



## 桑沟湾春季有色溶解有机物吸收光谱特性及空间分布特征

吴文广<sup>1,2</sup>, 张继红<sup>2\*</sup>, 刘毅<sup>2</sup>, 王新萌<sup>2</sup>,  
杨珺<sup>2</sup>, 冯旭<sup>2</sup>, 康秦梓<sup>2</sup>

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛海洋科学与技术试点国家实验室,  
海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 为探究有色溶解有机物 (CDOM) 光学性质如何示踪海水中溶解有机物组分的动态信息, 实验利用紫外可见吸收光谱手段, 分区域测定了桑沟湾春季水体及表层沉积物间隙水中 CDOM 的吸收光谱特征, 探讨了 CDOM 的来源组成、空间分布特征、迁移转化过程及其与养殖活动的关系。结果显示, ① 波长为 355 nm 的吸收系数  $[a(355)]$  范围为 0.23~9.09 /m, 不同水层空间分布差异显著, 表层和底层均从近岸区向贝藻区逐渐降低, 在海带区升高后向外海逐渐降低; 海带区从表层向底层先降低后升高, 高密度、规模化的海带养殖释放了大量的 CDOM, 各区域沉积物间隙水  $a(355)$  是其表层、中层和底层之和的 1.3~2.5 倍, CDOM 在沉积物间隙水中富集并逐渐累积。② 光谱斜率 ( $S_{275-295}$ ) 范围为 0.013~0.036, 外海区和海带区  $S_{275-295}$  均值显著高于其他各区, 海带区和外海区 CDOM 中海源有机质占主要成分, 而近岸区以陆源有机质为主; 近岸区 CDOM 中的腐殖酸类物质含量从表层到底层逐渐降低, 沉积物中积累的富里酸类物质含量较高, 海带区和外海区呈相反趋势。③ 比紫外吸光度 ( $SUVA_{254}$ ) 范围为 4.60~14.10 L/(mg·m), 贝类区、贝藻区和藻类区  $SUVA_{254}$  均呈现出从表层到底层逐渐增大的趋势, CDOM 的芳香性逐渐增强并在沉积物间隙水中达到最大; 海带区和外海区沉积物间隙水中的  $SUVA_{254}$  显著高于其他各区。研究表明, 海带区的规模化养殖活动向养殖海区及邻近海域贡献了较多的惰性溶解有机物, 暗示着海带养殖活动有较强的碳汇效应, 并通过海流作用向外海输送。本研究对桑沟湾海域不同养殖区域的 CDOM 的吸收特性和空间分布特征进行研究, 可为全面了解海水养殖的碳源汇效应提供基础数据。

**关键词:** 有色溶解有机物; 紫外吸收光谱; 海水养殖; 碳汇; 桑沟湾

中图分类号: S 914

文献标志码: A

有色溶解有机物 (colored dissolved organic matter, CDOM) 是水生态系统中碳的重要来源, 其主要成分包括腐殖酸、富里酸、氨基酸、蛋白

质和脂类等<sup>[1-3]</sup>, 是溶解有机物 (dissolved organic matter, DOM) 中具有光学特性的部分, 其来源、迁移与转化是水环境中碳循环过程的重要组成<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2021-08-13 修回日期: 2022-02-28

资助项目: 国家重点研发计划 (2020YFA0607603); 国家自然科学基金 (U1906216, 42376160); 山东省自然科学基金 (ZR2022QD035); 中国水产科学研究院黄海水产研究所基本科研业务费专项 (20603022022012); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类)“美丽中国生态文明建设科技工程”(XDA23050402); 山东省重大科技创新工程专项-“健康海洋”技术创新工程 (2018SDKJ0501-3)

第一作者: 吴文广 (照片), 从事海水养殖生态研究, E-mail: wuwg@ysfri.ac.cn

通信作者: 张继红, 从事海水养殖生态与渔业碳汇研究, E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn



CDOM 是一个成分复杂的溶解有机质储库, 从来源上看, 水生生态系统中的 CDOM 分为陆源 CDOM 与海源 CDOM, 陆源 CDOM 主要来源于土壤中的陆源植物、人类活动排放和地表河流输入等, 而海源 CDOM 则主要由浮游植物、藻类分泌及降解、微生物矿化和排泄以及水体中的生物摄食活动产生<sup>[5-6]</sup>。CDOM 作为海洋 DOM 的重要组成部分, 广泛存在于海洋和淡水生态系统以及沉积物间隙水中, 其生成、迁移和转化对于 C、N、P 等元素的生物地球化学循环起着重要作用, 是海洋碳循环重要而活跃的组成部分<sup>[7-8]</sup>。

海水中 CDOM 的来源及组成成分复杂, 因此陆源与海洋自生之间、不同河流输入的陆源 CDOM 之间、海水表层与深层的 CDOM 之间, 都可能表现出不同的光化学活性<sup>[9]</sup>。CDOM 具有光谱吸收性质<sup>[10]</sup>, 其特征光谱不仅可以表征 DOC 含量, 还可示踪 DOM 在海水中的迁移转化规律。海水中的 CDOM 对紫外光和蓝光波段有强烈的吸收作用, 其光吸收特性都表现为从紫外可见光区向红外光谱区域逐渐递减, 吸收系数与波长表现为指数关系<sup>[11-12]</sup>。吸收光谱是常用的表征 CDOM 特征的手段之一, 吸收系数、光谱斜率 S、比紫外吸光度 (SUVA<sub>254</sub>)、特定波长下吸收系数的比值等均是常用指标。紫外可见光谱分析技术因其高灵敏性已成为研究 CDOM 来源、组成和光谱特征的重要示踪手段, 目前已被广泛应用于海洋、河口和沉积物等生态系统中 DOM 的特征研究, CDOM 的研究在海洋生物地球化学、海洋光化学、

海洋遥感等研究领域都具有重要意义<sup>[13-15]</sup>。

中国是世界第一海水养殖大国, 贝类、藻类等养殖生物的碳汇功能受到越来越多的关注<sup>[16-17]</sup>。海水养殖系统因其强烈的人为活动干扰和活跃的碳循环显得尤为独特<sup>[18]</sup>, 养殖活动会影响水中溶解有机物 (DOM) 的组成特征, 改变海水中的碳酸盐体系<sup>[19-20]</sup>。目前的研究多集中于实验室条件或单一养殖系统中 CDOM 的研究<sup>[21-22]</sup>, 而贝藻养殖系统中 CDOM 的迁移转化过程及其空间分布等特性能真实反映养殖活动在海域碳循环中的作用。桑沟湾是我国北方最具有代表性的海水养殖海区 and 海水养殖基地, 从湾内向外海区依次排列的贝类 [牡蛎、栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 等] 养殖区、贝藻 [海带 (*Saccharina japonica*)] 混养区、大型藻类养殖区, 形成了一种养殖种类、方式与布局具有自身特征的多元养殖模式<sup>[23]</sup>。本研究利用紫外可见光谱分析技术, 选择贝藻生长旺盛的春季, 对桑沟湾海域不同养殖区域的 CDOM 的吸收特性和空间分布特征进行研究, 以阐释桑沟湾海域 CDOM 的主要来源及垂直迁移规律, 为全面了解海水养殖的碳汇效应提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

于 2021 年春季 (3 月) 分区域对桑沟湾进行了调查 (图 1, 箭头表示桑沟湾落潮时的海流方向, 涨潮时海流方向与之相反<sup>[24-25]</sup>), 从湾内向外海调

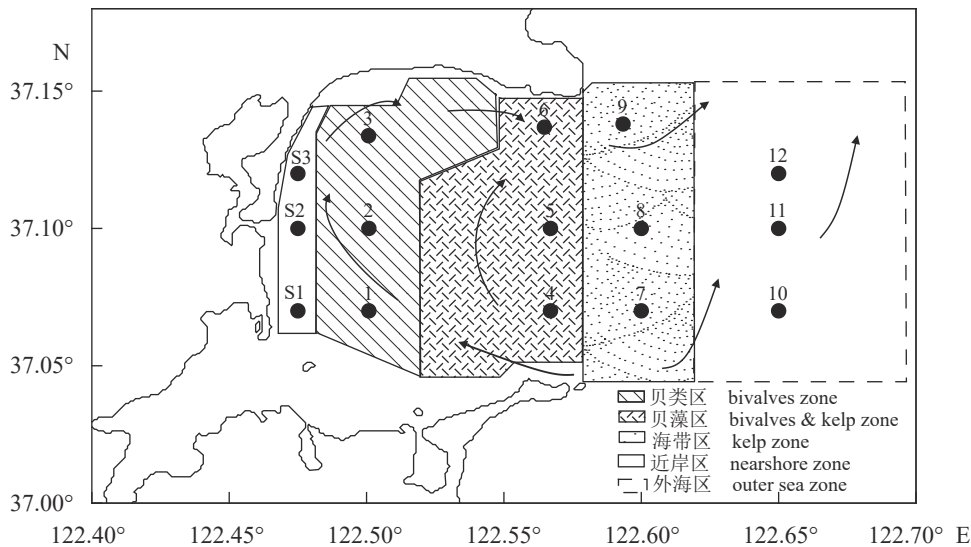


图 1 桑沟湾采样站位

Fig. 1 Sampling stations in Sanggou Bay

查区域依次为近岸区(非养殖区, S1~S3)、贝类区(1~3)、贝藻区(混养区, 4~6)、海带区(7~9)和外海区(非养殖区, 10~12), 调查站位共计 15 个。

## 1.2 样品采集与预处理

海水样品通过容积 5 L 的采水器采集, 依据不同站位水深, 每个站位分别采集表层、中层和底层海水, 带回后立即经 GF/F 膜过滤后盛装至 30 mL 棕色玻璃瓶, 沉积物样品通过小型抓斗采泥器 (van Veen grab 250 cm<sup>2</sup>; 德国) 获取, 采集表层沉积物至聚乙烯封口袋中冷冻保存带回实验室, 通过低温高速离心机 5 000 r/min 离心 10 min 得到沉积物间隙水<sup>[26]</sup>, 将间隙水盛装于 30 mL 棕色玻璃瓶中避光冷冻保存。上述样品均用于 CDOM 的紫外可见光谱扫描和溶解有机碳 (DOC) 指标的测定, 滤液于 -20 °C 避光保存直至测量前解冻<sup>[15, 20]</sup>。

## 1.3 数据分析

DOC 采用高温催化氧化法<sup>[27]</sup>测定, 单位为 mg/L, 样品解冻至室温, 所用仪器为总有机碳分析仪 (Elementar Vario TOC Select, 德国), 具体测定流程根据《海洋监测规范》(GB 17378.4—2007) 进行, 测量水样为过滤后水样, 总有机碳 (TOC) 浓度即为水体中 DOC 浓度。

CDOM 吸收光谱采用岛津 UV-2550 紫外可见分光光度计进行测定, 以超纯水作为空白进行基线扫描, 将“样品采集与预处理”中所述样品在 200~800 nm 范围进行光谱扫描, 扫描间隔 1 nm, 所有吸光度值均扣除 680~700 nm 波长范围的均值进行折射率差异和基线漂移校正。吸收系数按以下公式计算<sup>[10]</sup>:

$$a(\lambda) = 2.303 \times A(\lambda)/L$$

式中,  $a(\lambda)$  为波长  $\lambda$  时的吸收系数, 单位为 /m;  $A(\lambda)$  为波长  $\lambda$  时的吸光度,  $L$  为比色皿长度, 单位为 m。本研究选用 355 nm 处的吸收系数  $a(355)$  来表示 CDOM 的相对浓度<sup>[28]</sup>。

光谱斜率  $S_{275-295}$  为 275~295 nm 波长段采用非线性拟合获得的光谱斜率, 可表征分子质量、光化学反应活性及 CDOM 的组成特征信息。光谱斜率 ( $S_{275-295}$ ) 计算公式<sup>[29]</sup>:

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \times \exp[S(\lambda_0 - \lambda)]$$

式中,  $a(\lambda_0)$  是参照波长  $\lambda_0$  时的吸收系数, 本研究中  $\lambda_0$  选择 355 nm 为参考波长。

SUVA<sub>254</sub> 是指波长为 254 nm 的吸收系数与该

溶液 DOC 浓度之比, 可示踪水生系统中 CDOM 的芳香性<sup>[12]</sup>, SUVA<sub>254</sub> 计算公式:

$$\text{SUVA}_{254} = a(254)/C_{\text{DOC}}$$

式中, SUVA<sub>254</sub> 为比紫外吸光度, 单位为 L/(mg·m);  $a(254)$  为波长 254 nm 的吸收系数, 单位为 /m,  $C_{\text{DOC}}$  为 DOC 浓度, 单位为 mg/L。

特定波长下的吸收系数之比 ( $E_2 : E_3$ ) 常用来示踪 CDOM 相对分子质量的变化情况<sup>[30]</sup>, 公式:

$$E_2 : E_3 = a(250)/a(365)$$

式中,  $E_2 : E_3$  为水样在波长 250 和 365 nm 处吸收系数的比值, 无量纲;  $a(250)$  为波长 250 nm 时的吸收系数;  $a(365)$  为波长 365 nm 时的吸收系数。

实验数据采用 Microsoft Excel 2010、Surfer 8.0 和 Matlab 统计软件进行分析及绘图, 采用 SPSS 22.0 软件对组间差异进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA),  $P < 0.05$  为差异显著,  $P < 0.01$  为差异极显著。

## 2 结果

### 2.1 桑沟湾春季 $a(355)$ 的平面分布特征

桑沟湾春季不同水层的  $a(355)$  的平面分布特征见图 2。表层  $a(355)$  变化范围为 0.46~1.60/m, 均值为 (1.10±0.33)/m,  $a(355)$  从近岸区向贝藻区逐渐降低, 之后在藻类区升高后向外海区逐渐降低; 中层  $a(355)$  变化范围为 0.38~1.35/m, 均值为 (0.99±0.27)/m,  $a(355)$  从近岸区向贝类区逐渐升高, 之后在贝藻区降低后向外海逐渐升高; 底层  $a(355)$  变化范围为 0.23~1.31/m, 均值为 (0.81±0.34)/m,  $a(355)$  从近岸区向贝藻区逐渐降低, 之后在海带区升高后向外海逐渐降低; 沉积物间隙水  $a(355)$  变化范围为 2.43~9.09/m, 均值为 (5.04±2.11)/m,  $a(355)$  从近岸区向贝藻区逐渐降低, 之后在海带区向外海逐渐升高。

### 2.2 桑沟湾不同区域 $a(355)$ 的均值比较

桑沟湾海带区表层水体的  $a(355)$  均值显著高于底层水体, 并显著高于其他各区; 近岸区  $a(355)$  均值显著高于贝藻区和外海区 ( $P < 0.05$ ), 而贝类区和贝藻区差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 中层贝类区和外海区  $a(355)$  均值显著高于其他各区 ( $P < 0.05$ ), 贝藻区  $a(355)$  均值显著低于海带区和外海区 ( $P < 0.05$ ); 底层海带区和外海区  $a(355)$  均值显著高于其他各区 ( $P < 0.05$ ), 而近岸区、贝类区和贝藻



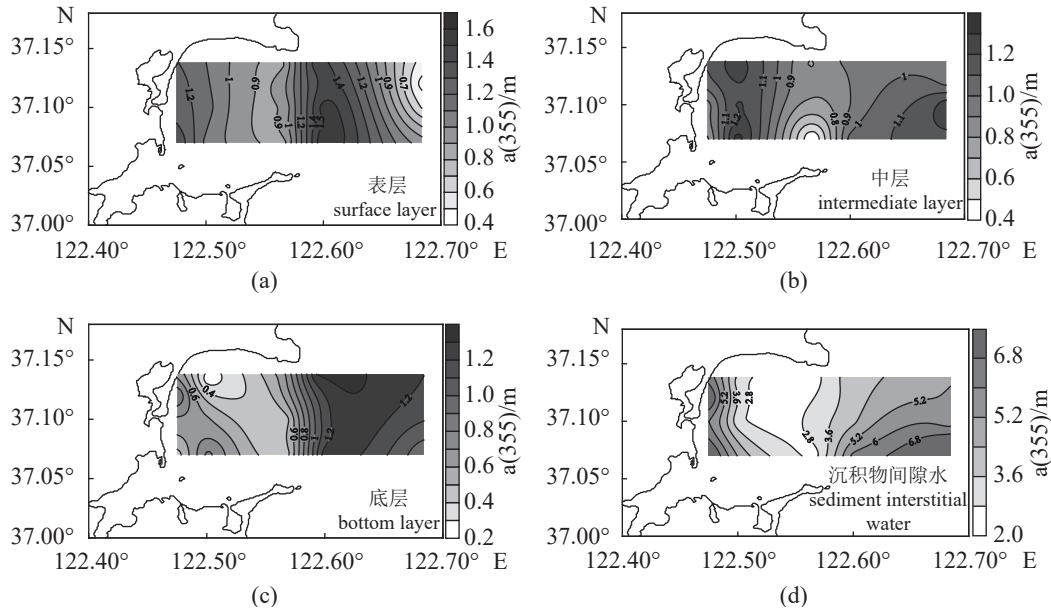


图2 桑沟湾春季不同水层 a(355) 的平面分布特征

Fig. 2 Plane distribution of a(355) in different water layers of Sanggou Bay in spring

区 a(355) 均值差异不显著 ( $P>0.05$ )。沉积物间隙水近岸区和外海区 a(355) 均值显著高于其他各区 ( $P<0.05$ )，贝藻区和贝类区 a(355) 均值显著低于其他各区，而海带区和外海区 a(355) 均值差异不显著 ( $P>0.05$ )，各区域沉积物间隙水 a(355) 是其表层、中层和底层水体之和的 1.3~2.5 倍 (图 3)。

### 2.3 桑沟湾不同区域水体中 a(355) 断面垂直分布特征

从湾内到外海依次以 S2、2、5、8 和 11 这 5 个站位作为一个断面，将各站位对应的表层、中层和底层水体的 a(355) 做垂直等值线分布图 (图 4)。结果显示，近岸区 a(355) 垂直变化范围为 0.68~1.30 /m，均值为 (0.96±0.31) /m，近岸区 a(355) 从表层向底层逐渐降低；贝类区 a(355) 垂直变化范围为 0.56~1.27 /m，均值为 (0.98±0.37) /m，贝类区 a(355) 从表层向底层先升高后降低；贝藻区 a(355) 垂直变化范围为 0.52~0.89 /m，均值为 (0.69±0.19) /m，贝藻区 a(355) 从表层向底层逐渐降低；海带区 a(355) 垂直变化范围为 0.95~1.53 /m，平均值为 (1.24±0.29) /m，海带区 a(355) 从表层向底层先降低后升高；外海区 a(355) 垂直变化范围为 0.67~1.13 /m，均值为 (0.95±0.25) /m，外海区 a(355) 从表层向底层逐渐升高。

### 2.4 桑沟湾春季光谱斜率的平面分布特征

桑沟湾春季表层  $S_{275-295}$  变化范围为 0.014~0.030，均值为 0.020±0.005，从湾内向外海呈现出

逐渐升高的趋势；中层  $S_{275-295}$  变化范围为 0.013~0.032，均值为 0.020±0.005，从近岸区向海带区呈现出逐渐升高的趋势，之后向外海区递减；底层  $S_{275-295}$  变化范围为 0.013~0.036，均值为 0.020±0.006，在贝类区北部出现高值区，外海区则从北部海域向南部递增；沉积物间隙水  $S_{275-295}$  变化范围为 0.013~0.036，均值为 0.020±0.006，在近岸区和贝类区出现高值区，从近岸区向外海区呈现出逐渐降低的趋势 (图 5)。

### 2.5 桑沟湾不同区域光谱斜率的均值比较

桑沟湾表层海带区和外海区  $S_{275-295}$  均值显著高于其他各区 ( $P<0.05$ )，近岸区、贝类区和贝藻区的  $S_{275-295}$  均值差异不显著 ( $P>0.05$ )；中层近岸区、贝类区和贝藻区的  $S_{275-295}$  均值差异不显著，海带区和外海区  $S_{275-295}$  均值差异也不显著，但海带区和外海区  $S_{275-295}$  均值显著高于其他各区 ( $P<0.05$ )；底层贝类区  $S_{275-295}$  显著高于近岸区和外海区，贝类区、贝藻区和海带区的  $S_{275-295}$  均值差异不显著；沉积物间隙水外海区和海带区  $S_{275-295}$  显著低于其他各区，而贝类区  $S_{275-295}$  显著高于其他各区 ( $P<0.05$ ) (图 6)。

### 2.6 桑沟湾不同区域光谱斜率垂直分布特征

桑沟湾春季近岸区  $S_{275-295}$  均值垂直变化范围为 0.015~0.025，平均值为 0.019±0.004，从表层向底层逐渐升高；贝类区  $S_{275-295}$  均值垂直变化范围为 0.018~0.029，平均值为 0.023±0.005，从表层向

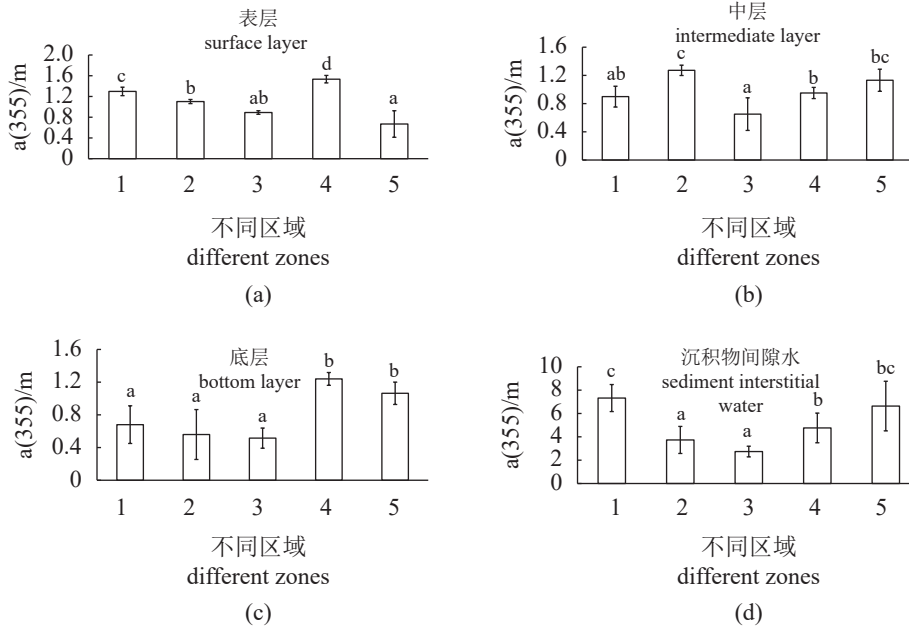


图3 桑沟湾春季不同区域 a(355) 的均值比较

1. 近岸区, 2. 贝类区, 3. 贝藻区, 4. 海带区, 5. 外海区, 图6和图8同。不同字母表示差异显著,  $P < 0.05$ , 图6同。

Fig. 3 Mean comparison of a (355) in different zones of Sanggou Bay in spring

1. nearshore zone, 2. bivalves zone, 3. bivalves & kelp zone, 4. kelp zone, 5. outer sea zone, the same as in Fig.6 and Fig.8. Different letter superscripts represented significant difference,  $P < 0.05$ , the same as Fig.6.

底层先升高后降低, 并在沉积物间隙水中降低; 贝藻区  $S_{275-295}$  均值垂直变化范围为 0.019~0.022, 平均值为  $0.020 \pm 0.001$ , 从表层向底层逐渐升高; 海带区  $S_{275-295}$  均值垂直变化范围为 0.017~0.027, 平均值为  $0.022 \pm 0.005$ , 从表层向底层先升高后降低; 外海区  $S_{275-295}$  均值垂直变化范围为 0.013~0.026, 平均值为  $0.019 \pm 0.006$ , 从表层向沉积物间隙水中逐渐降低 (图7)。

### 2.7 桑沟湾春季不同区域 CDOM 光学特性

桑沟湾春季各区域海水  $SUVA_{254}$  均值均表现为沉积物间隙水显著高于其他各个水层 (图8-a), 各区域变化范围为 0.41~2.19 L/(mg·m)。在水平分布上, 表层海带区  $SUVA_{254}$  均值显著高于近岸区和贝类区 ( $P < 0.05$ ), 略高于贝藻区和外海区, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 中层外海区  $SUVA_{254}$  均值显著高于近岸区和贝藻区, 与海带区和贝类区差异不显著; 底层近岸区和海带区  $SUVA_{254}$  均值显著高于其他各区 ( $P < 0.05$ ), 贝类区、贝藻区和外海区差异不显著; 沉积物间隙水海带区和外海区  $SUVA_{254}$  均值显著高于其余各区 ( $P < 0.05$ ), 且其余各区差异不显著。在垂直分布上, 外海区沉积物间隙水  $SUVA_{254}$  均值显著高于各水层, 但水体

中各水层差异不显著, 其余各区域  $SUVA_{254}$  均值均呈现出从表层向底层显著升高的趋势。桑沟湾近岸区、贝类区和贝藻区  $E_2 : E_3$  均值均表现为沉积物间隙水高于其他各个水层 (图8-b), 各区域变化范围为 4.60~14.10, 其中近岸区、贝类区和贝藻区  $E_2 : E_3$  均呈现出从表层向底层显著升高的趋势, 海带区和外海区沉积物间隙水  $E_2 : E_3$  显著低于其他各区 ( $P < 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 桑沟湾春季 CDOM 空间分布特性

养殖生物通过自身代谢和排泄可向海水中释放大量的有机物, 影响着海水中 DOM 库的组成和分布<sup>[31]</sup>。特定波长 (355 nm) 下的吸收系数常与 CDOM 的浓度成正比, 常被用于表征 CDOM 的含量<sup>[12]</sup>。桑沟湾是中国北部沿海最大的海水养殖基地之一, 是以规模化筏式贝藻养殖为主的特色养殖海湾, 通过光学手段可阐释不同养殖种类对海水 CDOM 分布的影响。研究表明, 近海海域 CDOM 受陆源输入和生物现场活动的影响, 而在受人类活动影响显著的海域, 如养殖活动、土壤有机物的溶解释放和人为污染排放均会显著影响

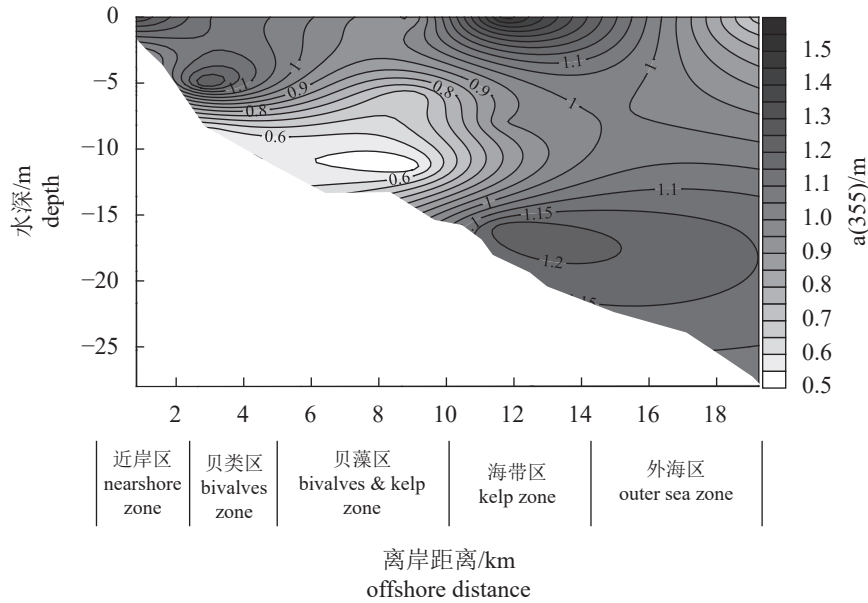


图 4 桑沟湾春季不同区域水体中 a(355) 断面垂直分布特征

Fig. 4 Vertical distribution of a(355) from middle transect in different zones of Sanggou Bay in spring

CDOM 的产生及其分布<sup>[32-33]</sup>。从平面分布上来看, 桑沟湾表层和底层 a(355) 均呈现出从近岸区向贝藻区逐渐降低, 在海带区升高后向外海逐渐降低的趋势 (图 2), 从不同区域均值比较上来看, 表层和底层海带区的 a(355) 均处于最高水平, 且表层和沉积物间隙水中近岸区的 a(355) 均显著高于相邻的贝类区 (图 3), 近岸区 CDOM 分布可能受陆源输入影响较强, 而海带养殖活动是导致海带区 CDOM 浓度较高的主要因素。桑沟湾沿岸的沽河、崖头河、桑干河等是陆源物质进入桑沟湾的主要通道<sup>[34]</sup>, 大量有机物质输入近岸区, 为该区域带来丰富的 CDOM, 成为近岸区的光吸收的主要来源。本研究结果与胶州湾、象山港等养殖海湾研究结果一致<sup>[35-36]</sup>。

大型藻类释放出的光合产物中, 相当一部分是黄棕色的溶解性有机物, 是近岸海水中 CDOM 的主要来源之一<sup>[37]</sup>, 本研究的结果显示, 高密度、规模化的海带养殖是桑沟湾 CDOM 的主要贡献者之一。此外, 沉积物间隙水的 a(355) 从近岸区向贝藻区逐渐降低, 之后在海带区向外海逐渐升高, 但海带区和外海区差异不显著 (图 3), 表明从湾内到外海陆源输入对桑沟湾 CDOM 的分布影响逐渐减弱, 而海带养殖活动带来的影响逐渐增强。大型海藻生长过程中会产生大量的碎屑与溶解有机碳, 大部分能通过海流等因素转移到周边环境或输送到深远海及其沉积物中<sup>[38-39]</sup>, 本研究与这一研究结论相符, 海带养殖活动及海流输送 (图 1)

是影响桑沟湾海带区和外海区 CDOM 分布的主要因素之一。

海水中的溶解有机物 (DOM) 向沉积物中垂直迁移的显著<sup>[40]</sup>, DOM 受光矿化或光漂白作用, 在沉降迁移过程中异常微生物驱动着 DOM 的转化和封存<sup>[41]</sup>。经典生物泵 (BP) 及微型生物碳泵 (MCP) 对海洋 CDOM 向远海及沉积物中迁移和埋藏起着重要的贡献<sup>[42-43]</sup>。桑沟湾春季不同区域 a(355) 在垂直方向的分布特征显示, 近岸区和贝藻区 a(355) 从表层向底层逐渐降低, 主要原因可能是该季节表层光合作用、陆源输入及海带养殖释放大量的 CDOM, 同时 CDOM 在垂直方向上受微生物降解作用, 导致其底层浓度低于表层<sup>[44]</sup>。海带区 a(355) 从表层向底层先降低后升高, 但表层 a(355) 显著高于底层, 表明高密度、规模化的海带养殖活动释放大量的 CDOM<sup>[45]</sup>, 导致海带区表层 CDOM 高于底层。桑沟湾春季各区域的沉积物间隙水 a(355) 是表层、中层和底层之和的 1.3~2.5 倍, 暗示着海水中的 CDOM 从水体向沉积物间隙水中富集并逐渐累积。沉积物间隙水中通常有相当含量的 CDOM, 其中的 CDOM 浓度可达海水水体的 10 倍以上, 这与沉积埋藏的颗粒有机物 (POM) 降解、再矿化以及 MCP 对溶解有机质的转化和输送有关<sup>[46]</sup>, 陆源和海源有机物中的活性成分会在微生物作用下转化为较惰性的组分, 可被长久封存于沉积物中<sup>[47]</sup>。

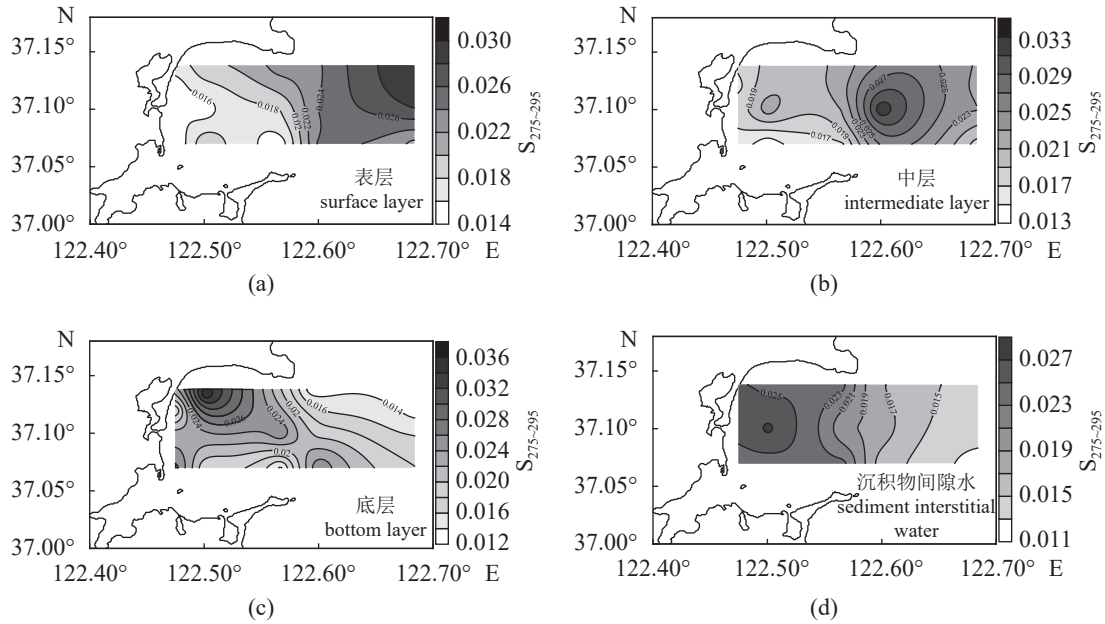


图 5 桑沟湾春季不同水层  $S_{275-295}$  平面分布特征

Fig. 5 Plane distribution of  $S_{275-295}$  in different water layers of Sanggou Bay in spring

### 3.2 桑沟湾春季 CDOM 来源及其迁移转化过程

$S_{275-295}$  可示踪 CDOM 在 UV-B 短波段内的光化学反应, 能较好地预测 CDOM 的来源,  $S_{275-295}$  值越大, 表示海源有机质较多, 反之则陆源有机质较多<sup>[12]</sup>。从水平分布上来看, 桑沟湾春季表层和中间层从近岸区到海带区呈现出逐渐升高的趋势 (图 5), 且外海区和海带区  $S_{275-295}$  均值显著高于其他各区 (图 6), 表明海带区和外海区海源有机质占主要成分, 而近岸区有最低值, 表示陆源有机质占主要成分, 人类活动排放给近岸区带来了丰富的陆源物质, 引起近岸区  $S_{275-295}$  降低, 而海带的规模化养殖向海水中释放了大量的 DOM 和颗粒有机物 (POM), 通过海流输送作用影响<sup>[37]</sup>, 从而导致海带区及外海区  $S_{275-295}$  较高。底层  $S_{275-295}$  贝类区均值显著高于其他各区, 表明底层贝类区海源有机质占主要成分, 滤食性贝类通过摄食活动可将海水中的部分颗粒有机物 (POC) 滤除, 实现 POC 在食物链中的进一步传递和转化, 并且贝类排放大量的生物性沉积物, 这些生物性沉积物不仅大量堆积在养殖区底部, 还会向水体中释放大量溶解有机物<sup>[48]</sup>, 从而导致贝类区底层 CDOM 以海源有机质为主。沉积物间隙水  $S_{275-295}$  从湾内向外海呈现出逐渐降低的趋势, 表明近岸区和贝类区沉积物间隙水中海源有机质占主要成分, 可能是由于近岸区和贝类区水质清澈、光投

射能力强, 而陆源输入的有机质可能由于富里酸和类蛋白质等相对活性的物质含量较高<sup>[49]</sup>, 易受到光降解的影响而很快被分解, 不能被富集在近岸的沉积物间隙水中, 加之桑沟湾海水滞留时间较长、规模化的海水养殖活动及海流输送作用等因素的综合作用<sup>[50]</sup>, 导致近岸区和贝类区沉积物间隙水中的海源有机质被有效地埋藏和富集。

光谱斜率  $S_{275-295}$  常用于样品中富里酸和腐殖酸比值的半定量分析, 富里酸含量越高,  $S_{275-295}$  值越大, 反之越小<sup>[10]</sup>, 因此常用来示踪水体中 CDOM 的迁移转化过程<sup>[51]</sup>。从垂直分布上看, 桑沟湾近岸区  $S_{275-295}$  从表层向底层逐渐升高, 表明从表层到底层腐殖酸类物质含量逐渐降低, 沉积物中积累的富里酸类物质含量较高, 该区域从表层到底层的海水腐质化程度逐渐降低, 而陆源输入可能是影响该区域 CDOM 迁移转化的主要因素<sup>[28]</sup>。贝类区  $S_{275-295}$  均从表层向底层先升高后降低, 并在沉积物间隙水中降低, 表明贝类间隙水中 CDOM 的腐质化程度比底层水高, 贝类区 CDOM 的迁移转化可能受陆源输入、现场浮游植物光合作用和养殖活动的共同影响<sup>[46-52]</sup>。贝藻区  $S_{275-295}$  从表层向底层逐渐升高, 表明从表层到底层的富里酸类物质含量逐渐升高, 贝藻区中 CDOM 的腐质化程度从表层到底层逐渐降低, 该区域由于水体透明度相对较低, 光投射能力较弱,



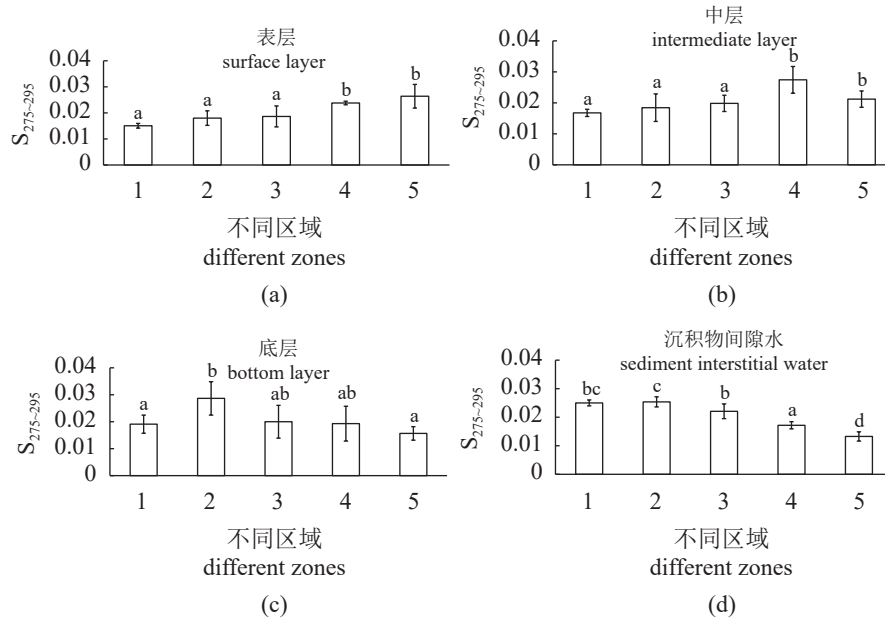


图 6 桑沟湾春季不同区域  $S_{275-295}$  的均值比较

Fig. 6 Mean comparison of  $S_{275-295}$  in water and pore water in different zones of Sanggou Bay in spring

导致水体光降解程度较低, 因此光降解和贝藻养殖活动可能是影响该区域 CDOM 迁移转化的主要因素<sup>[49]</sup>。海带区  $S_{275-295}$  从表层向底层先升高后降低, 即海带区 CDOM 中腐殖酸类物质含量从表层到底层先降低后升高, 暗示着海带区 CDOM 的腐质化程度从表层到底层先降低后升高, 并在沉积物中积累, 海带区 CDOM 的迁移转化可能受海带养殖活动和微生物降解的影响<sup>[53]</sup>, 而外海区  $S_{275-295}$  从表层向沉积物间隙水中逐渐降低, 即外海区 CDOM 中腐殖酸类物质从表层到底层逐渐升高, 表明外海区 CDOM 的腐质化程度从表层到底层逐渐增大, 并在沉积物中积累, 微生物降解和海流输运可能是影响外海区 CDOM 迁移转化的主要因素<sup>[54]</sup>。

### 3.3 桑沟湾春季海水养殖的碳汇效应

CDOM 普遍存在于海洋 DOM 库中, 在调节水生系统生物生产方面发挥着重要作用, 其地球化学过程是全球碳通量和海洋碳循环的重要而活跃的组成部分<sup>[55]</sup>。中国是世界上海水养殖规模最大的国家, 通过开展近海养殖增加海洋碳汇是应对全球气候变化和践行“海洋负排放”的重要途径<sup>[56]</sup>。利用本研究的结果可进一步阐释海水养殖对碳汇的贡献。特定波长下的吸收系数之比常用来示踪 CDOM 分子质量的变化情况,  $E_2 : E_3$  与 CDOM 的分子质量大小呈反比关系<sup>[30]</sup>。桑沟湾表

层外海区  $E_2 : E_3$  小于其他各区域, 表明外海区表层 CDOM 平均分子质量处于较高水平; 而海带区和外海区沉积物间隙水的  $E_2 : E_3$  小于其他各区域, 表明这两个区域 CDOM 的平均分子质量同样处于较高水平。研究表明, 海水 CDOM 中的富里酸相对于类腐殖质来说分子质量较低, 而类腐殖质是一类潜在惰性有机质, 相比多糖、蛋白和氨基酸等有机物更不易被微生物分解代谢<sup>[57]</sup>, 而微生物碳泵 (MCP) 理论指出海洋中的微型生物是惰性溶解有机物的主要贡献者<sup>[43]</sup>, Hopkinson 等<sup>[58]</sup>指出微型生物对 DOM 的组分进行了改造, 同时改变了有机碳与其他元素的比例, 即活性物质向惰性物质的转变过程中提高了分子的 C : N : P 比例, 本研究表明, 海带区的规模化养殖活动向养殖海区及邻近海域贡献了较多的惰性溶解有机物<sup>[20, 37, 51]</sup>, 而惰性溶解有机质可在海水中长久储存, 构成了养殖碳汇中稳定的惰性溶解有机碳库<sup>[53, 59]</sup>。

$SUVA_{254}$  是表征水生系统中 DOC 特性的重要指标, 物质的芳香性随着其比值的增加而增加,  $SUVA_{254}$  值越高, CDOM 芳香性越强<sup>[11, 60]</sup>。桑沟湾贝类区  $SUVA_{254}$  从表层到底层逐渐增大 (图 8), 表明该区域从表层到底层 CDOM 的芳香性逐渐增强, 并在沉积物间隙水中达到最强, 水体中的生物可利用性溶解有机物逐渐被分解, 惰性溶解有机物含量不断增加<sup>[20]</sup>。而贝藻区和海带区的  $SUVA_{254}$  变化趋势一致, 从表层向沉积物间隙水中先降低



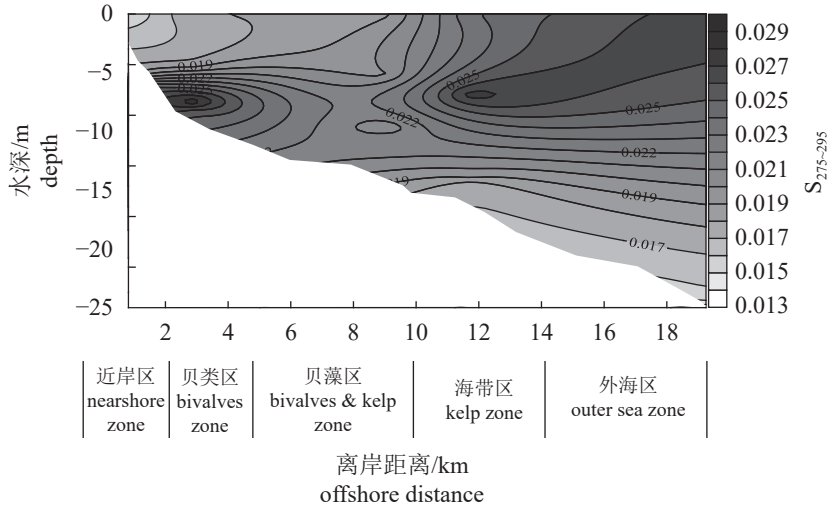


图 7 桑沟湾春季不同区域  $S_{275-295}$  均值垂直分布特征

Fig. 7 Vertical distribution of  $S_{275-295}$  average values in different zones of Sanggou Bay in spring

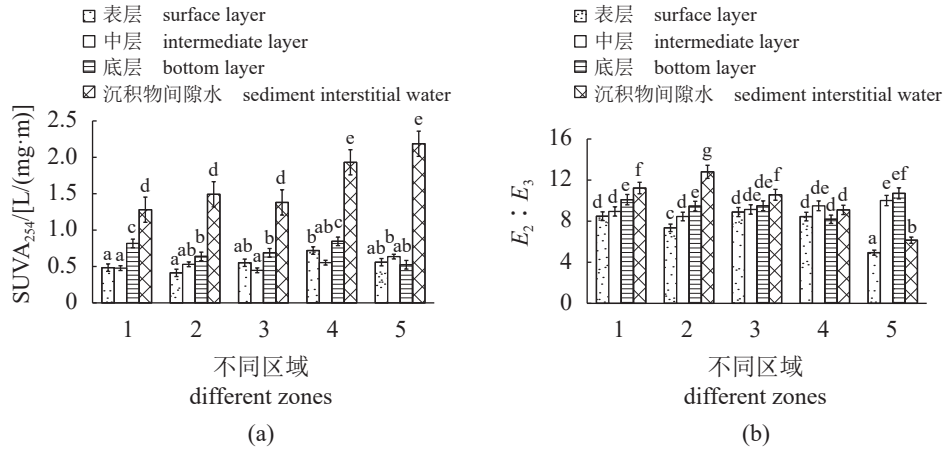


图 8 桑沟湾春季不同区域  $SUVA_{254}$  和  $E_2 : E_3$  均值变化

各区域各水层数据列上标不同字母表示差异显著,  $P < 0.05$ 。

Fig. 8 Variations of  $SUVA_{254}$  and  $E_2 : E_3$  average values in different zones of Sanggou Bay in spring

Different letter superscripts represent significant differences in the different zones and layers,  $P < 0.05$ .

后升高 (图 8), 表明该区域 CDOM 的芳香性先降低后逐渐增强并在沉积物间隙水中达到最强, 表层芳香性略高于中层可能是由于表层光降解作用较强, 导致表层 DOM 的平均分子量变大, 芳香性和腐殖质程度增加<sup>[61-62]</sup>。桑沟湾春季海带区和外海区沉积物间隙水中的  $SUVA_{254}$  显著高于其他各区 (图 8), 表明这两个区域沉积物间隙水中 CDOM 的芳香性较强, 即腐殖质类物质含量较高, 暗示着海带养殖活动有较强的碳汇效应, 并通过海流作用向外海输送<sup>[20, 45]</sup>, 本研究与厦门湾和象山港研究结果相符<sup>[8, 36]</sup>, 沉积物间隙水中的 CDOM 更富惰性组分, 且远海端沉积物间隙水中 CDOM 的芳香性要高于近岸端, 其性质主要取决

于更小空间尺度的生物地球化学过程<sup>[63-64]</sup>, 桑沟湾内高密度的筏式贝藻养殖向外海输送了较多的颗粒态和溶解态有机物, 这些活性的组分会在微生物作用下转化为更多惰性的溶解有机质, 并通过 BP 机制向深水 and 沉积物中迁移<sup>[43]</sup>, 同时外海区由于水体较深, 沉积物间隙水中的 CDOM 也受到较少的光降解, 高芳香度的 CDOM 在沉积物间隙水中得以被选择性保存<sup>[63-66]</sup>。将来需要进一步对比桑沟湾 CDOM 光学特性的季节变化, 以期更全面认识海水养殖的碳汇效应。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 1996, 51(4): 325-346.
- [ 2 ] Hulatt C J, Thomas D N, Bowers D G, *et al.* Exudation and decomposition of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) from some temperate macroalgae[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 84(1): 147-153.
- [ 3 ] Vantrepotte V, Danhiez F P, Loisel H, *et al.* CDOM-DOC relationship in contrasted coastal waters: implication for DOC retrieval from ocean color remote sensing observation[J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 33-54.
- [ 4 ] Coble P G. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color[J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107(2): 402-418.
- [ 5 ] Chen R F, Bissett P, Coble P, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) source characterization in the Louisiana Bight[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 89(1-4): 257-272.
- [ 6 ] Andrew A A, Del Vecchio R, Subramaniam A, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Equatorial Atlantic Ocean: optical properties and their relation to CDOM structure and source[J]. *Marine Chemistry*, 2013, 148: 33-43.
- [ 7 ] Coble P G, Del Castillo C E, Avril B. Distribution and optical properties of CDOM in the Arabian Sea during the 1995 Southwest Monsoon[J]. *Deep Sea Research Part II: topical Studies in Oceanography*, 1998, 45(10-11): 2195-2223.
- [ 8 ] 程远月, 郭卫东, 胡明辉. 近岸沉积物再悬浮期间所释放溶解有机物的荧光特征[J]. *地球化学*, 2008, 37(1): 51-58.
- Cheng Y Y, Guo W D, Hu M H. Fluorescence characteristics of dissolved organic matter released from estuarine sediments during resuspension[J]. *Geochimica*, 2008, 37(1): 51-58 (in Chinese).
- [ 9 ] 郭卫东, 程远月, 余翔翔, 等. 海洋有色溶解有机物的光化学研究进展[J]. *海洋通报*, 2008, 27(3): 107-114.
- Guo W D, Cheng Y Y, Yu X X, *et al.* An overview of the photochemistry of marine chromophoric dissolved organic matter[J]. *Marine Science Bulletin*, 2008, 27(3): 107-114 (in Chinese).
- [10] Stedmon C A, Markager S. Behaviour of the optical properties of coloured dissolved organic matter under conservative mixing[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(5-6): 973-979.
- [11] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(20): 4702-4708.
- [12] Stedmon C A, Markager S, Kaas H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 51(2): 267-278.
- [13] Kowalczyk P, Stedmon C A, Markager S. Modeling absorption by CDOM in the Baltic Sea from season, salinity and chlorophyll[J]. *Marine Chemistry*, 2006, 101(1-2): 1-11.
- [14] Maritorena S, Siegel D A. Consistent merging of satellite ocean color data sets using a bio-optical model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(4): 429-440.
- [15] 梁文健, 秦礼萍, 刘兆冰, 等. 东黄渤海11—12月有色溶解有机质的分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(6): 905-910.
- Liang W J, Qin L P, Liu Z B, *et al.* Spatial distribution of colored dissolved organic matter (CDOM) in the Bohai, Yellow and East China Seas in November and December[J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(6): 905-910 (in Chinese).
- [16] 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 359-365.
- Zhang J H, Fang J G, Tang Q S. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in China to the carbon cycle of coastal ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 359-365 (in Chinese).
- [17] 唐启升, 刘慧. 海洋渔业碳汇及其扩增战略[J]. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 68-73.
- Tang Q S, Liu H. Strategy for carbon sink and its amplification

- fication in marine fisheries[J]. *Engineering Science*, 2016, 18(3): 68-73 (in Chinese).
- [18] Tang Q S, Zhang J H, Fang J G. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO<sub>2</sub> absorption by coastal ecosystems[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 424: 97-104.
- [19] 刘毅, 张继红, 房景辉, 等. 桑沟湾春季海-气界面CO<sub>2</sub>交换通量及其与养殖活动的关系分析[J]. *渔业科学进展*, 2017, 38(6): 1-8.
- Liu Y, Zhang J H, Fang J H, *et al.* Analysis of the air-sea surface carbon dioxide flux and its interaction with aquaculture activities in Sungou Bay[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(6): 1-8 (in Chinese).
- [20] Li H M, Zhang Y Y, Liang Y T, *et al.* Impacts of maricultural activities on characteristics of dissolved organic carbon and nutrients in a typical raft-culture area of the Yellow Sea, North China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 137: 456-464.
- [21] Tanaka Y, Miyajima T, Umezawa Y, *et al.* Net release of dissolved organic matter by the scleractinian coral *Acropora pulchra*[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009, 377(2): 101-106.
- [22] Hambly A C, Arvin E, Pedersen L F, *et al.* Characterising organic matter in recirculating aquaculture systems with fluorescence EEM spectroscopy[J]. *Water Research*, 2015, 83: 112-120.
- [23] 吴文广, 张继红, 王巍, 等. 桑沟湾春季叶绿素a浓度分布及其影响因素[J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4855-4863.
- Wu W G, Zhang J H, Wang W, *et al.* Distribution of chlorophyll-a concentration and its control factors in spring in Sungo Bay[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4855-4863 (in Chinese).
- [24] Ning Z M, Liu S M, Zhang G L, *et al.* Impacts of an integrated multi-trophic aquaculture system on benthic nutrient fluxes: a case study in Sanggou Bay, China[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, 8: 221-232.
- [25] Sun K, Zhang J H, Lin F, *et al.* Evaluating the influences of integrated culture on pelagic ecosystem by a numerical approach: a case study of Sungo Bay, China[J]. *Ecological Modelling*, 2020, 415: 108860.
- [26] 周石磊, 孙悦, 苑世超, 等. 岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析[J]. *环境科学*, 2020, 41(6): 2635-2645.
- Zhou S L, Sun Y, Yuan S C, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and difference analysis of chromophoric dissolved organic matter in sediment interstitial water from Gangnan reservoir[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 2635-2645 (in Chinese).
- [27] Sharp J H, Carlson C A, Peltzer E T, *et al.* Final dissolved organic carbon broad community intercalibration and preliminary use of DOC reference materials[J]. *Marine Chemistry*, 2002, 77(4): 239-253.
- [28] 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 J J, Zhang J, Yang G P. Optical properties of the colored dissolved organic matter in the Yellow Sea and the East China Sea in autumn[J]. *Marine Environmental Science*, 2013, 32(6): 818-823 (in Chinese).
- [29] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains[J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, 26(1): 43-53.
- [30] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, 337(2): 133-149.
- [31] Buschmann A H, Varela D A, Hernández-González M C, *et al.* Opportunities and challenges for the development of an integrated seaweed-based aquaculture activity in Chile: determining the physiological capabilities of *Macrocystis* and *Gracilaria* as biofilters[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2008, 20(5): 571-577.
- [32] Chen Z Q, Li Y, Pan J M. Distributions of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Pearl River Estuary, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1845-1856.
- [33] Kowalczyk P, Stoń-Egiert J, Cooper W J, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter

- (CDOM) in the Baltic Sea by excitation emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2005, 96(3-4): 273-292.
- [34] 刘家琦, 任景玲, 陈晶, 等. 桑沟湾不同形态锰的分布、季节变化及影响因素[J]. *海洋学报*, 2021, 43(2): 16-27. Liu J Q, Ren J L, Chen J, *et al.* Distributions, seasonal variations and influence factors of different manganese species in the Sanggou Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 43(2): 16-27 (in Chinese).
- [35] 任倩倩, 邹立, 于格, 等. 环胶州湾河流入海口CDOM吸收光谱特征[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(8): 1407-1416. Ren Q Q, Zou L, Yu G, *et al.* Optical absorption properties of CDOM at the estuaries of Jiaozhou Bay[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(8): 1407-1416 (in Chinese).
- [36] 赵辰, 周玉萍, 庞宇, 等. 富营养化条件下浙江象山港可溶性有机质的光谱和分子特征初探[J]. *中国科学:地球科学*, 2021, 64(7): 1090-1104. Zhao C, Zhou Y P, Pang Y, *et al.* The optical and molecular signatures of DOM under the eutrophication status in a shallow, semi-enclosed coastal bay in south-east China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(7): 1090-1104 (in Chinese).
- [37] Wada S, Hama T. The contribution of macroalgae to the coastal dissolved organic matter pool[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 129: 77-85.
- [38] Chung I K, Sondak C F A, Beardall J. The future of seaweed aquaculture in a rapidly changing world[J]. *European Journal of Phycology*, 2017, 52(4): 495-505.
- [39] Duarte C M, Wu J P, Xiao X, *et al.* Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation?[J] *Frontiers in Marine Science*, 2017, 4: 100.
- [40] Gihring T M, Lavik G, Kuypers M M M, *et al.* Direct determination of nitrogen cycling rates and pathways in Arctic fjord sediments (Svalbard, Norway)[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(2): 740-752.
- [41] Benner R. Biosequestration of carbon by heterotrophic microorganisms[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2011, 9(1): 75.
- [42] Ducklow H W, Steinberg D K, Buesseler K O. Upper ocean carbon export and the biological pump[J]. *Oceanography*, 2001, 14(4): 50-58.
- [43] Jiao N Z, Herndl G J, Hansell D A, *et al.* Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: long-term carbon storage in the global ocean[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, 8(8): 593-599.
- [44] 王艺超, 刘小艳, 宋贵生, 等. 夏季黄海不同水团溶解有机物分布特征[J]. *海洋学报*, 2019, 41(12): 145-155. Wang Y C, Liu X Y, Song G S, *et al.* Distribution of dissolved organic matter in different water masses in the Yellow Sea in summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(12): 145-155 (in Chinese).
- [45] Ortega A, Gherini S A, Alam I, *et al.* Important contribution of macroalgae to oceanic carbon sequestration[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(9): 748-754.
- [46] Chen M L, Hur J. Pre-treatments, characteristics, and biogeochemical dynamics of dissolved organic matter in sediments: a review[J]. *Water Research*, 2015, 79: 10-25.
- [47] Krause-Jensen D, Duarte C M. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(10): 737-742.
- [48] Crawford C M, Macleod C K A, Mitchell I M. Effects of shellfish farming on the benthic environment[J]. *Aquaculture*, 2003, 224(1-4): 117-140.
- [49] Medeiros P M, Seidel M, Ward N D, *et al.* Fate of the Amazon River dissolved organic matter in the tropical Atlantic Ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(5): 677-690.
- [50] 王波, 游奎, 刘哲, 等. 秋季桑沟湾贝类养殖对海域水质影响的数值研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2007, 37(S1): 47-52,60. Wang B, You K, Liu Z, *et al.* A numerical study of scallop cultivation impacts on the water quality in Sanggou Bay in autumn[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(S1): 47-52,60 (in Chinese).
- [51] Wada S, Aoki M N, Tsuchiya Y, *et al.* Quantitative and qualitative analyses of dissolved organic matter released from *Ecklonia cava* Kjellman, in Oura bay, Shimoda, Izu Peninsula, Japan[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 342: 1-12. 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries



- Biology and Ecology*, 2007, 349(2): 344-358.
- [52] Chari N V H K, Pandi S R, Kanuri V V, *et al.* Structural variation of coloured dissolved organic matter during summer and winter seasons in a tropical estuary: a case study[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 149: 110563.
- [53] 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, 60(12): 2097-2107.
- Zhang Y Y, Zhang J H, Liang Y T, *et al.* Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(12): 2097-2107 (in Chinese).
- [54] Jiao N Z, Wang H, Xu G H, *et al.* Blue carbon on the rise: challenges and opportunities[J]. *National Science Review*, 2018, 5(4): 464-468.
- [55] Urban-Rich J, Fernández D, Acuña J L. Grazing impact on chromophoric dissolved organic matter (CDOM) by the larvacean *Oikopleura dioica*[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 317: 101-110.
- [56] 张继红, 刘纪化, 张永雨, 等. 海水养殖践行"海洋负排放"的途径[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 252-258.
- Zhang J H, Liu J H, Zhang Y Y, *et al.* Strategic approach for mariculture to practice "ocean negative carbon emission"[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 252-258 (in Chinese).
- [57] Druffel E R M, Williams P M, Bauer J E, *et al.* Cycling of dissolved and particulate organic matter in the open ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, 97(C10): 15639-15659.
- [58] Hopkinson C S Jr, Vallino J J. Efficient export of carbon to the deep ocean through dissolved organic matter[J]. *Nature*, 2005, 433(7022): 142-145.
- [59] Hansell D A. Recalcitrant dissolved organic carbon fractions[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5: 421-445.
- [60] Hur J, Jung K Y, Schlautman M A. Altering the characteristics of a leaf litter-derived humic substance by adsorptive fractionation versus simulated solar irradiation[J]. *Water Research*, 2011, 45(18): 6217-6226.
- [61] Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, 6(11): 572-579.
- [62] Hansen A M, Kraus T E C, Pellerin B A, *et al.* Optical properties of dissolved organic matter (DOM): effects of biological and photolytic degradation[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61(3): 1015-1032.
- [63] Lu Q Y, He D, Pang Y, *et al.* Processing of dissolved organic matter from surface waters to sediment pore waters in a temperate coastal wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 742: 140491.
- [64] Valle J, Harir M, Gonsior M, *et al.* Molecular differences between water column and sediment pore water SPE-DOM in ten Swedish boreal lakes[J]. *Water Research*, 2020, 170: 115320.
- [65] Qualls R G, Richardson C J. Factors controlling concentration, export, and decomposition of dissolved organic nutrients in the Everglades of Florida[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 62(2): 197-229.
- [66] Chen M L, Jaffé R. Photo- and bio-reactivity patterns of dissolved organic matter from biomass and soil leachates and surface waters in a subtropical wetland[J]. *Water Research*, 2014, 61: 181-190.

## Spectral and distribution characteristics of colored dissolved organic matter (CDOM) in Sanggou Bay in spring

WU Wenguang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jihong<sup>2\*</sup>, LIU Yi<sup>2</sup>, WANG Xinmeng<sup>2</sup>,  
YANG Jun<sup>2</sup>, FENG Xu<sup>2</sup>, KANG Qinzi<sup>2</sup>

(1. College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes,

Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao),

Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Colored dissolved organic matter (CDOM) is an important source of carbon in aquatic ecosystems, and the optical properties of dissolved organic matter (DOM) can be used to trace water masses and provide information about the dynamics of the dissolved organic fraction in seawaters. The ultraviolet-visible absorption spectrum was applied to investigate the chemical composition, sources, spatial distribution characteristics and migration and transformation processes of the CDOM in both the water body and interstitial water in Sanggou Bay, a representative semi-enclosed and mariculture bay in Shandong Province, China. The results indicated that, ① the range of absorption coefficient [ $a(355)$ ] was 0.23-9.09 /m in Sungo Bay, there are significant differences in the spatial distribution of different water layers, both the surface layer and bottom layer gradually decreased from the nearshore zone to the bivalves & kelp zone, then it rose in the kelp zone and gradually decreased towards the outer sea zone. The  $a(355)$  in the kelp zone decreased from surface to bottom and then increased, high-density and large-scale kelp mariculture released a large amount of CDOM into the seawater. The  $a(355)$  of sediment interstitial water in each region was 1.3-2.5 times of the sum of the surface, middle and bottom layers, and it was enriched and gradually accumulated in the sediment interstitial water. ② The range of spectral slope ( $S_{275-295}$ ) was 0.013-0.036 in Sanggou Bay, the mean values of  $S_{275-295}$  in outer sea zone and kelp zone were significantly higher than that in other zones, the main components of CDOM are marine organic matter in kelp zone and outer sea zone, and terrigenous organic matter is predominant in the nearshore zone. The content of humic acids in CDOM in the nearshore zone was gradually decreased from the surface layer to the bottom layer, the accumulation of fulvic acid in sediments was high, and kelp zone and outer sea zone showed opposite trend. ③ The range of specific UV absorbance ( $SUVA_{254}$ ) was 4.60-14.10 L/(mg·m) in Sanggou Bay, the  $SUVA_{254}$  of the shellfish zone, the bivalves & kelp zone and the kelp zone showed a trend of increasing gradually from the surface to the bottom layer, and the aromaticity of CDOM was gradually increased and reached the maximum in the sediment interstitial water. The  $SUVA_{254}$  in the sediment interstitial water of kelp zone and outer sea zone were significantly higher than that in other zones. This study showed that large-scale suspended cultivation activities from kelp zone contributed more refractory dissolved organic matter to the mariculture zone and adjacent seawaters, and it implied that kelp mariculture had a strong carbon sink effect and this sequestration was exported to the offshore waters through the current.

**Key words:** colored dissolved organic matter; absorption spectra; mariculture; carbon sequestration; Sanggou Bay

**Corresponding author:** ZHANG Jihong. E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

**Funding projects:** National Key R & D Program of China (2020YFA0607603); National Natural Science Foundation of China (U1906216, 42376160); Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2022QD035); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, YSFRI, CAFS (20603022022012); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA23050402); Marine S & T Fund of Shandong Province for Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (2018SDKJ0501-3)