

浅层地下水水化学演化特征及其形成机制研究 ——以蒙城县周边为例

张子鹏, 马杰, 薛恩平, 王富, 姚伟恒, 李浩然

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年4月22日; 发布日期: 2025年4月30日

摘要

为揭示蒙城县周边的浅层地下水水化学演化特征及其形成机制, 在研究区采集了40组浅层地下水样品, 并综合运用了描述性统计分析、离子比值分析、相关性分析、主成分分析、Gibbs图以及Piper三线图等多种方法。本文探讨了研究区地下水的常规离子组成特征, 明确了地下水化学类型及其形成原因, 并分析了不同来源地下水水化学特征。研究结果可知, 研究区域pH在6.60~7.40之间, 均值为7.08, 为弱碱性水; TDS介于250~1056 mg·L⁻¹, 均值为426.34 mg·L⁻¹, 属于淡水型。EC在249~1873 uS/cm, 平均值为782.69 uS/cm。阴阳离子主要以 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 为主, 水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型为主导。

关键词

浅层地下水, 水化学特征类型, 水岩作用类型, 蒙城县

Study on the Hydrochemical Evolution Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater

—Taking the Surrounding Area of Mengcheng County as an Example

Zipeng Zhang, Jie Ma, Enping Xue, Fu Wang, Weiheng Yao, Haoran Li

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

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: Apr. 22nd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

In order to reveal the hydrochemical evolution of shallow groundwater around Mengcheng County, forty shallow groundwater samples were collected in the study area. The analysis methods contain

文章引用: 张子鹏, 马杰, 薛恩平, 王富, 姚伟恒, 李浩然. 浅层地下水水化学演化特征及其形成机制研究[J]. 自然科学, 2025, 13(3): 420-431. DOI: 10.12677/ojns.2025.133044

descriptive statistical analysis, ion ratio analysis, correlation analysis, principal component analysis, Gibbs diagram and Piper three-line diagram. The conventional ionic composition characteristic is discussed, the chemical types of groundwater and their formation is clarified, the sources contribution of the hydrochemical properties is also explained. The results showed that the pH of the study area was between 6.60~7.40, the average value is 7.08, which is weakly alkaline water, the TDS is between 250~1056 mg·L⁻¹, and the mean value is 426.34 mg·L⁻¹, which belongs to the freshwater type. The EC is 249~1873 uS/cm, and the average value is 782.69 uS/cm. The anions and cations were mainly HCO₃⁻ and Ca²⁺, and the hydrochemical types were dominated by HCO₃-Ca.

Keywords

Shallow Aquifer, Hydrochemical Characteristic Type, Water Rock Interaction Type, Mengcheng County

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[1]。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,以便科学有效地管理和利用地下水资源,进而保护和改善地下水水质[2]。自然条件下地下水水化学特征受溶滤、脱硫酸/碳酸和阳离子交替吸附等水岩相互作用控制,而剧烈的人类活动则改变地下水中的化学组分及演化规律[3]。如工矿业活动导致SO₄²⁻浓度的升高[4],生活污水和农业活动则影响Cl⁻和NO₃⁻浓度不合理的农业灌溉增加地下水盐分浓度[5]。

水是生命之源,地下水作为饮用和灌溉的主体部分起着重要作用。国内外针对水化学类型与水质评价进行了大量的研究工作。Umar 和 Absar 通过研究拉贾斯坦邦甘比尔河流域地下水的化学特征,将地下水分为五种类型,即:高 TDS 型、混合型、富碱和 HCO₃富集型,以及 HCO₃缺乏型[6]。Zaki Sameh 等研究哈拉依卜地区的水化学特征,得出沿地下水流动方向水化学组分含量具有 Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺/Cl⁻ > HCO₃⁻ > SO₄²⁻ 的规律[7]。李明新等研究幸福湖泉区域的地下水得到其水化学类型以 HCO₃-Ca-Mg 型为主[8]。皖北地区开展过相关研究工作。胡云虎等对皖北地区集中式深层地下水饮用水源地进行水化学特征研究,得出皖北地区水化学类型以 HCO₃-Ca 和-Na 型为主[9]。

皖北地区主要以粮食生产为主,其含水量较丰富,但是由于人口居住量较大,从而使人均占有量不多。随着城镇化的不断发展,人们日常饮用水的需求量在不断增加。之前已有人针对蒙城县区域内水资源现状分析进行了相关的工作[10]。但对浅层地下水的研究鲜有报道。本文以亳州市蒙城县 40 组浅层地下水水样为研究对象,通过对其常规指标和离子的分析,揭示该含水层的水化学类型和水岩作用类型,分析水化学组分的来源,并为该地区浅层地下水的研究与水资源的管理提供水文地质依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

蒙城县位于中国安徽省西北部,属于亳州市管辖(图 1),西北与涡阳县相邻,西南接利辛县,东靠蚌

埠市, 北连淮北市。地理位置处于淮北平原, 地势平坦。全县总面积为 2091 平方公里, 辖 3 个街道、12 个镇、2 个乡。研究区地理坐标范围为东经 $116^{\circ}40' \sim 116^{\circ}43'$, 北纬 $33^{\circ}5' \sim 33^{\circ}12'$ 。属暖温带半湿润季风气候区, 气候温和, 年平均气温为 14.8°C 。雨量适中, 年平均降水量为 732.63 毫米, 主要集中在 6、7、8 三个月。春温多变, 秋高气爽, 夏雨集中, 冬季则相对干燥。

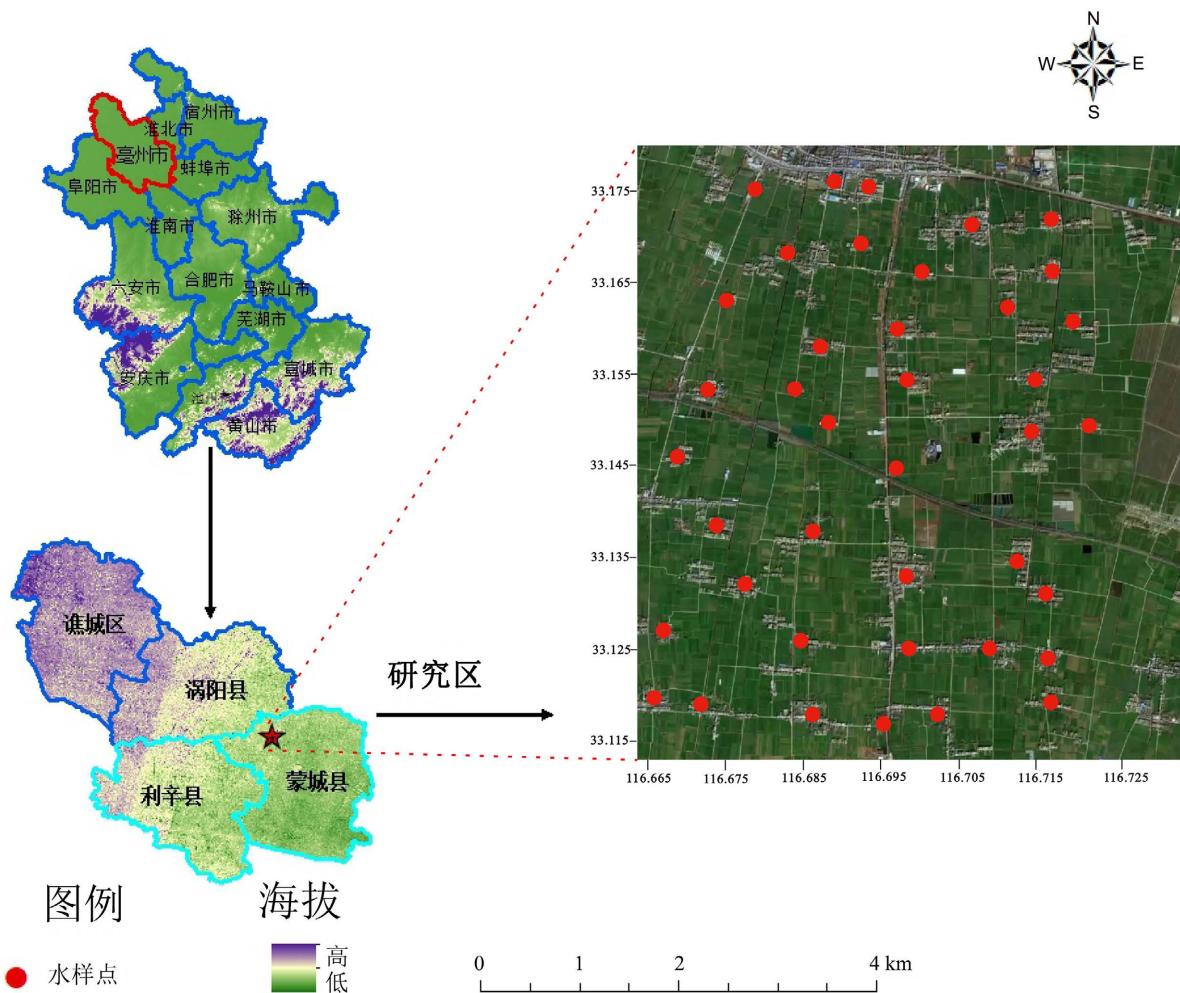


Figure 1. Distribution of sampling points in the study area
图1. 研究区采样点分布图

2.2. 样品采集与分析

为分析蒙城县浅层地下水水化学类型, 在研究区及其周边采集 40 个水样品, 样品采集分布均匀, 采样深度在 10~63 m 范围内, 采样时间在 2024 年 7 月 28 日, 采样点的位置分布如图 1 所示。现场携带并使用便携式测试仪, 测定 pH、TDS 和 EC 等参数。取样时, 用拟采样的浅层地下水对 500 ml 的聚乙烯瓶清洗 3 次, 然后装置满瓶并密封, 同时每一个取样点取两瓶水样。地下水样品的采集、运输及保存参照《地下水环境监测技术规范》(HT164-2020)、《水质样品的保存和管理技术规范》(HJ493-2009)。样品运送回实验室后, 先用 0.45 微米的醋酸纤维滤膜过滤后, 放置温度在 $0^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ 的环境下保存。测试的常规离子主要包括(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})。测试工作均在安徽省矿井勘探工程技术中心完成。

2.3. 数据处理方法

利用 SPSS27 对研究区浅层地下水水化学成分进行描述性统计分析(最大值、最小值、均值、标准差、变异系数等)、相关性分析和主成分分析[11]；利用 Origin2024 绘制 Piper 三线图和 Gibbs 图，分析浅层地下水的水化学类型和主要离子来源；通过氯碱指数评价浅层地下水中阳离子交替吸附作用的类型以及强度；采用离子比值进一步判断地下水化学组分的来源[12]。

3. 结果与讨论

3.1. 地下水化学主要组分特征

研究区浅层地下水的常规离子浓度和现场实测物理指标测试结果，如表 1 所示，该研究区的浅层地下水 pH 值范围为 7.40~6.60，平均值为 7.08，属于中性水。TDS 含量范围在 250~1056 mg/L，平均值为 426.31 mg/L，依据 TDS 划分标准属于淡水。EC 范围在 249~1873 uS/cm，平均值为 782.69 uS/cm。在该研究区浅层地下水中主要阳离子质量浓度平均值为： Ca^{2+} (75.56 mg/L) > Na^+ (70.01 mg/L) > Mg^{2+} (35.66 mg/L) > K^+ (0.99 mg/L)，主要阴离子质量浓度平均值为： HCO_3^- (483.24 mg/L) > Cl^- (58.62 mg/L) > SO_4^{2-} (35.77 mg/L)， Ca^{2+} 和 HCO_3^- 为研究区地下水的相对优势阳、阴离子。从表中可知，pH 值的变异系数为 0.04%，说明该研究区浅层地下水环境稳定处于弱碱性； HCO_3^- 空间变异较低($\text{CV} < 30\%$)； Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 空间变异中等(CV 为 30%~100%)，说明该离子含量受一定的人为活动影响。

Table 1. Descriptive statistics of the main chemical components of shallow groundwater

表 1. 浅层地下水主要化学组分描述性统计

项目	最大值	最小值	平均值	标准偏差	变异系数%
Na^+ (mg/L)	173.79	19.54	70.01	41.99	0.60
K^+ (mg/L)	3.16	0.42	0.99	0.65	0.66
Mg^{2+} (mg/L)	118.40	14.77	35.66	18.21	0.51
Ca^{2+} (mg/L)	235.99	28.49	75.56	43.95	0.58
Cl^- (mg/L)	337.07	1.79	58.62	75.36	1.29
SO_4^{2-} (mg/L)	125.58	2.30	35.77	34.50	0.96
HCO_3^- (mg/L)	842.04	347.80	483.24	114.04	0.24
TDS (mg/L)	1056.00	250.00	426.31	190.64	0.45
EC (uS/cm)	1873.00	249.00	782.69	345.08	0.44
pH	7.40	6.60	7.08	0.27	0.04

3.2. 地下水水化学类型

Piper 三线图可以用来分析地下水化学成分的演化规律，该方法的优点是不受人为因素影响，在三线图中可以看出各种离子的相对含量[13]~[15]。根据研究区 Piper 三线图(图 2)大部分水样点分布在 Ca 型、 HCO_3 型以及 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型区域，少部分浅层地下水样点分布在 $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ 型和 Na 型区域。由此可知研究区域浅层地下主要以 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 这两种离子为主，水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型为主。结合研究区地质条件初判，水化学类型形成与方解石、白云石为主的碳酸盐矿物和以硅酸盐矿物的风化溶解有关。

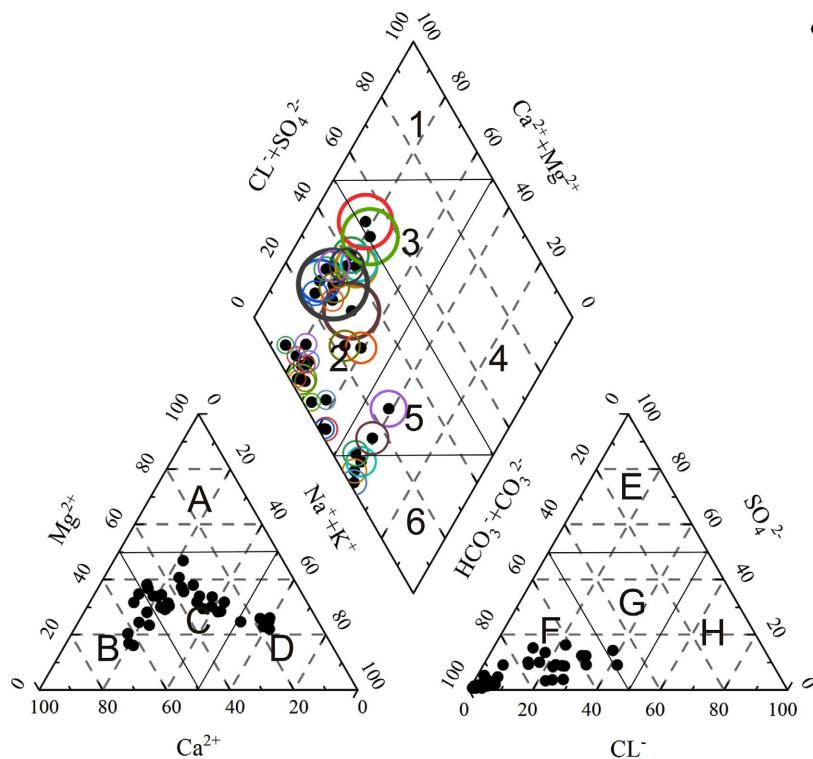


Figure 2. Piper diagram of shallow groundwater hydrochemistry
图 2. 浅层地下水水化学 Piper 图

3.3. 相关性分析

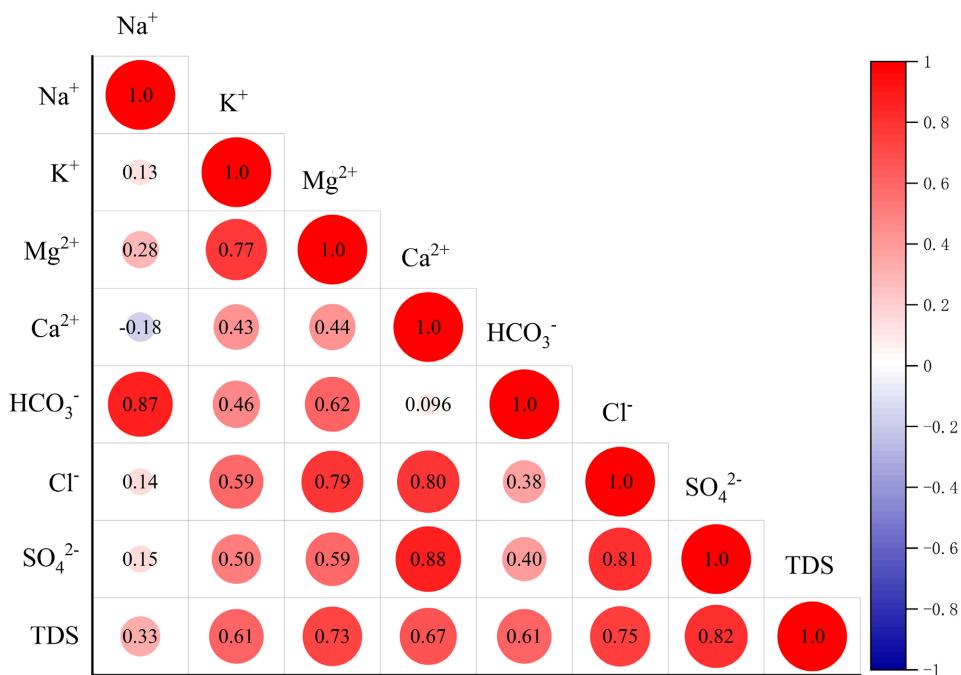


Figure 3. Correlation coefficient between hydrochemical components of shallow groundwater
图 3. 浅层地下水水化学组分间的相关系数

Pearson 相关性分析是用来研究两个变量之间的关联性, 通常情况下, 当两变量间相关系数绝对值在 0.7~1.0 范围内变化, 表示具有强相关性, 相关系数绝对值在 0.5~0.7 范围内变化, 则具有中等相关性; 若相关系数绝对值小于 0.5, 则具有弱相关性[16]。

如图 3 所示, 通过对 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、TDS 八项指标进行数据整理, 做出相关性分析图。其中 Na^+ 和 Ca^{2+} 两者之间是负相关, 其系数为 -0.18, 说明可能发生了阳离子交换作用。 Na^+ 与 HCO_3^- 之间是强相关性, 其系数为 0.87, 表明 Na^+ 和 HCO_3^- 离子来源相同, 推断出 Na^+ 来源可能与钠长石等硅酸盐矿物的风化作用有关。 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 之间有着显著的强相关关系为 0.88, 说明上述两个离子可能来自于硫酸盐矿物风化溶解作用。

3.4. 主成分分析

主成分分析方法是一种有效的数据降维工具, 它可以帮助我们从许多复杂的数据中提取出最重要的数据。将众多原始变量浓缩成少数几个因子变量同时减少数据的复杂性, 以及如何用因子变量分析解释现实现象的多元统计分析方法[17]。在分析过程中, 对原始数据进行了标准化转换, 具体做法是将每个变量值减去其均值后除以标准差(即 $Z_i = (X_i - \text{mean})/s$), 以确保各变量在数值上具有可比性。随后, 采用了方差最大正交旋转法对提取出的主因子进行旋转处理, 以便明确每个主因子所代表的实际意义[18]。

如表 2 所示, 提取出因子载荷矩阵中特征值大于 1 的两个因子 F1、F2, 结果如表所示。主因子 F1 的累计贡献率为 60.114%, 其中 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的因子载荷值大于 0.7 且均与 F1 呈正相关关系, 说明在研究区中该部分离子主要受到硫酸盐矿物、盐岩矿物的风化溶解和人类活动的影响。主因子 F2 的累计贡献率为 82.509%, Na^+ 、 HCO_3^- 的因子载荷值大于 0.7 且与 F2 呈正相关, 说明其可能来自于钠长石等硅酸盐矿物风化溶滤作用。

Table 2. Conventional ionic principal component analysis in shallow groundwater
表 2. 浅层地下水常规离子主成分分析

指标	因子	
	F1	F2
Na^+	0.35	0.87
K^+	0.75	0.00
Mg^{2+}	0.86	0.11
Ca^{2+}	0.73	-0.59
HCO_3^-	0.65	0.72
Cl^-	0.89	-0.24
SO_4^{2-}	0.87	-0.27
TDS	0.91	0.01
合计	6.04	0.61
贡献率/%	60.11	22.39
累计贡献率/%	60.11	82.50

3.5. 控制因素识别

Gibbs 图解法主要是用来揭示地表水和地下水化学组分来源, 依据 TDS 与 $\text{Na}^+/(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 、 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的关系, 用自然起源机制将水体主要水化学组分划分为 3 类, 即降雨控制型、岩石风化控制型

和蒸发浓缩型[19]。

由图4可知,大部分水样点的 $\rho(\text{Na}^+)/(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\rho(\text{Cl}^-)/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 都在0.5范围之内。这一结果清晰地表明,在该研究区中, Ca^{2+} 相较于 Na^+ 占据优势地位,而 HCO_3^- 相较于 Cl^- 也同样处于优势,其主要集中在岩石风化区域的部分,从而得知该区域的地下水环境中的水化学组分与岩石的风化溶解有关。同时有少量水样点向蒸发浓缩控制区域发生迁移,这说明水体的蒸发浓缩也会影响着地下水环境中的水化学组分。部分水样点的 $(\text{Na}^+)/(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的数值处于0.5的右边,说明农业活动中钾肥的使用以及生活污水中消毒剂的残留对研究区浅层地下水的化学组分产生了影响[19]。随着 $(\text{Na}^+)/(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值的增大,表明浅层地下水可能存在着阳离子交换作用[20]。

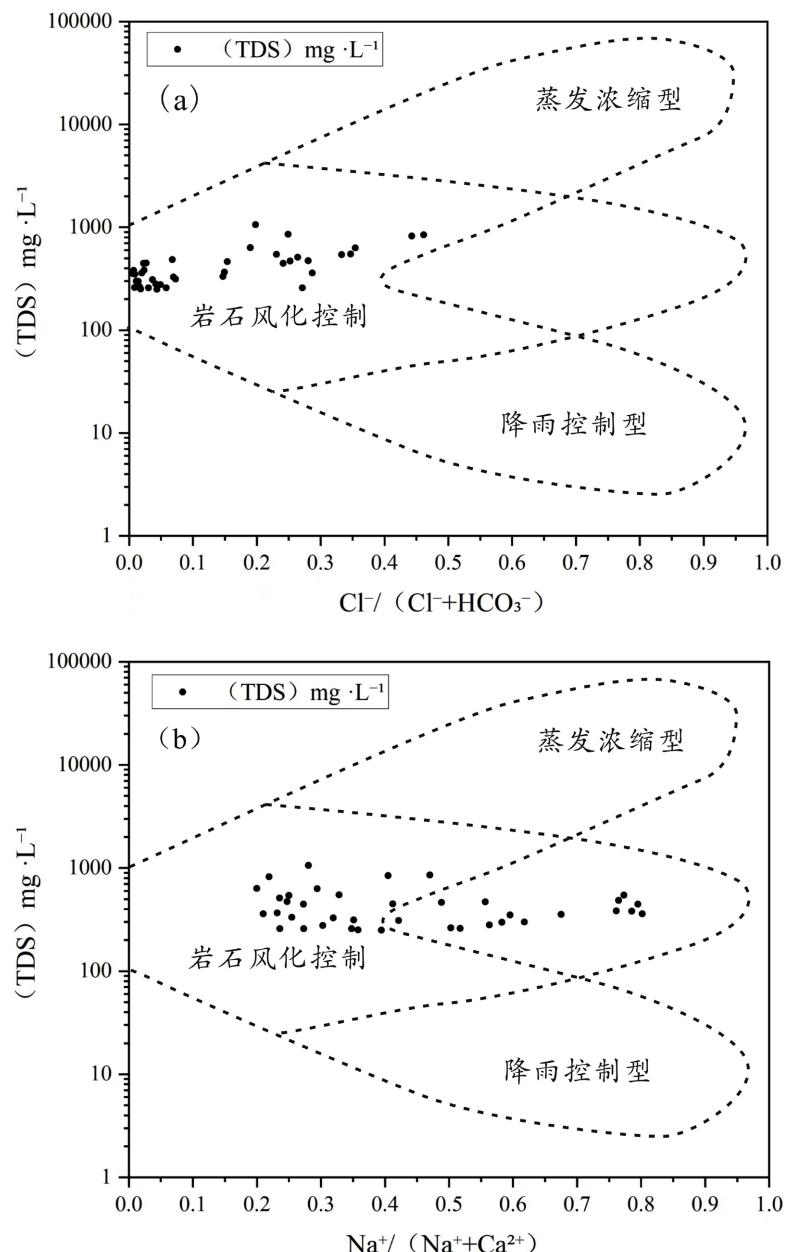


Figure 4. Gibbs plot of water chemistry

图4. 水化学 Gibbs 图

由离子端元图中可以看出(图 5), 该区域的取样点大部分坐落于硅酸盐矿物周围, 说明地下水环境中的水化学组分主要与硅酸盐岩的风化溶解有关, 并且少量的水样点分布在碳酸盐岩周围, 其与碳酸盐岩如白云石的风化溶解有关。

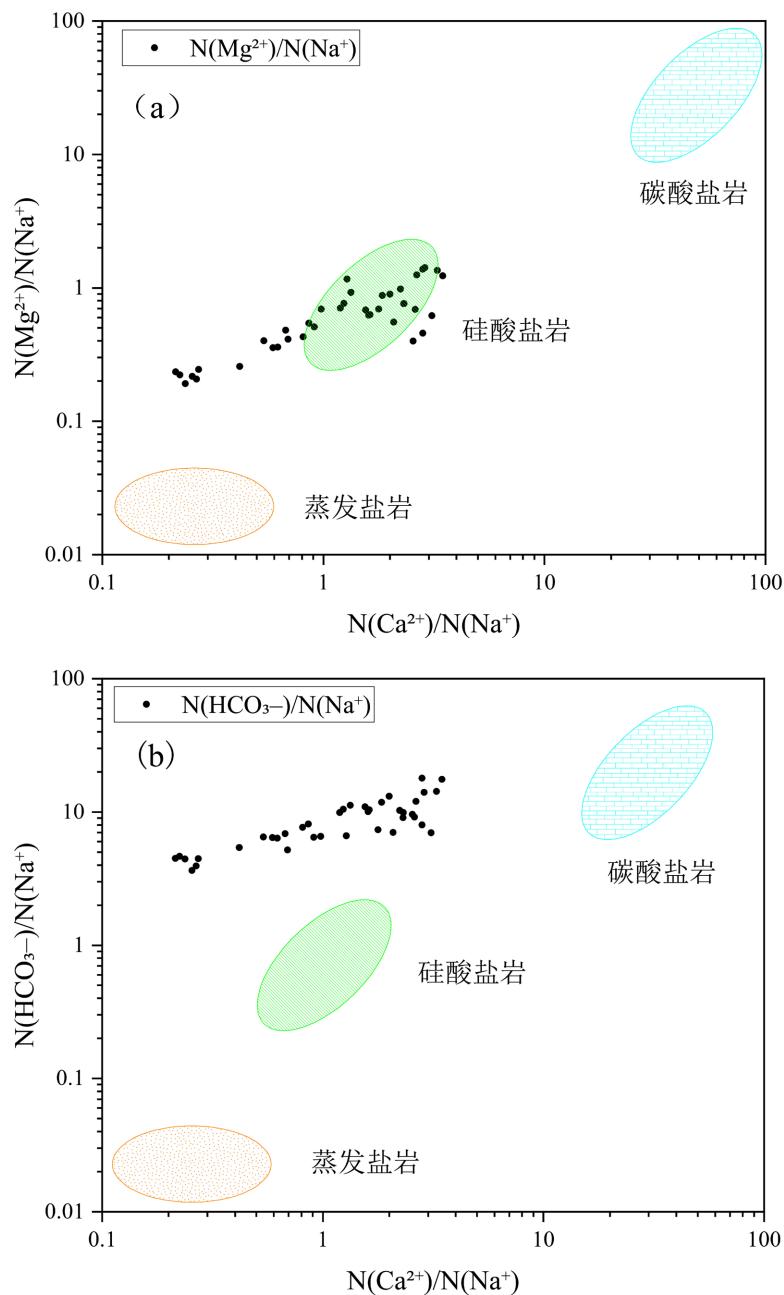


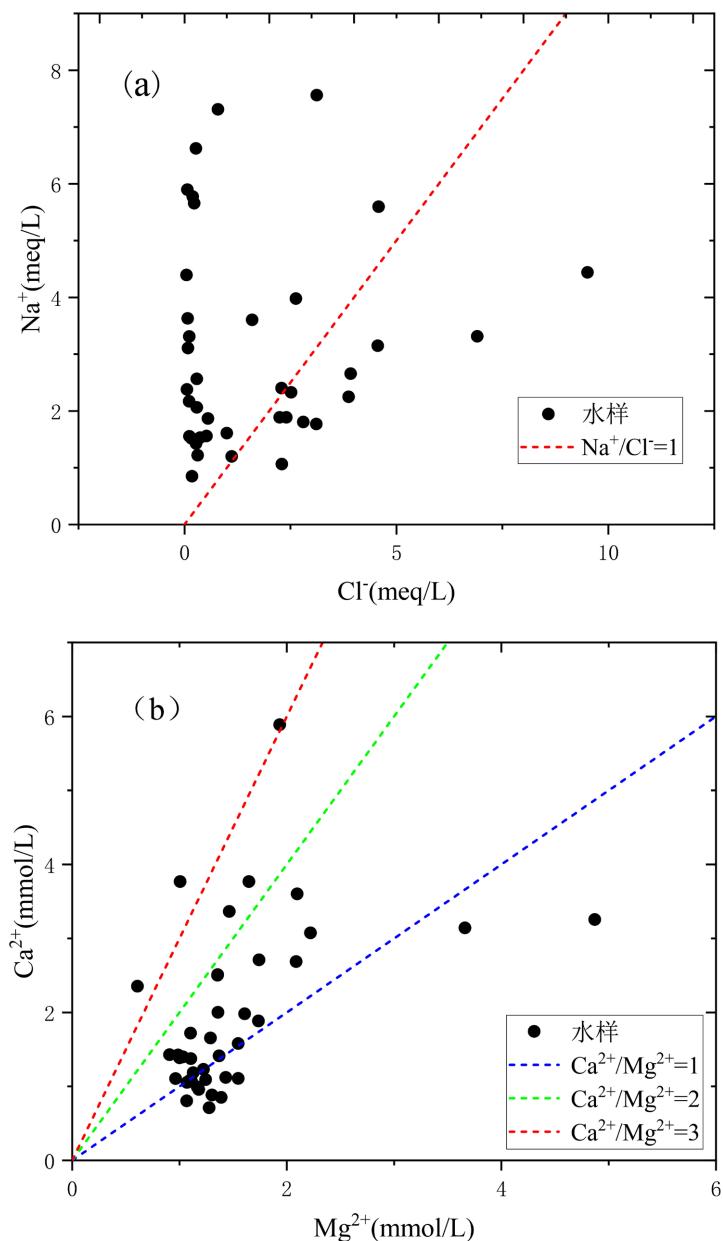
Figure 5. Ion terminal member diagram
图 5. 离子端元图

3.6. 离子比例系数

因受不同成因和形成条件影响的地下水, 各组分会存在显著差异, 可以利用地下水各组分的比例系数判别地下水化学组分的来源[21]。

一般说来,若 Na^+/Cl^- 离子当量浓度比接近1,则水体中 Na^+/Cl^- 离子当量浓度比值 >1 ,则 Na^+ 除盐岩溶解外,还受硅酸岩矿物如钠长石风化溶解[式(2)];而当 Na^+/Cl^- 当量浓度比值 <1 ,则说明 Na^+ 离子浓度的增加与人类活动有关[22]。由图6(a)所示,由 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 的比值可知,研究区内大部分水样点坐落在1:1比值线的上方,可知 Na^+/Cl^- 离子主要来源于盐岩与钠长石风化溶解。小部分水样点位于1:1等值线的下方,受人类活动的影响较小。

由图6(b)可以看出,通过 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Mg}^{2+})$ 的比值分析,由于大部分的水样点均紧密分布在1:1等值线附近。说明 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的主要来源是白云石的风化溶解。同时,少数水样点位于1:1等值线之上和2:1等值线之下的区域,这表明在这些水样点所代表的浅层地下水中,可能伴随着方解石的风化溶解。这是因为在浅层地下水体中会含有的少量 CO_2 气体,它能够与含水介质方解石发生化学反应使其溶解。然而,方解石比白云石先一步达到饱和状态并发生沉淀,从而限制溶解程度[23]。



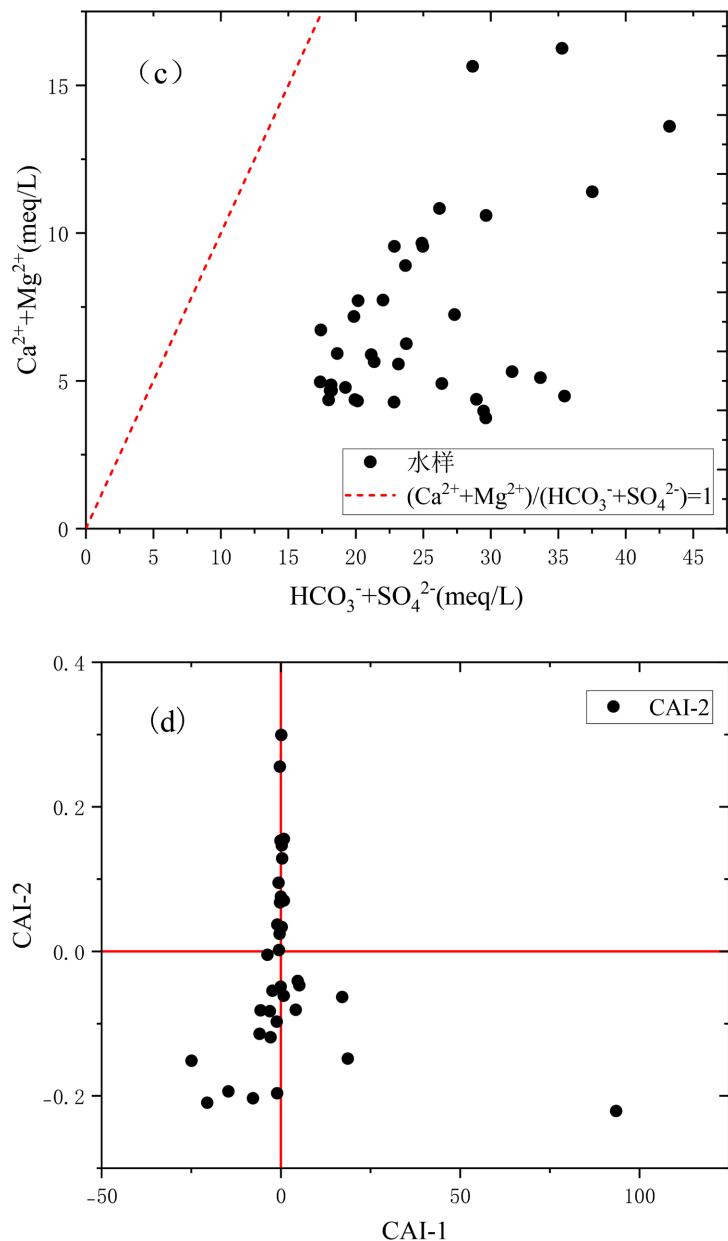
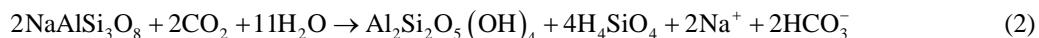


Figure 6. Diagram of ionic proportional coefficient of shallow groundwater
图 6. 浅层地下水离子比例系数图



如图 6(c)所示, 利用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 离子当量浓度比值可以判断地下水离子组分是否由蒸发盐岩和碳酸盐岩控制[24]。从图中可以看出, 水样点大部分坐落于 1:1 比值线下方, 表明该浅层地下水存在相对较高的 HCO_3^- , 这种情况与地层中硅酸盐矿物风化有关[25]。

氯碱指数(CAI-1 和 CAI-2)可以揭示水体中阳离子交换反应的类型和强度[26], 如下式所示:

$$\text{CAI-1} = \gamma(\text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{K}^+) / \gamma(\text{Cl}^-)$$

$$CAI-2 = \gamma(Cl^- \cdot Na^+ \cdot K^+) / \gamma(SO_4^{2-} + HCO_3^- + CO_3^{2-})$$

若水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 置换含水介质中的 Na^+ 和 K^+ , 其指数为负值, 反之为正值, 另外, CAI-1 和 CAI-2 绝对值越大, 阳离子交替吸附作用越易发生[5]。从图 6(d)可以得到, 部分水样的 CAI-1 和 CAI-2 值都小于 0, 这说明地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和岩石中的 Na^+ 发生交换导致地下水中 Na^+ 浓度不断增加, 该结论与相关性分析中 Na^+ 与 Ca^{2+} 呈负相关一致。

4. 结论

本文以亳州市蒙城县周边 40 组浅层地下水为研究对象, 开展了水化学类型分析、描述性统计、相关性分析和主成分分析, 得出的结论如下:

- 1) 蒙城县周边浅层地下水环境 pH 值研究区域 pH 在 6.60~7.40 之间, 均值为 7.08, 为弱碱性水, TDS 介于 250~1056 $mg \cdot L^{-1}$, 均值为 426.34 $mg \cdot L^{-1}$, 属于淡水型。EC 在 249~1873 uS/cm , 平均值为 782.69 uS/cm 。
- 2) HCO_3^- 和 Ca^{2+} 为研究区地下水的相对优势阴、阳离子。水化学类型以 HCO_3 -Ca 为主导。
- 3) 研究区浅层地下水化学组分主要受碳酸盐岩、硅酸盐岩、硫酸盐岩矿物的风化溶滤作用。

基金项目

宿州学院资助 2024 年省级大学生创新创业训练计划项目, 项目编号: S202410379179; 校级大学生创新创业训练计划项目, 项目编号: ZCXM24-234、ZCXM24-243。

参考文献

- [1] 汪名鹏. 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.
- [2] 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.
- [3] 孟舒然, 吕敦玉, 王翠玲, 等. 郑州市中牟县地下水水化学特征及控制因素[J]. 环境化学, 2022, 41(3): 977-986.
- [4] 范祖金, 魏兴, 李佳文, 等. 重庆市万州区浅层地下水化学特征及控制因素[J]. 环境化学, 2023, 42(01): 113-124.
- [5] 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区地下水化学演变特征及形成机制[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4011-4020.
- [6] Umar, R. and Absar, A. (2003) Chemical Characteristics of Groundwater in Parts of the Gambhir River Basin, Bharatpur District, Rajasthan, India. *Environmental Geology*, **44**, 535-544. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0789-y>
- [7] Zaki, S.R., Redwan, M., Masoud, A.M. and Abdel Moneim, A.A. (2018) Chemical Characteristics and Assessment of Groundwater Quality in Halayeb Area, Southeastern Part of the Eastern Desert, Egypt. *Geosciences Journal*, **23**, 149-164. <https://doi.org/10.1007/s12303-018-0020-5>
- [8] 李明新, 王现国, 李钊, 等. 幸福湖泉域地下水水化学特征及其演化机制[J]. 人民黄河, 2025, 47(1): 104-109, 117.
- [9] 胡云虎, 张付海, 钮志远, 等. 皖北地区集中式深层地下水饮用水源地水化学特征及水质评价[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(11): 913-920, 925.
- [10] 孟繁瑾, 王海明. 蒙城县水资源现状分析[J]. 治淮, 2017(3): 10-11.
- [11] 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 等. 无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 220-229.
- [12] 刘海, 康博, 沈军辉. 基于反向地球化学模拟的地下水形成作用: 以安徽省泗县为例[J]. 现代地质, 2019, 33(2): 440-450.
- [13] 周嘉欣, 丁永建, 曾国雄, 等. 疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3315-3324.
- [14] 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, 36(9): 3230-3237.
- [15] 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.

-
- [16] 高燕燕. 关中平原地下水化学成分时空演化规律及人体健康风险评价[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2020.
 - [17] 唐功爽. 基于 SPSS 的主成分分析与因子分析的辨析[J]. 统计教育, 2007(2): 12-14.
 - [18] 秦兵, 李俊霞. 大同盆地高氟地下水水化学特征及其成因[J]. 地质科技情报, 2012, 31(2): 106-111.
 - [19] 张春潮, 侯新伟, 李向全, 等. 三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 62-71.
 - [20] 沈照理. 水文地球化学基础[J]. 水文地质工程地质, 1983(5): 55-61.
 - [21] Wang, S., Wu, W., Liu, F., Yin, S., Bao, Z. and Liu, H. (2015) Spatial Distribution and Migration of Nonylphenol in Groundwater Following Long-Term Wastewater Irrigation. *Journal of Contaminant Hydrology*, **177**, 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2015.03.013>
 - [22] 肖勇, 莫培, 尹世洋, 等. 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.
 - [23] 侯庆秋, 董少刚, 张曼玮. 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.
 - [24] 刘敏, 赵良元, 李青云, 等. 长江源区主要河流水化学特征、主要离子来源[J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1243-1254.
 - [25] 许继影, 桂和荣, 葛春贵, 等. 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.
 - [26] 刘元晴, 周乐, 吕琳, 等. 牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1429-1439.