

鹤庆深钻孢粉记录揭示的 2.78 Ma 以来的 植被演替与气候变迁

肖霞云^{①*} 沈吉^{①†} 王苏民^① 肖海丰^① 童国榜^②

(^① 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; ^② 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 正定 050803)

摘要 对云南鹤庆盆地 737.72 m 长的湖泊沉积岩芯进行高分辨率的孢粉研究表明, 2.780 Ma 以来鹤庆盆地周围山地的古植被与古气候经历了 6 次大的变化, 即 2.780~2.729 Ma BP, 研究区周围山地主要被松林所占据, 垂直植被带结构简单, 反映气候相对温暖干旱; 2.729~2.608 Ma BP, 寒温针叶林和铁杉林面积增加较多, 已存在结构清楚的垂直带谱, 但根据孢粉组合中生长在低海拔的热带、亚热带成分含量也普遍增加可以推测此期寒温针叶林和铁杉林面积增加主要是由于山体强烈抬升为它们的母体植物提供了向上扩张的空间和生长条件的结果, 相对应的盆地周围较低海拔区气候相对温暖湿润; 2.608~1.553 Ma BP, 研究区周围山地大部分被松林所占据, 寒温针叶林林带上升, 反映气候整体偏暖干; 1.553~0.876 Ma BP, 研究区周围山地的垂直植被带增多, 并且植被带上下迁移的幅度变大, 反映气候变化幅度增加、气候组合特征更加复杂且大部分时期偏冷; 0.876~0.252 Ma BP, 研究区周围山地已存在现今所具有的所有植被带, 各植被带的组成成分较前期更丰富且复杂, 它们在不同时期此消彼长, 互相更替, 而且其上下迁移的幅度是整个剖面中最大的, 反映气候变化的幅度更大但频率降低、气候的组合特征更加复杂; 0.252 Ma BP 至今, 研究区周围山地的大部分时期是松林和半湿润常绿阔叶林的扩张期, 其他植被带扩张的时期很短, 反映气候冷暖波动的幅度减小. 在此 6 次大的古植被与古气候变化背景下, 还存在多次次一级的植被演替与气候波动. 在此基础上, 进一步探讨了鹤庆盆地植被演替与气候变化的驱动机制, 初步认为其主要影响因素是轨道参数等外部因素, 但在 2 次山地垂直植被带明显增加和 3 次大的气候转型时, 青藏高原隆升对鹤庆地区的环境变化起了非常重要的作用.

关键词 孢粉记录 古植被 古气候 气候转型 鹤庆盆地

第四纪是地球环境演化史上最晚的一次重大寒冷时期, 此期与人类的出现和发展关系十分密切. 研究第四纪古环境及其变化规律, 是进行未来中长期环境演变预测的重要依据. 然而较长期以来, 中国的古气候研究主要集中在东南季风区, 对于西南季风区的情况缺乏系统研究, 尤其缺乏长时间尺度的沉

积记录研究. 云南高原的现代气候主要受控于西南季风气候系统, 此外兼受西风带和青藏高原局地气候影响. 新生代以来随着青藏高原的隆升, 该区发育了众多构造断陷湖泊^[1]. 由于湖泊沉积忠实地记录了区域气候与环境的演变过程, 并具有连续性好、分辨率高、包含信息量丰富等特点, 近年来在全球变化和

收稿日期: 2006-11-21; 接受日期: 2007-02-07

国家自然科学基金重点项目(批准号: 40331003)和国家自然科学基金(批准号: 40572109)联合资助

* E-mail: xyxiao@niglas.ac.cn; † jishen@niglas.ac.cn

区域环境演化研究领域发挥了愈来愈重要的作用^[2,3]. 云南高原是中国生物多样性最丰富的地区, 垂直植被带发育, 从西双版纳到玉龙雪山不足 600 km 的范围内存在热带季雨林到高山砾石冻荒漠所有植被带, 是全球主要植被空间分布的浓缩^[4]. 总之, 云南高原是研究中国西南季风区第四纪古环境和湖泊生态环境演变的有利地区之一. 为此, 在国家科学技术部和中国科学院联合支持的“中国大陆环境钻探计划”资助下, 2002年7月在云南高原的鹤庆盆地实施了湖芯钻探, 获得了 737.72 m 连续湖泊沉积岩芯. 本文对该深钻进行了高分辨率的孢粉研究, 以期通过孢粉分析恢复研究区第四纪古植被与古气候, 并初步探讨了鹤庆地区发生显著环境变化的可能原因, 为全面认识亚洲季风环境以及青藏高原隆升的气候环境效应提供新的证据.

1 自然地理概况

鹤庆盆地(26°27'~26°46'N, 100°08'~100°17'E)为一构造断陷盆地, 位于青藏高原东南边缘部位, 属滇西北横断山余脉. 盆地四周被高山环绕, 周围山峰海拔均在 2500 m 以上, 紧邻鹤庆盆地的东西两侧是连续而较高峻的山地, 南面山地稍低, 而北面是相隔约

40 km 的玉龙雪山(5596 m), 由此鹤庆盆地形成了一个完整的山间盆地. 盆地面积约 144 km², 呈南北长条形展布, 与构造带走向一致, 南北长约 22 km, 东西宽约 5~10 km, 地势低平, 海拔 2193~2240 m, 北高南低, 坡度约 1°~3°. 盆地四周有小溪、小河汇入, 中部低洼地积水形成草海, 现在湖水变浅. 盆地东部有发源于玉龙雪山的漾弓河自北向南流过, 出盆地后折向东流入金沙江, 成为金沙江水系^[5](图 1).

盆地位于西南季风区, 夏季主要受来自孟加拉湾的暖湿气流影响, 冬季受南支西风急流控制, 另外还兼受青藏高原局地气候的影响, 因此具有夏暖湿、冬温干的气候特点. 1月均温 8℃, 7月均温 21℃, 年均温 13.5℃. 1月平均降水量 2.4 mm, 7月为 229.3 mm, 年降雨量在 900~1000 mm 之间, 主要集中在夏季, 占全年降雨量的 80%~90%^[5].

鹤庆盆地在云南省植被区划中归属于滇中西北部高中山高原云南松林、云、冷杉林亚区, 隶属于高原亚热带北部常绿阔叶林地带. 在这个植被地带内垂直植被带非常发育, 海拔 5000 m 左右为雪线, 树线位于大约海拔 3900 m 左右(冷杉 *Abies* 林上限), 它们之间主要为高山杜鹃灌丛, 嵩草高山草地, 高山砾石(岩屑)冻荒漠组成; 在海拔 3100 m 左右, 山地环境

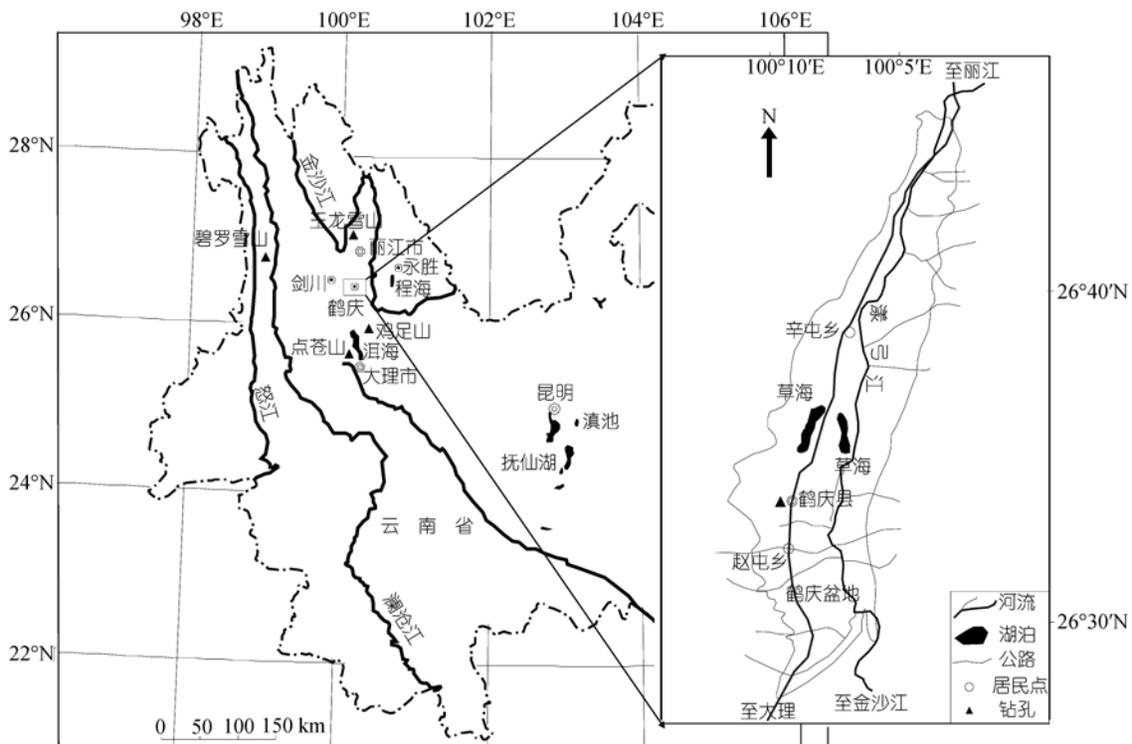


图 1 鹤庆钻孔位置图

明显变为凉湿,是为夏季云雾线分布所在,这以上直到海拔 3900 m 左右都为亚高山寒温针叶林带(云杉林和冷杉林)分布的范围;2800~3200 m 之间为山地针阔叶混交林,主要树种有铁杉、冷杉、石栎以及槭、桦等,林下多有箭竹和杜鹃层片;2400~2900 m 之间为中山湿性常绿阔叶林,优势成分为包斗栎、厚叶石栎、硬斗石栎和银木荷等;1600~2500 m 之间为半湿润常绿阔叶林和云南松林,主要成分是青冈属的滇青冈和黄毛青冈、栲属的元江栲和高山栲、石栎属的滇石栎以及云南松林;海拔 1600 m 以下的山谷地区,由于气候炎热干燥,分布着干热河谷稀树灌丛草甸 [4,6].

2 样品采集与实验方法

本次钻探首次在国内对第四纪松散沉积物采用内衬管取芯的方法,确保了岩芯不受外力作用而发生扭曲、变形. HQ 钻孔位于鹤庆盆地中部云鹤县城西南角,经纬度为 26°33'43.1"N, 100°10'14.2"E, 井口海拔为 2190 m, 孔深 737.72 m, 取芯率高达 97%.

在所获得的 737.72 m 长岩芯中,除底部约 17 m 岩芯为湖盆形成初期的底砾岩外,其余基本为连续的湖相沉积,岩性为青灰色、灰褐色泥或粉砂质泥,层理清晰,且内含丰富植物残体化石和螺壳碎屑,是极为理想的研究环境演化的优质湖泊沉积岩芯. 较详细的岩性特征划分见图 2 左侧.

本文对该深钻进行了高分辨率的孢粉研究,孢粉样品的取样间距为:上部 200 m 岩芯取样间距为 20 cm; 200 m 以下的岩芯取样间距为 50 cm, 共采集孢粉样 1989 个. 实验室孢粉前处理采用 HCl-HF 处理、过筛分选的方法,并用外加石松孢子定量测定孢粉浓度. 孢粉鉴定和统计是在 Leitz 光学投射显微镜下完成的,统计的孢粉分别用百分比和浓度表示. 文中计算陆生植物(包括木本、灌木、旱生草本)的花粉百分比时以陆生植物孢粉总数为基数,水生草本、蕨类和藻类孢子的百分比以所有孢粉属种总数为基数计算百分比.

岩芯古地磁测年采用 U-Channel 连续采样,在中国科学院地球环境研究所超导磁力仪上通过系统交变退磁和剩磁测量,获得深钻岩芯的古地磁结果(表 1),其磁性地层柱的极性转换十分清楚,并可以很好地与 Cande 和 Kent [7] 的标准极性年表、Singer 等 [8] (布容正极性时)和 Channell 等 [9,10] (主要是松山负极性时)进行对比. 在 Brunhes 正极性时段内, Blake 事件出现

在 24.14~25.09 m, B/M 界线位于岩芯 152.12 m 处,在 Matuyama 负极性时段内,我们获得了目前已知可能存在的所有正向极性事件(表 1),这是迄今中国磁性地层研究中获得的最详细的序列, M/G 界线位于 668.52 m. 岩芯底部结束于 Gauss 极性时第一正极性段(C2An.1n)内,由此确定长岩芯的沉积年代始于 2.78 Ma. 样品的年代根据古地磁年代进行线性插值得到.

表 1 鹤庆孔古地磁年龄

古地磁地层	深度/m	年龄/Ma
Blake	24.62	0.114
B/M	152.12	0.780
Pre-B/M	157.2	0.822
Kamikatsura	177.89	0.886
Santa Rosa	187.68	0.932
Jaramillo	193.57	0.987
	233.53	1.068
Punaruu	245.2	1.115
Cobb Mtn	290.15	1.190
	293.49	1.215
Bjorn	308.89	1.255
Cardar	355.36	1.472
	357.68	1.480
Gilsa	388.24	1.571
Olduvai	416.42	1.778
	452.93	1.945
2r. 1r. 1n	468.65	1.977
Reunion	539.53	2.140
	542.61	2.150
Gauss 顶界	668.52	2.581
	737.72(岩芯底)	2.780(推测)

3 孢粉分析结果

在研究的 1989 个孢粉样品中,共鉴定出 278 个孢粉(科)属(种),其中包括乔木花粉 61 个(科)属(种),灌木花粉 68 个(科)属(种),旱生草本花粉 100 个(科)属(种),水生草本花粉 15 个(科)属(种),蕨类孢子 30 个(科)属(种),藻类 4 个(科)属. 本钻孔除底部少数样品孢粉较少外,其他样品孢粉丰富,共统计到 1160859 粒孢粉,平均每个样品统计 584 粒,最多统计了 1621 粒/样,最少为 113 粒/样. 孢粉组合以乔木花粉为主,百分含量平均达到 90.3%,最高为 100%,其次为旱生草本花粉,百分含量平均为 7.5%,灌木花粉、水生草本花粉和蕨类孢子含量均较低. 乔木花粉中松属(*Pinus*)占绝对优势,平均含量为 79.3%,其次云杉属(*Picea/Abies*)、铁杉属(*Tsuga*)、杉/柏科(*Taxodiaceae/Cupressaceae*)、油杉属(*Keteleeria*)、雪松属(*Cedrus*)、桦属(*Betula*)、榆属(*Ulmus*)、落叶栎类(deciduous

oaks)、常绿栎类(evergreen oaks)、栲/石栎属(*Castanopsis/Lithocarpus*)等有较多含量。灌木花粉主要有绣线菊属(*Spiraea*)、南天竹属(*Nandina*)、山柳属(*Clethra*)、猕猴桃属(*Actinidia*)和木犀属(*Olea*)等。旱生草本花粉主要有禾本科(*Gramineae*)、蒿属(*Artemisia*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、玄参科(*Scrophulariaceae*)和唇形科(*Labiatae*)等。水生草本花粉主要是黑三棱属(*Sparganium*)和狐尾藻(*Myriophyllum*)。蕨类孢子以鳞盖蕨属(*Microlepia*)、水龙骨科(*Polypodiaceae*)为主。藻类主要是盘星藻属(*Pediastrum*)和光面球藻属(*Leiosphaeridia*)。

云南省植物种类丰富,为全国之冠^[4]。在对鹤庆深钻进行孢粉鉴定时,虽鉴定出了 278(科)属(种)化石孢粉,但本剖面中生态意义较大、能有一定代表性并有一定数量的化石孢粉却还不到已鉴定孢粉总数的 1/4。

为了便于统计与研究,我们选择在剖面中最高百分含量超过 1%且生态意义较大的孢粉属种用 Tilia 软件绘制孢粉百分比图谱和浓度图谱(图 2, 3),根据剖面的孢粉组合特征,参考聚类分析 Coniss 结果,将本剖面孢粉组合划分为 6 个孢粉组合带,各孢粉组合带内都包含了较明显的次级波动。各带的孢粉组合特征按由老到新的顺序简述如下:

孢粉组合带 I, 737.72~720.06 m, 即 2.780~2.729 Ma BP。本孢粉组合带中松属平均百分含量为 80.1%;云/冷杉属、铁杉属和雪松属百分含量都相对较低,平均分别为 3.1%、1.7%和 0.61%;旱生草本蒿属和藜科含量相对较高,平均分别为 4.0%和 2.5%;其他属种含量都很低。孢粉总浓度(指所有孢粉的总浓度,下同)和各孢粉属种的浓度都极低,总浓度平均仅 136 粒/g。

孢粉组合带 II, 720.06~677.97 m, 即 2.729~2.608 Ma BP。松属含量与上带相差不多,平均为 79.6%;云/冷杉属、铁杉属和雪松属花粉含量都相对较高,平均分别为 4.2%、3.3%和 2.4%;有一定量的灌木花粉绣线菊属和木犀属;蒿属和藜科含量降低至仅少量出现;以水龙骨科为主的蕨类孢子含量总体较高。孢粉总浓度除本带顶部不足 5 m 岩芯外都很低。本孢粉组合带内的主要属种还存在 4 次明显的波动。

孢粉组合带 III, 677.97~382.22 m, 即 2.608~1.553 Ma BP。带内乔木花粉含量非常高,平均为 95.7%;乔

木花粉中松属含量普遍很高,平均达 88.0%;云/冷杉属和铁杉属花粉含量相对较低,平均分别为 3.1%和 1.2%;雪松属在少数层位中含量相对较高;其他属种含量都很低。藻类在个别层位含量较高。孢粉总浓度普遍较高。在此孢粉组合带内,各孢粉属种还具有 5 次次级波动。

孢粉组合带 IV, 382.22~174.63 m, 即 1.553~0.876 Ma BP。松属含量在带内从下至上逐渐降低;云/冷杉属和铁杉属花粉含量较上带整体增加,普遍相对较高,而且波动幅度变大、频率增加;暖性针叶属种油杉属、罗汉松属和陆均松属以及喜暖的灌木花粉绣线菊属、猕猴桃属和木犀属等较上一孢粉组合带含量有所增加,在本孢粉组合带内出现了一定含量;温带落叶阔叶属种桦属、榆属含量增加较多,其含量是所有孢粉组合带中最高的;落叶栎类、常绿栎类与旱生草本禾本科、蒿属、玄参科和唇形科等在本带的中上部增加较多,含量相对较高;栲/石栎属在本带的中下部含量较高。孢粉总浓度的高低波动较大,平均为 17676 粒/g。在此大的背景下,孢粉带内各指标还具有 4 次大的明显的波动,每次大的波动下又具有更次一级的波动。

孢粉组合带 V, 174.63~51.14 m, 即 0.876~0.252 Ma BP。带内松属花粉含量较低,波动较大,平均为 73.7%,波动在 25.4%~95.8%之间;云/冷杉属含量较高,尤其是本孢粉带中上部,最高可达 22.1%,平均含量为 3.6%,波动幅度较大;铁杉属含量是整个剖面中波动幅度最大的,带内共出现了 8 次铁杉属含量峰值,其间间有 7 次铁杉属含量低值,含量峰值和低值之间相差较大,最大为 33.8%,最小为 0,铁杉属含量峰值所经历的时间较短,以至铁杉属含量变化非常急剧;出现了较多含量的油杉属和一定量杉/柏科,它们平均分别为 0.75%和 0.71%,其中油杉属的最高值可为 6.6%;落叶栎类和常绿栎类含量都整体增加较多,平均分别为 0.64%和 2.2%,它们的波动幅度也同时增大;栲/石栎属和灌木花粉如绣线菊属、南天竹属、猕猴桃属和木犀属等在上带的基础上又进一步增加,并且其中的绣线菊属、南天竹属、猕猴桃属和木犀属等的百分含量成为本剖面含量最高的,它们平均分别为 0.49%、0.65%、0.36%、0.33%和 0.82%;禾本科、蒿属、玄参科和唇形科含量都有降低,但仍有一定含量。水生草本花粉含量稍有增加,平均为

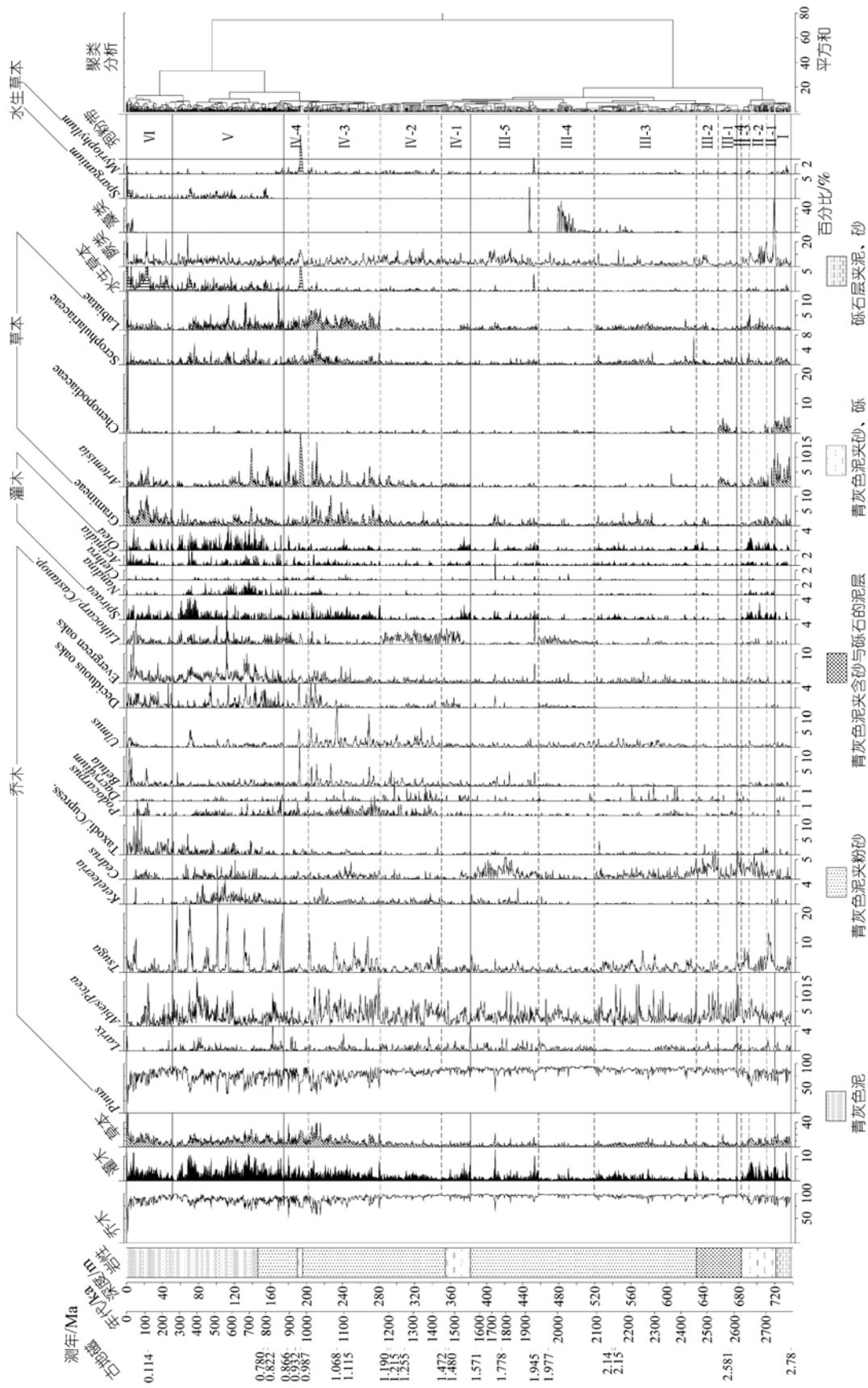


图 2 云南鹤庆深钻孢粉百分比图

0.74%。孢粉总浓度整体较高、波动大, 平均为 25952 粒/g, 波动在 829~268831 粒/g 之间, 在带内出现了 7 次峰值, 基本与铁杉属含量峰值相对应。在此基础上, 本孢粉组合带大致包含了 20 次左右较明显的波动。

孢粉组合带 VI, 51.14 m 至岩芯顶部, 即 0.252 Ma BP 至今。本带云/冷杉属和铁杉属除少数层位含量较高外, 其他层位含量都非常低, 平均分别为 1.9%和 1.2%; 出现了本剖面中含量最高的杉/柏科, 平均为 1.7%; 落叶栎类和常绿栎类含量仍较高, 平均分别为 0.94%和 2.2%; 栲/石栎属和灌木花粉绣线菊属、猕猴桃属和木犀属等仍有一定含量, 平均分别为 0.57%, 0.61%, 0.41%和 0.43%; 桦属在本孢粉组合带的偏上部出现整个剖面中的最高含量值, 最高可达 12.8%; 榆属在本带偏上部含量也较高, 最高为 3.7%; 旱生草本禾本科的含量是本剖面中最高的, 平均为 3.3%; 蒿属也有一定含量, 平均为 1.2%; 藜科在本带顶部出现了 80.4%的最高值; 水生草本花粉含量整体较高, 平均为 2.5%; 藻类除在本带偏上部出现较多含量外, 其他层位很少出现。孢粉总浓度仍较高, 平均为 23937 粒/g, 其变化幅度有所减少。本孢粉组合带内各指标还存在 7 次较大波动。

4 现代孢粉雨与古植被、古气候

为了更好地解释化石孢粉记录, 较准确地重建古植被与古气候, 童国榜等^[11,12]对云南省玉龙雪山及其邻近地区的现代花粉雨进行了研究或再研究。研究表明, 松属花粉在所有垂直植被带中含量都较高, 平均可达 75.5%, 而且相对来说在海拔 3350 m 以上和海拔 2250 m 以下的山地中含量更高, 海拔 3350 m 以上高含量的松属花粉应是上升气流从低海拔区携带上来的外来花粉, 而低海拔区高含量的松属花粉可能是森林砍伐后次生松林生长的结果^[13]。在亚高山寒温针叶林中(3100~3900 m)除了松属花粉外, 主要花粉是云/冷杉属, 另外还有少量落叶松。林内的云/冷杉属平均含量为 20%, 最高可达 53.7%, 出现在海拔 3220 m 左右。在相邻的云南铁杉常绿针阔叶混交林内云/冷杉属平均含量为 4.7%, 该林带以下的植被带中云/冷杉属含量最高不超过 2.6%。在云南铁杉常绿针阔叶混交林(2800~3200 m)植被带内的孢粉除了松属和一定量的云/冷杉属外, 主要是铁杉属和常绿栎类花粉, 与其植被的主要成分相对应。在该植被带内铁杉属含量平均为 1.8%, 最高为 10.8%, 出现

在海拔 3100 m 左右, 正对应着现代植被中的残存铁杉林; 常绿栎含量波动在 0.3%~49.0%, 平均为 11.5%。在云南铁杉常绿针阔叶混交林带以下的植被带中铁杉属含量最高不超过 3.8%, 平均不超过 0.6%; 在海拔 2250 m 以下常绿栎很少分布的地区, 常绿栎花粉含量平均仅 1.3%。中山湿性常绿阔叶林(2400~2900 m)中的孢粉与该植被带中优势树种较多相对应, 多个孢粉属种的含量峰值都出现在该植被带中, 如桦属(包括柁木)、柏科、栲/石栎属、落叶栎类、水龙骨科等, 此外, 还有一定的常绿栎类。半湿润常绿阔叶林(2250~2500 m)中的孢粉除松属以外, 主要是常绿栎类、榆属和槭属, 常绿栎最高含量为 19.6%, 平均为 9.9%, 榆属加槭属最高为 4.1%, 平均为 1.2%。各垂直植被带中的孢粉组合特征表明本区现代孢粉雨基本能够反映现代植被。

鹤庆盆地做为一个完整的山间盆地, 其孢粉主要来源于与盆地相邻的山地和相隔约 40 km 的玉龙雪山上的植被, 并主要通过风(包括西南季风、南支西风、高原季风与湖陆风)和流水(地表径流和河流)进行搬运。因此盆地中的化石孢粉包含了周围山地各垂直植被带的混合信息^[14], 如何从这些混合信息中判断存在什么样的垂直植被带? 李文漪^[15]研究认为 1% 以下的云/冷杉属花粉有可能是几十甚至几百公里以外的地区传播而来, 虽然鹤庆盆地中的化石孢粉主要来自盆地周围的山地, 但也不能完全排除少量外来的可能性。因此当盆地的孢粉组合中云/冷杉属含量超过 1% 时, 认为周围山地就应该有寒温针叶林的存在。从云南现代花粉雨可以推测如果鹤庆盆地的化石孢粉组合中铁杉属含量达到或超过 10.8%, 则周围山地有铁杉林存在; 如果铁杉属含量超过 1.8%, 并有百分含量大于 1.3% 的常绿栎类花粉时, 周围山地应有云南铁杉常绿针阔叶混交林的存在; 如果化石孢粉组合中有相对较多的多种孢粉属种如桦属、柏科、栲/石栎、落叶栎类、单裂缝孢子以及常绿栎类等出现, 则认为周围山地有中山湿性常绿阔叶林存在; 如果化石孢粉中阔叶树种仅常绿栎类含量较多, 并有一定量榆属与槭属时认为可能有半湿润常绿阔叶林存在。由于松属是超显示性花粉, 有人认为当其含量在 30% 以下时, 并不见林子存在^[16-18], 但本剖面中松属含量一般在 40% 以上, 平均达 79.3%, 因此可以认为云南松林自 2.78 Ma 以来在鹤庆盆地周围低海拔区都有存在。

山地植被对气候周期性的冷暖、干湿波动的响应主要表现在垂直植被带的上升和下降, 而垂直植被带的升降又表现为各植被带面积的增减, 植被带面积的增减在盆地的化石孢粉组合中反映在各植被带标志性成分孢粉含量的变化, 因此即使山间盆地包含了周围山地各垂直带谱的混合信息, 也可根据各植被带标志性成分孢粉含量在化石孢粉组合中的变化来推测研究区古气候的演变历史。

根据研究区现代花粉雨的研究结果^[11,12]和常见属种的生态特征^[19], 推测 2.780 Ma 以来鹤庆盆地周围山地的古植被与古气候经历了以下 6 个大的阶段:

第 1 阶段, 2.780~2.729 Ma BP: 相对较低的云/冷杉属和铁杉属花粉含量以及较高的旱生草本蒿属和藜科含量说明此期研究区周围山地主要被松林所占据, 可能仅在周围高山的山顶部位有面积较小的寒温针叶林存在, 此期植被带结构较简单。反映此期研究区气候相对温暖干旱。极低的孢粉总浓度主要受沉积岩性为砾石层夹少量泥、砂的影响, 由于主要是砾石的沉积物不利于孢粉保存, 且粗颗粒物堆积迅速冲淡了孢粉浓度, 导致即使在云南这类植物非常丰富的地区也仅能鉴定出较少的孢粉。

第 2 阶段, 2.729~2.608 Ma BP: 本阶段云/冷杉属、铁杉属和雪松属花粉含量增加, 整体相对较高, 推测研究区周围山地较高海拔区的寒温针叶林和铁杉林面积增加较多, 并各自构成一个垂直植被带, 说明此期山地已存在结构相对较清楚的垂直植被带谱。同时, 相对较高含量喜温湿的绣线菊属和热带、亚热带属种木犀属, 以及较高含量喜湿热的蕨类孢子^[20]说明松林中有一定量较温暖的绣线菊和木犀等树生长, 而且林下蕨类植物比较繁盛, 反映盆地周围较低海拔区的气候是相对温暖湿润。因此可以进一步推测此阶段寒温针叶林和铁杉林面积增加所指示的气温变冷可能主要是山体强烈抬升的结果, 由于山体强烈抬升为寒温针叶林和铁杉林提供了向上扩张的空间和生长条件。此次山体强烈抬升在沉积岩芯中也有反映, 即岩芯岩性大部分为青灰色泥夹砂、砾, 这也决定了此阶段孢粉总浓度大部分仍很低。盆地周围较低海拔区的气候整体相对温暖湿润, 但也存在温和湿润→温暖潮湿→温和较湿→温凉较湿的次级波动。

第 3 阶段, 2.608~1.553 Ma BP: 整个阶段的乔木花粉含量都很高, 乔木花粉中的松属含量普遍很高, 云/冷杉属和铁杉属花粉含量整体上相对较低, 雪松属在少数层位中含量相对较高, 其他属种含量都较低。推测此期研究区周围山地大部分被松林所占据, 寒温针叶林的林带上升, 其所占的面积大大减小, 可能仅出现在更高海拔的地区, 反映研究区气候整体相对偏暖干。在此背景下, 仍存在温暖干旱→温凉较湿→气温升高、降水变化不大→温暖干旱→气温降低、湿度增大等次一级的气候波动。孢粉总浓度整体较高, 这与本期沉积物岩性变细(以青灰色泥夹粉砂为主)紧密相关, 期间孢粉浓度的波动可能更多地受降雨等因素的控制。

第 4 阶段, 1.553~0.876 Ma BP: 本阶段云/冷杉属和铁杉属花粉含量较上阶段整体增加, 普遍相对较高, 而且波动幅度也变大、频率增加; 暖性针叶属种油杉属、罗汉松属和陆均松属, 温带落叶阔叶属种桦属、榆属和落叶栎类以及较温暖的常绿栎类、栲/石栎等, 还有喜暖的灌木花粉绣线菊属、猕猴桃属和木犀属等以及旱生草本禾本科、蒿属等的含量在本阶段都或多或少有所增加, 而且在阶段内的波动幅度也增大。推测研究区周围山地的垂直植被带谱由此前相对较简单到本阶段垂直植被带增多, 结构变复杂, 首次出现了云南铁杉常绿阔叶混交林、中山湿性常绿阔叶林和半湿润常绿阔叶林, 并且垂直植被带上下迁移的幅度变大, 反映研究区气候变化幅度增加, 气候组合特征更加复杂, 且本阶段的大部分时期偏冷。另外, 阶段内还存在次一级的气候波动, 即经历了温暖偏干、夏季降雨较多→气温降低、湿度增大→整体相对偏冷较湿, 但有频繁而历时较短的温凉潮湿与温和湿润的气候波动→气候主体是温暖干旱, 但存在更次一级的温和较湿的气候波动。本阶段大部分时期的岩性特征为青灰色泥夹粉砂, 仅初期和晚期两段相对较短的时期岩性为青灰色泥夹砂、砾, 与此岩性特征相应, 孢粉总浓度在本阶段的初期和晚期很低, 其他层位较高。

第 5 阶段, 0.876~0.252 Ma BP: 孢粉组合中松属花粉含量相对较低; 云/冷杉属含量较高, 波动幅度较大、波动频率降低; 铁杉属出现多次历时较短的峰值, 波动幅度很大; 出现了较多油杉属和一定量杉/柏科; 落叶栎类和常绿栎类含量都增加较多, 它们的

波动幅度也同时增大;栲/石栎属花粉以及灌木花粉如绣线菊属、南天竹属、猕猴桃属和木犀属等在上阶段的基础上又进一步增加;桦属、榆属、禾本科、蒿属、玄参科和唇形科等含量降低,但仍都有一定含量;水生草本花粉含量稍有增加.由此推测研究区周围山地的垂直植被带寒温带针叶林、铁杉林、云南铁杉常绿针阔叶混交林、中山湿性常绿阔叶林和半湿润常绿阔叶林以及松林在本阶段内都有发育,而且各垂直植被带的组成更加丰富.在本阶段的不同时期它们之间此消彼长,互相更替,在寒温带针叶林或云南铁杉常绿针阔叶混交林扩张时,它们可以扩张到前所未有的更低海拔.反映气候变化的幅度更大,但频率降低,大概存在 20 次左右明显的相对偏冷较湿、温凉潮湿、温和湿润、温暖偏干和温暖干旱的气候波动.孢粉总浓度整体较高,但波动也大,岩芯岩性在本阶段前期为青灰色泥夹粉砂,后期为青灰色泥,岩性都相对较细,对孢粉保存的差异不大,主要受孢粉产量、降雨以及风向与风力大小等的综合影响.

第 6 阶段, 0.252 Ma BP 至今: 本阶段云/冷杉属和铁杉属除少数层位含量较高外,其他层位含量都非常低,出现了本剖面中含量最高的杉/柏科,落叶栎类和常绿栎类含量仍较高,栲/石栎属和灌木花粉绣线菊属、猕猴桃属和木犀属等仍有一定含量,桦属在本阶段的偏上部出现整个剖面的最高值,榆属在偏上部含量也较高,旱生草本禾本科的含量是本剖面中最高,蒿属也有一定含量,藜科在本带顶部出现了 80.4% 的最高值,水生草本花粉含量整体较高,藻类在本阶段晚期出现了较多含量.推测此期研究区周围山地的大部分时期是松林和半湿润常绿阔叶林的扩张期,中山湿性常绿阔叶林和云南铁杉常绿针阔叶混交林的扩张也占有一定时段,而寒温带针叶林扩张的时期很短,反映气候冷暖波动幅度减小.在此总的气候背景下,本阶段仍存在 7 次较明显的气候波动.岩芯岩性主要是青灰色泥,孢粉总浓度主要受到孢粉产量、降雨和风等因素的影响.

5 讨论与结论

在鹤庆深钻岩芯的孢粉组合中,几乎整个剖面都是以松属花粉占绝对优势,说明鹤庆盆地周围山地自 2.780 Ma 以来肯定一直有松林存在,但是松属花粉含量有较大波动,可能指示松林占据山地的面积变化较大.在剖面底部就出现了生长在高海拔、耐

冷的属种云/冷杉属和生长在较高海拔反映温凉潮湿的铁杉属,说明在 2.780 Ma BP 时甚至在此之前,研究区周围山地的高度已达到甚至超过云/冷杉生长的高度.目前在云南省西北部以云/冷杉林为主的寒温带针叶林分布的海拔高度一般在 3100~3900 m 左右,即相当于年均温 2~8℃ 左右^[4,21],表明研究区周围山地中已有山地年均温低于 8℃.这也说明在 2.780 Ma BP 时甚至之前本研究区的垂直植被带谱就已存在,只是一开始垂直带谱相对较简单,往后逐渐发展得更复杂.

鹤庆深钻中孢粉浓度的高低并不一定指示植被的繁盛程度,宏观上还受岩性特征(即岩芯中粗颗粒物质的含量)的影响,一般来说,岩性粗时岩芯的孢粉浓度低,反之则高.在岩性特征基本相同的情况下,还与沉积物的沉积速率以及影响孢粉传播的外界条件如风向、风力和降水多少与强度等有关.

深钻岩芯中的孢粉组合记录了 2.729~2.608 Ma BP 期间鹤庆盆地周围山地的寒温带针叶林和铁杉林面积有一次明显增加,但同时孢粉组合中生长在低海拔的热带、亚热带成分含量也普遍增加,此时单一的气候变化已难以解释,必须考虑山体强烈抬升及其气候效应.由此我们认为 2.729~2.608 Ma BP 期间寒温带针叶林和铁杉林面积增加主要是由于山体强烈抬升为它们的母体植物提供了向上扩张的空间和生长条件的结果,山体的强烈抬升在沉积岩芯中也有反映,岩芯岩性大部分为青灰色泥夹砂、砾.此次山体强烈抬升对应着晚新生代地质时期青藏高原强烈隆升的“青藏运动B幕”^[22],也是青藏高原的断裂成盆时期^[11].此阶段寒温带针叶林和铁杉林面积增加所指示的气温变冷特指山顶由于山体强烈抬升所引起的一种区域性变冷,而不完全等同于全球气候的普遍变冷^[23~25],但它们之间是否存在某些动力学机制上的联系,还有待进一步研究.与全球气候普遍变冷相反,此期盆地周围较低海拔区气候应该是相对湿热.

鹤庆深钻 737.72 m 岩芯的孢粉组合揭示了鹤庆地区 2.780 Ma 以来山地垂直植被带经历了 2 次明显增加(或植被带组成变丰富)和 3 次大的气候转型.

从约 1.553 Ma BP 左右开始,研究区垂直植被带增加,首次明显出现了云南铁杉常绿针阔叶混交林、中山湿性常绿阔叶林和半湿润常绿阔叶林,气候波动幅度变大且频率增加、气候由之前整体偏暖干至之后

的大部分时期偏冷、气候组合特征变得复杂. 1.553 Ma BP附近的气候转型在已有的研究中也多有反映^[26-28]. Imbrie等^[29]认为 1.6 Ma BP左右北半球冰盖达到临界体积, 足够对东亚冬季风强度产生影响, 可能通过冰盖-北大西洋深水-绕极表面水-空气二氧化碳浓度之间相互作用机制对冬季风产生影响. 鹤庆深钻岩芯的岩性和粒度指标也指示在 1.553 Ma BP左右青藏高原存在一次较强烈的构造抬升^[30], 这正与“青藏运动 C幕”相应^[22], 伴随着青藏高原隆升, 青藏高原对西南季风演化的动力作用和热力影响逐渐突显出来, “青藏运动 C幕”可能使青藏高原在 1.553 Ma BP附近达到相应的临界高度, 从而使青藏高原达到一定的强度, 影响西南季风环流的发展和变化. 与青藏高原隆升相应, 此期研究区整体抬升、盆地与山地的高差加大, 从而导致研究区周围山地的垂直植被带增加、气候整体变冷. 由此认为, 鹤庆地区 1.553 Ma BP左右的气候转型可能是冰量变化和青藏高原隆升共同作用的结果.

在约 0.876 Ma BP时, 垂直植被带与气候发生了另一次大的变化: 山地垂直植被带谱更加复杂, 存在寒温针叶林、铁杉林、云南铁杉常绿阔叶混交林、中山湿性常绿阔叶林、半湿润常绿阔叶林和松林等垂直植被带, 相对 1.553 Ma BP左右的垂直植被带增加和气候转型, 此期各植被带的组成成分变得更加丰富而复杂, 气候变化的幅度更大且频率降低、气候的组合特征更加复杂等. 这次大的变化相当于中更新世转型(或“中更新世革命”)^[27,31], 其发生的可能原因是此阶段之前即约 0.991 Ma BP附近有次较强烈的构造运动^[30], 使研究区进一步抬升、盆地与山地的高差更大, 以至垂直植被带谱更加复杂, 其组成成分更加丰富. 在本研究区发生构造运动的同时, 青藏高原正经历着一次比本研究区更加强烈的构造运动, 即相当于昆黄运动^[22], 这次构造运动使青藏高原进入冰冻圈, 使其对西南季风的动力和热力影响进一步加强, 同时也减弱了寒冷的冬季风侵入本区, 对西风环流的阻挡与分支作用也更显著, 使南支西风得到了加强, 进而对本研究区的气候与环境产生重大影响.

自约 0.252 Ma 以后, 研究区的气温变化幅度大大减小. 其产生原因可能是在约 0.252 Ma BP 前后青藏高原持续隆升到一个新的临界高度, 此时夏季严重阻挡了南来的西南季风北去, 冬季使高纬来的冬

季风无法越过青藏高原而侵入中国的西南部, 尤其是本研究区. 同时, 由于南支西风得到了进一步加强, 以至本研究区的上空在冬季几乎完全受到南支西风的控制, 研究区冬季更加温和干燥, 因此造成此期研究区气温的变幅减小.

以上根据鹤庆深钻孢粉组合变化和岩芯岩性推测可能存在的 4 次强烈的青藏高原构造隆升分别对应着青藏高原错鄂湖的孢粉记录揭示的 2.58, 1.87, 0.83 和 0.3 Ma BP前后的构造抬升^[32]. 自 2.780 Ma 以来鹤庆地区的山地垂直植被带有 2 次明显增加(或植被带组成变丰富), 这主要是受青藏高原阶段性隆升所控制. 除此之外, 从图 2, 3 可以看出, 孢粉组合显示各垂直植被带的迁移是非常频繁的, 而且具有一定的周期性, 这应该主要受全球冰期、间冰期气候变化的影响. 由此认为, 2.780 Ma 以来鹤庆盆地的植被带迁移与气候变化主要受到轨道参数等外部因素的影响, 同时, 青藏高原隆升对鹤庆地区的重大环境变化起了非常重要的作用.

致谢 深钻岩芯的钻探由青海省核工业地质局负责完成, 钻探实施过程中得到中国地质大学国家深钻实验室刘保林教授、云南省鹤庆县人民政府和鹤庆县科技局的大力支持. 中国科学院湖泊沉积与环境重点实验室吴艳宏研究员、夏威夷高级工程师、金章东、朱育新副研究员、杨丽原和张恩楼博士参加了野外钻探工作, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- 1 朱海虹, 陈应泰, 濮培民, 等. 云南断陷湖泊环境与沉积. 北京: 科学出版社, 1989. 1—2, 25—47
- 2 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展. 科学通报, 1999, 44(6): 579—587
- 3 沈吉, 王苏民, Matsumoto R, 等. 内蒙古岱海古水温定量恢复及其古气候意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(12): 1017—1023
- 4 云南植被编写组. 云南植被. 北京: 科学出版社, 1987. 417, 771—773
- 5 云南省鹤庆县志编纂委员会. 鹤庆县志. 昆明: 云南人民出版社, 1991. 85—111
- 6 云南省林业调查规划院. 云南自然保护区. 北京: 中国林业出版社, 1989. 200—214
- 7 Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and cenozoic. J Geophys Res, 1995, 100: 6093—6095[DOI]
- 8 Singer B S, Relle M K, Hoffman K A, et al. Ar/Ar ages from transitionally magnetized lavas on La Palma, Canary Islands, and the geomagnetic instability timescale. J Geophys Res, 2002, 107(B11): EPM 7-1—7-20 [DOI]
- 9 Channell J E T, Lubs J, Raymo M E. The Réunion Subchronozone

- at ODP Site 981 (Feni Drift, North Atlantic). *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 215(1-2): 1—12[DOI]
- 10 Channell J E T, Stoner J S. Plio-Pleistocene magnetic polarity stratigraphies and diagenetic magnetite dissolution at ODP Leg 177 Sites (1089, 1091, 1093 and 1094). *Mar Micropaleontol*, 2002, 45(3-4): 269—290[DOI]
- 11 童国榜, 羊向东, 刘志明, 等. 云南玉龙山地区的表土花粉散布特征. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(2): 103—107
- 12 肖霞云. 鹤庆湖泊深钻孢粉记录揭示的植被演替与气候变迁. 博士学位论文. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2006. 57—65
- 13 Shen J, Jones R T, Yang X D, et al. The Holocene vegetation history of Lake Erhai, Yunnan Province southwestern China: the role of climate and human forcings. *Holocene*, 2006, 16(2): 265—276[DOI]
- 14 Hooghiemstra H, Ran E T H. Late and middle Pleistocene climate change and forest development in Colombia: pollen record Funza II (2-158 m core interval). *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1994, 109: 211—246[DOI]
- 15 李文漪. 中国第四纪植被与环境. 北京: 科学出版社, 1999. 2—22
- 16 孙湘君, 吴玉书. 云南滇池地区全新世以来植被及环境变迁历史. 见: 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论文集. 北京: 科学出版社, 1987. 28—41
- 17 Lichti-Federovich S, Ritchie J C. Recent pollen assemblages from the western interior of Canada. *Rev Palaeobot Palynology*, 1968, 7: 297—344
- 18 Tuner J. Surface sample analysis from Ayrshir, Scotland. *Pollen et Spores*, 1964, 5: 583—592
- 19 肖霞云, 沈吉, 肖海丰, 等. 云南鹤庆盆地中更新世以来的孢粉记录及其植被与气候变化. *湖泊科学*, 2006, 18(4): 369—376
- 20 Liew P M, Huang S Y, Kuo C M. Pollen stratigraphy, vegetation and environment of the last glacial and Holocene -A record from Toushe Basin, central Taiwan. *Quat Int*, 2006, 147: 16—33[DOI]
- 21 中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1995. 178—179
- 22 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究. *科学通报*, 1998, 43(15): 1569—1574
- 23 Shackleton N J, Backman J, Zimmerman H, et al. Oxygen isotope calibration of the onset of ice rafting and history of glaciation in the North Atlantic region. *Nature*, 1984, 307: 620—623[DOI]
- 24 Kukla G. Loess stratigraphy in central China. *Quat Sci Rev*, 1987, 6: 191—219[DOI]
- 25 Kashiwaya K, Sakai H, Ryugo M, et al. Long-term climatolimnological cycles found in a 3.5-million-year continental record. *J Paleol*, 2001, 25: 271—278[DOI]
- 26 Rutherford S, Hondt S D. Early onset and tropical forcing of 100000-year Pleistocene glacial cycles. *Nature*, 2000, 408: 72—75[DOI]
- 27 Raymo M E, Ruddiman W F, Shackleton N J, et al. Evolution of Atlantic-Pacific $\delta^{13}\text{C}$ gradient over the last 2.5 m y. *Science*, 1990, 97: 353—368
- 28 Clemens S C, Murray D W, Prell W L. Nonstationary phase of the Plio-Pleistocene Asian monsoon. *Science*, 1996, 274: 943—947[DOI]
- 29 Imbrie J, Berger A, Boyle E A, et al. On the structure and origin of major glaciation cycles. 2, the 100000 year cycle. *Paleoceanography*, 1993, 8: 699—735
- 30 肖海丰, 沈吉, 肖霞云. 云南省鹤庆盆地 2.78 Ma 以来的环境演化. *湖泊科学*, 2006, 18(3): 255—260
- 31 Maasch K A. Statistical detection of the mid-Pleistocene transition. *Clim Dyn*, 1988, 2: 133—143[DOI]
- 32 吕厚远, 王苏民, 吴乃琴, 等. 青藏高原错鄂湖 2.8 Ma 来的孢粉记录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31(增刊): 234—240