

煤矿区地表水水化学特征分析

蒋家沁¹, 闵宁^{1,2*}, 李田田¹

¹宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

²国家煤炭水害防治工程技术研究中心, 安徽 宿州

收稿日期: 2024年1月4日; 录用日期: 2024年3月12日; 发布日期: 2024年3月21日

摘要

文章为阐明地表水的水化学特征及成因机制, 以宿州芦岭矿区地表水为研究对象, 采集样品7个, 通过Piper三线图图示法、Gibbs图分析和离子比例系数的方法分析宿州芦岭矿区地表水水化学特征及形成机制, 开展地表水质量评价。得出结论: 研究区优势阳离子为Na⁺, 优势阴离子为HCO₃⁻。水体中水化学类型共有2种, 其中Na-Mg-HCO₃-Cl型有6个, Na-Mg-HCO₃-SO₄型有1个。影响地表水水化学特征的主要是岩石风化作用, Na⁺和Cl⁻主要来源于岩盐溶解, Ca²⁺和Mg²⁺主要以方解石溶解为主。研究区水样主要受蒸发岩风化溶解的影响。通过水质评价可以得到研究区地表水符合《地表水环境质量标准》, 研究区地表水若用于灌溉会给土壤或者作物带来中等程度的碱害风险。

关键词

水化学, 地表水, 特征分析

Chemical Characterisation of Surface Water in Coal Mining Areas

Jiaqin Jiang¹, Ning Min^{1,2*}, Tiantian Li¹

¹School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

²National Engineering Research Centre for Coal Water Damage Prevention and Control, Suzhou Anhui

Received: Jan. 4th, 2024; accepted: Mar. 12th, 2024; published: Mar. 21st, 2024

Abstract

In order to elucidate the hydrochemical characteristics of surface water and the mechanism of its formation, seven samples were collected from the surface water of Luling mine area in Suzhou,

*通讯作者。

文章引用: 蒋家沁, 闵宁, 李田田. 煤矿区地表水水化学特征分析[J]. 自然科学, 2024, 12(2): 300-308.

DOI: 10.12677/ojns.2024.122035

and the chemical characteristics and formation mechanism of surface water in Luling mine area in Suzhou were analysed by means of Piper's trilinear graphical method, Gibbs plot analysis and ion scale coefficients. The study area is characterised by Na^+ as the dominant cation and HCO_3^- as the dominant anion. There are two types of water chemistry in the water body, including six Na-Mg- HCO_3 -Cl types and one Na-Mg- HCO_3 - SO_4 type. The main influence on the chemical characteristics of surface water is rock weathering, with Na^+ and Cl^- mainly derived from rock salt dissolution, and Ca^{2+} and Mg^{2+} mainly from calcite dissolution. The water samples in the study area are mainly affected by the weathering dissolution of evaporites. The water quality assessment shows that the surface water in the study area complies with the Environmental Quality Standard for Surface Water, and that the surface water in the study area poses a moderate risk of alkali damage to soil or crops if used for irrigation.

Keywords

Water Chemistry, Surface Water, Characterisation

Copyright © 2024 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

水对人类来说是一种重要的资源,随着社会经济不断发展,我国不少地区的地表水都出现了一定程度的污染问题。除工业发展、城镇化及矿产资源开采加剧引起地表水污染[1]。煤矿开采对当地水资源的数量和质量有不同的影响。对于矿区周边地表水而言,采矿是大多数水污染的重要来源之一[2] [3]。煤炭开采过程中产生的大量含有毒物质的酸性废水,含有硫酸等酸性物质[4]。这些废水严重污染着地表水,改变地表水的化学组成[5]。因此,实时掌握矿区地表水的水质状况的情况很迫切。通过对地表水的水化学特征的深入研究,我们可以更好地了解它的水质状况,并且可以更准确地预测它可能出现的变化。因此,深入探索地表水的水化学特征及其影响因素显得尤为重要。

近年来,一些学者已经开始关注矿区地表水的质量问题。如刘基等[5]采用数理统计法、Piper 三线图、Gibbs 图和离子相关关系等方法对榆神矿区地表水进行了水化学特征分析,发现地表水中主要离子主要来源于硅酸盐的岩石风化溶解以及阳离子交换作用。Hu 等[6]对中国的长江、黄河、雅鲁藏布江、澜沧江及鸭绿江进行了水化学研究,指出中国河水的离子组成主要受碳酸盐岩石和蒸发岩的溶解影响,而铝硅酸盐岩石风化的影响不如前两者明显。张利田等[7]系统地分析了中国一些河流的水化学特征,如长江、黄河、松花江和珠江。孔令健等[8]研究了淮北临涣矿采煤沉陷区地下水 and 地表水的水化学特征及其影响因素;孙红福等[9]研究了重庆西部干旱区地下水和水库的水质状况。

前人对宿州芦岭煤矿区地表水环境的研究仅提出了大气沉降、地下水补给地表水、人类活动等各因素对地表水化学特征的影响,但并没有确定化学组分来源。确定污染程度是地表水治理的关键问题。确定化学组分来源,对后期污染地表水体采取何种措施治理尤为重要。

基于此,以宿州芦岭矿地表水为研究对象,通过 Piper 三线图、Gibbs 图解、离子比例系数确定其水化学特征和成因分析。分析研究区内水化学特征及成因等。本项目可为宿州地表水开发提供数据支撑。

2. 研究区概况

宿州市地处安徽省北部,地理位置为东经 $116^{\circ}09'$ ~ $118^{\circ}10'$,北纬 $33^{\circ}18'$ ~ $34^{\circ}38'$,地理位置优越。属于

暖温带半湿润季风气候区。芦岭镇地处平原地带，地势略呈西高东低、南低北高，地面海拔在 22~24 米之间。最高点在展桥，海拔 24 米；最低点在汪圩，海拔 22 米。

宿州市的降雨径流每年都有很大差异，而且全年分布不均。虽然宿州市地表水的过境量比较丰富，但地表水污染严重，多年均径流利用率仅占年均径流的 24%。

3. 水样采集与样品处理

2021 年 6 月在芦岭镇沱河采样，采集地表水样共 7 个，分布如图 1 所示。采样前，用要采集的水样清洗聚乙烯瓶 2~3 次，然后将水样装入聚乙烯瓶中，迅速密封。采样完成后，运回室内，立即进行过滤处理，冷藏，对常规离子进行测量。 HCO_3^- 浓度采用阴阳离子间的离子平衡关系计算得到，总溶解固体 (TDS) 含量利用各离子含量总和减去 $1/2$ 的 HCO_3^- 含量计算。水样的 pH 和电导率用便携式多参数水质测量仪现场测量

样品的分析在安徽省煤矿勘查工技术中心进行。用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤样品中杂质后， CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用酸碱指示滴定法测定。通过美国赛默飞公司的离子色谱仪 (ICS-900) 对主要阴离子 (F^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) 和主要阳离子 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) 进行测定。并且通过阴、阳离子浓度平衡法，将测量结果的误差控制在 5% 以内。

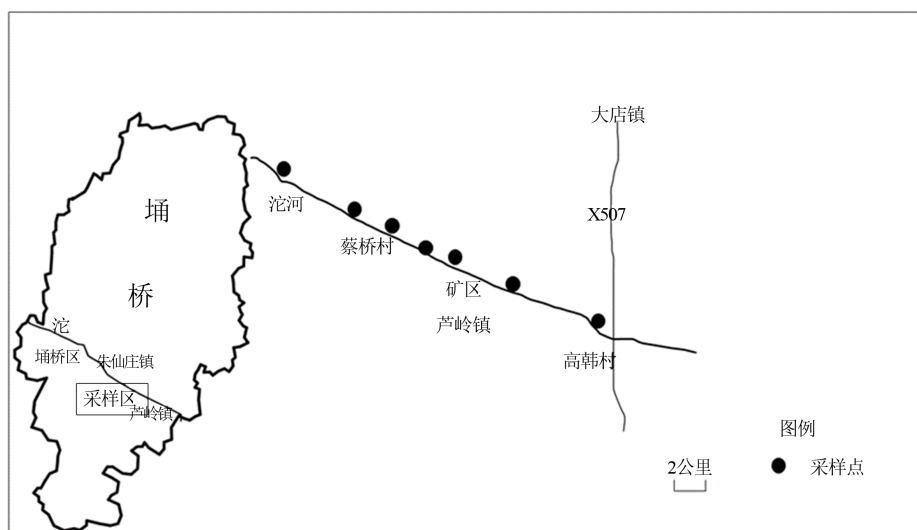


Figure 1. Location distribution of sampling points in Luling mining area, Suzhou
图 1. 宿州芦岭矿区采样点位置分布

4. 结果分析与讨论

4.1. 水化学特征分析

4.1.1. 常规离子组成

对地表水中的各个水化学指标进行了统计分析，所得出的结果见表 1。我们发现，地表水的 pH 值的波动幅度介于 8.68~9.05 之间，而且其平均 pH 值也达到 8.84，整体上呈现弱碱性。TDS 值变化范围为 425 mg/L~617 mg/L，平均值为 472 mg/L，高于世界河流平均值(世界河流 TDS 平均值为 115 mg/L [10])。如表 1 所示，安徽宿州芦岭矿区地表水中主要阳离子浓度依次为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ ，而阴离子浓度则依次是 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{F}^- > \text{NO}_3^-$ ，优势阳离子为 Na^+ ，优势阴离子为 HCO_3^- 。 NO_3^- 离子变异系数较大，大于 1，反映出 NO_3^- 离子离散程度较大，对周围环境因素的变化较为敏感，说明在这个地

区的 NO_3^- 容易受到自然和人类活动影响。

Table 1. Statistical characteristic values of surface water hydrochemical parameters

表 1. 地表水水化学参数统计特征值

指标	最小值	最大值	均值	变异系数
pH	8.68	9.05	8.85	1.65%
TDS	425	617	472	13.9%
Na^+	114	172	145	12.0%
K^+	2.43	5.48	3.55	27.6%
Ca^{2+}	11.5	24.8	18.6	27.5%
Mg^{2+}	28.8	61.0	36.2	31.6%
F^-	0.56	1.70	1.42	33.6%
Cl^-	84.8	132	95.3	17.0%
CO_3^{2-}	-	29.4	16.0	68.7%
HCO_3^-	236	342	283	11.6%
NO_3^-	-	0.10	0.02	225%
SO_4^{2-}	89.0	187	118	27.4%

注: pH 无量纲, 其他单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, - 表示含量过低未检出。

4.1.2. Piper 三线图分析

水化学 Piper 图能够反映出水体中的主要离子成分得变化情况, 还能体现出不同的水体中的水化学的组成特征, 利用实验数据可绘制宿州芦岭矿区地表水 Piper 三线图, 图 2 所示为宿州芦岭矿区不同水体主要离子当量浓度的相对比例, 通过图 2 可以发现研究区域的水体有两种化学类型, 为 $\text{Na-Mg-HCO}_3\text{-Cl}$ 型和 $\text{Na-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ 型, 其中 $\text{Na-Mg-HCO}_3\text{-Cl}$ 型有 6 个, $\text{Na-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ 型有 1 个。

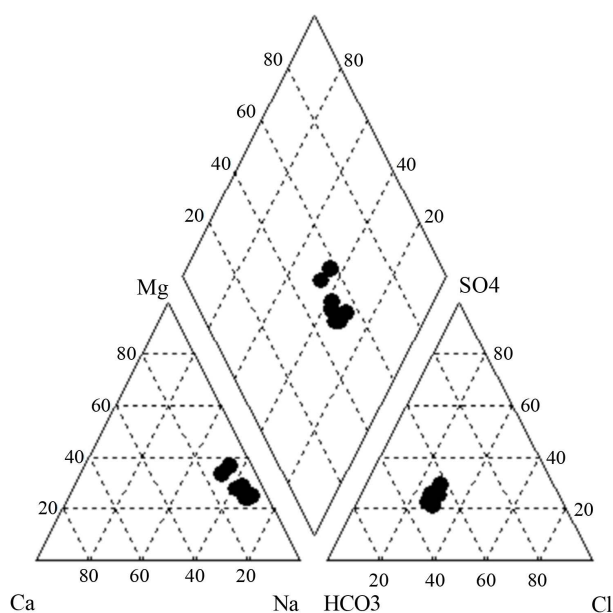


Figure 2. Piper three-line diagram of main ions in surface water in Luling mining area, Suzhou City

图 2. 宿州市芦岭矿区地表水主要离子 Piper 三线图

4.2. 主要离子来源

4.2.1. Gibbs 图分析

通过 Gibbs 图可大致确定地表水水化学组成的控制因素, 其通过 $\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 与 TDS 的关系可以将水体水化学组分分为岩石风化主导、大气降水主导与蒸发 / 结晶主导[11]。根据图 3 可以得出, 研究区地表水 TDS 值介于 425 mg/L~617 mg/L 之间。TDS 值离子比的分布大多集中分布于岩石风化作用区域, 由此可得出宿州芦岭矿区地表水离子组成主要受岩石风化作用影响。

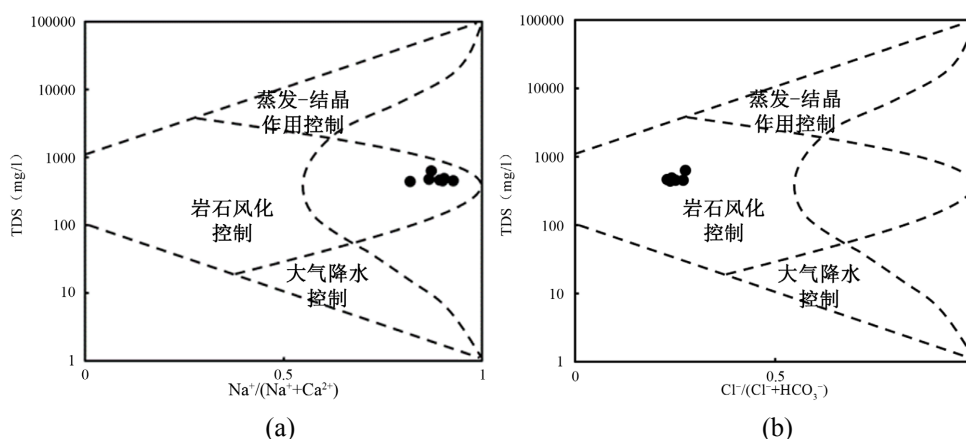


Figure 3. Gibbs diagram of surface water in Luling mining area, Suzhou

图 3. 宿州芦岭矿区地表水 Gibbs 图

4.2.2. 离子比例系数分析

离子的比值通常可以反映水化学离子的来源以及不同岩石风化对水化学组分的影响[12]。

地表水中的 Na^+ 通常与大气降水、硅酸盐矿物溶解以及蒸发盐矿物溶解有关, 而 Na^+ 与 Cl^- 的来源通常是通过 Na^+ 与 Cl^- 的含量比来研究的。当 Na^+/Cl^- 接近于 1 时, 研究表明, 如果不受人类活动影响, Na^+ 与 Cl^- 主要来自于岩盐溶解[13]。根据图 4(a) 可得, 大部分样点比值落在 $y = x$ 线下, 水样点表现为 Na^+ 富集。说明在采样区域除了岩盐溶解外, Na^+ 还存在其他来源的输入, 如硅酸矿物的溶解或阳离子交换作用。

$(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)/(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 常用来判断该地区是否发生阳离子交换作用, 通过发生了阳离子交换作用, 那么这两者比值应该在 -1 左右[14]。如图 4(b) 所示, 沱河水地表水 ($\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$) 与 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 有较强的相关关系 ($R^2 = 0.68$), 说明研究区发生着一定的阳离子交换作用。

$(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})/(\text{HCO}_3^-)$ 可以进行判定方解石、白云石等碳酸盐岩类矿物对 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的影响程度。当 $(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})/(\text{HCO}_3^-) \geq 0.5$ 时, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 方解石矿物的溶解是主要来源; 当 $(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})/(\text{HCO}_3^-) \leq 0.25$ 时, 白云石矿物的溶解是主要来源; 当 $(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})/(\text{HCO}_3^-)$ 介于 0.25~0.5 之间, 来源于方解石和白云石的共同溶解[15]。根据图 4(c) 可以看出, 研究区域内只有 1 个样品的比值低于 0.25, 而其 ta1 样品的比值均大于 0.5, 这表明除了方解石 (CaCO_3), 研究区域内还有部分硅酸盐岩或石膏 (硫酸盐岩) 的溶解。

在水岩相互作用中经常会有碳酸和硫酸参与碳酸盐岩的风化溶解。 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是只有碳酸盐岩参与水的溶滤作用时的产物, 所以 $(\text{HCO}_3^-)/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = 1$ 的比值线是碳酸盐岩风化溶解的控制线[16]。根据图 4(d), 大多数样点比值都落在 $y = x$ 线下, 这表明 HCO_3^- 的来源不仅仅是碳酸盐岩风化溶解, 还有一部分来源于硅酸盐岩的溶解, 则 Na^+ 还存在硅酸矿物的溶解。

通过观察 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$ 的关系图可以推断该区水化学是否受碳酸盐岩或者石膏的溶

解控制。如果该区水样中的 $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})/(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}) = 1$ 时, 表明该区域水化学受碳酸盐岩或石膏的溶解控制[17]。根据图 4(e)可知, 我们发现研究区地表水 $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})/(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})$ 的比值明显高于 1, 这表明, 水样中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要由碳酸盐岩溶解而来, 水样中 HCO_3^- 还有其它来源, 还有一部分来源于硅酸盐岩的溶解。

一般可用 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 的值来判断主要离子来源是蒸发盐还是碳酸盐的风化溶解。当 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)/(\text{HCO}_3^-) > 1$ 时, 说明 SO_4^{2-} 和 Cl^- 来源于蒸发岩的风化溶解[16]。根据图 4(f), 可以看出大多数水样点都落在 $y=x$ 线的上方, 只有一个样品比值小于 1, 由此可得出研究区水样主要受到蒸发岩风化溶解的影响。

综上所述, 芦岭矿区内地表水中 Na^+ 主要来源于岩盐的溶解, 除此之外还有一些硅酸矿物的溶解和阳离子交换作用; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 则以碳酸盐岩溶解为主, 主要以方解石溶解为主。研究区水样主要受蒸发岩风化溶解的影响。

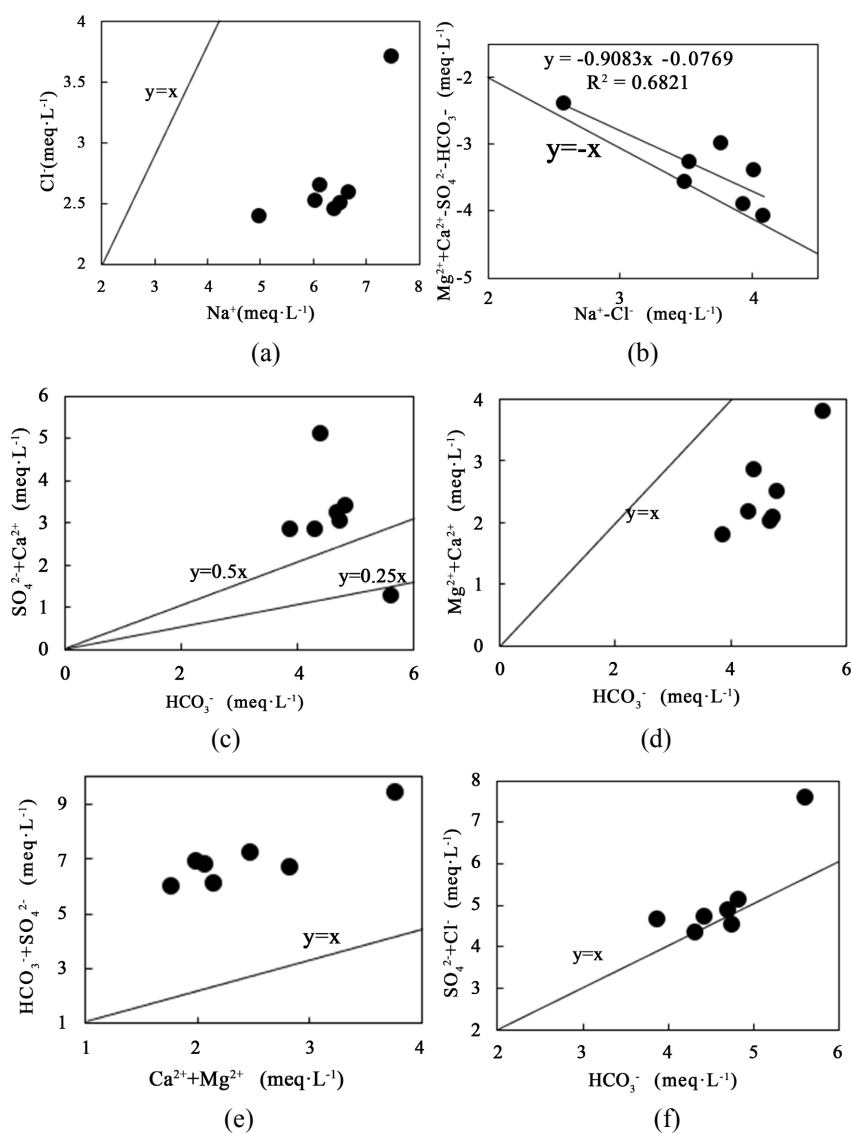


Figure 4. Surface water ion ratio in Luling mining area

图 4. 芦岭矿区地表水离子比值

4.2.3. 人为活动分析

研究区域矿化度变化范围为 425 mg/L~617 mg/L, 平均值为 472 mg/L。基本小于 500 mg/L。通过研究 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 与 Ca^{2+} 之间的比例关系, 可以推断出人类活动对水体中主要离子的影响程度, 当 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 时, 人为活动受工矿活动影响较大, 反之, 则受农业活动和生活污水的影响较大[18]。根据图 5 显示, $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$, 可得出结论人为活动受工矿活动影响较大。

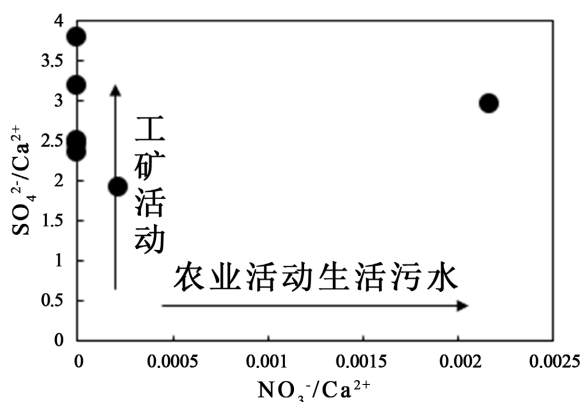


Figure 5. Ratio relationship between SO_4^{2-} , NO_3^- and Ca^{2+}
图 5. SO_4^{2-} 、 NO_3^- 与 Ca^{2+} 的比值关系

4.3. 水质评价

4.3.1. 地表水水质评价

本文根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)对研究区水质进行评估[19]。根据表 2 的数据, 我们发现该地区的 pH、氯化物、硝酸盐和硫酸盐的含量都处于国家规定的标准内, 则可得出研究区水质卫生符合国家标准。

Table 2. Comparison of surface water and conventional water quality index limits

表 2. 地表水与常规水质指标限值对比

指标	氯化物/(mg/L)	硫酸盐/(mg/L)	硝酸盐/(mg/L)	pH
L1	89.4	89	0	8.86
L2	87.0	101	0	8.78
L3	88.6	105	0	9.05
L4	92.0	110	0.10	9.01
L5	93.8	119	0	8.68
L6	84.9	113	0.02	8.68
L7	132	187	0	8.85
限值	250	250	250	6~9

4.3.2. 农田灌溉水水质评价

本文评价研究区灌溉水水质是通过四个指标, 即: 钠吸附比(SAR)、钠百分比(%Na)、渗透指数(PI)、残余碳酸钠(RSC)来进行的。由表 3 可以看出, 采样点钠吸附比(SAR)均小于 10, 灌溉水质很适宜灌溉; 钠百分比(%Na)采样点均大于 60%, 不适宜灌溉; 渗透指数(PI)采样点均大于 75%, 很适宜灌溉; 残余碳

酸钠(RSC)有 3 个采样点在 1.25~2.5 内, 基本适宜灌溉, 有 4 个采样点大于 2.5, 则表明不适宜灌溉。由上述可得, 钠吸附比和渗透指数两个评价指标所得出的结果显示宿州芦岭矿区研究区地表水很适宜灌溉, 钠百分比和残余碳酸钠两个指标得出的结果显示研究区地表水适宜灌溉的水占比为 42.9%。即, 研究区地表水若用于灌溉会给土壤或者作物带来中等程度的碱害风险[20]。

Table 3. Single-index irrigation water quality evaluation
表 3. 单指标灌溉水水质评价

采样点	SAR	评价结果	%Na	评价结果	PI (%)	评价结果	RSC	评价结果
L1	5.82	很适宜	73.2	不适宜	99.1	很适宜	3.11	不适宜
L2	6.28	很适宜	74.8	不适宜	101	很适宜	3.17	不适宜
L3	6.92	很适宜	77.8	不适宜	102	很适宜	3.02	不适宜
L4	6.69	很适宜	76.1	不适宜	102	很适宜	3.04	不适宜
L5	5.51	很适宜	70.5	不适宜	96.8	很适宜	2.34	基本适宜
L6	4.18	很适宜	63.1	不适宜	90.7	很适宜	1.80	基本适宜
L7	5.44	很适宜	65.6	不适宜	87.5	很适宜	2.49	基本适宜

5. 结论

以宿州芦岭矿区地表水为研究对象, 采集了 7 组样品, 经研究分析最后得出以下结论。

1) 水体 pH 值平均值为 8.84, 整体上呈现出弱碱性。TDS 值变化范围介于 425 mg/L~617 mg/L 之间, 高于世界河流平均值。阳离子以 Na^+ 为主, 阴离子以 HCO_3^- 为主。地表水中为 NO_3^- 变异系数最大, 是随环境变化最主要的敏感离子。

2) 研究区水化学类型共有 2 种, 其中 $\text{Na-Mg-HCO}_3^- \text{Cl}$ 型有 6 个, $\text{Na-Mg-HCO}_3^- \text{SO}_4$ 型有 1 个。

3) 研究区地表水离子组成主要受岩石风化作用影响。地表水中的 Na^+ 和 Cl^- 不仅存在岩盐溶解, 还存在其他来源的输入, 比如斜长石等硅酸矿物的溶解。研究区水样中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 以碳酸盐岩溶解为主, 主要以方解石溶解为主。研究区水样主要受蒸发岩风化溶解的影响。在研究区内存在阳离子交换作用。研究区域人为活动受工矿活动影响较大。

4) 研究区地表水符合《地表水环境质量标准》, 研究区地表水若用于灌溉会给土壤或者作物带来中等程度的碱害风险。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Fan, G. and Zhang, D. (2015) Mechanisms of Aquifer Protection in Underground Coal Mining. *Mine Water & the Environment*, **34**, 95-104. <https://doi.org/10.1007/s10230-014-0298-0>
- [3] Howladar, M.F. (2013) Coal Mining Impacts on Water Environs around the Barapukuria Coal Mining Area, Dinajpur, Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*, **70**, 215-226. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2117-x>
- [4] 覃政教, 林玉石, 袁道先, 等. 西南岩溶区矿山与水污染问题探讨及建议[J]. 地球学报, 2012, 33(3): 341-348.
- [5] 刘基, 高敏, 靳德武, 杨建, 王强民. 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. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2020.07.040>
- [6] Hu, M.H., Stallard, R.F. and Edmond, J.M. (2009) Major Ion Chemistry of Some Large Chinese Rivers. *Nature*, **298**, 550-553. <https://doi.org/10.1038/298550a0>

- [7] 张利田, 陈静生. 我国河水主要离子组成与区域自然条件的关系[J]. 地理科学, 2000, 20(3): 236-240. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0690.2000.03.007>
- [8] 孔令健, 姜春露, 郑刘根, 程桦, 任梦溪, 闵飞虎, 方刘兵. 淮北临涣矿采煤沉陷区不同水体水化学特征及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1158-1167.
- [9] 孙红福, 赵峰华, 张璐, 刘一鸣, 曹松华, 张伟. 重庆西部干旱区煤矿矿井水水质综合评价[J]. 煤炭学报, 2014, 39(4): 736-743. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2013.0510>
- [10] 李永柳, 周忠发, 孔杰, 蒋翼, 刘贤梅, 李韶慧. 喀斯特地区河流水化学季节变化特征及成因分析——以平寨水库上游流域为例[J]. 环境化学, 2023, 42(02): 478-486.
- [11] 高帅, 李常锁, 贾超, 等. 济南趵突泉泉域岩溶水化学特征时空差异性研究[J]. 地质学报, 2019, 93(S1): 61-70.
- [12] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4537-4545.
- [13] 张艳, 吴勇, 杨军, 等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015(9): 3230-3237. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.2015.09.014>
- [14] Xiao, J., Jin, Z.D., Wang, J., *et al.* (2015) Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Solute Sources of Groundwater within the Tarim River Basin in the Extreme Arid Region, NW Tibetan Plateau. *Quaternary International*, **380-381**, 237-246.
- [15] 卢丽, 陈余道, 邹胜章, 等. 岩溶区典型工业型城市地下水水化学特征及成因机制[J]. 中国岩溶, 2022, 41(4): 588-598.
- [16] 苏渤松, 冯松宝, 余浩, 陈梦圆. 安徽南陵县三里矿区地表水化学特征及离子来源分析[J]. 能源技术与管理, 2022, 47(5): 28-32.
- [17] 张涛, 王明国, 张智印, 刘廷, 何锦. 然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4003-4010. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202002080>
- [18] 左禹政, 安艳玲, 吴起鑫, 屈坤杰, 樊光辉, 叶祖鑫, 秦玲, 钱娟婷, 涂成龙. 贵州省都柳江流域水化学特征研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(7): 2684-2690.
- [19] GB 3838-2002. 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] 谢菲. 泾惠渠灌区地下水水质对不同水源灌溉的响应及评价[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.