

抚仙湖沉积物多指标记录的过去 5000 年湖泊环境变化*

杨春和¹, 杨欢², 郑平波¹, 段立曾³, 张晓楠³, 张虎才³, 沈才明¹, 孙惠玲^{1**}

(1: 云南师范大学地理学部, 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 昆明 650500)

(2: 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 流域关键带演化湖北省重点实验室, 武汉 430074)

(3: 云南大学资源环境与地球科学学院, 高原湖泊生态与污染治理研究院, 昆明 650504)

摘要: 我国西南地区湖泊众多, 利用湖泊沉积物已开展了大量全新世植被、降水、温度和水位等的重建工作。然而, 代用指标的季节性差异和气候演变的区域差异使得不同代用指标和地区重建的古气候结果存在较大差异, 需要更多可靠记录来相互佐证和构建我国西南地区气候变化的详细图景。本文以云南抚仙湖 FXH-6 钻孔沉积物为研究对象, 对正构烷烃和色度指标作了分析, 厘清其来源及环境指示意义的基础上, 重建过去近 5000 年抚仙湖有机质的来源和湖泊水位的变化, 探讨了湖泊环境变化与区域气候变化的关系。结果表明, 抚仙湖沉积物中正构烷烃 $n\text{-C}_{23}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 可有效指示内源沉水植物和外源陆生植物。近 5000 年抚仙湖湖泊环境经历了 3 个阶段: 在 5000—2300 cal a BP 阶段, 沉水植物广泛分布, 湖泊水位处于高位; 在 2300—2000 cal a BP 阶段, 抚仙湖沉积环境快速变化, 内源沉水植物生物量锐减, 水位快速下降; 2000 cal a BP 至今, 沉水植物生物量持续减少, 湖泊水位保持低水位; 同时, 人类活动也影响了该阶段(2000 cal a BP 至今)陆源植物的输入。本研究重建的抚仙湖持续降低的水位变化和湖泊生产力趋势与过去 5000 年西南地区的年平均温逐渐降低、年平均降水量逐渐减小的总体趋势相对应, 表明区域气候变化是湖泊沉积环境变化的主要驱动力。

关键词: 抚仙湖; 正构烷烃; 水位变化; 沉水植物

Lake environmental changes over the past 5000 years recorded by multiple proxies of sediments in Lake Fuxian, southwest China*

Yang Chunhe¹, Yang Huan², Zheng Pingbo¹, Duan Lizeng³, Zhang Xiaonan³, Zhang Hucui³, Shen Caiming¹ & Sun Huiling^{1**}

(1: Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographic Processes and Environment Change, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, P.R.China)

(2: Hubei Key Laboratory of Critical Zone Evolution, School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P.R.China)

(3: Institute for Ecological Research and Pollution Control of Plateau Lakes, School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650504, P.R.China)

Abstract: Numerous studies have been done to reconstruct the Holocene vegetation, precipitation, temperature, and lake water level using lake sediments in southwest China. However, differences in seasonal sensitivity of proxies as well as regional climate have led to great differences in paleoclimate reconstructed from different proxies and regions, more reliable records are thus essential to corroborate each other and develop a detailed picture of climate variability in southwest China. This study focused on a lacustrine sediment core (FXH-6) from Lake Fuxian in southwest China spanning the past 5000 years. The n -alkanes and sediment color were measured to determine the source of n -alkanes in the sediments and their environmental significance, and then to clarify composition changes of the inputs from terrestrial plants and submerged plants as well as to reconstruct the Lake Fuxian water level changes in the past 5000 years. Our results show that C_{31} and C_{23} n -alkanes in the sediments of Lake Fuxian can effectively indicate

* 2021-11-02 收稿; 2021-12-06 收修稿。

国家自然科学基金项目(41971115, 41761044)和云南省基础研究专项重点项目(202101AS070006)联合资助。

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

the input of terrestrial plants and submerged plants, i.e., the higher abundance of *n*-alkanes (C_{23}) indicated the higher biomass of submerged plants in the lake, implying relatively higher lake water level. The reconstructed Lake Fuxian water level exhibited a general decrease trend during the past 5000 years with a three-stage development. The stage I at 5000–2300 cal a BP was characterized by a relatively high lake water level, as indicated by abundant *n*-alkanes (C_{23}) and thus a large number of submerged plants; the stage II at 2300–2000 cal a BP is an abrupt transition when the biomass of submerged plants decreased sharply indicating a rapid drop of lake water level and thus an abrupt change of lake environments; the stage III from 2000 cal a BP to the present was characterized by continuous declines of submerged plants and low lake water level, in which the input of terrigenous plants was also influenced by intensified human activities. The reconstructed trends of continuously decreasing Lake Fuxian water level and biomass productivity are consistent with the overall trends of decreasing mean annual temperature and precipitation in southwest China during the past 5000 years, suggesting that regional climate change is the main driving force of lake sedimentary environment change.

Keywords: Lake Fuxian; *n*-alkanes; lake water level change; submerged plants

新生代以来伴随着青藏高原的不断隆升,与其相邻的云贵高原地区发育了众多的构造断陷湖泊^[1]. 这些封闭、半封闭的高原湖泊具有汇水面积小、入湖河流短、湖水较深的特点,因而产生了沉积连续、沉积速率较大且对区域环境变化响应尤为敏感的沉积物,在重建各种时间尺度的环境演化序列上具有其他沉积载体无法替代的优势^[2],使它成为揭示湖区古气候和环境变化的指示器^[3]. 西南季风作为亚洲季风环流系统的重要组成部分,其强弱进退不仅影响着云贵高原大气环流的水汽输送、能量传输和季节降水,同时也使得生态环境对其产生敏感快速的响应. 目前在该区域已经开展了不同湖泊沉积物的孢粉、硅藻、元素地球化学和生物地球化学等方面的工作,很好地揭示了全新世以来西南季风演化和山地植被的演替过程^[4-11]以及中晚全新世以来的气候突变事件^[5-6,12-13]和人类活动^[14-16]. 然而,由于指标差异、年代误差和人类活动的扰动,我国西南季风影响区内不同湖泊环境对于气候突变事件的响应程度各不相同,需要更多可靠的重建记录来深入探究.

本研究以云贵高原地区深水湖泊抚仙湖沉积物为研究对象,通过分析沉积物中正构烷烃、色度、总有机碳等环境指标数据,重建了过去 5000 年以来抚仙湖水位变化、生物来源变化特征和快速气候突变事件,并初步探究其可能的驱动原因.

1 研究区域概况

抚仙湖($24^{\circ}21' \sim 24^{\circ}38'N$, $102^{\circ}49' \sim 102^{\circ}57'E$)位于云南省玉溪市,海拔 1722.5 m,水域面积 212 km²,东西宽约 6.7 km,南北长 31.5 km,呈“倒葫芦状”;平均水深 95.2 m,最深处可达 158.9 m,是我国最大的深水寡营养淡水湖泊之一,水资源储量占全国淡水总量的 9.2%^[17-18]. 目前,抚仙湖沿岸只有尖山大河、梁王河、东大河和牛魔大河等几条稳定的入湖河流. 抚仙湖位于我国的西南季风区,属于亚热带高原半湿润季风气候. 全年平均气温 15.5℃,1 月平均气温 3.8℃,7 月平均气温 20.5℃,年平均降水量为 879.1 mm,5 月下旬至 10 月为雨季^[19]. 流域内土壤以红壤为主,棕壤次之,土壤随海拔分异明显. 流域植被存在自然植被和人工植被 2 种类型. 在自然植被中,云南松分布在海拔较低的区域,华山松分布于海拔相对较高的区域,灌草丛相间分布于其中;在人工植被中,存在水田栽培植被、旱作植被、经济林等. 抚仙湖属于断陷湖泊,主断裂带沿东北至西南方向,湖的南、北两岸各形成冲积性平缓岸带;而在东、西两岸,浪蚀作用导致湖岸峭壁直逼湖边;抚仙湖大部分的湖岸为陡峭的岩石,水面基本无自然生长的大型挺水植物分布,以沉水植物为主^[20]. 优势种为黑藻(*Hydrilla verticillata*)、轮叶狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)、篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)和苦草(*Vallisneria spiralis*).

2 样品采集与处理

2.1 样品采集

2013 年 8 月,在抚仙湖西南侧水深约 85 m 处使用 UWITEC 平台钻取校正长度为 245 cm 的 FXH-6 岩芯(位置见图 1),运回实验室后以 1 cm 间隔分样、冷冻干燥保存. 2016 年 7 月分别在抚仙湖流域采集了 19 个

土壤样品(图 1);自抚仙湖东岸沿水深梯度变化采集不同水深处的 5 个湖泊表层沉积物样品(图 1);随机重复采集 7 种典型沉水植物,包括丝藻(*Ulothrix* sp.)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、轮藻(*Chara* sp.)、丝叶眼子菜(*Potamogeton filiformis*)、光叶眼子菜(*P. lucens*)和苦草(*Vallisneria spiralis*);同时在钻孔位置附近水深 85 m 和 100 m 处用采水器采集两个水柱垂直剖面水样(20 L, 10 m 间隔,共 20 个),现场用预先灼烧过的 0.7 μm 的 GF/C Whatman 玻璃纤维滤膜过滤水样得到悬浮颗粒物(suspended particulate matter, SPM)样品。

2.2 样品处理和测定

正构烷烃前处理和测定在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成,具体实验步骤如下:选取研磨至约 180 μm 以下样品放入离心管内,用二氯甲烷:甲醇(体积比为 9:1)混合溶剂对样品进行超声萃取,得到的萃取液放在旋转蒸发仪进行浓缩;后将浓缩后的萃取液转移至细胞瓶中晾干;样品有机提取液用层析柱进行组分分离。正己烷淋洗分离得到烷烃组分。利用气相色谱与质谱联用仪(GC-MS)对正构烷烃进行测定。GC-MS 分析条件:气相色谱型号为 HP6890,质谱仪型号为 HP5973;色谱柱为 HP-5MS 石英毛细管柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm);载气为氦气;进样口温度 300 $^{\circ}\text{C}$;进样量 1 μL ;升温过程:初始温度为 70 $^{\circ}\text{C}$,升温速率 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$;终温 300 $^{\circ}\text{C}$,终温恒温持续 20 min;质谱条件:电子轰击源,电离能量 70 eV;GC 与 MS 接口温度为 280 $^{\circ}\text{C}$ [21]。

色度测定使用日本柯尼卡美能达公司的 CR-10 土色仪。

将碾磨均匀(用孔径为 0.15 mm 过筛)的沉积物样品置于 50 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱烘干,在室温下取 5 g 放于白色参照色板上,压实和压平后,随机取 3 个区域用土色仪进行测量,最终获得样品色度参数的平均值。

3 研究结果

3.1 年代测定

FXH-6 钻孔的年代测定由 BETA 实验室采用 AMS ^{14}C 测年获得 [22] (表 1)。测年样品分别为岩芯柱 3、56、99、149、203 和 244 cm 处的 6 个全有机沉积物样品;表层 3 cm 处接近现代碳水平,因此认为抚仙湖没有碳库效应。年代校正使用 intcal20 校正 [23],年代深度模型使用 Bacon2.2 建立 [24],得到 FXH-6 钻孔的年代框架(图 2)。FXH-6 沉积钻孔的岩性特征表现出明显的 3 个阶段:阶段 I (5000—2300 cal a BP),沉积物呈现灰棕色粉砂质黏土;阶段 II (2300—2000 cal a BP),沉积物为红棕色粉砂质黏土;阶段 III (2000 cal a BP 至今),沉积物为砖红色粉砂质黏土。

3.2 现代样品正构烷烃分布特征

Ficken 等 [25] 提出 Paq 指数能够反映出湖泊沉积物有机质中陆源与内源输入的相对变化; $\text{Paq}>0.4$,有机质主要由沉水、漂浮植物输入, $0.1<\text{Paq}<0.4$,有机质主要由挺水植物输入, $\text{Paq}<0.1$,有机质主要由陆源高等植物输入。土壤作为一个陆源有机质的库,所有现代陆源高等植物的有机质最终会归一化到土壤中,所以本文使用土壤中正构烷烃间接指代陆源高等植物的正构烷烃。抚仙湖流域表土、湖泊中沉水植物、悬浮颗粒物和湖泊表层沉积物的正构烷烃分布特征及 Paq 结果如图 3 所示。其中,表土(图 3a)呈现以长链正构烷烃 $n\text{-C}_{31}$ 为优势峰的单峰分布,奇偶优势明显; Paq 值为 0.07。抚仙湖水生植物由于受到构造断陷湖泊湖岸陡深

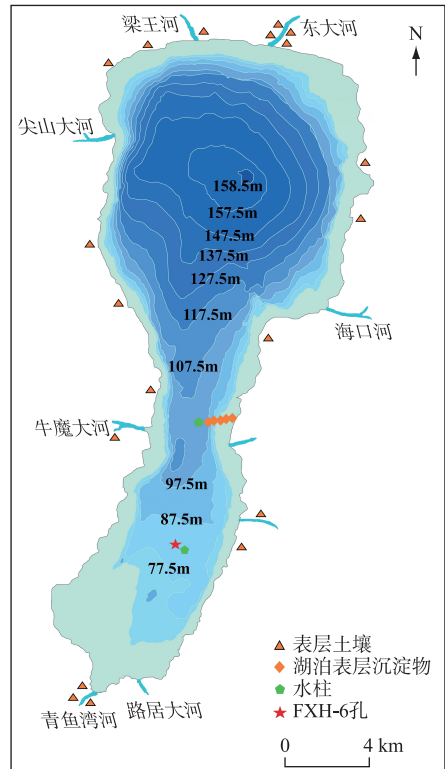


图 1 抚仙湖采样点示意

Fig.1 Distribution of sampling sites in Lake Fuxian

表 1 抚仙湖 FXH-6 钻孔 AMS ¹⁴C 测年结果^[22]
Tab.1 AMS ¹⁴C radiocarbon dates for core FXH-6 in Lake Fuxian

BETA 编号	深度/ cm	测定 材料	δ ¹³ C/ (‰ VPDB)	¹⁴ C 年代/ (a BP)	校正年代/ (2σ range cal a BP)	pMC
424291	3	全有机	-26.5	160±30	230-60	98.0%
418625	56	全有机	-24.8	1940±30	1945-1825	78.5%
418626	99	全有机	-25.2	2080±30	1955-1950	77.2%
418627	149	全有机	-27.2	2340±30	2630-2330	74.7%
418628	203	全有机	-27.5	3380±30	3695-3565	65.7%
418629	244	全有机	-28.5	4490±30	5005-4980	57.2%

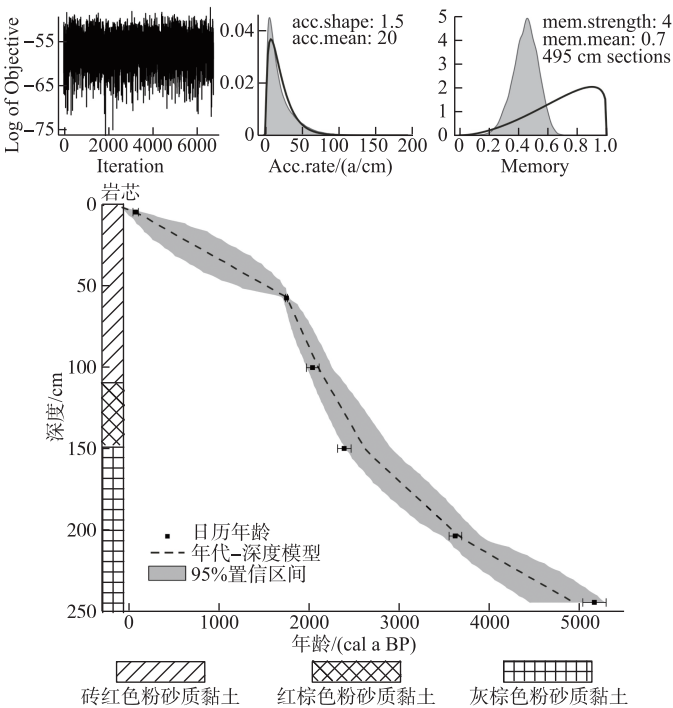


图 2 抚仙湖岩芯 FXH-6 孔的年龄—深度关系^[22]
Fig.2 The age—depth curve of core FXH-6 in Lake Fuxian^[22]

的影响,使得沉水植物生长占据优势,7 种沉水植物平均的正构烷烃分布(图 3b)呈现出以 $n\text{-C}_{23}$ 为优势峰的单峰分布模式,奇偶优势明显; Paq 值为 0.92. 抚仙湖悬浮颗粒物(SPM, 图 3c)以长链正构烷烃 $n\text{-C}_{27}$ 和 $n\text{-C}_{29}$ 为优势峰,奇偶优势较弱, Paq 值为 0.41. 湖泊表层沉积物(图 3d)呈现出以短链正构烷烃 $n\text{-C}_{17}$ 和长链正构烷烃 $n\text{-C}_{31}$ 为优势峰的双峰分布模式,且 $n\text{-C}_{17}$ 的相对丰度远大于 $n\text{-C}_{31}$;短链正构烷烃部分($n\text{-C}_{17} \sim n\text{-C}_{21}$)的奇偶优势不明显,中长链正构烷烃部分($n\text{-C}_{23} \sim n\text{-C}_{33}$)具有明显的奇偶优势; Paq 值为 0.38.

3.3 钻孔 FXH-6 沉积物中正构烷烃分布特征

钻孔 FXH-6 沉积物中正构烷烃的分布模式如图 4 所示,总体上,抚仙湖 FXH-6 沉积柱与表层沉积物中正构烷烃的分布模式相似,短链部分(图 4a)始终以 $n\text{-C}_{17}$ 为优势峰,无明显的奇偶优势;中长链部分(图 4b)呈现典型的双峰分布模式,奇偶优势明显. 随着沉积物岩性的动态变化,中长链正构烷烃的优势峰也相应发生改变:阶段 I,以 $n\text{-C}_{23}$ 和 $n\text{-C}_{29}$ 为优势峰, Paq 平均值为 0.50;阶段 II,也是以 $n\text{-C}_{23}$ 和 $n\text{-C}_{29}$ 为优势峰, Paq 平

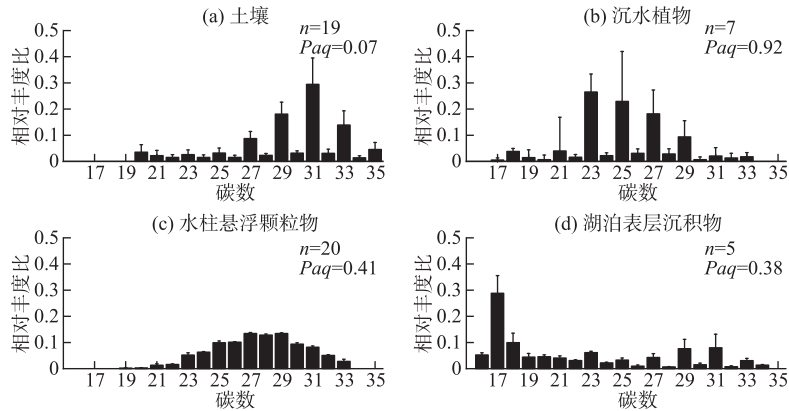


图 3 抚仙湖流域表层土壤(a)、沉水植物(b)、水柱悬浮颗粒物(c)、湖泊表层沉积物(d)的正构烷烃分布特征($Paq = (n-C_{23} + n-C_{25}) / (n-C_{23} + n-C_{25} + n-C_{29} + n-C_{31})$)

Fig.3 Distribution patterns of *n*-alkanes in catchment soils (a), submerged plants (b), suspended particulate matter in water columns (c) and lake surface sediments (d) in Lake Fuxian ($Paq = (n-C_{23} + n-C_{25}) / (n-C_{23} + n-C_{25} + n-C_{29} + n-C_{31})$)

均值为 0.49,与阶段 I 的结果较相似;阶段 III 则明显不同,中长链正构烷烃的双峰优势除了 $n-C_{23}$ 以外, $n-C_{31}$ 和 $n-C_{29}$ 的相对丰度均较高,且高于 $n-C_{23}$ 的相对丰度, Paq 平均值为 0.38.

3.4 钻孔 FXH-6 沉积物色度分布特征

沉积物色度指示沉积物的颜色变化,其主要利用由亮度(L^*)、红度(a^*)、黄度(b^*)组成的 CIE 表色系统来描述沉积物色度的变化. L^* 是描述沉积物明暗程度, L^* 值在 0 (黑)~100 (白) 范围内变化, L^* 值与沉积物湿度、碳酸盐含量变化有关, L^* 值高,表明气候寒冷干燥,碳酸盐含量高^[26-27]. a^* 值一般在 -60 (绿)~+60 (红) 范围内变化.通常 a^* 值与含 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 矿物及碳酸镁含量有关,与气温呈正相关关系^[28-29]. b^* 在 -60 (蓝)~+60 (黄) 范围内变化, b^* 值受到不同价态铁离子的氢氧化合物含量影响,常与湖泊水位和湿度变化有关,进一步反映湖泊沉积氧化-还原环境; b^* 值高,湖泊沉积处于氧化环境,水位低; b^* 值低,湖泊沉积处于还原环境,水位高^[30-33].抚仙湖 FXH-6 孔沉积物颜色变化明显,其色度 a^* 、 b^* 、 L^* 值结果如图 5 所示.总体上, a^* 、 b^* 值变化趋势一致,呈明显上升趋势, L^* 变化与 a^* 、 b^* 值变化趋势相反,呈逐渐下降趋势.阶段 I, a^* 、 b^* 值呈低值, L^* 值为高值,都较为稳定;阶段 II, a^* 、 b^* 值迅速上升至高值,而 L^* 值迅速降低;阶段 III, a^* 、 b^* 值呈高值, L^* 值为低值, a^* 、 b^* 值在高值范围内波动上升, L^* 值在低值内频繁波动.

4 分析与讨论

4.1 抚仙湖沉积物中正构烷烃指示意义

由现代样品(图 3)和 FXH-6 沉积钻孔(图 4)的正构烷烃分布结果可知,抚仙湖表层沉积物和钻孔沉积物都具有极高的 $n-C_{17}$ 相对丰度,而流域表层土壤、水体悬浮颗粒物、沉水植物的正构烷烃的 $n-C_{17}$ 相对丰度接近于零.说明陆源土壤、内源水生大型植物、浮游植物均不是沉积物中正构烷烃 $n-C_{17}$ 的主要贡献者.虽然,沉积物中短链正构烷烃 $n-C_{17}$ 也有可能受到石油烃类污染,但是,一般出现石油烃类污染的沉积物会具有两大特征:一是表层更易检测出石油烃类污染;二是它多集中于石油开采区、渡船较为频繁的水域^[34-36].抚仙湖 FXH-6 孔在整个中晚全新世阶段持续出现以 $n-C_{17}$ 为优势峰的分布模式,在此时期内抚仙湖流域并未有油气船舶大规模使用现象;可排除石油烃类污染是抚仙湖沉积物短链正构烷烃 $n-C_{17}$ 的来源.另一方面, Van Bree 等^[37] 对东非查拉湖现代过程的研究证实短链正构烷烃 $n-C_{19}$ 主要来源于蓝细菌;此外,Johnson 和 Calde 等^[38] 发现湖泊沉积界面的微生物降解转化作用可导致正构烷烃分布奇偶优势不明显.张永东等^[39] 对抚仙湖近百年沉积物中烷烃的研究发现,高丰度的 C_{2n} 化合物与支链烷烃可能源于在抚仙湖含氧量低的沉

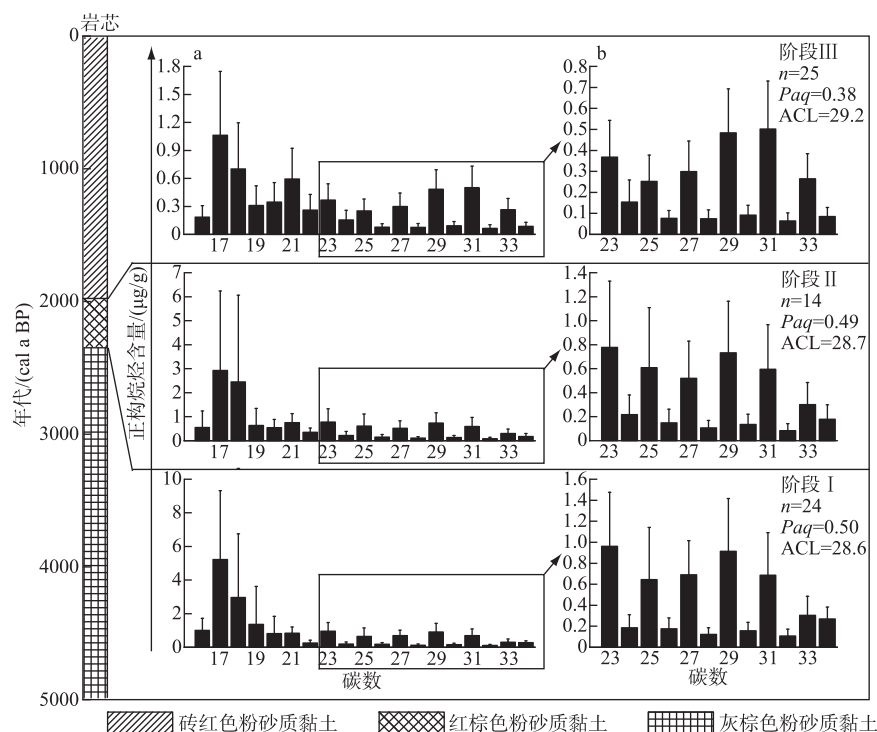


图4 抚仙湖沉积物 FXH-6 孔正构烷烃在不同阶段的含量分布模式(a 列为完整的正构烷烃分布模式; b 列为中长链正构烷烃($\geq n\text{-C}_{23}$)分布模式;阶段 I 为 5000—2300 cal a BP, 阶段 II 为 2300—2000 cal a BP, 阶段 III 为 2000 cal a BP 至今)

Fig.4 Distribution patterns of *n*-alkanes content in sediments of Lake Fuxian at 3 stages (Column a: Complete distribution patterns of *n*-alkanes for 3 stages; Column b: Distribution patterns of medium and long chain *n*-alkanes ($\geq n\text{-C}_{23}$) for 3 stages; stage I : 5000–2300 cal a BP, stage II : 2300–2000 cal a BP, stage III : 2000 cal a BP to the present)

积环境中改造藻类的异养细菌. 说明抚仙湖底部的沉积环境可能存在对初级有机质的降解改造. Li 等^[40]的研究也指出沉积物在缺氧条件下, 仅有短链正构烷烃会被微生物降解大量产生, 而几乎不降解产生长链正构烷烃. 综合推断, 抚仙湖沉积物的短链正构烷烃 $n\text{-C}_{17}$ 组分很有可能是来源于抚仙湖中蓝细菌和低含氧量的沉积界面改造其他有机化合物降解而成.

在排除短链正构烷烃的干扰之后, 由现代流域土壤、沉水植物、水柱悬浮颗粒物、湖泊表层沉积物中正构烷烃分布的对比结果(图 3)可知, 湖泊表层沉积物(图 3d)中正构烷烃呈现以 $n\text{-C}_{31}$ 和 $n\text{-C}_{23}$ 为优势峰的双峰型分布模式, 与流域表层土壤(陆源高等植物)来源(单峰, $n\text{-C}_{31}$ 相对丰度最高)和沉水植物来源(单峰, $n\text{-C}_{23}$ 相对丰度最高)的正构烷烃分布特征(图 3a, 3b)一一对应. 虽然湖泊表层沉积物中长链 $n\text{-C}_{27}$ 和 $n\text{-C}_{29}$ 正构烷烃也具有相对较高的丰度. 但以浮游生物为来源的水柱悬浮颗粒物(图 3c)也具有较高丰度的长链正构烷烃单化合物($n\text{-C}_{29}$ 、 $n\text{-C}_{27}$), 使得沉积物中的 $n\text{-C}_{27}$ 和 $n\text{-C}_{29}$ 正构烷烃来源相对复杂. 而沉积物中 $n\text{-C}_{31}$ 和 $n\text{-C}_{23}$ 正构烷烃的指示来源都相对单一, 流域表层土壤(陆源高等植物)和沉水植物都呈现极高的单一优势峰($n\text{-C}_{31}$ 和 $n\text{-C}_{23}$). 因此, 沉积物中正构烷烃单化合物($n\text{-C}_{31}$ 、 $n\text{-C}_{23}$)可以用来指示抚仙湖中陆源土壤(陆源高等植物)和内源沉水植物输入有机质的情况.

研究发现, 沉水植物的生物量虽然受到光强、营养盐、底质、水温和悬浮物等多项环境因子的调控^[41-44], 但是光照强度是最主要的限制因子^[45]. 抚仙湖是断陷而成的贫营养深水湖泊, 湖泊水体内营养物质有限,

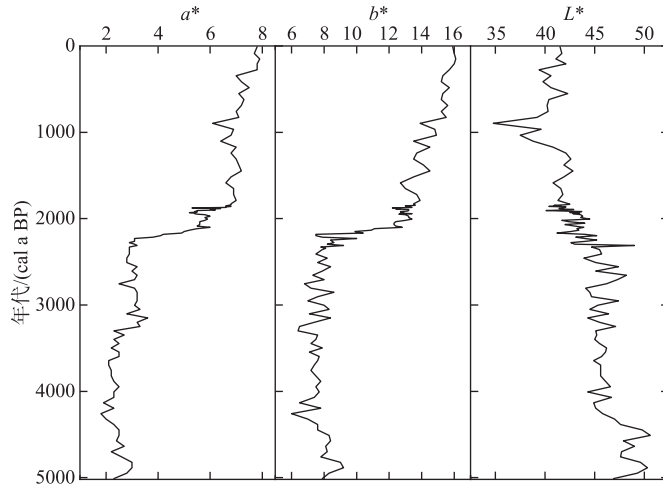
图 5 抚仙湖 FXH-6 孔色度 a^* 、 b^* 、 L^* 指标变化特征

Fig.5 Variation characteristics of chromaticity parameters a^* (redness), b^* (saturation) and L^* (brightness) in core FXH-6 from Lake Fuxian

水体透明度较高,使得沉水植物分布深度相应增加^[20];但是抚仙湖湖岸陡峭,湖泊水位变化极易对沉水植物分布区域产生影响,又使得沉水植物的分布在一定程度上受限于抚仙湖水位变化. 根据近 25 年抚仙湖水位变化^[46]与沉水植物生物量^[43,47]的正相关关系(图 6)可知,沉水植物生物量变化可敏感响应抚仙湖水位变化. 由于抚仙湖沉积物中正构烷烃 $n\text{-C}_{23}$ 以及 Paq 值又指示沉水植物输入量,因此在抚仙湖中,沉积物中的正构烷烃 $n\text{-C}_{23}$ 或 Paq 值的增加,可间接指示沉水植物生物量的增加以及抚仙湖水位的上升.

4.2 湖泊环境对气候变化和人类活动的响应

基于抚仙湖 FXH-6 孔沉积物 Paq 值(图 7a)、正构烷烃 $n\text{-C}_{23}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 浓度(图 7c)及其相对丰度比值(图 7b)、总氮(TN)^[22](图 7d)、总有机碳(TOC)^[22](图 7e)、色度 a^* 和 b^* (图 7f,7g)与 FXH-1 孔沉积物中禾本科植物孢粉通量指标^[7](图 7h)的对比分析,抚仙湖湖泊环境近 5000 年以来的重建结果如下:

阶段 I (5000—2300 cal a BP), Paq 值在大于 0.4 的范围波动,平均值为 0.5,处于整个岩芯的高值阶段;平均碳链长度 ACL 的平均值为 28.6,正构烷烃单化合物 $n\text{-C}_{23}$ 含量明显高于 $n\text{-C}_{31}$ 含量,使得 $n\text{-C}_{23}/n\text{-C}_{31}$ 比值均大于 1,也处于整个岩芯的高值阶段,且具有与 Paq 一致的变化趋势. 同时, TN、TOC 含量也稳定在整个沉积物钻孔的高值阶段,说明水生内源植物对抚仙湖沉积物中有机质的贡献明显高于陆源植物. 由于现代数据证明,高生物量的内源沉水植物指示抚仙湖的高水位环境,所以,正构烷烃的各指标都反映了阶段 I 的抚仙湖高水位湖泊环境. 另外,色度指标 a^* 、 b^* 的相对低值也指示湖泊在该阶段处于还原态的沉积环境,指示抚仙湖水位相对较高,与正构烷烃指标的指示意义相吻合. 禾本科植物孢粉通量非常保持在低值则说明该阶段人类活动影响微弱.

阶段 II (2300—2000 cal a BP), FXH-6 孔的各有机和无机指标都呈现锐增或锐减趋势,包括稳定碳同位素结果^[22],说明抚仙湖沉积环境发生快速变化. TN、TOC 含量分别减少了约 0.2% 和 3%,表明湖泊沉积物中

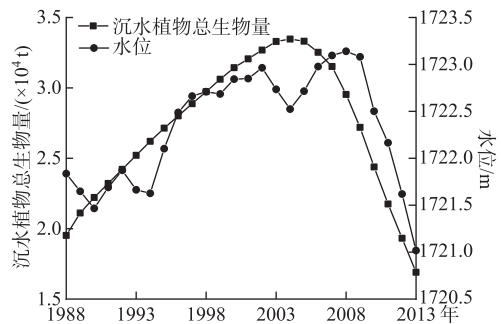
图 6 抚仙湖 1988—2013 年水位变化^[46]与沉水植物总生物量变化^[47]趋势

Fig.6 Trends of water level change^[46] and total biomass change of submerged plants^[47] from 1988 to 2013 in Lake Fuxian

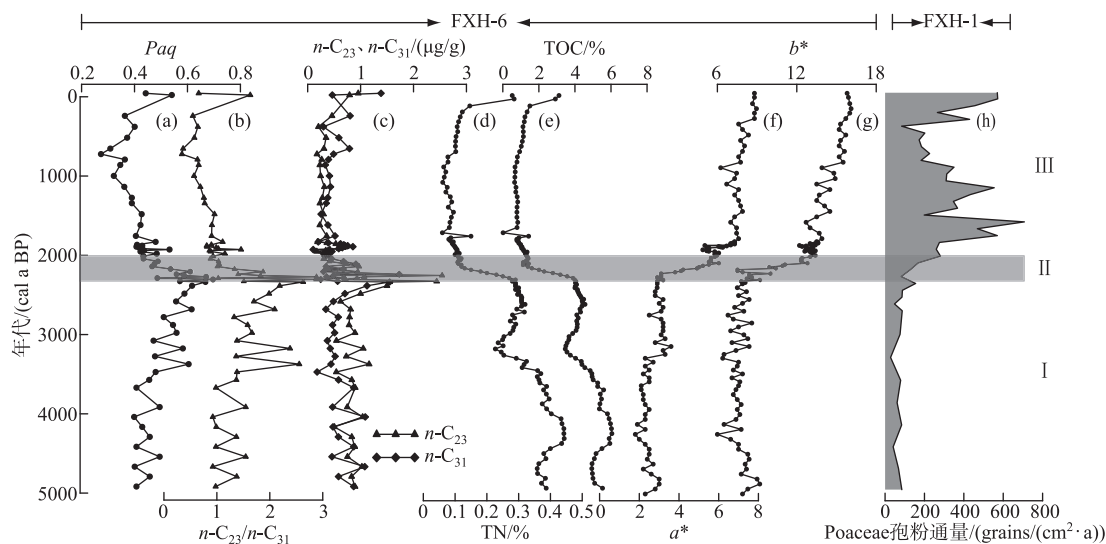


图7 抚仙湖 FXH-6 孔正构烷烃 Paq 指数 (a)、 $n-C_{23}/n-C_{31}$ 相对丰度比值 (b)、 $n-C_{23}$ 和 $n-C_{31}$ 含量 (c)、 $TN^{[22]}$ (d)、 $TOC^{[22]}$ (e)、色度 a^* (f) 和 b^* (g) 与抚仙湖 FXH-1 孔禾本科植物孢粉通量^[7] (h) 变化对比分析

Fig.7 Comparison of Paq index (a), $n-C_{23}/n-C_{31}$ relative abundance ratio (b), $n-C_{23}$ and $n-C_{31}$ content (c), TN (total nitrogen) content^[22] (d), TOC (total organic carbon content^[22]) (e), chromaticity parameters a^* (f) and b^* (g) from core FXH-6 with Poaceae pollen influx^[7] from core FXH-1 in Lake Fuxian (h)

的有机质含量在迅速减少。 Paq 值从 0.6 降至 0.4 左右, 平均值为 0.49, ACL 平均值为 28.7, 正构烷烃 $n-C_{23}$ 的绝对含量 (图 7c) 从约 3 $\mu\text{g/g}$ 减少至 0.8 $\mu\text{g/g}$, 远高于陆源输入植物 ($n-C_{31}$) 的降幅 (约 1 $\mu\text{g/g}$), 显示内源输入的沉水植物降幅最大。 内源沉水植物输入的锐减间接指示抚仙湖水位的快速下降。 同时, 色度 a^* 、 b^* 值快速增加, 也意味着水位迅速降低, 湖泊沉积环境由还原态向氧化态过渡。 当然, 各指标的快速变化, 尤其是 TOC 指标的快速减少, 可能也与水位快速变化期湖泊分层不稳定有关。 湖泊水位的快速变化扰乱了湖底沉积环境的氧化条件, 从而使得湖泊内源生物的类型和生物量相应改变, 进而影响 TOC 的来源和保存条件。 另外, 禾本科植物孢粉通量缓慢增加则说明与农业活动相关的人类扰动在这一时期初步开始影响流域土壤侵蚀。

阶段 III (2000 cal a BP 至近现代), Paq 值基本都在小于 0.4 的范围波动, 平均值为 0.38; 指示内源水生植物输入比例明显下降。 ACL 平均值为 29.3, 明显高于阶段 I 的 28.6, 长链正构烷烃平均链长的增加也间接指示了陆源植物输入比例增加。 除近现代样点以外, $n-C_{23}/n-C_{31}$ 比值在该阶段均小于 1, 正构烷烃 $n-C_{23}$ 含量相对阶段 I 明显减少, $n-C_{31}$ 含量相对阶段 I 变幅不大。 所以, TN 、 TOC 在该阶段始终保持低值的原因可能与 $n-C_{23}$ 指示的内源沉水植物明显减少有关; 与此同时, 陆源植物的输入量实际上并没有显著变化。 结合 Paq 值和 $n-C_{23}/n-C_{31}$ 比值所反映的抚仙湖沉水植物与湖泊水位的关系, 说明该阶段抚仙湖呈相对低水位。 色度指标 a^* 、 b^* 值均表现为相对高值, 指示湖泊在该阶段处于氧化条件的沉积环境, 抚仙湖水位相对较低。 另外, 禾本科植物的孢粉通量自阶段 II 末期以来呈现大幅度上升 (图 7h), 指示该阶段抚仙湖流域内加剧的人类活动扰动。 距抚仙湖不远的滇池^[48]、星云湖^[49]、洱海^[50] 沉积物均记录到 2000 aBP 以来加剧的人类活动。 说明以禾本科植物为主的农业发展, 使得地表土壤侵蚀加强, 裸露地表增加, 进而导致进入湖泊的碎屑物质增加 (a^* 、 b^* 值较高), 陆源有机质减少 (TOC 较低)。 但是伴随着湖泊水位下降导致的内源水生植物输入比例明显下降, 使得湖泊沉积物中陆源组分的占比增加 (ACL 高值)。

4.3 区域记录对比

将抚仙湖水位变化(图 8a, 8b)记录与西南季风影响区内的泸沽湖 brGDGTs 重建的年均温^[13](图 8c)、星云湖^[4]和腾冲青海湖^[51]孢粉定量重建的年平均降水量(MAP)记录(图 8d, 8e), 以及洞穴石笋氧同位素记录进行对比, 以探究气候变化对湖泊环境的影响历史. 基于星云湖和腾冲青海湖的化石孢粉资料, Chen 等^[4]与 Yang 等^[51]定量重建了云南过去的年均降水变化, 虽然 2 条记录在高频波动上存在差异, 但整体表现出自 5000 年以来降低的趋势; 这种趋势与泸沽湖 brGDGTs 重建的年均温整体一致^[13], 体现了亚洲季风区雨热同期的季风气候特征. 这种季风变化趋势受到了具有准确定年和高分辨率的石笋氧同位素记录的印证^[52-54], 虽然石笋氧同位素的环境指示意义目前仍存在争议, 特别是在东亚季风区, 但印度季风主导的云南地区其依然是降水量变化的有效指标^[55], 因此, 5000 年以来西南地区年平均温(MATT)逐渐降低、年平均降水量(MAP)逐渐减小, 能很好地与本文重建的抚仙湖不断降低的水位变化和降低的湖泊生产力趋势相对应, 进一步说明了气候变化是湖泊环境变化的背景.

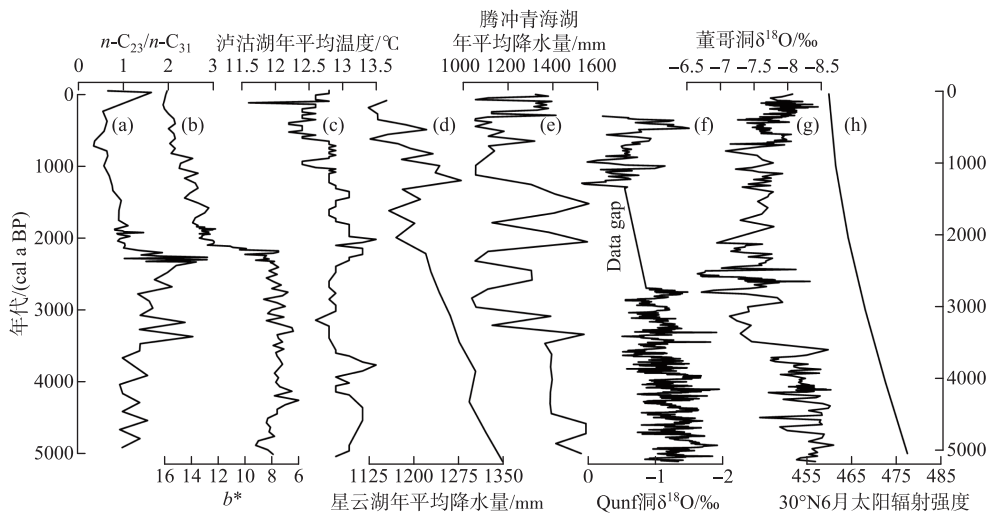


图 8 抚仙湖 FXH-6 孔沉积物正构烷烃 $n\text{-C}_{23}/n\text{-C}_{31}$ 比值(a)、色度 b^* (b)与泸沽湖 brGDGTs 重建的年均温(c)^[13]、星云湖孢粉重建年均降水量(d)^[4]、腾冲青海湖孢粉重建年均降水量(e)^[51]、Qunf 洞(f)^[52-53]、董哥洞(g)^[54]石笋氧同位素含量及 30°N 6月太阳辐射强度(h)^[56]对比分析

Fig.8 Comparison of n -alkanes parameters, chromaticity parameter b^* , reconstructed annual temperature in Lake Lugu (c)^[13], reconstructed annual precipitation in Lake Xingyun (d)^[4], reconstructed annual precipitation in Tengchong Lake Qinghai (e)^[51], oxygen isotope content of stalagmite in Qunf cave (f)^[52-53] and Dongge cave (g)^[54], and solar radiation intensity at 30°N in June (h)^[56]

这里需要指出的是, 我们重建的抚仙湖湖泊水位变化与基于抚仙湖 FXH-B2 孔全新世自生碳酸盐重建的结果^[57]相反, 虽然两孔反映的湖泊环境变化的时间模式对应得非常好. 导致此结果的原因在于如何解释湖泊碳酸盐含量. 但是, 如何解释现在还存在着争议, 同一湖泊在不同的时间尺度可能有不同的解释^[58]; 或同一解释在不同的湖泊有着相反的结果^[2, 57]. 我们倾向于碳酸盐含量高低代表由季风强弱也即季风降水多寡导致的湖泊水位的上升和下降的解释. 这种解释的机理是, 在旱季和雨季明显的西南季风区, 雨季的高降水(季风降水)不仅给抚仙湖带来了较多的外源碳酸盐碎屑, 也带来了大量的 Ca^{2+} , 而旱季时强烈的湖面蒸发导致内生碳酸盐析出. 高碳酸盐含量与高季风降雨一致在柬埔寨的 Kara 湖也有发现^[59]. 抚仙湖 FXH-B2 孔全新世自生碳酸盐如果按照此解释来进行, 则和我们的结果一致. 但是, 如果泸沽湖的碳酸盐含量按照此解释来进行, 则早中全新世是低水位, 晚全新世是高水位, 与目前对全新世季风强度和季风降水的普遍认识相反. 因此, 湖泊碳酸盐的解释除了与湖泊所处的气候环境外, 可能还与湖泊的大小、水深、外流河流和流域

岩性等因素有关,我们需谨慎解释湖泊碳酸盐的指代意义.

5 结论

1) 抚仙湖沉积物中正构烷烃 $n\text{-C}_{23}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 可以有效指示内源沉水植物和外源陆生植物. 基于此, 研究结果表明, 5000 年以来抚仙湖沉积物逐渐由内源有机质输入为主过渡到内源与陆源有机质混合输入.

2) 抚仙湖沉积物多指标记录表明近 5000 年以来抚仙湖湖泊环境经历了 3 个阶段: 在 5000—2300 cal a BP 阶段, 沉水植物广泛分布, 湖泊水位处于高位; 在 2300—2000 cal a BP 阶段, 抚仙湖沉积环境快速变化, 内源沉水植物生物量锐减, 水位快速下降; 自 2000 cal a BP 以来至今, 沉水植物生物量持续减少, 湖泊水位保持低水位, 同时, 人为扰动也影响该阶段陆源植物的输入.

3) 本文重建的抚仙湖不断降低的水位变化和降低的湖泊生产力趋势与 5000 年以来西南地区的年平均温度逐渐降低、年平均降水量逐渐减小趋势相对应, 说明区域气候变化是湖泊环境变化的主要驱动力.

致谢: 感谢吴铎研究员对论文修改提出的建设性意见, 作者在此谨致谢忱.

6 参考文献

- [1] Shi ZT, Ming QZ, Zhang HC. A study review on the modern processes and environmental evolution of the typical lakes in Yunnan. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2005, **17**(1): 24-26, 63. [史正涛, 明庆忠, 张虎才. 云南高原典型湖泊现代过程及环境演变研究进展. 云南地理环境研究, 2005, **17**(1): 24-26, 63.]
- [2] Zheng Q, Zhang HC, Ming QZ *et al.* Vegetational and environmental changes since 15000a BP recorded by lake Lugu in the southwest monsoon domain region. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1314-1326. [郑茜, 张虎才, 明庆忠等. 泸沽湖记录的西南季风区 15000a BP 以来植被与气候变化. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1314-1326.]
- [3] Shen J, Yang LY, Yang XD *et al.* Lake sediment records climate change and human activities since the Holocene in Erhai catchment, Yunnan Province, China. *Science in China: Series D*, 2004, **34**(2): 130-138. [沈吉, 杨丽原, 羊向东等. 全新世以来云南洱海流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录. 中国科学: D 辑, 2004, **34**(2): 130-138.]
- [4] 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.
- [5] Xiao XY, Haberle 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. DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.12.023.
- [6] Han Y, Xiao XY, Yang XD *et al.* The grain-size characteristics of Tiancai Lake in northwestern of Yunnan Province and paleo-precipitation history during the Holocene. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(6): 999-1010. [韩艳, 肖霞云, 羊向东等. 全新世以来滇西北地区天才湖粒度特征及古降水. 第四纪研究, 2011, **31**(6): 999-1010.]
- [7] Sun QF, Shen CM, Wang M *et al.* Pollen/charcoal record over the past 13300 years from Fuxian Lake in the Yunnan-Guizhou plateau. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2018, **57**(2): 249-259. [孙启发, 沈才明, 王敏等. 云贵高原抚仙湖近 13300 年的花粉/炭屑记录. 古生物学报, 2018, **57**(2): 249-259.]
- [8] Wang M, Meng HW, Huang LP *et al.* Vegetation succession and forest fires over the past 13000 years in the catchment of Yangzonghai Lake, Yunnan. *Quaternary Sciences*, 2020, **40**(1): 175-189. [王敏, 蒙红卫, 黄林培等. 云南阳宗海流域过去 13000 年植被演替与森林火灾. 第四纪研究, 2020, **40**(1): 175-189.]
- [9] Xiao XY, Yao A, Hillman A *et al.* Vegetation, climate and human impact since 20 ka in central Yunnan Province based on high-resolution pollen and charcoal records from Dianchi, southwestern China. *Quaternary Science Reviews*, 2020, **236**: 106297. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106297.
- [10] Wang ZX, Wang YL, Meng P *et al.* Iron and n-alkanes records and their environmental significance of Lugu Lake, south-eastern Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(1): 131-142. [王自翔, 王永莉, 孟培等. 泸沽湖沉积物中的铁元素和有机分子记录及其古气候/环境意义. 第四纪研究, 2015, **35**(1): 131-142.]
- [11] He W, Wang G, Wang YL *et al.* Characteristics of climate and environment over the past 30 cal. ka b. p. recorded in lacustrine deposits of the Qionghai Lake, Sichuan Province. *Quaternary Sciences*, 2018, **38**(5): 1179-1192. [何薇, 汪亘,

- 王永莉等. 四川邛海湖泊沉积物记录的过去 30cal.kB.P. 以来的古气候环境特征. 第四纪研究, 2018, **38**(5): 1179-1192.]
- [12] Zhao C, Cheng J, Wang JJ *et al.* Paleoclimate significance of reconstructed rainfall isotope changes in Asian monsoon region. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(12): e2021GL092460. DOI: 10.1029/2021GL092460.
- [13] Zhao C, Rohling EJ, Liu ZY *et al.* Possible obliquity-forced warmth in southern Asia during the last glacial stage. *Science Bulletin*, 2021, **66**(11): 1136-1145. DOI: 10.1016/j.scib.2020.11.016.
- [14] Wu D, Zhou AF, Liu JB *et al.* Changing intensity of human activity over the last 2,000 years recorded by the magnetic characteristics of sediments from Xingyun Lake, Yunnan, China. *Journal of Paleolimnology*, 2015, **53**(1): 47-60. DOI: 10.1007/s10933-014-9806-2.
- [15] Hillman AL, Abbott MB, Yu JQ *et al.* Environmental legacy of copper metallurgy and Mongol silver smelting recorded in Yunnan Lake sediments. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(6): 3349-3357. DOI: 10.1021/es504934r.
- [16] Yuan ZJ, Wu D, Niu LL *et al.* Contrasting ecosystem responses to climatic events and human activity revealed by a sedimentary record from Lake Yilong, southwestern China. *Science of the Total Environment*, 2021, **783**: 146922. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146922.
- [17] Wang SM, Dou HS eds. *Lakes of China*. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [18] Dong J, Li GB, Song LR. Historical changes of phytoplankton functional groups in Lake Fuxian, Lake Erhai and Lake Dianchi since 1960s. *J Lake Sci*, 2014, **26**(5): 735-742. DOI: 10.18307/2014.0511. [董静, 李根保, 宋立荣. 抚仙湖、洱海、滇池浮游藻类功能群 1960s 以来演变特征. 湖泊科学, 2014, **26**(5): 735-742.]
- [19] Xiong F, Liu HY, Dong YH *et al.* Spatial-temporal pattern of charophyte in Fuxian lake. *Journal of Jiangnan University: Natural Science Edition*, 2011, **39**(3): 102-107. [熊飞, 刘红艳, 董元火等. 抚仙湖轮藻植物的时空格局. 江汉大学学报: 自然科学版, 2011, **39**(3): 102-107.]
- [20] Xiong F, Li WC, Pan JZ *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, 李文朝, 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.]
- [21] Peng HX, Zhan C, Ma RY *et al.* Characteristics of biomarkers in Pleistocene red earth of Jiujiang, Jiangxi Province and its paleoclimatic and environmental significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 2019, **40**(3): 447-455. DOI: 10.3975/cagsb.2018.120501. [彭红霞, 詹成, 马瑞元等. 江西九江红土生物标志化合物的分布特征及其古气候环境意义. 地球学报, 2019, **40**(3): 447-455.]
- [22] Liu Y, Sun HL, Zhou XJ *et al.* Paleoenviromental significance of organic carbon isotope in lacustrine sediments in Lake Fuxian during the past 5 ka. *J Lake Sci*, 2017, **29**(3): 722-729. DOI: 10.18307/2017.0322. [刘颖, 孙惠玲, 周晓娟等. 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. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 722-729.]
- [23] Reimer PJ, Austin WEN, Bard E *et al.* The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 2020, **62**(4): 725-757. DOI: 10.1017/rdc.2020.41.
- [24] Blaauw M, Christen JA. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, 2011, **6**(3): 457-474. DOI: 10.1214/ba/1339616472.
- [25] Ficken KJ, Li B, Swain DL *et al.* An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**(7/8): 745-749. DOI: 10.1016/S0146-6380(00)00081-4.
- [26] Dai S, Liu JW, Zhang MZ *et al.* Climate change during 140.66–124.19 Ma recorded by the color of the sediments of the Hekou group from Lanzhou-Minhe Basin. *Acta Geologica Sinica*, 2011, **85**(6): 1058-1067. [戴霜, 刘俊伟, 张明震等. 兰州-民和盆地八盘峡剖面河口群沉积物色度纪录的 140.66~124.19Ma 间气候变化. 地质学报, 2011, **85**(6): 1058-1067.]
- [27] Ji JF, Chen J, Balsam W *et al.* Quantitative analysis of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequences and its implication for dry and humid variability. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(2): 221-229. [季峻峰, 陈骏, Balsam W 等. 黄土剖面中赤铁矿和针铁矿的定量分析与气候干湿变化研究. 第四纪研究, 2007, **27**(2): 221-229.]
- [28] Helmke JP, Schulz M, Bauch HA. Sediment-color record from the northeast Atlantic reveals patterns of millennial-scale climate variability during the past 500, 000 years. *Quaternary Research*, 2002, **57**(1): 49-57. DOI: 10.1006/qres.2001.2289.

- [29] Li XB, Ji JL, Cao ZM *et al.* The climatic significance of the color of the paleo-neogene fluvial and lacustrine sediments in the Northern Qaidam Basin. *Earth Science*, 2021, **46**(9): 3278-3289. DOI: 10.3799/dqkx.2020.329. [李星波, 季军良, 曹展铭等. 柴达木盆地北缘古-新近纪河湖相沉积物颜色的气候意义. 地球科学, 2021, **46**(9): 3278-3289.]
- [30] Wu YH, Li SJ. Significance of lake sediment color for short time scale climate variation. *Advances in Earth Science*, 2004, **19**(5): 789-792. [吴艳宏, 李世杰. 湖泊沉积物色度在短尺度古气候研究中的应用. 地球科学进展, 2004, **19**(5): 789-792.]
- [31] Tian QC, Yang TB, Shi PH *et al.* Environmental implication of color reflectance of drill hole BDQ0608, Keke Xili region and its influencing factors. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, **32**(1): 133-140. DOI: 10.3724/SP.J.1140.2012.01133. [田庆春, 杨太保, 石培宏等. 可可西里 BDQ0608 钻孔沉积物色度环境意义及其影响因素. 海洋地质与第四纪地质, 2012, **32**(1): 133-140.]
- [32] Zhang YX, Ye W, Ma CM *et al.* Environment variabilities archived by color of the drill core Beihuqiao in Hangjiahu Plain during the Early-Mid Holocene, China. *Quaternary Sciences*, 2016, **36**(5): 1331-1342. [章云霞, 叶玮, 马春梅等. 浙江北湖桥孔色度记录的早-中全新世环境变化. 第四纪研究, 2016, **36**(5): 1331-1342.]
- [33] Li Y, Fang J, Pan L *et al.* Application of sediment chromaticity in paleo-environment reconstruction. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, **8**(6): 22-27. [李杨, 方晶, 潘隆等. 沉积物色度在古环境重建中的应用. 气象科技进展, 2018, **8**(6): 22-27.]
- [34] Hu LM, Liu JH, Shi XF *et al.* Petroleum contamination in the surface sediments of the Bohai Sea: Evidence from the sedimentary biomarker records. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, **35**(1): 121-130. [胡利民, 刘季花, 石学法等. 渤海石油污染: 来自表层沉积物中生物标志物的证据. 海洋学报: 中文版, 2013, **35**(1): 121-130.]
- [35] Ran T, Zhang M, Li SL *et al.* Geochemical characteristics of saturated hydrocarbon and geological significance of sea bottom from the central Bohai Bay. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, **36**(11): 21-27, 4. [冉涛, 张敏, 李双林等. 渤海湾中部海底沉积物饱和烃地球化学特征及其地质意义. 石油天然气学报, 2014, **36**(11): 21-27, 4.]
- [36] Zhang L, Shi LL, Wang SR *et al.* Spatial and temporal distribution of suspended particulate matter in Lake Erhai and its environmental significance. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(5): 787-794. [张莉, 史玲珑, 王圣瑞等. 洱海悬浮颗粒物时空分布特征及其环境学意义. 环境科学研究, 2019, **32**(5): 787-794.]
- [37] van Bree LGJ, Peterse F, van der Meer MTJ *et al.* Seasonal variability in the abundance and stable carbon-isotopic composition of lipid biomarkers in suspended particulate matter from a stratified equatorial lake (Lake Chala, Kenya/Tanzania): Implications for the sedimentary record. *Quaternary Science Reviews*, 2018, **192**: 208-224. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.05.023.
- [38] Johnson RW, Calder JA. Early diagenesis of fatty acids and hydrocarbons in a salt marsh environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, **37**(8): 1943-1955. DOI: 10.1016/0016-7037(73)90150-6.
- [39] Zhang YD, Su YL, Liu ZW *et al.* Long-chain branched/cyclic alkanes in recent sediment of Lake Fuxian and their environmental implications. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(8): 656-667. [张永东, 苏雅玲, 刘正文等. 抚仙湖近现代沉积物中长链支链烷烃和环烷烃的检出及可能的环境意义. 科学通报, 2014, **59**(8): 656-667.]
- [40] Li GY, Li L, Tarozo R *et al.* Microbial production of long-chain n-alkanes: Implication for interpreting sedimentary leaf wax signals. *Organic Geochemistry*, 2018, **115**: 24-31. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2017.10.005.
- [41] Su RL, Li W. Advances in research on photosynthesis of submerged macrophytes. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, **40**(S1): 128-138. [苏睿丽, 李伟. 沉水植物光合作用的特点与研究进展. 植物学通报, 2005, **40**(S1): 128-138.]
- [42] Chen KN, Chen XF, Chen WM *et al.* Effects of sediments on submerged macrophytes growth. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(8): 1511-1516. [陈开宁, 陈小峰, 陈伟民等. 不同基质对四种沉水植物生长的影响. 应用生态学报, 2006, **17**(8): 1511-1516.]
- [43] Xia TX, Li WC, Xiong F. Submerged macrophytes distribution and water body nutrient contents in different type littoral zones of Fuxian Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26**(6): 846-852. [夏天翔, 李文熊, 熊飞. 抚仙湖不同类型岸带沉水植物分布及水体氮磷特征. 生态学杂志, 2007, **26**(6): 846-852.]
- [44] Wu ML, Li XY. Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(22): 7202-7212. [吴明丽, 李叙勇. 光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展. 生态学报, 2012, **32**(22): 7202-7212.]
- [45] Wang H, Pang Y, Liu SB *et al.* Research progress on influencing of environmental factors on the growth of submersed mac-

- rophytes. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(8): 3958-3968. [王华, 逢勇, 刘申宝等. 沉水植物生长影响因子研究进展. *生态学报*, 2008, **28**(8): 3958-3968.]
- [46] He KD, Gao W, Duan CQ *et al.* Water level variation and its driving factors in Lake Dianchi, Fuxian and Yangzong during 1988–2015. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1379-1390. DOI: 10.18307/2019.0504. [贺克雕, 高伟, 段昌群等. 滇池、抚仙湖、阳宗海长期水位变化(1988–2015 年)及驱动因子. *湖泊科学*, 2019, **31**(5): 1379-1390.]
- [47] Gao YM, Yin CY, Liu X *et al.* Changes of submerged macrophytes community in Lake Fuxian since 1960s. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 1209-1219. DOI: 10.18307/2021.0421. [高弋明, 殷春雨, 刘霞等. 抚仙湖近 60 年来沉水植物群落变化趋势分析. *湖泊科学*, 2021, **33**(4): 1209-1219.]
- [48] Hillman AL, Yao A, Abbott MB *et al.* Two millennia of anthropogenic landscape modification and nutrient loading at Dian Lake, Yunnan Province, China. *The Holocene*, 2019, **29**(3): 505-517. DOI: 10.1177/0959683618816504.
- [49] Li XJ, Liang LJ, Wu F *et al.* Variations of major elements and carbonate cycle of the northern South China Sea sediments and their paleoenvironmental significance. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(2): 411-421. [李小洁, 梁莲姬, 吴枫等. 南海北部沉积物常量元素变化、碳酸盐旋回及其古环境意义. *第四纪研究*, 2015, **35**(2): 411-421.]
- [50] Tan JF, Xiao XY, Li YL. Late Holocene climatic change revealed by sediment records in Gegongcuonaka Lake, northwestern Yunnan Province. *Quaternary Sciences*, 2018, **38**(4): 900-911. [谭金凤, 肖霞云, 李艳玲. 滇西北格贡错那卡湖沉积记录揭示的晚全新世气候变化. *第四纪研究*, 2018, **38**(4): 900-911.]
- [51] 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. DOI: 10.1016/j.palaeo.2016.07.017.
- [52] Fleitmann D, Burns SJ, Mudelsee M *et al.* Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman. *Science*, 2003, **300**(5626): 1737-1739. DOI: 10.1126/science.1083130.
- [53] Fleitmann D, Burns SJ, Mangini A *et al.* Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in *Stalagmites* from Oman and Yemen (*Socotra*). *Quaternary Science Reviews*, 2007, **26**(1/2): 170-188. DOI: 10.1016/j.quascirev.2006.04.012.
- [54] Dykoski CA, Edwards RL, Cheng H *et al.* A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **233**(1/2): 71-86. DOI: 10.1016/j.epsl.2005.01.036.
- [55] Liu XK, Liu JB, Chen SQ *et al.* New insights on Chinese cave $\delta^{18}\text{O}$ records and their paleoclimatic significance. *Earth-Science Reviews*, 2020, **207**: 103216. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103216.
- [56] Berger A, Loutre MF. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 1991, **10**(4): 297-317. DOI: 10.1016/0277-3791(91)90033-Q.
- [57] Li T, Zhang HC, Cai M *et al.* The composition of carbonate matters in the sediments from lake Fuxian and significance of paleoclimate and water level changes. *Quaternary Sciences*, 2019, **39**(3): 642-654. [李婷, 张虎才, 蔡萌等. 抚仙湖全新世自生碳酸盐及其区域气候和湖泊水位指示意义. *第四纪研究*, 2019, **39**(3): 642-654.]
- [58] He YX, Li XZ, Cao YN *et al.* Water depth variation and its impact on carbonate content and oxygen isotopes: A study from a satellite lake near Lake Qinghai over the past 7.6 kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, **562**: 110150. DOI: 10.1016/j.palaeo.2020.110150.
- [59] Maxwell AL. Holocene monsoon changes inferred from lake sediment pollen and carbonate records, northeastern Cambodia. *Quaternary Research*, 2001, **56**(3): 390-400. DOI: 10.1006/qres.2001.2271.