

海洋大气和环境卫星遥感技术进展

田林, 王曦, 杨冰韵, 吴晓京*

国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 分别从海雾、海上强对流、海洋环境监测角度, 介绍了卫星遥感监测能力、方法和相关产品的最新进展。卫星监测能力上, 发展方向主要为高低轨、主被动协同观测; 数据提取和产品反演方面, 遥感反演算法趋于多样化且逐渐稳定成熟。基于卫星遥感对高层大气(以强对流为代表)、边界层大气(以海雾为代表)以及海洋环境(以海洋藻类、水体组分参数为代表)的评估, 已经从科学研究过渡到业务监测, 进一步提升了对海洋大气和生态环境的监测能力。

关键词 卫星遥感; 海洋大气; 海洋环境

因海上缺乏实地观测资料, 且海上天气和环境生态系统变化迅速, 目前对海洋天气和环境生态的监测、评估及预警最有效的方法是卫星遥感观测。近年来, 随着卫星遥感技术的发展, 卫星的观测能力、数据提取和产品反演算法也都有了长足进步。本文从海雾、海上强对流及海洋生态环境监测角度, 介绍卫星遥感监测能力、方法和相关产品的最新进展, 能够帮助科研和海洋监测业务人员加深卫星遥感在海洋大气和生态环境监测方面的理解和拓展应用。

1 海雾卫星遥感应用方法及现状和发展趋势

全世界 40% 的海上事故与海雾有关, 海雾造

成的人员财产损失可与龙卷风、甚至飓风灾害造成的损失相比^[1]。

1.1 卫星(海)雾检测获取技术

天气预报和业务服务需要观测数据的及时、检测结果客观和相对准确, 因此卫星雾监测的首要目标就是研制稳定可靠的检测算法。

极轨气象卫星(LEO)系统是卫星探测技术的先行者, 因距地较近具有较高空间分辨率等优势, 多数雾检测方案的进展都源于极轨气象卫星遥感。卫星观测到的雾信息, 受辐射特征日夜变化的影响明显, 夜间和白天的雾检测方法完全独立。目前业务上夜间雾(含低层云)检测的方法是在中波、长波红外波段中小粒子不透明水云发射率存在差异的理论^[2]基础上建立的双通道差值法(BTD)^[3]。该方法当前仍是业务监测夜间雾的首选和夜间雾检测

收稿日期: 2020-10-25; 修回日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41675110, 42071334)

作者简介: 田林, 工程师, 研究方向为大气和海洋卫星遥感, 电子信箱: tianl@cma.gov.cn; 吴晓京(通信作者), 研究员, 研究方向为卫星资料天气监测与预报中的应用, 电子信箱: wuxj8@cma.gov.cn

引用格式: 田林, 王曦, 杨冰韵, 等. 海洋大气和环境卫星遥感技术进展[J]. 科技导报, 2021, 39(15): 54-66; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.15.006

的研究基础。但其缺乏从低云中检测出雾的能力,对低云和海雾混杂不严重中纬度以北海域,如我国的黄渤海海域业务监测效果相对较好,而越往南效果越差。20世纪90年代中期以来,美国海军对夜间雾的遥感识别和预报一度重视,其中一些成果给出了有应用前景的示例,也指出了BTD识别技术的缺陷^[4]。近年来仍有研究延续以寻求改进^[5]。

对于白天雾的检测,已经发展出多种光谱辐射特征分析和图像纹理结构检测方法。在光谱特征中,使用搭载高级甚高分辨率辐射计(AVHRR)不同卫星的6个探测波段数据的雾检测方法,经过多年研究,已趋于成熟。已发展出由单通道阈值的方法^[6]、双通道组合阈值^[7-8]和多通道阈值组合的方法^[9]的多种组合。针对中分辨率成像光谱仪(MODIS),Bendix由大气辐射传输模型模拟出发,发现雾在MODIS传感器的1~7波段的反射率、发射率阈值的阈值规律,建立了分类、检测白天雾的模型,实现了陆地雾检测方法的创新^[10]。

除通道特征外,另一种思路是由反演的云雾特征量来识别雾,如通过反演粒子尺度、光学厚度、垂直厚度、含水量作为识别雾的标准之一^[11],或主要手段^[12]。

对黄渤海海雾,有文献通过采样和模拟,较为系统地对比了诺阿17卫星搭载的高级甚高分辨率辐射计(NOAA17/AVHRR3)中海雾和其他类目标物光谱特性差异进行了对比研究^[13],通过辐射传输模式模拟雾、高云、中云和低云的光谱特征,用以检测黄渤海海雾,该算法对研究的样本取得了较好的检测精度^[14]。近2年,组合(2个)谱段通道的检测技术在海雾领域发展运用,如使用归一化差分积雪指数(NDSI)的通道阈值分离海雾与海上低云的试验^[8];创立归一化近红外水汽指数(NWVI)、晴空与海雾(层云)像元NWVI差值指数(D_NWVI)和海雾(层云)与临近晴空像元热红外亮温差(BTDback)等指数检测海雾的自动算法^[15]。

雾和层云具有非常相近的光谱辐射特征,因此雾检测研究一般都是以雾/低云为研究对象,而未提及低云与雾分离问题。从卫星遥感资料获取的光学厚度反演到云的垂直厚度,并推算云底高度^[11]

是对层云和雾分离技术的新探索。这种反演方法获取了过去卫星空基视角难以获得的云下特征,检测结果与西欧地基观测符合度有明显提高。

高时间分辨率的地球静止气象卫星(GEO)系统更能满足雾监测的业务时空分布需要,使用多时段数据合成晴空海温与单时段红外亮温差值,并以晴空像元分析参数来检测黄海海雾/低层云^[16]具有创新意义,将雾区作为整体而定义的面向对象的识别方法,标志着静止气象卫星雾识别算法的独立和技术发展^[12]。

随着新一代静止气象卫星的投入使用,雾检测能力明显改善,欧洲已经发展了基于欧洲第二代静止气象卫星上搭载的旋转增强型可见光和红外成像仪(MSG/SEVIRI)数据的15 min间隔的雾自动检测产品业务框架 satellite-based operational fog observation scheme(SOFOS)^[17]。美国静止气象卫星搭载的高级基线成像仪(GOES-R/ABI)的雾/低层云业务检测算法也在继承NOAA极轨气象卫星AVHRR的6个通道算法基础上,创新出利用美国大陆密集地面观测资料匹配卫星观测来动态确定卫星检测使用的阈值的方法^[18]。

雾检测技术的发展和逐渐稳定成熟的算法,增强了对于卫星雾气候分布特征的评估研究能力。突破原有地面观测的局限^[19]和增强了对缺乏地基观测的海洋雾分布情况的认识^[20]。

1.2 卫星(海)雾的物理参数反演技术

随着卫星遥感技术的发展,更加定量地应用卫星数据反演雾光学厚度和液态水粒子尺度、雾水含量等微物理特征参量^[10,17,21]成为卫星监测雾技术研究的重要组成部分。对于黄海海雾已有类似特性参数的卫星反演研究^[22]。可以通过反演的雾微物理特征值(如:液态水路径等)检测白天/夜间雾,但由于受区域特征影响以及缺乏更多实验验证而没有达到能够业务使用的程度^[1]。

1.3 卫星资料用于海雾的同化模拟

目前对(海)雾的预报准确率的提高多依靠数值天气模式,现有海雾模拟预报效果与其他气象要素相比还处于较低水平。这主要因缺乏针对性边界层物理方案和模式分辨率,尤其是垂直方向不

够,此外模式初始观测数据缺乏也是另一个影响模拟预报效果的原因。

卫星数据是改善初始条件最重要的观测数据来源,尤其是在海洋和高原等缺乏地基常规观测的区域。当前针对(海)雾的数值模拟研究较少,有同化模拟研究使用含有常规海气观测、卫星观测等的综合数据包来提高模拟效果,以揭示机理、评估模式性能^[23-25]。也有单独同化卫星资料以针对性地提高某种类型海雾模拟模拟预报效果,如对FY-3A的微波湿度计(MWHS)和微波温度计(MWTS)数据对黄渤海冷型海雾相关量模拟场的改善能力和条件的研究^[26]。

总体来讲,同化观测资料对海雾模拟效果的提高作用有限,表现为对冰冻条件下的雾模拟改进效果不明显^[6];对雾的爆发时段有效果,但无法改进雾持续阶段的预报^[23];多初始值集合同化后的模拟效果也不甚理想^[27]。

1.4 雾卫星检测产品业务现状和发展趋势

雾卫星监测产品普遍以雾/层云为检测对象,一般包括陆地和海洋,与地基能见度观测的匹配程度受当地区域天气气候特征影响。互联网上可检索到这种专业机构的业务产品,已知的海雾卫星遥感监测产品有中国国家卫星气象中心针对中国周边海域的极轨、静止2个系列5颗卫星的海雾检测产品,产品通过FTP等方式服务于特定用户,包括中国气象局台风海洋中心等单位;韩国有基于COMS的海雾检测产品^[28]。雾检测产品质量除识别算法设计外,还受遥感仪器通道数据质量和稳定性影响,因此各卫星的(海)雾检测结果并不完全一致。

未来新产品的发展目标更多的指向的模式数据与卫星检测产品的融合。在美国新一代静止气象卫星(GOES-R)产品预研中,针对美国西海岸海域海雾,由卫星云雾厚度产品和数值天气预报产品(NWP)预报结果融合形成了IFR(instrument flight rules)和LIFR(low instrument flight rules)的航空气象产品(图1)。卫星检测与高精度和分辨率的数值预报融合产品的研发将成为海雾检测产品的发展趋势,这样既克服了卫星观测能力的限制又能够比较客观的反映雾分布的实况。

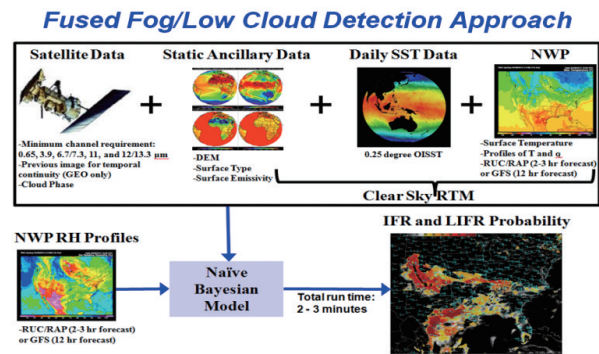


图1 卫星与NWP预报结果融合的IFR和LIFR的航空气象产品形成流程示意

2 强对流及相关环境场的卫星监测现状和潜力

强对流是造成海上人员伤亡和财产损失的主要灾害天气之一。具有突发性和局地性强、生命史短等特点^[29]。卫星观测具备观测范围大、可反演要素多、时效性强等诸多优势,大大提高了海洋强对流等灾害的监测和预警能力^[30-31]。

2.1 卫星多样化反演强对流参数研究

用卫星红外观测资料对强对流云团进行识别和追踪是目前应用较为广泛的方法之一,其原理主要是基于云顶温度阈值来进一步识别强对流云团^[32-34]。云顶温度阈值对于对流云团的识别有较大的影响^[35],因此仅依靠红外波段云顶温度阈值方法较难实现强对流云团的准确判识。为改善强对流云团识别精度,微波观测成为重要的手段之一。Liu等^[36]以红外波段观测为基础,利用红外波段反演得到的云顶温度结合美国国防气象卫星(DMSP)搭载的星载微波成像仪(SSM/I)的19.35 GHz和85.5 GHz通道观测参量来进一步区分薄卷云和强对流云团。Anagnostou等^[37]利用星载微波成像仪(SSM/I)的85 GHz通道亮温资料对对流云团及层状云进行分类。此后,Hong等^[38]将该算法改进,采用高精度TRMM/TMI微波观测资料进行对流云分类研究。然而,这2种算法仅实现了对流云与层状云的区分,并未将强对流云团从对流云中区分开来。有研究表明,高云中高层液态水的存在使得150 GHz微波观测亮温有较为明显的减少,而对于

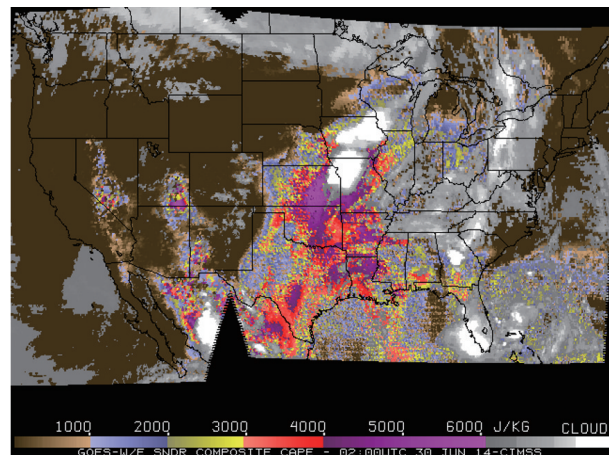
中心位于 183.3 GHz 的水汽吸收通道($183.3 \pm 1, \pm 3, \pm 7$)而言,若频率距中心频率越远,则亮温减少越为明显^[39]。研究表明利用 183.3 GHz 三通道对于高云液态水敏感性不同这一特性,通过对 183.3 GHz 三水汽吸收通道亮温差值设定阈值及对差值结果进行排序,即可实现强对流云团及对流上冲云顶的识别^[40]。

利用卫星资料分析强对流初生环境场对于提高强对流短时临近预报和预警能力有重要的意义。早期的研究多集中在对流云发生前卫星云图的特征分析^[41-42],或是通过不同光谱通道的亮温特征或差值特征来分析对流系统的水汽场特征或对流云云顶物理特征^[43-44]。随着气象卫星的发展,研究开始采用静止卫星观测资料来进一步反演抬升指数、对流有效位能及对流抑制能量等相关参数,来判定大气层结状态并进一步研究对流云的发展^[45-46]。Koenig 等^[47]利用欧洲第二代静止气象卫星生成全球不稳定指数、抬升指数、和 K 指数来进一步确定对流不稳定区,结合其他触发或抬升因素来分析强对流生成前的特征,预报时效可达几个小时。Mecikalski 等^[48-49]利用美国静止气象卫星(GOES)搭载的成像仪资料,采用不同红外通道亮温及其相关参数指标来判断积云能否发展成为对流风暴。Siewert 等^[50]利用欧洲第二代静止气象卫星上搭载的旋转增强型可见光和红外成像仪(MSG/SEVIRI)数据和不同的对流追踪技术检测对流初生,通过分析和试验在轨静止卫星可用光谱信息检测对流的效果,获得云厚度、云顶冻结和上升气流强度相关的光谱及其组合,形成对流初生的主要技术方法。

2.2 卫星对流检测业务产品

产生强对流天气需具备基本的不稳定能量、水汽条件、触发抬升机制等,对流有效位能同时包含了高低层的空气特性,能够较真实地描述大气不稳定性。美国静止气象卫星(GOES-W/E)已经发布对流有效位能产品 CAPE,该产品能够反映强对流发生环境的大气不稳定性,图 2 为 2014 年 6 月 30 日 GOES-W/E 对流有效位能产品(CAPE)检测成像。

EUMETSAT 开发了基于第二代业务静止气象卫星可见光和红外成像仪(SEVIRI)的临近预报产



(棕色:CAPE<1000 蓝色:1000<CAPE<2000
黄色:2000<CAPE<3000 红色:3000<CAPE<4000
紫色:4000<CAPE<6000,CAPE值的单位为J/kg)

图2 2014年6月30日 GOES-W/E
对流有效位能产品(CAPE)

品(NWC SAF)^[51-52]。与强对流相关的产品有快速发展的雷暴产品 RDT 和对流降水率产品 CRR 等。快速发展的雷暴产品(rapid development thunderstorm, RDT)主要采用静止卫星数据来提供从小尺度到中尺度对流系统的信息。包括识别、监测、追踪强对流系统以及识别快速发展的对流单体,图 3 为 RDT 产品图像。

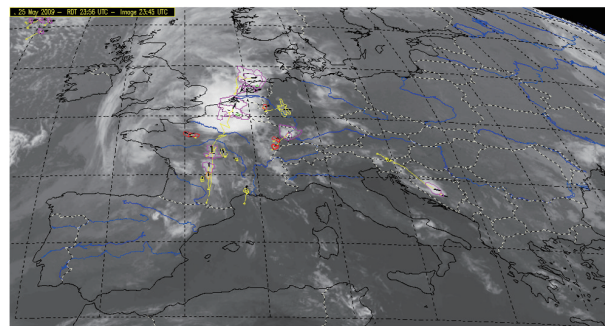


图3 RDT 产品图像(2009年5月25日 23:56 UTC,
云图时间 23:45 UTC)

对流降水率产品 CRR(convective rainfall rate)主要提供与降水和对流云监测有关的 NWC SAF 产品补充信息,同时评估对流云产生的降水率。图 3 所示为 2009 年 5 月 25 日的一次强对流个例,该个例重点关注亚得里亚海一天内的对流初生,及下午法国辐合线发展起来的强对流系统。其中,黄线代

表对流云轨迹,黑色箭头代表重心 30 min 内移动方向,彩色等值线代表云系边界,等值线颜色代表系统生命史的不同阶段。黄色为初生阶段(最暖区域中最低温度高于 -25°C),红色为发展阶段(最低温度高于 -40°C),洋红色为成熟阶段(最低温度小于等于 -40°C),橘色为分离情况(已有对流诊断方法),绿色菱形为上冲云顶。

GOES-R 的对流初生产品(CI)可用于检测快速降温的云顶及云的类型。综合应用云顶及云分类这两种产品可有效判识对流初生区域,对流生成区域,以及可能的对流发生区域。图 4 为 SEVIRI 运算个例结果(2007 年 6 月 8 日)。左侧为 $10.8\ \mu\text{m}$ 图像,右侧为检测结果。前两行图像时间分别为 1024UTC, 1029UTC。最后一行左侧图像为 1124UTC 红外图像,右侧为 1029UTC 算法有效输出结果。

MSG(meteosat second generation)是新一代欧洲静止气象卫星,对于观测快速变化发展的天气现象具有很大优势。MSG 对流及地形触发降水研究(COPS)主要利用 MSG 图像形成产品(仅限白天)^[53]。图 4 左侧图是 $10.8\ \mu\text{m}$ 红外云图,暖色调(偏红)代表亮温高,冷色调(偏蓝)代表亮温低;右侧为对流初生的可能性,暖色调代表可能性高,冷色调代表可能性低。

风云二号卫星现有强对流监测是从红外和水汽通道云顶亮温出发,提供实时对流预警监测和追踪类图像产品,并在识别追踪基础上形成基于过去

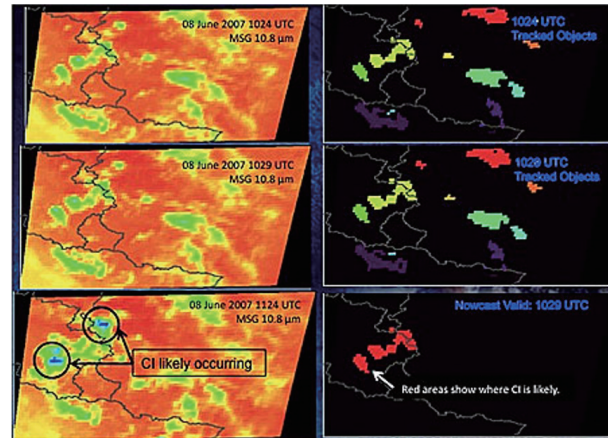


图 4 CI 输出结果对比

对流路径监测的 0.5~1 h 的外推产品。

2.3 与强对流相关的环境场反演卫星资料和产品应用

在最基础的卫星资料——云图上,对流云型在形态和尺度上具有很大的变化,对于不同的光谱通道,这些云型各具特征^[54]。一些对降水、水汽场及风场相关卫星定量产品的定量分析,也可从对流发生时其环境场所出现的某些特征来进一步进行对流监测与预警^[55]。有研究提出采用水汽分布特征指标可对改善强对流天气临近预警起到重要作用^[56],水汽场的分布特征、水汽区的活动、干湿区边界、暗区等都与强对流的发生发展有着密切的联系^[57]。表 1 列出了国内一些与对流监测间接相关的风云卫星产品及相应技术指标。

表 1 风云卫星遥感产品

| 产品名称 | 区域范围 | 分辨率 | 生成频次 |
|------------------|--------|---------------|--------------|
| 平均海面温度 | 中国区域 | 5 km | 3 h/次日/月/旬/候 |
| 晴空大气可降水 | 中国区域 | 5 km | 3 h/次 |
| 降水估计 | 中国区域 | 5 km | 1/3/6/24 h/次 |
| 大气运动矢量 | 中国区域 | 5 km | 6 h/次 |
| 风场 | 轨道 | 25 km/12.5 km | 2 d/次 d |
| MWRI 降水和云水 | 轨道 | 25 km×40 km | 102 min/次 |
| VIRR 海表温度 | 全球晴空海区 | 0.01°×0.01° | 日/月/旬/候 |
| VIRR 全球云量与云分类云相态 | 全球 | 0.05°×0.05° | 日/月/旬 |

3 海洋环境遥感监测卫星及遥感产品

海洋是天气、气候等现象的动力源,对海洋环境的监测对于人类活动及气候变化的研究都具有重要意义。海洋面积广阔且海洋参数变化较快,用卫星遥感的方式可以解决现场测量的采样点少时空分辨率低的问题,海洋环境遥感监测可为评估海洋水色、海洋污染、海岸带资源开发、海洋科学研究等领域服务。

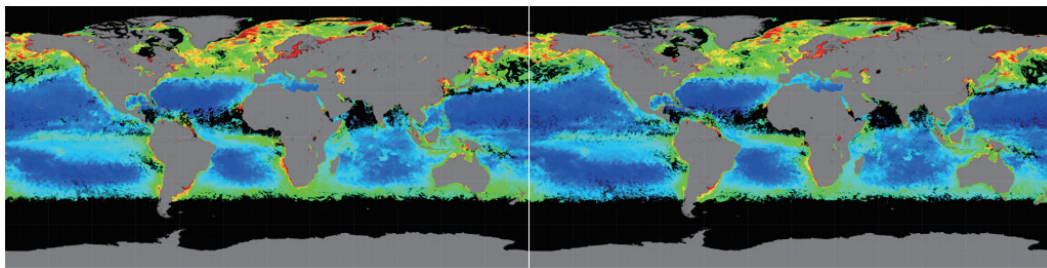
3.1 海洋水色遥感产品

3.1.1 叶绿素浓度遥感产品

海水叶绿素浓度对于海洋大气系统中碳循环、环境监测、气候变化及渔业等方面有重要影响。随着 SeaWiFS 资料在海洋叶绿素反演中的应用,后续有中分辨率光谱成像仪(MODIS)、我国第二代极轨

气象卫星风云三号搭载的中分辨率光谱成像仪(FY-3/MERSI)、可见光红外成像辐射仪(VIIRS)等卫星传感器数据的应用与延续,形成了长时间序列的卫星遥感海洋叶绿素浓度产品。

常用的叶绿素浓度遥感反演业务化算法有2种,分别为 OC_x (包括 OC_2 、 OC_3 、 OC_4 等, x 代表算法所用到的波段个数)算法^[58-59]和GSM算法^[60-61],其中 OC_x 算法为基于现场测量的海水叶绿素浓度与多波段遥感反射率比值所建立的经验算法,GSM为生物光学模型算法。目前常用的卫星遥感叶绿素浓度产品有MODIS叶绿素浓度产品和VIIRS叶绿素浓度产品,如图5所示分别为MODIS叶绿素浓度月合成产品(图5(a))和VIIRS叶绿素浓度产品(图5(b)),数据来源为NASA oceancolor网站^[62]。



(a) MODIS叶绿素浓度月合成产品

(b) VIIRS叶绿素浓度月合成产品

图5 2018年5月卫星遥感叶绿素浓度产品

3.1.2 真光层深度

真光层深度,在水体中能够支持净初级生产力的水体深度,也称为真光层厚度Zeu(euphotic zone depth)。由于浮游植物大多分布在真光层,因此研究真光层对海洋初级生产力的估算起着重要作用,同时对于水体富营养化,全球碳循环,以及全球温室效应都有重要的参考价值^[60-62]。图6所示为真光层深度在我国渤海和黄海海域的空间分布情况。目前业务化算法多参考Morel等方法^[63],基于叶绿素与光衰减系数的相关性,根据叶绿素浓度推算得到真光层深度。NASA ocean color网站^[64]提供真光层深度L2产品下载。

3.1.3 悬浮泥沙

悬浮泥沙作为近海水体污染物的源和汇,是表征水环境质量的一个重要参数,它与海水理化性

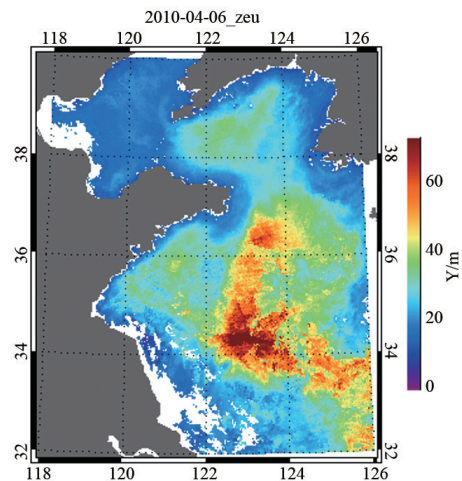


图6 MODIS真光层深度产品

质、声的传播及水域生产力有密切的关系,因此对于海水中悬浮泥沙含量的监测和研究具有重要意

义^[66-69]。

美国国家海洋和大气管理局(NOAA)利用可见光的红光波段(645 nm)的离水辐射率计算海水的悬浮泥沙^[70]。如图7所示为美国国家海洋和大气管理局基于MODIS反演的美国切萨皮克湾附近海域的悬浮物空间分布图。另外基于水体固有光学性质(IOP)反演水体悬浮泥沙含量的算法^[71]也成为应用较广的悬浮泥沙反演算法。

3.1.4 海水透明度

海水透明度是描述海洋光学性质的基本参数,能够反映海水的浑浊程度以及海水对光的吸收和散射程度^[72-73]。

目前海水透明度的反演产品主要采用半分析算法,即用卫星遥感反射率数据反演出水体的固有光学性质,并通过水体的固有光学性质计算海水透明度^[74]。欧空局(ESA)建立了全球海洋水色卫星遥感观测计划(GLOBColour)^[75],以发展基于卫星的海洋水色数据,支持全球碳循环研究,图8为GLOBCollur海水透明度融合产品。通过GLOBColour计划可以获取海水透明度的融合数据。

3.1.5 海表温度

海表温度是一个重要的气候和天气参量,在近岸范围海面温度对地球大气层中的气团有极大的影响。

基于MODIS卫星传感器的红外波段可以反演

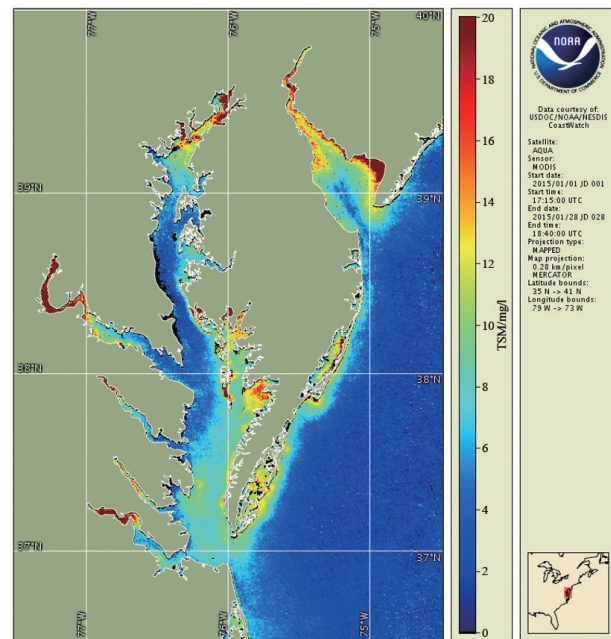


图7 MODIS悬浮泥沙产品^[70]

海表温度^[76],并提供海表温度的业务化产品,如图9所示^[77]。

3.2 海洋环境动力遥感产品

3.2.1 洋面风

海洋面积广阔,对海洋上的风进行测量对海洋导航、气象预报及气候研究都具有重要的意义。可以使用可见光图像来研究云的运动和间接确定风速和风向(即云导风)。另一方面微波仪器也可以测量海面风,微波测量海面风有两种方式——被动

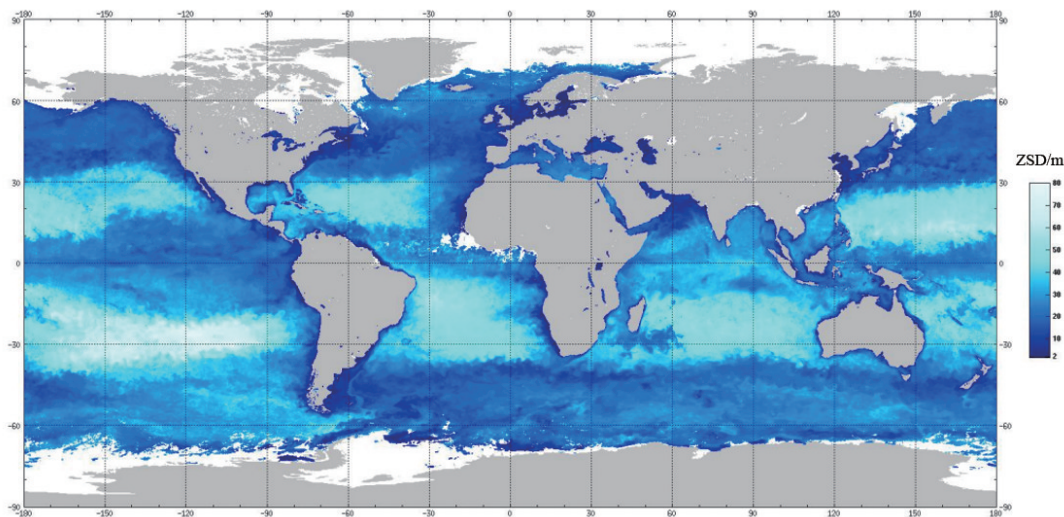
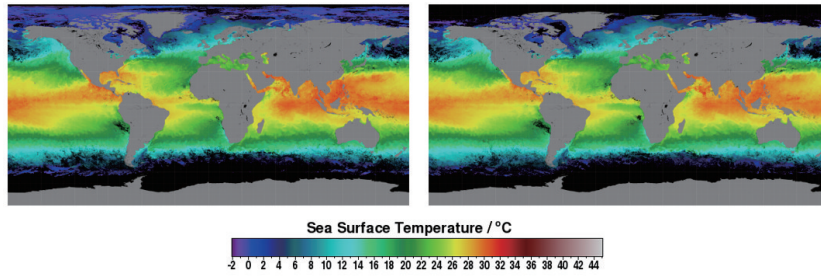


图8 GLOBColour海水透明度融合产品



(a) aqua/MODIS 海表温度月合成产品 (b) terra/MODIS海表温度月合成产品
图9 MODIS海温产品

微波辐射计和主动微波散射计。微波辐射计通过测量海面粗糙度来测量海面风速,可以测量海面 10 m 的风速^[78]。微波辐射计由于没有极化辐射计只能测量风速,不能测量风向,2003年发射的星载全极化微波辐射计(Windsat)是第一个极化微波辐射计,图10为Windsat洋面风产品^[79]。

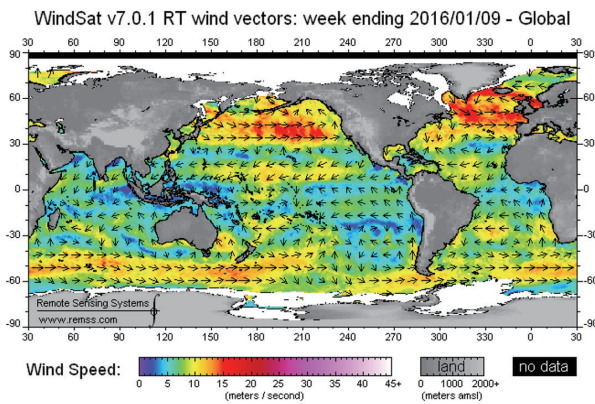


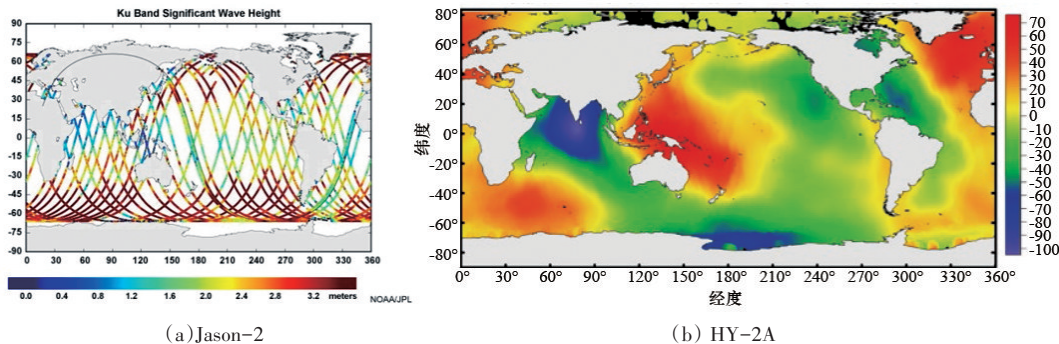
图10 Windsat洋面风产品^[79]

3.2.2 海面高度

通过对海面高度的监测对由全球气候变暖、极

地冰川融化、上层海水变热膨胀等气候现象引起的全球性海平面上升的研究有重要意义^[80]。卫星高度计是一种向卫星下方的地球发射脉冲的雷达,通过测量脉冲经海面反射之后的往返时间,则可获得卫星距海面的高度,通过地面轨道测距和计算,可以获得卫星轨道高度,从而获得卫星遥感海面高度值^[81]。

在国际上,目前以欧美为代表已发射了系列的高度计卫星,广泛应用于军事和民用,其中以测高卫星(Jason-2)为代表。海洋2号01星(HY-2A)是我国第一颗海洋动力环境卫星,其主载荷有雷达高度计、微波散射计、微波辐射计和大气校正辐射计。HY-2A 雷达高度计是一个发射频率为 13.58 GHz± 160 MHz 和 5.25 GHz± 160MHz 的双频雷达高度计,采用脉冲有限工作方式测量海面高度、有效波高和海面风速。该仪器在 20 m 有效波高条件下测高精度为 4 cm,在 4 m 有效波高条件下测高精度达 2 cm,测高精度水平与 Jason-2 卫星高度计相当^[82]。图 10 所示分别为 Jason-2(图 11(a))和 HY-2A(图 11(b))卫星测量的海面高度产品。



(a) Jason-2 (b) HY-2A

图11 Jason-2和HY-2海面高度产品^[82]

3.3 综合观测卫星遥感产品

海洋综合卫星应用于综合性的海洋观测,用高空间分辨率传感器观测包括海洋环境事件的监测、渔业管理等。如用 DMSP (defense meteorological satellite program) 卫星监测管理海洋的渔船,由于捕鱼船在夜间利用高亮度的灯光吸引鱼群,因此可根据 DMSP 卫星监测到海上的灯光结合 ARGOS 系统数据定位到海洋的渔船^[83],实现渔业的遥感监测管理。

合成孔径雷达利用主动微波遥感探测地球,受观测条件影响较小,可用于海岸带遥感监测及海洋溢油等海洋环境事件的监测。目前可用的主流雷达卫星有加拿大所发射的 RADARSAT-2 卫星。此外,海洋水色业务卫星 (HY-1C) 搭载的海岸带成像仪 (CZI) 星下点地面分辨率优于 50 m, 扫描幅宽大于 950 km, 同样可利用其高空间分辨率观测的优势,对海岸带环境事件进行监测^[84]。

4 结论

卫星遥感是观测辽阔海洋大气的最佳手段。近年来,气象卫星遥感技术高速发展,在海洋大气和环境探测、产品反演、数据同化应用等诸多领域进展显著。在海雾卫星遥感监测方面,目前已经发展出逐渐稳定成熟的检测方法(包括多光谱辐射特征分析和图像纹理结构检测)和微物理特征参量(包括雾光学厚度和液态水粒子尺度、雾水含量等)反演方法,随着新一代静止气象卫星的发射和应用,实现了海雾的高时空分辨率监测和定量反演;强对流及相关环境场的卫星监测方面,利用多源卫星观测资料(利用红外波段反演得到的云顶温度结合微波观测资料)能够很好地实现对强对流云团进行识别及追踪,同时综合分析卫星反演产品中的强对流初生环境场特征,能够改善海上强对流的短时临近预报和预警能力;海洋环境遥感监测方面,近年来结合卫星载荷的观测能力衍生出多种卫星遥感产品,提升了海洋水体组分、海洋动力场、海岸带事件的监测能力,为探测评估海洋环境、生态评估、海岸带资源开发、海洋科学研究等提供了首选资料

源。

卫星海洋遥感技术方兴未艾,近年来呈加速提升态势。基于卫星遥感对高层大气(以强对流为代表)、边界层大气(以海雾为代表)以及海洋环境(以海洋藻类、水体组分参数为代表)的评估,已经从科学研究过渡到业务监测。观测能力上,卫星遥感发展方向主要为高低轨、主被动协同观测;数据提取和产品反演方面,遥感反演算法趋于多样化,进一步提升了海洋大气和生态环境的监测能力,并在此基础上基于多源数据融合,作为资料源用于同化进入动力模式,对提高预报准确率做出贡献。

参考文献 (References)

- [1] Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. Fog research: A review of past achievements and future perspectives[M]. Fog and Boundary Layer Clouds: Fog Visibility and Forecasting, Birkhäuser-Verlag: Pure and Applied Geophysics, 2008.
- [2] Hunt G E. Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infra-red thermal window wavelengths[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1973, 99 (420):346-369.
- [3] Eyre J R, Brownscombe J L, Allan R J. Detection of fog at night using advanced very high resolution radiometer (AVHRR) imagery[J]. Meteorological Magazine, 1984, 113 (1346): 266-271.
- [4] Ellrod G P. Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery[J]. Weather and Forecasting, 1995, 10(3): 606-619.
- [5] Cermak J, Bendix J. Dynamical nighttime fog/low stratus detection based on meteosat SEVIRI data: A feasibility study[M]. Birkhäuser-Verlag: Pure and Applied Geophysics, 2007.
- [6] Lee T F, Turk F J, Richardson K. Stratus and fog products using GOES8 9 3.9- μm data[J]. Weather and Forecasting, 1997, 12(3): 664-677.
- [7] Gao S, Wei W, Zhu L, et al. Detection of nighttime sea fog/stratus over the Huang-hai Sea using MTSAT-1R IR data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 28(2):23-35.
- [8] Yi L, Zhang S P, Thies B, et al. Spatio-temporal detection of fog and low stratus top heights over the Yellow Sea with geostationary satellite data as a precondition for ground fog detection—a feasibility study[J]. Atmospheric

- Research, 2015, 151:212–223.
- [9] Ma H, Wu X, Zou B, et al. Algorithm for daytime radiation fog detection based on MODIS/TERRA data over land [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(1): 3589.
- [10] Bendix J, Thies B, Cermak J, et al. Ground fog detection from space based on MODIS daytime data—a feasibility study[J]. *Weather and Forecasting*, 2005, 20(6): 989–1005.
- [11] Cermak J, Bendix J. Detecting ground fog from space—a microphysics-based approach[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(12): 3345–3371.
- [12] Cermak J, Bendix J. A novel approach to fog/low stratus detection using Meteosat 8 data[J]. *Atmospheric Research*, 2008, 87(3–4): 279–292.
- [13] 郝增周, 潘德炉, 龚芳, 等. 海雾的遥感光学辐射特性[J]. *光学学报*, 2008, 28(12): 2420–2426.
- [14] Hao Z, Pan D, Gong F, et al. Sea fog characteristics based on MODIS data and streamer model[C]//*Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XIV*. Berlin, Germany: International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [15] Wu X, Li S. Automatic sea fog detection over Chinese adjacent oceans using Terra/MODIS data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(21–22): 7430–7457.
- [16] Ahn M H, Sohn E H, Hwang B J. A new algorithm for sea fog/stratus detection using GMS-5 IR data[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(6): 899–913.
- [17] Cermak J. SOFOS—a new satellite-based operational fog observation scheme[M]. Philipps-Universität Marburg, 2006.
- [18] Pavolonis M. GOES-R Advanced baseline imager (ABI) algorithm theoretical basis document for low cloud and fog [Z]. 2010
- [19] Egli S, Thies B, Drnner J, et al. A 10 year fog and low stratus climatology for Europe based on Meteosat second generation data[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 143(702): 530–541.
- [20] 吴晓京, 李三妹, 廖蜜, 等. 基于20年卫星遥感资料的黄海、渤海海雾分布季节特征分析[J]. *海洋学报*, 2015, 37(1): 63–72.
- [21] 吴晓京, 陈云浩, 李三妹. 应用MODIS数据对新疆北部大雾地面能见度和微物理参数的反演[J]. *遥感学报*, 2005, 9(6): 688–696.
- [22] Yi L, Thies B, Zhang S, et al. Optical thickness and effective radius retrievals of low stratus and fog from MT-SAT daytime data as a prerequisite for Yellow Sea fog detection[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(1):8.
- [23] Pagowski M, Gultepe I, King P. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in Southern Ontario[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(1):3–16.
- [24] Van d V I R, Steeneveld G J, Wichers Schreur B G J, et al. Modeling and forecasting the onset and duration of severe radiation fog under frost conditions[J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(11): 4237–4253.
- [25] 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 利用循环3DVAR改进黄海海雾数值模拟初始场 I :WRF数值试验[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010(10): 1–9.
- [26] 吴晓京, 朱江, 王曦, 等. 风云三号微波观测资料的海雾同化模拟[J]. *大气科学*, 2017, 41(3): 421–436.
- [27] Müller M D, Schmutz C, Parlow E. A one-dimensional ensemble forecast and assimilation system for fog prediction[J]. *Pure & Applied Geophysics*, 2007, 164(6–7): 1241–1264.
- [28] Korea Meteorological Administration. Satellite images [EB/OL]. (2015-03-31) [2015-03-31]. <http://web.kma.go.kr/chn/weather/images/satellite.jsp?data=fog&area=k&tm=2015.03.31&tmHour=09%3A00>.
- [29] 郑永光, 张小玲, 周庆亮, 等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. *气象*, 2010(7):33–42.
- [30] 许林之. 海洋观测在海洋灾害预报中的作用[J]. *海洋技术学报*, 1994, 13(1): 60–63.
- [31] 尹尽勇, 徐晶, 曹越男, 等. 我国海洋气象预报业务现状与发展[J]. *气象科技进展*, 2012, 2(6): 17–26.
- [32] Anagnostou E N, Kummerow C. Stratiform and convective classification of rainfall using SSM/I 85-GHz brightness temperature observations[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1997, 14(3): 570–575.
- [33] Burns B A, Wu X, Diak G R. Effects of precipitation and cloud ice on brightness temperatures in AMSU moisture channels[J]. *IEEE Transactions on Geoenvironment & Remote Sensing*, 1997, 35(6): 1429–1437.
- [34] Chesters D, Uccellini L W, Mostek A. VISSR atmospheric sounder /VAS/ simulation experiment for a severe storm environment[J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(3): 198–216.
- [35] Gettelman A, Salby M L, Sassi F. Distribution and influence of convection in the tropical tropopause region[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002, 107(D10): ACL 6–1–ACL 6–12.
- [36] Liu G, Curry J A, Sheu R S. Classification of clouds over the western equatorial Pacific Ocean using com-

- bined infrared and microwave satellite data[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995, 100(D7): 13, 811–813, 826.
- [37] Anagnostou E N , Kummerow C . Stratiform and convective classification of rainfall using SSM/I 85-GHz brightness temperature observations[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1997, 14(3): 570–575.
- [38] Hong Y, Kummerow W S, Olson. Separation of convective and stratiform precipitation using microwave brightness temperature[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(8): 1195–1213.
- [39] Burns B A, Wu X, Diak G R. Effects of precipitation and cloud ice on brightness temperatures in AMSU moisture channels[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1997, 35(6): 1429–1437.
- [40] Hong G, Heygster G, Miao J, et al. Detection of tropical deep convective clouds from AMSU-B water vapor channels measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(5): D05205,1–D05205,15.
- [41] Mapes B E, Houze R A. Cloud clusters and superclusters over the oceanic warm pool[J]. *Monthly Weather Review*, 1993, 121(5), 1398–1416.
- [42] Weaver J, Purdom J F W, Smith S B. Comments on "Nowcasts of Thunderstorm Initiation and Evolution"[J]. *Weather & Forecasting*, 2009, 9(4): 658–662.
- [43] Chesters D, Uccellini L W, Mostek A. VISSR atmospheric sounder /VAS/ simulation experiment for a severe storm environment[J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(3): 198–216.
- [44] Strabala K I, Ackerman S A, Menzel W P. Cloud properties inferred from 8–12m data[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(2): 212–229.
- [45] Menzel W P, Holt F C. Application of GOES8/9 soundings to weather forecasting and nowcasting[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(10): 2059–2078.
- [46] Schmit T J, Feltz W F, Menzel W P, et al. Validation and use of GOES sounder moisture information[J]. *Weather and Forecasting*, 2002, 17(1), 139–154.
- [47] Koenig M , Coning E D . The MSG global instability indices product and its use as a nowcasting tool[J]. *Weather & Forecasting*, 2009, 24(1): 272–285.
- [48] Mecikalski J R, Bedka K M. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery[J]. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(1): 49–78.
- [49] Mecikalski J R , Bedka K M, Paech S J, et al. A statistical evaluation of GOES cloud-top properties for nowcasting convective initiation[J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 136(12): 4899–4914.
- [50] Siewert C W, Koenig M, Mecikalski J R. Application of Meteosat second generation data towards improving the nowcasting of convective initiation[J]. *Meteorological Applications*, 2010, 17(4): 442–451.
- [51] Strabala K I, Ackerman S A, Menzel W P. Cloud properties inferred from 8–12- μm data[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(2): 212–229.
- [52] Weaver J, Purdom J F W, Smith S B. Comments on "Nowcasts of Thunderstorm Initiation and Evolution"[J]. *Weather & Forecasting*, 2009, 9(4): 658–662.
- [53] Institute for Meteorological Satellite Studies Space Science and Engineering Center (SSEC), University of Wisconsin-Madison. Meteosat Second Generation (MSG) images [EB/OL]. (2013–10–03) [2013–10–03]. <http://cimss.ssec.wisc.edu/snaap/cops/quicklooks.php>.
- [54] Yu R, Xu Y, Zhou T, et al. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(13): L13703,1–L13703,4.
- [55] Yu R, Zhou T, Xiong A, et al. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(1): 223–234.
- [56] 傅丙珊. 风云2号卫星云图在短时强对流天气预报中的应用[J]. *气象科技*, 2004, 32(5): 363–366.
- [57] 许健民, 方宗义. 《卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用》导读[J]. *气象*, 2008, 34(5): 3–8.
- [58] O'Reilly J E, Stéphane M, Mitchell B G, et al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1998, 103(C11): 24937–24953.
- [59] O'Reilly J, Werdell P. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors-OC4, Oc5 & OC6[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 229: 32 – 47.
- [60] Maritorena S, Siegel D A . Consistent merging of satellite ocean color data sets using a bio-optical model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(4): 429–440.
- [61] Maritorena S, d'Andon O H F. Merged satellite ocean color data products using a bio-optical model: Characteristics, benefits and issues[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010(114): 1791–1804.
- [62] Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration (NASA). Chlorophyll products [EB/

- OL]. (2018-06-01) [2018-05-31]. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.
- [63] Morel A, Antoine D, Babin M, et al. Measured and modeled primary production in the northeast Atlantic (EU-MELI JGOFS program): The impact of natural variations in photosynthetic parameters on model predictive skill [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1996, 43(8): 1273-1304
- [64] Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration (NASA). Euphotic zone depth products[EB/OL]. 2018-06-01 [2018-06-10]. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.
- [65] 陈晶晶, 商少平, 商少凌. 台湾海峡真光层深度半分析算法遥感反演的真实性检验[J]. 厦门大学学报(自然版), 2007, 46(S1): 12-17.
- [66] 唐世林, 陈楚群, 詹海刚, 等. 南海真光层深度的遥感反演[J]. 热带海洋学报, 2007(1):9-15.
- [67] Guo L Z, Xuan Z Y, Zhong J X, et al. Progress on suspended sediment concentration remote sensing in near-shore case 2 waters[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21 (1):321-326.
- [68] Miller R L, Brent A M. Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(1-2): 259-266.
- [69] 王繁, 凌在盈, 周斌, 等. MODIS 监测河口水体悬浮泥沙质量浓度的短期变异[J]. 浙江大学学报, 2009, 43 (4): 755-759.
- [70] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Concentrations of total suspended matter products [EB/OL]. (2015-01-31) [2015-01-28]. <http://coastwatch.chesapeakebay.noaa.gov/>.
- [71] Neukermans G, Loisel H, Mériaux X, et al. Variability of total, back and side scattering to mass concentration of marine particles[C]//Proceedings of the XX Ocean Optics Conference. Anchorage, Alaska, USA: [s.n.]. 2010.
- [72] Doron M, Babin M, Hembise O, et al. Ocean transparency from space: Validation of algorithms estimating Secchi depth using MERIS, MODIS and SeaWiFS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 2986-3001.
- [73] 何贤强, 潘德炉, 黄二辉, 等. 中国海透明度卫星遥感监测[J]. 中国工程科学, 2004, 6(9): 33-37.
- [74] Doron M, Babin M, Mantin A, et al. Estimation of light penetration, and horizontal and vertical visibility in oceanic and coastal waters from surface reflectance[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2007, 112, C06003.
- [75] Barrot G. GC-UM-ACR-PUG-01 Version 1.4. GlobColour product user guide[Z]. ESA DUE GlobColour, 2010.
- [76] Minnett P J, Evans R H, Kearns E J, et al. Sea-surface temperature measured by the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. [s. 1.]: IEEE, 2002, 2: 1177-1179.
- [77] Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration (NASA). Sea surface temperature products [EB/OL]. (2018-06-01) [2018-05-31]. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.
- [78] Gaiser P W, Germain K M St, Twarog E M, et al. The WindSat space borne polarimetric microwave radiometer: sensor description and early orbit performance[J]. IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 2004, 42 (11): 2347-2361.
- [79] Remote Sensing Systems. Sea surface temperature products [EB/OL]. (2016-01-10) [2016-01-09]. http://images.remss.com/wind/wind_vector_data_daily.html?&sat=wsat.
- [80] Stewart R H . Introduction to physical oceanography[M]. Introduction to Physical Oceanography. Prentice-Hall, 2018.
- [81] 毛庆文, 施平, 齐义泉. GEOSAT 卫星遥感资料研究南海海面动力高度场和地转流场[J]. 海洋学报, 1999(1): 11-16.
- [82] 许可. “海洋二号”卫星雷达高度计[J]. 高科技与产业化, 2013, 9(11): 81-82.
- [83] Paulino C, Escudero L. Use of night satellite imagery to monitor the squid fishery in Peru[A]. Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretation: Applications for Marine Living Resources Conservation and Management, 2011, Case Study 10: 143-153.
- [84] 沈亚峰, 刘建强, 丁静, 等. 海洋一号 C 星光学载荷对海面溢油的识别能力分析[J]. 遥感学报, 2020, 24(8): 933-944.

Overview of satellite remote sensing technology for marine atmospheric and environment observation

TIAN Lin, WANG Xi, YANG Bingyun, WU Xiaojing*

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

Abstract Satellite remote sensing is the best way to observe the vast ocean-atmosphere. With the development of satellite remote sensing technology in recent years, remarkable progress has been made in atmosphere and marine environment remote-sensing, and data assimilation in climate model. This paper summarizes the the latest development of marine meteorological satellite monitoring capabilities, methods and related products in sea fog, strong convection over ocean and marine environmental monitoring. And this provides the background and application information about ocean-atmosphere remote-sensing for scientific researchers and engineers.

Keywords satellite remote sensing; ocean-atmosphere; marine environmental ●



(责任编辑 祝叶华)