

2013年5月22日

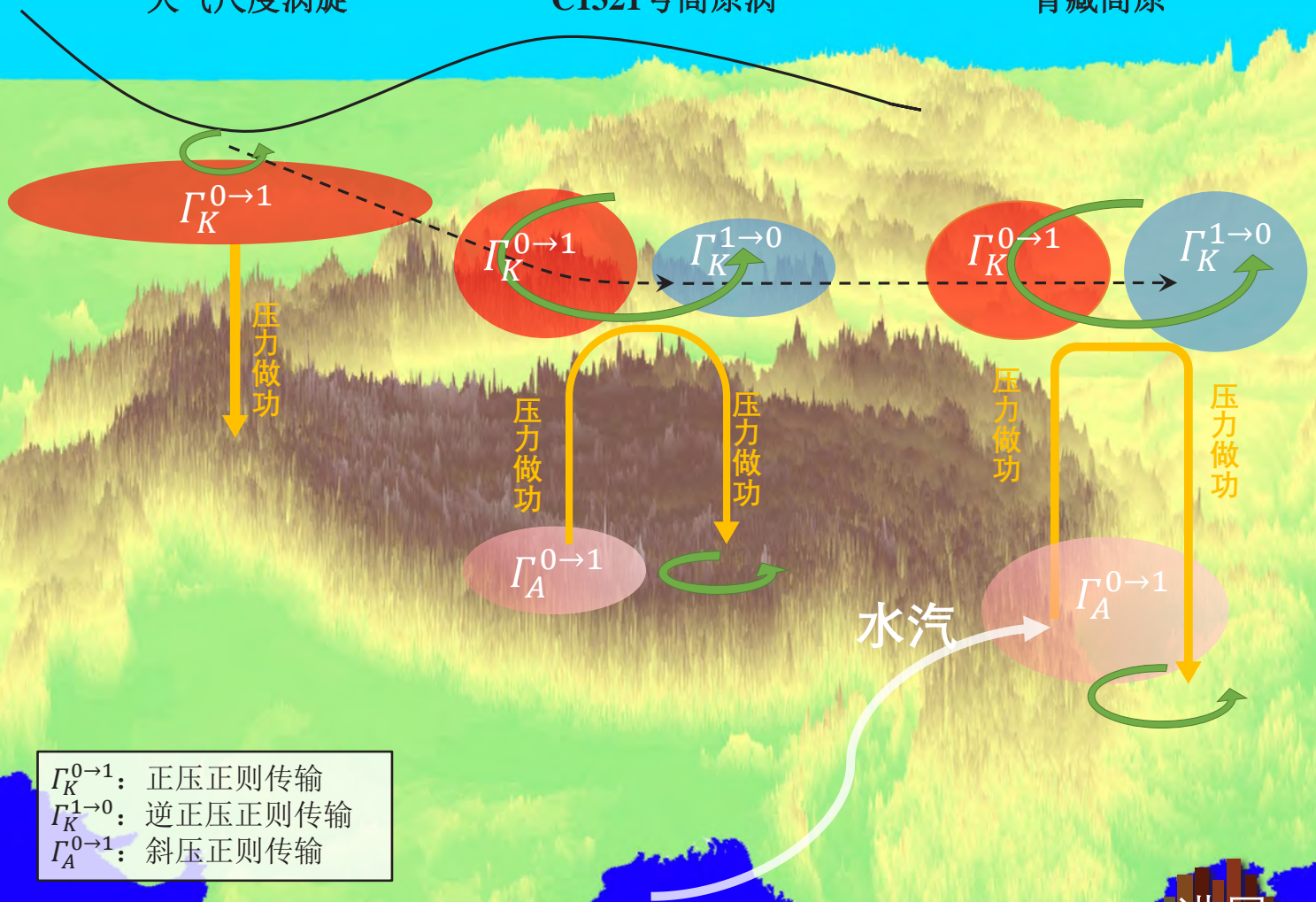
200hPa出现
天气尺度涡旋

2013年5月24日

500hPa上，观测到
C1321号高原涡

2013年5月25日

高原涡移出
青藏高原



$\Gamma_K^{0 \to 1}$: 正压正则传输
 $\Gamma_K^{1 \to 0}$: 逆正压正则传输
 $\Gamma_A^{0 \to 1}$: 斜压正则传输

高原涡多尺度动力学

气象科技 **进展**
Advances in Met S&T



中国气象局气象干部培训学院 主办
中国气象学会

主管 中国气象局
主办 中国气象局气象干部培训学院
中国气象学会
出版 《气象科技进展》(英文) 编辑部
名誉主编 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院
主编 许小峰 中国气象局

副主编
王志强 中国气象局气象干部培训学院
王金星 中国气象学会
肖子牛 中国科学院大气物理研究所
翟盘茂 中国气象科学研究院
姚学祥 中国气象局
李维京 国家气候中心
胡永云 北京大学
谈哲敏 南京大学
孙健 中国气象局公共气象服务中心
费建芳 国防科技大学
赵立成 国家气象信息中心
张鹏 国家卫星气象中心
管兆勇 南京信息工程大学
何建新 成都信息工程大学
黄建平 兰州大学
廖小罕 中国科学院地理科学与资源研究所
贾朋群 (专职) 中国气象局气象干部培训学院

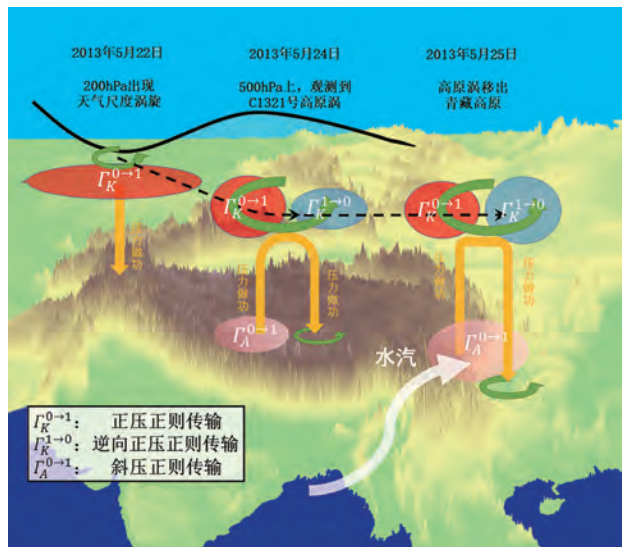
常务编委 (按音序排名)
陈金阳 成秀虎 龚建东 郭虎 郭学良
李柏 李国平 罗云峰 倪允琪 曲晓波
任国玉 任小波 沈文海 王存忠 王怀刚
武炳义 熊绍员 杨修群 俞小鼎 张朝林
张庆云 赵平

编委 (按音序排名)
毕宝贵 陈镜明 陈云峰 陈振林 崔春光
崔讲学 董文杰 杜钧 封国林 何金海
何清 胡欣 胡跃文 姜彤 金飞辉
雷小途 李集明 李俊 李良福 李耀辉
李跃清 李忠 梁旭东 李刘晶 李黎平
刘立成 刘实 刘征宇 卢乃锰 陆日宇
罗兵 罗亚丽 马舒庆 马耀明 陆彭莹
浦一芬 宋燕 索少清 汤绪 田红林
万齐林 王斌 王斌(海) 王东海 王建元
王式功 王卫丹 王延青 王迎春 王元
王自发 卫晓莉 温敏 翁富忠 吴立广
谢志辉 闫冠华 延晓冬 杨萍 杨崧
杨昭明 伊兰 于玉斌 翟武全 张大林
张广俊 张立祥 张玲 张跃堂 赵广忠
周定文 周建华 周凌晔 周显信 朱定真
朱小祥 朱玉洁 祝燕 邹立 邹晓蕾

编辑部
张萌 侯美亭 马杰 李莉 武欣蕊
崔晓军
地址: 北京市中关村南大街46号,
中国气象局气象干部培训学院 100081
电话: (010) 68409927/68409933
邮箱: amst@cma.gov.cn
网址: <http://cmalibrary.cn/amst>
投稿系统: <http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx>
印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

本期责任编辑: 张萌 侯美亭

ISSN 2095-1973
CN 10-1000/P
定价: 30元



本刊已被万方数据、《中国学术期刊网络出版总库》和CNKI系列数据库以及《中文科技期刊》(维普网)全文收录, 相关著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。作者向本刊提交文章发表的行为(除事先声明外)视为同意文章被上述数据库收录。

目次

第11卷 第1期 2021年2月20日

1 许小峰: 主编语

科学观察

- 2 贾朋群: 气象科学“内卷”了吗?
4 薛海乐: 复杂地形对大理地区风场的影响研究——兼论观测、理论和数值模拟配合解答科学问题

封面报道

- 7 容逸能, 马继望, 李瑶婷, 梁湘三: 一次自上向下发展的高原涡的多尺度动力学分析

研究进展

- 19 王柏林, 李佳: 低轨互联网卫星发展历程及气象领域合作模式展望
28 刘少军, 蔡大鑫, 韩静, 甘业星: 卫星遥感反演降水研究进展简述
34 何锡玉, 蔡夕方, 朱亚平, 张雷: 我国风云极轨气象卫星及应用进展

年度评述

- 40 蔡康龙, 黄先香, 李彩玲, 炎利军, 李兆明, 顾伯辉, 何秋蕊, 张晶晶: 2020年中国龙卷过程及灾情特征

主编语

在物理学研究中，尺度特征是一个必须要处理好的问题，大气科学也不例外，在不同的时空尺度条件下，运动所遵循的规律会表现出很大差异，或者说运动的特征会因尺度的变化而完全不同。在以往的多尺度研究领域，尺度分离问题相对比较成熟，可通过有效的方法、技术来实现。相对而言，对不同尺度系统间的相互作用，尽管也从不同角度开展过大量工作，但仍显薄弱。如果不能清晰、合理地分析尺度间相互作用问题，就难以解释大气运动如何在较为平稳的状态下产生变异，并有新尺度系统产生。多尺度相互作用一般用尺度间的能量传输来衡量，但这种传输属流体的内部过程，要靠动力学理论来推断。然而流体力学中较长时间延用的能量传输经验公式有着重大缺陷——能量不守恒，导致我们用此所作的动力学诊断不能如实反映大气内部的物理过程。针对这个问题，过去20年来气象学家从最基本的物理概念出发，通过构造物理意义上自洽的数学工具，在严格意义上导出了流体内部多尺度之间的能量传输公式。这种传输被称为“正则传输”，它与传统的、经验性的传输不同。其正确性不仅表现在理论上，并在实际问题的解决和应用中得到验证。在正则传输的框架下，不少遗留的气象问题得到合理解决。本期封面报道（P7）介绍

了上述多尺度相互作用理论与分析方法在一次高原涡个例研究中的应用。

大涡模拟，是近几十年才发展起来的研究湍流运动的一种重要的数值模拟研究方法。在观测资料不能高密度覆盖研究所关注的广阔区域，已有理论又无法解释所面对问题的情况下，利用精细数值模拟生产一套逼近真实的数据补充观测的欠缺，是否是一种可行的手段？过去一年，“内卷”成为流行语，这一起源于社会科学的词汇频繁被应用于各个领域，那么气象科学内卷了吗？本期科学观察栏目（P2-P6）分别就以上两个问题分别给出了解读。

年度评述栏目（P40）继续统计和梳理了过去一年中全国发生的龙卷过程和特征，数据显示，2020年全国可确认的龙卷个数较2019年增长约1倍。同时，本刊编辑就新型相控雷达阵列研发及其应用对我国强对流天气预警的意义采访了中国气象局探测领域专家和设备研发企业相关人员，尝试描绘强对流天气第一道防线的构建。

2021年起，本刊对栏目层次进行了微调，使栏目、体例和内容之间能够更加和谐。希望期刊在进入第二个十年的开端，能以更新的面貌回馈读者。

许小峰

46 贾朋群：“强对流天气第一道防线”的构建：新型相控雷达阵列研发应用对我国强对流天气预警的实践意义——对中国气象局大气探测中心马舒庆和湖南宜通华盛科技有限公司寸怀诚/王国荣的采访

53 戴建华：专家点评：“强对流天气第一道防线”的构建：新型相控雷达阵列研发应用

54 本刊：承上启下的担当——气象干部培训学院第17期中青班研究报告摘编

56 本刊：气象科技前沿：全局关注——中国气象局2020年气象科技前沿动态研究报告摘编

短论

58 吴栋桥，周登：金沙本底站空气质量与颗粒物浓度变化特征分析

61 魏华兵，周登，章帆：金沙大气本底站酸雨观测质量考核的质量控制

论坛

64 贾煦，肖萌，咸迪：基于影响力指标分析“风云卫星”公众号的服务现状

67 王淑一，王赞，邹善勇，李想：防雷减灾公众服务满意度测评与服务分析——以大连市1523份调查问卷为例

70 徐实，李亚平：移动端气象类直播初探

往事钩沉

73 李冬梅：中瑞西北科学考察团对新疆近代气象发展作用的探究

阅读

77 编辑选编 FY-4A AGRI热红外通道辐射定标的精确外场评估 / 凝结潜热释放对温带气旋相对涡度倾向的影响

78 2020年《气象科技进展》总目录

封三 AMS词汇 王春竹，张伊：荚状云（lenticularis）与眼壁（eyewall）

气象科学“内卷”了吗？

■ 贾朋群

新中国气象科学经过70年的快速发展，已经触摸到了世界前沿。从20世纪中叶开始的长时间“跟跑”和中国具有世界上最高、尺度最大的地形等带来的气象预报复杂性问题的挑战，或许在21世纪20年代到来时，“内卷”带来的挑战会更严峻：在全球气象进入“准停滞期”等待突破时，我们还很少有领跑的机会和经验。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.001

刚刚过去的2020年，在《咬文嚼字》评选出来的十大流行语中，“内卷”位列其中。2021年初，一些学术媒体也发声，历数“内卷”现象，其范围远远超出“内卷”一词作为社会学术语的范畴，大有“万物皆卷”之势。那么，气象科学是否“内卷”了？

“内卷”又称“内卷化”，对应的英文是involution，指一种社会或文化模式发展到一定程度或阶段后出现的停滞不前，或无法转化到更高层的模式。这一社会学术语，或许是因为迎合了世界大变革环境下人们思考和认识的自觉，很快被辐射到更多的方面：从生物学到人类学，再到历史经济等很多领域，在更广泛的学术意义上指一种由于追求增量而产生的不能进化的现象，提示整个社会的不同层面，应该也需要有一段相对冷静的反思时间。

1 近现代气象科学因卑尔根学派和芝加哥学派的完美接力实现过渡

近代、现代气象科学分别发展了数百年和超过百年，其阶段性的跨越和发展（可分别用与involution有联系的词，revolution（革命）和evolution（演进）表示），分别代表了计量气象传感器发明带动的气象观测网建设向把天气预报问题归为物理初值问题的两次突破（革命）和之间的过渡时段（演进）。第一次过渡因为伴随世界各地气象观测网的建设，其本应超长的演进期似乎被20世纪初的理论突破，主要是通过20世纪前半叶由卑尔根学派和芝加哥学派联手获得的新理念再次加速。

2 世纪之交气象学发展的“内卷”趋势逐渐明显

近现代气象学的第二个演进期，可以用全球气象界津津乐道的数值天气预报的进步（图1）给出更好

的表示。虽然这张图显示的预报持续进步的量度令人振奋，却也不难看出在世纪之交数值预报表征的学科进步已经出现进入“准停滞期”的预警信号。主要表现是，用大约数十年不变的模式性能统计指标，得到的模式性能虽然还在进步，但是进步的速率几乎没有有了提升的空间。

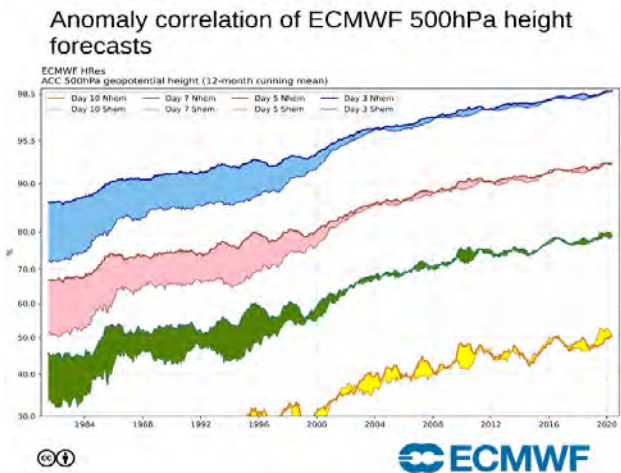


图1 20世纪80年代以来数值天气预报模式的性能持续提升，但改进的幅度在收缩（来源：ECMWF）

3 技术和多学科或使气象学避免“内卷”

气象科学的进步，以及学科进步带来的数值天气预报技巧的提升，两者之间的关系实际上是较为复杂的。在最近召开的欧洲中期天气预报中心（ECMWF）AI技术主题研讨会上，有学者对预报的“系统”到真实世界之间的层层“包装”进行了描述（图2）。在这张图中，如果说20世纪初的突破，是将真实大气与物理模型之间建立了联系（气象的系统有了最外层的“包装”），气象学者找到了解释大气运动的一把钥匙；那么数值天气预报的成功无疑是找

资助信息：中国气象局气象软科学项目（2021ZZXM29）

到了从物理模型到应用系统之间的一条最快捷的路，而后来的进步，仅仅是让各层包装尽量“变薄”，从而让“系统”反映的真实世界的“失真”越来越小。

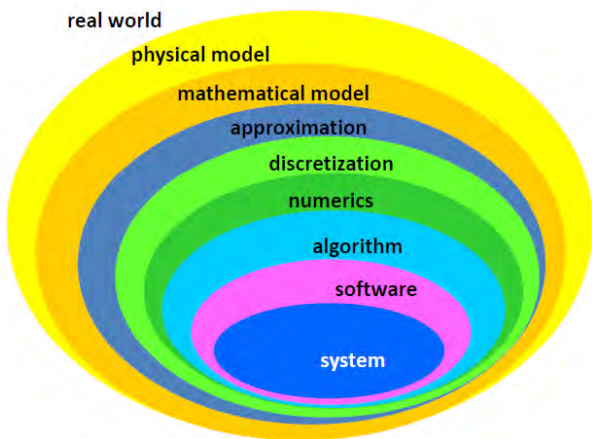


图2 真实的世界和气象系统之间的关系(从内到外:系统、软件、算法、数字、离散、近似、数学模式、物理模式、真实世界)

可以说，现代气象科学的发展之路，是皮叶克尼斯和罗斯贝等少数大师在指出了宏观道路之后，大量“工匠”很好地把道路“雕刻”得更加精细和尽可能少些“失真”。这样的学科发展之路也许具有很好的代表性，在新的“大师”出现前，找寻“工匠”更有效益的工作场合是关键，其背后的问题就是如何避免或缩短所谓“内卷期”。美国学界应对类内卷现象的一个举措，就是近日有媒体报道的美国自然科学基金（NSF）或许要改为NSTF（加入T，技术）^①，试图放大技术对学科的推动作用。我们以目前无论天气研究还是气候变化研究都关注的海冰和海洋探测为例（图3），可以洞察到已有的平台和探测技术种类之多和发展之快，很多新一代的探测资料，在很难把握的机制方面难见成效，或许能倒逼基础研究向前推进。在中国，中国自然科学基金委在进行了学科编码改革后，又最新成立了交叉学科部，其目的显然是优先将学科交界点上的研究作为重要资助的方向。这些举措，为打通科学系统与真实世界之间的屏障，都打下伏笔。

4 小结

气象学是中国近现代科学事业中，继天文学、地质学和生物学等学科后实现本土化的重要学科。一方面，与数学、物理和化学等具有普遍性的学科相比，气象学等的地域性更加突出；另一方面，新中国气象科学经过70年的快速发展，已经触摸到了世界前沿。从20世纪中叶开始的长时间“跟跑”和中国具有世界上最高、尺度最大的地形等带来的气象预报复杂性问题，或许在21世纪20年代到来时，“内卷”带来的挑战会更严峻：在全球气象进入“准停滞期”等待突破时，我们还很少有领跑的机会和经验。2020年，数学家彭骆斯荣获了诺贝尔物理学奖等案例，应该引起我们的思考：该奖项来自天文研究本不奇怪，但英国学者彭骆斯凭借几乎纯粹的数学研究，因“发现黑洞的形成是广义相对论的坚实预言”而获奖，则是没有先例的。反“内卷”在物理、数学和与气象同质的天文学上，无疑跨出了一步。

俗话说“既要低头拉车，也要抬头看路”。气象科学作为一门学科，无疑在现代意义上已经进入成熟期，出现消退期或进入发展相对缓慢的阶段在所难免。这时，“抬头看路”或许更加重要，而花一点时间回望近现代气象科学数百年来在物理学、化学、数学等学科交叉中，孕育、发展并最终找到快速发展之路的历史，尤其具有意义。

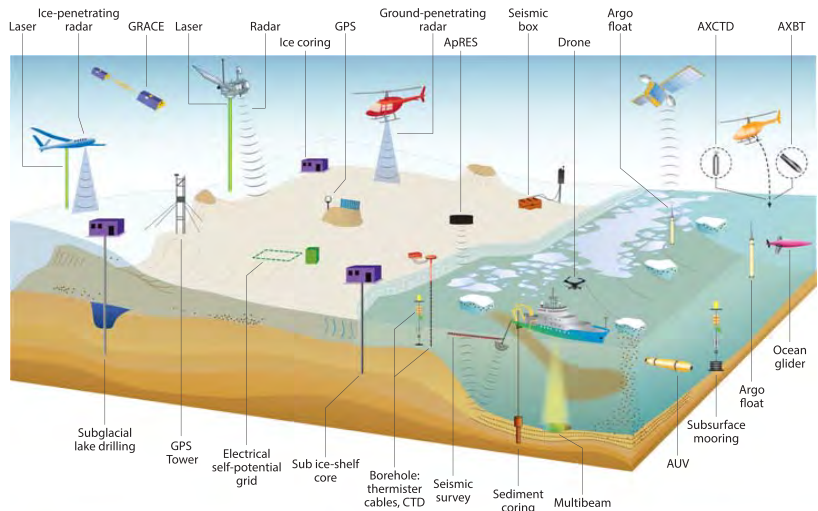


图3 目前可用的冰和海洋观测技术(其中: ApRes: 安装在飞机或雪上汽车牵引的自动相敏感回声探测仪; AXCTD: 空基投弃式导电温度深度探测仪; ADCP: 声多普勒流廓面仪; AXBT: 空基投弃式深海温度计)

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

^① 据媒体报道，2020年5月27日，美国国会两党联合立法小组提出了《无边疆法案》（Endless Frontier Act），该法案内容之一就是改革美国科研体制，将NSF更名为国家科学技术基金会（NSTF），并设立技术局，其职责是通过关键技术重点领域的基础研究加强美国在关键技术方面的领导地位。法案还明确了近期美国国家科学技术基金会重点突破的技术领域，包括人工智能和机器学习、高性能计算，自然和人为灾害防御等。

复杂地形对大理地区风场的影响研究 ——兼论观测、理论和数值模拟配合解答科学问题

薛海乐

由于观测资料不能覆盖研究所关注的高空区域，已有理论又无法解释所面对的问题，所以希望利用数值模拟来生产一套逼近真实的数据，以补充观测的欠缺。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.002

气候预测和天气预报一方面关注低频缓慢过程并向延伸期推进，另一方面关注快速变化的小尺度灾害性过程并向高精度和高准确率预报努力。然而对后者的观测仍然非常困难，其强非线性作用也导致了理论研究的困难，因此如何将模式模拟、观测和理论恰当地配合起来研究我们所关注的科学问题变得非常迫切。大理作为著名的旅游地，其“大理四绝，风花雪月”指的是下关的风、上关的花、苍山的雪和洱海的月。其中大理下关位于洱海南端，处于点苍山和哀牢山之间山谷的东侧，常年盛行强劲的偏西风。而位于大理古城东侧洱海西岸的大理气象站的大风蓝色预警（风速大于17 m/s）平均每年可达50次以上。一般而言大风往往和台风、强对流和地形重力波等天气过程有关，大理区域的大风天气很显然与其西侧的地形及其相关流场相关。

1 观测事实

大理地区未设探空站，观测主要以地面测站为主。以往研究显示大理下关常年盛行偏西风，古城东侧的大理站在大风期间主要为偏西风而其他时段盛行偏东风，机场盛行偏南风。所有站点都显示冬季风速大、夏季风速小、白天风速大、夜间风速小的特征（3个位置如图1所示）。大理站大部分的大风蓝色预警都发生在冬半季的午后。古城东侧另有一个20 m的观测铁塔和2 km有效观测的风廓线雷达。地表600 m以上基本为西风并随高度增速，600 m以下具有风向东西风交替的日变化，从午后到傍晚高空的西风下伸到近地面，其余时间盛行偏东风。尽管没有探空站，但是再分析资料仍然可以提供粗分辨率的高空风场信息，最新的ERA5数据显示北半球冬季副热带高空急

流位于该区域附近，夏季也以西风为主但风速稍弱。

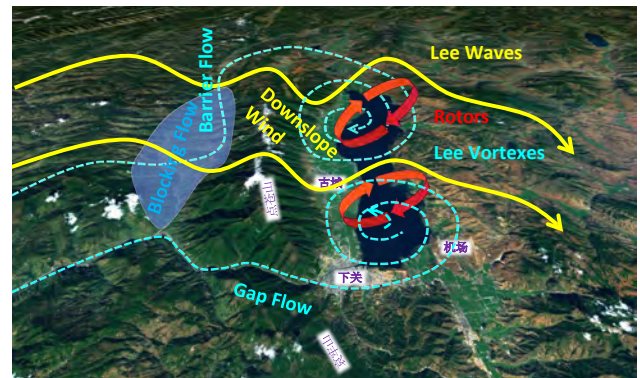


图1 大理区域流场结构示意图

如果去掉图1的流场概念图，仅凭上述观测是很难推测点苍山东侧的洱海上空发生了怎样的天气过程，当然也不能判断是什么机制导致了大理的大风。因此，如果希望通过观测来揭开大理大风的成因，点苍山背风区域对流层内的三维流场信息必不可少。

2 理论分析

关于地形造成的背风坡风暴的研究较为悠久而丰富，这很大程度上和欧洲的阿尔卑斯山和北美的落基山相关。尤其是因为美国国家大气研究中心位于落基山东麓，经常可以观测到超强的下坡风，因此大气科学家从20世纪60年代开始集中研究大型山体导致的背风坡风暴的机理。从简单的水跃模型、重力波破碎导致的波反射理论到非线性波破碎理论，都需要在对流层上部存在一个波破碎导致的湍流区域。另外，这种地形重力波一般针对巨大的山体（几十到上百千米宽度）。而大理区域的点苍山的山体横向宽度仅10~20 km，其上方存在稳定的西风急流，因此上述

理论很难直接应用。其次讨论背风坡风的线性背风波理论起步更早（20世纪40年代），该理论认为地形激发的重力波会被上层大气反射从而被“困”在对流层下部，因此在波谷和山顶之间会形成下坡风。然而这种理论一般针对的是高度很矮的山体（不超过数百米），且根据该理论波长会在上午和傍晚增长，但振幅会减小。而点苍山的高度（山顶距离东西侧山谷）可达1.8 km，另外这一理论的预测也和大理站的观测事实不符。大理站的大风主要出现在午后而早晨很少能够观测到，且大风表示波的振幅也应该增大，这也与线性背风波理论相悖。

3 大涡模拟

由于观测资料不能覆盖本文关注的高空区域，已有理论又无法解释所面对的问题，所以希望利用数值模拟来生产一套逼近真实的数据，以补充观测的欠缺。针对所关心的问题：地形对其流场的影响，需要在3个方面使得模式（WRF3.81版本）模拟逼近真实。首先，为了使得地形更真实，将90 m分辨率的地形导入到模式中。一方面高分辨地形资料能够更精确地刻画地形的复杂性而使其接近真实地形，另一方面当地形分辨率和模式分辨率相近的时候会对模式积分稳定性造成影响。因此，将90 m分辨率地形进行滤波，滤掉400 m以下尺度的地形后导入到WRF模式当中进行模拟。其次，为了让大气背景和边界更真实，

使用美国环境预报中心的最终分析资料（FNL）并同化了我国常规地面资料和探空资料。最后，为了让模式更真实，使用了110 m分辨率的大涡模拟以避免边界层参数化所带来的不确定性。所谓大涡模拟是指模式分辨率高到足以分辨边界层中的含能尺度的大涡，白天典型边界层高度为1 km左右，因此大涡尺度可达几百米到1 km。由于模式网格能够分辨大部分湍能，因此传统的边界层参数化方案可以关闭，从而使得模式对边界层的模拟不确定性减小。由于本文主要介绍文献中的主要结论，在此不再赘述具体的模式参数。

该模拟选取了2015年1月24日傍晚的大风个例进行模拟，该个例地面风观测和大理站风廓线观测与历史统计基本相似。图2给出了大理站的风廓线观测和模拟在该日的演变过程。无论是观测还是模拟，都给出了距地600 m范围内从上午的东风转为下午的西风，并在夜间重新转为东风的变化过程。垂直速度也显示了下沉—上升—下沉的变化过程。因此认为模拟基本接近真实。Xue等的文献同时也给出了点苍山周围几个地面站的风演变过程和模式模拟结果的对比，都显示了模拟可信度。图3a和3b分别给出了早晨和傍晚流场垂直剖面。早晨，点苍山上下游都是偏东风，仅仅在山体东侧上半部分存在小段西风下坡风；傍晚，上游区域的东风基本转为西风，下游低层仍然存在一支东风回流区，而下坡风明显伸展到接近谷

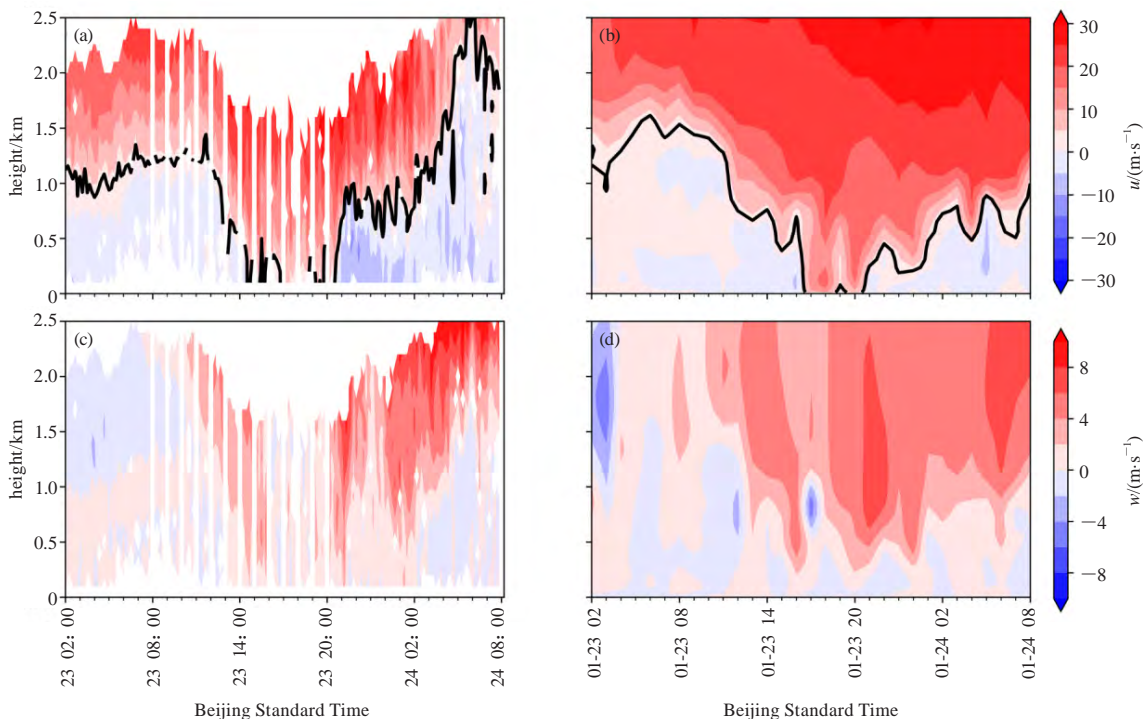


图2 纬向风速(a, b)及垂直速度(c, d)的时间变化图
(a, c) 风廓线雷达观测, (b, d) 模式模拟结果(黑线大概区分了东西风的边界)

底的位置了。从早晨到傍晚，位于背风坡上方的重力波的振幅和波长明显增大和伸长了。图3d明显地展示了下坡风在傍晚伸展到了点苍山东侧谷底附近（100.1°—100.2°E，25.6°—25.8°N），因此在背风波的波谷没有伸展到的地方，地表附近为偏东风回流，而当背风波波谷伸展所到之处，地表附近为西风。这种背风波伸展和收缩造成的近地表附近风向的周期性变化和上文中提到的观测事实相符，能非常合理地解

释大风为什么是西风，且发生在午后到傍晚。而大理下关（100.2°E，25.57°N）无论是早晨还是傍晚都位于点苍山和哀牢山之间峡谷的出口处而盛行强盛的西风。大理机场（100.3°E，25.65°N）所在的位置为峡谷绕流后并经过东侧山体阻挡后加强的一支气流，叠加其上方重力波第二个波谷（图3b），形成强劲的西南风（图3d）。

模拟结果分别解释了大理下关西风、机场偏南风

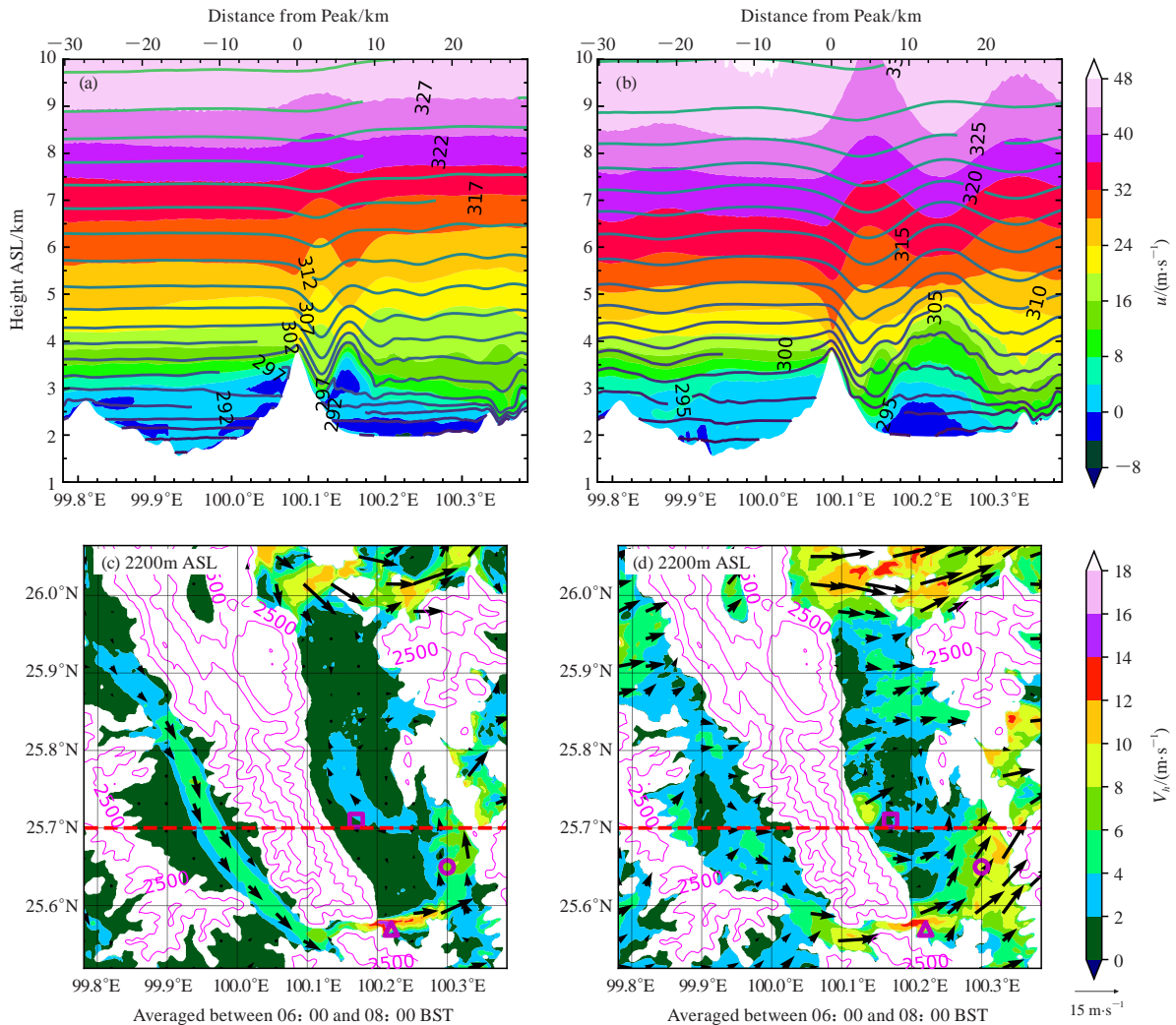


图3 (a, b) 为纬向风速 (填色) 和位温 (等值线) 剖面图, (c, d) 为海拔 2.2 km 平面上的风速和风向矢量截面; (a, c) 为早晨, (b, d) 为傍晚; (b, d) 中的红色虚线标记了 (a, b) 的剖面位置 (c 和 d 中紫色方框、圆圈和三角形分别代表大理站、机场站和下关站所在位置)

和大理站东西风日循环。其中下关西风是由点苍山和哀牢山之间的峡谷风造成的，机场偏南风是由于南支绕流（包括了峡谷风）复原并受下游山体阻挡而加强的气流，而大理站东西风交替是因为其上方背风波周期性加强伸长和减弱缩短而导致的。图1所示的概念图非常形象地展示了上述高低空气流的配合。底层气流遇到较高山体阻挡会形成绕流，在山体两侧的峡谷

形成峡谷流，并在背风区域形成水平旋转的涡旋。较高高度上的气流会翻越山体而形成背风波，这种背风波会在午后伸长变强，导致强劲的西风下坡风可以伸展到更远的地方，其波峰下方会形成垂直方向旋转的转子，转子的地面支为东风回流。因此，背风波的周期性伸缩导致了近地面东西风的交替变化。

(下转 72 页)

一次自上向下发展的高原涡的多尺度动力学分析

容逸能¹ 马继望² 李瑶婷³ 梁湘三^{1,4}

(1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044; 2 山东省气象台, 济南 250031; 3 中国民用航空飞行学院广汉分院, 广汉 618307; 4 南京信息工程大学大气海洋动力学实验室, 南京 210044)

摘要: 高原涡作为经常给我国带来暴雨等灾害的天气系统, 其形成一般认为是通过感热和潜热自下而上激发的, 然而, 2013年5月下旬发生的一次引发其下游灾害性强降水的高原涡却是由对流层高层天气尺度低涡诱发的。为此, 基于新发展多尺度子空间变换和多尺度能量涡度方法以及ERA5再分析资料对其动力学过程进行了详尽的探讨, 先将原始场重构到三个尺度子空间, 即背景环流尺度子空间、天气尺度子空间和高频尺度子空间, 重构场上首次显示此次过程生成于青藏高原西北侧, 其成因为对流层高层基本气流尺度向天气尺度的跨尺度动能正则传输, 即正压失稳, 并且表现为从高层向下。在发展阶段, 其能量最终来源为基本气流向天气尺度的有效位能传输和非绝热加热, 然而这些过程只发生于涡旋低层的西侧。进一步分析发现, 天气尺度内存在一个能量再分配“路径”: 首先, 低层西侧获得的有效位能转换为动能, 西侧垂直的气压梯度力做功将低层获得动能向高层分配; 在高层, 水平的气压梯度力做功进而将西侧获得的动能向东侧分配; 东侧垂直的气压梯度力做功再将动能向低层分配; 至此, 低层西侧获得的能量被分配到整个涡旋空间中, 使得涡旋能够均匀发展。

关键词: 高原涡, 正则传输, 多尺度子空间变换, 正压不稳定, 斜压不稳定

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.003

On the Multiscale Dynamics of A Top-Down Developing Vortex over Tibet Plateau

Rong Yineng¹, Ma Jiwang², Li Yaoting³, Liang Xiangsan^{1,4}

(1 School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031 3 Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307

4 Center for Ocean-Atmosphere Dynamical Studies, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract: Vortices over Tibet Plateau often bring heavy rain and other disasters to China. Generally, they are believed to be generated from bottom to top through sensible heating and latent heating. In this study, however, we find that the May 2013 plateau vortex, which has caused severe precipitation downstream, is actually induced by the synoptic-scale eddies in the upper layer of the troposphere. Using a recently developed functional analysis tools, i.e. the multiscale window transform (MWT), and the MWT-based localized multiscale energy and vorticity analysis (MS-EVA), we reconstruct the ERA5 reanalysis fields into three subspaces of scale, or *scale windows*, i.e., the basic flow scale window, synoptic scale (plateau vortex scale) window and high frequency window. By the reconstructions, it is shown for the first time that the vortex is generated on the northwestern side of the Plateau, and the generation is through the barotropic instability of the basic flow, i.e., the canonical transfer of kinetic energy from the basic flow window to the vortex scale window, which develops downward from top to bottom. Moreover, the ultimate source of energy for the vortex development is the baroclinic transfer from the basic flow, rather than the non-adiabatic heating as commonly believed. Further analysis shows that there exists a “path” of energy redistribution on the vortex scale window: In the lower layer, the vortex receives available potential energy on the western side, which is then converted into kinetic energy, and transported via vertical pressure work into the upper part. In the upper layer, the kinetic energy on the western side is transported horizontally (via horizontal pressure work) to the east, while the vertical pressure work there carries the gained kinetic

energy downward to the lower layer. In doing this the energy received in the lower-western part of the vortex is redistributed throughout, making it possible for an unusually long-duration vortex to develop.

Keywords: plateau vortex, canonical transfer, multiscale window transform, barotropic instability, baroclinic instability

收稿日期: 2020年9月6日; 修回日期: 2020年11月20日
第一作者: 容逸能(1994—), Email: yinengrong@foxmail.com
通信作者: 梁湘三, Email: sanliang@courant.nyu.edu
资助信息: 国家自然科学基金(41975064, 42005052);
江苏省双创计划团队项目(2015)

0 引言

青藏高原高耸而广阔的地形常年对东亚乃至全世界的气候带来显著的动力和热力的影响^[1-8]。在天气尺度上,高原上有着活跃的涡旋活动,自20世纪60年代以来,对高原涡旋的形成、发展、结构及其造成的灾害等问题一直是高原气象研究中的一个重要课题。

高原低涡(下称高原涡)是一类多发于夏季的青藏高原主体上的 α 中尺度(meso- α)低压涡旋,其平均水平尺度在500 km左右,垂直厚度一般在2~3 km^[2]。高原涡生成时多为暖心^[2, 9],部分成熟的高原涡甚至能发展出类似于热带气旋的明显的眼墙结构^[10-11],当发展至高原东侧时,高层冷平流由涡旋前部入侵,逐渐发展成斜压性低涡^[12-13],从源地上来看,高原涡主要生成于90°N以西的高原上,有少部分从高原西侧移入^[14-17]。由于观测条件的限制,人们普遍认为高原涡的生命史在1~3 d^[2, 9, 18-19],但近年来的统计发现24 h以下也存在着不小比例的高原涡,且高原涡的频次随着其生命周期的增长而减少^[14, 20-21]。高原涡通常在高原东侧下坡处消亡,而部分高原涡能发展并移出高原,其中绝大部分在高原东侧移出^[20, 22-23],这些东移的高原涡在下游暴雨的形成中起着非常重要的作用^[22],平均每年受高原涡影响而在下游产生大雨以上量级的降水过程有12次以上^[13],接连的高原涡活动甚至能引起如1998年夏季长江多次洪峰这样的巨大灾害^[24]。

一直以来,高原涡的生成与发展机制往往被认为与高原的热力作用密切相关。夏季高原,特别是高原西部,受太阳辐射影响,感热是潜热的2倍以上,并且高原近地面的温度远远高于同位势的附近区域^[1-2],这使得高原西部静态稳定性急剧下降,引起对流不稳定,使得高原边界层辐合上升运动,即Ekman抽吸增强^[25-26]。高原边界层的风场本身就因复杂的地形而具有较强的水平切变和垂直切变^[19],很容易在Ekman抽吸作用下激发出高原涡的初始对流扰动。在边界层之上(300 hPa以上),非线性的涡度平流与底层Ekman抽吸引起的辐散相抵消。李国平等^[10]进一步将高原涡简化为一个考虑感热和摩擦的轴对称涡旋模型并指出它是由环境位涡梯度所激发出来的Rossby-惯性重力波。此外,潜热释放在高原涡的发展,特别是于高原东区的发展过程中有着重要作用^[12, 17-18, 27],在数值模式中,不考虑潜热作用的试验并不能产生与观测强度相当的高原涡活动,甚至无高原涡生成^[18, 28]。

尽管早年钱正安等^[29]指出在高原西部32.5°—34.5°N间近地层的正压不稳定有利于高原涡的形成,但近年来对高原涡的涡度和扰动能量的诊断却表明热力作用在高原涡发展中起着主导作用。一方面,感热、潜热

引起的非均匀加热通过向涡旋动能的转换和高原自身近地面动能的辐合一起促进了该区域对流和高原涡的发展^[9, 30]。另一方面,对流系统的上升(下降)气流可以将由低(高)层汇聚的正(负)涡度传输到对流层高(低)层,以抵消由高(低)层辐散(辐合)所产生的负(正)涡度,从而维持高原涡的涡度平衡^[31-32]。除此之外, Ye等^[26]发现高原涡的涡度通过非线性过程,分别向更大尺度的系统和次网格尺度的对流系统输送,输送的损失由高低层辐散辐合气流产生的所补充。这些诊断结果都一再论证了Wang^[25]提出的一个类似于热带气旋的高原涡生成机制模型。他指出高原上的边界层的感热激发高原近地面空气上升,使得高原周围空气向高原输送,其中,高原南侧的气流向高原输送后,又在低层激发了一个靠近地面的低压辐合区,这使得高原近地面辐合的空气有着源源不断的来自印度洋的水汽,水汽在抬升过程中释放潜热进一步促进了高原边界层的辐合上升,从而加强了从印度洋向高原的空气辐合和水汽输送并促进高原涡的进一步发展。高原上的天气系统移至高原东坡后如有足够的水汽条件,那么斜压转换项和扰动位势平流项就能增强涡旋动能,并通过扰动动能平流项来维持涡旋动能的平衡^[33]。

目前,多尺度相互作用下的高原涡及其东移演变机理上仍停留在对涡度和扰动能量方程的诊断,不同尺度之间相互作用对高原涡机制的生成和发展还不清楚^[19],尤其是其局地特征。局地多尺度相互作用一直是地球流体力学的难点问题,过去的几十年前人在方法上做了大量的工作,从能量学的角度讲,局地多尺度能量学分析存在两大难题,分别为局地多尺度分解场的能量表达以及尺度间能量传输的正确推导, Liang等^[34-36]、Liang^[37]最近关于的多尺度子空间变换(Multiscale Window Transform, MWT)和局地多尺度能量和涡度分析(localized Multiscale Energy and Vorticity Analysis, 简称为MS-EVA)的工作是这两个方面的主要进展,详见方法介绍部分。本文期望基于上述理论,对2013年5月的一次高原涡过程进行分析,旨在能对其生成和发展的动力学机制有新的认识。

1 资料

本文采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA5高时空分辨率的四维变分再分析数据集^[38]。ERA5数据集的水平分辨率为0.25°×0.25°,时间分辨率为1 h。本文使用的物理量包括位势、三维风场和温度,垂直方向上选取了1000~100 hPa每隔50 hPa的19个层次,水平方向上包含中国和南亚地区(10°—50°N, 60°—140°E),时间上使用了2013年5

月5日00时—6月16日15时整个时段内共计2¹⁰个时次的序列。

2 方法

本研究采用Liang等^[36]的多尺度子空间变换(MWT)、以及基于MWT的局地多尺度能量和涡度分析法^[34, 37]对我们的研究对象进行多尺度动力学诊断,其中尤为关键的是正则传输理论^[37]以及基于MS-EVA的局地的斜压不稳定和正压不稳定理论^[35]。该方法现已广泛运用于多个复杂的大气海洋多尺度动力学问题中,如风暴轴^[39-40]、阻塞高压^[41]、平流层爆发性增温^[42]、台风^[43-44]以及黑潮延伸体^[45-46]等的动力学研究。这里仅对该方法做一个简单的介绍,关于该方法的详细阐述以及其与传统方法的差别,请参阅文献^[37]。

2.1 多尺度子空间变换

20世纪,对高原涡的多尺度动力学的研究多是基于时间上的雷诺平均—扰动分解^[47-48],这样得到的扰动能量没有时间变化的信息,因而不适合用来研究非平稳过程。对此问题,前人多采用滤波器做尺度分离来予以解决,如对一个速度场 $u(t)$ 进行滤波: $u(t) = \bar{u}(t) + u'(t)$,其中 $\bar{u}(t)$ 和 $u'(t)$ 分别为滤波后得到的背景重构场和扰动场,它们还是随时间变化的函数。现在一个问题是,这样得到的多尺度场(如扰动场)的能量是什么?前人一般直接取重构场的平方,即 $[\bar{u}(t)]^2$ 与 $[u'(t)]^2$,作为各自的能量,非常遗憾,这在概念上就是错误的。现假设 $u(t)$ 包含两个尺度的过程:

$$u(t) = \underbrace{a_0 \cos \omega_0 t + b_0 \sin \omega_0 t}_{\bar{u}(t)} + \underbrace{a_1 \cos \omega_1 t + b_1 \sin \omega_1 t}_{u'(t)} \quad (1)$$

其中, ω_0 和 ω_1 分别为背景场和扰动场的频率,那么众所周知这两部分的能量是它们各自傅里叶系数的平方: $(a_0^2 + b_0^2)$ 与 $(a_1^2 + b_1^2)$,它们绝对不会等于即 $[\bar{u}(t)]^2$ 与 $[u'(t)]^2$!事实上,前者 $((a_0^2 + b_0^2)$ 与 $(a_1^2 + b_1^2))$ 是相空间上的概念,这里是常数,后者 $([\bar{u}(t)]^2$ 与 $[u'(t)]^2)$ 是物理空间的概念,这里是时间的变量,它们怎么可能相等?所以,过去的研究为了方便把 $[u'(t)]^2$ 视为涡动能的做法是完全错误的,这种所谓的“能量”只是一个有着能量量纲的数学量,在物理上没有意义。

为了克服传统的滤波器只给出相当于重构场,却无法用来表征多尺度能量的缺陷,Liang等^[36]发展了一套称作“多尺度子空间变换”(Multiscale Window Transform, MWT)的尺度分离工具。他们发现,在一些特殊的情况,存在着—对如傅里叶变换与逆傅里叶变换一般的“变换—重构对”,这种变换对

正是MWT及其对应的重构,即多尺度子空间重构(Multiscale Window Reconstruction, MWR)。MWR可给出传统意义上的滤波场(即重构场),而对应的MWT系数就可给出相应滤波场的能量。

在MWT框架下,式(1)中的两个不同时间尺度的过程分别对应着两个时间采样空间的变换系数 \hat{u}_n^{-0} 和 \hat{u}_n^{-1} ,其中 $\hat{(\cdot)}_n^{-\sigma}$ 表示对某一变量表示在第 n 时次、在子空间 ω (即包含某一特定尺度范围的函数子空间)上进行的MWT变换, $\omega = 0, 1$ 分别表示背景场子空间和涡动子空间,这两部分的能量正比于各自的MWT变换系数的平方,即 $(\hat{u}_n^{-0})^2$ 和 $(\hat{u}_n^{-1})^2$ 。对于本研究的问题,我们需要考虑包含背景场、涡动场以及高频场的三个子空间,分别用符号 $\omega = 0, 1, 2$ 予以表示。

2.2 局地多尺度能量分析

在MWT框架下,可以从包含温度 T 、三维风场 $\mathbf{v} = (u, v, \omega)$ 、位势 Φ 的等压坐标系中的原始方程出发推导出局地多尺度能量方程。如上所述, ω 子空间上的动能 K^σ 和有效位能 A^σ 为:

$$K^\sigma = \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{v}}_h^{-\sigma} \cdot \hat{\mathbf{v}}_h^{-\sigma}), \quad (2)$$

$$A^\sigma = \frac{1}{2} c (\hat{T}^{-\sigma})^2, \quad (3)$$

其中, \mathbf{v}_h 是水平风速,系数 c 为重力加速度 g 、温度垂直递减率 L 和大气的定压比热容 c_p 的函数:

$c = \frac{g}{T(g/c_p - L)}$,根据原始方程组,Liang^[37]得到子空间 ω 的动能 K^σ 和有效位能 A^σ 的倾向方程分别为:

$$\frac{\partial K^\sigma}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{Q}_K^\sigma - \nabla \cdot \mathbf{Q}_P^\sigma - b^\sigma + \Gamma_K^\sigma + F_K^\sigma, \quad (4)$$

$$\frac{\partial A^\sigma}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{Q}_A^\sigma + b^\sigma + S_A^\sigma + \Gamma_A^\sigma + F_A^\sigma, \quad (5)$$

式中各项具体表达形式详见表1,表中未列的 Γ_K^σ 和 Γ_A^σ 分别是动能和有效位能方程中的残余项,代表了摩擦耗散过程和非绝热加热过程(如感热加热和潜热加热)^[39-42, 44]。

在以上的能量过程中,尤为重要是 Γ_A^σ 与 Γ_K^σ ,它们表征的是大气中一个尺度与另一个尺度间的能量传输,属于流体内部过程,是各种大气变化的内在成因,它们存在一个很好的性质,即满足以下守恒律:

$$\sum_{\omega} \sum_n \Gamma_n^\sigma = 0, \quad (6)$$

其中, \sum_n 和 \sum_{ω} 分别表示对所有时间样本和子空间的求和。其内在的物理意义是:能量在不同尺度子空间之间的传输只是一个能量的再分配过程,整体并不会产生或消耗能量,即能量守恒。注意:用传统的能量

表1 子空间 ω 上的多尺度能量方程 (单位: m^2/s^3) 各项的表达式, 其中 $\mathbf{v} = (u, v, \omega)$ 是三维速度矢量

表达式	物理意义
$\partial K^\sigma / \partial t$	$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (\hat{\mathbf{v}}_h^\sigma \cdot \hat{\mathbf{v}}_h^\sigma)$ 动能变率
$-\nabla \cdot \mathbf{Q}_K^\sigma$	$-\frac{1}{2} \nabla \cdot [(\hat{\mathbf{v}}_h^\sigma)^\sigma \cdot \hat{\mathbf{v}}_h^\sigma]$ 动能通量辐合, 即动能平流输运
$-\nabla \cdot \mathbf{Q}_p^\sigma$	$-\nabla \cdot [\hat{\mathbf{v}}^\sigma \cdot \hat{\boldsymbol{\phi}}^\sigma]$ 位势通量辐合, 即气压梯度力做功
b^σ	$\hat{\omega}^\sigma \hat{\alpha}^\sigma$ 浮力转换 (子空间 ω 内动能和有效位能的相互转换)
Γ_K^σ	$\Gamma_K^\sigma = \frac{1}{2} [(\hat{\mathbf{v}}_h^\sigma)^\sigma \cdot \nabla \hat{u}^\sigma - [\nabla \cdot (\hat{\mathbf{v}}_h^\sigma)^\sigma] \hat{u}^\sigma] + \frac{1}{2} [(\hat{\mathbf{v}}_h^\sigma)^\sigma \cdot \nabla \hat{v}^\sigma - [\nabla \cdot (\hat{\mathbf{v}}_h^\sigma)^\sigma] \hat{v}^\sigma]$ 向子空间 σ 的动能正则传输
$\partial A^\sigma / \partial t$	$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (c(\hat{T}^\sigma)^2)$ 有效位能变率
$-\nabla \cdot \mathbf{Q}_A^\sigma$	$-\frac{1}{2} \nabla \cdot [c \hat{T}^\sigma (\hat{\mathbf{v}}_T^\sigma)]$ 有效位能通量辐合, 即有效位能的平流输运
S_A^σ	$\frac{1}{2} \hat{T}^\sigma (\hat{\omega} T)^\sigma \frac{\partial c}{\partial p} + \frac{1}{T} (\hat{\omega} \alpha)^\sigma$ 层结变化引起的有效位能变化 (通常很小可忽略)
Γ_A^σ	$\frac{1}{2} c [(\hat{\mathbf{v}}_T^\sigma)^\sigma \cdot \nabla \hat{T}^\sigma - \hat{T}^\sigma \nabla \cdot (\hat{\mathbf{v}}_T^\sigma)^\sigma]$ 向子空间 σ 的有效位能正则传输

学方法得到的各种传输公式不满足这一性质, 为了与之相区分, Liang^[37]称之为“正则传输”(Canonical Transfer)。Liang等^[35]通过对郭晓岚正压模式的分析发现用传统的传输并不能表征该模型中的局地不稳定过程, 而用正则传输则可以精确地反映此结构。

值得注意的是 Γ_K^σ 和 Γ_A^σ 不仅包含了来自其他尺度的能量传输, 还有来自自身尺度的传输信息, 这部分传输因与不稳定性无关应予以剔除。为了简便起见, 本文使用 $\omega_0 \rightarrow \omega_1$ 来表示 ω_0 子空间向 ω_1 子空间的能量传输。如从背景子空间 ($\omega = 0$) 向涡动子空间 ($\omega = 1$) 的正则动能 (位能) 传输项用 $\Gamma_K^{0 \rightarrow 1}$ ($\Gamma_A^{0 \rightarrow 1}$) 来表示, 该值为正则动能 (位能) 由平均流向天气尺度传输, 表明发生了正压 (斜压) 不稳定。图1给出了三个尺度子空间的能量循环示意图。与传统的Lorenz总能量循环相比, 这个循环在时间与空间上完全是当地的, 所以能用来研究任何局地与运动中的天气过程。

3 高原涡的结构与重构场

3.1 高原涡的环流特征

图2是此次高原涡生成至离开高原时不同等压面上的环流形势。前人指出在500 hPa上, 24日便可在高原东侧上看到一个有着明显的风场切变^[49], 其离开高原后于25日06时 (世界时, 下同) 发展成一次强而持续的西南涡过程。此时500 hPa的风场切变发展成一个从陕西跨越至孟加拉湾的近千公里的大槽; 对应地在200 hPa和850 hPa上, 分别存在一个浅槽和一个局地于四川盆地的闭合低压系统, 这就是著名的西南

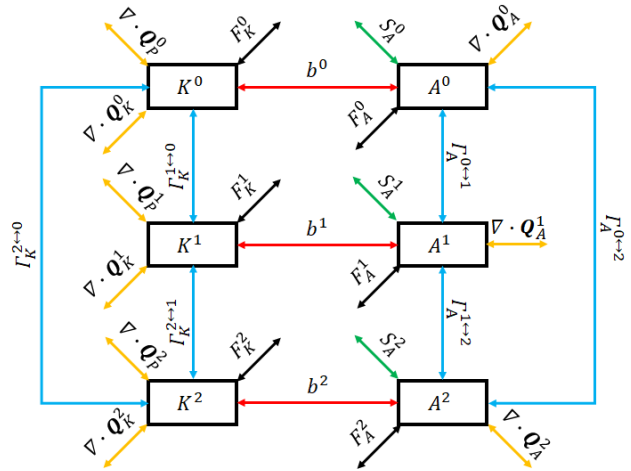


图1 三个尺度框架下的洛伦兹能量循环示意图。其中蓝色箭头表示正则传输过程, 红色是浮力转换过程, 黄色是同尺度输运、绿色是层结作用, 黑色是外力、耗散等过程
Fig. 1 A schematic of the local Lorenz cycle for a three-window decomposition. The arrows in blue stand for canonical transfers, and those in red, yellow, green, and black are for buoyancy conversions, transports, vertical stratifications, and external forces and dissipation processes, respectively

涡。西南涡移出四川盆地后先后经过湖北、河南、安徽、江苏, 并于27日在山东移入黄海^[49-52], 期间给途经的很多省份带来超历史同期的强降水, 甚至摧毁了一条青岛的百年栈道。高原涡东移出高原后形成西南涡的天气形势已有诸多分析, 本文不再赘述。此外, 从该图可以看出, 500 hPa在22日和24日在33°N、90°E附近先后出现了两个明显的低压槽, 前者 (图2中黑色三角形) 发展为《青藏高原低涡切变线年鉴 (2013)》^[53]中为编号C1320的高原涡, 于24日离开高原在甘肃南部消亡, 后者 (图2中绿色五角星) 加强为C1321号高原涡后东移下高原并引起四川盆地西南涡的生成, 虽然前人对于后续西南涡的环流特征及机制已经有较多研究, 但对于其前兆信号——高原上的低槽 (后文将展示, 从天气尺度重构场来看, 本质上是一次高原涡过程) 关注还较少, 因此, 本文将重点从多尺度动力角度讨论其主要特征及发展机制。

3.2 多尺度子空间重构场

一般认为高原涡的生命史在1~3 d^[2, 9, 18-19], 但近年来的统计发现24 h以下也存在着不小比例的高原涡^[14, 20-21]。为了了解控制此次高原涡系统的时间尺度, 本文采用Liu等^[54]改进的一个连续的小波功率谱工具对2013年5月—6月间青藏高原上的一个网格点 (32°N, 100°E) 的500 hPa位势进行小波变换 (图3)。从该序列做小波功率谱中可清晰地发现其主要由3种时间尺度的系统所控制: 1) 8~16 h的对流扰动;

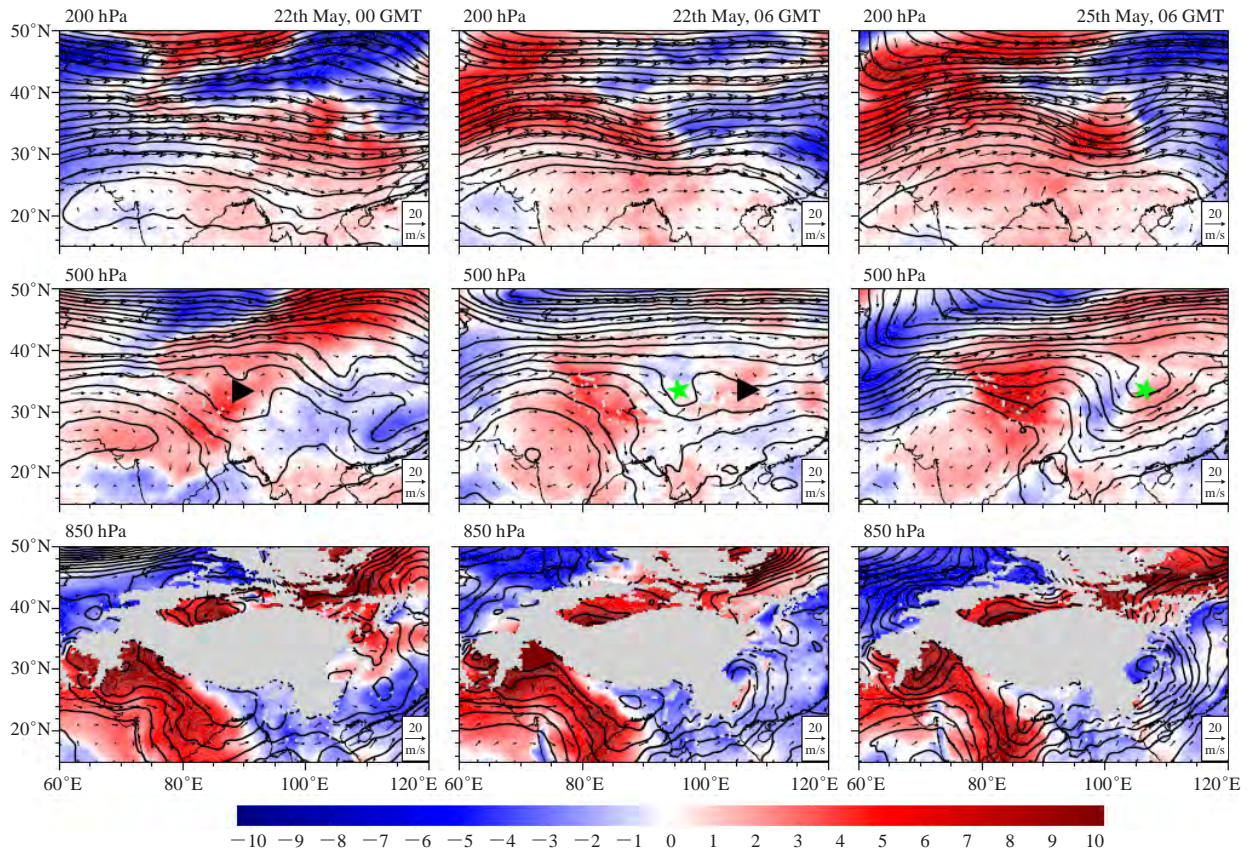


图2 此次高原涡在生成（2013年5月22日00时）、高原上发展（24日06时）、移出高原时（25日06时）不同等压面的位势（等值线，200 hPa间隔 $400 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，500 hPa间隔 $200 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，850 hPa间隔 $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ）、 $60^\circ\text{--}140^\circ\text{E}$ 间温度的纬向距平（阴影，单位： $^\circ\text{C}$ ）与水平风场（矢量）。500 hPa中黑色三角形是第C1320号高原涡，绿色五角星是本次个例（第C1321号）

Fig. 2 The geopotential (isoline, interval: $400/200/100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ at 200/500/850 hPa, respectively), zonal temperature anomaly (deviation from zonal mean between $60^\circ\text{--}140^\circ\text{E}$) (shaded, unit: $^\circ\text{C}$), and horizontal velocity (vector) as the vortex generates (00:00 GMT, May 22), develops (06:00 GMT, May 24), and leaves the plateau (06:00 GMT, May 25). The black triangle at 500 hPa marks the plateau vortex No. C1320, and the green star marks the one studied in this paper (No. C1321)

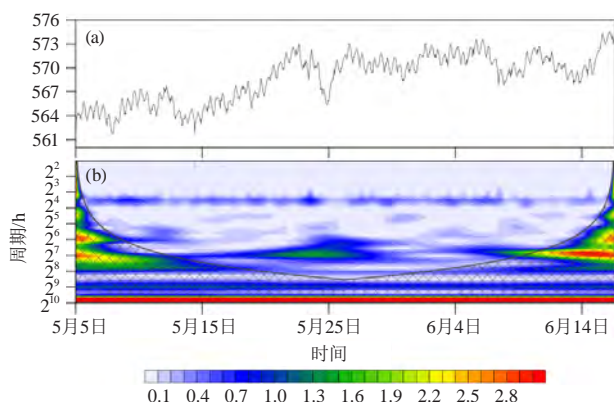


图3 2013年5月5日00时—6月16日15时青藏高原单点（ 32°N 、 100°E ）的位势时间序列（a）（单位： $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ）及其小波功率谱（b）

Fig. 3 The geopotential time series (a) (unit: $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$) and its wavelet power spectrum (b) at 32°N , 100°E on Tibetan Plateau from 00:00 GMT on 5 May 2013 to 15:00 GMT on 16 June 2013

2) $32\sim 256 \text{ h}$ 的天气尺度扰动；3) 512 h 以上的背景场，刨除序列的边界效应对小波谱的影响，此次高原涡过程主要受 $32\sim 256 \text{ h}$ 的天气尺度扰动所控制，而对流扰动的能量在此次过程中不占主导地位。考虑到使用MWT进行尺度分离，本研究将按时间尺度将气象物理量分为3个尺度：包含大气低频变化的背景环流尺度子空间（ $t > 256 \text{ h}$ ，大约10 d以上），包含锋面过程和 α 中尺度的天气尺度子空间（ $32 \text{ h} < t < 256 \text{ h}$ ，大约1~10 d）和包含雷暴、重力内波等对流系统的高频尺度子空间（ $t < 32 \text{ h}$ ）。

背景环流尺度的位势重构场如图4所示，它表现出该地区典型的夏季环流特征，主要包括500 hPa上的西北太平洋副热带高压和孟加拉湾上空的槽以及200 hPa上的南亚高压。

位势的小波谱表明本次高原涡过程的结构主要体现在天气尺度，多尺度子空间变换的重构场也证实这

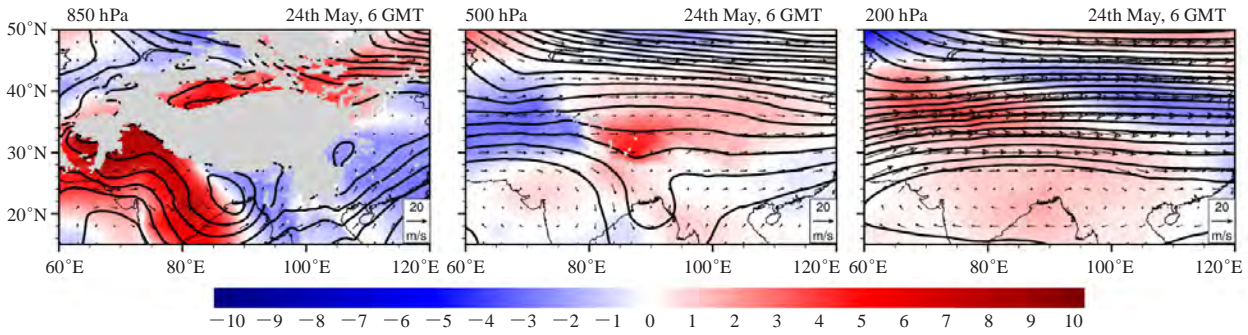


图4 同图2, 但为24日06时背景环流尺度位势与纬向温度异常
Fig. 4 Same as Figure 2, but for the basic flow window at 06:00 GMT on May 24

一点。对流层中高层中的原始场的槽/脊结构在天气尺度重构场中表现为闭合的低压/高压涡旋, 因此上述高原低槽过程本质上是一次高原涡过程。从天气尺度的重构场(图5)中可以看出, 24日500 hPa上的高原东区的风场切变表现为一个闭合的天气尺度低涡(图5中绿色五角星附近), 并且在200 hPa上, 该低涡表现

得更为明显(值得注意的是, 22日500 hPa上90°E附近的天气尺度低涡与此次过程无关的高原涡过程, 是23日便已移出高原)。上述分析表明该低涡的发展方向是自上而下而非常见的自下而上, 这与前人提出的高原涡自下而上发展的认识不同^[7, 55]。鉴于此, 下节我们将重点分析这类不常见的高原涡。

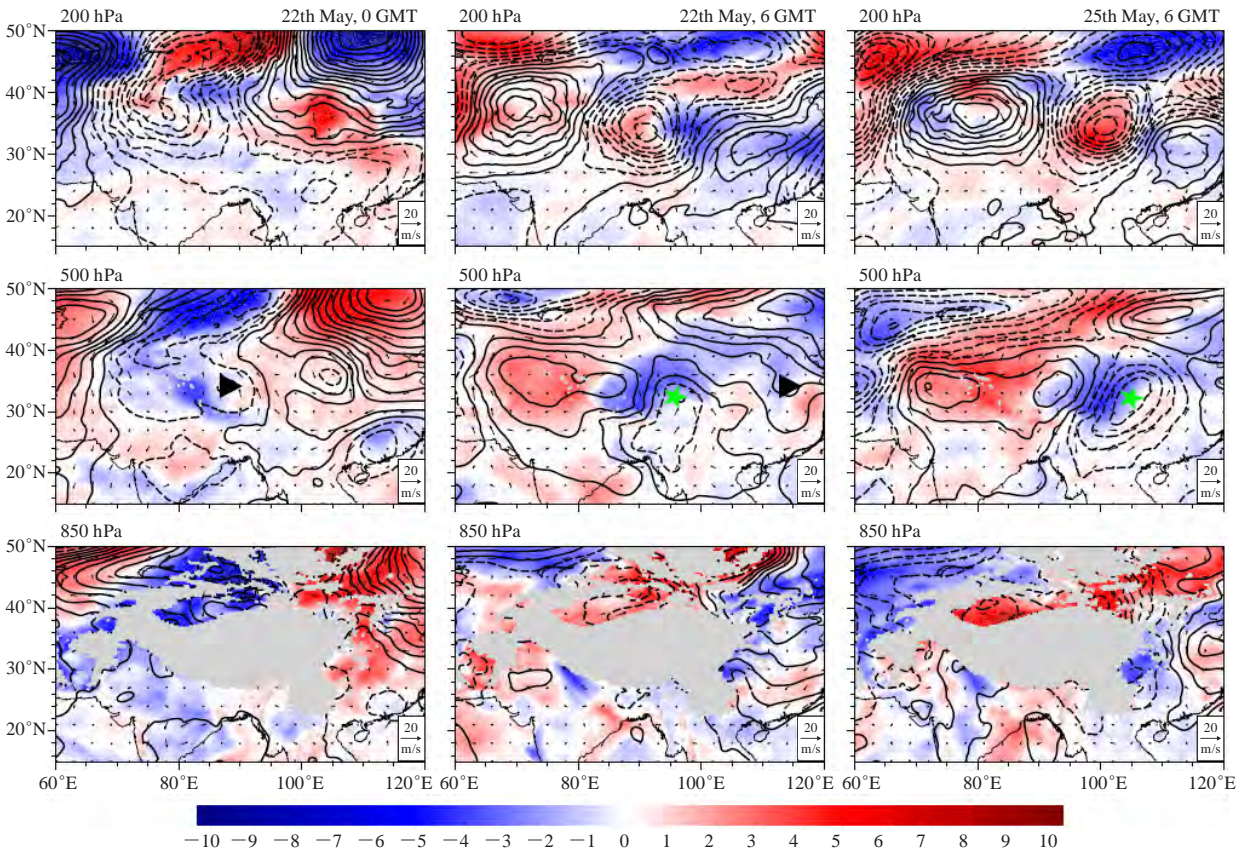


图5 同图2, 但为天气尺度, 且位势等值线间隔均为 $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the vortex window, and for a geopotential interval of $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$

4 天气尺度涡旋发展的动力学机制

前人研究发现高原地区夏季的低压涡旋主要是自下而上激发的^[7, 55], 为何该天气尺度涡旋在对流层高层先出现并自上而下发展引发高原涡的呢? 本文使用

基于MWT发展的MS-EVA对其能量收支进行了诊断。

4.1 对流层高层天气尺度涡旋的发展机制分析

因为此次高原涡过程在对流层高层最为显著, 本节重点分析200 hPa上的多尺度动力过程。根据公式

(4)和(5)以及图1,对多尺度能量学方程中的各项进行了分析,发现主要的过程体现在以下几项,其具体特征如下:

图6是该天气尺度涡旋在生成、于高原上发展以及东移离开高原时的三个阶段的背景场与天气尺度空间之间的动能正则传输,正值为从背景场中获得动能,表明此局地系统正压不稳定,负值则相反,表明系统正压稳定。整体来看, $\Gamma_K^{0 \rightarrow 1}$ 在对流层高层的强度要大于高原近地面,并随着涡旋的发展而增强。在200 hPa上,高原以西的45°N上空于21日移入一个天气尺度涡旋(图略)。该涡旋自西向东移动并于22日到达

高原西部,涡旋的南部(35°N)对应着一条正的东西向的 $\Gamma_K^{0 \rightarrow 1}$ 带,而位于40°—45°N的涡旋主体却处于负 $\Gamma_K^{0 \rightarrow 1}$ 区域,这表明该涡旋南部从背景场中获得动能,而涡旋主体将自身动能返还给背景场。到23日12时,40°—45°N的天气尺度涡旋消亡,而在35°N处已经发展成一个成熟的涡旋。此时35°N的天气尺度涡旋由正压不稳定获得的能量在东西侧表现出相反的特征——涡旋西侧从背景场中获得能量,而东侧向背景场传递能量。在500 hPa等压面,虽然未有明显的动能跨尺度传输,却出现了与高层一致的天气尺度的低涡。当涡旋移出高原变成西南涡时,这一特征更加明显。

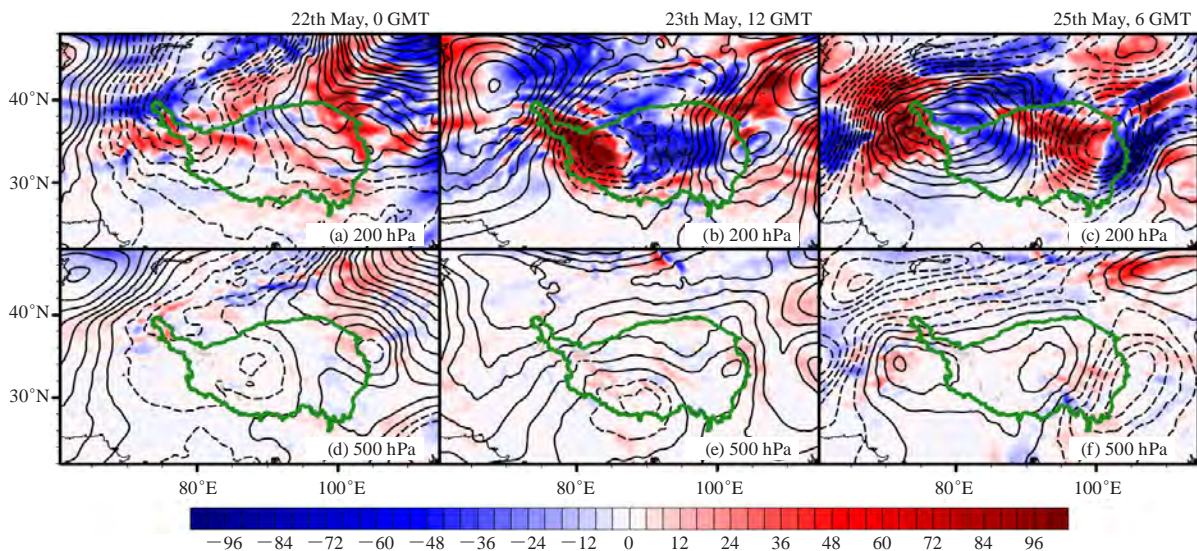


图6 天气尺度涡旋在生成(22日00时)、于高原上发展(23日12时)以及从高原东坡移出(25日06时)时的三个阶段的天气尺度位势(等值线间隔:100 m²/s²)以及背景场向天气尺度动能的正则传输($\Gamma_K^{0 \rightarrow 1}$,阴影,单位:10⁻⁴ m²/s³)。绿色等值线描绘了青藏高原的轮廓

Fig. 6 The synoptic-scale geopotential (isoline, interval: 100 m²/s²) and the canonical transfer of kinetic energy from the basic flow to the vortex ($\Gamma_K^{0 \rightarrow 1}$, shaded, unit: 10⁻⁴ m²/s³) as the vortex generates (00:00 GMT, May 22), develops (12:00 GMT, May 23), and leaves the plateau (06:00 GMT, May 25). The green isoline marks the contour of the Plateau

涡旋在高原上时,有效位能与动能的转换在200 hPa上与动能的正则传输类似,但其强度明显较弱(图7),当涡旋移出高原时,500 hPa上涡旋两侧有着大量的有效位能向动能的转换。

图8和图9分别表示动能在空间的输运以及气压梯度力做功,上述两种过程具有类似的特点,即使得涡旋西侧的动能减少而东侧的动能增加,这与前文讨论的动能正则传输的特征完全相反,表现为使得涡旋东西两侧动能平衡的特点。值得注意的是,在高原涡东移出高原时,其500 hPa上天气尺度有效位能向动能的转换、动能的输运以及气压梯度力做功都远大于反映正压不稳定的动能正则传输项,这与罗潇等^[33]的结果相似。

从上文的分析可以看出,涡旋东西两侧动能的来

源完全不同,表现为显著的东西两侧非对称特征,此外,200 hPa和500 hPa高度上,各能量项的表现特征也差异较大。总之,在涡旋三维空间的范围内,其不同高度、不同位置上的动力机制完全不同。以下我们对各个部分的动力机制进行分别讨论。

4.2 天气尺度涡旋演变中的能量收支

本节以涡旋在28°—38°N纬度带内300 hPa高度上的天气尺度重构场的高原涡中心经度为中心,按东西分为2个相位,分别平均了两个位相内对流层高层(100~300 hPa)与高原近地面(300~500 hPa)的天气尺度涡旋的动能(图10)和有效位能(图11)的能量收支。从能量收支上来看,高原涡的生成和发展经历了三个阶段:从中纬度涡旋主体中脱离并南移至高原(23日前,简记为S1),高原上空发展(23—25日,

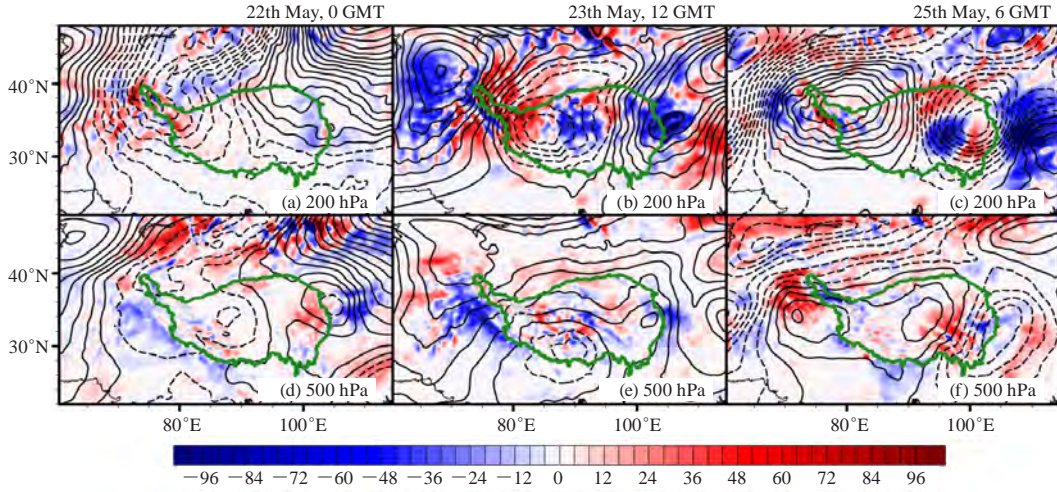


图7 同图6, 但为天气尺度有效位能向动能的转换 ($-b^1$)
Fig. 7 Same as Fig. 6, but for inverse buoyancy conversion ($-b^1$)

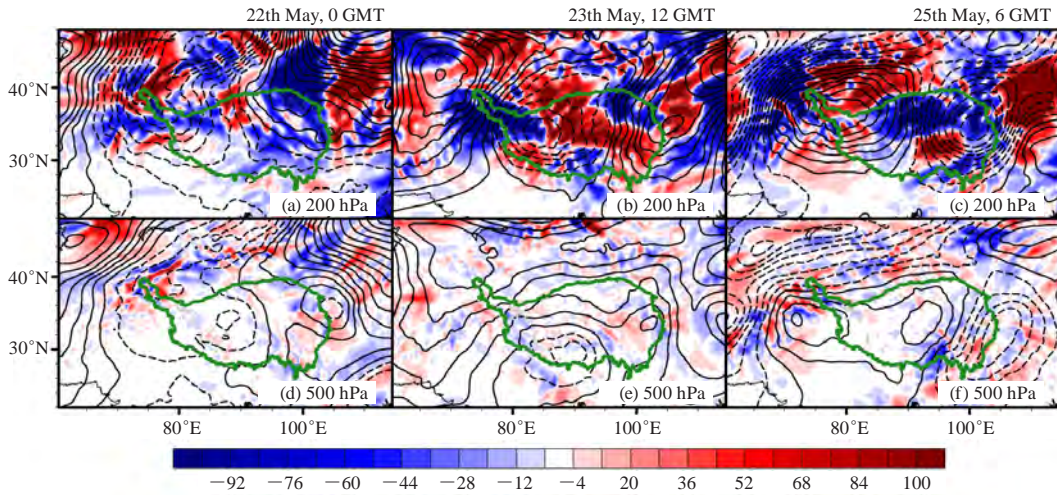


图8 同图6, 但为天气尺度动能在空间的运输 ($-\nabla \cdot Q_k^1$)
Fig. 8 Same as Fig. 6, but for the transport of kinetic energy ($-\nabla \cdot Q_k^1$)

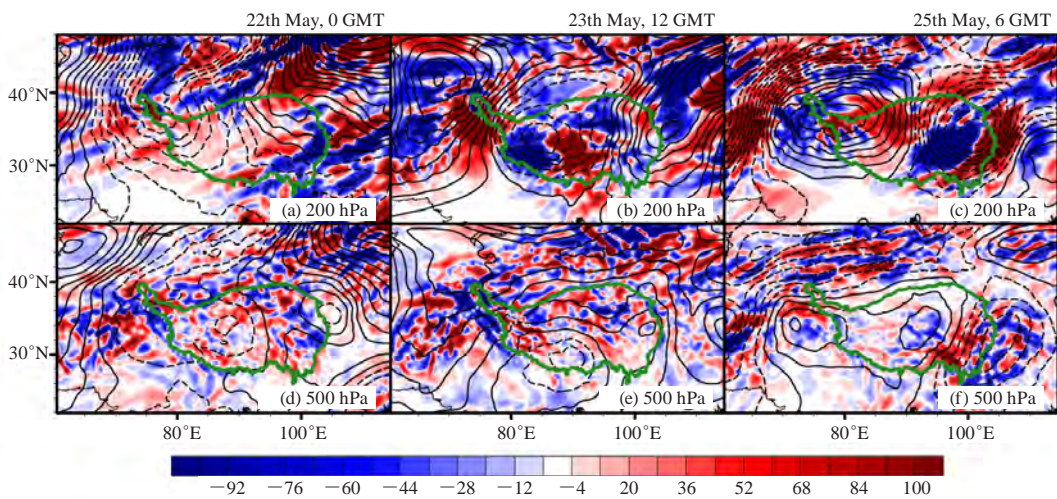


图9 同图6, 但为天气尺度气压梯度力做功 ($-\nabla \cdot Q_p^1$)
Fig. 9 Same as Fig. 6, but for pressure work ($-\nabla \cdot Q_p^1$)

记作S2)，下高原形成西南涡（25日后，记作S3）。

在S1阶段，涡旋主要是从对流层高层不稳定的背景场（图6，图10a、10b，图11a、11b）中获取能量。高原上35°N附近的带状不稳定区（正压、斜压同时失稳（ $\Gamma_K^{0 \rightarrow 1} > 0$ 且 $\Gamma_K^{0 \rightarrow 1} > 0$ ），且正压不稳定强于斜压）加强了主体在40°N以北的天气尺度旋涡南侧的动能，并使涡旋南侧脱离主体南移至高原上空。对流层高层天气尺度动能的水平非局地过程

（ $-\nabla_h \cdot \mathbf{Q}_*^1 = -\nabla_h \cdot \mathbf{Q}_K^1 - \nabla_h \cdot \mathbf{Q}_p^1$ ）^[45]和有效位能通量的水平辐合辐散（ $-\nabla_h \cdot \mathbf{Q}_A^1$ ）在槽前（图10b和图11b）槽后（图10a和图11a）相互抵消，西区（图10a）位势通量的垂直散度（ $-\nabla_p \cdot \mathbf{Q}_p^1$ ，其中下标 p 表示物理量在 p 坐标下的垂直分量）是动能的汇。这一阶段的近地面的天气尺度能量收支较小，仅有一些水平方向的能量通量在近地面西侧（图10c和图11c）积累能量。

在S2阶段，涡旋在高原上向东移动并迅速加强，

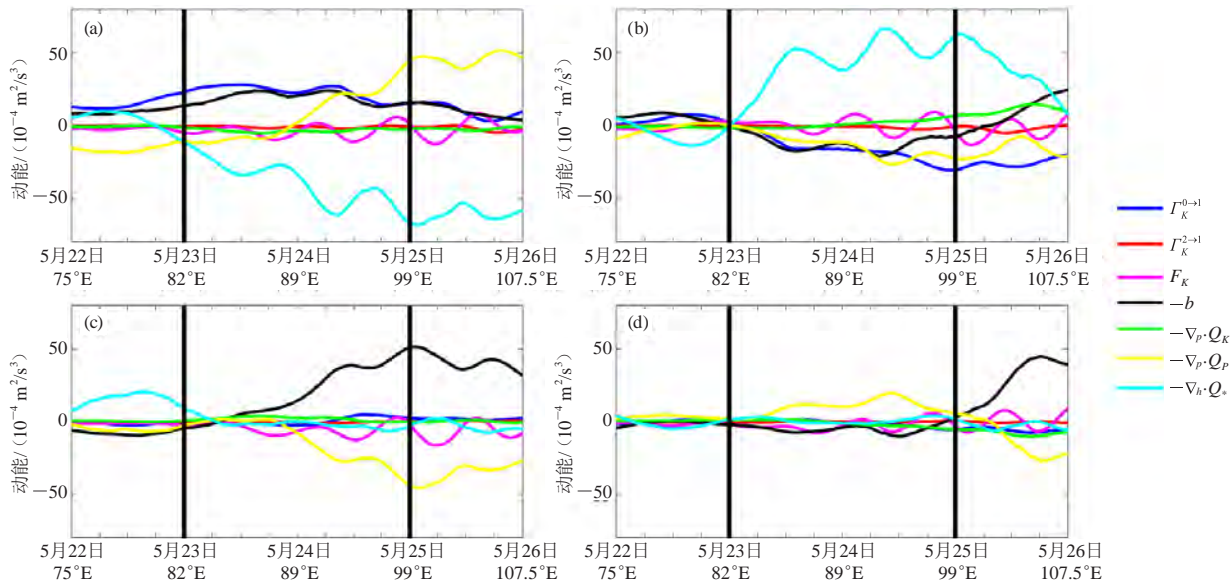


图10 以涡旋在28°—38°N纬度带内300 hPa高度上的中心经度为中心，东（记为东区）西（记为西区）方向各取8个经度，计算得到的28°—38°N内区域平均的动能收支

(a) 西区对流层高层（100~300 hPa）；(b) 同图10a，但为东区；(c) 同图10a，但为高原近地面（300~500 hPa）；(d) 同图10c，但为西区

Fig. 10 The locally averaged kinetic energy budgets. The averaging is taken over the eastern domain (28°–38°N, 8 degrees in longitude eastward from the vortex center at 300 hPa) and western domain (28°–38°N, 8 degrees in longitude westward from the vortex center at 300 hPa), respectively.

(a) The western domain averaged budget in the upper troposphere (100–300 hPa). (b) Same as Fig. 10a, but for the eastern domain averaged budget. (c) Same as Fig. 10a, but for 300–500 hPa. (d) Same as Fig. 10c, but for the western domain averaged budget

其能量收支也有明显的变化。涡旋西侧（图10c和图11c）高原近地面层斜压不稳定并有着较强的非绝热加热，通过浮力转换为动能的源，而位势通量的垂直辐散（ $-\nabla_p \cdot \mathbf{Q}_p^1$ ）则是动能的汇。高层西区（图10a）动能的源与S1阶段相似——主要是两类不稳定（ $\Gamma_K^{0 \rightarrow 1}$ 和 $\Gamma_A^{0 \rightarrow 1}$ ）——但位势通量的垂直散度从汇（辐散）逐渐转变为动能的源（辐合）并不断加强。该区域动能汇则是被动能的水平非局地项（ $-\nabla_h \cdot \mathbf{Q}_*^1$ ）所取代，而高层东区（图10b）的能量收支则与西区（图10a）相反，表明西区的动能通过动能的水平非局地项向东区平流，并在东区通过浮力转换为有效位能、向背景场传输以及位势通量的垂直辐散来耗散。高层有效位能水平通量虽大，但东西两区（图11a、11b）的趋势相反，并且没有对涡旋动能有直接的影

响。在东侧高原近地面（图10d），动能主要来源于位势通量的垂直辐合，其他几项并不重要。

在S3阶段，涡旋离开高原东移进入四川盆地，涡旋区域内的非局地项分布与S2阶段依旧相似。对流层高层的涡旋西侧（图10a和图11a）的局地不稳定项（ $\Gamma_K^{0 \rightarrow 1}$ 和 $\Gamma_A^{0 \rightarrow 1}$ ）持续减弱，但近地面（图11c）非绝热加热与斜压不稳定通过浮力转换仍旧为动能提供能量，此时，东侧（图11d）斜压失稳以及非绝热加热天气尺度系统发展的重要源，这与前人发现的长生命史西南涡在生成时就已有很强斜压性相一致^[56-57]。

在MS-EVA框架下天气尺度涡旋的高低空能量通过天气尺度动能、有效位能以及位势的垂直通量所联系。相较于较小的动能和有效位能的垂直通量，位势的

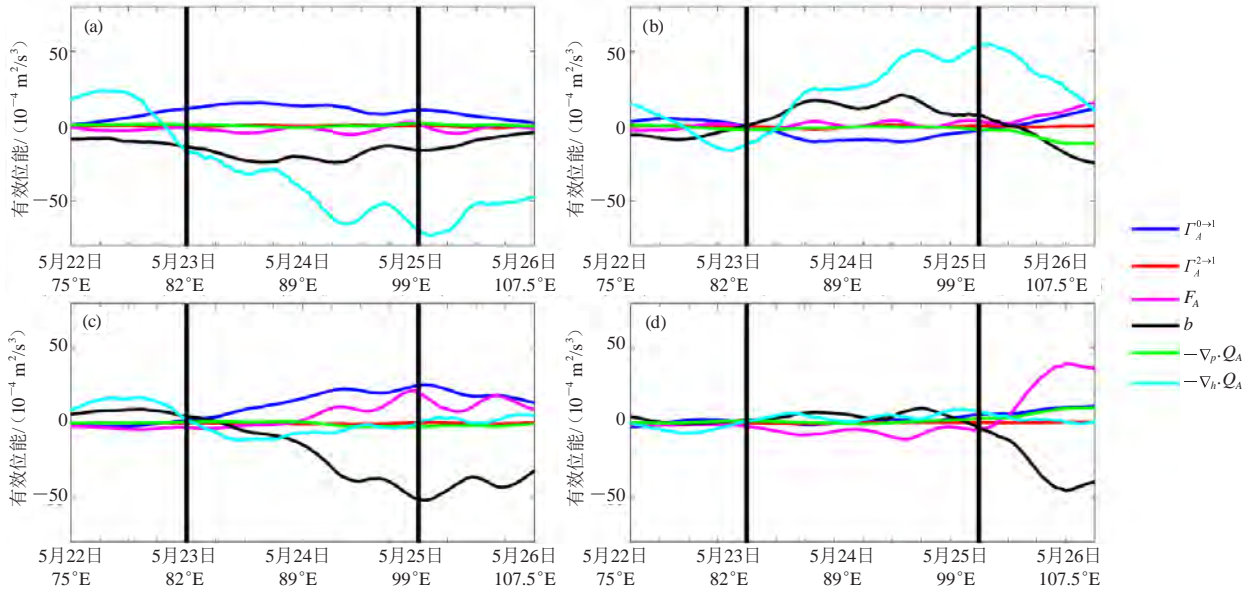


图11 同图10，但为有效位能
Fig. 11 Same as Fig. 10, but for available potential energy

垂直通量在高原涡发展过程中起到重要的作用。图12展现了其在高原涡发展过程三个阶段中的作用。在S1阶段，涡旋主要通过高层的正斜压不稳定获得动能，

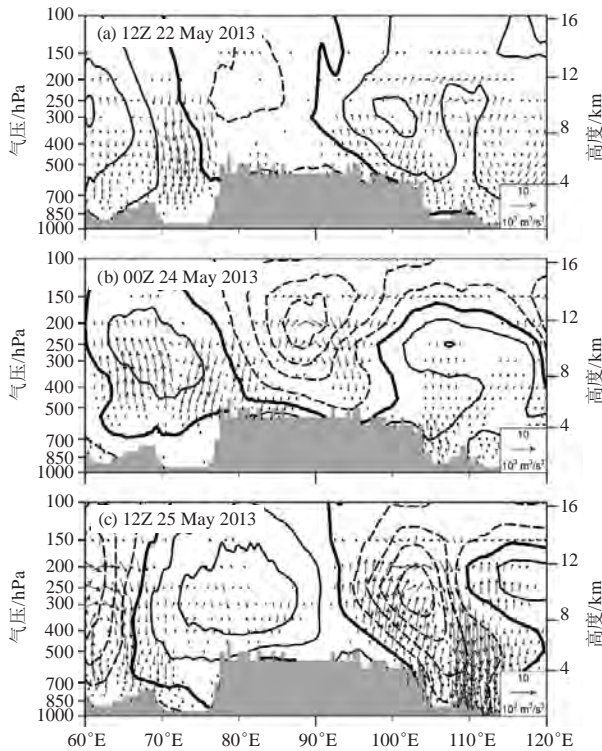


图12 28°—38°N内经向平均的位势通量（矢量为纬向位势通量和放大100倍的垂直位势通量，单位： $1000 \text{ m}^3/\text{s}^3$ ）与33°N的天气尺度位势（等值线间隔： $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ）

Fig. 12 Meridionally averaged geopotential flux over 28°—38°N (2D vector, with vertical component magnified by 100 times for clarity; unit: $1000 \text{ m}^3/\text{s}^3$), and the synoptic-scale geopotential at 33°N (isoline, interval: $100 \text{ m}^2/\text{s}^2$)

并在通过涡旋西侧向下的位势的垂直通量将高层的动能向下输运；在S2阶段，高原近地面的出现了局地能量来源（非绝热加热和斜压不稳定），并且能量的非局地项开始显著影响涡旋的能量收支，涡旋西侧高原近地面层的动能通过向上的位势通量向高层输运，而在高层，通过动能的水平非局地项向东区输运，再通过东区向下的位势通量影响高原近地面，通过垂直方向的位势通量，将西区的能量不断转移至东区，并促进了涡旋内部的能量循环并有利于在高空涡旋向下在东侧引起低涡环流。当开始下高原时（S3阶段），东侧的向下的位势通量迅速加强，将对流层中高层的涡旋以及能量拉伸或输运到涡旋东侧，即四川盆地的近地面层，从而引起了一次强烈的西南涡过程。

5 结论

通常认知下高原涡是自下而上发展的，而本文所讨论的高原涡过程却表现为自上而下发展的特征。为了探讨其动力学成因，本研究利用一套数学和物理上严格的多尺度分离工具，即多尺度子空间变换（MWT），以及基于该工具发展的局地多尺度能量分析法（MS-EVA）从多尺度的角度探讨了其发生和发展的机制。首先，本文将此次过程按时间尺度分解到高频尺度（ $<32 \text{ h}$ ）、天气尺度（ $32 \sim 256 \text{ h}$ ）、背景环流尺度（ $>256 \text{ h}$ ）三个子空间中，并在该三个尺度的框架下对各尺度的能量收支进行了诊断，并基于此分析了其多尺度动力学过程。我们发现此次涡旋以及该涡旋信号可追溯至21日青藏高原西北侧200 hPa上40°—45°N间的天气尺度低涡，当该涡旋经过高原

西北部时,其南部受到背景场的能量级串而独立于 40° — 45° N的涡旋主体并向高原移动。我们注意到,在涡旋到达高原前,其整体的斜压不稳定的作用不明显。此前众多研究已经表明,典型的斜压不稳定具有“底层捕获”(bottom-trapped)的特征(例如,文献[58-63]),其主要信号应该先体现在底层,这正是众多研究中发现的强斜压性高原涡一般表现为“自下而上”发展的理论原因,而本文的分析结果显示,此次高原涡在生成阶段与典型斜压不稳定导致的高原涡具有明显的不同。图2表明,此次高原涡环流结构首先出现在200 hPa的高层,而此时靠近地面的500 hPa上尚未有高原涡的信号,表明这并非典型的斜压不稳定导致的高原涡。进一步分析表明,在生成阶段,200 hPa上高原涡环流是由于正压不稳定导致的,高原西侧向下的垂直

位势通量将高层获得的动能向下输运(图13a),从而使得此次高原涡首先出现在上层,随后下层的结构才得以发展,呈现出“自上而下”发展的特征。

在高原上,涡旋东西侧的动力学过程近乎完全相反(图13b)。总体来说,涡旋西侧高原近地面层的斜压不稳定与非绝热加热增强局地的天气尺度有效位能,通过浮力转换为动能,并利用位势通量输运到对流层高层,高层通过动能的水平非局地过程将低层的位势通量以及高层自身因正斜压失稳从背景场中获得的动能转移到东侧,并通过位势通量向下输运。涡旋离开高原东移至盆地附近时,西侧的动力学过程不变,但东侧中下层出现的天气尺度非绝热加热(图13c)有利于其进一步发展。

总之,2013年5月下旬的这次高原涡是由上而下

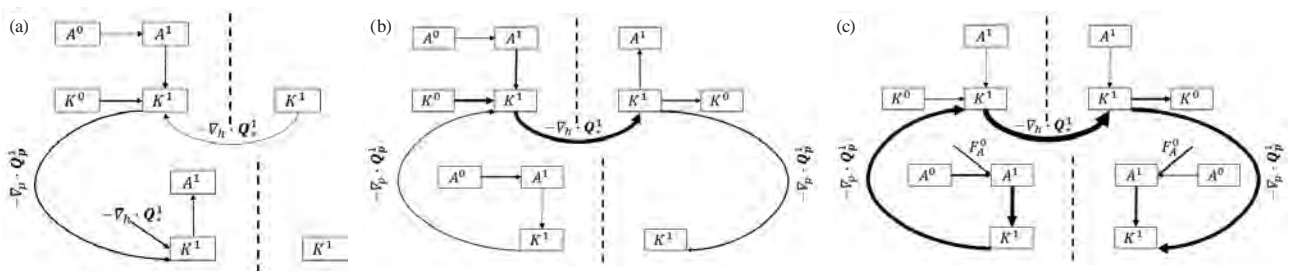


图13 涡旋在高原上发展的三个阶段(a: S1阶段; b: S2阶段; c: S3阶段)的天气尺度能量收支示意图。上下层分别为对流层高层与高原近地面,虚线左(右)侧为涡旋的西(东)侧

Fig. 13 Synoptic scale energy budgets on the three stages of the vortex over the Plateau: (a) S1, (b) S2, (c) S3. The upper and lower layers respectively represent the upper troposphere and the plateau near the ground. The left (right) to the dotted line is the western (eastern) side of the vortex

生成的,这与传统的认知大不相同。一般认为,高原上的天气系统多是由近地面感热、潜热等斜压过程自下而上触发或发展的,而此涡生成机制主要为背景环流的正压失稳,并且主要作用于高层,之后所得能量通过气压梯度力做功向下输运,使高原涡东移下高原演变为盆地西南涡,并最终导致大范围强降水的灾害性天气过程。

致谢:感谢南京信息工程大学高性能计算中心为本文的数值计算提供依托。

参考文献

- [1] 叶笃正,罗四维,朱抱真. 青藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡. 气象学报, 1957, 28(2): 108-121.
- [2] 叶笃正,高由德. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979.
- [3] Gao Y, Tang M, Luo S, et al. Some aspects of recent research on the Qinghai-Xizang Plateau meteorology. Bull Amer Meteorol Soc, 1981, 62(1): 31-35.
- [4] 朱抱真. 大地形对青藏高原夏季低层大气环流的动力作用. 科学通报, 1985, 30(13): 1005-1007.
- [5] Yanai M, Li C, Song Z. Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon. J Meteorol Soc Jpn Ser II, 1992, 70(1B): 319-351.
- [6] Wu G, Liu Y, Zhang Q, et al. The influence of mechanical

and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. J Hydrometeorol, 2007, 8(4): 770-789.

- [7] Zhao P, Xu X, Chen F, et al. The third atmospheric scientific experiment for understanding the Earth-Atmosphere Coupled System over the Tibetan Plateau and its effects. Bull Amer Meteorol Soc, 2017, 99(4): 757-776.
- [8] Smith R B. 100 years of progress on mountain meteorology research. Meteorol Monogr, 2018, 59: 20.1-20.73.
- [9] 罗四维,何梅兰,刘晓东. 关于夏季青藏高原低涡的研究. 中国科学(B辑), 1993, 23(7): 778-784.
- [10] 李国平,刘晓冉,黄楚惠,等. 夏季青藏高原低涡结构的动力学研究. 成都信息工程学院学报, 2011, 26(5): 461-469.
- [11] Feng X, Liu C, Fan G, et al. Climatology and structures of southwest vortices in the NCEP climate forecast system reanalysis. J Clim, 2016, 29(21): 7675-7701.
- [12] Wang W, Kuo Y H, Warner T T. A diabatically driven mesoscale vortex in the lee of the Tibetan Plateau. Mon Wea Rev, 1993, 121(9): 2542-2561.
- [13] 陈贝,高文良. 引发四川盆地西南地区暴雨的高原涡特征分析. 高原山地气象研究, 2015, 35(1): 9-15.
- [14] Feng X, Liu C, Rasmussen R, et al. A 10-yr climatology of Tibetan Plateau vortices with NCEP climate forecast system reanalysis. J Appl Meteorol Climatol, 2013, 53(1): 34-46.
- [15] Zhang P, Li G, Fu X, et al. Clustering of Tibetan Plateau vortices by 10-30-day intraseasonal oscillation. Mon Wea Rev, 2013, 142(1): 290-300.
- [16] 关良,李栋梁. 青藏高原低涡的客观识别及其活动特征. 高原气象, 2019, 38(1): 55-65.
- [17] Zhang F, Wang C, Pu Z. Genesis of Tibetan Plateau vortex: roles

- of surface diabatic and atmospheric condensational latent heating. *J Appl Meteorol Climatol*, 2019, 58(12): 2633-2651.
- [18] Wang B, Orlanski I. Study of a heavy rain vortex formed over the eastern flank of the Tibetan Plateau. *Mon Wea Rev*, 1987, 115(7): 1370-1393.
- [19] 李国平. 高原涡、西南涡研究的新进展及有关科学问题. *沙漠与绿洲气象*, 2013, 7(3): 1-6.
- [20] Lin Z. Analysis of Tibetan Plateau vortex activities using ERA-Interim data for the period 1979-2013. *J Meteorol Res*, 2015, 29(5): 720-734.
- [21] Curio J, Schiemann R, Hodges K I, et al. Climatology of Tibetan Plateau vortices in reanalysis data and a high-resolution global climate model. *J Clim*, 2018, 32(6): 1933-1950.
- [22] Tao S, Ding Y. Observational evidence of the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China. *Bull Am Meteorol Soc*, 1981, 62(1): 23-30.
- [23] 江吉喜, 范梅珠. 夏季青藏高原上的对流云和中尺度对流系统. *大气科学*, 2011, 26(2): 263-270.
- [24] 郁淑华. 夏季青藏高原低涡研究进展述评. *暴雨灾害*, 2008, 27(4): 367-372.
- [25] Wang B. The development mechanism for Tibetan Plateau warm vortices. *J Atmos Sci*, 1987, 44(20): 2978-2994.
- [26] Ye D Z, Wu G X. The role of the heat source of the Tibetan Plateau in the general circulation. *Meteorol Atmos Phys*, 1998, 67(1): 181-198.
- [27] Fu S M, Mai Z, Sun J H, et al. Impacts of convective activity over the Tibetan Plateau on plateau vortex, southwest vortex, and downstream precipitation. *J Atmos Sci* 2019, 76(12): 3803-3830.
- [28] Chang C P, Yi L, Chen G T. A numerical simulation of vortex development during the 1992 east Asian summer monsoon onset using the navy's regional model. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(6): 1604-1631.
- [29] 钱正安, 单扶民, 吕君宁, 等. 1979年夏季青藏高原低涡的统计及低涡产生的气候因子探讨. *青藏高原气象科学实验文集(二)*. 北京: 科学出版社, 1984.
- [30] 杨洋, 罗四维. 夏季青藏高原低涡的能量场分析. *应用气象学报*, 1992: 3(2), 198-205.
- [31] 杨伟愚, 叶笃正, 吴国雄. 夏季青藏高原气象学若干问题的研究. *中国科学(B)* 辑, 1990, 20(10): 1100-1111.
- [32] 杨伟愚, 叶笃正, 吴国雄. 夏季青藏高原热力场和环流场的诊断分析—III: 环流场稳定维持的物理机制. *大气科学*, 1992, 16(4): 409-426.
- [33] 罗潇, 李国平. 一次东移型高原切变线过程的扰动动能特征. *气象科学*, 2019, 39(2): 226-236.
- [34] Liang X S, Robinson A R. Localized multiscale energy and vorticity analysis: I. Fundamentals. *Dyn Atmos Oceans*, 2005, 38(3): 195-230.
- [35] Liang X S, Robinson A R. Localized multi-scale energy and vorticity analysis: II. Finite-amplitude instability theory and validation. *Dyn Atmos Oceans*, 2007, 44(2): 51-76.
- [36] Liang X S, Anderson D G M. Multiscale window transform. *Multiscale Model Simul*, 2007, 6(2): 437-467.
- [37] Liang X S. Canonical transfer and multiscale energetics for primitive and quasigeostrophic atmospheres. *J Atmos Sci*, 2016, 73(11): 4439-4468.
- [38] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018 (Accessed on 06-12-2020), url: <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>.
- [39] 赵远冰, 梁湘三, 朱伟军. 东亚地区南北两个风暴源地中风暴的结构和动力学差异. *气象学报*, 2018, 76(5): 663-679.
- [40] Zhao Y B, Liang X S. Causes and underlying dynamic processes of the mid-winter suppression in the North Pacific storm track. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62(5): 872-890.
- [41] Ma J, Liang X S. Multiscale dynamical processes underlying the wintertime Atlantic blockings. *J Atmos Sci*, 2017, 74(11): 3815-3831.
- [42] Xu F, Liang X S. On the generation and maintenance of the 2012/13 sudden stratospheric warming. *J Atmos Sci*, 2017, 74(10): 3209-3228.
- [43] 赵华睿, 吴立广, 梁湘三. MWT方法在分离台风环流中初步应用. *气象科技进展*, 2015, 5(6): 31-36.
- [44] Wang L, Liang X S. A diagnosis of some dynamical processes underlying a higher-latitude typhoon using the multiscale window transform. *Atmosphere*, 2017, 8(12): 118.
- [45] Yang Y, Liang X S, Qiu B, et al. On the decadal variability of the eddy kinetic energy in the Kuroshio Extension. *J Phys Oceanogr*, 2017, 47(5): 1169-1187.
- [46] Yang Y, Liang X S. The intrinsic nonlinear multiscale interactions among the mean flow, low frequency variability and mesoscale eddies in the Kuroshio region. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62(3): 595-608.
- [47] Lorenz E N. Available potential energy and the maintenance of the general circulation. *Tellus*, 1955, 7(2): 157-167.
- [48] von Storch J, Eden C, Fast I, et al. An estimate of the Lorenz energy cycle for the world ocean based on the STORM/NCEP simulation. *J Phys Oceanogr*, 2012, 42(12): 2185-2205.
- [49] 朱男男, 刘彬贤, 孙密娜, 等. 引发渤海风风暴潮一次江淮气旋北上过程诊断分析. *气象与环境学报*, 2016, 32(5): 10-17.
- [50] 程锦霞. 2013年5月河南一次大暴雨成因分析及数值预报检验. *气象与环境科学*, 2014, 37(2): 42-48.
- [51] 崔恒立, 赵宇, 王东仙, 等. 引发暴雨的低涡发生发展机制分析. *灾害学*, 2016, 31(2): 30-36.
- [52] Wang X, Liu Y. Causes of extreme rainfall in May 2013 over Henan Province: the role of the southwest vortex and low-level jet. *Theor Appl Climatol*, 2017, 129(1): 701-709.
- [53] 中国气象局成都高原气象研究所, 中国气象学会高原气象学委员会. *青藏高原低涡切变线年鉴(2013)*. 北京: 科学出版社, 2015.
- [54] Liu Y G, Liang X S, Weisberg R H. Rectification of the bias in the wavelet power spectrum. *J Atmos Ocean Technol*, 2007, 24(12): 2093-2102.
- [55] 朱抱真. 关于高原山地对大尺度过程的动力作用的研究. *高原气象*, 1984, 3(4): 34-44.
- [56] Fu S, Li W, Sun J, et al. Universal evolution mechanisms and energy conversion characteristics of long-lived mesoscale vortices over the Sichuan Basin: Universal evolution and energy features of the southwest vortex. *Atmos Sci Lett*, 2015, 16(2): 127-134.
- [57] Feng X, Liu C, Fan G, et al. Climatology and structures of southwest vortices in the NCEP climate forecast system reanalysis. *J Clim*, 2016, 29(21): 7675-7701.
- [58] Charney J G. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J Meteorol*, 1947, 4(5): 136-162.
- [59] Kuo H L. Three-dimensional disturbances in a baroclinic zonal current. *J Meteorol*, 1952, 9(4): 260-278.
- [60] Green J S A. A problem in baroclinic stability. *Q J R Meteorol Soc*, 1961, 87(372): 255-255.
- [61] Bretherton F P. Critical layer instability in baroclinic flows. *Q J R Meteorol Soc*, 1966, 92(393): 325-334.
- [62] Edmon H J, Hoskins B J, McIntyre M E. Eliassen-palm cross sections for the troposphere. *J Atmos Sci*, 1980, 37(12): 2600-2616.
- [63] Zhao Y B, Liang X S. Charney's model—the renowned prototype of baroclinic instability—is barotropically unstable as well? *Adv Atmos Sci*, 2019, 36(7): 733-752.

低轨互联卫星发展历程及气象领域合作模式展望

王柏林 李佳

(中国华云气象科技集团公司, 北京 100081)

摘要: 低轨互联卫星系统被认为是当今最新、最有前途的卫星移动通信系统, 能在一定程度上满足全球范围内气象数据和产品传输、气象移动通信和天基气象载荷探测的业务需求, 有效支撑全球气象监测、全球预报和全球服务的实施, 有广阔的应用前景。通过研究国内外低轨互联卫星星座发展历程, 对低轨互联星座产业链、存在风险、气象应用需求进行了分析, 提出了通过商业合作方式在气象领域加快应用推广的建议。

关键词: 低轨互联卫星, 气象, 合作模式, 展望

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.004

The Development of Low-Orbit Connected Satellites and the Prospect of Meteorological Cooperation Model

Wang Bailin, Li Jia

(China Huayun Meteorological Technology Group Corporation, Beijing 100081)

Abstract: LEO interconnected satellite system is considered to be the latest and most promising satellite communication system, which can meet practical needs of global meteorological data and product transmission, meteorological mobile communication and space-based meteorological load detection to some extent. And with broad application prospects, it supports the implementation of the global monitor, forecast and service. Through the study of the development history of domestic and foreign low orbit interconnected satellite system, we first analyzed the industrial chain, risks and the demands in meteorological application of LEO, and then put forward some suggestions to speed up the application and popularization in the field of meteorology through commercial cooperation.

Keywords: LEO, meteorology, cooperation model, prospect

0 引言

据国际电信联盟 (ITU) 估计, 至2019年12月, 全球互联网普及率约为58.7%, 世界上仍有超过40%的人口 (约32.2亿人) 未实现互联网连接, 这部分人口主要分布在地广人稀的地区和亚非拉区域大多数第三世界国家。卫星通信凭借着覆盖范围广、灾难容忍性强、灵活度高等独特的优势, 在偏远地区网络覆盖、航海、应急、军用通信、科考勘探等应用领域中具有不可替代的作用^[1-3]。

相较于传统中高轨通信卫星的高技术、高投入、高风险和较长研发周期等特性, 运行轨道高度为200~2000 km的低轨小卫星系统被认为是目前最新最有前途的卫星移动通信系统。低轨互联卫星系统是指基于卫星通信、通过一定数量的低轨小卫星形成规模组网, 从而辐射全球, 构建能够处理实时信息、向地面和空中终端提供互联网接入等通信服务的新型网络

系统, 主要有以下特点: 一是质量轻、成本低、研制周期短, 低轨互联卫星一般采用部件小型化和轻型化的技术, 研制一般为2年, 可以在短时间形成组网探测能力; 二是覆盖广、时延短、可靠性高, 卫星之间互为备份, 系统健壮可靠, 运行轨道高度较低, 卫星间通过星际链路互通, 传输延时短, 路经损耗小。建设以低轨互联卫星为主要依托的天基宽带互联网, 与地面宽带网络等互联融合, 可进一步满足人们对全球无缝覆盖的宽带网络需求, 是互联网技术未来发展的一个重要设想。

低轨小卫星星座发展由20世纪90年代末起步, 美国提出了天基综合信息网的基本概念, 欧洲也提出了构建“面向全球通信的综合空间基础设施 (ISICOM)”的设想^[4], 建立了“铱星”和“全球星”, 主要用于卫星电话中继, 但受限于技术和成本, 商业化运营范围很小。随着卫星制造技术、火箭发射、卫星通信、卫星终端制造等技术的快速进步, 高带宽、低延时的基于低轨道的卫星通信已经成为可能。2015年, 美国Space X公司提出了“星链 (Star

收稿日期: 2019年10月8日; 修回日期: 2020年7月14日
第一作者: 王柏林 (1979—), Email: wbl3309@126.com

Link) ”计划，第二次开启了世界范围内的低轨通信卫星网络建设浪潮。

自1960年美国发射第一颗气象卫星“泰罗斯”1号，气象卫星遥感技术成为近半个世纪以来全球对地观测发展速度最快、也是最为成熟的技术^[5]。随着小卫星技术的快速发展，为气象卫星技术体制带来了新的转型发展机遇。美国作为全球商业卫星气象服务市场的领军者，NOAA于2016年出台了《商业航天政策》，允许NOAA 采购商业数据，或在商业卫星上搭载政府气象有效载荷，或在政府卫星上搭载商业气象有效载荷，来弥补政府机构现有能力的不足，从而确保国家天气预测和预警服务能力不断提升^[6]。中国气象局于2020年也提出了在低轨互联卫星上搭载中小型气象载荷开展气象探测的思路，组网构建研制周期短、响应应用需求快、覆盖全球的“通信+气象探测”一体化天基气象观测网络，对风云系列、高分系列等遥感卫星的能力形成纵向补充，通过高密度组网的星座能够一定程度上满足在全球范围内气象探测数据传输与分发、气象移动通信和天基气象载荷探测的业务需求，对提升我国全球气象观测、全球气象预

报、全球气象服务能力具有重要意义，在气象行业有着广阔的应用前景。

鉴于低轨互联卫星系统在移动通讯的巨大优势以及良好的可拓展性，同时因为卫星星座建设两大核心资源要素：频率和轨道的唯一性，两者的国际分配规则均为“先占先得”的抢占方式，日益增长的需求使得卫星频率、轨道资源争夺白热化，国内外掀起了一股群雄逐鹿的低轨互联卫星发展热潮。

1 国内外低轨通信卫星系统建设进展

低轨通信星座（图1）在物联网、移动互联网的发展带动下，走出了20世纪末、21世纪初的发展低谷，迎来一个崭新的发展高潮。以L、S、VHF等低频段为主的铱星（Iridium）、全球星（Globalstar）、轨道通信（Orbcomm）等传统低轨通信星座已完成升级换代，以中低速业务为主，支持面向手持移动通信和低功耗小型化物联网服务；以Ku、Ka频段甚至更高频段为主的一网公司（OneWeb）、美国太空探索技术公司（SpaceX）等新兴互联网星座计划呈现爆发式增长，卫星数量多，以中高速业务为主，支持互联网接入、网络节点互联以及基站回程等服务^[7-8]。

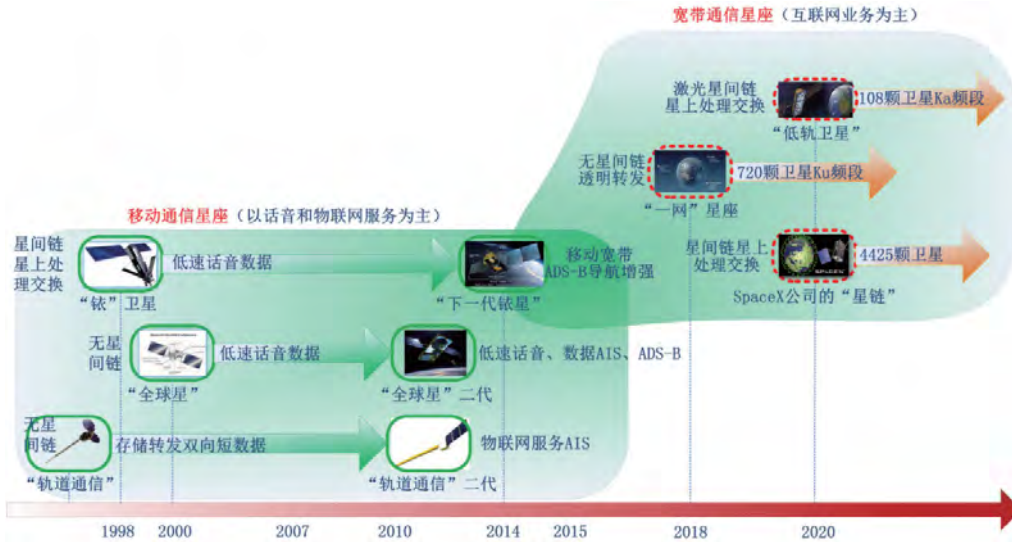


图1 国外低轨通信星座发展过程^[7]

Fig. 1 International low-orbit communication constellation development^[7]

1.1 全球第一次低轨通信卫星建设热潮

20世纪80年代开始掀起的小卫星技术热潮对星座的发展起了巨大的推动作用，90年代初期，低轨通信星座开始盛行，最多时有十几个卫星通信星座计划。在20世纪末，伴随铱星、全球星等低轨语音通信星座的兴起，业界相继提出了多个中低轨道互联网星座的概念，其中包括微软公司的Teledesic星座、法国阿尔卡特公司的Skybridge星座（表1）。早期的中低轨卫

星通信星座以电话和物联网服务为主。

铱星系统早期运营失败，核心问题是铱星的高成本导致了高价格，使其竞争力较弱。据铱星公司最初估算，需要大约65万个用户能够实现盈亏平衡，但铱星系统运行期间只有2万左右的用户，市场需求的下降以及初期市场估算时过于乐观，导致铱星公司经营难以为继。尽管后期为了挽救市场，铱星电话大幅降价，但为时已晚。到公司破产时，铱星的全球用户只

表1 20世纪末的低轨星座计划
Table 1 Low-orbit constellation program in the 1990s

星座计划	所属公司	发展历程与现状
低轨窄带 (含语音)星座	铱星通讯 (IRDM.O)	1997—1998年, 美国铱星公司发射了66颗用于手机全球通讯的人造卫星, 2000年3月铱星公司宣布破产。2001年3月新的铱星公司重新开始服务。2010年6月宣布了下一代卫星星座Iridium NEXT的筹措资金、建设和部署计划。2018年营收5.23亿美元, 净利润-0.13亿美元, 市值41亿美元。
	全球星 (GSAT.O)	1991年, 美国Loral和高通公司联合提出的全球数字卫星移动通信系统, 1998年首次发星, 2000年正式使用。2018年营收1.3亿美元, 净利润-0.07亿美元, 市值6.4亿美元。
	ORBCOMM (ORBC.O)	全球第一个双向短数据低轨小卫星通信系统, 在工业物联网领域成果显著, 目前大约60颗低轨卫星在轨运行。2018年营收2.76亿美元, 净利润-0.26亿美元, 市值3.1亿美元。
低轨互联网星座	Teledesic星座	美国微软公司和麦考公司提出的耗资90亿美元、924颗卫星, 瞄准宽带业务。2003年微软和Teledesic终止卫星合同。
	Skybridge星座	法国阿尔卡特公司、美国劳拉公司和日本东芝公司发起的预计总投资35亿美元、80颗卫星, 支持因特网接入及宽带多媒体技术。2014年, OneWeb公司收购了Skybridge旗下的卫星频谱。

有6万左右, 与预想的用户数量相差甚远。

同时, 2000年互联网产业遭遇第一次低谷, 这些通信星座设想全都停留在纸面上, 而没有付诸实施。但在那一轮浪潮中, 业界已经对星座结构、频率分配、接入方式、干扰、信号衰减、资费等问题做了相当详细的研究。因此, 今天的低轨宽带互联网星座可以认为是在这些技术基础上的第二次产业浪潮。

1.2 国外低轨互联卫星星座建设进展

目前, 国外提出卫星互联网计划的既有波音、O3b、Telesat、ViaSat等老牌企业, 也有OneWeb、SpaceX、Theia等新兴科技公司, 主要以提供互联网服务为主 (表2)。O3b星座系统是目前全球唯一一个成功投入商业运营的中地球轨道 (MEO) 卫星通信系统。

表2 国外主要低轨通信卫星计划
Table 2 Major international low-orbit communications satellite programs

计划名称	卫星数量	轨道情况	推出计划时间	工作频段	当前进展	卫星质量及造价
Space X	4425	LEO	2015	Ka/Ku	已经发射7次, 每次约60颗, 共约422颗在轨	单星质量约227 kg, 造价约100万美元
	7518	极低轨		V		
OneWeb	720	LEO	2015	Ka/Ku/V	已经发射3次, 依次为6颗、32颗、34颗; 2020年3月申请破产保护	单星质量约150 kg, 造价约100万美元
	1280	MEO				
Iridium NEXT	66+9	LEO	2007	Ka/V	75颗卫星在轨	单星质量约860 kg
Globalstar	48+8	LEO	1998	L/S	2002年申请破产保护, 重组后继续运营	单星质量约450 kg
Orbcomm	64	LEO	1991	VHF	35颗卫星在轨	单星质量约115 kg
O3b	60	MEO	2008	Ka	计划部署20颗卫星, 目前12颗星已投入运营	单星质量约700 kg
Boeing	2956	LEO	2016	Q/V	计划2022年发星	
LeoSat	108	LEO	2015	Ka	2019年11月因缺少投资而被迫停运, 尚未发过星	单星质量约1250 kg

1) Iridium NEXT重焕新生

2001年, 铱星公司破产重组后, 在2003年伊拉克战争中的战时通信方面发挥了重要作用, 美军由此成为铱星最重要客户, 并为其支付了3600万美元的包年费用。

2007年, 铱星公司发布了Iridium NEXT计划, Iridium NEXT的单星质量为860 kg, 设计在轨使用寿命为15年。2017—2019年, SpaceX公司将75颗卫星分8次完成部署。从商业逻辑来看, Iridium NEXT将聚焦窄带业务, 拓展宽带业务, 并逐步向宽带业务转变。在已经入轨运行的低轨星座当中, Iridium NEXT无论在规模、轨道高度还是服务模式上, 都最为接近国内企业畅想中的低轨宽带星座, 后续分析均以其为例。

2) O3b星座已在运营

O3b公司成立于2007年, 其创始人Greg Wyler也是OneWeb的创始人, 公司旨在为全球偏远地区 (主要是非洲、亚洲和南美等) 30 亿上网困难或上网昂贵的人口提供高带宽、低成本、低延迟的卫星互联网接入服务。O3b 星座系统是目前全球唯一成功运营的中轨道宽带星座卫星通信系统。

O3b方案和概念提出后, 得到了SES、Google等大公司的支持, 并于2010年底得到了全额资助。O3b星座服务了50个国家的客户, 惠及了超过1500万最终用户, 为6家石油和天然气超级巨头中的4家提供服务, 为全球五大邮轮公司中的四家提供卓越连接体验。

3) OneWeb星座破产重组

OneWeb公司成立于2012年，得到了谷歌的支持，2014年从破产的SkyBridge公司手中获得国际电信联盟（ITU）正式授权的部分Ku频段资源。OneWeb共获得五轮融资，融资总额超过34亿美元，仅2019年就获得单笔12.5亿美元的投资。OneWeb投资方包含软银、维珍集团、高通、国际通信卫星公司、可口可乐等巨头，至2020年3月已部署74颗卫星，目标用户是个人消费者和小型商业客户，为全球提供低成本高速度的网络覆盖。

受全球新冠疫情影响，市场动荡导致公司融资困难，OneWeb公司于今年3月在美国申请破产，包括亚马逊、Space X、卫星运营商Eutelsat、私募股权公司Cerberus，以及两家中国公司参与竞购，竞购重点关注的是估价10亿美元的无线频谱资源。

4) Starlink星座服务在即

2015年1月，Space X公司宣布了Starlink星座计划，Starlink将部署1.2万颗通信卫星，申请的轨道和频率获得了国际通讯联盟（ITU）批准，单星质量为227 kg，整个计划预计需要约100亿美元，2015—2019年已完成了5轮近30亿美元融资，Space X公司的火箭发射业务将提供30亿美元的峰值收入。

至2020年6月，Starlink星座已由猎鹰9号可回收火箭部署482颗，成为目前全球卫星在轨数量最多的商业卫星系统，预计美国部分地区用户最早可能在今年8月尝试到Starlink星座宽带服务。Starlink卫星互联网服务的延迟将为20 ms，目标价格约为每月80美元（约合人民币566元）。

低轨互联网星座需要较大的前期投入，创业公司需要拿到足够的融资以度过创业初期的“死亡谷”阶段，LeoSat计划尚未实施就已经宣告停止运作；OneWeb、Space X已拿到了较多融资，但预计仍然有资金缺口，OneWeb已于今年3月宣布破产重组、Space X于今年2月考虑将分拆Starlink单独IPO；政府和军方的支持也很重要，美军是铱星系统最重要的客户，加拿大Telesat公司已经提前获得了加拿大政府的订单。

1.3 国内低轨通信卫星星座建设进展

在全球低轨卫星及天基互联网的发展推动下，中国航天科技集团、中国航天科工集团等国有企业和银河航天、国电高科等民营企业也分别制定了低轨卫星计划，积极参与到该领域的竞争（表3）。同时，为了整合资源，国防科工局正在牵头对我国低轨互联网项目进行统筹协调，促进形成一体化的低轨互联网系统。

表3 国内主要低轨通信卫星计划
Table 3 Major China low-orbit communications satellite programs

计划名称	卫星数量	轨道情况	工作频段	当前进展	发起企业
鸿雁星座	300	LEO	Ka\L	2018年12月发射首颗试验星	航天科技集团
虹云工程	156	LEO	Ka	2018年12月发射首颗试验星	航天科工集团
行云工程	80	LEO	L	2020年5月试验1星、2星入轨	航天科工集团
天象星座	60+60	LEO	Ka\L	2019年6月试验1星、2星入轨	中电科集团
银河Galaxy星座	650	LEO	Ka\Q\V	2020年1月首发星入轨	银河航天
天启物联网星座	38	LEO	VHF/UHF	2020年1月已实现6星组网	国电高科
天基物联网	72	LEO	L	2018年12月“瓢虫系列”7星试验入网	九天微星

1) 鸿雁星座（低轨窄带+宽带星座）

2016年，中国航天科技公司提出“鸿雁星座全球卫星通信系统”计划，包含一个移动通信星座和一个宽带通信星座，为导航、航空、航海等领域提供综合服务。

2018年11月，航天科技集团、中国电信、中国电子、国新国同4家央企及其相关企业共同发起成立东方红卫星移动通信有限公司，注册资本金20亿元人民币，负责建设与运营全球低轨卫星移动通信与空间互联网系统（前身为“鸿雁星座”），项目首期投资200亿元。

2018年底，鸿雁星座发射首颗试验星，配置L/Ka频段通信载荷、导航增强载荷、航空监视载荷，预计

2022年建成60颗核心骨干卫星组成的鸿雁星座一期并投入运营，主要实现全球移动通信、物联网、导航增强、航空监视等功能；预计2025年完成二期建设，系统由数百颗宽带通信卫星组成，可实现全球任意地点的互联网接入。

2) 虹云工程（低轨宽带通信星座）和行云工程（低轨窄带通信星座）

2016年，航天科工集团提出“虹云工程”和“行云工程”。虹云工程计划发射156颗卫星，构建全球覆盖的低轨Ka宽带通信星座系统，满足中国及国际互联网欠发达地区、规模化用户单元同时共享宽带接入互联网的需求。行云工程计划发射80颗星，建立面向物联网应用的低轨窄带卫星服务系统，为用户提供

128字节短报文数据双向传输。

虹云工程技术验证星2018年底发射入轨开始测试。计划2020年，发射4颗业务试验星组建小星座，2022年实现全部156颗卫星组网运行，完成业务星座构建。行云工程首颗技术验证星已于2017年发射，2020年5月发射了两颗试验卫星，2021年计划建成由12颗卫星组成的小规模星座，到2025年建成由80颗卫星组成的全星座系统。

2018年底，行云公司邀请包括气象、海洋、应急管理等行业150家单位成立了天基物联网产业联盟，涵盖商业卫星的科研、制造、运营、服务、应用和金融资本等多类型企业。

3) 银河Galaxy星座（低轨宽带通信星座）

银河航天公司成立于2018年，由猎豹移动联合创始人、前总裁徐鸣创立，获得了顺为资本、晨兴资本、IDG资本等投资机构融资支持，2019年企业估值50亿元，成为国内商业航天企业估值最高的创业公司之一。

银河航天提出采用5G标准的“银河Galaxy”低轨宽带卫星星座，卫星重约227 kg，单颗卫星的通信带宽高达10 GB，使用Ka/Q/V频段，该卫星不但能提供不间断的5G信号，还可以提供卫星互联网业务，可提供覆盖全球的天地融合5G通信网络服务。

2020年2月首发星成功，银河航天计划在3年内再发射144颗卫星，使星座带宽总量达到20 TB，打造中国版的“星链”系统。

4) 天启物联网星座（低轨窄带通信星座）

国电高科公司成立于2015年，是目前国内唯一取得VHF和UHF频段无线电通信频率使用许可证及相关电信增值业务经营许可的民营公司。天启物联网星座由国电高科部署和运营，2019年4月股权融资1亿元，计划到2021年前部署完成由38颗低轨卫星组成的覆盖全球的物联网数据通信星座，重点以智慧农业、渔业救援、电力、油气运输、海洋运输及生态环境保护等行业应用为切入点。

目前，“天启星座”已完成6星组网，成为国内首个实现数据应用的物联网星座，计划今年底，实现20颗卫星组网运行，对全球覆盖区域内任意地点的时间分辨率缩短到10 min内，地面通信终端功率稳定在0.1~0.5 W，满足80%以上卫星物联网星座用户任务场景应用需求。天启星座通信终端销售价格量产后可以控制在百元级别，资费标准与短信相当。

2019年，由国防科工局、工业和信息化部牵头整合航天科工、航天科技、中国电科等国企提出的低轨通信卫星星座计划，按功能和用途、不同计划分为多

期多批建设，运行轨道高度约为800~2000 km。以宽带互联网接入服务为主、以窄带数据传输为辅，采用天地融合组网的系统架构，为政府、军队、商业用户提供互联网接入、专网接入、导航增强、遥感及数据采集与实时传输服务。

2 低轨通信卫星系统建设潜在风险分析

一方面，低轨卫星系统较传统通信卫星具有诸多优势：覆盖范围广，可实现全球无缝通信；信号传输时延小，传输损耗小；卫星体积小、重量轻、制造成本低，可实现一箭多星；研制周期短、发射成本低，可灵活补充等。另一方面，低轨卫星系统的建设目前仍面临着发射能力不足，前期资本投入大，商业应用不明晰，轨道、频率冲突等风险。

2.1 巨额资本投入带来财务风险

1998年建成的第一代铱星系统共花费超过50亿美元（破产后以2500万美元出售），2013年建成的全球星系统共花费33亿美元，即使目前卫星建造成本和发射成本较当时有所下降，OneWeb星座融资34亿美元，仍然走向破产保护。

以国内目前的人力资源成本、卫星制造水平和火箭发射技术，研制并部署一个全球实时覆盖、包含60颗卫星的低轨通信卫星系统（宽窄带结合，并拥有舰艇自动识别（AIS）和民用航空自动识别功能（ADS-B）的星座），至少需要投资200亿元^[9]。只有星座完全部署才能为用户提供最佳体验，对企业造成了较大的资金压力，特别是私有商业公司。同时，低轨道小卫星寿命约5年，卫星的替换给星座后续运营维护带来了更大的挑战。

铱星通讯公司于2000年底以低价获得了原铱星公司完整的低轨星座及地面设施、成熟的用户终端设计和有关专利等资产，目前尚处于负债经营之中。2014—2018年，由于第二代铱星系统部署工作逐步推进，铱星通讯公司总收入从4.09亿美元增长至5.23亿

表4 商业航天项目资金需求估算

Table 4 Estimation of funding requirements for commercial space projects

项目	数量/颗	资金需求/亿美元	提出方
Starlink低轨互联网星座	1.2万	大于100	美国Space X
OneWeb低轨互联网星座	74	70（已融资34亿）	美国一网公司
Iridium NEXT星座	75	50	美国铱星公司
Telesat低轨星座	292	30	加拿大电信卫星公司
O3b星座	42	42（已融资12亿）	O3b公司
Leosat	108	36亿（融资失败）	Leosat公司
鸿雁星座	300	首期200亿人民币	航天科技集团
虹云星座	156	预计100亿人民币	航天科工集团

美元，年均复合增速为 6.37%；净债务从7.33亿美元增长至15.8亿美元，年均复合增速为 21.17%，高于营收增速；公司近年来资本支出保持在4亿美元左右，资产负债率高，近5年在60%左右波动。公司不仅需要在漫长的前期建设阶段投入大量资金，还需要在后续较长时期内持续投入，以维持星座的运转。

根据航天十二院战略规划推进部发布的《2020年世界商业航天发展报告》分析，建成Starlink低轨互联网星座需要100亿美元，建成OneWeb低轨互联网星座资金需求在70亿美元，建成Iridium NEXT星座和Telesat低轨星座的资金需求均在30亿美元以上。

2.2 商业应用不明晰带来运营风险

建设初期，商业航天企业对外部融资依赖较大，一旦融资不畅，就将面临资金链断裂的危机。据美国卫星产业协会（SIA）数据显示，2018年，全球太空经济规模达到3600亿美元，卫星服务产业规模达1265亿美元，约占总规模的35%。商业航天公司需要具有自我造血的能力，挖掘科学实验、数据应用、广告营销等多方面用户需求订单，向卫星服务产业下游扩展。

根据铱星通讯2019财年报告，铱星二代星座的替换任务是导致净亏损增加的主要原因。铱星通讯2019年5.60亿美元收入包含了服务收入4.47亿美元、设备销售及工程支持项目收入1.13亿美元。其中，来自最大的单一客户美国政府的收入约1亿美元，占总收入不到20%。截至2019年底，铱星拥有了130万个可计费用户，去年同期为112.1万个，同比增长15.97%。具体来看，铱星的商业业务拥有116.5万个可计费用户，物联网数据用户为80.2万个，占比高达68.84%，未来物联网服务业务有望再进一步提升。

从铱星通讯2019财报可见两个重要趋势：首先，曾经挽救了铱星的政府用户如今在服务收入上只占不足20%的比例，商业用户已经成为铱星的主要收入来源。因此，政府虽然是商业星座的重要用户，但开发商业用户才是决定性的。其次，无论在商业用户还是政府用户中，物联网用户数量已经超过了传统的话音和数据用户，在营业收入中的占比越来越高。

2.3 轨道、频率冲突带来的政策风险

低轨通信卫星系统所需在轨卫星数量庞大，参与竞争企业众多，给捉襟见肘的轨道和频率资源分配提出了更大的挑战。世界各国和组织越来越重视卫星频率和卫星轨道的战略意义，基于静止卫星轨道资源“先占先得”的原则，纷纷自行或联合制造卫星，抢占轨道和频率资源。

就目前国际电信联盟（ITU）登记情况（表5）

看，地球同步静止轨道C频段通信卫星已接近饱和，Ku频段通信卫星也很拥挤（图2）。由此造成的卫星之间“撞车”的情况时有发生，全球卫星系统间的频率资源协调成为非常关键的问题。同时，由于低轨卫星星座自身庞大的卫星数量、全球性的覆盖范围，在干扰协调、设备能力上都会遇到与同步轨道卫星相异的挑战，其中最为关键的就是与同步轨道卫星的频率干扰问题。

表5 卫星通信用常用频段（摘自国际电联）
Table 5 Common frequency bands for satellite communications (from ITU)

频段	范围	用途
L	1~2 GHz	主要用于卫星移动通信、卫星无线电测定、卫星测控链路等
S	2~4 GHz	主要用于卫星移动通信、卫星无线电测定、卫星测控链路等
C	4~7 GHz	主要用于卫星固定业务通信，已近饱和
X	7~12 GHz	主要用于卫星固定业务通信，通常被政府和军方占用
Ku	12~18 GHz	主要用于卫星固定业务通信，已近饱和
Ka	27~40 GHz	正在被大量投入使用
Q	30~50 GHz	为了满足日益增加的频率轨道资源需求，已经开始逐步进入商业卫星通信领域
V	50~75 GHz	为了满足日益增加的频率轨道资源需求，已经开始逐步进入商业卫星通信领域

3 低轨互联星座产业链分析

低轨互联星座产业链包括卫星及地面系统制造、运载火箭制造、用户站制造、卫星运营及电信运营等环节，其中上游为卫星及运载火箭制造、地面系统制造、用户站制造，卫星运营为中游，电信运营等卫星应用为下游。根据2019年美国卫星产业协会（SIA）发布的卫星产业年度报告，卫星制造和发射服务约占卫星产业收入的10%，卫星地面系统制造、用户站制造约占卫星产业收入的45%，卫星运营服务约占卫星产业收入的45%。

参照Space X或OneWeb建造时序，低轨互联星座首先研制和部署卫星，因此卫星制造产业链和运载火箭产业链将率先受益；地面系统与卫星同步建设紧随其后，包括信关站、测控站等。卫星星座和地面站建设完成系统可以提供服务后，用户站制造将开始放量。最后是卫星运营商的客户规模逐渐扩大，达到盈亏平衡点后开始盈利。

借鉴风云系列气象卫星和北斗气象试验示范应用的成功经验，气象部门可以发挥气象行业优势，积极参与低轨互联卫星产业链的用户站制造和卫星运营、卫星应用工作。

3.1 用户站

用户终端设备主要包括卫星电视终端、卫星无线



图2 全球主要非静止轨道宽带通信星座轨道分布示意图 (截止到2020年1月17日)

Fig. 2 Map of the orbital distribution of the world's major non-geostationary orbit broadband communications constellations (until 17 January 2020)

电终端、卫星宽带终端、卫星移动通信终端等组件和产品。随着低轨互联网星座投入运营，用户站规模将开始放量，潜在市场巨大。

以OneWeb为例^[10]，所有终端均为热点覆盖形态，将卫星调制解调、地面LTE/3G、Wi-Fi集成为一体，为用户站周边一定区域的个人提供互联网服务。用户终端的大小将控制在30 cm×65 cm，天线大小预计36 cm×16 cm，预计终端和现行笔记本大小类似，可方便地移动端需求，价格定位在200~300美元。

假设我国低轨互联网星座用户站单价为1000元，按2025年4000万用户估计，用户站销售收入可达到400亿元。相对于卫星、火箭等制造业，用户站整机门槛相对较低，预计未来竞争者较多。国内从事用户站整机研制的企事业单位较多，气象部门具有风云系列卫星、北斗卫星等用户站研制和行业应用的成功经验，通过与国内用户站研发单位合作参与低轨互联卫星建设，负责气象、水文、海洋、环保等相关行业的用户站研发与建设。

3.2 卫星运营

卫星运营服务(图3)分为空间段运营服务和地面段运营服务两部分，空间段运营主要是通过卫星转发租赁业务，地面段运营主要包括支持用户访问卫星转发器并实现用户间通信的地面设施。预计2025年，我国卫星移动通信用户将达到300万，用户对于宽带接入、机载通信、远程教育、新闻采集、企业联网等应用的需求越来越旺盛。

卫星运营公司的主要资产为天上的卫星星座和信关站、测控站等地面设施，按200亿投资额，考虑卫星5年折旧、地面设施10年折旧，则每年固定资产折

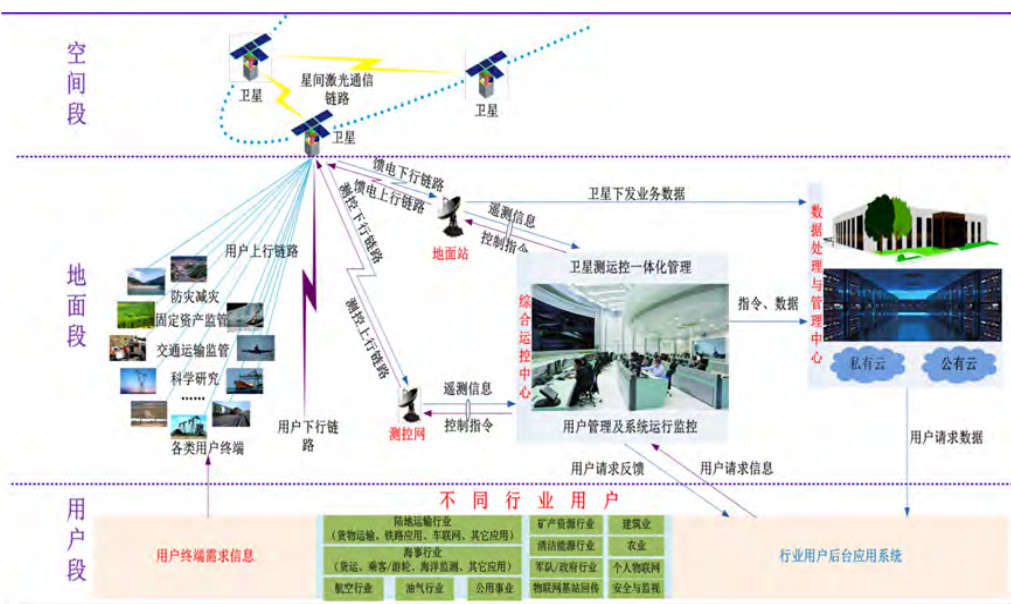


图3 低轨互联卫星运营服务示意图

Fig. 3 Map of low-orbit connected satellite operation services

旧费用达到40亿元。由于卫星运营企业固定成本占比较高，其收入规模一旦突破盈亏平衡点，其利润弹性将非常大。鉴于低轨互联卫星系统在气象行业的巨大应用潜力，气象部门与国内卫星运营企业加强“基础复用”，整合风云气象卫星、低轨互联卫星的地面通讯基础设施，推动地基天线、关口站、通讯终端的共享共用；推进“通信专用”，基于低轨互联卫星通信能力，建立气象部门的专用资源通信系统，加快推进其在气象行业的深层次应用。

4 低轨互联卫星气象应用需求分析

由于低轨互联卫星具有研制周期短、成本低、延时短的特点，同时数量众多，全球覆盖，为构建低延时通信天地一体化气象感知网络提供了很好的解决方案，如果再能搭载一些中小型气象载荷开展气象探测，就能具备全球组网观测能力，对提升我国全球气象观测、全球气象预报、全球气象服务能力具有重要意义，在气象行业有着广阔的应用前景。

4.1 提升气象观测数据收集能力

低轨互联卫星系统具有全球覆盖、低延迟、低成本、不受地形限制等通信优势，卫星星座通过星间激光链路传输数据，不需要大量地基基站便可实现地面观测设备的联网，弥补当前主要通信手段的不足，可实现全球范围内气象观测数据的实时传输，解决偏远地区台站通讯信号不稳定、成本高以及海外站受基础设施限制无法实现实时数据回传等问题，能显著提升我国西部地区、海上等偏远地区以及海外的气象观测数据传输能力。

4.2 支撑探空观测技术体制改革

低轨互联卫星系统可以在探空仪与数据中心之间起到数据中继传输的作用，实现探空仪和数据中心之间的通信和数据实时传输服务。探空仪采集数据后通过集成在探空仪上的卫星通信模组和卫星天线实时传送至低轨互联卫星星座，再由低轨互联卫星星座传至数据中心，可替代现有探空站地面数据接收系统，探空站将只需具备放球功能，从而大大简化探空系统，实现探空业务的无人值守。

重点需要解决探空仪在升空过程中与低轨互联卫星间的通信天线设计问题，保持通信天线姿态稳定，才能确保数据传输成功率。

4.3 扩大全球气象服务覆盖范围

由于全球覆盖的通信优势，低轨互联卫星系统可以实现全球气象预警信息实时短报文通信服务，对各区域的应用终端进行预警信息推送服务。结合我局突

发事件预警信息发布系统，可以把气象预警信息及时的传送到近海和远洋船舶、偏远地区、驻外使馆和企业人员以及广大海外用户，拓宽预警信息覆盖面。同时基于双向短报文的特点，船舶上的终端用户也能在极端气象环境下，向沿岸或附近海域的船舶、救援中心发送求救信息，有机地将海洋气象服务和海洋救援服务结合起来，更好地为用户服务。

4.4 拓展天基气象组网观测能力

低轨卫星星座组网卫星数量多，研制周期短，能够为气象载荷提供大量搭载平台，针对最新技术发展和应用需求迅速形成规模化的天基组网观测能力，与现有风云气象卫星星座观测能力形成互补。综合考虑低轨互联卫星平台的大小、功耗、稳定性指标等，难以搭载具有较强功能的对地观测仪器，目前仅具备搭载百千克以内的太赫兹冰云探测载荷、掩星探测载荷、GNSS-R探测载荷等中小型气象载荷（图4）^[11-13]。尤其是掩星探测载荷，在多星组网观测的情况下，相比于传统气象卫星，捕捉掩星事件的概率大大增加，从而为数值预报提供更为丰富的垂直大气信息，是目前最具应用前景的可由低轨卫星搭载的气象类载荷。

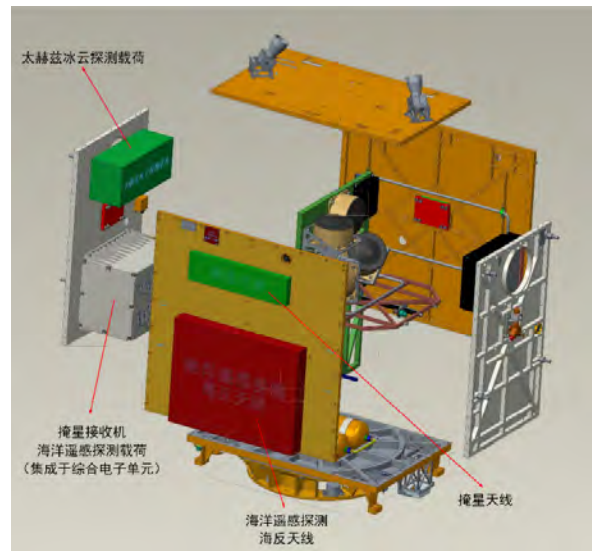


图4 低轨卫星气象载荷示意图

Fig. 4 Meteorological payloads by low-orbit satellites

相较于以通信服务为主的低轨互联卫星，搭载气象探测载荷的小卫星需要具备更高的姿控精度、热控系统和卫星轨道精度，探测仪器性能的一致性和数据定标也至关重要。

5 气象领域应用展望

综上所述，全球第二次低轨通信卫星建设热潮正在滚滚而来，美欧等国既有已建立的O3b星座、铱星二代等中低轨道卫星通信系统，又有OneWeb、Space

X等正在建立的低轨互联卫星星座，我国在低轨互联卫星星座方面，虽然项目规划与商用建设能力都与全球领先水平基本齐平，但我国通信卫星数量占比、卫星通信市场占比都低于全球平均水平，通信卫星规划数量远低于美国，“鸿雁星座”“虹云工程”“天象星座”“银河Galaxy”等超过1000颗的中国低轨通信卫星星座建设目标，相较于美国Space X公司Starlink星座已获批的1.2万颗卫星，仍然存在巨大差距。

随着低轨互联卫星系统应用领域的不断成熟，以及火箭发射能力逐步提升、成本不断下降，我国低轨互联卫星市场空间有望进入发展快车道。2020年4月，国家发改委发文将“以5G、物联网、工业互联网、卫星互联网为代表的通信网络基础设施”建设定义为“新基建”，在国家科技政策的引导下、在项目建设经费的支持下，低轨互联卫星未来将会带来继“北斗”导航之后相关产业链的再一次黄金发展机遇，也将持续成为国家政策支持的重点产业领域。

国内气象部门可将“全球气象”发展思路和气象业务现代化建设中的实际需求，融入到国内低轨互联卫星星座发展计划之中，借鉴铱星公司、OneWeb公司、Space X公司的商业运营成功经验与失败教训，尽可能规避潜在商业风险，展望低轨互联卫星气象应用发展模式：1) 积极参与国家低轨互联卫星发展顶层设计，气象部门与国防科工局共同将低轨互联卫星气象行业应用的相关内容纳入到后续空间基础设施规划中；2) 申请设立低轨互联气象应用专项，联合企业、高校、科研院所，利用多种合作模式开展低轨互联卫星在气象行业中的建设、应用和推广，研制气象类搭载载荷，研发数据处理及应用平台，复制“北斗专项”和“高分专项”在气象行业应用的成功案例；3) 通过商业合作，推动“气象+”低轨互联卫星应用推广：据测算，国内建设一个60颗低轨互联卫星的星座预计需要200亿元，因此以气象部门现有资金或是单独申请立项来发展低轨互联卫星，均不是现实可行方案，并且频率和轨道资源、后期商业运营经费都是难以完成的任务。

发挥中国气象局国有资本运营平台的作用，特别是利用好一批具有气象卫星运营服务经验、卫星用户站开发应用能力的局属企业，选择与国内优质商业航天企业（如航天科技、航天科工、中国电科、东方红卫星移动通信）开展商业合作，重点关注低轨互联卫星产业链中的运营服务以及卫星通信芯片、地面终端等领域。

采用资源互换的商业合作模式，既提出气象行业

应用需求，又拿出风云气象卫星的已有资源，整合双方地面通讯基础设施，推动地基天线、关口站、通讯终端的共享共用，共同推出低轨互联卫星气象数据处理及应用平台，积极向产业下游拓展服务。

采用加盟合作、股权转让的商业合作模式，推动局属企业与商业航天企业资本合作，形成利益共同体，推进“通信专用”，基于低轨互联卫星通信能力，研发气象专用卫星通信芯片，研制专属低轨卫星通信用户站，建立可涵盖气象、水文、海洋、环保监测数据传输的专用资源通信系统，并负责相关系统的运营服务。

虽然低轨卫星星座发展火热，但铱星公司、OneWeb公司也都曾因资金链断裂而破产重组，国内90%初创企业难以渡过创业初期的“死亡谷”阶段，共享单车也有前车之鉴。如果进一步规避可能的商业风险，建议采用政府购买服务的方式，购买低轨互联卫星相关运行数据，由星地通讯信号变化反演大气观测数据^[14]。例如2016年9月，美国NOAA将GPS无线电掩星数据服务合同给了本国的卫星气象数据服务公司Spire公司和GeoOptics公司，并评估商业卫星数据是否可以满足气象预报的需求。国内也可以租用低轨卫星搭载中小型气象探测载荷，拓展地基气象组网观测能力；租用低轨互联卫星信道用于气象监测数据传输，提升气象观测数据全球收集能力，开展全球气象预警信息实时短报文通信服务，扩大全球气象服务覆盖范围。

参考文献

- [1] 张明. 低轨道卫星系统的发展及面临的挑战. 中国无线电, 2019(3): 56-57.
- [2] 姜燕丽, 刘晓娟, 张雪梅, 等. 低轨卫星互联网发展问题研究. 数字通信世界, 2018(8): 21-22.
- [3] 高瓴园, 王妮炜, 陆洲. 卫星互联网星座发展研究与方案构想. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(8): 875-881.
- [4] 刘悦, 廖春发. 国外新兴卫星互联网星座的发展. 科技导报, 2016, 34(7): 139-148.
- [5] 卢乃锰, 谷松岩. 气象卫星发展回顾与展望. 遥感学报, 2016, 20(5): 832-841.
- [6] 宋晶晶. 美国商业卫星气象服务发展初探. 卫星应用, 2017(1): 66-70.
- [7] 肖永伟, 孙晨华, 赵伟松. 低轨通信星座发展的思考. 国际太空, 2018(11): 24-32.
- [8] 王晓海. 基于小卫星星座的移动互联网系统及应用发展. 卫星与网络, 2017(6): 58-63.
- [9] 梁艳, 郭朝晖. 低轨宽带星座是一场有进无退的冒险. 卫星与网络, 2018(8): 20-25.
- [10] 李小龙, 邓恒. “一网”星座的发展与启示. 国际太空, 2017(12): 9-14.
- [11] 龚燃. 美国气旋全球导航卫星系统与应用. 国际太空, 2020(1): 61-64.
- [12] 何善宝. 浅谈商业气象星座的发展. 国际太空, 2019(11): 69-74.
- [13] 刘豪. 国外商业卫星搭载有效载荷发展研究. 国际太空, 2014(1): 24-30.
- [14] 谢丰奕. 亚洲九号通信卫星也将探测天气. 卫星电视与宽带多媒体, 2014(2): 38-39.

卫星遥感反演降水研究进展简述

刘少军 蔡大鑫 韩静 甘业星

(海南省气象科学研究所/海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203)

摘要: 高质量的降水数据是开展天气、气候、水文、生态等研究的重要基础。由于传统地面雨量计站观测和地基雷达观测受站点数量和地形条件的限制, 很难实现大范围降水的均匀观测, 而卫星反演降水能有效弥补传统观测站网的缺点。根据卫星反演降水的原理, 简要概述了可见光、红外、微波、多种传感器组合的卫星降水反演算法、总结了5种不同卫星数据反演产品的优点和适用性。改进降水反演算法和加强多种传感器反演降水产品的融合, 才能获得更高精度和更大覆盖范围的降水产品, 这也是未来一段时间内卫星遥感反演降水的趋势。

关键词: 卫星遥感, 降水反演, 产品适用性, 进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.005

Progress of the Satellite Remote Sensing Retrieval of Precipitation

Liu Shaojun, Cai Daxin, Han Jing, Gan Yexing

(Hainan Institute of Meteorological Science/ Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203)

Abstract: High quality precipitation data are an important basis for meteorological, hydrological and ecological research. It is difficult to realize the uniform distribution observation of precipitation over a large area due to the limitation of the number of stations and topographic conditions. Fortunately, satellite retrieval of precipitation can effectively remedy the shortcomings of the traditional observation network. Based on the principle of satellite retrieval of precipitation, this paper briefly summarized the algorithms of satellite retrieval of precipitation using visible light, infrared, microwave and multi-sensor combination, and the applicability of five satellite precipitation products. Improving the algorithms of satellite retrieval of precipitation and enhancing the integration of precipitation products from multiple sensors to obtain higher precision and wider coverage of precipitation products are a trend of precipitation retrieval from satellite remote sensing in the future.

Keywords: satellite remote sensing, retrieval of precipitation, applicability of products, progress

0 引言

在灾害性天气过程的监测中, 及时了解降水空间分布情况具有十分重要的意义^[1-2]。传统的地面雨量计站观测可以提供准确和直接的站点观测降水, 但由于分布不均和地形的影响, 不能准确反映大尺度降水的时空特征; 地基雷达观测虽然能给出一定范围内降水的空间分布, 但降水反演的精度并不高^[3]。由于降水在时间和空间上有较大的不确定性, 而常规使用的雨量计和地基雷达在陆地上分布不均, 且在海洋、无人区分布更加稀少, 采用空间插值一般也难以反映真

实的降水时空分布状况^[4]。气象卫星在地球的上空观测地球, 不受地理和自然条件限制, 可实现大范围、全过程监测云系的发展、演变, 能有效克服观测站网观测降水的缺陷^[5-6], 利用卫星所搭载的各种探测器对降水进行监测、反演和融合, 可以得到多种类型的卫星反演降水产品。卫星观测的降水数据具有覆盖范围广、时间和空间分辨率高的特点, 但卫星降水产品大多通过探测的云层温度或云中粒子信息来间接推算降水量, 其并不等同于直接观测到的降水量^[7]。因此, 基于卫星遥感技术准确获取区域及全球降水的时空分布一直以来都是一个颇具挑战性的科学难题^[8]。

1 卫星估计降水原理及算法

云降水是大气动力作用和热力作用的综合结果, 这种作用决定了云中的降水和降水云的外在形态。因此, 利用卫星反演的云参数, 可以得到云中热力学相态变化和微物理演变的规律^[9]。卫星遥感降水反演评

收稿日期: 2019年9月3日; 修回日期: 2019年9月15日
第一作者: 刘少军(1980—), Email: cdutlsj@163.com
通信作者: 蔡大鑫(1978—), Email: cdxxxhyn@126.com
资助信息: 国家自然科学基金项目(41765007); 海南省自然科学基金项目(419QN330; 2019RC359)

估计最早由世界气象组织在2007年提出^[10], 随着卫星遥感技术的发展, 越来越多的卫星反演降水产品开始得到广泛的应用。由于卫星是通过观测云顶温度、云后向散射等信息来反演降水量, 加上算法上存在一定的误差, 导致卫星反演的降水产品中存在大量的空报和漏报现象^[3]。而且, 不同的卫星资料和反演算法得到的卫星降水产品在精度也存在一定的差别^[5]。目前, 针对卫星上不同传感器研发的降水反演算法已达上百种, 并已逐渐转向将多种传感器反演的降水产品进行融合以获取更加精准的降水信息。这些高质量的卫星降水反演数据在天气、气候、水文和农业等不同领域中发挥了至关重要的作用^[11]。卫星遥感降水反演(表1)主要依赖可见光、红外和主/被动微波传感器、多传感器组合反演^[8, 12]。

表1 遥感反演降水方法分类
Table 1 Classification of remote sensing algorithms of precipitation

传感器类型	主要反演算法	特点
可见光、红外	基于像素、基于窗格、基于云块的算法	时空分辨率较高, 属于间接估算
微波	辐射类算法、散射类算法、多波段反演类算法	能穿透非降水云, 可探测到强降水以外各种天气条件下的温、湿信息, 扫描宽度窄
多传感器组合	NCEP/CPC形变算法(CMORPH)、多卫星降水分析算法、GSMaP降水反演算法 ^[8]	弥补单一传感器算法存在的不足, 提高准确性、覆盖范围和分辨率

1.1 可见光、红外反演降水

红外降水反演算法可以划分为3个主要类型, 分别是基于像素、基于窗格和基于云块的算法^[13]。红外降水估算的主要理论依据是: 当某个云区的云顶温度低于一定的阈值, 并且区域的范围有继续扩大, 或当云区温度有下降趋势或者云顶核心区域与周围云区的温度梯度差较大时, 均预示着强对流有进一步发展的可能, 将产生降水。因此, 可以利用云顶辐射和反射信息来判断降水发生的可能, 并从云厚度和云顶温度等信息确定降水概率及降水持续时间, 进而估算出降水量^[14]。如, PERSIANN降水产品正是根据这一原理, 利用静止卫星红外(IR)亮温及地面信息, 采用自适应人工神经网络方法反演降水^[15]。熊秋芬等^[16]以GMS卫星4个通道(远红外、近红外、水汽通道和可见光通道)的资料作为输入层, 利用人工神经网络算法, 提高了降水的单站和面雨量的估算精度。夏双等^[17]同样利用红外波段及人工神经网络, 通过对长时间序列FY-2C卫星影像光谱特征的分析, 构建了基于三层前向型反向传播神经网络的卫星降水估算模型, 展现了卫星反演降水的非线性规律。岳彩军等^[18]总结

了卫星资料预测热带气旋降水的方法, 运用云团运动外推的办法, 预测短时对流降雨强度。Zhang等^[19]利用GMS-5红外1通道的亮度温度和水汽通道的亮度温度, 通过与未来1~3 h的降水量开展相关分析, 建立了卫星定量估计短时降水模型。王彦磊等^[20]利用GMS-5不同降水强度的红外和可见光通道样本云图资料, 建立了云图降水的模糊推理模型。

1.2 微波反演降水

与红外、可见光等相比, 微波能穿透非降水云, 可探测到强降水以外各种天气条件下的温、湿信息^[21]。微波降水反演算法主要可以分为三大类: 辐射类算法、散射类算法、多波段反演类算法^[22-24]。Grody^[25]较早建立了基于微波反演陆面降水的方法, 并建立了一个基于SSM/I中85 GHz频率段的全球散射指数。李万彪等^[26]在散射理论的基础上, 采用动态聚类法将TRMM/TMI的9个微波通道亮温及其组合, 划分为水面、湿土壤、干土壤、层状云降雨和对流云降雨等5类, 对雨区进行判别, 建立了以散射指数和极化订正温度为参数的雨强反演算法, 通过试验并与日本地球观测中心(NASDA)的产品比较, 显示对雨强的分布和降水落区的模拟效果较好。何文英等^[27]综合已有研究成果, 利用统计方法反演降水强度。选用两个反映中低频通道极化亮温差的信息参量 D_{V1937} 、 D_{H1910} 结合TMI的9个通道亮温, 以及85 GHz亮温的极化订正温度、综合微波指数^[28]、洪涝指数^[29]、散射指数^[26, 30], 分别组合进行逐步回归获取降水强度。张淼等^[31]基于微波辐射传输模式对风云三号微波探测仪反演降水的能力进行了分析, 表明50~60 GHz和118.75 GHz对应的通道对水凝物粒子均反应敏感, 采用UWNMS的云结构廓线库, 建立云-辐射数据集, 根据贝叶斯方法对廓线进行加权平均, 得到反演的物理量。李小青等^[32]基于TRMM/TMI的戈达德廓线算法(GPROF)和FY-3B的MWRI数据, 生成可以描述MWRI观测特征的云-辐射数据集来反演地面雨强。

1.3 多传感器组合反演

过去30年, 研究人员已经开始依赖各种卫星上的传感器, 用以获取估算全球降水量的信息。虽然单一类型的传感器也可以进行估算, 但研究人员越来越多地尝试使用传感器组合来提高准确性, 覆盖范围和分辨率。常见的组合算法有气候预测中心形变算法(CMORPH)、多卫星降水分析算法、GSMaP降水反演算法等^[8]。Vincente^[33]将被动微波观测数据与地球同步环境卫星(GOES)观测的红外数据和雷达数据相结合进行降水估计。Haddad等^[34]将TRMM测雨雷

达资料和TRMM微波资料联合反演的瞬时降水产品，充分利用了微波与雷达测雨的优势^[35]。Miller等^[36]将被动微波产生的降水估计与红外亮温进行回归，生成的降水估计值用于无法利用微波数据的区域。Todd等^[37]在前人研究的基础上提出了红外和微波联合反演降水的新算法MIRA (Microwave/Infrared Rainfall Algorithm)，该算法可以提供对瞬时雨强的准确估计，并且该信息可用于校准红外参数，以改善高时间频率下IR数据的降雨估计。应用概率匹配方法优化红外亮温与雨强的关系，通过对比同时空的微波雨强估计与红外亮温观测值的直方图，使得前者分布高于一个特定雨强的比例与后者分布低于相关阈值的比例相等，依据这个关系可以得到红外降水估计。闵爱荣等^[22]利用TRMM卫星上微波降水雷达、微波辐射计

资料 and 自记降水记录，采用逐步回归方法反演陆面降水。基于集合Kalman滤波与变分的混合方法是目前主被动联合反演的常用算法^[24]，如FY-3气象卫星采用联合主动双频雷达和被动多通道微波辐射计的探测信息来开展降水的估算^[1]。

2 降水反演产品及适用性分析

随着卫星遥感数据量的增加，出现了一系列具有高时空分辨率的卫星降水反演数据产品(表2)，如TRMM、GPM、PERSIANN、CMORPH等。卫星降水反演数据产品一定程度上能弥补降水资料的不足，但卫星收集数据以及数据反演的过程中存在较多的干扰因素^[38]，导致产品的反演精度与实际降水存在一定的误差，因此在使用不同降水反演数据集时需对其适用性开展评估。

表2 降水反演产品特点
Table 2 Characteristics of five remote sensing precipitation products

类型	空间分辨率	覆盖范围	应用范围	下载网站
TRMM降水数据集	0.25°×0.25°	50°S—50°N	降水强度、极端降水、洪涝灾害、水文预测、大尺度气象干旱监测等	https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm
GPM数据集	0.1°×0.1°	60°S—60°N	瞬时降水估计、轻度降水事件、水文模拟和水资源评价等	https://disc.gsfc.nasa.gov/SSW/
CMORPH数据集	0.25°×0.25°	60°S—60°N	对短的降水事件捕捉能力差	http://www.cpc.ncep.noaa.gov/
PERSIANN数据集	0.25°×0.25°	60°S—60°N	易高估弱降水，低估强降水	http://precip.gsfc.nasa.gov
FY-2卫星降水估计数据集	0.1°×0.1°	除极区外约1/3地球面积	大暴雨以上强降水	http://satellite.nsmc.org.cn

2.1 TRMM 数据集适用性分析

TRMM是美国国家航空航天局(NASA)和日本宇航研究开发机构(JAXA)联合研发的降水的卫星，其搭载的降雨雷达(PR)为全球第一个星载测雨雷达，可以提供暴雨的三维结构^[39-40]；TRMM上的微波成像仪(TMI)、微波成像专用传感器(SSMI)、改进的微波扫描辐射计(AMSR)和高级微波探测器(AMSU)等具有高质量的微波估算降水方法^[7]。TRMM降水产品算法采用微波和红外卫星信号相结合的方法，其降水产品生成的过程：校准及融合微波降水估计；使用校准过的微波降水生成可见光/红外降水估计；融合微波和可见光/红外降水估计；融入雨量计降水数据^[41]。其中，TRMM3B42卫星降水反演数据产品是在国际上应用最广泛的产品之一，广泛应用于降水强度时空分布^[42]、极端降水预测^[43]、洪涝灾害预测^[44]、水文过程模拟等^[45]方面，其覆盖范围为50°S—50°N，具有精确到经纬度0.25°×0.25°的空间分辨率以及最高精确到3 h的时间分辨率，使用最新校正算法的V7版，较V6版数据降低了随机误差，精度上有了显著提高^[46-49]。通过以往在长江、黄河、淮河、珠江等流域以及西南等区域的研究应用^[38, 50-54]，

探究该产品的精度和适用性，发现该数据具有一定的缺陷性。如，Prakash等^[52]进行了TRMM 3B42-V7产品在印度对于不同季节的误差分析，发现其误差具有较大的年际变化；刘俊峰等^[53]对TRMM 3B42产品在中国大陆区域内的适用性进行了评估，发现其精度具有时空不稳定性，在降雨量较大的地区精度较高；Yong等^[49]评价了TRMM 3B42实时和非实时卫星产品的时空变化特征；王兆礼等^[38]对TRMM 3B42-V7产品在中国大陆干旱区进行干旱事件的监测和识别，表明其适用于大尺度气象干旱的监测与评估。Sahoo等^[54]通过发生于美国、欧洲等地区的4场典型干旱事件进行验证，证实3B42-V7产品能够在时间和空间上准确地识别干旱。

2.2 GPM 数据集适用性分析

GPM是继TRMM之后新一代的全球卫星降水产品，为全球气候变化、洪旱监测等研究工作提供了有力的数据支持^[55]。GPM作为TRMM卫星的继任者，其核心卫星于2014年2月27日成功发射，GPM携带了全球首个Ku/Ka波段双频测雨雷达(DPR)^[56]。GPM降水产品对瞬时降水估计更加准确，特别是冷季固态降水和微量降水；其在统一框架内对卫星辐射计获取的

亮温数据进行交互校准,建立了统一基础条件下的各类微波探测仪的降水反演算法^[41]。GPM降水产品算法有DPR算法、DPR与GMI融合算法以及雷达增强辐射计算法^[41]。GPM能够提供全球范围基于微波反演的3h降水数据产品和基于微波红外多星融合算法IMERG的0.5 h雨雪数据产品^[41],其空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$,时间分辨率为0.5 h。相比上一代TRMM产品,GPM产品有着更大的覆盖范围(拓展至 $60^{\circ}\text{S}—60^{\circ}\text{N}$)、更高的时间和空间分辨率,能够更加精确地捕捉微量降水($<0.5\text{ mm/h}$)和固态降水,从而有效地提高了探测精度^[11]。

已有研究^[39, 55, 57-59]表明,受海拔高度和地理位置等因素的影响,GPM IMERG降水产品的精度和性能在不同地区差异较大。如,Tan等^[57]发现GPM IMERG产品在马来西亚对于轻度降水事件具有更好的探测能力;Caracciolo等^[58]在地中海岛屿开展了GPM IMERG降水产品检验工作,发现产品降水量高于观测站点实测降水量;孔宇^[59]开展了GPM IMERG降水产品在中国大陆地区的精度验证工作,发现其能很好展现中国降水的空间分布规律;许凤林等^[55]通过对GPM IMERG卫星降水产品在黄淮海平原的适用性研究发现,GPM IMERG卫星降水产品与气象站点数据表现出较好的相关性,虽然存在轻微的高估现象,但能够以较高的精度和较小的误差估测降水;王蕊等^[39]评估了淮河流域上游区GPM IMERG卫星产品在逐日和小时尺度上的监测精度,发现在降水探测能力方面,GPM与实测降水的一致性较高,尤其表现在小雨和中雨降水事件上,可用于日尺度的水文模拟和水资源评价等研究,但GPM对不同的极端降水事件监测能力不一,可靠性相对较低。

2.3 CMORPH 数据集适用性分析

CMORPH卫星数据是在多种微波降水数据和红外数据的基础上研制全球降水数据。分别采用TMI、SSMI、AMSU-B和AMSR-E等四种类型的微波传感器,首先利用时空间分辨率相对更高的红外降水估算量,进而对微波反演数据进行插值,获取的降水时空分布完全取决于微波反演数据。该算法充分利用了微波降水数据精度高和红外数据时空分辨率高的优势^[7],时间分辨率最高可达0.5 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,空间覆盖范围为 $60^{\circ}\text{S}—60^{\circ}\text{N}$ ^[3]。

由于卫星降水反演算法是通过观测降水的相关参数(如云顶温度、云后向散射等)与降水之间的对应关系而建立的,反演算法本身会有一些的误差,导致降水反演产品存在大量的空报数据和漏报数据。根据

许时光等^[3]的研究,当降水量小于5 mm时,CMORPH的空报率随着降水量的升高呈现出非线性的下降趋势;在中国中西部干旱地区,CMORPH的降水空报率在80%以上。Shen等^[60]对3、6、12、24 h的CMORPH产品进行了误差分析,发现该产品均方根误差在中国区域内呈现明显的递减趋势。针对CMORPH资料的系统性偏差,潘旸等^[61]基于最优插值方法,最终形成一套覆盖中国区域的高时空分辨率的降水场。在对陆地的降水进行反演时,由于地表的发射率与降水云团的发射率非常相近,所以利用微波数据判定降水往往存在较大的误差^[24]。Gosset等^[62]对CMORPH在西非热带干旱半干旱气候区的估算精度进行检验,发现CMORPH产品对降水的估算精度相对较高,但对降水稀少、降水历时短的降水事件捕捉能力相对较差。Li等^[63]评价了CMORPH在长江流域的适用性,发现该产品过低估算了降水量,不能有效捕捉冬季降水量。Xu等^[64]在分析CMORPH误差的基础上,采用最优插值方法融合卫星反演降水和地面观测降水。Joyce等^[65]采用最优插值方法,实现地面气象站的站点观测降水资料和CMORPH卫星反演降水产品的融合,提高降水产品精度。

2.4 PERSIANN 数据集适用性分析

PERSIANN数据是采用神经网络算法,通过对TMI、SSMI和AMSU数据进行模型率定,以红外数据作为模型输入,构建出的降水数据集。该数据时间分辨率为3 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,空间覆盖范围为 $60^{\circ}\text{S}—60^{\circ}\text{N}$ 。程开宇等^[7]对PERSIANN在浙江省南部的瓯江流域对该数据集的适用性分析表明,该数据精度较低,对降水量级存在低估现象。刘江涛等^[66]对PERSIANN对卫星数据在雅鲁藏布江流域使用的适用性进行评价表明,该数据存在高估弱降水,低估强降水现象,但对降水事件和降水量的反演精度较高,具备捕捉高寒地区地面降水特征的能力。李瑞泽等^[67]对PERSIANN在环渤海地区的精度评价表明,该数据对日降水量的估算精度较低,存在明显低估暴雨事件的实际降水量等现象。

2.5 FY-2 卫星降水估计数据集适用性分析

风云FY-2是中国的第一代静止气象卫星,包含从FY-2A到FY-2F的6颗地球同步轨道卫星。FY-2降水产品以卫星搭载的可见光和红外自旋扫描辐射计遥感探测的红外资料为主,选用云顶温度梯度、云体相对于云团中心的偏移量、云团移动速度作为影响因子回归得到卫星降水估计产品,提供1、3、6、24 h的降水估计产品,空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ^[68]。对FY-2C/FY-

2D /FY-2E降水产品检验表明, 降水累计的时间越长, 误差越小, 1 h降水估计结果的相对偏差要大于50%, 而24 h累计的降水结果相对误差小于50%^[69]。林建兴等^[70]研究表明, FY-2D降水产品对海南岛热带气旋降水的估计都显示出空报率大于漏报率的特征, 同时具有估测大暴雨以上强降水的优势。雷坤江等^[71]研究表明FY-2E降水资料能很好地反映西藏降水量的相对强弱和降水过程。

3 展望

遥感技术的快速发展使得降水估计具备更高的精度和更大的覆盖范围, 卫星降水产品促进了人们对全球水和能量循环的认知^[13]。目前各类卫星降水反演的方法和数据集都有自身的优缺点, 需要不断提高和完善。从以上5种降水反演产品及适用性分析可以看出, TRMM数据集虽然在空间分辨率低于GPM数据集和FY-2卫星降水估计数据集, 但由于数据集的反演算法和质量高的优势, 被广泛应用于降水强度、极端降水、洪涝灾害、水文预测、大尺度气象干旱监测等领域, 该数据集也有一定的缺陷, 如误差具有较大的年际变化、精度具有时空不稳定性等特点。GPM数据集有着更高的时间和空间分辨率, 也能更加精确地捕捉微量降水和固态降水, 科应用于瞬时降水估计、轻度降水事件、水文模拟和水资源评价等领域; 但对不同区域的极端降水事件监测存在较大误差。CMORPH数据集由于反演算法本身存在误差, 导致降水反演产品存在大量的空报和漏报数据, 因此使用时要尽量采用与其卫星反演降水资料的融合, 以提高精度; PERSIANN数据集整体上存在精度较低, 易出现高估弱降水, 低估强降水。FY-2卫星降水估计数据集中的1、3、6、24 h的降水估计产品空间分辨率较高, 但降水产品误差也较大。

由于卫星是通过观测降水的相关参数建立的算法对降雨进行反演, 导致高时空分辨率的卫星降雨数据中存在大量的空报和漏报数据^[3]。需要在卫星降水原理上针对反演模型的误差进行更加细致的分析^[72]。如何利用空报率与降水量之间的数学关系以及空报降水面积与总降水面积之间的关系建立相应的模型以及如何将下垫面信息加入到降水反演模型中, 降低卫星降水反演数据的空报率^[3]等, 都是提高卫星反演降水产品精度必须考虑的问题。因此, 加强改进降水反演算法研究是今后研究的重点之一。

各类多源降水融合产品也存在一定缺陷, 主要集中在不同区域降水监测能力存在差异、反演降水产品的质量依赖于地面监测降水量、产品精度存在季节特

征差异、产品误差大等特点^[6]。因此, 需加强多传感器联合反演算法等方面的关键性和基础性研究, 以提高卫星降水融合产品的质量。同时, 在降水产品选择应用方面, 首先要结合当地气候背景条件, 开展不同降水产品在该区域的适用性分析, 以确定最理想的降水产品。建议尽量利用国产卫星反演的降水产品开展产品的试用, 以提高国产卫星资料应用的比例。

参考文献

- [1] 尹红刚, 吴琼, 谷松岩, 等. 风云三号(03)批降水测量卫星探测能力及应用. 气象科技进展, 2016, 6(3): 55-61.
- [2] Tang G Q, Ma YZ, Long D, et al. Evaluation of GPM Day -1 IMERG and TMPA Version 7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales. Journal of Hydrology, 2016, 533: 152-167.
- [3] 许时光, 牛铮, 沈艳, 等. CMORPH卫星降水数据在中国区域的误差特征研究. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 189-194.
- [4] Castro L M, Gironás J, Fernández B. Spatial estimation of daily precipitation in regions with complex relief and scarce data using terrain orography. Journal of Hydrology, 2014, 517(5): 481-492.
- [5] 刘瑜, 吴裕珍, 冯志州, 等. 多种卫星降水产品对中国极端降雨反演效果评估. 热带地理, 2017, 37(3): 417-433.
- [6] 廖捷, 徐宾, 张洪政. 地面站点观测降水资料与CMORPH卫星反演降水产品融合的实验效果评估. 热带气象学报, 2013, 29(5): 865-873.
- [7] 程开宇, 张磊磊, 康颖, 等. 多源卫星降水数据在瓯江流域的适用性分析. 水电能源科学, 2016, 34(12): 15-19.
- [8] 刘元波, 傅巧妮, 宋平, 等. 卫星遥感反演降水研究综述. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1162-1172.
- [9] 师春香, 卢乃锰, 张文建. 卫星面降水估计人工神经网络方法. 气候与环境研究, 2001, 6(4): 467-472.
- [10] Turk F J, Arkin P, Ebert E, et al. Evaluating high resolution precipitation products. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 89: 1911-1916.
- [11] 陈晓宏, 钟睿达, 王兆礼, 等. 新一代GPM IMERG卫星遥感降水数据在中国南方地区的精度及水文效用评估. 水利学报, 2017, 48(10): 1147-1156.
- [12] Prigent C. Precipitation retrieval from space: An overview. Comptes Rendus Geoscience, 2010, 342(4/5): 380-389.
- [13] 王存光, 洪阳. 卫星遥感降水的反演、验证与应用综述. 水利水电技术, 2018, 49(8): 1-9.
- [14] 李小青, 杨虎, 游然, 等. 利用风云三号微波成像仪资料遥感“桑达”台风降雨云结构. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2843-2853.
- [15] Hsu K L, Gao X G, Sorooshian S, et al. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1997, 36(9): 1176-1190.
- [16] 熊秋芬, 胡江林, 夏军. 神经网络方法在静止卫星多通道资料估算降水中的应用. 气象, 2002, 28(9): 17-21.
- [17] 夏双, 阮仁宗, 周义, 等. 基于FY-2C卫星数据的藏北高原降水估算研究. 长江流域资源与环境, 2013, 22(6): 786-792.
- [18] 岳彩军, 端义宏, 雷小途, 等. 卫星资料在登陆热带气旋降水研究中的应用. 气象科学, 2005, 25(4): 433-439.
- [19] Zhang M X, Luo C R, Zou Y, et al. A model for quantitatively estimating short-range precipitation based on GMS digitalized cloud maps-part I: analysis quantitative cloud-precipitation relations and model design. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 17(2): 230-244.
- [20] 王彦磊, 江海英, 赵中军, 等. 多光谱卫星云图降水区域与强度估计的模糊推理模型. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(2): 198-204.
- [21] 于晓晶, 韩威, 马秀梅, 等. 卫星微波辐射资料同化在新疆降水预报中的应用初探. 暴雨灾害, 2018, 37(4): 337-346.
- [22] 闵爱荣, 游然, 卢乃锰, 等. TRMM卫星微波成像仪资料的陆面降水反演. 热带气象学报, 2008, 24(3): 265-272.

- [23] Kidd C, Levizzani V. Status of satellite precipitation retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15: 1109-1116.
- [24] Michaellides S, Levizzani V, Anagnostou E, et al. Precipitation: measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research*, 2009, 94(4): 512-533.
- [25] Grody N C. Classification of Snow Cover and Precipitation Using the Special Sensor Microwave / Imager (SSM/I). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991, 96: 7423-7435.
- [26] 李万彪, 陈勇, 朱元竟, 等. 利用热带降雨测量卫星的微波成像仪观测资料反演陆地降水. *气象学报*, 2001, 59(5): 591-601.
- [27] 何文英, 陈洪滨, 周毓莹. 微波被动遥感地面降水统计反演算法的比较. *遥感技术与应用*, 2005, 20(2): 221-227.
- [28] 李莉, 朱元竟, 赵柏林. 卫星微波(SSM/I)遥感陆地降水. *科学通报*, 1998, 43(17): 1877-1880.
- [29] 陈轶, 郑福海, 金亚秋. 星载微波遥感对中国1998年洪涝的观测统计研究. *电波科学学报*, 1999, 14(3): 241-246.
- [30] Ferraro R R, Grody N C, Marks G F. Effects of surface conditions on rain identification using the DMSP-SSM/I. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 11: 195-209.
- [31] 张森, 乃锰, 谷松岩, 等. 风云三号(02)批卫星微波氧气吸收通道降水特性. *应用气象学报*, 2012, 23(2): 223-230.
- [32] 李小青. 用TRMM资料反演降水强度和水凝物垂直结构. 北京: 中国气象科学研究院硕士学位论文, 2003.
- [33] Vincente G A. Hourly retrieval of precipitation rate from the combination of passive microwave and infrared satellite measurements. PhD dissertation, University of Wisconsin-Madison, 1994.
- [34] Haddad Z S, Smith E A, Kummerow C D, et al. The TRMM "day-1" radar/radiometer combined rain-profiling algorithm. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1997, 5(4): 799-809.
- [35] 吴庆梅, 程明虎, 苗春生. 用TRMM资料研究江淮、华南降水的微波特性. *应用气象学报*, 2003, 14(2): 206-214.
- [36] Miller S W, Arkin P A, Joyce R J. A combined microwave/infrared rain rate algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22, 3285-3307.
- [37] Todd M C, Kidd C, Kniveton D, et al. A combined satellite infrared and passive microwave technique for estimation of small-scale rainfall. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18: 742-755.
- [38] 王兆礼, 钟睿达, 赖成光, 等. TRMM卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究——以东江和北江为例. *水科学进展*, 2017, 28(2): 174-182.
- [39] 王蕊, 余钟波, 杨传国, 等. TRMM/GPM 卫星降水产品在淮河流域上游逐日和小时尺度的精度评估. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(5): 109-115.
- [40] Kummerow C, Barnes W. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(3): 809-817.
- [41] 唐国强, 万玮, 曾子悦, 等. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述. *遥感技术与应用*, 2015, 30(4): 607-615.
- [42] Arikoden H, Samah A A, Babu C A. Spatial and temporal characteristics of rain intensity in the peninsular Malaysia using TRMM rain rate. *Journal of Hydrology*, 2010, 387(3/4): 312-319.
- [43] Pombo S, Oliveira R P D. Evaluation of extreme precipitation estimates from TRMM in Angola. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 663-679.
- [44] Tekeli A E, Fouli H. Evaluation of TRMM satellite-based precipitation indexes for flood forecasting over Riyadh City, Saudi Arabia. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 471-479.
- [45] 杨传国, 余钟波, 林朝晖, 等. 基于TRMM 卫星雷达降雨的流域陆面水文过程. *水科学进展*, 2009, 20(4): 461-466.
- [46] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15: 809-817.
- [47] Prakash S, Mitra A K, Momin I M, et al. Comparison of TMPA-3B42 versions 6 and 7 precipitation products with gauge based data over India for the southwest monsoon period. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(1): 346-362.
- [48] Liu Z. Comparison of versions 6 and 7 3-hourly TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) research products. *Atmospheric Research*, 2015, 163: 91-101.
- [49] Yong B, Chen B, Gourley J J, et al. Intercomparison of the version-6 and version-7 TMPA precipitation products over high and low latitudes basins with independent gauge networks: is the newer version better in both real-time and post-real-time analysis for water resources and hydrologic extremes. *Journal of Hydrology*, 2014, 508(2): 77-87.
- [50] 孙乐强, 郝振纯, 王加虎, 等. TMPA卫星降水数据的评估与校正. *水利学报*, 2014, 45(10): 1135-1146.
- [51] 刘少华, 严登华, 王浩, 等. 中国大陆流域分区TRMM降水质量评价. *水科学进展*, 2016, 27(5): 639-651.
- [52] Prakash S, Mitra A K, Aghakouchak A, et al. Error characterization of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA-3B42) products over India for different seasons. *Journal of Hydrology*, 2015, 529(3): 1302-1312.
- [53] 刘俊峰, 陈仁升, 韩春坛, 等. 多卫星遥感降水数据精度评价. *水科学进展*, 2010, 21(3): 343-348.
- [54] Sahoo A K, Sheffield J, Pan M, et al. Evaluation of the tropical rainfall measuring mission multi-satellite precipitation analysis (TMPA) for assessment of large-scale meteorological drought. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 159: 181-193.
- [55] 许凤林, 郭斌, 叶贝, 等. GPM IMERG 卫星降水产品在黄淮海平原的适用性研究. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 79-86.
- [56] Prakash S, Mitra a k, Paids, et al. From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space? *Advances in Water Resources*, 2016, 88: 1-7.
- [57] Tan M L, Santo H. Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia. *Atmospheric Research*, 2018, 202: 63-76.
- [58] Caracciolo D, Francipane A, Viola F, et al. Performances of GPM satellite precipitation over the two major Mediterranean islands. *Atmospheric Research*, 2018, 213: 309-322.
- [59] 孔宇. 中国大陆GPM/IMERG 产品的精度评估. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [60] Shen Y, Xiong AY, Wang Y, et al. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D02114.
- [61] 潘昶, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验. *气象学报*, 2012, 70(6): 1381-1389.
- [62] [Gosset M, Viarre J, Quantin G, et al. Evaluation of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high-resolution gauge networks. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139: 923-940.
- [63] Li Z, Yang D, Hong Y. Multi-scale evaluation of high resolution multi-sensor blended global precipitation products over the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 2013, 500: 157-169.
- [64] Xu B, Yoo S, Xie P. Quantifying error in the CMORPH satellite precipitation estimates. San Francisco: AGU Annual Assembly, 2010.
- [65] Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(7): 487-503.
- [66] 刘江涛, 徐宗学, 赵焕, 等. 不同降水卫星数据反演降水量精度评价——以雅鲁藏布江流域为例. *高原气象*, 2019, 38(2): 386-396.
- [67] 李瑞泽, 张安定, 张华, 等. 多卫星降水产品在环渤海地区的精度评价. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2916-2924.
- [68] Lu N M, You R, Zhang WJ. A fusing technique with satellite precipitation estimate and raingauge data. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 18(2): 141-146.
- [69] 杨军. 气象卫星及其应用. 北京: 气象出版社, 2012.
- [70] 林建兴, 许向春, 冯文. 热带气旋影响下海南岛卫星降水估计产品的检验分析. *热带农业科学*, 2012, 32(4): 49-56.
- [71] 雷坤江, 假拉, 肖天贵. 利用FY-2E卫星降水资料对西藏地区降水日变化特征分析. *成都信息工程大学学报*, 2016, 31(1): 86-93.

我国风云极轨气象卫星及应用进展

何锡玉 蔡夕方 朱亚平 张雷
(中国人民解放军91001部队, 北京 100161)

摘要: 我国风云极轨气象卫星数据, 目前已经被应用在天气预报、气候预测、自然灾害、环境监测、科学研究等多个重要领域, 为我国国民经济建设、国防建设、防灾减灾和全球许多国家的经济发展做出了重要贡献。本文介绍了我国风云极轨气象卫星的发展历程, 重点阐述了目前风云极轨气象卫星在卫星数据预处理、定量产品反演、卫星资料同化等方面的应用研究进展, 并展示了第二代风云极轨气象卫星在全球业务观测、大气三维探测、海洋环境监测、数值预报应用等相关典型应用。在国家创新战略发展框架下, 根据“国家级气象现代化总体方案”确定的2020年气象卫星及应用发展目标, 第二代极轨气象卫星风云三号03批卫星系统工程必将进一步发挥重大支撑作用。

关键词: 风云极轨气象卫星, 大气探测, 海洋监测, 卫星资料同化, 典型应用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.006

The Development of FY Polar Orbiting Meteorological Satellite and Its Application

He Xiyu, Cai Xifang, Zhu Yaping, Zhang Lei
(Unit No. 91001 of PLA, Beijing 100161)

Abstract: The FY polar orbiting meteorological satellite data has been used in many important fields such as weather forecast, climate prediction, the monitor of environment and natural disaster, and scientific research. It has made great contribution to the national economy, defense, disaster prevention and mitigation, and economic development of many countries in the world. This paper focuses on 1) the development history of the FY polar orbiting meteorological satellite, 2) the application and research progress of the FY polar orbiting meteorological satellite in data pretreatment, quantitative product retrieval, and data assimilation, 3) the typical application of the second generation FY polar orbiting meteorological satellite in global observation, atmospheric 3D detection, marine environment monitoring, numerical forecast application, and so on. According to the 2020 meteorological satellite and application development target set by the national meteorological modernization master plan, the FY-3(03) satellites system will further play a significant supporting role under the framework of national innovation strategic development.

Keywords: FY polar orbiting meteorological satellite, atmospheric sounding, marine monitoring, satellite data assimilation, typical application

0 引言

卫星遥感具有覆盖范围广、观测连续性强、不受自然条件和地域限制的优势, 是监测和预防气象灾害及其他自然灾害的有效手段。我国从20世纪70年代开始实施自己的气象卫星计划, 经过40多年的工作, 已经成功发射了风云一号(FY-1)、风云二号(FY-2)、风云三号(FY-3)、风云四号(FY-4)系列气象卫星共16颗, 其中极地轨道系列气象卫星(FY-1、FY-3)共8颗, 完成了极轨气象卫星从试验应用型向业务服务型转变, 从第一代极轨气象卫星到第二代极轨气象卫星的转变, 从单一探测到综合探测的转变, 从定性应

用到定量应用的转变, 实现了业务化、系列化和定量化的发展目标^[1]。

1 风云极轨气象卫星发展历程

风云一号卫星分为两个批次, 各两颗星。01批的FY-1A星于1988年7月9日发射, FY-1B星于1990年9月3日发射。02批卫星在01批星的基础上, 改进了姿态控制系统的可靠性和扫描辐射计的性能, 将原先5个通道(0.48~0.63 μm 、0.53~0.58 μm 、0.58~0.68 μm 、0.725~1.10 μm 、10.5~12.5 μm)增加到10个通道(0.43~0.48 μm 、0.48~0.53 μm 、0.53~0.58 μm 、0.58~0.68 μm 、0.84~0.89 μm 、0.900~0.965 μm 、1.58~1.64 μm 、3.55~3.93 μm 、10.3~11.3 μm 、11.5~12.5 μm); 甚高分辨率图像传输数传码速率相应提高一倍, 由0.6654 Mbps提高到1.3308 Mbps; 星上装置了固态存储器, 实现了延时图像传输的数字化。这

收稿日期: 2019年7月4日; 修回日期: 2019年8月28日
第一作者: 何锡玉(1980—), Email: hexynew@163.com
资助信息: 国家重点研发计划项目(2017YFC1404005)

一系列的改进使02批星性能得到大幅度的提高,寿命都大大超过2年的设计寿命。02批的FY-1C星于1999年5月10日发射, FY-1D星于2002年5月15日发射。

风云三号卫星是我国第二代极轨气象卫星,它是在风云一号卫星技术基础上的发展和提高,在功能和技术上向前跨进了一大步,具有质的变化。风云三号01星(FY-3A)和风云三号02星(FY-3B)上搭载了众多先进的探测仪器,包括可见光红外扫描辐射计、红外分光计、微波辐射计、中分辨率成像光谱仪、微波成像仪、紫外臭氧探测器、地球辐射收支探测器、空间环境监测器等。风云三号03星(FY-3C)充分继承了FY-A/B星的成熟技术,核心遥感仪器技术状态在原有基础上进一步提升性能。星上搭载了12台套遥感仪器,包括:可见光红外扫描辐射计、红外分光计、微波温度计、微波湿度计、微波成像仪、中分辨率光谱成像仪、紫外臭氧垂直探测仪、紫外臭氧总量探测仪、地球辐射探测仪、太阳辐射测量仪、空间环境监测仪器包和全球导航卫星掩星探测仪。而风云三号04星(FY-3D)装载了10台套先进的遥感仪器,除了微波温度计、微波湿度计、微波成像仪、空间环境监测仪器包和全球导航卫星掩星探测仪等5台继承性仪器之外,红外高光谱大气探测仪、近红外高光谱温室气体监测仪、广角极光成像仪、电离层光度计为全新研制、首次上星搭载,核心仪器中分辨率光谱成像仪进行了大幅升级改进,性能提升显著。这些先进的探测仪器具体为解决三维大气探测,大幅度提高全球资料获取能力,进一步提高云区和地表特征遥感能力,从而能够获取全球、全天候、三维、定量、多光谱的大气、地表和海表特性参数。

FY-3气象卫星的应用目的包括四个方面:①为中期数值天气预报提供全球均匀分辨率的气象参数;②研究全球变化包括气候变化规律,为气候预测提供各种气象及地球物理参数;③监测大范围自然灾害和地表生态环境;④为各种专业活动(航空、航海等)提供全球任一地区的气象信息,为军事气象保障服务(<http://www.nsmc.org.cn/NSMC/Channels/100184.html>)。风云三号01批为试验星,包括两颗卫星,即风云三号01星(FY-3A)和风云三号02星(FY-3B),已分别于2008年5月27日和2010年11月5日成功发射。风云三号02批卫星是我国第二代业务极轨气象卫星,风云三号03星(FY-3C)是02批卫星的首发星,于2013年9月23日成功发射。风云三号04星(FY-3D)是我国第二代极轨气象卫星第二颗业务星,于2017年11月15日成功发射。

2 应用研究进展

2.1 卫星数据预处理

风云极轨气象卫星为三轴稳定卫星, FY-1卫星使用的地平穿越式红外地平仪,姿态测量精度较低,无法直接用于遥感数据地理定位计算过程中的姿态校正,主要通过地标点匹配计算方法来估计卫星的姿态误差,然后采用参数化方法进行遥感图像地理定位计算^[2]。第二代极轨气象卫星FY-3星上搭载了高动态GPS接收机,实时提供星载GPS测量的卫星三维位置信息,并由星载陀螺仪和星敏感器自动测量卫星姿态数据^[3]。FY-3卫星地理定位算法进一步提高了坐标系转换精度,同时采用卫星的精密定轨和高精度轨道预报相结合的方法,提高了GPS测量数据的可靠性和轨道计算的可靠性及连续性^[4]。

近年来,国家气象卫星中心先后研发了交叉定标、地球稳定目标定标、月亮定标、深对流云定标等多种定标技术,建立了一套将发射前实验室定标、多场地定标、月亮定标、深对流云定标和交叉定标融为一体的综合定标系统。该系统利用不同定标方法的优势,经综合分析得到反射太阳波段在轨响应变化特征,有效解决了场地定标存在的问题。目前风云气象卫星太阳反射波段平均定标偏差在5%左右^[5]。与太阳反射通道相比,由于大气红外探测仪(AIRS)和干涉式红外大气探测仪(IASI)等红外高光谱遥感的出现,红外通道的交叉定标更为成熟。FY-3卫星红外与微波通道星上定标技术相对成熟,目前红外通道定标偏差平均在0.5 K左右,微波通道平均定标偏差在1 K以内^[6]。

为了满足数值预报应用需求,明确提出到2020年风云卫星红外波段在轨辐射定标精度达到0.4 K,微波在轨辐射定标精度达到0.8 K,可见近红外波段在轨辐射定标精度在5%以内。

2.2 卫星载荷探测及产品反演

风云极轨气象卫星可提供数十种定量产品,产品分为大气、陆地、海洋、空间天气等几大类。以FY-3A/B星载仪器为例,仪器光谱范围十分宽广,实现了对地球大气的全天候的多用途综合探测及产品反演。其中可见光红外扫描辐射计(VIRR)可探测反演云、植被、雪、冰、陆/海表温度、气溶胶、火点等;红外分光计(IRAS)突破了红外窄带滤光片(3 cm^{-1})的研制技术,实现了较高光谱分辨率红外大气垂直温湿廓线的探测反演;IRAS和微波温度计(MWTS)、微波湿度计(MWHS)组成的大气探测仪器包,利于红外和微波探测优势互补,协同反演,提高大气参数温湿廓线、降水等的反演精

度；中分辨率光谱成像仪（MERSI），实现了宽视场（2000 km）和高分辨率（250 m）的全球云和地表特征监测，也是世界上首次获得了全球地表和云特征的自然景观影像图谱；微波成像仪（MWRI）采用双极化探测技术，可进行全天候动态跟踪监测台风等强对流天气，监测地面干湿程度，反演洋面风速等；紫外臭氧总量探测仪（TOU）和紫外臭氧垂直探测仪（SBUS），不仅能获取大气柱臭氧总量，而且可以探测臭氧在不同大气压高度层的分布；太阳辐射监测仪（SIM）和地球辐射监测仪（ERM）为了解和研究太阳辐射及地气系统辐射收支提供了宝贵的资料；空间环境监测仪（SEM）可探测高能粒子、星体内辐射、卫星表面电位差和粒子事件等，为其他飞行器和中国神州飞船安全飞行提供服务^[7]。

从FY-3C星开始，风云极轨气象卫星产品生成系统有较大改进^[1]，主要表现在：进一步改进了定量产品反演算法；完善了数据存储分发格式；修正了FY-3A/B星产品系统中存在的一些错误；建立了产品算法及质量检验文档；新增了大气掩星探测、极地云导风等产品，产品序列更加完整。FY-3C星定量产品精度整体优于FY-3A/B星，同时，首次提供5 km分辨率全球整幅定量遥感产品，用于开展气候及全球变化研究。

2.3 卫星资料同化

风云极轨气象卫星为环境监测、天气预报、资料同化等提供全球观测资料。第二代极轨气象卫星发射成功后，其上搭载的大气红外探测器、微波温度探测器、微波湿度探测器、微波辐射成像仪、GNSS掩星探测仪等载荷为数值天气预报提供了大量的观测数据，如图1所示^[8]。尤其是FY-3的微波观测资料的利用一直是研究的一个热点，陆其峰在ECMWF的工作中，定量评价了FY-3A卫星观测资料的质量及应用前景，为FY-3A卫星辐射资料的应用打下了基础^[9-11]。Chen等在陆其峰工作基础上，在ECMWF同化系统中利

用FY-3A/B的微波湿度计资料（MWSH）进行的试验表明，MWSH观测资料是对ECMWF微波湿度资料的很好补充，且对数值预报结果产生了积极作用，因此ECMWF将FY-3A/B的MWSH观测资料加入其同化系统中^[12]。Heather Lawrence等对FY-3C的MWSH II观测资料进行了质量评估，并将其应用到ECMWF同化系统中，结果表明对预报系统预报准确度有改进^[13]。我国自主研发的全球数值天气预报系统GRAPES已将FY-3C的微波湿度计II型（MWSH II）、FY-3B/C的微波成像仪（MWRI）、FY-3C的全球导航卫星掩星探测仪（GNOS）等观测资料进行了同化应用；军用数值天气预报系统也已将大量的FY-3卫星观测资料应用到业务化同化系统中，有效提升了数值天气预报军事保障能力。

3 典型应用

风云极轨气象卫星装载多种探测仪器，可提供丰富的全球影像产品、大气产品、陆表产品、海洋产品、辐射产品、空间监测产品等，在大气、海洋空间环境监测、数值预报、军事保障应用等方面发挥了重要作用。

3.1 全球业务观测

FY-3卫星具备对大气、海洋和地表状态进行全球、全天候条件下的多光谱和三维精确观测的能力，能为提高中国及其他亚洲国家，乃至全世界的天气预报的质量和自然灾害与环境的监测水平做出贡献。图2为FY-3C可见光红外扫描辐射计2015年5月16日全球影像图。



图1 FY-3A/B/C/D用于数值天气预报的探测载荷^[8]
Fig.1 The FY-3A/B/C/D instrument suits for NWP

① 来源：国家卫星气象中心数据服务<http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Default.aspx>。

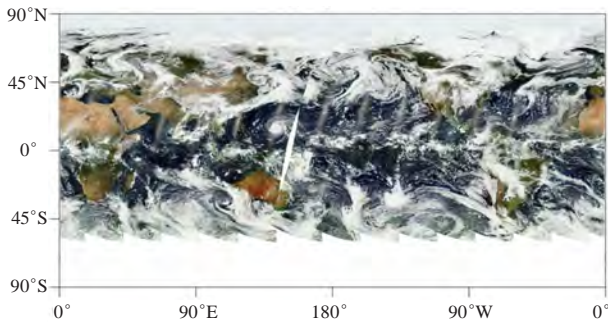


图2 2015年5月16日FY-3C/VIRR全球影像图

Fig.2 Global image of the FY-3C/VIRR on 16 May 2015

3.2 大气三维探测

FY-3卫星上携带有先进的微波探测仪器和红外垂直探测仪,不仅可以了解云和大气表面特性,而且可以了解大气温度湿度的垂直结构分布,实现了我国气象卫星从二维遥感成像到三维综合大气探测,在极轨气象卫星领域更进一步缩小与美国、欧洲等发达国家和地区的差距,增强我国参与国际合作和竞争的能力。

1) 台风三维监测。卫星遥感以其面积大、全天候和全天时的观测优势,是监测台风的有效手段。微波湿度计是FY-3卫星上的重要载荷,FY-3C星微波湿度计II型是我国FY-A/B星微波湿度计的升级换代产品,在150 GHz、183 GHz的基础上增加了89 GHz、118 GHz探测频率,探测通道也由5个增加到15个,显著提升了微波湿度计的探测能力,实现了多通道的细分探测,并且能够深入云层探测台风内部亮温分布,通过其内部亮温分布对台风内部结构进行诊断,对台风路径的预报提供技术手段。图3为FY-3C微波湿度计探测1323号台风菲特(Fitow)内部结构图^[14]。

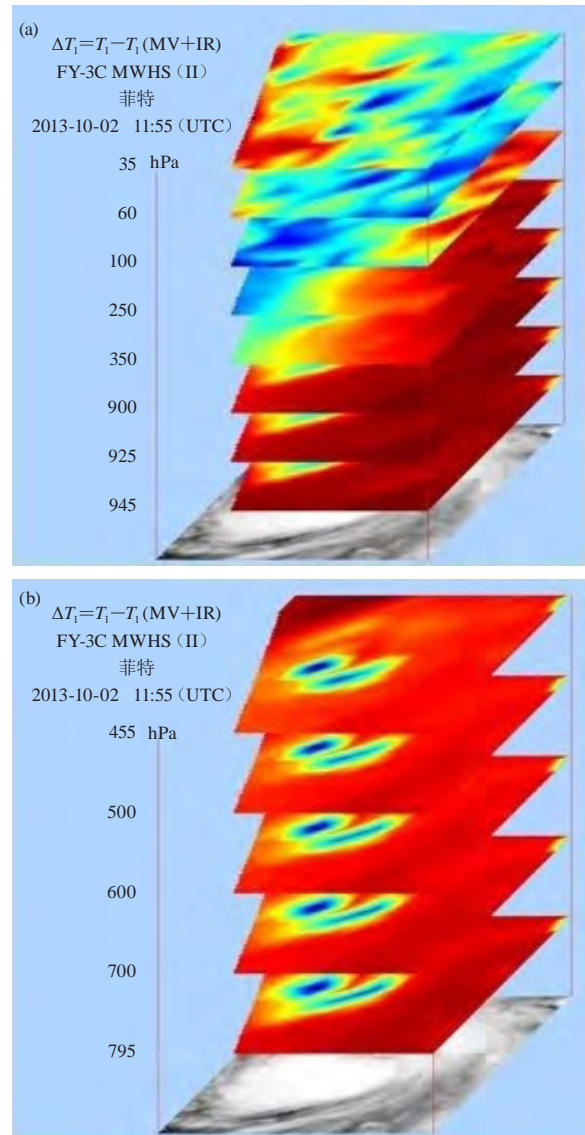
2) 全球温湿廓线反演。大气温度和湿度廓线是数值天气预报和实时天气预报的重要输入参数,利用星载微波探测仪被动探测全球范围的大气温度和湿度分布及其变化,可弥补偏远地区常规探空气象资料的不足,是获取全球大气温湿场的最佳选择之一。

FY-3卫星首次搭载的微波遥感器件有微波温度计(MWTS)、微波湿度计(MWHS)分别用于探测大气温度和湿度廓线。图4为FY-3C微波湿温度计和AMSU-B观测资料反演的大气温湿廓线,其结果较为一致^[15]。

3.3 海洋环境监测

风云三号不仅可提供丰富的全球大气产品还可以提供丰富的海洋环境产品,包括海面温度、海冰监测、海面风速、海洋水色等。

1) 海面温度。海面温度在海洋动力研究、海洋渔业等方面有重要的作用,利用卫星资料反演海面

图3 2013年10月2日FY-3C星微波湿度计探测1323号台风菲特内部亮温分布^[14]

(a) 118 GHz; (b) 183 GHz

Fig.3 Internal brightness temperature distribution of Typhoon Fitow detected by the FY-3C/MWHS on 2 October 2013

(a) 118 GHz; (b) 183 GHz

温度是获得大范围海面温度重要的途径。图5为FY-3C/VIRR反演的全球月平均白天SST分布。

(2) 海冰监测。海冰对海洋水文要素的垂直分布、海水运动、海洋热状况及大洋底层水的形成有重要影响,对航运、建港也构成一定威胁。我国渤海和黄海北部海域,每年冬季皆有不同程度的结冰现象。利用风云三号卫星资料,可对渤海的海冰灾害进行监测。图6为2010年1月13日FY-3A/MERSI渤海海冰监测图(图片来源:中国遥感信息服务网<http://rsapp.nsmc.org.cn/uus/index.jsp>)。

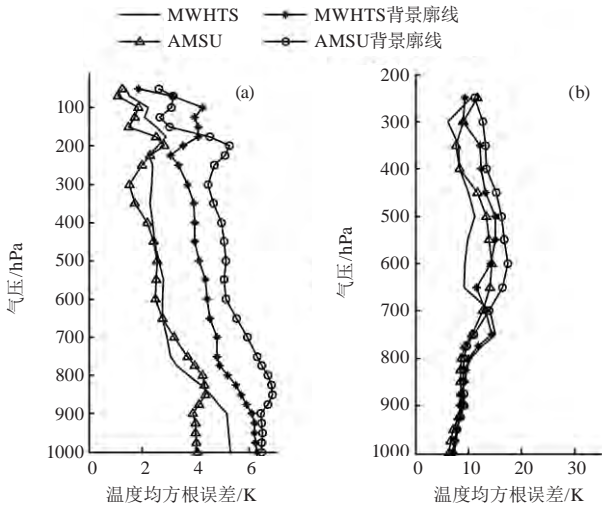


图4 FY-3C/MWHTS与AMSU-B观测资料反演大气温湿廓线对比^[15]

(a) 温度均方差根误差; (b) 湿度均方差根误差

Fig.4 Comparison of temperature and humidity profiles retrieved from

the FY-3C/MWHTS and AMSU-B observations:

Root mean square errors for temperature (a) and humidity (b)

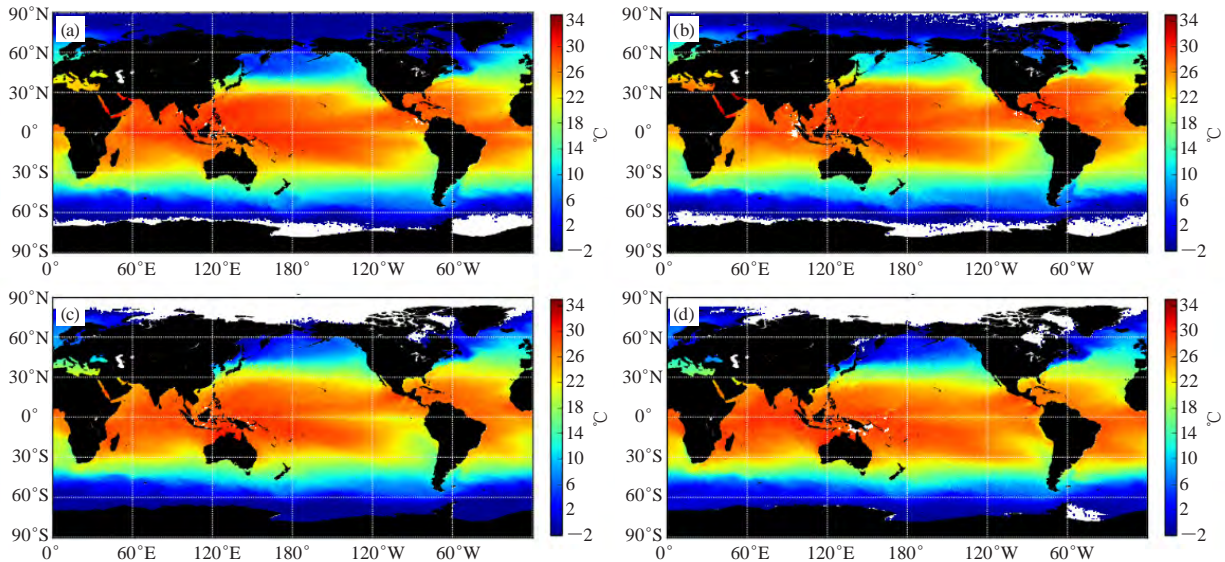


图5 2017年7月(a)、2017年9月(b)、2017年12月(c)和2018年3月(d)的全球月平均白天SST分布图(FY-3C/VIRR)

Fig.5 Global monthly daytime SST of FY-3C/VIRR in July 2017(a),September 2017 (b),December 2017(c),and March 2018(d)

线表示同化了常规观测和MWHTS II观测资料的台风路径预报结果偏差。可以得出,在台风路径预报偏差上,只同化常规观测资料的试验结果偏差最大,而在常规观测资料上加上MWHTS II观测资料或MWHTS II观测资料都对台风路径预报产生了正影响。

3.5 军事保障应用

随着军队作战使命任务的拓展和战略转型建设逐步深化,大量高新技术武器装备系统及作战平台的使

3.4 数值预报应用

数值预报是现代气象预报预测业务的基础。目前,国际上影响和制约数值预报准确率和预报时效的关键是大气运动的初始场和大气物理及化学过程的处理。根据国家经济社会发展需求,中国气象局在“国家级气象现代化总体方案”中明确提出到2020年以中国风云卫星资料同化应用为核心,研发多源卫星观测资料数据同化系统,实现卫星遥感探测资料占所同化观测资料总量的80%以上。

风云极轨气象卫星能够提供全球的温、湿、云辐射等气象参数,为中期数值天气预报提供全球均匀分辨率的气象参数;能够全天候、全天时获取全球大气亮温分布图像,进而反演全球降雨及温度和湿度的垂直分布,为中长期数值天气预报以及全球环境和气候变化研究提供服务^[16-17]。图7为FY-3C星的MWHTS II、MWTS II观测资料同化在台风海鸥路径预报偏差中的试验,绿色实线代表只同化了常规观测资料的台风路径预报结果偏差,红色实线表示同化了常规资料和MWHTS II观测资料的台风路径预报结果偏差,蓝色实

用尤其是海上作战平台的使用对信息化建设的需求越来越迫切,特别是航母编队的建设及发展,大气海洋环境保障需求几乎覆盖全球,全球化军事行动、非战争军事行动、新型武器系统和作战平台对军事大气海洋环境保障能力提出了更高的要求。

现阶段,针对军事大气海洋环境保障需求,充分挖掘FY-3卫星数据产品在军事大气海洋环境保障中的应用,研究制定基于FY-3卫星数据产品的军事大气海

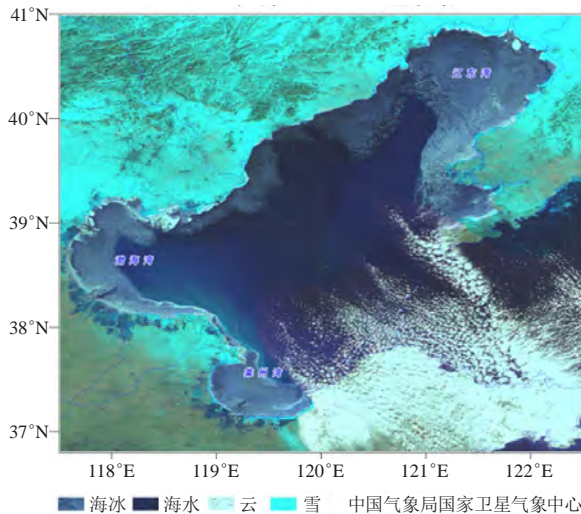


图6 2010年1月13日10:50 (北京时间) FY-3A/MERSI渤海海冰监测图

Fig.6 Bohai Sea ice monitoring of FY-3A/MERSI at 10:50 BT on January 13, 2010.

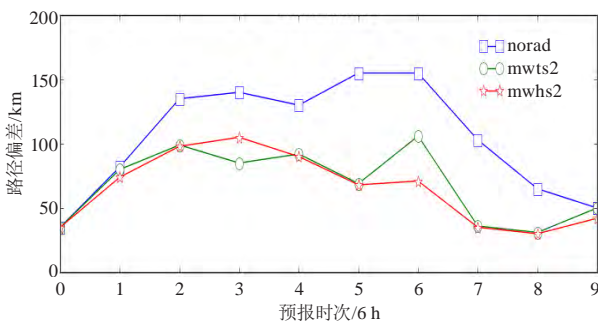


图7 台风海鸥路径预报偏差试验 (FY-3C/MWHTS)

Fig.7 The path deviation forecast test of Typhoon Kalmaegi

洋保障应用系统, 从而提升军事大气海洋环境保障综合能力, 主要体现在以下几方面:

1) 利用FY-3卫星获取全球可见光和红外云图, 针对军事训练作战任务的特点进行反演监测, 重点监测海上和目标区低云大雾的发生及演变情况, 为水面舰艇航行和航空飞行安全、精确制导武器运用保障提供实时云雾环境信息。

2) 利用FY-3卫星获取全球海面风场和海面温度信息, 为海上军事行动和舰(艇)载武器装备运用提供实时海况信息保障; 获取低轨道空间粒子辐射能谱和辐射剂量, 为航天器故障分析和运行安全保障提供实时粒子辐射监测信息。

3) 利用FY-3卫星资料反演生成大气海洋环境参数定量产品, 为军用大气海洋数值预报提供初始场。

4 展望

在国家创新战略发展框架下, 风云极轨气象卫星系统工程要在国家建设中发挥科技支撑作用, 支撑

国家提高应对自然灾害与突发事件的能力, 提升国家防灾减灾能力, 保障国家安全; 支撑国家战略新兴产业发展, 满足日益扩展的社会对风云卫星遥感信息的服务需求; 继续拓展完善风云三号全球观测能力, 参与国际对地观测活动, 推进国际化合作, 保障国家利益。

第二代极轨气象卫星风云三号03批卫星将瞄准气象卫星国际发展先进水平, 发展以数值天气预报为主要应用目标的晨昏星; 以地球表面成像观测为主要应用目标的上午星; 以大气定量探测和气候变化监测为主要应用目标的下午星; 以灾害性天气系统强降水监测为主要应用目标的降水星, 进一步完善和丰富我国现有的现代气象业务观测体系。建成世界一流的风云极轨气象卫星观测体系, 实现我国第二代极轨气象卫星的组网业务化观测, 带动我国气象卫星应用进入成熟发展阶段, 实现气象现代化所确定的2020年气象卫星及应用发展目标。

参考文献

- [1] 唐世浩, 邱红, 马刚. 风云气象卫星主要技术进展. 遥感学报, 2016, 20(5): 842-849.
- [2] 杨忠东, 关敏. 风云卫星遥感数据高精度地理定位软件系统开发研究. 遥感学报, 2008, 12(2): 312-321.
- [3] 关敏, 杨忠东. 星载GPS数据及高精度轨道模型在极轨卫星轨道计算中的应用. 应用气象学报, 2007, 18(6): 748-753.
- [4] 关敏, 郭强. 光学像消旋系统在FY-3 MERSI图像定位中的应用. 应用气象学报, 2008, 19(4): 420-427.
- [5] 胡秀清, 孙凌, 刘京晶, 等. 风云三号A星中分辨率光谱成像仪反射太阳波段辐射定标. 气象科技进展, 2013, (4): 71-83.
- [6] 徐娜, 胡秀清, 陈林, 等. FY-3A/MERSI热红外通道在轨辐射定标精度评估. 光谱学与光谱分析, 2014, (12): 3429-3434.
- [7] 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号. 气象学报, 2009, 67(4): 501-509.
- [8] Lu Q, Wu C, Qi C, et al. Brief introduction hyper spectral infrared sounder from FY-4A and FY-3D. <https://www.ecmwf.int/node/17228>, 2017.
- [9] Lu Q, Bell W, Bauer P, et al. An Initial Evaluation of FY-3A Satellite Data. ECMWF Technical Memoranda No.631, 2010.
- [10] Lu Q, Bell W, Bauer P, et al. Characterizing the FY-3A Microwave Temperature Sounder Using the ECMWF Model. ECMWF Technical Memoranda No.641, 2011.
- [11] Lu Q, Bell W, Bauer P, et al. Improved Assimilation of Data from China's FY-3A Microwave Temperature Sounder. ECMWF Technical Memoranda No.642, 2011.
- [12] Chen K, English S, Bormann N, et al. Assessment of FY-3A and FY-3B MWHS observations. ECMWF Technical Memoranda No.734, 2014.
- [13] Lawrence H, Carminati F, Bell W, et al. An Evaluation of FY-3C MWRI and Assessment of the long-term quality of FY-3C MWHS-2 at ECMWF and the Met Office. ECMWF Technical Memoranda No.798, 2017.
- [14] 张瑜, 张升伟, 王振占, 等. FY-3卫星大气湿度微波探测技术发展. 上海航天, 2017, 34(4): 52-61.
- [15] 贺秋瑞, 王振占, 何杰颖. FY-3C/MWHTS资料反演陆地晴空大气温湿廓线. 遥感学报, 2017, 21(1): 27-39.
- [16] 杨引明, 杜明斌, 张洁. FY-3A微波资料在“莫拉克”台风预报中的同化试验. 热带气象学报, 2012, 28(1): 23-30.
- [17] 董佩明, 黄江平, 刘桂青, 等. FY-3A微波探测资料的直接同化应用及云雨条件下的亮温模拟. 热带气象学报, 2014, 30(2): 302-310.

2020年中国龙卷过程及灾情特征

蔡康龙^{1, 2} 黄先香^{1, 2} 李彩玲¹ 炎利军¹ 李兆明¹ 顾伯辉³ 何秋蕊¹ 张晶晶¹

(1 佛山市气象局/佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528000; 2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 3 佛山三水区气象局, 三水 528100)

摘要: 2020年我国可确认的龙卷天气过程有13次、共20个龙卷, 发生在5—9月。其中, 强龙卷有8个, 分别是EF2级龙卷7个和EF3级龙卷1个。7月22日安徽宿州EF3级龙卷的路径长达62 km, 是我国近10年来, 使用无人机进行详细灾情调查获得的最长的龙卷路径。EF1级或以上级别龙卷有13个, 略低于2004—2013年全国记录到的14.3个/年, EF2级龙卷数量是2004—2013年的年平均数2.0个的3.5倍。2020年的龙卷过程都是西风带龙卷, 没有台风龙卷记录。2020年现场调查的9个龙卷, 路径的主要下垫面都是开阔平地, 具有明显的树木倒向呈辐合状、破坏范围纵横比大、浅色破坏条迹等地面灾情特征。

关键词: 中国龙卷过程, 灾情调查, 地面灾情特征, 2020年

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.007

龙卷生消快, 影响范围小, 但破坏力极强, 可在短时间内造成重大人员伤亡和财产损失^[1-4]。龙卷大风、下击暴流大风和直线大风是强对流风暴常导致的3类灾害性大风^[5]。龙卷大风破坏带(条迹)一般狭长, 沿破坏带会有明显辐合状树木倒伏; 下击暴流大风造成破坏区域一般比较宽, 树木倒伏则呈明显辐散特征。通常龙卷等灾害性大风空间尺度小, 影响时间短, 很少能直接被气象观测站观测到, 因此开展龙卷等灾害性大风现场灾情调查, 确认风灾类型、龙卷路径、龙卷强度和范围以及龙卷结构等对促进龙卷等强对流天气的研究有重要意义^[6-8]。

目前龙卷定级一般采用国际通用的EF等级来判定龙卷风级别^[9], 2019年8月1日中国气象行业标准《龙卷强度等级》QX/T 478—2019(以下简称行标)开始实施, 本文将结合EF等级和龙卷等级行标两套标准对2020年龙卷过程进行定级分析。

2020年佛山市龙卷风研究中心共参与了国内8次龙卷过程共9个龙卷的灾情调查, 包括6个强龙卷过程(EF3级1次, EF2级5次)、2个中等龙卷过程(EF1级)和1个弱龙卷过程(EF0级)。另外, 根据当地气象部门提供或网络权威发布, 还收集了5次龙卷过程

的10个龙卷活动情况(表1)。

从表1可以看出, 2020年我国能够确认的龙卷天气过程有13次, 确认发生20个龙卷, 其中EF1级或以上级别强度龙卷有13个, 略低于2004—2013年全国记录到的年平均EF1或以上级龙卷数量14.3个^[10]; EF2级龙卷有7个, 是2004—2013年全国记录到的年平均EF2或以上级龙卷数量2.0个^[10]的3.5倍, 分别发生在江苏高邮、江苏太仓、湖北荆门、江苏连云港、江苏盐城、黑龙江绥化和内蒙古包头; EF3级龙卷有1个, 发生在安徽宿州。龙卷发生时间集中在5—8月, 其中7月最多, 有8个龙卷生成, 占总数的42%。出现龙卷的7个省(市)中, 江苏龙卷最多, 有5个; 其次是广东和上海, 均有3个。13次龙卷过程全部发生在西风带系统中, 没有台风龙卷记录。有1人在龙卷天气中遇难、62人受伤。其中, 导致受伤人数较多是“2020.08.09”内蒙古包头龙卷和“2020.07.22”江苏灌南龙卷风, 受伤人数分别为33人和21人。从2016—2020年龙卷等风灾全国分布图(图1)可见, 龙卷主要分布在沿海一带、东北地区、内蒙古等地方, 这与范雯杰^[10]统计的2004—2013年全国龙卷分布比较相符。

灾情调查要注重方法, 才能保证灾情调查在更短时间收集到更多有效的灾情信息。首先, 收集新闻媒体或者互联网等信息尽量确定灾害发生时间、地点和灾情; 然后, 利用地面自动站观测风场和雷达观测径向风场进一步综合判断明确风灾的可能强度、影响区域和可能成因, 并结合灾害情况综合确定现场调查的大致区域和调查路线; 再有, 对受灾现场进行无人机航拍、走访、勘查取证、影像资料收集; 最后, 结

收稿日期: 2020年12月3日; 修回日期: 2020年12月18日
第一作者: 蔡康龙(1988—), Email:35642480@qq.com
通信作者: 黄先香, Email:fsqxj@163.com
资助信息: 广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项(2019B020208015); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2020LASW-A03); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2018LASW-B18); 佛山市气象局科技项目(201906)

表1 2020年中国龙卷活动情况及灾情

编号	时间	发生地点	强度等级	环流型	信息来源	伤亡情况
1	20200505 11: 00	福建三明	不详	切变线	官方报道	无
2	20200518 14: 06—14: 07	广东江门台山	EF0 (行标一级)	高空槽	现场调查	无
3	20200531 18: 59—19: 01	广东佛山高明	EF1 (行标二级)	高空槽	现场调查	无
4	20200601 10: 50—10: 56	广东江门开平	EF1 (行标二级)	高空槽	现场调查	无
5	20200612 13: 49—14: 00	江苏高邮	EF2 (行标三级)	低涡切变	现场调查	4人受伤
6	20200624 13: 48—14: 22	内蒙古锡林浩特	不详	冷涡	官方报道	/
7	20200627 19: 00前后	湖北荆门	EF2 (行标三级)	低涡切变	现场调查	无
8	20200706 09: 10前后	江苏昆山	EF0 (行标一级)	高空槽、切变线	气象部门	/
	20200706 09: 45—10: 00	江苏太仓	EF2 (行标三级)	高空槽、切变线	气象部门	无
	20200706 10: 30前后	上海崇明港沿镇	EF1 (行标二级)			
	20200706 10: 40前后	上海崇明陈家镇	EF1 (行标二级)	高空槽、切变线	气象部门	1人伤
	20200706 10: 45前后	上海崇明向化镇	EF0 (行标一级)			
20200722 17: 50—18: 59	安徽宿州	EF3 (行标三级)	低涡切变	现场调查	1人死亡	
20200722 21: 48前后	江苏宿迁沭阳镇	EF1 (行标二级)		气象部门	/	
20200722 22: 00前后	江苏连云港灌南镇	EF2 (行标二级)	高空冷涡和地面气旋	现场调查	/	
9	20200722 22: 40前后	江苏盐城响水镇	EF2 (行标二级)		气象部门	21人伤
10	20200809 11: 47—12: 09	黑龙江绥化	EF2 (行标三级)	高空槽和切变线	现场调查	无
11	20200809 15: 33—15: 43	内蒙古包头	EF2 (行标三级)	高空槽	现场调查	33人伤
12	20200814 16: 00前后	黑龙江密山	不详	冷涡	官方报道	2人伤
13	20200925 16: 00前后	香港赤鱗角机场	不详	短波槽	气象部门	无



图1 2016—2020年中国风灾分布

合多种气象数据，经多方会商综合确认的龙卷及其灾害等级。由于气象探测技术手段和能力所限，本文主要对2020年佛山市龙卷风研究中心参与灾情调查的9个龙卷过程进行分析，灾情资料主要是通过与当地气象部门共同开展的龙卷现场灾情调查，再结合气象监测资料等，经多方会商综合确认龙卷路径及其灾害等级，但由于龙卷尺度小、生消快等特点，灾调和分析过程中难免存在个别个例强度定级等还需商榷。

1 龙卷过程概况

1.1 5月龙卷

5月有3次龙卷过程，1次发生在福建，2次发生在

广东。

5月5日上午，受切变线影响，福建省三明市出现短时强降水、大风等强对流天气，其中11: 00前后沙溪河上出现龙卷风，有市民拍摄到龙卷视频，没有灾情，无法对此龙卷的强度进行定级。

5月18日14: 06—14: 07，受高空槽影响，广东省江门市台山市赤溪镇冲金村委会附近出现龙卷，有市民手机拍到了龙卷视频。龙卷在冲金村村委会约50 m外水稻田附近触地，移动方向大致是自西向东，造成水稻和蔬菜棚架倒伏，并在下垫面留下较明显的轨迹，龙卷路径长约35 m，宽约11 m，无人员伤亡，龙卷破坏程度相当于EF0级，对应我国行业标准一级，属于弱龙卷（图2）。

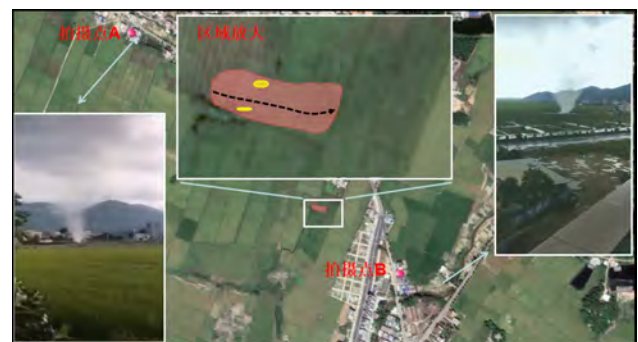


图2 5月18日江门台山龙卷路径及受灾范围 (红色阴影区域为大风影响范围; 黄色阴影区域是EF0范围; 黑色带箭头虚线表示龙卷移动路径及方向)

5月31日18: 59—19: 01，受高空槽影响，广东佛山市高明区更合镇出现龙卷，造成停步工业区附近

的铁皮厂房受损、树木倒伏和折断，超过80%钢槽结构的铁皮房顶被掀，两棵直径约10 cm的芒果树被拦腰截断，没有人员伤亡。这次过程没有拍到直观的龙卷漏斗视频，但停步工业区的监控视频拍到被卷起的厂房铁皮及其他碎片呈逆时针方向旋转，旋转时间超过1 min（图3）。龙卷造成的破坏区域狭长^[11]（图4），移动方向大致是西北向东南，影响路径长度约670 m，最大破坏直径约80 m，龙卷破坏程度相当于EF1级，对应我国行业标准二级，属于弱龙卷。



图3 5月31日佛山市高明区更合镇龙卷监控视频截

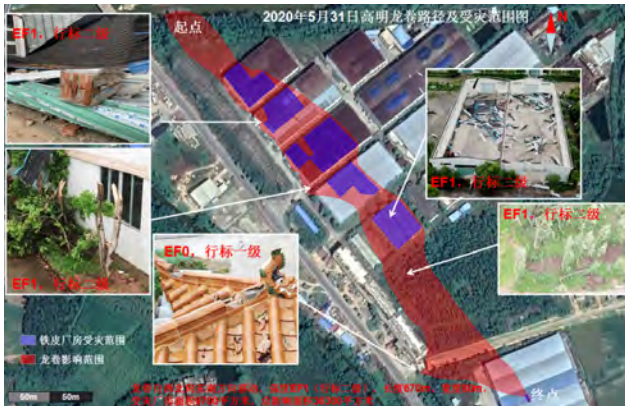


图4 5月31日佛山市高明区更合镇龙卷路径及受灾范围（红色阴影为破坏范围，蓝色阴影表示厂房受损区域）

1.2 6月龙卷

6月有4个龙卷过程，分别发生在广东江门、江苏高邮、湖北荆门和内蒙古锡林浩特。

6月1日10:50—10:56，受高空槽影响，广东江门开平市大沙镇大沙河水库附近出现龙卷，附近的居民拍摄到5 min的龙卷视频。龙卷在大沙镇沃江村北侧生成，向东北方向移动，跨过大沙河水库经Y756乡道上岸后在乡道北侧约230 m草地处消散，造成沃江村树木倒伏、树枝折断，砖瓦房屋顶瓦片零散吹落，Y756乡道北侧花木场树木折断、铁门吹走等灾害，龙卷路径长度约1200 m，最宽位置约100 m（图5），破

坏程度相当于EF1级，对应我国行业标准二级，属于弱龙卷。



图5 6月1日江门开平龙卷路径及受灾范围（红色区域表示龙卷影响范围）

6月12日13:49—14:00，受低涡切变影响，江苏省扬州市高邮勤王村和管伙村发生龙卷，导致水泥围墙倒塌、房顶及玻璃受损，成片树木折断、电线杆折断，简易养殖厂房倒塌。如图6所示，龙卷是从西向东移动，影响路径约3.5 km，最大宽度约320 m，龙卷破坏程度相当于EF2级，对应我国行业标准三级，属于强龙卷。

6月24日13:48—14:22，受冷涡系统影响，内蒙古自治区锡林郭勒盟东南方的阿利嘎哇乌拉山峰附近出现龙卷，有较多目击者拍摄到龙卷视频，龙卷出现在开阔的草原上，没有灾情，无法对此龙卷的强度进行定级。

6月27日19:00前后，受低涡切变影响，湖北省荆门市发生龙卷，龙卷经过上湾村、泉洼村、李宁物流园、荆门检验检测产业园、安能物流、阳光大道，柳家沟，污泥资源开发中心（图7）。从西南向东北移动，影响路径约19 km，最大宽度约160 m，破坏程度相当于EF2级，对应我国行业标准三级，属于强龙卷。主要灾情指示成片硬木折断、部分房子围墙倒塌等。龙卷漏斗云触地在开阔田地上，在上湾村到李宁物流园之间留下明显的浅色条迹，在尾段经过山丘地形（图7中的白色方框）后就开始消散。

1.3 7月龙卷

7月有2次龙卷过程共出现9个龙卷，分别发生在江苏昆山、江苏太仓、上海崇明（3个）、安徽宿州、江苏宿迁、江苏连云港和江苏盐城。

7月6日上午，受高空槽和切变线影响，09:10前后江苏省昆山市出现龙卷，灾情较轻，强度为EF0级09:45—10:00太仓市出现龙卷，造成房屋外墙

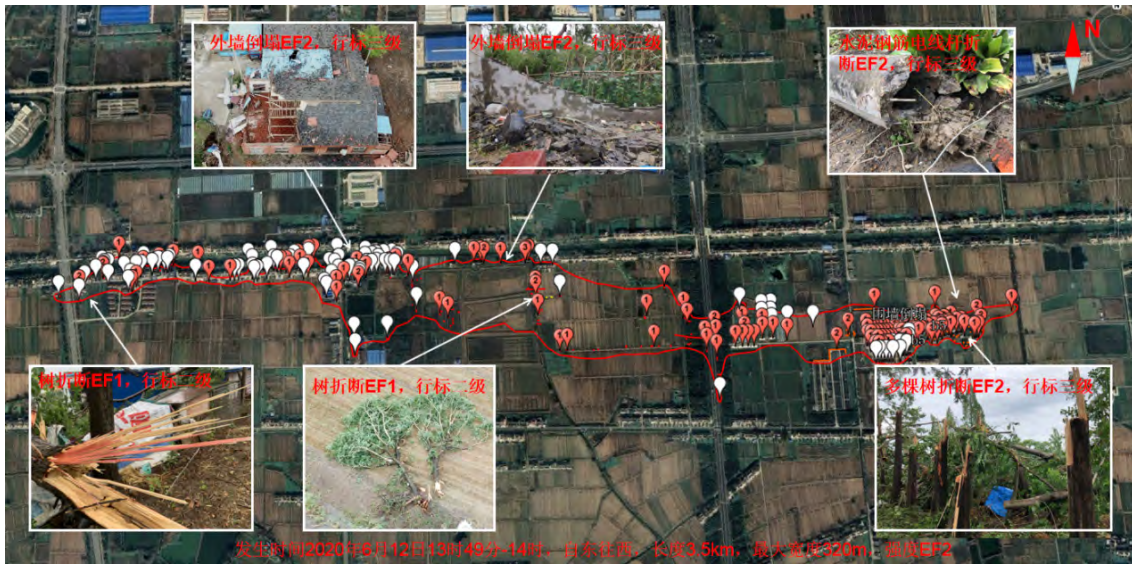


图6 6月12日江苏省扬州市高邮破坏范围（红色区域表示龙卷影响范围）

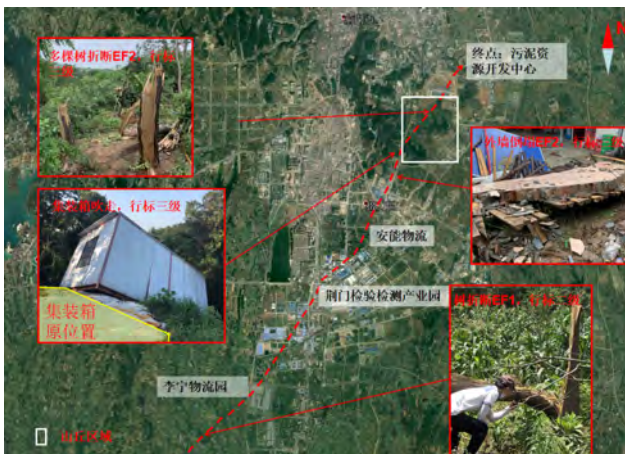


图7 6月27日湖北省荆门市龙卷路径（红色带箭头虚线）

倒塌，成片树木折断，强度达到EF2，属于强龙卷；10:30、10:40、10:45上海市崇明区港沿镇、陈家镇和向化镇先后出现EF0~EF1级弱龙卷，造成房屋受损、树木和田间作物倒伏，陈家镇裕西村住户辅房外墙坍塌，有1人受伤。

7月22日17:50—18:59，受低涡切变影响，安徽省宿州市发生龙卷，龙卷从南向东北移动，经过埇桥区蕲县镇、芦岭镇、姜庄镇和灵璧县，影响路径约62 km，最大宽度约800 m（图8）。主要灾情指示成片硬木折断、部分房子围墙倒塌等，破坏等级为EF3，对应我国行业标准三级，属于强龙卷。初步统计，房屋倒塌损坏670余间，受灾人口8720余人，死亡1人。这是我国近年进行详细灾情调查的破坏路径长度最长的一个龙卷。

7月22日22:00前后，受高空冷涡和地面气旋影响，江苏连云港灌南镇发生龙卷，龙卷从西南向东北



图8 7月22日安徽省宿州市发生龙卷路径（黑色带箭头虚线）

移动，经过条房村，影响路径约3.1 km，最大宽度约300 m（图9）。主要灾情指示铁路路灯杆和成片硬木折断、桥梁围栏倒塌等，破坏等级为EF2，对应我国行业标准三级，属于强龙卷。



图9 7月22日江苏连云港灌南镇发生龙卷影响范围（红色区域）

7月22日21:48前后、22:40前后,受高空冷涡和地面气旋影响,江苏省宿迁市沐阳镇、盐城市响水镇先后出现龙卷,根据当地气象部门的灾情调查资料,两次龙卷天气造成村民房屋不同程度受损,部分地区电力等基础设施受损,部分树木折断,响水镇龙卷强度达到EF2,属于强龙卷,而沐阳镇龙卷强度达到EF1。

1.4 8月龙卷

8月出现3个龙卷,分别发生在黑龙江省绥化市、内蒙古区包头市和黑龙江密山市。

8月9日11:47—12:09,受高空槽和切变线影响,黑龙江绥化市绥胜满族镇发生龙卷,龙卷从西南向东北移动,经过四排村、刘家屯、郭家村和三发村,影响路径约13.5 km,最大宽度约300 m(图10)。主要灾情指示成片硬木折断、部分房子水泥围墙倒塌和电线杆折断等,破坏等级为EF2,对应我国行业标准三级,属于强龙卷。



图10 8月9日黑龙江绥化市龙卷影响范围(红色区域)

8月9日15:33—15:43,受高空槽影响,内蒙古包头市武川县发生龙卷,15:38前后龙卷经过包头市希拉穆仁镇天鹅湖牧区(图11),市民录下了多段龙卷视频。根据目击者描述,龙卷影响时,伴有1.5 cm大小冰雹,石头、杂物等满天飞,天昏地暗,房屋门窗、大小轿车、屋顶瓦片、彩钢结构蒙古包等遭到严重破坏,部分墙体吹倒,院内烧烤炉、儿童车、娱乐卡丁车等吹起抛过房屋飞出数米。龙卷从西南向东北移动,影响路径约10 km,最大宽度约450 m。造成天鹅湖景区接待点33人不同程度受伤,其中游客24人、旅游点务工人员9人,188顶蒙古包受损或倾倒,员工生活区、砖混结构蒙古包钢制回廊等多处设施被毁,附近5户牧民房屋及车辆受损。此次龙卷破坏等级为EF2(图11),对应我国行业标准三级,属于强龙卷。



图11 8月9日内蒙古包头龙卷移动路径(红色带箭头虚线)

8月14日16:00前后,受冷涡影响,黑龙江省密山市富源乡珠山村富国组遭受龙卷风袭击,造成铁皮房盖被掀翻、电线杆和路灯被刮倒、成片树木折断,有68户民宅受损,2人受伤,由于没有收集到更全面灾情资料,龙卷强度待定。

1.5 9月龙卷

9月25日16:00前后,受短波槽影响,香港赤鱗角机场出现龙卷,有目击者拍摄到相关的视频,但缺少相关灾情资料,龙卷破坏等级无法确定。

2 龙卷破坏特征

龙卷地面灾情特征通常表现为树木倒向呈辐合状、破坏范围纵横比大,地面浅色破坏条迹。

2.1 纵横比

表2给出了9个龙卷的灾调信息。可以看出,龙卷的EF等级强度与长度、最大宽度和纵横比(长度与最大宽度之比)成正相关,强龙卷的纵横比大于10,特别是安徽宿州EF3龙卷的纵横比高达77.5,纵横比大也是龙卷区别于下击暴流的一个重要地面灾情特征。但是范雯杰^[10]在分析1961—2010年33次强龙卷的路径信息时,龙卷风路径宽度与其强度的暂时不存在明确的对应关系,有可能是因为1961—2010年期间的灾调手段较落后及对最大宽度的定义存在偏差而造成的。

2.2 辐合倒向

龙卷经过树林时,龙卷等级强度越强,地面的辐合倒向(尺度是龙卷的宽度)特征越明显。在地面灾情未处理的情况下,此辐合倒向特征很容易识别到,这也是及时开展灾情调查的原因之一。图12a是江苏省高邮市龙卷个例中,G233国道西辐合倒向的树木,图12b是安徽省宿州龙卷个例中,刘村西吴成片呈辐合状折断的杨树。若龙卷比较弱,强度达不到令树木

表2 现场灾调龙卷信息表

编号	时间	龙卷发生地点	强度等级	长度/m	最大宽度/m	纵横比
1	20200518 14: 06—14: 07	广东江门台山	EF0 (行标一级)	35	11	3.2
2	20200531 18: 59—19: 01	广东佛山高明	EF1 (行标二级)	670	80	8.4
3	20200601 10: 50—10: 56	广东江门开平	EF1 (行标二级)	1200	100	12
4	20200612 13: 49—14: 00	江苏高邮	EF2 (行标三级)	3500	320	11
5	20200627 19: 00前后	湖北荆门	EF2 (行标三级)	19000	160	11
6	20200722 17: 50—18: 59	安徽宿州	EF3 (行标三级)	62000	800	77.5
7	20200722 22: 00前后	江苏连云港灌南镇	EF2 (行标三级)	3100	300	10.3
8	20200809 11: 47—12: 09	黑龙江绥化	EF2 (行标三级)	13500	300	45
9	20200809 15: 33—15: 43	内蒙古包头	EF2 (行标三级)	10000	450	22.2

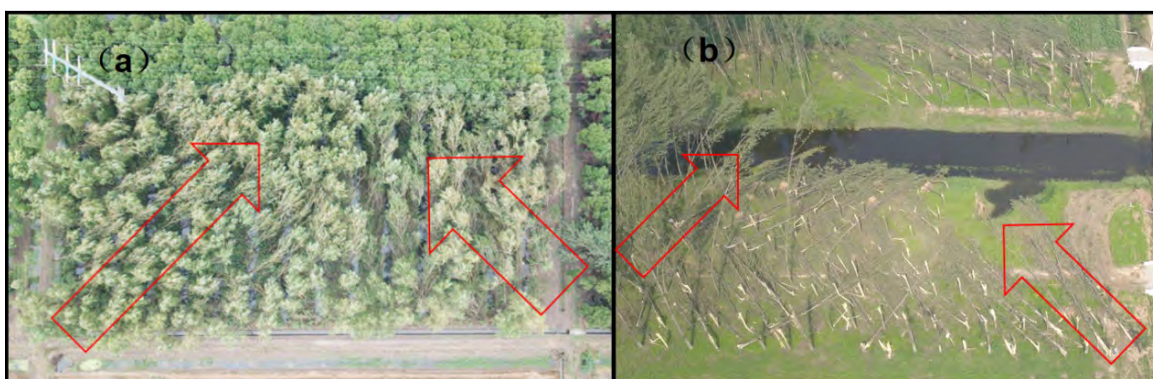


图12 江苏省高邮市龙卷 (a) 和安徽省宿州龙卷 (b) 个例中辐合倒向的树木

倒伏，或者龙卷强度较强，但没有经过树林，此辐合倒向特征则难以识别。

2.3 浅色条迹

强龙卷容易在开阔的植被（草地、水稻田、玉米地）留下浅色的条迹，植被在龙卷极高风速的冲击作用下，叶子及枝干容易被吹走，龙卷等级强度更高时，如2019年7月3日辽宁省开原市龙卷在榆树堡村的草地留下一条清晰的白色条迹。图13a 安徽省宿州龙卷在沈寨村附件留下的浅色条迹，图13b是黑龙江绥化

化龙卷在郭家村留下的浅色条迹，这个特征都是龙卷特有，在灾情调查时，可以根据此特征判断龙卷的特征方向。

3 总结与讨论

2020年我国可确认的龙卷天气过程有13次、共20个龙卷，龙卷数量较2004—2013年的年平均统计结果是属于偏多年景，EF2级强度龙卷数量是2004—2013年的年平均数的3.5倍^[11]。2020年龙卷全部是西风带龙卷，没有台风龙卷记录。台风龙卷比常年偏少，可能



图13 安徽省宿州龙卷 (a) 和黑龙江绥化 (b) 个例中浅色条迹

(下转53页)

“强对流天气第一道防线”的构建：新型相控雷达阵列研发应用对我国强对流天气预警的实践意义

——对中国气象局大气探测中心马舒庆和湖南宜通华盛科技有限公司寸怀诚/王国荣的采访

采访人：贾朋群（本刊专职副主编）

受访专家：马舒庆（本刊编委，中国气象局大气探测中心研究员）

寸怀诚 / 王国荣（湖南宜通华盛科技有限公司董事长兼总经理 / 高级工程师）

采访方式：线上

采访时间：2020年12月16日

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.008

贾朋群：本刊2020年6期刊载了期刊主编许小峰关于雷达探测的文章，阐述了从美国最早的雷达在气象领域用于风雨探测开始，雷达探测在推进大气科学学科发展和气象预报业务能力提升方面的重要作用，其中对几次技术进步带来的探测能力拐点，令人印象深刻。本刊2019年增刊介绍的美国气象学会百年文集中，多个章节也提及雷达资料不可或缺的作用。请专家先简要概述一下我国研发机构和企业在上述领域最新的发展情况。

马舒庆：天气雷达在各种天气过程，尤其是台风、暴雨和冰雹等强对流灾害性天气过程的快速监测中，显示出了不可替代的作用，成为气象防灾减灾的国之重器，取得了突出的社会经济效益。气象部门不断提升天气雷达探测能力：包括增补站点，提高覆盖；双偏振改造，增强识别和定量测量降水能力；提高资料质量控制，丰富探测产品；发展短程探测雷达，提高精细化探测能力。

短程探测雷达探测距离为几十千米，探测波段选择为X波段，技术体制有两类：一类是机械扫描雷达；另一类是相控阵雷达。X波段相控阵雷达同时多波束探测能力表现出巨大吸引力和强劲发展势头。

寸怀诚/王国荣：我国最初的天气雷达是由商船和军用雷达改造的，后来研制、生产、装备了711、713、714等型号的天气雷达，为了赶上国外天气雷达技术发展，引进了多普勒天气雷达（新一代天气雷达）。在2010年之前我国天气雷达研制、生产单位有电科集团14所、38所、航天科工23所、784厂、长海厂等，都是国字号单位。近十年来一批新兴企业加入了天气雷达研发生产的行列。其中，长沙宜通华盛在军工产业的基础上，带着先进的相控阵技术和创新发

展的分布式探测理念，研制出了新型相控阵天气雷达——阵列天气雷达（图1）。在中国气象局和省市气象局的帮助下，已经在上海、广东佛山、河北雄安等地进入应用。阵列天气雷达能够有效探测降水系统中大气流场，天气雷达业务化探测真正实现动力学探测与热力学探测相结合。为研究大气和天气预报提供更丰富、完整的信息。

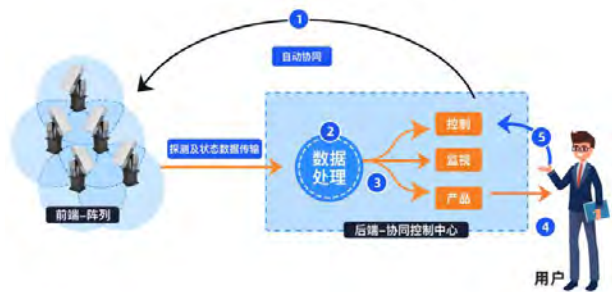


图1 新型相控阵天气雷达——阵列天气雷达

贾朋群：刚才马研究员提及，针对新的雷达技术，如新型相控阵雷达——阵列天气雷达，如果得到预报员和模拟系统的认可，即大幅度提高预报（预报员和业务模式）技巧，得到大气运动更多细节，一些具有跨越意义的关键技术值得期待。请问，以阵列天气雷达设计和研发的过程为代表，这类技术的研发瞄准的科学问题和技术问题是什么？两者结合起来更大的挑战在哪里？也请寸总和王工分析一下，这样的技术成果，现在和未来对于企业开发产品换代的意义。

马舒庆：21世纪初，美国气象专家设计了网络化天气雷达协同自适应观测系统（CASA），这是以多个X波段小功率、短程雷达构成的雷达系统。关于网络化雷达的功用，说的最多的是低空补盲，实际上

最重要的意义是多点协同观测，使得同一空间点，相同探测要素有多个探测值（如多个径向速度）。这与现有雷达网（新一代天气雷达网）探测理念完全不同。现有雷达网要求同一空间点，同一个探测要素有一个探测值即可（如一个径向速度）。我国也开展了网络化雷达技术研究，中科院大气所陈洪滨研究员主持开展了网络化天气雷达研究，在研究中发现了机械扫描雷达构成的网络化雷达扫描速度慢，空间覆盖不够，特别是同一空间点上不同雷达获取的数据时间相差（简称数据时差）大。数据时差大对于合成风场有致命的影响，比如同一空间点上两个雷达获取径向速度的时间差是1 min，当风速为20 m/s，那么这两个数据就是大气这个系统中相隔1200 m的两点的数据，如果这个系统是龙卷，那么这两个点的风向可能完全相反，用在这两点上获取的数据合成风场就可能完全错误。因此，我们把目光转向了相控阵雷达技术，相控阵雷达具有多波束同时扫描的能力。探测中心与多个雷达研发单位探讨过利用相控阵技术构建新的网络化天气雷达——阵列天气雷达，宜通华盛勇敢地扛起了这杆大旗。

寸怀诚/王国荣：宜通华盛有很好的微波技术和相控阵雷达基础（图2）。针对阵列天气雷达的功能需求，我们从微波技术开始，研制相控阵雷达部件，发展到相控阵雷达整机，能解决快速扫描的问题。但为了解决近程雷达多点观测资料时差大导致风场准确性不足的痛点，我们结合气象专家们提出的分组同步观测的技术路线，从相控阵雷达到同步协同观测设计了完整的实现方案。在雷达硬件上实现了从模拟到数字波束的过渡。2017年采用数字波束形成技术实现了16波束同时探测（图3），体扫时间快了16倍；在同步控制方面，我们研制了专门的支持远程同步控制和伺服自动校验同步的雷达同步系统，能保证多雷达的严格同步；在整体方案上，设立了以控制中心为大脑，指挥控制多个单相控阵雷达的工作模式、同步信息，并把多雷达变成一个整体，由中心站来统一进行气象数据的处理的模式。这些新技术为气象研究和天气分析提供了垂直时间一



图2 宜通华盛相控阵雷达

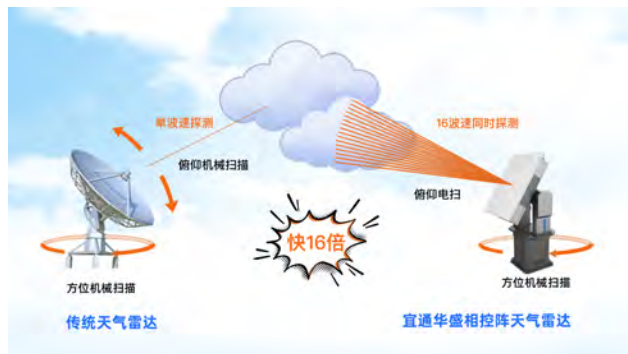


图3 单波束探测和16波束探测示意

致性，空间分辨率、时间分辨率、空间覆盖率十分优良的探测资料，并能获得比较准确的云内风场资料，为进一步提高预报准确性提供了可能。应该说这些技术成果无论是现在还是未来的一段时间内，都是代表气象探测领域的先进方向和理念，作为企业能有这样的机会把先进成果转化为产品，并应用到企业服务中，是非常荣幸的，也为企业在气象领域的自主创新奠定了坚实的基础。

贾朋群：WMO最新发表了精细到每个国家的主要气象灾害（图4），可以看到，“风暴”作为主要灾害，覆盖了全球最多的地区，是气象灾害的最主要成因。以风暴为代表的强对流天气，从大气探测学科和探测仪器两个角度，怎样才能更好地被认知？

马舒庆：李泽椿院士等在《自然灾害监测预警科技发展规划研究》中指出：气象灾害通过影响生产生活等方方面面，可以危害到环境安全、粮食安全、水资源安全、生态安全、社会安全、国防安全等。其中，暴雨、台风等强对流气象灾害及其衍生灾害严重危害人民生命财产安全；干旱、暴雨洪涝等气象灾害对农业生产影响严重，危害国家粮食安全；台风、暴雨（雪）及其导致的洪涝、电线道路结冰对生产生活安全造成威胁；极端天气气候事件直接影响军事行动实施以及作战平台、武器装备安全使用和效能发挥，影响重大国防工程建设，进而影响国防安全。如何提高对冰雹、龙卷、雷雨大风、短时强降水这些强对流天气的预报预警能力，从而降低其灾害程度呢？首先这是一个资料获取的问题，也就是探测问题。短临预报主要依靠天气雷达资料，以及短期天气预报、探空资料、地面气象站资料、卫星资料，风廓线雷达资料。辅之以短期天气预报、探空资料、卫星资料作为背景，给出强烈天气出现的可能性和可能类型。至于强烈天气在什么时间、什么地点出现，出现的强度就要靠天气雷达资料分析来确定。早期短临预报利用雷达回波的强度（反射率因子）来分析，现在很多地方

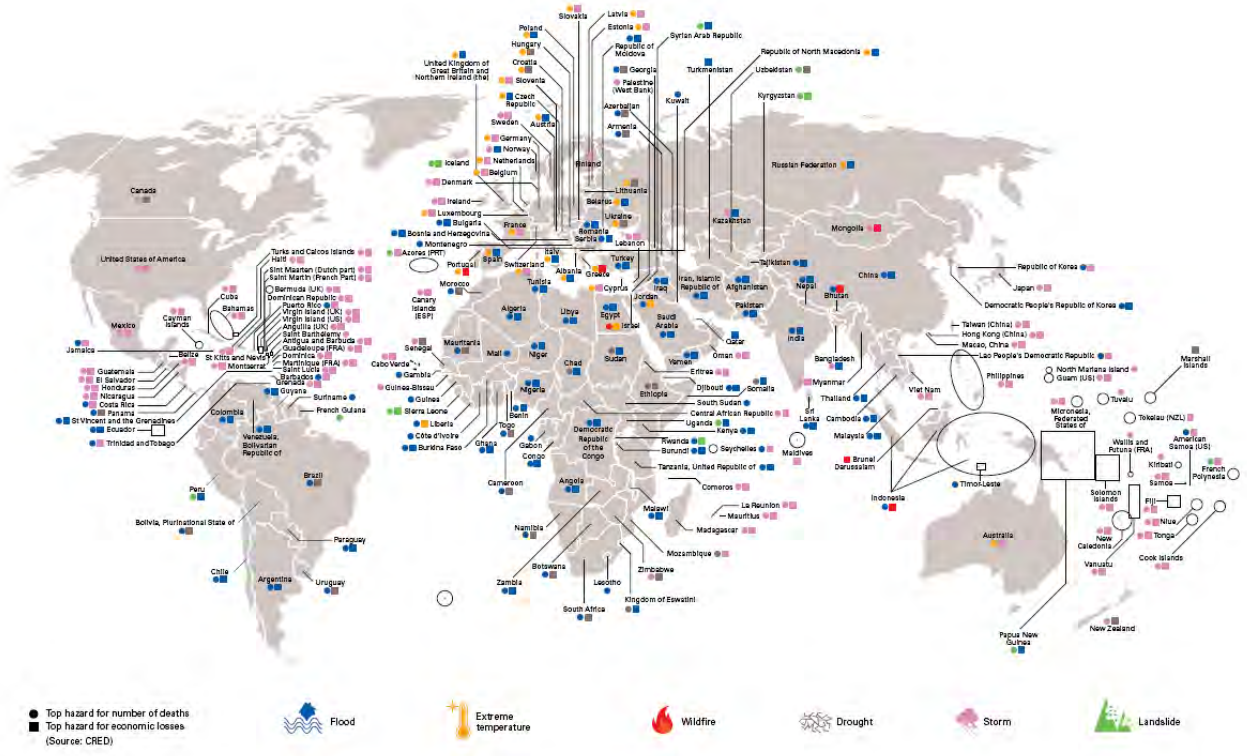


Figure 2: Map of deadliest and most costly weather, water and climate related hazards for each country (Source: WMO analysis of 1970-2019 data from the Emergency Events Database of the Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, CRED).

图4 各国死亡最多和损失最大的天气、水和气候灾害分布 (来源: WMO《2020气候服务状况》)

加入双偏振雷达资料来提高分析的准确性。反射率因子主要反映大气中热力学变化，双偏振参数也主要体现热力学变化状态。然而，大气的变化不仅包含了热力学变化，而且包括动力学过程。20世纪80年代，多普勒技术引入天气雷达，形成了多普勒天气雷达（如我国新一代天气雷达），雷达的价格也增加了10倍，这时可以测量降水粒子速度沿雷达波束方向的分量，即径向速度。多普勒天气雷达的应用是天气雷达应用发展的重要标志，标志着雷达探测从热力学探测走向动力学探测与热力学探测结合。但是多普勒天气雷达所测的不是粒子速度，而只是粒子速度的一个分量，因此，尽管为了获取这个径向速度投入巨大，但是在强天气的应用仍然存在很多困难，径向速度应用的场景受到限制。前面提到美国气象专家设计了网络化天气雷达（CASA），提出了多点协同观测，在网络化雷达多点协同探测方式的启发下，我们在相控阵雷达技术基础上设计、研制了独特的阵列天气雷达。阵列天气雷达利用相控阵多波束同时探测技术和分组方位同步技术，解决以往多雷达组网探测数据时差大问题，将数据时差缩短到几秒钟，准确获取对流天气风场资料（图5）。实现了天气雷达动力学探测和热力学探测结合。阵列天气雷达在空间覆盖和时间空间分辨率方面都按照精细化探测的需要进行了设计。

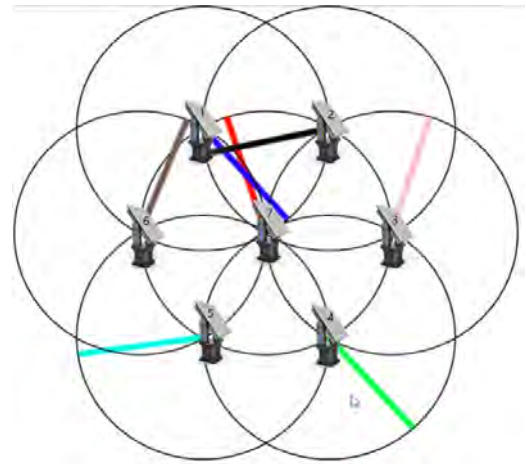


图5 7个前端阵列天气雷达前端布局和扫描示意图 (黑色圆圈为前端扫描范围；七种颜色线段表示扫描线；相邻3个前端构成一个三角形；相邻3个前端的扫描线同时进入这三个前端围成的三角形；扫描顺序：(1、2、7)，(2、3、7)，(3、4、7)，(4、5、7)，(5、6、7)，(6、1、7))

寸怀诚/王国荣：阵列天气雷达是一个新的概念，这是我们中国人在天气雷达领域提出的概念。作为企业我们将面对两个挑战：一是对新事物的接受。中国气象是一个有着改革创新文化的领域，几十年，特别是改革开放的40年，不断创新、蓬勃发展。因此，对于阵列天气雷达接受度极高，当把阵列天气雷的技术

内涵和应用价值讲清楚后，得到了普遍的认同和支持。我们与上海市气象局联合创办了阵列天气雷达开放实验室，共同研究，推进阵列天气雷达的完善和应用。还有一个例子：有一个市原来准备建2个相控阵雷达，但听完阵列天气雷达和应用报告后，将计划修改为7个雷达（前端）构成的阵列天气雷达。二是实现新概念需要攻克一系列技术难题，需要一系列技术的突破。经过几年的艰苦努力，企业形成了雷达前后端十四项核心关键技术，十一项发明专利。

贾朋群：我国气象“十四五”规划，瞄准全球气象观测发展前沿，持续优化气象站网布局。针对雷达观测，从单站到组网，从观测效益和设备配置方面看，有哪些能力提升和新挑战？

马舒庆：通过“十三五”建设，我国国家业务天气雷达网雷达数量达到216部，在灾害性天气监测和预警服务方面发挥了重要作用，取得了较好的社会经济效益。其中103部已建天气雷达完成双偏振技术改造，初步研究结果表明：双线偏振雷达在强降水估测、冰雹识别等方面有明显应用效果。在京津冀、长江三角洲、珠江三角洲等地区开展了X波段相控阵天气雷达应用或试验。

相控阵技术在国家雷达网和局域雷达两个方面都将得到发展。在十四五期间，针对国家雷达网（新一代天气雷达网）的更新换代会有相应的探索性或者说前期研究工作。在区域性天气雷达方面，随着气象灾害预警、短时临近预报和高分辨率数值预报的发展，尤其是精准气象预报和精细气象服务迫切需要天气雷达提供分钟级、百米级的气象监测实况产品；高分辨率数值模式需要高分辨云内风场资料；佛山、上海和长沙阵列天气雷达的示范作用。这些需求的刚性和示范的引领将极大推动相控阵技术在区域性天气监测中应用。多点协同探测是区域性天气雷达未来发展的特征。相对于国家雷达网而言，多点协同探测注重高时空分辨，仰角高覆盖（或全覆盖）和动力学探测与热力学探测结合。因此需要建立新的信号和数据处理系统。远高于国家雷达网的数据密度和数据量对于处理系统的能力带来新的挑战，必须将新的处理技术，比如并行运算技术引入，并且建立新的处理方法和流程。同时，进行新产品的开发与应用研究，提高对流天气预警的实效和准确性。

贾朋群：阵列天气雷达与相控阵天气雷达的关系，以及与相控阵雷达组网观测有什么差别？

马舒庆：阵列天气雷达是一种新型相控阵天气雷达，是一种分布式相控阵天气雷达。相控阵天气雷

达可以分成两部分，控制处理中心（监控、处理、产品）和收发通道（天线、收发模块、信号处理、伺服），按照雷达领域的习惯，可以把控制处理中心称之为雷达的后端，收发通道称之为雷达的前端。那么传统的相控阵天气雷达就是一个前端和一个后端组成的相控阵天气雷达，而阵列天气雷达就是多个前端和一个后端组成的相控阵天气雷达。阵列天气雷达的多个前端按照三角形方式分别设置在不同的地方，每3个相邻前端一组，在后端的统一控制下进行方位同步扫描，每个前端扫描得到的信息传送到控制处理中心综合处理生成观测产品。

从外表上看阵列天气雷达和相控阵天气雷达组网，都是在不同点进行探测，然后将数据汇到中心站。实际上相控阵雷达组网与阵列天气雷达有重大的差别：

（1）系统结构差别：阵列天气雷达是将多个前端分布在不同地方进行探测，而相控阵雷达组网观测是将多个雷达（前端和后端）分布在不同地方进行探测。阵列天气雷达有分组方位角同步系统，传统的相控阵雷达没有分组方位角同步系统。

（2）描方式不同：相控阵雷达组网，雷达与雷达之间的协同体现在共同完成指定区域的扫描探测，但是扫描波束进入制定区域的时间没有要求。阵列天气雷达的前端与前端之间不仅共同完成指定区域的扫描探测，而且每个子阵扫描波束进入共同探测区的时间严格同步，即分组方位角同步。

（3）探测效果不同：阵列天气雷达的方位角同步使得共同探测区同一空间点，数据时差非常小，是相控阵天气雷达组网数据时差的六分之一。

因此，阵列天气雷达几乎在所有降水天气都能够正确合成风场，而相控阵雷达组网探测在遇到移动、变化快的天气系统时，合成风场就会产生大的误差或失效。此外，阵列天气雷达同一空间点多个反射率因子融合后，反射率因子分辨率远高于相控阵雷达组网探测。

贾朋群：我国新一代天气雷达主要是S波段雷达和C波段雷达，X波段雷达在整个天气雷达体系中会扮演什么角色？

马舒庆：20世纪80年代中国气象局大部分业务雷达都是X波段雷达（711），后来全部退出业务。其主要原因是降水衰减太大的问题。当出现大范围降水，雷达看到的就是一块半径几十千米的一块“饼”。2003年美国提出CASA计划后，X波段雷达又热起来了。应该注意到这一次X波段“复兴”其特征是短程

探测（几十千米）和协同探测，称之为网络化雷达。短程探测减小了降水衰减的影响，协同探测增加了精细化探测的能力。

在美国提出X波段短程雷达构成网络化雷达时，就有一种说法：用几个短程雷达覆盖全美国，替代WSR-88D雷达。我认为这种方案难以实现。远程雷达与短程雷达结合是一种更加合理的方案，远程雷达解决大范围天气系统监测，短程雷达布设在更为关注的区域进行精细化探测。现在有X波段雷达的单位，都在做与S、C、X波段雷达的融合，可能主要工作还是将不同的雷达数据能够统一的在一张图上再现出来。现在重要的任务是真正将远程雷达与短程雷达融为一个体系，即构建远程雷达与短程雷达结合的现代化天气雷达体系。关键是短程雷达采用怎样的体制？主要技术指标怎么确定？怎样才能通过远程雷达与短程雷达数据结合更客观的反演出大气的气象要素场。体

制不对满足不了要求，指标不合适准确性、代表性就不够。

贾朋群：X波段雷达在整个天气雷达体系中作为短程雷达出现，那么短程雷达探测主要特点是什么？在设计时主要考虑哪些问题？

马舒庆：短程天气雷达以精细化探测为目标。那么首先要能够实现动力学和热力学探测。前面谈到多普勒天气雷达探测风场的一个关键问题数据时差问题，数据时差过大将导致风场误差过大以致失效。从图6a和6b可以看出，1 min数据时差，在风速变化大的地方就会有100%的误差。因此，要能够探测得到有效风场，就必须将数据时差尽可能缩小，达到秒级。采用数字多波束相控阵雷达可以将数据时差降低一个量级以上，比如从抛物面天线雷达的几百秒降低到几十秒。进一步降低就需要采用类似阵列天气雷达的分组同步技术。

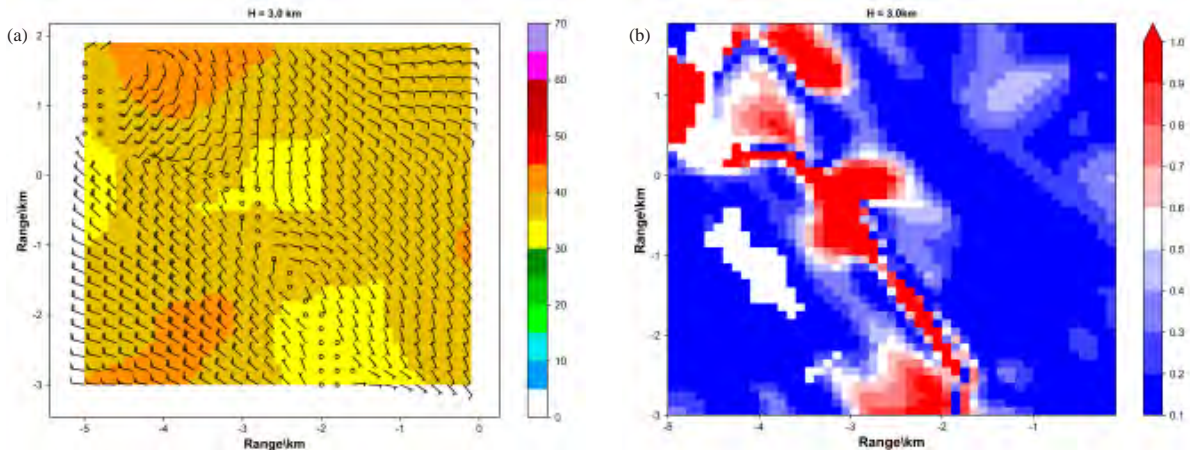


图6 风场 (a) 和时差1 min 风场误差分布 (b)

其次空间分辨率和时间分辨率满足揭示精细化结构。空间分辨率取决于波束宽度、接收通道带宽、采样速率以及处理方法，从国内外短程雷达研究的情况看，空间分辨率一般在百米左右。关于时间分辨率，首先反应了数据的更新速度，以及对天气变化的捕捉能力，时间分辨率体现了资料在时间上的一致性。如果时间分辨率过低，一个体扫中不同位置的可比性就会降低，会给预报分析带来困难。通过相控阵雷达与S波段雷达比较，发现S波段雷达扫描由于低仰角到高仰角需要6 min，在垂直方向的可比性就比较差。相控阵雷达一般采用先完成垂直一高度扫描的方式，所以垂直方向数据可比性非常好。但是相控阵雷达体扫时间就是PPI的时间，那么水平方向的可比性取决于体扫时间，当体扫时间为30 s时，水平方向的可比性就与S波段雷达水平可比性相当。因此，不建议将体扫

时间超过30 s。

再者，空间覆盖率要满足完整描述天气系统垂直结构的要求。S波段雷达远程探测，其仰角覆盖 $0\sim 20^\circ$ ，这时空间覆盖可以到达90%以上（不考虑地球曲率影响）。短程雷达探测几十千米距离范围，如果仰角覆盖也采用 $0\sim 20^\circ$ ，那么空间覆盖就不到50%，当天气系统移向雷达，就可能缺失大部分资料，导致分析天气困难。有一种说法，当天气系统移近一个雷达，就会远离另一个雷达，就可以用另一个雷达的资料来弥补。这对于探测反射率因子、双偏振量来说是可以的。但是对于探测风场来说，就缺了一条腿，无法行走。因此，建议短程雷达俯仰覆盖 $70^\circ\sim 90^\circ$ 。

贾朋群：佛山阵列天气雷达在龙卷、飑线、风暴单体监测的意义是什么？

马舒庆：龙卷是最为强烈的灾害天气，其系统复

杂、生消时间短，也是国内外气象科学家不断探索，然而仍然存在诸多未解之谜的天气系统。佛山市气象局的阵列天气雷达刚刚研制出来，就将这种技术用于佛山地区龙卷监测，建立全球第一个7前端的阵列天气雷达（图7），足见其勇气和远见。我们知道龙卷的危害在于它的强烈旋转气流。因此要揭示龙卷的秘密、提高龙卷的预报预警能力，获取龙卷母体云系的流场至关重要。国内外相关研究认为龙卷母体云系

中的流场，以及流场与强度场的配置决定了龙卷的形成，为了验证这个理论，美国气象学者还专门利用机载雷达跟随探测龙卷，获取龙卷生成前后云系流场，取得了重要研究成果。佛山市气象局在龙卷易发区布设阵列天气雷达，可以长期获取大量流场资料，将在强对流研究，揭示龙卷机理方面取得重大成果，在龙卷识别预警业务方面得到重要发展。

寸怀诚/王国荣：佛山阵列天气雷达2019年完成4

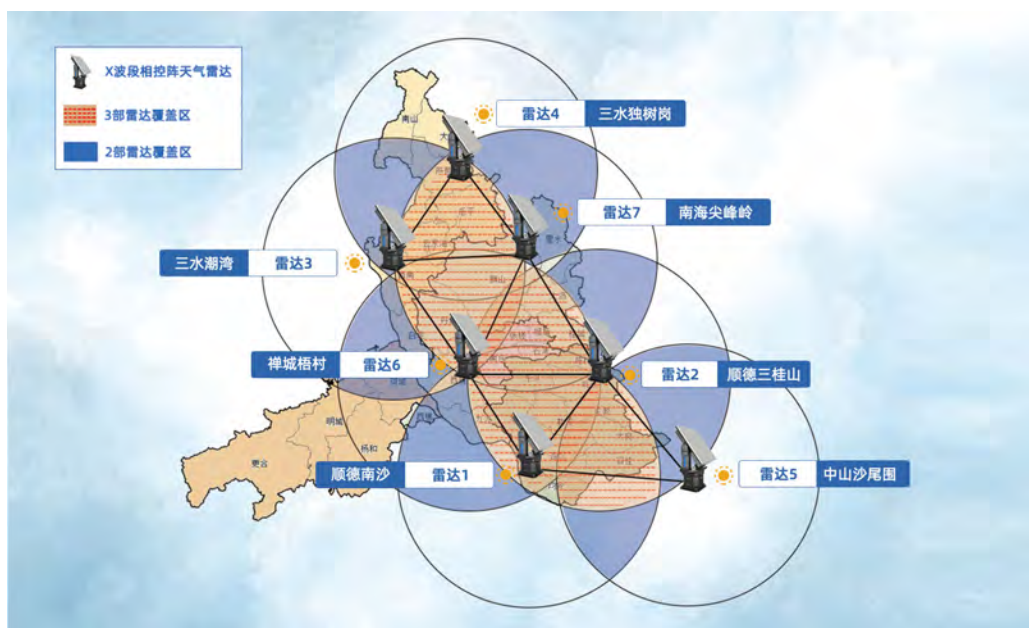


图7 佛山阵列天气雷达

个子阵布设，2020年完成全部7个子阵布设，获取了大量强对流天气资料。图8展示了风场、图9展示了垂直气流。宜通华盛与佛山气象局建立了深入合作关系，一方面为阵列雷达提供运维保障，另一方面针对探测数据质量和探测产品开展联合研究（图10），定

期交流，并且派技术人员驻佛山市气象局。

贾朋群：相控阵雷达雷达数据和产品远远大于现在业务雷达，这么密集的资料和产品，如何分析，预报员怎么消化？怎么在实际业务中更快地发挥作用？

马舒庆：相控阵雷达、阵列天气雷达时空分辨率

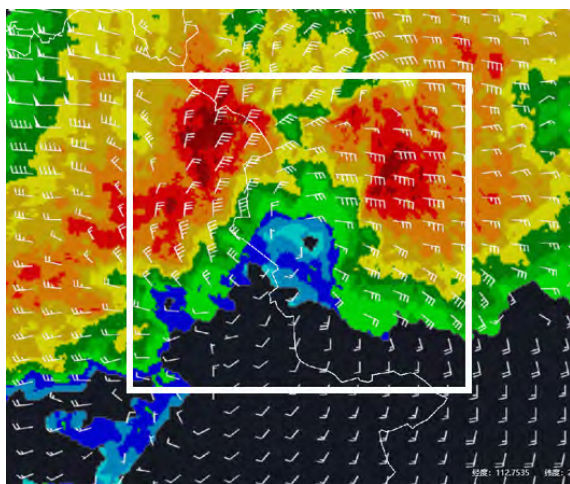


图8 佛山阵列天气雷达探测的风场

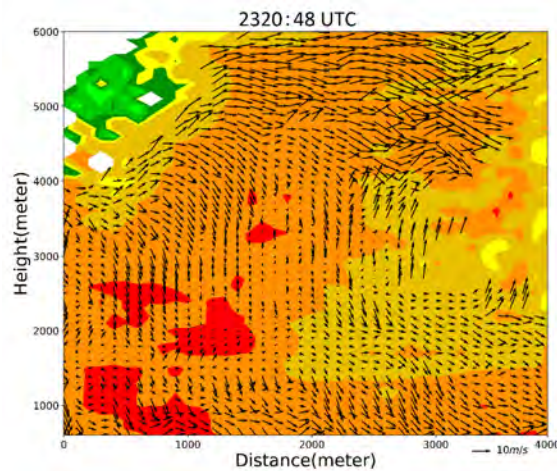


图9 佛山阵列雷达探测的垂直气流

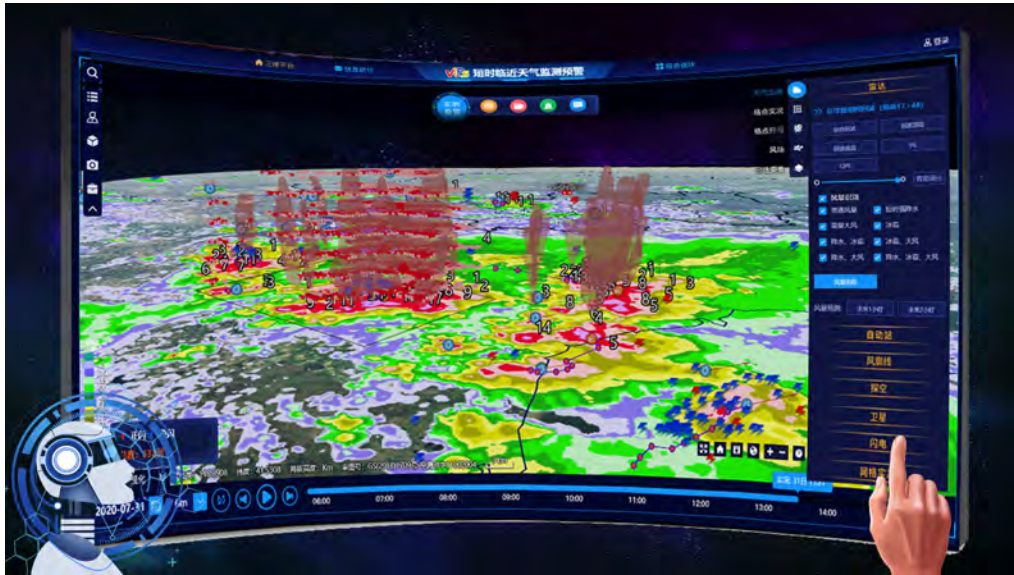


图10 三维显示平台

高、空间高覆盖，因此数据量非常大。宜通华盛与阿里云等团队合作，采用并行处理技术，建立专用处理方法，实现实时数据处理。研究新型的多源数据融合方法，智能识别与预警方法，建立三维立体呈现的平台。产品分级使用，将预报员最需要的信息和资料及时推送呈现，方便预报员的分析应用。这方面，还需要做一些合作研究。

贾朋群：我国相控阵阵列天气雷达在国内外处于什么水平？

马舒庆：前面讲到了，阵列天气雷达是在相控阵雷达技术和网络化雷达技术基础上发展起来的，主要是通过多波束同时扫描技术和方位同步实现了大幅度降低数据时差，从而有效获取强对流天气风场。2019年10月，上海市气象局专家在第39届国际气象雷达会议上做了大会报告，报告了上海阵列天气雷达试验情况，这个报告是我国在39届国际雷达会议上两篇大会报告之一，也是大会12篇相控阵口头报告之一。在国内外学术刊物上发表了多篇阵列天气雷达论文，并且还在继续投稿。

贾朋群：请谈谈国内外最新进展和未来发展展望。

马舒庆：目前国内外都在开展相控阵天气雷达研制和应用，在波段上有S、C、X，在极化方式上有单偏振、双偏振。在大的方面可以看出两个方面的发展趋势：

1) 在国家雷达网发展上，美国气象部门在技术层面和业务层面开展相控阵雷达用于国家雷达网的研究，美国对相控阵雷达多波束同时扫描能够缩短体扫时间，提高雷达网捕捉小尺度天气系统的能力感兴

趣。试图用相控阵天气雷达作为下一代业务使用天气雷达。美国的工作使我们看到了远程探测天气雷达下一代为相控阵雷达的可能性。

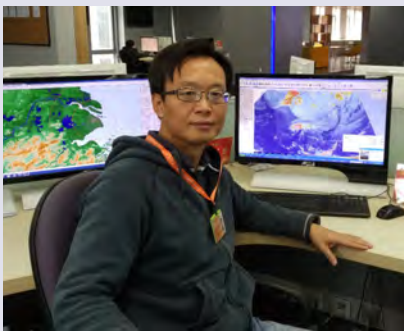
2) 另一个趋势就是短程相控阵雷达发展势头强烈，这些相控阵天气雷达也有不少共同点，大部分径向探测范围为几十千米；峰值发射功率不大，在几百瓦量级；采用有源天线体制；采用数字波束形成技术（DBF）；一维相控阵，俯仰电扫，方位机械扫描；体扫时间短。

短程雷达将以协同探测为特征，为短临预报提供精细化的动力学与热力学结合的较为完整的资料。在十四五期间我国短程相控阵天气雷达也处在一个快速阶段。

寸怀诚/王国荣：宜通华盛在相控阵雷达技术和雷达资料两个方面，通过与中国气象局和相关院校的合作已经做了准备和积累，将通过不断努力，在天气雷达发展的大趋势下，一方面把相控阵雷达与多种探测设备的协同观测结合起来，开展不同波段相控阵雷达产品，并不断提升相控阵气象雷达的性价比；另一方面，我们将和气象部门和科研单位一起把相控阵雷达的资料与多源资料的应用继续深入下去，为气象部门在人工智能、快速循环同化、中小尺度数值模式等应用方面做出应有的贡献。

贾朋群：谢谢专家们接受我刊的采访。祝愿在多方共同努力下，早日实现我国雷达气象探测先进技术的多样化和高效化。

专家点评：“强对流天气第一道防线”的构建：新型相控雷达阵列研发应用



上海市中心气象台首席戴建华

相较于机械扫描的常规业务天气雷达，相控阵阵列天气雷达的覆盖仰角广、时空分辨精度高，对尺度小、变化快的近距离对流天气监测优势显著，表现在以下几个方面：1) 高空间分辨率：有助于获取中小尺度对流降水的动力和热力精细结构，为监测和预警冰雹、下击暴流、龙卷等中小尺度灾害性天气提供支撑；2) 高垂直空间覆盖：多波束观测可以增加垂直方向空间探测范围和连续观测，获取垂直方向上对流降水的完整结构，为对流降水发展演变研究奠定基础；3) 高时间分辨率：低于1 min间隔观测，可捕捉中小尺度对流降水发展过程中重要的演变特征；4) 分布式阵列协同观测：进一步提升观测的针对性和一致性，可获取更加精细、全面的热力、动力信息。

因此，相控阵阵列天气雷达的重要价值之一是有助于提高对中小尺度对流天气的科学认识。1) 为探索新的发现提供了手段：对流天气的精细结构，如上升、下沉运动区、

各类中小尺度涡旋甚至龙卷等，一个典型的例子是2020年7月6日上海崇明迷你龙卷，相控阵雷达可以连续(30 s间隔)、精细(30 m距离库)地观测到水平尺度小于250 m、高度低于1.8 km、生命史不到18 min的龙卷涡旋的发展演变，揭示了龙卷涡旋自低层向上发展加强的过程，这些是周边的业务雷达无法识别的。2) 借助双偏振技术，可获取中小尺度对流云中的相态分布及其动态演变，从而提高对云物理过程的科学认识。3) 深入探索：借助阵列雷达的新型观测能力，通过业务观测和科学试验，进一步提高对中小尺度对流天气中动力结构及其演变的认识，探索其形成机制机理。

另外，相控阵阵列天气雷达还可有效推进强对流天气预报预警业务的发展：一方面，通过高时空精细化的观测，提高对中小尺度对流降水的探测能力，对临近预报预警技术的提升起到明显的促进作用；另一方面，其新型观测手段和协同观测方式对传统技术方法将有明显的提升，如协同观测的时空一致性将大大提升多雷达风场反演的精度。

经过2年多的业务观测试验，相控阵阵列雷达已展示其优势，对研究我国特色的中小尺度对流天气提供了有效手段。

(上接45页)

与今年生成和登陆我国的台风个数比常年偏少相关。龙卷发生时间集中在5—9月，其中7月最多，出现在湖北省、江苏省、安徽省和上海市，均为我国龙卷相对高发省(市)。江苏在同一过程出现3个龙卷，当上游出现龙卷，上下游的气象局部门联动可以更好对龙卷进行预警。

相对2018年和2019年的龙卷伤亡信息^[7-8]，2020年的龙卷数量有所增加，但致灾性比2019年低。7月22日安徽宿州EF3级龙卷的路径长达62 km，是我国近10年来利用微型无人机进行详细灾情调查的破坏路径长度最长的一个龙卷。2020年现场调查的9个龙卷中，除6月27日湖北荆门龙卷有部分路径经过山丘地形，其他龙卷风的路径的主要下垫面都是开阔平地，下垫面的粗糙程度与龙卷存在某些联系，还值得做进一步研究。部分强龙卷地面灾情特征具有树木倒向呈辐合状、龙卷破坏范围纵横比大，地面浅色破坏条迹，这些地面灾情特征对灾情调查判断灾情性质和龙卷的移向有重要作用。

致谢

感谢国家气象中心、江门市气象局、台山市气象局、开平气象局、高明区气象局、江苏省气象局、荆门市气象局、

宿州市气象局、盐城市气象局、响水县气象局、包头市气象局、武川市气象局、达茂旗气象局、绥化市气象局等对龙卷灾害调查提供的支持和帮助。

参考文献

- [1] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. 高原气象, 2006, 25(5): 914-924.
- [2] 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. 大气科学, 2008, 32(3): 508-522.
- [3] 郑永光, 朱文剑, 田付友. 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理. 气象科技进展, 2018, 8(2): 44-54.
- [4] 张小玲, 杨波, 朱文剑, 等. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析. 气象, 2016, 42(11): 1304-1314.
- [5] Fujita T T, Wakimoto R M. Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980. Monthly Weather Review, 1981, 109(7): 1438-1456.
- [6] 郑永光, 朱文剑, 姚聃, 等. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计. 气象, 2016, 42(11): 1289-1303.
- [7] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 2018年中国龙卷活动特征. 气象科技进展, 2019, 9(1): 51-55.
- [8] 李彩玲, 黄先香, 蔡康龙, 等. 2019年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征. 气象科技进展, 2020, 10(1): 7-14.
- [9] McDonald J R, Mehta K C. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-scale). Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University, 2006.
- [10] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [11] Meng Z, Yao D. Damage survey, radar, and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012. Weather and Forecasting, 2014, 29(3): 702-724.

承上启下的担当

——气象干部培训学院第17期中青班研究报告摘编

■ 本刊

【编者语】

2020年岁末，第17期气象部门中青年干部培训班的38位学员完成近3个月的课程，返回工作岗位。在完成课程的同时，学员分成6个小组，分别针对防灾减灾第一道防线、科技创新体系、气象优良传统、省和县事业单位优化6个主题，完成了专题研究报告。这些报告直面气象发展的核心问题，参训学员通过课程启发和工作中的思考，贡献了中青班的集体智慧。本文摘要给出其中5个主题报告给出的一些现状分析和思想的火花。需要报告全文的读者，请联系作者或培训班负责人。

1 防灾减灾第一道防线 我们还有哪些短板？

(张晓红、刘海峰、闫巍、曲岩、白鸣祺、吴瑞欢、谭建国)

1) 观测资料在服务中的使用挖掘不够，特别是如何应用多元融合资料、多种要素对可能致灾的高影响天气的服务应用需要加强。如基层台站业务人员利用雷达等探测设备开展冰雹、龙卷等强对流天气监测分析及应用能力不够，特别是在提升灾害性天气监测预警时效和精准靶向发布中的应用不充分。2) 基层业务人员对数值模式产品解释应用能力偏弱，大多依赖人工对环流形势的主观分析判断，缺乏人工智能等新技术应用，缺少针对本地气候特点的应用研究，难以提供针对性更强的服务产品。3) 基层对智能网格预报产品应用不够，在服务中基于智能网格预报产品的精细化服务产品自动化加工能力不足，精细服务能力需要进一步提升。4) 预报预警业务考核和业务规范已不适应服务发展需求，推进业务服务发展的指挥棒作用越来越弱。大多数台站短期预报仍在沿用一天3次的制作模式，预报要素单一，预报表述不够精细，如预报内容对降水起止时间精准度、降水强度、降水性质及致灾风险等考虑很少。5) 基层以部门业务为主向适应服务需要为主的观测、预报体系改革推进力度不够，急需建立面向防灾减灾服务需求的高效协同的业务体系。6) 部门间资源共享广度深度不够，存在种类、数量偏少的问题，开展气象灾害影响预报和风险预警所急需的基础数据很难获取，导致影响预报分析不出影响，风险预警给出的风险量化不够。

2 气象科技创新组织体系向支持研究型业务转化

(臧海佳、张志刚、李飞、黄玮、代刊、李建、黄秋菊)

气象部门科研力量现状。集中在国家级科研院所、国家级业务单位和省级业务科研单位。2019年全国气象部门专兼职科技人员合计6500人，占在职人员的12.7%，其中20%在国家级，80%分布各省。全国专职科研人员近2000人，占在职人员的3.86%，全年科研工作量3400人年，占在职人员工作量的6.64%。省级专职科研人员、科研工作量投入均为国家级的2倍。2019年底，国家级科研所在职796人，23个省级科研所在职664人。研究型业务加快推进，全国41.2%的预报员实现三个月班下科研，其中省级预报员实现三个月班下科研的平均比例达58%，各国家级业务单位2019年投入科研人力合计达784人年，初步形成直面业务一线需求的科技创新机制。

存在的问题。1) 科技人力投入不足，全部门专兼职科技人员不足在职人员的13%，其中全时科技人员比例尚不到4%。全国全年科研时间投入仅3400人年，仅占在职人员工作量的6.6%，比例不足5%的省份达18个。全国非全时科技人员的平均科研时间仅0.3人年。2) 科研院所体量过小。国家级科研所在岗人数仅800人，占全部门在职人员的1.5%，比例低于自然资源、生态环境、水利、地震、林草等部门。最大体量的气科院仅302人，远低于717个中央部门属科研机构研发人员平均数495人。8个专业气象研究院所更是中央部门直属科研机构中体量最小的。23个省所平均不足30人，人数最少的仅15人。3) 研究力量分散，2019年省级气象部门下达科研课题1389个，经费投入4861万元，平均每个课题仅3.5万元，对于仅5100

人的科技体量而言，人均不足1万元。

科研领域布局——科研机构。9个院所均在开展数值预报研究，从事灾害天气研究的最多，达142人，数值模式、气候与气候变化、大气环境与大气化学领域的研究人数超过70人不足100人。省所投入科技人员最多的3个领域分别是农业气象110人、气候与气候变化58人、生态气象53人，占比分别为16%、9%、8%。8个省所37人开展数值模式相关研发，仅6个省所35人从事灾害性天气研究。

科研领域布局——科技项目。2015—2019年科研课题数超过1000个的方向有5个，分别是气象信息技术、强对流天气预报、农业适应气候变化、数值天气预报和农业气象灾害防御。有7个方向课题数超过了500个，依次是多源资料融合分析与应用、气象灾害监测与风险评估、气候变化、定量降水与精细化气象要素预报、综合气象观测系统保障、人工影响天气和环境气象监测预报。

科技创新基地现状和问题。中国气象局管理的实验室有30个，包括1个国家重点实验室、10个联合共建实验室、17个气象部门重点实验室和2个其他实验室，其中，气候与气候变化领域有6个，大气探测与遥感领域4个，大气环境与大气化学领域、灾害性天气领域各3个。近年来，中国气象局分领域建设了31个野外科学试验基地和24个气候观象台。存在的问题包括：部分实验室运行管理机制与依托单位没有差别，实为依托单位“一套人马、两块牌子”导致空心化现象，没有发挥协同创新平台作用。2019年，17个气象部门重点实验室中，只有13个设立了开放基金，以合计410万的经费资助了111个项目，平均每个项目仅3万多元，如此规模，很难做到协同创新。

3 气象优良传统是强大的精神动力

(李晔、蔡守新、孙廷廷、卢松、李蕊、邹焯、吕波、王琪)

气象优良传统是气象部门的宝贵财富，也是推动气象事业高质量发展的强大精神力量。传承和弘扬气象优良传统是党和国家的重要嘱托，是气象事业发展的必然要求，也是全体气象工作者的共同需求。全国气象部门涌现出雷雨顺、陈金水、崔广等具有强烈时代感和震撼力的模范人物，锻造出拐子湖、长白山、珊瑚岛气象站等先进集体，形成了“艰苦创业、无私奉献，爱岗敬业、团结协作，严谨求实、崇尚科学，勇于改革、开拓创新”的气象优良传统。1945年

9月，延安气象台在凤凰山下成立，人民气象事业正式起步，到1960年，在全国建成3240个气象台站。进入新时代，气象优良传统是我们自信和自豪的底气，是我们风雨无阻、攻坚克难的精神支撑，更是我们推进气象事业高质量发展更基础、更深厚、更持久的力量。只有继续传承和弘扬气象优良传统，才能不负党和国家的重托——努力为实现“两个一百年”奋斗目标，实现中华民族伟大复兴的中国梦做出新的更大贡献。

4 省级及以下气象事业单位现状和问题

(李春筱、姜纪峰、彭洁、杨军远、辛源)

当前，全国31个省（区、市）气象局现有省级事业单位机构共计289个，平均每省9个机构，最多13个、最少8个。从机构名称分布上看，共涉及17类：31个省局均设有气象台、气候中心、气象服务中心、科研院所；设置数量较多的还有机关服务中心（29个）、气象信息中心（27个）、气象探测中心（26个）、灾害防御技术中心（23个）、财务核算中心（23个）；数量较少的有培训中心（12个）、生态中心（5个）、人工影响天气办公室（4个）、地面气象站（4个）、环境气象中心（3个）、海洋台（2个）、宣传科普中心（2个）、行政技术服务中心（1个）。加挂名称的机构223个，最多的事业单位一共挂了4个牌子。这些事业单位不同程度存在职能交叉和界面不清、重复建设和资源浪费、创新能力和专业合力不足等问题。如1) 业务低水平重复，上下一般粗，存在“数据孤岛”和“信息烟囱”；服务产品出口较多，质量不高。2) 名称不规范，以信息和探测为例，26个省局设置了气象探测中心，27个省局设置了信息中心。3) 研究型业务还未建立，核心技术创新能力不足，数值预报释用、集合预报、短临预报等核心技术创新乏力，技术进步面临更多压力，科研团队分散，缺乏核心竞争力。4) 省级少于10人、市级少于5人、县级少于3人的“小散弱”事业单位、独立设置台站的情况仍然存在。

5 县级气象公务员队伍的体量和问题？

(高荣、梁从虎、陈玉华、匡如献、程洪涛)

1993年《国家公务员暂行条例》发布，国家级

(下转57页)

气象科技前沿：全局关注

——中国气象局2020年气象科技前沿动态研究报告摘编

■ 本刊

【编者语】

2018年以来,中国气象局每年就国内外气象科技发展前沿动态,向全局所属部门部署研究报告的征集并开展评优。2020年度共选送64篇报告,是前两年的2倍。本刊受中国气象局科技与气候变化司委托组织了专家评审,共28篇报告被推荐为优秀报告。本文摘编其中6篇报告中的一些论点,需要完整报告的读者,请联系作者或主办机构。

1 千米尺度模式降水的检验评估进展及展望

陈昊明 李普曦 赵妍(中国气象科学研究院 报送)

传统的降水业务检验主要基于累积降水量的评估,较少考虑降水的发展演变过程。随着模式分辨率和降水精细化预报要求的提升,仅基于降水量的检验评估已不能满足定时、定点、定量的降水预报服务需求。基于降水频次、强度等小时尺度特征量及其日变化峰值时间的新评估方法,其评估结果对于深入认识日内降水预报偏差具有很好的应用价值,相关方法和结论为丰富和深化数值模式评估和对改进客观预报方法具有有益的启发作用。未来仍需进一步发展和完善针对不同区域通过分类分型的细致评估方法,并进一步研发面向快速更新循环系统和对流可分辨集合预报模式应用的检验评估指标,为千米尺度数值模式的改进和模式产品的合理应用提供科技支撑。

2 大气边界层对重污染天气影响研究及应用进展

蔡子颖 韩素芹 姚青 唐颖潇 郝天依(天津市气象局 报送)

大气边界层是指离地球表面约1~2 km高度的底层大气,作为地球表面与大气之间物质和能量交换的桥梁,是地气相互作用和大气污染主要发生地。天津市气象部门近年建成沿海-近岸-内陆的边界层和大气环境观测网,城区边界层观测站通过255 m气象塔、地基遥感仪器实现了边界层内风、温、湿、污染廓线的无缝隙观测。气象塔是边界层观测和大气环境立体观测的核心资源,其搭载仪器的种类更多、观测设备的精度和时间分辨率更高,受干扰程度小,在系统的边界层和大气环境研究中必须利用好现有的气象塔观测资源,尤其是200 m以上的边界层气象专用塔,结合

地面环境站和其他地基观测仪器,在规划和投资中,需要进一步加大力度,发挥其价值。

3 国内外台风飞行科学试验前沿动态

汤杰 雷小途 赵兵科(上海市气象局 报送)

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》将台风作为影响国家公共安全的重大自然灾害之一,将台风监测、预警和应急处置关键技术及科学研究列入重大自然灾害监测和防御优先主题。海上观测站稀少,现阶段基于卫星遥感的大气要素反演,受台风浓密云雨区的严重“干扰”,其精度尚不能满足路径和强度变化研究及预报对台风内部结构精细化程度的要求。美国对飓风探测的实践已经表明,基于飞行器的对台风直接观测是当前获取台风结构高精度观测资料的最有效手段。研发能搭载包括下投探空等的高空无人机、针对边界层内部的中低层无人机并构成多平台的台风综合探测体系,将可以获取台风内部气象要素(完整的)垂直廓线等精细结构特征信息,从而揭示海上台风内部(特别是近地层和出流层)精细热力动力结构特征,为包括台风涡旋结构初始化和物理过程参数化方案在内的台风数值模式改进及台风科学研究和预报能力的提高奠定基础,具有重要的科学意义和可靠的应用前景。

4 交通气象科技前沿动态及我国交通气象发展对策建议和研究计划报告

刘端阳 杨华栋 王宏斌 袁成松 周林义 吴泓 祖繁(江苏省气象局 报送)

目前,我国公路交通总里程已达500万 km(其中

高速公路里程15万km), 全国铁路营业总里程达到15万 km (其中高速铁路总里程3万 km), 内河航运、海上运输、航空(特别是通用航空)、城市交通等也有大的发展。因气象条件是影响和制约现代交通运输安全和通畅的重要因素之一, 气象为“平安交通”保驾护航, 交通气象科研和服务业务发展前景广阔。

5 相控阵天气雷达科技研究动态

张深寿(福建省气象局 报送)

我国现在对X、C、S波段雷达都有试验研究, 由于造价的原因, 均采用一维相控阵体制。相控阵天气雷达, 特别是X波段相控阵天气雷达探测到了相当多的典型个例, 并开始发挥它精细化探测的效益, 但由于各种原因限制相控阵天气雷达并未发挥它的全部威力。未来, 随着S波段、C波段等更多类型相控阵的试验和应用, 会有突破性的进展, 为下一代天气雷达做好准备。下一代天气雷达应突破固有思维, 把相控阵天气雷达打造成全方位、全空域、多目标自动跟踪的智能化分析预报预警的“灾害性天气监测和预警系统”。

6 新疆与中亚融雪型洪水监测、预警调研及对策建议

刘艳 卢新玉 郑奕 霍文(新疆自治区气象局 报送)

全球变暖背景下融雪型洪水灾害时空特征正发生重大变化, 在生态环境相对脆弱的新疆和中亚地区开展融雪型洪水监测与预警研究具有重要应用价值和前景。以“一带一路”重要区域——天山北坡的大量融雪洪水观测为突破, 利用现有气象业务观测网, 加快融雪型洪水监测基础设施建设, 在融雪型洪水极为典型的新疆阿勒泰地区阿尔泰山额尔齐斯河(境内)流域开展“融雪型洪水监测预警综合观测试验”: 以阿勒泰气象站为核心, 在重点区域科学布站组网, 通过地面观测并结合遥感观测分析, 进一步掌握融雪型洪水特征、强度分布及其破坏性, 为建立融雪型洪水分析预测模型、业务应用系统以及提升遥感监测能力提供关键数据支撑, 从而加深对积雪物理过程理解, 更好地建立积雪参数反演模型、确定融雪型洪水监测和预警因子, 以期将成果辐射至中亚地区, 为丝绸之路经济带核心区气象防灾减灾和应对气候变化提供科技支撑。

(上接55页)

气象主管机构纳入参公管理, 1996年、2001年、2013年, 省级、市级、县级气象管理管理机构人员先后纳入参公管理。目前, 气象部门参公编制16884个, 占国家气象编制总数的29%, 截至2019年底, 全国县级气象部门共有国家气象事业编制人员19401名, 其中参公管理7506名, 事业编制11895名。县级国家气象事业人员中, 最高学历是大气科学类占59%; 信息技术类占23%; 其他理工类占15%; 文科类占3%。参公人员中, 初级职称占23%; 中级职称占60%; 高级职称8%, 其中正高职称3人。事业编制人员中, 初级职称占41%; 中级职称占44%; 高级职称占8%, 其中正高职称6人。县级参公管理后, 气象部门形成了自上而下的四级参公管理体制, 有效确保了党中央和上级决策部署在基层的落地见效。县级气象公务员队伍建设也存在一些问题, 如1) 参公编制一般3~4人, 除局领导外, 一般设内设机构2人, 机构设置和人员配

备不匹配制约了职能的有效性。2) 事业编制人员分为参公人员和事业单位人员, 还有地方编制人员, 也有编制外聘用人员, 导致人员总量不大, 但人员分类多。3) 事业单位人员调任参公人员, 需任副科级以上领导干部或副高级工程师以上专业技术职务, 导致可选择的人选很少, 合适的人选还存在级别、职称限制, 选人用人通道不通畅。4) 大气科学类专业毕业生源较少, 县级气象局机关公务员招录大气科学类职位报考人员少, 有的甚至达不到开考比例的情况, 导致现有参公人员中气象专业技术类人员比例不高, 对建立专业化管理队伍有不利影响。对此, 报告提出县级气象公务员途径选择: 全员纳入综合管理类参公; 管理机构保持参公、事业单位人员纳入专业技术类公务员、事业单位保持不变、管理机构改为专业技术类公务员和全员纳入专业技术类公务员等。

金沙本底站空气质量与颗粒物浓度变化特征分析

吴栋桥^{1,2} 周登^{1,2}

(1 湖北省咸宁市气象局, 咸宁 437100; 2 金沙国家大气本底站, 武汉 430074)

摘要: 利用华中区域代表性站点金沙国家大气本底站2007—2018年的PM_{2.5}、PM₁₀颗粒物质量浓度数据, 2019年3月—2019年6月反应性气体数据, 对华中区域空气质量进行整体评价, 并分析了颗粒物浓度的变化特征及其影响因素。结果表明, 反应性气体CO、SO₂、NO、NO₂质量浓度其日平均最大值、平均值均达到一级标准, O₃日平均值超标率为10.6%, PM_{2.5}超标率为18%, PM₁₀超标率为17%。从颗粒物质量浓度多年变化来看, 2007—2013年金沙站大气颗粒物质量浓度属于上升趋势, 2013年至今质量浓度呈现下降趋势, 风向风速也在一定程度上影响颗粒物的来源。

关键词: 本底站, 空气质量, 颗粒物, 臭氧, 变化特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.009

Analysis of Variation Characteristics of Air Quality and Particulate Matter Concentration at Jinsha Atmospheric Background Station

Wu Dongqiao^{1,2}, Zhou Deng^{1,2}

(1 Meteorological Bureau of Xianning City, Xianning 437100 2 Jinsha National Atmospheric Background Station, Wuhan 430074)

Abstract: Based on the PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentration data from 2007 to 2018, and the reactive gas data from March 2019 to June 2019 from Jinsha National Atmospheric Base Station, which is a representative station in Central China, this study evaluated the overall air quality in Central China and the variation characteristics of particulate concentration and analyzed its influencing factors. The results showed that daily maximum and average values of particulate matter concentrations of CO, SO₂, NO and NO₂ reached the first-class standard, but daily average values of O₃, PM_{2.5} and PM₁₀ exceeded the national air quality standards of 10.6%, 18%, and 17%, respectively. The annual variations of particulate matter concentrations presented an upward trend from 2007 to 2013 and a downward trend from 2013 to the present. This study also found that the source of particulate matter is partly affected by wind directions and wind speeds.

Keywords: atmospheric background station, air quality, particulate matter, ozone, variation characteristics

0 引言

金沙国家大气本底站位于湖北省咸宁市崇阳县, 海拔750 m, 是我国7个成型的本底站之一。大气本底站监测的是(排除局地环境影响的)整个大气环境混合均匀之后的平均状况, 金沙国家大气本底站能对华中区域的大气成分状况进行连续实时的观测。金沙国家大气本底站从2006年开始气溶胶(PM_{2.5}、PM₁₀)的在线观测, 2019年2月开始反应性气体臭氧、二氧化硫、一氧化碳、氮氧化物的在线观测, 空气质量由颗粒物质量浓度与反应性气体质量浓度进行综合评价。

1 资料与方法

颗粒物资料采用位于金沙国家大气本底站的GRIMM180颗粒物监测仪探测到的PM₁₀、PM_{2.5}数据,

资料时段为2006年11月—2019年5月, 数据为5 min一组, 资料整体上连续性较好, 在数据分析上做了质量控制, 用于计算小时平均值的有效数据样本量不低于60%, 日平均采用的有效数据样本量不低于75%。

反应性气体资料采用2019年3月1日—6月30日数据, 每分钟一组数据, 统计计算到小时平均值, 然后再统计24 h平均浓度。

2 空气质量状况分析

《环境空气质量标准》(GB3095-2012)规定2016年1月1日起在全国实施。其中, 自然保护区、特殊保护区域按一级标准, 居住区、文化区、工业区、农村地区按二级标准^[1]。反应性气体数据采用的时间段为2019年3月1日—6月30日, 颗粒物质量浓度数据年平均采用时间段为2007—2018年, 颗粒物质量浓度24 h平均值采用时间段为2014年6月—2018年12月。反应性气体及颗粒物质量浓度统计结果见表1。

反应性气体CO、SO₂、NO、NO₂质量浓度其24 h

收稿日期: 2019年7月8日; 修回日期: 2019年11月7日
第一作者: 吴栋桥(1985—), Email: 241082016@qq.com
通信作者: 周登(1983—), Email: 48196170@qq.com

平均最大值达到一级标准,部分日数臭氧质量浓度超过一级标准,臭氧日超标率10.6%。 $PM_{2.5}$ 质量浓度日超标率为18.0%, PM_{10} 质量浓度日超标率17.0%。

从空气质量状况来看,对空气质量影响较大的为颗粒物及臭氧,臭氧质量浓度超过一级标准的日数较少,且超出范围不高。颗粒物质量浓度超标率较高, $PM_{2.5}$

年平均浓度无法达到一级标准 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$,只能达到二级标准 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$,二级达标率为83.3%。

从反应性气体质量浓度变化特征来看, CO 、 SO_2 、 NO 、 NO_2 远低于一级标准,说明金沙本底站本地空气污染源极少,臭氧的浓度有少部分超过一级标准。臭氧的主要来源为闪电、太阳的紫外辐射、臭氧的VOCs前体物(氮氧化物等),另有研究表明研究人员表示,臭氧水平上升与 $PM_{2.5}$ 污染的相应减少有直接关系。空气中的颗粒物能吸附化学自由基,以阻止臭氧的产生。当 $PM_{2.5}$ 浓度降低,细微颗粒减少时,对反应物的吸附量也会减少,最终导致大气氧化性增加,促使VOCs和 NO_x 转化成了臭氧。

3 颗粒物浓度变化特征分析

3.1 颗粒物质量浓度年变化特征

由图1可以看出,2006—2013年,金沙站大气颗粒物浓度属于上升趋势,2013年至今,年平均质量浓度呈现下降趋势。

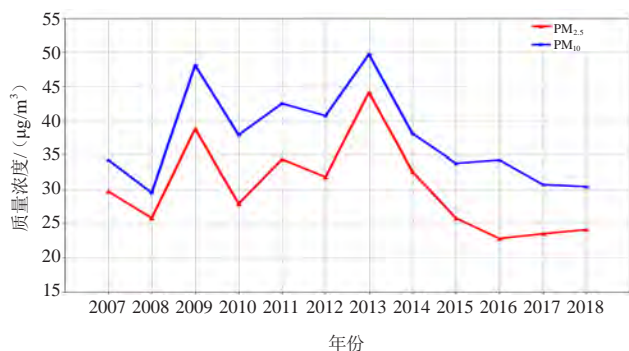


图1 2007—2018年颗粒物($PM_{2.5}$ 和 PM_{10})质量浓度年平均变化特征

Fig. 1 Annual average variations of particulate matter concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ during the period from 2007 to 2018

表1 空气质量标准与金沙本底站空气质量(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 其中 CO 浓度单位为 mg/m^3)统计
Table 1 Air quality standards and statistics of air quality (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$, except CO with an unit of mg/m^3) at Jinsha atmospheric background station

污染物项目/浓度/	平均时间	一级标准	二级标准	平均值	最小值	最大值	样本数	一级达标率	二级达标率
SO_2	24 h	50	150	9.88	1.89	25.24	119	100%	100%
	1 h	150	500	0.82	0.35	10.03	2762	100%	100%
NO_2	24 h	80	80	9.88	1.89	25.24	119	100%	100%
	1 h	200	200	9.89	0.58	33.07	2762	100%	100%
CO	24 h	4	4	0.18	0.02	0.86	119	100%	100%
	1 h	10	10	0.30	0.13	5.43	2762	100%	100%
O_3	日最大8 h平均	100	160	56.9	1.53	133.62	119	89.4%	100%
	1 h	160	200	57.31	1.26	165.25	2762	99.97%	100%
$PM_{2.5}$	年平均	15	35	29.7	22.8	44.1	12	0%	83.3%
	24 h	35	75	25.5	2.0	148.4	1257	82%	96.3%
PM_{10}	年平均	40	70	37.5	29.5	49.7	12	66.6%	100%
	24 h	50	150	35.3	2.2	210.0	1257	83%	97.7%

颗粒物质量浓度在2013年达到极值, $PM_{2.5}$ 年平均质量浓度为 $44.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} 年平均质量浓度为 $49.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$,2013年后逐渐降低,至2015年后 $PM_{2.5}$ 质量浓度降为 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下,最低年份均值出现在2016年为 $22.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2015年以前 $PM_{2.5}$ 质量浓度在 $25.8 \sim 44.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$,2016年后 $PM_{2.5}$ 质量浓度在 $22.8 \sim 24.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。自2013年以来,我国加大力度解决空气污染问题,从数据可以看到,华中区域颗粒物浓度的减少有明显的改善效果,2014年以后 $PM_{2.5}$ 年平均质量浓度小于 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的二级标准。

3.2 颗粒物质量浓度月变化特征

如图2所示, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 月变化趋势基本一致,呈夏季低而冬季高的特点^[2],最低月平均出现在2017年6月($11.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $12.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$),月均值最高出现在2013年1月($66.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $77.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$),主要是因为夏季气温高,有利于大气污染物的扩散,冬季容易出现逆温层,不利于近地面污染物扩散^[3]。

3.3 颗粒物质量浓度日变化特征

金沙 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 质量浓度的逐时变化趋势基本一致,呈波动变化(图3)。从00时(北京时,下同)至05时缓慢上升,05时达到日峰值($24.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $34.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$),06时后两种粒径的大气颗粒物缓慢下降,分别在13时和15时达到日谷值($20.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $28.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$),14时至夜间,大气颗粒物质量浓度逐渐上升,属于典型的昼低夜高的变化特征。

4 颗粒物质量浓度受气象要素的影响

4.1 风的影响

以颗粒物质量浓度及风向风速作图,数据采用2014年6月—2018年12月地面气象风数据及颗粒物质量浓度数据。

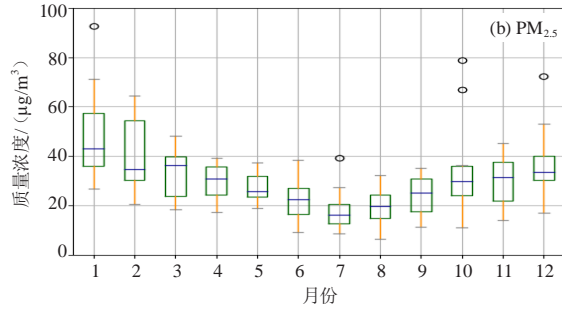
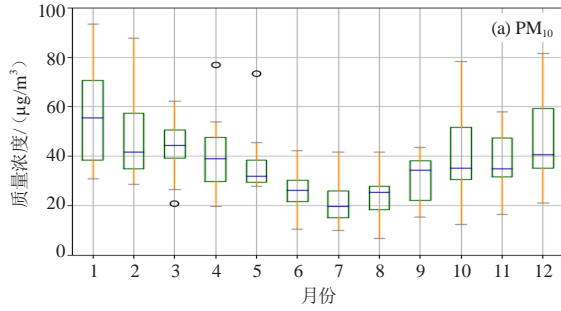


图2 颗粒物 (PM_{2.5}和PM₁₀) 质量浓度月平均变化特征
Fig. 2 Monthly variations of particulate matter concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5}

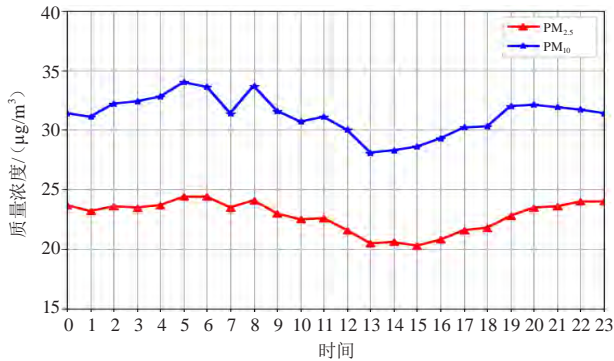


图3 颗粒物 (PM_{2.5}和PM₁₀) 质量浓度24小时变化特征
Fig. 3 Diurnal variations of particulate matter concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5}

风向决定了污染物输送的方向,而对污染物的稀释扩散程度很大程度取决于风速,从图4中可以看到出现系统性北风、东风时金沙站PM_{2.5}、PM₁₀质量浓度要明显高于其他风向,且随着风速的增加,大气污染物颗粒物浓度减少并不明显,这是因为起北风时,气流经过上游距金沙站90 km的武汉市,另外金沙站的东部30 km处为咸宁市中心城区,人口较为密集,工业化程度较高,对东向的颗粒物来源有较大贡献。而其他风向,随着风速的增加,PM_{2.5}、PM₁₀质量浓度都小于35 µg/m³^[4]。

5 结论

1) 影响金沙本底站空气质量污染物主要是颗粒物及臭氧,按《环境空气质量标准》一级标准,其中颗粒物PM_{2.5}日超标率为18.0%,颗粒物PM₁₀日超标率为17.0%,臭氧日超标率为10.6%。

2) 金沙本底站颗粒物质量浓度2013年达到峰值后逐渐降低,最低年份均值出现在2016年,PM_{2.5}为22.8 µg/m³。2015年以前PM_{2.5}浓度在25.8~44.1 µg/m³,2016年后PM_{2.5}浓度在22.8~24.1 µg/m³。颗粒物质量浓度年平均状况有明显的改善。

3) 金沙本底站颗粒物质量浓度有明显的季节性,冬高夏低。

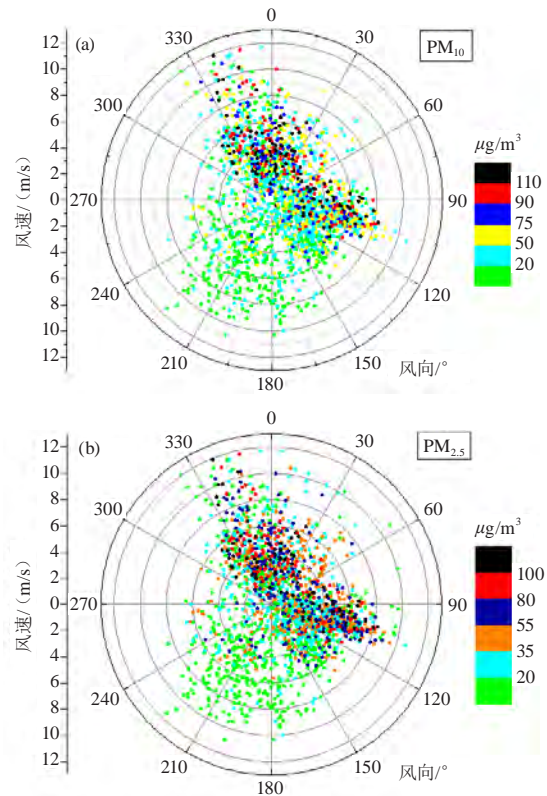


图4 金沙站颗粒物 (PM_{2.5}和PM₁₀) 质量浓度与风向风速的关系

Fig. 4 Distributions of particulate matter concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} in different wind directions and wind speeds at Jinsha Station

4) 风向影响金沙本底站颗粒物来源,当风向为北风或东风时台站颗粒物浓度较高,在其他风向上风速的增加会导致颗粒物质量浓度的明显减少。

参考文献

- [1] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局.环境空气质量标准(GB3095-2012).北京:中国标准出版社,2012.
- [2] 吕梳梳,李兰.PM_{2.5}污染特征及气象要素的影响分析.生态环境学报,2018,27(11):2073-2080.
- [3] 岳毅,李金娟,马千里.临安本底站2010-2015年PM₁₀污染特征及影响因素分析.中国环境科学,2017,37(8):2877-2887.
- [4] 周登,吴涛涛,贺文煌,等.夏末秋初金沙区域大气颗粒物浓度的变化特征.长春理工大学学报,2014,37(3):155-159.

金沙大气本底站酸雨观测质量考核的质量控制

魏华兵 周登 章帆

(湖北省咸宁市气象局, 咸宁 437100)

摘要: 酸雨水样测量结果的准确性对于研究酸雨时空分布、治理和防治十分重要。湖北金沙大气本底站现用质量控制的极值法和比较法, 无法保证酸雨观测数据的准确度。结合金沙大气本底站多年的考核工作情况, 从酸雨样品考核的目的和评分标准、测量误差的分类、酸雨测量误差的来源等方面进行分析, 提出酸雨测量的质量控制方法, 有利于台站提高酸雨观测质量的提高。

关键词: 金沙大气本底站, 酸雨质量, 质量控制

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.010

Quality Control of Acid Rain Observation Quality Assessment at Jinsha Atmospheric Background Station

Wei Huabing, Zhou Deng, Zhang Fan

(Meteorological Bureau of Xianning City, Xianning 437100)

Abstract: The accuracy of measurement results of acid rain water samples is very important for the study of acid rain spatial and temporal distribution, treatment and prevention. Extreme value method and comparison method of quality control currently used in Jinsha atmospheric background station cannot ensure the accuracy of acid rain observation data. Combining with the assessment work of Jinsha atmospheric base station for years, we analyzed the purpose and criteria of acid rain sample assessment, the classification of measurement errors and the sources of acid rain measurement errors, and introduced the quality control method of acid rain measurement, which is conducive to improving the quality of acid rain observation at weather stations.

Keywords: Jinsha atmospheric background station, acid rain quality, quality control

0 引言

酸雨是指 $\text{pH} < 5.6$ 的大气降水, 主要是因人类生产活动排放造成区域降水酸化的一种污染现象^[1]。随着工业发展、城市化进程加快、化石能源消耗的增加, 我国现已是继欧洲和北美后的全球第三大酸雨区^[2], 日益严重的酸雨对生态系统的影响巨大。

中国气象局从1989年开始逐步建立了覆盖全国的酸雨监测网^[3], 酸雨观测数据成为大气污染防治和酸雨治理的重要科学依据, 其数据的准确性十分重要。目前, 台站对酸雨观测中水样测量的 pH 值和 K 值的质量审查控制方法, 多采用极值法和比较法^[4-6]。极值法是以台站历史极值来判断酸雨测量值的合理性, 比较法是根据不同天气系统下台站 pH 值的差异性来判断酸雨测量值的准确性。在实际应用中, 这两种方法往往只能分辨测量结果的粗大误差, 无法保证酸雨观测数据的准确度。为了确保酸雨观测资料的准确性和可比性, 中国气象局业务部门每年都要组织一次全国酸雨

观测质量样品考核^[3], 以便发现台站酸雨观测的各种问题, 提高台站酸雨观测质量。结合金沙大气本底站多年工作实际, 本文从酸雨样品考核的评分标准、仪器性能及误差原因、测量误差的分类和控制措施方面提出一些思考。

1 酸雨观测质量样品考核目的和评分标准

酸雨观测质量样品考核是一个综合性检验方法, 其中, 对考核水样 pH 值和电导率(K 值)的测量是样品考核的重要内容。业务部门下发的酸雨考核水样是经专业实验室集中配置的, 一共下发三个样品, 台站要在规定时间内完成样品水样的 pH 值、 K 值以及台站测量用纯水 K 值的测量, 并按要求上报测量报告^[7]。金沙本底站常年是酸性降水, 多年来下发给金沙本底站的考核样品 pH 值约在 $3.5 \sim 7.0$, 电导率 $K < 500.0 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

酸雨观测质量样品的考核办法是采用标准偏差法来评定考核等级^[3]。测量报告中的测量结果在 ± 1 、 ± 2 和 ± 3 倍标准偏差内, 分别得5、4和3分, 超过3倍标准偏差时, 得0分。累计2个考核样品的得分 ≥ 9 分, 考核成绩优秀; 累计得分6~8分, 考核成绩合格; 累计得分 < 6 分, 考核不合格。标准偏差法表明

收稿日期: 2019年7月12日; 修回日期: 2020年2月10日
第一作者: 魏华兵(1970—), Email: hbcwhb@163.com

的是同一样品多次测量结果的离散程度,根据概率统计的规律^[8]:测量结果在 ± 1 、 ± 2 和 ± 3 倍标准偏差内的概率分别为68.3%、95.5%和99.7%。酸雨观测样品在样品不被污染的情况下,性能正常仪器测量结果的随机偏差是不会超过 ± 3 倍标准偏差的。因此,在酸雨样品的测量中,使用性能正常的仪器和采取避免样品污染的操作方法尤其重要。

2 仪器的测量原理和误差因素

目前,中国气象局指定国家级酸雨观测台站使用的酸雨测量仪器是上海雷磁pHS-3B型精密pH计和DDS-307型电导率仪^[9]。

2.1 精密pH计测量原理

电位测量法是酸度计测量酸碱度最精确的方法。上海雷磁精密pH计采用测量电极电位差、将微小电位差转换成电流信号的方法来测量样品的酸碱度,其pH计的测量部份由参比电极、玻璃电极和电流计三个部件构成^[7]。

测量时,在测量溶液中的玻璃电极与参比电极,构成了化学上的一个原电池装置,电池的电位等于玻璃电极与参比电极电位之和。在恒温下(如25℃),电池电位随溶液的pH值不同而变化,变化信息经信号放大后,通过电流表指针偏转或者pH计数字显示,来表示溶液的pH值。从其测量原理知道,影响精密pH计测量误差的主要因素有:测量溶液的环境温度变化和仪器测量电极的性能变化。

2.2 电导率仪测量原理

电导率表征溶液导电性能,常用测量方法包括电磁、电极和超声波电导率测量法。上海雷磁DDS-307型电导率仪采用电极电导率测量法,它依据电解导电的原理,通过电导仪插入溶液中的两个电极,测得电极间的电阻,由欧姆定律可求得电导。

电导率的测量结果与电阻和电极常数有关。温度通过影响溶液中离子活动率来影响电阻测量值,电极常数与电极间距和截面积的关系密切。因此,影响电导率仪测量误差的主要因素也是环境温度和仪器测量电极性能的变化。

3 测量误差的分类和控制措施

测量误差是测量结果与真实值之间的差异,依照误差的来源可以分为粗大误差、系统误差和随机误差。在酸雨测量中,测量误差可能来自操作不规范、流程失当、仪器性能下降、实验室环境不稳定等多种因素^[10-14]。控制误差是提高考核成绩的重要途径,而系统误差和随机误差是不可能避免的。所以,控制测量误差要从避免粗大误差、降低系统误差、减小随机误差三方面采取措施。

3.1 降低系统误差措施

系统误差主要来自于酸雨测量仪器。pH计和电导

率仪都是精密电子设备,仪器的性能下降是造成测量误差系统增大的重要原因。酸雨样品在测量前,要仔细检查仪器的电极,校验仪器的测量准确性,使用稳定性良好的测量仪器,是降低酸雨测量系统误差的关键。

3.1.1 仪器的外观检查

感应器件老化或者仪器其他部件受潮会增大仪器的偏差,要注意使用在检定有效期内的仪器。在检查pH计测量仪外观时,pH计的复合电极应透明无裂纹,前端玻璃球膜中的溶液应充满无气泡。在检查DDS-307电导率仪外观时,要注意导电电极的极片外形应正常无损伤,表面清洁干燥无异物,电极支架和导电电极固定牢靠,电极插头和仪器的电极插座与外界的绝缘性好,仪器接地良好。

3.1.2 仪器的性能校准

pH计和电导率仪在酸雨样品测量前,要对仪器性能进行校准,为了保证校准时示值的稳定,可对仪器进行30 min预热。

pH计要进行两点校准,即选择两种标准缓冲液:一种是pH7标准缓冲液,另一种是pH9标准缓冲液或pH4标准缓冲液。先用pH7标准缓冲液对pH计进行定位,再根据待测溶液的酸碱性选择第二种标准缓冲液。如果待测溶液呈酸性,则选用pH值=4.00标准缓冲液;如果待测溶液呈碱性,则选用pH值=9.18标准缓冲液。先在小烧杯中加入中性标准缓冲液(pH值=6.86),浸入电极,轻轻转动或摇动小烧杯,使溶液均匀接触电极,读取溶液的pH值,校对pH计,使其读数与标准缓冲液的pH值相同且稳定,从溶液中取出电极,用蒸馏水淋洗充分;再将小烧杯中换入另一标准缓冲液(pH值=4.00或者pH=9.18),浸入电极,重复上面操作步骤并稳定读数,校正完毕,用蒸馏水冲洗电极和烧杯^[7]。由于pH值与温度有关,在校准时要注意将仪器的温度指示调整到标准溶液的相应温度值,不得在校准过程中随意变动。

电导率仪测量前要正确设置电极常数。其设置方法如下:读取电极上标注的电极常数值,按模式键到“常数”进入常数设置状态,按“ Δ ”或“ ∇ ”键,在温度数值区选择“10、1、0.1、0.01”档数值,如果读得的电极常数为1.025,则选择“1”并按“确认”键,按“ Δ ”或“ ∇ ”键,调动电导率数值为“1.025”,按“确认”键保存,仪器返回测量模式,校准完毕^[14]。

3.2 避免粗大误差措施

在仪器性能正常的情况下,操作不规范可能致使测量结果“失真”,造成测量结果出现粗大误差。从金沙本底站酸雨测量工作的情况来看,粗大误差主要来自于测量样品的二次污染和不正确的测量方法。

3.2.1 二次污染的途径和防范措施

实验室测量的酸雨样品在取用、存放,测量用器

皿的洗涤、擦拭, pH值、K值的测量等环节中, 不规范的操作造成样品二次污染的可能性大, 造成测量结果“失真”。测量中要注意以下操作:

1) 测量前, 检查所用器皿(烧杯、清洗水瓶、表面皿等)和测量电极应保持清洁、干燥、无异物粘附; 用自来水洗净双手后擦干, 可以戴上医用橡胶手套, 防止手上汗渍污染器皿和仪器; 酸雨样品在进行温度平衡和取用测量小样后要盖好样品瓶, 不要敞口; 样品转移到烧杯后, 要加盖表面皿, 防止异物落入。

2) 每次对酸雨样品的测量中, 测量用的烧杯、仪器测量电极要按规范用蒸馏水(或纯净水, $K < 10 \mu\text{s}/\text{cm}$)多次冲洗烧杯, 除去沾附在上面的残留样本液体或杂物, 冲洗好的烧杯要倒扣在滤纸上晾干水分, 仪器电极可用滤纸轻轻吸干水份。

3) 测量时, 要等到仪器示值稳定后快速读数, 减少电极浸入时间, 防止电极因测液沾附而污染。

3.2.2 不当测量方法的防范措施

在实际测量酸雨考核水样的pH值和K值时, 由于因理解不清晰、操作不细致、流程杂乱、测量方法不当等情况, 造成测量结果“失真”。操作中要注意以下几点:

1) 要注意待测样品溶液的温度与校准用标准缓冲液同时进行温度平衡, 测量时两者温度相差要在 2°C 范围内, 确保标准缓冲溶液pH值标校时的准确性。

2) pH计参比电极内部的填充液高度应在 $1/2 \sim 2/3$ 高度, 使参比电极充分浸入其中, 填充液太少时应补充加入饱和氯化钾溶液。玻璃电极的测量端平时要浸在 3 mol/L 的氯化钾溶液中, 测量前用蒸馏水清洗干净, 并用滤纸轻轻吸干残液。

3) 在pH计或电导率仪的测量电极插入被测溶液中时, 要将电极完全浸泡在被测溶液中, 勿使电极与溶液接触面出现气泡, 电极也不要与容器壁接触。

4) 对酸雨样品进行pH值测量时, 要使用温度补偿。在测量前, 要将pH计后面板的温度补偿开关放到自动档位置, 在测量中始终保持, 并读取稳定示值。

5) 电导率仪进行自动温度补偿时, 要将温度补偿值调到与样品溶液温度一样后, 读取稳定的K值; 未经温度补偿测得的K值, 不能直接作为测量结果, 应该经过查表求算订正。

6) 测量时要遵循“先测K值, 后测pH值”的原则, 如果先测pH值, 可能会由于玻璃电极内的溶液渗入样品溶液, 影响K值测量。

3.3 减小随机误差措施

酸雨样品测量中的随机误差是不可避免的, 它产生的原因复杂, 比如实验室周边的电磁场环境的微变, 实验室内的空气扰动、气压、湿度的变化, 测量

人员感觉和反应的不同变化等。酸雨测量中, 要注意从以下方面来减小随机误差。

1) 测量实验室应保持清洁卫生, 操作台面和地面应保持干燥; 室温控制在 $10 \sim 30^\circ\text{C}$, 实验室应配置通风或空调设备, 避免潮湿, 通风口要远离实验操作台; 实验室要配备稳定的交流电源(220 V , 50 Hz)和功率 $\geq 500 \text{ W}$ 的稳压电源, 不要使用有震动或会产生较强电磁的设备; 实验室禁止非工作人员进入, 禁止吸烟, 禁止带入食品、饮料等; 测量过程中, 工作人员应穿戴工作服。

2) 测量中, 仪器应放置在固定的位置, 不要随意搬动; pH计可以多次采用两点校准的方法来提高仪器的稳定度; 在pH值或K值读数时, 要待示值稳定后读取。

3) 尽量保留部分考核样本, 进行全部流程的复测工作。

4 结论

综上所述, 控制测量误差不仅是提高酸雨观测质量样品考核成绩的有效方法, 也是保证酸雨观测数据准确性的内在要求。台站观测员要理解酸雨观测质量样品考核中标准偏差法对测量数据准确性控制的要求和内涵, 了解仪器的工作原理和性能, 弄清测量误差的可能来源, 从酸雨观测仪器检查、仪器维护、测量操作方法、《酸雨观测规范》和酸雨质量考核制度等有关业务技术规定中, 不断分析总结经验, 找准对可能增大测量误差的技术控制措施, 在酸雨测量工作中严格执行, 才能有效保证酸雨观测数据测量的准确性, 从而能提高酸雨观测样品质量考核成绩。

参考文献

- [1] 中国气象局. 酸雨观测业务规范. 北京: 气象出版社, 2005.
- [2] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状. 环境科学研究, 2010(5): 527-532.
- [3] 丁国安, 徐晓斌, 王淑凤, 等. 中国气象局酸雨网基本资料数据集及初步分析. 应用气象学报, 2004, 15(S1): 85-94.
- [4] 丁善文, 王德众, 王洪明, 等. 酸雨pH值测量中的质量控制方法. 山东气象, 2003, 23(4): 52.
- [5] 陈海辉, 覃丽娜, 邹定光, 等. 酸雨报表审核应注意的事项. 广东气象, 2009, 31(6): 65-66.
- [6] 杨丽娟, 刘景涛. 浅谈编制酸雨记录月报表的工作流程及技巧. 气象研究与应用, 2012, 12, (S2): 103-104.
- [7] 劳世毓, 谢仁忠, 冯克志, 等. 酸雨观测仪器的检查和维护. 气象研究与应用, 2012, (6): 266-267.
- [8] 韩进宏. 精密测量中标准偏差的计算方法及应用. 淄博学院学报, 2002, (3): 68-70.
- [9] 韩军, 史润琴, 白杰, 浅谈如何做好全国酸雨观测质量样品考核工作. 农业与技术, 2012, (7): 136.
- [10] 兰敬辉. 溶液电导率测量方法的研究. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [11] 张婷. 酸雨pH值测量误差产生原因及其准确性提高措施. 山东气象, 2004, 24(2): 52.
- [12] 曾华萍, 戴文娟. 酸雨pH值测量误差产生原因及解决方法. 气象水文海洋仪器, 2007, (2): 14.
- [13] 陈海辉. 如何避免酸雨观测的数据失真. 广东气象, 2008, 30(4): 61.
- [14] 邓红, 黄晨, 兰微波. 酸雨测量值准确性与操作方法的关系. 内蒙古气象, 2005, (3): 42.

基于影响力指标分析“风云卫星” 公众号的服务现状

贾煦 肖萌 咸迪

在缺乏用户直接意见反馈的情况下，由公众号文章所触发的用户行为数据是公众平台传播途径分析最客观的信息来源，是评估公众号影响力的主要依据。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.011

随着国民经济和社会的快速发展，公众获取气象信息的渠道不仅限于电视、广播、报纸、杂志等传统传播信息的媒介，在气象服务需求日渐加大的今天，微博、微信等新媒体的出现可以更加便捷现代人获取各种气象信息。微信公众平台与传统媒体相比，不仅可以存储大量的用户，而且传播信息的速度也非常快，其入门槛也比较多。

本文基于公众平台影响力指标分析风云卫星公众号在卫星气象服务中的应用现状和发展趋势，在公众平台发布信息现有的信息基础上，设计3个基于微信平台的信息传播影响力指标，并对其进行层次聚类分析，在契合微信用户活跃点与微信平台影响力的基础上，推广和传播风云卫星的品牌形象。

1 微信公众平台运营现状

随着风云系列卫星完成静止、极轨两个系列气象卫星的更新换代，我国的气象卫星事业进入了新的发展阶段，风云卫星在气象、环保、农业、重大服务保障、防灾减灾等多个领域发挥了重要作用^[4]。依托风云气象卫星的微信公众平台，在运营思路定位于为行业用户及公众提供气象预警信息、气象卫星监测以及实用有趣的卫星气象科普知识等内容。其中发布的图文消息在编写和排版方面均迎合新媒体传播的阅读特点。同时公众号具有很强的互动性，针对用户的特殊需求，提供卫星数据与遥感监测产品下载链接，同时根据时效更换专题模块，以便用户端收到最新的风云卫星相关知识。

自2017年2月微信公众平台正式运营以来，截至2018年12月31日，发送图文消息294条，累计关注人数达到6053人。

该公众平台的消息构成以卫星气象监测信息为主、行业资讯与气象科普为辅，公众号发布的大部分

内容时效性强，行业资讯多以转发其他公众平台发布的讯息，为用户提供气象卫星应用的最新发展情况。

表1为已发布文章中阅读量最大的10篇图文消息。吸引公众阅读的文章普遍具有三个特点：一是相关性强，均是与风云卫星即时事件强相关的权威消息，能够帮助读者获取最新的风云卫星资讯；二是打破常规、突破认知，无论是从卫星视角看到沙尘、还是“微信变脸”“台风辟谣”，都充分调动了读者的好奇心，提升了公众在气象卫星及其应用方面的认知水平；三是兼顾专业性和趣味性，在有限的篇幅内多以图片、视频等多媒体视觉传达为主，具备贴近公众号用户碎片化阅读、减压阅读的特点。

表1 “风云卫星”公众号最受欢迎文章TOP10

文章标题	图文阅读次数	图文送达人数	图文打开率*	净增粉丝数
微信启动页变脸，风云四号拍出新地球	17685	1596	979%	180
风云四号卫星监测今年以来北方最强沙尘天气	16356	642	2231%	264
“摩羯”刚走，“赫克托”又来了	13389	4550	290%	7
风云说：一张送给风云卫星的生日报纸	4466	4755	79%	57
风云四号卫星天气应用平台（SWAP2.0）测试版上线啦！	4054	3830	85%	48
重磅！风云四号A星已正式投入业务运行	3521	3702	82%	0
网络台风高清照不可信，气象卫星与高分卫星真实记录“山竹”形态	3505	5069	63%	152
风云卫星带你看看祖国母亲有多美！	3122	2786	99%	44
迎战台风“山竹”，星探登陆时刻	2853	5069	50%	152
风云三号D星仪器总览	2754	2364	99%	72

*注：图文打开率为图文阅读人数与图文送达人数之比。

2 公众平台用户关注情况

本文对国内各省份微信关注用户的地理分布数据进行优化，进行定量分级显示，获得公众号关注用户的全国各省份分布图。如图1所示，截至2018年12月

收稿日期：2019年7月10日；修回日期：2019年10月21日

第一作者：贾煦（1990—），Email: jiax@cma.gov.cn

31日,北京市的累计关注用户数达到1658个,其次是广东省用户数523个和上海市用户数433个,与其他省份用户关注数相差较大。

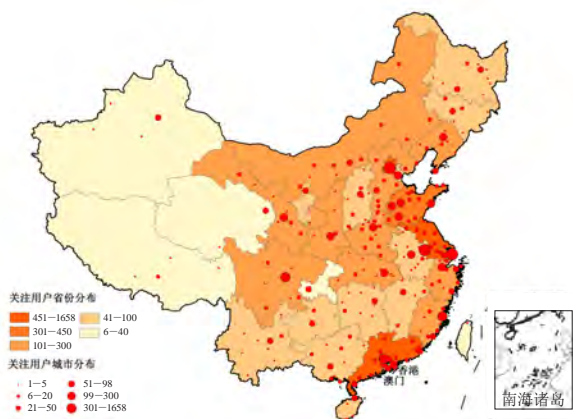


图1 风云卫星公众号关注用户地区分布

由于自然条件、经济发展、文化传统的不同,不同地域的微信用户行为存在差异。如北京、上海、广州这些地区经济实力雄厚,人口密度大的城市,其微信用户分布较为密集且活跃,同时在主汛期受气象灾害影响较大的地区,需要气象卫星进行应急监测的情况,公众更有意主动去访问“风云卫星”推送的消息,进而产生大量的用户数。图1是公众号关注用户的全国城市分布图。图中可以看出中国东南沿海省份与华北等地区用户数较为密集。可以初步判断这些区域常年存在固定的气象灾害,如台风、沙尘等天气事件,其受灾地区的用户对卫星气象监测服务信息更加敏感,在推送卫星气象的公众服务信息中,应增强发布应急事件和灾情信息的主动性和及时性,从而扩大卫星气象服务的应用效益。

3 微信公众平台影响力分析

基于微信公众平台管理数据统计数据,获取2017年3月—2018年12月发布的图文信息数据资源表,对“风云卫星”公众号用户的访问和传播行为进行剖析,并构建影响力指标,从传播途径和传播效益两方面进行公众号影响力分析。为了更好地掌握卫星气象服务信息的传播情况,在数据中除去从其他平台转发类的图文消息,汇总原创性图文消息共231篇。

在缺乏用户直接意见反馈的情况下,由公众号文章所触发的用户行为数据是公众平台传播途径分析最客观的信息来源,是评估公众号影响力的主要依据。

本文根据用户不同形式的阅读方式,通过定义公众号图文消息的活跃度、忠诚度与分享欲并进行量化,其3个指标反映用户访问公众号图文消息的行为习惯,即用户的“所作所为”可以反映公众平台的运营状况与影响程度。

活跃度由会话阅读人数和关注用户数共同决定,如公式(1)所示,表示主动打开公众号进行阅读的人次比例;忠诚度由会话阅读次数和会话阅读人数共同决定,如公式(2)所示,表示用户在公众号内平均阅读的文章数量;分享欲由通过朋友圈阅读的次数、通过好友转发阅读的次数和会话中阅读访问的人数共同决定的,如公式(3)所示,通过朋友圈与转发获得的访问数与主动打开人次做比,可以得出一个比较可信的分享欲指数,也可理解为图文内容的传播性指数。三个影响力指标从公众号的用户兴趣触发、习惯性阅读和转发分享三个传播途径方面确立了公众号的影响力水平。

$$\text{活跃度} = \frac{\text{会话阅读人数}}{\text{关注用户数}}, \quad (1)$$

$$\text{忠诚度} = \frac{\text{会话阅读次数}}{\text{会话阅读人数}}, \quad (2)$$

$$\text{分享欲} = \frac{\text{朋友圈阅读次数} + \text{好友转发次数}}{\text{会话阅读人数}}. \quad (3)$$

计算每篇图文的3个影响力指标值,各指标随时间变化的情况如图2所示。总体上,忠诚度与活跃度在不同文章之间差异较小并且在时间尺度上有一定变化规律,分享欲在不同文章间存在量级上的差异,与时间变化趋势不显著。忠诚度随着时间的增长,总体呈增长趋势,说明一些用户会多次阅读同一篇文章,在一定程度上表明公众号发布的消息对这些用户具有实用价值。活跃度随着时间的增长呈降低趋势,说明随着用户总数的增长,具有会话阅读习惯的用户数增长速度低于总用户增长速度,可以得知文章传播的主要途径并非公众号平台推送。而分享欲大部分时间偏低(90%以上小于10),分享欲极高的一些文章对应的活跃度和忠诚度也远高于平均水平,主要是由于这类文章更具有“爆点”特性,如“微信变脸”事件,从而以“转发”和“分享”的形式获得更广泛的传播。

4 效益分析

公众号的传播影响力方面存在一定的时间相关性,但是单篇文章变异性较大,从影响力指标值的分布情况与时间趋势中很难把握公众号的影响力发展规律。因此,本文采用层次聚类方法,进一步研究文章的影响力指标的特征模式,评估不同文章对公众号影响力的效益贡献情况,从而更好地归纳和推断公众号的用户行为、掌握公众号发展现状和未来趋势。

层次聚类方法是根据研究对象的特征对研究对象进行分类的多元统计分析技术,该方法根据样本数据按照其性质上的亲疏程度进行分类,使同类中的样本具有高同质性。凌标灿等利用聚类方法分析各城市消费水平差异的主要影响因素以及差异的变化趋势。陈娟等应用该方法对“知乎”用户群体进行细分,便于

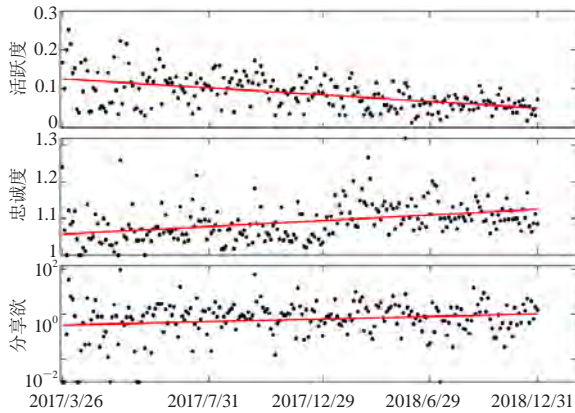


图2 活跃度、忠诚度、分享欲随时间变化趋势

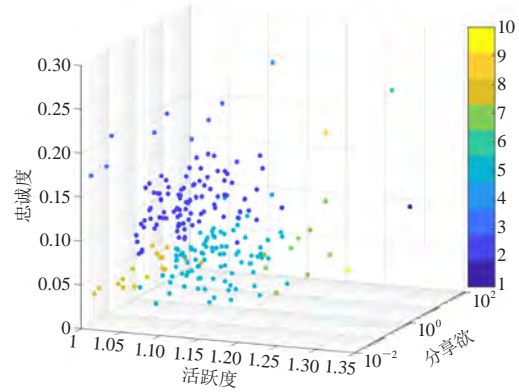


图3 公众号影响力分类示意图

服务商准确锁定目标群体，提供更优质、精确的社会化问答服务。阮光册等利用层次主题结构树探寻检索结果中知识的关联，帮助用户快速地筛选出有价值的信息，进而提供更有深度的知识服务。层次聚类方法有效地将样本量进行多层次多指标的归类，便于挖掘类别间的层次关系。

本文通过计算每篇图文影响力指标的数值与其他所有数值之间的距离来确定图文间的相似程度，距离越小，相似度越高。层次聚类的距离计算和聚类方法多样，根据图2可知，3个传播指标之间存在量级上的差异，且分享欲指标自身变异较大，为此选取具有尺度不变性且考虑指标间联系的“马氏距离”进行聚类。

将所有距离值进行对比，选择其中距离最近的两个数据点进行组合聚类，将合并为同类的样本取其重心作为该类的距离值，迭代这一过程，直到所有样本都聚为一类，并以树状图的形式将每一步的计算结果展现出来，从聚类树的最底层依次组合，形成聚类谱系图（图略）。

可以看出，通过层次聚类，较为相似的3个指标较早聚为一簇，不同簇之间具有较大的差异，且越高层次的聚类，差异越显著，说明越高层次的类之间传播效益的差异越显著，越能提取到具有典型代表性的模式特征。因此，本文设定层次类别为10类，即对完全展开树形图自顶端选取前10个层次，将层次以下的样本视为同一类。通过图3的散点可知，采用马氏距离重心法具有较好的分类效果，231条图文消息根据三个指标的分布较明确，类与类之间差别较显著。

5 结论

本文介绍风云卫星公众平台在卫星气象服务中的应用现状，剖析公众号公众平台信息发布频次、内容题材以及用户关注情况，同时利用影响力指标分析公众号的传播特点和服务效益，并得到以下结论：1）风云卫星公众号运营情况良好，发布内容贴合新媒体用户阅读特点，有利于卫星气象服务信息和专业科普

知识面向公众传播，优质内容获得了较高的社会关注。2）微信公众号关注用户主要集中在大中型城市以及气象灾害频发的个别省份及地区，确定了风云气象卫星宣传的普适性与可读性。3）通过传播途径分析可知，随着时间的推移，公众号有效吸引了忠实用户群体，但公众号推送途径的传播影响力有限，公众号内消息的广泛传播需要依靠转发分享等其他途径实现。4）高质量具有科普性的图文内容或较为特殊的灾害性气象事件更易吸引公众注意力并引发转发分享行为，形成具有高影响力的“热点”消息，可加以利用来增加卫星气象服务信息的宣传影响。

深入阅读

- 陈红妹, 张志强, 2016. 论新媒体新闻的写作特点及发展趋势. 南阳理工学院学报, 8(1): 64-67.
- 陈娟, 吴卓青, 邓胜利, 2018. 基于层次聚类法的“知乎”用户细分与行为分析. 情报理论与实践, 41(7): 110-116.
- 陈周旺, 邱奕超, 2019. 融媒体时代气象微信公众号的运营策略——以“嘉兴气象”为例. 新媒体研究, (6): 52-55.
- 霍甜, 2018. 微信公众号广告中增加用户黏性的策略研究. 韶关学院学报, 39(6): 43-46.
- 李进华, 安仲杰, 2016. 基于地理坐标的微博事件检测与分析. 现代图书馆情报技术, 267(2): 90-101.
- 凌标灿, 魏洪霞, 2017. 各城市消费水平差异层次聚类及因子分析. 华北科技学院学报, 14(1): 110-116.
- 秦慧媛, 2018. 基于影响力调查分析的高校微信公众号编辑策略研究. 齐鲁师范学院学报, 33(5): 146-151.
- 任永乐, 2019. 微信公众号新闻内容的编辑策略分析. 传播力研究, (9): 88-90.
- 阮光册, 任金玥, 2019. 基于主题层次关系的文献检索结果可视化应用研究. 图书馆杂志, 38(5): 71-78.
- 吴静, 2008. 基于层次聚类分析的我国居民收入状况地区比较分析. 经济师, (8): 26.
- 谢燕峰, 王淼, 刘博文, 等, 2019. ArcGIS制图模块在城市用地供应图制作中的应用研究. 北京测绘, 33(5): 570-574.
- 杨军, 咸迪, 唐世浩, 2018. 风云系列气象卫星最新进展及应用. 卫星应用, (11): 8-14.
- 赵成祥, 2018. 探析微信公众号的企业品牌形象传播策略. 新闻研究导刊, 9(3): 177-178.

(作者单位：国家卫星气象中心)

防雷减灾公众服务满意度测评与服务分析 ——以大连市1523份调查问卷为例

■ 王淑一 王赞 邹善勇 李想

公众对于预警信号的等级认识度较低，还不能完全通过红色、黄色、橙色预警信息准确获知雷电灾害的严重程度。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.012

2016年，国务院提出“放、管、服”机构改革指导意见，大连市防雷减灾中心在新要求、新形势下，深入挖掘多种服务渠道，提升服务水平。目前大众对防雷安全的认知度、防雷服务的满意度如何，以及影响其结果的因素又有哪些，是下一步工作需要了解的重要问题。

不少地区对其气象单项服务的需求及满意度调查做了相当多的工作，例如，黑龙江省对农业气象灾害服务需求进行了分析；钦州市对气象灾害影响预报预警业务进行了需求分析与研究；蓟县对地质灾害防治气象服务进行了需求分析及满意度分析。也有部分地区对当地的防雷服务现状进行了分析及满意度调查，例如：福建对新形势下防雷气象短信服务的现状进行了分析及策划；浙江对防雷重点单位雷电短信预警服务进行了满意度调查分析；陕西对防雷减灾技术服务的用户进行了满意度调查分析。目前针对大连市评价公众防雷安全认知度与服务满意度的文献较少。

本文以大连市多行业、多层次年龄群体为调查对象，采用隐变量分析模型（SEM），对防雷减灾认知度、服务满意度及服务需求进行了统计分析，为防雷服务部门建立一套合理的满意度测评模型，从量化的角度分析各影响变量对公众满意度的影响系数。

1 隐变量分析模型的建立

隐变量模型又称为结构方程模型，所研究的变量主要有两种模式：观测变量和潜在变量。隐变量模型包含两个模型：测量模型、结构模型。测量模型是指观测变量与潜在变量之间的模型，结构模型是指潜在变量之间的模型。模型中还引入了外生变量和内生变

量的概念。

本文研究的测评模型主要包含4个因变量：防雷安全公共认知度、公共服务质量感知价值、公众期望及公众对现有服务的满意度。选取防雷安全公共认知度、公共服务质量感知价值、公众期望作为影响公众对现有服务的满意度的三大因素，建立防雷安全服务满意度测评隐变量结构模型，每个潜在变量通过14个观测变量进行评价，见表1。

通过防雷安全认知度与服务满意度测评结构模型各变量的总结，结合具体的实际意义，提出以下假设：

H1：防雷安全公共认知度显著影响公众期望；

H2：公共服务质量感知价值显著影响公众期望；

H3：公众期望显著影响公众对现有服务的满意度；

H4：防雷安全公共认知度显著影响公众对现有服务的满意度；

H5：公共服务质量感知价值显著影响公众对现有服务的满意度。

2 案例分析

2.1 调查对象基本情况

2017和2018年，大连市防雷减灾中心在全市范围开展了防雷安全服务需求问卷调查，近两年的调查，发放调查问卷共计1636份，涉及了七区三地市一县，覆盖了石油化工、旅游景区、学校、港口、航空、通信、电力等16个行业，年龄最小的3岁、最大的78岁。在样本采集上采取随机抽样的方式，综合考虑行业、学历、年龄等影响因素，运用软件SPSS对收集

收稿日期：2019年5月13日；修回日期：2019年8月19日
第一作者：王淑一（1986—），Email: 349299149@qq.com

到的问卷进行整理，对于问题及不合格问卷进行必要的剔除和修正，最终获取1523份有效调查问卷作为分析样本，有效问卷占93.1%。

2.2 数据分析

在本次问卷调查中，采用李克特（Likert）5级量表的形式，该形式是目前普遍采用的一种评分标准，对18个问题指标，4个潜在变量，14个观测变量进行评测，设计成类似“非常满意、比较满意、不太满意、非常不满意”的选项，对应得分分别为“5分、4分、3分、2分、1分”。对于个别

表1 防雷安全认知度与服务满意度测评结构模型的潜在变量和观测变量

潜在变量	观测变量	问题指数
防雷安全公共认知度	关注度	您听说过防雷吗？（P1）
		您现在居住的房子或者办公楼有避雷装置吗？（P2）
		您的家庭或者您周围的人是否遭受过雷击破坏？（P3）
	宣传度	当地气象部门是否会定期到学校或单位检查雷电灾害防护设施？（P4）
		学校或者单位是否开展过防雷知识的相关培训？（P5）
	信息覆盖率	您接收雷电预警信号及其他雷电信息的渠道有哪些？（P6）
	指导性	您认为气象部门提供的雷电预警信号及其他雷电科普知识对您的工作生活有帮助吗？（P7）
防御认识	在遭受雷击后，您认为应该怎样处理？（P8）	
	学校或单位有制定防雷减灾应急预案吗？（P9）	
	重要性	您认为家庭防雷的必要性有多少？（P10）
公共服务质量感知价值	及时性	您认为及时接收雷电预警信号有必要吗？（P11）
	准确性	您认为气象部门提供的雷电预警信号准确吗？（P12）
	精细化	现有的雷电服务信息能满足您日常生产、生活需要？（P13）
	通俗化	您了解雷电灾害预警信号的具体含义吗？（P14）
公众期望	定制性	您愿意根据自己的需要定制更实用的防雷信息吗？（P15）
	预期性	您认为气象部门定期组织雷电知识科普有必要吗？（P16）
	渠道性	您最希望通过以下哪种方式接收雷电预警信号？（P17）
公众对现有服务的满意度	满意度	您认为气象部门提供的雷电安全专项服务满意吗？（P18）

表2 调查对象基本情况

分类	受访者情况	人数	比例/%
性别	男	970	63.7
	女	553	36.3
学历	小学及以下	182	11.9
	初高中	534	35.1
	大学本科	580	38.1
	研究生及以上	227	14.9
年龄	18岁以下	513	33.7
	18~35岁	304	19.9
	36~50岁	447	29.3
	50岁及以上	259	17.1

题目，例如您最希望通过以下哪种方式接收雷电预警信号？也采用相同的打分机制，题目答案设置为“新媒体渠道（如微信）、手机app、短信、传统方式如电视报纸、不需要”。其他类似问题均适当转换为5级量化形式。

运用SPSS统计软件对调查问卷的得分进行整理计算剔除异常与缺省数据，得出此次调查模型中各个观测变量的平均值和标准差，见表3。

2.3 调查结果分析

1) 防雷安全服务的价值体现及公众对现有服务的满意度

从雷电预警信号的发布角度来说，公众对灾害预警发布的及时性满意度最高，说明了气象部门信息发布相对及时，同时准确度也相对较高，但覆盖率却

表3 防雷安全服务的价值体现及公众对现有服务的满意度评分

指标	均值	标准差	方差
关注度	3.91	0.714	0.540
宣传度	3.83	0.709	0.502
信息覆盖率	3.05	0.929	0.925
指导性	3.77	0.941	0.868
防御认识	3.67	0.876	0.773
重要性	3.55	0.740	0.549
及时性	4.11	0.735	0.567
准确性	3.94	0.853	0.749
精细化	3.34	0.890	0.837
通俗化	3.87	0.900	0.824
定制性	3.75	0.883	0.857
预期性	3.43	0.723	0.594
渠道性	4.05	0.931	0.835
满意度	3.71	0.904	0.693

相对偏低，说明有很多公众并没有接收到雷电预警信号，原因大致归于目前雷电预警信号发布渠道比较受限，对公众的生命财产安全产生了较大的隐患。对于雷电预警信号与信息接收渠道，大多数公众倾向于微信、手机app等免费的新媒体渠道。

从公众的防雷安全认知角度来说，公众能充分理解气象用语，理解预警信号的意义，这与我国气象防雷知识的科普密不可分。但是公众对于预警信号的等级认识度较低，还不能完全通过红色、黄色、橙色预警信息准确获知雷电灾害的严重程度。公众对防御认知一般，对于遭受雷击时不能采取及时有效的措施，

对掌握雷电安全知识的重要性没有引起公众足够的重视。公众对信息精细化程度打分较低,说明目前雷电预警精细化服务水平还需要提高。公众对定制雷电监测产品有一定的需求度,但总体上需求度不及预期。

2) 问卷信度和效度检验

问卷调查结果的可靠性、稳定性、一致性需要通过检验问卷的信度来实现,本文采用克隆巴赫系数Alpha (Cronbach's coefficient alpha)、总体相关系数CITC值 (Correlated Item-Total Correlation)、巴赫系数Alpha (Cronbach's coefficient alpha) 进行信度检验。一般而言,CITC值要求不小于0.5、Alpha值以及CR值均不小于0.7,值越大,说明量表的信度越高。

运用SPSS进行信度分析,分析结果表明,各项信度指标均在合理范围内,可见模型所选取的变量稳定性和可靠性较高,数据具有良好的可信度。

2.4 模型拟合评价

运用SAS软件的CALIS可以对隐变量方程模型进行变量参数检验和评价,得到具体的关于防雷安全认知度与服务满意度测评结构模型。为确保模型的合理性,在得到模型的参数估计之后,还要将被估计的影响系数带入模型进行模型拟合度检验,考察模型绝对拟合指数、相对拟合指数和调整指标。拟合结果如下:拟合适配度指数(GFI)=0.968,调整的拟合适配度指数(AGFI)=0.923,接近0.9,模型拟合较好。相对拟合适配指数(CFI)=0.977,增值拟合适配指数(IFI)=0.936,均大于0.9。简约调整后的拟合适配度指数(PGFT)=0.536,大于0.5,表明模型适配度可以结束。

通过拟合指数的大小来评价一个模型的拟合优度,经模型输出结果分析可知,防雷安全认知度与服务满意度测评结构模型具有较好的拟合优度,可以评测公众对防雷安全认知度与服务满意度及其影响因素,具有较好的实际应用意义,见图1。

3 结论与建议

本研究通过实地发放调查问卷,构建了包含4个潜在变量、14个观测变量、18个问题指标的防雷安全认知度与服务满意度测评结构模型,各潜在变量之间存在5种关联,使用SPSS软件进行数据分析表明,模型中各观测变量对潜在变量具有显著影响,建立的隐变量模型经验值具有较好的测评结果;信息宣传度对防雷安全公共认知度的通径系数为0.51,说明信息宣传是否到位对公众的认知度影响较大,扩大防雷信息

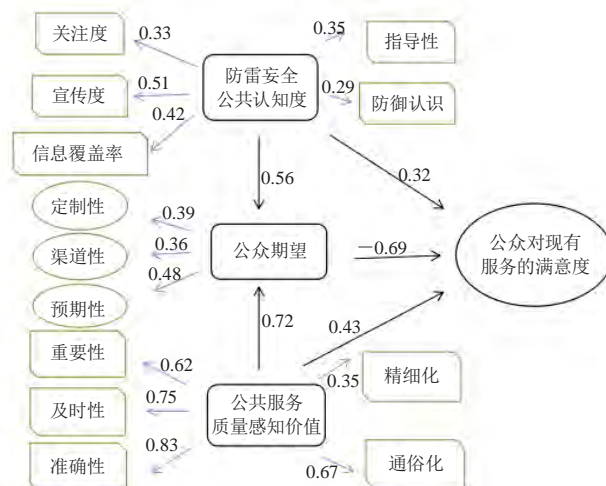


图1 模型输出结果

宣传可以大大提高公众认知度。

在防雷改革大背景下,基于现阶段雷电业务服务还未深入有效开展,建议在做好雷电实时监测预警的基础上开展雷电业务专项服务。思考雷电业务专项服务主要可以通过以下四种形式开展:政府决策服务、公众服务、专业服务和科技服务。服务渠道主要依托气象部门现有的成熟服务渠道及新媒体渠道,包括网络、电视、报纸、电话等媒介和微信微博等新媒体服务渠道,力争达到全覆盖、无漏洞。

深入阅读

- 陈莉,韩冰,李百超,等,2019. 黑龙江省农业气象灾害服务需求分析. 灾害学, 34(2): 78-82.
- 窦玉沛,2016. 健全体制机制提升能力水平推动新时期防雷减灾工作新发展. 中国减灾, 13(5): 6-11.
- 何晓群,刘文卿,2005. 应用回归分析. 北京: 中国人民大学出版社.
- 邝良俊,隆宇,2017. 钦州市气象灾害影响预报预警业务需求分析与研究. 南宁: 2017中国—东盟防灾减灾与可持续发展论坛气象专题论坛论文集.
- 王桂芝,都娟,曹杰,等,2011. 基于SEM的气象服务公众满意度测评模型. 数理统计与管理, 30(3): 522-530.
- 王丽娟,殷占福,2017. 气象服务公众满意度测评模型的研究. 气象科技进展, 7(3): 35-40.
- 王玉帆,张宏,胡德云,2012. 防雷重点单位雷电短信预警服务满意度调查分析. 浙江气象, 33(1): 20-22.
- 吴先华,邹隼,郭际,等,2015. 公众认知、感知价值与灾害气象服务满意度的关系研究——以深圳市3029份《公众气象安全认知度调查问卷》数据为例. 灾害学, 30(1): 150-156.
- 张朝临,高煜,胡旻,等,2010. 陕西防雷减灾技术服务的用户满意度调查分析. 气象软科学, (2): 22-25. 张炜,赵伯听,周武,2017. 新形势下防雷气象短信服务的现状与策划. 福建电脑, (5): 146.
- 周慧,孙玖玲,李健化,等,2014. 蓟县地质灾害防治气象服务需求及满意度分析. 安徽农业科学, 42(1): 187-188.

(作者单位: 大连市气象局)

移动端气象类直播初探

徐实 李亚平

移动端气象直播节目，就是指在移动互联网终端播出的、以气象信息为话题和内容的节目，即以能够通过网络实时传输图像、声音及文字的移动互联网终端应用程序为平台，以直播的形式将气象节目传播给受众。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.013

气象节目而言，不论是日常播出的天气预报，还是在突发事件发生时的气象专栏节目，对于公众的生产生活和生命财产安全来说都扮演着十分重要的角色。随着新媒体、融媒体、全媒体时代的不断更迭发展，气象节目也不再拘泥于传统媒体和传统形式，利用更加便捷的应用程序和平台来传播气象信息例如微信、微博等，大大提高了气象信息的传播速度和效率。

1 移动端直播平台的优势和选择

直播平台功能大同小异，打开程序后就能够开启一键式直播，具备与用户语音、文字交流的功能，用户也可以对直播节目进行打赏支持，还可以通过链接直接分享到微博、微信等社交平台。目前移动端直播平台以手机移动端为甚，应用程序包括众多直播小程序，由于每一款程序的用户群体性质不一、平台内容侧重不一，节目水平层次同样也是良莠不齐，所以选择一个合适的直播平台是关乎直播类气象节目成败十分重要的第一步。

1.1 移动端直播平台特点

移动互联网端的直播平台特点：实时传输、双向互动、真实用户体验。基于移动端的直播类气象内容，主要考虑对时效性、准确性和服务性的要求。节目内容必须以准确、高效的方式传递给受众，结合用户实际需求，为其提供用户所需要的气象服务内容。直播平台正是满足了切实的时效性、互动性，用户与节目实时沟通交流的需求，不但突破了以电视媒体为主要渠道的播出平台限制，而且还增强了气象节目的综合服务能力，拓宽了气象节目实时传输渠道，增加了用户与节目实时沟通、交流的功能。

1.2 主要移动平台示例

“一直播”（图1）是气象行业目前选择与之合作最多的平台，这主要得益于一直播与新浪微博的相互架构与联合，使气象部门能够通过官方微博直接实现节目的直播，成为令人信任的官方声音。两个平台的无缝对接，让受众不仅能够通过一直播平台观看和与节目互动，还能够通过新浪微博实时观看、评论和分享，真正实现了多平台、多渠道的用户内容共享和分发，在相当程度上扩大和提高了节目的服务范围。



图1 “一直播”界面主要功能

“今日头条”的优势在于平台内容，该平台的功能即是整合各大新闻媒体的实时内容，将所有信息统一发布在同一平台供用户浏览，并且通过用户使用偏好分析，主动推送用户可能关心的其他内容。基于此，气象直播节目以官方的身份在该平台上作直播节目更为合适，除却直播平台的特点优势外，如果能够与该平台建立深度合作，相互推广，也是相得益彰，使受众获益更多的举措之一。

2 移动端气象类直播内容

所谓气象类直播节目，是指通过能够实时传输图

收稿日期：2019年9月11日；修回日期：2020年5月30日
第一作者：徐实（1990—），Email：860289517@qq.com

像、声音及文字的移动端（如手机、平板电脑、公共运输媒体屏等）应用程序，通过互联网传播以气象信息为内容或话题的一种视频节目，以此向公众提供气象防灾减灾、气象科普、天气预报等的服务。直播类气象节目与录播类气象节目的制播流程具有一些不同（图2）。

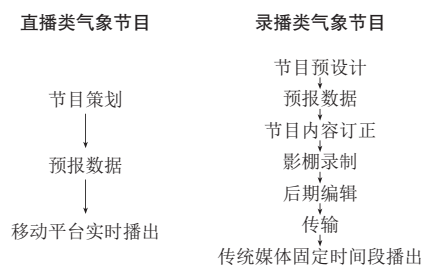


图2 直播类气象节目与录播类气象节目的制播流程对比

2.1 气象直播节目发展历程梳理

纵观互联网直播平台业态，2016年则被誉为是“中国网络直播元年”，随后所兴起的网络直播热潮势不可挡，影响力逐渐扩大。2016年中国气象局在新浪微博（一直播）平台开启了移动端直播类气象节目，当年共开展4次直播活动，取得了不错的关注度和影响力；桂林市气象局在2016—2018年共开展9期直播节目，累计观看人数从5.2万上升到65万；2017年中国气象频道与新浪（一直播）、今日头条等多个平台开展气象直播节目，随后在2018年3月首次成功推出由自己的云演播室系统打造的连续5 h的直播节目；2018年5月18日上午，安徽气象首档互动类直播节目——“天与天寻”在花椒直播平台开播。此外，还有多个省（市、区）已经开展移动端的气象直播节目，包括海南、上海、江苏、浙江、广西、江西、四川等。

2.2 气象直播节目的内容特点

在内容上，直播类气象节目多以气象日活动、气象灾害现场、气象科普、大型气象会议等为主，将直播平台作为一个很好的沟通平台，充分发挥其在双向沟通上的优势，扩展节目与受众的直接互动，达到更好的传播和服务效果；形式上，大多数节目都以主持人出镜作为引导，通过语言、动作来传达信息，从客观、专业的角度解答受众疑问，为公众带来更加直观和亲和的气象服务；还有的直播节目让场景多样化，在同一直播节目中将演播间、气象灾害现场、实验室、观测场等等相结合，打造出更加全面、丰富、直观的气象节目，直接服务于观看直播的用户群体。

3 中国天气平台分析

中国天气，是“一直播”平台下的中国气象官方

账号，自2017年9月29日测试开播以来，基本按照日播的形式坚持每天制作和播出直播节目，其中涵盖气象会议、世界气象日、天气过程现场、旅游、气象科普等等的话题，从关注度几千到几十万不等，每日的直播节目关注度平均在7万上下，而近期，在2020年3月18日“朱定真的气象科普公开课”特别节目中，热度甚至达到了890万的高峰。那么我们选取的是成功案例当中较为日常化节目中的一个，也就是在日播常规节目当中挑选出的成功案例，即2020年3月8日的直播节目。这一天的节目聚焦于日常天气形势分析，而关注度则达到17.1万，节目中气象分析师从专业的角度为受众解读专业的气象产品，用简单幽默的语言把晦涩难懂的产品分析透彻、到位，与受众取得良性的沟通和互动，是这一档节目收获高关注度的最主要因素。该直播平台成功的原因，可以概括为以下几个方面。

首先，节目的形式服务于节目的内容。气象解说员以主播形式小框出现在屏幕中，将其所展示的气象专业内容放大至全屏，两者比例可达1:20，相较于其他用主播人物来布满整个屏幕的节目来说，内容的主次第一眼就被锁定；其次，气象解说员通过对手头数据的梳理和展示，并向观众一一阐释这些专业气象产品所代表和说明的内容，用专业的判断进行简单易懂的解说，同时与受众互动。

第二，节目的内容服务于节目的话题。气象解说员不拘泥于气象专业产品的展示形式，他充分利用手头能够调取和阅览的气象专业产品，从多个角度、多个层次、多个维度对天气形势做出分析和判断，用其精湛的专业能力为受众解释每一个气象产品所表达的含义，不仅让气象学者受益，也能够让毫无气象基础的观众对节目内容有深刻清晰的理解和认识。

最后，节目的话题服务于气象和人。无论节目如何做，气象直播节目最核心的部分仍然是用气象专业知识服务于人，气象解说员无论从何角度分析什么样的天气，都要牢记以人为本，对天气形势的判断不单单是天气形势本身，更要服务于受到其影响的人，而利用专业气象知识对气象信息的生动解读恰恰是收获受众认可、服务于人的最好方式。

4 结语

移动互联网端的直播类气象节目基本是以主持人带领下的第一视角播出，绝大多数都以突发事件直播为主：世界气象日活动、防灾减灾气象服务、重大天气事件现场和影响等，都取得了不错的关注度和公众影响力。少数节目会在日常时刻增加直播量，以日常

的高温、寒冷为话题，向公众展示真实的气候环境，也取得了一定的浏览量和互动量。

因此，基于气象的公众服务要求，为充分发挥移动端直播平台的优势来传播气象信息，就必须扎实研究受众特点和受众需求，从内容出发，提高气象服务的整体形象和能力；加密直播时次，提高对移动端直播平台的利用率；以服务为核心，提高直播内容对用户的实际服务作用；加强节目互动，提高公众与节目的参与热情和参与度；提高直播节目质量，将气象直播节目打造成专业、正规的服务品牌，区别于直播乱象中的其他内容。

深入阅读

- 李岩, 胡静, 谭宇. 2019. 以网络直播为例探究桂林气象服务新模式. 新媒体研究, (10): 3-44, 58.
- 孟京, 李孟頫. 2018. 基于云端的气象融媒体直播演播室平台构建. 网络新媒体技术, 7(5): 51-57.
- 王晨, 田依洁, 唐立岩. 2017. 网络直播在气象宣传科普工作中的应用研究——以一直播平台为例. 新媒体研究, 3(16): 33-35.
- 王子龙. 2016. 直播APP下的全民网络主播初探. 新闻研究导刊, (4): 142.
- 吴吉义, 李文娟, 黄剑平, 等. 2015. 移动互联网研究综述. 中国科学(信息科学), 45(1): 45-69.

(作者单位: 徐实, 海南省气象服务中心;
李亚平, 海南省南海气象防灾减灾重点实验室)

(上接6页)

4 总结和讨论

本文引用了一次基于真实地形和大气背景的大涡模拟，阐述了大理大风成因并就如何配合使用观测资料、理论研究和模式模拟来研究小尺度高影响天气现象进行了讨论。通过大涡模拟的方式补充了观测的稀疏和理论的缺失，解答了大理三处地方大风形成的机制。同时又反过来分别对观测、理论和模式发展提出了新要求。本研究通过个例研究了大理风成因，更多的科学问题可以被提出来。1) 背风波是否真实存在，具有何种日变化和季节变化特征，如要提供更加坚实的证据，就必须要有长期的三维流场观测；2) 背风波为什么会有周期性增强伸展和减弱缩短的现象，这要求对这种特殊的大振幅背风波的机理进行研究（将会在另一篇文章中进行介绍），而机理研究要求进行理论研究和理想模拟研究，因此本次大涡模拟对模式（理想模型的建立）和理论（非线性背风波）也提出了新要求；3) 背风波的这种周期性变化会对动量在垂直和水平方向上的分布造成何种影响，其导致的背风波转子会对水汽和热量通量造成何种影响，这要求建立这种大振幅背风波的参数化方案或者使用超高分辨率大范围模拟，这对模式研发也提出了新要求。

大理被中国气象局确定为山地气象野外科学试验基地，已在点苍山东西向剖面（沿25.7°N）不同海拔高度（4092、3520、2640、2130、1990、1975、2088 m）建设地面自动气象站，并环洱海周边布设12个地面自动站。其他观测设备包括边界层风（温）廓线雷达、多普勒天气雷达、地面基准辐射站、近地层

通量观测系统和双波段（红外和微波）大口径闪烁仪等。然而，除了一个风廓线雷达以外，大部分观测设备只能观测到地面附近的气象要素场，这与山地气象所关注的重力波、地形阻挡、地形降水、冷池、污染物扩散、背风波及其转子湍流等的要求仍然有较大差距。目前点苍山上游几百千米范围内无探空数据可用，仅仅在其北部100 km左右的丽江站有一天两次的常规探空。如能在其上游的泸水市建立探空观测将不仅对横断山脉区域的背景场的改善有帮助，也会为大理山地气象的研究具有重要意义。

深入阅读

- 毕波, 赵建伟, 杨航. 大理机场风特征分析及对飞行的影响. 中低纬山地气象, 2019, 43(1): 50-54.
- 董保举, 李建, 孙绩华, 等. 青藏高原东南缘大理低层风场垂直结构与变化特征. 高原气象, 2016, 35(3): 597-607.
- 杨澄, 付志嘉, 赵晓红. 1971—2010年云南大理大风天气特征统计及分析. 沈阳: 第29届中国气象学会年会, 2012.
- Chow F K, De Wekker S F J, Snyder B. Mountain Weather Research and Forecasting: Recent Progress and Current Challenges. Berlin: Springer, 2013.
- Durrant D R. Mountain waves and downslope winds. Atmospheric Processes over Complex Terrain, Meteor Monogr No. 45, American Meteorological Society, 1990: 59-81.
- Pearce R P, White P W. Lee wave characteristics derived from a three-layer model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1976, 93: 155-165.
- Scorer R S. Theory of waves in the lee of mountains. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1949, 75: 41-56.
- Xue H, Li J, Qian T, Gu H. A 100-m-scale modeling study of a gale event on the Lee side of a long narrow mountain. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2020, 59(1): 23-45.

(作者单位: 薛海乐, 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室)

中瑞西北科学考察团对新疆近代气象发展作用的探究

■ 李冬梅

中瑞西北科学考察，是我国境内早期开展的最早中外大气科学考察活动之一，开展的观测活动采用了先进仪器，是近代新疆气象事业的开端。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.014

20世纪20—30年代，中国与瑞典合作开展了一次历时6年的大规模、综合性西北科学考察活动，覆盖内蒙古、甘肃、新疆、宁夏、青海等地（图1），内容涉及地质、古生物、考古、气象、地理、水文、历史、文化和民俗等。这次科考活动的目的之一，是为德国航空公司开辟欧洲至新疆的欧亚航线进行气象、地质考察，因此，科考团在新疆的气象科考活动是史无前例的。气象科考在德国气象专家赫德博士的领导下，除在内蒙古建立了一个气象观测站之外，在南疆、北疆、东疆建立了10个气象站（包括山区气象站），开展了年度以上的持续观测，观测项目多、观测内容全、使用的气象仪器先进，获取了大量的第一手气象观测资料（图2、图3），为分析新疆大范围的天气气候特点奠定了坚实的基础，并为新疆乃至全国开展气象活动培养了人才。



图1 新疆考察路线图



图2 考察期间设立的临时气象站



图3 刘衍淮在科考期间使用过的海拔高度表

1 考察团情况

1.1 背景

1926年末，瑞典探险家、地理学家斯文·赫定

收稿日期：2019年11月2日；修回日期：2020年2月17日
第一作者：李冬梅（1975—），Email: maylee9019@163.com

(Sven Hedin) 博士组团第五次来华, 提出在中国西北部进行科学考察。北京大学研究所考古学会、古物陈列所等11个学术团体发表宣言, 抗议北洋军阀政府与其签订的科考活动不准中国科学家参加, 采集品全部运到国外等不平等协议, 后经磋商达成新协议: 成立中瑞西北科学考察团, 分设中国及外国团长, 中外科学家各占一半, 采集品留在中国。《大公报》曾为此报道“开我国与外人订约之新纪元, 当此高唱取消不平等条约之秋, 望我外交当局一仿行之。”

1.2 人员组成

在外国书籍中, 中瑞西北科学考察团简称为“中瑞考察团”。正式考察团员27人, 其中包括在北京大学选拔的承担气象考察任务的四名大学生, 即土木系毕业生崔鹤峰, 物理系在读者马叶谦、李宪之和刘衍淮。外方团员17人, 瑞典人斯文·赫定任团长。

1.3 关于气象组

此次考察由德国航空公司发起和资助, 意在为开辟欧洲到中亚航线而进行地理和气象勘察, 可见, 获

取气象资料是考察的初衷。考察团中负责气象工作的是德国气象学家郝德博士, 10名来自德国航空的团员协助其开展气象工作, 4名北京大学特招生承担具体工作。27人的考察团中, 15人与气象直接相关, 前后在新疆境内(包括内蒙古)建立10多个长期或短期气象站, 在沿途中不间断地开展气象观测, 并不失时机地开展高空观测, 获取大量珍贵的气象资料。

2 气象科学活动

2.1 气象台站建设活动

考察团最初计划在内蒙古设立1站, 在新疆设立6站, 即哈密、吐鲁番、迪化、若羌、库车、和田。由于未得到新疆当局同意, 哈密站未能建成, 其余5站都如期建立, 且增建了5个山区站, 即内蒙古的额济纳, 新疆的福寿山(天池)、若羌屈莽山、库车喀拉古尔、博格达山、鄯善七格腾木山等站。站点设置基本覆盖全疆, 但侧重南疆。

各站建设情况在表1中给出。

1930年3月, 刘衍淮、李宪之离开考察团前往德

表1 中瑞科考建立的气象站

编号	站名	建站时间	说明
1	内蒙古额济纳站	1927年10月	考察团建立了第一个正式气象站, 在考察团整体向西出发后, 留守在气象站继续负责观测的是钱默满、生瑞恒、马叶谦三名队员。该站观测一直持续到1929年10月。
2	迪化站	1928年2月中旬	由赫德、李宪之、韩普尔等作为先遣队员到达并建立, 位于1923年倒闭的道胜银行迪化分行旧址。
3	福寿山(天池)站	1928年2月中下旬	继迪化站之后, 赫德又单独上天山建立了天池站, 站址位于天池湖畔, 海拔高度2682 m。
4	若羌站	1928年6月	赫德、狄特满、李宪之、翟绍武(新疆当地学生)等人于1928年5月10日从迪化出发前往若羌建站。该站还有探空观测业务, 探空高度达到2.1万m。其后, 赵玉春(新疆当地学生)来该站观测。该站于1929年7月底, 因军事原因被动撤销。
5	若羌屈莽山站	1928年下半年	继若羌站后, 在附近的屈莽山上建立的分站, 站址海拔高度3400 m, 观测一个月后撤销。
6	库车站	1928年6月	刘衍淮、德国团员华志两人6月19日达到库车, 次日在土尔巴克果园中建站, 随后开始观测。9月, 张广福(新疆当地学生)接替华志来此工作。1929年8月底刘衍淮离开库车返回迪化后, 该站由张广福负责观测。
7	库车喀拉古尔站	1928年10月	刘衍淮、张广福两人在库车附近的山中喀拉古尔建立分站, 轮流在库车站与喀拉古尔站值守观测, 1929年7月底喀拉古尔站撤销。
8	鄯善县七格腾木山站	大约在1929年春季	赫德带领刁德顺、赵克勤、翟绍武(均为新疆当地学生)在鄯善县七格腾木山中建立一个高山短期气象站, 观测数月。1929年秋该站撤销。
9	博格达山站	1929年夏	赫德又带着新疆当地学生在博格达山中建立一个高山短期气象站, 站址海拔高度在3600~3800 m, 观测3个月。1929年秋, 该站撤销。
10	和田站	1929年9月	根据考察团建议, 新疆省建设厅使用考察团移交的气象仪器在和田建站, 大致在1930年1月开始观测。
11	吐鲁番站	1929年9月	根据考察团建议, 新疆省建设厅使用考察团移交的气象仪器在吐鲁番建站, 大致在1930年1月开始观测。

国留学。考察团建立并移交给新疆省建设厅的台站包括: 迪化、库车、吐鲁番、和田等站, 其余如: 博格达山、屈莽山、福寿山(天池)站、库车喀拉古尔站、鄯善七格腾木山、若羌等高山短期站, 均被撤销。

2.2 气象业务情况

考察团在内蒙古所设的气象站, 每天都进行高空观测, 释放不带仪器的氢气球, 测量高空的风向风速。进入新疆后, 由于当政的杨增新政权不允许, 全疆都不准进行高空观测, 唯一的例外在若羌, 该站

有高空观测。研究显示, 1931年3月底, 赫德再次赴额济纳河进行气象观测, 由当时中央研究院气象研究所的徐近之、胡振铎等协助, 探空观测方式与之前不同, 此次使用风筝携带自记仪器进行观测。观测时次: 每天定时观测三次, 分别是07时、14时、21时, 夜间不做定时观测, 全天每小时观测一次风云变化。探空观测为07—09时, 夏季在17—19时增加一次。

地面观测所用仪器包括: 通风干湿温度表、最高最低温度表、温度自记表、黑白球温度表、湿度表、湿度自记表、水银气压表、空盒气压表、气压自记

表、沸点气压表、测风仪等。

3 西北科考是新疆气象的发端

中瑞西北科学考察，是我国境内早期开展的最早中外大气科学考察活动之一，开展的观测活动采用了先进仪器，是近代新疆气象事业的开端。此次考察成果及其第一手气象观测资料不但为后来开辟欧亚航线提供了最有价值的地质气象资料，而且对近代新疆气象事业的发展具有开创性的作用。

3.1 填补了新疆基础气象资料的空白

中瑞考察团在新疆的气象活动与此前外国人来新疆探险考察获取气象资料有很大不同。一是来新疆前做了周密计划，体现在站点空间布局广、站点位置稳定、气象观测内容全面、观测时间较长、观测人员专业、观测仪器先进、观测资料共享等方面。二是考察团先后在全疆建站10个，分布在南疆、北疆和山区，为获取足够长时间的气象资料，考察团对新疆当地学生进行气象观测技术培训，并将建立的气象站或气象仪器悉数移交给新疆省建设厅运行管理，保证考察团撤离后，气象站能继续开展观测工作。三是迪化、库车、若羌、吐鲁番等4站1930—1931年气象报告，在中央研究院南京气象研究所《气象月刊》上发表，实现了国人能够使用到新疆区域珍贵气象资料的愿望，这与此前俄国人来新疆探险考察，将采集到的气象资料全部带走的方式完全不同。四是使用黑白球温度表进行辐射观测、若羌站开展氢气球探空观测等，在新疆均属首次。

3.2 揭示了新疆天气的基本特点

气象组成员基于考察获取到的大量资料，对新疆天气的基本特点进行分析，让世界第一次对新疆这一神秘地区的天气气候特点有了系统、全面的认识。赫德博士回国后，发表了两卷中瑞西北气象考察报告，将新疆气象资料公布于世。刘衍淮、李宪之是除赫德博士外，对新疆气象活动贡献最突出的两位团员（图4—图6）。

刘衍淮建立库车气象站，主持观测工作超过1年，其间还在喀拉古尔建立一个山区气象站，另在天池站观测一个整月，还参加了迪化站观测。他赴德国柏林大学读书后，依据在新疆气象考察获取到的第一手资料，撰写了《天山南路的雨水》，1931年发表在北平《女师大学术季刊》第二卷。该文较早地揭示了天山南麓的基本气候特征，如降水稀少，库车一带年降水量仅有50~60 mm，但其山中的降水要明显高于绿洲；夏季降水不受季风影响；天山南麓背风坡降水



图4 刘衍淮发表的部分论文



图5 刘衍淮考察期间的素描

不如天山北麓迎风坡多等。而另一篇《迪化与博格达山春季天气之比较》论文则详细分析了1928年4月迪化（城市）与天池（山区）气象要素变化及相互之间的差别比较，包括气压、温度、降水、风向风速、湿度、云量以及天气过程等。

李宪之协助赫德博士在新疆首先建立了迪化站、天池站，之后又随赫德前往阿尔金山北侧的若羌建站，其间还在屈莽山建立一个山区气象站，并在上述站点承担观测任务。他在赴德国柏林大学读书期间，依据在新疆若羌亲身经历的一次特强寒潮天气的观测数据，完成了其博士论文《东亚寒潮侵袭的研究》。这篇论文利用当时较少的气象资料，找出了东亚寒潮侵袭中国的几条主要路径，为我国近代寒潮预报奠定了坚实的基础。同时指出：东亚寒潮可以穿越赤道，到达南半球并在那里引发降温与降水，成为研究东亚

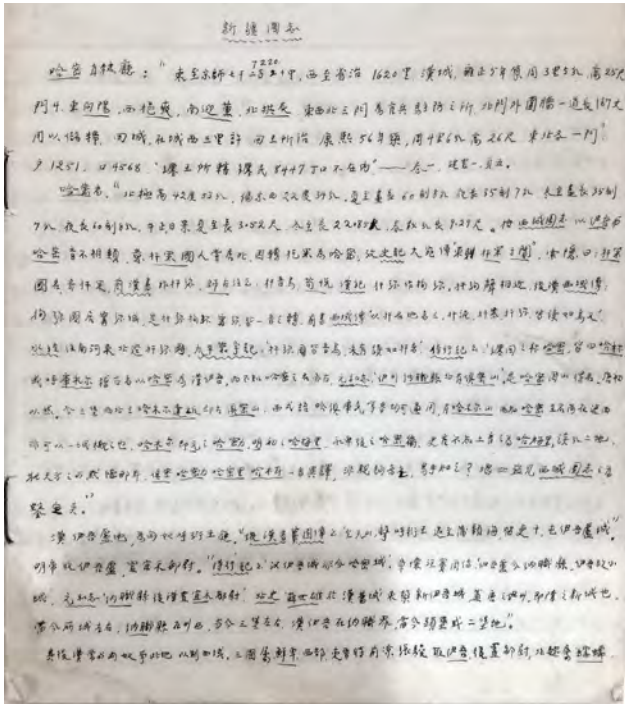


图6 刘衍淮考察日记

寒潮天气最经典的论文之一。另外，1934年，李宪之利用自己在若羌实地观测到的资料，在德国气象学报上发表了《塔克拉玛干沙漠对若羌长期天气的影响》一文，指出在中亚地区的天气也受到气旋的影响，在那里“对降水起主导作用的是冷空气的侵袭，而且冬夏都可发生”。

3.3 培养了一批新疆气象人才

考察团进疆后，曾引起新疆杨增新政权的高度警惕，一度受阻于东疆哈密一带，经过反复沟通和谈判后，才被允许在新疆开展考察工作。为更进一步了解考察团工作，新疆省政府选送4名当地学生进入考察团做气象实习，后又视工作情况加派学生。研究发现，留有姓名的学生包括：刁德顺、赵克勤、张广福、赵玉春、翟绍武等。

新疆当地学生师从赫德，并在刘衍淮、李宪之的指导下很快掌握了气象观测技术和规范，不到1年时间接手并继续开展气象观测业务和维护仪器设备，身影频频出现在各个气象站。如：张广福参与承担了库车站气象观测工作；翟绍武、赵玉春参与承担了若羌站气象观测工作；刁德顺、赵克勤、翟绍武承担了迪化及鄯善县七格腾木山、博格达山气象站的观测工作等。和田、吐鲁番两地气象站的建立和观测，均由新疆当地学生独立完成。1930年3月后，所有气象站的



图7 考察时的气象观测记录

观测与维护均由新疆当地学生承担，迪化、库车、吐鲁番等站的气象数据按月整理后，发送给中央研究院南京气象研究所。

考察团是一所“流动的气象大学”，为新疆培养了气象人才，打破了当时新疆气象科技较为落后、气象人才较少的局面。

4 小结

本次考察由于各种原因也留下了几点遗憾。一是计划中的哈密气象站未能如愿建成，缺少了最有区域气象代表性的一个关键地点；二是科考团虽然不远万里千辛万苦把气象探空装备带到了新疆，却不被允许进行探空观测，令一个最重要的观测项目留下了空白；三是耗费巨大物力、财力、人力获取到的大量珍贵原始气象资料被带去国外且毁于战火，十分令人痛心；四是考察团移交给新疆政府建设厅的气象站，因局势动荡不稳，仅维持两三年左右即先后中断夭折。

致谢：新疆师范大学黄文弼中心、新疆气象档案馆、阿克苏地区库车县气象局对本文的形成提供很多帮助，谨致谢忱。文中图片均拍摄于新疆师范大学黄文弼中心。

深入阅读

- 刘衍淮, 1931. 天山南路的雨水. 女师大学术季刊, (1): 1-9.
- 刘衍淮, 1935. 西北科学考察团中之气象工作. 师大月刊, (19): 13-22.
- 刘衍淮, 1937. 迪化与博格达山中春季天气之比较. 气象杂志, : 453-464.
- 刘衍淮, 1982. 我服膺气象学五十五年(1927—1982). 传记文学, 43(1): 10-13.

(作者单位：新疆兴农网信息中心)

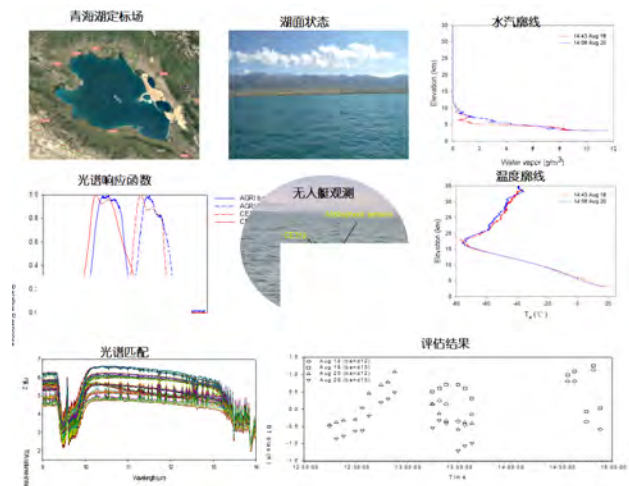
编辑选编

FY-4A AGRI热红外通道辐射定标的精确外场评估

Fengyun-4A (FY-4A) 卫星是2016年12月11日发射的我国新一代对地静止气象卫星, 它配备了先进的成像仪和测深仪, 可提供高时空和光谱分辨率的探测信息, 用于天气气候相关的监测、预警和预报。多通道扫描成像辐射计 (AGRI) 是FY-4A卫星平台挂载的关键辐射成像仪器, 重点用于云观测, 并利用高时间分辨率的特征进行天气过程追踪。AGRI的红外辐射通道具有全光路的星上红外定标系统, 与FY-2上的红外可见自旋扫描辐射计 (VISSR) 相比, 无论在定量标定、成像速度和空间分辨率方面均有了显著改善。FY-4A AGRI的在轨运行状态和星上辐射定标水平的精确评估, 对红外通道产品应用具有重大意义。

国家卫星气象中心与中国科学院空天信息创新研究院等在2019年8月14—22日于青海湖地区开展了联合外场定标试验, 首次使用无人艇配备红外辐射计 (CE312) 进行湖面水温连续观测, 避免了常规大船走测的湖面波动影响; 并在同步定标场附近布设近地面气象参数、气溶胶光学厚度、大气廓线等参数观测仪器, 获得了实时的大气状态, 结合大气辐射传输模拟 (MODTRAN 4.3) 手段分析评估了同步试验时刻的大气状况对红外通道辐射的影响; 分析中使用大气辐射传输模拟的光谱匹配方法, 减少地面仪器与卫星传感器的光谱响应匹配差异导致的亮温偏差。经过15组同步试验数据分析, 中

科院空天信息创新研究院的胡永红等发现FY-4A-AGRI在8月18日的12和13热红外通道的平均温度偏差为0.12 K和0.61 K, 在8月20日的亮温偏差减小到-0.01 K和-0.48 K。该试验结果满足了FY-4A-AGRI定标精度需求 (1K@300K), 表明目前AGRI红外通道具有较好的定标精度, 且工作状况良好。定标试验的不确定性分析发现大气状况差异是影响透射率和程辐射率的关键因素, 其中湖面风速的变化、云层覆盖及云边对亮温消减的空间效应需要在实际工作中充分考虑。



来源: Hu Y, Zhang Y, Yan L et al. Evaluation of the radiometric calibration of FY4A-AGRI thermal infrared data using Lake Qinghai. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, doi:10.1109/TGRS.2020.3037828.

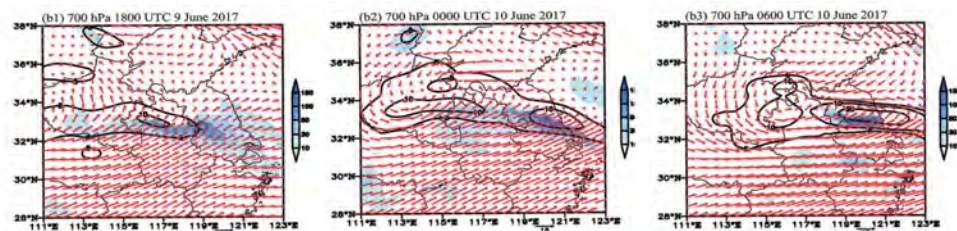
(■ 侯美亭 编译)

凝结潜热释放对温带气旋相对涡度倾向的影响

潜热释放的作用在温带气旋的研究中一直是研究的重点。江苏省气象台沈阳等以一个产生极端降水的温带气旋为研究对象, 基于全型涡度方程, 计算了凝结潜热释放对气旋相对涡度倾向的贡献。结果表明, 对流凝结潜热加热率最大可达稳定凝结潜热加热率的40倍。两类潜热加热中心均位于700 hPa以上, 加热率垂直梯度在对流层低层为正, 因而在加热中心下方形成正涡源中心。对流凝结潜热垂直梯度引发的涡度倾向比稳定凝结潜热高出1个数量级。虽然总的凝结潜热水平梯度引发的涡度倾向可以贡献气旋涡度实际增长值的65%, 但对流凝结潜热垂直梯度的贡献高达其2倍。凝结潜热释放不仅能够直接引发涡度倾向, 亦可通过改变位温梯度, 进一步造成涡度倾向。

从700 hPa对流凝结潜热垂直梯度引起的涡度倾向图中可知, 气旋生成初期到最大降水时期, 对流凝结潜热

引起的气旋中心涡度倾向不稳定, 对气旋中心涡度增长几乎没有贡献。然而, 在气旋向东移动的过程中, 6 h内对流潜热产生的涡度与相同时间内切变线涡度增长的速率达到相同甚至更大的数量级。在与凝结潜热垂直梯度相关的涡度增长过程中, 对流分量占绝对优势。



D2 研究区中 700 hPa 风矢量 (单位: m/s)、相对涡度 (等值线; 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和涡度倾向 (阴影; 单位: 10^{-10} s^{-2}) 与对流凝结潜热垂直梯度的关系

来源: Shen Y, Sun Y, Liu DY. Effect of condensation latent heat release on the relative vorticity tendency in extratropical cyclones: a case study. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2020, 13(4): 275-285, doi: 10.1080/16742834.2020.1750942.

(■ 张萌 编译)

2020年《气象科技进展》总目录

第一期

- 2 许小峰：奥林匹克山气象试验：对雷达卫星（GPM）的地空观测验证与应用
- 4 贾朋群：一篇文章、一张图和一个报告——2019年的阅读记忆
- 7 李彩玲，黄先香，蔡康龙，炎利军，李兆明：2019年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征
- 15 侯美亭：坎坷追风路——佛山市龙卷风研究中心李兆明博士谈龙卷灾情调查 郭明佳，张萌：2019年顶级期刊中国作者文献选编
- 22 何兴伟，冯小虎，韩琦，康宁，郭强，彭艺：世界各国静止气象卫星发展综述
- 30 丁德平，孔少飞，朱彬，张小玲，赵德龙，盛久江：“黑碳的农业与生活源排放对东亚气候、空气质量的影响及其气候健康效益评估”项目中期研究进展 侯亚红，徐方妹，明惠青，张蕊，赵森，关健华：气象旅游资源评估方法与应用研究
- 47 张荣，陈正洪，孙朋杰：山地风电场开发过程中水土流失相关问题研究进展
- 54 陆标标，刘德刚，陈永鑫，成驰：省级太阳辐射模拟可视化查询平台设计
- 58 姚琳，徐卫民，彭王敏子，温新龙，沈竞：CALMET模式不同参数化方案对江西省山地风场模拟的对比分析
- 65 刘轻扬，梁乐宁，陈默，卢大维，李寅锴，王峥：实景天气采集系统技术实现与业务化应用
- 69 胡亚旦，孔扬，薛国强，钱峥，陆鋈，潘婧茹：宁波舟山港气象预警和决策系统设计
- 72 李蓓蓓，钱馨平，张平：军山气象台的发展和贡献
- 封3 贾朋群：枝状晶体（dendritic crystal）

第二期

- 2 许小峰：低层垂直大气廓线遥感探测技术进展
- 6 贾朋群，李攀，邓京勉：研究型业务：来自2020年AMS百年年会的3个解读
- 9 陈静，李晓莉：GRAPES全球/区域集合预报系统10年发展回顾及展望
- 19 陈超辉，王勇，杜钧，何宏让，刘宇迪，姜勇强：欧洲业务集合预报系统进展
- 30 苏翔，袁慧玲：集合预报统计学后处理技术研究进展
- 42 郑明华，杜钧，Brian A. Colle：集合敏感性分析在北半球中纬度高影响天气中的应用
- 58 王毅，代刊，张晓美，唐健，周非凡，马杰：集合敏感性在预报误差及可预报性研究中的应用进展综述
- 65 陈圣劼，孙泓川，康志明：集合预报产品在省、市、县天气预报中的应用情况调查
- 75 杜钧，邓国：“预报挑战度”和“可预报性演变指数”简介
- 79 王梅华，刘蕊：气象部门高层次人才评价研究
- 83 蔡金玲，林巧，乐青：大气科学类专业毕业生就业意向对气象部门人才招聘工作的启示

- 87 乐青，林巧，蔡金玲：气象部门事业单位公开招聘工作现状及问题分析
- 92 钟琦，薛童，朱禾，叶梦姝：面向预报员的精细化数值预报产品应用培训需求研究
- 100 刘蕊，刘艺，杜净译：气象部门高层次人才队伍发展趋势研究
- 104 孙天蕊，蔡金玲，杜净译，周倩：中国气象局直属机关青年人才队伍建设研究
- 108 邢亚争，孙天蕊，周倩：气象部门人力资源管理岗位培训需求研究
- 112 林巧，乐青，张龙伯，邢亚争：微信公众号“气象人才”的宣传策略研究
- 115 刘艺，刘蕊，杜净译：气象部门国有企业职称工作浅析
- 118 姚秀萍，叶梦姝：浅析气象继续教育教案的编写
- 120 周倩，邢亚争，孙天蕊：气象部门国有企业人才队伍建设问题及对策研究——以华云和华风集团为例
- 123 杜净译，刘蕊，刘艺，孙天蕊：气象直属单位青年绩优员工发展特征研究
- 125 康雯瑛，赵洪升，温晶，李陶陶：新时代气象科普工作的定位与可持续发展路径研究
- 127 刘琛钊，王小超，王红侠：气象部门政府购买人才服务需求探讨
- 129 李冬梅：近代外国人历险记中的新疆天气——以《帕米尔历险记》为例
- 132 贾朋群，孙梦晗：飞沫传播与社交距离
- 封3 张伊，贾朋群：平顶冰山（tabular iceberg或table iceberg）

第三期

- 2 许小峰：气象小卫星：拓展天基气象观测的新领域
- 8 陆龙骅：北极臭氧洞
- 10 郭锐，王小平，王玮，王丽娟，胡蝶，沙莎：干旱遥感监测技术进展
- 21 匡秋明，于廷照：AI技术与卫星资料应用研究现状分析
- 30 朱智慧，王琴，李丽：上海市区与洋山港区气温日变化差异分析
- 36 何好斐，高祝宇：临安一次梅雨锋暴雨过程的风廓线雷达探测资料分析
- 43 赵现纲，林曼筠，谢利子，卫兰，范存群：风云卫星地面应用系统计算机网络平台架构
- 49 吕文忠，蔡秀华，孙京利：AMDAR数据在数值天气预报中的影响评估
- 55 苗运玲，宫恒瑞，张云惠，柴岩红：1961—2016年汛期东天山北坡不同量级降水日数时空变化特征
- 62 李国洋，徐启恒，陈宽文，曹永超：2005—2015年广东省森林生态系统净初级生产力时空变化特征
- 66 武君，于晋秋，黄冬至：茂名气候及其生产力变化与粮食产量关系研究
- 72 彭洁，王彩，覃鸿：洞庭湖气象生态服务：过去、现在和未来
- 74 何筱仙，向伟，周静，杨伟，李蜀湘：图看岳阳气象的百年

发展脚步

- 76 彭洁, 蒋帅, 袁泉, 尹依雯: 洞庭湖区水面气象站网的建立及2016—2018年数据特征及应用
- 84 王琪, 吴贤云: 近37年来湖南暴雨时空变化特征分析
89 许建伟, 彭保发, 郭蓉芳, 王夏青: 1960—2018年洞庭湖生态经济区极端气温和降水事件的变化规律
- 96 黄菊梅, 刘学, 李奇, 覃鸿, 向伟: 洞庭湖湿地“观鸟气象指数”研究
- 99 蒋帅, 尹依雯: 洞庭湖地区一次持续性暴雨特征诊断分析
- 107 杨伟, 刘擎, 王威, 张巧明, 方阳: 洞庭湖湖陆风特征分析
- 117 喻长建, 陈姣荣, 喻宇, 钟泽洲: 岳阳2015—2017年暴雨空间分布与天气形势特征分析
- 123 覃鸿, 刘学, 黄菊梅, 王波: 南湖富营养化与气象影响因子的关系研究
- 128 王威, 隋兵, 林南, 陈太龙: 基于Landsat遥感数据的洞庭湖面积变化研究
- 133 袁泉, 吴思雁, 肖平, 李奇: 利用区域自动站资料分析岳阳市城郊以及山区降水差异
- 138 许丽丽, 陈世文, 昌立伟: 岳阳市近30年城市气象灾害变化特征分析
- 141 昌立伟, 黄海波, 许丽丽, 李晶, 黄卓禹: 岳阳市冬季暴雪和一般性降雪条件对比分析
- 147 向伟, 彭洁, 吴劫远, 王威: 岳阳百年气象站在长江经济带发展中的历史作用探究
- 151 杨荣芳, 王红侠, 王贺: 河北省气象灾害预警信号分布特征研究
- 154 周庆亮, 任璐, 王蒙: 首届世界气象中心研讨会简评
- 158 张家诚: 我所认识的人才学
- 159 陶祖钰: 我所知道的陈受钧: 一位有国际声望的学者
- 160 丁一汇: 纪念全球气候变化科学评估的先驱John Houghton教授
- 封3 张伊, 张萌: 进潮量 (tidal prism) 与臭氧总量测绘光谱仪 (TOMS)

第四期

- 2 许小峰: 通量观测: 认识气候系统各圈层相互作用的重要桥梁
- 7 姚俊强, 曾勇, 李建刚, 杨莲梅: 中亚区域干湿及极端降水研究综述
- 15 王金辉, 王东, 井立红, 吴海英, 杨利鸿, 肉孜阿吉: 新疆南疆西部干旱地区短时强降水预报方法及指标
- 22 王春红, 王清平, 谭艳梅, 朱雯娜, 韩磊: 微波辐射计资料在乌鲁木齐机场持续浓雾天气中的试验应用
- 28 蔡银寅: 大气环境资源管理: 一个基本框架
- 37 孟庆涛, 张润福, 李萍阳, 林建, 张小玲: 天气预报中试基地支撑环境设计及建设
- 42 李俊竹, 张晓美, 吕明辉: 大型体育赛事气象服务社会效益评估方法的设计——以青年奥林匹克运动会为例
- 47 刘方奕, 郭建兴, 尤焕苓: 泰山旅游气象条件分析
- 51 曲晓黎, 张娣, 郭蕊, 杜建华: 高速公路高影响天气风险预报预警技术
- 54 张露雁, 贾巍, 张西婷, 王舒琪: 1965—2015年辉县市降水变化特征
- 57 周子强, 董晶, 马国忠, 欧娜音: 黑龙江春秋两季中雨夹雪到

暴雪天气形势分析

- 60 王梅华, 杨萍, 叶梦姝: 混合式教学模式在行业培训中的实践与思考——以气象行业在职培训为例
- 64 陈冬冬, 王柏林, 宋树礼: 近十年全国气象行业县级综合气象业务职业技能 (地面气象测报) 竞赛的发展
- 67 曾庆存: 海南气象助力“21世纪海上丝绸之路”建设
- 68 何君涛, 朱梅: 海绵城市
- 70 张春花, 董立就, 吴俞, 冯文, 郭冬艳, 吴慧, 符晓虹, 陈小敏: 海南岛中部山地地形对天气气候的影响
- 74 陈明, 魏晓雯, 陈升李: 基于北斗的海洋渔船气象信息服务
- 76 蒋贤玲, 任福民, 蔡亲波: 海南岛热带气旋极端降水的特征及其成因
- 83 李勋: 南海及毗邻海域热带气旋生成研究进展概述
- 93 张京红, 张明洁, 张亚杰, 车秀芬: 1409号超强台风“威马逊”对海南橡胶园的风害影响评估
- 96 张春花, 吴胜安: 高温对海南岛西南部干旱影响研究
- 102 郭冬艳, 陈红, 陈有龙, 李凡: 海南岛地闪活动的时空特征与海陆风关系
- 108 贵志成, 王艳莹, 赵小平, 甘思旧: 台风影响期间文昌航天发射场浅层风预报技术研究
- 114 李伟光, 刘少军, 李勋, 张国峰, 蔡大鑫, 韩静, 赵婷: 卫星遥感在海南气象服务中的应用进展
- 120 黄彦彬, 叶彩荣, 敖杰, 李光伟: 海南热带云人工影响天气作业系统
- 123 施晨晓, 陈珍莉, 刘霄燕, 王小洁, 羊清雯, 江益, 陈海莉: 海南省自动土壤水分观测数据异常原因分析
- 128 陈燕, 蔡亲波, 徐文静, 冼锦洪, 李勋, 张春花, 陈红, 林建兴: 能见度激光雷达在一次琼州海峡大雾中的应用
- 133 王天巍, 陈有龙, 冯文: 泛南海气象服务平台的应用与效益分析
- 137 朱梅, 何君涛, 黎江少, 冯志挺, 高芳嘉, 方勉: “低影响开发”对暴雨径流影响模拟分析: 以三亚某海绵小区为例
- 141 刘维, 周黎明, 佟树军, 陈凯: 海南北部地区夏季一次夜间雷暴天气过程分析
- 144 辛吉武: 海南气象服务“海上丝绸之路”建设的实践与构想
- 148 陈小敏, 田光辉, 蔡大鑫, 侯伟, 白蕤, 佟金鹤: 海南省天然橡胶气象服务现状
- 151 匡昌武, 张雪芬, 黄斌, 井高飞, 高涛: 南海海洋气象观测技术现状与发展
- 153 符史旺, 马凤妮: 三亚国家气候观象台气象观测现状及展望
- 157 郑秋红, 张定媛, 王改利, 贾朋群: 美国国家强风暴实验室 (NSSL) 文献产出分析
- 封3 张伊, 张萌: Sprite 幽灵闪电

第五期

- 2 许小峰: 气候系统研究与HUBEX
- 7 赵佳伟, 何清, 金莉莉, 李振杰, 郑先念, 马明杰: 涡动相关法通量数据处理研究概述
- 13 胡皓, 王建鹏, 薛春芳, 高嵩, 贺雅楠, 潘留杰, 戴昌明: 基于MICAPS4平台框架的格点预报智能编辑系统设计与应用
- 19 李庆雷, 陈哲, 廖捷, 周自江: 探空温度偏差订正技术调研报告
- 26 高婷, 陈晴, 孙晓燕, 徐海明, 杨明, 陆明: 基于气象行业共享数据标准化处理的设计与实现
- 30 肖媚, 李启芬, 杨蓼, 胡秋红, 周文钰: 安顺市近57年四季

气温和降水变化特征

- 33 张芳: 国外气象海洋航天装备军民融合发展现状及启示
38 唐卫, 渠寒花, 霍庆: 交管风险管控平台与气象大数据云平台融合的实践与思考
42 胡贵华, 汤兴芝, 李留毅, 鞠英芹: 暴雨预报培训设计的关键环节与对策
46 丁一汇: 致力气象科技创新, 守护淮河安澜
48 卢燕宇, 苏晓燕: 淮河流域能量与水分循环试验 (HUBEX)
52 卢燕宇, 苏晓燕: 寿县国家气候观象台发展历程
58 胡雯, 田红, 叶金印, 徐胜, 张晓红, 卢燕宇: 淮河流域气象业务服务及科技发展
68 李柏, 赵倩, 黄勇, 卢燕宇: 区域能量与水循环——淮河流域综合气候观象台观测网设计思考
77 黄勇, 张文建: 全球能量与水循环试验以及淮河流域能量与水循环试验概述
81 钱名开, 徐胜, 梁树献, 刘开磊: 淮河流域地表水资源量变化及降水驱动效应分析
87 詹艳玲, 林朝晖, 田凤云, 曹美春, 许永芳: 淮河流域土壤湿度的分布特征和记忆能力分析
97 杨传国, 林朝晖, 郝振纯, 余钟波, 刘少锋: 基于陆面水文耦合模型的淮河流域水文模拟与极值分析
102 姜彤, 吕嫣冉, 黄金龙, 王艳君, 苏布达, 陶辉: CMIP6模式新情景 (SSP-RCP) 概述及其在淮河流域的应用
110 段春锋, 田红, 黄勇, 刘俊杰, 曹雯: 淮河流域农田近地层风速、温度和湿度廓线特征
121 卢燕宇, 邓汗青, 田红, 何冬燕, 戴娟: 改进的暴雨洪水淹没模拟算法及其在淮河流域的应用研究
130 谢五三, 段春锋, 田红: 淮河流域农田生态系统能量变化特征及闭合率分析
138 段春锋, 田红, 黄勇, 曹雯, 凌新锋: 淮河流域稻麦轮作农田生态系统CO₂通量多时间尺度变化特征
146 王东勇, 安晶晶, 王皓, 靳莉莉, 童金, 王根: 近60年淮河流域子流域面雨量气候特征分析
153 姚筠, 张方敏, 侯灿, 翁升恒, 吴文玉: 淮河流域地上生物量时空特征分析
158 温华洋, 朱华亮, 陈凤娇, 侯灿, 段春锋, 刘惠兰: 寿县气象科学试验数据集研制
163 张伊, 张萌: 淮河流域主题文献计量分析
164 盛绍学, 石磊, 刘忠平: 深化科技合作, 推动新时期淮河流域能量与水分循环试验研究——记气象科技创新高峰论坛暨第八届淮河流域暴雨洪水学术研讨会
169 解明恩, 张改珍, 陈正洪, 董宛麟: 涂长望气象学学术谱系研究
167 李傲, 王斌, 王晓芳, 赵妍: 2020年长江中下游梅雨锋暴雨联合科学试验

第六期

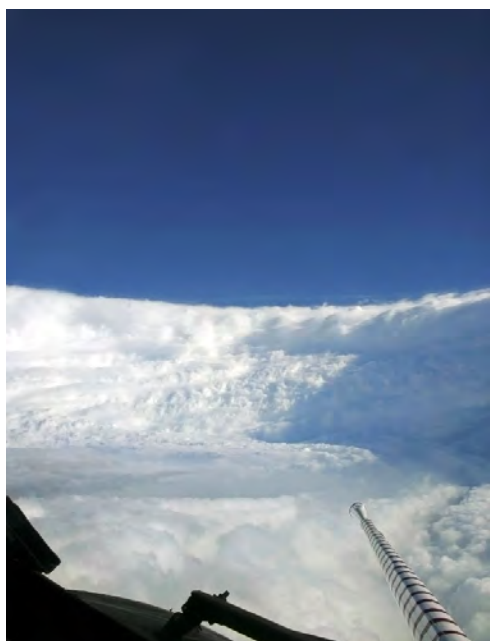
- 2 许小峰: NEXRAD: 走进“新一代”——天气雷达探测技术的起步与发展
8 张文建: WMO走过70年: 中国气象与世界共同发展
11 俞小鼎: 对佛山市龙卷研究中心的几点印象
12 贾朋群, 李兆明: 关注龙卷将我国激烈天气研究引向深入

——记2020年全国龙卷学术交流会

- 14 高玉春, 陈浩君, 步志超, 陶法, 徐鸣一, 王箫鹏, 张乐坚, 李瑞义, 文浩, 马舒庆: 从第39届国际气象雷达会议看相控阵天气雷达发展
19 姚聃: 龙卷预报预警体系建设——气象现代化的前沿挑战
23 李婉仪, 黄先香, 蔡康龙, 植江玲, 张晶晶, 周晓仪, 田良钰: 2020年5月31日佛山超级单体龙卷过程分析
28 植江玲, 李彩玲, 蔡康龙, 黄先香: 雷州半岛一次台风外围龙卷天气过程分析
34 周晓敏, 郑永光: 2020年梅雨期江苏两次龙卷过程环境背景和龙卷母风暴形态特征分析
43 顾伯辉, 黄先香, 张少婷, 植江玲: 瞬时扰动法在佛山一次台风龙卷的环境背景分析和模式预报中的应用
53 蔡康龙, 植江玲, 李彩玲, 黄先香, 李兆明, 彭斯琪: 微型无人机在龙卷灾情调查中的应用
60 郭瑞玲, 钟立华, 麦玲玲, 余晓健, 王硕甫, 梁华玲, 蔡康龙, 黄先香: 佛山初春冰雹天气层结构及雷达特征初探
69 郑永光: 中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述
76 郑艳, 林正扬, 蒋贤玲: 海南龙卷统计特征
80 张羽, 田聪聪, 傅佩玲, 黄辉: 广州X波段双偏振相控阵天气雷达观测试验进展
86 张晶晶, 李兆明, 黄先香: 佛山强降水与微压计滑动离散功率谱前置信号关联分析
90 褚红星, 李兆明, 麦文强, 杨云茜: 网络媒体信息在海南8.29龙卷灾情调查中的应用分析
95 官晓东, 刘玉, 卜银军: 基于风廓线雷达对暖式切变和冷式切变大范围强降水的风垂直结构观测与差异分析
101 王威, 何筱仙, 张深寿: 基于雷达的多源信息森林火灾监测模型应用研究
106 蔡银寅: 中国大气环境资源的地理分布
118 刘苏潇, 孙兰东, 吴蔚, 刘校辰, 杨涵洧: 城市适应气候变化行动方案——国内外应对气象灾害的典型案例
125 达月珍: 移动新媒体气象信息传播现状分析及发展思考——以气象微信公众号为例
128 李陶陶, 李梁威, 任珂, 田依洁: 《气象知识》读者群体特点及其知识获取偏好调查与分析
131 郭俊萍: 提升气象预警信息传播效果的分析与建议
134 赖雨薇, 杨宝回, 林美言, 白龙: 面对群体差异的气象服务——以广西为例
137 郑治斌, 任永建, 王凯: 湖北省高温灾害特征及其影响分析
140 杨培强, 何兵, 易亮: 新冠肺炎疫情期间武汉火神山医院气象保障服务效益评估研究
143 何明琼, 陈正洪, 谭静, 贾文茜, 陈英英, 王明: COVID-19在湖北爆发和流行的几种可能的影响因素分析
146 刘立成, 胡倩倩: 武汉封城战“疫”中气象短信的共情传播
149 贾朋群, 曾智琳, 周莘睿: 粤港澳大湾区: 或将成为极端天气气候研究关注的“特区”——第一届粤港澳大湾区极端天气气候及灾害风险学术会评介
153 路雅恬, 李蓓蓓: 新中国泰山气象站的发展
155 麻碧华: 民国时期浙江气象机构的考证
封3 张伊, 武欣蕊: 板架云 (shelf cloud) 与飓风 (回波) 带 (hurricane band)

荚状云 (lenticularis/lenticular cloud) 是一类特殊的云种, 其形状宛如光滑的透镜或杏仁, 通常单独出现, 其外轮廓线很清晰, 有时会呈现虹彩。气象出版社2012年出版的《英汉汉英大气科学词汇 (第二版)》收录了该词条并翻译为荚状云。商务印书馆2016出版的《综合英汉科技大词典 (第2版)》也将其翻译为荚状云。

荚状云 (lenticularis) 与眼壁 (eyewall)



眼壁 (eyewall) 是指围绕热带气旋风眼的积雨云环。气象出版社2012年出版的《英汉汉英大气科学词汇 (第二版)》收录了该词条并翻译为眼壁。在雷达图像中, 积雨云环须至少延展至180°方可被称为眼壁 (链接1)。

链接1 与“眼壁”相关的衍生词汇和短语包括

eyewall replacement 眼壁置换
inner eyewall 内眼壁
outer eyewall 外眼壁
double eyewall 重眼壁
concentric eyewall structure 同心双眼壁结构

以eyewall为主题词在Web of Science平台的SCI数据库中检索可得到800多条结果, 其中发文量占比最高的学科为气象与大气科学 (695篇), 此外在地理学 (59篇)、海洋学 (22篇)、环境科学 (19篇) 等学科中均有涉及到。2016—2020年, 每年发表的SCI文献均维持在50篇以上, 说明历经多年, 围绕eyewall的研究一直保持着较高的热度。表1按照引用次数, 列出被引190次以上的6篇相关论文信息。

表1 被引190次以上的eyewall主题相关论文

排名	题目	第一作者	来源	被引次数
1	Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes	Frank, WM	Monthly Weather Review, 2001, 129(9): 2249-2269	395
2	GPS dropwindsonde wind profiles in hurricanes and their operational implications	Franklin, JL	Weather and Forecasting, 2003, 18(1): 32-44	239
3	Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes - a review	Wang, Y	Meteorology and Atmospheric Physics, 2004, 87(4): 257-278	223
4	The dynamics of boundary layer jets within the tropical cyclone core. Part I: Linear theory	Kepert, J	Journal of the Atmospheric Sciences, 2001, 58(17): 2469-2484	211
5	Clouds in Tropical Cyclones	Houze, Robert A., Jr.	Monthly Weather Review, 2010, 138(2): 293-344	192
6	Hurricane intensity and eyewall replacement	Houze, Robert A., Jr.	Science, 2007, 315(5816): 1235-1239	191

AMS
词汇

王春竹 编辑
张伊

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)
Sponsor CMA Training Centre
Chinese Meteorological Society
Published by Editorial Office of Advances in Meteorological
Science and Technology

Honorary Editor Chou Jifan, CMA Training Centre

Editor-in-Chief Xu Xiaofeng, CMA

Associate Editors-in-Chief

Wang Zhiqiang

Wang Jinxing

Xiao Ziniu

Zhai Panmao

Yao Xuexiang

Li Weijing

Hu Yongyun

Tan Zhemin

Sun Jian

Fei Jianfang

Zhao Licheng

Zhang Peng

Guan Zhaoyong

He Jianxin

Huang Jianping

Liao Xiaohan

Jia Pengqun (executive)

Managing Editors

Chen Jinyang, Cheng Xiuhu, Gong Jiandong, Guo Hu, Guo Xueliang,
Li Bai, Li Guoping, Luo Yunfeng, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu,
Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Cunzhong, Wang Huaigang, Wu
Bingyi, Xiong Shaoyuan, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin,
Zhang Qingyun, Zhao Ping

Editors

Bi Baogui, Bin Wang, Chen Jingming, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin,
Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Du Jun, Feng Guolin, He
Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yuewen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu,
Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming,
Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu
Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing,
Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoqing, Tang
Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin,
Wang Shigong, Wang Weidan, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang
Yuan, Wang Zifa, Wei Xiaoli, Wen Min, Weng Fuzhong, Wu Liguang,
Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yan Xiaodong, Yang Ping, Yang Song, Yang
Zhaoming, Yi Lan, Yu Yubin, Zhai Wuquan, Zhang Dalin, Zhang
Guangjun, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao
Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Jianhua, Zhou Lingxi, Zhou
Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yujie, Zhu Yande, Zou
Liyao, Zou Xiaolei

Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Ma Jie, Li li, Wu Xinrui, Cui Xiaojun

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,
Beijing 100081, China

Tel: +86-10-68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

http://cmalibrary.cn/amst

Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

Main Contents

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief

Survey

2 Jia Pengqun/ Is It Involved for Meteorology ?

4 Xue Haile/ Influence of Complex Terrain on Wind Field in Dali

Cover Story

7 Rong Yineng, Ma Jiwang, Li Yaoting, Liang Xiangsan/ On the
Multiscale Dynamics of A Top-Down Developing Vortex over
Tibet Plateau

Progress

19 Wang Bailin, Li Jia/ The Development of Low-Orbit Connected
Satellites and the Prospect of Meteorological Cooperation
Model

28 Liu Shaojun, Cai Daxin, Han Jing, Gan Yexing/ Progress of the
Satellite Remote Sensing Retrieval of Precipitation

34 He Xiyu, Cai Xifang, Zhu Yaping, Zhang Lei/ The
Development of FY Polar Orbiting Meteorological Satellite and
Its Application

Annual Review

40 Cai Kanglong, Huang Xianxiang, Li Cailing, Yan Lijun,
Li Zhaoming, Gu Bohui, He Qiurui, Zhang Jingjing/
Characteristics of Tornado Activity in China in 2020

46 Jia Pengqun/ An Online Talk with Experts From Radar Institute
and Company

Letter

58 Wu Dongqiao, Zhou Deng/ Analysis of Variation Characteristics
of Air Quality and Particulate Matter Concentration at Jinsha
Atmospheric Background Station

61 Wei Huabing, Zhou Deng, Zhang Fan/ Quality Control
of Acid Rain Observation Quality Assessment at Jinsha
Atmospheric Background Station

Forum

64 Jia Xu, Xiao Meng, Xian Di/ Analysis of the Situation of
WeChat Public Platform in Satellite Meteorological Service
based on the Indicators of Influence

67 Wang Shuyi, Wang Yun, Zou Shanyong, Li Xiang/ Satisfaction
Evaluation and Service Suggestions of Public Service for
Lightning Protection and Disaster Reduction under New
Situation—A Case Study of 1523 Questionnaires in DaLian

70 Xu Shi, Li Yaping/ Discussion on Meteorological Live Broadcast
on Mobile Devices

History

73 Li Dongmei/ The Effect of the Scientific Mission to North-
Western China on the Development of Modern Meteorology in
Xinjiang

Reading

77 Selected Papers

Inside Back Cover Wang Chunzhu, Zhang Yi/ AMS Glossary