

宿州芦岭矿区浅层地下水化学特征及成因分析

李田田¹, 闵宁^{1,2*}, 蒋家沁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8日; 录用日期: 2024年3月19日; 发布日期: 2024年3月29日

摘要

文章以宿州芦岭矿区浅层地下水为研究对象, 结合统计分析、Piper三线图、Gibbs图和离子比例系数的方法分析研究区浅层地下水的水化学特征及其成因, 并开展了浅层地下水质量评价。结果表明: 该区域浅层地下水pH均值为7.52, 整体上属于偏弱碱性环境, TDS值介于397~933 mg/L, 平均值为613 mg/L, 属于淡水。水体阳离子以Na⁺, Mg²⁺为主, 阴离子主要为HCO₃⁻。水化学类型共有4种, 分别为Mg-Na-Ca-HCO₃型、Na-Mg-Ca-HCO₃型、Na-Mg-HCO₃型和Na-Mg-HCO₃-Cl型。浅层地下水水化学特征的主要受岩石风化作用的影响, Na⁺和Cl⁻主要来源于岩盐溶解, Ca²⁺及Mg²⁺主要受碳酸盐的溶解。通过对水质进行评估, 可以确定研究区的水质基本适合饮用, 该区浅层地下水如果作为灌溉用水会给土壤或者作物带来中等程度的碱害风险。

关键词

地下水, 水化学特征, 成因分析

Chemical Characteristics and Genesis of Shallow Groundwater in the Luling Mining Area, Suzhou

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

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

²National Coal Mine Water Hazard Prevention Engineering Technology Research Centre, Suzhou Anhui

Received: Jan. 8th, 2024; accepted: Mar. 19th, 2024; published: Mar. 29th, 2024

*通讯作者。

Abstract

The article takes the shallow groundwater in the Luling mining area of Suzhou as the research object, and analyses the hydrochemical characteristics and causes of the shallow groundwater in the study area by combining statistical analysis, Piper's trilinear diagram, Gibbs' diagram and ionic scale coefficient, and carries out the evaluation of the quality of the shallow groundwater. The results show that the pH of the shallow groundwater in the area is 7.52, which is a weakly alkaline environment overall. The water cations are mainly Na^+ and Mg^{2+} , while the anions are mainly HCO_3^- . There are four types of water chemistry, namely Mg-Na-Ca- HCO_3 type, Na-Mg-Ca- HCO_3 type, Na-Mg- HCO_3 type and Na-Mg- HCO_3 -Cl type. The water chemistry of shallow groundwater is mainly influenced by rock weathering, with Na^+ and Cl^- mainly derived from rock salt dissolution, and Ca^{2+} and Mg^{2+} mainly from carbonate dissolution. The assessment of the water quality has determined that the study area is generally suitable for drinking and that the shallow groundwater in the area poses a moderate risk of alkali damage to soil or crops if used as irrigation water.

Keywords

Groundwater, Hydrochemical Characteristics, Causal Analysis

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

地下水，是人类生活和生产活动最重要的水源之一，与我们的生活息息相关[1]。在人口、经济迅速发展的同时，水资源日益紧张，水污染日趋严重，水资源保护已成为当今社会关注的焦点，科学有效地管理水资源已经成为了当务之急。

目前，国内学者在浅层地下水的化学特征及其成因方面做了大量的研究，并且多依据数理统计法、Piper 三线图、Gibbs 模型、离子比例系数等方法。如王润涛[2]等采用 Piper 三线图、Gibbs 模型、舒卡列夫分类、离子比例系数、数理统计等方法，分析了南淝河下游浅层地下水的化学特征，发现研究区内的水化学类型分布比较丰富，共有 15 种水化学类型，地下水水化学组分主要受岩石风化溶解作用控制和碳酸盐矿物溶解的影响。李巧[3]等对玛纳斯河流域地下水的形成过程进行探究，在采用常规水化学分析方法的基础上，结合氢氧同位素分析，发现当地地下水化学成分的形成主要受碳酸盐岩和硫酸盐岩的溶滤以及大气降水和蒸发浓缩的影响。闵宁[4]等运用数理统计、Piper 三线图、因子相关性、Gibbs 图等方法，对研究区中常规的离子进行了统计分析，结果显示，宿州市市区的地下水是由碳酸盐和硅酸盐的溶解风化所控制的，与此同时蒸发浓缩在其中也起到重要的作用。

本文基于前人的成果，结合宿州市的水文地质条件，以宿州芦岭矿区周边浅层地下水为研究对象，采取 7 组浅层地下水水质样品，对该区浅层地下水的化学特征、形成原因等进行了分析。本项目对安徽省宿州市供水安全具有重要意义，并对宿州市的水资源开发利用进行了一定的数据支撑。

2. 研究区概况

宿州市坐落在中国安徽省的最北端，地理位置为东经 $116^{\circ}09'$ ~ $118^{\circ}10'$ ，北纬 $33^{\circ}18'$ ~ $34^{\circ}38'$ ，天气以暖

热带半湿度季风天气为主, 每年的降雨量只有 774~895 mm, 且大部分时间都是 5~9 月份。多年以来全市的平均径流量为 17.76 亿 m^3 , 地表水资源量为 19.1 亿 m^3 , 地下水资源总量为 19.4 亿 m^3 , 水资源量总量为 34.8 亿 m^3 , 人均水资源量为 605 m^3 , 占全国人均量的 22%, 属于水资源严重匮乏地区。

宿州位于淮北盆地的中朝准地台区, 地处皖北, 受淮北古黄河水系和淮河水系的共同影响, 其地质特征以山地和丘陵地带的岩石组成为特征, 其中以寒武纪、奥陶纪和震旦纪白云质灰岩最常见。

3. 样品采集与测试

在 2021 年 6 月, 我们在研究区的浅层地下水中进行了采样, 总计收获 7 组样品, 其中采样点分布位置可见于图 1。在取样之前, 先将被取样的水冲洗 2~3 次, 然后用 500 mL 聚乙烯瓶盛满水样, 并快速密封, 并根据需要做好标记。分别采用 pH 计和 TDS 计在现场直接检测 pH、温度和总溶解固体(TDS)。

本次样品分析全部在宿州学院安徽省煤矿勘探工程技术研究中心进行。首先将试样中的杂质用 0.45 μm 滤膜过滤, 然后将 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用酸碱中和滴定法进行测定。采用美国赛默飞公司的离子色谱仪 (ICS-900) 对 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等主要阳离子和 F^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 等阴离子进行测定, 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。

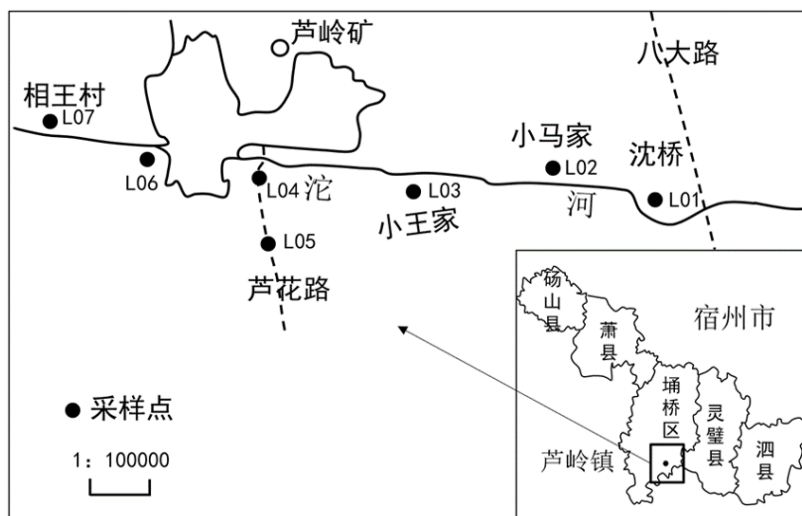


Figure 1. Location distribution of shallow groundwater sampling points around the Luling mining area in Suzhou

图 1. 宿州芦岭矿区周边浅层地下水采样点位置分布

4. 结果与讨论

4.1. 地下水化学组分特征分析

4.1.1. 常规离子组成

通过对宿州芦岭矿区周边浅层地下水中水化学指标统计分析, 得到结果如表 1 所示: 1) 该区域浅层地下水 pH 均值为 7.52, 整体上属于偏弱碱性环境, 变异系数为 3%, 表明 pH 值的空间差异性较小。2) TDS 值介于 397~933 mg/L, 平均值为 613 mg/L, 属于淡水。3) 水体阳离子以 Na^+ 、 Mg^{2+} 为主, 它们之间的含量关系是: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, 阴离子主要为 HCO_3^- , 它们之间的含量关系是: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{F}^-$ 。根据表 1 的数据可以看到, NO_3^- 、 Cl^- 的变异系数均超过了 1, 这表明离子的分布非常不均匀, 对外部环境的变化反应非常敏感且是不稳定的。

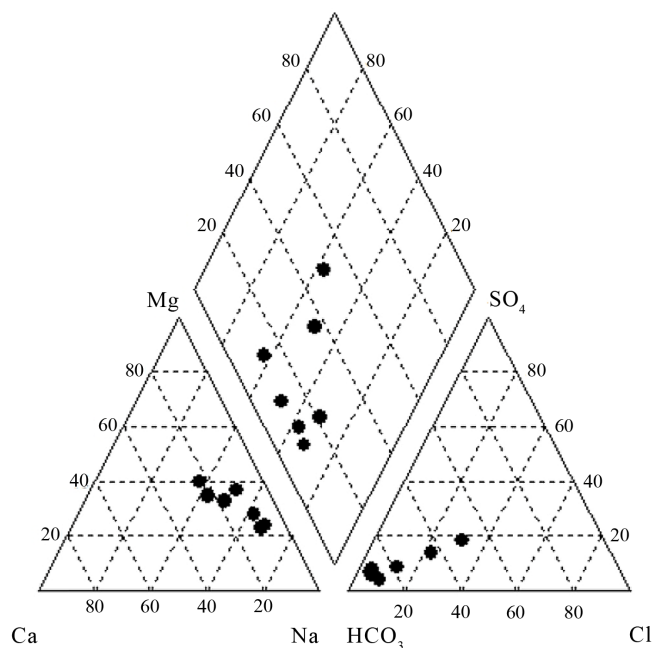
Table 1. Statistical results of each index content of the sample**表 1.** 样品各指标含量统计结果

指标	最小值	最大值	均值	变异系数
pH	7.28	8.02	7.52	0.30
TDS	397	933	613	0.26
Na ⁺	73.7	223	180	0.28
Mg ²⁺	39.9	90.1	55.4	0.33
Ca ²⁺	22.4	96.4	42.5	0.61
Cl ⁻	17.5	227	70.9	1.10
SO ₄ ²⁻	19.7	187	72.3	0.78
HCO ₃ ⁻	481	740	640	0.14
F ⁻	0.41	1.73	1.30	0.35
NO ₃ ⁻	-	80.0	11.5	2.64

注：pH 无量纲，其他单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

4.1.2. Piper 三线图分析

为了揭示研究区内浅层地下水水化学指标阴阳离子的浓度关系，更深层次地反映出水化学类型的特征、各离子的相对含量及空间分布，绘制 Piper 三线图对该区内的地下水进行统计分析，结果图 2 所示：在阳离子三角图中，水样点大部分落在阳离子三角图的右下方，表明研究区浅层地下水中阳离子以 Na⁺ 为主，其次为 Mg²⁺；阴离子主要分布在靠近 HCO₃⁻ 端且浓度比例较高的区域，表明其占阴离子总浓度的比例较高。该区域有 4 种不同的水化学类型，分别是 Mg-Na-Ca-HCO₃ 型、Na-Mg-Ca-HCO₃ 型、Na-Mg-HCO₃ 型和 Na-Mg-HCO₃-Cl 型。与同地区结果对比，发现水化学类型基本一致。

**Figure 2.** Piper three-line diagram of main ions in shallow groundwater in the study area**图 2.** 研究区浅层地下水主要离子 Piper 三线图

4.2. 地下水成因分析

4.2.1. 地下水 Gibbs 图

通过 Gibbs 图, 我们可以定性分析地下水的化学组成, 并判断它们是否受蒸发浓缩、岩石风化或者大气降水作用的影响[5]。我们以研究区内的浅层地下水水体为例, 绘制了研究区浅层地下水 Gibbs 图(图 3), 并对其进行了分析。通过对 Gibbs 图中离子成分的变化情况进行分析, 我们可以得出以下结论: 研究区浅层地下水水体样品 TDS 值分布于 397~933 mg/L 之间, $\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 小于 0.5, $\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 大于 0.5, 全部样品都位于岩石风化控制区, 这表明这一地区的主要离子成分是由岩石风化作用所决定的, 主要是由岩石的风化溶解所导致的。

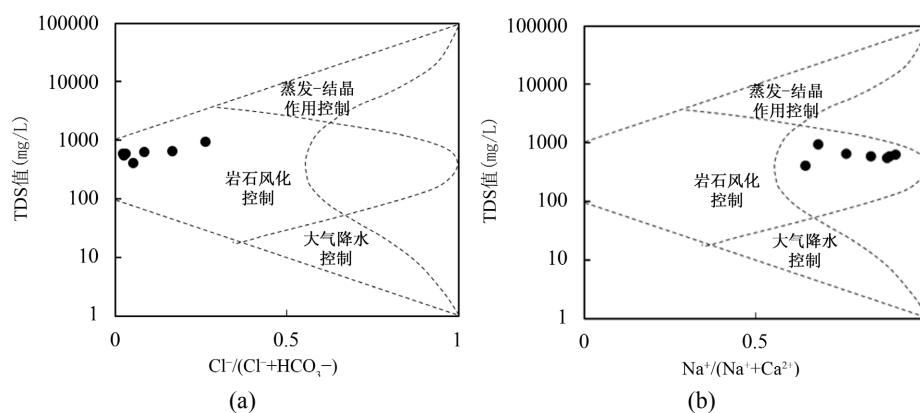


Figure 3. Gibbs diagram of shallow groundwater in the study area

图 3. 研究区浅层地下水 Gibbs 图

4.2.2. 离子比例系数

论离子比例系数可以用来识别地下水的成因和特定条件, 并且可以用来探究其中某些化学元素的来源[6]。 Na^+ 和 Cl^- 主要是来源于岩盐的溶解, Na^+/Cl^- 能反映出两种离子的来源, 是判定地下水成因的一个重要指标[7]。图 4(a)所示地下水 Na^+ 与 Cl^- 的关系, 可以看出, 研究区水样点绝大部分落在 1:1 线的上方, 表明 Na^+ 毫克当量浓度基本均高于 Cl^- 毫克当量浓度, 这说明除岩盐溶解外, 阳离子交换也可能是影响该比值的重要因素(见式(1))。对比采样点分布位置发现, L04 和 L05 采样点 Cl^- 的整体浓度增大, 说明人类采矿活动可能影响 Cl^- 的来源。



$\gamma(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)/\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})$ 可以用来判断阳离子交换作用。图 4(b)中显示, 研究区地下水水样的斜率接近-1, 呈现负相关关系, 暗示着研究区浅层地下水环境中存在一定程度的阳离子交换作用[8] [9] [10]。

$(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的比值能够反映出水质中是否含有碳酸盐、硅酸盐和蒸发岩溶解组分[11]。当其比值 < 1 时, 说明地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来源于来自于硅酸盐和蒸发岩溶解, 而相反, 它们来自于碳酸盐的溶解。图 4(c)揭示了浅层地下水中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 的关系, 所有采样点均落在 1:1 线以下, 而且相差甚远, 这说明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要受碳酸盐的溶解[12]。

$(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})/(\text{HCO}_3^-)$ 的比值关系可以进行判定方解石、白云石等碳酸盐岩类矿物对区内浅层地下水 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的影响程度[13]。当 $(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})/(\text{HCO}_3^-) \geq 0.5$ 时, 方解石矿物是主要的溶解来源; 当 $(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})/(\text{HCO}_3^-) \leq 0.25$ 时, 白云石矿物是主要的溶解来源; 当 $(\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})/(\text{HCO}_3^-)$ 在 0.25~0.5 之间时, 方解石和白云石的溶解是共同存在的。如图 4(d)所示, 研究区浅层地下水 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 比值低于

0.25, 这说明白云石溶解为碳酸盐主要来源[14]。

综合表明, Na^+ 主要来源于岩盐的溶解, 除此之外还有和阳离子交换作用; Cl^- 主要受人类采矿活动的影响; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要受碳酸盐的溶解, 主要以白云石溶解为主。

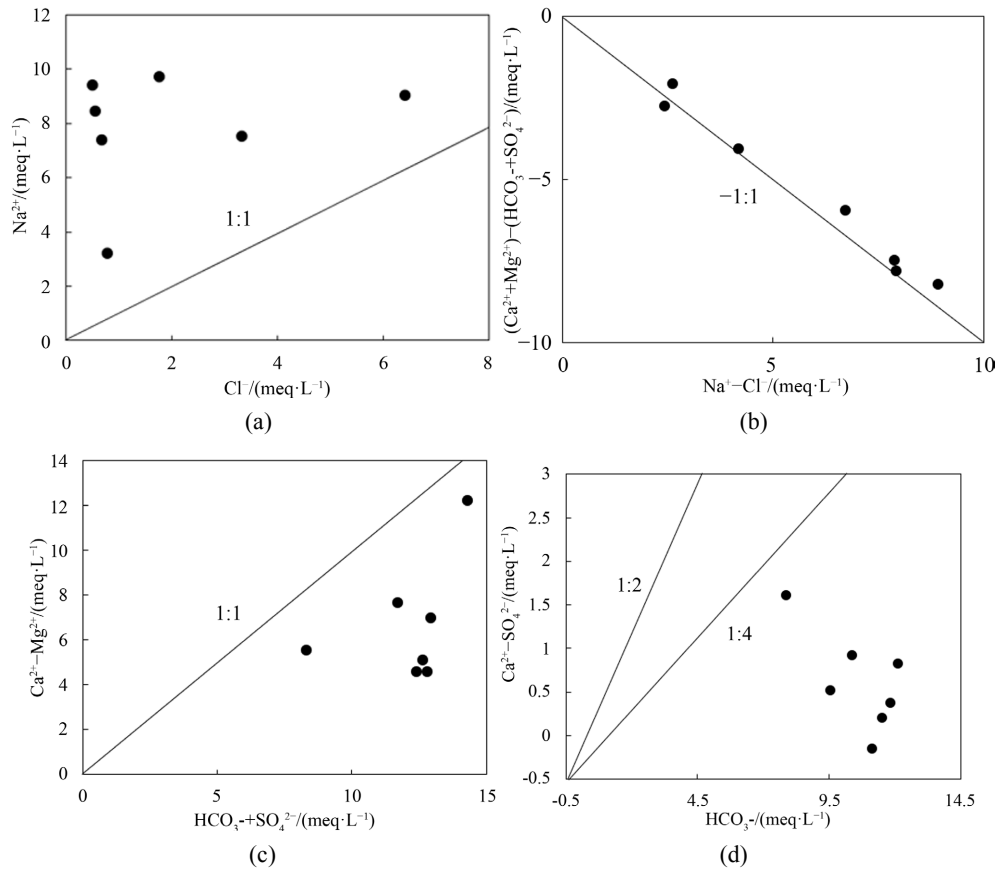


Figure 4. Main ion relationships in shallow groundwater in the study area
图 4. 研究区浅层地下水主要离子关系

4.3. 水质评价

4.3.1. 饮用水卫生评价

Table 2. General indicators and limits of water quality

表 2. 水质常规指标及限值

指标	氯化物/(mg/L)	硫酸盐/(mg/L)	pH	溶解性总固体/(mg/L)
L01	23.7	39.3	8.02	575
L02	17.5	45.0	7.58	581
L03	62.9	60.8	7.45	615
L04	227	187	7.28	933
L05	117	103	7.34	641
L06	19.4	52.9	7.52	546
L07	27.5	19.6	7.44	397
限值	250	250	6.5~8.5	1000

研究区浅层地下水是目前部分农村饮水安全工程的供水来源。本文参考《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006),对研究区内的饮水卫生进行了评估,该标准规定了居民生活饮用水的各项卫生指标[15]。根据表 2 的数据,我们发现该地区的 pH、TDS、氯化物和硫酸盐的浓度都达到了国家的相关要求(pH 国标范围在 6.5~8.5 之间, $TDS \leq 1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氯化物和硫酸盐均小于 $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),即研究区的水卫生状况达到国家规定的标准,为生活饮用水。

4.3.2. 灌溉水水质评价

浅层地下水通常含有丰富的矿物质,可以提供植物所需的营养,因此被广泛应用于农业灌溉中。本文通过钠吸附比(SAR)、钠百分比(%Na)、渗透指数(PI)、残余碳酸钠(RSC)四个指标对研究区灌溉水水质进行了评价。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)有 4 个采样点在 30%~60%内,基本适宜灌溉,有 3 个采样点大于 60%,不适宜灌溉;渗透指数(PI)有 3 个采样点大于 75%,很适宜灌溉,有 4 个采样点在 25%~75%内,基本适宜灌溉;残余碳酸钠(RSC)有 1 个采样点小于 1.25,很适宜灌溉,有 2 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,不适宜灌溉。总体而言,SAR 与 PI 两项指标的评价结果均表明,研究区大部分地下水都是很适宜灌溉的,%Na 与 RSC 两项指标的评价结果表明,研究区浅层地下水中适合灌溉的水量占到了 42.9%。即,研究区的浅层地下水如果用来灌溉,将对土壤和农作物产生一定的碱害风险[16]。

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
L01	2.78	很适宜	51.4	基本适宜	75.6	很适宜	5.13	不适宜
L02	4.37	很适宜	67.2	不适宜	91.8	很适宜	7.27	不适宜
L03	4.50	很适宜	67.8	不适宜	91.1	很适宜	6.53	不适宜
L04	2.57	很适宜	42.5	基本适宜	57.7	基本适宜	-1.83	很适宜
L05	2.70	很适宜	49.5	基本适宜	69.9	基本适宜	1.91	基本适宜
L06	3.71	很适宜	62.2	不适宜	87.2	很适宜	6.40	不适宜
L07	1.36	很适宜	36.7	基本适宜	68.8	基本适宜	2.34	基本适宜

5. 结论

1) 研究区浅层地下水属于弱碱性水,pH 值平均值为 7.52;TDS 处在 350~950 mg/L 之间,适宜作为生活饮用水;阳离子以 Na^+ 为主,阴离子以 HCO_3^- 为主。

2) 研究发现,该区域的水化学类型共有 4 种,分别是 Mg-Na-Ca- HCO_3 型、Na-Mg-Ca- HCO_3 型、Na-Mg- HCO_3 型和 Na-Mg- HCO_3 -Cl 型。其中, F^- 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 的空间变异性较小,分布较稳定, Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 的变异系数均大于 50%,在空间分布上存在较大的离散型和波动性特征。

3) 区内水化学演化主要是由岩石风化作用的结果。 Na^+ 和 Cl^- 主要是岩盐溶解产生的,此外,它们还来自于碳酸盐岩的溶解;而 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 主要是受碳酸盐的溶解。

4) 对该地区的饮用水卫生状况进行了综合评价,认为该地区的地下水均达到了国家饮用水标准,属于可饮用水。采用钠吸附比(SAR)、钠百分比(%Na)、渗透指数(PI)、残余碳酸钠(RSC)四个指标评价研究区灌溉水水质,研究区浅层地下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。

基金项目

本研究来源于以下项目:

- 1) 宿州学院校级教研项目, 项目编号: szxy2023jyxm44;
- 2) 宿州学院校级质量工程项目, “地球化学线上课程”, 项目编号: szxy2021xskc06。

参考文献

- [1] 刘俊萍. 地下水环境保护与防治建议研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(17): 86-88.
- [2] 王润涛, 钱家忠, 王宿轩, 马海春, 王小勇. 南淝河下游浅层地下水水化学特征及成因分析[J/OL]. 现代地质: 1-10. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.028>, 2023-10-25.
- [3] 李巧, 周金龙, 高业新, 等. 新疆玛纳斯河流域平原区地下水水文地球化学特征研究[J]. 现代地质, 2015, 29(2): 238-244.
- [4] 闵宁, 任瑾, 林曼利. 淮北平原区城市浅层地下水水化学特征及成因分析: 以宿州市为例[J]. 九江学院学报(自然科学版), 2018, 33(1): 14-17.
- [5] 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.
- [6] 高坛光, 康世昌, 张强弓, 等. 青藏高原纳木错流域河水主要离子化学特征及来源[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 3009-3016.
- [7] Edmunds, W.M., Ma, J., Aeschbach-Hertig, W., *et al.* (2006) Groundwater Recharge History and Hydrogeochemical Evolution in the Minqin Basin, North West China. *Applied Geochemistry*, **21**, 2148-2170. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.07.016>
- [8] Apollaro, C., Fuoco, I., Bloise, L., *et al.* (2021) Geochemical Modeling of Water-Rock Interaction Processes in the Pollino National Park. *Geofluids*, **2021**, Article ID: 6655711. <https://doi.org/10.1155/2021/6655711>
- [9] Fuoco, I., Apollaro, C., Criscuoli, A., *et al.* (2021) Fluoride Polluted Groundwaters in Calabria Region (Southern Italy): Natural Source and Remediation. *Water*, **13**, Article No. 1626. <https://doi.org/10.3390/w13121626>
- [10] Zhang, B., Zhao, D., Zhou, P., *et al.* (2020) Hydrochemical Characteristics of Groundwater and Dominant Water-Rock Interactions in the Delingha Area, Qaidam Basin, Northwest China. *Water*, **12**, Article No. 836. <https://doi.org/10.3390/w12030836>
- [11] 刘凯旋, 刘启蒙, 柴辉婵, 等. 孙疃矿区地下水化学特征及其控制因素研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(4): 74-79.
- [12] 刘德玉, 贾贵义, 张伟, 等. 甘肃敦煌地区疏勒河尾闾区地下水化学特征及成因分析[J]. 地质论评, 2022, 68(1): 181-194.
- [13] 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.
- [14] Guo, Y.L., Zhang, C., Xian, Q., *et al.* (2020) Hydrogeochemical Characteristics of a Closed Karst Groundwater Basin in North China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **325**, 365-379. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07247-w>
- [15] 金银龙, 鄂学礼, 陈昌杰, 等. GB 5749-2006. 生活饮用水卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社出版, 2006.
- [16] 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]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2016.