文章编号：1004—5589（2017）02—0616—09

基于 Landsat-8 数据南海近岸悬浮泥沙与叶绿素 a 浓度定量反演

孟凡晓，陈圣波，张国亮，范宪创

吉林大学 地球探测科学与技术学院，长春 130026

摘要：为了对南海近岸海域海水悬浮泥沙与叶绿素 a 进行浓度估算，基于 Landsat-8 数据确定悬浮泥沙与叶绿素 a 的敏感波段并构建估算模型。结果表明，Landsat-8 数据第一、二、四波段对悬浮泥沙浓度较为敏感，第一、二、三波段对叶绿素 a 浓度较为敏感，而以上单波段仍不能单独用于准确提取该区悬浮泥沙与叶绿素 a，故建立多种形式的统计模型。由第一、二、四波段线性组合形成的悬浮泥沙浓度反演模型的相关系数达到 0.904，平均相对误差为 10.24%，反演精度为 89.76%。由第一、二、三波段线性组合形成的叶绿素 a 浓度反演模型的相关系数达到 0.886，平均相对误差为 11.27%，反演精度为 88.73%。

关键词：Landsat-8；悬浮泥沙；叶绿素 a；估算模型；空间分布

中图分类号：TP751.1　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2017.02.029

Quantitative inversion of nearshore suspended sediment and chlorophyll-a concentration based on Landsat-8 data in South China Sea

MENG Fan-xiao, CHEN Sheng-bo, ZHANG Guo-liang, FAN Xian-chuang

College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: In order to estimate the nearshore suspended sediment concentration and the concentration of chlorophyll-a in South China Sea, the authors determined their sensitive wave bands and built the experience models based on Landsat-8 data. The results showed that Band 1, Band 2 and Band 4 in Landsat-8 data were sensitive to suspended sediment, and Band 1, Band 2 and Band 3 were sensitive to chlorophyll-a. However, the single-band model was not accurate enough to retrieve the concentration of suspended sediment or chlorophyll-a, therefore, a combination estimation model was established. The correlation coefficient, average relative error and inversion accuracy of suspended sediment concentration inversion model using Band 1, Band 2 and Band 4 were 0.904, 10.24% and 89.76%, respectively. The correlation coefficient, average relative error and inversion accuracy of chlorophyll-a concentration inversion model using Band 1, Band 2 and Band 3 were 0.886, 11.27% and 88.73%, respectively.

Key words: Landsat-8; suspended sediment; chlorophyll-a; estimation model; spatial distribution

收稿日期：2016-08-23；**改回日期**：2016-10-30

基金项目：乐东工区遥感地质解译和国家地质矿产调查评价项目（1212011087112）.

通讯作者：陈圣波（1967-），男，教授，博士生导师，主要从事定量遥感、地理信息系统研究. E-mail：chensb@jlu.edu.cn

0　引言

海水悬浮泥沙与叶绿素 a 是海洋水质监测研究的重要组分。传统的悬浮泥沙浓度（Suspended Sediment Concentration，简称 SSC）与叶绿素 a 浓度（Chlorophyll-a Concentration，简称 Chla）测定方法是海上定点测量，对取样水体进行实验室成分分析实现。这种方法不仅耗费大量的人力、财力，且受天气、海况等条件限制，远不能满足生产需要。卫星遥感技术的广泛应用为海洋监测注入了新的活力，它具有监测范围广、时效性强、成本低等特点，相对于传统方法不受环境限制。基于遥感技术的海洋监测既可以揭示某时间水质参数空间分布特征，又可以对不同时间的水质参数变化规律进行研究。因此，基于遥感技术的水质参数定量反演在海洋环境监测中的优势愈来愈明显。

对于水质参数遥感反演，国内外学者展开了广泛的研究。大多数学者研究水质参数以中低分辨率数据如美国 Nimbus/CZCS 和 SeaStar/SeaWiFS、NOAA/AVHRR/MODIS、欧洲 Envisat－1/MERIS、日本 ADIOS/OCTS、印度 IRS/OCM、韩国 Kompsat/OSMI 及中国台湾福卫一号海洋水色照相仪等卫星数据为主[1]，但也有很多学者以较高空间分辨率的 SPOT 系列[2,3]、高光谱系列[4]、风云系列[5,6]、高分系列[7,8]和环境小卫星[9]等卫星数据作为数据源研究水质参数的分布与变化。特别是 Landsat 系列卫星的成功发射为遥感领域注入了新的力量。早在 1972 年 Landsat－1 卫星发射后，Weisblatt E A 和 Yarger H L 等人就提出了用 Landsat-1 MSS 遥感数据定量计算水体悬浮泥沙含量的统计模型[10]；1974 年 Klemas 等人基于 Landsat－1（ERTS-1）数据，采用对数模型对海湾悬浮泥沙进行反演估算并取得了较好的效果[11]；1983 年 Carpenter 等人利用 Landsat MSS 波段建立了内陆湖水质参数的多元线性方程，反演了浊度与海藻色素浓度[12]；1985 年 JamesP Vedin 基于 Landsat MSS 数据与地面测量数据分析，得到内陆水库叶绿素 a 与 MSS6 波段的回归模型[13]；1992 年 Lathrop 通过拟合比较发现 TM 2、3 波段与水体悬浮物相关性很大并拟合得到幂函数形式[14]；Tassan 通过取对数法提高了水质参数与遥感卫星数据之间的相关性[15]；邓孺孺等人[16]根据水体反射光谱产生的物理过程，基于辐射传输模型建立了污染物浓度、悬浮泥沙浓度与 TM 多光谱反射率的物理模型，并得到了很好的反演效果；李云梅等人[17]基于 TM 数据利用 Gordon 模型，建立太湖水体悬浮物浓度的分析模型，并验证了模型精度；2015 年张毅博等人[18]基于 Landsat-8 数据对新安江水库悬浮物浓度进行了回归分析，并取得了较高精度。

以上研究均针对特定研究区域[1-18]，而对于近海岸悬浮泥沙与叶绿素 a 浓度的研究较少，笔者在这些研究基础上，通过 Landsat-8 数据反射率与悬浮泥沙、叶绿素 a 实测值相关分析，结合二者浓度的敏感波段建立反演模型，为以后该区域的海洋环境监测提供科学依据。

1　研究区与数据

1.1　研究区域概况

本次研究区位于海南岛西南近海域。该地区拥有海南省重要港口三亚港，对海岛的经济发展有不可忽视的作用。该地气候属于低纬度热带季风气候，冬季盛行东北风，夏季盛行东南风和西南风。终年湿润温暖无冬，海表层年平均水温 25℃ ~ 28℃，年平均降水量 1 500 ~ 2 600 mm[19]。这些自然因素都对海南近岸海域环境有重要影响。此外，人类活动如对近海域资源的开发利用等致使近岸海域的水体污染日益严重，研究近海域的水质状况是关系到当地经济发展、海水环境和海事活动的重要因素。

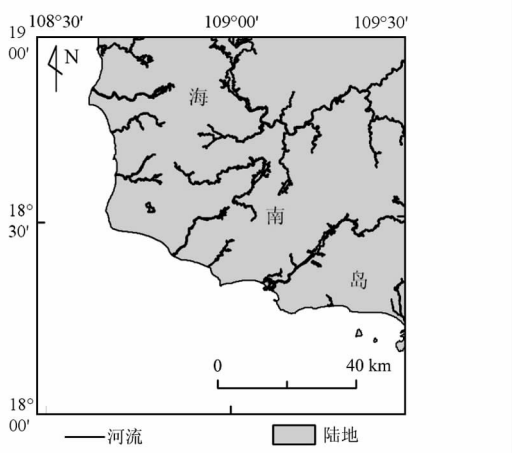


图 1　研究区域

Fig. 1　Research area

1.2 数据源

本次研究所用到的数据主要有两种：遥感卫星数据（表 1）和野外海表实测数据。

遥感卫星数据是 NASA 最新发射的 Landsat-8 卫星数据，Landsat-8 卫星搭载两个传感器：OLI（全称：Operational Land Imager）和 TIRS（全称：Thermal Infrared Sensor）。OLI 包括 ETM + 传感器所有的波段并新增两个波段：Coastal 波段主要应用海岸带观测，波段范围为 0.433 ~ 0.453 μm；Cirrus 波段可用于云检测，波段范围 1.360 ~ 1.390 μm。此外，OLI Band 5（0.845 ~ 0.885 μm）去除了 0.825 μm 处水汽吸收特征；全色波段 Band 8 波段范围变窄，目的是为了更好区分植被和无植被特征（表 2）。本文卫星数据来源于 USGS（http://glovis.usgs.gov/）网站下载，需对原始数据辐射定标以将传感器获取的 DN 值（Digital Number）转化为辐亮度，之后进行大气校正以消除大气吸收和散射的影响得到海表反射率数据。由于 Landsat-8 OLI 传感器有 8 个波段（Cirrus 波段用于观测卷云，故不分析此波段），FLAASH 不能对所有波段进行大气校正，所以本次采用 6S（Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum）大气校正模型对卫星数据进行大气校正。6S 大气校正模型是由 Vermote 和 Tanré 等人编写的适用于太阳光（0.25 ~ 4 μm）的大气辐射传输校正模型[20]，计算速度较快，是一种精度较高的模型[21,22]，满足本文基于可见光-近红外多波段对海表悬浮泥沙与叶绿素 a 浓度定量反演。

野外实测数据于 2015 年 2 月 4 日在海南三亚湾地区，由近海到深海基于GPS定位采样，共16个采样点（由岸边到深海依次编号为 1 ~ 16）。采样当天晴天，温度为 19℃ ~ 27℃，东北风 < 3 级，时间间隔 15 min（10 min 行驶时间，5 min 等待海面平静并采集样品时间）。样品采集后立即返回实验室并冷藏，由中国科学院东北地理与农业生态研究所测得海水样品的悬浮泥沙与叶绿素 a 浓度，悬浮泥沙采用烘烧、称重的方法测定；叶绿素 a 采用 EPA 方法 445.0 荧光计进行测定。采样点中 13 个用于建模，3 个用于模型精度分析，分别为第 5、10、15 点（图 2）。

表 1 Landsat-8 OLI 数据列表

Table 1 OLI data of Landsat-8

行列号	获取日期	过境时间（UTC）	云量
124/47	2015/01/17	03：05：41	12%
124/48	2015/01/17	03：06：06	15%
125/47	2015/01/24	03：11：48	13%

注：UTC 为协调世界时（Coordinated Universal Time），又称世界统一时间。另外文中三景数据云量虽 > 10%，拼接后研究区基本无云覆盖区；行列号为 125/47 与另外两景数据相差七天，考虑到南海水质在冬季 1 月份相对稳定，故可忽略其误差，统一为 2015 年 1 月 17 日。

表 2 Landsat-8 OLI 数据参数

Table 2 OLI parameters of Landsat-8

波段名称	波段范围/μm	空间分辨率/m
Band1 Coastal	0.433 ~ 0.453	30
Band 2 Blue	0.450 ~ 0.515	30
Band 3 Green	0.525 ~ 0.600	30
Band 4 Red	0.630 ~ 0.680	30
Band 5 NIR	0.845 ~ 0.885	30
Band 6 SWIR 1	1.560 ~ 1.660	30
Band 7 SWIR 2	2.100 ~ 2.300	30
Band 8 Pan	0.500 ~ 0.680	15
Band 9 Cirrus	1.360 ~ 1.390	30

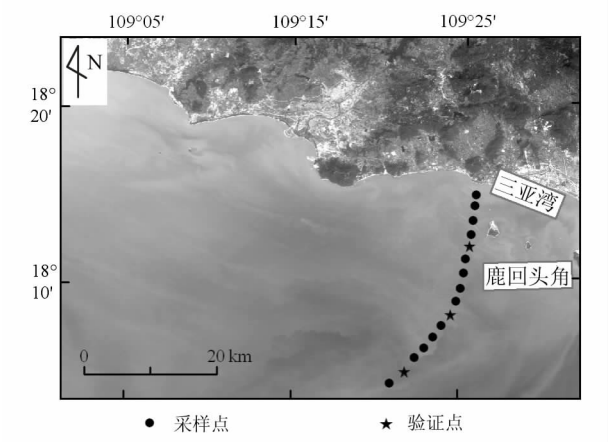


图 2 野外采样点位置图

Fig. 2 Distribution of sampling sites in studied area

此外，卫星数据与采样时间虽相差数天，但考虑到卫星过境时间与采样时间在风速、温度和海浪等方面几乎相同，且南海近岸 1 月份海表水质在短期内相对稳定，故本研究中采样时间与卫星数据时间之间的误差可忽略不计。

2　模型构建

在张毅博等人[18]对内陆水库总悬浮物浓度研究的基础上，本文对南海近岸悬浮泥沙与叶绿素 a 浓度反演。为了提高模型精度，分别找出与悬浮泥沙、叶绿素 a 敏感波段判断是否可以用于建模反演，若不能则对 8 个波段做 3 种形式的组合：Band（a）/Band（b），A * Band（a）+B * Band（b），A * Band（a）+B * Band（b）+C * Band（c），将以上得到的所有组合形式作为悬浮泥沙与叶绿素 a 的建模因子，选出相关系数最大的模型作为最优模型。利用最优模型对悬浮泥沙与叶绿素 a 进行反演并计算反演精度。

模型精度评价主要有两个参数：均方根误差 RMSE（Root Mean Square Error）与平均绝对百分比误差 MAPE（Mean Absolute Percentage Error）。表达式分别为：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_1 - X_0)^2}{n}} \tag{1}$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|X_1 - X_0|}{X_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中：X_1 与 X_0 分别表示反演对象的反演值与实测值；n 为样本数。

2.1　悬浮泥沙模型构建

诸多对含悬浮泥沙水体的研究表明[23]，水体反射率随着悬浮泥沙浓度变化而变化。为比较 Landsat-8 OLI 数据波段对悬浮泥沙浓度的敏感性，需对所有单波段与悬浮泥沙实测值做线性回归，发现对悬浮泥沙浓度最敏感的三个波段分别是：B 1、B 2、B 4 波段，相关系数分别为 0.362、0.402、0.392。

表 3　单波段反射率与悬浮泥沙实测值相关性

Table 3　Correlation between single band reflectance and measured suspended sediment

波段反射率	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
线性回归相关系数 R^2	0.362	0.402	0.331	0.392	0.299	0.290	0.288	0.334

由表 3 知 Landsat-8 OLI 数据 8 个单波段与实测悬浮泥沙浓度相关性较低，很难对悬浮泥沙浓度做出准确估算。为提高反演精度，对 8 个波段做 3 种形式的组合：Band（a）/Band（b），A * Band（a）+B * Band（b），A * Band（a）+B * Band（b）+C * Band（c），3 种类型的组合种类分别为 56、28 和 56 种。将以上所有组合作为与实测悬浮泥沙浓度之间的线性拟合因子，并比较它们的相关系数。每类组合因子的回归相关系数最大的 3 组是：Band（2）/Band（1）、A * Band（1）+B * Band（2）、A * Band（1）+B * Band（2）+C * Band（4），相关系数分别是 0.668、0.703、0.904（图 3）。

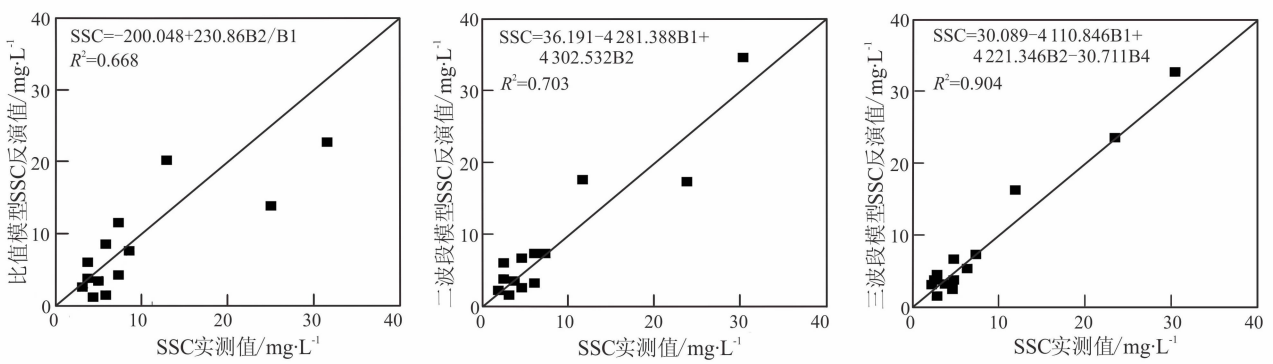


图 3　悬浮泥沙反演值与实测值的回归分析

Fig. 3　Regression analysis between inversion values and measured values of suspended sediment

通过表 4 分析 3 种模型的 RMSE、MAPE 可知，由 B 1、B 2 与 B 4 组合的多元线性回归模型在两个精度参数方面均优于其他两种模型，与实测悬浮泥沙浓度相关度最好，因此基于 Landsat-8 OLI 数据的南海近岸海域悬浮泥沙浓度定量反演模型为：

$$SSC = 30.089 - 4110.846B1 + 4221.346B2 - 30.711B4 \quad (3)$$

式中：SSC 为悬浮泥沙浓度，单位为 mg · L^{-1}；B 1、B 2 与 B 4 分别为对应波段的反射率。

表 4 悬浮泥沙 3 种模型精度分析

Table 4 Accuracy analysis of three models for suspended sediment

模 型	RMSE/mg · L^{-1}	MAPE/%
Band(2)/Band(1)	3.71	80.86
A * Band(1) + B * Band(2)	2.58	50.96
A *Band(1) +B *Band(2) +C *Band(4)	1.45	20.52

2.2 叶绿素 a 模型构建

总结前人研究可知[24]：叶绿素 a 在蓝光波段与红波范围内强吸收，主要受水体内浮游植物尤其是藻类的影响。通过分析发现，Landsat-8 OLI 数据 8 个波段对叶绿素 a 最敏感的波段是：B 1 波段 B 2 波段 B 3 波段，相关系数分别为 0.699、0.729、0.746。

由表 5 可知单波段与实测叶绿素 a 值相关性均达 0.6 以上，同理悬浮泥沙建模过程，对 Landsat-8 OLI 数据 8 个波段做 3 种形式的组合：Band（a）/Band（b）、A * Band（a） + B * Band（b）、A * Band（a） + B * Band（b） + C * Band（c），3 种类型的组合种类分别为 56、28 和 56 种。将以上 170 种组合作为实测叶绿素 a 浓度之间线性拟合因子，并比较他们的相关系数。3 类组合的线性相关系数最大的组合是：Band（1）/Band（5）、A * Band（1） + B * Band（2）、A * Band（1） + B * Band（2） + C * Band（3），相关系数依次是 0.792、0.814、0.886，回归效果如图 4 所示。

表 5 单波段反射率与叶绿素 a 实测值相关性分析

Table 5 Correlation between single band reflectance and measured chlorophyll-a

波段反射率	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
线性回归相关系数 R^2	0.699	0.729	0.746	0.675	0.665	0.655	0.654	0.651

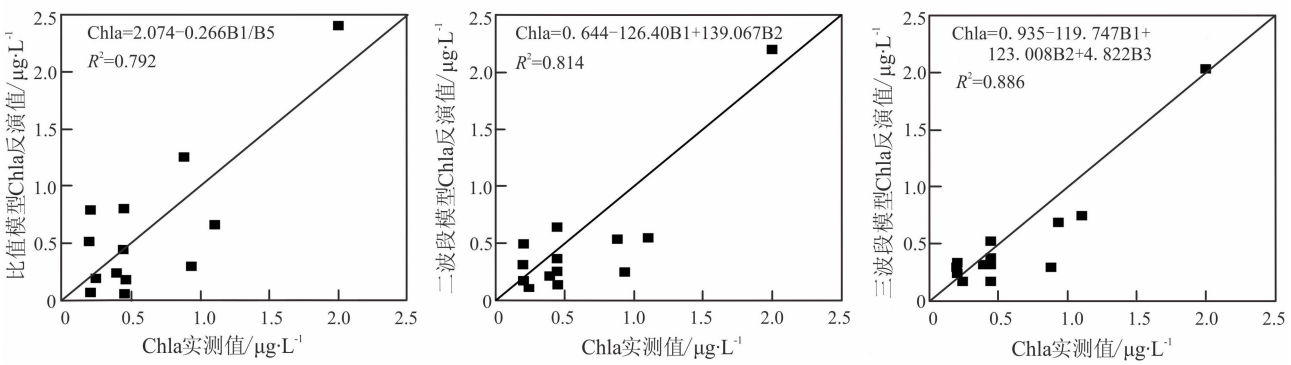


图 4 叶绿素 a 反演值与实测值的回归分析

Fig. 4 Regression analysis between inversion values and measured values of chlorophyll-a

通过表 6 分析叶绿素 a 3 种模型的 RMSE、MAPE 可知，由 B 1、B 2 与 B 3 组合的多元线性回归模型在两个精度参数方面均优于其他两种模型，且与实测叶绿素 a 浓度相关度最好，因此基于 Landsat-8 OLI 数据的南海近岸海域叶绿素 a 浓度定量反演模型为：

$$Chla = 0.935 - 119.747B1 + 123.008B2 - 4.822B3 \quad (4)$$

式中：Chla 为叶绿素 a 浓度，单位为 μg · L^{-1}；B 1、B 2 与 B 3 分别为对应波段的反射率。

表 6　叶绿素 a 3 种模型检验分析

Table 6　Accuracy analysis of three models for chlorophyll-a

模型	RMSE/μg·L^{-1}	MAPE/%
Band(1)/Band(5)	0.825	63.781
A * Band(1) + B * Band(2)	0.539	30.553
A * Band(1) + B * Band(2) + C * Band(3)	0.226	18.426

分别用悬浮泥沙与叶绿素 a 最佳反演模型对南海近岸悬浮泥沙与叶绿素 a 进行反演并对其进行精度分析（表 7、表 8）。结果表明：悬浮泥沙的平均相对误差为 10.24%，反演精度为 89.76%；叶绿素 a 的平均相对误差为 11.27%，反演精度为 88.73%，可满足实际需求。

表 7　悬浮泥沙经验模型精度分析

Table 7　Accuracy analysis of experimental model of suspended sediment

验证点序号	实测值/mg·L^{-1}	反演值/mg·L^{-1}	绝对误差/mg·L^{-1}	相对误差/%	平均相对误差/%	反演精度/%
5	1.86	2.02	0.16	8.60		
10	2.67	2.87	0.20	7.49	10.24	89.76
15	4.17	3.56	0.61	14.63		

表 8　叶绿素 a 经验模型精度分析

Table 8　Accuracy analysis of experimental model of chlorophyll-a

验证点序号	实测值/mg·L^{-1}	反演值/mg·L^{-1}	绝对误差/mg·L^{-1}	相对误差/%	平均相对误差/%	反演精度/%
5	0.614	0.540	0.074	12.05		
10	0.442	0.403	0.039	8.82	11.27	88.73
15	0.441	0.384	0.057	12.93		

3　结果分析

利用以上得到最优模型（3）、（4）对研究区悬浮泥沙和叶绿素 a 浓度进行反演，得到 2015 年 1 月 17 日二者的空间分布图（图 5）。

悬浮泥沙在空间格局上呈现由内陆向深海随水深增加而递减趋势，西北部泥沙浓度高于南部，南部地区浓度较低，海水较清澈。研究区冬季洋流由西到南逐渐减弱，冬季盛行东北向季风，海岛南部和西部因为离岸风等因素使海表悬浮泥沙被风浪和潮汐再次悬浮与分配，形成悬浮泥沙向深海方向逐减蔓延分布。另外近海岸几大主要河流入海口地区泥沙浓度明显增高，原因是由于河流的运移作用将内陆河水挟带的泥沙运移到下游，水流逐渐扩展而

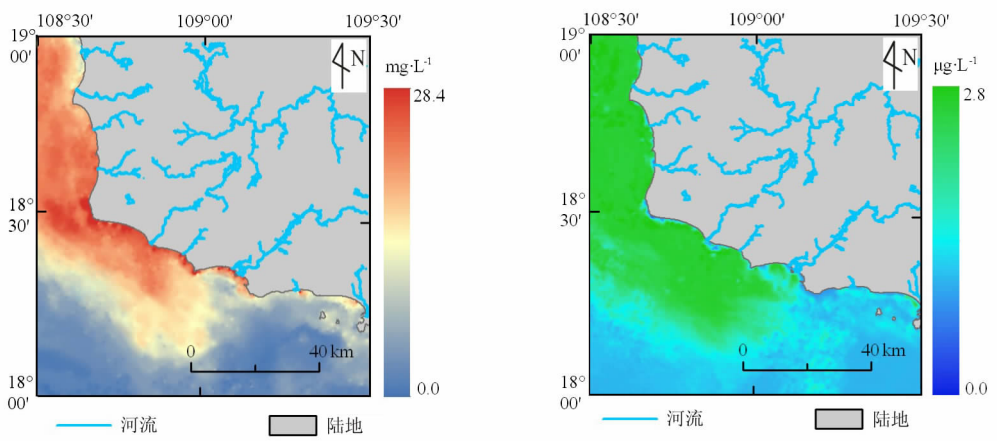


图 5　2015 年 1 月 17 日南海悬浮泥沙与叶绿素 a 反演图

Fig. 5　Concentration distribution of suspended sediment or chlorophyll-a in South China Sea on January 17th, 2015

减速，导致泥沙从水体沉积至底床和边滩由河口向大洋深处不断伸展。除此之外近岸海底地形的不同也会对悬浮泥分布产生影响，如南岸是典型的海蚀-海积岸，西岸具有较宽的海积阶地与沙丘岸段，河流供沙比南部海域丰富[25]。

叶绿素 a 空间分布大体趋势呈近岸浓度高，随水深增加浓度逐减，由西部到南部逐级递减。结合研究区气候与海洋动力特点分析，南海西海岸冬季主要受东北或偏北气流影响，海岛近岸邻开阔外海，风浪作用显著，在潮汐与波浪的驱使下，浮游植物由近岸向深海方向蔓延分布。由于南海属热带季风气候，全年海表温度变高，较适合悬浮植物尤其是藻类的生长繁殖，这些因素都影响叶绿素 a 的空间分布。另外发现几大主要河流入海口处与主要海港的叶绿素 a 浓度较低，原因是河流入海口处水流湍急，挟带大量内陆悬浮泥沙，且海港区日常运营以及产生的污水排放、运输粉尘和废气、舱底油泄露与污染等这些因素都不利于水体含叶绿素 a 的浮游植物生存，所以导致叶绿素 a 浓度出现明显降低[26]。

4 结论

（1）通过回归分析得到南海近岸海域的悬浮泥沙与叶绿素 a 最优模型精度分别为 89.76%、88.73%，满足实际需求，说明在模型适合该区域的水质参数反演。由于季节变化引起浮游植物、内陆泥沙挟带量不同，都会对悬浮泥沙、叶绿素 a 浓度产生影响。因此模型只适合南海西南近岸海域 1 月份悬浮泥沙与叶绿素 a 的反演。

（2）在空间分布方面悬浮泥沙与叶绿素 a 浓度均在，海岛西北岸浓度较高，东南岸浓度较低，分析原因除了受洋流、波浪的影响外，还受水底地形、人为活动等影响。

（3）由于忽略海浪、黄色物质吸收等因素的影响，反演精度与实际有出入，因此模型的建立有待进一步深化。

致谢：感谢中国科学院东北地理与农业生态研究所宋开山教授团队协助室内水样测量；感谢 USGS 网站提供的 Landsat-8 数据。

参考文献：

[1] 王旭楠，陈圣波，吕航，等. 遥感监测水质参数的方法概述［J］. 吉林大学学报：地球科学版，2007，37（增刊）：189-193.
WANG Xu-nan，CHEN Sheng-bo，LÜ Hang，et al. The means of water quality monitoring in remote sensing［J］. Journal of Jilin University：Earth Science Edition，2007，37（Suppl.）：189-193.

[2] 张穗，陈慧娟，陈鹏霄. 长江口水体表层泥沙含量遥感监测研究［J］. 长江科学院院报，2005，22（5）：23-25.
ZHANG Sui，CHEN Hui-juan，CHEN Peng-xiao. Analysis on suspended sediment of Changjiang estuary by remote sensing［J］. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，2005，22（5）：23-25.

[3] 许君，方红亮，傅肃性，等. 运用 SPOT 数据进行河流水体悬浮固体浓度的研究：以台湾淡水河为例［J］. 遥感技术与应用，1999，14（4）：17-22.
XU Jun，FANG Hong-liang，FU Su-xing，et al. Estimating suspended sediment concentrations from SPOT image：a case study in Danshuihe，Taiwan［J］. Remote Sensing Technology and Application，1999，14（4）：17-22.

[4] 王旭楠，陈圣波，宁亚灵，等. 基于 ASTER 数据的石头口门水库水质参数定量遥感反演［J］. 世界地质，2008，27（1）：105-109.
WANG Xu-nan，CHEN Sheng-bo，NING Ya-ling，et al. Quantitative remote sensing inversion method of water quality in Shitoukoumen reservoir parameter based on ASTER data［J］. Global Geology，2008，27（1）：105-109.

[5] 胡雯，吴文玉，孔庆欣，等. FY-1C/CAVHRR 数据估算巢湖蓝藻叶绿素的含量［J］. 南京气象学院学报，2002，25（1）：124-128.
HU Wen，WU Wen-yu，KONG Qing-xin，et al. Research on estimating the concentrations of Chlorophyll-a in Chaohu Lake using FY-IC/CAVHRR data［J］. Journal of Nanjing Institute Meteorology，2002，25（1）：124-128.

[6] 张鸽，黄方，龚绍琦，等. 基于 FY-3A/MERSI 数据和支持向量机的太湖水体悬浮物浓度遥感模型［J］. 东北师大学报：自然科学版，2016，48（1）：148-153.
ZHANG Ge，HUANG Fang，GONG Shao-qi，et al. Estimation of suspended solids concentration at the Taihu Lake using FY-3A/MERSI data［J］. Journal of Northeast Normal University：Natural Science Edition，2016，48（1）：148-153.

[7] 朱利，李云梅，赵少华，等. 基于 GF-1 号卫星 WFV 数据的太湖水质遥感监测 [J]. 国土资源遥感，2015，27（1）：113-120.
ZHU Li，LI Yun-mei，ZHAO Shao-hua，et al. Remote sensing monitoring of Taihu Lake water quality by using GF-1 satellite WFV data [J]. Remote Sensing for Land and Resources，2015，27（1）：113-120.

[8] 程乾，刘波，李婷，等. 基于高分 1 号杭州湾河口悬浮泥沙浓度遥感反演模型构建及应用 [J]. 海洋环境科学，2014，34（3）：558-563.
CHENG Qian，LIU Bo，LI Ting，et al. Research on remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in Hangzhou Bay by GF-1 satellite [J]. Marine Environmental Science，2014，34（3）：558-563.

[9] 王林，杨建洪，李冠男，等. 江苏近岸海域 HJ CCD 影像悬浮泥沙遥感反演 [J]. 海洋科学，2014，40（2）：77-83.
WANG Lin，YANG Jian-hong，LI Guan-nan，et al. Retrieval of suspended sediment concentration from HJ-CCD imagery in Jiangsu coastal sea [J] Marine Sciences，2014，40（2）：77-83.

[10] 丛丕福. 水色遥感机理与悬浮泥物的卫星遥感信息识别研究：硕士学位论文 [D]. 大连：大连海事大学，2002.
CONG Pi-fu. Water-color remote sensing principle and retrieval of suspended sediment concentration with satellite remote sensing method：master's degree thesis [D]. Dalian：Dalian Maritime University，2002.

[11] Klemas V，Bartlett D，Philpot W，et al. Coastal and estuarine studies with ERTS-1 and Skylab [J]. Remote Sensing of Environment，1974，3（3）：153-177.

[12] Carpenter D J，Carpenter S M. Modeling inland water quality using Landsat data [J]. Remote Sensing of Environment，1983，13（4）：345-352.

[13] Verdin J P. Monitoring water quality conditions in a large western reservoir with Landsat imagery [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing，1985，51（3）：343-353.

[14] Lathrop R G. Landsat thematic mapper monitoring of turbid inland water quality [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing，1992，53（4）：465-470.

[15] Tassan S. A numerical model for the detection of sediment concentration in stratified river plumes using thematic mapper data [J]. International Journal o f Remote Sensing，1997，18（12）：2699-2705.

[16] 邓孺孺，何执兼，陈晓翔，等. 珠江口水域水污染遥感定量分析 [J]. 中山大学学报：自然科学版，2002，41（3）：99-103.
DENG Ru-ru，HE Zhi-jian，CHEN Xiao-xiang，et al. Quantitative analysis on water pollution in the Pearl River estuary by remote sensing method [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni，2002，41（3）：99-103.

[17] 李云梅，黄家柱，陆皖宁，等. 基于分析模型的太湖悬浮物浓度遥感监测 [J]. 海洋与湖沼，2006，37（2）：171-177.
LI Yun-mei，HUANG Jia-zhu，LU Wan-ning，et al. Model-based remote sensing on the concentration of suspended sediments in Taihu Lake [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica，2006，37（2）：171-177.

[18] 张毅博，张运林，查勇，等. 基于 Landsat-8 影像估算新安江水库总悬浮物浓度 [J]. 环境科学，2015，36（1）：57-63.
ZHANG Yi-bo，ZHANG Yun-lin，ZHA Yong，el at. Remote sensing estimation of total suspended matter concentration in Xin'anjiang Reservoir using Landsat-8 Data [J]. Environmental Science，2015，36（1）：57-63.

[19] The Geographical Location of the South China Sea [EB/OL]. 2012/04/27http：//www. takungpao. com/military/content/2012-04/27/content_ 59186. htm.

[20] Vermote E F，Tanré D，Deuze J L，et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum，6S：an overview [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing，1997，35（3）：675-686.

[21] Zhao W J，Tamura M，Takahashi H. Atmospheric and spectral corrections for estimating surface albedo from satellite data using 6S code [J]. Remote Sensing of Environment，2001，76（2）：202-212.

[22] Burns P，Nolin A. Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca，Peru from 1987 to 2010 [J]. Remote Sensing of Environment，2014，140（1）：165-178.

[23] 刘大召，付东洋，沈春燕，等. 河口及近岸二类水体悬浮泥沙遥感研究进展 [J]. 海洋环境科学，2010，29（4）：611-616.
LIU Da-zhao，FU Dong-yang，SHEN Chun-yan，et al. Study advances on remote sensing of suspended sediment in estuaries and coastal case Ⅱ water [J]. Marine Environmental Science，2010，29（4）：611-616.

（下转 642 页）

terial diversity in Adirondack mountain lakes as revealed by 16S rRNA gene sequences [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63 (7): 2957-2960.

[16] Dolan J R. Biogeography of aquatic microbes [J]. Aquatic Microbial Ecology, 2005, 41 (7): 39-48.

[17] Crump B C, Kling G W, Bahr M, et al. Bacterio-plankton community shifts in an arctic lake correlate with seasonal changes in organic matter source [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69 (5): 2253-2268.

[18] Bouvy M, Bettarel Y, Bouvier C, et al. Trophic interactions between viruses, bacteria and nanoflagellates under various nutrient conditions and simulated climate change [J]. Environmental Microbiology, 2011 (13): 1842-1857.

[19] Nakano S I, Ishii N, Manage P M, et al. Trophic roles of heterotrophic nanoflagellates and ciliates among planktonic organisms in a hypereutrophic pond [J]. Aquatic Microbial Ecology, 1998 (16): 153-161.

(上接623页)

[24] 熊竹, 丁世敏, 肖红艳, 等. 水体中叶绿素a浓度遥感反演的算法研究进展 [J]. 中国西部科技, 2015, 14 (10): 16-20.
XIONG Zhu, DING Shi-min, XIAO Hong-yan, et al. Progress of algorithms research on remote sensing retrieval of Chlorophyll-a concentration in water body [J]. Science and Technology of West China, 2015, 14 (10): 16-20.

[25] 王颖. 海南岛海岸环境特征 [J]. 海洋地质动态, 2002, 18 (3): 1-9.
WANG Ying. Features of Hainan island coastal environment [J]. Marine Geology Frontiers, 2002, 18 (3): 1-9.

[26] 王雨, 林茂, 陈兴群, 等. 海南西部近岸浮游植物的周年变化及主要关联因素 [J]. 水生生物学报, 2012, 36 (4): 724-734.
WANG Yu, LIN Mao, CHEN Xing-qun, et al. Annual variation on phytoplankton in coastal waters of western Hainan Island and related affecting factors [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36 (4): 724-734.