

草海沉积物营养元素分布特征与控制因素

杨海全^{1,2}, 陈敬安^{1,*}, 刘文³, 王敬富¹, 李键⁴, 计永雪^{1,2}, 陈颜明³

(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, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 贵州草海国家级自然保护区管理局, 贵州 威宁 553100; 4. 济南市环境监测中心站, 济南 250014)

摘要: 选取贵州草海这一典型高原湖泊湿地作为研究对象, 在代表性湖区共布设 17 个采样点, 采集了表层沉积物和沉积物柱芯, 对沉积物总有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)分布特征及控制因素开展了对比研究。研究表明, 草海表层沉积物营养盐分布主要受外源输入和湖泊初级生产控制: 表层沉积物 TOC、TN 含量平均值分别为 232.98 mg/g 和 25.21 mg/g, 远高于国内其他湖泊, 且呈现湖心高、近岸区低的分布特征, 由于氮较高的迁移性和生物可利用性, 草海沉积物 TN 明显受湖泊水生植物生长控制, 主要以有机质形式赋存于沉积物中; 表层沉积物 TP 含量平均值为 1.03 mg/g, 其空间分布特征显著不同于 TOC、TN, 在湖心、东南湖区和出水口其含量较低, 主要受外源输入控制, 且主要以沉淀、吸附等无机形态赋存于沉积物中。草海沉积物柱芯中 TOC、TN、TP 含量总体上呈现随深度增加先迅速降低而后趋于稳定的变化趋势, 但不同湖区其含量差异较大, 反映了人为干扰强度和沉积环境的差异。草海流域外源污染物输入和沉积物较高的营养盐内负荷是其水体富营养化面临的主要威胁, 一方面应采取有效手段消减外源污染物输入, 另一方面应通过合理的生态修复措施控制内源营养盐释放。草海繁茂的沉水植物增强了水体自净功能, 优化草海水生植物种群结构、恢复草型健康湖泊生态系统对保护草海生态环境具有重要意义。

关键词: 草海; 沉积物; 总有机碳; 总氮; 总磷

中图分类号: P595 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2016)03-0297-07 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2016.03.003

湖泊富营养化是当前我国亟待解决的重要环境问题^[1-2], 其根源主要是水体氮、磷等营养过剩。湖泊沉积物对水体氮磷循环有重要影响, 一方面, 沉积物是水体氮磷营养盐的主要归宿地, 大部分营养盐被藻类及水生植物吸收利用后最终沉降埋藏在沉积物中; 另一方面, 沉积物中蓄积的氮磷营养盐通过有机质降解等早期成岩作用可再度释放至上覆水体^[3-5]。强烈的沉积物内源营养盐释放会加速藻类过度生长, 导致水体富营养化, 从而对水环境产生重大影响^[6]。研究揭示湖泊沉积物中碳、氮、磷时空分布特征及控制因素, 对深刻认识湖泊生态系统中碳、氮、磷的迁移转化过程和科学防治水体富营养化具有重要意义。

草海是云贵高原最重要的浅水湿地生态系统, 也是主要的候鸟越冬、迁徙停歇地, 被誉为高原上的明珠。近年来草海流域水土流失严重、湖泊水质

恶化、湿地生态系统明显退化, 制约了区域经济社会可持续发展。目前对草海湿地研究主要集中于对湖泊水体污染^[7]、水生动植物^[8-9]、根际沉积物磷^[10]、沉积物重金属污染^[11-12]等方面, 对草海沉积物营养盐分布特征及其控制因素尚缺乏系统研究。本文拟通过对草海典型湖区表层沉积物和沉积物柱芯的系统采样分析, 研究揭示沉积物有机碳、总氮及总磷时空分布特征, 阐明草海沉积物内源负荷特征及其控制因素, 为草海湿地保护和富营养化防治提供理论指导。

1 材料与方法

草海是典型的高原浅水湖泊湿地, 位于贵州省西北部威宁县境内(26°47′~26°52′N, 104°10′~104°20′E), 海拔 2 171.7 m。草海水面面积在枯水季为 19.8 km², 丰水季为 26.0 km², 最大水深

收稿日期: 2015-04-28; 改回日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1302231)和贵州省科学技术计划项目(黔科合 SY 字(2012)3025 号)。

第一作者简介: 杨海全(1987-)男, 博士研究生, 主要研究方向为湖泊生物地球化学循环。E-mail: yanghaiquan@vip.skleg.cn.

* 通讯作者: 陈敬安(1973-)男, 博士, 研究员, 从事环境地球化学研究。E-mail: chenjingan@vip.skleg.cn.

5.25 m, 平均水深 1.35 m, 蓄水量 $3.9 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。湖区水生植物种类繁多, 是我国重要的生物多样性保护区域之一^[13]。草海属山地亚热带西南季风气候, 垂直气候分带明显。湖区年平均降水量 950.9 mm, 5~10 月降水占年降水量的 88%, 水源补给主要来自大气降水, 其次为地下水^[9]。湖水 pH 变化范围 7.6~8.4。草海地区经济欠发达, 污水处理设施建设滞后, 周围村寨和乡镇的生产生活污水是其主要污染源^[7]。

1.1 样品采集与分析

1.2.1 样品采集

根据草海自然地理状况和水环境特征, 在全湖共布设 17 个采样点(图 1), 采集 0~5 cm 的表层沉积物。根据污染程度差异, 选取了 6 个代表性研究点位采集沉积物柱芯: 西海码头沉积物柱芯(MT) 采自 1 号采样点, 离县城最近, 该湖区水污染最为严重; 湖心沉积物柱芯(HX) 采自 7 号采样点, 位于湖心区域, 水质较好; 阳关山沉积物柱芯(YGS) 采自 15 号采样点, 位于全湖唯一出水口附近; 在 8、12、17 号采样点(图 1) 各采集了 1 根沉积物柱芯。

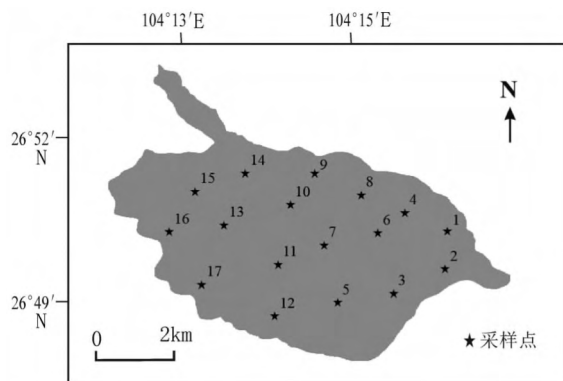


图 1 草海沉积物采样点分布图

Fig.1 Map of the sampling sites

表层沉积物用抓斗采样器采集, 采集到的沉积物装入离心管并于低温下密闭保存。沉积物柱芯采用自行设计的湖泊沉积物-水界面重力采样器进行采集^[14]。柱芯上层 0~20 cm 按每 2 cm 进行分割, 20 cm 以下均按 4 cm 进行分割。样品带回实验室后采用真空冷冻干燥仪(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。

1.2.2 总有机碳、总氮、总磷含量测定

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, 然后用超纯水反复冲洗样品至 pH 为中性, 在 60 °C 下烘干后将样品研磨至 100 目。称取约 30 mg 样品, 利用元素分析仪(Elementar-vario MACRO cube) 测定其总有机碳(TOC)、总氮(TN) 含量^[15]。

沉积物总磷采用国际通用的 SMT 法进行测定。称取 0.2 g 干燥样品, 在 500 °C 下灰化 2 h, 用 3.5 mol/L 的盐酸振荡提取 16 h, 于 3500 r/min 下离心分离 15 min 提取上清液, 采用钼锑抗比色法(GB11893-89) 测定上清液中磷的含量。

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 相对分析误差 $\leq 0.5\%$ 、TN 相对分析误差 $\leq 3\%$ 、TP 相对分析误差 $\leq 5\%$ 。

2 结果与讨论

2.1 草海表层沉积物 TOC、TN、TP 分布特征及控制因素

草海湿地表层沉积物中 TOC、TN 和 TP 的含量与空间分布特征见图 2。沉积物 TOC 含量变化范围为 68.64 ~ 348.48 mg/g, 平均值为 $232.98 \pm 77.95 \text{ mg/g}$ 。草海大部分湖区水深不到 2 m, 水生植物繁茂, 较高的初级生产力是造成草海表层沉积物储存大量有机碳的主要原因^[16]。草海湖心、南湖和西部湖区 TOC 含量明显高于其他湖区, 且表现为离岸越远(越靠近湖心) 有机碳含量越高。近年来毗邻县城的东部湖区水污染非常严重^[17], 已导致该区域沉水植物大幅减少, 这可能是导致该区域沉积物 TOC 含量不高的主要原因。此外, 草海出水口的阳关山湖区水流速度较快, 其表层沉积物中有机碳含量也明显低于其他湖区。表层沉积物 TN 含量变化范围为 9.32 ~ 39.96 mg/g, 平均值为 $25.21 \pm 7.58 \text{ mg/g}$ 。TN 空间分布与 TOC 相似, 湖心和西南部湖区含量明显高于其他湖区。草海沉积物 TP 含量变化范围为 0.52 ~ 1.54 mg/g, 平均值为 $1.03 \pm 0.27 \text{ mg/g}$, 大部分湖区 TP 含量在 0.7 ~ 1.2 mg/g 之间。草海沉积物 TP 空间分布特征与 TOC、TN 明显不同, 在湖心、东南湖区和出水口其含量较低。

草海表层沉积物中 TOC、TN 和 TP 的相关性分析(图 3) 表明, TOC 与 TN 呈显著正相关($R^2 =$

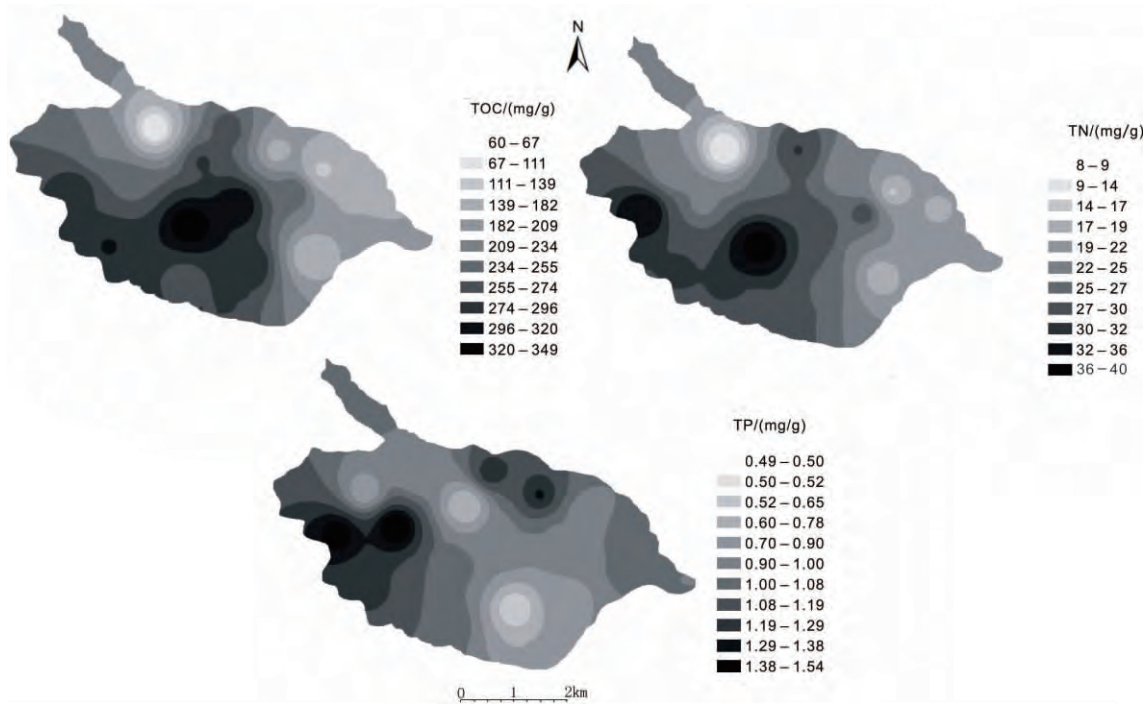


图 2 草海表层沉积物 TOC、TN、TP 含量与分布

Fig.2 Content and distribution of TOC , TN , and TP in surface sediment of Lake Caohai

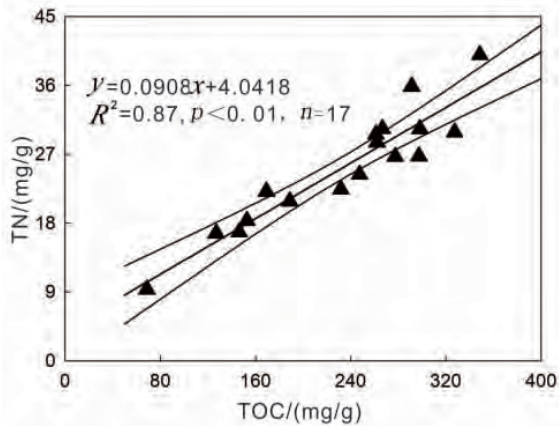


图 3 草海表层沉积物 TOC 与 TN 相关关系

Fig.3 Correlation of TOC and TN in surface sediments of Lake Caohai

0.87, $p < 0.01$) ,反映草海沉积物 TOC 和 TN 来源一致,且以有机质形式存在^[18]。表层沉积物 C/N 值范围为 7.36~11.12,平均值为 9.13 ± 1.17 ($n = 17$)。已有研究显示草海沉水植物 C/N 范围为 13.2~18.6^[16],而藻类 C/N 通常为 4~10^[16,18-20],因此,草海表层沉积物 TOC 和 TN 的直接来源为湖区藻类和沉水植物。草海表层沉积物 TP 与 TOC 和 TN 的相关性均较差 (R^2 分别为 0.01 和 0.08),表明 TP 与 TOC、TN 的来源、迁移转化过程与控制因素存在较

大差异。

草海的外源输入包括城镇生产生活污水排放、农村生活污水、农业生产(种植业和养殖业)面源排放等。2013 年草海流域内每天约 8066 m³ 以上的城镇生产生活污水未经任何处理直接排入草海,尤其是东部湖区受城镇生活污水排放影响明显。草海流域每年产生的农村生活污水约 223.68 万 m³,通过地表径流等方式直接排放至草海,其中 TN、TP 排放量分别为 237 t/a 和 21 t/a^[21]。此外,草海湖滨农业生产也造成大量营养物质排入草海。由于农村居民区和农田主要分布于草海西部和北部,且草海流域森林覆盖率低,水土流失严重,水土流失面积达 710 hm²,占草海保护区总面积的 15%^[9]。因此草海西部湖区和东北部湖区较其他湖区受到面源污染影响更大,表层沉积物中营养盐含量都较高(图 2)。草海表层沉积物中营养盐的分布特征主要受流域外源输入和湖内初级生产影响: TP 主要受外源输入控制,且主要以沉淀、吸附等无机形态赋存于沉积物中;尽管外源输入同时给草海增加了氮、磷,但由于氮较高的迁移性和生物可利用性,草海沉积物 TN 明显受湖泊水生植物生长控制,基本上以有机质形式存在于沉积物中。

与国内其他湖泊相比(表 1),草海沉积物 TOC 和 TN 含量不仅远远高于青海湖、太湖、乌梁素海,

表1 草海表层沉积物 TOC、TN、TP 平均含量与国内部分湖泊对比

Table 1 Comparisons of average contents of TOC, TN and TP in the surface sediments of Lake Caohai and other lakes mg/g

湖泊	TP	TN	TOC	参考文献
乌梁素海	0.55	0.86	20.93	[23]
鄱阳湖	0.46	1.34	15.90	[24]
青海湖	0.59	1.74	18.60	[25]
太湖流域	0.76	1.75	14.45	[26]
红枫湖	1.40	5.74	38.43	[6]
保安湖	0.75	5.2	—	[3]
太湖西岸湖滨带	0.38	0.82	7.12	[27]
草海	1.03	25.21	232.98	本研究

而且比同地区红枫湖和百花湖沉积物 TOC 和 TN 的含量也高出 6 倍以上^[22]，这充分证明了草海内源初级生产对沉积物 TOC 和 TN 的控制。虽然草海沉积物 TP 的含量略低于同地区红枫湖与百花湖沉积物中 TP 的含量^[5-6, 22]，但仍高于太湖、鄱阳湖、青海湖等国内其他湖泊，表明外源磷的输入不可忽视。

草海表层沉积物中极高的 TOC、TN、TP 负荷对湖泊水环境构成了巨大威胁，但草海湖区内繁茂的沉水植物可减缓风浪、固持底泥，大大增强了水体自净作用，可减缓沉积物内源营养盐释放^[28]。值得注意的是，一旦沉水植物生态系统被破坏，沉积物中的营养盐将会大量释放到水体，导致藻类大量繁殖，势必造成严重的水体富营养化，对区域生态环境和经济社会发展带来无法挽回的损失。因此在草海湿地，对沉水植物的保护显得尤为重要。

2.2 草海沉积物柱芯有机碳、总氮、总磷含量变化特征

草海沉积物柱芯 TOC、TN 含量变化范围见表 2。MT 柱芯 TOC 含量从表层至 9 cm 随深度增加缓慢降低，9 cm 到 50 cm 基本保持在 97~120 mg/g 范围内，50 cm 以下略有增加（图 4）。YGS 柱芯 TOC 含量略低于码头柱芯，从表层到 9 cm 迅速从最大值降低至 69 mg/g，9 cm 以下变化范围为 31.4~58.9 mg/g。HX 柱芯 TOC 含量明显高于 MT 和 YGS，从表层到 9 cm 迅速降低，9 cm 以下变化不大。三根柱芯 TN 含量变化与 TOC 含量变化趋势基本类似（图 4）。

草海三根沉积物柱芯中 TOC 与 TN 具有同步变化趋势，其含量均随深度增加而降低并最终趋于稳

表2 草海沉积物柱芯 TOC、TN 含量变化范围

Table 2 Contents of TOC and TN in sediment cores of Lake Caohai mg/g

柱芯	TOC			TN		
	最低值	最高值	平均值	最低值	最高值	平均值
MT	98.0	152.7	122.1	7.8	18.3	11.5
YGS	31.0	231.0	108.5	3.1	22.4	10.1
HX	188.0	327.0	246.5	13.0	29.9	18.8

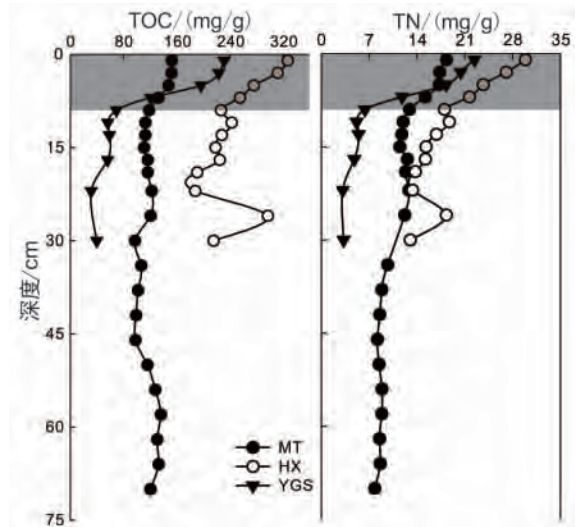


图4 草海不同湖区沉积物 TOC、TN 含量垂向分布
Fig.4 Vertical profiles of TOC and TN of sediments in different areas of Lake Caohai

定。不同湖区沉积物柱芯 TOC、TN 含量不论在水平和垂向上均存在较大空间差异性。其中 HX 与 YGS 柱芯表层 TOC、TN 含量明显高于中下层。HX 沉积物柱芯 TOC、TN 含量从表层到底部均高于其余两个湖区，这可能是因为湖心沉水植物生长更为繁茂，而且该区域水流速较小，周围输入的有机碳易在此沉积。YGS 柱芯 TOC、TN 含量从表层到 6 cm，明显高于 MT 柱芯，而 6~7 cm 以下则低于 MT 柱芯。MT 柱芯 TOC、TN 含量垂向差异性较小，表层略高于中下层。近年来码头附近湖区受到水污染严重，且受到旅游开发等强烈人为干扰，沉水植物较难在该湖区大量生长，因此 TOC、TN 含量低于湖心与阳关山湖区。

三个湖区沉积物柱芯，特别是 HX 与 YGS 柱芯，从表层到 9 cm 左右，TOC 与 TN 含量迅速降低，此后降低趋势减缓。相关研究表明草海湖心沉积物平均堆积速率约为 0.28 cm/a^[18]，因此可以推断该段沉积物的沉积历史大致从 1980 年开始。根据

文献记载草海于1972年进行大规模人工排水,湖水全部放干,大部分湖底被开垦为耕地,直至1980年恢复蓄水^[9]。因此,草海表层到9 cm 应为1980年开始重新蓄水后沉积形成,而9 cm 以下则为1980年以前被人类活动强烈干扰的沉积物。从1980年至今,较少的人为干扰和适宜的水环境为沉水植物生长提供了有利条件,且随着周边经济发展,营养盐的输入使湖区营养负荷不断增加。因此,三个湖区沉积物从表层到9 cm 都表现为有机碳和总氮含量远高于中下层。

草海不同湖区沉积物柱芯 TP 含量分布具有较大的空间差异性(图5)。TP 含量垂向上总体表现为从表层到底部先迅速降低而后趋于稳定的变化趋势,表层明显高于底部。底部 TP 含量差别不大,基本处于0.3~0.5 mg/g 范围,但各湖区柱芯 TP 含量到达稳定的深度不同。HX 柱芯 TP 含量从表层到9 cm 迅速降低,9 cm 到17 cm 处于稳定状态,17 cm 以下随深度增加继续降低; YGS 柱芯 TP 含量从表层到11 cm 迅速降低,11 cm 以下基本稳定; 12#柱芯从表层到17 cm 持续降低,17 cm 以下才趋于稳定。YGS、8#与17#三根柱芯 TP 含量在15 cm 以下基本达到稳定状态,而 MT 柱芯则在22 cm 以

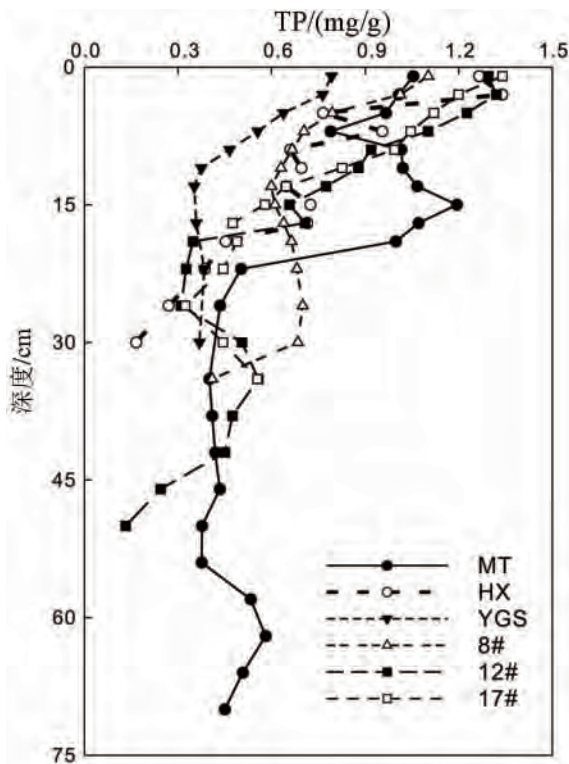


图5 草海不同湖区沉积物柱芯 TP 含量垂向分布

Fig.5 Vertical profiles of TP of sediments in different areas of Lake Caohai

下才趋于稳定。除 HX 外,各采样点均离岸较近,且大部分区域为河流入湖口,陆源输入影响较大。已有研究表明,入湖废水经水生植物阻滞、吸附,悬浮颗粒物的沉降速率和沉降量明显大于其他区域^[29]。草海各区域沉积环境不同,沉积速率差异较大,因此各柱芯 TP 含量到达稳定的深度也不同。与 TOC、TN 类似,草海沉积物柱芯 TP 含量与草海历史时期人工干预和自然恢复过程密切相关,表层沉积物反映了1980年草海蓄水后 TP 的沉积过程,而深部沉积物 TP 因蓄水前强烈的耕作活动而混匀,TP 含量变化不大。位于出水口区域的 YGS 柱芯上层部分 TP 含量明显低于其他湖区,可能反映该区域受陆源输入影响较小。

相关性分析(图6)表明 HX 与 YGS 沉积物柱芯中 TOC 与 TN、TOC 与 TP、TP 与 TN 均呈显著正相关,表明阳关山与湖心沉积物柱芯有机碳、氮、磷分布主要受湖区内源初级生产控制,外源输入的影响可能仅限于表层沉积物,这也反映出草海流域污染只是在最近十几年才日益凸显。

MT 柱芯 TOC 含量与 TN 相关性较差($R^2 = 0.42$),与 TP 相关性更差($R^2 = 0.09$),但 TN 含量与 TP 呈显著正相关($P < 0.01$, $R^2 = 0.48$),这表明控制该区域沉积物 TOC、TN、TP 分布的因素更为复杂:一方面,该区域离县城较近,又是主要入湖河流入湖区,外源输入对该区沉积物营养盐分布影响更大、更直接;另一方面,该区域水生植物生长受人为活动影响大,且沉积物因受历史时期人工排水开垦和近期人类活动干扰而混合均一化。

3 结论

1) 草海表层沉积物营养盐分布主要受湖区外源输入和湖泊初级生产控制,表层沉积物 TOC、TN 含量平均值分别为 232.98 mg/g 和 25.21 mg/g,远高于国内其他湖泊,且呈现湖心高、近岸区低的分布特征;表层沉积物 TP 含量平均值为 1.03 mg/g,其空间分布特征与 TOC、TN 明显不同,在湖心、东南湖区和出水口其含量较低,主要受外源输入控制,且主要以沉淀、吸附等无机形态赋存于沉积物中。尽管外源输入同时给草海增加了氮、磷负荷,但由于氮较高的迁移性和生物可利用性,草海沉积物 TN 明显受湖泊水生植物生长控制,基本上以有机质形式存在于沉积物中。

2) 草海各湖区沉积物柱芯营养盐随深度增加

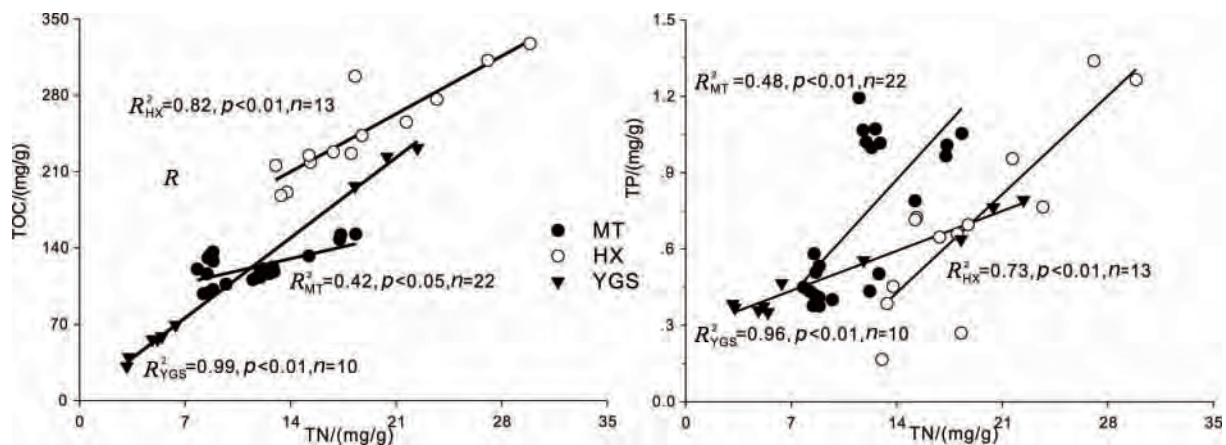


图6 草海沉积物柱芯 TOC 与 TN、TN 与 TP 相关关系

Fig.6 Correlation of TOC and TN ,TN and TP in sediment cores of Lake Caohai

均呈现先迅速降低后趋于稳定的趋势,主要受沉积环境和人为干扰等因素影响。1980年前因人工排水开垦使得大部分湖区沉积物混合均一化;1980年后重新蓄水后,随着周边经济发展,营养盐输入使湖区营养负荷不断增加,水生植物生长迅速,沉积物柱芯从9 cm至表层营养盐含量快速升高。

3) 草海流域外源污染物输入和沉积物较高的营养盐内负荷是草海水体富营养化面临的主要威胁,一方面应采取有效手段消减外源污染物输入,另一方面应通过合理的生态修复措施控制内源营养盐释放。

4 草海湿地治理对策

草海是典型的高原湿地,也是云贵高原重要的物种基因库,具有特殊生态服务功能,治理并恢复草海健康湿地生态系统刻不容缓。根据草海流域污染特征,提出以下治理措施建议。

1) 提高污水收集与处理率。建立完善的污水收集管网系统和污水处理厂,有效处理城镇生产废水和生活污水。

2) 恢复流域生态系统。通过退耕还湖、生态调水等措施恢复湿地面积;构建草海生态湖滨带和入湖河口湿地缓冲带,减少外源污染物输入。

3) 防治水土流失。通过封山育林,建设水源涵养林,提高森林覆盖率,减少入湖泥沙量,降低底泥淤积速率。

4) 消减内源污染。草海繁茂的沉水植物不但增强了水体自净作用,而且抑制了沉积物内源营养盐释放。应加强底泥内源污染原位控制技术研究和示范,有效抑制内源营养盐释放,重建草型清水生态系统。

5) 保护生物多样性。严格控制空心莲子草、满江红等生物入侵,加强对湖区水生植物优化调控,减缓草海向沼泽化发展。

参 考 文 献

- [1] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.
- [2] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1857-1866.
- [3] 张水元, 刘瑞秋, 黎道丰. 保安湖沉积物和间隙水中氮和磷的含量及其分布[J]. 水生生物学报, 2000, 24(5): 434-438.
- [4] 万国江, 万恩源, 陈敬安, 等. 深水人工湖环境生物地球化学过程研究: 以贵州红枫湖-百花湖为例[J]. 地球与环境, 2010, 38(3): 262-270.
- [5] Chen J A, Zhang W, Zhang R Y, et al. Times and spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Hongfeng [J]. Proceeding of 13th World Lake Conference, 2009: 2226-2230.
- [6] 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.
- [7] 徐松, 高英. 草海湖泊湿地水环境污染现状及可持续利用研究[J]. 环境科学导刊, 2009, 28(5): 33-36.
- [8] 晏妮, 潘鸿, 王洋, 等. 威宁草海浮游植物时空分布及其数量特征[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12F): 55-58.
- [9] 张华海, 李明晶, 姚松林. 草海研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2007.
- [10] 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.
- [11] 钱晓莉, 冯新斌, 毕向阳, 等. 贵州草海沉积物汞的含量和分布特征初步研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(1): 32-36.
- [12] 张清海, 林昌虎, 谭红, 等. 草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1055-1061.

- [13] 向应海,黄威廉,吴至康. 草海科学考察报告[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1986.
- [14] 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, 39(1): 121-124.
- [15] 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 Zeeko-evlei, South Africa: a record of human intervention in the lake[J]. Journal of Paleolimnology, 2007, 39(3): 349-360.
- [16] 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, 13(1): 15-20.
- [17] 张珍明,张清海,林绍霞等. 贵州草海湖湿地水体污染特征及污染因子分析研究[J]. 广东农业科学, 2012, (20): 183-187.
- [18] 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, 44(2): 250-258.
- [19] 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.
- [20] Meyers P A, Lallier-Vergès E. Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates [J]. Journal of Paleolimnology, 1999, 21(3): 345-372.
- [21] 中国国际工程咨询公司. 贵州草海高原喀斯特湖泊生态保护与综合治理规划[R]. 2015.
- [22] 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.
- [23] 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, (05): 58-60+64.
- [24] 王圣瑞,倪栋,焦立新等. 鄱阳湖表层沉积物有机质和营养盐分布特征[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(1): 23-28.
- [25] 陈学民,朱阳春,伏小勇等. 青海湖表层沉积物营养元素分布特征及相关性分析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 395-401.
- [26] 杨洋,刘其根,胡忠军等. 太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J]. 环境科学学报, 2014, 34(12): 3057-3064.
- [27] 甘树,卢少勇,秦普丰等. 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3064-3069.
- [28] 雷泽湘,徐德兰,黄沛生等. 太湖沉水和浮叶植被及其水环境效应研究[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 239-243.
- [29] 欧阳夏骏,宋永忠. 玄武湖入湖口的悬浮颗粒物沉降调查研究[J]. 污染防治技术, 2008, 21(4): 13-15.

Distribution Characteristics and Controlling Factors of Total Organic Carbon, Total Nitrogen, and Total Phosphorus in Sediments of Caohai Lake, China

YANG Haiquan^{1,2}, CHEN Jing'an¹, LIU Wen³, WANG Jingfu¹,
LI Jian⁴, JI Yongxue^{1,2,3}, CHEN Yanming³

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. The Administration Bureau of the Caohai National Natural Reserve, Weining 553100, China; 4. Jinan Environmental Monitoring Center Station, Jinan 250014, China)

Abstract: This study focused on the distribution characteristics and controlling factors of nutrients in sediments of Caohai Lake, a typical plateau wetland in China. Contents of total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in 17 surface sediments and three sediment cores were analyzed. Results show that the contents of TOC range from 68.64 mg/g to 348.48 mg/g, with an average of 232.98 ± 77.95 mg/g, and the contents of TN range from 9.32 mg/g to 39.96 mg/g, with an average of 25.21 ± 7.58 mg/g, both of which are much higher than other lakes in China. The TOC and TN in surface sediments come mainly from hydrophytes, and their contents are low in nearshore zone whereas high in central area. Contents of TP range from 0.52 mg/g to 1.54 mg/g, which was also higher than most lakes. The TP contents are low in central area but high in nearshore zone and come from sewage and agricultural nonpoint source pollution. Although there are differences for nutrients in sediments cores because of different anthropogenic disturbance and sedimentary environments, contents of TOC, TN, and TP decrease and gradually keep a constant level with increasing depth. The exogenous pollutions and heavy internal loading of nutrient pose a great threat to the water environment of Caohai Lake. Effective measures and ecological restoration should be taken to reduce the external pollution and control the release from sediment. The lush submerged plants in this lake greatly enhance self-purification and restrain the release of nutrient from sediments, and are therefore important for the optimization of submerged plants and restoration of a clear macrophytic-healthy ecosystem in Caohai Lake.

Key words: Caohai Lake; sediment; TOC; TN; TP