#### DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.12.016

引文格式: 邓宗裕, 陈留勤, 杨柳, 刘鑫. 2024. 江西鹰潭月湖岩大型石拱地质特征及成因分析 [J]. 华东地质, 45(4): 478-487. (DENG Z Y, CHEN L Q, YANG L, LIU X. 2024. Geological characteristics and genesis of the large rock arch at Yuehuyan in Yingtan City of Jiangxi Province [J]. East China Geology, 45(4): 478-487.)

# 江西鹰潭月湖岩大型石拱地质特征及成因分析

# 邓宗裕,陈留勤,杨柳,刘鑫

(东华理工大学地球科学学院,江西南昌 330013)

摘要:石拱是丹霞地貌区重要的景观要素之一,大者又被称为天生桥,具有重要的地貌学研究意义和旅游 开发价值。月湖岩大型石拱位于江西信江盆地西部,是我国湿润区石拱的典型代表,目前对其成因鲜有报道。 文章通过野外地质调查、水分测试及室内样品薄片显微观察和盐化学实验,研究月湖岩大型石拱的地质特征 并探讨其成因。结果表明:研究区 NNE 向和近 EW 向断裂控制了石拱的空间产状;石拱由晚白垩世塘边组风 成砂岩组成,地层产状平缓,发育大型交错层理,结构成熟度高,渗透性较好,但成分成熟度低,富含化学稳定 性较弱的长石、岩屑及钙质胶结物,有利于发生溶蚀风化;断裂和层理交汇处的岩石较破碎,在河流侵蚀作用 下易发生溶蚀,风化物质随流水从山体底部流出,随着溶蚀和崩塌的持续发生,研究区山体南、北两侧被侵蚀 穿透,最终形成石拱。文章为理解丹霞地貌区石拱的成因机制提供了实际材料,同时对石拱保护和旅游开发 具有参考价值。

关键词:石拱;丹霞地貌;溶蚀风化;湿润气候;风成砂岩;江西鹰潭

中图分类号: P931 文献标识码: A 文章编号: 2096-1871(2024)04-478-10

在丹霞地貌区,石拱是洞穴地貌的常见类型 之一(郭福生等, 2020),一般将小型石拱称为穿 洞,大型石拱称为天生桥。近年来,对风化洞穴 的成因研究(Chen et al., 2019; Chen X, 2021; 刘东 兴等, 2022; 史月欣等, 2023; 谭艳等, 2015; 吴子 杰等, 2023)相对较多, 但对石拱的形成过程及控 制因素的研究相对较少。石拱在国际砂岩地貌 中较常见,比较著名的石拱位于美国犹他州阿切 斯国家公园(Starr et al., 2015)。不同地区的地质 背景、地理环境和物质基础不同,导致石拱的形 态和规模各异(Tan et al., 2021)。Řihošek et al. (2019)通过对自然侵蚀作用的模拟实验,提出了 石拱的一个小尺度物理模型,包括初始、成熟和 老年3个演化阶段,认为形成精巧石拱的基本条 件包括薄且直立方向较长并具有适当不连续性 的岩石,以及易受应力控制的侵蚀作用。对石拱 的形成机制,有学者认为节理和裂隙加剧了岩石 的破碎程度,使石拱易发生风化和崩塌(黄乐清 等,2023;杨昊坤,2017;朱诚等,2005),岩性是基 本要素(Chen et al.,2022;彭小华等,2021),重力 作用和盐风化是主要的影响因素(Rihosek et al., 2016)。Bruthans et al.(2014)对石拱的砂岩颗粒 应力场进行了可视化研究,发现重力引起的应力 可以减缓砂岩的风化速率与侵蚀速率。Ostanin et al.(2017)利用拓扑形状优化模型证实了应力与 侵蚀之间呈负反馈关系,认为石拱的形成是随机 表面力和莫尔-库仑定律驱动的砂岩自然侵蚀 过程。

综上可知,前人主要通过野外观测、室内样 品实验及计算机模拟等手段分析石拱的形成过程, 对石拱成因的认识还存在争议。位于江西省鹰潭 市的月湖岩是一个发育在白垩纪红色砂岩中的大

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2023-12-27 修订日期: 2024-06-17 责任编辑: 谭桂丽

基金项目:国家自然科学基金"中国东南和西北地区丹霞地貌陡坡上洞穴成因对比研究(编号:42361002)"项目资助。

第一作者简介:邓宗裕,2000年生,女,硕士研究生,主要从事丹霞地貌研究工作。Email: 1973270747@qq.com。

通信作者简介:陈留勤,1983年生,男,教授,博士,主要从事沉积岩、丹霞地貌与旅游地学研究工作。Email: liuqincheen@163.com。

型石拱,是千年古刹月岩寺的所在地,目前已被开 发为市民公园。本文以月湖岩大型石拱作为研究 对象,通过野外调查、水分测试、岩石样品薄片显 微观察及盐化学实验等方法,分析月湖岩石拱形 成的影响因素,探讨其形成过程,为石拱地貌景观 的保护及利用提供参考。

#### 1 研究区概况

月湖岩大型石拱位于赣东北信江盆地西部的 鹰潭市月湖区,紧靠龙虎山大道,占地面积约 151000 m<sup>2</sup>,海拔 43 m,地理坐标为117°1′31″E、 28°13′15″N(图1(a))。该区属于亚热带季风性湿 润气候,雨量充沛,光照充足,年均温较高,无霜期 长。从空中俯瞰,月湖岩为向南(寺庙)开口的 "U"字形(图1(b)),形态独特,是湿润区丹霞地 貌大型石拱的典型代表。位于石拱环抱中的月岩 寺始建于唐朝,已有1300余年的历史。 研究区 1960—2020 年气候参数变化如图 2 所示。该区平均气温约 18.5 ℃,年平均气温变化 较小。2007 年平均气温(19.6 ℃)最高,1984 年平 均气温(17.5 ℃)最低。年平均降水量为 1 063.9~ 2 616.8 mm,多年平均降水量为 1 806.8 mm。近 10 年来,年平均降水量为 1 928.9 mm,高于多年降 水量平均值 122.1 mm;年平均气温为 18.9 ℃,高 于多年平均气温 0.4 ℃;年平均相对湿度为 70%~ 80%。降水量与相对湿度变化趋势大致相同,平 均气温与相对湿度呈轴对称分布。

信江盆地是华南晚中生代典型的陆相断陷盆 地之一,呈近 EW 向延伸,晚白垩世龟峰群以陆相 红色碎屑岩为主(姜勇彪等,2013)。龟峰群自下 而上划分为河口组、塘边组和莲荷组,其中分布 在盆地南缘的河口组以粒径粗大的砾岩为主,是 形成龙虎山和龟峰等丹霞地貌的主要造景岩石。 分布在盆地中部的塘边组以发育大型交错层理风 成砂岩为特征(陈留勤等,2022;李晓宁等,2023;



(a).江西省数字高程模型(DEM)图(数据来自地理空间数据云);(b).月湖岩遥感影像图(底图据 Google Earth)

图1 研究区位置图 Fig. 1 Location of the study area



图2 鹰潭市 1960—2020 年气候参数变化图 Fig. 2 Climograph of Yingtan City from 1960 to 2020

刘鑫等,2019)。研究区位于信江盆地西部,出露的岩石为晚白垩世龟峰群塘边组风成砂岩。

# 2 研究方法

(1)野外调查。在野外使用地质罗盘仪测量 月湖岩大型石拱的产状,用直尺和激光测距仪测 量石拱的长度、高度和深度。为了解岩石表面相 对湿度的分布情况,使用便携式水分测试仪 (BLD2000)在石拱东侧顶部、底部及底部偏上位 置,沿着3条横向测线由左到右分别测量相对湿 度,大约每隔10 cm 测量1个值。

(2)室内研究。在石拱外围采集 2 块砂岩样 品(编号分别为 YY-1和 YY-26),磨制成厚约 0.03 mm的薄片,在偏光显微镜下观察颗粒结构、 组成及胶结物类型等。每个样品统计 500 个颗粒 直径完成粒度分析,从而判断沉积环境。另外,采 集石拱 2 个砂岩样品(编号分别为 YHY-22-1和 YHY-22-2)和 3 个砂岩风化表层样品(编号分别 为 YHY-22-3、YHY-22-4和 YHY-22-5),磨成粉末 并烘干后与去离子水按 1:5 混合制成溶液,震荡 72 h 后置于离心机(台式低速离心机,TD5A-WS) 中,用台式电导率仪测试溶液的电导率。通过电 感耦合等离子体发射光谱仪(Agilent 5100, ICP-OES 型)和离子色谱仪(Thermo Scientific, ICS-2100) 测量溶液中离子的类型和浓度。

#### 3 研究结果

#### 3.1 月湖岩大型石拱基本特征

石拱(穿洞)部分(图 1(b)中黄色虚线所示) 长 46.4 m, 宽 24.1 m, 西北侧外缘高 6.2 m, 东南部 内缘高 6.1 m, 中部顶高 5.2 m(图 3(a))。石拱东 南侧可见 1 条直立节理和 1 条倾斜节理。石拱南 侧直立陡崖上发育近平行排列的直立沟槽、突脊 和白色风化物(图 3(b)), 石刻被藻类覆盖。石 拱东南侧和西北侧可见大型斜层理(图 3(c)、 图 3(g))。石拱底部较开阔, 内顶密集发育小洞 穴(图 3(d)、图 3(e)), 直径为 2~8 cm, 洞穴内较 干燥, 可见白色碎屑、藻类和泥蜂(图 3(e))。同 时, 还常见结壳风化现象, 结壳厚度一般<5 mm (图 3(f))。石拱东南侧底部砂岩直立面上发育龟 裂微地貌(图 3(g)), 顶部观音像东南侧发育细沟 (图 3(h))。

研究区白露河是信江的支流,自南向北流至 鹰潭月湖区体育馆路大桥汇入信江。石拱西北侧 底部位于白露河凹岸,正在遭受河流侧向侵蚀 (图 3(i))。

#### 3.2 相对湿度

石拱东侧顶部、底部及底部偏上位置3条横 向测线的相对湿度值呈现出规律性的变化(图4)。 石拱底部相对湿度为25%~60%,底部偏上位置 相对湿度为20%~25%,顶部相对湿度为8%~



(a).月湖岩石拱(镜头方向 320°),可见直立和倾斜节理;(b).石拱东南侧陡崖上的沟槽和突脊;(c).石拱西北侧大型斜层理;(d).石 拱内西侧的近水平层理面;(e).石拱内顶部小洞穴发育,其内常见泥蜂;(f).石拱下部结壳风化现象;(g).石拱东南侧直立面上的龟 裂微地貌;(h).石拱顶部流水侵蚀形成的细沟;(i).石拱西北侧受白露河侧向侵蚀

图3 月湖岩石拱景观及地貌特征 Fig. 3 Landscape and landform features of Yuehuyan rock arch





Fig. 4 Vertical changes of relative humidity values at Yuehuyan

16%,底部相对湿度平均值(38.15%)明显高于顶 部相对湿度平均值(10.40%)。此外,石拱底部偏 上位置的相对湿度值变化较小。

#### 3.3 砂岩结构和成分

在偏光显微镜下,砂岩样品的碎屑颗粒主要 呈次圆状,粒径大小主要为 0.12~1.05 mm, 磨圆 度及分选性较好(图 5)。碎屑颗粒成分主要为石 英(包括单晶石英和燧石、脉石英等多晶石英)、 岩屑、长石及少量云母,颗粒之间以点-线接触为 主;填隙物主要为钙质胶结物和铁质胶结物,含量 为5%~10%,杂基含量约为3%。其中,石英颗粒 含量为40%~50%,表面干净,可见裂纹,部分具 有次生加大边;钾长石颗粒含量为6%~10%,斜 长石发育聚片双晶,含量约为5%;岩屑主要有泥 岩和火山岩等,含量约为10%。长石矿物的溶蚀 现象较明显。粒度分析结果表明:粒径中值为 3.01¢,频率曲线呈单峰,概率累积曲线以跳跃组 分为主,标准偏差为0.49,说明组成石拱的砂岩结 构成熟度较高,但成分成熟度较低,反映了风成砂 岩的沉积特点(王宇佳等, 2019)。

#### 3.4 样品盐化学分析

研究区 5 个样品的盐化学实验结果如表 1 所示。样品 YHY-22-1 采自石拱顶部,具有最低的电

导率值(155 μS/cm)和离子浓度。样品 YHY-22-2 采自石拱西侧内底部,样品 YHY-22-3、YHY-22-4

和 YHY-22-5 采自石拱东南侧直立面上的小洞穴 及附近。样品 YHY-22-3 具有最高的电导率值(2090



(a).正交光照片;(b).单偏光照片;(c).频率曲线图;(d).累积曲线图;(e).概率累积曲线图;Qm.单晶石英;Qp.多晶石英;Fp.钾长石;Pl.斜长石;Cal.钙质胶结物

#### 图5 月湖岩砂岩显微照片及粒度分析图

Fig. 5 Microscopic photos and grain-size analysis of the sandstone samples at Yuehuyan

#### 表1 月湖岩样品电导率与盐化学实验结果 Table 1 Conductivity and salt chemistry results of samples at Yuehuyan

样品编号	电导率	$\mathbf{K}^{+}$	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl-	${\rm SO_4}^{2-}$	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	μS/cm				mg/L			
YHY-22-1	155.0	2.70	0.80	12.3	0.80	7.30	5.90	1.00
YHY-22-2	1 670.0	11.0	3.60	165	9.70	40.1	317	434
YHY-22-3	2 090.0	10.2	8.10	237	13.5	54.7	362	675
YHY-22-4	1 280.0	7.30	4.30	108	11.2	36.5	53.2	608
YHY-22-5	1 290.0	8.50	2.50	159	6.70	7.30	399	47.9

 $\mu$ S/cm),离子浓度也最高。样品主要的阴离子为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和 Cl<sup>-</sup>,其中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量最高,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量 次之,Cl<sup>-</sup>含量最低,说明主要的盐类型为硝酸盐 和硫酸盐;阳离子主要为 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>和 Na<sup>+</sup>,其 中 Ca<sup>2+</sup>含量最高,说明以钙盐为主。

#### 4 成因分析

#### 4.1 构造和岩性条件

中国东南部地区在渐新世末一中新世初发生 了构造抬升(Wang et al., 2020; 郭福生等, 2023), 包括信江盆地在内的众多陆相红盆发生整体抬升 后形成了断块。信江盆地及邻区主要发育 NNE 向和近 EW 向断裂(陆凡等, 2023; 杨明桂等, 2016),控制了断块的产状和空间分布格局。区域 上, NNE 向和近 EW 向断裂控制了月湖岩大型石 拱的空间产出形态。月湖岩大型石拱轴的走向近 SN 向(图 1(b)),与研究区 NNE 向断裂大致相当。 在石拱南侧亦可见 1 条直立节理和 1 条倾斜节理 (图 3(a)),断块抬升和断裂发育形成山体,是石 拱演化的内动力因素。岩石破裂后,更易受到流 水侵蚀和溶蚀的影响。

研究区石拱由晚白垩世塘边组风成砂岩组成, 砂岩单层厚度大,分选性较好,磨圆度高,岩 屑、长石及钙质胶结物等不稳定组分含量较高 (图 5),易受流水侵蚀和溶蚀作用的影响,抗风化 能力较弱。砂岩中不稳定组分的化学风化(主要 表现为钾长石向黏土矿物转变以及岩屑和钙质胶 结物的化学溶蚀)导致碎屑颗粒之间的结合力降 低,砂岩结构的完整性被破坏,在宏观上主要表现 为粒状风化。所以, 塘边组风成砂岩的结构和组 成特征决定了研究区及邻区总体以低矮圆丘地形 为主,而月湖岩以南约10km的龙虎山高大陡崖 的造景岩石则是河口组砾岩(陈留勤等, 2022; 刘 鑫等,2019)。同时,石拱底部层理面处有水流渗 出,相对湿度高,风化速率相对较大;石拱顶部细 沟沿着纹层面发育,均指示了岩性是地貌发育的 基本要素。

#### 4.2 应力机制

石拱自重是重要的荷载,会导致岩石内部的 应力发生变化,重力引起的应力可以降低岩石的 风化速率(Goudie, 2016)。但是,石拱的内部载荷 受外部环境影响,干湿应力的变化主要受湿度的 影响。月湖岩位于亚热带季风性湿润气候区,降 水具有明显的季节性变化。在雨季,由于亲水性 矿物的存在,砂岩吸收水分导致岩石发生膨胀(姜 伏伟等, 2018),从而使砂岩的裂缝扩张甚至破裂。 在干燥季节,由于砂岩分选性好,排列紧密,深层 水向表层的渗透速率小于表层水的蒸发速率,岩 石内、外含水率的差异使岩石由表及里收缩变形, 压应力限制了裂隙扩张,因此岩石在干燥情况下 较少发生崩解(赵奎等, 2021)。类似的实例有:浙 江烂柯山天生石梁的砂岩受干湿循环影响呈球面 状剥落,导致大部分失去了胶结而变得松散(谭玉 芳等, 2019)。

石拱顶部与底部的相对湿度存在明显差异 (图 4)。顶部相对干燥,水分蒸发速度快,不容易 发生破裂崩塌;底部相对湿润,砂岩吸水膨胀,容 易发生破裂崩塌。此外,在石拱底部两侧均发育 大型斜层理(图 3(c))以及岩性分界面(层理面) (图 3(d)),这些不连续面控制着砂岩的力学特 性。层理面倾角越小,可承受外荷载的有效面积 越小,在裂隙尖端应力集中越明显,更易形成宏观 裂纹(王桂林等, 2018)。层理面处的泥质岩层渗 透性较差,导致水流渗出,并搬运了风化物质,这 加速了层理面处的风化速率。在风化侵蚀作用下 形成了穿洞,后来穿洞逐渐扩大后形成了石拱。 在石拱形成的过程中,石拱东、西两侧应力相对 集中,砂岩结构被压实紧密,抗风化能力相对增强。 而石拱中部由于应力的释放分散,抗风化能力相 对减弱,形成了总体结构较为稳定的石拱(Řihošek et al., 2019).

#### 4.3 石拱演化过程

渐新世末一中新世初,研究区发生构造抬升, 在 NNE 向断裂和近 EW 向断裂的切割及风化作 用下,研究区形成了呈 NNE 向延伸的断块山体 (图 6(a))。山体底部发育近水平的层理面,不仅 使在山体中渗流的水流出,而且加速了山体底部 的化学风化进程,促成了石拱雏形的形成。山体 底部被侵蚀穿透,推测古代白露河可能发挥了重 要作用(图 6(b))。由于月湖岩寺庙的修建,古代 河流侵蚀痕迹已经难以追索,目前白露河正在对



(a).构造抬升,形成 NNE 向延伸的断块山体;(b).层理和节理交叉部位岩石破碎,被河流侵蚀后下部岩块崩塌,形成穿洞,压应力向两侧集中;(c).随着风化作用的持续,穿洞扩大后形成石拱;(d).月湖岩石拱的放大图,河流正在其北西侧发生侧向侵蚀

图6 月湖岩石拱演化过程图 Fig. 6 Evolution model of the Yuehuyan rock arch

石拱的西北侧进行侧向侵蚀(图 3(i)和图 6(c))。

研究区样品盐化学实验结果(表 1)指示参与 盐风化的盐类主要为硝酸盐和硫酸盐,其在水的 参与下与岩石发生化学反应,风化产物被水流带 出山体。洞穴形成中期,河流穿过洞穴时,加速了 岩石的溶蚀风化和洞穴的形成进程。当山体底部 被侵蚀穿透时,压应力便逐渐转移到石拱的东、 西两侧,而石拱中部压应力相对较小区域的砂岩 颗粒便发生剥落(Bruthans et al., 2014),经过多次 循环侵蚀,最后形成了大型石拱。

# 5 结论

(1)月湖岩大型石拱的基岩是晚白垩世塘边 组风成砂岩,其结构成熟度较高,渗透性较好,但 成分成熟度低,富含长石、岩屑颗粒及钙质胶结 物等化学稳定性较差的组分,为发生化学溶蚀提 供了物质基础。

(2)区域上, NNE 向和近 EW 向断裂控制了 月湖岩大型石拱的空间产出状态, 流水侵蚀和溶 蚀风化是形成月湖岩石拱的主要外动力。月湖 岩大型石拱底部发育近水平薄层泥质岩层,从山 体下渗的雨水经过此岩性界面后流出并搬运风化 物质。在频繁降水和河流侵蚀作用下,山体底部 被蚀穿,压应力逐渐向穿洞的两侧集中,导致穿 洞中部比两侧风化更快,穿洞逐渐扩大后即形成了大 型石拱。

#### References

- BRUTHANS J, SOUKUP J, VACULIKOVA J, FILIPPI M, SCHWEIGSTILLOVA J, MAYO A L, MASIN D, KLETETSCHKA G, RIHOSEK J. 2014. Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion[J]. Nature Geoscience, 7(8): 597-601.
- CHEN X, CHEN L Q, ZHANG Y H, DU D D, HU H P, LIU D X, LI W Z. 2021. Lithological and environmental controls on large tafoni along conglomerate cliffs in subtropic humid Danxiashan UNESCO Global Geopark[J]. Journal of Mountain Science, 18(5): 1131-1143.
- CHEN L Q, GUO F S, LIU F J, XU H, DING T, LIU X. 2019. Origin of tafoni in the Late Cretaceous aeolian sandstones,

Danxiashan UNESCO Global Geopark, South China[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 93(2): 451-463.

- CHEN L Q, GUO F S, SHAO C J, DU D D, CHEN F, LUO M. 2022. Geodiversity characterization of the Danxiashan UN-ESCO Global Geopark of China[J]. International Journal of Geoheritage and Parks, 10(4): 459-476.
- CHEN L Q, GUO F S, SHAO C J, LOU F S, LI B, LI G R, QIE H M, WU Z Y, JIANG Y B, LIU F J. 2022. Characteristics and controlling factors of Danxia landscapes in Jiangxi Province[J]. Acta Geologica Sinica, 96(11): 4023-4037 (in Chinese with English abstract).
- GOUDIE A S. 2016. Quantification of rock control in geomorphology [J]. Earth-Science Reviews, 159: 374-387.
- GUO F S, CHEN L Q, YAN Z B, LIU F J, PAN Z X, ZHANG W Q, HU H P. 2020. Definition, classification, and danxianization of Danxia landscapes[J]. Acta Geologica Sinica, 94(2): 361-374 (in Chinese with English abstract).
- GUO F S, LING Y Y, CHEN L Q, ZHOU W P, LI H W, CHENG L K, WU Z C, LI G R, GUO Z, LI B. 2023. Controlling factors and types of geomorphologic landscapes in Danxiashan UNESCO Global Geopark of China[J]. Geoscience, 37(6): 1665-1679 (in Chinese with English abstract).
- HUANG L Q, WU C H, ZHOU L Y, JIN N, PENG S L, HU N Y, YANG C M, CHEN J. 2023. New perspectives of the features, formation, and evolution of the special Danxia landscape in Chenzhou, Hunan[J]. Geoscience, 37(6): 1680-1694 (in Chinese with English abstract).
- JIANG Y B, GUO F S, CHEN S S. 2013. Spatial distribution and its genesis of the Danxia landforms in Xinjiang basin, Jiangxi[J]. Mountain Research, 31(6): 731-737 (in Chinese with English abstract).
- JIANG F W, GUO F S, YANG A L. 2018. Differential expansion and contraction characteristics of Danxia landform rock mass and its geomorphological effect[J]. Mountain Research, 36(4): 501-508 (in Chinese with English abstract).
- LI X N, JIANG Y B, WANG P P. 2023. Features and genesis analysis of Danxia landscape in the northwest foothills of the Wuyi Mountains[J]. East China Geology, 44(2): 228-238 (in Chinese with English abstract).
- LIU D X, CHEN X, CHEN L Q, GUO F S, LIU F J. 2022. Genesis of tafoni in the Cuiwei Peak, Jiangxi province, China[J]. Mountain Research, 40(2): 196-204 (in Chinese with English abstract).
- LIU X, GUO F S, CHEN L Q, LI X M, LIU F J. 2019. Lithologic control on the development of Danxia landscapes in red basins[J]. Mountain Research, 37(2): 214-221 (in Chi-

nese with English abstract).

- LU F, ZHANG Y, ZHANG X H, MO Z F, LÜ J S, WU B. 2023. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological significance of the Chakeng granite porphyry, northeast Jiangxi Province [J]. East China Geology, 44(1): 39-50 (in Chinese with English abstract).
- OSTANIN I, SAFONOV A, OSELEDETS I. 2017. Natural erosion of sandstone as shape Optimisation[J]. Scientific Reports, 7(1-4): 17301.
- PENG X H, WU H, LI X W, ZHANG Y, ZHU J. 2021. Danxia landform types and development mechanism in Yan'an City[J]. Arid Land Geography, 44(2): 418-426 (in Chinese with English abstract).
- RIHOSEK J, BRUTHANS J, MASIN D, FILIPPI M, CAR-LING G T, SCHWEIGSTILLOVA J. 2016. Gravity-induced stress as a factor reducing decay of sandstone monuments in Petra, Jordan[J]. Journal of Cultural Heritage, 19: 415-425.
- ŘIHOŠEK J, SLAVÍK M, BRUTHANS J, FILIPPI M. 2019. Evolution of natural rock arches: a realistic small-scale experiment[J]. Geology, 47(1): 71-74.
- SHI Y X, CHEN L Q, DU D D, CHAI L, WANG Z H. 2023. Basic characteristics and genesis of cavernous weathering features on the steep slopes of Danxia landscape in Danxiashan UNESCO Global Geopark[J]. Tropical Geography, 43(1): 103-114 (in Chinese with English abstract).
- STARR A M, MOORE J R, THORNE M S. 2015. Ambient resonance of mesa arch, Canyonlands National Park, Utah[J]. Geophysical Research Letters, 42(16): 6696-6702.
- TAN Y F, LI L H, HUANG B X. 2021. Contrasting characteristics and origin of Danxia arched rock shelters in Zhejiang, China, and natural arches and bridges on the Colorado Plateau, USA[J]. Journal of Geographical Sciences, 31(6): 802-818.
- TAN Y F, LI L H, YANG Z F, LIAO X H. 2019. Moisture stress effect and its control on differential weathering of redbed sandstone and conglomerate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38(S2): 3481-3492 (in Chinese with English abstract).
- TAN Y, ZHU C, WU L, SUN W, WANG X C, JIA T J, PENG H, HOU R F. 2015. Geomophogensis on sandstone honeycombs and white spot in the Mt. Danxiashan, Guangdong Province, South China[J]. Mountain Research, 33(3): 279-287 (in Chinese with English abstract).
- WANG Y J, CHEN L Q, LI W H, LI P C. 2019. Detrital zircon U-Pb dating of the Late Cretaceous aeolian sandstones from the Tangbian Formation in the Yiyang area of Jiangxi

- WANG G L, LIANG Z Y, ZHANG L, SUN F. 2018. Study of influence mechanism of Z-type fissure on sandstone strength and fracture behavior[J]. Rock and Soil Mechanics, 39(S2): 389-397 (in Chinese with English abstract).
- WANG Y, WANG Y J, LI S B, SEAGREN E, ZHANG Y Z, ZHANG P Z, QIAN X. 2020. Exhumation and landscape evolution in eastern South China since the Cretaceous: new insights from fission-track thermochronology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 191: 104239.
- WU Z J, QIU L W, WANG H P, ZHONG M S, GAO F L, HOU J, LI X. 2023. Discovery and significance of salt weathering tafoni in Meso-Neoproterozoic sandstone in Dalian area, Liaoning Province[J]. Geological Review, 69(6): 2158-2160 (in Chinese with English abstract).
- YANG H K. 2017. Genesis on the characteristics and formation mechanism of the Danxia landform in Zhejiang Province Jiangxi Province and Fujian Province [D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- YANG M G, WANG G H, XU M G, HU Q H. 2016. Basic characteristics of the Marina Pacific tectonic activities in Jiangxi Province and its adjacent areas[J]. East China Geology, 37(1): 10-18 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO K, RAN S H, ZENG P, YANG D X, TENG T Y. 2021. Effect of moisture content on characteristic stress and acoustic emission characteristics of red sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 42(4): 899-908 (in Chinese with English abstract).
- ZHU C, PENG H, LI S C, HUANG L Y, ZHENG C G, XI-ANG F S, SUN Y F, TANG Y S, HU J Y, ZHU G H, LU J J, CHENG G H. 2005. Danxia landform genesis on Qiyun Mountain, Anhui Province[J]. Acta Geographica Sinica, 60(3): 445-455 (in Chinese with English abstract).

# 附中文参考文献

- 陈留勤, 郭福生, 邵崇建, 楼法生, 李斌, 黎广荣, 郄海满, 吴知 勇, 姜勇彪, 刘富军. 2022. 江西省丹霞地貌特征及其控制 因素探讨[J]. 地质学报, 96(11): 4023-4037.
- 郭福生,陈留勤,严兆彬,刘富军,潘志新,张炜强,胡海平. 2020.丹霞地貌定义、分类及丹霞作用研究[J].地质学报, 94(2):361-374.
- 郭福生,凌媛媛,陈留勤,周万蓬,李宏卫,程亮开,吴志春,黎 广荣,国振,李斌. 2023. 丹霞山世界地质公园地貌景观控

制因素与景观类型研究[J].现代地质,37(6):1665-1679.

- 黄乐清, 吴驰华, 周丽芸, 金妮, 彭世良, 胡能勇, 杨长明, 陈 杰. 2023. 湖南郴州丹霞地貌景观特征、成因及演化探 讨[J]. 现代地质, 37(6): 1680-1694.
- 姜勇彪, 郭福生, 陈珊珊. 2013. 江西信江盆地丹霞地貌空间 分布及其成因[J]. 山地学报, 31(6): 731-737.
- 姜伏伟, 郭福生, 杨安林. 2018. 丹霞地貌岩体差异胀缩特征 及其成景作用[J]. 山地学报, 36(4): 501-508.
- 李晓宁,姜勇彪,王盼盼. 2023. 武夷山脉西北麓丹霞地貌特 征及成因分析[J]. 华东地质, 44(2): 228-238.
- 刘东兴, 陈欣, 陈留勤, 郭福生, 刘富军. 2022. 江西宁都翠微 峰蜂窝状洞穴特征及成因[J]. 山地学报, 40(2): 196-204.
- 刘鑫,郭福生,陈留勤,李馨敏,刘富军.2019. 红层盆地岩 性差异对丹霞地貌发育的控制[J]. 山地学报, 37(2): 214-221.
- 陆凡,张勇,张雪辉,莫子奋,吕劲松,武彬. 2023. 赣东北茶坑 花岗斑岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意 义[J]. 华东地质,44(1): 39-50.
- 彭小华, 吴昊, 李兴文, 张瑜, 祝捷. 2021. 延安地区丹霞地貌 类型及发育机制研究[J]. 干旱区地理, 44(2): 418-426.
- 史月欣, 陈留勤, 杜丁丁, 柴乐, 王子涵. 2023. 丹霞山陡坡上 风化洞穴的基本特征及成因探讨[J]. 热带地理, 43(1): 103-114.
- 谭玉芳,李丽慧,杨志法,廖小辉.2019.红层砂岩与砾岩差异 风化的湿度应力效应研究[J].岩石力学与工程学报, 38(S2):3481-3492.
- 谭艳,朱诚,吴立,孙伟,王晓翠,贾天骄,彭华,侯荣丰. 2015. 广东丹霞山砂岩蜂窝状洞穴及白斑成因[J].山地学报, 33(3):279-287.
- 王宇佳, 陈留勤, 李文灏, 李鹏程. 2019. 江西弋阳晚白垩世塘 边组风成砂岩碎屑锆石 U-Pb 定年及其物源意义[J]. 地 质通报, 38(4): 667-679.
- 王桂林,梁再勇,张亮,孙帆. 2018. Z 型裂隙对砂岩强度和破裂行为影响机制研究[J]. 岩土力学, 39(S2): 389-397.
- 吴子杰, 邱隆伟, 王海鹏, 仲米山, 高福亮, 侯静, 李欣. 2023. 辽宁大连地区中—新元古界砂岩盐风化穴的发现及意 义[J]. 地质论评, 69(6): 2158-2160.
- 杨昊坤. 2017. 浙赣闽典型丹霞地貌景观特征与形成机 理[D]. 南京: 南京大学.
- 杨明桂, 王光辉, 徐梅桂, 胡青华. 2016. 江西省及邻区滨太平 洋构造活动的基本特征[J]. 华东地质, 37(1): 10-18.
- 赵奎, 冉珊瑚, 曾鹏, 杨道学, 腾天野. 2021. 含水率对红砂 岩特征应力及声发射特性的影响[J]. 岩土力学, 42(4): 899-908.
- 朱诚, 彭华, 李世成, 黄林燕, 郑朝贵, 项伏生, 孙毓飞, 唐云松, 胡济源, 朱光辉, 吕健君, 程光华. 2005. 安徽齐云山丹 霞地貌成因[J]. 地理学报, 60(3): 445-455.

# Geological characteristics and genesis of the large rock arch at Yuehuyan in Yingtan City of Jiangxi Province

#### DENG Zongyu, CHEN Liuqin, YANG Liu, LIU Xin

(School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: Rock arch is a type of remarkable landform in the danxia landscape area, and the large arch is usually named as natural bridge, which has important geomorphological meaning and tourism development value. The Yuehuyan arch is located in the western Xinjiang Basin of Jiangxi Province, which is a representative rock arch in the humid climate area of China. However, there were few reports on its formation process. The research in this paper conducted field survey, moisture test, observation under a polarizing microscope and salt chemistry experiment to study the characteristics and genesis of the Yuehuyan arch. The results show that both the NNE-trending and near EW-trending fractures controlled the spatial occurrence of the rock arch in the study area. The bedrock is composed of Upper Cretaceous aeolian sandstones of the Tangbian Formation, characterized by large-scale cross-beddings, high textural maturity and good permeability. They are conducive to dissolution weathering owing to low compositional maturity and abundant feldspar, lithic fragments and calcite cements. The sandstones at the intersection of fractures and bedding surfaces are prone to be broken, which is easily dissolvable under the action of river erosion, and the weathered materials were removed from the bottom of the rock mass. With the continuous dissolution weathering and collapse, the north and south flanks of the rock mass were eroded and penetrated into the arch eventually. This study provides solid materials for understanding the formation processes of arches in humid danxia landscape areas, which is significant for the protection and tourism development of arches.

Key words: rock arch; danxia landscape; dissolution weathering; humid climate; eolian sandstone; Yingtan of Jiangxi