

doi: 10.6046/zrzyg.2021094

引用格式: 丁波,李伟,胡克. 基于同期光学与微波遥感的茅尾海及其入海口水体悬浮物反演[J]. 自然资源遥感,2022,34(1): 10–17. (Ding B, Li W, Hu K. Inversion of total suspended matter concentration in Maowei Sea and its estuary, Southwest China using contemporaneous optical data and GF SAR data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 10–17.)

# 基于同期光学与微波遥感的茅尾海及其入海口水体悬浮物反演

丁波<sup>1,3</sup>, 李伟<sup>2</sup>, 胡克<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264011; 3. 新玛科技(北京)有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 悬浮物是近海海湾及潟湖水质的影响因素之一。遥感技术能够准确快速地反演水体的悬浮物浓度,但鲜有同时利用2种不同类型的数据源反演同一研究区的悬浮物浓度。该文基于同一时期(2019年9月)的GF-1C光学影像和GF-3微波数据,采用双波段比值算法和Cloude-Pottier分解算法分别对原始影像进行图像分割和目标提取,并在此基础上,结合同期野外采样数据,利用三次多项式回归算法,开展了茅尾海及其入海口水体悬浮物反演。精度分析显示,GF-1C反演模型相关系数( $R^2$ )、均方根误差和平均相对误差分别为0.88, 130.25 mg/L和9.65%;而GF-3反演模型对应结果分别为0.61, 230.87 mg/L和15.13%,研究表明,GF-1C光学遥感反演精度(90.35%)要好于GF-3微波遥感反演结果(84.87%),但2种反演结果分布具有较高的相似性和一致性,进一步表明基于2种不同数据源建立的反演模型能够为茅尾海悬浮物反演和海岸带环境监测提供参考。

**关键词:** 悬浮物; 微波影像; 光学影像; 遥感; 茅尾海

**中图分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)01-0010-08

## 0 引言

悬浮物是指悬浮于海水中的固态物质,包括有机成分(如碳水化合物、蛋白质、生物残骸、排泄物和分解物等)和无机组分(如陆源矿物颗粒、悬浮泥沙、黏土以及人类活动产生的颗粒和溶解物等)<sup>[1-2]</sup>。悬浮物浓度是衡量近海海水清澈度和其他成分的重要参数,尤其是位于海湾、河流入海口、近海等区域,受陆源物质、人类活动和海洋动力等因素的影响<sup>[3]</sup>,较高的悬浮物浓度极大地降低了光线的穿透能力,不仅直接影响了水体生态条件比如浮游生物繁育<sup>[4-5]</sup>、生蚝养殖、鱼类生长,以及污染物扩散等<sup>[6]</sup>,同时也影响着河口变化及海岸带冲淤过程。悬浮物浓度高低,在光学遥感上表现为光谱反射率、水体清澈度和水色等光学特性<sup>[7-8]</sup>;而在微波遥感上反映为后向散射系数、粗糙程度和介电常数等特征。

悬浮物的监测方法主要包括常规实地调查和遥

感反演。常规方法是乘船逐点采样-化验成分-分析数据<sup>[9]</sup>,这种方法调查速度慢、周期长,费用高,且只能获得在时间、空间分布上都很离散的少量点数据。遥感反演得益于卫星技术的发展,传感器具有快速、高效且重访周期短等优势,能够快速获取任一区域内水体遥感影像,实时监测其悬浮物的空间分布和动态变化,克服了常规方法的不足,因此受到广泛关注。

光学遥感悬浮物反演理论依据是水体的光谱反射率,不同物质成分的水体拥有不同的光谱反射率,一般来说,纯水的光谱反射率较低,而悬浮物的光谱反射率较高<sup>[10-12]</sup>。过去的20 a里,众多的学者在悬浮物浓度反演方面开展了大量的研究工作并取得了可观的研究成果,反演算法涵盖从单波段<sup>[7,13]</sup>到多波段<sup>[2,13-17]</sup>,从低分辨率<sup>[2,14-16,18-20]</sup>到高分辨率<sup>[8,12,17,21]</sup>。而微波遥感反演悬浮物的理论核心是SAR图像的后向散射系数,一个包含物质微观结构(也包含浑浊水体或悬浮物)表面细节(粗糙度、几何形态、复介电常数等)的基本量<sup>[22-23]</sup>。根据大量

收稿日期: 2021-03-31; 修订日期: 2021-07-30

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“广西钦州湾海岸带综合地质调查”(编号: DD20191024)资助。

第一作者: 丁波(1978-),男,硕士,主要从事遥感地质及海岸带地质方面的研究。Email: ding\_bo@126.com。

通信作者: 李伟(1984-),男,硕士,主要从事区域地质及海岸带地质调查方面的研究。Email: 670095930@qq.com。

学者的研究,近海悬浮物浓度影响了海水的组分、粒径以及海水浑浊度等物理属性,而海水的组分和粒径跟水体的后向散射系数有密切的关系并对其产生着影响,这一特征最终在雷达影像上得到一定的反映<sup>[24-28]</sup>。

近些年来,学者更多利用多光谱遥感开展各类水体的悬浮物浓度反演,而较少利用微波遥感开展相关研究。本文针对同一目标海域,利用 2 种同时期获取的不同类型的国产数据源(GF-1C 和 GF-3)开展悬浮物遥感反演分析,并结合野外采样数据进行对比,讨论并分析了 2 种反演结果的可靠性和准确性。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

茅尾海地处广西钦州湾,是一个半封闭内海(N21°30′~21°55′,E108°25′~108°45′),由一条狭窄的水道与北部湾相连(图 1)。潟湖海岸线长约 120 km,东西宽约 14 km,南北纵深约 17 km,面积约 134 km<sup>2</sup>。平均水深为 0.1~5 m,最深处可达 29 m。

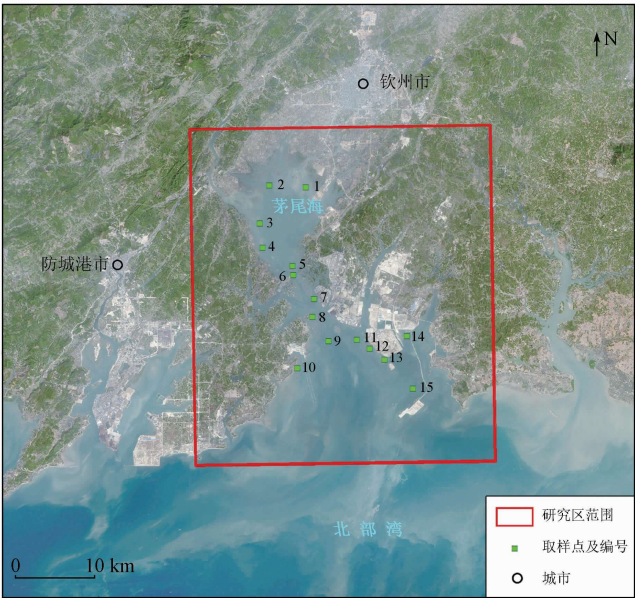


图 1 研究区域与野外采样点分布  
(2019 年 GF-1C 多光谱波段与全色波段融合影像)  
Fig.1 Map of the study area and sampling sites

茅尾海上游汇集大榄江、钦江和茅岭江等 3 条常年性河流,均发源于上游山区,地质构造复杂,地层主要包括:下层为下古生界志留系,表层为覆盖较厚的第四系,3 条主要河流每年通过径流为茅尾海输入大量陆源泥沙。茅尾海内海常年海面平静,泥沙充沛,饵料丰富,是广西重要的海洋牧场,也是中国著名的生蚝养殖基地,同时兼有对虾、青蟹、鱼类及贝类养殖;因其内海海域开阔,岛屿众多,也是

风景优美的旅游胜地。茅尾海入海口两侧分布着 2 处重要的基础设施:东侧为钦州港,包含多个人工岛和防护堤,西侧为防城港核电站,修建了 2 条短的平行防沙堤和进水通道,以及 2 条狭长的排水通道。

1.2 采样数据

水样采集严格按照海岸带综合地质调查技术规范要求执行<sup>[29]</sup>。研究区内水样采集点共计 15 处,具体分布如图 1。样品采集时间为 2019 年 9 月 18—20 日上午 8:00~10:00,潮汐资料显示该时间段处于高潮期。每个采样点均采集 3 份样品,采样深度(水面向下)分别为 0~0.5 m,5 m,10 m,样品经由专门的样品箱封存,然后带回实验室进行浓度测试。最终共计 45 份样品按计划进行了送检并测试分析,具体分析结果见表 1。

表 1 研究区悬浮物浓度野外采样数据  
Tab.1 In situ data of total suspended matter concentration in Maowei Sea

| 取样<br>编号 | 悬浮物浓度/(mg·L <sup>-1</sup> ) |        |         | 取样<br>日期   | 平均潮<br>高/cm |
|----------|-----------------------------|--------|---------|------------|-------------|
|          | 0.5 m 深度                    | 5 m 深度 | 10 m 深度 |            |             |
| 1        | 1 527                       | 822    | 1 120   | 2019-09-18 | 324         |
| 2        | 1 038                       | 1 276  | 1 201   |            |             |
| 3        | 924                         | 1 262  | 1 020   |            |             |
| 4        | 1 030                       | 1 064  | 989     |            |             |
| 5        | 892                         | 1 180  | 1 104   | 2019-09-19 | 345         |
| 6        | 1 124                       | 995    | 1 418   |            |             |
| 7        | 1 216                       | 1 230  | 962     |            |             |
| 8        | 1 036                       | 1 213  | 1 064   |            |             |
| 9        | 1 074                       | 1 464  | 948     | 2019-09-20 | 367         |
| 10       | 1 248                       | 1 394  | 1 174   |            |             |
| 11       | 1 090                       | 1 177  | 872     |            |             |
| 12       | 1 120                       | 1 226  | 1 186   |            |             |
| 13       | 1 149                       | 1 374  | 1 281   |            |             |
| 14       | 1 352                       | 964    | 1 053   |            |             |
| 15       | 1 103                       | 1 204  | 1 204   |            |             |

1.3 遥感数据集

高分专项是我国于 2010 年 5 月经由国务院审议并批准实施的高分辨率对地观测系统重大专项之一<sup>[30]</sup>,目前已发射了 14 个卫星系列(GF-1—GF-14),传感器类型从光学到雷达,轨道从太阳同步到地球同步,拍摄能力从全色、多光谱到高光谱等,构成了一个具有高空间分辨率、高时间分辨率和高光谱分辨率能力的对地观测系统,其中 7 个卫星系列已投入民用。

GF-1 是高分专项的首发光学遥感卫星,包括后续发射的姊妹星 GF-1B,C,D,全色影像空间分辨率为 2 m;多光谱影像空间分辨率为 8 m,光谱范围包括蓝光波段(0.45~0.52 μm)、绿光波段(0.52~0.59 μm)、红光波段(0.63~0.69 μm)以及近红外波段(0.77~0.89 μm)。GF-3 是我国首颗 C 频段多

极化合成孔径雷达(synthetic aperture Radar, SAR)卫星,传感器包括 12 种成像模式,能够高时效地实现不同应用模式下获取 1~500 m 空间分辨率、10~650 km 幅宽的微波遥感数据。本文所用数据具体参数见表 2。

表 2 研究区遥感影像详细信息

Tab. 2 Details of remote sensing images used in study area

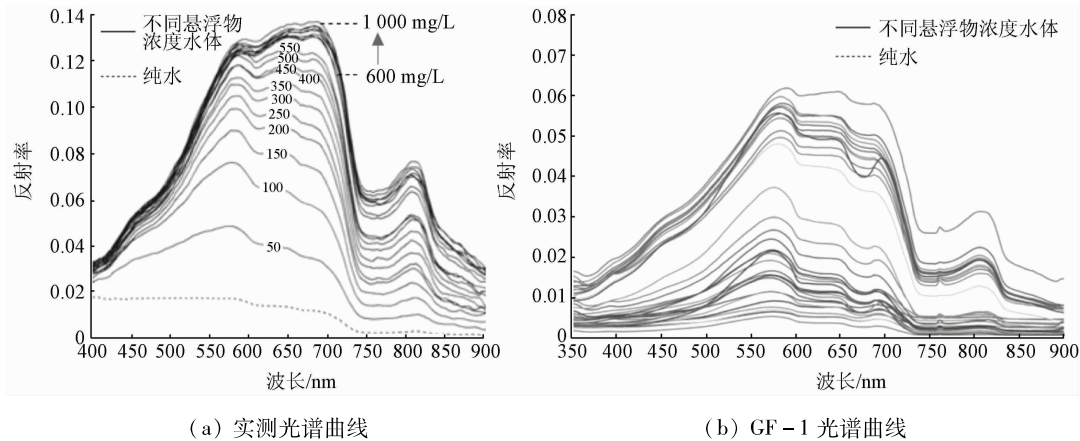
| 数据类型 | 传感器   | 分辨率/m | 时相                       | 参数                             |
|------|-------|-------|--------------------------|--------------------------------|
| 光学   | GF-1C | 8     | 2019-9-26<br>11:44:59 am | 多光谱波段                          |
|      |       |       |                          | 蓝光波段                           |
|      |       |       |                          | 绿光波段                           |
|      |       |       |                          | 红光波段                           |
| SAR  | GF-3  | 8     | 2019-9-4<br>11:01:40 am  | 近红外波段                          |
|      |       |       |                          | C 波段: (VH, VV)                 |
|      |       |       |                          | 分辨率: 4.5 m × 4.8 m;            |
|      |       |       |                          | 入射角: 42.787 378° ~ 47.954 950° |

上述 2 类数据均可用于悬浮物浓度反演。根据 GF-1 和 GF-3 的数据覆盖同步性,最终选取时相为 2019 年 9 月份的 GF-1 多光谱影像和 GF-3 SAR 影像各 1 景作为研究区悬浮物反演遥感源数据。同时收集了区内的地形数据及卫星参数信息作为辅助数据,为影像预处理提供基础参考。

## 2 研究方法

### 2.1 光学遥感悬浮物水体提取

一般来说,悬浮物浓度与其光学属性在不同水域有着较大的差异,但在光谱特征上表现出一致的“双峰”特性<sup>[26, 31-32]</sup>。图 2 表明,悬浮物光谱“双峰”敏感波段范围主要集中在 620~720 nm 和 790~840 nm 光谱范围,这与 GF-1 多光谱波段的红光波段和近红外波段光谱范围高度契合。



(a) 实测光谱曲线

(b) GF-1 光谱曲线

图 2 不同悬浮物浓度水体与其光谱反射率关系

Fig. 2 Relationship between TSMC and spectral reflectance

悬浮物浓度  $C_{TSM}$  与多光谱反射率  $R_{rs}$  存在较好的相关性<sup>[17, 32-33]</sup>,本文基于已有成熟的理论算法,利用影像上的水体红光波段和近红外波段的光谱反射率采用双波段比值,进而等效获得  $R_{rs}$ ,并求取相关系数,在此基础上利用统计回归模型开展光学遥感悬浮物反演。计算公式为:

$$R_{rs} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}, \quad (1)$$

$$\rho_i = Gain DN_i + Bias, \quad (2)$$

式中:  $\rho_R$  和  $\rho_{NIR}$  分别为 GF-1 的红光波段和近红外波段反射率;  $Gain$  和  $Bias$  分别为增益和偏差。

### 2.2 微波遥感悬浮物水体提取

根据雷达工作原理,自然界大多数地物均可以视为粗糙程度不同的粗糙表面,在雷达上表现为地物的后向散射回波强度,图像上呈现出不同的灰度值,常用后向散射截面积  $\sigma$  或后向散射系数  $\sigma_0$  来表达,其公式为:

$$\sigma_0 = f(\lambda, \theta, P, \varphi, \varepsilon, \Gamma_1, \Gamma_2, V), \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为波长;  $\theta$  为入射角;  $P$  为极化方式;  $\varphi$  为方位角;  $\varepsilon$  为复介电常数;  $\Gamma_1$  为表面粗糙度;  $\Gamma_2$  为次表面粗糙度;  $V$  为体散射系数。

1) 降噪处理(多视与滤波)。斑点噪声是 SAR 系统的固有缺陷,对 SAR 图像在实际应用过程中的目标识别、信息提取和分类等产生了严重影响和干扰。地距分辨率是指方位向和距离向相同的地面分辨率。为了得到地距分辨率同时减少 SAR 图像的噪声干扰,需要对原始 SAR 图像进行多视和滤波处理。计算公式为:

$$R_{grt} = \frac{r}{\sin \theta}, \quad (4)$$

式中:  $R_{grt}$  为地距分辨率;  $r$  为斜距分辨率。由于距离分辨率随入射角的变化而变化,多视处理尽管提升了数据的辐射分辨率,但降低了 SAR 数据的空间分辨率。

SAR 滤波的方法有多种,且均形成了较为成熟的算法,比如 SIGMA 滤波<sup>[34-35]</sup>、LEE 滤波<sup>[36-37]</sup>、Gamma-map 滤波<sup>[38]</sup>和小波分析<sup>[39-40]</sup>等。本文采用 Gamma-map 滤波算法,对研究区内 GF-3 SAR 图像进行滤波处理。

2) SAR 图像水体提取。研究表明,Cloude-Pottier 算法<sup>[41]</sup>是当前一种极为有效的极化信息提取方法。根据特征向量原理,利用 Cloude-Pottier 分解算法可得到极化熵  $H_{pe}$ 、散射角  $\alpha$  和各向异性度或反熵  $A$  这 3 个特征参数值<sup>[42-43]</sup>,其计算公式分别为:

$$H_{pe} = - \sum_{i=1}^3 P_i \log_3 P_i, \quad (5)$$

$$\alpha = P_1 \alpha_1 + P_2 \alpha_2 + P_3 \alpha_3, \quad (6)$$

$$A = \frac{P_2 - P_3}{P_2 + P_3}, \quad (7)$$

$$P_i = \frac{\chi_i}{\sum_{i=1}^3 \chi_i}, \quad (8)$$

式中:  $\alpha_i$  为第  $i$  个散射机制类型;  $P_i$  为第  $i$  个散射机

制发生概率;  $\chi_i$  为极化相干矩阵的特征值。

基于 VH + VV 增强后向散射强度图反映出的水体悬浮物浓度微弱信息,再利用已有现状海岸线进行海陆分割,提取目标水体的基础上,采用  $H_{pe} - \alpha$  对目标水体进行空间重分类<sup>[44]</sup>,最终获取了目标海域悬浮物浓度灰度图。

## 3 结果与分析

### 3.1 回归模型建立

将 2019 年 9 月实测的 15 组采样数据按悬浮物浓度值大小进行重排并编号,偶数序号(7 组数据)分为一组用于建模;奇数序号(8 组数据)分为另一组进行精度验证。利用本文方法将获得的等效光谱反射率作为自变量,实测悬浮物浓度作为因变量进行回归分析。对比发现,三次多项式拟合效果最好(图 3)。图 3(a)为基于 GF-1C 光学遥感数据与实测悬浮物浓度建立的回归模型,相关系数  $R^2$  为 0.88,图 3(b)为 GF-3 微波遥感数据与实测悬浮物浓度建立的回归模型,其相关系数  $R^2$  相对偏低,仅为 0.61。

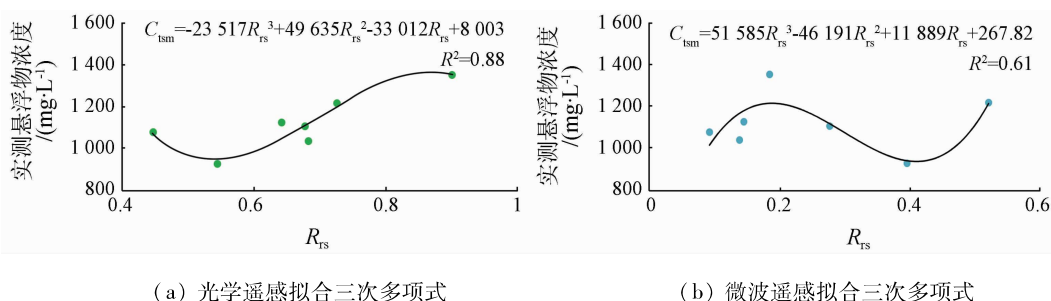


图 3 悬浮物浓度与等效反射率之间的回归关系

Fig. 3 Regression relationships of measured TSMC and equivalent remote sensing reflectance

### 3.2 模型验证

为了检验反演模型的精确度,采用均方根误差  $\Delta_{rmse}$  和平均相对误差  $\Delta_{mrpe}$  这 2 个评价指标分别对已建立的 2 种回归模型进行评价<sup>[14, 20]</sup>,其数学表达式分别为:

$$\Delta_{rmse} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (x_{r,i} - x_{m,i})^2}{8}}, \quad (9)$$

$$\Delta_{mrpe} = \frac{\sum_{i=1}^8 \left| \frac{x_{r,i} - x_{m,i}}{x_{m,i}} \right|}{8} \times 100\%, \quad (10)$$

式中:  $x_{r,i}$  为第  $i$  点悬浮物浓度反演值;  $x_{m,i}$  为第  $i$  点悬浮物浓度测量值。

基于已建立的评价指标,将 2 种反演模型分析得到的悬浮物浓度与另外 8 组采样点实测数据进行

精度验证与评估,如表 3 所示。精度结果表明,GF-1C 悬浮物反演精度(均方根误差为 130.25 mg/L,平均相对误差为 9.65%)明显好于 GF-3 悬浮物反演结果(均方根误差为 230.87 mg/L,平均相对误差高达 15.13%)。由于与 10 号验证点对应的 GF-3 反演值出现异常,原始数据发现该处存在坏点,故该异常点在对 GF-3 反演悬浮物精度评价时不参与验证。

表 3 反演模型精度验证  
Tab. 3 Validations of two regression models

| 反演模型  | 验证点数/个 | $\Delta_{rmse}/$<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 相对误差/% |      |                 |
|-------|--------|---------------------------------------------------------|--------|------|-----------------|
|       |        |                                                         | 最大值    | 最小值  | $\Delta_{mrpe}$ |
| GF-1C | 8      | 130.25                                                  | 17.70  | 2.15 | 9.65            |
| GF-3  | 7      | 230.87                                                  | 34.14  | 5.57 | 15.13           |

### 3.3 结果分析

#### 3.3.1 研究区悬浮物分布规律

根据已建立的悬浮物反演理论模型,分别对研

究区内 2 种数据源的悬浮物分布进行了反演。图 4 结果表明,2 种方法反演出的结果具有高度的相似性和一致性:茅尾海内海及入海口两侧悬浮物浓度总体较高,均超过 1 000 mg/L,其分布规律呈现由东北向西南依次递减。结合研究区同季节历史资料<sup>[45]</sup>分析其原因:在茅尾海内海上游 3 条主要河流每年向其注入泥沙量高达 60 万 t,而在连接外海

通道处分布着大量的天然岛屿和人工养殖蚝排蚝桩,严重阻碍了内海水体与北部湾海域的水体交换;而在茅尾海入海口,悬浮物浓度分布表现为两侧偏高,中间偏低,原因在于入海口中部海域每年都进行人工航道清淤,但两侧人为活动和船只进出对水体扰动频繁,泥沙沉积过程和海洋动力作用如洋流、潮汐等在该区域的影响微弱。

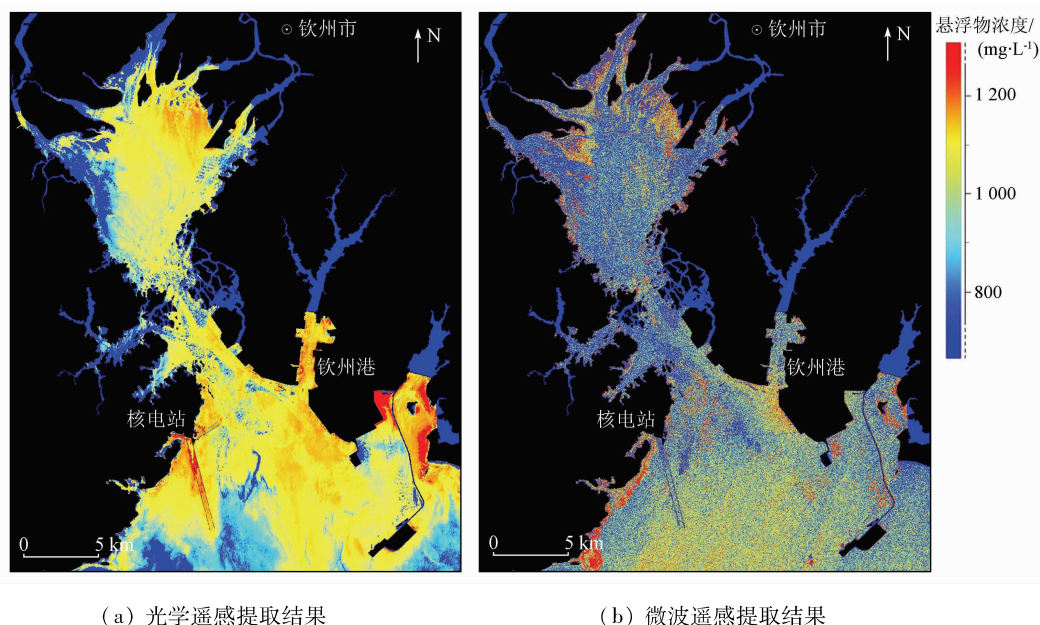


图 4 不同数据源的悬浮物浓度分布

Fig. 4 Distributions of retrieved TSMC based on different remote sensing images

### 3.3.2 反演结果对比

根据反演结果,将悬浮物浓度进一步划分为 3 个区间:  $< 1\ 100$  mg/L,  $[1\ 100, 1\ 200)$  mg/L,

$\geq 1\ 200$  mg/L, 分别代表悬浮物浓度低、中、高 3 个等级,再将实测点分布与悬浮物浓度等级区间进行相对位置关系讨论,如图 5 所示。

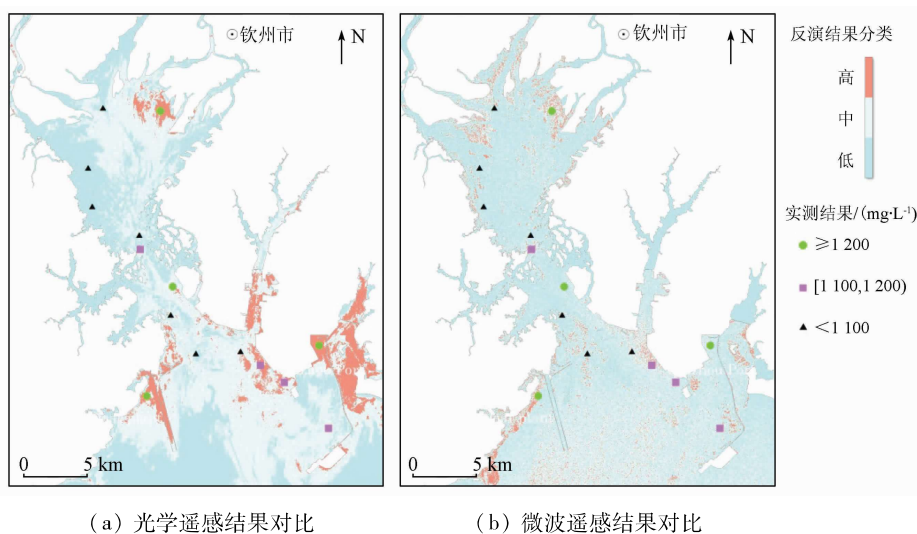


图 5 悬浮物浓度反演结果与实测结果对比

Fig. 5 Comparisons of retrieved TSMCs and in situ measurements

从精度评价结果看,研究区悬浮物浓度光学遥感反演结果精度(90.35%)明显高于微波遥感反演结果(84.87%),表明光学遥感反演结果要明显好于微波遥感反演结果。

1)从反演效果(图 4)看,光学遥感反演结果灰

度值过渡均匀,噪声点较少,效果明显好于微波遥感反演结果。

2)从反演结果分区和实测点相对位置(图 5)看,光学遥感反演结果高值区和低值区与对应的实测数据完全吻合,仅在悬浮物浓度中值区,存在 1 处

错误;而微波遥感反演结果各个浓度分区与实测点均存在偏差,其中反演结果中值区和低值区各有1处错误,而在高值区有2处错误。

3)从取样时间和卫星数据获取时间节点看,由于不同传感器对同一区域数据获取时间以及野外取样时间三者无法保证高度一致,光学遥感反演结果精度要高于微波遥感反演结果,这与取样时间和光学遥感影像获取时间间隔(6~8 d)要小于和微波影像获取时间间隔(14~16 d)存在一定的相关性。

## 4 结论

近海及海湾地区悬浮物浓度的分布对于海岸带综合地质研究和生态环境保护具有重要的意义。利用遥感技术能够快速准确地反演其分布特征,本文利用2种不同的遥感数据源,采用不同的提取算法,并结合同期实地采样数据,准确地反演了茅尾海及其入海口悬浮物的分布。从技术方法看,2种手段均能准确地反演茅尾海悬浮物的分布特征,且反演结果表现出了高度的一致性;从反演结果看,光学遥感反演结果要优于微波遥感反演结果,但微波遥感反演突破了光学遥感反演诸多的干扰因素,是光学遥感反演的有力技术补充。

另外,需要指出的是,由于野外取样数据有限,反演结果的准确性需要更多野外采样数据进行实验验证。

## 参考文献 (References):

- [1] 李京,陈云浩,刘志刚,等. 海岛与海岸带环境遥感[M]. 北京:科学出版社,2010.  
Li J, Chen Y H, Liu Z G, et al. Remote sensing of island and coast environment[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] Miller R L, McKee B A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(1-2): 259-266.
- [3] Astoreca R, Doxaran D, Ruddick K, et al. Influence of suspended particle concentration, composition and size on the variability of inherent optical properties of the Southern North Sea[J]. Continental Shelf Research, 2012, 35(2): 117-128.
- [4] May C L, Koseff J R, Lucas L V, et al. Effects of spatial and temporal variability of turbidity on phytoplankton blooms[J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, 254(6): 111-128.
- [5] Ondrusek M, Stengel E, Kinkade C S, et al. The development of a new optical total suspended matter algorithm for the Chesapeake Bay[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119: 243-254.
- [6] Group S W. GEOTRACES: An international study of the global marine biogeochemical cycles of trace elements and their isotopes[J]. Chemie der Erde, 2007, 67(2): 85-131.
- [7] Ouillon S, Douillet P, Petrenko A, et al. Optical algorithms at satellite wavelengths for total suspended matter in tropical coastal waters[J]. Sensors, 2008, 8(7): 4165-85.
- [8] Shi L L, Mao Z, Wang Z. Retrieval of total suspended matter concentrations from high resolution WorldView-2 imagery: A case study of inland rivers[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 121(3): 1-12.
- [9] Larrarte F, Pons M N. Suspended solids concentration in wastewater: Influence of sampling conditions[J]. Urban Water Journal, 2011, 8(6): 397-404.
- [10] Clark R N. The spectral reflectance of water-mineral mixtures at low temperatures[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1981, 86(b4): 3074-3086.
- [11] Kokaly R F, Clark R N, Swayze G A, et al. USGS Spectral Library Version 7[Z]. U. S. Geological Survey Data Series 1035, 2017: 1-68.
- [12] Malinowski R, Groom G, Schwanghart W, et al. Detection and delineation of localized flooding from WorldView-2 multispectral data[J]. Remote Sensing, 2015, 7(11): 14853-14875.
- [13] Knaeps E, Ruddick K G, Doxaran D, et al. A SWIR based algorithm to retrieve total suspended matter in extremely turbid waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 168: 66-79.
- [14] Wang L, Zhao D Z, Yang J H, 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.
- [15] Giannini M F C, Harari J, Ciotti A M, et al. The use of CBERS (China-Brazil earth resources satellite) to trace the dynamics of total suspended matter at an urbanized coastal area[J]. Brazilian Journal of Oceanography, 2017, 65(2): 309-323.
- [16] Dekker A G, Vos R J, Peters S W M. Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 268: 197-214.
- [17] 高晨,徐健,高丹,等. 基于GF-1与实测光谱数据鄱阳湖丰水期总悬浮物浓度反演[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 101-109. doi:10.6046/gtzyyg. 2019.01.14.  
Gao C, Xu J, Gao D, et al. Retrieval of concentration of total suspended matter from GF-1 satellite and field measured spectral data during flood period in Poyang Lake[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(1): 101-109. doi: 10.6046/gtzyyg. 2019.01.14.
- [18] Ngoc D D, Loisel H, Vantrepotte V, et al. A simple empirical band-ratio algorithm to assess suspended particulate matter from remote sensing over coastal and inland waters of Vietnam: Application to the VNREDSat-1/NAOMI sensor[J]. Water (Switzerland), 2020, 12(9): 1-16.
- [19] Kishino M, Tanaka A, Ishizaka J. Retrieval of Chlorophyll a, suspended solids, and colored dissolved organic matter in Tokyo Bay using ASTER data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 99: 66-74.
- [20] Ciancia E, Campanelli A, Lacava T, et al. Modeling and multi-temporal characterization of total suspended matter by the combined use of Sentinel 2-MSI and Landsat 8-OLI Data: The Pertusillo Lake case study (Italy)[J]. Remote Sensing, 2020, 12(13): 1-24.
- [21] Moore G. Satellite remote sensing of water turbidity[J]. Hydrologi-

- cal Sciences Bulletin, 1980, 25(4): 407–421.
- [22] Chen J F, Zagzebski J A, Madsen E L, et al. Tests of backscatter coefficient measurement using broadband pulses[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1993, 40(5): 603–607.
- [23] Lavarello R J, Ghoshal G, Oelze M L. On the estimation of backscatter coefficients using single – element focused transducers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(5): 2903–2911.
- [24] 刘国祥, 刘文熙, 黄丁发. InSAR 技术及其应用中的若干问题[J]. 测绘通报, 2001, 1: 21–24.  
Liu G X, Liu W X, Huang D F. In SAR technology and its key problems in applications[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2001, 1: 21–24.
- [25] Kritikos H, Yorinks L, Smith H. Suspended solids analysis using ERTS – A data[J]. Remote Sensing of Environment, 1974, 3: 69–78.
- [26] 王 繁, 周 斌, 徐建明, 等. 基于实测光谱的杭州湾悬浮物浓度杨反演模式[J]. 环境科学, 2008, 11: 3022–3026.  
Wang F, Zhou B, Xu J M, et al. Remote sensing inversion mode of suspended particles concentration in Hangzhou Bay based on in situ measurement spectrum[J]. Environmental Science, 2008, 11: 3022–3026.
- [27] Shi W, Zhang Y L, Wang M H, et al. Deriving total suspended matter concentration from the near – infrared – based inherent optical properties over turbid waters: A case study in Lake Taihu[J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 333–350.
- [28] 陈 炯, 贾海峰, 杨 健, 等. 基于极化 SAR 的河流有机物污染监测研究[J]. 环境科学, 2010, 31(9): 2017–2022.  
Chen J, Jia H F, Yang J, et al. Monitoring of organic pollutants in river based on polarimetric SAR [J]. Environmental Science, 2010, 31(9): 2017–2022.
- [29] 中国地质调查局. DD2014 – 03 海岸带地质环境调查评价规范[S]. 北京: 中国地质调查局, 2014.  
China Geological Survey. DD2014 – 03 Specification for survey and evaluation of coastal geological environment [S]. Beijing: China Geological Survey, 2014.
- [30] 高分系列卫星介绍[N]. <http://www.cheos.org.cn/n380375/n380413/index.html>.  
Introduction of GF series satellites [N]. <http://www.cheos.org.cn/n380375/n380413/index.html>.
- [31] Clark R N, Swayze G A, Wise R, et al. USGS digital spectral library splib06a[Z]. U. S. Geological Survey, Digital Data Series 231, 2007.
- [32] Xu J, Gao C, Wang Y. Extraction of spatial and temporal patterns of concentrations of chlorophyll – a and total suspended matter in Poyang Lake using GF – 1 satellite data [J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 1–21.
- [33] 钟凯文, 刘旭拢, 解 靛, 等. 基于遥感方法反演珠江三角洲西江干流悬浮泥沙分布研究[J]. 遥感应用, 2009, 12(3): 49–52.  
Zhong K W, Liu X L, Xie L, et al. Study on inversion model for the suspended sediment concentration in the Pear River delta using remote sensing technology[J]. Remote Sensing Information, 2009, 12(3): 49–52.
- [34] Lee J S. A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture Radar images [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1983, SMC – 13(1): 85–89.
- [35] Lee JS, Wen J H, Ainsworth T L, et al. Improved sigma filter for speckle filtering of SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(1): 202–213.
- [36] Lee J S, Grunes M R, Mango S A. Speckle reduction in multipolarization, multifrequency SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1991, 29(4): 535–544.
- [37] Lee J S, Grunes M, Schuler D, et al. Scattering – model – based Speckle filtering of polarimetric SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44: 176–187.
- [38] Tian S, Eltoft T. Gamma – WMAP: A wavelet based statistical speckle filter for SAR images[C]// 5th Nordic Signal Processing Symposium, 2002.
- [39] López C, Fábregas X, Mallorquí J, et al. Noise filtering of SAR interferometric phase based on wavelet transform[C]// International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2001: 2928–2930.
- [40] 卜方玲, 徐 新. 一种基于小波分析的 SAR 图像斑点噪声滤波算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 4: 315–319.  
Bu F L, Xu X. Speckle filtering method of SAR images based on wavelet analysis[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 4: 315–319.
- [41] Cloude S R, Pottier E. A review of target decomposition theorems in Radar polarimetry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(2): 498–518.
- [42] 曹 芳, 洪 文, 吴一戎. 基于 Cloude – Pottier 目标分解和聚合的层次聚类算法的全极化 SAR 数据的非监督分类算法研究[J]. 电子学报, 2008, 3: 543–546.  
Cao F, Hong W, Wu Y R. An unsupervised classification for fully polarimetric SAR data using Cloude – Pottier decomposition and agglomerative hierarchical clustering algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 3: 543–546.
- [43] 杨 杰, 郎丰铠, 李德仁. 一种利用 Cloude – Pottier 分解和极化白化滤波的全极化 SAR 图像分类算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(1): 104–107.  
Yang J, Lang F K, Li D R. An unsupervised Wishart classification for fully polarimetric SAR image based on Cloude – Pottier decomposition and polarimetric whitening filter[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(1): 104–107.
- [44] 曹 仕, 刘湘南, 刘美玲, 等. 基于 Radarsat – 2 目标极化分解 H –  $\alpha$  特征空间的海洋悬浮物浓度监测研究[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(4): 107–112.  
Cao S, Liu X N, Liu M L, et al. Monitoring marine suspended particulate matter concentration using full polarimetric SAR data of Radarsat – 2[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2013, 32(4): 107–112.
- [45] 黄洪辉, 廖秀丽, 戴 明, 等. 茅尾海生态环境调查与现状评估报告[R]. 广州: 中国水产科学研究院, 2013.  
Huang H H, Liao X L, Dai M, et al. Report of ecological environment and status assessment in Maowei Sea [R]. Guangzhou: Chinese Academy of Fishery Sciences, 2013.

## Inversion of total suspended matter concentration in Maowei Sea and its estuary, Southwest China using contemporaneous optical data and GF SAR data

DING Bo<sup>1,3</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, HU Ke<sup>1</sup>

(1. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Yantai Geological Survey Center of Coastal Zone, China Geological Survey, Yantai 264011, China; 3. NewMark Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** Total suspended matter concentration (TSMC) is one of the important factors influencing water bodies in coastal gulfs and lagoons. The rapid and accurate TSMC inversion can be obtained using remote sensing data. However, it is scarce to conduct TSMC inversion using two different data sources at the same time. This study conducted the inversion of TSMC in Maowei Sea and its estuary based on two data sources. Specifically, this study carried out image segmentation and object extraction using the dual-band ratio algorithm and the Cloude-Pottier target decomposition algorithm, respectively based on GF-1C optical images and GF-3 SAR data of September 2019. Meanwhile, contemporaneous field sample data were utilized. Then, the TSMC inversion was performed using the cubic polynomial regression algorithm. As revealed by the accuracy analysis, the fitting degree ( $R^2$ ), root mean square error, and mean relative percentage error of the GF-1C-based inversion model were 0.88, 130.25 mg/L, and 9.65%, respectively, while those of the GF-3-based inversion model were 0.61, 230.87 mg/L, and 15.13%, respectively. These indicate that the GF-1C-based TSMC inversion had a higher inversion accuracy (90.35%) than the GF-3-based TSMC inversion (84.87%). However, the inversion results of the two models showed highly similar distribution patterns. This further indicates that the inversion models established using two different data sources in this study can serve as references for TSMC inversion of Maowei Sea and its estuary and for the environmental monitoring in coastal zones.

**Keywords:** total suspended matter concentration (TSMC); SAR image; optical image; remote sensing; Maowei Sea

(责任编辑: 陈理)