

贵州高原北部河流阶地发育与喀斯特地貌演化

蒋玺^{1,2}, 陈文奇¹, 宁凡¹, 孙玉慧¹, 敖进¹, 罗维均³, 况光显⁴

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025; 3. 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; 4. 绥阳双河洞国家地质公园管理处, 绥阳 563300)

摘要: 贵州高原北部发育平缓丘丛和深切峰丛2种喀斯特地貌组合, 保存于喀斯特山间盆地的河流阶地对区域地貌演化具有指示意义。本文根据阶地发育特征和光释光(OSL)测年, 分析阶地形成的时代和动力, 结合区域地质背景, 探讨构造抬升和河流侵蚀对黔北喀斯特地貌演化的驱动作用。结果显示, 绥阳盆地T1阶地时代 18.8~8.2 ka, T2时代 144.4~104.1 ka; 旺草盆地T1年龄为 5.5 ka, T2年龄为 45.1 ka。绥阳盆地阶地以漫滩相沉积物为主, 旺草盆地阶地则多切割了白云岩基岩。分析认为, 气候条件影响了阶地的沉积过程, 但差异性构造抬升应为区域河流阶地差异发育的主要因素。阶地测年显示, 旺草盆地的河流平均下切速率明显高于绥阳盆地, 表明芙蓉江流域构造抬升和河流下切强度明显高于洋川河。在差异性构造抬升和河流侵蚀综合作用下, 北部大娄山区形成了深切的喀斯特峰丛-峡谷地貌, 南部乌江中游流域则发育以平坦盆地和宽缓丘丛为主的地貌组合。

关键词: 贵州高原; 河流阶地; OSL测年; 喀斯特; 地貌演化

DOI: 10.11821/dlyj020200485

1 引言

贵州高原位于中国地貌上青藏高原向湘西丘陵过渡的第二级阶梯, 受青藏高原持续隆升影响, 分布广、厚度大的碳酸盐岩地层形成了生态脆弱的喀斯特连片山区, 因此喀斯特地貌发育和演化一直是区域环境地质和地貌研究的重要内容^[1]。由于地处中国西南喀斯特集中发育的核心地带, 贵州高原的地貌演化研究也由来已久。从20世纪40年代杨怀仁教授提出的大娄山期、山盆期、乌江期3级地文期^[2]开始, 学者们就一直围绕贵州的高原喀斯特地貌演化展开持续讨论^[3-7]。然而, 由于地貌面识别和沉积物保存等条件限制, 区域地貌年代学工作十分薄弱, 导致长期以来关于贵州高原演化的时代讨论仍以定性为主, 极大制约了区域喀斯特地貌演化研究。

河流阶地作为河流系统变迁保留下来的阶梯状地貌, 记录了区域地貌演化中的构造抬升、气候变化及古水文等诸多信息, 因此通过阶地研究重建地貌演化过程一直是第四纪地质和地貌研究的热点领域^[8-11]。在系统的阶地研究中, 阶地测年不仅可构建多级阶地形成的年代序列, 更提供了区域河流下切时代、侵蚀速率, 以及古河流沉积速率等重要演化信息, 可为区域地貌演化讨论提供关键的定量年代学基础^[12-18]。因此, 利用阶地测年

收稿日期: 2020-06-05; 录用日期: 2020-07-27

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2019]2852号); 贵州省科学技术基金项目([2020]1Y164); 中国科学院大学生创新实践训练计划项目(20184000956, 20194000470)

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

开展区域地貌演化的定量时代分析,对贵州高原喀斯特地貌演化研究具有重要启示意义。

受地层岩石、构造、水文等条件控制,贵州高原喀斯特地貌主要包括溶蚀地貌、溶蚀-侵蚀地貌和溶蚀-构造地貌等3种基本成因类型,以及峰丛洼地、峰丛谷地、峰林谷地等16种形态组合^[9]。资料显示,贵州高原黔北地区发育有2种形态迥异的喀斯特地貌组合。在以遵义、绥阳等地为代表的乌江中游流域,主要发育宽缓分水岭和平坦盆地,以及分布其中的缓丘和圆丘状锥峰等,地貌组合与黔中喀斯特丘丛-峰丛区相似。绥阳以北的大娄山区,喀斯特地貌则由层层叠置的深切峰丛山地,密集的干沟和谷地等组成,并发育大量错综复杂的溶洞系统,如亚洲第一长洞——双河洞等,地形切割明显高于乌江中游喀斯特区。这2种地貌组合反映了新构造运动中黔北地区喀斯特地貌的差异演化,对贵州高原地貌演化研究具有重要指示意义。为此,本文从这2个不同喀斯特地貌区河流阶地观测出发,利用光释光(OSL)测年法开展阶地测年,并以阶地发育动力和时代为基础探讨黔北地区构造运动和水文条件影响下的地貌差异演化,为青藏高原隆升背景下的贵州高原喀斯特地貌演化研究提供启示。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

研究区位于贵州高原北部(图1a)。区内主要河流有洛安江、湄江、芙蓉江、桐梓河等(图1b)。洛安江和湄江由北向南汇入湘江,为乌江中游支流。芙蓉江为乌江下游支

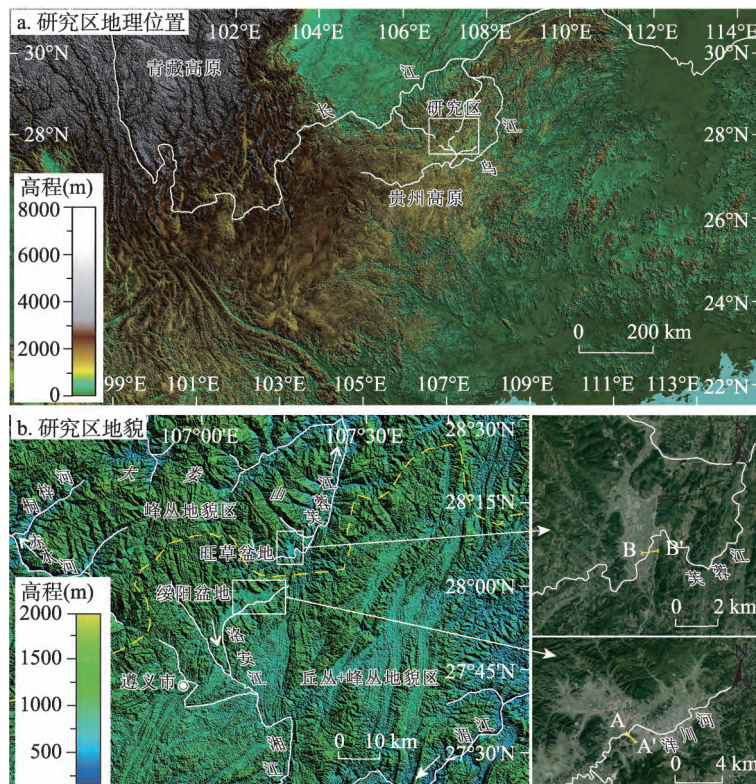


图1 研究区地理位置和地貌

Fig. 1 Geographical location and geomorphic map of the study area

流, 由南向北至重庆市武隆区汇入乌江。桐梓河为长江支流赤水河中段支流。研究区整体地貌分区属于黔北-黔东南喀斯特丘丛-峰丛区^[9], 但区域内地貌却呈显著的差异发育特征。东、南部乌江中游流域地貌以宽缓的丘丛、峰丛以及圆丘状锥峰等喀斯特山地为主, 山间多发育平坦盆地, 地形相对高差一般低于500 m。西、北部的大娄山区则以喀斯特峰丛山地地貌为主, 山间沿构造线发育密集的深切峡谷, 地形相对高差常超过800 m (图1b)。

2.2 研究区河流阶地

区域保存较好的河流阶地多分布于喀斯特山间盆地中, 本次工作分别开展了坐落于南部丘丛-峰丛区的绥阳盆地和北部峰丛区的旺草盆地的阶地研究。阶地调查中, 海拔高度利用手持GPS读取, 剖面厚度观测通过皮尺现场测定。

2.2.1 绥阳盆地阶地

绥阳盆地位于乌江支流洛安江上游洋川河段, 面积约60 km², 洋川河自北向南西流经盆地内 (图1b)。盆地及周边地形总体北高南低, 河谷最低海拔约850 m, 北侧分水岭最高海拔约1450 m, 相对高差约600 m。盆地周边出露地层主要有寒武系娄山关群 (C₂₋₃ls) 厚层细晶白云岩, 奥陶系桐梓-红花园组 (O_{1t-h}) 厚层白云岩和灰岩, 东南侧零星出露奥陶系湄潭组 (O_{1m}) 薄层粉砂岩和泥页岩。盆地内以第四纪松散沉积物为主, 基底多为寒武系娄山关群 (C₂₋₃ls) 白云岩。

绥阳盆地内可见级次清晰的三级河流阶地 (图2a), 研究剖面位置见图1b。T1阶地主要分布于洋川河两侧, 海拔约855 m, 拔河高度约3~6 m, 为堆积阶地, 阶地沉积物以漫滩相砂泥质为主, 未见砾石层 (图2b)。T2阶地海拔约862 m, 拔河高度约10~14 m。T2主要为基座阶地, 基底为强风化的碳酸盐岩, 未见阶地底部砾石层。在研究剖面上, 阶地沉积物明显分3层, 底部为厚度约3 m的砂泥质层; 其上为厚约0.6 m的砾石层, 砾石含量约60%, 以砾径2~5 cm的棱角状碳酸盐岩为主, 具明显的洪积特征; 剖面顶部主要为砂泥质, 但沉积物剥蚀明显, 残留厚度0~0.3 m (图2c)。盆地内T3阶地剥蚀强烈, 阶地面形成盆地中的残留孤丘, 海拔约870 m, 拔河高度约20 m (图2d)。观测剖面上仅见残留的部分沉积物, 以漫滩相砂泥质为主, 底部局部见砾石层, 砾石含量约40%, 以砾径约1~4 cm的棱角状、次棱角状碳酸盐岩为主。

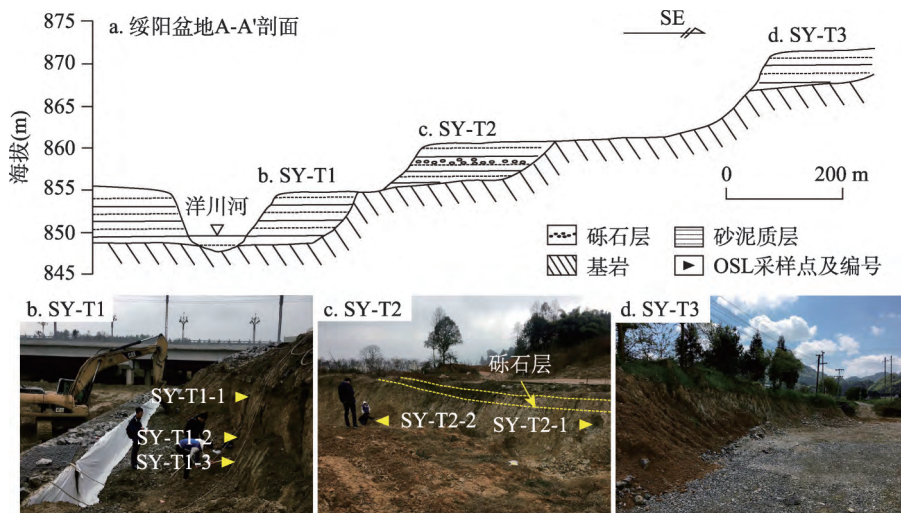


图2 绥阳盆地阶地剖面

Fig. 2 Terraces profile of Suiyang Basin

2.2.2 旺草盆地阶地 旺草盆地位于绥阳盆地北约15 km，面积约20 km²。盆地地处乌江支流芙蓉江上游，芙蓉江自南向北流经盆地（图1b）。盆地周边地形西高东低，区内芙蓉江最低海拔约665 m，与西侧分水岭相对高差约900 m。盆地周边出露地层主要为寒武系娄山关群（C₂₋₃ls）厚层细晶白云岩，盆地内第四纪松散沉积物以角度不整合堆积其上。

旺草盆地内可见四级河流阶地（图3a），工作剖面位置见图1b。T1阶地主要分布于盆地内芙蓉江及其支流沿岸，阶地面海拔约680 m，拔河高度10~12 m。T1为基座阶地，上部为厚约2 m的阶地沉积物（图3b），基底为弱风化的白云岩，基岩出露厚度8~10 m。T2阶地海拔约690 m，拔河高度约20 m，主要为堆积阶地，阶地剖面呈强风化的土黄色（图3c），阶地下部见大量磨圆的粗大砾石，最大砾径超过50 cm，以碳酸盐岩为主。T3阶地形成盆地边缘一系列平顶小山丘，阶地面海拔约700 m，拔河高度约30 m。T3主要为基座阶地，基底为弱风化白云岩。在观测剖面上，砂泥质沉积物中见一厚约20 cm的砾石层，砾石含量约40%，砾径多小于10 cm，以次圆状至圆状的碳酸盐岩为主（图3d）。T4阶地海拔大约720 m，拔河高度约50 m。在盆地东侧见一工程揭露剖面（图3e）。除下伏白云岩基底外，剖面自下而上见3个沉积层。下部为砂泥质沉积物（厚约1.5 m），少见砾石；中部为厚约0.5 m的砾石层，砾石含量约60%，以棱角状至次棱角状的碳酸盐岩和砂岩为主，砾径2 cm到20 cm不等，具粒序结构，自下而上含量降低，粒度减小；上部为厚约2 m的砂泥质层，底部含砾石与下层过渡，中部砂泥质沉积物中偶见中等磨圆的砾石。

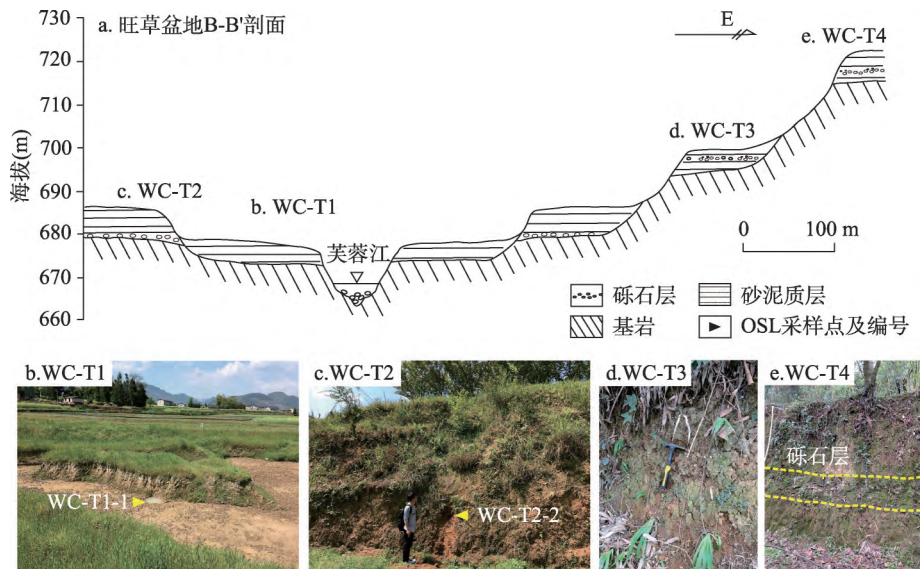


图3 旺草盆地阶地剖面

Fig. 3 Terraces profile of Wangcao Basin

2.3 样品与实验方法

阶地年代学研究主要利用沉积物光释光（OSL）测年法。野外采样时，首先选取阶地剖面上层理清晰的漫滩相沉积层，挖去表层约30 cm以上，确保样品为原始沉积物。然后将一端堵塞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。在取出钢管时，将周边的沉积物挖出装袋，用于辐射背景值测定。

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,在暗室中剥离出不锈钢管中段的沉积物样品,并筛选出粒径 $<90\ \mu\text{m}$ 的碎屑颗粒。然后,分别加入 H_2O_2 和 HCl 除去样品中的有机质和碳酸盐,待反应完成后再用 H_2SiF_6 溶液刻蚀1~3天除去样品中的长石。最后用蒸馏水冲洗至中性后制备成高纯度石英颗粒测年样品。释光测年实验在Daybreak2200自动释光测量系统上完成,测年方法为简单多片再生法(SMAR),详细实验流程参考王旭龙等^[20,21]。

3 结果与讨论

3.1 阶地测年结果

本次工作先后开展了绥阳盆地T1、T2和旺草盆地T1、T2、T3等多个阶地共9个样品的OSL测年,但旺草盆地T2阶地上部样品和T3阶地样品测年结果分别为 $1.5\pm 0.1\ \text{ka}$ 和 $11.2\pm 0.7\ \text{ka}$,表明沉积物明显遭受后期改造影响,因此不予采用。其余阶地沉积物OSL测年结果见表1,样品测年位置分别见图2和图3。

表1 绥阳盆地和旺草盆地河流阶地OSL测年结果

Tab. 1 OSL dating results of terrace sediment in Suiyang Basin and Wangcao Basin

样品编号	埋深(m)	U-238(Bg/kg)	Ra-226(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)
SY-T1-1	1.0	100.0±10.1	76.5±1.0	65.0±0.7	601.8±11.3	18	4.9±0.2	40.2±1.3	8.2±0.5
SY-T1-2	2.2	40.2±6.6	22.0±0.5	32.9±0.4	358.7±7.2	15	2.4±0.1	40.2±1.0	16.7±0.8
SY-T1-3	2.7	22.9±5.9	20.4±0.4	31.5±0.4	348.8±6.8	18	2.2±0.1	40.8±1.4	18.8±1.1
SY-T2-1	1.1	36.3±7.0	23.5±0.5	50.8±0.6	430.4±8.2	16	3.0±0.1	316.7±16.7	104.1±7.2
SY-T2-2	3.6	55.6±7.9	32.4±0.6	56.8±0.6	464.9±9.0	32	3.0±0.2	430.0±8.0	144.4±10.7
WC-T1-1	0.5	44.5±8.4	40.3±0.7	68.0±0.7	863.3±16.7	23	4.6±0.2	28.5±0.8	5.5±0.3
WC-T2-2	3.6	55.3±8.4	34.3±0.6	71.7±0.7	729.3±12.8	25	4.2±0.2	186.2±8.4	45.1±3.2

注:数据测试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完成;测年样品埋深为减除松散表土层的稳定沉积层深度。

绥阳盆地T1阶地不同深度的3个OSL年龄依次为 $8.2\pm 0.5\ \text{ka}$ 、 $16.7\pm 0.8\ \text{ka}$ 和 $18.8\pm 1.1\ \text{ka}$,反映了阶地稳定的沉积过程。T2阶地2个OSL年龄分别为 $104.1\pm 7.2\ \text{ka}$ 和 $144.4\pm 10.7\ \text{ka}$,实验测量时样品SY-T2-2释光信号接近饱和,因此年龄值有可能被低估。但根据剖面上稳定的漫滩相沉积特征和区域阶地时代对比,样品SY-T2-2年龄对指示阶地沉积时代仍具参考意义。同时,由于T2阶地顶部沉积物剥蚀严重,阶地沉积的最新年龄(代表河流下切时代)可能小于样品SY-T2-1测定年龄($104.1\pm 7.2\ \text{ka}$)。旺草盆地内T1阶地顶部沉积物埋藏年龄为 $5.5\pm 0.3\ \text{ka}$,T2阶地测定年龄为 $45.1\pm 3.2\ \text{ka}$,表明同级阶地指示的河流下切时代晚于绥阳盆地。

3.2 黔北高原阶地发育动力和时代

河流阶地形成是区域阶段性构造隆升的响应已被大量研究所证实^[12-15,22-25]。而越来越多的研究表明,气候变化也是阶地形成的重要因素,尤其是冰期-间冰期的气候转变常成为驱动阶地形成的主要动力^[26-30]。林树基等通过区域河流阶地沉积特征的定性分析,认为贵州高原河流阶地的发育与多期冰期气候有关,并根据阶地序列划分了平坝冰期、龙塘沟冰期、惠水冰期、赤土冰期等多个冰期^{[31]60-66}。但这仅是缺乏年代学约束的推测。根据绥阳盆地阶地测年结果,T1阶地沉积从 $18.8\pm 1.1\ \text{ka}$ 持续到 $8.2\pm 0.5\ \text{ka}$,跨越了气候相对

寒冷的上更新世末期和温暖的全新世早期。而结合本次阶地测年和前期工作, 贵州绥阳盆地和乌当盆地^[32]T2阶地沉积时代在 177.4 ± 17.0 ka到 87.6 ± 6.8 ka区间, 与气候整体温暖湿润的末次间冰期(MIS 5, 125 ka~75 ka)^[33]基本一致, 而且远早于旺草盆地T2时代(45.1 ± 3.2 ka)。从绥阳盆地和乌当盆地^[32]中上部的洪积相砾石沉积层看, 气候显著影响了阶地的沉积过程。但根据T2阶地较大的时代差异, 加之贵州处于构造活跃的山区, 推测至少在黔北高原, 河流阶地形成的动力更多应来自差异性构造抬升。

阶地的沉积时代指示了古河流的发育和演化过程。表2列出了贵州高原及邻近区域河流阶地的沉积时代。从表中可看出, 由于河流发育位置和所处流域不同, 不同区域阶地的沉积时代差别较大。对于同属长江水系的绥阳盆地、旺草盆地和乌当盆地^[32], T1阶地年龄从5.5 ka到26.7 ka不等, 但整体上与长江T1阶地的发育时代范围(9~31 ka)^[34,35]基本一致。贵州高原南部珠江水系的T1阶地年龄也从约8.3 ka^{[31]88-101}到35.1 ka^{[36]35-50}不等, 表明区域T1阶地发育整体上可能与同期构造运动有关。对于T2阶地沉积时代, 这种区域上的年龄差异更为明显, 尤其是绥阳盆地和乌当盆地, T2阶地不同深度沉积时代从177.4 ka持续到87.6 ka, 记录了黔中台地区T2阶地持续数万年的沉积过程。从表2看, 绥阳盆地和乌当盆地T2阶地的沉积持续时间远大于其他区域, 阶地下部的沉积年龄与湘

表2 贵州高原及邻近区域河流阶地沉积时代

Tab. 2 Ages of river terraces of Guizhou Plateau and neighboring areas

水系	区域	阶地	拔河高度 (m)	基座岩性	年龄 (ka)	平均下切速率 (m/ka)	
长江水系	黔北绥阳盆地	T1	5	碳酸盐岩	8.2±0.5 (OSL) 16.7±0.8 (OSL) 18.8±1.1 (OSL)	0.35	
		T2	12	碳酸盐岩	104.1±7.2 (OSL) 144.4±10.7 (OSL)	0.08	
	黔北旺草盆地	T1	10	碳酸盐岩	5.5±0.3 (OSL)	1.67	
		T2	20	碳酸盐岩	45.1±3.2 (OSL)	0.16	
	黔中乌当盆地 ^[32]	T1	3.6	碎屑岩	26.7±1.8 (OSL) 23.6±1.8 (OSL)	0.11	
		T2	16~18	碎屑岩	87.6±6.8 (OSL) 114.0±11.9 (OSL) 177.4±17.0 (OSL)	0.21	
		T1	4~15	碳酸盐岩	60.95±5.18 (TL)	0.51	
		T2	15~33	碳酸盐岩	104.45±8.88 (TL)	0.24	
	湘江张家界 ^[24]	T3	25~62	碳酸盐岩	117.62±9.99 (TL) 151.05±12.84 (TL) 201.24±17.11 (TL)	0.27 0.21 0.32	
		T4	78~83	碳酸盐岩	347±34 (ESR)	0.11~0.34	
		长江三峡段 ^[34,35]	T1		以碳酸盐岩为主	9~31 (¹⁴ C)	
			T2		以碳酸盐岩为主	56~59 (U-series)	
			T3		以碳酸盐岩为主	110~200 (ESR)	
			T4		以碳酸盐岩为主	300~500 (TL、ESR)	
珠江水系		黔西南岔河 ^{[36]35-50}	T1	3	碳酸盐岩	35.1±3.5 (OSL)	0.08
			T2	110~115	碳酸盐岩	57.4±5.7 (OSL) 61.6±6.2 (OSL)	4.04
	黔南曹渡河 ^{[31]88-101}	T1	5~10	碳酸盐岩	8.268±0.14 (¹⁴ C)	0.6~1.2	

注: 阶地年龄后括号内为测年方法, OSL代表光释光法; TL代表热释光法; ESR代表电子自旋共振法; ¹⁴C代表碳十四法; U-series代表U系法。

西北张家界^[24]和长江^[34-35]T3阶地年代具有可比性,反映了区域构造隆升影响下古河流发育和演化的差异性。

从阶地成因机制分析,导致贵州高原阶地发育时代差异较大的因素可能主要有几方面。首先是区域性差异构造抬升。贵州高原形成和演化受西侧青藏高原隆升影响显著,区调成果显示,贵州高原河流阶地具有明显的自西向东级次减少、级差降低发育趋势,反映了新构造运动中区域的掀斜式、差异性构造抬升^[37]。同时,密集的活动断层也是区域阶地差异发育的重要因素。综合构造因素,从阶地发育特征看,地形和水系也导致了贵州高原阶地沉积时代的差异。黔西南岔河流域和黔北旺草盆地地貌上分别位于贵州高原南北两侧深切峡谷区,地形坡降大,河流冲刷作用强烈,导致阶地发育对构造运动和气候变化响应更为灵敏,其T2时代在45.1~61.6 ka区间,与湘西北张家界地区和长江T2阶地(年龄约60 ka)基本一致。而绥阳盆地和乌当盆地地貌上都位于黔中隆起部位,地形平缓,河流冲蚀相对较弱,因此阶地沉积厚度大、时间长,尤其是T2阶地,时代上部年龄可与其他区域T3对应,反映了该时期黔中台地区持续的夷平作用。

值得说明的是,从上述同一阶地的多个测年结果看(如绥阳盆地T1、乌当盆地T2),阶地年龄应指示其沉积过程。因此,开展阶地沉积时代探讨应建立在其年龄序列基础上,而仅根据零星的测年结果进行对比分析显然具有片面性。例如对比绥阳盆地和乌当盆地T2阶地沉积特征,在阶地上部都存在一套结构相似的洪积相角砾状砾石层,绥阳盆地砾石层之下T2年龄(104.1±7.2 ka)与乌当盆地相应层位年龄(114.0±11.9 ka)基本一致,表明其发育时代具可比性。因此结合剖面观测和测年结果,推测绥阳盆地T2阶地顶部应存在较大剥蚀,故河流下切时代应远晚于该测年结果。所以,表2中的贵州高原及邻近区域阶地年龄差异也受剖面保存及测年部位影响。

3.3 黔北地区河流下切速率

阶地序列代表了区域多期河流下切和地貌夷平过程。表2中根据阶地级序和测年列出了不同阶段河流的平均下切速率。必须指出,理论上阶地最顶部的沉积年龄才可指示河流的下切时代,因此要探讨河流的下切速率,应以顶部沉积年龄为依据。然而,实际工作中受阶地面保存和测年条件限制,很难确保测定的阶地年龄为最顶面的沉积年龄,这也是不同研究获取阶地年龄不同的重要因素。为此,在详细的阶地剖面工作基础上开展河流的下切速率探讨尤为必要。

首先,野外调查显示绥阳盆地和旺草盆地河流阶地的基座均为寒武系中上统娄山关群($C_{2,3}ls$)厚层细晶白云岩。如表2,绥阳盆地T1阶地指示的河流平均下切速率为0.35 m/ka,从剖面特征分析,最新年龄来自稳定的沉积层约1 m深处,因此实际下切速率应稍高于此值。旺草盆地T1阶地指示的下切速率为1.67 m/ka,由于测年位置已接近顶部(埋深约0.5 m),基本可代表河流的实际下切速率。对于T2阶地,虽然根据绥阳盆地剖面顶部测定年龄计算平均下切速率为0.08 m/ka,但由于该剖面上部存在明显的剥蚀现象,因此实际河流的下切速率应远高于此计算结果。旺草盆地T2年龄(45.1±3.2 ka)明显晚于绥阳盆地,因此其指示的河流平均下切速率(0.16 m/ka)也大于绥阳盆地。同时,由于测年位置处于剖面中下部(深度约3.6 m),因此河流实际下切速率也应更大。

尽管受剖面保存影响,根据阶地测年结果计算的河流下切速率与实际下切过程存在差异,但总体上旺草盆地的河流平均下切速率无疑明显高于绥阳盆地。尤其是T1阶地,两个区域计算的河流下切速率基本可代表实际下切过程,而计算结果相差近4倍,表明旺草盆地芙蓉江的下蚀作用明显更为强烈。而且从阶地剖面上,对于同一地层的基座,旺草盆地T1阶地上河流下切出厚度约8 m的白云岩基岩,T2阶地底部也存在明显的粗大砾石层。而绥阳盆地阶地整体上少见基岩出露,而且下部无稳定的砾石层,也表明北部

芙蓉江的下切冲刷作用明显强于南部洋川河。同时,从测年结果看,旺草盆地同级阶地沉积年龄明显晚于绥阳盆地,也反映了差异性构造抬升背景下区域河流的差异侵蚀过程。

3.4 阶地对黔北高原喀斯特地貌演化的指示

研究区位于扬子准地台向川黔-大巴山褶皱带过渡的黔北喀斯特集中地貌区^[1],以厚厚的中上寒武统和下奥陶统白云岩喀斯特为主(图4)。构造上,区域地处黔北北东向构造与南北向紧闭构造交汇的缝合带,应力集中的北部大娄山区表现为强烈的构造抬升,形成了主脊多高出南部高原面600~700 m的大娄山脉^[38]。绥阳盆地和旺草盆地分别位于黔北高原南部台地区和北部大娄山区,其形成和演化对黔北喀斯特地貌演化具有指示意义。

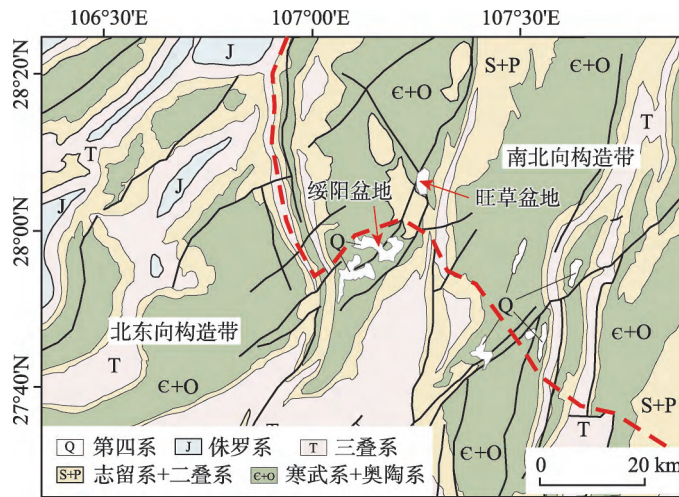


图4 研究区地质构造分布

Fig. 4 Geological map of the study area

分水岭南侧的绥阳盆地,水系多呈北东、北西向发育,自北向南汇入乌江中游。位于大娄山余脉的旺草盆地,芙蓉江则受构造控制自南向北流入乌江下游。绥阳盆地洋川河三级河流阶地以及现代河床都沉积了稳定的漫滩沉积层,河床砾石层不发育,反映了区域阶段性沉积夷平作用。测年结果表明,盆地内T1、T2阶地沉积时间长,河流侵蚀速率低,区域构造稳定。相比而言,旺草盆地芙蓉江的下切侵蚀作用明显强于洋川河。四级阶地都显示强烈的侵蚀特征,T1、T3、T4阶地均切割出厚度较大的坚硬基岩,T2底部则沉积了粗大的砾石层,现代芙蓉江河床裸露的基岩也表明下切侵蚀仍在持续进行。测年结果指示的河流平均下切速率也明显大于绥阳盆地,尤其是近同时代的T1阶地,平均下切速率相差近4倍。同时T2阶地时代远晚于绥阳盆地,也表明了芙蓉江流域更活跃的构造抬升。

综上,对区域喀斯特地貌差异演化作如下总结(图5)。首先,由于地处黔北两组构造发育的缝合带,旺草盆地所在的大娄山区由于强烈的构造抬升形成了高出黔北高原的剥夷面。同时,芙蓉江流域正位于黔中喀斯特台地向黔渝中低山山地(即中国地貌第二和第三级阶梯)^[1]过渡的边缘部位,受南北向紧闭构造控制形成了自北向南强烈的溯源侵蚀。因此,在构造抬升和河流侵蚀综合作用下,大娄山区形成了相对高差较大的深切喀斯特峰丛山地地貌。绥阳盆地所处的乌江中游流域,构造抬升和河流下切强度均不及芙蓉江流域,因而形成了以平坦盆地和宽缓丘丛为主的喀斯特地貌组合。

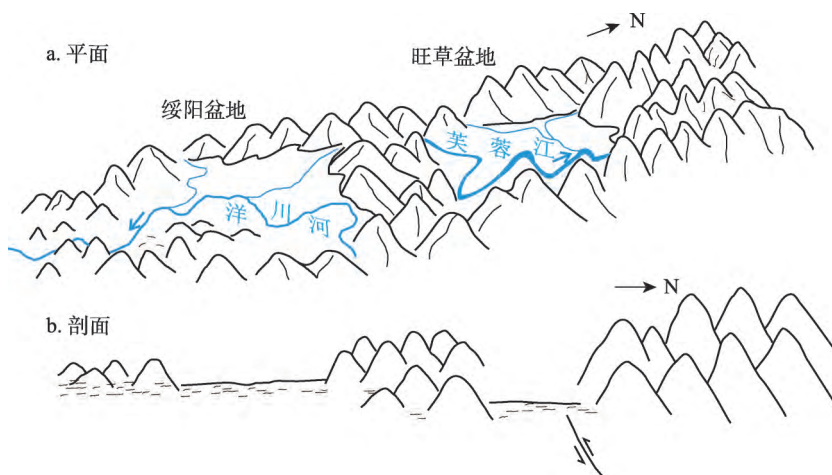


图5 黔北高原喀斯特地貌演化示意

Fig. 5 Sketch map of karst landform evolution in the northern Guizhou Plateau

4 结论

利用光释光 (OSL) 法开展了黔北高原绥阳盆地和旺草盆地 T1、T2 阶地的测年, 结合阶地沉积特征, 分析了区域构造抬升和河流下切侵蚀过程, 以此对黔北高原喀斯特地貌演化进行了探讨, 得到如下结论:

(1) 绥阳盆地 T1 阶地不同深度 OSL 年龄分别为 8.2 ± 0.5 ka、 16.7 ± 0.8 ka 和 18.8 ± 1.1 ka, T2 阶地不同深度年龄分别为 104.1 ± 7.2 ka 和 144.4 ± 10.7 ka; 旺草盆地 T1 阶地顶部年龄为 5.5 ± 0.3 ka, T2 阶地中下部年龄为 45.1 ± 3.2 ka。

(2) 黔北高原河流阶地的形成更多受构造运动控制。差异性构造抬升、地形、水系等因素导致黔中台地区阶地时代相对较老, 尤其是 T2 阶地, 沉积厚度大、时间长, 对区域地貌夷平具有重要意义。

(3) 旺草盆地芙蓉江的下切速率明显高于绥阳盆地洋川河, 尤其是在 T1 阶地指示的最近一期构造抬升中, 两个区域河流平均下切速率相差近 4 倍。T2 阶地形成及河流下切反映了旺草盆地所处的大娄山区构造活动更为活跃。

(4) 区域构造和阶地发育表明, 强烈的构造抬升和河流溯源侵蚀形成了黔北大娄山区深切的喀斯特峰丛地貌。南侧乌江中游流域构造抬升和河流下切强度相对较弱, 因此形成了以平坦盆地和宽缓丘丛为主的喀斯特地貌。

致谢: 本文得到二位匿名评审专家在图表和文字完善、研究成果讨论等方面的修改建议, 以及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在释光年代样品测定上的帮助和支持, 在此对他们付出的时间和精力表示真诚感谢!

参考文献(References)

- [1] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要. 山地学报, 2015, 33(6): 641-648. [Wang Shijie, Zhang Xinfao, Bai Xiaoyong. An outline of karst geomorphology zoning in the karst areas of Southern China. Mountain Research, 2015, 33(6): 641-648.]. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000079.
- [2] 杨怀仁. 贵州中部之地形发育. 地理学报, 1944, 11(0): 1-14. [Yang Huairan. The longitudinal and transverse profiles of the Maotiao River and their bearing on the morphological development of Central Kweichow. Acta Geographica Sinica,

- 1944, 11(0): 1-14.]. DOI: 10.11821/xb194400001.
- [3] 杨明德. 贵州高原喀斯特地貌的结构及演化规律. 见: 中国地理学会地貌专业委员会. 喀斯特地貌与洞穴. 北京: 科学出版社, 1985: 27-28. [Yang Mingde. The structure and evolution of karst geomorphology in Guizhou Plateau. In: Geomorphology Committee, The Geographical Society of China. Karst Geomorphology and Cave. Beijing: Science Press, 1985: 27-28.]
- [4] 聂跃平. 贵州中南部地区喀斯特地貌发育的趋势面分析. 南京大学学报(自然科学版), 1994, 30(1): 154-159. [Nie Yaoping. Analysis to the trend surface of karst landform process in Mid-Southern Guizhou Province. Journal of Nanjing University (Natural Science Edition), 1994, 30(1): 154-159.]. DOI: CNKI: SUN: NJDZ. 0. 1994-01-019.
- [5] 崔之久, 李德文, 冯金良, 等. 覆盖型岩溶、风化壳与岩溶(双层)夷平面. 中国科学(D辑), 2001, 31(6): 510-520. [Cui Zhijiu, Li Dewen, Feng Jinliang, et al. Covered karst, weathering crust and double leveling surfaces of karst planation. Science China (Series D), 2001, 31(6): 510-520.]. DOI: CNKI: SUN: JDXK. 0. 2001-06-009.
- [6] 李德文, 崔之久, 刘耕年. 湘桂黔滇藏红色岩溶风化壳的发育模式. 地理学报, 2002, 57(3): 293-300. [Li Dewen, Cui Zhijiu, Liu Gengnian. A development model of red weathering crust on limestones: An example from Hunan, Guangxi, Guizhou, Yunnan and Tibet. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(3): 293-300.]. DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2002.03.005.
- [7] 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.]. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9250.2005.02.013.
- [8] 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.]. DOI: 10.11821/dlyj201503004.
- [9] 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.]. DOI: 10.11821/dlyj201706016.
- [10] Schanz S A, Montgomery D R, Collins B D, et al. Multiple paths to straths: A review and reassessment of terrace genesis. Geomorphology, 2018, 312: 12-23. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.03.028.
- [11] Maddy D, Veldkamp A, Demir T, et al. Early Pleistocene river terraces of the Gediz River, Turkey: The role of faulting, fracturing, volcanism and travertines in their genesis. Geomorphology, 2020, 358: 107102. doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107102. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107102.
- [12] 吴环环, 吴学文, 李玥, 等. 黄河共和-贵德段河流阶地对青藏高原东北缘晚期隆升的指示. 地质学报, 2019, 93(12): 3239-3248. [Wu Huanhuan, Wu Xuewen, Li Yue, et al. River terraces in the Gonghe-Guide section of the Yellow River: Implications for the late uplift of the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(12): 3239-3248.]. DOI: CNKI: SUN: DZXE. 0. 2019-12-014.
- [13] 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. DOI: 10.1016/j.quascirev.2009.09.003.
- [14] 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. DOI: 10.1007/s11430-016-5037-8.
- [15] Delmas M, Calvet M, Gunnell Y, et al. Terrestrial ^{10}Be and electron spin resonance dating of fluvial terraces quantifies quaternary tectonic uplift gradients in the eastern Pyrenees. Quaternary Science Reviews, 2018, 193: 188-211. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.06.001.
- [16] Lu H H, Cheng L, Wang Z, et al. Latest Quaternary rapid river incision across an inactive fold in the northern Chinese Tian Shan foreland. Quaternary Science Reviews, 2018, 179: 167-181. DOI: 10.1016/j.quascirev.2017.10.017.
- [17] Yang Y, Liu C Q, Woerd J V D, et al. New constraints on the late Quaternary landscape evolution of the eastern Tibetan Plateau from ^{10}Be and ^{26}Al in-situ cosmogenic nuclides. Quaternary Science Reviews, 2019, 220(15): 244-262. DOI: 10.1016/j.quascirev.2019.07.020.
- [18] Su H, Dong M, Hu Z B. Late Miocene birth of the Middle Jinsha River revealed by the fluvial incision rate. Global and Planetary Change, 2019, 183: 103002. doi: 10.1016/j.gloplacha.2019.103002. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.103002.
- [19] 李宗发. 贵州喀斯特地貌分区. 贵州地质, 2011, 28(3): 177-182. [Li Zongfa. Division of karst landform in Guizhou. Guizhou Geology, 2011, 28(3): 177-182.]. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5943.2011.03.005.
- [20] 王旭龙, 卢演涛, 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 regener-

- ative-dose (MAR) protocol. *Seismology and Geology*, 2005, 27(4): 615-623.]. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2005.04.010.
- [21] 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.]. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2011.02.014.
- [22] 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. DOI:10.1016/j.geomorph.2017.06.007.
- [23] Maddy D, Bridgland D, Westaway R. Uplift-driven valley incision and climate-controlled river terrace development in the Thames Valley, UK. *Quaternary International*, 2001, 79(1): 23-36. DOI: 10.1016/s1040-6182(00)00120-8.
- [24] Yang G F, Zhang X J, Tian M Z, et al. Alluvial terrace systems in Zhangjiajie of northwest Hunan, China: Implications for climatic change, tectonic uplift and geomorphic evolution. *Quaternary International*, 2011, 233: 27-39. DOI: 10.1016/j.quaint.2010.05.019.
- [25] Guo X H, Forman S L, Marin L, et al. Assessing tectonic and climatic controls for Late Quaternary fluvial terraces in Guide, Jianzha, and Xunhua Basins along the Yellow River on the northeastern Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 195: 109-121. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.07.005.
- [26] Starkel L. Climatically controlled terraces in uplifting mountain areas. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(20): 2189-2198. DOI:10.1016/S0277-3791(03)00148-3.
- [27] Pan B T, Burbank D, Wang Y X, et al. A 900 k.y. record of strath terrace formation during glacial-interglacial transitions in northwest China. *Geology*, 2003, 31(11): 957-960. DOI: 10.1130/G19685.1.
- [28] Bridgland D, Westaway R. Climatically controlled river terrace staircases: A worldwide Quaternary phenomenon. *Geomorphology*, 2008, 98(3):285-315. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.12.032.
- [29] Hu C S, Liu S C, Hu C Q, et al. Fluvial incision by the Qingyijiang River on the northern fringe of Mt. Huangshan, eastern China: Responses to weakening of the East Asian summer monsoon. *Geomorphology*, 2017, 299: 85-93. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.09.035.
- [30] 刘芬良, 高红山, 李宗盟, 等. 金沙江巧家-蒙姑段的阶地发育与河谷地貌演化. *地理学报*, 2020, 75(5): 1095-1105. [Liu Fenliang, Gao Hongshan, Li Zongmeng, et al. Terraces development and their implications for valley evolution of the Jinsha River from Qiaojia to Menggu. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 1095- 1105.]. DOI: CNKI:SUN:DLXB.0.2020-05-016.
- [31] 林树基, 周启永, 陈佩璞. 贵州的上新生界. 贵阳: 贵州科技出版社, 1994. [Lin Shuji, Zhou Qiyong, Chen Peiyong. Late Cenozoic of Guizhou. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1994.]
- [32] 蒋玺, 陈文奇, 宁凡, 等. 黔中乌当盆地阶地沉积特征及其对盆地演化的指示. *地理研究*, 2020, 39(6): 1242-1254. [Jiang Xi, Chen Wenqi, Ning Fan, et al. Sediment characteristics of terraces in Wudang Basin and their implications on basin evolution. *Geographical Research*, 2020, 39(6): 1242-1254.]. DOI: CNKI:SUN:DLYJ.0.2020-06-002.
- [33] 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.]. DOI: 10.11821/xb201107001.
- [34] Li J J, Xie S Y, Kuang M S. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation. *Geomorphology*, 2001, 41(2-3): 125-135. DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00110-6.
- [35] 向芳, 朱利东, 王成善, 等. 长江三峡阶地的年代对比法及其意义. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 32(2): 162-166. [Xiang Fang, Zhu Lidong, Wang Chengshan, et al. Terrace age correlation and its significance in research of Yangtze Three Gorges, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2005, 32(2): 162-166.]. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9727.2005.02.011.
- [36] 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.]. DOI: CNKI:CDMD:2.1017.218796.
- [37] 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.]
- [38] 李兴中. 晚新生代贵州高原喀斯特地貌演进及其影响因素. *贵州地质*, 2001, 18(1): 29-36. [Li Xingzhong. Evolution of karst geomorphology of Upper-Cenozoic and its influential factors in Guizhou Plateau. *Guizhou Geology*, 2001, 18(1): 29-36.]. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5943.2001.01.007.

River terraces in the northern Guizhou Plateau and their implications for karst landform evolution

JIANG Xi^{1,2}, CHEN Wenqi¹, NING Fan¹, SUN Yuhui¹, AO Jin¹,
LUO Weijun³, KUANG Guangxian⁴

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment of Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 4. Administration for Shuanghe Cave National Geopark, Suiyang 563300, Guizhou, China)

Abstract: Geologists pay much attention to mountainous geomorphic evolution of Guizhou Plateau, because of its core region of karst area in Southwest China. There are two different geomorphic blocks in the northern Guizhou Plateau, which is representative for the karst landforms in Guizhou. River terraces in the karst intermontane basin, as an important step-like landform system in this area, are of great significance for the study of regional geomorphic evolution. In this work, we studied sediment characteristics and optical stimulated luminescence (OSL) dating of the terraces in the Suiyang Basin and the Wangcao Basin in the northern Guizhou Plateau. And then, the terrace ages and associated evolutionary dynamics of Guizhou Plateau have been discussed. Combining the terrace development and geological background, we explored karst landform evolution of northern Guizhou Plateau. It is found that in the Suiyang Basin, the ages of terrace are ranged between 18.8 ka-8.2 ka for T1 and 144.4 ka-104.1 ka for T2. In the Wangcao Basin, the ages of terrace are 5.5 ka for T1 and 45.1 ka for T2. In the Suiyang Basin, the terraces mainly deposited floodplain sandy sediments, while the terraces in the Wangcao Basin mostly cut the thick dolomite bedrock. The dating results show that in the formation stage of terrace T1, the average cutting rate of the Furong River in Wangcao Basin is 1.67 m/ka, significantly greater than that of the Yangchuan River in the Suiyang Basin, which is 0.35 m/ka. According to dating and regional geological correlation, we hold that climate change may affect the sedimentary characteristics of the terraces, but tectonic uplift is the dominant driving force for terrace formation. Different terrace ages are the results of differential uplifts in the Guizhou Plateau. Based on the terrace characteristics and dating, we found that tectonic uplift and river undercutting in the Wangcao Basin were more intensive than those in the Suiyang Basin. Actively driven by differential tectonic uplift and river erosion, the karst deep-cutting gorges and peak clusters landform is formed in the Furong River Basin, a part of Dalou Mountain, while the flat intermontane basins and hill clustered landform has been developed in the middle reaches of Wujiang River Basin.

Keywords: Guizhou Plateau; river terrace; OSL dating; karst; landform evolution