

和 祥,董学兰,杨 超,等. 云南鹤庆县北衙金矿岩溶发育及富水特征[J]. 中国岩溶, 2023, 42(6): 1173-1182.

DOI: 10.11932/karst2023y025

云南鹤庆县北衙金矿岩溶发育及富水特征

和 祥,董学兰,杨 超,刘 鹏,薛博强

(云南黄金矿业集团股份有限公司, 云南 昆明 650299)

摘 要:为确保云南北衙矿区的安全开采及岩溶水的合理开发利用,将区域水文地质调查和矿区地质勘探资料与生产实际进行对比分析,从岩性、构造、地貌等因素分析和总结矿区岩溶发育及富水特征。结果表明:岩性上,中三叠统北衙组二段细晶灰岩最纯, CaO 含量为 41.52%~54.77%, 岩溶最发育,北衙组一段灰岩夹粉砂岩段限制了岩溶发育深度,侵蚀基准面以下岩溶发育深度大于 150 m; 岩溶发育主要受构造控制,岩溶发育方向与区内南北向、东西向及北西向构造线一致,且褶皱轴部、翘起端、断裂影响带、岩体接触带岩溶较发育;矿区岩溶水富水模式属于向斜汇流型,北衙向斜对岩溶水的富集起主导作用,断裂影响带和岩体与围岩接触带也有利于地下水的运移和富集。

关键词:岩溶发育;构造;地下水;北衙矿区;云南

中图分类号: TD745 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2023) 06-1173-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

矿床岩溶水害问题历来是采矿工程常见的问题之一,国内外关于矿区的岩溶发育和岩溶水研究以岩溶成因、岩溶水运动特征、突水量预测预报为主。例如,齐跃民^[1]在北方岩溶矿区提出基于地下水动态的水害预警混沌度模型。李涛等^[2]在淮北煤田通过抽水和示踪试验查明了岩溶发育与岩层和垂深的关系。姜文^[3]在湘中灰山港—煤炭坝地区探讨了构造演化对岩溶发育的控制作用。吴继文等^[4]研究了压扭性构造对云南银厂坪岩溶系统发育控制作用。李小明等^[5]探讨了淮南矿区奥灰水富集规律。吕玉香等^[6]研究渝东岩溶区地下水富集特征及富水模式。李铎等^[7]在山东福山铜矿建立了岩溶水三维渗流模型,数值法预测了矿坑涌水量。王宇等^[8-12]系统总结了云南岩溶水系统类型、岩溶地貌组合形态富水特征及相关的勘查技

术。Weary^[13]、Hauselmann^[14]等研究了地质构造对溶洞发育各阶段的控制作用。

北衙金矿位于云南大理白族自治州鹤庆县境内,是金沙江-哀牢山富碱斑岩带内已发现的规模最大的新生代富碱斑岩型金多金属矿床。矿山自 1956 年开始开采,现状开采方式为露天凹陷坑采,设计 2030 年将采用露天+井下联合开采。区内广泛分布碳酸盐岩,矿体赋存于中三叠统北衙组岩溶含水层,井下开采后矿井有发生溶洞暗河突(涌)水风险,且近年来矿山的开采扰动造成了地下水资源浪费、地下水动力条件改变、水化学环境破坏等问题。当前针对北衙矿区岩溶发育和富水规律的研究还比较薄弱,制约了矿山的整体规划和开发。本文通过区域水文地质调查和矿区地质勘探资料与生产实际进行对比分析,从岩性、构造、地貌等因素研究矿区岩溶发育特征及其富水规律,以期对矿山安全开采、工程建设及水环境保护提供依据。

资助项目:云南省劳模创新工作室科研项目资助(云金资源 202211)

第一作者简介:和祥(1986—),女,硕士,高级工程师,主要从事水文地质、工程地质、环境地质勘查工作。E-mail: 526070552@qq.com。

收稿日期: 2022-12-28

1 矿区水文地质概况

北衙金矿地处构造-剥蚀高中山区岩溶向斜盆地内,位于区域水文地质单元的径流-排泄区。地形总体上西高东低,北高南低,区内最高点位于西北部边缘的马鞍山主峰,标高 3 958 m,最低点为东北部边缘的锅厂河河谷,标高约 1 640 m,最大相对高差 2 318 m,属构造剥蚀-溶蚀高中山地貌。

矿区出露含(隔)水层包括第四系孔隙含(透)水层(Q),中三叠统北衙组灰岩岩溶含水层(T_2b),下三叠统青天堡组砂岩相对隔水层(T_1q),上二叠统峨眉山玄武岩相对隔水层(Pe)及侵入岩体石英正长斑岩相对隔水体($\xi\sigma\pi$)。矿区主要含水层为北衙组灰岩岩溶含水层(T_2b),分布面积达 95 km²,组成了轴向 NNE 向、南部扬起的北衙向斜。中三叠统北衙组碳酸盐岩(T_2b)广泛裸露并构成向斜盆地基底,下三叠统青天堡组碎屑岩(T_1q)和上二叠统峨眉山组玄武岩(Pe)集中出露于盆地东部外围,盆地中心地段第四系更新统含砂砾黏土岩(Q_{1s})、灰质角砾岩(Q_p)厚度较大,全新统松散层(Q_4)零星分布(图 1)。

矿体与侵入北衙组的富碱性斑岩联系密切,矿体赋存于北衙组灰岩与石英正长斑岩接触带,环绕斑岩体分布。北衙组岩溶水是矿床主要充水因素,揭露充水溶洞或北衙暗河时易发突涌水,北衙组岩溶裂隙含水层以直接充水为主、局部存在管道流。

北衙组(T_2b)岩溶含水层在区域上分布较广,矿区内受其相对隔水底板青天堡组(T_1q)及南部的 F_{21} 断层、西部的马鞍山断裂、北东部的 F_{28} 断层围限,自成一个相对独立的水文地质单元。大气降水为矿区地下水的主要补给源,大气降水通过漏斗、落水洞及洼地等直接渗入补给地下水,地下水沿东、西、南三面斜坡向北衙向斜核部汇流,补给沿轴部发育的北衙暗河(暗河出口 W123 岩溶大泉),区内地下水总体流向为自南向北径流,西北部为自西向东径流,最终都在北衙暗河出口处排泄。

2 岩溶发育特征

2.1 岩溶形态

区内可溶性岩层主要为中三叠统北衙组(T_2b)灰

岩,主要为裸露型岩溶区,盆地中部一带属覆盖型岩溶。矿区岩溶形态主要有石林、落水洞、岩溶洼地、溶槽、溶隙、溶洞及地下河。

2.1.1 地表岩溶

根据岩溶调查资料^[15],区内发育地表岩溶现象 30 处,分布标高 2 547~1 694 m,2 000~1 800 m 最发育(图 2),主要发育于北衙组二至四段(T_2b^2 ~ T_2b^4)砂屑灰岩、泥质灰岩、细晶灰岩,其中较为典型的地表岩溶现象如下:①发育于北衙向斜南部翘起端的小石林(图 3a),面积约 0.60 km²,是北衙组四段(T_2b^4)砂屑灰岩经溶蚀、风化作用形成形态大小不一的石柱,最高的石柱约 7 m,石柱上沿水平层面及各个方向的节理裂隙面溶蚀形成形态各异的溶洞、溶隙、溶蚀凹槽、沟壑;②沿北衙向斜盆地串珠状分布的落水洞、岩溶洼地(图 3b、图 3c),雨季汇集地表水;③溶洞暗河,矿区附近地表发育 6 个溶洞,规模较大的有北衙暗河溶洞、鸡鸣寺溶洞,其中北衙暗河沿北衙向斜轴部发育,发育地层为北衙组四段(T_2b^4)砂屑灰岩,暗河分布标高 1 740~1 694 m,暗河出口位于锅厂河西岸 1 694 m 标高,形成 W123 岩溶大泉(图 3d),流量 133~2 888 L·s⁻¹;鸡鸣寺溶洞位于矿区南东部边缘观音箐峡谷南坡(图 3e、图 3f),发育于北衙组二段(T_2b^2)泥质细晶灰岩中,洞口标高 1 730 m,长度大于 600 m,发育两层溶洞,最上层干燥,最下层形成暗河。

2.1.2 地下岩溶

矿区 2008—2022 年施工 1 195 个勘查钻孔,有 44 个钻孔揭露溶洞,见溶洞率 3.68%,发育标高 2 211.34~1 479.54 m,主要分布在 2 000~1 600 m 标高(图 2)。山坡一带溶洞出露位置较高,位于岩溶水垂直入渗补给带,钻进过程中冲洗液漏失严重;北衙坝子及北衙向斜轴部附近溶洞多出露于标高 1 721 m 附近及以下,1 600 m 标高以下揭露溶洞 5 个。地下岩溶主要发育于北衙组四段(T_2b^4)砂屑灰岩中,发育 36 个,占比 62.07%;其次发育于北衙组三段(T_2b^3)泥质灰岩、(T_2b^5)白云质灰岩、二段(T_2b^2)细晶灰岩,三段发育 11 个,占比 18.97%,五段发育 7 个,占比 12.07%,二段发育 4 个,占比 6.90%;北衙组一段(T_2b^1)细砂岩与细晶灰岩互层段未揭露溶洞,主要以溶隙为主(图 4)。洞高 0.24~29.56 m,以 0~10 m 为主,

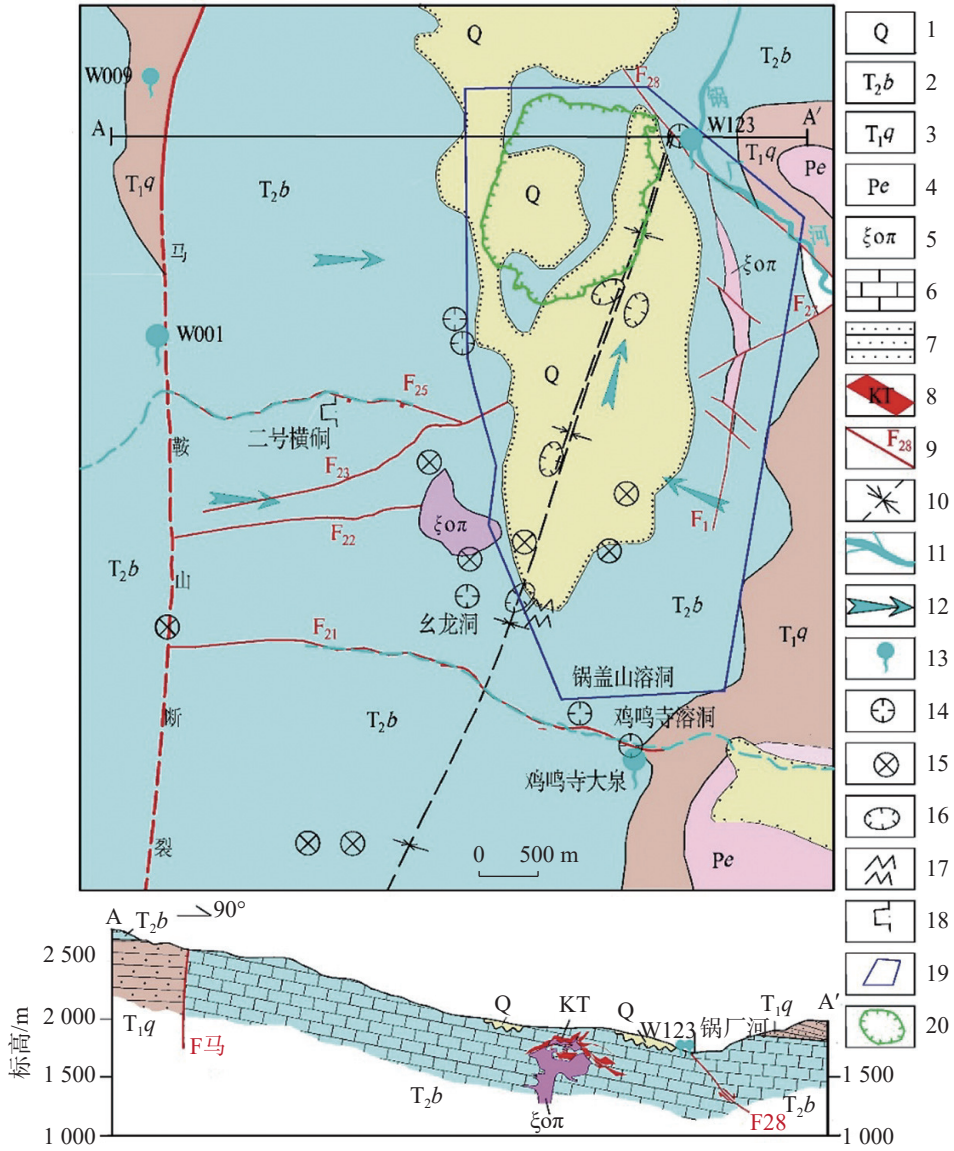


图 1 矿区水文地质简图

1. 第四系孔隙(透)水层 2. 中三叠统北衙组岩溶含水层 3. 下三叠统青天堡组相对隔水层 4. 下三叠统峨眉山组玄武岩裂隙含水层 5. 侵入岩体
6. 灰岩 7. 砂岩 8. 矿体 9. 断层 10. 向斜轴线 11. 沟流 12. 地下水流向 13. 岩溶大泉 14. 溶洞 15. 落水洞 16. 岩溶洼地
17. 小石林 18. 二号横洞 19. 采矿权范围 20. 露天采场现状线
- Fig. 1 Hydrogeological map of the mining area
1. Quaternary porous (permeable) aquifer 2. The Middle Triassic Beiya Formation karst aquifer 3. The Lower Triassic Qingtianbao Formation relatively water-resisting layer 4. The Lower Triassic Emeishan Formation basalt fissure water-bearing body 5. Intrusive body 6. Limestone 7. Sandstone 8. Ore body
9. Fault 10. Synclinal axis 11. Channeling 12. Groundwater flow direction 13. Karst spring 14. Karst cave 15. Ponor 16. Karst depression
17. Small stone forest 18. No. 2 adit 19. Scope of mining right 20. Exposed mining field status line

多为空洞,空洞 38 个,半充填溶洞 5 个,全充填溶洞 15 个,充填物为褐红色黏土及砂砾石,砂砾石成分主要由灰岩、砂岩、石英正长斑岩、煌斑岩组成,磨圆度较差,呈次棱角状-次圆状。空洞分布标高 2 064.41~1 539.42 m,半充填溶洞分布标高 2 211.34~1 716.80 m,全充填溶洞分布标高 1 894.04~1 479.54 m,整体上西侧及东侧山坡径流区、北衙向斜核部溶洞

无充填,半充填-全充填溶洞主要分布在斑岩体及构造破碎带附近,1 540 m 标高以下溶洞全充填。

2.2 岩溶发育规律

2.2.1 岩性对岩溶发育的影响

可溶岩是岩溶发育的物质基础^[16-17]。矿区内可溶岩为中三叠统北衙组(T₂b)灰岩。北衙组按岩性特

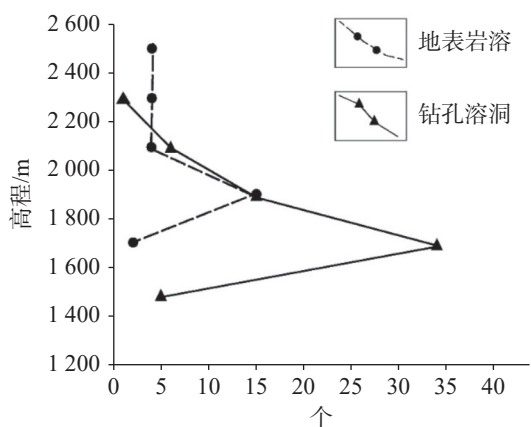


图 2 岩溶发育高程分布图

Fig. 2 Elevation distribution of karst development

征, 自下而上划分为 $T_2b^1 \sim T_2b^5$ 五个岩性段, 岩性分别为中至厚层状细晶灰岩夹粉砂岩、细晶灰岩、泥质灰岩、砂屑灰岩、白云质灰岩。

据岩石化学成分统计分析(表 1), 二段细晶灰岩最纯, CaO 含量为 41.52%~54.77%, MgO 含量为 0.62%~1.97%, CaO/MgO 比值为 21.08~85.53, 相对溶解度接近 1, 岩溶发育。其次是三段泥质灰岩及四段砂屑灰岩, CaO 含量为 28.17%~52.29%, MgO 含量为 0.89%~21.33%, CaO/MgO 比值为 1.43~53.26, 相对溶解度较小, 岩溶发育程度不及二段。一段灰岩夹粉砂岩, CaO 含量为 13.28%~19.63%, MgO 含量为 2.62%~3.21%, 粉砂岩夹层限制了岩溶发育, 岩溶发育强度弱。



(a) 小石林



(b) 岩溶洼池



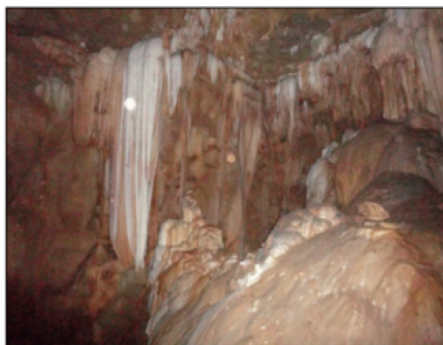
(c) 落水洞



(d) 北衙暗河出口 W123 泉



(e) 深切岩溶峡谷



(f) 鸡鸣寺溶洞

图 3 矿区岩溶形态照片

Fig. 3 Photos of karst morphology in the mining area

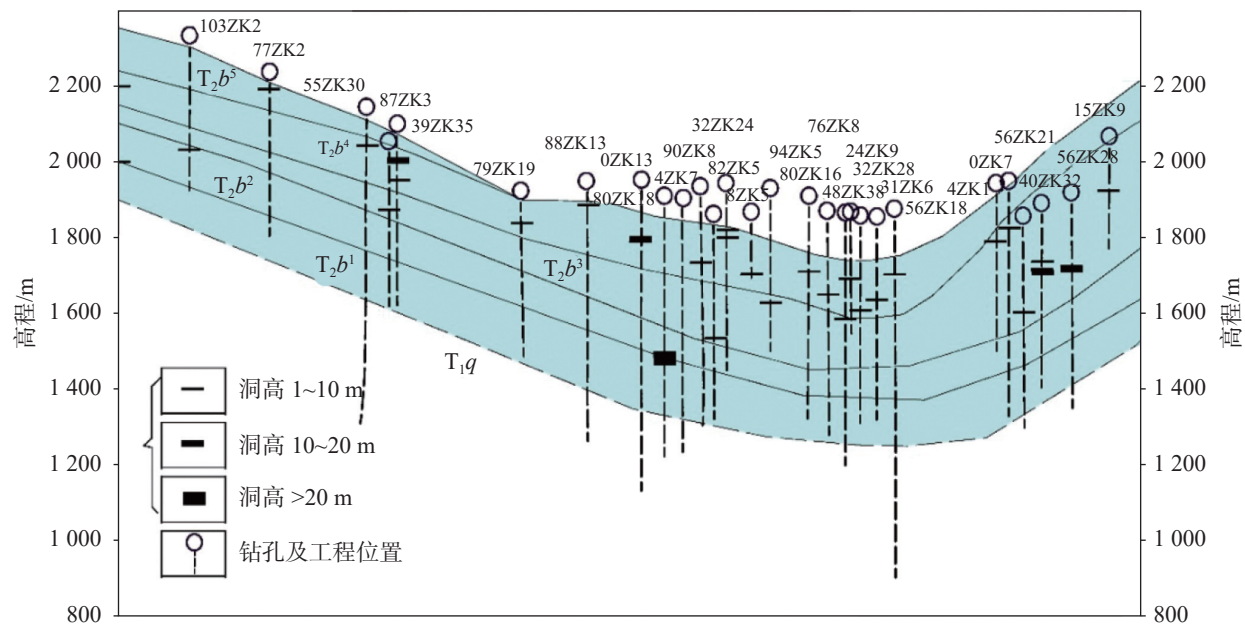


图 4 钻孔揭露溶洞垂向分布图

Fig. 4 Vertical distribution of solution caves tapped by drilling wells

表 1 北衙组岩石化学分析成果一览表

Table 1 Petrochemical analysis of the rocks of the Beiya Formation

化学组份(%)	岩性						
	T ₂ b ⁴	T ₂ b ³		T ₂ b ²		T ₂ b ¹	
	砂屑灰岩	似角砾状灰岩	泥质灰岩	泥质条带状灰岩	细晶灰岩	细晶灰岩	灰岩夹粉砂岩
CaO	28.17~34.97	29.10~43.57	28.81~52.29	45.73~51.32	41.52~54.77	36.78~41.93	13.28~19.63
MgO	3.97~21.33	1.60~20.15	0.89~21.33	0.98~2.29	0.62~1.97	2.10~2.37	2.62~3.21
CaO/MgO	1.43~2.00	1.44~27.23	1.38~53.26	22.38~48.01	21.08~85.53	15.52~19.97	4.14~7.49
SiO ₂	0.42~16.74	0.49~10.03	0.89~23.42	1.99~7.72	0.38~11.79	11.06~15.64	32.29~40.50

在同一层位中,化学成分含量不同,岩溶发育差异性很大,整体质纯的灰岩比泥质灰岩、白云岩更发育,区内北衙组二段至四段厚层的灰岩发育岩溶洼地、落水洞、溶洞、地下暗河,地表面岩溶率10.0%~18.6%^[18]。在北衙组一段角砾状含泥质灰岩、粉晶灰岩中夹粉砂岩、钙质粉砂岩,岩溶发育主要以溶蚀裂隙为主,且在一段与二段接触带的二段一侧岩溶发育,一段岩溶现象少见。如钻孔 0ZK13 在一段与二段接触带 1 514.21~1 484.65 m、1 482.07~1 479.54 m 标高发育溶洞,由泥沙全充填。

2.2.2 构造对岩溶发育的影响

北衙矿区在大地构造上,处于三江造山带与扬子板块的弧形结合部位,在北西向金沙江-红河断裂、南北向宾川-程海断裂和北东向丽江-木里断裂之间^[15]。本区构造形迹及构造体系主要为印支期、燕

山期、喜马拉雅期地壳运动的产物。根据王锦国等^[19]的研究,结合构造运动将区内岩溶发育划分为古近纪岩溶发育期、新近纪岩溶发育期、第四纪岩溶 3 个发育期。区内整体构造活动强烈,水-岩交互作用频繁,岩溶发育程度较高,受构造和地貌的影响明显。

(1)构造对岩溶发育方向的控制。构造是控制岩溶发育的重要因素,特别是对岩溶发育方向上的控制表现明显^[20]。据调查实测,发育于中三叠统北衙组第二段(T₂b²)的鸡鸣寺溶洞、锅盖山溶洞均沿 F₂₁ 断层线方向发育,鸡鸣寺溶洞洞口至 450 m 段沿 EW 构造线发育,450 m 至暗河出口段沿 SN 构造线发育;锅盖山溶洞洞口标高 1 835 m,长度>100 m,宽 6~15 m,高 2~3 m,主要沿 NE、NW 两组构造线方向发育,为水平溶洞,干燥无水。

(2)褶皱轴部、翘起端岩溶发育。区内碳酸盐岩中的褶曲不甚发育,且规模较小。地壳的上升和多

次构造运动的影响,致使部分褶曲隆起成山,如马鞍山背斜,高出当地侵蚀基准面 1 000 m 以上,由于受强大的压应力,褶曲轴部狭窄,两翼倾角较陡,不利于岩溶发育,在马鞍山一带发育少量的漏斗、落水洞,构成区内岩溶水的补给区。在较宽缓的褶曲轴部,断裂及裂隙发育,有利于岩溶发育,如区内主要的褶皱北衙向斜,沿向斜轴延伸方向落水洞、岩溶洼地呈串珠状分布,其下发育北衙暗河;褶皱轴部类似岩溶现象在研究区以北的鹤庆-剑川地区高美古、汝寒坪、香炉山一带较常见^[20]。在北衙向斜的翘起端,纵张裂隙发育,发育大片石林,地表溶蚀洼地、溶蚀沟槽发育,大沙地尾矿库工程勘察钻孔揭露溶洞 14 个,发育深度 1.5~42.0 m,多黏土充填,物探探测未发现厅堂式溶洞及地下暗河^[21],相比湘西洛塔向斜翘起端发育有地下河系统^[22],本区向斜翘起端岩溶发育程度相对较弱。

(3) 断裂影响带岩溶发育。矿区断裂主要为 SN 向、EW 向及 NW 向的压性断裂,挤压带宽数十至数百米,以断层角砾岩、碎裂岩、糜棱岩为主,胶结致密,岩溶不发育,但在断裂影响带裂隙发育,岩石破碎,岩溶发育,有利于岩溶水富集与运移。例如,矿区外围沿 SN 向马鞍山断裂出露的杨家院岩溶大泉、沿东西向断裂 F_{21} 旁侧发育的鸡鸣寺溶洞、锅盖山溶洞;位于断裂影响带的勘查钻孔 39ZK35 在孔深 58.91~69.21 m、188.24~188.83 m 处,55ZK30 在 68.48~77.08 m 处均揭露有溶洞。区内断层影响带控制岩溶发育深度,在万洞山露采区主断裂 F_6 影响带内岩溶发育深度大于 400 m,且深部岩溶发育与浅层相比具有一定差异,深部发育长大裂隙,见挤压蚀变与裂隙性溶蚀现象,局部发育溶蚀洞穴。

(4) 岩体接触带岩溶发育。矿区内分布喜马拉雅期形成的浅成侵入富碱斑岩,分别为万洞山岩体、红泥塘岩体、大沙地岩体。由于岩体侵入,在岩体与围岩(T_2b)的接触部位受挤压作用,岩石破裂形成较厚大的破碎带。万洞山接触破碎带长约 1 800 m,宽 5~60 m,总体南北走向环绕岩体分布,倾向 W-SW,为矿区最主要的控矿构造,是主矿体 KT52 的主要赋存部位。由于侵入岩不可溶蚀,起相对阻水作用,接触带裂隙发育,地下水易聚集在这一界面上,并伴有地热高异常的影响,溶蚀作用强烈,环绕斑岩体形成溶蚀裂隙密集发育带。

2.2.3 地貌对岩溶发育的影响

岩溶形态及发育规律随不同的地貌部位而变化,显示垂向分带特征^[23]。矿区西侧外围马鞍山一带,在 2 500~2 700 m、2 800~3 000 m、3 000~3 500 m 高程的三级夷平面上,岩石溶蚀作用强烈,主要发育漏斗、落水洞,密集分布于山岭之间,地下水埋藏较深,以垂直运动为主,成为岩溶水的补给区。在 1 800~2 500 m 高程的东、西、南缓坡地带主要发育溶沟、溶槽,主要是地表水长期冲刷和缓慢流动所致,地下水以水平运动为主,为地下水径流区。在当地侵蚀基准面 1 694 m 标高附近主要发育北衙坡立谷、溶洞及北衙暗河,且在侵蚀基准面 1 694 m 标高以下岩溶仍较发育,钻孔 56ZK21、32ZK24、32ZK28、4ZK7、0ZK13、31ZK6 均在 1 640 m 标高以下北衙组三段、二段揭露溶洞,溶洞最低控制标高 1 479.54 m,侵蚀基准面以下岩溶发育深度大于 150 m。

3 岩溶水富集规律

矿区岩溶水的富集受构造、岩性、地貌等因素的综合控制,构造对地下水的富集起主导作用^[17]。

3.1 断裂影响带地下水富集

可溶岩断裂带常是地下水富集带和强径流带^[23]。矿区南北向构造体系与东西向构造体系复合,各种应力场复杂,加剧了岩石的破碎,断裂破碎带节理裂隙较发育,为地下水的运移创造了良好的条件。

区内断裂对地下水运移和岩溶发育的影响主要表现为:近南北向、东西向断层沿断层方向导水,垂直断层方向阻水。逆断层上盘岩体内部因应力变化导致张裂隙发育,区内西侧山坡地下水在张裂隙的控制下自西向东径流;断层垂向显示压性构造面特征,南北向阻水,因此岩溶发育在矿区西侧山坡表现为独立的東西向长条形岩溶断块,沿断裂破碎带有较多泉水出露。例如外围西侧沿马鞍山断裂出露杨家院岩溶大泉(W001),流量 $93 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$,矿区南部沿东西向 F_{21} 断裂出露鸡鸣寺大泉,流量 $50 \sim 2\,808 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$,矿区中部 F_{25} 断裂影响带的二号横洞,流量 $90 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.2 向斜轴部地下水富集

北衙矿区岩溶水富水模式属于向斜汇流型,向斜轴部构造运动强烈,张力、张扭力在此交汇,张裂

隙极为发育,为区内岩溶水的富集提供了良好的条件和水流通道。北衙向斜核部低,翼部及翘起端较高,地下水沿节理裂隙向核部汇流,补给沿轴部发育的北衙地下暗河,构成北衙向斜储水构造(图 5)。

在北衙盆地径流、排泄区,北衙组灰岩长期处于饱水带中,岩溶发育相对均匀,形成岩溶管隙构成的网络体系,连通性好,具有较大的储水空间和储存量。

矿区北衙组岩溶含水层钻孔抽水试验数据(表 2)显示,位于向斜轴部附近 96ZK51、64ZK29、SY2 等 6 个钻孔单位涌水量 $0.065\sim 0.869\text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$,渗透系数 $0.206\sim 2.316\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,富水性中等至强富水;位于向斜两翼 8 个钻孔单位涌水量 $0.027\sim 0.109\text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$,渗透系数 $0.029\sim 0.082\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,富水性弱,向斜轴部富水程度高于两翼,形成受北衙向斜控制的富水块段。

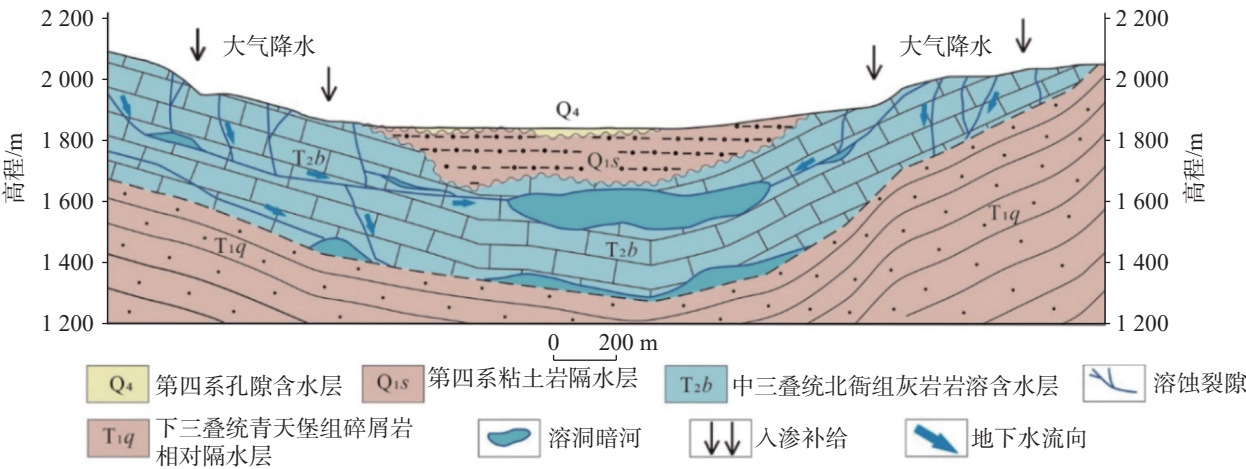


图 5 北衙向斜储水构造剖面示意图

Fig. 5 Schematic profile of the water storage structure of the Beiya syncline

表 2 钻孔抽水试验参数一览表

Table 2 Aquifer parameters obtained through pumping tests in some boreholes

孔号	构造位置	单位涌水量 $q/\text{L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$	渗透系数 $K/\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	孔号	构造位置	单位涌水量 $q/\text{L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$	渗透系数 $K/\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$
96ZK51	向斜轴部	0.869	1.589	40SC14	向斜两翼	0.040	0.029
72ZK18		0.065	0.256	40SC15		0.033	0.035
64ZK29		0.228	0.339	24ZK3		0.072	0.037
56SC08		0.128	0.206	23ZK11		0.038	0.056
SY2		0.326	2.316	39ZK9		0.046	0.051
63ZK21		0.150	0.366	67ZK12		0.027	0.082
40SC20	向斜两翼	0.050	0.070	79ZK12		0.109	0.082

3.3 侵入岩与围岩接触带地下水富集

矿区内分布喜马拉雅期形成的浅成侵入富碱斑岩,规模较大的为万洞山岩体、红泥塘岩体、大沙地岩体,矿区矿体主要产出于北衙组(T₂b)碳酸盐岩与斑岩体内外接触带,接触带岩石破碎,岩溶储水空间发育,常沿接触带形成带状的岩溶富水段。如万洞山露采矿坑主要沿北衙组灰岩与斑岩接触带、北衙组灰岩与矿体接触带呈股状涌出,环绕斑岩体形成涌水带。采场北帮、西帮涌水点分布标高 1 764~1 604 m,涌水带长约 400 m,涌水量 $534\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$;南帮、

东帮涌水点分布标高 1 574~1 554 m,涌水带长约 300 m,总涌水量 $2\,778\sim 4\,026\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。

综上所述,区内地下水的富集受多种因素的影响,其中主要受构造控制,但与岩性、地貌、气象、水文等因素也密切相关。

4 矿坑开采涌水特征及水环境影响

4.1 矿坑涌水特征

矿区矿体主要产出于北衙组(T₂b)碳酸盐岩与斑

岩体内外接触带,北衙组(T_2b)碳酸盐岩岩溶水构成矿床开采主要的充水水源。受北衙向斜构造和侵入岩体影响,北衙组岩溶含水层富水性空间变异大,总体表现为以侵入岩体为中心,自岩体向外,富水性、渗透性依次呈弱—中等—强或极强序次排列。万铜山露天开采揭露,采坑底 1 700 m 标高起,采坑边帮沿北衙组灰

岩溶蚀裂隙、构造裂隙涌水,北帮、西帮富水性弱,单点涌水量 $<1.00\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$;南帮、东帮富水性较强,单点涌水量 $2.00\sim11.39\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,涌水点环绕斑岩体、矿体成群成带密集分布。露采矿坑总涌水量随疏干降深、采坑面积的变大而增大,2012 年至 2022 年平均总涌水量 $1\,734\sim6\,442\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,最大涌水量 $18\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ (表 3)。

表 3 露采矿坑涌水量统计表
Table 3 Statistics of water inflow in the open mining pit

时间	坑口面积/ m^2	坑底标高/m	最大涌水量/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	最小涌水量/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	平均涌水量/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$
2012年	880 868	1 690	3 645	345	1 734
2013年	1 153 254	1 670	5 490	375	2 564
2016年	1 266 478	1 630	11 125	1 000	3 246
2017年	1 335 089	1 620	12 000	2 250	3 887
2018年	1 420 964	1 610	11 750	2 375	4 918
2019年	1 571 008	1 585	15 000	2 000	4 217
2020年	1 897 648	1 550	18 000	2 750	5 554
2021年	2 040 000	1 540	18 000	3 375	6 442
2022年	2 040 000	1 540	15 625	3 250	5 600

4.2 采动影响下水环境问题

北衙矿山现采用露天开采,2030 年将转入地下开采,随开采规模的不断扩大,水环境问题将会逐渐加剧,主要水环境问题有以下几个方面:

(1)地下水流场及水位变化。矿坑长期疏干排水,形成以矿坑为中心的地下水降落漏斗,改变了矿区地下水的原始径流方向,采坑四周地下水均向采坑中心汇集,以涌水的方式集中排泄;其次破坏地下水埋藏条件,引发地下水位超常下降,露天采场北衙组灰岩初始水位标高为 1 721.58 m,2022 年采坑内水位标高 1 574 m,采坑内水位下降 147.58 m,采坑南侧北衙村一带灰岩水位 1 711.55~1 677.97 m,对比该带附近初始水位标高 1 730 m,水位下降约 20~50 m,水力坡度 8.16%,初步推测南部影响半径约 1 500 m,整体地下水降落漏斗主要往采坑南部、东部扩展。

(2)矿区周边岩溶泉流量减少或干枯。流经矿坑南东部的北衙暗河(出口为 W123 岩溶大泉)2012 年矿坑排水前年平均流量 $857.93\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,2020—2022 年年平均流量 $833.67\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,现状情况下流量虽然变化不大,但因北衙暗河位于矿坑疏干排水影响范围内,在 2030 年开始井下开采后易出现流量减少或干枯断流现象。

(3)矿井水质变化。矿山开采后剧烈变化的自然条件和各种人为因素导致原生地下水接触到不同的岩石矿物介质,并发生水-水混合作用、水-岩相互作用等,导致水中特征组分含量发生变化。北衙组地下水原生化学背景特征属Ⅲ类水,据 2022 年北衙组地下水样测试成果,地下水水质属Ⅳ~Ⅴ类水,最差类别指标主要为总硬度、TDS、硝酸盐、硫酸盐、氨氮、Mn、Fe,未来随着开采加剧,矿井水因受矿体围岩金属硫化物分解淋漓析出影响,矿井水质变差,如废水未经处理直接排放会对锅炉河造成污染。

5 结 语

(1)北衙矿区岩溶发育与地质构造密切相关,岩溶发育方向与区内南北向、东西向及北北向构造线一致,且在褶皱轴部、翘起端、断裂影响带及岩体接触带岩溶较发育。

(2)岩性上,中三叠统北衙组二段细晶灰岩最纯,岩溶最发育,北衙组一段灰岩夹粉砂岩段限制了岩溶发育深度,在一段与二段接触带的二段一侧岩溶发育,一段岩溶不发育,且侵蚀基准面以下岩溶发育深度大于 150 m。

(3)矿区岩溶水富水模式属于向斜汇流型,北衙向斜储水构造对矿区岩溶水的富集起主导作用,断

裂影响带、岩体与围岩接触带也有利于地下水的运移和富集。

若矿山开采穿越断裂带和向斜核部,有发生溶洞或暗河突水的可能。建议重点工程避开岩溶发育区,必要时可采取帷幕注浆隔水、灌浆堵漏、防渗墙等工程措施,以便减少矿坑排水量,防止含水层被破坏,保护地下水资源。

参考文献

- [1] 齐跃民. 矿区岩溶地下水动态的随机模拟及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
QI Yuemin. Stochastic simulation of karst groundwater dynamics in coal mine and its application[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2009.
- [2] 李涛, 李文平, 高颖, 乔伟. 杨庄矿6煤底板深部岩溶裂隙水体特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 94-99.
LI Tao, LI Wenping, GAO Ying, QIAO Wei. Characteristics of karst-fissure water bodies deeply seated in the floor of No. 6 coal seam in Yangzhuang coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 94-99.
- [3] 姜文, 柏道远, 尹欧, 杨帆, 彭祖武, 钟响, 李彬, 李银敏. 湘中灰山港—煤炭坝地区岩溶发育特征及其构造控制[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 1-12.
JIANG Wen, BAI Daoyuan, YIN Ou, YANG Fan, PENG Zuwu, ZHONG Xiang, LI Bin, LI Yinmin. Characteristics of karst development and its structural control in the Huishangang-Meitanba area of central Hunan[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(1): 1-12.
- [4] 吴继文, 吴亮君, 吕勇, 王璞珺, 周嘉铭, 林宇, 潘明, 廖家飞, 孟庆鑫. 云南泸水市压扭性构造对银厂坪白云岩岩溶系统发育控制作用[J]. 中国岩溶, 2021, 40(5): 793-804.
WU Jiwen, WU Liangjun, LV Yong, WANG Pujun, ZHOU Jiaming, LIN Yu, PAN Ming, LIAO Jiafei, MENG Qingxin. Transpressional structure and its control on development of Yinchangping dolomite karst system in Lushui City, Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(5): 793-804.
- [5] 李小明, 朱丽, 李永军, 杨希培. 淮南矿区岩溶发育特征及其富水规律[J]. 华北科技学院学报, 2010, 7(1): 8-11, 22.
LI Xiaoming, ZHU Li, LI Yongjun, YANG Xipei. The karst development characteristic and the water abundance regular in Huainan mine area[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2010, 7(1): 8-11, 22.
- [6] 吕玉香, 胡伟, 周军. 渝东南渝东北岩溶区地下水富集特征研究[J]. 重庆交通大学学报, 2016, 35(4): 83-87, 92.
LV Yuxiang, HU Wei, ZHOU Jun. Study on the enrichment characteristics of groundwater in Chongqing southeast and northeast karst areas[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2016, 35(4): 83-87, 92.
- [7] 李铎, 魏爱华, 贾磊, 陈康. 山东福山铜矿岩溶裂隙水充水矿井涌水量预测[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 319-325.
LI Duo, WEI Aihua, JIA Lei, CHEN Kang. Prediction of water inflow in karst fracture of Fushan copper mine, Shandong Province, China[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(3): 319-325.
- [8] 王宇, 王梓微. 岩溶地下水富集的地貌组合形态[J]. 中国岩溶, 2015, 34(4): 314-324.
WANG Yu, WANG Ziwei. Patterns of karst geomorphologic combinations in areas with rich groundwater[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(4): 314-324.
- [9] 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): 1-7.
WANG Yu. Vertical zoning of groundwater runoff system in karst plateau[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 1-7.
- [10] 王宇. 西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 114-119.
WANG Yu. Classification, features of karst water system and key point for the evaluation to karst water exploration in Southwest China karst area[J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(2): 114-119.
- [11] 王宇, YUAN Daoxian, YANG Shiyu. Geophysical prospecting of karst water in Yunnan Province, China[J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(2): 155-161.
- [12] 王宇, 彭淑惠. 云南省岩溶水赋存特征[J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 253-259.
WANG Yu, PENG Shuhui. Distribution features of karst water in Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(3): 253-259.
- [13] Randall C Orndorff, David J Weary, Stanka Sebel. Geologic framework of the ozarka of south-central Missouri—contributions to a conceptual model of karst[C]//Geological survey karst interest group proceedings, water-resources investigations report 01-4011, 2001: 18-24.
- [14] Philipp Hauselmann, Pierre Yves Jeannin, Thomas Bitterli. Relationships between karst and tectonics: Case study of the cave system north of Lake Thun (Bern, Switzerland)[J]. Geodinamica Acta, 1999, 12(6): 377-387.
- [15] 云南黄金矿业集团股份有限公司. 云南省鹤庆县北衙铁金矿水文地质工程地质环境地质专项勘查报告[R]. 2021.
- [16] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 许绍倬, 于青春, 梁杏. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
WANG Dachun, ZHANG Renquan, SHI Yihong, XU Shaozhuo, YU Qingchun, LIANG Xing. Fundamentals of Hydrogeology [M]. Beijing: Geology Press, 1995.
- [17] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 浦俊兵, 肖琼. 现代岩溶学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [18] 中国人民解放军〇〇九三九部队. 鹤庆幅区域水文地质普查报告[R]. 1979.
- [19] 王锦国, 赵洪达, 周云, 黄华, 陈长生. 云南鹤庆西山地质构造对岩溶发育的控制作用分析[J]. 河海大学学报, 2021, 49(3): 241-248.
WANG Jinguo, ZHAO Hongda, ZHOU Yun, HUANG Hua, CHEN Changsheng. Control effect analysis of geological structure on karst development in Westshan mountains, Heqing county, Yunnan Province[J]. Journal of Hohai University, 2021,

- 49(3): 241-248.
- [20] 叶浩, 周云, 房艳国, 罗文行, 吴海斌, 翁文林, 付兴伟. 鹤庆—剑川地区岩溶发育特征及其控制因素[J]. *华南地震*, 2021, 41(2): 19-26.
- YE Hao, ZHOU Yun, FANG Yanguo, LUO Wenxing, WU Haibin, WENG Wenlin, FU Xingwei. The development characteristics and controlling factors of Heqing-Jianchuan karst[J]. *South China Journal of Seismology*, 2021, 41(2): 19-26.
- [21] 吴慧群. 大沙地尾矿库岩溶发育特征及地下水环境影响分析[D]. 云南: 昆明理工大学, 2015.
- [22] 梁彬, 李兆林. 西南岩溶石山地区岩溶水资源合理开发利用模式: 以湖南龙山洛塔为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(1): 62-67.
- LIANG Bin, LI Zhaolin. Reasonable mode in exploitation of karst water resources in karst stone mountainous areas in South-west China: A case study of Luota, Longshan county, Hunan province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(1): 62-67.
- [23] 周训, 胡伏生, 何江涛, 王旭升, 方斌. 地下水科学概论(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 2014.

Characteristics of karst development and water abundance of the Beiya Gold Deposit in Heqing county of Yunnan

HE Xiang, DONG Xuelan, YANG Chao, LIU Peng, XUE Boqiang

(Yunnan Gold and Mining Group Company(Ltd), Kunming, Yunnan 650299, China)

Abstract The Beiya Gold Deposit is a typical karst water-filled deposit. As the hydrogeological conditions and water environment are expected to be changed by future deep mining, the water inrush risk will increase if the roadway is exposed or connected with the karst zone, the underground river and Guochang river. In this study, comparing the field investigation of regional hydrogeology and the geological exploration data with the actual production, we analyze the karst development and water abundance characteristics from the aspects of lithology, structure, landform, etc.

The study results show as follows. (1) The karst forms mainly include stone forest, drainage cave, karst depression, solubilization trough, solubilization gap, karst cave and underground river. (2) Lithologically, karst in the second segment of the Middle Triassic Beiya Formation is the most developed, with the purest fine crystalline limestone containing 41.52%–54.77% of CaO. Karst development in the first segment of the Beiya Formation is restricted by limestone and siltstone. Karst is developed in the contact zone on the side of the second segment, while not developed on the side of the first segment. (3) Karst development is mainly controlled by structure, and the direction of karst development is consistent with the NS, EW and NW tectonic lines. Karst is more developed in the fold axis and the warped end, and is relatively developed in the zone affected by fault and the contact zone of rock mass. (4) Karst development shows the characteristics of vertical zonation. Funnels and sink holes are developed at the level of 2,500 m to 3,500 m, grikes and solution grooves at 1,800 m to 2,500 m. Slope valleys, karst caves and underground rivers are developed at the level of 1,694 m, while karst is still relatively developed below the base level of erosion. The lowest control elevation of the cave is 1,479.54 m, and the depth of karst development below the base level of erosion is more than 150 m. (5) The karst water abundance shows its synclinal confluence pattern. The Beiya synclinal water storage structure plays a key role in karst water enrichment. The zone affected by fault and the contact zone between rock mass and its surrounding rock are also conducive to groundwater migration and enrichment. (6) The spatial variation of water abundance in karst aquifer is large. From rock mass as the center to its outward direction, radial water abundance and permeability can be listed in the order of weak-medium-strong or extremely strong. The rock mass and its proximal annular ore-bearing alteration zone shows weak-medium water abundance, while the distal end shows medium-strong water abundance. Some parts of the area are extremely strong in water abundance. (7) The underground river is developed along the axis of the Beiya syncline at the level of 1,740 m to 1,694 m. The Beiya Formation is composed of sandy limestone. The possibility of karst cave or water inrush of the underground river will increase if the mining passes through the fault zone and the syncline core.

Key words karst development, structure, groundwater, Beiya mining area, Yunnan

(编辑 杨杨)