

# 我国海洋水色遥感应用工程技术的新进展

潘德炉, 白雁

(卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

**[摘要]** 介绍了近年来我国在海洋水色遥感应用工程技术方面的新进展, 包括以应用为导向的关键技术研究 and 各类应用示范系统的开发等。针对当前海洋水色遥感业务化应用服务所面临的问题和一些急需解决的关键工程技术进行了分析和展望。

**[关键词]** 海洋水色遥感; 业务化应用; 中国海洋一号卫星

**[中图分类号]** P714 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)09-0014-11

## 1 前言

海洋水色遥感是利用可见光、近红外辐射计在航天和航空平台上接收海面上行的光谱辐射, 经大气校正和水色信息反演, 获得水体中浮游植物色素浓度、悬浮体浓度、溶解有机物浓度等要素信息, 在海洋初级生产力、海洋生态环境、海洋通量、渔业资源监测等方面具有重要意义<sup>[1]</sup>。自1978年美国航空航天局(NASA)成功发射世界上第一台星载水色扫描仪——CZCS (coastal zone color scanner) 以来, 许多国家都陆续发射了多台肩负不同使命的海洋水色卫星遥感器, 至今全球共发射了十多颗具有海洋水色探测功能的遥感卫星。经过近30年的发展, 开阔大洋水色遥感反演技术已趋于成熟, 实现了水色信息的业务化获取, 并在全球海洋水色环境监测中发挥了遥感技术独特的优势。中国的海洋水色遥感起步于20世纪80年代, 并于2002年成功发射了第一颗海洋水色卫星——“海洋一号”A星(HY-1A)<sup>[2]</sup>, 成为继美国、日本、欧盟等之后第七个拥有自主海洋水色卫星的国家。2007年4月11日, 我国又成功发射了第二颗海洋水色卫星——“海洋一号”B星(HY-1B), 使我国海洋水色遥感技术朝着业务化应用目标迈进了一大步。同时, 在两颗海洋水色卫星发射期间, 我国在水色遥感应用工程方面

也取得了较大的进展, 开展了量化水色遥感信息提取的深化研究, 并逐渐发展成为各种遥感监测应用服务系统。文章将详细阐述近几年来中国海洋水色遥感应用工程技术的新进展, 以及进一步发展的展望和建议。

## 2 关键技术新进展

高精度处理和信息量化是海洋水色遥感永恒的主题<sup>[1]</sup>。经过美国 CZCS/Nimbus-G (1978—1986年)、SeaWiFS/SeaStar (1997年至今)、MODIS/EOS (1999至今), 以及欧洲空间局 MERIS/EnviSat (2002年至今) 等近30年水色卫星遥感资料的积累和应用, 目前国际水色遥感技术已基本解决了全球海洋水色遥感数据处理、信息提取方面的关键技术, 实现了叶绿素等水色产品的业务化制作。随着海洋水色卫星遥感观测优势的日益凸现, 人们对高精度的区域性水色信息获取提出了更高的要求。近年来, 中国在水色遥感关键技术方面有了实质性的发展, 包括海洋水色遥感辐射传输机理、大气校正算法、水体光学特性研究及水色信息反演等, 为我国海洋水色遥感应用工程系统提供了良好的技术支撑, 并极大地促进了我国海洋水色卫星系列(如HY-1B)资料的业务化服务应用。

### 2.1 海洋水色遥感辐射传输机理研究

辐射传输是海洋水色遥感的理论基础, 为了从

**[收稿日期]** 2007-06-04

**[作者简介]** 潘德炉(1945-), 男, 浙江东阳市人, 中国工程院院士, 长期从事海洋遥感研究

水色遥感器获取的光谱信息中提取海洋水色信息,必须对辐射在大气、海洋介质中的整个传输过程有深入了解,并发展完备的海洋-大气耦合矢量辐射传输模型,为建立精确的大气校正算法和水色信息反演算法提供基本的工具。

到目前为止,国际上已开发了几十种精确计算大气、海洋辐射传输的数值计算模型和软件包,其中较著名的有 DISORT<sup>[3]</sup>和 Hydrolight<sup>[4]</sup>等。但适用于海洋-大气耦合介质系统辐射传输数值计算的模型较少,较典型的是 COART<sup>[5]</sup>和 MOMO<sup>[6]</sup>,但两者均只考虑了标量辐射传输问题。国内对海洋(或水体)辐射传输数值计算模型的研究也很少,从目前公开发表的文献看,唐军武等<sup>[7]</sup>为了研究水体光场的非朗伯特特性,利用蒙特卡罗模拟方法开发了标量海洋辐射传输数值计算模型。段民征等<sup>[8]</sup>在 DISORT 的基础上开发了海洋-大气耦合辐射传输模型,但该模型只对大气辐射传输进行数值计算,而将复杂的海洋辐射传输问题直接利用经验关系式等效为水体反射效应。张鉴等<sup>[9]</sup>利用矩阵算法处理海洋-大气耦合辐射传输来模拟水色遥感信息量的变化特性,其开发的数值计算模型虽然是实际意义上的海洋-大气耦合辐射传输数值计算模型,但也只是标量辐射传输模型。

何贤强等<sup>[10]</sup>利用矩阵算法开发了较为完备的海洋-大气耦合矢量辐射传输数值计算模型——PCOART(polarized coupled ocean-atmosphere radiative transfer)。PCOART 利用矩阵算法数值解大气、海洋矢量辐射传输方程,并将海洋和大气两个单一折射率介质的矢量辐射传输过程进行耦合,得到整个海洋-大气耦合介质系统的矢量辐射传输数值计算模型。根据瑞利大气和 Mobley 标准水体辐射传输问题<sup>[4]</sup>的验证结果,PCOART 计算大气瑞利散射的相对误差小于 0.25%,且完全满足 Mobley 等对水体辐射传输数值计算模型的精度要求。PCOART 是我国近年自主开发的海洋-大气耦合矢量辐射传输的精确数值计算模型,为进一步开发海洋水色遥感大气校正和水色信息反演算法提供了数值计算模型。

## 2.2 大气校正算法研究

通常将水色遥感器接收总辐射中扣除大气的程辐射及海表反射辐射的过程称为大气校正。典型情况下,水色遥感器接收总辐射的 90% 以上来自大气的程辐射和海面反射,而真正携带海洋水色信息的离水

辐射只占其中很小一部分。中国近海水体悬浮物浓度高,且受吸收性沙尘气溶胶影响较大,标准的大洋一类水体大气校正算法应用于该海区会出现“过校”现象。开发中国近海区域大气校正算法不仅具有相当的难度,也是我国海洋水色遥感应用的关键技术之一。

针对国外标准大洋一类水体大气校正算法在我国近海水体应用的不足,国内许多学者对其进行了改进,使其适用于中国近海浑浊水体。Pan<sup>[11]</sup>和 Mao 等<sup>[12]</sup>在分析标准 SeaWiFS 大气校正算法在中国近海存在问题的基础上,提出一种通过限定 865 nm 波段气溶胶反射率的中国近海浑浊水体大气校正算法。韦钧等<sup>[13]</sup>利用 SeaWiFS 遥感资料,针对珠江口海域提出了二类水体大气校正算法。Li<sup>[14]</sup>对 Ruddick 二类水体大气校正算法进行了改进。丁静等<sup>[15]</sup>提出将中国近岸浑浊水体进一步区分为中低和中高浑浊水体,用光谱优化方法对中高浑浊水体进行水色大气修正。何贤强等<sup>[16]</sup>利用高浑浊水体蓝紫光波段离水辐亮度相对较小的特点,提出了一种利用蓝紫光波段辅助近红外波段的浑浊水体大气校正算法。

虽然国内在浑浊水体大气校正算法方面进行了较多研究,但在自主研制精确的大洋一类水体大气校正算法方面仍然相当缺乏。主要原因有两点:一是国外典型水色遥感器有共享的大气校正算法模块可借用,无须再次开发;二是国内缺乏自主的精确海洋、大气矢量辐射传输数值计算模型,无法生成高精度的大气瑞利散射、气溶胶散射及大气漫射透过率等查找表,制约了我国精确大洋一类水体大气校正算法的开发。近年来,在我国“海洋一号”水色卫星遥感资料高精度处理需求的推动下,何贤强等<sup>[17,18]</sup>利用 PCOART 生成了 HY-1B 的精确瑞利散射查找表、气溶胶散射查找表及大气漫射透过率查找表,在此基础上,开发了我国海洋水色系列卫星的精确大洋一类水体大气校正算法,达到了与国际同步的水平,并已作为 HY-1B 的业务化大气校正算法。此外,何贤强等<sup>[19]</sup>利用 PCOART 生成了可用于所有海洋水色遥感器的通用型精确瑞利散射查找表,比目前国际上各水色遥感器专用的精确瑞利散射查找表更适用于高光谱遥感,并在气压修正方面更有优势。

## 2.3 水体光学特性研究

水体光学特性是海洋水色遥感的基础。近年

来,在我国海洋水色卫星定标与真实性检验及近海海洋综合调查与研究专项的推动下,国内开展了大量的区域性水体光学测量。其中,2003年春季和秋季2个航次的黄东海二类水体光学试验,以及2006—2007年我国近海海洋综合调查与研究专项的中国近海光学调查试验,是我国近年来规模最大、测量仪器最先进、参数最齐全的近海水体光学特性测量。

大量的区域性水体光学测量分析不仅促进了对我国近海水体固有光学特性的系统性认识,并开发了适合于我国近海光学复杂水体的固有光学量半分析遥感反演模型。朱建华、李铜基等对色素、黄色物质、非藻类颗粒的吸收光谱模型进行了研究,建立了色素吸收系数的波段关系模型,以及色素吸收系数和叶绿素 a 浓度的经验模型<sup>[20,21]</sup>。王晓梅通过水体总吸收系数光谱特性的分析,建立了总吸收系数的波段组合经验模型<sup>[22]</sup>。彭海龙等分析了光谱漫衰减系数波段间的相关性<sup>[23]</sup>。李铜基等建立了水体后向散射系数与水面之下遥感反射率的统计模型<sup>[24]</sup>。宋庆君等建立了颗粒后向散射系数和总散射系数的经验关系<sup>[25,26]</sup>。汪小勇等建立了各波段遥感反射率与固有光学量  $u$  的经验关系<sup>[27]</sup>。在以上统计模型的基础上,李铜基对生物-光学半经验分析算法进行了初步探讨,利用黄色物质吸收系数光谱模型、遥感反射率和后向散射系数关系、遥感反射率与  $u$  关系等一系列经验模型,反演叶绿素 a 浓度<sup>[28]</sup>。此外,孙从容研究了水体光谱离水辐亮度、遥感反射率和漫衰减系数等参量与悬浮泥沙之间的关系,讨论了光学量对水体类型的识别方法<sup>[29]</sup>。白雁和潘德炉等<sup>[30]</sup>在借鉴 Lee QAA 算法的基础上,将 510 nm 和 555 nm 波段作为参考波段(以 SeaWiFS 波段为例),建立了黄东海水体的总吸收系数和后向散射系数的半分析遥感模型,并探索与建立了黄东海水体组份固有光学量的遥感半分析算法(包括非藻类颗粒吸收系数、CDOM 吸收系数,以及总衰减系数、颗粒衰减系数等参数),具有较好的海区适用性。

## 2.4 水色信息反演研究

叶绿素浓度是水色遥感获取的最基本的参数,但大洋水体的叶绿素反演模型(如 OC4v4 等)在中国近海水体应用具有较大的误差。近年来我国也开发了许多区域叶绿素浓度反演算法,包括波段组合的反演算法<sup>[31]</sup>,以及基于神经网络<sup>[32-34]</sup>和最小二乘法等反演算法<sup>[35]</sup>;区域性的悬浮泥沙和黄色物质

遥感反演算法也较多,主要是基于实测数据和离水辐射率或者遥感反射率之间的经验关系<sup>[36-38]</sup>。针对我国海洋卫星 HY-1A 传感器 COCTS 和 CCD 数据,也开发了相应的三要素算法<sup>[39,40]</sup>。除了区域性的水色三要素的遥感模型之外,海水透明度、初级生产力、水质参数等遥感反演模型也取得了较大进展,并已在各种海洋环境、生态、水质监测示范系统中应用。

### 2.4.1 海水透明度反演

海水透明度是描述海水光学特性的传统参数,也是最早的水光学现场调查参数。海水透明度与水体中悬浮物、叶绿素、黄色物质的含量和成分密切相关,它是研究水团、流系,水质监测及海洋初级生产力的重要参数。王晓梅等<sup>[41]</sup>在黄东海光学试验的实测数据基础上建立了黄东海海水透明度的统计遥感反演模式。何贤强等<sup>[42]</sup>根据水下光辐射传输理论及对比度传输理论,建立了海水透明度的半分析定量遥感模式;利用 556 组实测海水透明度资料对模式进行了验证,结果表明卫星遥感反演的透明度与实测透明度的相关系数为 0.84,平均相对误差为 22.6%。利用该海水透明度遥感反演模式和 SeaWiFS 卫星遥感数据,制作了中国邻近海域多年的海水透明度遥感产品,并进行了中国邻近海域透明度时空变化规律的遥感分析<sup>[43]</sup>。

### 2.4.2 海洋初级生产力反演

海洋初级生产力即海洋浮游植物光合作用的速率,对深刻理解和研究海洋生态系统、碳循环及认识海洋在全球气候变化中的作用等方面具有重要意义。相对于传统的黑白瓶培养法,遥感方法具有大面积同步、高频度动态观测的优势。宁修仁等<sup>[44]</sup>利用 CZCS 的叶绿素遥感分布,结合渔场及赤潮等资料,发现长江口和杭州湾及其毗邻海域存在明显的生物生产力的锋面。李国胜等<sup>[45]</sup>根据实测的叶绿素浓度数据,修正了大洋的 OC4v4 算法,建立了东海的二类水体叶绿素浓度的经验反演模型,并利用 VGPM 模型反演了东海的初级生产力。潘德炉等<sup>[46]</sup>通过多年对东海、南黄海实测海洋初级生产力与环境数据的分析,基于 P-E(生产力与光照强度)曲线,利用叶绿素浓度、海水透明度和光合作用有效辐射率等数据,建立了适合我国海区特点的初级生产力遥感模型;与国外典型的初级生产力遥感模型比较,该模型获得的海洋初级生产力遥感数据能更好地反映我国渤海、黄海、东海的海洋初级生产

力时空分布及其变化特征,而且与实测的海洋初级生产力时空分布一致<sup>[47]</sup>。该模型已应用于我国海洋水色卫星 HY-1A 的 COCTS 遥感数据,获得了中国海区初级生产力的遥感分布图<sup>[48]</sup>。

### 2.4.3 水质参数反演

卫星遥感监测技术的发展,同时也促进了对水色遥感应应用领域拓展的进一步需求,非光学活性的生物地球化学参数的遥感反演是遥感信息提取技术的一个发展趋势。如氮、磷营养盐和颗粒有机碳、溶解有机碳浓度等生物化学参数,目前国际上已经有了初步的遥感反演探索,国内也开展了相关的研究。

磷、氮是引起港湾、湖泊水体富营养化和诱发赤潮的主要环境因子,也是我国近海水体环境污染最重要的评价指标之一。张穗等<sup>[49]</sup>采用在水质评价中较常用的修正富营养化指数 TSIM 法,利用总磷、总氮与叶绿素的相关特征得出适合河口特征的富营养化评价方法,并在长江口的遥感影像上进行试验,取得了较好的结果。张宵宇等<sup>[50]</sup>根据杭州湾和嵊泗列岛海域的实测数据,发现研究海域悬浮物含量与颗粒态总磷呈正相关关系,建立了遥感悬浮物含量和颗粒态总磷含量的遥感信息提取模式,并利用 SeaWiFS 数据得到了长江口及附近海域颗粒态总磷分布的遥感产品。李小斌等<sup>[51]</sup>利用珠江口海域 2 个航次 36 个站位的实测遥感反射率和总无机氮(TIN)数据,基于偏最小二乘法,建立了珠江口海域无机氮浓度估算的遥感模型。将该模型用于 1998 年 12 月 31 日的 SeaWiFS 资料,与当日的实测资料对比,遥感估算值的平均相对误差为 31.9%,模型的稳定性较好。

颗粒有机碳和溶解有机碳含量分别表示海水中有机颗粒物和溶解物的含碳量,是海洋水质和生态环境的重要指标,同时也是海洋碳循环研究的关键参数。黄色物质 CDOM 和溶解有机碳 DOC 的生化光学特性研究在珠江口的研究中相对较多,如 Callahan 等人<sup>[52]</sup>研究发现在深圳河口北部,水体的 DOC 和荧光性呈现线性相关,随着盐度的升高,CDOM 通过光化学转化变为非荧光性物质,CDOM/DOC 比值降低。陈志强等人在珠江口的研究认为,不同来源的有机质与不同的 DOC 和 CDOM 分布的控制机制,导致珠江口 CDOM 和 DOC 之间没有明显的关系<sup>[53]</sup>。国内对颗粒有机碳的遥感反演研究较少。白雁和潘德炉等<sup>[30]</sup>对中国近海有机碳的遥感反演机理进行了分析,在固有光学量半分析算法

的基础上,初步建立了黄东海海区颗粒有机碳和溶解有机碳的遥感反演技术方法。

水体富营养化和赤潮是水质恶化的体现,需要利用遥感技术进行有效的预警和监测。经过多年的技术积累,利用卫星遥感离水辐射率与水色水温等要素建立的离水辐射率多波段差值法、多波段差值比值法、水色水温综合法和归一化植被指数法等多种赤潮信息的提取模式,都已对赤潮的识别进行了成功的尝试<sup>[54-56]</sup>。赵冬至等<sup>[57]</sup>采用太阳光激发的叶绿素荧光峰高度,建立了不同藻类归一化荧光高度与叶绿素浓度的关系,提出了表征赤潮水体叶绿素荧光高度的波段优化法。唐军武等<sup>[58]</sup>研究了大气散射对归一化植被指数法进行赤潮遥感监测的影响。目前在遥感赤潮信息提取方面,现有的模式仍具有很强的经验性,有关的遥感业务化速报技术将在“十一五”的“八六三”项目支持下,进一步深入研究。

## 3 应用服务系统新进展

近年来,随着海洋水色遥感数据源的不断丰富及应用需求的增大,我国的海洋水色遥感应取得了极大发展。在上述各种水色遥感关键技术的支持下,针对不同的用户需求,建立了多类基于海洋水色遥感资料的应用示范系统,实现了利用实时获取的卫星和(或)航空遥感数据,对海洋环境进行实时、动态、长期的监测。

### 3.1 卫星遥感地面接收处理及应用示范系统

由于 MODIS 数据的开放性共享原则,我国许多单位都建立了 MODIS 数据接收的卫星地面站和相应的数据处理和应用示范系统,但主要是以大气和陆地应用为主,海洋遥感产品的应用相对较少。针对于我国的海洋卫星系列,国家卫星海洋应用中心在北京和三亚建立了中国“海洋一号”卫星 HY-1A/B 的地面接收应用系统,并正在筹建牡丹江地面接收应用系统,对 HY-1A/B 卫星的 COCTS 和 CCD 数据,及 EOS/MODIS 和 NOAA/AVHRR 系列等卫星遥感资料进行接收和处理,在海冰监测、大洋渔场信息服务、污染监测、海岸带监测和海洋初级生产力估算等方面开展了量化业务应用试验,取得了良好的效果<sup>[59,60]</sup>。

国家海洋局第二海洋研究所拥有国内水色卫星资料最齐全的卫星地面站,研制了具有自主知识产权、业务化运行的海洋水色卫星遥感接收、处理和应用系

统,具有自动接收、融合处理和综合应用的特点,为水色遥感数据业务化应用和科学研究提供了良好的平台。该系统可自动实时接收和处理国内外的 11 颗海洋水色水温卫星遥感资料,包括我国海洋水色卫星 HY-1B 遥感资料和极轨气象卫星系列 FY-1 遥感资料,以及国外的 EOS/MODIS 和 NOAA/AVHRR 等系列卫星遥感资料。通常的卫星地面站,针对某一颗或系列卫星有一个单独接收机,一套单独处理系统,处理后生成单卫星、单轨道的遥感专题产品,处理平台利用率低,各卫星资料交互融合处理困难和综合应用效果差。海洋二所的系统可实现一个接收机自动接收多颗卫星资料,在一套处理系统上实现运控分时同步处理;并解决了不同卫星遥感产品归一化、质量控制和云替补等关键技术问题,实时融合多卫星资料,节省时间和空间,并充分发挥了多颗卫星的作用,取长补短,大大提高了遥感资料综合应用的效果;实现了多颗卫星、多参数的海洋环境遥感信息产品的业务化制作,包括叶绿素浓度、悬浮体浓度、黄色物质吸收系数、水体漫衰减系数、海水透明度、水体吸收系数、气溶胶光学厚度、大气能见度、水色主波长等 16 种遥感产品,为海洋光场、水文、气象等环境提供遥感信息<sup>[61,62]</sup>。该系统已成功地在北京、天津、青岛、宁波、湛江、三亚等地业务化试运行 3 年,积累了中国邻近海区的多卫星、长时相的海洋水色遥感数据。同时,在该系统平台上,可以进一步开发新的海洋环境参数遥感产品,实现大洋渔场环境、赤潮和溢油监测等的业务化应用。

### 3.2 近海水质遥感监测系统

海洋经济占国民经济的比重越来越大,但同时近海水质恶化引起的灾害频发(如赤潮等),严重危害了人类的生产生活。由于我国传统水质监测方法存在空间分辨率低、时效性差的问题,迫切需要利用具有快速、同步、大范围、实时获取海洋水质信息的海洋水色遥感技术。在浙江省“科技兴海”重大攻关专项和“长三角”联合攻关项目资助下,对沿海水质遥感定量化监测,水质遥感监测与速报平台构建,以及水质遥感信息速报等三方面的关键技术进行了攻关,建立了“浙江沿海水质遥感实时监视和速报系统”。该系统自动接收 EOS/MODIS, NOAA/AVHRR, FY-1/MVISR 等卫星遥感资料,经融合处理,制作近海水质分类图、温度图、悬浮体浓度图、赤潮监测图及重点海区污染状况图。目前,利用该系统已经对浙江省和上海市两个海区进行了连续 2 年

的遥感水质监测和速报的试验<sup>[63]</sup>。利用自动、实时接收和融合处理制作的海洋水色遥感产品,生成遥感水质评价和水质异常速报专题产品和简报,以电子邮件和电话等形式报送相关行政监测部门。到 2006 年底,已向浙江海洋渔业局海洋监测预报中心、上海市海洋局、国家遥感中心发布 27 期遥感赤潮监测速报,24 期上海和浙江省海区遥感水质分类速报(每月一次)(见图 1、图 2),4 期浙江沿海遥感水质趋势遥感简报(每半年一次),供各部门作为对社会发布简报的依据。与常规水质速报成本比较,该系统生成遥感水质速报成本仅为常规水质监测的 1%,观测频率提高了 100 倍,在长三角海区的高频度、大范围海洋环境实时监测中发挥了独特优势和十分重要的作用。

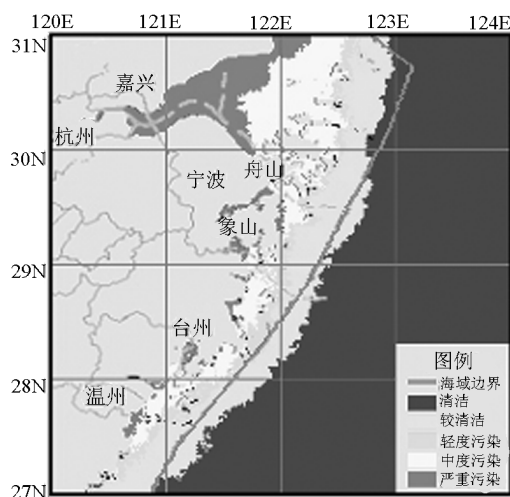


图 1 2005 年 8 月浙江省海域遥感水质分类图  
Fig. 1 Satellite image of water quality classification in the sea area of Zhejiang province in Aug. 2005

尽管国内也有许多卫星实时接收和数据处理系统,但大多都处于常规水色水温产品制作阶段,“浙江沿海水质遥感实时监视和速报系统”实现了遥感观测数据的深层次应用服务,拓展了水色水温遥感数据的应用领域,为浙江省以及长三角省市实现高频度、大范围水质实时监视和速报提供了可靠的平台,并形成了集船测-机载-卫星遥感系统为一体的海洋立体监测和应用系统,整体框架如图(见图 3)。系统充分发挥了卫星遥感大范围、高重复性监测的优点,以及航空遥感监测灵活、机动的优势,利用卫星监测水环境异常,指导飞机进行巡航监测,然后利用船只进行现场勘查,实时地向浙江省相关政

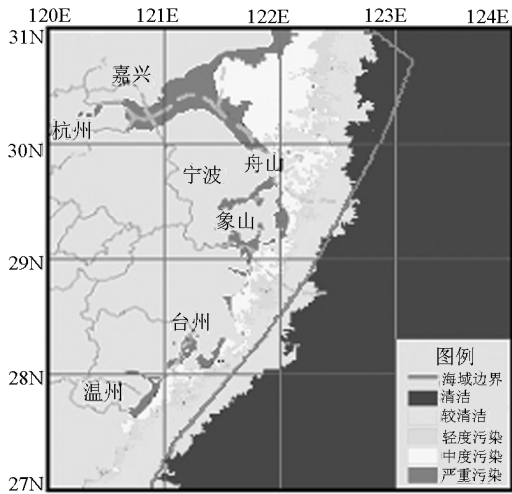


图2 2006年8月浙江省海域遥感水质分类图  
Fig. 2 Satellite image of water quality classification in the sea area of Zhejiang Province in Aug. 2006

(由浙江沿海水质遥感实时监视和速报系统根据实时接收的多颗海洋水色卫星数据制作)  
(Produced from multi-ocean color satellite data by the remote sensing real-time monitoring system for coastal water quality and information fast report)

府部门、沿海的生产部门提供浙江沿海水质环境状况,成为浙江省科学高效的海洋生态安全预警体系中的一个实用子系统。

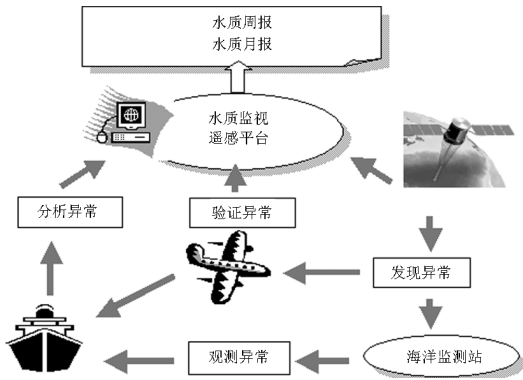


图3 船测-机载-卫星的整体遥感水质监测系统框架示意图

Fig. 3 The sketch framework of integrative water quality monitoring system by ocean-color satellite, aerosol remote sensing, and ship-based measurement

国家对海洋水色遥感信息的需求分为四个层次,第一和第二层次为我国海岸带和我国近海监测的需求,可以通过卫星地面站和应用服务系统实现;第三和第四层次分别为周边海区和全球尺度海洋信息的需求。由于卫星数据接收范围的限制,目前此类遥感数据主要依靠于美国 NASA 的共享数据库,在分辨率和数据时效方面受到极大的限制,需要建立我国自己的境外数据接收系统。境外建站限制条件较多,因此,船载的卫星数据接收和应用系统将是获取外海信息的主要途径。而由于平台稳定性、远程诊断维护、空间容量及系统可靠性等因素,船载卫星接收及数据应用系统比地面系统具有更高的技术要求。

目前,在船载海洋卫星接收系统方面,已于2001年在“舟渔”1301渔船上,安装了一套“北太平洋鱿鱼渔场环境信息获取、传输、处理、分析与海洋环境要素产品制作系统”,作为我国“大洋渔业资源开发环境信息应用服务系统”渔情速报的关键信息源。利用该船载海洋卫星遥感资料接收系统,能够实时接收 NOAA/AVHRR 和 FY-1C/MVISR 等海洋卫星遥感资料,经过系统处理后自动生成当天的渔场温度分布图,同时生成3天和7天的遥感专题图,提供大面积海洋水色水温分布实况<sup>[65,66]</sup>,为现场海况、渔情和中心渔场分析和现场生产指挥调度提供可靠依据,提高了渔场海况速报产品的时效性,使我国远洋渔船摆脱了长期依赖美国、日本卫星资料的局面。该系统在北太平洋鱿鱼渔场作业期间业务试运行2年,共接收卫星遥感资料4000多条轨道,接收的原始数据达到500GB,完成北太平洋鱿鱼渔场速报产品制作共33期,取得了明显的社会和经济效益。

目前,在我国科考船“大洋一号”上,正在计划安装船载海洋环境卫星遥感资料接收和应用系统,实时接收L波段的我国风云FY卫星系列和NOAA系列等多颗卫星资料,提供船行过程中大面积的大气云图和海洋水色水温分布实况,不仅能为船只躲避台风安全航行及针对实时特殊的海洋现象规划科考航线提供可靠依据,而且更重要的是,能够形成移动的卫星数据实时接收平台,获取我国自主、实时的全球大洋环境遥感信息,为我国的全球环境研究及国家安全战略决策提供必要及宝贵的数据源。

### 3.4 航空水色遥感应用系统

在目前的技术条件下,单一遥感平台已经不能

### 3.3 船载海洋环境卫星接收及数据应用系统

潘德焱<sup>[64]</sup>从国家主权和经济活动安全出发,将

够满足海洋环境监测的多项要求,因此,需要开发海洋立体监测和应用系统。虽然卫星遥感具有监测范围大、全天候等特点,但目前其最大的不足是重复观测周期相对较长,不利于对突发事件过程的及时监测,且空间分辨率较低。作为空间覆盖范围尺度位于卫星和船测之间的遥感手段,航空遥感正在以它的高机动性和较大覆盖范围受到关注,被越来越多地运用于近海海洋环境遥感调查与环境评估、海洋生产等诸多方面,同时也是海上事故监测中使用最多的有效技术手段。

“十五”期间,我国新增了多架海监飞机,并同时加大时空覆盖率,为海洋航空遥感提供了宝贵的平台资源。在海监飞机平台上,进行了多种光学遥感的海洋监测试验,包括上海技术物理研究所研制的多光谱扫描仪 OMIS、多波段扫描仪 MAMS、空间推扫式高光谱成像仪 PHI,以及从芬兰引进的高光谱成像光谱仪 AISA + 等。

2001年7月至8月,中国海监飞机对辽东湾海域频繁发生的大面积赤潮进行了航空遥感监测,首次利用装载的推扫式成像光谱仪(PHI)获得了赤潮的机载高光谱数据。马毅和张杰等<sup>[67]</sup>发展了基于航空高光谱数据的赤潮发现检测、赤潮生物优势种类识别和赤潮生物量分布特征提取技术;2004年5月,海监飞机 B-3837 装载了海洋多波段扫描仪(MAMS),在东海进行了试飞,获得了有效的航空水色遥感数据<sup>[68]</sup>,并初步研制了航空水色遥感应用系统,利用 MAMS 从紫外到红外的 11 个波段,对海洋环境、灾害及污染物进行监测,如叶绿素浓度、悬浮体浓度、海表温度、赤潮等。2005 年中国海监南海航空支队配备了从芬兰引进的航空成像光谱仪 AISA+,并已在海监飞机上安装试用<sup>[69]</sup>。AISA+ 在可见光范围内具有 200 多个波段,可获取丰富的海洋水色信息,具有极大的应用潜力,为中国海监执法、海岸带环境保护、资源管理和灾害预警监测提供了科学信息和技术支撑。此外,在国家“十五”“八六三”项目支持下,建立了国内首套以海洋环境与灾害快速监测为目标的海洋航空遥感多传感器集成与应用系统(IAMSMA),集成的传感器包括机载成像光谱仪、微波辐射计、微波散射计和激光雷达等设备,并开展了相关的 IAMSMA 系统业务化能力示范实验<sup>[70]</sup>。

由于航空平台稳定性较差,及航空遥感数据处理和应用技术起步较晚等多种原因,目前航空水色

遥感应用系统还落后于卫星水色遥感应用系统。我国在“十一五”期间,加大了对航空水色遥感应用技术的支持。届时,我国水色卫星遥感监测和航空遥感监测将能够充分地实现优势互补,在我国海洋立体监测中发挥重要作用。

## 4 展望

2006 年初召开的全国科学技术大会部署实施了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》,对海洋科技发展提出了规划,要求海洋科技为海洋经济和社会可持续发展、海洋资源开发、海洋环境保护和减灾防灾、海洋权益维护和海洋安全提供有效保障。如何抓住机遇,全面提高我国海洋水色遥感应用工程技术水平,并使之发展成为海洋动态监测的主导手段,是“十一五”期间海洋水色遥感工作者的历史使命。虽然近年来我国海洋水色遥感技术和应用取得了较大进展,但对于业务化及工程化的水色遥感应用服务这一目标来说,仍存在许多关键问题需要解决。针对应用需求和我国现有的技术状况,下一步需要重点开展以下几个方面的研究工作。

### 4.1 高精度的区域遥感模型及遥感产品验证

离水辐射率是海洋水色遥感最基本的特征量,是连接水色传感器接收光谱与水色要素信息的关键量,其获取的准确程度直接决定了水色传感器获取海洋水色信息的精度。随着高精度的第二代海洋水色卫星遥感的不断发展,及我国第二颗海洋水色卫星 HY-1B 的发射,对离水辐射率的遥感反演精度提出了很高的指标要求,要求其反演误差小于 5%,因此,需要对离水辐射率遥感机理、粗糙海面的离水辐射率归一化处理及偏振校正进行研究,并且加强我国海洋水色卫星 HY-1B 现场及星-星比对辐射定标和真实性检验的研究,为进一步的水色信息反演提供高精度离水辐射率数据。

由于生物-光学特性的差异较大,近海水体不存在一个通用的水色遥感模型。因此,需要针对我国各海区的生物-光学特性,尤其是在河口和港湾,必须建立各自适用的高精度区域水色遥感模型。此外,海洋环境是一个复杂多变的综合场,每一个海洋要素均要受多个环境要素的影响,不是单一遥感模型可以完全描述的。遥感产品存在着不同程度的反演误差,在量化海洋遥感信息应用中,需要确定这些误差的大小。由于过去现场光学测量资料的缺



乏,遥感产品的精度验证工作还不够充足,使得遥感产品的精度问题成为制约我国海洋水色遥感信息应用的主要“瓶颈”之一。因此,在海洋水色遥感产品业务化制作的基础上,还需要系统而深入地开展遥感产品的精度验证工作,从而促进海洋水色遥感信息在各领域中的实际应用。

#### 4.2 生物地球化学参数的遥感反演

卫星遥感数据的不断丰富和技术的发展,及其在海洋环境实时监测中的成效,都极大促进了人们对水色遥感数据应用的需求,需要进一步从卫星接收的数据中获取更多的海洋信息。到目前为止,受产品种类和区域精度等因素的影响,水色遥感数据的应用主要是叶绿素浓度等全球数据,产品种类单一,离水质环境评价、海洋生态、地球化学等研究应用还有一定差距,还需要有针对性地开发非光学活性生物地球化学参数的遥感反演模型。

在光学和生化特征复杂的近海水体,如果沿用以往的光谱经验拟合算法对生化参数进行估算,由于影响因素较多,很难得到满意的精度及适用性。高精度的生化参数遥感反演主要涉及到两方面的研究内容:a. 由于沿海物质组成多样、来源复杂,需要进行水体细分物质的固有光学量遥感研究,获得不同物质的固有光学特征;b. 进行光学-生化参数同步试验,研究区域的光学和生物地球化学参数的相关性,建立光-化学转换公式。目前国外在现场观测和遥感反演中,利用物质吸收、散射和衰减等光学性质估算生物化学参数都取得了较好的效果;而国内有关的光学和化学同步测量试验刚处于开展阶段,例如,与生态环境状况和水质评价有关的参数,如营养盐、总氮、总磷、化学耗氧量、溶解氧含量等,还需加深对其与光学参数之间的生化机制和遥感机理的研究,建立更合理有效的算法。从大尺度海洋观测来说,随着人为 CO<sub>2</sub> 排放及温室效应影响的增加,海洋碳循环作为全球变化研究中的一个关键部分已日趋重要,也同样需要遥感技术对关键的海洋碳循环参数进行监测,如颗粒有机碳含量、溶解有机碳含量、海气 CO<sub>2</sub> 通量等。今年以来,我国加大了对区域水体光学特征的调查研究,并已开展水体物质固有光学量及光学-生化参数的同步研究。相信在不久的将来,多种生物地球化学参数会成为水色卫星的标准遥感产品。

#### 4.3 多源遥感数据的融合应用

海岸带是海陆交互、复杂多变的地区,许多现象

和过程发生的尺度都非常小,需要百米级,甚至米级空间分辨率的观测。而近海许多关键的过程都是以动态的水为载体,水体观测需要多波段甚至是高光谱的遥感,而且必须有较高的重复观测频率。由于卫星高度、传感器技术和数据承载量等限制,通常情况下卫星遥感的空间分辨率和时间、光谱分辨率难以统一。因此,迫切需要综合各种遥感数据的优势,发展多源遥感融合技术,包括陆地卫星和海洋卫星资料、航空及卫星资料以及微波与可见光资料的综合应用技术,实现沿海水体中、高分辨率的遥感监测。

随着对海洋监测,尤其是海岸带监测需求的提高,静止海洋水色卫星成为国际海洋水色遥感发展的主要趋势之一。与极轨水色卫星相比,静止水色卫星(相对地球静止,卫星轨道高度 36 000 km 左右)具有时间分辨率高的独特优点。通常,极轨水色卫星的重复观测时间至少 1 天,而静止水色卫星的重复观测时间可缩短至半小时,这对近海动态变化较快的海洋现象监测具有十分重要的意义,如赤潮、排污及随潮汐变化的悬沙浓度监测等。目前,韩国已计划于 2008 年(或 2009 年)发射 GOCI 静止水色卫星,而美国也将于 2012 年在 NOAA/GOES-R 静止系列卫星上携带水色遥感器。为了国家安全以及海洋资源监测的需要,我国也需要开展水色静止卫星的相关研究。

#### 4.4 海洋水色遥感信息应用服务系统

中国水色卫星遥感数据的接收、多卫星数据的融合和遥感产品制作已基本实现了业务化运行,但总体来说,目前卫星应用技术远远落后于卫星和传感器本身的技术,积累的这些海量遥感数据并没有得到充分的利用,造成数据“过剩”。为了使海洋水色遥感信息能够切实地为政府管理决策、科学研究及公众服务,需要建立便捷、实用的信息服务系统。

国家海洋局第二海洋研究所初步建立了基于 Web 的海洋水色水温环境卫星遥感信息查询系统。该查询系统已通过了局域网的测试,并对遥感专题产品进行网上实时发布<sup>[71]</sup>。在“浙江沿海水质遥感实时监视和速报系统”中采用基于空间数据库引擎(SDE)来管理海洋遥感数据,实现了面向分布式异构数据库环境下的海洋遥感 WebGIS 系统,支持大量用户的并发访问<sup>[72]</sup>。尽管目前卫星遥感技术和 GIS 技术在对静态对象的空间分析研究方面已相对较完善,但现有的技术很难满足沿海水环境动态、海



量、多源多维遥感信息的组织和一体化管理、时空过程的可视化表达,以及海洋环境信息的实时生成和发布的功能需求。因此,需要专门针对海洋遥感信息的特点进行技术开发,为政府管理决策、生产部门、科学研究及公众等多级用户提供实时、可视化、交互式的信息应用服务。

此外,实用的遥感监测系统与其他平台的数据采集系统具有不可分割的联系。由于遥感受直接探测海洋要素类型和探测精度、频度、深度的限制,海洋遥感的实用价值还需要在其他数值模型中体现,比如海洋环流、海洋灾害性气象过程、海洋物质传输过程、海洋环境预报等<sup>[64]</sup>。因此,对连接遥感数据与其他采集系统数据的同化技术,以及基于遥感数据的水动力和生态参数预报数值模型也提出了很高的要求。

#### 4.5 自主海洋水色遥感信息的获取和应用

我国已计划长期发展三个系列的海洋卫星,其中包括海洋水色系列卫星(即“海洋一号”系列)。2002年成功发射了第一颗海洋水色卫星 HY-1A,2007年发射了第二颗海洋水色卫星 HY-1B。此外,我国计划近两年发射 FY-3A 气象卫星,将携带可用于探测海洋水色信息的中分辨率成像光谱仪 CMODIS<sup>[73]</sup>;而计划于明年发射的环境与灾害监测预报小卫星星座,将携带光学小卫星和合成孔径雷达小卫星。这些卫星遥感器的在轨运行,将极大地丰富我国自主的海洋水色遥感资料来源。因此,需要深入开展基于自主卫星遥感资料的海洋水色遥感信息提取和应用技术的研究,并在海洋环境监测、大洋渔场信息服务、污染监测、海岸带监测等方面进行业务化应用,并扩展中国海洋水色遥感数据在国际上的影响力。

以我国 HY-1B 水色卫星发射为契机,在海洋公益项目及国家“八六三”等项目支持下,将集成多源遥感数据融合、水质参数定量化技术,并在数据同化和海洋水质模型的基础上,进行沿海水质预报技术的开发,最终形成水质信息的网络发布、预报的服务系统。这种以应用服务为导向的关键技术开发和服务系统构建,不仅能为我国海洋经济可持续发展提供重要支撑,而且对海洋水色遥感应应用工程技术具有极大的促进作用,也将大大推动国产水色遥感卫星(如 HY-1B)业务化应用水平的提高。

## 5 结语

近年来,中国海洋水色遥感技术取得了实质性

的进展,水色遥感算法和应用系统正在逐步完善。针对中国近海特有的区域海洋环境,如吸收性沙尘气溶胶、沿岸水体浑浊、大陆架宽广等,开发并完善了海洋-大气耦合矢量辐射传输模型、大气校正算法和区域海洋水色遥感模型;在全国多个地区建立了多颗水色卫星的接收处理和应用系统,及各类水色遥感产品的应用示范系统,广泛用于渔场环境监测、沿海水质监测、赤潮监测和海岸带航空监测等领域,并初步实现了水色遥感产品网上发布系统。总的来说,目前中国海洋水色遥感技术和应用已经位于世界先进之列,在海洋环境监测、资源管理及国家安全等领域发挥着不可替代的作用。

中国海洋水色遥感技术进一步的发展将着重于建立高精度的区域遥感模型和进行遥感产品精度验证,以及生物地球化学参数遥感反演模型的开发;对多种来源的遥感数据进行融合应用,建立海洋水色遥感信息应用服务系统,实现水色遥感信息的业务化应用,为政府管理决策、科学研究及公众服务。随着第二颗海洋水色卫星 HY-1B 的成功发射,中国将从自主海洋水色遥感信息获取,以及以应用服务为导向的关键技术和应用系统开发方面,促进遥感应应用工程技术的跨越式发展,为海洋经济和社会可持续发展、海洋资源开发、海洋环境保护和减灾防灾、海洋权益维护和海洋安全提供高效的遥感信息服务。

## 参考文献

- [1] 潘德炉,王迪峰.我国海洋光学遥感应应用科学研究的新进展[J].地球科学进展,2004,19(4):506-512
- [2] 潘德炉,何贤强,李淑菁,等.我国第一颗海洋卫星 HY-1A 的应用潜力研究[J].海洋学报,2004,26(2):37-44
- [3] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W, et al. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method Radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media [J]. Appl. Opt., 1988, 27: 2502-2509
- [4] Mobley C D. Light and water: radiative transfer in natural water [M]. Academic Press, San Diego, 1994
- [5] Jin Z, Stamnes K. Radiative transfer in nonuniformly refracting layered media: Atmosphere-ocean system [J]. Appl. Opt., 1994, 33: 431-442
- [6] Fell F, Fischer J. Numerical simulation of the light field in the atmosphere-ocean system using the matrix-operator method [J]. J. Quant. Spect. Rad. Trans., 2001, 69: 351-388
- [7] 唐军武,田国良,陈清莲.离水辐射非朗伯特特性的 Monte Carlo 模拟及分析[J].海洋学报,2000,22(2):48-57
- [8] 段民征,吴北婴,吕达仁.海洋-大气耦合辐射传输模式[J].大气科学,1997,21(6):734-742

- [9] 张 鉴, 何晓雄, 赵凤生. 利用大气-海洋系统辐射传输模拟水色遥感信息量的变化特性[J]. 量子电子学报, 2003, 20(5): 623-628
- [10] 何贤强, 潘德炉, 朱乾坤, 等. 基于矩阵算法的海洋-大气耦合矢量辐射传输数值计算[J]. 中国科学 D 辑, 2006, 36(9): 860-870
- [11] Pan Delu, Mao Zhihua. Atmospheric correction for Chinese coastal water color remote sensing[J]. Acta Oceanol. Sinica, 2001, 20(3): 343-354
- [12] 毛志华, 黄海清, 朱乾坤, 等. 我国海区 SeaWiFS 资料大气校正[J]. 海洋与湖沼, 2002, 32(6): 581-587
- [13] 韦 钧, 陈楚群, 施 平. 一种可适用于二类水体的 SeaWiFS 资料大气校正方法[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 118-125
- [14] Li Y. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters; comment[J]. Appl. Opt., 2003, 42: 893-895
- [15] 丁 静, 唐军武, 宋庆君, 等. 中国近岸浑浊水体大气修正的迭代与优化算法[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 732-741
- [16] He Xianqiang, Pan Delu, Mao Zhihua. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 23(4): 609-615
- [17] 何贤强, 潘德炉, 朱乾坤, 等. 海洋水色及水温扫描仪精确瑞利散射计算[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 145-151
- [18] 何贤强. 海洋-大气耦合矢量辐射传输计算模型研究及其在中国海洋水色系列卫星中的应用[D]. 北京: 中国科学院. 2007
- [19] 何贤强, 潘德炉, 白 雁, 等. 通用型海洋水色遥感精确瑞利散射查找表[J]. 海洋学报, 2006, 28(1): 47-55
- [20] 朱建华, 李铜基. 黄东海海区浮游植物色素吸收系数与叶绿素 a 浓度关系研究[J]. 海洋技术, 2004, 23(4): 117-122.
- [21] 朱建华, 李铜基. 黄东海非色素颗粒与黄色物质的吸收系数光谱模型研究[J]. 海洋技术, 2004, 23(2): 7-13
- [22] 王晓梅, 唐军武, 宋庆君, 等. 黄海、东海水体总吸收系数光谱特性及其统计反演模式研究[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(3): 256-263
- [23] 彭海龙, 孙从容, 张正, 等. 黄、东海区光谱漫衰减系数特性研究[J]. 海洋通报, 2004, 23(4): 15-18
- [24] 李铜基, 陈清莲, 杨安安, 等. 黄东海春季水体后向散射系数的经验模型研究[J]. 海洋技术, 2004, 23(3): 11-14
- [25] 宋庆君, 唐军武, 马超飞. 黄东海区水体后向散射系数与总散射系数的关系[A]. 第 14 届全国遥感技术学术交流会[C]. 青岛, 2003, 10
- [26] 宋庆君, 唐军武. 黄海、东海海区水体散射特性研究[J]. 海洋学报, 2006, 28(4): 56-61
- [27] 汪小勇, 李铜基, 杨安安. 黄东海海区表观光学特性和固有光学特性春季模式研究[J]. 2004, 23(4): 123-126
- [28] 李铜基, 朱建华, 陈清莲. 黄东海海区春季半经验分析生物-光学算法研究[J]. 海洋技术, 2006, 25(1): 83-88
- [29] 孙从容, 唐军武, 彭海龙. 黄东海海水体类型综合识别技术研究[J]. 海洋预报, 2005, 22(2): 7-14
- [30] 白 雁. 中国近海固有光学量及有机碳卫星遥感反演研究[D]. 北京: 中国科学院. 2007
- [31] 唐军武, 王晓梅, 宋庆君, 等. 黄东海二类水体水色要素统计反演模式[A]. 第 14 届全国遥感技术学术交流会[C]. 2003
- [32] 黄海清, 何贤强, 王迪峰, 等. 神经网络法反演海水叶绿素浓度的分析[J]. 地球信息科学, 2004, 6(2): 31-36
- [33] 詹海刚, 施平, 陈楚群. 基于遗传算法的二类水体水色遥感反演[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 32-26
- [34] 沈春燕, 陈楚群, 詹海刚. 人工神经网络反演珠江口海域叶绿素浓度[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(6): 38-43
- [35] 杨燕明, 刘贞文, 陈本清, 等. 用偏最小二乘法反演二类水体的水色要素[J]. 遥感学报, 2005, 9(2): 123-130
- [36] 廖迎娣, 张 玮, Deschamps P Y. 运用 SeaWiFS 遥感数据探测中国东部沿海悬浮泥沙浓度的研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, A 辑, 20(5): 558-564
- [37] 陈晓翔, 丁晓英. 用 FY-1D 数据估算珠江口海域悬浮泥沙含量[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(增刊): 194-196
- [38] Chen Chuqun, Shi Ping, Yin Kedong, et al. Absorption coefficient of yellow substance in the Pearl River estuary[J]. Proc. SPIE 2003, 4892: 215-221
- [39] 马超飞, 蒋兴伟, 唐军武, 等. HY-1/CCD 宽波段水色要素反演算法[J]. 海洋学报. 2005, 27(4): 38-44.
- [40] 唐军武, 丁 静, 田纪伟, 等. 黄东海二类水体三要素浓度反演的神经网络模型[J]. 高技术通讯, 2005, 15(3): 83-88
- [41] 王晓梅, 唐军武, 丁 静, 等. 黄海、东海二类水体漫衰减系数与透明度反演模式研究[J]. 海洋学报, 2005, 27(5): 38-45
- [42] 何贤强, 潘德炉, 毛志华, 等. 利用 SeaWiFS 反演海水透明度的模式研究[J]. 海洋学报, 2004, 26(5): 55-62
- [43] 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
- [44] 宁修仁, 史君贤, 蔡显明, 等. 长江口和杭州湾海域生物生产力锋面及其生态学效应[J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 96-106
- [45] 李国胜, 王 芳, 梁 强, 等. 东海初级生产力遥感反演及其时空演化机制[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 483-493
- [46] Pan Delu, Guan Wenjiang, Bai Yan, et al. Ocean primary productivity estimation of China Sea by remote sensing[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(7): 627-632
- [47] 官文江, 何贤强, 潘德炉, 等. 渤、黄、东海海洋初级生产力的遥感估算[J]. 水产学报, 2005, 29(3): 367-372
- [48] Bai Yan, Pan Delu, He Xianqiang, et al. Ocean primary production estimation of China Bohai Sea and Yellow Sea by HY-COCTS[J]. Proc. of SPIE, 2005, 5977, 597704
- [49] 张 穗, 何报寅. 河口 II 类水体富营养化的遥感定量方法研究[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(3): 29-31
- [50] 张霄宇, 林以安, 唐仁友, 等. 遥感技术在河口颗粒态总磷分布及扩散研究中的应用初探[J]. 海洋学报, 2005, 27(1): 51-56
- [51] 李小斌, 陈楚群, 施 平, 等. 2007. 珠江口海域总无机氮的遥感提取研究[J]. 环境科学学报, 27(2): 313-318
- [52] Callahan Julie, Dai Minhan, Chen Robert F, et al. Distribution

- of dissolved organic matter in the Pearl River Estuary, China [J]. Marine Chemistry, 2004(89): 211 - 224
- [53] Che Zhiqiang, Li Yan, Pan Jianming. Distributions of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Pearl River Estuary, China [J]. Continental Shelf Research, 2004 (24): 1845 - 1856
- [54] Zhang Xiaoyu, Pan Delu. Remote monitoring of eutrophication parameters with basic ecological models [J]. Proc. of SPIE. 2005, 5832: 461 - 470
- [55] Zhang Xiaoyu, He Xianqiang, Pan Delu. Forecast and real time monitor of algal bloom in Chinese coast using MODIS ocean color imagery[J], Proc. of SPIE. 2005, 5832: 493 - 501
- [56] 王其茂, 马超飞, 唐军武, 等. EOS/MODIS 遥感资料探测海洋赤潮信息方法[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(1): 6 - 10
- [57] 唐军武, 丁静, 王其茂, 等. 大气散射对采用归一化植被指数进行赤潮遥感监测的影响研究[J]. 海洋学报, 2004, 26(3): 136 - 142
- [58] 赵冬至, 张丰收, 杨建洪, 等. 表征赤潮水体太阳激发的叶绿素荧光高度的波段优化——归一化荧光高度法[J]. 海洋学报, 2005, 27(6): 146 - 153
- [59] 王曙光. 2003 年中国海洋卫星应用报告[M]. 国家海洋局, 2004
- [60] 罗亚威, 张蕴斐, 孙从容, 等. “海洋 1 号”卫星在海冰监测和预报中的应用[J]. 海洋学报, 2005, 27(1): 7 - 17
- [61] Wang Difeng, He Xianqiang, Gong Fang, et al. The design and construction of a satellite data processing system for marine application[J]. Proceedings of SPIE. 2004, 5570: 602 - 611
- [62] Wang Difeng, Gong Fang, He Xianqiang, et al. Design and construction of a satellite data processing system (SatDPS) for marine application[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5832: 652 - 661
- [63] Pan Delu, Zhang Xiaoyu, Huang Haiqing, et al. Preliminary study on coastal water quality classification by satellite data[J]. Proc. of SPIE, 2006, 6406, 64060F.
- [64] 潘德炉, 李炎, 龚芳. 海洋光学遥感技术的发展和前沿[J]. 中国工程科学, 2003, 5(3): 39 - 43
- [65] Mao Zhihua, Zhu Qiankun, Pan Delu. Development of an operational fisheries oceanography system of North Pacific Fishery[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5233: 314 - 321
- [66] 毛志华, 朱乾坤, 龚芳. 卫星遥感北太平洋渔场叶绿素 a 浓度[J]. 水产学报, 2005, 29(2): 270 - 274
- [67] 范学炜, 张汉德, 孙幸文. 成像高光谱数据在赤潮检测和识别中的应用研究[J]. 国土资源遥感, 2003, 1(55): 8 - 12
- [68] 王迪峰, 于龙, 龚芳, 等. 机载多光谱扫描仪及其海洋遥感信息获取的潜力[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8) 增刊: 585 - 588
- [69] Difeng Wang, Delu Pan, Fang Gong, et al. Inflight experimentation and preliminary marine application of AISA + in Chinese coastal zone[J]. Proc. of SPIE, 2006, 6405, 640521
- [70] 蒋旭惠, 陈性义, 赖祖龙, 等. 海洋航空遥感多传感器应用系统集成[J]. 测绘工程, 2007, 16(1): 47 - 50
- [71] 赵艳玲, 何贤强, 王迪峰, 等. 基于 Web 海洋卫星遥感产品的查询系统[J]. 东海海洋, 2005, 23(1): 32 - 39
- [72] 王舒境, 刘仁义, 刘南, 等. 面向分布式异构数据库的海洋遥感 WebGIS 研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2006, 33(6): 702 - 706
- [73] Pan Delu. Future - generation satellites of Chinese ocean remote sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5570: 228 - 232

(下转 46 页)