

富营养化湛江港湾有色溶解有机物光学特性的时空变化分析

余果^{1,2}, 付东洋¹, 刘大召¹, 刘贝¹, 廖珊¹, 王立安¹, 张小龙^{1,2}

(1. 广东海洋大学 电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088; 2. 广东海洋大学, 海洋与气象学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 有色溶解有机物(CDOM)是海洋水色遥感三要素之一, 近海二类水体 CDOM 的遥感监测一直是国内外研究的热点和难点。基于 2016–2017 年湛江港湾两个航次的调查资料, 探讨了湛江湾水体中 CDOM 光学特性的时空变化特征及溯源问题。结果表明: 在季节变化方面, 港湾内表层水体 CDOM 吸收系数 $a_g(355)$ 和光谱斜率 $S_{275-295}$ 呈现出秋季 > 夏季的变化特征。在空间分布方面, 夏季港湾内表层和底层的 $a_g(355)$ 则基本呈现由北向南、由西向东递减的趋势, 表层和底层 CDOM 光谱斜率 $S_{275-295}$ 在水平空间上大致呈现斑块状的分布; 同时, 湾内叶绿素 a 浓度和浊度均较高, 叶绿素 a 浓度在 1~5 $\mu\text{g/L}$ 之间变化, 浊度的范围是 5~70 NTU, 溶解氧的浓度较小, 在 3~5 ml/L 之间变化。对 CDOM 吸收系数 $a_g(355)$ 与光谱斜率、叶绿素 a、溶解氧、浊度的关系深入分析发现, 夏季和秋季水体中 CDOM 来源主要有浮游植物现场生产和陆源所携带, 同时底层沉积物的再悬浮也是秋季水体中 CDOM 来源之一。两个季节 CDOM 浓度与 DO 负相关性较好, 表明它对水体的污染和富营养化具有一定的指示作用。

关键词: 有色溶解有机物; 吸收系数; 光谱斜率; 时空变化; 湛江港湾

中图分类号: P733.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0100-06

Spatial and temporal variation of optical properties of colored dissolved organic matter in eutrophic Zhanjiang Harbor

YU Guo^{1,2}, FU Dongyang¹, LIU Dazhao¹, LIU Bei¹, LIAO Shan¹, WANG Li'an¹, ZHANG Xiaolong^{1,2}

1. School of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. College of Oceanography and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: The colored dissolved organic matter (CDOM) is one of the three elements of ocean color remote sensing, and remote sensing monitoring of CDOM of the case - II coastal water has always been a hot but difficult topic in the world. Based on the survey data of the two voyages in Zhanjiang harbor from 2016 to 2017, the spatial-temporal characteristics of the optical properties and the source of CDOM in the waters of Zhanjiang bay were discussed. The results showed that: In terms of seasonal changes, it manifest that CDOM absorption coefficient ($a_g(355)$) and spectral slope ($S_{275-295}$) in the surface waters of the harbor in autumn were greater than that in summer. In terms of spatial distribution, the $a_g(355)$ of the thalassic surface and bottom layers of summer basically showed a decrease trend from the north to the south and from the west to the east, meanwhile the $S_{275-295}$ presented a patchy distribution in the horizontal space generally. Moreover, chlorophyll a concentration and turbidity were relatively high with a variation range from 1 $\mu\text{g/L}$ to 5 $\mu\text{g/L}$ of chlorophyll a concentration and a range from 5 NTU to 70 NTU of turbidity. For another, dissolved oxygen concentration is relatively low which ranges from 3 ml/L to 5 ml/L in the bay. According to the comprehensive analysis of CDOM absorption coefficient, spectral

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-06-30

基金项目: 国家海洋公益专项(201305019); 广东省自然科学基金项目(2014A030313603); 广东省科技计划项目(2013B030200002、2016A020222016); 广东海洋大学创新强校项目(GDOU2014050226); 广东海洋大学大学生创新创业训练计划项目(CXXL2017026); “海之帆”起航计划大学生科技创新培育项目(qhjh2017zr15); 广东省哲学社会科学规划项目(GD12YGL04); 广东省普通高校优秀青年创新人才培养计划项目(2012WYM_0077); 广东海洋大学博士科研启动项目(E11097)

作者简介: 余果(1993-), 男, 安徽宿松人, 硕士研究生, 研究方向为海洋环境遥感。

通讯作者: 付东洋(1969-), 男, 四川阆中人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋水色遥感及近海环境研究。

slope, chlorophyll a, dissolved oxygen and turbidity, we can draw a conclusion that the CDOM in the Zhanjiang bay waters mainly comes from terrestrial input and phytoplankton on-site production in the summer and autumn, the sediments resuspension has a certain contribution to the source of colored dissolved organic matter in the autumn. Furthermore, the concentration of colored dissolved organic matter was negatively correlated with DO in the two seasons accompanying a certain indication function for water pollution and eutrophication.

Key words: colored dissolved organic matter; absorption coefficient; spectral slope; spatial and temporal variation; Zhanjiang Harbor

1 研究背景

有色溶解有机物(CDOM)是一种组成成分较复杂的大分子物质,广泛存在于天然水体中,是水色遥感所要研究的重要对象之一^[1-3]。CDOM吸收系数和光谱斜率(S 值)是CDOM两个重要的光学特性参数。某一波段处的CDOM吸收系数可以用来表征CDOM浓度, S 值可以反映CDOM不同来源和CDOM分子量的大小,一般情况下分子量越大, S 值会越小,反之分子量越小, S 值会越大^[1-4]。CDOM在紫外区具有强烈的吸收特性,一方面能够降低紫外在水中的穿透深度,保护水体生态系统中的各种生物,另一方面CDOM发生光化学降解,生成其他的小分子物质,从而被细菌等生物所利用。但是CDOM吸收会延伸到蓝光区,从而会影响浮游植物光合作用,对浮游植物生物量的遥感估算产生影响^[5-7]。在近海海域,陆源有机物的输入对CDOM的浓度会产生很大的影响,CDOM浓度的大小在一定程度上可以反应水体的有机污染程度^[8]。

CDOM光学特性的研究一直是国内外许多学者所研究的热点,其研究区域主要包括海洋、河口、湖泊、水库等。Clementson等^[9]对澳大利亚塔斯马尼亚东南部Huon河口中的CDOM进行了研究,发现上游地区CDOM吸收系数 $a_g(440)$ 可达 13 m^{-1} ,且在蓝光部分CDOM吸收是最强烈的;Kowalczyk等^[10]在拉美尼亚湾和几内亚湾研究CDOM发现,这两个地方的春季CDOM浓度平均值都要大于秋季和冬季;李猛等^[11]研究了厦门湾CDOM的光学特性,并结合盐度等参数分析了厦门湾各个区域CDOM的混合行为;段洪涛等^[12]研究了太湖水体CDOM的光学特性,发现在贡湖湾区域的CDOM吸收系数最大。尽管CDOM光学特性研究取得不少的进展,但是将CDOM光学特性用于富营养化水质监测的应用研究却很少见。

湛江港湾既是华南地区重要的货物贸易港口,也是湛江市内陆与外海水体的重要交换通道,由于

城市人口及工业产值的快速增长,大量的生活及工业废水排入港湾内,湛江港湾海域出现富营养化的现象,它已是广东省污染及富营养化最严重的海域之一^[7,13]。因此本文研究湛江港湾海域的CDOM光学特性参数的时空分布及其变化,分析湛江港湾海域CDOM来源及其影响因素,探讨CDOM光学参数与叶绿素a、浊度、溶解氧之间的关系,为湛江港湾海域富营养化水质监测提供参考。

2 材料与方法

2.1 研究区域和数据采集

研究海区为南海西北部湛江近海海域,共计两个航次,站位设置如图1所示,站位 $S_1 \sim S_{21}$ 是2016年9月设置,站位 $Z_1 \sim Z_{24}$ 是2017年6月设置。9月采集的表层水样有21个,6月每个站位都采集了表层和底层水样,共48个水样,所有采集的水样都放在保温箱进行避光保存,然后当天将样品带回实验室进行过滤,将过滤好的样品放在 -20°C 的冷冻室保存。叶绿素a、溶解氧和浊度等水质参数均由RBRmaestro多参数水质仪所测得。

2.2 样品处理方法和数据处理方法

本次CDOM光学密度测量所使用的仪器是紫外分光光度计UV-2550,过滤海水的膜是 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 的聚碳酸酯滤膜,过滤、测量和计算处理等均按照《我国近海海洋光学调查技术规程》相关规范^[14]来进行。

CDOM吸收系数随波长的增加呈指数形式的衰减,其表达式为^[7,15-16]:

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0) \exp(S(\lambda_0 - \lambda)) + K \quad (1)$$

式中: S 为光谱斜率值, nm^{-1} ,利用此式来拟合求得。各参数具体含义参见文献[7,17-18]。

3 结果与讨论

3.1 CDOM光谱吸收特征

图2为湛江港湾海域不同季节表层CDOM光谱吸收系数曲线。由图2(a)、2(b)可以看出,夏季和秋

季表层水体 CDOM 光谱吸收系数曲线都是呈现指数形式的衰减^[7,23],但表现特性有一定的差异。秋季各站点吸收光谱聚合度较高,而夏季各站点吸收光谱离散度较高。Yang 等^[19]研究发现 $a_g(355)$ 与类腐殖质荧光组分有良好的线性正相关关系,周雯等^[20]在台湾海峡南部海域选取 355 nm 处的吸收系数来表征 CDOM 浓度,李猛等^[11]在对厦门湾有色溶解有机物的光吸收特性进行研究时也是选用 355 nm 波段处的吸收系数来表示 CDOM 的浓度,均具有较好的应用效果。故本文选用 $a_g(355)$ 来表征 CDOM 的浓度。夏季表层 $a_g(355)$ 值最大值为 2.76 m^{-1} (Z_{24} 号点),最小值为 0.58 m^{-1} (Z_{11} 号点),平均值为 1.47 m^{-1} ,均方差为 0.6 m^{-1} 。秋季表层 $a_g(355)$ 值最大值为 1.87 m^{-1} (S_1 号点),最小值为 1.21 m^{-1} (S_{10} 号点),平均值为 1.51 m^{-1} ,均方差为 0.19 m^{-1} 。结果表明,秋季各站点 CDOM 浓度的差异性要比夏季要小。

3.2 CDOM 浓度时空分布特征

两个季节表层 CDOM 浓度测量数据如表 1 所示,CDOM 浓度总体上来看呈现秋季大于夏季的变化特征。图 3(a)、3(b) 分别是夏季、秋季各站点 $a_g(355)$ 表层值。图 3(a) 显示夏季 CDOM 表层最大值在 Z_{24} 号站点,最小值在 Z_{11} 号站点,且离岸水体中的 CDOM 浓度一般要比近岸低。图 3(b) 可以看出秋季 CDOM 表层最大值在港内的 S_1 号站点,最小值在南三岛附近海域的 S_{10} 号站点,港内的分布情况为麻斜湾比其他区域的 CDOM 浓度略大。

夏季底层 $a_g(355)$ 的变化范围为 $0.69 \sim 3.22 \text{ m}^{-1}$,平均值为 1.58 m^{-1} ,比表层 CDOM 浓度平均值要大。在湛江港北部海域表层和底层均存在极大值,表层极大值要比底层要低,且表层高值区范围比底层要大,在南三岛的南部靠近入海口海域和东海岛的北部海域,表层和底层均出现低值区。图 4 为湛江港湾海域夏季 $a_g(355)$ 空间分布。从图 4(a)

和 4(b) 可以看出表层和底层 $a_g(355)$ 从西向东、从北向南的基本变化趋势都是在减小。由图 4(c) 也可以看出表层和底层分布规律较为相似,各站点表层和底层 CDOM 浓度变化趋势基本保持一致,同时统计出 13 个站点底层吸收系数比表层吸收系数大,7 个站点底层吸收系数和表层吸收系数一样大,4 个站点底层吸收系数比表层吸收系数小。

3.3 光谱斜率的时空分布特征

光谱斜率(S 值)在 CDOM 光学特性研究中,是一个重要的研究参数,它在一定程度上反映了 CDOM 的来源和种类,不同海域的 S 值可能会不同,主要受季节、海水营养状态、河流入海径流量、大气干湿沉降等因素的影响^[21]。研究表明,离岸的海水 S 值通常较大($>0.02 \text{ nm}^{-1}$),而受河流、人为因素影响较大的沿岸海水 S 值通常在 $0.011 \sim 0.018 \text{ nm}^{-1}$ 之间^[22]。两个季节表层光谱斜率 S 值如下表 2 所示,可以看出两个季节 S 值总体上呈现秋季大于夏季的变化特征。图 5(a)、5(b) 分别是夏季、秋季各站点表层 S 值。夏季表层 S 最大值在 Z_{11} 号站点,最小值在 Z_{23} 号站点,低值区主要集中在麻斜湾海域和五里山港海域,低值区 S 值的变化范围为 $15.51 \times 10^{-3} \sim 17.48 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-1}$,低于整个港内平均值。秋季表层 S 值最大值在 S_{16} 号站点,最小值在 S_{11} 号站点。

夏季底层 S 值的变化范围与表层变化情况基本相同,为 $15.04 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-1} \sim 21.14 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-1}$,平均值为 $17.79 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-1}$ 。由图 6 可以看出表层和底层 S 值的空间分布特征呈现斑块状的分布^[7],在东海岛、五里山港和麻斜湾附近海域,表层 S 值具有很明显的低值分布情况,在南三岛附近海域表层 S 值高值区极为突出,底层 S 值虽然也有类似的特征,但没有表层那么显著。表层和底层在五里山港和麻斜湾海域都具有较低的 S 值分布。

表 1 两个季节表层 CDOM 浓度的统计情况

季节	表层 $a_g(355)$ 值变化范围/ m^{-1}	表层 $a_g(355)$ 平均值/ m^{-1}	表层 $a_g(355)$ 最大值站位	表层 $a_g(355)$ 最小值站位	均方差 / m^{-1}
夏季	0.58 ~ 2.76	1.47	Z_{24}	Z_{11}	0.60
秋季	1.21 ~ 1.87	1.51	S_1	S_{10}	0.19

表 2 两个季节表层 CDOM 光谱斜率 S 值的统计情况

季节	表层 S 值变化范围/ 10^{-3} nm^{-1}	表层 S 值平均值/ 10^{-3} nm^{-1}	表层 S 值最 大值站位	表层 S 值最 小值站位
夏季	15.51 ~ 21.16	17.94	Z_{11}	Z_{23}
秋季	15.47 ~ 19.67	18.19	S_{16}	S_{11}

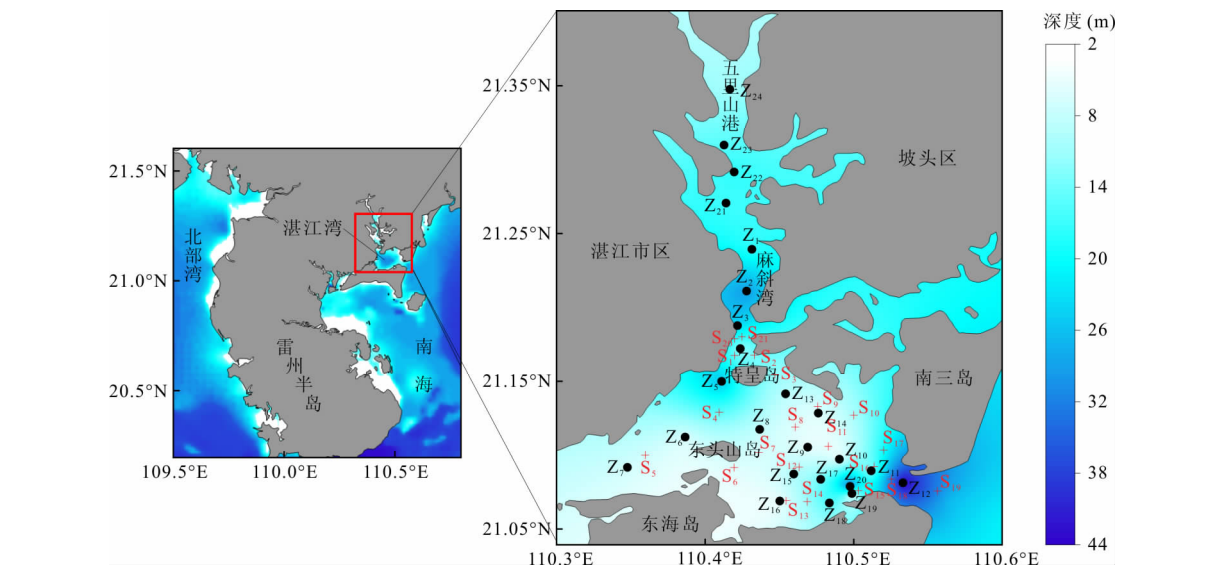


图 1 南海西北部湛江港湾海域站位分布图($Z_1 - Z_{24}$:夏季航次, $S_1 - S_{21}$:秋季航次)

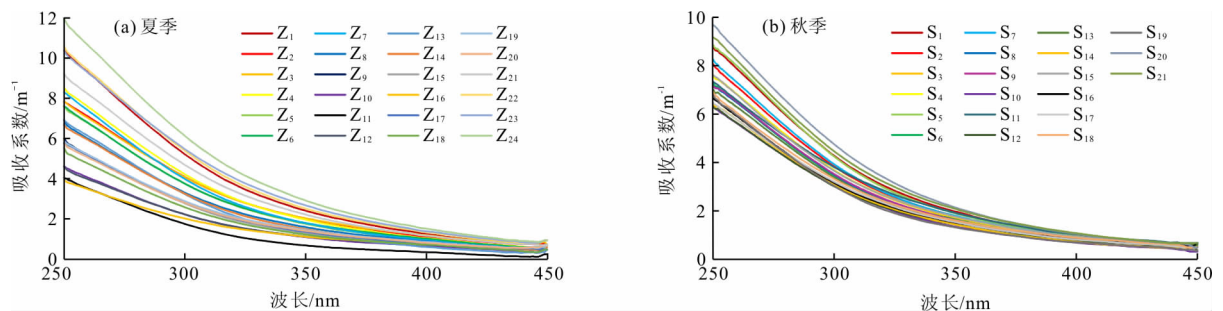


图 2 南海西北部湛江港湾海域不同季节表层 CDOM 光谱吸收系数曲线

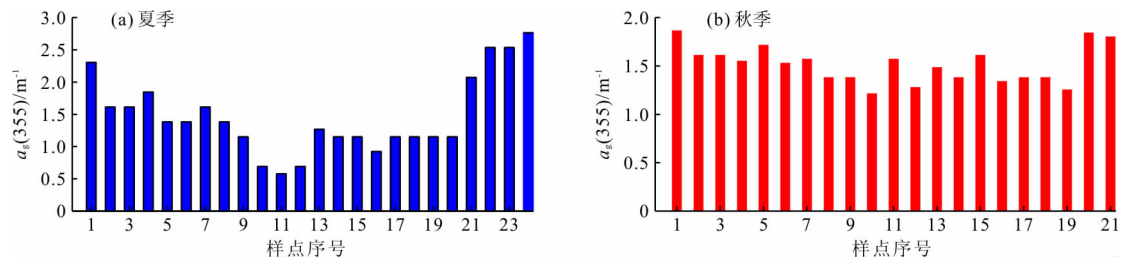


图 3 南海西北部湛江港湾海域不同季节各站位表层 $a_g(355)$ 值

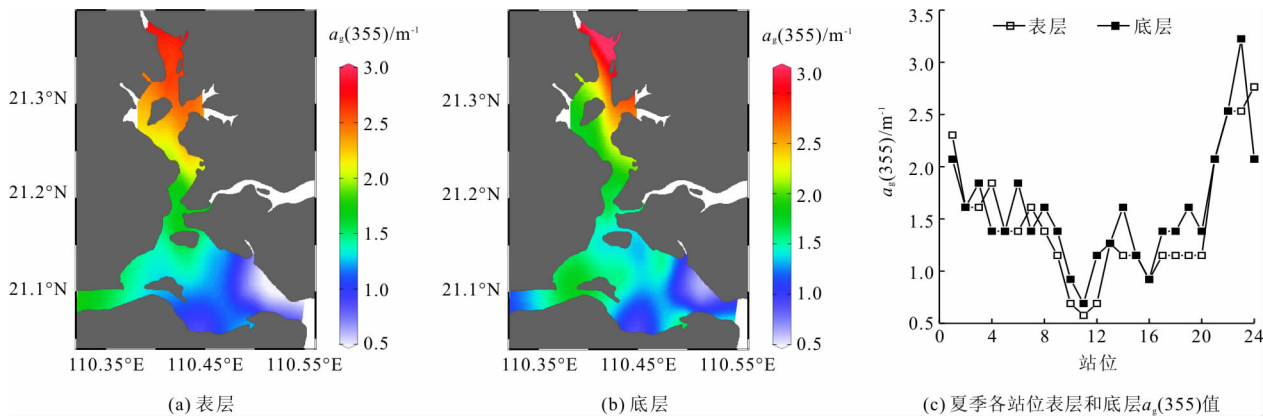


图 4 南海西北部湛江港湾海域夏季 $a_g(355)$ 空间分布图

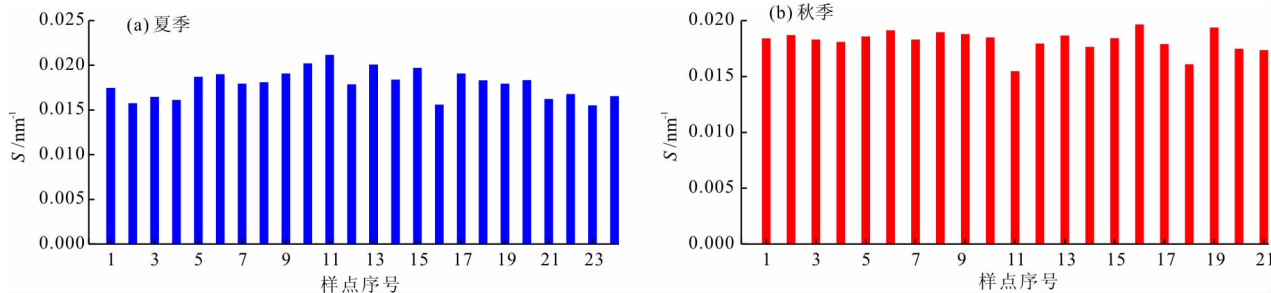


图5 南海西北部湛江港湾海域各站位表层 S 值

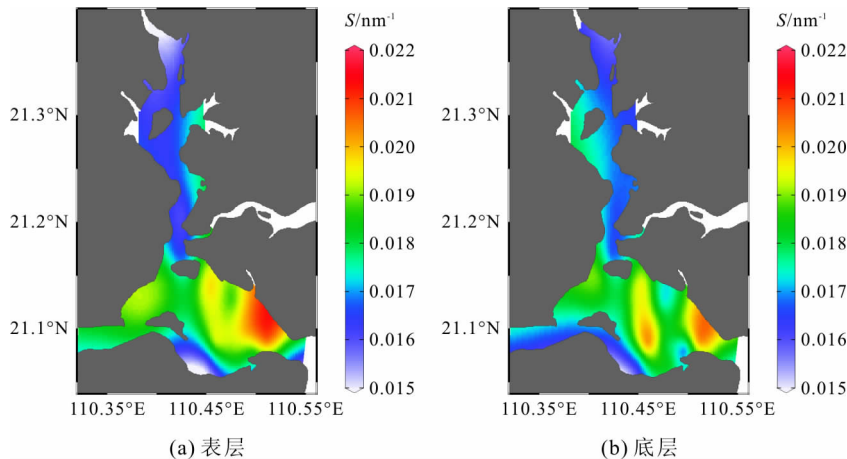


图6 南海西北部湛江港湾海域夏季 S 值空间分布图

3.4 CDOM 来源、季节差异性和影响因素分析

海水中 CDOM 来源主要可以分为海源和陆源^[23]。陆源主要是地表径流所携带的一些可溶性有机物,海源主要是海水中浮游植物的现场生产及细菌降解等^[23-24]。Boss 等^[25]研究表明底层沉积物的再悬浮同样也是 CDOM 来源之一。 S 值的差异可以反映 CDOM 不同的来源,而 S 值的不同主要是由 CDOM 的组成成分富里酸和腐殖酸所占比例不同^[4,23,26]。对于受陆源输入影响较大的近岸二类水体而言,一般 S 值较小,CDOM 分子量较大,腐殖酸所占的比例大,陆源所携带 CDOM 的腐殖酸含量远大于海源自身产生的,腐殖酸的比吸收系数较大,CDOM 含量也较多,从而使得陆源输入的近岸水体吸收系数就偏高。对于大洋一类水体而言, S 值较大,CDOM 分子量较小,富里酸所占的比例大,富里酸的比吸收系数较小,CDOM 含量也较少,从而就使得大洋水体吸收系数偏低^[4]。

CDOM 组成成分腐殖酸和富里酸浓度的比值决定 S 值和 $a_g(355)$ 的大小,可用以下两个公式表示^[4,26]:

$$S = G\left[\delta\left(1 - \frac{\delta C_{f-m}}{C_{h-t} + \delta C_{f-m}}\right)\right] \quad (2)$$

$$a_g(\lambda_0) = F\left(C_{h-t}, \frac{C_{h-t}}{\delta}, 0, C_{f-m}\right) \quad (3)$$

式中: $\delta = C_{h-t}/C_{f-t}$, C_{h-t} 和 C_{f-t} 分别为陆源输入的腐殖酸和富里酸的质量浓度; C_{f-m} 为海源富里酸的质量浓度。这两个公式有两个前提,即陆源 CDOM 成分和浓度稳定、海源 CDOM 浓度低较稳定且以富里酸为主,那么 δ 和 C_{f-m} 就保持恒定不变,海源所产生的腐殖酸质量浓度为零, $S = G(x)$ 为减函数, $a_g(355)$ 与 C_{h-t} 成正相关关系,因此 $a_g(355)$ 与 S 理论上存在负相关关系^[4,26]。然而,这种理想的水体很难存在,腐殖酸和富里酸的比例变化存在一定的不规则性,造成这种负相关关系极不稳定^[4,23,26]。

夏季表层 S 值和底层 S 值与 $a_g(355)$ 呈负相关关系,决定系数 R^2 分别为 0.53 和 0.26,表层相关性较好,底层相关性较小,地表径流量达到全年的峰值,使城市污染物随着地表径流的排放,而进入港湾,CDOM 受到陆源输入的影响较大。对夏季表层和底层叶绿素 a 浓度进行分析发现呈正相关,表层和底层决定系数分别达到了 0.88 和 0.85,这说明浮游植物现场生产对夏季水体中 CDOM 的影响极大。对浊度与 $a_g(355)$ 进行分析发现没有相关关系,表明陆源输入和浮游植物现场生产这两者是对夏季

CDOM 的主要贡献者。对 $a_g(355)$ 与溶解氧进行相关性分析发现呈负相关关系,决定系数 R^2 分别为 0.75 和 0.65,相关性较高。表明 CDOM 浓度越高,则 DO 越低,对水体的污染和富营养化具有一定的指示作用。

秋季 S 值与表层 $a_g(355)$ 呈负相关,决定系数 R^2 为 0.62,反映了秋季湛江港湾海域水体中 CDOM 陆源输入是一个主要来源。对叶绿素 a 浓度与表层 $a_g(355)$ 进行分析,发现呈正相关关系,决定系数 R^2 为 0.76,表明浮游植物现场生产仍然是水体中 CDOM 浓度的一个重要影响因素。对浊度与表层 $a_g(355)$ 进行分析发现线性决定系数 R^2 为 0.35,说明底部沉积物的再悬浮对 CDOM 浓度有一定的贡献。对溶解氧与表层 $a_g(355)$ 进行分析发现呈负相关,决定系数 R^2 为 0.68,同样可以通过 CDOM 浓度对水体的污染和富营养化进行示踪。

4 结 论

(1) 湛江港湾夏季和秋季表层水体 CDOM 光谱吸收系数曲线从紫外至可见光范围呈典型的指数衰减,研究区域夏季 CDOM 吸收光谱离散度较高,而秋季聚合度更高。

(2) 湛江港湾海域表层水体 CDOM 含量 $a_g(355)$ 及光谱斜率 S 均呈现秋季大于夏季的时间变化特征。夏季的表层和底层水体 CDOM 平面分布整体呈现由北向南、由西向东递减的趋势。夏季表层、底层 S 值空间分布特征整体大致呈现斑块状分布。

(3) 湛江湾夏季和秋季水体中 CDOM 来源主要有浮游植物现场生产和陆源地表径流所携带,同时底层沉积物的再悬浮也是秋季水体中 CDOM 来源之一,两个季节 CDOM 浓度与叶绿素浓度及溶解氧负相关性都较高,与叶绿素 a 浓度及溶解氧含量最高决定系数分别可达 0.8、0.7 以上,表明研究区域 CDOM 含量对水体的污染和富营养化具有较强的指示作用。

参考文献:

[1] MANNINO A, NOVAK M G, HOOKER S B, et al. Algorithm development and validation of CDOM properties for estuarine and continental shelf waters along the northeastern U. S. coast[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152(3):576–602.

[2] ROCHELLE E – NEWALL E J, FISHER T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in

Chesapeake Bay[J]. *Marine Chemistry*, 2002, 77(1):23–41.

[3] KOWALCZUK P, OLSZEWSKI J, DARECKI M, et al. Empirical relationships between coloured dissolved organic matter (CDOM) absorption and apparent optical properties in Baltic Sea waters[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(2):345–370.

[4] 王林, 赵冬至, 傅云娜, 等. 黄色物质吸收系数 $a_g(440)$ 与斜率 S_g 相关关系[J]. *大连海事大学学报*, 2007, 33(S2):179–182.

[5] HUOVINEN P S, PENTTILÄ H, SOIMASUO M R. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lakes in Central Finland[J]. *Chemosphere*, 2003, 51(3):205.

[6] WALSH J J, WEISBERG R H, DIETERLE D A, et al. Phytoplankton response to intrusions of slope water on the West Florida Shelf: Models and observations[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2003, 108(C6):3190.

[7] 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.

[8] 黄妙芬, 王迪峰, 邢旭峰, 等. 珠江口海域 $ag(440)$ 遥感模式研究及应用[J]. *海洋学报*, 2015, 37(7):67–77.

[9] CLEMENTSON L A, PARSLOW J S, TURNBULL A R, et al. Properties of light absorption in a highly coloured estuarine system in south – east Australia which is prone to blooms of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2004, 60(1):101–112.

[10] KOWALCZUK P, STON – 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):273–292.

[11] 李猛, 郭卫东, 夏恩琴, 等. 厦门湾有色溶解有机物的光吸收特性研究[J]. *热带海洋学报*, 2006, 25(1):11–16.

[12] 段洪涛, 马荣华, 孔维娟, 等. 太湖沿岸水体 CDOM 吸收光谱特性[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(2):242–247.

[13] 施玉珍, 张瑜斌, 孙省利. 湛江湾富营养化分布特征及与环境因子的关系[J]. *环境科学与技术*, 2015(12):90–96.

[14] 国家海洋局 908 专项办公室. 我国近海海洋光学调查技术规程[S]. 北京:海洋出版社, 2006.

[15] KOWALCZUK 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.

(下转第 121 页)

区,几乎所有粒子都是通过中心景观湖区进入水街一区、二区再进入引江航道,仅在东风作用下有1粒子附着在涉水区东侧岸边。粒子在景观中心湖区均出现了往复的情况,但最终还是通过水街区流出。

(2)分析水动力、水质及富营养化表明:无引水时,3个风向条件下中心景观湖区流速均较小,沿岸水深较浅处受风速影响较大,在不同风向下呈现出稍大流速。泵引水时,连续泵引30 h的水质好于20 h。自引水时,引江河道与人工湖水水位差 Δh 越大,人工湖水质越好。

参考文献:

- [1] 吕文,孙瑞瑞,王诚,等. 阳澄湖西湖水源地富营养化时空变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 87-90.
- [2] SONG Weiwei, XU Qing, FU Xingqian, et al. Research on the relationship between water diversion and water quality of Xuanwu Lake, China. [J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2018, 15(6): 1262-1288.
- [3] WANG Xue, PANG Yong, WANG Xiao, et al. Study of water environmental cumulative risk assessment based on control unit and management platform application in plain river network[J]. Sustainability, 2017, 9(6): 975-991.
- [4] NIU Yong, NIU Yuan, YU Hui, et al. Concentration dis-

tribution and toxicity of heavy metals in surface sediment of poyang lake, China[J]. Wetlands, 2017(2): 1-8.

- [5] 张鹏飞, 岳焱, 侯嫔, 等. 人工湖水体富营养化的活性炭处理技术及生态修复建议[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 92-98.
- [6] 姜龙杰, 陈琳, 邱云鹏, 等. 漂水水库型饮用水水源地水环境现状及污染源分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 93-99.
- [7] 李一平, 邱利, 唐春燕, 等. 湖泊水动力模型外部输入条件不确定性和敏感性分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2): 410-416.
- [8] 王瑶瑶, 逢勇, 黄亚文, 等. 围隔导流对太湖蓬坑湾藻类富集效能的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 42-47.
- [9] 毕良芹, 逢勇, 罗缙. 落蓬湾断面水质达标及胥河水环境容量研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 124-128.
- [10] 刘一童, 逢勇, 肖洵. 南京市鼓楼区入江断面水质达标方案的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 99-104.
- [11] 宋为威, 逢勇. 秦淮河流域控源截污与生态补水联合效应研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(1): 31-39.
- [12] 张鹏, 逢勇, 石成春, 等. 闽江下游水质变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 64-69.
- [13] 宋为威, 逢勇. 基于国考七桥瓮断面水质达标秦淮河流域水环境容量计算[J]. 中国农村水利水电, 2017(10): 80-84.

(上接第105页)

- [16] 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 & Oceanography, 2008, 53(3): 955-969.
- [17] MARKAGER S, VINCENT W F. Spectral light attenuation and the absorption of UV and blue light in natural waters[J]. Limnology & Oceanography, 2000, 45(3): 642-650.
- [18] STEDMON C A, MARKAGER S, KASS H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in danish coastal waters[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2000, 51(2): 267-278.
- [19] YANG L, GUO W, CHEN N, et al. Influence of a summer storm event on the flux and composition of dissolved organic matter in a subtropical river, China[J]. Applied Geochemistry, 2013, 28(3): 164-171.
- [20] 周雯, 吴琮瑜, 商少凌, 等. 2005年夏季台湾海峡南部有色溶解有机物质吸收特征及其来源初探[J]. 厦门大学学报(自然版), 2007, 46(4): 86-86.

- [21] HAYASE K, SHINOZUKA N. Vertical distribution of fluorescent organic matter along with AOU and nutrients in the equatorial Central Pacific[J]. Marine Chemistry, 1995, 48(3-4): 283-290.
- [22] 周红. 三峡水库小江回水区水体光学特征与溶解性有机物的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [23] 余果, 廖珊, 付东洋, 等. 湛江港湾及邻近海域有色溶解有机物光谱吸收特性分析[J]. 广东海洋大学学报, 2017, 37(4): 123-127.
- [24] 白莹. 黄东海春秋季节有色溶解有机物(CDOM)的分布特征及季节变化的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [25] BOSS E, PEGAU W S, ZANEVELD J R V, et al. Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2001, 106(C5): 9499-9507.
- [26] 朱伟健. 长江口及邻近海域有色溶解有机物(CDOM)的光学特性和遥感反演的初步研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.