

晨昏轨道卫星的气象应用需求分析

张鹏 杨磊 谷松岩 胡秀清 吴晓京 吴荣华 毕研盟 刘诚

(国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 晨昏卫星(晨昏轨道极轨气象卫星, 也简称晨昏轨道卫星)是指太阳同步近极地轨道卫星中轨道降交点地方时间(Equator Cross Time, ETC)在6:00左右的卫星, 观测地方时间总在凌晨和傍晚。在介绍晨昏卫星的基础上, 分析了晨昏卫星的平台特征、观测特点和潜在应用。对轨道模拟仿真和多国观测系统试验(observing system experiments, OSE)的分析表明: 晨昏卫星同上午卫星和下午卫星共同构成极轨气象卫星业务观测系统, 可以每6h提供一次无缝隙的全球大气探测资料, 改进NWP的初始场, 对南北半球预报和行星尺度的区域预报均有积极的贡献。利用FY-1D卫星观测资料的分析表明: 晨昏卫星对气候和环境监测也具有独特的作用。根据现有风云气象卫星的发展规划, 还讨论了发展晨昏卫星的可能途径。

关键词: 晨昏卫星, 数值天气预报, 气候监测, 环境监测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.001

Meteorological Requirements for the Early-Morning-Orbit Satellite

Zhang Peng, Yang Lei, Gu Songyan, Hu Xiuqing, Wu Xiaojing, Wu Ronghua, Bi Yanmeng, Liu Cheng

(National Satellite Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: The early-morning-orbit satellite is one of the polar orbiting satellites whose local time of the descending node is around 6:00 A.M. The observing time is close to dawn and dusk. After the conceptual introduction, this paper analysed the characteristics of the satellite platform, the observing geometrical conditions of the early-morning-orbit satellite, and its potential applications as well. The results from the orbit simulation and the observing system experiments (OSE) indicate that the early-morning-orbit satellite together with the morning-orbit satellite and the afternoon-orbit satellite can provide the initial meteorological field for the numerical weather prediction (NWP) model without any blank left on the global scale every 6 hours so that the forecast period and the forecast accuracy can be improved for both the hemispheric and the regional scales. The images from FY-1D also show unique applications of the early-morning-orbit satellite on the climate and environmental monitoring. According the existing Fengyun satellite programme, the paper discussed the possible way of developing Chinese Fengyun early-morning-orbit satellite.

Keywords: early-morning-orbit satellite, numerical weather prediction(NWP), climate monitoring, environmental monitoring

0 引言

极轨气象卫星是全球气象观测体系的重要组成部分, 它提供多光谱谱段、多探测通道的全球观测资料, 用于数值天气预报(Numerical Weather Prediction, NWP)、全球气候要素和环境灾害监测^[1]。

根据观测地方时间, 极轨气象卫星主要有上午卫星和下午卫星两种类型。上午卫星的轨道降交点地方时间(Equator Cross Time, ETC)在10:00左右,

观测地方时间白天在上午、夜间在前半夜; 下午卫星的轨道升交点地方时间在14:00左右, 观测地方时间白天在下午、夜间在后半夜。目前, 气象业务中常用的上午卫星主要有我国的FY-3A卫星、欧洲气象卫星组织(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT)的Metop-A和Metop-B卫星, 下午卫星主要有我国的FY-3B卫星、美国国家海洋大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的NOAA-15至NOAA-19卫星和新一代极轨环境卫星系统先导计划(National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System Preparatory Project, NPP)中的Suomi NPP卫星^[2]。此外, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的科

收稿日期: 2013年8月28日; 修回日期: 2013年12月13日
第一作者: 张鹏(1970—), Email:zhangp@cma.gov.cn
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项“风云三号晨昏轨道卫星资料处理和应用关键技术研究”; 风云三号气象卫星地面应用系统工程

学研究卫星EOS系列中的上午卫星Terra、下午卫星Aqua、Aura、PARASOL、CloudSat和CALIPSO等以其先进的探测技术、稳定的观测质量和优异的测量精度，在气象业务中也被广泛使用^[3]。

极轨气象卫星的首要任务是为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。目前，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，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卫星轨道接近欧洲的Metop卫星，FY-3B卫星轨道接近美国的Suomi NPP卫星。上述卫星观测时间要么集中在10:00左右，要么集中在14:00左右，从NWP同化要求来看，每6h观测同化时间窗内全球总有2~3条轨道的卫星观测空白区，无法提供全球覆盖的初始观测^[4-5]。为了满足NWP观测需求，世界气象组织（WMO）在《2025年全球观测系统展望》报告中提出了建立上午、下午和晨昏轨道三颗卫星组网观测的概念^[6]。

在介绍晨昏卫星的基础上，本文分析了晨昏轨道卫星的平台特征和观测特点。利用轨道仿真模拟、国外观测系统试验（observing system experiments, OSE）和FY-1D的实际观测资料，本文讨论了晨昏卫星对NWP的影响及对气候和环境监测的独特作用。最后，根据现有风云气象卫星发展规划，分析了研发风云晨昏卫星的可能性。

1 晨昏卫星介绍

晨昏轨道极轨气象卫星，简称晨昏轨道卫星或者晨昏卫星，是指轨道降交点地方时间在06:00左右的卫星，观测地方时间总在凌晨和傍晚（图1）。相比上午轨道和下午轨道，晨昏轨道卫星的观测视场几何条件、太阳对卫星平台的光照特点不同，因此需要对卫星平台、遥感仪器配置和遥感仪器具体技术指标开展针对性的设计。

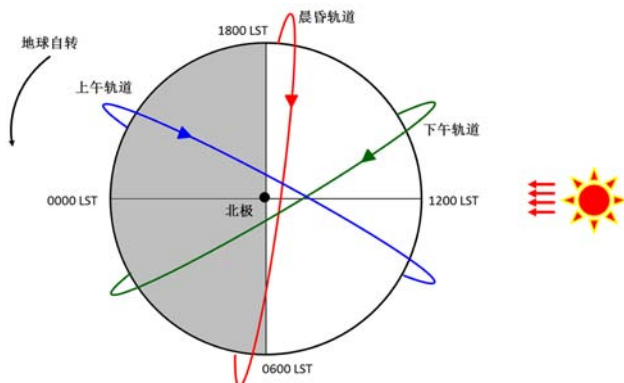


图1 极轨卫星晨昏轨道、上午轨道和下午轨道示意图

1.1 太阳对晨昏卫星平台的光照特点

晨昏卫星沿观测地方的晨昏圈运行（图1），卫星始终受到太阳光的照射并在卫星平台上形成稳定的明暗边界，卫星一侧始终背阳，另一侧始终向阳，两侧温度差异大，造成星上温度梯度大。为了保障星上遥感仪器的工作状态和工作寿命，需要对卫星平台进行针对性的热补偿和热平衡设计，消除温度梯度的影响。此外，还需要对星上遥感仪器进行严格的遮光设计，避免观测信号受到太阳杂散光的影响，同时为星上定标系统提供稳定、可靠的工作环境。

晨昏卫星轨道平面法线总是指向太阳方向，卫星太阳能帆板电池阵可以固定安装，其扰动性对星体的影响较小，利于侧摆机动控制和快速稳定。此外，太阳能帆板电池阵始终朝向太阳，卫星可以持续获得能源补充。相对上午卫星和下午卫星，晨昏卫星平台可以提供更为充足的能源，有利于平台上配置大功耗的主动和被动遥感仪器，如SAR、散射计和降水雷达等。

1.2 晨昏卫星的观测视场几何条件

晨昏卫星观测地方时间总在凌晨和傍晚，对地观测时太阳高度角较小。图2是降交点地方时06:00，高度830km的太阳同步轨道在2012年春分、夏至、秋分和冬至四天的第一条轨道数据及星下点太阳高度角分布情况。如图2所示，轨道约有半数区域太阳高度角为负，表明晨昏卫星观测区域处于夜间，这些区域不能获取传统的可见光图像。在夏季半球（夏至的北半球、冬至的南半球）的高纬区域，太阳高度角为正，其中，北半球高度角最大值出现在夏至这天，达到 32° ，地点在轨道最南端附近；南半球高度角最大值出现在冬至这天，达到 15° ，地点在轨道最北端附近。对于太阳高度角为正的区城，可以获取可见光图像，但相对于上午卫星和下午卫星，太阳高度角依然较低，斜长的大气路径衰减了太阳入射能量，光照条件不好。对于利用反射太阳波段能量开展定量遥感的算法要求较高的太阳高度角，因此很难利用传统的反演算法定量处理晨昏卫星的可见光观测资料。

卫星红外和微波大气探测，例如风云三号（FY-3）的红外分光计（InfraRed Atmospheric Sounder, IRAS）、微波温度计（MicroWave Temperature Sounder, MWTS）和微波湿度计（MicroWave Humidity Sounder, MWHS），利用地球发射的红外和微波辐射反演大气的温度和湿度廓线^[7]。红外和微波观测不受太阳光照条件的影响，因此晨昏卫星装载的气象遥感仪器首选红外和微波大气

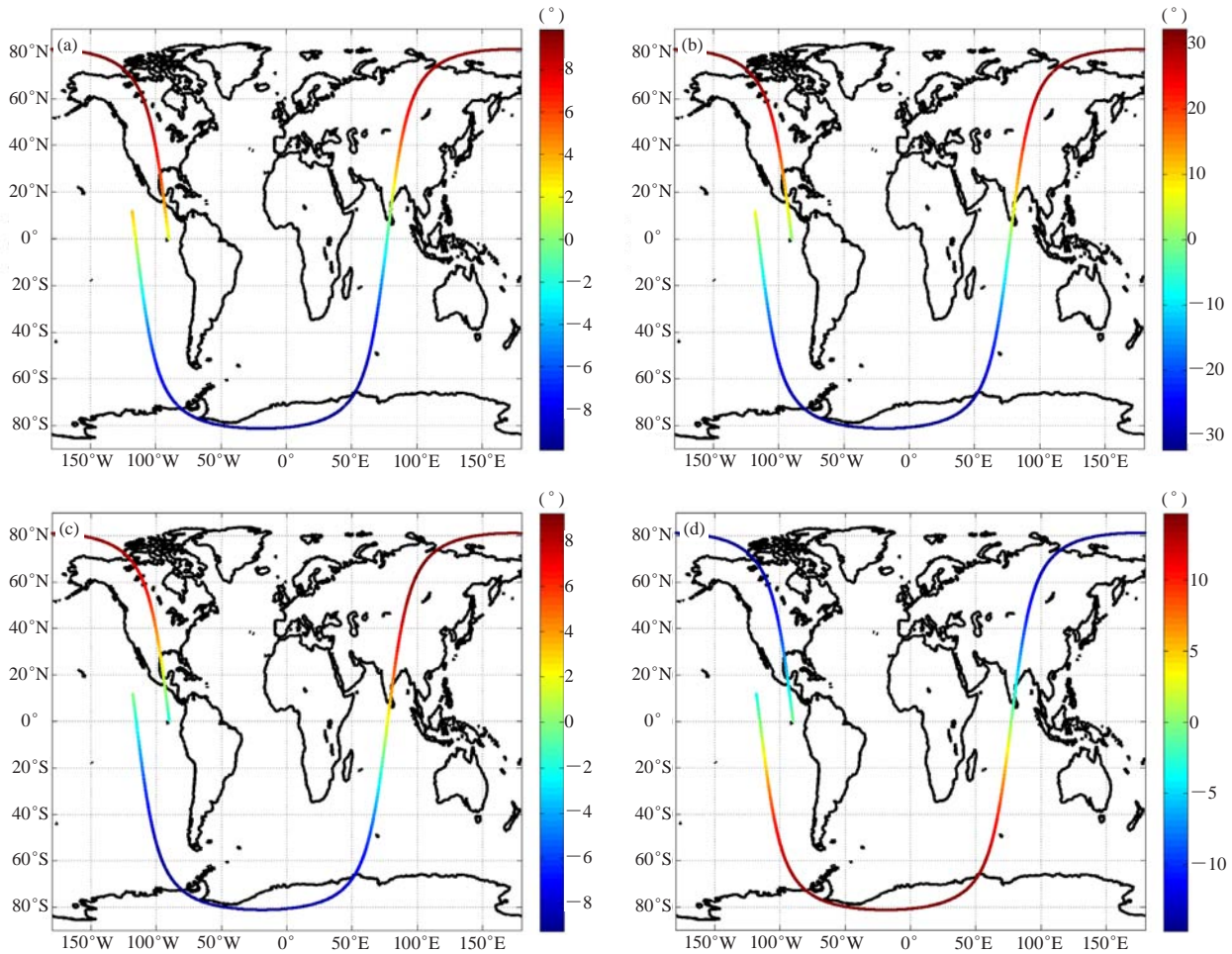


图2 晨昏卫星太阳高度角示意图
(a)春分; (b)夏至; (c)秋分; (d)冬至

探测类仪器、主动遥感仪器，其次是具有微光夜视功能的可见光成像仪器。

2 晨昏卫星的应用需求分析

2.1 三星组网在 6h 同化窗内的全球资料覆盖度分析

图3a~3e分别给出了上午卫星、下午卫星、晨昏卫星、上午和下午卫星双星组网、三星组网观测后，极轨气象卫星在6h同化窗内观测资料的全球覆盖度。单星6h可以观测全球45%左右的区域，双星6h可以观测全球85%左右的区域，三星6h可以观测全球的全部区域。对比图3d和3e可以看到，晨昏卫星观测主要补充了太平洋和大西洋上空的观测资料，海洋上空是常规气象观测缺乏的区域，这些观测资料的补充对改进和提高NWP的预报精度和预报时效将产生积极的影响。

2.2 三星组网对 NWP 预报的影响

英国气象局Eyre等^[8]系统地回顾了已有的OSE和观测系统模拟试验（Observing System Simulation Experiments, OSSE），指出晨昏卫星观测有效补充

了上午卫星和下午卫星在NWP每6h同化窗内卫星观测资料的空白，对南北半球预报和行星尺度的区域预报均有积极的贡献。Eyre等^[8]使用了欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的Jean-Noel Thepaut和Graeme Kelly利用美国NOAA系列的NOAA-15（07:30 am）、NOAA-16（13:30 pm）和NOAA-17（10:00 am）三星组网观测资料对NWP预报的影响评估结果（图4），试验中，控制试验使用了NOAA-15和NOAA-16两颗卫星的资料，影响试验使用了NOAA-15、NOAA-16和NOAA-17三颗卫星的资料。同双星观测资料的预报相比，对南、北半球预报，三星组网的观测资料对7d的预报（图4a和4b）有不同程度的改进，其中北半球的改进程度更为明显；对欧洲和北美洲的区域预报，三星组网观测资料对欧洲4d之内的预报有所改进，对北美洲7d之内的预报有大幅提升。对区域预报改进的程度主要与资料同化时间窗内观测资料的补充区域和资料质量有关，我国的天气系统受印度洋、太平洋上空大气环流的影响，同北美洲的天气预报有类似可比

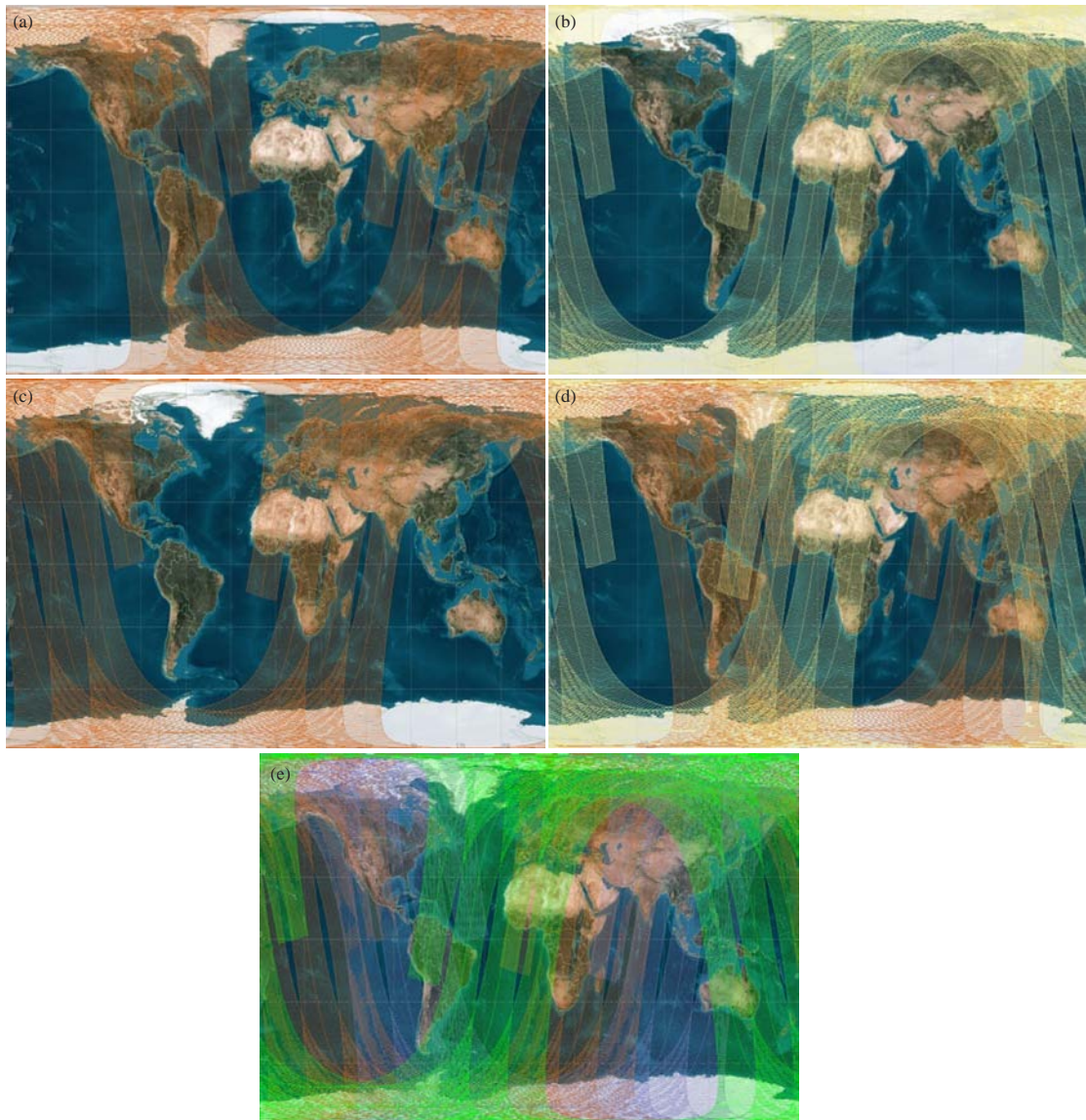


图3 极轨卫星6h观测间隔内的全球资料覆盖度
 (a) 上午卫星观测区域; (b) 下午卫星观测区域; (c) 晨昏卫星观测区域; (d) 上午和下午卫星组网观测区域;
 (e) 上午、下午、晨昏三星组网观测区域

之处，因此可以估计，晨昏卫星的资料对包括中国在内的东亚地区天气预报会有较大的提升和改进。

2.3 晨昏卫星的光学图像应用分析

受凌晨、傍晚光照条件差的影响，晨昏卫星的光学图像应用能力受到限制。尽管如此，高纬度地区在适当的光照条件下仍然具有一定的光学成像能力。同上午卫星和下午卫星相比，晨昏卫星观测时太阳高度角低，地形和云顶高度的几何特征更为明显，利用晨昏卫星光学图像的这种特征可以在晨雾、台风、强对流的监测和分析中开展独特的应用。

FY-1D是第一代风云极轨气象卫星的最后一颗卫星，成功发射于2002年，随着卫星轨道的飘移，目前

的轨道降交点地方时在5:30左右，尽管受到寿命期内仪器性能衰减的影响，其观测数据仍可较好地展示晨昏卫星光学图像的一些独特应用。

图5是利用FY-1D（晨昏卫星）、FY-3A（上午卫星）和FY-3B（下午卫星）的扫描辐射计（Visible and Infrared Radiometer, VIRR）制作的高纬度春季的三通道彩色合成图，其中红通道利用通道6（短波红外 $1.6\mu\text{m}$ ）、绿通道利用通道2（近红外）、蓝通道利用通道1（可见光）的数据。RGB彩色合成图中，白色为水云、青灰色为积雪或者冰晶云、绿色为植被，三张RGB彩色合成图均能提供水云、冰云/积雪、植被的信息。对比上午图像5b和下午图像5c，从图5a中可以

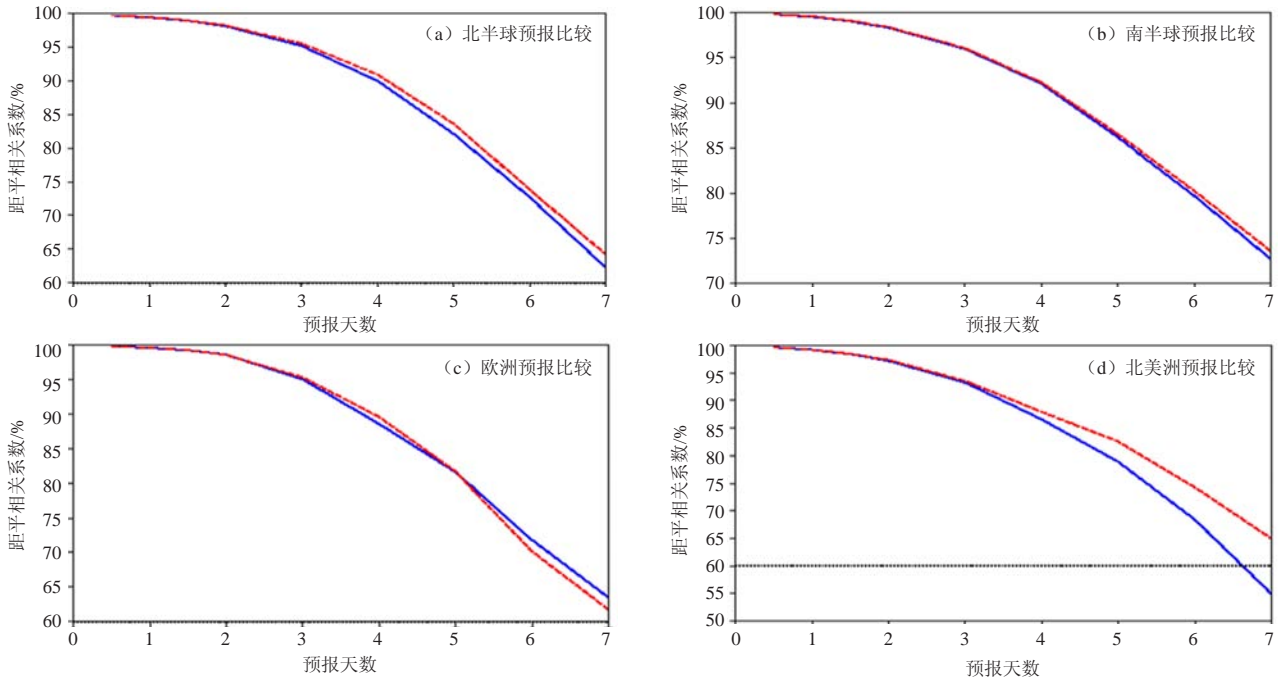


图4 三星组网同两星组网对NWP预报的比较试验结果^[6] (图中蓝线为控制试验结果, 红线为影响试验结果)

看到云在地球表面投射形成的暗长阴影区, 利用云的投射阴影可以推导获得云顶高度。根据云高信息, 可以识别光学图像中的对流云团和对流活跃区域, 为天气分析提供参考信息。

由于大雾天气易出现于凌晨, 晨昏轨道卫星适合对大雾等灾害性天气的监测。图6是FY-1D和FY-3A扫描辐射计VIRR监测的黑龙江北部雾区效果图, FY-1D

图像(图6a)中大片的灰白色区域是夜间长波辐射冷却作用在地表生成稳定逆温层中所形成的雾, 图中的雾有清晰的地表特征结构, 靠近地表水体处, 有与地形等高线匹配的枝杈状结构; FY-3A图像(图6b)反映出, 10:00以后, 由于太阳升起地面逆温层被破坏, 雾逐渐消散。所以, 晨昏卫星能够有效观测到每日凌晨开始形成并于清晨达到最强状态的雾现象。

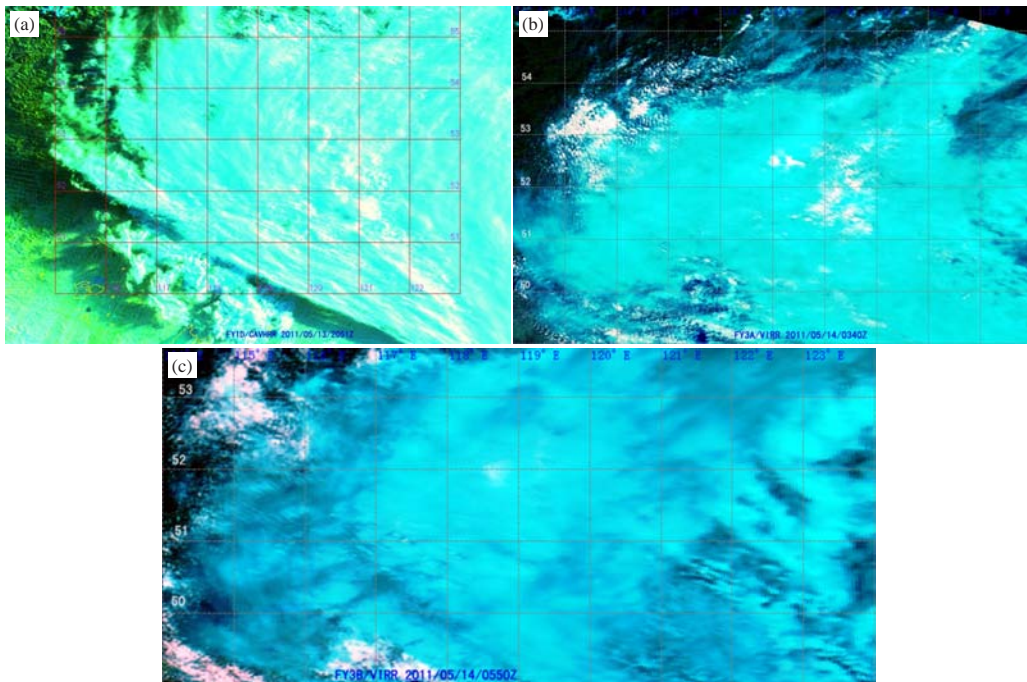


图5 FY-1D (a)、FY-3A (b) 和FY-3B (c) 扫描辐射计VIRR的RGB彩色合成图

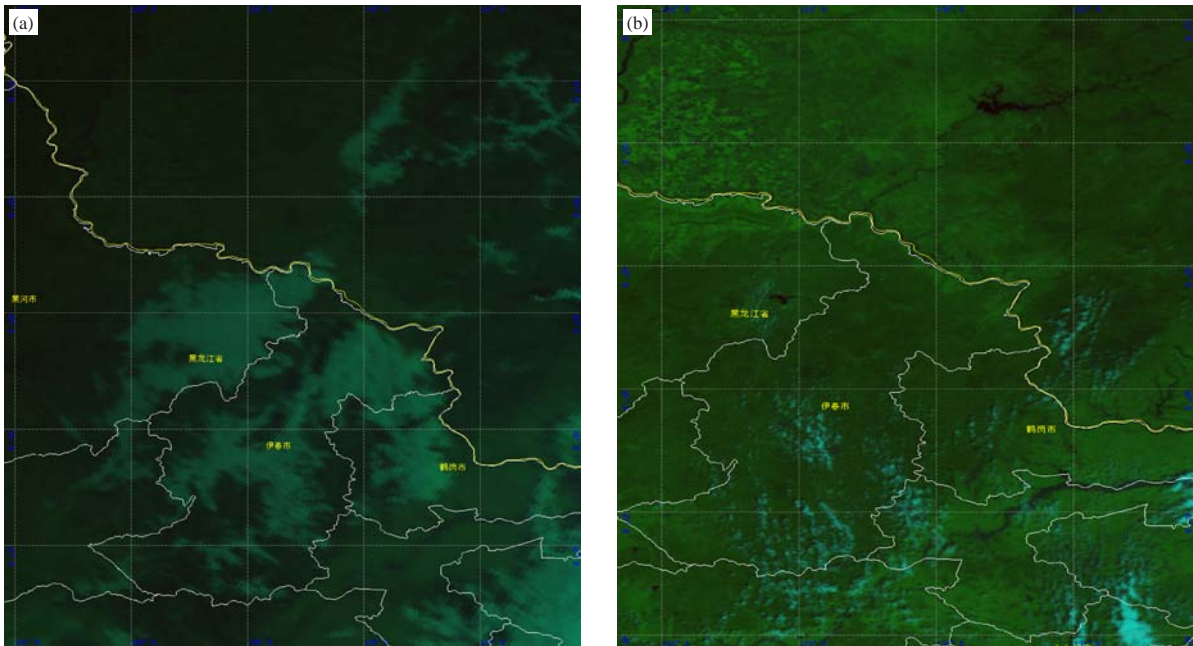


图6 FY-1D (a) 和FY-3A (b) 扫描辐射计VIRR监测的黑龙江北部雾区效果图

2.4 晨昏卫星观测的其他可能应用

很多国家和地区的天气预报机构会在每天上班的开始时刻进行例行的天气简报，一般是在08:00地区的天气预报。晨昏卫星观测可以使会商人员拿到时次最接近、资料最新的卫星图像和产品，对预报员的天气预报提供有益的信息。

对气候研究而言，地表温度、大气温度、大气湿度和降水等要素的日变化完整样本非常重要。晨昏轨道卫星将补充现有的上午和下午轨道系统的数据，并实现全球大部分地区在红外和微波波段的每天六次测量，三星组网后可以显著提升极轨气象卫星的气候监测能力。

在空气质量监测方面，由于晨昏卫星的太阳仰角较低，因此不适宜开展紫外遥感观测。但晨昏卫星观测时段，地表温度和大气边界层温度差异最大，有助于利用红外发射原理开展对大气中的CO和O₃等痕量气体的遥感观测。此外，清晨时一般云量较少，绝对湿度较低，这也有利于空气质量的监测。其他的一些应用，可以参见WMO专门为晨昏卫星观测组织的专家论证报告^[9]。

3 发展风云极轨晨昏卫星的可行性

我国第二代极轨气象卫星FY-3A和FY-3B已分别于2008年5月和2010年11月成功发射，在遥感能力上实现了从单一遥感成像到地球环境综合探测、从光学遥感到微波遥感、从千米级分辨率到百米级分辨率，

以及从国内接收到极地接收的四大技术突破，完成了我国极轨气象卫星的升级换代和组网观测，并在全球观测体系中发挥着日益重要的作用^[10-12]。

FY-3卫星的数据质量已经经过欧美数值模式检验并公认具有稳定优良的卫星资料质量^[13-14]，但是由于FY-3A和FY-3B卫星同欧洲的Metop卫星、美国的NPP卫星观测时间和区域重复，在欧美的全球数值天气预报模式中仅作为业务同化资料的备份。与国外同期卫星Metop和NPP相比，FY-3卫星的全球观测资料价值没有得到充分的体现，业务地位有必要进一步提升。

在2011—2020年我国风云气象卫星发展规划中^[15]，还将发射五颗FY-3卫星，如表1所示。原有规划中，FY-3后续卫星为上午卫星和下午卫星交替配置，没有考虑晨昏卫星的设计。如需发展风云极轨晨昏卫星，需要对原有的卫星规划进行适当调整，同时

表1 2011—2020年我国气象卫星发射计划

年份	静止系列		极轨系列
	FY-2	FY-4	FY-3
2011	业务星		
2012			
2013	业务星		业务星（上午星）
2014			业务星（下午星）
2015	业务星		
2016			业务星（上午星）
2017		光学业务星	
2018			业务星（下午星）
2019		光学业务星	降水测量业务星
2020			业务星（上午星）

也需对原有卫星平台设计和星上遥感仪器配置进行技术调整。考虑到卫星的工业研发周期，将原定2016年发射的风三上午卫星调整为风三晨昏卫星，技术风险相对较小，工程可实现性高。

4 结论

晨昏卫星观测有效补充了6h同化窗内卫星观测资料的空白，对南北半球预报和行星尺度的区域预报有积极的贡献。晨昏卫星弥补了全球观测资料的不足，上午卫星（10:00左右）、下午卫星（14:00左右）、晨昏卫星三星组网观测可以使6h同化窗内卫星资料100%全球覆盖，对4~7d 500hPa位势高度的预报半球尺度（北半球）提高2%~3%，区域尺度（北美洲）提高2%~10%。此外，晨昏卫星观测将完善极轨气象卫星观测体系，对天气会商、气候监测、环境灾害监测、空气质量监测、太阳常数和空间天气监测等均具有积极的作用。

如果在我国FY-3后续卫星中发展晨昏卫星，将完善和丰富我国现有的现代气象业务观测体系，并使FY-3极轨卫星资料具有自己的特色，在业务上形成同欧美卫星的等价互补之势。如果将2016年发射的上午卫星FY-3E调整至晨昏轨道，可能面临没有上午卫星观测资料的风险，特别影响了原有上午卫星的紫外观测和光学成像能力。但权衡利弊，晨昏卫星的应用效益和国际影响大于技术改动引起的风险。

将预计2016年发射的上午卫星FY-3E调整至晨昏轨道，并对部分有效载荷进行技术调整，研制风险小，工程可实现性高。考虑到卫星的研制周期，需要及早推动和开展风云卫星规划调整、极轨晨昏轨道卫星立项论证和研制工作。

参考文献

- [1] Rao P K, Holmes S J, Anderson P K, et al. 气象卫星——系统、资料及其在环境中的应用. 许健民, 方宗义, 徐建平, 等译. 北京: 气象出版社, 1994.
- [2] 国家卫星气象中心. 风云卫星发展研究年度报告. 北京: 国家卫星气象中心, 2013.
- [3] 刘玉洁, 杨忠东. MODIS遥感信息处理原理与算法. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] Eyre J R, English S J. Impact studies with satellite data at the Met Office. Proceedings of 4th WMO Workshop on "The impact of various observing systems on NWP". Geneva: WMO, 2008. http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Reports/NWP-4_Geneva2008_index.html.
- [5] Di Tomasi E, Bormann N. Assimilation of ATOVS radiances at ECMWF: EUMETSAT/ECMWF Fellowship Progress Report No.22. Darmstadt: EUMETSAT, 2011.
- [6] WMO. The Vision for the GOS in 2025. Geneva: WMO, 2009. <http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/gos-vision.html>.
- [7] 董超华, 李俊, 张鹏. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用. 北京: 科学出版社, 2013.
- [8] Eyre J R. Status and results of OSEs: Observing system experiments on the impact of AMSU data from 3 satellites. Geneva: WMO, 2003. <https://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Meetings/...6/Doc6-1.doc>.
- [9] WMO. Assessment of the benefits of a satellite mission in an early morning orbit. Geneva: WMO, 2003. http://www.wmo.int/pages/prog/sat/documents/CGMS_LEO_TigerTeam-Final-Report-April-2013.pdf.
- [10] 杨军. 我国“风云”气象卫星及其应用的回顾与展望. 航天器工程, 2008, 17(3): 23-28.
- [11] 杨军, 董超华. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用. 北京: 科学出版社, 2011.
- [12] Yang J, Zhang P, Lu N M, et al. Improvements on global meteorological observations from the current Fengyun 3 satellites and beyond. International Journal of Digital Earth, 2012, 5(3): 251-265.
- [13] 陆其峰. 风云三号 A 星大气探测资料数据在欧洲中期天气预报中心的初步评价与同化研究. 中国科学 (D辑: 地球科学), 2011, 41(7): 890-894.
- [14] Zou, X L, Wang X, Weng F Z, et al. Assessments of Chinese Fengyun Microwave Temperature Sounder (MWTS) Measurements for Weather and Climate Applications. J Atmos Oceanic Technol, 2011, 28, 1206-1227.
- [15] 国家卫星气象中心. 2011—2020年我国气象卫星及应用发展规划. 北京: 国家卫星气象中心, 2010.