



地下水水化学垂向分带特征及成因机制

王旭东 闫祖喻 郭强 张锁 唐佳伟 胡瑜恬 刘小庆 李井峰

引用本文:

王旭东, 闫祖喻, 郭强, 等. 地下水水化学垂向分带特征及成因机制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 222–233.

WANG Xudong, YAN Zuyu, GUO Qiang. Vertical zoning characteristics and genesis mechanism of groundwater hydrochemistry: a case study of Xinjie Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8): 222–233.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0782>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿地下水库水体水化学特征及其成因解析

Analysis of hydrochemical characteristics and formation mechanism in coal mine underground reservoir

煤炭科学技术. 2020, 48(11): 223–231 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ae02bb14-6d13-449b-9e8a-db869c52bf74>

榆神府矿区地下水水化学特征及形成机理

Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yushenfu Mining Area

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 383–394 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1050>

台格庙矿区地下水水化学特征与演变规律研究

Study on chemical characteristics and evolution law of groundwater in Taigemiao Mining Area

煤炭科学技术. 2023, 51(9): 284–291 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1439>

呼吉尔特矿区矿井水回灌模拟的水化学演化研究

Hydrochemical evolution of mine water injection in Hojirt Mining Area

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 470–476 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1601>

桌子山煤田奥灰水水化学特征及成因分析

Hydrogeochemical characteristics and forming reason of Ordovician limestone groundwater in Zhuoshan Coalfield

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 180–188 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9e9c2d8f-b7a2-422e-adb4-96db4de43bfa>

矿井水水化学特征及资源化利用研究

Study on chemical characteristics and resource utilization of mine water: taking Zhangji Coal Mine as an example

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 254–263 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0927>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王旭东, 闫祖喻, 郭强, 等. 地下水水化学垂向分带特征及成因机制——以新街矿区为例[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 222–233.

WANG Xudong, YAN Zuyu, GUO Qiang, et al. Vertical zoning characteristics and genesis mechanism of groundwater hydrochemistry: a case study of Xinjie Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8): 222–233.

地下水水化学垂向分带特征及成因机制

——以新街矿区为例

王旭东¹, 闫祖喻¹, 郭强², 张锁¹, 唐佳伟², 胡瑜恬², 刘小庆², 李井峰²

(1. 神华新街能源有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 017200; 2. 北京低碳清洁能源研究院 煤炭开采水资源保护与利用全国

重点实验室, 北京 102211)

摘要: 矿井水作为煤矿矿区主要的潜在供水水源, 具有较好的综合再利用潜力。然而, 煤层顶板充水含水层与围岩发生的复杂多样的物理、化学反应共同影响煤矿矿井水水质。因此, 确定不同充水含水层地下水水质状况及其成因机制, 对矿井水的保护与综合利用具有至关重要的意义。本研究基于新街矿区一井田的地下水样本和岩石矿物成分数据, 采用多元统计分析与水文地球化学方法, 并通过 PHREEQC 软件对水化学平衡进行模拟, 深入探讨了不同含水层地下水的化学特征及其矿物溶解/沉淀的垂直分带规律, 旨在揭示其成因机制。研究发现: ①矿区地下水的化学特征呈现出明显的垂直异质性, 其中志丹群以 $\text{HCO}_3\text{--Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{--Mg}\cdot\text{Ca}$ 型为主, 而安定组至延安组则主要为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{--Na}$ 、 $\text{SO}_4\text{--Na}$ 型, TDS、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 可能是主导水质垂向分异的关键驱动因子。②关键水质指标, 如 TDS、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 的浓度与含水层深度(从志丹群至延安组)呈线性关系, 通过离子比值分析发现 K^+ 、 Na^+ 主要源于硅酸盐矿物溶解, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度受到碳酸盐、硫酸盐以及硅酸盐矿物溶解作用的共同影响。③矿物饱和指数的深度变化表明, 白云石、斜长石和岩盐等矿物在不同含水层中存在未饱和与过饱和状态的交替, 志丹群和安定组的地下水中, 许多矿物显示出进一步溶解的趋势; 而在直罗组和延安组, 多数矿物已达到过饱和状态。④水岩相互作用控制不同深度矿井水的水化学组成, 最上层的志丹群水化学组分主要受钠长石、钾长石、方解石、绿泥石等矿物溶解作用的影响, 深部含水层硅酸盐矿物、石膏、岩盐和黄铁矿的溶解反应更强, 并伴随着阳离子交替吸附作用, 形成了高矿化的 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{--Na}$ 、 $\text{SO}_4\text{--Na}$ 型水。本研究深入探讨了煤矿区不同含水层地下水化学的垂直分带特征及其矿物溶解机制, 为矿井水资源的精准管理、水质调控和环境保护提供了坚实的科学基础, 具有重要的理论指导价值和实践应用前景。

关键词: 矿井水; 水化学特征; 垂向分带; 矿物饱和指数; 新街矿区

中图分类号: TD74

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)08-0222-12

Vertical zoning characteristics and genesis mechanism of groundwater hydrochemistry: a case study of Xinjie Mining Area

WANG Xudong¹, YAN Zuyu¹, GUO Qiang², ZHANG Suo¹, TANG Jiawei², HU Yutian², LIU Xiaoqing², LI Jingfeng²

(1. Shenhua Group Xinjie Energy Co., Ltd, Ordos 017200, China; 2. National Institute of Low Carbon and Clean Energy,

State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102211, China)

Abstract: Mine water, as the main potential water supply source for coal mine sites, has a good potential for comprehensive reuse. However, the complex and diverse physical and chemical reactions between the coal seam roof-filling aquifers and the surrounding rocks

收稿日期: 2024-06-14

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2024-0782

基金项目: 国家能源集团科技资助项目 (GJNY-21-129)

作者简介: 王旭东(1981—), 男, 江苏徐州人, 工程师。E-mail: 10000105@ceic.com

通讯作者: 郭强(1986—), 男, 内蒙古包头人, 高级工程师, 博士。E-mail: guoqiang_2004@163.com

jointly affect the quality of mine water in coal mines. Therefore, it is of vital significance to determine the status of groundwater quality and its genesis mechanism in different water-filled aquifers for the protection and comprehensive utilization of mine water. Based on the groundwater samples and rock mineral composition data from a well field in Xinjie Taigemiao Mine, this study uses multivariate statistical analysis and hydrogeochemical techniques, and simulates the water chemical equilibrium by PHREEQC software, to explore in depth the chemical characteristics of the groundwater in different aquifers and its vertical zoning laws of mineral dissolution/precipitation, with the aim of revealing the causative mechanism. It is found that ① the chemical characteristics of the groundwater in the mining area show obvious vertical heterogeneity, in which the Zhidan Group is dominated by $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$ and $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$ types, while the Anding Formation to Yan'an Formation is dominated by $\text{Cl-SO}_4\text{-Na}$ and $\text{SO}_4\text{-Na}$ types, TDS, Na^+ , and SO_4^{2-} may be key drivers dominating vertical water quality differentiation. ② The concentrations of key water quality indicators, such as TDS, Na^+ , and SO_4^{2-} , show a linear relationship with the depth of the aquifer (from the Zhidan Group to the Yan'an Formation), and the analysis of the ionic ratios reveals that the K^+ and Na^+ mainly originate from the dissolution of silicate minerals, and that the concentrations of Ca^{2+} and Mg^{2+} are affected by the dissolution of carbonate, sulfate and silicate minerals. ③ The depth variation of the mineral saturation index shows that dolomite, plagioclase feldspar and rock salt alternate between unsaturated and oversaturated states in different aquifers. In the groundwater of the Zhidan Group and the Anding Formation, many minerals show a tendency of further dissolution, while in the Zhiluo Formation and the Yan'an Formation, the majority of the minerals have already reached the oversaturated state. ④ Water-rock interactions control the hydrochemical composition of mine water at different depths. The hydrochemical components of the uppermost Shidan Group are mainly affected by the dissolution of minerals such as sodium feldspar, potassium feldspar, calcite, chlorite, and so on, and the deeper aquifers show a stronger reaction to the dissolution of silicate minerals, gypsum, rock salts, and pyrite accompanied by alternating adsorption of cations, resulting in the formation of highly mineralized $\text{Cl-SO}_4\text{-Na}$, $\text{SO}_4\text{-Na}$ type water. This study deeply explores the vertical zoning characteristics of groundwater chemistry in different aquifers in the coal mine area and its mineral dissolution mechanism, which provides a solid scientific foundation for the precise management of mine water resources, water quality regulation and environmental protection, and has important theoretical guidance value and practical application prospects.

Key words: mine water; hydrochemical characteristics; vertical zoning; mineral saturation index; Xinjie Mining Area

0 引 言

煤炭在我国既具有储量优势,又具有成本优势,且分布广泛,尽管可再生能源的发展势在必行,但煤炭在可预见的未来仍将是国家主要的能源支柱和重要的战略物资^[1-3]。随着煤炭开发重心的西移,西部地区水资源的稀缺性和恶劣的自然条件对矿井水的综合再利用提出了紧迫的挑战^[4-6]。为了支持后续矿井水的有效处理和高效利用,关键在于准确识别煤层充水含水层的水化学特性及其空间异质性^[7]。此外,由煤炭开采产生的矿井水可能携带有害物质,对周边水环境构成潜在威胁。因此,研究不同充水含水层的水化学垂向分带特征及其成因机制,对于指导煤炭资源的可持续开采、矿井水质的污染防治、以及周边环境的保护,具有重大的实践意义和应用价值。

在煤矿矿井水化学特征及其水质演变规律方面,国内外学者的研究目前主要聚焦于充水含水层的平面空间分布和时间变化规律。张亚军等^[8]通过建立“三带”模型,深入分析了华北型、西北—东北型、南方型三种典型矿井水水质形成的水文地质结构模式及其主控因素,进一步划分并阐明了矿井水水质形成过程中水动力场的演化阶段及作用过程。此外,王强民等^[9]依据水文地球化学理论,对榆神矿区不

同充水含水层的水化学和氢、氧同位素特征进行了探讨,成功识别了不同埋深(浅埋、中深埋和深埋)煤矿矿井水的来源。吕情绪^[10]在此基础上,详细描述了保德煤矿地表水、地下水和矿井水的水化学特征,并明确了采煤活动对水化学影响的具体机制。随后的研究揭示了煤矿不同地下水含水层在垂直方向上存在明显的差异,并指出了后期开采中矿井水水质演变的不确定性特征^[11-15],这种差异性和不确定性为矿井水的处理、水质判别和水害防治提出了新的挑战。进一步的研究还发现,矿井水水化学组分的演变主要受到矿井水与围岩矿物反应状况的控制^[16-18]。在这方面,房满义等^[19]深入探讨了大柳塔煤矿地下水库中水岩作用的机理,发现矿井水中矿物的饱和状态对顶板岩样中矿物溶解/沉淀过程有显著影响。殷晓曦等^[20-21]通过对历年常规水化学数据进行主成分分析,揭示了采动影响下水化学演化过程中水-岩作用强度的变化规律,这一强度受到矿井水天然矿物饱和状态的制约。尽管这些研究极大地丰富了对矿区地下水化学特征的认识,但李海祥等^[22]在新街矿区的研究指出,对于白垩系、侏罗系地下水、河水和湖水之间的水化学差异性,以及不同水源之间的补排关系,仍有更多的探索空间,特别是对于不同含水层地下水水化学垂直分带特征、矿物溶解/沉淀的平衡状态,以及水化学特征成因的深入理解,仍

然是未来研究的重要方向。这些深入的理解将为矿井水的有效处理、水害防治以及环境保护提供坚实的科学基础,进一步推动煤矿开采的可持续发展。

新街台格庙煤炭矿区,作为神东煤炭基地东胜煤田的一部分,是国家规划中的大型整装矿区,对于保障国家能源供应发挥着至关重要的作用。本研究基于新街台格庙一井田不同充水含水层地下水水质和岩石矿物成分分析数据,探究井田不同充水含水层地下水化学特征垂向分带性;通过多维分析确定含水层中组分间的来源关系和垂向空间差异特征;借助 PHREEQC 软件计算不同充水含水层地下水中矿物饱和指数,探讨不同充水含水层矿物溶解/沉淀,确定水化学垂向分带特性成因;并通过离子比值分析等确定主要离子的成因及其形成条件,以探讨阳离子交换现象对地下水化学特性的影响。研究成果将为新街矿区矿井水的有效处理和利用提供科学依据,同时为预测开采扰动下矿井水的水质变化提供支撑,降低煤炭开发利用给生态环境带来的负面压力,推动矿区可持续发展。

1 研究区概况

新街台格庙矿区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市东南部,行政区划隶属于鄂尔多斯市伊金霍洛旗和乌审旗。地理坐标为东经 $109^{\circ}25'48''\sim 109^{\circ}43'46''$,北纬 $39^{\circ}02'45''\sim 39^{\circ}26'37''$,矿区面积 800.77 km^2 。矿区总体规划共划分 8 个井田,其中一井田为首开井田。矿区具典型高原堆积型地貌特征,地表几乎全部被第四系风积砂所覆盖,植被稀疏,为半沙漠地区。气候特征属于半干旱的温带大陆季风性气候,平均气温 $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。降水少、蒸发强烈,气温和降水量季节性变化大,年平均降水量 341.5 mm ,集中在 7—9 月,年平均蒸发量 $2\,534.2\text{ mm}$ 。

矿区地层由老至新发育有:三叠系上统延长组(T_{3y}),侏罗系中下统延安组(J_{1-2y}),侏罗系中统直罗组(J_{2z})、安定组(J_{2a}),白垩系下统志丹群(K_1zh)、第三系上新统(N_2)和第四系(Q_4)。含煤地层为侏罗系中下统延安组(J_{1-2y})。一、二井田首采煤层为 2 煤层,位于延安组上部。区内地下水类型可分为松散岩类孔隙潜水含水岩组,碎屑岩类孔隙、裂隙潜水含水岩组;碎屑岩类孔隙、裂隙承压水含水岩组。地下水含水层从上到下依次划分为:第四系松散岩类孔隙潜水含水层,白垩系下统志丹群孔隙、裂隙承压含水层(I 含水层,简称 I 含),侏罗系安定组、直罗组至 2 煤顶裂隙承压含水层(II 含水层,简称 II 含),2 煤底板至 3 煤顶板裂隙承压含水层(III 含水层,简称

III 含)。其中第四系含水层为潜水含水层,I、II、III 含为承压含水层。

2 样品采集与研究方法

为了揭示新街矿区一井田不同含水层水化学特征垂向分带性和矿物溶解/沉淀平衡状态。本研究针对一井田进行了地下水和岩石样品采集与分析工作。共采集地下水水样 23 组(编号为 J1-01 至 J1-23),岩石样品 40 组。采样地下水含水层从上至下分别为白垩系志丹群、安定组、直罗组和延安组;由于含水层存在混合开采现象,部分钻孔地下水样为混合地下水样。具体采样信息详见表 1 和图 1。

表 1 地下水采集信息
Table 1 Groundwater sampling information

样品编号	含水层
J1-01	白垩系志丹群
J1-02	安定组下部-延安组上部
J1-03	安定组下部-延安组上部
J1-04	延安组中部
J1-05	延安组中部
J1-06	延安组下部
J1-07	延安组下部
J1-08	安定组-直罗组
J1-09	安定组-直罗组
J1-10	安定组
J1-11	直罗组
J1-12	白垩系志丹群
J1-13	白垩系志丹群
J1-14	白垩系志丹群
J1-15	白垩系志丹群
J1-16	白垩系志丹群
J1-17	白垩系志丹群
J1-18	白垩系志丹群
J1-19	白垩系志丹群
J1-20	白垩系志丹群
J1-21	安定组
J1-22	安定组下部-延安组上部
J1-23	安定组下部-延安组上部

本次研究对所取水样测试项目包括:钾、钙、钠、镁;氯离子、氟离子、硫酸根离子、碳酸根离子、碳酸氢根、二氧化硅;总硬度、pH。其中 pH 值、矿化度、碳酸氢根和碳酸根为野外现场测试;钾、钙、钠、镁测试方法为电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP

AES-6 000); 氯离子、硫酸根测试方法为离子色谱法(ICS-900)。岩石样品经过扫描电镜和 X 荧光衍射分析其矿物成分。

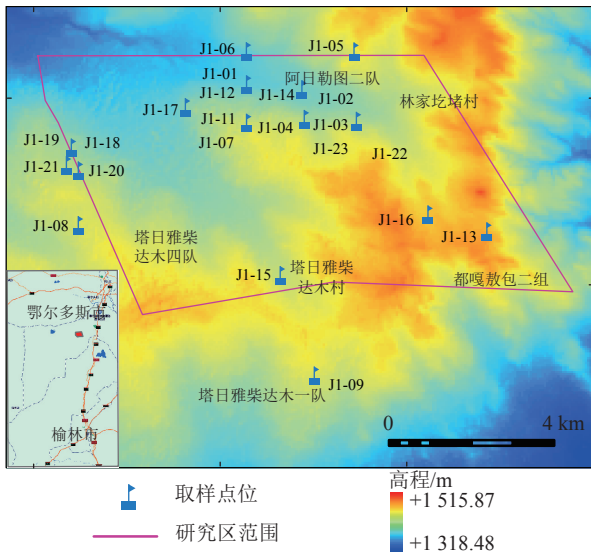


图1 地下水采样点分布

Fig.1 Distribution map of groundwater sampling points

3 结果与讨论

3.1 一井田水化学垂向分带特征

3.1.1 一井田水化学组分垂向分带特征

由图2可知,新街矿区一井田矿区地下水中 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 SO_4^{2-} 等离子浓度均总体呈现随含水层深度波动性增加的趋势。其中志丹群地下水化学组分 pH 均值为 8.6, 呈现弱碱性; 阳离子以钠和钙为主, 阴离子以重碳酸根为主, 其中钠和钙离子质量浓度平均值分别为 40.09 mg/L 和 19.80 mg/L, 重碳酸根平均值为 155.6 mg/L, 硫酸根和氯离子质量浓度平均值分别为 24.9 mg/L 和 10.4 mg/L, 矿化度平均值为 199.67 mg/L, 地下水为淡水。安定组地下水化学组分 pH 均值为 8.0, 呈现弱碱性; 阴阳离子分别以硫酸根和钠离子为主, 其质量浓度平均值分别为 449.5 mg/L 和 286.0 mg/L; 钙离子质量浓度平均值为 19.7 mg/L, 与志丹群地下水含量相近; 矿化度均值为 960.3 mg/L, 较志丹群矿化度升幅较大。直罗组地下水化学组分 pH 均值为 9.5, 呈现碱性; 阴阳离子以硫酸根和钠离子为主, 其中硫酸根和钠离子质量浓度平均值分别为 1 985.0 mg/L 和 842.0 mg/L, 矿化度均值为 2 868.0 mg/L, 为咸水; 钙离子质量浓度平均值为 216.1 mg/L, 氯离子质量浓度平均值为 90.0 mg/L; 直罗组含水层相对于安定组含水层水化学组分含量均有升高。安定组-直罗组地下水化学组分 pH 均值为

9.0; 阴阳离子以硫酸根和钠离子为主, 其中硫酸根和钠离子质量浓度平均值分别为 275.5 mg/L 和 297.5 mg/L, 矿化度均值为 828.0 mg/L, 安定组-直罗组两组地层混合地下水更接近安定组化学组分, 混合后浓度与两组地层混合比以及矿物溶解/沉淀有关。安定组底部-延安组上部地下水化学组分 pH 均值为 10.2, 为碱性; 阴阳离子以硫酸根和钠离子为主, 其中硫酸根和钠离子质量浓度平均值分别为 1 550.2 mg/L 和 639.3 mg/L, 矿化度均值为 2 439.3 mg/L。延安组中下部地下水化学组分 pH 均值为 9.5, 为碱性; 阴阳离子以硫酸根和钠离子为主, 其中硫酸根和钠离子平均值分别为 1 569.3 mg/L 和 2 759.3 mg/L, 矿化度均值为 6 613.3 mg/L。

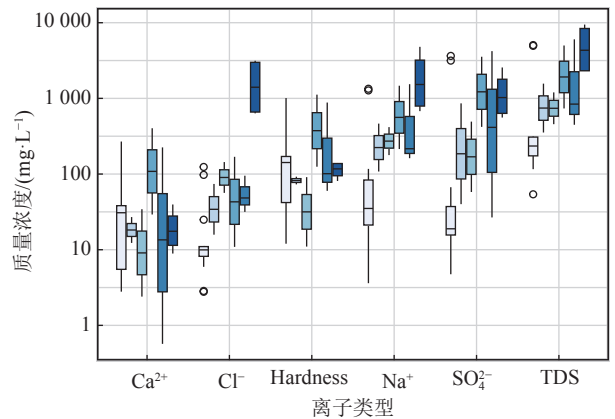


图2 新街矿区1号井田各离子浓度随含水层深度的变化规律

Fig.2 Change rule of each ion concentration with aquifer depth in the No.1 well field of Xinjie Mine Area

综上,一井田地下水水化学特征垂向上呈现出较好的规律性,由志丹群至延安组地下水 pH 值介于 8.0 ~ 10.2, 并且随着含水层深度增加, pH 呈现增大趋势; 此外, 主要阴阳离子浓度和类型随着深度增加也发生变化; 其中志丹群含水层阳离子以钙和钠为主, 阴离子以重碳酸根为主; 安定组-延安组含水层阳离子以钠为主, 阴离子以硫酸根为主。钠离子含量和硫酸根随着深度增加, 其浓度值分别呈现增大趋势, 其中钠离子质量浓度均值分别由 40.1 mg/L 增大至 2 759.3 mg/L, 硫酸根质量浓度均值由 24.9 mg/L 增大至 1 569.3 mg/L; 矿化度均值由 199.67 mg/L 增大至 6 613.3 mg/L。

水化学组分的垂向分带差异进一步导致地下水水化学类型也呈现明显的垂向分带性。志丹群地下水水化学类型阳离子为 $\text{HCO}_3^- \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- \text{Mg} \cdot \text{Ca}$;

安定组含水层组地下水水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型;直罗组和延安组上部含水层组地下水水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Na}$;延安组中部含水层地下水水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$;延安组下部含水层地下水水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Na}$ (图 3 和图 4)。

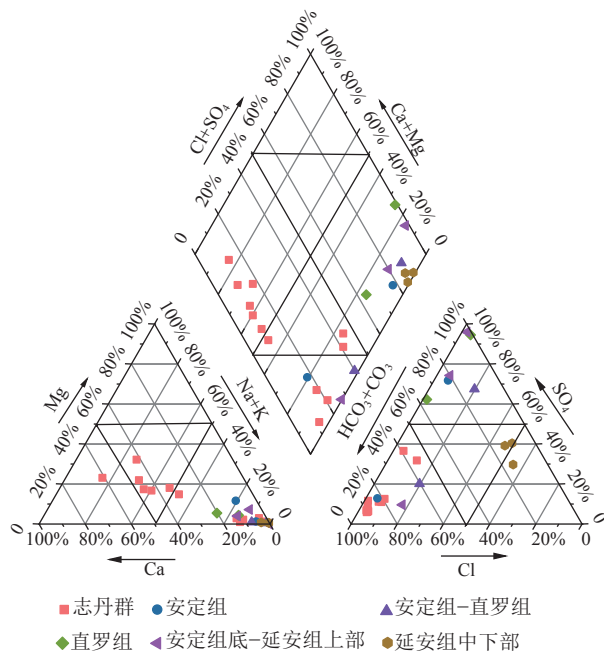


图 3 垂向含水层地下水水化学类型
Fig.3 Vertical aquifer groundwater hydrochemical type diagram

地层		柱状	水化学垂向分带特征
系	组		
新近系			
白垩系	志丹群		pH弱碱性, 阳离子以钠和钙为主, 阴离子以重碳酸根为主, 为淡水, 水化学类型 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 硬石膏、方解石、白云石、氟石、石膏、盐岩、岩盐、石英、斜长石均处于未饱和状态, 玉髓处于过饱和状态
	安定组		pH弱碱性, 阴阳离子以硫酸根和钠为主, 水化学类型 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 为淡水; 硬石膏、方解石、白云石、氟石、石膏、盐岩、石英、斜长石均处于未饱和状态, 玉髓处于过饱和状态
侏罗系	直罗组		pH弱碱性, 阴阳离子以硫酸根和钠为主, 水化学类型 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 为咸水。硬石膏、氟石、石膏均处于未饱和状态, 方解石、玉髓、白云石、岩盐、石英、斜长石处于过饱和状态
	延安组	2 ⁻¹ 煤	pH弱碱性, 阴阳离子以硫酸根和钠为主, 水化学类型 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 为咸水; 硬石膏、方解石、玉髓、白云石、岩盐、石英、斜长石处于过饱和状态
		2 ⁻² 煤	
		3 ⁻¹ 煤	

图 4 不同含水层水化学垂向分带特征规律
Fig.4 Vertical distribution characteristics of hydrochemistry in different aquifers

3.1.2 矿区地下水化学特征的多维分析

矿区地下水主要组分间的来源关系可以通过相关性分析确定,图 5 为新街矿区地下水化学参数见的相关关系矩阵图,颜色深浅代表相关系数的大小,颜色趋于深蓝色表示正相关,趋于深红色表示负相关,从图 5 中可看出, TDS 与 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Cl^- 相关性显著,表明这些离子是 TDS 的主要来源,其中 TDS 与 Na^+ 和 SO_4^{2-} 的相关性系数分别达到 0.95 和 0.83,表明该地区水中 Na^+ 和 SO_4^{2-} 浓度普遍较高。阳离子 K^+ 、 Na^+ 与 Cl^- 相关性较高, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 相关性较高,4 种阳离子均与 HCO_3^- 相关性较度较小。

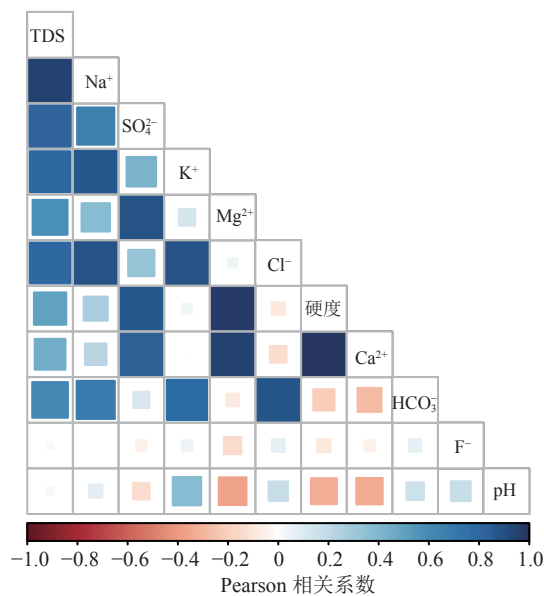


图 5 地下水化学参数间的相关性矩阵
Fig.5 Correlation matrix of hydrochemical parameters in groundwater

为了探索垂向分带对水质指标的影响,本研究通过对水化学指标进行主成分分析(PCA),旨在揭示不同深度含水层水化学特征的差异性及其潜在的地质学和水文学驱动因素。图 6 为 PCA 结果,其中箭头指向水质指标,颜色和箭头长短代表离子在对应主成分下的权重,箭头越长且颜色趋于蓝色,代表权重越大。其中主成分 1 和主成分 2(F1 和 F2)分别捕捉了数据集 46.3% 和 25.2% 的变异性,指出了主要的水化学变异趋势。样本点的颜色差异反映了不同深度含水层样本的分布,这些分布趋势可能与深度相关的水文地质条件有关,进而影响地下水的化学组成,即含水层深度影响地下水的水化学特征。特别是,总溶解固体(TDS)。此外,图 7 为因子载荷矩阵图,进一步量化了各水化学指标在 PCA 中的权重和贡献度,其中 F1 ~ F5 为 5 个主成分,圆圈大小和

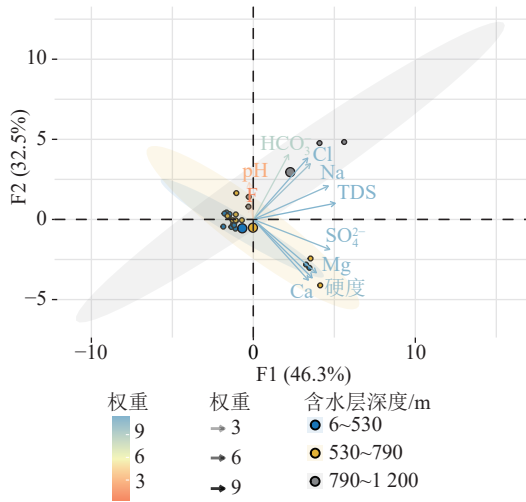


图6 含水层深度差异的主成分分析双标图

Fig.6 Principal component biplot differentiating aquifer depths

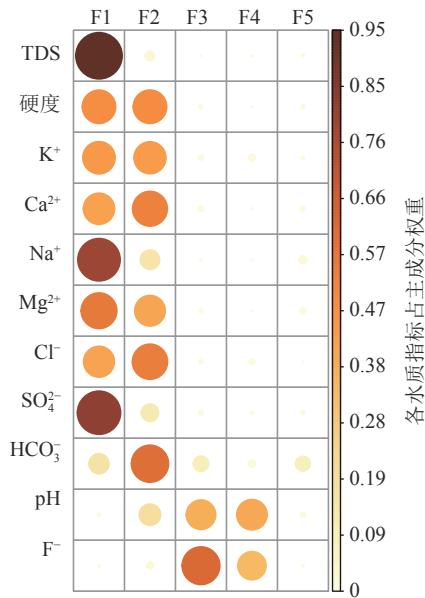


图7 因子载荷矩阵

Fig.7 Factor load matrix diagram

颜色深浅明确指出了这些指标在主成分中的相对影响力。TDS 在 F1 主成分中占据显著的权重,这不仅凸显了其在地下水样本变异性中的核心作用,而且也可能指示了地下水中溶解固体的来源和迁移过程。其他参数如 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的权重也不容忽视,这些成分可能与硫酸盐矿物的氧化还原反应、硬水的形成或其他地质过程有关。 HCO_3^- 和 Cl^- 在主成分 F2 中的较大权重可能与地下水中的离子交换作用等过程相关。总之, TDS、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 可能是主导水质垂向分异的关键驱动因子。

3.1.3 水化学组分与含水层深度关系

含水层深度显著影响地下水中水化学组分和浓度。进一步对含水层深度和水化学组分浓度建立数

学关系,发现矿区地下水水化学特征离子组分含量(尤其是 pH 值、钠离子、硫酸根离子以及矿化度)垂向上与含水层深度存在较好的相关性。其中 pH 值由志丹群至延安组地下水 pH 值由 8.0 升高至 10.2,随着含水层深度增加, pH 呈现增大趋势;钠离子均值由 40.1 mg/L 增大至 2 759.3 mg/L;硫酸根均值由 24.9 mg/L 增大至 1 569.3 mg/L;矿化度均值由 199.67 增大至 6 613.3 mg/L(图 8)。

3.2 一井田水化学垂向分带特征成因机制

3.2.1 岩石矿物成分分析

根据新街矿区地质勘探报告,矿区志丹群岩性上部为浅红色,棕红色含砾砂岩与砾岩互层,中部为棕红色泥具大型交错层理的中粗粒砂岩,下部为深红色泥岩和褐红色细粒砂岩。安定组岩性为紫红色、浅红色、灰绿色泥岩,局部夹灰绿色、灰紫色中粒砂岩,底部黄色灰白色块状中粗粒砂岩,含钙质结核。直罗组地层岩性为灰白、灰黄、灰绿、紫红色泥岩、砂质泥岩、细粒砂岩、中粒砂岩、粗粒砂岩。下部夹薄煤层及油页岩,含 1 煤组。延安组地层岩性为灰白色砂岩,深灰色、灰黑色砂质泥岩,泥岩和煤层,含 2、3、4、5、6、7 煤组。通过扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)对一井田岩石矿物成分进行了分析(详见表 2 和表 3),并结合前人研究成果确定了不同地层岩石矿物成分。一井田岩石矿物以石英、斜长石、绿泥石、方解石、白云母、钾长石和沸石为主。

3.2.2 垂向含水层矿物饱和状态

不同埋深的地下水水质受到附近的岩层性质及矿物饱和状态影响,采用 PHREEQC 3.7.3 软件进行矿物饱和指数(SI)计算。PHREEQC 是一个用于计算多种低温水文地球化学反应的计算机软件,具有以下 3 个功能:①计算物质形成种类与饱和指数;②模拟地球化学反演过程;③计算批反应与一维运移反应。另外,与多组分溶质-运移模型耦合的 PHREEQC 可生成 Phase,一个用于模拟地下水流动系统的三维反应-运移模拟器。本次主要采用 Solution 和 Phase 两个模块进行计算。

由图 9 可知,各种矿物的饱和指数在垂向分布上存在一定的规律,其饱和指数随着含水层深度的增加而增加,其中白云石、斜长石和岩盐的变化规律尤为显著,呈现出未饱和状态和过饱和状态的交替变化规律。这种规律可能与地下水流动、岩石溶解和沉淀等地质过程密切相关。具体而言,一井田中志丹群地下水中硬石膏、方解石、白云石、氟石、石膏、岩盐、石英、斜长石矿物饱和指数 SI 均小于 0,

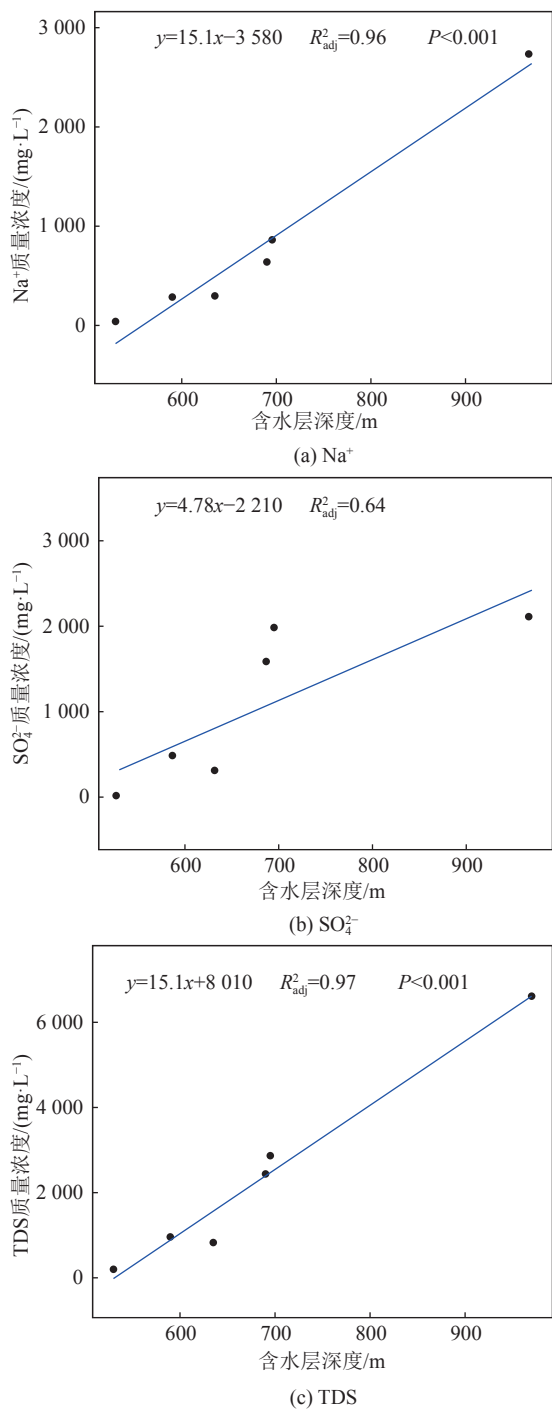


图8 钠离子、硫酸盐根离子和 TDS 含量与含水层埋藏深度关系曲线

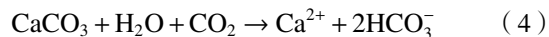
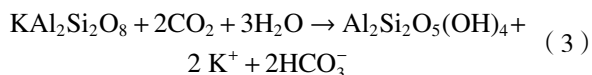
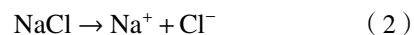
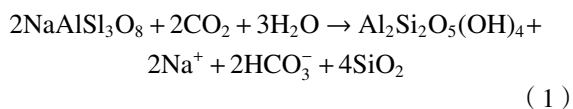
Fig.8 Relationship between Na^+ , SO_4^{2-} and TDS and aquifer depth

说明这些矿物相对水溶液均处于未饱和状态;玉髓矿物饱和指数均大于0,说明这些矿物相对水溶液均处于过饱和状态。安定组地下水中硬石膏、方解石、白云石、氟石、石膏、岩盐、石英、斜长石矿物饱和指数 SI 均小于0,说明这些矿物相对水溶液均处于未饱和状态;玉髓矿物饱和指数均大于0,说明这些矿物相对水溶液均处于过饱和状态。直罗组地下水

中硬石膏、氟石、石膏矿物饱和指数 SI 均小于0,说明这些矿物相对水溶液均处于未饱和状态;方解石、玉髓、白云石、岩盐、石英、斜长石矿物饱和指数均大于0,说明这些矿物相对水溶液均处于过饱和状态。延安组地下水中氟石矿物饱和指数 SI 均小于0,说明这些矿物相对水溶液均处于未饱和状态;硬石膏、方解石、玉髓、白云石、岩盐、石英、斜长石矿物饱和指数均大于0,说明这些矿物相对水溶液均处于过饱和状态。这种规律可能与地下水流动、岩石溶解和沉淀等地址过程密切相关。

3.2.3 水化学垂向分带特征成因机制

一井田志丹群位于第四系含水层的下部,与外界联系较为紧密,较多的参与水循环,受地表河水径流淋滤作用,水化学特征主要受岩石溶解作用控制,阴阳离子均以重碳酸根、钠和钙为主;矿化度值较小,均为淡水。志丹群含水层中各离子浓度含量较小。水-岩作用中,矿物溶解作用占主导地位。其中,水中的 Na^+ 、 K^+ 主要来源是钠长石、岩盐、钾长石等矿物的溶解(式(1)至式(3)),而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来自于方解石、绿泥石的溶解(式(4))。志丹群含水层中大多数矿物相对于水溶液均处于未饱和状态,有进一步溶解的趋势为



随着含水层埋藏深度增加,含水层中阴离子逐渐转变为硫酸根为主,阳离子以钠离子为主,而且矿化度增大趋势明显;特别是直罗组和延安组地下水为咸水。阴离子的转变主要是由于随着含水层埋深深度增加,地下水含水层围岩中由于含有大量的石膏矿物,同时煤系地层往往含有黄铁矿,硫酸根的增大主要是由于煤系地层中石膏的溶解作用和黄铁矿的氧化作用(式(5)一式(7)),这一过程不断的消耗氧气,使水体内的氧化剂含量减少,导致底部含水层还原性增强;除此之外,由于产生 H^+ 离子使水中 pH 值减小,直罗组和延安组含水层地下水 pH 值呈现中性,说明该反应较为强烈。而阳离子以钠离子为主,主要是由于硅酸盐、岩盐矿物的溶解,并伴随着阳离子交替吸附作用,水中的 Ca^{2+} 被矿物中的 Na^+ 离子交换

表 2 不同含水层岩性扫描电镜元素含量

Table 2 Percentage of elements in different aquifer lithology by scanning electron microscopy

含水层位置 及岩性	各元素含量/%								
	O	Si	Na	K	Ca	Al	Sr	C	N
志丹群粗粒砂岩	81.02	11.69	—	—	1.78	2.84	2.66	—	—
志丹群细粒砂岩	77.50	10.52	—	0.80	1.44	5.02	1.78	—	—
安定组粗粒砂岩	74.48	11.43	7.02	—	—	5.26	1.81	—	—
直罗组粗粒砂岩	73.02	10.08	2.56	0.65	—	4.25	1.53	4.15	3.21
直罗组含砾砂岩	78.11	11.91	—	1.73	—	5.33	2.54	—	—
延安组粗粒砂岩	81.55	5.32	1.52	—	5.17	3.78	2.67	—	—
延安组细粒砂岩	76.86	10.77	3.65	—	2.34	2.82	3.56	—	—
延安组砂质泥岩	73.82	9.90	3.10	—	—	7.34	2.04	3.81	—

表 3 J01-05 钻孔不同地层岩石矿物含量

Table 3 Percentage content of mineral composition from different strata in J01-05 borehole

地层岩性	深度/m	各矿物含量/%							
		石英	叶绿泥石	鲕绿泥石	白云母	钠长石	微斜长石	赤铁矿	方沸石
志丹群中粒砂岩	195 ~ 230	23.5	—	2.5	6.0	20.4	29.8	0.7	6.9
志丹群中粒砂岩	276 ~ 364	30.0	—	0.5	3.4	23.5	20.3	1.2	23.1
志丹群中粒砂岩	579 ~ 599	25.9	—	0.8	2.5	24.3	21.5	0.7	19.6
志丹群中粒砂岩	195 ~ 230	23.5	—	2.5	6.0	10.3	18.4	0.4	41.7
安定组粗粒砂岩	674 ~ 694	19.6	—	5.6	11.2	23.5	20.3	1.2	23.1
直罗组粉砂岩	760 ~ 764	23.0	21.1	8.7	9.5	24.6	17.5	—	16.4
延安组顶部砂质泥岩	805 ~ 832	23.4	18.6	8.2	12.3	21.5	16.2	—	—
延安组中部砂质泥岩	871 ~ 871.6	27.4	23.6	10.1	9.1	21.5	16.1	—	—
延安组中部粗粒砂岩	89 ~ 900	14.5	32.0	4.8	3.2	15.6	14.2	—	—
延安组底部砂质泥岩	947 ~ 954	16.1	30.3	13.2	7.2	21.7	23.9	—	—
延安组底部粉砂岩	1 142 ~ 1 145.5	21.5	—	13.0	7.7	15.8	17.3	—	—

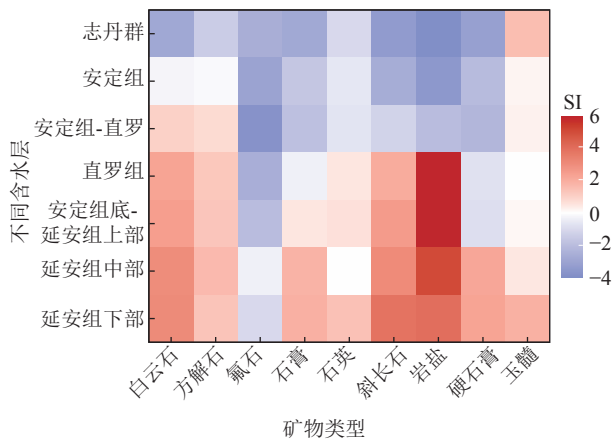
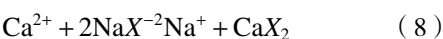
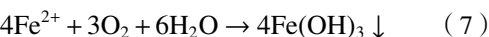
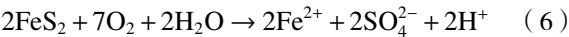


图 9 不同含水层各矿物饱和指数 SI

Fig.9 Saturation index SI of various minerals in different aquifers

(式(8), X 为离子交换活性位点)。由于底部含水层矿化度较大,地下水为咸水,水岩作用较为强烈,多

数矿物相对于水溶液已经处于过饱和状态,进一步溶解的可能性较小。同时,随着水-岩作用的持续进行,混合作用逐渐凸显,使直罗组-延安组含水层的水化学特征趋于一致。



分别选择一井田志丹群含水层为路径起点,延安组含水层为路径终点,选择 3.2 节矿物相,并考虑阳离子交替吸附作用,通过 PHREEQC 软件进行了反向水文地球化学模拟,以确定由志丹群至延安组含水层矿物相反应机制。图 10 显示了志丹群-延安组含水层矿物相反应量与生成量(+ 为反应量;- 为

生成量),可以看出由一井田志丹群到延安组含水层,斜长石、石膏、岩盐、白云石均有溶解,方解石、石英、绿泥石有所生成;并且发生了强烈的阳离子交替吸附作用。由图11可知,志丹群含水层地下水主要受大气降水和岩石风化作用影响,直罗组和安定下-延安上组水化学组分受岩石风化作用和蒸发浓缩作用影响。由志丹群到直罗组,水化学组分的控制因素由大气降水影响为主逐渐演变为岩石风化作用和蒸发浓缩影响为主,也呈现出明显的垂向分带特征。

离子浓度 c 比值可以反应水岩相互作用的过程和强度^[23],通过离子比值法分析了新街矿区地下水中主要离子的成因及其形成条件,以探讨阳离子交换现象对地下水化学特性的影响。当 $[c(\text{Na}^+)+c(\text{K}^+)]/c(\text{Cl}^-)$ 接近1时,通常表明地下水中的 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 主要来源于岩盐(如卤石)矿物的溶解。若该比值大于1,表明钠和钾的来源倾向于硅酸盐矿物(如钠长石)的风化与溶解,反之,当 $[c(\text{Na}^+)+c(\text{K}^+)]/c(\text{Cl}^-)$ 小于1,地下水中的氯离子可能受到人为活动的影响

或其他含氯矿物(如方解石)的溶解作用。根据图12a分析,新街矿区所有含水层的水样比值均高于1:1线,这指示了矿区地下水中的钠和钾离子主要由硅酸盐矿物溶解提供,这与钠长石等矿物在各含水层的分布(占比为10.3%~24.6%)相对应,同时其溶解度随着含水层深度的增加而增加(图9)。

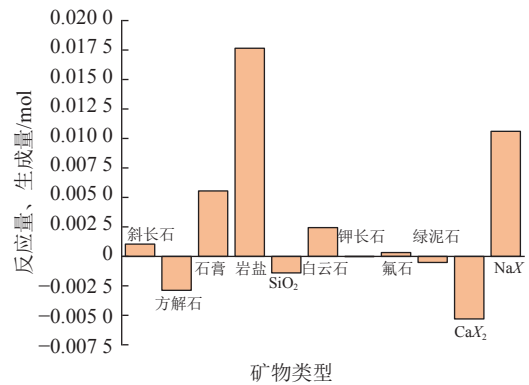


图10 志丹群-延安组含水层矿物相反反应量与生成量
Fig.10 Mineral phase reactivity and production in the Zhidan Group-Yanan Formation aquifer

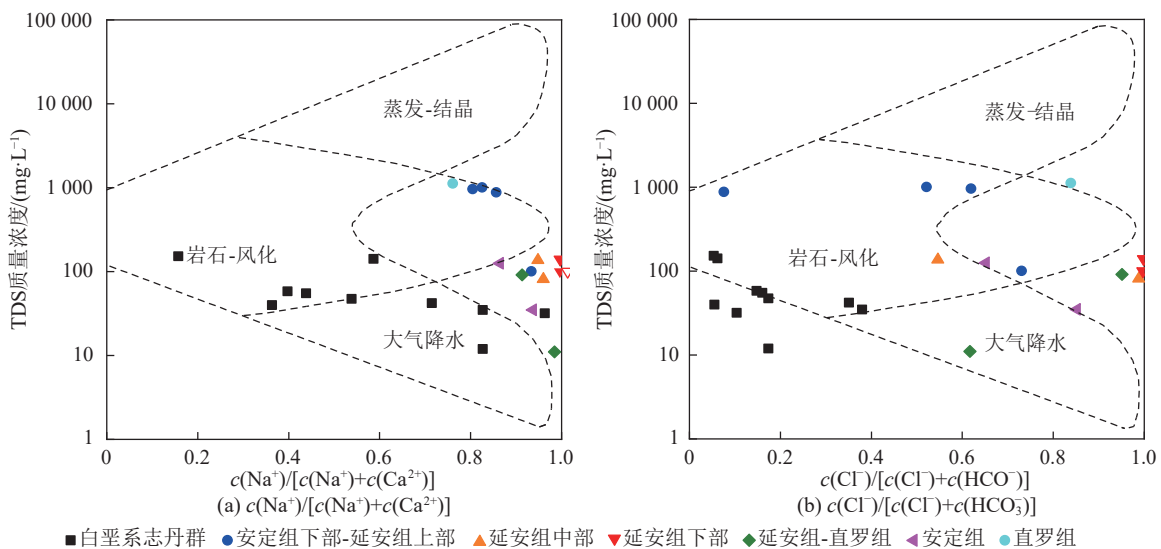


图11 志丹群-延安组含水层 Gibbs 图
Fig.11 Gibbs diagram of aquifer in Zhidan-Yanan Formation

同样,当 $[c(\text{Ca}^{2+})+c(\text{Mg}^{2+})]/[c(\text{HCO}_3^-)+c(\text{SO}_4^{2-})]$ 接近1时,一般意味着地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来源于碳酸盐(如方解石、白云石)和硫酸盐(如石膏、硬石膏)矿物的溶解^[24],则表明碳酸盐矿物对钙和镁离子的贡献占主导地位。而当比值小于1时,可能反映了硅酸盐矿物对地下水中的钙和镁含量也有显著贡献。图12b的分析结果显示,新街矿区所有含水层的水样比值均低于1:1,同时结合碳酸盐矿物和硫酸盐矿物在含水层中的溶解度变化趋势(图9)表明研究区地下水中的钙和镁离子浓度受到碳酸盐、

硫酸盐以及硅酸盐矿物溶解作用的共同影响。

进一步分析 $[c(\text{Na}^+)+c(\text{K}^+)-c(\text{Cl}^-)]$ 与 $[c(\text{Ca}^{2+})+c(\text{Mg}^{2+})]-[c(\text{HCO}_3^-)+c(\text{SO}_4^{2-})]$ 之间的关系揭示了地下水中的阳离子交换现象。阳离子交换是地下水化学过程中的一个关键动力学机制涉及 Na^+ 和 K^+ 离子与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子在水相和固相界面上的相互替代。当地下水中发生阳离子交换时,理论上 $[c(\text{Na}^+)+c(\text{K}^+)-c(\text{Cl}^-)]$ 与 $[c(\text{Ca}^{2+})+c(\text{Mg}^{2+})]-[c(\text{HCO}_3^-)+c(\text{SO}_4^{2-})]$ 将呈现负相关关系,这种关系反映了随着钠和钾含量的增加,钙和镁含量相应减少,这可能是由于钠和

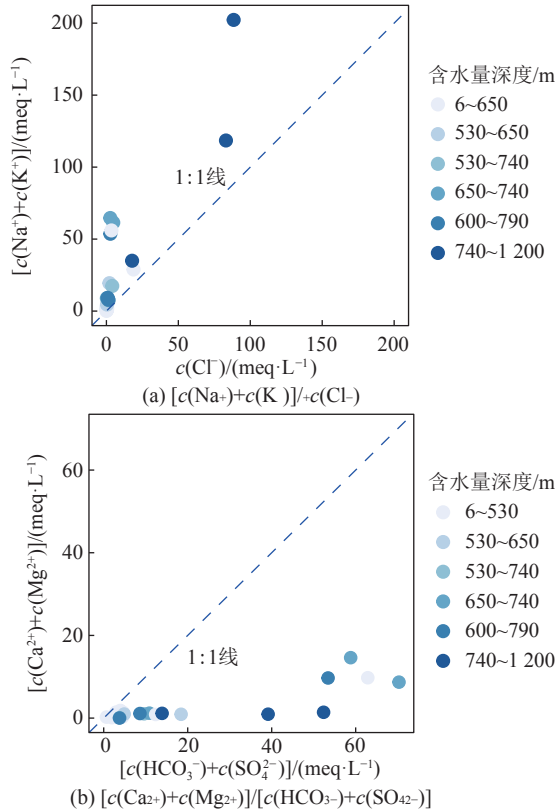
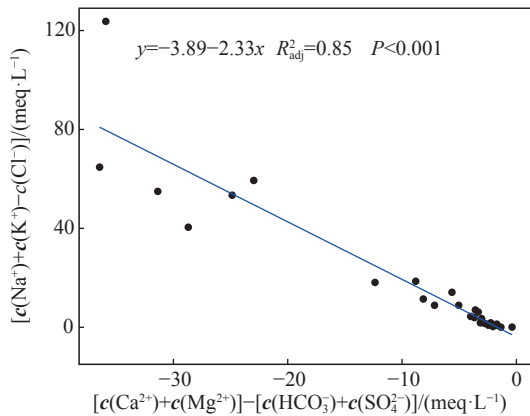


图12 研究区地下水离子浓度比值关系

Fig.12 Ratio of groundwater ion concentration in research area

钾离子从固相(如黏土矿物)中释放到水相中,同时钙和镁离子从水相吸附到固相上。图13显示,新街矿区大部分含水层水样的数据点分布在 $[c(\text{Na}^+) + c(\text{K}^+) - c(\text{Cl}^-)]$ 与 $[c(\text{Ca}^{2+}) + c(\text{Mg}^{2+})] - [c(\text{HCO}_3^-) + c(\text{SO}_4^{2-})]$ 比值线的两侧或正上方,且 R_{adj}^2 达到了0.85(R_{adj}^2 为修正后的决定系数)。这表明,在该矿区地下水系统中发生了显著的离子交换作用。这种离子交换不仅反映了地下水与周围地质介质的相互作用,而且也

图13 $[c(\text{Na}^+) + c(\text{K}^+) - c(\text{Cl}^-)]$ 与
 $[c(\text{Ca}^{2+}) + c(\text{Mg}^{2+})] - [c(\text{HCO}_3^-) + c(\text{SO}_4^{2-})]$ 的线性关系Fig.13 Relation diagram of $[c(\text{Na}^+) + c(\text{K}^+) - c(\text{Cl}^-)]$ and
 $[c(\text{Ca}^{2+}) + c(\text{Mg}^{2+})] - [c(\text{HCO}_3^-) + c(\text{SO}_4^{2-})]$

可能指示了地下水流动路径、水文地质条件以及矿区开采活动对地下水化学特性的影响。

4 结 论

1) 一井田不同含水层地下水水化学特征具有明显的垂向分带性,矿化度随含水层深度增加而增加,由淡水逐渐转为碱水。志丹群地下水化学组分阳离子以钠和钙为主,阴离子以重碳酸根为主,水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 型;安定组阴阳离子分别以硫酸根和钠离子为主,较志丹群矿化度升幅较大,水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型;直罗组和延安组阴阳离子以硫酸根和钠离子为主,水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型。

2) 通过多维分析,发现各组间呈现相关性,且TDS、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 可能是影响水质垂向分异的关键因素,TDS、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 与含水层深度呈现较好的线性关系。

3) 一井田不同含水层地下水中矿物饱和状态也存在明显的规律性,呈现出未饱和状态和过饱和状态的交替变化规律。志丹群和安定组地下水中硬石膏、方解石、白云石、氟石、石膏等均处于未饱和状态,多数矿物存在进一步溶解的趋势;直罗组和延安组地下水中方解石、玉髓、白云石、岩盐、石英、斜长石矿物均处于过饱和状态。

4) 一井田志丹群水化学组分主要受矿物溶解作用影响, Na^+ 、 K^+ 主要是钠长石、钾长石等硅酸盐矿物的溶解,而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要源于碳酸盐、硫酸盐以及硅酸盐矿物溶解作用的共同作用。随着含水层埋藏深度增加,硅酸盐类矿物、石膏、岩盐和黄铁矿的溶解反应加强,并伴随阳离子交替吸附作用,产生了高矿化度 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型地下水。

参考文献(References):

- [1] 葛世荣,樊静丽,刘淑琴,等. 低碳化现代煤基能源技术体系及开发战略[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 203-223.
GE Shirong, FAN Jingli, LIU Shuqin, et al. Low carbon modern coal-based energy technology system and development strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 203-223.
- [2] 辛德林,方新英,张逸阳. 基于五大发展理念的新街台格庙矿区总体规划研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(12): 1-6.
XIN Delin, FANG Xinying, ZHANG Yiyang. Master plan of Xinjie Taigemiao mining area based on the Five Development Principles[J]. Coal Engineering, 2020, 52(12): 1-6.
- [3] 李伟,孙希奎. 深地煤炭资源安全高效智能化开采关键技术与实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 52-64.
LI WEI, SUN Xikui. Key technologies and practices for safe, effi-

- cient, and intelligent mining of deep coal resources[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 52–64.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 曹志国, 李全生, 董斌琦. 神东矿区煤炭开采水资源保护利用技术与应用[J]. *煤炭工程*, 2014, 46(10): 162–164, 168.
- CAO Zhiguo, LI Quansheng, DONG Binqi. Water resource protection and utilization technology and application of coal mining in Shendong mining area[J]. *Coal Engineering*, 2014, 46(10): 162–164, 168.
- [7] 曾一凡, 武强, 赵苏启, 等. 我国煤矿水害事故特征、成因与防治对策[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(7): 1–14.
- ZENG Yifan, WU Qiang, ZHAO Suqi, *et al.* Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine water hazard accidents in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(7): 1–14.
- [8] 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.
- [9] 王强民, 王皓, 杨建, 等. 西部侏罗系矿区充水含水层水文地球化学特征及矿井水来源综合识别[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(4): 1084–1093.
- WANG Qiangmin, WANG Hao, YANG Jian, *et al.* Hydrogeochemical characteristics of main water filled aquifers and source indicators of mine water in typical Jurassic Mine area of Western China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(4): 1084–1093.
- [10] 吕情绪. 采煤活动对煤矿地下水化学特征的影响研究[J]. *能源与环保*, 2021, 43(5): 84–90.
- LYU Qingxu. Study on influence of coal mining activities on chemical characteristics of underground water in coal mines[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2021, 43(5): 84–90.
- [11] 王甜甜, 张雁, 赵伟, 等. 伊敏矿区地下水水化学特征及其形成作用分析[J]. *环境化学*, 2021, 40(5): 1480–1489.
- WANG Tiantian, ZHANG Yan, ZHAO Wei, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and formation process of groundwater in Yimin mining area[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(5): 1480–1489.
- [12] 吴晓丽, 张杨, 孙媛媛, 等. 平朔矿区地下水水化学特征及成因[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2021, 57(3): 417–425.
- WU Xiaoli, ZHANG Yang, SUN Yuanyuan, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Pingshuo mining area[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2021, 57(3): 417–425.
- [13] 刘洋, 杨建, 梁向阳. 纳林河深埋矿区水文地球化学垂向综合特征[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(30): 12872–12878.
- LIU Yang, YANG Jian, LIANG Xiangyang. Vertical comprehensive characteristics of hydrogeochemistry in deep buried mining area of nanlinhe[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(30): 12872–12878.
- [14] 刁海忠, 于桑, 李洪亮, 等. 淄博洪山—寨里煤矿地下水串层污染治理区水化学和硫同位素特征[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(1): 171–181.
- DIAO Haizhong, YU Sang, LI Hongliang, *et al.* Analysis on the hydrochemical and sulfur isotope characteristics of the groundwater in cross-strata pollution control area of Hongshan and Zhaili coal mines in Zibo[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1): 171–181.
- [15] 刘旭东, 许峰, 石磊, 等. 乌东煤矿地下水水化学特征及其指示[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(4): 115–119.
- LIU Xudong, XU Feng, SHI Lei, *et al.* Hydrochemical characteristics of groundwater in Wudong Mine and its significance[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(4): 115–119.
- [16] 孙亚军, 赵先鸣, 徐智敏, 等. 煤矿采空区水岩作用模拟试验研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 237–246.
- SUN Yajun, ZHAO Xianming, XU Zhimin, *et al.* Simulation test on water-rock interaction in coal mine goaf[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 237–246.
- [17] 张凯, 高举, 蒋斌斌, 等. 煤矿地下水库水-岩相互作用机理实验研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(12): 3760–3772.
- ZHANG Kai, GAO Ju, JIANG Binbin, *et al.* Experimental study on the mechanism of water-rock interaction in the coal mine underground reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3760–3772.
- [18] SALCEDO SÁNCHEZ E R, GARRIDO HOYOS S E, ESTELLER M V, *et al.* Hydrogeochemistry and water-rock interactions in the urban area of Puebla Valley aquifer (Mexico)[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 181: 219–235.
- [19] VÁSÁRHELYI B, VÁN P. Influence of water content on the strength of rock[J]. *Engineering Geology*, 2006, 84(1-2): 70–74.
- [20] 殷晓曦, 陈陆望, 谢文苹, 等. 采动影响下矿区地下水主要水-岩作用与水化学演化规律[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(5): 33–39.
- YIN Xiaoxi, CHEN Luwang, XIE Wenping, *et al.* Main water-rock interactions and hydrochemical evolution in the aquifers under the mining-induced disturbance in a mining district[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(5): 33–39.
- [21] 陈陆望, 许冬清, 殷晓曦, 等. 华北隐伏型煤矿区地下水化学及其控制因素分析: 以宿县矿区主要突水含水层为例[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(4): 996–1004.
- CHEN Luwang, XU Dongqing, YIN Xiaoxi, *et al.* Analysis on hydrochemistry and its control factors in the concealed coal mining area in North China: a case study of dominant inrush aquifers

- in Suxian mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(4): 996–1004.
- [22] 李海祥, 曹志国, 王路军, 等. 台格庙矿区地下水水化学特征与演变规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(9): 284–291.
LI Haixiang, CAO Zhiguo, WANG Lujun, *et al.* Study on chemical characteristics and evolution law of groundwater in Taigemiao Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(9): 284–291.
- [23] 刘聪丽, 刘飞, 甄品娜, 等. 河北典型压采区地下水水化学变化特征及控制因素[J/OL]. *环境科学*. 1–18 [4-03-24]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202403259>.
LIU Congli, LIU Fei, ZHEN Pin-na, *et al.* Characteristics and Controlling Factors of Groundwater Chemical Change in a Typical Area of Groundwater Exploitation Reduction in Hebei Province[J/OL]. *Environmental Science*, 1–18[2024-03-24]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202403259>.
- [24] 陈伟志, 陶兰初, 李静婷, 等. 高原湿地纳帕海流域地表水水化学特征及控制因素[J/OL]. *地学前缘* 1–19[4-07-24]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.6.39>.
CHEN Weizhi, TAO Lanchu, LI Jingting, *et al.* Surface Water in the Napahai Basin of Plateau Wetland. *Earth Science Frontiers*[J/OL]. *Earth Science Frontiers*, 1–19[2024-07-24]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.6.39>.