贻贝养殖区悬浮颗粒物浓度的卫星遥感反演研究

刘彬宇¹, 孟家羽¹, 王胜强^{1,2}, 成洺萱¹, 孙德勇^{1,2}, 张秀梅³, 许永久³

(1.南京信息工程大学海洋科学学院,江苏南京210044;2.自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 江苏南京210024;3.浙江海洋大学水产学院,浙江舟山316022)

摘 要:悬浮颗粒物(total suspended matter, TSM)是重要的水环境参数,影响着海水的透明度和初级 生产力,因此总悬浮颗粒物的监测对于海洋牧场环境的评价具有重要意义。卫星遥感技术具有显著的 时空观测优势,但目前尚无专门针对海洋牧场小尺度海域的 TSM 遥感产品。本研究以浙江嵊泗枸杞 岛贻贝养殖区为研究对象,基于春、夏、秋、冬4个季节的调查实测数据,建立了面向 Landsat-8 卫星遥感 影像的 TSM 浓度定量反演模型。验证结果表明,反演模型具有良好的估算精度,决定系数 R²为 0.72, 均方根误差为 6.59 g/m³,绝对偏差为 0.72 g/m³,平均绝对百分误差为 29.8%;进一步将其用于 2021— 2022 年春、夏、秋、冬4个季节的 Landsat-8 影像,反演了贻贝养殖区及毗邻海域的 TSM 浓度遥感产品, 分析了其时空变化特征。

关键词:贻贝养殖区;悬浮颗粒物浓度;遥感反演模型;Landsat-8 OLI 卫星影像 中图分类号:X87 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2024)01-0152-09

Remote sensing estimation of total suspended matter concentration in the mussel culture area

LIU Binyu¹, MENG Jiayu¹, WANG Shengqiang^{1,2}, CHENG Mingxuan¹, SUN Deyong^{1,2}, ZHANG Xiumei³, XU Yongjiu³

(1.School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210024, China; 3.School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Total suspended matter (TSM) is an important water constituent, influencing seawater's transparency and primary productivity. Therefore, monitoring TSM concentration is of great significance for evaluating marine ranch environments. Satellite remote sensing has significant advantages in terms of spatial and temporal observations. However, the current TSM product of ocean color remote sensing is for large-scale regions, lacking specific products for small-scale regions, like the marine ranch. In this study, we focused on the mussel culture area around Gouqi island in Shengsi, Zhejiang province, and conducted four observation cruises during

收稿日期:2023-06-04,修订日期:2023-08-03

基金项目:国家自然科学基金项目(42176181,42176179,42106176);江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK20211289, BK20210667);遥感科学国家重点实验室开放基金项目(OFSLRSS202103);自然资源部海岸带开发与保护重点实验 室开放基金项目(2021CZEPK02);浙江省自然科学基金资助项目(LY20C030004);大学生创新创业训练计划项目 (202210300021Z)

作者简介:刘彬宇(2001-),男,江苏苏州人,本科生,主要从事海洋遥感方面的研究, E-mail: by_liu1231@163.com

通信作者:王胜强(1986-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事海洋光学和水环境遥感方面的研究, E-mail: shengqiang.wang@nuist.edu.cn

different seasons. Based on the *in situ* data, we proposed a remote sensing model for deriving TSM concentration from the Landsat-8 satellite image with a high spatial resolution (30 m). The model validation showed a good performance, with determination coefficient, root-mean-square error, bias, and mean absolute percentage error of 0.72, 6.59 g/m³, 0.72 g/m³ and 29.8%, respectively. Subsequently, the proposed model was applied to generate TSM products in the mussel culture area using Landsat-8 satellite images in different seasons, and the spatial and temporal variations of TSM were further studied.

Key words: mussel culture area; total suspended matter concentration; remote sensing estimation model; Landsat-8 OLI image

海水养殖业是我国粮食安全保障体系中的 重要组成部分^[1],为了解决渔业资源与生态环境 问题,"海洋牧场"这一新型的模式近年来快速 发展起来。"海洋牧场"是指利用自然海洋生 态环境,对鱼、虾、贝、藻等海洋资源进行有计划 和有目的的海上放养^[2]。海洋牧场既能养护生 物资源,又能修复生态环境,是实现我国近海渔 业资源恢复、生态系统和谐发展与"蓝色碳 汇"的重要途径^[3]。海洋牧场的发展依赖于健 康的海洋生态系统^[4],因此对牧场生态环境的有 效监测是极为重要的工作。

总悬浮颗粒物(total suspended matter, TSM)、 叶绿素 a、浊度等环境因子对海洋牧场中的生物 生长有着重要影响,其中 TSM 是指悬浮在水中 的超过一定大小的物质,包括不溶于水的无机 物、有机物(藻类等)以及泥沙、黏土、微生物 等。TSM 浓度是衡量水体清澈程度和水污染程 度的重要指标,是重要的水色和水环境遥感参 数^[5-7],影响着海水的透明度和初级生产力,进而 影响水生生物的生存和繁殖,因此, TSM 的有效 监测对海洋牧场环境评估管理具有重要意义。

针对海水 TSM 浓度的监测,通常采用离散 的水样调查法,该方法不但耗时耗力,而且只能 获得时空不连续的数据。相比之下卫星遥感技 术具有高时空观测优势,能够实时或准实时对海 域进行连续观测,及时、客观地掌握海域的 TSM 实际状况。因此,卫星遥感技术目前已成 为监测海洋 TSM 的重要手段。随着海洋水色遥 感技术的不断发展,诸多水色卫星传感器发射成 功并用于反演监测 TSM 浓度,如宽视场海洋观 测传感器(sea-viewing wide field-of-view sensor, SeaWiFS)、中分辨率成像光谱仪(moderateresolution imaging spectroradiometer, MODIS)、中 等分辨率成像频谱仪(medium resolution imaging spectrometer, MERIS)、地球静止海洋水色成像 仪(geo-stationary ocean color imager, GOCI)等。同时,研究学者们也针对不同传感器、不同海域 提出了多种 TSM 遥感反演算法^[8-11]。例如,1994 年 Tassan^[8]利用 SeaWiFS 辐射计 490 nm、555 nm 和 670 nm 波段遥感反射率反演了 TSM 浓度; Zhang 等^[9]针对黄东海海域,提出了利用 MODIS 数 据 的 TSM 浓度反 演 算 法。 He^[10]等利用 GOCI 数据开发了区域 TSM 浓度算法,并分析了 沿海悬浮颗粒物的日内变化。

需要指出的是,现有常用海洋水色传感器空 间分辨率多为1km左右,其TSM遥感产品主要 针对大尺度海域。但是,海洋牧场贻贝养殖区的 空间尺度通常较小(多为几公里),而且受水动力 环境和人为扰动等因素综合影响,海洋牧场水体 光学特性复杂多变。这使得现有海洋水色传感 器的 TSM 产品, 难以满足对海洋牧场小尺度海 域的空间精细化监测需求。因此,有必要针对海 洋牧场小尺度区域,开发基于高空间分辨率卫星 影像的 TSM 浓度反演技术,进而构建 TSM 浓度 的高质量遥感产品。事实上,国内外已有研究学 者尝试利用 Landsat、高分系列等的陆地卫星开 展近海区域的 TSM 研究^[12-14]。例如, Zhang 等^[12] 利用 Landsat TM / ETM +数据反演了黄河口悬浮 颗粒物浓度; Qiu 等^[13]利用 Landsat-8 OLI 数据 分析了黄河口的总悬浮颗粒物分布变化特征;邵 宇杰等^[14]针对高分4号卫星(GF-4),构建了杭 州湾悬浮泥沙反演模型。这些研究表明利用陆 地卫星开展海洋水体 TSM 浓度遥感反演是可行的。

本文以浙江嵊泗枸杞岛海洋牧场(贻贝养殖 区)为研究对象,基于多个航次的现场实测数据, 面向高空间分辨率(30 m)的 Landsat-8 卫星影 像,研发 TSM 浓度遥感反演模型,构建不同季节的 TSM 卫星遥感产品,并分析其时空分布特征, 为海洋牧场环境监测评估提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文研究区域为浙江嵊泗枸杞岛贻贝养殖 区及毗邻海域,具体范围为: 30.695°N-30.760°N, 122.717°E-122.800°E(图1)。枸杞岛是浙江省 嵊泗列岛最东边的海岛之一,位于浙江省舟山市 东北方向,处于长江与东海交汇的入海口。贻贝 养殖区位于枸杞岛西北部近岸海域,面积约 1020 hm²,一年可孕育贻贝近10万吨,因此素有 "海上牧场"之称,是"中国贻贝"的主产地。





图 1 研究区域及航次调查站点分布



1.2 现场调查数据

本研究分别于 2021 年 11 月(秋)和 2022 年 1 月(冬)、6 月初(晚春)、8 月(夏)不同季节在贻 贝养殖区及毗邻海域进行了 4 个航次调查实 验。每个现场航次调查在贻贝养殖区及毗邻海 域布设 20 个站点,站点位置如图 1 所示。调查 参数包括水体的遥感反射率(*R*_{rs})和 TSM 浓度 等。参数调查及测量过程严格按照 NASA 海洋 光学规范进行^[15]。

TSM 浓度采用称重法测量获取^[16],主要步 骤包括烘干、冷却、称重、过滤、再烘干、再冷 却、再称重。具体过程:在航次开展之前,先在 实验室内利用烘箱在 110 ℃ 条件下对空白 GF/F 滤膜进行烘干,待在干燥皿中冷却后,利用十万 分之一精度的天平进行称重,计为w₁;在开展航 次调查时,利用事先称重过的空白滤膜过滤0.5~ 1L的水样,过滤后将滤膜保存在-20℃冰箱中, 待调查结束后,将滤膜带回实验室进行再次烘 干、冷却及称重,此时重量计为w₂。TSM浓度 使用以下公式计算:

$$C_{\rm TSM} = \frac{w_1 - w_2}{V} \tag{1}$$

式中: C_{TSM} 表示 TSM 的浓度(g/m^3); V 为过 滤水样体积(m^3)。

遥感反射率 R_{rs}利用 ASD 便携式野外光谱 仪 FieldSpec® Pro FR(波长范围: 350~2500 nm) 现场测得,测量方法为水面以上测量法^[15,17-18]。 主要流程如下:在天空晴朗无云时,根据调查船 停靠方位和太阳光情况,确定测量方位角和天顶 角分别为 135°和 40°^[17];然后,利用 ASD 便携式 野外光谱仪测量参考灰板、水体和天空光的辐 亮度光谱,对于每个目标物分别测量 10 次光谱, 然后去除异常光谱后计算剩余光谱平均值;最 后,计算得到遥感反射率 R_{rs}(*λ*):

$$R_{\rm rs}(\lambda) = \frac{L_{\rm t}(\lambda) - \rho L_{\rm sky}(\lambda)}{\pi L_{\rm p}(\lambda) / \rho_{\rm p}}$$
(2)

式中: $L_t(\lambda)$ 、 $L_{sky}(\lambda)$ 和 $L_p(\lambda)$ 分别为水体、天 空光和参考灰板的辐亮度; ρ_p 为参考灰板的漫反 射率,由参考灰板生产商提供; ρ 为水—气界面 对天空光的反射率,与风速、风向、观测几何角 度以及太阳位置有关,当水面平静时, ρ 一般取 值 0.022^[18]。将 $R_{rs}(\lambda)$ 数据与现场实测 TSM 浓度 数据进行匹配,共得到 76 组样本。

为了构建面向 Landsat-8 卫星影像的 TSM 浓度遥感反演模型,本研究利用美国地质勘探局 (United States Geological Survey, USGS) 官网 (https://earthexplorer.usgs.gov/) 给出的 Landsat-8 OLI 传感器光谱响应函数,将所有站点的实测 $R_{rs}(\lambda)$ 重采样到 Landsat-8 OLI 波段, 计算公式^[9] 为:

$$R_{\rm rs}(\lambda_k) = \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_j} S(\lambda) R_{\rm rs}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_i}^{\lambda_j} S(\lambda) d\lambda}$$
(3)

式中: λ_k 为 Landsat-8 OLI 波段的中心波长; λ_i 和 λ_j 分别为中心波长 λ_k 的下限和上限; $S(\lambda)$ 为 光谱响应函数; $R_{rs}(\lambda)$ 为所有站点现场实测的遥感反射率。

1.3 卫星遥感数据

本研究使用的卫星数据来自 Landsat-8 卫星的 L1 级产品。Landsat-8 携带有 OLI 和 TIRS 传感器, OLI 成像仪包括 9 个波段,时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 30 m,其中包括一个空间分辨率 15 m 的全色波段。本文选取前 5 个波段(中心波长为:443 nm、482 nm、561 nm、655 nm 和 865 nm)进行 TSM 浓度的反演。针对研究区域,本文从 USGS 官网(https://earthexplorer.usgs.gov/)下载获得了 2021 年 11 月 16 日(秋季)、2022 年 1 月 3 日(冬季)、2022 年 3 月 24 日(春季)和 2022 年 8 月 15 日(夏季)4 景晴空无云的影像,并将遥感图像裁切至本文所需的研究区域,真彩色合成影像如图 2 所示。





大气校正是海洋水色遥感反演海洋光学和 生物参数的关键过程^[19]。本文利用 ACOLITE (Atmospheric Correction for OLI lite) 20220222.0 版本(下载网址: http://odnature.naturalsciences. be/remsem/software-and-data/acolite/)对 Landsat-8 OLI 卫星影像数据进行大气校正。ACOLITE 是一种专门针对高浊度近岸水体的大气校正方 法,被广泛用于近岸及内陆湖泊水色遥感研究领 域^[20-22]。ACOLITE 包含默认的"暗光谱拟合" (dark spectrum fitting, DSF)和"指数外推" (exponential extrapolation, EXP)两种大气校正算法。DSF 算法是针对米级分辨率传感器开发的,对于高分辨率卫星传感器其算法性能优于EXP 算法,基于现场实测数据的验证表明,在大多数情况下 DSF 算法的误差小于 EXP 算法,其均方根误差小于 0.01, 而 EXP 算法的误差较大,均方根误差有时超过 0.02^[22]。因此,本研究采用了 DSF 算法进行大气校正。

1.4 模型精度评价指标

本文利用留一交叉检验法对模型精度进行验证,精度评价指标包括:决定系数 (determination coefficient, R^2)、平均偏差(*Bias*)、 均方根误差(root-mean-square error, *RMSE*)及平 均绝对百分误差(mean absolute percentage error, *MAPE*),计算公式分别为:

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (\hat{y}_{i} - y_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (\bar{y} - y_{i})^{2}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (\hat{y}_{i} - \bar{y})^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (y_{i} - \bar{y})^{2}}$$
(4)

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)$$
 (5)

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\%$$
 (6)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)^2}$$
(7)

式中: y_i(*i*=1,2,…,N)表示现场实测 TSM 浓 度; ȳ为现场实测 TSM 浓度平均值; ŷ_i表示 TSM 浓度反演值; N 为样本数量。

2 结果与讨论

2.1 现场实测悬浮颗粒物浓度及遥感反射率光 谱分布特征

不同季节 4 个航次调查实测的 TSM 浓度数 据呈现出明显的变化特征(表 1),可以看出: 贻 贝养殖区及毗邻海域所有季节的实测 TSM 浓度 范围为 2.2 ~ 45.4 g/m³,其平均值、方差和变异 系数分别为 10.9 g/m³、11.0 g/m³和 100.9%; 4 个 季度的 TSM 浓度分布也呈现出明显的差异, 整 体上冬季 TSM 浓度最高,均值(*Mean*)高达 27.7 g/m³,变异系数(coefficient of variation, *CV*) 也最大(124.4%), 而秋季、晚春和夏季 3 个季节的 TSM 浓度值则相当。在冬季现场航次调查前 3 d, 研究区域遭遇强风天气, 这可能引起了海水

上下强烈混合,导致底层悬浮颗粒物再悬浮,进 而使得表层海水 TSM 浓度升高。这些结果表明 研究区域的 TSM 浓度具有显著的变异性。

Tab.1Variations of measured total suspended matter concentration							
时间	最大值 / g·m ⁻³	最小值/g·m ⁻³	平均值/g·m ⁻³	标准差/g·m ⁻³	变异系数 / (%)		
2021-11	18.7	2.2	6.3	3.8	60.5		
2022-01	43.0	13.7	27.7	8.6	31.2		
2022-06	45.4	3.0	7.5	9.4	124.4		
2022-08	8.3	3.3	5.0	1.5	29.2		
总量	45.4	2.2	10.9	11.0	100.9		

表1 实测总悬浮颗粒物浓度的分布特征

相应地,受TSM浓度的高度变化影响,遥感 反射率 R_{rs}(λ)光谱也呈现出了明显的变化(图 3)。 由图 3 可以看出: R_{rs}(λ)光谱值在蓝绿波段随波 长的增加而增大,在550~580 nm 波长范围达到 峰值,这主要是由于该波长处TSM 有着较高的 后向散射^[23]。此外,部分样本的 R_{rs}(λ)光谱在 600~700 nm 波长范围有着明显的"肩状"特 征,同时在 810 nm 波长附近出现第二反射峰,这 些特征均为典型的浑浊水体 R_{rs}(λ)光谱特征^[23]。





图 3 现场实测 $R_{rs}(\lambda)$ 光谱曲线 Fig. 3 In situ measured $R_{rs}(\lambda)$ spectra

进一步,为了探究 $R_{rs}(\lambda)$ 光谱对 TSM 浓度变 化的响应特征,本文分析了 TSM 浓度与光谱之 间的关系。图 4 展示了 Landsat-8 OLI 各个波段 $R_{rs}(\lambda)$ 与 TSM 浓度 (C_{TSM})以及对数转换后的 TSM 浓度 [$\log_{10}(C_{TSM})$]之间的相关性,可以看 出: $R_{rs}(\lambda)$ 与 C_{TSM} 以及 $\log_{10}(C_{TSM})$ 均呈现显著相 关性,相关系数均大于 0.5;同时, $R_{rs}(\lambda)$ 与 $log_{10}(C_{TSM})$ 之间的相关性均强于与 C_{TSM} 的相关性; $R_{rs}(\lambda)$ 与 $log10(C_{TSM})$ 之间的相关系数最大值为 0.77(最大值出现在 650 nm 附近)。以上显著相关性结果表明 $R_{rs}(\lambda)$ 具有很大的潜力用于 TSM 浓度反演,而且在建立 TSM 反演模型时,相比 C_{TSM} , $log_{10}(C_{TSM})$ 作为模型因变量可能会有更好的建模精度。





- Fig. 4 Correlation coefficient of $R_{rs}(\lambda)$ with C_{TSM} and $\log_{10}(C_{TSM})$
- 2.2 TSM 浓度遥感反演模型构建

为了建立最优的 TSM 浓度遥感反演模型, 本文尝试构建了不同光谱指数形式以充分利用 $R_{rs}(\lambda)$ 信息。如表 2 所示,本文共建立了 8 个不 同的 $R_{rs}(\lambda)$ 光谱指数。针对每种光谱指数,考虑 了所有可能的 Landsat-8 OLI 波段组合,并分析 了不同波段组合下的光谱指数和 log₁₀(C_{TSM})的 相关性,在表 2 中展示了最佳的(即相关系数最 大的)波段组合及其相关系数。可以发现:最优 波段组合下的每种光谱指数与 log₁₀(C_{TSM})相关 系数均大于 0.7, 其中 X₄、X₅ 和 X₈ 与 log₁₀(C_{TSM}) 的相关系数最高, 均大于 0.8。因此, 本研究选 取 X₄、X₅ 和 X₈ 这 3 个光谱指数进行后续的 TSM 浓度反演模型构建。

	8 1 8		
X	光谱指数	最佳波段组合	相关系数
X ₁	$R_{\rm rs}(\lambda_1)$	$\lambda_1 = 655 \text{ nm}$	0.76
X_2	$\lg[R_{\rm rs}(\lambda_1)]$	$\lambda_1 = 655 \text{ nm}$	0.71
X3	$R_{\rm rs}(\lambda_1) - R_{\rm rs}(\lambda_2)$	$\lambda_1 = 865 \text{ nm}$ and $\lambda_2 = 655 \text{ nm}$	0.77
X_4	$\frac{R_{\rm rs}(\lambda_1)}{R_{\rm rs}(\lambda_2)}$	$\lambda_1 = 655 \text{ nm}$ and $\lambda_2 = 443 \text{ nm}$	0.85
X_5	$\lg\left[\frac{R_{\rm rs}\left(\lambda_1\right)}{R_{\rm rs}\left(\lambda_2\right)}\right]$	$\lambda_1 = 655 \text{ nm}$ and $\lambda_2 = 443 \text{ nm}$	0.82
X_6	$\frac{R_{\rm rs}(\lambda_1) - R_{\rm rs}(\lambda_2)}{R_{\rm rs}(\lambda_1)/R_{\rm rs}(\lambda_2)}$	$\lambda_1 = 561 \text{ nm}$ and $\lambda_2 = 482 \text{ nm}$	0.71
X ₇	$\frac{R_{\rm rs}(\lambda_1) + R_{\rm rs}(\lambda_2)}{R_{\rm rs}(\lambda_1)/R_{\rm rs}(\lambda_2)}$	$\lambda_1 = 443 \text{ nm}$ and $\lambda_2 = 655 \text{ nm}$	0.79
X ₈	$\frac{R_{\rm rs}(\lambda_1) - R_{\rm rs}(\lambda_2)}{R_{\rm rs}(\lambda_1) + R_{\rm rs}(\lambda_2)}$	$\lambda_1 = 655 \text{ nm}$ and $\lambda_2 = 443 \text{ nm}$	0.83

表 2 用于估算 TSM 浓度的 8 个光谱指数及其与悬浮颗粒物浓度的相关性 Tab.2 Eight spectral indexes for deriving TSM concentrations and their correlations with TSM concentrations

进一步,针对光谱指数 X₄、X₅和 X₈,分别建 立与 log₁₀(C_{TSM})的线性模型、指数模型、二次模 型以及幂函数模型,并计算各反演模型的 R²、 *MAPE*、*RMSE*和 *Bias*,结果列于表 3。从表 3 可 以看出:光谱指数 X₄ 对应的线性模型和幂函数 模型、光谱指数 X₄ 对应的指数模型和二次函数 现出良好的反演效果。相比之下, X₈ 对应的二次函数模型反演效果最优,同时具有较高的 R²(0.73)以及较低的 RMSE(6.28 g/m³)、Bias (0.71 g/m³)和 MAPE(29.0%),其模型拟合效果如 图 5a 所示,多数样本点能够较好地分布在拟合 曲线附近。因此,该模型被最终确定为 TSM 浓 度的最优反演模型,其表达式如下:

表 3 悬浮颗粒物浓度反演模型对比

Tab.3	Comparisons	of the performance	e of different	estimation	models of total	l suspended matter	concentration
-------	-------------	--------------------	----------------	------------	-----------------	--------------------	---------------

光谱指数	模型形式	模型方程	R^2	MAPE/(%)	$Bias/g \cdot m^{-3}$	$RMSE/g \cdot m^{-3}$
	幂函数模型	$y = 1.17x^{0.81}$	0.71	34.5	0.94	6.25
$R_{\rm rs}$ (655)	指数模型	$y = 0.43 \exp(0.92x)$	0.45	33.9	0.58	8.13
$x_4 - \frac{1}{R_{\rm rs}(443)}$	线性模型	y = 0.99x + 0.20	0.72	34.0	0.91	6.33
	二次模型	$y = 704.51x^2 - 24.16x + 0.65$	0.63	39.6	1.23	8.24
	幂函数模型	$y = 0.54x^{-0.28}$	0.61	53.9	1.85	11.71
$K_{\rm rs} = 10 \left[R_{\rm rs} (655) \right]$	555)] 指数模型	$y = 1.17 \exp(1.87x)$	0.71	34.5	0.94	6.25
$x_5 - \log\left[\frac{R_{rs}}{R_{rs}}$	线性模型	y = 1.72x + 1.19	0.45	39.0	1.41	6.44
	二次模型	$y = 2.91x^2 - 2.47x + 1.15$	0.73	32.3	0.71	6.62
	幂函数模型	$y = 0.56x^{-0.28}$	0.62	54.1	1.85	11.76
$R_{\rm rs} (655) - R_{\rm rs} (443)$	指数模型	y = 1.16(1.68x)	0.73	33.9	0.90	6.26
$X_8 = \frac{1}{R_{\rm rs}(655) + R_{\rm rs}(443)}$	线性模型	y = 1.58x + 1.19	0.49	37.7	1.32	6.33
	二次模型	$y = 2.18x^2 - 2.16x + 1.15$	0.73	29.0	0.71	6.28



图 5 TSM 浓度反演模型拟合与验证

Fig. 5 Model fitting and validation for estimation of TSM concentration

$$C_{\text{TSM}} = 10^{2.18X^2 + 2.16X + 1.15}$$
(8)
$$X = \frac{R_{\text{rs}}(655) - R_{\text{rs}}(443)}{R_{\text{rs}}(655) + R_{\text{rs}}(443)}$$
(9)

为了进一步验证所建立的 TSM 浓度反演模型的精度,对其进行了留一法交叉检验,结果如图 5b 所示:整体上 TSM 浓度的反演值和实测值具有较好的一致性,绝大多数样本均匀分布在1:1线附近,交叉检验的 R²、RMSE、Bias 和MAPE 分别为0.72、6.59 g/m³、0.72 g/m³和29.8%。这些结果表明本研究针对贻贝养殖区小尺度区域所建立的 TSM 浓度反演模型具有良好的估算精度。

需要指出的是,本研究区的贻贝养殖方式主 要为浮筏吊养,虽然网箱等布放在水面以下,但 漂浮在水面以上的浮标(分布稀疏)可能会对水 体遥感反射率产生一定的影响。为此,分别统计 分析了养殖区内、外大量的遥感反射率光谱,发 现浮标潜在的影响主要存在于近红外和短波红 外波段,而在可见光波段的影响较小,这使得本 文所构建的 TSM 反演模型受其影响也较小。而 要想获得更精确的 TSM 遥感产品, 需考虑贻贝 养殖区内浮标的潜在影响,并对其进行相应的校 正。此外,本文开发的反演模型主要针对枸杞岛 贻贝养殖区及毗邻海域,模型在其他海洋牧场区 的适用性还有待进一步检验。本文利用了 Landsat-8 OLI 影像对贻贝养殖区 TSM 浓度进行 了反演,对于其他高分辨率卫星传感器(如 Sentinel-2、环境卫星等),也需要根据其传感器 波段设置,进一步研究开发相应的 TSM 浓度遥

感反演模型,以实现利用多源卫星传感器数据的 海洋牧场水环境要素监测,这些问题将在下一步 工作中深入研究。

2.3 基于 Landsat-8 影像的 TSM 浓度反演

将本文开发的 TSM 浓度遥感反演模型应用 于 2021 年 11 月 16 日(秋季)、2022 年 1 月 3 日 (冬季)、2022年3月24日(春季)和2022年 8月15日(夏季)大气校正后的 Landsat-8 OLI 卫 星影像,反演得到了4个季节的TSM浓度遥感 产品(图 6),同时,也根据图 1 所示的贻贝养殖区 范围,统计分析了养殖区的 TSM 浓度平均值 (图 7)。可以看出: 2021 年秋季(2021 年 11 月) (图 6a), 贻贝养殖区及毗邻海域的 TSM 浓度较 低, 贻贝养殖区的 TSM 浓度平均值为 5.3 g/m³; 冬季(2022年1月)(图 6b), 贻贝养殖区及毗邻 海域的 TSM 浓度最高, 大多数区域的 TSM 浓度 大于 45 g/m³; 春季(2022 年 3 月)(图 6c), 贻贝养 殖区及毗邻海域大部分海域的 TSM 浓度有所升 高,海域牧场大部分区域 TSM 浓度在 12 g/m³ 左 右,这可能和春季常发生的浮游植物藻华有关, 浮游植物藻华增加了有机悬浮颗粒物,进而使 得 TSM 浓度升高; 夏季(2022 年 8 月)(图 6d), 除少部分区域 TSM 浓度出现高值外, 贻贝养殖 区及毗邻海域绝大部分区域 TSM 浓度较低,浓 度为 5~ 10 g/m³, 平均值为 9.1 g/m³。正如 2.1 节所述, 2022年1月初(航次调查前3d), 贻 贝养殖区经历了一次强风天气,强风触发的海水 上下混合可能引起了底层悬浮颗粒物再悬浮,进



图 6 利用 Landsat-8 OLI 影像反演的贻贝养殖区及毗邻海域 TSM 浓度分布

Fig. 6 Distributions of TSM concentrations in the mussel culture area and adjacent areas derived from Landsat-8 OLI satellite images







而导致 TSM 浓度升高。

此外,值得注意的是,在冬季贻贝养殖区内 部部分区域的 TSM 浓度明显低于毗邻海域浓度 (大于 45 g/m³), TSM 浓度为 20~30 g/m³,这可 能和贻贝养殖有关。贻贝养殖采用的养殖方式 为浮筏吊养方式,由于浮筏的存在,将养殖区分 隔成一个个小区域,在一定程度上减弱了水体的 上下混合,抑制了底层悬浮颗粒物再悬浮。同 时,仔细观察也可发现,2021 年秋季和 2022 年夏 季,贻贝养殖区内部区域的 TSM 浓度也略低于 毗邻海域浓度值,这也可能和养殖区的贻贝摄食 方式有关,贻贝属于滤食性贝类,主要以小型的 浮游生物、有机碎屑以及一些微生物为食,这可 能在一定程度上降低了 TSM 的浓度^[24-26]。

3 结论

(1)针对海洋牧场(贻贝养殖区)小尺度区 域,基于多个海洋牧场航次调查数据,本文建立 了面向 Landsat-8 OLI影像的 TSM 浓度遥感反 演模型,模型表现出良好的估算精度($R^2 = 0.72$, *RMSE* = 6.59 g/m³, *Bias* = 0.72 g/m³, *MAPE* = 29.8%);进而利用该模型得到了贻贝养殖区小尺 度区域的 TSM 浓度空间和季节分布特征。

(2)贻贝养殖区 TSM 浓度在 2021 年秋季和 2022 年夏季最低,在 2022 年春季有所升高,在 2021 年冬季达到最高;冬季 TSM 浓度高可能与 海水上下混合引起的底层悬浮颗粒物再悬浮有 关。贻贝养殖区内部部分区域 TSM 浓度明显低 于毗邻海域,这可能与贻贝养殖筏架抑制水体上 下混合有关。 (3)本研究构建的 TSM 浓度遥感反演模型 为枸杞岛贻贝养殖牧场区 TSM 浓度快速监测提 供了科学支持,进而可服务于贻贝养殖区养殖环 境的评估和管理。

参考文献:

- 陈 勇,田 涛,刘永虎,等.我国海洋牧场发展现状、问题 及对策(上)[J].科学养鱼,2022 (2): 24-25.
- [2] 陈力群, 张朝晖, 王宗灵. 海洋渔业资源可持续利用的一种 模式——海洋牧场[J]. 海岸工程, 2006, 25(4): 71-76.
- [3] 林承刚,杨红生,陈 鹰,等.现代化海洋牧场建设与发展——第230期双清论坛学术综述[J].中国科学基金,2021,35(1):143-152.
- [4] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1133-1140.
- [5] DOXARAN D, CASTAING P, LAVENDER S J. Monitoring the maximum turbidity zone and detecting fine-scale turbidity features in the Gironde estuary using high spatial resolution satellite sensor (SPOT HRV, Landsat ETM+) data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(11): 2303-2321.
- [6] SHEN F, VERHOEF W, ZHOU Y X, 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.
- [7] ODERMATT D, GITELSON A, BRANDO V E, et al. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 118: 116-126.
- [8] 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.
- [9] ZHANG M W, TANG J W, DONG Q, 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.
- [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] SISWANTO E, TANG J W, YAMAGUCHI H, et al. Empirical ocean-color algorithms to retrieve chlorophyll-a, total suspended matter, and colored dissolved organic matter absorption coefficient in the Yellow and East China Seas[J]. Journal of Oceanography, 2011, 67(5): 627-650.
- [12] ZHANG M W, DONG Q, CUI T W, 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.

- [13] QIU Z F, XIAO C, PERRIE W, et al. Using Landsat 8 data to estimate suspended particulate matter in the Yellow River estuary[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2017, 122(1): 276-290.
- [14] 邵宇杰, 胡越凯, 周 斌, 等. 基于GF-4卫星的杭州湾悬浮泥 沙浓度遥感监测研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(9): 134-142.
- [15] MUELLER J L, FARGION G S, MCCLAIN C R, et al. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision 4, Volume VI: Special topics in ocean optics protocols and appendices[M]. Goddard Space Flight Center: Greenbelt, MD, USA, 2003.
- [16] GB 17378.4-2007, 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[S].
- [17] 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.
- [18] 汪小勇, 唐军武, 李铜基, 等. 水面之上法测量水体光谱的关键技术[J]. 海洋技术, 2012, 31(1): 72-76.
- [19] BAI R F, HE X Q, BAI Y, et al. Atmospheric correction algorithm based on the interpolation of ultraviolet and shortwave infrared bands[J]. Optics Express, 2023, 31(4): 6805-6826.
- [20] VANHELLEMONT Q, RUDDICK K. Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 216: 586-597.
- [21] VANHELLEMONT Q, RUDDICK K. Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 161: 89-106.
- [22] VANHELLEMONT Q. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 225: 175-192.
- [23] QIU Z F. A simple optical model to estimate suspended particulate matter in Yellow River Estuary[J]. Optics Express, 2013, 21(23): 27891-27904.
- [24] SMAAL A C, SCHELLEKENS T, VAN STRALEN M R, et al. Decrease of the carrying capacity of the Oosterschelde estuary (SW Delta, NL) for bivalve filter feeders due to overgrazing?[J]. Aquaculture, 2013, 404/405: 28-34.
- [25] NEWELL R I E. Ecosystem influences of natural and cultivated populations of suspension-feeding bivalve molluscs: a review[J]. Journal of Shellfish Research, 2004, 23(1): 51-61.
- [26] CARVER C E A, MALLET A L. Estimating the carrying capacity of a coastal inlet for mussel culture[J]. Aquaculture, 1990, 88(1): 39-53.

160

(本文编辑:胡莹莹)