

# 双河洞层状溶洞与区域河流阶地发育耦合关系探析

陈文奇<sup>1,2</sup> 蒋 玺<sup>\*1</sup> 宁 凡<sup>1</sup> 况光显<sup>3</sup> 罗维均<sup>4</sup>

(1.贵州大学 资源与环境工程学院,贵州 贵阳 550025; 2.兰州大学 地质科学与矿产资源学院,甘肃 兰州 730000;

3.贵州绥阳双河洞国家地质公园管理处,贵州 绥阳 563300;

4.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,贵州 贵阳 550081)

**摘 要:** 双河洞岩溶洞穴系统是双河洞国家地质公园的核心景观,溶洞主体发育于寒武系中上统白云岩地层中,层状延伸的4层溶洞反映了洞穴系统的阶段性发育过程。野外调查显示,与双河洞层状溶洞一致,池武溪河谷和芙蓉江上游旺草盆地保存了4级河流阶地,其形成对多层溶洞的发育具有指示意义。本文从双河洞岩溶洞穴系统的成层性出发,分析了区域河流阶地的发育特征,探讨了层状溶洞与区域河流阶地发育的耦合关系。结果表明,在池武溪河谷,多层溶洞和河流阶地具有发育对应关系,而旺草盆地阶地级差明显低于池武溪河谷,反映了同一流域不同构造部位的地貌发育差异。根据阶地和溶洞发育耦合关系分析,开展高精度阶地定年将有助于厘定双河洞多层溶洞系统的阶段性发育时代。

**关键词:** 绥阳; 双河洞国家地质公园; 白云岩溶洞; 阶地

**中图分类号:** P534.63 **文献标识码:** A

贵州是喀斯特公园省,位于黔北绥阳县境内的双河洞国家地质公园有着独具特色的岩溶洞穴系统、峡谷群、水文系统、野生生态资源等,是开展喀斯特研究、科普、旅游、探险的绝佳场所<sup>[1-6]</sup>。双河洞岩溶洞穴系统是国家地质公园的核心景观,据2019年3月27日发布的最新洞穴科考成果,截至2019年3月,双河洞探明长度已达257.366 km,为亚洲第一、世界第五长洞。探洞资料显示,双河洞具有成层发育特点,自下而上大致由4层溶洞通过错综复杂的支洞连通形成庞大的岩溶洞穴系统。前人根据洞穴高程和发育特征,将双河洞的形成和演化划分了古地下河孕育期、石膏洞地下河期、山王洞地下河期、双河水洞期4个阶段,指示了黔北地区在新构造运动中的多期间歇性构造抬升<sup>[1,7]</sup>。

成因上,多层溶洞是地下水流通过溶蚀、冲刷、下切等形成的层状地下空间。与之对应,受构造运动和气候变化影响,地表河流常通过阶段性侵蚀和加积作用,形成一系列阶梯状地貌——阶地<sup>[8]</sup>。因

此,一般认为同一自然地理区域内层状溶洞和河流阶地在发育机理和时效性上具有可对比性<sup>[9-11]</sup>。所以,开展层状溶洞与河流阶地发育的耦合关系分析,成为探讨区域新构造运动和地貌演化的重要方法。例如, YANG 等通过对索溪河流域河流阶地、多层溶洞、层状剥蚀台地等地貌的发育耦合关系研究,探讨了构造抬升和气候变化影响下张家界世界地质公园砂岩峰林的形成和演化<sup>[12]</sup>; 吕金波等分析了房山世界地质公园石花洞系的发育特征,认为石花洞系8层溶洞可与北京西山永定河8级河流阶地进行对比,溶洞与阶地的发育对中国东部新构造隆升具有指示意义<sup>[13]</sup>。

笔者围绕双河洞国家地质公园开展了野外调查,发现在区域芙蓉江流域池武溪河谷和旺草盆地可见多级河流阶地,它们的形成可与双河洞多层岩溶洞穴发育相对应,综合指示了黔北地区多期次的构造抬升与河流下切。为此,本文将从双河洞岩溶洞穴的成层性和区域河流阶地的分布及沉积特征

收稿日期: 2020-05-24

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

作者简介: 陈文奇(1996-),男,在读硕士,研究方向: 裂变径迹热年代学, Email: 15519008284@163.com.

\* 通讯作者: 蒋 玺, Email: xjiang@gzu.edu.cn.

出发,探讨阶地与层状溶洞发育的耦合关系,综合分析双河洞岩溶系统的形成和演化。

### 1 双河洞发育地质背景

双河洞国家地质公园位于黔北绥阳县北部,区域大地构造位于上扬子地块黔北隆起区的凤冈南北向隔槽式褶皱变形区<sup>[14]</sup>。溶洞系统发育于由

NNE 向、NE 向和 NW 向 3 组褶皱断裂带所围成的一个三角形断块中,断块内褶皱、断裂不发育,但岩层节理较发育(图 1(a))。燕山运动中近东西向构造挤压变形使三角形断块成为相对独立的地质体,受新构造运动影响,区域发生多次间歇性构造隆升,构成多层溶洞发育的地质背景<sup>[1-2]</sup>。

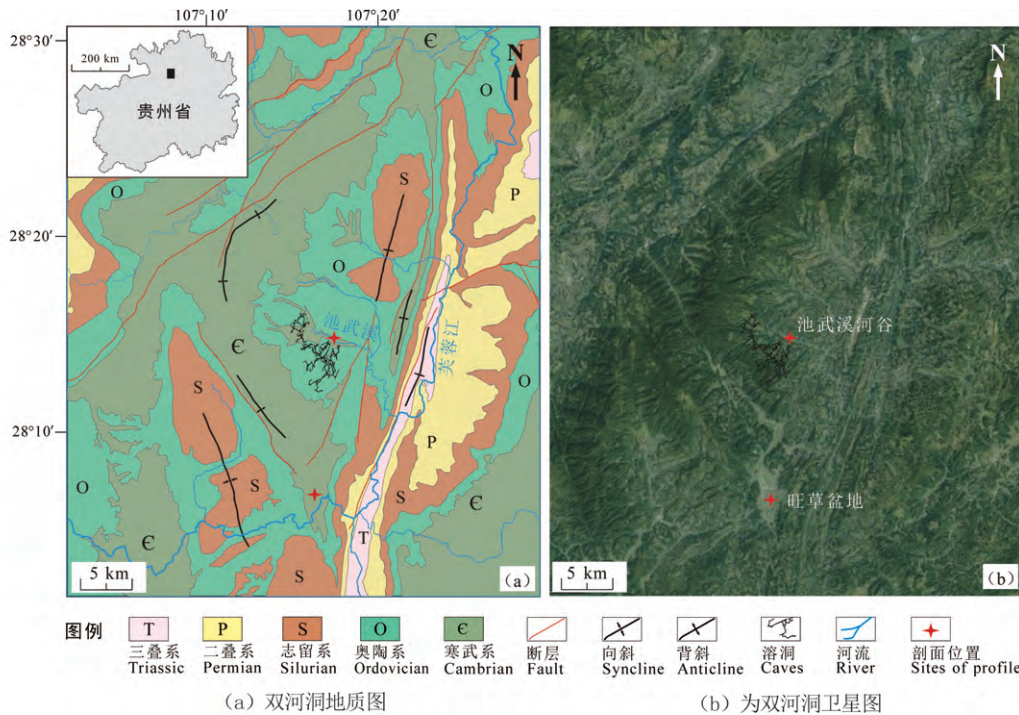


图 1 双河洞区域地质图和卫星图(地质图据双河洞地质公园地质图<sup>[1]</sup>绘制)

Fig.1 Regional geological map and satellite image of Shuanghe cave

双河洞岩溶洞穴系统地处黔北集中的白云岩喀斯特地貌区,区域出露地层从寒武系(ε)到三叠系(T)缺失泥盆系(D)和石炭系(C)。其中寒武系中上统娄山关群(ε<sub>2-3</sub>ls),奥陶系下统桐梓组(O<sub>1</sub>t)、红花园组(O<sub>1</sub>h)厚度超过千米的碳酸盐岩为溶洞发育提供了重要的物质基础,尤其是寒武系中上统娄山关群(ε<sub>2-3</sub>ls)白云岩地层中的硬膏岩、含膏白云岩对溶洞的发育具有十分重要的诱发和促进作用<sup>[15]</sup>。

### 2 溶洞发育特征

双河洞洞穴系统主体发育于寒武系娄山关群(ε<sub>2-3</sub>ls)白云岩和奥陶系桐梓组(O<sub>1</sub>t)白云质灰岩地层中,是目前已探知的全球最长白云岩洞穴。洞区地层产状平缓,倾向由南向西北呈 NE、E、SE 向展布。溶洞发育受地下水流向、地层产状和岩层节理综合控制<sup>[2,15,16]</sup>。

根据探洞资料,双河洞洞穴系统洞道整体上由 SW 向 NE 向倾斜延伸,洞口指向池武溪河谷,组成一个庞大的地下洞穴网络系统。从洞体末端到洞口,洞穴海拔高度从 950 ~ 1 050 m 逐渐降低到 700 m 以下,发育密度和发育参数(长、宽、高)逐渐变大,各层溶洞从基本不连通到彼此连通,洞穴类型也逐渐由旱洞和渗流带洞穴变为水洞和地下水面洞穴<sup>[2]</sup>。

受阶段性构造隆升影响,双河洞具有多层性发育特点。多层溶洞间相对高差达 501 m<sup>[1]</sup>,通过支洞、天坑、竖井等相连,形成复杂的网络状洞穴系统和地表水、地下水交互系统。双河洞洞穴系统垂向上大致可分 4 层,其中最上第 4 层溶洞不发育,溶洞系统主体由其下 3 层洞穴组成。

由于双河洞溶洞系统长度超过 200 km,分布极为复杂,但从洞穴古地下河道发育及其延伸方向的相对高程变化,可推断其成层发育特点。下面仅

以溶洞系统中部的双河水洞-石膏洞-杉林洞一线为例详细描述其多层性。如图 2,首先从整体上,该区域洞穴发育主要有 NE 和 SE 两个方向,洞穴呈西高东低倾斜延伸,反映了构造裂隙和地层产状对岩溶洞穴发育的控制作用。根据古地下河延伸方向和洞道高程变化分析,可看出洞穴明显呈 3 层分布。

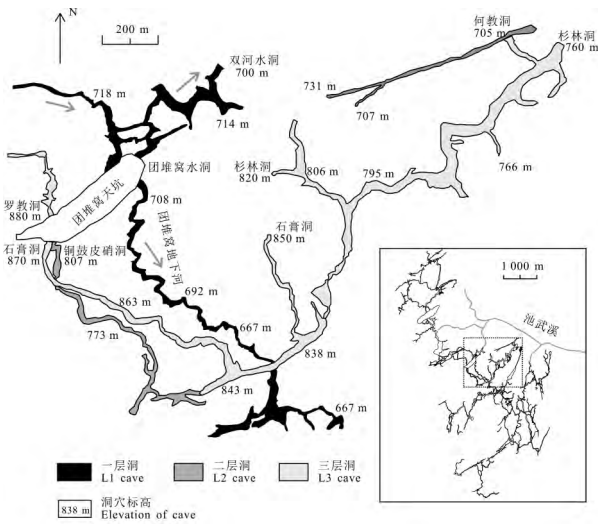


图 2 双河水洞、石膏洞、杉林洞洞穴分布图  
(据李坡等<sup>[1]</sup>绘制)

Fig. 2 Distribution map of Shuangshui cave ,  
Shigao cave and Shanlin cave

双河水洞和团堆窝地下河构成第一层溶洞(L1)。双河水洞洞口见于池武溪上游(图 3(a)),洞穴由西向东标高从约 720 m 降低到洞口的 700 m。团堆窝地下河北接团堆窝天坑(图 3(b)),洞穴由北西向南东延伸,标高由团堆窝天坑处 708 m 逐渐降低到 667 m 并与红罩子洞东北支相连。L1 层洞穴常年充水,为池武溪主要补给水源。上层洞穴通过团堆窝天坑和竖井等与 L1 层洞连通并完成水流补给。

第二层溶洞(L2)发育程度稍低于上下洞穴,区内主要由铜鼓皮硝洞和何教洞组成。西侧铜鼓皮硝洞洞口位于团堆窝天坑,标高 807 m,洞穴延伸与团堆窝地下河同向,南端通过竖井与上层石膏洞和下层团堆窝地下河相连。东侧何教洞洞口见于池武溪河谷(图 3(c)),洞穴自西向东倾斜,标高从约 730 m 降低到洞口 705 m,虽然其绝对高程与西侧双河水洞相当,但从溶洞群自西向东倾斜延伸的特点,以及洞口与池武溪高差(高于河面约

20 m)分析,其为第二层溶洞无疑。何教洞在距洞口约 300 m 处有竖井与上层杉林洞相连。

第三层溶洞(L3)由杉林洞、石膏洞、罗教洞组成。杉林洞主洞口见于池武溪河谷(图 3(c)),标高 760 m,由北向南西洞穴标高增大,到双河水洞南部峡谷的另一洞口标高达到 820 m。与何教洞类似,虽然杉林洞洞口段绝对高程低于铜鼓皮硝洞(L2),但从洞穴的延伸和倾斜,以及与临近的何教洞分析(图 3(c)),其应为三层洞穴。石膏洞也有两个洞口,西侧见于团堆窝天坑(图 3(d))标高 870 m,东侧见于双河水洞南部峡谷(图 3(e)),与杉林洞口隔谷相望,标高 850 m。从高到低,石膏洞先为北西-南东向延伸,然后转而南西-北东向发育并与杉林洞相连。罗教洞洞口见于团堆窝天坑(图 3(d)),与石膏洞隔谷相望,洞口标高 880 m。从洞穴发育形态和展布特征分析,杉林洞、石膏洞、罗教洞主洞道原为同一洞穴,后被团堆窝天坑和峡谷切割分开。

### 3 区域河流阶地

#### 3.1 池武溪河谷阶地

双河洞岩溶洞穴系统地处长江水系乌江一级支流芙蓉江上游流域。区内池武溪从洞区发源,自西向东流经桂花村、公馆槽等地后,与北侧猛溪沟汇合折为近由北向南于温泉镇南汇入芙蓉江。

池武溪河谷为一狭长谷地,由于地表径流较强,上游区域阶地发育及保存较差。池武溪在公馆槽以北与猛溪沟汇合后,河谷变得相对宽缓,断续可见四级河谷阶地(图 4)。

T1 阶地总体保存较好,位于池武溪两侧沿岸,标高从下游约 640 m 到上游约 700 m,拔河高度 4 ~ 10 m(图 4(a))。T1 阶地为基座阶地,基底主要为碳酸盐岩,下游部分区域为奥陶系湄潭组(O<sub>1</sub>m)页岩、粉砂岩。T1 阶地面为山区难得的大片平地,因此土地利用程度高,基本未见原始的阶地沉积物,阶地面上深灰褐色耕植土中可见磨圆的砾石。

T2、T3 阶地一般见于池武溪中下游河谷北(东)侧,与南侧 L2、L3 层溶洞基本对应。T2 阶地为 T1 阶地外侧断续平台,标高约 660 ~ 710 m,拔河高度约 25 m(图 4(b)、图 4(c)),为基座阶地。阶地未见完整的沉积物剖面,但在部分区域可见磨圆较好的砾石,砾石主要为碳酸盐岩,砾径从数厘米到数十厘米不等,最大者见约 40 cm。

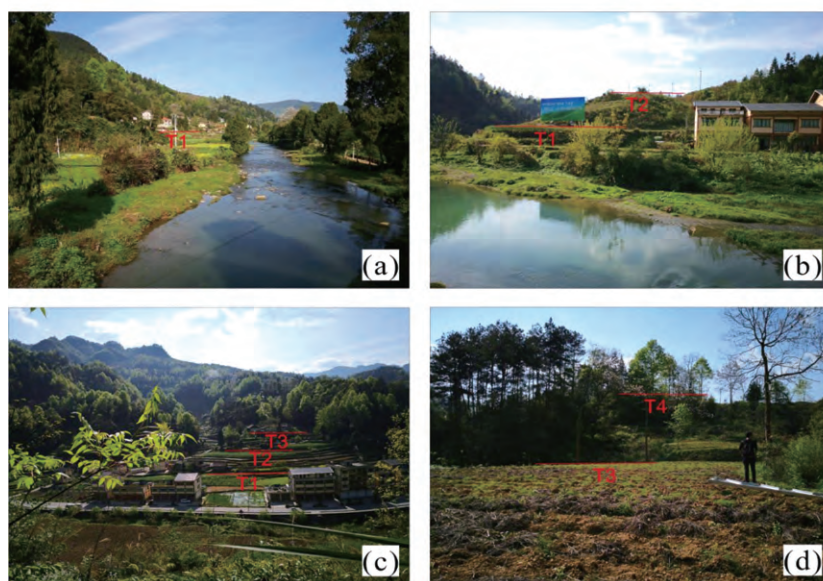




(a) 双河水洞; (b) 团堆窝天坑; (c) 杉林洞、何教洞; (d) 罗教洞; (e) 双河水洞南部峡谷。

图 3 多层溶洞照片

Fig.3 Photographs of multi-layer karst caves



(a) 池武溪河谷一级阶地; (b) 池武溪河谷一、二级阶地; (c) 池武溪河谷一、二、三级阶地; (d) 池武溪河谷三、四级阶地。

图 4 池武溪河谷阶地野外照片

Fig.4 Photographs of terraces in Chiwuxi valley

T3 阶地由谷地边缘一系列独立的小山头组成,标高从 690 ~750 m 不等,拔河高度约 50 m(图 4(c)、图 4(d)),为基座阶地,阶地面风化残积物中偶见磨圆砾石。

河谷 T4 阶地整体保存最差,基本未见相关的河流沉积物,仅从部分山脊上的平缓部位依稀可辨,拔河高度推测约 80 m 以上(图 4(d))。

总体上,池武溪河谷阶地发育及保存较差,基本未见完整的阶地沉积剖面,但从地貌上仍可分辨阶地级次。各级阶地从分布和高度上与溶洞系统发育具有一定的对应关系。

### 3.2 旺草盆地阶地

旺草盆地位于芙蓉江上游,双河洞南约 15 km,

与双河洞溶洞区同为芙蓉江流域。盆地南北长约 5 km,东西宽约 3 km,芙蓉江从盆地南部蜿蜒流过。由于地处山间盆地,阶地发育和保存更为完整。盆地内可见级次清晰的四级河流阶地(图 5、图 6(a))。

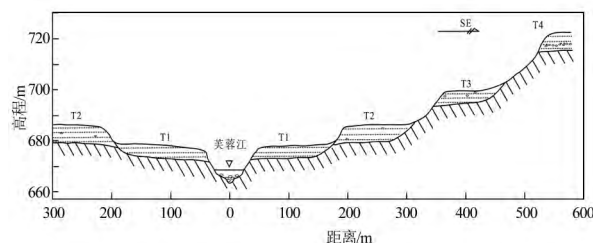


图 5 旺草盆地阶地剖面图

Fig.5 Profile of terraces in Wangcao basin



(a) 旺草盆地一、二、三、四级阶地; (b) 旺草盆地一、二级阶地; (c) 旺草盆地二、三级阶地;  
(d) 旺草盆地四级阶地桃树湾开挖砾石层。

图 6 旺草盆地阶地野外照片

Fig.6 Photographs of terraces in Wangcao basin

T1 阶地主要分布于芙蓉江及盆地内支流沿岸,形成盆地内广阔的第一平台,阶地标高约 680 m,拔河高度 10~12 m(图 6(b))。T1 阶地为基座阶地,基底为寒武系娄山关群( $\epsilon_{2-3}$ ls)白云岩,基岩风化程度低。阶地面的耕植土中多见大小不等的砾石,在官银滩附近开挖虾塘工地中,可见

河漫滩相的砂质沉积物。

T2 阶地在盆地周边基本为连续平地,盆地内则被切割为一系列平台,阶地标高约 690 m,拔河高度约 20 m(图 6(b)、图 6(c))。T2 阶地为堆积阶地,自然剖面强风化为土黄色,强风化的阶地沉积物中可见细小的磨圆砾石和砂粒,砾石以碳酸盐



岩为主,砂粒则主要是粗细不等的石英碎屑。石英碎屑具有较好的磨圆度。

T3阶地断续见于盆地边缘,由一系列平顶小山丘组成,阶地标高约700 m,拔河高度约30 m(图6(c))。T3阶地为基座阶地,基底为寒武系娄山关群( $\epsilon_{2-3}$ ls)白云岩,阶地沉积物与T2阶地类似。在盆地北侧,见一层厚度约20 cm的砾石层,砾石含量约40%,以碳酸盐岩为主,砾径小于10 cm,磨圆中等。

T4阶地主要由芙蓉江右岸的一系列孤立小山头组成,地貌上依稀可辨。阶地标高大约720 m,拔河高度约50 m。在盆地东南端桃树湾见一工程开挖揭露较好的剖面(图6(d))。剖面除白云岩基底外,自下而上可见3个沉积层。最下部为厚约

1.5 m的砂泥质沉积物,很少见砾石。中间则为厚约0.5 m的砾石层,砾石含量约60%,以碳酸盐岩和砂岩为主,砾石呈次棱角状,砾径数厘米到数十厘米不等,具粒序结构,自下往上粒度减小,含量降低。砾石层上为厚约2 m的砂泥质层,沉积层底部含砾石与下层逐渐过渡,中部偶见中等磨圆的砾石,其余多为砂泥质沉积物,沉积物特征与T2阶地类似。

## 4 讨论

### 4.1 溶洞与阶地耦合关系分析

层状溶洞和河流阶地都是间歇性地壳隆升保留下来的层状地貌,因此其发育时间和级次上都具有可比性。双河洞层状溶洞与区域河流阶地发育对比见表1。

表1 双河洞分层与区域阶地对应表

Tab.1 Feature table of multi-layer caves and fluvial terraces

双河洞			池武溪河谷阶地			旺草盆地阶地		
分层	标高/ m	拔河高度/ m	分层	标高/ m	拔河高度/ m	分层	标高/ m	拔河高度/ m
L4	—	—	T4	—	—	T4	720	~50
L3	760(杉林洞)	~80	T3	690~750	~50	T3	700	~30
L2	705(何教洞)	~25	T2	660~710	~25	T2	690	~20
L1	700(水洞)	0	T1	640~700	4~10	T1	680	10~12

注:—表示由于溶洞和阶地发育较差或因自身条件限制而无法测得准确的标高;洞穴标高指洞口处高程。

L1层的充水溶洞为池武溪主要补给水源,洞穴最低标高对应当前池武溪河床。但L1层溶洞洞体宽阔,洞顶高出水位线10 m以上(图3(a)),所以从其发育看,L1层溶洞应与T1阶地对应,洞穴主体应发育于T1阶地形成阶段,且当前区域正处于抬升下蚀期。在池武溪河谷,T1阶地从上游向下游,阶地拔河高度逐渐增大,反映了河流下切中随水流汇集侵蚀作用加剧。旺草盆地T1阶地拔河高度明显高于池武溪河谷,也反映了当前阶段芙蓉江干流强烈的河流下切侵蚀作用。

L2层溶洞洞口拔河高度约25 m,洞口呈锁孔状,洞高超过15 m(图3(c)),所以洞穴形成可对应于池武溪河谷T2阶地(拔河高度约25 m)。本阶段在池武溪流域,溶洞形成规模较小,河谷阶地保存也较差。但在旺草盆地,T2阶地与T1阶地相似,发育及保存都较好,形成了厚度超过10 m的堆积阶地沉积层。旺草盆地T2阶地与T1阶地级差

(8~10 m)总体低于池武溪河谷,且主要为堆积阶地,反映了此阶段盆地已基本形成,芙蓉江在盆地内以加积作用为主。

L3层溶洞规模较大,而对应的T3阶地保存很差,说明在此阶段地表和地下径流都较强,利于洞穴冲刷形成,但河流沉积作用较弱。前人在与L3层溶洞对应的峡谷内,也发现了古河流强烈冲刷形成的砾石层<sup>[1]</sup>。旺草盆地的T3阶地保存也不及T2和T1阶地,但在盆地周边仍可见间断的水平阶地面,一方面表明阶地遭受了后期的强烈侵蚀和风化,另一方面说明本阶段盆地已见雏形,但尚未充分夷平,不利于水流汇集和阶地广泛形成。

L4层溶洞发育程度低,仅在区域金钟山南麓海拔1 000 m以上发现一些小型的竖井和斜洞<sup>[1]</sup>,说明早期古地下河尚未充分形成和贯通。而此时古地表河流已基本成型,在区域最高一级地形夷平面上形成一系列峡谷<sup>[1]</sup>与池武溪河谷T4阶地对

应。旺草盆地内 T4 阶地也保存较差,从仅见的一个剖面(图 6(d))看,此时芙蓉江水流总体比较稳定,剖面中部的角砾状沉积层反映了山区河流受季节性水力变化影响的沉积特征。

总体上,随区域间歇性构造抬升,池武溪河谷由于古河流坡降大、径流强,层状溶洞和阶地发育级差大,并受间歇时间和古气候影响,形成了发育程度不等的多层溶洞和河谷阶地。旺草盆地在构造上位于区域 NNE 和 NW 向 2 组断裂褶皱带的交汇部位(图 1),岩层变形和破碎导致风化作用加剧,利于负地形形成和水流汇集,因此在 T4 阶地形成阶段就沉积了稳定的河流沉积层。经过芙蓉江的长期侵蚀和山前沉积作用,山间盆地逐渐形成和夷平,因此阶地整体保存较好,级差也明显低于池武溪河谷。到 T1 和 T2 阶地阶段,盆地基本形成,水流汇集沉积稳定,在盆地内形成了广阔平坦的阶地漫滩相沉积层。

#### 4.2 溶洞发育时代研究展望

近 10 年来,前人围绕双河洞国家地质公园开展了大量科学研究,从洞穴发育特征、水化学、溶洞成因与古环境演化等方面开展了大量卓有成效的工作<sup>[1-6,15-19]</sup>。随着国家地质公园的深入建设,双河洞岩溶洞穴系统的发育时代成为亟待解决的科学问题。李坡等测定了洞穴石笋的 U 系年龄,指示其生长时间从 198 kaBP 延续到 36 kaBP<sup>[1]</sup>,但由于石笋生长通常滞后于溶洞形成,且时间连续性上具有不确定性,所以难以准确指示多层溶洞的阶段性发育时代。

通过本文对层状溶洞发育与区域阶地形成的耦合关系分析,可看出阶地的形成时代对双河洞白云岩洞穴的阶段性发育时代具有指示意义。研究表明,贵州主要河谷 T1 阶地的沉积时代为全新世<sup>[14]</sup>,T2—T5 阶地则主要沉积于中—晚更新世<sup>[20]</sup>。但由于贵州的新构造运动隆升具有显著的掀斜式特征,这些定性的时代探讨并不足以限定双河洞发育的准确时代。目前,阶地定年已发展成为十分成熟的第四纪年代学研究方法<sup>[21-24]</sup>,因此,要准确厘定双河洞岩溶洞穴系统的发育时代,开展高精度的阶地定年将是一种有效方法。

## 5 结论

根据野外调查和观测结果,本文对双河洞层状溶洞和区域河流阶地发育的耦合关系进行了探讨,

得出如下结论:

(1) 双河洞白云岩洞穴系统具有显著的成层性,多层溶洞总体呈西高东低向池武溪河谷倾斜延伸,溶洞分层与池武溪河谷阶地发育具有一定的对应关系。

(2) 在区域芙蓉江上游旺草盆地,四级河流阶地可与池武溪河谷阶地及双河洞层状溶洞对应,由于地处断裂褶皱交汇带,阶地发育和保存更好,级差总体小于多层溶洞和池武溪河谷阶地,反映了芙蓉江对旺草山间盆地形成的重要驱动作用。

(3) 阶地和溶洞发育的耦合关系分析表明,阶地的形成与区域溶洞的阶段性发育具有时效可对比性,可综合指示区域间歇性构造抬升与河流下切,开展高精度阶地定年可望用于厘定双河洞岩溶洞穴系统的发育时代。

#### 参考文献:

- [1]李坡,贺卫,钱治,等. 双河洞地质公园研究[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2008.
- [2]韦跃龙,罗书文,陈伟海,等. 贵州绥阳地质公园白云岩喀斯特景观特征及其形成演化分析[J]. 地球学报, 2018, 39(3): 365-383.
- [3]周忠发,张结,殷超,等. 岩溶洞穴地下水水化学特征及其地球化学敏感性比较: 以贵州双河洞和织金洞为例[J]. 水利水电技术, 2017, 48(6): 98-105.
- [4]张结,周忠发,曹明达,等. 双河洞小流域主要离子化学特征及其来源分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 327-333.
- [5]高占东,JEAN B,赵欣楠,等. 双河洞中大熊猫—剑齿象动物群化石的发现[J]. 中国岩溶, 2016, 35(4): 402-406.
- [6]戴素娟,郭琳,刘少伟,等. 双河洞放线菌多样性和抗菌活性的初步研究: 以阴河洞和杉林洞为例[J]. 中国岩溶, 2015, 34(6): 624-630.
- [7]贺卫,李坡,车家骥,等. 双河洞穴系统主要形成特征及演化[J]. 贵州科学, 2001, 19(1): 71-76.
- [8]严钦尚,曾昭璇. 地貌学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [9]潘凤英. 对宜兴南部溶洞与阶地对比问题的探讨[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 1986(4): 84-90.
- [10]王健,陈琢,张梅平,等. 河北省天桂山典型溶洞景观成因类型[J]. 山地学报, 2011, 29(6): 188-194.
- [11]付顺,阚瑗珂,马德芹,等. 大巴山国家地质公园岩溶景观空间分层结构及受新构造运动的影响[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 396-406.
- [12]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 [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64: 671-683.

- [13] 吕金波, 卢耀如, 郑桂森, 等. 北京西山岩溶洞系的形成及其与新构造运动的关系[J]. 地质通报, 2010, 29(4): 502-509.
- [14] 贵州省地质调查院. 贵州省区域地质志(下册)[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- [15] 蒋玺, 龙克树, 刘纯军, 等. 贵州绥阳双河洞白云岩溶洞群成因研究[J]. 地质论评, 2018, 64(3): 674-684.
- [16] 陈建庚, 张英骏. 贵州绥阳双河洞系的发育与成因探讨[J]. 中国岩溶, 1994, 13(3): 247-255.
- [17] 曹明达, 周忠发, 张结, 等. 贵州绥阳阴河洞洞穴壶穴的演化过程[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 2010-2019.
- [18] 杨振华, 李坡, 吴克华. 岩溶洞穴古河漫滩沉积物特征及其沉积环境演变: 以山王洞中段为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35(4): 394-401.
- [19] 曹明达, 周忠发, 张结, 等. 白云岩喀斯特洞穴水理化性质特征及其环境指示研究: 以绥阳双河洞为例[J]. 地球化学, 2017, 46(1): 87-97.
- [20] 林树基, 周启永, 陈佩琰. 贵州的上新生界[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1994.
- [21] 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[J]. Quaternary International, 2017, 440: 137-146.
- [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 [J]. Geomorphology, 2017, 295: 323-336.
- [23] 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 [J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60(3): 413-427.
- [24] 赵希涛, 贾丽云, 胡道功. 内蒙河套地区黄河阶地与新近纪砾石层的发现及其对黄河发育、中国河流古老性与河湖共存论的意义[J]. 地质学报, 2018, 92(4): 845-886.

(责任编辑: 于慧梅)

## Analysis of Coupling Relationship Between Multi-layer Caves in Shuanghe Cave National Geopark and Regional Fluvial Terraces

CHEN Wenqi<sup>1,2</sup>, JIANG Xi<sup>\*1</sup>, NING Fan<sup>1</sup>, KUANG Guangxian<sup>3</sup>, LUO Weijun<sup>4</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. School of Earth Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Administration for Shuanghe Cave National Geopark, Suiyang 563300, China; 4. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** Shuanghe cave is the core landscape of Shuanghe Cave National Geopark, which is developed in the dolomite strata of Middle-upper Cambrian. Horizontal four-storey caves extending from west to east reflect the episodic evolution of the karst cave system. Through field investigation it is found that there are four fluvial terraces both in Chiwuxi valley and Wangcao basin of upper Furong River, which commendably correspond to the four-storey caves in Shuanghe cave. These multi-layer caves and terraces directly indicate regional staggered tectonic uplift. In this paper, we analyzed the stratification of Shuanghe cave system and the distribution of the fluvial terraces. And then we discussed the coupling relationship of the landform development between multi-layer karst caves and fluvial terraces. The results show that in Chiwuxi valley, there is a good development correspondence between the four-storey caves and the fluvial terraces. But in Wangcao basin, the terraces gradients are significantly lower than the terraces in Chiwuxi Valley, which reflect a different geomorphological development process in same basin. According to the coupling relationship between the fluvial terraces and the multi-layer karst caves, we hold that high-precision terraces dating will be an effective way to determine the forming time of multi-layer caves in Shuanghe cave.

**Key words:** Suiyang; Shuanghe Cave National Geopark; dolostone cave; fluvial terrace