

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2020216

引用格式: 周燕,禹定峰,刘晓燕,等. 基于 GOCI 数据的胶州湾水体透明度遥感反演及日变化研究[J]. 国土资源遥感,2021,33(2):108 – 115. (Zhou Y, Yu D F, Liu X Y, et al. Research on remote sensing retrieval and diurnal variation of Secchi disk depth of Jiaozhou Bay based on GOCI[J]. Remote Sensing for Land and Resources ,2021,33(2):108 – 115.)

基于 GOCI 数据的胶州湾水体透 明度遥感反演及日变化研究

周 燕, 禹定峰, 刘晓燕, 杨 倩, 盖颖颖

(齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东省海洋监测仪器装备
技术重点实验室, 国家海洋监测设备工程技术研究中心, 青岛 266100)

摘要: 透明度是描述海洋和湖泊水体光学性质的一个重要参数。利用 2017 年 5 月 16 日胶州湾航次的现场实测数据和 GOCI 卫星影像,采用 2 种半分析算法 Doron11 和 Lee15 对水体透明度进行反演。研究表明, Lee15 算法在胶州湾海域表现较好,透明度反演值与实测值之间的决定系数为 0. 98,均方根误差为 0. 02 m。选择当日 8 幅 GOCI 影像,利用 Lee15 算法反演获得胶州湾水体透明度日变化的时空分布特征。空间分布上,海域整体透明度较低(0 ~ 4 m),从湾内到湾外透明度呈现出逐渐增大的趋势。时间变化上,湾内水体透明度的变化受潮汐影响明显,湾外和湾口的变化由太阳天顶角主导,海域平均水体透明度的变化由太阳天顶角和潮汐共同作用。根据各采样点实测水体透明度与现场同步测量的其他环境因子的统计分析,胶州湾水体透明度的变化是多个环境因子共同作用的结果,与水深存在较强的正相关,相关系数达 0. 84,与其他环境因子均呈负相关关系。

关键词: 透明度; GOCI 影像; 半分析算法; 日变化; 环境因子

中图法分类号: P 76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001 – 070X(2021)02 – 0108 – 08

0 引言

透明度(Secchi disk depth, Z_{sd})是描述海洋和湖泊水体光学性质的一个重要参数,能够直观反映水体的浑浊程度以及水体对光的吸收和散射程度^[1],与水体固有光学性质^[2]、叶绿素^[3]、悬浮颗粒物^[4]、浮游植物生物量^[5]等有着密切关系。传统的透明度观测方法是利用直径约为 30 cm 的白色或黑白四等分的圆盘^[6],即塞克盘,垂直放入水体后测量观测者能隐约看到盘面的深度,这种测量方法至今仍在使用。然而,该方法获取的数据在时间和空间上是离散的,同步性较差,不能满足实时监测和长时间连续观测透明度的需求。卫星遥感技术以高空间、高时间分辨率快速有效地覆盖大面积区域,成为透明度观测的重要方法^[7]。

近年来,国内外开展了很多透明度遥感反演方法的研究,主要有经验方法和半分析算法 2 种。经验方法通过在遥感数据与原位透明度测量值之间进行回归分析来估测^[8-9],虽然易于实现,但始终需要用于校准的现场数据,这限制了它们对其他水体的适用性。相比之下,半分析算法基于光在水下的辐射传输理论(或生物光学模型),在某些假设下具有几个次要重要的经验关系,因此通常不需要重新校准,在缺乏现场数据的情况下,使用半分析算法是估算水质参数的可行和最实用的方法。目前,主要有 2 种半分析算法可用于从遥感数据估测 Z_{sd} 值。在 Tyler^[10] 和 Preisendorfer^[11] 的经典水下可见光学理论基础上, Doron 等^[12] 提出了一种计算海水漫衰减系数和光束衰减系数的算法(以下称为 Doron11),但该算法估算的透明度与实测值之间误差较大。Lee 等^[13] 研究发现经典水下光学理论存在不能准确

收稿日期: 2020 – 07 – 15; 修订日期: 2020 – 08 – 27
基金项目: 山东省重点研发计划项目“面向沿海水色环境监测的机载高光谱成像探测仪研究”(编号: 2019GHY112017)、国家重点研发计划项目“多基平台海洋生态环境监测系统集成”(编号: 2017YFC1404802)、热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所)开放课题“基于遥感数据的南海海水透明度长时序时空演变规律及其环境调控机制研究”(编号: LTO2017)、山东省自然科学基金项目“基于多传感器卫星数据的海洋牧场生态环境监测研究”(编号: ZR2019PD021)和国家海洋公益性项目“海洋高光谱仪和机载激光测量系统产品化关键技术及应用示范”(编号: 2015031)共同资助。
第一作者: 周 燕(1985 –),女,硕士,助理研究员,主要从事海洋水色遥感应用研究。Email: zhouyan_ocrs@qlu.edu.cn。
通信作者: 禹定峰(1986 –),男,博士,副研究员,主要从事海洋遥感研究。Email: dfyu@qlu.edu.cn。

解释人眼观察塞克盘等问题,提出了一种新的水下能见度理论和透明度半分析反演算法(以下称为 Lee15),通过 338 个大洋、海岸带和湖泊等水体的独立样本验证表明,该模型的决定系数为 0.96,平均绝对误差约 18%。目前,该算法已在渤海^[14]、黄渤海^[15]、典型海湾^[16]、内陆^[17-18] 等二类水体得到检验。

GOCI 是搭载在韩国 2010 年发射的世界上第一颗地球同步轨道水色卫星 (Communication, Ocean & Meteorological Satellite, COMS) 上用于海洋水色观测的传感器,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 1 h,每天可获取从北京时间 8—15 时的逐小时观测数据,覆盖我国黄海、渤海和东海海域。本文利用 2017 年 5 月 16 日胶州湾航次的现场实测数据和 GOCI 卫星影像,探讨 2 种透明度半分析算法 Doron11 和 Lee15 在胶州湾海域的适用性,同时获取水体透明度日变化的时空分布特征,通过现场调查资料分析实测透明度与环境因子之间的相关性,以拓展在胶州湾水质监测中的应用。

1 研究区概况和数据源

1.1 研究区概况

胶州湾 (N 35°48′ ~ 36°18′, E 119°54′ ~ 120°30′),为黄海中部、山东半岛南岸的半封闭海湾,冬季多为西北风,夏季多为东南风,水交换能力较弱,受到沿岸工业污染和人类生活排污的影响,水质变差,营养盐浓度升高^[19],易发生赤潮^[20]。透明度作为水质监测的重要参数之一,利用卫星遥感进行连续性监测,可以为今后胶州湾水质监测和治理提供有力的监测依据。

1.2 现场实测数据

2017 年 5 月 16 日,天气晴朗,海况较好,在胶州湾海域布设采样点 (图 1),获取 18 组水体透明度数据,各采样点现场同步测量水深、风速、海表温度

和海表盐度等气象水文要素,并采集海水样品,放置 -40 ℃ 低温冷冻柜带回实验室处理分析,获得叶绿素浓度 ([Chl-a])、总悬浮物浓度 ([TSM]) 和有色可溶性有机物吸收系数 ($a_y(400)$) 等水质要素。海水透明度测量采用直径为 30 cm 的白色塞克盘测量按照 GB 17378.4—2007 第四部分的相关规定执行,现场测量数据最大值为 3.3 m,最小值为 0.7 m,平均值为 1.49 m,标准差为 0.87 m,变异系数为 58.1%。

现场采样点的光谱数据测量,依照水面以上测量法执行^[21],根据 Mobley 提出的 (40°, 135°) 测量几何,由 QE-pro 光纤光谱仪采集海表面水体的上行辐亮度 L_{sw} 、天空光的辐亮度 L_{sky} 和标准漫反射板的上行辐亮度 L_p 的光谱信号。为保证光谱数据质量,采样点的各个参数测量时间至少跨越 1 个波浪周期。忽略海面或避开水面泡沫的情况下,推导得出水体的遥感反射率 R_{rs} 为:

$$R_{rs} = \frac{\rho_p(L_{sw} - \rho \times L_{sky})}{\pi L_p}, \tag{1}$$

式中: ρ_p 为标准漫反射板的方向-半球反射率; ρ 为气-水界面反射率。实测光谱数据通过暗噪声校正、气-水界面反射率确定、异常数据的剔除等处理,得到海表面水体的遥感反射率光谱,如图 2 所示。

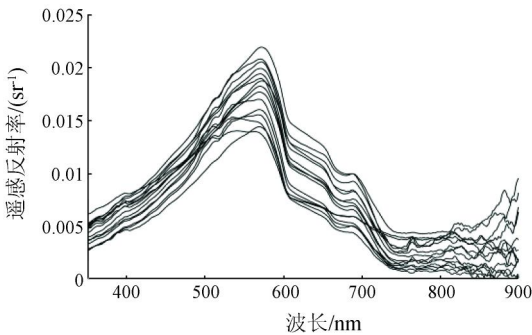


图 2 采样点实测遥感反射率光谱曲线
Fig. 2 In-situ R_{rs} values of sampling stations

1.3 遥感数据及预处理

从韩国海洋卫星中心 (<http://kosc.kiost.ac.kr>) 获取 2017 年 5 月 16 日的 GOCI Level-1B 数据,使用 NASA 处理软件 SeaWiFS 数据分析系统 (SeaDAS 7.4) 核心处理模块对 GOCI 影像进行大气校正。SeaDAS 是针对极轨卫星 SeaWiFS 开发的,大气校正模块采用基于 SeaWiFS 开发的标准大气校正方法。SeaWiFS 过境成像时间与 GOCI 的 8 个成像时间不尽相同,而且晨昏时刻即第一景和最后一景 GOCI 图像的大气程辐射是特殊的,因而需要用实测光谱数据对 SeaDAS 大气校正的结果进行评估。GOCI 传感器获取的图像只有 8 个波段,每个波段记

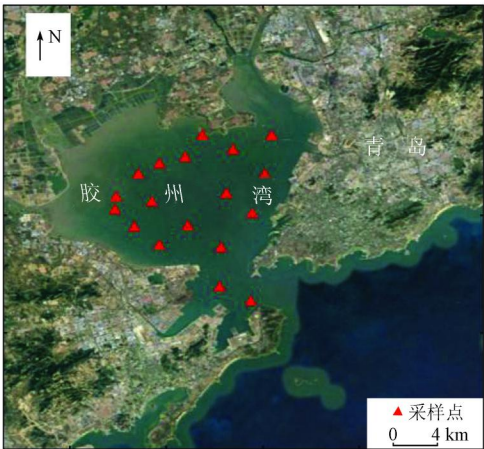


图 1 胶州湾海域采样点站位置分布

Fig. 1 Location of sampling stations in Jiaozhou Bay

录的能量值与光谱响应函数有关,根据 GOCI 的波段响应函数,对实测得到的遥感反射率数据进行等效波段积分处理,以模拟不同波段的 GOCI 等效遥感反射率数据 $\langle R_{rs}(\lambda) \rangle$, 计算公式为:

$$\langle R_{rs}(\lambda) \rangle = \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{rs}(\lambda) f(\lambda) d\lambda \right) / \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{rs}(\lambda) d\lambda \right),$$

(2)

式中: $f(\lambda)$ 为 GOCI 波段响应函数。对各个采样点的波段等效遥感反射率与 SeaDAS 大气校正得到的遥感反射率按照波段进行平均,如图 3 所示,GOCI 影像大气校正后的遥感反射率在数量和光谱形状上都与实测遥感反射率值的波段等效数据吻合较好,平均相对误差分别为 26.6% (412 nm), 26.3% (443 nm), 7.8% (490 nm), 10.3% (555 nm), 13.0%

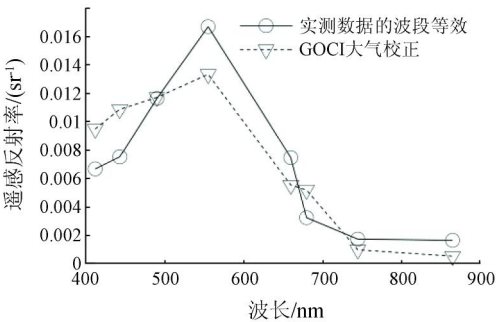


图 3 波段等效遥感反射率与 GOCI 大气校正影像的遥感反射率的光谱曲线对比

Fig. 3 Comparison of R_{rs} values between band-equivalent of in-situ measured and GOCI data after atmosphere correction

(660 nm), 32.1% (680 nm), 19.7% (745 nm) 和 29.4% (865 nm), 所有波段的平均相关系数为 0.892。GOCI 影像大气校正后的遥感反射率在近红外波段趋近于 0,对表面散射光的去除效果较好。

对遥感影像大气校正后,根据官网提供的经纬度信息,在 ENVI 中基于 GLT 进行几何纠正,并裁剪出研究区域。由于 GOCI 遥感影像的时间分辨率为 1 h,实测的采样点数据与 GOCI 影像进行时空匹配时,时间窗口设置为实测数据测量时间 ± 0.5 h,与实测采样点采取点对点的方式进行空间匹配,空间窗口为 3 像元 $\times$ 3 像元,形成能用于遥感反演模型建立的匹配样本。

2 研究方法

2.1 Doron11 和 Lee15 算法

应用半分析算法反演水体透明度,均包含以下 3 个步骤。首先,使用 QAA 半分析算法从水体的遥感反射率 $R_{rs}(\lambda)$ 中估算水体的总吸收系数 $a(\lambda)$ 和总散射系数 $b_b(\lambda)$ 。目前,QAA 算法已经发展到第六版,如表 1 所示。表中: $r_{rs}(\lambda)$ 为水面下遥感反射率; $u(\lambda)$ 为后向散射系数 $b_b(\lambda)$ 与吸收系数和后向散射系数之和 $(a(\lambda) + b_b(\lambda))$ 的比值; a_w 为纯海水的吸收系数; $b_{bp}(\lambda)$ 为悬浮粒子的后向散射系数; $a(\lambda_0)$ 为参考波长 λ_0 处的总吸收系数; b_{bw} 为纯海水后向散射系数; η 为粒子后向散射系数的光谱指数; g_0, g_1, h_0, h_1 及 h_2 是常数。

表 1 QAA_V6 模型计算流程		
步骤	物理量	计算公式
1	$r_{rs}(\lambda)$	$r_{rs}(\lambda) = R_{rs}(\lambda) / (0.52 + 1.7R(\lambda))$
2	$u(\lambda)$	$u(\lambda) = \frac{-g_0 + \sqrt{(g_0)^2 + 4g_1r_{rs}(\lambda)}}{2g_1}, g_0 = 0.089, g_1 = 0.125$ $R_{rs}(670) < 0.0015 \text{ sr}^{-1} \text{ (QAA_V5)}$ $R_{rs}(670) \geq 0.0015 \text{ sr}^{-1} \text{ (QAA_V6)}$
3	$a(\lambda_0)$	$a(\lambda_0) = a(55x) = a_w(\lambda_0) + 10^{h_0+h_1x+h_2x^2}$ $h_0 = -1.146, h_1 = -1.366, h_2 = -0.469$ $\chi = \lg \left[\frac{r_{rs}(443) + r(490)}{r_{rs}(55x) + 5 \frac{r_{rs}(670)}{r_{rs}(490)} r_{rs}(670)} \right]$ $= a(670)$ $= a_w(670) + 0.39 \left[\frac{R_{rs}(670)}{R_{rs}(443) + R_{rs}(490)} \right]^{1.14}$
4	$b_{bp}(\lambda_0)$	$b_{bp}(\lambda_0) = b_{bp}(55x) = \frac{u(\lambda_0) - a(\lambda_0)}{1 - u(\lambda_0)} - b_{bw}(55x)$ $b_{bp}(\lambda_0) = b_{bp}(670) = \frac{u(\lambda_0) - a(\lambda_0)}{1 - u(\lambda_0)} - b_{bw}(670)$
5	η	$\eta = 2.0 \left[1 - 1.2 \exp \left(-0.9 \frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(55x)} \right) \right]$
6	$b_{bp}(\lambda)$	$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^\eta$
7	$a(\lambda)$	$a(\lambda) = [1 - u(\lambda)] [b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)] / u(\lambda)$

在 QAA_V6 中,如果 $R_{rs}(670) < 0.0015 \text{ sr}^{-1}$, 则将 550 nm 作为参考波段(即 QAA_V5), 否则选择 670 nm 作为参考波段。其次,采用 Lee 等的公

式^[22-23],根据 $a(\lambda)$ 和 $b_b(\lambda)$ 和水上方的太阳天顶角 θ_s 估算水体的漫衰减系数 $K_d(\lambda)$, 即

$$K_d(\lambda) = (1 + m_0 \theta_s) a(\lambda) + m_1 [1 - \gamma \eta_w(\lambda)] (1 - m_2 e^{-m_3 a(\lambda)}) b_b(\lambda) , \quad (3)$$

式中：参数 m_0, m_1, m_2, m_3 和 γ 分别为 0.005, 4.18, -0.52, -10.8 和 0.265; η_w 为 $b_{bw}(\lambda)$ 和 $b_b(\lambda)$ 的比值。Pope 等^[24] 和 Smith 等^[25] 列表给出了不同波段纯海水的吸收系数和后向散射系数值。最后,通过估算得到的水体固有光学特性,基于水下能见度理论可估算水体透明度。

根据 Tyler^[10] 和 Preisendorfer^[11] 的经典水下可见光学理论,Doron11 算法对均匀介质中垂直方向上的明视对比度衰减可描述为:

$$Z_{sd} = \frac{\ln\left(\frac{C_0}{C_{min}}\right)}{K_d(v) + c(v)} , \quad (4)$$

式中: Z_{sd} 为透明度, m; $K_d(v)$ 为可见光的垂直衰减系数, m^{-1} ; $c(v)$ 为可见光的光束衰减系数, m^{-1} ; C_{min} 为人眼可识别的最小表观对比度; C_0 为透明度盘和背景水体之间的固有对比度。Preisendorfer^[11] 研究发现, $\ln\left(\frac{C_0}{C_{min}}\right)$ 受到透明度盘反射率、背景水体反射率和 C_{min} 变化的影响,变化范围为 5~10 之间。本文研究中,参照 Morel 的观测数据分析^[26], $\ln\left(\frac{C_0}{C_{min}}\right)$ 取值为 5.5。 $K_d(v) + c(v)$ 可以通过 K_d

(490) + $c(490)$ 的二阶多项式回归估测得到,即:

$$K_d(v) + c(v) = 0.098\ 9x^2 + 0.887\ 9x - 0.046\ 7 , \quad (5)$$

式中: x 代表 $K_d(490) + c(490)$, $K_d(490)$ 是 490 nm 处的垂直漫衰减系数; $c(490)$ 代表 490 nm 处的光束衰减系数,即为 490 nm 处的总吸收系数 $a(490)$ 、纯海水后向散射系数 $b_{bw}(490)$ 和颗粒物后向散射系数 $b_b(490)$ 的函数^[27]。因而,通过 QAA 算法反演得到的 $a(490)$, $b_b(490)$ 和 $b(490)$,便可估算出水体透明度。

基于 Lee 等^[13] 提出的新的水下能见度理论, Lee15 算法根据 $K_d(\lambda)$ 和相应的 $R_{rs}(\lambda)$ 估算 Z_{sd} ,即:

$$Z_{sd} = \frac{1}{2.5 \min(K_d(\lambda))} \ln\left(\frac{|0.14 - R_{rs}^{PC}|}{C_t^r}\right) , \quad (6)$$

式中: $\min(K_d(\lambda))$ 为 GOCI 可见光波段中的最小 K_d 值; R_{rs}^{PC} 为具有最小 K_d 值的波段对应的 R_{rs} ; C_t^r 为人眼观察透明度盘反射的对比度阈值(即 0.013 sr^{-1})。

2.2 精度评价

选择决定系数 (R^2)、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 对 2 种半分析算法的性能进行评价,分别表达了透明度反演值与现场实测值之间的拟合程度和绝对偏差,相应度量指标为:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (\overline{x_{est,i}} - \overline{x_{est,i}})(\overline{x_{mea,i}} - \overline{x_{mea,i}}) \right]}{\sum_{i=1}^N (\overline{x_{est,i}} - \overline{x_{est,i}})^2 \sum_{i=1}^N (\overline{x_{mea,i}} - \overline{x_{mea,i}})^2} , \quad i = 1, 2, \cdots, N , \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\overline{x_{est,i}} - \overline{x_{mea,i}})^2 / N} , \quad (8)$$

式中: $\overline{x_{est,i}}$ 和 $\overline{x_{est,i}}$ 分别为算法反演的透明度值及其均值; $\overline{x_{mea,i}}$ 和 $\overline{x_{mea,i}}$ 分别为相应匹配的现场实测的透明度值及其均值; N 为匹配的透明度样本数。

3 结果与分析

3.1 Doron11 和 Lee15 比较

使用 Droon11 和 Lee15 算法对 GOCI 数据反演得到的胶州湾水体透明度值与现场测量的透明度值进行比较,如图 4 所示。尽管这 2 种算法是根据不同的水下能见度理论开发,与实测透明度值相比较,2 种算法获得的反演值均分布于 1:1 线附近,与实测值的相关性较好。Doron11 算法的 R^2 为 0.95, RMSE 为 0.05 m; Lee15 算法的 R^2 为 0.98, RMSE 为 0.02 m。相比之下, Lee15 算法较 Doron11 算法表现更好,与实测值的相关性更高,绝对偏差更小。

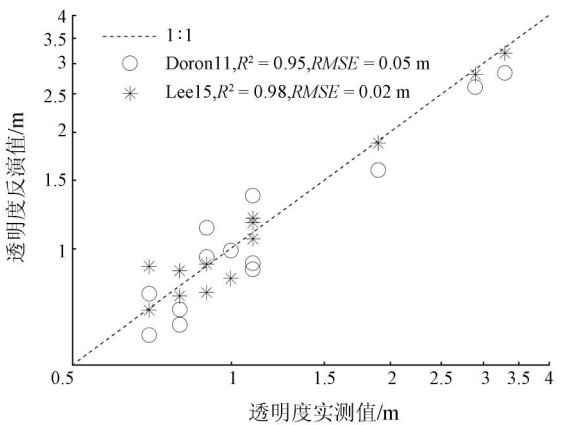


图 4 透明度实测值与算法反演值的散点图
Fig. 4 Scatter plot of Z_{sd} values of in-situ measured and model estimated

3.2 透明度日变化特征

以 2017 年 5 月 16 日 08:16—15:16 共 8 个时相的 GOCI 遥感影像为例,利用 Lee15 算法反演获得的胶州湾水体透明度的时空分布状况。为了更清楚地显示胶州湾透明度的日变化特征,选择 3 个矩

形区域 A,B 和 C 分别代表湾内、湾口和湾外,图 5 具体显示了当日透明度的分布状况。

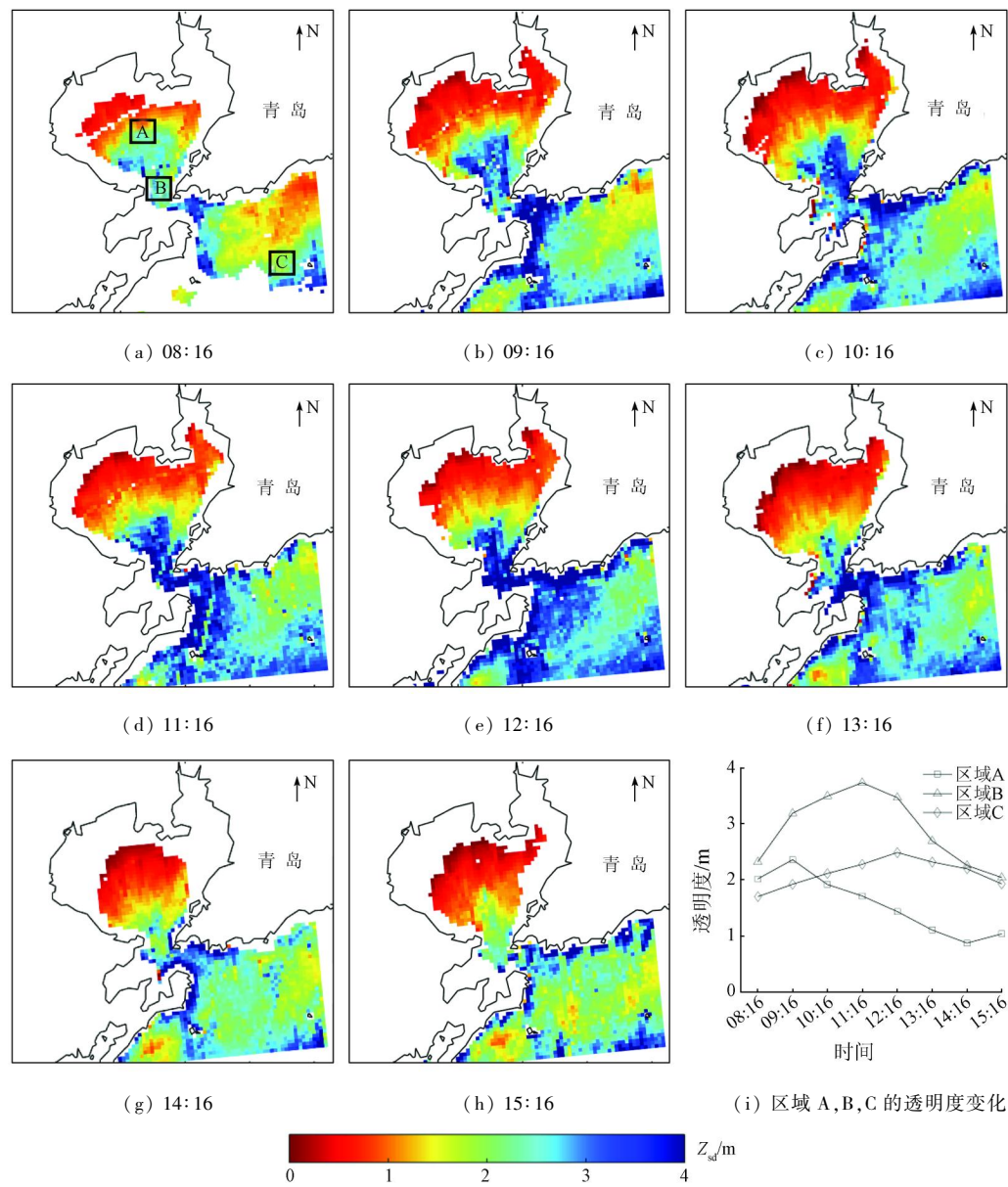


图 5 2017 年 5 月 16 日 08: 16—15: 16 胶州湾水体透明度时空分布

Fig. 5 Spatio-temporal distribution of the Secchi disk depth of Jiaozhou Bay from 08: 16—15: 16 on May 16, 2017

空间分布上,该海域整体透明度较低(0~4 m),从湾内到湾外透明度呈现出逐渐增大的趋势。湾内区域 A 的水体透明度较低,这是由于湾北部海域水深较浅,是典型的养殖区,有机物丰富,湾西北和东岸沿岸的工业污染和生活污水,给湾内带来丰富的营养盐。胶州湾内外海水中营养盐的分布,表层低于低层,湾内明显高于湾外^[28]。湾口区域 B 由于水深较大,湾内外水体交换频繁,因而该处水体透明度较高。湾外区域 C 透明度不及湾口高,主要是由于沿岸水体散射特征明显,春季充分的光照和适宜的温度同时带动浮游植物生长,也造成水体透明度下降。

时间变化显示,随着太阳天顶角的增加,低透明

度区域在 12: 16 之前逐渐缩小到湾内(图 5(a)—(d)),而高透明度区域在 12: 16 之后逐渐向湾外扩展(图 5(e)—(h)),图 5(i)显示了 3 个区域的 GO-CI 影像获取的透明度值的日变化。影响胶州湾水体透明度日变化的主要因素包括太阳天顶角 SOLZ 和潮汐,图 6 显示了胶州湾海域平均水体透明度、太阳天顶角以及潮汐的日变化,透明度值与太阳天顶角呈现出反比关系。太阳天顶角的每日变化是规律的,当时间接近中午时,太阳天顶角的值逐渐减小,而下午,太阳天顶角的值逐渐增大。当日潮位最大高度出现在上午 9: 24。由于 Z_{sd} 与 K_d 存在很强的负相关,而 Kirk 根据蒙特卡罗计算发现 K_d 和 SOLZ 之间正相关^[29],这种关系在清澈的水中尤其明显,因

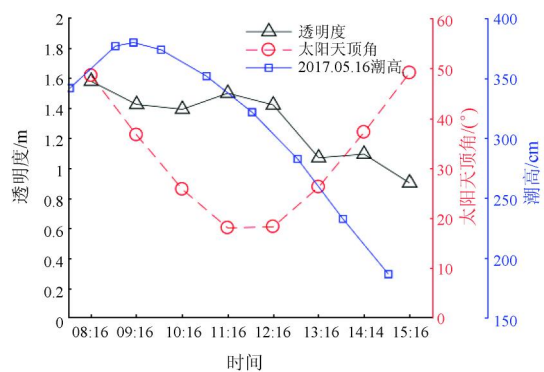


图 6 胶州湾水体透明度、太阳天顶角和潮汐的日变化曲线

Fig. 6 Diurnal variation of Secchi disk depth, solar zenith angle and tide in Jiaozhou Bay

而湾口和湾外水体受 SOLZ 控制明显。胶州湾湾内潮流主要是往复流,涨潮流速大,落潮流速小,涨潮时间短,落潮时间长^[30],由于来自沿岸和径流的污染物以及养殖区营养盐的流动过程中,海水的涡动混合占主导地位^[31],湾内水深较浅,污染物和营养盐按照潮流方向漂移,因而湾内区域 A 的透明度在

最大潮位出现的时间之后开始缓慢下降,受潮汐影响较为明显。对湾内和湾口的水体透明度进行区域平均,得到图 6 中胶州湾海域的平均水体透明度,可以看出最高潮位以后水体透明度随着潮位缓慢下降,太阳天顶角达到最小时水体透明度有所升高,之后在太阳天顶角和潮汐的共同作用下,水体透明度逐渐下降。

3.3 透明度与环境因子之间的相关性

胶州湾海域为半封闭海湾,水体类型为典型的 II 类水体,其光学性质不仅仅受到浮游植物及其伴生物的影响,还包括水体中的悬浮颗粒物和有色可溶性有机物。将实测水体透明度与实测的[Chl - a],[TSM], $a_y(440)$ 、水深、海表温度、海表盐度、风速等环境因子数据分别进行统计分析,如表 2 所示。统计表明,水体透明度的变化是多个环境因子共同作用的结果,与水深存在较强的正相关,相关系数达到 0.84,与其他环境因子均为负相关。

表 2 实测水体透明度与其他环境因子的相关性

Tab. 2 Correlation analysis between in - situ measured Secchi disk depth and environmental factors

统计	[Chl - a]/ (mg m ⁻³)	[TSM]/ (mg l ⁻³)	$a_y(400)$ / (m ⁻¹)	水深/m	海表温度/℃	海表盐度	风速/(m s ⁻¹)
最小值	1.12	3.40	0.161	2.00	15.20	0.296	0.20
最大值	4.30	45.30	0.453	41.40	22.30	0.320	7.50
中值	3.36	21.59	0.315	4.85	19.40	0.315	3.60
平均值 ± 标准误差	3.06 ± 0.21	24.07 ± 3.17	0.319 ± 0.019	10.62 ± 3.00	19.20 ± 0.47	0.312 ± 0.002	3.72 ± 0.55
标准差	0.90	13.44	0.082	12.71	1.99	0.008	2.34
变异系数	0.293	0.559	0.257	0.896	0.103	0.025	0.629
皮尔逊相关系数	-0.660	-0.816	-0.713	0.840	-0.805	-0.560	-0.484

在近海海域,水体透明度是评估水质状态的重要指标,透明度的变化可以反映水质和陆源输入的变化,同时影响浮游植物光合作用的可见光以及沿海地区的海草、大型藻类、微底栖动物的初级生产等^[32]。表 2 显示,作为海洋浮游植物现存量和初级生产力的一个良好指标,[Chl - a]与透明度存在一定的负相关,但相关性不高。浮游植物量的多少直接反映了水体透明度的水平,浮游植物大量生长,直接影响水体透明度和光衰减,而水透明度的下降降低太阳辐射在水中的渗透,并减少更深水中的光吸收。影响水体[Chl - a]含量和分布的其他要素,如温度、风速、盐度等,均间接引起水体透明度的变化。与[TSM]以及 $a_y(440)$ 的相关性相比,湾内水体透明度与[Chl - a]的相关性偏低,则透明度的变化可能更多是由沿岸或径流输入湾内的悬浮颗粒物、溶解有机物以及湾内养殖区的丰富的营养盐等引起的,受浮游植物色素影响较小。此外,水深与透明度之间存在明显的正相关。水深较浅的区域位于湾口

或径流入海口,水体盐度较低,随着风力的增加,带动营养盐丰富的底水涡旋上升,支持浮游植物的生长,海底淤泥等容易在浪、流的影响下重新再悬浮,使[TSM]提高。水深较大的区域,水体特性较沿岸海域稳定,透明度受风速等影响较小。

4 结论与展望

利用 2017 年 5 月 16 日胶州湾航次的现场实测数据和当日 GOCI 卫星影像,采用 2 种半分析算法 Doron11 和 Lee15 对水体透明度进行反演。研究发现, Lee15 算法在胶州湾海域表现较好,反演值与现场实测值之间的 R^2 为 0.98, RMSE 为 0.02 m。在此基础上对胶州湾透明度的日变化特征进行了分析。空间分布上,海域整体透明度较低(0 ~ 4 m),从湾内到湾外透明度呈现出逐渐增大的趋势。时间变化上,水体透明度在湾内的变化受潮汐影响明显,湾外和湾口的变化由太阳天顶角主导,海域平均水

体透明度的变化由太阳天顶角和潮汐共同作用。根据各采样点实测水体透明度与现场同步测量的其他环境因子的统计分析,水体透明度的变化是多个环境因子共同作用的结果,与水深存在较强的正相关,相关系数达到 0.84,与其他环境因子均为负相关。

本研究可为连续获取胶州湾水体透明度提供有力参考,为胶州湾水质监测和治理提供监测依据。由于半分析模型由表观光学量获取的水体固有光学量必然与水体实际的固有光学量存在一定偏差,且二类水体的光学特性较为复杂,限制于采样的季节和站位分布,现场采样获取的样本并不是很多,在今后的研究中应对半分析反演模型在半封闭海湾的适用性进行更多的实测数据验证,以进一步提高模型的可靠性。

参考文献 (References):

[1] Padial A A, Thomaz S M. Prediction of the light attenuation coefficient through the Secchi disk depth: Empirical modeling in two large neotropical ecosystems [J]. *Limnology*, 2008, 9 (2): 143 – 151.

[2] Swift T J, Perez – Losada J, Schladow S G, et al. Water clarity modeling in Lake Tahoe: Linking suspended matter characteristics to Secchi depth [J]. *Aquatic Sciences*, 2006, 68 (1): 1 – 15.

[3] Swan B K, Reifel K M, Tiffany M A, et al. Spatial and temporal patterns of transparency and light attenuation in the Salton Sea, California, 1997—1999 [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2007, 23 (5): 653 – 662.

[4] Testa J M, Lyubchich V, Zhang Q. Patterns and trends in Secchi disk depth over three decades in the Chesapeake Bay estuarine complex [J]. *Estuaries and Coasts*, 2019, 42 (4): 927 – 943.

[5] Kukushkin A S. Long – term seasonal variability of water transparency in the surface layer of the deep part of the Black Sea [J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2014, 39 (3): 178 – 186.

[6] Wernand M R. On the history of the Secchi disc [J]. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2010, 5: 10013.

[7] Li N, Shi K, Zhang Y L, et al. Decline in transparency of Lake Hongze from long – term MODIS observations: Possible causes and potential significance [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11 (2): 177.

[8] Prasad K S, Bernstein R L, Kahru M, et al. Ocean color algorithms for estimating water clarity (Secchi Depth) from Sea WiFS [J]. *Journal of Advanced Marine Science and Technology Society*, 2000, 4 (2): 301 – 306.

[9] Kratzer S, Hkansson B, Sahlin C. Assessing secchi and photic zone depth in the baltic sea from satellite data [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2003, 32 (8): 577 – 585.

[10] Tyler J E. The Secchi disc [J]. *Limnology and Oceanography*, 1968, VIII (1): 1 – 6.

[11] Preisendorfer R W. Secchi disk science: Visual optics of natural waters [J]. *Limnology and Oceanography*, 1986, 31 (5): 909 – 926.

[12] Doron M, Babin M, Hembise O, et al. Ocean transparency from space: Validation of algorithms using MERIS, MODIS and SeaWiFS

data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115 (12): 2986 – 3001.

[13] Lee Z P, Shang S L, Hu C M, et al. Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 139 – 149.

[14] Shang S, Lee Z, Shi L, et al. Changes in water clarity of the Bohai Sea: Observations from MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 22 – 31.

[15] Mao Y, Wang S Q, Qiu Z F, et al. Variations of transparency derived from GOCI in the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (9): 12191 – 12209.

[16] Luis K M A, Rheuban J E, Kavanaugh M T, et al. Capturing coastal water clarity variability with Landsat 8 [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 145: 96 – 104.

[17] Vundo A, Matsushita B, Jiang D, et al. An overall evaluation of water transparency in Lake Malawi from MERIS data [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11 (3): 279.

[18] Gomes A C, Alcantara E, Rodrigues T, et al. Satellite estimates of euphotic zone and Secchi disk depths in a colored dissolved organic matter – dominated inland water [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 110 (b): 105848.

[19] 孙晓霞, 孙松, 张永山, 等. 胶州湾叶绿素 a 及初级生产力的长期变化 [J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42 (5): 654 – 661.

 Sun X X, Sun S, Zhang Y S, et al. Long – term changes of chlorophyll – a concentration and primary productivity in the Jiaozhou Bay [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42 (5): 654 – 661.

[20] 董兆选, 姜安刚, 崔文连. 胶州湾海域营养状况研究 [J]. *海洋科学*, 2010, 34 (12): 36 – 39.

 Dong Z X, Lou A G, Cui W L. Assessment of eutrophication of Jiaozhou Bay [J]. *Marine Sciences*, 2010, 34 (12): 36 – 39.

[21] Mobley C D. Estimation of the remote – sensing reflectance from above – surface measurements [J]. *Applied Optics*, 1999, 38 (36): 7442 – 7455.

[22] Lee Z P, Du K P, Arnone R, et al. Penetration of solar radiation in the upper ocean: A numerical model for oceanic and coastal waters [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2005, 110 (9): 13.

[23] Lee Z P, Hu C M, Shang S L, et al. Penetration of UV – visible solar radiation in the global oceans: Insights from ocean color remote sensing [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118 (9): 4241 – 4255.

[24] Pope R M, Fry E S. Absorption spectrum (380 – 700 nm) of pure water II. integrating cavity measurements [J]. *Applied Optics*, 1997, 36 (33): 8710 – 23.

[25] Smith R C, Baker K S. Optical properties of the clearest natural waters (200 – 800 nm) [J]. *Applied Optics*, 1981, 20 (2): 177 – 184.

[26] Morel A, Huot Y, Gentili B, et al. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi – sensor approach [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111 (1): 69 – 88.

[27] 魏国妹, 商少凌, 李忠平, 等. 基于固有光学特性的北部湾透明度遥感反演及其检验 [J]. *高技术通讯*, 2009, 19 (9): 977 – 982.

 Wei G M, Shang S L, Lee Z P, et al. An IOP – based remote –

sensing algorithm for secchi depth and its validation for the Gulf of Tonkin[J]. Chinese High Technology Letters,2009,19(9):977 – 982.

[28] 任 玲,张曼平,李 铁,等. 胶州湾内外海水中营养盐的分布[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版),1999,29(4):692 – 698.

Ren L,Zhang M P,Li T,et al. Distribution of nutrients inside and outside Jiaozhou Bay[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1999,29(4):692 – 698.

[29] Kirk J T O. Dependence of relationship between inherent and ap- parent optical properties of water on solar altitude[J]. Limnology and Oceanography,1984,29(2):350 – 356.

[30] 丁文兰. 胶州湾的潮汐与潮流[J]. 海洋科学集刊,1986,26:1 – 25.

Ding W L. Tides and currents in Jiaozhou Bay[J]. Studia Marina Sinica,1986,26:1 – 25.

[31] 康兴伦,李培泉,刘玉珊,等. 胶州湾自净能力的研究[J]. 黄渤海海洋,1990,8(3):48 – 56.

Kang X L,Li P Q,Liu Y S,et al. The study of self – purification capacity of Jiaozhou Bay[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas,1990,8(3):48 – 56.

[32] Gattuso J – P,Gentili B,Duarte C M,et al. Light availability in the coastal ocean:Impact on the distribution of benthic photosynthetic organisms and their contribution to primary production[J]. Biogeo- sciences,2006,3(4):489 – 513.

Research on remote sensing retrieval and diurnal variation of Secchi disk depth of Jiaozhou Bay based on GOCI

ZHOU Yan, YU Dingfeng, LIU Xiaoyan, YANG Qian, GAI Yingying
(Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Monitoring Instrument Equipment Technology, National Engineering and Technological Research Center of Marine Monitoring Equipment, Qingdao 266100, China)

Abstract: Secchi disk depth (Z_{sd}) is an important parameter for describing the optical properties of water bodies . With high spatial and temporal resolution , satellite remote sensing technology has become an important method of Z_{sd} observation. Using the in – situ measured data and GOCI images of Jiaozhou Bay (JZB) on May 16, 2017, the authors used semi – analytical algorithms Doron11 and Lee15 to retrieve the Z_{sd} . It is shown that the Lee15 performed better than Doron11, with the decision coefficient of 0.976 and the root mean square error of 0.02 m between the estimated values and in – situ measured values. Selecting eight GOCI images from 8:16 to 15:16, the authors used Lee15 algorithm to get the spatial and temporal distribution characteristics of the diurnal variation of Z_{sd} on the JZB. On the spatial distribution, the overall Z_{sd} level of the JZB is low (0 ~ 4 m), and gradually increases from the inside to the outside of the Bay. On the time variations, the Z_{sd} at the Bay mouth is obviously affected by the tides. The changes between the Bay mouth and the Bay outside are dominated by the solar zenith angle (SOLZ). The change of average Z_{sd} of the JZB is mainly caused by the joint effect of the SOLZ and the tide . According to the respectively statistical analysis between the in – situ Z_{sd} at each sampling station and simultaneously measured other environmental factors , the change in the Z_{sd} of the JZB is the result of the joint action of multiple environmental factors , and has a strong positive correlation with the water depth , with correlation coefficient reaching 0.84, but it is negatively correlated with other environmental factors .

Keywords: Secchi disk depth; GOCI image; semi – analytical algorithm; diurnal variation; environmental factors
(责任编辑: 李 瑜)