

# 云南营盘山地区岩溶水文地质特征分析

于振涛<sup>1,2</sup>, 徐正宣<sup>1,2</sup>, 贾杰<sup>1,2</sup>, 舒杨<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都

<sup>2</sup>中铁二院劳模(专家)徐正宣地质创新工作室, 四川 成都

收稿日期: 2026年1月12日; 录用日期: 2026年3月18日; 发布日期: 2026年3月26日

## 摘要

本文通过对云南营盘山地区岩溶发育特征、岩溶水文地质条件及岩溶水系统的研究揭示了营盘山地区的岩溶分布特征、发育形态及其发展规律。研究显示研究区岩溶发育受地层岩性、地质构造、地形地貌和地表水系等因素的显著控制, 具有顺层性、不均匀性和垂向分带性的特点。研究区地下水主要为孔隙水、裂隙水和岩溶水, 其中以岩溶水为主。地下水主要由大气降水和地表水补给, 整体上地下水在背斜北西侧及核部接受补给, 向两翼及南东倾伏端径流、汇集, 分别以马过河、新庄河为当地排泄基准。研究区划分为四个一级岩溶水系统: 永宁坪岩溶水系统、新庄河岩溶水系统、营盘山复式背斜岩溶水系统和马过河岩溶水系统。本文为后续开展岩溶水文地质分析奠定了坚实的数据基础, 为铁路工程的设计和施工提供科学依据, 确保工程的安全性和经济性, 同时促进沿线地区的经济社会发展。

## 关键词

岩溶, 水文地质, 地下水, 水系统, 营盘山

# Analysis of Karst Hydrogeological Characteristics in the Yingpanshan Area, Yunnan Province

Zhentaoyu<sup>1,2</sup>, Zhengxuan Xu<sup>1,2</sup>, Jie Jia<sup>1,2</sup>, Yang Shu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Xu Zhengxuan Expert (Model Worker) Geological Innovation Studio, China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: January 12, 2026; accepted: March 18, 2026; published: March 26, 2026

## Abstract

In this paper, we analyzed the karst development characteristics, karst hydrogeological conditions

文章引用: 于振涛, 徐正宣, 贾杰, 舒杨. 云南营盘山地区岩溶水文地质特征分析[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(3): 420-429. DOI: 10.12677/ag.2026.163038

and karst water systems in the Yingpanshan area of Yunnan Province, to reveal the karst distribution features, development forms and evolution laws in the Yingpanshan area. Research shows that the karst development in the study area is significantly controlled by factors, such as stratum lithology, geological structure, topography and geomorphology, and surface water systems, and it has the characteristics of bedding, non-uniformity and vertical zonation. The groundwater in the study area mainly consists of pore water, fracture water and karst water, with karst water being the dominant type. Groundwater is mainly replenished by atmospheric precipitation and surface water. Generally, groundwater is replenished in the northwestern flank and core of the anticline, and flows and converges towards the two wings and the southeastern dip end, with Ma Guo River and Xin Zhuang River as the local discharge benchmarks. The study area has been divided into four primary karst water systems: the Yongningping Karst Water System (I), the Xinzhong River Karst Water System (II), the Yingpanshan Complex Anticline Karst Water System (III), and the Maguo River Karst Water System (IV). This paper lays a solid data foundation for subsequent karst hydrogeological analysis, provides a scientific basis for the design and construction of railway projects, ensures the safety and economy of the projects, and promotes the economic and social development.

## Keywords

Karst, Hydrogeology, Groundwater, Water System, Yingbangshan

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

营盘山位于青藏高原南缘，处于横断山脉向云贵高原过渡的地带，地质结构错综复杂，主要由泥盆纪中期和震旦纪的地层构成，这些地层富含碳酸盐岩，易于形成岩溶地貌，包括溶洞、溶沟、溶隙等。此外，区域内还分布着多条断裂带，如白石岩背斜、小丙习断层等，这些断裂带不仅加剧了岩溶的发育，也对地下水的流动产生了显著的影响。研究区的地下水系统主要由岩溶水构成，其补给、径流、排泄方式多样，水源主要来自大气降水，通过岩石裂缝和管道进行流动，最终在河流、岩层交界处或断裂带上显露。在岩溶隧道施工期间，经常面临大量的涌水问题，有时甚至会出现突水、突泥等严重灾害，这对施工的安全性和项目的进度构成了严重的威胁[1]-[3]。近年来，岩溶及岩溶水水文地质研究的重要性日益凸显，在地质灾害防治方面，岩溶地区常见的地质灾害对人类生活和基础设施构成威胁，研究可以预测和评估风险，确保工程建设的安全。此外，岩溶水文地质研究对于生态保护和生物多样性保护具有重要意义，有助于维护脆弱的生态系统。在科学研究与技术创新方面，岩溶水文地质研究推动了多学科的发展，并应用现代技术提高了研究精度[4] [5]。社会经济发展的需求也推动了这一领域的研究[6]-[10]。本文通过搜集资料、地质及水文地质现场调查，对营盘山区域水文地质条件进行分析，进而对区域水文地质单元进行划分，掌握区域水文地质条件特征，为铁路工程的设计和施工提供科学依据。

## 2. 区域地质环境

研究区地处印度板块与欧亚板块碰撞造山带附近之扬子亚板块，受印度板块向北(偏东)的强烈推挤和青藏高原向南南东的强力楔入的叠加作用。喜山运动以来，由于两大板块强烈碰撞挤压，本区表现为地壳强烈抬升成高原，地壳紧缩，加之川滇菱形块体向南南东的滑移，导致区域地质构造复杂，新构造运动强烈[11]-[14]。在断裂构造上，云南地区断裂格局复杂，主要为近南北向、北西向和北东向三组断裂。研究区的断裂活动与区域的构造变动密切相关，尤其是受印度板块的挤压与青藏高原的滑移影响，导致

了强烈的抬升与断块变形。研究区位于红河断裂以东、小江断裂以西的区域，断裂带的活动特征表现为多次改造与强烈的断层活动[15]。具体的主要断裂包括程海-宾川活动断裂、大厂断裂、腊古德断裂、毛谷厂断裂等。此外，研究区内还存在多个重要的断层带，例如腊古德断裂、黑塘河断层、白石岩断层等，这些断层对区域的地质演化起到了重要作用，导致岩层破碎、岩体变形，并形成了不同规模的断陷或隆起带。研究区内存在多个小型褶皱，如白石岩复式背斜、六德背斜和马过河背斜等。这些褶皱的形成与区域的强烈应力作用密切相关，局部表现为背斜或不对称褶皱，影响了岩层的倾斜度和结构。

研究区出露地层岩性有白垩系(K)浅海相碎屑岩沉积砂泥岩；侏罗系(J)浅海相碎屑岩沉积砂泥岩；三叠系(T)浅海-沼泽泥炭相沉积砂岩、泥页岩夹煤线；泥盆系(D)浅海相碎屑岩-碳酸岩相沉积灰岩、砂岩、页岩；寒武系(C)海陆交替相-陆相沉积砂岩、页岩、炭质页岩夹碳酸盐岩；震旦系(Z)浅海碳酸盐岩沉积相白云岩及白云质灰岩(上部)，海陆交替相灰岩、页岩(下部)；下元古界(Pt)片岩、片麻岩、变粒岩夹角山岩、大理岩；以及晋宁期至燕山期等侵入岩地层(图 1)。

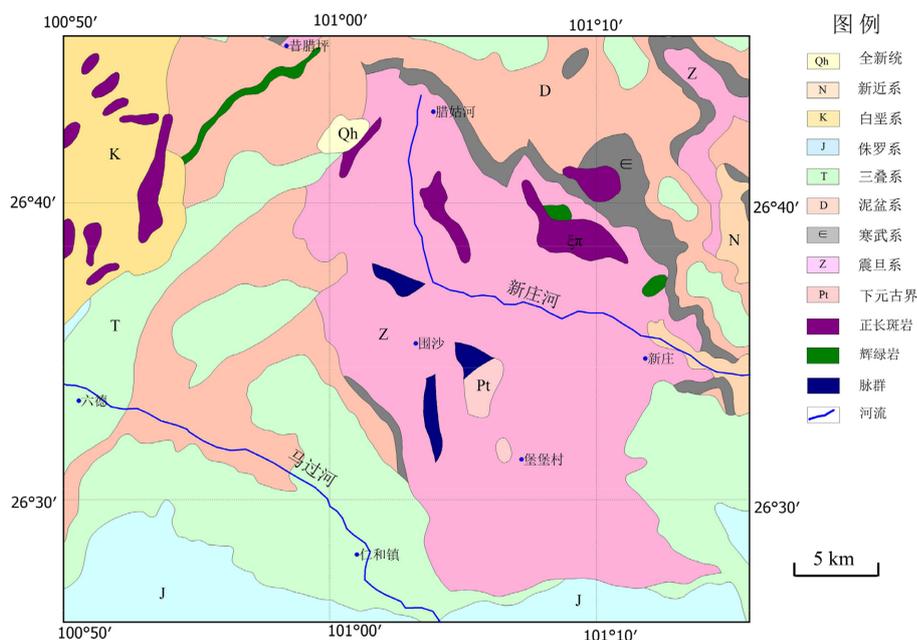


Figure 1. Geological map of the study area (modified from 1:500,000 geological map)  
图 1. 研究区地质图(底图修改自 1:50 万地质图)

### 3. 区域岩溶发育特征

#### 3.1. 岩溶平面分布特征

研究区内岩溶的平面分布特征主要受可溶岩的岩性、地貌及构造组合控制，具体分析如下：

##### (1) 研究区内中部、南部(黑塘河以南区域)

发育北西至南东向的复式背斜(白石岩复式背斜)，背斜轴部附近受侵入岩(Pt)挤压隆起形成山岭，在轴部附近发育次级小断层，破坏了背斜核部的完整性，后期核部受侵蚀、剥蚀作用，使得在核部附近出露可溶岩地层下伏观音涯组非可溶岩地层，根据白石岩复式背斜形态特征与可溶岩分布特征控制岩溶平面的分布特征：

白石岩复式背斜整体上发生沿西北段翘起，使得可溶岩侵蚀、溶蚀作用强烈，下伏观音涯组非可溶岩出露面积相对较大，可溶岩厚度相对南东段变薄，使得岩溶西北段相对东南段岩溶发育相对较弱，呈现出西北

段以溶蚀裂隙为主,东南端以裂隙-管道发育为主要的特征;其核部由于受拉张构造应力的影响,岩溶相对于两翼较为发育,如位于背斜核部的乌鸽-上半节-上苦荞地-锅厂一线洼地、漏斗、落水洞发育;东北翼倾角较缓,可溶岩分布面积较大(补给面积大),而西南翼倾角较陡,可溶岩呈现由北西向南东方向的条带状展布,出露面积相对较小(补给面积较小),使得东北翼岩溶较西南翼相对发育,如东北翼泉点、岩溶发育现象较西南翼多;两翼转折端和倾伏端位置相对其他位置岩溶较为发育,经调查发现研究区西南部(西南翼)兰家坪、小丙习附近的溶洞、岩溶大泉,研究区东南部(东北翼)葫芦坪溶洞系统及兰家村的岩溶洼地等。

#### (2) 研究区内西部马过河上游段

沿马过河发育规模相对较小的马过河背斜,核部岩溶(河床附近)较两翼(河岸斜坡)较为发育,如河床附近小溶洞、岩溶泉较为发育,而两翼以溶蚀裂隙发育为主;两翼被断层切割部分较其他地段岩溶较为发育,如岩溶泉在断层带附近较为发育。

#### (3) 研究区西北部永宁坪至扎马坪以北区域

该区域分布的地层主要为泥盆系可溶岩地层,位于断裂的西北盘,洼地、漏斗、落水洞等密集分布,且发育暗河(扎马坪暗河)、岩溶大泉,为研究区内岩溶发育最强区域。

### 3.2. 岩溶垂向分布特征

自燕山期褶皱隆起之后,营盘山地区经历了长期的构造侵蚀剥蚀过程,喜山运动表现为大面积上升,形成了现代区域的地貌轮廓,第三纪渐新世以后,新构造运动使得研究区区域发生五次间歇性抬升,使得山区受到强烈的侵蚀剥蚀,形成了一、二、三、四、五级夷平面,即第一夷平面标高 3500~4000 m,第二夷平面标高 3100~3400 m,第三夷平面标高 2800~3000 m,第四夷平面标高 2500~2700 m,第五夷平面标高 2000~2400 m,对应岩溶发育分为五个期次(I~V)。

研究区标高 1200~3200 m,西北部高,东南部的的新庄河下游段和西南部的马过河下游段最低,根据区域夷平面分布的标高,研究区内分布有第二、三、四、五夷平面,对应经历了II~V岩溶发育期次。研究区共发育八层岩溶,各个岩溶期次发育的岩溶层位具体如下:

(1) 第II岩溶发育期: 标高 2750~2850 m, 发育一层岩溶。

(2) 第III岩溶发育期: 标高 2500~2600 m, 发育三层岩溶, 第一层岩发育标高为 2606 m, 第二层岩溶发育标高 2596 m; 第三层岩溶发育标高 2489 m。

(3) 第IV岩溶发育期: 标高 2100~2200 m, 发育一层岩溶出露标高 2105~2167 m。

(4) 第V岩溶发育期: 经历的时间相对较长,在此期间发生几次小规模的上旋回,使得标高跨度较大(1250~1950 m),在此基础上又分为三个亚岩溶发育期(V1~V3)。其中,V1期发育标高为 1700~1850 m; 第二层为岩溶大泉、暗河(标高 1700~1750 m); V2期发育标高为 1450~1600 m, 主要发育一层岩溶; V3期发育标高为 1250~1400 m, 主要发育一层岩溶。

### 4. 区域岩溶水文地质特征

新庄河流域断层破碎带为地下水的富集和流动提供了空间和通道,泉点和暗河沿主要断层或其影响带发育,呈现串珠状分布。不同地层之间的水理性质差异使得地下水在岩性界面和接触带(如沉积岩与变质岩、碳酸盐岩与碎屑岩等)处积聚,形成泉点和暗河。岩层的张裂和节理裂隙(特别是北东、南东向)是地下水的主要流动通道,沿这些裂隙溶蚀作用增强,形成强岩溶带,成为水源富集区。此外背斜倾伏端及轴线富集,如白石岩背斜构造区,倾伏端的岩溶水层保存较好,成为地下水富集和排泄的关键区域,东南倾伏端水源丰富,常见岩溶泉和暗河。

在新庄河流域,岩溶水的补给主要依赖大气降水,通过漏斗、落水洞和洼地渗透地下水,局部地区还受到沟水和基岩裂隙水的间接补给。岩溶水的补给强度与岩溶发育程度密切相关,发育强烈的区域,

如羊窝子、兰家村, 补给量较大。流域内的岩溶水径流分为裂隙型和管道型, 裂隙型径流多分布于北部和中部, 流量较小; 管道型径流则出现在南部发育强烈的地区, 流量较大, 最大可达 120 L/s。岩溶水的径流方向一般由高处向新庄河及其支流流动, 具体方向取决于各支流的侵蚀基准面。

马过河流域的岩溶水富集特点包括: 地貌条件和构造作用影响水的补给强度, 岩溶发育程度决定地下水富集程度。岩溶水的补给、径流和排泄过程在不同地形区具有差异, 特别是在断裂带、暗河和岩溶大泉的分布上表现突出。

在马过河流域, 岩溶水补给以大气降水为主, 受地势陡峭影响, 水文网一般位于侵蚀基准面附近。流域内岩溶水径流也分为裂隙型和管道型, 裂隙型径流分布较广, 但流量较小, 管道型径流主要集中在岩溶发育强烈的地区。径流方向主要由上游向马过河及其支流流动。岩溶水的排泄多沿河谷、岩层界面或断裂带出露, 表现为泉点或暗河, 排泄方式与岩溶水的大泉分布相一致。

总体而言, 两个流域的岩溶水系统都受到地貌、构造及岩性等因素的复杂影响, 岩溶水的补给、径流和排泄特征在不同地区表现出差异性。

## 5. 区域岩溶水系统研究

研究区一级岩溶水系统以区域贯穿型河谷、盆地及山脉为划分依据, 金沙江支流新庄河、马过河构成了区域性岩溶水系统的最低侵蚀基准面, 两侵蚀基准面间南北向山脉为营盘山, 研究区可划分为 4 个一级岩溶水系统, 依次为: 研究区北部永宁坪岩溶水系统(I)、研究区东北部的的新庄河岩溶水系统(II)、研究区中部、南部的营盘山复式背斜岩溶水系统(III)、研究区西部的马过河岩溶水系统(IV), 见图 2。

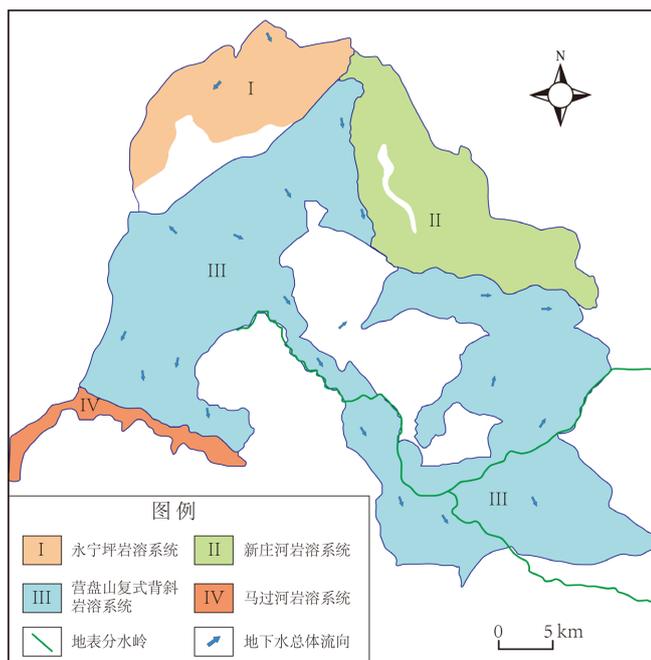


Figure 2. Zoning diagram of karst water system  
图 2. 岩溶水系统分区图

### 5.1. 永宁坪岩溶水系统(I)

永宁坪岩溶水系统(I)位于研究区北部区域, 地形北高南低, 系统的边界、流域面积、可溶岩基底分布、构造、岩溶及岩溶水特征分析如下:

### (1) 地质特征及系统边界

永宁坪岩溶水系统(I)为地势最高区段, 四周受断层挟持, 侵入岩侵入挤压, 使得岩体破碎, 地层整体向东南方向倾斜, 在泥盆系上统至三叠系上统之间的地层缺失, 形成三叠系上统碎屑岩直接超覆于泥盆系可溶岩之上, 向东南方向延伸受到北东至南西向展布的断层切割而止, 最终使得岩溶系统呈现由北东向南西方向展布和地层向东南方向倾斜的形态特征, 地下水总体上向东南方向径流, 于泥盆系上统可溶岩与三叠系上统非可溶岩接触带附近汇集、径流和排泄, 形成较为独立完整的岩溶水系统。其系统边界东南侧以断层为界, 西北侧以侵入岩体为界, 东北、西南侧以地表分水岭及非可溶岩为界, 系统的分布面积为 82.67 km<sup>2</sup>。

### (2) 岩溶发育特征

该岩溶水系统标高 2800~3200 m 分布第二、三夷平面上, 地表岩溶强烈发育, 漏斗、落水洞、洼地星罗棋布, 总体上沿北东至南西方向及可溶岩与非可溶岩界面发育; 垂向上处于第II、III岩溶期, 共发育三层岩溶, 现状三层岩溶均充水, 第一层岩溶为永宁坪三股泉(图 3), 发育标高 2761 m, 第二层岩溶为发育标高为 2596 m, 为扎马坪暗河出口(图 4), 第三层岩溶发育标高为 2489 m, 为溶洞泉(2-S7), 使得岩溶发育形成溶隙-管道-通道形式, 见图 5 和图 6。



Figure 3. San Gu Spring, Yongningping  
图 3. 永宁坪三股泉

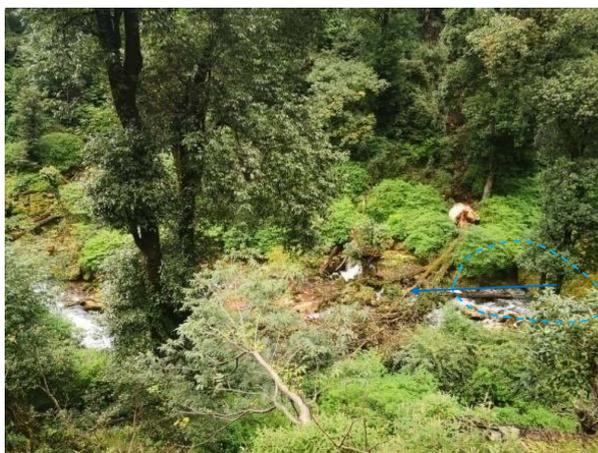
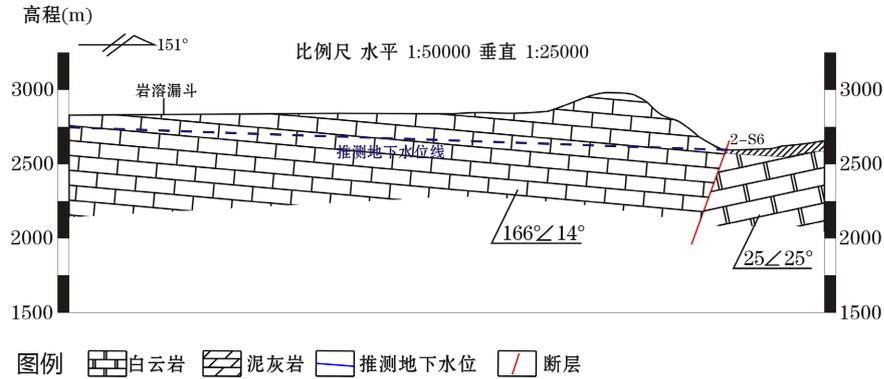
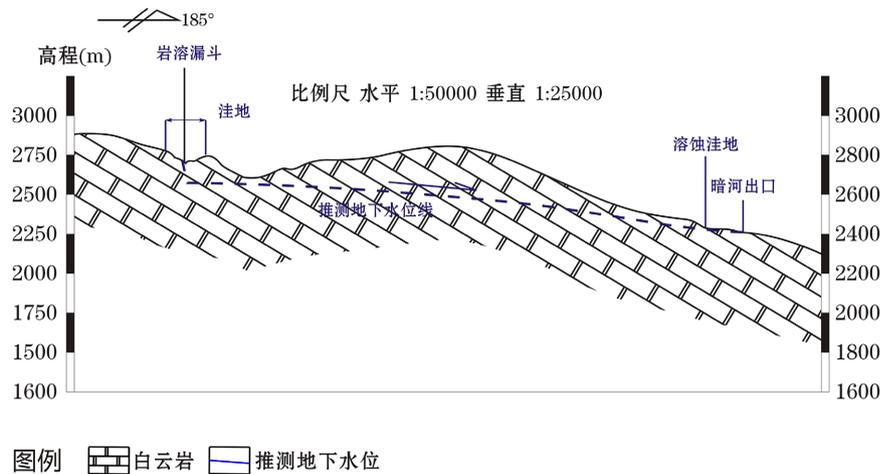


Figure 4. The exit of the Zama Ping River  
图 4. 扎马坪暗河出口



**Figure 5.** Schematic diagram of the geological section of the San Gu Spring in Yongningping  
**图 5.** 永宁坪三股泉水文地质剖面示意图



**Figure 6.** Schematic diagram of the hydrogeological section of the Zama Ping Underground Rive  
**图 6.** 扎马坪暗河水文地质剖面示意图

## 5.2. 新庄河岩溶水系统(II)

新庄河岩溶水系统(II)位于研究区东部区域，地形整体上由北东向南西方向的新庄河倾斜，系统的边界、流域面积、可溶岩基地分布、构造、岩溶及岩溶水特征分析如下：

### (1) 地质特征及系统边界

新庄河岩溶水系统(II)标高 1250~2600 m，位于白石岩复式背斜的北东翼，期间侵入岩侵入挤压，地层整体向北东方向倾斜，倾角较缓，可溶岩基底为震旦系观音崖组，位于新庄河右岸，受到新庄河排泄基准面的控制，地下水整体上由北东向南西方向的新庄河运移和排泄，期间受到侵入岩体挤压破坏和阻隔，使得地下水多高于河岸出露，形成较为独立完整的岩溶水系统。其系统边界东北侧以带状分布寒武系非可溶岩和侵入岩墙的为界，西、东两侧以次级地表分水岭及为界，南侧以侵蚀基准面新庄河为界，系统的分布面积为 100.13 km<sup>2</sup>。

### (2) 岩溶发育特征

该处地表侵蚀、剥蚀严重，于白如河左岸缓坡一带残留，地表绝大部分处于斜坡区，地表岩溶以石芽、溶沟、溶蚀裂隙发育为主，偶见洼地、漏斗；垂向上处于第IV、V岩溶期，共发育三层岩溶，现状均以岩溶大泉的形成出露，发育标高分别为 2167~2183 m (2-S11、2-S13 泉)、1820 m (3 泉)、1441 m (1-S02 泉)，岩溶发育形成溶隙 - 管道形式。

### 5.3. 营盘山复式背斜岩溶水系统(III)

营盘山复式背斜岩溶水系统(III)为研究区内的主要范围内,分布范围较大,该系统内白石岩复式背斜核部受到侵入岩挤压隆起成山,破碎背斜核部的完整性,并引发次级小断裂的发育,使得该系统形成多期次、多类型、多方向的复杂岩溶水系统,系统的边界、流域面积、可溶岩基底分布、构造、岩溶及岩溶水特征分析如下:

#### (1) 地质特征及系统边界

营盘山复式背斜岩溶水系统(III)位于研究区中部及东南部区域,标高 1250~2700 m,系统处于白石岩复式背斜,背斜轴部附近受侵入岩挤压隆起形成山岭,在轴部附近发育次级小断层破坏了背斜核部的完整性,后期核部受侵蚀、剥蚀作用,使得在核部附近出露可溶岩地层下伏观音涯组非可溶岩地层。

白石岩复式背斜整体上发生沿西北段翘起,南东向倾伏使得可溶岩侵蚀、溶蚀作用强烈,下伏观音涯组非可溶岩出露面积相对较大,可溶岩厚度相对南东段变薄,使得岩溶西北段相对东南段岩溶发育相对较弱,呈现出西北段以蚀裂隙为主,东南端以裂隙-管道发育为主的特征;复式背斜核部由于受拉张构造应力的影响,岩溶相对于两翼较为发育;白石岩复式背斜东北翼倾角较缓,可溶岩分布面积较大(补给面积大),而西南翼倾角较陡,可溶岩呈现由北西向南东方向的条带状展布,出露面积相对较小(补给面积较小),使得东北翼岩溶较西南翼相对发育;白石岩复式背斜两翼转折端和倾伏端位置相对其他位置岩溶较为发育,经调查发现研究区西南部(西南翼)兰家坪、小丙习附近的溶洞、岩溶大泉,研究区东南部(东北翼)葫芦坪溶洞系统及兰家村的岩溶洼地等。

营盘山复式背斜岩溶水系统(III)以北西向南东展布的背斜隆起山岭为界向两侧径流,于侵蚀基准面新庄河支流、马过河河岸边及可溶岩与非可溶岩接触带附近排泄,形成较为完整的岩溶水系统。系统边界东侧以新庄河为界;西侧以断裂(可溶岩与非可溶岩接触带)为界;西南侧以马过河及可溶岩与非可溶岩接触带为界;南侧以可溶岩与非可溶岩接触带为界,系统分布面积为 469.11 km<sup>2</sup>。

#### (2) 岩溶发育特征

该岩溶水系统分布第四、五夷平面上,其中,第四夷平面位于系统西北部牦牛坪一带,地表岩溶较发育,漏斗、洼地广发分布;第五夷平面主要分布于营盘山区域一带的山脊平台,地表岩溶较发育,漏斗、洼地零星分布,岩溶发育规律北部北东至南西方向发育,西部、南部为北西向南东方向发育,中部、东部主要是向东方向发育。

岩溶垂向上处于第IV、V岩溶期,共发育五层岩溶。第一层岩溶标高 2105~2167 m,主要位于研究区北部的黑塘河、白茹河,岩溶发育以岩溶泉(2-S11、2-S19、2-S20、2-S21、1-S37)(图 7)的形式发育;第二层岩溶发育标高 1770~1850 m,第三层岩溶标高 1700~1750 m,均位于研究区西部马过河上游河床附近和南部兰家坪-小丙习-钢厂一带,岩溶发育溶洞(仙人洞、银河洞)、暗河(1-S36)(图 8)、岩溶大泉(1-S38~1-S41);第四层岩溶发育标高为 1400~1500 m,主要分布于研究区西部马过河和新庄河中游河谷一带,岩溶发育形式为岩溶大泉及葫芦坪溶洞;第五层岩溶发育标高为 1250~1400 m,主要分布于研究区西部马过河和新庄河下游河谷一带,岩溶主要以裂隙岩溶泉的形式在河床附近发育。系统北部、东部以岩溶发育形成溶隙-管道形式发育为主,西部南部以溶隙-管道-道通形式发育为主。

### 5.4. 马过河岩溶水系统(IV)

马过河岩溶水系统(IV)位于研究区西南角,分布的可溶岩地层为 D,地形整体上由南向北的马过河倾斜,系统的边界、流域面积、可溶岩基底分布、构造、岩溶及岩溶水特征分析如下:

#### (1) 地质特征及系统边界

马过河岩溶水系统(IV)位于研究区西南角,标高 1500~2800 m,出露以近东西向可溶岩地层为 D2,

位于马过河小背斜，可溶岩由于背斜核部拉张裂隙在地表水侵蚀破碎而出露，地层整体向南倾斜，受到马过河排泄基准面的控制，地下水整体上由南向北马过河方向运移和排泄，受上覆三叠系非可溶岩的夹持，使得该系统分布范围狭窄，呈带状，地下水的径流、排泄相对独立，形成较为完整的岩溶水系统。其系统边界除北侧边界以马过河为界外，其余边界均以上覆三叠系非可溶岩接触带为界，系统的分布面积较小，为 18.86 km<sup>2</sup>。



Figure 7. 1-S37 Spring (Caijiaping)  
图 7. 1-S37 号泉(蔡家坪)



Figure 8. 1-S36 Spring Group (Lanjiaping)  
图 8. 1-S36 号泉群(兰家坪)

## (2) 岩溶发育特征

该岩溶水系统标高 1500~2800 m，地表侵蚀、剥蚀严重，地表绝大部分处于陡峻的斜坡区，地表多变上覆三叠系非可溶岩风化的残坡积覆盖，少量见石芽、裂隙发育，岩溶发育较弱，以溶蚀裂隙为主，岩溶期次即层位不明显，只是在马过河右岸上方以裂隙岩溶泉(悬挂泉)的形式散状出露，流量相对较小，且具有季节性特点，如发育标高为 1806 m 的 2-S34 号泉。

## 6. 结论

通过对云南营盘山地区岩溶发育特征、岩溶水文地质条件及岩溶水系统的研究，得到以下初步认识：

(1) 研究显示研究区岩溶发育受地层岩性、地质构造、地形地貌和地表水系等因素的显著控制,具有顺层性、不均匀性和垂向分带性的特点。

(2) 研究区地下水主要为孔隙水、裂隙水和岩溶水,其中以岩溶水为主。地下水主要由大气降水和地表水补给,整体上地下水在背斜北西侧及核部接受补给,向两翼及南东倾伏端径流、汇集,分别以马过河、新庄河为当地排泄基准。

(3) 研究区划分为四个一级岩溶水系统:永宁坪岩溶水系统、新庄河岩溶水系统、营盘山复式背斜岩溶水系统和马过河岩溶水系统。

## 参考文献

- [1] 蒙彦,雷明堂.岩溶区隧道涌水研究现状及建议[J].中国岩溶,2003,22(4):287-292.
- [2] 吴朝钢,吴国斌,刘伟,等.云桂铁路营盘山隧道溶洞综合勘察与评价[J].云南大学学报(自然科学版),2023,45(S1):141-146.
- [3] 马泽聘.岩溶隧道涌水后长期积水围岩力学性能与稳定性研究[D]:[硕士学位论文].石家庄:石家庄铁道大学,2023.
- [4] 赵旭峰,陈植华,周天智.西南岩溶地区水资源预测评价中流域水文模型应用的特点及展望[J].水资源与水工程学报,2007(3):22-26.
- [5] 王浩,陆垂裕,秦大庸,等.地下水数值计算与应用研究进展综述[J].地学前缘,2010,17(6):1-12.
- [6] 郜现磊.营盘山隧道涌突水机理分析及涌水量计算[J].工程技术研究,2022,7(10):230-232.
- [7] 马云.中-老铁路主要技术方案比选研究[D]:[硕士学位论文].兰州:兰州交通大学,2016.
- [8] 余世滔.顾北矿岩溶水文地质特征及疏放性评价[D]:[硕士学位论文].淮南:安徽理工大学,2019.
- [9] 许卫民.新疆且末县车尔臣河流域地下水水文地质条件分析[J].地下水,2017,39(3):230-231.
- [10] 穆鹏飞.黄陵-彬长矿区地下水赋存规律研究[D]:[硕士学位论文].西安:西安科技大学,2012.
- [11] 杜宇本,蒋良文.大瑞铁路大保段主要工程地质问题及地质选线[J].铁道工程学报,2010,27(4):23-28.
- [12] 林之恒.高黎贡山隧道动力稳定性及抗减震措施研究[D]:[硕士学位论文].成都:成都理工大学,2010.
- [13] 杨英,杨文辉.滇西北地区断陷盆地软土特征及选线原则[J].铁道工程学报,2013,30(8):31-36.
- [14] 晏长根,刘彤,伍法权.复杂条件下大型地下洞室群的变形稳定性分析[J].工程地质学报,2008,16(1):84-88.
- [15] 卢婷,王鹰,丁文富.汤郎-易门深大活动断裂对成昆铁路秀宁隧道水文地质条件的影响评价[J].铁道建筑,2019,59(11):75-78.