

水体透明度两种半分析反演模型的对比与分析

高磊¹, 胡鹏¹, 朱金山^{1,2,3}

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 自然资源部 海洋测绘技术重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要: 针对目前反演遥感透明度的方法多是经验方法, 而半分析方法运用在二类水体时, 由于分析参数较难获取导致应用较少等问题, 本文在缺少相关光学参数实测数据的情况下, 基于 GOCI 卫星影像数据及实测透明度数据开展两种半分析透明度反演模型的对比与分析。首先选用 555 nm 和 660 nm 两种参考波段的 QAA-v6 算法分别反演水体固有光学参数, 代入到 Lee15 和 Jiang19 两种半分析模型中定量反演胶州湾水域透明度。结果表明, 660 nm 作为参考波段的 Lee15 模型反演精度更高, 误差更小 ($R^2=0.771$, $MAPE=0.137$, $RMSE=0.331$)。为进一步探究各模型在不同透明度范围内的反演精度, 将透明度范围分成 3 段(0.5~1.5, 1.5~2.5, 2.5~3.5 m)分别进行误差分析后发现, 660 nm Lee15 模型在各分段均达到最佳精度。所以该模型能够为胶州湾这种二类水体的透明度反演提供一条有效途径。

关键词: 水体透明度; 参考波段; QAA 算法; 遥感反演

中图分类号: P722.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2021)03-0014-10

DOI: 10.11759/hyxx20200619002

水体透明度是描述水体光学重要参数之一, 能直观反映水体清澈和混浊程度。研究表明, 水体透明度与光学衰减系数、漫衰减系数之间存在密切关系^[1]。传统透明度的测量方法使用塞氏度盘进行测量, 操作简单, 但是只能用于单点测量, 测量效率太低。而遥感技术能够以高分辨率快速有效地覆盖大面积地区, 并且可以获取监测人员难以到达区域的数据, 因此成为获取区域水体透明度数据最合适来源^[2]。

自 20 世纪 70 年代以来, 随着遥感技术的兴起, 国内外学者针对透明度反演提出了多种方法。至今为止常用的透明度反演方法主要有经验方法和半分析方法两类。

当前研究者大多是利用波段组合的经验方法来反演近海水体透明度, 通过直接在遥感数据和实测透明度之间进行回归分析来估算透明度。其中傅克付等^[3]通过建立黄海海域离水辐亮度及遥感反射率和海水透明度的多种统计回归模型, 发现多元统计分析的估算精度高于一元回归分析。郭国锋等^[4]使用 TM 影像以及实测透明度数据, 建立了 TM1、TM3 波段的自然对数与透明度自然对数的线性模型。禹定峰等^[5]利用 2 个航次黄东海透明度数据和 MODIS 遥感反射率数据, 建立了透明度单波段模型、波段比值模型、三波段模型进行了黄东海透明度遥感反演

研究。Kloiber 等^[6]利用皮尔逊相关系数矩阵和多元逐步回归等统计分析方法, 将 TM1、TM1/TM3 作为构建透明度反演模型参数, 建立透明度与影像像元值的经验模型。这类经验方法通常需要足够多的现场实测数据来建立统计模型。

而半分析方法则是基于水下能见度理论来计算透明度。Preisendorfer^[7]深入研究了透明度与水体光学参数之间的关系, 提出了透明度主要取决于水体固有光学参数, 并使用吸收系数和漫衰减系数之和 ($a+K_d$) 来估计透明度。何贤强等^[8]根据水下光辐射传输理论及对比度传输理论, 建立了海水透明度半分析定量遥感模型, 该模型对于一类水体可取得较好的反演结果。张春桂等^[9]基于海洋水体固有光学特性和 MODIS 卫星数据建立了台湾海峡海水透明

收稿日期: 2020-06-19; 修回日期: 2020-11-17

基金项目: 地理信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目 (SKLGIE2017-Z-3-3); 国家重点研发计划课题(协作)(2018YFC1405903); 测绘地理信息公益性行业科研专项(201512034)

[Foundation: Project supported by open research foundation of National Key Laboratory of Geographic Information Engineering, No. SKLGIE2017-Z-3-3; National key research and development project (cooperation), No. 2018YFC1405903; Special scientific research project of Surveying and mapping geographic information public welfare industry, No. 201512034]

作者简介: 高磊(1994—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向为海洋遥感, E-mail: gaolei_1994@163.com; 朱金山, 通信作者, E-mail: zhujinshan@sdust.edu.cn, 电话: 0532-86057276

度的遥感反演模型,并初步分析了台湾海峡海水透明度的分布特点和变化规律。Lee 等^[10]针对传统水下能见度理论误差较大的弊端,使用透明度最大值对应波长处的漫衰减系数来构建透明度模型。该模型根据可见光(443~665 nm)范围内最小漫衰减系数 K_d 和对应可见波段反射率 R_{rs} 来估计透明度(Lee15)。Jiang 等^[11]在 Lee15 模型的基础上,使用混合 QAA (quasi-analytical algorithm)算法代替普通 QAA 算法,确保在浑浊的二类水体也可以获得更准确的固有光学参数。同时用动态漫衰减系数比(K_t/K_d)来构建新的动态模型(Jiang19),经过验证发现新模型适用于全球水域透明度反演。与经验方法相比,半分析方法通常不需要实测数据来重新校准检索算法。因此,认为半分析方法对于那些缺乏现场测量的水体尤其有用^[12]。

本文基于 Lee15 和 Jiang19 两种半分析模型分别进行透明度反演。为了获取模型中漫衰减系数 K_d 值,首先选取 555 nm 和 660 nm 两个波长分别作为 QAA-v6 算法的参考波段 λ_0 ,反演得到胶州湾水体吸收系数 a

和后向散射系数 b_b ,并与 GOCI 卫星 L2B 数据中的吸收系数 a 及 L2A 数据中的漫衰减系数 K_d (490) 进行精度比较来验证反演参数的可靠性。最后将三种情况(555 nm QAA-v6 算法、660 nm QAA-v6 算法及 GOCI 卫星使用的 QAA-v5 算法)计算得到的漫衰减系数 K_d 均带入 Lee15 和 Jiang19 两种半分析模型中,将反演透明度与胶州湾实测透明度进行比较分析。验证修改参考波段 λ_0 的 QAA-v6 算法及两种半分析透明度模型在浑浊水体的适用性。

1 研究区域与实验数据

1.1 研究区域

本文选取山东半岛南岸胶州湾作为研究区域,如图 1(a)中红色框所示。其经纬度范围为 36°00'53"N~36°02'36"N, 120°16'49"E~120°17'30"E。胶州湾是一个半封闭海湾,被中国北方最大的工业城市之一青岛市所包围。其水底地形变化复杂,平均水深约 7 m,最大水深约为 64 m^[13]。

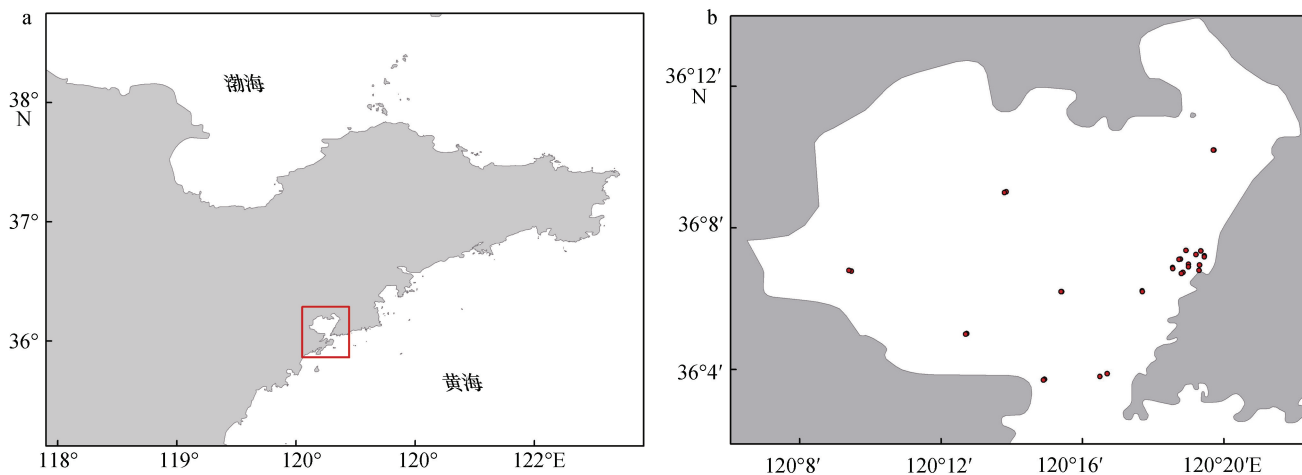


图 1 胶州湾位置及测量点位分布图

Fig. 1 Location of Jiao Zhou Bay and distribution of survey points

1.2 实验数据

本文于 2019 年 6 月 23 日使用塞氏度盘对胶州湾水体透明度实施测量,同时使用手持 GPS 接收机记录观测点的地理坐标,点位分布如图 1(b)所示。一共采集了 32 组透明度数据。

本文所使用 2019 年 6 月 23 日 GOCI 的一级数据产品(L1B), GOCI 是由韩国海洋卫星中心(Korea Ocean Satellite Center, KOSC)发射的第一颗面向海洋水色观测的静止卫星,空间分辨率为 500 m,时间分

辨率为 1 小时(白天 8 景)^[14]。对地静止轨道有较好地时间覆盖范围,可以减小地面采样点与影像之间因时间不匹配而导致的误差。官方提供的 GDPS(GOCI Data Processing System)软件拥有对 L1B 级数据进行几何校正、辐射定标和大气校正等预处理工作的功能。软件使用的是基于浑浊水体的大气校正算法(NIR-SWIR),是目前针对水体运用最为广泛的算法,用其在中国和世界各地近海区域进行了精度验证,效果显著^[15]。为了保证几何校正的精确性,使用 GLT 文

件对影像进行几何精校正。经过预处理后,得到 L2A、L2B、L2C 和 L2P 这四个 2 级数据。Zhang 等^[16]结合 GOCI 与 MODIS、MERIS 等遥感数据和实测数据对东海和东京海湾的吸收及后向散射系数进行分析,验证了 GOCI 数据的可靠性和适用性。

本文需要的海洋数据产品主要有 L2A 级数据的 490 nm 漫衰减系数 $K_d(490)$, L2B 级数据的吸收系数 a 、后向散射系数 b_b , L2P 级数据的遥感反射率 R_{rs} 和太阳天顶角 θ_s 。在数据使用之前需要对相关卫星数据进行筛选,剔除掉数据中异常值。然后采用一个 3×3 的高斯低通滤波去除数据“噪声”,增强像元值代表性以及减小空间异质性引起的误差。通过上述方法对实测数据与遥感反射率数据进行时空匹配与质量控制^[5]。

2 模型与方法

2.1 两种透明度半分析反演模型

2015 年 Lee 等^[10]在以前的研究基础上,提出了一种基于降低能见度的全新理论模型来反演透明度。与其他经典模型需要所有波段漫衰减系数不同, Lee15 模型仅依赖透明度最大值对应波长 λ 处的漫衰减系数 K_d 值,即 $K_d(\lambda)$ 。因为透明度 Z_{sd} 与漫衰减系数 K_d 互为倒数,从而得到反射率 R_{rs} 与漫衰减系数 K_d 和透明度 Z_{sd} 之间的表达式,如公式(1)。

$$Z_{sd15} = \frac{1}{2.5 \min(K_d(\lambda))} \ln \left(\frac{0.14 - R_{rs}^{pc}}{C_t^r} \right), \quad (1)$$

式中, $\min(K_d(\lambda))$ 表示波长在 443 nm 和 665 nm 之间 K_d 的最小值, R_{rs}^{pc} 是 K_d 最小值所对应波长 λ 的 R_{rs} 值, C_t^r 是人眼在辐射反射率上的对比阈值(0.013 sr^{-1})。

在 Lee15 模型使用过程中,由于 QAA 算法在反演浑浊内陆水体吸收系数 a 和后向散射系数 b_b 时误差较大,且这些反演误差最终将传播到透明度的预测中,从而影响透明度反演精度^[11]。为了提高模型在全球各种水体的适用性,2019 年 Jiang 等^[11]试图修改 QAA 算法,以便在浑浊内陆水域获得更准确的吸收系数和后向散射系数。因此使用动态 K_t/K_d 比(即上行漫射衰减系数与下行漫射衰减系数之比)来代替 Lee15 模型中的固定比率,得到了适合不同水质的水体新模型(Jiang19)。如公式(2)。

$$Z_{sd19} = \frac{1}{(1 + K_t/K_d) \times \min(K_d(\lambda))} \ln \left(\frac{0.14 - R_{rs}^{pc}}{C_t^r} \right), \quad (2)$$

其中, K_t/K_d 结果可按照下列公式得出。如公式(3-5)。

$$r_{rs}(\lambda) = R_{rs}(\lambda) / (0.52 + 1.7 R_{rs}(\lambda)), \quad (3)$$

$$u(\lambda) = \frac{-0.089 + \sqrt{0.089^2 + 4 \times 0.125 r_{rs}(\lambda)}}{2 \times 0.125}, \quad (4)$$

$$K_t/K_d = \frac{1.04(1 + 5.4u)^{0.5}}{1 / \left(1 - \frac{\sin(\theta_s)^2}{RI^2} \right)^{0.5}}, \quad (5)$$

式中, $r_{rs}(\lambda)$ 表示水面下遥感反射率; RI 表示水体折射率,数值为 1.34^[17]。

2.2 漫衰减系数 K_d 反演模型

根据辐射传输理论,漫衰减系数 K_d 是与水体吸收系数 a 和后向散射系数 b_b 有关的函数。由于现有半分析 K_d 模型大多针对水质较好的大洋水体,并不适用于胶州湾这种二类水体的反演^[18]。

基于这样的理论基础, Lee 等^[18]提出了一种适用于浑浊水体的半分析模型。该模型明确考虑了吸收系数 a 和后向散射系数 b_b 变化以及太阳天顶角 θ_s 对 K_d 反演结果的影响。如公式(6)。

$$K_d(\lambda) = (1 + m_0 \times \theta_s) a_{(\lambda)} + \left(1 - \gamma \frac{b_{bw}(\lambda)}{b_b(\lambda)} \right) \times m_1 \times (1 - m_2 \times e^{-m_3 \times a_{(\lambda)}}) b_b(\lambda), \quad (6)$$

式中, m_0, m_1, m_2, m_3 和 γ 的值通过模拟数据集求出分别为 0.005, 4.26, 0.52, 10.8 和 0.265。 $b_{bw}(\lambda)$ 表示纯水后向散射系数波谱,被认为是一个常数^[19]。

2.3 QAA-V6 反演模型

由公式(6)可知,式中未知数为吸收系数 a 和后向散射系数 b_b 。QAA 算法是 Lee 等^[20]在 2002 年提出的一种计算水体吸收系数和后向散射系数的方法,它利用辐射传输方程近似解构建遥感反射率与水体固有光学特性之间的关系模型。为了估算胶州湾透明度准确性,本文使用 QAA 算法最新版本(QAA-v6)。具体步骤见表 1。

QAA 算法中核心思路是:首先在可见光范围内选定 1 个参考波段 λ_0 , 则该波段的吸收系数 $a(\lambda_0)$ 可以被较准确地估计(比如某个红光波段,该波段由水体的吸收占主导地位),从而其他参数可以被更精准地估计^[20,21]。标准 QAA 算法推荐参考波段为 550 nm 或者 555 nm。因为一类水体吸收系数较低,标准 QAA 算法更加适用。而对于不太清澈的二类水体,水体中的浮游植物和悬浮物浓度过高,由于其吸收系数较高,

表 1 QAA-v6 准分析算法具体步骤

Tab. 1 Specific steps of QAA-v6 quasi-analysis algorithm

步骤	变量	公式	方法
1	r_{rs}	$=R_{rs}/(0.52+1.7R_{rs})$	半分析方法
2	$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}$	$= \frac{-g_0 + [(g_0)^2 + 4g_1r_{rs}(\lambda)]^{1/2}}{2g_1}$	半分析方法
3	$a(\lambda_0)$	$= a_w(\lambda_0) + 0.39 \left(\frac{R_{rs}(\lambda_0)}{R_{rs}(443) + R_{rs}(490)} \right)^{1.14}$	分析模型
4	η	$= 2.0 \left(1 - 1.2 \exp \left(-0.9 \frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(\lambda_0)} \right) \right)$	分析模型
5	$b_{bp}(\lambda_0)$	$= \frac{u(\lambda_0) \times a(\lambda_0)}{1 - u(\lambda_0)} - b_{bw}(\lambda_0)$	分析模型
6	$b_{bp}(\lambda)$	$= b_{bp}(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^\eta$	半分析方法
7	$a(\lambda)$	$= \frac{[1 - u(\lambda_0)] [b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)]}{u(\lambda)}$	分析模型

即 $\Delta a(\lambda)$ 较大, 如果继续选用标准算法, 会导致浑浊水体吸收系数 $a(\lambda)$ 估计值偏小。如公式(7)所示。此时选择参考波段需要向长波方向移动, 以便将光学特性从参考波段适当地传递到其他波段, 从而获得更好的反演效果^[20]。而胶州湾属于高吸收水体, 故可以认定图 2 中黑线可以代表胶州湾水体吸收系数曲线的走势^[20]。如图 2 所示。

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + \Delta a(\lambda). \quad (7)$$

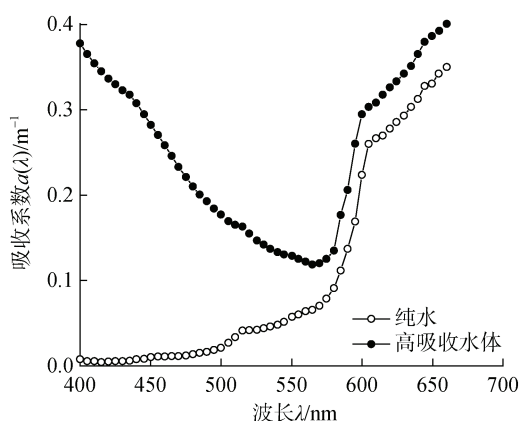


图 2 不同情况下 $a(\lambda)$ 随波长的变化^[20]

Fig. 2 Variation of $a(\lambda)$ with wavelength in different cases^[20]

同时参考波段 λ_0 选取应满足一个关键条件: 在 λ_0 处, 由于纯水吸收系数 $a_w(\lambda_0)$ 可用 $a_w(\lambda_0)$ 基本代替 $a(\lambda_0)$, 即 $a_w(\lambda_0)$ 近似等于 $a(\lambda_0)$ ^[22]。而纯水吸收系数

$a_w(\lambda_0)$ 在对应波长处均是定值。根据 GOCI 卫星现有的处于可见光范围内的 5 个波段, 发现 660 nm 处吸收系数 $a(\lambda_0)$ 相对于纯水吸收系数 $a_w(\lambda_0)$ 变化最小, 即 $a(660)$ 变化值小于 $a(555)$, 如图 2 所示。所以 660 nm 作为二类水体 QAA 算法的参考波段从理论上可以获得更好的效果。为了证明该理论的正确性, 我们选择 555 nm 和 660 nm 分别作为参考波段来反演吸收系数 a 和后向散射系数 b_b 。

3 结果和分析

3.1 固有光学参数反演

基于 GOCI 卫星波段, 选取 λ 为 412、443、490、555、660 nm 这五个波段进行 QAA-v6 算法吸收系数 a 和后向散射系数 b_b 的反演。由于 GOCI 卫星 L2P 级数据反演吸收系数 a 使用的是 QAA-v5 算法, 其参考波段为 555 nm, 故将 GOCI 卫星 L2P 级数据产品作为标准数据与 555 nm 和 660 nm 两种参考波段的 QAA-v6 算法反演的 5 个波段的结果进行比较分析, 结果如图 3 所示。

由图 3(a)和(b)可知, 参考波段选取 660 nm 时吸收系数 a 的预测值拟合效果更好, R^2 达到了 0.999, 优于图 3(a)中的 0.934。故以 660 nm 作为参考波段时, QAA-v6 算法得出吸收系数 a 的预测值与 L2P 级数据中吸收系数 a 展现出强相关性。

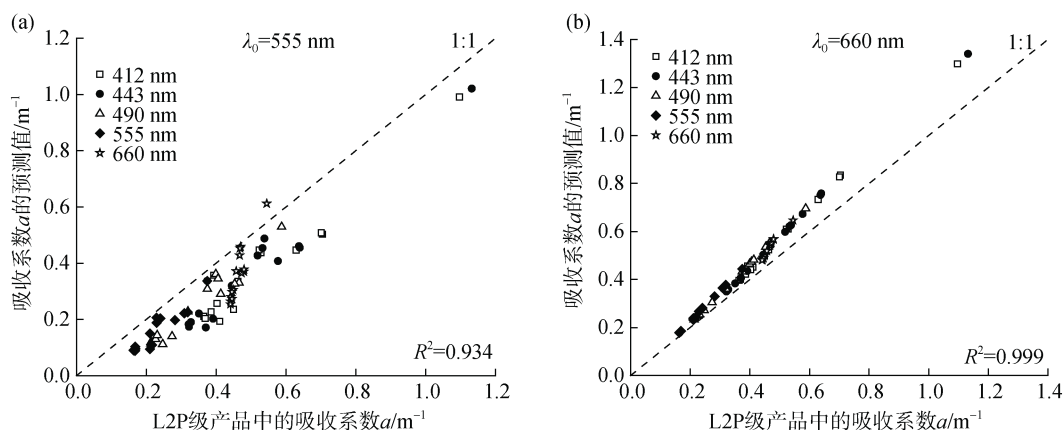

 图 3 不同参考波段反演得到吸收系数 a 的预测值与 L2P 级产品中 a 比较

 Fig. 3 Predicted value of the total absorption coefficient a obtained from the two reference bands is compared with a in L2P products

对于后向散射系数 b_b , 一些学者提出后向散射概率具有波长依赖性, 但多数人的研究都认为其在各波长处十分相近^[23-25]。Whitmire 等^[26]发现各波段后向散射概率之间的差异远小于估算过程中引入的误差, 提出了后向散射概率与波长无关的结论。由表 1 可知, 吸收系数 a 是在后向散射系数 b_b 反演结果的基础上计算得到的, 吸收系数 a 反演结果精度较高, 可间接证明后向散射系数反演精度具有一定的可信度^[27]。故忽略参考波段变化带来的后向散射系数 b_b 变化。

在分别选用 555 nm 和 660 nm 反演得到吸收系

数 a 和后向散射系数 b_b 后, 代入公式(6)可以得到漫衰减系数 $K_d(\lambda)$ 预测值。而 GOCI 卫星 L2A 级数据也提供 490 nm 处的漫衰减系数 $K_d(490)$, 其也是使用 Lee 等的半分析方法, 如公式(8)。由公式(6)和(8)可知, 由于两个公式的模型基本一致, 所以将公式(6)计算得到 $K_d(\lambda)$ 预测值中的 $K_d(490)$ 与 L2A 级数据中 $K_d(490)$ 进行比较分析, 结果如图 4 所示。

$$K_d(490) = (1 - 0.005 \times \theta_s) a_{(490)} + 4.18 \times \left(1 - 0.52 \times e^{-10.8 \times a_{(490)}}\right) b_b(490) \quad (8)$$

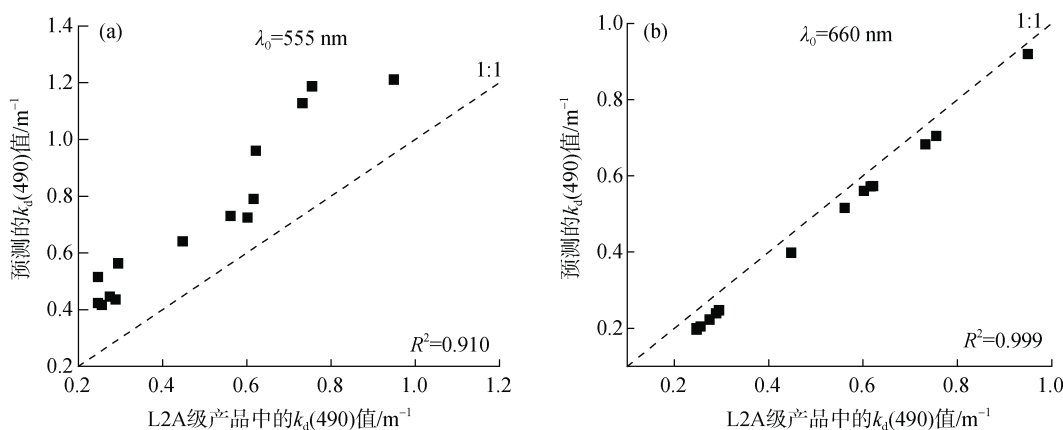

 图 4 $K_d(490)$ 的预测值与 L2A 级产品中 $K_d(490)$ 比较

 Fig. 4 Comparison between the predicted value of $K_d(490)$ and $K_d(490)$ in L2A products

如图 4(a) 可知, 555 nm 作为参考波段时, 漫衰减系数预测结果整体偏大, 离散程度较大, 精度较低。如图 4(b) 可知, 用 660 nm 作为参考波段时, $K_d(490)$ 的离散程度更加接近, R^2 达到了 0.999。由此可见: 当参考波段 λ_0 为 660 nm 时, 利用 QAA-v6 算法反演吸

收系数 a 和后向散射系数 b_b 计算得到的 $K_d(490)$ 相关性更好。

反演得到所有波段 K_d 值后, 可以确定 Lee15 和 Jiang19 模型中的 $\min(K_d(\lambda))$ 取 $K_d(555)$ 的值, 同时 R_{rs}^{pc} 为波长 555 nm 处的反射率。

3.2 透明度 z_{sd} 反演

将所有反演得到的固有光学参数分别代入公式(1)和公式(2), 得到 Lee15 和 Jiang19 的透明度。为了验证

各种情况下两种模型的透明度反演能力, 将各模型的透明度反演值和实测值进行比较分析, 并绘制各模型得到透明度反演值与实测值分布散点图, 结果如图 5 所示。

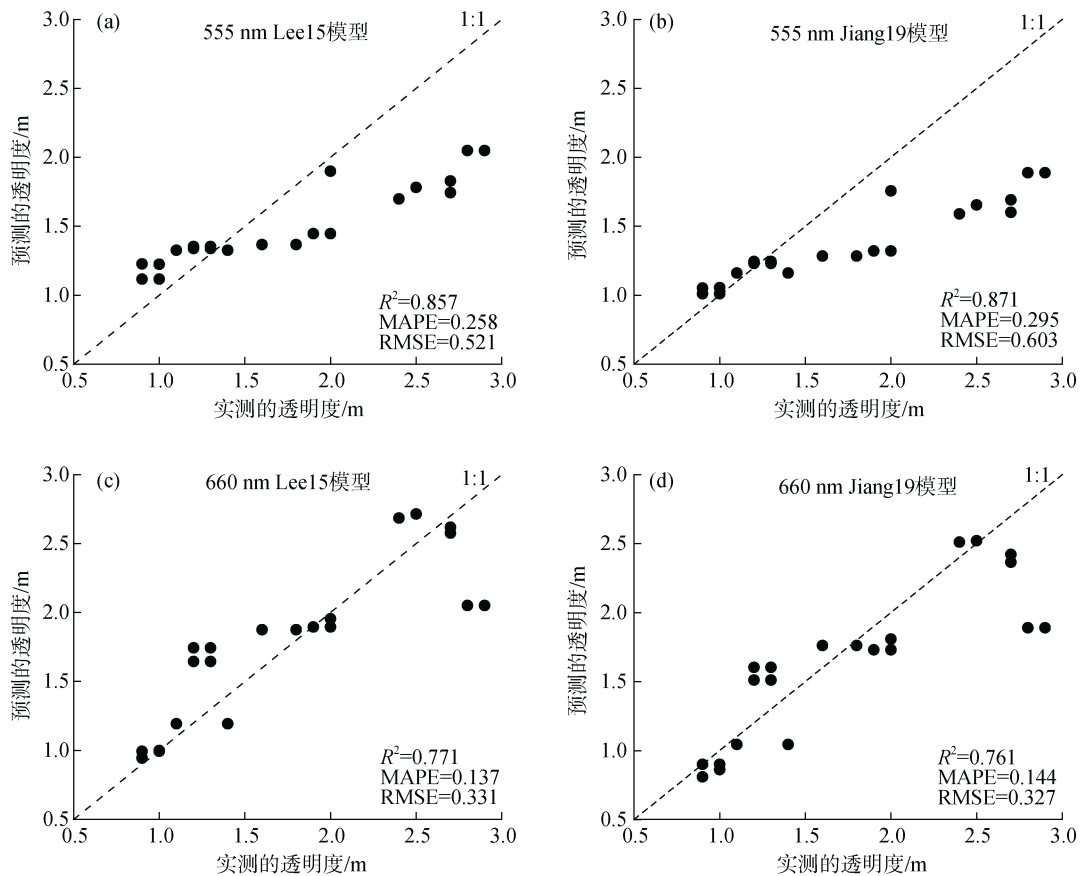


图 5 四种情况下预测值与透明度实测值比较

Fig. 5 Comparison of predicted value and measured value of transparency in four cases

由图 5(a)和(c)可知, 参考波段选择 660 nm 时 Lee15 模型相关系数为 0.771, 小于参考波段为 555 nm Lee15 模型的相关系数(0.857), 但 660 nm 反演结果的 MAPE 为 0.137, 即误差更小, 精确度更高。由图 5(b)和(d)可知, 参考波段为 660 nm Jiang19 模型的相关系数(0.761)小于参考波段为 555 nm Lee15 模型(0.871), 但 MAPE 仅有 0.327, 误差值为所有模型中最小值。由此可得: 660 nm 作为参考波段的 QAA-v6 反演胶州湾透明度是更好地选择。

根据图 5(c)和(d)可知, Lee15 和 Jiang19 两种反演模型总体反演结果相仿。但 Jiang19 模型在 2~3 m 处偏差较大, 而 Lee15 反演结果偏差明显较小, 因此将 Lee15 模型作为反演模型更加符合胶州湾水域透明度反演。

为了验证 GOCI 卫星数据产品反演光学参数准确性, 将 L2A 级数据中吸收系数 a 、后向散射系数

b_b 及漫衰减系数 K_d 直接带入 Lee15 和 Jiang19 两种透明度反演模型(后称 GOCI 模型)与实测透明度值进行比较, 结果如图 6 所示。

由图 5(c)及图 6(a)可知, GOCI 的 Lee15 模型的相关系数(0.712)小于使用 660 nm Lee15 模型的相关系数(0.771), 但是 MAPE 和 RMSE 要大于使用 660 nm Lee15 反演模型。且由图 5(d)及图 6(b)可知, GOCI 的 Jiang19 模型的相关系数(0.724)小于 660 nm Lee15 模型的相关系数(0.761), 但 MAPE 和 RMSE 要大于 660 nm Jiang19 反演模型。

由于在反演吸收系数 a 和后向散射系数 b_b 时仅选取的参考波段不同, 故得出了使用 660 nm 作为 QAA-v6 的参考波段反演胶州湾透明度是更好选择的结论。同时也证明了使用 QAA-v6 算法反演光学参数和 L2A 数据中(QAA-v5)光学参数的准确性。

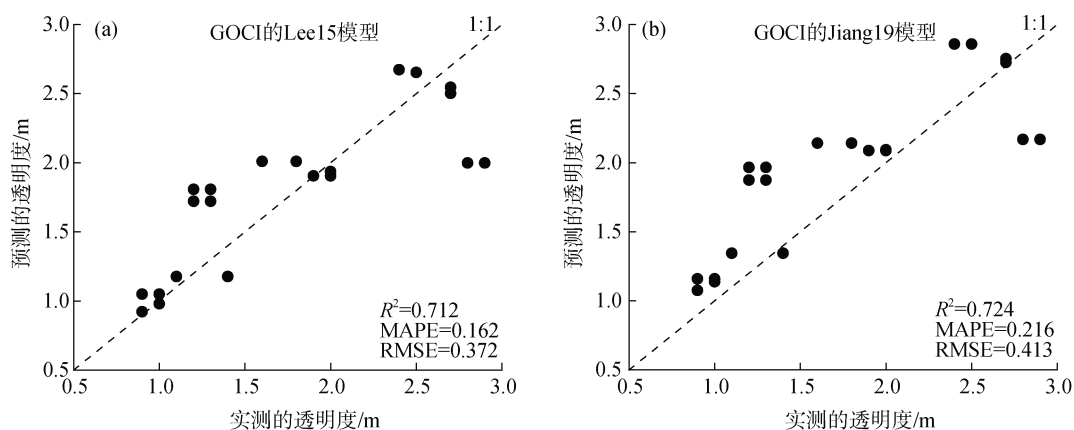


图6 GOCI模型预测值与实测透明度值比较

Fig. 6 Comparison between the predicted value of GOCI model and the measured transparency value

总体来看, 由于反演时 QAA 算法带入的预测误差不可避免, 会最终传递到透明度结果上。由此看来, MAPE 控制在 0.2 以下的反演结果是非常理想的。其中 660 nm Lee15 模型性能最好, 说明该模型利用经验算法得到的参数较适合胶州湾透明度反演。

为了进一步分析各模型反演透明度的能力, 将透明度范围分成 3 段(0.5~1.5 m, 1.5~2.5 m, 2.5~3.5 m), 分段比较六种情况下模型的精度, 结果如表 2 所示。在

0.5~1.5 m 段, 两种 660 nm 模型和两种 GOCI 反演模型反演值与实测值偏差较小, 660 nm Lee15 模型精度最高, RMSE 为 0.102。在 2.5~3.5 m 段, 555 nm 的两种模型没有结果, 可见这两种模型效果较差。另外四种情况中, 使用 660 nm Lee15 模型反演值与实测值误差最小。主要是胶州湾东南部与海相连, 海洋净化能力比较高, 故水体比较清澈, 水体透明度也相对较高。不同于西北部与内陆河流接壤, 受河流泥沙及人为因素影响大^[28]。

表 2 各种模型透明度反演结果分段结果

Tab. 2 Segmented results of transparency inversion results of various models

透明度范围		0.5~1.5 m	1.5~2.5 m	2.5~3.5 m
均方根误差 RMSE	555 nm Lee15 模型	0.277	0.782	—
	555 nm Jiang19 模型	0.302	0.917	—
	660 nm Lee15 模型	0.102	0.446	0.080
	660 nm Jiang19 模型	0.168	0.440	0.182
	GOCI 的 Lee15 模型	0.116	0.501	0.200
	GOCI 的 Jiang19 模型	0.185	0.540	0.262

在 1.5~2.5 m 段, 555 nm 的两种反演模型偏差最大, RMSE 高达 0.782 和 0.917, 而 660 nm 的两种模型误差较小。通过分析研究区域内叶绿素浓度后发现, 1.5~2.5 m 水域叶绿素浓度较高。因叶绿素浓度与吸收系数 a 呈正相关, 故反演的吸收系数 a 偏小, 最终导致反演透明度值较小^[29]。

总体来说, 660 nm Lee15 模型获得透明度反演值与实测值之间相对系数 R^2 较高且反演误差 MAPE 最低, 更加适合在不能准确测定水体固有光学参数情况下水体透明度的反演。

4 结束语

本文针对二类水体半分析方法反演透明度难以提供可靠光学参数的问题, 提出了分别选用 555 nm 和 660 nm 两种参考波段, 基于 QAA-v6 算法反演吸收系数 a 和后向散射系数 b_b , 与 GOCI 卫星 L2P 级数据进行对比分析; 再基于 Lee15 和 Jiang19 两种模型对胶州湾水体透明度进行反演并比较模型精度。结果表明: (1) 660 nm 作为参考波段的 QAA-v6 算法反演出吸收系数 a 比 555 nm 作为参考波段反演出的

吸收系数 a 相关性高。所以在内陆水体反演水体属性时, 可以通过更换 QAA 算法参考波段的方式来提高反演精度。(2) 参考波段为 660 nm 时, QAA-v6 算法结合 Lee15 透明度半分析模型可以更好地反演出胶州湾水体透明度。(3) 在无法准确测量水体固有光学参数的情况下, 可以使用 QAA 半分析算法或相关卫星产品提供可靠的数据支持。

本研究为缺乏水体相关实测数据的透明度反演提供了新思路, 但二类水体光学特性相当复杂, 其他水域反演出的光学参数可能偏差较大。同时由于受到样本点个数和分布及采样环境的限制, 模型通用性有待验证, 这需要在以后的使用工作中继续深入研究。

参考文献:

- [1] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体透明度的分析、变化及相关分析[J]. 海洋湖沼通报, 2003, 2: 30-36. Zhang Yunlin, Qin Boqiang, Chen Weimin, et al. Distribution, seasonal variation and correlation analysis of the transparency in Taihu lake[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2003, 2: 30-36.
- [2] 纪伟涛, 鄢国锋, 吴建东, 等. 大湖池水体透明度、水位及两者之间关系分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 36-39. Ji Weitao, Wu Guofeng, Wu Jiandong, et al. Analyses of water clarity, water level and their relation in Lake Dahu-chi[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 36-39.
- [3] 傅克付, 曾宪模, 任敬萍, 等. 由现场离水辐亮度估算黄海透明度几种方法的比较[J]. 黄渤海海洋, 1999, 2: 3-5. Fu Kecun, Zeng Xianmo, Ren Jingping, et al. Comparison of several methods for estimating secchi disc depth of the Yellow Sea with in situ water leaving radiance data[J]. Advances in Marine Science, 1999, 2: 3-5.
- [4] 鄢国锋, 刘耀林, 纪伟涛. 基于 TM 影像的水体透明度反演模型——以鄱阳湖国家自然保护区为例[J]. 湖泊科学, 2007, 3: 235-240. Wu Guofeng, Liu Yaolin, Ji Weitao. Landsat TM image-based retrieval model of water clarity: a case study of Lake Poyang National Nature Reserve, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 3: 235-240.
- [5] 禹定峰, 周燕, 邢前国, 等. 基于实测数据和卫星数据的黄海透明度估测模型研究[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(5): 774-779. Wu Guofeng, Zhou Yan, Xing Qianguo, et al. Retrieval of Secchi disk depth using MODIS satellite remote sensing and in situ observations in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(5): 774-779.
- [6] Kloiber S M, Brezonik P L, Bauer M E. Application of Landsat imagery to regional-scale assessments of lake clarity[J]. Water Research, 2002, 36(17): 0-4340.
- [7] Preisendorfer R W. Secchi disk science: Visual optics of natural waters1[J]. Limnology and Oceanography, 1986, 31(5): 909-926.
- [8] 何贤强, 潘德炉, 毛志华, 等. 利用 Sea WiFS 反演海水透明度的模式研究[J]. 海洋学报(中文版), 2004, 5: 55-62. He Xianqiang, Pan Delu, Mao Zhihua, et al. A model study on seawater transparency using SeaWiFS inversion[J]. Haiyang Xuebao (Chinese Edition), 2004, 5: 55-62.
- [9] 张春桂, 曾银东. 台湾海峡海水透明度遥感监测及时空变化分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(2): 73-81. Zhang Chungui, Zeng Yindong. Remote sensing monitoring and spatial-temporal change of seawater transparency in Taiwan Strait[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(2): 73-81.
- [10] Lee Z, Shang S, Hu C, et al. Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 169: 139-149.
- [11] Jiang D, Matsushita B, Setiawan F, et al. An improved algorithm for estimating the Secchi disk depth from remote sensing data based on the new underwater visibility theory[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2019, 152(2): 13-23.
- [12] Liu X, Lee Z, Zhang Y, et al. Remote Sensing of Secchi Depth in Highly Turbid Lake Waters and Its Application with MERIS Data[J]. Remote Sensing, 2019, 11(19): 2226.
- [13] 王文海. 胶州湾自然环境概述[J]. 海岸工程, 1986, 3: 20-26. Wang Wenhai. Natural environment of Jiaozhou Bay[J]. Coastal Engineering, 1986, 3: 18-24.
- [14] 盛琳, 陈静, 刘锐, 等. 一种水质分析方法: 基于 GOCI 影像的东平湖叶绿素 a 浓度估算[J]. 环境保护, 2017, 45(10): 60-63. Sheng Lin, Chen Jing, Liu Rui, et al. A Method of Water Quality Analysis: Chlorophyll-a Concentration Estimation of Dongping Lake Based on GOCI Image[J]. Environmental Protection, 2017, 45(10): 60-63.
- [15] 陈会明, 郭瑞, 邓实权, 等. 基于 GOCI 的浑浊水体大气校正修复方法——以太湖为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(5): 892-897. Chen Huiming, Guo Rui, Deng Shiquan, et al. Atmospheric correction and repair method for turbid water body based on GOCI: take Taihu Lake as an example[J]. Journal of Central China Normal University(Natural Sciences), 2020, 54(5): 892-897.

- [16] Zhang M, Tang J, Dong Q, et al. Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery[J]. Remote Sens Environ, 2010, 114(2): 392-403.
- [17] Lee Z, Carder K L, Mobley C D, et al. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model[J]. Applied optics, 1998, 37(27): 6329-6338.
- [18] Lee Z, Hu C, Shang S, 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.
- [19] Zhang X, Hu L, He M X. Scattering by pure seawater: Effect of salinity[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5698-5710.
- [20] Lee Z, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. Applied optics, 2002, 41(27): 5755-5772.
- [21] 胡连波, 刘智深. 利用准分析算法由遥感反射比反演黄海水体吸收系数[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(S2): 154-160.
Hu Lianbo, Liu Zhishen. Deriving Absorption Coefficients from Remote Sensing Reflectance Using the Quasi-Analytical Algorithm (QAA) in the Yellow Sea[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2007, 37(S2): 154-160.
- [22] 谢飞, 郭子祺, 田野, 等. 基于 QAA 算法的昆承湖固有光学量反演模型[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(2): 242-250.
Xie Fei, Guo Ziqi, Tian Ye, et al. Retrieving Inherent Optical Properties of Lake Kuncheng based on Quasi-Analytical Algorithm[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(2): 242-250.
- [23] Zhang B, Li J, Shen Q, et al. A bio-optical model based method of estimating total suspended matter of Lake Taihu from near-infrared remote sensing reflectance[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 145(1-3): 339-347.
- [24] 戴永宁, 李素菊, 王学军. 巢湖水体固有光学特性研究[J]. 环境科学研究, 2008(5): 173-177.
Dai Yongning, Li Suju, Wang Xuejun. Inherent Optical Properties of Water Body of Chao Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2008(5): 173-177.
- [25] 宋庆君, 唐军武. 黄海、东海海区水体散射特性研究[J]. 海洋学报(中文版), 2006, 4: 56-63.
Song Qingjun, Tang Junwu. The study on the scattering properties in the Huanghai Sea and East China[J]. Haiyang Xuebao (Chinese Edition), 2006, 4: 56-63.
- [26] Whitmire A L, Boss E, Cowles T J, et al. Spectral variability of the particulate backscattering ratio[J]. Optics Express, 2007, 15(11): 7019-7031.
- [27] 张红, 黄家柱, 李云梅, 等. 基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究[J]. 环境科学, 2012, 2: 95-101.
Zhang Hong, Huang Jiazhu, Li Yunmei, et al. Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm[J]. Environmental Science, 2012, 2: 95-101.
- [28] 殷子瑶, 江涛, 杨广普, 等. 1986—2017 年胶州湾水体透明度时空变化及影响因素研究[J]. 海洋科学, 2020, 44(4): 21-32.
Yin Ziyao, Jiang Tao, Yang Guangpu, et al. The spatial-temporal variation of water clarity and its influencing factors in Jiaozhou Bay from 1986 to 2017[J]. Marine Sciences, 2020, 44(4): 21-32.
- [29] 朱建华, 李铜基. 黄东海海区浮游植物色素吸收系数与叶绿素 a 浓度关系研究[J]. 海洋技术, 2004, 4: 117-122.
Zhu Jianhua, Li Tongji. Relationship Research of Phytoplankton Pigments Absorption and Chlorophyll a Concentration in the East China Sea and Yellow Sea[J]. Journal of Ocean Technology, 2004, 4: 117-122.

Comparison and analysis of two semi-analytical inversion models for water transparency

GAO Lei¹, HU Peng¹, ZHU Jin-shan^{1, 2, 3}

(1. Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi'an 710054, China; 3. Key Laboratory of marine mapping technology, Ministry of natural resources, Qingdao 266590, China)

Received: Jun. 19, 2020

Key words: Water transparency; reference band; QAA algorithm; remote sensing inversion

Abstract: Currently, most transparency inversion methods utilized are empirical. On the other hand, semi-analysis method is applied to Class II water bodies, which makes obtaining the analytical properties difficult leading to few applications. In the absence of relevant optical properties, this paper compares and analyzes two semi-analytical transparency inversion models based on the GOCI satellite image data and the measured transparency data. First, a QAA-v6 algorithm with 555 nm and 660 nm reference wavelengths is used to invert the inherent optical properties of the waterbody. This is then substituted into the Lee15 and Jiang19 semi-analytical models to quantitatively invert the transparency of Jiaozhou Bay waters. Results show that the Lee15 model with 660 nm as the reference band has higher accuracy and lower error ($R^2 = 0.771$, MAPE = 0.137, and RMSE = 0.331). To further investigate the inversion accuracy of each model in different transparency ranges, the transparency range is divided into three segments: (1) 0.5–1.5, (2) 1.5–2.5, and (3) 2.5–3.5 m. The corresponding error analysis is conducted separately. It is found that the 660 nm Lee15 model achieves the best accuracy in each segment. This study proves that the proposed model can provide an effective way for the transparency inversion of a Class II water body like Jiaozhou Bay.

(本文编辑: 康亦兼)