

山东半岛近岸海带养殖活动对水体光学吸收特性的影响

姜珊珊^{1,2}, 黄海军¹, 董玉国³, 刘艳霞¹, 严立文¹, 王启飞⁴, 李冰⁴

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 华能霞浦核电有限公司, 福建 宁德 352000; 4. 华能山东石岛湾核电有限公司, 山东 威海 264312)

摘要: 为了研究近岸海带养殖活动对水体光学特性的影响, 本文选取山东半岛黑泥湾海域为典型研究区, 利用 2021 年 4 月和 8 月在该区的 9 站同步观测数据, 分析其总悬浮颗粒物、藻类颗粒物、非藻类颗粒物以及有色溶解有机物的吸收特性, 并计算各组分对总吸收系数的贡献率, 同时采用 Quasi-analytical algorithm(QAA)算法借助 MODIS 影像反演了水体总吸收系数, 结合实测数据获得了黑泥湾水体吸收特性的季节变化情况。结果表明, 有海带养殖季节表层水体藻类颗粒物、非藻类颗粒物、总颗粒物和有色溶解有机物的吸收系数明显大于无海带养殖季节, 且春季海带养殖区水体的总吸收系数大于无海带养殖区; 海底表层沉积物的再悬浮造成底层吸收系数较大, 而在春季成熟期的海带汇聚较大量的有机物质导致中层藻类颗粒物吸收系数相对较高; 参考波长向红波移动, QAA_v5 算法能够较好地估算该区表层水体吸收系数, 且在海带养殖季节水体组分会影响到更长的波段特征。本研究可为深入了解海带养殖对水体各组分浓度和分布、碳循环以及水生生态系统的结构和功能的影响提供参照, 并有助于提高近岸水体组分的遥感反演精度。

关键词: 黑泥湾; 海带养殖; 吸收特性; Quasi-analytical algorithm; 季节变化

中图分类号: P7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)10-0010-15

DOI: 10.11759/hyxx20221114002

水体的吸收系数在海洋光学研究中应用非常广泛, 它是水色遥感进行生物-光学模型、辐射传输方程、热流密度计算、地下光强度研究、水体类型分类、初级生产力估算、海洋动力学研究和生态环境评价的关键参数^[1-3], 对其精确估算有利于了解水体各组分的浓度和分布情况^[4], 提高水质参数的遥感反演精度^[5]。Montecino 等^[6]对智利附近海域研究发现, 不同水动力条件下藻类和非藻颗粒物吸收系数具有明显差异。朱建华等^[7]发现在黄东海海区叶绿素 *a* 的浓度越高, 藻类颗粒物吸收系数越大。王桂芬等^[8]在广东沿岸水体中发现, 非藻类颗粒物在 440 nm 处的吸收系数随海水盐度的增大而减小, 随总悬浮颗粒物浓度增大而增大。吴云超等^[9]通过研究发现在海草床生态系统中, 海草床海草的释放、河流的输入及网箱养殖区浮游植物的降解是 CDOM 的主要来源。廖珊等^[10]通过对湛江湾有色溶解有机物(CDOM)光谱吸收特性进行研究, 发现叶绿素 *a* 浓度和溶解氧含量与 CDOM 吸收系数密切相关。魏兰苏等^[11]对东中国海悬浮颗粒物的吸收光谱进行研究, 发现东海、渤海和黄河的总悬浮颗粒物吸收光谱与藻类颗粒物光谱具有相似特

征。吴文广等^[12]通过对桑沟湾 CDOM 吸收光谱特性和空间分布特征研究发现海带养殖活动是桑沟湾 CDOM 的主要贡献者之一。中国是世界第一海水养殖大国, 其中海带养殖属于我国海藻养殖的第一大种类^[13], 海带在生长过程中能够起到气候调节、缓解水体富营养化、净化环境的作用^[14], 也会引起水体各组分光学特性的变化, 对初级生产力、近岸水体碳循环和水生生态系统的结构和功能等都会产生影响。

目前众多学者已经基于实测数据对黄渤海海区的吸收特性开展研究, 并结合固有光学特性算法估算较长时空尺度水体光学特性的变化。Cui 等^[15]利用

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2023-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41976166); 华能石岛湾核电厂址水文观测专题(FWQT00029)

[Foundation: The National Natural Science Foundation of China, No. 41976166; Huaneng Shidao Bay Nuclear Power Plant Site Hydrological Observation Topics, No. FWQT00029]

作者简介: 姜珊珊(1998—), 女, 汉族, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋地质遥感与地理信息系统, E-mail: 1774454824@qq.com; 黄海军(1963—), 通信作者, 男, 汉族, 湖南湘潭人, 研究员, 主要研究方向为海岸带及近海海洋地质调查、海岸带滩稳定性研究、海洋遥感与 GIS 应用及数模分析工作, E-mail: hjhuang@qdio.ac.cn

遥感数据和实测数据采用 Quasi-analytical algorithm (QAA)对黄海和东海浑浊水体的吸收系数进行反演,得到春季 $a_t(555)$ 大于夏季 $a_t(555)$ 的特征。Qing 等^[16]利用 QAA-685, QAA-715 和 MERIS 数据产品对渤海水体吸收系数进行反演,得到了渤海总吸收系数的时空变化特征; Huang 等^[17]验证了 QAA 算法在黄海和东海的适用性; Chen 等^[18]对 QAA 算法进行改进,使用 QAA-RGR 反演了中国东部海域的吸收系数; Zhan 等^[19]利用 IOCCG 数据集比较了 QAA_v4、QAA_V5、QAA_v6 反演水体吸收系数的精度。

山东半岛东南端的黑泥湾是我国重要的海带生产基地,湾内养殖种类仅有海带一种,物质来源单一,相比于附近贝藻混养的桑沟湾,黑泥湾更适合研究海带养殖对水体吸收特征的影响^[20-22]。自 20 世纪 80 年代以来,黑泥湾就开始规模化养殖海带,海带养殖为该区域极为活跃的人类活动之一,多年来,众多学者对黄渤海大空间尺度范围内光学特性进行了研究^[23],但对近岸小空间尺度海带养殖区内光学特性及遥感探测还较少涉及,研究吸收特性的变化有助于通过遥感手段了解海带养殖对水体水质情况、光学组分浓度、初级生产力、近岸碳循环等的影响。

结合前人的研究,本文对总悬浮颗粒物、藻类颗粒物、非藻类颗粒物和有色溶解有机物的吸收特性进行了研究,并计算了各组分对总吸收的贡献率,利用 QAA 算法对 MODIS 数据进行反演,将反演结果与实测数据对比,得到有海带养殖季节和无海带养殖季节水体吸收系数的空间分布和数值变化情况,分析海带养殖对水体吸收特征的影响。

1 数据和方法

1.1 研究区域

黑泥湾位于山东半岛东南侧,桑沟湾以南,石岛湾以北,是一个小型开敞海湾(图 1)。自 20 世纪 80 年代海带养殖大规模发展以来,研究区海底表层沉积物中已经形成了 6 cm 厚的沉积物,说明海带养殖活动增加了海水中有机组分的含量,海带养殖历史悠久^[22]。与其他近岸养殖水体相比,研究区域内的养殖种类单一^[21],每年 11 月份开始夹幼苗,至次年 4 月中旬收割,近岸无大型河流注入,物质来源单一^[20]。通过遥感影像反演得到的总吸收系数分布特征发现,黄海沿岸流并没有对黑泥湾吸收特征产生较大影响。因此,黑泥湾是研究海带养殖活动对水体吸收特性影响较理想区域。

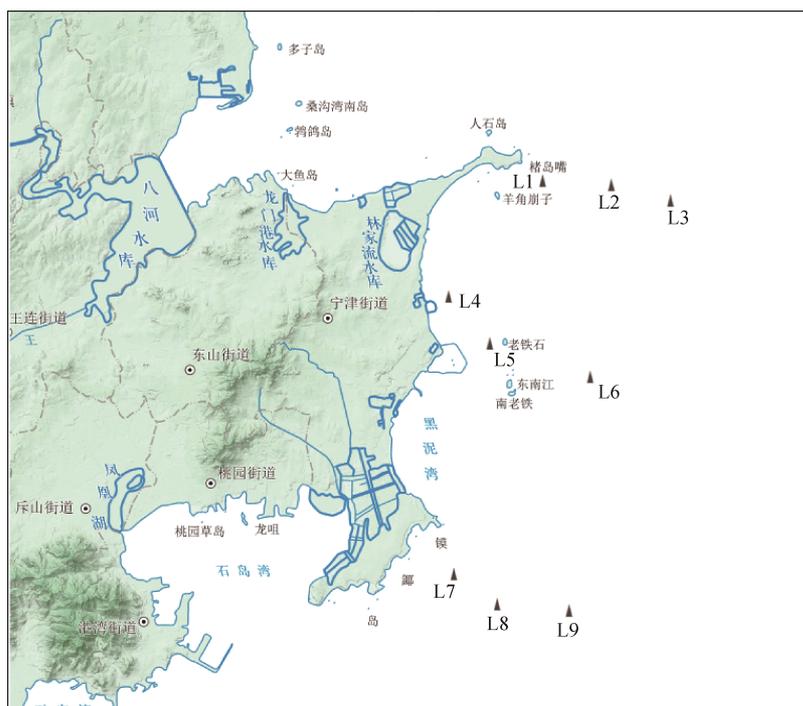


图 1 研究区地理位置和采样点位置[根据审图号鲁 SG(2021)026 号的地图制作]

Fig. 1 Geographical location of the study area and sampling points

注: 黑色三角表示采样站位

1.2 数据采集

依据海带每年的养殖周期^[24], 我们分别于 2021 年 4 月(海带基本长成)和 2021 年 8 月(海带收割完毕)2 个时间对黑泥湾沿岸水体相同站位进行同步重复采样, 共布设采样点 9 个(图 1, 后文用 L1—L9 表示站位), 分别在涨急、涨憩、落急和落憩(后文图中在站位之后用 1, 2, 3, 4 来表达这 4 个典型时刻), 使用标准采水器在表层、0.2H(H 为水深)、0.4H、0.6H、0.8H 及底层采集水样, 用干净的聚乙烯管将水样从采水器中立即转移到干净的样品瓶中, 最终将采集的水样保存在 1 L 聚乙烯采样瓶中^[25-26]。为了避免水样变质对后续参数测量的影响, 采集到的水样在接近现场水温的阴暗处保存并迅速送至实验室进行处理和分析。过滤后的样品均保存在-80 °C 冷库或液氮中。

1.3 吸收系数的测定

水样中总悬浮颗粒物、藻类颗粒物、非藻类颗粒物和 CDOM 吸收系数的测定分析工作在中国海洋大学完成, 按照《我国近海海洋光学调查技术规程》^[26]规定的方法进行。总颗粒物吸收系数 $a_p(\lambda)$ 的测定采用定量滤膜技术(quantitative filter technique, QFT)测定^[27], 在低真空度(约 166.25 hPa)下, 过滤 0.5 L 的海水到 GF/F 玻璃纤维滤纸上, 得到总颗粒物样品滤纸, 将滤纸保存到滴有纯净水的无菌样品盒中, 用锡纸包裹无菌样品盒, 及时将无菌样品盒冷冻避光保存, 最终利用分光光度计测量总颗粒物滤纸和参比滤纸在 400~700 nm 处的吸光度, 然后根据式(1)计算总颗粒物的吸收系数:

$$a_p(\lambda) = \frac{2.303A_f}{\beta V_f} \{ [N_{fp}(\lambda) - N_{bf}(\lambda)] - N_{null}(\lambda) \}, \quad (1)$$

其中, $a_p(\lambda)$ 为 λ 处总颗粒物的吸收系数, A_f 为滤纸上富有颗粒物的滤纸面积, V_f 为过滤水样的体积, $N_{fp}(\lambda)$ 为样品滤纸测得的吸光度, $N_{bf}(\lambda)$ 为完全水合滤纸的空白吸光度, $N_{null}(\lambda)$ 为颗粒吸收在近红外波段的残余校正, 此处采用 700 nm 处吸光度作为平均吸光度, β 为光程放大因子。

总颗粒物样品测量完后, 采用甲醇提取法^[28]制作非色素颗粒物样品, 在样品滤纸和参比滤纸上分别加入甲醇, 让滤纸在甲醇中保持大约 1 h, 将滤纸上的色素溶解, 然后用备用纯净海水将甲醇清洗干净, 得到非色素颗粒物滤纸和参比滤纸的吸光度, 非藻类颗粒物吸收系数的计算与公式(1)相同。浮游植物的吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 则是通过总颗粒物吸收系数减去非藻类颗粒物吸收系数得到。

黄色物质 CDOM 样品是利用 0.2 μm 的聚碳酸酯滤纸过滤 0.25 L 的水样并取 0.05 L 到样品瓶, 样品瓶中水样需保存在至少-20 °C 条件下, 冷冻时水不能过满, 以防冻裂。将样品运送至中国海洋大学实验室, 使用紫外-可见分光光度计(日本岛津 UV-2450), 采用 10 cm 石英比色皿在 200~800 nm 范围内测量 CDOM 溶液相对于纯水的吸光度和纯水空白相对于纯水的吸光度, 根据式(2)计算黄色物质吸收系数:

$$a_g(\lambda) = \frac{2.303}{l} [N_s(\lambda) - N_{bs}(\lambda)], \quad (2)$$

其中, $a_g(\lambda)$ 为黄色物质吸收系数, l 为比色皿长度, 此处采用 10 cm 比色皿, $N_s(\lambda)$ 为黄色物质相对于纯水的吸光度, $N_{bs}(\lambda)$ 为纯水空白相对于纯水的吸光度。

1.4 卫星影像数据处理

研究选用 MODIS-terra level-1B 数据(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>), 根据实测数据的采样时间选择晴朗无云的 MODIS 遥感影像用于表层水体总吸收系数的反演, 为了更好地反映采样月份的吸收特征, 在春季和夏季分别选取两景结果进行平均, 其中春季 MODIS 影像的获取时间为 2021 年 4 月 17 日 03: 10 和 4 月 5 日 02: 35, 夏季 MODIS 影像的获取时间为 2021 年 8 月 11 日 02: 35(格林威治时间)。本研究 MODIS 数据的预处理主要涉及遥感影像的几何校正和大气校正, 最终得到 410 nm, 443 nm, 490 nm, 550 nm 波段的遥感反射率影像, 作为后续反演表层水体吸收系数的输入数据。

2 基于 QAA 算法的总吸收系数反演

2.1 QAA_v5 算法

LEE 等^[29]开发了 QAA 算法用于反演水体的固有光学参量, 该算法通过 7 个步骤利用遥感反射率得到吸收系数, 其中包含两个经验模型、两个分析方法和三个半分析模型^[30], 并针对不同类别的水体进行了多次的改进, 提出了 QAA_v4, QAA_v5 和 QAA_v6^[31-33]。基于此大多数研究已经根据近岸水体特征改进了 QAA_v5 算法, 在黄渤海水体中反演吸收系数时通常将 555 nm 作为参考波长^[15-17, 19], 但在更浑浊的水体中参考波长往往需要向长波方向移动^[29, 34], 延长参考波长既有利于大气校正, 又减小了短参考波长处包含水体光学组成信息的复杂性^[34]。

在任一波长处水体的总吸收系数是纯水吸收系数、总悬浮物吸收系数和黄色物质吸收系数之和, 我们可以把上述关系用式(3)表达:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_d(\lambda) + a_g(\lambda), \quad (3)$$

其中, $a(\lambda)$ 为水体总吸收系数, $a_w(\lambda)$ 为纯水的吸收系数, $a_{ph}(\lambda)$ 是藻类颗粒物吸收系数, $a_d(\lambda)$ 是非藻类颗粒物吸收系数, $a_g(\lambda)$ 是有色溶解有机物吸收系数^[29]。

根据式(3), 我们绘制了研究区春季和夏季水体总吸收系数和纯水吸收系数随波长的变化曲线(图 2), 发现随着波长的增加, 总吸收系数和纯水吸收之间的差距越来越小, 在某一波长处水体总吸收系数可以近似等于纯水的吸收系数, 该波长在春季为 678 nm, 夏季为 667 nm。而在黄渤海地区, 已有研究确定在 555 nm 处水体各组分的吸收非常弱, 可以忽略, 以此推断可能由于本研究区接近岸边, 受近岸泥沙再悬浮及人类活动等的影响, 水体成分较为复杂, 水体的吸收在长波段仍然较为显著。因此我们在不同的季节选取相应的长波波段估算吸收系数并与 555 nm 处作为参考波长进行了对比(见 3.2 部分)。

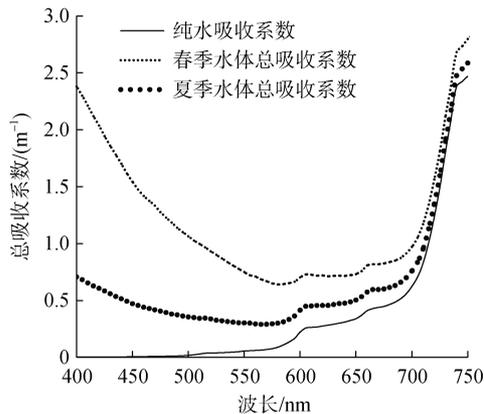


图 2 春、夏季水体总吸收系数和纯水吸收系数光谱曲线
Fig. 2 Spectral absorption coefficient curves of pure water and the total water body in spring and summer

2.2 QAA 算法的精度评价指标

比较 QAA 反演吸收系数与实测吸收系数的统计参数采用均方根误差(root-mean-square error, RMSE, 记为 E_{RMS})、平均相对误差(mean relative error, MRE, 记为 E_{MR})和相关系数(R^2), 各参数计算公式见式(4)–(6):

$$E_{RMS} = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [a(\lambda)_i^D - a(\lambda)_i^M]^2 \right)^{0.5}, \quad (4)$$

$$E_{MR} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|a(\lambda)_i^D - a(\lambda)_i^M|}{a(\lambda)_i^M} \right) \times 100\%, \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (6)$$

其中, n 代表实测数据个数, $a(\lambda)_i^D$ 代表通过反演获得的吸收系数, $a(\lambda)_i^M$ 代表实测的吸收系数。均方根误差代表 n 个观测值与真实值之间偏差的平方根。平均相对误差是相对误差的平均值, 通常由平均相对误差的绝对值表示^[44]。 R^2 是回归平方与总偏差平方和的比值^[19]。

3 结果和讨论

3.1 实测水体吸收系数的季节特征

3.1.1 藻类颗粒物吸收系数空间分布特征的季节变化

春季和夏季表层水体中藻类颗粒物实测吸收系数曲线显示[图 3(a)和图 4(a)], 春季表层水体藻类颗粒物的吸收系数明显大于夏季。春季所有站位和夏季小部分站位仅在 675 nm 处有吸收峰存在, 在 440 nm 处吸收峰不存在或者不明显, 而夏季部分采样点在 440 nm 和 675 nm 处有吸收峰存在。春季和夏季底层水体中藻类颗粒物实测吸收系数曲线显示[图 3(e)和图 4(b)], 春季和夏季底层藻类颗粒物吸收系数相当。将春季表层、0.2H(H 为水深)、0.4H、0.6H、0.8H 及底层水体的藻类颗粒物吸收曲线[图 3(a)–(e)]进行对比发现, 春季水柱中藻类颗粒物吸收系数呈现出从表层到底层先增大后减小的趋势, 在 0.4H 和 0.6H 层值较大; 由于水体太浑浊, 无法对样品进行萃取, 因此夏季 0.2H、0.4H、0.6H 层藻类颗粒物吸收系数数据缺失, 而 0.8H 层藻类颗粒物吸收系数有效数据仅有一个, 不具有代表性, 因此只分析了夏季表层和底层藻类颗粒物吸收光谱特征。对夏季表层和底层藻类颗粒物吸收光谱曲线[图 4(a)–(b)]进行分析发现, 夏季表层和底层藻类颗粒物吸收系数近似相等。

春季表层水体中藻类颗粒物的吸收系数明显大于夏季说明春季表层水体中藻类颗粒物的含量大于夏季, 而春夏季底层水体中藻类颗粒物吸收系数相当, 说明海带养殖对表层水体藻类颗粒物的影响大于底层。一般来说, 藻类颗粒物会在 440 nm 和 675 nm 波段附近存在两个吸收峰, 675 nm 的吸收峰主要是由叶绿素 a 导致, 440 nm 处的吸收是叶绿素 a 和其他辅助色素共同作用的结果^[35]。然而本研究区水体在 440 nm 处吸收峰不显著(图 3), 可能是由于水体中存在某种具有比叶绿素 a 更强的吸收蓝光的物质。前人研究显示造成这种现象的原因可能有三种: 1) 脱镁色素的作用。海带碎屑中会形成大量的脱镁色素, 脱镁色素在 410~420 nm 有强吸收, 当其大量存在时, 会使得藻类颗粒物的吸收峰值向蓝光方向移动。2) 悬浮泥沙的影响。研究区为

近岸水域, 较强的水动力造成水体中悬浮泥沙含量较高, 而藻类颗粒物的含量很少, 非藻类颗粒物的吸收在总颗粒物吸收中占有绝对优势^[35]。3) 有色溶解有机物(CDOM)的影响。过滤水样时, 会有部分 CDOM 吸附在颗粒上, 从而使得藻类颗粒物具有和 CDOM 类似的吸收光谱^[36]。水体吸收特征垂向变化显示, 底层藻类颗粒物吸收系数大于表层可能是由海底表层沉积物

再悬浮引起, 中层藻类颗粒物吸收系数较大可能是成熟期的海带汇聚了较大量的有机物质在水体中所致。通过对海带养殖季节水体垂向叶绿素特征进行分析发现, 随水深的增加, 叶绿素浓度逐渐增大, 可排除藻类最大层对藻类吸收系数的影响。夏季表层和底层水体藻类颗粒物吸收系数相当表明在无海带养殖期, 水体表层和底层藻类颗粒物含量接近。

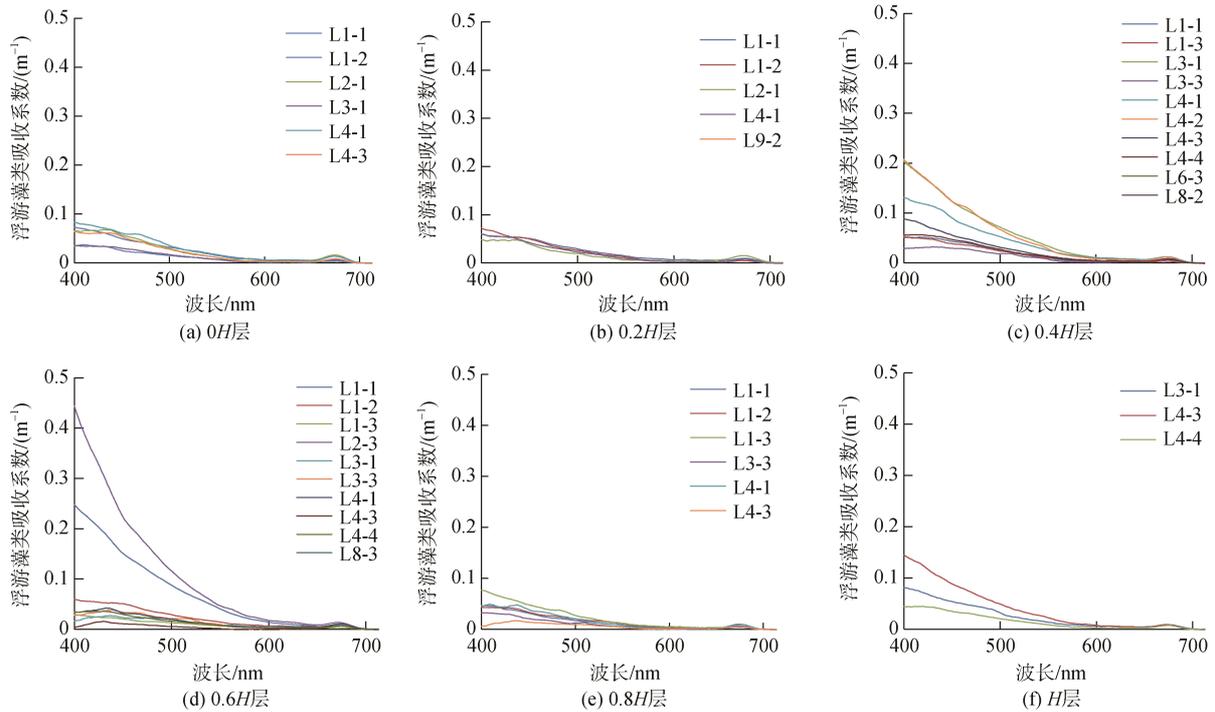


图 3 春季 0H、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、H 层浮游藻类吸收光谱曲线

Fig. 3 Absorption spectral curve of phytoplankton of different depth (0H, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, and H) in spring

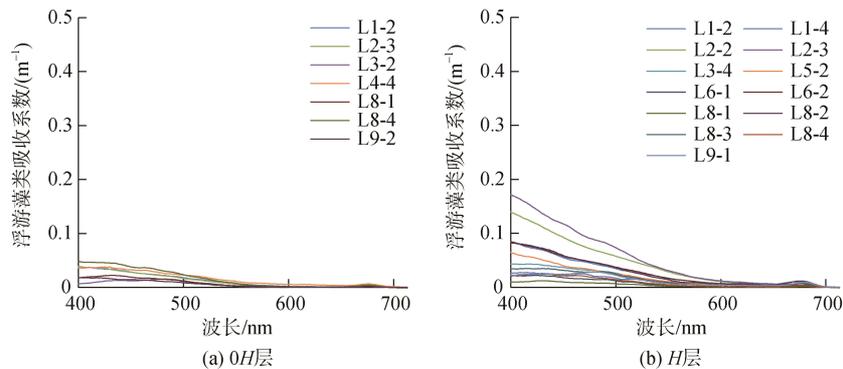


图 4 夏季 0H、H 层浮游藻类吸收光谱曲线

Fig. 4 Absorption spectral curve of phytoplankton of different depths (0H and H) in summer

3.1.2 非藻类颗粒物吸收系数空间分布特征的季节变化

水体中非藻类颗粒物主要包括矿物、非活性有机体(如排泄物、退化的藻类细胞等)以及非藻类活性有机

体^[37]。研究区内春季和夏季非藻类颗粒物吸收系数曲线均呈指数变化[图 5(a)和图 6(a)], 图 5 和图 6 为排除无法萃取样品数据和异常数据后的有效数据, 夏季仅有表层和底层非藻类颗粒物吸收系数数据, 其中 0.2H 和 0.8H

层由于数据较少,不具有代表性,因此不予以考虑。春季表层水体的非藻类颗粒物吸收系数和曲线斜率明显大于夏季,春季底层水体的非藻类颗粒物吸收系数也略大于夏季。将春季表层、0.2H(H为水深)、0.4H、0.6H、

0.8H及底层水体的非藻类颗粒物吸收曲线[图 5(a)—(e)]进行对比发现,春季水柱中非藻类颗粒物吸收系数呈现出先增大后减小再增大的特征。夏季表层水体的非藻类颗粒物吸收系数小于底层[图 6(a)—(b)]。

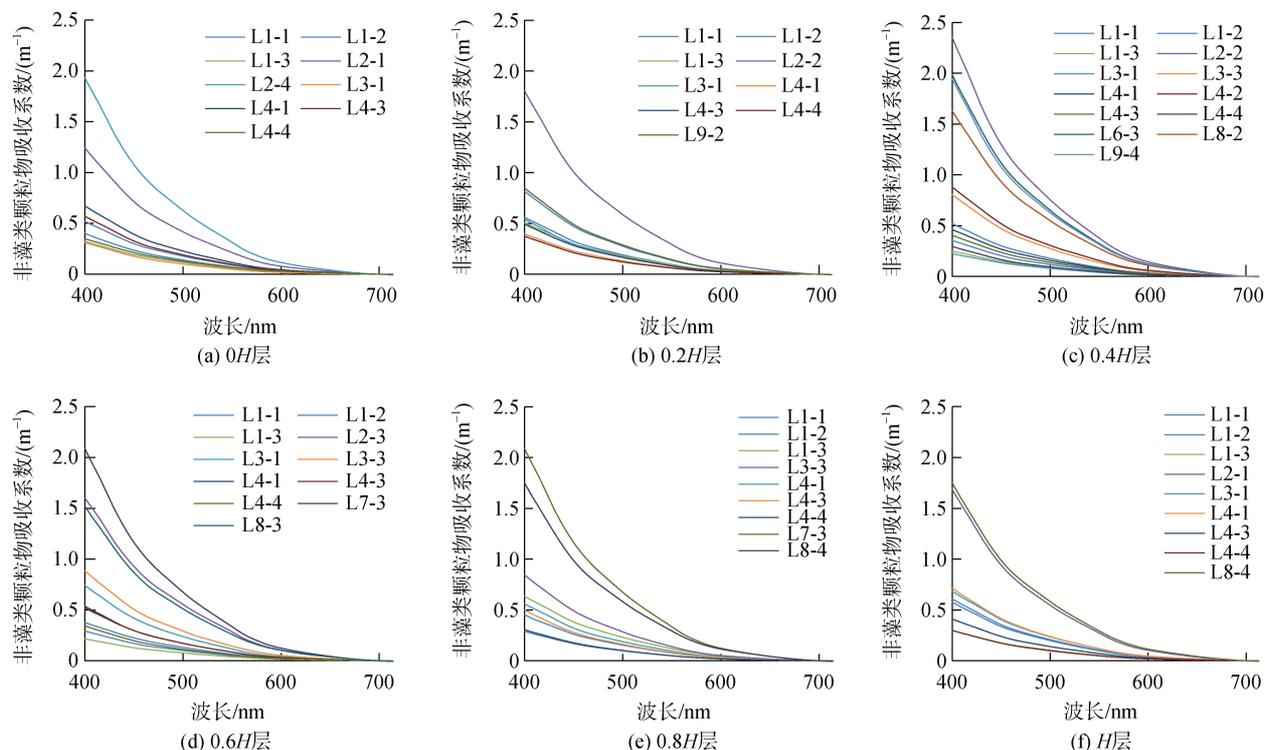


图 5 春季 0H、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、H 层非藻类颗粒物吸收光谱曲线

Fig. 5 Absorption spectral curve of nonalgal particles of different depths (0H, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, and H) in spring

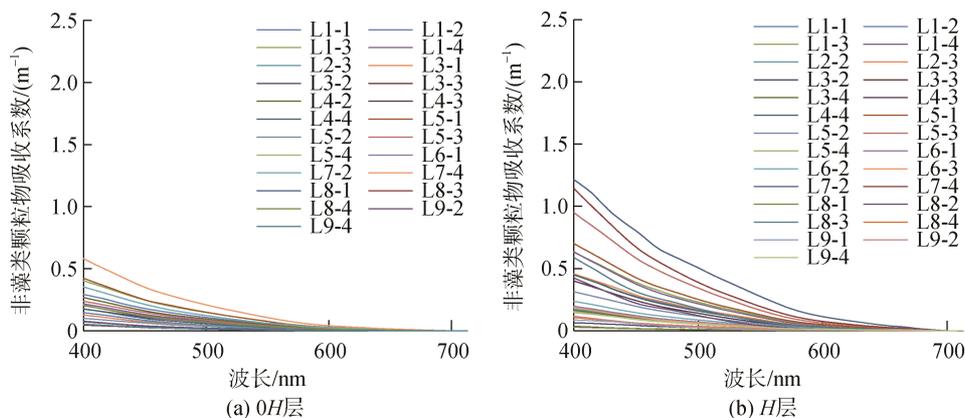


图 6 夏季 0H、H 层非藻类颗粒物吸收光谱曲线

Fig. 6 Absorption spectral curve of nonalgal particles of different depths (0H and H) in summer

春季表层和底层非藻类颗粒物吸收系数均大于夏季,由于春季对海带进行施肥、海带自身扰动导致海底颗粒物的再悬浮以及海带自身产生的大量碎屑^[37-39],使得水体中非藻类颗粒物含量显著增加。根据已有研究,黑泥湾海底沉积物钻孔岩芯中,自海带养殖以来,

沉积物烧失量明显增大,显示海带养殖能增加水体中有机物的含量^[22]。从非藻类颗粒物的组成来看,有机物和矿物颗粒物是水体中非藻类颗粒物吸收特性的决定因素^[35],因此海带养殖会增加水体非藻类颗粒物的吸收,这与我们测量结果相一致。从春季水体非

藻类颗粒物吸收系数的垂直分布特征来看,春季表底层存在差异的原因可能是沿岸人类活动影响造成的,0.4H 和 0.6H 层非藻类颗粒物吸收系数数值较大,可能是由于海带自身生长会产生碎屑,使得海带生长层附近深度(0.4H, 0.6H)水域中含有较多的非藻类颗粒物。夏季表层水体非藻类颗粒物吸收系数小于底层可能是受夏季风暴潮、季风和流等因素的影响,使海底表层沉积物中的非藻类颗粒物再悬浮。

3.1.3 总颗粒物吸收系数空间分布特征的季节变化

图 7 和图 8 给出了春季和夏季总颗粒物吸收系数曲线,从图中可以看出,不同季节总颗粒物吸收系数的光谱特征相似,但曲线数值大小和范围存在较大的差异。由于只在少部分站位未采集样品,而且异常数据较少,因此总颗粒物吸收系数的有效数据较多。总颗粒物吸收是藻类颗粒物和 非藻类颗粒物吸收的总和,从 a_p 曲线的形状来看,无论是在哪个季节,本研究区的总颗粒物吸收光谱曲线更接近于非藻类颗粒物的吸收特征,未发现与藻类颗粒物吸收光谱曲线形态相似的站位。从 a_p 的数值大小来看,春季所有层总颗粒物吸收系数数值均大于夏季。春季各站位间表层吸收系数大小波动范围较大,夏季则差异较小。从春季水体总颗粒物吸收系数的垂直分布特征[图 7(a)–(f)]来看,春季

研究区域水柱中除表层外,总颗粒物吸收系数都分布均匀,整体数值较大。夏季水柱中总颗粒物吸收系数从表层到底层逐渐增大,其中表层总颗粒物吸收系数明显小于底层,0.4H 层总颗粒物吸收系数略大,0.6H、0.8H、H 层总颗粒物吸收系数差别不大。

已有研究将总颗粒物吸收光谱曲线分为 2 种典型类型:与浮游藻类吸收光谱曲线形态相似;与非藻类颗粒物吸收光谱曲线形态相似^[40]。本研究区的光谱曲线类型则属于后者。可能由于黑泥湾近岸海域水体悬浮泥沙含量较高,非藻类颗粒物成为水体吸收的主要贡献者。在无机颗粒物浓度较高的河流、湖泊、河口和沿岸带经常会出现这种类型的总颗粒物吸收曲线^[40]。形成不同季节总颗粒物吸收系数数值和空间分布差异的主要原因是水体组分含量和空间分布的变化^[5]。在本研究区,春季采样时海带生长最为茂盛,夏季海带基本收割完毕,因此春季总颗粒物吸收系数大于夏季。春季受水体中基本成熟的海带叶子的影响,水动力条件比其他两个季节复杂,因此海区各站位的吸收系数有显著的差异。夏季水体在 0.4H 层略大可能是受到春季海带碎屑残留的影响,表层总颗粒物吸收系数较小可能是因为无海带养殖时,表层水体受人类活动影响较小。

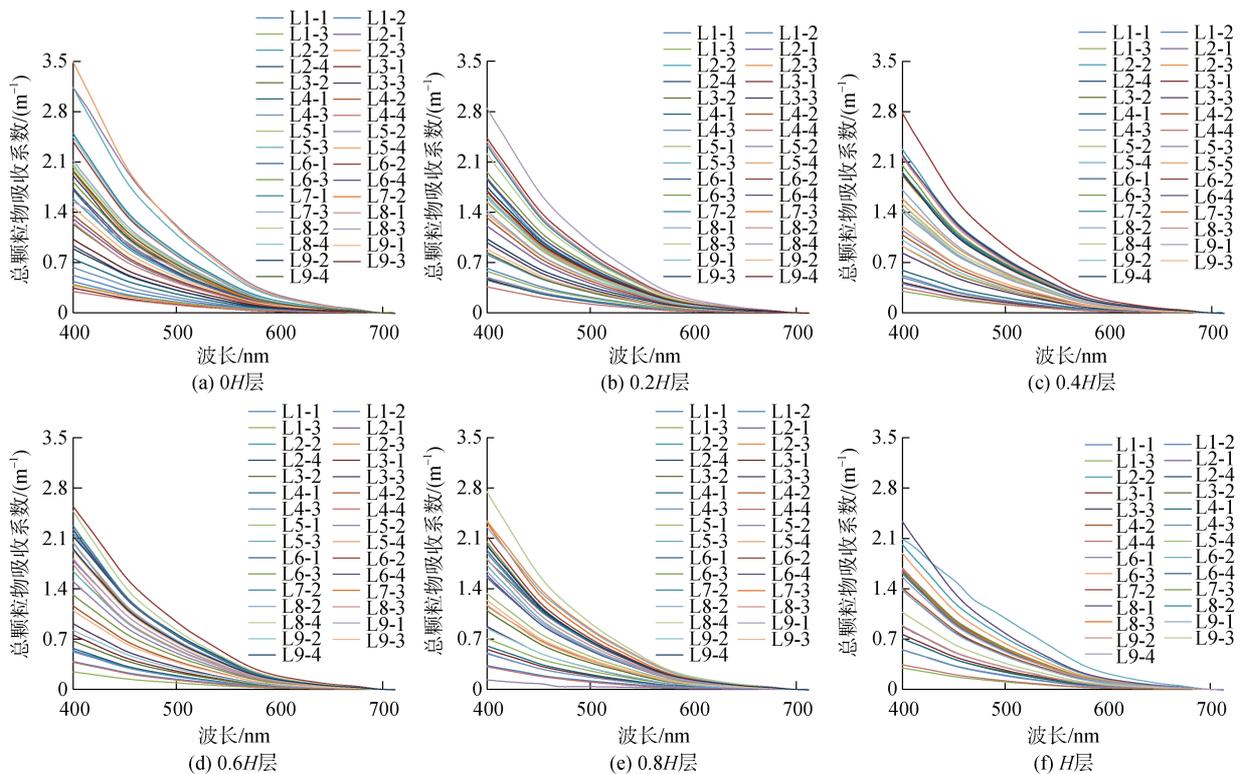


图 7 春季 0H、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、H 层总颗粒物吸收系数曲线

Fig. 7 Absorption spectral curve of total suspended particles of different depths (0H, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, and H) in spring

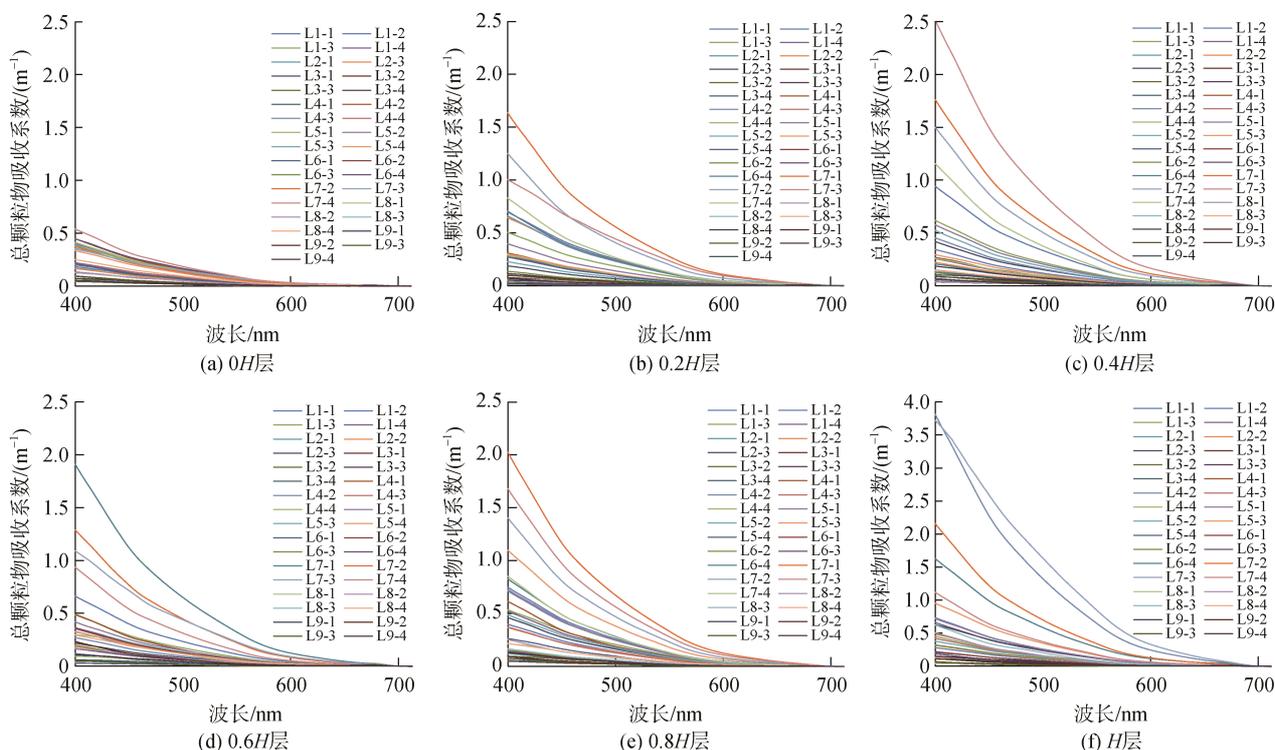


图 8 夏季 0H、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、H 层总颗粒物吸收系数曲线

Fig. 8 Absorption spectral curve of total suspended particles of different depths (0H, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, and H) in summer

3.1.4 有色溶解有机物吸收系数空间分布特征的季节变化

春季和夏季黑泥湾实测 CDOM 吸收光谱曲线随波长的增加逐渐减小, 在 700 nm 处趋近 0。由于水体中 CDOM 的来源各异, 确定其浓度比较困难, 在水色遥感领域一般用 CDOM 在 355 nm 处的吸收系数 $a_g(355)$ 代表其浓度^[41-42]。本研究主要侧重于对水体中 CDOM 浓度季节变化的研究, 因此本文通过对 $a_g(355)$ 进行分析来了解黑泥湾水体中 CDOM 吸收系数的季节变化特征。从实测数据可知(表 1), 春季水柱中 $a_g(355)$ 的平均值为 0.96 m^{-1} ; 夏季水柱中 $a_g(355)$ 的平均值为 0.82 m^{-1} 。通过对比垂向 $a_g(355)$ 的值发现, 春季水柱在 0.2H 层出现 $a_g(355)$ 最大值, 整体分布呈现上层水体小于下层水体; 夏季水柱中 $a_g(355)$ 除 0H 层外, 其他层 $a_g(355)$ 值相差不大, 趋于均匀分布, 春季所有层 $a_g(355)$ 均大于夏季。光谱斜率 S 数值的大小反映了 CDOM 的光密度随波长增加而逐渐降低的程度, 与 CDOM 浓度无关, 与分子组成有关, 光谱斜率的差异可表征分子组成的差异。 $S_{275-295}$ 值大, 表示海源有机质较多^[43-45]。对实测数据光谱斜率 S 数值进行计算发现黑泥湾水柱中 $S_{275-295}$ 的值较大, 均在 0.023 左右。

表 1 黑泥湾春、夏季垂向各层 CDOM 浓度
Tab. 1 Colored dissolved organic matter concentrations in vertical depths in spring and summer at Heini Bay

层位	春季 $a_g(355)$ 平均值/ (m^{-1})	夏季 $a_g(355)$ 平均值/ (m^{-1})
0H	0.83	0.79
0.2H	1.13	0.89
0.4H	0.83	0.82
0.6H	1.07	0.90
0.8H	0.99	0.78
H	0.91	0.87

整体来看, 春季水柱中 CDOM 浓度大于夏季, 可能是由于该区域高密度、规模化的海带养殖释放了大量的 CDOM。春夏季不同层 CDOM 吸收差异的可能原因有两个: 1) CDOM 的来源。CDOM 的来源主要有 2 个: 外来的和自生的。外来的主要在靠近河口及近岸海域, 主要由陆地径流输入和生物降解产物组成的腐殖酸和富里酸; 自生的主要在远离沿岸流影响的近海和开阔大洋, 主要由现场生物活动产生, 如浮游植物、细菌、珊瑚、珊瑚礁、水下水生植物群、海带等^[43, 45]。黑泥湾所在海域周围基本没有陆源河流输入, 而且春夏季整个水柱中光谱斜率 $S_{275-295}$ 数值较大, 说明水体中海源有机质较多, CDOM 来源主

要为自生的, 春夏季自生 CDOM 来源无法准确判断。
2)CDOM 的浓度。春季降雨量较夏季相对较少, 这可能是造成春季水体中 CDOM 浓度较高的原因^[35]。另外, 春季和夏季 0H 层 $a_g(355)$ 值小于 0.2H 层可能是由于表层光降解造成^[45]。

3.1.5 水体中各组分的吸收贡献

黑泥湾水体藻类颗粒和非藻类颗粒在 400~700 nm 波段内的平均吸收占总颗粒物平均吸收的比例(图 9)显示, 无论在春季还是夏季, 400~675 nm 范围内非藻类颗粒吸收占总颗粒物吸收的比例大于 50%;

而在 675 nm 之后藻类颗粒物的吸收贡献占主导, 此时非藻类颗粒对总吸收的贡献随波长增加逐渐降低。夏季水体中藻类颗粒对总颗粒物吸收的贡献要大于春季, 这与 3.1.1 中夏季大部分藻类颗粒吸收系数曲线有两个叶绿素吸收峰相对应, 说明夏季 440 nm 处的吸收峰没有被非藻类颗粒物的吸收特征完全掩盖。

3.2 MODIS 数据反演

利用 3.1 中的 QAA_v5 算法, 将校正后的 MODIS 数据估算得到 410 nm, 443 nm, 490 nm 和 550 nm 处的春季和夏季黑泥湾水体总吸收系数(图 10、图 11 和表 2)。

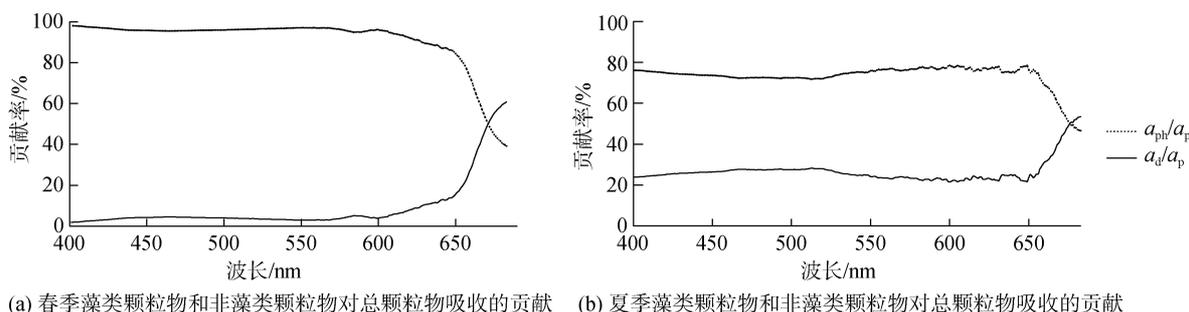


图 9 春季(a)和夏季(b) a_d 、 a_{ph} 对总颗粒物吸收 a_p 的贡献率

Fig. 9 Contributions of nonalgal particles and phytoplankton to the absorption coefficient of total suspended particles in (a) spring and (b) summer

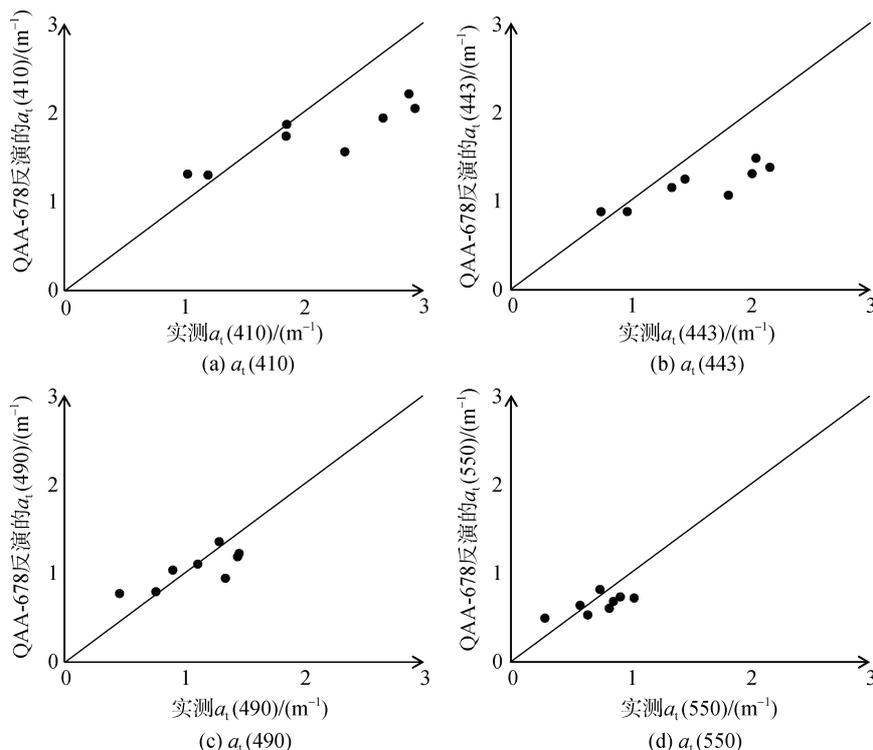


图 10 QAA_v5 算法在 410, 443, 490 和 550 nm 处实测数据与反演数据的比较(春季)

Fig. 10 Scatter plot of derived versus in-situ total absorption coefficient at 410, 443, 490, and 550 nm in spring obtained by the QAA_v5 algorithm (solid line represents 1: 1 ratio)

注: 实线表示 1: 1 的比例, 余同

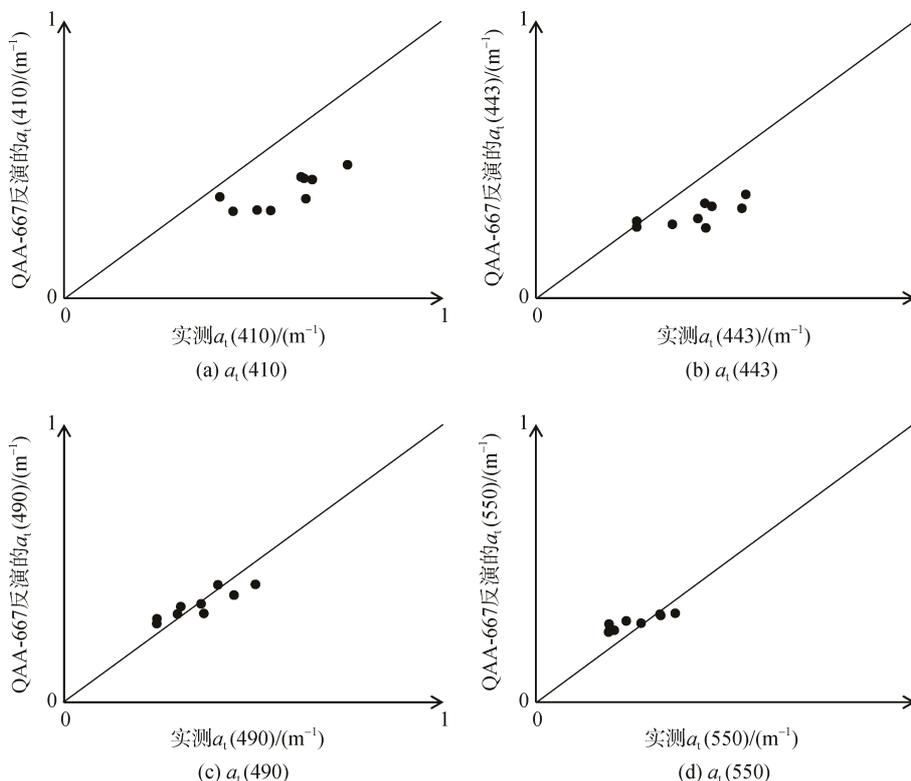


图 11 QAA_v5 算法在 410, 443, 490 和 550 nm 处实测数据与反演数据的比较(夏季)

Fig. 11 Scatter plot of derived versus in-situ total absorption coefficients at 410, 443, 490, and 555 nm in summer obtained by the QAA_v5 algorithm (solid line represents 1: 1 ratio)

表 2 总吸收系数反演值和实测值的评估

Tab. 2 Evaluation of inverted and measured values of the total absorption coefficient

误差波长	春季						夏季					
	$\lambda_0=555\text{ nm}$			$\lambda_0=678\text{ nm}$			$\lambda_0=555\text{ nm}$			$\lambda_0=667\text{ nm}$		
	$E_{\text{RMS}}/(\text{sr}^{-1})$	$E_{\text{MR}}/\%$	R^2									
410	1.55	0.62	0.14	0.55	0.25	0.78	0.28	0.45	0.54	0.21	0.33	0.61
443	1.20	0.66	0.11	0.51	0.24	0.77	0.19	0.39	0.34	0.14	0.29	0.49
490	0.75	0.56	0.19	0.22	0.19	0.62	0.09	0.19	0.30	0.05	0.12	0.80
550	0.52	0.58	0.47	0.18	0.26	0.47	0.07	0.24	0.00	0.05	0.21	0.84

注: λ_0 为参考波长

春、夏季实测和反演的总吸收系数在各波段具有较好的相关性, 部分偏差可能与影像获取时间与采样时间差、参考波段的选择有关。整体来看, QAA_v5 算法在春季对吸收系数的反演精度随波长逐渐降低, 而夏季则逐渐增加, 受水体组分变化影响较显著。

不同波段的总吸收系数的空间分布图(图 12 和图 13)显示, 春季水体的总吸收系数要明显大于夏季, 春季近岸海带养殖区的水体总吸收系数明显大于远岸无海带养殖区, 这与我们实测水体总吸收系数趋

势相同, 说明海带养殖能引起水体光学性质的改变。而且随着波长的增加, 总吸收系数呈现出减小的趋势, 与实测数据(图 2)一致。夏季近岸水体总吸收系数的值远小于春季, 没有显著的空间差异, 整个空间范围内的总吸收系数变化不大, 不同波段间也无明显差异, 呈现出自然水体的特征。此处, 对 4 月份影像扩大反演范围是为了排除黄海沿岸流对吸收系数高值区的影响, 图 12 显示, 虽然吸收系数高值区出现在沿岸地区, 但是在山东半岛北部没有明显的

流迹特征(可参考 443, 490, 550 nm 处总吸收系数), 吸收系数高值区的出现是受到近岸人类活动(黑泥湾近岸主要人类活动即为海带养殖)的影响。由于 8 月份在该地区的 MODIS 影像基本都被云覆盖, 而且夏季黄海沿岸流基本衰退, 因此在夏季仅对黑泥湾附近海域遥感影像进行了反演。

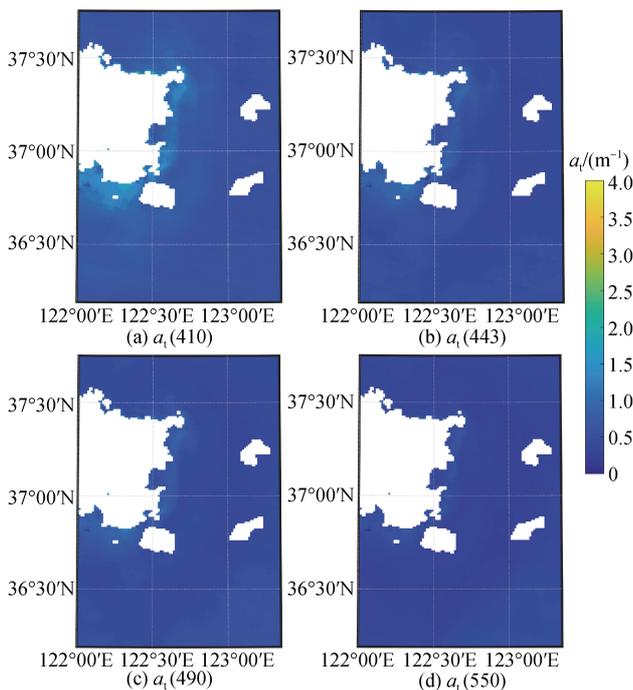


图 12 黑泥湾海域春季反演总吸收系数(a) $a_t(410)$, (b) $a_t(443)$, (c) $a_t(490)$, (d) $a_t(550)$ 空间分布图

Fig. 12 Derived total absorption coefficient of water a_t (a) 410, (b) 443, (c) 490, and (d) 550 nm in Heini Bay in spring

4 结论

(1)春季海带养殖季节黑泥湾表层水体各光学组分的实测吸收系数均大于夏季无海带养殖季节。通过 MODIS 影像反演的黑泥湾表层水体总吸收系数呈现出与实测数据相同的特征, 而且从总吸收系数的空间分布特征可以看到海带养殖区的总吸收系数明显大于外海区, 表明海带养殖会增加水体中各光学组分的浓度并对其分布产生影响, 引起水体光学性质的变化。

(2)海底表层沉积物的再悬浮可能是造成底层吸收系数大于表层的原因。春季水柱中藻类颗粒物的吸收系数主要由水柱内部浮游植物降解或微生物活动决定, 基本不受陆源输入的影响, 水体中层藻类颗粒物吸收系数大于其他层, 可能是成熟期的海带汇聚了有机物质造成。

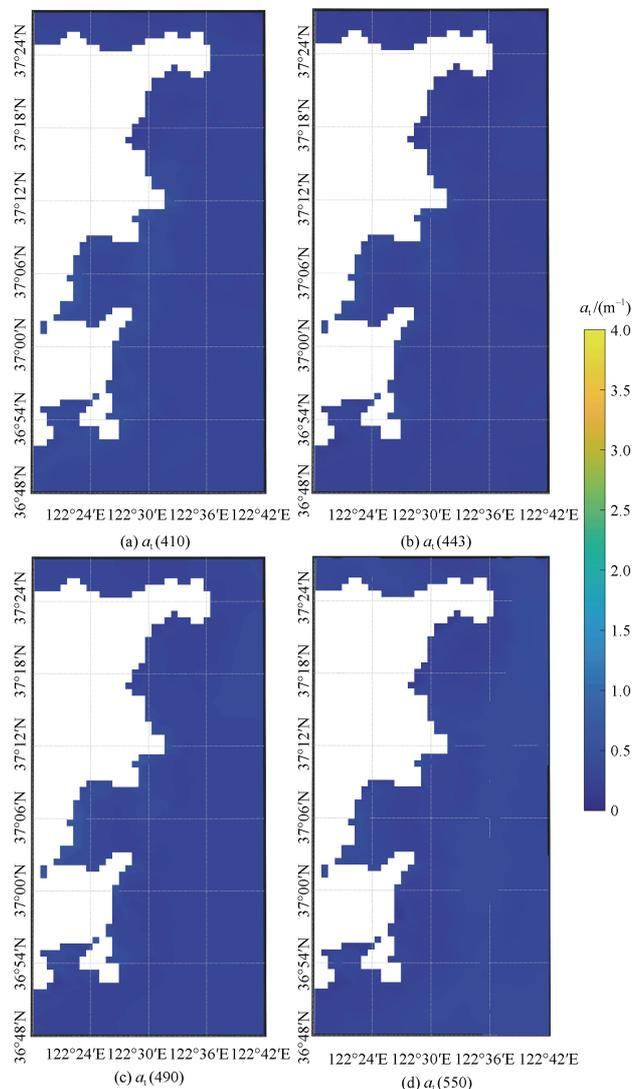


图 13 黑泥湾海域夏季反演总吸收系数(a) $a_t(410)$, (b) $a_t(443)$, (c) $a_t(490)$, (d) $a_t(550)$ 空间分布图

Fig. 13 Derived total absorption coefficient of water a_t (a) 410, (b) 443, (c) 490, and (d) 550 nm in Heini Bay in summer

(3)受近岸水体光学组分的影响, QAA_v5 算法中吸收系数的参考波长应向红波方向移动, 且在春季海带养殖季节水体组分对吸收的影响较其他季节移动的波长更长。因此, 也造成春季随波长增加估算精度越差, 而夏季则相反。

参考文献:

- [1] LEE Z P, CARDER K L, STEWARD R G, et al. An empirical algorithm for light absorption by ocean water based on color[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1998, 103(C12): 27967-27978.
- [2] 樊杰. 近海水体浮游植物种群吸收特征及其反演研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.

- FAN Jie. Study on the absorption characteristics of phytoplankton population in offshore waters and its inversion[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2021.
- [3] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 3969-3979.
ZHANG Yunlin, QIN Boqiang, YANG Yuanlong. Absorption characteristics of suspended particulate matter and CDOM in Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. Journal of Ecology, 2006, 26(12): 3969-3979.
- [4] 高峰, 陈晓玲, 杨文府, 等. 太原市不同类型夏季水体颗粒物与 CDOM 吸收特性研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(7): 1455-1469.
GAO Feng, CHEN Xiaoling, YANG Wenfu, et al. Study on the absorption characteristics of particulate matter and CDOM in different types of water bodies in Taiyuan in summer[J]. Journal of Ecological Environment, 2021, 30(7): 1455-1469.
- [5] 乐成峰, 李云梅, 查勇, 等. 太湖梅梁湾水体组分吸收特性季节差异分析[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2448-2455.
LE Chengfeng, LI Yunmei, ZHA Yong, et al. Seasonal difference analysis on absorption characteristics of water components in Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2008, 29(9): 2448-2455.
- [6] MONTECINO V, ASTORECA R, ALARCÓN G, et al. Bio-optical characteristics and primary productivity during upwelling and non-upwelling conditions in a highly productive coastal ecosystem off central Chile (~36°S) [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2004, 51(20/21): 2413-2426.
- [7] 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, 23(4): 117-122.
ZHU Jianhua, LI Tongji. Study on the relationship between phytoplankton pigment absorption coefficient and chlorophyll *a* concentration in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Ocean Technology, 2004, 23(4): 117-122.
- [8] 王桂芬, 曹文熙, 许大志, 等. 南海北部海区非藻类颗粒物吸收系数的变化特性[J]. 海洋技术, 2007, 26(1): 45-49, 53.
WANG Guifen, CAO Wenxi, XU Dazhi, et al. Variation characteristics of absorption coefficient of non algal particles in the northern South China Sea[J]. Ocean Technology, 2007, 26(1): 45-49, 53.
- [9] 吴云超, 江志坚, 刘松林, 等. 海南新村湾海草床生态系统有色溶解有机物的分布、来源及光降解特性[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2187-2194.
WU Yunchao, JIANG Zhijian, LIU Songlin, et al. Distribution, source and photodegradation characteristics of colored dissolved organic matter in the seaweed bed ecosystem of Xincun Bay, Hainan[J]. Journal of Ecology, 2015, 34(8): 2187-2194.
- [10] 廖珊, 余果, 付东洋, 等. 湛江湾海域春季黄色物质光学吸收特性及遥感探测[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(2): 56-62.
LIAO Shan, YU Guo, FU Dongyang, et al. Optical absorption characteristics and remote sensing detection of yellow matter in Zhanjiang Bay waters in spring[J]. Journal of Marine Technology, 2018, 37(2): 56-62.
- [11] 魏兰苏, 孙德勇, 李楠. 东中国海水体悬浮颗粒物的光谱吸收特征研究[J]. 科技视界, 2018, 243(21): 58-61.
WEI Lansu, SUN Deyong, LI Nan. Study on spectral absorption characteristics of suspended particulate matter in east China Sea water[J]. Science and Technology Horizon, 2018, 243(21): 58-61.
- [12] 吴文广, 张继红, 刘毅, 等. 桑沟湾春季有色溶解有机物(CDOM)吸收光谱特性及空间分布特征[J/OL]. 水产学报[2023-04-11].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20220518.0835.002.html>.
WU Wenguang, ZHANG Jihong, LIU Yi, et al. Absorption spectral characteristics and spatial distribution characteristics of colored dissolved organic matter (CDOM) in Sanggou Bay in spring[J/OL]. Journal of Fisheries [2023-04-11].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20220518.0835.002.html>.
- [13] 岳冬冬. 海带养殖结构变动与海藻养殖碳汇量核算的情景分析[J]. 福建农业学报, 2012, 27(4): 432-436.
YUE Dongdong. Scenario analysis on structural change of kelp farming and carbon sink accounting of seaweed farming[J]. Fujian Journal of Agriculture, 2012, 27(4): 432-436.
- [14] 欧官用, 王鑫杰, 杨安强, 等. 大型海藻碳汇能力的种间差异[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(8): 1436-1439, 1443.
OU Guanyong, WANG Xinjie, YANG Anqiang, et al. Interspecific differences in carbon sink capacity of macroalgae[J]. Zhejiang Agricultural Science, 2017, 58(8): 1436-1439, 1443.
- [15] CUI T W, ZHANG J, TANG J W, et al. Satellite inversion of intrinsic optical parameters of turbid water in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(8): 721-725.
- [16] QING S, TANG J W, CUI T W, et al. Retrieval of inherent optical properties of the Yellow Sea and East China Sea using a quasi-analytical algorithm[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011, 29(1): 33-45.
- [17] HUANG J, CHEN L Q, CHEN X L, et al. Validation of semi-analytical inversion models for inherent optical

- properties from ocean color in coastal Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2013, 69(6): 713-725.
- [18] CHEN S G, ZHANG T L. 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.
- [19] ZHAN J, ZHANG D J, TAN L F, et al. Performance analysis of inverting optical properties based on quasi-analytical algorithms[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 81(4): 4693-4709.
- [20] LIU Y X, HUANG H J, YAN L W, et al. Particle size parameters of particulate matter suspended in coastal waters and their use as indicators of typhoon influence[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(16): 2581.
- [21] 张泽华. 浅海筏式海带养殖活动对水动力及沉积环境影响研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016.
ZHANG Zehua. Study on the influence of raft kelp culture on hydrodynamics and sedimentary environment in shallow sea[D]. Qingdao: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2016.
- [22] 严立文. 浅海区海带养殖的沉积环境效应及动力机制[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2008.
YAN Liwen. Sedimentary environmental effects and dynamic mechanism of kelp aquaculture in shallow waters[D]. Qingdao: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2008.
- [23] WANG X M, TANG J W, SONG Q J, et al. A research on statistical retrieval algorithms and spectral characteristics of the total absorption coefficients in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2006, 24(3): 236-242.
- [24] 刘晓. 黑泥湾海域沉降颗粒物通量及其影响因子研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
LIU Xiao. Study on sedimentary particulate flux and its influencing factors in the sea area of Heini Bay[D]. Qingdao: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanography), 2012.
- [25] 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, 21(5): 173-1717.
DAI Yongning, LI Suju, WANG Xuejun. Study on inherent optical characteristics of Chaohu Lake[J]. *Environmental Science Research*, 2008, 21(5): 173-1717.
- [26] 国家海洋局 908 专项办公室. 海洋光学调查技术规程[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
908 Special Office of the State Oceanic Administration. Technical regulations for marine optical survey[M]. Beijing: Ocean Press, 2006.
- [27] MITCHELL B G. Algorithms for determining the absorption coefficient for aquatic particulates using the quantitative filter technique[J]. *Proceedings of the Defense, Security, and Sensing*, F, 1990, 1302: 137-148.
- [28] KISHINO M, TAKAHASHI M, OKAMI N, et al. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea[J]. *Bulletin of Marine Science*, 1985, 37(2): 634-642.
- [29] LEE Z P, CARDER K, ARNONE R. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755-5772.
- [30] LI S J, SONG K S, MU G Y, et al. Evaluation of the Quasi-Analytical Algorithm (QAA) for Estimating Total Absorption Coefficient of Turbid Inland Waters in Northeast China[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(9): 1-15.
- [31] ZHAN J, ZHANG D J, ZHANG G Y, et al. Estimation of optical properties using QAA-V6 model based on MODIS data[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, XLII-3/W10: 937-940.
- [32] LEE Z P, WEIDEMANN A, KINDLE J, et al. Euphotic zone depth: Its derivation and implication to ocean-color remote sensing[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C3): 1-11.
- [33] YANG W, MATSUSHITA B, CHEN J. Retrieval of inherent optical properties for turbid inland waters from remote-sensing reflectance[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(6): 3761-3773.
- [34] 李思佳. 内陆水体光学活性物质吸收特性与 QAA 反演[D]. 四平: 吉林师范大学, 2015.
LI Sijia. Absorption characteristics of optically active substances in inland waters and QAA inversion[D]. Siping: Jilin Normal University, 2015.
- [35] 邵田田, 宋开山, 丁智, 等. 辽河水体光学吸收特性的季节变化[J]. *生态学报*, 2016, 36(7): 1861-1871.
SHAO Tian Tian, SONG Kaishan, DING Zhi, et al. Seasonal variation of optical absorption characteristics of Liaohe River[J]. *Journal of Ecology*, 2016, 36(7): 1861-1871.
- [36] 吴璟瑜. 中国东南近海光吸收特性研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
WU Jingyu. Study on light absorption characteristics of Southeast China offshore[D]. Xiamen: Xiamen University, 2006.
- [37] 张红, 黄家柱, 李云梅, 等. 滇池水体光学物质的吸收特性研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(2): 4524-4563.
ZHANG Hong, HUANG Jia zhu, LI Yunmei, et al. Study on absorption characteristics of optical materials in Dianchi Lake[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(2): 452-463.

- [38] 张海灵. 海带的科学施肥[J]. 水产养殖, 2001(6): 17.
ZHANG Hailing. Scientific fertilization of kelp[J]. Aquaculture, 2001(6): 17.
- [39] KRUMHANSL K, SCHEIBLING R. Production and fate of kelp detritus[J]. Marine Ecology Progress Series, 2012, 467: 281-302.
- [40] 孙德勇, 李云梅, 王桥, 等. 内陆湖泊水体固有光学特性的典型季节差异[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1117-1124.
SUN Deyong, LI Yunmei, WANG Qiao, et al. Typical seasonal differences in the inherent optical properties of inland lakes[J]. Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 1117-1124.
- [41] 郭卫东, 程远月, 吴芳. 海洋荧光溶解有机物研究进展[J]. 海洋通报, 2007, 26(1): 98-106.
GUO Weidong, CHENG Yuanyue, WU Fang. Research progress of marine fluorescent dissolved organic matter[J]. Ocean Bulletin, 2007, 26(1): 98-106.
- [42] 赵军杰, 张婧, 杨桂朋. 秋季东、黄海有色溶解有机物(CDOM)的光学特性研究[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(6): 818-823.
ZHAO Junjie, ZHANG Jing, YANG Guipeng. Study on optical properties of colored dissolved organic matter (CDOM) in the East and Yellow Seas in autumn[J]. Marine Environmental Science, 2013, 32(6): 818-823.
- [43] 张永雨, 张继红, 梁彦韬, 等. 中国近海养殖环境碳汇形成过程与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(12): 1414-1424.
ZHANG Yongyu, ZHANG Jihong, LIANG Yantao, et al. Formation process and mechanism of carbon sink in China offshore aquaculture environment[J]. Chinese Science: Earth Science, 2017, 47(12): 1414-1424.
- [44] WILLMOTT C, MATSUURA K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance[J]. Climate Research, 2005, 30(1): 79-82.
- [45] 周倩倩. 黄渤海夏秋季有色溶解有机物(CDOM)的分布特征及季节变化的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
ZHOU Qianqian. Study on the distribution characteristics and seasonal changes of colored dissolved organic matter (CDOM) in summer and autumn in the Yellow Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.

Effects of coastal kelp farming on the absorption characteristics of water in the Shandong Peninsula

JIANG Shan-shan^{1, 2}, HUANG Hai-jun¹, DONG Yu-guo³, LIU Yan-xia¹, YAN Li-wen¹, WANG Qi-fei⁴, LI Bing⁴

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Huaneng Xiapu Nuclear Power Co., Ltd, Ningde 352000, China; 4. Huaneng Shandong Shidao Bay Nuclear Power Co., Ltd, Weihai 264312, China)

Received: Nov. 14, 2022

Key words: Heini Bay; kelp aquaculture; absorption properties; quasi-analytical algorithm; seasonal variation

Abstract: To study how nearshore kelp aquaculture affects the optical characteristics of water bodies, the Heini Bay of the Shandong Peninsula was selected as a research area. Using synchronous observation data from nine stations from April to August 2021, the absorption characteristics of the total suspended, algal, and nonalgal particulate matter, as well as colored dissolved organic matter (CDOM), were analyzed, and the contribution of each component to the total absorption coefficient was calculated. In addition, a quasi-analytical algorithm was used to invert the total absorption coefficient of water using MODIS images, and the seasonal variation in the absorption characteristics of water in Heini Bay was obtained based on the measured data. The results show that the absorption coefficients of algal, nonalgal, and total suspended particulate matter, as well as that of CDOM in the surface water, are considerably higher during the kelp aquaculture season than during the no-kelp aquaculture season, and the total absorption coefficient of water is greater in kelp aquaculture areas than in no-kelp aquaculture areas during spring. The resuspension of surface sediment on the seabed results in a higher absorption coefficient of the bottom layer during the ripening period (spring), and kelp accumulates a large amount of organic matter, resulting in a higher absorption coefficient of algae particles in the middle depth water body. The shift in the reference wavelength toward the red light better estimates the absorption coefficient of the surface water in the study area based on the QAA_v5 algorithm. In addition, the water components were observed to affect the longer band characteristics during the kelp farming season. This study can provide a reference for an in-depth understanding of the effects of kelp aquaculture on the concentration and distribution of water components, carbon cycling, and the structure and function of aquatic ecosystems. Moreover, the findings of this study could help improve the remote-sensing inversion accuracy of nearshore water components.

(本文编辑: 丛培秀)