

云贵高原抚仙湖近 13 300 年的花粉/炭屑记录*

孙启发 沈才明** 王敏 蒙红卫 张虎才

(云南师范大学旅游与地理科学学院, 高原湖泊生态与全球变化重点实验室, 高原地理过程与环境
云南省重点实验室, 昆明 650500, sunqifa19920708@foxmail.com, cmshen@hotmail.com)

提要 抚仙湖是云贵高原著名的断陷深水湖, 其沉积物蕴藏着流域地质历史时期丰富的环境信息。对钻取自该湖的 900 cm 湖泊沉积物岩芯进行花粉/炭屑分析及花粉数据的主成分分析表明, 抚仙湖流域的植被、气候与火灾在过去的 13 300 年经历了 5 个阶段的变化: (1) 13 300—10 400 cal. a BP, 植被以松林为主, 伴有山地暗针叶林和常绿阔叶林, 表明该时期气候较为冷湿, 森林火灾多发, 在后期随着温度和湿度的降低, 森林火灾愈加频繁。 (2) 10 400—5 700 cal. a BP, 松林收缩, 常绿阔叶林扩张, 出现一定数量的落叶阔叶林, 显示该时期气候偏暖偏干; 此阶段早期随着气候变暖变干森林火灾的发生延续上阶段高发的状态, 直到 9 500 cal. a BP 后随着湿度的增加森林火灾明显减少。 (3) 5 700—1 800 cal. a BP, 松林变化较小, 常绿/落叶阔叶林比重增大, 首次出现了暖热性的枫香林, 显示该时期暖湿的气候特征, 火灾发生频率低。 (4) 1 800—500 cal. a BP, 松林扩张, 阔叶林收缩, 本阶段后期草本植被比重开始增加, 显示该时期气候相对冷干, 森林火灾发生频率较高。 (5) 500 cal. a BP 至今, 松林收缩, 落叶阔叶树种增多, 草本植物花粉明显增多, 显示该时期气候温凉偏干, 森林火灾发生频率降低。

关键词 花粉 炭屑 植被 气候 森林火灾 抚仙湖

1 前言

湖泊是陆地相对稳定的沉积区, 蕴藏着丰富的生物和环境变化信息。在热带和亚热带地区, 冰川、黄土不发育, 因而湖泊沉积物对于环境变化的研究显得尤为重要(宋学良等, 1994)。湖泊沉积物具有沉积连续、沉积速率较快、分辨率较高、信息量丰富的特点, 其花粉及炭屑记录是重建不同时间尺度的区域植被演替、气候变迁、森林火灾史乃至人类活动的重要手段(吴立等, 2008; 高鑫等, 2016; Tinner *et al.*, 1998; Pitkänen and Huttunen, 1999; Wick *et al.*, 2003)。在亚热带地区的云南, 利用湖泊沉积进行花粉学研究开始于上世纪 80 年代的中国-澳大利亚第四纪合作研究(Lin *et al.*, 1986; Liu *et al.*, 1986; Sun *et al.*, 1986), 随后的工作比较零散(吴艳宏等, 1998; Shen *et al.*, 2006), 直到近 10 年, 在滇西北和滇中地区才有较多成果出现(郑茜等, 2014;

Cook *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014; Xiao *et al.*, 2014, 2017; Yao *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2016)。

滇中湖群是云南最大的淡水湖泊群, 不仅包括了云南九大湖泊中面积最大的滇池和水深第一(全国第二)的抚仙湖, 还包括星云湖、杞麓湖和阳宗海。虽然滇池(吴艳宏等, 1998; Sun *et al.*, 1986)和星云湖(Chen *et al.*, 2014)已作了花粉学研究, 但是均未涉及与炭屑结合研究森林火灾史, 而抚仙湖的花粉及炭屑研究仍为空白。

抚仙湖属珠江流域南盘江水系的源头型湖泊, 为半封闭的山间盆地型深水淡水湖, 湖水主要靠降雨和四周山间小溪汇集补给, 而湖东岸与南盘江相通的海口河为唯一出水口且出水量很小(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 1990)。因此, 抚仙湖具备稳定的沉积环境, 湖泊沉积物能够记录区域环境演化的连续信息, 为区域环境演变研究提供良好的材料。本文以抚仙湖沉积物的花粉/炭屑分析来重

收稿日期: 2018-04-16

* 国家自然科学基金项目(批准号: 41372191, 41601201), 云南省高端科技人才引进项目(2013HA024)和云南省领军人才项目(2015HA024), 云南省科技计划重点项目(2014FA005)共同资助。

** 通讯作者。

建抚仙湖流域近 13 300 年的植被、气候与森林火灾史,为了解全新世我国西南地区环境变化和西南季风的演化提供新的认识。

2 研究区概况

抚仙湖(24°21′—24°38′N,102°49′—102°58′E)位于滇中地区,分属玉溪市的澄江、江川和华宁三县管辖。抚仙湖南北长 31.5 km,平均宽度为 6.7 km,北部宽阔,最宽处达 11.5 km,南部狭窄,最窄处仅 3.2 km;湖泊水域面积为 212 km²,流域面积为 674.7 km²,湖面海拔为 1 721 m;湖泊平均水深为 89.6 m,最大水深 155 m,是云贵高原最深的湖泊(插图 1)。抚仙湖是典型的高原断陷型深水湖泊,其流域湖泊沉积物位于小江断裂带上,是云南高原第三纪构造抬升形成的断陷湖盆(中国科学院南京地理与湖泊研究所,1990;王苏民、龚鸿身,1998)。抚仙湖流域属亚热带高原半湿润季风气候,附近的江川气象站过去 50 年的气象记录表明,年均温约为 15.8℃,年降水量约为 870 mm(插图 2)。

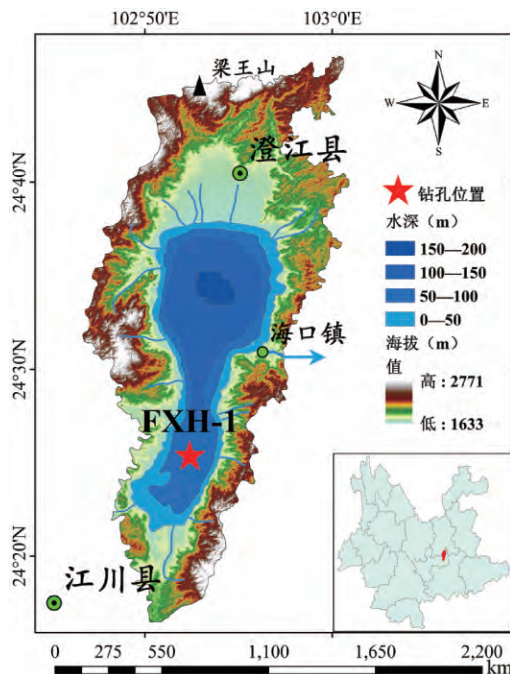


插图 1 抚仙湖地形图及钻孔位置图
Topographic map showing the location of Fuxian Lake and the coring site

抚仙湖流域的植被属于亚热带常绿针阔叶混交林,由自然植被和人工植被组成。流域内自然植被以暖温性针叶林、常绿和落叶阔叶林(灌木丛等)和灌草丛为主;人工植被主要为经济林、水田和旱地农

作物等;森林面积占流域陆地面积的 46.5%,主要树种为云南松(*Pinus yunnanensis*)、华山松(*P. armandii*)和栎(*Quercus*)等(孔维琳等,2012)。云南松林为现存林地的主要类型,主要分布在海拔 1 500—2 800 m 之间,常伴生有滇油杉(*Keteleeria evelyniana*)、滇栲(*Castanopsis delavayi*)、黄毛青冈(*Cyclobalanopsis delavayi*)、旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)等,林下灌木丛多以杜鹃花科(*Ericaceae*)、蔷薇科(*Rosaceae*)为主。海拔 2 000 m 以上到 2 500 m 也常有华山松林分布,多见于云南松林分布范围之上的海拔稍高较偏冷湿的山地以及坡缓、土层较厚和较为肥沃的生境或沟谷内部。此外,本地区落叶阔叶树种也相当丰富,较为常见的树种有滇朴(*Celtis tetrandra*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、滇合欢(*Albizia simeonis*)、滇楸(*Catalpa fargesii*)、化香(*Platycarya strobilacea*)等,但都少量混生于常绿阔叶林中(《云南植被》编写组,1987)。

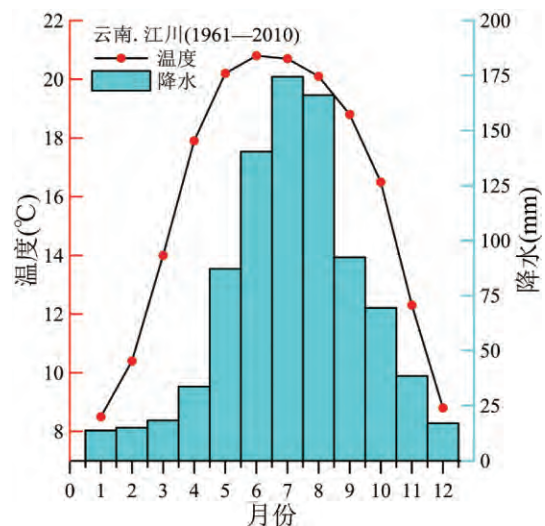


插图 2 抚仙湖地区的气候(江川气象站 1961—2010 的观测资料)
Climate in the Fuxian Lake region(observational data of 1960—2010 from Jiangchuan meteorological station)

3 材料与方法

2013 年 8 月在抚仙湖南部(24°25′24″N, 102°52′24″E)水深 81.2 m 处成功钻取 900 cm 长度的湖泊沉积物岩芯(编号 FXH-1,插图 1),岩芯提取后运抵云南师范大学高原湖泊生态与全球变化重点实验室进行低温保存。

FHX-1 孔岩芯年代框架由 7 个湖泊沉积物全样所作的 AMS ¹⁴C 测年建立(表 I 和插图 3)。

AMS ¹⁴C 年代测定在北京大学重离子物理教育部重点实验室完成。抚仙湖另一钻孔(FXH-6 钻孔) 3 cm 处的²¹⁰Pb 测年结果为 1 950 年,而 3 cm 处沉积物全样和湖泊现代沉水植物的 AMS ¹⁴C 测年分别为 160 和 106.7 a BP,说明抚仙湖碳库效应几乎可以不计(刘颖等,2017)。因此,FXH-1 孔的底部年龄估计为距今 13 300 年。根据所测的 7 个¹⁴C 年龄和设定表层年龄是 -60 cal. a BP,得出年代框架图(插图 3)。从插图 3 可以看出,整个钻孔的沉积速率差别较大,最大的可达 2.3 mm/a,最小的仅 0.2 mm/a。在 663—576 cm 和 382—320 cm 段是否存在沉积间断,尚需更多的年代数据作进一步分析确定,在本文中以不存在沉积间断处理。计算花粉/炭屑的沉积通量所需的沉积速率以插图 3 中的线性内插和多项式拟合确定。

对岩芯自上而下进行 20 cm 等间距取样,共获得 46 个样品。实验室样品处理以常规的氢氟酸法同步提取花粉和炭屑,用外加石孢子定量测定花粉和炭屑浓度(沈吉等,2010)。花粉及炭屑鉴定和统计工作在 Olympus 光学显微镜下进行。每个样品的陆生植物花粉至少统计 300 粒,46 个样品的平均统计花粉数是 670 粒(347—1 308 粒)。炭屑按粒径大小分为 0—50 μm、50—100 μm 和 >100 μm 三

个等级(李宜垠等,2010)。以陆生植物花粉为花粉总数计算了花粉百分比数据,而花粉和炭屑的沉积通量是根据它们的浓度和沉积速率求得。选择含量较高且生态指示意义较强的花粉类型利用 Tilia 软件(Grimm, 2004) 绘制花粉图谱,根据聚类分析(CONISS)(Grimm, 1987)的结果划分花粉组合带(插图 4)。为分析花粉谱的生态梯度及其影响因子,对生态意义较强的 14 个木本和草本花粉类型组成的数据组作了主成分分析(Principal component analysis, PCA)。

表 I 抚仙湖岩芯年代测定结果
AMS ¹⁴C dates of FXH-1 core from Fuxian Lake

Depth(cm)	Lab no.	¹⁴ C age/a BP	Calendar age /cal. a BP*
320	BA152014	2 165±25	2 280±20
382	BA152015	4 615±25	5 380±70
509	BA152016	5 840±25	6 650±90
576	BA152017	8 480±35	9 500±40
663	BA152018	9 215±35	10 380±120
770	BA152019	10 530±60	12 430±250
865	BA152020	10 920±70	12 840±140

* 以 IntCal13 校正的年代(Reimer et al., 2013)

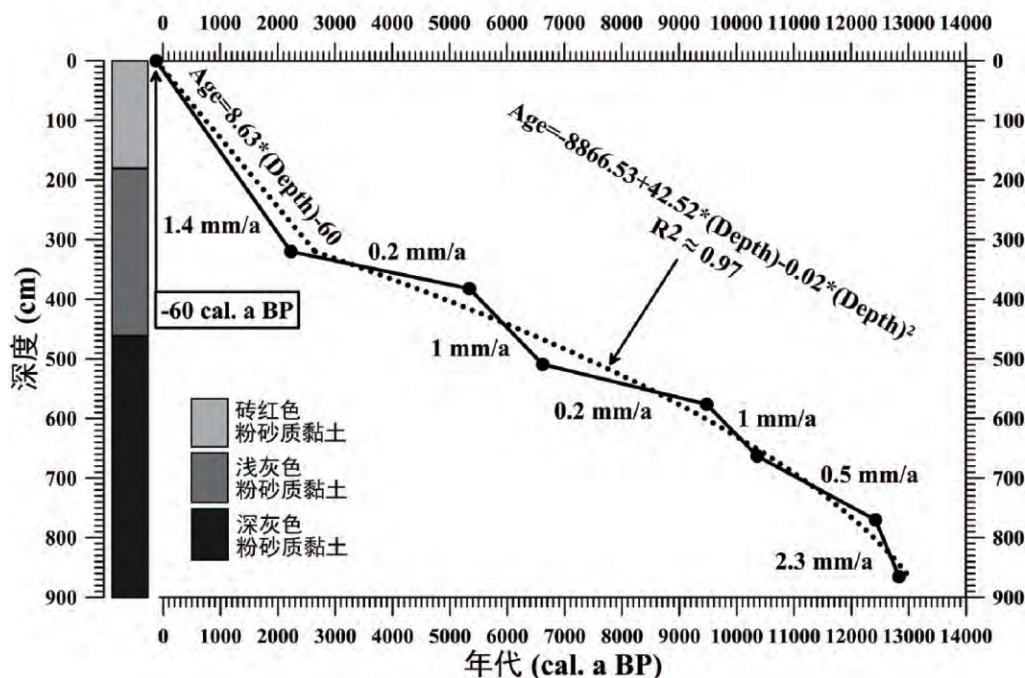


插图 3 抚仙湖 FXH-1 孔年代-深度模式

The age-depth model for FXH-1 core from Fuxian Lake

圆点为¹⁴C 校正年龄;点线为线性内插和多项式拟合年代模型。

Large dots are calibrated ¹⁴C dates and dot lines are linear interpolation and polynomial fitting models.

4 花粉及炭屑组合特征

在 46 个样品中,共鉴定出 54 个花粉类型。花粉组合以木本植物花粉占绝对优势,其百分含量平均值可达 93.9%;草本植物花粉很少,百分含量平均值仅为 6.1%。在乔木植物花粉中,松属(*Pinus*)花粉含量最高,平均百分比含量为 68.5%,次为常绿栎类(*Evergreen Quercus*)、落叶栎类(*Deciduous Quercus*)、柯属/栲属(*Lithocarpus/Castanopsis*)、栗属(*Castanea*)等壳斗科植物花粉,此外还有少量的云杉属/冷杉属(*Picea/Abies*)、铁杉属(*Tsuga*)、桤木属(*Alnus*)、桦木属(*Betula*)、榆属(*Ulmus*)、枫香属(*Liquidambar*)和枫杨属(*Pterocarya*)等花粉;陆生草本花粉主要有禾本科(*Poaceae*)、蒿属(*Artemisia*)和唇形科(*Labiatae*)等。

炭屑分析结果表明:各粒径的炭屑沉积通量呈现出较为一致的变化趋势,其中 0—50 μm 粒径的炭屑沉积通量最高,波动起伏最大;50—100 μm 炭屑沉积通量次之;从近 13 300 年的变化趋势来看,早期炭屑沉积通量最高,中期炭屑沉积通量最低,晚期炭屑沉积通量有所升高且波动较大。

根据聚类分析的结果,将 46 个样品的花粉谱(百分比数据和花粉通量数据)划为 5 个花粉带(插图 4,5)。各花粉带的特征描述如下:

花粉带 I (900—650 cm; 13 300—10 400 cal. a BP):本带以木本植物花粉为主,百分含量达 97.2% (带平均含量,下同),草本植物花粉仅为 2.8%。木本植物花粉以针叶乔木为主,松属花粉占绝对优势(73.2%),其次是山地暗针叶林主要树种的铁杉属(2.9%)和云杉属/冷杉属(2.4%)。常绿阔叶树种含量也较高,如常绿栎(8%)和柯属/栲属(3.9%)。在陆生草本植物中,以禾本科为主,还有少量的蒿属和唇形科等。此带的花粉沉积通量较高,在 5 136—24 626 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)之间波动,平均值为 9 351 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)。本带各种类型的炭屑沉积通量波动很大,在 27 539—65 754 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)之间波动,炭屑总沉积通量较高,平均值为 40 707 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)。

花粉带 II (650—430 cm; 10 400—5 700 cal. a BP):本带以针叶树花粉的减少及常绿和落叶阔叶树种花粉的进一步增加为特点。松属花粉含量从上带的 73.2% 下降到 66%,铁杉属(1.1%)及云杉属/冷杉属(0.6%)也有所下降。常绿阔叶乔木的常绿栎类(8.2%)仍有一定的花粉含量,柯属/栲属

(5.3%)以及落叶阔叶乔木的落叶栎类(4.9%)、栗属(1.6%)和桤木属(2.6%)花粉含量均有不同程度的增加。在陆生草本植物中,禾本科含量相对较高(1.9%),其次为蒿属、唇形科等。此带的花粉沉积通量与上带相比波动较小,在 4 716—6 888 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)之间变化,平均值为 5 846 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)。本带各种类型的炭屑沉积通量从峰值急剧下降到低值,炭屑总沉积通量在 7 995—72 986 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)之间变化,平均值为 25 861 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)。

花粉带 III (430—210 cm; 5 700—1 800 cal. a BP):本带以常绿阔叶树种柯属/栲属花粉的减少及落叶阔叶树种榆属和枫香属花粉的增加区别于上带。针叶乔木花粉松属(63%)、铁杉属(1.4%)及少量云杉属/冷杉属与上带区别不大,常绿栎(8.9%)和落叶栎类(5.6%)也无明显变化。但常绿阔叶的柯属/栲属(2.3%)减少相对明显。落叶阔叶树种的榆属(2.5%)、枫香属(2.4%)和枫杨属(1%)的增加相对明显。陆生草本植物花粉含量仍低,主要是禾本科(1.6%)和唇形科(1.7%)。此带的花粉沉积通量总体呈递增趋势,在 3 311—12 815 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)之间,平均值为 7 099 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)。各种类型的炭屑沉积通量整体上波动较小,各种类型的炭屑沉积通量平均含量在 900 cm 岩芯中较低。炭屑总沉积通量变化在 4 446—17 068 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)之间,平均值为 9 646 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)。

花粉带 IV (210—70 cm; 1 800—500 cal. a BP):本带以针叶树松属花粉的明显增加和阔叶树花粉的显著减少为特征。松属花粉含量从上带的 63% 大幅上升至 78%,其它针叶树如铁杉属及云杉属/冷杉属的花粉含量极少。常绿阔叶树种常绿栎类(4.9%)和柯属/栲属(1.1%)及落叶阔叶乔木的落叶栎类(3.4%)、栗属(1%)花粉明显减少,其它落叶阔叶树种如榆属、枫香属、枫杨属和桦木属花粉从上带的少量出现,到此带仅零星出现或消失。在陆生草本植物中,禾本科含量由 1.6% 增加至 3.5%,蒿属及唇形科变化不明显。此带的花粉沉积通量平均值为整个岩芯最高,花粉沉积通量经历了一个先增多后减少的趋势,在 1 698—17 987 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)之间变化,平均值为 10 574 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)。本带各种类型的炭屑沉积通量也呈现一个递减的趋势,炭屑总沉积通量变化在 3 736—25 464 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)之间,平均值为 14 695 粒/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}$)。

花粉带 V (70—0 cm; 500 cal. a BP 至今):本带以针叶树种松属花粉的急剧减少和草本植物禾本科

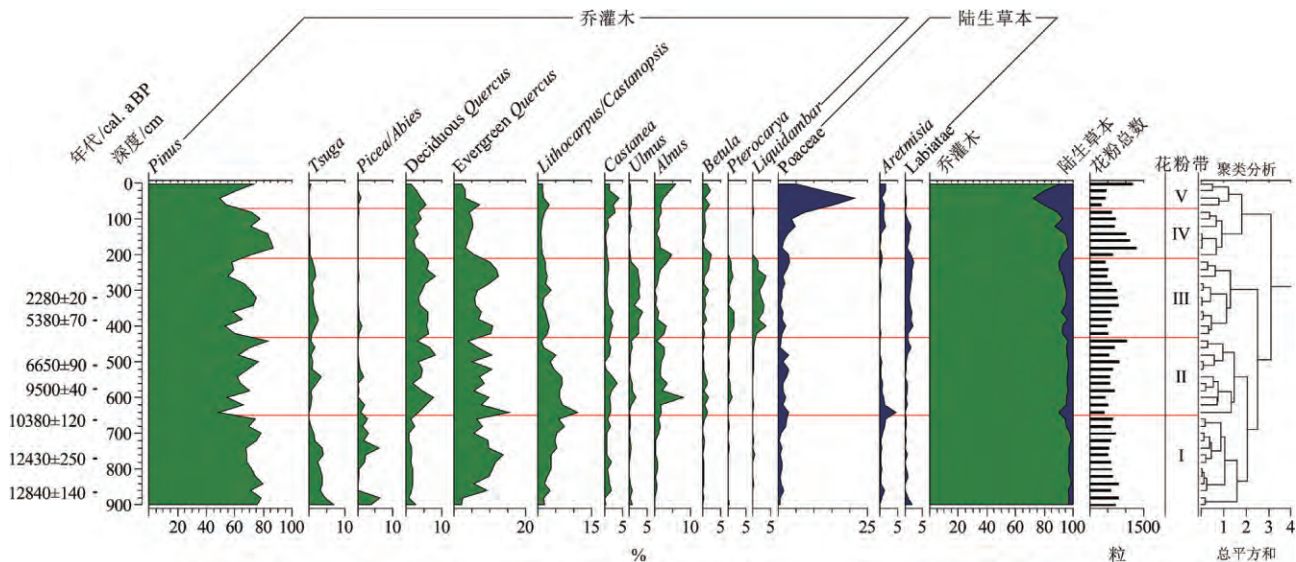


插图 4 抚仙湖 FXH-1 钻孔主要花粉类型百分比图

Pollen percentage diagram of selected pollen taxa for FXH-1 core from Fuxian Lake

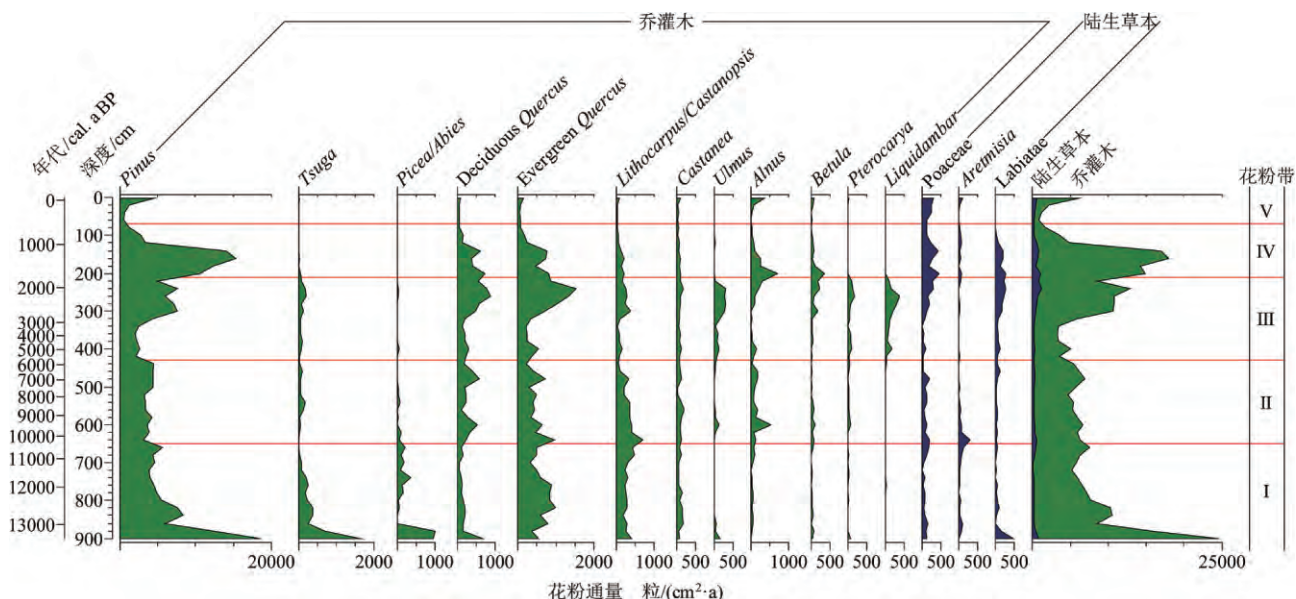


插图 5 抚仙湖 FXH-1 钻孔主要花粉类型沉积通量图

Pollen influx diagram of selected pollen taxa for FXH-1 core from Fuxian Lake

花粉的明显增加为主要特征。松属花粉含量从 78% 下降至 59%，禾本科花粉含量从上带 3.5% 急剧增加到 13.7%。此外，一些落叶阔叶树种的花粉增加，如栗属花粉含量从上带 1% 升至 2.3%，柃木属含量由 1.9% 增至 3.6%。其它乔木树种的花粉含量变化不大。此带的花粉沉积通量在 60 cm 处降至本钻孔的最低值 836 粒/(cm²·a)，之后持续递增至最上部的 6 082 粒/(cm²·a)，平均值为 2 576 粒/(cm²·a)。本带各种类型的炭屑沉积通量平均含量较低且略有波动，炭屑总沉积通量变化在 2 588—7 046 粒/(cm²·a) 之间，平均值为 4 697

粒/(cm²·a)。

5 花粉/炭屑记录的植被、气候和火灾

抚仙湖位于澄江盆地，四周是山地，无大河注入，仅有尖山河、东大河、西大河等二十余条山间溪流汇入，是相对比较封闭的湖盆，故钻孔花粉源主要是湖泊沿岸植被和湖泊流域的山地植被。FHX-1 孔花粉记录主要反映了抚仙湖流域的区域植被。为探讨抚仙湖 FHX-1 孔 46 个化石花粉谱的主要生态变化梯度及其影响因子，本研究选择了一个花粉含

量较高($>2\%$)、生态指示意义较强的 14 个花粉类型组成的数据组。14 个花粉类型为松属、常绿栎类、落叶栎类、柯属/栲属、栗属、云杉属/冷杉属、铁杉属、桫木属、桦木属、榆属、枫香属、枫杨属、禾本科和蒿属。此数据组的 PCA 结果表明,第一、二主成分分别解释了数据组总体变化的 30% 和 25.1%。插图 6 为各花粉种属在第一和第二主成分轴上的载荷。在第一主成分轴上,高正载荷的是针叶树铁杉属和云杉属/冷杉属花粉,而高负载荷是草本植物禾本科与落叶阔叶植物桫木属花粉。铁杉属是云南温凉性针叶林云南铁杉林的建群属种,云杉属/冷杉属是寒温性针叶林云冷杉林的建群属种,它们主要生长于森林垂直带的较高海拔,生境的一个共有特性是湿度高(年平均湿度通常大于 75%);而草本植物禾本科和阔叶乔木桫木属是相对耐旱的植物。因此,第一主成分轴反映了植被演替过程中的湿度梯度,是湿度的代用指标。在第二主成分轴上,高正载荷的是枫香属和榆属花粉,高负载荷的是松属和云杉属/冷杉属花粉。枫香属是云南暖热性阔叶林枫香林的主要建群种(《云南森林》编写委员会,1986);榆属目前在云南地区主要有分布于滇东南的常绿越南榆(*Ulmus tonkinensis*)、滇南和滇西的常绿榆(滇榆)(*U. lanceafolia*)以及滇中的昆明榆(*U. kunmingensis*),前两者是暖热性阔叶林的主要成分,后者是暖性阔叶林的常见种属(傅立国,1980);相反,云杉属/冷杉属是寒温性针叶林的建群属种,而松属在云南是温凉性针叶林和暖性针叶林云南松林的主要建群属种(《云南森林》编写委员会,1986)。因此,第二主成分轴反映了植被演替过程中的温度梯度,是温度的代用指标。

植被类型的差异受到气候、地形、水分和土壤等自然因素影响和控制,植被类型的差异会导致不同的花粉组合,湖泊沉积物中的化石花粉组合是所在流域内不同历史时期植被的表征(沈吉等,2010)。因此,湖泊沉积物中化石花粉组合,不仅反映了古植被的演替,还反映了流域气候的变化。炭屑是森林火灾发生后,植物不完全燃烧的产物,是森林火灾的代用指标。湖泊沉积的不同粒径炭屑通常反映了炭屑的来源。粒径小于 $50\ \mu\text{m}$ 的炭屑来自于区域性森林火灾,而粒径大于 $50\ \mu\text{m}$ 的炭屑来自于地方性森林火灾(李宜垠等,2010)。因此,炭屑沉积通量的变化反映森林火灾发生的频率和强度变化。花粉组合、PCA 结果以及炭屑记录(插图 7)表明,抚仙湖流域的植被演替、气候变化与森林火灾在过去的

13 300 年经历了 5 个阶段的变化,各阶段的植被、气候和森林火灾情况描述如下:

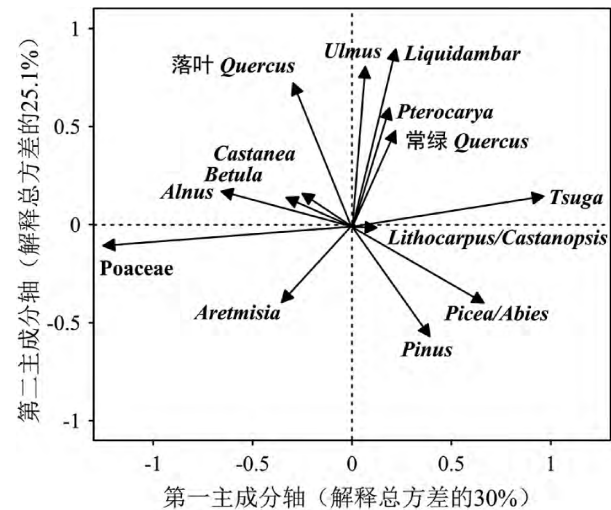


插图 6 花粉类型在第一和第二主成分轴上的载荷
Loadings of pollen taxa on the first and second principal component axes

第一阶段(13 300—10 400 cal. a BP):该阶段的花粉组合表明,抚仙湖流域生长着以寒温性和温凉性针叶林为主的植被,主要包括寒温性的云冷杉林及温凉性的铁杉林和松林。此外,早期常绿栎类和柯属/栲属组成的暖性阔叶林比重持续增加,后期暖性阔叶林保持早期的规模,但成分有所变化,常绿栎类减少,柯属/栲属增多。花粉沉积通量较高,表明此时植被覆盖度较好(生物量高),其中以富含油脂的松科(松属、铁杉属、云杉属/冷杉属)树种占绝对优势,为森林火灾多发提供了物质条件。PCA 分析指示气候较为冷湿,湿度在本阶段后期急剧降低。该阶段的炭屑沉积通量持续增多,并在该阶段末期达到本钻孔炭屑沉积通量的一个峰值,说明由于湿度急剧下降导致更加频繁的森林火灾。

第二阶段(10 400—5 700 cal. a BP):花粉组合表明,流域内松林收缩,由常绿栎和柯属/栲属和一定数量落叶阔叶树种如落叶栎、桫木属和栗属组成的常绿阔叶林扩张,铁杉林和云冷杉林进一步减少。早期的花粉沉积通量与上一阶段相比变化不大,表明植被覆盖度也与上一阶段大致相同,后期花粉沉积通量下降,可能部分归因于异常低的沉积速率。PCA 结果显示暖干气候,但较现在要温暖湿润,温度总体是由冷转暖,湿度由湿润转向偏干。炭屑沉积通量在此阶段早期达到整个 13 300 年的最高值,是森林火灾最为频繁的时期;中后期炭屑沉积通量逐渐降低,指示火灾的减少。

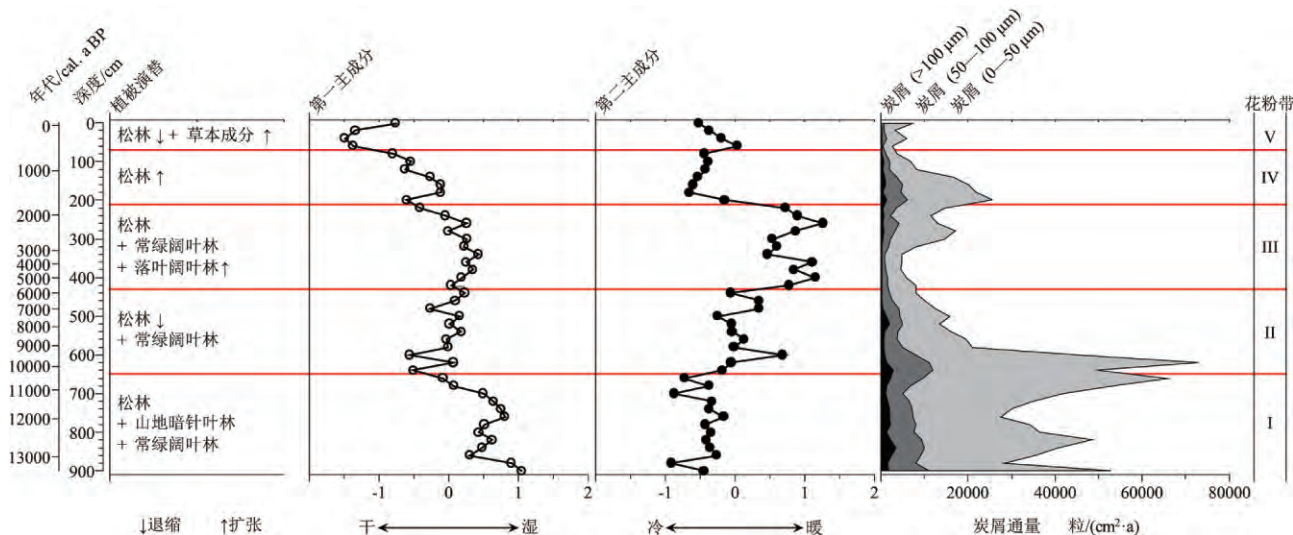


插图 7 抚仙湖 FXH-1 钻孔花粉和炭屑记录的流域植被演替、气候变化和森林火灾史

Vegetation succession, climate change, and forest fire history documented by pollen and charcoal records from FXH-1 core of Fuxian Lake

第三阶段(5 700—1 800 cal. a BP):花粉组合表明,流域内松林范围与上带相似,虽有所波动,铁杉和云冷杉分布范围小或混生于松林中;常绿阔叶林成分仍以常绿栎和柯属/栲属为主,后者有所减少,见到较多的落叶阔叶树种榆属、栗属和枫杨属等;此阶段的特别之处是暖热性的枫香林的出现;早期花粉沉积通量和上阶段晚期的一样较低,可能的原因是异常的沉积速率,后期的花粉沉积通量超过第一阶段的水平,意味着较第一阶段高的植被覆盖度。PCA 结果指示暖湿的气候特征,温度和湿度均高于现在。炭屑沉积通量保持在较低水平,表明较低的火灾发生频率。

第四阶段(1 800—500 cal. a BP):花粉组合表明,流域内松林扩张,常绿阔叶林明显减少,铁杉林和云冷杉林基本消失。花粉沉积通量高,为过去 13 300 年之最,反映高植被覆盖度。PCA 结果显示相对冷干的气候,温度急剧下降,同时伴随的是湿度的下降,也意味着降水的明显减少。在此阶段,炭屑沉积通量出现一个小高峰,表明较高的森林火灾发生频率。

第五阶段(500 cal. a BP 至今):花粉组合表明,流域内松林收缩,常绿阔叶林范围与上阶段相似,常绿阔叶成分变化较小,但栗属和桤木属等落叶阔叶成分有所增多。本阶段与其它阶段最明显的区别是禾本科植物的高值,可能指示人类农业活动的加强。花粉沉积通量在 500 cal. a BP 左右降至本钻孔的最低值,之后有所增加,表明植被盖度的明显降低。PCA 结果表明凉干的气候。炭屑沉积通量低,表明

火灾发生频率较低。

6 气候变化和森林火灾的区域对比

抚仙湖花粉记录表明,冷湿气候是 13 300—10 400 cal. a BP 期间的古气候特征。此气候特征在云南地区,特别是中部地区具有一定的普遍性。例如,邻近滇池的花粉记录反映 13 000—10 000 ^{14}C a BP 为冷(凉)湿气候(吴艳宏等,1998;Sun *et al.*, 1986);大理洱海和西湖的花粉记录也表明 13 000—10 300 cal. a BP 洱海流域气候具有冷偏湿或温凉较湿的特征(Lin *et al.*, 1986;Shen *et al.*, 2004);保山腾冲青海火山湖的花粉记录和重建的年降水量指示 12 900—11 500 cal. a BP 为一次冷事件,年降水量与现代相当(Yang *et al.*, 2016;Xiao *et al.*, 2017)。但在滇西北地区,冷干为主要的古气候特征;例如,属都湖花粉记录反映 22 600—10 500 cal. a BP 为冷干气候(Cook *et al.*, 2011);12 230—11 510 cal. a BP 天才湖流域植被主要为高山草甸,指示气候相对冷干(Xiao *et al.*, 2014);在泸沽湖流域,花粉记录和 CaCO_3 (降水代用指标)表明,12 300—10 300 cal. a BP 气候相对偏暖(但比现在低)且干(郑茜等,2014)。

此阶段的大部分时间相当于新仙女木冷事件的时段(12 900—11 700 cal. a BP),因此,从区域古气候的对比来看,新仙女木冷事件在云南有明显的表现,无论是滇中地区还是滇西北地区均以冷气候为主。但在湿度上滇中和滇西北有着不同的模式,滇

中偏湿,滇西北偏干。造成此格局的原因可能与云南现代降水分布的主导因素一样:云南现代降水分布南高北低,主要是因为来自西南季风的暖湿气流在翻山越岭北上时水分逐渐减少(王宇,2016)。新仙女木冷事件时,降水在滇中地区仍有与现在大致相对的量(Yang *et al.*, 2016),但在滇西北可能比现在要低,从而导致虽然温度明显降低但湿度并没有增加。

抚仙湖花粉记录表明,10 400—5 700 cal. a BP 的古气候比上阶段偏暖偏干,但相对于现在要温暖湿润,随后的一个阶段(5 700—1 800 cal. a BP)是抚仙湖地区全新世最为暖湿的时期。抚仙湖全新世主要时段的古气候特征与云南其它地区相比较,有一致性的方面,也有其特殊性的地方。10 400—5 700 cal. a BP 时期的气候比现在暖湿,这一特征不仅在滇中如滇池流域、洱海流域、星云湖流域、青海火山湖地区能见到,而且在滇西北的天才湖、哈里谷湖、泸沽湖流域也能见到(吴艳宏等,1998;郑茜等,2014;Shen *et al.*, 2006;Song *et al.*, 2012;Chen *et al.*, 2014;Xiao *et al.*, 2014, 2017)。但是,最为暖湿的时期在始末时间、持续时间长短、气候条件(气温、降雨、湿度)等方面在不同的地区有很大的不同。吴艳宏等(1998)在滇池地区的研究认为,7 500—4 000 ^{14}C a BP 气候暖湿,达到了水热条件的最佳配置,4 000 ^{14}C a BP 后气候转干;沈吉等(2004)对洱海流域的研究认为 8 400—6 400 cal. a BP 是最温暖的时期;Yang 等(2016)对腾冲青海火山湖年降水量的重建表明,8 000—7 000 cal. a BP 是全新世年降水量最大的时期;Xiao 等(2014)对天才湖的研究发现,6 100—3 410 cal. a BP,铁杉林规模扩张到全新世最大,指示该时期是该地区全新世气候最为暖湿的时期。这些对比表明,“全新世气候最适宜期”(The Holocene climate optimum)或全新世最暖湿时期在云南难于得到一个比较统一的认识,可能原因包括由于云南特殊的地形地貌导致的气候区域差异和对暖湿水热条件的认识差异等。这也说明了应用花粉资料和其它代用指标作古气候定量重建的重要性。

1 800 cal. a BP 以后,抚仙湖流域松林扩张。滇中地区的松树主要包括云南松和华山松,它们通常是常绿阔叶林破坏后的次生植被成分,因此,它的急剧扩张代表着人类活动的加强。洱海流域较为强烈的人类活动开始出现在 2 100 cal. a BP(沈吉等, 2004),滇池地区则开始于约 1 700 ^{14}C a BP(吴艳宏

等,1998)。Chen 等(2014)对邻近星云湖的研究指出,1 000 cal. a BP 以来,柞木林等次生林扩张及禾本科、蒿属等草本植被比重上升,反映了人类砍伐森林进行农业生产活动的状态。500 cal. a BP 后我们的花粉记录也反映同样的情况,而且在次生林扩张后出现森林面积的大幅减少。因此,尽管抚仙湖花粉记录反映了 1 800 cal. a BP 以后的冷干的气候特征,但导致这种从前期的暖湿气候变为冷干气候的成因,部分在于气候的自然变化,部分在于人类活动加强导致的植被变化。

我们的研究表明,在过去的 13 300 年里,抚仙湖流域森林火灾存在两个高发期阶段。前一个阶段是 13 300—9 500 cal. a BP,其早期(13 300—10 800 cal. a BP)森林火灾频率高,其后期(10 800—9 500 cal. a BP)森林火灾异常高,达到了过去 13 300 年的顶峰;后一个阶段是 1 800—500 cal. a BP。腾冲青海火山湖过去 13 300 年的炭屑记录也显示两个森林火灾高发期阶段,分别出现在 13 000—11 500 和 4 000—900 cal. a BP(Xiao *et al.*, 2017)。两个花粉/炭屑记录(抚仙湖和腾冲青海火山湖)均表明,在全新世早中期的暖湿条件下,森林火灾均非常少。很显然,冷事件(如 12 900—11 700 cal. a BP 的新仙女木冷事件)或冷气候阶段(如 1 800—500 cal. a BP)或气候由冷转暖的转折期(如 10 800—9 500 cal. a BP)是森林火灾高发的时期,因此,冷气候是云南森林火灾频率增加的气候驱动因子之一。原因可能是冷气候不利于枯枝落叶的分解(刘文耀等, 2000),从而有利于森林火灾所需燃料的堆积。就受西南季风影响的滇中地区而言,气候有明显的旱季和雨季,即使在湿环境条件下旱季气候仍相对干旱,燃料的积累有利于森林火灾或大火灾的发生,如果湿度高表现为降水的季节性增强(降水主要集中于雨季,旱季特别干燥),则更容易发生森林火灾。同时,如前所述,1 800 cal. a BP 以后人类活动显著加强,因此,人类活动在云南森林火灾活动中有着不可低估的影响。

7 结 论

抚仙湖花粉记录反映了该流域近 13 300 年的植被、气候与火灾状况:

(1) 植被经历了松林+山地暗针叶林+常绿阔叶林(13 300—10 400 cal. a BP)→松林收缩+常绿阔叶林(10 400—5 700 cal. a BP)→松林+常绿阔

叶林+落叶阔叶树增多(5 700—1 800 cal. a BP)→松林扩张(1 800—500 cal. a BP)→松林收缩+草本增多(500 cal. a BP 至今)的演替过程。抚仙湖流域绝大部分时期植被以松林和常绿阔叶林为主,后期受气候和人类活动的干预,植被覆盖度降低,草本比重增加。近 500 年以来禾本科植物的高值,可能指示人类农业活动的加强。

(2) 气候经历了由冷湿→相对暖干→暖湿→相对冷干→凉干的变化过程,温度大致反映了一个低温→升温→高温→降温的变化趋势,湿度总体呈一个越来越干的变化趋势。

(3) 炭屑记录则反映频发的森林火灾主要出现在 13 300—9 500 cal. a BP 和 1 800—500 cal. a BP,冷气候是云南森林火灾频率增加的气候驱动因子之一。

致谢 感谢云南师范大学高原湖泊生态与全球变化重点实验室的段立曾、黄林培、赵帅营、王磊老师和李华勇博士等人在野外采样及室内分样等方面给予的指导和帮助。感谢审稿专家提出的有益修改意见。

参 考 文 献 (References)

- Chen F H, Chen X M, Chen J H, Zhou A F, Wu D, Tang L Y, Zhang X J, Huang X Z, Yu J Q, 2014. Holocene vegetation history, precipitation changes and Indian Summer Monsoon evolution documented from sediments of Xingyun Lake, south-west China. *Journal of Quaternary Science*, **29**(7): 661—674.
- Cook C G, Jones R T, Langdon P G, Leng M J, Zhang E, 2011. New insights on Late Quaternary Asian palaeomonsoon variability and the timing of the Last Glacial Maximum in southwestern China. *Quaternary Science Reviews*, **30**(7-8): 808—820.
- Editorial Board for Yunnan Forests(《云南森林》编写委员会), 1986. *Forests of Yunnan*. Kunming: Yunnan Science and Technology Press. 1—572(in Chinese).
- Editorial Group for Yunnan Vegetation(《云南植被》编写组), 1987. *Vegetation of Yunnan*. Beijing: Science Press. 1—1024(in Chinese).
- Fu Li-guo(傅立国), 1980. Notulae de *Ulmus sinensis*. *Journal of North-Eastern Forestry Institute(东北林学院学报)*, **3**: 3—42 (in Chinese with English abstract).
- Gao Xin(高鑫), Jia Tie-fei(贾铁飞), Xu Qing-hai(许清海), Wang A-min(王阿敏), 2016. Records of lacustrine sedimentology and pollen-charcoal assemblages responding to climate change and human activities in Zhongzhouxi Oxbow Lake, Hubei Province for about 70 years. *Quaternary Sciences(第四纪研究)*, **36**(6): 1445—1455(in Chinese with English abstract).
- Grimm Eric C, 1987. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers & Geosciences*, **13**(1): 13—35.
- Grimm Eric C, 2004. Tilia software 2. 0. 2. Illinois State Museum Research and Collection Center, Springfield.
- Kong Wei-lin(孔维琳), Wang Yu-zhou(王余舟), Xiang Ling(向伶), Wang Chong-yun(王崇云), He Zhao-rong(和兆荣), Yang Shu-hua(杨树华), 2012. An analysis on the landscape pattern of the vegetation in Fuxian Lake basin in Yunnan. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences(云南大学学报自然科学版)*, **34**(4): 468—475(in Chinese with English abstract).
- Li Yi-yin(李宜垠), Hou Shu-fang(侯树芳), Zhao Peng-fei(赵鹏飞), 2010. Comparison of different quantification methods for microfossil charcoal concentration and the implication for human activities. *Quaternary Sciences(第四纪研究)*, **30**(2): 356—363 (in Chinese with English abstract).
- Lin S M, Qiao Y L, Walker D, 1986. Late Pleistocene and Holocene vegetation history at Xihu, Eryuan, Yunnan Province, southwest China. *Journal of Biogeography*, **13**(5): 419—440.
- Liu J L, Tang L Y, Qiao Y L, Head M J, Walker D, 1986. Late Quaternary vegetation history at Menghai, Yunnan Province, southwest China. *Journal of Biogeography*, **13**(5): 399—418.
- Liu Wen-yao(刘文耀), Liu Lun-hui(刘伦辉), Jing Gui-fen(荆桂芬), He Ai-jun(和爱军), 2000. Decomposition of leaf litter in *Pinus yunnanensis* forest and evergreen broad-leaved forest in central Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica(云南植物研究)*, **22**(3): 298—306(in Chinese with English abstract).
- Liu Ying(刘颖), Sun Hui-ling(孙惠玲), Zhou Xiao-juan(周晓娟), Duan Li-zeng(段立曾), Li Hua-yong(李华勇), Zhang Hu-cai(张虎才), 2017. Paleoenvironmental significance of organic carbon isotope in lacustrine sediments in Lake Fuxian during the past 5 ka. *Journal of Lake Sciences(湖泊科学)*, **29**(3): 722—729(in Chinese with English abstract).
- Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences(中国科学院南京地理与湖泊研究所), 1990. *Fuxian Lake*. Beijing: Ocean Press. 1—7(in Chinese).
- Pitkänen A, Huttunen P, 1999. A 1300-year forest-fire history at a site in eastern Finland based on charcoal and pollen records in laminated lake sediment. *Holocene*, **9**(3): 311—320.
- Reimer P J, Bard E, Bayliss A, Beck J W, Blackwell P G, Ramsey C B, Buck C E, Cheng H, Edwards R L, Friedrich M, 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0—50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, **55**: 1869—1887.
- Shen J, Jones R T, Yang X D, Dearing J A, Wang S M, 2006. The Holocene vegetation history of Lake Erhai, Yunnan Province southwestern China: the role of climate and human forcings. *Holocene*, **16**(2): 265—276.
- Shen Ji(沈吉), Xue Bin(薛滨), Wu Jing-lu(吴敬禄), Wu Yan-hong(吴艳宏), Liu Xing-qi(刘兴起), Yang Xiang-dong(羊向东), Liu Jian(刘健), Wang Su-min(王苏民), 2010. *Lake Deposition and Environmental Evolution*. Beijing: Science

- Press. 1—473(in Chinese).
- Shen Ji(沈吉), Yang Li-yuan(杨丽原), Yang Xiang-dong(羊向东), Matsumoto R, Tong Guo-bang(董国榜), Zhu Yu-xin(朱育新), 2004. Climate change and lake record of human activities in Erhai Lake Basin, Yunnan Province since the Holocene. *Science in China Series D-Earth Sciences(中国科学 D 辑地球科学)*, **34**(2):130—138(in Chinese with English abstract).
- Sun X J, Wu Y S, Qiao Y L, Walker D, 1986. Late Pleistocene and Holocene vegetation history at Kunming, Yunnan Province, southwest China. *Journal of Biogeography*, **13**(5):441—476.
- Song Xue-liang(宋学良), Wu Yu-an(吴遇安), Jiang Zhi-wen(蒋志文), 1994. *Ancient Limnology Research Central Plateau Lakes in Yunnan Limestone Area*. Kunming: Yunnan Science and Technology Press. 1—124
- Song X Y, Yao Y F, Wortley A H, Paudyal K N, Yang S H, Li C S, Blackmore S, 2012. Holocene vegetation and climate history at Haligu on the Jade Dragon Snow Mountain, Yunnan, SW China. *Climatic Change*, **113**(3-4):841—866.
- Tinner W, Conedera M, Ammann B, Gaggeler H W, Gedye S, Jones R, 1998. Pollen and charcoal in lake sediments compared with historically documented forest fires in southern switzerland since AD 1920. *Holocene*, **8**(1):31—42.
- Wang Su-min(王苏民), Dou Hong-shen(窦鸿身), 1998. *Lakes in China*. Beijing: Science Press. 1—580(in Chinese).
- Wang Yu(王宇), 2006. *Climate of Yunnan Mountain Climate*. Kunming: Yunnan Science and Technology Press. 1—412(in Chinese).
- Wick L, Lemcke G, Sturm M, 2003. Evidence of Lateglacial and Holocene climatic change and human impact in eastern Anatolia; high-resolution pollen, charcoal, isotopic and geochemical records from the laminated sediments of Lake Van, Turkey. *Holocene*, **13**(13):665—675.
- Wu Li(吴立), Wang Xin-yuan(王心源), Zhang Guang-sheng(张广胜), Xiao Xia-yun(肖霞云), 2008. Vegetation evolution and climate change since the Holocene recorded by pollen-charcoal assemblages from lacustrine sediments of Chaohu Lake in Anhui Province. *Journal of Palaeogeography(古地理学报)*, **10**(2):183—192(in Chinese with English abstract).
- Wu Yan-hong(吴艳宏), Wu Rui-jin(吴瑞金), Xue Bin(薛滨), Qian Jun-long(钱君龙), Xiao Jia-yi(萧家仪), 1998. Paleoenvironmental evolution in Dianchi Lake area since 13ka BP. *Journal of Lake Sciences(湖泊科学)*, **10**(2):5—9(in Chinese with English abstract).
- Xiao X Y, Haberle S G, Shen J, Xue B, Burrows M, Wang S, 2017. Postglacial fire history and interactions with vegetation and climate in southwestern Yunnan Province of China. *Climate of the Past*, **13**(6):1—23.
- Xiao X Y, Haberle S G, Shen J, Yang X D, Han Y, Zhang E L, Wang S M, 2014. Latest Pleistocene and Holocene vegetation and climate history inferred from an alpine lacustrine record, northwestern Yunnan Province, southwestern China. *Quaternary Science Reviews*, **86**:35—48.
- Yang Y P, Zhang H C, Chang F Q, Meng H W, Pan A D, Zheng Z, Xiang R, 2016. Vegetation and climate history inferred from a Qinghai Crater Lake pollen record from Tengchong, southwestern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **461**:1—11.
- Yao Y F, Song X Y, Wortley A H, Blackmore S, Li C S, 2015. A 22 570 yr record of vegetational and climatic change from Wenhai Lake in the Hengduan mountains biodiversity hotspot, Yunnan, southwest China. *Biogeosciences*, **12**(5):1525—1535.
- Zhang E L, Sun W W, Zhao C, Wang Y B, Xue B, Shen J, 2015. Linkages between climate, fire and vegetation in southwest China during the last 18.5 ka based on a sedimentary record of black carbon and its isotopic composition. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **435**:86—94.
- Zheng Qian(郑茜), Zhang Hu-cai(张虎才), Ming Qing-zhong(明庆忠), Chang Feng-qin(常凤琴), Meng Hong-wei(蒙红卫), Zhang Wen-xiang(张文翔), Liu Meng-zhu(刘梦竹), Shen Cai-ming(沈才明), 2014. Vegetation and environmental changes since 15ka B. P. recorded by Lake Lugu in the southwest monsoon domain region. *Quaternary Sciences(第四纪研究)*, **34**(6):1314—1326(in Chinese with English abstract).

POLLEN/CHARCOAL RECORD OVER THE PAST 13 300 YEARS FROM FUXIAN LAKE IN THE YUNNAN-GUIZHOU PLATEAU

SUN Qi-fa, SHEN Cai-ming, WANG Min, MENG Hong-wei and ZHANG Hu-cai

(Key Laboratory of Plateau Lake Ecology and Global Change, Yunnan Provincial Key Laboratory of Plateau Geography Process and Environment Changes, College of Tourism and Geographical Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500)

Key words Pollen, charcoal, vegetation, climate, forest fire, Fuxian Lake

Abstract

Fuxian Lake is a well-known rift deep-water lake on the Yunnan-Guizhou Plateau. Its sediments contain abundant environmental information in its drainage region during geologic times. Pollen/charcoal analysis on 46 samples from a 900 cm core of this lake provides a history of vegetation, climate, and forest fire in its drainage region during the last 13 300 years. The results of pollen/charcoal analysis and principal component analysis on pollen data show five-stage vegetation succession, climate change, and forest fire: 1) 13 300—10 400 cal. a BP, the vegetation was dominated by pine forests, accompanied by dark coniferous forests and evergreen broadleaved forests, indicating cold and wet conditions; high frequent forest fires occurred in this stage, and especially more fires appeared as the humidity decreased in its late period. 2) 10 400—5 700 cal. a BP, the shrinkage in pine forest, expansion in

evergreen broadleaved forest, and appearance of deciduous broadleaved forest indicated relatively warm and dry conditions; forest fires occurred frequently like the previous stage as climatic conditions became warm and dry at the early period of this stage until 9 500 cal. a BP, when relative humidity increased and forest fires decreased obviously. 3) 5 700—1 800 cal. a BP, the pine and evergreen broadleaved forests still dominated, but *Liquidambar* forests favoring warm and hot climate first appeared, showing warm and wet conditions; the occurrence frequency of forest fire was low. 4) 1 800—500 cal. a BP, the expansion of pine forest and the shrinkage of deciduous broadleaved forest with an increase of upland herbaceous plants indicated relatively cold and dry conditions; forest fires were more than the preceding stage but less than the first stage. 5) 500 cal. a BP to the present, the shrinkage of pine forests and a significant increase of upland herbs showed cool and dry conditions, and suggested increasing human activities.