

2019年长江口及其邻近海域溶解有机物的 分布和季节变化特征

高源, 明玥, 高磊

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 2019年3月和7月分别采集长江口及其邻近海域表层和底层的海水样品, 测定了其中溶解有机碳(DOC)浓度和有色溶解有机物(CDOM)的吸收光谱。本文根据DOC浓度和CDOM吸收系数 a_{254} 、比紫外吸光度 $SUVA_{254}$ 、光谱斜率 $S_{275-295}$ 等参数对该区域溶解有机物(DOM)的分布情况和季节变化进行了研究。结果表明, DOC浓度和 a_{254} 指征的CDOM丰度总体表现出近岸高、外海低的特点; 指征CDOM芳香性的 $SUVA_{254}$ 和指征CDOM平均分子量的 $S_{275-295}$ 分别随着离岸距离的增加逐渐降低和升高, 表明CDOM的芳香性和平均分子量均逐渐降低; 两个航次表层的DOC浓度、CDOM丰度、芳香性及平均分子量均显著高于底层; 7月和3月相比, DOC浓度、CDOM丰度及芳香性较高, 但未发现平均分子量存在显著的季节变化; DOC浓度、 a_{254} 、 $SUVA_{254}$ 、 $S_{275-295}$ 均与盐度呈现显著的相关关系, 其中, DOC浓度、 a_{254} 、 $SUVA_{254}$ 呈现负相关关系, 而 $S_{275-295}$ 呈现正相关关系。上述参数与盐度的相关系数(R^2)表明, DOC和CDOM在3月较为保守, 而在7月(尤其是在表层)不保守程度明显升高。

关键词: 有色溶解有机物; 溶解有机碳; 生物地球化学; 长江口; 东海

中图分类号: P734; X142 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2022)01-0040-08

DOI: 10.13634/j.cnki.mes.2022.01.016

Distributions and seasonal variations of dissolved organic matter (DOM) in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and its adjacent area in 2019

GAO Yuan, MING Yue, GAO Lei

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Surface and bottom seawater samples were collected in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and the adjacent area in March and July 2019. Concentrations of dissolved organic carbon (DOC) and absorption spectra of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) were measured in those samples. During both cruises, concentrations of DOC and abundances of CDOM (reflected by the decreasing a_{254} values) generally decreased from land to sea. At the same time, the decreasing CDOM aromaticity (reflected by the decreasing $SUVA_{254}$ values) and the decreasing overall molecular weights of CDOM (reflected by the increasing $S_{275-295}$ values) were also found. DOC and CDOM generally showed significantly higher abundances, higher aromaticity, and higher molecular weights at the surface layer than those at the bottom of the same station. Moreover, the two components showed higher concentrations or abundances and aromaticity in July than in March, but molecular weights had no significant change. During each of the two cruises, DOC concentrations

收稿日期: 2020-12-26, 修订日期: 2021-03-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0600902); 国家自然科学基金项目(41676066)

作者简介: 高源(1993-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为生源要素近海生物地球化学, E-mail: ygaoecnu@163.com

通讯作者: 高磊(1980-), 博士, 研究员, 主要研究方向为化学海洋学和海洋生物地球化学, E-mail: lgao@skelc.ecnu.edu.cn

and CDOM parameters (a_{254} , $SUVA_{254}$, and $S_{275-295}$) all showed significant correlations with salinity, in which $S_{275-295}$ showed positive correlations while the others showed negative correlations. From the correlation coefficient values (R^2), it can be concluded that DOC and CDOM were more conservative in March than in July, and they were more conservative at the bottom than at the surface in July.

Key words: chromophoric dissolved organic matter; dissolved organic carbon; biogeochemistry; Changjiang (Yangtze River) Estuary; East China Sea

海洋中的溶解有机物 (dissolved organic matter, DOM) 是地球上最大的碳储存库之一。其中, 溶解有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 是 DOM 的主要存在形式, 对 DOM 的生物地球化学行为、海洋乃至全球碳循环具有重要影响^[1]。有色溶解有机物 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 是 DOM 中能吸收紫外光和可见光的部分, 是由腐殖质、富里酸、氨基酸等一系列成分组成的混合物^[2]。海洋中 CDOM 的来源分为陆源和海源, 陆源 CDOM 主要由陆地维管植物在降解过程中的产物构成, 通过河流、地下水等方式输入到近岸海域; 海源 CDOM 则主要由海水中的细菌通过其生命活动产生^[3]。海洋中的 CDOM 一方面可以减少紫外光对水体中浮游生物的危害, 另一方面也会削弱海洋中浮游植物的光合作用, 从而对海洋生态系统产生复杂而深刻的影响^[4]。基于其光学特性, 通过测定 CDOM 吸收光谱得到的相关参数可以作为表征海洋中 DOM 浓度和性质的重要指标, 目前这些参数已广泛应用于海洋环境、化学海洋学、海洋生物地球化学等研究中^[5]。

强烈的人类活动、大量的陆源输入、复杂的环流过程使得在河口海岸及其邻近大陆架区域研究 DOM 的生物地球化学过程具有相当大的挑战性。CDOM 是河口海岸区域 DOM 的主要成分, 在全球某些河口海岸区域其占比甚至高达 70%^[6], 阐明 CDOM 在这些区域的时空变化特征具有重要的研究意义。长江是我国第一大河, 也是世界重要大河之一, 年平均径流量可达 $9 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 其每年向东海输送大量的包括 DOM 在内的陆源物质。长江口环流复杂, 除长江冲淡水以外, 还受到台湾暖流、黑潮等众多水团的影响。同时, 强烈的潮汐过程和长江径流量的季节变化又在不同程度上影响着长江口生源要素的生物地球化学行为^[7]。此外, 长江三角洲和长江

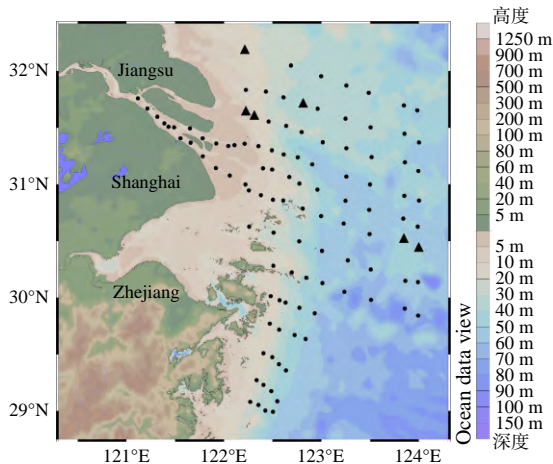
流域是我国经济最发达、人口最密集的地区之一, 长江径流向长江口及其邻近海域排放了大量的污染物。在上述众多影响因素的共同作用下, 长江口及其邻近海域 DOM 分布特征及其生物地球行为尤其复杂, 历来是该区域海洋学中的研究热点和难点。

目前对于长江口及其邻近海域 CDOM 的分布、来源等问题已有相关研究。例如, 朱伟健等^[8]发现潮汐和最大浑浊带对 CDOM 的分布具有显著影响; 范冠南等^[9]发现 CDOM 的丰度和腐殖酸含量由陆向海逐渐降低; 孙语嫣等^[10]研究了长江口 CDOM 的主要来源组成, 并探讨了陆源输入和人类活动等过程的影响。在上述研究基础上, 通过使用两个航次最新的研究数据和较大的样品量, 本文对长江口及其邻近海域 CDOM 的分布特征和季节变化规律进行了更为详细、深入、系统的梳理和总结, 并对 DOC 和 CDOM 在该区域的生物地球化学过程及不保守程度进行了探讨。

1 材料与方法

1.1 样品采集

依托国家自然科学基金委 2019 年 3 月和 7 月在长江口及其邻近海域的共享开放航次, 分别采集了 75 个和 70 个站位的海水样品。研究区域地形和采样站位如图 1 所示。在每个采样站位, 使用 SBE-25 温盐深仪 (CTD; Sea-Bird, 美国) 测定盐度垂直剖面, 使用 Niskin 采水器采集表层 (0 m) 和底层 (最大水深以上 2 m) 的海水样品。样品采集后立即使用 $0.7 \mu\text{m}$ 孔径的 GF/F 玻璃纤维滤膜 (Whatman, 英国) 过滤。滤出液中用于测定 CDOM 吸收光谱的样品于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 避光冷藏保存, 用于测定 DOC 浓度的样品于 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷冻保存。所有样品在航次结束后尽快测定。



(标注为三角的站位仅在 2019 年 7 月进行调查, 其余站位在两个航次均进行了盐度调查; 图中等高线数据来自 Ocean Data View 软件)

图 1 2019 年 3 月和 7 月两个航次的采样站位

Fig. 1 Positions of all sampling stations during the two cruises in March and July, 2019

1.2 样品测定

1.2.1 DOC 浓度

使用 TOC-L 总有机碳分析仪 (Shimadzu, 日本) 测定样品中的 DOC 浓度 (单位: $\mu\text{mol/L}$)。测定过程中样品每次进样量为 $50 \mu\text{L}$, 每个样品重复测定 3 ~ 5 次, 以确保测量结果的标准偏差小于 2%。具体的操作步骤和质量控制流程见文献 [11]。

1.2.2 CDOM 吸收光谱

使用 TU-1810 紫外可见分光光度计 (普析通用, 中国) 测定 CDOM 吸收光谱, 测定波长范围为 $200 \sim 800 \text{ nm}$, 测量间隔为 1 nm 。测样时使用光程为 5 cm 的石英比色皿, 并以测样当天采集的 Milli-Q 水进行基线校准。测得的吸光度需减去 $650 \sim 800 \text{ nm}$ 波长范围的吸光度平均值以消除样品折射等效应的影响。通过公式 (1) 计算得出波长 λ 下的光吸收系数:

$$a_{(\lambda)} = 2.303 \times A_{(\lambda)} / L \quad (1)$$

式中: a 为光吸收系数 (absorption coefficients, 单位: $1/\text{m}$); λ 为波长 (单位: nm); A 为吸光度 (absorbance, 无量纲单位); L 为光程 (单位: m) [12]。

本文使用在 254 nm 处的光吸收系数 (a_{254}) 这一参数指征 CDOM 丰度。波长 $275 \sim 295 \text{ nm}$

处光谱斜率 $S_{275-295}$ 可以大致反映 CDOM 的分子量大小 [13], 其计算方法为: 先将吸收光谱 $275 \sim 295 \text{ nm}$ 波长范围内光吸收系数进行自然对数计算, 然后将这些对数值与对应波长做线性回归, 所得回归直线的斜率即为 $S_{275-295}$ 。通常情况下, $S_{275-295}$ 越大, CDOM 分子量越小。参数 $SUVA_{254}$ 用于指征 CDOM 分子的芳香性 [14], 其计算方法为: 波长 254 nm 处的吸光度 A_{254} 与 DOC 浓度的比值, $SUVA_{254}$ 越高, CDOM 的芳香化程度也越高。

2 结果与讨论

2.1 盐度

2019 年 3 月和 7 月的盐度分布呈现明显的季节变化特征。3 月, 受长江径流量较小和北向季风的影响, 表层长江冲淡水 (盐度 < 31) 向东扩展范围受限 (表层局限在 123.2° E 以西, 底层局限在 122.6° E 以西), 而更多沿着海岸向南扩展 (图 2 a 和图 2 b)。受到台湾暖流的影响, 3 月研究区域东南部出现了盐度大于 34 的水团, 这一入侵的高盐度水团在底层更为明显。7 月, 长江径流量增大 [15], 长江冲淡水向东北、东南等多个方向扩展。低盐度长江冲淡水的扩展使得研究区域表层仅在东部有一小块盐度大于 32 的高盐度水团 (图 2 c)。但 7 月底层东南方向仍有盐度

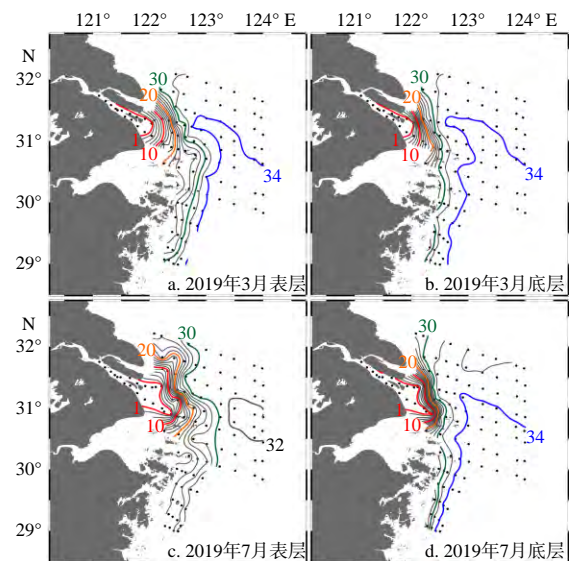


图 2 2019 年 3 月和 7 月两个航次表层和底层盐度的分布
Fig. 2 Distributions of salinity at surface and bottom layers during the two cruises in March and July, 2019

大于 34 的水团入侵, 入侵程度和范围与 3 月底层的情况类似(图 2 d)。本研究两个航次盐度分布和季节变化特征与以往的观测结果基本相符^[16-17]。

2.2 DOC

3 月和 7 月 DOC 浓度分布情况如图 3 所示。两个航次 DOC 浓度总体呈现由陆向海逐渐降低的趋势; 其中高值区均出现在口门处, 说明陆源输入是研究区域 DOC 的主要来源。3 月和 7 月, 表层 DOC 浓度平均值 $[(81 \pm 22) \mu\text{mol/L}]$ 和 $(88 \pm 17) \mu\text{mol/L}$ 均显著高于底层平均值 $[(76 \pm 22) \mu\text{mol/L}]$ 和 $(68 \pm 16) \mu\text{mol/L}$ (配对 t 检验; $p < 0.05$)。在相同采样站位, 虽然 7 月 DOC 平均浓度高于 3 月, 但两者的差异并不显著(配对 t 检验; $p > 0.05$)。口门附近的站位在 3 月具有更高的 DOC 浓度, 该处位于黄浦江入海口及上海市白龙港污水处理厂排放口附近。Guo 等^[18] 先前已经指出长江口较高的 DOC 浓度与黄浦江的排放有关。7 月外海(盐度 > 31) 表层水体普遍具有较高的 DOC 浓度值 ($> 80 \mu\text{mol/L}$), 说明了当地浮游生物释放等过程对 DOC 的贡献。2019 年 3 月和 7 月, DOC 浓度变化范围(表 1)落在了以往 2014 年、2015 年、2016 年观测结果的变化范围内 ($40 \sim 200 \mu\text{mol/L}$)^[19]。

2.3 CDOM

a_{254} 可以指征 CDOM 的丰度, 其数值越高说明 CDOM 丰度越高。在图 4 中, CDOM 均表现出近岸丰度高、外海丰度低的总体分布特征。 a_{254} 的 6 /m 等值线与盐度 30 等值线基本重合, 显示长江冲淡水是研究区域内 CDOM 的主要来源。3 月表层和底层 a_{254} 平均值分别为 $(3.64 \pm 2.21) \text{ /m}$ 和 $(2.94 \pm 1.87) \text{ /m}$, 7 月表层和底层平均

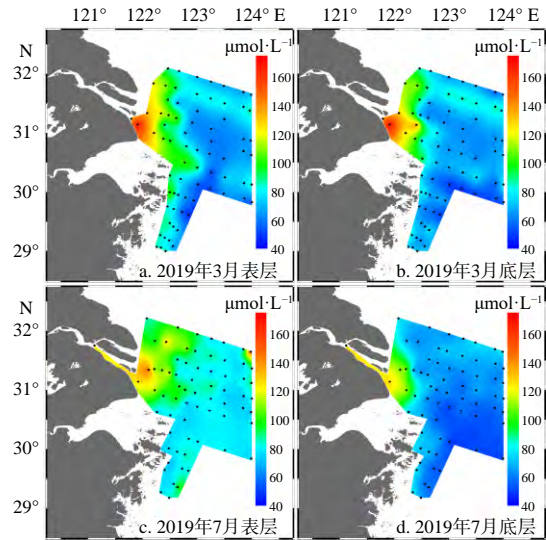


图 3 2019 年 3 月和 7 月两个航次表层和底层 DOC 浓度的分布

Fig. 3 Distributions of DOC concentrations at surface and bottom layers during the two cruises in March and July, 2019

值分别为 $(4.34 \pm 2.38) \text{ /m}$ 和 $(3.11 \pm 2.20) \text{ /m}$ 。在相同采样站位, 7 月的 a_{254} 显著高于 3 月(配对 t 检验; $p < 0.05$), 即夏季 CDOM 的丰度更高。夏季径流量增大带来了更多陆源 CDOM, 同时, 海水中也产生了更多的海源 CDOM, 这一趋势在外海表现得更为明显(图 4 c)。与 2016 年秋季东海区域研究的 a_{254} 变化范围 ($0.71 \sim 3.02$) /m 相比^[20], 2019 年 7 月 a_{254} 的最小值和最大值均更高(表 1)。上述差别可能主要归因于不同的采样季节和不同的采样站位。

$SUVA_{254}$ 和 $S_{275-295}$ 这两个参数可以反映 CDOM 的化学性质^[13-14]。两个航次 $SUVA_{254}$ 值由陆向海逐渐降低, $S_{275-295}$ 则相反(图 5 和图 6)。通过比较表层和底层 $SUVA_{254}$ 和 $S_{275-295}$

表 1 2019 年长江口及其邻近海域 DOC 浓度和 CDOM 相关指标的变化范围

Tab.1 Variation ranges of DOC concentrations and the three CDOM parameters in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and its adjacent sea in 2019

参数	2019年3月		2019年7月	
	表层	底层	表层	底层
DOC / $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	49.2 ~ 167.6	48.0 ~ 169.6	69.7 ~ 155.5	50.2 ~ 130.7
$a_{254} \text{ /m}^{-1}$	1.61 ~ 11.51	1.52 ~ 11.87	2.03 ~ 11.39	1.52 ~ 11.41
$SUVA_{254} \text{ /L}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$	0.87 ~ 3.69	0.80 ~ 2.57	0.74 ~ 3.53	0.86 ~ 3.47
$S_{275-295} \text{ /nm}^{-1}$	0.017 ~ 0.052	0.017 ~ 0.045	0.017 ~ 0.035	0.017 ~ 0.040

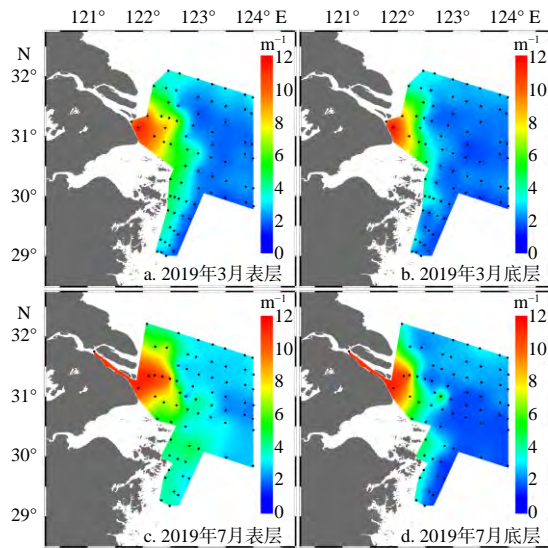


图 4 2019 年 3 月和 7 月两个航次表层和底层 a_{254} 值的分布

Fig. 4 Distributions of a_{254} values at surface and bottom layers during the two cruises in March and July, 2019

发现, 表层 CDOM 芳香性更高, 平均分子量更大 (配对 t 检验; $p < 0.05$)。在相同采样站位, 7 月的 CDOM 分子芳香性大于 3 月 (配对 t 检验; $p < 0.05$), 但平均分子量没有显示出显著的季节差异 (配对 t 检验; $p > 0.05$)。

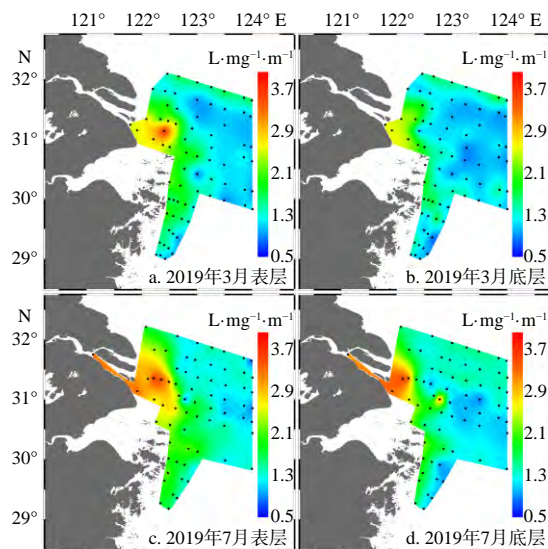


图 5 2019 年 3 月和 7 月两个航次表层和底层 $SUVA_{254}$ 值的分布

Fig. 5 Distributions of $SUVA_{254}$ values at surface and bottom layers during the two cruises in March and July, 2019

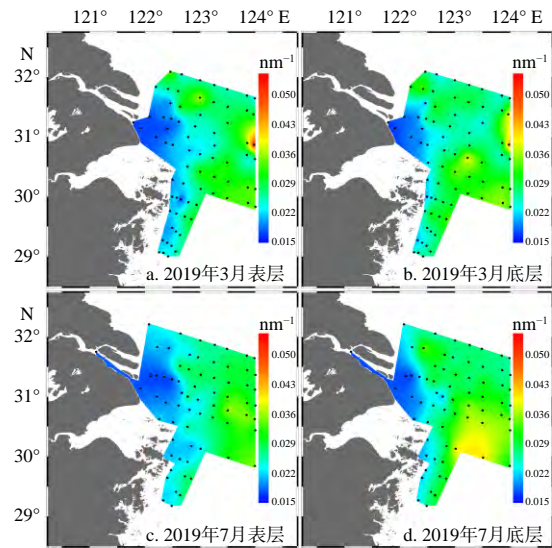


图 6 2019 年 3 月和 7 月两个航次表层和底层 $S_{275-295}$ 值的分布

Fig. 6 Distributions of $S_{275-295}$ values at surface and bottom layers during the two cruises in March and July, 2019

两个航次表层和底层样品的 DOC 浓度和 a_{254} 的线性相关关系如图 7 所示。3 月, 表层和底层 DOC 浓度和 a_{254} 均具有显著的正相关关系 ($p < 0.001$; 图 7 a), 说明春季研究区域内 DOC 和 CDOM 具有相似的来源组成, 都以河流陆源输入为主, 这与国内外其他河口研究结果一致^[5, 21-22]。7 月, DOC 浓度和 a_{254} 在表层的相关性 ($R^2 = 0.45$) 低于底层 ($R^2 = 0.87$; 图 7 b); 在相同 DOC 浓度下, 表层的 CDOM 丰度较低, 这与表层 CDOM 受光降解作用较强有关。根据回归直线在 x 轴的截距值可知, 3 月, 表层和底层分别有约 $38.5 \mu\text{mol/L}$ 和 $36.4 \mu\text{mol/L}$ 的无色溶解有机物 (transparent dissolved organic matter, TDOM) 与 CDOM 的变化无关; 而在 7 月, TDOM 在表层和底层的浓度值分别为 $42.8 \mu\text{mol/L}$ 和 $45.1 \mu\text{mol/L}$, 比春季含量更高。碳水化合物可能是这些 TDOM 的重要组分^[23]。

2.4 DOC 浓度、CDOM 参数与盐度的相关关系

此外, DOC 浓度、CDOM 相关参数与盐度的相关性分析结果如图 8 所示, 两个航次 DOC 浓度和 3 个 CDOM 参数均与盐度呈现显著的相关关系, 说明盐淡水混合过程、高浓度的陆源输入

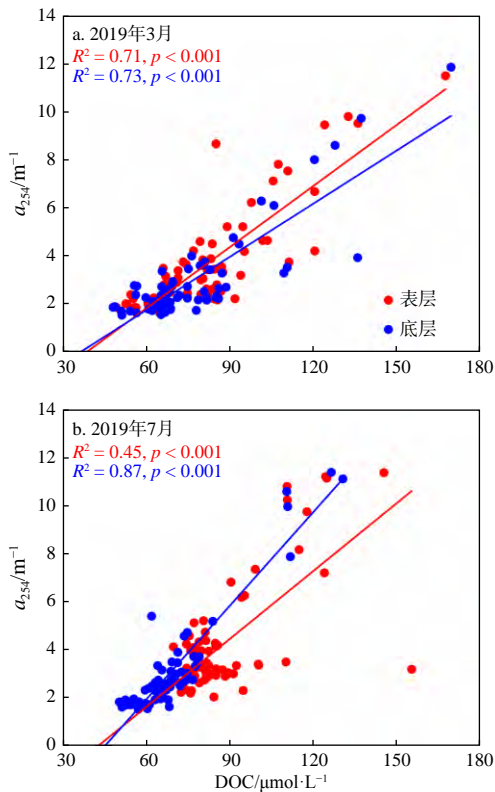


图 7 2019 年 3 月和 7 月两个航次表层和底层样品 DOC 浓度与 a_{254} 值的相关关系

Fig. 7 Correlation relationships between the DOC concentrations and the a_{254} values for samples collected at the surface and bottom layers, during the two cruises in March and July, 2019

始终是影响长江口及其邻近海域 DOC 和 CDOM 分布及变化的最主要因素。

两个航次 DOC 浓度与盐度呈现显著的负相关关系 ($p < 0.001$), DOC 浓度随着盐度的升高逐渐下降 (图 8 a 和图 8 b)。3 月, 表层和底层呈现相似的相关性 (R^2 分别为 0.64 和 0.65), 这与 3 月海水强烈的垂直混合有关。而在 7 月, 表层相关性 ($R^2 = 0.32$) 远低于底层 ($R^2 = 0.81$), 说明与底层相比, 表层 DOC 显示出了更明显的不保守行为, 且盐度越大 DOC 浓度偏离回归直线的趋势越明显。增加的 DOC 可能归因于夏季表层生物活动增强而产生的自生 DOC。

两个航次表层和底层 a_{254} (图 8 c 和图 8 d) 也与盐度呈显著负相关关系 ($p < 0.001$), 说明随着盐度升高, CDOM 的丰度也在逐渐下降。3 月, 表层 a_{254} 和底层的相关系数 (表层 $R^2 = 0.84$;

底层 $R^2 = 0.91$) 略高于 7 月 (表层 $R^2 = 0.80$; 底层 $R^2 = 0.86$), 表明与 DOC 一样, 夏季 CDOM 更不保守^[24]。值得注意的是, 表层 CDOM 在盐度 12 ~ 25 范围内不保守现象最为明显 (图 8 d), 而 DOC 的不保守行为更多地出现在盐度大于 30 的海水中 (图 8 b)。上述现象说明, 在研究区域盐淡水混合过程中, DOC 和 CDOM 的不保守过程存在一定的差异。

两个航次表层和底层 $SUVA_{254}$ 均与盐度呈现负相关关系 ($p < 0.001$; 图 8 e 和图 8 f), 同样在夏季表层盐度 12 ~ 25 范围内出现最明显的偏离回归直线的现象 (图 8 f), 此处 $SUVA_{254}$ 的升高是基于 CDOM 在生物地球化学过程中的不保守行为, 而非基于盐淡水混合等物理过程。两个航次无论是表层还是底层, $S_{275-295}$ 与盐度均呈现显著的正相关关系 ($p < 0.001$; 图 8 g 和图 8 h), 即随着盐度的增加, CDOM 的平均分子量在下降。3 月, 盐度小于 25 的站位的 $S_{275-295}$ 变化不大, 当盐度超过 25 时, $S_{275-295}$ 急剧升高 (图 8 g)。7 月, 当盐度大于 15 时, 部分 $S_{275-295}$ 相对于回归曲线就已经明显偏高 (图 8 h)。

3 结论

(1) 在长江口及其邻近海域, 2019 年 3 月和 7 月的 DOC 浓度总体表现出近岸高、外海低的分布特征, 且同一站位表层浓度显著高于底层。长江陆源输入是研究区域 DOC 的最主要来源; 而在 7 月, 外海生物活动带来的自生 DOC 也在一定程度上造成了局地 DOC 浓度的升高。

(2) 与 DOC 类似, 研究区域内 CDOM 丰度和性质也具有明显的时空变化特征。随着离岸距离的增加, CDOM 的丰度、分子芳香性和平均分子量均逐渐降低。3 月和 7 月, 同一站位表层 CDOM 丰度、芳香性及平均分子量均显著高于底层。研究区域 CDOM 丰度和芳香性在 7 月显著高于 3 月, 但平均分子量在两个季节没有显著的差别。研究区域 CDOM 和 DOC 的分布特征与季节变化模式基本相同; 但在 7 月的表层水体中, DOC 和 CDOM 的不保守过程略有差异。

(3) 两个航次 DOC 浓度、 a_{254} 、 $SUVA_{254}$ 、 $S_{275-295}$ 等指标均与盐度呈现显著的相关关系, 说明盐淡

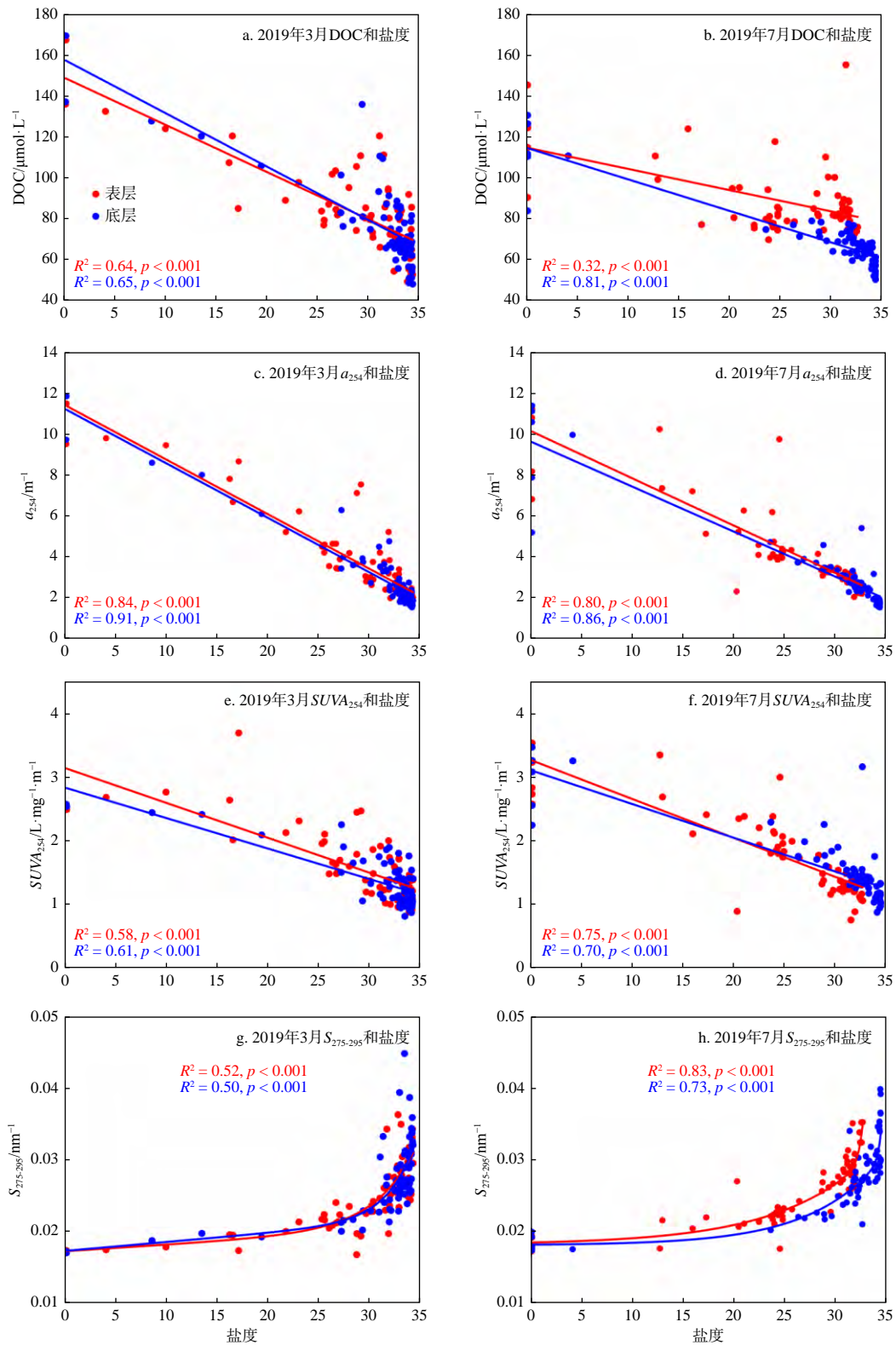


图8 2019年3月和7月研究区域内表层和底层盐度与DOC浓度、CDOM参数(a_{254} 、 $SUVA_{254}$ 、 $S_{275-295}$)的相关关系

Fig. 8 Correlation relationships between salinity and DOC and CDOM parameters (a_{254} , $SUVA_{254}$ and $S_{275-295}$) at surface and bottom layers during the two cruises in March and July, 2019

水混合过程是影响长江口及其邻近海域 DOC 和 CDOM 分布的最主要因素。DOC 和 CDOM 在 7 月显示出更加明显的不保守行为,夏季较强的生物活动和光照是造成这种季节差异的重要原因。

参考文献:

- [1] HANSELL D A, CARLSON C A, REPETA D J, et al. Dissolved organic matter in the ocean: a controversy stimulates new insights[J]. *Oceanography*, 2009, 22(4): 202-211.
- [2] KOWALCZUK P, DURAKO M J, YOUNG H, et al. Characterization of dissolved organic matter fluorescence in the South Atlantic Bight with use of PARAFAC model: interannual variability[J]. *Marine Chemistry*, 2009, 113(3/4): 182-196.
- [3] ROCHELLE-NEWALL E J, FISHER T R. Production of chromophoric dissolved organic matter fluorescence in marine and estuarine environments: an investigation into the role of phytoplankton[J]. *Marine Chemistry*, 2002, 77(1): 7-21.
- [4] 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.
- [5] BAKER A, SPENCER R G M. Characterization of dissolved organic matter from source to sea using fluorescence and absorbance spectroscopy[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 333(1/2/3): 217-232.
- [6] COBLE P G. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color[J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107(2): 402-418.
- [7] 沈焕庭,潘定安.长江河口最大浑浊带[M].北京:海洋出版社,2001: 1-9.
- [8] 朱伟健,沈芳,洪官林.长江口及邻近海域有色溶解有机物(CDOM)的光学特性[J].*环境科学*, 2010, 31(10): 2292-2298.
- [9] 范冠南,毛志华,陈鹏,等.长江口及其邻近海域CDOM光谱吸收特性分析[J].*海洋学研究*, 2013, 31(1): 53-58.
- [10] 孙语嫣,白莹,苏荣国,等.长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素[J].*环境科学*, 2017, 38(5): 1863-1872.
- [11] ZHOU Z Z, GUO L D. Evolution of the optical properties of seawater influenced by the deepwater horizon oil spill in the Gulf of Mexico[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(2): 025301.
- [12] HU C M, MULLER-KARGER F E, ZEPP R G. Absorbance, absorption coefficient, and apparent quantum yield: a comment on common ambiguity in the use of these optical concepts[J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(4): 1261-1267.
- [13] HELMS J R, STUBBINS A, RITCHIE J D, et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(3): 955-969.
- [14] 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.
- [15] 水利部长江水利委员会.长江泥沙公报2019[M].武汉:长江出版社,2020: 4-22.
- [16] BEARDSLEY R C, LIMEBURNER R, YU H, et al. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1/2): 57-76.
- [17] 刘雅丽,高磊,朱礼鑫,等.长江口及邻近海域营养盐的季节变化特征[J].*海洋环境科学*, 2017, 36(2): 243-248.
- [18] GUO W D, YANG L Y, ZHAI W D, et al. Runoff-mediated seasonal oscillation in the dynamics of dissolved organic matter in different branches of a large bifurcated estuary—the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(5): 776-793.
- [19] GAO L, GAO Y Q, SONG S Z, et al. Non-conservative behavior of dissolved organic carbon in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and the adjacent East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2020, 197: 104084.
- [20] 梁文健,秦礼萍,刘兆冰,等.东黄渤海11-12月有色溶解有机物的分布特征[J].*海洋环境科学*, 2019, 38(6): 905-910.
- [21] 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.
- [22] 陈欣,张霄宇,雷惠.长江口CDOM的光谱吸收特征以及DOC物源示踪意义[J].*海洋环境科学*, 2012, 31(5): 625-630.
- [23] SONG S Z, GAO L, LI D J, et al. Distributions and dynamics of dissolved carbohydrate species in Changjiang Estuary and the adjacent East China Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2017, 194: 22-32.
- [24] SONG G S, LI Y J, HU S Z, et al. Photobleaching of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Yangtze River estuary: kinetics and effects of temperature, pH, and salinity[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2017, 19(6): 861-873.