

草海沉积物有机质空间分布与来源识别

杨海全¹ 陈敬安¹ 宋以龙^{1,2} 王敬富¹ 陆顶盘^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文选取草海湿地这一典型高原湖泊湿地作为研究对象, 分析了17个表层沉积物和3根代表性湖区沉积物柱芯总有机碳(TOC)含量、有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 及C/N值, 探讨了草海湿地上层沉积物和三个重点湖区不同深度沉积物有机质的主要来源, 并利用有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N值对表层沉积物有机碳来源进行定量分析。结果表明: 草海表层沉积物中TOC含量、 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N值变化范围分别为6.86%~34.85%, -28.49%~-18.19%, 7.36~11.12; 表层沉积物有机碳主要来源于藻类生产和沉水植物, 沉水植物贡献率为49.7%, 藻类初级生产的贡献率为48.8%, 而陆源输入只对东部湖区有较小影响; 东部湖区上部沉积物有机碳主要来源于藻类, 底部受到藻类生长、陆源输入及沉水植物共同影响, 湖心沉积物有机碳主要来源于藻类与沉水植物, 出水口沉积物有机碳主要来源于沉水植物。

关键词: 草海; 沉积物; 有机质来源; 稳定碳同位素; 碳氮比

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1672-612X(2017)08-0001-09

DOI:10.16276/j.cnki.cn51-1670/g.2017.08.001

0 引言

湖泊沉积物作为流域地表运移物质和大气散落物质的宿体, 连续、敏感、高分辨地记录了区域及全球环境信息, 是研究过去环境变化的重要档案馆^[1-2]。沉积物包含了丰富的生物与环境信息, 沉积物有机质保存了原始生产力转变过程及自然因素控制的水质变化等重要信息^[3]。沉积物中有机质来源包括内源(主要是藻类和水生植物)和外源(主要是流域侵蚀带来的陆源植物碎屑)^[4]。不同来源的有机碳由于其光合作用、碳同化作用和碳源同位素组成不同, 因而具有特定的稳定碳同位素组成, 可以指示水生系统中有机碳的不同来源^[5-6]。有机质的稳定碳同位素组成和C/N值被认为是判断有机质来源的有效指标^[7], 很多研究者将有机质碳同位素组成与C/N值结合起来示踪有机质的不同来源。

研究沉积物中有机碳的空间分布和来源变化, 对阐明水生生态系统中碳氮磷的迁移转化过程以及控制内源负荷和防治富营养化具有重要指导价值^[8]。草海湿地是云贵高原最重要的湿地生态系统和主要的候鸟越冬、迁徙停歇地, 目前对草海湿地沉积物有机质方面的研究鲜有报道, 仅有少数研究利用稳定碳同位素探讨了古气候信息^[16-17], 对有机质的来源及其空间变化尚缺乏系统研究。本文拟通过对草海表层沉积物 and 不同湖区沉积物柱芯中有机碳、氮含量和碳同位素组成的对比研究, 揭示草海沉积物有机碳的不同来源及贡献大小, 为草海湿地保护和富营养化防治提供科学依据与理论指导。

1 研究区概况

草海(26°47'~26°52'N, 104°10'~104°20'E)是一个高原淡水湖泊, 位于贵州省西北部威宁彝族虎族苗族自治县境内。流域海拔2172~2234m, 湖泊长约14.2km, 最大宽6.2km, 平均宽1.76km, 最大水深5.0m, 平均水深1.5m。草海属山地亚热带西南季风气候, 垂直气候带明显。湖区年平均降水量950.9mm, 5~10月降水占全年降水量的88%。水源补给主要来自大气降水, 其次为地下水^[19]。湖水pH变化范围为7.6~8.4。草海地区经济较为落后, 污水处理设施缺乏, 周围村寨和乡镇的生产生活污水是主要污染源^[20]。

收稿日期: 2017-03-10

基金项目: 贵州省科技重大专项计划项目(黔科合重大专项字[2016]3022-04)。

第一作者简介: 杨海全(1987—), 男, 甘肃兰州人, 博士, 助理研究员, 研究方向: 湖泊生物地球化学循环。

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

2.1.1 样品采集 根据草海湿地水文特点,在全湖布设 17 个采样点(图 1),采集 0~5 cm 的表层沉积物。根据污染程度分别在西海码头(MT)、湖心(HX)、阳关山(YGS)三个典型湖区各采集 1 根沉积物柱芯,其中 MT 柱芯采自 1 号采样点,离县城最近,该湖区水污染最严重;HX 柱芯采自 7 号采样点,位于湖心区域,水质较好;YGS 柱芯采自 15 号采样点,位于全湖唯一出水口附近,该湖区沉水植物繁茂。与此同时,采集草海各主要湖区藻类样品。

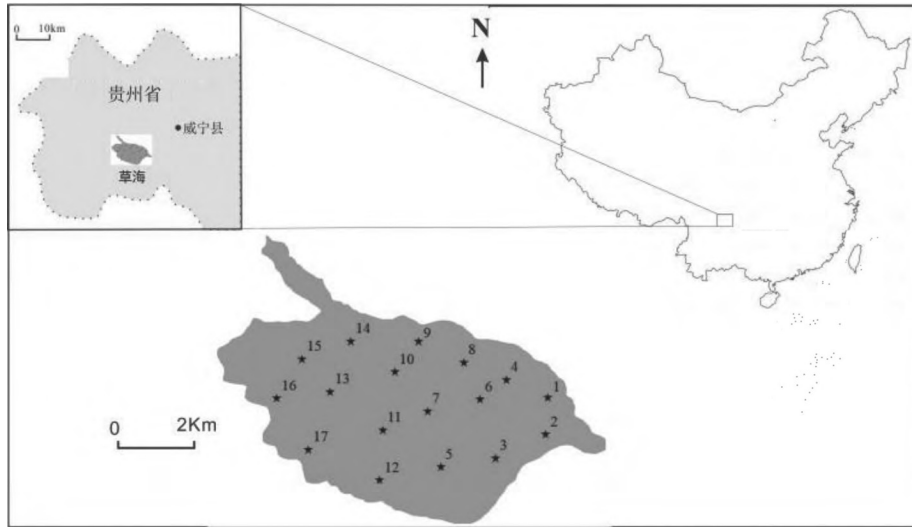


图 1 草海沉积物采样点分布图

Fig. 1 Location of sediment sampling sites of Lake Caohai

表层沉积物用抓斗采样器采集,采集到的沉积物装于预先处理过的离心管并于低温(4℃)保存。采用课题组自行设计的湖泊沉积物-水界面重力采样器采集沉积物柱芯^[21]。对采集到的沉积物柱芯,上层 0~20 cm 按每 2 cm 进行分样,20 cm 以下按 4 cm 进行分样,分别装于预先处理过的离心管,于低温(4℃)保存,带回实验室后用真空冷冻干燥仪(TechcompFD-3-85-MP)冷冻干燥。干燥后的沉积物样品除去砂砾、动植物残体后用玛瑙研钵研磨,过 200 目筛后装于样品袋中备用。藻类样品用 25#浮游生物网采集,经冷冻干燥后测定 C/N 值与稳定碳同位素组成。

2.1.2 总有机碳、总氮测定 称取适量沉积物干样于烧杯中,用 1 mol/L 的稀盐酸浸泡 24 h 除去无机碳,再用超纯水反复冲洗样品至 pH 为中性,在 60℃ 下烘干、研磨至 120 目以下,称取约 30 mg 样品用元素分析仪(Elementar-vario MACRO cube)测定其总有机碳(TOC)、总氮(TN)、碳氮比(C/N)^[22]。

为保证分析测试的准确性,实验分析中插入沉积物标准样品 B2150(碳含量为 7.17%,氮含量为 0.57%)并设置平行样进行质量控制,标样碳氮含量测量值分别为 $7.04\% \pm 0.34\%$ 和 $0.59\% \pm 0.04\%$ 。通过插入平行样控制分析误差,其中 TOC 分析误差 $\leq 0.5\%$ 、TN 分析误差 $\leq 3\%$ 。

2.1.3 有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 测定 有机质的稳定碳同位素组成测定在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成。采用熔封石英管高温燃烧法^[23]产生的 CO_2 气体经纯化后用气质谱仪 MAT-253 测定。有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 对应国际标准 PDB,以国际纤维素标样 IAEA-C₃($\delta^{13}\text{C} = -24.91\%$)为参考标准,分析误差 $< \pm 0.2\%$ 。计算公式为:

$$\delta^{13}\text{C}(\%) = [(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] \times 10^3$$

上式中 $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$, R_{sample} 为样品同位素比值, R_{standard} 为标准物同位素比值。

3 结果与讨论

3.1 草海表层沉积物 TOC、TN、C/N 与 $\delta^{13}C_{org}$ 含量空间分布

草海表层沉积物中 TOC、TN 含量、C/N 及有机碳稳定碳同位素组成的空间分布特征如图 2 所示。沉积物 TOC 含量变化范围为 6.86% ~ 34.85%，平均值为 $23.30\% \pm 7.80\%$ ，高出红枫湖^[24]、太湖^[6]、鄱阳湖^[25]等湖泊 10 倍甚至更高。这与草海湿地水生植物繁茂有关，较高的湖泊初级生产力对草海有机碳贡献非常大^[26]。大量的水生植物和藻类死亡后累积在沉积物表层，短期内很难被降解，致使表层沉积物中有机碳含量远远高于其他湖泊。毗邻县城的东部湖区近年来水污染严重，沉水植物大幅减少，导致该地区沉积物 TOC 含量不高，而草海出水口的西北湖区水流速度较快，沉积物 TOC 含量也明显低于其他湖区^[27]。表层沉积物 TN 含量在 0.93% ~ 4.00% 之间，平均值为 $2.52\% \pm 0.76\%$ ，空间分布特征与 TOC 接近，东部湖区较低，湖心和西南湖区较高，出水口湖区最低。相关性分析(图 3)显示草海表层沉积物中 TN 与 TOC 含量呈显著正相关($R=0.9338, p<0.01$)，表明草海表层沉积物中 TOC 与 TN 来源一致，且氮绝大部分以有机态形式存在于有机质中。

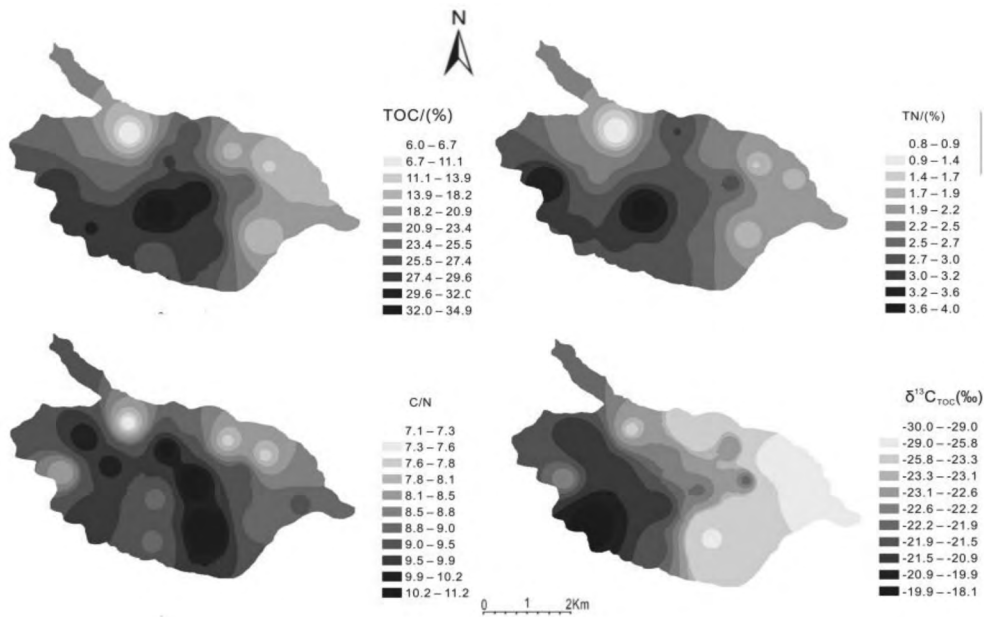


图 2 草海表层沉积物有机碳氮含量、碳氮比稳定碳同位素组成空间分布图

Fig.2 The content and distribution of TOC, TN, C/N and $\delta^{13}C$ of TOC in the surface sediment of Lake Caohai

表层沉积物有机碳稳定碳同位素组成变化范围为 -28.49% ~ -18.19% 之间，平均值为 $23.30\% \pm 2.88\%$ 。东部湖区相比其他湖区明显偏负，变化范围为 -26.48% ~ -28.49%，此处为全湖水体污染最严重区域。其余湖区有机碳稳定碳同位素值变化集中在 -20.82% ~ -24.64% 之间，位于西南湖区的 17 号采样点最正(-18.19%)，该区域水质较好，沉水植物繁茂。表层沉积物 C/N 值变化范围为 7.36 ~ 11.12，平均值为 9.13 ± 1.17 ，未表现出明显的差异。

3.2 草海表层沉积物有机碳来源分析

根据沉积物有机质稳定碳同位素组成和 C/N 值可确定其有机碳的来源。稳定碳同位素组成反映了生物体光合作用中碳

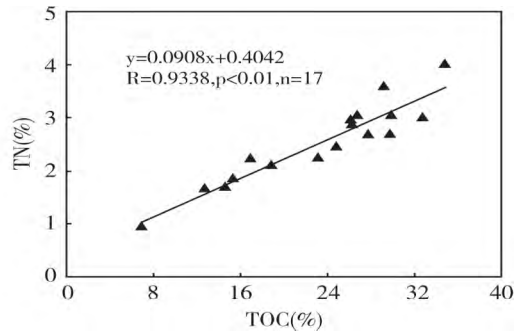


图 3 草海表层沉积物 TOC 与 TN 相关性

Fig.3 The correlation of TOC and TN in the surface sediment of Lake Caohai

同化作用的动力学过程及其碳源的同位素组成。由于不同的光合途径，C4 植物吸收 CO₂ 效率更高，因此体内碳同位素较 C3 植物偏正^[5]。一般认为陆生高等植物的 C/N 值较高，而低等植物和藻类有机氮含量较高，因此湖泊浮游植物的 C/N 值较低。沉积物 C/N 值越高，说明沉积物中有机质更多来源于陆源输入，C/N 值较低则反映了更多藻类来源及湖区初级生产力较高。

研究表明湖泊水生藻类植物含较多的蛋白质，其 C/N 一般小于 10，而 δ¹³C_{org} 为 -20% ~ -30%。陆源有机质富含腐殖质，TOC/TN 一般大于 10，通常 20 ~ 30 之间，也有不少在 30 以上。C4 植物的 δ¹³C 值为 -10% ~ -16%，平均为 -14%。C3 植物 δ¹³C 值较低，一般为 -23% ~ -30%，平均为 -27%^[13, 28-32]。为作图方便，将 C3、C4 植物 C/N 值上限定为 80，再结合 Meyers 的研究^[29]，将 C3 植物和 C4 植物 C/N 值下限分别确定为 20 和 40。因此确定草海陆源输入的 C3 植物端元的 δ¹³C 值为 -23% ~ -30%，C/N 值为 20 ~ 80。C4 植物端元的 δ¹³C 值为 -10% ~ -16%，C/N 值为 40 ~ 80。根据草海藻类样品分析结果，参考已有研究^[15, 30]，确定草海藻类端元 δ¹³C 为 -24% ~ -31%，C/N 值为 4 ~ 10。参考南四湖^[12]和草海^[26]研究，确定草海沉水植物端元 δ¹³C 为 -14.6% ~ -19.9%，C/N 值为 13.2 ~ 18.6。四类端元特征值见表 1。

表 1 草海沉积物有机碳来源端元特征值

Tab.1 The characteristic values of end members in the sediments of Lake Caohai

来源类型	湖泊藻类	沉水植物	C3 植物	C4 植物
C/N	4 ~ 10	13.2 ~ 18.6	20 ~ 80	40 ~ 80
δ ¹³ C/%	-24 ~ -31	-14.6 ~ -19.9	-23 ~ -30	-10 ~ -16

通过 δ¹³C 与 C/N 作图绘制草海沉积物有机碳来源端元示意图(图 4)。草海表层沉积物有机碳稳定碳同位素和碳氮比差异性较大。东部湖区少数几个点的表层沉积物主要来源于湖泊藻类初级生产，较少受到陆源输入和沉水植物影响。该地区受到县城生活污水直接排入，营养盐充足，威宁地区光照时间较长^[19]，适宜藻类生长。前人研究也表明该区域浮游植物总量和叶绿素 a 均大于其他湖区^[33]。出水口区域沉积物有机碳基本来源于当地沉水植物。此处水流较快，藻类物质很容易被带走。其余大部分湖区沉积物有机碳来源于沉水植物和藻类。陆源输入对草海表层沉积物有机碳贡献较小，即使在主要入湖河流进入湖泊的东部区域也影响甚微。这是因为草海主要补给为大气降水和地下水，几个主要入湖河流流量不大，而且大部分被沿线居民用于农业灌溉，所以陆源物质较难大量进入湖区。

根据前文分析研究区外源输入较少，且草海流域碳 4 植物分布非常少，所以 C4 植物对沉积物有机碳的贡献很小，可以忽略此端元。将草海沉积物有机碳确定为以下三个端元：藻类、沉水植物、陆源 C3 植物。混合模型为：

$$\delta^{13}C_s = f_{algae} \delta^{13}C_{algae} + f_{sp} \delta^{13}C_{sp} + f_{C3} \delta^{13}C_{C3}$$

$$C/N_s = f_{algae} C/N_{algae} + f_{sp} C/N_{sp} + f_{C3} C/N_{C3}$$

$$1 = f_{algae} + f_{sp} + f_{C3}$$

上式中 δ¹³C 为稳定碳同位素组成，C/N 为碳氮含量比，s 为沉积物，f 为不同端元对应的贡献值，下标 algae 为藻类端元，sp 为沉水植物端元，c3 为陆源 C3 植物端元。根据端元值范围平均值或文献常用数据确定三个端元特征值，其中 δ¹³C_{algae} 为 -30%、δ¹³C_{sp} 为 -16.6%、δ¹³C_{c3} 为 -27%，C/N_{algae} 为 6.6、C/N_{sp} 为 16.1、C/N_{c3} 为 21。

根据各采样点表层沉积物有机碳的稳定碳同位素组成和碳氮比数据，用上述端元值进行模型计算得到三类端元对应的贡献率(表 2)。计算结果显示绝大部分采样点主要来源为浮游藻类和沉水植物，而陆源 C3 植物贡献值为负值。这与以上分析基本相符，即草海表层沉积物有机碳主要来源于藻类生产和沉水植物，陆源输入只影响到东部局部区域。基于以上分析，为了较

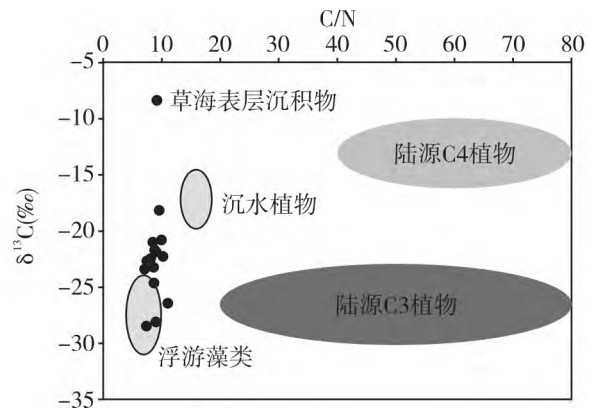


图 4 草海表层沉积物有机碳来源示意图
Fig.4 The different sources of organic carbon in the surface sediment of Lake Caohai

准确计算各采样点表层沉积物有机碳来源, 假设陆源 C3 植物端元只对 1#、2#、5# 三个采样点有贡献, 其余采样点忽略只有藻类和沉水植物两种端元, 将上述模型简化为二元混合模型。因为这两个端元值中稳定碳同位素组成的差异性较碳氮比的差异性大, 所以根据稳定碳同位素组成计算两个端元的贡献值更精确, 重新计算的结果如表 2 中实际贡献率所示。从以上结果可以看出, 草海表层沉积物有机碳三类端元中藻类贡献率为 11.86% ~ 88.71%, 平均值为 48.79%; 沉水植物贡献率为 11.27% ~ 88.14%, 平均值为 49.68%; 陆源输入影响较小, 贡献率范围为 0 ~ 16.50%, 平均值为 1.54%。靠近县城东部湖区表层沉积物有机碳主要来源为藻类(最大贡献率为 88.71%), 其次为沉水植物, 外源输入贡献较小。西部湖区沉水植物繁盛, 沉积物有机碳主要来源于沉水植物(最大贡献率为 88.14%), 藻类贡献较少。

表 2 草海表层沉积物有机碳各端元贡献率

Tab. 2 The Contribution of different end-members in surface sediments of Lake Caohai %

采样点 编号	三端元贡献率			实际贡献率		
	f_{algae}	f_{C3}	f_{sp}	f_{algae}	f_{C3}	f_{sp}
1	81.97	0.54	17.49	81.97	0.54	17.49
2	78.81	9.13	12.06	78.81	9.13	12.06
3	66.61	-21.88	55.27	49.59	0	50.41
4	89.05	-0.41	11.36	88.71	0	11.27
5	60.93	16.50	22.57	60.93	16.50	22.57
6	59.43	-25.80	66.37	39.37	0	60.63
7	48.86	-10.17	61.31	40.95	0	59.05
8	71.46	-33.90	62.44	45.14	0	54.86
9	70.12	-13.04	42.92	59.99	0	40.01
10	53.09	-13.40	60.31	42.66	0	57.34
11	59.90	-34.48	74.58	33.15	0	66.85
12	61.26	-29.60	68.34	38.26	0	61.74
13	50.07	-23.94	73.87	31.49	0	68.51
14	75.71	-31.59	55.88	51.16	0	48.84
15	48.85	-22.84	73.99	31.09	0	68.91
16	68.10	-30.82	62.72	44.20	0	55.80
17	44.32	-41.82	97.50	11.86	0	88.14

3.3 草海不同湖区沉积物柱芯有机碳、稳定碳同位素组成及 C/N 垂向变化特征

草海 MT 沉积物柱芯中 TOC 与 TN 含量变化趋势相似, 均表现为表层高, 随深度增加逐渐降低的变化趋势(图 5)。在 0 ~ 6 cm 含量最高(最大值分别为 15.3% 和 1.83%), 并表现为从上到下缓慢降低。这也说明该区域沉积物沉积较快、且表层沉积物中有机质分解较慢。从 6 cm 到 12 cm 迅速降低至相对较低值, 从 12 cm 到 28 cm 变化不大, 此后 TN 含量缓慢降低至最低值, TOC 含量在底部出现波动并略微增加。C/N 值变化范围为 8.57 ~ 15.45, 平均值为 11.21 (n = 22)。稳定碳同位素组成表层最负(-27.64%), 底部最正(-24.89%), 平均值为 -26.05% (n = 22)。C/N 值与稳定碳同位素组成变化趋势相似, 除在 30 cm 出现波动外, 整体表现为从表层到底部逐渐增大, 到底部 10 cm 保持稳定的变化趋势。

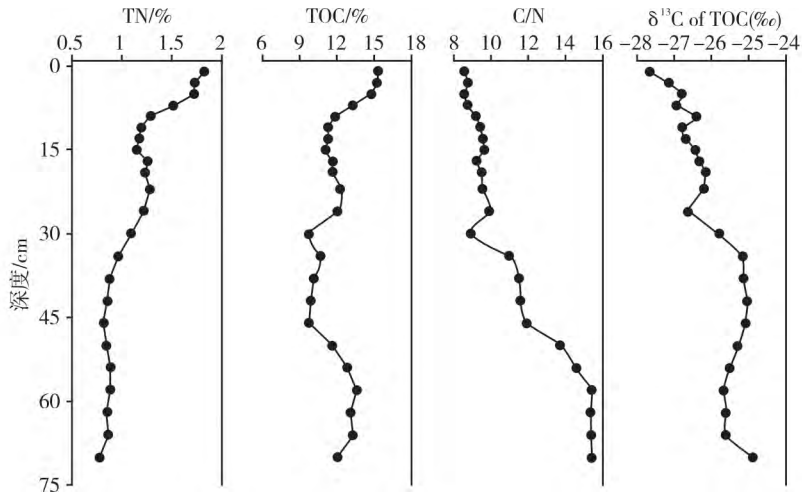


图 5 草海码头沉积物总氮/总有机碳、C/N 及稳定碳同位素垂向变化

Fig.5 The vertical profiles of TOC ,TN , C/N and δ¹³C of TOC in MT Sediments of Lake Caohai

HX 沉积物柱芯中 TOC 与 TN 含量变化趋势与 MT 柱芯相似,表现为从表层到底部逐渐减低的变化趋势(图 6),但 TOC 含量远高于其余两根柱芯,表层 2 cm 沉积物 TOC 含量为 32.7%,是码头表层的 2 倍多. TN 含量为 2.99%,高于码头和阳关山柱芯. 从表层到 9 cm TOC、TN 含量迅速降低,9 cm 以下缓慢降低. C/N 值变化范围为 10.96 ~ 16.57,平均值为 13.46 (n = 13). 表层 C/N 值明显高于 MT 柱芯,从表层到底部逐渐增大. 这可能是藻类比沉水植物来源的有机质更易于降解造成的. 随着有机质降解作用的进行,含较低 C/N 值的藻类占沉积物有机质的比例越来越少,因而从沉积物柱芯表层到底层,有机质 C/N 值越来越大. 沉积物柱芯稳定碳同位素组成变化较小,变化范围为 -23.36% ~ -21.24%,平均值为 -22.04% (n = 13). 这反映出草海湖心沉积物有机质来源在沉积过程中变化不大.

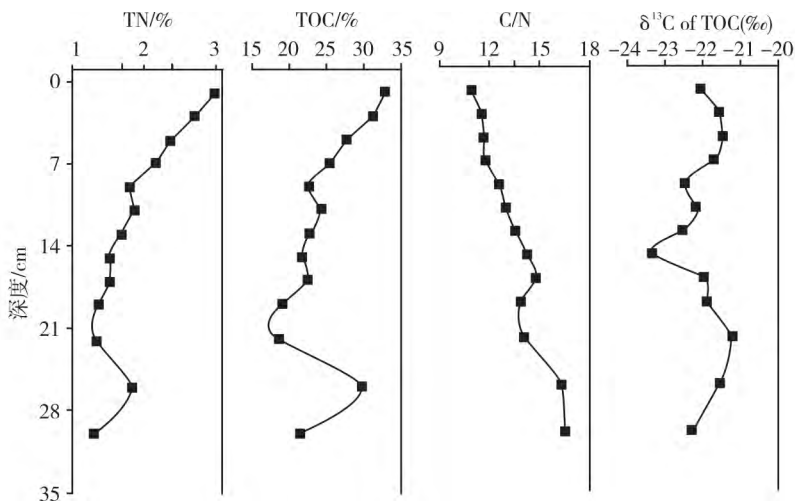


图 6 草海湖心沉积物总氮、总有机碳、C/N 及稳定碳同位素垂向变化

Fig.6 The vertical profiles of TOC ,TN , C/N and δ¹³C of TOC in HX Sediments of Lake Caohai

YGS 沉积物柱芯中 TN 与 TOC 含量表层最高,分别为 2.24% 和 23.2%,变化趋势基本一致,均表现为从表层到 9 cm 迅速降低,9 cm 以下趋于稳定(图 7). C/N 值变化不大,变化范围为 10.05 ~ 12.23,平均值为 10.88 (n = 10). 除了底部最大值(12.23)外,垂向变化不大,反映出有机质来源的 C/N 值差异很小. 稳定碳同位素组成变化与 C/N 值变化趋势类似,变化范围为 -23.84% ~ -18.15%,平均值为 -20.52% (n = 10). 表层到 17 cm 变化较小,略有增加,17 cm 以下迅速减小后又趋于稳定. C/N 值和稳定碳同位素组成在沉积

物柱上部和底部差异较大,这也说明阳关山湖区上层沉积物有机质来源与底部有较明显的差异。

综上所述,湖心区域的沉积物的 TOC 和 TN 含量均比码头和阳关山高,在表层沉积物中尤为明显。三个湖区沉积物柱的 TN 和 TOC 含量均表现为从表层到底部逐渐降低。根据 C/N 与碳同位素组成分析发现湖心区域沉积物有机质来源变化较小,而码头和阳关山的表层沉积物和下层沉积物来源存在明显差异。三根沉积物柱的 TN 与 TOC 相关性分析发现,三个区域沉积物中 TN 与 TOC 均显著相关(图 8)。相比码头区域($R = 0.6488, n = 22$)和湖心区域($R = 0.9063, n = 13$)沉积物柱,阳关山沉积物柱 TN 与 TOC 含量的相关性最高($R = 0.9986, n = 10$)。这反映出草海沉积物 TN 与 TOC 来源接近, TN 绝大部分以有机态形式存在于有机质中^[34]。

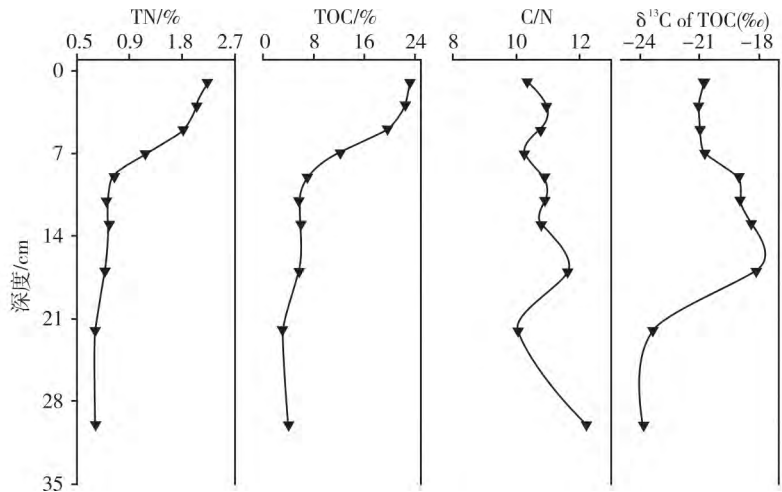


图 7 草海阳关山沉积物总氮、总有机碳、C/N 及稳定碳同位素垂向变化

Fig. 7 The vertical profiles of TOC, TN, C/N and $\delta^{13}C$ of TOC in YGS Sediments of Lake Caohai

3.4 草海典型湖区沉积物柱芯有机质来源分析

通过对比 3 根不同湖区沉积物柱芯的 C/N 与有机碳稳定碳同位素组成,并结合草海沉积物有机碳来源端元分析发现,沉积物柱芯中有机碳来源在水平和垂向均有较大差异(图 9)。MT 柱芯有机碳主要受到藻类初级生产的影响,陆源输入和沉水植物对其影响略小,其中表层沉积物有机碳主要来源于藻类,受到陆源输入和沉水植物影响较小,而中下层则受到藻类、陆源输入、沉水植物三者共同影响。这与该地区污染历史有关,近年来,东部湖区受到越来越多生活污水输入,为藻类生长提高了充足的营养,且草海主要入湖河流也将流域中一定量的陆源物质带入湖区。HX 柱芯有机碳稳定碳同位素组成和 C/N 值差异较小,反映了其有机碳来源影响因素未发生明显变化,主要来源于藻类生产、沉水植物,而陆源输入影响很小。YGS 柱芯表层沉积物有机碳主要来源于沉水植物,底部沉积物却更多受到藻类影响,陆源输入对该地区沉积物柱芯有机碳的影响很小,这可能是底部沉积物沉积时沉水植物并不像现在这样繁茂,且该地区少有陆源输入。

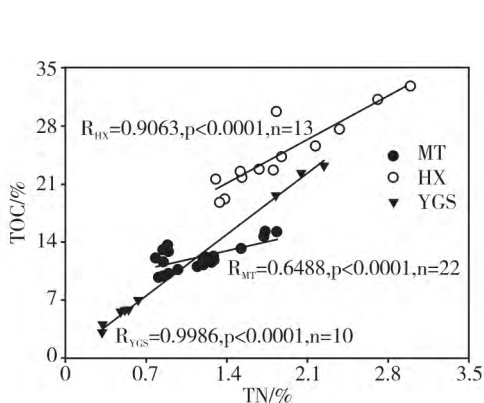


图 8 草海柱状沉积物总氮与总有机碳相关性分析
Fig. 8 The correlation of TOC and TN in sediment cores of Caohai Lake

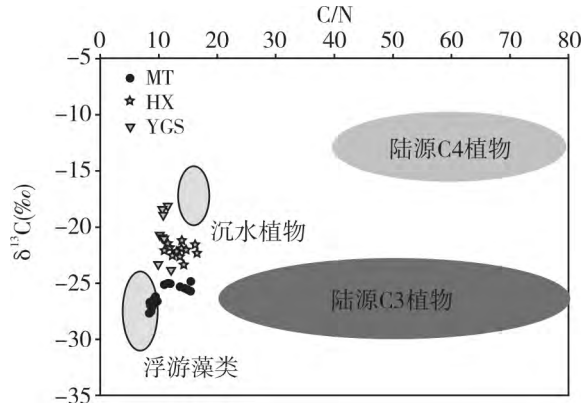


图 9 草海沉积物有机碳来源示意图
Fig. 9 The different sources of organic carbon in sediments of Lake Caohai

4 结论

草海湿地表层沉积物 TOC 含量远高于其他湖泊,平均值达到 23.30%。其中东部湖区含量较低,主要来源于湖泊藻类初级生产,较少受到陆源和沉水植物影响,湖心 TOC 含量最高,出水口湖区最低,TOC 主要来源于沉水植物和藻类,受到陆源影响较小。湖心区域沉积物中 TOC 和 TN 含量均比码头和阳关山高。

三个典型湖区沉积物柱芯的 TN 和 TOC 含量从表层到底部逐渐降低,草海湿地沉积物中 TOC 与 TN 来源接近,TN 绝大部分以有机态形式存在于有机质中。码头区域沉积物柱有机碳主要来源于藻类初级生产、少量来自陆源输入。湖心区沉积物有机碳主要来源于藻类生产、沉水植物,少量来源于陆源输入。出水口沉积物有机碳更多来源于沉水植物。

致谢:

感谢草海国家自然保护区管理局管护员秦仲虎协助完成采样工作,中国科学院地球化学研究所耿龙年老师协助完成稳定碳同位素测定前处理。

参考文献:

- [1] Graney J R, Halliday A N. Isotopic record of lead pollution in lake sediments from the northeastern United States [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(9): 1715—1728.
- [2] 万国江,白占国,王浩然,等. 洱海近代沉积物中碳-氮-硫-磷的地球化学记录 [J]. *地球化学*, 2000(2): 189—197.
- [3] Wu J L, Gagan M L, Jiang X Z, et al. Sedimentary geochemical evidence for recent eutrophication of Lake Chenghai, Yunnan, China [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2004, 32(1): 85—94.
- [4] 陈敬安,万国江,汪福顺,等. 湖泊现代沉积物碳环境记录研究 [J]. *中国科学(D 辑:地球科学)*, 2002(1): 73—80.
- [5] 陈菡,郗敏,李悦,等. 稳定碳同位素在滨海湿地碳生物地球化学循环中的应用 [J]. *生态学杂志*, 2013(6): 1613—1619.
- [6] 倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等. 太湖沉积物有机碳与氮的来源 [J]. *生态学报*, 2011(16): 4661—4670.
- [7] Krishnamurthy R V, Bhattacharya S K, Kusumgar S. Palaeoclimatic changes deduced from $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and C/N ratios of Karewa lake sediments, India [J]. *Nature*, 1986(323): 150—152.
- [8] 王立群,戴雪荣,华瑛,等. 安徽龙河口水库沉积物碳、氮、磷地球化学记录及其环境意义 [J]. *海洋湖沼通报*, 2008(4): 59—64.
- [9] Han X, Dickman M. Changes in ^{13}C content of the organic component of lake sediments during the last 500 years in Crawford Lake, South Ontario [J]. *Canada. Hydrobiologia*, 1995, 310(3): 177—187.
- [10] Stuiver M. Climate versus changes $\delta^{13}\text{C}$ content of the organic component of lake sediments during the Late Quaternary [J]. *Quaternary Research*, 1975, 5(2): 251—262.
- [11] Tudryn A, Tucholka P, Ozgur N, et al. A 2300-year record of environmental change from SW Anatolia, Lake Burdur, Turkey [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2013, 49(4): 647—662.
- [12] Liu E, Shen J, Zhang E, et al. A geochemical record of recent anthropogenic nutrient loading and enhanced productivity in Lake Nansihu, China [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2009, 44(1): 15—24.
- [13] 王春雨,郭庆军,朱光旭,等. 稳定碳同位素技术在北京市公园湖泊沉积物有机质来源分析与评价中的应用 [J]. *生态学杂志*, 2014(3): 778—785.
- [14] Hu J, Peng P, Jia G D, et al. Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopes in sediments of the subtropical Pearl River estuary and adjacent shelf, Southern China [J]. *Marine Chemistry*, 2006, 98(2-4): 274—285.
- [15] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter [J]. *Chemical Geology*, 1994, 114(3): 289—302.
- [16] 林瑞芬,卫克勤. 草海 ZHJ 柱样沉积物有机 $\delta^{13}\text{C}$ 记录及其古气候信息 [J]. *地球化学*, 2000(4): 390—396.
- [17] 朱正杰,陈敬安,曾艳. 草海地区过去 500 年来古温度重建: 来自沉积物纤维素结合碳酸盐氧同位素的证据 [J]. *中国科学:地球科学*, 2014(2): 250—258.
- [18] 段素明,黄先飞,胡继伟,等. 贵州草海湿地植物根际沉积物磷素形态特征 [J]. *环境科学研究*, 2013, 26(7): 743—749.
- [19] 张华海,李明晶,姚松林. 草海研究 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2007.
- [20] 夏品华,薛飞,孔祥亮,等. 贵州草海湿地农田渠系水质空间分异特征及影响分析 [J]. *环境化学*, 2012, 31(8): 1201—1207.
- [21] 李键,张维,陈敬安,等. 一种可实现不同水深条件下采样的湖泊沉积物柱芯采样装置 [J]. *地球与环境*, 2011(1): 121—124.

- [22] 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 Zeekoeflei ,South Africa: a record of human intervention in the lake [J]. *Journal of Paleolimnology* ,2007 ,39(3) : 349—360.
- [23] Sofer Z. Preparation of carbon dioxide for stable carbon isotope analysis of petroleum fractions [J]. *Analytical Chemistry* ,1980 ,52(8) : 1389—1391.
- [24] 魏中青,刘丛强,梁小兵,等. 贵州红枫湖沉积物中有机质的降解与微生物作用 [J]. *科学通报* 2005(14) : 1486—1489.
- [25] 王毛兰,赖建平,胡珂图,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(4) : 1019—1025.
- [26] 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.
- [27] 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(3) : 297—303.
- [28] Lamb A L ,Leng M J ,Umer M M ,et al. Holocene climate and vegetation change in the Main Ethiopian Rift Valley ,inferred from the composition (C/N and $\delta^{13}\text{C}$) of lacustrine organic matter [J]. *Quaternary Science Reviews* 2004 23(7) : 881—891.
- [29] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic ,paleolimnologic ,and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry* ,1997 27(5 -6) : 213—250.
- [30] Meyers P A ,Lallier - Vergès E. Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates [J]. *Journal of Paleolimnology* ,1999 21(3) : 345—372.
- [31] 唐珉,杨守业,李保华,等. 长江三角洲冰后期沉积物的有机碳氮和有机碳同位素组成与古环境指示 [J]. *海洋地质与第四纪地质* 2006(5) : 1—10.
- [32] Cloern J E ,Canuel E A ,Harris D. Stable carbon and nitrogen isotope composition of aquatic and terrestrial plants of the San Francisco Bay estuarine system [J]. *Limnology and oceanography* 2002 47(3) : 713—729.
- [33] 潘静,陈椽,宁爱丽,等. 草海浮游植物的调查及其富营养化评价 [J]. *安徽农业科学* 2012 40(12) : 7309—7312.
- [34] 王敬富,陈敬安,杨永琼,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(5) : 599—603.

The Distribution Characteristics and Sources of Organic Carbon in Sediments of Caohai Lake

YANG Haiquan¹ , CHEN Jingan¹ , SONG Yilong^{1, 2} , WANG Jingfu¹ , LU Dingpan^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry , Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550002 , China;

2. University of Chinese academy of Sciences , Beijing 100049 , China)

Abstract: This study focused on the distribution characteristics and sources of organic carbon in sediments of Caohai Lake , a typical plateau lake in China. Stable carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$) , C: N ratio , total organic carbon (TOC) contents of 17 surface sediments and three sediment cores were analyzed. Our results showed that the contents of TOC in surface sediments varied from 6. 86% to 34. 85% , with a median of 23. 30 \pm 7. 80% . The $\delta^{13}\text{C}$ ranged from -28. 49% to -18. 19% , averaged 23. 30 \pm 2. 88% , while the C: N ratio ranged from 7. 36 - 11. 12 , averaged 9. 13 \pm 1. 17. The results indicated that primary production of phytoplankton was the main source of organic carbon in surface sediments in the east areas of Caohai Lake , the effect of terrestrial input and submerged plant was negligible. However , primary production of phytoplankton and submerged plants were the main sources in other lake areas. The contribution of submerged plants to TOC in surface sediments accounted for 49. 7% , while the contribution of primary production of phytoplankton was 48. 8% . The results of sediment cores in the east area showed that organic carbon in the upper sediments mainly originated from algae , but in bottom sediments from algae , terrestrial input and submerged plants. Besides , organic carbon in center area sediment core mainly came from algae and submerged plants , while in the outlet area almost came from submerged plants.

Keywords: Caohai Lake , sediments , organic carbon sources $\delta^{13}\text{C}$ of TOC , C/N ratio

(责任编辑: 陈桂芳)