

黔中乌当盆地阶地沉积特征及其对盆地演化的指示

蒋玺¹, 陈文奇¹, 宁凡¹, 郑军¹, 罗维均², 周涌¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 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 550081)

摘要: 黔中乌当盆地是贵州省山间盆地的典型代表, 四级河流阶地清晰地记录了新构造运动中区域地壳抬升和盆地演化。通过阶地沉积物砾组统计、粒度分析、光释光(OSL)测年, 探讨盆地的发育和演化。结果显示, 阶地砾石排列指示盆地水系古流向与现代河流基本一致, 砾石磨圆度变化大, 分选较差, 岩性继承了区域地层。砾石组合特征反映了构造抬升期盆地内强烈的冲刷剥蚀。漫滩沉积物粒度表明盆地在稳定阶段河流水动力整体呈增大趋势。T4和T3发育阶段区域以冲刷剥蚀为主并塑造了盆地雏形。T2阶地沉积特征及测年结果(177.4 ka~87.6 ka)表明中更新世末期持续数万年的沉积夷平作用使盆地基本成型。T1阶地形成时代约25ka, 指示了黔中地区最近一次构造抬升和盆地的最终定型。

关键词: 乌当盆地; 阶地; 砾组统计; 粒度分析; OSL测年

DOI: 10.11821/dlyj020190515

1 引言

贵州省地处中国陆块西部青藏高原向东南湘西丘陵过渡的斜坡地带, 在青藏高原持续隆升影响下, 全省发育多级剥夷面、水平溶洞、河流阶地等层状地貌, 记录了区域在新构造运动中的间歇性抬升和气候变化^{[1]1117-1151}。阶地作为水系变迁保留下来的阶梯状地貌, 保存了区域古水文、古气候变化和构造抬升的诸多演化信息。因此, 对阶地沉积物开展粒度、形态、粒序、岩性等定量研究以及埋藏年龄测定, 一直是探讨区域水系发展、气候变化、地貌演化的重要手段^[2-7]。但是, 由于贵州地形切割大, 气候温暖多雨, 风化剥蚀强烈, 导致阶地保存普遍较差, 因而目前关于贵州地区阶地及其沉积特征的研究又鲜有报道。尤其是第四纪测年数据的缺乏, 导致该区域阶地以及地貌演化的时代探讨还多处于定性阶段^[8]。

在贵州, 保存较好的河流阶地多见于规模不等的山间盆地中, 其典型特征为以一套上白垩统洪积相砾岩和紫红色含砾粉砂岩作为基底, IV~V级阶地沉积物以角度不整合堆积其上, 如乌当盆地、惠水盆地、榕江盆地、荔波盆地等。这些山间盆地水系发育、土地肥沃、景色优美, 是贵州山区主要的人口聚居地和旅游目的地, 因此盆地的形成和演化成为区域地貌和山地旅游研究的重要内容。

位于黔中贵阳市近郊的乌当盆地是贵州山间盆地的典型代表, 盆地与其周边区域被划定为全国科普教育基地和省级地质公园。近年, 工程活动在乌当盆地周边揭露了保存

收稿日期: 2019-06-24; 修订日期: 2019-09-17

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2019]2852号); 国家自然科学基金项目(41673121); 贵州大学教学研究重点项目(JGZD201508)

作者简介: 蒋玺(1977-), 男, 贵州瓮安人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为第四纪地质和环境。
E-mail: xjiang@gzu.edu.cn

完整的四级河流阶地剖面, 它们清晰地展示了黔中地区的地壳间歇性抬升, 成为研究新构造运动中贵州地貌演化的难得载体。为此, 本文围绕乌当盆地开展多级阶地的沉积特征研究, 并利用沉积物光释光 (OSL) 测年, 定量分析阶地的演化时代, 以此综合探讨构造抬升和气候影响下盆地地貌的形成和发育过程。

2 研究方法与数据来源

2.1 乌当盆地及阶地概况

乌当盆地位于贵阳市东北郊约 15 km, 地处长江水系和珠江水系分水岭苗岭山脉北侧, 属长江水系乌江流域 (图 1)。区内南明河为乌江一级支流清水河上游。南明河由南西向北东流经盆地北侧, 盆地内鱼梁河和渔洞河由南向北汇集后流入南明河。区内地形总体南高北低, 盆地最低海拔约 996 m, 相对高差约 350 m。乌当盆地是贵州高校开展地学类实习最重要的野外基地, 周边出露地层有寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、白垩系和第四系。岩石类型包括白云岩、石灰岩、砂岩、粉砂岩、泥质岩、硅质岩、砾岩等^[9]。

乌当盆地内可见四级阶地, 多为基座阶地, 基底为白垩系紫红色泥质粉砂岩、砾岩等。T1 阶地分布于河流沿岸广大区域, 海拔约 1000 m, 拔河高度约 2~5 m。由于近年河道整治, 一级阶地剖面已保存无几, 现仅见洛湾砖厂南明河畔一处 (LW-T1) (图 2a、图 2b)。T2 阶地组成盆地内第二平台, 海拔约 1015 m, 区内可见冷库剖面 (LK-T2) (图 3b)、渔洞峡剖面 (YDX-T2) (图 3c), 以及长坡剖面等。T3 阶地保存较差, 主要位于盆地周边, 海拔约 1030~1035 m, 仅洛湾剖面见零星阶地沉积物 (LW-T3) (图 2c)。T4 阶地见两处, 一处在大洼垃圾填埋场附近, 剖面出露完好 (DW-T4) (图 3a), 阶地顶面标高 1053 m。另一处位于洛湾砖厂东南侧山顶, 标高 1048 m, 顶部河漫滩相沉积物已剥蚀殆尽, 仅残留底部砾石层 (图 2d)。

本次工作共选择了 5 个保存较好的阶地剖面开展研究, 每个剖面根据沉积物组合特征进行分层, 共分 13 个沉积层。阶地基本沉积特征见表 1。

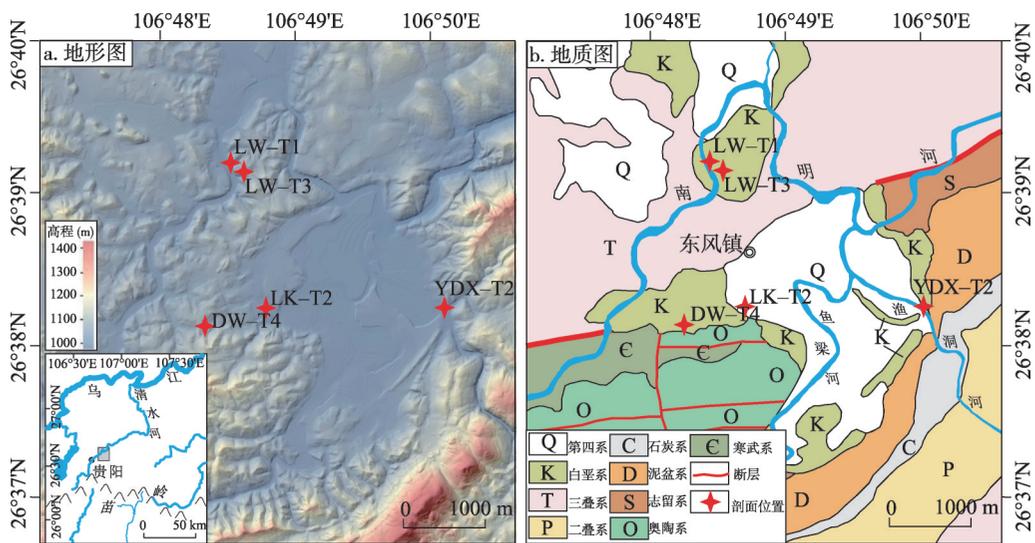


图 1 乌当盆地地形图和地质图

Fig. 1 Topographic map and geological map of Wudang Basin

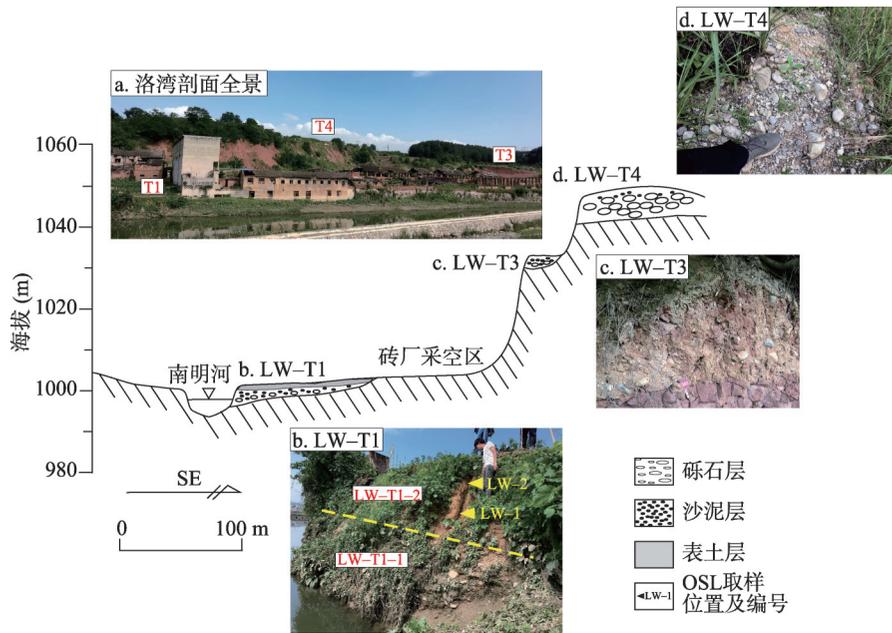


图2 乌当盆地洛湾阶地剖面

Fig. 2 Terraces profile of Luowan in Wudang Basin

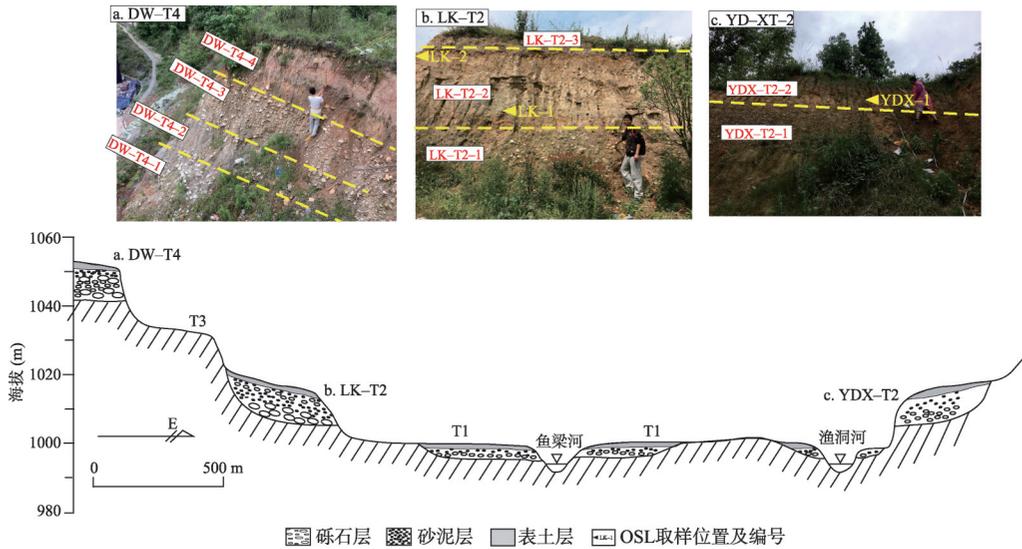


图3 乌当盆地大洼-渔洞峡阶地剖面

Fig. 3 Terraces profile from Dawa to Yudongxia in Wudang Basin

2.2 砾组统计

对阶地剖面中的砾石层，采用网格法进行砾组统计^[10]。首先目测砾石层，估算层中砾石大小和总体含量，然后根据目测砾石组合情况布置网格，对网格区粒径超过2 mm的砾石进行砾径、砾向测量和砾态、岩性观测（除砾向外，砾组统计样品数大于100件）。砾径统计根据实测砾石长轴（a）、中轴（b）和短轴（c）长度，计算出砾石的平均

表1 研究阶地剖面特征

Tab. 1 Profile characteristics of the terraces in Wudang Basin

阶地	拔河高度(m)	阶地描述	研究分层	沉积物基本特征	研究内容	样品数(件)
LW-T1	3.6	位于洛湾南明河东岸, 上部为砂泥层, 下部为砾石层	LW-T1-2	砂泥质层, 局部夹少量砾石 (<5%), 厚度1.7 m	粒度分析	17
			LW-T1-1	砾石层, 砾石含量约60%, 厚度>1.2 m	OSL测年	2
LK-T2	16.0	距鱼梁河西岸约500 m, 阶地顶部为砂泥层, 中上部为砾石层, 中部为砂泥层, 下部为砾石层	LK-T2-4	砂泥质层, 厚度0.3~1.5 m	砾组统计	133
			LK-T2-3	砾石层, 砾石磨圆差, 含量约85%, 厚度0.8 m	粒度分析	42
			LK-T2-2	砂泥质层, 厚度4.2 m		
			LK-T2-1	砾石层, 砾石含量约80%, 厚度>1.6 m	砾组统计	117
YDX-T2	18.0	距渔洞河东岸约30 m, 上部为砂泥层, 下部为砾石层	YDX-T2-2	砂泥质层, 厚度2.3 m	粒度分析	23
			YDX-T2-1	砾石层, 砾石含量约85%, 厚度1.1 m	OSL测年	1
LW-T3	30.0	位于洛湾砖厂东侧, 距南明河东岸约150 m	LW-T3	仅残存少量阶地沉积物, 砾石、砂泥混合沉积, 砾石含量约40%, 厚度约0.8 m	砾组统计	109
DW-T4	57.0	距南明河约500 m, 由上至下分砂泥层、粗砾石层、细砾石层、粗砾石层共4层	DW-T4-4	砂泥质层, 局部夹少量砾石 (<5%), 厚度1.7 m。	粒度分析	17
			DW-T4-3	砾石层, 砾石粗大, 磨圆好, 含量约85%, 厚度约2.5 m	砾组统计	116
			DW-T4-2	砾石层, 砾径明显小于上下两层, 砾石含量约85%, 厚度约2.5 m	砾组统计	111
			DW-T4-1	砾石层, 砾石粗大, 磨圆好, 含量约80%, 厚度约3.2 m	砾组统计	134

注: 由于工程建设, LK-T2-4层原始沉积特征已受破坏, 故未作粒度等分析研究。

砾径 (d_{50}) 和分选系数 (S_0)。砾向利用地质罗盘对剖面上稳定的砾石进行现场测量, 分别测定砾石 a 轴走向、ab 面倾向和倾角。砾态根据每个砾石的磨圆度, 按棱角状、次棱角状、次圆状、圆状、极圆状进行现场统计。砾石岩性根据现场观察进行野外鉴定。

2.3 粒度分析

对剖面中河漫滩相砂泥层, 从顶到底按 10 cm 高度连续取样。各剖面取样位置见图 2 和图 3, 样品数见表 1。取样时先将剖面表层剥去 20 cm 以上, 以高 10 cm, 宽约 6 cm, 深约 10 cm 挖取新鲜沉积物, 充分混合后提取约 50 g 进行粒度分析。由于样品均为未固结的砂泥沉积物, 显微观察均由陆源碎屑和粘土质组成, 未见明显的自生矿物。同时考虑到碎屑中常含有少量碳酸盐碎屑。因此粒度分析前只对样品进行了简单预处理^[11,12]。首先称取样品 10 g, 烘干后揉碎过 10 目筛子, 取 0.5 g 过筛样品, 滴加 10% 的 H_2O_2 溶液去除有机质, 反应至不冒泡后加 40 ml 去离子水煮 1 小时, 冷却后用超声波清洗机振荡 10 分钟。然后静置 24 小时, 小心抽去上层清液并对样品充分搅拌后上机测试。粒度分析在贵州大学喀斯特地区矿产资源高效利用国家地方联合工程实验室完成, 分析设备为 Beckman Coulter LS13320 型激光粒度仪, 测量范围 0.375~2000 μm 。

2.4 沉积物 OSL 测年

本次工作开展了低级阶地 (T1 和 T2) 沉积物的 OSL 测年。首先, 选择沉积稳定的漫滩相砂泥层, 剥去表层 30 cm 以上。然后, 将塞上黑色塑料袋的不锈钢管 (长 20 cm、内径 5 cm) 垂直剖面砸入采样新鲜面, 待样品充满后挖出钢管, 两端立即用黑色塑料袋

包裹并用胶带密封。

OSL测年实验在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成。首先,在暗室中选取不锈钢管中段的样品,筛选出粒径<90 μm的碎屑颗粒。然后,利用H₂O₂和HCl除去样品中的有机质和碳酸盐。之后用H₂SiF₆刻蚀1~3天除去样品中的长石,再用蒸馏水冲洗至中性后制备成高纯度石英颗粒测年样品。样品OSL测量均在Daybreak 2200自动释光测量系统上完成,测量方法为简单多片再生法(SMAR),详细实验流程参考杨会丽等^[13,14]。

3 结果分析

3.1 砾石排列方向

砾石排列方向可作为指示河流古流向的标志,通常砾石ab面倾向指示河流上游方向^[15]。阶地砾石层砾向统计结果见表2和图4。LW-T1-1层沉积物具有显著定向排列,纵向上粒序结构不明显,砾石ab面倾向平均值为219°,与现代南明河水流方向整体一致。LK-T2-1层砾石定向也十分明显,与LW-T1-1层相似,指示了较稳定的河床沉积。砾石ab面倾向平均值为147°,表明沉积时鱼梁河古水流来向为南东向。LK-T2-3层砾石ab面

表2 阶地砾石层的砾石排列方向

Tab. 2 Gravel orientation of terrace gravel layers in Wudang Basin

沉积层	测点数 (个)	a轴平均 走向(°)	ab面平均 倾向(°)	平均倾角 (°)	最大倾角 (°)	古水流 来向
LW-T1-1	58	200±	219±	22±	60	SW
LK-T2-1	58	205±	147±	25±	69	SE
LK-T2-3	26	119±	119±	12±	40	SEE
YDX-T2-1	56	165±	151±	22±	67	SE
DW-T4-1	56	145±	152±	18±	47	SE
DW-T4-2	56	166±	153±	18±	56	SE
DW-T4-3	57	177±	205±	21±	57	SSW

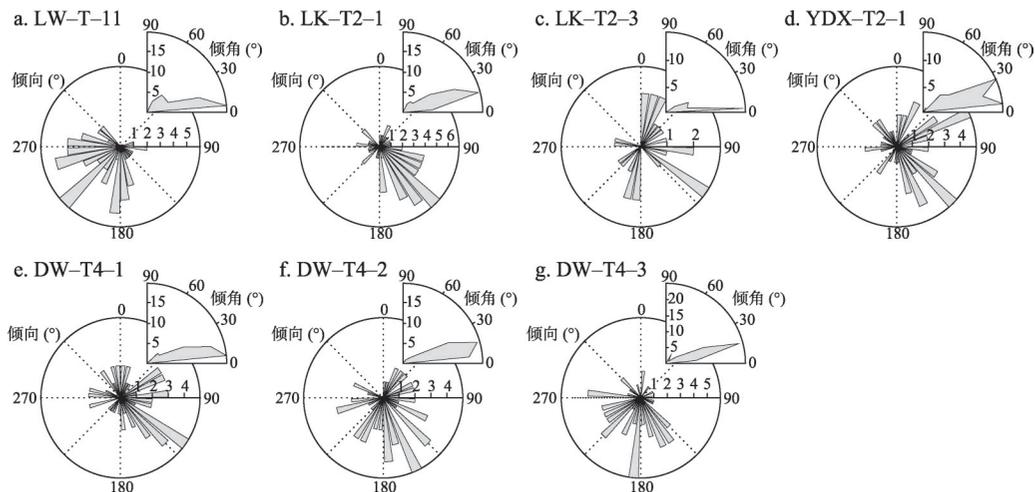


图4 砾石ab面产状

Fig. 4 Attitudes of gravel ab surface

倾向变化大,表明其为快速堆积而成,沉积物中板状、片状的碎屑排列指示其大致方向为南东东向。与LK-T2-3层类似,YDX-T2-1层砾石ab面倾向分布也较离散,暗示两者具有相似的沉积环境。DW-T4剖面上砾石按砾径分3层,顶部DW-T4-3层定向性最好,砾石多呈叠瓦状定向排列,ab面倾向平均值 205° ,与南明河流向一致。DW-T4-1层和DW-T4-2层ab面倾向平均值分别为 152° 和 153° ,但砾石倾向变化较大,反映了阶地发育初期水流变化大的沉积特点。以上砾向分析显示乌当盆地水系古流向与现代河流基本一致,且河流有从盆地边缘向中心汇集的趋势。

3.2 砾石磨圆度

砾石的磨圆度是反映搬运距离和冲刷时间的重要指标。表3显示,LK-T2-3层和YDX-T2-1层砾石磨圆度明显低于其他层位,且其中还有大量几乎没有磨圆的棱角状砾石,表明其未经长距离搬运便迅速沉积的特征。同时,LW-T3层中次棱角状砾石含量也较高(51.85%),也指示了沉积物的近距离搬运沉积。除外,其他层位砾石均以圆状和次圆状为主,而且砾石表面光滑,反映了长时间的流水冲刷作用。而且,野外观测发现在含粗大砾石的LW-T1、LK-T2-1、DW-T4-1、DW-T4-3层位,一般大砾径砾石的磨圆度高于小颗粒砾石,推测是由于粗大砾石被搬运进入盆地后迅速沉积,并遭受后期长时间的水流及搬运物冲刷、磨蚀所致。

3.3 砾石岩性

砾石岩性可有效指示其物源。由于硅质矿物(如石英、玉髓等)抗风化能力强,常在远离物源区保存下来,而泥质岩类(如泥岩、页岩)主要由粘土矿物组成,在河流搬运过程中则不易成为砾石沉积。从表3看,乌当盆地阶地砾石多以砂岩、碳酸盐岩、硅质岩等坚硬岩类为主。除YDX-T2-1层外,盆地砾石层中碳酸盐岩砾石均超过40%,尤以DW-T4剖面最高,超过70%。LW-T1-1和LW-T3层有大量细晶-中晶白云岩砾石,与区域三叠系地层岩性一致。砾石层LK-T2-1、LK-T2-3、DW-T4-1、DW-T4-2、DW-T4-3层碳酸盐岩砾石主要为微晶-细晶白云岩和亮晶生物碎屑灰岩,与盆地西侧寒武系、奥陶系碳酸盐岩地层岩性吻合。除碳酸盐岩外,砾石层中含量不同的砂岩和硅质岩也来自周边地层。YDX-T2-1层中硅质岩和砂岩含量超过70%,与河流上游的泥盆系、二叠系地层岩性一致。从产状和岩性分析,其余层位硅质岩、砂岩、粉砂岩砾石主要来自区域寒武系娄山关群、奥陶系红花园组碳酸盐岩地层中的硅质团块,以及奥陶系湄潭组碎屑岩段的石英砂岩和粉砂岩。这些硬质岩类砾石风化明显,可见由外向内的风化晕。与其他层位不同,LK-T2-3层还有超过40%的泥质岩和粉砂岩,多为强风化、松散的角砾状沉积

表3 阶地砾石层砾石形态和岩性

Tab. 3 Gravel shape and lithology of terrace gravel layers in Wudang Basin

沉积层	砾石形态百分比(%)					砾石岩性百分比(%)				
	棱角状	次棱角状	次圆状	圆状	极圆状	硅质岩	碳酸盐岩	砂岩	粉砂岩	泥质岩
LW-T1-1		29.36	26.61	44.04		21.10	55.04	16.51	6.42	0.92
LK-T2-1		18.75	19.64	55.36	6.25	21.43	43.75	34.82		
LK-T2-3	39.84	48.43	11.72			8.59	47.65	3.13	9.38	31.25
YDX-T2-1	24.22	36.72	38.28	0.78		39.06	23.44	32.03	4.69	0.78
LW-T3		51.85	25.00	23.15		15.74	69.45	5.56	9.26	
DW-T4-1		23.31	30.83	40.60	5.26	18.80	74.44	6.02	0.74	
DW-T4-2		16.36	44.55	38.18	0.91	9.09	90.91			
DW-T4-3		17.54	29.83	44.74	7.89	14.91	77.20	7.89		

物, 岩性与盆地边缘的奥陶系湄潭组地层高度一致。以上砾石岩性分析表明, 各阶地砾石都来自盆地周边地层, 整体上为近距离搬运沉积, 尤其是LK-T2-3层, 砾石中含大量泥质岩和粉砂岩等抗风化能力极弱的岩类, 且排列定向性差, 推测其为泥石流沉积物。

3.4 砾石砾径

砾径是反映河床水动力最直接的指标。图5中 d_{50} 和 S_0 分别代表各砾石层的平均砾径和分选系数。统计显示, 乌当盆地各阶地砾石砾径都比较分散, 数量上砾径小于2 cm的砾石占主体, 其中LW-T3层和DW-T4-2层砾径相对集中, 最大砾径分别为3.6 cm和4.0 cm。其余砾石层则含有数量不等的粗大砾石(砾径>8 cm), 最大者可达12 cm以上, 反映了极强的水动力沉积特征。根据各层砾石分选系数(S_0)等级, 砾石层分选从中等(1.41~1.71)到很差(>2)变化^[10], 指示砾石层沉积时水流流速快, 冲刷作用强烈, 具有明显的山区河流暴涨暴落的水动力特征。

3.5 砂泥层粒度变化

阶地砂泥层沉积物粒度随深度变化见图5。图中沉积物平均粒径根据以下公式计算:

$$Mz = \frac{D_{16} + D_{50} + D_{84}}{3} \quad (1)$$

式中: D_{16} 、 D_{50} 、 D_{84} 分别表示累积频率曲线上16%、50%、84%处对应的粒度值^[16]。图5显示, LW-T1阶地中砂泥层沉积物平均粒径多处于150~300 μm 之间, 且从底到顶呈递增

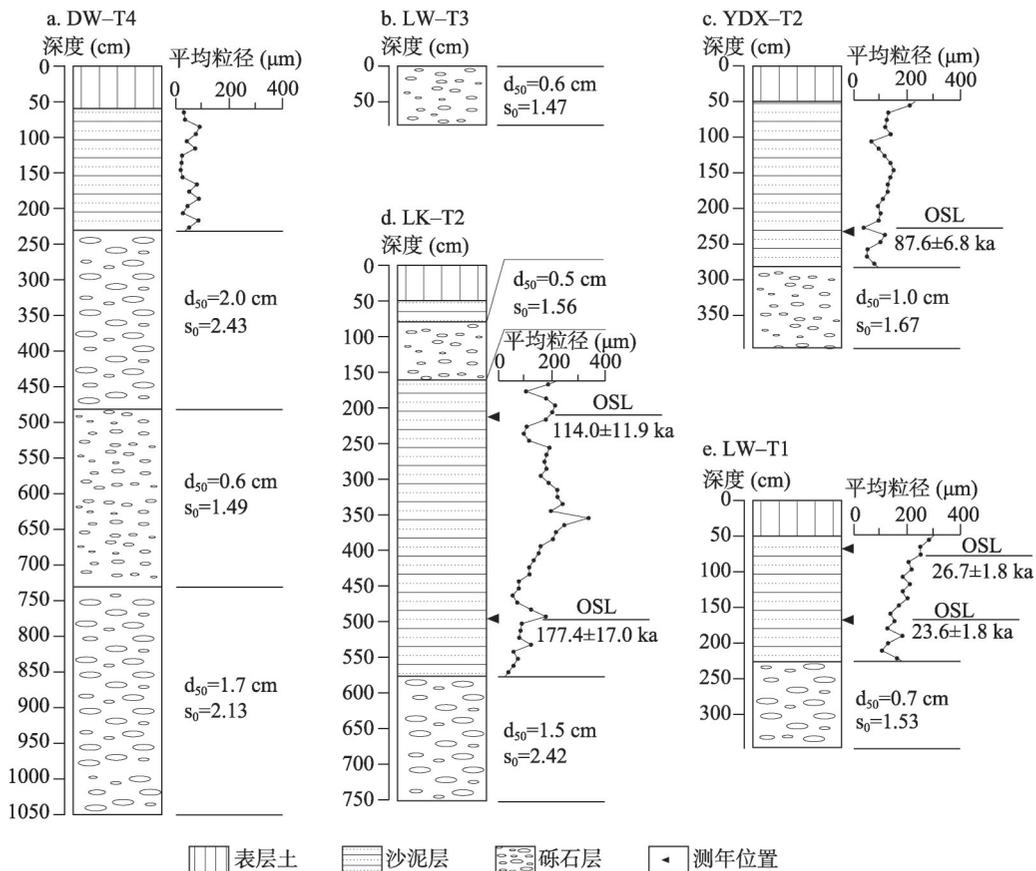


图5 乌当盆地阶地沉积物粒度柱状图

Fig. 5 Sedimentary histogram of terraces in Wudang Basin

趋势, 表明其沉积时水动力逐渐增大。该沉积层就位于南明河左岸, 推测其沉积环境与现代南明河基本一致, 为一山区盆地内河流的漫滩相沉积。LK-T2剖面砂泥层平均粒度多处于50~250 μm 之间, 下部(深度350 cm以下)沉积物粒度随水动力有递增趋势, 上部(160~350 cm)粒度较粗并有阶段性振荡变化, 表明该层沉积时水动力有阶段性变化。YDX-T2剖面砂泥层平均粒径多小于200 μm , 整体上由底到顶呈增大趋势, 但粒度特征显示其沉积时水动力变化不如LW-T1剖面稳定。DW-T4阶地中砂泥层平均粒径均在100 μm 以内, 且仅有小范围阶段性变化, 表明沉积时水动力较弱且相对稳定, 其沉积环境类似于水动力条件很弱的河漫滩或湖滨^[5,17]。

3.6 沉积物 OSL 测年结果

阶地沉积物 OSL 测年结果见表4和图5。LW-T1阶地剖面获得2个沉积物埋藏年龄, 分别为23.6 \pm 1.8 ka和26.7 \pm 1.8 ka。虽然两个年龄存在倒挂现象, 但根据误差推算, 两者差别不大, 可以用于指示阶地的形成时代。LK-T2剖面的两个OSL年龄分别为177.4 \pm 17.0 ka和114.0 \pm 11.9 ka。虽然该剖面在实验测量时释光信号接近饱和, 但从剖面上稳定的漫滩相沉积特征看, 数据仍有参考意义。YDX-T2剖面沉积物OSL年龄为87.6 \pm 6.8ka, 表明YDX-T2-2层晚于冷库剖面LK-T2-2层沉积。

表4 乌当盆地阶地沉积物的OSL测年结果

Tab. 4 OSL dating results of terrace sediments in Wudang Basin

样品编号	埋深(m)	U-238 (Bg/Kg)	Th-232 (Bg/Kg)	K-40 (Bg/Kg)	含水量 (%)	环境剂量率 (Gy/ka)	等效剂量 (Gy)	年龄 (ka)
LW-1	1.6	39.5 \pm 5.8	29.2 \pm 0.4	231.6 \pm 5.1	17	2.1 \pm 0.2	48.7 \pm 2.1	23.6 \pm 1.8
LW-2	0.7	55.1 \pm 7.2	39.5 \pm 0.5	282.3 \pm 6.2	18	2.7 \pm 0.2	71.2 \pm 1.7	26.7 \pm 1.8
LK-1	4.8	40.9 \pm 6.7	31.6 \pm 0.4	306.6 \pm 6.5	26	2.1 \pm 0.1	362.9 \pm 19.7	177.4 \pm 17.0
LK-2	1.8	48.1 \pm 7.1	41.1 \pm 0.5	302.0 \pm 6.4	15	2.6 \pm 0.2	301.1 \pm 25.1	114.0 \pm 11.9
YDX-1	2.3	40.7 \pm 5.9	25.6 \pm 0.4	102.2 \pm 3.4	12	1.6 \pm 0.1	138.5 \pm 7.0	87.6 \pm 6.8

数据测试: 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室杨会丽博士。

4 讨论

在乌当盆地及周边, 阶地基底白垩系洪积相砾岩和含砾粉砂岩倾向均指向盆地, 表明盆地的地貌格架早在晚白垩世以前已经形成。叶春等还根据乌当上白垩统地层的岩性、结构和相变等特征, 圈定了中生代晚期乌当盆地的两个湖相沉积中心^[18]。野外观测发现, 乌当盆地阶地普遍具有二元结构, 而且二元结构面均倾向河槽, 表明其河流演化总体以下切为主^[19], 因而指示了新生代以来, 在青藏高原持续隆升影响下, 区域地貌通过多次垂向抬升剥蚀和夷平作用, 逐渐形成底部平坦的山间盆地的演化过程。

T4和T3阶地面均位于盆地边缘, 其沉积代表盆地夷平的初期阶段。T4阶地剖面砾石层厚度近10 m, 岩性分析显示砾石主要来自周边碳酸盐岩地层, 说明砾石只经历了短程搬运。从砾石层的结构特征(分选差、磨圆好、有定向性等)分析, T4阶地砾石层为山区河流进入盆地后, 水力降低沉积物迅速堆积, 并持续遭受后期水流及搬运物的冲刷、磨蚀形成。这些特征反映了流域由于构造抬升导致的强烈冲刷作用。同时, 3个不同砾组特征的沉积层显示了区域水力条件的阶段性变化。一般认为阶地漫滩相砂泥层主要沉积于地壳抬升稳定期^[20]。粒度分析显示与其他阶地漫滩沉积物以砂(50~200 μm)为主不同, T4阶地顶部砂泥层中含有大量粉砂质(5~50 μm)^[21]沉积物, 表明T4阶段后期地壳趋于稳定, 此时河流水动力并不强。推测此时盆地内河道尚不稳定, 水流进入盆地

后在残丘间呈枝杈状迅速分散, 导致搬运能力降低, 因而沉积了粒度较细的粉砂质河漫滩沉积物。T3阶地保存整体较差, 区域上以侵蚀阶地为主, 表明此阶段河流沉积作用相对较弱, 盆地演化以风化剥蚀为主。

T2阶地沉积代表了乌当盆地的广泛夷平, 阶地在盆地内形成了广阔的二级平台(图1a)。在阶地形成初期, 河流下切并堆积了阶地底部的砾石层。砾石层在不同剖面的厚度变化, 反映了河流不同部位的水动力差异。在LK-T2剖面, 阶地按沉积特征分4层, 底部LK-T2-1砾石层厚度近2 m, 其上LK-T2-2层是厚达4.2 m、层理清晰的河漫滩砂泥质沉积物(图6a), OSL测年显示其沉积年代 $177.4\pm 17.0\sim 114.0\pm 11.9$ ka。LK-T2-3砾石层以棱角状和次棱角状为主, 砾石中含有大量极易风化的泥质岩、粉砂岩(图6b), 岩性分析其与邻近的奥陶系湄潭组地层高度一致, 推测其为—套泥石流沉积物。在LK-T2-3层

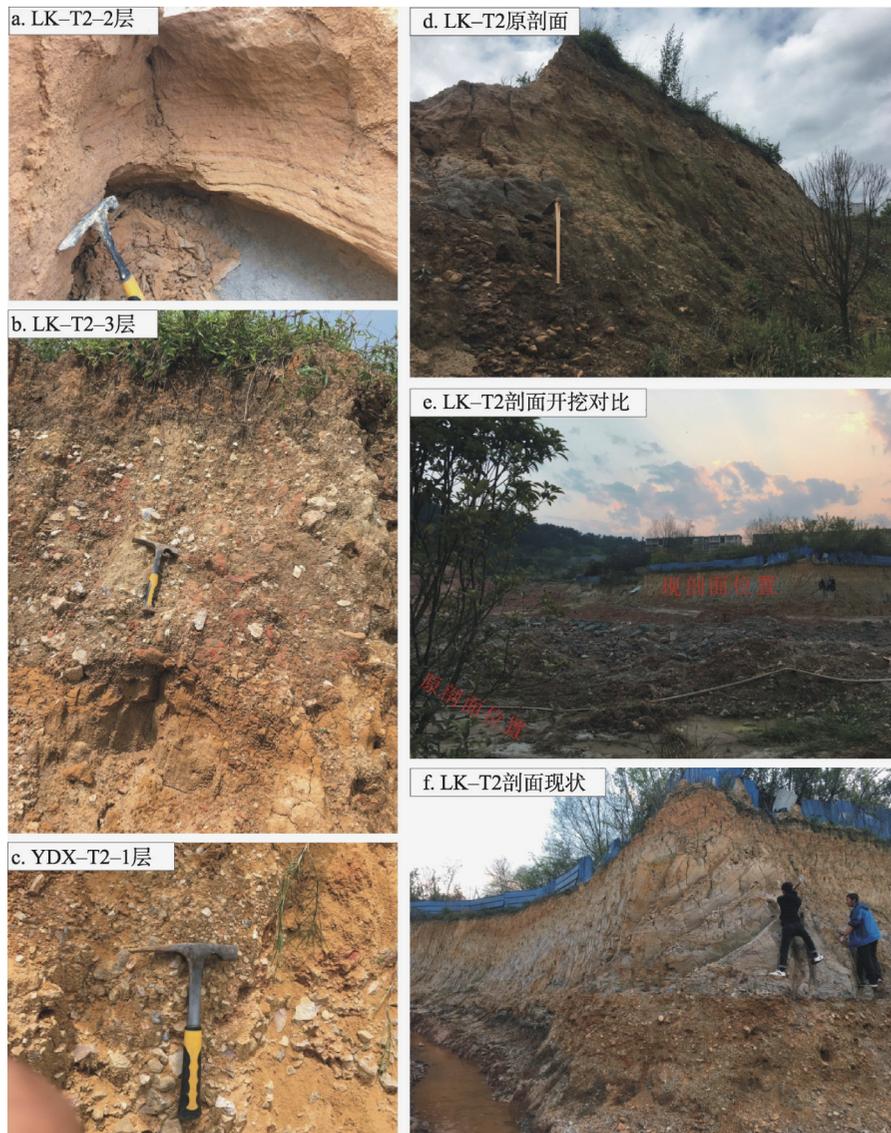


图6 乌当盆地 T2 阶地沉积特征

Fig. 6 Sedimentary characteristics of T2 terraces in Wudang Basin

底部,有一层厚约25 cm的土黄色致密粘土层(图6b),表明该层与下部砂泥层之间可能存在沉积间断。LK-T2-4层厚度沿剖面0.3~1.5 m不等,指示后期的稳定沉积。

在YDX-T2剖面,砾石层YDX-T2-1中砾石以棱角状和次棱角状为主,岩性与周边地层的硅质岩、石英砂岩和碳酸盐岩一致,砾石方向性和分选都较差,沉积特征与冷库剖面LK-T2-3层十分相似(图6c),而且两层标高基本一致。所以推测YDX-T2-1和LK-T2-3应为同期沉积。由此,渔洞峡剖面的YDX-T2-2层沉积序列应对应于冷库剖面的LK-T2-4层。OSL测年也显示,YDX-T2-2层沉积时间(87.6 ± 6.8 ka)明显在LK-T2-2层之后。

目前在黔中及周边地区可供对比的阶地定年研究十分少见。本次测得的T2阶地OSL年龄为177.4ka~87.6 ka,与胡智丹在兴义岔河流域的T2阶地OSL测年结果(57.4 ± 5.7 ka和 61.6 ± 6.2 ka)^{[22]35-50},以及中国其他流域利用热释光(TL)等不同方法获得的T2阶地年龄(约60 ka)^[23]相比,虽时间跨度大,时代更老,但最新年龄(YDX-T2-2层底部年龄 87.6 ± 6.8 ka)仍具有可比性。分析认为,这些差异可能是新构造运动中区域深大活动断裂造成的地壳差异性升降所致。乌当盆地北侧的乌当断层是一条区域性深大活动断层,前人对第四纪以来该断层的活动性进行了研究,发现其中更新世发生过强烈的构造活动^[24]。从砾石层砾组特征和地貌上,可推断LK-T2阶地为古鱼梁河沉积。根据现鱼梁河集水面积(约400 km²)和水量(多年平均天然流量约6.5 m³/s)推测,古鱼梁河规模应该不大。但LK-T2阶地沉积物厚度近10 m(图6d),而且近期工程开挖将剖面向盆地边缘推进了约100 m(图6e),沉积物厚度仍超过8 m(图6f),表明当时鱼梁河水面十分宽阔,沉积缓慢、稳定。因此,推测中更新世乌当断层强烈的构造活动可能在此形成了一个类似湖湾的小型沉积盆地,所以其沉积厚度大于YDX-T2剖面,且时代更早。而随着沉积过程发展,乌当盆地T2阶地沉积时代逐步接近其他区域T2阶地。总体上,乌当盆地T2阶地形成在时间上也与中国第四纪冰期划分的末次间冰期(MIS5, 125 ka~75 ka)^[25]基本吻合,表明当时气候整体上温暖湿润,利于阶地稳定沉积。同时与阶地标高对应,盆地南侧鱼梁河上游黄花冲碳酸盐岩地层中发育的水平溶洞也是这一阶段的产物。因此可以推断在中更新世末期乌当盆地经历了持续数万年的广泛夷平作用。

T1阶地是乌当盆地最近一次夷平堆积的结果,也记录了贵州最后一次构造抬升。阶地下部砾石层砾石沿南明河流向排列,代表了构造抬升导致的河流下切侵蚀作用。上部河漫滩相沉积物粒度分析表明,在盆地的堆积过程中,河流水动力受气候影响呈逐渐变强的趋势。区域调查显示,贵州境内的河谷阶地具有自西向东阶地高程、级数、级差逐渐减小的特点,阶地类型由侵蚀阶地为主向基座阶地、堆积阶地为主变化的分布特点,反映了新构造运动中区域自西向东的间歇式、掀斜式构造抬升^{[1]117-1151}。由此前人推测贵州地区的河流阶地具有自西向东时代由老到新的发育趋势^[8]。本次沉积物OSL测年显示黔中乌当盆地T1阶地形成时代约25 ka,晚于贵州西部兴义岔河流域的T1阶地沉积(OSL年龄 35.1 ± 3.5 ka)^{[22]35-50},而早于东南部平塘曹渡河的T1阶地形成(炭化木年龄 8268 ± 140 a)^[26],也印证了最近一次构造抬升中贵州地区自西向东的掀斜式抬升。

综上,乌当盆地阶地的沉积特征蕴含了盆地的多期演化信息,也记录了黔中地区在新构造运动中的多次构造抬升。T1和T2阶地沉积代表了盆地演化最广泛的夷平过程,尤其是T2阶段,持续数万年的沉积作用使盆地基本成型。

5 结论

通过黔中乌当盆地阶地沉积物的砾组统计和粒度测量,分析了阶地的沉积特征,并

利用OSL测年法,获得了T1和T2阶地的沉积时代,以此重建了区域多级阶地形成的水动力条件和沉积过程,并对盆地的发育和演化进行了探讨,得到如下结论:

(1) 乌当盆地阶地普遍具二元结构,阶地砾石层砾组特征反映了山区河流水动力强,流速不稳定的水流特征。在T4和T3阶段,强烈的冲刷剥蚀作用塑造了盆地的雏形。

(2) OSL测年显示,T2阶地形成时代(177.4 ka~87.6 ka)与MIS5末次间冰期基本一致,持续数万年温暖湿润的气候条件,使乌当盆地沉积了厚度近10 m的阶地沉积物,盆地基本成型。

(3) T1阶地形成时代约25 ka,代表黔中地区最近一次构造抬升和乌当盆地的最终定型。

致谢: 本文释光年代样品由中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室杨会丽博士测定;论文得到匿名评审专家在砾组统计数据表达、测年数据解释、文字和图件提升方面客观中肯的修改建议,在此对他们的付出表示真诚感谢!

参考文献(References)

- [1] 贵州省地质调查院. 贵州省区域地质志: 下册. 北京: 地质出版社, 2018: 1117-1151. [Guizhou Geological Survey. Regional Geology of Guizhou Province: Book 2. Beijing: Geological Publishing House, 2018: 1117-1151.]
- [2] Hu C S, Xu Y P, Hu C Q, et al. Genesis of the Qingyijiang River on the northern fringe of Mt. Huangshan, China, based on a combined analysis of gravel fabrics and ESR dates. *Quaternary International*, 2017, 440: 137-146.
- [3] Gao H S, Li Z M, Liu X F, et al. Fluvial terraces and their implications for Weihe River valley evolution in the Sanyangchuan Basin. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(3): 413-427.
- [4] Jia L Y, Hu D G, Wu H H, et al. Yellow River terrace sequences of the Gonghe-Guide section in the northeastern Qinghai-Tibet: Implications for plateau uplift. *Geomorphology*, 2017, 295: 323-336.
- [5] 刘玉清, 林晓, 王君波, 等. 西藏中部当惹雍错湖泊阶地记录的中晚全新世古气候变化. *地理研究*, 2017, 36(6): 1191-1200. [Liu Yuqing, Lin Xiao, Wang Junbo, et al. Paleoclimate changes reflected by lake terrace in Tangra Yumco of Central Tibet since middle-late Holocene. *Geographical Research*, 2017, 36(6): 1191-1200.]
- [6] 周亮, 黄春长, 周亚利, 等. 汉江上游郧西郧县段古洪水事件光释光测年及其对气候变化的响应. *地理研究*, 2014, 33(6): 1178-1192. [Zhou Liang, Huang Chunchang, Zhou Yali, et al. Palaeoflood OSL chronology and its response to climate change in the Yunxi-Yunxian reach in the upper Hangjiang River valley. *Geographical Research*, 2014, 33(6): 1178-1192.]
- [7] Pan B T, Su H, Hu Z B, et al. Evaluating the role of climate and tectonics during non-steady incision of the Yellow River: Evidence from a 1.24 Ma terrace record near Lanzhou, China. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(27-28): 3281-3290.
- [8] 周德全, 刘秀明, 姜立君, 等. 贵州高原层状地貌与高原抬升. *地球与环境*, 2005, 33(2): 79-84. [Zhou Dequan, Liu Xiuming, Jiang Lijun, et al. Step-like landforms and uplift of Guizhou Plateau. *Earth and Environment*, 2005, 33(2): 79-84.]
- [9] 顾尚义, 周洪庆, 孙士军, 等. 贵阳乌当地质填图实习指导书. 南京: 南京大学出版社, 2007: 23-73. [Gu Shangyi, Zhou Hongqing, Sun Shijun, et al. A Handbook for Geological Mapping Practice in Wudang, Guiyang. Nanjing: Nanjing University Press, 2007: 23-73.]
- [10] 胡春生, 吴立, 杨立辉. 青弋江上游泾县段阶地砾石层砾组结构及其沉积环境研究. *地理科学*, 2016, 36(6): 951-958. [Hu Chunsheng, Wu Li, Yang Lihui. Gravel fabric and sedimentary environment of terrace gravel layers of the upper Qingyijiang River at Jingxian county. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(6): 951-958.]
- [11] 赵绍华, 刘志飞. 海洋沉积物陆源碎屑粒度分析预处理方法研究. *地球科学进展*, 2017, 32(7): 769-780. [Zhao Shaohua, Liu Zhifei. A study of pretreatment methods for terrigenous grain-size analysis of marine sediments. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(7): 769-780.]
- [12] 贾铁飞, 王峰, 袁世飞. 长江中游沿江牛轭湖沉积及其环境意义: 以长江荆江段天鹅洲、中洲子为例. *地理研究*, 2015, 34(5): 861-871. [Jia Tiefei, Wang Feng, Yuan Shifei. Oxbow lake sedimentary characteristics and their environmental significance in Tianezhou and Zhongzhouzi lakes in the middle Yangtze River. *Geographical Research*, 2015, 34

- (5): 861-871.]
- [13] 杨会丽, 陈杰, 刘进峰, 等. 2008年汶川地震相关堆积物的细颗粒石英光释光测年研究. 地震地质, 2011, 33(2): 413-420. [Yang Huili, Chen Jie, Liu Jinfeng, et al. Optical dating of fine quartz from the 12 May 2008, M_s 8.0 Wenchuan earthquake related sediments. *Seismology and Geology*. 2011, 33(2): 413-420.]
- [14] 王旭龙, 卢演铸, 李晓妮. 细颗粒石英光释光测年: 简单多片再生法. 地震地质, 2005, 27(4): 615-623. [Wang Xulong, Lu Yanchou, Li Xiaoni. Luminescence dating of fine-grained quartz in Chinese loess simplified multiple aliquot regenerative-dose (MAR) protocol. *Seismology and Geology*. 2005, 27(4): 615-623.]
- [15] 杨景春, 李有利. 地貌学原理. 北京: 北京大学出版社, 2001: 20-58. [Yang Jingchun, Li Youli. *Principle of Geomorphology*. Beijing: Peking University Press, 2001: 20-58.]
- [16] 刘志杰, 公衍芬, 周松望, 等. 海洋沉积物粒度参数3种计算方法的对比研究. 海洋学报, 2013, 35(3): 179-188. [Liu Zhijie, Gong Yanfen, Zhou Songwang, et al. A comparative study on the grain-size parameters of marine sediments derived from three different computing methods. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(3): 179-188.]
- [17] 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究. 沉积学报, 2009, 27(2): 343-351. [Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Wu Jinshui, et al. The multimodal grain-size distribution characteristics of loess, desert, lake and river sediments in some areas of northern China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(2): 343-351.]
- [18] 叶春, 毛铁. 贵阳乌当盆地白垩纪红层的形成及丹霞地貌. 贵州大学学报: 自然科学版, 2012, 29(1): 62-67. [Ye Chun, Mao Tie. The formation of Guiyang Wudang basin Cretaceous red beds and Danxia landform. *Journal of Guizhou University: Natural Sciences*, 2012, 29(1): 62-67.]
- [19] 金德生, 乔云峰, 杨丽虎, 等. 新构造运动对冲积河流影响研究的回顾与展望. 地理研究, 2015, 34(3): 437-454. [Jin Desheng, Qiao Yunfeng, Yang Lihu, et al. A research of influence of neo-tectonic movement on alluvial rivers: Review and prospect. *Geographical Research*. 2015, 34(3): 437-454.]
- [20] 胡春生. 河流阶地研究进展综述. 地球环境学报, 2014, 5(5): 353-362. [Hu Chunsheng. Progress in research on river terraces. *Journal of Earth Environment*, 2014, 5(5): 353-362.]
- [21] 张晴华, 王红亚, 徐琳, 等. 广东惠州黄洞水库沉积物特征及其反映的近50年土壤侵蚀意义. 地理研究, 2014, 33(4): 643-653. [Zhang Qinghua, Wang Hongya, Xu Lin, et al. Characteristics of sediment from Huangdong Reservoir in Hui-zhou, Guangdong province and their implications on soil erosion during the past 50 years. *Geographical Research*. 2014, 33(4): 643-653.]
- [22] 胡智丹. 贵州兴义地区活动构造及其对地貌的影响. 成都: 成都理工大学硕士学位论文, 2017. [Hu Zhidan. Active tectonic and its influence on geomorphology in Xingyi, Guizhou. Chengdu: Master Dissertation of Chengdu University of Technology, 2017.]
- [23] Yang G F, Zhang X J, Tian M Z, et al. Geomorphological and sedimentological comparison of fluvial terraces and karst caves in Zhangjiajie, northwest Hunan, China: An archive of sandstone landform development. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64: 671-683.
- [24] 雷东宁, 傅焰林, 蔡永建, 等. 贵阳乌当断裂探测及第四纪活动初步分析. 地震研究, 2012, 35(2): 213-219. [Lei Dongning, Fu Yanlin, Cai Yongjian, et al. Detecting on Wudang Fault in Guiyang and preliminary analysis of its Quaternary movement. *Journal of Seismological Research*. 2012, 35(2): 213-219.]
- [25] 赵井东, 施雅风, 王杰. 中国第四纪冰川演化序列与MIS对比研究的新进展. 地理学报, 2011, 66(7): 867-884. [Zhao Jingdong, Shi Yafeng, Wang Jie. Comparison between Quaternary glaciations in China and the marine oxygen isotope stage (MIS): An improved schema. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 867-884.]
- [26] 林树基, 周启永, 陈佩璜. 贵州的上新生界. 贵阳: 贵州科技出版社, 1994: 88-101. [Lin Shuji, Zhou Qiyong, Chen Peiyong. Late Cenozoic of Guizhou. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1994: 88-101.]

Sediment characteristics of terraces in Wudang Basin and their implications on basin evolution

JIANG Xi¹, CHEN Wenqi¹, NING Fan¹, ZHENG Jun¹, LOU Weijun², ZHOU Yong¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550081, China)

Abstract: Studying river terrace is an important way to explore regional evolution of hydrology, paleoclimate and geomorphology. There is few reports about terraces of Guizhou because intense weathering results in poor profile preservation in this area. In Wudang Basin, a typical intermountain basin located in central Guizhou, Neotectonic movement resulted in a well-preserved sequence of four terraces, which indicates the regional crustal uplift and basin evolution clearly. In this article, measurements on gravel fabric and grain size of sediments are used to analyze the sedimentary environment of terraces. And then, combined with optical luminescence (OSL) dating, the discussion is focused on evolution age and process of Wudang Basin. The results show that in the study area, the gravels are poorly sorted and varying roundness but well orientated with river flows. The fact that lithology of gravels possess distinct inheritance indicates that they come from the surrounding stratum. Based on the gravel fabric analysis, it is concluded that the basin experienced an intense erosion during tectonic uplift. Grain size measurements on floodplain sediments present that dynamics of the rivers have an increasing tendency, which indicates regional climatic changes during a relatively tectonic stable stage. In stages of T4 and T3, there was erosion and denudation in Wudang Basin, which formed the embryo of the modern geomorphology. OSL dating shows that the age of T2 terrace is from 177.4 ka to 87.6 ka, which is consistent with the last interglacial in the sequence of Chinese glaciations and MIS5 (125 to 75 ka). So it is held that in stage of T2, warm and humid climate was important for terrace deposit up to a 10-m thickness. Based on sediment characteristics and time series, it is believed that at the late stage of Middle Pleistocene, there was a sedimentary leveling lasting for tens of thousands of years before Wudang Basin basically formed. The age of T1 terrace is about 25 ka, indicating the last tectonic uplift of Guizhou and the final shaping of Wudang Basin.

Keywords: Wudang Basin; terrace; gravel fabric analysis; grain size analysis; OSL dating