

洱海中北部水体 DOM 的同位素和荧光特征及其地球化学指示意义*

陈 玥¹, 赵青峰¹, 张 灿², 李祥忠³, 何毓新^{1**}

(1: 浙江大学地球科学学院, 浙江省地学大数据与地球深部资源重点实验室, 杭州 310027)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 211135)

(3: 云南大学, 云南省地球系统科学重点实验室, 昆明 650506)

摘 要: 洱海作为一个受人类活动影响强烈的典型湖泊, 经历了富营养化和人为生态修复的过程, 其碳库特征和碳循环模式可能随之改变。溶解性有机质 (DOM) 是湖泊有机碳循环过程的直接参与者, 不同来源 DOM 具有不同的生物地球化学过程和归宿。因此, 研究洱海水体 DOM 的组成和来源特征, 有利于更好地理解湖泊富营养化和环境修复过程的有机碳循环模式。本研究以洱海中北部 4 个区域的水柱为研究对象, 利用稳定碳同位素、紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱技术, 解析洱海中北部水体 DOM 浓度、组成和来源的空间分布特征, 并探究其地球化学指示意义。研究结果表明, 洱海中北部水体 DOM 浓度整体稳定, 变化范围为 4.21~4.66 mg/L (均值为 (4.37 ± 0.12) mg/L)。对比洱海早期 DOM 浓度结果发现, 周期性的富营养化对 DOM 表现出季节性波动但长期不断积蓄的特征; 与云南其他高原湖泊相比, 洱海 DOM 浓度处于中等水平, DOM 浓度记录了湖泊生产力的强度并与营养类型有一定的响应关系。洱海中北部水体稳定碳同位素变化范围为 $-26.8\text{‰} \sim -26.2\text{‰}$ (均值为 $-26.4\text{‰} \pm 0.2\text{‰}$), 吸光系数 a_{355} 值、紫外吸光度 SUVA₂₅₄ 值、荧光指数 FI 值和自生源指数 BIX 值变化范围分别为 1.36~2.58 m⁻¹ (均值为 (1.78 ± 0.33) m⁻¹)、3.10~3.38 L/(mg·m) (均值为 (3.20 ± 0.08) L/(mg·m))、1.57~1.69 (均值为 1.64 ± 0.03) 和 1.13~1.34 (均值为 1.19 ± 0.06)。稳定碳同位素和光谱参数结果表明有色溶解性有机质、荧光溶解性有机质和总 DOM 在来源上存在一定的相似性, 受到浮游藻类等内源物质和陆源腐殖类有机物输入的共同影响; 对比其他湖泊发现光谱参数的绝对值主要用于判断水体 DOM 的整体背景特征, 参数波动则可能表征了水体 DOM 的变化。空间分布上, 近岸区域具有较高的新鲜内源 DOM 输入, 与北部农业活动导致的近岸初级生产力提升有关; 湖心区域内源 DOM 对水体的贡献逐渐减弱, 水体更多体现为腐殖化更强的残留 DOM 特征。水柱变化上, 近岸区域的水柱有机碳降解较快, 表层富营养化产生的内源 DOM 在水柱过程会被一定程度地消弭, 最终导致近岸区域深层水的 DOC 浓度和其他点位的差异相对于表层水变小; 湖心区域受控于多因素的共同影响, 但 DOM 特征总体变化不大。因此, 洱海富营养化导致的初级生产力对水体 DOM 碳库有直接贡献, 但这种效应主要体现在表层水体, 对湖泊水体长期碳汇的影响可能并不显著, 而 DOM 的性质除了受到初级生产力和有机质来源的影响之外, 地理、水文、生态环境等属性对 DOM 的影响也不容小觑。

关键词: 洱海; 溶解性有机质; 碳同位素; 紫外-可见吸收光谱; 三维荧光光谱; 富营养化

Isotopic and fluorescence characteristics of DOM in the water column of the north-central Lake Erhai and their geochemical significance*

Chen Yue¹, Zhao Qingfeng¹, Zhang Can², Li Xiangzhong³ & He Yuxin^{1**}

(1: Key Laboratory of Geoscience Big Data and Deep Resource of Zhejiang Province, School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

(3: Yunnan Key Laboratory of Earth System Science, Yunnan University, Kunming 650506, P.R.China)

* 2024-04-10 收稿; 2024-07-16 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (42073071) 和云南省基础研究计划项目 (202301AS070056) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: yxhe@zju.edu.cn。

Abstract: As a typical lake strongly influenced by human activities, Lake Erhai has experienced eutrophication and anthropogenic ecological restoration, and its carbon pool characteristics and carbon cycling patterns may change accordingly. As a direct participant in the organic carbon cycling process in lakes, dissolved organic matter (DOM) of different sources have different biogeochemical processes and fates. Therefore, studying the composition and source characteristics of DOM in lakes is beneficial for better understanding the organic carbon cycling patterns during lake eutrophication and environmental remediation processes. In this study, spatial distribution in concentrations, compositions and sources of DOM from water columns in the north-central areas of Lake Erhai were investigated by methods of stable carbon isotopes, ultraviolet fluorescence spectroscopy and three-dimensional fluorescence spectroscopy. The geochemical significances of isotopic and fluorescence characteristics of DOM in Lake Erhai also were discussed. Results showed that the total dissolved organic carbon concentration in the lake was stable, with a range of 4.21–4.66 mg/L (mean (4.37 ± 0.12) mg/L). By examining early DOM concentrations, it was found that periodic eutrophication exhibited seasonal fluctuations but long-term accumulation. Compared with other lakes on the Yunnan Plateau, the DOM concentration in Lake Erhai was at a moderate level, which recorded the intensity of lake productivity and had a certain response relationship with the degree of eutrophication. The stable carbon isotopes variation range was -26.8‰ – -26.2‰ (mean $-26.4\text{‰}\pm 0.2\text{‰}$), and the variation ranges of absorption coefficient a_{355} , specific ultra violet absorbance at 254 nm, fluorescence index and biological index were 1.36 – 2.58 m^{-1} (mean (1.78 ± 0.33) m^{-1}), 3.10 – 3.38 $\text{L}/(\text{mg}\cdot\text{m})$ (mean (3.20 ± 0.08) $\text{L}/(\text{mg}\cdot\text{m})$), 1.57 – 1.69 (mean 1.64 ± 0.03) and 1.13 – 1.34 (mean 1.19 ± 0.06), respectively. The stable carbon isotopes and spectral parameters suggested that chromophoric DOM, fluorescent DOM, and the overall DOM share similar organic source, and was influenced by both endogenous substances such as planktonic algae and humic organic matter from land-based sources. Comparison with other lakes revealed that absolute values of spectral parameters were mainly used to determine the overall background characteristics of DOM, while fluctuations in the parameters may characterize changes in lake water DOM. In terms of spatial distribution, the relative contributions of fresh endogenous DOM in surface waters from the lakeshore were associated with high primary productivity due to nutrient inputs from agricultural activities in the north. Meanwhile, the water bodies in the lake central area were characterized by residual DOM reflecting a stronger humification, largely due to lower contribution of fresh endogenous DOM. In terms of vertical variabilities, higher DOM degradation was observed in the water column at the lakeshore site, and the additional inputs of endogenous DOM from surface eutrophication being eliminated to a certain extent during the water column process. Although the DOM in the lake central area was influenced by multiple factors, the overall changes of DOM in the water column in the lake central area were relatively small. Therefore, primary productivity under lacustrine eutrophication condition contributes directly to lake DOM carbon pools, but mainly at the surface layer and in a relatively short-term manner. In the long-term perspectives, the lacustrine eutrophication does not have significant impact on the long-term organic carbon pool in the water bodies. In addition to being influenced by primary productivity and organic matter sources, the properties of DOM, such as geography, hydrology, and ecological environment, also have significant impacts on DOM.

Keywords: Lake Erhai; dissolved organic matter; carbon isotope; ultraviolet fluorescence spectroscopy; three-dimensional fluorescence spectroscopy; eutrophication

工业革命以来,人类活动不仅引发了全球气温升高、生物多样性减少、环境污染等问题,也直接或间接导致了全球表生环境碳循环模式的改变^[1]。湖泊作为陆地生态系统的重要组成部分,是流域内物质和能量迁移、转化的重要场所^[2-3],也是地球各圈层之间相互作用的重要连接点^[4-6]。虽然全球湖泊面积(5×10^6 km^2)仅为海洋面积的1.38%,湖泊有机碳埋藏通量却是海洋的25%~58%^[7-8]。城市化和工农业污染导致的湖泊富营养化不仅严重破坏了湖泊生态环境^[9-11],也一定程度改变了湖泊有机碳循环模式^[12-13],进而对全球碳平衡产生重要影响^[14-16]。位于云南省大理市北部的洱海是一个典型的受人类活动影响强烈的高原湖泊^[9]。洱海北部湖区拥有大面积农田^[17],南部湖区则主要受城市化发展和旅游业影响^[18],导致大量营养盐和污染物输入到湖泊中。除此之外,气候变暖也会为藻类生长提供适宜的条件,潜在增加了洱海藻华发生的频率。受此影响,洱海的富营养化水平从20世纪50年代的贫营养型过渡到20世纪90年代的中营养型,在1996年和2003年暴发了2次典型的蓝藻水华灾害事件之后,逐渐转变到富营养型初期阶段并开始频繁形成水华^[19]。除了水体富营养化以外,人类过度放牧、开垦和矿山开采导致的洱海流域植被退化也会直接或间接地影响洱海生态环境^[20-21]。当地政府认识到人类活动对区域生态的破坏后,开始积极进行抢救性治

理。近年来,洱海的富营养化得到一定的控制,目前从富营养型初期转为中营养型,从抢救性治理阶段迈入保护性治理阶段,在经历富营养化和环境修复的过程中,湖泊的初级生产力和有机碳循环模式可能也随之变化^[22]。因此,研究洱海的有机碳分布特征和控制因素,有助于理解湖泊富营养化和环境修复过程的有机碳循环模式^[23]。

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)存在于各种天然的水体中,是表生环境有机碳循环的直接参与者^[24]。湖泊水体 DOM 主要由类蛋白质(类色氨酸、类络氨酸等)和类腐殖质(类富里酸等)组成^[25-26],主要来源包括浮游生物代谢产物、残体碎屑等内源 DOM 和土壤类腐殖质、陆生动植物残体等外源 DOM 贡献^[27]。不同来源的 DOM 有着不同的分子组成和矿化稳定性,因而具有不同的生物地球化学过程和归宿^[28]。因此,研究湖泊水体 DOM 的组成和来源特征,有利于更好地理解湖泊碳循环的动态变化过程。近年来,碳同位素、紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱等技术已广泛应用于 DOM 组成和来源解析的研究中^[29-31]。首先,陆源 DOM 以流域陆生 C3 植物贡献为主, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOM}}$ 值介于 $-29\text{‰} \sim -26\text{‰}$ 之间,而内源 DOM 更多受到浮游植物和沉水植物的贡献,稳定碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_{\text{DOM}}$)介于 $-25\text{‰} \sim -20\text{‰}$ 之间^[32-33],因此 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOM}}$ 可用于反映 DOM 的来源特征^[32]。其次,紫外-可见吸收光谱技术(UV-Vis)能对有色溶解性有机质(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)组分进行识别,相关指标包括吸光系数 a_{355} 值、紫外吸光度 SUVA_{254} 值、光谱斜率 $S_{275-295}$ 值、光谱斜率比值 S_R 等,可用于反映 CDOM 的组成和来源分布特征。再者,三维荧光光谱技术(3DEEMs)通过激发波长(Ex)、发射波长(Em)及荧光强度组成的三维矩阵光谱数据,可用于揭示荧光溶解性有机质(fluorescent dissolved organic matter, FDOM)的组成和结构信息^[34]。基于三维荧光光谱开发的荧光指数 FI、腐殖化指数 HIX、自生源指数 BIX 等指标,可用于反映 FDOM 的腐殖化程度、自生源贡献量等特征(相关指标的含义和指示意义见附表 I)。

近年来,紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱技术已在洱海沉积物和水体 DOM 的组成、来源及其空间和季节性变化特征等方面得到了一定应用^[43-48]。例如,在水体 DOM 的不同来源特征方面,Zhao 等^[46]运用三维荧光光谱揭示了洱海水体中有机质的不同来源对洱海 DOM 行为的影响差异;赵海超等^[47]和吴鹏^[48]利用三维荧光光谱技术对洱海 DOM 荧光特征进行分析时均发现,DOM 荧光组分占比变化对湖泊内源生产力(即富营养化强度)具有指示作用。吴鹏^[48]进一步通过对比洱海水体 DOM 和其他 5 个湖泊荧光组分的异同点,发现洱海水体的类色氨酸组分和类腐殖质组分相对较多,可能与湖泊北部入湖河流污染物输入及蓝藻堆积有关。在空间和季节性变化特征方面,Li 等^[43]运用紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱技术研究了洱海表层沉积物 DOM 组成和来源特征,发现洱海沉积物中的 DOM 来源存在空间差异。管玉莹等^[44]和李昊洋^[45]发现洱海水体 DOM 的紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱参数随季节变化,主要是内源和外源输入的季节性差异所致。

尽管前人已经通过紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱技术对洱海水体 DOM 的组成和来源特征进行了分析,但基于稳定碳同位素手段的宏观特征分析仍较为匮乏;同时,对于洱海水体 DOM 垂向空间特征和归宿的分析也相对匮乏。因此,本研究以洱海中北部 4 个区域的水柱为研究对象,联用稳定碳同位素、紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱技术,分析 DOM 结构组成、来源特征、空间分布特征和垂向变化规律,解析洱海中北部水体 DOM 的主要影响因素,从而理解洱海水体的有机碳库特征和碳循环模式。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

洱海($25^{\circ}36' \sim 25^{\circ}58' \text{N}$, $100^{\circ}5' \sim 100^{\circ}17' \text{E}$,海拔 1974 m)位于中国西南部的云南省大理市,是云南省第二大高原淡水湖泊^[49]。该区域属亚热带高原季风气候,平均气温为 15.1°C ,湖面一年蒸发量可达 1208.6 mm,多年平均降水为 1050 mm。洱海是一个典型的内陆断陷淡水湖,水量补给主要依赖大气降水和入湖径流,其中弥苴河是最大的入湖河流,年均入湖水量为 $5.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,西洱河是唯一的天然出湖河流^[50]。洱海南北长 42 km,东西宽 3~9 km,湖泊面积为 250 km^2 ,平均水深为 10.5 m,最大水深可达 20.9 m,湖泊蓄水量为 $27.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[51]。根据湖底地形特征,洱海可以分为北(康廊海舌以北)、中(康廊和龙龕海舌之间,以挖色湖心为中心)、南(龙龕海舌以南)3 个湖区(图 1)。洱海北部覆盖大面积农田,北部“三江”(弥苴河、罗时江

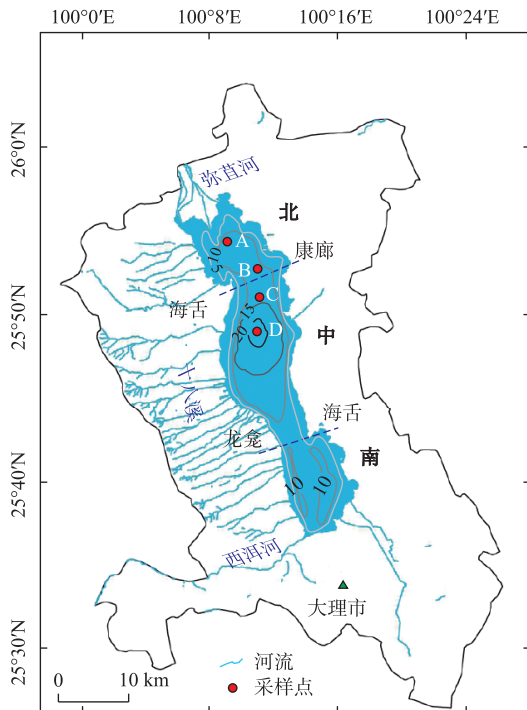


图1 洱海地理信息和采样点位
(湖内灰色线为等深线(单位:m))

Fig.1 Geographic information and sampling points of Lake Erhai (Grey lines denote the isobaths of Lake Erhai (unit: m))

和永安河)携带大量农业面源污染物流入河流,是洱海水体污染的主要原因^[52];中部主要受到村镇及旅游景点污水污染,通过下河和苍山十八溪输入;南部靠近大理市区主要为建筑用地,以生活污水污染为主^[18]。近几十年来,随着经济快速发展,人类生产活动(特别是农业的快速发展)引起流域面源污染负荷快速增加,导致洱海水质不断恶化,严重威胁居民饮用水安全和湖泊生态健康^[53]。

1.2 样品采集和实验分析

本研究选取了洱海北部(A和B)和中部湖区(C和D)的4个点位,于2021年10月在4个点位不同水深处采集了1~2 L的水样(附表II)。其中点位A、B和C的水深均为12 m,点位D位于湖中心,水深为20 m(图1)。虽然本研究只采集了10月的样品,对时间尺度的研究具有一定的局限性,但是10月份为藻华暴发期末期,对解析藻华暴发后水体DOM紫外-可见吸收参数和荧光参数特征具有一定意义。

水样采集后迅速利用预灼烧的0.7 μm的Whatman玻璃纤维滤纸和0.2 μm的Millipore聚碳滤膜分别进行过滤,然后在低温避光条件下送回实验室测试进行后续分析。水样的DOC浓度直接使用Shimadzu高温催化氧化溶解态有机分析仪进行测定。首先利用超纯水及7个浓度梯度的邻苯二甲酸氢钾溶液制定标准曲线。然后,将过滤水样经优级纯盐酸酸化至pH=2.0,由高纯氧气曝气3 min除去水中溶解的无机碳后进行测试。每个水样测定3

次,选取变异系数在2%以内的两次测量值,取平均值作为测试结果。水样的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOM}}$ 值测试:首先需要将预酸化的过滤水样通过固相萃取柱(Agilent Bond Elut PPL, 300 mg, 3 mL)进行固相萃取(SPE)浓缩富集获得SPE-DOM(具体而言,调节流速5 mL/min使水样通过固相萃取柱,再用pH=2.0的稀盐酸溶液冲洗固相萃取柱,保证去除无机盐之后,用惰气将固相萃取柱吹干);之后用约4 mL甲醇溶液洗脱已经吹干的固相萃取柱,获得SPE-DOM的甲醇溶液;然后,根据固相萃取过程的回收率为50%进行估算^[13],取适量SPE-DOM的甲醇溶液置于锡杯,低温去除甲醇后,通过Thermo-Fisher MAT 253元素分析仪-同位素质谱仪进行 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOM}}$ 分析。每个样品重复测试2次,每6次实际样品加入2个标准样品测试,最终保证测试偏差在 $\pm 0.2\%$ 以下(VPDB标准)。

在紫外-可见光吸收光谱和三维荧光光谱测试方面,使用HORIBA公司的Aqualog紫外荧光光谱仪对过滤水样进行直接测定。测试使用1 cm四通石英比色皿,以超纯水作为空白。紫外-可见光吸收光谱对样品在240~600 nm进行扫描,间隔为3 nm,得到CDOM的紫外-可见光吸光度曲线。三维荧光光谱测试参数设置为:氙灯光源激发功率为150 W,Ex设置为240~600 nm,Em设置为248~825 nm,积分时间1 s,狭缝宽度为3 nm。每个样品测量在扣除空白之后进行瑞利散射和拉曼散射校正,并且以拉曼单位(R.U.)进行荧光强度的单位化。紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱相关参数的计算方法见附表I。由于本研究所用仪器的Ex读取间隔为5 nm,在HIX指标计算时利用Ex在255 nm时,Em在435~480 nm和300~345 nm荧光强度积分之比表示^[54]。

2 结果与讨论

2.1 洱海水体的 DOC 浓度特征

DOC 浓度可直接表征溶解性有机碳总体丰度,是水体富营养化程度的重要指标。2021 年 10 月采集的洱海中北部水体 DOC 浓度变化范围为 4.21~4.66 mg/L,平均值为(4.37±0.12) mg/L。DOC 浓度最高值出现在最靠近岸边 A 点位的表层,浓度为 4.66 mg/L,可能是由于 A 点位受到农业排水的影响,初级生产力整体较高。其他点位 DOC 浓度相对较低,在 4.21~4.41 mg/L 之间波动。本研究结果低于吴鹏^[48]在 2018 年 8 月采集的洱海中北部水体的 DOC 浓度(6.17 mg/L),可能是因为水体 DOC 浓度是富营养化过程中积蓄和降解行为动态平衡的体现,具有一定的季节性。10 月可能已经过了洱海藻华暴发最强期(8 月),随着水体中 DOM 不断降解,其 DOC 浓度低于藻华暴发最强期。同时,2021 年 10 月采集的洱海中北部水体的 DOC 浓度整体高于赵海超等^[47]在 2013 年 10 月采集测得的洱海中北部水体 DOC 浓度(2.98 mg/L),表明即使近年来洱海已经进入了保护性治理阶段,湖泊富营养化得到一定控制,周期性的富营养化仍然对水体 DOM 有着积蓄作用。因此,洱海中北部水体的 DOC 浓度主要受洱海水体的富营养化控制,表现出季节性波动但长期不断积蓄的特征。

与云南其他典型高原湖泊相比,洱海水体的 DOC 浓度(数据来自本研究和前人研究^[48])整体低于云南高原湖泊的平均水平(5.68~21.51 mg/L,平均值为 12.55 mg/L,图 2)^[55]。其中,洱海水体的 DOC 浓度高于贫营养湖泊泸沽湖(1.78~4.35 mg/L,平均值为 3.07 mg/L)和抚仙湖(1.65~5.80 mg/L,平均值为 3.19 mg/L),但低于中营养湖泊程海(10.99~17.37 mg/L,平均值为 13.42 mg/L)、富营养湖泊滇池(2.22~21.67 mg/L,平均值为 12.40 mg/L)和富营养湖泊星云湖(5.72~16.69 mg/L,平均值为 12.78 mg/L)^[48]。因此,中营养湖泊洱海的 DOC 浓度介于云南贫营养湖泊和富营养湖泊之间,说明湖泊水体的 DOC 浓度与云南地区湖泊营养类型有一定的响应关系,记录了湖泊生产力的强度^[48,56]。

2.2 洱海中北部水体 DOM 的碳同位素、紫外-可见吸收特征和荧光特征

2.2.1 洱海中北部水体 DOM 的碳同位素特征 由于浮游藻类与陆生维管束植物在光合作用过程中利用碳源不同,两者的稳定碳同位素差异明显^[57-58],因此, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOM}}$ 值可用于粗略地分辨陆源和自生源有机质相对输入程度^[58-59]。洱海中北部水体样品 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOM}}$ 值的范围为-26.8‰~-26.2‰,平均值为-26.4‰±0.2‰(表 1),低于浮游藻类稳定碳同位素(-25‰~-20‰)^[32-33],与陆源 C3 植物稳定碳同位素的高值端较为接近(-29‰~-26‰)^[32-33]。因此,洱海中北部水体受到了自生源(藻源生产力)和外源(流域植被土壤输入)的双重贡献,但整体偏向于陆源特征。洱海水体这种 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOM}}$ 值偏负于藻源有机质稳定碳同位素信号的现象也在乌梁素海、太湖和鄱阳湖等富营养化湖泊存在($\delta^{13}\text{C}_{\text{DOM}}$ 平均值分别为-28.3‰^[60]、-27.6‰^[54]和-26.1‰^[61])。因此,尽管很多湖泊当前遭受着富营养化,但是水体 DOM 仍旧体现出一定程度的陆源特征。这种现象可能与藻类水华产生的自生源 DOM 活性更高、容易降解,无法长期保存在水体中有关^[62],也可能与水体中包含大量长期降解过后的残留 DOM 库,稀释了自生源 DOM 的输入效应有关^[63]。

2.2.2 洱海中北部水体 CDOM 的紫外-可见吸收特征 对于洱海中北部水体 CDOM 的紫外-可见吸收特征(图 3a),表征 CDOM 浓度的 a_{355} 值变化范围为 1.36~2.58 m^{-1} ,平均值为(1.78±0.33) m^{-1} (表 1),高于管玉莹等在 2019 年 10 月采集水样的 a_{440} 值(0.58 m^{-1})^[44],这与 DOC 浓度结果表征一致,体现了持续富营养化对湖泊 DOM 的积蓄作用。洱海中北部水体样品的 S_{R} 值变化范围为 1.17~1.72,平均值为 1.44±0.14,高于 2019

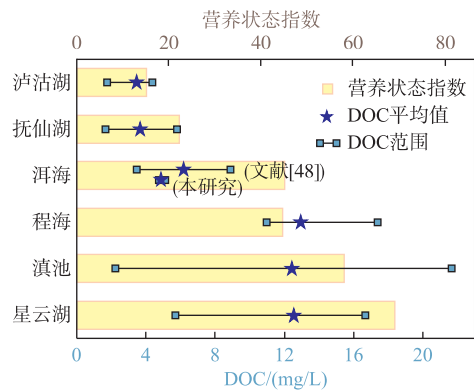


图 2 洱海与云南其他湖泊水体 DOC 浓度对比

Fig.2 Comparison of DOC concentrations among Lake Erhai and other lakes in the Yunnan Province

年 10 月水样的结果(0.98~1.28)^[44],也略高于富营养湖泊滇池(1.02)^[64]和太湖(1.09±0.22)水体样品的 S_R 值,一定程度上说明富营养湖泊具有相似之处^[54]。理论上说, S_R 值常用来表征 DOM 的自生源与陆源相对输入和光化学反应活性等特征,通常 $S_R > 1$ 指示浮游植物和细菌活动等内源产出丰富^[37]。因此,洱海作为富营养化湖泊,浮游植物和细菌活动等内源具有一定程度的贡献。

表 1 洱海中北部水体样品的各类参数指标

Tab.1 Parameters of the water samples in the north-central Lake Erhai

样品名	DOC/ (mg/L)	$\delta^{13}C_{DOM}/$ ‰	$a_{355}/$ m^{-1}	S_R	$S_{275-295}/$ nm^{-1}	SUVA ₂₅₄ / (L/(mg·m))	FI	β/α	BIX	HIX
EH21W-A-0	4.66	-26.3	2.22	1.60	0.024	3.17	1.65	1.21	1.34	1.46
EH21W-A-12	4.52	-26.7	2.58	1.72	0.024	3.38	1.57	1.14	1.23	1.63
EH21W-B-0	4.28	-26.4	1.75	1.51	0.027	3.30	1.62	1.06	1.14	1.92
EH21W-B-12	4.37	-26.8	1.52	1.32	0.028	3.15	1.62	1.09	1.17	1.88
EH21W-C-0	4.41	-26.3	1.64	1.55	0.027	3.17	1.64	1.13	1.20	1.74
EH21W-C-4	4.38	-26.3	1.93	1.45	0.026	3.26	1.66	1.16	1.25	1.81
EH21W-C-8	4.26	-26.2	1.49	1.36	0.028	3.18	1.67	1.08	1.15	1.86
EH21W-C-12	4.39	-26.2	1.50	1.34	0.028	3.10	1.66	1.10	1.17	1.46
EH21W-D-0	4.31	-26.5	1.74	1.51	0.028	3.17	1.69	1.07	1.13	1.85
EH21W-D-4	4.41	-26.4	1.93	1.45	0.026	3.24	1.62	1.10	1.19	1.68
EH21W-D-12	4.33	-26.3	1.79	1.46	0.027	3.17	1.65	1.11	1.19	1.87
EH21W-D-16	4.28	-26.3	1.70	1.31	0.027	3.19	1.68	1.10	1.18	1.72
EH21W-D-20	4.21	-26.4	1.36	1.17	0.028	3.14	1.67	1.10	1.17	1.95

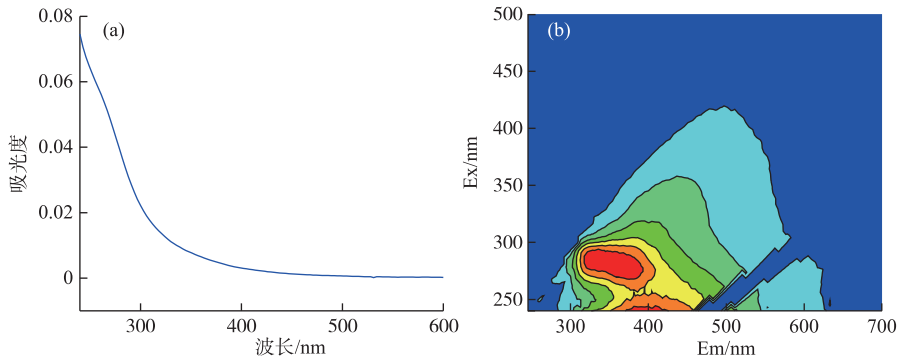


图 3 洱海中北部代表性水样(EH21W-C-4)的 UV-Vis 谱图(a)和 3DEEMs 谱图(b)

Fig.3 UV-Vis (a) and 3DEEMs (b) spectrum diagrams of representative water sample (EH21W-C-4) in the north-central Lake Erhai

洱海中北部水体样品的 $S_{275-295}$ 值变化范围为 0.024~0.028 nm^{-1} ,平均值为(0.027±0.001) nm^{-1} 。洱海中北部水体样品的 $S_{275-295}$ 值整体低于贫营养湖泊抚仙湖(0.023~0.060 nm^{-1})^[65],高于轻度富营养湖泊太湖、骆马湖、高邮湖、东平湖、滇池和适度富营养湖泊南四湖(0.014~0.024 nm^{-1} ,图 4a)^[41,54]。洱海中北部水体样品的 SUVA₂₅₄ 值变化范围为 3.10~3.38 L/(mg·m),平均值为(3.20±0.08) L/(mg·m) (表 1)。洱海中北部水体样品的 SUVA₂₅₄ 值整体低于太湖、骆马湖、高邮湖、东平湖、滇池等轻度富营养湖泊(2.60~7.61 L/(mg·m)) 和南四湖、洪泽湖等适度富营养湖泊(4.57~5.19 L/(mg·m))^[41,54](图 4b)。理论上, $S_{275-295}$ 值越小,SUVA₂₅₄ 值越大,CDOM 的腐殖化及芳香性程度越高,指示相对较强的陆源腐殖类有机物输入^[36]。因此,湖泊水体的腐殖化和芳香化程度与富营养化程度具有一定的相关性,随着湖泊富营养化程度升高,湖泊荧光腐殖化程度逐渐

升高^[66]。

综上所述,洱海中北部水体 CDOM 受到内源和外源输入的共同影响,浮游藻类等内源物质和陆源腐殖类有机物的输入共同影响了 CDOM 的来源组成^[44,67]。对比不同湖泊的 DOM 组分信息,可以发现湖泊 CDOM 的紫外-可见吸收特征和来源特征与湖泊所处的富营养化程度有一定的关系,基本遵循富营养化程度越高、CDOM 腐殖化和芳香化程度越强的规律。

2.2.3 洱海中北部水体 FDOM 的三维荧光特征 对于洱海中北部水体 FDOM 的三维荧光特征(图 3b),一般可以通过“寻峰法”识别出表征陆源高分子量和高芳香度的类腐殖质(类富里酸的 A 峰, E_x/E_m : 220~250/380~550 nm 和类腐殖酸的 C 峰, E_x/E_m : 320~360/420~460 nm)^[68]、微生物代谢产物(M 峰, E_x/E_m : 290~310/370~410 nm)^[69]和类蛋白质(T 峰和 B 峰, E_x/E_m : 220~250/330~380 和 220~250/280~330 nm)^[70]。洱海中北部水体 FDOM 的 A 峰、C 峰、M 峰、T 峰和 B 峰平均丰度分别是(1.97±0.03)、(1.02±0.02)、(2.08±0.11)、(1.43±0.12)和(3.63±0.26) R.U.。A:T 值、C:T 值、C:A 值、C:M 值和 M:B 值的波动范围分别为 1.19~1.57(平均值 1.39±0.11)、0.61~0.82(平均值 0.72±0.06)、0.50~0.53(平均值 0.52±0.01)、0.43~0.51(平均值 0.49±0.02)和 0.53~0.59(平均值 0.58±0.02)。因此,洱海中北部水体 FDOM 以类富里酸(A 峰)、类蛋白质(B 峰)和微生物代谢产物(M 峰)为主,与前人研究结果(以 C 峰和 A 峰为主)不同^[47],这可能与近年来洱海富营养化程度或者有机质输入来源变化有关。与云贵高原湖泊相比,贫营养湖泊泸沽湖 FDOM 以类蛋白质为主^[47],而富营养湖泊滇池 FDOM 以类腐殖酸为主^[48]。因此,不同富营养化程度的湖泊在 FDOM 组分上存在一定区别。

洱海中北部水体 FDOM 的 FI 值变化范围为 1.57~1.69,平均值为 1.64±0.03,与前人研究结果接近(1.66~1.72)^[47]。理论上,FI 值可以半定量表征 FDOM 芳香度物质和陆源输入的贡献率^[71],FI>1.9 表征该 FDOM 以微生物内源生产为主,FI<1.4 则表征该 FDOM 具有较高的陆源贡献率^[72]。洱海中北部水体的 FI 值介于 1.4~1.9 之间,说明 FDOM 同时受到湖泊初级生产力和陆源腐殖质的共同影响。与其他湖泊相比,洱海中北部水体的 FI 值低于轻度富营养湖泊太湖、白洋淀以及中度富营养湖泊蘑菇湖的 FI 值,与贫营养湖泊抚仙湖、轻度富营养湖泊鄱阳湖和长寿湖以及中度富营养湖泊达里湖的 FI 值接近(图 4c),说明 FI 指标与湖泊营养状态指数的相关性较差。其原因在于,不同湖泊之间水文条件、地理位置、生态环境等因素对 FDOM 源的主导性可能更强,对于有机质来源复杂的湖泊,FI 指标对水质状态的响应可能并不灵敏。

洱海中北部水体 FDOM 的 β/α 值变化范围为 1.06~1.21,平均值为 1.11±0.04,BIX 值变化范围为 1.13~1.34,平均值为 1.19±0.06,与前人研究结果接近(BIX 范围为 1.01~1.12)^[47]。理论上,自生源指数 BIX 值和新鲜度指数 β/α 值均可反映生物利用率较高的新鲜 DOM 所占的比例,一般 BIX>1 表明内源有机质对 FDOM 的主要贡献,0.6<BIX<0.7 则表示自生源比例较少^[73]。洱海中北部水体的 BIX 值均大于 1,说明内源物质对洱海水体 DOM 贡献率较高。同时,BIX 值和 β/α 值均与 DOC 浓度有非常强的相关性($r^2=0.71$, $r^2=0.67$, $n=13$, $P<0.05$),进一步说明 BIX 值和 β/α 值的变化表征了洱海中北部水体初级生产力的强弱。然而,与其他湖泊相比,洱海中北部水体的 BIX 值低于贫营养湖泊抚仙湖,高于轻度富营养湖泊鄱阳湖、太湖、白洋淀和轻度富营养湖泊长寿湖、达里湖、蘑菇湖的 BIX 值(图 4d)。该结果说明 BIX 值与富营养化程度表现出一定的反向关系,这与湖泊富营养化程度越高、初级生产力相对较强的结论相悖。因此,湖泊水体 FDOM 的 BIX 值和 β/α 值变化可以表征水体初级生产力强弱,BIX 值和 β/α 值绝对值则还进一步受到地理、水文、生态环境等要素的影响。

洱海中北部水体 FDOM 的 HIX 值变化范围为 1.46~1.95,平均值为 1.76±0.16(表 1)。理论上,荧光指数 HIX 值可以表征有机质腐殖化程度或成熟度^[71],HIX≥3 表征水体腐殖化程度较强,1.5<HIX<3 表征水体腐殖化程度较弱,HIX≤1.5 则说明水体 FDOM 主要来源于微生物^[74]。洱海中北部水体的 HIX 值介于 1.5~3,说明 FDOM 的腐殖化程度较弱,受到内源和陆源输入的双重影响,与 FI 值表征的结果一致。与其他湖泊相比,洱海中北部水体的 HIX 值高于贫营养湖泊抚仙湖以及轻度富营养湖泊鄱阳湖、太湖的 HIX 值,低于轻度富营养湖泊白洋淀、长寿湖以及中度富营养湖泊达里湖、蘑菇湖的 HIX 值(图 4e)。这表明在一定范围内,HIX 值与湖泊营养状态指数有一定程度的关联性,富营养化程度较低的湖泊 HIX 值也整体较低,富营养化程度较高的湖泊有着较高的 HIX 值,即贫营养湖泊具有更多的生物源或自身源成分,而富营养湖泊具有更多的陆源贡献。前

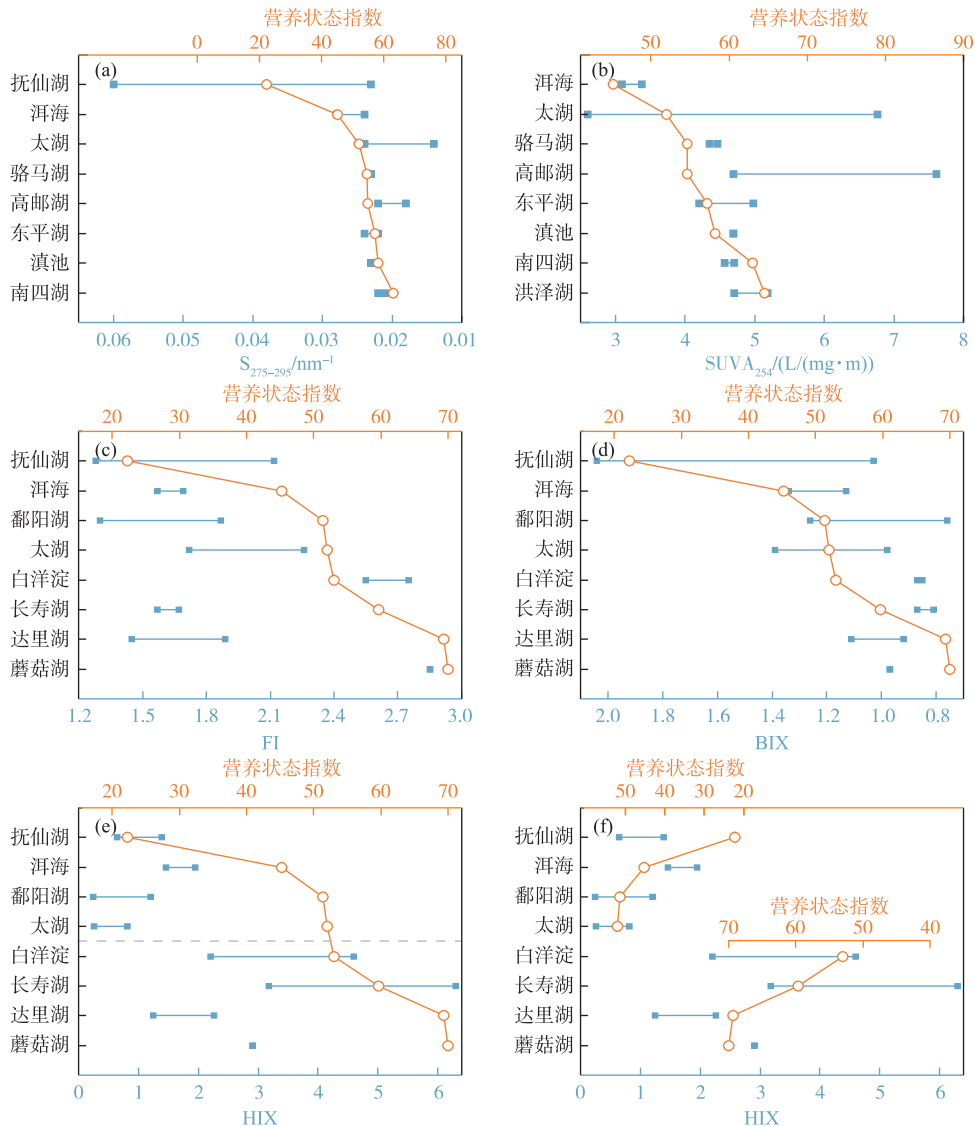


图4 洱海与其他湖泊水体的紫外-可见吸收特征和三维荧光光谱特征与营养状态指数对比

Fig.4 Comparison of UV-Vis and 3DEEMs characteristics and trophic state indices of water bodies among Lake Erhai and other lakes

人的研究也发现相似的现象,Shang 等于 2015 和 2020 年分析了中国 33 个典型湖泊水体的 HIX 值,发现富营养、中营养、贫营养湖泊的平均 HIX 值分别为 13.45 ± 8.51 、 8.83 ± 7.21 和 3.27 ± 1.83 ^[74],表明贫营养湖泊具有更多的自身源成分,而富营养湖泊具有更强的陆源贡献。因此,HIX 值与湖泊营养状态指数之间并非简单的相关关系。然而,若将这些湖泊分成相对富营养化程度较低(抚仙湖、洱海、鄱阳湖和太湖)和较高(白洋淀、长寿湖、达里湖和蘑菇湖)的两组(图 4f),在两组内部,还是能观察到一定的营养状态指数与 HIX 值的反相关关系,这与富营养化湖泊初级生产力更强、腐殖化程度越低的现象一致。因此,尽管 HIX 的绝对值主要受到湖泊地理位置和水文属性等因素的影响,但仍与湖泊的富营养化程度存在一定联系。

综上所述,洱海中北部水体 FDOM 整体表现为弱腐殖质的特征,水体腐殖化程度较低,受到浮游植物及藻类等内源物质和陆源的混合影响。通过对比不同湖泊的 DOM 荧光组分信息,可以发现 FDOM 的 FI 值与

富营养化程度关系并不明显,BIX 值与富营养化程度却呈反相关,HIX 值与湖泊富营养化程度之间的关系更为复杂。这些现象说明,三维荧光参数的绝对值主要用于判断湖泊水体 FDOM 的整体背景特征,参数波动则可能表征了湖泊水体 FDOM 的变化特征。因此,湖泊 FDOM 的性质除了受到初级生产力和有机质来源的影响之外,地理、水文、生态环境等属性对 FDOM 的影响也不容小觑^[74]。

2.3 洱海中北部水体 DOM 指标的相关性和主成分分析

为进一步探究不同指标之间的内在关系和对不同样品 DOM 组成和结构的贡献,本研究对洱海中北部水体 DOM 指标进行了皮尔逊相关性分析(图 5a)。结果表明, a_{355} 值与 DOC 浓度相关性很强($r^2=0.56$, $n=13$, $P<0.05$),说明 DOM 与 CDOM 的来源具有一定的相似性,即水体中 CDOM 组分能够较好地表征水体 DOC 的来源特征,这与前人研究结果一致^[75-76]。 $SUVA_{254}$ 值与 $S_{275-295}$ 值呈现较好的负相关关系($r^2=0.46$, $n=13$, $P<0.05$),这与指标所表征的含义一致。 S_R 值与 $S_{275-295}$ 值呈负相关关系($r^2=0.55$, $n=13$, $P<0.05$), S_R 值与 $SUVA_{254}$ 值呈正相关关系($r^2=0.41$, $n=13$, $P<0.05$),这与 S_R 指标表征的含义不同,可能是此次研究中 S_R 指标对 CDOM 的反应不够灵敏,而 $S_{275-295}$ 值和 $SUVA_{254}$ 值更能准确地表征 CDOM 的芳香性。

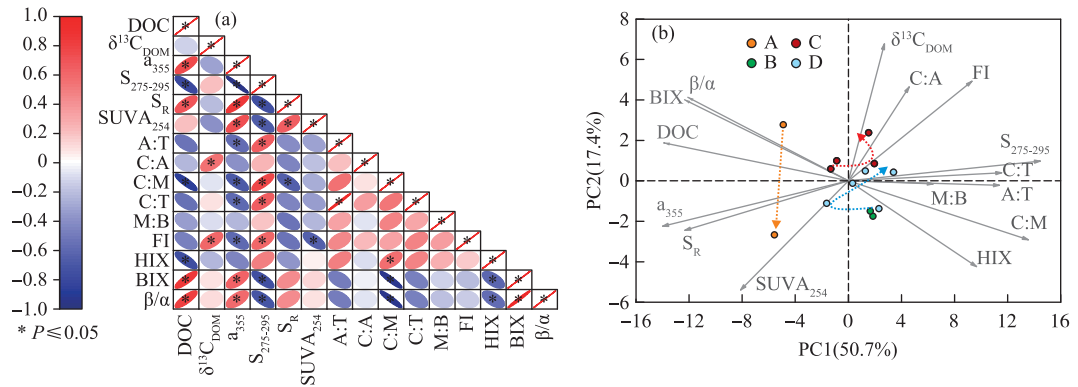


图 5 洱海中北部水体 DOM 中各参数的皮尔逊相关性分析(a)和 PCA 分析(b)

Fig.5 Pearson's correlation analysis (a) and PCA analysis (b) for all DOM parameters investigated on the water column in the north-central Lake Erhai

FI 值与 $S_{275-295}$ 值和 $SUVA_{254}$ 值分别有一定的正相关($r^2=0.37$, $n=13$, $P<0.05$)和负相关关系($r^2=0.43$, $n=13$, $P<0.05$),表明 FDOM 和 CDOM 的特征也具有一定的关联性。BIX 值与 β/α 值呈现高度正相关($r^2=0.97$, $n=13$, $P<0.05$),这与指标本身所表达的含义一致。BIX 值与 DOC 浓度呈现较强的正相关关系($r^2=0.71$, $n=13$, $P<0.05$),说明 DOC 的来源是新鲜的有机质,即藻类的直接输入对 DOM 的贡献较大。相较而言,HIX 值与 $S_{275-295}$ 值、 $SUVA_{254}$ 值和 FI 值均无相关性($r^2=0.24$, $n=13$, $P>0.05$; $r^2=0.00$, $n=13$, $P>0.05$; $r^2=0.03$, $n=13$, $P>0.05$),与 BIX 值有一定的相关性($r^2=0.37$, $n=13$, $P<0.05$)。前人基于洱海水体 DOM 的特征研究也指出了对于来源复杂的有机质,HIX 指标对腐殖化程度的表征没有 $SUVA_{254}$ 指标灵敏^[67]。其他研究结果也表明,生物降解过程会导致水体 DOM 的 $SUVA_{254}$ 值、HIX 值、FI 值整体上升^[77-78]。因此,对于洱海水体而言,BIX 值可作为较为可靠的 FDOM 源解析指标,而 HIX 值影响因素相对复杂,要谨慎使用。

鉴于水体的 DOC 浓度、同位素组成、紫外-可见吸收参数和荧光参数之间是一组存在相关性的变量,通过主成分分析(PCA)对这些参数进行降维,可以提取出水体 DOM 的主要特征信息,该方法已在诸多前人工作中得到了充分应用^[79-80]。对于洱海中北部水体 DOM 而言,PCA 分析提取的特征值 >1 的两个主成分,解释总方差约 68.1%(图 5b),其中第一和第二排序轴的特征值分别为 50.7% 和 17.4%。因此,PC1 和 PC2 可以表征洱海中北部水体 DOM 的主要变化。两个主成分和水体 DOM 各参数的相关性表明,PC1 值与 $S_{275-295}$ 值、C:M 值呈正相关,与 a_{355} 值、DOC 浓度呈负相关;相较而言,PC2 值与 $\delta^{13}C_{DOM}$ 值、FI 值、C:A 值呈正相关,与 $SUVA_{254}$ 值呈负相关(均以 $r^2>0.1$ 为判断标准)。因此,PC1 值可能表征了有机质绝对贡献强度(反向关系),而 PC2 值可能表征有机质的腐殖化程度大小,即有机质来源的综合指标。其中, β/α 值、BIX 值与 PC1

值、PC2 值均呈现一定的相关性 ($0.08 < r^2 < 0.1$), 潜在说明内源有机质的输入同时影响有机质的绝对贡献和腐殖化程度。其他参数与 PC1 值、PC2 值基本没有相关性, 因而无法表征洱海中北部水体 DOM 的主要变化, 这与前述基于皮尔逊相关性分析的结论相近。

2.4 洱海中北部水体 DOM 空间变化特征及其指示意义

2.4.1 洱海中北部表层水 DOM 空间分布特征 对于洱海中北部表层水 DOM, 靠近岸边的 A 点位表层水的 DOC 浓度和 a_{355} 值明显高于其余各点 (图 6a), 说明 A 点位表层水的有机质输入强度高于其余各点位。随着水流方向从 A 点位到 B~D 点位, 表层水 DOC 浓度和 a_{355} 值迅速降低, 说明 10 月水华主要集中在北部湖滨区域^[17], 对于离岸较远的区域影响较弱。同时, BIX 值和 β/α 值也表现为在 A 点位表层水最高的特征 (图 6c), 且 A 点位表层水的 $\delta^{13}C_{DOM}$ 值相较于其余点位略微偏正 (图 6b)。这表明 A 点位较高的表层水 DOC 浓度主要来自新鲜的內源有机质贡献, 可能是近岸农业污染源导致区域性藻类繁盛进而直接输入 DOC, 也可能与 10 月藻类顺着风向往北部近岸湖区漂移聚集有关。

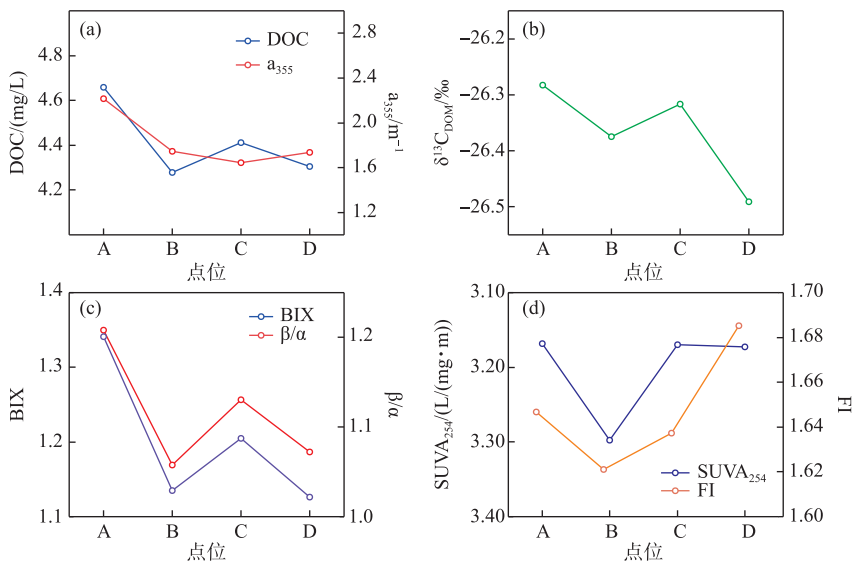


图 6 洱海中北部不同点位表层水体 DOM 的各类参数特征

Fig.6 Various parameter characteristics of different regions in the surface waters of the north-central Lake Erhai

从 B 点位到 D 点位, 表层水 DOC 浓度、 a_{355} 值、BIX 值、 β/α 值和 HIX 值并没有呈现出明显的梯度趋势, 反而呈现出 B 点位到 C 点位先升高、C 点位到 D 点位再下降的现象。不仅如此, B 点位表层水的 SUVA₂₅₄ 值明显高于其余各点, 且 FI 值明显低于其余各点 (图 6d)。这些现象均指示了 B 点位表层水存在较多的腐殖化和芳香性程度较高的陆源物质输入, 原因可能在于 B 点特殊的地理位置 (图 1), 导致其接收了更多由湖岸两侧带来的陆源物质。

如果仅考虑 A、C 和 D 点位, 可观察到表层水 DOC 浓度、 a_{355} 值、 $\delta^{13}C_{DOM}$ 值、BIX 值、 β/α 值和 HIX 值从北部到中部均呈现下降趋势。该现象与前人的研究结果相似, 例如, Li 等同样发现洱海水体 DOM 从北部到中部 BIX 值呈现下降的趋势^[43]。这些结果说明, 从湖岸到湖心初级生产力的减弱导致内源 DOM 对水体的相对贡献下降, 湖心区域水体更多体现为腐殖化更强的残留 DOM 的特征。同时, A、C、D 点位表层水的 SUVA₂₅₄ 值基本没有变化, 表明洱海中北部表层水 CDOM 的芳香度没有明显差异, 说明内源有机质的绝对贡献强度 (DOC 浓度和 a_{355} 值) 对 CDOM 芳香度 (SUVA₂₅₄ 值) 影响较弱。如前所述, 不同富营养化程度湖泊水体 CDOM 表现出富营养化程度越高、芳香性也越高的特征^[66]。因此, CDOM 芳香度可能无法直接表征富营养化和初级生产力的绝对强度, 当然, 也有可能是由于洱海有机质来源的复杂性, 对 DOM 吸收参数带来了

复杂的响应模式^[67]。综上所述,从北部湖区到中部湖区有机质来源变化的空间差异较大,不同区域的 DOM 受控于陆源 DOM 输入、新鲜的内源 DOM 输入和残留碳库的相对贡献强弱影响,而不同的参数灵敏度与有机质来源有关^[67]。

2.4.2 洱海中北部水柱的 DOM 垂向变化特征 通过洱海中北部不同点位水柱 DOM 各项参数的垂向变化可以看出,北部湖区 A 点位各项参数的垂向变化与其他点位存在着显著差异(图 7)。A 点位随着深度的增加 DOC 浓度、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOM}}$ 值、FI 值、BIX 值和 β/α 值均降低,而 SUVA_{254} 值增加,说明顶部产生的自生源有机质在底部被大量降解,而陆源腐殖质有机质的降解程度相对较低。同时,PCA 结果表明,A 点位从表层到底层 PC1 值变化不大,但绝对值和其他点位有明显差异(图 7f),说明有机质的绝对输入量是区分 A 点与其他点位的主要因素,这与紫外-可见吸收参数和荧光参数的结果一致(图 5b)。A 点位从表层到底层 PC2 值从 2.77 变化为 -2.67(图 7g),说明 A 点位水柱 DOM 特征变化差异主要表现为有机质来源变化,即表层富营养化产生的内源 DOM 额外输入在水柱过程会被一定程度地消弭,最终导致 A 点位深层水 DOC 浓度与其他点位的差异相对于表层水变小。

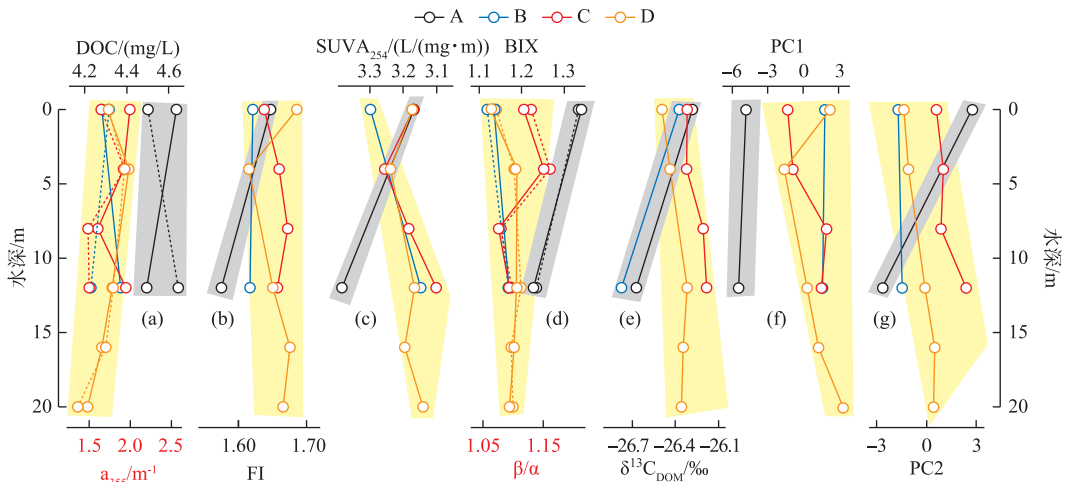


图 7 洱海中北部不同区域水柱的各类参数特征
(a 图:DOC(实线)和 a_{355} (虚线);d 图:BIX(实线)和 β/α (虚线))

Fig.7 Various parameter characteristics of different regions in the water column of the north-central Lake Erhai

B 点位随着深度增加,DOC 浓度增加、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOM}}$ 值负偏, SUVA_{254} 值和 BIX 值升高,间接表明 B 点位底层水同时有陆源 DOM 有机质和内源有机质 CDOM 和 FDOM 的额外贡献,可能存在侧向运移的强烈影响。如前所述,B 点位表层水的结果与其他点位相比也具有特殊性,可能与 B 点位特殊的地理位置有关(图 1),导致其有机质的来源较为复杂。同时,PCA 结果表明,B 点位从表层到底层 PC1 值和 PC2 值变化均不大(PC1 值从 1.85 变化到 1.65,PC2 值从 -1.75 变化到 -1.50,图 5b),说明尽管 B 点位不同深度水体的 DOM 变化同时受有机质绝对贡献强度和来源特征的控制,但这些因素具有一定的复杂性,导致产生的影响相互抵消。除此之外,B 点位还可能存在额外的控制因素,需要未来进一步研究来确定。

C、D 点位水柱的 DOM 整体而言有着相似的垂向变化,随着深度的增加,DOC 浓度、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOM}}$ 值和 FI 值变化不大, SUVA_{254} 值略微降低,BIX 值和 β/α 值则呈现波动变化(图 7)。PCA 结果表明,C、D 两个点位水体的 DOM 特征同时受到 PC1 值和 PC2 值的影响,即受到有机质输入和来源变化的共同影响。这些结果说明垂向上水体的有机质输入和来源贡献有一定差异,但整体上差异较小,总体呈现出随着深度的增加腐殖化程度略微降低的趋势。腐殖化程度略微降低有可能与深水区还保留着之前藻类水华暴发期(8-10 月)水体 DOM 信号有关,也有可能与湖底沉积有机质的降解为深层水体带来了额外的新鲜有机质有关。但不论如何,这些因素对 C、D 两个点位水柱 DOM 的影响并不强烈。此外,C、D 两点的水深不同,却有着相似的

DOM 特征变化,可能间接表明水深对 DOM 特征变化影响不大。因此,湖中心水柱 DOM 特征总体变化不大,受控于多因素共同作用的影响。

综上所述,不同区域湖区水柱的 DOM 变化特征有所差异,近岸地区(A 点位) DOM 降解能力相对较强。尽管 4 个点位表层水 BIX 值、 β/α 值有一定差异,但到达湖泊底部,这些点位底层水的 BIX 值、 β/α 值趋于一致(图 7d)。该现象表明,随着深度的增加,新鲜的內源有机质迅速被降解而无法保存下来,湖底 DOM 主要是以残留的惰性 DOM 碳库的方式存在,富营养化导致表层水 DOM 在不同区域的差异会被一定程度地消弭。因此,富营养化对于湖泊 DOM 碳库的影响是一个复杂过程,富营养化带来的 DOM 升高效应主要体现在表层水体,长期碳汇效应可能并不显著。

3 结论

1) 洱海中北部水体 DOC 浓度整体较为稳定,范围为 4.21~4.66 mg/L,平均值为(4.37±0.12) mg/L。与洱海早期 DOM 浓度结果对比发现,周期性的富营养化对 DOM 表现出季节性波动但长期不断积蓄的特征。与其他云南高原湖泊相比,洱海 DOM 浓度处于中等水平,DOM 浓度记录了湖泊生产力的强度,与富营养化程度有一定的响应关系。

2) 洱海中北部水体 DOM 的稳定碳同位素和光谱参数结果表明,CDOM、FDOM 和总 DOM 在来源上存在一定的相似性,主要受浮游藻类等內源物质和陆源腐殖类有机物输入的共同影响。通过对比其他湖泊发现,光谱参数的绝对值主要用于判断湖泊水体 DOM 的整体背景特征,参数波动则可能表征了湖泊水体 DOM 的变化,即 DOM 的性质除了受到初级生产力和有机质来源的影响之外,地理、水文、生态环境等因素的影响也不容小觑。

3) 空间分布上,近岸区域具有较高的新鲜內源 DOM 输入,这与洱海北部农业活动营养盐输入导致近岸初级生产力提升有关;湖心区域內源 DOM 对水体的贡献逐渐减弱,水体更多体现为腐殖化更强的残留 DOM 特征。水柱变化上,近岸区域水柱有机碳降解较快,表层富营养化产生的內源 DOM 额外输入在水柱过程会被一定程度地消弭,最终导致近岸区域 A 点位深层水 DOC 浓度与其他点位的差异相对于表层水变小;湖心区域受控于多因素共同作用的影响,但水柱 DOM 特征总体变化不大。即湖泊富营养化初级生产力对洱海水体 DOM 碳库有直接贡献,但这种效应主要体现在表层水体,对湖泊水体长期碳汇的影响可能并不显著。

4 附录

附表 I 和附表 II 见电子版(DOI: 10.18307/2025.0223)。

5 参考文献

- [1] Reichstein M, Bahn M, Ciais P *et al.* Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 2013, **500**: 287-295. DOI: 10.1038/nature12350.
- [2] Algesten G, Sobek S, Bergström AK *et al.* Role of lakes for organic carbon cycling in the boreal zone. *Global Change Biology*, 2004, **10** (1): 141-147. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2003.00721.x.
- [3] Stackpole SM, Butman DE, Clow DW *et al.* Inland waters and their role in the carbon cycle of Alaska. *Ecological Applications*, 2017, **27** (5): 1403-1420. DOI: 10.1002/eap.1552.
- [4] Shen J. Progress and prospect of palaeolimnology research in China. *J Lake Sci*, 2009, **21**(3): 307-313. DOI: 10.18307/2009.0301. [沈吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 307-313.]
- [5] Davidson TA, Audet J, Jeppesen E *et al.* Synergy between nutrients and warming enhances methane ebullition from experimental lakes. *Nature Climate Change*, 2018, **8**: 156-160. DOI: 10.1038/s41558-017-0063-z.
- [6] Wang M, Wu JH, Chen H *et al.* Temporal-spatial pattern of organic carbon sequestration by Chinese Lakes since 1850. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(3): 1283-1297. DOI: 10.1002/lno.10771.
- [7] Galy V, Peucker-Ehrenbrink B, Eglinton T. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion. *Nature*, 2015, **521**: 204-207. DOI: 10.1038/nature14400.
- [8] Bertolet BL, West WE, Armitage DW *et al.* Organic matter supply and bacterial community composition predict methanogenesis rates in temperate lake sediments. *Limnology and Oceanography Letters*, 2019, **4**(5): 164-172. DOI: 10.1002/lol2.10114.
- [9] Bai XY, Hu XZ, Pang Y. Pollution load, distribution and characteristics of low-polluted water in Lake Erhai watershed. *J Lake Sci*, 2015, **27**(2): 200-207. DOI: 10.18307/2015.0202. [白献宇, 胡小贞, 庞燕. 洱海流域低污染水类型、污染负荷及分布. 湖泊科学, 2015,

- 27(2): 200-207.]
- [10] Paerl HW, Paul VJ. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water Research*, 2012, **46**(5): 1349-1363. DOI: 10.1016/j.watres.2011.08.002.
- [11] Wang CH, Jiang HL. Chemicals used for *in situ* immobilization to reduce the internal phosphorus loading from lake sediments for eutrophication control. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2016, **46**(10): 947-997. DOI: 10.1080/10643389.2016.1200330.
- [12] Pacheco F, Roland F, Downing J. Eutrophication reverses whole-lake carbon budgets. *Inland Waters*, 2014, **4**(1): 41-48. DOI: 10.5268/iw-4.1.614.
- [13] Zhang FF, Harir M, Moritz F *et al.* Molecular and structural characterization of dissolved organic matter during and post cyanobacterial bloom in Taihu by combination of NMR spectroscopy and FTICR mass spectrometry. *Water Research*, 2014, **57**: 280-294. DOI: 10.1016/j.watres.2014.02.051.
- [14] Alin SR, Johnson TC. Carbon cycling in large lakes of the world: A synthesis of production, burial, and lake-atmosphere exchange estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, **21**(3): GB3002. DOI: 10.1029/2006GB002881.
- [15] Heathcote AJ, Anderson NJ, Prairie YT *et al.* Large increases in carbon burial in northern lakes during the Anthropocene. *Nature Communications*, 2015, **6**: 10016. DOI: 10.1038/ncomms10016.
- [16] Zhang FJ, Xue B, Yao SC. Spatiotemporal pattern of inorganic carbon sequestration in Lake Hulun since 1850. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1770-1782. DOI: 10.18307/2019.0617. [张风菊, 薛滨, 姚书春. 1850年以来呼伦湖沉积物无机碳埋藏时空变化. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1770-1782.]
- [17] Guo HC, Liu L, Huang GH *et al.* A system dynamics approach for regional environmental planning and management: A study for the Lake Erhai Basin. *Journal of Environmental Management*, 2001, **61**(1): 93-111. DOI: 10.1006/jema.2000.0400.
- [18] Li XX, Huang L, Li K. Analysis of spatio-temporal change of land use around Erhai Lake from 1991 to 2020 based on GEE platform. *GNSS World of China*, 2021, **46**(5): 17-25. DOI: 10.12265/j.gnss.2021041802. [李小祥, 黄亮, 李凯. 基于GEE平台的1991—2020年环洱海地带土地利用时空变化分析. 全球定位系统, 2021, **46**(5): 17-25.]
- [19] Yang GS, Ma RH, Zhang L *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 799-810. DOI: 10.18307/2010.0601. [杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 799-810.]
- [20] Lai CW, Ma Z, Liu ZH *et al.* Alleviating eutrophication by reducing the abundance of Cyanophyta due to dissolved inorganic carbon fertilization: Insights from Erhai Lake, China. *Journal of Environmental Sciences: China*, 2023, **131**: 68-83. DOI: 10.1016/j.jes.2022.10.030.
- [21] Liu XJ, Chen JY, Tang BH *et al.* Eco-environmental changes due to human activities in the Erhai Lake Basin from 1990 to 2020. *Scientific Reports*, 2024, **14**: 8646. DOI: 10.1038/s41598-024-59389-6.
- [22] Gong FL, Luo LC, Li HY *et al.* Quantitative assessment of water quality improvement by reducing external loadings at Lake Erhai, southwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, **20**(6): 5038. DOI: 10.3390/ijerph20065038.
- [23] Mi Y, Huang CC, Yang H *et al.* Effects of human activities on sedimentary records in the Meiliang Bay of Taihu. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2014, **9**(4): 26-35. [宓莹, 黄昌春, 杨浩等. 太湖梅梁湾地区人类活动对湖泊沉积环境的影响. 亚热带资源与环境学报, 2014, **9**(4): 26-35.]
- [24] Zhang HF, Zheng YC, Wang XC *et al.* Characterization and biogeochemical implications of dissolved organic matter in aquatic environments. *Journal of Environmental Management*, 2021, **294**: 113041. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113041.
- [25] Zhang L, Fang WK, Li XC *et al.* Linking bacterial community shifts with changes in the dissolved organic matter pool in a eutrophic lake. *Science of the Total Environment*, 2020, **719**: 137387. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137387.
- [26] Zhang W, Zhou YQ, Jeppesen E *et al.* Linking heterotrophic bacterioplankton community composition to the optical dynamics of dissolved organic matter in a large eutrophic Chinese Lake. *Science of the Total Environment*, 2019, **679**: 136-147. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.055.
- [27] Feng SJ, Han ZY, Fei YQ *et al.* Spatiotemporal distribution of dissolved organic matter in groundwater near municipal solid waste landfill in Red Bed Zone: A case study of landfill in Sichuan Province. *Research of Environmental Sciences*, 2023, **36**(6): 1156-1165. [冯诗杰, 韩智勇, 费勇强等. 填埋场地下水溶解性有机物时空分布特征分析: 以四川红层区某生活垃圾填埋场为例. 环境科学研究, 2023, **36**(6): 1156-1165.]
- [28] Azam F, Malfatti F. Microbial structuring of marine ecosystems. *Nature Reviews Microbiology*, 2007, **5**: 782-791. DOI: 10.1038/nrmi-cro1747.
- [29] Li YJ, Song GS, Hu SZ *et al.* Optical characterization, distribution and sources of chromophoric dissolved organic material (CDOM) in the Changjiang River estuary in July 2014. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, **46**(3): 670-678. DOI: 10.11693/hyhz20140900251. [李奕洁, 宋贵生, 胡素征等. 2014年夏季长江口有色溶解有机物(CDOM)的分布、光学特性及其来源探究. 海洋与湖沼, 2015, **46**(3): 670-678.]
- [30] Kellerman AM, Kothawala DN, Dittmar T *et al.* Persistence of dissolved organic matter in lakes related to its molecular characteristics. *Nature Geoscience*, 2015, **8**: 454-457. DOI: 10.1038/ngeo2440.
- [31] Chen YJ, Hu WX, Pang SJ *et al.* Spatial distribution characteristics and source analysis of dissolved organic matter in Beiyun River. *Envi-*

- ronmental Science*, 2016, **37**(8): 3017-3025. DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.024. [陈永娟, 胡玮璇, 庞树江等. 北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析. 环境科学, 2016, **37**(8): 3017-3025.]
- [32] Zhou YQ, Jeppesen E, Zhang YL *et al.* Chromophoric dissolved organic matter of black waters in a highly eutrophic Chinese Lake: Freshly produced from algal scums? *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **299**: 222-230. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.06.024.
- [33] Spencer RGM, Butler KD, Aiken GR. Dissolved organic carbon and chromophoric dissolved organic matter properties of rivers in the USA. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, **117**(G3): G03001. DOI: 10.1029/2011JG001928.
- [34] Shang YX, Wen ZD, Song KS *et al.* Natural versus anthropogenic controls on the dissolved organic matter chemistry in lakes across China: Insights from optical and molecular level analyses. *Water Research*, 2022, **221**: 118779. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118779.
- [35] Jian ZJ, Xu J, Huang XL *et al.* Optical absorption characteristics, spatial distribution, and source analysis of colored dissolved organic matter in wetland water around Poyang Lake. *Water*, 2021, **13**(3): 274. DOI: 10.3390/w13030274.
- [36] Weishaar JL, Aiken GR, Bergamaschi BA *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(20): 4702-4708. DOI: 10.1021/es030360x.
- [37] Helms JR, Stubbins A, Ritchie JD *et al.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(3): 955-969. DOI: 10.4319/lo.2008.53.3.0955.
- [38] Lavonen EE, Kothawala DN, Tranvik LJ *et al.* Tracking changes in the optical properties and molecular composition of dissolved organic matter during drinking water production. *Water Research*, 2015, **85**: 286-294. DOI: 10.1016/j.watres.2015.08.024.
- [39] McKnight DM, Boyer EW, Westerhoff PK *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(1): 38-48. DOI: 10.4319/lo.2001.46.1.0038.
- [40] Zhou SL, Zhang YR, Huang TL *et al.* Microbial aerobic denitrification dominates nitrogen losses from reservoir ecosystem in the spring of Zhoucun Reservoir. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**(Pt 1): 998-1010. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.160.
- [41] He J, Wu X, Zhi GQ *et al.* Fluorescence characteristics of DOM and its influence on water quality of rivers and lakes in the Dianchi Lake Basin. *Ecological Indicators*, 2022, **142**: 109088. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109088.
- [42] Clark MG, Biagi KM, Carey SK. Optical properties of dissolved organic matter highlight peatland-like properties in a constructed wetland. *Science of the Total Environment*, 2022, **802**: 149770. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149770.
- [43] Li YP, Wang SR, Zhang L. Composition, source characteristic and indication of eutrophication of dissolved organic matter in the sediments of Erhai Lake. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(5): 3739-3751. DOI: 10.1007/s12665-014-3964-4.
- [44] Guan YY, Huo D, Wu XY *et al.* The characteristics of CDOM optical and its influence factors in Erhai lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(4): 838-845. DOI: 10.7541/2021.2020.123. [管玉莹, 霍达, 吴兴元等. 洱海 CDOM 吸收光谱特征变化及其影响因素. 水生生物学报, 2021, **45**(4): 838-845.]
- [45] 李昊洋. 基于多技术联用的洱海有机质分布特征及溯源研究[学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [46] Zhao YQ, Shen J, Feng JM *et al.* Relative contributions of different sources to DOM in Erhai Lake as revealed by PLS-PM. *Chemosphere*, 2022, **299**: 134377. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134377.
- [47] Zhao HC, Li YP, Wang SR *et al.* Fluorescence characteristics of DOM in overlying water of Erhai Lake and its indication of eutrophication. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, **39**(12): 3888-3896. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)12-3888-09. [赵海超, 李艳平, 王圣瑞等. 洱海上覆水 DOM 荧光特征及对富营养化的指示意义. 光谱学与光谱分析, 2019, **39**(12): 3888-3896.]
- [48] 吴鹏. 云南典型高原湖泊溶解性有机质特征研究[学位论文]. 天津: 天津大学, 2020.
- [49] Wen ZQ, Li X, Liu B *et al.* A comprehensive evaluation method for plateau freshwater lakes: A case in the Erhai Lake. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2021, **7**(1): 1993753. DOI: 10.1080/20964129.2021.1993753.
- [50] Chen XH, Qian XY, Li XP *et al.* Long-term trend of eutrophication state of Lake Erhai in 1988–2013 and analyses of its socio-economic drivers. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 70-78. DOI: 10.18307/2018.0107. [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. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 70-78.]
- [51] Fu PQ, Wu FC, Liu CQ. Geochemical characteristics of dissolved organic matter in the sediment pore water of Erhai Lake. *Advances in Water Science*, 2005, **16**(3): 338-344. DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2005.03.005. [傅平青, 吴丰昌, 刘丛强. 洱海沉积物孔隙水中溶解有机质的地球化学特性. 水科学进展, 2005, **16**(3): 338-344.]
- [52] Liu JL, Xu JJ, Chen J *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of water quality in miju river and Erhai Lake. *Journal of Coastal Research*, 2019, **93**(sp1): 31. DOI: 10.2112/si93-005.1.
- [53] Gao SJ, Hou ZY, Wu Y *et al.* Trend and driving factors of water environment change in Lake Erhai in the last 50 years. *J Lake Sci*, 2023, **35**(4): 1296-1305. DOI: 10.18307/2023.0422. [高思佳, 侯泽英, 吴越等. 近 50a 洱海水环境演变特征及其主要驱动因素. 湖泊科学, 2023, **35**(4): 1296-1305.]
- [54] 庞佳丽. 太湖梅梁湾水体藻华暴发-消退周期溶解性有机质演变特征[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [55] 贾海斌. 云南高原湖泊溶解性有机质荧光特征及影响因素研究[学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2021.
- [56] Bade DL, Carpenter SR, Cole JJ *et al.* Sources and fates of dissolved organic carbon in lakes as determined by whole-lake carbon isotope ad-

- ditions. *Biogeochemistry*, 2007, **84**(2): 115-129. DOI: 10.1007/s10533-006-9013-y.
- [57] O'Leary MH. Carbon isotopes in photosynthesis. *BioScience*, 1988, **38**(5): 328-336. DOI: 10.2307/1310735.
- [58] Meyers PA. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. *Organic Geochemistry*, 1997, **27**(5/6): 213-250. DOI: 10.1016/s0146-6380(97)00049-1.
- [59] Hayes JM. Factors controlling ^{13}C contents of sedimentary organic compounds: Principles and evidence. *Marine Geology*, 1993, **113**(1/2): 111-125. DOI: 10.1016/0025-3227(93)90153-m.
- [60] Geng Y, Lv XX, Yu RH *et al.* Isotopic characteristics and sources of organic carbon in suspended particulates and sediments in Lake Wuliangsuhai. *J Lake Sci*, 2021, **33**(6): 1753-1765. DOI: 10.18307/2021.0612. [耿悦, 吕喜玺, 于瑞宏等. 乌梁素海悬浮颗粒物 and 沉积物有机碳同位素特征及来源. 湖泊科学, 2021, **33**(6): 1753-1765.]
- [61] 李艳红. 鄱阳湖水体溶解碳的时空格局及其收支分析[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [62] Ziegler SE, Fogel ML. Seasonal and diel relationships between the isotopic compositions of dissolved and particulate organic matter in freshwater ecosystems. *Biogeochemistry*, 2003, **64**(1): 25-52. DOI: 10.1023/A: 1024989915550.
- [63] Liang H, Huang LP, Chen GJ *et al.* Patterns of carbon and nitrogen stable isotopes and elemental composition of lake primary producers and zooplankton in Eastern Yunnan. *J Lake Sci*, 2018, **30**(5): 1400-1412. DOI: 10.18307/2018.0521. [梁红, 黄林培, 陈光杰等. 滇东湖泊水生植物和浮游生物碳、氮稳定同位素与元素组成特征. 湖泊科学, 2018, **30**(5): 1400-1412.]
- [64] Liu SS, He ZQ, Tang Z *et al.* Linking the molecular composition of autochthonous dissolved organic matter to source identification for freshwater lake ecosystems by combination of optical spectroscopy and FT-ICR-MS analysis. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**: 134764. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134764.
- [65] Chen L, Zhou YQ, Zhou QC *et al.* Sources, composition and spatiotemporal variations of chromophoric dissolved organic matter in a deep oligotrophic Lake Fuxian, China. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1357-1367. DOI: 10.18307/2019.0525. [陈乐, 周永强, 周起超等. 抚仙湖有色可溶性有机物的来源组成与时空变化. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1357-1367.]
- [66] Zhang YL, Zhang EL, 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. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2645-2659. DOI: 10.4319/lo.2010.55.6.2645.
- [67] 吴婧. 我国西南湖泊洱海中有有机碳的来源、时空变化及碳汇通量[学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- [68] Fellman JB, Hood E, Spencer RGM. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: A review. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2452-2462. DOI: 10.4319/lo.2010.55.6.2452.
- [69] Coble PG. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346. DOI: 10.1016/0304-4203(95)00062-3.
- [70] Hernes PJ, Bergamaschi BA, Eckard RS *et al.* Fluorescence-based proxies for lignin in freshwater dissolved organic matter. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2009, **114**(G4): G00F03. DOI: 10.1029/2009JG000938.
- [71] Senesi N. Molecular and quantitative aspects of the chemistry of fulvic acid and its interactions with metal ions and organic chemicals. *Analytica Chimica Acta*, 1990, **232**: 77-106. DOI: 10.1016/s0003-2670(00)81226-x.
- [72] Liu SS, Zhao TH, Zhu YR *et al.* Molecular characterization of macrophyte-derived dissolved organic matters and their implications for lakes. *Science of the Total Environment*, 2018, **616/617**: 602-613. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.289.
- [73] Huguet A, Vacher L, Relexans S *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 706-719. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2009.03.002.
- [74] Shang YX, Song KS, Lai FF *et al.* Remote sensing of fluorescent humification levels and its potential environmental linkages in lakes across China. *Water Research*, 2023, **230**: 119540. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119540.
- [75] Jiang GJ, Ma RH, Loiselle SA *et al.* Remote sensing of particulate organic carbon dynamics in a eutrophic lake (Taihu Lake, China). *Science of the Total Environment*, 2015, **532**: 245-254. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.120.
- [76] Jiang GJ, Ma RH, Duan HT. Estimation of DOC concentrations using CDOM absorption coefficients: A case study in Taihu Lake. *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. 环境科学, 2012, **33**(7): 2235-2243.]
- [77] Lee MH, Osburn CL, Shin KH *et al.* New insight into the applicability of spectroscopic indices for dissolved organic matter (DOM) source discrimination in aquatic systems affected by biogeochemical processes. *Water Research*, 2018, **147**: 164-176. DOI: 10.1016/j.watres.2018.09.048.
- [78] Xia F, Liu ZH, Zhang YL *et al.* Calcium regulates the interactions between dissolved organic matter and planktonic bacteria in Erhai Lake, Yunnan Province, China. *Water Research*, 2024, **261**: 121982. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121982.
- [79] Wang Z, Zhang CX, Pan SL *et al.* Responses of molecular composition and biodegradation of dissolved organic matter to erosion in topsoil versus subsoil in a Mollisol agricultural ecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, **354**: 108569. DOI: 10.1016/j.agee.2023.108569.
- [80] Hu J, Kang LY, Li ZL *et al.* Photo-produced aromatic compounds stimulate microbial degradation of dissolved organic carbon in thermokarst lakes. *Nature Communications*, 2023, **14**: 3681. DOI: 10.1038/s41467-023-39432-2.

附表 I 紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱相关参数的含义和指示意义

Attached Tab.I Definitions and indications for parameters derived from UV-Vis and 3DEEMs analyses

光谱类型	指标	含义	指示意义
紫外-可见 吸收光谱	吸光系数 a_{355}	355 nm 波长处的吸收系数	含共轭体系的 DOM 浓度 ^[35]
	紫外吸光度 SUVA ₂₅₄ (specific ultra violet absorbance at 254 nm)	254 nm 波长处的 CDOM 吸光度与 DOC 浓 度之比	DOM 腐殖化程度 ^[36]
	光谱斜率 $S_{275-295}$	275~295 nm 波段吸收光谱斜率	陆源 DOM 输入强弱 ^[37]
	光谱斜率比值 S_R	275~295 nm 波段吸收光谱斜率与 350~400 nm 波段吸收光谱斜率之比	DOM 来源和相对分子质量信息 ^[38]
三维荧光光 谱	荧光指数 FI (fluorescence index)	激发波长为 370 nm 时, 发射波长在 450 nm 与 500 nm 荧光强度之比	陆源与微生物来源 DOM 贡献程度 ^[39]
	腐殖化指数 HIX (humification index)	激发波长为 254 nm 时, 发射波长在 435~480 nm 与 300~345 nm 荧光强度平均值之比	DOM 腐殖化程度 ^[40]
	自生源指数 BIX (biological index)	激发波长为 310 nm 时, 发射波长在 380 nm 与 430 nm 荧光强度之比	自生来源 DOM 贡献程度 ^[41]
	新鲜度指数 β/α	激发波长为 310 nm 时, 发射波长在 380 nm 与 420~435 nm 荧光强度最大值之比	新鲜 DOM 占比 ^[42]

附表 II 本研究采样信息

Attached Tab.II Information of the samples investigated

湖区	点位	经度/E	纬度/N	水深/m	样品名
北部	A	100°9'19"	25°54'43"	0	EH21W-A-0
				12	EH21W-A-12
	B	100°10'58"	25°52'59"	0	EH21W-B-0
				12	EH21W-B-12
中部	C	100°11'02"	25°51'29"	0	EH21W-C-0
				4	EH21W-C-4
				8	EH21W-C-8
				12	EH21W-C-12
	D	100°10'55"	25°49'11"	0	EH21W-D-0
				4	EH21W-D-4
				12	EH21W-D-12
				16	EH21W-D-16
				20	EH21W-D-20