

淮北市城郊区浅层地下水水岩作用及水环境质量评价

李浩然¹, 马杰^{1*}, 杨洋², 吴祥睿¹, 刘向红¹, 闵宁¹, 张子鹏¹, 薛恩平¹, 张家俊¹

¹宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

²安徽省煤田地质局第一勘探队, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年9月12日; 录用日期: 2025年10月14日; 发布日期: 2025年10月23日

摘要

为进一步了解皖北地区浅层地下水水岩作用及水环境质量, 本文在安徽省淮北市城郊区采集了43件浅层地下水样品, 基于Piper图、Gibbs图, 离子比例系数和WQI饮用水评价等方法, 对研究区内浅层地下水水岩作用、水化学特征和饮用水质量进行评价和分析。结果表明: 浅层地下水pH值变化范围为6.97~8.19, 平均值为7.37, 属于弱碱性水。TDS值范围为222.00~842.00 mg/L, 平均值为421.3 mg/L, 为淡水。水化学类型主要以HCO₃-Ca·Mg型为主。浅层地下水常规水化学组分与盐岩矿物、硫酸盐岩矿物、硅酸盐岩矿物的风化溶解作用和阳离子交替吸附作用有关。WQI的变化范围为20.00~71.13, 平均值为36.53, 表明浅层地下水水质良好, 适宜居民饮用。

关键词

水岩作用, 水化学特征, 离子来源, 水质评价

Water Rock Interaction and Water Environment Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Suburban Areas of Huaibei City

Haoran Li¹, Jie Ma^{1*}, Yang Yang², Xiangrui Wu¹, Xianghong Liu¹, Ning Min¹, Zipeng Zhang¹, Enping Xue¹, Jiajun Zhang¹

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

²The First Exploration Team of Anhui Province Bureau of Coal Geology, Huainan Anhui

Received: September 12, 2025; accepted: October 14, 2025; published: October 23, 2025

*通讯作者。

文章引用: 李浩然, 马杰, 杨洋, 吴祥睿, 刘向红, 闵宁, 张子鹏, 薛恩平, 张家俊. 淮北市城郊区浅层地下水水岩作用及水环境质量评价[J]. 地理科学研究, 2025, 14(5): 1110-1118. DOI: 10.12677/gser.2025.145106

Abstract

In order to understand the hydrochemical processes and water environment quality of shallow groundwater in Huaibei City, Northern Anhui Province, forty-three groundwater samples were collected in the suburban area of Huaibei City. Based on the methods of Piper plot, Gibbs plot, ion ratio, and WQI, the hydrochemical characteristics and drinking water quality were evaluated and analyzed. The results indicate that the pH value ranges from 6.97 to 8.19, with an average of 7.37, indicating the samples are weak alkaline. The TDS value ranges from 222.00 to 842.00 mg/L, with an average of 421.30 mg/L, indicating these samples belong to the fresh water. The hydrochemical type of shallow groundwater is mainly $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ type. The main chemical components of shallow groundwater are related to the weathering and dissolution of salt rock minerals, sulfate rock minerals, and silicate rock minerals, as well as the cation alternating adsorption. The variation range of WQI is from 20.00 to 71.13, with an average value of 36.53, indicating that the shallow groundwater quality is good and suitable for residents to drink.

Keywords

Water Rock Interaction, Hydrochemical Characteristics, Ion Source, Water Quality Assessment

Copyright © 2025 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

地下水是极为宝贵且重要的水资源，在经济社会追求全面、协调、可持续发展的目标中，地下水占据举足轻重的地位[1]。合理开发与保护地下水资源不仅是国家持续发展的条件之一，更是维护生态平衡、保障人民生活质量的关键所在[2]。随着经济社会的持续影响，人类活动对地下水的影响不断加大。各种生产和生活活动不断改变地下水的水量和水质，对地下水的可持续利用和保护提出了严峻的挑战[3]。

淮北市位于淮北平原，拥有丰富的煤炭资源，其经济主要由农业和矿业构成。近年来，淮北市经济快速发展，由此导致地下水开采量上升。因此，作为研究区的主要供水来源，地下水对于满足当地居民生活用水需求至关重要。国内诸多学者对淮北市水化学特征展开过大量研究工作，如费中良等对淮北平原浅层地下水进行研究，水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na-Mg}$ 型为主[4]。许金昭对淮北平原地下水化学特征进行研究，主要离子来源为碳酸岩、盐岩、硅酸岩风化[5]。陈星等对淮北市临涣矿区地表水开展相关研究工作，研究成果表明其地表水 TDS 含量较高，属高矿化度水质类型，其中 SO_4^{2-} 的含量较高[6]。上述研究成果的研究区多集中在淮北平原及市区周边，而对城郊区浅层地下的水文地球化学及水环境质量的研究工作较少。基于上述背景，本文开展了淮北市城郊区浅层地下水水岩作用和水环境质量分析与评价工作，研究成果有助于了解研究区及其周边浅层地下水的水质状况和水化学演化规律，对保护、有效利用和开发区域地下水资源具有重要的指导作用。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

研究区位于安徽省淮北市的南部区域，其南部紧邻安徽省亳州市蒙城县，东部与安徽省宿州市埇桥

区接壤。研究区地势总体上由西北向东南微倾，大部分区域为平原，东北部地区有少量低山地形。淮北市属于温带季风气候，冬季寒冷干燥，夏季高温多雨。研究区地理坐标范围为东经 116°46'34"~116°51'23"，北纬 33°37'54"~33°33'36"。丰富的煤炭资源为淮北市带来较大经济效益，已成为当地的主要经济支柱产业。此外，淮北地区主要农作物包括小麦、大豆和玉米等。

2.2. 样品采集与测试

本次采集工作于 2024 年 11 月开展，共采集 43 件浅层地下水样品。采样方法参照《地下水水质检测方法水样的采集和保存》(DZ/T 0064.2-1993)的相关要求，对酸碱度、电导率和总溶解固体等指标进行现场实测，并用专门的容器收集水样。收集前，用待取水样对容器进行 2 至 3 次的冲洗，确保容器干净后，将水样装满并密封。随后，将水样送至矿井水资源化利用安徽普通高校重点实验室进行样品预处理。随后，利用 ICS600-900 测试 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 以及 SO_4^{2-} 等离子的浓度。用甲基橙滴定加有酚酞的样本，测试 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的浓度。

2.3. 数据分析方法

利用 SPSS 进行描述性统计；利用 Origin 绘制 Piper 图和 Gibbs 图，分析水化学类型和水岩作用；利用 Excel 绘制离子比例图，判断离子来源及水文地球化学作用类型；利用 Origin 进行相关性分析，进一步作证常规离子来源；利用 WQI 饮用水评价方法，评价浅层地下水可饮用性。

3. 结果与讨论

3.1. 描述性统计分析

Table 1. Statistics of the samples' hydrochemical components
表 1. 样品水化学成分统计表

测试项目	最小值	最大值	平均值	变异系数
Na^+	24.57	340.19	101.87	0.68
K^+	0.38	6.91	0.67	1.50
Mg^{2+}	19.33	110.64	36.42	0.46
Ca^{2+}	18.48	179.46	42.11	0.67
Cl^-	2.68	213.05	39.60	1.70
SO_4^{2-}	0.13	257.37	37.70	1.44
HCO_3^-	336.81	887.80	482.04	0.26
pH	6.97	8.19	7.37	0.04
TDS	222.00	842.00	421.30	0.38
EC	442.00	1739.00	862.28	0.40

注：pH 值无量纲，其他参数单位均为 mg/L。

从表 1 可看出，TDS (总溶解固体)浓度介于 222.00 至 842.00 mg/L 之间，平均值达到 421.30 mg/L，表明研究区浅层地下水为淡水。电导率(EC)量值在 442 至 1739 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 范围之内。pH 值在 6.97 至 8.19 之间，平均值为 7.37，表明浅层地下水偏弱碱性。阳离子浓度由大到小依次为 Na^+ ($101.87 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > Ca^{2+}

(42.11 mg·L⁻¹) > Mg²⁺ (36.42 mg·L⁻¹) > K⁺ (0.67 mg·L⁻¹), 阴离子浓度由大到小依次为 HCO₃⁻ (482.04 mg·L⁻¹) > SO₄²⁻ (37.70 mg·L⁻¹) > Cl⁻ (39.60 mg·L⁻¹), 表明 HCO₃⁻和 Na⁺分别为研究区浅层地下水的优势阴、阳离子。Cl⁻、K⁺、SO₄²⁻变异系数超过 0.9, 表示其在研究区内各采样点含量差异较大[7], 说明受到人为活动影响。Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、HCO₃⁻、TDS 和 EC 变异系数并不突出, 介于 0.1~0.9 之间, 表明其在研究区内各采样点含量差异一般, 人为活动影响小。而 pH 值变异系数为 0.04, 表明研究区内各采样点的 pH 含量均匀, 变化不大, 表明浅层地下水酸碱性稳定, 受控影响较少。

3.2. 水化学类型及水岩作用

Piper 三线图是一种直观、有效的水化学分析工具, 常用于揭示水化学类型。由图 1 可知, 38 件样品在阳离子图中分布于 B 区和 D 区, 表明主要阳离子为 Na⁺; 在阴离子图中, 40 件样品分布于 E 区, 表明主要阴离子为 HCO₃⁻。浅层地下水的水化学类型主要包括 HCO₃-Ca·Mg 型, 占 54.76%; 还包括 HCO₃-Na 型(占 40.48%)和 SO₄·Cl-Na 型(占 4.76%)。

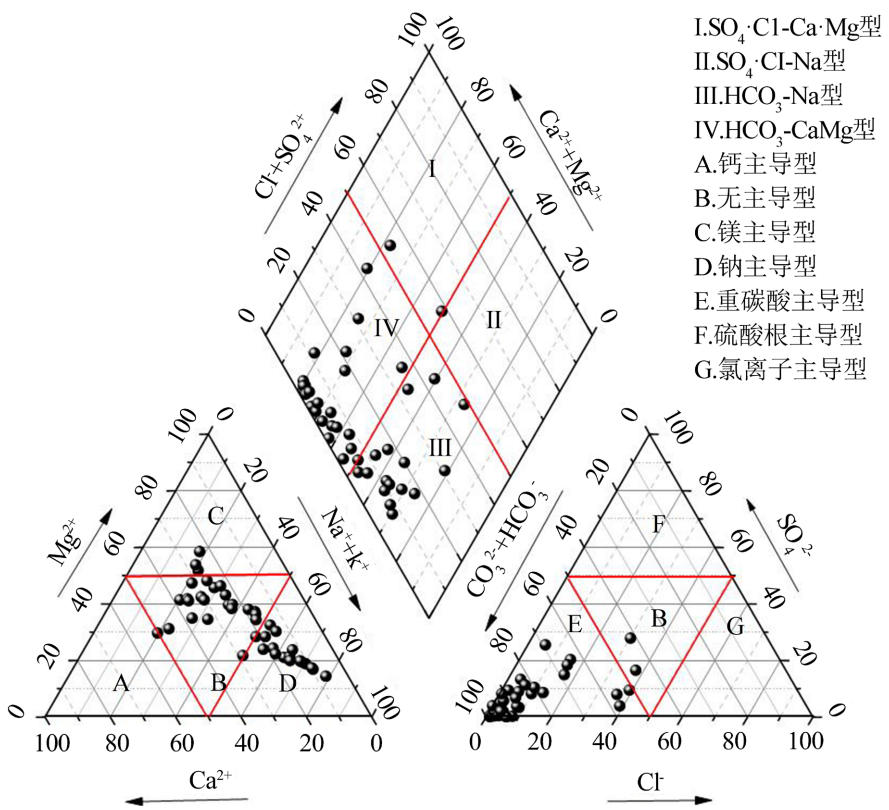


Figure 1. Piper diagram of shallow groundwater
图 1. 研究区浅层地下水 Piper 三线图

Gibbs 图可直观地反映地下水主要组分的形成原因, 其指示的水岩作用类型主要包括三种, 即降雨型、蒸发浓缩型和水岩作用型。当 TDS 含量在中等范围且 Cl⁻/(Cl⁻ + HCO₃⁻)或 Na⁺/(Na⁺ + Ca²⁺)的比值小于 0.5 时, 地下水的水化学组分主要与岩石风化作用有关[8]。由图 2(a)和图 2(b)可知, Cl⁻/(Cl⁻ + HCO₃⁻)比值在 0.004~0.322 之间, 平均值为 0.064, TDS 位于 100.00 mg 和 1000.00 mg 之间; Na⁺/(Na⁺ + Ca²⁺)比值在 0.300~0.930 之间, 平均值为 0.660。研究区多数水样集中在中部偏左的区域, 表明岩石风化作用对浅层地下水的常规水化学组分影响较大。同时, 也存在部分水样分布在蒸发浓缩区域, 表明蒸发浓缩作用

也对研究区地下水水化学组分的形成存在一定的影响。

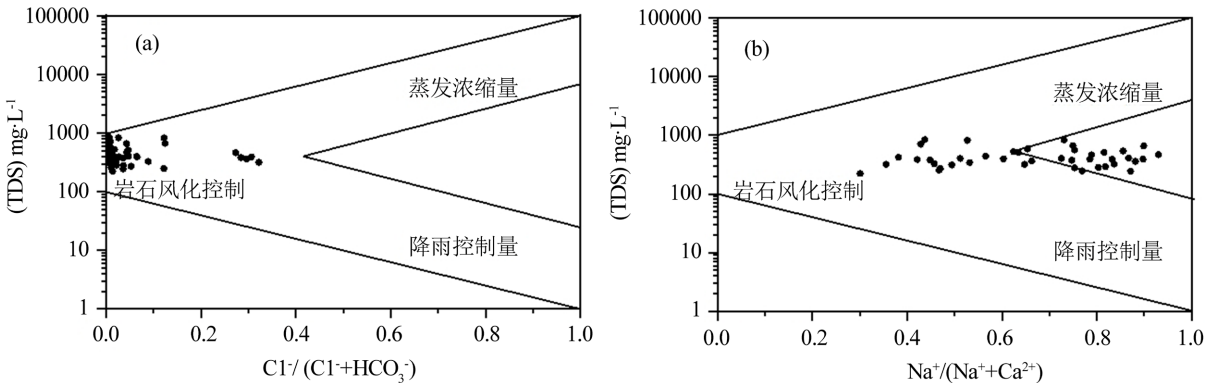


Figure 2. Gibbs diagram of shallow groundwater
图 2. 研究区浅层地下水 Gibbs 图

3.3. 离子组分比例

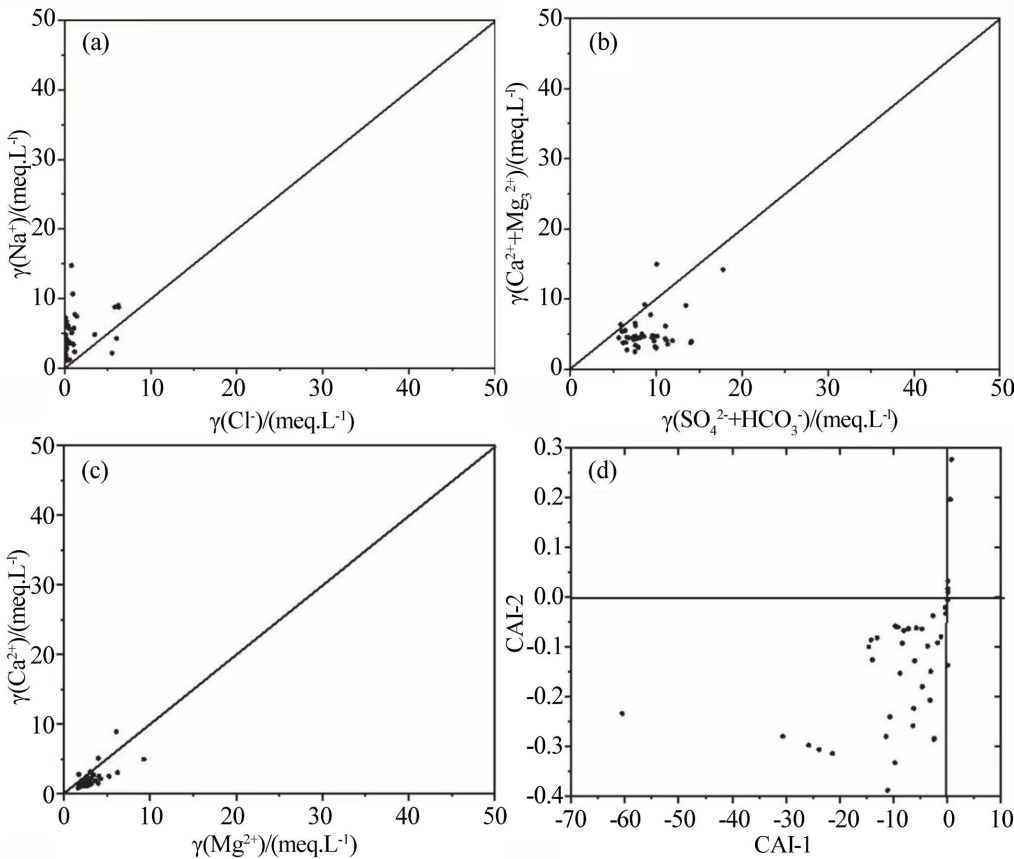


Figure 3. Ion ratio diagram of shallow groundwater
图 3. 研究区浅层地下水离子组分比例关系图

不同水体的常规离子比例常用于推断含水层或水体常规组分的离子来源以及水化学作用类型。若 Na⁺、Cl⁻主要来自盐岩溶解，则 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-) = 1$ 。如图 3(a)所示，采样点主要分布在 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-) = 1$ 分界线

上方,说明Na⁺浓度偏高。相关研究表明,Na⁺来源除盐岩溶解作用以外,硅酸盐矿物风化和阳离子交替吸附作用均会发生水体中Na⁺含量升高的现象。其中,硅酸盐矿物风化溶解作用中Na⁺释放可导致含水层中Na⁺含量升高的化学方程式如下[9]:

$$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{16} + 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} = 2\text{HCO}_3^- + 2\text{Na}^+ + \text{H}_4\text{Al}_2\text{SiO}_9 + 4\text{SiO}_2 \tag{1}$$

结合图3(a)、图3(b)与方程式(1)综合分析,浅层地下水中的Na⁺和HCO₃⁻浓度偏高和Ca²⁺和Mg²⁺浓度偏低表明,除盐岩矿物风化溶解作用外,硅酸盐矿物风化溶解作用对Na⁺和HCO₃⁻的来源也有一定的贡献。此外,氯碱指数(CAI)常用于判断阳离子交替吸附作用的强度和方向[10]。当氯碱指数的绝对值越大,表明阳离子交替吸附作用越容易发生。若氯碱指数为负值,则证明地下水中Ca²⁺、Mg²⁺与矿物中Na⁺、K⁺发生交换,反之则证明地下水中Na⁺、K⁺与矿物中Ca²⁺、Mg²⁺发生交换。如图3(d)所示,CAI-1和CAI-2的值均小于0,表明地下水中存在Ca²⁺、Mg²⁺与含水层中Na⁺、K⁺发生阳离子交换的情况,最终导致水体中发生Na⁺含量升高和Ca²⁺、Mg²⁺含量减少的现象。

如图3(c)所示,所有水样均集中在1:1等值线与1:1和2:1等值线之间,前者说明Ca²⁺和Mg²⁺的离子组分来源于白云岩的风化溶解作用,后者说明Ca²⁺和Mg²⁺的离子组分来源于石灰岩的风化溶解作用[11][12]。

3.4. 相关性分析

Table 2. Correlation analysis of shallow groundwaters' hydrochemical parameters
表 2. 研究区浅层地下水水化学参数相关性分析

	pH	EC	TDS	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
pH	1									
EC	-0.496*	1								
TDS	-0.459*	0.994*	1							
Na ⁺	0.249	0.034	0.041	1						
K ⁺	0.296	-0.119	-0.113	0.204	1					
Mg ²⁺	0.200	0.221	0.220	-0.065	0.065	1				
Ca ²⁺	0.227	-0.007	0	-0.050	0.336*	0.671*	1			
Cl ⁻	0.368*	-0.037	-0.018	0.346*	0.377*	0.508*	0.623*	1		
SO ₄ ²⁻	0.353*	0.081	0.092	0.689*	0.601*	0.436*	0.547*	0.620*	1	
HCO ₃	-0.301	0.608*	0.593*	0.271	-0.045	0.262	0.064	0.174	0.271	1

注: *表示显著性水平为 0.05。

对pH、EC等10项指标进行相关性分析,结果如表2所示。其中,Na⁺与Ca²⁺、Mg²⁺呈现负相关,相关性系数分别为-0.050和-0.065,表明Na⁺与Ca²⁺、Mg²⁺发生阳离子交换作用。SO₄²⁻与Ca²⁺呈现相关性,相关性系数为0.547,可能与石膏风化溶解有关。SO₄²⁻与Na⁺、K⁺呈现强相关性,相关性系数分别为0.689、0.601,可能与研究区芒硝风化溶解有关。Cl⁻与Na⁺、K⁺都呈现相关性,相关性系数分别为0.346、0.377,可能与研究区内盐岩风化溶解有关[13]。

4. 水质评价

采用WQI饮用评价方法分析研究区地下水水质状况,其计算步骤分为四步,具体计算过程如下[14]:

(1) 以研究区内所取水样的 10 项水化学指标对其进行 WQI 计算和分析, 相关化学参数权重参照世界卫生组织水质标准, 如表 3 所示。

Table 3. The threshold value of WQIs' parameters
表 3. WQI 相关参数的界限值

化学参数	单位	标准值	权重	相对权重
pH	/	7	1	0.03704
EC	μs/cm	1500	2	0.07407
TDS	mg/L	1000	5	0.18519
Na ⁺	mg/L	200	4	0.14815
K ⁺	mg/L	12	2	0.07407
Ca ²⁺	mg/L	300	3	0.11111
Mg ²⁺	mg/L	100	3	0.11111
HCO ₃ ⁻	mg/L	500	1	0.03704
SO ₄ ²⁻	mg/L	250	3	0.11111
Cl ⁻	mg/L	250	3	0.11111

(2) 计算相对权重

$$W_i = w_i / \sum w_i T \tag{2}$$

(3) 计算评价指数 Q_i

$$Q_i = (C_i/S_i) \times 100 \tag{3}$$

其中: C_i 为样品化学参数的浓度, S_i 为水质标准值, 单位均为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(4) 计算 WQI

$$WQI = \sum W_i \times Q_i \tag{4}$$

根据地下水水质状况和人体健康风险, 将水质级别分为 5 类。其中, 根据 WQI 分类, 可将水质状况分 5 类: $WQI \leq 50$, 表明水质很好; $50 < WQI \leq 100$, 表明水质好; $100 < WQI \leq 200$, 表明水质差; $200 < WQI \leq 300$, 表明水质很差; $WQI > 300$, 表明水不适宜饮用。

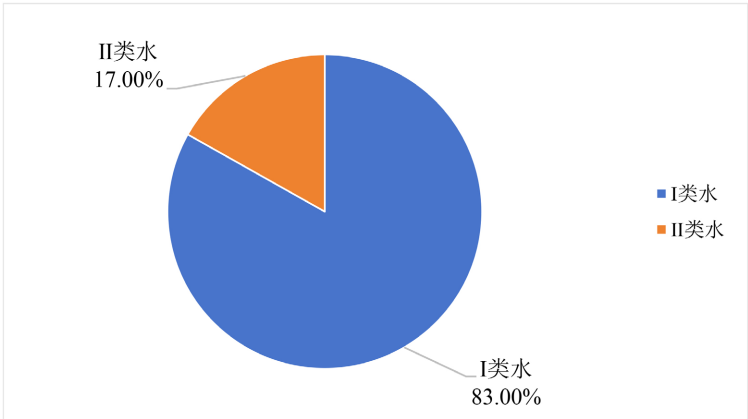


Figure 4. The proportion pie diagram of shallow groundwater samples' water quality
图 4. 研究区浅层地下水水质类型占比饼图

浅层地下水 WQI 值水质占比如图 4 所示, 其中 WQI 值在 50 以下的水样有 36 件, 占总水样比例的 83.00%, 表明研究区浅层地下水多为 I 类水; WQI 值介于 50~100 之间的水样有 7 件, 占总水样比例的 17.00%, 为 II 类水; III 类水和 V 类水在研究区内未出现。说明研究区内浅层地下水水质良好, 适合用于居民饮用水。

5. 结论

本研究以安徽省淮北市某乡镇 43 件浅层地下水样品为研究对象, 综合运用了描述性统计分析、Piper 图、Gibbs 图、离子组分比例分析和 WQI 水质评价等方法, 讨论了浅层地下水主要水化学类型及离子来源, 并评价了浅层地下水可饮用性。得出如下结论:

1) 研究区浅层地下水偏弱碱性, 其主要阳离子为 Na^+ 、 Ca^{2+} , 主要阴离子为 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} , 水化学类型主要包括 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型(占 54.76%); 还包括 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型(40.48%)和 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}$ 型(4.76%)。

2) Gibbs 图显示浅层地下水以水岩作用为主, 并受到一定的蒸发作用。结合离子组分比例和相关性分析综合得出, 地下水主要常规离子来源的水岩作用类型主要包括盐岩矿物、硅酸盐矿物、硫酸盐矿物的风化溶解和阳离子交替吸附作用。

3) WQI 可饮用性评价结果表明, 研究区浅层地下水 WQI 值在 50 以下的水样有 36 件, 为 I 类水, 占总水样比例的 83.00%, WQI 值介于 50~100 之间的水样有 7 件, 为 II 类水, 占总水样比例的 17.00%。研究区地下水水质良好, 适宜居民饮用。

基金项目

2023 年度宿州市科技计划项目(SZKJXM202309); 国家级大学生创新创业训练项目(202510379057); 省级大学生创新创业训练项目(S202410379179, S202510379079); 宿州学院横向科研项目(2024xhx122, 2025xhx023); 宿州学院钻探工程技术研究中心(2024PT04); 宿州学院大学生创新创业训练计划项目(ZCXM24-243, ZCXM24-234)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 英爱文. 地下水监测与评价[J]. 水文, 2006(3): 63-66.
- [3] 袁政莲, 马杰, 颜晓龙, 等. 典型乡镇地下水水化学特征及离子来源多元统计分析——以皖北解集乡为例[J]. 科技视界, 2021(14): 141-143.
- [4] 费中良, 鲍微. 淮北市应急水源地地下水资源评价[J]. 西部资源, 2019(4): 86-88.
- [5] 许金昭. 淮北平原松散层地下水环境水文地球化学特征[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.
- [6] 陈星, 郑刘根, 姜春露, 等. 安徽淮北临涣矿区地表水水化学及硫氢氧同位素组成特征[J]. 地球与环境, 2019, 47(2): 177-185.
- [7] 颜晓龙, 马杰, 张玉洁, 等. 皖北地区浅层地下水水化学特征及水质评价——以宿州市某乡镇为例[J]. 河南科技, 2022, 41(6): 111-116.
- [8] 武文静, 冯松宝, 余浩, 等. 淮北平原区农田地下水水化学特征影响因素及水质评价[J]. 能源与环境, 2025(2): 138-142.
- [9] 黄望望, 姜春露, 陈星, 等. 淮南新集矿区主要充水含水层水化学特征及成因[J]. 地球与环境, 2020, 48(4): 432-442.
- [10] 郝启勇, 徐晓天, 张心彬, 等. 鲁西北阳谷地区浅层高氟地下水化学特征及成因[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(5): 668-677.
- [11] 刘海, 宋阳, 李迎春, 等. 长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1525-1538.

- [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] 唐起, 李晓, 王维, 等. 四川盆地中下三叠统盐卤水水化学成分相关性分析[J]. 人民珠江, 2017, 38(4): 70-73.
- [14] Sunitha, V. and Reddy, B.M. (2022) Geochemical Characterization, Deciphering Groundwater Quality Using Pollution Index of Groundwater (PIG), Water Quality Index (WQI) and Geographical Information System (GIS) in Hard Rock Aquifer, South India. *Applied Water Science*, **12**, Article No. 41. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01527-w>