

长江口水质 MERIS 卫星数据遥感反演研究*

Water Quality Retrievals from MERIS Satellite Data in Yangtze Estuary

谢明媚,孙德勇** ,丘中锋,王胜强,路颖,吴晨颖,叶之翩,岳小媛

XIE Mingmei, SUN Deyong, QIU Zhongfeng, WANG Shengqiang, LU Ying, WU Chenying, YE Zhipian, YUE Xiaoyuan

(南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏南京 210044)

(School of Marine Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China)

摘要:【目的】获取准确的水质参数分布情况,进而对水质参数与动力作用复杂的河口水域环境进行综合评价。【方法】利用 2011 年 5 月 30 组长江口水域的遥感反射率数据,在尝试多种波段组合以及不同函数形式后,针对叶绿素 a 浓度和总悬浮物浓度分别建立最优经验反演模型。【结果】对总悬浮物浓度,波段差值(634~644 nm)的二次函数形式最优,决定系数 R^2 为 0.837,均方根误差(RMSE)为 $0.226 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,利用独立的验证样本得到平均绝对百分比误差(MAPE)为 58.2%。对叶绿素 a 浓度,波段比值(650 nm/644 nm)的二次函数形式最优, R^2 为 0.552, RMSE 为 $0.486 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,利用独立的验证样本得到 MAPE 为 66.2%。将模型运用于 2011 年 5 月 MERIS 卫星数据,反演出长江口水域叶绿素 a 浓度与总悬浮物浓度空间分布图,叶绿素 a 浓度呈现出从河口向海外海逐渐减少的趋势,最大值出现在舟山群岛附近。总悬浮物浓度呈阶梯状向海外海减少。【结论】通过评价参数可看出,总悬浮物浓度反演模型对总悬浮物浓度反演效果较为准确,而叶绿素 a 浓度反演模型显示对叶绿素 a 的反演浓度较低。

关键词: 叶绿素 a 浓度 总悬浮物浓度 MERIS 卫星遥感算法

中图分类号: P731.14 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2016)06-0520-08

Abstract:【Objective】In order to grasp the distribution map of water quality parameters more accurately, we evaluate the estuary which has complex dynamical system.【Methods】After using 30 *in situ* remote sensing reflectance data collected in May 2011 and trying many kinds of band combinations and function forms, the optimal empirical models for chlorophyll-a concentration and total suspended matter concentration were established.【Results】For total suspended matter concentration, Quadratic function model by band difference (634~644 nm) performs best, of which coefficient of determination (R^2) is 0.837 and root mean square error (RMSE) is $0.226 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. In the model validation, the mean absolute percentage error (MAPE) by using the independent dataset shows a value of 58.2%. For chlorophyll-a concentration, quadratic function model by band ratio (650 nm/644 nm) performs best, of which coefficient of determination (R^2) is 0.552 and root mean square error (RMSE) is $0.486 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. In the model validation, the mean absolute percentage error (MAPE) by using the independent dataset shows a value of 66.2%. The MERIS satellite data in May 2011 were evaluated by the models, and the distribution map was obtained for spatial concentration of chlorophyll-a and total suspended matter of

收稿日期:2016-09-26

作者简介:谢明媚(1995-),女,本科生,主要从事海洋水色遥感方面研究。

*国家自然科学基金项目(41276186,41576172,41506200),江苏省自然科学基金项目(BK20151526, BK20150914),江苏省高校自然科学基金项目(15KJB170015),“全球变化与海气相互作用”专项(GASI03030101),江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目和南京信息工程大学大学生实践创新训练计划项目(201510300256, 201510300073, 201610300035, 201610300064)资助。

**通信作者:孙德勇(1984-),男,博士,副教授,主要从事水光学、水环境遥感等方面的研究, E-mail: sundayong1984@163.com。

the Changjiang Estuary through simulation. There was a trend that the concentration of chlorophyll-a decreased gradually from the estuary to the sea, and the maximum value appeared in the Zhoushan Islands. The concentration of total suspended matter reduced stepwisely to the sea.

【Conclusion】As is shown in the evaluation parameters, the total suspended matter concentration model has accurate effect in retrieve water quality while the chlorophyll-a concentration model has lower effect.

Key words: chlorophyll-a concentration, total suspended matter concentration, MERIS, remote sensing algorithm

0 引言

【研究意义】长江口是我国最大的河口,每年约有 4×10^8 t 泥沙及大量污染物质被径流携带入海,其中作为浮游植物营养盐的 N、P、Si 等的含量非常高^[1]。长江口特殊的水文条件使其成为一个对环境污染非常敏感的水域,同时,其生态环境和生物资源的变化与人类生活和经济发展密切相关^[2]。叶绿素是各种浮游植物体内普遍含有的光合作用色素,是海洋浮游植物生物量的一个良好指标^[3]。因此,海洋水体叶绿素浓度是海洋生物和海洋化学研究的重要水质参数之一^[4]。悬浮物同样也是重要的水质参数,它可直接影响光在水体中的传播,进而影响水体透明度、真光层深度、水色等光学性质,同时限制着浮游植物对光照的利用,最终影响水体中的生物^[5]。遥感技术在水质参数检测中已有大量的应用,其提供的数据资料具有水平范围大和瞬时近乎同步的特点,能有效地监测海洋水色要素的海域分布和动态变化^[6]。利用卫星数据反演叶绿素 a 浓度和悬浮物浓度等水色要素能够直观有效的对水域环境情况做出评估。**【前人研究进展】**国内外学者对复杂水体中的叶绿素 a 浓度和悬浮物浓度的反演已经展开过许多有价值的研究。Doerffer 等^[7]针对 MERIS 数据产品开发了 C2P (case 2 waters processor) 算法来反演二类水体水色组分,但由于长江口为高浑浊含沙水域,叶绿素 a 浓度往往被高估或无效估计^[8]。洪官林等^[2]在对长江口水体叶绿素 a 浓度进行经验模型的反演时,发现 SCI (Synthetic chlorophyll index) 模型在精度上要高于二波段比值法和三波段比值法,并得出整个长江口叶绿素 a 浓度分布呈“低-高-低”的分布特征。李素菊等^[9]在巢湖利用反射率比值(705 nm/680 nm)和 690 nm 处反射率的一阶微分与叶绿素 a 浓度之间较好的相关性,建立了较高反演精度的叶绿素 a 浓度反演模型。He 等^[10]利用 GOCI (geostationary ocean color imager) 卫星数据反演了在沿岸水域的总悬浮物浓度的日动态分布状况。**【本研究切入点】**我国长江口水域属于典型的二类水体,其光谱信号受多种水质参数的影响,因此对该区域的水质评价不能局限于

广西科学 2016 年 12 月 第 23 卷第 6 期

单一的变量。**【拟解决的关键问题】**为此,本研究在分析了实测的高光谱水体遥感反射率数据的基础上,利用长江口区域实测的叶绿素 a 浓度和总悬浮物浓度的数据,分别建立叶绿素 a 浓度和总悬浮物浓度的最佳经验模型。并将同时段的 MERIS 卫星数据应用到所建立的经验算法中,以获取大面积同步的水质参数分布情况,进而对长江口水环境进行综合评价。

1 材料与方法

1.1 研究区域与实测数据

长江全长 6 300 多千米,是我国最长的河流,其河口区自安徽大通向下到水下三角洲前缘长达 700 多千米。河口段自徐六径(122°55'12"E, 31°44'54"N)向下由崇明岛分为南、北两支水道。南支水道在吴淞口附近被长兴岛以及横沙岛分割为南港和北港;而南港又被九段沙分为南槽和北槽,从而形成三级分叉,四口入海的特征;长江口往外则为面积约 1 万 km² 的水下三角洲,其前缘最东可达 123°E^[2]。研究区域站点分布如图 1 所示。

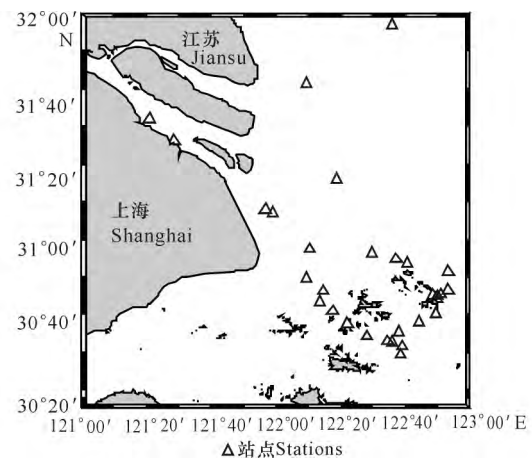


图 1 2011 年 5 月长江口实测站点分布

Fig. 1 Distribution of sample stations in Yangtze Estuary in May 2011

本研究所利用的实测数据观测时间为 2011 年 5 月中下旬,一共 30 个站点数据。测量参数包括水体高光谱遥感反射率、总悬浮物浓度和叶绿素 a 浓度。水体光谱数据采用美国分析光谱仪器公司 (Analytical Spectral Devices) 制造的 ASD Field Spec Pro 便

携式光谱辐射计测量,该仪器波段范围为 350~1 050 nm,光谱分辨率为 2 nm。选择水面平静,天空晴朗时测量。具体步骤按照唐军武等^[11]提出的关于内陆二类水体水面以上光谱测量的方法进行,并最终计算出水面遥感反射率参数。

悬浮物浓度 C_{TSM} 采用滤膜法测量。基本方法为实验前将滤膜烘干 6~8 h 称重获取空白膜质量记为 w_1 ,实验时将一定体积的水样通过 0.45 μm 的滤膜,过滤后密封带回实验室处理,将带回实验室的滤膜再次烘干,称量留在滤膜上的悬浮颗粒物的重量记为 w_2 ,运用如下公式计算出海水中悬浮颗粒物浓度:

$$C_{TSM} = \frac{w_2 - w_1 - \Delta w}{V}, \quad (1)$$

式中 C_{TSM} 为悬浮物浓度,单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; w_2 为过滤后滤膜重量,单位为 mg ; Δw 为过滤前滤膜重量,单位为 mg ; V 为空白校正滤膜正值(应为负值),单位为 mg ; V 为水样体积,单位为 L 。具体测量步骤参见 GB 17378.4-2007(文献^[12])。

本研究中叶绿素 a 浓度的测量方法采用热乙醇法^[13]。首先利用 GF/F 膜过滤 200 mL 原水,加入热乙醇水浴 2 min,再将萃取样品放到室温下避光处萃取 4~6 h。萃取结束后,用 25 mm 玻璃纤维滤膜过滤萃取液并定容至 10 mL,将 10 mL 叶绿素样品萃取液在 UV-2550 紫外分光光度计上用 90% 乙醇作为参比液进行比色,先后在 665 nm 和 750 nm 波长处测消光率 E_{665} 和 E_{750} ,然后在样品比色皿中加一滴 1 mol/L 的盐酸进行酸化,加盖摇匀,1 min 后重新在 665 nm 和 750 nm 波长处测消光率 A_{665} 和 A_{750} 。由 E_{665} 、 E_{750} 、 A_{665} 、 A_{750} 、萃取液定容的体积和过滤水样的体积求得叶绿素 a 浓度。

1.2 卫星数据

MERIS 是搭载于欧洲空间局(ESA)发射的迄今为止最大的综合性环境卫星 ENVISAT-1 上的主要传感器,是目前水色传感器中最有优势的传感器之一,专门测量海洋及近岸水体水色。MERIS 传感器在可见光与近红外(412~900 nm)设置了 15 个波段,带宽为 3.75~20.00 nm,在可见光波段平均带宽为 10 nm(文献^[14])。本研究选取 2011 年 5 月的月平均遥感反射率数据进行卫星数据反演研究。

1.3 模型精度评价

本研究利用数据处理软件(Matlab)对水质参数进行统计分析建模。在 30 组数据中随机选取 20 组数据建模,10 组数据验证,并使用平均绝对百分比误差(MAPE)、均方根误差(RMSE)、相关系数 R 、决定系数 R^2 等参数进行精度评价,公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{N}}, \quad (2)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \times 100\%, \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4)$$

式中 x 表示实测数据, y 表示反演数据, N 表示样本数据,决定系数是相关系数的平方。

2 结果与分析

2.1 水质参数与遥感反射率

图 2 为实测叶绿素 a 浓度与总悬浮物浓度取对数后得到的频数分布图,实测叶绿素 a 浓度的变化范围为 0.07~20.09 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,从取对数图中可看出对数浓度小于 1 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的站点占 53%,图 2a 表明叶绿素 a 浓度较多集中在低浓度,仅有个别站点数值较大。总悬浮物浓度的变化范围为 7.2~374.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,图 2b 表明站点以低浓度为主。

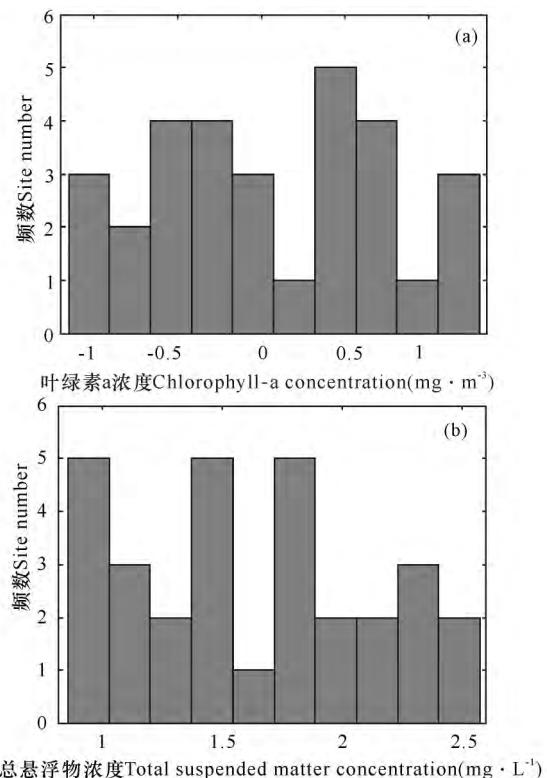


图 2 站点频数分布图

Fig. 2 Distribution of site number

图 3 为实测光谱遥感反射率随波长变化的曲线。从中看出随着波长的增加,叶绿素 a 的吸收特征变弱,反射增强。在可见光的蓝、绿波段 400~500 nm 内,水体的反射率较低,主要是由于叶绿素 a、类胡萝卜素以及有色溶解有机物在蓝光波段的强烈吸收作用引起的,悬浮泥沙的影响使得蓝光波段叶绿素 a 的

吸收峰变得不明显。在 560~580 nm 附近存在一个反射峰,该反射峰主要是由于叶绿素 a 与胡萝卜素的弱吸收和浮游植物细胞的散射作用形成的^[5],并且随着叶绿素浓度的增加,反射辐射随之增加。该反射峰与色素的组成有关,可以用来指示叶绿素浓度。而随着波长增加,在 685~715 nm 附近存在一个明显的反射峰,一般认为是由于浮游植物所含的叶绿素 a 的荧光效应造成的,并且该峰会随着叶绿素 a 浓度的增加向长波方向移动——“红移”,该荧光峰可作为含藻水体最明显的指示标志,亦可用于指示水体叶绿素 a 含量的高低^[15]。在大于 700 nm 的波段,纯水的吸收系数迅速增大,所以水体的光谱反射率降低,在 850~900 nm 波段,光谱的噪声较大。在整个波段范围内悬浮颗粒物对光都具有散射作用^[16]。

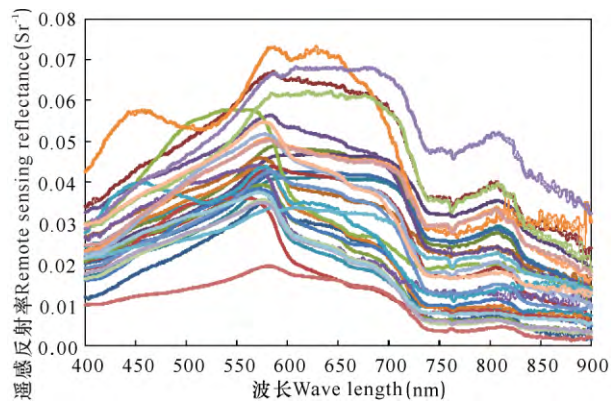


图 3 长江口水体遥感反射光谱曲线图

Fig. 3 The remote sensing reflectance spectrum in Yangtze Estuary

2.2 经验算法模型

2.2.1 总悬浮物浓度反演模型的建立

本研究选取 20 个站点的 400~900 nm 波段的

表 1 各类反演模型精度分析 R^2 和 RMSE

Table 1 Calibration accuracies R^2 and RMSE of multiple models

模型类型 Model type	模型数学形式 Mathematical form	模型方程 Model equation	R^2	RMSE ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
近红外单波段模型 Near-infrared single band	一次函数型 Linear polynomial	$\lg(y) = 28.38x + 0.808$	0.557	0.362
	二次函数型 Quadratic polynomiac	$\lg(y) = -0.402.3 + 55.35x + 0.4401$	0.585	0.361
	幂函数型 Power	$\lg(y) = 9.844x^{0.4997}$	0.576	0.354
	指数函数型 Exponential	$\lg(y) = 1.033e^{15.01x}$	0.518	0.378
差值模型 Band difference	一次函数型 Linear polynomial	$\lg(y) = -1289x + 2.385$	0.815	0.234
	二次函数型 Quadratic polynomiac	$\lg(y) = -537700x^2 - 770.5x + 2.337$	0.837	0.226
	指数函数型 Exponential	$\lg(y) = 2.362e^{-685.6x}$	0.765	0.263
比值模型 Band ratio	一次函数型 Linear polynomial	$\lg(y) = 1.193x + 0.5765$	0.769	0.261
	二次函数型 Quadratic polynomiac	$\lg(y) = -0.2604x^2 + 1.671x + 0.395$	0.772	0.267
	幂函数型 Power	$\lg(y) = 1.802x^{0.6247}$	0.772	0.260
	指数函数型 Exponential	$\lg(y) = 0.8482e^{0.7002x}$	0.750	0.272
一阶微分模型 First-order differential	一次函数型 Linear polynomial	$\lg(y) = 12890x + 2.385$	0.815	0.234
	二次函数型 Quadratic polynomiac	$\lg(y) = -53770000x^2 + 7705x + 2.337$	0.837	0.226
	指数函数型 Exponential	$\lg(y) = 2.362e^{6858x}$	0.765	0.263

遥感反射率与总悬浮物浓度进行相关性分析,结果如图 4 所示:实测遥感反射率与总悬浮物浓度的相关系数在可见光范围内随波长的增加大致呈递增趋势,并在红外光波段内达到最大,而在近红外光波段的相关系数要低于红外光波段。在 700~820 nm 波段范围内各波长遥感反射率与总悬浮物浓度相关系数较高并在 0.6 以上,最大值出现在 714 nm 波长处,相关系数达到 0.746。

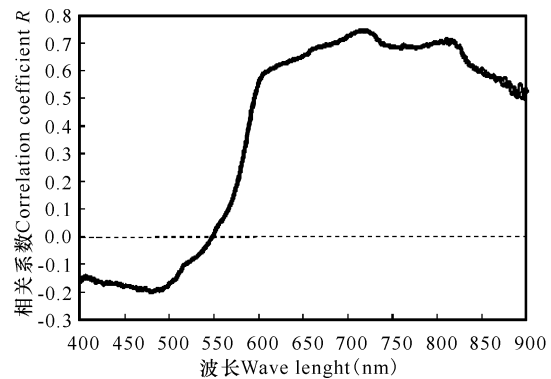


图 4 单波段相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis by single bands

将总悬浮物浓度取对数使数据符合正态分布后,根据实测光谱遥感反射率与总悬浮物浓度数据,通过优化迭代的方法,针对不同波段组合分别确定不同的敏感波长位置,波段组合有近红外单波段模型、差值模型、比值模型和一阶微分模型。之后选择相关系数较为理想的波段组合进行建模分析,针对每种波段组合模型尝试多种数学函数形式,包括一次函数型、二次函数型、指数函数型和幂函数型,模型结果如表 1 所示。

表 1 显示了各类反演模型构建结果(表 2 为表 1 中自变量的取值)。由表 1 可看出,差值模型和一阶微分模型的 R^2 、RMSE 相同,并且比单波段模型和比值模型的精度高,其中二次函数模型的决定系数达到了 0.837,拟合效果最好(图 5)。说明对长江口水域来说,差值模型和一阶微分模型的二次函数型反演总悬浮物浓度的效果最好。本研究选取表达式较为简单的差值模型的二次函数型作为总悬浮物浓度反演的最佳模型。

表 2 反演模型自变量取值

Table 2 Independent variables for multiple retrieval models

模型类型 Model type	自变量取值 Independent variable value
近红外单波段模型 Near-infrared single band model	Rrs(716)
差值模型 Difference model	Rrs(634)-Rrs(644)
比值模型 Ratio model	Rrs(714)/Rrs(475)
一阶微分模型 First-order differential model	(Rrs(634)-Rrs(644))/(634-644)

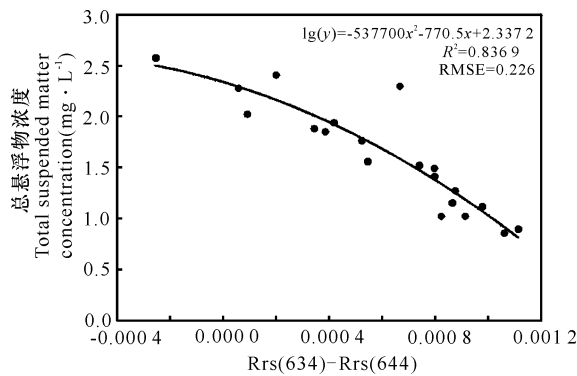


图 5 差值模型二次函数型拟合

Fig. 5 Regression fitting of the Quadratic function model by band difference

表 3 各类反演模型精度分析 R^2 和 RMSE

Table 3 Calibration accuracies R^2 and RMSE of multiple models

模型类型 Model type	模型数学形式 Mathematical form	模型方程 Model equation	R^2	RMSE ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
组合模型 Combination	一次函数型 Linear polynomial	$\lg(y) = 87.06x + 0.742$	0.548	0.474
	二次函数型 Quadratic polynomiac	$\lg(y) = -1357x^2 + 63.48x + 0.6847$	0.552	0.486
	指数函数型 Exponential	$\lg(y) = -0.01042e^{-241.1x}$	0.190	0.634
比值模型 Band ratio	一次函数型 Linear polynomial	$\lg(y) = 44.26x - 43.52$	0.548	0.474
	二次函数型 Quadratic polynomiac	$\lg(y) = -382.4x^2 + 796x - 412.9$	0.552	0.486
	幂函数型 Power	$\lg(y) = 0.7743x^{132.9}$	0.248	0.611
一阶微分模型 First-order differential	一次函数型 Linear polynomial	$\lg(y) = 2258x + 0.5649$	0.524	0.487
	二次函数型 Quadratic polynomiac	$\lg(y) = 1198000x^2 + 2860x + 0.5844$	0.530	0.500
	指数函数型 Exponential	$\lg(y) = 0.4698e^{6598x}$	0.261	0.606

2.2.2 叶绿素 a 浓度反演模型的建立

本研究选取 20 个站点的 400~800 nm 波段的遥感反射率与叶绿素 a 浓度进行相关性分析,结果如图 6 所示:在 719 nm 波长附近相关系数最高且呈正相关。说明在这波段附近的光谱反射率受浮游植物浓度变化的影响较大,但总体上单波段反射率与叶绿素 a 浓度的相关系数较小,最大值为 0.414。所以在建立叶绿素 a 浓度模型中不适宜选择单波段作为自变量。

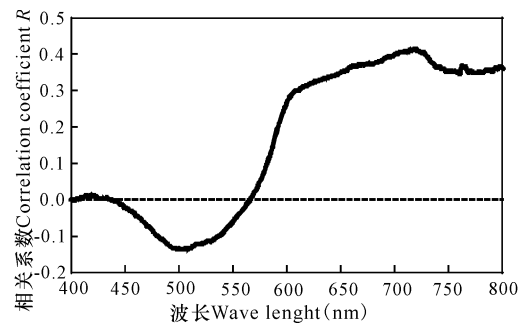


图 6 单波段相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis by single bands

将叶绿素 a 浓度取对数使数据符合正态分布后,根据实测光谱遥感反射率与叶绿素 a 浓度,通过优化迭代的方法,针对不同波段组合分别确定不同的敏感波长位置,波段组合有比值模型、一阶微分模型和组合模型。之后选择相关系数较高的波段组合进行建模分析,针对每种波段组合模型尝试多种数学函数形式,包括一次函数型、二次函数型、指数函数型和幂函数型,目的是为了遴选出最优反演模型,模型结果如表 3 所示。

表 3 显示了各类反演模型构建结果(表 4 为表 3 中自变量的取值)。从表 3 可知,所建立模型的决定系数在 0.190~0.552。其中, R^2 最大值出现在比值模型的二次函数形式中,且对应的均方根误差(RMSE)较为理想,同时从图 7 可看出在反演叶绿素 a 浓度中,尚有个别点与线性模型不拟合,但大致围绕在模型周围。因此,综合考虑选择波段比值模型的二次函数形式作为叶绿素 a 浓度反演的最优模型。

表 4 反演模型自变量取值

Table 4 Independent variables for multiple retrieval models

模型类型 Model type	自变量取值 Independent variable value
组合模型 Combination model	$(Rrs(650) - Rrs(644)) / (Rrs(650) + Rrs(644))$
比值模型 Ratio model	$Rrs(650) / Rrs(644)$
一阶微分模型 First-order differential model	$(Rrs(586) - Rrs(588)) / (586 - 588)$

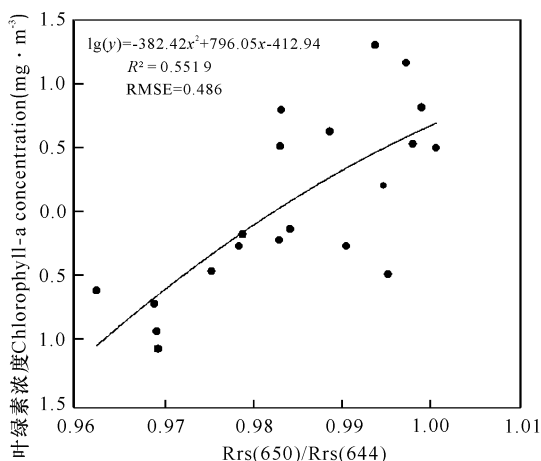


图 7 比值模型二次函数型拟合

Fig. 7 Regression fitting of the Quadratic function model by band ratio

2.3 模型验证

2.3.1 总悬浮物浓度反演模型验证

将总悬浮物浓度最优反演模型利用独立的 10 个站点验证数据进行误差验证,得出实测值与模型估算值的 MAPE 为 58.20%。且图 8 中散点大致沿着对角线分布,说明该模型具有较高的适用性。

2.3.2 叶绿素 a 浓度反演模型验证

将叶绿素 a 浓度最优反演模型利用独立的 10 个站点验证数据进行误差验证,得出实测值与模型估算值的 MAPE 为 66.20%。从图 9 可看出,除了极少浓度大的点,其余散点大致沿着对角线分布。说明所建立的叶绿素 a 浓度反演最优模型能较好的反演低浓度的叶绿素 a 浓度,而对浓度较高的部分有一定的局限性。

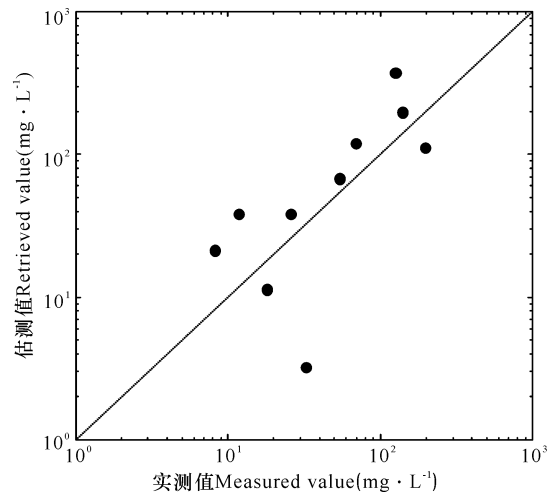


图 8 总悬浮物浓度精度检验

Fig. 8 Accuracy test of total suspended matter concentration

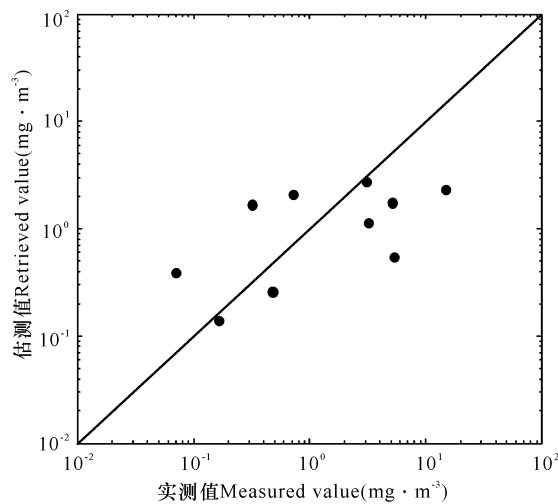


图 9 叶绿素浓度精度检验

Fig. 9 Accuracy test of chlorophyll-a concentration

3 MERIS 卫星数据应用

图 10a 为从 ocean color 网站下载得到 2011 年 5 月 L3 卫星遥感数据在 665 波段处的遥感反射率,在建立实测的 650 nm 和 644 nm 处遥感反射率的线性模型后,将 665 波段卫星数据近似代替 650 nm 处的遥感反射率代入线性模型,以求得卫星数据在 644 nm 处的遥感反射率。之后将所求得波段卫星数据经过 Matlab 软件代入本研究建立的叶绿素 a 最优模型中,从而反演出长江口区域叶绿素 a 浓度空间分布图。图 10b 为下载得到 2011 年 5 月 L3 卫星遥感数据在 620 波段处的遥感反射率,在建立实测 634 nm 和 644 nm 处遥感反射率的线性模型后,将 620 波段卫星数据近似代替 634 nm 处的遥感反射率代入线性模型以求得近似的卫星数据在 644 nm 处的遥感反射率,同样将所求得波段数据代入本研究建立的总悬浮物最优模型中,进而反演出长江口区域总悬浮物

浓度空间分布图。

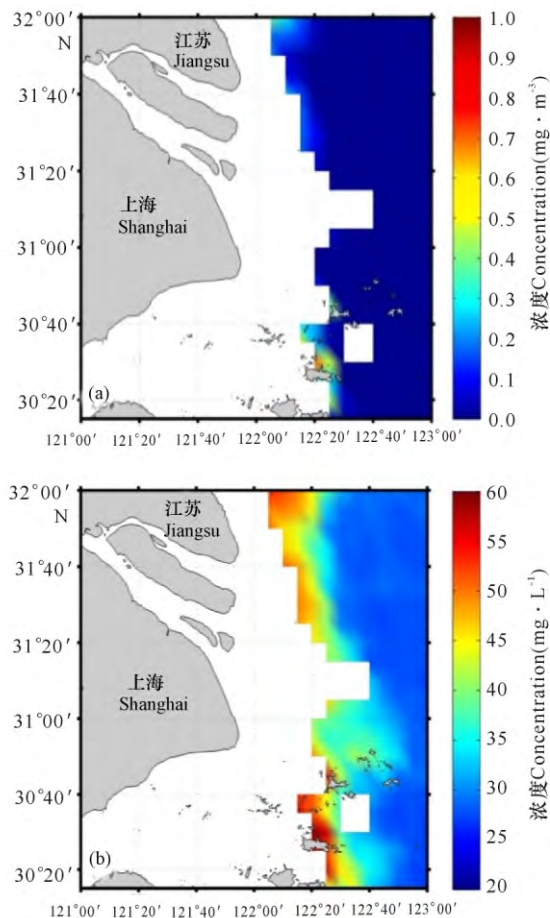


图 10 叶绿素 a 浓度(a)与总悬浮物浓度(b)卫星反演产品

Fig. 10 Distribution map of chlorophyll-a (a) and total suspended matter (b) by satellite data

图 10 中白色部分为缺测值。由于长江口水域含有高浓度的泥沙,用标准方法进行大气校正会过高的估算气溶胶在可见光部分的反射率,使得大气校正失效即在沿岸区域出现缺测值^[17]。后续工作将针对高浑浊入海口水体的卫星数据进行大气校正研究,以获取较为全面的卫星遥感数据。

从图 10a 可看出叶绿素 a 浓度在舟山群岛附近达到了最大值,之后往东逐渐减少,主要是由于舟山群岛附近海域在长江冲淡水以及台湾暖流的共同作用下,携带大量营养物质的上升流造成这部分海域叶绿素 a 浓度较高。

由图 10b 看出长江口入海泥沙主要向东南方向扩散,浑水的舌端主要位于 122°E 以东,悬浮物浓度呈阶梯状从河口向外海递减,并且在 122°30'E 往外急剧减少。长江口水域高浓度悬浮泥沙的含量主要由于长江流域径流量巨大,每年随径流入海的泥沙可达几亿吨,造成长江水域属于高浑浊水体。

4 结论

本研究基于实测的长江口水域的遥感反射率、叶绿素 a 浓度和总悬浮物浓度,在尝试多种波段组合后选择相关系数最大的波段进行函数拟合。结果表明对于叶绿素 a 来说最优反演模型是比值模型(650 nm/644 nm)的二次函数形式,对总悬浮物来说最优反演模型是差值模型(634~644 nm)的二次函数形式。在对模型进行检验时发现叶绿素 a 浓度最优模型能较好的反演低浓度的叶绿素 a 浓度,而对较大的浓度会有偏差,主要是由于所获取的实测数据大部分聚集于低浓度导致的。将建立的叶绿素 a 浓度反演模型和总悬浮物浓度反演模型应用到 MERIS 卫星数据上,得到了同时间段长江口水域的水质参数分布图,可以看出总体上叶绿素 a 反演浓度较低,而总悬浮物反演浓度较为准确。这是由于在高浓度泥沙的水体中叶绿素 a 信号较弱难以反演所致。从产品分布图可以看出长江口水域叶绿素 a 浓度最大值在舟山群岛附近,总悬浮物浓度呈阶梯状从河口向外海减少。由于在高浑浊水体中叶绿素 a 浓度难以反演,所以下一步需要研究如何较为精准地反演河口区的叶绿素 a 浓度,进而对河口水体的生态环境做出全面有效的评估。

致谢:

感谢郑鹭飞、沈晓晶和肖聪在数据分析以及成文上给予的帮助。

参考文献:

- [1] 吴玉霖,傅月娜,张永山,等. 长江口海域浮游植物分布及其与径流的关系[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(3): 246-251.
WU Y L, FU Y N, ZHANG Y S, et al. Phytoplankton distribution and its relation to the runoff in the Changjiang (Yangzte) Estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(3): 246-251.
- [2] 洪官林. 长江口及邻近海域叶绿素的光学特性及其遥感应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
HONG G L. Optical Properties of Chlorophyll and Remote Sensing Application in Yangtze Estuary and Adjacent Sea[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [3] 王作华. 黄东海叶绿素 a 和溶解有机碳分布特征及固碳强度初探[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
WANG Z H. The Primary Study of Distribution of Chlorophyll a, Dissolved Organic Carbon in Yellow-East China Sea and the Carbon Fixed Production of Phytoplankton [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.

- 2008.
- [4] 高爽. 北黄海叶绿素和初级生产力的时空变化特征及其影响因素[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
GAO S. Spatial and Seasonal Variation of Chlorophyll and Primary Productivity and Their Controlling Factors in the Northern Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [5] 孙德勇, 周晓宇, 李云梅, 等. 基于光学分类的太湖水体叶绿素 a 浓度高光谱遥感[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3002-3009.
SUN D Y, ZHOU X Y, LI Y M, et al. Hyperspectral remote sensing of chlorophyll a concentrations in the Lake Taihu, based on water optical classification[J]. Environmental Science, 2013, 34(8): 3002-3009.
- [6] 丛丕福. 海洋叶绿素遥感反演及海洋初级生产力估算研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2006.
CONG P F. Oceanic Chlorophyll Retrieval by Remote Sensing and Ocean Primary Production Estimate[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing Applications), 2006.
- [7] DOERFFER R, SCHILLER H. The MERIS case 2 water algorithm[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(3/4): 517-535.
- [8] SHEN F, ZHOU Y X, LI D J, et al. Medium resolution imaging spectrometer (MERIS) estimation of chlorophyll-a concentration in the turbid sediment-laden waters of the Changjiang (Yangtze) Estuary[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(17/18): 4635-4650.
- [9] 李素菊, 吴倩, 王学军, 等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 228-234.
LI S J, WU Q, WANG X J, et al. Correlations between reflectance spectra and contents of chlorophyll-a in Chaohu Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 14(3): 228-234.
- [10] HE X Q, BAI Y, PAN D L, et al. Using geostationary satellite ocean color data to map the diurnal dynamics of suspended particulate matter in coastal waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 133: 225-239.
- [11] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37-44.
TANG J W, TIAN G L, WANG X Y, et al. The methods of water spectra measurement and analysis I: Above-water method[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(1): 37-44.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析: GB 17378. 4-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
China National Standardization Administration of the State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. The Specification for Marine Monitoring—Part 4: Seawater Analysis: GB 17378. 4-2007[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [13] 田国良, 倪晓东, 宋福, 等. 用光谱数据估算水体叶绿素浓度[J]. 环境遥感, 1988, 3(1): 71-80.
TIAN G L, NI X D, SONG F, et al. Estimation of chlorophyll concentration in water bodies using spectral data[J]. Remote Sensing of Environment China, 1988, 3(1): 71-80.
- [14] 高中灵. 台湾海峡 MERIS 数据悬浮泥沙与叶绿素浓度遥感分析[D]. 福州: 福州大学, 2006.
GAO Z L. Quantitative Analysis of Suspended Sediment and Chlorophyll Concentration using MERIS Data in Taiwan Strait[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.
- [15] 杨曦光. 黄海叶绿素及初级生产力的遥感估算[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
YANG X G. Chlorophyll and Primary Productivity Estimation based on Remote Sensing in Yellow Sea[D]. Qingdao: The University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2013.
- [16] 李素菊, 王学军. 巢湖水体悬浮物含量与光谱反射率的关系[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 66-68.
LI S J, WANG X J. Relationship between suspended matter concentration and spectral reflectance of Chao Lake[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003, 16(6): 66-68.
- [17] HE X Q, PAN D L, MAO Z H. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 23(4): 609-615.

(责任编辑: 陆 雁)