

DOI: 10.5846/stxb202002080213

汪啟容, 蒋勇军, 郝秀东, 乔伊娜, 张彩云, 马丽娜, 茆杨, 吕同汝, 邱菊. 孢粉记录的重庆岩溶槽谷区 700 年来植被演替与喀斯特石漠化. 生态学报, 2021, 41(9): 3634-3644.

Wang Q R, Jiang Y J, Hao X D, Qiao Y N, Zhang C Y, Ma L N, Mao Y, Lü T R, Qiu J A. 700-year record of vegetation and rocky desertification evolution based on palynological data of the karst valley area, Chongqing City, China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3634-3644.

孢粉记录的重庆岩溶槽谷区 700 年来植被演替与喀斯特石漠化

汪啟容¹, 蒋勇军¹, 郝秀东^{1,2,3,*}, 乔伊娜¹, 张彩云¹, 马丽娜¹, 茆杨¹, 吕同汝¹, 邱菊¹

¹ 西南大学地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715

² 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001

³ 南宁师范大学广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530001

摘要:在精确 AMS¹⁴C 测年的基础上, 对采自重庆中梁山岩溶洼地的剖面样品进行了孢粉分析, 并结合详细的历史文献资料, 获取了该地区近 700 年以来的植被变迁与石漠化演化记录。结果显示: (1) 1274—1553 cal a AD 研究区周围主要分布以松属、柏科/杉科占优势的亚热带常绿针叶林, 伴人植物花粉少量出现, 人类活动相对较弱。(2) 1553—1780 cal a AD, 针叶树松属、柏科/杉科花粉含量下降, 伴人植物花粉增多, 指示研究区人类活动开始加强。(3) 1780—1840 cal a AD, 松属花粉含量急剧下降, 灌木和伴人植物花粉急剧增加, 指示该地区人类活动加剧, 石漠化现象出现。(4) 1840—2000 cal a AD, 玉米花粉含量大幅度增加, 表明人类活动更加强烈, 石漠化现象进一步加剧。近 700 年来不断增加的人类活动是重庆地区植被退化、石漠化现象严重的重要因素。该研究结果对重庆岩溶地区的全面治理, 恢复和重建自然生态环境具有重要的指示意义。

关键词:孢粉; 植被历史; 人类活动; 土地石漠化; 岩溶槽谷区

A 700—year record of vegetation and rocky desertification evolution based on palynological data of the karst valley area, Chongqing City, China

WANG Qirong¹, JIANG Yongjun¹, HAO Xiudong^{1,2,3,*}, QIAO Yina¹, ZHANG Caiyun¹, MA Lina¹, MAO Yang¹, LÜ Tongru¹, QIU Ju¹

¹ Chongqing Key Laboratory of Karst Environment & School of Geographical Sciences of Southwest University, Chongqing 400715, China

² Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization (Nanning Normal University), Nanning 530001, China

³ Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning 530001, China

Abstract: Karst rocky desertification is the most seriously ecological and geological problem in southwestern China, which severely restricts the economic and social development of karst areas. As one of the main parts of rocky desertification research, the evolution process of rocky desertification not only reflects the changes of regionally ecological environment, but also affects the social and economic development of the region. The research on reconstruction of paleoenvironment in Chongqing is mainly focused on the change of climate itself, rarely involving the change of regionally ecological environment. The research on the evolutionary pattern of ecological environment in the past 1000 years has rarely been reported. As one of the most direct and reliable indicators of paleoenvironment and paleovegetation, spores and pollen play

基金项目:科技部国家重点研发计划项目(2016YFC0502306); 国家自然科学基金项目(41861020); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA281264); 岩溶环境重庆市重点实验室开放课题(Cqk201901)

收稿日期: 2020-02-08; 网络出版日期: 2021-03-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiudonghao@126.com

an irreplaceable role in correctly understanding and recovering the past climate and environmental changes. The depressions in karst areas are ideal places for studying regionally environmental changes. The sediment records provide abundant information including vegetation succession, climate change, human activities, and environmental changes. Therefore, in this study, we chose the karst depression area of Zhongliang Mountain as our study area and documented its vegetation changes and rocky desertification evolution during the past 700 years in terms of spores and pollen analysis, AMS ^{14}C dating, and detailed historical literature. The results showed that the subtropical evergreen coniferous forests were dominated by *Pinus*, Cupressaceae/Taxodiaceae with a small amount of pollen of anthropogenic plants during the 1274—1553 cal a AD, which reflected relatively weak human activities. Conversely, during the 1553—1780 cal a AD, *Pinus*, Cupressaceae/Taxodiaceae overall declined while the pollen of anthropogenic plants increased, indicating that the human activities had begun to strengthen. During the 1780—1840 cal a AD, the pollen content of *Pinus* decreased sharply, while the pollen content of shrubs as well as anthropogenic plants increased sharply, which was consistent with the intensification of human activities and the occurrence of rocky desertification. During the 1840—2000 cal a AD, the significant increase of *Zea* mays pollen content indicated that human activities and rocky desertification were further intensified. The increasing human activity in the past 700 years was an important factor in vegetation degradation and serious rocky desertification in Chongqing. The results of this study are significant to improve the comprehensive management, restoration and reconstruction of the naturally ecological environment in Chongqing karst area.

Key Words: spores and pollen; vegetation history; human activity; land rocky desertification; karst trough valley

喀斯特石漠化是中国西南地区最为严重的生态地质环境问题,是强烈的人类经济活动与脆弱的生态环境相互作用的综合结果,已成为继西北沙漠化、黄土高原水土流失后的第三大生态问题,严重制约了西南地区的经济与社会发展^[1]。石漠化问题研究始于 20 世纪 80 年代,石漠化演化过程作为石漠化问题研究的重要内容之一,不仅反映了区域的生态环境变迁,同时其演化结果还会影响该区域的社会经济发展^[2-3]。相关学者已从石漠化变化面积、变化趋势等方面探讨了不同石漠化类型^[4]、不同时空格局^[5-6]、不同土地利用类型^[7]等的演化特征。当前,重庆地区的古环境重建研究对象主要集中在石笋上^[8-11],而石笋研究主要集中在论述气候本身的变化上,很少涉及区域生态环境变迁,特别是过去 1000 年以来的生态环境演变格局研究,更是鲜有报道。

孢粉作为最直接、最可信的古环境和古植被代用指标之一,在正确认识和恢复过去气候和环境变化方面具有不可替代的作用^[12-13],能重建和恢复扰动前和扰动后的植被状况及其演化趋势^[14]。因此,孢粉研究一直备受国内外学者的重视,也取得了很多重要的研究成果^[15-18]。古环境研究的重要环节就是能否提供可靠的年代。在岩溶区,常见的 ^{14}C 测年材料,主要为有机质、螺、炭屑等^[19-21]。土壤中有机质在自然因素作用下不断遭到分解、淋溶淀积和腐殖质化,测年结果具有混合年龄的特征^[22],而活螺具有移动性,用螺作为测年物质建立的年代框架也相对不可靠^[21]。炭屑广泛存在于不同时期的沉积物中,且大多为原地沉积^[23],是岩溶地区常见的含碳量最高、又不易与周围的物质发生碳原子交换的优质 ^{14}C 测年样品,所测得的 ^{14}C 年代准确可靠^[24]。岩溶地区的洼地是进行区域环境变化重建的理想场所,其沉积物记录了植被演替、气候变化、人类活动、环境变迁等丰富信息。因此,在进行古环境重建研究中,尤其是在喀斯特地区天然湖泊极其稀少的情况下,岩溶洼地具有非常明显的研究优势,加之其沉积连续和沉积速率比较高,可以开展高分辨率的古环境重建研究^[14,25]。

以重庆中梁山岩溶洼地为研究对象,在精确的 AMS ^{14}C 测年的基础上,利用土壤剖面的孢粉记录,并结合研究区的历史文献资料,重建了该区近 700 年来的植被历史、人类活动及石漠化演化过程,为重庆岩溶地区的全面治理,恢复和重建自然生态环境提供参考性依据。

1 研究区概况

研究区(图1)位于重庆市近郊北碚区中梁山龙凤槽谷凤凰村附近,地理坐标为 $106^{\circ}25'—106^{\circ}29'E$, $29^{\circ}45'—29^{\circ}50'N$,地质构造为观音峡复式背斜,整体呈南北走向,背斜核部为下三叠统飞仙关组(T_{1f})地层,向两翼地层逐渐过渡为下三叠统嘉陵江组(T_{1j})、中三叠统雷口坡组(T_{2l})以及上三叠统须家河组(T_{3xj}),槽谷整体上呈“一山三岭二槽”笔架式地貌格局,东槽面积显著大于西槽。研究区气候属于亚热带湿润季风气候,冬暖夏热,雨量丰沛,年平均气温为 $16.5^{\circ}C$,年平均降水量为 $1200—1300\text{ mm}$ ^[26]。现代植被主要为亚热带常绿针叶林,该植被为现今北碚地区分布最广、面积最大的一种次生植被类型,通常可分为乔木和灌木两层。乔木层主要为马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柏木(*Cupressus funebris*)。灌木层多为砍伐后萌生,以白栎(*Quercus fabri*)占优势。地被植物有白茅(*Imperata cylindrica*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)等^[27]。土壤发育的地质背景是三叠纪嘉陵江组的岩溶角砾岩白云质灰岩,土层浅薄。区内人类活动以农业生产活动为主,主要农作物包括玉米(*Zea mays*)、土豆(*Solanum tuberosum*)、油菜(*Brassica napus*)、红薯(*Ipomoea batatas*)等。

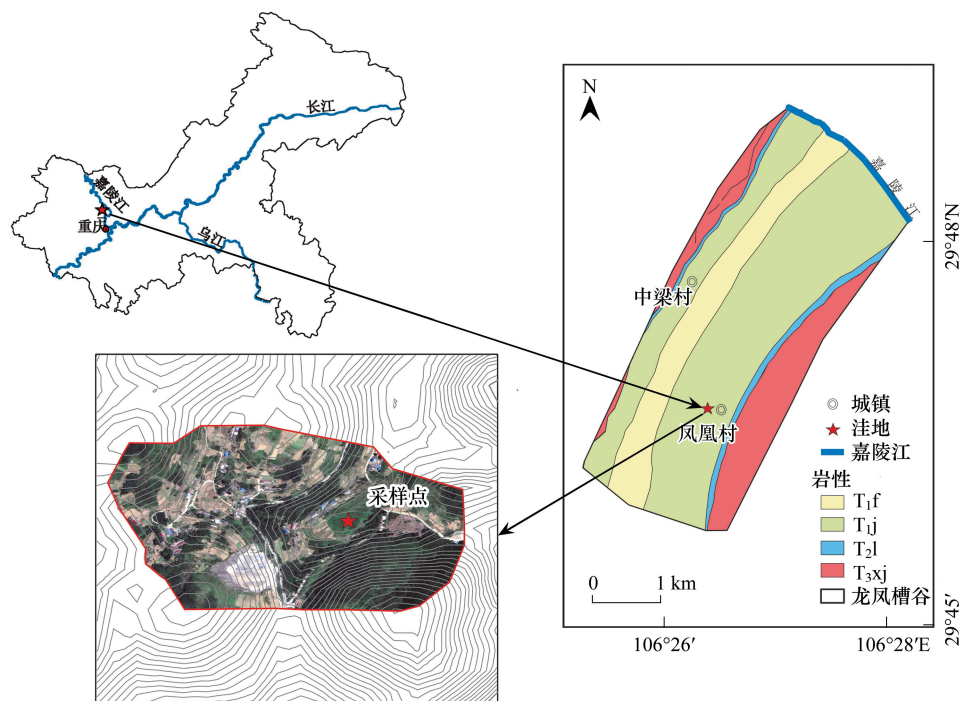


图1 岩溶洼地及 ZLM 剖面位置图

Fig.1 Location of the ZLM sediment core and karst depression

T_{1f} : 下三叠统飞仙关组 Feixianguan Formation of Lower Triassic; T_{1j} : 下三叠统嘉陵江组 Jialingjiang Formation of Lower Triassic; T_{2l} : 中三叠统雷口坡组 Leikoupo Formation of Middle Triassic; T_{3xj} : 上三叠统须家河组 Xujiache Formation of Upper Triassic

2 材料与方法

2.1 沉积物取样

2018年12月,在重庆中梁山龙凤槽谷岩溶洼地,获取了一个325 cm长的沉积物剖面ZLM,其中325—165 cm为黑色黏土;165—70 cm为浅黄色粉砂质黏土,夹砾石;70 cm—表层为棕色黏土。本研究按照5 cm间距进行等距离连续取样,共采集了62份孢粉样品。

2.2 AMS ¹⁴C 测年

本研究选取 3 份沉积物中的炭屑作为测年材料,在美国 Beta 实验室进行 AMS ¹⁴C 测年。运用 R 语言中的 CLAM v.2.2 程序包以及北半球校准曲线 IntCal13,将所获得的 AMS ¹⁴C 年龄结果校准为日历年,并建立了 ZLM 土壤剖面的年龄-深度模型(图 2)。

2.3 孢粉分析

孢粉提取在西南大学孢粉实验室进行,按照常规法开展实验,每份样品约 30—50 g,先用浓度为 36% 的 HCl 去除样品中的钙质,再加入浓度为 55% 的 HF 去除硅质,最后将样品通过孔径为 7 μm 的尼龙筛布在超声波中震荡。所有样品在处理前,均加一片石松孢子(每片(27560±593)粒)以计算花粉浓度^[28]。孢粉鉴定和统计在德国 Zeiss 显微镜 400 倍目镜下进行,孢粉鉴定多数到属少数到科,每个样品统计 3 玻片以上,花粉(包括乔灌木和陆生草本)统计数不低于 300 粒,孢粉(孢子、花粉)统计数不低于 500 粒。花粉百分比基于陆生植物花粉总和计算,孢粉百分比基于花粉、孢子总和计算。在本研究中,把直径大于 60 μm 的禾本科花粉鉴定为玉米花粉^[29]。根据张金谈和王萍莉^[30]的研究结果,将粒径大于 30 μm (表面纹饰较粗,颗粒明显)的栎属花粉归为落叶栎属;粒径小于 30 μm (表面纹饰细而密,颗粒不太明显)的栎属花粉归为常绿栎属。使用 Tilia 2.1.1 软件^[31]处理孢粉数据,绘制孢粉图谱,花粉组合带用 CONISS 聚类程序^[32]采用地层约束最小方差原则进行分带。

3 结果

3.1 年代序列的建立和沉积速率

ZLM 土壤剖面的深度和校准年龄如表 1 所示,依据 3 个校正后的 AMS ¹⁴C 年龄建立了该剖面的年龄—深度模型(图 2),其余层位的年龄基于邻近两个¹⁴C 校准年龄数据线性内插和外推而获得。ZLM 剖面在 325—165 cm 深度范围内沉积稳定,累积速率较低,平均为 0.34 cm/a。在离地表 165—70 cm 深度范围内,观测到沉积速率较高,为 0.97 cm/a。而在 70—5 cm 的深度范围内沉积速率为 0.44 cm/a。

表 1 重庆中梁山岩溶洼地剖面 AMS¹⁴C 年龄结果及日历校正

Table 1 Results of AMS ¹⁴C and the IntCal13 datasets were used to calibrate the radiocarbon dates in karst depression profiles of Zhongliang Mountain, Chongqing

编号 No.	深度 Depth/cm	测年材料 Dating material	测定年龄 Age/(cal a BP)	校正年龄范围 Calibrate age range/ (cal a AD, ±2σ, 95%)	校正年龄 Calibrate age/ (cal a AD, ±2σ, 95%)
ZLM1247	80	炭屑	152—59	1798—1891	1810
ZLM1230	165	炭屑	231—124	1719—1826	1742
ZLM1201	325	炭屑	676—630	1274—1320	1274

3.2 孢粉分析结果

ZLM 剖面出现的乔灌木植物花粉主要以松属(*Pinus*)、柏科(*Cupressaceae*)、杉科(*Taxodiaceae*)、落叶栎属(*Quercus* (D))、枫杨属(*Pterocarya*)为主,其次是常绿栎属(*Quercus* (E))、棕榈科(*Palmae*)、铁杉属(*Tsuga*)、榆属(*Ulmus*)、桦木属(*Betula*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)、桤木属(*Alnus*)、胡桃属(*Juglans*)、柳属(*Salix*)、豆科(*Leguminosae*)、漆树科(*Anacardiaceae*)、栗属(*Castanea*)、栲属(*Castanopsis*)、忍冬科(*Caprifoliaceae*)、构属(*Broussonetia*)、榛属(*Corylus*)、杜鹃花属(*Rhododendron*)、大戟科(*Euphorbiaceae*)、蔷薇科(*Rosaceae*)等;陆生草本植物花粉以禾本科(*Poaceae*)、蒿属(*Artemisia*)、菊科蒲公英属(*Taraxaci*)为主,其次是葎草属(*Humulus*)、菊科紫菀属(*Aster*)、石竹科(*Caryophyllaceae*)、百合科(*Liliaceae*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、蓼科(*Polygonaceae*)、十字花科(*Brassicaceae*)、玉米(*Zea mays*)、唇形科(*Labiatae*)等;蕨类植物孢子主要为芒萁属(*Dicranopteris*)、凤尾蕨属(*Pteris*)、水龙骨科(*Polypodiaceae*)、卷柏属(*Selaginella*)、紫萁科(*Osmundaceae*)、膜

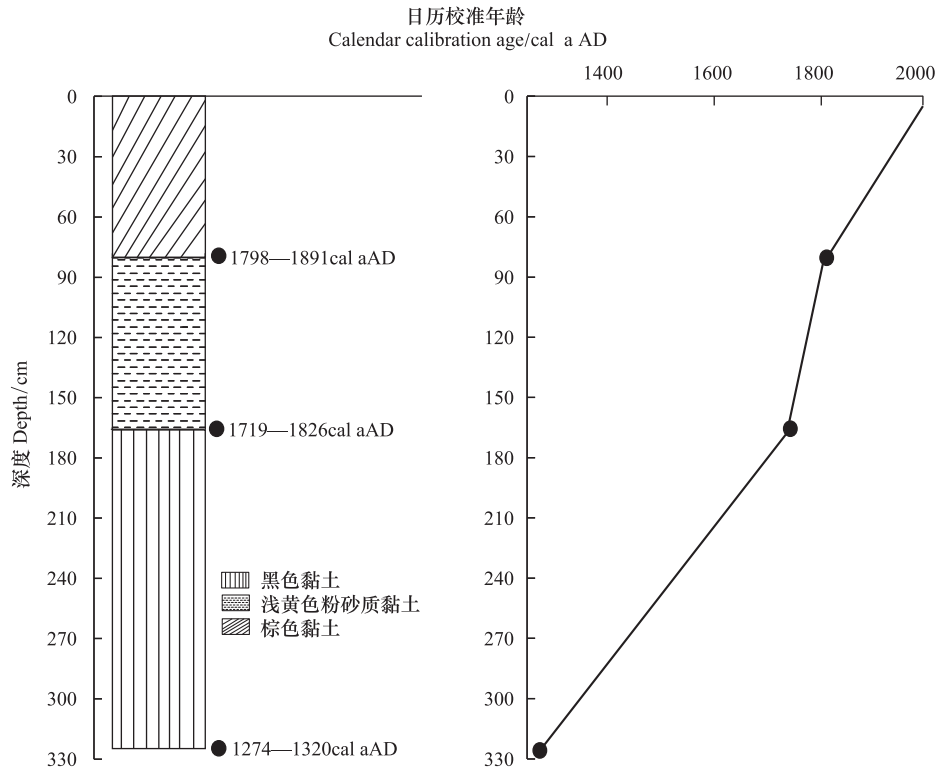


图 2 ZLM 剖面岩性-年龄-深度模型图

Fig.2 Lithological, age-depth model of ZLM core

蕨科 (Hymenophyllaceae)、单缝孢子 (Monolet spores)、石松科 (Lycopodiaceae) 等;淡水藻类主要有双星藻科 (Zygnemataceae)、环纹藻属 (*Concentricystes*) 等。

根据花粉组合和聚类分析结果,将整个剖面的孢粉记录由下至上划分为五个孢粉带 (图 3)。

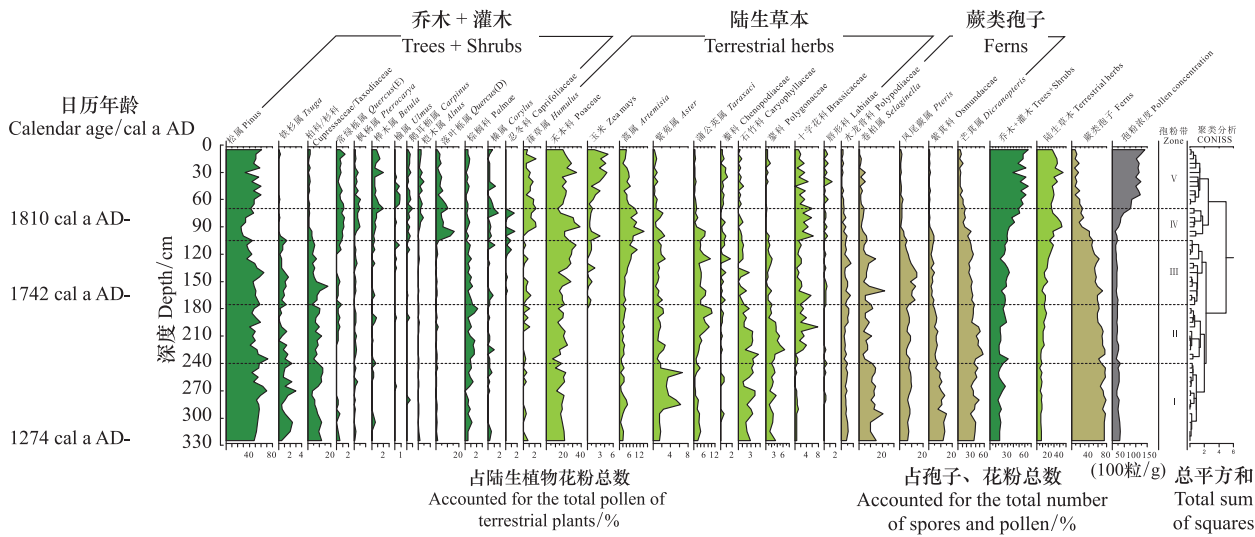


图 3 ZLM 剖面孢粉图谱

Fig.3 The spores-pollen spectrum of ZLM core

3.2.1 带 I (325—240 cm, 1274—1553 cal a AD)

本带的孢粉浓度为 2738 粒/g。孢粉组合中蕨类孢子含量最高,为 73.92% (平均值,下同),主要以芒萁属 (37.15%) 为主,其次为乔灌木花粉,含量为 19.05%,陆生草本花粉含量最低,为 8.12%。乔灌木花粉以松属为主,含量高达 55.18%,其次为柏科/杉科 (9.12%) 和铁杉 (1.5%),枫杨属 (0.73%)、榆属 (0.02%)、桦木属 (0.15%)、鹅耳枥属 (0.04%)、桤木属 (0.29%)、落叶栎属 (0.74%)、棕榈科 (0.75%) 等零星出现。陆生草本花粉以禾本科 (17.84%) 为主,其次为菊科紫菀属 (3.11%) 和石竹科 (2.72%),菊科蒲公英属 (2.01%)、蓼科 (2.30%)、蒿属 (2.2%)、十字花科 (0.53%)、葎草属 (0.22%) 等也有一定含量。

3.2.2 带 II (240—175 cm, 1553—1736 cal a AD)

本带的孢粉浓度略有下降,由 2738 粒/g 降至 2147 粒/g。孢粉组合仍以蕨类孢子为主,较带 I 略有下降 (由 73.92% 降至 66.09%),但芒萁属孢子 (42.81%) 含量达到其在整个剖面中的最大值,乔灌木花粉和陆生草本花粉含量轻微上升,其含量分别为 21.14% 和 11.76%。乔灌木花粉仍以松属为主,含量高达 51.28%,但与带 I 相比整体上略有下降,其次为柏科/杉科 (8.02%) 和棕榈科 (1.24%),此外,其他乔灌木花粉,如铁杉 (0.78%)、枫杨属 (1.15%)、落叶栎属 (0.70%)、棕榈科 (1.24%) 等变化不大,鹅耳枥属 (0.04%) 花粉出现,陆生草本以禾本科 (17.42%)、蓼科 (3.50%)、菊科蒲公英属 (5.31%)、十字花科 (2.72%)、石竹科 (2.50%) 为主,其中菊科蒲公英属花粉含量达到其在整个剖面中的最大值,蒿属 (2.44%)、菊科紫菀属 (1.62%) 等植物的花粉也有一定含量,葎草属 (0.29%)、藜科 (0.13%)、唇形科 (0.05%) 仅以分散的花粉粒为代表。

3.2.3 带 III (175—105 cm, 1736—1780 cal a AD)

本带的孢粉浓度略微下降,由 2147 粒/g 降至 1852 粒/g。在孢粉组合中蕨类植物孢子仍然占据优势,但较带 II 有较大幅度的下降 (由 66.09% 降至 55.60%),乔灌木花粉和陆生草本花粉含量略有增加,含量分别为 26.41% 和 18.03%。乔灌木花粉含量降低,以松属、柏科/杉科花粉含量的下降为主,其含量分别为 48.1% 和 7.1%,落叶栎属 (0.91%) 花粉含量上升,棕榈科 (0.80%) 花粉含量略微下降,铁杉属 (0.89%)、枫杨属 (1.02%)、桤木属 (0.23%)、榛属 (0.21%) 等花粉含量变化不大,忍冬科 (0.21%) 花粉首次出现,陆生草本植物以禾本科、蒿属花粉含量的上升为主,其含量分别为 23.31% 和 5.04%,蒿属花粉含量首次达到峰值,菊科蒲公英属、十字花科、菊科紫菀属、石竹科、蓼科花粉含量略有下降,分别为 4.60%, 2.04%, 1.48%, 0.82%, 1.12%, 藜科 (0.41%)、唇形科 (0.16%)、葎草属 (0.37%) 等花粉含量有所上升,玉米 (0.53%) 花粉首次出现。

3.2.4 带 IV (105—70 cm, 1780—1840 cal a AD)

本带的孢粉浓度迅速升高,由 1852 粒/g 升至 4147 粒/g。孢粉组合以乔灌木花粉为主,含量为 39.01%,陆生草本花粉含量较带 III 大幅度上升 (由 18.03% 升至 33.24%),并达到其在整个剖面中的最大值,蕨类孢子含量大幅度下降,其含量为 27.81%。花粉组合发生了明显的变化,乔灌木花粉枫杨属、落叶栎属含量较带 III 均有较大幅度上升,分别为由 1.02% 上升至 3.21% 和由 0.91% 上升至 8.92%,且两者的花粉含量均达到其在整个剖面中的最大值,松属花粉含量大幅度下降,最低含量仅为 25.31%,柏科/杉科 (1.84%)、棕榈科 (0.50%) 花粉含量减少,常绿栎属 (1.54%)、桤木属 (1.77%)、鹅耳枥属 (0.46%)、桦木属 (0.80%)、榛属 (0.63%)、忍冬科 (0.47%) 等花粉含量有所上升,且鹅耳枥属、榛属、忍冬科花粉含量达到其在整个剖面中的最大值,陆生草本花粉中禾本科、蒿属、十字花科、玉米等花粉的含量均有大幅度的增加,分别为 24.45%, 9.51%, 4.42%, 1.04%, 其他草本类群,如葎草属 (1.43%)、唇形科 (0.24%) 花粉含量也有所上升,但菊科紫菀属 (1.47%)、菊科蒲公英属 (2.80%)、石竹科 (0.41%)、藜科 (0.34%)、蓼科 (0.27%) 花粉含量下降。

3.2.5 带 V (70—5 cm, 1840—2000 cal a AD)

本带的孢粉浓度大幅度上升,由 4147 粒/g 升至 16397 粒/g,并达到其在整个剖面中的最大值。在孢粉组合中仍以乔灌木花粉为主,其含量较带 IV 大幅度上升 (由 39.01% 升至 56.30%),陆生草本花粉含量略微下降 (31.51%),蕨类植物孢子零星出现,其含量仅为 12.32%。乔灌木花粉含量以松属花粉含量的上升为主,其含量为 50.74%,但柏科/杉科 (1.41%)、常绿栎属 (0.75%)、鹅耳枥属 (0.43%)、榛属 (0.36%)、棕榈科 (0.48%)

等植物花粉含量降低,仅少量出现,枫杨属、落叶栎属花粉含量较带Ⅳ大幅度下降,含量分别为2.01%、3.95%,桦木属(0.89%)、桤木属(2.21%)花粉含量较带Ⅳ有所上升,并达到其在整个剖面中的最大值。陆生草本花粉含量以蒿属花粉含量的下降为主,含量降至4.34%,禾本科(22.44%)花粉含量较带Ⅳ变化不大,其他草本植物类群,如菊科紫菀属(0.57%)、菊科蒲公英属(0.66%)、葎草属(1.17%)、十字花科(2.18%)等花粉含量有所降低,石竹科(0.43%)、蓼科(0.37%)、藜科(0.50%)花粉含量略有增加,而玉米花粉含量较带Ⅳ大幅度增加(由1.04%升至2.80%)。

4 讨论

4.1 孢粉记录的植被演替与气候变迁

ZLM剖面的花粉组合显示,乔灌木花粉以针叶类(松属、柏科/杉科)为主。在1274—1780 cal a AD阶段,松属、柏科/杉科花粉含量逐渐减少,落叶栎属、常绿栎属、枫杨属、榆属、桦木属、鹅耳枥属、桤木属、榛属等常绿阔叶、落叶阔叶成分花粉含量很低,仅零星出现,指示气候偏干。该结果与重庆芙蓉洞石笋记录^[11]和从《中国气象灾害大典:重庆卷》整理的历史干湿数据^[33](图4)较为一致。本阶段气候偏干,有利于耐旱能力强的松属的生长^[34]。但孢粉结果显示,松属花粉含量却逐渐降低,而伴人植物花粉,如禾本科、十字花科、菊科蒲公英属等花粉却增加,表明在本阶段的植被退化不仅仅受气候变化的影响,人类活动的影响也不可忽视。

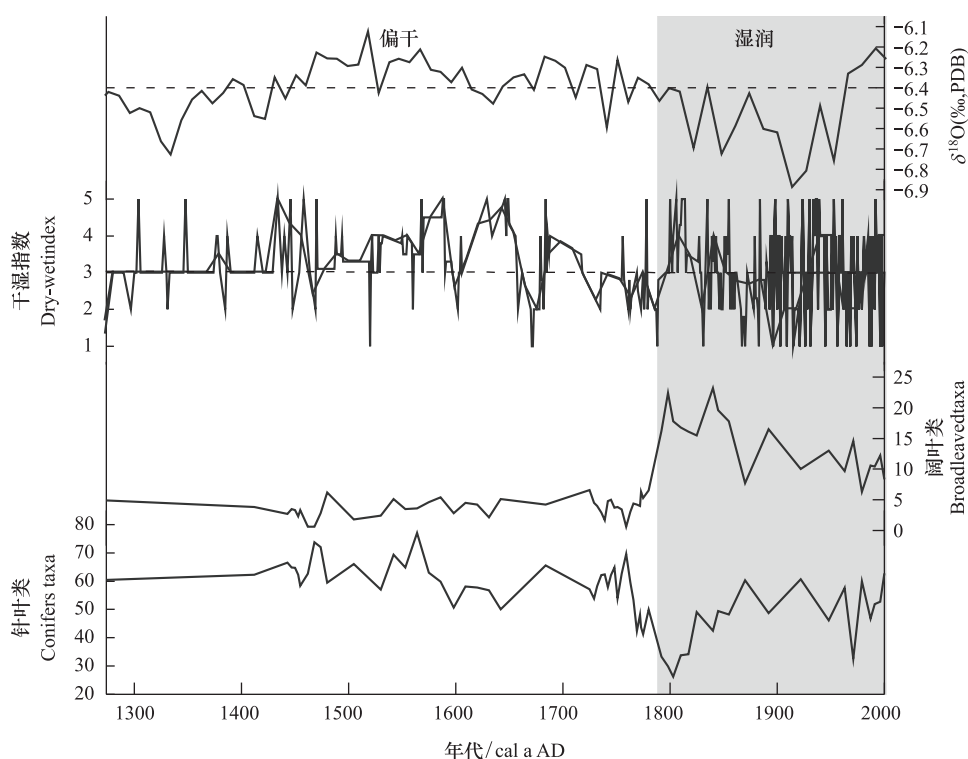


图4 ZLM剖面针叶类、阔叶类花粉百分含量与重庆芙蓉洞 $\delta^{18}\text{O}$ 记录和历史干湿指数对比图^[34]

Fig.4 Comparison of pollen data in ZLM core with the $\delta^{18}\text{O}$ record of Furong Cave^[11] and the historic dryness/wetness index of Chongqing^[34]

在1780—1840 cal a AD阶段,枫杨属、落叶栎属、桤木属等喜湿的常绿阔叶、落叶阔叶成分花粉含量增加,其中落叶栎属花粉达到其在整个剖面中的最大值(14.91%)。根据许清海等^[35]的研究结果表明,落叶栎属花粉为低代表性的花粉,落叶栎属花粉含量高于1%,可指示落叶栎属植物的存在,当落叶栎属植物花粉含量低于1%,可以认为无落叶栎属植物的存在。而本阶段研究区内落叶栎属花粉含量为14.91%,远高于1%,指示落叶栎属植物发育,反映气候较上一阶段湿润,这与芙蓉洞石笋和历史干湿数据记录的结果一致(图4)。

但在 1840 cal a AD 后,常绿阔叶、落叶阔叶成分花粉含量降低,以松属为主的针叶类花粉含量上升,伴人植物花粉禾本科(22.44%)、玉米(2.80%)含量大幅度增加,表明本阶段的孢粉组合是人类活动强烈影响的结果,反映的气候信号较弱。

4.2 人类活动与喀斯特石漠化演化

重庆的石笋记录显示^[9],人类活动是造成重庆历史时期森林退化的一个重要因素。早中全新世,季风强盛,降水较多,地处亚热带的重庆地区植被丰茂,到了中全新世,季风强度减弱,但地表植被仍然保持一个相对稳定的状态,而在 1.7 ka BP, $\delta^{13}\text{C}$ 大幅度偏正,地表植被遭受大幅破坏,人地矛盾开始显现,在 0.5 ka BP, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正到极点,人地矛盾进一步恶化,此后千百年中 $\delta^{13}\text{C}$ 值再也没有恢复到之前的状态。ZLM 剖面的孢粉记录显示:在 1274—1553 cal a AD,孢粉组合以松属、柏科/杉科为主的针叶类花粉含量较高,十字花科、禾本科、菊科蒲公英属、石竹科、藜科等伴人植物花粉^[14]较少。表明此时人类活动相对较弱,可能开始在该地种植十字花科等蔬菜作物,但并未开始开垦坡地种植粮食。此时,人类活动对植被的扰动强度弱,植被保持较好。说明该时期人口压力是有限的,槽谷平坦的耕地产出的粮食能够满足当时的需求。但是,以芒萁属为主的蕨类孢子含量极高(37.15%)(图 5)。据 Cheng 等^[18]、郑卓^[36]的研究结果表明,在中国南方,芒萁属植物在开阔地区的高强度光线下快速生长和扩张。当原始林地遭到破坏后,作为先锋物种的蕨类植物(如芒萁属等),可以很快地成长起来,并形成类似垫子的密集林下层。本研究大量出现的芒萁属孢子,可能与自唐宋以来,当时经济重心开始南移,西南地区的人口大幅增长,除农业活动外,冶铁业、陶瓷制造业等经济活动也极为兴盛,对木材需求不断加大,使得森林植被遭到严重破坏^[37],从而为蕨类植物(特别是芒萁属)的扩张提供了良好的生存条件。

1553—1780 cal a AD,禾本科、菊科蒲公英属、石竹科、十字花科、藜科等伴人植物花粉开始增多,后期旱地作物玉米花粉出现。与此同时,松属、柏科/杉科等木本植物花粉含量持续下降,蕨类植物芒萁属含量出现峰值,指示此时人类活动增强。该结果与《重庆市志·人口志》记录的由于人口大幅度增加,造成人类活动加剧在时间节点上是相对应的(图 5)。随着人口增加,为了满足人口增长的需要,自然植被被大肆砍伐,耕地面积不断增加。据《重庆历史与文化》^[38]记载,在明朝时期,重庆农业取得了较大发展,其中万历六年(1578 年),四川全省有耕地 449.33 万亩,而重庆府的耕地占全省的 1/3 左右。到雍正七年(1729 年)耕地面积达到 1339.52 万亩,耕地面积的扩大,导致周围植被逐渐减少。后期玉米花粉的出现、木本植物花粉的持续减少、以及伴人植物花粉的增多等花粉证据表明,自 1553 cal a AD 起,人类耕作活动开始不断加强。起初在槽谷地区种植蔬菜作物,后来随着人口的不断增长,旱地农作物(玉米)的传入以及国家政策的实施,人类开始开垦坡地种植玉米。据张祥稳等^[39]的研究结果,玉米大约在十六世纪传入中国,但在明代后期和清代前期的 200 多年时间里,它的种植规模不大。在乾隆年间,随着四川人口发展速度的加快^[40],面对平陆可垦之地几已尽垦的现实,乾隆即位之初,便鼓励民众开垦山地,掀起了规模不等的开垦山地、种植玉米的高潮^[39]。这与本研究中玉米花粉出现的时间一致。此时森林植被遭到破坏,森林面积开始减少。

1780—1840 cal a AD,禾本科花粉含量达 38.4%,十字花科(4.42%)花粉含量达到了其在整个剖面中的最大值,玉米花粉含量迅速增加并达到第一个峰值(2.90%),而松属、柏科/杉科花粉含量大幅度下降,其中松属花粉含量低于 30%。许清海^[41]曾对松的花粉及其与植被间的定量关系做过专门研究,在无松林地带,松属花粉含量一般低于 30%,有松林地带,松属花粉百分比高于 30%,平均为 42.5%。根据许清海的研究结果,本研究中松属花粉含量低于 30%,此时松树林遭到极度破坏或可能在取样点周围消失。这表明本阶段农业活动大规模扩张,研究区周围基本上已转化为农业用地,导致周围松树林被砍伐殆尽。这与《重庆市志·人口志》以及《重庆历史与文化》记载的本阶段整个重庆地区人口进入高速增长期,耕地面积急剧增加的时间是一致的。此时是重庆中梁山岩溶地区森林植被遭到历史时期以来破坏最为严重的一个时段,加上周围山地碳酸盐岩广泛分布,每年降水集中在 4—10 月,雨热同期的气候特点为石漠化形成提供了侵蚀动力和溶蚀条件。在自然条件和人类活动的共同作用下,该区石漠化出现。这与蓝勇等^[42]研究得出的重庆地区石漠化现象出现

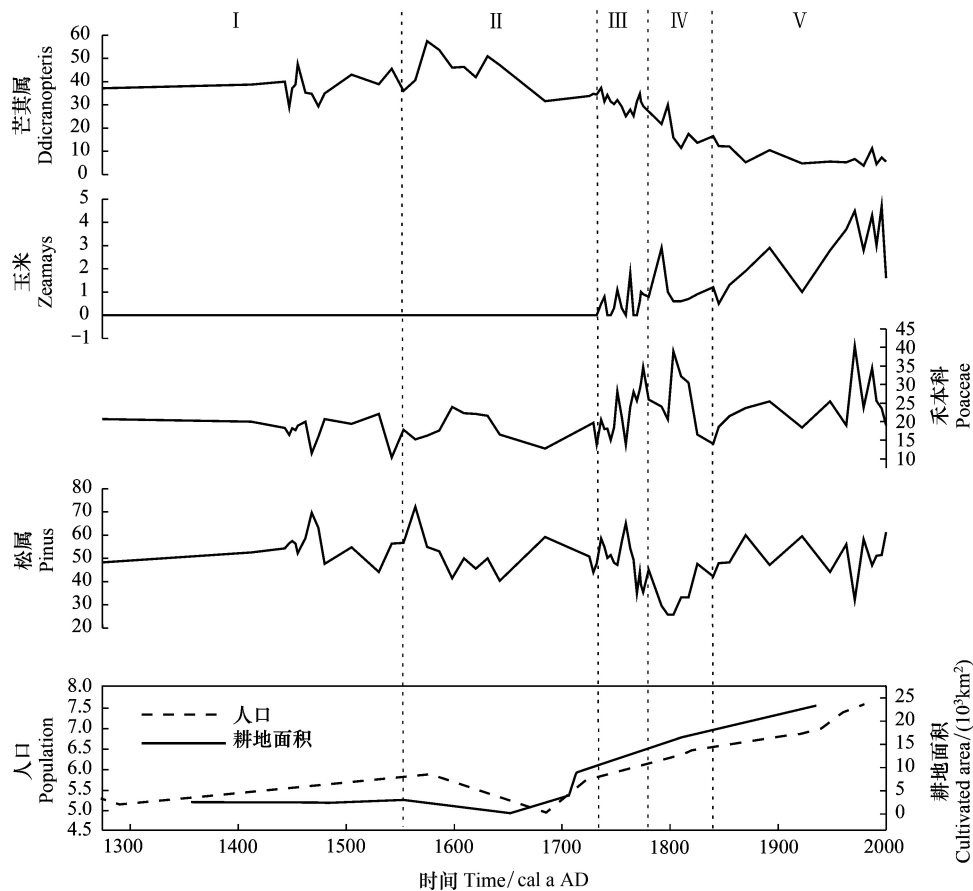


图 5 与人类活动相关的主要花粉和孢子百分比与重庆市人口(对数(以 10 为底))、耕地面积对比图

Fig.5 Comparison of the variations in key pollen and spores percentage related to human activity with the population (logarithmic (base 10)), cultivated area of Chongqing

的时间基本一致。土地发生石漠化后,其生态环境更加严酷,生境的旱生化迅速加剧,局部阴湿生境消失^[43],生境的旱生化为松树林的恢复^[35]提供了条件,同时也使喜阴湿生境的蕨类植物孢子大幅度减少。

1840—2000 cal a AD,松属花粉含量逐渐增加,表明松树林有所恢复,柏科/杉科、落叶栎属、枫杨属花粉含量下降,草本植物花粉含量变化不大,玉米(2.80%)花粉含量急剧增加,表明此时人类活动更加强烈。特别是 20 世纪 50 年代以来,人口再次进入高速增长期,人口的持续增长加大对土地的压力、增强对土地的开发力度,提高耕地复种指数^[44]。50 年代末开始掀起的“大炼钢铁”高潮以及文革期间“以粮为纲”,大搞开山造田。导致此时剖面中的玉米(5.80%)以及禾本科(34.30%)花粉含量大幅度升高,乔灌木(46.7%)植物花粉含量急剧下降。这表明,此时由于人口高速增长,大面积开垦,自然森林植被遭到大规模破坏,水土流失愈发严重,从而加速了石漠化的发展。

5 结论

通过对重庆中梁山岩溶洼地沉积物进行的孢粉分析,揭示了近 700 年来重庆岩溶槽谷区植被、人类活动经历了 4 个阶段的变化;

- (1) 1274—1553 cal a AD 研究区周围主要分布针叶树松、柏科/杉科等亚热带常绿针叶植物,伴人植物花粉少量出现,表明此时人类活动相对较弱。
- (2) 1553—1780 cal a AD 针叶树松、柏科/杉科花粉含量逐渐下降,伴人植物花粉增加,指示研究区人类活动开始不断增强。

(3) 1780—1840 cal a AD 松属花粉含量大幅度下降,灌木和伴人植物花粉含量急剧增加,标志着该地区森林结构的总体重组,人类活动加剧,生态环境退化,石漠化现象出现。

(4) 1840—2000 cal a AD,玉米花粉含量急剧增加,表明人类活动更加强烈,石漠化现象进一步加剧。随着人口的不断增长,大规模的在山坡垦殖、砍伐、焚尽地表植被,ZLM 剖面所在位置成为了玉米、蔬菜种植地,人类活动是造成重庆历史时期森林退化、石漠化现象出现的一个重要原因。

参考文献 (References):

- [1] 曹坤芳,付培立,陈亚军,姜艳娟,朱师丹. 热带岩溶植物生理生态适应性对于南方石漠化土地生态重建的启示. 中国科学: 生命科学, 2014, 44(3): 238-247.
- [2] Yang Q Q, Wang K L, Zhang C H, Yue Y M, Tian R C, Fan F D. Spatio-temporal evolution of rocky desertification and its driving forces in karst areas of Northwestern Guangxi, China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(2): 383-393.
- [3] Li Y B, Shao J A, Yang H, Bai X Y. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China. *Environmental Geology*, 2009, 57(3): 621-627.
- [4] 王德炉,朱守谦,黄宝龙. 贵州喀斯特石漠化类型及程度评价. 生态学报, 2005, 25(5): 1057-1063.
- [5] Yue Y M, Liu B, Wang K L, Li R, Zhang B, Zhang C H, Chen H S. RETRACTED ARTICLE: using remote sensing to quantify the fractional cover of vegetation and exposed bedrock within a complex landscape: applications for karst rocky desertification monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(1): 1025.
- [6] Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, Zhang C H. Responses of spatial-temporal variation of Karst ecosystem service values to landscape pattern in northwest of Guangxi, China. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(4): 446-453.
- [7] Jiang Y J, Li L L, Groves C, Yuan D X, Kambesis P. Relationships between rocky desertification and spatial pattern of land use in typical karst area, Southwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2009, 59(4): 881-890.
- [8] 杨勋林,陈发虎,袁道先,程海,张月明,黄帆. 高分辨率石笋记录的三峡库区小冰期气候变化. 地理科学, 2013, 33(5): 629-634.
- [9] 史志超,杨勋林,刘秀明,李国军,孙喜利,王宝艳,方默勤,崔古月. 重庆地区石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的全新世气候环境变化. 地球与环境, 2018, 46(2): 138-145.
- [10] Zhang T T, Li T Y, Cheng H, Edwards L, Shen C C, Spötl C, Li H C, Han L Y, Li J Y, Huang C X, Zhao X. Stalagmite-inferred centennial variability of the Asian summer monsoon in southwest China between 58 and 79 ka BP. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 160: 1-12.
- [11] Li H C, Lee Z H, Wan N J, Shen C C, Li T Y, Yuan D X, Chen Y H. The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records in an aragonite stalagmite from Furong Cave, Chongqing, China: A-2000-year record of monsoonal climate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(6): 1121-1130.
- [12] Zheng Z, Wei J H, Huang K Y, Xu Q H, Lu H Y, Tarasov P, Luo C X, Beaudouin C, Deng Y, Pan A D, Zheng Y W, Luo Y L, Nakagawa T, Li C H, Yang S X, Peng H H, Cheddadi R. East Asian pollen database: modern pollen distribution and its quantitative relationship with vegetation and climate. *Journal of Biogeography*, 2014, 41(10): 1819-1832.
- [13] 许清海,曹现勇, Tian F, 张生瑞,李月丛,李曼玥,李洁,刘耀亮,梁剑. 中国北方典型草原区花粉产量及其定量重建古植被的作用. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(12): 2016-2028.
- [14] Li Y Y, Zhou L P, Cui H T. Pollen indicators of human activity. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(9): 1281-1293.
- [15] Di Rita F, Molisso F, Sacchi M. Late Holocene environmental dynamics, vegetation history, human impact, and climate change in the ancient *Literna Palus* (Lago Patria; Campania, Italy). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2018, 258: 48-61.
- [16] Ge Y W, Zhang K, Yang X D. A 110-year pollen record of land use and land cover changes in an anthropogenic watershed landscape, eastern China: understanding past human-environment interactions. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2906-2918.
- [17] 郝秀东,欧阳绪红,谢世友,魏兴萍. 重庆喀斯特地区现代花粉组合与植被的关系. 生态学报, 2020, 40(15): 5266-5276.
- [18] Cheng Z J, Weng C Y, Steinke S, Mohtadi M. Anthropogenic modification of vegetated landscapes in southern China from 6, 000 years ago. *Nature Geoscience*, 2018, 11(12): 939-943.
- [19] 覃军干,张新荣,张强,周建超. 近 1000 年以来气候波动在广西桂北地区沉积物中的记录. 第四纪研究, 2016, 36(2): 268-277.
- [20] Zhou W J, Lu X F, Wu Z K, Deng L, Jull A J T, Donahue D, Beck W. Peat record reflecting Holocene climatic change in the Zoige Plateau and AMS radiocarbon dating. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(1): 66-70.
- [21] 周建超,覃军干,张强,张春来,蒋仕清. 广西桂林岩溶区中全新世以来的植被、气候及沉积环境变化. 科学通报, 2015, 60(13): 1197-1206.
- [22] 尹金辉,郑勇刚,刘粤霞,卢演涛. 古土壤中胡敏酸和胡敏素 ^{14}C 测年值统计分析. 地震地质, 2007, 29(2): 381-389.

- [23] Ohlson M, Tryterud E. Interpretation of the charcoal record in forest soils: forest fires and their production and deposition of macroscopic charcoal. *The Holocene*, 2000, 10(4): 519-525.
- [24] 徐馨, 何才华, 沈志达. 第四纪环境研究方法. 贵阳: 贵州科学技术出版社, 1992: 277-284.
- [25] Bai X Y, Zhang X B, Long Y, Liu X M, Zhang S Y. Use of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements on deposits in a karst depression to study the erosional response of a small karst catchment in Southwest China to land-use change. *Hydrological Processes*, 2013, 27(6): 822-829.
- [26] 张远瞩, 蒋勇军, 李勇, 王正雄, 段世辉, 吴韦, 彭学义, 王冬. 隧道工程对喀斯特槽谷区坡面产流及土壤侵蚀的影响. *生态学报*, 2018, 39(16): 6126-6135.
- [27] 重庆市北碚区地方志编纂委员会. 北碚自然地理. 重庆: 西南师范大学出版社, 1986: 190-199.
- [28] Stockman J. Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen et Spores*, 1971, 13: 615-621.
- [29] Whitehead D R, Sheehan M C. Measurement as a means of identifying fossil maize pollen. II. The effect of slide thickness. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 1971, 98(5): 268-271.
- [30] 张金谈, 王萍莉. 中国栎属花粉形态研究. *中国科学院大学学报*, 1986, 24(5): 362-369.
- [31] 舒军武, 黄小忠, 徐德克, 陈炜, 宋兵, 崔安宁, Grimm E. 新版 Tilia 软件: 中文指南和使用技巧. *古生物学报*, 2018, 57(2): 260-272.
- [32] Grimm E C. CONISS: a Fortran 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers & Geosciences*, 1987, 13(1): 13-35.
- [33] 温克刚. 中国气象灾害大典: 重庆卷. 北京: 气象出版社, 2008.
- [34] 苏文华, 崔凤涛, 赵元蛟, 周睿, 张光飞, 曹建新. 云南松球果延迟开放及其植冠种子库. *生态学报*, 2017, 37(2): 541-548.
- [35] 许清海, 李月丛, 周力平, 李宜垠, 张振卿, 林凤友. 长白山针阔混交林带花粉通量及垂直散布特征初步研究. *科学通报*, 2007, 52(5): 568-571.
- [36] 郑卓. 近几千年华南沿海地区植被的人为干扰. *生态科学*, 1998, 17(2): 29-36.
- [37] 蓝勇. 长江三峡历史地理. 成都: 四川人民出版社, 2003: 21-25.
- [38] 李家发. 重庆历史与文化. 西安: 陕西人民教育出版社, 2003.
- [39] 张祥稳, 惠富平. 清代中晚期山地广种玉米之动因. *史学月刊*, 2007, (10): 34-38, 72-72.
- [40] 王笛. 清代四川人口、耕地及粮食问题(上). *四川大学学报: 哲学社会科学版*, 1989, (3): 90-105.
- [41] 许清海, 李月丛, 阳小兰, 郑振华. 中国北方几种主要花粉类型与植被定量关系. *中国科学 D 辑*, 2007, 37(2): 192-205.
- [42] 蓝勇. 乾嘉垦殖对四川农业生态和社会发展影响初探. *中国农史*, 1993, 12(1): 19-28.
- [43] 王世杰. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(2): 120-126.
- [44] 韩昭庆. 雍正王朝在贵州的开发对贵州石漠化的影响. *复旦学报: 社会科学版*, 2006, (2): 120-127, 140-140.