

抚仙湖悬浮颗粒物正构烷烃来源及季节特征

袁红香¹,孙惠玲^{1*},段立曾²,张虎才² (1.云南师范大学地理学部,云南省高原地理过程与环境变化重点实验室,云南 昆明 650500; 2.云南大学资源环境与地球科学学院,高原湖泊生态与污染治理研究院,云南 昆明 650504)

摘要: 为了探究抚仙湖水体中有机质的正构烷烃来源和时空变化特征,对 2016 年 4 月~2017 年 3 月抚仙湖水柱悬浮颗粒物中正构烷烃的分布特征、来源、季节变化特征及其与沉积物中正构烷烃的关系进行了研究.结果表明:抚仙湖水柱悬浮颗粒物中正构烷烃的碳数分布范围在 C₁₇~C₃₃ 之间,呈现以优势峰 C₂₇ 和 C₂₉ 为主的单峰分布模式.在垂直梯度的空间分布上,正构烷烃在变温层和温跃层的浓度高于深水层,最大浓度出现在深 20m 水层,深层水体中正构烷烃浓度受沉积物再悬浮作用影响微弱;在季节变化上,正构烷烃含量存在明显的季节波动,在 10 月和 4 月呈现最高值;其中,中长链正构烷烃(C₂₅、C₂₇ 和 C₂₉)丰度与浮游植物生物量季节变化趋势一致,证明浮游植物是抚仙湖水柱中正构烷烃的主要来源,水温是限制抚仙湖水柱中正构烷烃时空分布的关键因子.浮游植物、流域表土和沉水植物的共同输入是抚仙湖沉积物中正构烷烃 C₂₉ 具有较高丰度的原因,沉积物中正构烷烃(C₃₁ 和 C₃₃)来源相对单一,可以有效指示流域陆源植物和沉水植物输入.本文结果可多应用正构烷烃指标进行抚仙湖长序列钻孔古环境重建研究提供数据支持.

关键词: 抚仙湖; 悬浮颗粒物; 正构烷烃; 浮游植物

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)06-2812-09

The sources and seasonal variation characteristics of *n*-alkanes in suspended particulate matter in Fuxian Lake. YUAN Hong-xiang¹, SUN Hui-ling^{1*}, DUAN li-zeng², ZHANG Hu-cai² (1.Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Change, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2.Institute for Ecological Research and Pollution Control of Plateau Lakes, School of Resources, Environment and Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650504, China). *China Environmental Science*, 2021,41(6): 2812~2820

Abstract: In order to investigate the sources and spatiotemporal variation characteristics of *n*-alkanes in organic matter in Fuxian Lake, the distribution characteristics, biological sources and seasonal variations of suspended particulate matter in water columns of Fuxian Lake from April 2016 to March 2017 were studied. The vertical distribution of *n*-alkanes demonstrated the relative abundance of *n*-alkanes above the thermocline was higher than that below the thermocline. The maximum concentration of *n*-alkanes occurred in ~20m depth. The relative abundance of *n*-alkanes in water columns was weakly affected by sediment resuspension. The obvious seasonal fluctuation in *n*-alkanes with the highest values in October and April can be found. Furthermore, the seasonal variation trends of *n*-25, *n*-27, *n*-29 alkanes were consistent with that of phytoplankton biomass, which illustrated that the phytoplankton was the main source of *n*-alkanes in water columns of Fuxian Lake. Water temperature was one of the key factors to limit the spatial and temporal distribution of *n*-alkanes in water columns of Fuxian Lake. All the input from the phytoplanktons, surface soil and submerged plants played an important role for the high abundance of C₂₉ in the surface sediments. The *n*-alkanes (C₃₁ and C₃₃) in the sediments of Fuxian Lake could effectively indicate the input of terrestrial plants and submerged plants. The results were good foundation of paleo-environmental reconstruction in down core sediments based on *n*-alkanes in Fuxian Lake.

Key words: Fuxian Lake; suspended particulate matter; *n*-alkanes; phytoplankton

正构烷烃是地质体中分布广泛的类脂生物标志化合物之一,其分子结构具有饱和性与稳定性,通过其分子特征可以区分不同生物来源从而反映气候环境变化^[1-2].湖泊沉积物中的正构烷烃能够较为准确地反映不同生物来源有机质的相对含量变化,进而用于推测历史时期的沉积环境^[3],是重建古环境和古气候的重要指标之一^[4-5].但对于沉积环境相对复杂的湖泊,在进行古气候和古环境重建之前,评估正构烷烃的来源、沉积过程及其在此类沉积环境中的分布情况,是确保重建环境信息准确性的基础和

前提.湖泊沉积物中有机质主要来自于流域外源输入的陆生有机质、碎屑物质和水体内源输入有机质^[6],同时,也受到有机质沉降过程中的生物地球化学作用过程影响^[7];特别是在深水湖泊中,有机质在水体中存滞时间较长,沉积过程中可能会受到多种因素的影响.因此,了解正构烷烃在湖泊水体中的分

收稿日期: 2020-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41761044,41971115);云南省领军人才项目(2015HA024)

* 责任作者, 副教授, huilingsun07@hotmail.com

布特征是利用该指标进行环境重建的前提和基础。

悬浮颗粒物(SPM)是多数疏水性有机物在水环境中的主要载体^[8]。通常,湖泊水体悬浮颗粒物中有机质的来源主要包括陆源和自生两大类。自生来源指来源于水生植物、藻类和细菌等分泌、排泄物及其残体分解产物,以类蛋白质物质为主;陆源有机质则主要来自土壤、陆地植物碎屑及人类活动,以类腐殖质物质为主^[9-11]。目前,我国对水体悬浮颗粒物中正构烷烃的研究多集中在河流和海湾。如,冯精兰等^[12]、魏星等^[13]和张倩等^[14]曾对黄河、长江和海棠湾水体悬浮颗粒物中正构烷烃的组成特征、来源等进行研究,但对于存在温跃层的深水湖泊水体中正构烷烃的来源、时空分布特征及其来源和影响因素的研究还较少。因此,本文对抚仙湖 SPM 中正构烷烃的来源、季节和垂直分布特征进行探寻,从而为利用抚仙湖沉积物正构烷烃重建古环境奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

抚仙湖(24°21'N~24°38'N,102°49'E~102°57'E)是典型的断陷型高原深水湖泊,位于云南省中部,地跨云南省玉溪市澄江、江川、华宁三县,湖泊面积为212km²,最大水深157.3m,平均水深87m,是我国已知的第二大深水湖^[15]。抚仙湖为南北向的断层溶蚀湖泊,形状呈狭长的倒葫芦状(图1),北部水域宽而深,南部水域窄而浅,湖区四面环山,陡峭的岩石构成了抚仙湖大部分湖岸。抚仙湖是半封闭性的山间盆地淡水湖,属于珠江和西江水系的源头水系,共有大小入湖河流103条,海口河是历史上唯一的明河出水口,经出流改道后,隔河是抚仙湖的出湖河流之一,抚仙湖水经隔河泄入星云湖,湖水主要靠大气降水和流域地表径流进行补给^[16]。

气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/data/weatherBk.html>)玉溪红塔区气象站,资料时段为2016年3月~2017年3月。抚仙湖流域属于亚热带低纬高原季风气候,在2016年3月~2017年3月的采样期间,气温在11.2~21.3℃之间波动,其中5~8月气温较高,平均气温为21.1℃,6月达到最高温(21.3℃),9~12月气温呈下降趋势,9月和10月气温仍较高,从10月~11月气温从18.1℃骤降到13.4℃,12月和次年1月气温较低,均低于12℃;

年降水量为994mm,降雨多集中在6~9月,在145.2~162.7mm之间,11月降水量也较大(132mm),但在10月的降水量却异常减少,仅为52.7mm。

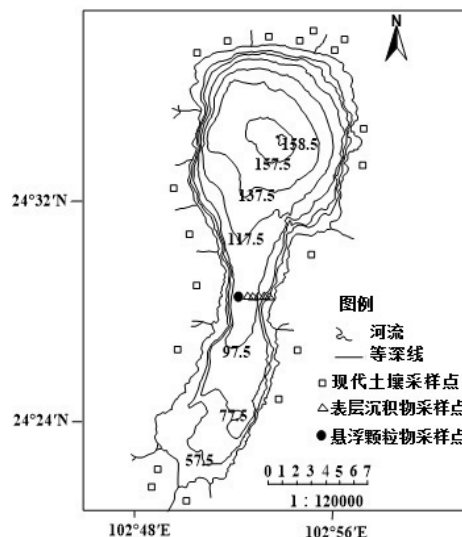


图1 抚仙湖水深及采样点位置

Fig.1 Water depth and sampling location of Fuxian Lake

1.2 样品的收集与水质参数测定

在图1采样点位置,从2016年4月~2017年3月期间,逐月通过采水器(Niskin瓶)采集水柱垂直剖面水样(0,20,40,60,80,100m),现场用预先灼烧过的0.7μm的GF/C Whatman玻璃纤维滤膜过滤水样收集悬浮颗粒物(SPM)样品。同时,用多参数水质分析仪(YSI-6600V2,美国)原位测量水柱垂直剖面的水质参数值(水温,溶解氧,电导率和pH值等)。此外,2016年7月分别采集了抚仙湖流域四周不同海拔梯度的表土样(19个)、典型沉水植物样(7个),以及不同水深梯度处的湖泊表层沉积物样(5个)、浮游植物样品(5个),于2016年4月在采样点附近0~20m水层中以水深5m为间隔使用采水器采集,经22μm孔径网筛过滤,得到浮游植物样品;沉水植物包括穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)、苦草(*Vallisneria spiralis* L.)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* L.)、丝藻(*Ulothrix* sp.)、轮藻(*Chara* sp.)、光叶眼子菜(*Potamogeton lucens* L.)和丝叶眼子菜(*Potamogeton filiformis* Pers.)。

1.3 样品的预处理和测定

正构烷烃的GC-MS分析测定在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成。气

相色谱-质谱联用仪为 HP6890+GC/5973MS. 色谱条件: HP-5MS 石英毛细管柱(30m×0.25mm×0.25μm), 始温 70℃, 升温速率 3℃/min, 终温 300℃, 终温稳定 20min, 进样口温度 300℃, 进样量 1μL, 载气为氦气. 质谱条件: 电子轰击源, 电离能量 70eV, GC 与 MS 接口温度 280℃. 样品前处理如下: 将滤膜剪碎, 用二氯甲烷(DCM): 甲醇(9:1, 体积比)的混合溶液在超声器中萃取 15min, 连续超声 5 次. 将抽提液浓缩后, 转移到细胞瓶中用氮气吹干称重. 用层析柱法分离出饱和烃、芳烃和非烃^[17]. 饱和烃用正己烷溶解后, 直接进行气相色谱-质谱(GC-MS)分析.

总碳(TC)、总氮(TN)含量的测定在云南省高原地理过程与环境变化重点实验室完成. 样品用美国 Thermo Scientific 的 MAT 253 气体稳定同位素比质谱仪联用 Flash EA 元素分析仪测定. 样品预处理如下: 将采集的表土和沉积物样品经真空冷冻干燥后过筛去除植物残体和沙砾等. 用玛瑙研钵进行研磨粉碎再用过量低浓度 10%稀盐酸反复滤洗去除碳酸盐, 然后用去离子纯水洗至中性, 并低温烘干研磨过 120 目筛后制成供试样品; 将清洗干净风干后的水生植物带回实验室, 用 10%盐酸酸化处理, 然后用蒸馏水清洗干净, 60℃下烘干, 磨成粉末后待测; 浮游植物样品装入玻璃皿中进行镜检并挑出杂质, 用 10%盐酸酸化处理, 以去除浮游植物体内可能存在的无机碳, 用蒸馏水清洗干净, 在-50℃下冻干至恒重后磨成均匀粉末待测^[18].

2 结果与讨论

2.1 抚仙湖水体理化参数时空变化特征

2.1.1 抚仙湖水温垂直分层及季节变动 抚仙湖由于上下层水体的增温与冷却不一致, 致使水温(WT)沿垂向呈现一定变化^[19]. 采样期间(2016年4月~2017年3月)的 WT 变化如图 2(a)所示, 抚仙湖 WT 在夏季和秋季(6 月底~10 月)水体垂直断面温度梯度明显, 在垂直断面上可分为 3 层: 变温层(0~20m)、温跃层(20~40m)和深水层(40m~底部), 变温层 WT 为最高, 平均 WT 约为 18.9℃, 最高 WT 达 23.9℃(2016 年 8 月); 在温跃层 WT 迅速降低(平均 WT 为 16.5℃), 且变化幅度非常明显; 深水层受外界影响较小, WT 逐渐趋于平稳并恒定至 14℃左右; 在季节上, 抚仙湖分层受季节气温变化的影响, 在夏、秋季(6 月

底~10 月)随着太阳辐射增强, 气温升高, 表层水体快速增温, 与深层水体温差逐渐增大, 水体出现分层现象; 在冬季和春季(4 月、11 月、12 月、次年 2 月和 3 月)太阳辐射减弱, 气温降低, 湖泊水体释放潜热, 最终形成水体上下较均匀的温度分布, 无明显分层, 因此, 抚仙湖水体分层受季节气温变化的影响, 在夏秋季水体分层明显, 在冬、春季水体混合.

2.1.2 pH 值垂直变化特征及季节变化 云南高原湖泊 pH 值偏高的特征性^[20]在抚仙湖也有所体现, 抚仙湖水体 pH 值整体呈弱碱性, 具有垂向变化且季节变化明显(图 2b). 在垂直方向上随深度的增加 pH 值逐渐降低, 表现出变温层(pH 为 8.0~10.2)高于温跃层(pH 为 7.9~10.0)和深水层(pH 为 7.4~9.9). 这可能是由于变温层光照强度较大, 湖泊表层温度升高, CO₂ 将向大气逸出, 而水中 CO₂ 的减少则会直接导致 pH 值的升高^[21], 另外, 0~20m 深水体中水生生物大量发育, 光合作用强烈, 消耗大量 CO₂, 致使表层水体 pH 值偏高, 而深层水体水生植物光合作用较弱, 有机质分解使水体积累大量 CO₂ 和有机酸, 同时由于下层水体滞留时间长, 分子扩散速率较慢, 导致 pH 值缓慢降低^[19]. 因此, pH 值的垂直分层可能主要受到水体 CO₂ 溶解和光合作用的影响. 从季节上看, pH 值在各深度上均表现出 10 月达到异常高值. 除了受到光合作用持续消耗 CO₂ 的累积效应外, 可能还与该年度 10 月气温异常高、降水异常少有关(图 1b).

2.1.3 溶解氧变化特征 抚仙湖垂向水体的溶解氧(DO)含量表现出变温层>温跃层>深水层(图 2c), 在垂直梯度上, 抚仙湖 DO 在变温层(0~20m)呈现最大值, 这可能是由于在深水区的 DO 主要是通过水体的垂直对流扩散获得, 而抚仙湖由于温跃层主要分布在 20~40m, 高梯度的水温分布阻碍了上下水团交换, 表层 DO 无法向下层输移, 导致 DO 迅速降低. 此外, 随着水深的增加太阳辐射在水体中受到水分子、悬浮颗粒和可溶性有机物等物质的散射和吸收而呈现 DO 衰减^[22], 因此, 导致湖泊底层的 DO 较低. 在季节变化上, 变温层 DO 含量的低值主要分布在夏、秋季, 高值出现在春季(2 月、3 月和 4 月), 最高值在 4 月(图 2c). 这可能是由于抚仙湖流域的气温在春季开始回暖, 加上冬季和春初水体混合较好, 且营养盐较为充足, 春季浮游植物开始激增, 这与抚仙湖春

季浮游植物细胞密度最高相一致^[23]。此外,在水深 20~40m 处,季节变化仍延续着上层水体的季节变化,由于夏、秋季水体分层较为明显,导致水层较稳定,阻碍了表层水和深层冷水之间的交换,上层水体的营养盐得不到补充,浮游植物逐渐死亡,光合作用强度变弱,导致氧跃层在该深度形成,而冬季和春初水体混合扰动较大,氧跃层分布在较深层位。夏、秋季,深水区水体 DO 值与上层各深度水体的 DO 值具有明显的差异,出现 DO 的最低值,分别为 3.68 和 3.63mg/L。这可能主要受到深度和底层生物的呼吸耗氧所致^[24]。

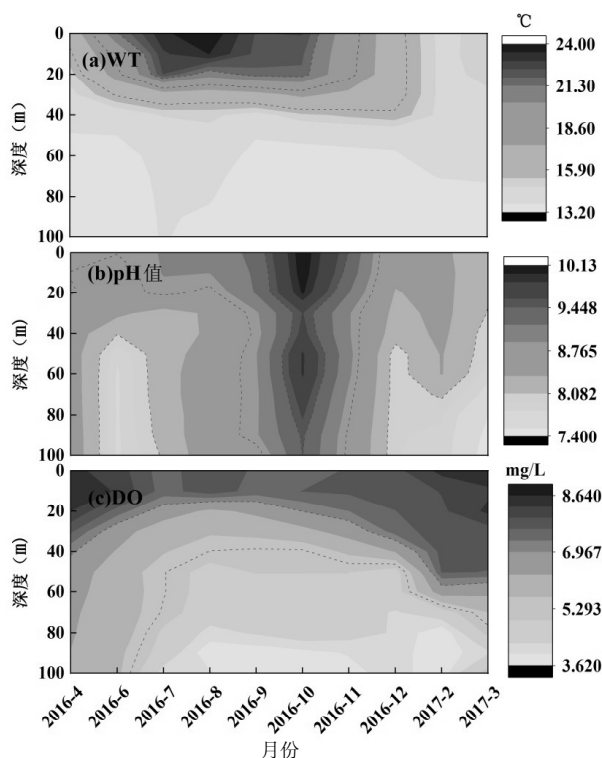


图2 2016年4月~2017年3月抚仙湖水柱各水体理化参数逐月剖面示意

Fig.2 Diagram of monthly profile of physical parameters of water column in Fuxian Lake from April 2016 to March 2017

2.2 抚仙湖 SPM 中正构烷烃时空分布特征

2.2.1 正构烷烃分布特征 如图 3 所示,碳数分布区间在 17~33 之间,无论是从水柱垂直剖面(图 3a)还是季节变化(图 3b)来看,正构烷烃的相对丰度分布均呈现出以长链正构烷烃单体 C₂₇、C₂₉ 为优势峰的单峰型分布模式,中链 C₂₃、C₂₅ 正构烷烃占比也相对较高,短链正构烷烃 C₁₇、C₁₉ 和 C₂₁ 的相对含量较低。通常,在沉积物中以 C₂₇、C₂₉ 为优势峰的正构烷

烃分布特征常直接被解译为外源陆生高等植物输入,碳数为 C₂₃、C₂₅ 的正构烷烃则被认为主要源于沉水和浮水等内源大型水生植物^[25-26]。据此,抚仙湖 SPM 正构烷烃可能显示出以陆生高等植物为主的有机质来源,然而考虑到浮游藻类和细菌也可以产生长链正构烷烃^[27-28],本文观察了抚仙湖 SPM 正构烷烃含量的季节变化动态。

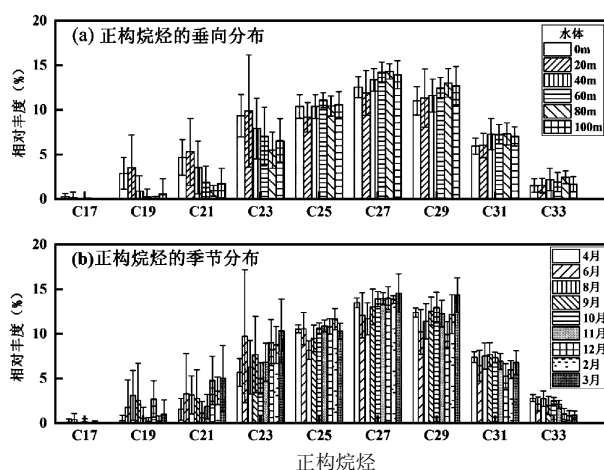


图3 抚仙湖水柱 SPM 中正构烷烃碳数分布

Fig.3 Carbon number distribution of *n*-alkanes in suspended particulate matter in Fuxian Lake

2.2.2 正构烷烃含量的时空变化特征 抚仙湖 SPM 正构烷烃总浓度分布范围为 0.01~6.45μg/L (图 4i)。水柱从表层到底部的 6 个深度(0,20,40,60,80 和 100m)的正构烷烃总含量分别为 0.04~0.81,0.05~6.45,0.03~1.74,0.01~0.64,0.01~0.69,0.02~0.35μg/L。高值主要分布在温跃层及以上,深层含量较低,且均存在明显的季节差异。其中,约 20m 水深处的变温层与温跃层的临界面是正构烷烃含量的峰值所在;从表层到 20m 水深处正构烷烃含量呈现随水深递增趋势,从 20m 水深到 40m 水深处正构烷烃含量逐渐减少,40m 水层以下的深层正构烷烃含量极低。在各深度上长链正构烷烃单体 C₂₇ 和 C₂₉ 的浓度最高(图 4f,4g),其次为 C₂₃、C₂₅ 和 C₃₁ 正构烷烃单体(图 4d,4e,4h),短链正构烷烃单体 C₁₇、C₁₉、C₂₁ 浓度最低(图 4a,4b,4c)。在季节上,正构烷烃总浓度在各深度上均表现明显的季节变化,总体上,正构烷烃总浓度在 10 月和 4 月达到峰值,分布区间分别为 0.19~6.45 和 0.17~2.07μg/L。短链 C₁₇、C₁₉ 和 C₂₁ 正构烷烃单体在各月的浓度较低,

且仅在变温层表现出明显的季节变化,而中、长链正构烷烃浓度较高,其季节变化与正构烷烃总浓度的季节变化相一致,从变温层到深水层都在 10 月和 4 月达到峰值.这与 2015 年抚仙湖变温层水体浮游植物总生物量在 4 月和 10 月出现峰值^[29](图 5b)完全吻合,在垂直分布上,浮游植物也体现出与中、长链正构烷烃相似的梯度变化,即在变温层和温跃层的生物量明显高于深水层^[30-31],这表

明中、长链正构烷烃的有机质来源可能与浮游植物有关.此外,抚仙湖 SPM 正构烷烃浓度的垂直分布特征(图 4)还证明了在该深水湖泊中沉积物的再悬浮作用较小.通常在深水湖泊中,热力分层增强了水体运动随深度的衰减,温跃层阻碍了风的直接影响^[32];在不分层期间,由于水深较深而导致湖底受湖面风浪作用的影响较小,从而导致抚仙湖水底的再悬浮作用微弱.

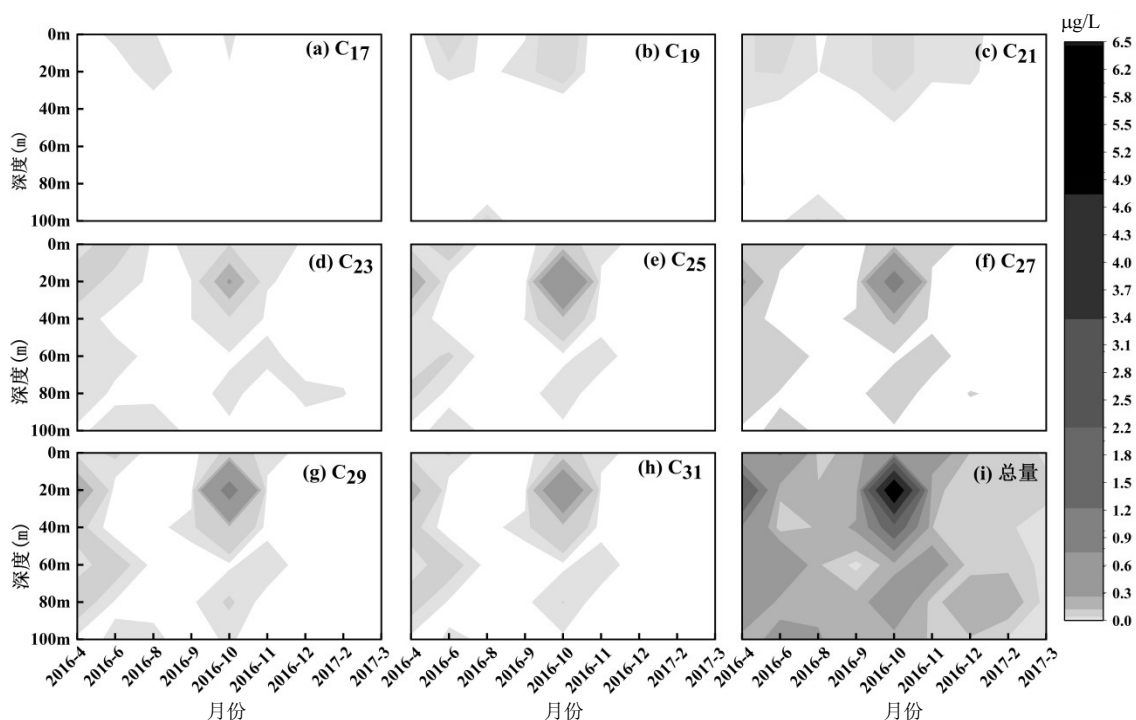


图 4 抚仙湖水柱深度剖面 SPM 主要正构烷烃的时空分布

Fig.4 Spatial and temporal distribution of concentrations of individual *n*-alkanes in SPM through water column of Fuxian Lake (0~100m depth), from April 2016 to March 2017

2.2.3 抚仙湖 SPM 中的正构烷烃来源 C/N 值的大小可对沉积物有机质来源进行初步判断^[33].一般湖泊沉积物有机质的 C/N 值小于 12,指示湖泊内部含较多蛋白质来源的水生植物输入,而富含腐殖质的陆生植物的 C/N 值通常大于 14^[1].抚仙湖不同来源有机质的 C/N 平均值如图 5(a)所示,其分别是:流域表层土壤 13.9;湖泊表层沉积物 10.2;沉水植物 11.8;表层水(0~20m 水深)浮游植物是 8.5;水柱(0~100m)SPM 为 8.6.水柱 SPM 的 C/N 值与浮游植物的 C/N 值分布区间基本重叠,平均值基本吻合,间接说明抚仙湖 SPM 的有机质可能主要来源于浮游植物的贡献.同时,本文将 2015 年抚仙湖表层浮游植物逐月总生物量变化^[29]与本文中水柱变温层(0~

20m)和整个水柱(0~100m)的正构烷烃含量的年变化趋势进行对比(图 5b),浮游植物生物量和正构烷烃含量变化均呈现相似的变化趋势.即,二者均在 4 月和 10 月呈现 2 个峰值;只是浮游植物的生物量最大值出现在 4 月,而正构烷烃含量的最大值出现在 10 月.这或许与两组数据并非同一年度有关,出现正构烷烃含量最高值的 2016 年 10 月,气温和降水较异常,降水偏少,导致云量减少,以及气温较往年偏高使得湖泊 WT 相对偏高从而为浮游植物生长繁殖创造了环境.另外,抚仙湖变温层(0~20m)中,正构烷烃单化合物(C₂₅、C₂₇、C₂₉)丰度的年变化趋势也与表层浮游植物生物量年变化一致,而短链正构烷烃单化合物(C₁₇、C₁₉、C₂₁、C₂₃)由于含量极低,并未表现出相

似的年变化趋势,也间接验证了抚仙湖 SPM 中的中长链正构烷烃单化合物(C_{25} 、 C_{27} 、 C_{29})主要来源于浮

游植物的贡献,而非以往认知的浮游植物主要为短链正构烷烃提供来源。

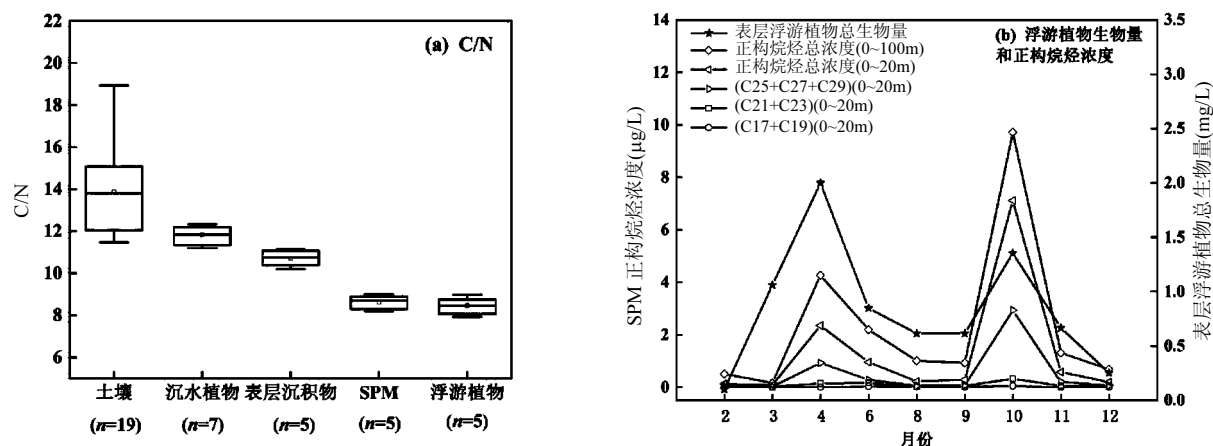


图5 抚仙湖流域表层土壤、表层沉积物、沉水植物、SPM和浮游植物的C/N值分布以及抚仙湖正构烷烃总浓度和部分单化合物的季节年变化与2015年抚仙湖浮游植物总生物量年变化^[29]的比较

Fig.5 C/N ratios in Fuxian lake of surface soil, surface sediments, submerged plants, SPM and phytoplanktons and the monthly comparison between total phytoplankton biomass in surface water in 2015^[29] and concentrations of total and individual *n*-alkanes in 0~100m and 0~20m water depths in Fuxian Lake

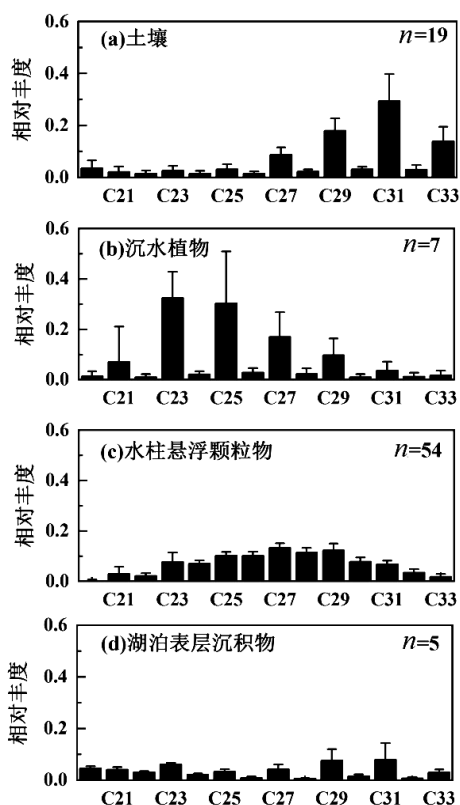


图6 抚仙湖现代样品的正构烷烃碳数分布

Fig.6 Carbon number distribution of *n*-alkanes in modern samples from Fuxian Lake
n=样品数量

本文进一步对比了流域表层土壤、湖泊表层沉

积物、沉水植物和 SPM 的正构烷烃分布(图 6)。由图 4 和图 5(b)可知,SPM 中的正构烷烃单化合物(C_{29} 、 C_{27} 、 C_{25})具有较高的含量,在组成分布中也占绝对优势(图 6c);但在湖泊表层沉积物中正构烷烃分布与前人^[34]一样呈双峰模式分布,优势峰为 C_{31} 和 C_{23} (图 6d),说明沉积物中的中长链正构烷烃(C_{29} 、 C_{27} 、 C_{25})还大量源于陆生表层土壤(图 6a)和沉水植物(图 6b);浮游植物对沉积物中有机质的绝对贡献还相对有限,反而是来源于流域表层土壤中相对丰度最高的 C_{31} 和来源于沉水植物中相对丰度最高的 C_{23} 正构烷烃与湖泊表层沉积物中的双峰型(C_{31} 、 C_{23})分布相对应。由于二者指示来源都相对单一,因此,抚仙湖沉积物中正构烷烃单化合物 C_{31} 、 C_{23} 可以有效的分别指示陆源植物和沉水植物。而同样在沉积物中丰度较高的正构烷烃单化合物 C_{29} ,其共同来源于浮游植物、沉水植物、流域表土的有机质贡献,环境指示意义不大。

2.3 环境影响因素

首先对抚仙湖 SPM 正构烷烃数据进行除趋势对应分析(DCA),结果表明,排序轴(第一排序轴梯度长度为 0.082)的梯度长度小于 3,因此采用基于线性模型的主成分分析(PCA)和冗余分析(RDA)^[35]。抚仙湖 SPM 正构烷烃 PCA(图 7a)结果显示,2 个轴一

共解释了正构烷烃单化合物总变量 82% 的因子载荷.而 PCA1 就解释了 62.2% 的因子载荷,其中,正因子载荷主要由短、中链正构烷烃单化合物 C₁₇、C₁₉、C₂₁、C₂₃ 组成;负因子载荷主要由中、长链正构烷烃单体 C₂₅、C₂₇、C₂₉、C₃₁ 和 C₃₃ 组成;这表明两组烷烃化合物来源上可能存在巨大差异. RDA 结果显示(图 7b),轴 1 和轴 2 的特征值分别为 32.3% 和 4.8%,说明轴 2 上环境因子 pH 值对正构烷烃分布的解释量极低;轴 1 可以解释大部分环境因子 WT、DO 和深度(Depth)对正构烷烃分布的影响.再利用向前引入法对环境因子逐步筛选, Monte Carlo 置换检验结果显示, WT 对水柱 SPM 正构烷烃分布的影响达到了极显著水平($P < 0.01$);而 DO($P = 0.06$)和 Depth($P = 0.43$)对水柱 SPM 正构烷烃垂直分布的影响不显著.即 WT 是限制抚仙湖水柱中正构烷烃垂直分布的关

键因素.因为温度是影响浮游植物生长的关键因子之一,在浮游植物生物量和群落结构的变化过程中起到了重要的作用.一方面, WT 通过影响水体的对流运动,改变水体中的 DO 以及各类营养物质的垂直分布;另一方面, WT 会影响藻细胞酶活性,抑制光合作用和呼吸代谢过程^[36].另外,浮游植物复杂的群落分布结构也影响 SPM 中正构烷烃垂直分布态势.据潘继征等^[31]和刘晓曦等^[29]对抚仙湖浮游植物空间分布的调查结果可知,绿藻、甲藻、金藻、硅藻和蓝藻是抚仙湖主要的浮游植物种类,绿藻是抚仙湖浮游植物中的绝对优势种,且主要分布在 30m 水层以上,峰值在 10~20m 水层;在 40m 以下的深水层密度锐减;而金藻、甲藻类浮游植物在深水层中几乎没有分布,刚好与抚仙湖水柱中正构烷烃的分布特征一致.

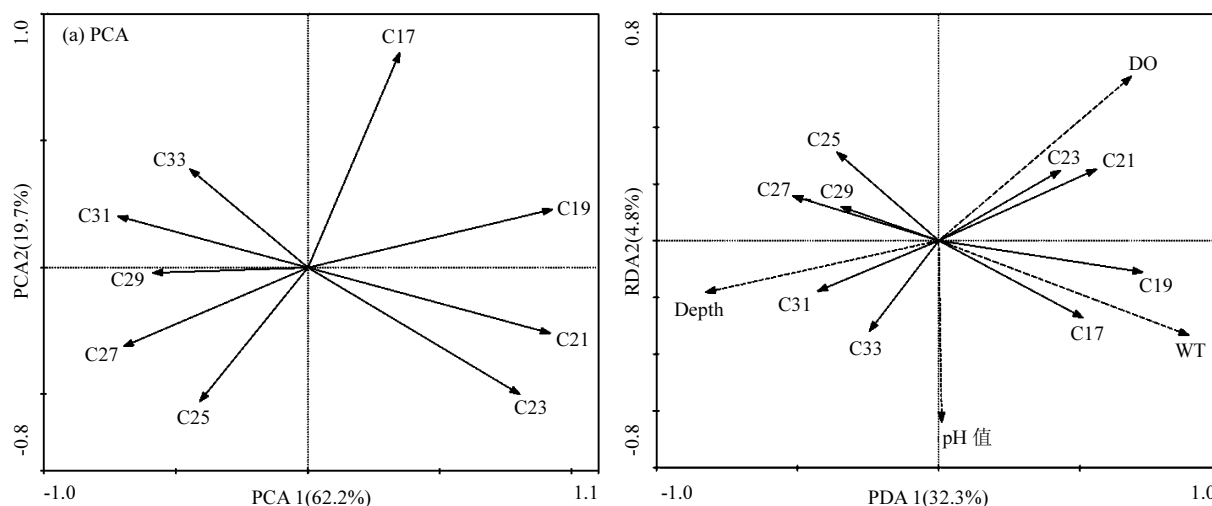


图 7 抚仙湖水柱 SPM 中正构烷烃 PCA 分析和 RDA 分析

Fig.7 Principal component analysis (PCA) and Redundancy analysis (RDA) of *n*-alkanes in water column of Fuxian Lake

3 结论

3.1 抚仙湖水柱 SPM 中正构烷烃的碳数分布范围在 C₁₇~C₃₃ 之间,以 C₂₇ 和 C₂₉ 为优势峰的单峰型模式分布,水柱 SPM 中正构烷烃总含量分布范围为 0.01~6.45 μg/L,在季节变化尺度上,正构烷烃含量在 10 月和 4 月呈现最高值,这与浮游植物生物量的变化相一致;在垂直梯度的空间分布上,正构烷烃的峰值主要分布在约 20m 水深处的变温层与温跃层的临界面,底层水体中含量较少,表明湖泊沉积物-水界面的沉积物再悬浮作

用影响微弱.

3.2 抚仙湖水柱 SPM 中正构烷烃单化合物(C₂₅、C₂₇ 和 C₂₉)丰度与浮游植物生物量变化显著相关,水柱 SPM 与浮游植物的 C/N 值分布区间基本吻合,表明浮游植物是 SPM 正构烷烃主要来源. WT 是限制抚仙湖水柱中正构烷烃时空分布的关键因子.抚仙湖沉积物中的正构烷烃碳数分布以双峰型为主,正构烷烃 C₃₁ 和 C₂₃ 可以有效指示流域陆源植物和沉水植物,而沉积物中丰度较高的正构烷烃 C₂₉ 则源于浮游植物、流域表土和沉水植物的有机质的共同输入,不宜用于重建古环境.

参考文献:

- [1] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter [J]. Chemical Geology, 1994,114(3/4):289–302.
- [2] Ficken K J, Li B, Swain D L, et al. An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes [J]. Organic Geochemistry, 2000,31(7/8):745–749.
- [3] 沈贝贝, 吴敬禄, 曾海鳌, 等. 网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化 [J]. 环境科学, 2017,38(9):3682–3688.
- Shen B B, WU J L, Zeng H A, et al. Distribution of *n*-alkanes from lake wanghu sediments in relation to environmental changes [J]. Environmental Science, 2017,38(9):3682–3688.
- [4] Meyers P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great lakes [J]. Organic Geochemistry, 2003,34(4):261–289.
- [5] Sarkar S, Wilkes H, Prasad S, et al. Spatial heterogeneity in lipid biomarker distributions in the catchment and sediments of a crater lake in Central India [J]. Organic Geochemistry, 2014,66(1):125–136.
- [6] Meyers P A, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments [J]. Organic Geochemistry, 1993,20(7):867–900.
- [7] Cripps G C, Clarke A. Seasonal variation in the biochemical composition of particulate material collected by sediment traps at Signy Island, Antarctica [J]. Polar Biology, 1998,20(6):414–423.
- [8] Schoellhamer D H, Mumley T E, Leatherbarrow J E, et al. Suspended sediment and sediment-associated contaminants in San Francisco Bay [J]. Environmental Research, 2007,105(1):119–131.
- [9] Wang J, Hilton R G, Jin Z, et al. The isotopic composition and fluxes of particulate organic carbon exported from the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2019,252(1):1–15.
- [10] Smith J C, Galy A, Hovius N, et al. Runoff-driven export of particulate organic carbon from soil in temperate forested uplands [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2013,365(1):198–208.
- [11] Adams J L, Tipping E, Bryant C L, et al. Aged riverine particulate organic carbon in four UK catchments [J]. Science of The Total Environment, 2015,536(1):648–654.
- [12] 冯精兰, 席楠楠, 张 飞, 等. 黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析 [J]. 环境科学, 2016,37(3):893–899.
- Fen J L, Xi N N, Zhang F, et al. Distribution characteristics and source apportionment of *n*-alkanes in water from Yellow River in Henan Section [J]. Environmental Science, 2016,37(3):893–899.
- [13] 魏 星, 戚艳平, 吴 莹. 长江口徐六泾颗粒态正构烷烃的月变化组成特征及来源解析 [J]. 地球与环境, 2013,41(6):605–611.
- Wei X, Qi Y P, Wu Y. Monthly changes of the composition and the source apportionment of particulate organic matter *n*-alkanes in Xuliujing, Changjiang Estuary [J]. Earth and Environment, 2013,41(6):605–611.
- [14] 张 倩, 宋金明, 彭全材, 等. 胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析 [J]. 环境科学, 2017,38(7):2763–2772.
- Zhang Q, Song J M, Peng Q C, et al. Distribution and sources of *n*-alkanes in surface seawater of Jiaozhou Bay [J]. Environmental Science, 2017,38(7):2763–2772.
- [15] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊调查报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2019:16–17.
- Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese academy of sciences. Chinese lake survey report [M]. Beijing: Science Press, 2019:16–17.
- [16] 王小雷, 杨 浩, 丁兆运, 等. 云南抚仙湖近现代沉积速率变化研究 [J]. 地理学报, 2011,66(11):1551–1561.
- Wang X L, Yang H, Ding Z Y, et al. Modern sedimentation rates of fuxian lake by ^{210}Pb and ^{137}Cs dating [J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(11):1551–1561.
- [17] 王志远, 谢树成, 陈发虎. 临夏塬堡黄土地层 S1 古土壤中的正构烷烃及其古植被意义 [J]. 第四纪研究, 2004,24(4):231–235.
- Wang Z Y, Xie S C, Chen F H. *N*-alkane distribution as indicator for paleo-vegetation an example from Yuanbao S1 paleosol in Linxia, Gansu Province [J]. Quaternary Sciences, 2004,24(4):231–235.
- [18] 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 [J]. 湖泊科学, 2018,30(5):226–238.
- Liang H, Huang L P, Chen G J, et al. Patterns of carbon and nitrogen stable isotopes and elemental composition of lake primary producers and zooplankton in Eastern Yunnan [J]. Journal of Lake Sciences, 2018,30(5):226–238.
- [19] 文新宇, 张虎才, 常凤琴, 等. 泸沽湖水体垂直断面季节性分层 [J]. 地球科学进展, 2016,31(8):858–869.
- Wen X Y, Zhang H C, Chang F Q, et al. Seasonal stratification characteristics of vertical profiles of water body in Lake Lugu [J]. Advances in Earth Science, 2016,31(8):858–869.
- [20] 莫美仙, 张世涛, 叶许春, 等. 云南高原湖泊滇池和星云湖 pH 值特征及其影响因素分析 [J]. 农业环境科学学报, 2007,(1):269–273.
- Mo M X, Zhang S T, Ye X C, et al. PH characters and influencing factors in dianchi and Xingyun Lakes of Yunnan Plateau [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007,(1):269–273.
- [21] 龙爱民, 陈绍勇, 周伟华, 等. 南海北部秋季营养盐、溶解氧、pH 值和叶绿素 a 分布特征及相互关系 [J]. 海洋通报, 2006,25(5):9–16.
- Long A M, Chen S Y, Zhou W H, et al. Distribution of Macro-nutrients, dissolved oxygen, pH and Chl a and their relationships in Northern South China Sea [J]. Marine Science Bulletin, 2006,25(5):9–16.
- [22] 卢 蓓. 湖泊沉水植物适应水体光衰减的初步研究 [D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2017:1–65.
- Lu B. Primary research on adaptation to underwater light attenuation by submerged macrophytes in lakes [D]. Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences November, 2017:1–65.
- [23] 吉正元, 刘绍俊. 抚仙湖浮游植物群落结构、影响因子及水质评价 [J]. 中国环境监测, 2019,35(4):67–77.
- Ji Z Y, Liu S J. Phytoplankton community structure, related influencing factors and the evaluation of water quality in the Fuxian Lake [J]. Environmental Monitoring in China, 2019,35(4):67–77.
- [24] 劳齐斌, 卞培旺, 曾 珍, 等. 湖光岩玛珥湖溶解氧的时空分布特征及其影响因素 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018,37(4):714–723.
- Lao Q B, Bian P w, Zeng Z, et al. Spatial-temporal distributions of dissolved oxygen and its affecting factors in Huguangyan Maar Lake [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018,

- 37(4):714–723.
- [25] Mead R, Xu Y P, Chong J D, et al. Sediment and soil organic matter source assessment as revealed by the molecular distribution and carbon isotopic composition of *n*-alkanes [J]. *Organic Geochemistry*, 2005,36(3):363–370.
- [26] 李存林,马素萍,常福宣,等.青藏高原北部土壤正构烷烃氢同位素及物源意义 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(5):2095–2105.
- Li C L, Ma S P, Chang F X, et al. *N*-alkanes hydrogen isotopes in soil from the northern region, Tibetan Plateau: implications for sources of organic matter [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(5):2095–2105.
- [27] Li G Y, Li L, Torozo R, et al. Microbial production of long-chain *n*-alkanes: implication for interpreting sedimentary leaf wax signals [J]. *Organic Geochemistry*, 2018,115(1):24–31.
- [28] 朱 纯,潘建明,卢 冰,等.长江、老黄河口及东海陆架沉积有机质物源指标及有机碳的沉积环境 [J]. *海洋学研究*, 2005,(5):36–46.
- Zhu C, Pan J M, Lu B, et al. Source indication and accumulative effect of sedimentary organic matter in the Changjiang Estuary, the old Huanghe River subaqueous delta and the East China Sea shelf [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2005,(5):36–46.
- [29] 刘晓曦,陈 丽,蒋伊能,等.抚仙湖浮游植物群落时空变化特征及其与环境因子的关系 [J]. *湖泊科学*, 2020,32(3):793–803.
- Liu X X, Chen L, Jiang Y N, et al. Spatiotemporal variation of phytoplankton communities and their relationship with environmental factors in Lake Fuxian [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020,32(3):793–803.
- [30] 牛 远,孔祥虹,余 辉,等.抚仙湖夏季热分层时期浮游植物空间分布特征 [J]. *生态学杂志*, 2016,35(7):1865–1871.
- Niu Y, Kong X H, Yu H, et al. Spatial distribution of phytoplankton community during summer stratification in Lake Fuxian [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016,35(7):1865–1871.
- [31] 潘继征,熊 飞,李文朝,等.抚仙湖浮游植物群落结构、分布及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2009,29(10):5376–5385.
- Pan J Z, Xiong F, Li W C, et al. Structure, distribution and its impact factors of phytoplankton community in Fuxian Lake [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009,29(10):5376–5385.
- [32] Bloesch J. Mechanisms, Measurement and importance of sediment resuspension in lakes [J]. *Marine & Freshwater Research*, 1995,46(1):295–304.
- [33] 王毛兰,赖建平,胡珂图,等.鄱阳湖表层沉积物有机碳、氮同位素特征及其来源分析 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(4):1019–1025.
- Wang M L, Lai J P, Hu K T, et al. Compositions and sources of stable organic carbon and nitrogen isotopes in surface sediments of Poyang Lake [J]. *China Environmental Science*, 2014,34(4):1019–1025.
- [34] 赖 珊,万宏滨,唐 芳,等.抚仙湖沉积物有机碳埋藏特征及来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(3):1246–1256.
- Lai S, Wan H B, Tang F, et al. Characteristics and source analysis of organic carbon buried in sediments of Fuxian Lake [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(3):1246–1256.
- [35] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5 [M]. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [36] 周彦锋,宋江腾,刘 凯,等.怀洪新河浮游植物群落结构与水环境因子的关系研究 [J]. *生态科学*, 2017,36(1):35–42.
- Zhou Y F, Song J T, Liu K, et al. Study on the relation between phytoplankton community structure and aquatic environment factors in Huaihong River [J]. *Ecological Science*, 2017,36(1):35–42.

作者简介: 袁红香(1995–),女,傈僳族,云南丽江人,云南师范大学硕士研究生,主要从事湖泊沉积与环境变化研究.发表论文 1 篇。