

王宇. 论云南高原岩溶大水矿区地下水系统的复杂性[J]. 中国岩溶, 2024, 43(6): 1223-1234.

DOI: 10.11932/karst20240601

论云南高原岩溶大水矿区地下水系统的复杂性

王宇^{1,2,3}

(1. 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;

2. 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; 3. 云南省地质调查局, 云南昆明 650051)

摘要: 岩溶大水矿区地下水系统的复杂性是指系统及其环境的构成元素、组织结构、影响因子及其相互联系和交互作用的多元性、非线性、随机性所导致的无序、突变、探测与推断误差较大的特性。文章从地下水系统的边界条件、水文地质结构、含水介质性状、开采影响效应四个方面系统论述了岩溶大水矿区地下水系统的复杂性, 并通过典型实例分析, 提供了岩溶大水矿区地下水系统复杂性的实证, 以及对岩溶大水矿区地下水系统复杂性特征的形象化描述。根据对岩溶大水矿区地下水系统复杂性的系统认识, 结合矿区水文地质勘查实践中的问题, 讨论了现行规范中水文地质条件复杂程度评价指标优化调整及评价标准量化的意见, 以及水文地质条件复杂矿区勘探控制程度的合理评价尺度, 同时对规范的修订和完善提出了建议。

关键词: 水文地质; 岩溶矿区; 地下水系统; 复杂性; 坑道涌水; 勘探程度

创新点: 论证了岩溶大水矿区地下水系统复杂性的决定因素, 即地下水系统的边界条件、水文地质结构、含水介质性状及开采影响效应。分析归纳了岩溶大水矿区地下水系统的复杂性特征, 得出了水文地质条件复杂程度评价指标优化调整的意见, 以及水文地质条件复杂矿区勘探控制程度的合理评价尺度。

中图分类号: P641; P694 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)06-1223-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

大水矿区通常指矿坑涌水量大于 $10000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的矿山^[1]。鉴于岩溶充水含水层富水性的不均匀性和涌水量预测计算精度较差, 大水矿区的界定不应拘泥于具体的涌水量数值, 主要应基于含水层的富水性强、补给丰富、存在管道流等条件。水文地质术语标准定义水文地质单元为具有统一补给边界和补给、径流、排泄条件的地下水系统, 本文所说的地下水系统即为与之相同的对象和范畴^[2-4]。成矿条件优越, 形成大型矿床的矿区, 往往地质构造复杂, 构造运动强烈, 岩浆活动频繁, 沉积相变较大, 岩溶水系统更为复杂^[5-7]。岩溶大水矿区地下水系统的复杂性是矿区水文地质勘查类型的主要决定因素, 也是矿坑涌水来源、途径、动态分析评价和涌水量预测计算以及防治水工作的重要依据^[1-6]。云南高原岩溶分布区主要为东经 102° 以东的滇东片区、滇西北片区及滇西保山至沧源片区, 对应于上扬子陆块、华南陆块、三江造山带和腾冲造山带, 成矿条件优越, 矿产资源丰富。现有生产矿山 2300 多个, 在建矿山 530 多个, 多为以岩溶含水层充水为主的矿床, 抽排水矿坑以有色金属和能源矿山居多, 统计矿坑排水

资助项目: 国家重点研发计划项目课题(2016YFC0502502); 云南省地质灾害综合防治体系建设专项计划项目(2013—2020)

作者简介: 王宇(1960—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水工环、灾害及生态地质研究。E-mail: ynddywy@163.com。

收稿日期: 2023-12-02

总量约 $18594.67 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 其中大水矿区水文地质勘查类型主要是岩溶山间河谷、山间盆地、峰丘谷地、峰丛洼地区的岩溶强含水层直接或间接充水的复杂类型、中等—复杂类型^[8-11]。历史上岩溶区矿产开采主要位于侵蚀基准以上, 山区地形一般有利于自然排水, 因此对矿区地下水系统复杂性重视及研究程度并不高。随着经济社会需求的增大, 探矿与采矿区域不断扩大和向深部延伸, 一些原来难以开采的大水矿床也相继投入开发, 致使水文地质条件复杂程度由简单向复杂或极复杂演变, 矿山防治水难度随之加大、勘查要求相应提高。例如滇东北构造侵蚀溶蚀高中山峡谷区的彝良毛坪铅锌矿开拓中段已处于洛泽河河床下, 随着开采水平的不断向下延深, 矿坑涌水量不断增大, 发生了严重的突水事故, 水文地质补勘控制程度远远超过了规范要求的基本工作量^[12-15]。研究岩溶大水矿区地下水系统的复杂性、提高研究水平、加强勘查控制, 显然已是非常必要和迫切的课题。以往对岩溶大水矿区地下水系统复杂性的研究主要针对含水层岩溶发育特征、透水性、富水性的非均匀性、时空变化的随机性及突水事件的突发性等研究, 以具体矿区分析研究居多, 系统归纳总结不够^[12-18]。本文通过岩溶大水矿区地下水系统复杂性的系统分析论述, 并探讨水文地质条件复杂程度评价指标优化与量化及勘查控制程度, 以期促进岩溶大水矿区地下水系统的研究和科学勘查评价。

1 地下水系统的复杂性

系统的复杂性是指系统及其环境的构成元素、组织结构、影响因子及其相互联系和交互作用的多元性、非线性、随机性所涌现的无序、突变、探测与推断误差较大的特性^[19-23]。根据彝良毛坪铅锌矿、会泽铅锌矿、威信李子埂煤矿、昆阳磷矿、弥勒飞马龙煤矿、个旧老厂锡矿、富宁普阳煤矿、香格里拉热林铅锌矿和红牛铜矿、鹤庆北衙金矿、保山金厂铜锌铁矿和西邑铅锌矿等勘查研究成果资料^[12-15, 24-39], 以及中国矿产地质志·云南卷、云南省矿山地质环境调查成果报告、云南省岩溶水文地质环境地质调查与研究等调查研究成果资料分析归纳^[8-11], 岩溶大水矿区地下水系统的复杂性主要体现在系统边界条件、水文地质结构、含水介质性状、开采影响效应的复杂多变特征上。

1.1 系统边界条件复杂

岩溶区无论内生矿床、外生矿床、变质矿床等矿床埋藏分布区, 成矿地质作用或后期改造均非常强烈, 地质条件异常复杂。在地下水系统边界上表现为地形分水岭的不规则性、侵蚀基准的多级性、地质边界成因—构造类型的多样性和隐蔽性、边界水动力性质的多变性等方面。

岩溶区地形地貌复杂多变, 构造地貌、侵蚀地貌和岩溶地貌叠置, 高原山原、山间峡谷、山间盆地、坡立谷、峰丛槽谷、峰丛洼地、石林石牙丘原等相间组合。由于岩溶地貌形态起伏转折多变, 锥状、塔状峰丘洼地组合地形地貌的延展连续性差, 地表水系不发育, 故岩溶区地形分水岭既不规则, 也不明显, 在岩溶发育强烈的大水矿区尤为突出。如在滇东岩溶高原浅切割低山丘陵、峰丛洼地和槽谷区的诸多有色金属、能源、非金属矿区, 在间断性的丘峰谷地间圈画矿区所处流域分水岭就很困难。

在矿区水文地质勘查评价中, 规范所言的侵蚀基准实质上是地下水的排泄基准。侵蚀基准控制了矿坑涌水风险、自然排水的最低标高, 是评价水文地质条件复杂程度的重要因子。岩溶矿区水文地质勘查从地形和水系观测, 往往将地下水系统集中排泄点或排泄带直接关联的河、湖等水面定为矿区的侵蚀基准。但实际上受地壳间歇性升降、深大断裂切割、含水层和隔水层(带)互层或断错交接、以及受到不同等级的侵蚀基准控制的分层溶蚀作用影响, 形成了不同循环深度和行程的地下水径流带, 地下水排泄基准也随之呈现分级性状。如高原岩溶峡谷区由于河流侵蚀切割强烈, 溶蚀作用滞后以及下伏非可溶岩限制等, 常形成控制地下水排泄基准的地下河或大泉高悬于河床之上。另外, 受干、支流的差异影响, 能量梯度不同的浅循环和深循环岩溶水的行程和排泄基准也不同。比如南盘江与元江之间岩溶高中山区的个旧各矿区主要位于老厂—绿水河、个旧—乍甸、黄草坝—卡房水文地质单元内, 作为岩溶水集中排泄基准的绿水河九股水暗河、乍甸暗河及水头村大泉、黄草坝暗河均出露在高于地表侵蚀基准 100~330 m 的次级沟谷中。金沙江支流洛泽河和牛栏江流域的毛坪铅锌矿、会泽铅锌矿等矿区的深循环承压水排泄基准均在当地侵蚀基准之外。

岩溶区构造复杂, 断层、褶皱、不整合面、侵入

岩接触带等构造常常构成地下水系统复杂多样的边界。经勘探和挖(采)掘工程揭露所证实,这些构造由物质组成、结构构造、胶结充填、力学性质、产状变化、地应力及风化作用等因素所决定,既有导水、透水的,也有阻水、隔水的和介于其间的。同一构造若通过的地层(岩体)的岩性、力学性质和可溶性等不同,以及不同段的力学性质发生变化等均可导致其地下水动力性质发生转变。不同时期、不同形态和产状的构造相互叠加、交接、切错,使隔水层(带)断裂和错动,沿断裂岩溶强烈发育形成了透水、导水通道,也会沟通地表水体、其它含水层或溶洞、老空区积水与矿坑充水含水层的水力联系等。地质构造边界由于隐伏于地下,物质组成和结构空间变化大,构造碎裂岩抗风化能力弱,地表松散层覆盖常较严重,观测和勘探试验较为困难。因此地质构造成为了地下水系统边界条件复杂程度的主要决定因素。如弥勒飞龙马煤矿开采层为宣威组(P_2x),矿井正常涌水量 $267.0\sim 542.0\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,原定水文地质勘探类型为裂隙弱含水层充水为主的简单类型。2011年12月在矿区东南部分,1340 m 水平南翼三石门巷道掘穿F9断层进入对盘玄武岩70 m,转弯迎头又揭露茅口灰岩,因围岩破碎、地应力释放及岩溶承压水压力作用,至12月17日围岩失稳发生突水,涌水量约 $20000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。此后生产勘探报告将水文地质勘查类型修定为岩溶和裂隙充水为主的中等-复杂类型。

1.2 系统结构复杂多变

地下水系统结构是指含水层、含水岩体和构造碎裂带与隔水层、隔水岩体和结构面的空间组合形式。岩溶大水矿区地下水系统结构的复杂性主要表现为岩溶含水层与非可溶岩隔水层(体)以及原生和次生结构面的类型特征、物质组成、结构构造、水理性质、组合关系的多样性、多变性。

经历多期地壳振荡运动与沉积旋回,岩溶区形成了多重不同岩相的碳酸盐岩与碎屑岩相间的岩石地层序列,以及穿插或互层于其间的侵入岩体和火山岩层,岩相岩性空间变化普遍较大。岩溶含水层富水性多为较强和强,非岩溶含水层或岩体富水性一般为中等到弱,属相对隔水层。松散层碎石类土、砂性土、粘性土多呈透镜状交互组合,孔隙含水层连续性差,总体上对岩溶水系统起到局部隔水边界的作用。因此,岩溶水系统含水层组结构主要为间互状

多层结构,且结构构造与水文地质特征空间变化很大。

在地质历史进程中,岩溶区各个地质体之间间歇性的错动、分离、碰撞与拼接运动,生成了多期交织或叠加的构造体系,致使地层断裂和褶皱,含水层组空间联系形式复杂,既有连通,也有截断或过渡形态。加上不整合面、火成岩接触带等原生构造面的交切,形成了不同方向和层次、不同结构和性质的地下水径流和转换通道,使地下水循环更加深远、水力联系更加广泛、形式更为复杂,岩溶发育的空间分异愈加强烈,含水层及隔水层(带)的各向异性愈加显著。新构造运动过程的差异性和间歇性,导致不同时期的古岩溶和现代岩溶分布在不同的高程上或埋藏在不同的深度下,共同构成了可溶岩地层内的岩溶垂向分带现象,岩溶山地丘陵区普遍发育的多级夷平面或溶蚀台面以及缓倾斜的溶洞层,反映出地下成层分布的岩溶发育带。岩溶发育的垂向分带使得地下水系统的结构层次和分级更趋复杂。

上述岩溶含水系统间互状多层结构、岩溶发育分带、线与面状导水空隙交织分布的复杂系统结构特征在高原岩溶大水矿区是普遍存在的。如保山西邑铅锌矿、建水挣财洞铅锌矿、富宁普阳煤矿等,岩溶含水系统受岩溶层组、断裂构造控制和新构造运动影响,洼地、漏斗、落水洞、溶隙、溶洞等岩溶形态发育,垂向上可分出3~4个岩溶发育带,导水储水空隙为岩溶裂隙与管道系统、断裂破碎带,有大泉和暗河出露,岩溶发育不均,各向异性明显,水文地质条件复杂程度分型均为复杂型。

1.3 含水介质极不均匀

由控制和影响岩溶作用的内外条件及因素的复杂多变性所决定,岩溶形态及其属性在空间上形成了复杂和随机多变的非均匀性特征。从而导致岩溶含水层导水储水空隙在空间上发育不均,富水性、透水性和水力联系各向异性突出。勘查及开发实践证明,岩溶大水矿区地质构造复杂,内外动力地质作用强烈,岩溶作用对导水构造由先适应到后改造的发育过程,决定了分异溶蚀作用非常显著,因此岩溶含水层不仅岩溶发育强烈,而且也是极不均匀的,其中溶洞、管道、裂隙的发育方向、规模、密度、联通程度及其富水性、透水性和水力联系均具突出的各向异性特征。

岩溶大水矿区含水介质的极不均匀性直观地表

现在矿坑涌水量主要源自股状的集中管道流,类似于多孔介质的孔隙、裂隙扩散流占比很小。不仅中生界、古生界的岩溶充水含水层如此,元古界的岩溶充水含水层也如此。如寒武系渔户村组(ϵ_y)、震旦系灯影组(Z_{2dn})岩溶充水含水层,在区域上是富水性较均匀的岩溶含水层,但在昆明地区的昆阳、海口、尖山磷矿的大水露采矿坑中,集中管道流占矿坑涌水量的 70% 左右。处于高寒山地峡谷区的香格里拉热林铅锌矿,上三叠统曲嘎寺组三段二层(T_3q^{3-2})大理岩化灰岩、大理岩层是矿区主要含矿地层和岩溶含水层。含水层岩溶发育极不均匀,地表发育串珠状岩溶洼地、溶洞、溶穴、溶隙等岩溶现象,钻孔揭露空隙多为宽 2~3 cm 的裂隙、直径约 3 cm 的溶孔,但个别钻孔揭露了 0.3~6.7 m 的溶洞,无充填,钻进中发生掉钻。施工坑道 WPD1、WPD2, WPD1 坑口标高 4213 m,矿坑水通过岩溶通道汇入其下坑口标高 4153 m 的 WPD2 中, WPD2 合计流量 0.707~24.922 L·s⁻¹。正是由于溶洞、管道发育孤立狭窄、随机易变和深埋隐蔽的特征,往往导致勘查、开采和采矿工程超前探水难以达到详细查明主要进水通道及其渗透性的程度^[1]。通常所见,通过矿产地质勘探的地球物理探测、钻孔水文地质编录、简易水文地质观测和专门水文地质钻探试验,勘探点、线和网格密度均较其他水文地质勘探高得多,但仍未能揭示集中径流管道,以致统计计算的钻孔涌水量、水理性质参数偏小,确定水文地质勘查类型偏于简单,矿坑涌水量预测计算结果偏低。然而当开采达到一定的深度和范围时,本来涌水量很小的矿坑,一旦揭露到集中径流管道,流量每小时数百到数千立方米的巨大水流即刻涌入坑道,矿坑涌水量大大超出了预计的水平,如果防排水措施不力,甚至发生重大突水事故。

1.4 开采影响难以预测

采矿工程和采矿活动对矿区地下水系统的影响是巨大而深远的,并且矿山井巷、采坑开拓工程往往需随着开采过程中矿体和开采技术条件的变化而实时调整,而采矿工程和采矿活动对水环境及地下水系统的扰动和影响也随之而变,这些影响均不同程度地增强了矿区地下水系统的复杂性。

具体而言,矿山井巷、采坑开拓工程、封闭不良的钻孔等可能打通不同含水层组间的隔水或弱透水边界,沟通和强化地下水与地表水的联系,揭露积水

老空或导水陷落柱,使矿坑涌水来源、途径和充水强度更加复杂,形成自然与人工复合的复杂地下水系统。开拓、采准、切割、回采等过程中的爆破可造成不同程度的岩体破裂、充水断裂带和溶洞管道淤塞体溃决,从而触发突水事故,而其发生的时空点位,强度和规模也常常是随机性很强的。采空区冒落带或裂隙带与地表水体、间隔含水层(带)或老空区积水连通时,会导致地下水补给条件发生突变,新增矿坑涌水来源。坑道排水导致地下水位持续下降,降落漏斗不断扩张,乃至引发地裂缝、地面塌陷,也会大幅增加矿坑涌水量。此外,老空积水的隐蔽性、无规律性、不稳定性也增强了矿区地下水系统的复杂性。如滇东地区较为严重的矿坑突水,常有采煤巷道接近岩溶承压含水层时,由于采动影响导致隔水岩层破裂或断裂破碎带、岩溶空隙充填物松动,在渗流潜蚀和水压力作用下,迅速发展为集中管道流突水。比如威信李子埂煤矿,开采层为二叠系上统龙潭组(P_3l)煤系地层,下伏二叠系下统茅口组(P_1m)灰岩较强岩溶承压含水层。正常情况下,生产井巷和采空区仅见星散淋水点,流量 0.04~0.86 L·s⁻¹。2009 年 12 月 17 日在主回风巷斜下山井巷开凿中揭露宽约 15 cm 的溶蚀裂隙,充填灰黄色黏土,至 12 月 18 日在裂隙出现少量渗水,呈滴水状,而后渗水量渐渐增大,逐步呈股状涌出,迅速淹没了井巷。在矿井突水的同时,距突水区 500 m 处的龙洞坝岩溶泉流量由 48.38 L·s⁻¹ 迅速减小,至 12 月 21 日断流,到 12 月 22 日矿井水位趋稳后,泉水开始出流,流量逐渐恢复。局部的地质隐患和人为扰动对地下水系统复杂性的影响无论南方或北方的岩溶矿区都是显著的。比如河南鹤壁煤业第十煤矿的二叠系下统山西组(P_1s)煤层顶底板直接充水含水层为砂岩裂隙含水层,已处于疏干半疏干状态;顶板间接充水含水层为新近系砾石孔隙含水层,富水性不均一;底板间接充水含水层为石炭系和奥陶系的多层岩溶含水层,富含承压水,富水性中等—强。地下水系统总体为间互状多层结构,水文地质条件复杂程度分型为中等。2017 年 3 月 10 日,1309 底抽巷发生了突水,当日平均突水量约为 4291 m³·h⁻¹。事故调查分析原因为 1309 工作面及底抽巷揭露导水断层,在高承压水、构造应力和采动应力等共同作用下,奥灰水沿断裂带导升突破隔水岩柱,逐渐形成集中径流通道,发生奥灰滞后突水。

2 典型实例分析

典型实例分析既是岩溶大水矿区复杂性的实证,也是对岩溶大水矿山复杂性特征的形象化描述。本文主要选取复杂性和典型性突出,研究程度较高的彝良毛坪铅锌矿为例进行分析,辅以其他实例丰富分析内容^[9-15]。

2.1 彝良毛坪铅锌矿

毛坪铅锌矿矿区面积约 8.27 km²,洛泽河由南往北流过矿区,将矿区分为河东与河西两个采区,河谷高程 887~2 194 m。北部、西北部弱透水的峨嵋山玄武岩组、东部地表分水岭与南部次级地表分水岭构成地下水系统边界,洛泽河谷底部的河床沉积层对岩溶水系统起到局部隔水边界的作用,汇水面积 67.28 km²。矿体位于当地最低侵蚀基准(约 887 m)之下,矿体主要赋存在泥盆系、石炭系碳酸盐岩地层中,主要充水来源为岩溶含水层,充水通道为构造破碎带、溶洞管道和裂隙发育带。河东采区开采标高至 610 m,井下正常排水量 23 000~28 000 m³·d⁻¹;河西采区开采标高至 503 m,井下正常排水量 4 500~12 000 m³·d⁻¹。勘探试验和采矿工程揭露与水化学场、温度场及同位素分析验证,矿区地表分水岭与地下水系统的相对隔水层或断裂边界、深层承压水的侧向补给和排泄边界分异明显,洛泽河主要是上部浅循环岩溶水的局部排泄基准和边界,深循环承压水侧向补给边界和排泄基准已超出地表分水岭和上覆玄武岩相对隔水边界。

从地层层序看二叠系梁山组(P₁l)、石炭系万寿山组(C₂l)砂页岩为隔水层,隔断了二叠系、石炭系、泥盆系等三套岩溶含水层间的水力联系。然而随着勘探和采矿的逐步深入,揭示出矿区南北向主干断裂及 30 余条北东、南北、北西、东西走向的次级断裂破坏了两组隔水层的完整性和连续性,断层及影响带透水构造裂隙发育,成为地下水的良好赋存空间及运移通道,各岩溶含水层产生了性质和强度不同的水力联系,使地下水系统边界及子系统边界条件趋于复杂化。

三层碳酸盐岩岩溶含水层与两层碎屑岩相对隔水夹层构成的间互状含水层组,因倒转褶皱形成了深部重叠的多层含水层组结构,根据富水性、透水性和水动力性质的差异,可大致划分为上部和下部两

个岩溶水子系统(图 1)。由于多条断裂带所沟通,下部含水子系统的承压水以越流形式通过隔水层断裂部位顶托补给上部含水子系统。以溶洞分布为标志,矿区及周边侵蚀基准面以上发育有高程 1 500~1 979 m, 1 172~1 367 m, 954~1 000 m 三个岩溶带。灌浆帷幕钻孔揭露,侵蚀基准面以下大致可划分出高程 910~700 m、630~250 m、300~220 m 三个强岩溶发育带。含、隔水层组和构造组合以及岩溶发育分带相叠加,形成了极为复杂的地下水系统结构。

岩溶发育强烈而不均匀,岩溶含水层裸露区洼地、漏斗、落水洞、石芽等遍布,溶洞多沿层间裂隙和断层带发育,一般宽 1.5~8.0 m,高 1.5~10 m,长 2~5 m。调查统计溶洞 74 个,平均 7.12 个·km⁻²,洼地有 34 处,平均 3.44 处·km⁻²,落水洞 28 处,平均 2.77 处·km⁻²。地表出露的龙洞泉群流量 12.90~130.52 L·s⁻¹,塘坊泉流量 25.34~60.09 L·s⁻¹,水炉电站泉流量 74.60 L·s⁻¹(已疏干),反映出溶洞管道流的存在。矿区北部帷幕轴线西北段 3 个钻孔揭露了不同深度的溶洞 8 个,洞高 0.3~4.02 m。钻孔压水试验 62.9% 的试验段透水率小于 5 Lu,但最大超过 60 Lu,有 4 个溶洞段不起压,岩溶含水层透水性及富水性极不均匀。

多期次矿山专门水文地质勘探试验及监测揭示,矿山井巷和封闭不良的钻孔穿过了不同含水层组间的隔水或弱透水边界,沟通和强化了各个含水层之间的水力联系,长期排水已形成整体性的疏干流场,改变了地下水补给、径流和排泄条件。2012 年 9 月 7 日,彝良县间隔 1 h 发生了 5.6、5.7 级两次地震,震中位于矿区附近,地震导致矿山供电中断,造成淹井,并造成部分导水断裂连通性增强,复产后排水量增至 34 000~43 000 m³·d⁻¹,使矿山水文地质条件更加复杂。目前河东片区已形成统一的疏干降落漏斗,开拓系统均位于地下水位以下,最低开拓水平 310 m,开拓施工突水风险渐增。2019 年 3 月 2 日,河东片区 430 m 中段配电硐室在超前钻孔探水未发现异常的情况下,在掘进爆破后工作面出现涌水,初始涌水量约 30 m³·h⁻¹,涌水开始为清水,后涌水量逐渐增大并夹黄色泥砂,随着径流空隙淤塞物的潜蚀疏通,约 10 h 后涌水量增至约 5 932 m³·h⁻¹。

2015 年完成的毛坪铅锌矿区 9.07 地震后水文地质研究与河东片区帷幕注浆轴线水文地质工程地质勘察将矿区水文地质条件复杂程度分型由中等型提升为复杂型。可见对于复杂矿区地下水系统复杂性

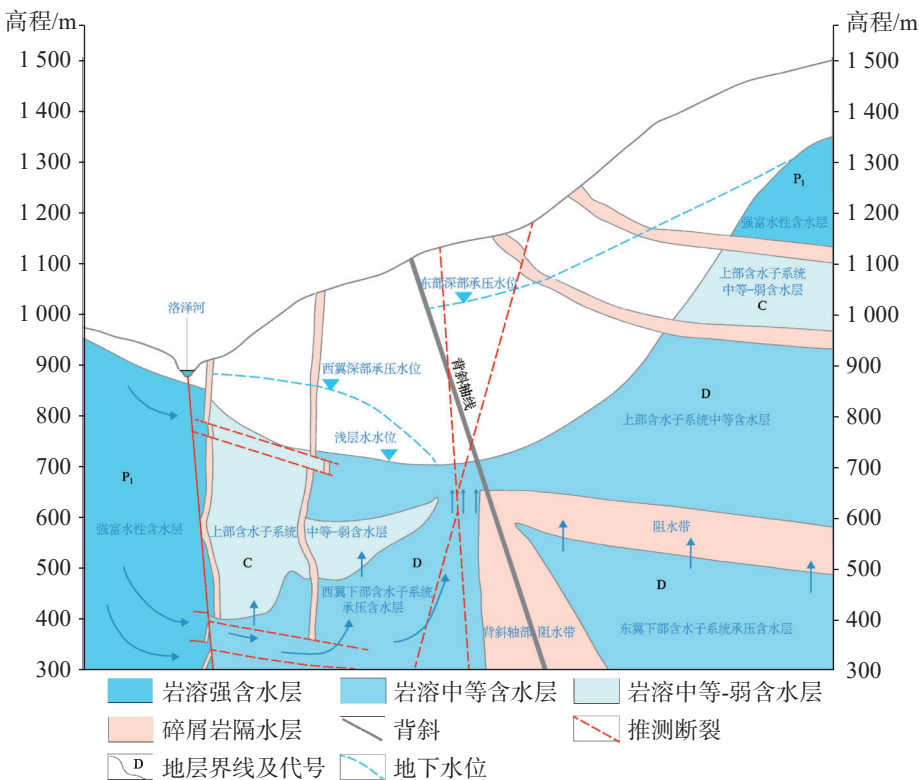


图 1 滇东北彝良毛坪铅锌矿区水文地质结构示意图(据李金秀等,2016)

Fig. 1 Schematic profile of hydrogeological structure of the lead-zinc mining area in Maoping of Yiliang, northeast Yunnan Province (Li Jinxiu, et al., 2016)

的认识,往往是随着勘探和开采的深入而逐步提升的。

2.2 其他矿山

会泽铅锌矿位于滇东北牛栏江构造侵蚀溶蚀中山峡谷西岸谷坡至分水岭地带,高程 1550~2830 m,矿区面积约 60 km²,所属地下水系统汇水面积约 220 km²,处在地下水补给—径流区^[15]。矿体位于当地侵蚀基面(牛栏江河床)和地下水位以下,矿体主要赋存在下石炭统摆佐组碳酸盐岩地层中,主要充水来源为岩溶含水层,充水通道是断裂破碎带、裂隙发育带及少量岩溶管道。开采标高至 924 m,矿坑总涌水量平均达 30000 m³·d⁻¹ 左右。由梁山组加马平组(P₁l+C₃m)、海口组加邛竹寺组(D₂h+Є₁q)两个碎屑岩隔水层组与栖霞—茅口组(P₁q+m)、威宁组、摆佐组、大塘组加宰格组(C₂w+C₁b+C₁d+D₃zg)及灯影组加陡山沱组(Z₂dn+Z₂d)三组岩溶含水层构成间互状多层结构类型(图 2)。灯影组加陡山沱组岩溶含水层钻孔揭露富含承压水,水头压力最大为 5.9 MPa,最大涌水量达 167.21 m³·h⁻¹,边界条件与其上浅循环岩溶含水层组有明显的分异。在断裂、岩溶和后期钻孔及井巷开拓影响下,3 个岩溶含水层组之间以及

与江水之间存在不同程度的水力联系,使地下水系统结构趋于复杂。地表溶洞、落水洞、溶蚀漏斗及岩溶洼地发育,垂直溶洞最大直径约 14 m,下游牛栏江西岸出露特大泉和暗河各 1 个,流量分别为 0.523~0.990 m³·s⁻¹ 和 1.901~2.164 m³·s⁻¹,反映出溶洞管道流的存在。井下仅见少量直径约 0.5~2.0 m 的溶洞,涌水通道主要为断裂及影响带,如 1274 m 中段一断层破碎带涌水量达 80~100 m³·h⁻¹,占全中段涌量的 67%,总体上导水储水空隙发育不均。由于含水层补给充沛、静水头高,曾发生多次规模不等的突水,如 1031 m 中段 2016 年 9 月揭露栖霞—茅口组岩溶含水层,发生突水涌砂,初始涌水量 175 m³·h⁻¹,水头压力达到 4.5 MPa。

会泽铅锌矿区采用降压疏干方式保证安全生产,地下水位动态主要受井巷开拓及疏排水影响。目前地下水位已降至 1033.602~1065.09 m,远低于牛栏江水位,但未发现对江边特大泉、暗河流量的明显影响,可见大泉、暗河系统比已有认识更为复杂。矿床石炭系和泥盆系直接充水含水层经长期疏排水地下水位大幅下降,现与上覆二叠系间接充水含水层和

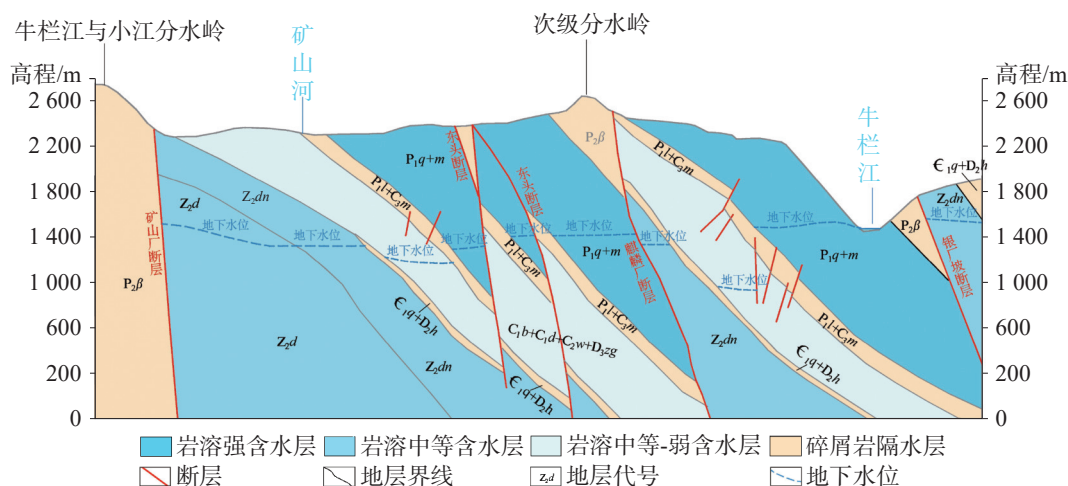


图2 滇东北会泽铅锌矿区水文地质结构示意图(据宋煜等, 2016)

Fig. 2 Schematic profile of hydrogeological structure of the lead-zinc mining area in Huize of northeast Yunnan Province (Song Yu, et al., 2016)

下伏震旦系间接充水含水层水头差达 140~150 m 和 420~520 m, 预计随着降落漏斗继续扩张, 以及采矿爆破、地震等影响, 井巷开拓遇到导水断裂带、溶洞管道, 产生突水的风险将更大。矿区勘探和开采深度在侵蚀基准面以上时, 水文地质条件复杂程度分型定为简单型, 随着勘探和开采的深入分阶段提升到了中等乃至复杂型。

复杂的地质边界决定地下汇水及排泄条件的典型实例如个旧老厂、卡房、松树脚等矿区, 矿区均位于北西—南东走向的元江与南盘江的分水岭地带, 为构造侵蚀溶蚀高中山地貌, 高程 2000 m 以上, 最高点莲花山高程 2766 m。北部侵蚀基准为南盘江流域的蒙自断陷盆地, 盆底湖泊大屯海高程 1278 m; 南部侵蚀基准为元江水面, 高程 157~200 m。蒙自盆地北缘支沟中的乍甸暗河出口高程 1351 m, 雨季流量约 $1500 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。南部支沟内出露的绿水河暗河出口高程 492 m, 最大流量为 $29.37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 黄草坝暗河出口高程 335 m, 雨季流量约 $1600 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。矿体主要赋存于隐伏花岗岩体与中三叠统个旧组(T_2g)碳酸盐岩地层的接触带中。上覆个旧组(T_2g)岩溶强含水层, 下伏巨大的花岗岩体和变玄武岩隔水层, 埋深 150~600 m, 局部沟谷地带出露地表, 成为上覆岩溶含水层的隔水底板和排泄边界, 地下水位面随花岗岩体顶面起伏变化, 埋深在 249~529 m。据观测, 老厂矿区 2050 m 中段排水量 $4870 \sim 33623 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 2000 m 中段排水量 $5046 \sim 26679 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 1800 m 中段排水量 $11295 \sim 38051 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 1360 m 中段排水量 $22917 \sim 102775$

$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 地表侵蚀基准对矿坑涌水几无影响, 主要受岩溶发育分带和原生构造面控制^[24]。

孤立和随机埋藏分布的溶洞管道流对水文地质条件复杂程度的影响在鹤庆北衙金多金属矿较为突出。矿区位于近南北走向的澜沧江与金沙江分水岭马鞍山东麓岩溶向斜盆地内, 地势总体西高、东低, 马鞍山主峰高程 3958 m, 向东经向斜盆地递降至东缘锅厂河, 河床高程 1640 m, 为地表侵蚀基准。三叠系中统北衙组(T_2b)碳酸盐岩地层厚 568~811 m, 既是矿区主要赋矿地层及围岩, 又是主要充水含水层, 导水空隙为岩溶裂隙及洞管。外围山地补给区岩溶洼地、漏斗、落水洞发育, 地下水由西、南、东三面向北, 运移至锅厂河谷西坡高程 1694 m 的暗河出口排泄, 流量 $133.20 \sim 2888.91 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$, 矿区钻孔初见水位 1819~1830.45 m。露采矿坑东北边缘距暗河出口约 400 m, 现采坑南北长 1800 m、东西宽 1500 m, 坑口面积约 1.89 km^2 , 坑底高程 1547 m, 已低于锅厂河和暗河出口, 涌水主要为边帮裂隙股状流, 涌水量 $345 \sim 18000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。虽然矿坑涌水以隙流为主, 流量并不大, 但侵蚀基准面至控制矿体最低标高 1322 m 已在地表河流和暗河之下, 锅厂河及暗河经过矿区东缘, 未来转井工开采后, 发生暗河突水的风险增大, 故水工环专项勘查将水文地质勘查类型定为岩溶裂隙含水层直接充水为主、局部存在管道流的复杂类型^[9,34]。

在开采时间较长的矿区, 老空区突水也常有发生, 采空区地面沉降、地裂缝和塌陷导致矿坑涌水

增大或突水的现象也较常见,但在目前合理的经济技术水平下尚难详细查明老空区详情及积水情况,对采空区的灾变及突涌水事故一般也尚难做到精确监测预警,这也是矿区地下水系统复杂性的构成因素之一^[35-37]。

3 讨论

通过以上论述,形成了对岩溶大水矿区地下水系统复杂性特征的系统认识,在此基础上对现行规范中有关的内容和问题进行讨论,并提出有益于矿区水文地质勘查实践的建议。

3.1 评价指标优化

现行矿区水文地质工程地质勘查规范列出了 8 项矿床水文地质条件复杂程度评价指标,即:矿体与当地侵蚀基准面的关系、地下水补给条件、第四系覆盖程度、水文地质边界复杂程度、充水含水层富水性、隔水性能、老空水及分布状况、疏干排水引起地面塌陷和沉降情况^[1]。系统分析这些指标,可看到他们之间有的水文地质属性和功能是重叠的,有必要根据矿区地下水系统的复杂性特征进行指标优化。如第四系覆盖程度、隔水性能 2 项指标,从属性和功能上属于地下水补给条件、水文地质边界复杂程度、疏干排水引起地面塌陷和沉降等指标内蕴的构成或影响因素,在这些指标评价中必须加以考虑,故无须再行单列。反之,则应增加涌(突)水危险性作为评价指标,在附录 D 中明确危险性分级及评定标准;再增加含水介质的均匀性作为评价指标,根据导水储水空隙的成因形态类型、规模和空间分布格局以及水理性质的各向异性程度划分为较均匀、不均匀、极不均匀 3 级。另外,各项评价指标对应水文地质条件复杂程度简单、中等、复杂分级的评定标准,多数是定性的,如地下水补给条件的差、一般、好;水文地质边界复杂程度的简单、较复杂、复杂;老空水及分布状况的无老空水分布,存在少量老空水且位置、范围、积水量清楚,存在大量老空水且位置、范围、积水量不清楚;疏干排水引起地面塌陷和沉降情况的疏干排水不会产生塌陷、沉降,疏干排水可能产生少量塌陷,疏干排水可能产生大量地表塌陷、沉降等。仅据此进行复杂程度分级评定受人为因素的影响较大,时有在矿业权人要求下偏低评定复杂程度等级的情况,因此对每项指标均应补充附录或通过

编制出版指南的方式,推荐评价方法、计算参数和评定标准,以增强复杂程度分级评定的客观合理性和提高量化评价水平。

3.2 勘查控制程度

在勘探阶段,常有坑、钻工程未能揭露和控制到所推测的透水边界、集中径流通道、老空积水等情况,以致于矿坑最大涌水量及突水危险性评价不够确切,这在勘探成果评审时常常引起争议。理性地分析,实践中受岩溶大水矿区地下水系统复杂性、经济合理性和技术能力制约,对岩溶大水矿区水循环过程及规律、问题和隐患的认识往往是随着勘查和开采的深入而逐步提高和完善的,并非按规范规定的基本工作量完成勘探即可一步到位。因此,在完成了规范规定的各项任务,实物工作量达到或超过规范要求,查明了矿区水文地质条件,矿坑涌水量预测计算、重大问题和隐患预测评估结果合理可信,措施建议可行有效,能满足先期开拓水平疏排水设计的需要,则勘查成果应予通过评审,但应指出存在问题,提出今后工作的建议。从长远来看,则应加强水文地质勘查技术研发,加速科技创新与进步,切实提高勘查探测精度。

鉴于高原岩溶发育的不均匀性及空间分带和分层特征,对于矿权面积和深度较大的矿区,勘探控制和采掘工程揭露证明空间上水文地质条件复杂程度变化区间和规律明确的,在进行矿产资源储量核实时,应允许一般和特别区段以及特定深度上下分别确定水文地质条件复杂程度分型。随着开采的推进水文地质条件复杂程度发生变化的,也应及时调整水文地质勘查类型。这样做有利于促使勘查控制程度、矿山水害防治工作更为切实有效、经济合理。

此外,现行规范要求区域水文地质条件研究,应确定矿区所处水文地质单元位置,详细查明矿区地下水补径排条件,区域地下水对矿区的补给关系,主要进水通道及其渗透性,确定矿区水文地质边界。但受经济社会因素制约,在探矿权或采矿权范围之外实施物、化、槽、井、坑、钻探等工作难度较大,前人勘查研究程度低或资料收集困难,这项研究常常难以完全达到规范要求。对此,业主和勘查工作单位应充分认识该项研究对矿区勘查评价和确定水文地质勘查类型的基础性和指导性作用,加强资料收集和综合研究,补充必要的调查测量、动态监测和勘

探试验等工作,使之基本达到规范要求^[40-41]。

4 结 论

(1)岩溶大水矿区水文地质边界和结构复杂,矿体主要位于侵蚀基准以下,地下水补给条件好,含水层富水性强,各向异性突出,集中径流通道发育,涌(突)水危险性大,疏排水产生地面塌陷和沉降的可能性大。水文地质勘探与预测难度大、精度差,水文地质条件复杂程度多为复杂分型。

(2)岩溶大水矿区地下水系统的复杂性主要体现在边界条件复杂、结构复杂多变、含水介质极不均匀、开采影响难以预测四个方面。实例分析表明,具体在不同的矿区每个方面对地下水系统复杂性的影响权重有所差异。

(3)对岩溶大水矿区水循环过程和规律、问题和隐患及其复杂性的认识往往是随着勘查和开采的深入而逐步逼近实际的。尚需加强区域水文地质规律研究以及勘查技术创新与进步,不断提高勘探和预测的精度。

参考文献

- [1] GB/T12719-2021. 矿区水文地质工程地质勘查规范[S].
GB/T12719-2021. Exploration specification of hydrogeology and engineering geology in mining areas[S].
- [2] AQ2061-2018. 金属非金属地下矿山防治水安全技术规范[S].
AQ2061-2018. Safety technical specifications for water prevention and control in metal and nonmetal underground mines[S].
- [3] DZ/T0342-2020. 矿坑涌水量预测计算规程[S].
DZ/T0342-2020. Specification for water yield estimation of mine[S].
- [4] GB/T14157-93. 水文地质术语[S].
GB/T14157-93. Hydrogeologic terminology[S].
- [5] 王宇. 岩溶区地表水与地下水资源及环境统一评价的流域边界划分研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(6): 823-830.
WANG Yu. Study on watershed boundary division for unified evaluation of surface water and groundwater resources and environment in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(6): 823-830.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 施玉北, 卢映祥, 李文昌, 程胜辉, 王宇, 等. 中国矿产地质志·云南卷[R]. 昆明: 云南省地质调查局, 2021.
- [9] 王宇, 侯曙光, 曾文涛, 等. 云南省矿山地质环境调查成果报告[R]. 昆明: 云南省地质调查局, 2018.
- [10] 王宇, 张贵, 柴金龙, 等. 云南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2013.
WANG Yu, ZHANG Gui, CHAI Jinlong, et al. The serious environmental geological problems and countermeasures in karst area of Yunnan Province[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2013.
- [11] 王宇, 张贵, 张华, 等. 云南省岩溶水文地质环境地质调查与研究[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- [12] 李金秀. 滇东北毛坪铅锌矿区深部开采条件下矿坑水防治研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016: 10-60.
- [13] 张亮. 毛坪铅锌矿岩溶地下水系统及结构辨识研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021: 10-40.
ZHANG Liang. Study on karst groundwater system and structure identification in Maoping lead-zinc mine, Southwest China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021: 10-40.
- [14] 项彩娟, 陈植华, 王涛, 黄荷, 孙帮涛, 王勇. 基于小波分析的滇东北毛坪铅锌矿充水水源识别[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 231-240.
XIANG Caijuan, CHEN Zhihua, WANG Tao, HUANG He, SUN Bangtao, WANG Yong. Recognition of water source of Maoping lead zinc mine in northeast Yunnan based on wavelet analysis[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(6): 231-240.
- [15] 宋煜. 云南会泽铅锌矿区深部岩溶水特征及矿井涌水预测[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016: 6-50.
SONG Yu. Lead-zinc mine deep karst water features and the mine water gushing prediction in Huize, Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016: 6-50.
- [16] 陈彦美, 陈植华, 於开炳. 南方岩溶金属矿区地下水非均质性及其防治水意义: 以福建马坑铁矿为例[J]. 地球科学, 2016, 41(4): 692-700.
CHEN Yanmei, CHEN Zhihua, YU Kaibing. Heterogeneity and water prevention of karst water system in metal mine areas in Southern China: A case study of Makeng iron mine, Fujian Province[J]. *Earth Science*, 2016, 41(4): 692-700.
- [17] 朱远峰, 崔光中, 庞景细. 北山矿区岩溶系统的划分及岩溶发育期的厘定[J]. 中国岩溶, 1991, 10(4): 327-334.
ZHU Yuanfeng, CUI Guangzhong, PANG Jingxi. Karst system in Beishan mine district and its stages of karstification[J]. *Carsologica Sinica*, 1991, 10(4): 327-334.
- [18] 李贵仁, 赵珍, 陈植华. 复杂岩溶矿区疏干条件下的地下水数值模拟: 以福建省马坑铁矿为例[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4): 382-387.

- LI Guiren, ZHAO Zhen, CHEN Zhihua. Numerical simulation for groundwater under draining condition in complex karst mining area: An example from the Makeng iron mine in Fujian Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(4): 382-387.
- [19] 宋学锋. 复杂性、复杂系统与复杂性科学[J]. *中国科学基金*, 2003, 17(5): 262-269.
- SONG Xuefeng. Complexity, complex systems and the science of complexity[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2003, 17(5): 262-269.
- [20] 范智伟. 复杂系统的时空结构与动力学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022: 10-30.
- FAN Zhiwei. Study on spatiotemporal structure and dynamics of complex systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022: 10-30.
- [21] 魏一鸣. 自然灾害复杂性研究[J]. *地理科学*, 1998, 18(1): 25-31.
- WEI Yiming. A research on the complexity of natural disasters[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(1): 25-31.
- [22] 宋长青, 程昌秀, 史培军. 新时代地理复杂性的内涵[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1204-1213.
- SONG Changqing, CHENG Changxiu, SHI Peijun. Geography complexity: New connotations of geography in the new era[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1204-1213.
- [23] 袁道先. 论岩溶环境系统[J]. *中国岩溶*, 1988, 7(3): 179-186.
- YUAN Daoxian. On the karst environmental system[J]. *Carsologica Sinica*, 1988, 7(3): 179-186.
- [24] 彭必建, 李四堂. 个旧矿区水文地质现状及地下水保护与利用[J]. *云南地质*, 2014, 33(4): 594-600.
- PENG Bijian, LI Sitang. The present hydrogeology and protection, utilization of underground water in Guijiu orefield[J]. *Yunnan Geology*, 2014, 33(4): 594-600.
- [25] 崔灿文. 云南西邑铅锌矿复杂岩溶充水矿床涌水量预测[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018: 42-113.
- CUI Canwen. Prediction of water inflow of complex karst water-filled deposit in Xiyi lead-zinc mine, Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018: 42-113.
- [26] 赵雪琼, 程先锋, 李广涛, 王明伟, 齐武福. 滇西某铅锌矿床矿坑涌水量预测与分析[J]. *地下水*, 2011, 33(6): 15-17, 67.
- [27] 何智, 杨苏焕. 云南保山市金厂矿区矿坑充水因素浅析[J]. *云南地质*, 2016, 35(2): 292-295.
- HE Zhi, YANG Suhuan. A preliminary analysis of water filling factor in pit of Jinchang orefield in Baoshan, Yunnan Province[J]. *Yunnan Geology*, 2016, 35(2): 292-295.
- [28] 陈思颖, 张颖. 滇西红牛铜矿区巷道水文地质特征浅析[J]. *云南地质*, 2021, 40(4): 484-489.
- CHEN Siying, ZHANG Ying. A preliminary analysis on hydrogeological feature in tunnel of Hongniu Cu orefield in W Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2021, 40(4): 484-489.
- [29] 台宁宁. 云南建水县挣钱洞铅锌矿区岩溶发育特征及 1800m 中段涌水量预测[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020: 27-88.
- [30] 段乔文, 吴继明, 冷吉诚. 滇东南高原岩溶盆地普阳煤矿的深层涌水趋势分析[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 189-197.
- DUAN Qiaowen, WU Jiming, LENG Jicheng. Trend of water inrush at depth in the Puyang coal mine, karst basin area, south-eastern Yunnan plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 189-197.
- [31] 王宇, 康晓波, 张华, 王燕. 昆明地热田的成因与外延[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(2): 125-133.
- WANG Yu, KANG Xiaobo, ZHANG Hua, WANG Yan. The genesis and extension of Kunming geothermal field[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(2): 125-133.
- [32] 李灿辉, 董绍华, 邹绍丹, 徐兴业. 云南香格里拉市热林铅锌矿水文地质条件分析[J]. *云南地质*, 2020, 39(1): 98-102.
- LI Canhui, DONG Shaohua, ZOU Shaodan, XU Xingye. An analysis of the hydrogeological conditions in Relin Pb-Zn deposit of Xianggelila[J]. *Yunnan Geology*, 2020, 39(1): 98-102.
- [33] 虞慧, 莫美仙, 庞君, 杨光亮. 云南省威信县李子埂煤矿突水与龙洞坝泉断流原因分析[J]. *矿业安全与环保*, 2014, 41(1): 102-105.
- YU Hui, MO Meixian, PANG Jun, YANG Guangliang. Cause analysis on water inrush in Lizigeng coal mine and Longdongba spring cut-off in Weixin county of Yunnan Province[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2014, 41(1): 102-105.
- [34] 和祥, 董学兰, 杨超, 刘鹏, 薛博强. 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.
- HE Xiang, DONG Xuelan, YANG Chao, LIU Peng, XUE Boqiang. Characteristics of karst development and water abundance of the Beiya gold deposit in Heqing county of Yunnan[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(6): 1173-1182.
- [35] 董书宁, 虎维岳. 中国煤矿水害基本特征及其主要影响因素[J]. *煤田地质与勘探*, 2007, 35(5): 34-37.
- DONG Shuning, HU Weiyue. Basic characteristics and main controlling factors of coal mine water hazard in China[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2007, 35(5): 34-37.
- [36] 虎维岳, 田干. 我国煤矿水害类型及其防治对策[J]. *煤炭科学技术*, 2010, 38(1): 92-96.
- HU Weiyue, TIAN Gan. Mine water disaster type and prevention and control countermeasures in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(1): 92-96.
- [37] 缪钟灵. 岩溶矿区突水水文地质探讨[J]. *化工矿山技术*, 1979(3): 21-26, 14.
- [38] 袁道先. 论岩溶水的不均匀性[C]//岩溶地区水文地质及工程地质工作经验汇编(第二辑). 北京: 地质出版社, 1978: 1-19.
- [39] 任美镔, 刘振中, 王飞燕, 等. 岩溶学概论[M]. 北京: 商务印书馆, 1983.
- [40] 罗明明, 尹德超, 张亮, 陈植华, 周宏, 韩兆丰, 史婷婷. 南方岩溶含水系统结构识别方法初探[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(6): 543-550.
- LUO Mingming, YIN Dechao, ZHANG Liang, CHEN Zhihua, ZHOU Hong, HAN Zhao Feng, SHI Tingting. Identifying methods of karst aquifer system structure in South China[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(6): 543-550.

logica Sinica, 2015, 34(6): 543-550.

[41] 王宇. 南方岩溶地区水文地质调查的问题与改进措施[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(4): 627-635.

WANG Yu. Problems and their countermeasures in a hydrogeological survey of karst areas in South China[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(4): 627-635.

Study on complexity of groundwater systems in the karst mining areas with abundant water on the Yunnan plateau

WANG Yu^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming,

Yunnan 650216, China; 3. Yunnan Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract A mining area with abundant water usually refers to the mine with a pit water inflow greater than $10,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. In view of the unevenness of the water-richness of karst aquifers and the poor accuracy of predicting water inflow, the definition of a mining area with abundant water should not be confined to the specific values of water inflow. Instead, it should be defined mainly based on the conditions of high water-richness, abundant recharge and pipeline flow of aquifers. According to the standard of hydrogeological terminology, a hydrogeological unit is defined as a groundwater system characterized by uniform recharge boundaries and conditions of recharge, runoff, and discharge. The groundwater systems described in this paper belong to the same object and category. The Yunnan plateau refers to the western section of the Yunnan-Guizhou Plateau, and, in a broad sense, encompasses Yunnan Province, which covers an area of $39.4 \times 10^4 \text{ km}^2$. The karst contiguous areas on the Yunnan plateau are mainly located in the east area of 102°E and north of the Yuanjiang river in eastern Yunnan, and the northwest and the west from Baoshan to Cangyuan. These karst contiguous areas total $11.09 \times 10^4 \text{ km}^2$, corresponding to the upper Yangtze massif, South China massif, Sanjiang orogenic belt and Tengchong orogenic belt, with superior mineralization conditions and abundant mineral resources. Historically, minerals in karst areas are primarily exploited above the erosion base. The mountainous terrain typically facilitates natural drainage, which has led to a lack of emphasis on and research into the complexity of groundwater systems in mining areas. With the growing economic and social demands, the exploration areas and mining areas are continually expanded, and are increasingly extending to deeper areas. Some deposits with abundant water that were previously challenging in exploitation have been developed. This shift has transformed hydrogeological conditions, evolving from simple to complex or even extremely complex scenarios. As a result, the challenges associated with mine water control have intensified, and the requirements for exploration have correspondingly increased. Therefore, it is both necessary and urgent to study the complexity of groundwater systems in karst mining areas with abundant water, enhance the research level, and strengthen measures for exploration control.

The complexity of a system encompasses the characteristics such as disorder, sudden change, detection errors, and inference errors, which arise from the pluralism, nonlinearity, and randomness of its constituent elements, organizational structures, influencing factors, and their interrelations and interactions with the environment. Based on existing research and exploration findings, the complexity of groundwater systems in karst mining areas with abundant water is mainly reflected in the intricate and variable characteristics of system boundary conditions, hydrogeological structures, properties of water-bearing media, and the effects of mining activities.

In karst areas, the geological processes of mineralization and subsequent transformation are highly intense, and the geological conditions are exceedingly complex, no matter whether the deposits are endogenous, exogenous, or metamorphic. The complexity of boundary conditions of groundwater systems in karst mining areas with abundant water is mainly manifested in the irregularity of topographic watersheds, the multistage nature of erosion datum, the diversity and invisibility of genesis-tectonic types of geological boundary, and the variability of boundary hydrodynamic properties. The complexity of groundwater system structure is mainly manifested in the diversity and

variability of karst aquifers, non-soluble rock aquifers (bodies), primary and secondary structural properties and their mutual relationship. The complexity of the properties of water-bearing media is mainly manifested in karst aquifers, which are not only strongly developed but also exhibit significant variability. This variability includes the direction, scale, density, and connectivity of karst caves, conduits and fissures. The characteristics of water richness, permeability, and hydraulic connections also display prominent anisotropy. The influence of mining engineering and mining activities on groundwater systems in mining areas is huge and far-reaching. In addition, the design of mine shafts, mining pits, and development engineering often requires real-time adjustments in response to changes in ore bodies and mining technical conditions during the mining process. The disturbances and impacts of mining engineering and activities on the water environment and groundwater systems are also difficult to predict accurately. These influences have increased the complexity of groundwater systems in mining areas to varying degrees.

This paper systematically examines the complexity of groundwater systems in karst mining areas with abundant water. It provides a detail analysis of typical examples, along with a visual representation of the distinctive characteristics of these systems. This paper discusses the complexity of groundwater systems in mining areas with abundant water. It addresses the challenges encountered in hydrogeological exploration within mining areas. The discussion focuses on optimizing and adjusting the evaluation indices for the complexity of hydrogeological conditions as outlined in current specifications. Furthermore, it emphasizes the need for quantifying evaluation standards and establishing a reasonable assessment scale for the exploration control of complex hydrogeological conditions in mining areas. Besides, the paper offers recommendations for revising and improving the existing specifications.

Key words hydrogeology, karst mining area, groundwater system, complexity, water yield of mine, degree of exploration

(编辑 张玲)