

浅层地下水水化学特征及离子来源分析

——以宿州市新濉河部分河段区域为例

张惜梦¹, 马杰^{1*}, 沈孝珂¹, 汪定圣², 王新建³, 代涛³, 周洁¹, 高懿凡¹

¹宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

²安徽省地质环境监测总站(安徽省地质灾害应急技术指导中心), 安徽 宿州

³安徽省煤田地质局水文勘探队, 安徽 宿州

收稿日期: 2024年1月7日; 录用日期: 2024年3月21日; 发布日期: 2024年3月31日

摘要

本文以安徽宿州埇桥区新濉河部分河段周边的20组浅层地下水样为研究对象, 综合采用了描述性统计、Piper图法、Gibbs图法、相关性分析和主成分分析等方法, 对该研究区内的浅层地下水水化学特征进行分析。研究表明: 地下水水化学类型以 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 型和 $\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 型为主; 地下水化学成分大部分受岩石风化作用影响, 少数受蒸发作用影响; 水岩作用与碳酸盐岩、硫酸盐岩、硅酸盐岩和岩盐的风化溶解作用有关。此外, 人类活动也影响研究区浅层地下水水化学组分及特征。

关键词

新濉河, 浅层地下水, 水化学特征, 离子来源

Hydrochemical Features and Ion Source of Shallow Aquifer

—A Case Study of Certain Part of New Sui River, Suzhou City

Ximeng Zhang¹, Jie Ma^{1*}, Xiaoke Shen¹, Dingsheng Wang², Xinjian Wang³, Tao Dai³, Jie Zhou¹, Yifan Gao¹

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

²Anhui Institute of Geological Environment Monitoring (Geological Disaster Emergency Technical Guidance Center of Anhui Province), Suzhou Anhui

³Hydrogeological Exploration Team of Anhui Coalfield Geology Bureau, Suzhou Anhui

Received: Jan. 7th, 2024; accepted: Mar. 21st, 2024; published: Mar. 31st, 2024

*通讯作者。

文章引用: 张惜梦, 马杰, 沈孝珂, 汪定圣, 王新建, 代涛, 周洁, 高懿凡. 浅层地下水水化学特征及离子来源分析[J]. 自然科学, 2024, 12(2): 405-411. DOI: 10.12677/ojns.2024.122047

Abstract

This study focused on 20 shallow groundwater samples of certain part of New Sui River, Suzhou City, and we conducted descriptive statistics, Piper plot, Gibbs plot, correlation analysis, and principal component analysis to analyze the hydrochemical characteristics. The results showed that the water types of shallow groundwater contained $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) and $\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$). The components of shallow groundwater were influenced by the rock weathering and a slight certain effect of evaporation. The water-rock interactions concluded the weathering and dissolution of carbonate rocks, sulfate rocks, silicate rocks, and rock salts. Additionally, human activities also affected the hydrochemical compositions and characteristics of shallow groundwater in the study area.

Keywords

New Sui River, Shallow Aquifer, Hydrochemical Features, Ion Source

Copyright © 2024 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

地下水是最主要的资源之一，同时也是维持地球生态系统正常运行的重要基础条件[1]。地下水物理化学特性与成因是水文地质学的主要研究内容，通过对地下水水化学的空间演变特性和时间演化规律的深入研究，能够更有效地阐述地下水和自然环境之间的相互作用机制[2] [3] [4] [5]。了解地下水的化学特征及其形成作用，能更有效地分析地下水的起源与形成[6]。同时，地下水水质的优劣又直接关系到地区内人民的生命安全和身体健康问题[7]。地下水水化学过程受各种因子的影响和制约，不但受自然因子影响，还与人类社会活动有关，同时也与周边的自然条件产生了复杂的水文地球化学影响[8] [9] [10]。

目前，关于地下水化学特征的相关研究已有较多，孙从建等[11]、赵楠芳等[12]综合运用描述性统计、Piper 三线图、Gibbs 图及离子比例系数等方法对地下水水化学特征进行了分析，说明了地下水化学组分的质量浓度变化，解释了地下水水化学特征形成的原因。针对皖北地区的研究，其中孟祥嵩等[13]以宿州市城区河流沱河为研究对象对水质现状进行评价，闵宁等[14]对宿州市浅层地下水的水化学特征及成因进行研究，结果表明宿州市城区地下水化学成分主要受碳酸盐、硅酸盐风化作用的影响。而针对皖北地区区域浅层地下水的水化学特征及离子来源分析较少。基于以上研究成果，本研究选取皖北地区传统的农业乡镇 - 宿州市埇桥区新濉河部分河段区域为研究区，对该区域的浅层地下水进行采样，运用了描述性统计法对研究区地下水中的主要阴阳离子进行分析；利用了 Piper 三线图法对研究区地下水的水化学类型进行分析；采用了 Gibbs 图法分析研究区地下水化学组分的影响因素；采用了离子相关性分析和主成分分析法对研究区地下水的离子来源进行分析。研究结果对本河段周边浅层地下水水资源管理和质量现状评价提供了基础水文地球化学资料。

2. 材料及方法

2.1. 研究区概况

埇桥区隶属于安徽省宿州市，该区位于安徽省北部，与苏鲁豫三省接壤，总面积约 2907 平方千米。

研究地理坐标为东经 116°58'30"~116°59'23", 北纬 33°38'08"~33°45'08", 地貌特征是北高南低, 由西北向东南递减倾斜。其气候条件为典型的暖温带半湿润气候, 总体的水资源时空分布不均匀, 降雨主要集中在每年的 6 月至 9 月之间。

2.2. 样品采集及测定

本研究对新濉河区域共采集 20 个水样, 采样时间为 2021 年 11 月 10 日。取样前, 用拟取样的浅层地下水(埋深为 10 米~80 米)冲洗聚乙烯玻璃瓶(550 ml) 3~5 分钟, 随后再收集水样至满瓶后密封, 每一个取样点取水样两瓶。取样方法依据 HT 164-2020《地下水环境监测技术规范》, 在现场采用便携式检测仪, 对 pH、TDS、EC 等参数进行检测。试样运送至实验室后, 先用 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤后, 在 0~4 $^{\circ}\text{C}$ 的低温下储存, 随后进行常规离子(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等)的测试工作, 测试均在安徽省煤矿勘探工程技术中心完成。

2.3. 研究方法

利用分析统计软件 SPSS.26 对地下水水化学成分进行描述性统计分析、离子相关性分析和主成分分析; 利用 Origin 2021 软件绘制 Piper 三线图和 Gibbs 图。

3. 结果与分析

3.1. 水化学组分

研究区水样测试结果如表 1 所示, 水样中 pH 的范围为 7.60~8.73, 平均值为 7.96, 说明研究区水样呈弱碱性, 其中 pH 的变异系数最小, 为 0.03, 表明 pH 值在空间上的分布均衡, 对空间变化影响较小。TDS 的含量介于 133.00~1453.00 mg/L 之间, 平均值为 739.70 mg/L, 研究区地下水主要是淡水。EC 在 296.00~1754.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间, 平均值为 1210.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。阳离子质量浓度平均值由大到小依次为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$; 阴离子质量浓度平均值由大到小依次为 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$, 阳离子 Ca^{2+} 含量最高, 阴离子 HCO_3^- 含量最高。由表 1 知, K^+ 的变异系数大于 1, 表示它的离散性很好; Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的变异系数达到 0.6 以上, 表示其中的离散程度很高, 说明这些离子浓度在地下水中处于不平衡的状态, 受到一定程度的人类活动干扰。

Table 1. Descriptive statistics of the hydrochemical composition of the shallow groundwater in the study area

表 1. 研究区浅层地下水水化学成分描述性统计

项目	最小	最大值	平均值	标准差	变异系数%
Na^+ (mg/L)	0.00	246.90	58.50	51.48	0.88
K^+ (mg/L)	0.00	9.57	1.24	2.00	1.61
Ca^{2+} (mg/L)	0.00	273.48	112.62	68.21	0.61
Mg^{2+} (mg/L)	0.00	58.92	35.87	15.20	0.42
Cl^- (mg/L)	0.00	521.64	166.57	137.43	0.83
SO_4^{2-} (mg/L)	0.00	336.34	86.48	81.45	0.94
HCO_3^- (mg/L)	187.93	523.93	318.30	87.86	0.28
TDS (mg/L)	133.00	1453.00	739.70	398.34	0.54
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	296.00	1754.00	1210.30	348.97	0.29
pH	7.60	8.73	7.96	0.26	0.03

3.2. 水化学类型及特征

Piper 三线图常用于判定水化学及其水岩相互作用类型。由图 1 可知, 阳离子三角形中, 水样基本分布于 1 区和 2 区, 水化学类型属于钙类型和混合型; 阴离子三角形中, 水样位于 5 区、6 区和 7 区, 水化学类型属于碳酸氢盐型、氯类型及混合型; 且阳离子多偏向 Ca^{2+} 端元, 阴离子多偏向于 HCO_3^- 端元, 说明地下水受碳酸盐岩风化影响较大, 其中 5 区表示碳酸盐硬度超过 50%, 即钙、镁的碳酸盐的含量超过 50%, 说明该水样中的主要阳离子为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 主要阴离子为 HCO_3^- 和 Cl^- 。由以上结论可推断, 本研究区地下水水化学类型以 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)型和 $\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)型为主。

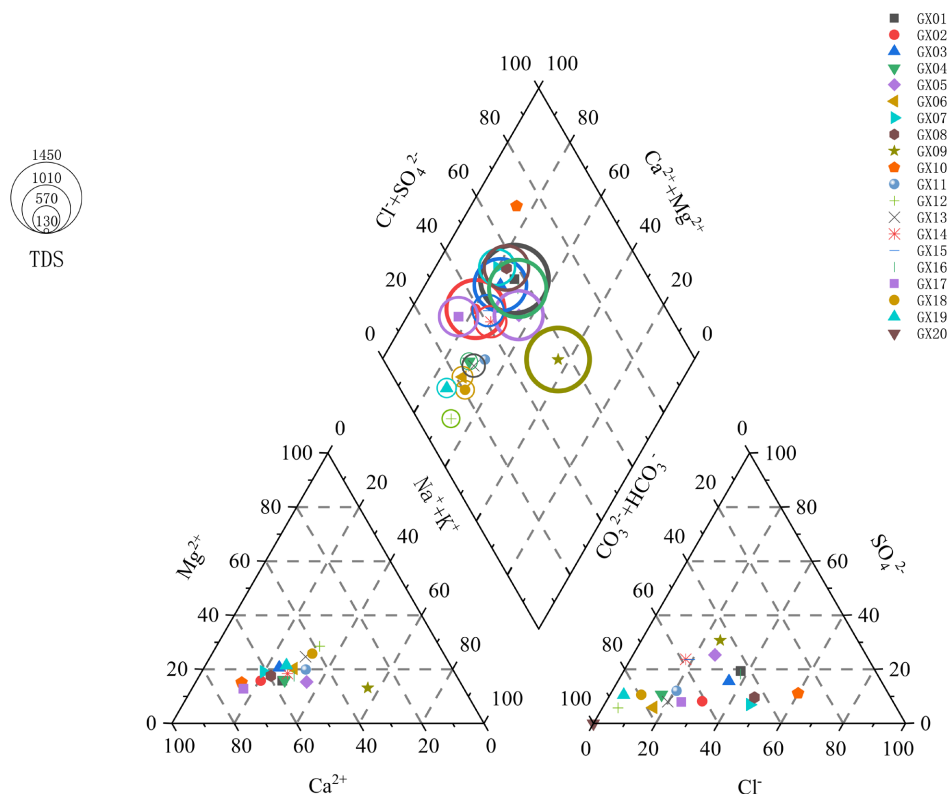


Figure 1. Piper three-line plot of shallow groundwater hydro chemistry in the study area
图 1. 研究区浅层地下水水化学 Piper 三线图

经过对自然界中水体水化学组成的分析, Gibbs 把对自然界饮用水质组成的主要影响因子分成了三种类型: 大气降水控制型、岩石风化控制型以及蒸发 - 结晶控制型[15] [16]。蒸发浓缩所控制的区域代表性的水化学特性主要表现在: 高 TDS 值和高 Na^+ 、 Cl^- 的含量; 降雨控制的地区代表性的水化学特征表现为: 低 TDS 和低 Na^+ 、 Cl^- 含量; 而岩石风化的地区代表性的水化学特征表现为: TDS 低于 100~1000 mg/L, 但 Na^+ 、 Cl^- 的浓度却处于前两者之间[1]。

从 Gibbs 图分析可得(图 2), 研究区水样 TDS 范围为 133~1453 mg/L, $\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的比值为 0.20~0.50, 主要落在以岩石风化作用为主导类型的区域内, 极少部分落在蒸发浓缩区域, 表明该研究区地下水的水化学组分主要受岩石风化作用控制, 极少部分受蒸发浓缩控制。 $\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的比值约 0.00~0.60, 阴离子点位基本分布在 Gibbs 图的岩石风化区域内, 极少数阴离子点位落在 Gibbs 图外, 说明水化学离子特征受到外界人为活动的影响。综上所述, 岩石风化作用是研究区域地下水水化学组分最主要的影响因子。

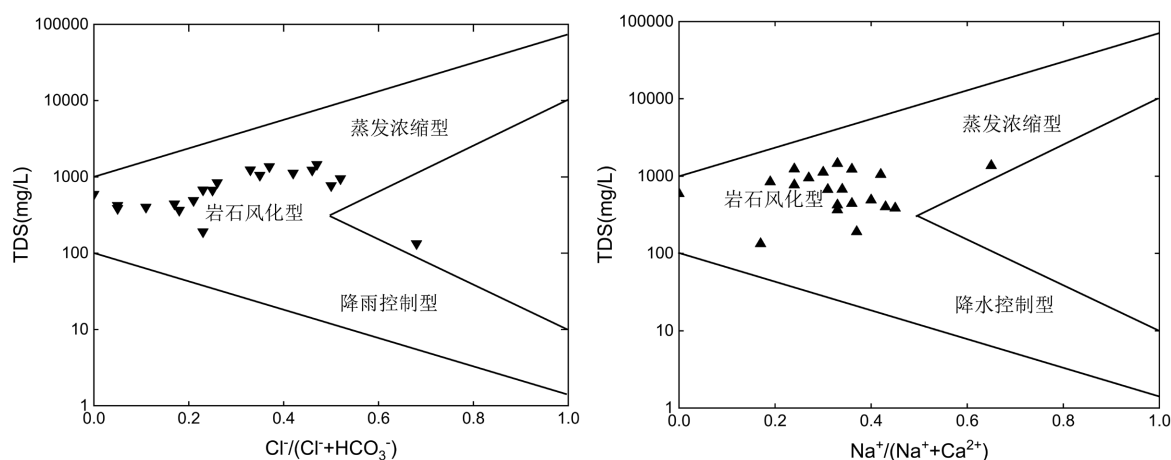


Figure 2. Gibbs diagram of the shallow groundwater in the study area

图 2. 研究区浅层地下水 Gibbs 图

3.3. 离子相关性分析

离子相关性分析可以反映地下水水化学成分的相似、相异性和来源的一致性与差异性。本研究使用 SPSS 软件对研究区地下水样数据进行相关性分析，从而得出地下水中各主要阴阳离子之间的相关系数。由表 2 可知，阳离子中，TDS 与 Na^+ 相关性较强，相关系数为 0.589；阴离子中，TDS 与 SO_4^{2-} 相关关系较强，其中 TDS 与 SO_4^{2-} 相关性最强 ($R = 0.618, P < 0.01$)，说明 SO_4^{2-} 是研究区水样中 TDS 的主要贡献者。 Na^+ 与 SO_4^{2-} 相关性极强，相关系数大于 0.9， Na^+ 与 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 相关性较强， Mg^{2+} 与 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 相关性较强，相关系数大于 0.7， Ca^{2+} 与 Cl^- 相关性极强 ($R = 0.912, P < 0.01$)。由以上结果可推断，方解石、灰岩等碳酸盐矿物、硫酸盐矿物、硅酸盐矿物以及岩盐的风化溶滤是该研究区地下水的主要离子来源。

Table 2. Routine ion correlation analysis in shallow groundwater in the study area

表 2. 研究区浅层地下水常规离子相关性分析

参数	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	TDS
Na^+	1.000							
K^+	0.001	1.000						
Mg^{2+}	0.695**	0.138	1.000					
Ca^{2+}	0.413	-0.016	0.856**	1.000				
Cl^-	0.487*	-0.035	0.873**	0.912**	1.000			
SO_4^{2-}	0.945**	-0.035	0.729**	0.468*	0.502*	1.000		
HCO_3^-	0.600**	0.183	0.429	0.463*	0.282	0.579**	1.000	
TDS	0.589**	-0.246	0.500*	0.370	0.401	0.618**	0.528*	1.000

3.5. 主成分分析

主成分分析能够较好地解析出控制水文地球化学作用的主控因素。按照特征值大于 1，选择研究区域水样常规指标进行主成分分析，研究区共识别出 3 个主成分因子，其累计方差贡献率达到 90.201%，总解释率较高。由表 3 可知，第一主成分因子方差贡献率为 58.835%， Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 因子载荷极高， HCO_3^- 因子载荷比较高，其中 Mg^{2+} 因子载荷最高，说明第一主成分因子可能受碳酸盐岩、

硫酸盐岩和岩盐风化作用的影响；第二主成分因子方差贡献率为 16.629%，因子载荷较大的为 K^+ 和 HCO_3^- ，说明第二主成分因子可能受硅酸盐岩和碳酸盐岩风化作用的影响；第三主成分因子贡献率为 14.734%， K^+ 的因子载荷最大，说明第三主成分因子可能受人类活动影响[17]。综上所述，研究区地下水的化学成分主要与碳酸盐岩、硫酸盐岩、硅酸盐岩和岩盐的风化溶解，以及人类活动等自然及人为因素有关。

Table 3. Analysis of conventional ions in shallow groundwater in the study area

表 3. 研究区浅层地下水常规离子主成分分析

成分	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
1	0.833	0.057	0.939	0.836	0.833	0.851	0.65
2	0.367	0.492	-0.17	-0.426	-0.485	0.308	0.497
3	-0.315	0.848	0.166	0.224	0.171	-0.326	0.011

4. 结论

1) 新濉河研究区域地下水为淡水，整体呈现弱碱性，阳离子质量浓度平均值由大到小为 $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$ ，其中 Ca^{2+} 为相对优势离子；阴离子质量浓度平均值由大到小为 $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$ ，其中 HCO_3^- 为相对优势离子。

2) 研究区地下水化学类型以 $HCO_3^- - Ca^{2+} (Ca^{2+} + Mg^{2+})$ 型和 $HCO_3^- + Cl^- - Ca^{2+} (Ca^{2+} + Mg^{2+})$ 型为主。根据 Gibbs 图可知，阴阳离子点位大部分落在以岩石风化作用为主体类型的研究范围内，极小部分落在蒸发浓缩区，表明研究区内地下水中的物理化学因素大部分受岩石风化作用的制约，极小部分受蒸发浓缩的制约。

3) 根据离子相关性分析和主成分分析，说明研究区地下水的化学成分主要与碳酸盐岩、硫酸盐岩、硅酸盐岩和岩盐的风化溶解作用，以及人类活动等自然及人为因素有关。

基金项目

宿州学院大学生创新创业训练计划项目，YBXM23-022；宿州学院课程思政建设研究项目，szxy2021ksjy031。

参考文献

- [1] 程敏, 姜纪沂, 任杰, 赵振宏. 察布查尔县地区地下水水化学特征及地下水水质评价[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 527-534.
- [2] 章光新, 邓伟, 何岩, Ramsis Salama. 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.
- [3] 赵振华, 袁革新, 吴吉春, 陈剑杰. 西北某放射性废物处置预选区地下水水化学特征及地球化学模拟[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 1-7.
- [4] 王文祥, 王瑞久, 李文鹏, 殷秀兰, 刘成林. 塔里木盆地河水氢氧同位素与水化学特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 29-35.
- [5] Adams, S., Titus, R., Pietersen, K., et al. (2001) Hydrochemical Characteristics of Aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa. *Journal of Hydrology*, **241**, 91-103. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00370-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00370-X)
- [6] 王新峰. 水文地质学基础[M]. 第六版. 北京: 地质出版社, 2011.
- [7] 安红梅, 邓利君, 赵矿, 朱桂丽. 西藏地下水水化学特征及水质评价[J]. 水利规划与设计, 2018(8): 45-47, 56.
- [8] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 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.
- [9] 左禹政, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 贵州省都柳江流域水化学特征研究[J]. 中国环境学, 2017, 37(7): 2684-2690.

-
- [10] 孙平安, 于爽, 莫付珍, 等. 不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 123-131.
- [11] 孙从建, 陈若霞, 张子宇, 李伟, 陈伟. 山西浅层地下水水化学特性时空变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 314-324.
- [12] 赵楠芳, 鄢笑宇, 李青, 付莎莎, 储小东. 鄱阳湖环湖区浅层地下水化学特征及形成机制[J]. 人民长江, 2021, 52(1): 44-48.
- [13] 孟祥嵩, 李致春, 桂和荣, 余浩, 江雅琪, 余铭明, 李前伟, 成开峰. 煤炭型城市城区河流水质现状评价与分析——以宿州市沱河为例[J]. 绿色科技, 2020(8): 57-61+67.
- [14] 闵宁, 任瑾, 林曼利. 淮北平原区城市浅层地下水化学特征及成因分析——以宿州市为例[J]. 九江学院学报(自然科学版), 2018, 33(1): 14-17.
- [15] Gibbs, J.R. (1970) Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science*, **170**, 1088-1090.
<https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>
- [16] 沈照理. 水文地球化学基础(三) [J]. 水文地质工程地质, 1983(5): 59-65.
- [17] 赵艳丽, 王敏, 李常锁. 山东省淄河流域地下水化学污染源解析[J]. 人民长江, 2022, 53(12): 37-43+49.