

文章编号: 1008-2786-(2018)4-509-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000347

龙虎山世界地质公园象鼻山栈道洞穴地貌成因

李馨敏^{1,2}, 郭福生^{1,2*}, 陈留勤^{1,2}, 王凤之², 李余亮²

(1. 东华理工大学 省部共建核资源与环境国家重点实验室培育基地, 南昌 330013; 2. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013)

摘 要: 龙虎山世界地质公园的丹霞地貌主要产于晚白垩世河口组红层中, 分布在陡峻崖壁上的洞穴地貌, 是丹霞地貌成景系统的重要组成部分。通过测量象鼻山栈道 1 个露头剖面 and 383 个洞穴的大小、形态、岩性组成, 认为大多数洞穴的形成主要受控于岩性不同而导致的差异风化作用。砾岩层中粗大砾石、筛状沉积的聚集状砾岩透水性强易于风化脱落形成洞穴雏形。夹于砾岩层之间的抗风化能力较弱的砂岩层易于风化凹进形成洞穴, 横向上沿层理方向断续排列, 持续风化可使其联结成为岩槽、扁平洞。暴雨天气顺陡崖壁倾泻而下的快速水流对洞穴形成具有重要影响, 经冲刷等侵蚀作用, 岩壁表面形成垂向分布的洞穴地貌。后期水流侵蚀、化学和物理风化、微观气候变化以及生物活动等使洞穴进一步扩大。在洞穴发展的晚期阶段, 岩壁悬空而发生崩塌后退, 形成新的赤壁丹崖。

关键词: 丹霞地貌; 崖壁洞穴; 岩性差异; 流水侵蚀; 龙虎山

中图分类号: P931

文献标志码: A

自 20 世纪 30 年代陈国达^[1]提出“丹霞地形”以来, 中国学者对丹霞地貌的研究经历了初创、成型和发展三个阶段^[2]。丹霞地貌作为地貌学一个新领域逐渐受到地貌学家、地质学家的广泛关注^[2-5]。在丹霞地貌的陡峭崖壁上, 经常能见到奇形怪状、大小迥异的洞穴, 它们构成了丹霞地貌成景系统的重要组成部分, 吸引着众多游客和研究人员的关注。国内对这些洞穴的成因解释成为近年来丹霞地貌研究的一个热点, 一般认为岩性差异、风化作用、气候是导致这些洞穴形成的主要原因^[6-8]。国外也有许多针对类似洞穴的研究实例, 包括花岗岩、灰岩、砂岩等^[9-11], 认为这些洞穴是在一定气候条件下风化作用的综合产物^[12]。

本文以象鼻山栈道崖壁洞穴地貌为研究对象, 通过测量洞穴的实际长、深、高的参数和观察描述寄主岩石的沉积组构, 提出了洞穴地貌的成因。

1 地质背景

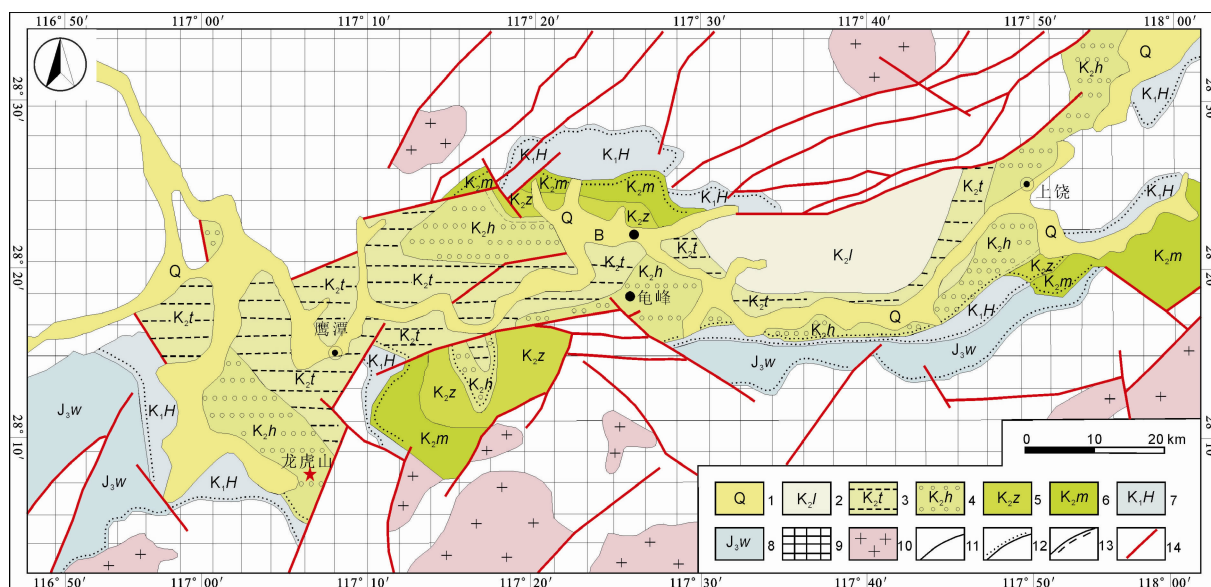
受岩石圈伸展构造背景^[13]的影响, 华东南地区晚中生代产出典型的“盆岭构造”^[14]。沿赣杭构造带分布的永崇盆地、信江盆地、金衢盆地、永康盆地等断陷盆地往往一侧以正断层为界, 另一侧不整合覆盖于侏罗-白垩纪火山-侵入杂岩之上, 因而具有半地堑盆地的特点^[15-18]。江西东北部的信江盆地产于华夏板块与扬子板块结合带(图 1), 呈近东

收稿日期(Received date): 2017-02-09; 改回日期(Accepted date): 2017-05-22

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41772197, 41602113); 省部共建核资源与环境国家重点实验室开放基金项目(NRE1605); 江西省研究生创新基金项目(YC2015-S271)。[National Natural Science Foundation of China (41772197, 41602113); Open Research Fund from State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment (East China University of Technology) (NRE1605); Jiangxi Provincial Graduate Innovation Fund (YC2015-S271)]

第一作者(Biography): 李馨敏(1993-), 男, 山西孝义人, 硕士研究生, 研究方向为沉积岩石学和丹霞地貌。[LI Xinmin (1993-), male, born in Xiaoyi, Shanxi province, M. Sc. candidate, research on sedimentary geology and Danxia landforms] E-mail: lixinmin@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): 郭福生(1962-), 男, 江西赣州人, 教授, 博士, 研究方向为区域地质与地貌景观。[GUO Fusheng (1962-), male, born in Ganzhou, Jiangxi province, Ph. D., professor, research on regional geology and geomorphologic landscape] E-mail: fshguo@ecit.cn



1. 第四系;2. 晚白垩世莲荷组;3. 晚白垩世塘边组;4. 晚白垩世河口组;5. 晚白垩世周田组;6. 晚白垩世茅店组;7. 早白垩世火把山群;8. 晚侏罗世武夷群;9. 前白垩系;10. 花岗岩;11. 地层整合线;12. 角度不整合线;13. 平行不整合线;14. 断层
1. Quaternary; 2. Lianhe formation of Late Cretaceous; 3. Tangbian Formation of Late Cretaceous; 4. Hekou Formation of Late Cretaceous; 5. Zhoutian Formation of Late Cretaceous; 6. Maodian Formation of Late Cretaceous; 7. Huobashan Group of Late Cretaceous; 8. Wuyishan Group of Late Jurassic; 9. Pre-Cretaceous; 10. Granite; 11. Conformity boundary; 12. Angular unconformity boundary; 13. Parallel unconformity boundary; 14. Fault

图1 江西信江盆地地质图^[24]

Fig. 1 Geological map of Xinjiang Basin in Jiangxi Province, China

西向展布,是“盆岭构造”中陆相断陷盆地的典型代表^[19]。该盆地长约 180 km,宽 10~40 km,面积约为 3148 km²。盆地内晚白垩世圭峰群河口组红层以发育丹霞地貌为特色,产于其中的龙虎山世界地质公园享誉国内外^[4-5,20]。

对信江盆地内晚白垩世沉积盆地充填的研究由来已久。圭峰群主要为一套红褐色砾岩,夹少量砂砾岩及砂岩,已经发现恐龙蛋、介形类、轮藻等化石,含有蒸发盐沉积^[21],总体上反映了晚白垩世时期干旱炎热的沉积背景^[18,22-23]。圭峰群自下而上分为河口组、塘边组、莲荷组。

龙虎山世界地质公园位于赣东北鹰潭市和弋阳县境内,北东长约 64.5 km,南西宽 9~34.5 km,面积约 996.63 km²,116°53'00"~117°29'00"E,27°59'30"~28°26'00"N。龙虎山世界地质公园以发育丹霞地貌为主,作为世界自然遗产地之一,是中国华南湿润区水蚀型丹霞地貌的代表,具有突出的美学普遍价值。

2 研究方法

象鼻山栈道长约 3180 m,为本次实际近距离接

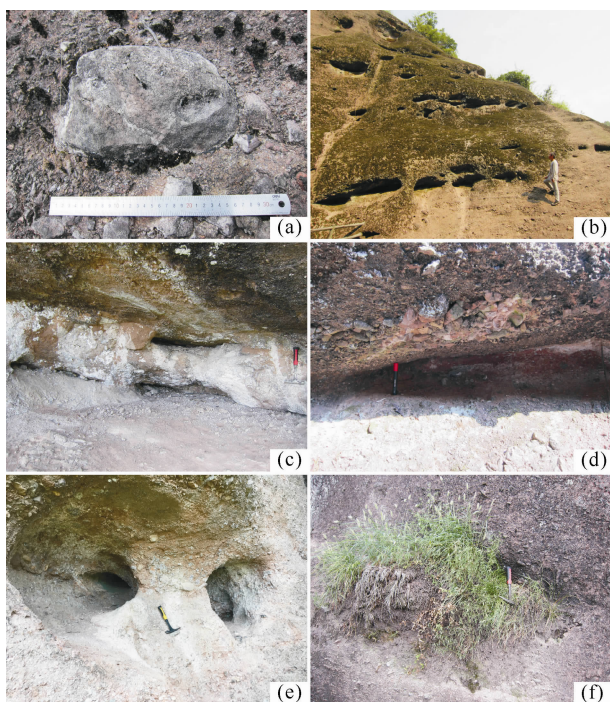
触丹霞陡崖上的洞穴地貌提供了便利条件。在详细观察、描述、记录洞穴及围岩的岩石组成、沉积构造的同时,沿栈道对 383 个洞穴的长、深、高进行了实际的厘米级测量。

为了更好地解释其成因,将各个孤立的洞穴联系起来,观察描述横向及纵向洞穴的分布、变化和联系,对其围岩的沉积地层剖面,分层、粒序、沉积构造等进行详细的测制,为下一步对洞穴地貌成因的模拟试验奠定了良好的基础。本文将通过所测垂直剖面的分层、粒序、沉积构造等,根据岩性、岩相及沉积构造解释红层的沉积水动力过程。

3 研究结果

3.1 洞穴地貌发育的岩性组成

信江盆地中的圭峰群是红层地貌的主要成景地层^[4-5]。地质公园位于信江盆地的西南边缘,象鼻山栈道的红层属于晚白垩世圭峰群河口组,岩性组合常表现为厚度不等的砾岩夹砂岩薄层,局部可见粉砂岩透镜体、粗大的砾石(图 2a),最大粒径可达 28 cm。



(a)局部见粗大砾石(最大粒径达28 cm);(b)顺层呈断续状分布的洞穴,主要由岩性所致;(c)顺层岩槽;(d)扁平洞穴;(e)洞穴横向串通形成迷宫;(f)洞穴内岩石风化为可供植物生长的土壤,植物生长又加速了洞穴的扩大

(a) One coarse gravel occur locally (The maximum diameter can reach up to 28 cm); (b) Intermittent cavities were mainly caused by lithological differences; (c) Bedding-controlled- rock trough; (d) Flat cavities; (e) Cavities are laterally coalesced; (f) The inside walls were weathered to form soil for plant growth, resulting in further enlargement of cavities

图2 象鼻山高空栈道河口组岩石特征及典型崖壁洞穴露头照片

Fig. 2 Outcrop photos of the Hekou Formation and typical cavities along the plank road of the Xiangbishi scenic area

在象鼻山高空栈道阶梯处(后障排衙),对产出洞穴的围岩(河口组)岩性、沉积构造进行了详细观察,实测厚度约5 m的地层柱状图(图3a)。该剖面岩性以砾岩为主,砾岩单层厚度为20~100 cm,砾石之间填充物可以从细小的泥、粉砂到粗砾石级别。底部见叠瓦状构造,平均倾角为18°。向上依次可见板状交错层理、逆粒序层理构造。逆粒序层理从下向上表现出粒度由细到粗的变化,厚度接近1 m。上部可见清晰的侵蚀冲刷面,说明当时水动力能量较高(图3a)。下凹状冲刷侵蚀面深度可达40 cm。

根据在后障排衙景点砾石统计结果,砾石成分以凝灰岩为主,平均含量达到53%;砂岩、花岗质岩石和石英次之,变质岩(主要是片岩)最少,仅占2%

(图3c)。

根据砾石的a轴粒径频数分布柱状图(图3d),砾石粒径分布具有比较明显的特征:(1)粒径跨度大,在0.2~13 cm均有分布;(2)频数曲线基本服从正态分布,峰值分布范围较宽且靠前;(3)粒径较大的砾石虽然数量较少,但大砾石的存在对洞穴的形成具有重要意义。

3.2 洞穴地貌形态特征

本次沿象鼻山高空栈道测量了383个洞穴的长、高、深。这些洞穴多为椭圆形,大小不一,深浅不等,或单独生长,或顺层密集分布(图2b),或垂向相连(图6e)。参考黄进^[6]对丹霞洞穴地貌的分类研究,象鼻山栈道洞穴可分为岩槽(图2c)、额状洞(图2d)和岩洞(图2e)。部分洞穴内部及附近砾石发育,砾石大小为几毫米至几十厘米不等,洞壁平整圆滑,苔藓、绿藻等生长在部分洞穴壁上。洞穴表面通常因流水或生物生长而表现为外暗内亮。洞穴内部可见风化残余砾石堆积(图2e),或被土壤填充和植被生长(图2f)。

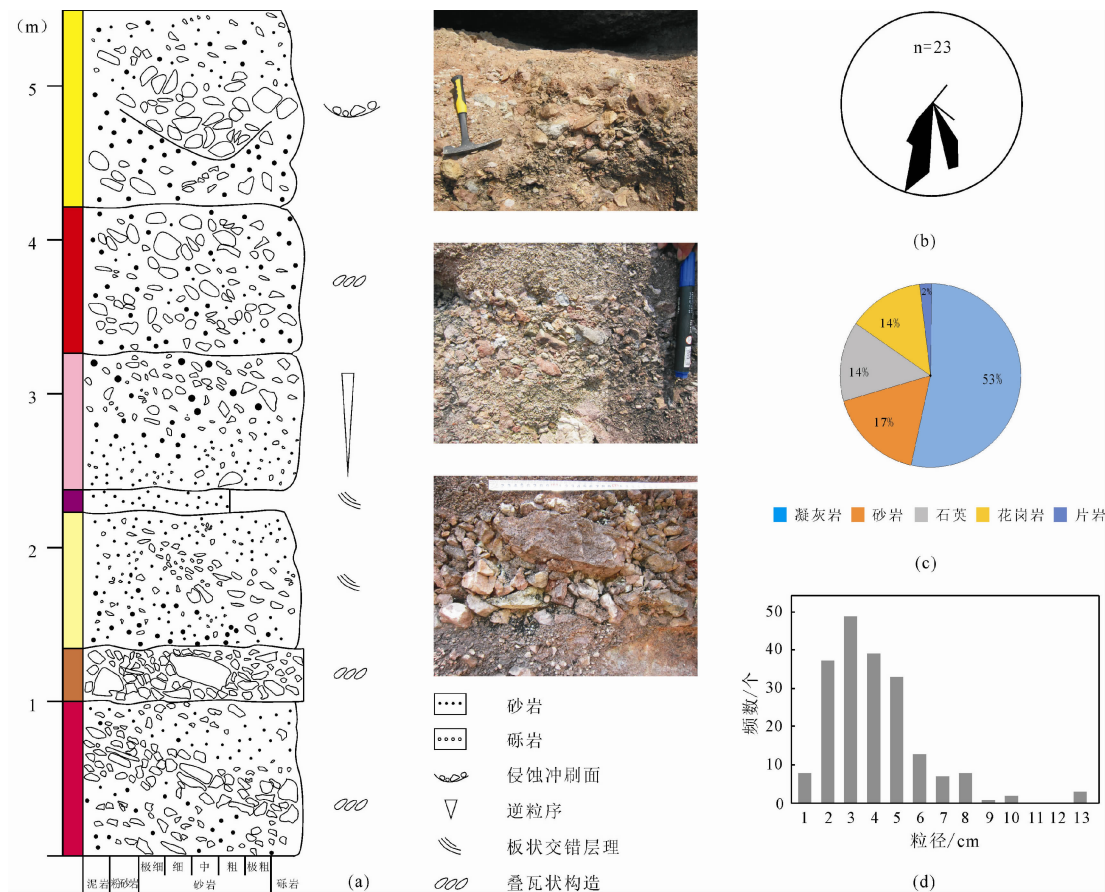
洞穴地貌的长度范围为10~500 cm,深度范围为10~180 cm,高度范围为10~200 cm。最大的洞穴长2250 cm、深440 cm、高190 cm。最小的洞穴长27 cm、深8 cm、高18 cm。通过对长与高、长与深、深与高的数学模型分析,可以看到三者均成线性关系。高/长比值约为0.2,高/深比值约为0.5,总体来说向内延伸较深,本次测量洞穴地貌最大深度可达10 m。深/长比值约为0.3,方差约为0.52(图4)。同时,本次研究利用扁率描述洞口形态特征。 e 为洞口扁率,可以采用下式^[25]进行计算:

$$e = [(1/2L_l) - (1/2L_s)] / (1/2L_l) \\ = (L_l - L_s) / L_l \quad (1)$$

式中: L_l 为长轴长度, L_s 为短轴长度, e 是洞穴扁率。当 $e=0$ 时,为圆形洞穴;当 $0 < e \leq 0.1$ 时,为近圆形洞穴;当 $0.1 < e \leq 0.4$ 时,为椭圆形洞穴;当 $0.4 < e < 1$ 时,为极椭圆形洞穴。

由表1可知,象鼻山栈道洞穴以极椭圆形为主,占比62%,其余依次为椭圆形、近圆形和圆形,理想洞穴圆形仅占2%。

Frankl等^[26]曾对埃塞俄比亚北部沟渠进行研究,认为控制其体积形态的主要因素有岩性、气候和人类活动等。因此从统计学意义上,长/高、长/深和高/深均较好的线性模型拟合效果反映出研究区洞穴的成因相似性,对其他丹霞地貌区洞穴的研究具



(a) 河口组柱状图;(b) 扁平状砾石倾向玫瑰花图;(c) 砾石成分饼状图;(d) 砾石 a 轴粒径频率分布柱状图
(a) Stratigraphic column of the Hekou Formation; (b) Rose diagram plotted from azimuth measurements of elongated pebbles;
(c) Pie chart showing gravel composition; (d) The a-axis size histogram of pebbles

图 3 后障排衙景点河口组沉积特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics of the Hekou Formation in the Houzhangpaiya scenic spot

有一定的对比和借鉴意义。

表 1 洞穴扁率统计表

Tab. 1 Summary table of cavity oblateness

洞穴形态	正圆形 $e = 0$	近圆形 $0 < e \leq 0.1$	椭圆形 $0.1 < e \leq 0.4$	极椭圆形 $0.4 < e < 1$
个数	9	11	127	236
比例	2%	3%	33%	62%

4 洞穴地貌的成因讨论

在丹霞地貌分布区,洞穴地貌是重要成景要素,根据形态特征可分为岩槽、额状洞(崖)、扁平洞、穿洞、天生桥、蜂窝状洞穴、竖状洞穴等,成因包括风化、崩塌、流水侵蚀、溶蚀作用、海蚀、风蚀^[5,8,27-28]。

信江盆地年平均气温为 17.9℃,极端最高气温 40.7℃,最低气温 -6℃ 到 -7℃,年平均降雨量为

1889.2 mm^[29]。气候风化模式表明,研究区属于强烈化学风化类型(图 5)。因此,流水侵蚀及其产生的溶蚀作用在本区洞穴地貌的形成过程中起到了重要的作用。龙虎山世界地质公园内的许多大型景观洞穴,比如仙姑洞、丹勺洞、福地门等的形成主要与节理、断层等构造作用有关^[5]。与这些丹霞地貌相比,本次在象鼻山栈道测量的 383 个洞穴属于中观规模(图 2b、图 2d、图 2e),主要与岩性差异和流水侵蚀有关。

4.1 岩性对洞穴地貌发育的控制作用

如图 3 所示,象鼻山栈道的河口组剖面以砾岩为主,发育块状层理、冲刷面、河道充填、叠瓦状构造、逆粒序等沉积构造。砾岩分选差,杂基成分可以从粘土到细砾石。这些特征说明象鼻山分布的砾岩主要为泥石流形成的冲积扇沉积^[18,31-32]。其中,颗粒支撑结构的砾岩为冲积扇相中的筛状沉积

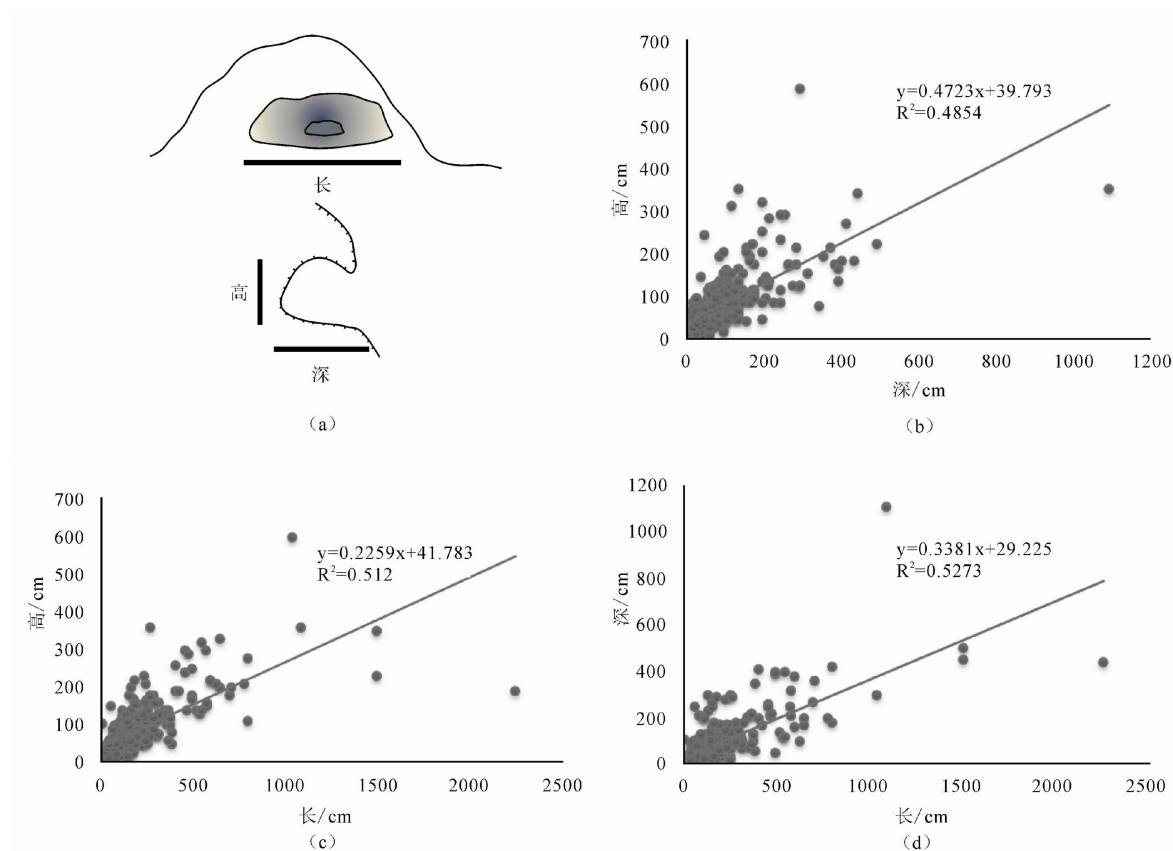


图4 测量洞穴三维图示

Fig. 4 Plots of the three-dimensions of the measured cavities

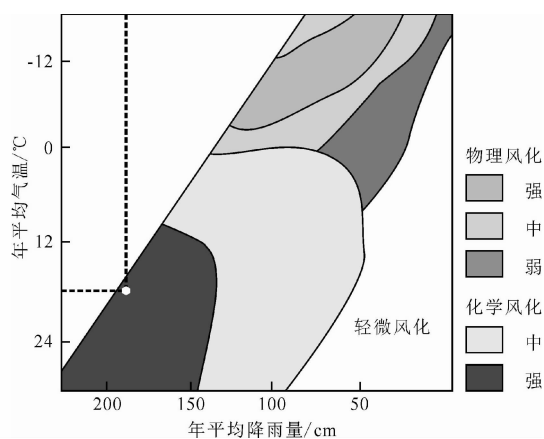
图5 不同风化类型与年均降水量和年均温度的关系^[30]

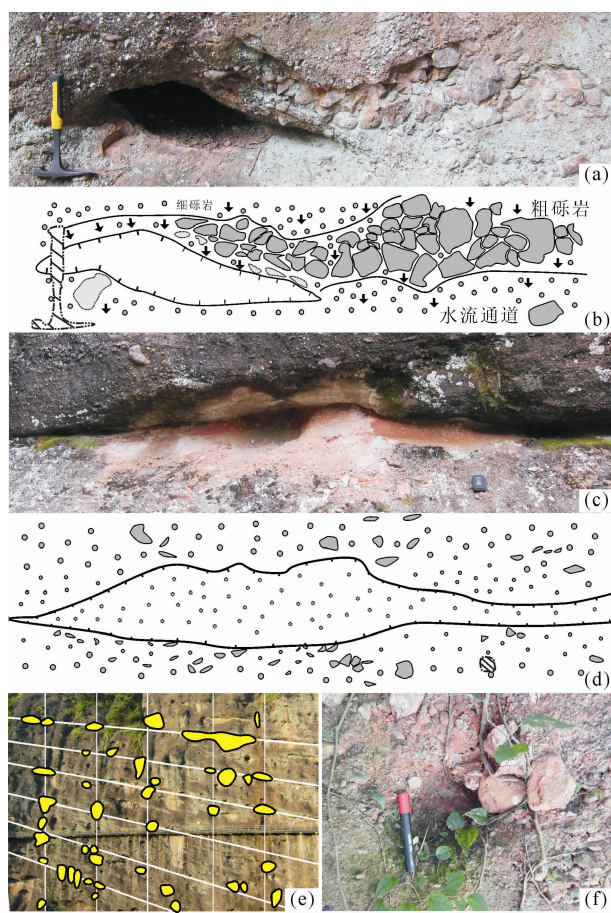
Fig. 5 Relative importance of different types of weathering in relation to mean annual rainfall and temperature

(图6a),可能是流水经过渗透性碎屑骨架时将细粒沉积物带走,而使粗粒度的砾石在原地集中的结果^[33]。叠瓦状构造则反映了高粘度和剪切力的介

质条件^[34]。另外,缺乏交错层理构造、分选性差及含有粗大砾石则指示了搬运过程中高沉积物/水比值。

在这套冲积扇厚层砾岩沉积序列中,受雨水长期冲刷侵蚀作用,个别粗大的单个砾石会发生脱落,特别是那些可溶性的灰岩砾石,容易发生溶蚀而形成小型洞穴(图2a)。多个这样的小洞穴相互连接则可演变为较大的洞穴地貌。另外,筛状沉积的聚集状砾石,由于与周围相对细粒的沉积物相比,透水性更高,易于整体脱落而形成洞穴的雏形(图6a、6b)。根据岩石力学实验研究^[28],砾岩层之间的砂岩层(软岩层)抗风化能力比其上下的砾岩层要差,因而易于被风化凹进形成岩槽(图6c、6d),进一步演变为额状洞穴、扁平状洞穴等。

由此可见,红层岩性组成是洞穴地貌形成的重要因素。特别是岩槽、额状洞穴、扁平状洞穴等大多具有沿着软弱岩层发育的趋势,这即是洞穴地貌受



(a) 聚集状砾石易于脱落形成洞穴雏形;(b) 照片 a 的素描图;(c) 砾岩层间的薄层砂岩被风化凹进形成岩槽;(d) 照片 c 的素描图;(e) 横向斜线为岩槽连接线,垂向线为水流冲刷形成的洞穴连接线,黄色阴影表示部分典型洞穴;(f) 植物根系破坏砾岩使砾石脱落加速洞穴变大

(a) The concentrated pebbles were readily broken off to form small cavities; (b) The sketch of the photo a; (c) The interbedded thin sandstone beds between the thick conglomerate beds were weathered to produce rock trough; (d) The sketch of the photo c; (e) The lateral lines show rock troughs, the vertical lines indicate cavities formed by water erosion, and the yellow shadows represent the typical cavities; (f) The destruction of conglomerates by plant roots made gravel fall and led to enlargement of cavities

图 6 象鼻山栈道典型洞穴地貌

Fig. 6 Typical cavities along the Xiangbishan cliffs

控于岩性变化的最好例证。

4.2 暴雨事件与洞穴地貌的关系

丹霞地貌的山顶由于片状风化剥落而植被稀疏,在暴雨时期,雨水直接从山顶顺陡峭的崖壁倾泻而下。丹霞地貌陡崖壁上一般少有植被覆盖,因此,垂直向下快速流动的水流势必对崖壁岩石形成巨大的冲击力。特别是当这种垂向水流遇到本来已经发

育洞穴的地方,水流携带砂石对洞穴进行侵蚀,使洞穴进一步扩大并变得圆滑。垂直节理的发育为这种暴雨天气垂向水流侵蚀形成洞穴(特别是竖状洞穴地貌)提供了先天条件。

暴雨对崖壁的侵蚀方式主要为涡旋和空化空蚀。象鼻山陡崖独特的粗糙壁面很容易使水流发生局部分离形成涡体^[35],涡体在随水流向下运动的同时可以形成作用于崖壁的激振力;在分离水流的内部,由于脉动压强的作用可能形成瞬态空化水流^[36],空蚀产生的强烈脉动力能够影响崖壁的振动,使其表面受到损坏。这种暴雨事件在丹霞地貌陡崖壁上形成的洞穴地貌形似珠帘。

另一个方面,在由砾岩(抗风化能力较强)和砂岩(抗风化能力较弱)互层构成较规则韵律层结构的崖壁上,由于砂岩层抗风化能力弱而形成顺层发育的一系列洞穴(图 2b)。这些横向上断续分布的洞穴与由暴雨倾泻冲刷形成的纵向洞穴发生叠加,巧妙地组合形成类似棋盘一样的景观(图 6e)。

4.3 其他有利于洞穴扩大的因素

(1) 物理风化

岩石是热的不良导体,其表层和内部在温差变化的条件下会产生张引力,频繁的湿润,干燥交替容易使岩石发生破碎。温度的降低会使空气中的水汽凝结成雨雾,浸润至矿物之间的小裂缝中,加剧矿物的膨胀—收缩作用并促进不稳定矿物分解^[37]。

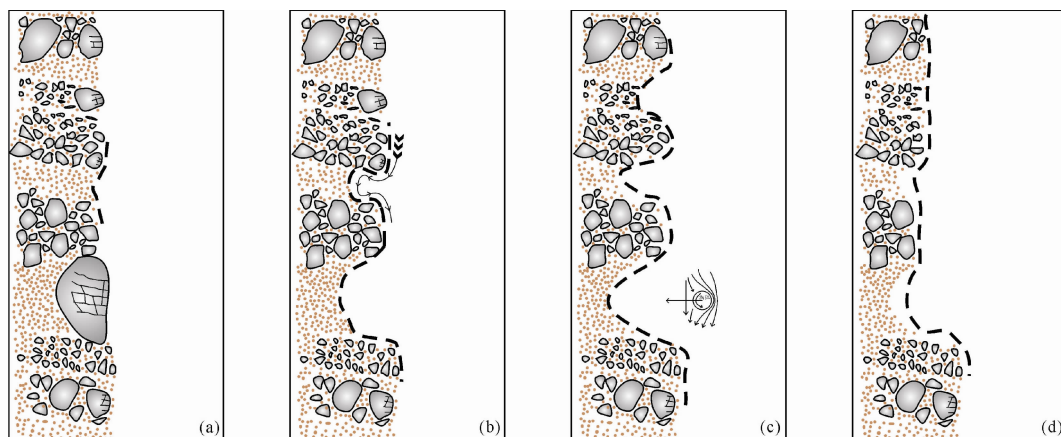
(2) 微气候

大气降水或其他流体在经过崖壁洞穴时,表层水流走或被蒸发,洞穴内部的高含水量使内部气温变化与外部相比较小,形成洞穴内外不同的微气候类型。水量的供给、风速的变化、温度的差异都会对洞穴的扩张速率产生影响^[8]。

(3) 生物活动

藻类等低等植物生长在岩壁上,其分泌的有机酸可以加速岩石的分解^[38]。较大型植物的根系深入岩壁继续生长,对周边产生的压力促使岩石组成颗粒发生分离、脱落,进一步导致崖壁崩解形成洞穴或使先存洞穴扩大(图 6f)。另外,在触手可及的洞穴中,常见为祈福而人为放置的树枝。不可否认,这些人类活动对洞穴内岩层具有一定的破坏作用,客观上加速了洞穴的增长。

此外风化剥落、化学溶蚀、重力作用等因素都在一定程度上促进洞穴的扩大^[6,27]。



(a) 粗糙的岩壁; (b) 早期阶段, 差异风化作用形成洞穴雏形; (c) 中期阶段, 洞穴在以流水侵蚀作用下进一步扩大;

(d) 晚期阶段, 洞穴隔壁减薄失稳、崩塌

(a) Rough rock walls; (b) Small cavities are formed owing to differential weathering at the early stage; (c) Cavities are further enlarged as a result of water erosion at the middle stage; (d) Side walls of cavities become thin and unstable and eventually collapse at the late stage

图7 洞穴形成演化图

Fig. 7 Diagram showing the development processes of the cavities

4.4 洞穴不同演化阶段的影响因子

结合前人^[7,15-16]对白垩纪红层的研究,及象鼻山栈道附近洞穴地貌的实际测量数据,本文认为象鼻山栈道的洞穴地貌形成过程可以划分为早、中、晚三个阶段(图7)。在洞穴演化的不同时期,促进洞穴地貌发育的主要影响因素也不相同。

早期阶段胶结物水解、风化、空蚀等作用对红层进行选择性破坏。常在河口组互层砂砾岩的砂岩薄层或透镜体处或结构脆弱处(如“少女之春”构造节理)首先发生侵蚀^[28],造成砾石脱落,软岩凹进等洞穴雏形。一般来说,在风化过程中,一旦形态开始变化,岩石风化的速度将比邻近岩石更快^[39],所以会在栈道附近发现孤立洞穴,其围岩并未显现出凹陷的性质。

龙虎山所在地区属亚热带湿润季风气候,加之泸溪河以及龙门湖、清水湖等较大面积水体和茂盛的森林植被共同调节作用的影响^[29],雨量充沛,大气湿度较高。季节性的丰富降水沿岩壁倾泻而下,在水的参与下,空化冲击洞穴,涡旋带动泥砂旋转,冲刷、研磨洞穴^[35]。同时,水解作用、碳酸岩化作用等加剧,使岩壁上呈现出横向断续相连,纵向串珠排列的奇景(图6e)。

随着洞穴持续扩大、深入,岩层原本平衡的应力场发生改变,加上空化和风化的影响,洞穴上覆岩层缺乏支撑,在重力的作用下崩塌^[5,27],客观上使洞穴

的体积增大,高和深的比值随之增大。岩层垂直节理的发育使崖壁崩塌后退,也能直接导致洞穴的消亡。在龙虎山地区因为洞穴受垂直流水影响较大,所以此种垂向消亡方式最为普遍。

5 结论

本文通过对龙虎山象鼻山栈道洞穴地貌发育特征的研究,分析总结了该处洞穴的成因及演化阶段,得出以下几个主要结论:

(1) 研究区河口组红层主要由冲积扇相砾岩构成,其中的洞穴发育主要受控于岩性因素。位于上下砾岩层之间的砂岩层抗风化能力相对较弱,更容易被侵蚀形成岩槽、额状洞穴、扁平状洞穴等。另外,粗大砾石、筛状沉积的聚集状砾岩与围岩之间的岩性界面诱发差异风化,导致砾岩更易于脱落(特别是可溶性的灰岩砾石)而形成洞穴雏形,后期持续的风化作用、水流侵蚀作用等使洞穴地貌进一步扩大。

(2) 丹霞地貌区暴雨期间形成沿陡崖倾泻而下的垂直水流,会在崖壁上形成串珠状垂向分布的洞穴。这种垂向分布的洞穴叠加在先存的横向断续分布的洞穴之上,形成惟妙惟肖的棋盘状复杂洞穴地貌景观。

(3) 洞穴地貌的形成可划分为早、中、晚三个阶

段。早期阶段胶结物水解、风化、空蚀等作用对红层进行选择性破坏;中期在降水、风化、生物等影响下洞穴进一步扩大;晚期阶段岩壁悬空,在重力作用下发生崩塌后退,形成新的赤壁丹崖。

致谢:龙虎山风景旅游区管理委员会领导和工作人员为本次野外数据采集提供了热情的帮助。

参考文献 (References)

- [1] CHAN K T. On the subdivisions of the red beds of South-Eastern China [J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1938, **18**: 301–324
- [2] 彭华. 中国丹霞地貌研究进展[J]. *地理科学*, 2000, **20**(3): 203–211 [PENG Hua. A survey of the Danxia landform research in China [J]. *Geoscience*, 2000, **20**(3): 203–211]
- [3] 齐德利. 中国丹霞地貌多尺度对比研究[D]. 南京:南京师范大学, 2005 [QI Deli. Multi-scale comparative study on Danxia geomorphology in China [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2005]
- [4] KUSKY T M, YE M H, WANG J P. Geological evolution of Longhushan World Geopark in relation to global tectonics [J]. *Journal of Earth Science*, 2010, **21**: 1–18
- [5] 郭福生, 姜伏伟, 胡中华, 等. 丹霞地貌危岩景观分类及可持续发展对策——以龙虎山景区为例[J]. *山地学报*, 2012, **30**(1): 99–106 [GUO Fusheng, JIANG Fuwei, HU Zhonghua, et al. Danxia landscape rockfall-landscape types and protection measures – a case study of Mt. Longhushan in Jiangxi, China [J]. *Mountain Research*, 2012, **30**(1): 99–106]
- [6] 黄进. 丹霞山地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 17–74 [HUANG Jin. Landform of Mt. Danxiashan [M]. Beijing: Science Press, 2010: 17–74]
- [7] 彭华, 邱卓炜, 潘志新. 丹霞山顺层洞穴风化特征的试验研究[J]. *地理科学*, 2014, **34**(4): 454–463 [PENG Hua, QIU Zhuowei, PAN Zhixin. Experimental study on the weathering features of bedding caves at Mt. Danxiashan [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, **34**(4): 454–463]
- [8] 谭艳, 朱诚, 吴立, 等. 广东丹霞山砂岩蜂窝状洞穴及白斑成因[J]. *山地学报*, 2015, **33**(3): 279–287 [TAN Yan, ZHU Cheng, WU Li, SUN Wei, et al. Geomorphogenesis on sandstone honeycombs and white spot in the Mt. Danxiashan, Guangdong Province, south China [J]. *Mountain Research*, 2015, **33**(3): 279–287]
- [9] HALL K, JOSELITO M A, BOELHOUWERS J, et al. The influence of aspect on the biological weathering of granites: observations from the Kunlun Mountains, China [J]. *Geomorphology*, 2005, **67**: 171–188
- [10] ZWALIŃSKA K, DĄBSKI M. Cavernous weathering forms in SW Iceland: a case study on weathering of basalts in a cold temperate maritime climate [J]. *Miscellanea Geographic*, 2012, **16**: 11–16
- [11] SIEDEL H, PFEFFERKORN S, PLEHWE L E, et al. Sandstone weathering in tropical climate: Results of low-destructive investigations at the temple of Angkor Wat, Cambodia [J]. *Engineering Geology*, 2010, **115**: 182–192
- [12] YONG R W, WRAY R A L, YOUNG A R M. Sandstone landforms [M]. Cambridge University Press, Cambridge University Press, 2009: 60–95
- [13] 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. *地球学报*, 2012, **33**(3): 257–279 [ZHANG Yueqiao, DONG Shuwen, LI Jianhua, et al. The new progress in the study of mesozoic tectonics of South China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, **33**(3): 257–279]
- [14] WANG D Z, SHU L S. Late Mesozoic basin and range tectonics and related magmatism in Southeast China [J]. *Geoscience Frontiers*, 2012, **3**: 109–124
- [15] 祖辅平, 李成, 王彬. 金衢盆地的沉积相[J]. *沉积学报*, 2004, **22**(3): 417–424 [ZU Fuping, LI Cheng, WANG Bin. Sedimentary facies and evolution of tectonic environments in the Jinhua-Quzhou Basin, Zhejiang Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, **22**(3): 417–424]
- [16] 陈留勤, 郭福生, 杨庆坤, 等. 江西永丰–崇仁盆地晚白垩世沉积体系及其演化模式[J]. *山地学报*, 2015, **33**(4): 416–424 [CHEN Liuqin, GUO Fusheng, YANG Qingkun, et al. The Late Cretaceous depositional systems and evolution model of the Yongfeng-Chongren Basin in Jiangxi Province [J]. *Mountain Research*, 2015, **33**(4): 416–424]
- [17] CHEN L Q, GUO F S, STEEL R J, et al. Petrography and geochemistry of the Late Cretaceous redbeds in the Gan-Hang Belt, Southeast China: implications for provenance, source weathering, and tectonic setting [J]. *International Geology Review*, 2016, **58**(10): 1196–1214
- [18] CHEN L Q, STEEL R J, GUO F S, et al. Alluvial fan facies of the Yongchong Basin: Implications for tectonic and paleoclimatic changes during Late Cretaceous in SE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, **134**: 37–54
- [19] SHU L S, ZHOU X M, DENG P, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Southeast China block: New insights from basin analysis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, **34**: 376–391
- [20] 姜勇彪, 郭福生, 胡中华, 等. 龙虎山世界地质公园丹霞地貌特征及与国内其他丹霞地貌的对比[J]. *山地学报*, 2009, **27**(3): 353–360 [JIANG Yongbiao, GUO Fusheng, HU Zhonghua, et al. A Study on the features of Danxia landform in Longhushan World Geopark and comparing with others in China [J]. *Mountain Research*, 2009, **27**(3): 353–360]
- [21] 江西省地质矿产厅. 江西省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 286–290 [Department of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province. Stratigraphy (lithostratic) of Jiangxi Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press,

- 1997: 286–290]
- [22] 陈丕基. 晚白垩世中国东南沿岸山系与中南地区的沙漠和盐湖化[J]. 地层学杂志, 1997, **21**(3): 203–213 [CHEN Piji. Coastal Mountains of SE China, desertization and saliniferous lakes of Central China during the Upper Cretaceous [J]. Journal of Stratigraphy, 1997, **21**(3): 203–213]
- [23] CHEN L Q, GUO F S, TANG C. Evolution of the Late Cretaceous Yongfeng-Chongren Basin in Jiangxi Province, Southeast China: insights from sedimentary facies analysis and pebble counting[J]. Mountain Research, 2016, **13**(2): 342–351
- [24] 郭福生, 姜勇彪, 胡中华, 等. 龙虎山世界地质公园丹霞地貌成景系统特征及其演化[J]. 山地学报, 2011, **29**(2): 195–201 [GUO Fusheng, JIANG Yongbiao, HU Zhonghua, et al. Evolution and genesis system features of Danxia Landform in Longhushan World Geopark [J]. Mountain Research, 2011, **29**(2): 195–201]
- [25] 刘晓娇, 徐娟, 张斌, 等. 川中丘陵区河成壶穴的形态对比及成因[J]. 山地学报, 2013, **31**(6): 723–730 [LIU Xiaojiao, XU Juan, ZHANG Bin, et al. Morphological comparison and cause of river potholes in Sichuan Hilly Area [J]. Mountain Research, 2013, **31**(6): 723–730]
- [26] FRANKL A, POESEN J, SCHOLIER N. Factors controlling the morphology and volume (v)-length (l) relations of permanent gullies in the Northern Ethiopian Highlands [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, **38**: 1672–1684
- [27] 黄进, 黄瑞红, 苏泽霖. 丹霞洞穴地貌的初步研究[J]. 经济地理(增刊), 1994: 33–47 [HUANG Jin, HUANG Ruihong, SU Zelin. A preliminary study of Danxia cave landforms [J]. Economic Geography (supplement), 1994: 33–47]
- [28] 朱诚, 马春梅, 张广胜. 中国典型丹霞地貌成因研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1–364 [ZHU Cheng, MA Chunmei, ZHANG Guangsheng. Development mechanisms of typical Danxia landforms in China [M]. Beijing: Science Press, 2005: 1–364]
- [29] 贺留杰. 龙虎山丹霞洞穴的成因、空间分布及对沉积古气候研究的关系[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 12 [HE Liujie. The causes and spatial distribution of the Longhushan Danxia cave and the relationship with the Paleo climate research [D]. Beijing: A Dissertation Submitted to China University of Geosciences for Master Degree, 2012: 12]
- [30] POPE G A, DORN R I, DIXON J C. A new conceptual model for understanding geographical variations in weathering [J]. Annals of the Association of American Geographers, 1995, **85**(1): 38–64
- [31] NEMEC W, STEEL R J. Alluvial and coastal conglomerates-their significant features [C]//In: KOSTER E H, STEEL R J (Eds.). Sedimentology of gravels and conglomerates. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir, 1984, **10**: 1–31
- [32] BLAIR T C, MCPHERSON J G. Processes and forms of alluvial fans [M]//In: PARSONS A J, ABRAHAMS A D (Eds.). Geomorphology of Desert Environments (2nd edition). Springer Science + Business Media B, 2009, **V**: 413–467
- [33] MAJOR J J. Pebble orientation on large, experimental debris-flow deposits [J]. Sedimentary Geology, 1998, **117**(3): 151–164
- [34] SOHN Y K, RHEE C W, KIM B C. Debris flow and hyperconcentrated flood-flow deposits in an alluvial fan, northwestern part of the Cretaceous Yongdong Basin, Central Korea [J]. The Journal of Geology, 1999, **107**(1): 111–132
- [35] 于布. 水力学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001: 116–127 [YU Bu. Hydraulics [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2001: 116–127]
- [36] 刘士和. 高速水流[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 13–19, 43–47 [LIU Shihe. High velocity flow [M]. Beijing: Science Press, 2005: 13–19, 43–47]
- [37] 严钦尚, 曾昭璇. 地貌学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985: 27 [YAN Qinshang, ZENG Zhaoxuan. Geomorphology [M]. Beijing: Higher Education Press, 1985: 27]
- [38] 黄进. 武夷山丹霞地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 38, 57 [HUANG Jin. Landform of Wuyishan [M]. Beijing: Science Press, 2010: 38, 57]
- [39] PARADISE T R. Tafoni and other rock basins [J]. Treatise on Geomorphology, 2013, **4**: 111–126

Origin Analysis of the Cavities along the Xiangbisha Cliffs in the Longhushan Global Geopark, Southeast China

LI Xinmin^{1,2}, GUO Fusheng^{1,2*}, CHEN Liuqin^{1,2}, WANG Fengzhi², LI Yuliang²

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, Nanchang 330013, China;

2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: The Late Cretaceous Hekou Formation in the Longhushan Global Geopark constitutes the bedrock of the present-day Danxia landforms. A large number of different cavities found along the rock cliffs are an important element of Danxia scenery system. The origin of these cavities has stimulated great interests among geologists and

geomorphologists for a long time. One outcrop section and the three-dimensional size, shape and lithology of 383 cavities were measured and recorded. The research results showed that the cavities were largely caused by differential weathering related with lithologic changes. The outsized pebbles and concentrated pebbles were easily weathered to form small cavities. The interbedded sandstone beds between the conglomerate beds were readily weathered to generate intermittent cavities, which were coalesced to form rock toughs and flat cavities because of continuous weathering. The rapid water flows caused by torrential rains had an important effect on the formation of the cavities. The vertical distribution pattern of the cavities were produced by erosion on the cliff faces. In addition, the water erosion, chemical and physical weathering, microscale climate changes, and biological activities also possibly enhanced the enlargement of the cavities. The rock walls would become unstable and suffer from sudden collapse at the late stage of the cavity development.

Key words: Danxia landform; cliff cavities; lithologic differences; water-flow erosion; Longhushan Global Geopark