

# 浅层地下水水文地球化学特征及其演化规律

## ——以淮北东部典型乡镇为例

张家俊, 马杰\*, 张多佳, 左元乐, 李浩然, 秦浩, 卢家帅

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2026年3月12日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月11日

### 摘要

为研究淮北东部典型乡镇浅层地下水水文地球化学特征及其演化规律, 采集研究区浅层地下水样品33组, 综合运用数理统计水化学图解(Gibbs)图、离子比例系数、氯碱指数等方法, 开展了地下水的水文地球化学特征及其演化规律相关研究。结果表明: 研究区浅层地下水呈弱碱性(pH均值7.82), TDS变化范围为46~752 mg/L<sup>-1</sup> (均值287.45 mg/L<sup>-1</sup>), 整体属于优质淡水。优势阳离子和优势阴离子分别为Na<sup>+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>。地下水化学组分主要受岩石风化-溶解作用控制, 水岩作用以硅酸盐岩矿物风化和碳酸盐岩矿物风化溶解。此外, 氯碱指数(CAI)负值占多数, 该阳离子交替吸附作用是引起地下水中Na<sup>+</sup>富集的重要水文地球化学作用。研究成果可为淮北地区地下水资源可持续开发利用和保护提供参考。

### 关键词

浅层地下水, 水文地球化学特征, 水岩相互作用, 淮北

# Hydrogeochemical Characteristics and Evolution Law of the Shallow Groundwater

## —Taking the Typical Towns in Eastern Huaibei as an Example

Jiajun Zhang, Jie Ma\*, DuoJia Zhang, Yuanle Zuo, Haoran Li, Hao Qin, Jiashuai Lu

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

Received: March 12, 2026; accepted: May 2, 2026; published: May 11, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 张家俊, 马杰, 张多佳, 左元乐, 李浩然, 秦浩, 卢家帅. 浅层地下水水文地球化学特征及其演化规律[J]. 自然科学, 2026, 14(3): 282-289. DOI: 10.12677/ojns.2026.143032

## Abstract

In order to study the hydrogeochemical characteristics and evolution law of the shallow groundwater of typical towns in Eastern Huaibei, this study collected thirty three shallow samples. The mathematical statistics, hydrochemical map, ion ratio, and alkaline indices were conducted for grasping the hydrogeochemical characteristics and evolution law of the shallow groundwater. The results showed that the shallow groundwater belonged to the weak alkaline (the average value was 7.82), the content of TDS varied from 46 mg/L<sup>-1</sup> to 752 mg/L<sup>-1</sup> (the mean value was 287.45 mg/L<sup>-1</sup>), and the aquifer belonged to the high quality fresh water. The dominant cation and anion were Na<sup>+</sup> and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, respectively. The hydrochemical components are controlled by the rock weathering-dissolution, containing the weathering-dissolution of the silicate mineral and the carbonate mineral. In addition, the major alkaline indices were negative, indicating that the enrichment of the aquifer's Na<sup>+</sup> was affected by the cation exchange absorption. The research findings can provide reference for the sustainable development and protection of groundwater resources in Huaibei area.

## Keywords

Shallow Groundwater, Hydrogeochemical Characteristics, Water Rock Interaction, Huaibei

Copyright © 2026 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

水是生命之源，是参与地质作用、构成水资源与地下水环境的关键组分。地下水是人类生存的重要供水水源，支撑着全球近半数的饮用水需求。同时，也承担着农田灌溉、工业用水等重要方面。近年来，由于社会的快速发展，对地下水的需求量大大提升，地下水资源遭受了不合理的开发利用和人类活动的污染，导致地下水环境恶化。自然条件下，地下水地球化学特征主要受水层岩性、水文地质条件、大气降水与地表水补给、水岩相互作用及气候条件等因素综合控制。当前，地下水成因机制是水文地质与水文地球化学领域的研究热点与难点。因此，阐明地下水水化学特征及主要的控制因素，对地下水污染防治、开发利用与保护具有重要意义。

前人已开展过地下水化学特征、成因及演化的部分研究，例如：刘君等分析了北方主要盆地和平原的地下水化学变化规律，认为北方区域地下水化学特征在时间和空间上均各有差异，其原因是长期大规模开采和人类活动产生的污染[1]；王雅欣等研究了南水北调通水对梁济运河地下水化学成分的影响[2]；蒋万军等通过 Piper 三线图、氢氧稳定同位素、Gibbs 图以及离子相关关系分析的方法，探讨了该地区地下水化学特征及其形成作用[3]。但总体而言，地下水化学特征的成因机理研究相对薄弱。针对淮北地区水体的研究多聚焦于浅层地下水的水化学类型、离子成分分布及水质现状评价，重点探讨了农业面源污染对地下水环境的影响[4]。然而，针对区域内地下水水化学演化的具体过程，以及自然与人为因素共同作用下的成因机制研究尚显薄弱。

基于以上分析，本研究选取了淮北地区典型乡镇 33 组浅层地下水样品，综合运用数理统计、相关性分析、水岩作用、Piper 图等方法，分析浅层地下水化学特征及演化规律，明晰研究区域内浅层地下水水文地球化学演化。旨在为区域地下水资源的合理开发运用与保护提供科学依据。

## 2. 研究区概况

淮北平原地处黄淮海平原南侧、淮河干流以北，是淮河中游北岸重要的冲积平原，行政范围以安徽省北部淮北、宿州、阜阳、亳州等市为核心，少量延伸至苏、豫两省边缘，为皖北核心地理单元，总面积约 3.74 万 km<sup>2</sup>。区域地形平坦开阔，地势由西北向东南微倾，属暖温带半湿润季风气候，四季分明，降水时空分布不均。淮河及颍河、涡河、浍河等水系穿流而过，水文网发育，浅层地下水含水层分布广泛、埋藏较浅，是区域生产生活的主要水源。

研究区地下水按赋存条件可分为松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类裂隙岩溶水、基岩裂隙水三类。松散岩类孔隙水分布最广、水量最大，是区域主要供水水源；裂隙岩溶水主要赋存于西部灰岩中，富水性不均，为矿坑主要充水水源；基岩裂隙水分布零散、富水性弱，仅作为局部辅助水源。三类地下水在分布、富水性及利用价值上差异明显，共同构成区域地下水系统。地下水以大气降水入渗为主要补给来源，其次为河道渗漏与农田灌溉回归水入渗。地下水排泄以人工开采和蒸发蒸腾为主。

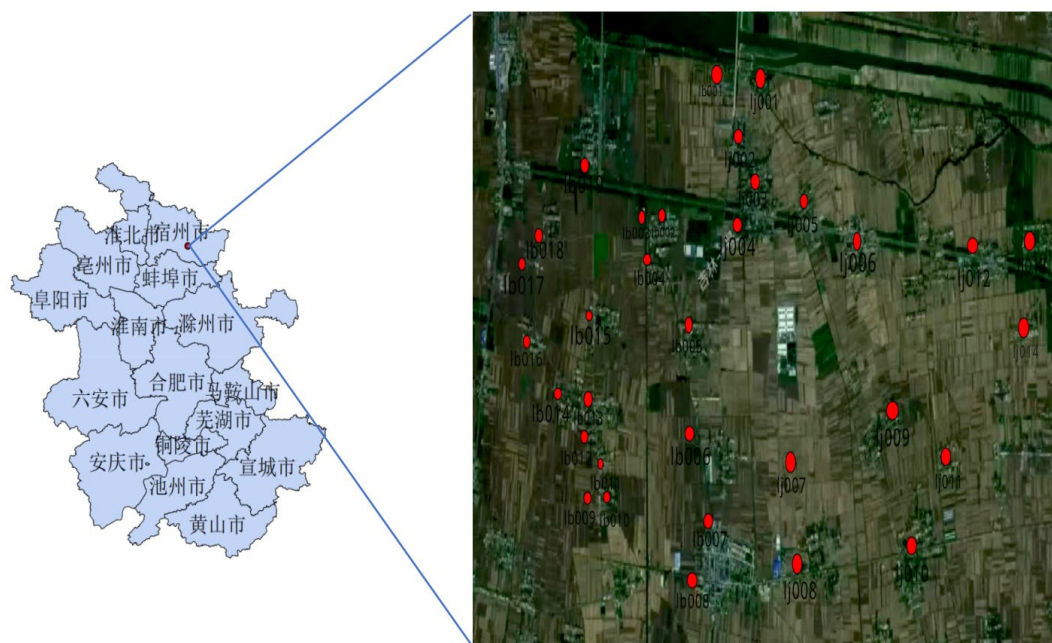


Figure 1. Sampling point distribution map  
图 1. 采样点分布图

## 3. 材料与方法

### 3.1. 样品采集与测试

采样工作于 2025 年 11 月完成，在研究区内均匀布设 40 个浅层地下水采样点(图 1)。采样点布设重点兼顾农田区和村镇生活区等典型功能区。样品取自当地居民供水井及农田灌溉井。野外采样阶段，采用便携式多参数水质测试仪现场测定地下水总溶解固体(TDS)、pH 值及电导率(EC)，同步记录相关数据参数。采样容器为聚乙烯塑料瓶，采集前用去离子水反复冲洗 3 次以上。样品加入 1:1 硝酸酸化，确保 pH < 2 以防止金属离子沉淀。所有样品均在采集后 24h 内送至实验室完成后续测试。

实验室分析主要采用酸碱滴定法测定碳酸氢根浓度，经酸化的阳离子样品采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-MS)测定 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等主要阳离子，阴离子样品则采用离子色谱仪测定 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

等主要阴离子,所有测试工作均在矿井水资源化利用安徽普通高校重点实验室(宿州学院)完成,确保数据可靠。经离子平衡计算后,最终保留 33 组有效数据用于分析研究区浅层地下水的水化学类型及演化规律。

### 3.2. 数据处理

采用 SPSS27 软件对地下水水化学数据进行描述性统计和相关性分析,以揭示各组分间的内在关联与主控因子;利用 Origin2026 软件绘制 Gibbs 图、离子比例系数图及氯碱指数(CAI)图,用于判别地下水化学组分的主导控制机制和识别水岩相互作用类型。

## 4. 结果与讨论

### 4.1. 地下水水化学特征

统计结果(图 2)显示,研究区 33 组地下水样品整体呈现弱碱性低矿化度淡水特征。pH 值分布在 7.10~9.05 之间,均值为 7.82;TDS 含量介于 46~752  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,均值 287.45  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,全部样品均属于淡水范畴。阳离子方面, $\text{Na}^+$ 浓度范围 10.95~233.34  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,均值 68.72  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,存在明显的局部富集现象; $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 含量相对稳定,均值分别 32.57  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、21.43  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $\text{K}^+$ 含量整体偏低,均值仅 2.86  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,多数样品浓度低于 10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。阴离子中, $\text{Cl}^-$ 最高浓度达 244.37  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ 最高浓度为 293.41  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。箱线图分析进一步验证了离子的分布规律, $\text{Na}^+$ 的中位数及数据离散程度远高于  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Cl}^-$ 的浓度水平略高于  $\text{SO}_4^{2-}$ 。此外,EC 与 TDS 整体呈正相关关系,综合表明研究区地下水水化学特征受多重因素影响,空间分布差异显著。

浅层地下水  $\text{Na}^+$ 局部富集主要源于硅酸盐矿物(如钠长石)溶解,同时伴随反向离子交换作用,土壤中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 与地下水中  $\text{Na}^+$ 发生交换,进一步提升  $\text{Na}^+$ 浓度;局部高值区与地下水径流条件差、水岩作用时间长有关[5]。

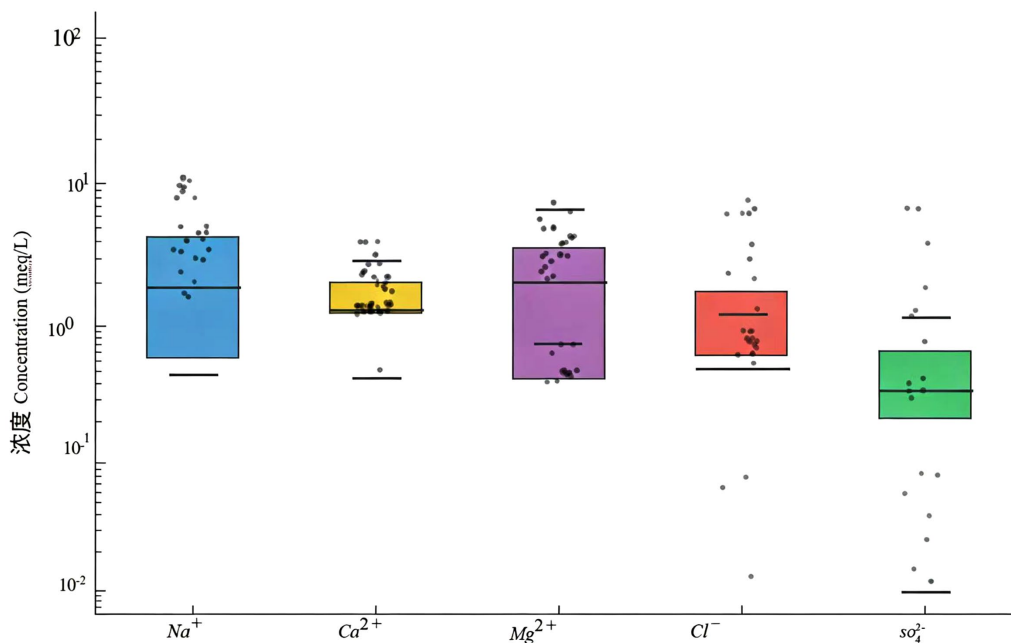


Figure 2. Box plot of major ions in groundwater

图 2. 地下水主要离子箱型图

### 4.2. 相关性分析

本次研究对水样的 8 项化学参数进行相关性分析[4]。相关性热图(图 3)显示, TDS 与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 均呈显著正相关, 表明这些离子是控制矿物度的主要成分。 $\text{Na}^+$ 与  $\text{Cl}^-$ 的相关性较高( $r > 0.5$ ), 说明  $\text{Na}^+$ 来源的多样性。一般情况下水体中  $\text{Cl}^-$ 和  $\text{SO}_4^{2-}$ 主要来源于蒸发盐的溶解,  $\text{HCO}_3^-$ 主要来自碳酸盐岩溶解;  $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{Mg}^{2+}$ 来源于蒸发岩、碳酸盐岩和硅酸盐岩溶解, 而  $\text{Na}^+$ 和  $\text{K}^+$ 则来源于蒸发盐和硅酸盐岩的风化产物[6]。

$\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ 主要与碳酸盐岩风化作用有关,  $\text{Na}^+$ - $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{Cl}^-$ 则表示水体的蒸发作用以及易溶盐对水化学组分的影响, 这与 Gibbs 图分析结果相同[7]。

研究区地下水各化学组分间的相关性特征如图 2 所示。TDS 与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 呈中等强度正相关, 表明这两种离子是控制地下水矿化度的核心组分。阳离子中,  $\text{Ca}^{2+}$ 与  $\text{Mg}^{2+}$ 呈极强正相关( $r = 0.82$ ), 暗示二者共同来源于碳酸盐岩等岩石的风化溶滤作用;  $\text{Na}^+$ 与  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r = 0.58$ )、 $\text{Ca}^{2+}$  ( $r = 0.25$ )呈正相关, 而与  $\text{K}^+$ 呈负相关( $r = -0.30$ ), 指示研究区地下水发生了阳离子交换过程, 即地下水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 与岩土颗粒吸附的  $\text{Na}^+$ 发生置换, 导致  $\text{Na}^+$ 在地下水中富集。阴离子方面,  $\text{Cl}^-$ 与  $\text{SO}_4^{2-}$ 呈显著正相关( $r = 0.51$ ), 且二者均与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 呈正相关, 表明  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 具有同源性, 其来源主要为蒸发岩溶解。此外,  $\text{Cl}^-$ 与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 的较强正相关, 进一步印证了水岩相互作用对离子组成的重要影响。此外, 研究区作为典型乡镇, 农业施肥(如氯化钾、硫酸钾肥料)是地下水  $\text{K}^+$ 的重要人为输入途径,  $\text{K}^+$ 与  $\text{SO}_4^{2-}$ 的正相关可能叠加了化肥输入的影响。

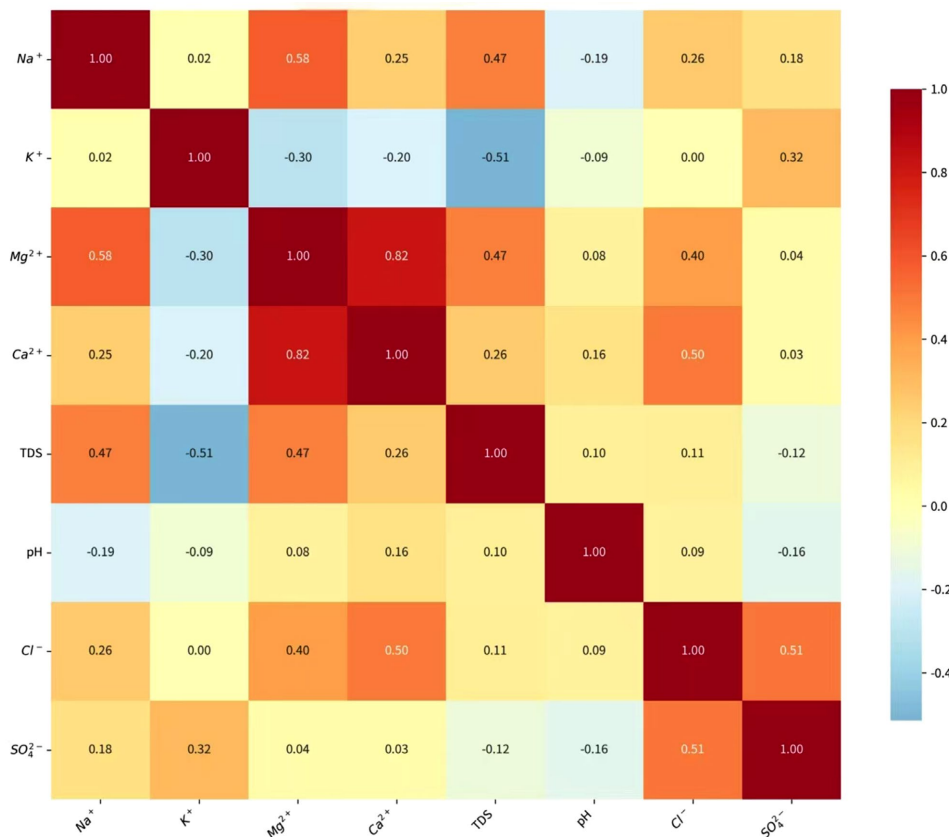


Figure 3. Correlation heatmap of water chemical parameters

图 3. 水化学相关性热图

### 4.3. 水化学演化机制

#### 4.3.1. 岩石风化与蒸发浓缩

通过研究水岩相互作用可揭示水化学演化机制。利用 Gibbs 图可以判别地下水是否受大气降雨、岩石风化的控制。Gibbs 图(图 4)是判别地下水化学形成机制的经典方法。研究区水样点主要落在 Gibbs 图的“岩石风化控制区”，这表明淮北地区浅层地下水受岩石风化影响。图 4(a)为  $\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  与 TDS 关系图，所有样品点均落于岩石风化主导区域，部分样品靠近蒸发主导区边缘，说明地下水化学组成主要受岩石风化作用控制，同时伴随一定的蒸发浓缩影响。图 4(b)为  $\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  与 TDS 关系图，大部分样品点同样位于岩石风化主导区域，少数样品向蒸发主导区偏移，进一步印证了岩石风化作用的主导作用。综上，研究区地下水化学组分主要受岩石风化作用控制，同时存在一定的蒸发浓缩作用影响。

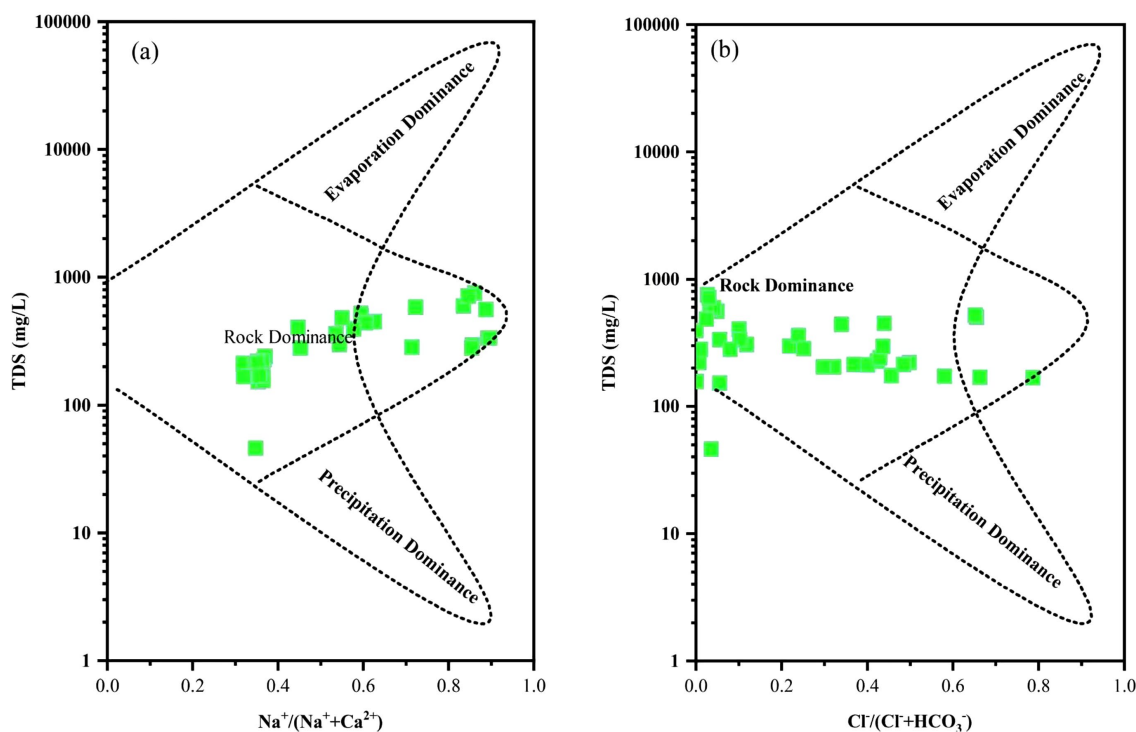


Figure 4. Gibbs diagram for controlling the chemical evolution of groundwater

图 4. 控制地下水化学演化的 Gibbs 图解

#### 4.3.2. 离子来源解析

离子比例分析是指以水文地质背景为基础，通过分析地下水中不同化学组分占比，从而识别地下水中不同化学组分的来源，判断可能发生的水文地球化学演化过程[8]。

为进一步揭示地下水化学组分的来源及水岩作用机制，本次研究绘制了主要离子比例关系图(图 5)。在  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  关系图中，大部分样品点位于 1:1 等当量线的上方，表明地下水中  $\text{Na}^+$  浓度略高于  $\text{Cl}^-$ ，说明  $\text{Na}^+$  并非全部来源于岩盐溶解，硅酸盐岩风化和阳离子交换作用是其重要的补充来源。在  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  关系图中，样品点主要分布于 1:1 等当量线的下方，说明  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  主要来源于碳酸盐岩和蒸发岩的溶滤作用，且这一过程是维持地下水化学平衡的关键自然机制。 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  关系图显示二者呈显著线性正相关，且分布于 1:1 线附近，进一步证实了碳酸盐岩风化溶滤是  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的共同来源。此外， $\text{Na}^+$  与 TDS 的正相关关系，表明  $\text{Na}^+$  是控制本区地下水矿化度的核心离子之一。

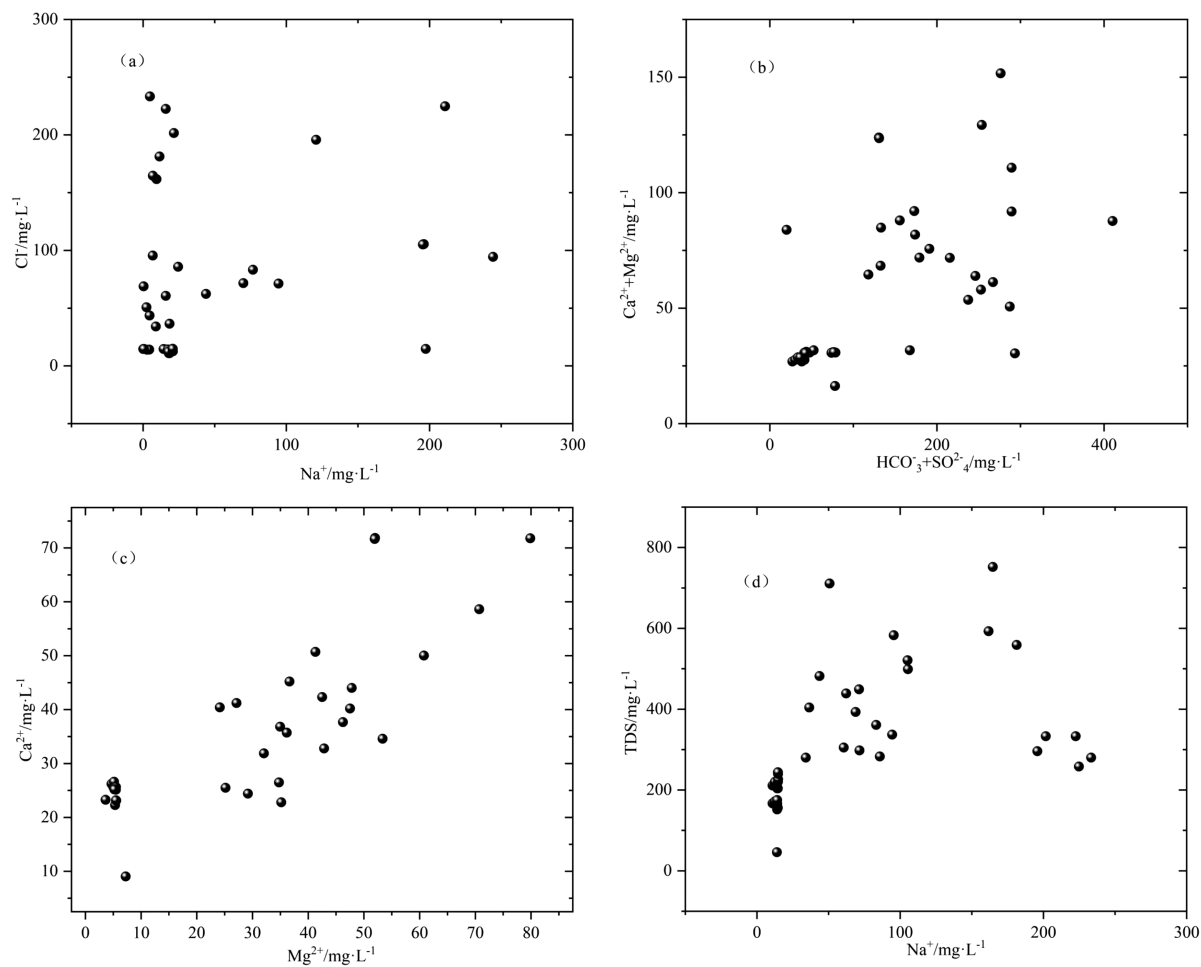


Figure 5. Ion ratio relationship diagram

图 5. 离子比例关系图

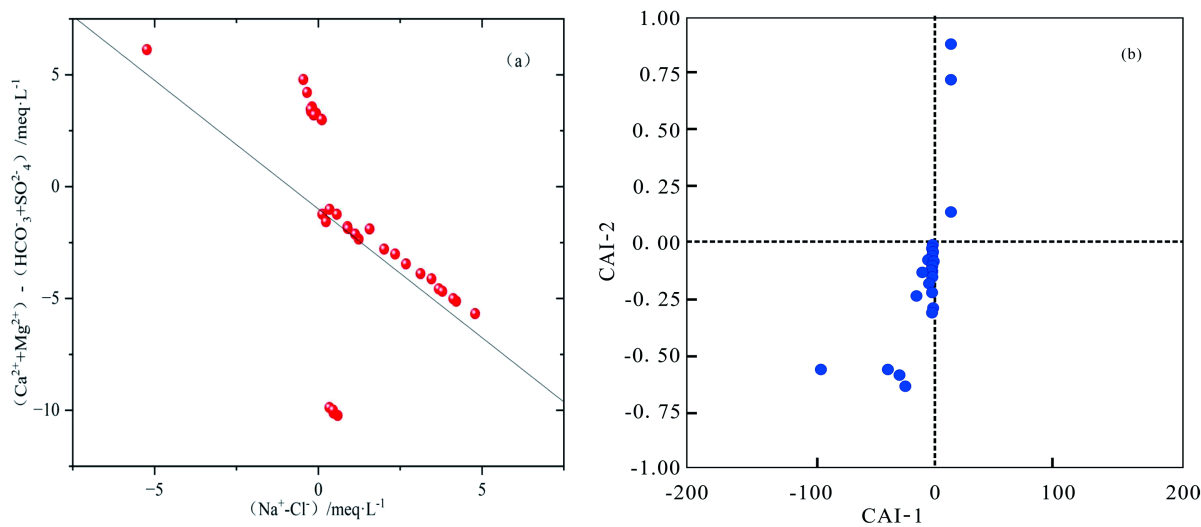


Figure 6. Cation alternating adsorption of Chlor Alkali Index

图 6. 氯碱指数的阳离子交替吸附作用

### 4.3.3. 阳离子交替吸附作用

氯碱指数(CAI-1 和 CAI-2)是诊断阳离子交换方向和程度的有效指标[9]。为定量表征地下水阳离子交换作用的类型与强度,本次研究计算了氯碱指数(CAI-1 和 CAI-2)。如图 6(a)所示,  $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-}) / (Na^+ - Cl^-)$  的斜率在-1 之间,表明研究区内的浅层地下水发生了明显的阳离子交替吸附作用。同时,研究区绝大多数地下水样品的 CAI-1 和 CAI-2 值均小于 0 (图 6(b)),表明地下水以反向阳离子交换作用为主,即含水层介质中的  $Na^+$  被置换到地下水中,而  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  则被吸附到岩土颗粒表面,这是导致本区地下水  $Na^+$  相对富集的关键水文地球化学过程。少数样品点的 CAI-1 和 CAI-2 值为正,分布于正阳离子交换区。综上,淮北平原浅层地下水多以反向阳离子交换为主。

## 5. 结论

(1) 淮北地区某典型乡镇浅层地下水整体水质良好,属于弱碱性淡水。主要的化学组分由天然水岩相互作用控制。

(2) 水化学演化过程中,阳离子交替吸附作用起到了关键调节作用,导致了地下水中  $Na^+$  的富集。蒸发浓缩作用后,地下水矿物度(TDS)显著升高,进一步加剧了  $Na^+$  在浅层地下水中的主导地位。

(3) 研究区水化学演化受岩性控制的溶滤作用、阳离子交替吸附作用和蒸发浓缩作用共同影响,整体水质符合生活饮用水标准,但局部区域需关注 TDS 和  $Na^+$  含量偏高的问题,为当地地下水资源合理开发利用提供了科学依据。

## 基金项目

省级大学生创新创业训练项目(S202510379079);宿州学院科研团队创新平台项目(2024PT04);S202510379080。

## 参考文献

- [1] 陈宗宇,王莹,刘君,等.近50年来我国北方典型区域地下水演化特征[J].第四纪研究,2010,30(1):115-126.
- [2] 王雅欣,冯忠伦,邱庆泰,等.南水北调通水对梁济运河流域地下水化学成分影响[J].中国农村水利水电,2015(11):110-114.
- [3] 蒋万军,赵丹,王广才,等.新疆吐-哈盆地地下水水文地球化学特征及形成作用[J].现代地质,2016,30(4):825-833.
- [4] 朱春芳,龚建师,檀梦皎,等.淮北平原浅层地下水化学特征及水质动态研究[J].水文地质工程地质,2025,52(3):56-67.
- [5] 夏雨波,王冰,李海涛,等.雄安新区浅层地下水化学成因及健康地质区划研究[J].中国地质,2025,52(01):331-346.
- [6] 李状,苏晶文,董长春,等.安徽马鞍山市当涂地区地下水水化学特征及演化机制[J].中国地质,2022,49(5):1509-1526.
- [7] 罗进,安艳玲,吴起鑫,等.赤水河中下游冬季河水化学空间分布特征分析[J].地球与环境,2014,42(3):297-305.
- [8] 孔令健,王振龙,王兵.阜阳市集中式深层地下水饮用水源地水化学特征及成因分析[J].中国农村水利水电,2020(3):78-82.
- [9] 许开卿,乔伟,李文平,等.深部岩溶矿井水化学特征及含水层水力联系研究[J].煤矿安全,2023,54(8):150-160.