

数值天气预报对卫星大数据的需求分析

杨何群^{1,2}, 王晓峰^{1,3}, 高彦青^{1,3}, 陆一闻¹, 麻烦欣¹, 王昕瑶^{1,3}

1. 上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200030;
2. 复旦大学大气与海洋科学系, 上海 200438;
3. 区域高分辨率数值预报创新中心, 上海 200030

摘要

多星协同的对地观测可提供多谱段、多时相、多要素、多尺度、多层次的遥感数据, 为数值天气预报提供丰富的价值信息。为了支撑未来地球系统无缝隙精细化网格预报服务, 从探测变量、时间分辨率、空间覆盖度和水平分辨率、垂直分辨率、精度与时效等方面探讨了数值天气预报对卫星观测大数据需求的应用现状。同时, 为了使卫星大数据高受容于数值天气预报, 总结了多星数据一体化一致性处理、全天候/耦合的资料同化方法、与人工智能深度结合、卫星观测与预报互动等方面面临的挑战和前景。

关键词

数值天气预报; 卫星; 大数据; 特征变量; 时空分辨率; 精度

中图分类号: P237, P456

文献标志码: A

10.11959/j.issn.2096-0271.2022017

Analysis of satellite big data requirements in numerical weather prediction

YANG Hequn^{1,2}, WANG Xiaofeng^{1,3}, GAO Yanqing^{1,3}, LU Yiwen¹, MA Bingxin¹, WANG Xinyao^{1,3}

1. Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200030, China
2. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China
3. Shanghai Innovative Center of Regional High Resolution NWP, Shanghai 200030, China

Abstract

Multi cooperative satellites can provide multi spectral, multi temporal, multi factor, multi scale and multi-level remote sensing data, which is rich in valuable information for numerical weather prediction (NWP). In order to support earth system seamless fine gridded forecasting service in the future, the application status of satellite observation big data was discussed for numerical weather prediction from the aspects of detection variables, time density, spatial coverage, horizontal and vertical resolution, as well as accuracy and timeliness. At the same time, in order to make satellite big data be highly tolerant with NWP, the challenges and prospects were summarized, such as multi-satellite integrated

and consistent processing, all-weather, coupled data assimilation methods, deep integration with artificial intelligence, and interaction between satellite observation and prediction.

Key words

numerical weather prediction, satellite, big data, feature variable, spatiotemporal resolution, accuracy

0 引言

数值天气预报 (numerical weather prediction, NWP) 把可信的天气预报延伸到一周以上, 并为天气和气候变化的研究提供了数值模拟的研究平台, 是近半个世纪以来气象领域非常引人瞩目的科学技术成就之一^[1]。回归到其本质, 其以积分模拟大气四维时空运动的偏微分方程组为基础, 属于微分方程的初值/边值问题, 需要利用观测资料不断修正模式初值, 产生更接近实况的模式大气状态。积分初始条件的优劣直接影响着数值天气预报的准确性, 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。而气象卫星作为半个多世纪以来气象领域另一项引人瞩目的科学技术成就, 使人类“看到”了地球大气的全貌, 使数值预报从多年来缺乏观测资料的困境中摆脱出来, 通过资料同化、物理过程参数化等, 使模式的初始场在时空上尽可能地接近观测值且满足真实大气的动力和统计关系。

未来数值天气预报的发展将“地球系统无缝隙预报”作为未来几十年科学界指导方针的重要指标, 提出从分钟级到世纪尺度、从米到全球空间尺度的预报发展趋势, 这意味着在天气、水、气候、环境等领域各个维度上的无缝隙, 即时空尺度无缝隙、学科融合无缝隙、影响预报无缝隙^[2-4]。为了实现上述预报性能, 全球乃至区域NWP对卫星观

测提供的关键变量、时间分辨率、空间覆盖度、水平分辨率、垂直分辨率、精度均有诸多需求, 世界气象组织全球综合观测系统 (WIGOS) 针对空间观测系统也阐释了框架性的远景发展规划^[5]。因此, 面向数值天气预报的未来发展, 在大数据的背景下, 开展NWP对卫星大数据的需求动向分析有助于把握观测技术的发展趋势, 丰富“大数据科学”的内涵, 拓展遥感应用面和加深遥感应用深度。

1 卫星观测大数据和NWP的特点

1.1 卫星观测优势及大数据特征

卫星观测具有明显的优点: 一是观测面广、水平分辨率高, 能够提供大范围 (包括人迹罕至) 地域上有关大气、海洋、地表和云况等的时空演变信息; 二是针对空间异质地域的扫描成像或垂直探测来自同一观测仪短时间的测量, 使得测量误差易于掌握。自从美国国家环境预报中心 (NCEP) 和欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 分别于1995年和1996年在业务三维变分同化中实现卫星辐射率资料的直接同化后, 以全球模式为代表的各类确定性预报和集合预报系统 (如 GRAPES等), 陆续将静止和极轨卫星云导风 (AMVs-IR/VIS/WVs)、GPS掩星、中国“风云”气象卫星系列、欧洲MetOp等的微波温度计 (AMSU-A)、微波湿度计

(MHS)、高光谱大气红外探测仪(IASI、AIRS)、微波散射计风场(ASCAT)等多平台卫星资料成功同化,数值天气预报技巧和能力持续提高。尤其是近10年,各类卫星资料的同化应用进展非常迅速,对于处于领先地位的ECMWF,其同化系统中所用观测资料超过90%来自卫星探测,这些资料涉及30颗卫星,包括超过90种数据和1 000多种参数。我国自主研发并建立的新一代多尺度通用资料同化与数值天气预报系统GRAPES对卫星资料的应用也已占其采用观测资料的70%。因此,卫星资料逐步占据了所有观测资料的最大份额,成为改善数值天气预报效果的一种重要而有效的动态信息源,对于数值天气预报效果的提高起着关键作用^[6-8],而数值天气预报对卫星资料的应用评估反馈也促使对地观测卫星系统的进一步改进^[5,8]。

与此同时,通过多卫星、多平台获取到的地球多维属性遥感数据集具有典型的大数据特征^[9]。随着对地观测技术的发展,多样化的成像方式、不同波段和时空分辨率的数据并存,遥感数据日益多元化;通信传输能力的提升和卫星组网运行使得遥感数据获取的速度提高,更新周期缩短,时效性越来越强;各种飞行平台上搭载的传感器不仅实现了对同一区域的短期重复观测,且遥感数据呈指数级增长,而海量数据背后隐藏的海陆气界面多粒度、多时相、多方位、多层次信息和知识则是新型的战略资源,亟待挖掘。总之,卫星遥感数据已体现出完整的大数据“5V”特征^[10]。深化卫星大数据在数值天气预报中的应用需依托于观测数据质量分析、偏差订正、云检测、通道选择、质量控制、资料同化等关键技术,准确把握NWP服务指标协同处理,提高多源卫星应用数量和效益。

1.2 面向气象服务需求的NWP性能指标

图1所示为数值天气预报的特性及挑战^[1],其中椭圆部分展示了需要被模式解析的关键现象及其所代表的从小尺度气流到完全耦合的地球系统模拟过程的复杂性。

从服务需求的视角来看,未来15~20年,面向风暴、洪水、干旱等高影响天气和极端气候事件预报的防灾减灾应对,满足人民生活需求的气象景观、生态服务功能预报,以及航空、交通、健康等行业趋利避害和城市精细化管理的气象增值决策服务,要求数值天气预报系统具备以下功能:在空间尺度方面,全球NWP单模式能够完成水平分辨率为1 km的对流可分辨尺度运行,集合预报模式分辨率需达到5 km、200个层次和100个诊断变量,非静力和完全耦合模式、区域模式的分辨率甚至要达到100 m;在复杂性方面,能够充分耦合大气-陆地-海洋-海冰模型;在及时性方面,具备从短时临近、中长期天气预报到季节延伸期、年际气候预测等符合对象特性的提前时效。

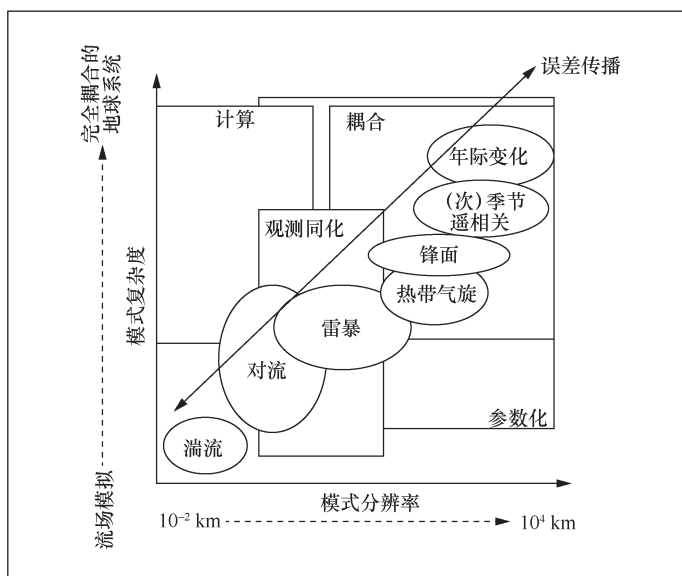


图1 数值天气预报的特性及挑战^[1]

表1为针对具体领域和项目的NWP期望性能指标,与现状对比,其体现出更加精密、精准、精细的总体趋势。

2 NWP对卫星大数据的需求及现状

根据用途以及探测反演的对象或变量要素,卫星划分为不同的平台(如气象、海洋和陆地卫星)和轨道平面,搭载相应的传感器;从探测属性方面,卫星传感器能探测的最小空间网格和两次观察同一地区的时间间隔分别称为空间分辨率和时间分辨率。如前所述,NWP的精确度和及时性很大程度上取决于卫星遥感等技术手段对大气物理和化学过程初始场描述的全面性、精准性。为了实现NWP的性能目标,数值天气预报对卫星大数据在以下方面具有更明确、更迫切的需求。

2.1 探测变量

数值天气预报强烈依赖卫星遥感提供

的天气要素实况,尤其需要从近地面层到平流层、具有足够垂直分辨率的、全天候的三维温湿廓线、三维风场,以及云特征量。除此之外,卫星对陆表(如土地覆盖/土地利用情况、土壤湿度)、海洋(如海表温度等)及大气成分的观测数据在数值天气预报与气候数值模拟中具有不可替代的作用,因此各国不断研制功能迥异的卫星,以满足数值天气预报的复杂要求。

温湿廓线探测方面。卫星微波仪器现今有NPP/ATMS、FY-3/MWTHS、AMSU-A/B等,集中于4~8 GHz、8~12 GHz、12~20 GHz、20~26 GHz、26~40 GHz、50~70 GHz、70~110 GHz、110~130 GHz、170~200 GHz、200 GHz以上频段;红外光谱仪器有AIRS、CrIS、IASI、FY-4A/GIIRS等,其中位于12.5~15.5 μm 光谱区域范围内的CO₂吸收线主要提供大气温度廓线信息,位于8.3~12.5 μm 光谱区域的是大气窗区,包含了地表温度和近地面的水汽信息。此外,GPS掩星、激光雷达也可探测大气水汽廓线。未来计划发射的星载微波垂直探测

表1 针对具体领域和项目的NWP期望性能指标

主要领域/属性	项目	期望目标
临近和短期预报	龙卷风	提前60 min
	雷暴、对流扰动	提前6~12 h
	火灾、溢油、化学或放射性污染等局地灾害性事故	实时发展趋势预测
中期预报	7~10天预报	准确率达90%以上
	台风(飓风)	3天路径预报精度达到75海里,2天强度预报精度达到9海里/h
	洪水	提前4天预报
	空气质量	可以开展7~10天预报
气候预测	ENSO(厄尔尼诺和南方涛动)、MJO(热带大气季节内振荡)等	可以常规预报15~20个月的厄尔尼诺事件,实现较高精度的季节到次季节尺度延伸期预报
水平分辨率	全球	1~5 km
	区域/城市	100 m
垂直分辨率	上层对流层	500 m
	边界层	30~50 m
诊断变量/要素	风压、温湿度等	100个

将拥有更加强大的获取大气信息的能力。

大气运动矢量探测方面。2018年,欧洲航天局发射的风神(Aeolus)卫星通过激光雷达基于多普勒和双/三频后向散射效应观测风廓线,实现了从太空对全球大气风场进行三维观测。其主要任务包括:①对高度0~30 km对流层和较低平流层的全球大气垂直风廓线进行测量;②以1 m/s的风速精度,对地表(高度0~2 km)的大气风场进行测量;③以2 m/s的风速精度,对自由对流层内(高度0~16 km)的大气风场进行测量;④确定50 km范围内的平均风速,每小时测量120个风廓线,从而有效弥补全球天气观测系统对三维动力场观测的不足。2019年,我国发射的捕风一号A/B试验卫星能同时接收中国和美国全球导航卫星系统的直射和反射信号。该信号能穿透降水,在海面反射后,会受海浪影响而发生变化,通过标定和反演,解码出“风”的信息,可获取台风中心厚云或强降水区域高质量海面风场信息。

云雨探测方面。主要使用降水测量雷达、云雷达、微波成像仪等进行探测。雷达探测云和降水的频段集中于Ku-波段(12~18 GHz/1.67~2.4 cm)、Ka-波段(26.5~40 GHz/0.75~1.1 cm)、W-波段(75~110 GHz/2.7~4 mm)。它们大多属于厘米波范围,仪器属于微波散射计和雷达类型。微波成像仪探测大气云雨状态的频段集中于1~200 GHz、200 GHz以上频段范围。降水雷达测量卫星采用主动降水测量与被动微波、光学成像遥感相结合,实现降水和云雨大气参数遥感探测,获取融化层高度和厚度信息,为提高降水数值预报的准确率提供有力支撑。

除了观测上述基础气象变量,数值天气预报还关注更多大气变量,如气溶胶、CO₂、臭氧等,以及作为季节和年际气候预测物理基础的陆地和海洋表面变量,如土

地覆盖/利用类型、土壤湿度、陆面温度、海洋上层(0~500 m)温度、积雪/海冰覆盖面积与厚度等。这些观测主要由陆地、海洋卫星承担。

陆地卫星技术利用可见光/红外、合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)等多手段,重点关注几何定量(几何分辨率与定位精度)和辐射定量(光谱辐射分辨率与定标精度),实现对地表资源环境的精细识别,支持数值天气预报陆面过程参数化^[11]。Landsat、Sentinel、MODIS、FY-3/MERSI等中空间分辨率卫星被广泛用来提供下垫面土地覆被类型和地表反照率、叶面积指数、地表温度等参数信息,AMSR-E、WindSat、ACSAT、SMOS、AMSR-2、GRACE等卫星则用于反演土壤湿度和地下水储量,这对于中期天气预报(即10~15天预报)更为重要。基于GOSAT、GOME-2、SCIAMACHY、OCO-2实现日光诱导叶绿素荧光反演,用于植被物候和碳循环的参数化。未来还需进一步补充激光、超光谱、多角度偏振成像等多种遥感探测手段,以具备亚纳米级地物光谱与地表空间垂直结构的精确探测能力,针对性提升对城市三维街渠冠层能量平衡与水分平衡的描述能力。

海洋卫星具有海洋水色、海洋动力环境和海洋监视监测三大系列。Jason、HY卫星上的雷达高度计可以测量海面高度、有效波高和重力场等参数,ASCAT、OSCAT、RapidScat等微波散射计可以测量全球洋面风场等;AMSR-E、AMSR-2、HY-2/RM、SMOS等扫描微波辐射计用于观测反演海面温度、海表盐度;中法海洋卫星搭载的扫描幅宽达180 km的波谱仪则连续测量全球海面波浪谱,通过风浪联合探测可以描述海表面波的动力过程与变化过程,揭示长涌

浪与风浪的相互作用、与交接海面的关系, 以及与危险海况相关的能量聚合。此外还需要海洋卫星监测反演海流、海冰、叶绿素浓度、悬浮泥沙、内波等要素信息^[12]。

2.2 探测时间分辨率

时间分辨率又称重访周期。时间间隔大, 则时间分辨率低, 反之时间分辨率高。天气系统瞬息万变, 为了提高预报效能, NWP需要时间分辨率高的卫星来观测要素, 以捕捉、描述其变化对地气系统的影响。

目前, 观测各类丰富地球变量的卫星多是极轨气象卫星, 它们的首要任务是为NWP提供满足时间和空间要求的全球观测资料, 改善初始场, 提高NWP的预报时效和精度。例如, 欧洲和美国业务极轨气象卫星采用欧洲MetOp卫星负责上午轨道, 美国NOAA和Suomi NPP卫星负责下午轨道, 采用双边全球资料业务交换和共享的协作组网观测模式。我国的FY-3A/C卫星轨道接近欧洲的MetOp卫星, FY-3B/D卫星轨道接近美国的Suomi NPP卫星。但是, 上述卫星观测时间要么集中在10:00(22:00)左右, 要么集中在14:00(02:00)左右。从NWP同化要求来看, 目前每6 h观测, 同化时间窗内会存在2~3条轨道的卫星观测空白区, 且对于易生成天气现象(如对流等)的清晨时段也存在观测缺失。

为了满足NWP的观测需求, 世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)在《2025年全球观测系统展望》报告中提出了在太阳同步轨道平面上建立上午、下午和晨昏轨道卫星组网观测的概念^[5,13]。3颗卫星(清晨/上午/下午)分别携带高光谱红外垂直探测仪、可见光/红外成像仪(包括昼/夜微光成像)、微波成像仪、微波垂直探测器、散射计等, 满足全球3个时间段的全覆盖。晨昏轨道卫

星在数值天气预报中具有重要意义, 它是轨道降交点地方时(equator cross time, ETC)在6:00(18:00)左右的卫星。该类卫星的增设可以让每6 h观测同化时间窗内形成一次无缝隙的全球大气探测资料, 从而改进NWP的初始场, 对于南北半球预报和行星尺度的区域预报均有积极的贡献。

极轨气象卫星虽然具有微波红外垂直探测和成像观测能力, 但存在覆盖面小、观测频次低的短板。静止卫星则具有从小时到分钟级的扫描重访优势。以我国第二代静止轨道气象卫星(FY-4A和FY-4B)为例, 其配备的辐射成像仪和快速成像仪相互协同配合, 不仅保证了静止轨道大气遥感所需的多光谱功效, 而且可每15 min对东半球扫描一次; 面向短时临近预报的需求, 可提供2 000 km×2 000 km区域、1 min间隔的昼夜高频次连续快速监测。此外, 其还搭载了静止轨道干涉式大气垂直探测仪, 从静止轨道上在垂直方向对大气结构实现高精度温度、湿度廓线探测, 以获取高光谱大气数据。

静止气象卫星观测频次虽高, 但缺乏穿透性能, 更适用于晴天条件。因此, 未来可能的解决方案是高时间频次微波探测(地球静止轨道或低地球轨道星座), 包括: ①开展静止气象卫星轨道微波探测试验和业务运行。由于静止气象卫星的轨道高度是极轨(或低地球轨道)卫星的40倍左右, 如果想达到接近极轨的观测性能, 具有很大的技术挑战性, 迄今为止国际上静止轨道微波大气探测仍是一项技术空白。我国气象卫星发展明确规划下一代风云静止气象卫星将有搭载微波遥感仪器的微波星系列, 既利用静止平台的高时间分辨率特性, 又利用微波与云雨大气的相互作用及穿透特性, 满足数值天气预报对卫星高效观测的需求。②实现极轨小卫星群的微波组网观测。如果最低要求为每小时

观测一次,则需要在极地太阳同步轨道平面上均匀分布12颗卫星。未来如果与业务化的低倾角降水测量卫星星座结合,可以大大提高观测频次。

此外,由于陆气耦合作用,驱动数值模式的下垫面特征卫星反演产品(如土地覆被类型、植被覆盖度、叶面积指数、土壤湿度等)也需要提高产品生成的时间密度,体现旬、月、季等动态变化特征。

2.3 探测空间覆盖度及水平分辨率

卫星遥感器能观察到的地面区域大小被称为刈幅。极轨单星6 h可以观测全球45%左右的区域,双星6 h可以观测全球85%左右的区域,三星6 h可以观测全球的全部区域,多星组网可以提高大气探测的空间覆盖度。除了三星组合,发展宽刈幅卫星、减少地面轨道间的间隙也是发展方向之一。为了高频次覆盖全球,WMO提出至少6颗业务地球静止轨道卫星互为补充,这6颗卫星间距最好不超过经度70°,并且每颗卫星需配备常规多光谱可见光/红外成像、红外超光谱大气垂直探测、紫外/可见光/近红外垂直探测(大气成分和大气污染监测)、闪电成像。

然而,静止气象卫星存在的问题是在纬度60°以上的区域空间分辨率迅速下降,纬度70°以上的区域卫星基本无法应用。为了覆盖和连续观测北极和南极地区,需要发展高椭圆轨道(highly elliptical orbit, HEO)卫星。这种轨道的功能类似位于赤道的静止卫星,是绕地球两极飞行的大椭圆和大偏心率轨道。大偏心率轨道增加了极地地区连续观测的频次,实现了全球覆盖观测,能对高寒极区高时间频次天气要素变化进行监测,可应用于极地涡旋引发的寒潮预报等。

此外,空间分辨率也需提高。空间分

辨率指遥感图像上能够详细区分的最小单元的尺寸,其大小反映了空间细节水平。实际上,将地面信息离散化而形成的栅格像元与遥感影像空间分辨率高低密切相关,像元越小,空间分辨率越大。较低的空间分辨率易受混合像元等的干扰,影响反演精度。FY-4B卫星成像分辨率达到了250 m,是目前业务型地球静止轨道气象卫星领域的最高分辨率。考虑到红外成像波段受云影响只能探测全球小于40%的区域,NWP的发展更多地依赖于发展能在有云和昼夜条件下全天候工作的微波探(1.4 GHz)、对海表温度最敏感的是C频段(7 GHz),但上述频段目前对海表盐度探测的最高空间分辨率为40 km,对海表温度探测的最高空间分辨率为50 km,而未来海表盐度空间分辨率需达到3~10 km,海表温度空间分辨率需达到1~5 km,这对大尺寸天线和孔径探测体制提出了更高的技术要求^[14]。

2.4 探测垂直分辨率

研究表明,当卫星观测大气的垂直分辨率小于模式大气分辨率时,同化卫星资料对预报精度的改善作用有限。WMO对早期卫星大气探测资料(TOVS)在数值天气预报准确率方面的贡献进行了评估,提出只有当卫星大气温度、水汽探测达到无线电探空仪的精度水平时,才可能对数值天气预报做出重大的改进。其对垂直分辨率即不同高度垂直分层观测的基本要求见表2^[15]。

表2 NWP对垂直分辨率的基本要求

高度范围	垂直分辨率
500 hPa~地表	0.3~0.5 km/层
300~500 hPa	0.5~1 km/层
100~300hPa	1~2 km/层
100 hPa以下	2~3 km/层

垂直分辨率降低的本质原因是仪器通道的权重函数太宽,即光谱分辨率太低。当光谱分辨能力为50~200 μm 时,垂直分辨率为3~5 km。其光谱响应的宽度比大气吸收线的宽度大数百倍,观测辐射是许多吸收强度完全不同的谱线的平均结果,使得通道的权重函数被加宽,卫星仪器接收的辐射来自较厚的气层,只能提供低阶的大气垂直结构信息,这将严重限制卫星探测大气高阶(精细)垂直结构的能力。此外,垂直分辨率还需满足模式分层的需求,目前气象模式垂直分层大多大于60层,模式层顶高度不低于0.1 hPa。细致的模式垂直分辨率能模拟出对流层与平流层之间深厚的质量交换层,改善模式模拟的地面气温和低层环流及物理过程的变化,对于暴雨以及强对流天气的数值模拟预测有重要影响^[16]。而目前由微波业务卫星的光谱分辨率转换成的探测的垂直分辨率仅为4 km,与实际需求存在差距。

提高卫星观测、反演产品的垂直分辨率是卫星定量应用迫切需要解决的问题。高光谱仪器光谱分辨率高(超过1 000个通道),因此大气垂直分辨率高,噪声水平低,会包含比以前的通道式业务垂直探测仪器多一个量级以上的大气结构信息。例如,AIRS通道光谱宽度窄,且光谱响应特性很好,它能提高大气探测的垂直分辨率。但是,高光谱分辨率仪器需扩展可开展高光谱分辨率观测的频段,实现全光谱覆盖的高光谱观测。

2.5 精度与时效需求

提高大气探测反演精度是提升数值天气预报精度的重要手段。高分辨率的NWP要求大气温度探测在低对流层、高对流层和平流层下部的精度最优目标、技术突破值、门槛阈值分别是0.5 K、1 K、

3 K;湿度探测在低对流层、高对流层的最优目标、技术突破值、门槛阈值分别为2%、5%、10%;整层水汽含量精度的最优目标、技术突破值、门槛阈值分别为1 kg/m^2 、2 kg/m^2 和5 kg/m^2 ;等等(见表3)。精度与辐射分辨率相关,因此在轨辐射定标精度需要受到重视。为了满足数值天气预报应用需求,风云卫星明确提出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,可见光/近红外波段在轨辐射定标精度为5%。

在数据获取的实时性与连续性需求方面,对于用于临近及短时天气预报的静止气象卫星来说,实时获取是最基本的要求。对于极轨气象卫星来说,无论在全球模式四维变分同化还是区域快速更新同化中使用,数据越接近实时,效果越好。

3 挑战与未来展望

卫星大数据对数值天气预报性能的改善作用主要受到模式架构(动力框架、物理方案)、同化方法、卫星产品数量与质量三方面的限制。第2节主要从提高观测数据数量的角度分析了NWP对卫星大数据的需求,但是数值天气预报在应用卫星大数据时,在质量控制、受容性及目标效率方面还存在诸多挑战,主要体现在以下四方面。

3.1 多星数据一体化、一致性处理

随着对地观测技术的进步和对地观测卫星的密集发射,人类对遥感数据的获取能力已超越了以往任一时期,不同成像方式、不同波段、不同分辨率、不同观测尺度和维度的对地观测数据呈爆发式增长,其所呈现的多传感器、多时相、多分辨率、多要素的新特点标志着卫星大数据时代的到

表3 高分辨率NWP对部分观测变量的精度需求

探测领域	变量	高度层次	精度	水平分辨率	垂直分辨率	观测周期	及时性	覆盖范围	
基本大气要素	大气温度	边界层	0.5 K ¹⁾	0.5 km	0.1 km	15 min	10 min	全球	
			1 K ²⁾	2 km	0.25 km	60 min	30 min		
			3 K ³⁾	10 km	1 km	3 h	2 h		
	(其他单元格上标同, 故略)								
	湿度	自由对流层	2 %	2 km	0.3 km	15 min	15 min	全球	
			5 %	10 km	0.4 km	60 min	30 min		
			10 %	30 km	1 km	6 h	2 h		
	风速(水平)	边界层	1 m/s	0.5 km	0.1 km	15 min	15 min	全球	
			2 m/s	2 km	0.2 km	60 min	30 min		
			5 m/s	10 km	0.4 km	12 h	2 h		
	水汽含量	整层	1 kg/m ²	0.5 km	—	15 min	15 min	全球	
			2 kg/m ²	5 km		60 min	30 min		
5 kg/m ²			20 km		6 h	2 h			
云和降水	云水云冰	边界层、自由对流层	5 %	0.5 km	0.1 km	15 min	15 min	全球	
			8 %	2 km	0.17 km	60 min	30 min		
			20 %	10 km	0.5 km	3 h	2 h		
	地表雨强	近地层	0.1 mm/h	0.5 km	—	15 min	15 min	全球	
			0.2 mm/h	2 km		30 min	30 min		
			1 mm/h	10 km		2 h	2 h		
气溶胶和辐射	射出长波辐射	大气层顶	5 W/m ²	2 km	—	30 min	60 min	全球	
			10 W/m ²	10 km		60 min	3 h		
			20 W/m ²	50 km		6 h	12 h		
海洋	有效波高	海洋表面	0.1 m	5 km	—	30 min	10 min	全球海洋	
			0.3 m	10 km		3 h	30 min		
			0.5 m	40 km		6 h	3 h		
	海冰厚度	海洋表面	20 cm	2 km	—	12 h	12 h	全球海洋	
			50 cm	10 km		24 h	24 h		
			100 cm	40 km		2 d	3 d		
陆地	地表温度	陆地表面	0.5 K	1 km	—	15 min	15 min	全球陆地	
			1 K	5 km		30 min	30 min		
			3 K	20 km		2 h	2 h		
	叶面积指数	陆地表面	5 %	1 km	—	12 h	24 h	全球陆地	
			10 %	5 km		24 h	3 d		
			20 %	40 km		2 d	7 d		
	土壤水含量	陆地表面	0.02 m ³ /m ³	1 km	—	60 min	30 min	全球陆地	
			0.04 m ³ /m ³	5 km		3 h	60 min		
			0.08 m ³ /m ³	40 km		6 h	6 h		
大气化学	臭氧含量	整层	5 mol/mol	5 km	1 km	15 min	15 min	全球	
			10 mol/mol	20 km	1.4 km	60 min	30 min		
			20 mol/mol	100 km	3 km	6 h	2 h		

注: 上标1) 表示最优目标, 2) 表示技术突破值, 3) 表示门槛值。来源于WMOOSCAR网站。

来^[17]。尽管NWP对卫星观测存在切实的多类型、高时空密度需求, 但多星数据的一体化、一致性处理在未来相当长一段时间内更是数值天气预报对卫星数据同化吸纳的技术瓶颈。目前主流全球数值天气预报只

使用了5%~10%的卫星数据, 这一比例已经包括了对这些预报有用的大部分信息^[18]。每颗卫星的传感器类型或特点不同导致成像数据间非线性辐射差异大、同名点匹配难度大, 处理与信息提取方法迥异, 且不

同来源的观测数据可能存在重复,数据质量也难以得到保障^[17],需要解决海量多源异构遥感数据协调一致性处理的关键技术难题。多时空尺度的多源卫星数据存在接收、预处理、特征映射计算、信息挖掘提取等链路长、处理环节多、技术复杂的问题,一方面,需要用统一的基准进行处理;另一方面,偏差订正、云检测、质量控制和观测误差及背景误差协方差分配是资料同化前卫星预处理的关键步骤,需要构建多星一体化成像处理物理模型,量化全链路处理中各环节的误差和不确定性,有效减少错误分析增量的出现。

3.2 资料同化

高质量的模式初值是根据初始时刻的气象观测资料和背景场信息通过特定的资料同化方案形成的^[19]。过去数值天气预报中大量的卫星数据由于受到云和降水、陆地、海冰的影响被剔除。事实证明,只有实现全天候同化(即云雨区资料和晴空资料同时进入同化系统)才能利用数值天气预报中的动力和湿物理过程改进预报效果。然而如何处理云和降水区的观测资料仍是资料同化领域重要而具有挑战性的一项任务,其中湿物理参数化方案和辐射传输模式是制约全天候同化的瓶颈^[20]。要发展全诊断的对流参数化方案以及更好的微物理参数化方案,优化针对高频微波通道对固态水凝物粒子散射响应,以及低频微波通道对地表发射率和暴雨敏感性订正的辐射传输算法等,扩大数值天气预报对卫星资料的受容性。

耦合资料同化对于地球系统模式初始化至关重要^[21]。而大气组分(气溶胶、示踪气体)、海洋、陆面等每个地球系统的组成都有独特的过程特征和时空尺度,在一个统一的资料同化框架下对卫星反演提取的

上述信息进行处理挑战性很大。

此外,由于模式系统性误差的存在,对观测资料进行同化时可能使初值和模式不协调,出现“初值冲击”现象,引起计算紊乱,影响模式的预测性能。因此在资料同化过程中,要尽量克服卫星观测资料和模式的不协调,减小其产生的“初值冲击”^[22]。

3.3 人工智能与遥感、数值预报的结合

在面对多源、开放、不同类型、多时空尺度、不够精确的海量卫星数据和复杂的非线性天气气候动力模式时,考虑到初值不确定性引发的误差随预报时效延长而迅速增长的问题,以及全球或区域应用的大规模计算需求,要寻求更有效的解决方案。深度学习等人工智能理论与方法的优势是具有针对模糊、不确定性问题进行分析、联想、记忆、学习和推断的能力^[23]。人工智能不仅在卫星影像的复杂场景精细分类、特征参数提取方面显示出高效能^[24],将其用于数值天气预报的初值生成物理过程各环节,也能够不失准确性又显著地提高预报时效^[25]。海量高时空分辨率卫星资料在模式中的应用与人工智能技术的深度融合无疑是未来的发展方向之一。

3.4 观测与预报的互动

中国气象局发布的《综合气象观测系统发展规划(2014—2020年)》提出,要利用数值预报模式,通过预报对观测资料的敏感性研究,分析评估观测系统变化对预报的影响,开展基于适应性观测的观测站网和重大技术装备布局设计与优化研究。不仅是地面站网观测,卫星观测也需与预报形成互动。在观测与预报的目标协调方面,中国自主研发的数值预报系统

GRAPES利用FY-4A探测仪的观测能力和数值天气预报系统的云预报和敏感区识别技术,实现了“智能快速晴空业务观测模式”和“高影响天气目标观测模式”。针对台风“玛丽亚”“安比”和“山竹”,其应用GRAPES奇异矢量识别的敏感区,对卫星观测区域、观测频次等参数进行最优确定试验,实现面向预报对象的静止卫星探测模式,并同化到GRAPES全球4Dvar,改进了台风路径预报^[8]。此类观测和预报的协同互动也是提高卫星应用效率的有效举措。

4 结束语

数值天气预报融大数据与大计算于一体,是复杂工程系统的典型应用之一。由于每个地球系统分量都有各自特殊的过程特征和时空尺度,同时考虑NWP现存的较大不确定性和未来期望的预报性能,为了改善初始场、做好NWP模式优化,本文从数值天气预报对卫星大数据的需求视角,从探测变量、时间分辨率、空间覆盖度和水平分辨率、垂直分辨率、精度与时效等方面探讨了数值天气预报对卫星大数据的需求及现状。同时本文指出了数值天气预报应用卫星大数据面临的挑战和未来发展方向,如多星数据一体化一致性处理、全天候与耦合资料同化、与人工智能趋向深度结合以及卫星观测与预报的目标协同互动等。卫星大数据与数值天气预报两强联合,在“监测精密、预报精准”道路上任重道远,前景广阔。

参考文献:

[1] BAUER P, THORPE A, BRUNET G. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. *Nature*, 2015, 525(7567):

47-55.

[2] RAUSER F, ALQADI M, AROWOLO S, et al. Earth system science frontiers: an early career perspective[J]. *Bulletin American Meteorological Society*, 2017, 98(6): 1119-1127.

[3] 金荣花, 代刊, 赵瑞霞, 等. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. *气象*, 2019, 45(4): 445-457.

JIN R H, DAI K, ZHAO R X, et al. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. *Meteorological Monthly*, 2019, 45(4): 445-457.

[4] 王毅, 周庆亮, 代刊, 等. 全球数据处理和预报系统发展及展望[J]. *气象科技进展*, 2019, 9(2): 6-10.

WANG Y, ZHOU Q L, DAI K, et al. Development and outlook of global data-processing and forecasting system[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2019, 9(2): 6-10.

[5] 张文建. 世界气象组织全球综合观测系统(WIGOS)空间部分2040年远景发展规划的解读[J]. *气象科技进展*, 2016, 6(1): 135-145.

ZHANG W J. Interpretation of the 2040 long term development plan for space in WMO global integrated observing system(WIGOS)[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(1): 135-145.

[6] EYRE J R. Progress achieved on assimilation of satellite data in numerical weather prediction over the last 30 years[C]//ECMWF Seminar on Recent Development in the Use of Satellite Observations in NWP. [S.l.:s.n.], 2007.

[7] 董佩明, 薛纪善, 黄兵, 等. 数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展[J]. *气象科技*, 2008, 36(1): 1-7.

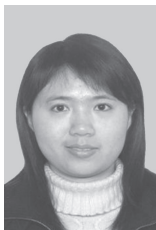
DONG P M, XUE J S, HUANG B, et al. Application status and development of satellite data assimilation in numerical weather forecast[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(1): 1-7.

[8] 沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等. 中国数值天气

- 预报的自主创新发展[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 451-476.
- SHEN X S, WANG J J, LI Z C, et al. China's independent and innovative development of numerical weather prediction[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 451-476.
- [9] 李德仁, 张良培, 夏桂松. 遥感大数据自动分析与数据挖掘[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1211-1216.
- LI D R, ZHANG L P, XIA G S. Automatic analysis and mining of remote sensing big data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(12): 1211-1216.
- [10] ZIKOPOULOS P, EATON C, DEROOS D, et al. Understanding of big data[M]. New York: Mc Graw Hill, 2012.
- [11] 曹海翊, 高洪涛, 赵晨光. 我国陆地定量遥感卫星技术发展[J]. 航天器工程, 2018, 27(4): 1-9.
- CAO H Y, GAO H T, ZHAO C G. Development of China land quantitative remote sensing satellite technology[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(4): 1-9.
- [12] 黄耀辉, 赵晓磊, 阎诚, 等. 中法海洋卫星及典型应用[J]. 卫星应用, 2020(5): 32-37.
- HUANG Y H, ZHAO X L, YAN C, et al. Sino French ocean satellite and its typical applications[J]. Satellite Application, 2020(5): 32-37.
- [13] 张文建. 世界气象组织综合观测系统(WIGOS)[J]. 气象, 2010, 36(3): 1-8.
- ZHANG W J. WMO integrated global observing system(WIGOS)[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(3): 1-8.
- [14] 宋学儒, 崔新东, 翟宇梅, 等. 面向海表盐度和温度遥感的微波辐射计研究综述[J]. 航天器工程, 2021, 30(1): 108-114.
- SONG X R, CUI X D, ZHAI Y M, et al. Remote sensing of sea surface salinity and temperature with microwave radiometers research review[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(1): 108-114.
- [15] 董超华, 李俊, 张鹏. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- DONG C H, LI J, ZHANG P. Principle and application of satellite hyperspectral infrared atmospheric remote sensing[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [16] 王宁, 平凡. 垂直分辨率对广州“5·7”特大暴雨数值模拟影响的研究[J]. 大气科学, 2019, 43(6): 1245-1264.
- WANG N, PING F. The impact of vertical resolution at different levels on the numerical simulation of the torrential rain in Guangzhou on 7 may 2017[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(6): 1245-1264.
- [17] 付琨, 孙显, 仇晓兰, 等. 遥感大数据条件下多星一体化处理与分析[J]. 遥感学报, 2021, 25(3): 691-707.
- FU K, SUN X, QIU X L, et al. Multi-satellite integrated processing and analysis method under remote sensing big data[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(3): 691-707.
- [18] BAUER P, GEER A J, LOPEZ P, et al. Direct 4D-var assimilation of all-sky radiances. part I: implementation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 136(652): 1868-1885.
- [19] 马旭林, 陆续, 于月明, 等. 数值天气预报中集合-变分混合资料同化及其研究进展[J]. 热带气象学报, 2014, 30(6): 1188-1195.
- MA X L, LU X, YU Y M, et al. Progress on hybrid ensemble-variational data assimilation in numerical weather prediction[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30(6): 1188-1195.
- [20] 窦芳丽, 陆其峰, 郭杨. 全天候卫星微波观测资料变分同化研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(11): 1120-1130.
- DOU F L, LU Q F, GUO Y. Overview of researches on all-sky satellite microwave data variational assimilation[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(11): 1120-1130.
- [21] 和王君, 刘咪咪, 王斌. 年代际预测和耦合资料同化研究综述[J]. 地球物理学报, 2020, 63(1): 1-18.
- HE Y J, LIU M M, WANG B. Review on the study of decadal prediction and coupled data assimilation[J]. Chinese Journal of

- Geophysics, 2020, 63(1): 1-18.
- [22] 孙丞虎, 李维京. 观测资料与模式的协调性对同化效果的影响[J]. 大气科学, 2009, 33(4): 796-810.
SUN C H, LI W J. The impact of compatibility between dynamic model and observational data on data assimilation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(4): 796-810.
- [23] 许小峰. 从物理模型到智能分析: 降低天气预报不确定性的新探索[J]. 气象, 2018, 44(3): 341-350.
XU X F. From physical model to intelligent analysis: a new exploration to reduce the uncertainty of weather forecast[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(3): 341-350.
- [24] 张兵. 遥感大数据时代与智能信息提取[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 1861-1871.
ZHANG B. Remotely sensed big data era and intelligent information extraction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 1861-1871.
- [25] 孙健, 曹卓, 李恒, 等. 人工智能技术在数值天气预报中的应用[J]. 应用气象学报, 2021, 32(1): 1-11.
SUN J, CAO Z, LI H, et al. Application of artificial intelligence technology to numerical weather prediction[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2021, 32(1): 1-11.

作者简介



杨何群 (1981-), 女, 上海市生态气象和卫星遥感中心高级工程师, 复旦大学大气与海洋科学系博士生, 主要研究方向为卫星遥感与生态气象、土地覆盖分类、城市热环境。



王晓峰 (1975-), 男, 博士, 上海市生态气象和卫星遥感中心研究员、高级工程师, 主要研究方向为区域高分辨率数值天气预报、中小尺度天气分析、台风预报。



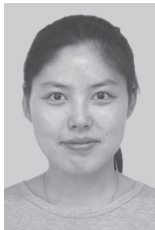
高彦青 (1994-), 男, 上海市生态气象和卫星遥感中心助理工程师, 主要研究方向为数值模拟。



陆一闻 (1991-), 男, 上海市生态气象和卫星遥感中心工程师, 主要研究方向为卫星遥感反演、图像识别、水环境遥感监测。



麻炳欣 (1986-), 男, 上海市生态气象和卫星遥感中心工程师, 主要研究方向为卫星遥感下垫面识别与生态评估。



王昕瑶 (1992-), 女, 上海市生态气象和卫星遥感中心工程师, 主要研究方向为数值模式研发及应用。

收稿日期: 2021-09-29

通信作者: 王晓峰, wangxf@typhoon.org.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.41801367); 上海市“科技创新行动计划”长三角科技创新共同体领域项目 (No.20232410100)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.41801367), Shanghai Science and Technology Commission Project in Yangtze River Delta Innovation Community Field of “Science and Technology Innovation Action Plan” (No.20232410100)