

东中国海表层悬浮体浓度卫星遥感反演研究进展

王震¹ 乔璐璐¹ 王云飞²

(1.中国海洋大学海洋地球科学学院 山东青岛 266100;2.青岛市科学技术信息研究所 山东青岛 266100)

摘要 用卫星遥感手段反演海洋表层悬浮体浓度(Suspended Sediment Concentration, SSC)来研究其分布和运输的方法已经被广泛使用。东中国海属于水文和光学性质较为复杂的二类水体,表层悬浮体浓度的分布规律和水体的固有光学特性时空变化大,增加了遥感研究的难度。在对前人的研究进行比较和总结后发现,根据实测SSC数据对不同区域、不同时间段(季节、潮汐周期)建立分段模型可以提高整体反演精度。在选择参与反演的波段时,河口和近岸等高SSC海域以及远岸低SSC海域有各自不同的最优波段组合。高SSC海域常使用水体反射率第二反射峰、第一反射峰前波段作正比波段组合参与反演,低SSC海域常使用水体反射率第一峰波段作正比、峰前波段作反比参与反演。同时,在反演模型中考虑泥沙粒径的影响可以显著提升反演精度,并且也有可能浅海区突破现有遥感研究手段的水深限制。目前模型精度评价标准使用较为混乱,平均相对误差、平均绝对误差和均方根误差等可以作为综合精度评价指标,模型的稳定性则可以用误差敏感性分析方法验证。高时空分辨率的海色卫星传感器的出现使得海洋短时间尺度事件的研究成为海色遥感研究的趋势之一。

关键词 卫星遥感反演 悬浮体浓度 东中国海

第一作者简介 王震 男 1991年出生 硕士研究生 海洋地质 E-mail: wyuchen0304@gmail.com

通讯作者 乔璐璐 女 副教授 E-mail: qiaolulu126@sina.com

中图分类号 P751.7 P731.1 **文献标识码** A

0 引言

悬浮体是海色三要素之一,是海水中重要的物质成分,本文的研究对象主要是悬浮体中的矿物颗粒,即悬浮泥沙。用卫星遥感手段研究水体悬浮物浓度分布及其变化特征较传统观测调查方法具有长时间序列和短时间突发事件兼顾、大范围和小区域兼顾的优势,是海色遥感的研究内容之一,也是目前研究水体悬浮物浓度的常用手段。

大气校正是海色遥感的关键技术之一,目的是去除大气程辐射项、求得离水辐射率,其中最重要的两项校正是瑞利散射和气溶胶散射的校正,难点在于气溶胶散射的计算和漫射透过率的计算。20世纪70年代末,Gordon等提出了标准大气校正算法^[1],对一类水体的校正精度较高,标准大气校正算法及其后来的改进模式^[2]的基本假设是近红外波段的反射项主要是大气程辐射的影响,但二类水体近红外波段的反射主要是海色要素的贡献因此无法适用。90年代,Arnone等提出光谱迭代法^[3],以Gordon标准大气校

正算法为基础,重新研究从近红外的大气程辐射外推到可见光波段的计算过程。20世纪末,一些学者开始将海色要素浓度考虑进迭代法^[4-5],国内学者基于光谱迭代的原理也开发了适用我国的大气校正算法^[6-9]。同时,Chomko和Gordon^[10-11]提出了基于简单气溶胶模型的优化方法估算相关海洋和大气参数进行大气校正并随后对该方法进行了验证,国内学者丁静等^[12]基于优化法以气溶胶在865 nm波段的散射和中等精度算法中气溶胶散射指数为优化变量,拟合实测反射比并建立误差函数优化求解。何贤强等^[13]开发了海洋—大气耦合矢量辐射传输数值计算模型(Polarized Coupled Ocean-Atmospheric Radiative Transfer numerical model, PCOART),并生成了通用型海洋水色遥感精确瑞利散射查找表及气溶胶散射、大气漫射透过率查找表,推动了我国海色大气校正算法的研究^[14]。21世纪初,Schiller和Doerffer提出的神经网络大气校正算法^[15-16]拥有更强的非线性拟合和自我收敛能力,但是目前国内应用较少。

海色遥感的另一个关键技术是提取海色要素信

收稿日期: 2015-05-04; 收修改稿日期: 2015-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41476030); 山东省优秀中青年科学家奖励基金(BS2012HZ022); 中国地质调查局项目(GZH201100203)
[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41476030; Outstanding Young Scientist Award Fund of Shandong Province, No. BS2012HZ022; China Geological Survey Project, No. GZH201100203]

息,它经历了定性和定量研究两个发展阶段^[17]。定性研究主要通过遥感影像灰度值的变化分级粗略代表水体中悬浮泥沙浓度(Suspended Sediment Concentration, SSC)的变化。20世纪70年代,Austin^[18]开始了遥感反演悬浮体浓度的定量化研究。在海色遥感定量化研究的早期阶段,一般采用经验统计的方法找到遥感反射率和SSC之间简单的数学关系进行反演。1975年,Gordon *et al.*^[19]首先建立了表观光学量与固有光学量之间的定量关系,并在80年代初依此建立了Gordon式半分析模型(又称理论模型)^[20],原理是基于辐射传输理论通过表观光学量计算水体固有光学量,同时找到固有光学量和SSC之间的统计关系建立反演模型,国内学者也建立了负指数式和统一式等理论模型^[21-23]。Tassan在90年代提出了著名的适用于二类水体的多波段比值经验模型Tassan式^[24],将经验统计模型从线性、单波段提升到现在的非线性、多波段的形式,国内许多学者也借鉴Tassan式建立了适合我国近海的经验统计模型^[25-29]。同时,Mertes *et al.*^[30]从遥感图像本身出发,将图像亮度值看作是某几个主要地物的光谱的线性混合,国内学者也对此方法进行了应用^[31-32]。20世纪末,Doerffer和Schiller^[33]将基于遗传算法的神经网络模型应用在海色遥感反演上,十分适合表观光学量和海色要素之间复杂的非线性关系拟合,国内神经网络模型的使用主要以B.P.(Back Propagation)神经网络算法和G.P.(Genetic Programming)遗传算法为主^[34-36],应用并不广泛。最近几年,为了充分利用各个遥感波段以及水色要素的信息,国内学者采用主成分分析法^[37]和偏最小二乘法^[38]建立反演模型,以提高模型的信息使用率。之前大部分的反演模型对于影响水体固有光学量的其他因素考虑不足,王芳等^[34]将悬浮体粒径因素考虑进反演模型,发现反演精度大大提高。

1 研究区域概况

1.1 东中国海水体光谱特性

水体光谱性质分为表观光学量(Apparent Optic Properties, AOPs)和固有光学量^[39](Inherent Optic Properties, IOPs)。海色三要素通过各自浓度消涨变化引起固有光学量中吸收系数和后向散射系数的变化,从而影响表观光学量。

水体总的吸收系数可看作水体本身和海色三要素吸收系数的线性之和^[40],图1a为纯水及海色三要素的吸收系数。纯水的吸收在蓝光和绿光波段较弱,

在黄绿波段快速上升,在红及近红外波段维持一个高吸收的水平;黄色物质在蓝光波段为强吸收,随着波长增加吸收强度不断减弱,600 nm波长以后黄色物质呈现低吸收的光谱特性。浮游植物色素(主要为叶绿素a)在440 nm和675 nm波长处有两个强吸收峰,600 nm波长附近以及700 nm以后波段吸收较低。悬浮体颗粒物在蓝波段处为强吸收,随着波长增加吸收强度逐渐减弱,600 nm波长以后处于极低水平。汪小勇等^[41]研究还发现非色素颗粒物(主要是悬浮泥沙)吸收系数在近岸的河口和海湾海域较高,且总体上北高南低,黄色物质吸收系数在渤海部分海湾和长江口较高,因此中国近海不同区域海色三要素对水体光谱特征的影响因海域而异。

海水的后向散射可看成是纯海水和悬浮体颗粒后向散射项的叠加^[42],图1b为纯海水、矿物质以及浮游植物色素后向散射系数。纯海水的后向散射在蓝光波段较高,随着波长增加呈指数衰减。悬浮体的后向散射在蓝光波高,随着波长增加缓慢减小。浮游植物色素的后向散射随波长衰减较缓慢,但在数值上远远低于悬浮体。在近岸二类水体中,海色三要素分布比例不均衡,近岸水体后向散射系数由于主要受悬浮体颗粒影响而比远岸海域大(赤潮等情况除外)^[43]。

同时,水体的反射率光谱还呈现出红移现象。低SSC水体有一个位于可见光波段的反射峰,近岸中、高SSC水体除可见光波段外还有一个反射峰外位于近红外波段,并且随着水体含沙浓度的增加可见光波段反射峰向长波方向移动^[44-48]。红移现象直接影响着反演波段的选择。

1.2 东中国海表层悬浮体浓度分布

东中国海表层悬浮体浓度分布和变化复杂。前人研究表明,冬季在强烈的季风作用下波浪作用增强扰动底部沉积物,导致渤海浅水海域冬季表层SSC最高,春秋季节次之,夏季(除河口外)最低,夏季河口海域由于河流输沙作用增强导致SSC偏高^[50-52]。空间分布上,全年最大值出现在黄河口,浓度大于1000 mg/L,其次是辽河口,悬浮体浓度在20~100 mg/L之间,渤海中央平均SSC小于20 mg/L。黄海SSC变化类似渤海,冬季由于波浪作用强底部扰动大致使SSC较高,夏季最低,春秋为过渡阶段。空间上山东半岛近岸高值区秋、冬季显现,夏季基本消失,黄海的全年高值区出现在苏北浅滩一带,高值线平行于苏北海岸^[53-57]。东海近岸河口区SSC全年均较高,夏季由

于长江冲淡水的影响长江口高 SSC 分布向外海扩张的范围比冬季大,冬季由于强风作用的影响风浪扰动底部沉积物致使东海中、外部陆架 SSC 增高^[58-60]。整个东中国海表层悬浮体浓度季节分布变化如图 2,就全年而言,SSC 高值区集中于河口或近岸海域,离岸海域 SSC 较低^[61],SSC 时空变化大。

综合东中国海全年 SSC 分布规律和各海域水体光谱特性,将东中国海按照悬浮体浓度定性地分为高值区(黄河口、长江口、渤海湾—莱州湾沿岸、苏北浅滩、杭州湾)和低值区(远离大陆的海域如渤海中部、南黄海中部、东海中部等),分别进行研究。

2 东中国海遥感反演表层悬浮体浓度研究比较

遥感反演表层悬浮体浓度研究的一般技术路线主要包括遥感图像获取及预处理、选取参与反演的因子、建立和检验模型以及分析应用等步骤(图 3)。本文按照上述主要研究过程对前人的研究进行比较分析和总结。

2.1 遥感数据选择

目前,国际常用的水色卫星传感器主要是美国国家航空航天局(NASA)EOS 卫星上的 MODIS(Moder-

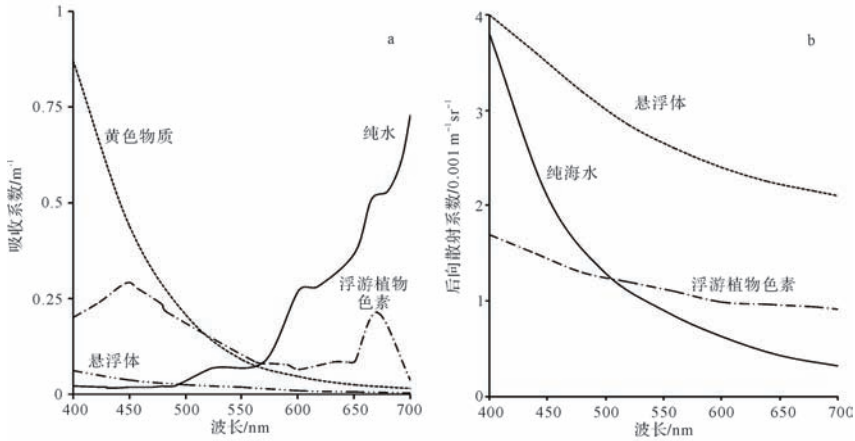


图 1 水体主要组分吸收与后向散射系数曲线

a. 改绘自文献[42]; b. 改绘自文献[49]

Fig.1 Absorption and backscattering coefficient curves of main constituents of sea waters

a. absorption coefficient, from reference [42]; b. backscattering coefficient, from reference [49]

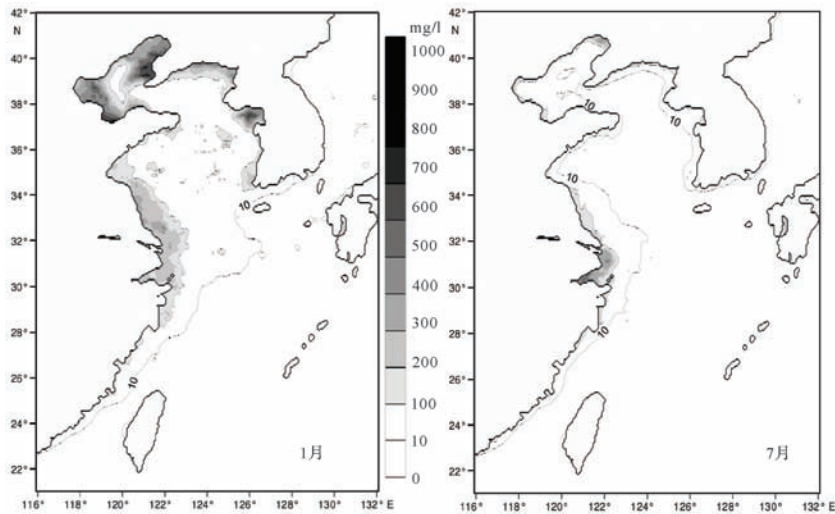


图 2 1 月和 7 月东中国海 SSC 分布(改绘自文献[62])

Fig.2 Distribution of SSC in January and July in the eastern China seas (from reference [62])

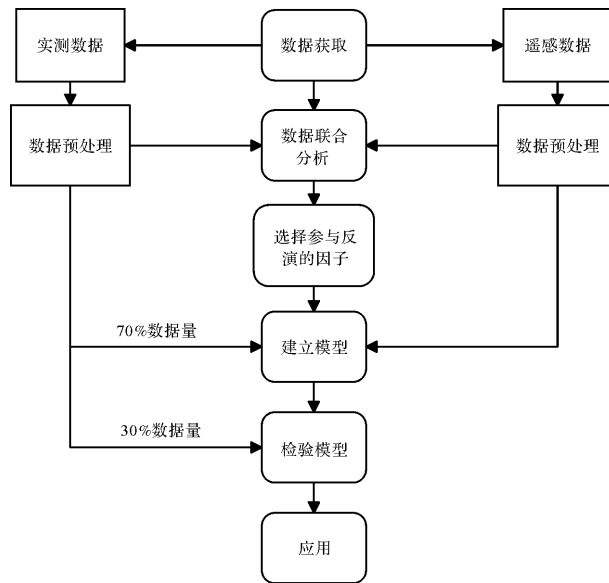


图 3 遥感反演表层悬浮体浓度研究技术路线

Fig.3 Framework of SSC retrieval with remote sensing

ate Resolution Imaging Spectroradiometer) 传感器、Sea-star 卫星上的 SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) 传感器以及韩国宇航研究院 (KARI) 静止轨道卫星 COMS 上的 Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) 传感器。欧洲航天局 (ESA) ENVISAT 卫星上的 MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) 海色传感器使用也很广泛,但目前已停止提供新的数据。我国 HY 系列海色卫星装载的海洋水色扫描仪波段设置与 MODIS 相似,经过实践检验逐步用于我国近海的海色遥感研究^[28,63]。

表 1 整理了东中国海遥感监测 SSC 使用的卫星传感器,主要以 MODIS 和 Landsat 卫星为主,海色遥

感卫星和陆地、气象卫星的使用情况大致平衡。河口、近岸海域陆地卫星使用更多,这是因为海色卫星传感器虽然拥有更多的波段和更高的辐射分辨率,但是海色波段空间分辨率大部分在 1 000 m 以上,难以满足小范围的精细遥感研究。但是普通陆地卫星虽然空间分辨率高但是波段设置不佳,在满足了高空间分辨率研究的同时也牺牲了海色遥感的效果。近年来,随着 GOCI 等新一代高时间、空间和辐射分辨率的卫星传感器的使用不断增加,使得海色卫星逐渐可以满足小范围高时空分辨率的精细研究。

2.2 反演波段选择

目前大部分的研究都是通过对各波段反射率值

表 1 用于东中国海海色遥感的主要卫星传感器使用情况不完全统计

Table 1 Usage of satellite sensors in the eastern China seas

卫星\传感器	辐射分辨率 /nm	主要空间分辨率 /m	时间分辨率 /天	使用比例/%			
				河口	近岸	远岸	总计
Landsat\MSS/TM/ETM	≥70	30	16	34.8	25.0	0.0	25.0
CBERS\ CCD	≥70	19.5	26	4.3	0.0	0.0	2.1
NOAA\ AVHRR	≥110	1 100	6	4.3	12.5	0.0	6.3
FY-3\ MERIS	20~50	1 000	5.5	4.3	0.0	0.0	2.1
HJ\ CCD	≥80	30	4	0.0	12.5	0.0	4.2
HY-1B\ COCTS	20	1 100	1	0.0	0.0	22.2	4.2
ALOS\ AVNIR-2	80	10	2	0.0	6.3	0.0	2.1
Seastar\ SeaWiFS	10~20	1 100	1~2	4.3	0.0	33.3	8.3
ENVISAT\ MERIS	10	1 200	3	8.7	6.3	0.0	6.3
EOS\ MODIS	10~15	1 000	0.5	34.8	25.0	44.4	33.3
COMS\ GOCI	20	500	1天8次	4.3	12.5	0.0	6.3

注:卫星传感器参数来源 <http://www.ioccg.org/sensors/>。

与 SSC 进行相关性分析得到敏感波段,波段的组合多以正反比、升降次幂的方式进行,以达到突出悬浮体信息,削弱噪声的目的。

图 4 是东中国海 18 个实测数据多、反演精度高的模型波段使用情况。低 SSC 海域反演模型使用的波段多集中在水体反射率第一峰和峰前水体反射率递增波段处。高 SSC 海域反演模型正比波段的使用多集中在水体反射率第一(600~700 nm)和第二反射峰(700 nm 以后)及近红外波段处,反比波段的使用集中在 520~600 nm(第一反射峰前反射率快速递增波段)和 620~700 nm 波段(第一反射峰)。刘志国等研究发现 SSC 和水体反射率在 750 nm 以后波段比 580~700 nm(含沙水体第一反射峰)波段显示出更强且稳定的相关性^[30],表明 750 nm 以后的近红外波段反射率峰几乎全部由悬浮体颗粒后向散射贡献,其他组分影响较少(图 1b 表明水体和浮游植物色素的后向散射指数衰减到低水平),而第一反射峰处于中等水平的相关系数表明反射率值增加不仅有悬浮体的贡献,还有其他组分的影响。因此水体第二反射峰在正常海洋环境下对悬浮体来说较为纯净,而第一反射峰受其他组分的影响大,所以这两个反射峰波段的使用有所区别。

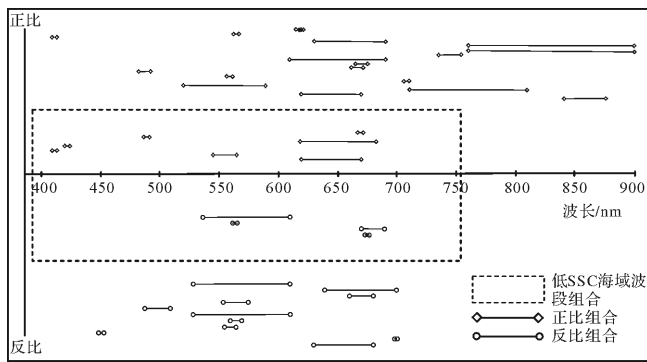


图 4 东中国海主要反演模型波段使用统计

Fig.4 Bands and their combination forms used in retrieval models

2.3 反演模型比较

表 2 是近年来河口、近岸和远岸低 SSC 海域建立的样本较多、反演精度较好的部分反演模型汇总。在东中国海遥感反演表层悬浮体浓度的研究中,用到的非业务化大气校正算法有十余种,由于大气校正的结果难以用精准的指标衡量,本文涉及的大部分研究也没有讨论大气校正方法的优劣或展示校正结果,因此只能定性地从总体上比较业务化和非业务化大气校正算法的使用对反演结果的影响。

2.3.1 河口海域

黄河口海域,Zhang *et al.*^[67] 和陈磊等^[66] 建立的多波段组合对数式模型精度较高,两者均将水体反射率第一峰值波段作反比参与反演。唐军武等^[17] 基于黄东海实测数据建立的指数式在黄河口反演结果 *MRE* 达到 45%,误差大的原因一方面是黄东海和黄河口的区域差异导致模型适应性降低,另一方面 CBERS-02 波段设置少且辐射分辨率低。黄海军等^[45] 和 Zhang *et al.*^[67] 均基于 Landsat 卫星数据建立了反演模型,由于后者采用了拟合度更好的多波段对数式并且采用 MODIS 的瑞利散射和气溶胶参数对 TM 数据进行大气校正^[85],因此反演精度更高。

长江口海域,Feng *et al.*^[69] 根据实测 SSC 数据将研究区域以 50 mg/L 和 150 mg/L 为分界点划分高中低值区,低值区采用 620~670 nm 波段,高值区采用 841~876 nm 波段突出悬浮体信息,并配合短波红外大气校正方法^[86],取得了高反演精度。刘杰等^[68] 分别用指数、负指数模式反演小潮和大潮时的水体表层 SSC,也提高了反演精度。Shen *et al.*^[23] 建立了基于经验系数的半分析模型,并采用基于查找表的大气校正方法^[87],同时以 SSC 值 20 mg/L、80 mg/L、250 mg/L 为分界点分别采用 560、620、708、778 nm 波长附近波段参与反演,反演精度高。彭翔翼等^[71] 采用 Shen *et al.*^[23] 的反演模型对比了不同遥感数据的反演效果,发现由于 GOCI 对 SSC 更敏感的短波波段设置更佳而能更好地反映低 SSC 水体。陈本清等^[31] 采用线性光谱混合模型将遥感反射率看作是高浓度悬浮泥沙、低浓度悬浮泥沙和叶绿素 a 的光谱线性叠加的结果,拟合度达到 0.991。

2.3.2 近岸海域

渤海近岸海域,崔廷伟等^[25] 在研究中采用了神经网络大气校正算法^[16],且所使用的 555 nm 和 670 nm 处波段对 SSC 敏感受黄色物质干扰小,因此反演精度较高。并且采用误差敏感性分析的方法对反演结果进行了分析,在原始离水反射率中加入随机误差,发现反演结果波动并不大,进一步确证了模型的稳定性。于小淋^[36] 采用 GP 遗传算法进行反演建模,由于建模样本涵盖海域过大(渤海、黄海)、时间跨度过大(春、冬季数据无区分),其反演精度不及上述模型。雷佩平^[74] 和陈燕等^[82] 建立了相似的半分析模型,虽然他们使用的卫星传感器波段设置相似,但后者反演精度较高。主要区别在于后者使用 830 nm 处波段统计固有光学量和 SSC 的关系,而前者使

表2 东中国海遥感反演表层悬浮体浓度部分模型一览表

Table 2 Representative SSC retrieval models in the eastern China seas

模型	研究者	数据来源	波段设置/nm	反演精度
河口海域	线性	黄海军等 ^[45]	Landsat TM 830	RE 39%
	多项式	刘志国等 ^[44]	实测光谱 690\810	R^2 0.916 0, $RMSE$ 0.054 1 kg/m ³
		唐军武等 ^[17]	CBERS-02 555	MRE 45%
	指数	刘志国等 ^[44]	实测光谱 690\810	R^2 0.890 9, $RMSE$ 0.060 4 kg/m ³
		刘杰等 ^[64]	MODIS 645	R^2 0.66, MRE 27.5%
		尤玉明等 ^[65]	Landsat MSS 550\ 650\ 750\ 950	R^2 0.981
	对数	陈磊等 ^[66]	实测光谱 660\ 600	R^2 0.87, MRE 28.3%
		Zhang 等 ^[67]	Landsat ETM 488\ 551\ 667	MRE 16.7%, STD 0.141
		李四海等 ^[27]	SeaWiFS 555\670	对数多项式: R^2 0.776;对数线性式: R^2 0.813,总体 MRE 22.7%
	分段模式	刘杰等 ^[68]	MODIS 645	大潮: R^2 0.61, MRE 26.2%;小潮: R^2 0.67, MRE 26.8%
		Feng 等 ^[69]	MODIS 645\ 858.5	总体: R^2 0.996, MRE 22.3%, $RMSE$ 0.277
	半分析模型	陈本清等 ^[31]	MODIS 绿\红\近红外	R^2 0.991
		刘杰等 ^[64]	MODIS 645	R^2 0.60, MRE 27.5%
		Shen 等 ^[23]	MREIS 560\620\708	总体 $RMSE$ 0.104 g/L, 剔除极值点后 $RMSE$ 0.055 g/L
		陈勇等 ^[70]	Landsat TM 750\830	MRE 30.04%
		MODIS\ 665\865;	MODIS: R^2 0.892	
近岸海域	线性	彭翔翼 ^[71]	MERSI\ 565\685\765;	GOCI: R^2 0.872
			GOCI 560\665\754	MERSI: R^2 0.780 2
	多项式	潘雪峰 ^[72]	Landsat TM 560\660	MAE 14.69, MRE 18.27%
		潘进等 ^[73]	MODIS 555\ 645	R^2 0.911 7
	幂函数	雷佩平 ^[74]	ALOS 560\ 650	MAE 4.24 mg/L, MRE 36.4%, $RMSE$ 5.06 mg/L
		樊辉等 ^[75]	实测光谱 412\565\665	春: R^2 0.93, $RMSE$ 18.17;秋: R^2 0.85, $RMSE$ 3.19
	指数式	宋召军 ^[76]	AVHRR 615\ 862.5	R^2 0.945 8
		Bi 等 ^[77]	MODIS 554.5\ 645	R^2 0.90, MRE 17%, $RMSE$ 0.087 mg/L
	对数式	刘王兵 ^[78]	HJ 660\ 830	R^2 0.903, AE 70.76 mg/L, RE 7.12%
		王飞等 ^[79]	HJ-1A 830	R^2 0.808, MRE 19.79%, $RMSE$ 62.0 mg/L
		宋召军 ^[76]	AVHRR 615	R^2 0.953 7
	半分析模型	崔廷伟等 ^[25]	MERIS 555\670	R^2 0.92, MRE 18%, $RMSE$ 0.11 mg/L
		樊辉等 ^[75]	实测光谱 412\560\ 620\665\ 705	春: R^2 0.92, $RMSE$ 15.42;秋: R^2 0.85, $RMSE$ 3.10
		Bi 等 ^[77]	MODIS 554.5\645	R^2 0.86, $RMSE$ 4.73 mg/L
		潘进等 ^[73]	MODIS 555\645	R^2 0.961 5, MRE 20.96%
Lu 等 ^[80]		MODIS 645	R^2 0.752, MRE <20%	
李京 ^[21]		AVHRR 615	无云时: R^2 0.994, ME 15.5 mg/L	
雷佩平 ^[74]		ALOS 650	R^2 0.998, MRE 30.83%, MAE 3.61 mg/L, $RMSE$ 4.22 mg/L	
远岸低悬浮体浓度海域	神经网络	刘猛等 ^[81]	GOCI 555\660\745	未标明
		陈燕等 ^[82]	Landsat TM 830	MAE 1.73 mg/L, MRE 18.28%, $RMSE$ 2.05 mg/L
	线性式	于小淋 ^[36]	GOCI 490\550\ 660\745	R^2 0.992, MAE 16.96 g/m ³ , MRE 39.99%
		Wang 等 ^[83]	MODIS 645	R^2 0.95, MRE 10.1%, $RMSE$ 0.512 mg/L, 检 MRE 12.9%
	幂函数式	廖迎娣等 ^[9]	SeaWiFS 443\555\865	未标明
		王文娟 ^[62]	SeaWiFS 448\555	MRE 30.63%, 400 mg/L 以下 R^2 0.75, 500 mg/L 以下 R^2 0.70, 500 mg/L 以上 R^2 0.62
	指数式	余佳 ^[57]	MODIS 555	R^2 0.89
		Wang 等 ^[83]	MODIS 645	R^2 0.93, MRE 12.5%, $RMSE$ 0.585 mg/L, 检 MRE 20.4%
	对数式	唐军武等 ^[17]	实测光谱 490\565\ 670	R^2 0.97, MRE 19%
		马超飞等 ^[63]	HY-1 564\650.5	R^2 0.97, MRE 21%
半分析模型	龚芳等 ^[29]	实测光谱 490\555\ 670	R^2 0.702, MRE 28.48%, 50 mg/L 以下 MRE 27%	
	Zhang 等 ^[84]	MODIS 488\551\ 667	春季 MRE 0.36, 秋季 MRE 0.38	
	Wang 等 ^[83]	MODIS 645	R^2 0.92, MRE 12.6%, $RMSE$ 0.635 mg/L	
	庞重光等 ^[59]	SeaWiFS 555\ 670	MRE 18.1%	
	龚芳等 ^[29]	实测光谱 670	R^2 0.710, MRE 20.0%	
主成分分析	王芳等 ^[34]	MODIS 第8~16波段	未考虑粒径: R^2 0.697, MRE 38.4%, STD 0.828	
			考虑粒径: R^2 0.716, MRE 25.6%, STD 0.802	
偏最小二乘法神经网络	杨燕明等 ^[38]	实测光谱 400~800	最大误差<0.38	
	仲京臣等 ^[35]	实测光谱 412\443\ 555	R^2 0.655, MRE 24.2%, $RMSE$ 0.188 g/m ³	
	王芳等 ^[34]	MODIS 第8~16波段	未考虑粒径: MRE 39.04%;考虑粒径: MRE 24.442 7%	

注:表中RE为悬浮体浓度, R^2 为复相关系数,ME为平均误差,MRE为平均相对误差,MAE为平均绝对误差,RMSE为均方根误差,STD为标准差。

用 650 nm 处波段,据前文分析 830 nm 波长处于较为纯净的含沙水体反射率第二峰值处,而 650 nm 波长位于各组分综合影响的第一峰值处,因此后者精度较高;二者计算后向散射系数的方法也不同,陈燕等^[82]使用多波段准分析算法(Quasi-Analytical Algorithm, QAA)^[86],以 640 nm 处为参考波段计算后向散射系数并经验统计出总体后向散射系数,雷佩平^[74]则计算出不同粒级的悬浮体后向散射再求和^[87]。

在杭州湾海域,刘王兵^[78]和王飞等^[79]均基于我国 HJ 卫星数据建立了高精度指数式反演模型。李京^[21]基于水体的辐射传输方程建立了理论反演模式负指数模型,在天气良好无云时,拟合度可达 0.994。

在苏北浅滩海域,樊辉等^[75]对春秋两季样本分别建立三波段指数和对数式的混合组合模型,反演精度较高。潘雪峰^[72]建立的波段比值模式使用的样本数据最多,以 630~690 nm(含沙水体第一反射峰)反射率和 520~600 nm(叶绿素强吸收波段)的比值作为反演因子,也取得了较高的反演精度。

2.3.3 远岸低 SSC 海域

在渤海海域,Wang *et al.*^[83]基于 MODIS 数据建立的线性、指数和对数式模型均取得了较高的反演精度。庞重光等^[59]基于 SeaWiFS 数据建立的对数式模型反演结果的 *MRE* 也低至 18.1%。王芳等^[34]首次在反演模型中考虑泥沙粒径因子,分别应用到主成分分析和神经网络的算法中,反演结果的 *MRE* 与未考虑泥沙粒径因子之前相比有明显地下降。

黄东海海域,廖迎娣等^[9]提出新的大气校正方法用于 SSC 的反演,与业务化算法相比细节反映地更加清晰。龚芳等^[29]建立的 Gordon 式半分析模型反演结果的 *MRE* 低至 20.1%,杨燕明等^[38]在主成分分析法基础上使用偏最小二乘法,充分利用了光谱仪 400~800 nm 大部分通道的光谱信息和水色要素矩阵的信息,模型在黄海进行检验,最大误差小于 38% 并且并且稳定性有所增强。仲京臣等^[35]建立的 BP 神经网络算法也取得了高反演精度。

总体来说,河口海域对数式模型表现最佳,其次是半分析和分段式模型;近岸海域指数式模型表现最佳,其次是对数式和半分析模型;远岸海域对数式模型表现最佳,其次是半分析和指数式模型。并且远岸低 SSC 海域经验模型和半分析模型反演效果均比高 SSC 海域好。从整个东中国海来看,对数式模型在各海域反演精度均较佳,具有强适应性。模型参数具有明确物理意义的半分析模型表现并不稳定,与经验模

型相比并无太大的优势,甚至反演精度略低于对数式模型,可能是目前半分析模型的理论基础——辐射传输理论的研究还不够精细、深入。同时,在 18 个实测数据多、反演精度高的模型中,采用非业务化大气校正算法的有 13 个,表明选取合适的二类水体大气校正方法有助于提高反演精度。

同时,大量的研究也发现不同水文周期(干湿季、潮周期等)的表层悬浮体浓度变大,按照不同水文周期或不同悬浮体浓度分段采取不同反演模型或者调整模型参数、反演波段等可使反演精度大大提升。^[27,45,62,64,68-69,75,88-89]。

3 遥感监测表层悬浮体的应用

3.1 长时间、大范围的悬浮泥沙分布、输运及其季节变化

遥感手段的主要优点是可以获取长时间、大范围的遥感数据研究某一海域 SSC 分布特征和泥沙输运格局的季节性、年际、年代际变化。崔廷伟等^[25]利用遥感手段从空间分布格局和季节性差异等方面分析了渤海悬浮体的时空分布特征。于炜^[50]利用经验正交分解法分析卫星遥感反演出的 SSC 来研究渤海海域 SSC 的时空分布规律。庞重光等^[51]基于连续 5 年的卫星数据反演出渤海海域月平均 SSC 资料,得到渤海不同季节的 SSC 分布特征,并研究了黄河入海径流对渤海 SSC 分布格局的影响。肖合辉^[52]综合遥感数据、实测资料和模型模拟数据分析了渤海海域悬浮体分布特征、扩散模式和动力机制,并定量估算了悬浮体扩散通量。余佳^[57]结合遥感影像和实测数据反演出黄海悬浮体月均分布特征,研究了黄海悬浮体分布和季节性的扩散变化及其机制。孙效功等^[90]利用遥感手段分析了黄东海陆架区悬浮体向深海输运的时空变化规律。王文娟^[62]利用月平均遥感数据反演了东中国海 SSC 分布及输运特征和变化。毕世普等^[91]利用近 20 年的遥感数据反演长江口海域 SSC 分布并讨论了潮汐、河口径流量输沙量对 SSC 空间分布特征的影响以及河流泥沙入海的形态特征。陈勇等^[70]利用 15 个时相的遥感数据研究近 40 年来长江口 SSC 的时空分布规律。陈斌等^[92]结合遥感反演的 SSC 和潮流实测数据,研究了长江口外海域水体含沙量的季节变化特征和潮周期变化特征。目前渤海、黄东海的海洋表层悬浮体输运遥感研究已经十分成熟,但是局部海域的精细研究还较少,如浙闽沿岸海域等。

3.2 短期事件对悬浮泥沙浓度影响的遥感研究

事件性的海洋环境变化可以包括人为活动导致的变化和短时间内的台风、寒潮大风、自然灾害等自然因素引起的海洋环境变化。崔廷伟等^[25]研究了大风过程的短期扰动对渤海悬浮物分布的影响,发现大风可在1~3天内明显改变整个渤海的SSC分布格局,影响程度与水深、底质和悬浮体粒径有关。于小淋^[36]利用遥感手段研究渤海表层SSC对台风过境的响应,发现由于海底沉积物再悬浮导致台风过境期间海洋表层悬浮体浓度会异常急剧增高至原来的3~5倍,一直持续到台风过后一周左右。Sheremet *et al.*^[93]、Chen *et al.*^[94]和Bian *et al.*^[95]的研究也得出类似的结果。于小淋^[36]用经验模态分解法(Empirical Mode Decomposition, EMD)填补台风过境期间被云层遮挡的遥感信息并分析台风对渤海悬浮体分布的影响。王文娟^[62]、李婧等^[96]和毕世普等^[91]分别利用遥感手段研究1998年长江特大洪水期间长江口表层悬浮泥沙的分布变化和运输特征,发现洪水期间长江口表层悬浮体浓度以及运输距离和扩散范围急剧增加,这种影响持续到第二年。毕世普等^[91]和Feng *et al.*^[69]分别利用遥感手段研究了长江口表层悬浮体浓度变化对长江三峡大坝建成的响应,发现长江三峡竣工后,长江口的悬沙浓度呈逐渐降低的趋势。由于遥感手段的实时性和获取方便等优势,事件性海洋环境变化的遥感研究近年来逐渐成为海色遥感主要研究方向之一。

3.3 悬浮泥沙运动、运输机制的遥感研究

悬浮体的时空分布特征变化可以反映出某一海域的动力机制特征。庞重光等^[51]利用长时间序列遥感数据反演的SSC和风场数据定量研究了渤海海域SSC时空分布的动力成因。孙效功等^[90]直接计算海面反射率变化的梯度,解译出表层悬浮体锋面信息,研究黄东海陆架区悬浮体分布的季节变化和主要受控因素。Yuan *et al.*^[97]和庞重光等^[98]分别利用遥感手段获取分析黄东海SSC和相应SST以及风场数据定量分析黄东海悬沙分布形成的动力机制。杨扬等^[99]对反演的SSC数据取对数,找出数值变化的最大梯度以提取次级悬沙锋面,研究不同季节的水动力和沉积作用。陆兵^[100]从遥感数据中提取长江口最大浑浊带的范围,通过比较多年最大浑浊带的范围变化探讨长江口SSC的变化及水动力特征。刘猛等^[81]利用静止轨道卫星的一天多景遥感数据结合数值模拟分析杭州湾海域SSC分布变化对潮汐和风浪的响

应。将遥感和实测资料以及数值模拟相结合的方法成为近年来研究区域动力机制及其变化的重要手段和趋势。

4 讨论

4.1 泥沙粒径因子

目前遥感反演SSC的研究多数只是利用遥感波段的光谱信息,对于影响水体光谱的其他因素考虑不足,比如悬浮体颗粒的粒径、成分、形状等,都对悬浮体的后向散射有贡献,严重影响水体的固有光学量^[101-107]。研究表明在反演模型中加入粒径因子可以提高反演精度。悬浮体颗粒粒径对于水体反射率的影响较大,超过了悬浮体成分的影响,如果不考虑粒径因素会导致反演结果误差较大^[106]。王艳姣^[108]通过实验发现悬沙浓度相同时,悬浮体颗粒粒径越小,使悬沙整体散射表面积增加,导致光谱反射率增加,且水体光谱因粒径变化在500~700 nm、800 nm波长附近波动较大,这两个波段也是反演模型中的常用波段。Sydor *et al.*^[103]发现当悬浮体颗粒平均粒径分异小于15%时,对反射率影响可忽略。因此对于平均粒径变化较大的海域,需要考虑悬浮体颗粒粒径的影响。沈芳等^[106]认为在陆—海交互作用强烈、粒径分布不均匀的动力河口海域粒径对于遥感反射率的影响较大,在这些海域需要注意悬浮体粒径的影响。王芳等建立了包含颗粒粒径的海洋悬沙二元参数的反演模型,反演精度显著提升^[34]。悬浮体粒径可以通过理论模型参与悬浮体浓度的遥感反演。现有的半分析模型在处理向后散射项时直接忽略了颗粒粒径的影响,这恰恰是颗粒粒径对遥感反射率影响的关键所在。因此需要基于表观光学量与固有光学量的关系,建立包含悬浮体颗粒粒径因子的精细理论模型,提高反演精度。

考虑粒径因子还可能拓展浅海海色遥感的深度。海色遥感本质上是所使用的遥感波段穿透深度的积分,目前普遍采用的可见光和近红外波段的有效穿透深度有限,Gordon *et al.*^[109]认为均质海洋中水深20 m以内光能量即衰减90%以上,在大洋二类高浑浊水体中光的穿透深度甚至不足数米,因此目前的海色遥感应用只能局限于海洋表层。但是研究发现不同粒径的表层悬浮体也具有不同的光谱特性^[108,110],根据这一原理可以利用遥感手段反演出表层悬浮体的粒径信息,通过对比浅水区某一海域遥感反演的表层悬浮体粒径的变化及其表层和底部悬浮体粒径历史

实测数据,可以推断出水体深部是否受到异常扰动,将海色遥感深度延伸至次表层甚至是浅海海底。目前粒径遥感反演的相对误差可以达到 20%^[110],理论上可以将此方法应用在寒潮大风、台风等极端海洋环境下的东中国海部分浅海海域。

4.2 反演效果评价

4.2.1 模型拟合度评价

拟合度评价常用回归分析的方法,但是经常与相关性分析混淆。实际工作中,一般首先对遥感反射率值和实测 SSC 数据进行相关性分析,以确定它们之间是否存在不确定的依赖关系,得到复相关系数 (Multiple R, R^2),它是皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient, r) 的平方值,以消除 r 对相关程度的过度解释,值域为 $[0, 1]$,值越接近 1 表明相关性越好^[111];再对遥感反射率值和反演出的 SSC 数据作回归分析,得到决定系数 (Coefficient of determination),它是复相关系数的平方值,用来判断反演模型的自变量对因变量的解释程度,值域 $[0, 1]$,决定系数大于 0.5 表明模型因变量对结果有强决定性^[112];最后对实测 SSC 和反演出的 SSC 数据作散点图,若散点均位于 $y=x$ 函数图象附近说明模型计算结果与实测数据较一致、拟合度高。以上三个统计分析有各自不同的指示作用和意义,目前的研究一般只计算实测和反演的 SSC 之间的复相关系数来评价拟合度,物理意义不明确且使用混乱。

4.2.2 反演结果精度评价

目前,国内外使用过的遥感反演模型精度评价指标有十余种,使用混乱,给后人的研究工作造成了不便。并且从表 2 的模型精度对比结果来看,一些研究只使用 1~2 个指标评价反演精度,并不能全面、准确地衡量模型的真实误差、可信度和精密程度。总结前人的研究发现,平均绝对误差 (Mean absolute error, MAE)、平均相对误差 (Mean relative error, MRE) 和均方根误差 (Root mean square error, $RMSE$) 使用比较广泛且效果较好,可以作为评价反演精度的综合指标。

式(1)为平均绝对误差计算式, n 为样本数, e_i 为第 i 组实测数据与模型预测数据的绝对误差。由于误差被绝对值化, MAE 能更好地描述模型拟合结果与实测数据的误差大小,百分比形式, MAE 越接近 0,模型拟合精度越高。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (1)$$

式(2)为平均相对误差计算式, n 为样本数, O_i 为第 i 个实测数据, S_i 为第 i 个模型拟合数据。 MRE 描述实测数据与模型拟合结果和实测数据值本身的偏差,能够反映模型的可信程度,百分比形式, MRE 越小,模型拟合精度越高。

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - S_i|}{O_i} \quad (2)$$

式(3)为均方根误差计算式, n 为样本数, O_i 为第 i 个实测数据, S_i 为第 i 个模型拟合数据。均方根误差的计算过程与标准差类似,但标准差描述的是一组数据自身的离散程度, $RMSE$ 对模型中的极端误差敏感,能够很好地反映模型的精密程度,单位与原数据一致, $RMSE$ 越小,模型拟合精度越高。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (3)$$

文中涉及的反演模型在河口、近岸和远岸开阔海域 SSC 反演结果的 MRE 范围分别约为 16.7%~30.0%、18.0%~30.0% 和 10.1%~30.0%,个别可高达 30.0% 以上。 $RMSE$ 的范围分别为 0.054 1~0.277 mg/L、0.087~5.0 mg/L、0.188~0.635 mg/L,近岸海域个别模型 $RMSE$ 高达 10 mg/L 以上。 MAE 的使用较少且集中在近岸海域的研究中,范围约为 3.61~17.0 mg/L。 MAE 、 MRE 、 $RMSE$ 分别表示了模型的真实误差、可信度和精密程度,同一个模型的上述指标指示的反演精度可能差异较大,因此如何权衡上述精度评价指标以综合地衡量和比较模型的反演精度还需要深入研究。

4.2.3 模型误差敏感性分析

评价反演模型还需要考虑其稳定性。基于较多实测数据建立的模型精度也许不高但是稳定性好,因此以上拟合优度和精度评价指标并不能评价反演模型的稳定性。唐军武等^[28]采用了误差敏感性分析方法检验模型的稳定性,即人为向模型输入的反射率值中随机添加均值为 0、标准差为 5% 的正态分布随机误差,模拟 50 次,观察反演结果与原结果相比是否会有较大的波动,如果反演结果波动较小 (SSC 误差增值小于 10%^[25,28]),说明模型具有良好的稳定性。用误差敏感性分析的方法可以解决因实测数据少带来的模型稳定性不佳的问题。

5 结论与展望

5.1 结论

本文通过对近几十年来东中国海遥感反演海洋

表层悬浮体浓度的研究进行比较、总结和分析,得出结果如下:

(1) 在东中国海海域,海色卫星传感器数据适合进行大时空尺度的海洋表层悬浮体研究,GOCI 遥感数据更适合进行小区域、高时效性的研究,对于更精细的研究宜采用高空间分辨率的陆地卫星传感器。

(2) 高 SSC 海域经验模型常使用水体反射率第二反射峰、第一反射峰前反射率递增波段作正比并根据具体的水体光谱特性选择反比波段组合参与反演;远岸等低 SSC 海域经验模型常使用水体反射率第一峰波段作正比、峰前波段作反比参与反演。

(3) 经验模型中的对数式具有较好的反演精度和适应性,神经网络算法、具有明确物理意义的半分析模型等其他建模方法应用较少。

(4) 东中国海海洋表层悬浮体浓度时空变化大,在进行遥感反演时可根据实测数据定性地对研究区域进行时空分段分别建立反演模型,以提高反演精度。

(5) 较多的实测数据和误差敏感性分析方法可以保证和检验模型的稳定性。反演精度的评价宜采用 MAE、MRE 和 RMSE 等最为综合评价指标。

5.2 展望

(1) 提高遥感反演模型的精度

通过对大气和水下辐射传输模型进一步精细研究,不仅可以改进现有的二类水体大气校正方法,得到更精确的离水辐射率,从而提高模型反演精度;还可以推进基于辐射传输方程的理论反演模型的研究,提升反演效果。

卫星遥感手段受天气条件制约严重,尤其是云层的遮挡。目前对遥感影像云层的处理只能是“去云”,有学者采用经验模态分解法尝试对云层遮挡的数据缺数区域直接进行 SSC 数据填补,发现当数据变化剧烈时填补精度较高^[36],但是无法填补大范围的数据缺失。不受云、雨、雾等天气限制微波遥感近年来逐渐投入使用可以缓解云层遮挡的问题,但是目前卫星微波遥感的空间分辨率普遍较低^[113-114],其波段也无法用来反演 SSC。如何获得被云层覆盖的缺失遥感数据目前是可见光和近红外遥感技术面临的一大难题。

国内外学者的研究已经证实悬浮体粒径对于水体固有光学量影响重大,且在模型中加入粒径因子可以提高反演精度。但是目前这种考虑悬浮体粒径因子的遥感反演模型并没有被大规模的应用,粒径因子

的具体使用方法以及业务化算法还需要深入研究。

一些海色要素在微小的时空范围内有时会急剧变化,因此卫星影像数据与实测数据的时空精确匹配十分重要,尤其是为了弥补去云后的数据空缺广泛采用取某一时间段平均值代替的方法,更是降低了数据匹配的精准性,从而导致遥感反演精度降低。随着新一代高时空分辨率海色卫星传感器的出现和应用(如韩国静止轨道卫星传感器 GOCI),可以有效提高遥感数据和实测数据的时空匹配精度,这一问题正在被逐步解决。

(2) 拓深海色遥感的深度

目前,利用卫星遥感手段监测悬浮体只能局限于海洋表层,这就决定了现有的遥感手段在大部分研究中只能作为传统观测方法的补充。文中讨论部分提出在浅海海域利用遥感手段同时监测海域表层浓度和粒径变化,并结合底部沉积物粒径的实测资料来研究浅水区底部沉积物受到的扰动和再悬浮,但是这一方法理论上只能用在受扰动时的浅海海洋环境中。在水深较深的正常海洋环境下如何利用遥感手段研究海域三维悬沙场也有待研究。

(3) SSC 与其他海洋要素相互影响研究

目前遥感反演海色三要素或者其他海洋要素都比较独立,对于它们之间的关系和相互影响没有足够的研究和认识,比如表层悬浮体浓度与叶绿素浓度、黄色物质的之间的关系,海色三要素与水温、海水浊度、透明度的关系等。

参考文献 (References)

- Gordon H R. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans[J]. Applied Optics, 1978, 17(10): 1631-1636.
- Gordon H R, Wang M H. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm[J]. Applied Optics, 1994, 33(3): 443-452.
- Arnone R A, Martinolich P, Gould Jr R W, et al. Coastal optical properties using SeaWiFS[C]//Ocean Optics XIV Conference. Kailua Kona, Hawaii, USA: SPIE, 1998.
- Moore G F, Aiken J, Lavender S J. The atmospheric correction of water colour and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in Case II waters: application to MERIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(9): 1713-1733.
- Siegel D A, Wang M H, Maritorena S, et al. Atmospheric correction of satellite ocean color imagery: the black pixel assumption[J]. Applied optics, 2000, 39(21): 3582-3591.
- Pan Delu, Mao Zhihua. Atmospheric correction for China's coastal water color remote sensing[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 20(3): 343-354.

- 7 韦钧,陈楚群,施平. 一种实用的二类水体 SeaWiFS 资料大气校正方法[J]. 海洋学报,2002,24(4):118-126. [Wei Jun, Chen Chuhun, Shi ping. A practical algorithm for atmospheric correction of SeaWiFS data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(4): 118-126.]
- 8 He Xianqiang, Pan Delu. Practical method of atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[C]//Proceedings of SPIE 4892, Ocean Remote Sensing and Applications. Hangzhou: International Society for Optics and Photonics, 2003, 4892: 494-505.
- 9 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: A 辑, 2006,20(5):558-564. [Liao Yingdi, Zhang Wei, Deschamps P Y. Remote sensing of suspended sediments in China east coastal waters from SeaWiFS data[J]. Journal of Hydrodynamics (Series A), 2006, 20(5): 558-564.]
- 10 Chomko R M, Gordon H R. Atmospheric correction of ocean color imagery: use of the Junge power-law aerosol size distribution with variable refractive index to handle aerosol absorption[J]. Applied Optics, 1998, 37(24): 5560-5572.
- 11 Chomko R M, Gordon H R. Atmospheric correction of ocean color imagery: Test of the spectral optimization algorithm with the Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor[J]. Applied Optics, 2001, 40(18): 2973-2984.
- 12 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. [Ding Jing, Tang Junwu, Song Qingjun. Atmospheric correction for Chinese coastal turbid waters using iteration and optimization method[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(5): 732-741.]
- 13 何贤强,潘德炉,白雁,等. 基于辐射传输数值模型 PCOART 的大气漫射透过率精确计算[J]. 红外与毫米波学报,2008,27(4):303-307. [He Xianqiang, Pan Delu, Bai Yan, et al. Exact calculation of atmospheric diffuse transmittance based on radiative transfer numerical model PCOART[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2008, 27(4): 303-307.]
- 14 潘德炉,白雁. 我国海洋水色遥感应用工程技术的新进展[J]. 中国工程科学,2008,10(9):14-24,26. [Pan Delu, Bai Yan. Advances on the application of ocean color remote sensing engineering in China[J]. Engineering Sciences, 2008, 10(9): 14-24, 26.]
- 15 Schiller H, Doerffer R. Neural network for emulation of an inverse model operational derivation of Case II water properties from MERIS data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(9): 1735-1746.
- 16 Schroeder T, Behnert I, Schaale M, et al. Atmospheric correction algorithm for MERIS above case-2 waters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(7): 1469-1486.
- 17 唐军武,马超飞,牛生丽,等. CBERS-02 卫星 CCD 相机资料定量反演水体成分初探[J]. 中国科学 E 辑:信息科学,2005,35(增刊 I):156-170. [Tang Junwu, Ma Chaofei, Niu Shengli, et al. The primary results of quantitative ocean color retrieval in China coastal area with CBERS CCD data[J]. Science in China Series E Engineering & Materials Science, 2005, 35(Suppl.I): 156-170.]
- 18 Austin R W. The remote sensing of spectral radiance from below the ocean surface[M]//Jerlov N G, Nielsen E S. Optical Aspects of Oceanography. London: Academic Press, 1974: 317-344.
- 19 Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean[J]. Applied Optics, 1975, 14(2): 417-427.
- 20 Gordon H R, Morel A Y. Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A review[M]. Berlin: Springer, 1983.
- 21 李京. 水域悬浮固体含量的遥感定量研究[J]. 环境科学学报, 1986,6(2):166-173. [Li Jing. A study on determination of concentration of suspended solids in water by remote sensing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1986, 6(2): 166-173.]
- 22 黎夏. 悬浮泥沙遥感定量的统一模式及其在珠江口中的应用[J]. 环境遥感,1992,7(2):106-114. [Li Xia. An united equation for remote sensing quantitative analysis of suspended sediment and its application at Zhujiang river estuary[J]. Remote Sensing of Environment China, 1992, 7(2): 106-114.]
- 23 Shen Fang, Verhoef W, Zhou Yunxuan, et al. Satellite estimates of wide-range suspended sediment concentrations in Changjiang (Yangtze) Estuary using MERIS data[J]. Estuaries and Coasts, 2010, 33(6): 1420-1429.
- 24 Tassan S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters[J]. Applied Optics, 1994, 33(12): 2369-2378.
- 25 崔廷伟,张杰,马毅,等. 渤海悬浮物分布的遥感研究[J]. 海洋学报,2009,31(5):10-18. [Cui Tingwei, Zhang Jie, Ma Yi, et al. The study on the distribution of suspended particulate matter in the Bohai Sea by remote sensing[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(5): 10-18.]
- 26 Pan Delu, Mao Tianming, Li Shujing, et al. Study on detection of coastal water environment of China by ocean color remote sensing[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 20(1): 51-63.
- 27 李四海,唐军武,恽才兴. 河口悬浮泥沙浓度 SeaWiFS 遥感定量模式研究[J]. 海洋学报,2002,24(2):51-58. [Li Sihai, Tang Junwu, Yun Caixing. A study on the quantitative remote sensing model for the sediment concentration in estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(2): 51-58.]
- 28 唐军武,王晓梅,宋庆君,等. 黄、东海二类水体水色要素的统计反演模式[J]. 海洋科学进展,2004,22(S):1-7. [Tang Junwu, Wang Xiaomei, Song Qingjun, et al. Statistical inversion models for case II water color elements in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(S): 1-7.]
- 29 龚芳,朱乾坤,黄海清,等. 中国近海悬浮泥沙浓度卫星遥感反演模式研究[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Remote Sensing (ICRS 2010) Volume 3. Hangzhou: Asia Pacific Environmental Science Research Center, 2010. [Gong Fang, Zhu Qiankun, Huang Haiqing, et al. Study on the model of suspended material in Chinese coastal by satellite remote sensing[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Remote Sensing (ICR-S 2010) Volume 3. Hangzhou: Asia Pacific Environmental Science Research

- Center, 2010.]
- 30 Mertes L A K, Smith M O, Adams J B. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 43(3): 281-301.
- 31 陈本清,杨燕明. 基于光谱混合模型的河口表层悬浮泥沙浓度卫星遥感反演研究[J]. *遥感技术与应用*, 2009, 24(4): 469-477. [Chen Benqing, Yang Yanming. Estimating surface suspended sediment concentration in the estuary based on the spectral mixture model with remotely sensed data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(4): 469-477.]
- 32 刘大召,陈楚群,刘汾汾,等. 利用混合光谱分解估测珠江口悬浮泥沙浓度[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(5): 43-48. [Liu Dazhao, Chen Chuqun, Liu Fenfen, et al. Estimation of suspended sediment concentration at Zhujiang River Mouth based on decomposition of mixing spectrum[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(5): 43-48.]
- 33 Doerffer R, Schiller H. Determination of Case 2 water constituents using radiative transfer simulation and its inversion by neural networks [C]// Ackleson S G, Campbell J. *Proceedings of Ocean Optics XIV*. Washington, DC, USA: US Office of Naval Research, 1998.
- 34 王芳,李国胜. 海洋悬浮泥沙二元特征参数 MODIS 遥感反演模型研究[J]. *地理研究*, 2007, 26(6): 1186-1196. [Wang Fang, Li Guosheng. Two parameters retrieval models of suspended sediment concentration of Bohai Sea based on MODIS data[J]. *Geographical Research*, 2007, 26(6): 1186-1196.]
- 35 仲京臣,汪小勇,陈清莲. 基于神经网络的黄东海春季二类水体三要素浓度反演方法[J]. *海洋技术*, 2006, 24(4): 118-122. [Zhong Jingchen, Wang Xiaoyong, Chen Qinglian. A retrieval method on the chlorophyll, total suspended matter, and gelbstoff concentrations of case II waters in Yellow Sea and East China Sea based on artificial neural network[J]. *Ocean Technology*, 2006, 24(4): 118-122.]
- 36 于小淋. 基于 GOCI 的渤海海悬浮物浓度遥感反演及缺失数据填补研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013. [Yu Xiaolin. Retrieval of suspended matter concentration and reconstruction of missing data based on GOCI in Bohai and Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.]
- 37 王艳姣,张培群,董文杰,等. 悬浮泥沙反射光谱特性和泥沙量估算试验研究[J]. *泥沙研究*, 2007(5): 36-41. [Wang Yanjiao, Zhang Peiqun, Dong Wenjie, et al. Experimental study on reflected spectrum and estimating amount of suspended sediment[J]. *Journal of Sediment Research*, 2007(5): 36-41.]
- 38 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. [Yang Yanming, Liu Zhenwen, Chen Benqing, et al. Retrieval of oceanic color constituents from case II water reflectance by partial least squares regression[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(2): 123-130.]
- 39 Beardsley G F, Zaneveld J R V. Theoretical dependence of the near asymptotic apparent optical properties on the inherent optical properties of sea water[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1969, 59(4): 373-377.
- 40 Gordon H R, Clark D K, Mueller J L, et al. Phytoplankton pigments from the Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner: comparisons with surface measurements[J]. *Science*, 1980, 210(4465): 63-66.
- 41 汪小勇,李铜基,周虹丽,等. 中国近海海洋光学特性及其分布[J]. *中国海洋大学学报*, 2014, 44(1): 104-111. [Wang Xiaoyong, Li Tongji, Zhou Hongli, et al. Discussion on ocean optics properties of Chinese offshore and its distribution characteristics[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(1): 104-111.]
- 42 Lee Z P. *Visible-infrared remote-sensing model and applications for Ocean Waters*[D]. Florida: University of South Florida, 1994.
- 43 李敏敏. 我国典型近岸水体悬浮颗粒物后向散射特性研究[D]. 天津:国家海洋技术中心, 2013. [Li Minmin, Research on back-scattering characteristics of suspended particle matter in typical coastal waters-a case of Yellow Sea and East China Sea[D]. Tianjin: National Ocean Technology Center, 2013.]
- 44 刘志国,周云轩,沈芳. 河口水体泥沙浓度的水面光谱统计模式分析[J]. *水利学报*, 2007, 38(7): 799-805. [Liu Zhiguo, Zhou Yunxuan, Shen Fang. Statistic analysis of suspended sediment concentration in offshore waters based on field measurement of reflectance hyper-spectral[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(7): 799-805.]
- 45 黄海军,李成治,郭建军. 黄河口海域悬沙光谱特征的研究[J]. *海洋科学*, 1994(5): 40-44. [Huang Haijun, Li Chengzhi, Guo Jianjun. A study on the spectral feature of suspended matter in the Huanghe River delta area[J]. *Marine Sciences*, 1994(5): 40-44.]
- 46 陈涛,李武,吴曙初. 悬浮泥沙浓度与光谱反射率峰值波长红移的相关关系[J]. *海洋学报*, 1994, 16(1): 38-43. [Chen Tao, Li Wu, Wu Shuchu. Study on correlation between suspended sediment concentration and red-shift of peak reflectance[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 16(1): 38-43.]
- 47 博克付,荒川久幸,曾宪模. 悬沙水体不同波段反射比的分布特征及悬沙量估算实验研究[J]. *海洋学报*, 1999, 21(3): 134-140. [Fu Kecun, Arakawa H, Zeng Xianmo. Distribution feature of reflectance of water body containing suspended particles in different wave lengths and experimental study on estimating amount of suspended particles[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(3): 134-140.]
- 48 王繁,周斌,徐建明,等. 杭州湾混浊水体表面光谱测量及光谱特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(3): 730-734. [Wang Fan, Zhou Bin, Xu Jianming, et al. Surface spectral measurement and characteristics analysis of turbid water in Hangzhou Bay[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(3): 730-734.]
- 49 Dmitry P, Graßl H. *Colour of Inland and Coastal Waters: A Methodology for Its Interpretation*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 54-55.
- 50 于炜. 渤海表层悬浮物分布变异规律的研究[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2011. [Yu Wei. Study on distribution characteristics of surface suspended sediment concentration in Bohai Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, 2011.]
- 51 庞重光,李坤,于炜. 渤海表层悬沙的时空分布特征及其动力成因[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(4): 450-458. [Pang Chongguang, Li

- Kun, Yu Wei. Distribution characteristics, seasonal variability and dynamical mechanism of suspended sediment in the surface layer of the Bohai Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(4): 450-458.]
- 52 肖合辉. 渤海海域悬浮体分布:季节性变化及扩散通量[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014. [Xiao Hehui. Distribution of suspended sediment in Bohai Sea and Yellow Sea; Seasonal variability and diffusion fluxes[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.]
- 53 王勇智, 乔璐璐, 鲍献文, 等. 夏季北黄海水体浊度分布特征的初步研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2012, 42(6): 1-8. [Wang Yongzhi, Qiao Lulu, Bao Xianwen, et al. A preliminary study on water turbidity distribution characteristics in the Northern Yellow Sea in Summer[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(6): 1-8.]
- 54 刘芳. 南黄海及东海北部海域悬沙的遥感研究[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2005. [Liu Fang. Study of the suspended matter in the the Yellow Sea and East China Sea with remote image[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, 2005.]
- 55 Li Zhen, Bao Xianwen, Wang Yongzhi, et al. Seasonal distribution and relationship of water mass and suspended load in North Yellow Sea [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(4): 907-918.
- 56 韦钦胜, 刘璐, 臧家业, 等. 南黄海悬浮体浓度的平面分布特征及其运输规律[J]. *海洋学报*, 2012, 34(2): 73-83. [Wei Qinsheng, Liu Lu, Zang Jiaye, et al. The distribution and transport of suspended matter in the southern Huanghai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(2): 73-83.]
- 57 余佳. 黄海悬浮体分布及季节性变化[D]. 青岛:中国海洋大学, 2012. [Yu Jia. Seasonal variation and distribution of suspended sediment in the Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.]
- 58 郭志刚, 杨作升, 张东奇, 等. 冬、夏季东海北部悬浮体分布及海流对悬浮体运输的阻隔作用[J]. *海洋学报*, 2002, 24(5): 71-80. [Guo Zhigang, Yang Zuosheng, Zhang Dongqi, et al. Seasonal distribution of suspended matter in the northern East China Sea and barrier effect of current circulation on its transport [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(5): 71-80.]
- 59 庞重光, 王凡. 东海悬浮体的分布特征及其演变[J]. *海洋科学集刊*, 2004(46): 22-31. [Pang Chongguang, Wang Fan. The distributing features and temporal variability of suspended matter concentration in the East China Sea[J]. *Studia Marina Sinica*, 2004(46): 22-31.]
- 60 王勇智. 渤、黄、东海悬浮物浓度及运输季节变化的数值模拟[D]. 青岛:中国海洋大学, 2006. [Wang Yongzhi. A numerical simulation of the seasonal variation of transport of suspended particles in East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.]
- 61 Bian Changwei, Jiang Wensheng, Greatbatch R J, et al. The suspended sediment concentration distribution in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(3): 345-354.
- 62 王文娟. 东中国海表层悬浮体分布的遥感反演及运输机制研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2008. [Wang Wenjuan. Study on the suspended matter's distribution from remote sensing retrieval and its movement mechanisms in the surface layer of the East China Seas[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.]
- 63 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. [Ma Chaofei, Jiang Xingwei, Tang Junwu, et al. Inverse algorithms of ocean constituents for HY-1/CCD broadband data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(4): 38-44.]
- 64 刘杰, 程海峰, 徐志扬, 等. 应用 MODIS 遥感影像反演长江口表层泥沙场[J]. *水运工程*, 2009(10): 58-60, 64. [Liu Jie, Cheng Haifeng, Xu Zhiyang, et al. Using MODIS imagery to map concentration of suspended sediment in Yangtze Estuary[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009(10): 58-60, 64.]
- 65 尤玉明. 卫星数据表达的悬沙回归模式及其应用[J]. *水利水运工程学报*, 1985(4): 71-78. [You Yuming. The regression model of satellite CCT data and its application to remote sensing analysis of suspended sediment in water[J]. *Hydro Science and Engineering*, 1985(4): 71-78.]
- 66 陈磊, 杨立森, 郝艳玲, 等. 黄河口海域水体光学特征与悬浮物浓度反演模型研究[J]. *内蒙古师范大学学报:自然科学汉文版*, 2012, 41(3): 258-261, 268. [Chen Lei, Yang Lisen, Hao Yanling, et al. Optical characteristics of Yellow River Estuary waters and suspended matters concentration retrieval model [J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University: Natural Science Edition*, 2012, 41(3): 258-261, 268.]
- 67 Zhang Minwei, Dong Qing, Cui Tingwei, et al. Suspended sediment monitoring and assessment for Yellow River Estuary from Landsat TM and ETM+ imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 146: 136-147.
- 68 刘杰, 程海峰, 赵德招. 长江口悬浮泥沙遥感反演模型研究[C]//中国水利学会 2013 学术年会论文集——S5 河口治理与保护. 广州:中国水利学会, 2013. [Liu Jie, Cheng Haifeng, Zhao Dezhao. Study on remote sensing retrieval model of suspended sediment concentration in Yangtze Estuary [C]//Chinese Hydraulic Engineering Society: 2013 academic essays. Guangzhou: Chinese Hydraulic Engineering Society, 2013.]
- 69 Feng Lian, Hu Chuanmin, Chen Xiaoling, et al. Influence of the Three Gorges Dam on total suspended matters in the Yangtze Estuary and its adjacent coastal waters; Observations from MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 779-788.
- 70 陈勇, 韩震, 杨丽君, 等. 长江口水体表层悬浮泥沙时空分布对环境演变的响应[J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 145-152. [Chen Yong, Han Zhen, Yang Lijun, et al. The spatial and temporal distribution of suspended sediment concentration and its response to environmental change in the Changjiang Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(1): 145-152.]
- 71 彭翔翼, 沈芳. 多种卫星传感器反演长江口悬浮泥沙浓度的对比分析[J]. *红外*, 2014, 35(4): 31-37. [Peng Xiangyi, Shen Fang. Comparative analysis of suspended particulate matter concentration in

- Yangtze Estuary derived by several satellite sensors [J]. *Infrared*, 2014, 35(4): 31-37.]
- 72 潘雪峰. 基于悬浮泥沙的辐射沙洲水下地形遥感反演研究[D]. 南京:南京师范大学,2007. [Pan Xuefeng. Study on retrieval model of underwater terrain of sand-bank based on suspended sediment[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2007.]
- 73 潘进,丁贤荣,康彦彦,等. 辐射沙脊群海域悬浮沙场遥感反演方法[J]. 地理空间信息,2013(2):82-84,87. [Pan Jin, Ding Xianrong, Kang Yanyan, et al. Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration field in radial sand ridges area[J]. *Geospatial Information*, 2013(2): 82-84, 87.]
- 74 雷佩平. 曹妃甸近岸海域悬浮泥沙遥感反演半分析模型的建立与应用[D]. 西安:长安大学,2012. [Lei Peiping. The establishment and application of semi-analysis model on suspended sediment remote sensing inversion in Caofeidian offshore Water[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.]
- 75 樊辉,黄海军. 南黄海辐射沙洲邻近海域表层悬浮颗粒物浓度遥感反演[J]. 地理科学,2011,31(2):159-165. [Fan Hui, Huang Haijun. Remote sensing retrieval of suspended particulate matter concentrations of surface waters near radial sand ridges area in the South Yellow Sea[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(2): 159-165.]
- 76 宋召军. 南黄海辐射沙洲海区悬沙及沙洲演变的遥感研究[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2006. [Song Zhaojun. Study on suspended sediment distribution and evolution of radial sand ridges in the South Yellow Sea using remote sensing images[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2006.]
- 77 Bi Naishuang, Yang Zuosheng, Wang Houjie, et al. Seasonal variation of suspended-sediment transport through the southern Bohai Strait [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 239-247.
- 78 刘王兵. 基于HJ CCD影像的杭州湾悬浮泥沙浓度及粒径分布遥感反演研究[D]. 杭州:浙江大学,2013. [Liu Wangbing. Retrieval of suspended sediment concentration and particle size distribution in Hangzhou Bay based on HJ CCD images[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.]
- 79 王飞,王珊珊,王新,等. 杭州湾悬浮泥沙遥感反演与变化动力分析[J]. 华中师范大学学报:自然科学版,2014,48(1):112-116, 135. [Wang Fei, Wang Shanshan, Wang Xin, et al. Remote sensing retrieval and dynamic driving force analysis of suspended sediment in Hangzhou bay[J]. *Journal of Huazhong Normal University: Natural Sciences*, 2014, 48(1): 112-116, 135.]
- 80 Lu Jianzhong, Chen Xiaoling, Tian Liqiao, et al. Numerical simulation-aided MODIS capture of sediment transport for the Bohai Sea in China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(11/12): 4225-4238.
- 81 刘猛,沈芳,葛建忠,等. 静止轨道卫星观测杭州湾悬浮泥沙浓度的动态变化及动力分析[J]. 泥沙研究,2013(1):7-13. [Liu Meng, Shen Fang, Ge Jianzhong, et al. Diurnal variation of suspended sediment concentration in Hangzhou Bay from geostationary satellite observation and its hydrodynamic analysis[J]. *Journal of Sediment Research*, 2013(1): 7-13.]
- 82 陈燕,孔金玲,孙晓明,等. 基于半分析模型的渤海湾近岸海域悬浮泥沙浓度遥感反演[J]. 地理与地理信息科学,2014,30(3):33-36,55. [Chen Yan, Kong Jinling, Sun Xiaoming, et al. Retrieval of sea surface suspended sediment concentration in Bohai Gulf offshore area based on semi-analysis model[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2014, 30(3): 33-36, 55.]
- 83 Wang Lin, Zhao Dongzhi, Yang Jianhong, et al. Retrieval of total suspended matter from MODIS 250 m imagery in the Bohai Sea of China[J]. *Journal of Oceanography*, 2012, 68(5): 719-725.
- 84 Zhang Minwei, Tang Junwu, Qing Dong, et al. Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 392-403.
- 85 Hu Chuanmin, Muller-Karger F E, Andrefouet S, et al. Atmospheric correction and cross-calibration of LANDSAT-7/ETM+ imagery over aquatic environments: a multiplatform approach using SeaWiFS/ MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78(1/2): 99-107.
- 86 Lee Z P, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755-5772.
- 87 Haltrin V I, Kattawar G W. Self-consistent solutions to the equation of transfer with elastic and inelastic scattering in oceanic optics: I. Model [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(27): 5356-5367.
- 88 刘汾汾,陈楚群,唐世林,等. 基于现场光谱数据的珠江口 MERIS 悬浮泥沙分段算法[J]. 热带海洋学报,2009,28(1):9-14. [Liu Fenfen, Chen Chuqun, Tang Shilin, et al. A piecewise algorithm for retrieval of suspended sediment concentration based on in situ spectral data by MERIS in Zhujiang River Estuary[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(1): 9-14.]
- 89 曹通,郝嘉凌,高晨,等. 基于TM影像的长江口悬沙浓度遥感反演定量模式研究[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2013,35(4):40-43,52. [Cao Tong, Hao Jialing, Gao Chen, et al. Research on suspended sediment concentration in Yangtze River Estuary with TM image[J]. *Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences*, 2013, 35(4): 40-43, 52.]
- 90 孙效功,方明,黄伟. 黄、东海陆架区悬浮体运输的时空变化规律[J]. 海洋与湖沼,2000,31(6):581-587. [Sun Xiaogong, Fang Ming, Huang Wei. Spatial and temporal variations in suspended particulate matter transport on the Yellow and East China Sea shelf[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 581-587.]
- 91 毕世普,胡刚,何拥军,等. 近20年来长江口表层悬沙分布的遥感监测[J]. 海洋地质与第四纪地质,2011,31(5):17-24. [Bi Shipu, Hu Gang, He Yongjun, et al. Remote sensing monitoring of surface suspended sediments at Yangtze Estuary in the past two decades[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(5): 17-24.]
- 92 陈斌,刘健,白大鹏. 长江口外海域含沙量的变化特征[J]. 海洋地质前沿,2011,27(2):39-44. [Chen Bin, Liu Jian, Bai Dapeng. Variation of suspended sediment concentration in offshore Yangtze Estuary[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(2): 39-44.]
- 93 Sheremet A, Mehta A J, Liu B, et al. Wave-sediment interaction on a

- muddy inner shelf during Hurricane Claudette[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 63(1/2): 225-233.
- 94 Chen Shuisen, Huang Wenrui, Wang Hongqing, et al. Remote sensing assessment of sediment re-suspension during Hurricane Frances in Apalachicola Bay, USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2670-2681.
- 95 Bian Changwei, Jiang Wensheng, Song Dehai. Terrigenous transportation to the Okinawa Trough and the influence of typhoons on suspended sediment concentration[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(10/11): 1189-1199.
- 96 李婧,高抒,汪亚平. 长江口水域悬沙含量时空变化卫星遥感定量研究方法探讨[J]. *海洋学报*, 2009, 31(4): 167-175. [Li Jing, Gao Shu, Wang Yaping. Studying the temporal and spatial changes of suspended sediment content in the Changjiang Estuary using a remote sensing quantitative method[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(4): 167-175.]
- 97 Yuan Dongliang, Zhu Jianrong, Li Chunyan, et al. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 70(1/2): 134-149.
- 98 庞重光,杨扬,刘志亮. 黄东海悬浮泥沙输运结构及其形成机制[J]. *泥沙研究*, 2010(3): 24-30. [Pang Chongguang, Yang Yang, Liu Zhiliang. Transportation pattern of suspended sediment and its forming mechanism in the Yellow and East China Sea[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(3): 24-30.]
- 99 杨扬,庞重光. 黄东海表层悬沙浓度次级锋面及其季节变化初探[J]. *泥沙研究*, 2012(2): 41-46. [Yang Yang, Pang Chongguang. Suspended sediment sub-front and its seasonal variability in Yellow and East China Seas[J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(2): 41-46.]
- 100 路兵. 人类活动影响下长江河口变化的遥感研究[D]. 上海:华东师范大学, 2012. [Lu Bing. Research on the Yangtze Estuary changes under the impacts of human activities based on remote sensing[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.]
- 101 Pollack J B, Cuzzi J N. Scattering by non-spherical particles of size comparable to a wavelength: a new semi-empirical theory [M]// Schuerman D W. *Light Scattering by Irregularly Shaped Particles*. US: Springer, 1980: 113-125.
- 102 Novo E M M, Hansom J D, CURRAN P J. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10(7): 1283-1289.
- 103 Sydor M, Arnone R A. Effect of suspended particulate and dissolved organic matter on remote sensing of coastal and riverine waters[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(27): 6905-6912.
- 104 Binding C E, Bowers D G, Mitchelson-Jacob E G. Estimating suspended sediment concentrations from ocean colour measurements in moderately turbid waters: the impact of variable particle scattering properties[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(3): 373-383.
- 105 Ramakrishnan D, Bharti R, Das M. A technique for estimation of suspended sediment concentration in very high turbid coastal waters: An investigation from Gulf of Cambay, India[J]. *Marine Geology*, 2013, 346: 256-261.
- 106 沈芳,周云轩,李九发,等. 河口悬沙粒径对遥感反射率影响的理论分析与实验观测[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(3): 168-172. [Shen Fang, Zhou Yunxuan, Li Jiufa, et al. Theoretical analysis and experimental observation for the effect of suspended sediment particle size on remote-sensing reflectance [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(3): 168-172.]
- 107 Sokoletsky L G, Shen Fang. Optical closure for remote-sensing reflectance based on accurate radiative transfer approximations: the case of the Changjiang (Yangtze) River Estuary and its adjacent coastal area, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(11/12): 4193-4224.
- 108 王艳姣. 基于悬浮泥沙影响的水深遥感方法研究[D]. 南京:南京师范大学, 2006. [Wang Yanjiao. Application of remote sensing technology to map water depth by weakening the influence of suspended sediment[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2006.]
- 109 Gordon H R, McCluney W R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(2): 413-416.
- 110 青松. 渤海盐度和悬浮颗粒粒径的遥感反演及应用研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011. [Qing Song. Remote sensing research and application of salinity and suspended particle size of the Bohai Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.]
- 111 Ji Zhengang. *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries* [M]. Hoboken, N. J.: John Wiley & Sons, 2008: 449-454.
- 112 Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- 113 刘一良. 微波遥感的发展与应用[J]. *沈阳工程学院学报:自然科学版*, 2008, 4(2): 171-173. [Liu Yiliang. The development and application of microwave sensing[J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering: Natural Science*, 2008, 4(2): 171-173.]
- 114 姜景山,吴一戎,刘和光,等. 中国微波遥感发展的新阶段新任务[J]. *中国工程科学*, 2008, 10(6): 10-15, 22. [Jiang Jingshan, Wu Yirong, Liu Huguang, et al. New stage and new tasks, development of microwave remote sensing in China [J]. *Engineering Sciences*, 2008, 10(6): 10-15, 22.]

Progress on Retrieval Models of Suspended Sediment Concentration from Satellite Images in the Eastern China Seas

WANG Zhen¹ QIAO LuLu¹ WANG YunFei²

(1. Ocean University of China, College of Marine Geosciences, Qingdao, Shandong 266100, China;

2. Qingdao Institute of Scientific and Technological Information, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: Remote sensing has been widely used to research suspended sediment concentration on sea surface. The hydrology and inherent optical properties of sea waters are very complex in the eastern China seas, which makes building retrieval models from satellite images more difficult. By comparing and summarizing former researches, some conclusions and suggestions about establishing inversion models have been offered. It can improve accuracy to build models separately in different time and regions identified by in-situ data. Areas containing different SSC have their own optimal bands combination to be used in models. In the coastal areas with high SSC, using the combination of the second peak of water reflectance and the increasing part before the first peak as proportional input factors and choosing inverse proportional input factor based on specific spectrum feature of water can offer the best bands' choice. In offshore waters with low SSC, optimal bands' combination are the first peak of reflectance of water and the increasing part before it. And taking sediment grain size into models can also increase accuracy and may break the depth limitation of remote sensing in shallow sea. It's better to use determination coefficient, mean relative error, mean absolute error and root mean square error as the assessment criterion of models' results and its stability can be certified by error sensitivity analysis. Though semi-analytical and neural network models have more explicit physical foundations, empirical models have better precision and applicability. There is a promising trench using remote sensing to study instantaneous oceanic events due to the advancement of high spatial-and-temporal resolution satellites.

Key words: retrieval models from satellite images; suspended sediment concentration; eastern China seas