

洱海CDOM吸收光谱特征变化及其影响因素

管玉莹 霍达 吴兴元 韩睿明 虞功亮

THE CHARACTERISTICS OF CDOM OPTICAL AND ITS INFLUENCE FACTORS IN ERHAI LAKE

GUAN Yu-Ying, HUO Da, WU Xing-Yuan, HAN Rui-Ming, YU Gong-Liang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2021.2020.123>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

洱海底泥特性对七种沉水植物生长的影响

GROWTH OF SEVEN SUBMERSED MACROPHYTES CULTURED ON FIVE SEDIMENT MIXTURES FROM THE LAKE ERHAI

水生生物学报. 2017, 41(2): 428–436 <https://doi.org/10.7541/2017.53>

洱海漂浮草垫的物种组成及分布

SPECIES COMPOSITION AND DISTRIBUTION OF FLOATING MAT IN LAKE ERHAI

水生生物学报. 2020, 44(1): 222–230 <https://doi.org/10.7541/2020.026>

洱海微囊藻水华的水生态风险评估研究

ECOLOGICAL RISK ASSESSMENT OF MICROCYSTIS BLOOMS IN ERHAI LAKE

水生生物学报. 2018, 42(5): 1066–1074 <https://doi.org/10.7541/2018.131>

基于环境DNA宏条形码的洱海鱼类多样性研究

INVESTIGATING THE FISH DIVERSITY IN ERHAI LAKE BASED ON ENVIRONMENTAL DNA METABARCODING

水生生物学报. 2020, 44(5): 1080–1086 <https://doi.org/10.7541/2020.125>

高原裸裂尻鱼头部轮廓形状及其变异的几何形态测量分析

GEOMETRIC MORPHOMETRICS OF THE CEPHALIC CONTOUR AND ITS MORPHOLOGICAL VARIATIONS AMONG *SCHIZOPYGOPSIS STOLICZKAI* (TELEOSTEI: CYPRINIDAE)

水生生物学报. 2017, 41(1): 182–193 <https://doi.org/10.7541/2017.23>

洞庭湖克氏原螯虾肌肉成分分析及品质特性分析

THE MUSCLE COMPOSITION ANALYSIS AND FLESH QUALITY OF *PROCAMBARUS CLARKIA* IN THE DONGTING LAKE

水生生物学报. 2017, 41(4): 870–877 <https://doi.org/10.7541/2017.108>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2021.2020.123

## 洱海CDOM吸收光谱特征变化及其影响因素

管玉莹<sup>1,2</sup> 霍达<sup>2,3</sup> 吴兴元<sup>2</sup> 韩睿明<sup>1,4\*</sup> 虞功亮<sup>2\*</sup>

(1. 南京师范大学环境学院, 南京 210023; 2. 中国科学院水生生物研究所藻类生物学重点实验室, 武汉 430072;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

**摘要:** 为了解溶解性有机质(CDOM)光学特性及影响因素, 在2018年11月至2019年10月期间采集了洱海120个表层水样本, 利用紫外吸收光谱解析了CDOM的组成及来源, 主成分分析法(PCA)阐明光学特性与环境因子之间的相关性。结果表明: CDOM吸收系数 $[a(440)]$ 范围为0.22—0.90/m, 随时间变化显著( $P < 0.01$ ), 营养水平差异较小( $P = 0.97$ )。 $[a(440)]$ 与溶解性有机碳(DOC)关系显著( $P < 0.01$ ), 有利于建立遥感模型监测CDOM时空分布特征。基于芳香度(SUVA<sub>254</sub>)、斜率比值( $S_R$ )、分子量参数( $M$ )和吸收光谱斜率( $S_{275-295}$ )等吸收特征参数发现CDOM光学特性随季节变化差异显著, 由非度量多维尺度(NMDS)分析可分为以下2个时期: 2018年11月至2019年7月和2019年8—10月, 后者CDOM的SUVA<sub>254</sub>显著低于前者。吸收特征参数表明洱海CDOM分子量较小, 主要为内源产生。在不同时期, 水温、pH和TP始终对CDOM吸收特征产生较大影响。文章阐明了洱海表层水体CDOM分布特征及影响因素, 为洱海水体污染治理提供理论依据。

**关键词:** 洱海; CDOM; 光学特性; 营养水平; 主成分分析

中图分类号: X832 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2021)04-0838-08



溶解性有机质(Dissolved organic matter, DOM)作为天然水体中最大的有机碳库, 可以调节水体的代谢过程和生物地球化学过程, 决定水生生态系统对全球碳循环的贡献<sup>[1]</sup>。有色溶解性有机质(Chromophoric dissolved organic matter, CDOM)作为DOM的重要组成部分, 不仅能够强烈吸收紫外辐射, 引发光化学反应, 也是影响遥感反演模型精度的重要参数<sup>[2,3]</sup>。在自然条件下CDOM的来源复杂, 主要分为内源和外源<sup>[4]</sup>。内源CDOM主要来自于水体初级生产力本身产生的动植物残体、死亡藻类及微生物残体等, 而外源主要是指流域颗粒和溶解态有机物质<sup>[5]</sup>。紫外吸收光谱因其灵敏度高, 已经成为研究CDOM组成及来源的重要手段, 并广泛应用于湖泊和沉积物中CDOM的研究<sup>[6]</sup>。

国内外学者对CDOM吸收特征的研究主要集中在吸收系数的季节和地区差异性及其来源辨识<sup>[7-9]</sup>。

Shang等<sup>[10]</sup>通过对中国5个湖区的CDOM研究发现, 东北湖区 $[a(355)]$  (4.07±2.31)/nm值高于青藏高原湖区(0.79±0.67)/nm和云贵高原湖区(2.41±1.41)/nm。陈晓玲等<sup>[11]</sup>发现长江中游湖泊CDOM吸收系数 $[a(355)]$ 的浓度范围为0.37—1.77/nm, 显著高于海洋中的CDOM吸收系数。此外, CDOM的组成多样性受气候变化和环境因素的共同影响, 例如温度、降水、大气酸沉降和土地利用, 都会改变CDOM的特性<sup>[12,13]</sup>。一些研究发现, 水质参数与CDOM光学特性之间也存在显著的相关关系, 如N和P<sup>[14]</sup>。且在不同的营养状态下, CDOM吸收系数也会产生显著差异<sup>[15]</sup>。目前有关高原湖泊CDOM的光学特性及分布特征的研究, 及环境因子对CDOM的影响的研究相对较少, 尤其是对低营养状态的CDOM光学特性的研究更加缺乏。

洱海(25°36′—25°58′N, 100°06′—100°28′E)是

收稿日期: 2020-05-27; 修订日期: 2020-11-10

基金项目: 中国科学院科学仪器开发项目(YJKYYQ20170044); 国家自然科学基金(41773081); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-003)资助 [Supported by the Scientific Instrument Development Project of the Chinese Academy of Sciences (YJKYYQ20170044); the National Natural Science Foundation of China (41773081); the National Water Pollution Control and Treatment Science and Technology Major Project, China (2017ZX07203-003)]

作者简介: 管玉莹(1995—), 女, 硕士研究生; 主要从事溶解性有机物生物地球化学循环。E-mail: 996363893@qq.com

通信作者: 韩睿明(1980—), 男, 教授, 博士; 主要从事水环境生态修复研究。E-mail: ruiming.han@njnu.edu.cn 虞功亮(1970—), 男, 副研究员, 博士; 主要从事水环境遥感及蓝藻生物学研究。E-mail: Yugl@ihb.ac.cn \*共同通信作者

云南省第二大高原淡水湖, 流域面积2565 km<sup>2</sup>。洱海作为大理市生活、灌溉和工业用水的主要水源地, 其农业源入湖污染负荷要远高于工业源、生活源及旅游人口等其他污染源负荷<sup>[16]</sup>。研究表明, 1988—2013年洱海氮磷总体处于II—III类水。总氮在2003年前后出现拐点, 2003—2013年期间总氮浓度一直维持在III类水平。且在2003年后浮游藻类Chl.a浓度是之前平均浓度的10余倍<sup>[16]</sup>。洱海在持续的富营养化过程中, 不仅表现为水质恶化, 而且可能导致生态系统的结构发生改变, 发生由“水草型”向“藻型”的稳态转换<sup>[17]</sup>。藻类的代谢和死亡分解会增加水体中的CDOM, 同时藻类生长也在吸收利用水体中的有机碳源<sup>[18, 19]</sup>。因此, 本次研究以CDOM作为一个新角度, 通过对洱海表层水体CDOM的组成来源及其与环境因子之间的关系进行分析, 以期对洱海水质的优化提供一定的理论基础, 也是对高原湖泊CDOM数据库的补充。

## 1 数据与方法

### 1.1 样点采集与处理

本研究依托洱海监测站2018年11月至2019年10月常规采样, 选取洱海全湖11个点逐月采样 ( $N=129$ ), 采样点分布如图1所示。采集的水样当天运回实验室, 进行过滤。原水样经过Whatman GF/F膜(450℃灼烧4h)后过滤, 将一部分滤液转入棕色玻璃瓶中, 用于测定DOC浓度; 剩余滤液经过0.22 μm Millipore膜, 用于CDOM吸收系数的测定。DOC经由总有机碳仪测定; CDOM吸收系数由岛津分光光度计测定, 波段扫描范围为200—900 nm, 间隔1 nm, 且用Milli-Q水为空白对照。

### 1.2 数据处理

**理化指标** 水温和pH在现场用YSI仪测定; 总氮(TN)采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法测定; 总磷(TP)和正磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ )通过钼锑抗分光光度法测定; 氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、硝氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )等测定方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版); 叶绿素 $a$ (Chl.a)采用热乙醇法测定。

**CDOM吸收系数** [ $a(440)$ ]: CDOM在波长440 nm处的吸收系数, 公式如下<sup>[20, 21]</sup>:

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = 2.303 \times A(\lambda) / L \quad (1)$$

式中,  $A(\lambda)$ 为波长 $\lambda$ 吸光度,  $L$ 为光路路径(m)。CDOM浓度选取440 nm处的吸收系数来表示。

**光谱斜率( $S_{275-295}$ ):** CDOM在275—295 nm波段处的吸收光谱的斜率, /nm; **光谱斜率( $S_{350-400}$ ):** CDOM在350—400 nm波段的吸收光谱的斜率,

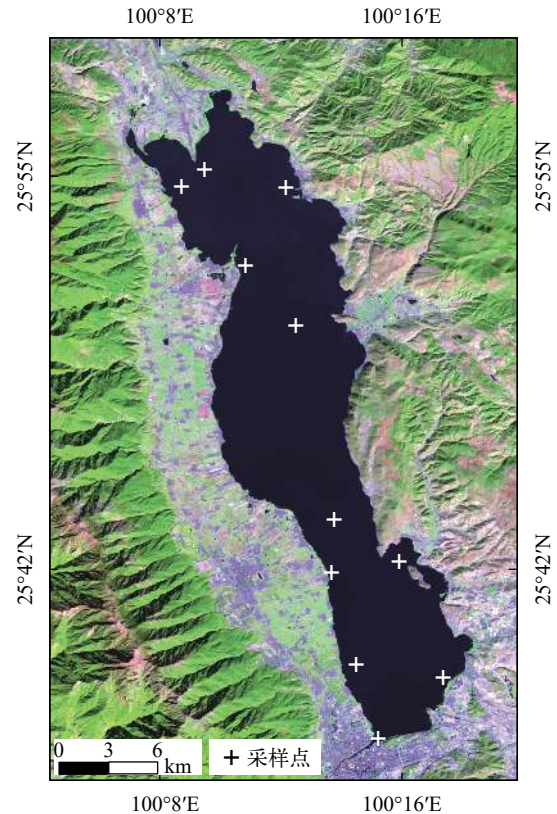


图1 洱海采样点位置

Fig. 1 Sampling sites of Erhai Lake

/nm。公式如下<sup>[22, 23]</sup>:

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_{\text{CDOM}}(\lambda_0) \exp [S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (2)$$

式中,  $\lambda$ 为测定波长,  $\lambda_0$ 为参照波长, 本文选取440 nm。采用最小二乘法对斜率进行计算,  $S_{275-295}$ 在一定程度上可以反映光化学反应信息。

**光谱斜率比值 $S_R$ :**  $S_{275-295}$ 与 $S_{350-400}$ 的比值, 反映了DOM的组成特征及分子量信息<sup>[24]</sup>。

**SUVA<sub>254</sub>:** 表征CDOM的腐殖化程度, 该值越大, 表明腐殖化程度越大。定义为254 nm处的吸光度除以DOC浓度,  $\text{L}/(\text{mg} \cdot \text{m})$ <sup>[25]</sup>。

**$M$** 表征分子量和腐殖化程度, 定义为250和365 nm处吸收系数的比值<sup>[26]</sup>。

**营养状态指数(Trophic State Index, TSI)**根据Wei等<sup>[27]</sup>提供的方法测定, 公式如下:

$$TSI = 0.421 \times TSI(\text{Chl.}a) + 0.282 \times TSI(\text{TN}) + 0.297 \times TSI(\text{TP}) \quad (3)$$

$$TSI(\text{Chl.}a) = 10 \times (2.5 + 1.086 \times \ln \text{Chl.}a) \quad (4)$$

$$TSI(\text{TN}) = 10 \times (5.453 + 1.694 \times \ln \text{TN}) \quad (5)$$

$$TSI(\text{TP}) = 10 \times (9.436 + 1.624 \times \ln \text{TP}) \quad (6)$$

### 1.3 统计分析

本文采用非参数检验方法(Kruskal-Wallis, K-W)检验各参数的时空差异,该分析在Rstudio软件中的kruskal.test()函数实现。检验各参数差异性,在 $P<0.05$ 水平认为显著差异。采用非度量多维尺度分析(The non-metric multidimensional scaling, NMDS)分析周年DOM吸收和荧光参数时间和空间上的相似性,该分析利用Rstudio软件中的Vegan包中的metaMDS()函数实现。

## 2 结果和讨论

### 2.1 水质参数特征

如表 1 所示, TN和TP浓度分别为0.05—1.38和0.001—0.09 mg/L, 总体处于国家 II—III类水标

准。 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ 的浓度分别为0.04—0.29、0.003—0.1和0.001—0.07 mg/L。Chl.a浓度在5.81—37.37  $\mu\text{g/L}$ , 且秋季浓度最高。卫志宏等<sup>[28]</sup>研究结果表明, 由于乌龙藻和惠氏微囊藻大量繁殖, 洱海浮游植物生物量在秋季最高, 且最高值出现在11月。DOC浓度为3.81—25.57 mg/L, 秋季浓度最高, 冬季浓度最低。综合TN、TP和Chl.a指标计算洱海营养状态指数, 洱海营养状态指数在33.04—55.75波动, 均处于中度营养化( $30<TSI<50$ )和轻度富营养化( $50\leq TSI<60$ ), 说明洱海目前处于中度营养-轻度富营养化过渡中。该研究结果与陈小华等<sup>[16]</sup>的结果一致, 均认为洱海已经由贫营养转为富营养化, 且流域畜禽养殖业和种植业等农业面源污染是造成洱海富营养化的主要驱动力。

表 1 洱海水质参数

Tab. 1 The physio-chemical parameters of water samples in Erhai Lake

季节Season	水温 Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH	TN (mg/L)	TP (mg/L)	$\text{NO}_3^-$ - N (mg/L)	$\text{NH}_4^+$ - N (mg/L)	$\text{PO}_4^{3-}$ (mg/L)	Chl.a ( $\mu\text{g/L}$ )	TSI	DOC (mg/L)
春季Spring	15.95±3.66	8.80±0.14	0.64±0.21	0.04±0.02	0.13±0.01	0.05±0.01	0.01±0.001	16.13±3.68	49.04±2.09	6.05±0.72
夏季Summer	24.04±0.72	8.68±0.26	0.53±0.25	0.05±0.02	0.13±0.04	0.05±0.02	0.01±0.01	16.32±9.01	47.46±4.51	10.52±7.30
秋季Autumn	20.95±3.21	8.75±0.21	0.65±0.15	0.02±0.01	0.18±0.06	0.05±0.02	0.01±0.003	20.83±5.61	44.62±4.20	17.35±9.63
冬季Winter	13.11±1.33	8.79±0.12	0.70±0.15	0.04±0.04	0.09±0.06	0.05±0.04	0.02±0.01	15.12±3.87	48.52±3.47	5.93±1.05

### 2.2 CDOM浓度变化特征

如图 2 所示, 所有样点的吸收特性都极为相似, 数值间差距较小: 在短波附近吸收强烈, 随着波长的增大而逐渐减小, 直至700/nm处时趋向于零。2018年11月至2019年10月, CDOM吸收系数 $[a(440)]$ 的值在0.22—0.90/m, 平均值为(0.46±0.13)/m。如图 3 所示, 洱海的CDOM吸收系数随月份变化差异显著

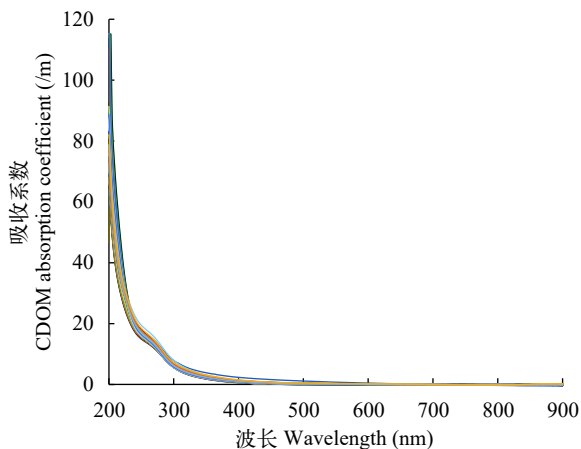


图 2 2018—2019年洱海CDOM吸收光谱

Fig. 2 CDOM absorption spectra in Lake Erhai from 2018 to 2019

( $P<0.001$ ), 其中, 6月的均值最高, 达(0.58±0.24)/m; 2月份的均值最低, 为(0.32±0.23)/m。在空间上,  $[a(440)]$ 值差异较小( $P=0.97$ ), 说明总体上洱海全湖CDOM浓度较为平均。当营养水平发生变化时, 中营养化水平下的 $[a(440)]$ 值要高于轻度富营养化水平。

CDOM吸收系数均在秋季最高, 夏季次之, 该结果与前人的研究结果一致<sup>[28]</sup>。夏秋季节的相对高温会使水体中的微生物活性增加, 且洱海夏秋季节雨水增多, 陆地径流增加, 也为水体中微生物异养代谢提供相对充足的碳源<sup>[29]</sup>。光降解是水体DOM损失的重要途径之一, 云南高原夏、秋季的总辐射低于冬、春季, 表明洱海DOM夏秋光降解低于冬春季, 在一定程度上可以解释CDOM吸收系数的季节差异性。

大量研究表明, CDOM与DOC浓度之间有显著的相关关系<sup>[30, 31]</sup>。2018年11月至2019年10月间,  $[a(440)]$ 与DOC浓度之间的回归模型表明(图 4), 作为中国典型高原湖泊的洱海, 其表层水体中的 $[a(440)]$ 与DOC存在显著的正相关关系( $R^2=0.117$ ,  $P<0.001$ ), 说明DOC与CDOM的来源具有一定的相似性。2019年8—10月, 洱海DOC浓度显著升高, 均

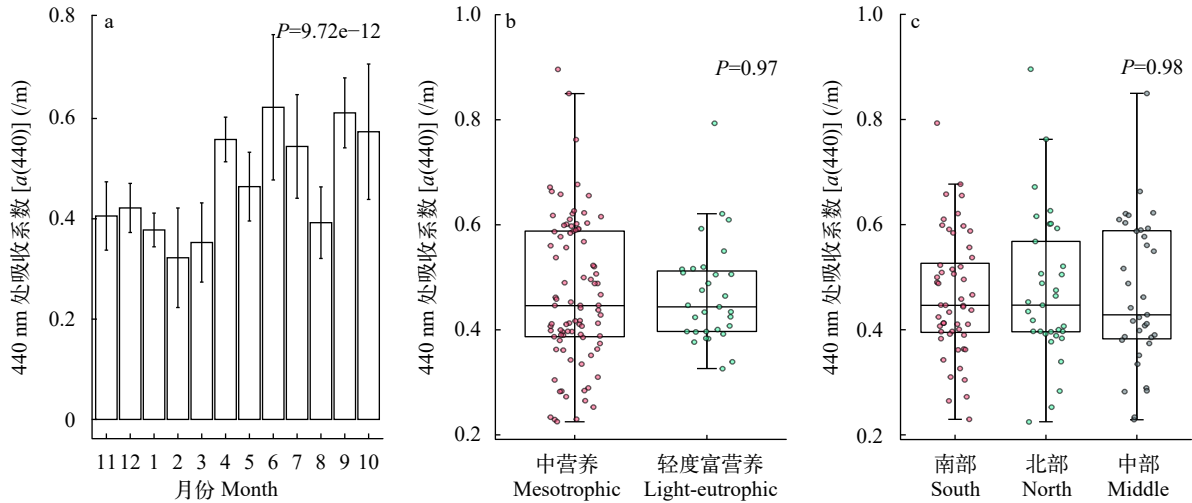
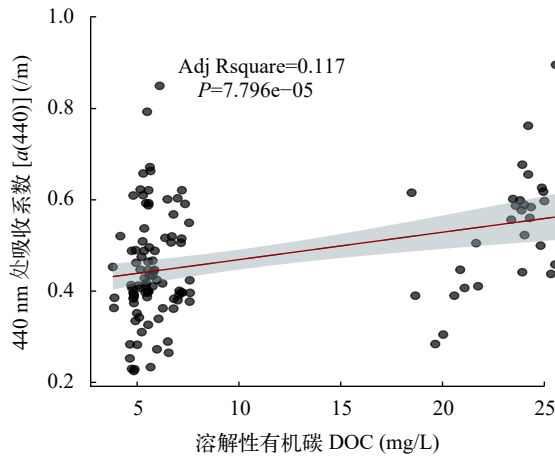


图3 2018年11月至2019年10月洱海CDOM浓度变化

Fig. 3 The variation of CDOM concentration in Erhai Lake from 2018 to 2019

图4 洱海 $[a(440)]$ 与DOC浓度的相关分析(拟合区阴影表示95%置信区间)Fig. 4 The correlation between $[a(440)]$ and DOC(The fit zone shadow represents the 95% confidence interval)

值达到 $(23.27 \pm 1.92)$  mg/L, 其余月份的均值仅为 $(5.84 \pm 1.61)$  mg/L。将该部分点位(32个)去除后, DOC与 $[a(440)]$ 线性回归模型的决定系数和显著性均降低( $R^2=0.016$ ,  $P<0.05$ )。结果显示, 利用洱海CDOM吸收系数建立遥感模型估算DOC浓度是可行的。

### 2.3 CDOM吸收特征参数

基于吸收特征参数 $S_R$ 、 $SUVA_{254}$ 、 $M$ 和 $S_{275-295}$ 对洱海CDOM的组成和来源进行解析。2018—2019年,  $S_R$ 、 $SUVA_{254}$ 、 $M$ 和 $S_{275-295}$ 等吸收光特征参数随着时间变化显著( $P<0.001$ ), 在空间 and 不同营养状态下差异不显著( $P>0.05$ )。陆源 $S$ 值相对较低, 大约为 $0.01/\text{nm}$ , 大洋寡营养区 $S$ 值在 $0.02-0.03/\text{nm}$ 左右<sup>[32]</sup>; 2018—2019年, 洱海 $S_{275-295}$ 值在 $0.016-0.024/\text{nm}$ , 值大于 $0.02/\text{nm}$ 的样本数占比41.46%, 与

内蒙古高原的呼伦湖和贝尔湖 $S_{275-295}$ 的均值( $0.02/\text{nm}$ )相似<sup>[33]</sup>。 $M$ 的变化范围为 $7.17-11.40$ , 年均值为 $9.76 \pm 0.74$ , 与 $S_{275-295}$ 之间有较显著的相关性, 但受拟合范围影响<sup>[34]</sup>。洱海的 $M$ 与 $S_{275-295}$ 在时间上的变化趋势相似, 冬季最高, 可能的原因是云南高原在夏、秋季的辐射低于冬、春季, 冬季较强的光降解将复杂的大分子有机质分解成小分子物质<sup>[35]</sup>。 $S_R$ 的变化为 $0.98-1.28$ , 且 $S_R$ 值大于1的样点数达157个, 占样本总数的95.7%。根据前人的研究, 通常认为 $S_R>1$ , CDOM分子量小且光漂白度低, 多为浮游植物和细菌活动等内源产出<sup>[36]</sup>。2018年11月至2019年7月,  $SUVA_{254}$ 变化范围为 $0.60-3.81 \text{ L}/(\text{mg} \cdot \text{m})$ , CDOM腐殖质的芳香性随季节变化较大, 8—10月芳香性显著降低, 分子量变大, 可能是由于期间降水增多, 土壤中的大分子腐殖质输入导致分子量变大。

据2018—2019年洱海样本的 $SUVA_{254}$ 、 $S_{275-295}$ 、 $S_R$ 和 $M$ 参数进行NMDS分析, 结果如图5所示。在二维空间上NMDS的应力值小于 $0.027$ , 一般认为: 应力值 $<0.05$ , 排序效果较好<sup>[37]</sup>。结果表明以上4种CDOM吸收特征参数排序结果代表性较好。通过前两轴排序图(图6)可以发现, 洱海多数样点集中在x轴的左边, 不同样本存在较为明显的季节差异, 说明洱海CDOM光学特性主要受到季节变化的影响。所有样点可分为2个时期, 第I时期是2018年11月至2019年7月; 第II时期是2019年8—10月。从时间上分析, 春季和夏季CDOM的吸收特性较为相似, 8—10月CDOM的吸收特性较为一致, 且显著不同于其他月份。主要是因为8—10月DOC浓度显著升高, 导致 $SUVA_{254}$ 值显著降低, 影响排序结果。从空间上分析, 洱海全湖CDOM光学特性无明显

差异。

### 2.4 CDOM吸收特性与环境因子之间的关系

为了进一步分析营养盐和其他环境因子与CDOM相关参数的关系,本文通过PCA分析确定在不同时期对CDOM影响较大的参数。数据在分析前均经过 $\lg(x+1)$ 的转换,通过999次随机置换检验环境变量的显著性,从而剔除不显著的环境参数(图7)。结果显示,不同时期第一和第二排序轴的特征值分别为39.9%和20.8%,50.9%和26.4%。

在不同的时期,水温、pH和TP对CDOM特征参数均有显著影响。前人研究表明,pH与CDOM吸光度之间具有显著的相关关系<sup>[38]</sup>。此外,TP在第I时期与DOC和 $[a(440)]$ 均呈现显著正相关关系;在第II时期,与DOC和 $[a(440)]$ 均呈现显著负相关关系。邵田田等<sup>[7]</sup>在辽河流域中也发现TP对CDOM吸收特征有较大影响。结果表明,CDOM与水环境中磷的迁移转化有重要联系,可通过CDOM浓度反映水体TP的状态。

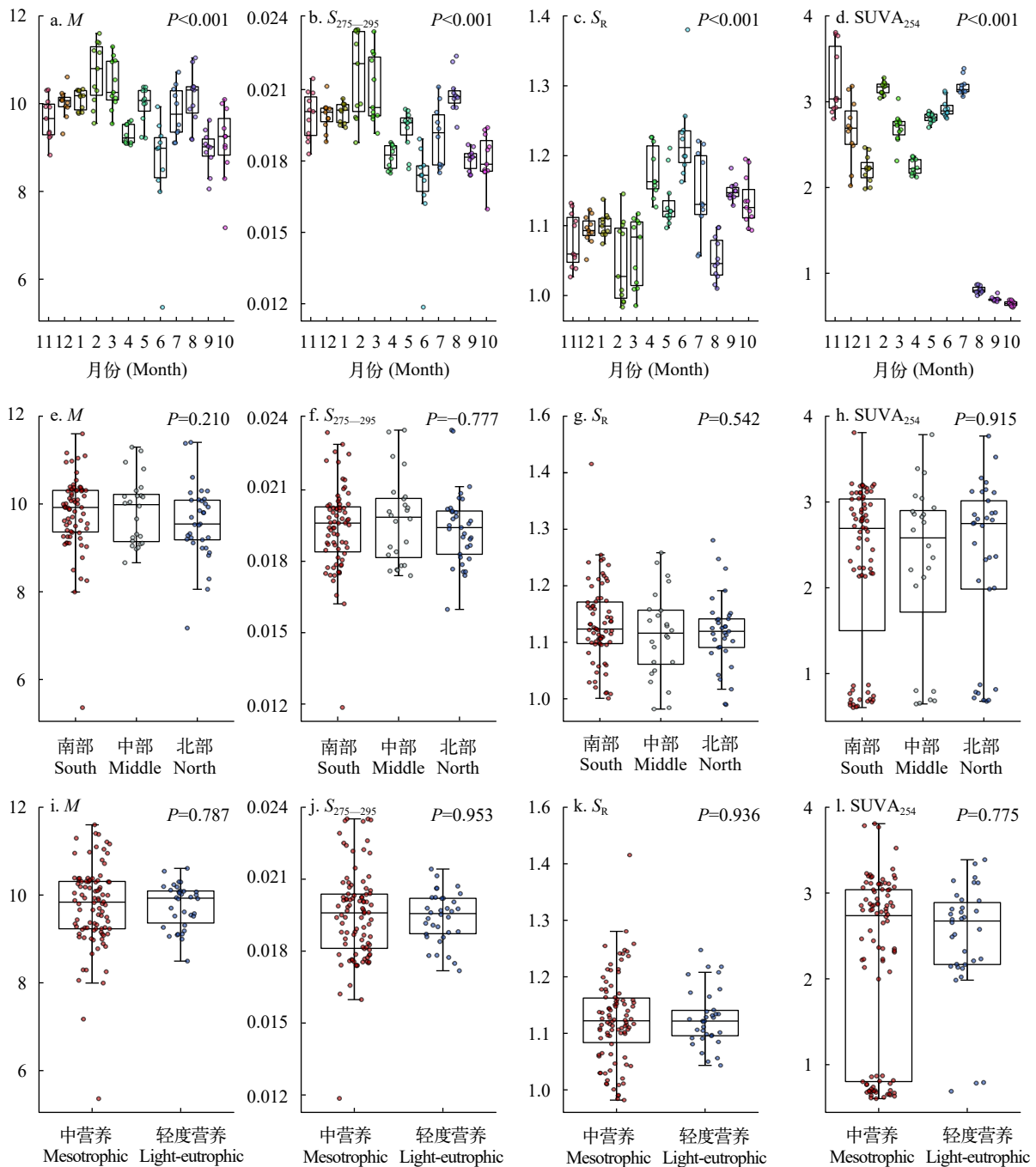


图5 2018—2019年洱海CDOM吸收特征参数变化

Fig. 5 The variation of CDOM absorption characteristic parameters in Erhai Lake from 2018 to 2019

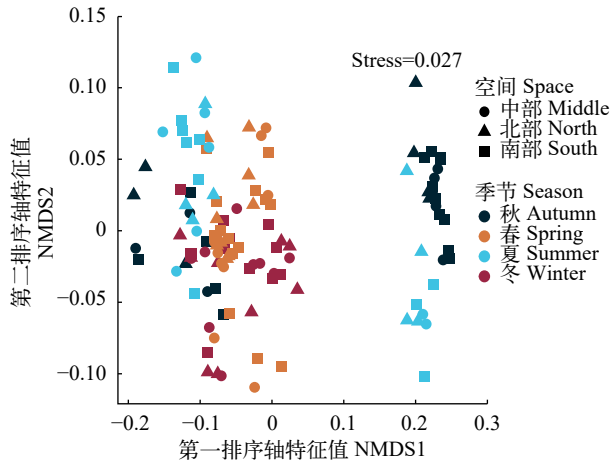


图6 DOM吸收系数的非度量多维尺度排序

Fig. 6 Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) analysis of DOM absorption parameters

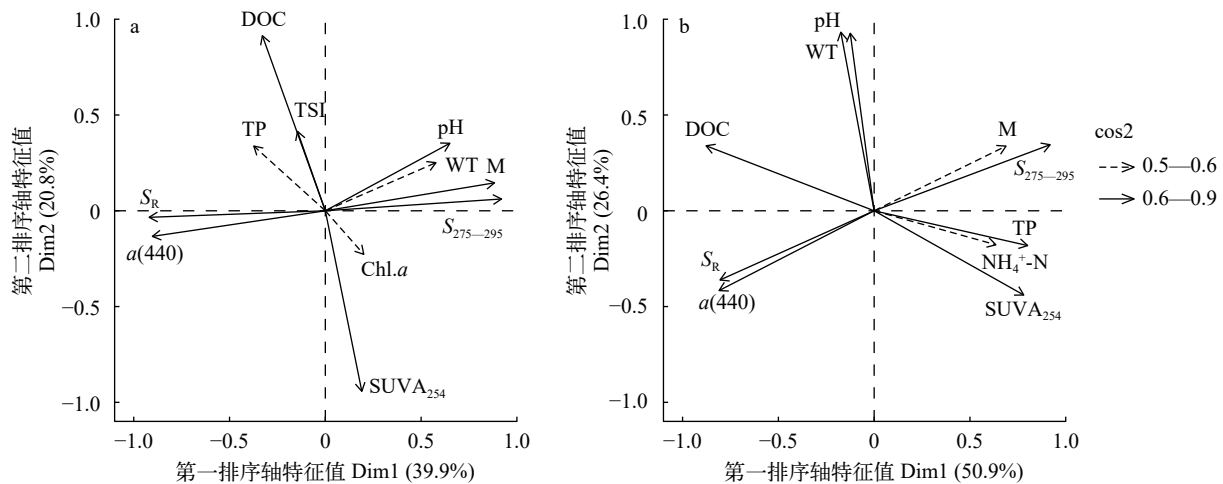


图7 基于PCA分析洱海CDOM吸收参数与环境因子之间的关系

Fig. 7 Principle component analysis between CDOM absorption parameters and environmental variables in Erhai Lake

### 3 结论

(1)洱海营养状态主要处于中营养-轻度富营养的过渡中( $33.04 < TSI < 55.75$ )。TN和TP的浓度范围处于国家地表水II—III类水标准。(2)洱海CDOM、DOC随时间和营养水平的变化差异显著,但空间上差异较小; $S_R$ 、 $SUVA_{254}$ 、 $M$ 和 $S_{275-295}$ 随时间变化差异显著,随空间和营养水平变化差异较小。根据CDOM吸收特征参数可将CDOM分为两类,分别为:第I时期(2018年11月至2019年7月)和第II时期(2019年8—10月),主要差异在于第II时期 $SUVA_{254}$ 低于第I时期。(3)基于 $S_R$ 、 $S_{275-295}$ 、 $M$ 和 $SUVA_{254}$ 发现,洱海CDOM分子量较小,主要以内源为主,可能来源于浮游植物降解或者微生物活动。(4)在不同时期,影响CDOM吸收特征参数的环境变量有所差别,但水温、pH和TP始终对CDOM浓度产生较大影响。

$TSI$ 、 $Chl.a$ 与 $[a(440)]$ 只在第I时期存在显著的相关关系,但是相关系数不高。虽然有研究表明浮游植物在光合作用下会产生DOM,但是在本研究中浮游植物生物量对DOM吸收系数的影响较小<sup>[39]</sup>。可能的原因是较高的pH抑制浮游植物的生长,影响了湖泊中浮游植物的初级生产力,或者是因为藻类生长和腐烂降解产生了较多无色的DOM成分。虽然洱海CDOM不是由浮游植物直接产生的,但可能与浮游植物的新陈代谢和降解密切相关<sup>[40]</sup>。且洱海作为中营养与轻度富营养化初期,细菌C、N和P量可能高于浮游植物,微生物食物链成为有机质流动的主要途径<sup>[29]</sup>。在不同的时期, $S_{275-295}$ 与 $M$ 之间存在显著相关关系,说明洱海CDOM能通过光降解将复杂的大分子有机质分解,且pH会对光降解产生一定的影响<sup>[38]</sup>。

### 参考文献:

- [1] Catalán N, MarcéR, KothawalaD N, *et al.* Organic carbon decomposition rates controlled by water retention time across inland waters [J]. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(7): 501-504.
- [2] Liu L Z, Huang Q, Wu Y M, *et al.* Optical absorption properties of chromophoric dissolvable organic matter (CDOM) and their quantitative relationships with dissolved organic carbon in the Poyang Lake in dry season [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, **33**(8): 762-768. [刘丽贞, 黄琪, 吴永明, 等. 鄱阳湖枯水期CDOM光吸收特性与DOC浓度的定量关系研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2017, **33**(8): 762-768.]
- [3] Hestir E L, Brando V, Campbell G, *et al.* The relationship between dissolved organic matter absorption and dissolved organic carbon in reservoirs along a temperate to tropical gradient [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015(156): 395-402.
- [4] Muscarella M E, Boot C M, Broeckling C D, *et al.* Resource heterogeneity structures aquatic bacterial com-

- munities [J]. *The ISME Journal*, 2019, **13**(9): 2183-2195.
- [5] Jiang G, Ma R, Duan H, *et al.* Remote determination of chromophoric dissolved organic matter in lakes, China [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2014, **7**(11): 897-915.
- [6] Feng K X, Li Y F, Jiang X, *et al.* Distribution and source analysis of chromophoric dissolved organic matter of the surface sediments in the Danjiangkou Reservoir [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(2): 373-382. [冯可心, 李永峰, 姜霞, 等. 丹江口水库表层沉积物有色可溶性有机物空间分布特征及其来源分析 [J]. *环境化学*, 2016, **35**(2): 373-382.]
- [7] Wang X, Wu Y, Bao H, *et al.* Sources, transport, and transformation of dissolved organic matter in a large river system: illustrated by the Changjiang River, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, **124**(12): 3881-3901.
- [8] Shao T T, Li L Y, Wang T, *et al.* CDOM optical characteristics and influences factors affected on them for rivers in Liaohe River watershed in autumn [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1558-1568. [邵田田, 李柳阳, 王涛, 等. 辽河流域河流秋季CDOM光学特性及影响因素研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1558-1568.]
- [9] Blough N V. Chromophoric DOM in the coastal environment [J]. *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*, 2002: 509-546.
- [10] Shang Y, Song K, Wen Z, *et al.* Characterization of CDOM absorption of reservoirs with its linkage of regions and ages across China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(16): 16009-16023.
- [11] Chen X L, Chen L Q, Yu Z F, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter optical characteristics and spatial distribution in the lakes of the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Science*, 2009, **21**(2): 248-254. [陈晓玲, 陈莉琼, 于之锋, 等. 长江中游湖泊CDOM光学特性及其空间分布对比 [J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 248-254.]
- [12] Creed I F, Bergström A K, Trick C G, *et al.* Global change-driven effects on dissolved organic matter composition: Implications for food webs of northern lakes [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(8): 3692-3714.
- [13] Battin T J, Kaplan L A, Findlay S, *et al.* Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **2**(8): 95-100.
- [14] Wu Y, Li Y, Lü J, *et al.* Influence of sediment DOM on environmental factors in shallow eutrophic lakes in the middle reaches of the Yangtze River in China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, **76**(4): 142.
- [15] Zhang Y, Zhang E, Yin Y, *et al.* Characteristics and sources of chromophoric dissolved organic matter in lakes of the Yungui Plateau, China, differing in trophic state and altitude [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2645-2659.
- [16] Chen X H, Qian X Y, Li X P, *et al.* Long-term trend of eutrophication state of Lake Erhai in 1988-2013 and analyses of its socio-economic drivers [J]. *Journal of Lake Science*, 2018, **30**(1): 70-78. [陈小华, 钱晓雍, 李小平, 等. 洱海富营养化时间演变特征(1988-2013年)及社会经济驱动分析 [J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(1): 70-78.]
- [17] Scheffer M, Nes E H V. Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size [J]. *Hydrobiologia*, 2005, **584**(1): 455-466.
- [18] Her N, Amy G, Park H R, *et al.* Characterizing algogenic organic matter (AOM) and evaluating associated NF membrane fouling [J]. *Water Research*, 2004, **38**(6): 1427-1438.
- [19] Liu X J, Duan S S, Li A F. Effects of organic carbon sources and nitrogensources on the growth of *Phaeodactylum tricornutum* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, **32**(2): 252-257. [刘晓娟, 段舜山, 李爱芬. 有机碳源和氮源对三角褐指藻生长的影响 [J]. *水生生物学报*, 2008, **32**(2): 252-257.]
- [20] Watanabe F, Alcântara E, Curtarelli M, *et al.* Landsat-based remote sensing of the colored dissolved organic matter absorption coefficient in a tropical oligotrophic reservoir [J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2018(9): 82-90.
- [21] Xu J, Fang C, Gao D, *et al.* Optical models for remote sensing of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) absorption in Poyang Lake [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018(142): 124-136.
- [22] Song K, Shang Y, Wen Z, *et al.* Characterization of CDOM in saline and freshwater lakes across China using spectroscopic analysis [J]. *Water Research*, 2019(150): 403-417.
- [23] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains [J]. *Limnology & Oceanography*, 1981, **26**(1): 43-53.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, **337**(2): 133-149.
- [27] Wei M, Gao C, Zhou Y, *et al.* Variation in spectral characteristics of dissolved organic matter in inland rivers in various trophic states, and their relationship with phytoplankton [J]. *Ecological Indicators*, 2019(104): 321-332.
- [28] Wei Z H. Community structure and seasonal succession of phytoplankton in Erhai Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(4): 21-25. [卫志宏. 洱海浮游植物群落结构及季节演替 [J]. *水生生态学杂志*, 2012, **33**(4): 21-25.]
- [29] Tan H X, Hu Y A, Mei Z P. Research of bacteria utilizing dissolved organic matter [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, **24**(3): 271-281. [谭洪新, 胡煜昂, 梅志平. 细菌利用溶解有机质(DOM)的研究 [J]. *水生生物学报*, 2000, **24**(3): 271-281.]
- [30] Jiang G, Ma R, Loisel S A, *et al.* Remote sensing of particulate organic carbon dynamics in a eutrophic lake (Taihu Lake, China) [J]. *Science of The Total Environ-*



- ment, 2015(532): 245-254.
- [31] Jiang G J, Ma R H, Duan H T. Estimation of DOC concentration using CDOM absorption coefficients: a case study in Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2235-2243. [姜广甲, 马荣华, 段洪涛. 利用CDOM吸收系数估算太湖水体表层DOC浓度 [J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2235-2243.]
- [32] Blough N V. Chromophoric DOM in the Coastal Environment [M]. *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*. Elsevier Inc. 2002: 509-546.
- [33] Wen Z D, Song K S, Zhao Y, et al. Influence of environmental factors on spectral characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Inner Mongolia Plateau, China [J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2016, **20**(2): 787-801.
- [34] Wang L, Zhao D Z, Yang J H, et al. Near ultraviolet absorption spectral properties of chromophoric dissolved organic matter in the north area of Yellow Sea [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(12): 3379. [王林, 赵冬至, 杨建洪, 等. 黄海北部CDOM近紫外区吸收光谱特性研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(12): 3379.]
- [35] Liu Y Y, Qin J H, Sun H. UV-VIS spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) of the natural alpine rivers in the western Sichuan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2108, **38**(9): 283-292. [刘堰杨, 秦纪洪, 孙辉. 川西高海拔河流中溶解性有机质(DOM)紫外-可见光吸收光谱特征 [J]. 环境科学学报, 2108, **38**(9): 283-292.]
- [36] Xiao Y H, Sara-Aho T, Hartikainen H, et al. Contribution of ferric iron to light absorption by chromophoric dissolved organic matter [J]. *Limnology & Oceanography*, 2013, **58**(2): 653-662.
- [37] Li Z Q, Li W Q, Chen Z Y, et al. Influencing factors and classifications of arc-shaped coasts in South China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(5): 595-606. [李志强, 李维泉, 陈子燊, 等. 华南岬间弧形海岸平面形态影响因素及类型 [J]. 地理学报, 2014, **69**(5): 595-606.]
- [38] Timko S A, Michael G, Cooper W J. Influence of pH on fluorescent dissolved organic matter photo-degradation [J]. *Water Research*, 2015(85): 266-274.
- [39] Emerson S, Hedges J. Chemical oceanography and the marine carbon cycle [J]. *Stable and Radioactive Isotopes*, 2008, **131**(6): 187.
- [40] Li Z. Phytoplankton community and its related carbon sinking in the Changjiang (Yangtze River) estuary and adjacent waters [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2018: 84-85. [李照. 长江口邻近海域浮游植物群落特征及其碳沉降研究 [D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2018: 84-85.]

## THE CHARACTERISTICS OF CDOM OPTICAL AND ITS INFLUENCE FACTORS IN ERHAI LAKE

GUAN Yu-Ying<sup>1,2</sup>, HUO Da<sup>2,3</sup>, WU Xing-Yuan<sup>2</sup>, HAN Rui-Ming<sup>1,4</sup> and YU Gong-Liang<sup>2</sup>

(1. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Algal Biology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) is a chemical intermediary substance between terrestrial ecosystems and lake ecosystems, which has a profound impact on the structure and function of lakes. In order to understand the optical characteristics of CDOM and its influencing factors, 120 surface water samples from Erhai Lake were collected from November 2018 to October 2019. The composition and source of CDOM were analyzed by UV-Vis, and the correlation between optical properties and environmental factors was clarified by the principal component analysis (PCA). The result showed that CDOM absorption coefficient [ $a(440)$ ] ranged from 0.22 to 0.90/m with significant difference in temporal distribution ( $P < 0.01$ ) but no difference in trophic state ( $P = 0.97$ ). There was a positive correlation between [ $a(440)$ ] and dissolved organic carbon (DOC) ( $P < 0.01$ ), which was conducive to establish a remote sensing model for monitoring the spatial and temporal distribution characteristics of CDOM. Based on  $SUVA_{254}$ ,  $S_R$ ,  $M$  and  $S_{275-295}$ , it was found that optical characteristics of CDOM were significantly different with seasonal changes. All samples were mainly divided into the following two periods by the NMDS: November 2018 to July 2019 and August to October 2019. The latter  $SUVA_{254}$  was lower than the former. The molecular weight of CDOM in Erhai Lake was relatively small, mainly due to endogenous production. In different periods, water temperature, pH and TP always have a greater impact on CDOM absorption characteristics. This paper clarified distribution characteristics of CDOM and its influencing factors, and provided a theoretical basis for the water management in Erhai Lake.

**Key words:** Lake Erhai; CDOM; Optical properties; The trophic state; PCA