

云南抚仙湖沉积物有机质来源与时空变化特征

宋以龙^{1,2}, 陈敬安^{1*}, 杨海全^{1,2}, 丁薇³, 陶红波³, 罗婧⁴, 王敬富¹

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. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 4. 中国航天建设集团有限公司, 北京 100071

摘要:为揭示抚仙湖沉积物总有机碳(TOC)和总氮(TN)的时空分布特征及其主要来源,对抚仙湖表层沉积物和沉积物柱芯的TOC、TN和有机碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)进行了分析。结果表明,表层沉积物的TOC和TN含量分别为2.02%~3.40%和0.16%~0.36%;沉积物柱芯的TOC和TN含量分别为0.41%~6.63%和0.08%~0.77%,呈现出北湖高南湖低、表层高底部低的分布特征。内源有机质是抚仙湖沉积物中有机质的主要来源,不同湖区外源有机质的输入差异明显,其中南湖沉积物有机质中陆源比例较高。沉积物柱芯C/N值从底部到表层逐步增大,表明抚仙湖沉积物有机质中陆源有机质所占比例持续增加。与内源有机质相比,外源有机质输入增加更快,指示流域内人为活动增强导致流域侵蚀和水土流失加剧。

关键词:抚仙湖; 沉积物; 有机质; $\delta^{13}\text{C}$; 来源

中图分类号:P593 文章编号:1007-2802(2016)04-0618-07 doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2016.04.002

Distribution and Source of the Organic Matter in the Sediment of Fuxian Lake, Yunnan Province

SONG Yi-long^{1,2}, CHEN Jing-an^{1*}, YANG Hai-quan^{1,2}, DING Wei³,
TAO Hong-bo³, LUO Jing⁴, WANG Jing-fu¹

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. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 4. China Aerospace Construction Group Limited Company, Beijing 100071, China

Abstract: Total organic carbon (TOC) content, total nitrogen (TN) content, and stable carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$) composition of surface and cored sediment samples from the Fuxian Lake in southwest China were determined to explore spatial temporal distributions and sources of the organic matter in the lake sediment. The results showed that TOC of surface and cored sediment samples were in the ranges of 2.02%~3.40% and 0.16%~0.36%, respectively, while TNs were in the ranges of 0.41%~6.63% and 0.08%~0.77%, respectively. As a whole, contents of TOC and TN were higher in the north part than in the south part of the lake, and both decreased as the sediment depth increased due to, probably, the increasing impact of anthropogenic activities. All evidences indicated that the primary production was the main organic carbon (OC) source of the sediment, and contributions of the terrestrial OC source were regionally dependent, and only played an important role in the south part of the Lake. In contrast to most other lakes, the C/N ratios of Fuxian lake sediment samples decreased gradually from the surface to the bottom of sediment columns, suggesting contributions of terrestrial OC were increasing. The more exogenous OC were found in sediments indicated that the soil erosion resulted from increased human activities in the lake area should be received more attentions.

Key words: Sediment; Organic matter; stable carbon isotope; sources; Fuxian Lake

湖泊沉积物作为环境物质输送的宿体,汇集了流域侵蚀、大气沉降及人为释放等多种来源的环境物质(万国江,1988),蕴含了丰富的物理、化学和生物信息(陈敬安等,1999;吕明辉等,2007;沈吉,

2009;陈传红,2012;于志同等,2015)。湖泊沉积物有机质主要保存了流域植被变化和水体初级生产力等重要信息,可用于判定有机质来源和反演湖泊古生产力变化,是古湖沼信息的有效载体(周德

收稿日期:2016-06-07 收到,2016-06-21 改回

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFA0601003);国家自然科学基金项目(U1302231);贵州省重大基础应用研究计划项目([2015]2001)

第一作者简介:宋以龙(1990-),男,硕士研究生,研究方向:湖泊生物地球化学循环. E-mail: songyilong@vip.skleg.cn.

* 通讯作者简介:陈敬安(1973-),男,博士,研究员,研究方向:湖泊与环境. E-mail: chenjingan@vip.skleg.cn.

全,2006;王毛兰等,2014;徐敏等,2014)。全球湖泊面积虽然不及海洋面积的2%,但每年的碳埋藏量却占海洋碳埋藏量的25%~58%(Dean *et al.*, 1998; Cole *et al.*, 2007),湖泊碳循环是全球碳循环的重要组成部分。此外,与湖泊富营养化密切相关的氮、磷等生源要素迁移转化过程往往以有机质为主要载体,湖泊初级生产和有机质降解过程将湖泊碳循环和氮-磷循环紧密耦合在一起(Bratkič *et al.*, 2012)。因此,对湖泊沉积物有机质来源及迁移转化过程的研究可深化对湖泊碳循环的认识,有助于揭示与湖泊富营养化密切相关的氮-磷循环过程及控制因素,进而为制定合理的湖泊富营养化防控策略提供科学指导。

湖泊沉积物有机质一般可分为内源有机质和外源有机质。前者指藻类、浮游动物和水生植物等水生生物的残体沉积;后者主要包含由湖盆流域输入的陆源植物碎屑、土壤有机质等。不同来源有机质的碳氮含量和稳定同位素组成常存在明显差异,因此,有机质C/N和碳氮同位素被广泛用于示踪沉积物有机质来源(Meyers and Ishiwatari, 1993; Chen *et al.*, 2002; Ramaswamy *et al.*, 2008; Tue *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013; 王雨春等, 2014; 郭庆军等, 2015)。抚仙湖是典型的深水型湖泊,水质达地表水I类标准,但近年来随着外源营养盐输入量的增加,湖泊富营养化趋势日益显现。Liu等(2013)对抚仙湖北湖沉积物TOC、TN及稳定碳同位素的研究表明,抚仙湖已受到较为明显的人为干扰,部分湖区出现轻微富营养化。王小雷等(2014)分析了抚仙湖沉积物中营养盐近150年的分布特征,并采用C/N对其来源进行辨识,发现抚仙湖沉积物有机质主要来源由北部的内部菌藻类向南部的地表陆生植物过渡。由于抚仙湖水深、沉积物采样难度大,以往的研究多局限于湖滨带和北湖,缺乏对全湖的系统对比研究,尤其是有机质碳同位素数据较少,研究结论存在较大不确定性。为此,本次在抚仙湖选取代表性点位,应用TOC-TN含量、C/N及碳同位素组成,揭示抚仙湖沉积物有机质来源及其时空变化特征,为深入认识抚仙湖碳循环、富营养化过程与机制奠定基础。

1 研究区概况

抚仙湖是中国最大的深水型淡水湖泊,位于云南省玉溪市澄江、江川、华宁3县之间,距昆明市70 km。湖面海拔1721 m,水面面积212 km²,水容量189.3

亿 m³,平均水深89.6 m,最大水深155.0 m。抚仙湖处于亚热带常绿阔叶林-红壤地带,年平均气温15.6℃,年降雨量800~1100 mm,雨季一般为5~10月份,占全年降雨量的84%(中国科学院南京地理与湖泊研究所,1990;王苏明等,1998)。抚仙湖为南北向的断层溶蚀湖泊,北湖宽而深,南湖窄而浅,湖水补给主要为大气降水与流域地表径流。抚仙湖是贫营养型湖泊,水质清澈,透明度高,水体营养元素含量较低,初级生产力较低,是中国为数不多的I类水质湖泊之一(高伟等,2013)。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集

在抚仙湖全湖布设7个代表性采样点(图1),用彼得森抓斗采样器采集表层沉积物样品,并采用课题组研制的重力采样器(李键等,2011)在北湖、湖心和南湖(分别为1#、2#和3#点)采集沉积物柱。所获沉积物柱芯悬浮层未受扰动,界面水清澈,柱芯长度分别为30~40 cm。

现场对表层沉积物加饱和HgCl₂溶液毒化处理后带回实验室真空冷冻干燥(TechconpFD-3-85-MP)。沉积物柱芯于现场按1 cm间隔分样,装于预先处理好的50 mL离心管中冷藏保存,带回实验室冷冻干燥。干燥后的样品除去砂砾、动植物残体后,用玛瑙研钵研磨,过筛(120目)后装袋。

2.2 总有机碳、总氮及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 分析

称取适量的沉积物样品于烧杯中,用1.5 mol/L的盐酸进行酸化处理,以除去样品中的无机碳,再用超纯水反复洗至中性,冷冻干燥后研磨至120目。称取20~30 mg样品采用元素分析仪(Elementar-vario MACRO cube)测定TOC、TN。实验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相对分析误差低于0.5%、TN相对误差小于3%。

沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的测定在环境地球化学国家重点实验室完成。采用石英管熔融高温燃烧法(Sofer, 1980),根据元素分析得到含碳量,称取适量样品与过量的丝状CuO装于石英管中,在真空线系统抽真空后熔融,于马弗炉中850℃下灼烧4~5 h,使样品中有机碳全部转化为CO₂气体,冷却后,将CO₂气体导出,纯化后收集于样品管,用气体质谱仪MAT-252测定CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。分析过程中设置平行

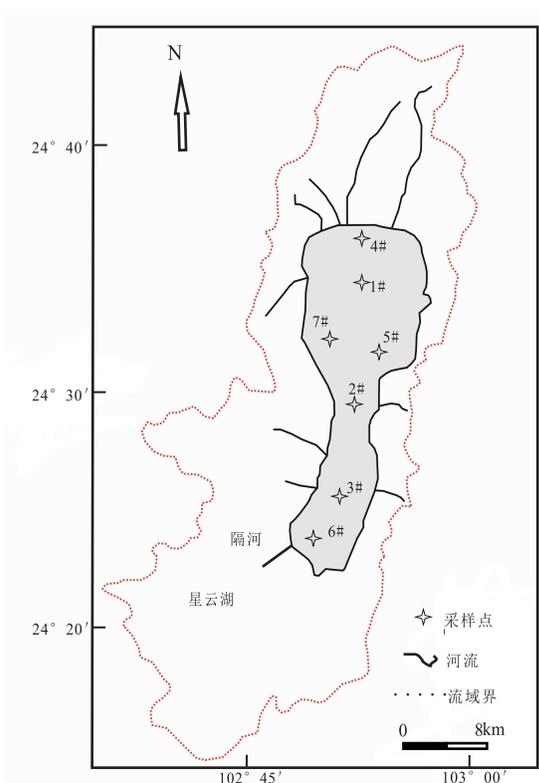


图1 采样点分布图
Fig.1 Map of sampling sites

样,并插入标准样品(IAEA-C3 纤维)进行质量控制,分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。计算公式为:

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

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 沉积物 TOC、TN 含量分布特征及其影响因素

表层沉积物样品的 TOC 含量分析结果见表 1, 其变化范围为 2.02%~3.40%, 平均为 2.42%, 其中靠近北岸的 4 号点 TOC 含量明显高于其他采样点, 北湖中部近岸 5 号点和 7 号点 TOC 含量较低。表层沉积物 TN 含量为 0.16%~0.36%, 平均 0.27%, 最高值同样出现在北岸的 4 号点, 而最低值则出现在南湖心 3 号点。抚仙湖表层沉积物营养盐含量整体呈现北湖高南湖低, 南北岸高东西岸低的分布特征, 这可能与抚仙湖的地形特征和环境条件密切相关。抚仙湖是一个南北向的断层溶蚀湖泊, 形如倒置葫芦。北部湖区宽而深, 且北岸地势较平坦, 汇流区域面积大, 分布有大面积的农耕区以及城镇生活区, 入湖河流大多流经澄江县。澄江县是抚仙湖最主要的非点源污染源产生区域(夏天翔等, 2008; 吴斌等, 2010), 大量营养盐和陆源有机质由此入

湖, 导致北湖水体初级生产力明显高于其他湖区, 表层沉积物 TOC、TN 含量较高。与北湖相反, 南湖窄而浅, 南岸地区无大面积平坦区域, 汇水面积相对较小, 陆源输入的营养物质较少, 初级生产力不高, 且南岸地区人口稀少, 人为影响较小, 因此南湖沉积物 TOC、TN 含量较低。此外, 抚仙湖东西两侧主要以坡地和陡峭山壁为主, 汇流主要以降雨时山坡径流为主, 因此湖区陆源输入有机质相对较少, 初级生产力低, 沉积物 TOC、TN 含量较低。

表 1 抚仙湖表层沉积物 TOC、TN、C/N 及 $\delta^{13}\text{C}$ 值
Table 1 Contents of TOC, TN, C/N and $\delta^{13}\text{C}$ values of surface sediments in the Fuxian lake

	1	2	3	4	5	6	7	平均值
TOC/%	2.42	2.26	2.16	3.40	2.04	2.65	2.02	2.42
TN/%	0.28	0.29	0.16	0.36	0.24	0.31	0.24	0.27
C/N	10.00	9.02	12.91	11.07	10.01	9.97	9.73	10.39
$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	-27.87	-27.93	-27.14	-26.61	-26.49	-26.50	-26.81	-27.05

北湖沉积物柱芯 TOC 含量为 0.41%~6.63% (平均 1.55%); 湖心、南湖沉积物柱芯 TOC 含量相对较低, 剖面含量分别为 0.67%~3.61% (平均值 1.15%) 和 0.57%~4.09% (平均值 1.30%) (图 2)。3 根柱芯 TOC 含量变化趋势基本一致, 表层 5 cm 随深度增加含量迅速降低, 5 cm 以下缓慢降低并最终趋于稳定。但 3 根柱芯 TOC 含量存在明显差异, 具体表现为: 北湖>南湖>湖心, 与表层沉积物 TOC 含量分布类似。

沉积物柱芯 TN 含量变化趋势与 TOC 一致, 表层随深度增加快速降低, 底部趋于稳定。北湖柱芯 TN 含量为 0.08%~0.77%, 平均含量 0.21%; 湖心柱芯 TN 含量为 0.12%~0.44%, 平均含量 0.18%; 南湖柱芯 TN 含量为 0.08%~0.41%, 平均含量 0.15% (图 2)。相关性分析结果显示抚仙湖沉积物柱芯 TOC 与 TN 呈极显著正相关关系(北湖、南湖和湖心 R^2 分别为 0.998、0.993、0.999 ($p < 0.001$)), 表明沉积物中 TOC 与 TN 来源可能一致, 且 TN 基本以有机氮的形式存在。

已有研究表明抚仙湖不同湖区沉积速率差异显著, 北湖平均沉积速率为 2 mm/a, 湖心略高于北湖(Zeng and Wu, 2009; 王小雷等, 2010, 2014), 南湖沉积速率明显低于北湖和湖心, 平均值约为 1.3 mm/a(王小雷等, 2011; 燕婷等, 2016)。本研究中沉积物柱芯采样点与上述研究部分采样点位置接近, 因此可以推断本研究中北湖与湖心沉积物柱芯 TOC 与 TN 含量转折点(约 5 cm 处)和南湖转

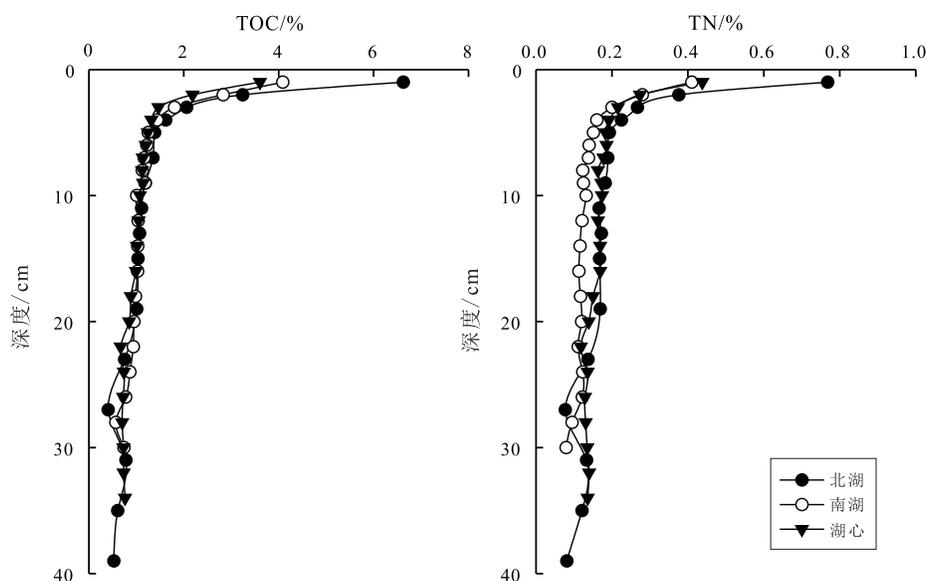


图2 抚仙湖不同湖区沉积物柱芯 TOC、TN 含量剖面图

Fig.2 Profiles of TOC and TN contents in sediment cores of the Fuxian Lake

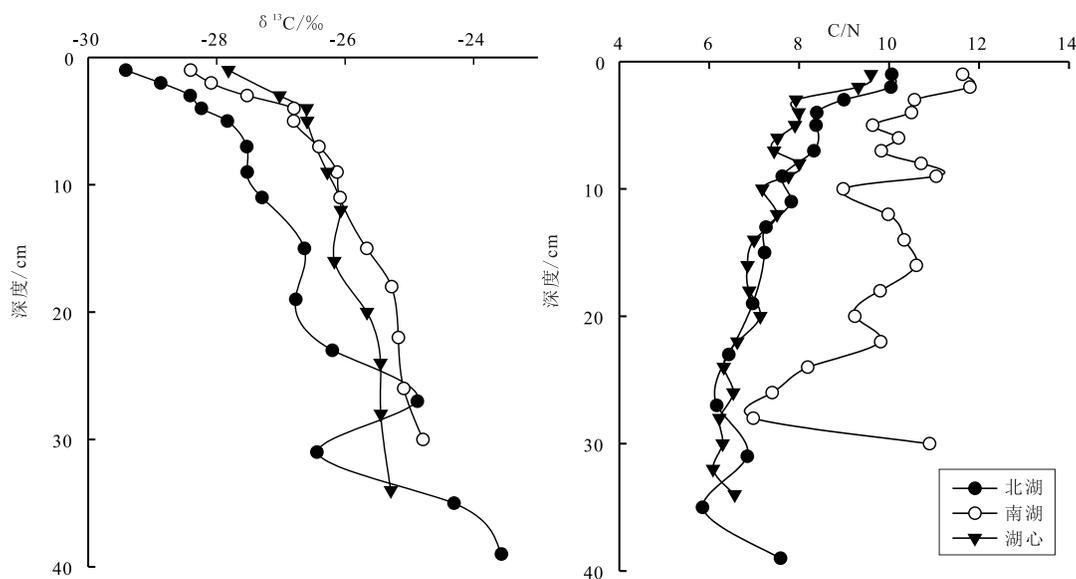
折点(约 4 cm 处)对应的时间为 20 世纪 80 年代中期。80 年代中期以前抚仙湖流域基本未进行过大规模磷矿开采,输入抚仙湖的磷的总量也比较小,抚仙湖营养盐含量总体处于较低水平,初级生产力也维持在一个比较平稳的水平,因此图 2 中各湖区柱芯转折点以下 TOC 与 TN 含量随深度增加呈现缓慢降低趋势。而 20 世纪 80 年代中期以后,抚仙湖流域开展了大规模的磷矿露天开采和磷化工开发,磷矿开采加速了 P 的释放,每年约有 7.27 t 磷通过地表径流等方式排入湖泊(冯慕华等,2008),导致水体初级生产力增大,表层沉积物 TP 含量明显升高(王小雷等,2014)。李荫玺等(2003)研究表明,1995 年以来,抚仙湖水体浮游植物的生物量增长速度明显加快,从 1995 年至 2000 年,浮游植物的生物量增加了近两倍。随着人类生产活动的加强,输入抚仙湖的营养物质不断增加(侯长定,2001),从而导致了抚仙湖表层沉积物 TOC 与 TN 含量快速增加。

3.2 沉积物有机质 C/N、 $\delta^{13}C_{org}$ 分布特征与来源

很多研究表明,沉积物有机质的 C/N 原子比可有效地指示有机质的来源(Meyers and Ishiwatari, 1993; Meyers, 1994; Dean and Gorham, 1998; Chen *et al.*, 2002): 湖泊水生植物含有较多的蛋白质,其 C/N 原子比一般小于 10,通常为 4~10; 陆源有机质富含腐殖质,蛋白质相对较少,其 C/N 原子比往往大于 15。抚仙湖表层沉积物有机质 C/N 值变化范围为 9.02~12.91,平均值为 10.39,南湖心 3 号点、

北岸 4 号点表层沉积物 C/N 值较高。从 C/N 值可初步判断抚仙湖表层沉积物中有机质具有混合来源,既有湖泊内源有机质,也有陆源物质的输入。

3 根柱芯的 C/N 值剖面变化如图 3 所示。由图 3 可见, C/N 值总体表现为南湖>北湖>湖心。南湖 C/N 值为 6.97~11.80,平均值为 9.91; 北湖为 5.84~10.06,平均值为 7.74; 湖心为 6.08~9.60,平均值为 7.30。3 个湖区沉积物柱芯 C/N 值基本低于 10,但不同湖区差异明显,南湖柱芯 C/N 值明显高于其他湖区,北湖和湖心 C/N 值较接近,说明不同湖区沉积物中有机质来源存在差异。北湖和湖心 C/N 值基本在 10 以下,说明有机质主要来源于湖泊水生植物,而南湖偏高的 C/N 值指示该湖区陆源有机质占有更高比例。很多湖泊的研究结果表明,沉积物柱芯有机质 C/N 值多呈表层低、底层高的变化特征,这主要有两方面原因: ①近几十年来的湖泊富营养化导致水体初级生产力增大,藻类等水生植物占有更高比例,导致表层沉积物有机质 C/N 值减小; ②在沉积物早期成岩作用过程中,藻类等内源有机质优先降解,陆源有机质则更多被保存,导致底层沉积物 C/N 增大。值得注意的是,与大多数湖泊相反,抚仙湖沉积物柱芯 C/N 值从底部到表层呈明显的逐步增大趋势(图 3),表明抚仙湖沉积物有机质中陆源有机质所占比例持续增加,与内源有机质相比,外源有机质输入增加更快,指示近 30 年来抚仙湖流域人为活动逐步增加、流域侵蚀和水土流失逐步加剧。近几十年来,抚仙湖流域农

图3 3个不同湖区沉积物柱芯 C/N 和 $\delta^{13}\text{C}$ 剖面图Fig.3 Profiles of C/N and $\delta^{13}\text{C}$ in sediment cores of the Fuxian lake

业生产活动逐渐加强,流域内土壤侵蚀严重(张建萍等,2004),水体营养化程度不断提高,初级生产力逐渐增强,内源有机质和陆源有机质输入的持续增加导致了沉积物中有机质快速积累,导致表层沉积物有机质含量快速增长。

有机质碳同位素组成反映了不同生物体碳同化作用的动力学过程与碳源的稳定碳同位素组成(王毛兰等,2014),因此有机质 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 也被用作判别沉积物中有机质来源。通常认为陆生高等植物 C3、C4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围分别为: $-23\text{‰} \sim -30\text{‰}$ 和 $-17\text{‰} \sim -9\text{‰}$ (Boutton, 1991)。抚仙湖流域以 C3 植物为主,其典型陆源有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围为 $-30\text{‰} \sim -27\text{‰}$ (丁薇等,2016)。浮游植物 $\delta^{13}\text{C}$ 大约在 $-24\text{‰} \sim -42\text{‰}$ 之间 (Schlacher and Wooldridge, 1996),抚仙湖 7 个采样点的藻类碳同位素组成的测定结果为 $-23.63\text{‰} \sim -26.93\text{‰}$,平均值为 -25.05‰ (作者未发表数据)。抚仙湖表层沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值变化较小,为 $-26.49\text{‰} \sim -27.93\text{‰}$,平均值为 -27.05‰ 。

分析结果显示,抚仙湖沉积物柱芯 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 剖面变化趋势非常一致(图 3),表现为表层偏负,随深度增加逐渐变正,不同湖区沉积物柱芯 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 明显不同。北湖柱芯 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 由表层的 -29.42‰ 逐渐偏正至底部的 -23.57‰ ,平均值为 -26.93‰ ;南湖柱芯 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 由表层的 -28.41‰ 逐渐偏正至底部的 -24.79‰ ,平均值为 -26.33‰ ;湖心柱芯 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 则由表层的 -27.82‰ 逐渐偏正至底部的 -25.29‰ ,平均值为 -26.21‰ 。与水生植物相比,抚仙湖流域典型陆源植物有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显偏负,因此 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 剖面

变化趋势也指示抚仙湖沉积物中陆源植物输入比例近几十年来逐渐增加。

C/N 值可粗略判断沉积物有机质来自外源或内源,但精确度较差。相对 C/N 值, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 可作为一种更精确的判源指标,但不同来源有机质碳同位素端元值亦存在交叉重叠,而且在利用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 作为判别指标时,还要考虑有机质在迁移转化过程中可能存在的早期成岩及选择性降解等作用导致的同位素分馏。因此,为了更精准地判别沉积物有机质来源,应采用 C/N 值与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 相结合的方法。

为了检验沉积物有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 是否受到早期成岩作用的影响,对 3 个沉积物剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 TOC、C/N 分别进行相关性检验,若两者线性关系较好,说明有机碳可能受到成岩作用影响(倪兆奎等,2011;秦俊等,2015)。结果显示,北湖柱芯 $\delta^{13}\text{C}$ 和 TOC、南湖柱芯 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 之间相关性较差,湖心柱芯 $\delta^{13}\text{C}$ 和 TOC、C/N 之间相关性相对较好(图 4)。由此可见,抚仙湖南北 2 个主要湖区沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 受到成岩转化作用的影响较小,而湖心沉积物在一定程度上受到成岩转化带来的分馏影响。因此,在抚仙湖南北 2 个主要湖区,较合适利用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 指示沉积物中有机质的来源。

通过实地考察和文献调研,笔者选取湖泊内源有机质(藻类和水生植物)、陆源高等植物碎屑(主要为 C3 植物)及土壤有机质作为抚仙湖沉积物有机质的 3 个主要来源端元。从图 5 可见,抚仙湖沉积物有机质来源在不同区域存在一定差异。北湖柱芯绝大部分样品及湖心表层沉积物有机质主要

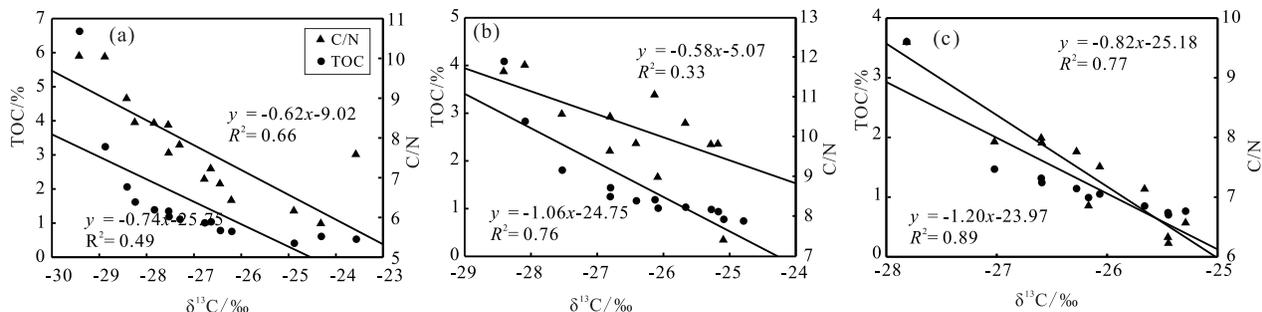


图4 抚仙湖沉积物柱芯 $\delta^{13}C$ 与 C/N 和 TOC 含量相关性分析

Fig.4 Relationships of C/N ratio and TOC contents versus $\delta^{13}C$ in the Fuxian lake sediments

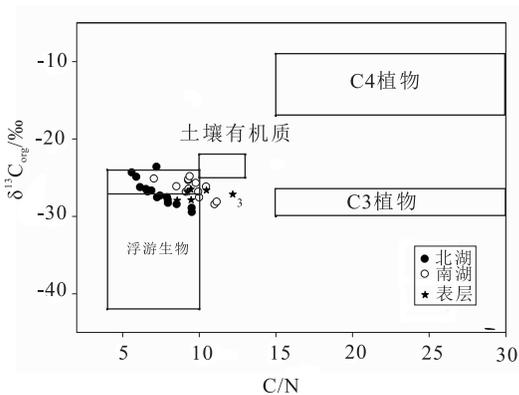


图5 抚仙湖沉积物有机质来源示意图

Fig.5 The sources of organic carbon in sediments of the Fuxian Lake

来源于湖泊水生植物；南湖柱芯大部分样品及部分近岸区域的表层沉积物有机质主要是内源有机质与土壤有机质的混合来源；3号采样点表层沉积物及南湖柱芯部分样品有机质的来源主要为内源有机质、土壤有机质与陆源 C3 植物。因此，抚仙湖沉积物有机质的最大贡献者为湖泊内源有机质，即藻类等水生植物，外源有机质输入对不同湖区沉积物有机质的贡献存在明显差异。南湖沉积物有机质 C/N 值偏高，表明其陆源有机质占比更高。

4 结论

(1) 抚仙湖表层沉积物 TOC、TN 含量分别为 2.02%~3.40%、0.16%~0.36%，柱芯 TOC、TN 含量分别为 0.41%~6.63%和 0.08%~0.77%，总体上呈北湖高南湖低、表层高底部低的变化特征。日益增强的人为活动是导致表层沉积物有机质快速累积的主要原因。

(2) 抚仙湖表层沉积物 C/N 和 $\delta^{13}C$ 分别为 9.02~12.91 和 $-27.93‰$ ~ $-26.49‰$ ，沉积物柱芯 C/N 和 $\delta^{13}C$ 分别为 5.85~11.80 和 $-29.42‰$ ~ $-23.57‰$ 。

有机质 C/N 值与 $\delta^{13}C_{org}$ 的综合判别结果表明，抚仙湖沉积物有机质的最大贡献者为湖泊内源有机质，即藻类等水生植物，外源有机质输入对不同湖区沉积物有机质的贡献存在明显差异。南湖沉积物有机质 C/N 值偏高，表明其陆源有机质占比更高。

(3) 与大多数湖泊相反，抚仙湖沉积物柱芯 C/N 值从底部到表层逐步增大、而 $\delta^{13}C_{org}$ 则逐渐偏负，表明抚仙湖沉积物有机质中陆源有机质所占比例持续增加，与内源有机质相比，外源有机质输入增加更快，指示近三十年来抚仙湖流域人为活动逐步增强、流域侵蚀和水土流失加剧，应当引起高度重视：一方面，应削减各类污废水排放导致的营养盐输入，抑制水体富营养化趋势；另一方面，应采取切实有效措施控制流域水土流失，降低因土壤侵蚀导致的陆源有机质和营养盐输入。

参考文献 (References) :

Boutton T W. 1991. Stable carbon isotope ratios of natural materials: II. Atmospheric, terrestrial, marine, and freshwater environments. In: Coleman D C, Fry B, eds. Carbon isotope techniques. New York: Academic Press, 173-185

Bratkic A, Šturm M, Faganeli J, Ogrinc N. 2012. Semi-annual carbon and nitrogen isotope variations in the water column of Lake Bled, NW Slovenia. Biogeosciences, 9(1): 1-11

Chen J A, Wan G J, Wang F S, Zhang D D, Huang R G, Zhang F, Schmidt R. 2002. Environmental records of carbon in recent lake sediments. Science in China Series D: Earth Sciences, 45(10): 875-884

Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, McDowell W H, Tranvik L J, Striegl R G, Duarte C M, Kortelainen P, Downing J A, Middelburg J J, Melack J. 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. Ecosystems, 10(1): 172-185

Dean W E, Gorham E. 1998. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands. Geology, 26(6): 535-538

Liu W G, Li X Z, An Z S, Xu L M, Zhang Q L. 2013a. Total organic carbon isotopes: A novel proxy of lake level from Lake Qinghai in

- the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Chemical Geology*, 347: 153-160
- Liu W, Wu J L, Zeng H A, Ma L. 2013b. Geochemical evidence of human impacts on deep Lake Fuxian, southwest China. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 45: 1-6
- Meyers P A. 1994. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114 (3-4): 289-302
- Meyers P A, Ishiwatari R. 1993. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic Geochemistry*, 20(7): 867-900
- Ramaswamy V, Gaye B, Shirodkar P V, Rao P S, Chivas A R, Wheeler D, Thwin S. 2008. Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopic signatures in sediments from the Ayeyarwady (Irrawaddy) continental shelf, northern Andaman Sea. *Marine Chemistry*, 111(3-4): 137-150
- Schlacher T A, Wooldridge T H. 1996. Origin and trophic importance of detritus-Evidence from stable isotopes in the benthos of a small, temperate estuary. *Oecologia*, 106(3): 382-388
- Sofer Z. 1980. Preparation of Carbon Dioxide for Stable Carbon Isotope Analysis of Petroleum Fractions. *Analytical Chemistry*, 52(8): 1389-1391
- Tue N T, Hamaoka H, Sogabe A, Quy T D, Nhuan M T, Omori K. 2011. The application of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios as indicators of organic carbon sources and paleoenvironmental change of the mangrove ecosystem from Ba Lat Estuary, Red River, Vietnam. *Environmental Earth Sciences*, 64(5): 1475-1486
- Zeng H A, Wu J L. 2009. Sedimentary records of heavy metal pollution in Fuxian Lake, Yunnan Province, China: Intensity, history and sources. *Pedosphere*, 19(5): 562-569
- 陈传红. 2012. 近 200 年泸沽湖藻类沉积记录及其对气候变化的响应. 博士学位论文. 武汉: 华中师范大学
- 陈敬安, 万国江, 陈振楼, 黄荣贵. 1999. 洱海沉积物化学元素与古气候演化. *地球化学*, 28(6): 562-570
- 丁薇, 陈敬安, 杨海全, 宋以龙, 陶红波, 罗婧. 2016. 云南抚仙湖主要入湖河流有机碳来源辨识. *地球与环境*, 44(3): 290-296
- 冯慕华, 潘继征, 柯凡, 李文朝. 2008. 云南抚仙湖流域废弃磷矿区水污染现状. *湖泊科学*, 20(6): 766-772
- 高伟, 陈岩, 徐敏, 郭怀成, 谢阳村. 2013. 抚仙湖水质变化(1980~2011年)趋势与驱动力分析. *湖泊科学*, 25(5): 635-642
- 郭庆军, 王雨春, 朱光旭, Peters M, 杨俊兴, 魏荣菲, 田丽艳, 韩晓昆. 2015. 氮同位素研究城市湖泊沉积物有机质来源和迁移过程-以北京为例. *矿物岩石地球化学通报*, 34(3): 532-538
- 侯长定. 2001. 抚仙湖富营养化现状、趋势及其原因分析. *云南环境科学*, 20(3): 39-41
- 李键, 张维, 陈敬安, 朱正杰, 曾艳, 王敬富, 杨永琼, 杨海泉. 2011. 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. *地球与环境*, 39(1): 121-124
- 李荫玺, 陆娅, 刘红, 王云华, 王林. 2003. 抚仙湖浮游植物发展趋势分析. *云南环境科学*, 22(3): 34-35
- 吕明辉, 王红亚, 蔡运龙. 2007. 基于湖泊(水库)沉积物分析的土壤侵蚀研究. *水土保持通报*, 27(3): 36-41, 58
- 倪兆奎, 李跃进, 王圣瑞, 金相灿, 储昭升. 2011. 太湖沉积物有机碳与氮的来源. *生态学报*, 31(16): 4661-4670
- 秦俊, 杨浩, 张明礼, 谢标, 李婧, 孙盼盼, 王延华. 2015. 滇池流域宝象水库沉积物中有机碳的来源. *地理研究*, 34(1): 53-64
- 沈吉. 2009. 湖泊沉积研究的历史进展与展望. *湖泊科学*, 21(3): 307-313
- 万国江. 1988. 环境质量的地球化学原理. 北京: 中国环境科学出版社
- 王春雨, 郭庆军, 朱光旭, Peters M, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 田丽艳, 万鹰听. 2014. 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. *生态学杂志*, 33(3): 778-785
- 王毛兰, 赖建平, 胡珂图, 张丁苓, 赖劲虎. 2014. 鄱阳湖表层沉积物有机碳、氮同位素特征及其来源分析. *中国环境科学*, 34(4): 1019-1025
- 王苏明, 窦鸿身. 1998. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社
- 王小雷, 杨浩, 赵其国, 魏荣菲. 2010. 利用 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 和 ^{241}Am 计年法测算云南抚仙湖现代沉积速率. *湖泊科学*, 22(1): 136-142
- 王小雷, 杨浩, 丁兆运, 杨本俊, 张明礼. 2011. 云南抚仙湖近现代沉积速率变化研究. *地理学报*, 66(11): 1551-1561
- 王小雷, 杨浩, 顾祝军, 张明礼. 2014. 抚仙湖沉积物中营养盐和粒度垂向分布及相关性研究. *环境工程技术学报*, 4(5): 353-360
- 吴斌, 秦洁, 郭红, 吴献花. 2010. 抚仙湖北岸主要入湖河流对湖泊水质的影响. *玉溪师范学院报*, 26(4): 39-42
- 夏天翔, 潘继征, 刘雪华, 赵孟彬, 祁云宽, 熊飞, 徐力刚. 2008. 抚仙湖水体 NP 变化及其非点源污染特征. *农业环境科学学报*, 27(4): 1340-1345
- 徐敏, 董旭辉, 羊向东. 2014. 古湖沼学研究揭示湖泊生态系统服务变化的过程. *湖泊科学*, 26(3): 331-339
- 燕婷, 刘恩峰, 张恩楼, 李艳玲, 沈吉. 2016. 抚仙湖沉积物重金属时空变化与人为污染评价. *湖泊科学*, 28(1): 50-58
- 于志同, 王秀君, 赵成义, 兰海燕. 2015. 基于多指标分析的博斯腾湖表层沉积物有机碳来源. *湖泊科学*, 27(5): 983-990
- 张建萍, 杨树华, 王宝荣. 2004. 抚仙湖流域磷矿区主要植物群落水土保持效应研究. *西部林业科学*, 33(2): 76-80
- 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 1990. 抚仙湖. 北京: 海洋出版社
- 周德全. 2006. 湖泊沉积记录与过去全球变化. *矿物岩石地球化学通报*, 25(3): 260-265

(本文责任编辑: 龚超颖)