

DOI: 10.5846/stxb201206120845

杜荣荣, 陈敬安, 曾艳, 朱正杰. 贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的 5.5 kaB. P. 以来的气候变化. 生态学报 2013, 33(12): 3783–3791.

Du R R, Chen J A, Zeng Y, Zhu Z J. Climate change recorded mainly by pollen from baixian lake during the last 5.5ka. Acta Ecologica Sinica 2013, 33(12): 3783–3791.

贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的 5.5 kaB. P. 以来的气候变化

杜荣荣¹, 陈敬安^{2,*}, 曾艳², 朱正杰²

(1. 贵州大学资源与环境学院, 贵阳 550003; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘要: 通过对白鹇湖沉积物柱芯孢粉组合的剖面变化分析, 在有机质¹⁴C 定年基础上, 探讨了白鹇湖地区过去 5.5 ka calB. P. 以来的植被演替和气候变化过程。研究表明, 5500—4500 aB. P. 期间, 各类植被比较丰富, 气候温暖湿润; 4500—2750 aB. P. 期间, 干旱草本和蕨类植物开始出现, 是气候转变过渡期; 2750—1500 aB. P. 期间, 木本植物组合类型发生明显变化, 喜湿草本减少, 耐旱草本增加, 气候向温凉干旱化发展; 1500 aB. P. 至今, 木本植被和喜湿草本继续减少, 中生耐旱草本和蕨类植物数量继续大幅增加, 干旱化趋势明显, 植被组合向典型石漠化植被组合类型发展。白鹇湖沉积物剖面孢粉组合变化表明, 该地区近 5000a 来气候变化以温度下降、降水减少为主要趋势, 并存在明显的陆地植被退化现象。研究还揭示了自然气候变化事件(如气候持续干旱)可导致喀斯特地区发生石漠化, 证实了喀斯特地区生态环境具先天脆弱性。科学评估白鹇湖地区气候干旱化趋势及其生态环境影响对指导该地区科学应对气候变化具有重要意义, 亟待加强。

关键词: 白鹇湖; 沉积物; 孢粉; 植被; 气候变化

Climate change recorded mainly by pollen from baixian lake during the last 5.5kaB. P.

DU Rongrong¹, CHEN Jing'an^{2,*}, ZENG Yan², ZHU Zhengjie²

1 College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China

2 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Abstract: Sporopollen has the advantages of being a very tiny unit, being abundant and having a wide range of distribution. It reflects changes in vegetation very directly and also is sensitive to and reflects changes in the environment. Therefore, sporopollen has been applied broadly to reconstruct prehistoric environments. The perfect study site for collecting sporopollen is a small closed lake without a drainage outlet. Karst areas are the best places to study the relationships between climate and the environment, and an understanding of the evolution of past environments is needed before they can be adequately protected. Baixian Lake, a small closed lake located in a karst area in Guizhou is selected for this study.

Through an analysis of pollen assemblages of the sediment profile in Baixian Lake, we discuss the vegetation and climate change in the past 5.5 ka using organic ¹⁴C dating. The records of the pollen assemblages reveal four stages to the vegetative evolution and climate changes in the Baixian Lake region. From 5500—4500 aB. P., various types of vegetation were relatively rich, with *Pinus*, *Quercus*, *Cyclobalanopsis*, *Lithocarpus*/*Castanopsis*/*Castanea* and other woody plants more frequent than other species. Plants and grass species preferring mesic habitats comprised as high as 30% of the flora on average while the percentage of herbs of non-mesic habitats as well as drought or cold tolerant herbs were relatively low,

基金项目: 贵州省科技计划项目资助 [2009]7011, [2006]400105

收稿日期: 2012-06-12; 修订日期: 2013-03-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenjingan@vip.skleg.cn

<http://www.ecologica.cn>

averaging 2% of the flora. Ferns also comprised a relatively low percentage of the flora, less than 10%. These findings agree with climatic records based on cave related data, which implies that this period experienced a warm and humid climate during that time frame. From 4500—2750 aB. P., drought-resistant herbs and ferns began to appear more frequently, which implied a transition occurred as the climate changed. Trees of cool hygrophilous habitats appeared while some woody plants with seasonal resistance to drought decreased in frequency compared with the previous period. Xerophytic herbs such as *Artemisia* and ferns such as *Lepisorus* began to appear. From 2750—1500 aB. P., changes in woody plant species occurred. Tropical and subtropical woody species increased during this period, although small fluctuations in their populations occurred in the second half of this period with these species comprising up to 7% of the flora. Hygrophilous herbal or moist herbal content declined to 15%. The content of pollen from aquatic herbs in the Cyperaceae declined to 20000 grains/g and continued a downward trend in the next period. Hygrophilous herb species declined and drought tolerant herbaceous species increased in frequency. Cold- or drought-resistant herbs increased to 8% of the pollen flora; fern spore content in the sediment band from this time period was high, averaging 30%; sporopollen content in the Polypodiaceae and *Lepisorus* increased; this all indicated the climate tended to be cool and dry. Since 1500 aB. P., woody plants and moisture-loving herbs continued to decline, while hygrophilous herbs and coniferous trees almost disappeared, and plants and grasses of mesic habitats made up about 15% of sporopollen samples. Gramineae pollen content increased and *Artemisia* pollen content increased to 100000 grains/g, reaching a maximum at 400000 grains/g. Hygrophilous *Cyperaceae* content declined to almost nothing. Herbs and ferns continued to increase, while cold or drought tolerant herb pollen content increase and fluctuated, the highest point reaching 12%. Fern spores in the samples continue to increase in number, in this period, aridification obviously intensified, reached 35%. The vegetation tended to be dominated by the plants adapted to conditions with rocky desertification. The pollen assemblages in Baixian Lake showed that temperature and precipitation gradually decreased, while the vegetation obviously degraded in the last 5000 aB. P.. This study also reveals that the climatic events (e. g., the continuous dry climate) can result in rocky karst desertification, and supports the idea that the environment in the karst region is innately fragile. Therefore, scientific assessment of aridification and the associated affect on the environment in the Baixian Lake region is essential in addressing climate change, and future research in this field is needed.

Key Words: Baixian Lake; sediment; pollen; vegetation; climate change

植物在繁殖期间要撒出大量花粉(植物)和孢子(苔藓类、蕨类等),一部分孢粉散落在土壤表面,随地表径流迁移入湖;一部分孢粉随风飘扬,直接沉降到湖泊,并保存在沉积物中。不同植物种属的孢粉形态各不相同,根据沉积物不同层位的孢粉形态分析,可以判断其母体植物种属,从而可推断该地区的植被和气候变迁。孢粉具有个体小、数量大、分布广泛等优点,在古植被恢复方面得到了广泛应用。理想的孢粉研究地点是封闭的小型湖泊^[1]。贵州白鹇湖是位于喀斯特地区的一小型山区封闭型湖泊。喀斯特地区的生态环境具有先天脆弱性^[2-3],对气候变化敏感,是研究气候变化-生态环境耦合关系的理想场所。本文选取贵州典型喀斯特地区的白鹇湖为研究对象,通过对沉积物孢粉组合的研究,探讨该地区近 5000 年来的植被演替和气候变化过程。

1 白鹇湖概况

贵州茂兰喀斯特保护区位于贵州省荔波县,其东南面与广西环江县毗邻,是云贵高原向湖广丘陵盆地的过渡地带。东西宽 22.8 km,南北长 21.8 km,地理位置为 25°09'20"—25°20'50"N, 107°52'10"—108°05'40"E,保护区面积 2×10^4 km²,森林覆盖率在 90% 以上。茂兰喀斯特林区受中亚热带季风湿润气候影响,春秋温暖,冬无严寒,夏无酷暑,且雨量充沛,年均气温约 18 °C,年平均降水量 1700 mm 左右。该保护区除局部地区覆盖少量页岩外,主要分布纯质石灰岩和白云岩^[4]。白鹇湖位于贵州省荔波县茂兰镇(半)原始森林区(图

1) ,位于接近山顶地区的凹地(海拔约 700 m)。湖泊面积约 5000 m²,平均水深约 2 m,湖盆周围广泛分布着碳酸盐岩。



图 1 白鹇湖地理位置示意图

Fig. 1 Map showing the location of Lake Baixian

茂兰森林现生群落乔木层树种主要有圆果化香(*Platycarya longipes*)、翅荚香槐(*Cladrastis platycarpa*)、青冈(*Quercus glarca*)、椴木石楠(*Photinia davidsoniae*)、掌叶木(*Handeliodendron bodinieri*)等。灌木层主要有湖北十大功劳(*Mahonia confusa*)、球核荚(*Viburnum propinquum*)、贵州悬竹(*Ampelocalamus calcareus*)等。草本有庐山楼梯草(*Elatostema stewardii*)、翠云草(*Selaginella uncinata*)、柳叶蕨(*Cyrtogonellum fraxinellum*)等植物^[5-7]。草坡以禾本科草本植物为主,灌丛草坡以草本植物占优,灌木层种类主要有枫香(*Liquidambar*)、杨梅(*Myrica*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、香叶树(*Lindera communis*)、野牡丹(*Melastomaceae*)等;灌木林主要树种有青冈栎(*Quercus Glauca*)、小叶柿(*Diospyros mollifolia*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)等;乔灌木层次分化明显,主林层由枫香(*Liquidambar*)、椿木(*Ailanthus*)、黄檀(*Dalbergia*)等组成;灌木层由香叶树(*Lindera communis*)、藤黄檀(*Garcinia*)、老虎刺(*Pterolobium punctatum Hemsl*)、拔葵(*Smilaxchinal*)、朴树(*Celtis*)组成^[8]。

2 样品采集与分析

利用课题组自我研制的沉积物柱芯取样装置于 2007 年 5 月在白鹇湖湖心区采得长 56 cm 的沉积物柱芯。所采沉积物柱芯保存完好,悬浮层未受扰动。沉积物柱芯在野外现场按 1 cm 间隔分样,装入塑料自封袋中密闭保存。运回实验室后,沉积物样品经真空冷冻干燥器干燥后,称量样品干重,密封保存备用。

对从沉积物柱芯中挑选出的陆源植物碎屑样品,在环境地球化学国家重点实验室前处理,制备成 CO₂ 气体送至苏格兰大学环境研究中心(Scottish Universities Environmental Research Centre)利用加速器质谱(Accelerator Mass Spectrometry)进行放射性¹⁴C 测年,并使用高精度¹⁴C 树轮年龄校正曲线校正为日历年龄(Calibrated age)。

孢粉分析在中国地质科学院水文地质环境地质研究所孢粉实验室完成,采用常规的 HF 酸处理法,每个样品的孢粉统计数量约为 500—800 粒,共鉴定统计孢粉 23287 粒。

3 结果分析

在白鹇湖沉积物柱芯 49 cm 深度处,发现了一个非常适合于¹⁴C 测年的陆源植物碎屑样品,其¹⁴C 测年结

果为(4943±30) aB.P., 由此可计算出白鹈湖平均沉积速率约为 1 cm/100a^[4]。白鹈湖位于(半)原始森林区, 基本不受人活动影响, 其沉积速率相对保持稳定, 采用内插法可计算各沉积物样品的对应年代。该沉积物柱芯记录了白鹈湖过去 5000 多年来的生态环境变化历史。

据各种属孢粉粒数量与总孢粉粒数量可得到各孢粉所占百分比。计算公式为:

$$P = (Q/X) \times 100\%$$

式中 P 为各科属植物孢粉所占百分比(%), Q 为各科属植物孢粉数(粒), X 为各科属植物孢粉总数(粒)^[9-11]。根据各种类植物的习性不同, 将孢粉分成 9 个组合(图 2): 喜湿针叶乔木组、凉湿落叶阔叶乔木组、一定季节耐干木本、热带、亚热带木本、热带和温带喜温暖湿润木本、温带和亚寒带耐寒和耐旱木本、喜湿或湿生草本、中生和耐寒或耐旱草本、蕨类。

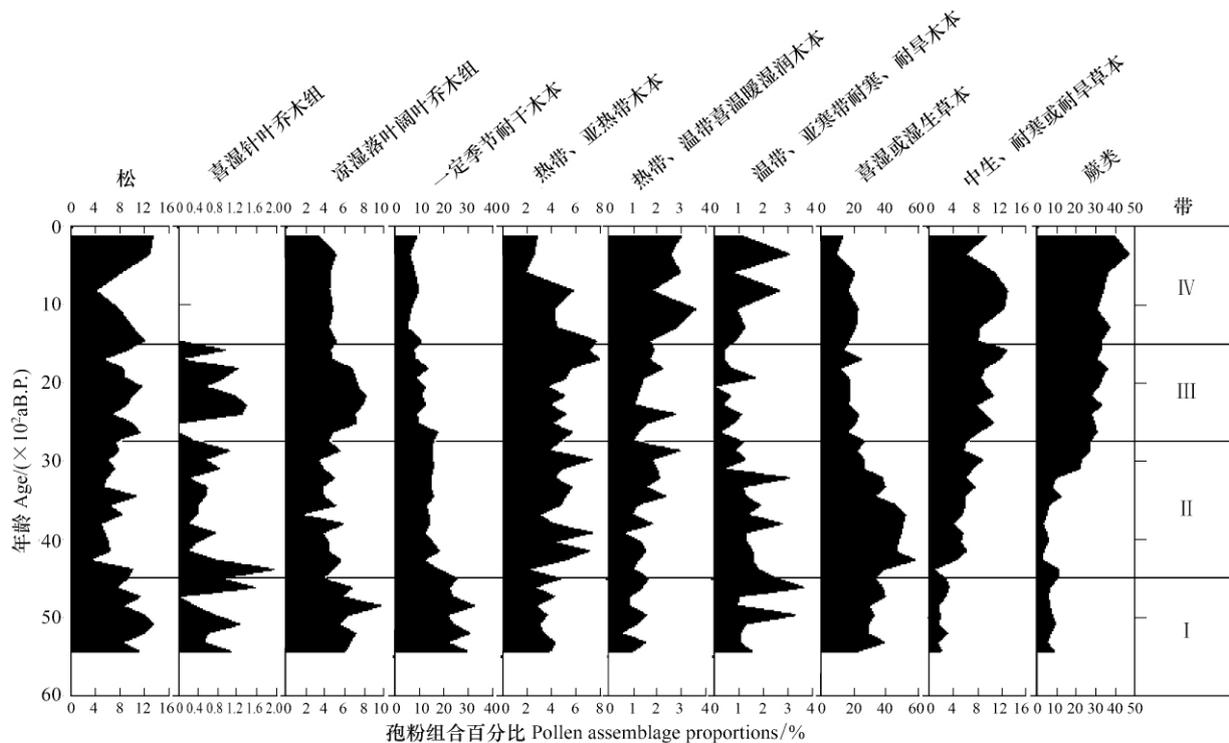


图 2 白鹈湖 LB-1 柱芯孢粉组合百分比图谱

Fig. 2 Pollen palynological assemblages diagram in core LB-1 in the Baixian lake

(1) 喜湿针叶乔木组 铁杉(*Tsuga*)、泪杉(*Dacrydium*)、杉科(*Taxodiaceae*)。

(2) 凉湿落叶阔叶乔木组 棕榈科(*Palmae*)、桦(*Betula*)、鹅耳枥(*Carpinus*)、槲木(*Alnus*)、槭树(*Acer*)、胡桃(*Juglans*)、榆(*Ulmus*)、青钱柳(*Cyclocarya*)、朴(*Celtis*)、榉(*Zelkova*)、椴(*Tilia*)、山毛榉(*Fagus*)、枫杨(*Pterocarya*)、杨梅(*Myrica*)、落叶栎(*Quercus*)。

(3) 一定季节耐干木本 石栎/栲/栗(*Lithocarpus/Castanopsis/Castanea*)、黄杞(*Engelhardtia*)、化香(*Platycarya*)、山核桃(*Carya*)、枫香(*Liquidambar*)、冬青(*Ilex*)、野桐(*Mallothus*)、桃金娘科(*Myrtaceae*)、莢竹桃科(*Apocynaceae*)、漆树科(*Anacardiaceae*)、南酸枣(*Choerospondias*)、黄连木(*Pistacia*)、常绿栎(*Cyclobalanopsis*)。

(4) 热带、亚热带木本 大风子科(*Flacourtiaceae*)、金缕梅科(*Hamamelidaceae*)、山榄科(*Sapaceae*)、芸香科(*Rutaceae*)、桑科(*Moraceae*)、紫金牛科(*Myrsinaceae*)、酸藤子(*Embelia*)、紫金牛(*Ardisia*)、杜茎山(*Maesa*)、胡椒(*Peperomia*)等。

(5) 热带、温带木本 山麻杆(*Alchornea*)、五月茶(*Antidesma*)、梭罗树(*Reevesia*)、栎木(*Cornus*)、白蜡树(*Fraxinus*)、柳(*Salix*)、五加科(*Araliaceae*)、猕猴桃(*Actinidia*)、鼠李科(*Rhamnaceae*)、荚迷(*Viburnum*)、忍冬

(*Lonicera*)、木犀科(*Oleaceae*)、女贞(*Ligustrum*)、马桑(*Coriaria*)。

(6) 温带、亚寒带或耐寒、耐旱木本 柞木(*Xylosma*)、榛(*Corylus*)、花椒(*Zanthoxylum*)、卫矛(*Euonymus*)、接骨木(*Sambucus*)、杜鹃花科(*Ericaceae*)、胡秃子科(*Elaeagnaceae*)。

(7) 喜湿或湿生草本 紫菀(*Aster*)、毛茛(*Ranunculus*)、蓼科(*Polygonaceae*)、紫茉莉(*Mirabilis*)、十字花科(*Cruciferae*)、半边莲(*Lobelia*)、柳叶菜(*Epilobium*)、百合(*Lilium*)、莎草科(*Cyperaceae*)、禾本科(*Gramineae*)等。

(8) 中生、耐寒或耐旱草本 绣线菊(*Spiraea*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、蔷薇(*Rosa*)、蒿(*Artemisia*)、菊科(*Compositae*)、大戟科(*Euphorbiaceae*)、唇形科(*Labiatae*)、桔梗科(*Campanulaceae*)、苦苣苔科(*Gesneriaceae*)等。

(9) 蕨类 石松(*Lycopodium*)、卷柏(*Sellaginella*)、水龙骨科(*Polypodiaceae*)、瓦韦(*Lepisorus*)、石韦(*Pyrrosia*)、蹄盖蕨(*Athyrium*)、铁线蕨(*Adiantum*)、凤尾蕨(*Pteris*)、里白(*Hicriopteris*)、鳞盖蕨(*Microlepria*)、金星蕨科(*Thelypteridaceae*)、海金沙(*Lygodium*)、莲座蕨(*Angiopteris*)、单缝孢(*Monolete spores*)等。

选择孢粉百分含量大于 1% ,花粉粒数在 1000 粒/g 以上且具有生态环境指示意义的孢粉属种 ,用 grapher 5.0 和 origin 7.5 绘制孢粉浓度图谱^[10]。共选了 14 个浓度高的种属: 落叶栎(*Quercus*)、常绿栎(*Cyclobalanopsis*)、石栎/栲/栗(*Lithocarpus/Castanopsis/Castanea*)、榆(*Ulmus*)、无患子科(*Sapindaceae*)、山麻杆(*Alchornea*)、榛(*Corylus*)、花椒(*Zanthoxylum*)、杜荃山(*Maesa*)、禾本科(*Gramineae*)、蒿(*Artemisia*)、莎草科(*Cyperaceae*)、水龙骨科(*Polypodiaceae*)、瓦韦(*Lepisorus*)。

在孢粉浓度图式中 ,以常绿栎(*Cyclobalanopsis*)、禾本科(*Gramineae*)、蒿(*Artemisia*)、莎草科(*Gyperaceae*)和水龙骨科(*Polypodiaceae*)等属种变化最为明显 ,以此变化结合孢粉组合百分比图谱作为划带主要依据。将湖泊沉积物柱芯从下到上划分为 4 个孢粉组合带(图 2 ,图 3)。

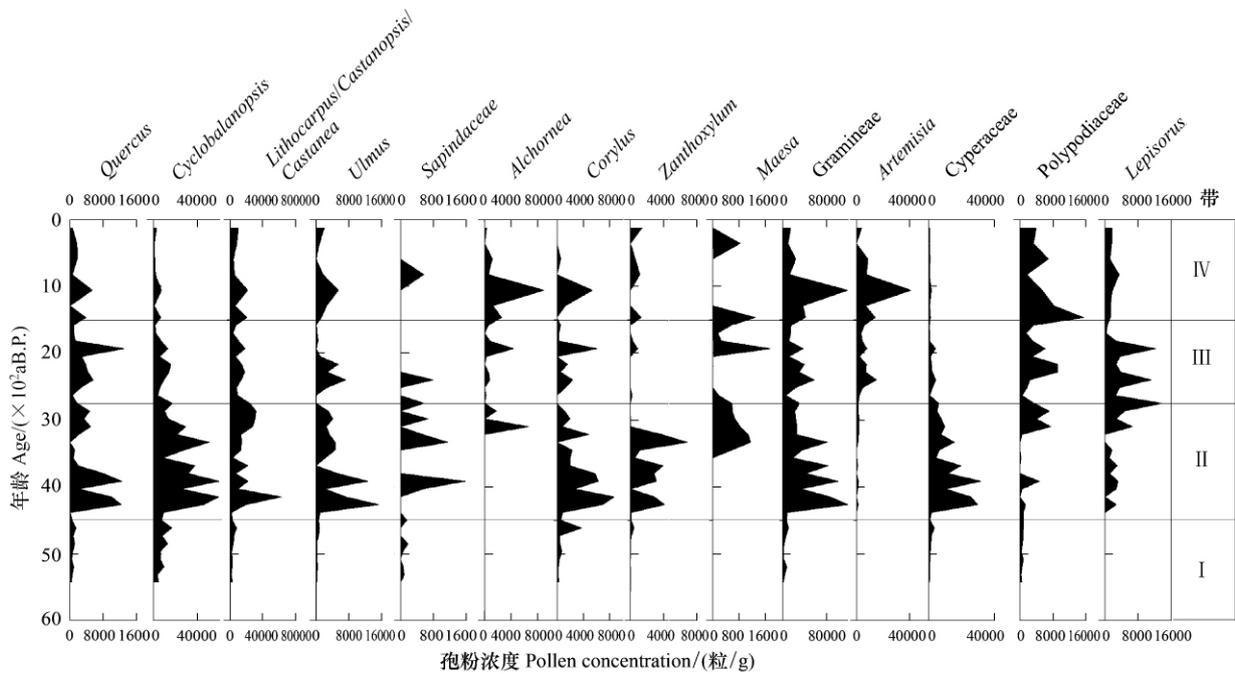


图 3 白鹮湖 LB-1 柱芯孢粉浓度图谱

Fig. 3 Pollen concentration diagram in core LB-1 in the Baixian lake

带 I 47.5—39 cm ,即 5500—4500 aB. P. 期间

本带喜湿针叶乔木平均约 0.6% ,凉湿落叶阔叶乔木平均值达 7% ;一定季节耐旱木本平均 27% ;热带、亚热带木本平均约 3.5% ;热带、温带木本平均 1% ;温带、亚寒带耐寒或耐旱木本平均 2% ;喜湿或湿生草本

平均含量高, 达 30%; 中生、耐旱或耐寒草本含量相对低, 平均 2%。蕨类植物含量也相对较低, 小于 10%。松 (*Pinus*)、落叶栎 (*Quercus*)、常绿栎 (*Cyclobalanopsis*)、石栎/栲/栗 (*Lithocarpus/Castanopsis/Castanea*) 等木本植物都较多。从图 3 可见这一时期, 草本主要是禾本科 (*Gramineae*)、喜湿性莎草科 (*Cyperaceae*); 蕨类有喜湿的水龙骨科 (*Polypodiaceae*); 而耐旱的蒿 (*Artemisia*) 含量为 0。

带 II 39.50—23.5 cm, 即 4500—2750 aB. P. 期间。本带松 (*Pinus*) 含量与上一时期比有所降低, 平均约 6%; 喜湿针叶乔木平均 0.4%; 凉湿落叶乔木与上一时期相比含量有所降低, 平均 4%; 一定季节耐干木本与上一时期相比也有所降低, 平均 15%; 热带、亚热带木本乔木与上一时期比, 稍有上升, 平均 5%; 热带、温带木本平均 1.5%; 温带、亚寒带耐寒或耐旱木本 1.8%; 喜湿或湿生草本在本带含量最高, 与上一时期比有所增加, 平均 40%; 中生、耐寒或耐旱草本含量升高, 平均 6%; 蕨类植物在本带的后半时期升高至 25%。落叶栎 (*Quercus*)、常绿栎 (*Cyclobalanopsis*) 含量较高, 分别为 4000 粒/g 和 30000 粒/g 左右; 草本禾本科 (*Gramineae*) 和湿生莎草科 (*Cyperaceae*) 花粉浓度含量也是最高的, 分别为 40000 粒/g 和 200000 粒/g 左右; 而旱生草本蒿 (*Artemisia*) 开始出现; 蕨类植物除水龙骨科 (*Polypodiaceae*) 含量波动外, 还有瓦韦 (*Lepisorus*) 开始出现。

带 III 23.5—13.5 cm, 即 2750—1500 aB. P. 期间

松 (*Pinus*) 约 8%; 喜湿针叶乔木平均 0.8%; 凉湿落叶阔叶乔木含量稍稍升高, 约为 7%; 一定季节耐干木本花粉含量下降, 小于 10%; 热带、亚热带木本与上一时期差不多, 小幅波动, 在该带的后半期上升至 7%; 热带、温带木本花粉平均 1%; 温带、亚寒带木本含量稍稍降低, 平均 1%; 喜湿或湿生草本含量降低至 15%; 中生、耐寒或耐旱草本升高至 8%; 蕨类植物在本带含量高, 平均 30%。落叶栎 (*Quercus*)、常绿栎 (*Cyclobalanopsis*) 和石栎/栲/栗 (*Lithocarpus/Castanopsis/Castanea*) 含量都不高; 而花椒 (*Zanthoxylum*) 几乎没有; 榆 (*Ulmus*) 和榛 (*Corylus*) 含量与上一时期比也有所降低; 禾本科 (*Gramineae*) 含量降低至 30000 粒/g 以下; 蒿 (*Artemisia*) 含量升高至 80000 粒/g 左右; 而湿生草本莎草科 (*Cyperaceae*) 含量降低至 20000 粒/g 以下, 并继续呈下降趋势; 蕨类植物水龙骨科 (*Polypodiaceae*) 和瓦韦 (*Lepisorus*) 含量均上升。

带 IV 13.5—0 cm, 即 1500 aB. P. 一今

松 (*Pinus*) 约 8%; 喜湿针叶乔木含量为 0; 凉湿落叶阔叶乔木花粉 5% 以下; 一定季节耐干木本花粉低于 10%; 热带、亚热带木本波动下降, 在该带的后半期降至 3% 以下; 热带、温带木本花粉含量升高至平均 3%; 温带、亚寒带木本花粉含量稍稍降低至 2%; 喜湿或湿生草本花粉约 15%; 中生、耐寒或耐旱草本花粉含量升高波动变化, 最高时达到 12%; 蕨类植物孢子在本带含量继续升高, 平均 35%, 最高时高于 45%。落叶栎 (*Quercus*)、常绿栎 (*Cyclobalanopsis*) 和石栎/栲/栗 (*Lithocarpus/Castanopsis/Castanea*) 含量都不高; 而花椒 (*Zanthoxylum*) 依然几乎没有; 榆 (*Ulmus*) 和榛 (*Corylus*) 含量与上一时期比又有所降低; 禾本科 (*Gramineae*) 含量有所升高; 蒿 (*Artemisia*) 含量升高至 100000 粒/g 左右, 最高时达到 400000 粒/g; 而湿生草本莎草科 (*Cyperaceae*) 含量降低至几乎没有; 蕨类植物水龙骨科 (*Polypodiaceae*) 含量上升, 瓦韦 (*Lepisorus*) 含量稍稍下降。旱生草本在这一时期基本呈上升趋势, 湿生草本含量降低, 显示这一时期以气候持续变干为主。

4 白鹈湖古植被与古气候变化历史

白鹈湖地区现生种由圆果化香 (*Platycarya longipes*)、翅荚香槐 (*Cladrastis platycarpa*)、青冈 (*Quercus glarca*)、椴木石楠 (*Photinia davidsoniae*)、掌叶木 (*Handeliidendron bodinieri*)、湖北十大功劳 (*Mahonia confusa*)、球核荚 (*Viburnum propinquum*)、贵州悬竹 (*Ampelocalamus calcareus*)、庐山楼梯草 (*Elatostema stewardii*)、翠云草 (*Selaginella uncinata*)、柳叶蕨 (*Cyrtogonellum fraxinellum*) 等植物组成^[5]。剖面中, 松孢粉含量一直比较稳定, 松孢粉是传播较远的种属, 松可能来自远源。石漠化地区主要植被以草本、蕨类及灌木为主^[12]。白鹈湖沉积物孢粉应该来源于白鹈湖流域及周边地区植被, 通过风传播和地表径流带入。根据孢粉分析结果, 白鹈湖地区古植被与古气候变化可分为 4 个阶段。

I 带 5500—4500 aB. P. 期间, 气候温暖湿润

松 (*Pinus*)、常绿栎 (*Cyclobalanopsis*)、石栎/栲/栗 (*Lithocarpus/Castanopsis/Castanea*)、枫香 (*Liquidambar*)、

禾本科(Gramineae)、莎草科(Cyperaceae) 及单缝包(*Monolete spores*) 含量较高, 苦苣苔科(Gesneriaceae)、大戟科(Euphorbiaceae) 等中旱生草本含量很低, 旱生蒿类(*Artemisia*) 花粉为零, 水龙骨科(Polypodiaceae) 和鳞盖蕨(*Microlepria*) 及瓦韦(*Lepisorus*) 等蕨类植物孢子含量很低, 其中栎属(*Quercus*)、石栎属(*Lithocarpus*) 为山地湿性常绿阔叶林的特征属。温暖湿润的气候条件, 适宜大多数种类植物的生长。图 2 显示该带喜湿针叶木本、凉湿阔叶落叶木本、热带、温带木本及喜湿草本百分比都较高, 而中旱生草本和蕨类植物含量较低; 图 3 可见落叶栎(*Quercus*)、常绿栎(*Cyclobalanopsis*)、石栎/栲/栗(*Lithocarpus/Castanopsis/Castanea*) 等木本植物都较多, 草本主要是禾本科(Gramineae)、喜湿性莎草科(Cyperaceae); 蕨类有喜湿的水龙骨科(Polypodiaceae); 而耐旱的蒿(*Artemisia*) 含量为 0。对应这一时期, 桂林响水洞和荔波董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值平均为 -6.15% 、 -8.02% , 与石笋序列平均值相比偏负, 显示这一时期西南地区为气候适宜期^[13]。贵州白骨洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值也显示这一时期降雨充沛^[14]。草海 $\delta^{18}\text{O}$ 值也显示这一阶段气温较高^[15]。湖泊孢粉记录与洞穴记录的一致性表明这段时期内, 贵州地区主要表现为温暖湿润的气候特征。

II 带 4500—2750 aB. P. 期间, 是该区的气候转变过渡期

本带松(*Pinus*) 花粉含量与上一时期比有所降低, 平均 6%; 喜湿针叶乔木花粉平均 0.4%; 凉湿落叶乔木和一定季节耐干木本花粉与上一时期相比也有所降低, 平均 15%; 热带、亚热带木本乔木与上一时期比, 稍有上升, 平均 5%; 热带、温带木本花粉平均 1.5%; 温带、亚寒带耐寒或耐旱木本花粉约 1.8%; 喜湿或湿生草本花粉在本带含量最高, 与上一时期比有所增加, 平均 40%, 但在 3600 aB. P. 以来呈降低趋势; 中生、耐寒或耐旱草本含量升高, 平均 6%; 蕨类植物在本带的后半时期升高至 25%。落叶栎(*Quercus*)、常绿栎(*Cyclobalanopsis*) 含量较高, 分别为 4000 粒/g 和 30000 粒/g 左右; 禾本科(Gramineae) 和湿生莎草科(Cyperaceae) 花粉浓度含量也是最高的, 分别为 40000 粒/g 和 200000 粒/g, 但在 4000 aB. P. 以后呈逐渐下降趋势; 旱生草本蒿(*Artemisia*) 开始出现, 并且呈缓慢上升的趋势; 蕨类植物除水龙骨科(Polypodiaceae) 含量波动外, 还有瓦韦(*Lepisorus*) 开始出现。以上特征表明, 这一时期, 木本植物稍有减少, 草本含量开始增加, 并且草本中的喜湿类含量由高向低转变, 而旱生类草本开始出现并且呈增长趋势, 表明该期是气候转变过渡期, 气候开始向干旱发展, 气温逐渐下降。桂林响水洞、荔波董哥洞和云南宁蒗仙人洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示 4000—2100 aB. P. 时段内是气候冷事件的突变或转变期, 气温降低^[13]。而云南拱王山地区 4.7—2.1 KaB. P. 时段气候凉湿^[16]。由于地理位置不同, 两地在降水方面存在差异, 但这些记录均反映这一时期气温降低。

III 带 2750—1500 aB. P. 期间, 气候温凉干旱

该带松(*Pinus*) 花粉平均 8%, 与上一时期接近; 喜湿针叶乔木花粉平均 0.8%, 与上时期比略有增加; 凉湿落叶阔叶乔木含量稍稍升高, 为 7%; 一定季节耐干木本含量下降, 低于 10%; 热带、亚热带木本与上一时期接近, 仅有小幅波动, 在该带的后半期上升至 7%; 热带、温带木本平均 1%; 温带、亚寒带木本含量稍稍降低, 平均 1%; 喜湿或湿生草本含量降低至 15%; 中生、耐寒或耐旱草本升高至 8%; 蕨类植物孢子在本带含量较高, 平均 30%。落叶栎(*Quercus*)、常绿栎(*Cyclobalanopsis*) 和石栎/栲/栗(*Lithocarpus/Castanopsis/Castanea*) 含量都不高; 花椒(*Zanthoxylum*) 几乎消失出现; 榆(*Ulmus*) 和榛(*Corylus*) 含量与上一时期比也有所降低; 禾本科(Gramineae) 含量降低至 30000 粒/g 以下; 蒿(*Artemisia*) 含量升高至 80000 粒/g; 而湿生草本莎草科(Cyperaceae) 含量降低至 20000 粒/g 以下, 并继续呈下降趋势; 蕨类植物水龙骨科(Polypodiaceae) 和瓦韦(*Lepisorus*) 含量均上升。综合上述特征, 乔木灌木种类没有一致性变化, 一些种类有所减少, 而另一些种类又有所增加; 木本植物对环境变化有一定的抵御力, 整体上没有太大变化; 草本总体上数量增加, 但喜湿草本减少, 而耐旱草本显著增加, 尤其是适宜石漠化环境的蕨类植物大幅增加^[12]。上述事实表明该时期气候向温凉干旱转变, 该区植被组合逐渐趋向石漠化地区的植被组合。该区孢粉记录的气候变化与洞穴石笋记录的 4000—2100 aB. P. 时段内气温降低相一致^[13]。白鹇湖沉积物柱芯有机质 C/N 比值、Sr/Rb 比值变化分析结果亦表明 3.6—2.2 kaB. P. 气候持续向干旱化方向发展^[4]。

IV 带 1500 aB. P. 至今, 气候干旱、温凉

松(*Pinus*) 平均 8%; 喜湿针叶乔木含量为 0; 凉湿落叶阔叶乔木花粉低于 5%; 一定季节耐干木本低于 10%; 热带、亚热带木本波动下降, 在该带的后半期降至 3% 以下; 热带、温带木本含量升高至平均 3%; 温带、亚寒带木本含量稍稍降低, 平均 2%; 喜湿或湿生草本花粉平均 5% 左右; 中生、耐寒或耐旱草本花粉升高且波动变化, 最高时达到 12%; 蕨类植物在本带含量继续升高, 平均 35%, 最高时高于 45%。落叶栎(*Quercus*)、常绿栎(*Cyclobalanopsis*) 和石栎/栲/栗(*Lithocarpus/Castanopsis/Castanea*) 含量都不高; 而花椒(*Zanthoxylum*) 依然几乎消失; 榆(*Ulmus*) 和榛(*Corylus*) 含量与上一时期比又有所降低; 禾本科(*Gramineae*) 含量有所升高; 蒿(*Artemisia*) 含量升高至 100000 粒/g 左右, 最高时达到 400000 粒/g; 而湿生草本莎草科(*Cyperaceae*) 含量降低至几乎没有; 蕨类植物水龙骨科(*Polypodiaceae*) 含量上升, 瓦韦(*Lepisorus*) 含量稍稍下降。木本的变化说明了该区气候向温凉转变, 草本和蕨类的变化反应了气候干旱化, 蕨类的大量生长说明了该区生态环境向石漠化方向发展。贵州东部洞穴石笋记录也反映这一时期气候波动并向温凉干旱发展^[17]。白鹈湖位于接近山顶地区的(半)原始森林区, 人为活动影响很少, 其生态环境主要受自然地质环境条件和气候变化影响。因此, 上述研究结果还揭示了自然气候变化事件(如气候的持续干旱)也可导致喀斯特地区发生石漠化, 证实了喀斯特地区生态环境具先天脆弱性。

5 结论

白鹈湖孢粉记录揭示该地区近 5000 年来经历了 4 个不同的植被与气候变化阶段: 5500—4500 aB. P. 期间, 各类植被比较丰富, 气候温暖湿润; 4500—2750 aB. P. 期间, 木本植被变化不大, 干旱草本和蕨类植物开始出现, 是气候转变过渡期; 2750—1500 aB. P. 期间, 木本植物组合发生明显变化, 喜湿草本减少, 耐旱草本增加, 气候继续向温凉干旱化发展; 1500 aB. P. 至今, 木本植被和喜湿草本继续减少, 中生耐旱草本和蕨类植物数量继续大幅增加, 干旱化趋势明显, 植被组合向典型石漠化植被组合类型发展。白鹈湖沉积物剖面孢粉组合变化表明, 该地区近 5000 年来气候变化以温度下降、降水减少为主要趋势, 并存在明显的植被退化现象。本研究也表明, 自然气候变化事件(如气候持续干旱)可导致喀斯特地区发生石漠化, 科学评估白鹈湖地区气候干旱化趋势及其生态环境影响对指导该地区合理应对气候变化具有重要意义, 在今后的研究工作中亟待加强。

References:

- [1] Wo K D. Yunnan pollen data on the significance of the tropical and subtropical regions//Quaternary Collaborative Research Group of Chinese Academy of Sciences in Australia. China-Australia Quaternary Symposium Collection, Beijing: Science Press, 1987: 21-27.
- [2] Wan G J. Carbonate and Environment (Volume 1). Beijing: Seismological Press, 1995: 1-90.
- [3] Wan G J. Carbonate and Environment (Volume 2). Beijing: Seismological Press, 2000: 1-6.
- [4] Chen J A, Zen Y, Zhang W, Li J, Zhu Z J. Day event at 4—2kaB. P. recorded by the sediments of Baixian lake and its impact on the regional eco-environment. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(6): 1131-1137.
- [5] Long C L, Yu S X. Space variation of seed rain and seed bank in gaps of Karst forest in Maolan nature reserve, Guizhou Province. *Acta Botanica Yunnanica*, 2007, 29(3): 327-332.
- [6] Long C L. Regeneration and the quantitative characteristics of trees in gaps in karst forest in Maolan Natural Reserve, Guizhou province. *Journal of Yunnan University*, 2007, 29(3): 317-323.
- [7] Long C L, Zhu S Q. A preliminary discussion on the fate of seeds in soil seed bank of karst forest. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Sciences*, 2001, 19(2): 20-22.
- [8] Li Y Y, Mu B, Zhu X K, Long C L. Microclimate characteristics of different successional stages of communities of Karst forest. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 1998, 17(6): 364-367.
- [9] Pan T, Wu S H, Dai E H, Wang H, Zhao D S. Quantitative relationships between surface pollen and spores assemblages and vegetation in the Southern Subtropics of Yunnan Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6060-6069.
- [10] Xu Z P, Chen J X, Xiao J Y. Pollen records since late middle-2 pleistocene in the Kunming Basin, Yunnan Province and paleoclimate evolution. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(1): 65-78.
- [11] Yang X D, Wang S M, Tong G B, Wu J L, Jiang X Z. The late pleistocene pollen record in the lake sediments from ancient Heqing lake and its

significance for palaeoclimate. *Quaternary Sciences*, 1998, (4): 335-343.

- [12] Zhao Z Y, Yuan D X, Luo L D, Shi S Q, Hao X D. Aalynological assemblage characters and the ecologic significance among rocky desert of different grades—A case in Huajiang. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(2): 113-120.
- [13] Zhang M L, Tu L L, Lin Y S, Qin J M, Wang H, Feng Y M, Yang Y, Zhu X Y. The cooling events from stalagmite records during the middle and late Holocene in southwest China. *Carsologica Sinica*, 2004, 23(4): 283-290.
- [14] Wu J Y, Wang Y J, Kong X G. Evolution and abrupt changes of the Holocene Asian monsoon climate recorded by stalagmite in Baigu cave in Guizhou. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 26(5): 55-61.
- [15] Tao F X, Hong Y T, Jiang H B. The near 8Ka climate change in Caohai Guizhou. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(16): 1489-1492.
- [16] Zhang W, Mu K H, Cui Z J, Feng J L, Yang J Q. Record of the environmental change since Holocene in the region of Gongwang mountain, Yunnan province. *Earth and Environment*, 2007, 35(4): 343-351.
- [17] Zhang M L, Cheng H, Lin Y S, Qin J M, Zhu X Y, Yang Y, Chen H M, Edwards R L. High-resolution climatic record from a stalagmite in the past 2000 years in Libo, Guizhou Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(3): 339-348.

参考文献:

- [1] D. 沃克. 云南花粉资料对热带亚热带区域的意义//中国科学院中澳第四纪合作研究组编. 中国-澳大利亚第四纪学术讨论会文集, 北京: 科学出版社, 1987: 21-27.
- [2] 万国江. 碳酸盐岩与环境(卷一). 北京: 地震出版社, 1995: 1-90.
- [3] 万国江. 碳酸盐岩与环境(卷二). 北京: 地震出版社, 2000: 1-6.
- [4] 陈敬安, 曾艳, 张维, 李键, 朱正杰. 贵州白鹇湖沉积物记录的 4—2kaB. P. 干旱气候事件及其生态环境影响. *第四纪研究*, 2010, 30(6): 1131-1137.
- [5] 龙翠玲, 余世孝. 茂兰喀斯特森林林隙种子雨、种子库空间变异. *云南植物研究*, 2007, 29(3): 327-332.
- [6] 龙翠玲. 茂兰喀斯特森林林隙树种更新及数量特征. *云南大学学报: 自然科学版*, 2007, 29(3): 317-323.
- [7] 龙翠玲, 朱守谦. 喀斯特森林土壤种子库种子命运初探. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 2001, 19(2): 20-22.
- [8] 李援越, 穆彪, 祝小科, 龙翠玲. 喀斯特森林不同演替阶段群落的小气候特征. *山地农业生物学报*, 1998, 17(6): 364-367.
- [9] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 王昊, 赵东升. 云南亚热带南部表土孢粉组合与植被间的定量关系. *生态学报*, 2008, 28(12): 6060-6069.
- [10] 许哲平, 陈建强, 肖景义. 云南昆明盆地中更新世晚期以来的孢粉记录及古气候演化. *地质学报*, 2009, 83(1): 65-78.
- [11] 羊向东, 王苏民, 董国榜, 吴敬禄, 蒋雪中. 云南鹤庆古湖晚更新世的孢粉记录及其古气候学意义. *第四纪研究*, 1998, (4): 335-343.
- [12] 赵增友, 袁道先, 罗伦德, 石胜强, 郝秀东. 不同石漠化等级的孢粉组合特征及其生态指示意义——以花江实验区为例. *中国岩溶*, 2010, 29(2): 113-120.
- [13] 张美良, 涂林玲, 林玉石, 覃嘉铭, 王华, 冯玉梅, 杨琰, 朱晓燕. 中国西南地区中一晚全新世降温事件的石笋记录. *中国岩溶*, 2004, 23(4): 283-290.
- [14] 吴江滢, 汪永进, 孔兴功. 贵州白骨洞石笋记录的全新世季风气候演化与突变. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(5): 55-61.
- [15] 陶发祥, 洪业汤, 姜洪波. 贵州草海地区最近 8Ka 的气候变化. *科学通报*, 1996, 41(16): 1489-1492.
- [16] 张威, 穆克华, 崔之久, 冯金良, 杨建强. 云南拱王山地区全新世以来的环境变化记录. *地球与环境*, 2007, 35(4): 343-351.
- [17] 张美良, 程海, 林玉石, 覃嘉铭, 朱晓燕, 冉景丞, 杨琰, 陈会明, Edwards R L. 贵州荔波地区 2000 年来石笋高分辨率的气候记录. *沉积学报*, 2006, 24(3): 339-348.