

低层垂直大气廓线遥感探测技术进展

■ 许小峰

不同探测方式的遥感设备针对各类目标物的探测能力有较大区别，靠单一设备难以承担综合信息的获取，较好的设计是通过多种设备协调探测，信息互补，综合分析，融合处理，最终得到可有效用于业务的完整信息。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.001

从当前气象预报业务发展的实际情况看，对于数百千米以上尺度天气系统的中短期预报，数值模式预报结果基本上已超越了预报员的能力，预报员虽还能做些订正改进，但多数情况下也只能仅此而已。对于月、季、年以上时间尺度的天气、气候预测，无论是传统方法还是数值模式方法，都还存在差距，仍有许多难点和问题尚未解决。但气候模式的进步也是显著的，已成为气候研究和预测的重要方法。而对于几十千米以下的中小尺度天气系统预报，存在不少尚待解决的问题，如地形影响、云物理过程、与大尺度系统的相互作用等，需要从机理上深入研究，而其中需要解决的一个重要问题是提高初始场信息的获取能力，特别是当数值预报水平网格加密到几千米甚至1 km以下时，现有业务探测系统显然就难以满足需求了，特别是地面以上数千米的垂直探测，差距更大。

尽管从全球视角来看，我国气象探空业务系统的水平不低，但从捕捉中小尺度系统天气角度看，多年来布设在全国的约120个气象探空站，平均水平间隔在数百千米以上，时间上每天探测两次，基本上体现了国际整体水平，但多数情况下无法完整刻画中小尺度天气系统的结构特征，难免出现大量漏网之鱼。而对于强对流系统发展过程中的云物

理结构变化，也难以通过目前的探空系统获取。且若想提高探空站的时空密度，从运行成本、环境制约等因素考虑，都难以承受。对于大尺度天气系统的预报，卫星资料提供了强有力的支撑，但对于云系发展较活跃的中小尺度天气，卫星在大气低层的探测能力受到较大制约。

世界气象组织(WMO)在《数值天气预报应用指南》特别强调了对风、温度和湿度垂直廓线信息的需求，特别是在多云地区，具有更重要的价值。在实践中，不少国家都在探索如何获取高时空分辨率的垂直基本气象要素场的方案选择，满足实际气象业务和科技发展需求。低空遥感综合探测被认为是可行的方案，前提是要解决好信息合理处理中的难点问题。不同探测方式的遥感设备针对各类目标物的探测能力有较大区别，靠单一设备难以承担综合信息的获取，较好的设计是通过多种设备协调探测，信息互补，综合分析，融合处理，最终得到可有效用于业务的完整信息。

从目前实际业务需求考虑，要重点针对以温度、湿度、气压、风向、风速、云水变化为主要特征的大气垂直探测要素，综合考虑所要获取的气象探测信息与各类探测设备性能特点的一致性，在不同的气象条件下，形成处理好不同探测设备信息的业务能力。

1 美国大气研究中心(NCAR)发展的低对流层观测系统(LOTOS)

为了获取大气对流层中下层和大气边界层的气象信息，NCAR的地球观测实验室(EOL)近年来发展了一个低对流层观测系统(LOTOS)，利用多种遥感设备进行综合观测，构成一个集成化平台，以解决在大气边界层和对流层中下部这一大气与陆面相互作用活跃及强对流系统发展旺盛的垂直高度场信息获取问题。其主要做法和特点是不同设备的探测能力进行分类，设计出了可以综合集成多种探测设备的系统平台，在不同条件下获取各类气象要素的垂直廓线及云水物理参数，解决了依靠单一设备难以满足的多样信息需求问题。用户可以根据实际任务选择设备，灵活构建不同性能的应用平台。

LOTOS集成平台可以进行温度、湿度、风、云、温室气体和气溶胶的遥感垂直剖面观测，湍流和地表通量观测，及自动无线电探空仪发射等，是一个可针对不同用户需求进行区别设计的灵活解决方案。图1列出了LOTOS不同设备选项的性能特征，包括设备、探测要素和探测高度等，从中可以看到获取不同要素和垂直分布所应选择的设备类型。在具体观测实施时，可以针对业务科研目标进行设计，解

资助信息：国家自然科学基金重点项目(91637211)

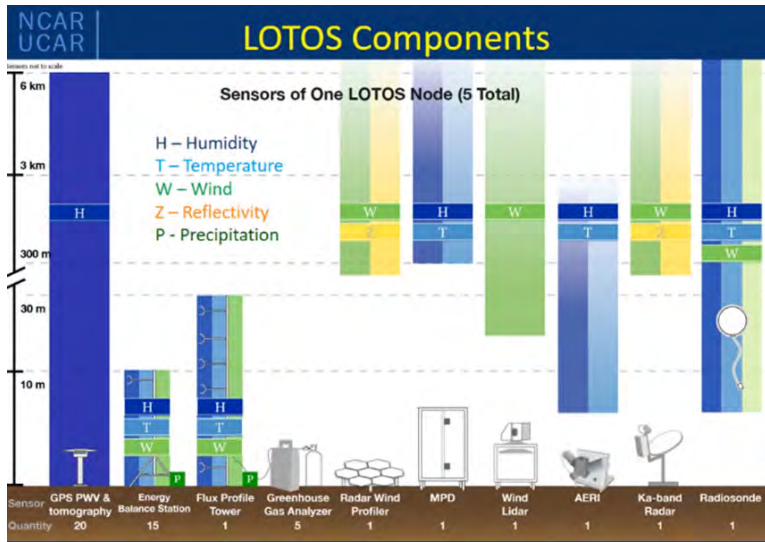


图1 低对流层观测系统 (LOTOS) 设备选项功能特征 (EOL报告)

决与大气表层、边界层和对流层中下层的各类信息获取问题,这一系统可以实现从局地到区域规模的观测,也可针对气候系统各圈层要素相互作用的需求选择仪器设备,进行观测站点设计。

从实际业务应用角度看,并不是有了这些综合设备就能有效获取所需要的要素测值了。如图1所示的激光测风雷达 (wind lidar) 和微脉冲激光测温湿雷达 (MPD) 在出现了云雨的条件下就难以发挥作用,这些遥感仪器在不同气象条件下及针对不同的探测目标物探测效果会有很大差异。如何根据具体条件综合应用各类仪器是必须考虑和解决的关键问题。

在每一个观测点建立组合观测

的基础上, LOTOS的另一个重要特点是可以对多达五个站点的观测进行集成 (图2), 建立区域观测网络, 这一组合网络很适合在复杂地形条件下针对业务、科研需求进行观测设计, 达到对中小尺度天气系统进行区域性精细化立体观测。

2 欧洲地基遥感廓线观测网建设

从全球气象业务发展水平看, 欧洲在气象资料处理和数值天气预报模式方面具有明显优势, 近年来在垂直遥感信息应用方面也取得明显成效, 特别是目前在一些欧洲国家已开始运行的分辨率达1 km的细网格数值模式, 已能够有效利用这些低层遥感数据提高预报时效。

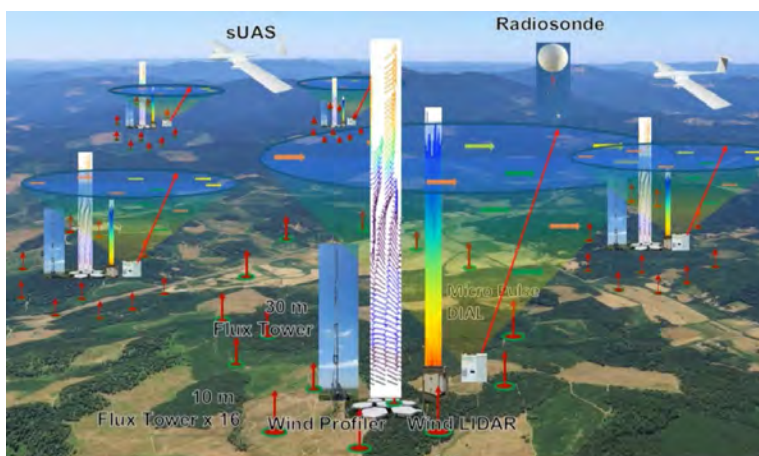


图2 LOTOS复杂地形下多站点观测 (EOL报告)

欧洲气象业务部门目前主要是通过已建成的由多普勒激光测风雷达 (DWL)、后向散射激光雷达/云高仪 (ALC)、微波辐射计 (MWRs) 等设备组成的欧洲地基廓线观测网获取对流层中下部温、湿、风、气溶胶、云等信息。云高仪最初的功能只是测量云底高度, 但现在这些仪器已有能力提供气溶胶和云的后向散射能量变化廓线。因此, 提出了激光雷达和云高探测结合的新概念, 即 ALC。在获取基本信息的基础上, 还可以推算出更多产品, 如湍流水平、边界层状况、低空急流变化等。这个地基观测网是由欧洲科技合作联盟 (COST) 与欧洲国家气象网 (EUMETNET) 合作建立, 其中包括了COST的为改进预报的地基遥感业务廓线观测项目 (TOPROF) 和EUMETNET的欧洲廓线 (E-PROFILE) 项目, 通过合作共同解决了经费支持、观测和信息处理技术、标准规范建立、会议交流、仪器性能比较、物理参数校正、软件开发、业务流程、信息分发、预报应用等问题。E-PROFILE项目原目标是建设风廓线雷达网, 现在通过与TOPROF项目合作, 扩充了垂直廓线信息种类, 在应用上也有了更多的技术选择, 形成综合产品, 供预报业务和数值模式使用。图3为欧洲廓线网的布局和进展情况。

在E-PROFILE网络中运行的激光/云高仪ALC发射波长为532、910和1064 nm的激光短脉冲, 并接收后向散射信号。原始数据的平均垂直分辨率为15~30 m, 时间为15~60 s, 可以获取云、气溶胶、灰尘、雾和火山灰的廓线特征。多普勒激光测风雷达发射波长为1.5 μm , 通过获取气溶胶或云粒子在光束方向上后向散射信号的径向多普勒频移, 做出对风的垂直变化、风切变、湍流状况、最大阵风、低空急流和边界层状态的推算, 探测范围一般为几十米到10 km, 随着天气条

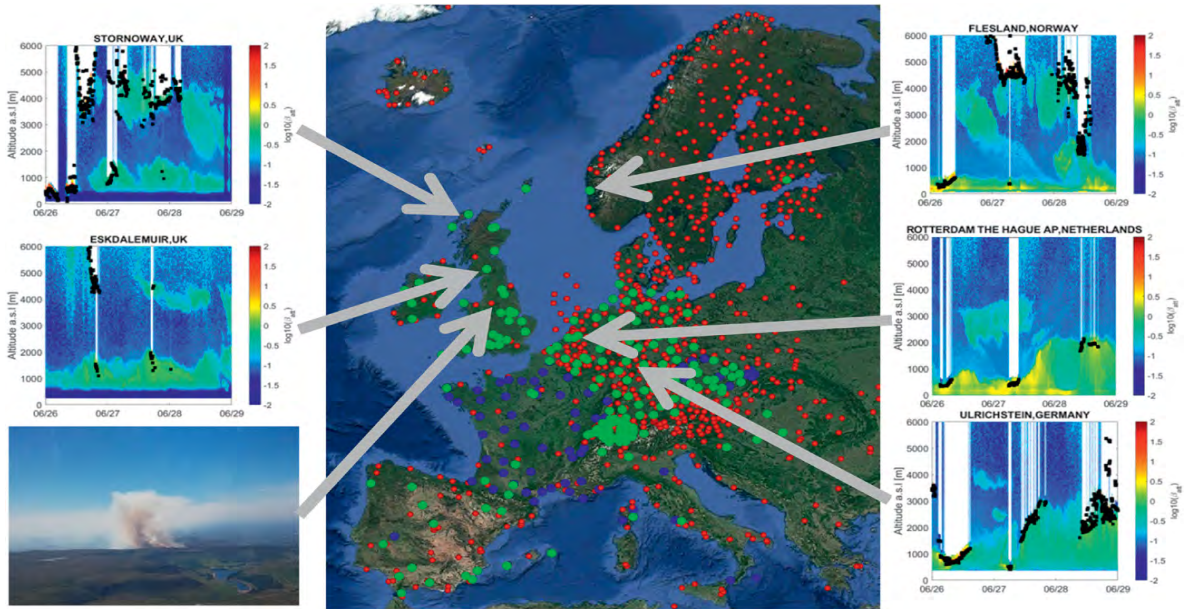


图3 欧洲廓线观测网布局和五个廓线剖面图 (绿色为已在业务中综合集成的站点; 蓝色和红色为近期和计划中集成的站点)

件不同会发生变化, 如在厚的云层或强降雨条件下, 激光探测则无能为力。地基微波辐射计MWR通过测量宇宙背景下的大气辐射频谱微波部分, 通常表现为等效亮温TB, 进而推算大气温度廓线和湿度廓线。在中等以下降水条件下, 这种测量都可以进行, 特别是在地表以上几千米范围, 较卫星等微波观测更为有效。

有了这些直接观测到的垂直观测资料, 就可以用来改进数值预报的初始场了, 包括模式中的云物理参数化方案。这些与应用相关的前期科研工作已开展多年了, 如在21世纪初, 欧盟就组织开展云监测网计划(Cloudnet), 在该计划中科技人员利用云雷达、ALCs和MWRs获得云观测资料, 并将它们与几个欧洲运行预测模式中的云参数进行比较, 形成对比统计数据, 改进预报模式。有些数据的应用相对简单, 如DWL的测风数据可以直接用到模式中。通过实际统计检验, 表明这些数据对预测都有积极影响。

在观测网中使用的设备型号有较大差别, 这也是在应用中需要关注的问题。如ALCs设备, 就有多种频段的仪器运行, 维萨拉公司生产的CL31和CL51测量频率为910 nm,

Lufft公司的CHM 15k测量频率为1064 nm, Sigma Space公司的微脉冲激光雷达(MiniMPL)测量频率为532 nm。遥感设备观测信号处理本身的复杂性与设备类型不同造成的信号差异, 增加了处理的难度, 但这也是业务运行过程中必须要面对并处理好的问题。TOPROF项目的主要任务之一就是要建立各类仪器的通用标校程序、数据质量的通用检验方法和数据准确性的独立验证流程, 包括与数值模式计算数据的比较分析方法, 只有对不同设备观测的数据进行严格的比较和技术处理, 才有可能获取有意义的可用信息。

ALCs发射的激光和接收的后向散射信息在低空会产生光学重叠, 且重叠状况除随高度变化外, 还与环境温度相关, 这使得重叠区域受到干扰的信号使用受到影响。这一问题已通过建立用于校正的重叠变化函数得到解决, 从而在重叠区也可以得到较为准确的信号。需要处理的问题很多, 如对某些天气条件下出现的探测虚假信息、提高远距离目标物探测信噪比、不同设备探测信息的标定及差异处理等, 这些工作都需要在不同天气条件下进行长期实测对比试验才能完成。对信息进行了合理的校正, 数据质量可

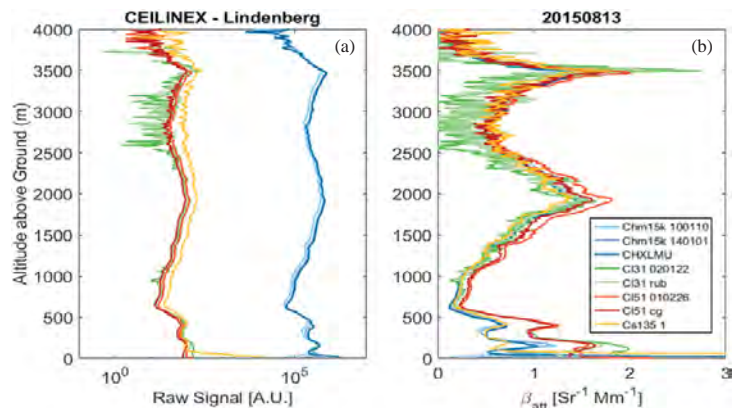


图4 2015年8月13日在德国林登伯格开展的云高仪/激光雷达试验(CeiLinEx)活动期间获取的8个ALC后向散射廓线对比数据, 包括坎贝尔、维萨拉公司和路赋德公司的产品

(a) 原始廓线信号; (b) 校准后的信号 (在500 m以上校正效果明显优于低层)

以得到显著提升, 如将激光雷达探测信噪比中值偏差有效降低后, 较低的信噪比阈值可使探测灵敏度提高5倍以上, 明显改进了数据质量。对灵敏度高低的处理还与要获取的目标物种类有密切关系, 若对近地面层的风场和湍流等更感兴趣, 则可以通过部分牺牲远距离灵敏度来实现。图4显示了在德国林登伯格气候观象台开展试验时对八台设备信号对比较正后的结果, 可以看出若不进行校正, 不同仪器的信号会有较大差异, 处理后有了较好的一致性。

在处理好ALCs信号质量的基础上, 一些气象变量便可直接用到数值模式当中, 如风、气溶胶、云信息等。图5显示在芬兰赫尔辛基站获取的风场等变量的垂直分布图。除此之外, 还可以在初始信息的基础上, 开发各类应用产品, 使这些自动化、连续性的摇杆设备发挥更大效用。如在TOPROF项目中, 利用ALC信息, 研发了大气边界层高度诊断, 雾形成预警, 灰尘、生物燃烧和火山灰的运输监测等业务服务产品, 供各国使用。

地基微波辐射计工作原理是通过被动接收大气亮温TB的向下辐射值, 然后转化为大气变量, 如温度、湿度等。原理并不复杂, 但难点也在信号处理上。TOPROF项目围绕获取更精确的TB观测值, 在MWR设备软硬件开发上取得了显著进展, 可以直接用于改进数值模式, 也可以转换为较准确的大气变量。所用的设备为22~31 GHz频段(用于湿度)和51~60 GHz频段(用于温度)的多通道温湿廓线仪, 这些仪器还提供总体水汽含量(IWV)和云液态水路径(LWP)。

在TOPROF项目中, 与仪器供应商一起进行了两次校准现场试验(JCAL), 消除了因反射波与驻波引起的测值不确定性, 使TB的绝对精度提高了0.1 K, 导致最终的观测精度提升了5倍, 温度剖面反演的不确定性降低0.3 K, 提高了边界层的温度反演准确性, 并使IWV和LWP

的精度提高了50%, 实现了新的标校目标及接收技术的改进。同时, 还开发了一个可以广泛用于现有卫星同化软件的快速计算模式, 用来计算地面接收到的亮温测值, 其雅可比背景矩阵可使用源于包括探空、数值模式等任何大气温湿廓线值, 并免费对外提供。经过1年的多站对比试验校正, 观测和反演结果都在可控制在预期误差范围内。

试验表明, 通过同化MWR资料有助于改进近地面2 km范围的数值模式温湿度场结果, 包括在对流和非常稳定的条件。图6显示了在稳定和对流条件下, 同化MWR亮温资料后对温度场的改进, 通过探空资料

进行了验证对比, 在低层效果十分显著。稳定的大气条件是近地面层污染物积累和扩散的关键因素, 而对流性天气则会导致强天气发生。

这些有效的改进从硬件和软件上都促进了探测设备的完善, 促使欧洲国家准备进一步拓展观测网络, 并将这些资料分享给更多国家, 包括欧洲中期数值预报中心(ECMWF)。

3 小结

综合以上介绍, 地基垂直探测信息在改进中小尺度预报业务方面具有很大潜力, 是未来大气探测业务发展的重要领域之一, 但要做好这项工作, 需要综合考虑和解决好

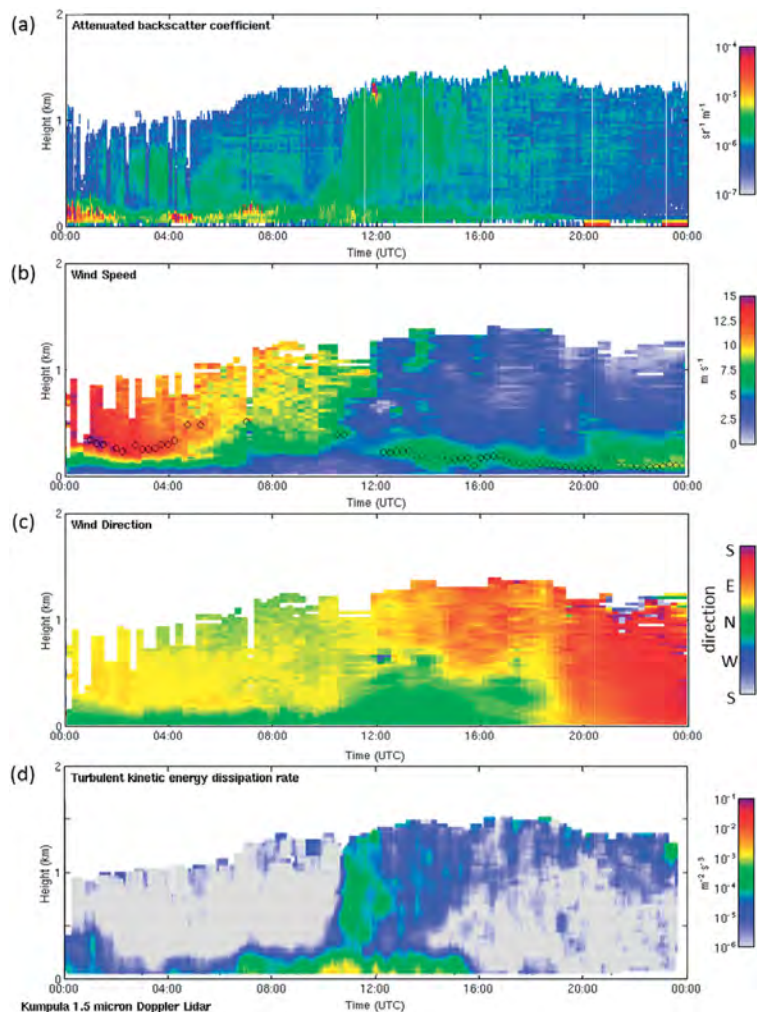


图5 2014年3月24日, 通过在芬兰赫尔辛基运行多普勒激光雷达获取的24小时风场变化高度图

(a) 雷达后向散射系数; (b) 包括低空急流分析(黑圈)的风速分布; (c) 风向; (d) 湍流动能耗散率

(下转8页)



图3 IBM天气公司提倡的HOTL平台

循环”，而预报员是这个“循环”中必不可少的一部分，没有他们的干预是不能发布预报的。而过度的干预让整个预报过程变慢，而且随着时空分辨率的提升，数据量和模式种类不断增加，越来越多的预报数据也对预报员如何干预预报提出了更高的要求。这时，HOTL无疑是优化预报员干预和显示预报员在循环中的价值所在的一个选择。

形，并通过配置属性来管理预测；将查询接口指向API，以查看表格和图形详细信息。此外，在平台上还可以与来自不同领域的预报员通过Slack进行交流。

自动化的预报需要“护栏”式的呵护，HOTL式的护栏则即可防止数值模式“跑偏”，更是在精细化气象服务中发挥预报员智慧的有力支撑。HOTL运行反馈和倒逼的对预

那么HOTL又是如何运作的呢？预报员首先登陆到工作站，在云上连接HOTL服务器，继而通过云获得其他服务器的“底层”天气数据；接着，预报员便可以利用这些数据绘制多边形图

报系统“后端”改进的研究，与会上NSF提出的“收敛性研究”有异曲同工之妙，其核心均体现在解决业务实践中的关键科学问题上。

在生物工程学领域，器官芯片已经研发出来，各种器官芯片耦合成的“芯片人”也浮出水面。AMS年会展示的借助AI芯片（TPU）的更有效的模拟、借助统一编码规则（CCPP）研发各种物理过程的“芯片”并方便地耦合成与人体一样复杂的地球系统，再借助护栏式的“纠偏”机制，已然成为未来预报系统的关键节点。这3个解读单独看是发展动态，合力贡献却可能是未来气象预报全流程的变革和新方向。这些新年代出现的一些创新思想，释放出来的新理念和提示的研究型业务的有力抓手，值得我们关注、学习和在实际工作中思考及选择性借鉴。

(作者单位：中国气象局气象干部培训学院)

(上接5页)

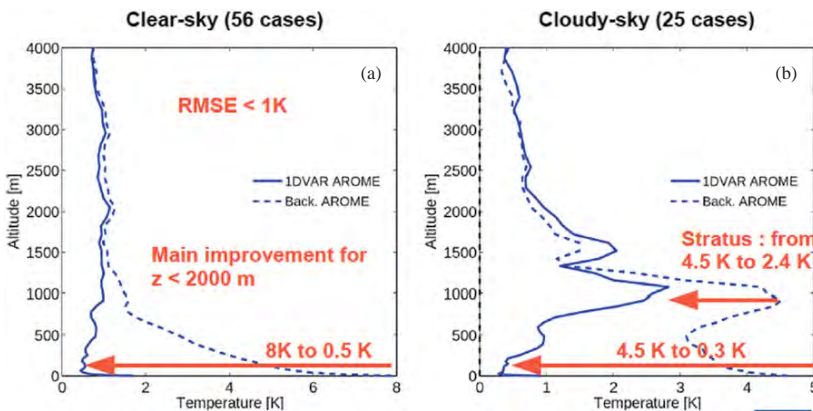


图6 在稳定(a)和对流(b)天气条件下同化WMR资料后对数值预报温度场的改进

一些问题和难点。

1) 综合性仪器配置。地基遥感垂直探测较传统探空业务在技术上要更为复杂，且不是单一设备可以解决所有要素的探测问题，需要针对需求综合考虑设备的选择，以达到最佳效果。

2) 多方协调解决信息质量和应用问题。用好这些仪器装备，需要生产厂商、探测业务人员、数据处理和预报应用人员共同协作，从设备的特

性、观测方法、标准的统一、数据处理分发、不同设备间的配合、观测试验、软件开发、同化应用等多个环节开展合作，才有可能做好。

3) 构建统一处理各类设备探测信息的综合平台。要建立统一的自动化信息处理平台，针对多种设备探测信息进行综合处理，形成标准化数据供业务使用。

4) 科研与培训是用好综合遥感仪器的重要前提。地基遥感仪器与传

统探空相比，在仪器合理使用和数据处理上要复杂得多，需要根据不同环境条件进行对比试验观测，确定信息的可靠性。探测人员对各类遥感仪器的技术与特点要提高理解程度，掌握各类设备在不同条件下的优势和局限，而不仅是简单操作。

深入阅读

Illingworth A J, Cimini D, Haeferle A, et al. How Can Existing Ground-Based Profiling Instruments Improve European Weather Forecasts? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(4): 605-619.

Illingworth A J, et al. Cloudnet: continuous evaluation of cloud profiles in seven operational models using ground-based observations. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88: 883-898. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-6-883>.

Weckwerth TM, Oncley S P, Stephens B B, et al. Planning for LOTOS: a new lower tropospheric observing system. <https://ams.confex.com/ams/2019Annual/webprogram/Paper350252.html>.

(作者单位：中国气象局)