

吴亮君, 王璞珺, 张晶, 等. 典型岩溶高原边缘夷平面沉积特征及古气候环境——以湘西洛塔及贾坝剖面为例[J]. 中国岩溶, 2024, 43(2): 239-252.

DOI: 10.11932/karst2023y030

典型岩溶高原边缘夷平面沉积特征及古气候环境 ——以湘西洛塔及贾坝剖面为例

吴亮君^{1,2,3}, 王璞珺¹, 张晶^{2,3}, 辛存林⁴, 容悦冰^{2,3}, 陈伟海^{2,3}, 张远海^{2,3}, 黄超⁵

(1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部, 广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004; 3. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406; 4. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 5. 湖南省水文地质环境地质调查监测所, 湖南 长沙 410003)

摘要: 文章对云贵高原边缘洛塔期(洛塔剖面)和召市期(贾坝剖面)夷平面风化壳进行粒度、磁化率、孢粉等方面的研究, 探索其沉积特征及古气候响应。结果显示: 洛塔剖面和贾坝剖面风化壳都以黏土和不等粒砂为主, 但洛塔剖面岩性和粒度变化比较明显, 为杂色黏土质粉砂和粉砂质黏土互层, 夹一层砂砾石; 贾坝剖面岩性和粒度相对稳定, 主要为粉砂黏土。洛塔剖面 Mz、Md、SC/D 值以及磁化率值整体较高, 但变化幅度小且快, 贾坝剖面 Mz、Md、SC/D 值以及磁化率值相对波动较大, 由此推断两条剖面所揭示的沉积环境都整体湿润, 但贾坝剖面显示出小的干燥波动, 即洛塔期夷平面风化壳沉积时期气候为温暖湿润型, 召市期夷平面风化壳沉积时期气候为温凉干燥型, 这与孢粉中大量水龙骨科(*Polypodium*)、松属(*Pinus*)指代的气候意义相同。对比孢粉组合及前人资料, 推测洛塔剖面风化壳可能为新近纪早期开始形成, 该夷平面可能形成于中新世, 而贾坝剖面可能形成于第四纪早期, 该夷平面可能形成于更新世。

关键词: 湘西世界地质公园; 夷平面; 古气候; 粒度; 磁化率; 孢粉

创新点: 探讨云贵高原这一典型岩溶高原边缘的洛塔期和召市期夷平面的风化壳沉积特征, 通过粒度参数、磁化率、孢粉等数据发现洛塔期夷平面可能形成于湿度较大的温暖环境, 召市期夷平面可能形成于湿度较小的凉润环境。

中图分类号: P512.2; P532 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)02-0239-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

云贵高原是典型的岩溶高原, 在新构造运动造成的多次不均一抬升后, 叠加流水侵蚀等作用在高原边缘广泛形成具有多种切割形态的古夷平面, 表现为台地与峡谷地貌的紧密交互。这种深切、孤立

的台地峡谷组合与碎屑岩高原有所不同, 岩溶高原边缘的台地峡谷组合形态上可形成密集网状, 对高原抬升速率与构造运动强度更为敏感, 也为以岩溶地貌为载体的岩溶生物环境体系记录更丰富的演化信息。从全球来看, 古夷平面分布于地球各纬度带^[1], 在山地形成演化、区域地貌分化中占有极其重要的

基金项目: 国家自然科学基金(42001011)、中国地质科学院基本科研业务费专项经费(JKYQN202365、2020015)、广西自然科学基金(2022GXNSFBA035592)、广西重大科技创新基地建设项目(2018-242-Z01)、湖南湘西世界地质公园申报项目联合资助

第一作者简介: 吴亮君(1991—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事沉积学与地质遗迹调查。E-mail: wuliangjun@mail.cgs.gov.cn.

收稿日期: 2023-03-15

地位^[2],目前已被运用到构造、沉积、地貌演化等多个地质研究领域,如可利用夷平面来研究青藏高原的抬升幅度^[3-5],研究新构造运动的分期和形式^[6-7]以及运动特征^[8],伴生的风化壳和覆盖层可用来约束古气候^[9-11],也可将不同高原,如青藏高原、云贵高原等的地貌演化构建联系^[3,8,12-14]。

湘西是云贵高原边缘由高原向冲积平原过渡的低山与中山结合带^[15](图1),发育有蔚为壮观的台地峡谷群地貌^[16-17],被湘西世界地质公园(Xiangxi UNESCO Global Geopark)列入世界级地质遗迹的重要组成部分,且得到联合国教科文组织的承认^[18]。湘西的侵蚀和剥夷活动在台地峡谷群中十分突出,根据前人调查资料^①,湘黔鄂地区可能存在三期较大

规模的构造抬升和稳定期旋回,第一期为白垩纪末的地壳上升,到新生代逐渐稳定,形成第一级夷平面(或称大娄山期高夷平面),高程1 600~2 000 m,该期夷平面在研究区被漫长剥蚀,已残存不多;随后在中新世湘西地区继续抬升并稳定,形成第二级夷平面,海拔1 000~1 400 m,属于洛塔期(或称山盆期),在洛塔台地比较发育;更新世以来,湘西地区再一次上升,河流强烈下切,形成了第三级夷平面,海拔600~700 m,属于召市期(乌江期),以河谷地貌为主。对于湘西地区,洛塔期和召市期夷平作用较发育,代表区内构造运动差异升降强度较大的动力响应^[19]。这两期主要的夷平作用期产物可划分为6个夷平面级别(表1)^[19-21]^②,并形成多种未裸露型岩溶微地貌^[6]。

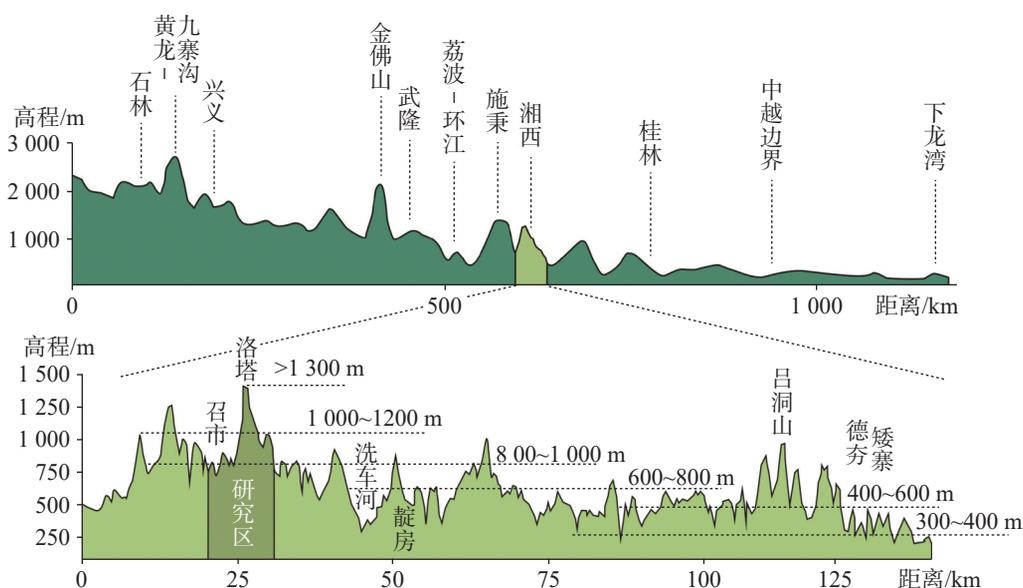


图1 西南岩溶区高程剖面及湘西地区夷平面分布图

Fig. 1 Elevation profile of the karst area in Southwest China and distribution of the planation surface in Xiangxi

对于湘西这两期夷平面,陈长明^[19]研究了它们的发育特征和分类,认为区域上夷平面存在南北不平衡的特点,而夷平面之上的风化壳可能记录了抬升作用强度和变化;于浩然等^[22]研究了其基岩特征,认为基岩是夷平面之上岩溶微地貌的控制因素,同时将岩溶微地貌划分为9种类型,并强调古水文等环境条件对地貌的影响;靳立多等^[20]探讨了洛塔台地发育史,认为洛塔台地可划分为5个发展期次,其中与环境变化密切相关的黏土堆积物广泛堆积的时间可能是早中更新世;彭汉兴等^[10]研究了洛

塔及邻区的第四纪堆积物,认为不同海拔堆积物存在分层和差异,洛塔台地上的堆积物为内源堆积,台地外围可能存在多种来源,并根据堆积物元素特征指出早中更新世本区域可能存在温暖湿润的古气候;劳文科等^[11]对其岩溶表层带进行特征分析,指出气候是表层岩溶带发育的一个极为重要的外部条件;殷建军^[23]和张会领等^[24]根据洛塔莲花洞石笋进行古气候研究,均发现中晚全新世存在气候波动,与半球尺度的大气环流和太阳辐射背景有关,可能在第四纪中存在多次变化。还有很多学者对湘西区域的构

① 湖南省地质调查院.湖南省湘西、湘南岩溶石山地区地下水资源勘查与生态环境地质调查报告[R].2002.

② 湖南省地质矿产勘查开发局四一六队.湖南省1:25万工程地质图说明书[S].2018.

表 1 湘西片区岩溶地貌与夷平面发育特征

Table 1 Development characteristics of karst landform and planation surface in Xiangxi

序号	岩溶 分层 ^②	夷平面级别 (北区) ^[19]	区域夷平面 举例(山名) ^[19]	湘西岩溶台 面发育期 ^[20-21]	湘西岩溶台 面海拔/m	堆积 物 ^[21]	湘西岩溶台面形 成时代(推测) ^[19-21]	地貌类 型组合
1		1~2级		梯子岩期	>1 300	残坡积、冰 水堆积	古近纪	孤峰、落水洞、残留洞 穴、石林、溶丘
2	第I层	3级	壶瓶山、西海、 西晃山、腊尔山、 大青山等	八洞仙山期	1 230	红色砂砾岩 堆积	新近纪	溶丘、漏斗、洼地、竖井、 垄脊、石牙、石林、 落水洞
3				亚不寺期	1 030	流水相堆积	新近纪末— 第四纪初	丘峰深谷、垄脊、石林、 石牙
4	第II层	4级	大米界、何家 山、排碧等	洛塔河谷期(高 谷—宽谷—车 水坪湖亚期)	650~900	红黄黏土沙土 砾石、灰黑 淤泥	更新世	河谷、峡谷、丘陵
5	第III层	5级	宝风湖、南华 山等	洛塔河谷期 (峡谷亚期)	400~600	砂砾石亚黏土	全新世	暗河、水平溶洞、漏斗、 洼地
6	第IV层	6级	沅水、澧水 两岸	近现代期	300~400	黏土、砾石	全新世	水平溶洞、浅洼地、浅漏 斗、暗河

造^[25-28]、水文^[29-32]地质等方面进行了研究,但目前这两期夷平面风化壳物质性质和古气候对比还不明确,这两期夷平面虽然距离较近(图 2),但却具有显著的海拔差异,同时也处于不同的碳酸盐岩区和碎屑岩区,物质来源有所不同,基岩岩性也有所不同,研究其覆盖层有助于对比不同海拔和基岩的夷平面覆盖层岩性差异、反演夷平面形成时的古气候,以期为探究云贵高原边缘夷平面发育特征和古气候演化提供更多依据。

1 研究区概况

研究区位于湖南省西北部,处于中国地貌第二级阶梯与第三级阶梯的转折线南段,地质构造区位于扬子陆块东南缘、云贵掀斜隆起区东部边缘,毗邻华南陆块,属二者过渡地带。自燕山运动以来,该区形成了一套巨型的新华夏构造体系并经历了多期次构造作用影响,区内向斜成山、背斜成谷,断裂纵横交错(图 2),出露地层有寒武系、奥陶系、志留系、二叠系、三叠系及第四系,厚度为 880~1 160 m。进入古近纪,受侵蚀作用、基准面变化等影响,早期形成的褶皱和山系逐渐被剥蚀,最终在湘西形成可对比的两级大规模夷平面,分别为洛塔期夷平面(1 400 m)和召市期夷平面(600~700 m)(图 3),虽然不同学者根据不同地区的标志地貌对这两期夷平面的称谓有所不同^[19],但实际指代的都是这两个高程差异明显的夷平面。

洛塔期夷平面是湘西规模较大的古夷平面之一^[19],在研究区主要表现为一座北东向展布的岩溶台地——洛塔台地,面积约 82 km²,最高海拔 1 437 m,由向斜核部断裂形成的洛塔河继承原有向斜谷地,溯源侵蚀切割而成。召市期夷平面表现为北东向的召市盆地,位于洛塔台地的西侧,即洛塔向斜构造的北西翼,海拔 600~700 m,主要地貌类型为溶蚀洼地及残留台地、溶丘洼地、丘陵等。洛塔台地的基岩为二叠系茅口组泥晶灰岩、白云质灰岩,召市盆地的基岩为志留系小河坝组细砂岩、粉砂岩、页岩。

2 研究方法

2.1 样品采集

对上述两期夷平面的地貌与地层进行细致考察后,选择洛塔剖面和贾坝剖面进行实测,其分别代表洛塔期夷平面和召市期夷平面,并进行系统分层、采样。以土表记为 0 m,向下用皮尺实测各沉积层厚度。为确保样品新鲜,在采集过程中首先将覆盖层刨除 20 cm 表土后,使用圆柱钢管凿进覆盖层中进行取样。以近等距原则对洛塔剖面的 150~500 cm 风化壳采集 30 件样品、对贾坝剖面 50~350 cm 风化壳采集 15 个样品进行分析。采样顺序由下至上,避免上层样品对下层样品造成污染。同时在剖面中采集孢粉样品,洛塔剖面风化壳岩性较丰富,采集 10 个孢粉样品,贾坝剖面风化壳岩性较单一,采集 4 个孢粉样品。此次洛塔剖面的样品编号以大写字母 LT 开头,

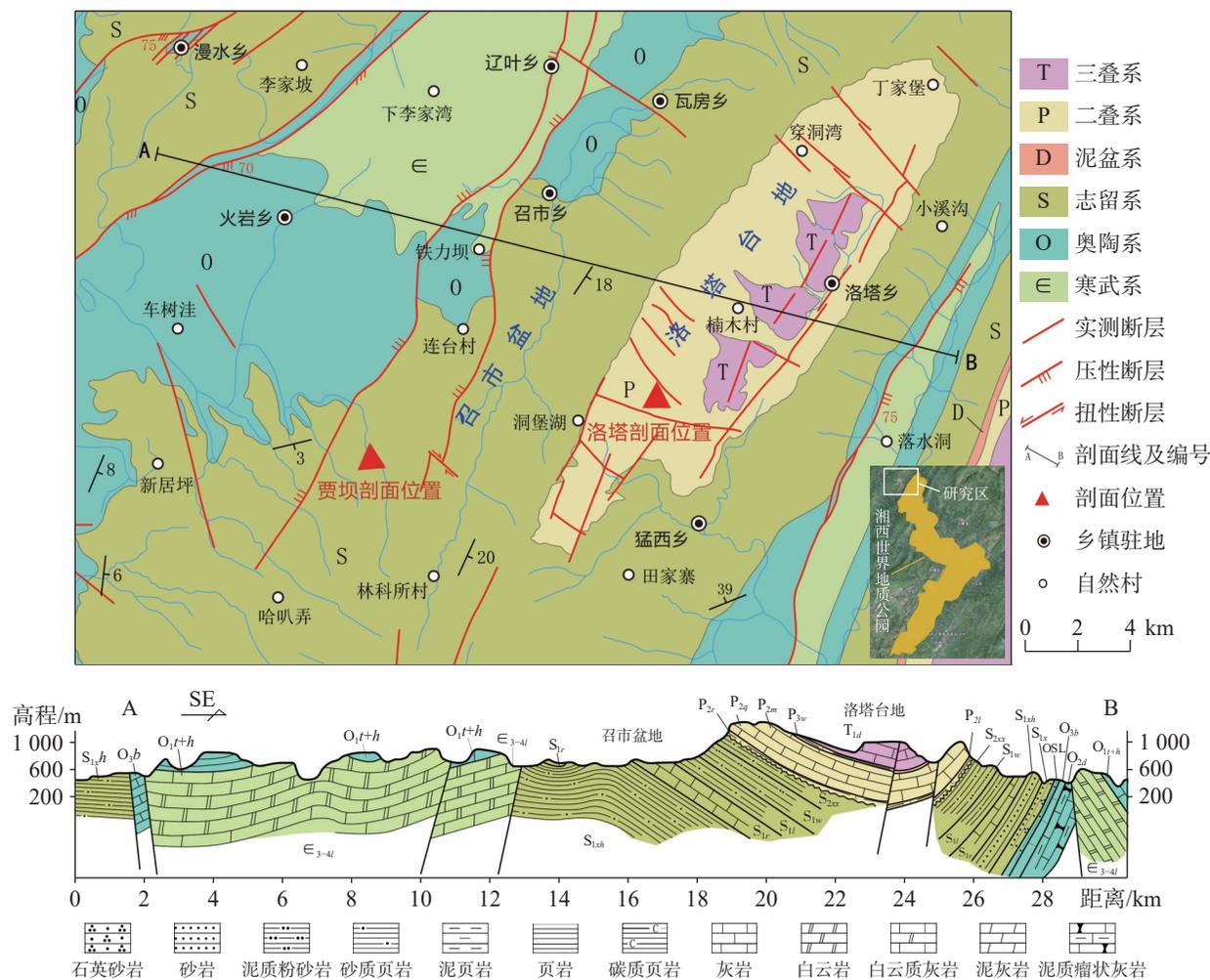


图 2 湘西洛塔—召市地区地质概况图

Fig. 2 Geological map of Luota-Zhaoshi area in Xiangxi

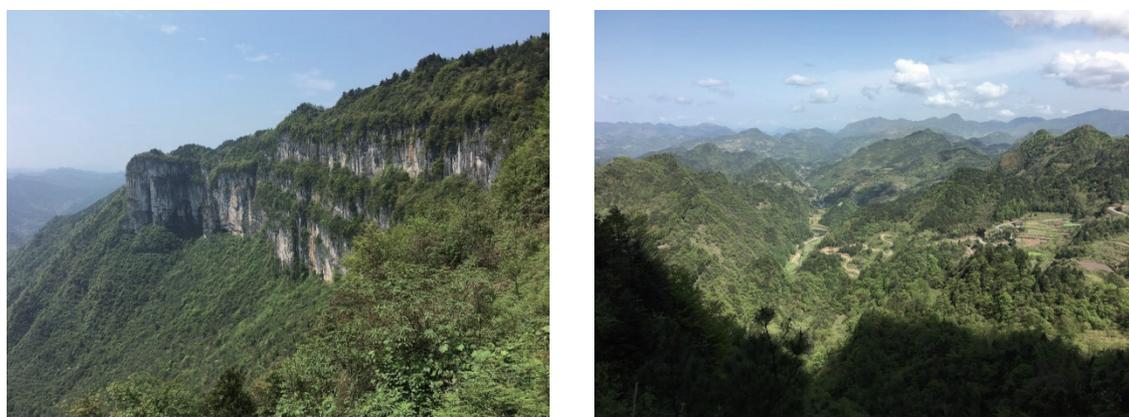


图 3 洛塔期与召市期夷平面实景图

Fig. 3 Realistic view of the planation surface in Luota period and Zhaoshi period

贾坝剖面样品编号以大写字母 JB 开头。

2.1.1 洛塔剖面概况

洛塔剖面位于湘西龙山县洛塔乡附近的一处洼地边坡,因附近改修村道,此剖面留下了挖掘之后的

新鲜面(图 4),总厚约 5 m,覆盖层出露良好,分层明显,有利于系统采样;地貌单元属于洛塔台地。

2.1.2 贾坝剖面概况

贾坝剖面位于湘西龙山县召市镇贾坝村,因村

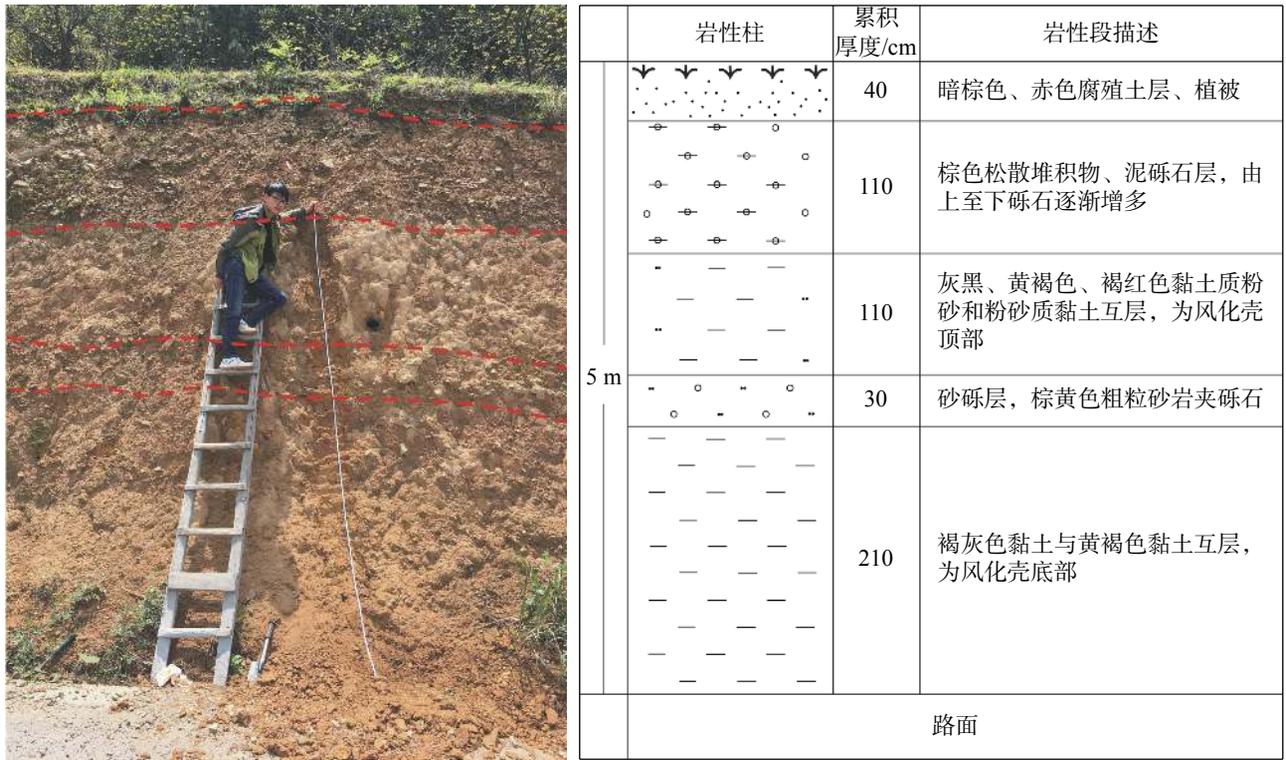


图 4 洛塔剖面地层性质柱状图

Fig. 4 Stratigraphic histogram of Luota section

民靠坡建房，此剖面为挖掘之后留下的新鲜面(图 5)，距离相近，属二者的地貌转换带附近。总厚约 6.5 m，地貌单元属于召市盆地，与洛塔台地

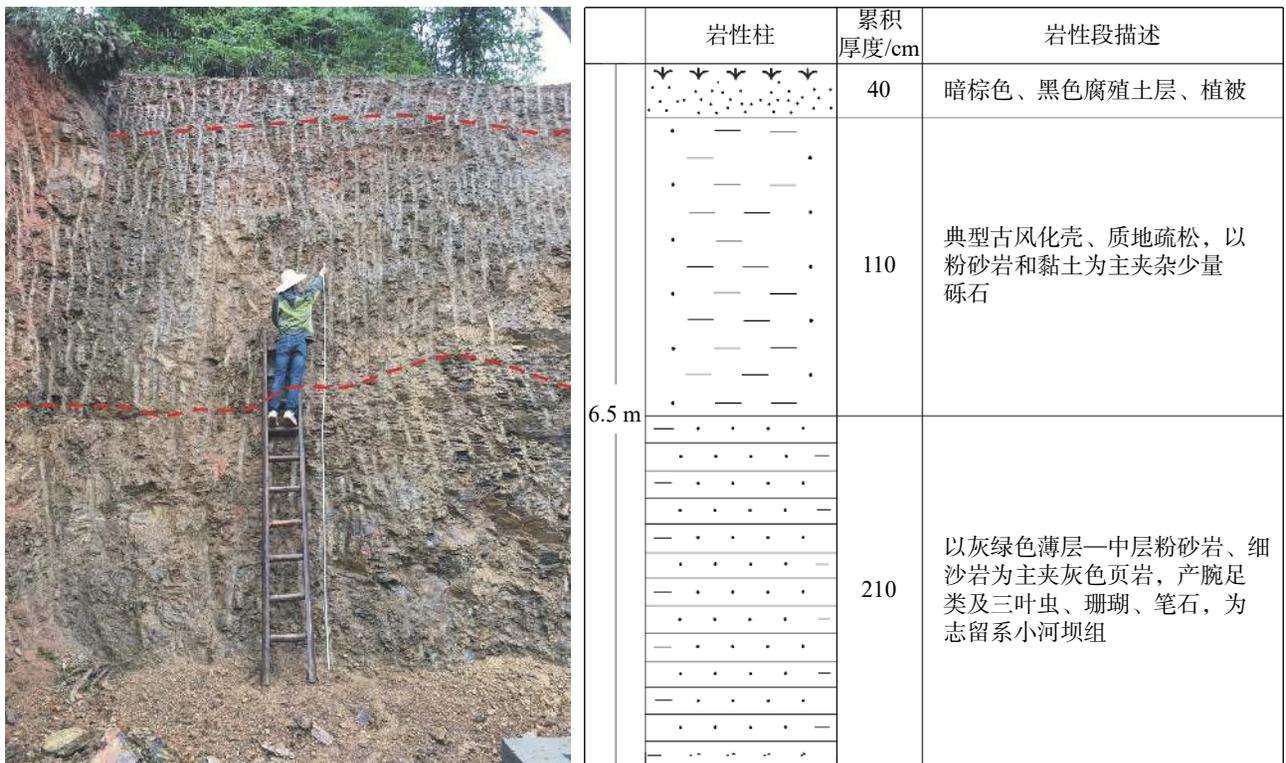


图 5 贾坝剖面地层性质柱状图

Fig. 5 Stratigraphic histogram of Jiaba section

2.2 分析方法

在对两条剖面进行野外踏勘实测后,分析剖面岩性特征、沉积物粒度组成、磁化率特征、孢粉组成等,进而探索夷平面记录的古气候信息。

2.2.1 粒度、磁化率与孢粉的作用

(1)粒度的气候指示意义 沉积物的粒度组成在不同沉积环境通常存在差异,因此粒度特征可间接指示沉积岩相、气候环境变化^[33-34],如其被作为揭示东亚冬季风和夏季风作用的替代性指标^[35]。砂粒含量可反映沙漠化的进退和气候变化,指示冬季风变化的强弱,而黏粒与风化成壤作用密切相关,能够反映夏季风变化的强弱^[36-37],前人^[37-42]认为黏粒含量越高,成壤作用越强,夏季风也越强,反之成壤作用越弱,夏季风也越弱;同时,沉积物平均粒径(Mz)和中值粒径(Md)为高值时,说明气候环境相对温湿,风化程度高,反之则说明气候环境相对冷干,风化程度较弱。此外,利用粒度敏感值(SC/D,粉砂、黏粒与砂的比值)可以放大 $>4.32\Phi$ / $<4.32\Phi$ 颗粒物质的比例关系,从而反映沉积剖面风沙活动的强弱。在相对冷干的条件下,冬季风较强,粉砂和黏粒含量相对砂较少,SC/D为低值,而在温湿的条件下,粉砂和黏粒含量相对砂更多,SC/D为高值。

(2)磁化率的气候指示意义 磁化率(magnetic susceptibility, MS)是反映单位物质被磁化程度的物理量,岩石磁化率值的大小受控于其所含磁性矿物的种类、含量、粒径等因素,是样品中各种磁性矿物MS值的总和^[43-44]。磁性矿物分为反磁性矿物、顺磁性矿物和铁磁性矿物,反磁性矿物主要包括石英、磷灰石等,顺磁性矿物包括大多数纯净矿物,如白云石等,铁磁性矿物包括磁铁矿等许多含铁、镍元素的矿物^[43,45]。反磁性矿物的MS一般为负值,顺磁性矿物的MS为较小的正值,铁磁性矿物的MS为较大的非衡量正值^[43,46]。通常陆源碎屑所含的磁性矿物较多,因此磁化率高可能代表河流或风尘的输入增强^[43,47-50],在岩溶区磁化率也是反演古环境的一种可靠手段^[14]。

一般认为,当夏季风较强时,气候处于温湿状态,化学风化和成壤作用较强,铁磁性矿物较易生成,从而使沉积物中的磁性矿物数量增多,磁化率值变大;当夏季风较弱时,气候处于干冷状态,化学风化和成壤作用较弱,磁性矿物数量相对较少,磁化率值较低^[34,42,51],这也与降水量和温度存在较好的正相关关

系^[51-52]。

(3)孢粉的气候指示意义 沉积地层中的孢粉化石组合与对应地质时期的植被分布密切相关,而不同的植被组合受到气候的影响十分强烈^[53-54]。植物孢粉具有产量大、孢粉壁易保存、体积小易被搬运等特点,在地球表面含量丰富,因此孢粉资料可用于分析植物群的性质,进而反演出植物群生长时所处的气候、地形、土壤等背景条件,使孢粉分析成为重建古环境和古气候的重要方法^[55-58]。通过对不同的孢粉组合以及优势种属的分析来还原古气候,目前已成功运用到许多不同地貌区^[59-61],包括岩溶区^[62-64]。

2.2.2 测试方法

(1)粒度测试方法 具体方法参考张文丽^[37]、潘宁惠^[65],简要步骤为将0.5~1.0 g样品使用10 mL 30%的双氧水加热去除有机质,至不再冒泡后冷却,加入10%的稀盐酸10 mL除去碳酸盐,再用上清液将样品调至中性,测量前半小时加入10 mL 0.05 mol·L⁻¹的六偏磷酸钠(NaPO₃)₆溶液通过超声波震荡器充分震荡使沉积物颗粒充分分散。测定采用英国马尔文公司生产的Mastersizer 2000激光粒度仪,测量范围为0.02~2 000 μm,测量3次后取平均值。本文运用粒度组成特征和粒度参数作为替代性指标^[28,66]来分析剖面沉积物的沉积环境。运用公式 $\Phi=-\log 2D(\text{mm})$ ^[34,67]将粒径转换为Φ值,采用Folk and Ward公式来计算粒度参数:

$$\text{中值粒径: } Md = \Phi 50$$

$$\text{平均粒径: } Mz = (\Phi 16 + \Phi 50 + \Phi 84) / 3$$

$$\text{分选系数: } \sigma = (\Phi 84 - \Phi 16) / 4 + (\Phi 95 - \Phi 5) / 6.6$$

$$\text{峰度: } Kg = (\Phi 95 - \Phi 5) / 2.44(\Phi 75 - \Phi 25)$$

$$\text{偏度: } Sk = (\Phi 16 + \Phi 84 - 2\Phi 50) / 2(\Phi 84 - \Phi 16) + (\Phi 95 + \Phi 5 - 2\Phi 50) / 2(\Phi 95 - \Phi 5)$$

Md和Mz反映沉积物粒度分布的集中趋势,其低值反映搬运营力越大,颗粒较粗;Kg反映粒度分布曲线凸出程度,Kg<0.90粒度频率曲线表现为平缓;0.90<Kg<1.11,曲线基本对称,为正态分布;Kg>1.11,曲线相对尖锐;Sk反映粒度分布曲线的不对称性,介于-1.00~-0.10之间呈负偏,介于-0.10~0.10之间呈近对称,介于0.10~1.00之间呈正偏;σ表示沉积物的分选程度,σ<0.71代表分选性好,介于0.71~1.00之间代表分选性中等,σ>1.00代表分选性差^[34]。

(2)磁化率测定与分析 具体测试方法见于寒

等^[68]、左海玲^[34],使用英国 Bartington 仪器公司 MS2 型磁化率仪测量,将样品烘干、碾碎后,后装入 10 mL 乙烯样品盒中,选择低频(0.47 kHz)和高频(4.7 kHz)的工作频率,分别测得样品的低频磁化率(χ_{lf})和高频磁化率(χ_{hf})^[33]。重复测试 3 次,求取高、低频磁化率的平均值。

根据高频磁化率(HF)和低频磁化率(LF)计算出样品的质量磁化率(χ)和频率磁化率($\chi_{fd}\%$),G 为样品质量,计算公式为:

$$\chi = 10 \times \chi_{lf} / G$$

$$\chi_{fd}(\%) = 100 \times (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}$$

(3)孢粉分析 孢粉的提取技术目前已相当成熟,尤其近年来孢粉学者根据不同区域、不同岩性特点对原有的孢粉提取手段进行了改进,使得孢粉提取水平升高,纯度增加^[62]。在鉴定孢粉属种时,一般先对属种进行全面观察,系统描述,确认其基本构造,由大类定起,逐级缩小,最后定出属种;再将所见到的每种(或属)孢粉分别统计其出现的数量,根据所得孢粉数量计算各种植物占孢粉总数的比例,再得到不同时代各科、属和种的比例。使用的鉴定工具为 Zeiss Scope A1 生物荧光显微镜。

3 结果与分析

3.1 沉积特征

3.1.1 洛塔剖面

通过野外观察,可将洛塔剖面自顶部向下分为 5 层:

0~40 cm: 暗棕色、褐色现代腐殖土壤层,结构疏松多孔,有机质含量高。

40~150 cm: 棕色松散堆积物、泥砾石层,此段沉积较多含泥质胶结的砾石,磨圆度差,直径多为 4~10 cm。

150~260 cm: 黏土互层 1,灰黑、黄褐色、褐红色黏土质粉砂和粉砂质黏土互层。本研究从该段开始取样,该段以下为古风化壳,该古风化壳总厚度为 350 cm。

260~290 cm: 砂砾层,棕黄色粗粒砂岩夹砾石,砾石直径 3~8 cm。

290~500 cm: 黏土互层 2,褐灰色黏土与黄褐色黏土互层。

3.1.2 贾坝剖面

通过野外观察,可将贾坝剖面自顶部向下分为 3 层:

0~50 cm: 暗灰色、黑色腐殖现代土壤层,结构疏松多孔,有机质含量高。

50~350 cm: 粉砂黏土层,质地疏松,以粉砂岩和黏土为主夹杂少量砾石。本研究采样段即为该层位,总厚度为 300 cm,为典型的古风化壳。

350~650 cm: 为志留系小河坝组(S_1xh)地层,以灰绿色薄—中层粉砂岩、细砂岩为主夹灰色页岩,产三叶虫、笔石。

3.2 沉积物组成

3.2.1 洛塔剖面

对洛塔剖面目的层 150~500 cm 风化壳进行粒度组成分析发现:风化壳以粒径介于 5~50 μm 的粉砂为主,平均含量为 57.6%;黏粒次之,平均含量为 41.9%;砂含量最少,为 0.56%,且全为细砂组分,整个剖面几乎不含极粗砂和粗砂(表 2,图 6)。

从图 6 不同粒度垂直变化曲线可知,在垂直方向上砂质含量自剖面底部向上整体表现为先减小后增大的趋势,且与细砂含量变化曲线基本一致,表明洛塔剖面砂质含量主要由细砂控制。粉砂和黏粒含量变化趋势相反,黏粒含量自剖面底部向上总体呈现先增大后减少的趋势。分层粒度组成特征显示:同一粒度在同一地层的不同深度差异变化较大且出现多次波动。

3.2.2 贾坝剖面

贾坝剖面 50~350 cm 风化壳的粒度组成特征分析结果显示:风化壳以粒径介于 5~50 μm 的粉砂为主,平均含量为 54%;黏粒次之,平均含量为 39%。对砂质分析发现,细砂是砂粒组成的主体,平均含量为 6.5%,整个剖面只含极少的中砂和粗砂,不含极粗砂。细砂、中砂、粗砂含量变化相对一致,粉砂与黏粒的含量变化相反,同一粒级的变化幅度大但不如洛塔剖面变化频繁。

3.3 粒度参数特征

3.3.1 洛塔剖面

分析洛塔剖面粒度参数发现, Md 介于 7.18~7.42 Φ 之间,平均为 7.31 Φ ; Mz 变化于 7.31~7.54 Φ ,平

表2 洛塔和贾坝剖面的沉积特征数据表

Table 2 Sedimentary characteristics of Luota section and Jiaba section

样品 编号	成分/%			质量磁化率 $\times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	样品 编号	成分/%			质量磁化率 $\times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	样品 编号	成分/%					质量磁化率 $\times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
	黏粒	粉砂	细砂			黏粒	粉砂	细砂			黏粒	粉砂	细砂	中砂	粗砂	
LT01	40.16	59.10	0.74	26.25	LT16	42.74	56.83	0.43	17.97	JB01	38.07	53.87	6.39	1.28	0.39	10.31
LT02	41.26	58.24	0.50	16.09	LT17	41.80	57.82	0.38	20.94	JB02	34.84	55.50	8.86	0.67	0.12	11.56
LT03	43.05	56.61	0.35	18.26	LT18	41.72	57.78	0.50	22.50	JB03	41.71	53.92	4.37	0	0	12.66
LT04	39.67	59.77	0.56	24.22	LT19	42.85	56.76	0.39	19.22	JB04	35.91	56.88	7.21	0	0	11.88
LT05	40.17	59.37	0.52	21.88	LT20	41.04	58.41	0.55	24.38	JB05	43.75	52.15	4.11	0	0	11.72
LT06	42.42	57.26	0.32	16.88	LT21	43.01	56.64	0.35	19.38	JB06	41.00	55.76	3.24	0	0	12.03
LT07	42.46	57.14	0.40	19.69	LT22	41.92	57.55	0.53	22.34	JB07	44.22	50.26	5.52	0	0	14.69
LT08	42.86	56.56	0.58	16.72	LT23	39.73	59.65	0.62	10.47	JB08	42.13	52.21	5.66	0	0	15.00
LT09	43.22	56.47	0.32	20.51	LT24	39.73	59.55	0.73	11.72	JB09	37.61	53.22	7.86	0.98	0.33	12.19
LT10	44.55	55.09	0.36	15.16	LT25	42.47	56.97	0.56	11.09	JB10	35.48	51.76	12.07	0.56	0.13	12.19
LT11	42.07	57.60	0.34	18.44	LT26	42.87	56.59	0.55	9.53	JB11	36.27	54.66	8.29	0.62	0.17	14.38
LT12	42.08	57.59	0.33	14.69	LT27	39.46	59.19	1.35	8.59	JB12	36.62	54.69	7.78	0.76	0.16	13.91
LT13	42.91	56.78	0.31	15.47	LT28	41.37	57.35	1.29	10.31	JB13	42.55	51.99	5.46	0	0	14.22
LT14	42.13	56.93	0.94	12.81	LT29	41.66	57.49	0.86	10.63	JB14	36.06	54.97	8.01	0.84	0.12	14.06
LT15	41.97	57.35	0.68	22.81	LT30	42.74	56.79	0.48	11.56	JB15	38.60	58.37	3.03	0	0	14.69

均为 7.44Φ ; σ 介于 $-1.68 \sim -1.51$ 之间, 平均为 -1.57 ; Sk 介于 $-0.16 \sim -0.1$ 之间, 平均为 -0.14 ; Kg 变化于 $0.95 \sim 1.01$, 平均为 0.98 。由此可知, 洛塔剖面各个参数变化范围较小, 剖面组成物质以细颗粒为主, 分选性极好, 频率曲线呈负偏近对称分布。

进一步分析洛塔剖面粒度参数发现, 自剖面底部向上, 各参数变化特征为: Md 和 Mz 变化趋势基本一致, 在黏土互层 2 中二者整体呈现增大趋势, 但波动较为频繁剧烈(图 6), 到黏土互层 1 出现剖面最低值, 但随之二者又渐趋增大; σ 和 Kg 的变化趋势大体一致, 在黏土互层 2 中出现多次旋回波动, 但幅度相对较小, 在黏土互层 1 及砂砾层过渡段, 二者明显减小且在 $180 \sim 200 \text{ cm}$ 处达到剖面最小值, 之后其值则渐趋增大。

洛塔剖面 SC/D 峰值段对应 Mz 、 Md 较大, 分选较差, 反映区域冬季风强度较弱, 季节性降水的增多使得气候相对温湿, 生物化学作用增强促使沉积物风化加剧, 成壤作用明显; 而 SC/D 谷值段反映风力较强, 气候干燥。剖面不同沉积深度粒度特征参数旋回曲线在垂直方向上与各层位沉积旋回对应较好, 但也可见在同一地层中多个参数存在多次波动。

3.3.2 贾坝剖面

分析贾坝剖面粒度参数发现, Md 介于 $6.8 \sim$

7.37Φ 之间, 平均为 7.07Φ ; Mz 变化于 $6.75 \sim 7.35\Phi$ 之间, 平均为 7.07Φ ; σ 介于 $-2.07 \sim -1.7$ 之间, 平均为 -1.9 ; Sk 介于 $-0.08 \sim 0.01$ 之间, 平均为 -0.02 ; Kg 变化于 $0.86 \sim 0.98$ 之间, 平均为 0.93 。剖面组成物质以细颗粒占主体, 分选性极好, 各个参数变化范围相对较小。

3.4 磁化率特征

3.4.1 洛塔剖面

分析洛塔剖面磁化率发现, 剖面质量磁化率值介于 $8.59 \times 10^{-8} \sim 26.25 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $17.02 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 频率磁化率的最大值为 9.1% , 平均值为 3.3% 。分析可知剖面质量磁化率平均值小于 $20 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 当质量磁化率小于 $20 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 频率磁化率可能反映的是测量误差^[69], 其反映的信息可靠性相对差。因此, 本文中讨论的磁化率仅为质量磁化率。

由图 6 可知, 洛塔剖面磁化率在垂直方向上整体表现为先波动减小后波动增大再稳定减小的趋势, 其分层变化特点较为明显, 在黏土互层 2 中出现一次显著的交替波动现象。另外, 剖面磁化率变化与粒度组分和粒度参数变化有较为明显的对应关系。黏土互层 2 的磁化率与黏粒和平均粒径的在不同深

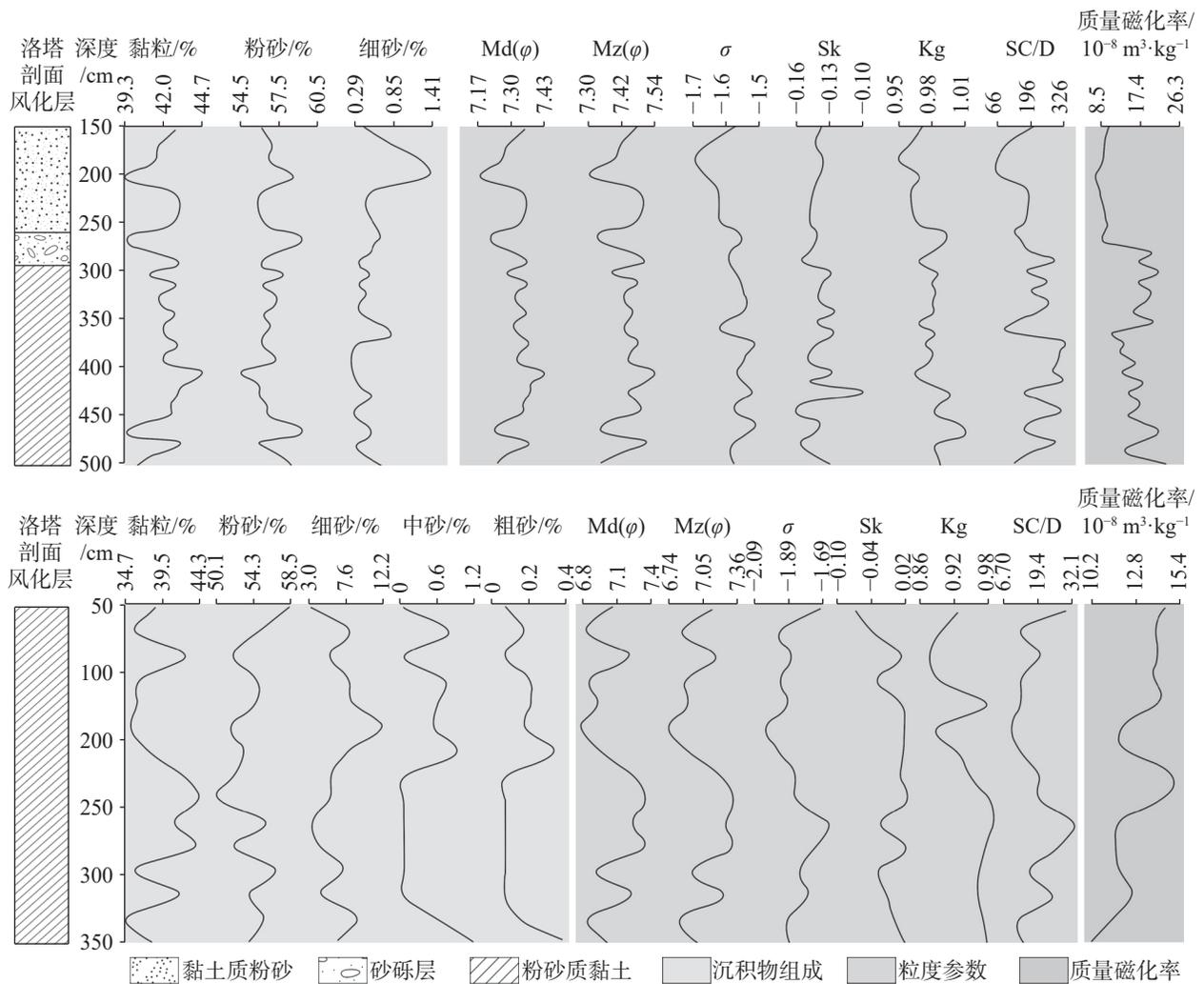


图 6 洛塔剖面与贾坝剖面风化壳沉积物组成、粒度参数和磁化率垂直变化特征
 Fig. 6 Vertical variation characteristics of sediment composition, grain size and magnetic susceptibility of weathering crust in Luota section and Jiaba section

度呈现不同变化趋势，剖面 270~410 cm 呈显著正相关，在 410 cm 以下呈现较明显的负相关。在黏粒互层 1 中，剖面磁化率与二者变化规律不明显。与砂粒变化曲线对比发现，370 cm 以下剖面磁化率与砂含量变化特征大体一致，但 270~370 cm 二者呈负相关变化。

3.4.2 贾坝剖面

贾坝剖面的质量磁化率值介于 $10.31 \times 10^{-8} \sim 15 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间，平均值为 $13.03 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，频率磁化率的最大值为 7.9%，平均值为 1.82%；剖面质量磁化率最大值为 $15 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其值同样小于 $20 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

贾坝剖面磁化率整体变化特征表现为先增加后减小再增加的趋势，与 Mz 变化趋势较为一致，而与

黏粒和砂粒曲线变化呈现较为明显的阶段性。砂粒曲线在 170 cm 以下与磁化率波动大致呈正相关变化趋势，在 50~170 cm 二者规律变化不显著；黏粒曲线在 200 cm 以下与磁化率波动呈现负相关趋势，50~200 cm 二者大致呈现正相关变化趋势。

3.5 孢粉特征

孢粉样品经检查、鉴定(图 7)，发现其中 8 件样品 LT-1、LT-2、LT-3、LT-7、LT-Y1、LT-Y2、JB-1 和 JB-Y1 的孢粉含量较丰富；LT-4、LT-5、LT-6 的孢粉含量较少；LT-Y3、JB-2、JB-3 这 3 件样品未见任何孢粉化石。具体如下：

(1)LT-1 水龙骨属 *Polypodium* >100 粒；松属 *Pinus* 35 粒；冷杉属 *Abies* 4 粒；罗汉松属 *Podocarpus* 2 粒。

(2)LT-2 水龙骨属 *Polypodium* 64粒; 松属 *Pinus* 8粒; 藜属 *Chenopodium* 1粒。

(3)LT-3 水龙骨属 *Polypodium* 36粒; 松属 *Pinus* 2粒。

(4)LT-7 水龙骨属 *Polypodium* 37粒; 松属 *Pinus* 2粒。

(5)LT-Y1 水龙骨属 *Polypodium* 11粒; 松属 *Pinus* 26粒; 冷杉属 *Abies* 1粒。

(6)LT-Y2 水龙骨属 *Polypodium* > 100粒; 松属 *Pinus* 7粒; 罗汉松属 *Podcarpus* 1粒。

(7)JB-1 水龙骨属 *Polypodium* 7粒; 松属 *Pinus* 21粒; 禾本科 *Gramineae* 1粒。

(8)JB-Y1 水龙骨属 *Polypodium* 18粒; 松属 *Pinus* 14粒; 栎属 *Carpinipites* 1粒; 禾本科 *Gramineae* 1粒。

(9)LT-4 水龙骨属 *Polypodium* 1粒; 罗汉松属 *Podcarpus* 1粒。(10)LT-5 松属 *Pinus* 2粒。

(11)LT-6 松属 *Pinus* 1粒。

4 讨论

4.1 夷平面与区域岩溶地貌演化的联系

湖南现今地势轮廓呈东、西、南三面环山、向北缓倾的马蹄形盆地,以洞庭盆地为中心,西、南、东三面所环绕的武陵、雪峰、幕阜山脉是喜马拉雅晚期运动的强烈上升区,夷平面和河谷阶地由西向东级数逐渐减少,同级夷平面和阶地高度相应降低^③。与之相应,区域上的岩溶发育强度遵循由低级夷平面向高级夷平面逐渐减弱的变化规律,高级夷平面主要为岩溶水补给区,以洼地、漏斗、落水洞垂直岩溶形态为主,而低级夷平面多为径流区和排泄区,多以水平洞穴、地下河、石漠化区等岩溶地貌形态为主^[21,70]。

湘西夷平面具有南北不平衡发育的特点,南部可能存在4级夷平面而北部为6级^[19-21] (表1),一般一个夷平面反映一个相对静止的阶段,至少是构造隆升阶段中一个相对较长的稳定期,表明湘西地区作为云贵高原边缘的地貌转变带,受到构造抬升作用方式可能存在不均一性。从全球范围看,古近纪是发育夷平面或形成准平原的有利时期,湘西在

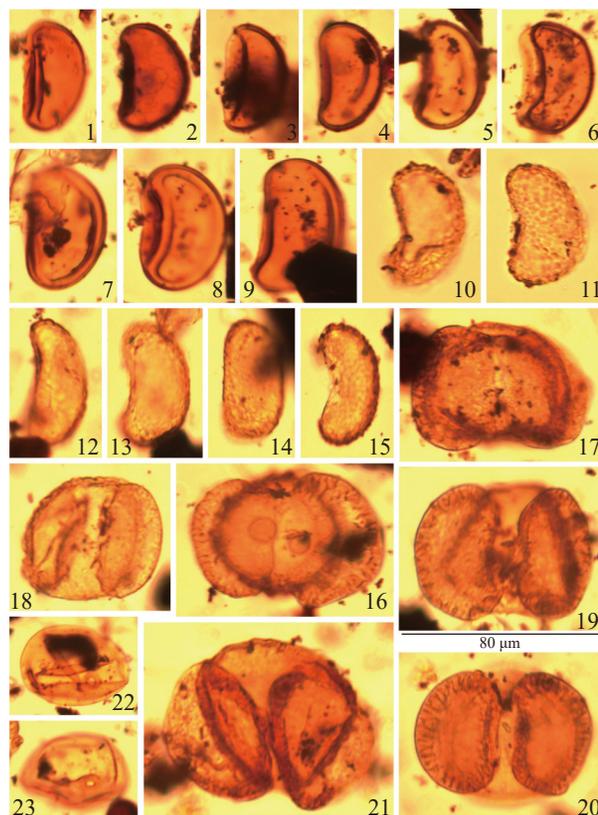


图7 洛塔与贾坝剖面孢粉组合特征图版

1-15.水龙骨属 *Polypodium*(1-9 样品编号为 LT-3, 10-15 样品编号为 LT-Y2) 16.罗汉松属 *Podcarpus*(样品编号为 LT-Y2) 17-21.松属 *Pinus*(17-20 样品编号为 LT-Y1, 21 样品编号为 LT-3) 22-23.禾本科 *Gramineae*(22 样品编号为 JB-1, 23 样品编号为 JB-Y1)

Fig. 7 Sporepollen assemblage chart of Luota section and Jiaba section

1-15. *Polypodium* (sample numbers of 1-9: LT-3; sample numbers of 10-15: LT-Y2); 16. *Podcarpus* (sample numbers: LT-Y2); 17-21. *Pinus* (sample numbers of 17-20: LT-Y1; sample number of 21: LT-3); 22-23. *Gramineae* (sample number of 22: JB-1; sample number of 23: JB-Y1)

古近纪末期至新近纪形成了具有区域代表性的洛塔期和邵市期夷平面,其上溶丘、漏斗、落水洞、石林、石牙、竖井、洼地、河谷等丰富,同时具有补给区和排泄区的特点,也说明该时期岩溶作用时限相对长,是构造运动中一个稳定的时期,这构成湘西地区与湘中、湘南地区地貌差异的基本条件。

而造成区域岩溶地貌演化差异的另外一个重要条件即是古气候,中国在新近纪湿热时期形成的夷平面自青藏经云贵至湘桂一线均有发育^[71-72],上新世中国亚热带北界到达北纬41°左右,湿热气候对夷平面和岩溶地貌的作用常跨越地质单元、跨越流域^[73]。

③ 湖南省地质调查院. 中华人民共和国湖南省区域地质志 [M]. 2012.

西南岩溶区各地大多存在覆于不同基岩之上的风化壳,湘西洛塔期和召市期夷平面风化壳同样代表区域上不同时代和不同海拔古气候和古环境作用的产物,对周缘一系列岩溶地貌的形成环境具有重要影响。

4.2 湘西夷平面风化壳反映的古气候

洛塔剖面地层沉积记录显示,剖面风化壳在沉积时期出现3次明显的气候波动变化:分别为410~500 cm的气候明显回暖期、280~410 cm的气候湿润度波动减小期和150~280 cm的气候相对湿润期。从剖面沉积曲线来看,虽然整个剖面沉积曲线出现多次峰谷交替,但其波动幅度较小,沉积时期气候环境整体温暖湿润,河流水位整体较高且较为稳定。剖面粒度组分中黏粒和粉砂含量分别达到41.9%和57.6%,而砂含量仅为0.56%;Mz、Md、SC/D值以及磁化率值整体均较高同样指示相对较为湿润的沉积环境。从风化壳沉积特征来看,剖面在290~500 cm和150~260 cm沉积为黏土互层,在260~290 cm为砂砾层。在黏土互层2中,黏粒含量平均值达42.1%,砂含量平均值为0.47%,黏粒最高值(44.55%)和砂粒最低值(0.31%)均出现在该层;Mz、Md和SC/D值平均值分别为7.45 Φ 、7.33 Φ 和233.8。与其他两层沉积特征相比,该层反映的气候环境整体最为湿润,150~260 cm的黏土互层1所记录的气候环境与其较为接近,但其波动变化较为显著,推断该剖面揭示洛塔期夷平面风化壳沉积时期气候发生了回暖期—湿润期—温暖期的波动。

贾坝剖面风化壳沉积时期也出现3次较为明显的气候波动旋回,分别为230~350 cm的气候相对湿润期、160~230 cm的气候相对凉润(干燥)期、50~160 cm的气候波动增暖期。在230~350 cm的气候相对湿润期,剖面黏粒含量明显升高,粉砂和砂粒含量降低且达剖面最低值;Mz、Md、SC/D值以及磁化率值整体波动增大,指示此阶段气候相对较为湿润,夏季风强度增大,河流水位上升。在160~230 cm的气候相对干燥期,剖面黏粒含量整体减少,粉砂和砂粒含量整体增加,但黏粒减少幅度和粉砂、砂粒增加幅度均较小;Mz、Md和SC/D值明显减小,指示该时段剖面沉积时期气候环境相对干燥或凉润,夏季风较前一阶段相对较弱,河流水位有所降低。在50~160 cm的气候波动增暖期,剖面出现较为明显的

峰区(110 cm)和谷区(90 cm),但整体而言,剖面黏粒含量升高,砂含量明显降低,磁化率保持相对高值不变;Mz、Md和SC/D值整体呈现增大趋势,指示该阶段区域气候相对湿润,夏季风强度较冬季风强度略高,相应河流水位基本保持稳定。由此,推断该剖面揭示召市期夷平面风化壳沉积时期气候存在温润—干燥—凉润—增温变换。

总体来看,虽然洛塔剖面和贾坝剖面在沉积过程中均出现多次波动旋回,但剖面粒度和磁化率记录显示两个剖面沉积环境总体上湿润,期间伴随的干燥波动幅度较小。综合对比两个剖面沉积环境发现,相较于贾坝剖面,洛塔剖面沉积时期其粉砂含量较高,砂含量明显较低;Mz、Md值和磁化率平均值也较低,指示贾坝剖面风化壳沉积环境相对于洛塔剖面略微干燥或凉润。此外,洛塔剖面还发育一层砂砾层,可能代表古河流的回春作用。因此,可认为洛塔剖面风化壳沉积环境为湿度较大的温暖性气候环境,而贾坝剖面风化壳沉积环境为湿度较小的凉润性气候环境。

4.3 孢粉对古气候的验证

由上文孢粉鉴定结果可知,两个剖面的孢粉类型和种类有所不同。洛塔剖面LT-1、LT-2、LT-3、LT-7、LT-Y1、LT-Y2号样品见中等丰度且组合一致的孢粉,主要成分为水龙骨属和松属,少量见有冷杉属、罗汉松属、藜属,主要是裸子植物的松属,蕨类植物的水龙骨科。LT-4、LT-5、LT-6号样品:孢粉含量较低,发现几粒水龙骨属和松属、罗汉松属孢粉。LT-Y3号样品未见任何孢粉。贾坝剖面JB-1、JB-Y1样品中孢粉浓度低,主要成分为水龙骨属和松属,少量见有禾本科、栎属。JB-2、JB-3号样品未见任何孢粉化石。从野外采样位置看,可能风化程度不高,属于母岩。

虽然两条剖面的孢粉信息有所差异,洛塔剖面孢粉浓度较高,孢粉类型不丰富,贾坝剖面孢粉浓度低,类型也较少,但两个剖面都大量见有水龙骨属,推测当时气候偏温热,与粒度和磁化率的分析相符。温湿度较大的气候对夷平面的形成以及岩溶地貌的发育也起到了重要推动作用。

4.4 夷平面剥蚀年代的探讨

判断夷平面的剥蚀和形成年龄一直以来是一个难题^[6-8]。虽然前人对湘西地区的夷平面进行过一些

讨论,但仍然没有很好地解决年代学问题。如靳立多等^[20]研究洛塔地区的岩溶洞穴和堆积物认为从海拔最高的岩溶台面到河谷的演化时间可从前第三纪到早中更新世,彭汉兴等^[10]对比洛塔第四纪堆积物岩性和化学成分发现早中更新世沉积的相关证据,陈安泽^[21]根据梯子岩残坡积和冰水堆积遗迹推测最高的台面在古近纪—新近纪已经形成,而台地上的岩溶石林等地表岩溶产物则形成于533~1万年之间。

洛塔剖面风化壳的孢粉主要成分为新生代常见的水龙骨属和松属,少量见有冷杉属、罗汉松属、藜属,未发现指示古生代、中生代的孢粉化石,也未见到明显指示古近纪地层的孢粉化石类型,但是含有新近纪常见的孢粉,主要是裸子植物的松属、蕨类植物的水龙骨科。因此,初步推测洛塔剖面可能为新近纪早期开始沉积,其代表的洛塔期夷平面可能形成于中新世。

贾坝剖面少量见有禾本科、栎属,未见古生代、中生代常见孢粉,也未见到明显指示古近纪地层的孢粉化石类型,其中栎属和禾本科主要见于新近纪—第四纪。根据资料,推断贾坝剖面可能开始沉积于第四纪早期,其代表的召市期夷平面可能形成于更新世。

5 结 论

(1)洛塔期夷平面的洛塔剖面风化壳以黏土与砂砾岩互层为主,黏粒和粉砂含量高,砂含量低,Mz、Md、SC/D值以及磁化率值整体较高;召市期夷平面的贾坝剖面风化壳以粉砂黏土层与砂岩为主,Mz、Md、SC/D值以及磁化率值相对波动较大。两条剖面总体都出现3次较明显的指标波动,但贾坝剖面波动更大。

(2)两条剖面风化壳粒度、磁化率反映出的风化壳形成时期古气候均总体湿润,期间伴随小的干燥波动。洛塔期古夷平面风化壳沉积时期气候可能为湿度较大的温暖性气候环境,召市期古夷平面风化壳沉积时期气候可能为湿度较小的凉润性气候,与孢粉分析结果相符,温湿度较大的气候对夷平面的形成以及岩溶地貌的发育起到重要推动作用。

(3)根据孢粉资料推测洛塔期夷平面可能形成于中新世,召市期夷平面可能形成于更新世,但目前

尚不能给出准确时代,未来仍需要进行更多研究和对比。

参考文献

- [1] 任雪梅,陈忠,罗丽霞,周心琴,王健力.夷平面研究综述[J].地理科学,2003,23(1):107-111.
- [2] Coltorti M, Ollier C D. Geomorphic and neotectonic evolution of the Ecuadorian Andes[J]. Geomorphology, 2000, 32(1): 1-19.
- [3] 崔之久,高全洲,刘耕年,潘保田,陈怀录.夷平面、古岩溶与青藏高原隆升[J].中国科学(D辑:地球科学),1996,26(4):378-386,101.
- [4] 潘保田,邬光剑,王义祥,刘志刚,管清玉.祁连山东段沙沟祁连山东段沙沟河阶地的年代与成因[J].科学通报,2000,45(24):2669-2675.
- [5] 李吉均.青藏高原隆起的三个阶段及夷平面[M].北京:中国环境科学出版社,1995:1-5.
- [6] 崔之久,李德文,冯金良,刘耕年.夷平面研究的再评述[J].科学通报,2001,46(21):1761-1768.
- [7] 李德文,崔之久.岩溶夷平面演化与青藏高原隆升[J].第四纪研究,2004,24(1):58-63.
- [8] 潘保田,高红山,李吉均.关于夷平面的科学问题:兼论青藏高原夷平面[J].地理科学,2002,22(5):520-526.
- [9] 李德文,崔之久,刘耕年.湘桂黔滇藏红色岩溶风化壳发育模式[J].地理学报,2002,57(3):293-300.
- [10] 彭汉兴,吴应科.洛塔岩溶山区第四纪堆积物的地球化学特征[J].中国岩溶,1985,5(4):39-46.
- [11] 劳文科,李兆林,罗伟权,梁彬.洛塔地区表层岩溶带基本特征及其类型划分[J].中国岩溶,2002,21(1):32-37.
- [12] 李吉均,方小敏,潘保田,赵志军,宋友桂.新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[J].第四纪研究,2001,21(5):381-391.
- [13] 吴忱,马永红,张秀清,马永红,赵明轩.华北山地地形面、地文期与地貌发育史[M].石家庄:科学技术出版社,1999:245-252.
- [14] 冯金良.夷平面及风化壳研究[D].北京:北京大学,2002.
- [15] 王静爱,左伟.中国地理图集[M].北京:中国地图出版社,2010.
- [16] 蒋忠诚,张晶,黄超,容悦冰,吴亮君.湘西地质公园岩溶峡谷群成因及其地学意义[J].中国岩溶,2019,38(2):269-275.
- [17] Wu Liangjun, Jiang Haixian, Chen Weihai, Peng Wenhong. Geodiversity, geotourism, geoconservation, and sustainable development in Xiangxi UNESCO Global Geopark: A case study in ethnic minority areas[J]. Geoheritage, 2021, 13(99): 1-18.
- [18] 吴亮君,陈伟海,容悦冰,张晶,黄超,朱海燕,孟庆鑫,吴继文,罗劬侃,白冰,欧梦梦.湘西地质公园红色碳酸盐岩石林发育特征与研究价值[J].中国岩溶,2020,39(2):251-258.
- [19] 陈长明.论湘西北区新构造运动[J].湖南地质,1988,7(2):64-72.
- [20] 靳立多,吕中源,林玉石,张顺志.湘西洛塔岩溶发育史[J].中国岩溶,1983,2(1):19-30.

- [21] 陈安泽. 中国喀斯特石林景观研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [22] 于浩然, 吴应科. 洛塔岩溶地质概要[J]. 中国岩溶, 1982, 1(1): 33-39.
- [23] 殷建军. 湖南湘西龙山莲花洞近2000年来气候变化石笋记录研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [24] 张会领, 余克服, 赵建新, 俸月星, 林玉石, 周玮, 刘国辉. 中晚全新世湘西莲花洞石笋旋回沉积速率变化及其古气候意义[J]. 中国岩溶, 2017, 36(4): 580-590.
- [25] 姜端午, 李大明, 梅金华. 湘西北地区岩溶旋回及新构造遥感信息特征[J]. 湖南地质, 2001, 20(3): 225-229.
- [26] 刘钟伟. 湖南省大型矿床成矿大地构造背景: 以湘西北、湘南为例[J]. 国土资源导刊, 2006, 3(3): 46-51.
- [27] 梁恩云, 刘伟, 刘耀荣, 黄乐清, 刘庚寅, 彭能立, 曹解华. 关于湘西北红岩溪地区沉积—构造—成矿研究的一些认识[J]. 中国地质调查, 2016, 3(4): 29-36.
- [28] 李斌, 胡博文, 罗群, 晋长昊, 王一霖. 湘西地区构造层序地层及沉积环境演化特征[J]. 海相油气地质, 2018, 23(1): 1-12.
- [29] 劳文科, 蒋忠诚, 时坚, 梁彬. 洛塔表层岩溶带水文地质特征及其水文地质结构类型[J]. 中国岩溶, 2003, 22(4): 9-17.
- [30] 杜毓超, 梁彬, 李兆林. 湖南洛塔饱水岩溶带地下水动态分析[J]. 地下水, 2006, 28(2): 48-52.
- [31] 苏春田, 潘晓东, 唐建生, 邹胜章, 梁小平, 李兆林. 环境对湘西洛塔表层岩溶水文地球化学特征的影响[J]. 山地学报, 2014, 32(2): 205-211.
- [32] 蓝芙宁, 王文娟, 吴华英, 蒋忠诚, 覃小群, 安树青. 不同土地利用方式下土壤CO₂时空分布特征及其影响因素: 以湘西大龙洞地下河流域为例[J]. 中国岩溶, 2017, 36(4): 427-432.
- [33] 徐树建, 潘保田, 张慧, 李琼. 末次冰期旋回风成沉积物图解法与矩值法粒度参数的对比[J]. 干旱区地理, 2005, 28(2): 194-198.
- [34] 左海玲. 郎曲剖面记录的全新世以来玛曲高原的沉积环境演变[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016.
- [35] 丁仲礼, 任剑璋, 刘东生, 孙继敏, 周晓权. 晚更新世季风—沙漠系统千年尺度的不规则变化及其机制问题[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1996, 1(5): 385-391.
- [36] Ding Zhongli, Sun Jimin, Liu Dongsheng. A sedimentological proxy indicator linking changes in loess and deserts in the Quaternary[J]. *Science in China*, 1999, 42(2): 146-152.
- [37] 张文丽. 粒度和磁化率反映的中晚全新世以来玛曲高原的沙漠化演化[D]. 兰州: 西北师范大学, 2015.
- [38] 鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义[J]. 科学通报, 1997, 42(1): 66-69.
- [39] 陈骏, 季峻峰, 仇纲, 朱洪兵, 鹿化煜. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1997, 2(6): 531-536.
- [40] 刘冰, 靳鹤龄, 孙忠, 苏志珠, 张彩霞. 青藏高原东北部共和盆地风成沉积地球化学特征及其揭示的气候变化[J]. 地球科学进展, 2012, 27(7): 788-799.
- [41] 余雪飞, 李保生, 靳鹤龄, 吕玉晓. 末次间冰期全球变化区域响应的粒度旋回: 萨拉乌苏河流域米浪沟湾剖面记[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2004, 31(1): 129-135.
- [42] 胡梦琪, 李森, 高尚玉, 张登山. 风成沉积物粒度特征及其反映的青海湖周边近32ka以来土地沙漠化演变过程[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1240-1247.
- [43] 李山, 吴怀春, 房强, 许俊杰, 时美楠. 华南泥盆—石炭系界线剖面旋回地层学研究[J]. 地学前缘, 2022, 29(3): 329-339.
- [44] 王建, 刘泽纯, 姜文英. 磁化率与粒度、矿物的关系及其古环境意义[J]. 地理学报, 1996, 51(2): 155-163.
- [45] Ellwood B B, Crick R E, Hassani A E, Benoist S L, Young R H. Magnetosusceptibility event and cyclostratigraphy method applied to marine rocks: Detrital input versus carbonate productivity[J]. *Geology*, 2000, 28(12): 1135-1138.
- [46] 薛祥煦, 赵景波. 陕西旬邑新近纪红粘土微形态特征及其意义[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 448-451, 481.
- [47] Stage M. Magnetic susceptibility as carrier of a climatic signal in chalk[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 188(1-2): 17-27.
- [48] Rey D, Rubio B, Mohamed K, Vilas F, Alonso B, Ercilla G, Rivas T. Detrital and early diagenetic processes in Late Pleistocene and Holocene sediments from the SW Galicia Bank inferred from high-resolution enviromagnetic and geochemical records[J]. *Marine Geology*, 2008, 249(1-2): 64-92.
- [49] Hladil J, Cejchan P, Babek O, Koptikova L, Navratil T, Kubinova P. Dust-A geology-orientated attempt to reappraise the natural components, amounts, inputs to sediment, and importance for correlation purposes[J]. *Geologica Belgica*, 2013, 13(4): 367-384.
- [50] Maher B A. The magnetic properties of Quaternary Aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance[J]. *Aeolian Research*, 2011, 3(2): 87-144.
- [51] Han J M, Jiang W Y, Liu D S, Lyu H Y, Guo Z T, Wu N Q. Carbonate isotopic records of paleoclimate changes in Chinese loess[J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 1996, 39(5): 460-467.
- [52] 胡守云, 邓成龙, Appel E, Verosub K. 湖泊沉积物磁学性质的环境意义[J]. 科学通报, 2001, 46(17): 1491-1494.
- [53] 施雅风. 中国全新世大暖期气候与环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 1-212.
- [54] 龚胜利, 毕力刚. 孢粉沉积作用与PL19-3地区晚第三纪沉积环境的关系[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(6): 388-392.
- [55] 冯晓华, 阎顺, 倪健. 基于孢粉的新疆全新世植被重建[J]. 第四纪研究, 2012, 32(2): 304-317.
- [56] 邵兆刚, 孟宪刚, 朱大岗, 杨朝斌, 雷伟志, 王津, 韩建恩, 余佳, 孟庆伟, 钱程, 贺承广. 西藏那曲孔玛盆地孢粉记录及其环境意义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2013, 38(Suppl.1): 1-9.
- [57] 王伟铭. 中国孢粉学的研究进展与展望[J]. 古生物学报, 2009, 48(3): 338-346.
- [58] 黄文. 中国孢粉学研究进展[J]. 科技视界, 2014(1): 143-144.
- [59] 吕可欣, 石光耀, 张欢, 张金龙, 李庆喆, 张鹏程. 河北平原三河市S9钻孔第四纪孢粉记录及其气候指示意义[J]. 中国地质调

- 查, 2022, 9(1): 64-72.
- [60] 陈平, 王任, 覃军干, 杨锐, 李君, 阮枝梅. 琼东南盆地深水区 WN-A井渐新世—中新世孢粉地层学及古气候[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 390-402.
- [61] 于俊杰, 彭博, 兰佑, 武彬, 王继龙, 丁大林, 劳金秀, 李帅丽, 戴璐. 孢粉证据揭示MIS5a以来福建东北沿海地区人类活动、海平面及气候变化[J]. 地球科学, 2021, 46(1): 281-292.
- [62] 赵增友. 基于孢粉、炭屑的近1600年来桂、渝岩溶区人类活动演变及对环境影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [63] 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[J]. 科学通报, 2015, 60(13): 1197-1206.
- [64] 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[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3634-3644.
- [65] 潘宁惠. 共和盆地马四剖面记录的全新世以来的风沙活动与气候环境演变[D]. 兰州: 西北师范大学, 2017.
- [66] 王勇, 蔡云锋, 李果, 刘梦娇, 张耀华. 重庆市岩溶区不同石漠化程度下土壤磁化率特征分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(11): 49-55.
- [67] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [68] 于寒, 黄书捷. 湘江下游漫滩沉积物粒度和磁化率特征研究[C]//第31届中国气象学会年会S11 第三届城市气象论坛—城市与环境气象, 2014.
- [69] 宋春晖, 高东林, 方小敏, 崔之久, 李吉均, 杨胜利, 金洪波, Douglas Burbank, Joseph L Kirschvink. 青藏高原昆仑山垭口盆地晚新生代高精度磁性地层及其意义[J]. 科学通报, 2005, 50(19): 2145-2154.
- [70] 巩书华, 朱丽芬. 湘西北地质地貌特征对岩溶石漠化影响研究: 以张家界市为例[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 504-512.
- [71] 谢世友, 袁道先, 王建力, 况明生. 长江三峡地区夷平面分布特征及其形成年代[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 40-45.
- [72] 吴继文, 吴亮君, 吕勇, 王璞珺, 周嘉铭, 林宇, 潘明, 廖家飞, 孟庆鑫. 云南泸水市压扭性构造对银厂坪白云岩岩溶系统发育控制作用[J]. 中国岩溶, 2021, 40(5): 793-804.
- [73] 罗书文, 贺卫, 杨桃, 邓亚东, 吕勇, 吴克华, 孟庆鑫. 湘桂走廊地貌发育特征的地学意义及形成机制研究[J]. 中国岩溶, 2021, 40(5): 750-759.

(编辑 黄晨晖)

全球岩溶科技创新合作倡议发布——联合国教科文组织国际岩溶研究中心“岩溶与气候变化”国际培训班开幕式顺利召开

4月16日,在联合国教科文组织国际岩溶研究中心“岩溶与气候变化”国际培训班开班,开幕式上,国际岩溶研究中心发布全球岩溶科技创新合作倡议,此倡议对于在全球范围内推动广泛合作共享,共绘岩溶科技创新未来蓝图具有重要意义。联合国教科文组织驻华代表夏泽翰、斯洛文尼亚共和国驻华大使苏岚、自然资源部国际合作司(海洋权益司)副司长范黎、中国科学技术交流中心主任高翔、国际岩溶研究中心主任彭轩明出席开幕式并致辞,来自克罗地亚驻华使馆参赞 Bisera Fabrio 女士等 20 个国家的 40 多名驻华使节以及专家学者出席开幕式。自然资源部中国地质调查局岩溶地质研究所副所长赵小明主持开幕式。

本次培训班是“中国-中东欧国家同‘新’结”(China-CEEC InnoShare)2024年首场活动。活动主题“共享、共进、共应对;共商、共行、共发展”,期望通过合作解决共同面临的气候变化背景下岩溶区资源环境问题。

此次国际培训班为期 14 天,将在北京、武汉、桂林开展培训。室内培训以岩溶水文地质研究、岩溶水生生态系统、岩溶地质灾害预警与防治、岩溶地质遗迹多样性保护为主要内容;结合水环境治理、岩溶水资源监测、岩溶地质遗迹保护等野外实习,将系统全面介绍气候变化背景下的岩溶科技创新工作成果。

(供稿:白冰、赵良杰)