需求滚动评估与弥补风场观测短板的风神卫星

■ 许小峰

DOI：10.3969/j.issn.2095-1973.2022.01.001

【编者语】

文章简要介绍了世界气象组织的数据需求滚动评估方法，并根据评估结果，对全球观测短板高空垂直风廓线需求问题的解决方案卫星激光测风技术的实现做了延伸介绍，ECMWF对卫星激光测风资料进行了系统性检验评估，给出了非常积极的评价，证实了其对全球数值预报系统的显著贡献，并于2021年1月9日正式将这一来源的资料列入到了实时业务。

研究瞬息万变的大气，并对其进行有效的预报、预测，离不开对初始状态信息的掌握，这需要通过对相关气象要素尽可能完整、准确的观测来实现。近两百年来，伴随着科技进步，人类不断探索实现对全球海、陆、空、天立体大气多种要素的观测方法，取得了巨大进步。面对不断增多的海量气象数据，气象学家一方面需要对数据的质量和应用方法进行严格把控，另一方面还要对如何使这些诸多类型的资料满足各种不同需求进行具体分析，包括哪些领域的需求已得到基本满足，哪些环节仍存在基本观测数据的缺失，从而影响到对实况的掌握和预报准确性。针对需求满足程度的检验和评估对合理设计和发展探测系统具有重要的引导作用，也是对数据应用能力的有效检验。本文对世界气象组织（WMO）建立的需求滚动评估系统整体情况做了概要说明，并结合对全球高空测风资料短缺的评估结果，进一步对欧空局发展卫星激光测风系统的过程及成效做了具体介绍。

1 WMO需求滚动评估系统的建立

为了对各不同领域观测需求及实际满足程度进行客观定量分析，从而对观测系统的发展提供指导，从20世纪初90年代末开始，世界气象组织（WMO）基本系统委员会（CBS）专家组牵头，组织多领域高层次专家对各不同应用领域对气象数据的需求开展了滚动评估（Rolling Review of Requeirements，RRR）[1]活动，最终将RRR作为全球观测系统发展进程中的规范性工作，纳入到WMO的2003年版全球观测系统手册中（WMO-No.544）[2]。

需求滚动评估的要求在WMO启动2015年编制新的综合观测系统（WIGOS）手册时也同样被确定为重要原则，其目的是减少观测系统发展的盲目性，加强科学设计，提高针对性。评估过程按照严格的科技、业务流程开展，包含四个步骤：对世界气象组织各业务、科研计划所覆盖的领域所涉及的观测需求进行分析；对已建成的和在规划中的观测系统能力进行评估；将上述分析、评估中的需求与能力进行对比分析，形成对特定应用领域观测需求和观测能力之间满足程度的评估报告，称为“关键评估（Critical Review）”；根据关键评估报告对每个应用领域做出差距分析，并对如何发展和缩小这些差距提出“指导意见”[3]。这一流程最终被WMO大会确定为所有成员国和参与WMO观测合作的网络都应遵循的观测站网设计、规划发展和效果评价的规范[4]。

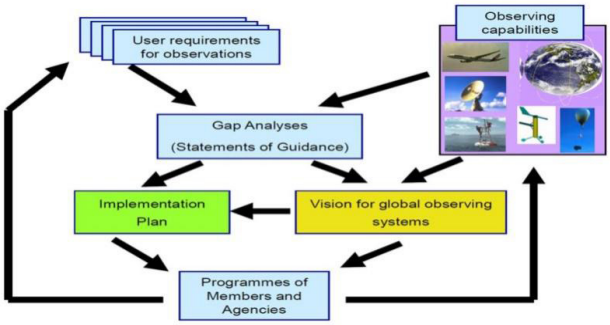

图1 RRR流程图

RRR的实现（图1）需要由观测系统能力与评估（Observation Systems Capabilities and Review，OSCAR）工具的三个数据库支持，第一个是OSCAR需求数据库，在这个库中，不涉及技术要求，仅提供具体的地球物理变量数[5]，目前有260多个，包括大气和其他气候系统圈层，陆面、海洋、冰冻圈等；第二个是OSCAR空基观测能力数据库，列出了所有卫星载荷传感器具备的能力，包括历史曾有的，目前运行的，及计划发展中的；第三个是OSCAR地基观测能力数据库，列出了所有基于地面设备的观测能力。这三

收稿日期：2021年11月22日；修回日期：2022年1月17日
第一作者：许小峰（1957—），Emaill: 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）

个数据库提供了为实现RRR评估所需的基础信息。

WMO所涉及的业务领域会随着发展变化有所调整，最新列入RRR评估的包括14类，即全球数值天气预报、高分辨数值天气预报、短时临近预报、季节和年季预报、航空气象、大气成分预报、大气成分监测、城市大气成分应用、海洋应用、农业气象、水文、气候监测、气候应用和空间天气[6]。

对于每一个应用领域和每一个相关变量，在OSCAR需求数据库中都会列出同样的要求列表，包括变量的时空分辨率、精度要求、实时性需求、覆盖区域、信息来源、置信度等。对于每一项需求又分别列出三项基本要求：一是最低阈值，如果观测无法满足这一设定要求，探测信息将无法使用；二是最优性价比，这也是判断是否可以满足业务运行要求的指标；三是最优目标，超越这个指标不会增加任何额外价值。这三项要求体现出的判定价值取向是值得关注的，既有最低标准门槛，又不盲目提出无必要的高要求，同时追求最佳性价比，是一种非常务实的需求判定导向。而这些需求变量和判定指标的确定则由WMO基本系统委员会（CBS）和其他相关专项委员会或技术组的专家们研究确定。2019年6月，世界气象大会批准了大规模WMO改革方案，将原有的十几个技术委员会合并为4个，观测、信息、基础设施等归并到基础设施委员会（The Commission for Observation, Infrastructure and Information Systems，Infrastructure Commission），与RRR相关工作由这一委员会主要负责。

根据WMO最新评估结果，在所有资料需求最重要应用领域中的优先排序中名列第一的是全球数值预报（GNWP），其次是高分辨率数值预报（HRNWP），给出的理由是数值预报是所有天气和气候应用中最基础的工作，而GNWP又是做好HRNWP和短时临近天气预报的先决条件；GNWP还是通过再分析资料开展气候监测所依赖的核心条件。另一方面，开展GNWP所依赖的全球资料也需要各国共同协作提供支持，这也正是需要通过WMO总体协调，通过相关机制推进解决的问题。

确定了GNWP优先地位后，进一步分析在诸多观测资料中，目前重点需要解决的薄弱环节又是什么呢？RRR给出的结果是地球表层气压和高空风场。地表气压的缺失来自两个因素，一是在海洋和人烟稀少的区域，地表观测的覆盖面仍然不足；二是地面气压值的获取还主要靠仪器实测，尚难像温度和湿度那样通过卫星遥感信息反演的方法获得。高空风场的问题也类似（图2），通过探空站观测可以准确获取大气垂直风场，但全球探空站的分布主要是在有人居住的陆地区域；少量海洋观测船可以做一些探空补充，每天两次固定的探测在时间分辨率上也无法满足，且在现有高空站网的基础上，进一步扩充的潜力也很有限，需要增加较大成本；飞机观测可以发挥重要作用，但仅在起飞和降落时可以提供大气廓线信息，多数情况都是在某一高度上飞行；卫星观测可以提供较好的温度和湿度水平和垂直廓线产品，也可以通过云系变化推算云导风，但覆盖的有效区域不够，且垂直分辨率和精度也不足。有了以上分析和结论，如何改进全球观测的目标和重点任务也就清晰了。

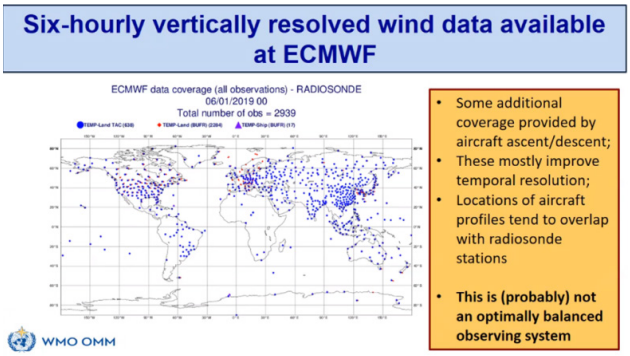

图2 ECMWF获取到的全球有效垂直风场资料分布

2 弥补高空风场探测的短板

在综合分析了几种高空风场的提供方式后，难以提出一种完备的方法解决全部问题，只能在保持目前已有系统的基础上，重点考虑弥补短板，即如何增强风场信息的空间分辨率和覆盖范围，在此基础上，再进一步解决时间分辨率的问题。

回顾实际发展情况，欧洲航天局（ESA）在20世纪末决定发展装载激光测风雷达的低轨卫星确有先见之明。测量高空连续风场，通过地基的风廓线或激光雷达可以解决部分陆地区域，但从全球均匀覆盖需求角度看显然无法做到。20世纪80年代，经过对多种可能的方法和技术进行比较调研后，美国宇航局给出了结论性报告，只有利用主动激光源从太空观测，才有可能获取全球范围满足需求和精度的立体风场资料[7-8]。这一强烈需求促成了在低轨卫星上搭载激光测风仪（Laser Atmospheric Wind Sounder，LAWS）实现天基全球风场探测的构想，尽管在技术实现上有难度，需要一定研发周期，但从弥补探测领域短板的角度，是最可行的选择。

ESA于1977年11月23日成功发射了第一颗静止轨道气象卫星Meteosat，为开启天基对地观测迈出了坚

实一步。随后又成功发射了系列对地观测卫星，包括ERS-1、ERS-2、Envisat和MetOp等，获取了大量宝贵数据。为了推进更为全面的地球观测计划，1999年6月7日，ESA启动了新的地球观测计划，称为“生命星球（Living Planet）”，旨在加深对包括天气、气候变化的地球系统演变的全面认识和理解。正是在这个计划下，为了实现全球完整垂直风场的观测目标，由欧美相关领域专家组成的ESA多普勒激光雷达工作组提交了建议报告，内容包括基础研究、技术实现和应用方法等，目标是通过星载高光谱多普勒激光雷达测量到0～30 km的全球垂直风廓线，还可获得云和气溶胶光学特性等其他大气特征产品。其中有争议的问题是要达到怎样的观测目标，早期方案曾设想过采用圆锥扫描方式，这是在地基测风激光雷达中常用的选择，可以通过三个不同方向测量到的风矢量计算出三维风场。但这种扫描方式在高速运行的卫星上很难实现，在硬件设计上无法保证稳定运行，获取到的信息也难以有效反演成可用数据。从大气运动的实际情况看，通常情况下运动的垂直分量很小，在大尺度测量中可以舍去。而根据法国[9]和英国[10]等国的科学家所做的相关研究，认为即便是通过星载激光雷达获得单分量风场信息，也可以对改进全球数值预报提供有效支持。这些分析成果使得在星载激光雷达的设计上可以得到很大程度简化，对需求做出适当妥协，仅考虑探测真实风矢量在激光视向上的分量，这样做可以提高方案的可行性，报告于1999年最终获得批准，利用卫星搭载激光雷达测风的大气动力学项目（ADM-Aeolus）进入到了ESA的重要核心创新计划[11]，Aeolus指希腊神话中的风神，被用来为新的测风卫星命名。2000年开始了前期技术研发，2002年ESA正式与制造厂商签署了合同，进入到项目实施阶段，2005年完成了关键技术审查。图3为基本原理图。

ADM-Aeolus原计划在2007年完成，但激光仪器的设计难度比原设想要大得多，故推迟了11 a，直到2018年才完成发射，项目耗资约4.8亿欧元（5.5亿美元）。尽管卫星设计寿命为3 a，但这项动用了上千人参与研发的科研成果，对全球大气探测而言确实时是划时代的创新，为下一步的选择奠定了科技研发和业务实现基础，物超所值。

Aeolus卫星重约为1260 kg，运行在距地表320 km的太阳同步轨道上，每天大约完成16次环球轨道运行，轨道周期为90 min，重复周期为7 d。卫星上主要装置为一部直径为1.5 m的大型望远镜、一部非常灵敏的散射接收器和一台每秒发出50次脉冲的高功率

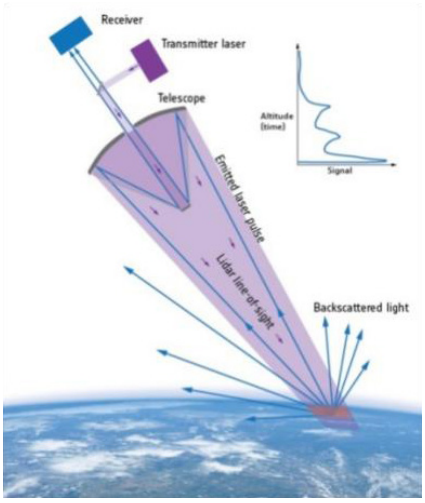

图3 星载激光雷达测风原理示意图（激光雷达向大气发射激光脉冲，然后收集、采样和检索从云、气溶胶、分子和地球表面反向散射的信号的频率）

紫外线激光器（Atmospheric Laser Doppler Instrument，ALADIN）。激光器可在355 nm的紫外光谱段发射光脉冲，使用紫外光普段是因为大气分子在这段波长的反向散射特别强，并开发了在355 nm频段同时探测气溶胶的米氏散射（Mie scattering）和分子的瑞利散射（Rayleigh scattering）方法，从而可以在富含气溶胶的大气和洁净大气中同时开展风的探测。望远镜用于收集来自大气的反向散射光，并引导至接收器，接收器处理分析反向散射信号相对于发射激光脉冲频率的多普勒频移。望远镜与轨道平面成35°，以便发射和接收与卫星移速垂直的光，使ALADIN能够确定大气运动的东西水平分量（图4）。

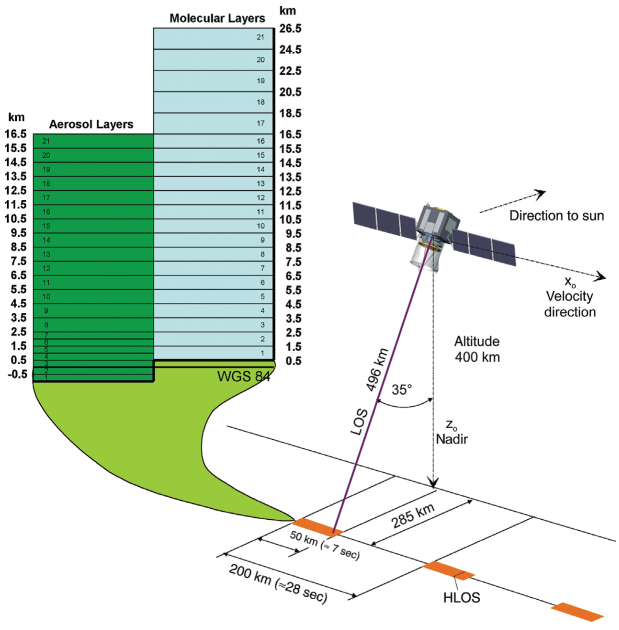

图4 风神卫星测量几何结构示意图

激光雷达测风原理是利用光散射现象和多普勒效应，雷达发射的短而强的光脉冲穿过大气时，可以获取大气中的气体分子、气溶胶和水滴颗粒反向散射光，Aeolus的望远镜和接收器负责接收、处理这些散射信号，发送出的光脉冲和收回信号之间的时间决定了到“散射体”的距离，即得到了散射体在地球上方的高度。如果发射信号与返回信号的频率出现改变，称作多普勒频移，频移是由于散射物沿激光发射方向做相对运动而引起的，这种运动与观测体积中的平均风有关。观测体积由50 km的最大地面积分长度、所需的垂直高度分辨率和激光覆盖区的宽度所确定，并在大约200 km的距离上不断重复，即激光器开启7 s，相当于地面约50 km，并在28 s重复周期剩余时间保持关闭，相当于200 km地面轨迹（图4）。垂直高度分辨率的要求在对流层和平流层下部至少应为1 km，在大约16 km以上高度上可以增加到2 km，对于地面边界层附近为0.5 km或更小。水平分量（HLOS）的精度目标在边界层为1 m/s，对流层为2.5 m/s，平流层下部为3 m/s，对数据获取的时效要求为3 h。相对运动的产生除散射物的运动外，还应包括卫星的运动和地球的旋转，这需要特殊的系统设计和处理。根据多普勒频移原理和以上确定的设计方案，便可以计算观测物的移动速度、方向和距离。

Aeolus可以在晴空、薄云、气溶胶、及厚云层顶部区域提供风廓线观测信息，也可以探测云顶高度及薄云或气溶胶层的垂直分布。光的散射可以来自气溶胶或云滴粒子的米散射，也可以是来自空气分子的瑞利散射。两种散射机制表现出不同的光谱特性和不同的波长依赖，从设计上，可以构建仅评估一种信号类型或同时评估两种信号的仪器。Aeolus安装了两个光学分析仪，分别测量来自大气分子的瑞利散射和来自气溶胶、水滴的米散射所产生的多普勒频移，从而通过获取两类散射物运行的移动变化得到风场分布和变化。从图5可以看出，接收到的光谱相对于发射的激光（红线）发生位移。虚线表示未移动的频谱（零风速）。由于热运动，分子的返回信号谱很宽，而较重的气溶胶和云粒子的热运动几乎可忽略不计，表现出一个狭窄的返回信号。由于在分子（瑞利）散射的情况下，接收光谱被显著拓宽，其宽度相当于几百秒米的视向风速范围，因此对于分子散射，需要更高的发射信号来实现相同速度的测量性能。最终获取到的风包括四种类型，分别为晴空条件下的瑞利散射风、多云条件下的瑞利散射风、晴空条件下的米散射风、多云条件下的米散射风。

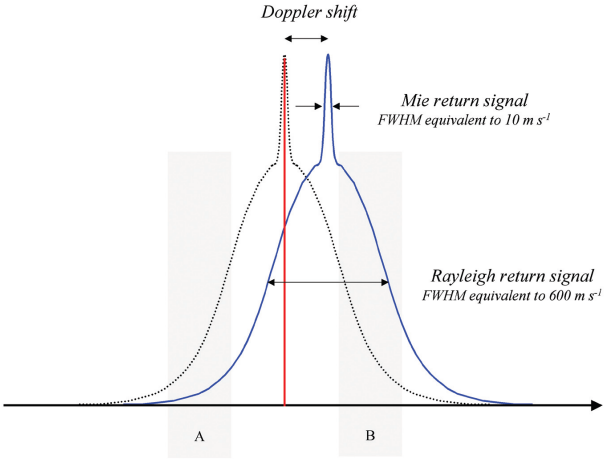

图5 无风和有风条件下瑞利散射和米散射多普勒频移示意图（半峰全宽FWHM：Full Width at Half Maxima）

ESA于2018年8月22日将ADM-Aeolus成功送入预定轨道，已正常运行了三年多时间，送回了大量有价值的资料，已超过了预期设计寿命，服役进入到了最后时光。从获得的大量应用成果看，已充分印证了从空间测量全球风场的可行性，并为未来全球大气探测业务中利用星载多普勒测风激光雷达技术积累的宝贵经验。

对于Aeolus资料，在发射前就做了大量检验评估工作，包括通过飞机对设备进行检验，通过与地对空探测进行实测资料对比，及数值模拟评估等，但最终的结果还要看发射后的实际验证结果。从图6可以看到从一个完整轨道获取到的完整垂直分布的HLOS风场，从中可以看到赤道东风带、副热带西风急流等所在位置。ECMWF对Aeolus发回的资料进行了系统性

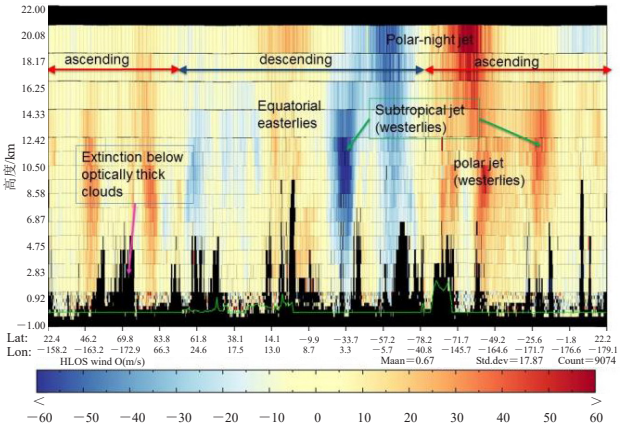

图6 2018年9月15日一个完整轨道的L2B瑞利-晴空和米氏-多云HLOS风观测图
（色标表示HLOS的风速。吹离卫星的风产生正HLOS风，吹向卫星的风产生负HLOS风。为了更清楚地显示较低的风速，尽管一些急流的速度达到较大值，但尺度在60 m/s时达到饱和。黑色区域表示没有测值）

检验评估，通过对视向水平分量风场（horizontal line-of-sight，HLOS）Level-2B级资料质量进行量化检验分析，给出了非常积极的评价，证实了其对全球数值预报系统的显著贡献，并于2021年1月9日正式将这一来源的资料列入到了实时业务[12]。

对于Aeolus信息质量的影响评估，ECMWF采用的是两种标准做法，一是观测系统试验（OSE），二是基于预报敏感度观测影响（FSOI）。在OSE评估中，将数据同化系统运行两次，第一次包括待评估的观测系统数据，第二次不包括。然后将两组结果进行比较，以评估新观测数据的影响[13]，考虑到评价一种新观测资料的影响不能仅凭个例试验或者短时间试验，OSE评估需要相对时间长一些的稳定运行周期；FSOI则是一种评估同化观测信息后如何影响短期预报（24～36 h）误差增长的方法，使用四维变分资料同化系统中的基础算子量化某种类型观测对于分析场或者预报结果误差的灵敏度，不必像OSE那样进行“排除”性检验，而是在所有观测资料都参与同化的背景下评估各类观测所能产生的误差影响[14]，此外，FSOI也不需要为获得稳定结果而进行长时间运行计算。

图7给出了同化Aeolus两类散射信息后风场的平均误差变化，总体上反映出有显著正效果，其他要素如温度、湿度、位势高度场的变化也都有类似改进。图8显示了ECMWF通过FSOI评估获得的自2020年1月9—22日业务数据同化结果，涵盖了各观测子集的全部影响，从中体现了Aeolus产生的L2B级风场资料重要性，在大约80种仪器获得的资料贡献排名中位列第五，对预测改进贡献度约3.8%，体现出重要价值。值得关注的是在图中排名第一的“Wigos Amdar”资料的贡献十分突出，体现了飞机观测的重要性，但这是每天数千架飞机资料的合成效果，如果能有几颗测风雷达同时观测，贡献度也应会有大幅提升。

除了通过数值预报模式对Aeolus的风场资料进行检验评估外，也有学者通过探空仪实测资料进行了对比分析[15]。由于Aeolus测到的风仅是一个投影分量值，这需要将探空仪获取的真实水平风场资料也进行反算投影，与HLOS Level 2B资料保持一致。具体反算公式为：

$$V_{\mathrm{RSHLOS}} = V_{\mathrm{RS}} \cdot \cos\left(\varphi_{\mathrm{Aeolus}} - \varphi_{\mathrm{Rs}}\right),$$

其中：V_{RS}为探空仪测到的总水平风速，φ_{Rs}为探空仪测到的风向，$\varphi_{\mathrm{Aeolus}}$为Aeolus的方位角，$V_{\mathrm{RSHLOS}}$为得到的反算投影值。2018年11月，通过基于五个无线电探空仪资料的对比统计分析，显示 Aeolus 在发射后的早期阶段已表现出良好性能，晴空瑞利散射风的系统误差约为1.5 m/s，随机误差为4.84 m/s；多云米散射风的效果更好，系统误差约为1 m/s，随机误差为1.58 m/s。应指出，当时所用的验证数据还不是Aeolus的最终风数据集，在欧空局对因仪器问题而出现的误差做出调整后，数据质量又有了明显改进。

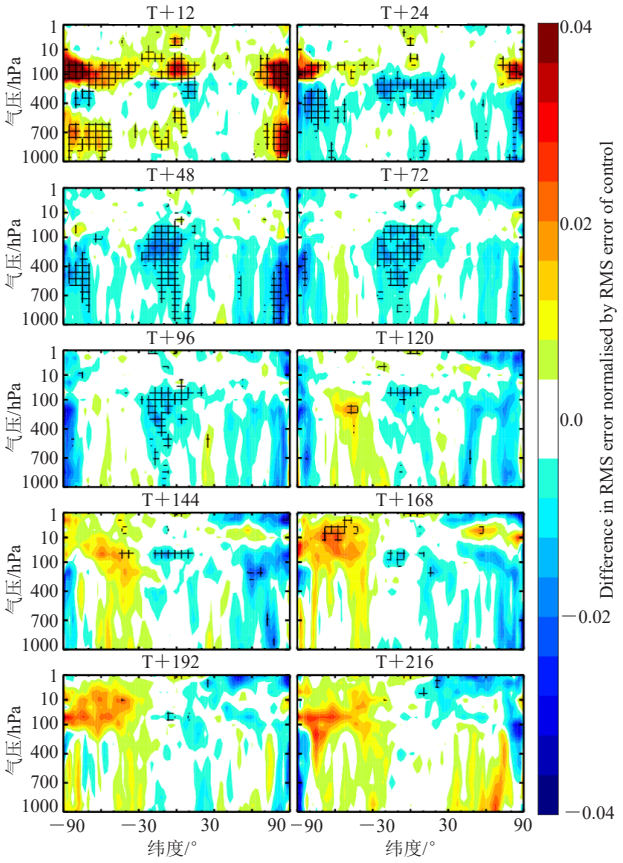

图7 2019年8月2日—12月31日期间同化Aeolus（Rayleigh-clear和Mie-cloudy）资料后的风矢量均方根（RMS）误差的纬向平均归一化变化
负值（蓝色）：误差减少；正值（红色）：误差增加

3 几点讨论

1）对气象观测系统的发展应结合需求针对薄弱环节进行设计，并根据业务发展的状况进行持续评估。可参照WMO的做法和利用WMO的评估结果，结合我国的实际，规划海、陆、空、天的探测的布局。

2）满足全球化和精细化预报，特别是数值预报的需求是未来观测系统发展的重点，全球化观测可按WMO已有的结论，重点关注大气风场和海平面气压的观测需求，精细化的需求还应结合我国不同区域的特点做进一步分析。

3）欧空局发展激光测风的成功经验和曾遇到的问题值得学习和关注，目前Aeolus卫星已运行到原设计寿命的最后阶段，各国都将面临全球风场再次缺失的

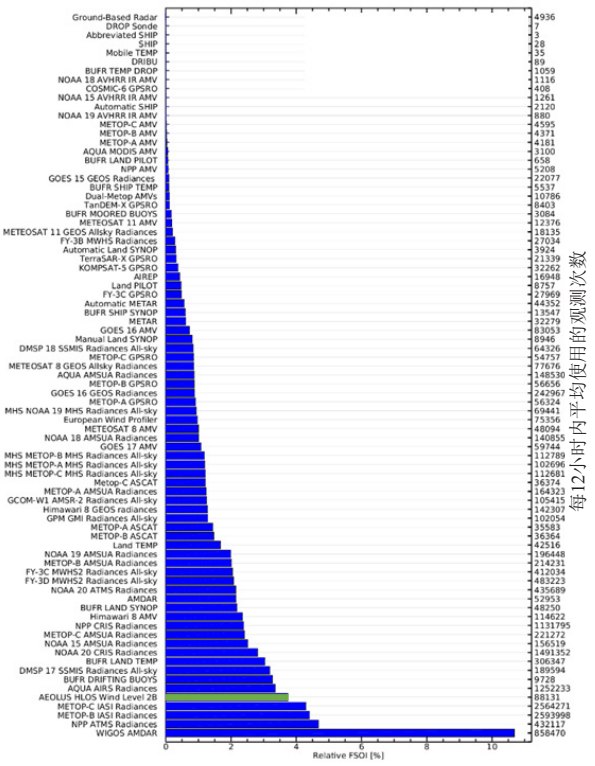

图8 ECMWF业务系统计算的2020年1月9—22日期间按探测仪器类型划分的相对FSOI（%）贡献
（“Aeolus HLOS Wind Level 2B”为绿色条标）

局面，即便是有Aeolus，从数量上看也显不足，应开始谋划我国测风卫星的发展，在未来形成多国互补的局面。

4）数据的有效应用是促进观测系统发展的重要基础工作。Aeolus卫星计划能取得成功，除卫星装备的研发外，对数据的质量控制、应用检验发挥了重要作用。在数据处理与应用领域，ECMWF的能力确实优势明显，迅速将Aeolus数据同化到了全球数值模式中，对卫星探测的发展起到了推动作用，同时也成为最大的受益方。

参考文献

[1] Riishojgaard L P, Zillman J, Simmons A, et al. Home Resources Bulletin WMO Data Exchange-Background, History and Impact. WMO Bulletin, 2021, 70: 2.

[2] World Meteorological Organization. Manual on the global observing system. Geneva: WMO, 2003.

[3] World Meteorological Organization. Manual on the WMO Integrated Global Observing System. Geneva: WMO, 2015.

[4] Riishojgaard L P. The WMO Rolling Review of Requirements and the State of Wind Measurements in the Global Observing System (Invited Presentation). 99th American Meteorological Society Annual Meeting. AMS, 2019.

[5] Eyre J. Requirements for Observational Data: The Rolling Review of Requirements. WMO, 2014

[6] Riishojgaard L P. The WMO Rolling Review of Requirements and the State of Wind Measurements in the Global Observing System (Invited Presentation). 99th American Meteorological Society Annual Meeting. AMS, 2019.

[7] Waymen B, Robert C. Proceedings of the NASA Symposium on Global Wind Measurements: Air Force Developments Toward Space and Wind Sensing. Columbia: NASA, 1985.

[8] Baker W E, Emmitt G D, Robertson F, et al. Lidar-measured winds from space: a key component for weather and climate prediction. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 76(6): 869-888.

[9] Courtier P, Gauthier P, Rabier F, et al. Study of preparation for the use of Doppler wind lidar information in meteorological assimilation systems. Paris: ESA, 1992: 82.

[10] Lorenc A C, Graham R J, Dharssi I, et al. Preparation for the use of Doppler wind lidar information in meteorological assimilation systems. Paris: ESA, 1992: 90.

[11] European Space Agency, Andersson E, Clissold P. ADM-AEOLUS: science report. Paris: ESA Communication Production Office, 2008.

[12] Rennie M P, Isaksen L, Weiler F, et al. The impact of Aeolus wind retrievals on ECMWF global weather forecasts. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2021,147(740): 3555-3586.

[13] Andersson E, Hollingsworth A, Kelly G, et al. Global Observing System Experiments on operational statistical retrievals of satellite sounding data. Monthly Weather Review, 1991, 119(8): 1851.

[14] Langland R H, Baker N L, et al. Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system. Tellus A, 2004, 56:189-201.

[15] Baars H, Herzog A, Heese B, et al. Validation of Aeolus wind products above the Atlantic Ocean. Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13(11): 6007-6024.

（作者单位：中国气象局）