胶州湾海域海水浊度和悬浮物粒径分布及遥感反演模型

陈祥舰^{1,2},刘洪霞¹,张德强²,袁圣铭²,蔺 超³,庞重光²

(1. 山东科技大学 数学与系统科学学院,山东 青岛 266590; 2. 中国科学院海洋研究所 环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

> 摘要:为拓展无人机搭载多光谱相机在海上应用的广度和精度,利用 2021 年 1 月、3—7 月共 6 个航次 的胶州湾海域现场观测数据,采用多种数理统计方法,开展了海水浊度和悬浮物粒径时空分布特征及 基于多光谱数据的遥感反演研究。浊度和悬浮物粒径的分析结果表明,胶州湾湾内海域表层浊度冬季 偏低,春夏季高,特别是 5 月浊度最高,是春季水华暴发浮游植物大量繁殖的结果。胶州湾悬浮颗粒以 极细砂为主; 悬浮物粒径冬季较粗、春季较细、夏季最小,与水动力条件的季节变化密切相关。将多 光谱数据计算得到的不同波段离水辐照度反射率与浊度和悬浮物粒径分别进行相关性分析,结果显示 红光波段(660~680 nm)的辐照度反射率对浊度和粒径参数最敏感。基于红光波段的波段组合构建了多 种函数类型的浊度反演模型,基于 450 和 660 nm 处的离水辐照度反射率构建的多项式模型反演效果最 好,预测浊度与实测浊度的相关系数为 0.82, 预测浊度的均方根误差为 1.448 FTU。通过基于红光波段 的波段组合以及后向散射系数分别构建平均粒径的反演模型,基于 555 和 660 nm 处的离水辐照度反射 率构建的多项式模型对平均粒径有较好的预测效果,预测结果的均方根误差为 0.051 φ,平均相对误差 为 1%。已构建的基于胶州湾海域的两类遥感反演模型可以推广应用到其他二类水体。

关键词: 遥感反演模型; 多光谱数据; 浊度; 粒径参数; 后向散射系数; 胶州湾 中图分类号: P756 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)4-0054-15 DOI: 10.11759/hykx20220822002

浊度是重要的水质参数之一,其在近岸及河口 区域悬浮物的运移、沉降和再悬浮等研究中被广泛 使用^[1-4]。悬浮物粒径与海水浊度以及悬浮物质量和 体积浓度等关系密切^[5-6],了解悬浮物的粒度特征对 研究海水的动力条件、环境变化以及物质循环都有 着重要的作用^[5,7-8]。

近年来,水色遥感技术取得了很大的进步,在 水体浊度和悬浮物粒径的研究中被广泛应用,基于 不同算法得到了多种反演模型^[9-11]。Chen 等^[12]针对 MODIS 陆地波段数据,提出了基于准解析算法 (QAA)的 QAA-RGR 算法,在利用 MODIS 对东海固 有光学特征研究中有较好的反演精度。Zhao 等^[13]利 用相同算法得到的模型研究渤海悬浮物浓度的多年 变化,发现渤海地区在 2003—2016 年期间,悬浮物 浓度呈下降趋势。胡静雯等^[14]基于 QAA-v5 算法,构 建了东中国海浊度反演模型,对东中国海浊度的时 空分布进行研究。顺布日等^[15]基于实测光谱数据,对 多种遥感算法进行了比较,并基于 Landsat-8 OLI 卫 星数据,得到黄河口的悬浮物时空分布图。此外,利 用水色遥感对近海的浊度和悬浮物浓度研究发现, 红绿波段对浊度和悬浮物浓度更敏感^[16],在反演模 型的构建中应用较多。

研究表明,水体反射率受悬浮物粒径大小及组成的影响,随粒径增大,反射率下降^[17],并且悬浮物粒径对颗粒的后向散射系数也有很大的影响^[18]。 在对黄东海悬浮物的固有光学特征研究中发现,悬 浮物粒径越大,颗粒物后向散射系数越小,两者成 反比^[11,19]。在利用水色遥感对悬浮物粒径的研究中, 青松^[10]通过表观光学量和固有光学量分别构建了悬 浮物粒径反演模型,结果显示,在莱州湾两种模型 的精度相当。

收稿日期: 2022-08-22; 修回日期: 2022-10-25

基金项目:中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20190047) [Foundation: The Scientific Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences, No. YJKYYQ20190047]

作者简介: 陈祥舰(1998—), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从 事陆架环流及物质输运研究, E-mail: cxj15864526689@163.com; 庞 重光(1973—), 山西榆社人, 通信作者, 博士生导师, 研究员, 主要 从事沉积动力学研究, E-mail: chgpang@qdio.ac.cn

在利用卫星遥感对胶州湾悬浮物浓度的研究中 发现, Landsat 卫星数据在该区域有较好的反演效果, Zhang 等^[20]基于该卫星数据,通过波段组合构建了 胶州湾地区的悬浮物反演模型,并且发现基于红光 波段的波段组合构建的模型精度最高。侯琳琳等^[9] 基于多种卫星数据构建胶州湾悬浮物浓度的反演模 型,对比发现,基于 Landsat 数据构建的多波段反演 模型精度更高。

目前东中国海悬浮物的反演模型绝大多数都是 基于卫星遥感数据,基于多光谱相机数据的反演模 型研究很少。多光谱相机多通过船载或者无人机搭 载的方式对研究区域进行拍摄。与卫星遥感相比,直 接使用多光谱相机或者通过搭载来获取数据更加机 动灵活、成本更低。卫星遥感主要解决的问题是大 气校正,因此当出现云层遮挡或大气影响就会导致 严重的数据缺失^[21],而通过搭载多光谱相机进行观 测时,拍摄高度一般在1000m以下^[22],可以忽略大 气和云层的影响,使得观测更便捷,误差更小。而与 光谱仪相比,多光谱相机的测量过程更简捷,并且 多光谱相机便于携带,有利于通过无人机搭载,获 得远距离、大面积的水体信息;同时,使用多光谱数 据更利于结合卫星数据,进行更深入的研究。

国内外多通过无人机搭载多光谱相机对农作物、 生物量等农业方向或者内陆河流、小型水域的水质进 行研究。近年来,多光谱相机在海上有了一定的应用, 刘善伟等^[23]使用无人机搭载的多光谱成像仪获得了 青岛灵山湾地区 5 个波段的光谱数据,并进行了辐射 定标、光谱归一化处理,基于得到的反射率构建了荧 光溶解有机物(fDOM)的反演模型。McEliece 等^[24]利 用无人机搭载多光谱相机在英格兰南部和法国布列 塔尼西部获得了光谱图像数据以及叶绿素浓度和浊 度,其对不同水质参数之间、不同波段反射率之间分 别进行了相关性检验,表明叶绿素浓度和浊度之间可 以认为是相互独立的,然后用不同波段反射率进行组 合得到叶绿素浓度和浊度的反演模型。

鉴于多光谱相机数据在海上的应用刚刚处于步阶 段,已建立的反演模型零星稀少;而且还未见针对悬 浮物粒径的反演研究,本文拟开展的基于多光谱数据 的海水浊度和悬浮物粒径的遥感反演研究有较重要的 科学意义和应用价值。本研究将采用 6 个航次的胶州 湾现场观测数据,这些观测覆盖胶州湾全域(含湾口), 且历经冬季、春季和夏季 3 个季节,因此可以再现胶州 湾悬浮物浓度的典型时空变化特征。现场观测参数包 括同步获得的海水浊度、悬浮物粒径,以及多光谱相机 数据等,本文将利于这些数据开展基于多光谱数据的 浊度和悬浮物粒径的遥感反演研究,构建胶州湾海域 遥感反演模型,有望推广应用到利用无人机搭载光谱 相机对我国海洋生态灾害和环境污染的监测预警中。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

胶州湾位于 120°04′~120°23′E, 36°00′~36°18′N, 为 黄海中部、山东半岛南岸的半封闭海湾,属于典型二类 水体。胶州湾潮汐类型稳定,属于正规半日潮^[25]。胶 州湾悬浮物浓度有着明显的空间和季节性变化,春冬 季高于夏季,悬浮物浓度由西北部向东南部减小^[26-27]。 表层悬浮物以砂、粉砂、黏土为主^[27-28],受水动力影响, 悬浮物粒径由湾口向湾内湾外变细^[27, 29]。胶州湾悬浮 物来源有限^[30],主要来源于河流输入,这是胶州湾成 为优良港湾的重要原因之—^[9, 20]。胶州湾是青岛的母亲 湾,承担着青岛及周边地区工农业用水、海上交通、滨 海旅游等重任,对青岛地区发展有重要意义。

1.2 现场观测

2021年1月、3—7月在胶州湾进行了6次现场观测(图1),每次观测12个站点的位置相同,6次测量共获得72个站位的数据。考虑到天气和潮汐对观测参数的影响,出海期间均为晴天,风速小,观测时间集中在每个月的9—12日,由于光照条件对观测数据精度的影响,拍摄时间选择在早上08:00—12:00,两个相邻观测站点间隔0.5h。

1.2.1 浊度与悬浮物粒径的测量

利用多参数温盐深(Conductivity Temperature Depth, CTD)仪进行浊度测量。在每个航次观测时对 12 个站位进行测量,测量的深度间隔为 0.1 m,得到 每个站位的全海深浊度(单位: FTU)。

利用现场激光粒度仪(LISST-100X)进行絮凝体 粒径测量, 粒度仪测量范围为 1.25~250 μm, 分为 32 个粒级, 通过激光衍射原理获得悬浮物在 32 个粒级 的体积浓度(单位: μL/L)。每个站点的总悬浮物体积 浓度是 32 个粒级体积浓度之和。

1.2.2 船载多光谱数据测量

利用长春光机所提供的两部型号为 MS600 的多 光谱相机(编号分别为 8011 和 8012),获得了观测海 域的多光谱影像。每部相机有 6 个光谱通道,分别为: 450 nm、555 nm、570 nm、660 nm、680 nm、720 nm 和 410 nm、490 nm、610 nm(该通道数据错误)、750 nm、 800 nm、840 nm。

在每个站点获得海面图像前,光谱相机须对用 于辅助定位的标定板进行多次拍照,获得多组标定 板图像,用于对海面图像进行辐射定标。在对标定板 进行拍照后,将两部多光谱相机固定在三脚架的两 端,由两个人分别负责一部光谱相机,找到合适的 拍摄位置和时间,调整好角度后对海面进行拍照, 每部相机在每个站点至少拍摄五组海面图像。

1.3 多光谱数据处理

利用 Yusense Map 软件对得到的多光谱图像进行辐射定标处理。对拍摄得到的不同波段的灰板图像按照公式(1)处理,得出每个像元对应的辐亮度 L_i ,取平均求得灰板有效范围的平均辐亮度 \overline{L} 。

对拍摄的海面图像, 在未经像元合并与图像压 缩的情况下, 对每个波段的图像按照公式(1)处理, 得到对应的辐亮度 L_i, 最后根据公式求出离水辐照度 反射率(通过多光谱相机直接测量得到的为离水辐照 度反射率, 利用离水辐照度反射率可以计算得到遥 感反射率^[31], 并在式(10)给出了计算方法)β_i(i 表征像 元标号):



$$L_i = \frac{D_{\rm N} - D_{\rm Ndark}}{a(c_i ta + c_i)},\tag{1}$$

$$\beta_i = \frac{\alpha L_i'}{\overline{L}},\tag{2}$$

其中, *a* 表征实验室辐射定标系数,一个光谱通道 对应960×1280的矩阵,是根据上述回传的坐标信息 选出灰板所占据像元对应的定标系数。*t* 和*g*分别表 征积分时间和增益,每张图像对应一个积分时间和 增益; *c*₁和 *c*₂为积分时间相关系数和增益相关系数; *D*_N是像元亮度值;*D*_{Ndark}表征暗像元值,是通过实验 室辐射标定给出的一个数值,使用时直接读入,*α* 是灰板的标准反射率,每个通道对应一个数值。

通过上述公式计算,每张多光谱图像得到一个 960×1280的矩阵,该矩阵即为由多光谱影像得到的 离水辐照度反射率。由于调光稳定性、耀斑以及阴 影会影响多光谱图像的质量,所以在每个站点挑选 一组质量较好的多光谱图像,在图像中间位置选取 200×200的范围,取其均值作为该站点在其通道的 离水辐照度反射率 r_s(λ), λ是光谱通道的波长。剔除 由于光线、船体阴影等环境因素造成的异常数据;以 及 7 月观测期间正值青岛浒苔暴发,有多个站位拍 摄了含浒苔的影像,浒苔的光谱反射特征将另文研 究,因此本文剔除相关站位,最终得到有效的胶州 湾离水辐照度反射率数据 53 组,图 1(a)是胶州湾海 域实测离水辐照度反射率,图 1(b)是 3 月在 D8 站点 观测的 555 nm 处原始多光谱图片。



(b) 3月D8站555 nm多光谱现场观测数据



从图 1(a)(不同颜色线条代表不同站点的离水辐照 度反射率)中可以看出, 胶州湾海域水体的离水辐照度 反射率为单波峰形,最大峰值出现在 555~570 nm;在 660~720 nm 区间反射率减小趋势相对平缓;在 490 nm

和 750 nm 处出现明显的波谷。

1.4 粒径参数

在 6 次出海期间,由于仪器故障,仅观测得到 48 个站点在 32 个粒级的体积浓度。每个站位的粒径 随深度进行连续测量,首先将连续数据平均,每间 隔1m得到一个数值;由于0~1m内的数据质量较差, 所以取 1~4m内数据的平均值作为表层粒径分布值; 最后得到 48 个站点 32 个粒级的体积浓度。

利用公式[32-33]:

$$\varphi = -\log_2(d / d_0), \qquad (3)$$

得到 φ 值, d为悬浮物粒径,单位 mm, d_0 =1 mm。然 后利用 MATLAB 软件,通过图解法求得中值粒径 D_{50} ,以及累计百分比为 16 时的粒径 D_{16} ,百分比为 84 时的粒径 $D_{84}^{[34]}$ 。平均粒径根据公式^[32]:

$$M_{z} = \frac{D_{16} + D_{50} + D_{84}}{3},$$
 (4)

求得。

由于条件所限,没有进行悬浮物中有机、无机成 分所占比例的测试,所以本文粗略地仅以上述无机颗 粒物大小的概念,来大致表述总悬浮物的粒度特征。

2 结果和讨论

2.1 胶州湾浊度和悬浮物粒径时空分布特征

为了更清楚地显示胶州湾浊度和悬浮物粒径的 时空变化,根据不同月份在胶州湾的观测数据,计 算出每个站点不同深度的浊度和平均粒径,由此绘 制浊度的表层和垂向分布图(图 2,图 3)以及平均粒 径的表层和垂向分布图(图 4,图 5)。

由图 2 可以看出, 胶州湾冬季(1月)湾内、湾外表 层浊度变化较小, 分布均匀, 浊度主要在 2.1~3.0 FTU, 这与冬季强风导致的高混合效应相关。春(3—5 月)、 夏季(6—7 月)湾内浊度高、湾外低, 且等浊度线呈东 北西南向分布, 湾内北部和西部浊度更高。夏季河流 输沙量达到全年的 98%, 西部和北部浊度高与河流的 携沙输入相关, 输入胶州湾的主要河流有:大沽河、 墨水河、白沙河, 均分布在胶州湾的北部和西部^[35]。 胶州湾外春季浊度在 1.035~2.71 FTU, 小于冬季浊度, 与春季水动力条件弱相匹配。胶州湾外夏季浊度略高, 在 1.776~3.015 FTU, 特别是 7 月与冬季浊度相当。夏 季虽然水动力条件弱, 但由于河流在 7 月输沙量



Marine Sciences / Vol. 47, No. 4 / 2023

研究报告 REPORTS



Fig. 2 Surface turbidity distribution in Jiaozhou Bay

剧增,增加的浊度大致抵消了因水动力条件弱而减 少的浊度。

如图 2(d)所示, 5 月份湾内浊度最高, 主要是 由于春季水华, 即春季浮游植物暴发, 悬浮物中 生物组分(几十微米的浮游植物)大量增加所致, 与 水动力条件关系不大。5 月浊度最高的现象, 与以 往观测一致。张铭汉^[26]观测显示, 1994 和 1995 年, 以及 1997 和 1998 年均是 5 月悬浮物含量最高。 Zhang 等^[20]利用 1984—2000 年的 Landsat 卫星数 据进行研究, 同样发现胶州湾在 5 月悬浮物浓度达 到最高。Yin 等^[36]基于 2000—2018 年的 MODIS 卫 星数据对胶州湾透明度反演也发现,除少数年份 (2005、2010 年)外,胶州湾内春季透明度最低,即 水体浊度最大。

如图 3 浊度的垂向分布显示,水深大的站位如: D5 和 D6 站位(分布在湾口和湾外),浊度随水深变化 较小,且不同季节浊度变化也不大;水深小的站位, 特别是位于湾内的 A3、C1 和 D3 站位,底层浊度相 较于表层明显增加,最大可增加 3 倍以上,并且在不 同月份浊度也有明显差别。





如图 4 所示,平均粒径最显著的特征是冬春季 粒径粗,夏季粒径细,且冬季粒径的平面分布均匀。 这和水动力条件相符,冬春季节水动力强,可以使 更大粒径的沉积物再悬浮,因此悬浮物粒径相对较 粗;夏季水动力弱,比重大的粗颗粒悬浮物容易发 生沉降,因此悬浮物粒径相对较细。从空间分布看, 夏季平均粒径等值线呈东北西南向分布,由湾内向 湾外平均粒径有所增大。

海洋科学 / 2023 年 / 第 47 卷 / 第 4 期

研究报告 REPORTS



图 5 不同月份、不同站位悬浮物粒径和平均粒径垂向分布

Fig. 5 Particle size distribution of suspended matter and vertical distribution of average particle size in different months and at different stations

胶州湾表层悬浮物以砂(-1~3.99 φ)和粉砂(3.99~ 7.97 φ)为主, 个别站点有极少量黏土(>7.97 φ), 砂中 包括细砂(2~3 φ)和极细砂(3~3.99 φ),极细砂平均占 总浓度的 38.22%,细砂平均占 20.37%,粉砂中主要 为粗粉砂(3.99~5.01 φ)。在冬春季砂的占比更大, 夏季 粉砂占比有所升高。通过平均粒径的垂向分布可以看 出,冬春季悬浮物粒径较大,并且随深度变化较小, 夏季平均粒径较小, 随深度粒径有所变化。

2.2 利用多光谱数据得到的离水辐照度反射 率进行浊度反演

0~1 m 内浊度数据质量较差,为了更好地构建浊 度反演模型,取 1~4 m 内的浊度均值作为表层浊度, 与不同波段的离水辐照度反射率分别进行相关性分 析,发现红光波段(660~680 nm)与浊度的相关系数较 高, 其中 r_e(660) 与浊度的相关性最好, R²=0.442 5。

在对水体组分的遥感研究中, 波段组合常被用于 建立反演算法^[20, 37-38],所以在本研究中也尝试用不同 的波段组合来进行反演算法的建立。红光波段 (660~680 nm)与浊度的相关系数最高,因此将以红光 波段为主,与其他波段组合,来构建浊度的反演模型。 选用的光段为: 蓝光波段(B)、绿光波段(G)、红光波段 (R)和近红外波段(N_R), 波长分别为: 450和490 nm、555 和 570 nm、660 和 680 nm、750 和 800 nm。

将不同的波段组合与浊度进行相关性分析, $r_{\rm rs}(N_{\rm IR})/r_{\rm rs}(R)$ 与浊度的相关性较差, R^2 均在 0.01 左 右; r_{rs}(B)+r_{rs}(R) 与浊度的相关系数平均为 0.61; r_{rs}(G)+r_{rs}(R) 对浊度更敏感,与浊度的相关性平均为 0.62; r_{rs}(B)/r_{rs}(R) 与浊度的相关系数平均为 0.66, 在 该组合中 $r_{rs}(450)/r_{rs}(660)$ 与浊度的相关性最好, $R^2=0.469$ 7; $r_{rs}(R)/r_{rs}(G)$ 与浊度的相关系数平均为 0.66, 其中 r_{rs}(660)/r_{rs}(555) 与浊度的相关系数为

0.70; $\frac{r_{rs}(G) + r_{rs}(R)}{r_{rs}(G)/r_{rs}(R)}$ 与浊度的相关性最佳,相关系数

平均为 0.68, $\frac{r_{rs}(555) + r_{rs}(660)}{r_{rs}(555) / r_{rs}(660)}$ 与浊度的相关系数为

0.69。根据相关性分析结果,本研究以 $r_{rs}(B)/r_{rs}(R)$ 、

 $r_{rs}(R)/r_{rs}(G)$ 、 $\frac{r_{rs}(G) + r_{rs}(R)}{r_{rs}(G)/r_{rs}(R)}$ 三组合中相关系数最高 的波段组合进行反演模型的建立。水体在 555 nm 处 的反射率常用于水体浊度以及悬浮物浓度的反演,因 此除以上3种组合中的最大相关系数组合外,本研究 还基于 $\frac{r_{rs}(555) + r_{rs}(680)}{r_{rs}(555) / r_{rs}(680)}$ 进行了反演算法的建立。

在实测的 53 组数据中随机挑选 41 组, 基于上述 四种波段组合通过不同的函数类型构建反演模型,结 果如表1、其中第4列为预测浊度与实测浊度相关系数

表1 基于实测水体反射率建立的模型和反演精度值

Tab. 1	Model and inversion acc	curacy value based	on the measured	water reflectance
--------	-------------------------	--------------------	-----------------	-------------------

类型	自变量	函数类型	R^2	$R_{\rm MSE}({\rm FTU})$	$M_{\rm RE}(\%)$
		指数	0.493 1	1.824	31.59
	n (555) + n (660)	线性	0.483 8	1.816	36.87
组合1	$\frac{r_{\rm rs}(555) + r_{\rm rs}(660)}{r_{\rm rs}(555) / r_{\rm rs}(660)}$	对数	0.434 9	1.900	43.17
	$r_{\rm rs}(000)/r_{\rm rs}(000)$	幂	0.476 4	1.907	34.96
		一元二次多项式	0.485 7	1.812	36.75
		指数	0.478 9	1.851	32.05
	n(555) + n(690)	线性	0.467 2	1.845	37.60
组合 2	$\frac{r_{\rm rs}(555) + r_{\rm rs}(080)}{r_{\rm rs}(555)/r_{\rm rs}(680)}$	对数	0.415 9	1.931	44.35
	$r_{\rm rs}(000)/r_{\rm rs}(000)$	幂	0.456 5	1.945	35.66
		一元二次多项式	0.469 9	1.840	37.35
	$r_{\rm rs}(450)/r_{\rm rs}(660)$	指数	0.525 9	1.918	33.52
		线性	0.409 5	1.942	46.25
组合 3		对数	0.515 4	1.759	43.75
		幂	0.640 5	1.722	34.33
		一元二次多项式	0.671 8	1.448	38.51
	$r_{\rm rs}(660)/r_{\rm rs}(555)$	指数	0.521 9	1.907	37.67
		线性	0.432 3	1.904	48.13
组合 4		对数	0.373 3	2.001	49.56
		幂	0.451 8	2.026	38.27
		一元二次多项式	0.668 0	1.472	37.76

的平方, 第 5 列为预测浊度与实测浊度的均方根误差 (root mean square error, R_{MSE}), 第 6 列为预测浊度与实 测浊度的平均相对误差误差(mean relative error, M_{RE})。

从表中可以看出,组合1与组合2利用指数函数

表 2 基于不同波段组合的浊度反演模型

Tab. 2	Turbidity	inversion	model based	on	different band	combinations
--------	-----------	-----------	-------------	----	----------------	--------------

类型	自变量	反演模型
组合1	$\frac{r_{\rm rs}(555) + r_{\rm rs}(660)}{r_{\rm rs}(555) / r_{\rm rs}(660)}$	$T_{\rm ur} = 2.258 \ 1e^{1.876 \ 5x}$
组合 2	$\frac{r_{\rm rs}(555) + r_{\rm rs}(680)}{r_{\rm rs}(555)/r_{\rm rs}(680)}$	$T_{\rm ur} = 2.282 \ 61e^{1.973 \ 7x}$
组合 3	$r_{\rm rs}(450)/r_{\rm rs}(660)$	$T_{\rm ur} = 5.634 \ 5x^2 - 22.471x + 23.816$
组合 4	$r_{\rm rs}(660)/r_{\rm rs}(555)$	$T_{\rm ur} = 87.072x^2 - 83.167x + 21.65$

通过以上反演算法进行浊度预测,预测浊度与 实测浊度的散点图如图 6。由图 6 可以看出,基于组 合 3 构建的反演模型精度要高于其余组合,其中预 测浊度与实测浊度的相关系数 R^2 =0.671 8(显著性检验 P<0.05),均方根误差 R_{MSE} =1.448 FTU,平均相对误差 M_{RE} =38.51%。

拟合得到的模型精度更好,组合3和组合4利用多项

式拟合得到的模型精度更好。利用精度最好的 4 种

反演模型(如表 2)、分别对浊度进行反演、并利用剩

余的12组数据对模型进行检验。



图 6 预测浊度与实测浊度比较 Fig. 6 Comparison of the predicted and measured values of turbidity

利用剩余的 12 组数据对模型的精度进行检验, 散 点图如图 7。由图 7 可以看出, 组合 3 的结果最好, R²=0.814 7(显著性检验 P<0.05), R_{MSE}=1.24 FTU, M_{RE}= 29.22%, 并且散点分布均匀。而其余三种模型的散点 分布有较大偏离, 且相关系数也要小于基于组合 3 构 建的模型。



图 7 浊度反演模型检验 Fig. 7 Turbidity inversion model test

2.3 浊度反演模型对比

陈黄蓉等^[38]在对长江口的浊度遥感研究中发现, 基于 680 和 490 nm 处瑞利校正反射率的差构建的二 次多项式模型对浊度最敏感,基于多光谱数据利用 此方法构建模型 2;丁梦娇^[39]使用 VIIRS 卫星遥感反 射率对渤黄海浊度研究中,使用 486 nm 处的遥感反 射率建立单波段反演模型对该区域的浊度预测较好, 利用此方法,基于 *r*_{rs}(490) 构建模型 3;基于组合 *r*_{rs}(450)/*r*_{rs}(660) 构建的模型作为模型 1,将 3 种模型 进行比较,结果如图 8。

通过对 3 种模型的预测结果对比发现, 模型 1 的 实测值与反演值的相关性最高, *R*²=0.671 8, 模型 2 及模型 3 的实测值与反演值的相关系数分别为 *R*²= 0.4876 和 *R*²=0.319 7, 利用平均相对误差和均方根







海洋科学 / 2023 年 / 第 47 卷 / 第 4 期

误差误差检验,模型 1 的平均相对误差误差为 38.51%,均方根误差为 1.448 FTU,模型 2 的平均相对 误差为 44.92%,均方根误差为 1.809 FTU,模型 3 的 平均相对误差为 35.31%,均方根误差为 2.129 FTU。

以上研究表明,基于蓝光波段(450 nm)和红光波 段(660 nm)构建的浊度反演模型在胶州湾海域的精 度最高,并且稳定性较于其他组合也最好,蓝光和 红光波段分别为叶绿素和悬浮泥沙的敏感波段^[31,37], 该组合的精度说明胶州湾浊度主要受叶绿素和悬浮 泥沙影响。通过与其他模型对比发现,不同海域的光 谱特征虽然存在差异,敏感波段也有所不同,但对 比结果显示,不同二类水体之间的经验统计模型存 在可以借鉴之处。

2.4 基于多光谱数据的粒径参数遥感反演 模型

2.4.1 利用波段组合进行模型构建

去掉异常数据,得到 32 个站点的平均粒径及对 应反射率。将平均粒径与各波段反射率进行相关性 分析,发现其与各波段反射率均有着较好的相关性, 其中红光波段(660~680 nm)对粒径信号最敏感,平 均粒径与*r*_(660)的相关系数 *R*² 为 0.754 9。

海水浊度与悬浮泥沙的粒径有关^[5],于是将浊 度与平均粒径进行相关性分析,发现浊度与平均粒 径显著相关,相关系数 *R*²为 0.822 2。

基于粒径参数的敏感波段以及平均粒径与浊度

表 3 基于波段组合的平均粒径反演模型

Tab. 3	Average particle size	inversion i	nodel based on	band combinations
1	if of age particle size	III (CI SIOII I	noucl bused on	bana compliantions

的相关性,因此将以红光波段(R)为王, 辅以蓝光波段
(B)、绿光波段(G),将不同波段组合与平均粒径,进行
相关性分析发现, $r_{rs}(B)/r_{rs}(R)$ 与平均粒径的相关系
数平均为 0.69, $r_{rs}(R)/r_{rs}(G)$ 其与平均粒径的相关系
数平均为 0.76, $\frac{r_{rs}(G) + r_{rs}(R)}{r_{rs}(G)/r_{rs}(R)}$ 与平均粒径的相关性最
佳,相关系数平均为 0.87,其中 $\frac{r_{\rm rs}(555) + r_{\rm rs}(660)}{r_{\rm rs}(555)/r_{\rm rs}(660)}$ 与
平均粒径的相关系数为 0.88, 在所有组合中与平均粒
径相关性最高。根据相关性分析结果,本研究基于波
段组合 $\frac{r_{rs}(555) + r_{rs}(660)}{r_{rs}(555) / r_{rs}(660)}$ 与 24 组实测数据使用不同函

数类型构建平均粒径反演模型。

从表 3 中可以看出,使用多项式拟合得到的模型精度最好,该模型为:

$$M_{\rm z} = 12.481 \ 8x^2 - 0.559 \ 7x + 3.609 \ 6 \,, \qquad (5)$$

其中, $x = \frac{r_{rs}(555) + r_{rs}(660)}{r_{rs}(555) / r_{rs}(660)}$, M_z 是平均粒径。将得到的反演值与实测值拟合发现[图 9(a)],反演平均粒径与实测平均粒径相关系数 R^2 =0.863 1, R_{MSE} = 0.051 φ , M_{RE} =1%。利用剩余的 8 组数据对模型的精度进行检验, 散点图如图 9(b)。由图 9(b)可以看出,针对平均粒径的反演模型稳定性较好,反演值与实测值相关系数高, R^2 为 0.833, 平均相对误差为 3.23%,反演精度较高。

函数类型	R^2	$R_{\rm MSE}(\phi)$	$M_{ m RE}(\%)$
指数	0.784 5	0.064	1.38
线性	0.776 8	0.065	1.42
对数	0.531 9	0.094	1.99
幂	0.542 9	0.093	1.95
一元二次多项式	0.863 1	0.051	1.00

2.4.2 利用后向散射系数进行模型构建

基于 QAA-RGR 算法^[12]中估计粒子后向散射系 数的方法,利用 555 nm 处的遥感反射率 $R_{rs}(555)$ 和 660 nm 处的遥感反射率 $R_{rs}(660)$,求得 555 nm 处的 粒子后向散射系数 $b_b(555)$ 。

$$R_{\rm rs}(555) = \frac{R_{\rm rs}(555)}{0.52 + 1.7R_{\rm rs}(555)},\tag{6}$$

$$u(555) = \frac{-g_0 + (g_0^2 + 4g_1 R_{\rm rs}(555))^{\overline{2}}}{2g_1},$$
 (7)

$$a(555) = 0.059 \ 6 + 0.52 \left(\frac{R_{\rm rs}(660)}{R_{\rm rs}(555)}\right)^{1.423} - 0.047 \ 82, (8)$$

$$b_{\rm b}(555) = \frac{u(555) \cdot a(555)}{1 - u(555)},\tag{9}$$

*g*₀=0.089, *g*₁=0.125, *R*_{rs}(555)和 *R*_{rs}(555)是通过 *r*_{rs}(555)和 *r*_{rs}(660)利用公式(10)求得^[31]:

$$R_{\rm rs}(\lambda) = \frac{r_{\rm rs}(\lambda)}{\pi},\tag{10}$$

λ是波长。





χ 4 至 J U_{h} (JJJ) 的十均 2 1 2 及 演 任 2	表 4	基于 b _h (55)	5)的平均粒径反演模型
--	-----	------------------------	-------------

Tab. 4 Average particle size inversion model based on $b_{\rm b}(555)$

函数类型	R^2	$R_{\rm MSE}(\phi)$	$M_{ m RE}(\%)$
指数	0.803 7	0.061	1.3
线性	0.796 7	0.062	1.33
对数	0.547 6	0.093	1.96
幂	0.558 7	0.092	1.92
一元二次多项式	0.857 5	0.052	1.02

利用 24 组数据,基于后向散射系数 b_b(555)使用不同函数类型构建反演平均粒径的算法。

从表中可以看出,使用多项式拟合得到的模型 精度最好,该模型为:

 $M_z = 2.556 6x^2 + 0.017 5x + 3.594,$ (11) 其中, x 是后向散射系数 $b_b(555), M_z$ 是平均粒径。将反演 平均粒径与实测平均粒径进行线性拟合发现(图 10a), 预测值与实测值相关系数 R² 为 0.8575, R_{MSE}=0.052 φ, M_{RE}=1.02%;根据结果可以看出,由反射率预测后向散 射系数,再基于后向散射系数构建平均粒径的反演模型, 对于平均粒径的预测效果较好。利用剩余的 8 组数据对 模型的精度进行检验,散点图如图 10(b)。由图 10(b)可 以看出,反演模型稳定性较好,反演值与实测值相关系 数高, R² 为 0.8197,平均相对误差为 3.31%。





Fig. 10 Comparison of the predicted and measured average particle size and model accuracy test

2.4.3 粒径模型对比

在对渤海的粒径研究中, 青松^[10, 12]发现利 用不同波段组合反演得到颗粒物衰减系数 *C*_p(676), 然后利用颗粒物衰减系数构建幂函数

$$\lg[C_{\rm p}(676)] = 1.6 \cdot \lg \frac{R_{\rm rs}(660)}{R_{\rm rs}(490)} + 0.431 \cdot 1$$

然后利用最小二乘法得到平均粒径的幂函数反 演模型

$$M_z = 3.509 \ 6 \cdot C_{\rm p} (676)^{0.040 \ 3}, \tag{13}$$

利用该方法得到的预测值与实测值的相关系数 R^2 为 0.6, R_{MSE} =0.089 φ , M_{RE} =2.01%。

可以看出该方法对胶州湾平均粒径的反演结果精 度要低于利用波段组合 $\frac{r_{\rm rs}(555) + r_{\rm rs}(660)}{r_{\rm rs}(555) / r_{\rm rs}(660)}$ 和基于后向 散射系数 $b_b(555)$ 得到的反演模型,利用波段组合

 $\frac{r_{rs}(555) + r_{rs}(660)}{r_{rs}(555) / r_{rs}(660)}$ 和 $b_b(555)$ 构建的模型反演值与实测

值的相关系数分别为R²=0.863 1和R²=0.857 5, M_{re}分别 为 1%和 1.02%, 模型精度相较于该方法提高了 1%。

以上研究结果显示, 基于波段组合 <u>r_{rs}(555)+r_{rs}(660)</u> 对胶州湾平均粒径的预测精度以及 <u>r_{rs}(555)/r_{rs}(660)</u>

稳定性都要强于基于后向散射系数 b_b(555)和颗粒物 衰减系数 C_p(676)构建的反演模型,主要是因为在可 见光波段,绿光(555 nm)和红光波段(660 nm)对悬浮 物变化最敏感,而通过波段组合可有效去除黄色物 质等其他因素的干扰。

3 结论

利用包括冬、春、夏3个季节的6个航次的胶州 湾现场观测数据:同步获得的海水浊度、悬浮物粒径, 以及多光谱相机数据等,开展基于多光谱数据的浊度 和悬浮物粒径的遥感反演研究,并展示胶州湾浊度和 悬浮物粒径的时空变化特征。主要结论如下。

(1)胶州湾湾内海域表层浊度冬季偏低,春夏季高,特别是5月浊度最高,与春季水华暴发相关。受 胶州湾北部和西部河流输入泥沙的影响,等浊度线 呈东北-西南向分布。胶州湾悬浮物以极细砂为主; 悬浮物粒径冬季较粗,春季较细,夏季最小,与水动 力条件的季节变化相关。

(2)将不同波段的反射率与浊度分别进行相关性 分析,结果显示红光波段(660~680 nm)的反射率对 浊度最敏感;基于红光波段进行各种波段组合,并 反演模型对粒径的反演有着较好的精度。利用该 方法对胶州湾地区的平均粒径进行反演。通过 660 nm、490 nm 和 570 nm 处的反射率进行组合 得到 *C*_p(676)

$$\lg \frac{R_{rs}(600)}{R_{rs}(400)} + 0.431 \cdot \lg [R_{rs}(570) + R_{rs}(660)] + 1.571,$$
(12)

使用不同函数类型构建浊度反演模型。得到基于组合 $r_{rs}(450)/r_{rs}(660)$ 构建的多项式模型反演效果最好,预测浊度与实测浊度的相关系数 R^2 为 0.671 8, R_{MSE} =1.448 FTU, M_{RE} =38.51%。模型检验表明,该模型反演精度高,稳定性好。

(3)分别用不同波段的反射率与平均粒径进行相 关性分析,同样显示红光波段对粒径参数最敏感。通 过不同波段组合以及后向散射系数分别构建平均粒 径的反演模型,得到基于组合 <u>r_s(555)+r_s(660)</u>构建 的多项式模型对平均粒径的预测效果最好。

参考文献:

- 霍世奎,张怀静,范德江,等.长江口及其邻近海域 悬浮物浓度和浊度的对应关系[J].环境科学学报, 2005,25(5):693-699.
 ZHAI Shikui, ZHANG Huaijing, FAN Dejiang, et al. Corresponding relationship between suspended matter concentration and turbidity on Changjiang Estuary and adjacent sea area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(5): 693-699.
 LEWIS J. Turbidity-controlled suspended sediment
- [2] LEWIS J. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation[J]. Water Resources Research, 1996, 32(7): 2299-2310.
- [3] KATLANE R, NECHAD B, RUDDICK K, et al. Optical remote sensing of turbidity and total suspended matter in the Gulf of Gabes[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(5): 1527-1535.
- [4] QIU Z F, ZHENG L F, ZHOU Y, et al. Innovative GOCI algorithm to derive turbidity in highly turbid waters: a case study in the Zhejiang coastal area[J]. Optics Express, 2015, 23(19): A1179.
- [5] 邵秘华,张素香,马嘉蕊.略论浊度标准、单位和测量仪器的研究与进展[J].海洋技术学报,1997,16(4): 52-63.
 SHAO Mihua, ZHANG Suxiang, MA jiarui. The standard, basic unit and instrament for measurement of tur-

dard, basic unit and instrament for measurement of turbidity[J]. Journal of Ocean Technology, 1997, 16(4): 52-63.

 [6] 杨海丽,郑玉龙,黄稚.海南近海海域浊度与悬浮颗 粒物粒径的分布特征[J].海洋学研究,2007,25(1): 34-43. YANG Haili, ZHENG Yulong, HUANG Zhi. Characteristics of turbidity and suspended particle size distribution on adjacent area of Hainan[J]. Journal of Marine Sciences, 2007, 25(1): 34-43.

- [7] 周明乐.水中浑浊度的测定研究近况[J].中国公共 卫生,2000,16(6):92-94.
 ZHOU Mingle. Recent research on water turbidity measurements[J]. Chinese Journal of Public Health, 2000, 16(6):92-94.
- [8] 吴月英, 彭立功. 长江入海悬移质泥沙粒度与流量、 含沙量的关系[J]. 泥沙研究, 2005, 30(1): 26-32.
 WU Yueying, PENG Ligong. Relationships between suspended sediment size, water discharge and sediment concentration at Datong Gauging station of Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 2005, 30(1): 26-32.
- [9] 侯琳琳,马安青,胡娟,等.胶州湾水体悬浮物浓度 遥感反演模式优化研究[J].中国海洋大学学报(自然 科学版), 2018, 48(10): 98-108.
 HOU Linlin, MA Anqing, HU Juan, et al. Study on remote sensing retrieval model optimization of suspended sediment concentration in Jiaozhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(10): 98-108.
- [10] 青松. 渤海盐度和悬浮颗粒粒径的遥感反演及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
 QING Song. Remote sensing research and application of salinity and suspended particle size of the Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [11] 李敏敏. 我国典型近岸水体悬浮颗粒物后向散射特 性研究[D]. 天津: 国家海洋技术中心, 2013.
 LI Minmin. Research on backscattering characteristics of suspended particle matter in typical coastal waters[D].
 Tianjin: National Ocean Technology Center, 2013.
- [12] CHEN S G, ZHANG T G. Evaluation of a QAA-based algorithm using MODIS land bands data for retrieval of IOPs in the Eastern China Seas[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 13953-13971.
- [13] ZHAO G B, JIANG W S, WANG T, et al. Decadal variation and regulation mechanisms of the suspended sediment concentration in the Bohai Sea, China[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2022, 127(3): e2021JC017699.
- [14] 胡静雯,陈树果,张亭禄,等.利用MODIS卫星遥感数据监测东中国海浊度的时空分布[J].海洋环境科学,2015,34(4):564-569.
 HU Jingwen, CHEN Shuguo, ZHANG Tinglu, et al. Spatial and temporal variations of turbidity in the East China Seas derived from MODIS satellite data[J]. Ma-
- rine Environmental Science, 2015, 34(4): 564-569. [15] 顺布日, 青松, 郝艳玲. 基于半分析方法的黄河口悬 浮物浓度遥感反演[J]. 海洋科学, 2019, 43(12): 17-27.

SHUN Buri, QING Song, HAO Yanling. Remote sensing retrieval of suspended-particulate-matter concentrations in Yellow River estuary based on semi-analytical method[J]. Marine Sciences, 2019, 43(12): 17-27.

- [16] 黄以琛,李炎,邵浩,等.北部湾夏冬季海表温度、 叶绿素和浊度的分布特征及调控因素[J]. 厦门大学 学报(自然科学版), 2008, 47(6): 856-863.
 HUANG Yichen, LI Yan, SHAO Hao, et al. Seasonal variations of sea surface temperature, chlorophyll-a and turbidity in Beibu Gulf, MODIS imagery study[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2008, 47(6): 856-863.
- [17] 张芸,张鹰,王晶晶. 悬沙水体光谱反射率与质量浓度、粒径的相关关系[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(3): 340-346.
 ZHANG Yun, ZHANG Ying, WANG Jingjing. Correlations between the spectral reflectance of water mass containing suspended sediments and the concentration and particle size of the suspended sediments[J]. Advances in Marine Science, 2008, 26(3): 340-346.
- [18] 周雯,曹文熙,李彩.海水中矿物质颗粒吸收和散射 特性 Mie 理论分析[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(1): 22-26.
 ZHOU Wen, CAO Wenxi, LI Cai. Modeling absorption and scattering properties of mineral particles suspended

and scattering properties of mineral particles suspended in seawater based on Mie theory[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(1): 22-26.

- [19] 李敏敏, 李铜基, 朱建华, 等. 黄东海海区悬浮颗粒物 后向散射系数和后向散射比的空间分布规律研究[J]. 海洋技术学报, 2013, 32(1): 50-55.
 LI Minmin, LI Tongji, ZHU Jianhua, et al. Spatial distribution of backscattering coefficient and backscattering ratio of suspended particle matter in Yellow Sea and East China Sea[J]. Journal of Ocean Technology, 2013, 32(1): 50-55.
- [20] ZHANG X, SONG Y, CHEN J J, et al. Landsat Image-Based retrieval and analysis of spatiotemporal variation of total suspended solid concentration in Jiaozhou Bay, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(23): 4796.
- [21] 邹凯, 孙永华, 李小娟, 等. 基于无人机遥感的水质 监测研究综述[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(S2): 69-75.
 ZOU Kai, SUN Yonghua, LI Xiaojuan, et al. Summary of water quality monitoring based on remote sensing of unmanned aerial vehicle[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(S2): 69-75.
- [22] SHANG S L, LEE Z P, LIN G, et al. Sensing an intense phytoplankton bloom in the western Taiwan Strait from radiometric measurements on a UAV[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 198: 85-94.
- [23] 刘善伟, 武钰林, 许明明, 等. 无人机多光谱遥感反

演近海 fDOM 浓度[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(6): 33-39.

LIU Shanwei, WU Yulin, XU Mingming, et al. Retrieval of offshore fDOM concentration by UAV multispectral remote sensing[J]. Journal of Ocean Technology, 2021, 40(6): 33-39.

- [24] MCELIECE R, HINZ S, GUARINI J M, et al. Evaluation of nearshore and offshore water quality assessment using UAV multispectral imagery[J]. Remote Sensing, 2020, 12(14): 2258.
- [25] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第四分册[M]. 北京:海洋出版社, 1993: 157-260.
 Editorial Committee of Chinese Gulf Annals. Chinese gulf annals(the first book of four)[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993: 157-260.
- [26] 张铭汉. 胶州湾海水中悬浮体的分布及其季节变化[J]. 海洋科学集刊, 2000, 42: 49-54.
 ZHANG Minghan. Distribution and seasonal variation of suspended matter in sea water of Jiaozhou Bay[J].
 Studia Marina Sinica, 2000, 42: 49-54.
- [27] 沈萍萍,汤亚楠,李影,等. 胶州湾表层沉积物甲藻 孢囊的分布与环境因素的相关分析[J]. 烟台大学学 报(自然科学与工程版), 2021, 34(4): 392-399.
 SHEN Pingping, TANG Yanan, LI Ying, et al. Relationship between dinoflagellate cyst and environmental factors in surface sediment of the Jiaozhou Bay[J].
 Journal of Yantai University(Natural Science and Engineering Edition), 2021, 34(4): 392-399.
- [28] 庄海海,徐绍辉,高茂生,等.胶州湾表层沉积物粒 度特征及其沉积环境[J].海洋地质前沿,2018,34(9): 24-31.

ZHUANG Haihai, XU Shaohui, GAO Maosheng, et al. Grain size distribution of surface sediments in JiaoZhou Bay and its environmental significance[J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(9): 24-31.

- [29] 高抒, 汪亚平. 胶州湾沉积环境与潮汐汊道演化特征[J]. 海洋科学进展, 2002, 20(3): 52-59.
 GAO Shu, WANG Yaping. Characteristics of sedimentary environment and tidal inlet evolution of Jiaozhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2002, 20(3): 52-59.
- [30] 汪亚平,高抒,贾建军. 胶州湾及邻近海域沉积物分 布特征和运移趋势[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 449-458.
 WANG Yaping, GAO Shu, JIA Jianjun. Sediment distribution and transport patterns in Jiaozhou Bay and adjoining areas[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(4): 449-458.
- [31] 安颖,丁静,蔺超,等.相对反射深度的秦皇岛海域 叶绿素浓度反演[J].光谱学与光谱分析,2022,42(4): 1083-1091.

AN Ying, DING Jing, LIN Chao, et al. Inversion method of chlorophyll concentration based on relative reflection depths[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(4): 1083-1091.

- [32] 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.海洋调查规范:第8部分海洋地质地球物理调查:GB/T 12763.8-2007[S].北京:中国标准出版社,2008:1-88.
 General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Specifications for oceanographic survey: Part 8 Marine geological and geophysical surveys: GB/T 12763.8-2007[S]. Beijing: China Standards Press, 2008: 1-88.
- [33] MCMANUS D A. A criticism of certain usage of the phi-notation[J]. Journal of Sedimentary Research, 1963, 33(3): 670-674.
- [34] 王为, 吴正. 基于 MATLAB 的图解粒度参数计算[J]. 热带地理, 2006, 26(3): 239-242.
 WANG Wei, WU Zheng. A Matlab method of graphical calculation for grain size parameters[J]. Tropical Geography, 2006, 26(3): 239-242.
- [35] 王文海,王润玉,张书欣. 胶州湾的泥沙来源及其自然沉积速率[J]. 海岸工程, 1982, 1(1): 83-90.
 WANG Wenhai, WANG Runyu, ZHANG Shuxin. Sediment supply and natural deposition rate of Jiaozhou Bay[J]. Coastal Engineering, 1982, 1(1): 83-90.
- [36] YIN Z Z, LI J S, HUANG J, et al. Steady increase in water clarity in Jiaozhou Bay in the Yellow Sea from 2000 to 2018: Observations from MODIS[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2021, 39(3): 800-813.
- [37] 崔廷伟,张杰,马毅,等. 渤海悬浮物分布的遥感研究[J]. 海洋学报,2009,31(5):10-18.
 CUI Tingwei ZHANG Jie, MA Yi, et al. The study on the distribution of suspended particulate matter in the Bohai Sea by remote sensing[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(5): 10-18.
- [38] 陈黄蓉,张靖玮,王胜强,等.长江口及邻近海域的 浊度日变化遥感研究[J].光学学报,2020,40(5): 34-46.
 CHEN Huangrong, ZHANG Jingwei, WANG Shengqiang, et al. Study on diurnal variation of turbility in

the Yangtze Estuary and adjacent areas by remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 34-46.
[39] 丁梦娇. 基于多源卫星的渤黄海浊度分布特征研究[D].

(59) 了多财. 基丁多脲卫生时初更得强度分布将征研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2019. DING Mengjiao. Study on turbidity distribution in the Bohai and Yellow Sea based on Multi-source satellites[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019.

Remote sensing inversion model of seawater turbidity and suspended particle size based on multispectral data

CHEN Xiang-jian^{1, 2}, LIU Hong-xia¹, ZHANG De-qiang², YUAN Sheng-ming², LIN Chao³, PANG Chong-guang²

(1. School of Mathematics and Systems Science, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. State Key Laboratory of Applied Optics Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Received: Aug. 22, 2022

Key words: remote sensing inversion model; multispectral data; turbility; particle size parameter; backscatter coefficient; the Jiaozhou Bay

Abstract: A remote sensing inversion model was developed based on multispectral data and the spatiotemporal distribution of seawater turbidity and suspended solid particle sizes in Jiaozhou Bay in January 2021 and March-July 2021. The model was developed using various mathematical and statistical methods to enhance the accuracy of multispectral cameras and expand their drone-based applications in the sea. Analysis of the turbidity and suspended particle size shows that the surface turbidity of the water in Jiaozhou Bay is low in winter and high in spring and summer. Phytoplankton blooms in the spring, leading to the highest turbidity in May. The suspended particles in Jiaozhou Bay consist primarily of very fine sand. The suspended matter particle size is strongly influenced by the seasonal variation of the hydrodynamic conditions, leading to it being coarser in winter, relatively finer in spring, and the smallest in summer. The correlation analyses between the irradiance reflectance of different bands, as calculated from the multispectral data and turbidity, and suspended particle size indicate that the reflectivity of the red band (660-680 nm) has the highest sensitivity to variation in turbidity and particle size parameters. Turbidity inversion models of various function types are constructed based on the band combination of red wavelengths. The polynomial model based on the effluence of water irradiance at 450 and 660 nm achieves the best-predicted results, with a correlation coefficient between predicted turbidity and measured turbidity of 0.82 and a root mean square error of 1.448 FTU. The inversion models of the mean particle size are established by a band combination based on the red light band and the backscattering coefficient. The polynomial models based on the effluence of water irradiance at 555 and 660 nm are found to be able to predict the average particle size well, with a predicted result root mean square error of 0.051 φ and mean relative error of 1%. The two types of remote sensing inversion models that have been constructed can also be generalized and applied to other type-II water bodies.

(本文编辑:丛培秀)