

## 过去 5000 a 以来抚仙湖沉积物有机质碳同位素的古环境指示意义\*

刘颖<sup>1,2</sup>, 孙惠玲<sup>1,2\*\*</sup>, 周晓娟<sup>1,2</sup>, 段立曾<sup>1,2</sup>, 李华勇<sup>1,2</sup>, 张虎才<sup>1,2</sup>

(1: 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650500)

(2: 云南师范大学高原湖泊生态与全球变化重点实验室, 昆明 650500)

**摘要:** 通过测定抚仙湖沉积物全有机样品的稳定碳同位素组成( $\delta^{13}C_{org}$ )、总氮、总有机碳含量指标并计算碳氮比值, 对过去 5000 a 以来抚仙湖沉积物有机质来源、 $\delta^{13}C_{org}$  的影响因素及其所指示的古环境意义进行分析. 结果表明: 在过去的 5000 cal a BP 里, 抚仙湖沉积物有机质主要来源发生明显变化, 沉积物有机质输入由内源水生生物和陆生  $C_3$  植物共同输入(5000—2300 cal a BP 阶段)转变为以内源沉水植物、浮游植物和藻类等输入为主(2000 cal a BP 至今阶段); 有机质来源发生变化是造成抚仙湖沉积物  $\delta^{13}C_{org}$  值变化的主要原因; 2000 cal a BP 以来, 陆源有机质输入的锐减与人类活动的影响密切相关; 在 2300—2000 cal a BP 阶段, 抚仙湖沉积物  $\delta^{13}C_{org}$  值的快速变化可能指示了抚仙湖流域的古环境在这一时期经历了快速变化的气候事件.

**关键词:** 抚仙湖; 稳定碳同位素; 碳氮比值; 有机质来源; 古环境

## Paleoenvironmental significance of organic carbon isotope in lacustrine sediments in Lake Fuxian during the past 5 ka

LIU Ying<sup>1,2</sup>, SUN Huiling<sup>1,2\*\*</sup>, ZHOU Xiaojuan<sup>1,2</sup>, DUAN Lizeng<sup>1,2</sup>, LI Huayong<sup>1,2</sup> & ZHANG Hucui<sup>1,2</sup>

(1: College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Plateau Lake Ecology & Global Change, Yunnan Normal University, Kunming 650500, P.R.China)

**Abstract:** We measured several indexes including the stable organic carbon isotope ( $\delta^{13}C_{org}$ ), the total nitrogen content, the total organic carbon content and the ratio of carbon and nitrogen content of bulk sediments in Lake Fuxian to exploring the sources of organic matters in sediments and the paleoenvironmental significance of  $\delta^{13}C_{org}$  during the last 5 ka. The results showed the organic matter inputs from both the terrestrial  $C_3$  plants and the aquatic organisms as the main source to the lake sediments have greatly changed during the period of 5000–2300 cal a BP, and changed to the only aquatic input (submerged plants, phytoplankton and algae) since 2000 cal a BP.  $\delta^{13}C_{org}$  values of bulk sediments in Lake Fuxian were mainly affected by different organic matter inputs. Rapid changes of the  $\delta^{13}C_{org}$  values during the stage of 2300–2000 cal a BP may indicate that the paleoenvironment of Lake Fuxian basin has experienced a rapid climate event.

**Keywords:** Lake Fuxian; stable carbon isotope; carbon and nitrogen ratio; organic matter source; palaeoenvironment

湖泊沉积物能够完整记录地质历史时期区域气候、植被以及人类活动的演化轨迹<sup>[1]</sup>, 是古环境、古气候变迁的良好载体, 也是全球变化研究的重要地质档案. 由于湖泊沉积物中的有机质是外源陆生植物输入和内源水生植物输入的集合, 从而能够间接指示历史时期湖泊及流域内的有机质贡献<sup>[2-7]</sup>、植被类型<sup>[7-8]</sup>和环境变迁<sup>[5,9-10]</sup>. 因此, 1960s 以来, 湖泊沉积物全有机碳同位素( $\delta^{13}C_{org}$ ) 逐渐成为古环境变化研究中的一个重要指标<sup>[2-4,11]</sup>. 近些年来, 诸多学者利用  $\delta^{13}C_{org}$  指标并结合氮、氢、锶、铅等同位素<sup>[12-14]</sup>、岩性特征<sup>[5-6,9,13]</sup>、孢粉含量<sup>[7,15-16]</sup>以及  $\alpha$  纤维素碳同位素组成<sup>[15]</sup> 等代用指标对我国末次冰期以来北方地区和南方地区的古环境变化进

\* 国家自然科学基金项目(41201203)、云南省高端人才引进项目(2010CI111)和湖泊沉积与环境变化云南省创新团队项目(2010CI)联合资助. 2016-08-09 收稿; 2016-09-02 收修改稿. 刘颖(1992~), 女, 硕士研究生; E-mail: liuying18mail@163.com.

\*\* 通信作者; E-mail: huilingsun07@hotmail.com.

行了重建. 结果表明,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  指标除了受湖水化学性质(pH 值、水的硬度等)<sup>[4,17]</sup>、湖泊有机生产力<sup>[5,18-19]</sup>、大气中  $\text{CO}_2$  浓度<sup>[6,20]</sup>、流域水文特征<sup>[21]</sup>、沉积环境<sup>[21]</sup> 以及沉积物的后期降解<sup>[22]</sup> 等因素影响外, 主要受到有机质来源<sup>[10-11,23-24]</sup> 及气候因素(主要是温度和降水)变化<sup>[25-27]</sup> 的影响. 在用湖泊沉积物有机碳同位素解释某一地区古环境指示意义的时候, 由于不同区域、不同湖泊系统对不同影响因子的响应差异, 使得我们在利用湖泊沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  指标解译古环境变迁时存在多解性<sup>[6]</sup>. 例如, Stuiver<sup>[4]</sup> 对位于全球不同纬度的 12 个湖泊沉积物有机质  $^{13}\text{C}$  值的变化特征进行统计后认为: 湖泊有机质  $^{13}\text{C}$  值随纬度的升高而降低. Nakai<sup>[28]</sup> 对处于中低纬度的日本琵琶湖进行研究后认为有机质碳同位素变化与温度存在相关关系. 张恩楼等<sup>[29]</sup> 对我国青海湖的研究也证实了这一观点. 刘强等<sup>[6-7]</sup> 认为我国北方的湖泊有机质碳同位素受有效降水影响, 可以反映有效湿度的变化. 吕厚远等<sup>[30]</sup> 对青藏高原的  $\text{C}_3$ 、 $\text{C}_4$  类植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值进行研究后认为纬度和海拔对湖泊沉积物中的  $\delta^{13}\text{C}$  值有影响. 因此, 在利用湖泊沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  指标对某一地区的古环境气候意义进行解释时要结合其他指标共同解译.

位于我国西南地区的抚仙湖是典型的断陷型高原深水寡营养湖泊, 广布的喀斯特地质环境使得流域范围内的生态环境极其脆弱, 并且抚仙湖水位自 2009 年以来持续下降, 加之周边大规模的商业开发, 使得湖泊长期建立起来的环境平衡遭到急剧破坏. 科学地规划利用湖泊资源已成为迫在眉睫的一项任务, 这就需要我们了解抚仙湖地质历史时期的生态环境变化过程. 目前抚仙湖已开展的研究工作主要集中于近现代或百年时间尺度<sup>[31-35]</sup>, 缺乏长尺度的、高分辨率的研究工作. 本文试图在准确定年的基础之上, 利用抚仙湖沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  指标和有机质含量等指标对抚仙湖流域中晚全新世以来的古环境变化进行研究, 为深入理解高原湖泊演变过程及基于全球变暖背景下湖泊演化趋势提供理论依据.

## 1 研究区域概况

抚仙湖(24°21'28"~24°38'00"N, 102°49'12"~102°57'26"E)地处云贵高原东部, 属珠江流域南盘江水系, 是我国地壳断陷形成的第二深水湖泊. 湖面海拔 1721 m, 跨玉溪市的澄江、江川和华宁三县, 南隔野牛大山与江川的星云湖相连, 两湖相距 2.1 km<sup>[36]</sup>. 湖泊面积 211 km<sup>2</sup>, 最大水深 155 m, 平均水深 89.6 m, 是典型的深水、断陷、高原湖泊. 抚仙湖流域属中亚热带低纬高原季风气候, 受西南季风的影响显著, 年平均气温约 15.6°C, 年降雨量 800~1100 mm, 雨季旱季分明<sup>[36]</sup>. 湖泊水源主要靠降雨和四周山间小溪汇集补给, 一年最高水位多出现在 9—12 月, 最低水位出现在 5、6 月份<sup>[37]</sup>. 由于抚仙湖是在岩石峡谷中发育而成的南北向断陷溶蚀湖泊, 大部分的湖岸为陡峭的岩石, 形如倒置葫芦状, 两端大、中间小, 北部宽而深, 南部窄而浅, 中呈喉扼形. 流域植被主要分为两大类: 自然植被和人工植被. 其中自然植被又包括了半湿润常绿阔叶林、半湿润常绿阔叶灌丛、云南松林、华山松林、灌草丛; 人工植被包括了水田栽培植被、旱地栽培植被、经济林等<sup>[38]</sup>. 抚仙湖的水生植物以沉水植物为主, 水面基本无自然生长的大型挺水植物分布<sup>[39]</sup>.

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与处理

2013 年 8 月, 使用本实验室 UWITEC 平台钻(奥地利)和可定位漂浮平台在抚仙湖深水区(西南侧水深约为 85 m 处, 图 1)进行湖泊岩芯钻取, 获得短钻孔(FXH-6), 岩芯经校正后总长度为 245 cm. 切割样品管之后对样品进行 1 cm 间隔分样, 其中测定沉积物全有机样品的稳定碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )、总氮(TN)含量、总有机碳(TOC)含量指标的样

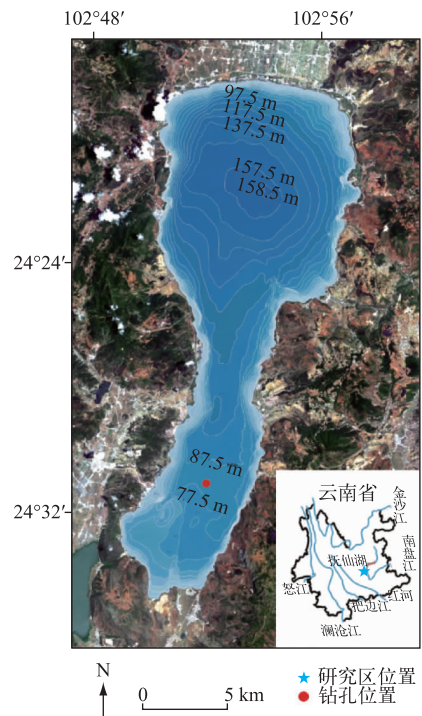


图 1 抚仙湖地理位置和等深线图

Fig.1 Location and bathymetry of Lake Fuxian

品是 2 cm 间隔取样. FXH-6 孔的年代测定通过 AMS<sup>14</sup>C 测年获得. 7 个测年样品分别为 3、56、99、149、203 和 244 cm 处的 6 个全有机沉积物样品和 1 个现代沉水植物样品, 由美国 BETA 实验室测定, <sup>14</sup>C 结果采用 Talma 等<sup>[40]</sup>的计算方法, 利用 INTCAL 13 曲线<sup>[41]</sup>进行日历年校正获得.

## 2.2 研究方法

所有样品均进行预处理: 样品冷冻干燥后用玛瑙研钵研磨粉碎, 然后用过量低浓度稀盐酸 (10%) 浸泡去除碳酸盐, 再用去离子纯水洗至中性并低温烘干、研磨, 最后过 0.125 mm (120 目) 筛并装入锡箔纸袋备用. TOC、TN 含量采用兰州大学化学化工学院 EA1110 元素分析仪测定.  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  采用兰州大学西部环境教育部重点实验室的 Flash EA 1112 型元素分析仪 (Thermo Electron, USA) 与 Delta Plus 气体质谱仪 (Thermo Finnigan, German) 联用测定,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值的计算公式为<sup>[42]</sup>:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left[ \left( \frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{\text{sample}} / \left( \frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{\text{standard}} - 1 \right) \right) \times 1000 \right] \text{‰ (PDB)} \quad (1)$$

## 3 结果分析

### 3.1 年代标尺的建立

抚仙湖测年样品中的 6 个湖泊沉积物全有机样品和 1 个现代沉水植物样品的测年结果如表 1 所示, 基于课题组尚未发表的 <sup>210</sup>Pb 测年结果已知 FXH-6 岩芯钻孔 3 cm 处约为 1950 年, 我们将 3 cm 处沉积物样品和湖泊内沉水植物样品进行 AMS<sup>14</sup>C 测年, 其 <sup>14</sup>C 年龄分别为 160 和 106.7 a BP, 结果表明抚仙湖碳库效应几乎可以不计. 通过线性内插和外延的计算方法, 抚仙湖 FXH-6 岩芯钻孔的年龄-深度关系如图 2 所示, 平均沉积速率约为 0.48 mm/a, 岩芯最底部 245 cm 处的校正年龄约为 5011±30 cal a BP.

表 1 抚仙湖 FXH-6 岩芯 AMS 放射性碳年代测定  
Tab.1 AMS radiocarbon dates from core FXH-6 in Lake Fuxian

深度/cm	测定材料	$\delta^{13}\text{C}/$ (‰, VPDB)	<sup>14</sup> C 年代/ a BP	误差/ ±a	校正年代/ (cal a BP-2σ range)
*	现代沉水植物	-23.9	106.7	0.3	-63(106.7%)
3	全有机沉积物	-26.5	160	30	8(98.0%)
56	全有机沉积物	-24.8	1940	30	1825(78.5%)
99	全有机沉积物	-25.2	2080	30	1955(77.2%)
149	全有机沉积物	-27.2	2340	30	2360(74.7%)
203	全有机沉积物	-27.5	3380	30	3695(65.7%)
244	全有机沉积物	-28.5	4490	30	4980(57.2%)

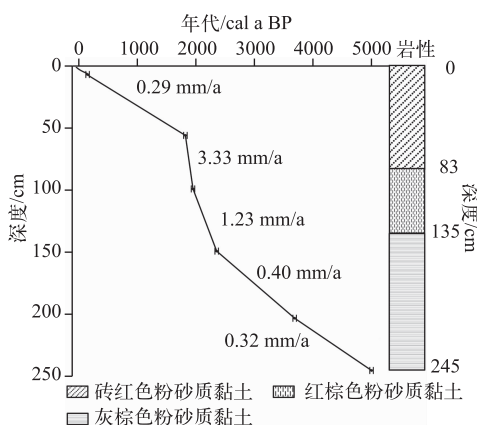


图 2 抚仙湖 FXH-6 岩芯钻孔的年龄-深度关系

Fig.2 The age-depth curve of core FXH-6 in Lake Fuxian

### 3.2 沉积物代用指标重建结果

抚仙湖岩芯钻孔样品 TOC 含量、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值、C/N 比值以及 TN 含量指标均表现出自 5000 cal a BP 以来逐渐减少的趋势 (图 3). 其中 TOC 含量在 0.7%~6.0% 之间变化 (图 3a), 平均值为 2.8%;  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  的变化范围为 -28.3‰~-24.4‰ (图 3b), 平均值为 -26.5‰; C/N 比值的 变化范围为 8.2~15.3 (图 3c), 平均值为 12.3; TN 含量处于 0.06%~0.44% 之间 (图 3d), 平均值为 0.21%. 由图 3 看出, 抚仙湖沉积物上下两段样品各指标的数值相对比较稳定; 而在中间 300 a 里变化大. 根据沉积物的变化可将沉积序列分为 5000—2300 cal a BP、2300—2000 cal a BP 和 2000 cal a BP 至今 3 个阶段. 每部分 TOC 含量、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、C/N 比值和 TN 含量的特征分别如下:

在 5000—2300 cal a BP 阶段, 岩芯 TOC 含量变化

范围为 3.5%~6.0%, 平均值为 4.8% (图 3a), 波动相对较大, 但稳定在较高值;  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  的变化范围为  $-28.3\text{‰}$ ~ $-27.0\text{‰}$ , 平均值为  $-27.7\text{‰}$ , 其值处于相对稳定的状态 (图 3b); C/N 比值的范围在 13.0~15.3 之间, 平均值为 14.0 (图 3c); TN 值不稳定, 但其值总体偏正, 处于 0.23%~0.44% 之间, 平均值为 0.34% (图 3d).

在 2300—2000 cal a BP 阶段的 300 a 时间里, 各项指标在相对较短的时期内快速变化, 总体上呈下降趋势. TOC 含量自 4.5% 降低为 1.0%, 下降了 3.5% (图 3a);  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  由  $-27.3\text{‰}$  变化至  $-25.1\text{‰}$ , 下降了 2.2‰ (图 3b); C/N 由 14.6 急剧降低为 9.0, 变化了 5.6 (图 3c); TN 含量由 0.31% 降低为 0.09%, 下降 0.22% (图 3d).

2000 cal a BP 至今, TOC 含量偏负, 没有明显波动, 其值处于 0.7%~1.5% 范围之内, 平均值为 1.0% (图 3a);  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  在  $-26.8\text{‰}$ ~ $-24.4\text{‰}$  之间波动, 平均值为  $-25.4\text{‰}$  (图 3b); 相对于 5000—2300 cal a BP, 该阶段 C/N 比值较低, 变化范围为 8.2~12.7, 平均值为 10.3 (图 3c); TN 含量与 TOC 含量的波动相似, 变化范围为 0.06%~0.15%, 平均值约为 0.10% (图 3d).

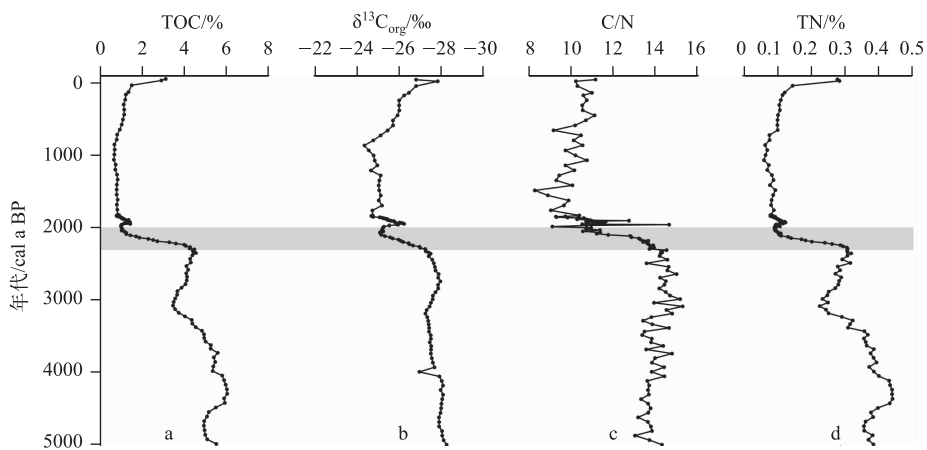


图 3 抚仙湖沉积物中 TOC 含量(a)、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  (b)、C/N 比值(c)和 TN 含量(d)的变化特征 (阴影部分为 2300—2000 cal a BP 阶段)

Fig.3 Characteristics of the sediment parameters in the Lake Fuxian: TOC content(a),  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  content(b), C/N ratios (c) and TN content(d) (the shadow section represents 2300—2000 cal a BP)

## 4 讨论

### 4.1 抚仙湖沉积物有机质来源

沉积物中 TOC 含量是描述沉积物中有机质输入多少的基本参数<sup>[23]</sup>, 而湖泊沉积物有机质的输入可分为外源陆生植物输入和内源水生生物输入<sup>[10]</sup>. 余俊清等<sup>[24]</sup>的研究表明, C/N 比值可用于判断湖泊沉积物有机质是源于湖泊自生还是湖泊以外; 通常湖泊自生植物的 C/N 比值仅为 5~12, 陆生植物的 C/N 比值约为 20~30, 甚至高达 50. 抚仙湖沉积物的 TOC 含量 (图 3a) 和 C/N 比值 (图 3c) 在 5000—2300 cal a BP 阶段明显比 2000 cal a BP 至今阶段的值高, 二者的变化趋势呈现自 5000 cal a BP 以来逐渐减少的趋势, 尤其是在 2300—2000 cal a BP 阶段, TOC 含量 (图 3a) 和 C/N 比值 (图 3c) 分别减少了 3.5% 和 5.6. 这可能与陆生植被覆盖度降低、陆源有机质输入量减少有关, 进而导致 TOC 含量减少了一半以上. 在 5000—2300 cal a BP 阶段, C/N 比值几乎都大于 12, 说明湖泊沉积物有机质来源为内源水生植物和外源陆生植物混合输入模式; 而在 2000 cal a BP 至今这一阶段, C/N 平均值约为 10, 说明湖泊沉积物有机质来源以内源水生植物输入为主; 表明 2300—2000 cal a BP 阶段的 300 a 里, 湖泊沉积物有机质来源从内源水生植物和陆源的混合输入模式迅速转变成成为内源水生植物输入占优势的模式, 有机质的主要来源发生了巨大变化.

### 4.2 抚仙湖沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 指标的影响因素

湖泊沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  的变化与外源陆生植物输入和内源水生生物输入密切相关. 由于陆源输入植物中  $\text{C}_3$

和  $C_4$  植物的光合作用固碳方式不同,使得  $C_3$  和  $C_4$  植物的生态习性和碳同位素组成存在明显差异<sup>[42]</sup>. 通常陆源  $C_3$  植物的  $\delta^{13}C$  值在  $-37\text{‰}$ ~ $-24\text{‰}$  之间,平均值约为  $-27\text{‰}$ ;  $C_4$  植物的  $\delta^{13}C$  值在  $-19\text{‰}$ ~ $-9\text{‰}$  之间,平均值约为  $-13\text{‰}$ <sup>[43]</sup>. 湖泊内的水生植物可分为挺水植物、沉水植物、浮游植物及藻类 3 大类型,由于它们进行光合作用所利用的碳源不同,其  $\delta^{13}C$  组成比较复杂且分布范围较大. 挺水植物一般直接利用大气  $CO_2$  进行光合作用,因此具有陆生  $C_3$  植物的  $\delta^{13}C$  值分布特征,可偏负至  $-30\text{‰}$ ~ $-24\text{‰}$ ; 沉水植物利用湖水中的  $HCO_3^-$  作为碳源,因此沉水植物的  $\delta^{13}C$  值比挺水植物的  $\delta^{13}C$  值偏正,变化范围为  $-20\text{‰}$ ~ $-12\text{‰}$ ,平均约为  $-15\text{‰}$ ; 浮游植物和藻类如果利用与大气  $CO_2$  保持平衡的湖水中溶解的  $CO_2$  作为光合作用的碳源时,其  $\delta^{13}C$  值与陆生  $C_3$  植物的  $\delta^{13}C$  值接近,可偏负至  $-35.5\text{‰}$ ; 但如果湖水中溶解  $CO_2$  严重亏损,它们则利用湖水中的  $HCO_3^-$  作为碳源,其  $\delta^{13}C$  值将显著偏正,如某些藻类的  $\delta^{13}C$  值可达  $-24\text{‰}$ ~ $-12\text{‰}$ <sup>[42]</sup>. 抚仙湖受湖岸陡峻、滨岸水深较大等地理环境特征影响,水生植物以沉水植物为主,几乎无明显的挺水和浮水植物群落<sup>[44]</sup>. 所以内源水生植物对沉积物有机质的贡献主要来源于沉水植物和浮游植物、藻类. 在 5000—2300 cal a BP 阶段,抚仙湖沉积物  $\delta^{13}C_{org}$  的平均值为  $-27.7\text{‰}$ ,间接指示陆源  $C_3$  植物的大量输入,与 TOC 含量、C/N 比值结果显示的该阶段沉积物中有机质来源为外源和内源共同输入结果一致; 在 2000 cal a BP 至今阶段,抚仙湖沉积物  $\delta^{13}C_{org}$  的平均值为  $-25.4\text{‰}$ ,间接印证了 TOC 含量、C/N 比值结果,即该阶段沉积物中有机质来源以内源输入为主,随着陆生  $C_3$  植物输入的减少,沉水植物和浮游植物、藻类成为该阶段有机质的主要来源,使得沉积物  $\delta^{13}C_{org}$  值相对偏正. 因此有机质来源可能是抚仙湖沉积物  $\delta^{13}C_{org}$  的主要影响因子.

#### 4.3 抚仙湖沉积物 $\delta^{13}C_{org}$ 值指示的古环境意义

地处低纬亚热带地区的抚仙湖,其沉积物  $\delta^{13}C_{org}$  值 ( $-28.3\text{‰}$ ~ $-24.4\text{‰}$ ) 自 5000 cal a BP 以来呈现阶段性变正的趋势,  $\delta^{13}C_{org}$  平均值由 5000—2300 cal a BP 阶段的相对偏负 ( $-27.7\text{‰}$ ) 转变为 2000—0 cal a BP 阶段的相对偏正 ( $-25.4\text{‰}$ ), TOC 含量和 C/N 比值结果也呈现快速减少的变化趋势. 在 2300—2000 cal a BP 阶段的 300 a 里抚仙湖沉积物各指标都发生了急剧变化. 沉积物有机质来源从内源水生植物和陆源  $C_3$  植物混合输入模式向内源水生植物输入为主过渡,也间接说明在过去 5000 cal a BP 里抚仙湖流域内的陆生植被覆盖度明显降低. 通常,在中晚全新世阶段,不适宜陆生植物生长的干旱少雨气候和人类活动扰动是影响陆生植被覆盖度减少的两个主要因素. 那么,是什么原因造成了抚仙湖流域有机质输入的快速变化呢? 目前西南地区已经有大量的中晚全新世以来的湖泊沉积孢粉重建记录,诸如星云湖<sup>[45]</sup>、云南青海火山湖<sup>[46]</sup>、天才湖<sup>[47]</sup>、泸沽湖<sup>[48]</sup>、哈里谷<sup>[49]</sup>和洱海<sup>[50]</sup>. 虽然年代误差的问题无法避免,但是上述湖泊的孢粉重建结果均指示各流域内晚全新世(时间节点分布在 3500—2000 cal a BP 之间)孢粉组合发生明显变化,针叶树、常绿和阔叶树孢粉含量迅速减少,而与人类活动相关的禾本科植物孢粉含量迅速增加. 说明晚全新世以来人类活动显著影响着流域内的地表植被. 抚仙湖与星云湖相邻,势必也会受到人类活动影响. 而且,位于抚仙湖西南岸的李家山遗址<sup>[51]</sup>,发掘出大量西汉至东汉时期的青铜器,也证明抚仙湖流域在约 2000 a BP 时期就已经受到了滇文化的影响,即,2000—0 cal a BP 阶段,抚仙湖流域的陆源有机质来源锐减与人类活动密切相关. 而在 2300—2000 cal a BP 阶段  $\delta^{13}C_{org}$  和 TOC 含量指标的快速变化尚且难以判定是人类活动还是气候变化所致. 不过,课题组的另一温度重建结果(尚未发表)表明该阶段存在快速降温事件. 洱海沉积记录<sup>[52]</sup>也显示 2200 a BP 是气候变化的一个转折点. 因此,我们初步推断气候快速变化是造成 2300—2000 cal a BP 阶段抚仙湖沉积物陆源有机质来源锐减的主要原因.

## 5 结论

1) 在过去的 5000 cal a BP 里,抚仙湖沉积物有机质主要来源发生明显变化. 在 5000—2300 cal a BP 阶段,抚仙湖沉积物中有机质由内源水生生物和陆生  $C_3$  植物共同输入,二者所占比例相差不大; 在 2300—2000 cal a BP 的 300 a 间抚仙湖沉积物有机质来源正发生快速变化,陆源输入量明显减少,致使在 2000 cal a BP 至今抚仙湖沉积物中有机质以内源输入的沉水植物、浮游植物和藻类为主.

2) 有机质来源发生变化是造成抚仙湖沉积物  $\delta^{13}C_{org}$  值变化的主要因素,而大气  $CO_2$  和温度对研究区湖泊沉积物的影响相对较小. 因此沉积物  $\delta^{13}C_{org}$  值的波动变化对抚仙湖沉积物有机质来源具指示意义.

3)5000 cal a BP 以来,抚仙湖流域陆生植被覆盖度在 2300 cal a BP 后逐渐减少.其中,2300—2000 cal a BP 阶段陆源有机质输入的锐减可能是因为经历了快速气候变化事件;而 2000 cal a BP 以来,陆生植被覆盖度的减少与人类活动的影响密切相关.

## 6 参考文献

- [ 1 ] Lu Yuehan, Sun Yongge, Weng Huanxin. Lacustrine sediments as a record of change of regional climate and environment. *Geochimica*, 2004, **33**(1): 20-28. [卢粤晗,孙永革,翁焕新.湖泊沉积有机质的地球化学记录与古气候古环境重建.地球化学,2004,**33**(1): 20-28.]
- [ 2 ] Oana S, Deevey ES. Carbon 13 in lake waters, and its possible bearing on paleolimnology. *American Journal of Science*, 1960, **258**: 253-272.
- [ 3 ] Degens ET. Biogeochemistry of stable carbon isotopes. In: Eglinton G, Murphy MTJ eds. *Organic geochemistry: Methods and results*. Berlin: Springer-Verlag, 1969: 304-329.
- [ 4 ] Stuiver M. Climate versus change in  $^{13}\text{C}$  content of the organic component of lake sediments during the Late Quaternary. *Quaternary Research*, 1975, **5**: 251-262.
- [ 5 ] Zhao Liyuan, Lu Huayu, Zhang Enlou *et al.* Lake level and paleoenvironment variations in Yitang lake (northwestern China) during the past 23 ka revealed by stable carbon isotopic composition of organic matter of lacustrine sediments. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(1): 172-179. [赵丽媛,鹿化煜,张恩楼等.敦煌伊塘湖沉积物有机碳同位素揭示的末次盛冰期以来湖面变化.第四纪研究,2015,**35**(1): 172-179.]
- [ 6 ] Liu Qiang, Gu Zhaoyan, Liu Jiaqi *et al.* Bulk organic carbon isotopic record of Huguangyan Maar Lake, Southeastern China and its paleoclimatic and paleoenvironmental significance since 62 ka BP. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, **25**(2): 115-126. [刘强,顾兆炎,刘嘉麒等.62 ka BP 以来湖光岩玛珥湖沉积物有机碳同位素记录及古气候环境意义.海洋地质与第四纪地质,2005,**25**(2): 115-126.]
- [ 7 ] Liu Qiang, Li Qian, Wang Luo *et al.* Stable carbon isotope record of bulk organic matter from a sediment core at Moon lake in the middle part of the Daxing'an mountain range, Northeast China during the last 21 ka. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(6): 1069-1077. [刘强,李倩,旺罗等.21 ka BP 以来大兴安岭中段月亮湖沉积物全岩有机碳同位素组成变化及其古气候意义.第四纪研究,2010,**30**(6): 1069-1077.]
- [ 8 ] Yin Yong, Fang Nianqiao, Hu Chaoyong *et al.* Characteristics of organic carbon isotopes and their paleoclimatic implications inferred from the lacustrine deposits in the last 57,000 years at Napa Sea, Zhongdian County, Yunnan Province. *Quaternary Sciences*, 2001, **21**(3): 277-277. [殷勇,方念乔,胡超涌等.云南中甸纳帕海 57000 年来的有机质碳同位素特征及其古气候意义.第四纪研究,2001,**21**(3): 277-277.]
- [ 9 ] Jin Fang, Huang Junhua, Tang Xinyan *et al.* Characteristics of compositions of  $\delta(^{13}\text{C}_{\text{org}})$  in Liangzi Lake sediment and its paleoclimatic implications. *Geological Science and Technology Information*, 2007, **26**(3): 13-18. [金芳,黄俊华,汤新燕等.梁子湖沉积物有机质碳同位素特征及其古气候指示意义.地质科技情报,2007,**26**(3): 13-18.]
- [ 10 ] Wu Jinglu, Wang Sumin. Climate versus changes in  $\delta^{13}\text{C}$  values of the organic matter in lake sediments. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, **16**(2): 103-109. [吴敬禄,王苏民.湖泊沉积物中有机质碳同位素特征及其古气候.海洋地质与第四纪地质,1996,**16**(2): 103-109.]
- [ 11 ] Pearson FJ Jr, Coplen TB. Stable isotopes of lakes. In: Lerman A ed. *Lakes: chemistry, geology, physics*. New York: Springer-Verlag, 1978: 235-236.
- [ 12 ] Liu Min, Hou Lijun, Xu Shiyuan *et al.* Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers to source organic matter in the Yangtze Estuary. *Acta Geographica Sinica*, 2004, **59**(6): 918-926. [刘敏,侯立军,许世远等.长江口滩有机质来源的 C、N 稳定同位素示踪.地理学报,2004,**59**(6): 918-926.]
- [ 13 ] Zhang Chengjun, Chen Fahu, Shang Huaming *et al.* The paleoenvironmental significance of organic carbon isotope in lacustrine sediments in the arid China: An example from Sanjiaocheng palaeolake in Minqin. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(1): 88-94. [张成君,陈发虎,尚华明等.中国西北干旱湖泊沉积物中有机碳同位素组成的环境意义——以民勤盆地三角城古湖泊为例.第四纪研究,2004,**24**(1): 88-94.]
- [ 14 ] Chen Yuwei, Gui Xuntang, Wei Gangjian *et al.* C, O, Sr and Pb isotope geochemistry of sediment core NG93-1 from Maxwell bay, west antarctic, and their paleoenvironmental implications. *Geochimica*, 1997, **26**(3): 1-11. [陈毓蔚,桂训唐,韦刚健等.西南极长城湾 NG93-1 沉积柱样碳、氧、锶、铅同位素地球化学研究及其古环境意义.地球化学,1997,**26**(3): 1-11.]

- [15] Zhou Bin, Wali Guzailinuer, France PETERSE *et al.* Organic carbon isotope and molecular fossil records of vegetation evolution in central Loess Plateau since 450 kyr. *Science China: Earth Sciences*, 2016, **46**(4): 509-518. [周斌, 古再丽努尔·外力, France PETERSE 等. 黄土高原中部 450 ka 以来植被演化的有机碳同位素与分子化石记录. 中国科学: 地球科学, 2016, **46**(4): 509-518.]
- [16] Liu Quanyu, Lu Huahuang, Li Xiaoqiang *et al.* A tentatively quantitative reconstruction of palaeoprecipitation and palaeovegetation for the Banpo Neolithic site, Xian (China). *Archaeology and Cultural Relics*, 2007, **1**: 107-112. [刘全玉, 鹿化煌, 李小强等. 利用孢粉和有机质碳同位素重建半坡人时期古环境再探. 考古与文物, 2007, **1**: 107-112.]
- [17] Zhang Chengjun, Chen Fahu, Shi Qi *et al.* Carbon isotopic records of lake organic matter during Holocene climatic variations in the arid-semiarid areas of northwest China: Taking Sanjiaocheng in the drainage area of the Shiyang River as an example. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, **20**(4): 93-97. [张成君, 陈发虎, 施祺等. 西北干旱区全新世气候变化的湖泊有机质碳同位素记录——以石羊河流域三角城为例. 海洋地质与第四纪地质, 2000, **20**(4): 93-97.]
- [18] Aravena R, Wagner BG, MacDonald GM *et al.* Carbon isotope composition of lake sediments in relation to lake productivity and radio carbon dating. *Quaternary Research*, 1992, **37**(3): 333-345.
- [19] Brenner M, Whitmore TJ, Curtis JH *et al.* Stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) signatures of sedimented organic matter as indicators of historic lake trophic state. *Journal of Paleolimnology*, 1999, **22**(2): 205-221.
- [20] Meyers PA, Horie S. An organic carbon isotopic record of glacial-postglacial change in atmospheric  $\text{pCO}_2$  in the sediments of Lake Biwa, Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1993, **105**: 171-178.
- [21] Wu Jinglu, Wang Sumin, Shen Ji. Informations of climate and environment deduced from the organic matter  $\delta^{13}\text{C}$  of lacustrine sediments. *J Lake Sci*, 1996, **8**(2): 113-118. DOI: 10.18307/1996.0204. [吴敬禄, 王苏民, 沈吉. 湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  所揭示的环境气候信息. 湖泊科学, 1996, **8**(2): 113-118.]
- [22] Meyers PA, Eadie BJ. Sources, degradation and recycling of organic matter associated with sinking particles in Lake Michigan. *Organic Geochemistry*, 1993, **20**(1): 47-56. DOI: 10.1016/0146-6380(93)90080-U.
- [23] Shen Ji, Xue Bin, Wu Jinglu *et al.* eds. Lake sediments and environmental evolution. Beijing: Science Press, 2010: 242-243. [沈吉, 薛滨, 吴敬禄等. 湖泊沉积与环境演化. 北京: 科学出版社, 2010: 242-243.]
- [24] Yu Junqing, Wang Xiaoyan, Li Jun *et al.* Palaeoenvironmental interpretations on organic carbon isotopic records from lake sediments: A critique. *J Lake Sci*, 2001, **13**(1): 72-78. DOI: 10.18307/2001.0111. [余俊清, 王小燕, 李军等. 湖泊沉积有机碳同位素与环境变化的研究进展. 湖泊科学, 2001, **13**(1): 72-78.]
- [25] Krishnamurthy RV, Bhattacharya SK, Kusumgar S. Palaeoclimatic changes deduced from  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  and C/N ratios of Karewa lake sediments, India. *Nature*, 1986, **323**: 150-152.
- [26] Talbot MR, Livingstone DA. Hydrogen index and carbon isotopes of lacustrine organic matter as lake level indicators. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1989, **70**: 121-137.
- [27] Talbot MR, Johannessen T. A high resolution palaeoclimatic record for the last 27500 years in tropical West Africa from the carbon and nitrogen isotopic composition of lacustrine organic matter. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, **110**: 23-37.
- [28] Nakai N. Carbon isotopic variation and paleoclimate of sediments from lake Biwa. *Proceeding of the Japan Academy*, 1972, **48**: 516-521.
- [29] Zhang Enlou, Shen Ji, Xia Weilan *et al.* Environmental records from organic carbon and its isotope of Qinghai lake sediment. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, **22**(2): 105-108. [张恩楼, 沈吉, 夏威岚等. 青海湖沉积物有机碳及其同位素的气候环境信息. 海洋地质与第四纪地质, 2002, **22**(2): 105-108.]
- [30] Lü Houyuan, Gu Zhaoyan, Wu Naiqin *et al.* Effect of altitude on the organic carbon isotope composition of modern surface soils from Qinghai-Xizang plateau. *Quaternary Sciences*, 2001, **21**(5): 399-406. [吕厚远, 顾兆炎, 吴乃琴等. 海拔高度的变化对青藏高原表土  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  的影响. 第四纪研究, 2001, **21**(5): 399-406.]
- [31] Li Yinxi, Liu Hong, Lu Ya *et al.* Preliminary studies on eutrophication in Fuxian lake. *J Lake Sci*, 2003, **15**(3): 285-288. DOI: 10.18307/2003.0315. [李荫玺, 刘红, 陆娅等. 抚仙湖富营养化初探. 湖泊科学, 2003, **15**(3): 285-288.]
- [32] Pan Jizheng, Xiong Fei, Li Wenchao *et al.* Spatial-temporal dynamic changes of the water transparency and their influencing factors in Lake Fuxian, Yunnan Province. *J Lake Sci*, 2008, **20**(5): 681-686. DOI: 10.18307/2008.0519. [潘继征, 熊飞, 李文朝等. 云南抚仙湖透明度的时空变化及影响因子分析. 湖泊科学, 2008, **20**(5): 681-686.]

- [33] Pan Jizheng, Xiong Fei, Li Wenchao *et al.* Community structure and spatial distribution of crustacean zooplankton in Lake Fuxian, Yunnan, China. *J Lake Sci*, 2009, **21**(3): 408-414. DOI 10.18307/2009.0315. [潘继征, 熊飞, 李文朝等. 抚仙湖浮游甲壳动物群落结构与空间分布. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 408-414.]
- [34] Wang Xiaolei, Yang Hao, Ding Zhaoyun *et al.* Modern sedimentation rates of fuxian lake by  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  dating. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(11): 1551-1561. [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. 地理学报, 2011, **66**(11): 1551-1561.]
- [35] Yan Ting, Liu Enfeng, Zhang Enlou *et al.* The spatio-temporal variations of heavy metals in the sediment of Lake Fuxian and the contamination assessment. *J Lake Sci*, 2016, **28**(1): 50-58. DOI: 10.18307/2016.0106. [燕婷, 刘恩峰, 张恩楼等. 抚仙湖沉积物重金属时空变化与人为污染评价. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 50-58.]
- [36] Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences ed. Fuxian Lake. Beijing: China Ocean Press, 1990: 273-317. [中国科学院南京地理与湖泊研究所. 抚仙湖. 北京: 海洋出版社, 1990: 273-317.]
- [37] Xiong Fei, Li Wenchao, Pan Jizheng *et al.* Distribution and community structure characteristics of submerged macrophytes in Lake Fuxian, Yunnan province. *Acta Botanica Yunnanica*, 2006, **28**(3): 277-282. [熊飞, 李朝文, 潘继征等. 云南抚仙湖沉水植物分布及群落结构特征. 云南植物研究, 2006, **28**(3): 277-282.]
- [38] Kong Weilin, Wang Yuzhou, Xiang Lin *et al.* An analysis on the landscape pattern of the vegetation in Fuxian Lake basin in Yunnan. *Journal of Yunnan University*, 2012, **34**(4): 468-475. [孔维琳, 王余舟, 向伶等. 抚仙湖流域植被景观格局分析. 云南大学学报, 2012, **34**(4): 468-475.]
- [39] Hu Yuanlin, Zhao Guangzhou. The protect and sustainable development of Lake Fuxian. *Inquiry into Economic Issues*, 2006, (9): 130-133. [胡元林, 赵光洲. 抚仙湖保护与湖区可持续发展. 经济问题探索, 2006, (9): 130-133.]
- [40] Talma AS, Vogel JC. A simplified approach to calibrating (super 14) C dates. *Radiocarbon*, 1993, **35**(2): 317-322.
- [41] Reimer PJ, Bard E, Bayliss A *et al.* IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 2013, **55**(4): 1869-1887. DOI: 10.2458/azu\_js\_rc.55.16947.
- [42] Meyers PA, Lallier Verges E. Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates. *Journal of Paleolimnology*, 1999, **21**(3): 345-372.
- [43] Yang Jialin, Li Jie, Li Jingwei *et al.* Summarize on the research of the hydro-bios and aquatic environment in Fuxian lake and Xingyun lake. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2012, **24**(2): 98-109. [杨加林, 李杰, 李经纬等. 抚仙湖-星云湖水生生物与水环境研究综述. 云南地理环境研究, 2012, **24**(2): 98-109.]
- [44] Smith BN, Epstein S. Two categories of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios for higher plants. *Plant Physiology*, 1971, **47**(3): 380-384.
- [45] Chen FH, Chen XM, Chen JH *et al.* Holocene vegetation history, precipitation changes and Indian Summer Monsoon evolution documented from sediments of Xingyun Lake, south-west China. *Journal of Quaternary Science*, 2014, **29**(7): 661-674. DOI: 10.1002/jqs.2735.
- [46] Yang YP, Zhang HC, Chang FQ *et al.* Vegetation and climate history inferred from a Qinghai Crater Lake pollen record from Tengchong, southwestern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, **461**: 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.07.017>.
- [47] Xiao XY, Haberleb SG, Shen J *et al.* Latest Pleistocene and Holocene vegetation and climate history inferred from an alpine lacustrine record, northwestern Yunnan Province, southwestern China. *Quaternary Science Reviews*, 2014, **86**: 35-48.
- [48] Zheng Z, Wei JH, Huang KY *et al.* East Asian pollen database: Modern pollen distribution and its quantitative relationship with vegetation and climate. *Journal of Biogeography*, 2014, **41**(10): 1819-1832. DOI: 10.1111/jbi.12361.
- [49] Song XY, Yao YF, Wortley AH *et al.* Holocene vegetation and climate history at Haligu on the Jade Dragon snow mountain, Yunnan, SW China. *Climatic Change*, 2012, **113**(3/4): 841-866. DOI: 10.1007/s10584-011-0364-6.
- [50] Shen J, Jones RT, Yang XD *et al.* The Holocene vegetation history of Lake Erhai, Yunnan province southwestern China: The role of climate and human forcings. *The Holocene*, 2006, **16**(2): 265-276. DOI: 10.1191/0959683606h1923rp.
- [51] Li Xiaocen, Zhang Xinning, Han Rufen *et al.* Analysis and research of metal artifacts unearthed at the Lijiashan burials in Jiangchuan county, Yunnan Province. *Archaeology*, 2008, (8): 76-90. [李晓岑, 张新宁, 韩汝芬等. 云南江川县李家山墓地出土金属器的分析和研究. 考古, 2008, (8): 76-90.]
- [52] Zhang Zhenke, Shen Ji, Yang Xiangdong *et al.* Climate changes and Indian monsoon variations recorded by the lacustrine sediments from Erhai Lake, Yunnan Province during the past 8 ka. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2008, **3**(3): 1-6. [张振克, 沈吉, 羊向东等. 近 8ka 来云南洱海湖泊沉积记录的气候变化与夏季印度季风强弱变化的关系. 亚热带资源与环境学报, 2008, **3**(3): 1-6.]