基于Landsat8数据的舟山群岛海域悬浮泥沙浓度遥感研究

潘磊剑，郭碧云

（浙江海洋大学海洋科学与技术学院 舟山 316022）

摘要：文章利用舟山近岸海域实测水体光谱及泥沙浓度数据，分析光谱反射率与悬浮泥沙浓度的相关性，并结合Landsat8遥感数据进行该海域的悬浮泥沙浓度遥感反演。研究表明：随着水体悬浮泥沙浓度的增加，各波段的反射率相应增加，且不同波段的增幅有明显不同，水体光谱曲线存在“双峰”现象；Landsat8遥感数据的波段4与波段3的比值与悬浮泥沙浓度的相关性较好；舟山群岛海域总体处于高泥沙浓度的状态，岛屿近岸悬浮泥沙浓度明显高于开阔水域，岛屿周围的悬浮泥沙浓度呈现“西高东低”的格局；一元二次方程模型（二次模型）对舟山海域水体的悬浮泥沙浓度反演精度较其他模型（线性模型，对数模型，指数模型，幂指数模型）高；Landsat8遥感数据可用于舟山海域悬浮泥沙浓度的监测。本研究成果能为近岸海域港口建设、航道安全、环境监测等研究提供数据支持。

关键词：悬浮泥沙；舟山海域；模型构建；Landsat8；遥感反演

中图分类号：P733.3；P734.2+3 **文献标志码**：A **文章编号**：1005－9857(2020)09－0082－09

Remote Sensing Research of Suspended Sediment Concentration in Zhoushan Archipelago Sea Area Based on Landsat8 Data

PAN Leijian，GUO Biyun

（Zhejiang Ocean University Marine Science and Technology College，Zhoushan 316022，China）

Abstract：In this paper，the retrieval of suspended sediment concentration in Zhoushan sea area was studied by using the measured spectrum data，suspended sediment concentration data and Landsat8 remote sensing data.Research showed that with the increase of suspended sediment concentration，the reflectance of different wavebands increased correspondingly，and the increase was obviously different，the spectral curve of water showed “double peak” phenomenon.The ratio of band 4 and band 3 of Landsat 8 remote sensing data had a great correlation with suspended sediment concentration.Zhoushan archipelago was in a state of high sediment concentration generally，

收稿日期：2020-07-23；**修订日期**：2020-08-31

基金项目：国家自然科学基金项目（51479179）；浙江海洋大学科研配套经费项目（21109004614P）；浙江海洋大学科研启动经费项目（21105011713）.

作者简介：潘磊剑，硕士研究生，研究方向为海洋遥感

通信作者：郭碧云，副教授，博士，研究方向为遥感通信技术

the concentration of suspended sediment near the islands was higher than that in the open water area significantly and suspended sediment concentration around the islands presented a pattern of "higher in the west and lower in the east". The accuracy that retrieval of suspended sediment concentration in Zhoushan coastal area by the model of one variable quadratic equation model (quadratic model) was higher than others (linear model, logarithmic model, exponential model, power exponential model). The remote sensing data of Landsat8 could be used to monitor the concentration of suspended sediment concentration in Zhoushan sea area. The results of this study could provide data support for the research of port construction, channel safety, environmental monitoring and so on.

Key words: Suspended sediment, Zhoushan sea area, Model building, Landsat8, Remote sensing retrieval

0　引言

悬浮泥沙的含量直接影响水体诸如水色、浑浊度、透明度等光学性质，悬浮泥沙的分布、扩散、沉降的过程也影响着水体的生态环境状况，同时也影响着河口、海岸带等的冲淤变化，以及海岸带水质、地貌、生态环境，影响港口建设工程、航道建设以及安全情况[1-4]。舟山海域的航运、水产、旅游业发达，因此对该区域悬浮泥沙的研究具有重要意义。

传统的悬浮泥沙浓度的测量方法是利用调查船对研究区进行逐点采样与分析，该方法可以获得准确的泥沙浓度数据，但是存在速度慢、周期长，且只能获得少量的离散点的缺点，难以对大面积区域进行监测。卫星遥感技术可以对水体进行快速、经济、大范围、连续性的动态监测，在大面积海域悬浮泥沙浓度的研究中有着不可替代的作用[5-7]。黎夏[5]结合辐射传输理论，运用 Gordon 和负指数关系式推导得出悬浮泥沙遥感定量的统一式，并将其应用于珠江口悬浮泥沙遥感定量研究。Richard[8]、Forget[9]利用 TM 和 SPOT 等遥感影像结合实地光谱测量数据以及实测悬浮泥沙浓度数据，通过数据的线性回归分析确定反射率与研究区域悬浮泥沙浓度的关系，建立了基于统计分析方法的悬浮泥沙遥感反演模式。李炎等[10]利用比值模式得出长江口的表层悬浮泥沙含沙量与海面光谱反射率关系曲线斜率的线性关系式和指数关系式。并且将其与各同步采样点遥感测量的斜率值和海面实测含沙量的关系进行比较验证，两者结果的最大误差小于 30 %。马超飞等[11]利用 2003 年春季黄海、东海现场实测数据，建立了基于风云 1 号卫星第 4 波段的水色要素反演算法，并得到了悬浮泥沙、总悬浮物以及低浊度水体中叶绿素 a 的浓度反演算法，该算法能够满足需要，而高浊度水体中叶绿素 a 的浓度反演算法还需要进一步探究结论。

本研究在利用实测海水光谱及悬浮泥沙浓度数据的基础上，结合 Landsat8 遥感数据对舟山群岛海域悬浮泥沙浓度进行研究，能够对该区域泥沙分布情况进行监测。

1　研究区概况

舟山群岛位于浙江省东北部，杭州湾东侧，长江口以南，地理坐标为 121°31′E—123°25′E、29°32′N—31°04′N。作为我国第一大群岛，舟山群岛由 1 390 余个岛屿组成，海域面积远远大于其陆地面积，拥有丰富的港口、航道和渔业资源，因此研究舟山群岛海域悬浮泥沙分布对于航运以及渔业等有着重要的意义。由于钱塘江和长江输送的大量泥沙影响，其近岸水体为典型的二类水体[12-13]。

2　数据来源与处理

2.1　实测数据

2.1.1　光谱数据

利用 ISI921VF 地物光谱仪测量舟山近岸海水光谱。分别测量标准板的辐亮度(L_p)、水体反射辐亮度(L_{wat})以及天空漫反射辐亮度(L_{sky})，测量时间是 9:30－14:30，测量点 22 个，每个测量点进行3 次

测量，每次采集 15 条曲线，在每个测量点同时采集表层 0.5 m 处 500 mL 水样 3 瓶。具体测量点位置见图 1。

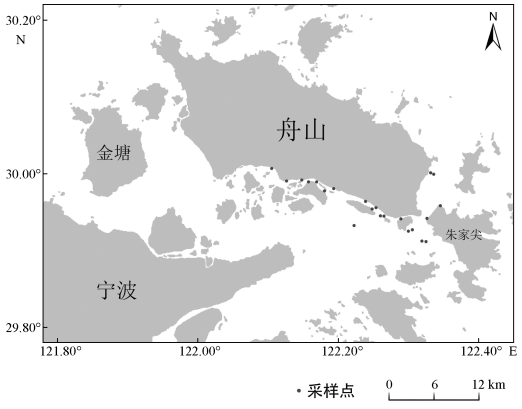

图 1 野外采样点分布

遥感反射率的计算公式：

$$R_S = \frac{(L_{wat} - r \times L_{sky}) \times R_p}{\pi \times L_p} \quad (1)$$

式中：L_{wat} 为水体反射辐亮度；L_{sky} 为天空漫反射辐亮度；L_p 为标准板的辐亮度；R_p 为标准板的反射率；r 为水气界面反射率；取经验值 0.022[14]。

2.1.2 泥沙浓度实测数据

将水样带回实验室进行过滤、烘干、称重，计算水体中悬浮泥沙浓度。实验过程参照国家标准(GB 17378.4—2007)的操作方法。

2.2 遥感数据

本研究利用 Landsat8 遥感数据，成像时间是 2017 年 7 月 23 日上午 10 时 25 分。数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)。Landsat8 卫星上携带着 OLI 陆地成像仪和 TIRS 热红外传感器两个传感器，具体参数见表 1。

利用 ENVI5.3 软件对遥感数据进行辐射定标，大气校正。辐射定标是将图像的数字量化值(DN)转化为辐射亮度值或者反射率或者表面温度等物理量的处理过程。大气校正的目的是消除大气吸收、散射的影响，将辐射定标得到的辐射亮度值转化为地表实际反射率，大气校正使用 ENVI 5.3 软件自带的 FLAASH 大气校正模块，并且根据研究区选取参数。

表 1 Landsat8 OLI 及 TIRS 数据参数

波段	波长/μm	分辨率/m
波段 1－气溶胶	0.43～0.45	30
波段 2－蓝	0.45～0.51	30
波段 3－绿	0.53～0.59	30
波段 4－红	0.64～0.67	30
波段 5－近红外	0.85～0.88	30
波段 6－SWIR1	1.57～1.65	30
波段 7－SWIR2	2.11～2.29	30
波段 8－全色	0.50～0.68	15
波段 9－Cirrus	1.36～1.38	30
波段 10－TIRS 热红外传感器 1	10.60～11.19	100
波段 11－TIRS 热红外传感器 2	11.50～12.51	100

3 结果与分析

3.1 舟山近岸悬浮泥沙光谱特征

利用式(1)计算采样点的遥感反射率值，并绘制出反射率光谱曲线，结果见图 2。横坐标为波长，纵坐标是遥感反射率，由图 2 可以看出，随着水体悬浮泥沙浓度的增加，各波段的反射率相应增加，但是各波段的增幅有明显的不同，在波长 580～820 nm 时不同悬浮泥沙浓度水体的反射率的变化较大，而在小于 580 nm，大于 820 nm 时其变化则相对较小。水体光谱曲线存在着“双峰”的现象，第一峰值出现在波长 580 nm 左右，呈“宽峰”的形状，延伸至波长 710 nm 左右，第二个峰位于波长 820 nm 左右。

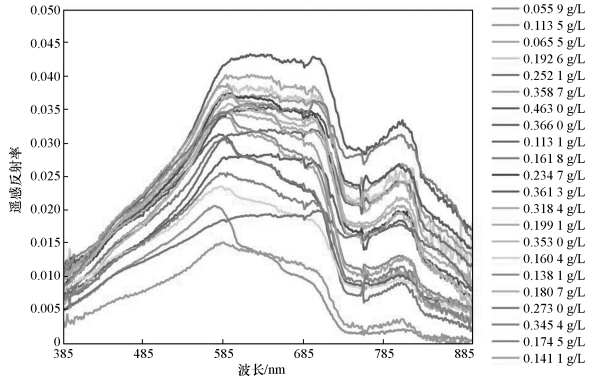

图 2 舟山近岸海域水体光谱曲线

3.2 悬浮泥沙反演模型的建立

通过分析发现，Landsat8 的波段 1 至波段 4 对

泥沙浓度变化反应较敏感。分析实测光谱数据与这 4 个波段的遥感反射率，将 4 个波段遥感反射率与对应实测的悬浮泥沙浓度建立关联，以反射率不同波段组合结果作为自变量，实测泥沙浓度为因变量构建回归方程，分别建立线性、对数、二次、指数、幂指数模型。计算两个变量之间的相关系数 R^2，R^2 值越高表示该波段组合与悬浮泥沙浓度之间的相关性越大[15]。选取 15 个测量点进行模型构建，另外 7 个测量点的数据进行模型验证。

3.2.1　波段比值法

分别用 4 个波段的反射率进行两两比值计算，将不同的比值结果与实验室实测泥沙浓度进行回归分析，构建不同的模型，包括线性模型、对数模型、二次模型、指数模型、幂指数模型。构建的模型和相关系数见表 2。

表 2　波段比值法悬浮泥沙反演模型

波段组合	模型	回归方程	R^2
B_4/B_3	线性模型	$SSC=0.605\ 3x-0.391\ 9$	0.750 6
	对数模型	$SSC=0.512\ 3\ln(x)+0.220\ 6$	0.671 0
	二次模型	$SSC=1.302\ 3x^2-1.811x+0.693$	0.888 9
	指数模型	$SSC=0.007\ 3e^{3.262\ 9x}$	0.901 4
	幂指数模型	$SSC=0.197\ 3x^{2.844\ 1}$	0.854 6
B_4/B_2	线性模型	$SSC=0.323\ 9x-0.296\ 2$	0.817 9
	对数模型	$SSC=0.445\ 4\ln(x)+0.020\ 3$	0.747 9
	二次模型	$SSC=0.297\ 3x^2-0.566\ 9x+0.345\ 4$	0.893 5
	指数模型	$SSC=0.013\ 1e^{1.697\ 6x}$	0.928 5
	幂指数模型	$SSC=0.066\ 9x^{2.406\ 9}$	0.902 4
B_4/B_1	线性模型	$SSC=0.236\ 9x-0.262\ 4$	0.812 6
	对数模型	$SSC==0.435\ 8\ln(x)-0.081\ 5$	0.767 0
	二次模型	$SSC=0.110\ 7x^2-0.198\ 1x+0.148\ 4$	0.842 6
	指数模型	$SSC=0.016\ 3e^{1.222\ 1x}$	0.893 3
	幂指数模型	$SSC=0.039\ 8x^{2.309\ 5}$	0.890 2
B_3/B_2	线性模型	$SSC=0.984\ 7x-1.324\ 5$	0.573 7
	对数模型	$SSC=1.559\ln(x)-0.48$	0.575 7
	二次模型	$SSC=-0.762\ 6x^2+3.401\ 7x-3.235\ 2$	0.577 3
	指数模型	$SSC=0.000\ 1e^{4.793\ 3x}$	0.561 7
	幂指数模型	$SSC=0.006\ 5x^{7.606\ 5}$	0.566 2
B_3/B_1	线性模型	$SSC=0.422\ 6x-0.626\ 1$	0.386 5
	对数模型	$SSC=0.850\ 1\ln(x)-0.367\ 9$	0.382 8
	二次模型	$SSC=0.100\ 8x^2+0.012\ 2x-0.210\ 8$	0.387 5
	指数模型	$SSC=0.004\ 1e^{1.929\ 6x}$	0.332 9
	幂指数模型	$SSC=0.013\ 4x^{3.882\ 4}$	0.329 9

注：式中，SSC 为表层悬浮泥沙浓度，单位 g/L；B_1、B_2、B_3、B_4 分别为 Landsat8 数据的第一、第二、第三、第四波段；x 为反射率的不同波段组合结果。

由表 2 可以看出，在所构建的回归方程中，B_4/B_3 和 B_4/B_2 的相关性较高，这两组波段比值的指数模型的相关系数都超过了 0.9，B_4/B_2 的幂指数方程的相关系数达到了 0.902 4。

3.2.2 多波段组合

将不同波段的反射率进行多波段组合运算后与实验室实测泥沙数据进行相关性分析，构建回归方程(表 3)。

表 3 多波段组合悬浮泥沙反演模型

波段组合	模型	回归方程	R^2
$B_4/(B_3+B_2)$	线性模型	$SSC=0.933\ 9x-0.357\ 4$	0.788 3
	对数模型	$SSC=0.488\ 8\ln(x)+0.461\ 8$	0.710 3
	二次模型	$SSC=2.901\ 6x^2-2.388x+0.561$	0.905 0
	指数模型	$SSC=0.009\ 1e^{4.973\ 2x}$	0.923 7
	幂指数模型	$SSC=0.741\ 3x^{2.681\ 4}$	0.883 3
$B_4/(B_3+B_1)$	线性模型	$SSC=0.858\ 4x-0.359\ 3$	0.797 8
	对数模型	$SSC=0.497\ 6\ln(x)+0.422\ 6$	0.725 9
	二次模型	$SSC=2.373\ 2x^2-2.128\ 8x+0.550\ 1$	0.902 1
	指数模型	$SSC=0.009\ 1e^{4.548x}$	0.925 3
	幂指数模型	$SSC=0.593\ 6x^{2.712\ 7}$	0.891 3
$(B_4+B_3)/B_2$	线性模型	$SSC=0.261\ 8x-0.608$	0.813 6
	对数模型	$SSC=0.788\ 3\ln(x)-0.682\ 9$	0.789 9
	二次模型	$SSC=0.140\ 9x^2-0.609\ 2x+0.721$	0.846 6
	指数模型	$SSC=0.002\ 7e^{1.353\ 9x}$	0.899 1
	幂指数模型	$SSC=0.001\ 7x^{4.137\ 6}$	0.899 1
$B_4/(B_2+B_1)$	线性模型	$SSC=0.563x-0.283\ 2$	0.819 5
	对数模型	$SSC=0.443\ 3\ln(x)+0.277\ 8$	0.760 2
	二次模型	$SSC=0.794\ 5x^2-0.787\ 5x+0.268\ 7$	0.873 7
	指数模型	$SSC=0.014\ 3e^{2.929\ 9x}$	0.917 0
	幂指数模型	$SSC=0.268\ 2x^{2.374\ 9}$	0.901 5
$(B_4+B_3)/(B_2+B_1)$	线性模型	$SSC=0.438x-0.556\ 8$	0.795 0
	对数模型	$SSC=0.751\ 6\ln(x)-0.205\ 7$	0.780 0
	二次模型	$SSC=0.250\ 4x^2-0.439\ 7x+0.201\ 8$	0.806 5
	指数模型	$SSC=0.003\ 7e^{2.237\ 5x}$	0.857 2
	幂指数模型	$SSC=0.021\ 7x^{3.891}$	0.863 7
$(B_4+B_2)/(B_3+B_1)$	线性模型	$SSC=0.939\ 6x-0.813\ 6$	0.785 3
	对数模型	$SSC=0.957\ 5\ln(x)+0.132\ 5$	0.747 3
	二次模型	$SSC=2.898\ 6x^2-5.178x+2.382\ 6$	0.898 3
	指数模型	$SSC=0.000\ 8e^{4.998\ 7x}$	0.918 3
	幂指数模型	$SSC=0.122\ 7x^{5.172}$	0.900 8
$(B_4+B_1)/(B_3+B_2)$	线性模型	$SSC=0.958\ 4x-0.665\ 4$	0.720 0
	对数模型	$SSC=0.785\ 9\ln(x)+0.286\ 4$	0.666 7
	二次模型	$SSC=3.415\ 6x^2-4.957\ 1x+1.857\ 4$	0.872 2
	指数模型	$SSC=0.001\ 6e^{5.211\ 5x}$	0.879 6
	幂指数模型	$SSC=0.284\ 2x^{4.359}$	0.847 5

续表

波段组合	模型	回归方程	R^2
$\lg(B_4)/\lg(B_3)$	线性模型	$SSC=-1.976x+2.193\ 6$	0.706 5
	对数模型	$SSC=-2.057\ln(x)+0.215\ 6$	0.726 5
	二次模型	$SSC=15.904x^2-34.703x+18.986$	0.875 7
	指数模型	$SSC=9\ 852.8e^{-10.83x}$	0.877 7
	幂指数模型	$SSC=0.192\ 1x^{-11.19}$	0.889 0
$\lg(B_4)/\lg(B_2)$	线性模型	$SSC=-1.736\ 2x+1.759\ 5$	0.731 0
	对数模型	$SSC=-1.6\ln(x)+0.025\ 2$	0.749 9
	二次模型	$SSC=10.292x^2-20.528x+10.306$	0.838 6
	指数模型	$SSC=798.68e^{-9.37x}$	0.879 7
	幂指数模型	$SSC=0.069\ 4x^{-8.561}$	0.887 3
$\lg(B_3)/\lg(B_2)$	线性模型	$SSC=-5.321\ 1x+4.942\ 4$	0.545 0
	对数模型	$SSC=-4.721\ln(x)-0.344\ 1$	0.545 2
	二次模型	$SSC=12.185x^2-26.943x+14.532$	0.545 6
	指数模型	$SSC=5\cdot10^9e^{-27.02x}$	0.580 7
	幂指数模型	$SSC=0.011\ 3x^{-23.95}$	0.579 7

注：式中，SSC 为表层悬浮泥沙浓度，单位 g/L；B_1、B_2、B_3、B_4 分别为 Landsat8 数据的第一、第二、第三、第四波段；x 为反射率的不同波段组合结果。

从表 3 中可以看出，$B_4/(B_3+B_2)$、$B_4/(B_3+B_1)$、$B_4/(B_2+B_1)$、$(B_4+B_2)/(B_3+B_1)$这 4 种波段组合间的运算结果与泥沙浓度建立的回归方程中，分别有两种方程的相关系数超过 0.9，其中构建的指数方程的相关系数高于其他方程。

3.3　精度检验

使用另外 7 个采样点的实测泥沙浓度分别对所构建的回归方程中相关系数较高的方程进行精度检验。方程包括由 B_4/B_3、B_4/B_2、$B_4/(B_3+B_2)$、$B_4/(B_3+B_1)$、$B_4/(B_2+B_1)$、$(B_4+B_2)/(B_3+B_1)$6 种组合构建的二次模型、指数模型、幂指数模型。7 个验证点及海水的泥沙浓度详细信息见表 4。验证结果如表 5 所示。

表 4　验证点位置及悬浮泥沙浓度

验证点	位置	实测悬浮泥沙浓度/(g·L^{-1})
1	122.3192167°E　29.91225833°N	0.123 8
2	122.2226667°E　29.9325°N	0.076 1
3	122.18055°E　29.97758333°N	0.192 6
4	122.3056667°E　29.927°N	0.273 0
5	122.3°E　29.92516667°N	0.345 4
6	122.1577783°E　29.98938833°N	0.252 1
7	122.1265°E　29.9905°N	0.463 0

表 5　6 种组合模型验证结果

波段组合	模型	关系式	R^2	平均相对误差/%	均方根误差/(g·L^{-1})
B_4/B_3	二次模型	$SSC=1.302\ 3x^2-1.811x+0.693$	0.888 9	23.21	0.069 1
	指数模型	$SSC=0.007\ 3e^{3.262\ 9x}$	0.901 4	23.43	0.069 9
	幂指数模型	$SSC=0.197\ 3x^{2.844\ 1}$	0.854 6	25.80	0.077 7
B_4/B_2	二次模型	$SSC=0.297\ 3x^2-0.566\ 9x+0.345\ 4$	0.893 5	38.37	0.097 5
	指数模型	$SSC=0.013\ 1e^{1.697\ 6x}$	0.928 5	37.61	0.094 7

续表

波段组合	模型	关系式	R^2	平均相对误差/%	均方根误差/(g·L^{-1})
	幂指数模型	SSC=0.066 9$x^{2.406\,9}$	0.902 4	37.93	0.096 4
	二次模型	SSC=2.901 6x^2−2.388 x+0.561	0.905 0	30.29	0.083 0
$B_4/(B_3+B_2)$	指数模型	SSC=0.009 1e$^{4.973\,2x}$	0.923 7	31.43	0.082 2
	幂指数模型	SSC=0.741 3$x^{2.681\,4}$	0.883 3	32.98	0.087 1
	二次模型	SSC=2.373 2x^2−2.128 8x+0.550 1	0.902 1	28.62	0.078 4
$B_4/(B_3+B_1)$	指数模型	SSC=0.009 1e$^{4.548x}$	0.925 3	29.67	0.078 0
	幂指数模型	SSC=0.593 6$x^{2.712\,7}$	0.891 3	31.36	0.084 1
	二次模型	SSC=0.794 5x^2−0.787 5x+ 0.268 7	0.873 7	36.85	0.096 7
$B_4/(B_2+B_1)$	指数模型	SSC=0.014 3e$^{2.929\,9x}$	0.917 0	37.07	0.095 0
	幂指数模型	SSC=0.268 2$x^{2.374\,9}$	0.901 5	36.65	0.096 0
	二次模型	SSC=2.898 6x^2−5.178x+2.382 6	0.898 3	24.84	0.069 8
$(B_4+B_2)/(B_3+B_1)$	指数模型	SSC=0.000 8e$^{4.998\,7x}$	0.918 3	25.47	0.069 5
	幂指数模型	SSC=0.122 7$x^{5.172}$	0.900 8	26.70	0.073 8

注:式中,SSC 是表层悬浮泥沙浓度,单位 g/L;B_1、B_2、B_3、B_4 分别为 Landsat8 数据的第一、第二、第三、第四波段;x 是反射率的不同波段组合结果。

从表 5 可以看出,B_4/B_3、$(B_4+B_2)/(B_3+B_1)$这两种波段组合的 3 种模型的平均相对误差和均方根误差明显低于另外 4 种波段组合。B_4/B_3 组合 3 种模型的平均相对误差分别为 23.21%、23.43%、25.80%,均方根误差分别为 0.069 1 g/L、0.069 9 g/L、0.077 7 g/L。$(B_4+B_2)/(B_3+B_1)$组合的平均相对误差分别为 24.84%、25.47%、26.70%,均方根误差分别为 0.069 8 g/L、0.069 5 g/L、0.073 8 g/L。将 7 个验证点在这两种组合下的 3 个模型的误差情况进行详细分析,如图 3、图 4 所示。图 3(a)(b)(c)分别表示 B_4/B_3 模型中 7 个验证点在二次、指数、幂指数模型中的模拟值与实测值的比较,图 3(d)表示 7 个验证点在 3 种模型下的相对误差。图 4(a)(b)(c)分别表示$(B_4+B_2)/(B_3+B_1)$模型中 7 个验证点在二次、指数、幂指数模型中的模拟值与实测值的比较,图 4(d)表示 7 个验证点在 3 种模型下的相对误差。

B_4/B_3 二次模型的最大最小相对误差分别为 54.33%和 4.26%,指数模型的最大最小相对误差分别为 56.97%和 2.93%,幂指数模型的最大最小相对误差分别为 58.77%和 1.57%。$(B_4+B_2)/(B_3+B_1)$二次模型的最大最小相对误差分别为 56.12%和 9.29%,指数模型的最大最小相对误差分别为 57.53%和 4.43%,幂指数模型的最大最小相对误差分别为 58.86%和 3.74%。

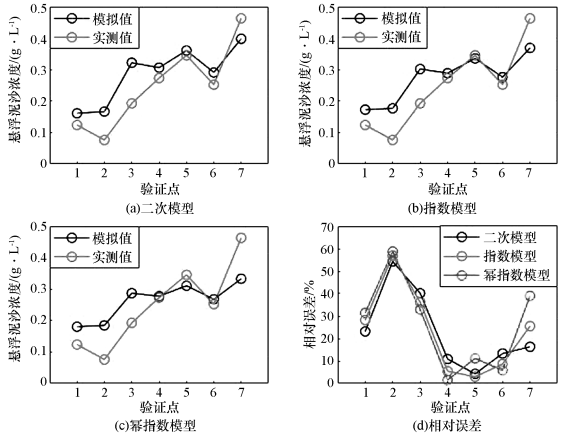

图 3 B_4/B_3 构建的模型精度验证

根据图 3 和图 4 对比悬浮泥沙含量低浓度时(样本 1:0.123 8 g/L,样本 2:0.076 1 g/L,样本 3:0.192 6 g/L)和高浓度时(样本 4:0.273 0 g/L,样本 5:0.345 4 g/L,样本 6:0.252 1 g/L,样本 7:0.463 0 g/L)的相对误差,所分析的 3 种模型,在悬

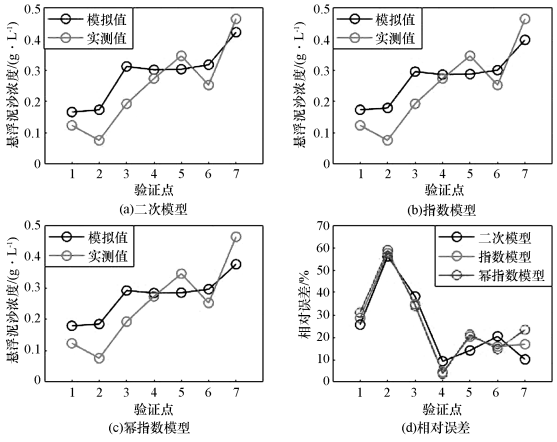

图 4　$(B_4+B_2)/(B_3+B_1)$构建的模型精度验证

浮泥沙浓度低时，模型的误差较悬浮泥沙浓度高时的误差要高。并且对于两种不同波段组合来说，B_4/B_3 的模型精度比$(B_4+B_2)/(B_3+B_1)$模型精度高，选用 B_4/B_3 波段组合中精度最高的二次模型：$SSC=1.302\ 3x^2-1.811x+0.693$ 对舟山海域悬浮泥沙浓度进行反演。

3.4　Landsat8 卫星数据对舟山近岸悬浮泥沙浓度反演

运用 Landsat8 卫星数据对舟山近岸悬浮泥沙浓度进行反演，反演结果如图 5 所示。

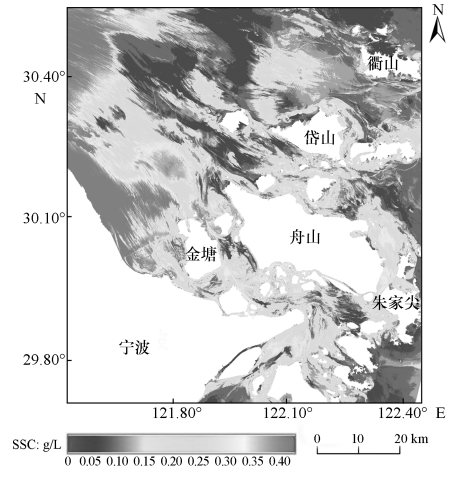

图 5　2017 年 7 月 23 日舟山海域悬浮泥沙浓度遥感反演结果

图 5 是 Landsat8 卫星数据反演的 2017 年 7 月 23 日舟山海域悬浮泥沙分布情况，可以看出舟山群岛海域处于高泥沙浓度的状态。岛屿近岸悬浮泥沙浓度明显高于开阔水域泥沙浓度，岛屿近岸的悬浮泥沙浓度大部分高于 0.2 g/L，靠近杭州湾一侧的舟山本岛西北角的悬浮泥沙浓度明显高于其他地区，西北角的悬浮泥沙浓度大部分超过 0.4 g/L。在杭州湾以及长江口入海水流的作用下泥沙向东南方向输移，受岛屿阻隔的影响，在多数岛屿西侧泥沙大量堆积，使得大部分岛屿西侧的泥沙浓度高于东侧，水体悬浮泥沙浓度呈现“西高东低”的格局。

4　结果与讨论

通过对舟山海域水体光谱特征观测、采样点泥沙浓度的实验室测量及 Landsat8 遥感数据不同波段反射率的计算，获得光谱反射率与悬浮泥沙浓度的相关性，构建反演模型。研究结果如下：

(1)随着水体悬浮泥沙浓度的增加，各波段的反射率相应增加，且不同波段的增幅有明显的不同。水体光谱曲线存在“双峰”现象，第一峰值出现在波长 580 nm 左右，呈“宽峰”的形状，第二个峰值位于波长 820 nm 左右。

(2)根据不同波段之间的组合，通过综合分析发现 Landsat8 遥感数据波段 4 与波段 3 的比值模型与悬浮泥沙浓度的相关性较高。经过精度检验，认为 B_4/B_3 构建的二次模型 $SSC=1.302\ 3x^2-1.811x+0.693$ 适用于舟山群岛海域悬浮泥沙浓度的反演。

(3)舟山群岛海域处于高泥沙浓度的状态，其西北角的悬浮泥沙浓度明显高于其他地区。由于水流的流向及海岛的阻隔影响，舟山岛屿周围的悬浮泥沙浓度呈西高东低。

(4)本研究只是基于遥感数据，并未考虑海流、潮汐等其他动力因素对泥沙浓度分布的影响，采样点数量较少，对舟山群岛海域悬浮泥沙浓度的空间分布的研究存在不足。在今后的研究中应弥补这一不足，并进一步对于舟山群岛海域不同季节的悬浮泥沙浓度变化进行研究。

参考文献

[1]　MILLIMAN J D，SHEN H T，YANG Z S，et al.Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf[J].Continental Shelf Research，1985，4(1)：37－45.

[2] 博克忖,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(中文版),1999 (3):134－140.

[3] 何青,恽才兴,时伟荣.长江口表层水体悬沙浓度场遥感分析关[J].自然科学进展,1999 (2):66－70.

[4] CHEN X L,LI Y S,LIU Z G,et al.Integration of multi-source data for water quality classification in the Pearl River estuary and its adjacent coastal waters of Hong Kong[J].Continental Shelf Research,2004,24(16):1827－1843.

[5] 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 (2):106－114.

[6] 陈晓玲,袁中智,李毓湘,等.基于遥感反演结果的悬浮泥沙时空动态规律研究:以珠江河口及邻近海域为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2005 (8):677－681.

[7] 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,2016,40(2):77－83.

[8] RICHARD L M,CRUISE J F.Effects of suspended sediments on coral growth:Evidence from remote sensing and hydrologic modeling[J].Remote Sensing of Environment,1995,53(3):177－187.

[9] FORGET P,OUILLON S.Surface suspended matter off the Rhone river mouth from visible satellite imagery[J].Oceanologica Acta,1998,21(6):739－749.

[10] 李炎,李京.基于海面－遥感器光谱反射率斜率传递现象的悬浮泥沙遥感算法[J].科学通报,1999(17):1892－1897.

[11] 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(中文版),2005 (4):38－44.

[12] 李植斌.浙江省海岛区资源特征与开发研究:以舟山群岛为例[J].自然资源学报,1997,12(2):139－145.

[13] 宋亚民.舟山群岛水文特性[J].水文,2001,21(6):59－62.

[14] 韩留生,周成虎,李勇,等.近岸河口与内陆水环境遥感[M].北京:中国水利水电出版社,2018:27－28.

[15] 孟凡晓,陈圣波,张国亮,等.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[J].世界地质,2017,36(2):616－623＋642.