

张家界砂岩地貌形成时代:来自阶地与溶洞对比的证据

平亚敏¹⁾, 杨桂芳¹⁾, 张绪教¹⁾, 田明中¹⁾, 陈安泽²⁾, 葛之亮¹⁾, 倪志云¹⁾, 杨振¹⁾

1) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083;

2) 中国地质科学院, 北京 100037

内容提要: 张家界以其独特罕见的石英砂岩峰林地貌闻名于世, 一直是地貌学家、地质学家们关注的焦点, 但关于其形成年代问题尚显薄弱, 一直缺乏系统深入的研究。本文对索溪流域不同层状地貌进行了地貌学、沉积学和年代学综合研究。研究结果表明, 索溪河谷普遍发育三级阶地, T_4 很少发育, 主要表现为河流两侧位置较高的古宽谷或剥蚀面。岩溶洞穴黄龙洞从上往下可分为4层, 最高层发现的砾石层表明, 该砾石为外源砂岩, 至少形成于中更新世暖湿环境下。张家界砂岩峰林可明显分为四个主要层次, 与索溪中下游的河流阶地、黄龙洞穴在地貌形态上具有良好的对比关系, 据此可推断张家界砂岩峰林最早形成于中更新世。这种青年到壮年期地貌, 总体上相对稳定。在今后的地质公园建设中, 应注意旅游资源的科学合理利用与保护工作, 采取科学有序的方式进行开发, 并要做好地貌景观资源的科学保护工作。

关键词: 砂岩峰林; 形成时代; 河流阶地; 岩溶洞穴; 张家界

张家界砂岩峰林世界地质公园位于湖南省西北部的澧水之源, 武陵山脉腹地, 公园面积达 398 km²。地理位置为: 29°13'18"~29°27'27"N, 110°18'~110°41'15"E, 海拔 300~1300m。该地质公园以“山峻、峰奇、水秀、峡幽、洞美”而闻名于世, 拥有世界上独一无二的砂岩峰林地貌, 其保存了一套完整的微地貌形态, 具备完善的砂岩峰林形成模式, 具有很好的科学研究和地质美学欣赏价值。上世纪 80 年代以来, 众多学者对张家界峰林地貌进行了调查研究, 在成因机制、演化过程及发育特征等方面取得了一些进展(邓美成, 1989; 陈长明等, 1994; 周中民, 1994; 周学军等, 2004; 唐云松等, 2005; 黄林燕等, 2006)。例如, 周中民(1994)、唐云松等(2005)提出流水沿构造破裂面的节理侵蚀及重力崩塌作用造就了石英砂岩峰林地貌的基本形态; 黄林燕等(2006)认为较高的 SiO₂ 含量及独特的砂状结构有利于张家界砂岩峰林景观的长久保存; 邓美成(1989)和陈长明等(1994)、周学军等(2004)阐释了张家界砂岩峰林可划分为石柱、石峰、石堡等不同形态, 其发育是受大地构造条件、新构造运动、岩性组合等内外环

境综合作用的产物。然而对比喀斯特峰林而言, 砂岩峰林地貌研究尚显薄弱。砂岩峰林是一种剥蚀地貌, 可供测年的资料很少, 其形成时代一直缺少系统的研究, 张家界砂岩峰林地貌形成过程亦有待更多的证据。受张家界世界地质公园专项基金的资助, 笔者及所在的项目组成员于 2008 年 10 月和 2009 年 5 月对地质公园内的不同地貌类型进行了详细的调查, 旨在为砂岩峰林地貌形成时代及过程提供一定的科学依据。

以往研究表明, 河流阶地和岩溶洞穴在地貌演化、气候和环境变化等方面始终占有重要的位置(Bridgland, 2000; Li et al., 2001; Pan et al., 2003; Piccini et al., 2003; Bridgland et al., 2008)。而索溪中下游发育有一系列河流阶地和岩溶洞穴, 这无疑可以为砂岩峰林地貌的研究提供重要的证据(Yang et al., 2010)。因此本文在综合前人研究的基础上, 详细剖析索溪河流阶地发育特征, 结合典型洞穴系统——黄龙洞及砂岩峰林不同层状地貌之间的内在联系, 从沉积学、地貌学和年代学角度综合探讨张家界砂岩峰林地貌形成时代。

注: 本文为张家界世界地质公园专项“张家界世界地质公园砂岩峰林地貌形成时代及地壳稳定性研究”资助成果。

收稿日期: 2010-07-23; 改回日期: 2010-12-12; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 平亚敏, 女, 1984 年生, 硕士研究生。从事地貌与地质遗迹规划研究。Email: pingyaminer19841113@126.com。通讯作者: 杨桂芳, 女, 1975 年生。副教授。主要从事地貌学与第四纪环境变化相关的教学和研究。Email: yangcugb@gmail.com 或 yangguifang@cugb.edu.cn。

1 研究区概况及研究方法

张家界世界地质公园地处云贵高原东北边缘的武陵山区,区内以中山、低山为主,总地势西北高、东南低。公园西北部昆仑峰为最高,海拔 1282m,最低处位于公园东北部的吴家峪,海拔 230m。地貌类型以石英砂岩峰林地貌为主,次为喀斯特地貌、侵蚀构造地貌、河谷堆积地貌(湖南省环境地质监测总站^①)。张家界砂岩峰林地貌主要发育于泥盆系云台观组和黄家磴组,园内峰林面积达 85.9km²,区内的砂岩峰林可明显分为四个层次,主要分布于索溪的上游。公园内岩溶地貌发育在公园天子山和喻家咀向斜核部二叠系、三叠系碳酸盐岩分布区,以黄龙洞最为典型,洞穴内可分为四层。张家界武陵源区主要水系为索水(属澧水二级支流),流域面积 534 km²,全长 68.3km,在水绕四门之上称为金鞭溪,至索溪峪后称为索溪,途径喻家咀、三官寺、抵江垭而入澧水(图 1)。索溪河谷中有河流阶地发育,普遍发育有三级阶地,T₄阶地较少,表现为河流两侧位置较高的古宽谷或剥蚀面。

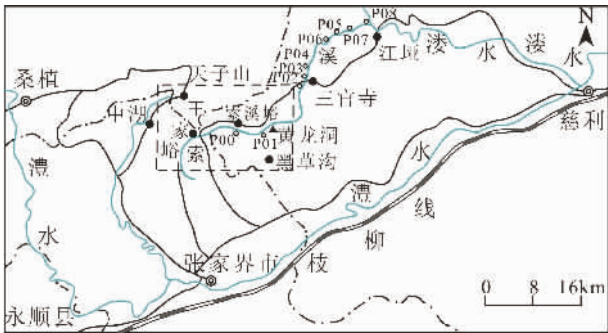


图 1 研究区交通位置图及典型洞穴黄龙洞和阶地分布示意图

Fig. 1 Map of the study area showing typical karst cave, Huanglong Cave, and terraces localities along the Suoxi River

野外工作除了重点考察张家界世界地质公园外,沿着索溪流域一直追溯到江垭入澧水处(图 1),借助地形图、卫星遥感影像图,对索溪两岸的阶地、洞穴和砂岩峰林地貌进行了详细考察。对各级阶地的阶地面和阶地基面海拔进行了测量,对阶地沉积物特征进行了详细描述和砾石统计工作。阶地沉积物年代学样品采集均是在避光的条件下进行的,采集的样品密封在干净的铁罐内,并用黑色塑料袋封装包裹。此外,我们还对黄龙洞进行了分层详细描

述,并对最高层的砾石层进行了沉积学分析和年代学样品采集。本文拟采用电子自旋共振法(ESR)及热释光(TL)技术对河流阶地以及黄龙洞最高层砾石层进行测年,ESR 样品的处理、测试和分析均由中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成,TL 样品的处理、测试和分析均由中国地震局地壳应力所完成。

2 砂岩峰林地貌特征

张家界世界地质公园砂岩峰林地貌是在特定的地质构造部位、特定的新构造运动和外力作用下形成的,代表了地球上一种独特的地貌形态和自然地理特征,为世界所罕见。砂岩峰林地貌主要发育于索溪流域的上游天子山周围一带,及索溪河谷以南的王家峪至黑草沟呈东西方向条带状展布(图 1)。受控于构造特征、流水侵蚀和重力崩塌作用的影响,砂岩峰林地貌形态具有明显的层次性和规律性,可明显分为四个主要层次。

其中最高一层为与泥盆系砂岩顶面齐平,海拔高度在 800~1000 m 左右,主要为一些切割较弱的砂岩峰林组成的平台;在 700~750 m 之间形成第二个砂岩平台,可能是由上部薄层粉砂岩坍塌而成;在海拔 500~550 m 左右,形成砂岩峰林的第三层,主要是流水侵蚀切割和重力崩塌共同作用的结果;第四层则表现为一些坍塌的残林地貌,分布在河谷底两侧(图 2)。

3 河流阶地级序及发育特征

在张家界索溪流域阶地考察中,先后对该流域各段进行了阶地测量,野外考察发现从索溪上游到下游阶地级数逐渐增多,阶地面非常平坦宽阔。索

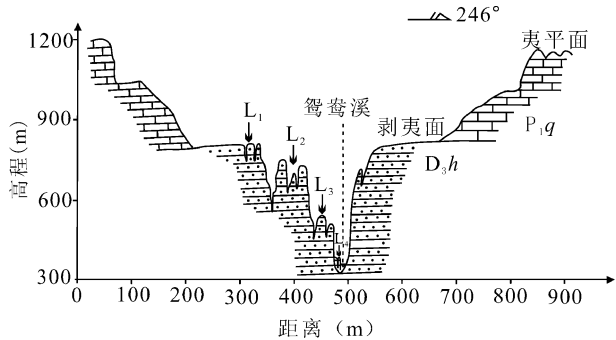


图 2 砂岩峰林地貌特征图

Fig. 2 Development features of sandstone peak forest landform

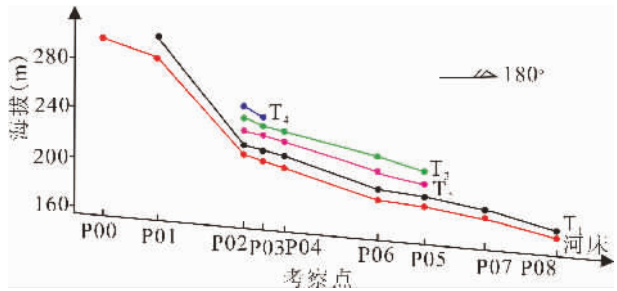


图 3 索溪河流阶地相图

Fig. 3 Longitudinal profile of fluvial terraces in the Suoxi River

溪河流阶地在纵剖面上看,上游不发育河流阶地,中游到下游河流阶地级数开始增多,索溪普遍发育三级阶地, T_4 较少,只有在三官寺、马湾段零星分布 (P02 和 P03),表现为河流两侧位置较高的古宽谷或剥蚀面 (图 3)。三级阶地的沉积结构基本相似,河流冲积物二元结构明显,上层为河漫滩相的较细的粉砂质粘土,砾石较小,下层为河床相粗大的砾石,砾石磨圆度较好,定向性好,主要为石英砂岩。靠近江垭附近阶地高差减小,一般只发育一级阶地,阶地河拔为 5~9m。典型河段的阶地特征自上游而下描述如下:

3.1 邓家坪附近段 (P01)

从河床往两岸,依次发育河漫滩和一级河流阶地 (图 4a),阶地主要特征为:阶地为堆积阶地,谷坡较陡,河漫滩高程约 282m,阶面由冲积的砾石层组成,砾石层出露的厚度不一,岩性与索溪河现代河床砾石特征一致,为石英砂岩,一级阶地较平坦,其上有民房,左岸下部有第四纪崩塌物。

3.2 三官寺段 (P02)

从河床往两岸,依次发育河漫滩和三级河流阶地 (图 4b),阶地以阶梯状分布于河床两岸,阶地在河床左岸较发育,河漫滩较宽阔,河漫滩被两条分支河道包围,南侧的分支河道切割较深,与北侧河床相差约 4~5m。

左岸(北岸) T_1 阶地阶面平坦,平面呈弧形,阶面由冲积的砾石层组成,面积小,河拔约 3~5m。 T_2 阶地阶面平坦开阔,面积大,阶面由冲积的砾石层组成,具二元结构。阶坡较陡,阶坡由于风化看不到基岩,下游河床侵蚀部位见基岩出露,推测可能为基座阶地,河拔约 10~12m。 T_3 阶地不如 T_2 阶地发育,面积小,顶面较平坦,阶面和 T_2 高差约 6m。 T_4 阶地不如 T_1 、 T_2 发育,面积较 T_3 大,位于小丘陵顶部,平坦状地形, T_4 阶地与 T_3 阶地高差约 12~15m。

右岸(南岸): T_1 比左岸 T_1 高度稍高些,与左岸 T_2 阶地等高的位置发现一人工开挖的剖面,露头良

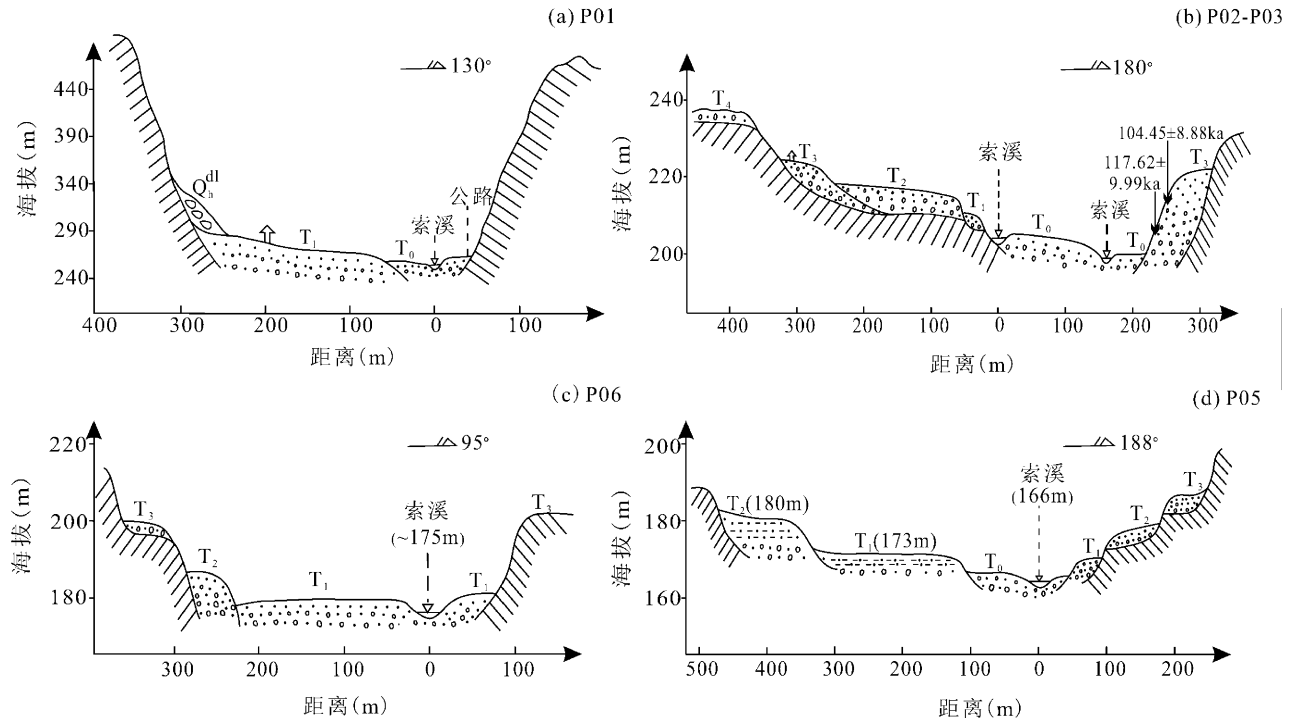


图 4 索溪河谷典型河流阶地剖面

Fig. 4 Transverse section of fluvial terraces along the Suoxi River

好,有冲积砾石层,砾石层特征如下:砾石层主要以砾石为主,充有砂和粘土;砾石分选较好,磨圆良好;砾径:a 轴最大 30cm,一般 15~20cm 者居多。砾石岩性为石英砂岩,风化程度较弱,胶结程度较差,充填物粘土颜色较红,在此采集 TL 年代样品,样品测年结果为 $104.45\pm8.88\text{ka}$,为三级阶地。

3.3 马湾段阶地(P03 点)

距离 P02 约 1200m 处,由于人工开挖公路,基岩裸露,风化较严重,颜色较红,基岩上面有一薄层砾石层,砾石层最厚地方约 100 cm,最薄 50cm(图 5)。砾石岩性为石英砂岩,砾石分选较好,磨圆较好,砾径 a 轴最大约 50cm,最小几厘米,一般 15~20cm,砾石中间填充砂和粘土,二元结构明显,砾石表面有很薄的风化皮(一般小于 0.6 cm),为三级阶地。在此采集 TL 年代样品,样品 TL-03-01(下)测年结果为 $117.62\pm9.99\text{ka}$ (图 5)。



图 5 马湾段三级阶地冲积砾石层
Fig. 5 The gravel layer of terrace level T₃ in Mawan

3.4 赵家岗王家坪镇段(P06 点)

从河床往两岸共发育三级阶地,如图(4c),T₁阶地阶面非常平坦开阔,面积大,阶面由冲积的砾石层组成,高程约 180m,河拔约 6m。T₂阶地阶面面积比 T₁较小,由冲积的砾石层组成,高程约 188m。T₃阶地为侵蚀阶地,岩性为志留纪砂质页岩。

3.5 赵家岗大桥段(P05 点)

从河床往两岸,依次发育河漫滩和三级河流阶地(图 4d),阶地以阶梯状分布于河床两岸。T₁阶地阶面由冲积的砾石层组成,阶面非常平坦宽阔,现表面种植庄稼,具明显的二元结构。与河漫滩高差约 3~5m。河水面高程约 166m。T₂阶地阶面平坦,由冲积的砾石层组成,与 T₁阶地高差约 12~15 m。

T₃阶地阶面面积比 T₁、T₂都较小,T₃阶地与 T₂阶地高差约 8~10 m。

3.6 阶地形成时代

本文对索溪三官寺北段及马湾剖面 T₃级阶地冲积砾石层进行了 TL 测年,测年结果分别为 $104.45\pm8.88\text{ ka}$ 和 $117.62\pm9.99\text{ ka}$,由此可知索溪流域 T₃形成于晚更新世早期。此外,我们对张家界世界地质公园西南边的茅溪阶地也进行了野外考察,其 T₄~T₁年代样品测量结果如表 1 所示,与索溪河流阶地具有良好的对比关系。

表 1 索溪河流阶地与黄龙洞、茅溪及长江三峡河
流阶地形成时代对比

Table 1 Timing of fluvial terraces and Huanglong Cave in the Suoxi, the Maoxi and middle Yangtze Rivers				
类别	级别	海拔 (m)	河拔 (m)	形成时代 (ka)
索溪 河流阶地	T ₄			Q_p^{2-2}
	T ₃	205	~55	$104.45\pm8.88(\text{TL})$ $117.62\pm9.99(\text{TL})$
	T ₂	188	~28	Q_p^3
	T ₁	173	~13	Q_h
黄龙洞	L ₄	~345	80~90	$463\pm46(\text{ESR})$
	L ₃	~300	40~45	$Q_p^2 - Q_p^3$
	L ₂	~280	20~25	Q_p^3
	L ₁	~262	2~5	Q_h
茅溪河 流阶地 (Yang et al., 2010)	T ₄	256	78~83	$347\pm34(\text{ESR})$
	T ₃	235	57~62	$151.05\pm12.84(\text{TL})$ $201.24\pm17.11(\text{TL})$
	T ₂	206	28~33	$60.95\pm5.18(\text{TL})$
	T ₁	188	10~15	Q_h
长江三 峡阶地 (Li et al., 2001)	T ₄			310~540
	T ₃			110~150
	T ₂			50~60
	T ₁			10~30

由表 1 可知,茅溪流域 T₄阶地的形成时代为中更新世中期(Yang et al., 2010;表 1),与长江三峡第四级河流阶地的形成时间 0.49Ma(中更新世中期;Li et al., 2001)相一致。据此可知索溪流域 T₄级阶地的形成时代为中更新世中期。

4 岩溶洞穴发育特征及分层

区内溶洞众多,其中以黄龙洞最为典型。黄龙洞位于军地坪东 10km 处,武陵源地势低洼处——

索溪中游谷地北侧,黄龙洞是一个大型综合性岩溶洞穴,总长达 13km,垂直、水平、斜向溶洞均有发育,但以水平溶洞为主。垂直方向上黄龙洞从上往下可分为 4 层,垂直高度 140m。各层特征如下:

第一层:为最古老的龙宫洞穴,海拔约 345m~400m,面积约 2000m²,发育大量的石笋,洞顶为椭圆形的坍塌圈,有小型石钟乳发育。后宫有整个洞穴系统中规模最大、最古老的崩塌,为整个黄龙洞中的最高点。我们在黄龙洞第一层龙宫底板处黑暗通道的壁上,发现了溶洞中厚约 60cm 的砾石层。砾石胶结良好,为钙质胶结,分选和磨圆中等,但定向性不好,砾石层中长轴长度主要分布在 3~5 cm,最大粒径 18 cm。大部分砾石以弱风化为主,风化皮平均厚度<0.8cm。砾石层充填物为偏红色或黄色砂质粘土,二元结构不明显。砾石岩性单一,主要为不同颜色的砂岩和粉砂岩,与黄龙洞围岩灰岩岩性完全不同,在砾石层底部采集的 ESR 年代样品的年龄为 463±46ka。

第二层:溶洞以天柱街为代表,洞底海拔约为 300m,天仙水瀑布为本层最高点。石钟乳和石笋不甚发育,本层不同于龙宫的发育特点,规模以长带状展布,主要沿水流方向发育,由潜水层控制,水流搬运能力较强,大量泥、砂等冲积物填充洞内。

第三层:溶洞海拔高度约为 280m,通道内大量发育石钟乳和石笋。

第四层:海拔为 262m 左右,现代河床高程约为 260m 左右。黄龙洞洞口高程与索水上游一级阶地相对应,且保持一定的水力联系。

5 砂岩峰林地貌与河流阶地、溶洞对比

在地貌垂直分布上,位于索溪流域的上游、中游和中下游的砂岩峰林地貌、岩溶洞穴以及河流阶地有着明显的层状对应关系,砂岩峰林地貌的最高层与黄龙洞的第一层与河流阶地的第四级阶地有着很好的对应关系;同时,砂岩峰林的第二—第四个砂岩平台与黄龙洞的第二—第四层对应,如图 6 所示。

索溪中下游三级河流阶地阶面都是由冲积的砾石层组成,砾石主要岩性以石英砂岩为主,同一地区不同阶地砾石岩性具有很好的相似性。这表明,砾石的沉积物质主要来源于中泥盆统砂岩地层。三级阶地普遍发育,且砾石磨圆度较好,说明砾石是经过相当距离的水流搬运或多次搬运。较弱的风化(风化皮厚度<0.6cm)及年代学均表明索溪三级阶地 T₃可能形成于晚更新世早期,与茅溪阶地和长江中游阶地具有很好的对比关系。因此我们有理由推断索溪四级阶地发育于 T₃形成之前的中更新世中期,与茅溪阶地和长江中游的 T₄阶地发育的年代相对应(分别为中更新世中期、0.35 Ma、0.3~0.5Ma;见表 1)。

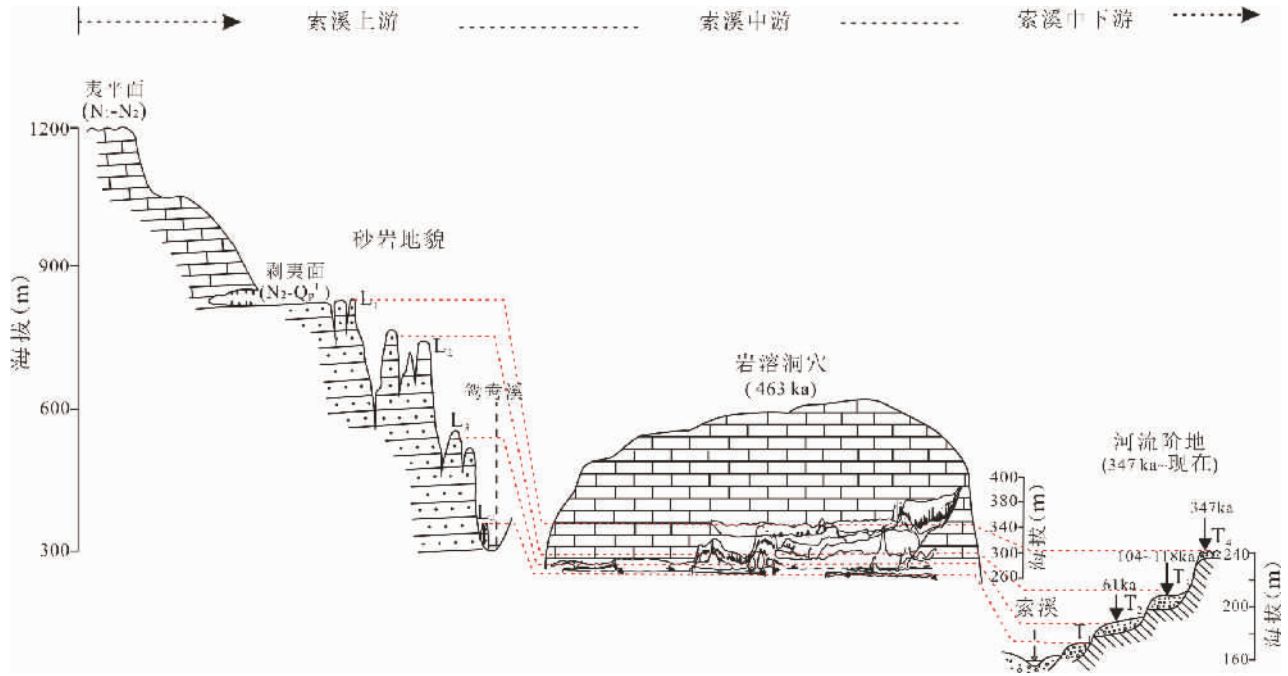


图 6 砂岩峰林、黄龙洞及索溪河流阶地地貌发育关系对比图

Fig. 6 Geomorphic comparison of sandstone landforms, Huanglong Cave and fluvial terraces along the Suoxi River

黄龙洞最高砾石层砾石主要为石英砂岩,与围岩灰岩岩性不同,说明砾石是被水流从外部携带而来,可能来自上游的中泥盆统砂岩地层,被当时的地表河流多次搬运到地下古暗河。砾石总体磨圆和分选较好,说明砾石经过了一定距离的搬运。显然砾石层中的砾石在进入古暗河之前,主要遭受物理风化,化学风化较弱。砾石中弱风化砾石含量为70%,风化皮厚度 $<0.8\text{cm}$ 。砾石被搬运到地下暗河后迅速堆积,不再暴露于地面,因此较弱的风化说明砾石层形成不晚于晚更新世,甚至更早。砾石层中填充物为偏红色的砂质粘土,表明砾石层形成于温暖湿润的气候条件下,与中更新世中期温暖湿润的总体气候特征相吻合(刘东生,1997)。由此可见,地貌学、沉积学和年代学特征均表明,黄龙洞的最高砾石层形成于湿热的气候条件下,与中更新世中期的气候特征一致。

研究区内的地表河流因流水的下切侵蚀作用而形成众多水系,碳酸盐岩分布区地表河流大多数与地下河相通,因此地下岩溶的发育状况与地表水的下切侵蚀有着非常密切的联系。暖期气候温暖湿润时,在靠近河水面附近岩溶洞穴开始发育。而河流下切发生在冷期向暖期转换的过渡时期(Bridgland, 2000; Bridgland et al., 2008),此时植被开始变好,沉积物的来源供给减少,而河水的流量则明显增大,较大的水流和较少的沉积物来源导致索溪河流的下切侵蚀作用明显加强,构造的相对抬升使得早期形成的水平溶洞被抬升到较高的部位;暖期时,地下水向下溶蚀作用又开始加强,形成更低一层的溶洞。随着中更新世以来气候的冷暖交替变化及新构造运动的间歇性抬升,岩溶洞穴在垂直方向上呈多层分布,而在河流两侧形成多级阶地(见图6)。因此溶洞和阶地的发育具有密切的联系,可提供区域地貌演化的重要证据。

综合地貌学、沉积学和年代学结果,并将位于索溪流域的砂岩峰林地貌和河流阶地以及岩溶洞穴对比表明,张家界砂岩峰林地貌最早形成于中更新世,即在索溪河流的下切期,再加上研究区内高度发育的节理更加速了重力崩塌的过程,对砂岩峰林地貌的形成起了决定性作用。中更新世以来气候的冷暖交替导致多次的河流下切以及伴随而来的重力崩塌,塑造了世界罕见的独特砂岩地貌形态。

以上分析表明,张家界砂岩峰林形成时代较晚,约为中更新世,仍是一种相对年轻的地貌,应为青年期—壮年期地貌。随着地壳抬升、河流下切以及时

间的推移,逐渐形成了平台、方山—峰墙、峰丛—峰林—残林的峰林地貌模式。在流水侵蚀、重力崩塌、风化等不同的外营力作用下,其地貌形态会逐步发生演变。特别是研究区属于湿润地区,区内地表水系发育,流水将进一步侵蚀,沟谷将进一步下切,垂直节理又比较发育,石英砂岩峰林的稳定性将受到潜在的威胁。但是总体上张家界砂岩峰林地貌的岩层本身比较硬,地壳相对较稳定(Yang et al., 2010),且这种相对年轻的地貌更有利于保存,因此张家界砂岩峰林地貌应处于相对稳定状态。

作为独特的“世界自然遗产”、“世界地质公园”的中国张家界武陵源景区,更应注重地质旅游资源的保护和可持续管理。为此,园区内应加强地质特征等调查工作,对区域地貌稳定性及工程建设的安全性进行评价。应尽量避免各种人为因素所诱发的地貌环境过程,采取选择性开发,处理好地质旅游资源开发与地貌过程以及环境效应之间的关系。不断完善和改进旅游开发的方法、手段,按照科学有序的步骤和程序进行操作,以利于地貌景观资源的合理保护和区域的可持续发展。

6 结论

结合野外实地考察和区内砂岩峰林地貌、河流阶地及岩溶洞穴的地貌学、沉积学及相关年代学研究,发现索溪流域中下游普遍发育三级阶地, T_4 阶地较少,与临沅茅溪和长江中游发育的阶地对比表明,研究区第四级阶地形成于中更新世中期($\sim 347 \pm 34\text{ ka}$)。位于索溪中游的黄龙洞共发育四层,其最高砾石层的沉积学和年代学特征表明,黄龙洞形成于中更新世中期温暖潮湿的环境下,其年代不晚于 $463 \pm 46\text{ ka}$ 。区内砂岩峰林地貌与河流阶地、岩溶洞穴在地貌特征上可进行良好对比,据此可推测索溪最早于中更新世开始发育,并下切入基岩形成砂岩峰林地貌。

张家界砂岩峰林地貌是一种相对年轻的地貌,总体上相对稳定。作为独特的“世界自然遗产”、“世界地质公园”的中国张家界武陵源景区,更应注重旅游资源的科学合理利用与保护工作,采取科学有序的方式,以利于地貌景观资源的合理保护和区域的可持续发展。

致谢:项目组成员崔之久教授、邓乃恭研究员、郭克毅研究员提出了很多宝贵建议。史文强、杨艳、王敏参与了部分野外考察工作。野外调查工作得到了张家界世界地质公园管理委员会、张家界市国土

资源局等部门领导和相关工作人员的大力帮助,在此谨表示衷心感谢。

注 释 / Note

- ① 湖南省环境地质监测总站. 1988. 湖南省武陵源砂岩峰林地质自然保护区区划及科学考察报告. 1~206.

参 考 文 献 / References

- 陈长明, 谢丙庚. 1994. 关于建立“张家界柱峰砂岩地貌”类型的探讨. 湖南师范大学自然科学学报, 17(4): 84~94.
- 邓美成. 1989. 索溪地貌特征及其形成和演化. 湖南师范大学自然科学学报, 12(3): 262~268.
- 黄林燕, 朱诚, 孔庆友. 2006. 张家界岩性特征对峰林地貌形成的影响研究. 安徽师范大学学报(自然科学版), 29(5): 484~489.
- 刘东生. 1997. 第四纪环境. 北京: 科学出版社, 1~304.
- 唐云松, 陈文光, 朱诚. 2005. 张家界砂岩峰林景观成因机制. 山地学报, 23(3): 308~312.
- 周学军, 夏卫生, 谭长银. 2004. 金鞭溪地貌及其形成机制和演变过程——对张家界地貌的再认识. 湖南师范大学自然科学学报, 27(3): 95~96.
- 周中民. 1994. 武陵源石英砂岩峰林成因之讨论. 长沙水电师院自然科学学报, 9(4): 394~398.

- Bridgland D R. 2000. River terrace systems in north-west Europe: an archive of environmental change, uplift and early human occupation. *Quaternary Science Reviews*, 19: 1293~1303.
- Bridgland D R, Westaway R. 2008. Climatically controlled river terrace staircases: a worldwide Quaternary phenomenon. *Geomorphology*, 98: 285~315.
- Li Jijun, Xie Shiyu, Kuang Mingsheng. 2001. Geomorphic evolution of the Yangtze Gorges and the time of their formation. *Geomorphology*, 41(2~3): 125~135.
- Pan Baotian, Burbank D, Wang Yixiang, Wu Guangjian, Li Jijun, Guan Qingyu. 2003. A 900 k. y. record of strath terrace formation during glacial—interglacial transitions in northwest China. *Geology*, 31: 957~960.
- Picini L, Drysdale R, Heijnis H. 2003. Karst morphology and cave sediments as indicators of the uplift history in the Alpi Apuane (Tuscany, Italy). *Quaternary International*, 101~102: 219~227.
- Yang Guifang, Zhang Xujiao, Tian Mingzhong, Brierley G J, Chen Anze, Ping Yamin, Ge Zhiliang, Ni Zhiyun, Yang Zhen. 2010. Alluvial terrace systems in Zhangjiajie of northwest Hunan, China: implications for climatic change, tectonic uplift and geomorphic evolution. *Quaternary International*, doi: 10. 1016/j. quaint. 2010. 05. 019.

Timing of Zhangjiajie Sandstone Landforms: Evidence from Fluvial Terraces and Karst Caves

PING Yamin¹⁾, YANG Guifang¹⁾, ZHANG Xujiao¹⁾, TIAN Mingzhong¹⁾,
CHEN Anze²⁾, GE Zhiliang¹⁾, NI Zhiyun¹⁾, YANG Zhen¹⁾

1) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083;

2) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract: Zhangjiajie, well-known for its spectacular sandstone landforms, has been the subject of geomorphologists and geologists for decades. Prior to our present study, however, little is known about the timing of these spectacular sandstone landforms. Integrating the geomorphological, sedimentological and geochronological techniques, the correlations between sandstone landforms, fluvial terraces and karst caves have been investigated. Our results indicate that three terrace levels are well developed in the Suoxi River, with terrace level T₄ locally emerging in the middle Suoxi catchment. Huanglong Cave, a typical karst cave in the study area, can be divided into four vertical levels, with the gravel layer occurring in the topmost level. Sedimentological analysis indicates an allochthonous source for the gravels, which have been formed under a warm and humid environment in Middle Pleistocene. Four primary geomorphic levels are distinctive in the Zhangjiajie sandstone landforms, displaying a good geomorphic correlation with the alluvial terraces and Huanglong Cave in the middle—lower reaches of the Suoxi River. We thus can infer the timing of sandstone landforms formation in Zhangjiajie at Middle Pleistocene. This landform is in the period from adolescence to maturity, showing relatively stability. In the process of Geopark constructing, tourism resources should be utilized and protected properly, allowing scientific protection and sustainable management.

Key words: sandstone peak forest landform; formation age; alluvial terraces; karst caves; Zhangjiajie