

大方清虚洞穴景观资源特征及形成机制的初步研究^{*}

罗书文^{1,2}, 陈伟海^{1,2}, 杨桃³, 潘晓东^{1,2}, 邓亚东^{1,2}, 章星铭^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004; 2. 自然资源部、广西壮族自治区岩溶动力重点实验室, 广西桂林 541004; 3. 贵阳市第十二中学, 贵州贵阳 550002)

摘要: 探测清虚洞发育特征及景观资源组成, 研究清虚洞形成机理, 为科学开发、保护提供参考。本文在探测清虚洞的基础上, 根据清虚系统的洞道结构和空间展布特征, 分析其资源构成及特征; 分析区内地形地貌、地质构造和人文等自然条件, 对清虚洞形成的影响; 以区域新构造演进为主线, 讨论清虚洞形成与演化过程。结果表明: (1) 清虚洞洞穴系统属于大型洞穴系统, 其洞道结构为“一桥、两坑、一窗、一支洞”; (2) 天生桥、天坑、天窗、洞内景观及边缘坡立谷等, 是清虚洞景观资源的重要组成部分, 其中边缘坡立谷、清虚洞天生桥及云坛天坑构成了核心资源; (3) 区内地形特征及下伏非碳酸岩夜郎组(T_{1y})地层, 为外源水流入碳酸岩地层溶蚀成洞提供了隔水条件; (4) 区内地下水不仅沿着构造节理和裂隙运移溶蚀, 而且单斜构造条件也有利于地下水沿着层间裂隙溶蚀、侵蚀, 是控制清虚洞成因之一; (5) 清虚洞穴系统在形成演化过程中, 主要经历溶蚀期、崩塌期和下切3个时期。区内岩层空间展布和区域构造是清虚洞形成的前提条件, 外源水是清虚洞形成的基本动力, 在区内地文演进过程塑造了世界罕有的天生桥景观。

关键词: 大方清虚洞 岩溶洞穴 发育特征 形成机理 洞穴景观资源 天生桥 天坑

中图分类号: P931.5 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2019)04-0444-12



微信扫一扫, 与作者在线交流(OSID)

0 引言

清虚洞位于贵州省大方县羊场镇境内, 清虚洞天生桥于2001年获得“世界最大自然拱桥”的吉尼斯世界纪录^[1], 其规模和形态, 在岩溶区内较为罕有且独特。当地政府也依托清虚洞天生桥这一罕有景观资源开展旅游业, 但对其利用局限于天生桥和边缘坡立谷, 而对清虚洞系统内的其他资源没有利用, 或认识不清。例如, 对其景观特征及构成、空间展布特征、形成机制, 以及清虚洞穴系统洞道结构等核心地学问题

一无所知, 极大地影响了清虚洞旅游开发与保护工作的顺利实施, 导致清虚洞景区旅游业萧条或呈现季节性较强的旅游现状, 因此, 急需对清虚洞资源进一步清查与研究。

洞穴景观的奇异、神秘和对行为感受的冲击性等特征对广大游客有着极大的吸引力^[2], 系集幽、奇、幻为一体的景观资源。不少学者对洞穴旅游开发^[3-5]、景观资源价值^[4-6]及洞穴形成演化过程^[7-14]等进行了大量研究并取得丰硕成果。在洞穴成因研究方面, 主要对地质构造、岩性和水化学等方面进行论述, 从水

^{*} 国家自然科学基金青年基金项目(41502257), 中国地质大调查项目(DD20160285, DD20190022, DD20179313), 中国地质科学院院长基金项目(YY-WF201638)和广西自然科学基金项目(202018GXNSFBA138051)资助。

【作者简介】

罗书文(1978—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事岩溶水文地貌、洞穴等地质遗迹和岩溶环境研究, E-mail: luoshuwen6700167@126.com。

【引用本文】

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20190808.007

罗书文, 陈伟海, 杨桃, 等. 大方清虚洞穴景观资源特征及形成机制的初步研究[J]. 广西科学, 2019, 26(4): 444-455.

LUO S W, CHEN W H, YANG T, et al. Preliminary study on the characteristics and formation mechanism of Qingxudong cave in Dafang county [J]. Guangxi Sciences, 2019, 26(4): 444-455.

文系统视角开展的研究少见报道。为此,本研究在探测并绘制清虚洞洞穴图的基础上,查明其景观分布和构成、洞道发育、地貌环境、区域地质构造特征及水文条件等,从水文地貌系统角度,对清虚洞的形成机制进行探讨,客观地认识其形成机制,为科学规划和保护提供有力的支撑和依据。

1 研究区自然地理地质概况

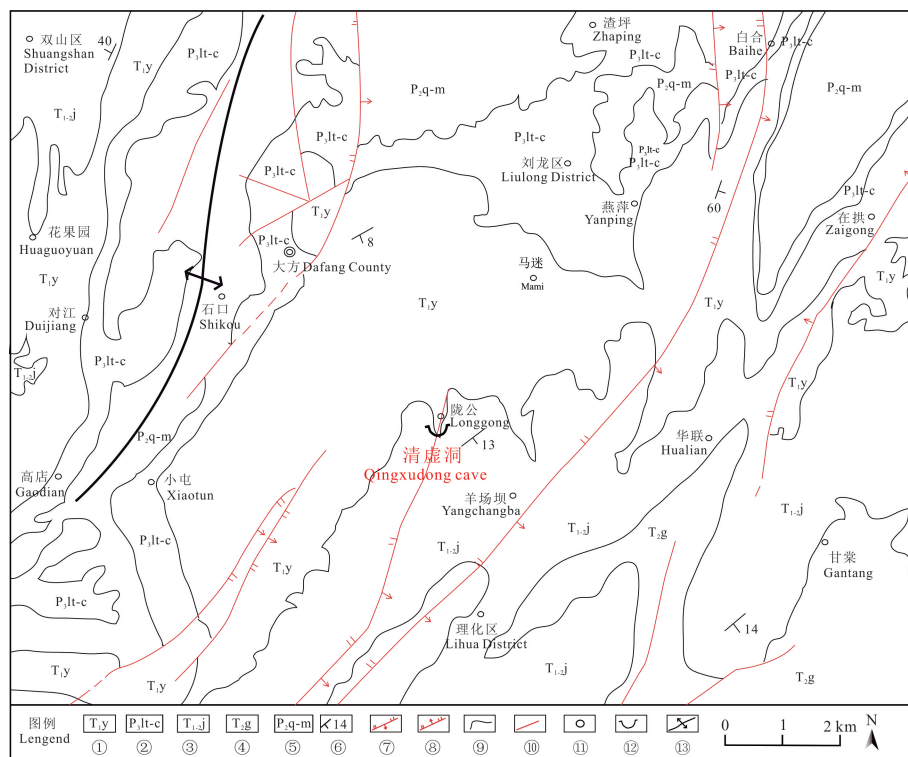
1.1 自然地理概况

大方清虚洞原名穿洞,又名大洞、千虚洞,位于贵州省毕节市大方县城南面的羊场镇陇公境内,距县城10 km,距大方县 X004 县道 1.5 km,交通较为便捷,地理坐标 27°05'50"N, 105°40'16.58"E,海拔 1 476 m。地处黔西北高原(云贵高原)向黔中山原丘陵过渡斜坡地带,地形地貌以丘陵和山间谷地为主,境内大部分地区海拔 1 200~1 850 m,相对高差 450~550 m,地势西北高,东南低,最高为雷打坡 1 850 m,最低位于乌溪河河谷 1 200 m。区域内沟壑纵横,地貌破碎,地形多样,山地、坡地、丘陵、洼地、盆地(小坝

子)、河谷等交错分布。区域内发育乌溪河,朱仲河以及陇公坝溪流两条支流,属于长江水系乌江(六冲河)支流。研究区属于低纬度高海拔山区,系亚热带湿润季风气候,气候温和,雨量充沛,雨热同期,具有冬无严寒,夏无酷暑的气候特点,年平均气温 11.8℃,最高气温 32.7℃,最低气温零下 9.3℃,最冷月(1月)平均气温为 1.6℃,最热月(7月)平均气温为 20.7℃,年平均气温 13.9℃,属典型的夏凉山区,雨季特别明显,年降雨量为 955~1 179 mm,降雨多集中在 4—9月,占全年降雨量的 78.8%。

1.2 区域地质概况

研究区内地质构造运动复杂,在早白垩纪晚期到始新世主要以南北向左旋直扭作用为主,渐新世以来以近东西向挤压的构造为主,多期构造运动交织在一起,奠定了区内复杂的构造体系,形成了新华夏系构造、南北向构造、西北向构造、二次张性断裂等一系列构造体系^[15],使得研究区出露地层有二叠系、三叠系、侏罗系及第四系等(图 1)。



①三叠系下统夜郎组,②二叠系龙潭长兴组,③三叠系嘉陵江组,④三叠系关岭组,⑤二叠系栖霞茅口组,⑥岩层产状,⑦逆断层,⑧正断层,⑨地层线,⑩性质不明断层,⑪村镇,⑫清虚洞,⑬高店背斜

①The Yelang group of Triassic,②The Longtan-Changxing groups of Permian,③The Jialingjiang group of Triassic,④The Guanling group of Triassic,⑤The Qixia-maokou groups of Permian,⑥Attitude of rocks,⑦Reverse fault,⑧Normal fault,⑨Formation line,⑩Unidentified fault,⑪Villages and small towns,⑫Qingxudong cave,⑬Gaodian anticline

图 1 研究区地质图

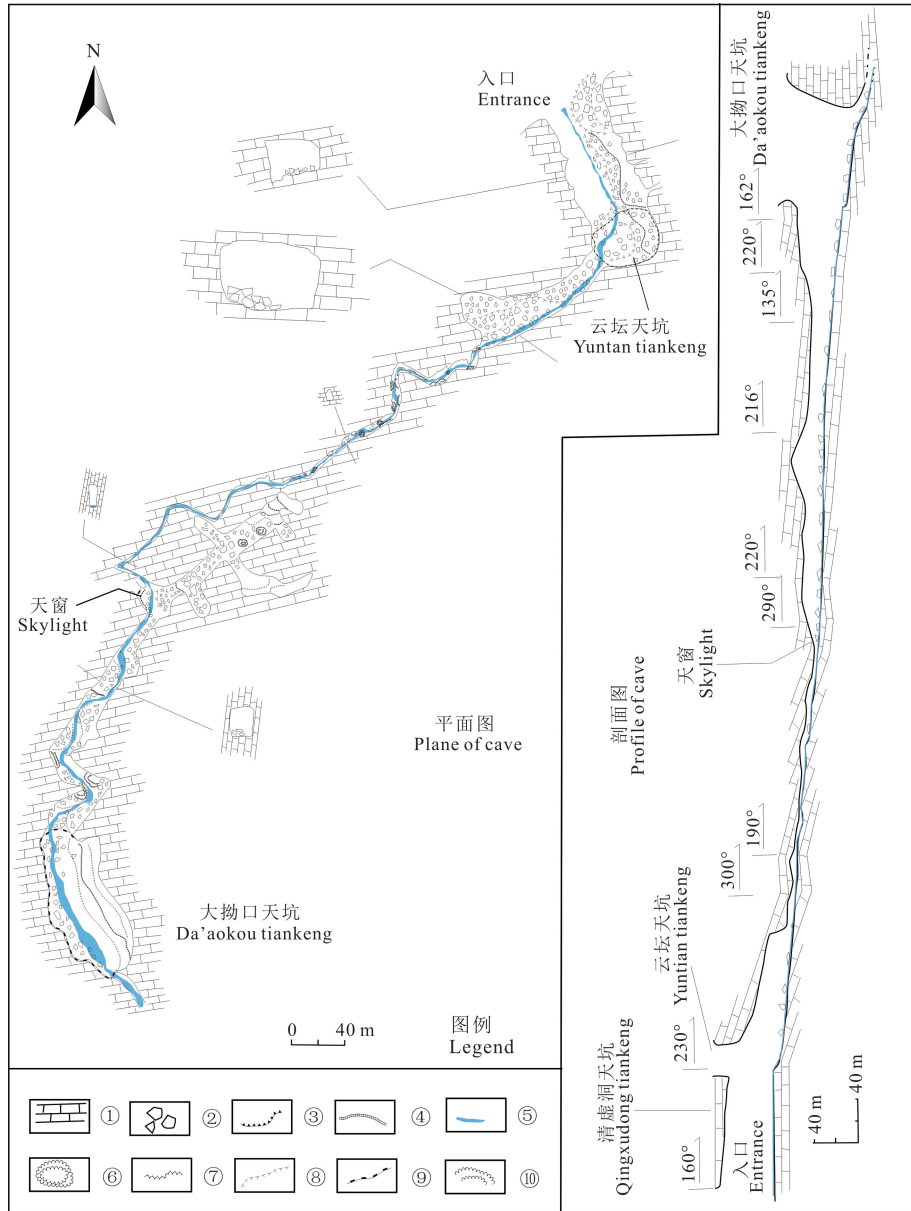
Fig. 1 Geological map of the study area

2 洞穴发育特征与景观资源

2.1 清虚洞穴发育概况

清虚洞洞口位于大方向羊场镇小丫口,陇公坝边缘坡立谷东南侧。洞口朝北北西向,位于碳酸岩与非碳酸岩交界处,洞口高 105 m,宽 120 m,系边缘坡立

谷的消水口(天生桥型入口)。据 1:20 万水文地质图推测,洞道长大于 8 km。本次探测清虚洞天生桥至大拗口天坑段,系该洞景观资源条件最好的部分,该段洞穴长 3 055 m,宽 3~120 m,高 3~120 m,洞道形态结构特征为“一桥、两坑、一窗、一支洞”(图 2)。



①碳酸岩,②崩塌碎石,③陡坡,④人工墙,⑤水流,⑥石笋,⑦流石坝,⑧缓坡,⑨陡坎,⑩壁流石

①Carbocrite,②Collapse of gravel,③Steep slope,④Artificial wall,⑤Flow,⑥Stalagmite,⑦Flowstone dam,⑧Gentle slope,

⑨Scarp,⑩Wall flow stone

图 2 清虚洞三相图

Fig. 2 Three-phase diagram of Qingxudong cave

根据该段洞道结构特征,将洞道分为 4 个部分,分别为入口至云坛天坑段、云坛天坑至天窗段、天窗至大拗口天坑段、天窗支洞段。各段的洞道特征

如下:

(1)入口至云坛天坑段:洞口朝西北方向,洞口前为宽 60~400 m 的边缘坡立谷,谷地中央发育一小

溪流流入洞口, 洞口宽 120 m, 高 75 m, 洞道中央溪流穿过, 左侧平整, 宽 30~60 m, 右侧为崩塌碎石堆积呈斜坡状, 其顶部平整, 宽 20~30 m, 洞壁发育两支洞, 洞道延伸不长, 该段长 200 余米为天生桥; 天生桥后为云坛天坑, 天坑东北侧堆积大量的碎石块, 西南侧为天坑最低处, 在天坑中央生长着草本植物和少量灌木。该段洞道长 320 m, 宽 120~150 m, 高 75~120 m。

(2) 云坛天坑至天窗段: 云坛天坑后洞道延伸 300 余米, 该段洞穴宽 50~110 m, 高 38~50 m, 洞底为崩塌碎石石块堆积, 该段洞道未见次生化学沉积物发育。此后, 洞道变得低矮狭窄, 为溶蚀型洞道, 洞壁常见溶蚀窝穴, 洞底水流潺潺, 洞壁偶有壁流石、石幕等次生化学沉积物发育, 洞顶常见石钟乳发育。该段洞道宽 3~15 m, 高 3~25 m, 洞底时而积水成塘, 时而卵石堆积, 洞道变化莫测, 该段洞道长 500 m。

(3) 天窗至大拗口天坑段: 天窗发育于洞道的西侧, 距离洞底 40 m, 天窗直径 20 m。该段洞道比前段洞道高大, 洞道宽 14~36 m, 高 30~50 m。洞道相对平缓, 洞底以崩塌块石为主, 洞到中部有人工用石块砌的石门和城墙, 墙体厚 2.5 m, 高 5 m, 门高 1.5 m, 宽 1.5 m。洞内发育一处长 25 m, 宽 5~20 m 的流石坝。洞道末端是大拗口天坑, 天坑呈北西向展布的长方形, 天坑长 210 m, 宽 140 m, 最大深度 120 m, 最浅 60 m, 西侧悬崖绝壁, 东北侧地势较为平缓, 坑底植被茂密, 以草本和乔木为主。天坑东南端为洞穴延伸方向, 但未探测, 据 1:20 水文地质图该洞河水最终排到 8 km 外的乌溪河内。

(4) 天窗支洞段: 支洞发育于天窗对侧, 支洞前段为长度 95 m, 相对高差 44 m 的斜坡, 洞道高 50~75 m, 宽 25~30 m, 到达顶端洞道水平, 洞道变为长条形大厅, 洞道长 100 m, 宽 26~60 m, 高 25~40 m。洞庭两侧有小支洞发育, 其发育情况不详, 在洞庭周边低矮洞道发育有大量的石钟乳, 洞底为崩塌石块堆积。

2.2 清虚洞景观资源特征

2.2.1 资源构成

岩溶洞穴景观主要包括洞内次生化学沉积物、洞道形态结构、洞壁溶蚀形态、水体、崩塌形态以及人文遗迹等^[3-4], 由此可以看出, 岩溶洞穴景观资源由自然景观和人文景观两部分组成。清虚洞景观资源还依托于区内自然、人文环境的大背景条件, 这些人文、自然条件成为洞穴景观资源的辅助资源, 是区内景观资

源的重要组成部分(图 3)。

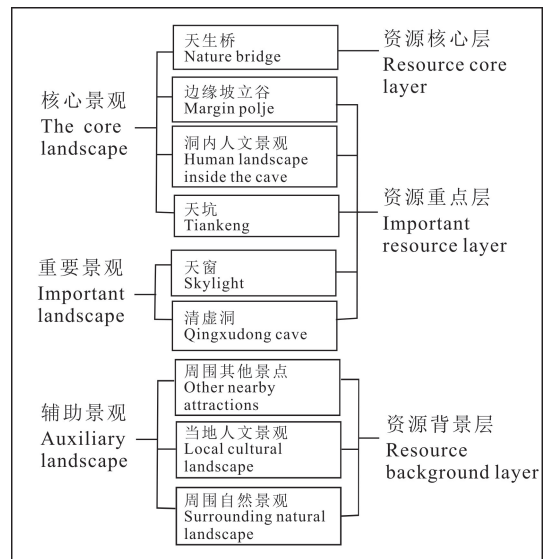


图 3 清虚洞自然景观构成

Fig. 3 Landscape composition of Qingxudong cave

清虚洞自然景观包括天生桥、云坛天坑、大拗口天坑、天窗、溶蚀景观、次生化学沉积物(图 4)。特征如下:

(1) 天生桥: 位于清虚洞入口。高 178.25 m, 拱高 105.25 m, 拱桥跨度最大处 127.35 m, 最小处 77.69 m, 桥身长 400 m, 宽 200 m。2001 年获得吉尼斯世界纪录(图 4a)。

(2) 大拗口天坑: 天坑为长方形, 口长 210 m, 宽 140 m, 最大深度 120 m, 最浅 60 m, 容积 $3.52 \times 10^6 \text{ m}^3$, 为小型天坑^[5], 坑底流水潺潺, 树木郁郁葱葱, 周围绝壁有如斧劈刀削(图 4b)。

(3) 云坛天坑: 位于天生桥后端。直径 105 m, 最大深度 120 m, 最小深度 75 m, 坑口呈圆形, 坑口小坑底大, 坑底直径 130 m, 容积分别为 $1.36 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。根据罗书文等^[16]提出的天坑等级评价方法, 该天坑为小型天坑(图 4c)。

(4) 天窗: 呈直径 20 m 的圆形, 距离洞底 40 m。

(5) 次生化学沉积物: 洞内发育有壁流石、石钟乳。壁流石零星分布于洞内, 呈垂帘状、钟状形态, 洞底流石坝发育面积 200 m^2 (图 4d), 有穴珠等次生化学沉积物景观。石钟乳主要分布在低矮洞道上游段, 发育密度较大, 直径 5~250 cm, 长 10~300 cm 的瘤状石钟乳(图 4e)。

(6) 溶蚀景观: 洞底溶蚀窝穴为口直径 1~20 cm, 深 2~15 cm 圆形、碟型; 洞壁波状流痕大小不一, 波长 5~50 cm, 宽 3~25 cm。



(a)清虚洞天生桥及边缘坡立谷,(b)大拗口天坑,(c)清虚洞天坑,(d)洞内流石坝景观,(e)洞内石钟乳景观,(f)地表峰丛景观

(a)Qingxudong tiansheng bridge and edge slope valley,(b)Big mouthful tiankeng,(c)Qingxudong tiankeng,(d)Flows stone dam landscape inside the cave,(e)Stalactite landscape inside the cave,(f)Landscape of peak clusters on the surface

图4 清虚洞自然景观

Fig. 4 Landscape of Qingxudong cave

清虚洞历史文化景观主要为天生桥下的文物建筑遗址。据记载,清朝道光六年(1826年)大定城陷,匪患猖獗,兵匪四方掳掠,陇公坝、新寨民众筹资在洞内最高处修筑有围坪、营门的营盘,以之避匪,沿袭百年。营门门柱楹联:邻舍三五共盘桓,依岩架屋自为尊。民国三年(1915年),一位住持和尚(姓名失考)率十数僧人在该洞门边右侧建造木柱、板壁、屋面盖小青瓦的佛庙一座,供奉观音,选用“清虚道德真君”之“清虚”二字取名清虚洞。民国二十七年(1932年),僧侣在洞中营盘内和营盘坎脚各增建木质不盖顶的道庙二座,拥僧、尼数十人。民国二十九年(1940年)下半年,中国航空第一发动机制造厂选址羊场坝乌鸦洞后,征用仅距厂区2 km 多的清虚洞建造火电厂、翻砂厂、螺旋桨厂等,后来国民党中央政府派员到清虚洞考察,因溶洞后方有一巨大的天窗,及洞顶岩

层薄,恐难避飞机轰炸而停工未建^[17]。

区内其他景观资源包括洞口前的边缘坡立谷,长1.72 km,宽60~400 m,一派田园风光;坡立谷两侧高80余米的独立峰体及洞穴地层表面的峰丛景观(图4f),其形态各异,蔚为壮观;周边村庄民族众多,以彝族、白族、苗族、蒙古族、仡佬族等民族为主,每种民族都保留和传承了许多优秀、多彩的民族风情。

2.2.2 核心资源特征

清虚洞属于大型洞穴系统,集桥、洞、窗、坑为一体综合性的洞穴景观资源。由图3可知,清虚洞系统的核心资源为清虚洞天生桥,清虚洞天生桥规模宏大,其各项规模特征参数均位列世界天生桥前茅,国内乃至世界罕有(表1),并于2001年获得了吉尼斯世界纪录^[1]。天生桥是岩溶景观的重要组成部分,是岩溶区较为少见的景观资源,集雄、奇、险、壮等特征

为一体^[6], 是各种自然景观中最具旅游吸引力的景观之一^[18-19]。以天生桥为主或辅助景观建立旅游区的

地方是屡见不鲜^[13, 18-20], 清虚洞内的天生桥和云坛天

坑组合景观, 构成了区内的核心景观, 系国内乃至世界少有的岩溶景观, 具有极高的景观价值。

表 1 国内外典型岩溶天生桥规模对比(据韦跃龙等^[6]改)

Table 1 Scale parameters comparison of typical karst tiansheng bridge at home and abroad (Modified according to Wei Yuelong et al, 2012)

| | 所处区域 Region | 名称 Name | 桥高 Bridge height (m) | 拱孔高 Arch high (m) | 拱孔跨度 Arch span (m) | 桥面厚度 Thickness of the deck(m) | 桥面宽度 Bridge deck width(m) | 规模级别 Scale |
|-------------|------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------|
| 中国 China | 贵州大方 Dafang, Guizhou | 清虚洞天生桥 Qingxudong nature bridge | 178 | 105 | 77~127 | 35 | 200 | 巨型 Giant |
| | 贵州黎平 Liping, Guizhou | 高屯天生桥 Gaotun nature bridge | 77 | 37 | 88~118 | 40 | 98~138 | 大型 Large |
| | 贵州水城 Shuicheng, Guizhou | 干河天生桥 Ganhe nature bridge | 136 | 121 | 55 | 15 | 35 | 巨型 Giant |
| | 贵州织金 Zhijin, Guizhou | 大天桥 Datian bridge | 128 | 93 | 85 | 35 | 55 | 大型 Large |
| | 贵州铜仁 Tongren, Guizhou | 川硐天生桥 Chuangong nature bridge | ≈110 | ≈50 | 30 | — | — | 中型 Middle |
| | 贵州绥阳 Suiyang, Guizhou | 石天生桥 Shi nature bridge | ≈80 | — | ≈60 | — | — | 中型 Middle |
| | 贵州七星关 Qixingguan, Guizhou | 沔鱼河天生桥 Mianyuhe nature bridge | 133 | 72 | 89 | 50 | 103 | 巨型 Giant |
| | 贵州荔波 Libo, Guizhou | 大七孔天生桥 Daqikong nature bridge | 60 | 95 | ≈20 | ≈10 | 20 | 中型 Middle |
| | 重庆武隆 Wulong, Chongqing | 天龙桥 Tianlong nature bridge | 235 | 84~123 | 20~75 | 150 | 147 | 巨型 Giant |
| | 重庆武隆 Wulong, Chongqing | 黑龙桥 Heilong nature bridge | 223 | 90~141 | 16~49 | 107 | 193 | 巨型 Giant |
| | 重庆黔江 Qianjiang, Chongqing | 蒲花河一桥 Puhuahe No. 1 nature bridge | >113 | >76 | 48 | 37 | 135 | 大型 Large |
| | 重庆黔江 Qianjiang, Chongqing | 蒲花河二桥 Puhuahe No. 2 nature bridge | >99 | >76 | 21 | 23 | 25 | 中型 Middle |
| | 广西乐业 Leye, Guangxi | 仙人桥 Xianren nature bridge | 165 | 87 | 177 | 78 | 19 | 巨型 Giant |
| | 广西凤山 Fengshan, Guangxi | 江州天生桥 Jiangzhou nature bridge | 150 | 25~35 | 70 | 8~19 | 150 | 中型 Middle |
| | 广西凤山 Fengshan, Guangxi | 社更天生桥 Shengeng nature bridge | 80 | 60~76 | 78~142 | 25~100 | 120 | 中型 Middle |
| | 广西凤山 Fengshan, Guangxi | 猛里天生桥 Mengli nature bridge | 75~168 | 60~80 | 110~150 | 15~18 | 70~80 | 大型 Large |
| | 广西凤山 Fengshan, Guangxi | 蚂拐天生桥 Maguai nature bridge | 68 | 57 | 36 | 11 | 10 | 中型 Middle |

续表 1

Continued table 1

| 所处区域 Region | 名称 Name | 桥高 Bridge height (m) | 拱孔高 Arch high (m) | 拱孔跨度 Arch span (m) | 桥面厚度 Thickness of the deck(m) | 桥面宽度 Bridge deck width(m) | 规模级别 Scale |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------|
| 广西兴安 Xingan, Guangxi | 白石乡天生桥 Baishixiang nature bridge | — | 40~105 | 30~60 | — | 50~150 | 大型 Large |
| 广西鹿寨 Luzhai, Guangxi | 香桥天生桥 Xiangqiao nature bridge | 60 | 50 | 40 | 10 | 40 | 中型 Middle |
| 云南曲靖 Qujing, Yunnan | 马龙天生桥 Malong nature bridge | 21 | — | 11 | — | 6 | 小型 Small |
| 云南大理 Dali, Yunnan | 弥渡天生桥 Midu nature bridge | 30 | 7 | 17 | 23 | — | 小型 Small |
| 云南中甸 Zhongdian, Yunnan | 中甸天生桥 Zhongdian nature bridge | 70 | — | 200 | — | 10 | 小型 Small |
| 云南文山 Wenshan, Yunnan | 天生桥村天生桥 Tianshengqiao village nature bridge | 53~99 | 35~45 | 75~17 | 18~54 | 159 | 大型 Large |
| 湖北神农架 Shennongjia, Hubei | 神农架天生桥 Shennongjia nature bridge | ≈27 | 17 | 4~5 | 13~17 | — | 小型 Small |
| 国外 Abroad | 法国 France | Bous del Biel | 67 | — | — | — | 中型 Middle |
| | 美国弗吉尼亚州 Virginia, USA | Cedar | 67 | — | — | 27 | 中型 Middle |
| | 美国亚利桑那州 Arizona, USA | Tonto | 56 | — | — | 122 | 中型 Middle |

3 清虚洞形成演化机制

3.1 洞穴发育影响因素

3.1.1 岩石空间展布对洞穴形成的影响

洞穴发育于高店背斜东翼,三叠系中下统嘉陵江组(T_{1-2j})灰色中厚层及薄层微粒灰岩,时含泥质及白云质,偶见鲕状、蠕状结构的地层之中。其下伏地层组成如下:上部为灰绿色黏土岩,下部为灰色中厚层灰岩的夜郎组(T_{1y})地层。嘉陵江组下部地层为灰绿色黏土岩,出露地表形成常态地貌,如区内的最高峰(雷打坡),且具有一定的隔水作用。因此,当地表径流沿着该层流入嘉陵江地层时,在下伏地层隔水作用下,使得径流沿着嘉陵江碳酸岩地层内的裂隙节理溶蚀形成清虚洞。

3.1.2 水化学条件对洞穴形成的影响

水对碳酸盐岩具有溶蚀作用这是不争的事实,但

水的溶蚀能力的强弱与水化学性质相关,并通过实验得以证实^[21]。外源水较内源水的溶蚀能力强,朱学稳^[22]在研究桂林地貌形成时,认为外源水由于硬度和pH值较低,对碳酸盐岩具有更强的侵蚀性,这是桂林峰林形成的重要因素,外源水这一特性也是岩溶同行的普遍共识^[21-23]。清虚洞发育于高店背斜东翼单斜构造区,三叠系中下统嘉陵江组(T_{1-2j})薄层灰岩及白云质灰岩地层,而下伏地层为三叠系下统夜郎组(T_{1y})非碳酸岩地层构成。区内径流由夜郎组(T_{1y})的非碳酸盐岩区域,流向嘉陵江组(T_{1-2j})的碳酸盐岩区,由表2可以看出夜郎组地层中水的硬度、碱度和pH值均较低,系偏弱酸性水,当进入嘉陵江组石灰岩地层时,会发生化学反应,即 $\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$ 。因此,研究区内这一径流水化特征为清虚洞的形成,提供了强有力的外源水溶蚀作用条件。

表 2 水化学特征统计

Table 2 Characteristic statistics of water chemistry

| 含水岩组 Rock groups with water content | 水化学类型 Hydrochemical type | 矿化度 Degree of mineralization (g/L) | 总硬度 Total hardness (d) | 总碱度 Total alkalinity (d) | pH 值 pH value |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------|
| T _{1y} | HCO ₃ -Ca | 0.08 | 3.01 | 2.63 | 6.5 |
| T _{1-2j} | HCO ₃ -Ca· HCO ₃ -Mg | 0.45 | 20.47 | 17.19 | 7.8 |

3.1.3 裂隙及节理对洞穴形成的影响

地下水沿着裂隙、节理溶蚀扩大形成洞穴, 这是岩溶洞穴研究同行普遍共识^[24]。清虚洞发育高店背斜东翼翼部, 顺向和走向节理较为发育, 通过统计研究区内节理展布方向和洞道延伸方向(图 5), 可以看出洞穴展布方向与研究区内节理、裂隙发育方向具有较好的一致性。因此可认为, 清虚洞的延伸方向受到研究区内构造裂隙、节理的控制。

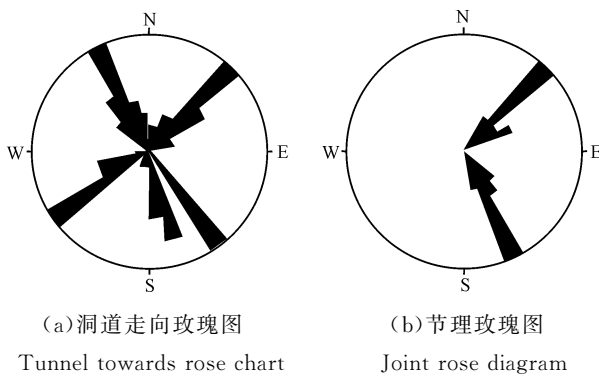


图 5 裂隙、节理和洞道走向玫瑰图

Fig. 5 Rose diagram of fissure, joint and tunnel trend

3.1.4 岩层产状对洞穴形成的影响

节理、断裂等裂隙系地下水运移的天然通道, 岩层间的层间裂隙也同样如此, 尤其在单斜构造区特别显著。罗书文等^[25]就针对单斜构造区岩溶倾斜洞穴发育趋势与岩层产状相关性识别方法进行了论述。因此, 根据洞穴探测数据, 运用该方法, 用 SPSS 软件对清虚洞洞道展布进行一次趋势面拟合分析, 并获得趋势面方程; 同时, 根据研究区内岩层产状(165°/13°)建立岩层倾向面, 获取其倾向趋势面方程, 用 Matlab 软件在同一坐标系内拟合两平面(图 6), 研究其展布关系。由图 6 可以看出两趋势面的倾向具有较好的一致性, 因此认为清虚洞的发育, 不仅受到构造节理断裂的影响, 还受到层间裂隙即岩石产状的影响。

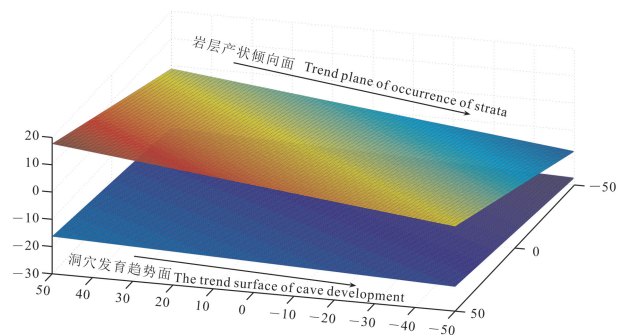


图 6 洞道倾向面与岩层产状关系图

Fig. 6 Relationship between inclined surface of the tunnel and the occurrence of rock formation

3.1.5 地形对洞穴形成的影响

如前所述, 在燕山运动和喜马拉雅运动时期, 研究区发生多期地壳挤压抬升, 形成向东南倾斜的单斜构造地块, 其地势总体特征为以雷打坡一带为首的最高点向东南地形越来越低, 最终形成了北西高东南低, 倾向与岩层倾向基本一致的地势格局。这样的地势格局, 使地块接受的大气降水时在地表、地下形成天然水头势差, 有利于地下水沿着北西、北东两个方向节理及东南倾向的层间裂隙(顺层)^[25]流动。因此, 研究区内在地表水沿着北东向断裂、节理(图 5)溶蚀、侵蚀下, 形成朱仲河和乌溪河等地表径流, 地下水溶蚀形成东南向的洞道(图 2)。所以, 认为研究区内特殊的地形条件, 为地下水沿断裂、节理和层间裂隙溶蚀、侵蚀形成洞穴, 提供了良好的水动力条件。

3.1.6 新构造运动对洞穴形成的影响

新构造运动是第三纪以来以地壳隆升为特点的喜马拉雅运动, 其运动形式以垂直断块运动为主。地壳抬升地下水水位下降, 排泄基准面下降, 地表水水头差增加, 溯源侵蚀能力增强导致河流下切形成峡谷, 因此, 地壳抬升作用的强度直接关系着河流下切的深浅。研究区在新第三纪至早更新世时期是以大面积大幅度的间歇性隆升为主, 曾经历新第三纪中至上新世末期和第四纪早更新世末期等强烈隆升阶段^[15]。在此过程中, 区内主要河流乌溪河溯源侵蚀能力远大

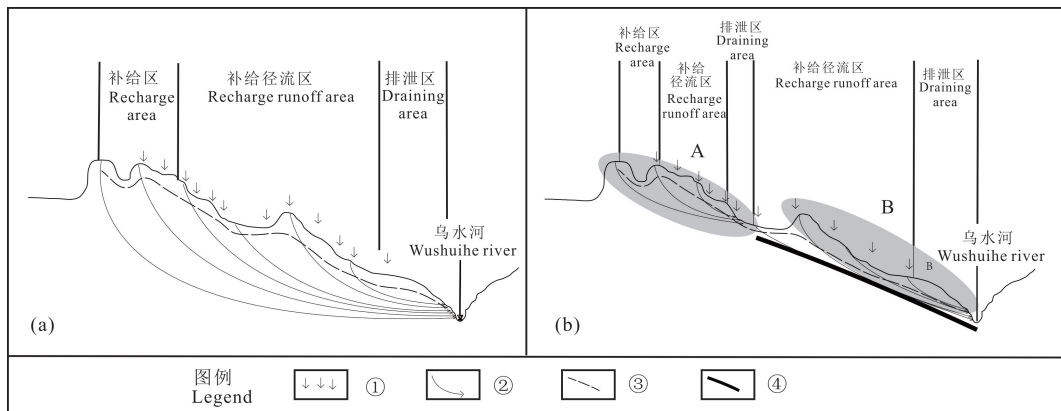
于其他河流,下切呈谷形成了区内的排泄基面,地下河在排泄基面下降的影响作用下,形成现在清虚洞道形态结构。

3.2 洞穴形成与演化过程

3.2.1 洞穴形成机制

如上所述,大方清虚洞发育受到了区域地质构造、地层岩性空间展布和水化学等因素的影响。其最根本原因是影响水的运移过程与碳酸盐岩作用形成

地下空间(岩溶洞穴),所以根据区内地下水运移规律,研究区内洞穴形成机制具有重要意义。根据地下水文流场基本原理,结合实际,研究区地下水文系统划分为区域性(图 7a)和局部(图 7b)两个水文网,分别由补给区、补给径流区和排泄区 3 个部分构成。在两个系统共同作用和多种因素相互影响(见 3.1 节)下发育成清虚洞及研究区内岩溶洞穴。



①大气降水,②水文流出场线,③潜水面,④隔水层

①Atmospheric precipitation,②Hydrologic outflow field line,③Water table,④Water-resisting layer

图 7 清虚洞区域地下水流网

Fig. 7 The flow net of region in Qingxudong cave

区内地下水文网总体趋势或单一岩性的水文网(图 7a)较为单一。区内出露岩区分为两类,透水性较好的碳酸盐岩和透水性较差的黏土岩,因此形成了两个水文系统。黏土岩区其透水性较差,大气降水后基本以地表水形式流走,极少部分渗入地下再通过深切区排泄出来。外源水(表 3)对石灰岩具有较强溶蚀作用,因此,在两种岩石接触带附近,形成较低地形成区内的排泄区,进而形成了自己的水文系统(A区,见图 7b)。对于碳酸盐岩区而言,下伏地层为黏土岩,呈为隔水层,因此在其上的碳酸盐岩地层中形成了另一水文系统(B区,见图 7b)。在碳酸盐岩区内的水流,既有 A 区排泄的地表水,又有 B 区大气降水汇聚而成。A 区来的水虽然具有较强的溶蚀作用,但随着与碳酸盐岩作用的深入,其溶蚀作用也逐渐变弱,因此形成随着洞道的深入,洞道空间也逐渐变小,如清虚洞前 400 m 洞段较为高大。在 B 区内部,因大气降水沿节理、裂隙下渗溶蚀作用使洞内形成天井或厅堂,有利于洞顶崩塌形成天坑等地貌形态。

3.2.2 洞穴演化过程

岩溶洞穴是碳酸盐岩地层在地下水溶蚀形成的天然空间,这是研究者的共识^[8-11,14,26]。根据水的作

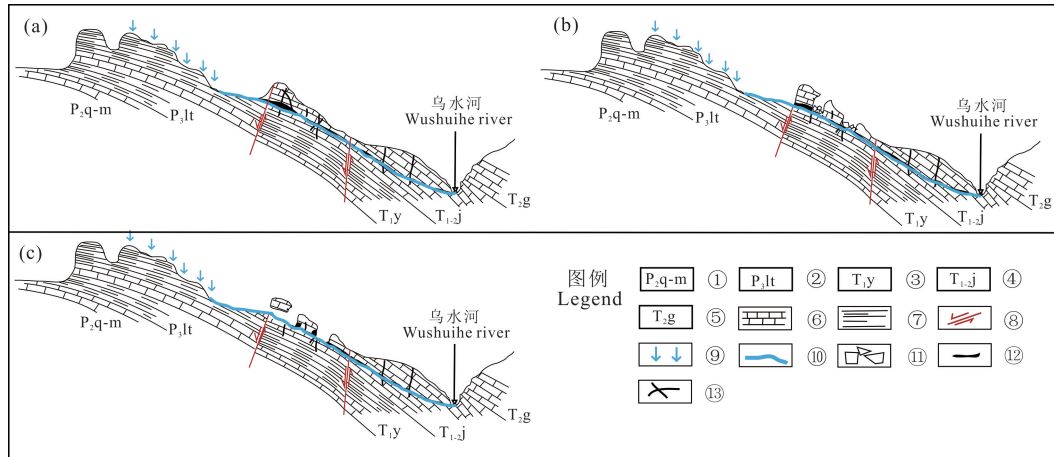
用形式不同可以将洞穴分为流入、流出和穿越含水层 3 种类型^[14];而在形成过程中,根据水的充填情况可分为深潜、侧蚀和悬脱等 3 个时期^[12];另外,研究者还以洞道层层性或其他形态结构特征,来研究和探讨洞穴形成与演化过程^[5,7,27-28]。参考这些研究成果,结合清虚洞的实际探测情况,本研究分析认为清虚洞形成过程经历了溶蚀期、崩塌期和下切搬运 3 个时期。

(1)溶蚀期(管道期)

研究区在地质构造作用下,形成了一系列北东向构造,同时发育了北东向和北西向节理。形成了西北高东南低的地势格局,在研究区西北方向的下垫面,接受大气降水顺坡面往下流,当流经碳酸岩与非碳酸岩接触带时,具有强烈溶蚀能力的外源水,沿着碳酸岩地层内的层间裂隙、节理,向区内排泄基面(乌溪河)排泄。在此过程中,最先发挥作用的是溶蚀作用^[29-30],从原始裂隙溶蚀成为岩溶管道这一过程是漫长的^[31],只有溶蚀作用通道打开到一定程度时,溶蚀作用才能很好地进行^[30],随着通道逐渐扩大,侵蚀作用才会逐渐加强或超过化学溶蚀作用^[31]。随着地壳抬升排泄基面不断下降,地下水的不断溶蚀、侵蚀作

用,使得地下裂隙不断被扩大形成管道,与乌溪河形成强烈的水力联系(图 8a),该时期人无法进入,多数

洞道处于充水状态或十分小。



①二叠系栖霞茅口组,②二叠系龙塘组,③三叠系夜郎组,④三叠系嘉陵江组,⑤三叠系关岭组,⑥碳酸岩,⑦非碳酸盐,⑧逆断层,⑨降雨,⑩河流,⑪崩塌体,⑫洞体,⑬节理

①Qixia-Maokou groups of Permian,②The Permian Longtang group,③Triassic Yelang group,④The Jialing jiang river Triassic group,⑤Guanling group of Triassic system,⑥Carbonatite,⑦Noncarbonate,⑧Reverse fault,⑨Precipitation,⑩River,⑪The collapse of the body,⑫Cave,⑬Joint

图 8 清虚洞形成演化示意图

Fig. 8 Formation and evolution of Qingxudong cave

(2) 崩塌期(天坑期)

洞穴不断被扩大,洞壁在流水作用下,因“X”节理较为发育,当底部岩石被流水蚀空洞壁岩体很容易崩塌,在节理发育密集区内形成大型厅堂,同时洞顶板在内崩、外剥的共同作用下,使得洞道顶板逐渐变薄,在外力诱导下洞顶崩塌形成天窗或天坑。因此,形成了清虚洞中天窗、云坛天坑和大拗口天坑的雏形(图 8b)。该时期洞道被崩塌体堆积堵塞,使地下水被拦截呈一个个水潭,多数洞道处于充水状态。在洞口附近,因云坛天坑崩塌体将河水堵截,地下河回水在陇公坝区内形成水潭,区内地表水侧蚀作用加强,使得清虚洞洞口逐渐变大,边坡被侧蚀岩体崩塌后退变陡;附近的峰丛也因侧蚀作用将垭口蚀低而形成一个个独立的峰体。

(3) 下切搬运期

随着地壳不断抬升,乌溪河下切,区内排泄基面下降,地下河溯源侵蚀能力逐渐加强,洞内的崩塌体逐渐被河水侵蚀带走,河道也逐渐被疏通,洞内各段回水逐渐消失。该时期,河道下切,陇公坝回水也逐渐消失,而形成峰体高于洼地,陇公坝也从湖泊变为沼泽地;同时,洞道基本处于脱水状态,洞内的石钟乳开始发育,而形成现在的洞穴景观(图 8c)。

4 结论

本文从岩石空间展布、水化学条件、裂隙及节理、岩层产状、地形和新构造运动等要素分析其对清虚洞形成的影响,并试探性地运用水文地质流网理论,从定性的角度探讨其形成与演化过程。分析表明,清虚洞是在外源水沿着造节理、裂隙和层间裂隙溶蚀、侵蚀作用下形成的大型洞穴系统,随区内新构造运动的演进而演化的,其形成主要经历了溶蚀期、崩塌期和下切 3 个时期。这为清虚洞旅游开发普及科学知识提供了地学依据,但对于清虚洞的形成时序问题还是一无所知,有待于进一步研究和探讨。

调查探测结果表明:(1)清虚洞可开发利用洞长 1 855 m,洞道形态结构特征为“一桥、两坑、一窗、一支洞”的洞道格局;(2)清虚洞景观资源由天生桥、天坑、天窗、洞道和历史人文景观构成,其核心景观由陇公坝边缘坡立谷、清虚洞天生桥和云坛天坑构成;(3)清虚洞天生桥是世界上规模最大的天生桥,并获得吉尼斯世界纪录,且极具观赏价值;(4)清虚洞在开发过程中对资源分布、组成及等级认识不清,而进行粗放的资源规划利用,导致旅游业的萧条。因此,清虚洞景区的旅游开发,要在充分认识其景观构成的基础上,将洞穴资源充分利用,合理规划旅游路线,打造

洞穴旅游观光为主,乡村休闲旅游为辅,利用吉尼斯世界纪录的品牌效应进行广告营销。

参考文献

- [1] 吉尼斯世界纪录. 这个五一有的玩,盘点你不知道的“世界级”旅游景点[EB/OL]. [2018-04-27.]. <https://www.guinnessworldrecords.cn/news/2018/4/8-record-breaking-scenes-of-the-world-523436>.
- [2] 杨明德. 喀斯特研究——杨明德论文选集[M]. 贵阳: 贵州民族出版社, 2003.
- [3] 杨明德. 岩溶洞穴旅游资源特性与开发保护[J]. 中国岩溶, 1998, 17(3): 233-238.
- [4] 邓亚东, 熊伟, 李俊峰. 岩溶洞穴景观特征及照明设计原则与方法研究——以伏羲洞为例[J]. 国土与自然资源研究, 2013(1): 72-74.
- [5] 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, 2018.
- [6] 韦跃龙, 陈伟海. 岩溶天生桥纵向分层旅游开发方——以重庆黔江蒲花天生桥群为例[J]. 地球学报, 2012, 33(1): 98-110.
- [7] 贺卫, 李坡, 车家骧. 刍议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] SWINNERTON A C. Origin of limestone caverns [J]. Geological Society of America Bulletin, 1932, 43(3): 662-694.
- [9] WHITE W B. Geomorphology and hydrology of carbonate terrains [M]. New York: Oxford University Press, 1988.
- [10] WILLIAM R H. American caves and caving [M]. U. S. A: Haper & Row Publishers, 1978.
- [11] RHOADES, R, SINACORI M N. Patterns of groundwater flow and solution [J]. The Journal of Geology, 1941, 49(8): 785-794.
- [12] 罗书文, 刘一玲, 邓亚东. 四川洪雅县瓦屋山燕子洞探测与形成研究[J]. 国土与自然资源研究, 2014(3): 85-87.
- [13] 韦跃龙, 陈伟海, 罗幼侃, 等. 贵州织金洞世界地质公园喀斯特成景机制及模式研究[J]. 地质论评, 2018, 64(2): 459-475.
- [14] 张任. 岩溶洞穴分类新思考[J]. 中国岩溶, 1994, 13: 229-236.
- [15] 贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [16] 罗书文, 杨桃, 黄保健, 等. 天坑的等级评价方法[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(3): 446-451.
- [17] 搜狗百科. 大方清虚洞[EB/OL]. <https://baike.sogou.com/v73855961.htm?fromTitle>.
- [18] 韦跃龙, 陈伟海, 黄保健. 广西乐业国家地质公园地质遗迹成景机制及模式[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 580-594.
- [19] 赵汀, 赵逊. 地质遗迹分类学及其应用[J]. 地球学报, 2009, 30(3): 309-324.
- [20] 赵逊, 赵汀. 地质公园发展与管理[J]. 地球学报, 2009, 30(3): 301-308.
- [21] 刘再华. 外源水对灰岩和白云岩的侵蚀速率野外试验研究——以桂林尧山为例[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 1-4.
- [22] 朱学稳. 桂林岩溶地貌与洞穴研究[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [23] 熊康宁. 关于锥状喀斯特与塔状喀斯特的水动力成因过程——以黔中地区为例[J]. 中国岩溶, 1994(3): 237-246.
- [24] 罗书文, 杨桃, 邓亚东, 等. 云贵川鸡鸣三省大峡谷景观特征及形成机理研究[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2018, 43(2): 49-56.
- [25] 罗书文, 杨桃, 陈伟海, 等. 单斜构造区岩溶单斜洞穴发育趋势与岩层产状相关性识别[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 433-439.
- [26] 沈继方, 史毅虹, 于青春, 等. 碳酸盐岩中岩溶洞穴的形成条件及预测方法初探[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1991, 11(1): 61-70.
- [27] 张美良, 林玉石, 冉景丞. 贵州荔波岩溶洞穴发育特征[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 13-20.
- [28] 罗书文, 李伟, 李成展, 等. 螳螂河流域洞穴发育特征及其地学意义研究[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2016, 50(2): 297-302.
- [29] 肖鸿林, 邹成杰. 喀斯特峡谷成因及数学模型研究——以猫跳河、六冲河为例[J]. 中国岩溶, 1997, 16(2): 105-112.
- [30] 邹成杰. 岩溶管道水汇流理论研究[J]. 中国岩溶, 1992, 11(2): 119-130.
- [31] PALMER A N. Recent trends in karst geomorphology [J]. Journal of Geological Education, 1984, 32(4): 247-253.

Preliminary Study on the Characteristics and Formation Mechanism of Qingxudong Cave in Dafang County

LUO Shuwen^{1,2}, CHEN Weihai^{1,2}, YANG Tao³, PAN Xiaodong^{1,2}, DENG Yadong^{1,2},
QIN Xinming^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi, 541004, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi, 541004, China; 3. Number Twelve Middle School of Guiyang, Guiyang, Guizhou, 550002, China)

Abstract: The development characteristics and landscape resource composition of Qingxudong cave were explored, and the formation mechanism of Qingxudong cave was studied to provide reference for scientific development and protection. Based on the detection of Qingxudong cave and according to the tunnel structure and spatial distribution characteristics of the Qingxu system, the composition and characteristics of the resources were analyzed and the influence of the topographical features, geological structures and hydrological conditions on the formation of the Qingxudong cave was analyzed. Taking the evolution of regional neotectonics as the main line, the formation and evolution of Qingxudong cave was discussed. The results show that: (1) the cave system of Qingxudong cave belongs to a large cave system with a tunnel structure of "one bridge, two pits, one window and one hole". (2) Tiansheng bridge, Tiankeng, skylight, landscape in cave and edge slope valley are the important landscape resources of Qingxudong cave, among which edge slope valley, Qingxudong cave, Tiansheng bridge and Yuntan tiankeng constitute the core resources. (3) The topographical features in the area and the underlying non-carbonated rock (aquiclude) Yelang group (T_{1y}) provide conditions for the inflow of exogenous water into the carbonated rock formation to dissolve and form holes. (4) Groundwater in the area not only migrates and erodes along the structural joints and fissures, but also the monoclinic structural conditions are conducive to groundwater erosion and erosion along the interstratified fissures and become one of the controlling factors for the formation of Qingxudong cave. (5) In the process of formation and evolution, the Qingxudong cave system mainly experiences three periods: dissolution period, collapse period and undercutting period. The spatial distribution of rock strata and regional structure in the area are prerequisites for the formation of the Qingxudong cave, and exogenous water is the basic driving force for the formation of the Qingxudong cave. In the process of geography evolution in the region, the world's rare natural bridge landscape is created.

Key words: Qingxudong cave of Dafang county, karst cave, development characteristics, formation mechanism, landscape resource of cave, nature bridge, tiankeng

责任编辑: 符支宏



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>