

陕北某露天煤矿矿坑涌水化学特征及灌溉适宜性

白 浩, 籍丽勇, 李国庆, 刘 斌, 李松瑶, 闫 丽

Chemical characteristics and irrigation suitability of mine pit water at an open-cast coal mine in northern Shaanxi

BAI Hao, JI Liyong, LI Guoqing, LIU Bin, LI Songyao, and YAN Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202412025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤层气井产出水化学特征及水化学场动态演化规律

Hydrochemical characteristics and dynamic evolution of hydrochemical field for the produced water of CBM wells

刘贺, 罗勇, 雷坤超, 孔祥如, 赵龙, 王新惠, 齐鸣欢 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 92-99

煤层下部太原组岩溶水化学组分特征及其成因分析

An analysis of the chemical composition characteristics and formation of the karst groundwater in the Taiyuan Group in the lower part of a coal seam

杨婷婷, 许光泉, 余世滔, 苏悦, 郑竹艳, 黎志豪 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 100-108

三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制

Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring

张春潮, 侯新伟, 李向全, 王振兴, 桂春雷, 左雪峰 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 62-71

湘西峒河流域水化学特征及无机碳通量计算

Hydrochemical characteristics and estimation of the dissolved inorganic carbon flux in the Donghe River Basin of western Hunan

霍俊伊, 于, 张清华, 李亮 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 64-72

贵州洪家渡盆地泉水水化学和碳同位素特征及成因

Characteristics and controls of the hydrochemistry and carbon isotope of the spring water in the Hongjiadu Basin of Guizhou

任坤, 潘晓东, 焦友军, 黄宇, 曾洁, 彭聪, 梁嘉鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 9-17

通过永定河渗漏补给地下水的适宜性评估研究

The suitability assessment of groundwater recharge by leakage of the Yongding River

曹欣怡, 翟远征, 李木子, 潘成忠, 郑富新, 芦红, 夏雪莲, 滕彦国, 王金生 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 20-29



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202412025

白浩, 籍丽勇, 李国庆, 等. 陕北某露天煤矿矿坑涌水化学特征及灌溉适宜性 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 98-108.
BAI Hao, JI Liyong, LI Guoqing, et al. Chemical characteristics and irrigation suitability of mine pit water at an open-cast coal mine in northern Shaanxi[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 98-108.

陕北某露天煤矿矿坑涌水化学特征及灌溉适宜性

白浩¹, 籍丽勇¹, 李国庆², 刘斌³, 李松瑶³, 闫丽³

(1. 国家能源集团陕西神延煤炭有限责任公司, 陕西榆林 719300; 2. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 湖北武汉 430074; 3. 国能水务环保有限公司, 北京 100039)

摘要: 黄河中游某露天煤矿位于我国西北干旱半干旱地区, 利用矿坑涌水进行排土场复垦区生态灌溉是矿坑水资源化利用的有效途径, 而目前对灌溉水质特征及水土作用的认识并不充分。通过现场采样与室内水化学测试、土柱淋滤试验, 分析矿坑涌水水化学特征及灌溉过程中的水土作用, 采用钠离子吸附比、可溶性钠百分比、残余碳酸钠与渗透指数等指标评价矿坑涌水灌溉适宜性。结果表明: (1) 矿坑涌水水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{—Na}$ 型, 阳离子以 Na^+ 为主, 阴离子以 HCO_3^- 为主, 水化学成分主要受阳离子交换作用与矿物溶解作用的影响, 溶解性总固体主要来源为 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 与 HCO_3^- , 矿坑涌水可以直接用于灌溉; (2) 在淋滤试验过程中发生了溶解作用和阳离子交换作用, 初期渗出液中 Ca^{2+} 浓度明显增加, 随着淋滤试验进行, 渗出液水化学类型由 $\text{HCO}_3\text{—Ca}$ 型逐渐向 $\text{HCO}_3\text{—Na}$ 型演化; (3) 随淋滤时间增加, 渗出液阳离子交换强度升高, 淋滤渗出液中各项灌溉评价指标值有升高趋势, 但总体仍符合灌溉限值要求。研究结果可为矿坑涌水合理利用提供科学依据。

关键词: 矿坑涌水; 水化学; 灌溉适宜性; 土柱淋滤

中图分类号: TD167; X824

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)04-0098-11

Chemical characteristics and irrigation suitability of mine pit water at an open-cast coal mine in northern Shaanxi

BAI Hao¹, JI Liyong¹, LI Guoqing², LIU Bin³, LI Songyao³, YAN Li³

(1. Shaanxi Shenyang Coal Co. Ltd., CHN Energy, Yulin, Shaanxi 719300, China; 2. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 3. CHN Energy Water Environmental Protection Co. Ltd., Beijing 100039, China)

Abstract: In the arid and semi-arid middle reaches of the Yellow River in northwest China, an open-cast coal mine has adopted the use of pit water for ecological irrigation in dump reclamation areas, which is an effective approach for the pit water resource utilization. However, the irrigation water quality and the interactions between the pit water and soil in the long-term irrigation remain insufficiently understood. Field sampling, water chemical testing, and soil column leaching experiments in lab were conducted to analyze the mine pit water quality and the water-soil interactions during the irrigation process. The irrigation suitability of pit water was evaluated by using indicators such as sodium adsorption ratio, soluble sodium percentage, residual sodium carbonate, and

收稿日期: 2024-12-11; 修订日期: 2025-03-02

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家能源集团科技创新项目(GJNY22-134); 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金(SHJT-17-42.8); 国家自然科学基金面上项目(42072204)

第一作者: 白浩(1990—), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事矿山生态修复工作。E-mail: 10041119@ceic.com

通讯作者: 李国庆(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质环境与地质灾害方面的教学与科研工作。E-mail: ligq@cug.edu.cn

permeability index. The results show that the water chemical type of the pit water is $\text{HCO}_3\text{—Na}$, with Na^+ as the main cation and HCO_3^- as the main anion. The water chemical composition is mainly influenced by cation exchange and mineral dissolution. Total dissolved solids are mainly derived from Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , and HCO_3^- . The pit water can be directly used for irrigation. During the leaching experiment, dissolution and cation exchange were evident, with a significant increase in Ca^{2+} concentration in the early leachate. As the leaching experiment progressed, the water chemical type of the leachate gradually evolved from $\text{HCO}_3\text{—Ca}$ type to $\text{HCO}_3\text{—Na}$ type; with the increase of leaching time, the cation exchange intensity in the leachate increased, and the irrigation evaluation indicators in the leachate showed an increasing trend, though remaining within acceptable irrigation thresholds. This study can provide a basis for the rational utilization of mine pit water.

Keywords: mine pit water; hydrogeochemistry; irrigation suitability; soil column leaching

在当前以及未来较长时间内,煤炭在我国能源生产与消费结构中依然占主体地位,是保障我国能源安全的“压舱石”^[1]。在煤炭资源开采过程中不可避免地产生大量矿井水,每生产 1 t 煤炭产生约 2 t 矿井水,预计在 2035 年前我国矿井水产量将稳定超过 60 亿 m^3 ^[2-4]。由于矿井水易受污染,一般不宜直接排放或使用^[5-6]。未经妥善处理的矿井水被排放到地面,不仅浪费水资源,而且会导致环境污染和地面塌陷,增加矿山治理的难度和成本^[7]。我国西部气候干旱少雨,生态环境脆弱,煤炭开采导致的矿井水大量排放,进一步加剧了矿区水资源的短缺^[8]。将矿井水进行资源化处理,以满足矿区生产、生活和生态建设的需求,具有极其重要的意义^[9-10]。

生态灌溉对水质的要求相对较低,使用经过简易处理后达标的矿井水进行灌溉,有助于提升环境和生态质量,实现矿区水资源的高效利用与生态环境保护之间的平衡^[11]。而利用未经处理的矿井水进行灌溉,则可能引发土地盐碱化、土壤酸化或重金属超标等问题。翟建平等^[12]利用盆栽实验,发现使用矿井水再生水灌溉能提升土壤微生物数量,有助于土壤有机物质的转化,适合在控制条件下灌溉作物。任静等^[13]综合考虑了煤矿退水区域的水库容量和农田灌溉需求,采用定量对比分析法,评估了煤矿排水量与灌区可纳水量的匹配度及其水质,论证了煤矿排水用于农业灌溉的可行性。刘敏等^[14]调查了峰峰矿区矿井水污灌区农田土壤的重金属元素分布特征,发现重金属污染主要来源于农业活动、矿井水灌溉、车辆尾气排放以及土壤成土母质。吕情绪等^[15]分析了神东矿区矿井水的水化学特征及灌溉适宜性,认为该矿区长期使用矿井水灌溉可能会造成严重的土壤盐碱害。郭洋楠^[16]提出神东矿区乌兰木伦河以西的矿井水水质较差,受其影响,周边土壤存在盐害和碱害风险,不宜直接用

于灌溉;矿区土壤主要为砂土,地下水位埋深大,地下水与地表水渍涝共同影响下的盐分积累作用不明显,土壤板结问题不突出,渗透率指数(permeability index, PI)法不适于该矿区砂土土壤的水质灌溉适宜性评价。马莲净等^[17]利用电导率、钠吸附比和钠百分含量 3 个指标评价了鄂尔多斯新上海庙一号井田矿井水的灌溉适宜性,提出了矿井水“分层分质综合利用方法”。总体而言,由于矿区矿井水质、土壤土质条件的差异,目前对于煤矿区灌溉水质的研究认识并不充分。

研究区位于陕北干旱半干旱气候区,区域降水量少,蒸发量大,水资源相对短缺,利用矿坑涌水进行排土场生态灌溉是必然选择,而目前尚未开展灌溉水质评价及长期灌溉水土作用的相关研究。本研究通过现场取样与水质测试,并利用自主设计的土柱淋滤试验装置模拟灌溉过程,对矿坑涌水以及淋滤试验渗液进行水化学分析,基于钠离子吸附比(sodium adsorption ratio, SAR)、可溶性钠百分比(soluble sodium percentage, SSP)、残余碳酸钠(residual sodium carbonate, RSC)与 PI 4 项指标进行灌溉适宜性评价,研究认识可为矿坑水资源化处理提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于陕西省神木市大保当镇(图 1),地处陕北黄土高原北部边缘和毛乌素沙漠东南部边缘,除了南部有冲洪积平原以外,地势较为平缓,主要为风沙滩地。矿区地势南高北低、西高东低,海拔高度为 1 125 ~ 1 280 m。矿区东西平均宽度约 3.22 km,南北长度约 16.56 km,面积约 50.77 km^2 ,开采深度 80 ~ 190 m。矿区地层由老至新依次为:上三叠统永坪组(T_3y),下侏罗统富县组(J_1f),中侏罗统延安组(J_2y)、直罗组(J_2z),上新统保德组(N_2b),中更新统离石组(Q_2l),上更新统萨拉乌苏组(Q_3s),全新统河流冲积层(Qh^{al})及风积沙

(Qh^{col})。中侏罗统延安组是本区含煤地层,露天开采区含煤地层主要为延安组第四段的 2^{-2} 煤。区域多年平均降水量为434.1 mm,多年平均蒸发量为1 712.0 mm,蒸发量是降水量的4倍,且降水分布不均匀,雨季集中在7—9月,占年总降水量的66%,区域水资源短缺,生态环境敏感^[18]。研究区属黄河一级支流秃尾河流域,靠近露天生产区域的地表水系为野鸡河,该河流属于季节性河流,从煤矿西边界流入,流量逐渐减小直至消失在小阿包壕村附近,渗流补给矿区烧变岩含水层。为了消除潜在的不利影响,矿山已提前对该河流进行了改道处理。目前,矿坑涌水量为450~700 m³/h,主要用于矿区生产、复垦区生态建设。

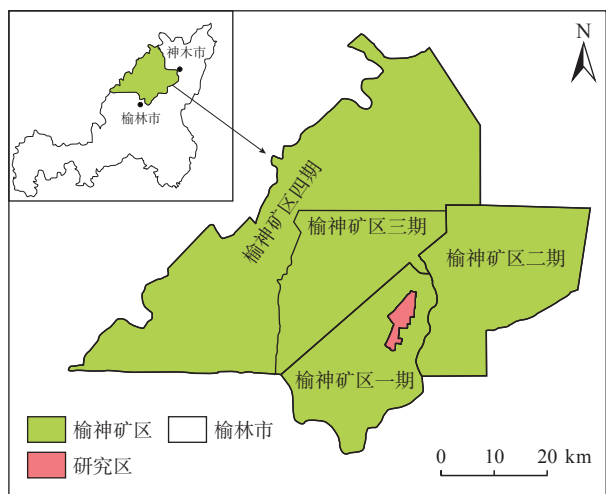


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

2 材料与方法

2.1 样品采集

根据该煤矿水文地质类型划分报告,大气降水和含水层水是矿坑涌水的主要水源,且目前矿坑涌水量及水质均较稳定。该矿将矿坑涌水储存在蓄水池中,作为生态灌溉水源。因此,在该矿坑蓄水池采集水样具有代表性。采样瓶为2.5 L聚乙烯瓶,采样前用待采样的水源清洗采样瓶3次,用0.45 μm聚醚砜膜过滤水样,采集2份平行样品,分别用作阳离子、阴离子分析,其中用于阳离子(除 Hg^{+} 外)分析的样品加 HNO_3 酸化至pH为2。水样采集后48 h内送至中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室进行水质测试。

土样取自矿区排土场内新鲜剥离土,密封后送至实验室用于土柱淋滤试验。排土场新鲜剥离土壤天然含水率平均值为13.238%,容重平均值为1.588 g/cm³,

比重平均值为2.67。土壤主要由粉粒和黏粒组成,土壤砂粒含量为9.70%~14.20%,粉粒含量为23.84%~50.30%,黏粒含量为35.50%~66.46%,土壤质地为粉砂质黏土—粉砂质黏壤土。

2.2 试验设计

自主设计的淋滤试验装置主要由马氏瓶与淋滤柱组成(图2)。淋滤柱直径10 cm、高40 cm,侧壁设置刻度线,顶端连接马氏瓶,底端为漏斗形,漏斗形上部设计多孔隔板,下部连接出水管与阀门。

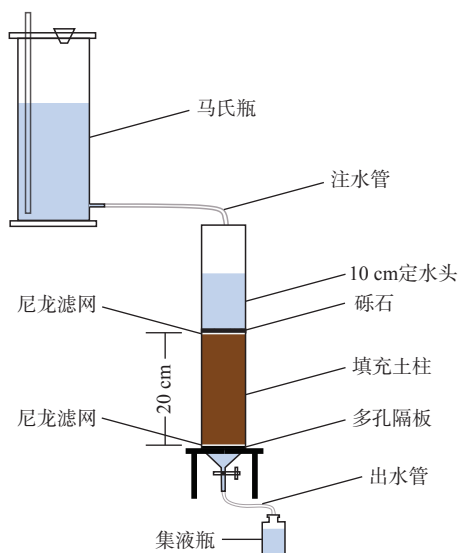


图2 室内土柱淋滤试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the indoor soil column leaching test apparatus

采用淋滤试验模拟矿区灌溉过程,以考察矿坑涌水灌溉过程中的水化学变化特征。首先用去离子水清洗淋滤柱及尼龙滤网并沥干水分,然后将排土场土壤填充至淋滤柱中,土样填充高度为20 cm,控制填充土样容重与实测容重保持一致。在填充土样的上方,铺设2层尼龙滤网,再铺设1 cm左右的砾石层,使淋滤液均匀下渗,防止淋滤液对土壤直接冲刷。以矿坑涌水作为淋滤液,将注水软管连接至淋滤柱最下方,使淋滤液由下往上入渗,直至达到饱和状态。饱和24 h后,将注水软管连接至淋滤柱顶端,底端恢复成出水口,外接集液瓶。土柱上方保持10 cm定水头,每隔24 h开启淋滤柱下端阀门,利用集液瓶收集淋滤渗出液。实验持续15 d,取矿坑涌水水样以及淋滤试验第1、3、5、7、9、11、13、15 d的渗出液样品进行检测。测试项目包括一般化学指标(pH、TDS、 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 、F质量浓度)和毒理学指标(As、 Cr^{6+} 、Cd、Pb、Hg质量浓度)。pH采用玻

璃电极法测定,TDS 质量浓度采用蒸发法测定, HCO_3^- 质量浓度采用滴定法测定,其他阴离子质量浓度采用离子色谱法测定,一般阳离子指标采用火焰原子吸收分光光度法测定,毒理学指标采用电感耦合等离子体质谱法测定^[16]。

2.3 分析方法

根据水质测试数据,利用 Piper 图分析矿坑涌水的水化学类型^[18],利用 SPSS 数理统计软件进行 TDS 与各离子的相关性分析,通过离子比值图分析矿坑涌水水化学特征成因,根据氯碱指数图分析阳离子交换作用。

灌溉适宜性评价关键在于综合考量水化学特征以及对土壤渗透性、植被生长可能产生的负面影响^[19]。灌溉水中过量的 Na^+ 、 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 、 Mg^{2+} 可能导致土壤发生盐害、碱害,其主要的评价指标包括 SAR、SSP、PI、RSC、凯利比率(Kelly’s ratio, KR)和镁吸附比(magnesium adsorption ratio, MgR)^[20]。SAR 主要用于表征地下水对土壤的钠害,当土壤颗粒吸附高浓度的可溶性钠时,土壤的渗透性会降低,变得坚硬致密,从而影响作物吸收水分以及生长^[21]。RSC 是表征碳酸盐和碳酸氢盐对灌溉土壤有害影响的指标,一般来说,地下水中高浓度 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 以及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 会影响作物生长;过量的碳酸盐可能与钠离子结合形成碳酸氢盐,从而影响土壤的渗透性^[22]。灌溉水中的 SSP 过高会降低土壤的渗透性,使灌溉水中的 Na^+ 与土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 发生交换,导致 Na^+ 大量吸附在土壤中,影响作物对水分的吸收,从而影响作物生长^[23]。PI 是评价灌溉用水对土壤渗透性影响的指标,受 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的影响,长期灌溉含盐量高的水会影响土壤中的水分运动能力,即土壤的渗透性^[24]。KR 和 MgR 分别是用于表征钠害和镁害的指标。由于矿坑涌水

中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 浓度较低,而 Na^+ 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 浓度相对较高,因此,研究采用 SAR、SSP、PI、RSC 作为评价指标。利用雷达图定性分析灌溉适宜性。各项指标计算公式如下:

$$I_{\text{SAR}} = \frac{c(\text{Na}^+)}{\sqrt{\frac{c(\text{Ca}^{2+}) + c(\text{Mg}^{2+})}{2}}} \tag{1}$$

$$I_{\text{RSC}} = \left[c(\text{HCO}_3^-) + 2 \times c(\text{CO}_3^{2-}) \right] - 2 \times \left[c(\text{Ca}^{2+}) + c(\text{Mg}^{2+}) \right] \tag{2}$$

$$I_{\text{SSP}} = \frac{c(\text{K}^+) + c(\text{Na}^+) \times 100\%}{2 \times \left[c(\text{Ca}^{2+}) + c(\text{Mg}^{2+}) \right] + c(\text{K}^+) + c(\text{Na}^+)} \tag{3}$$

$$I_{\text{P}} = \frac{c(\text{HCO}_3^-) + c(\text{Na}^+) \times 100\%}{2 \times \left[c(\text{Ca}^{2+}) + c(\text{Mg}^{2+}) \right] + c(\text{Na}^+)} \tag{4}$$

式中: I_{SAR} ——SAR 的值/ $(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})^{1/2}$;
 c ——物质的量浓度/ $(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$;
 I_{RSC} ——RSC 的值/ $(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$;
 I_{SSP} ——SSP 的值/%;
 I_{P} ——PI 的值/%。

3 结果

矿坑涌水 pH 为 7.1, TDS 质量浓度为 142 mg/L, F^- 质量浓度为 0.6 mg/L;淋滤试验渗出液 pH 为 6.9~7.2, TDS 质量浓度为 97~152 mg/L, F 质量浓度为 0.7~0.9 mg/L。矿坑涌水的一般化学指标和毒理学指标测试结果均符合《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)^[25] 的要求(表 1—2)。根据 Piper 三线图(图 3),矿坑涌水中 Na^+ 、 HCO_3^- 占有明显优势;淋滤试验初期渗出液中阳离子以 Ca^{2+} 为主,随着试验的进行, Ca^{2+} 和 Na^+ 成为主要阳离子。矿坑涌水的水化学类型为 HCO_3^- —Na 型;随着淋滤试验的进行,渗出液的水化学类型由

表 1 矿坑涌水及淋滤试验渗出液的一般化学指标测试结果
Table 1 General chemical index test results of mine pit seepage and leachate from leaching test

样品	质量浓度/(mg·L ⁻¹)									pH
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	TDS	F ⁻	
矿坑涌水	17.4	11.3	95.5	3.1	261.7	69.4	10.5	142	0.6	7.1
第1天	45.1	9.1	11.2	2.3	154.6	19.8	8.4	97	0.9	6.9
第3天	47.9	9.9	42.3	2.5	202.2	61.3	9.2	134	0.7	6.9
第5天	43.8	8.8	52.3	2.4	207.0	62.6	9.4	137	0.8	7.2
第7天	38.3	7.8	63.1	2.3	214.1	64.8	10.0	145	0.8	7.2
第9天	36.3	7.3	67.2	2.2	223.6	65.5	10.0	146	0.8	7.2
第11天	34.5	6.9	72.0	2.2	226.0	64.5	9.8	148	0.8	7.1
第13天	33.3	6.6	62.8	2.1	226.0	65.0	9.8	149	0.7	7.1
第15天	32.9	6.5	73.1	2.1	226.0	65.9	10.0	152	0.7	7.1

表 2 矿坑涌水毒理学指标质量浓度

Table 2 Toxicological index mass concentration of pit water inflow

样品	质量浓度/(mg·L ⁻¹)						
	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg
矿坑涌水	0.001 993	0.000 917	0.000 114	0.000 673	0.000 072	0.002 574	0.000 927 4
农田灌溉水质标准	≤1.0	≤2.0	≤0.1	≤0.1	≤0.005	≤0.05	≤0.001

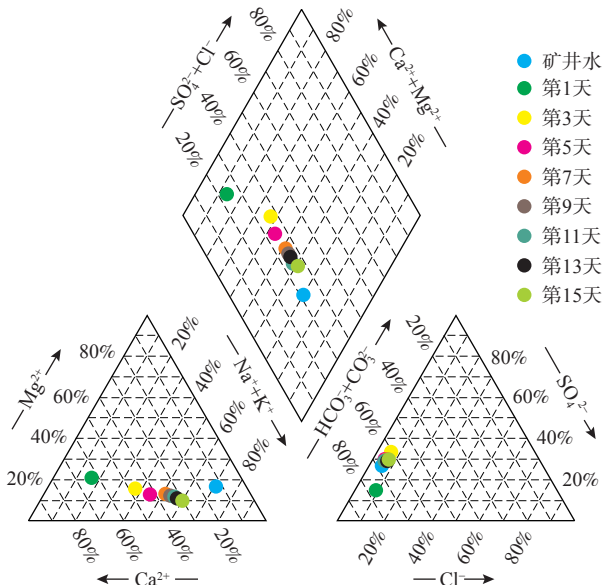


图 3 水样 Piper 图

Fig. 3 Piper diagram of water samples

HCO₃—Ca 型逐渐向 HCO₃—Na 型演化,表现出由 Ca 型水向 Na 型水转化的趋势。

4 分析与讨论

4.1 水化学特征分析

4.1.1 TDS 与主要离子质量浓度相关性分析

随着地下水运移路径的增加,TDS 和主要离子浓度通常呈升高的趋势^[26]。在淋滤试验初期,渗出液

TDS 质量浓度低于矿坑涌水;随着淋滤试验进行,淋滤渗出液 TDS 质量浓度逐渐升高,并略高于矿坑涌水。根据水化学参数相关系数矩阵(表 3),Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻和 TDS 质量浓度呈显著正相关性(p<0.01),相关系数分别为 0.840,0.857,0.954,0.830。

由于 Na⁺与 K⁺的来源和性质相近,且 K⁺浓度远低于 Na⁺,所以一般情况下将 K⁺归到 Na⁺中,不单独进行区分。淋滤渗出液中主要离子质量浓度变化见图 4。在淋滤试验过程中,淋滤液阳离子中的 Ca²⁺和 Na⁺+K⁺浓度的变化幅度较大,Mg²⁺浓度变幅较小。Ca²⁺浓度先升高后逐渐降低,Na⁺+K⁺浓度先降低后逐渐升高,Mg²⁺浓度呈降低趋势。淋滤液阴离子中的 HCO₃⁻和 SO₄²⁻浓度变化幅度较大,先降低后升高。在淋滤初期淋滤液中 F⁻浓度大于矿坑涌水,之后 F⁻浓度先升高后逐渐降低。Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻与 TDS 质量浓度变化趋势相同,结合表 3,说明 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻是淋滤渗出液中 TDS 的主要来源。

4.1.2 离子比值浓度分析

淋滤试验中水和土壤之间发生物理化学作用导致水体中离子组分浓度变化,离子比值可以揭示水体中离子组分来源^[27-28],离子比值变化一定程度上可以反映水土作用的过程。在自然环境中,岩盐溶解产生的 γ(Na⁺)/γ(Cl⁻)(γ 为离子浓度)接近于 1^[29],矿坑涌水的 γ(Na⁺)/γ(Cl⁻)的比值远大于 1,如图 5(a)所示,表明矿坑涌水的 Na⁺除了来源于岩盐溶解之外,还来自于

表 3 水化学参数相关系数矩阵

Table 3 Correlation matrix of hydrochemical parameters of leaching mine water

水化学参数	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	pH	TDS
Ca ²⁺	1								
K ⁺	-0.407	1							
Mg ²⁺	-0.127	0.937**	1						
Na ⁺	-0.845**	0.287	-0.058	1					
Cl ⁻	-0.804**	0.229	-0.112	0.976**	1				
SO ₄ ²⁻	-0.483	0.137	-0.172	0.860**	0.867**	1			
HCO ₃ ⁻	-0.835**	0.355	0.017	0.984**	0.955**	0.879**	1		
pH	-0.437	-0.022	-0.305	0.684*	0.727*	0.689*	0.625	1	
TDS	-0.479	-0.130	-0.439	0.840**	0.857**	0.954**	0.830**	0.701*	1

注: *表示置信度在 0.05 水平,相关性显著; **表示置信度在 0.01 水平,相关性显著。

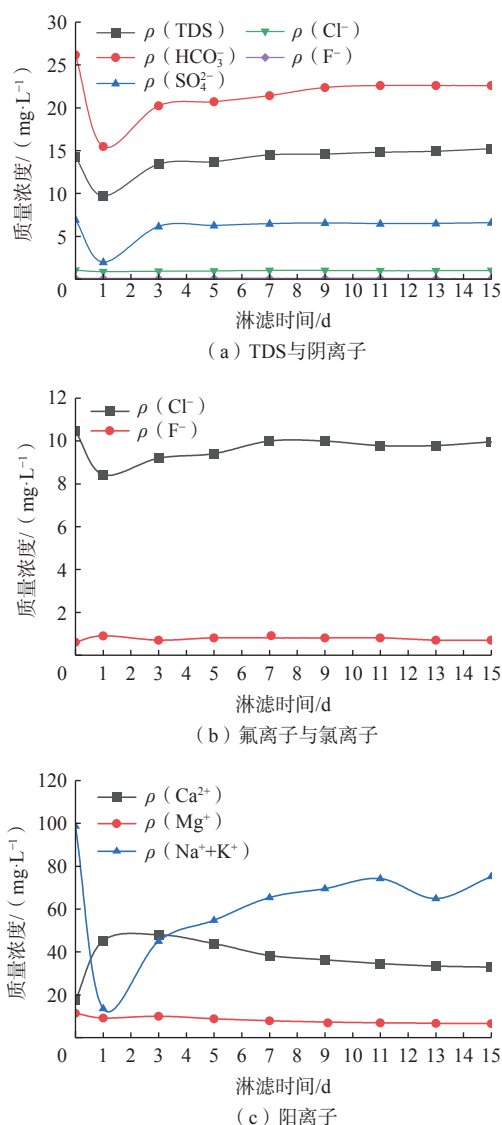


图4 淋滤渗出液主要离子质量浓度变化

Fig. 4 Variations of the mass concentration of major ions in the leaching water

注:图中 ρ 为质量浓度。

其他含钠矿物的溶解^[30]。淋滤试验第一天淋滤渗出液 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 的比值接近于 1, 主要是由于水体中 $\gamma(\text{Na}^+)$ 较矿坑涌水大幅度降低(表 1), 导致 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 的比值变小, 表明淋滤过程淋滤液与土壤存在离子交换作用。图 5(b) 中矿坑涌水 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-)$ 的比值在 1:4 下方, 而渗出液 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-)$ 的比值在第 1 天接近 1:1, 此后比值逐渐下降, 且降幅逐渐变缓, 说明淋滤过程中有离子交换作用和含钙矿物溶解作用, 导致淋滤渗出液中 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 大于矿坑涌水。同时, 渗出液中 $\gamma(\text{F}^-)$ 升高, 也表明存在含氟矿物溶解。图 5(c) 中, 矿坑涌水 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{SO}_4^{2-})$ 的比值在 1:1 下方, 淋滤过程渗出液 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{SO}_4^{2-})$ 的比值在 1:1 上方, 淋滤

过程渗出液比值逐渐下降, 向 1:1 靠近, 说明在淋滤过程中存在离子交换作用导致 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 降低^[31]。 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的比值可以用来判断 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的来源, 比值大于 1 说明来源于碳酸盐, 比值小于 1 说明来源于蒸发盐岩和硅酸盐的溶解^[32]。图 5(d) 中, 矿坑涌水 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的比值在 1:1 下方, 远小于 1, 由此判断矿坑涌水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来自硅酸盐及蒸发盐岩的溶解, 淋滤过程渗出液 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的比值向着矿坑涌水的比值靠近。淋滤初期渗出液中 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 大于矿坑涌水, 随着淋滤试验的进行, 淋滤液中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 被 Na^+ 置换进入土壤中, 使得淋滤液中 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 、 $\gamma(\text{Mg}^{2+})$ 降低, 而 $\gamma(\text{Na}^+)$ 增加。初期淋滤渗出液中的 $\gamma(\text{SO}_4^{2-})$ 和 $\gamma(\text{HCO}_3^-)$ 低于矿坑涌水, 考虑矿坑涌水中的 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 与土壤中的 Ca^{2+} 发生竞争性吸附或沉淀, 从而被固定吸附在固体相中, 导致水中的浓度降低。

4.1.3 阳离子交换作用

土壤颗粒表面通常带有负电荷, 可以吸附水体中的阳离子。在一定条件下, 水体中的离子会替换土壤颗粒表面吸附的离子, 发生离子交换作用, 改变水体组分特征。氯碱指数(chloro-alkaline indices, CAI)可以表征阳离子交换的强度与可能性, 水体中的 Na^+ 、 K^+ 与围岩中吸附态的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 发生交换时, CAI-I 与 CAI-II 值为正值; 当水体中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与围岩矿物中吸附态的 Na^+ 、 K^+ 发生交换时, CAI-I 与 CAI-II 值为负值^[33]。CAI 绝对值的大小可以用来表征阳离子交换作用的强度, CAI 的绝对值越大, 阳离子交换作用越强。

$$\text{CAI-I} = \frac{c(\text{Cl}^-) - [c(\text{K}^+) + c(\text{Na}^+)]}{c(\text{Cl}^-)} \quad (5)$$

$$\text{CAI-II} = \frac{c(\text{Cl}^-) - [c(\text{K}^+) + c(\text{Na}^+)]}{2 \times c(\text{SO}_4^{2-}) + c(\text{HCO}_3^-) + c(\text{NO}_3^-)} \quad (6)$$

如图 6(a) 所示, 矿坑涌水的 CAI-I 与 CAI-II 值均为负值, 表明矿坑涌水的主要阳离子交换作用过程为水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与含水介质的 Na^+ 、 K^+ 发生交换。淋滤液中的 CAI 随着淋滤作用时间而变化。在淋滤初期, CAI-I 与 CAI-II 值都为接近 0 的负值, 表明土壤中的 Na^+ 、 K^+ 与淋滤液中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 发生阳离子交换作用, 导致土壤中 Na^+ 与 K^+ 浓度降低, 与矿坑涌水相比 CAI-I 与 CAI-II 值均变大。随着淋滤试验的进行, 淋滤液中的 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 被充分交换, 淋滤液中的 Na^+ 与 K^+ 浓度增加, 而淋滤液未停止注入, 因此淋滤液 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 继续与土壤中的 Na^+ 、 K^+ 发生交换, 淋滤液 CAI-

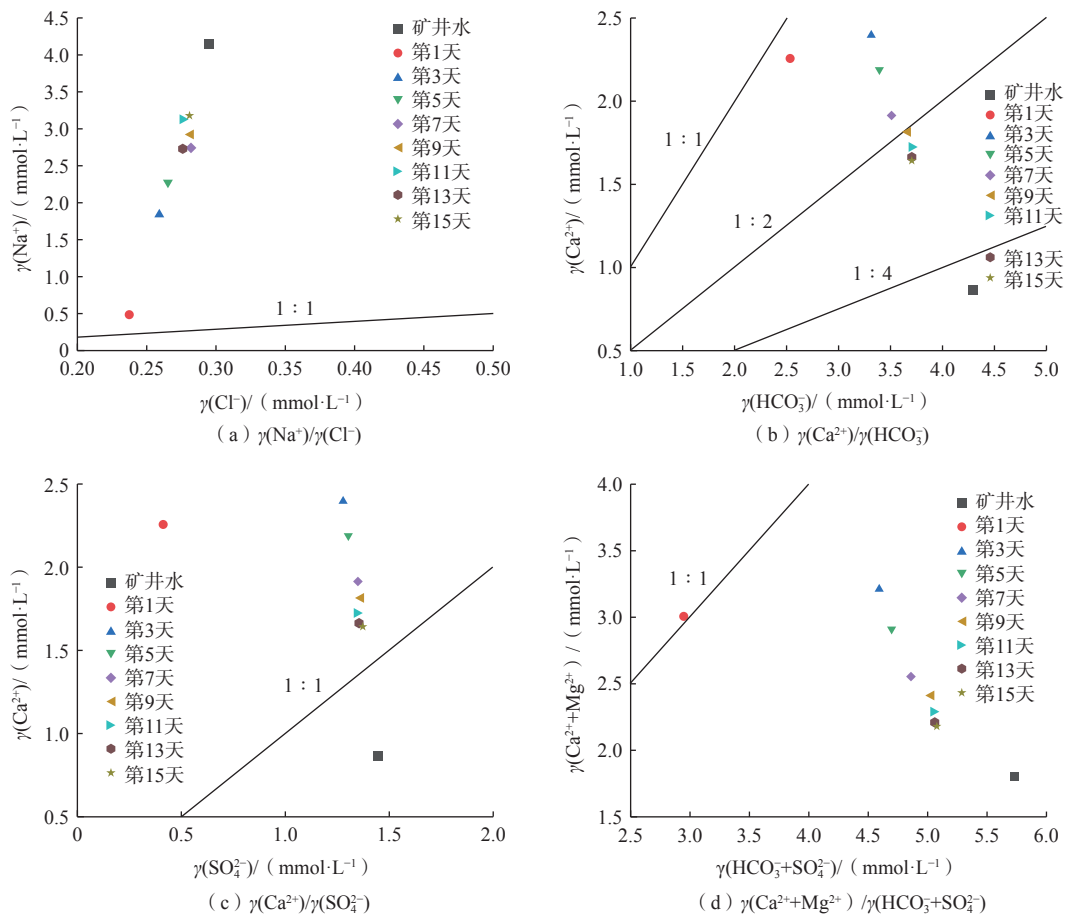


图 5 主要离子比值关系图

Fig. 5 Ratio of major ions

I 与 CAI- II 值开始降低, 阳离子交换作用增强。

除了 CAI 之外, $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{HCO}_3^--\text{SO}_4^{2-})$ 与 $\gamma(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-)$ 的关系也可以表征阳离子交换作用^[34]。当 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{HCO}_3^--\text{SO}_4^{2-})$ 与 $\gamma(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-)$ 的比值越靠近 1 : 1 时, 代表水体发生的阳离子交换作用强度越

大。如图 6(b) 所示, 矿坑涌水中的 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{HCO}_3^--\text{SO}_4^{2-})$ 与 $\gamma(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-)$ 的比值近似 1 : 1, 表示阳离子交换作用程度非常强。随着淋滤试验的进行, 淋滤液 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{HCO}_3^--\text{SO}_4^{2-})$ 与 $\gamma(\text{Na}^++\text{K}^+-\text{Cl}^-)$ 比值逐渐靠近 1 : 1, 阳离子交换作用增强, 与氯碱指数图指示的

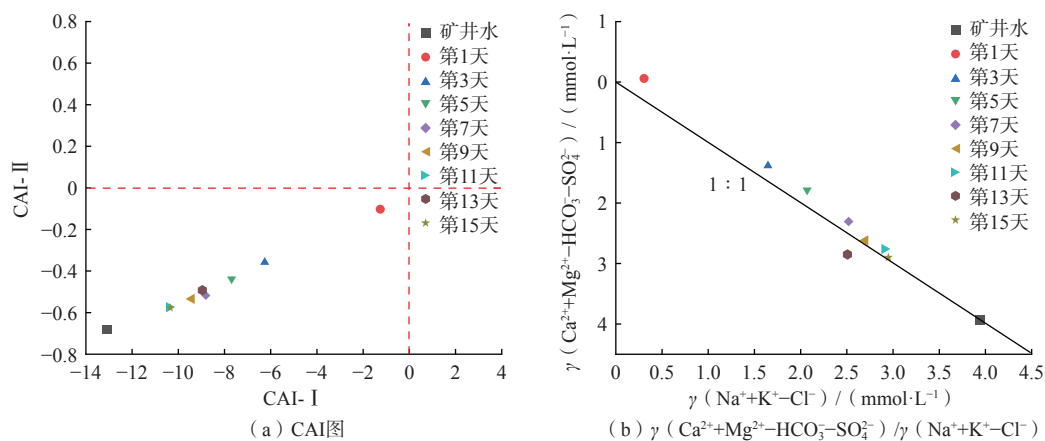


图 6 阳离子交换作用强度示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cation exchange intensity

结果一致。

4.2 灌溉适宜性评价

根据 SAR、RSC、SSP 和 PI 4 项评价指标计算结果,利用 Origin 软件绘制了水质灌溉适宜性雷达图(图 7)。图中绿色区域为非常适宜灌溉的标准范围,黄色区域为适宜灌溉的标准范围,各参数限值如表 4

所示。若水样点的 4 项指标均位于限值范围之内,可判断该水样水质良好,适宜灌溉。矿坑涌水的 RSC 指标为 2.479 mmol/L,适宜灌溉;SSP 指标为 70.024%,灌溉适宜性处于不确定范围内,SAR 与 PI 2 项指标分别为 4.364 (mmol/L)^{1/2}、104.358%,处于非常适宜等级;总体上,矿坑涌水可用于直接灌溉。

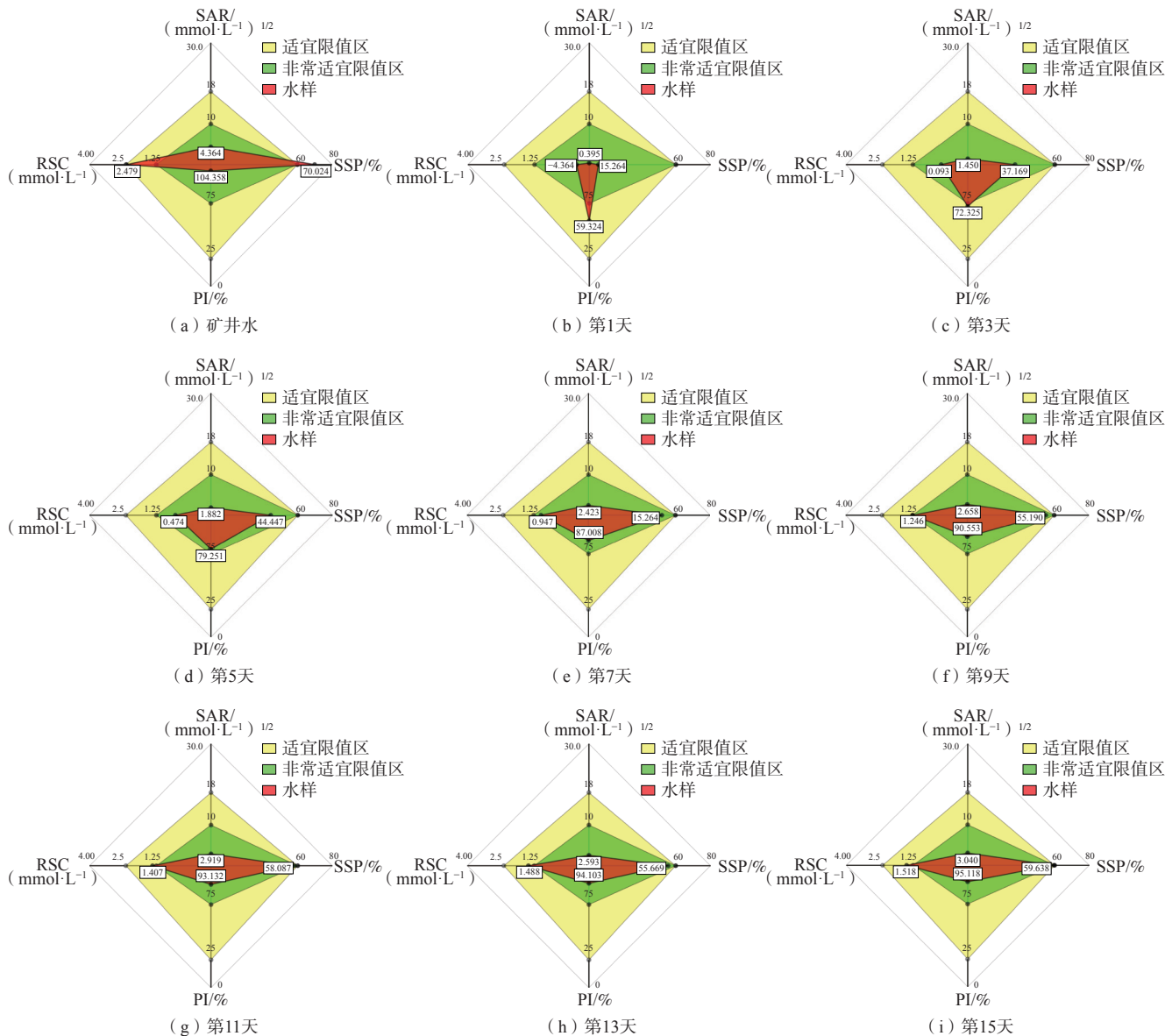


图 7 矿坑涌水灌溉适宜性雷达图

Fig. 7 Radar chart of irrigation suitability for mine pit water

从第 1 天至第 15 天,淋滤试验渗出液的 SAR、RSC、SSP、PI 均逐渐上升。其中,SAR 从 0.395(mmol/L)^{1/2} 上升至 3.040 (mmol/L)^{1/2},在非常适宜灌溉范围内,但距离矿坑涌水的 SAR 值还有一定的距离;RSC 从 -0.482 mmol/L 上升至 1.518 mmol/L,在适宜灌溉范围

内;SSP 值从 15.264% 上升至 59.638%,到达非常适宜灌溉限值边缘;PI 值同样逐渐上升,从 59.324% 上升至 95.118%,趋向于非常适宜灌溉。整体来看,第 1 天至第 15 天的样品水质都处于适宜灌溉的范围内。随着灌溉时间的增加,部分指标趋于限值边缘。在利用

表 4 灌溉水质适宜性分级标准
Table 4 Classification standards for irrigation water quality suitability

评价参数	分类	适宜等级
SAR/(mmol·L ⁻¹) ^{1/2}	$I_{\text{SAR}} < 10$	非常适宜
	$10 \leq I_{\text{SAR}} \leq 18$	适宜
	$I_{\text{SAR}} > 18$	不适宜
RSC/(mmol·L ⁻¹)	$I_{\text{RSC}} < 1.25$	非常适宜
	$1.25 \leq I_{\text{RSC}} \leq 2.5$	适宜
	$I_{\text{RSC}} > 2.5$	不适宜
SSP/%	$I_{\text{SSP}} < 60$	非常适宜
	$60 \leq I_{\text{SSP}} \leq 80$	不确定
	$I_{\text{SSP}} > 80$	不适宜
PI/%	$I_{\text{p}} > 75\%$	非常适宜
	$25\% \leq I_{\text{p}} \leq 75\%$	适宜
	$I_{\text{p}} < 25\%$	不适宜

矿坑涌水实际灌溉时,可对灌溉水进行适当预处理,优化灌溉时间,以达到最优灌溉效果。

5 结论

(1)研究区矿坑涌水主要阳离子为 Na⁺,主要阴离子为 HCO₃⁻,水化学类型为 HCO₃—Na 型;矿坑涌水与排土场复垦区土壤淋滤试验渗出液的水化学类型由 HCO₃—Ca 型逐渐过渡为 HCO₃—Na 型;TDS 与 Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻质量浓度具有较高的正相关性。

(2)矿坑涌水水化学类型主要受阳离子交换作用以及矿物溶解作用的影响,矿坑涌水中 Na⁺的来源包括岩盐以及其他含钠矿物的溶解;矿坑涌水中 Ca²⁺、Mg²⁺主要来自硅酸盐及蒸发盐岩的溶解。

(3)基于 SAR、RSC、SSP 和 PI 4 项指标的综合评价结果,研究区矿坑涌水可以直接用于灌溉。在淋滤试验过程中,由于溶解作用及阳离子交换吸附作用,初期渗出液中 Ca²⁺浓度明显增加;随着淋滤试验的进行,淋滤液中阳离子交换强度逐渐增加,淋滤液中各项灌溉水质指标浓度呈上升趋势,但总体仍符合灌溉限值要求。

参考文献 (References) :

[1] 王双明. 对我国煤炭主体能源地位与绿色开采的思考 [J]. 中国煤炭, 2020, 46(2): 11 - 16. [WANG Shuangming. Thoughts about the main energy status of coal and green mining in China[J]. China Coal, 2020, 46(2): 11 - 16. (in Chinese with English abstract)]
[2] 顾大钊, 李井峰, 曹志国, 等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(10):

3079 - 3089. [GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, et al. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3079 - 3089. (in Chinese with English abstract)]
[3] 孙亚军, 张莉, 徐智敏, 等. 煤矿区矿井水水质形成与演化的多场作用机制及研究进展 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 423 - 437. [SUN Yajun, ZHANG Li, XU Zhimin, et al. Multi-field action mechanism and research progress of coal mine water quality formation and evolution[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 423 - 437. (in Chinese with English abstract)]
[4] 顾大钊, 李庭, 李井峰, 等. 我国煤矿矿井水处理技术现状与展望 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 11 - 18. [GU Dazhao, LI Ting, LI Jingfeng, et al. Current status and prospects of coal mine water treatment technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 11 - 18. (in Chinese with English abstract)]
[5] 何绪文, 王绍州, 张学伟, 等. 煤矿矿井水资源化利用技术创新 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 523 - 530. [HE Xuwen, WANG Shaozhou, ZHANG Xuewei, et al. Coal mine drainage resources utilization technology innovation[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 523 - 530. (in Chinese with English abstract)]
[6] 孙亚军, 陈歌, 徐智敏, 等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 304 - 316. [SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, et al. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 304 - 316. (in Chinese with English abstract)]
[7] 李竞赢, 刘启蒙, 杨明慧. 矿井水水化学特征及资源化利用研究——以张集煤矿为例 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 254 - 263. [LI Jingying, LIU Qimeng, YANG Minghui. Study on chemical characteristics and resource utilization of mine water: Taking Zhangji Coal Mine as an example[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 254 - 263. (in Chinese with English abstract)]
[8] 彭苏萍, 毕银丽. 西部干旱半干旱煤矿区生态环境损伤特征及修复机制 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 57 - 64. [PENG Suping, BI Yinli. Properties of ecological environment damage and their mechanism of restoration in arid and semi-arid coal mining area of western China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 57 - 64. (in Chinese with English abstract)]

- [9] 王皓,董书宁,尚宏波,等.国内外矿井水处理及资源化利用研究进展[J].*煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 222 – 236. [WANG Hao, DONG Shuning, SHANG Hongbo, et al. Domestic and foreign progress of mine water treatment and resource utilization[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 222 – 236. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李庭,李井峰,杜文凤,等.国外矿井水利用现状及特点分析[J].*煤炭工程*, 2021, 53(1): 133 – 138. [LI Ting, LI Jingfeng, DU Wenfeng, et al. Current status and characteristics of mine water reuse in foreign countries[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(1): 133 – 138. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 樊龙斌. 乌兰木伦煤矿矿井水综合利用工程技术研究[J].*煤炭科学技术*, 2017, 45(增刊2): 42 – 44. [FAN Longbin. Study on comprehensive utilization engineering technology of mine water in Ulan Mulun Coal Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(Sup2): 42 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 翟建平,王茜,王宝萍. 矿井水再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物影响研究[J].*陕西水利*, 2014(1): 175 – 176. [ZHAI Jianping, WANG Qian, WANG Baoping. Research on the impact of mine water reclaimed water irrigation on Soil properties and Soil microorganisms[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2014(1): 175 – 176. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 任静,钱建立,孟冲,等.河南豫北某煤矿矿井排水综合利用研究[J].*中国科技论文*, 2015, 10(15): 1856 – 1860. [REN Jing, QIAN Jianli, MENG Chong, et al. Research on comprehensive utilization of coal mine drainage in North Henan[J]. *China Sciencepaper*, 2015, 10(15): 1856 – 1860. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 刘敏,郝春明. 峰峰矿区矿井水灌溉区重金属污染评价及定量源解析[J].*科学技术与工程*, 2021, 21(17): 7377 – 7384. [LIU Min, HAO Chunming. Evaluation and quantitative source analysis of heavy metal pollution in Fengfeng mine drainage irrigation area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(17): 7377 – 7384. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 吕情绪,李果,许峰,等. 神东矿区矿井水水化学特征及其灌溉适宜性评价[J].*能源与环保*, 2021, 43(12): 116 – 122. [LV Qingxu, LI Guo, XU Feng, et al. Hydrochemical characteristics of mine water and its suitability for irrigation in Shendong Mining Area[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2021, 43(12): 116 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 郭洋楠. 神东矿区矿井水灌溉适宜性空间分布特征[J].*矿业科学学报*, 2024, 9(4): 561 – 572. [GUO Yangnan. Spatial distribution characteristics of suitability of mine water for irrigation in the Shendong mining area[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(4): 561 – 572. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 马莲净,赵宝峰,吕玉广,等. 煤矿矿井水水化学形成作用与灌溉适宜性评价[J].*环境化学*, 2023, 42(10): 3429 – 3438. [MA Lianjing, ZHAO Baofeng, LV Yuguang, et al. Hydrogeochemical processes and irrigation applicability of mine water in coal mine[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(10): 3429 – 3438. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 朱春芳,龚建师,檀梦皎,等. 淮北平原浅层地下水化学特征及水质动态分析[J].*水文地质工程地质*, 2025, 52(3): 56 – 67. [ZHU Chunfang, GONG Jianshi, TAN Mengjiao, et al. Hydrochemical characteristics and water quality dynamic analysis of shallow groundwater in Huaibei Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2025, 52(3): 56 – 67. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 刘基,高敏,靳德武,等. 榆神矿区地表水水化学特征及其影响因素分析[J].*煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 354 – 361. [LIU Ji, GAO Min, JIN Dewu, et al. Hydrochemical characteristics of surface water and analysis on influence factors in Yushen Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 354 – 361. (in Chinese with English abstract)]
- [20] BISHWAKARMA K, WANG Guanxing, ZHANG Fan, et al. Hydrochemical characterization and irrigation suitability of the Ganges Brahmaputra River System: Review and assessment[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(2): 388 – 402.
- [21] 刘鑫,向伟,司炳成. 渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素[J].*环境科学*, 2021, 42(6): 2817 – 2825. [LIU Xin, XIANG Wei, SI Bingcheng. Hydrochemistry and its controlling factors and water quality assessment of shallow groundwater in the Weihe and Jinghe river catchments[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(6): 2817 – 2825. (in Chinese with English abstract)]
- [22] GUO Haipeng, LI Muzi, WANG Lu, et al. Evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in an agricultural region of the North China

- Plain[J]. *Water*, 2021, 13(23): 3426.
- [23] 张勇军, 杨余辉, 胡义成, 等. 新疆喀什河流域水化学时空变化特征及灌溉适应性评价[J]. 干旱区地理, 2023, 46(4): 583 – 594. [ZHANG Yongjun, YANG Yuhui, HU Yicheng, et al. Temporal and spatial variation characteristics of hydrochemistry and irrigation adaptability evaluation in Kashi River Basin, Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(4): 583 – 594. (in Chinese with English abstract)]
- [24] BATARSEH M, IMREIZEEQ E, TILEV S, et al. Assessment of groundwater quality for irrigation in the arid regions using irrigation water quality index (IWQI) and GIS-Zoning maps: Case study from Abu Dhabi Emirate, UAE[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, 14: 100611.
- [25] 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. 农田灌溉水质标准: GB 5084—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for irrigation water quality: GB 5084—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)]
- [26] 张泽源, 许峰, 王世东, 等. 保德煤矿奥陶纪灰岩水水化学特征及形成机理[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(5): 81 – 88. [ZHANG Zeyuan, XU Feng, WANG Shidong, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of Ordovician limestone water in Baode coal mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(5): 81 – 88. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 张景涛, 史浙明, 王广才, 等. 柴达木盆地大柴旦地区地下水水化学特征及演化规律[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 194 – 205. [ZHANG Jingtao, SHI Zheming, WANG Guangcai, et al. Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Dachaidan area, Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(4): 194 – 205. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 苏绘梦, 张发旺, 侯甦予, 等. 基于水化学与氢氧稳定同位素的平禹矿区沉降区地下水循环变化解析[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 53 – 67. [SU Huimeng, ZHANG Fawang, HOU Suyu, et al. An analysis of groundwater circulation in the Pingyu mining area based on hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(5): 53 – 67. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 郭小娇, 王慧玮, 石建省, 等. 白洋淀湿地地下水系统水化学变化特征及演化模式[J]. *地质学报*, 2022, 96(2): 656 – 672. [GUO Xiaojiao, WANG Huiwei, SHI Jiansheng, et al. Hydrochemical characteristics and evolution pattern of groundwater system in Baiyangdian wetland, North China Plain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(2): 656 – 672. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 吕晓立, 郑跃军, 刘可, 等. 兰州不同城镇功能区地下水氟赋存特征及影响因素[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(2): 215 – 226. [LV Xiaoli, ZHENG Yuejun, LIU Ke, et al. Characteristics and driving factors of fluoride in groundwater in different urban functional area of Lanzhou city[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(2): 215 – 226. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 苏贵芬, 刘桂建, 刘玥, 等. 阜阳市集中式地下水饮用水源地水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2025, 46(2): 796 – 808. [SU Guifen, LIU Guijian, LIU Yue, et al. Hydrochemical characteristics and origin of centralized groundwater drinking water source in Fuyang city[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(2): 796 – 808. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 刘德玉, 贾贵义, 张伟, 等. 甘肃敦煌地区疏勒河尾间区地下水水化学特征及成因分析[J]. 地质论评, 2022, 68(1): 181 – 194. [LIU Deyu, JIA Guiyi, ZHANG Wei, et al. Hydrochemical characteristics and genetic mechanism analysis of groundwater in the tail area of the Shule River, Dunhuang, Gansu[J]. *Geological Review*, 2022, 68(1): 181 – 194. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 吕晓立, 刘景涛, 周冰, 等. 塔城盆地地下水氟分布特征及富集机理[J]. 地学前缘, 2021, 28(2): 426 – 436. [LV Xiaoli, LIU Jingtao, ZHOU Bing, et al. Distribution characteristics and enrichment mechanism of fluoride in the shallow aquifer of the Tacheng Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(2): 426 – 436. (in Chinese with English abstract)]
- [34] LIU Jiutan, PENG Yuming, LI Changsuo, et al. Characterization of the hydrochemistry of water resources of the Weibei Plain, Northern China, as well as an assessment of the risk of high groundwater nitrate levels to human health[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268(Pt B): 115947.

编辑: 宗 爽