

相伴而生、相依同行的航空与航空气象

■ 许小峰

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.001

1 相伴而生

没有航空的出现,显然也谈不上航空气象保障,从这一简单推论出发似可以得出结论,航空应早于航空气象出现,时间上有先后。但若从另一个角度分析,如果将航空气象保障作为航空作业的必要条件,时间发生顺序或许就会改变。具体考察两类活动发生的时间节点,可以发现有一定重合性,至少若从现代动力飞机试飞成功那一刻算起,气象保障也同时启动了,应该说航空与航空气象相伴而生应算是客观的。

1903年12月17日,美国北卡罗来纳州的基蒂霍克(Kitty Hawk)天气寒冷,刮着大风,空旷的沙滩上停放着一个带着巨大双翼的怪家伙,这是美国发明家莱特兄弟(Wright Brothers)设计的动力飞机——“飞行者一号”(图1)。10时35分,哥哥奥维尔(Orville Wright)爬上“飞行者一号”的下机翼,手中紧握着木制操纵杆,弟弟威尔伯(Wilbur Wright)开动发动机并推动它滑行。飞机达到一定速度后,威尔伯松开手,飞机升起,飞行了12 s,共36.5 m,又落回到沙滩上,这一短暂的腾空标志着人类历史上第一架动力飞机首飞成功,人们梦寐以求的动力航空时代由此拉开帷幕,莱特兄弟创造了历史。当天,莱特兄弟又轮流进行了3次飞行。最后一次,威尔伯用59 s飞了260 m。不幸的是,几分钟后,一阵狂风把“飞行者一号”掀翻

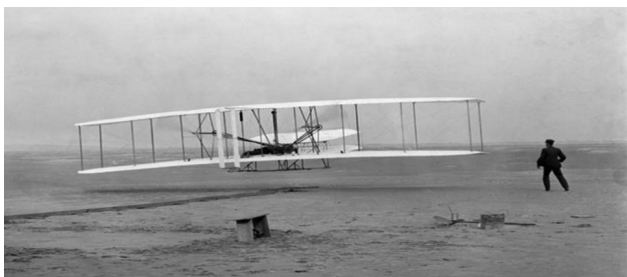


图1 1903年12月17日世界上第一架动力飞机首飞成功

【编者语】

航空气象保障是气象业务服务中最重要的领域之一,其中存在的一些问题也是大气科学领域所关注的难点。航空业的发展与气象条件密不可分,同时也为气象科技与业务提供了大量宝贵信息。文章通过对一些史实的回顾和分析,梳理了航空与气象发展的密切联系,揭示了一些重要事件发生的因果关系,并对当前和未来如何进一步加强航空与气象服务保障的关系和推进航空气象发展进行了探讨。

了,飞机严重损坏,但已经完成了历史使命。

美国天气局在这次首飞中发挥了重要作用,1875年1月北卡罗来纳州在基蒂霍克建立气象台。为了确定试飞的最佳位置,莱特兄弟在实施试飞的三年前就写信给基蒂霍克气象台进行咨询,希望提供预期天气状况的信息,并收到了气象台工作人员多舍尔(Joseph Doshier)

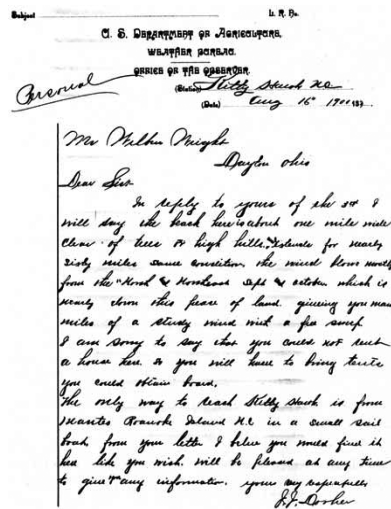


图2 基蒂霍克气象台多舍尔1900年8月给莱特兄弟的回信,介绍了基蒂霍克海滩的基本情况

的积极回应(图2),预计9月和10月会有大约60英里(1英里 \approx 1.609km)宽的海滩,盛行东北偏北风,几乎直吹海滩,存在数英里的一致风向。这一预测促使莱特兄弟确信基蒂霍克是实现他们梦想的最佳场所^{[1]①}。1903年12月17日下午近傍晚,奥维尔步行至基蒂霍克气象台,向其父亲发送一封电报(图3),详细介绍了当天的成功。

从动力飞机首次试验成功的完整过程看,至少发生了这样几件事:试飞之前莱特兄弟向气象台进行了咨询;气象台提供了及时气象服务,对试飞地点的选

收稿日期:2021年11月1日

第一作者:许小峰(1957—),Email: xuxf@cma.gov.cn

资助项目:国家自然科学基金项目(42142009);中国气象局气象干部培训学院科研项目(重2021-015)

① OAA's National Weather Service. December 17, 2013 Marks the 110th Anniversary of the Wright Brothers' First Flight, 2013. <https://www.weather.gov/mhx/FirstFlight>.

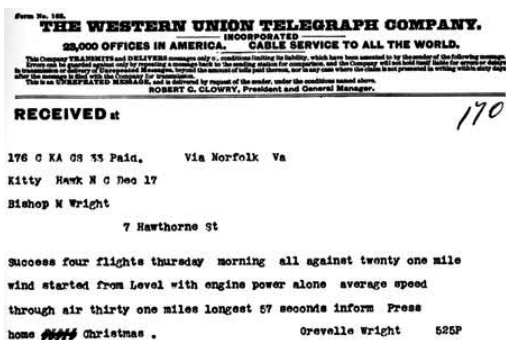


图3 奥威尔从气象台向其父亲发出的试飞成功电报

择和天气状况做了分析；飞机首次试飞成功；后续再试时遭遇了天气袭击，发生气象事故；试飞成功的重要消息通过气象台的通信系统对外发出。这些事件都可作为首飞成功的一部分，若硬要区分前后，判定气象保障在前与史实也是吻合的，但若将试飞成功与气象保障都作为一个完整过程来看待，相伴而生则更为准确。重要的是从首飞成功遇到的情况人们已认识到天气对飞行的重要性，从而伴随航空业在需求与技术的双重推动下快速发展的同时，航空气象保障也迅速成为气象业务最重要的组成部分之一。1909年，美国陆军通信兵从莱特兄弟那里以25000美元的价格购买了第一架飞机，军队的需求对航空和航空气象的发展起到了极大的推动作用。

2 相依同行

航空气象一般会被认为是气象如何适应航空需求并有效提供服务保障的科学与业务体系，实际上，航空业的发展对气象而言并不仅是单纯的依赖关系，同时也为气象提供了重要支持，可谓是关联密切的命运共同体。

在20世纪初，与动力航空试飞成功相近的时间阶段，也正是气象科学的发展开始从关注地面天气变化转向探索三维立体大气的整体演变规律的转折时期，欧、美、俄罗斯等一些国家的气象学家通过各种方式探索高空探测的有效方法，风筝、系留气球携带探测仪器等方式等都被作为试验选项。1894年，在美国波士顿Blue Hill观象台放飞了第一支携带测量大气环境记录仪的风筝，标志着高空观测业务的开始，但风筝或系留气球的探测高度都受到限制，一般不会超过3~4 km。1902年，德国气象学家理查德·阿斯曼（Richard Assmann）最早发明用橡胶气球探测大气，通过对橡胶球皮进行特殊处理，使气球升空后可以膨胀到直径达到释放前两倍以上才爆炸，探测高度可提高到20 km以上^[2]。这项技术为最终在业务上选择气

球携带无线电探空仪放飞升空，有效获取高空大气垂直廓线信息做出了重要贡献，也对促进航空气象的发展具有重要价值。

气象学家阿斯曼与航空气象有不解之缘，他在地球大气高空探测领域做出了许多贡献，这些成果也是航空科技发展必不可少的基础性工作。阿斯曼也被认为是科学航空学的创始人之一。1887年，他加入了成立于1881年航空促进协会，在动力飞机发明之前，所谓航空主要是通过热气球实现。1888—1899年阿斯曼发起并组织了该协会的科学航空，通过载人自由气球上升来探索大气层。为了获得航空所需的气球，阿斯曼多方筹集资金，最终获得德皇威廉二世5万马克的资助，1893年，制造出了洪堡气球（Ballon Humboldt）（图4）。洪堡载人气球的第一次升空为1893年3月1日，阿斯曼亲自参加了飞行。整个过程都还算顺利，但在着陆时出现了小故障，阿斯曼为此付出代价，摔断了右腿。从中可以看出，当时所谓航空的一个重要任务就是研究大气活动。1888年6月2日，柏林普鲁士气象研究所所长威廉·冯·贝佐德（Wilhelm von Bezold）在德国航空促进协会第100次会议上发表了题为“航空对气象学的意义”的演讲^[3]，描绘了气象与航空在高层大气探测方面的合作前景，也反映出航空与气象的密切关系。1892年，阿斯曼与飞艇设计师鲁道夫·汉斯·巴奇·冯·西格斯菲尔德（Rudolf Hans Bartsch von Sigsfeld）一起开发了一种用于精确测量大气湿度和温度的干湿计，能够保护其测温元件免受太阳辐射，是第一台能够为高空气球提供可靠温度记录的仪器。

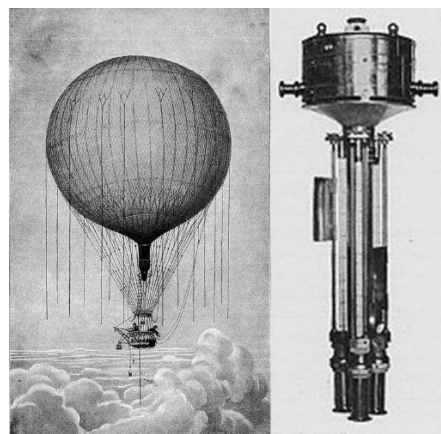


图4 洪堡气球与阿斯曼干湿计

阿斯曼在研究高空大气过程中也取得不少原创性进展，其中最重要的成果之一是发现了对流层顶和平流层。1902年5月1日，他向普鲁士科学院提交了一篇

题为《关于10~15 km暖气流的存在》的论文^①，与同时发现这一现象的法国气象学家莱昂-菲利普·泰瑟伦德·博尔特（Léon Philippe Teisserenc de Bort）共享了这一突破性成果。阿斯曼1905—1914年担任著名的德国林登伯格气象观察台台长，2005年10月16日，该观察台成立100周年时，增加了一个新名称：理查德-阿斯曼观察台（Richard-Assmann-Observatory）。

从航空发展看，1903年莱特兄弟首飞成功后，动力飞行器发展迅速，很快进入到实用阶段。1911年6月，32岁的卡尔布雷斯·佩里·罗杰斯（Calbraith Perry Rodgers）向奥维尔学习了90 min的飞行课程，并从奥维尔那里购买了一架飞行器，这架飞机的26 kW发动机可以在1000英尺（305 m）上空以每小时50英里（80 km/h）的速度飞行。飞机以一种软饮料Vin Fiz命名，目的是为完成横跨美国东西大陆飞行获得经费支持。罗杰斯于1911年9月17日下午从纽约布鲁克林的羊头湾赛马场架机起飞（图5），沿途落地检修75次，包括16次因遭受严重碰撞，罗杰斯也多次受伤，甚至遭受脑震荡和脊椎扭曲。最终，在地面支持团队的护驾下，飞机最终于12月10日降落在加州海滩上，罗杰斯完成了这次创纪录的航程，飞行距离超越4000英里（即6400 km）^[4]。1919年，美国海军的一架飞机经两次停靠后完成了首次跨大西洋飞行。

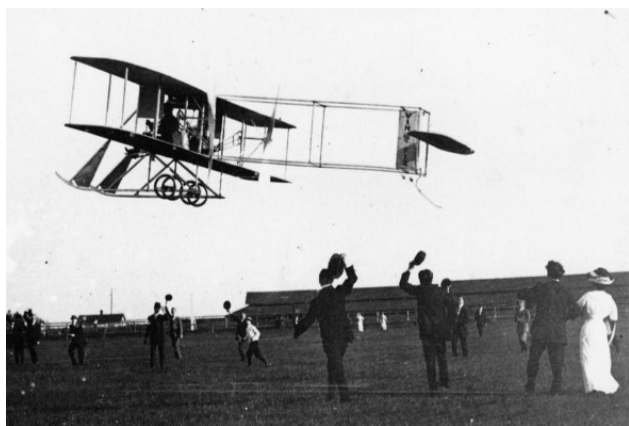


图5 1911年9月17日，罗杰斯驾驶的“Vin Fiz”飞机（莱特模型EX双翼飞机）从纽约布鲁克林的羊头湾赛马场起飞，第一次横穿美国大陆的航班的开始

罗杰斯长距离飞行成功的轰动效应及动力飞行技术的快速发展，为飞机的使用打开了广阔空间，也产生了两类与气象相关的直接需求：一是如何确定适合于飞行的天气信息，二是如何利用飞行器获取空中气象信息，这也进一步印证了航空与气象的密切关联。而对动力飞机发展起到了刺激作用则是战争，首次将飞机用于战争的是意大利人。1911年，在的黎

波里附近对抗土耳其人时，意大利的朱利奥·加沃蒂（Giulio Gavotti）中尉（图6）驾驶飞机向对方部队投掷了一枚炸弹^[5]。而在随后不久的一次世界大战期间（1914—1918年）则广泛使用了飞机，英、法、德、俄、美等国都在战争中迅速发展了其空中力量，投入战争的各类飞机总量超过20万架，从最初的仅用于侦察，到后来用于轰炸和扫射攻击，敌对双方都体会到了空中优势的重要性。除战斗外，飞机也成为提供战场环境天气观测的重要工具，当时一个重要需求来自于要满足远程火炮准确射击，高炮发射需要掌握大气信息来确定炮弹轨迹，而配备气象传感器的飞机可以探测到从地面到4000多米高度的气象要素变化。同时，飞机的出行也必须掌握天气信息，自身不安全，也无法发回准确信息。



图6 朱利奥·加沃蒂 (Giulio Gavotti) 中尉在控制法曼双翼飞机 (1910年, 罗马)

气象与航空在合作发展中确实做到了相互促进，受益共赢。

3 国际航空气象保障体系的确立

一战结束后，航空技术的发展和影响受到空前重视，1919年10月13日，26个国家在巴黎签署了《关于管理空中航行的公约》，即《巴黎公约》。主要解决了领空主权、外国航空器通行权等问题，该公约1922年经批准生效，并在公约基础上创建了国际空中航行委员会（International Commission for Air Navigation, ICAN）于1922年12月在巴黎设立总部。

面对激增的军用航班和新开辟的邮件航线，对天气预报的需求也随之增长，美国天气局从1918年逐步为每个机场都安装广播电台，所有的飞机都可通过无

① Assmann R. Ber die Existenz eines wrrmeren Luftstromes in der Hhe von 10 bis 15 km. 1902.

线通信接收到天气报告。1925年美国国会正式批准邮局可以授权民用航空企业可以提供邮件服务，为航空业的发展开辟了持续的经费支持渠道。1926年美国国会通过了《航空商务法》（Air Commerce Act），通过立法要求气象局提供航空天气报告、预报和警告，促进空中航行的安全和效率，主要影响飞行安全的危害性天气包括积冰、雪、雾和低云、风、湍流和雷暴。可以看到航空业起步较早的美国对于航空气象保障的理解是比较到位的，保障重点分为机场和航线，并对引发航空灾害的天气现象做了重点划分。特别是到了20世纪30年代，客运航班逐渐成为普遍性业务，但通常飞机只能搭载10~15人，且只能在较低的高度飞行，既带来了交通上的便利，也存在较大风险，或者说乘飞机既有乐趣，也是冒险。其中，除飞机本身的问题外，对天气的依赖度非常高，存在很大不确定性。1939年，跨大西洋客运航班开始，到1941年，每周飞越北大西洋的飞机达数百架，进一步加大了对气象保障的需求，包括对高空天气信息的获取。且随着飞行高度的增加，一些新的需求也随之出现，如对高空风的影响，特别是急流区的存在，对飞行的影响很大，如风切变、晴空湍流等。1944年，一支盟军轰炸机群前往柏林，预计最大风力为20 m/s，实际遇到的风速达54 m/s，导致72架飞机坠毁的重大损失。若果缺少高空观测，或对高空风的分布与变化缺少足够认识，类似的事件就难以避免。

由于二战期间空军的作用与一战期间已不可同日而语，成为影响战争胜负的重要力量，一些国家的有识之士和政策制定者预计到战争结束后，商业航空将面临难以估量的发展态势，形成全球范围的广泛需求，而这一即将来临的民用航空新时代需要扎实的国际合作基础。为此，美国政府邀请了55国代表（54国到会）于1944年11月在美国芝加哥召开了富有远见的国际航空会议（International Aviation Conference in Chicago），那时战争还未结束。会议从11月1日—12月7日（图7），最终由52个国家签署了《国际民用航空公约》，即著名的“芝加哥公约”（Chicago Convention on International Civil Aviation）。这一具有里程碑意义的协议为建立全球标准和规范、和平推进全球民用航运奠定了基础，并确定要建立一个负责协调全球航运规则的国际民用航空组织（ICAO）。由于《公约》的批准需要时间，先建立临时国际民航组织（PICAO）作为临时咨询和协调机构。1946年6月在加拿大蒙特利尔举行了第一届PICAO大会，蒙特

利尔以27票支持被确定为国际民航组织永久总部所在地。1947年4月4日，《芝加哥公约》获得足够签约国批准后生效，同日，国际民航组织（ICAO）正式成立，第一次大会于当年5月在蒙特利尔举行^①。如今已有190多个成员加入了ICAO，签署了12000多个项国际标准和措施（SARP），这些SARP为推动国际航空网络的发展和相关技术进步发挥了重要作用，堪称二战后最有成效的国际合作项目之一。



图7 1944年11月首次国际民航会议在美国芝加哥举行

芝加哥公约原有18个附件，包括各类标准和建设性措施，2013年新增了附件19《安全管理》。附件3为《国际航行气象服务》（Meteorological Service for International Air Navigation），对机场和航线上的气象保障提出了具体要求，包括各类气象要素、天气系统及通信方式等。

芝加哥公约生效后不久，发生了另一件与其相关的重要事件，1947年9月在华盛顿召开的各国气象局长会议，有45个国家和30个地区气象组织机构负责人参加的这次会议，决定把已成立了70多年的国际气象组织（IMO）改组为政府间机构：世界气象组织（WMO）。10月11日签署了《世界气象组织公约》，1950年3月23日该公约批准生效，1951年，联合国大会通过决议，将世界气象组织作为联合国的一个专门机构。这一变化的主要原因是考虑到建立全球气象业务体系所需的国际气象合作需要在各国政府支持下才有可能实现。

在联合国统一框架下，ICAO与WMO很快建立了工作联系，在航空气象服务领域明确了各自分工，ICAO负责制定对国际航空气象服务的要求，WMO负责建立满足这些要求的方式并制定提供服务标准。这些需求、标准及服务方式会随着时间有所调整，需要经过ICAO和WMO理事会批准，一般三年

① Travel C A. Chicago Convention on International Civil Aviation.

会审议一次，若是需要做出重大变化，则应由ICAO的气象司和WMO航空气象学委员会(CAeM)召开联合会议审议，这样的联合会议通常每十年举行一次^[6]。从ICAO和WMO这两大国际组织的建立与合作可以看到，航空与气象虽都有了各自的发展领域和方向，但仍保持着密不可分的联系，有着无法分割的相互需求。

4 世界气象组织与国际民航组织的两项重要合作

WMO与ICAO自成立以来，一直保持着富有成效的合作，取得了多方面的成果，其中有两个项目对保证航空运输安全和气象科技水平提升具有重要作用。

1) 飞机资料中继下传 (Aircraft Meteorological Data Relay, AMDAR)

19世纪60年代末至70年代，为了研究全球大气对流层和平流层的物理过程变化，WMO与国际科学联合会(ICSU)共同组织了一项全球大气研究计划(GARP)，其中包括第一次全球试验(FGGE)、大西洋热带试验(GATE)、气团变性试验(AMTEX)、季风试验(MONEX)、西非季风试验(WAMEX)和极地试验(POLEX)等若干分计划。其中FGGE计划中包含了当时全球几乎所有可以调用到的大气探测手段，包括地面观测、高空探测、船舶观测、浮标站观测、志愿船舶探空、飞机下投探空、极轨卫星、静止卫星等，其中，将商用飞机探测信息的收集纳入到了计划当中，即AMDAR项目。当时至少有80架装有气象探测仪器的飞机参与了试验。为了实现飞机资料实时传递的目的，还开发出了两个通信支持系统，基于卫星传播的ASDAR系统和基于标准甚高频通信的ACARS系统，这一信息获取方式迅速获得世界范围认可，并持续发展至今^①。为了实现既定目标，WMO与ICAO进行了密切合作，包括相关文件和标准的制定，必要的资金支持等。WMO执行理事会在1997年第四十九届会议上决定设立一个AMDAR专家组，由运行或打算参与该项目的国家级WMO会员组成，1997年11月在荷兰德比尔特召开筹备和成立会议后，AMDAR专家组的第一次正式会议于1998年在日内瓦WMO总部举行。从那时起，全球AMDAR计划的发展非常迅速，许多WMO会员已经建立了国家AMDAR计划或参与了区域AMDAR计划，这导致建立了一个全球飞机探测资料获取计划，目前参与

AMDAR计划的飞机达数千架，每天可以获取80多万条观测信息，通过WMO的全球通信系统(GTS)进行国际交换(图8)，这已成为全球大气观测系统的重要组成部分^[7]。

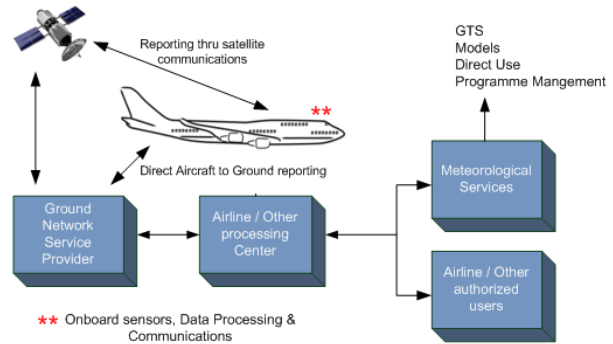


图8 AMDAR信息流程图

2) 世界区域预报系统(WAFS)与世界区域预报中心(WAFC)

AMDAR最初是WMO从提升大气科学研究与业务水平的需求角度出发，对及时获取飞机探测资料提出计划，在ICAO的支持下，最终逐步转化发展成为受到各国欢迎的重要气象信息获取系统。而气象科技水平的提高显然有助于保障全球航空系统的高效安全运行，这是每个发展航运国家都面临的共同需求，但从提供及时准确的全球航空气象服务的能力角度，国家之间的水平差异很大，基于这一发展不平衡的状况，ICAO提出了构建全球统一的高水平航空气象预报服务系统的计划，且得到WMO的配合支持。1982年，ICAO与WMO协商，提出了面向航空用户服务的世界区域预报系统(World Area Forecast System, WAFS)计划，其主要内容是统一制作全球航空天气预报，并将这些预报信息迅速传递给航空用户。同时将一些原由若干个地区航空预报中心(RACF)的业务转移到WAFS。

统一制作全球预报的任务分别由设在气象科技与业务发展水平较先进的美国华盛顿和英国伦敦的两个世界区域预报中心(World Area Forecast Center, WAFC)承担，两个中心的预报产品都可以覆盖全球，形成互为备份，产品形式包括报文、图形、数值预报格点资料和重要天气报告，按照统一格式通过位于大西洋、太平洋和印度洋上空的商业通信卫星向国际民航组织成员国发送。伦敦中心和华盛顿中心分别于1995年4月和1995年5月开始发布产品(图9)^②，构

① Gauber J M. Currently Developing and Future Communications and Technology Impact on AMDAR. World Meteorological Organization, 2016. <http://www.amc.namem.gov.mn/juram/wmo/26.pdf>.

② Johnson A. The world area forecast system. APANPIRG WAFS Service Specification, 2004.

成了目前全球范围提供和获取航空气象服务产品的总体格局。

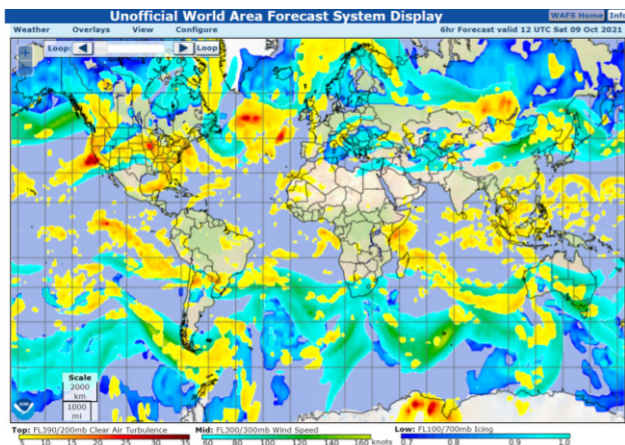


图9 华盛顿中心发出的不同高度格点预报图像产品,包括200 hPa湍流、300 hPa风场和700 hPa积冰

5 几点讨论

1) 航空业的快速发展仍然对气象有着广泛的需求

航空技术与航空业的快速发展,很大程度上提升了飞机抗击危险天气的能力,但仍不能说在任何天气条件下都能确保航行安全,一些航班在恶劣天气下遇险的情况仍时有发生。强雷暴、下击暴流、风切变、积冰、大雾、湍流等仍是需要尽量规避的天气;航空遇险的起因往往不是单一因素,但坏天气往往会伴随其中推波助澜,需要格外关注;航运的发展也面临着越来越高的需求,如准时起飞与到达、空中的平稳与舒适、节能减排等,美国学者曾通过对2000年影响美国航运系统航班出发与到达延误的各类因子进行了统计计算分析,包括交通量、飞机类型、飞机维护、航空公司运营、天气条件、途中程序变更、容量限制、客户服务问题及飞机或机组人员到达晚点等因素,结果显示,天气仍是造成航班延误的首要原因,占比为69%^[8]。其他一些分析也表明,天气因素在航班延误中的占比一般都会超过50%;另外,通用航空的快速发展也会对气象服务提出更多需求,需要时空分辨率更高的精细化产品来支持。因此,加强对各类天气的监测与预报,仍是高质量发展航运业务需要关注的重点问题之一。

2) 飞机探测仍将是大气探测领域的重要信息来源

从进一步提升气象科技与业务水平的角度出发,发展海、陆、空、天立体观测体系是必要的基础条件。从目前的现状看,空基观测是相对薄弱的环节,特别是在缺乏无线电探空资料的广阔海域上空,飞机

资料就更加珍贵。检验飞机观测资料重要性的一个重要例证是2020年新冠疫情爆发后大量航运飞机停飞,造成飞机资料缺失,对全球天气预报准确率产生显著影响。2020年2月和3月初,欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF)每天使用大约60万份飞机报告,而4月下半月每天只有不到15万份报告,减少约75%^[9]。据ECMWF专家分析,飞机资料在预报中的各类资料的贡献率占比则从15%左右降至约5%。这一变化可以清晰表明飞机探测资料对提高天气预报水平的重要性,是空基观测的主要信息源。

3) 航空技术的变化将为气象业务提供新的支撑

近几十年来,天气预报准确率的稳步提升为航运业务提供了重要支持,同样,航空科技的发展也为气象业务的提升带来新的机遇,如近年来无人机的快速发展,预计将成为空基大气探测的重要补充。我国气象部门已开始进行各种试验或业务试用,通过不同性能的无人机针对实际需求获取各类信息,弥补空基探测的不足。在国际上,这类试验起步更早,如美国NOAA在2014—2016年期间就曾开展过利用全球鹰(Global Hawk)无人机对热带风暴进行观测评估的试验项目,结果表明,对风暴路径预报效果有了显著改进^[10]。相对于陆基和天基观测,空基观测具有一定灵活性,特别是小型无人机,可以针对具体任务目标进行观测,相信在未来的大气探测领域会有其特定的发展空间。

4) 气象科技的发展也将为航空提供更好的保障

近年来,气象科技的快速发展和业务水平的提高对提升航空的安全、高效运行提供了越来越有力的支持和保障,特别是在基本探测和预报预测领域的提高效果显著。气象卫星的发展,使对全球大气进行完整的监测。中国、美国、欧洲和日本的静止气象卫星联手,可以每半小时进行一次全球范围的观测,配合低轨卫星的信息,中尺度以上的天气系统大多可以捕捉到。全球数值预报准确率不断提升,可用时间尺度已达9 d以上,空间分辨率可达千米级,区域精细化预报模式的分辨率可达百米。有了这些技术的支撑,航空气象的保障水平也会随之显著提升。

5) 中国需要建立航空与气象更为有效的协调机制

在中国,由于气象和航空气象管理分属两个部门,尽管已建立了较好的合作关系,但从充分、合理利用各方资源,不断提升航空气象预报服务能力,特别是瞄准世界先进水平,为我国蓬勃发展的庞大航空体系提供高质量气象保障服务的角度看,在体制机制

(下转20页)

- [39] 官元红,周光庆,陆维松,等.资料同化方法的理论发展及应用综述.气象与减灾研究,2007,30(4):1-8.
- [40] 兰鑫宇,郭子祺,田野,等.土壤湿度遥感估算同化研究综述.地球科学进展,2015,30(6):668-679.
- [41] 邵明轩,陈敏,陶祖钰,等.降水量的直接同化对初始场的影响.大气科学,2006,30(2):268-276.
- [42] Talagrand O. Assimilation of observation, an introduction. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1997, 75(1B): 191-209.
- [43] 王跃山.数据同化:它的起源、含义和主要方法.海洋预报,1999,16(1):11-20.
- [44] Ehrendorfer M. Four-dimensional data assimilation: comparison of variational and sequential algorithms. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1992, 118(506): 673-713.
- [45] 邱崇践,张蕾,邵爱梅.一种显式四维变分资料同化方法.中国科学(地球科学),2007,37(5):698-704.
- [46] 胡娅敏,丁一汇,廖菲.土壤湿度资料同化对中国东部夏季区域气候模拟的改进.科学通报,2009,54(16):2388-2394.
- [47] 马建文,秦思娴.数据同化算法研究现状综述.地球科学进展,2012,27(7):747-757.
- [48] 黄春林,李新.陆面数据同化系统的研究综述.遥感技术与应用,2004,19(5):424-428.
- [49] 李霞,高艳红,王婉昭,等.黄河源区气候变化与GLDAS数据适用性评估.地球科学进展,2014,29(4):531-540.
- [50] 邹永成,宋耀明,王志福.四套土壤湿度再分析数据在中国西北部—华北—江淮地区的适用性研究.气候与环境研究,2017,21(5):538-550.
- [51] Spennemann P C, Rivera J A, Saulo A C, et al. A comparison of GLDAS soil moisture anomalies against standardized precipitation Index and multisatellite estimations over South American. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(1):158-171.
- [52] 韩帅,师春香,姜立鹏,等. CLDAS土壤湿度模拟结果及评估.应用气象,2017,28(3):369-378.
- [53] 崔圆圆,谭军,敬文琪,等. GLDAS和CLDAS融合土壤水分产品在青藏高原地区的适用性评估.高原气象,2018,37(1):123-136.
- [54] 李新,黄春林.中国西部地区陆面数据同化数据集(2002).国家青藏高原科学数据中心,2013. doi: 10.3972/westdc.002.2013.db.
- [55] 师春香,潘昶,谷军霞,等.多源气象数据融合格点实况产品研制进展.气象学报,2019,77(4):774-783.
- [56] Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, et al. Comparison of soil moisture products from microwave remote sensing, land model, and reanalysis using global ground observations. Hydrological Processes, 2019, 34(3): 836-851.
- [57] 范科科,张强,史培军,等.基于卫星遥感和再分析数据的青藏高原土壤湿度评估.地理学报,2018,73(9):1778-1791.
- [58] 朱智,师春香,张涛,等.四套再分析土壤湿度资料在中国区域的适用性分析.高原气象,2018,37(1):240-252.
- [59] 邹永成,宋耀明,王志福.四套土壤湿度再分析数据在中国西北部—华北—江淮地区的适用性研究.气候与环境研究,2017,21(5):538-550.
- [60] 赵天保,符凉斌,柯宗建,等.全球大气再分析资料的研究现状与进展.地球科学进展,2010,25(3):242-254.
- [61] He J, Yang K, Tang W, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. Scientific Data, 2020, 7, 25, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0369-y>.
- [62] Yang K, He J, Tang W, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1):38-46.

(上接7页)

和业务水平上都还存在差距,需要加强管理协调,采取有效措施,形成合力,促进我国航空气象业务服务水平的提升。2016年1月,中国民用航空空中管理总局、中国气象局和香港天文台启动联合建设亚洲航空气象中心,民航气象中心为建设和运行的主体单位,国家气象中心提供技术支持,香港天文台则为备份中心。2018年7月11日,该中心正式成立并开始运行,对亚洲区域内未来六小时可能影响航空运行的雷暴、颠簸、积冰、沙暴等天气提供预报。这一合作方式应成为一个新的起点,通过中心的发展,解决好航空气象服务的协调机制问题。

参考文献

- [1] Haupt S E, Rauber R M, Carmichael B, et al. 100 years of progress in applied meteorology. Part I: Basic applications. Meteorological Monographs, 2017, 59: 22. 1-22. 33.
- [2] Dubois J L, Multhauf R P, Ziegler C A. The Invention and Development of the Radiosonde: with a Catalog of Upper-Atmosphere Telemetering Probes in the National Museum of American History, Smithsonian Institution. Smithsonian Institution Press, 2002.
- [3] von Bezold W. Die Bedeutung der Luftschiffahrt für die Meteorologie. Zeitschr Luftschiffahrt, 1888: 193-203.
- [4] Lebow E F. Cal Rodgers and the Vin Fiz: The First Transcontinental Flight. Smithsonian Institution Press, 1989. <https://sirimm.si.edu/EADpdfs/NASM.2007.0004.pdf>.
- [5] Johnston A. Libya 1911: How an Italian pilot began the air war era. BBC News, 2011: 10.
- [6] Shun C M, Lisk I, McLeod C, et al. Meteorological services to aviation. WMO Bulletin, 2009, 58(2): 94-103.
- [7] Perry J S, O'Neill T H R. The global atmospheric research program. Reviews of Geophysics, 1979, 17(7): 1753-1762.
- [8] Mueller E, Chatterji G. Analysis of aircraft arrival and departure delay characteristics. AIAA's Aircraft Technology, Integration, and Operations (ATIO) 2002 Technical Forum. 2002: 5866.
- [9] Ingleby B, Candy B, Eyre J, et al. The impact of COVID-19 on weather forecasts: a balanced view. Geophysical Research Letters, 2021, 48(4): e2020GL090699.
- [10] Wick G A, Dunion J P, Walker J. Sensing Hazards with Operational Unmanned Technology: Impact Study of Global Hawk Unmanned Aircraft System Observations for Hurricane Forecasting. NOAA Technical Memorandum, 2018.