

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.01.023

四川盆地北部方山地区砂岩洞穴特征、成因分析 ——以四川营山地质公园为例

韩艳, 罗培, 陈俊伊, 陈秋艳, 张凤秋, 文星跃

(西华师范大学, 四川 南充 637002)

摘 要:以四川盆地北部营山县的四川营山地质公园中蓬莱镇组砂岩洞穴为研究对象,在资料文献收集、野外考察的基础上,对研究区砂岩洞穴的分布和类型等特征进行了分析。利用地貌学的研究方法,采用导线法原理对洞穴进行测量,对研究区不同类型砂岩洞穴的成因进行了探讨。结果表明,莲花状构造背景下和缓的褶皱构造、构造裂隙和风化裂隙是该区域形成方山地貌乃至砂岩洞穴群的构造条件;蓬莱镇组含钙质长石砂岩夹泥页岩地层是洞穴发育的物质基础;砂岩中发育的裂隙水是水洞形成的重要水文地质条件;岩层差异性风化是旱洞形成的主要原因;岩溶作用、水解作用和崩塌作用是砂岩水洞形成的主要原因。

关键词:砂岩洞穴;四川盆地北部;方山地区;莲花状构造;特征成因

中图分类号:P931.5

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2020)01-0243-11

Characteristics and Geomorphogenesis on Sandstone Caves in Fangshan Area of the Northern Sichuan Basin ——a Case of the Sichuan Yingshan Geological-park

HAN Yan, LUO Pei, CHEN Junyi, CHEN Qiuyan, ZHANG Fengqiu, WEN Xingyue

(China West Normal University, Nanchong 637002, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, the sandstone caves of Penglai formation have been taken as the research objects, which is located in Sichuan Yingshan Geological Park of Fangshan area of Northern Sichuan Basin. On the basis of data collection and field investigation, the distribution and types of sandstone caves in the study area were analyzed. Using the method of geomorphology, the caves are measured by wire method, this paper discusses the genesis of different types of sandstone caves in the study area. The results are as follows: The gentle lotus-shaped fold structured fissure and weathering fissure are the tectonic conditions for forming the Fangshan landform and the sandstone caves in this area; the calcareous arkose sandstone with shale in the Penglai formation

收稿日期:2019-08-08;**修回日期:**2019-09-04

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划项目“川东北蓬莱镇组砂岩洞穴群特征及成因分析——以拟建四川营山黑马山地质公园为例”(201810638038),四川省国土资源厅项目“基于旅游供给侧改革的地质遗迹保护与开发模式研究”(KJ-2017-8),国家自然科学基金项目“岷江上游地区晚第四纪环境变化的古土壤记录与古文化响应”(41671220),西华师范大学“地质遗迹保护与开发”科研创新团队(CXTD2016-4)

作者简介:韩艳(1993-),女,四川人,硕士,主要从事地貌学和旅游地学研究。E-mail: hy2anan@163.com

is the material basis for the development of the caves; the fracture water developed in the sandstone is an important hydrogeological condition for the formation of water tunnel; differential weathering of rock layers is the main reason for the formation of dry caves; karstification, hydration and collapse are the main reasons for the formation of sandstone water tunnels.

Keywords: Sandstone caves; the Northern Sichuan Basin; Fangshan area; lotus-formed structure; characteristics and geomorphogenesis

洞穴指自然条件下形成的地下空间,是自然界中景观的一种。按照岩石分类,洞穴可分为岩溶洞穴和非岩溶洞穴。其中,非岩溶洞穴包括砂岩洞穴、砾岩洞穴、黄土洞穴、冰川洞穴和花岗岩洞穴等(朱德浩,1988)。目前,对洞穴的研究主要以岩溶洞穴为主,成果多且逐渐形成体系(罗培等,2004;朱学稳,2005;杨晓霞等,2013;张绍云等,2016;韦跃龙等,2016; D'ANGELI I M, et al., 2017; SZCZY-GIE J, et al., 2018),而对非岩溶洞穴的研究较少。

中国碳酸盐出露面积 91 万 km^2 (李大通等, 1983), 红层覆盖面积同其差距不大, 为 82.6 万 km^2 (郭永春等, 2007)。砾岩、砂砾岩和砂岩所形成的丹霞地貌, 是红层地貌的典型代表, 主要分布在大型红层盆地边缘, 占比有限。而占很大比重的却是盆地中部由砂岩、粉砂岩和泥质岩构成的低山丘陵区域(彭华等, 2013)。

砂岩洞穴是一种重要地质遗迹, 为地貌景观资源。中国对砂岩洞穴的研究成果主要集中在红层地貌区或丹霞地貌区, 如广州(彭华, 2014; 谭艳等, 2015; 陈留勤, 2018)、浙江(欧阳杰, 2009; 朱诚, 2009)、福建(梁诗经等, 2008; 魏勇, 2013)、江西(贺留杰, 2012; 李馨敏等, 2018)、甘肃(柯雨田, 2018; 刘宇, 2018)和青海(保广普等, 2018)等地, 研究对象主要为顺层发育的凹槽、蜂窝状洞穴或者岩腔, 浅小且较干燥。而其他砂岩地貌区, 如张家界地貌区和嶂石岩地貌区, 由于砂岩洞穴发育不典型, 研究较少。目前, 四川盆地是出露面积最大的红层盆地, 达 26 万 km^2 (彭华等, 2011), 其在湖盆时期接受了大量沉积, 白垩系和侏罗系岩层广布, 砂岩占很大比重, 砂岩洞穴发育典型, 却少有人关注。

四川盆地北部营山一片, 受莲花状构造和外力作用影响形成了典型的低山区方山地貌, 该类方山多阶梯状台地。方山陡壁以及与台阶交接部位多发育砂岩洞穴, 数量众多, 分布集中, 且一些砂岩洞穴

洞径深长, 内部有大量积水, 具较强的科普科研和旅游价值。在旅游供给侧改革和全域旅游大背景下, 旅游经济不发达的四川盆地北部地区, 砂岩洞穴是一种重要的旅游资源, 亟需得到合理开发和科学保护。笔者以 2018 年拟建四川营山地质公园典型的砂岩洞穴为例, 通过资料收集、野外考察和导线法测量等地貌学研究方法对盆北方山区砂岩洞穴的分布、形态以及成因演化进行初步分析, 进而给研究区砂岩洞穴这种自然资源的保护和开发提供一些指导, 促使其经济、生态效益相统一, 创造良好的社会效益。

1 研究区概况

根据 1980 年四川省地貌区划编写组提出的四川省地貌区划方案, 梓潼、盐亭、南部、阆中、营山一线以北, 广元、旺苍、南江一线以南 28 891 km^2 的区域为盆北低山区, 区内多厚层砂岩, 地貌上主要以山顶平坦、四周陡峭的桌状山(方山)为主, 该类方山呈长梁状, 两侧多发育阶梯状台地(四川省地方志编纂委员会编纂, 1996)。由于特殊的构造背景, 以及白垩系、侏罗系的岩层组合条件, 区域内方山陡崖或者崖麓结合部位发育大量的砂岩洞穴, 由于数量众多, 地处山区, 发育部位特殊, 类型多样, 这些砂岩洞穴成为该区域内特有的地质遗迹景观, 不但承载着川北大巴山区特有的“寨堡文化”和巴人文化, 更成为山区旅游的重要地学旅游资源。四川营山地质公园, 位于四川省南充市营山县北部, 由黑马山园区、太蓬山园区、磨刀岭—孔雀洞园区 3 个独立园区组成, 分布范围为东经 $106^{\circ}44'17'' \sim 106^{\circ}54'32''$, 北纬 $31^{\circ}13'31'' \sim 31^{\circ}21'29''$ (图 1)。砂岩洞穴和长梁状方山是其重要的地质遗迹保护对象和旅游开发资源。

2 研究区洞穴特征

2.1 分布特征

四川营山地质公园面积为 77 km²,分布着约 50 个砂岩洞穴。通过 GPS 野外洞口定点,并完成洞穴分布图(图 1),由图 1 可知,除头洞、二洞和三洞这 3 个由流水侵蚀形成的洞穴分布在低海拔,大部分洞穴都分布在山体的中上部长梁状阶梯式方山崖壁与陡崖和台阶交界处,呈现出“大分散小集中”的特点。实地考察结合图 2 可知,洞穴主要在蓬莱镇组中发育,集中分布在 417~517 m 和 680~780 m 2 个高程段(图 3)。

2.2 分类特征

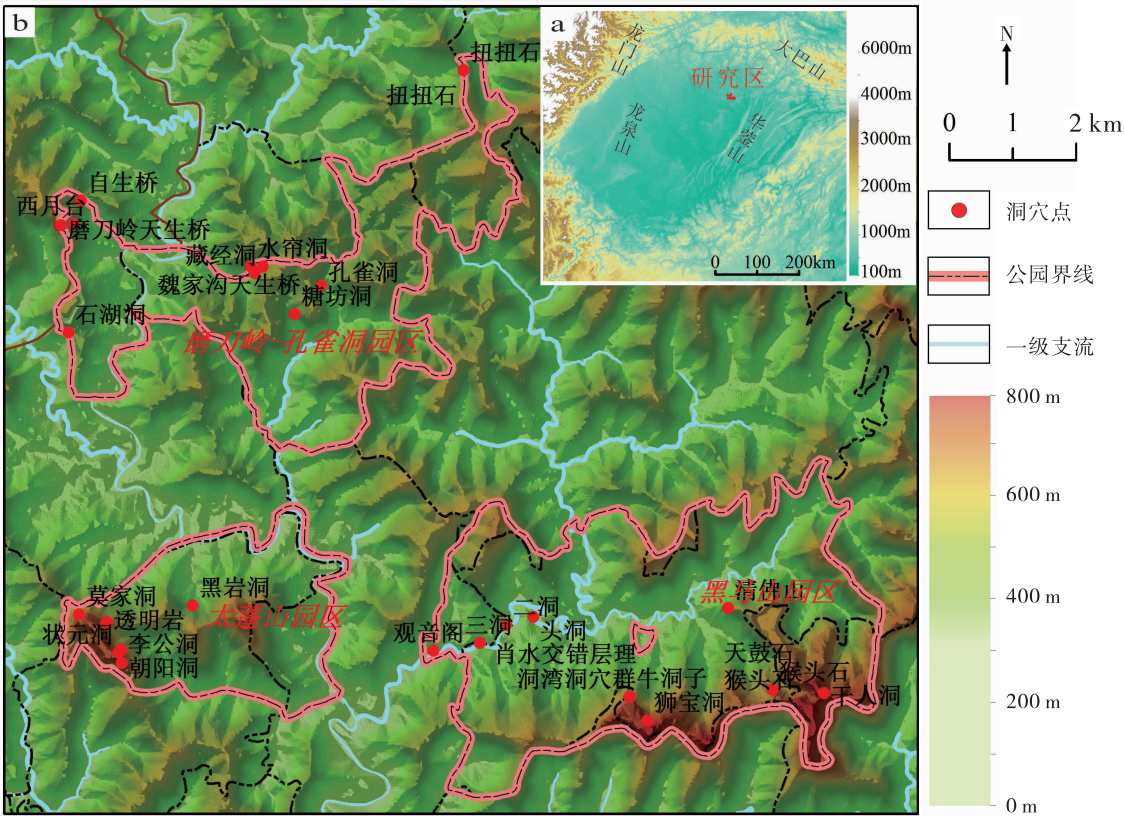
2.2.1 按水文条件分类

在营山北部地区,砂岩洞穴之间干湿状况差异显著,可分为旱洞和水洞。洞穴底部常年有大量积水存在、洞深大于洞宽和洞高的洞穴称为砂岩水洞。

研究区有孔雀洞和石湖洞这 2 个砂岩水洞,洞内常年积水,并有不间断外流现象。砂岩旱洞指洞穴内部常年比较干燥,少有积水的浅小洞穴,研究区内有干人洞、朝阳洞、糖坊洞、李公洞、黑岩洞、状元洞、狮宝洞、石湖洞、黑洞子、水帘洞、僧家洞、刘家洞、莫家洞、磨刀岭天生桥、透明岩、观音阁、西月台崖嵌、透明岩岩槽、自生桥、魏家沟天生桥、藏经洞、牛洞子、羊子洞、母猪洞、赖子洞、头洞、二洞、三洞、天鼓石岩槽、扭扭石岩槽、摇摆石岩槽、猴头石凹槽、乌龟岩凹槽、肖水交错层理凹槽、磨刀岭天生桥凹槽、李公洞蜂窝状洞穴和水帘洞蜂窝状洞穴等 40 多个旱洞。总体来看,砂岩水洞的规模大于旱洞的规模,但研究区以砂岩旱洞为主。

2.2.2 按规模形态分类

研究区洞穴形态多样,规模大小不等,笔者参照梁诗经丹霞洞穴的分类方案,对砂岩洞穴分类,具体见表 1(梁诗经等,2008)。按洞穴规模,将研究区砂岩洞穴分成大型洞、小型洞和微型洞。按洞穴形态,



a. 四川营山地质公园在四川盆地中的位置;b. 四川营山地质公园地形

图 1 四川营山地质公园位置和地形

Fig. 1 The location and topographic map of the Sichuan Yingshan Geological-park

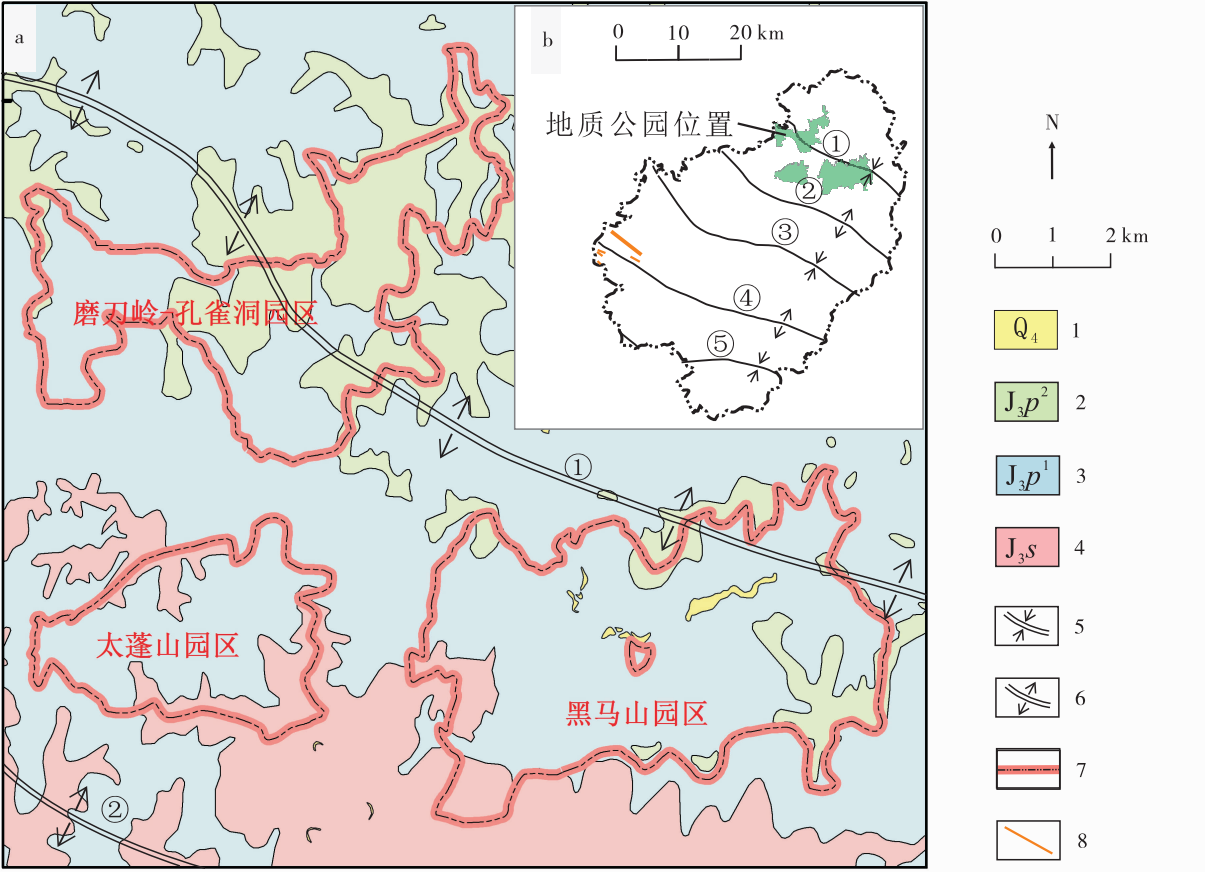


图 2 研究区地质图

Fig. 2 Geological map of the study area

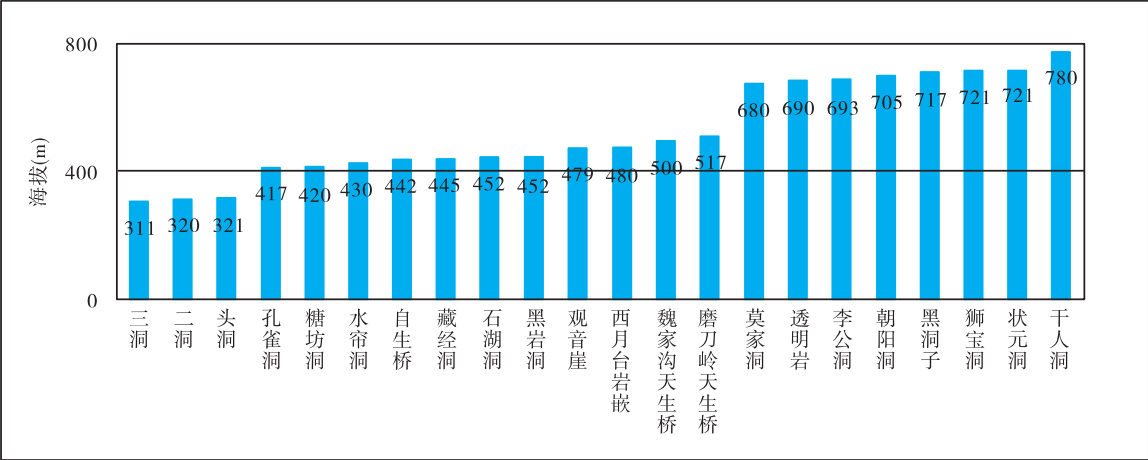
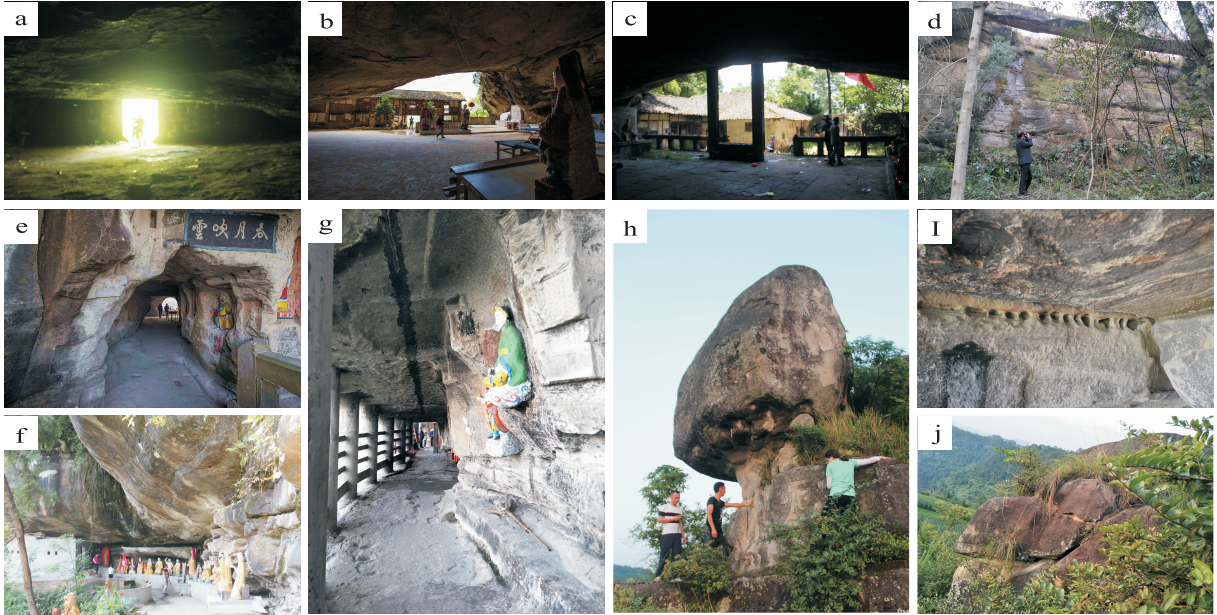


图 3 研究区部分砂岩洞穴海拔分布特征图

Fig. 3 Distribution characteristics of elevation of some sandstone caves in the study area

大型洞分为穹形洞、拱形洞、隧道形洞、天生桥、水平穿洞和顺层岩槽等(梁诗经等,2008);小型洞分为锅形洞、小型天生桥和小型顺层岩槽;微型洞主要是指蜂窝状洞穴和顺层发育的凹槽,具体特征和典型洞穴见

图 4、表 1。由表 1 和图 4 可知,研究区多穹型或者拱形的大型洞穴,内部空间较大,人能进入其中,状元洞、干人洞、朝阳洞最为典型。隧道型洞穴最为典型的是孔雀洞,洞中常年有积水。



a. 穹型状元洞;b. 拱形干人洞;c. 拱形朝阳洞;d. 磨刀岭天生桥;e. 穿洞透明岩;f. 观音阁顺层岩槽;g. 透明岩岩槽;
h. 天鼓石岩槽;i. 李公洞蜂窝状洞穴;j. 猴头石凹槽

图 4 研究区砂岩洞穴图

Fig. 4 The sandstone caves in the study area

表 1 研究区砂岩洞穴规模形态分类表

Tab. 1 Classification of the scale and form of the sandstone caves in the study area

规模	形态	特 征	典 型 洞 穴
大型(洞径>10 m)	穹形洞	洞顶呈半弯形,底部平坦或向洞口倾斜,无明显洞壁	状元洞、狮宝洞、石湖洞、黑洞子、水帘洞、僧家洞、刘家洞、头洞
	拱形洞	洞顶呈拱形,底部平坦,两侧洞壁和后壁明显	干人洞、朝阳洞、糖坊洞、李公洞、莫家洞、普林岩洞
	隧道形洞	但洞深远大于洞宽和洞高	孔雀洞
	天生桥	洞高>洞顶岩层的厚度	磨刀岭天生桥
	水平穿洞	顺层穿透山体,洞口偏圆	透明岩
	顺层岩槽	槽深和槽高都小于槽长,岩壁上顺岩层延伸较长,扁平状或不规则状	观音阁、西月台崖嵌、透明岩岩槽、李公洞岩槽、二洞、三洞
小型(洞径≤10 m)	锅形洞	洞顶有弧度,额状洞	藏经洞、天星洞、牛洞子、羊子洞、母猪洞、赖子洞
	天生桥	洞高>洞顶岩层的厚度	自生桥、魏家沟天生桥
	顺层岩槽	槽深和槽高都小于槽长,崖壁上顺岩层延伸较长,扁平状或不规则状	天鼓石岩槽、扭扭石岩槽、摇摆石岩槽、肖水交错层理凹槽
微型洞(洞径<1 m)	蜂窝状洞穴	顺层密集分布,直径<10 cm 的圆形、椭圆形洞穴	李公洞蜂窝状洞穴、水帘洞蜂窝状洞穴、观音阁蜂窝状洞穴、糖坊洞蜂窝状洞穴、三洞蜂窝状洞穴
	顺层凹槽	槽深<槽高,崖壁上顺岩层延伸较长,扁平状或不规则状	猴头石凹槽、乌龟岩凹槽、磨刀岭天生桥凹槽

3 研究区洞穴形成条件分析

3.1 构造条件

构造单元上,地质公园位于川中台拱、川北台陷和川东陷褶束的交接部位,属于川中台拱北部(四川省地质矿产局,1982)。距今一亿三千七百万年,发育于开江、达县和宣汉的印支古隆起中心,后迁至平昌、达县及营山北部一带,区域内上覆岩层围绕平昌境内的瓦子场、元沱的隆起砥柱发生水平扭动,形成仪陇-巴中莲花状构造(四川省地质矿产局,1982;营山县委志编纂委员会,1914)。地质公园一带无明显断层,形成一系列北西—南东走向的宽缓褶曲,如铁顶垭向斜、水口场背斜等(图2),属于该构造体系西南群的一部分。

在莲花状构造作用下,形成近于直立的弧形横冲断裂面或褶皱轴面。弧形横冲断裂将该区域分割成一系列弧形条块状构造地貌,这将成为形成平行排列而相间分布的长梁状方山和槽谷的构造基础,长梁状方山两侧的陡崖为洞穴的形成创造了条件;本区莲花状构造中的褶皱虽为宽缓褶皱,但仍成为承压水的构造基础。

莲花状构造的形成过程中,弧形横冲断裂或褶皱产生的拉应力、剪应力在形成梁槽相间地貌的同时,使岩体形成大量的构造节理和裂隙,加速洞穴风化、侵蚀,也为水的下渗创造了条件。

3.2 地层岩性条件

地层区划上,地质公园属于扬子地层区的万县小区(辜学达等,1997),境内出露地层由老到新为:遂宁组(J_3s)、蓬莱镇组(J_3p)、全新统(Q_4),以蓬莱镇组河湖相地层为主(图2)。研究区砂岩内洞穴主要发育于蓬莱镇组。

蓬莱镇组(J_3p)为河湖相,长石石英砂岩、泥(页)岩,呈不等厚互层,夹页岩及灰岩条带,厚780~1200余m,一些层间含扁平状泥砾,或泥砾状碎屑灰岩透镜体(四川省地质局航空区域地质调查队,1981;辜学达等,1997)。砂岩比泥页岩硬度大,抗风化侵蚀能力强,软硬相间的地层结构有利于差异性风化。岩石含钙质、长石,遇水可发生岩溶作用和水解作用,是水洞发育的关键原因。此外,与泥页岩相比,砂岩、砂砾岩为透水岩层,是水洞水分运移的重要通道,而泥页岩和水解后的黏土对洞穴下方的裂隙具有堵塞限流的作用。

3.3 地形地貌条件

本研究区位于四川盆地北部,地形以低山为主,

长梁状方山阶梯状台地地貌显著。方山陡峭的崖壁使砂岩夹泥页岩的岩层裸露,是发生差异性风化的重要前提。该地的旱洞大多发育于方山陡崖或者陡崖与台阶缓麓的交接部位。方山顶部和台地起伏和缓,一般覆盖1~3m的风化层,风化层上部多为农田,利于涵养水源。

3.4 气候水文及水文地质条件

该地区属于中亚热带湿润季风气候,降雨丰富,多年平均降水量达1150mm,加之方山地势平坦,植被好,蒸发较小,汇流时间慢,地面拦截量多,利于地表水向地下下渗。湾滩河和响水滩等消水河支流流经研究区,多年平均径流深为38000mm,多年平均径流量为 $2.29 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均比降为1.35‰,侵蚀下切强度较大(营山县委志编纂委员会,1989)。营山县多年平均水资源总量为 $10.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中,天然地下水藏量为 $0.72 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总量的6.57%,研究区所在的低山区是其主要分布地(营山县委志编纂委员会,1989)。该地地下水丰富,泉水出露点多,比如龙井沟水井、神龙泉、三姓寨水井、何家井、朱家井、黑马山古井和桅杆坪水井等。这些井水主要为砂岩裂隙水,集中分布在阶梯状台地上,且部分具有承压性质。蓬莱镇组砂岩风化裂隙发育,风化带约为20~30m,是研究区主要的浅层含水层,有利于流水对岩体侵蚀和溶蚀的发生,并对松散物进行运移。

3.5 土壤植被条件

研究区方山顶部主要成土母质为蓬莱镇组风化物,棕紫色水稻土、红棕紫泥土和沙黄泥土分布,土壤养分含量丰富,多为农田,耕作方式上既有旱地也有水田,农田周围(方山顶部边缘)一般植被繁茂。方山顶部的土壤类型、耕作方式及植被特点有利于涵养水源,为其下部水洞的发育创造了条件。

4 砂岩洞穴形成过程分析

4.1 砂岩旱洞发育过程分析

根据地貌学原理,砂岩旱洞的形成主要有以下过程。

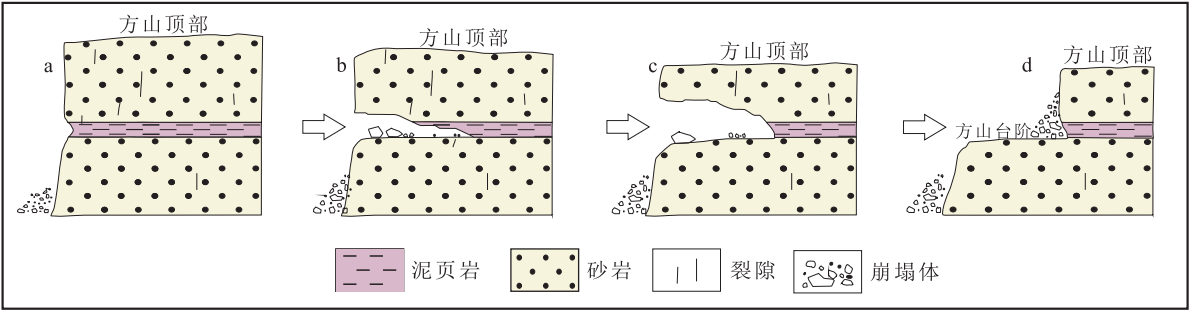
(1)方山陡崖形成,岩层裸露。印支运动,研究区由一片汪洋转入内陆湖盆环境;侏罗纪时期,区域内形成近似水平的巨厚钙质岩屑长石砂岩夹泥岩等沉积;在四川运动时,本区发生大面积整体上升运动成为陆地;燕山运动时,在仪陇-巴中莲花状构造影响下,本区形成一系列北西—南东向褶曲构造,节理裂隙发育;之后,铁顶垭向斜被侵蚀演变为地势高于

背斜的正地形,呈现低山地貌;新构造运动中,境内处于间歇性缓升状态,使河流下切,众多的节理裂隙发育成两壁直立的深沟,深沟两边的谷坡逐渐变成陡崖,而山顶为蓬莱镇组坚硬砂岩层盖层,最终形成顶面平整,四周陡峭,呈阶梯状的方山地貌。

(2)差异性风化,岩石内凹。与钙质长石砂岩相比,粉砂质泥岩、泥页岩等岩石抗风化能力较弱,先被风化剥蚀,逐渐内凹,形成顺层延伸的凹槽、岩腔(图 5a)。凹槽岩腔进一步展宽、加深、增高,形成无明显洞壁的类型洞穴(图 5b),如状元洞(图 4a)。而风化剥落的碎屑物在重力、流水、风力或人力作用下带出洞外。

(3)岩层卸荷剥离,洞穴空间增大。岩腔形成过程中,腔壁和腔顶岩层在重力产生的剪切应力作用下,当剪切应力大于砂岩层的抗剪强度时,顶部的砂岩层会破裂并崩落,这个过程实质上是一个卸荷剥离的过程。岩层崩落过程中,软弱岩层的风化剥蚀继续顺岩层向深部发展。最终由岩腔逐渐发育成空间较大,洞壁明显,略成拱型的砂岩洞穴(图 5c),如干人洞(图 4b)、朝阳洞(图 4c)。甚至还可能形成天生桥,如磨刀岭天生桥(图 4d)。

(4)洞穴坍塌,方山崖壁整体后退,新出露的崖壁又因为差异分化,开始形成小凹槽。这个运动周而复始(图 5d)。



a. 方山陡崖形成; b. 差异风化形成穹型洞; c. 卸荷剥离形成拱形洞; d. 洞穴坍塌

图 5 研究区旱洞形成示意图

Fig. 5 Sketch map of the formation of dry cave in the study area

4.2 砂岩水洞形成过程分析

研究区的水洞有孔雀洞和石湖洞。其中孔雀洞的规模大,由此,笔者以孔雀洞为例对砂岩水洞的成因进行分析。选取导线测量法的原理,借助 GPS、罗盘、全站仪、激光测距仪和卷尺等工具对孔雀洞进行初步探测,绘制孔雀洞的三相图(图 6、图 7)。考察发现,洞口海拔为 417 m,朝向 282°,走向大致西西北。在洞中约 150 m 处有一块长约为 50 m,宽约为 12 m 的崩塌体。

孔雀洞发育在蓬莱镇组厚层块状钙质岩屑长石砂岩夹薄层砂砾岩和粉砂质泥岩之中。孔雀洞顶部为砂岩,偶含泥质透镜体(图 8a),节理裂隙发育(图 8b);洞壁局部出露砂砾岩(图 8c);洞底堆积有平均厚度约为 0.6 m 的风化物(淤泥)和大量岩石崩塌体(图 8d、图 8e),洞中有大量积水,局部深达 2 m 以上。此外,孔雀洞中湖泊边缘的沉积物中发现白色粉末状的石膏(图 8f)。

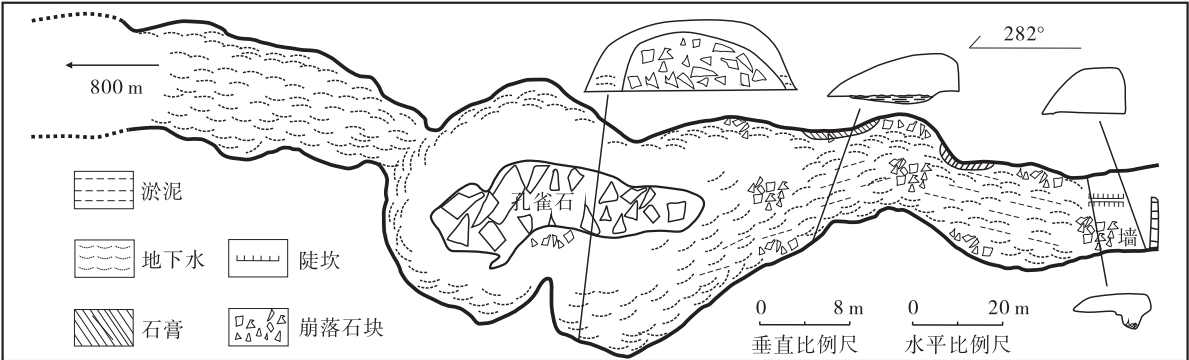


图 6 孔雀洞平面图和横截面图

Fig. 6 Plane and cross-sectional maps of the peacock cave

以孔雀洞为代表的砂岩水洞的形成过程有以下几个过程。

(1)方山陡崖形成为主的阶段。与前述旱洞形成相同。

(2)下渗的裂隙水被下层的泥页岩层阻隔,发生化学风化作用。一方面为钙质砂岩发生岩溶作用

(式(1)),钙质砂岩中的碳酸盐岩被溶失;硬石膏遇水转变为石膏,体积增大(式(2)),对周围岩石压力增强,加速风化;另一方面砂岩黏土矿物(长石)的水解作用(式(3)),泥岩以及砂岩中的泥质透镜体通过水解作用软化形成黏土,一部分随流水带走,一部分堆积在洞底,填充洞底节理裂隙,形成隔水层,利于

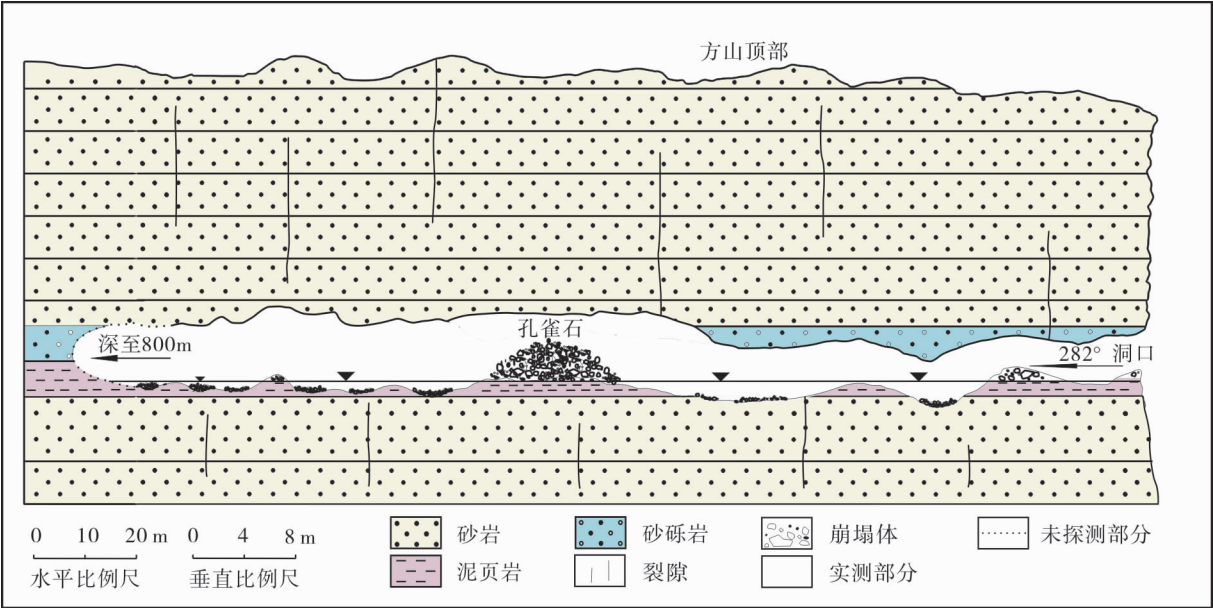
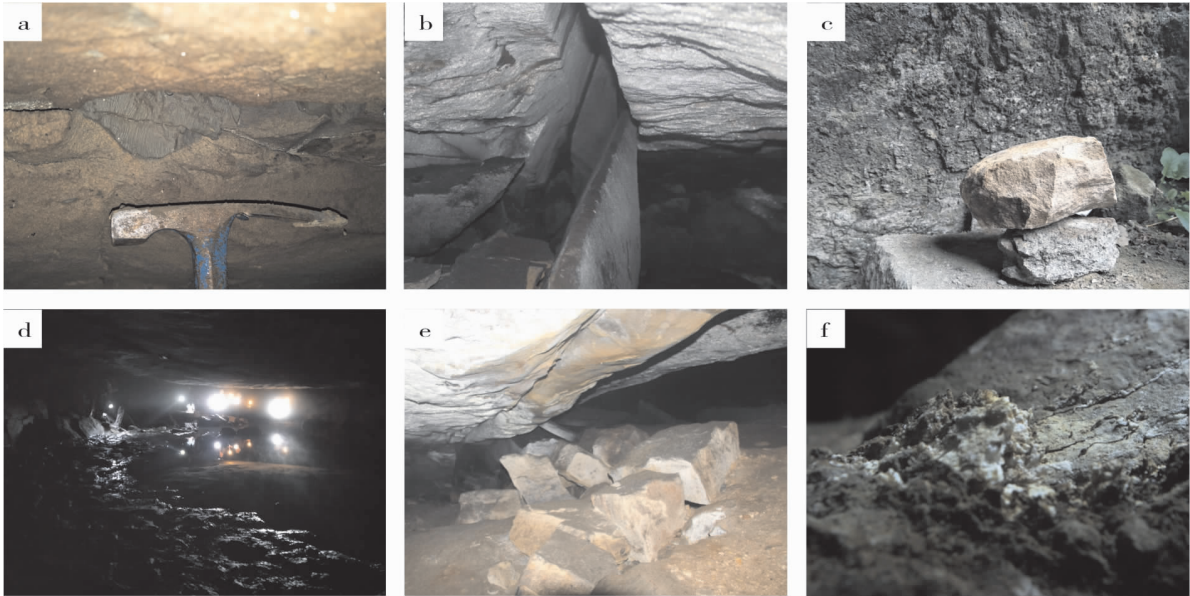


图 7 孔雀洞纵剖面图

Fig. 7 A longitudinal plan of the peacock cave

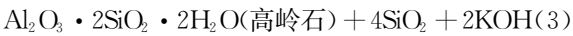
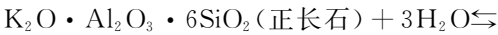
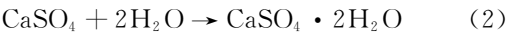
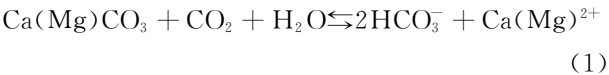


a. 洞顶泥质透镜体;b. 洞顶裂隙;c. 洞壁砂砾岩;d. 洞中积水和淤泥;e. 洞中崩塌体;f. 洞中石膏

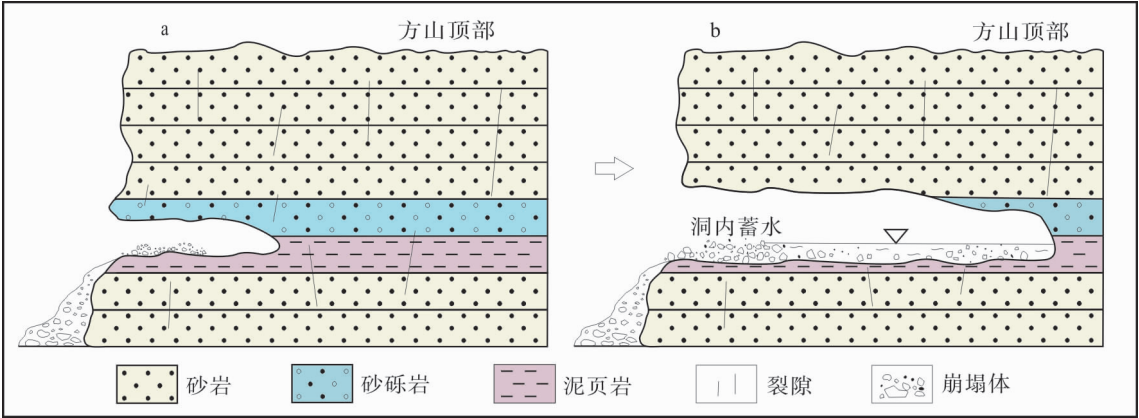
图 8 孔雀洞照片

Fig. 8 Photos of the Peacock Cave

水资源储蓄结构形成(肖琼,2017)。岩溶和水解作用导致岩石结构被破坏,节理裂隙增大,化学风化加快,洞中空间增多(图 9a)。在化学风化的同时,还有机械风化和流水侵蚀作用的参与。



(3)软弱岩层的风化剥蚀,导致顺泥岩层、砂砾岩层方向的隧道状空间越来越大,与旱洞一样,上层的砂岩出现层状的重力崩塌,层层崩落。部分崩落物和风化沉积物被水、风带出洞穴,一部分崩落物在洞厅底部大量堆积,与粉砂质泥岩风化沉积物、水解后的黏土一起,对洞内的水起阻挡作用。大气降水、地下水透过节理裂隙,向洞内汇集,蓄水量增大,加速了岩石化学风化,洞底黏土等堆积物增多,隔水层增厚,洞穴水更不易渗漏,最终水洞得以形成(图 9b)。



a. 空腔形成;b. 隔水层形成,开始蓄水

图 9 研究区水洞形成示意图

Fig. 9 Sketch map of the formation of the study area

5 结论

砂岩洞穴是川北山区长梁状方山地貌背景下形成的洞穴遗迹,其分布具有“大分散小集中”的特点,规模大小不一,形态上多旱洞,多呈穹、拱形,水洞多呈隧道型。洞穴大部分顺层发育在方山崖壁 417~517 m 和 680~780 m 2 个层位,在蓬莱镇组中发育。仪陇-巴中莲花状构造是长梁状方山发育的主要构造,为崖壁砂岩洞穴的形成创造了条件;缓的向斜构造和发育的节理裂隙有利于水运移至洞穴;蓬莱镇组厚层、巨厚层钙质长石砂岩夹薄层泥页岩的岩层组合是砂岩洞穴群形成的物质基础。研究表明,砂岩旱洞的形成主要经过差异性风化、剥蚀、再风化的地貌循环过程;砂岩水洞的形成主要与岩溶作用和水解作用、洞壁剥蚀、洞顶崩塌等几个地貌过程密切相关。四川盆地北部方山蓬莱镇组砂岩洞穴分类、特征、成因的研究,可为同类地区砂岩洞穴遗迹的保护和旅游开发提供理论借鉴。

参考文献(References):

保广普,张海龙,陈光庭. 青海省曲什安砂砾岩峰林地貌及其国内对比[J]. 西北地质,2018,51(3):253-258.

BAO Guangpu,ZHANG Hailong,CHEN Guangting. Glutenite Peak—forest Landform in Qushi’An, Qinhai Province and Its Domestic Comparison Significance [J]. Northwestern Geology,2018,51(3):253-258.

陈留勤,李馨敏,郭福生,等. 丹霞山世界地质公园蜂窝状洞穴特征及成因分析[J]. 地质论评,2018,64(4):895-904.

CHEN Liuqin,LI Xinmin,GUO Fusheng,et al. Characteristics and origin of honeycombs in the Danxiashan Global Geopark in South China[J]. Geological Review,2018,64(4):895-904.

辜学达,刘啸虎. 四川省岩石地层:全国地层多重划分对比研究(51)[M]. 北京:中国地质大学出版社,1997:2-4.

GU Xueda,LIU Xiaohu. Lithostratigraphy of Sichuan Province: A Comparative Study of Multiple Stratigraphic Di-

- vision in the Whole Country(51)[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1997: 2-4.
- 郭永春, 谢强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2007, (6): 67-71.
- GUO Yongchun, XIE Qiang, WEN Jiangquan. Red beds distribution and engineering geological problem in China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, (6): 67-71.
- 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, 2012.
- HE Liujie. The causes and spatial distribution of the Longhushan Danxia cave and the relationship with the Paleoclimate research[D]. Beijing: A Dissertation Submitted to China University of Geosciences for Master Degree, 2012.
- 柯雨田. 崆峒山岩性特征与丹霞地貌成因[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- KE yutian. Lithology Characteristics of Kongtong Mountain and Development Mechanism of Danxia Landform[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- 李大通, 罗雁. 中国碳酸盐岩分布面积测量. 中国岩溶, 1983, 2(2): 147-150.
- LI Datong, LUO Yan. Measurement of Carbonate Rocks Distribution Area in China[J]. Carsologica Sinica, 1983, 2(2): 147-150.
- 李馨敏, 郭福生, 陈留勤, 等. 龙虎山世界地质公园象鼻山栈道洞穴地貌成因[J]. 山地学报, 2018, 36(4): 509-518.
- LI Xinmin, GUO Fusheng, CHEN Liuqin, et al. Origin Analysis of the Cavities Along the Xiangbishan Cliffs in the Longhushan Global Geopark, Southeast China[J]. Mountain Research, 2018, 36(4): 509-518.
- 梁诗经, 文斐成, 陈斯盾. 福建泰宁丹霞地貌中的洞穴类型及成因浅析[J]. 福建地质, 2008, (3): 296-307.
- LIANG Shijing, WEN Feicheng, CHEN Sidun. On Grotto Types and their Origin of the Danxia Landform in Taiping County of Fujian Province[J]. Geology of Fujian, 2008, (3): 296-307.
- 刘宇. 崆峒山丹霞洞穴特征及成因分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- LIU Yu. The Characteristics and Cause Analysis of Danxia Cave in Kongtong Mountain[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- 罗培, 况明生, 李华. 浅析岩溶洞穴旅游的可持续性发展——以重庆武隆芙蓉洞为例[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2004, (4): 61-65.
- LUO Pei, KUANG Mingsheng, LI Hua. Analysis of the Sustainable Development about Karst Cave Tourism[J]. Journal of Yunnan Normal University(Natural Sciences Edition), 2004, (4): 61-65.
- 欧阳杰, 朱诚, 彭华, 等. 浙江方岩丹霞地貌类型及其空间组合[J]. 地理学报, 2009, 64(3): 349-356.
- OUYANG Jie, ZHU Cheng, PENG Hua, et al. Types and Spatial Combination of Danxia Landforms of Fangyan in Zhejiang Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(3): 349-356.
- 彭华. 中国南方湿润区红层地貌及相关问题探讨[J]. 地理研究, 2011, 30(10): 1739-1752.
- PENG Hua. Perspectives on the red beds landforms in humid area of southern China and some related problems[J]. Geographical Research, 2011, 30(10): 1739-1752.
- 彭华, 潘志新, 闫罗彬, 等. 国内外红层与丹霞地貌研究述评[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1170-1181.
- PENG Hua, PAN Zhixin, YAN Luobin, et al. A review of the research on red beds and Danxia landform[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1170-1181.
- 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.
- 四川省地方志编纂委员会编纂. 四川省志·地理志[M]. 成都: 成都地图出版社, 1996.
- Compilation of Sichuan Local History Compilation Committee. Geography of Sichuan Province [M]. Chengdu: Chengdu Map Publishing House, 1996.
- 四川省地质局航空区域地质调查队. 中华人民共和国区域地质调查报告(地质部分): H-48-(5)(仪陇幅)、H-48-(6)(通江幅)、H-48-(11)(南充幅)、H-48-(17)(广安幅)、H-48-(23)(重庆幅)[R]. 成都: 1:200 万区域地质调查报告验收会议, 1981.
- 四川省地质矿产局. 中华人民共和国地质矿产部地质专报: 区域地质第 23 号—四川省区域地质志(下册)[M]. 北京: 地质出版社, 1982, (7): 567-585.
- Sichuan Bureau of Geological and Mineral Resources. Geological Special Report of the Ministry of Geology and Mineral Resources of the PRC: Regional Geology No. 23—Regional Geological Chronicles of Sichuan Province (next volume)[M]. Beijing: Geology Press, 1982, (7): 567-585.
- 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, et al. Geomorphogenesis on Sandstone Honeycombs and White Spot in the Mt. Danxiaishan, Guangdong Province[J]. South China Mountain Research, 2015, 33(3): 279-287.
- 韦跃龙, 陈伟海, 罗劬侃. 洞穴次生化学沉积物与地质背景及洞穴环境的耦合关系——以广西巴马水晶宫为例[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1528-1543.
- WEI Yuelong, CHEN Weihai, LUO Qukan. Coupling Relationship Among Speleothems, Geological background and Cave Environment[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1528-1543.
- 魏勇. 福建冠豸山丹霞洞穴类型及成因[J]. 福建地质, 2013, 32(3): 213-220.
- WEI Yong. Type and Causes of Guanzhaishan Danxia Cave in Fujian Province[J]. Geology of Fujian, 2013, 32(3): 213-220.
- 肖琼, 张志诚, 谢磊, 等. 昌源河国家湿地公园含水层水文地质特征研究[J]. 中国地质, 2017, 44(05): 1006-1016.
- XIAO Qiong, ZHANG Zhicheng, XIE Lei, et al. A study of hydrogeological characteristics of aquifers in the Changyuan River National Wetland Park[J]. Geology in China, 2017, 44(05): 1006-1016.
- 杨晓霞, 石定芳, 向旭. 基于内容分析法的喀斯特洞穴导游解说词研究[J]. 中国岩溶, 2013, 32(2): 239-245.
- YANG Xiaoxia, SHI Dingfang, XIANG Xu. Study on Karst Cave Tour Guide Commentary Based on Content Analysis[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(2): 239-245.
- 营山县县志编纂委员会. 营山县志[M]. 成都: 四川辞书出版社, 1989, (08): 27-28, 40-46.
- Yingshan County Compilation Committee. Yingshan County annals[M]. Chengdu: Sichuan Lexicography Press, 1989, (08): 27-28, 40-46.
- 张绍云, 周忠发, 熊康宁, 等. 贵州洞穴空间格局及影响因素分析[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1998-2009.
- ZHANG Shaoyun, ZHOU Zhongfa, XIONG Kangning, et al. Spatial Pattern of the Caves in Guizhou Province and their Influencing Factors[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 71(11): 1998-2009.
- 朱诚, 彭华, 欧阳杰, 等. 浙江方岩丹霞地貌发育的年代、成因与特色研究[J]. 地理科学, 2009, 29(2): 229-237.
- ZHU Cheng, PENG Hua, OUYANG Jie, et al. Age genesis and characteristics of Danxia landform of Fangyan in Zhejiang Province, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(2): 229-237.
- 朱德浩, 覃厚仁. 洞穴类型及岩溶洞穴成因研究[J]. 旅游学刊, 1988, (增刊 1): 41-46.
- ZHU Dehao, QIN Houren. In Genetic Research of Cave Types and Karst Caves[J]. Tourism Tribune, 1988, (Supp. 1): 41-46.
- 朱学稳. 洞穴钟乳石类的分类方案[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 169-174.
- ZHU Xuewen. The Classification Scheme of Speleothems[J]. Carsologica Sinica, 2005, 24(3): 169-174.
- D'ANGELI I M, SERRAZANETTI D I, MONTANARI C, et al. Geochemistry and microbial diversity of cave waters in the gypsum karst aquifers of Emilia Romagna region, Italy[J]. Science of the Total Environment, 2017, 598: 538-552.
- SZCZYGLIEŃ J, GOLICZ M, HERCMAN H, et al. Geological Constraints on Cave Development in the Plateau-Gorge Karst of South China (Wulong, Chongqing)[J]. Geomorphology, 2018, 304: 50-63. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.12.033.