

清平磷矿深部延伸接替工程水文地质条件暨涌(突)水危险性探讨

姚毅^{1,2*}, 何良^{1,2#}, 石亮^{1,2#}, 魏春吉^{1,2}, 谢意^{1,2}, 陈元喜^{1,2}, 贺天全^{3,4}, 邹德林^{1,2}, 周克昌^{1,2}, 乔喜旦^{3,4}, 邓志勇^{3,4}

¹德阳昊华清平磷矿有限公司, 四川 德阳

²德阳昊华清平磷矿有限公司技术中心, 四川 德阳

³四川省化工地质勘查院, 四川 成都

⁴四川省第二地质大队, 四川 成都

收稿日期: 2023年9月11日; 录用日期: 2023年10月11日; 发布日期: 2023年10月20日

摘要

本研究旨在解决清平磷矿深部延伸接替工程中关于1017米胶带斜井水文地质条件、斜井涌(突)水量预测和涌(突)水机制等方面的一些薄弱环节。通过研究, 我们可以了解深部延伸工程胶带斜井主要充水含水层岩性及其富水性, 查明可能的充水通道以及其突水强度, 并预测地下水涌水量, 同时还可以探测涌(突)水发生机制问题。这些研究结果将为深部接替工程提供有关矿床水文地质的依据, 并对清平磷矿深部延伸接替工程矿井水害防治及深部磷矿安全开采具有重要的科学意义。同时, 本研究的方法和结果也可为类似矿区的水文地质研究提供借鉴和参考。

关键词

清平磷矿, 水文地质条件, 延伸接替工程, 涌水量预测, 深部磷矿开采

Discussion on Hydrogeological Conditions and Water Inrush (Outburst) Hazard of the Deep Extension and Replacement Project of Qingping Phosphate Mine

Yi Yao^{1,2*}, Liang He^{1,2#}, Liang Shi^{1,2#}, Chunji Wei^{1,2}, Yi Xie^{1,2}, Yuanxi Chen^{1,2}, Tianquan He^{3,4}, Delin Zou^{1,2}, Kechang Zhou^{1,2}, Xidan Qiao^{3,4}, Zhiyong Deng^{3,4}

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 姚毅, 何良, 石亮, 魏春吉, 谢意, 陈元喜, 贺天全, 邹德林, 周克昌, 乔喜旦, 邓志勇. 清平磷矿深部延伸接替工程水文地质条件暨涌(突)水危险性探讨[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(10): 1184-1195.

DOI: 10.12677/ag.2023.1310113

¹Deyang Haohua Qingping Phosphate Mine Co., Ltd., Deyang Sichuan

²Technical Center of Deyang Haohua Qingping Phosphate Mine Co., Ltd., Deyang Sichuan

³Sichuan Provincial Institute of Chemical Geological Exploration, Chengdu Sichuan

⁴Sichuan Provincial Second Geological Brigade, Chengdu Sichuan

Received: Sep. 11th, 2023; accepted: Oct. 11th, 2023; published: Oct. 20th, 2023

Abstract

This study aims to address some weak aspects regarding the hydrogeological conditions, water influx prediction, and mechanism of water influx in the 1017-meter tape inclined shaft of the Qingping phosphate mine deep extension replacement project. Through this research, we can understand the lithology and aquifer characteristics of the main water-bearing layer in the deep extension project, identify possible water channels and their water influx intensity, and predict groundwater influx. Additionally, we can investigate the mechanism of water influx occurrence. These research findings will provide a basis for the hydrogeology of the deposit in the deep replacement project and are of significant scientific importance for the prevention and control of mine water hazards and safe mining of deep phosphate mines in the Qingping phosphate mine. Furthermore, the methods and results of this study can serve as a reference for hydrogeological research in similar mining areas.

Keywords

Qingping Phosphate Mine, Hydrogeological Conditions, Extension Replacement Project, Water Influx Prediction, Deep Phosphate Mining

Copyright © 2023 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

在当前百年未有之大变局的深刻变革和复杂调整的国际背景下，磷矿资源开发已上升到国家战略层面，成为新一轮全球资源战略的焦点，因而磷矿资源勘查需要从浅部资源向深部资源勘查进军。目前清平磷矿燕子岩矿段 900 m 和邓家火地矿段 950 m 以上浅部的资源储量已基本消耗完，因此对 950 m、900 m 以下深部矿体的开发已迫在眉睫，清平磷矿已于 2015 年启动矿山深部的接替延伸工程项目。

随着清平磷矿深部延伸接替工程开采深度不断向深部延伸，磷矿在开采巷道掘进过程中面临的矿床水文地质条件、工程地质环境也越来越复杂，如何减少或解决磷矿巷道掘进过程中涌(突)水事故的发生，成为亟待解决的研究课题。因此，研究清平磷矿深部接替工程水文地质条件及斜井涌(突)水量预测、涌(突)水机制分析问题已迫在眉睫、刻不容缓。这些问题已成为制约深部延伸接替工程部署和实现深部探矿、采矿突破的焦点和难点。

本文针对清平磷矿深部延伸接替工程 1017 米胶带斜井水文地质条件、斜井涌(突)水量预测、涌(突)水机制等研究的薄弱环节，查明深部延伸工程胶带斜井主要充水含水层岩性及其富水性，查明可能的充水通道及其突水强度，预测地下水涌水量，探测涌(突)水发生机制问题，为深部接替工程提供矿床水文地质依据，该研究无疑对清平磷矿深部延伸接替工程矿井水害防治及深部磷矿安全开采均具有重要科学意义。

2. 深部延伸接替工程水文地质条件分析

2.1. 研究区可溶岩分布、出露格局

岩溶作用的发生、发展和结果是受岩石可溶性、透水性、水的溶蚀力和水的流动等各种因素的综合控制,并受到当地一系列自然因素(包括气候的、水文的、地质的)的影响和制约。由于各种影响因素是相互联系、相互包含的,通过岩体可溶性、地下渗流场和地下水溶蚀力的有机结合,最终表现为一定的岩溶形式和发育程度,三者不同的结合与匹配则表现为不同的岩溶现象。

研究区位于可溶岩分布地段,出露的可溶岩地层[1]主要包括震旦系灯影组(Z_{bdn})、泥盆系沙窝子组(D_s)、二叠系栖霞与茅口组(P_{1q+m}),非可溶岩在本区分布与可溶岩相当,主要出露的地层为震旦系观音崖组(Z_g)、寒武系清平组(C_{qp})、泥盆系观山雾组(D_g)、石炭系岩关组(C_{1y})、二叠系梁山组(P_{1l})、吴家坪组(P_{2w})、三叠系飞仙关组(T_{1f})及嘉陵江组一段(T_{1j}^1)。研究区可溶岩分布见图1,从图中可以得知燕子岩矿段可溶岩分布较为普遍。

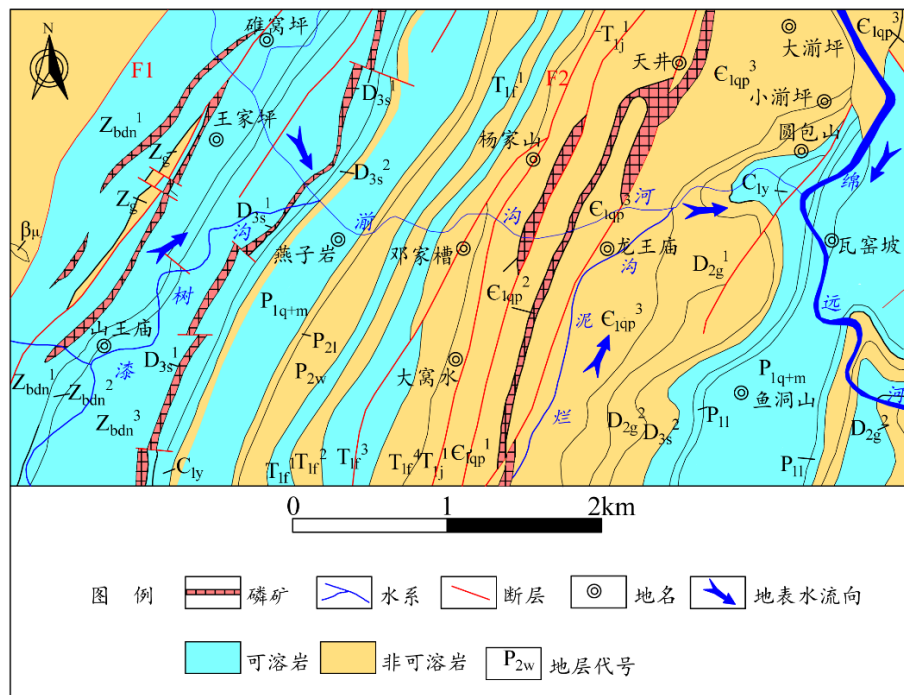


Figure 1. Shows the distribution pattern of soluble lava in Qingping phosphate mining area
图1. 清平磷矿区可溶岩分布格局图

2.2. 研究区地下水类型及含水岩组划分

基岩内部各类空隙的成因、形态、大小和发育程度,都能决定地下水类型及富水程度。根据地下水赋存条件、水理性质、水力特征等条件因素,以岩性为基础,划分出该研究区的含水层、隔水层及地下水类型。

2.2.1. 研究区地下水类型

按含水岩组容储水空间特征将矿区的地下水类型划分为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和碳酸盐岩岩溶水[1] [2]。

a) 松散岩类孔隙水(Q^{al+pl})

由第四系砂、卵石及粘土、亚粘土组成，沿绵远河及其支流沟谷两侧或局部山脊缓坡地带分布，泉水流量 0.08~13.05 l/s，水质类型为 $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}^{2+}$ 或 $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 型。

b) 基岩裂隙水

由震旦系观音崖组(Z_g)和三叠系下统嘉陵江组一段(T_{1j}^1)组成，观音崖组岩性为一套砂岩及变质砂岩。节理裂隙和风化裂隙较发育，赋存裂隙水。统嘉陵江组由中层状粉砂岩及薄层状粉砂质泥岩组成，夹少量白云岩。

c) 碳酸盐岩类岩溶水

1) 溶蚀裂隙(溶孔)岩溶水

由震旦系(Z)、泥盆系(D)厚层状微~中晶碳酸盐岩类组成，以白云岩为主，出露于大水闸复式背斜两翼，地表风化裂隙发育，仅偶见小型不连通的溶洞。深部以构造裂隙为主，沿裂隙面偶见溶蚀小孔。泉水流量 0.001~26.13 l/s，最大可达 50.008 l/s。单位涌水量 0.0010~0.59 l/s·m，渗透系数 0.00020~2.11 m/d。富水性不同区域有异，由弱富水到强富水，水质类型为 $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 型水。

2) 溶蚀裂隙(溶洞)岩溶水

由二叠系(P)、三叠系(T)碳酸盐岩类组成，岩性以灰岩、白云质灰岩为主。但由于区内岩层一般产状较陡，水文网发育，沟谷深切，加之其间具含泥质较重的碎屑岩层的隔挡，一般发育程度较弱，规模较小，连通性较差。分布高程多在 1859.3~1777.8 m 以上，泉水流量 0.001~38.66 l/s，个别可达 88.6~100 l/s，弱富水到强富水。水化学类型属或 $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 型水或 $\text{HCO}_3^- \text{-Ca}^{2+}$ 型水。该类地下水主要分布在矿区外围尖山包 - 大梁子山脊一带，地表发育溶洞、溶斗、落水洞等岩溶地貌。

2.2.2. 含水层与隔水层划分

1) 含水层

研究区内主要含水层按岩性分属二大岩系：变质岩和沉积岩的碳酸盐岩类，其赋水特性具明显的差异性。而碳酸盐岩类中又因其岩石成分中 CaO 、 MgO 的含量多少和溶蚀方式的差异进一步细分为以白云岩为主的溶蚀裂隙(孔)含水层和以石灰岩为主的溶蚀裂隙(洞)含水层。主要含水地层为震旦系观音崖组(Z_g)、灯影组(Z_{bdn})、寒武系清平组(C_{1qp})、泥盆系观雾山组(D_{2g})、沙窝子组(D_{3s}^2)、石炭系岩关组(C_{1y})、二叠系栖霞茂口组(P_{1q+m})、上统吴家坪组(P_{2w})、三叠系下统飞仙关组一段和三段(T_{1f}^1 、 T_{1f}^3)、嘉陵江组一段(T_{1j}^1)。

2) 隔水层

由泥盆系上统沙窝子组下段(D_{3s}^1)、二叠系下统梁山组(P_{1l})、上统龙潭组(P_{2lt})、三叠系下统飞仙关组(T_{1f}) 2 段、4 段各层组成。除 D_{3s}^1 为磷块岩外，其余各层的岩性则以泥岩、页岩、粘土岩为主，层位稳定连续，隔水性能良好。

2.3. 地下水补径排条件及动态变化特征

研究区位于褶皱型山区，断裂构造和节理裂隙发育，含水层的露头条件好，地表植被茂密，受采矿影响，局部有裂缝发育，为大气降水的入渗提供了有利条件。研究区内主体的大型纵向断裂以逆冲阻水为主，纵向断裂间所夹持地带一般无水力联系，补、径、排各成系统。加之含、隔水岩组呈互层状的组合，水文网基本横切构造线，决定了地下水在远处接受补给后一般循层运移，至沟谷深切的低洼处和主干河道排泄，或以下降泉的形式出露于含隔水岩组的接触地带。以大气降水入渗为主的近区补给，径流途径较短，向水文网迅速排泄，水循环的交替剧烈是本区地下水运移的主要特色，研究区地表水流动见图 2。研究区地下水的总体径流、排泄条件较好，地下水径流沿地层走向方向，自南西向北东，排泄于地表河流。

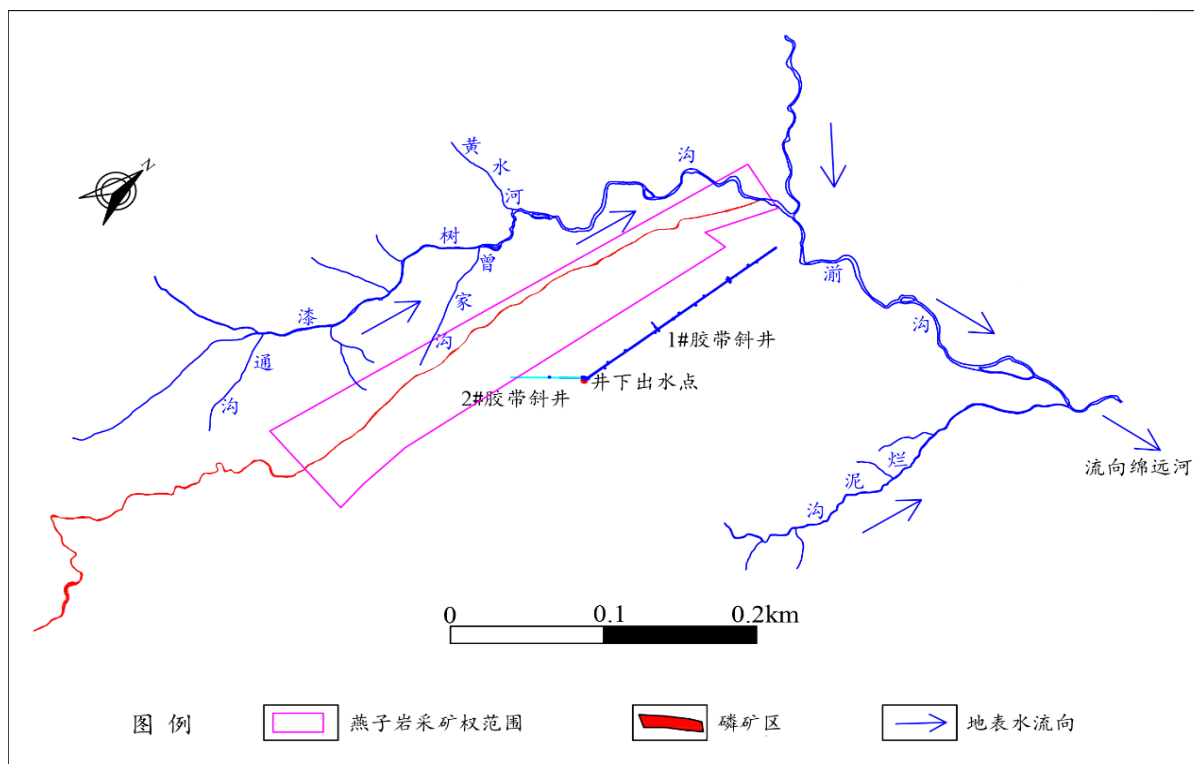


Figure 2. Represents the schematic diagram of surface water flow in Qingping phosphate mining area
图 2. 清平磷矿区地表水流动示意图

2.4. 研究区水化学研究分析

由于地下水赋存情况及交替条件的不同,导致各类含水层的水化学特征同样有明显的差异[3] [4] [5]。因此可以运用水文地球化学分析法,根据寻找到各类含水层的水质变化特征与各个指标的空间分布特征和在各含水层的差异,从而准确识别突水水源。本次研究涉及地表水、矿井水,为了研究清楚矿井涌水来源、矿井涌水与地表水的相互关系,综合地质条件,选取 5 组水样进行测试分析,采样点分布见图 3,具体测试结果展示于表 1。

Table 1. Presents the water chemical parameters of the water samples
表 1. 水样水化学参数

项目	样品编号					
	QPS01	QPS02	QPS03	QPS04	QPS05	QPS06
简分析数据(除 pH 为无量纲外,其余项目单位均为 mg/L)						
pH	7.42	7.65	7.73	8.04	8.01	7.58
Ca ²⁺	23.711	106.292	50.693	82.581	40.822	59.278
K ⁺ + Na ⁺	3.151	2.737	5.612	3.657	14.352	7.636
Mg ²⁺	3.948	31.759	33.726	38.195	5.862	6.214
Cl ⁻	0.362	<0.100	7.955	1.446	0.145	0.362
SO ₄ ²⁻	33.327	174.479	160.756	221.530	36.856	49.011
HCO ₃ ⁻	72.468	268.736	120.780	169.092	150.975	169.092

Continued

TDS	104	450	319	432	170	207
游离 CO ₂	8.17	21.79	10.89	5.45	2.72	16.34
总硬度	87.81	396.16	265.47	363.48	126.20	173.57
永久硬度	28.41	175.88	166.47	224.88	7.40	34.97
暂时硬度	59.40	220.28	99.00	138.60	118.80	138.60
总碱度	59.40	220.28	99.00	138.60	118.80	138.60
水化学类型	HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Ca	SO ₄ -Ca	SO ₄ -Ca	HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Ca

根据简分析数据, 研究区内地表水 pH 介于 7.42~7.73 范围内, pH 随出露位置不同而有所差异, 根据表 1, 其中湔沟河、烂泥沟和棕树岩沟的地表水样 pH 分别为 7.42、7.65、7.73, 而漆树沟上游和 1#胶带斜井涌水处的水样 pH 分别为 8.04、8.01, 按 PH 分类标准, 所取水样为中性偏弱碱性水。QPS04 为漆树沟上游溪沟水, pH 推测可能受闭坑矿井出水影响。QPS06 和 QPS05 同为 1#胶带斜井涌水水样, 但 QPS06 为矿井涌水处理前期注浆后不久所取水样, QPS05 为矿井涌水处理后期注浆后一段时间所取水样, 受注浆影响, 矿井涌水的 pH 有所升高, 故而 QPS05 水样呈现弱碱性, QPS06 水样为中性水。

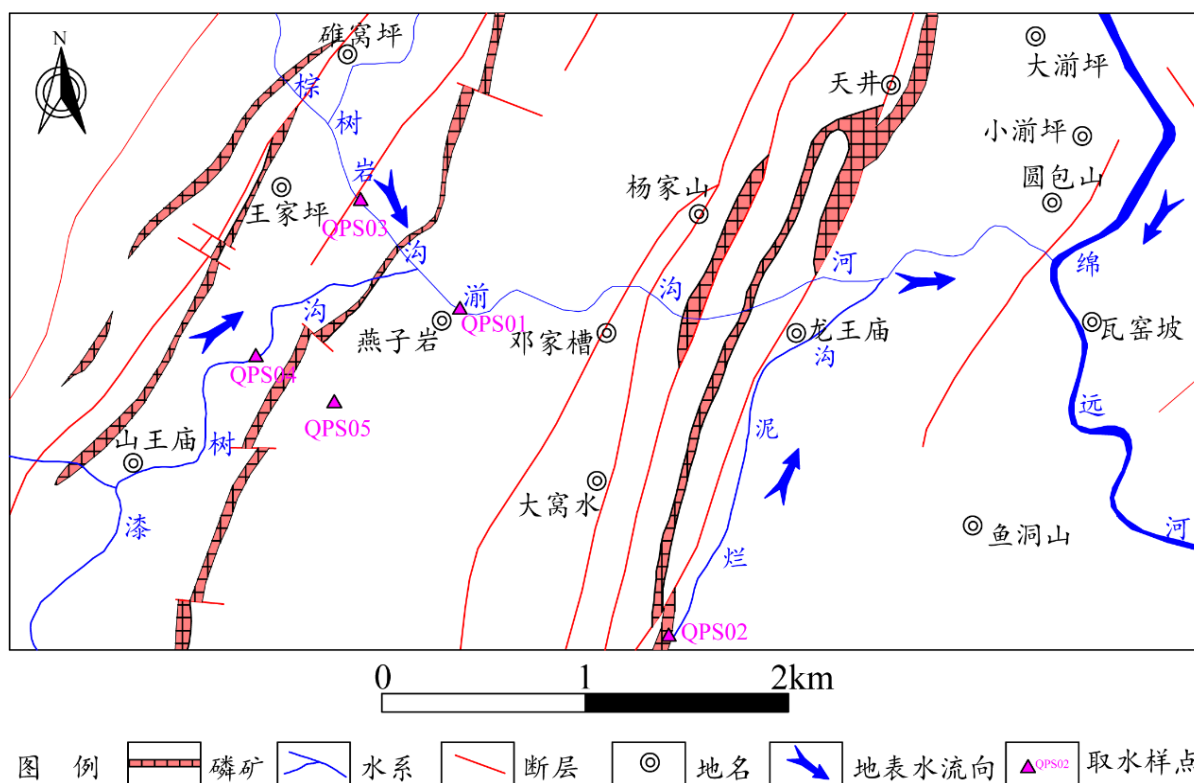


Figure 3. Shows the distribution map of the sampling points for water samples

图 3. 水样取水点位分布图

研究区各类水样 TDS 介于 104 mg/L~450 mg/L 之间, 均为淡水, 说明无论是地表水亦或是矿井水, 水的径流路径和时间短, 结合矿区矿井水和地表水的补给来源均是大气降雨, 反映出降雨后快速补给地表水和矿井水的特征。根据表 1, 湔沟河水样和矿井涌水水样的水化学类型与特征相近, 两者处于同一

套可溶岩地层中，都来源于大气降水的补给。其中 QPS02、QPS03 和 QPS04 的 SO_4^{2-} 离子含量较高，造成这种异常的原因可能受矿井废水的影响。

据水样 Piper 三线图所示(图 4)，矿区地表水阳离子主要为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ，高含量的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与采样点位于碳酸盐岩地层相关， Cl^- 含量低；阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主， HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 离子的含量高低反映了岩石受溶滤作用的强度。

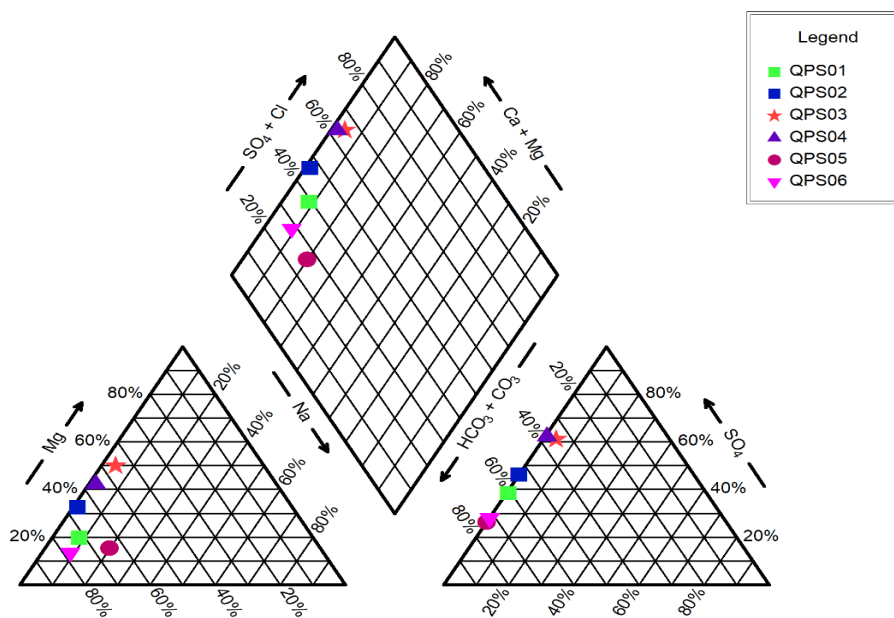


Figure 4. The Piper trilinear diagram of water samples
图 4. 水样 Piper 三线图

本次研究中对 1#胶带斜井矿井内涌水采样进行 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测试，样品在野外采集后及时送至国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心，采用 L2130-i 型液态水同位素分析仪进行同位素检测，取样点信息及检测结果见表 2。

Table 2. Presents the sampling information for isotopes in the mining area
表 2. 矿区同位素取样信息

编号	水样类型	取样高程(m)	取样地点	地层	$\delta\text{D}_{(\text{V-SMOW})}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{(\text{V-SMOW})}\text{‰}$
QPS05	矿井水	850	1#胶带斜井涌水处	P ₁ q + m	-66.5	-10.26

根据表 2 的测试结果绘制 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图(图 5)，本次分析以四川盆地地区大气降雨线 $\Delta d = 7.17\delta^{18}\text{O} + 2.68$ 为基准[6]，据图 5，水样点分布在降雨线附近，表明 1#胶带矿井涌水来源为大气降雨，因矿区处于四川盆地西部的内陆，来自东亚季风、南亚季风及青藏高原季风的水汽输送距离长， ^2H 同位素相对富集， ^{18}O 同位素相对贫化，致使 QPS05 水样位于四川盆地地区降水线的上方。

大气降雨的氢氧同位素组成具有高程效应，降雨中同位素含量因高度增加而减少，根据中国科学院贵阳地球化学研究所于津生等人[7]对我国川、黔、藏一带的同位素与高程关系进行研究，得出了如下关系式

$$\delta^{18}\text{O} = -0.0031 h - 6.19$$

式中： h 为采样点的补给高程(m)；

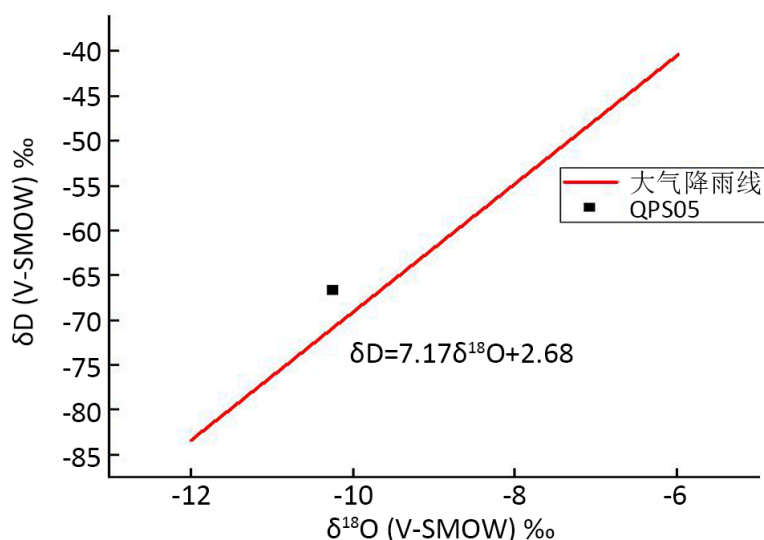


Figure 5. δD - $\delta^{18}\text{O}$ relationship diagram of water samples from outburst water in inclined shaft 1# with adhesive tape

图 5. 1#胶带斜井涌水水样 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图

根据采样点的同位素测试结果,再结合上式计算得 QPS05 的补给高程约为 1996 m,与矿区南部地表高程相近。因此,由 $\delta^{18}\text{O}$ 推测的补给高程也说明矿井涌水来源为大气降雨。降雨后,通过溶蚀裂隙、节理及断层破碎带等通道入渗补给地下水,待矿井涌水条件具备时,即造成矿井的淹井事故。

3. 斜井涌突水危险性评价

3.1. 斜井充水条件

矿区斜井的充水条件可分为充水水源与充水通道,水源是与矿区斜井有联系的水体,通道是水源与矿段斜井联系的方式,两者统一和有机结合才能构成斜井充水,因此分析斜井的充水水源和查明斜井的充水通道,对研究矿段斜井涌水危险性预测评价有重要意义[8] [9] [10]。

3.1.1. 充水水源

清平磷矿燕子岩矿段 1#胶带斜井西东两侧分布的梁山组页岩隔水层和龙潭组页岩铝土岩隔水层,将斜井与采空区、坑道系统及地表水系相隔离,因此,斜井的充水水源主要为大气降水和地下水。大气降水是 1#胶带斜井的直接充水水源,斜井处于二叠系栖霞-茅口组的灰岩中,地势陡峻,地层陡倾,水文网发育,灰岩裸露。降雨后,大气降水一部分以坡面流的方式快速排泄于地表溪沟,一部分通过溶隙、溶孔快速入渗补给灰岩转为地下水从而对斜井形成充水影响,斜井涌水量动态变化与降雨量密切相关,在雨季地下水位会抬升,斜井涌水量增大。斜井所在区域地表没有大型岩溶地貌,但层面裂隙、溶孔、溶隙发育,岩溶地下水较为丰富,地下水对斜井产生充水影响主要表现在储于溶隙、溶孔的岩溶裂隙水不均匀地下渗、径流。

3.1.2. 充水通道

研究区斜井所在地层未发现泉点、溶洞,推测没有大型管道发育。1#胶带斜井的充水通道应为掌子面前方的构造断裂带,该斜井施工至 K1+573 位置时遇地质构造充填物,此构造为一位于侵蚀面上部的断层破碎带,充填体干燥呈胶状,降雨后,雨水快速入渗至断裂带,并带走其内的充填物,给斜井带来涌水灾害。从斜井洞口至斜井掘进方向约 900 m,井壁较为干燥,渗水现象不明显;从 900 m 处至斜井

出水点位置, 此段距离掌子面相对较近, 受构造影响, 裂隙发育, 井壁见水呈点滴状、淋雨状渗出。

3.2. 斜井涌突水机理分析

清平磷矿深部延伸接替工程 1#胶带斜井从 K1+573 开始往前为一构造破碎带, 富水性好, 天然条件下赋存了大量地下水, 形成了一大型静储量含水构造。在岩溶水和水压的持续作用下, 破碎带内的充填物质不断发生松散软化。在暴雨后雨水由导水断层、裂隙进入冲刷溶洞充填体, 导致地下水位升高、水压增大, 同时斜井开挖为破碎带水体下覆松散体创造了滑移空间, 高水压击穿堵塞的泥土后形成涌水[11]。涌水发生后, 由于破碎带导水性好, 地下水快速涌向斜井, 造成地下水位降低(图 6)。

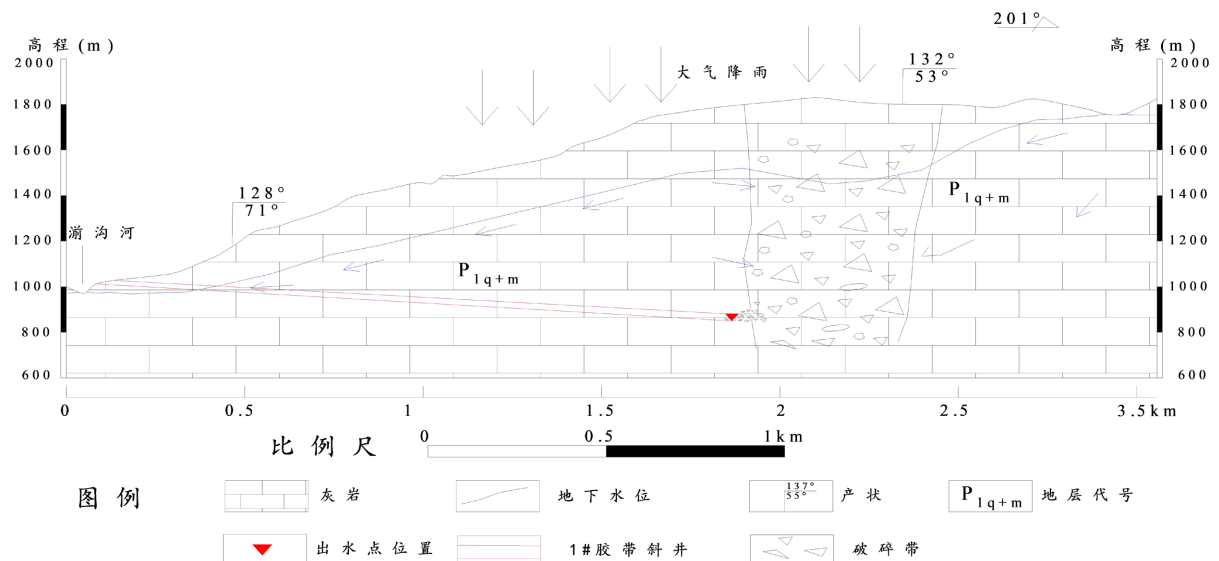


Figure 6. Analysis diagram of the formation of outburst water in inclined shaft
图 6. 斜井涌突水形成分析图

3.3. 斜井掌子面静水压力

根据 1#胶带斜井的纵剖面地下水位线的情况, 可以看出斜井除洞口位于地下水位之上, 其余均位于地下水为之下, 如图 6 所示。采用下式进行斜井静水压的计算。

$$P = \gamma \cdot H \quad (4)$$

式中: P —1#胶带斜井所处的静水压(kpa);

γ —水的容重(kN/m^3);

H —潜水位至斜井底板的高度(m);

根据上式, 将 γ 取为 10, 斜井掌子面高程为 850 m, 地下水位为 1600 m, 故 H 为 750 m, 因此通过计算可知斜井静水压为 7500 kpa (7.5 Mpa)。

3.4. 斜井涌水量预测与分析

矿井涌水量计算的解析法是以地下水动力学理论为基础, 在分析掌握矿区水文地质条件基础上, 用数学方法建立解析公式, 进行矿井涌水量计算[12] [13] [14]。它适用于任何井巷和巷道系统, 以及专门性的疏干排水工程的涌水量计算, 是目前矿井涌水量计算中应用最广泛的一种方法。在地下水动力学中, 主要有两种理论: 一是以裘布依公式为代表的稳定流理论, 二是以泰斯公式为代表的非稳定流理论[15]。

本文结合研究区的水文地质条件、地形地貌、地质构造,对1#胶带斜井拟采用解析法中以裘布依稳定流(倾斜巷道)公式和降雨入渗法进行涌水量预测计算。

3.4.1. 计算公式的确定

对水平巷道涌水量进行预测时,可将水平巷道看成水平集水工程。因此,利用地下水向水平集水工程运动的公式计算。

潜水完整水平巷道(图7)涌水量计算可采用下式

$$Q = LK \frac{H^2 - h^2}{R} \quad (1)$$

式中: L ——水平巷道的长度(m);

K ——含水层渗透系数(m/d);

H ——潜水水位(m);

h ——井中出水地段积水高度(m) (井筒中不允许有积水,故 $h = 0$);

R ——影响半径(m)。

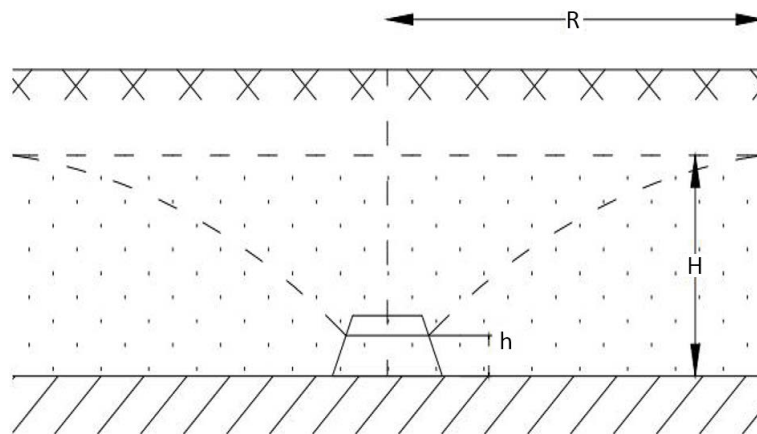


Figure 7. Schematic diagram of a complete horizontal tunnel for diving
图7. 潜水完整水平巷道示意图

通过前面的分析可以得知该斜井的充水条件较为简单,充水来源为大气降水,斜井围岩为二叠系栖霞组与茅口组灰岩,大部分位于地下水位以下,含水层为潜水含水层;由于1#胶带斜井属于倾斜巷道,倾斜角度小于 45° ,巷道涌水量的计算可以按水平巷道公式(1)计算,此时,水平巷道计算公式中的 L 值,取巷道水平投影的长度 $L = L_0 \cos \alpha$, (L_0 为倾斜巷道的长度, α 为巷道倾角),含水层厚度取最大值的一半。1#胶带斜井涌水量计算公式如下:

$$Q = L_0 \cos \alpha K \frac{1}{4} \frac{H^2 - h^2}{R} \quad (2)$$

式中: Q 为井筒涌水量(m^3/d); K 为含水层渗透系数(m/d); H 为初始水头(m); h 为井中出水地段积水高度(m) (井筒中不允许有积水,因此, $h = 0$); R 为影响半径。

同时,还采用降雨入渗法来计算斜井的涌水量,公式如式3所示。

$$Q = 2.74\alpha \cdot W \cdot A \quad (3)$$

式中: Q ——大气降雨补给量(m^3/d);

- α ——降雨入渗系数;
 W ——多年平均降水量(mm);
 A ——汇水面积(km²);

3.4.2. 计算参数的确定

a) 渗透系数(K)

根据前期的钻孔抽水资料, 结合含水层水文地质特征确定, 本次确定 $K = 0.5$ m/d。

b) 巷道投影长度($L_0 \cos \alpha$)

在 1#胶带斜井平面图上量得其投影长度为 1558.86 m。

c) 潜水水头 H

H 取为 1#胶带斜井出水点高程与地下水位之间的高程差, 为 750 m。

d) 影响半径 R

根据无压时的影响半径计算公式 $R = 2S\sqrt{KH}$, S 为设计水位降深。高压水冲毁保护层在掌子面形成突涌水, 形成了一个新的排泄通道, 但地下水位不会降低到掌子面高程。根据经验, 在可溶岩地层(无大型管道发育)中开挖地下坑道, 水位降深约下降三分之一含水层厚, 因此, 本次 S 取 250 m, 故计算 R 为 9682.5 m。

e) 降雨入渗系数 α

参考同类地层的降雨入渗系数取值, α 取 0.2。

f) 汇水面积 A

1#胶带斜井两侧隔水边界为二叠系上统梁山组和二叠系中统龙潭组, 故以 1#胶带斜井出水点为中心, 将出水点汇水边界近似概化为矩形区域, 矩形长为 $2R$, 宽为梁山组至吴家坪组的距离, 约为 495.80 m, 故汇水面积为 9.6 km²。

g) 降雨量 W

查阅绵竹市气象资料, 得到绵竹市年均降雨量 1053.2 mm, 最大降雨量为 1421.4 mm。

3.4.3. 预测结果

本次预测矿井突涌水量, 动力学法预测结果为 471.67 m³/h, 降雨入渗透法预测结果为正常涌水量 230.86 m³/h (表 3), 预测计算的涌水量与实际情况较为吻合。动力学法计算出的涌水量(471.67 m³/h)与掌子面初期涌水量(450 m³/h)基本一致, 此时的涌水主要为储存于富水构造破碎带中的大量静态水。经过一段时间排泄, 静态储水基本释放完, 此时涌水来源主要为降雨入渗水量, 因此, 长期稳定状态下涌水量预测采用降雨入渗法计算的结果(230.86 m³/h), 与实际监测的 250 m³/h 相吻合。

Table 3. Shows the predicted water inflow volume of inclined well #1 tape

表 3. 1#胶带斜井涌水量预测结果

	降雨入渗系数 (m/d)	正常降水量 (mm)	最大降水量 (mm)	汇水面积 A (km ²)	正常涌水量 (m ³ /d)/(m ³ /h)	最大涌水量 (m ³ /d)/(m ³ /h)
降雨入渗法	0.2	1053.2	1421.4	9.6	5540.67/230.86	7477.7/311.57
	渗透系数 K (m/d)	巷道投影长度 $L_0 \cos \alpha$ (m)	潜水水头 H (m)	设计降深 (m)	影响半径 R (m)	涌水量 (m ³ /d)/(m ³ /h)
动力学法	0.5	1558.86	750	250	9682.45	11,320.19/471.67

4. 结论

1) 1#胶带斜井的充水水源为大气降水和地下水, 两者联系密切。斜井的主要充水水源为大气降水,

斜井涌水量动态变化与降雨量密切相关；地下水对斜井产生充水影响主要表现在储于溶隙、溶孔的岩溶裂隙水不均匀地下渗、径流。

2) 1#胶带斜井从 K1+573 开始往前为一构造破碎带，该破碎带富水性好，天然条件下赋存了大量地下水，形成了一大型静储量含水构造。在岩溶水和水压的持续作用下，破碎带内的充填物质不断发生松散软化。暴雨后雨水由导水断层、裂隙进入冲刷溶洞充填体，导致地下水位升高、水压增大，同时斜井开挖为破碎带水体下覆松散体创造了滑移空间，高压水击穿堵塞的泥土后形成涌水。涌水发生后，由于破碎带导水性好，地下水快速涌向斜井，造成 1#胶带斜井的淹井事故。

3) 通过降雨入渗法和动力学法对 1#胶带斜井进行涌水量的预测，通过降雨入渗法计算得到 1#胶带斜井正常涌水量为 5540.67 m³/d (230.86 m³/h)，最大涌水量为 7477.70 m³/d (311.57 m³/h)；动力学法得到 1#胶带斜井涌水量为 11,320.19 m³/d (471.67 m³/h)。动力学法计算出的涌水量(471.67 m³/h)与掌子面初期涌水量(450 m³/h)基本一致，降雨入渗法计算得出的涌水量与监测涌水量值较为接近，此时的涌水主要为储存于富水构造破碎带中的大量静态水。经过一段时间排泄，静态储水基本释放完，此时涌水来源主要为降雨入渗水量，长期稳定状态下涌水量预测采用降雨入渗法计算的结果(230.86 m³/h)，与实际监测的 250 m³/h 相吻合。1#胶带斜井除洞口段位于地下水位之上，其余段均位于地下水位之上，通过计算可得 1#胶带斜井所处的静水压约为 7500 kpa，高压涌水问题突出。

基金项目

全国危机矿山接替资源找矿项目管理办公室：“四川省绵竹市清平磷矿接替资源勘查”(项目编号：200751070)、德阳昊华清平磷矿有限公司深部延伸接替工程项目“德阳昊华清平磷矿有限公司 100 万吨/年磷矿延伸接替工程”联合资助。

参考文献

- [1] 乔喜旦, 曹新群, 邓志勇, 等. 四川省绵竹市清平磷矿燕子岩矿段延伸勘查及资源储量核实报告[R]. 成都: 四川省化工地质勘查院, 2012.
- [2] 褚登安, 武敏建, 李德俊, 胡勇, 等. 四川省绵竹市清平磷矿接替资源勘查(普查)及资源储量核实报告[R]. 成都: 四川省化工地质勘查院, 2011.
- [3] 曾波. 湖北省宜昌磷矿杨柳矿区麻坪矿段矿坑涌水量预测[J]. 化工矿产地质, 2017, 39(2): 78-83.
- [4] 地质部水文地质工程地质技术方法研究队. 水文地质手册[M]. 北京: 地质出版社, 1978.
- [5] 杨潇, 马春燕. 大井法预测神农架大白莲矿区磷矿矿坑涌水量[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(6): 911-914.
- [6] 李维杰, 王建力, 王家录. 西南地区不同地形降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1132-1142.
- [7] 于津生, 虞福基, 刘德平. 中国东部大气降水氢、氧同位素组成[J]. 地球化学, 1987(1): 22-26.
- [8] 刘军省. 雷波县卡哈洛磷矿水文地质与开采条件研究[J]. 化工矿产地质, 2020, 42(3): 257-263.
- [9] GB12719-91 矿区水文地质工程地质勘探规范[S]. 北京: 国家技术监督局, 1991.
- [10] 沈继方. 矿床水文地质学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1992.
- [11] 张翔, 王向鹏, 李小辉, 何定桥, 叶长文. 矿山巷道水害综合治理——以昊华磷矿为例[J]. 采矿技术, 2022, 22(3): 100-105.
- [12] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [13] 薛禹群. 地下水动力学原理[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [14] 沈照理. 水文地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [15] 陈崇希. 矿坑涌水量计算方法研究[M]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 1985.