

山西慈林山煤矿不同煤层含水层水化学特征研究

李晓鹏, 冯春学, 张楠, 郭军峰, 程亚军, 解宇星, 田克娜, 柴林茂, 宋王鑫, 杨凯

山西潞安矿业集团慈林山煤业有限公司, 山西 长治

收稿日期: 2025年10月21日; 录用日期: 2025年11月20日; 发布日期: 2025年11月27日

摘要

山西慈林山煤矿3号、9号及15号煤层矿井主要充水水源是大气降水、第四系松散岩类孔隙水含水层地下水、二叠系碎屑岩类裂隙水含水层地下水、石炭系碳酸盐岩类裂隙岩溶水含水层地下水, 这些水源在采掘活动过程中有诱发突涌水灾害的风险。为此, 本研究采集并分析了各煤层矿井水水样, 结果表明, 3号煤层的水样以 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 为主, 水质类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 矿化度范围为743.60~1045.54 mg/L, 表明地下水径流条件较好, 其来源主要为大气降水或地表水补给, 水循环交替条件较好; 9号煤层的水样以 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 为主, 水质类型为 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 矿化度范围为846.00~1398.56 mg/L, 表明地下水径流条件相对滞缓, 水岩相互作用时间延长; 15号煤层的水样以 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 为主, 水质类型为 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型, 矿化度范围为922.60~3279.18 mg/L, 表明地下水处于高度封闭的水文地质环境中, 地下水径流条件极差, 水岩相互作用时间显著延长。研究结果对于深入认识矿区的水文地质条件, 以及指导矿井水害防治具有一定的参考价值。

关键词

矿井水害防治, 水质类型, 矿化度

Study on the Water Chemical Characteristics of Aquifers in Different Coal Seams of Cilinshan Coal Mine, Shanxi Province

Xiaopeng Li, Chunxue Feng, Nan Zhang, Junfeng Guo, Yajun Cheng, Yuxing Xie, Kena Tian, Linmao Chai, Wangxin Song, Kai Yang

Cilinshan Coal Industry Co., Ltd., Lu'an Chemical Group, Changzhi Shanxi

Received: October 21, 2025; accepted: November 20, 2025; published: November 27, 2025

文章引用: 李晓鹏, 冯春学, 张楠, 郭军峰, 程亚军, 解宇星, 田克娜, 柴林茂, 宋王鑫, 杨凯. 山西慈林山煤矿不同煤层含水层水化学特征研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1505-1513. DOI: 10.12677/me.2025.136166

Abstract

The main water sources for coal seams No. 3, No. 9 and No. 15 of Cilinshan Coal Mine in Shanxi Province are atmospheric precipitation, groundwater from Quaternary loose rock pore water aquifers, groundwater from Permian clastic rock fissure water aquifers, and groundwater from Carboniferous carbonate rock fissure karst water aquifers. These water sources pose a risk of sudden water inrush disasters during mining activities. Therefore, this study collected and analyzed mine water samples from various coal seams. The results showed that the water sample from coal seam No. 3 was mainly composed of Ca^{2+} and HCO_3^- , with an $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type water quality and a mineralization range of 743.60~1045.54 mg/L, indicating relatively good groundwater flow conditions. The water source was mainly atmospheric precipitation or surface water recharge, and the water cycle was relatively good. The water sample from coal seam No. 9 was mainly composed of Ca^{2+} , SO_4^{2-} , and HCO_3^- , with an $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ type water quality and a mineralization range of 846.00~1398.56 mg/L, indicating relatively slow groundwater flow conditions and prolonged water-rock interaction time. The water sample from coal seam No. 15 was mainly composed of Ca^{2+} and SO_4^{2-} , with an $\text{SO}_4\text{-Ca}$ type water quality and a mineralization range of 922.60~3279.18 mg/L. The concentration of mg/L indicates that the groundwater is in a highly enclosed hydrogeological environment with extremely poor groundwater flow conditions and a significantly prolonged water-rock interaction time. The findings provide valuable reference for a deeper understanding of the hydrogeological conditions of the mining area and for guiding mine water hazard prevention and control.

Keywords

Mine Water Hazard Prevention and Control, Water Quality Type, Mineralization

Copyright © 2025 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

山西慈林山矿区位于沁水煤田东南部，作为晋城国家规划矿区的核心组成部分，其煤层开采活动对区域能源供应具有战略意义[1][2]。随着开采深度增加(现主要开采 9 号、15 号煤层，开采标高+1020~+550 m)，矿井水文地质条件日趋复杂，尤其是多层含水层系统(如松散孔隙含水层、基岩风化带裂隙含水层、太原组灰岩岩溶裂隙含水层等)的交互作用，使得矿井突涌水风险显著上升[3]。近年来，矿区已揭露 23 条断层及多个陷落柱，构造控水特征明显，再加上 3 号煤层采空区积水的动态变化，进一步加剧了 9 号、15 号煤层开采的水害威胁[4]。

近年，国内外众多学者围绕煤矿矿井含水层的水文地质特征、富水性特征、物理力学性质、水害防治技术等方面进行了大量的分析和研究。张楠对慈林山煤矿 9 号煤层顶板含水层的富水性进行评价，通过构建针对含水层厚度、导水系数等指标的评价体系，确定 9 号煤层顶板含水层富水性总体呈中-弱等级。其中弱富水区占比 72%，中等富水区占比 28%，为矿井水害防治提供了分区依据[5]。李威对慈林山煤矿水文地质特征进行了系统分析，矿井水害风险主要受多含水层系统、构造通道及采动破坏共同控制。研究确立了以奥灰水突水危险区禁采、采空积水疏放为核心的防治体系，通过“三区”划分实现水害风险分级管控[6]。张玉卓等通过对新巨龙煤矿区高 TDS 地下水的系统研究，发现其水化学类型由单一 $\text{SO}_4\text{-}$

Na 型分异为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 和 $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,高矿化度主要成因包括水动力条件差、高温水岩作用强烈、蒸发浓缩显著及反阳离子交换作用,其研究成果为矿井水害防治及资源化利用提供理论支撑[7]。王甜甜等通过对敏东一矿矿井涌水的水化学与同位素综合分析,水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型,离子来源以硅酸盐矿物风化为主。氢氧同位素特征显示涌水年龄约 69 年,与深层含水层水力联系密切[8]。令狐昌卫等以滇东典型煤矿区为研究对象,分析不同水体的水化学数据,水体整体呈弱碱性,TDS 为 140~828 mg/L,水化学类型由 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 向 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型过渡。水体离子组成受碳酸盐/硅酸盐岩溶解、阳离子交换及人类活动共同控制,主因子分析显示矿业活动、农业活动及岩石风化为主要影响因素,累计贡献率达 82.06% [9]。王旭东等对内蒙古新街台格庙矿区进行研究,发现其首采井田充水含水层为直罗组 - 延安组,地下水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型;GMS 模拟预测显示,矿井涌水主要离子为: Na^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} ,水岩相互作用导致 pH 升高、离子浓度增大,反映砂岩含水层的溶滤主导特征[10]。综上所述,通过系统分析煤矿矿井水化学特征与成因机制,可有效揭示含水层水力联系、识别突水通道,对保障类似水文地质条件矿区的安全开采与水资源可持续利用具有重要实践意义。

本文以山西慈林山煤矿为研究对象,深入探讨其不同煤层含水层水化学特征的变化规律及影响因素。通过对该区域含水层水化学特征的研究,可以更准确地评估其对地下水环境的影响,并为矿区水资源保护与绿色开发策略的制定提供理论支撑。

2. 研究区概况

2.1. 矿井基本概况

慈林山煤矿位于长子县慈林镇龙塘村至色头镇鲍寨村一带,井田面积为 12.3249 km²,批准开采 3、9、15 号煤层,生产规模 60.00 万吨/年,开采标高: +1020~+550 m,3 号煤层已于 2010 年闭层,现开采 9 号、15 号煤层,含煤地层平均总厚为 154.99 m,煤层平均总厚度为 13.49 m,含煤系数为 8.70%。矿井采用走向(倾斜)长壁采煤法开采,综采一次采全高,全部垮落法管理顶板。矿区位于太行山脉西侧之长治盆地南部的低山中,区内沟谷纵横,地貌单元划为黄土陡崖冲沟,河漫滩低地和低山侵蚀三种。

2.2. 地质与水文地质

慈林山煤矿处于沁水盆地中段东部,海河水系浊漳河流域和黄河水系丹河流域的分水岭地带(辛安泉域与三姑泉域地表南北分水岭部位)。原属辛安泉域范围,后因南部三姑泉域高平市一带长时间大量开采利用岩溶水产生向北袭夺作用的缘故,目前分水岭已北移至长治县韩店一带,现属于三姑泉域。北部为长治盆地,南部为高平 - 晋城盆地。长治盆地为一新生代早期形成的断陷盆地,堆积物较厚,可达 300 m。高平 - 晋城盆地则较薄,一般为 30~70 m。盆地范围内的奥陶、寒武系岩层埋藏深。慈林山煤矿主要开采煤层充水水源均以大气降水补给为主要来源。充水含水层在得到大气降水补给后往深部运移,在运移途中通过水岩相互作用、岩石风化和蒸发作用、阳离子交换作用以及可溶岩溶解等控制水质的演化。

井田内大部分为第四系黄土覆盖,局部出露地层为二叠系上统上石盒子组、以及下统下石盒子组。依据以往钻探资料,井田地层由老至新分别是奥陶系中统上马家沟组(O_2s)、奥陶系中统峰峰组(O_2f)、石炭系中统本溪组(C_2b)、石炭系上统太原组(C_3t)、二叠系下统山西组(P_{1s})、二叠系下统下石盒子组(P_{1x})、二叠系上统上石盒子组下段(P_{2s})、第四系中、上更新统(Q_{2+3})。煤矿地层综合柱状图如图 1 所示。

井田内构造总体为走向 NE、倾向 NW 的单斜,地层产状平缓,倾角一般为 5°~10°,局部可达 17°,发育断层 23 条,大部分落差都小于 5 m,无岩浆岩侵入现象。井田附近区域位于辛安泉域与三姑泉域之间的移动性分水岭以南,应归属于三姑泉域,位于三姑泉域北部径流区。矿井主要含水层有松散岩类孔隙含水层、基岩风化带裂隙含水层、二叠系下统山西组及上、下石盒子组砂岩裂隙含水层、石炭系上统

Figure 1. Comprehensive histogram of coal mine strata
图 1. 煤矿地层综合柱状图



地下水的水化学组成是水岩相互作用及平衡条件的综合反映, 其形成与演化与地质构造、岩性、气

候及水动力等环境因素密切相关[11]。因此，分析地下水化学组成可有效反演其循环条件，进而判断含水层的补给来源。

为了分析 3 号煤、9 号煤、15 号煤层矿井水的水质特征，分析各矿井水之间的水力联系，结合山西慈林山煤矿以往水质资料和本次采集水样水质数据，共统计了 26 组水质分析报告数据。其中，3 号煤层矿井水数据 6 组，取样地点分别为 3#煤老空水、3#煤、3#煤大巷、3#煤轨道大巷、3 煤大巷、3#老空水；9 号煤层矿井水数据 9 组，取样地点分别是 9101 运输巷 3 号钻场 4 号孔、9105 运巷里程 350 m 处、9105 轨道巷、9 煤轨道大巷、9 煤回风大巷 - 井下爆炸材料库 T2-1、9201 运输大巷 1#钻场 1#孔、9201 运巷 4#、9101 运输巷 3#钻场、太原组含水层水(SU-1)；15 号煤层矿井水数据 11 组，取样地点分别是 15103 运输巷顶板淋水、15 煤顶板主斜井 520 米处、1501 运输巷工作面钻场、15 煤回风南、15#煤南翼轨道巷 4#贯眼 200 m 处、15202 运输巷、15#煤轨道南 550 米处、15203 工作面三号切眼锚索、15#煤皮带南 7#联巷锚索、15203 工作面管口处 15#4、15106 工作面回风北密闭排水管口 15#1。样品具体信息见表 1。

Table 1. Sample information table
表 1. 样品信息表

矿区不同煤层	水样编号	取样地点
3 号煤	3-1	3#煤老空水
	3-2	3#煤
	3-3	3#煤大巷
	3-4	3#煤轨道大巷
	3-5	3 煤大巷
	3-6	3#老空水
9 号煤	9-1	9101 运输巷 3 号钻场 4 号孔
	9-2	9105 运巷里程 350 m 处
	9-3	9105 轨道巷
	9-4	9 煤轨道大巷
	9-5	9 煤回风大巷-井下爆炸材料库 T2-1
	9-6	9201 运输大巷 1#钻场 1#孔
	9-7	9201 运巷 4#
	9-8	9101 运输巷 3#钻场
	9-9	太原组含水层水(SU-1)
15 号煤	15-1	15103 运输巷顶板淋水
	15-2	15 煤顶板主斜井 520 米处
	15-3	1501 运输巷工作面钻场
	15-4	15 煤回风南
	15-5	15#煤南翼轨道巷 4#贯眼 200 m 处

续表

15-6	15202 运输巷
15-7	15#煤轨道南 550 米处
15-8	15203 工作面三号切眼锚索
15-9	15#煤皮带南 7#联巷锚索
15-10	15203 工作面管口处 15#4
15-11	15106 工作面回风北密闭排水管口 15#1

3.2. 测试方法

水样的水化学分析工作严格遵循《地下水水质分析方法》(DZ/T 0064)系列行业标准及《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750)的相关规范,确保了分析过程的标准化与结果的可靠性。主要离子测定采用经典方法: K^+ 、 Na^+ 采用火焰发射光谱法(AP1200 火焰光度计); Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及总硬度采用乙二胺四乙酸二钠滴定法; Cl^- 采用银量滴定法; SO_4^{2-} 采用乙二胺四乙酸二钠-钡滴定法; HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、总碱度及游离 CO_2 等通过精密滴定法完成。微量组分如 NH_4^+ 、 TFe 、 NO_3^- 、 NO_2^- 及可溶性硅酸等采用分光光度法(752N 紫外可见分光光度计)进行测定,保证了低浓度组分检测的准确性。 pH 值与 F^- 分别采用玻璃电极法与离子选择电极法(PXSJ-226 离子计)测定,直接反映水体的基本物理化学性质。整套分析方法体系完整、针对性强,为水化学类型的精确判别和水文地球化学过程的深入阐释提供了坚实的方法保障与质量基础。

3.3. 结果分析

(1) 不同煤层水样矿化度分析

图 2 和图 3 分别为不同煤层水样矿化度和 pH 值的分布。

由图可知,3 号煤层矿井水矿化度变化范围为 743.60~1045.54 mg/L,平均值为 897.54 mg/L。从数据分布来看,矿化度变化幅度较小,极差 301.94 mg/L,说明该煤层水文地球化学环境相对均一。 pH 值稳定在 7.73~8.13 之间,均值为 7.91,属于典型的弱碱性水。这种较低且稳定的矿化度特征表明,3 号煤层处于开放-半开放的水文地质环境中,地下水径流条件较好,水循环交替较为积极。根据 3 号煤层矿井水的水质全分析结果,水化学类型以 HCO_3-Ca 型为主,其中,阳离子以 Ca^{2+} 为主,浓度为 156.05~170.60 mg/L,其次是 Mg^{2+} 、 Na^+ ;阴离子以 HCO_3^- 为主,浓度为 444.28~532.82 mg/L,其次是 SO_4^{2-} 、 Cl^- ;反映出大气降水或地表水补给的特征,水-岩相互作用时间较短,溶滤作用较弱。还可能受到阳离子交换作用或硅酸盐矿物风化的影响。且 Na^+ 摩尔分数为 13.62%~31.81%, Cl^- 摩尔分数为 5.05~7.49%, $Na^+ > Cl^-$ 常与阳离子交换有关。3 号煤层矿井水水质特呈现混合型特征。值得注意的是,所有水样均保持稳定的弱碱性环境,说明围岩中碳酸盐矿物(如方解石)对水体起到了良好的缓冲作用,有效中和了可能产生的酸性物质。

9 号煤层矿井水矿化度变化范围为 846.00~1398.56 mg/L,平均值为 1084.29 mg/L。从数据分布来看,矿化度变化幅度较大,极差达 552.56 mg/L,说明该煤层水文地球化学环境出现明显分异。 pH 值在 7.44~8.10 之间波动,均值为 7.73,整体仍属弱碱性水。这种矿化度离散程度加大的特征表明,9 号煤层矿井水处于半封闭的水文地质环境中,地下水径流条件相对滞缓,水岩相互作用时间延长。根据 9 号煤层的矿井水水质全分析结果,水化学类型以 $SO_4 \cdot HCO_3-Ca$ 型为主,其中,阳离子以 Ca^{2+} 为主,浓度范围为 139.82~299.88 mg/L,其次是 Na^+ 、 Mg^{2+} ;阴离子以 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 为主,浓度分别为 392.64~660.62 mg/L

和 312.42~592.3 mg/L。这种水化学组成反映出该煤层地下水经历了更充分的溶滤作用，围岩中易溶盐类矿物溶解加剧。值得注意的是，部分水样 pH 值偏低且 SO_4^{2-} 含量偏高，说明硫酸盐矿物及碳酸盐矿物的溶解作用在加强。但整体上碳酸盐矿物的缓冲作用仍维持水体的弱碱性特征。

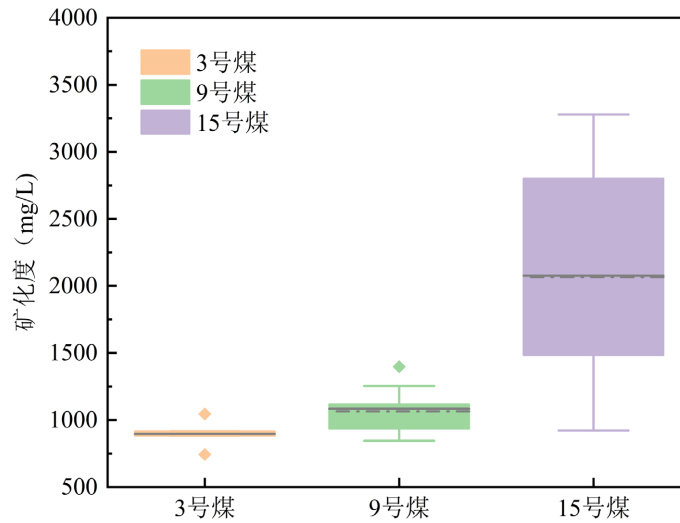


Figure 2. Characteristics of water salinity

图 2. 水样矿化度特征

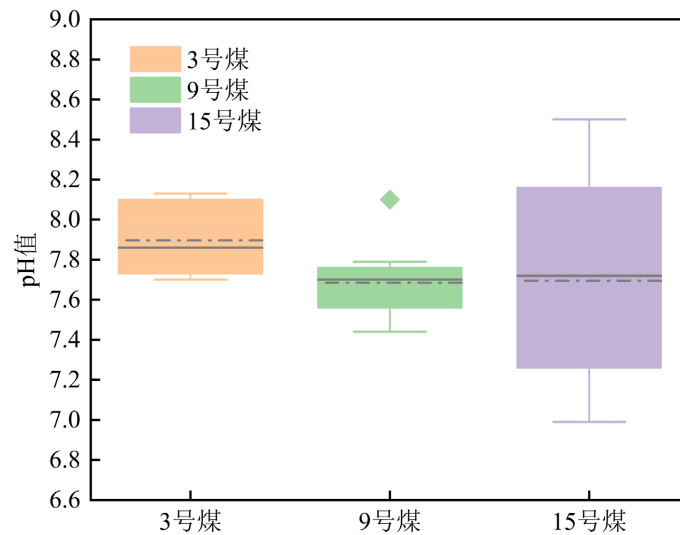


Figure 3. pH value of water sample

图 3. 水样 pH 值

15 号煤层矿井水矿化度变化范围为 922.60~3279.18 mg/L，平均值为 2011.06 mg/L。从数据分布来看，矿化度变化幅度极大，极差高达 2356.58 mg/L，说明该煤层水文地球化学环境具有强烈的非均质性。pH 值在 6.99~8.50 之间波动，均值为 7.66，整体仍属弱碱性水。这种超高矿化度且剧烈波动的特征表明，15 号煤层处于高度封闭的水文地质环境中，地下水径流条件极差，水岩相互作用时间显著延长。根据 15 号煤层矿井水水质全分析结果，水化学类型以 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型为主，阳离子以 Ca^{2+} 为主，浓度范围为 179.58~681.36 mg/L，其次为 Mg^{2+} 、 Na^+ ；阴离子以 SO_4^{2-} 为主，浓度范围为 362.06~1969.23 mg/L，其次是 HCO_3^- 、 Cl^- 。该煤层的水化学组成反映出地下水经历了长期充分的溶滤作用，围岩中易溶盐类矿物大量溶解。值得注

意的是, 15-6 水样呈现酸性特征且 SO_4^{2-} 含量偏高, 说明发生了强烈的硫化物(黄铁矿)的酸化及石膏的溶解, 同时 Fe^{2+} 、游离 CO_2 含量也随之增加。3 号、9 号煤层矿井水 Fe^{2+} 含量检不出, 15 号煤层充水水源平均值为 0.275 mg/L ; 3 号、9 号煤层矿井水游离 CO_2 含量平均 23 mg/L , 15 号煤层充水水源平均值为 48.45 mg/L 。而 15-4 水样 pH 值偏高($\text{pH} = 8.50$), 则可能与硅酸盐矿物水解有关, 显示出复杂的水文地球化学作用共存的特征。

(2) 基于 Piper 三线图的水化学特征综合分析

Piper 三线图分析表明(见图 4), 慈林山煤矿 3 号、9 号及 15 号煤层矿井水水化学特征呈现显著的垂向分异性。3 号煤层水样点集中分布于菱形区左下象限, 阳离子以 Ca^{2+} 为主, 阴离子以 HCO_3^- 为主, 水化学类型为典型的 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 反映其处于开放 - 半开放水文地球化学环境, 地下水径流条件良好, 离子来源主要受碳酸盐矿物(方解石、白云石)溶解控制, 水源来源主要为大气降水或地表水补给, 还存在阳离子交换作用或硅酸盐矿物风化的影响。

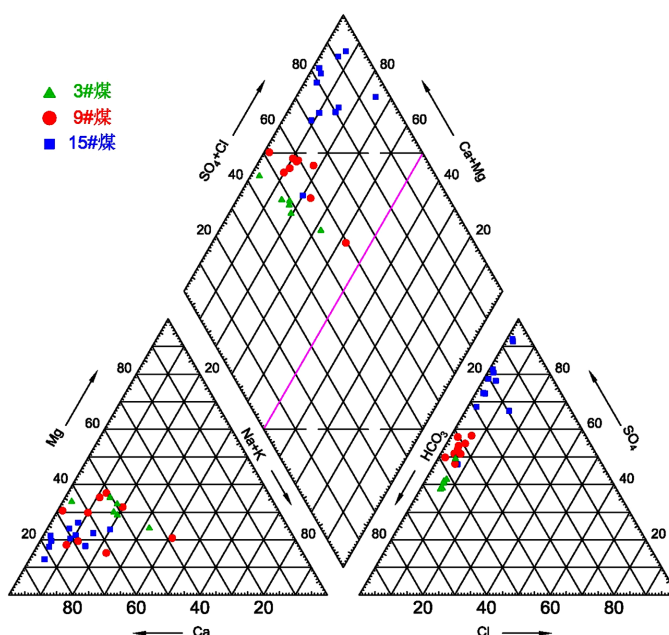


Figure 4. Piper trilinear diagram of water chemistry
图 4. 水化学 Piper 三线图

9 号煤层水样向菱形区中部迁移, 阴离子中 SO_4^{2-} 比例显著升高, 与 HCO_3^- 共同主导, 演变为 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ 型水, 揭示半封闭环境下地下水滞留时间延长, 硫酸盐矿物及碳酸盐矿物的溶解作用也在加强。

15 号煤层水样进一步向右上扩散, 集中分布于菱形区右上方, 阴离子以 SO_4^{2-} 主导, 阳离子中 Ca^{2+} 仍占优势, 但 Na^+ 与 Mg^{2+} 比例显著升高, 形成典型的 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型水, 部分样品向 $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型过渡。这一分布特征揭示了深部含水层的高度封闭性: SO_4^{2-} 的富集主要源于石膏溶解及黄铁矿氧化产酸过程; Na^+ 的升高暗示硅酸盐矿物(如钠长石)水解作用的增强; 而 Ca^{2+} 的持续主导则反映碳酸盐岩溶滤仍在进行。进一步印证了该矿井水水文地质环境的强非均质性及复杂水岩相互作用。

4. 结论

根据对山西慈林山煤矿 3 号、9 号及 15 号煤层矿井水水化学特征的系统研究, 得出以下结论与建议:

(1) 3 号煤层矿井水为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水, 矿化度低, 指示其处于开放 - 半开放环境, 接受大气降水或地表水补给; 9 号煤层过渡为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水, 矿化度升高, 反映半封闭环境下溶滤作用增强; 15 号煤层演化为 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型水, 矿化度急剧增高, 揭示其处于高度封闭环境, 水岩作用强烈, 局部存在黄铁矿氧化导致的酸性水环境。

(2) 浅部含水层以碳酸盐矿物溶解为主, 深部则叠加石膏溶解、黄铁矿氧化及硅酸盐风化作用。水化学垂向分异规律为突水水源识别提供了关键地球化学指标, 并为矿井水害的精准防控提供了直接依据。

(3) 针对 15 号煤层高矿化度及潜在酸性水问题, 建议采取“源头阻隔 + 末端处理”的防控策略: 在采掘过程中加强构造探查与封堵, 减少奥灰水导入; 对已揭露的高矿化度水体, 可采用中和沉淀与膜处理工艺, 实现水质达标与资源化回用。

参考文献

- [1] 孟祥甜. 上行开采过悬空区域的工艺优化[J]. 煤炭技术, 2022, 41(7): 24-28.
- [2] 东兆星, 吴士良. 井巷工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [3] 张楠. 慈林山矿上覆采空区积水煤层开采突水危险性评价[J]. 煤炭与化工, 2022, 45(7): 50-53.
- [4] 李四清. 慈林山煤业上行开采可行性研究与应用[J]. 能源技术与管理, 2024, 49(3): 156-159.
- [5] 张楠. 慈林山 9 号煤层顶板含水层富水性分区分析与研究[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(6): 45-48.
- [6] 李威. 山西慈林山煤矿水文地质特征及水害防治措施[J]. 煤矿现代化, 2023, 32(6): 31-34.
- [7] 张玉卓, 徐智敏, 张莉, 等. 山东新巨龙煤矿区场地高 TDS 地下水水化学特征及成因机制[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 52-62.
- [8] 王甜甜, 方刚, 张溪彧, 等. 基于水化学和氢氧同位素特征的敏东一矿水源定性定量研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(10): 190-197.
- [9] 令狐昌卫, 寸得欣, 尹林虎, 等. 滇东典型煤矿区地表水地下水化学特征及控制因素[J]. 科学与工程, 2023, 23(32): 13728-13740.
- [10] 王旭东, 闫祖喻, 唐佳伟, 等. 新街台格庙矿区首采井田矿井水水化学特征及数值模拟预测[J]. 中国煤炭, 2024, 50(7): 154-163.
- [11] 高小伟. 塔然高勒井田煤铀协调开采条件下水文地球化学特征研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(2): 209-211.