

风云三号卫星的定量遥感应用能力

张鹏 杨虎 邱红 马刚 杨忠东 卢乃锰 杨军

(国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 风云三号 (FY-3) 是我国第二代极轨气象卫星, 目前已经形成了上下午星的组网观测能力。同第一代风云一号卫星相比, 风云三号实现了光谱覆盖紫外、可见光、红外和微波的多遥感仪器综合观测。详细介绍了风云三号在宽刈幅光学成像、大气垂直结构探测、微波成像、大气成分探测和地球辐射收支监测等方面观测能力的改进和提高, 展示了一些典型的应用个例, 最后针对新型极轨气象卫星资料讨论了开展定量遥感工作需要关注的问题。

关键词: 风云三号, 气象卫星, 定量遥感

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.04.001

Quantitative Remote Sensing from the Current Fengyun 3 Satellites

Zhang Peng, Yang Hu, Qiu Hong, Ma Gang, Yang Zhongdong, Lu Naimeng, Yang Jun

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

Abstract: The Fengyun 3 (FY-3) series is the second generation of Chinese sun-synchronous meteorological satellites. The first two of them were successfully launched in 2008 and 2010 separately. In comparison with the first generation FY-1 series, FY-3 has improved the global observation including optical imaging capacity from kilometre to hundred-metre resolution, passive microwave imaging, atmospheric temperature and moisture sounding, atmospheric chemistry remote sensing, and Earth radiation budget measurement with 11 payloads on board. This paper introduces elementary observations from FY-3A and FY-3B as well as the data utilization. The examples show the excellent performance of FY-3 measurements in weather scale analysis, numerical weather prediction, elementary climate variables monitoring, global environment and disaster monitoring. The optical imager, Medium Resolution Spectral Imager (MERSI) can provide true-colour composite images with three RGB channels in 250 m spatial resolution globally every day so that MERSI possesses more advanced properties in global environment and disaster monitoring with a better image texture and image lamination. The microwave imager, MicroWave Radiation Imager (MWRI) can penetrate most non-precipitating clouds to retrieve the surface properties in all weather conditions with lower-frequency channels. In addition, higher-frequency channels of MWRI are a good indicator to detect rainfall over both land and ocean. The atmospheric sounding system is composed of three instruments, i.e., InfraRed Atmospheric Sounder (IRAS), MicroWave Temperature Sounder (MWTS) and MicroWave Humidity Sounder (MWSH). Data from the FY-3 sounding system have been introduced into the ECMWF Integrated Forecasting System to assess the data quality and the influence of the data on analyses and forecasts. The analysis of first-guess departures has shown data with high quality overall. The FY-3 sounding data contribute positively to NWP model forecasting. The atmospheric chemistry mission provides a total ozone amount, ozone profile from Total Ozone Unit (TOU) and Solar Backscatter Ultraviolet Sounder (SBUS). The Earth radiation budget mission provides the incoming solar irradiance and the outgoing long-wave radiance at the top of atmosphere from Earth Radiation Measurement (ERM) and Solar Irradiance Monitor (SIM). The morning orbit satellite FY-3A and the afternoon orbit satellite FY-3B have constituted the polar constellation to provide global observation of the Earth four times per day operationally. They are becoming an important component of the space-based global observing system.

Although great progress has been achieved, the quantitative remote sensing and products utilization of FY-3 satellites are still challenging. To deepen the demonstration of FY-3 data, the theoretical study on the atmospheric radiation transfer, the radiometric and spectrometric calibration, the validation of the retrieved products should be further strengthened. The potential application of polar orbiting satellite in weather analysis, climate change research should be made with acceleratory efforts.

Key words: FY-3, meteorological satellite, quantitative remote sensing

收稿日期: 2012年2月8日; 修回日期: 2012年3月19日

第一作者: 张鹏 (1970—), zhangp@cma.gov.cn

资助信息: 中国科技部国际合作项目 (2010DFA21140);

国家重点基础研究发展计划 (2011CB403401)

1 引言

风云三号 (FY-3) 卫星属于中国第二代极轨气象业务卫星系列, 最初的概念设计始于20世纪90年代。为了满足现代气象业务发展的要求, 风云三号设计中

提出了四项主要任务,即:第一,为天气预报,特别是为中期数值天气预报提供全球的温、湿廓线以及云、辐射等气象参数;第二,监测大范围自然灾害和生态环境;第三,研究全球环境变化,探索全球气候变化规律,并为气候诊断和预测提供所需的地球物理参数;第四,为军事气象和航空、航海等专业气象服务提供全球及地区的气象信息^[1,2]。作为新一代的风云极轨业务卫星,风云三号由两颗研发卫星和至少4颗业务卫星组成,预期将工作至2020年^[3]。

风云三号的前两颗星,即FY-3A和FY-3B是技术研发卫星,分别于2008年5月27日和2011年11月5日在太原卫星发射中心成功发射。两颗卫星设计相同,星上安装了11台性能一致的仪器,其中10台为对地遥感仪器,1台为外层空间环境的测量仪器。10台遥感仪器光谱覆盖紫外、可见光、红外和微波波段^[4]。FY-3A为上午轨道卫星,FY-3B为下午轨道卫星,双星组成的极轨卫星观测系统实现了对地球系统的全球、全天候、多光谱综合观测。

同第一代风云极轨气象卫星相比,FY-3A和FY-3B卫星的综合对地观测能力有了大幅度的提高,主要包括:宽刈幅光学成像能力从千米级提高到了百米级,首次实现了微波成像遥感,综合三维大气垂直探测,地球辐射收支探测,臭氧等大气痕量组分的探测。自发射以来,风云三号资料已在数值天气预报、大尺度天气分析、基本气候变量监测、环境和灾害监测等方面发挥了积极的作用。此外,风云三号资料也获得了世界气象组织(WMO)、欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)、美国环境卫星、数据和信息中心(NESDIS)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)等国际组织和机构的认可,成为全球天基观测系统的重要组成部分。

2 风云三号的观测能力

风云三号系列卫星不仅是新一代的极轨气象业务卫星,还是目前国内最先进的综合对地观测平台之一,主要执行五类观测任务,即光学成像、微波成

像、大气探测、大气化学观测和地球辐射收支测量。卫星和遥感仪器的具体指标参数可以参阅国家卫星气象中心的相关技术文件^[5-7]。

2.1 光学成像

FY-3A和FY-3B星上的光学成像类仪器有两台,分别是可见近红外扫描辐射计VIRR和中分辨率光谱成像仪MERSI。光学成像类仪器的主要任务是成像观测,获取地表、海表和云表的信息。VIRR功能类似于美国NOAA卫星系列上的AVHRR,是唯一从FY-1系列继承来的仪器,用以确保气象卫星升级换代过程中观测资料的业务连续性。VIRR有10个光谱通道,星下点空间分辨率是1.1km,刈幅为2800km,可以每日昼夜实现无缝隙覆盖全球观测各一次。在FY-3D之后,VIRR将结束历史使命。

MERSI是VIRR的升级换代仪器,功能类似于美国EOS卫星系列上的MODIS。MERSI在VIRR观测通道基础上进行了扩展,拥有20个可见至热红外通道。MERSI的刈幅与VIRR相同,但它有5个空间分辨率高达250m的光谱通道,其他15个通道星下点空间分辨率为1km。MERSI将风云气象卫星的宽刈幅光学成像的分辨率从千米级提高到了百米级,增强了气象卫星精细化图像观测的能力。为了降低新研发仪器的业务应用风险,MERSI将同VIRR一起工作于FY-3A,FY-3B和FY-3C卫星平台。之后,改进型的MERSI(即MERSI II)将从FY-3D开始独立工作。

MERSI每日可以提供一幅全球无缝隙覆盖的250m分辨率真彩色三通道RGB合成图像,这一特点使得MERSI较MODIS在全球环境和灾害监测方面性能更为优越。从风云三号的全球卫星云图,可以对赤道辐合带ITCZ、热带气旋和副热带高压等大尺度的天气现象进行业务监测。此外,空间分辨率的提高也增强了对台风定位定强、强对流天气发生发展的精细化判别能力^[8]。图1是2008年凤凰台风中心区域60km×80km范围截取的卫星云图,分别对应于FY-2(5km),FY-1(1.1km)和FY-3(250m)的观测,随着空间分

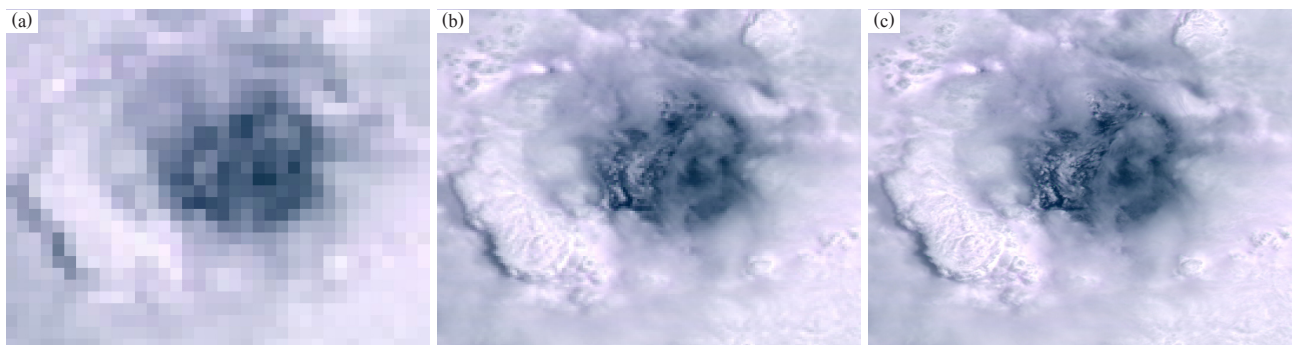


图1 三种空间分辨率的台风中心区域监测结果 (a) 为5km, (b) 为1.1km, (c) 为250m

分辨率的提高, 台风中心晴空区位置和外围螺旋云带对流活动显示出更多的精细结构特征。

2.2 微波成像

在电磁波谱上, 微波的波长要远长于可见和红外光波, 通常长于1mm, 可以穿透大多数非降雨云团到达地表和海表。因此, 作为光学成像的补充, 微波成像可以提供全天候的地表和海表信息。

FY-3A和FY-3B上的微波成像仪, 简称MWRI, 设计有水平和垂直两种极化方式的5个微波频点, 因此共有10个探测通道。MWRI是一台圆锥扫描的微波辐射计, 仪器的空间分辨率在高频的89GHz约为15km, 在低频的10GHz约为85km, 刈幅是1400km。

MWRI的5个工作频点中89GHz通道对降水散射信号非常敏感, 主要用于获取地面降水信息; 23.8GHz为水汽吸收通道, 与其他频点观测亮温配合能够反演全球大气和降水信息; 18.7GHz和36.5GHz通道针对冰雪微波辐射特征设置, 利用这两个频点接收的微波辐射亮温能够定量获取地表雪盖、雪深和雪水当量信息, 而光学遥感仪器仅能获取晴空积雪覆盖的信息(图略); 同时36.5GHz还能够用于全球陆表温度的反演; 低频10.65GHz通道具有穿透云雨大气的能力, 并且对地表粗糙度和介电常数比较敏感, 主要用于全天候获取全球海表温度、风速、土壤水分含量等地球物理参数^[9]。

2.3 大气三维探测

大气探测仪器有别于成像类仪器, 成像类仪器关注的重点是陆地表面和海洋表面, 所以要求图像水平空间的连续性和空间分辨率; 而大气探测仪器关注的重点是大气, 大气的水平空间分布比较均匀, 所以大气探测仪对水平空间的连续性和空间分辨率要求不高, 但对仪器的光谱分辨率有极高的要求。为了探测大气垂直方向的温度和湿度廓线, 需要在二氧化碳、氧气、水汽等的红外或者微波吸收谱带设计一系列的探测通道。吸收带的中心, 吸收强烈, 在此位置的观测主要可以获取大气层高层的信息; 吸收带的翼区, 吸收较弱, 大气底层的辐射可以穿透整层大气到达大气层顶, 在此位置的观测可以获取大气层底层的信息。据此, 从吸收带强吸收中心到弱吸收翼区的光谱变化就可以反演获得大气垂直方向的温度或者湿度信息^[10]。

FY-3上的大气探测仪器由红外分光计IRAS、微波温度计MWTS和微波湿度计MWHS组成, 称为大气垂直探测系统VASS, 功能类似于NOAA系列卫星上的ATOVS系统。IRAS是一台具有26个探测通道的红外辐射计, 波长设计在15 μm CO₂吸收带、6.7 μm 水汽

吸收带和4.3 μm CO₂吸收带, 用来探测晴空大气的温度和湿度廓线。IRAS采用跨轨扫描, 刈幅2250km, 星下点空间分辨率17km。MWTS是一台4通道的微波辐射计, 跨轨扫描刈幅为2200km, 星下点空间分辨率约为70km。MWTS探测频率设计在54GHz的氧气吸收带, 用来配合IRAS获取有云情况下的大气温度廓线。MWHS是一台5通道的微波辐射计, 跨轨扫描刈幅为2700km, 星下点空间分辨率约15km。MWHS探测频率设计在183GHz的水汽吸收带, 用来配合IRAS获取有云情况下的大气湿度廓线。

FY-3大气垂直探测系统的观测数据主要通过卫星资料同化技术应用于数值天气预报模式, 在这一方面欧洲中期数值预报中心(ECMWF)代表了当今国际上的最好水平。Lu等^[11]利用ECMWF的集成预报系统IFS评价了VASS观测资料的质量和对数值天气预报的影响, 表明风云三号MWTS, MWHS, IRAS和WMRI同国外同类仪器AMSU-A/Metop, MHS/Metop, HIRS/Metop以及AMSR-E/EOS的观测系统误差相当。Guan等^[12]也利用风云三号卫星资料得到了类似的结果。

图2是Lu等^[11]利用ECMWF业务系统作为控制试验的基线, 在同化了2008年7月20日—11月1日三个多月的FY-3A全球观测资料的基础上, 统计分析了93组试验, 结果表明FY-3A大气垂直探测资料对NWP模式预报有正的贡献, 同国外同类资料的同化应用能力相当。图中, 在0线以上的位置表明风云三号大气垂直探测资料进入模式后对模式预报有正的贡献, 可以看到北半球(图2左侧部分)和南半球(图2右侧部分)500和200hPa位势高度预报均有不同程度改进。

2.4 大气成分遥感

大气化学是大气科学的一门新兴分支学科, 主要研究大气中各种气体成分以及悬浮颗粒物的各种化学组成的形成、演化、迁移、输送和累积的规律与机制以及与此有关的现象和过程。国际上, 主要从20世纪70年代开始出现利用星载高光谱技术遥感大气组成含量及其变化的工作。进入20世纪90年代, 随着气候变化研究的兴起, 美国和欧洲均在大力发展和实施大气化学天基观测计划, 例如美国NASA的AURA卫星、欧洲ESA的Envisat卫星等^[13]。

FY-3A和FY-3B卫星初步具备了一定程度的大气成分遥感能力, 紫外臭氧总量探测仪TOU和紫外臭氧廓线探测仪SBUS利用观测的反射太阳紫外光谱可以反演获取全球臭氧总量和垂直廓线分布的信息。TOU在308~360nm的长波紫外臭氧吸收带设计了6个通道, 跨轨扫描的刈幅约3000km, 星下点空间分辨率为

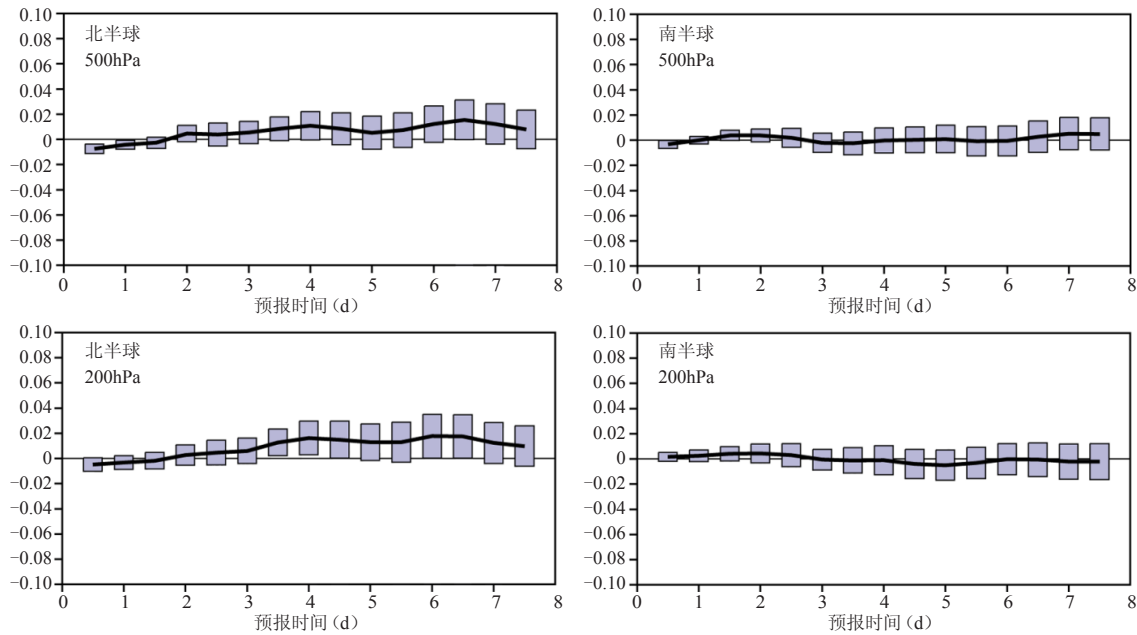


图2 控制试验和验证试验获得的00时刻北半球（左侧）和南半球（右侧）500和200hPa位势高度预报的归一化RMS差异^[11]

50km^[14]。SBUS在252~340nm的短波紫外臭氧吸收带设计了12个通道，仪器对星下点进行观测，空间分辨率为200km^[15]。

TOU臭氧总量的反演原理类似于TOMS/NIMBUS-7和OMI/AURA卫星使用的方法，选择臭氧吸收带内波长临近但吸收强度差异很大的一对波长。利用波长对方法可以有效消除大气分子瑞利散射、气溶胶散射、地表发射的影响，提取整层大气的臭氧总量信息。图3给出了TOU/FY-3A观测的全球臭氧总量结果，作为比较还给出了同期国外类似仪器GOME2/Metop和OMI/Aura的结果，三者之间的观测精度相当一致，反演结果的误差在3%以内^[16]。

2.5 地球辐射收支观测

太阳是驱动地球系统的唯一能量来源，观测大气层顶的入射太阳短波辐射和出射地球长波辐射对于地球能量收支平衡和全球气候变化研究至关重要。美国自1984年开始，在“挑战者”号航天飞机以及NOAA-9, NOAA-10, TRMM, Terra和Aqua等卫星上利用地球辐射收支实验仪器ERBE、云和地球辐射能量系统测量实验仪器CERES连续观测地球能量收支。

风云三号利用地球辐射探测仪ERM和太阳辐射监测仪SIM两台仪器组对联合监测大气层顶的辐射能量收支情况，其中ERM是一台宽通道辐射计，设计有0.2~50 μm 全波和0.2~4.3 μm 短波两个通道，分别测量地球出射的辐射通量总量和地球反射的太阳短波通量。ERM有两组观测模式，一组为窄视场观测模式（NFOV），瞬时视场为2°，星下点分辨率约28km，

跨轨扫描，刈幅是2300km；另一组为宽视场观测模式（WFOV），瞬时视场120°，直接对全视场成像观测，不扫描。两组观测匹配使用，其中宽视场主要用于比较和检验窄视场的测量。SIM由三台相同的太阳光度计组成，光谱覆盖0.2~50 μm 的全部入射太阳能量波段。图4给出了2010年厄尔尼诺年和2011年拉尼娜年全球短波和长波辐射的距平图，平均值计算自1985—2009年1, 2和3月的季节平均。结果显示厄尔尼诺年在西太平洋区域短波辐射增加、长波辐射减少，拉尼娜年在同一区域趋势相反^[16]。

3 关于开展定量遥感的思考和讨论

风云卫星经过四十年的发展，形成了极轨和静止两个系列卫星稳定的业务观测能力。风云卫星遥感仪器的工艺水平不断提高，资料处理的定位、定标技术逐步完善和成熟，初步完成了从看图说话到定量应用的跨越。

第二代极轨气象卫星初步完成了升级换代，风云三号形成了上下午组网观测的能力，可以提供1级、2级定量产品五十余种，在全球气象观测、数值天气预报、全球关键气候变量监测、全球环境和灾害监测中具有极高的应用能力。特别在数值天气预报方面，经过欧洲、美国数值预报模式的检验，风云三号仪器的观测资料同国外在轨的同类仪器质量相当，卫星资料对数值天气预报有正的改进效果，风云三号的定量遥感应用能力已经获得了国际上的认可。

尽管风云三号资料在定量遥感应用方面取得了大量的进展，但是在卫星定量遥感的基础研究领域还面

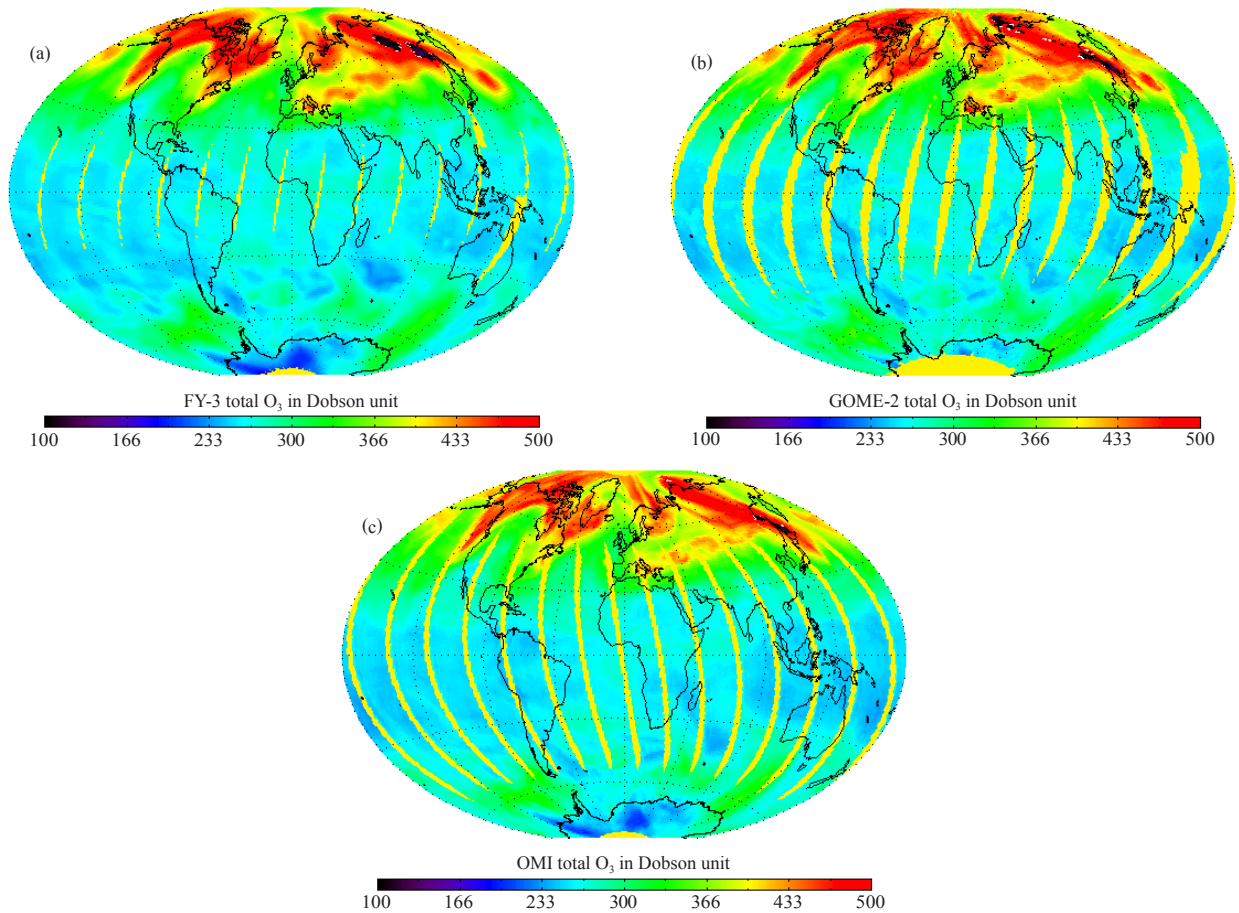


图3 臭氧总量的全球分布^[16]
(a) TOU/FY-3A的结果, (b) GOME2/Metop的结果, (c) OMI/Aura的结果

临着一些问题和挑战, 主要表现在:

(1) 大气辐射传输理论研究方面。大气辐射传输理论是卫星定量遥感和卫星资料同化的基础, 在反射和发射同时存在的复杂源函数的辐射传输计算、云

雨大气的散射计算、地表双向反射同大气耦合的辐射传输计算等方面, 大气辐射传输计算的速度和精度都存在缺陷, 制约了定量遥感的精度, 也制约了数值模式对卫星资料的同化使用效率。

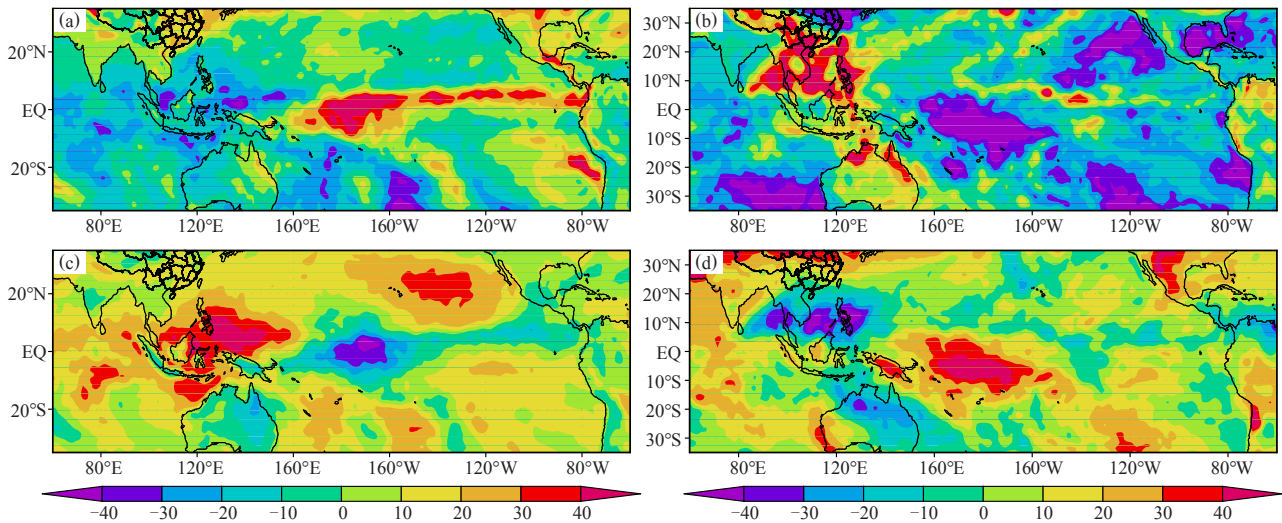


图4 ERM/FY-3观测的厄尔尼诺年(2010年)和拉尼娜年(2011年)全球辐射距平分布^[16]
(a) El Niño年(2010年)短波辐射距平, (b) La Niña年(2011年)短波辐射距平,
(c) El Niño年(2010年)长波辐射距平, (d) La Niña年(2011年)长波辐射距平

(2) 卫星观测资料的辐射和光谱定标精度方面。辐射和光谱定标精度与卫星资料的定量应用直接相关, 准确的卫星资料辐射和光谱定标不仅仅是资料处理方面的技术问题, 同时也是一个需要全面协同考虑的科学问题。卫星辐射和光谱定标的精度由发射前的遥感仪器星上定标设计、发射前的遥感仪器实验室定标、发射后的场地与交叉定标三个环节决定。其中发射前的星上定标设计和实验室定标至关重要, 确定了仪器定标性能的优劣程度; 而发射后的场地定标、交叉定标等方法只能对遥感仪器定标精度进行验证和一定程度的修正, 不能从本质上改进遥感仪器的定标精度。定量遥感要求在遥感仪器上星发射前必须做好遥感仪器的星上定标设计, 必须做好发射前实验室定标中对关键参数的系统测量工作。

(3) 卫星定量遥感产品的精度检验方面。卫星观测是对空间一个有限区域的物理属性的观测, 典型的范围是 $1\text{km} \times 1\text{km}$; 而常规观测是对空间一个点上的观测。因此, 如何将面观测和点观测进行有效的对比验证, 需要针对具体观测目标讨论其属性的空间尺度效应和空间代表性。此外, 卫星定量遥感产品不仅受到卫星观测误差的影响, 还受到反演算法适用范围的制约。遥感产品的精度随时间、空间分布存在较大的差异, 这种精度的变化对应用带来很大程度的困扰, 需要在遥感产品的整个生命期内同步给出产品精度的信息。因此, 卫星定量遥感产品的精度检验不仅是一个时间段、一次过程的检验, 而应该是规定了比较对象和比较方法的长期的、连续的规范化、标准化过程。

(4) 卫星资料的天气学应用方面。传统的卫星气象学, 主要依靠预报员的主观分析能力, 利用静止气象卫星的云图动画信息, 对未来天气现象的发生和发展进行分析和判断。在卫星云图分析中, 除了用好传统的可见光、红外和水汽云图分析之外, 还要学会使用极轨卫星红外和微波大气探测通道的观测信息, 加强对云下温湿度廓线、中低层水汽结构的了解。当前, 卫星气象学的应用还出现了两个新的趋势, 一个趋势是包含地面雷达、常规观测和卫星资料在内的多源资料客观诊断分析和融合, 多源资料经过诊断和融合后可以给预报员提供更为准确客观的天气形势分析场, 同时还可数值天气预报模式提供更为准确的初始场; 另一个方向是卫星资料的同化应用技术, 通过卫星观测资料与模式预报场的多次迭代, 数值天气预报模式的动力和物理过程同观测资料逐步匹配, 预报的准确率得到提高。因此, 对卫星资料的定量分析和应用将是卫星气象学发展的趋势。

(5) 卫星资料的气候学应用方面。气象卫星具有大尺度全球观测的优势, 其观测获取的关键气候参量可以作为检验气候模式的依据。另一方面, 气象卫星从1960年开始, 已经累积了50年的观测资料, 初步具备了气候诊断的价值。然而, 长期存档的卫星资料不是简单地等同于卫星资料的气候数据集, 长期存档的卫星资料必须经过空间的一致化处理、时间的一致化处理, 将卫星观测的系统误差订正到一个非常一致精确的范围。在卫星资料的气候数据集加工处理中必须考虑遥感仪器的定标精度和可能的影响订正、同一遥感仪器寿命期内仪器的性能衰减、同一遥感仪器寿命期内轨道漂移造成的观测时间的变化、不同平台同类型遥感仪器性能指标的差异、遥感仪器升级换代后的观测误差的变化等多种因素的困扰。由于气候变化的幅度远小于天气变化的幅度, 所以利用卫星资料研究气候变化挑战大、难度高, 是卫星资料应用仍需要探索和研究的全新领域。

参考文献

- [1] 张文建. “风云”系列气象卫星的发展现状及其展望. 上海航天, 2001, 2: 8-13.
- [2] 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.
- [3] Dong C H, Yang J, Zhang W J, et al. An Overview of a New Chinese Weather Satellite FY-3A. BAMS, 2009, 90(10): 1531-1544.
- [4] 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号. 气象学报, 2009, 67(4): 501-509.
- [5] 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 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.
- [6] 国家卫星气象中心. 风云三号(01批)卫星使用要求. 2004.
- [7] 国家卫星气象中心. 风云三号气象卫星应用系统一期工程初步设计. 2006.
- [8] Zhang P, Yang J, Dong C H, et al. General introduction on payloads, ground segment and data application of Fengyun 3A. Front Earth Sci China, 2009, 3(3): 367-373.
- [9] Yang H, Weng F Z, Lv L Q, et al. The FengYun-3 Microwave Radiation Imager On-Orbit Verification. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49: 4552-4560.
- [10] Kaplan L D. Inference of atmospheric structure from remote radiation measurements. J Opt Soc Am, 1959, 49: 1004-1007.
- [11] Lu Q F, Bell W, Bauer P, et al. An evaluation of FY-3A satellite data for numerical weather prediction. Q J R Meteorol Soc, 2011, 137(658): 1298-1311, doi:10.1002/qj.834.
- [12] Guan L, Zou X L, Weng F Z. Assessments of FY-3A Microwave Humidity Sounder measurements using NOAA-18 Microwave Humidity Sounder. J Geophys Res, 2011, 116, D10106, doi:10.1029/2010JD015412.
- [13] 张兴赢, 张鹏, 方宗义, 等. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展. 气象, 2007, 33(7): 3-14.
- [14] Wang W H, Zhang X Y, An X Q, et al. Analysis for retrieval and validation results of FY-3 Total Ozone Unit(TOU). Chinese Sci Bull, 2010, 55(26): 3073-3043.
- [15] 黄富祥, 刘年庆, 张鹏, 等. 风云三号A星紫外臭氧垂直探测仪反演产品比较和评估. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1568-1575.
- [16] 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.