

潘天望, 史文强, 李成展, 等. 云南麻栗坡老山地区岩溶地貌地质遗迹特征及成因分析[J]. 中国岩溶, 2024, 43(6): 1430-1444.

DOI: 10.11932/karst20240619

云南麻栗坡老山地区岩溶地貌地质遗迹特征及成因分析

潘天望^{1,2}, 史文强^{1,2}, 李成展^{1,2}, 陈伟海^{1,2}, 唐亮亮^{1,2}, 武红梅^{3,4,5}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西桂林 541004; 2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西平果 531406; 3. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室(筹), 云南昆明 650216; 4. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 云南昆明 650216; 5. 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216)

摘要: 麻栗坡老山地区位于滇东南岩溶高原向越北三角洲平原过渡的中间地带, 峡谷型岩溶地貌发育典型, 形成了丰富多样的岩溶地貌地质遗迹, 在中国西南及东南亚岩溶地貌演化过程中具有典型性和代表性。文章梳理出该区域岩溶地貌地质遗迹分布和发育特征及其形成原因, 并探讨了云南典型峡谷型岩溶地貌区的形成及演化机理。结果表明: (1) 研究区形成了涵盖地表、地下及其过渡型岩溶地貌以及水体地貌等4种地质遗迹类型, 以峰丛洼地(谷地)、峡谷、洞穴群、瀑布群和岩溶泉群及其景观组合为特色; (2) 研究区溶洞可以划分出>1750 m、1600~1200 m、1000~600 m、500~200 m、<150 m共5个层级, 溶洞类型为旱洞、出水洞、入水洞及其混合型溶洞; (3) 地层、岩性一构造背景下的水文地质条件为塑造该区丰富的岩溶地貌地质遗迹类型提供了外部动力因素; (4) 晚中生代以来研究区岩溶地貌地质遗迹成因演化过程可初步划分为燕山期构造盆地形成和喜马拉雅期地壳差异性抬升两个阶段。

关键词: 岩溶地貌; 地质遗迹; 成因分析; 麻栗坡; 云南

创新点: 麻栗坡老山地区岩溶地貌发育典型, 丰富多样, 地质遗迹包括地表、地下及过渡型岩溶地貌和水体地貌。溶洞分5个层级, 类型多样。地层、岩性一构造背景下的水文地质条件为岩溶地貌形成提供动力。晚中生代以来, 岩溶地貌演化经历燕山期盆地形成和喜马拉雅期地壳抬升两阶段。

中图分类号: P942 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)06-1430-15

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

地质遗迹是指在地球漫长的地质演化过程中, 由各种内外地质作用形成、发展并遗留下来的具有科学价值和美学价值的不可再生的地质现象, 它不仅

仅是生态环境的重要组成部分, 更是珍贵的、不可再生的地质自然遗产^[1-3]。岩溶作用所形成的地下、地表及其过渡型形态统称岩溶地貌^[4-5]。由峰林、峰丛、溶丘、石林、洼(谷)地、峡谷等地表型岩溶地貌景观, 各类洞穴及其各类次生化学沉积物、地下河等地下

资助项目: 中国地质调查局项目“滇东南地区岩溶地貌地质遗迹立典调查评价”(DD20242325); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费“重庆金佛山洞天宫冰洞成景机制研究”(2023005)

第一作者简介: 潘天望(1988—), 男, 助理研究员, 主要从事构造地质学、岩溶地貌景观与洞穴方面研究。E-mail: pantianwang@mail.cgs.gov.cn.

收稿日期: 2024-05-17

型岩溶地貌景观,天坑、天窗、天生桥、穿洞(旱洞)、竖井(漏斗)等地表—地下过渡型岩溶地貌景观,以及地表河流、瀑布、岩溶泉、湖等水体地貌景观,或它们的组合地貌,是一种重要的地质遗迹和旅游资源,统称为岩溶地貌地质遗迹^[6]。云南麻栗坡老山地区位于北回归线南部,滇东南岩溶高原向越北三角洲平原过渡的中间地带,是云南峡谷型岩溶地貌发育最为典型的地区之一,在中国西南及东南亚岩溶地貌演化过程中具有重要的链接作用和典型代表性。2013 年以来,在该区“英雄老山圣地”景区的建设中,以岩溶地貌地质遗迹为主体的自然观光游占举足轻重的作用,调查发现该区有以洞穴群、峡谷群、瀑布群和峰丛洼地(谷地)等为特色的典型地质遗迹 47 处^[7]。但从已有资料来看,该区的地质调查研究以矿产资源、构造与岩石单元系统调查为主^[8-11],而针对该区独特的亚热带峡谷型岩溶地貌地质遗迹特征及构成、空间展布以及成因演化等核心问题缺乏认识,从而影响了高质量开发和合理保护,急需开展进一步研究与探讨。因此,在岩溶地貌地质遗迹调查基础上,加强研究区地质遗迹特征及成因分析,对揭示滇东南岩溶高原向越北三角洲平原过渡的典型岩溶地貌发育区的形成演化机理,以及沿边地区旅游经济发展和兴边富民具有现实意义。

1 研究区概况

研究区位于云南省文山壮族苗族自治州麻栗坡县东南部天保镇、麻栗镇与猛硐瑶族乡一带(图 1),面积约 150 km²,属云贵高原南部滇东南岩溶山原地貌的南部边缘,是峡谷型岩溶地貌发育最为典型的地区之一^[9]。沿河谷两侧呈“V”字型峡谷地势,最高海拔 2579 m,最低海拔 107 m,相对高差 2472 m,年平均气温为 17.7 ℃,多年平均降水量 1054.0 mm,年平均相对湿度 86%,属典型的南亚热带季风气候区。研究区与越北高原相连,以中低山岩溶地貌为主,其中,盘龙河南温河段作为本区侵蚀基准面,是由断层控制走向的一条峡谷性河流,构造作用和水岩作用在此强烈复合,成为本区岩溶地貌地质遗迹分布的轴线(图 1)。

研究区大地构造位置处于扬子、华夏和三江提斯交接转换的过渡区,属于华南板块西缘滇东南燕山期造山带(图 1),地质构造较为复杂,具有多期

次构造岩浆活动特征^[10,12-13]。区内主要构造有 NW 向南温河和文山—麻栗坡左旋走滑断裂带(图 1)。这两组组断裂带切割了本区早期地质体及构造,使其他断裂带及地层呈弧形展布,并对工作区成景岩系和地层的发育演化及空间分布具有重要控制作用。区内岩溶地貌主要出露在研究区东南面,发育于寒武系、奥陶系、泥盆系和二叠系碳酸盐岩地层中,岩性以深灰色中厚、厚层块状白云岩、灰岩、白云质灰岩等为主,是区内主要含水岩层。基于以上地层和构造基础,本区典型岩溶地貌地质遗迹沿南温河谷整体呈 NW—SE 向带状分布,河流两侧形成峰丛—槽谷和洼地等岩溶地貌组合景观,而河谷发育河流景观带、瀑布群、峡谷群和溶洞群等,类型多样,平面上呈线状分布,垂向上地表、地下立体交叉,呈现相对集中的特点(图 1)。

2 岩溶地貌地质遗迹类型及特征

2.1 地质遗迹类型

按照《地质遗迹调查规范(DZ/T 0303-2017)》的分类标准^[12],研究区地表型岩溶地貌有峰丛、峡谷、石牙及溶沟、溶痕等,地下型岩溶地貌有各类溶洞、地下河以及多种次生化学沉积物形态,地表—地下过渡型岩溶地貌以局部出露的小规模塌陷漏斗群为代表(表 1),水体地貌景观有岩溶瀑布和岩溶泉等。总体来看,以溶洞发育最为典型。

2.2 典型岩溶地貌地质遗迹

2.2.1 地表型岩溶地貌

地表型岩溶地貌是指岩溶地貌地质遗迹主要出露在地表,以地表水的溶蚀、侵蚀作用为主,岩溶发育的空间位置和景观特色以地表岩溶作用为主的类型。按岩溶发育特征和区域分异规律,可分为岩溶高山、中山和低山三种;按形态和成因划分,此类地质遗迹的类型具体可指峰丛、峰林、峡谷(含地缝)、石林、石柱峰、台原、溶丘、洼(谷)地、坡立谷、泉(钙)华等^[14]。

2.2.1.1 峰丛与洼(谷)地

研究区峰丛洼(谷)地属东南褶皱带大面积分布的中低山峰丛洼地貌的一部分,标高 400~2 000 m,峰洼高差在 40~200 m 之间,主要分布于南温河峡谷

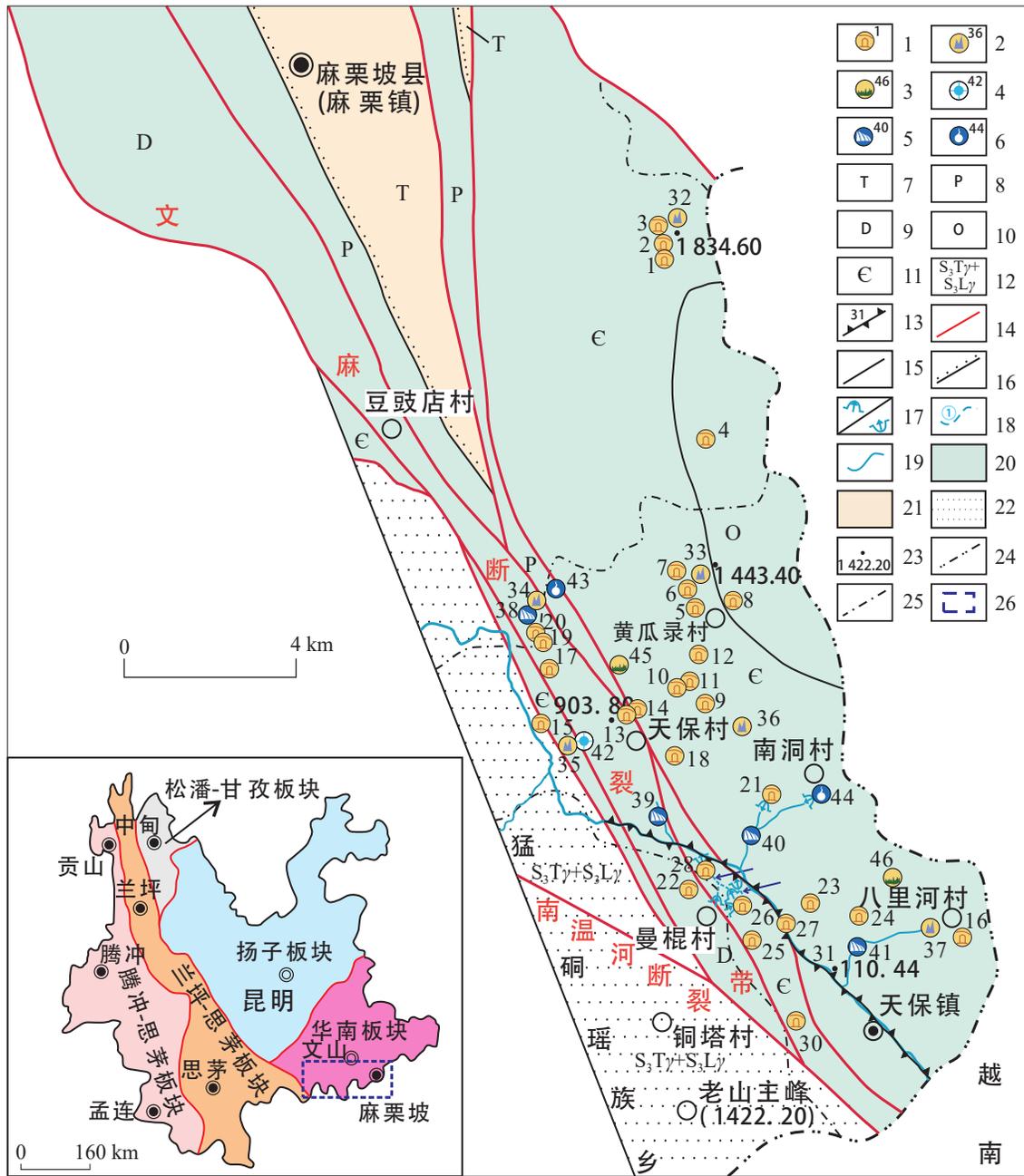


图 1 研究区区域地质(左)^[10]与典型岩溶地貌地质遗迹分布图(右)^[13]

1.溶洞及编号 2.峰丛及编号 3.石芽及编号 4.天窗及编号 5.瀑布及编号 6.岩溶泉及编号 7.三叠系 8.二叠系 9.泥盆系 10.奥陶系 11.寒武系 12.团田+老城坡岩体 13.峡谷及编号 14.断层 15.地层界线 16.地层不整合接触界线 17.地下河入口及出口 18.地下河及编号 19.地表河流 20.岩溶区 21.半岩溶区 22.非岩溶区 23.高程 24.乡镇界线 25.国界 26.研究区范围线

Fig. 1 Regional geological map (left)^[10] and distribution of typical geological relics of karst landforms in the study area (right)^[13]

1. karst cave and numbering 2. peak cluster and numbering 3. clint and numbering 4. skylight and numbering 5. waterfall and numbering 6. karst spring and numbering 7. Triassic 8. Permian 9. Devonian 10. Ordovician 11. Cambrian 12. Tuantian and Laochengpo rock mass 13. canyon and numbering 14. fault 15. stratigraphic boundary 16. stratigraphic unconformity contact line 17. inlet and outlet of underground river 18. underground river and numbering 19. surface river 20. karst area 21. semi-karst area 22. non-karst area 23. elevation 24. township boundary 25. national boundary 26. range line of the study area

东南面茨竹坝—黄瓜录—八里河村一带，峰丛谷地和洼地是径流和排泄区，南温河是最低排泄基准面，由分水岭至河谷呈峰丛洼地→峰丛谷地→岩溶峡谷正向更替，呈圆锥状和纺锤状的缓峰丛或溶丘与浅

碟状洼地或线谷组合的特征，多呈长条状或椭圆状，与褶皱和断裂的展布方向一致，构成面积达数十平方公里或更大的山体，而石峰基部彼此相连，之间常形成“U”形的马鞍地形，以麻栗镇茨竹坝峰丛谷地，

表 1 研究区典型岩溶地貌地质遗迹形态

Table 1 Forms of typical geological relics of karst landforms in the study area

区域	地表型岩溶地貌 溶蚀、侵蚀形态		地下型岩溶地貌 溶蚀、侵蚀形态		地下型岩溶地貌 沉积、溶蚀形态		过渡型岩溶地貌 溶蚀、侵蚀形态
	宏观地貌	微观貌	宏观地貌	机械堆积物	次生化学沉积物	微地貌	宏观地貌
天保镇	峰丛洼地(33.黄瓜录、34.散水村、35.平安坡、36.马家湾、37.八里河东山)、石牙(45.苏麻湾、46.谷地坪)、峡谷(31.南温河)	溶纹、溶痕、溶窝、溶斗、溶沟、溶槽	溶洞群(1-3.下月亮坝、4.下围山、5-8.黄瓜录、9-12.吊竹坪、13-14.平安坡、15.新城、16.八里河、17.老寨、18.天六、19-20.散水、21.落水洞、22.腰芦、23.双河村、24.三转弯、25.干田、26.曼棍洞、27.那马、28.清凉洞)	沙泥质崩塌堆积物、黏土堆积物、砾石胶结层	滴石类(石钟乳、石笋、石柱、鹅管、石旗、石盾),流石类(石幔、石瀑布)、池水类(石田、边池坝和莲花盆)、非重力水类(石花和石珍珠等)	波痕、边槽、流痕、窝穴、沟槽、井管、蚀龛、壑沟、天沟、天锅	漏斗(42.平安坡漏斗群)
麻栗镇	峰丛谷地(32.茨竹坝)						



图 2 南温河峡谷

Fig. 2 Nanwen river gorge

天保镇一带散水村、黄瓜录、平安坡、马家湾及八里河东山峰丛洼地为代表,多数分布在高程 1400 m 之上,洼地(谷地)内无地表河,表现出岩溶发育的老年期阶段。

2.2.1.2 峡谷

岩溶峡谷主要分布于天保镇盘龙河南温河段,北起奇石滩景区,南东至天保镇口岸,长(平距)约 8 km (图 2),为地表河成因峡谷,受控于 NW 向文山—麻栗坡左旋走滑断裂带。峡谷底部为南温河,年均流量大于 $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,水面海拔 100~130 m,河面宽 30~70 m。峡谷深度 670~1060 m,最大可达 1270 m,峡谷顶部宽 3.0~6.5 km。以三转弯水电站为界,上游奇石滩段已经初步作旅游开发,长约 1 km,该段峡谷属典型“V”型谷,底部宽 40~150 m,两侧多为陡壁,最

高达 270 m。下游段峡谷至天保口岸长约 7 km,该段谷底较为宽阔,宽 150~400 m,为“V”型与“U”型复合型峡谷,两岸多为斜坡,向顶端延伸至云贵高原面。峡谷两岸还发育较多洞穴,以清凉洞和将军洞为代表。

2.2.2 地下型岩溶地貌

地下型岩溶地貌是指岩溶地貌地质遗迹主要在地下出露,或受外力作用由地下抬升至地表,以地下水的溶蚀侵蚀作用为主,地表水为辅,相互间具有直接成因联系,且岩溶发育的空间位置和景观特色以地下(或可反映地下)岩溶作用为主的类型。此类地质遗迹具体类型主要有洞穴及各类洞穴次生化学沉积物、地下河和伏流等^[15]。

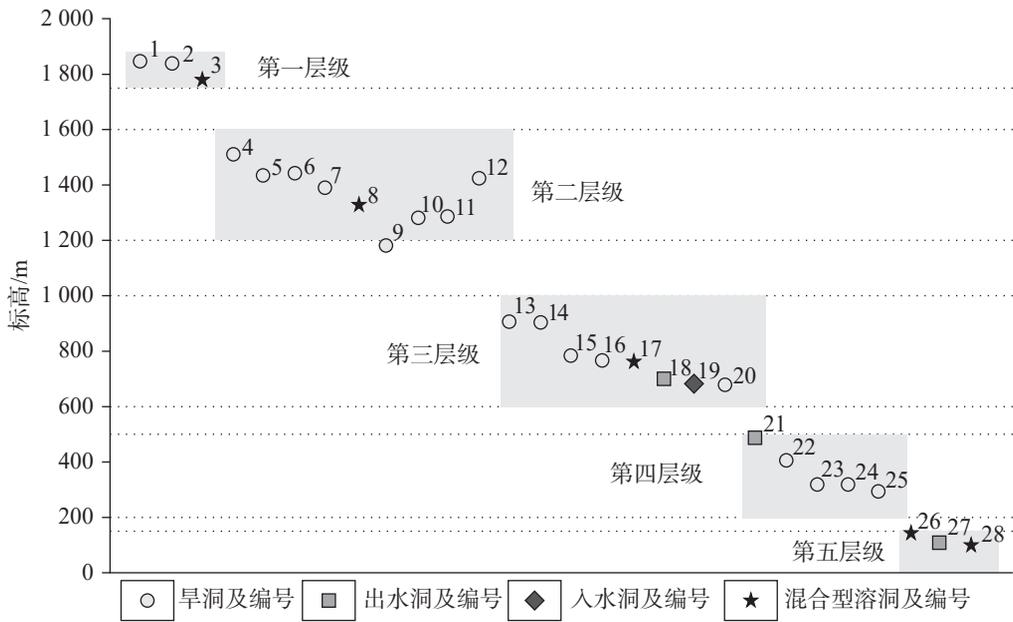


图3 研究区南温河峡谷两侧溶洞分层特征示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stratification characteristics of karst caves along the two sides of the Nanwen river gorge in the study area

2.2.2.1 溶洞

研究区岩溶洞穴分布较广,沿南温河谷两岸海拔110~1 800 m的高程内均有分布(表2)。通过实地勘测,结合溶洞发育层位和海拔等地形条件分析,其具有以下特征:①不同层级的溶洞类型以及沉积形态类似,具有明显的成层性,可划分为>1 750 m、1 600~1 200 m、1 000~600 m、500~200 m、< 150 m共5个层级(图3),溶洞类型主要为旱洞、出水洞、入水洞及混合型溶洞,其中,第1层级和第2层级主要分布有旱洞和混合型溶洞,前者发育3处溶洞,后者发育有9处,第3层级溶洞类型齐全,发育8处旱洞、出水洞、入水洞及混合型溶洞,第4层级为旱洞

和出水洞,第5层溶洞为出水洞和混合型溶洞。②在旱洞中有大量的原岩或砂泥质崩塌堆积物堵塞洞道,次生化学沉积普遍不发育。曼棍洞和清凉洞因靠近本区侵蚀基准面,次生化学沉积物最为发育,且类型较为齐全,有原岩、砂泥质崩塌堆积物、黏土堆积物和砾石堆积层发育(图4)。其中,滴石类沉积物有鹅管、石钟乳、石笋、石柱、石盾和石旗等,流石类沉积物有石幔、石帘和石瀑布等,池水沉积物有石田、边池坝和莲花盆等,非重力水沉积物有石花和石珍珠等。③溶洞内少有大型洞厅,以清凉洞和曼棍洞为代表的中大型规模溶洞具有“不同形迹、不同期次的构造相互重叠、相互作用”和“双



图4 清凉洞洞口和洞顶胶结花岗岩鹅卵石形成的“大灵芝”景观

Fig. 4 "Big Ganoderma" landscape formed by the cementation of granite pebbles at the mouth and the top of Qingliang cave

层式”发育的特征,其中,曼棍洞洞厅宽在1.6~52.0 m之间,高在2.0~23.0 m之间,容积 $10.77 \times 10^4 \text{ m}^3$,为云南文山地区少见的洞穴大厅,高程洞穴除黄瓜录洞穴4为大型溶洞外,其它溶洞深度均小于100 m。各类型洞道的平面展布多呈单一廊道状,且溶洞尽头洞道狭窄,呈尖灭状。④部分交通便利的溶洞人类活动痕迹明显,清凉洞和曼棍洞已开发为旅游区,黄瓜录洞穴1、天六水洞和落水洞洞穴被用作居民饮用水源地,吊竹坪洞穴2和吊竹坪洞穴3为矿业遗址,腰芦洞穴、双河村洞穴、八里河洞和老寨洞穴为军事遗址,其余仍处于自然状态,且多未

被保护。

2.2.2.2 地下河(伏流)

研究区南东面岩溶中低山峰丛区具有较完备的含水层垂向水文地质分带和地下水流系统,表现为有较为深厚的饱气带、地下水埋藏较深、呈网脉状和线状分布等特点,呈现为不同海拔高程发育有数量极多的入水洞和出水洞(图3),但受制于水流湍急或洞道狭窄,部分水洞无法深入探测。而南西面低山峰丛区受老山中低山区外源水、大气降水补给和渗流水的强烈溶蚀作用,在河谷侵蚀面附近与非岩溶区接触带上形成NW—SE向宽广带状展布的裸露

表2 研究区不同海拔高程岩溶洞穴发育特征表

Table 2 Development characteristics of karst caves at different altitudes in the study area

序号	名称	发育地层	水文特征	洞口标高/m	洞口规模(宽×高)/m	长度/m	钟乳石	层级
1	下月亮坝洞穴1	博菜田组(ϵ_3b)	旱洞	1842.90	1.6×2.4 廊道状	20	不发育	1
2	下月亮坝洞穴2	博菜田组(ϵ_3b)	旱洞	1834.60	15.0×11.0 竖井状	>32	少量	1
3	下月亮坝洞穴3	博菜田组(ϵ_3b)	混合型	1782.00	20.0×3.8 廊道状	>10	不明	1
4	下山围洞穴	南津关组(O_1n)	旱洞	1512.20	1.9×2.1 廊道状	19	不发育	2
5	黄瓜录洞穴1	博菜田组(ϵ_3b)	旱洞	1433.50	11.0×4.3 厅堂状	15	少量	2
6	黄瓜录洞穴2	博菜田组(ϵ_3b)	旱洞	1443.40	1.8×2.0 廊道/厅堂复合状	62	少量	2
7	黄瓜录洞穴3	博菜田组(ϵ_3b)	旱洞	1394.00	9.0×5.8 厅堂状	16	少量	2
8	黄瓜录洞穴4	南津关组(O_1n)	混合型	1325.30	12.0×4.5 廊道/厅堂复合状	>1 000	较发育	2
9	吊竹坪洞穴1	博菜田组(ϵ_3b)	旱洞	1178.50	1.2×4.2 裂隙状	8	发育	2
10	吊竹坪洞穴2	博菜田组(ϵ_3b)	旱洞	1283.40	8.0×10.0 廊道状	25	少量	2
11	吊竹坪洞穴3	博菜田组(ϵ_3b)	旱洞	1284.30	6.5×7.3 厅堂状	60	少量	2
12	吊竹坪洞穴4	博菜田组(ϵ_3b)	旱洞	1428.00	1.8×1.7 厅堂状	5	少量	2
13	平安坡洞穴1	歇场组(ϵ_3x)	旱洞	903.90	4.6×5.8 厅堂状	7	不发育	3
14	平安坡洞穴2	唐家坝组(ϵ_3t)	旱洞	903.70	3.5×3.5 厅堂状	4	不发育	3
15	新城洞穴	歇场组(ϵ_3x)	旱洞	782.70	9.3×2.9 廊道状	5	少量	3
16	八里河洞	博菜田组(ϵ_3b)	旱洞	767.00	0.7×1.4 裂隙状	20	不发育	3
17	老寨洞穴	东岗岭组(D_2d)	混合型	760.90	4.2×2.5 厅堂状	42	较发育	3
18	天六水洞	博菜田组(ϵ_3b)	出水洞	700.00	2.9×2.7 廊道/厅堂复合状	23	少量	3
19	散水洞穴1	东岗岭组(D_2d)	入水洞	685.90	1.5×2.1 竖井状	3	少量	3
20	散水洞穴2	东岗岭组(D_2d)	旱洞	681.90	12.0×1.9 厅堂状	不明	未知	3
21	落水洞洞穴	博菜田组(ϵ_3b)	出水洞	491.10	5.3×4.8 裂隙状	>8	少量	4
22	腰芦洞穴	东岗岭组(D_2d)	旱洞	401.60	18.0×3.9 厅堂状	50	少量	4
23	双河村洞穴	博菜田组(ϵ_3b)	旱洞	324.20	5.6×2.4 斜井状	24	发育	4
24	三转弯洞	歇场组(ϵ_3x)	旱洞	324.20	2.3×1.3 廊道状	12	不发育	4
25	干田洞穴	吴家坪组(P_3w)	旱洞	291.50	5.0×2.7 裂隙状	9	少量	4
26	曼棍洞	田蓬组(ϵ_2f) 东岗岭组(D_2d)	混合型	146.50	52.0×23.0 廊道/厅堂复合状	193	发育	5
27	那马水洞	歇场组(ϵ_3x)	出水洞	110.44	1.5×1.5 廊道状	16	少量	5
28	清凉洞	田蓬组(ϵ_2f) 东岗岭组(D_2d)	混合型	107.70	6.7×10.3 廊道/厅堂复合状	>1 800	发育	5

型岩溶区地下水补水带,且表现为饱气带较薄,地下水埋深普遍较浅,具有裂隙—管道双重含水介质特性等特点,碳酸盐岩地层富水性较强,该区已探明的地下河系统规模均较小,且主要集中于天保镇曼棍村一带。以曼棍洞和清凉洞地下河伏流为例,西南侧非岩溶区外源水猛洞河支流在曼棍村桥头一带转入地下形成地下河,前者长度约0.45 km,后者约2.30 km,已测量洞道长度分别为0.19 km和1.70 km。早期伏流发育于洞穴的上部,地质运动抬升后,河流下切,洞道侵蚀崩塌后形成洞厅,大量块石崩塌,形成堆积并堵塞原河道,水流改由崩塌物下方潜流,并流出地表。

2.2.3 地下-地表过渡型岩溶地貌

地下-地表过渡型岩溶地貌主要指岩溶地貌地质遗迹在地表、地下均有出露,地表水、地下水交替作用为主,可将其看作连接地表与地下的“空间枢纽”,或是地表空间与地下空间相互转化的产物,与地表类和地下类具有密切的成因联系,为一套独立或相互联系的岩溶系统。天坑、天窗、天生桥、穿洞(旱洞)、竖井(漏斗)、落水洞等可归为此类型^[16]。研究区地表地势落差大、节理裂隙发育,竖井、落水洞及塌陷型漏斗等岩溶地貌地质遗迹景观及组合类型较为发育,其中以平安坡塌陷漏斗群为代表,该漏斗群分布3处塌陷型漏斗,发育于上寒武统歇场组地层中,受控于文山—麻栗坡左旋走滑断裂带,呈NW—SE向串珠状分布,漏斗平面形态均为椭圆形,长轴多在26~52 m之间,短轴多在23~34 m之间,深4~16 m,岩壁出露高差在4~8 m之间,漏斗底部均为黏土覆盖。

2.2.4 水体地貌

研究区内南温河河谷地形狭长、低凹、陡窄,河床高程由北西向南东逐渐下降,地表河网围绕峡谷两侧起着汇聚和排泄作用,具有相对完整的补给、径流、排泄和边界条件,北西面形成老君山主峰至猛洞河一带的弧形分水岭,南西面则以猛洞河为界,从新南坪—老山主峰一带形成弧形分水岭,北东面黄瓜录—八里河村一带岩溶地貌区受构造线控制,分水岭呈NW—SE向线状分布,使得研究区形成一个相对独立的“V”字型峡谷汇水单元,有利于地表水和地下水汇集。河网密度相对较高,地表河、季节性瀑

布、岩溶泉与地下河交替出现,并与地表典型岩溶地貌相结合,加之良好的植被生态条件,形成多处典型的岩溶瀑布和岩溶泉地质遗迹景观,代表有猫猫跳瀑布(图5)、偏马瀑布、散水瀑布(图6)、新寨瀑布以及南洞岩溶泉和大岩迁岩溶泉(表3)。

3 形成条件分析

岩溶地貌地质遗迹的个体形态以及不同景观组合特征是地层、岩性、构造以及气候水文等因素的综合反映,其成因机制是指在影响岩溶地貌形成的各要素、各形成机理等进行集中分析、研究和总



图5 猫猫跳瀑布

Fig. 5 Maomaotiao waterfall

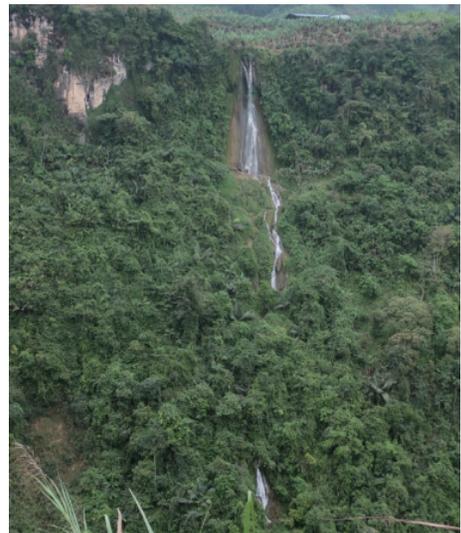


图6 散水瀑布

Fig. 6 Sanshui waterfall

表3 研究区典型水体地貌地质遗迹主要特征表

Table 3 Main characteristics of typical aquatic geomorphic geological relics in the study area

序号	名称	地理位置	地质遗迹编号	水文特征	主要景观特征
1	散水瀑布	天保镇散水村	38	常年性	由3级瀑布组成,总落差为166 m,瀑面宽2~9 m,总体朝向为270°,2021年4月19日流量约0.15 m ³ ·s ⁻¹ ;上级瀑布落差约为46 m,宽4~9 m,瀑面倾角80°,中级瀑布落差约40 m,瀑面宽2~4 m,瀑面倾角50°,下级瀑布瀑面宽2~4 m,高度大于4 m,瀑面倾角60°
2	新寨瀑布	天保镇天保村	39	季节性	由2级瀑布组成,总落差17 m,瀑面宽3~5 m,总体朝向为37°,2021年4月14日流量0.015 m ³ ·s ⁻¹ ;上下两级落差分别为11 m和6 m,两级瀑布顶底平距约10 m,瀑面倾角为68°和60°
3	猫猫跳瀑布	天保镇天保村	40	季节性	瀑布总体落差约195 m,瀑面宽5~15 m,总体朝向为75°,平面流程约470 m,为瀑面倾角在60°~85°之间的多级季节性跌水瀑布,其间有数级高5~18 m不等的单级瀑布,2021年4月8日大雨后瀑布总流量约2 m ³ ·s ⁻¹
4	偏马瀑布	天保镇八里河村	41	季节性	单级瀑布,总落差为70 m,瀑面宽0.5~1.2 m,瀑面倾角85°,总体朝向为250°,2021年3月29日流量0.01 m ³ ·s ⁻¹
5	大岩迁岩溶泉	天保镇天保村	43	长流泉	下降泉,泉口不规则状,泉眼宽约0.3 m,2021年4月24日流量约0.003 m ³ ·s ⁻¹ ,水质清澈,无冒泡现象
6	南洞岩溶泉	天保镇天保村	44	长流泉	下降泉,泉口不规则状,泉眼宽约0.6 m,2021年4月1日流量约0.005 m ³ ·s ⁻¹ ,水质清澈,无冒泡现象

结的基础上,提炼出来的系统化、理论化的岩溶地貌形成机理^[14,17-18]。

3.1 地层岩性

研究区碳酸盐岩基本为连续沉积,层位相对稳定且沉积厚度较大,广泛分布的寒武系大部分、泥盆系和二叠系地层为地质遗迹的形成提供了优异的物质条件,控制了地质遗迹的区域分布。区内洞穴主要发育于寒武系田蓬组、博菜田组、歇场组、唐家坝组地层中,少数发育于奥陶系南津关组、泥盆系东岗岭组和二叠系吴家坪组等地层中,以清凉洞和将军洞为代表,发育于田蓬组和东岗岭组地层中,豆豉店村—八里河东山一带广泛分布的峰丛洼地(谷地)则主要发育于田蓬组、博菜田组和歇场组地层中。碳酸盐岩地层的可溶化程度直接决定岩溶地貌和洞穴的发育程度,如研究区东南面发育典型峰丛洼地地貌组合;而老山底部南温河西南面曼棍、干田和南榔一带发育寒武系龙哈组和田蓬组等地层,其与泥盆系东岗岭组和老山复式花岗岩呈断层接触,虽然也处于斜坡峰丛洼地类似的岩溶发育阶段,但岩溶地层分布也有限,且因断裂和褶皱相对较多,容易阻断不同区块间的水力联系,同时因靠近老山岩体碳酸盐岩地层多数已发生大理岩化或千枚岩化等变质作用,导致多数碳酸盐岩地层中夹有隔水层,该区强岩

溶、弱岩溶和非岩溶岩组相间成条带分布,加之地势向底部南温河倾斜,进而限制了岩溶横向发展互相沟通,导致该区岩溶地貌发育较差,石峰或洼地形态不太典型。

3.2 地质构造

3.2.1 区域构造

构造对岩溶地貌的发育具有较强的控制性^[19]。研究区最主要的构造为NW-SE向文山—麻栗坡左旋走滑断裂带^[20],该断裂带对区内成景岩系和地层的发育演化及空间分布具有重要控制作用,其向北东至延伸至麻栗坡,向南西延伸至越南境内,切割了上寒武至二叠系地层,形成于加里东期,在海西晚期或印支期以及燕山期再次开始活化,并在此后各构造演化期均有活动。本区岩溶地貌地质遗迹的形成和发展同时也受到区域构造明显地控制和影响,主体表现为区内典型岩溶地貌地质遗迹沿南温河河谷整体呈NW-SE向带状分布。以清凉洞为例,该溶洞发育于文山—麻栗坡左旋走滑断裂带上,洞道走向与断裂走向基本一致,洞中断裂带上原岩发生大理岩化以及发育密级节理。而受歹字型构造的制约,南温河沿断裂延伸,成NW-SE向,本区主要山脉、河流也与上述方向一致。

3.2.2 新构造运动

麻栗坡一带曾发生过与青藏高原隆升相应强烈的构造隆升运动^[9],研究区紧邻青藏高原三江造山系,新生代隆升及剥蚀作用造就了该区独特的山原地貌特征。由于碳酸盐岩分布广泛,新生代持续强烈的上升,造成的水流侵蚀和溶蚀作用是该区地貌形成的主要营力,导致南温河整个水系侵蚀基面的持续下降,河流深切,形成深切峡谷、陡崖和河流裂点(瀑布)的出现(图 7)。因此,研究区近代和现代的侵蚀作用以河流迅速下切,溯源侵蚀为主要特征,导致高原面受到强烈破坏残存无几。溶蚀作用则受新构造运动间歇性上升的影响,表现为多期性而呈现出复杂多变的岩溶地貌景观,例如河谷两侧发育的 5 个层级洞穴群,是本区新构造运动多期间歇性抬升的结果和证据。清凉洞和将军洞为水-旱复合廊道/厅堂状双层洞穴,也暗示了本区新生代以来发生多次间歇性抬升,导致地下水流不断侵蚀、下切,上覆岩石失去支撑,逐渐崩塌形成洞厅,现今洞内崩塌也趋于稳定,早期崩塌物被洞内次生沉积物所包裹,形成钙华皮壳、洞壁和洞顶悬挂鹅卵石钙质胶结物,崩塌的

洞道则发育形成石钟乳、石瀑、石幔、石柱、石帘、石盾等次生沉积物景观,而早期的构造裂隙则成为钟乳石沉积所需物质来源的通道,洞内石钟乳具有沿裂隙线状发育的显著特点。

3.3 气候水文条件

岩溶地貌地质遗迹的发育演化不但受地层岩性与构造等内力的控制,也受气候、水文等外力作用的影响^[21]。研究区位于北回归线南部亚热带季风气候区,气候温暖湿润,丰富的大气降水是工作区地表水和地下水的主要补给来源。降雨量、气温等气象因子年内、年际不均,且与高程有关,海拔愈高,雨量愈大、气温愈低,这为岩石的物理化学风化作用和地下河强烈的溶蚀作用创造了有利条件。同时,形成的水文网控制了岩溶地貌区峰丛谷地、峰丛洼地景观的分布、形成和发育过程^[22]。研究区高原面峰丛区受南东面岩溶中低山区外源水、大气降水和渗流水的溶蚀作用,峰丛洼地(谷地)发育,由分水岭至河谷呈峰丛洼地→峰丛谷地→岩溶峡谷正向更替,地形坡度相对较大,属地下水的补给、径流区。大气降水以垂直入渗为主,直接灌入地下,补给量大,使得地

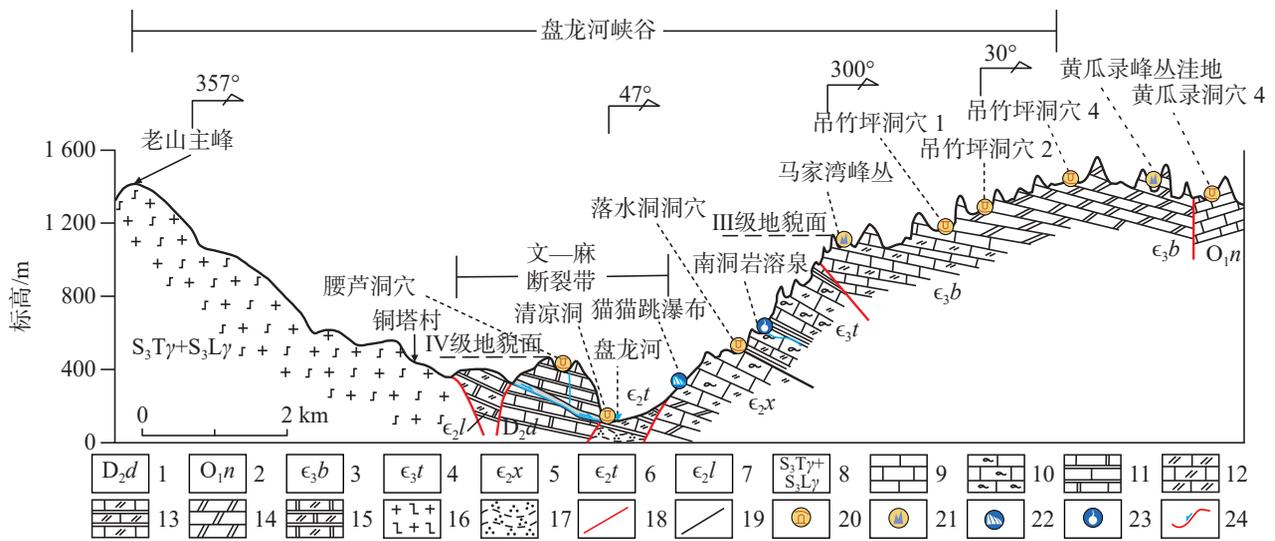


图 7 研究区综合地质地貌剖面示意图

1.中泥盆统东岗岭组 2.下奥陶统南津关组 3.上寒武统博莱田组 4.上寒武统唐家坝组 5.中寒武统歇场组 6.中寒武统田蓬组 7.中寒武统龙哈组 8.团田+老城坡岩体 9.灰岩 10.泥质条带灰岩 11.大理岩化灰岩 12.白云质灰岩 13.大理岩化白云质灰岩 14.白云岩 15.白云质大理岩 16.片麻状花岗岩 17.石英千枚岩 18.断层 19.地层界线 20.溶洞 21.峰丛(洼地) 22.岩溶瀑布 23.岩溶泉 24.地下河及流向

Fig. 7 Schematic profile of comprehensive geology and geomorphology in the study area

1. Donggangling formation in middle Devonian 2. Nanjinguan formation in lower Ordovician 3. Bolaitian formation in upper Cambrian 4. Tangjiaba formation in upper Cambrian 5. Xiechang formation in middle Cambrian 6. Tianpeng formation in middle Cambrian 7. Longha formation in middle Cambrian 8. Tuantian and Laochengpo rock mass 9. limestone 10. muddy-banded limestone 11. marbled limestone 12. dolomitic limestone 13. marbled dolomitic limestone 14. dolomite 15. dolomitic marble 16. gneissose granite 17. quartz phyllite 18. fault 19. stratigraphic boundary 20. karst cave 21. peak cluster (depression) 22. karst waterfall 23. karst spring 24. underground river and its flow direction

下水力坡度大,径流集中畅通,地下水循环交替迅速,水量大且侵蚀性较高。在雨季,多数水源以地表面流形式排泄,常形成季节性瀑布、溶潭、溶井、季节泉等临时性排泄口。在断裂带上由于节理裂隙极其发育,因此以发育非均匀垂直岩溶为主,加之碳酸盐地层分布较广,岩溶形态规模一般较大,伏流管道、溶洞和落水洞等较为发育,岩溶水以地下暗河和大泉的集中排泄为主,如南洞村南洞岩溶泉和天保村大岩迁岩溶泉等,老山一带非岩溶区外源水猛洞河支流在桥头一带潜入地下则形成清凉洞和曼棍洞洞内地下河伏流。

4 岩溶地貌地质遗迹成因分析

云南现代岩溶地貌形成的主要构造营力来自燕山期—喜山期,特别是新近纪以来发生的新构造运动^[20,23]。研究区紧邻青藏高原三江造山系,处于云南高原台地东南缘滇东南地区,地形地貌、气候、植被组成都与云南其他地区或青藏高原邻区都有明显的差异。正是这些差异性才造就了研究区绝无仅有的现今环境面貌,而对这一面貌的构造演化史还有诸多分歧^[20]。根据区域高程、地貌形态对比分析,晚中生代以来本区岩溶地貌地质遗迹的形成主要经历了燕山期构造盆地和喜马拉雅期地壳差异性抬升两个阶段的地质构造演化过程^[20,23-27](图 8)。

4.1 燕山期构造盆地形成阶段

晚中生代,受太平洋板块的俯冲作用、欧亚板块和印支板块的碰撞挤压的远程交替影响,燕山构造运动造成本区北西部断裂带剧烈活动,使得文麻断裂具有明显的拉伸走滑特征,断裂旁有较多的北西向次级断裂,并形成了半地堑式文山断陷溶蚀盆地^[20]。南西面老君山岩体多期次侵入^[9-10],而东南部大面积上升,本区受强烈侵蚀切割和风化剥蚀作用,但未接受沉积,由此基本奠定了现代地貌的地质基础。

4.2 喜马拉雅期地壳差异性抬升阶段

喜马拉雅构造运动早期,即古新世晚期开始,在红河断裂带的两侧(兰坪—思茅地块和扬子地块)形成周缘前陆盆地和压陷盆地,并随着喜马拉雅的挤压隆升,古新世盆地逐渐萎缩直至消失^[20],地壳大幅抬升形成,形成 I 级夷平面,海拔范围为 2 300~2 430 m,

零星分布于滇东北地区,较为破碎,为高程相近的残留峰顶面^[23]。

喜马拉雅构造运动中期,即从始新世开始为文山盆地较长时期的稳定剥蚀—堆积阶段,表现为盆地大面积的“削高填低”的夷平过程,以水平方向的浅表层岩溶过程为主,形成云南高原 II 级地貌面,海拔范围 1 750~2 080 m^[23],该时期文山盆地受文山—麻栗坡左行走滑断裂带限制^[20],盆地中堆积了始新统砚山组含砾砂岩、砂页岩、砾岩等岩性地层,同时形成本区上层洞穴(第一层溶洞,海拔高程 > 1 750 m),晚始新世—早渐新世期间又有一次构造变动^[20],文山盆地北东强烈抬升,使始新统砚山组地层等高出盆地 150~200 m^[25],文山盆地开始接受渐新统花枝格组紫红色泥灰岩、含砾泥岩等及褐煤的沉积并堆积于盆地边缘,上新世中期盆地又间歇性抬升,在本区形成了较大的剥夷面,主要分布在海拔范围 1 200~1 600 m 地区,表现为大型峰丛、槽谷和洼地组合,该区峰丛与洼地、谷地之间的相对高差可达 80~250 m 左右,峰与峰之间疏离程度变小,一般在 300~500 m 之间,岩溶洞穴十分发育,以本区中层溶洞(第二层级溶洞群,海拔高程 1 200~1 600 m)为代表,成层性明显,并发育有较丰富的次生化学沉积物。沉积物为红黏土,并发育有铁质风化壳,如本区较多溶洞为早期铁矿遗址,总体为壮年期地面特点。

晚上新世—早更新世,青藏高原持续差异性抬升,使得云南高原地貌面解体,在一些抬升缓慢和相对凹陷地方,形成汇水盆地、湿地等负地形地貌,在发育断裂、裂隙、节理构造密集地段,地表径流开始下潜或下渗,对地下埋藏的碳酸盐岩岩石开始侵蚀和溶蚀,随着气候条件变暖,降水增多和水动力加强,岩溶作用也跟着提速,岩溶塌陷漏斗等开始发育,为地下径流提供了水资源,中低层位洞穴开始发育。该时期残留剥蚀面分布在海拔 500~1 000 m 地区,以峰丛—槽谷、洼地为主,比高为 60~300 m,峰与峰之间疏离程度往河谷逐渐加宽,一般在 200 m 以上,靠近老山岩体地区碳酸盐岩地层多数已发生大理岩化或千枚岩化等变质作用,石峰或洼地形态不太典型,但顶部平坦,仍保留原始地貌面特点,沉积物以黄色石灰土为主,体现为青年期岩溶地貌发育阶段的特点。岩溶洞穴较为发育,以海拔高程为 600~1 000 m 第三层级溶洞群为代表,溶蚀层位较浅,洞穴化学沉积少,河流沟谷网络开始发育,峰丛、洼地(谷地)地

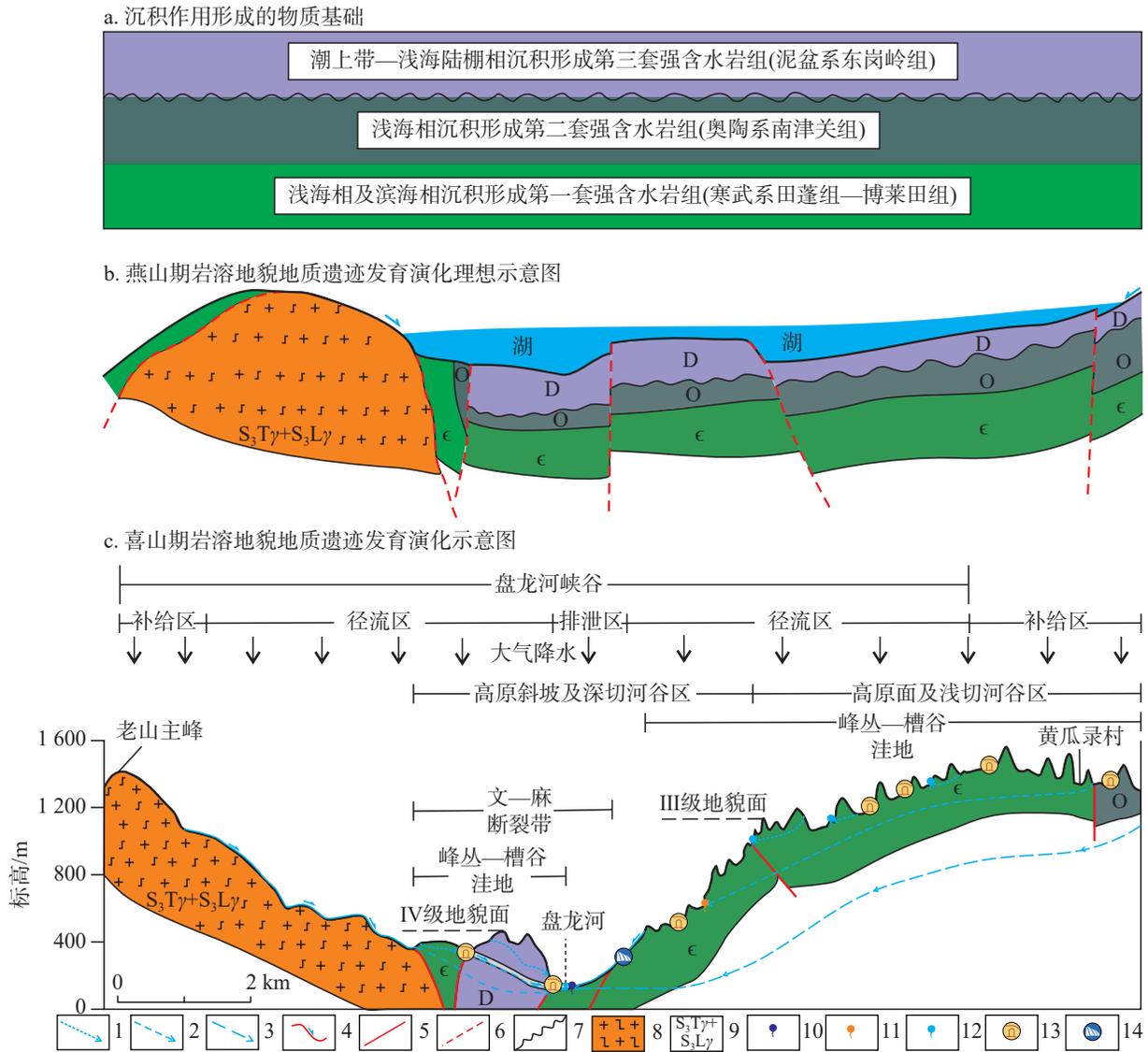


图 8 研究区地质遗迹成因演化示意图^[28]

1.表层径流 2.浅循环径流 3.深循环径流 4.地表流水及方向 5.断层 6.推测断层 7.角度不整合界线 8.团田+老城坡岩体 9.片麻状花岗岩 10.深循环径流排泄点 11.浅循环径流排泄点 12.表层径流排泄点 13.洞穴 14.岩溶瀑布

Fig. 8 Genesis evolution of geological relics in the study area

1. surface runoff 2. shallow circulation runoff 3. deep circulation runoff 4. surface flow and direction 5. fault 6. presumed fault 7. angular unconformity line 8. Tuantian and Laochengpo rock mass 9. gneissose granite 10. discharge point of deep circulation runoff 11. discharge point of shallow circulation runoff 12. discharge point of surface runoff 13. cave 14. karst waterfall

貌呈现锥形。中更新世以来仍然以断块普遍上升为主,幅度也较大,而且具有间歇性,水平方向和垂直方向的侵蚀溶蚀过程持续,河床沿展,洞穴扩大加长,部分洞穴出现塌顶现象,陷落型漏斗或竖井出现,低海拔洞穴发育,以第四层级溶洞群(海拔高程为200~500 m)为代表,洞穴滴石、流石类沉积物不多,洞穴成为河流的地下通道,支流河网形成。

喜马拉雅构造运动晚期,即晚更新世以来,区域大部分地区再次大面积抬起,使古剥夷面抬升成现今高原面。其中,本区间歇性升降运动使湖盆逐渐

消亡,河流阶地出现,大部分地区转为亚热带气候,人类活动影响加剧。青藏高原快速隆升又再次强化了本区的地形差异,主干河流强烈下切,侵蚀基准面下降,峡谷和深切曲流发育,河流沉积物颗粒加粗,地下水位下降,岩溶地貌以垂直侵蚀、溶蚀发育为主,加之特殊的气候背景下,峡谷两岸岩溶地貌主要在地下水垂向径流带持续发育^[28],从山地补给区向下,垂向渗流带厚度达1000 m以上,为本区岩溶地貌的持续发育提供优越水文地质条件。洞穴化学沉积过程加强,区内洞穴发育演化出现两个方向,一方面高

层位洞穴向深部发展, 由于河流强烈下切及溶蚀作用, 原有的地下河通道被切断并形成新的通道, 由于逐级抬升而下移, 而抬高的洞穴逐渐退化或趋向死亡, 最终形成了形态各异的岩溶洞穴和塌陷漏斗; 另一方面, 低层级洞穴(海拔高程 $<150\text{ m}$)如清凉洞和曼棍洞等在亚热带气候降雨量增强过程中, 则强盛发育, 洞道水平上扩大和纵向上侵蚀加速, 洞穴大厅愈来愈大, 洞穴沉积物类型增多和规模扩大, 多层次洞穴体系全面形成, 最终塑造造成了如今的地质遗迹分布格局与发育特征。

5 结 论

(1) 云南麻栗坡老山地区岩溶地貌地质遗迹类型丰富, 涵盖地表、地下及其过渡型岩溶地貌以及水体地貌等, 地表岩溶地貌有峰丛、洼地、峡谷、石牙及溶沟、溶痕等, 地下岩溶地貌有溶洞、地下河以及多种沉积形态, 地表-地下过渡型岩溶地貌以局部出露的小规模塌陷漏斗群为代表, 水体地貌景观有岩溶瀑布和岩溶泉等。

(2) 研究区以峡谷岩溶地貌为典型, 溶洞发育并具有成层性, 不同层级的溶洞类型以及沉积形态类似, 以低海拔洞穴为特色, 可以划分出 $>1750\text{ m}$ 、 $1200\sim 1600\text{ m}$ 、 $600\sim 1000\text{ m}$ 、 $200\sim 500\text{ m}$ 、 $<150\text{ m}$ 5个层级, 溶洞类型主要为旱洞、出水洞、入水洞及其混合型溶洞。

(3) 文山—麻栗坡 NW 向左旋走滑断裂带, 对岩溶地貌地质遗迹的形成和演化具有重要控制作用, 岩溶地貌地质遗迹主要沿南温河河谷呈 NW-SE 向带状分布, 新构造运动的多期性抬升对岩溶地貌的形成也有重要影响; 研究区连续沉积、层位稳定和较大沉积厚度且分布广泛的寒武系、泥盆系和二叠系碳酸盐岩地层为地质遗迹的形成和发育提供了优异的物质条件, 控制了地质遗迹的区域分布; 同时, 独特的气候和水文条件对岩溶地貌的形成有显著影响, 丰富的降水为本区岩溶作用提供了充足的水源。

(4) 基于前人调查研究成果, 根据区域高程、地貌形态对比和本区岩溶地貌景观个体形态特征以及不同景观组合形成条件分析, 将晚中生代以来研究区岩溶地貌地质遗迹成因演化过程初步划分为燕山期构造盆地形成期和喜马拉雅期地壳差异性抬升期两个阶段。

参考文献

- [1] DZ/T 0303-2017. 地质遗迹调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
DZ/T 0303-2017. Specification for geoheritage investigation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [2] 罗书文, 杨桃, 邓亚东, 覃星铭. 毕节鸡鸣三省·贵州地质公园地质遗迹特征及价值研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(6): 946-956.
LUO Shuwen, YANG Tao, DENG Yadong, QIN Xingming. Characteristics and value of geological relics in the Bijie Jiming Sansheng-Guizhou geopark[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(6): 946-956.
- [3] 邓亚东, 孟庆鑫, 吕勇, 罗书文, 潘明. 桂林地质遗迹景观特征及其保护开发策略研究[J]. 中国岩溶, 2021, 40(5): 783-792.
DENG Yadong, MENG Qingxin, LV Yong, LUO Shuwen, PAN Ming. Characteristics of geological heritage landscapes in Guilin and their protection and development strategies[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(5): 783-792.
- [4] 袁道先. 现代岩溶学在中国的发展[J]. 地质论评, 2006, 52(6): 15-18.
YUAN Daoxian. The development of modern karstology in China[J]. Geological Review, 2006, 52(6): 15-18.
- [5] 朱学稳. 我国峰林喀斯特的若干问题讨论[J]. 中国岩溶, 2009, 28(2): 155-168.
ZHU Xuewen. Discussions on Fenglin karst in China[J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(2): 155-168.
- [6] 韦跃龙, 李成展, 陈伟海, 罗劭侃, 朱德浩, 潘天望. 广西岩溶景观特征及其形成演化分析[J]. 广西科学, 2018, 25(5): 465-504.
WEI Yuelong, LI Chengzhan, CHEN Weihai, LUO Qukan, ZHU Dehao, PAN Tianwang. Characteristics and formation and evolution analysis of the karst landscape of Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 2018, 25(5): 465-504.
- [7] 中国地质科学院岩溶地质研究所. 西南岩溶区重点调查区碳酸盐岩地质遗迹详细调查与评价报告[R]. 2023.
- [8] Liu Y P, Ye L, Li C Y, Hu R Z. Laojunshan-Song Chay metamorphic core complex and its tectonic significance[C]//13th Annual VM Goldschmidt Conference, 2003.
- [9] 阙朝阳. 云南麻栗坡南温河—洒西一带钨成矿系统及找矿方向研究[D]. 中国地质大学(北京), 2016.
QUE Chaoyang. Tungsten metallogenic system and prospecting direction in the Nanwenhe-Saxi area, Malipo county, Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [10] 刘艳宾. 滇东南老君山地区燕山期花岗岩成因机制及钨锡成矿规律[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
LIU Yanbin. Petrogenesis of the Yanshanian granite and metallogenic characteristics of the W-Sn polymetallic deposits in the Laojunshan region, southeastern Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [11] 印贤波, 王杰亭, 刘争. 滇东南南部老君山地区成矿地质特征

- [J]. 西部资源, 2018(3): 21-23.
- [12] 董树文, 李廷栋, 钟大赟, 王成善, 沙金庚, 陈宣华. 侏罗纪/白垩纪之交东亚板块汇聚的研究进展和展望[J]. 中国科学基金, 2009, 23(5): 281-286.
DONG Shuwen, LI Tingdong, ZHONG Dalai, WANG Chengshan, SHA Jingeng, CHEN Xuanhua. Recent progress and perspective of the research on J-K East Asian multi-direction convergent tectonics[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2009, 23(5): 281-286.
- [13] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. Journal of the Regional Geology of Yunnan Province[M]. Beijing: Geology Press, 1990.
- [14] 韦跃龙, 陈伟海, 罗劭侃, 罗书文. 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): 457-476.
WEI Yuelong, CHEN Weihai, LUO Qukan, LUO Shuwen. Study on the karst landscape formation mechanism and model of the Zhijindong Cave Global Geopark, Guizhou Province[J]. Geological Review, 2018, 64(2): 457-476.
- [15] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成. 现代岩溶学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
YUAN Daoxian, JIANG Yongjun, SHEN Licheng. Modern Karstology[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [16] 朱学稳, 朱德浩, 黄保健, 陈伟海, 张远海, 韩道山. 喀斯特天坑略论[J]. 中国岩溶, 2003, 22(1): 51-65.
ZHU Xuewen, ZHU Dehao, HUANG Baojian, CHEN Weihai, ZHANG Yuanhai, HAN Daoshan. A brief study on karst Tiankeng[J]. Carsologica Sinica, 2003, 22(1): 51-65.
- [17] 夏凯生, 袁道先, 谢世友, 楚伟春. 乌江下游岩溶地貌形态特征初探: 以重庆武隆及其邻近地区为例[J]. 中国岩溶, 2010, 29(2): 196-204.
XIA Kaisheng, YUAN Daoxian, XIE Shiyu, CHU Yuchun. Preliminary study on morphology features of karst in the lower reaches of Wujiang river: A case in Wulong, Chongqing and the surrounding area[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(2): 196-204.
- [18] 任娟刚, 洪增林, 张静, 唐力, 刘晓峰, 秦臻, 王鹏, 王研. 陕西宁强禅家岩天坑群喀斯特地质遗迹特征及成因[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 539-547.
REN Juangang, HONG Zenglin, ZHANG Jing, TANG Li, LIU Xiaofeng, QIN Zhen, WANG Peng, WANG Yan. Features of geological relics and genesis of the Chanjiayan Tiankeng group in Ningqiang, Shaanxi Province[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 539-547.
- [19] 邓自强, 林玉石, 张美良, 刘功余, 魏志民. 桂林岩溶洼地和洞穴发生、发展的构造控制剖析[J]. 中国岩溶, 1987, 6(2): 48-59.
DENG Ziqiang, LIN Yushi, ZHANG Meiliang, LIU Gongyu, WEI Zhimin. Analysis of controlling effects of structure on depressions and caves in Guilin[J]. Carsologica Sinica, 1987, 6(2): 48-59.
- [20] 田宜敏. 云南文山盆地渐新世早期地层年代学与古环境重建[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
TIAN Yimin. Chronostratigraphy and paleoenvironmental reconstruction during Early Oligocene of Wenshan Basin, Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [21] 刘金荣. 广西热带岩溶地貌发育历史及序次探讨[J]. 中国岩溶, 1997, 16(4): 332-345.
LIU Jinrong. The development history of the Guangxi tropical karst geomorphology and its sequences[J]. Carsologica Sinica, 1997, 16(4): 332-345.
- [22] 陈宏峰, 张发旺, 何愿, 夏日元, 邹胜章, 苏春田, 罗书文. 地质与地貌条件对岩溶系统的控制与指示[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 42-47.
CHEN Hongfeng, ZHANG Fawang, HE Yuan, XIA Riyuan, ZOU Shengzhang, SU Chuntian, LUO Shuwen. Geological and geomorphologic settings acting as the controlling factors and indicators for karst systems[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 42-47.
- [23] 陈思宇. 云南高原岩溶洞穴的发育特征及地学意义[D]. 昆明: 云南师范大学, 2018.
CHEN Siyu. Developmental characteristics and significance in geoscience of karst caves in Yunnan Plateau[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2018.
- [24] 何发荣, 杨荆舟. 云南地质构造基本特征: 兼论高原地壳演化形成机制[J]. 云南地质, 1982, 1(1): 5-16.
- [25] 云南省地质矿产局. 马关幅 F-48-91/20 万区域水文地质普查报告[R]. 1980.
- [26] 明庆忠, 潘玉君. 对云南高原环境演化研究的重要性及环境演变的初步认知[J]. 地质力学学报, 2002, 8(4): 361-368.
MING Qingzhong, PAN Yujun. The elementary acknowledge on the importance of environmental evolution of Yunnan Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8(4): 361-368.
- [27] 王宇. 岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 1-8.
WANG Yu. Vertical zoning of groundwater runoff system in karst plateau[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 1-8.
- [28] 魏泽跌, 李向东. 云南省昭通市昭阳区地质遗迹分布特征及成因分析[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 188-200.
WEI Zeyi, LI Xiangdong. Distribution characteristics and genesis analysis of geological relics in Zhaoyang district, Zhaotong City, Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 2024, 43(1): 188-200.

Features and genesis analysis of geological relics of karst landforms in the Laoshan area of Malipo, Yunnan Province

PAN Tianwang^{1,2}, SHI Wenqiang^{1,2}, LI Chengzhan^{1,2}, CHEN Weihai^{1,2}, TANG Liangliang^{1,2}, WU Hongmei^{3,4,5}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China; 4. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216, China; 5. Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China)

Abstract The Laoshan area in Malipo, Yunnan Province is located in the transitional zone from the karst plateau in southeastern Yunnan to the Red River Delta Plain in Northern Vietnam, where the gorge-type karst landform is typically developed, forming a rich and diverse set of geological relics of karst landforms. These relics play an important connecting role and are typical representatives in the evolution process of karst landforms in Southwest China and Southeast Asia. Since 2013, the development of the scenic area named "Heroic Laoshan Sacred Land" has prominently featured nature sightseeing tours centered around geological relics of karst landforms. Surveys have found 47 typical geological relics in this area, characterized by cave groups, canyon groups, waterfall groups, peak-cluster depressions, and peak-cluster valleys. However, the existing data indicates that this area primarily focuses on the investigation and research of mineral resources, and structural and rock unit systems. In contrast, there is a significant gap in understanding the unique geological relic characteristics and composition of subtropical canyon-type karst landforms, as well as their spatial distribution, and evolutionary causes, which are critical issues. This lack of understanding has affected high-quality development and reasonable protection, and there is an urgent need for further research and discussion. Therefore, based on the investigation of karst landform geological relics, it is essential to enhance studies on the characteristics and genesis analysis of geological relics in the study area. These studies are of practical significance for revealing the formation and evolutionary mechanisms of the typical areas developed with karst landforms that transition from the karst plateau in southeastern Yunnan to the plains of the Northern Vietnamese Delta. Additionally, these studies will contribute to the economic development of border area tourism and the prosperity of the border area and its inhabitants.

This article analyzes the distribution and developmental characteristics of geological relics of karst landforms in the study area, examines the causes of their formation, and, based on previous research findings, discusses the formation and evolutionary mechanisms of typical canyon karst landforms in Yunnan. The results show as follows, (1) The study area boasts a rich variety of geological relics of karst landform, including surface karst landforms, subsurfaces karst landforms, transitional karst landforms and hydrological landforms. Surface karst landforms include peak clusters, depressions, karst gorges, clints, grikes and karstic traces. Subsurface karst landforms consist of karst caves, underground rivers, and various depositional forms. The transitional karst landforms from surface to subsurface are represented by small-scale karst collapse doline groups that are locally exposed. Hydrological landforms include karst waterfalls and karst springs. (2) The study area is characterized by gorge-type karst landforms, with developed karst caves that exhibit stratification. The types of caves and depositional forms at different levels are similar, with low-altitude caves being a distinctive feature. They can be divided into five levels: >1,750 m, 1,200–1,600 m, 600–1,000 m, 200–500 m, and <150 m. The main types of caves are dry caves, water-out caves, water-in caves, and their mixed types. In the karst dry caves, there is a significant amount of collapse debris of original rock or sandy silt blocking the cave passages, and secondary chemical sediments are generally underdeveloped. There are few large cave halls in the caves, and medium to large-scale caves represented by Qingliang cave and Mangun cave are characterized by different traces and different periods of structures overlapping and interacting with each other and by double-layered development. Several caves with convenient transportation show clear signs of human activities, but the most remain in

their pristine states. (3) The Wenshan-Malipo NW-trending left-lateral strike-slip fault zone significantly influences the formation and evolution of geological relics of karst landforms. The geological relics of karst landforms are mainly distributed in a northwest to southeast strip along the karst gorge of the Nanwen river. The multi-stage uplift of neotectonic movements also has significantly impacted the formation of karst landforms. The continuous deposition, stable stratification, and extensive distribution of Cambrian, Devonian, and Permian carbonate formations, characterized by significant depositional thickness in the study area create optimal material conditions for the formation and development of geological relics. These factors also control the regional distribution of these relics. At the same time, the study area is located in the subtropical monsoon climate zone, south of the Tropic of Cancer, where the unique climate and hydrological conditions have a significant impact on the formation of karst landforms. The abundant atmospheric precipitation provides ample water sources for the karstification process in this area. (4) Based on previous research findings and comparison of regional elevations, landform morphologies, individual morphological characteristics of karst landforms in the study area, as well as the conditions for the formation of different landform combinations, the genesis and evolutionary process of geological relics of karst landforms in the study area since the Late Mesozoic can be preliminarily divided into two stages: the formation of the tectonic basin during the Yanshan Period and the crustal differential uplift during the Himalayan Period.

Key words karst landform, geological relics, genesis analysis, Malipo county, Yunnan Province

(编辑 杨杨)

岩溶所在典型岩溶流域碳循环研究方面取得新进展

近日,岩溶所岩溶水资源研究团队系统采集了典型岩溶流域地下水水化学、氧氧、硫氧和碳同位素样品。通过分析上述指标阐明了流域丰枯水期外源酸(硫酸、硝酸)导致碳酸盐岩溶解加强及碳释放机制。研究表明:1)流域水体中硝酸盐主要来自化肥,硫酸盐主要来自当地的煤层硫化物氧化;2)碳酸、硫酸和硝酸共同参与了碳酸盐岩的溶解。酸性矿坑水加速了流域碳酸盐岩的溶解,导致水体碳同位素

偏重;3)通过计算定量得出,硫酸和硝酸参与碳酸盐岩风化分别贡献地下水中 67.24%(旱季)和 76.31%(雨季)的钙镁,同时使碳汇通量降低了 55.31%(旱季)和 66.64%(雨季)。研究成果对今后岩溶地区碳酸盐岩风化过程及碳循环的研究具有重要借鉴意义,为更准确地认知和管理生态系统碳平衡奠定基础。

(供稿:任坤)