

许疃地区浅层地下水水文地球化学特征

陈杰¹, 温廷中², 戴洪宝³, 张海涛¹, 许继影¹, 代珊珊¹, 余凯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三勘探队, 安徽 宿州

³宿州学院环境与测绘工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2025年3月11日; 录用日期: 2025年5月8日; 发布日期: 2025年5月16日

摘要

本研究以许疃地区浅层地下水为研究对象, 通过对19组松散层水样的水化学特征进行分析, 探讨了地下水化学成分的来源及其演化规律。研究采用离子比值分析、数理统计、Piper三线图和Gibbs图等方法, 揭示了地下水的主要离子组成及其形成机制。结果表明, 松散层水样品中阳离子以 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 为主, 阴离子以 HCO_3^- 为相对优势离子, 水化学主要类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Na} + \text{K}$ 型。基于离子比值分析, 研究区松散层水水样主要来源于蒸发浓缩等水岩相互作用过程, 同时伴有岩石风化作用和不同程度的离子交换。通过Gibbs图和离子比值分析, 发现地下水化学成分主要受蒸发浓缩作用的影响, 同时伴有岩石风化和离子交换作用。研究结果为许疃煤矿区地下水资源的可持续利用和环境保护提供了科学依据。

关键词

松散层水, 水化学特征, 来源分析, 许疃煤矿

Hydrogeochemical Characteristics of Shallow Groundwater in Xutuan Area

Jie Chen¹, Tingzhong Wen², Hongbao Dai³, Haitao Zhang¹, Jiying Xu¹, Shanshan Dai¹, Kai Yu¹

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

²The Third Exploration Team of Anhui Bureau of Coalfield Geology, Suzhou Anhui

³School of Environment and Geomatics Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: Mar. 11th, 2025; accepted: May 8th, 2025; published: May 16th, 2025

Abstract

Analysis of groundwater chemical characteristics is helpful to understand the composition of groundwater and its source, and can also provide important support for ensuring sustainable use

文章引用: 陈杰, 温廷中, 戴洪宝, 张海涛, 许继影, 代珊珊, 余凯. 许疃地区浅层地下水水文地球化学特征[J]. 自然科学, 2025, 13(3): 538-545. DOI: 10.12677/ojns.2025.133057

of water resources, preventing water resources and protecting ecological environment. Coal mining will cause certain damage to groundwater environment. With 19 sets of water samples in Xutuan area as the research object, the ion ratio and mathematical statistics are used to analyze the main ion concentration of the unconsolidated layer water. The results show that the cation in the unconsolidated layer water sample is mainly $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, and the anion is HCO_3^- as the relative dominant ion. The main type of water chemistry is $\text{HCO}_3^- - \text{Na} + \text{K}$ type. Based on ion ratio analysis, the water samples of the unconsolidated layer in the study area are mainly derived from the water-rock interaction process, such as evaporation and concentration, accompanied by rock weathering and different degrees of ion exchange.

Keywords

Loose Layer Water, Hydrochemical Characteristics, Source Analysis, Xutuan Coal Mine

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

地下水作为重要的水资源之一，其化学成分分布和演化规律对于水资源管理、环境保护以及地质工程等领域具有重要意义[1]-[3]。随着工业化进程的加快，尤其是煤炭资源的开采，地下水环境受到了不同程度的破坏，水质问题日益突出。许疃煤矿自 2004 年投产以来，随着采掘深度的增加，松散层水可能因矿井水的排放和煤矿堆积而受到污染，进而影响地下水的水质。此外，煤矿开采导致的地下水水位下降也可能引发地面沉降等环境问题。近年来，学者们通过多种方法(如主要成分分析[4] [5]、离子比值分析[6]、聚类分析[7]和相关性分析[8]等)对不同矿区含水层的水化学特征及地下水离子来源进行了深入研究。例如，陈凯等对钱营孜煤矿深部地下水的水化学特征进行了分析，为煤矿区深部水害防治和水资源利用提供了理论支持[9]。颜晓龙等对皖北地区浅层地下水的水化学特征进行了水质评价，发现该区域地下水基本符合用水标准[10]。本研究以许疃煤矿区松散层水为研究对象，通过对 19 组水样的水化学指标进行分析，采用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 图解法和离子比值分析法，系统研究了该地区砂岩裂隙水的水化学特征及其形成机制。研究成果不仅有助于理解地下水化学成分的来源及其演化规律，还为矿井水害防治和水资源可持续利用提供了科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

许疃煤矿位于安徽省蒙城县境内，行政区划隶属亳州市蒙城县许疃镇，矿区位于淮北平原中部，研究区区域概况图见图 1。矿井中心东北距宿州市约 37 km，西南距蒙城县城约 28 km。其地理坐标为东经 $116^{\circ}40'10'' \sim 116^{\circ}44'41''$ ，北纬 $33^{\circ}21'14'' \sim 33^{\circ}27'35''$ 。许疃煤矿地处淮北平原中部。该区域地势平坦，北部略高于南部，地面标高范围为 +20.70~+28.46 m，平均标高为 +25.43 m。矿区内人工沟渠纵横交错，村庄分布密集，北淝河流经矿井南部，为淮河支流，属于季节性河流[11] [12]。

2.2. 样品收集与处理

本次研究中，我们共采集了研究区域内的 19 组松散层水样。在采样之前，我们用去离子水对采样桶

进行了三次清洗,采样时也利用待采的水样对桶进行了三次冲洗。样品采集完毕后,我们确保在 24 小时内将它们送至实验室,并通过 0.45 μm 滤膜进行抽滤,之后将样品保存在 4℃ 的冰箱中以备后续检测。



Figure 1. Overview of the study area
图 1. 研究区域概况图

我们使用便携式 OHAUS 仪器对水样的 pH 值和总溶解固体(TDS)进行了测试。至于钠(Na^+)、钾(K^+)、钙(Ca^{2+})、镁(Mg^{2+})的测定,则是通过 ISC-600 型离子色谱仪完成的,具体操作是将 1.3 mL 的甲基磺酸加入到 1000 mL 的容量瓶中作为阳离子淋洗液。而阴离子氯(Cl^-)和硫酸根(SO_4^{2-})的含量则是通过 ICS-900 型离子色谱仪来测试的,淋洗液使用的是超纯水。硬度和碳酸氢根(HCO_3^-)的含量则是通过酸碱滴定法来测定的。在对所有样品进行测试之前,我们先用标准样品检验了仪器的稳定性,并设置了平行样品,确保平行样品的相对偏差不超过 5%。

2.3. 数据分析方法

本研究通过数理统计和 Piper 三线图来探究含水层主要离子的水化学特性;同时,运用 Gibbs 图解法和离子比值分析法来研究砂岩裂隙水化学成分的形成机制[13]。描述性统计工作借助 Excel 实现,而 Piper 图、Gibbs 图以及离子比值分析图的绘制则通过 Origin2024 和 CorelDRAW 软件完成。

3. 结果与讨论

3.1. 水化学特征

许疃煤矿松散层水水样主要离子浓度、TDS 和 pH 值平均值统计结果见表 1。

Table 1. Statistical characteristics of hydrochemical indicators of loose layer water in Xutuan area**表 1.** 许疃地区松散层水水化学指标统计特征

统计项目	Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	PH
	mg/L							
最小值	1040.12	170.14	151.15	104.10	298.13	1385.15	196.09	0.05
最大值	6567.94	1067.74	760.59	514.04	3620.15	47097.07	1397.46	8.89
平均值	1834.08	437.18	329.13	160.23	1369.57	4792.98	278.58	5.08
标准差	1137.08	278.20	166.13	102.02	687.97	9726.64	257.47	4.45
变异系数	0.62	0.64	0.50	0.64	0.50	2.03	0.92	0.88

观察表 1 数据, pH 值范围在 0.05 至 8.89 之间, 平均浓度为 5.08 mg/L, 这说明水体环境略带酸性。TDS 的数值则位于 96.09 至 1397.46 mg/L 之间, 水样的平均 TDS 值显示为 796.775 mg/L, 较低的数值指示了地下水属于淡水类型。阳离子的平均质量浓度排列顺序为: Na⁺和 K⁺ (1834.08 mg/L) > Ca²⁺ (437.18 mg/L) > Mg²⁺ (329.13 mg/L), 这说明 Na⁺和 K⁺是主要的阳离子。Ca²⁺的质量浓度区间在 170.136 至 1067.736 mg/L 之间, 而 Mg²⁺的质量浓度区间在 151.145 至 760.59 mg/L 之间。阴离子的平均质量浓度排列顺序为: HCO₃⁻ (4792.98 mg/L) > SO₄²⁻ (1574.86 mg/L) > Cl⁻ (1369.57 mg/L), 显示出 HCO₃⁻ 在地下水样品中是占主导地位的阴离子。

在分析数据的离散性时, 变异系数是标准差与平均值的比率, 它反映了数据相对于平均值的分散程度[13]; 地下水指标的变异系数较高, 表明其水化学成分的不稳定性较大, 能够揭示不同地下水化学成分的形成过程[13]。许疃煤矿松散层水中的 TDS 变异系数介于 0.5 至 0.9 之间, 这表明这些指标相对稳定; 而 pH 值的变异系数为 0.88, 显示出其空间变化性较大; 唯有 HCO₃⁻ 的变异系数超过 1, 这说明在松散层水中, HCO₃⁻ 的含量是不稳定的, 容易受到环境因素变化的影响[14]。

Piper 三线图是一种常用于水化学分析的图表, 它能够帮理解解和比较水样的化学成分以及更好的分析水化学的类型[15] [16]。许疃煤矿松散层水水样 Piper 三线图如图 2 所示。

根据图 2 的分析结果, 松散层水样中主要离子的组成情况表明, 碱金属离子(Na⁺, K⁺)的含量占比超过 80%, 显著高于碱土金属离子(Ca²⁺, Mg²⁺), 占据主导地位; SO₄²⁻、HCO₃⁻ 的含量占比高于 Cl⁻; 主要的水化学类型为 SO₄²⁻ · HCO₃⁻ - Na + K 型, 而 Ca²⁺、Mg²⁺和 Cl⁻的浓度普遍较低[13], 仅在少数水样中 Cl⁻ 的浓度较高。

图 2a 的数据显示, 所有水样均位于分区 2, 这表明水化学特性是碱金属离子含量多于碱土金属离子; 大多数水样的水化学特性是强酸根含量多于弱酸根, 只有少数水样的水化学特性是弱酸根含量多于强酸根; 图 2c 中大部分水样位于分区 7, 表明这些水样的水化学特性是非碳酸盐碱硬度超过 50%, 因此这些水样主要由碱金属离子、强酸组成, 极少数水样位于分区 8, 表明这些水样的水化学特性是碳酸盐碱硬度超过 50%, 因此这些水样主要由碱土金属离子、弱酸组成。

3.2. 水岩作用

吉布斯图能够揭示控制水化学过程的关键因素, 进而研究水化学组成与气候或地质特征之间的相互作用; 在吉布斯图中, 控制水化学过程的机制被划分为三个主要区域: 蒸发浓缩、岩石风化和大气降水[17]。研究区域水样的吉布斯图分析如图 3 所示。图 3a 通过 TDS 含量与 Na⁺/(Na⁺ + Ca²⁺)比例的关系表明, 研究区域水样的 TDS 值范围为 1000 至 10,000, Na⁺/(Na⁺ + Ca²⁺)比例虽有波动, 但主要集中在蒸发浓缩区域, 仅少数样本位于岩石风化区域。图 3b 则从 TDS 与 Cl⁻/(Cl⁻ + HCO₃⁻)比例均小于 0.5 的视角出

发,随着 TDS 值的升高, $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比例呈现上升趋势,从岩石风化区域向蒸发浓缩区域过渡。这揭示了研究区域地下水化学组成主要受蒸发浓缩等水岩相互作用过程的主导,岩石风化作用的影响相对较小,且几乎不受大气降水的显著影响。

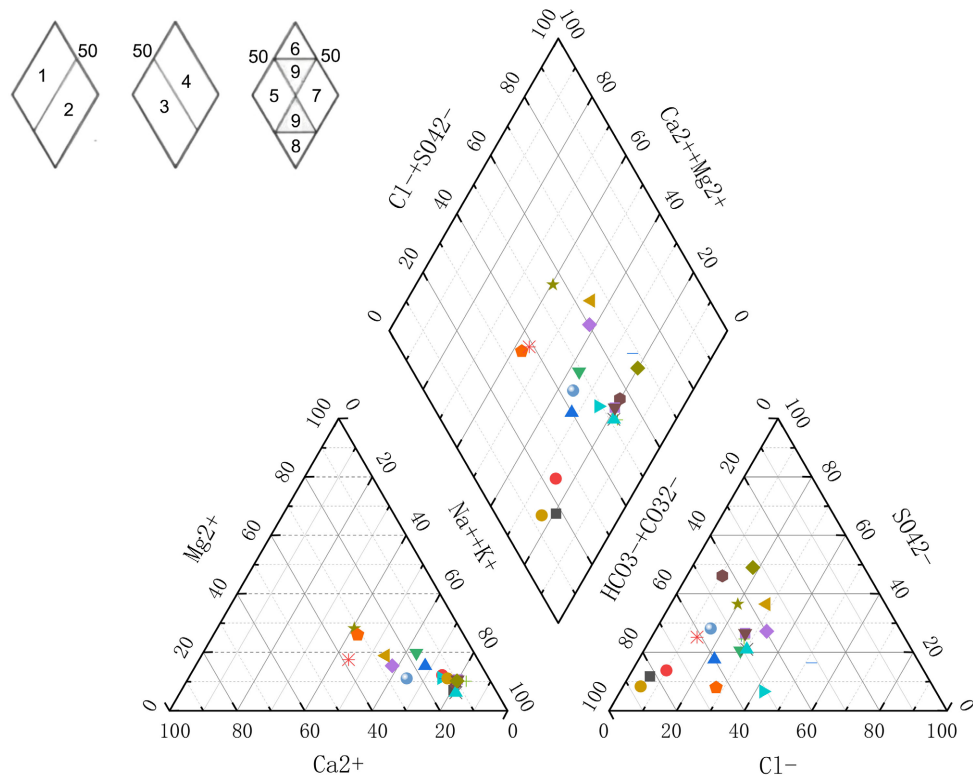


Figure 2. Piper diagram of a sandstone fissure water sample
图 2. 元素的空间分布特征

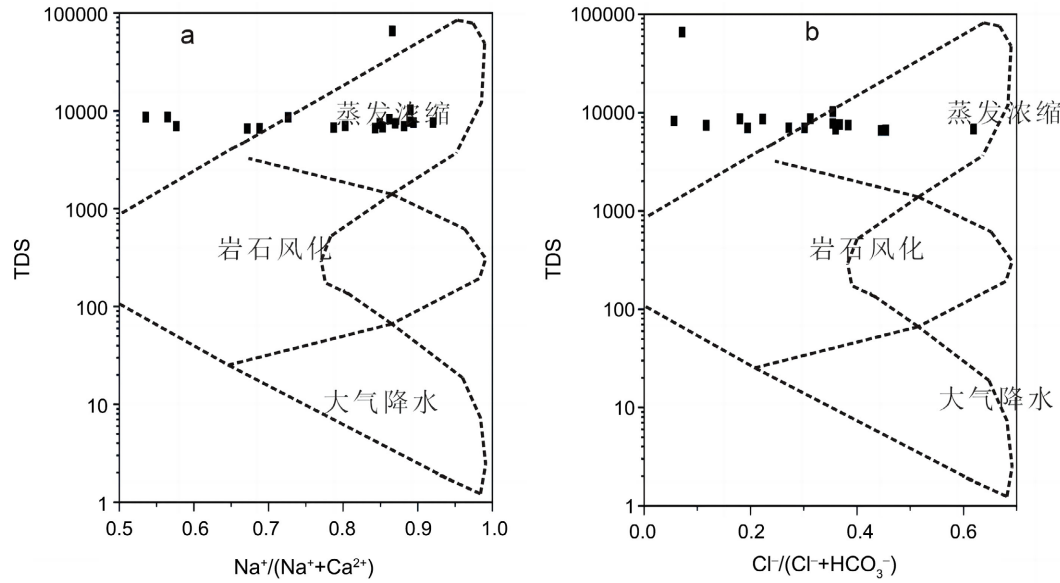


Figure 3. Gibbs plot of the study area
图 3. 研究区 Gibbs 图

3.3. 离子比值分析

分析地下水中的离子含量比值,有助于探究其化学构成及水文地球化学的相关问题。具体比值图示见图4。

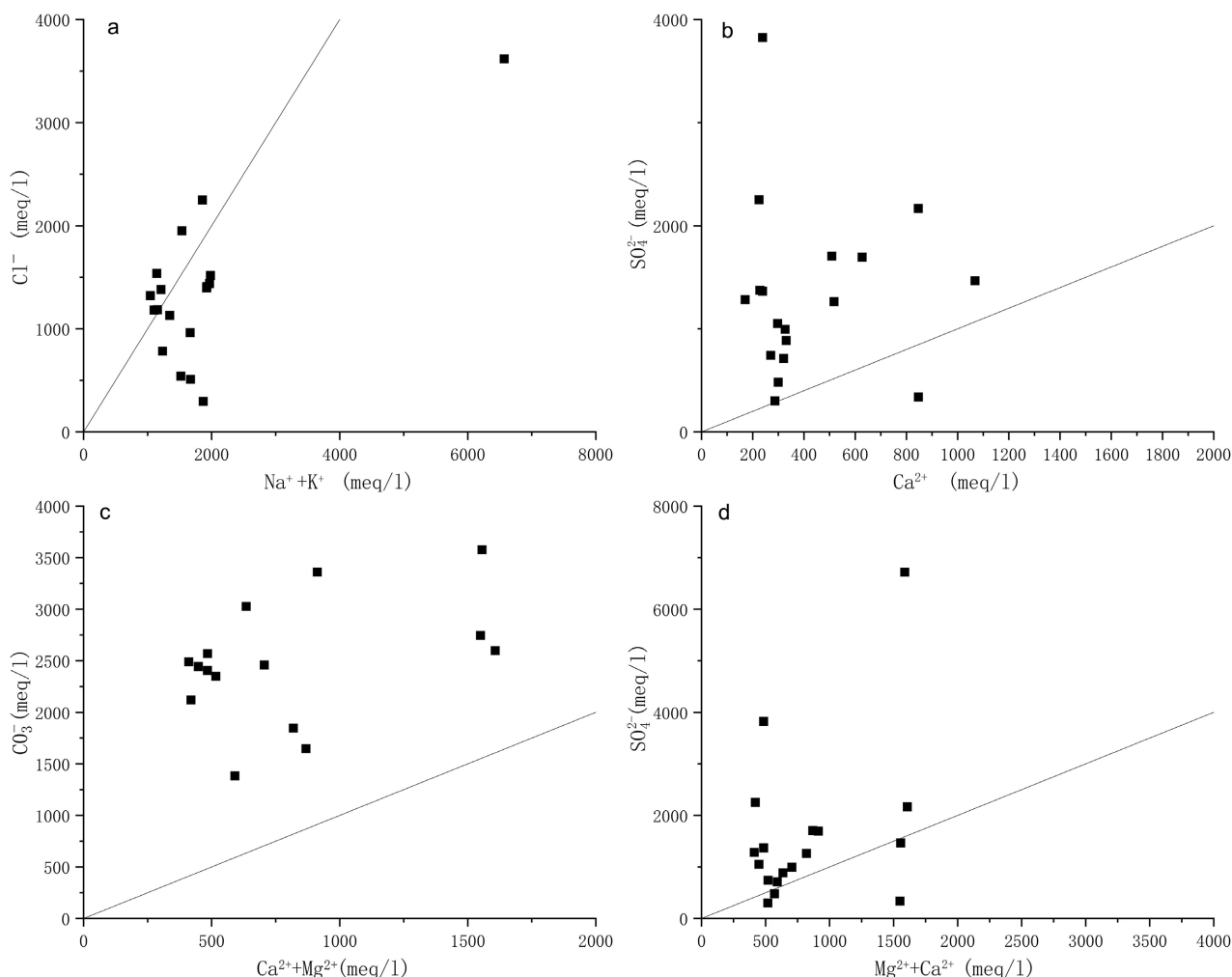


Figure 4. Ion ratio results in water samples

图4. 水样中离子比值结果

岩盐溶解导致的 Na^+/Cl^- 比值为 1, 表明地下水化学成分主要由岩盐风化和溶解作用形成; 若比值超过 1, 则暗示 Na^+ 可能有其他来源, 例如其他钠盐的溶解。

图4a显示, 松散层水样中 Na^+/Cl^- 的比值均低于 1, 这表明 Na^+ 不仅来自岩盐溶解, 还可能源自其他途径, 比如硅酸盐的溶解, 或者松散层水中发生了阳离子交替吸附现象, 导致 Na^+ 含量高于 Cl^- [9]。

若地下水中 $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ 比值为 1, 则表明 Ca^{2+} 主要源自碳酸盐和硫酸盐的溶解[9]。图4b中松散层水样的 $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ 比值在 1 附近波动, 表明 Ca^{2+} 相对于 SO_4^{2-} 含量较低, 这可能由多种因素造成: 松散层水中 Mg^{2+} 来源有限, 地层中 S2-氧化导致 SO_4^{2-} 含量增加, 以及煤系中硅酸盐矿物风化导致 SO_4^{2-} 含量上升。

若地下水 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^-)$ 比值为 1, 则说明水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来自碳酸盐的溶解[9]。本次研究的水样显示, 图4c中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量远低于 HCO_3^- 含量, 这进一步证实了含水层中硅酸盐风化的贡献[9]。

硫酸盐矿物的溶解是地下水中离子的一个重要来源,因此, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{SO}_4^{2-}$ 比值常用于研究 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 的来源。图 4d 显示, 水样大多位于 $(\text{Mg}^{2+})/\text{SO}_4^{2-} = 1$ 的基准线上方, 表明水样中 SO_4^{2-} 的主要来源不仅包括硫酸盐的溶解, 还有其他来源。

综合离子比值分析, 松散层水中的离子主要源自碳酸盐和硫酸盐的溶解, 以及硅酸盐的风化。

4. 结论

本研究选取许疃煤矿松散层水的 19 个地下水样本作为研究对象, 运用数理统计、水化学类型分析以及传统图解等方法, 对研究区域地下水的化学特性及其演变趋势进行了深入探讨, 最终得出了三项主要结论。

(1) 在研究区域中, 松散层水表现为弱酸性, 地下水分类为淡水。在常规成分中, 阳离子主要由 Na^+ 和 K^+ 构成, 而阴离子则以 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 为主。

(2) 通过派珀三线图分析可知, 研究区域的主要水化学类型为 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{Na} + \text{K}$ 型。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 的浓度总体偏低, 但也有少数水样的 Cl^- 浓度较高。

(3) 利用 Gibbs 图和离子比值分析法的研究结果显示, 研究区域松散层水的成分主要受到蒸发浓缩作用的影响, 而离子来源不仅限于岩盐溶解, 还可能有其他来源。

基金项目

宿州学院大学生创新创业训练计划项目(ZCXM24-235), 项目名称“许疃地区浅层地下水水文地球化学特征”, 安徽省教育厅科研项目(2023AH052224), 宿州学院校级传统专业改造升级(szxy2022ctzy01), 安徽省高校理工科教师赴企业挂职实践计划(2024jsqygz117), 宿州学院校企合作实践教育基地(szxy2023xxhz01)。2024 年宿州学院国家级大学生创新创业训练项目(202410379064S), 项目名称: 宿州众源地质技术服务有限公司; 2024 年宿州学院资助安徽省大学生创业实践项目(S202410379176S), 项目名称: 宿州众源地质技术服务有限公司。

参考文献

- [1] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5428-5439.
- [2] 王晓曦, 王文科, 王周锋, 等. 滦河下游河水及沿岸地下水水化学特征及其形成作用[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 25-33, 73.
- [3] 章光新, 邓伟, 何岩, 等. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 20-28.
- [4] 韩佳明, 高举, 杜坤, 等. 煤矿地下水库水体水化学特征及其成因解析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 223-231.
- [5] 陈陆望, 许冬清, 殷晓曦, 等. 华北隐伏型煤矿区地下水化学及其控制因素分析——以宿县矿区主要突水含水层为例[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 996-1004.
- [6] 洪涛, 谢运球, 喻崎雯, 等. 乌蒙山重点地区地下水水化学特征及成因分析[J]. 地球与环境, 2016, 44(1): 11-18.
- [7] 吴春勇, 苏小四, 郭金淼, 等. 鄂尔多斯沙漠高原白垩系地下水水化学演化的多元统计分析[J]. 世界地质, 2011, 30(2): 244-253.
- [8] 寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3142-3149.
- [9] 陈凯, 刘启蒙, 刘瑜, 等. 钱营孜煤矿深部地下水水化学特征及来源解析[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 99-106.
- [10] 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.
- [11] 绿色矿山建设规划下载_Word 模板[EB/OL]. <https://www.taodocs.com>, 2023-09-15.

-
- [12] 檀海洋, 黄凯, 陈孝杨, 等. 煤矿充填开采塌陷区地表土壤理化性质时空演变特征[J]. 江苏农业科学, 2014(10): 320-322, 323.
- [13] 冯琪, 马雷, 罗江发, 等. 顾桥矿二叠系砂岩裂隙水化学特征及其形成作用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(12): 1693-1698.
- [14] Désilets, P. and Houle, G. (2005) Effects of Resource Availability and Heterogeneity on the Slope of the Species-Area Curve along a Floodplain-Upland Gradient. *Journal of Vegetation Science*, **16**, 487-496.
<https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02389.x>
- [15] Cheng, Z.L., Zhao, Z.H. and Li, C.X. (2014) Prediction of the Location of the Sources of Mine Water Influx Based on Cluster Analyses of the Chemical Characteristics of Water. *Advanced Materials Research*, **962**, 328-333.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.962-965.328>
- [16] 黄俊杰. 隆德煤矿水化学特征及煤层开采对地下水的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- [17] 张景涛, 史浙明, 王广才, 等. 柴达木盆地大柴旦地区地下水水化学特征及演化规律[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 194-205.