

贵州威宁草海湿地表层沉积物有机质时空分布及其来源辨析

李林蔚, 吴攀, 曹星星, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪

引用本文:

李林蔚, 吴攀, 曹星星, 等. 贵州威宁草海湿地表层沉积物有机质时空分布及其来源辨析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 153-161.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0617>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东北典型湖泊沉积物氮磷和重金属分布特征及其污染评价研究

刘丽娜, 马春子, 张靖天, 何卓识, 霍守亮, 席北斗

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 520-529 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1131>

普者黑河流-湖泊湿地表层沉积物磷素时空分布及影响因素

刘鹏, 张紫霞, 张超, 王妍, 杨波, 张叶飞

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2553-2562 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0555>

会仙湿地水体有机磷农药污染特征及生态风险

张健威, 曾莎莎, 梁延鹏, 覃礼堂, 曾鸿鹄, 马诚佑

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1990-1997 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0208>

小麦和玉米生长对土壤碳输入和输出的贡献

孙昭安, 朱彪, 张译文, 李梦雨, 孟凡乔

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2257-2265 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0295>

广西某采选废矿区重金属生态风险与源汇关系

毛志强, 田康, 刘本乐, 张晓辉, 卞子金, 黄标, 袁旭音, 吴龙华, 罗栋源

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 987-998 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1338>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李林蔚, 吴攀, 曹星星, 等. 贵州威宁草海湿地表层沉积物有机质时空分布及其来源辨析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 153-161.

LI L W, WU P, CAO X X, et al. Spatial-temporal distribution of organic matter in surface sediments of Caohai wetland in Weining, Guizhou Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(1): 153-161.



开放科学 OSID

贵州威宁草海湿地表层沉积物有机质时空分布及其来源辨析

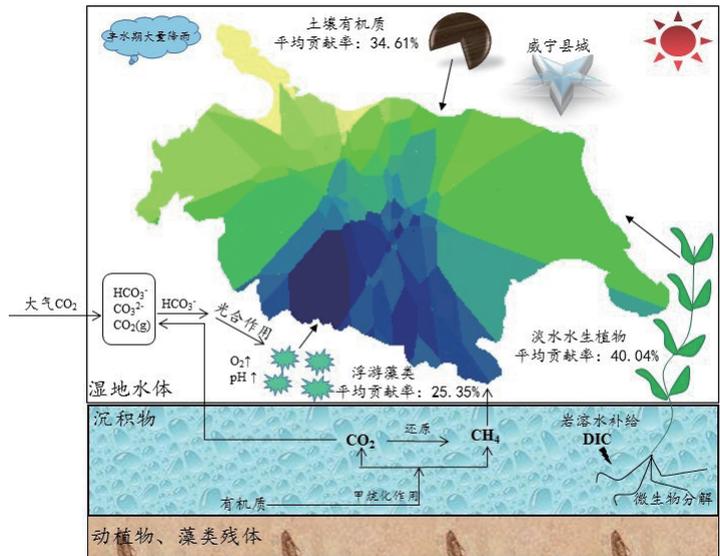
李林蔚^{1,2}, 吴攀^{1,2}, 曹星星^{1,2*}, 杨诗笛^{1,2}, 刘闪^{1,2}, 廖家豪^{1,2}

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025)

摘要:为探究岩溶湿地生态环境的营养状况及污染物来源,以贵州威宁草海岩溶湿地为例,通过对其不同水文期表层沉积物中总有机碳(TOC)和总氮(TN)的含量分布及其稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)、稳定氮同位素($\delta^{15}\text{N}$)和C/N的分析,探讨了沉积物有机质的分布特征及来源。结果表明:草海湿地表层沉积物丰水期TOC、TN含量变化范围分别为3.75%~32.71%和0.39%~2.90%,平均值分别为14.34%和1.52%;枯水期TOC、TN含量变化范围分别为1.26%~34.11%和0.18%~2.49%,平均值分别为12.46%和1.12%;丰水期TOC、TN含量略高于枯水期,这与丰水期大量降雨带来的陆源输入有关,同时在空间分布上二者在两个水文期均表现为西南和湖心区域大于东部和西北区域。草海湿地表层沉积物丰水期 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 分布范围分别在-2.55%~-1.97%和0.03%~0.37%,平均值分别为-2.23%和0.24%;枯水期 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 分布范围分别在-2.75%~-1.96%和0.10%~0.46%,平均值分别为-2.35%和0.30%;其中 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间分布特征表现为东区较西区明显偏负,说明东区污染严重,这是由于东区毗邻县城,污染物来源复杂,沉水植物遭到破坏,使得湖泊自身生产力降低。通过端元混合模型对沉积物来源进行定性和半定量分析,结果表明:草海湿地表层沉积物有机质的主要来源为土壤有机质、浮游藻类及淡水水生植物,同时由于草海岩溶湿地具有较高的初级生产力,沉积物中有机质来自内源的贡献大于来自外源的输入。

关键词:草海湿地;有机质;碳同位素($\delta^{13}\text{C}$);氮同位素($\delta^{15}\text{N}$);来源

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)01-0153-09 doi:10.11654/jaes.2021-0617



收稿日期:2021-05-27 录用日期:2021-08-18

作者简介:李林蔚(1998—),女,贵州毕节人,硕士研究生,从事环境地球化学研究。E-mail:1203812295@qq.com

*通信作者:曹星星 E-mail:xxcao@gzu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41807376);贵州大学人才引进项目[贵大人基合字(2019)24号];贵州省人才基地项目(RCJD2018-21);喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室开放课题(KST2017K06)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41807376); Guizhou University Talent Introduction Project[GDJHZ(2019) No.24]; Guizhou Talent Base Project(RCJD2018-21); Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment Open Project of Ministry of Education(KST2017K06)

Spatial-temporal distribution of organic matter in surface sediments of Caohai wetland in Weining, Guizhou Province, China

LI Linwei^{1,2}, WU Pan^{1,2}, CAO Xingxing^{1,2*}, YANG Shidi^{1,2}, LIU Shan^{1,2}, LIAO Jiahao^{1,2}

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2.Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To explore the nutritional status and pollutant sources of the ecological environment of karst wetlands, the distribution of total organic carbon (TOC) with total nitrogen (TN), including stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$), nitrogen isotopes ($\delta^{15}\text{N}$), and C/N ratios, were studied in the surface sediments of the Caohai Lake karst wetland in Weining, Guizhou Province; then, the distribution characteristics and sources of organic matter in sediments were discussed. The results showed that the TOC and TN contents varied from 3.75% to 32.71% and 0.39% to 2.90% in the wet season, with average values of 14.34% and 1.52%, respectively. The TOC and TN contents ranged from 1.26% to 34.11% and 0.18% to 2.49% in the dry season, with average values of 12.46% and 1.12%, respectively. The TOC and TN contents in the high water period were slightly higher than those in the dry season, which was related to the land source input caused by increased rainfall during the high water period. Meanwhile, regarding the spatial distribution, the concentrations of TOC and TN in the southwest and the lake center region were greater than those in the east and northwest regions in both seasons. Regarding surface sediments in the Caohai Lake wetland, the distribution of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ ranged from -2.55% to -1.97% and from 0.03% to 0.37% in the wet season, with average values of -2.23% and 0.24%, respectively. The distribution of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ ranged from -2.75% to -1.96% and 0.10% to 0.46% in the dry season, with average values of -2.35% and 0.30%, respectively. The spatial distribution of $\delta^{13}\text{C}$ in the eastern area was significantly lower as compared to the western area, which indicated that the eastern area was seriously polluted. This was because the eastern area was adjacent to the county, the source of pollutants was complex, the submerged plants were destroyed, and the productivity of the lake itself was reduced. The end member mixed model was used to qualitatively and semi-quantitatively analyze the sediment sources. The results showed that the main sources of organic matter in the surface sediments of the Caohai Lake wetland were soil organic matter, planktonic algae, and freshwater aquatic plants. At the same time, due to the high primary productivity of the Caohai Lake karst wetland, the contribution of organic matter in the sediments from internal sources was greater than that from exogenous inputs.

Keywords: Caohai Lake wetland; organic matter; carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$); nitrogen isotope ($\delta^{15}\text{N}$); source

湿地是水陆系统交互作用形成的具有特殊结构的自然综合体,是自然界三大生态系统之一^[1]。而岩溶湿地则是指以岩溶水为主要补给水源或主要分布在岩溶地区(包括地表、地下),具备岩溶地区特殊的高钙偏碱性水土特征的内陆湿地^[2-3],由于受到特殊水文地质的影响,其结构和功能与其他类型的湿地差异较大。我国西南地区是典型的喀斯特岩溶地形地貌区,其独特的地表地下双重水系统及快速的水文变化过程使得该地区岩溶湿地生态环境复杂而脆弱,也因此受到了国内外学者的广泛关注^[4]。贵州威宁草海是我国最大的岩溶湿地湖泊,近几十年来由于遭受城市生活污水及农业农村面源污水的污染,湿地面积大量萎缩,水环境和水功能下降明显^[5]。

湿地沉积物是水体环境的重要组成部分,不仅能为湿地生物提供丰富的营养物质,还对湿地中污染物起着吸附沉降的作用,是各类污染物质的“指示体”和“积蓄体”^[6-7]。研究沉积物有机质的组成和分布特征对了解其在水环境中如何参与物质循环至关重要^[8],研究湿地沉积物中碳、氮元素及其同位素的特征有助于掌握水域营养状况、水体初级生产力及物质来

源^[9]。通常湿地表层沉积物的有机质来源分为内源和外源,内源一般来自动植物残体、浮游生物及微生物等,外源主要来自于外排水中溶解态和颗粒态的有机质等^[10],其富集可能会造成湿地富营养化。对沉积物有机质的含量、空间分布特征以及来源进行全面系统分析,对更深入了解沉积物在湿地生态系统中的作用具有重要意义^[11]。

目前针对贵州草海自然保护区碳、氮等营养元素循环过程已开展相关研究工作并取得了一定成果^[12-15]。然而,对于表层沉积物有机质空间分布特征及来源辨析尚不够全面深入,且相关研究的样点布设较少,采样点位主要集中在湖心区域,呈线形条带状,且采样时间多为一个季度,虽然进行了同季度分区对比,但是仍然缺少更详细的时空参考性及不同类型的湿地/湖泊之间的对比。草海湿地面积辽阔,是重要的候鸟越冬迁移的停歇地,湖区水动力条件复杂,季节差异性大,近年来管理措施的逐步完善使得水环境得到改善,要全面反应有机质在草海中的空间分布情况,需要加强采样点的空间布设、增加样品的采集期数^[16],同时在分析有机质来源时进行定性和定量分

析。基于此,本研究对草海全湖不同季节表层沉积物进行了样品采集,以期揭示草海湿地表层沉积物总有机碳(TOC)和总氮(TN)的时空分布及碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)和氮同位素($\delta^{15}\text{N}$)组成特征,定性和半定量地分析草海湿地有机质的来源。研究结果可为草海湿地环境管理提供有效参考,亦可进一步丰富对岩溶湿地生态系统碳、氮循环过程的认识。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

草海属国家级自然保护区,总规划面积96 km²,位于贵州省西部的威宁县城西南角(26°47′~26°52′N, 104°10′~104°20′E)。草海流域属山地暖温带湿润季风气候,具有日照丰富、冬干夏湿等特点,年平均气温10.5℃,年均降水量950.9 mm,主要集中在下半年。由于受季节性降雨的影响,草海平水期水位为2 171.7 m,平均水深2.4 m,正常蓄水面积为25 km²,相应库容为4 703.2万 m³,而丰水期水位可达2 172.8 m,相应水域面积达到29.85 km²;枯水期水位则降至2 171.2 m,相应水域面积缩小为15 km²。草海地区贫困面广、经济总量小,污水处理设备不足,草海内污染物主要来自于周边入湖的面源污染及周围城镇乡村的生活污水^[17]。

1.2 样品采集与预处理

本研究分别于2019年7月(丰水期)和2019年12月(枯水期)对保护区进行样品采集,共设置25个点位(图1),各采样点使用GPS确定坐标和高程。使用沉积物采样器分别采集10 cm以内的表层沉积物样品,装入干净的密封袋内,避光低温保存,带回实验室经过冷冻干燥机干燥后,去除杂质,过100目筛后存

置于棕色聚乙烯瓶中密封保存。

1.3 样品分析方法

称取过筛后的沉积物样品0.5 g,置于50 mL离心管中,并加入0.5 mol·L⁻¹HCl(优级纯)30 mL以去除无机碳酸盐,期间每8 h摇动一次,浸泡24 h后,再用去离子水淋洗样品直至滤液呈中性,并用AgNO₃溶液检测样品中是否有Cl⁻残留,然后将该样品进行冷冻干燥。

采用元素分析仪(FLASH 2000HT,美国Thermo)和同位素质谱仪(MAT253plus,美国Thermo)联用系统对沉积物中有机碳/氮含量及其同位素组成进行测定,具体流程为:将预处理后的样品用锡舟紧密包裹送入氧化炉中,在960℃的过氧环境下瞬间高温燃烧,形成的碳、氮、氧各成分混合气体在高纯氮气的运载下经还原转化成CO₂和N₂,燃烧产生的所有气体在氮载气流下带入并通过分层充填Cr₂O₃、还原铜和镀银Co₃O₄的氧化还原反应管,气体通过色谱柱(美国Thermo)将N₂和CO₂气体分开后进入质谱仪测试。计算公式为:

$$\delta^{13}\text{C} \text{ 或 } \delta^{15}\text{N} = (R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}} - 1) \times 100\%$$

式中: $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ 或 ${}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$,其中有机碳、氮同位素标准分别为VPDB和大气中的氮,分析误差小于0.02%。预处理及同位素分析测试工作分别在贵州大学资源与环境工程学院及北京科荟测试技术有限公司完成。

有机质来源的半定量分析,采用混合模型进行量化:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} = \delta^{13}\text{C}_p \times f_p + \delta^{13}\text{C}_{\text{algae}} \times f_{\text{algae}} + \delta^{13}\text{C}_s \times f_s$$

$$\text{C/N}_{\text{sample}} = \text{C/N}_p \times f_p + \text{C/N}_{\text{algae}} \times f_{\text{algae}} + \text{C/N}_s \times f_s$$

$$1 = f_p + f_{\text{algae}} + f_s$$

式中: $\delta^{13}\text{C}$ 为有机质的稳定碳同位素构成;sample代表样品; f 为不同端元对应的贡献百分数; C/N 为有机质中碳、氮元素的含量比;淡水水生植物记为p;浮游藻类记为algae;土壤有机质记为S。

1.4 数据分析

研究数据采用Excel 2016和SPSS Statistics 20软件进行处理及分析,所有数据均通过正态分布检验,采样布点图和数据分析图采用ArcGIS 10.4和Origin 2018软件绘制。

2 结果与讨论

2.1 草海湿地表层沉积物有机质特征

2.1.1 表层沉积物TOC、TN时空分布特征

丰水期沉积物TOC含量变化范围为3.75%~

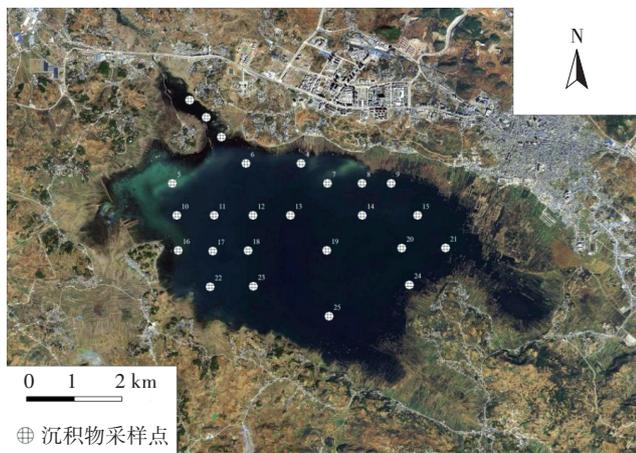


图1 草海采样点分布图

Figure 1 Distribution of sampling sites of Caohai Lake

32.71%,平均值为14.34%;枯水期沉积物TOC含量变化范围为1.26%~34.11%,平均值为12.46%;丰水期沉积物TN变化范围为0.39%~2.90%,平均值为1.52%;枯水期TN变化范围为0.18%~2.49%,平均值为1.12%。枯水期沉积物的TOC和TN含量略低于丰水期,这可能是由于丰水期降雨量大,外源含碳、氮物质随地表径流进入湿地的量增多。TOC、TN在空间分布上表现为西南和湖心区域最高,东部和西北湖区较低(图2和图3)。由于西南湖区有大量的农田,降雨时有机质会随陆源输入沿地表径流进入湖泊内,使得总体上西南湖区的有机质含量高于其他湖区;湖心

的TOC、TN整体上变化不明显,这是由于湖心距离两岸较远,生态系统保持较稳定。

前人研究表明,沉积物中TOC、TN具有最低级别生态毒性效应所对应的含量为1%和0.055%^[18],而草海湿地的平均TOC、TN含量超过限值的10倍,足够引起严重级别的生态毒性效应,对湖泊的生态水环境造成严重的威胁,说明草海湿地整体的初级生产水平较高,有机质降解不够彻底,同时部分地区还面临富营养化风险。

由表1可知,从2010年到2016年,草海湿地的TOC、TN含量有明显的增加,这可能是由于当时的水

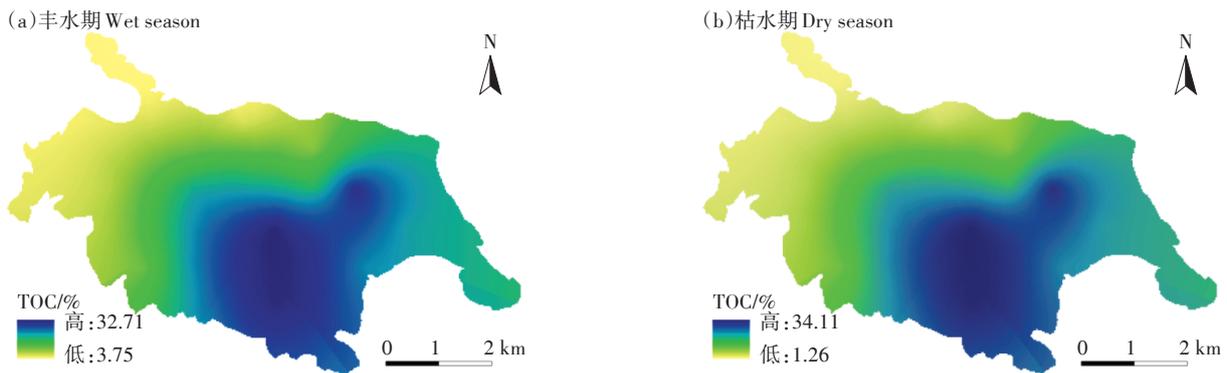


图2 草海表层沉积物丰、枯水期TOC含量空间分布

Figure 2 Spatial distribution of TOC content in Caohai Lake surface sediments during wet and dry seasons

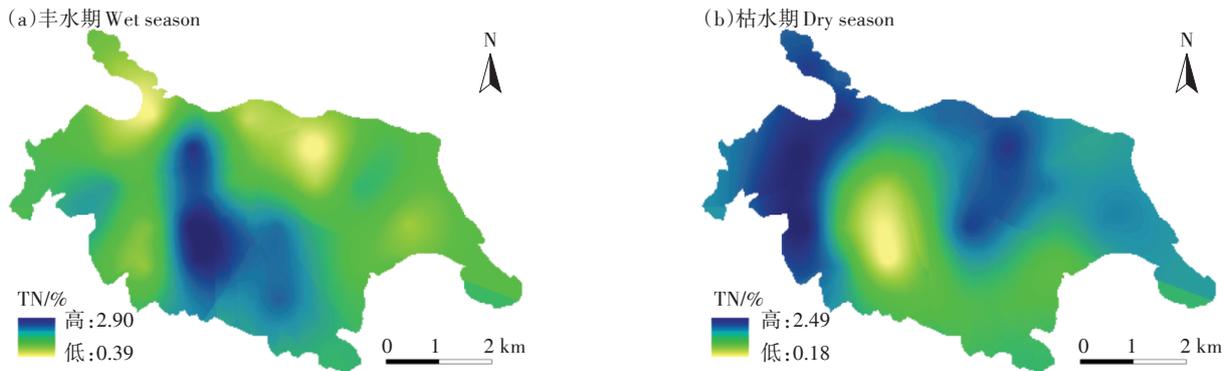


图3 草海表层沉积物丰、枯水期TN含量空间分布

Figure 3 Spatial distribution of TN content in Caohai Lake surface sediments during wet and dry seasons

表1 草海不同时期TOC和TN的变化

Table 1 Changes of TOC and TN in different periods of Caohai Lake

采样时间 Sampling time	TOC/%	TOC平均值 Average value of TOC/%	TN/%	TN平均值 Average value of TN/%	C/N	C/N平均值 Average value of C/N	数据来源 Data source
2010-08	5.27~24.11	14.11	0.40~1.83	1.16	—	—	[14]
2016	6.86~38.45	23.30	0.93~4.00	2.52	7.36~11.12	9.13	[12]
2019-07	3.75~32.71	14.34	0.39~2.90	1.52	6.35~13.73	9.24	本研究
2019-11	1.26~34.11	12.46	0.18~2.49	1.12	6.95~13.68	10.06	本研究

处理设施较为落后,来自周围农村的生活污水直接排入湿地,使得有机质受外源输入影响增加;从2016年至今,由于流域环境管理措施逐渐完善,周围的面源污染得到一定控制,因此由污染源输入的有机物质的量减小。

2.1.2 表层沉积物碳氮同位素时空分布特征

$\delta^{13}\text{C}$ 通常用来指示有机质的来源及污染状况,通常 $\delta^{13}\text{C}$ 值越小说明污染越严重^[12]。草海湿地丰水期表层沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围在 -2.55% ~ -1.97% ,平均值为 -2.23% ;枯水期 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围在 -2.75% ~ -1.96% ,平均值为 -2.35% 。从图4中可以看出, $\delta^{13}\text{C}$ 在空间分布上未表现出明显的季节变化,说明有机质来源组成差异性较小,同时东部湖区较其他湖区偏小,是因为东部湖区毗邻县城,污染物来源相对于其他区域较为复杂,沉水植物受破坏严重,导致草海东部成为全湖污染最严重的区域。由图5可知,丰水期表层沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 分布范围为 0.03% ~ 0.37% ,平均值为 0.24% ;枯水期 $\delta^{15}\text{N}$ 分布范围为 0.10% ~ 0.46% ,平均值为 0.30% 。枯水期的 $\delta^{15}\text{N}$ 比丰水期的高,这可能与丰水期大量降

雨冲刷带来无机氮存在于沉积物中,使其含量大于枯水期有关,因此丰水期有机氮同位素含量相对较小。

2.2 草海湿地表层沉积物有机质来源分析

C/N在一定程度上可以用来指示有机质的主要来源及营养成分的种类,不同的有机质来源表现为C/N值的显著差别,根据这一特性可以用C/N来判断潜在输入的有机质来源,表征生态环境的演化过程。草海湿地丰水期表层沉积物的C/N变化范围为 $6.35\sim 13.73$,平均值为 9.24 ;枯水期表层沉积物的C/N变化范围为 $6.95\sim 13.68$,平均值为 10.06 。C/N在时间上表现为枯水期大于丰水期,但是差异较小,说明沉积物中有机质的来源较稳定;空间分布上表现为西南和东部湖区高于西北湖区(图6)。相关研究表明,当 $\text{C/N}>8$ 时,通常认为有机质既受陆源输入影响,又受湖泊自身水环境的影响,属于混合来源;当 $\text{C/N}<8$ 时,认为有机质来源以内源为主^[19]。本研究草海丰、枯水期分别有76%和80%的样品点 $\text{C/N}>8$,这表明有机质应属于混合来源。

现有研究中,C/N还可与 $\delta^{13}\text{C}$ 一同用来区分湖泊

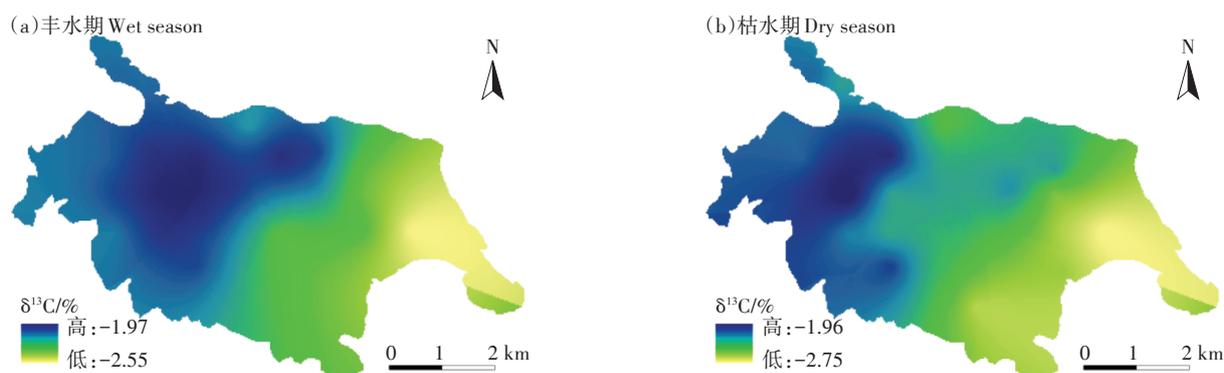


图4 草海表层沉积物丰、枯水期 $\delta^{13}\text{C}$ 组成空间分布

Figure 4 Spatial distribution of $\delta^{13}\text{C}$ composition of surface sediments in Caohai Lake during wet and dry seasons

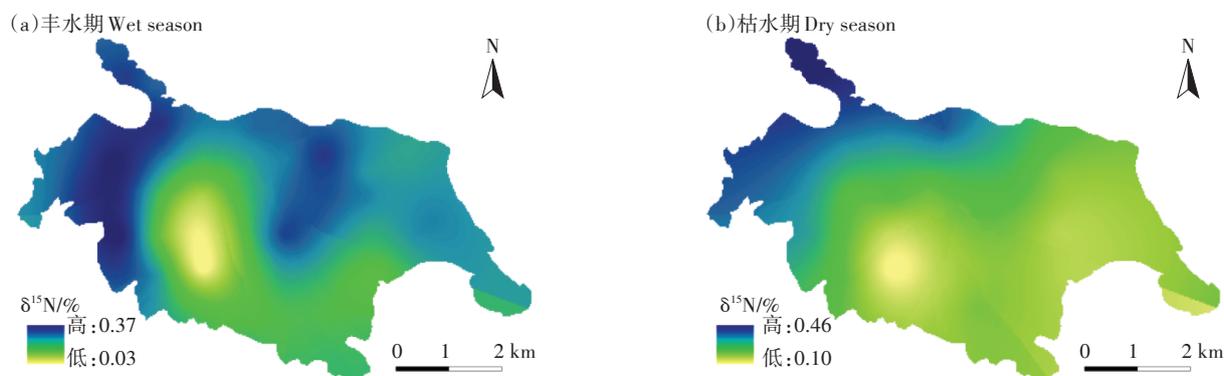


图5 草海表层沉积物丰、枯水期 $\delta^{15}\text{N}$ 组成空间分布

Figure 5 Spatial distribution of $\delta^{15}\text{N}$ composition of surface sediments in Caohai Lake during wet and dry seasons

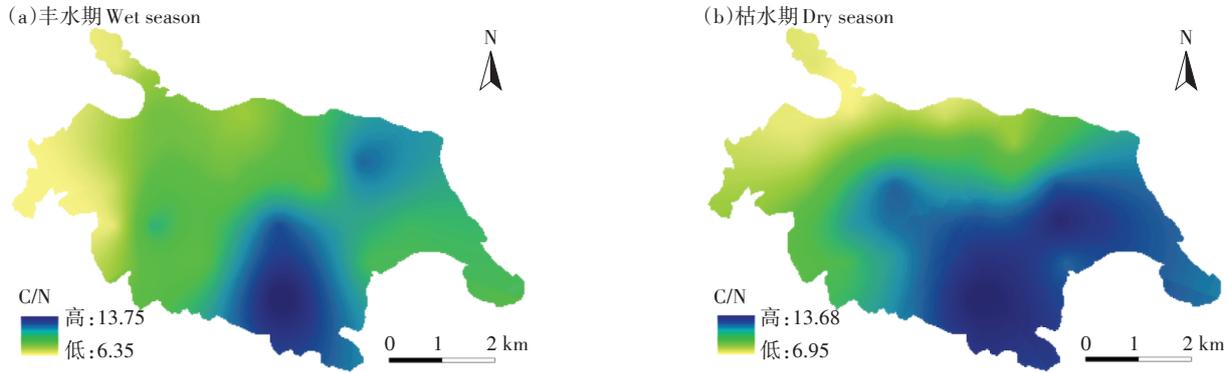
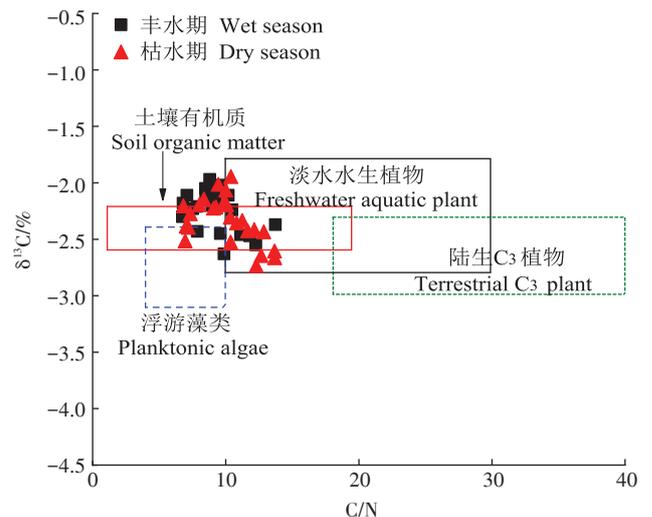


图6 草海表层沉积物丰、枯水期 C/N 空间分布

Figure 6 Spatial distribution of C/N ratio of surface sediments in Caohai Lake during wet and dry seasons

中有机质的起源。通常,湖泊沉积物的 C/N 随时间的推移而下降,这是因为二氧化碳和甲烷作为降解产物被释放,同时保留了氨以及微生物固定的氮。因此,有机质来源应结合 C/N 和 $\delta^{13}\text{C}$ 共同进行识别。通常,水体中沉积物有机质的来源主要分为两大类:一是内源有机质,包括浮游生物、藻类、淡水水生植物等;二是外源有机质,包括土壤有机质、陆生 C_3 植物和 C_4 植物等。前人已经对沉积物有机质不同来源的 C/N 和 $\delta^{13}\text{C}$ 含量变化范围进行了详细总结,例如典型藻类的 C/N 为 4~10,而维管束陆生植物的 $\text{C/N} \geq 20$ ^[20]。 $\delta^{13}\text{C}$ 是判定有机质来自湖泊植物或陆上植物更好的指标,来自典型陆地 C_3 植物的有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-3.0\% \sim -2.3\%$,平均值为 -2.7% ;而来自 C_4 植物有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-1.6\% \sim -0.9\%$,平均值为 -1.3% ;浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -2.4% 和 -1.7% ,平均值为 -2.1% ;人类活动产生的污水的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-2.8\% \sim -2.3\%$;土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-2.6\% \sim -2.2\%$ ^[21-25]。在本研究中,草海表层沉积物丰水期 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -2.23% ,枯水期为 -2.35% ,没有发现明显季节性差异。结合 C/N 及 $\delta^{13}\text{C}$ 含量初步判定草海湿地表层沉积物中有机质的内源以湖泊内藻类物质和淡水水生植物贡献为主,外源主要来自土壤有机质和陆生 C_3 植物的输入。综上,本文将端元物质判定为 4 类,分别是浮游藻类、淡水水生植物、土壤有机质、陆生 C_3 植物,将 C/N 和 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围绘制成四端元关系图,通过图 7 分析可知,草海湿地表层沉积物有机质外源主要是土壤有机质输入,内源以淡水水生植物为主要来源,浮游藻类贡献次之。

为量化每个端元的贡献值以及分析草海表层沉积物有机质的来源,本研究采用三端元混合模型进行半定量分析,该模型的原理是在形成沉积物的过程中



图中源范围参考文献[12,23,26]

The source range in the figure is quoted from [12, 23, 26]

图7 草海表层沉积物丰、枯水期 $\delta^{13}\text{C}$ 与 C/N 的端元关系图
Figure 7 End member relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and C/N of surface sediments in Caohai Lake during wet and dry seasons

C/N 和 $\delta^{13}\text{C}$ 遵循质量守恒定律和保守性。根据前文分析将草海表层沉积物有机质来源端元简化确定为土壤有机质、淡水水生植物及浮游藻类。将图 7 中端元物质分布范围的平均值确定为 3 个端元的特征值进行模型计算,对应的端元值分别为:(1)土壤有机质, $\delta^{13}\text{C} = -2.40\%$, $\text{C/N} = 10$; (2)淡水水生植物, $\delta^{13}\text{C} = -2.30\%$, $\text{C/N} = 20$; (3)浮游藻类, $\delta^{13}\text{C} = -2.70\%$, $\text{C/N} = 7$ 。根据各采样点表层沉积物的 $\delta^{13}\text{C}$ 组成和 C/N,结合上述端元值进行数值计算编制三元混合模型,得出 3 类端元对应的贡献率。丰水期沉积物有机质中土壤有机质的平均贡献值为 36.96%,淡水水生植物平均贡献值为 37.76%,浮游藻类的平均贡献值为 25.28%;而枯水期沉积物有机质中土壤有机质的平均贡献值为

32.26%,淡水水生植物平均贡献值为42.31%,浮游藻类的平均贡献值为25.43%。半定量分析进一步佐证了定性分析结果,草海湿地的沉积物有机质来源是内源与外源的结合,内源贡献的有机质含量高于外源,反映出草海湿地内沉水植物、挺水植物生长繁茂,自身的初级生产力较高。

2.3 与国内其他湖泊沉积物有机质来源对比

与国内的其他湖泊相比(表2),草海湿地沉积物的TOC和TN含量比太湖^[27]、鄱阳湖^[28]、乌梁素海^[29]高出5倍以上,比同一流域背景下的红枫湖^[30]和百花湖^[31]高出3倍左右。这一方面是由于湿地中大量生长的藻类和水生植物死亡后累积在沉积物的表层,相对厌氧的环境抑制了有机质的降解,导致沉积物中有机碳、氮的蓄积量远大于其他湖泊,间接表明草海湿地的初级生产力较高,湿地内水生植被生长茂盛,且物种丰富,植物自身的光合作用、降解过程对有机质的贡献较大^[32];另一方面也表明岩溶湿地由于受到岩溶水补给影响,岩溶地下水中丰富的无机碳可能对湿地水生植物生长具有施肥效应,刺激着湿地内植被的生长。此外,与藻型湖泊相比,大量生长茂盛的挺水植物、沉水植物等使得草型湖泊具有更高的初级生产力,因此其有机质来源通常是以内源生产为主,湖泊不同的地域环境可能会带来一定量的陆源输入;而藻型湖泊的有机质一部分来自大量生长的各种藻类的降解作用,另一部分来自水中的浮游植物及周边河流排水、陆地降雨的影响。

同时,引起草型湖泊和藻型湖泊富营养化的一部分原因是内源生产过量,因此可采取定期收割水生植物的措施来防止内源污染物释放,遏制湖泊富营养化的进程。

3 结论

(1)草海湿地表层沉积物丰水期总有机碳(TOC)和总氮(TN)含量变化范围分别为3.75%~32.71%和0.39%~2.90%,平均值分别为14.34%和1.52%;枯水期TOC、TN含量变化范围分别为1.26%~34.11%和0.18%~2.49%,平均值分别为12.46%和1.12%。两个水文期的TOC、TN含量在空间分布特征上都表现为西南和湖心区域大于东部和西北区域。

(2)草海湿地表层沉积物丰水期稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)和稳定氮同位素($\delta^{15}\text{N}$)分布范围分别为-2.55%~-1.97%和0.03%~0.37%,平均值分别为-2.23%和0.24%;枯水期 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 分布范围分别为-2.75%~-1.96%和0.10%~0.46%,平均值分别为-2.35%和0.30%。 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间分布特征表现为东部湖区较西部湖区明显偏低, $\delta^{15}\text{N}$ 的时间分布特征表现为枯水期较丰水期高。

(3)端元混合模型对草海湿地表层沉积物来源的定性和半定量分析结果表明:草海湿地表层沉积物有机质的来源可能是土壤有机质、浮游藻类及淡水水生植物以一定比例的混合,其中来自内源的有机质贡献大于来自外源的贡献。

表2 草海表层沉积物相关数据与国内部分湖泊对比

Table 2 Comparison of surface sediment data of Caohai Lake with some lakes in China

湖泊类型 Lake type	研究区 Research area	TOC/%	TN/%	C/N	$\delta^{13}\text{C}/\%$	$\delta^{15}\text{N}/\%$	有机质来源 Source of organic matter	数据来源 Data source
草型湖泊 Grass lake	草海(丰水期) Caohai Lake(wet season)	14.34	1.52	9.24	-2.55~-1.97	0.03~0.37	土壤有机质、浮游藻类和淡水水生植物	本研究
	草海(枯水期) Caohai Lake(dry season)	12.46	1.12	10.06	-2.75~-1.96	0.10~0.46		
藻型湖泊 Algal lake	太湖(草型区域) Taihu Lake(grass type area)	0.82	0.12	6.79	-2.34	0.53	藻类和浮游植物	[27]
	鄱阳湖 Poyang Lake	1.15	0.06~0.16	8.97~24.01	-2.57~-1.26	0.35~0.63	土壤有机质、水生维管束植物和浮游植物	[28]
	乌梁素海 Wuliangsuhai Lake	2.10	0.20	12.79	—	—	湖泊水生生物和陆源输入	[29]
	巢湖 Chaohu Lake	1.95	0.17	—	-2.37~-1.93	0.34~0.49	水生藻类	[33-34]
	滇池(双龙水库) Dianchi Lake(Shuanglong reservoir)	0.76	0.15	6.81	-2.53~-2.15	—	陆源C ₃ 植物和藻类	[23]
	红枫湖 Hongfeng Lake	3.84	0.57	6.70	—	—	藻类等浮游生物	[30]
	百花湖 Baihua Lake	2.91	0.34	9.00	—	—	—	[31]
	太湖(藻型区域) Taihu Lake(algal region)	0.74	0.12	6.60	-2.45	0.73	藻类和浮游植物	[27]

参考文献:

- [1] 徐慧博, 乔红娟, 雷茵茹. 中国湿地保护现状问题及对策分析[J]. 南方农业, 2018, 12(19): 19-20, 23. XU H B, QIAO H J, LEI Y R. Analysis on the current situation, and countermeasures of wetland protection in China[J]. *South China Agriculture*, 2018, 12(19): 19-20, 23.
- [2] 陈静, 罗明明, 廖春来, 等. 中国岩溶湿地生态水文过程研究进展[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 221-230. CHEN J, LUO M M, LIAO C L, et al. Review of eco-hydrological process in karst wetlands in China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(6): 221-230.
- [3] 马祖陆, 蔡德所, 蒋忠诚. 岩溶湿地分类系统研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2009, 27(2): 101-106. MA Z L, CAI D S, JIANG Z C. About Karst wetland classification system[J]. *Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition*, 2009, 27(2): 101-106.
- [4] 王月, 尹辉, 李晖, 等. 桂林会仙岩溶湿地生态环境保护与生态补偿研究[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(1): 66-69. WANG Y, YIN H, LI H, et al. Ecological environment protection and ecological compensation to Huixian karst wetland in Guilin[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(1): 66-69.
- [5] 余斌潇, 夏品华, 葛皓, 等. 贵州草海岩溶湿地沉积物磷的赋存特征及释放风险[J]. 环境化学, 2019, 38(3): 653-661. YU B X, XIA P H, GE H, et al. Preservation and release risk of phosphorus in sediments from karst wetland in Caohai, Guizhou[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(3): 653-661.
- [6] 吴云杰, 任强, 姬文琴, 等. 草海湖底沉积物重金属垂直分布特征及污染状况评价[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(23): 352-357. WU Y J, REN Q, JI W Q, et al. The vertical distribution characteristics and pollution status of heavy metals in the sediment of the Caohai Lake[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(23): 352-357.
- [7] 和向东, 陈积颖, 丁德鼎, 等. 异龙湖表层沉积物有机质含量空间分布初步研究[J]. 环境科学导刊, 2020, 39(6): 18-22. HE X D, CHEN Z Y, DING D D, et al. Preliminary study on spatial distribution of organic matter content in surface sediments of Yilong Lake[J]. *Environmental Science Survey*, 2020, 39(6): 18-22.
- [8] 郭云艳, 周光鑫, 王雅雯, 等. 南湖水系表层沉积物有机质的赋存特征、来源及生物有效性[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(6): 936-943. GUO Y Y, ZHOU G X, WANG Y W, et al. Occurrence characteristics, sources and bioavailability of organic matter in surface sediments of Nanhu Lake water system[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(6): 936-943.
- [9] 雷明丹, 王朝晖, 江涛. 青岛近岸海域表层沉积物生源要素分布及污染状况评价[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(1): 93-100. LEI M D, WANG Z H, JIANG T. Distribution and pollution assessment of biogenic elements in surface sediments from Qingdao coastal area[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(1): 93-100.
- [10] 赵胜男, 李畅游, 史小红, 等. 乌梁素海沉积物中有机质与营养元素分布特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2010(5): 58-60, 64. ZHAO S N, LI C Y, SHI X H, et al. Distribution characteristics of organic matter and nutrient elements in the sediments of Wuliangsu Hai Lake[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(5): 58-60, 64.
- [11] 王雯雯, 王书航, 姜霞, 等. 多方法研究呼伦湖表层沉积物有机质的赋存特征及来源[J]. 环境科学研究, 2021, 34(2): 305-318. WANG W W, WANG S H, JIANG X, et al. Occurrence characteristics and sources analysis of sediment organic matter of Lake Hulun by multiple methods[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(2): 305-318.
- [12] 杨海全, 陈敬安, 宋以龙, 等. 草海沉积物有机质空间分布与来源识别[J]. 绵阳师范学院学报, 2017, 36(8): 1-9. YANG H Q, CHEN J A, SONG Y L, et al. The distribution characteristics and sources of organic carbon in sediments of Caohai Lake[J]. *Journal of Mianyang Teachers' College*, 2017, 36(8): 1-9.
- [13] 杨海全, 陈敬安, 刘文, 等. 草海沉积物营养元素分布特征与控制因素[J]. 地球与环境, 2016, 44(3): 297-303. YANG H Q, CHEN J A, LIU W, et al. Distribution characteristics and controlling factors of total organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus in sediments of Caohai Lake, China[J]. *Earth and Environment*, 2016, 44(3): 297-303.
- [14] 郭媛, 林昌虎, 何腾兵, 等. 草海表层沉积物有机碳、氮、磷分布特征及污染评价[J]. 贵州科学, 2012, 30(1): 27-32. GUO Y, LIN C H, HE T B, et al. The distribution characteristics and pollution evaluation of organic carbon, nitrogen and phosphate in surface sediments of Caohai Lake[J]. *Guizhou Science*, 2012, 30(1): 27-32.
- [15] 张征. 贵州草海水体有机质时空分布与来源辨析[D]. 西安: 西安科技大学, 2020: 33-40. ZHANG Z. Spatial-temporal distribution and sources of organic matter in Caohai Lake, Guizhou Province[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020: 33-40.
- [16] 韩志伟, 张水, 吴攀, 等. 贵州草海氮磷分布特征及沉积物释放通量估算[J]. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2501-2506. HAN Z W, ZHANG S, WU P, et al. Distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in waters and release flux estimation in the sediment of Caohai basin, Guizhou[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(9): 2501-2506.
- [17] 夏品华, 薛飞, 孔祥亮, 等. 草海湿地农田渠系空间分异特性及影响分析[J]. 环境化学, 2012, 31(8): 1201-1207. XIA P H, XUE F, KONG X L, et al. Spatial characteristics and impact of water quality in agricultural dieth systems of Caohai wetland in the Guizhou Plateau, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(8): 1201-1207.
- [18] 李任伟. 沉积物污染和环境沉积学[J]. 地球科学进展, 1998(4): 81-85. LI R W. Contamination of sediments and environmental sedimentology[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998(4): 81-85.
- [19] 刘倩, 庞燕, 项颂, 等. 骆马湖表层沉积物有机质分布特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2021, 41(10): 4850-4856. LIU Q, PANG Y, XIANG S, et al. Distribution characteristics and source analysis of organic matter in surface sediments of Luoma Lake[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(10): 4850-4856.
- [20] MAYER L M. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(4): 1271-1284.
- [21] WU X D, WU B, JIANG M Y, et al. Distribution, sources and burial flux of sedimentary organic matter in the East China Sea[J]. *Journal of*

- Oceanology and Limnology*, 2020, 38(5):1488-1501.
- [22] ANDREWS J E, GREENAWAY A M, DENNIS P E. Combined carbon isotope and C/N ratios as indicators of source and fate of organic matter in a poorly flushed, tropical estuary: Hunts Bays, Kingston Harbour, Jamaica[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46:743-756.
- [23] ZHOU Z K, WANG Y P, YANG H, et al. Sedimentary record of nutrients and sources of organic matter in the Shuanglong reservoir, Dianchi watershed, China[J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2021, 28(14):17763-17774.
- [24] DAS S K, ROUTH J, ROYCHOUDHURY A N, et al. Elemental (C, N, H and P) and stable isotope ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$) signatures in sediments from Zeekoevlei, South Africa: A record of human intervention in the lake[J]. *J Paleolimnol*, 2008, 39:349-360.
- [25] XU C, YANG B, DAN S F, et al. Spatiotemporal variations of biogenic elements and sources of sedimentary organic matter in the largest oyster mariculture bay (Maowei Sea), Southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 730:139056.
- [26] 张晓晶, 卢俊平, 张圣微, 等. 大河口水库表层沉积物有机质特征及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12):2835-2843. ZHANG X J, LU J P, ZHANG S W, et al. Characteristics and sources of organic matter in surface sediments of Dahekou reservoir, China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2019, 38(12):2835-2843.
- [27] 吴筱清. 太湖水环境特征及沉积物有机质来源识别[D]. 南京: 南京大学, 2015: 37-40. WU X Q. Water environmental characters and sediment organic matter source identification of Lake Taihu[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015: 37-40.
- [28] 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.
- [29] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9):1770-1776. ZHANG X J, LI C Y, ZHANG S, et al. Distribution analysis of nutrient salt in the sediment of Lake Wuliangsu with respect to its effects on the environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9):1770-1776.
- [30] 叶锋, 张明时, 刘汉林, 等. 红枫湖水底质污染物富集现状分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(3):8-12. YE F, ZHANG M S, LIU H L, et al. Analysis of organic enrichment in the sediment of Red Maple Lake reservoir[J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(3):8-12.
- [31] 王敬富, 陈敬安, 曾艳, 等. 贵州百花湖沉积物磷、氮及有机碳的空间分布特征[J]. 环境化学, 2012, 31(5):599-603. WANG J F, CHEN J A, ZENG Y, et al. Spatial distribution of TP, TN and C_{org} in the sediment of Baihua Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(5):599-603.
- [32] 陈毅凤, 张军, 万国江. 贵州草海湖泊系统碳循环简单模式[J]. 湖泊科学, 2001(1):15-20. CHEN Y F, ZHANG J, WAN G J. A simple carbon cycle model of Lake Caohai, Guizhou Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2001(1):15-20.
- [33] 周志华, 刘丛强, 李军, 等. 巢湖沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 记录的生态环境演化过程[J]. 环境科学, 2007, 28(6):1338-1343. ZHOU Z H, LIU C Q, LI J, et al. Record of ecosystem evolution processes provided by $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values in Chaohu Lake sediments[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6):1338-1343.
- [34] 苗慧, 沈峥, 蒋豫, 等. 巢湖表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12):2120-2125. MIAO H, SHEN Z, JIANG Y, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Chaohu Lake[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(12):2120-2125.