

宿州市农村地区浅层地下水水文地球化学特征及水质评价

高力^{1,2}, 许继影^{1*}, 束永列^{1,2}, 王晓悦^{1,2}

¹宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

²宿州全源地质技术服务有限公司, 安徽 宿州

收稿日期: 2022年7月23日; 录用日期: 2022年8月25日; 发布日期: 2022年9月1日

摘要

为进一步了解和掌握宿州市农村区域浅层地下水水文地球化学特征及水质状况, 以农村区域32组家庭饮用浅层地下水为研究对象, 运用Piper图、Gibbs图及多元统计分析, 综合分析研究区浅层地下水水文地球化学特征及水岩作用; 利用USSL和Wilcox图解法, 结合《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006), 对浅层地下水的卫生状况进行水质评价。研究表明: 研究区域浅层地下水水化学类型以HCO₃-Ca型为主, pH范围为6.83~7.76, 平均值为7.25, 极少部分属于中性偏弱酸性水, 绝大部分属于中性偏弱碱性水, TDS值的范围为285.00~943.00 mg·L⁻¹, 平均值为531.16 mg·L⁻¹, 属于水质硬度较高。阴阳离子浓度由大到小依次为HCO₃⁻ > Cl⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻ > F⁻和Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺。离子来源与硫酸盐岩溶解、岩盐溶解、碳酸盐岩溶解、硅酸盐岩风化等作用有关。研究区水质不适于饮用, 但基本符合农田灌溉的要求, 合理灌溉不会造成盐害与碱害。

关键词

水化学特征, 离子来源, 水岩作用, 水质评价

Hydrogeochemical Characteristics and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Rural Areas of Suzhou

Li Gao^{1,2}, Jiying Xu^{1*}, Yonglie Shu^{1,2}, Xiaoyue Wang^{1,2}

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

²Suzhou Quanyuan Geological Technology Service Co.Ltd, Suzhou Anhui

Received: Jul. 23rd, 2022; accepted: Aug. 25th, 2022; published: Sep. 1st, 2022

*通讯作者。

Abstract

In order to further understand and grasp the hydrological geochemical characteristics and water quality of shallow groundwater in rural areas of Suzhou City, 32 groups of households in rural areas took shallow groundwater drinking as the research object, and used Piper diagram, Gibbs diagram and multivariate statistical analysis to comprehensively analyze the hydrological geochemical characteristics and water rock action of shallow groundwater in the research area; Using the USSL and Wilcox diagrams, combined with the Sanitary Standard for Drinking Water (GB5749-2006), the sanitary status of shallow groundwater was evaluated. The results show that the chemical type of shallow groundwater in the research area is mainly $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type, the pH range is 6.83~7.76, the average value is 7.25, only a tiny minority belong to neutral weak acidic water, most of them belong to neutral weak alkaline water, and the TDS value ranges from 285.00 to 943.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the average is 531.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, which belongs to the high hardness of water quality. The anion and plasma concentrations, from largest to smallest, were $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{F}^-$ and $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. The ion source is related to the dissolution of sulfate rocks, the dissolution of rock salts, the dissolution of carbonate rocks, and the weathering of silicate rocks. The water quality in the research area is not suitable for drinking, but it basically meets the requirements of farmland irrigation, and reasonable irrigation will not cause salt and alkali damage.

Keywords

Hydrochemical Characteristics, Ion Sources, Hydro-Rock Action, Water Quality Assessment

Copyright © 2022 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

随着社会高速发展和人口的不断增加,全球水资源短缺已成为普遍存在的现象[1]。地下水的化学成分是不同水体在不同尺度的循环过程中与周围环境(气候、水文、地形、岩石、人类活动等)长期相互作用的结果[2]。通过对地下水水化学特征和水质状况系统研究,有利于掌握地下水水化学特征与水资源可再生能力,以便科学有效的管理和利用地下水资源,进而保护和改善地下水水质[3]。中国作为世界的一部分,也面临同样的问题[4]。华北地区多年平均水资源仅占全国的4%,人均水资源量仅为全国平均水平的1/7 [5]。与此同时,皖北地区人口及耕地分别占全省的45.4%、50.3%,而水资源总量仅占全省的13.68% [6]。水资源短缺、水资源分布不均匀、水环境污染等问题日益突出,因此,对水资源的科学利用显得尤为重要。从目前来看,对于水资源利用的研究主要分为水量、水质2个方面[7] [8]。我国对于地下水资源的利用十分广泛,但对于地下水环境的管理基础薄弱。研究分析地下水化学类型以及分析其影响因素市地下水水质评价的重要内容,对地下水资源的开发、管理和利用以及环境保护等方面具有重大意义。

宿州市是国家重要的农业和工业相结合的城市之一,人口基数大,水资源分布不均匀,而地下水资源也成为了绝大部分地区居民活动和工农业活动的主要水源。因此,该地区地下水资源的使用广泛为我们的研究开展提供了地下水的研究来源,以及国家煤矿防治技术中心提供实验条件的支持,同时也为我们的研究提供了良好的研究基础。随着社会经济的发展、人民生活水平的提高,地下水资源也越来越受

到人们的关注和重视。地下水化学特征、地下水中离子的来源、水岩作用的类型及程度以及含水层水化学特征及类型均与区域水文地质环境、人类活动、气候变迁等作用密切相关。而对于浅层地下水的使用也存在着以下几个主要问题,例如地下水中的金属离子的主要来源,金属离子含量是否超标,地下水是否符合国家生活饮用水的卫生标准等。基于此,本研究以宿州市农村区域 32 组家庭饮用浅层地下水为研究对象,通过对浅层地下水常规离子浓度的测试与分析,重点开展了水岩作用、水质评价及影响因素的分析,了解农村地区浅层地下水水质状况,确定影响水质的主要影响因素,有助于全面了解家庭饮用浅层地下水安全,同时也为农村区域水资源保护及水资源管理提供科学依据。

2. 研究区概况

研究区位于安徽省宿州市埇桥区灰古镇和二铺村农村地区(如图 1 所示),东、东北接宿迁市、徐州市,南邻蚌埠市,西、西北邻淮北市、河南省商丘市、山东省菏泽市。地理坐标为 $117^{\circ}3'8''\sim 117^{\circ}7'38''\text{E}$, $33^{\circ}36'58''\sim 33^{\circ}45'14''\text{N}$,总面积约为 67 km^2 ,属于温带季风气候,冬季干冷,夏季炎热,日照充足,四季气候分明。据宿州市气象资料显示,研究区多年平均气温 14.3°C ,极端最高气温 40.3°C ,多年平均降水量达 820 mm ,蒸发量为 1124 mm ,平均干旱指数为 1.37 ,整体偏干旱。

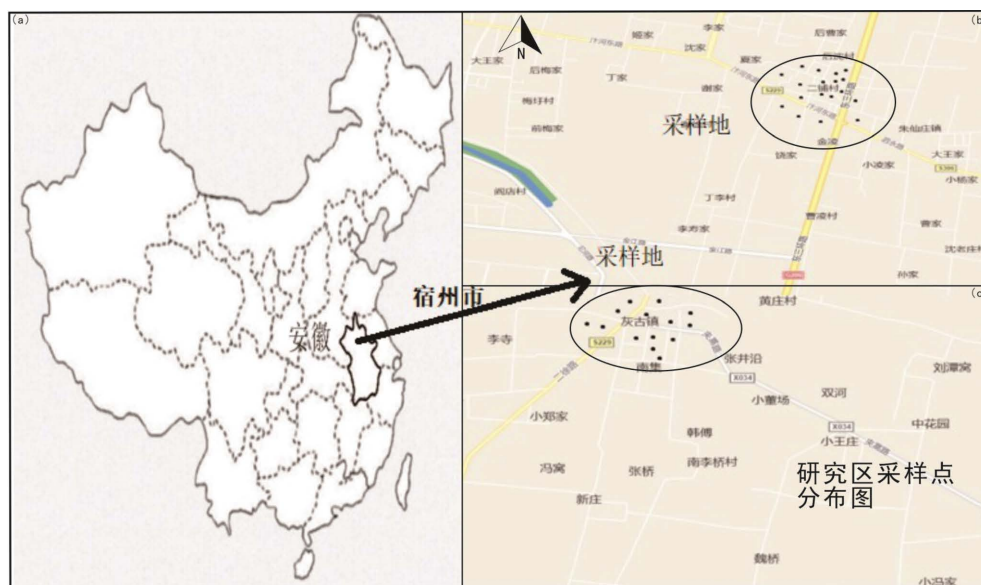


Figure 1. Distribution map of sampling points in the research area

图 1. 研究区采样点分布图

3. 研究方法

3.1. 样品采集与测试

本研究水样的采集于 2022 年 4 月开展,共采集地下水样品 32 组。取样过程采用 2.5 L 聚乙烯瓶进行采样,采样前用待采集的水样润洗采样瓶 2~3 次后装满、密封并贴好标签。取样现场还将测定温度、pH、电导率(EC)和总溶解性固体(TDS)等参数,同时对采样地点进行 GPS 定位。水样并于当天送往高校实验室,实验室利用抽滤装置($0.45\text{ }\mu\text{m}$ 膜)对水样进行过滤处理。过滤后的水样用标准浓度的酸溶液滴定法测定 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- ,利用 ICS-900 离子色谱仪测定水样中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 的含量。误差分析采用阴、阳离子浓度平衡法进行检测,测定误差在 ± 0.1 以内。

3.2. 数据分析方法

水化学数据的分析处理, 通过 Excel 进行水化学数据的数理统计。利用水化学数据, 综合运用数理统计、相关性分析以及传统图解法(Pipper 图、Gibbs 图、USSL 图和 Wilcox 图)等方法, 进行水化学特征分析及水质评价[9]。Pipper 图由 Origin.2018 软件完成, Gibbs 图、USSL 图和 Wilcox 图由 Origin.2018 和 CoreDraw.2018 完成, 通过 Piper 图和 Gibbs 图可以清晰的看出研究区地下水化学的类型以及受到的主要因素控制。描述性统计分析由 Excel 完成, 通过对地下水中各金属离子含量的最大值、最小值、平均值、标准差、中位数和变异系数的综合分析, 从而确定研究区地下水中的优势离子等。相关性分析由 SPSS 完成, 采用相关性双变量分析法, 对样品中的各项指标进行相关分析。

4. 结果与分析

4.1. 描述性统计分析

地下水水化学指标描述性统计结果如表 1 所示。pH 的范围为 6.83~7.76, 平均值为 7.25, 由此可知, 少数水属于偏弱酸性水, 绝大多数水属于偏弱碱性水。TDS 值为 285~943 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。平均值为 531.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 属于水质硬度较高。EC 为 576~1930 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。阳离子质量浓度平均值由大到小依次为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$, 表明阳离子以 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+} 为主, K^{+} 的质量浓度相对较低, 仅为 0.26~1.60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 阴离子质量浓度平均值由大到小依次为: $\text{HCO}_3^{-} > \text{Cl}^{-} > \text{SO}_4^{2-}$, 地下水样品阴离子以 HCO_3^{-} 为绝对优势离子。研究区内的离散性较大, Cl^{-} (变异系数 1.87) 变异系数高于 0.9, 说明其空间变异性相对较大; Na^{+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 、TDS 和 EC 变异系数为 0.1~0.9, 表明其空间变异性相对中等; pH 变异系数小于 0.1, 说明其空间变异性相对较小, 含量相对稳定。

Table 1. Statistical results of the water chemical composition of the sample

表 1. 样品水化学成分统计结果

测试项目	最小值	最大值	平均值	标准差	中位数	变异系数
Na^{+}	23.48	178.49	62.42	38.03	46.62	0.82
K^{+}	0.26	1.60	0.95	0.26	0.92	0.28
Mg^{2+}	18.12	172.93	54.79	35.02	46.52	0.75
Ca^{2+}	30.88	164.74	80.10	34.56	71.54	0.48
Cl^{-}	13.02	591.96	130.11	140.69	75.33	1.87
SO_4^{2-}	12.59	162.14	55.22	30.98	51.78	0.60
HCO_3^{-}	124.66	840.35	465.28	124.66	450.62	0.28
pH	6.83	7.76	7.25	0.20	7.25	0.03
TDS	285	943	531.16	160.46	513.50	0.31
EC	576	1930	1075.31	340.00	1047	0.32

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

4.2. 水化学类型及水岩作用分析

Pipper 三线图常被应用于刻画区域水化学地球化学特征[10], 研究区 Piper 三线图如图 2 所示, 浅层地下水水化学类型主要为 HCO_3^{-} -Ca 型(75%)、 Cl^{-} -Mg-Ca 型(约 19%)、 HCO_3^{-} -Na-Ca 型(约 6%)。结合阳离

子与阴离子三角图, 可知 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 分别为研究区内浅层地下水的主要阳离子和阴离子。

Gibbs 图可以直观地比较各类水体的水化学组成、形成原因及彼此之间的相互关系, 常被用于河流水化学主要影响因素的识别(大气降雨、岩石风化以及蒸发浓缩) [11]。研究区的 Gibbs 图如图 3 所示, 纵坐标为 TDS 含量, 且 TDS 含量均在 100~1000 之间, 横坐标分别为 $\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$, 从图中他们的关系可以判断出, $\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 少数存在明显差异变化, 但都集中在岩石风化区。这表明研究区地下水水化学组份主要受岩石风化等水岩相互作用过程的控制, 受蒸发沉淀作用微弱且几乎不受大气降水控制[12]。

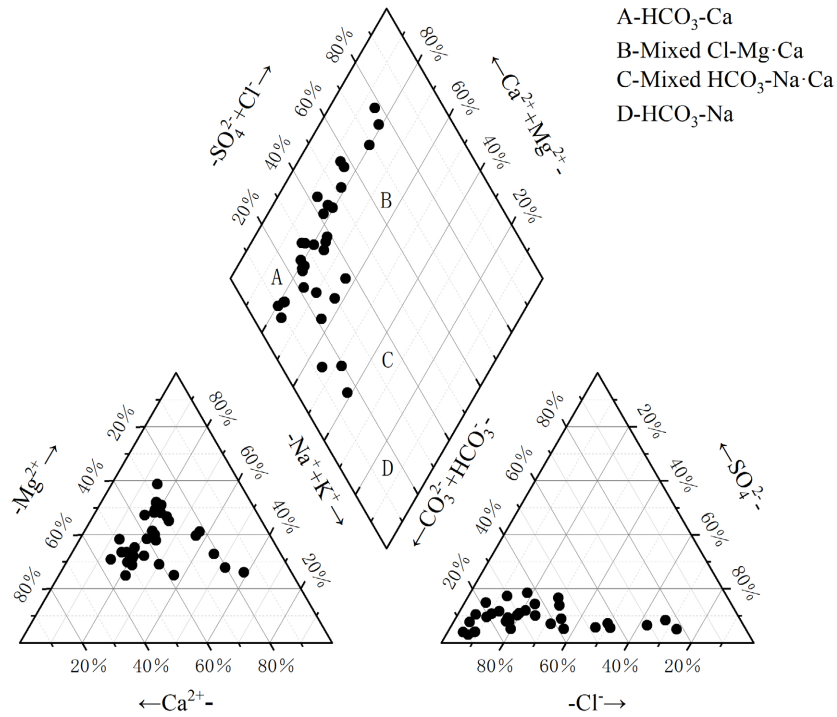


Figure 2. Piper three-line diagram
图 2. Piper 三线图

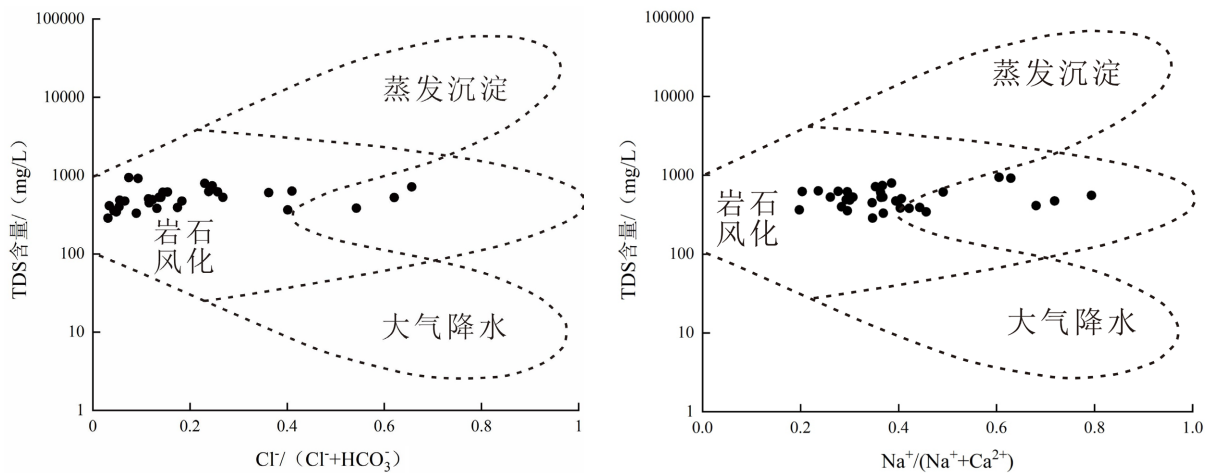


Figure 3. Research area Gibbs chart
图 3. 研究区 Gibbs 图

4.3. 相关性分析

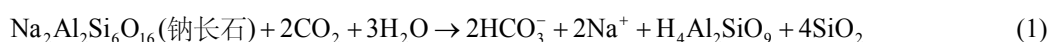
一般情况下, Na^+ 可能来源于盐岩的溶解作用、硅酸盐的风化作用(见式(1)), 以及阳离子交替吸附作用(见式(2)); Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩矿物溶解或阳离子交替吸附作用; HCO_3^- 主要来源于碳酸盐矿物的溶解和硅酸盐矿物的风化, 少部分可能来源于土壤和大气中 CO_2 的溶解和生物降解有机物过程的产物; Cl^- 主要来源于盐岩溶解, SO_4^{2-} 主要来源于石膏或硫化物的氧化[13] [14] [15]。

Table 2. Correlation analysis of hydrochemical parameters

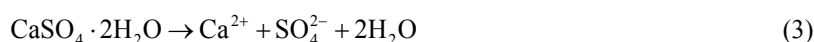
表 2. 水化学参数相关性分析

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	pH	EC	TDS
Na^+	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K^+	0.234	1	—	—	—	—	—	—	—	—
Ca^{2+}	0.095	-0.020	1	—	—	—	—	—	—	—
Mg^{2+}	0.438	0.320	0.611	1	—	—	—	—	—	—
HCO_3^-	0.479*	0.167	-0.031	-0.045	1	—	—	—	—	—
Cl^-	0.194	0.089	0.796	0.845	-0.247	1	—	—	—	—
SO_4^{2-}	0.627	0.202	0.447**	0.450	0.488	0.223	1	—	—	—
pH	-0.324	0.013	-0.513	-0.175	-0.643	-0.255	-0.430	1	—	—
EC	0.410	0.537	0.146	0.178	0.597	-0.069	0.568	-0.409	1	—
TDS	0.464	0.577	0.243	0.369	0.489	0.125	0.589	-0.392	0.957	1

注: *表示显著性水平为 0.05; **表示显著性水平为 0.01。



研究利用多元统计方法, 对样品中的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、pH、EC 和 TDS 共十项指标进行相关性分析(见表 2)。 Na^+ 和 Ca^{2+} 之间的相关系数为 0.095, Na^+ 和 HCO_3^- 之间的相关系数为 0.479, 并呈现出 0.05 水平的显著性, 说明 Na^+ 和 HCO_3^- 之间有着显著的正相关关系。而 Na^+ 也极有可能来源于硅酸盐矿物的风化作用。 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 之间的相关系数为 0.477, 并呈现出 0.01 水平的显著性, 说明 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 之间有着显著的正相关关系。二者可能来源于石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)的风华溶解。



综合研究区样品水化学参数相关性分析, 研究区含有的以长石为主的硅铝酸盐矿物, 以石膏为主的硫酸盐矿物是研究区浅层地下水中离子的主要来源。

5. 水质评价

5.1. 饮用水卫生评价

参照《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006), 对研究区地下水资源卫生标准和对地下水一般化学指标进行评价(见图 4)。研究区内所有样品的硫酸盐和 pH 符合国家饮用水的标准, 但 TDS 含量和氯化物不在国家标准范围内(pH 国标范围在 6.5~8.5 之间, $\text{TDS} \leq 1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氯化物和硫酸盐均小于 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。因此, 研究区水质卫生不符合国家标准, 属于不可饮用水。

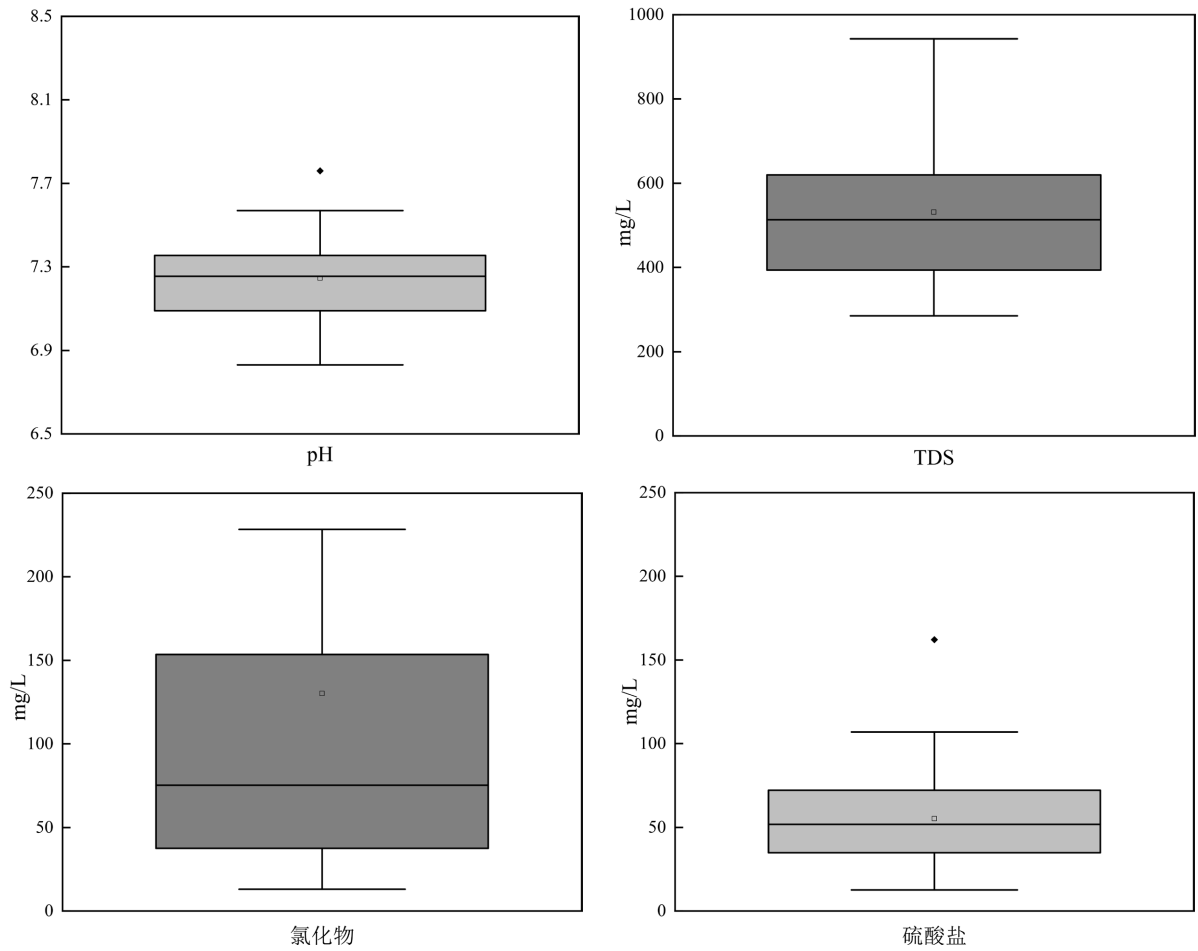


Figure 4. Drinking water sanitation standard index limit chart
图 4. 饮用水卫生标准指数限度图

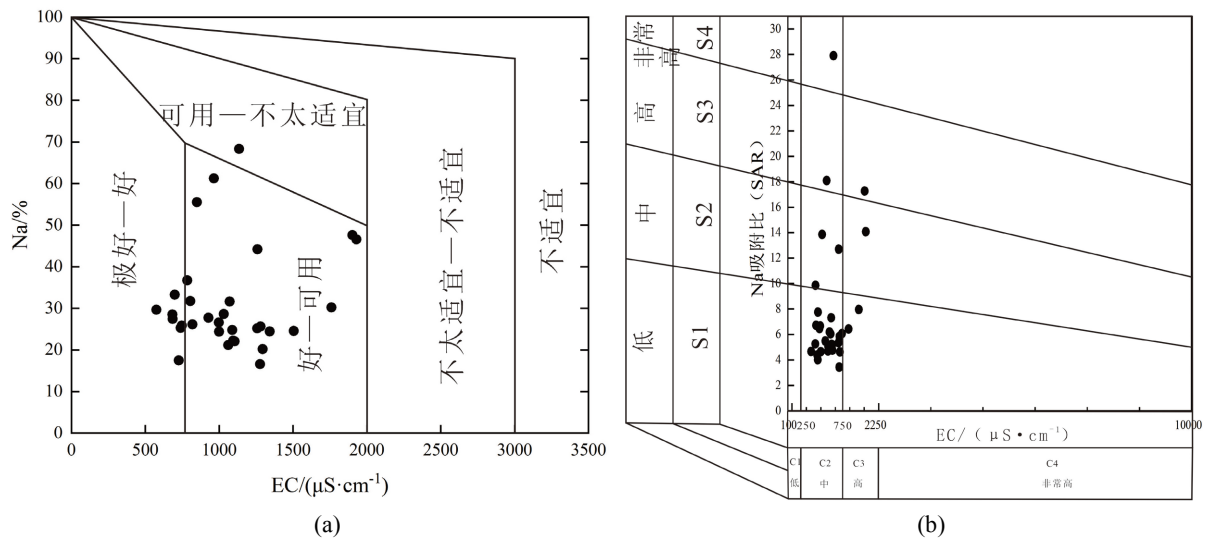


Figure 5. Classification of irrigation water quality and evaluation of irrigation water quality in the research area (a) research area USSSL chart (b) research area Wilcox chart

图 5. 研究区灌溉水质分类情况及灌溉水水质评价 (a) 研究区 USSSL 图 (b) 研究区 Wilcox 图

5.2. 灌溉水水质评价

综合考虑 SAR(碱害)与 EC(盐害)的影响,对研究区灌溉水盐碱化程度进行评价。如图 5 所示,研究区样品大都分布在 S1-C2、S1-C3 和 S2-C2 区域,87.5%的样品处于中度盐害影响区,12.5%的样品处在高度盐害影响区,而有 78.5%的样品处于低碱害影响区,21.5%的样品处于中、高和非常高碱害的影响区,说明研究区浅层地下水用于农田灌溉可能会导致该地区盐碱化的风险。从图 5 中水质分类情况可看出,研究区的样品几乎全部落在极好与良好区域,且二者均属于适宜灌溉区域,综合以上分析得出,研究区样品基本符合灌溉用水条件,可直接作为农业灌溉用水,合理灌溉不会对土壤以及农作物造成危害。

6. 结论

本研究以宿州市农村区域 32 组浅层地下水样品为研究对象,采用数理统计、水化学类型分析和传统图解等方法,对研究区浅层地下水水化学特征及其演化规律进行分析,得到以下三个结论。

1) 研究区浅层地下水绝大多数水属于偏弱碱性水,而少数水属于偏弱酸性水,以偏弱碱性水为主,水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型为主,少量为 Cl-Mg-Ca 混合型。

2) 根据 Gibbs 图及水化学参数相关性分析可直接研究得出,研究区浅层地下水水化学组分主要受到岩石风化作用的影响,以及水岩相互作用过程的控制。研究区浅层地下水中的主要离子来源于以长石为主的硅铝酸盐矿物,和以石膏为主的硫酸盐矿物。

3) 饮用水卫生评价结果表明,区域内地下水不符合国家饮用水标准,属于不可饮用水。灌溉水水质评价结果表明,研究区水样基本符合灌溉用水条件,可直接作为农业灌溉用水,合理灌溉不会对土壤以及农作物造成危害。

致 谢

感谢国家煤矿防治技术中心提供实验条件。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目:宿州全源地质技术服务有限公司;省级大学生创新创业训练计划入选项目(S202110379188);校级大学生创新创业训练计划入选项目(ZCXM22-308、ZCXM22-309、ZCXM22-310)。

参考文献

- [1] Kattel, G.R., Shang, W.X., Wang, Z.G., *et al.* (2019) China's South-to-North Water Diversion Project Empowers Sustainable Water Resources System in the North. *Sustainability*, **11**, 3735. <https://doi.org/10.3390/su11133735>
- [2] 汪名朋. 江苏泗阳城区浅层地下水化学特征及其影响因素[J]. 现代地质, 2014, 28(6): 1329-1336.
- [3] 张传奇, 王晓曦, 陈曦. 莱州湾东岸地下水化学特征及水质评价[J]. 环境保护与循环经济, 2020, 40(4): 56-61.
- [4] 苏聪文, 邓宗兵, 李莉萍, 文江雪, 曹宇美. 中国水生态文明发展水平的空间格局及收敛性[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1282-1301.
- [5] 丁跃元, 陈飞, 李原园, 唐世南, 于丽丽, 羊艳. 华北地区地下水超采综合治理行动方案编制背景及思路[J]. 中国水利, 2020(13): 22-25.
- [6] 梁中, 黄杜鹃. 皖北地区水资源可持续利用的发展研究[J]. 蚌埠学报, 2014, 3(4): 82-86.
- [7] 白乐, 李恩宽, 郭欣伟, 杜凯. 矿井水资源开发利用现状及潜力评价方法[J]. 人民黄河, 2021, 43(2): 73-78.
- [8] 傅国圣, 周佳楠, 李云中, 蒋陈娟. 基于熵权法的里下河腹部典型区综合水质评价[J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 79-82.
- [9] 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3230-3237.

- [10] Qian, C., Wu, X., Mu, W.P., *et al.* (2016) Hydrogeo-Chemical Characterization and Suitability Assessment of Groundwater in an Agro-Pastoral Area, Ordos Basin, NW China. *Environmental Earth Sciences*, **75**, 1356.
<https://doi.org/10.1007/s12665-016-6123-2>
- [11] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵淼, 蔡月梅. 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.
- [12] 侯庆秋, 董少刚, 张旻玮. 内蒙古四子王旗浅层地下水水化学特征及其成因[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(4): 116-121.
- [13] 肖勇, 莫培, 尹世洋, 刘洪禄, 张云辉. 北京南郊平原地下水化学特征及成因分析[J]. 环境工程, 2021, 39(8): 99-107.
- [14] Bahar, M.M. and Reza, M.S. (2010) Hydrochemical Characteristics and Quality Assessment of Shallow Groundwater in a Coastal Area of Southwest Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*, **61**, 1065-1073.
<https://doi.org/10.1007/s12665-009-0427-4>
- [15] 许继影, 桂和荣, 葛春贵, 倪建明, 郭艳, 庞迎春, 胡杰, 聂锋. 淮北青东煤矿深层地热水的水文地球化学特征与水源识别[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 1037-1047.