

南通市通州区松散孔隙含水层地下水化学特征演化规律

董立康弘¹, 李 兆¹, 张建忙²

(1. 河海大学地球科学与工程学院; 2. 江苏省环境地质调查大队)

摘要:为探究南通市通州区松散孔隙含水层地下水化学特征的演化规律,综合运用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 图及离子比值分析等方法,分析了通州区 2016—2023 年主要含水层地下水化学特征及主要离子成分的时空演化规律。研究结果表明:地下水整体呈弱碱性;第Ⅰ承压含水层水化学类型在 2016—2023 年间未发生显著变化,第Ⅲ承压含水层水化学类型则由 HCO₃-Na 型逐步转变为 Cl-Na 型;潜水含水层与第Ⅲ承压含水层主要受水岩作用影响,第Ⅰ承压含水层则受海水入侵、地层盐分溶滤及蒸发浓缩作用控制,呈现高矿化度咸水特征;地下水总溶解固体含量与 Cl⁻ 质量浓度高度相关,说明 Cl⁻ 是影响地下水总溶解固体的主要离子;在地下水位恢复过程中,第Ⅰ承压含水层水岩作用较强,促使土壤中 Cl⁻ 释放至地下水中,加剧了该含水层的咸化程度,同时,上覆含水层咸化水体通过越流补给第Ⅲ承压含水层,导致该含水层亦呈现轻微咸化趋势。

关键词:地下水;化学特征;离子来源;通州区

Evolution law of groundwater chemical characteristics in the loose porous aquifer of Tongzhou District, Nantong City//Dong Likanghong¹, Li Zhao¹, Zhang Jianmang² (1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University; 2. Jiangsu Provincial Environmental Geological Survey Brigade)

Abstract: To explore the evolution law of the groundwater chemical characteristics in the loose porous aquifer of Tongzhou District, Nantong City, a comprehensive analysis was conducted on the groundwater chemical characteristics and the spatio-temporal evolution of the main ion components in Tongzhou District from 2016 to 2023 by using mathematical statistics, Piper trilinear diagram, Gibbs diagram and ion ratio methods. Research results show that the groundwater is generally weakly alkaline. The water chemical type of the first confined aquifer did not change significantly from 2016 to 2023, while that of the third confined aquifer gradually changed from HCO₃-Na type to Cl-Na type. The phreatic aquifer and the third confined aquifer are mainly affected by water-rock interaction, while the first confined aquifer is controlled by seawater intrusion, dissolution of stratum salts and evaporation concentration, presenting the characteristics of high salinity brackish water. Total dissolved solids content of groundwater is highly correlated with Cl⁻ mass concentration, indicating that Cl⁻ is the main ion affecting total dissolved solids in groundwater. During the process of groundwater level recovery, water-rock interaction in the first confined aquifer is strong, promoting the release of Cl⁻ from the soil into the groundwater, which aggravates the salinization of this aquifer. Meanwhile, the brackish water from the upper aquifer seeps through and replenishes the third confined aquifer, leading to a light salinization trend in this aquifer as well.

Key words: groundwater; chemical characteristics; ion source; Tongzhou District

随着工业化与城市化的快速发展,人类活动对地下水系统的影响日益显著,地下水开采及其引发的地下水化学特征变化引起了广泛关注^[1]。地下水化学特征变化不仅直接关乎地下水水质状况和可利用性,还可能对生态环境造成潜在威胁^[2-3]。因

此,深入研究地下水化学特征的演化规律,对于揭示地下水系统的影响机制、保障水资源的可持续利用及维护水环境安全具有重要意义。

当前研究地下水化学特征演化过程的主要方法包括统计分析法(如聚类分析、因子分析和主成分

基金项目:国家自然科学基金项目(42302270);江苏省自然科学基金项目(BK20220994);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B250201061)

作者简介:董立康弘(1997—),女,博士研究生,主要从事水文地质研究。E-mail:donglikanghong68@163.com

通信作者:李兆(1990—),男,副教授,博士,主要从事水文地质研究。E-mail:liz1990@hhu.edu.cn

分析等)、水文地质调查法以及水文地球化学模拟法等。这些方法为揭示地下水化学特征的成因机制与演化规律提供了重要手段。邓晓颖等^[4]运用统计分析法对河南省沿黄地区地下水化学特征进行系统分析,结果表明,研究区地下水化学组成主要受水岩作用和蒸发浓缩作用的影响;谢浩等^[5]结合层次聚类分析和 Gibbs 模型等方法,从水岩作用和人类活动影响的角度揭示了岩溶地下水化学成因机制,发现人类活动对地下水化学特征的影响较为显著;朱珂冰等^[6]综合运用相关性分析、Piper 图、Gibbs 图和离子比值分析方法,深入研究了紫阳县地下水化学特征及其控制因素,发现碳酸盐岩风化溶解、阳离子吸附和人类活动是该地区地下水化学特征的主要控制因素;Shang 等^[7]通过水文地球化学与水文地质模拟方法,预测华北平原沿海地区浅层咸水将进一步影响深层含水层地下水质量。

南通市通州区第四纪松散孔隙含水层水资源丰富,其东部与黄海相邻,地下水系统易受海水入侵的影响^[8-9]。1960 年,南通大部分地区地下水水质良好,仅沿海地区矿化度较高;1992 年,地下水化学类型主要为 Na·Ca-HCO₃ 型或 Na-HCO₃·Cl 型;1990—1997 年,地下水咸化加剧,水化学类型一般为 Na-Cl 型;2010 年,随着地下水开采量的持续减少,地下水水质逐渐向良好态势转化。尽管已有较多关于南通市地下水化学特征的研究^[10-14],但针对南通市通州区松散孔隙含水层地下水化学特征时空演化规律分析的系统性研究仍较为薄弱,尤其在不同时段、不同空间尺度下,地下水中各类化学成分的变化趋势、影响因素及其驱动机制尚未得到充分阐明。基于此,本文选取 2016—2023 年南通市通州区松散孔隙含水层为研究对象,综合运用水化学分析和时空演化法,系统分析地下水水质变化趋势及其主要影响因素。

1 研究区概况

南通市通州区(31°52′N~32°15′N,120°38′E~121°15′E)地处江苏省东南部、长江入海口北岸,东临黄海,南濒长江,面积为 1 172 km²;属于北亚热带季风气候,气候温和,四季分明^[15];多年平均气温 15.1℃,年均降水量 1 084 mm,年均蒸发量 857 mm。通州区地势平坦,整体呈现西北向东南轻微倾斜趋势,平原辽阔、水网密布是其显著的地貌特征。

近年来,通州区处于经济高速增长阶段,区域人口规模迅速扩张、工业化进程加快,导致地下水开采量大幅增加。受沿海特殊地理环境的影响,该区域为海水入侵易发区,极易引发地下水水质咸化问题,对环

境的可持续发展及居民生活用水安全构成严峻挑战。

通州区地下水主要为松散岩类孔隙水,含水层自上而下划分为 5 个含水层组:潜水含水层组、第Ⅰ承压含水层组、第Ⅱ承压含水层组、第Ⅲ承压含水层组与第Ⅳ承压含水层组^[16-17]。其中,潜水含水层组下部多为亚黏土或亚砂土层,具有一定的隔水性;第Ⅰ承压含水层组岩性以灰色、深灰色粉细砂为主,含砾中粗砂和砂砾层,局部夹有灰褐色亚黏土薄层,底板由灰黄、棕黄色粉质黏土,黏土及淤质土构成隔水层;第Ⅱ承压含水层组岩性为粉砂、粉细砂、中粗砂及砂砾层。部分区域第Ⅰ、Ⅱ承压含水层间的隔水层缺失,直接发生水力联系。根据历史资料,第Ⅱ承压含水层水质复杂,矿化度自西向东逐渐增高,演变为半咸水和咸水,水质较差,且与第Ⅰ承压含水层水质极为相似。第Ⅲ承压含水层组岩性为灰色中细砂、中粗砂,顶、底部泥质成分较多,局部为泥砾、砂卵石层,砾石多为细砾,分布广泛、富水性良好、水质优良,是主要的淡水开采层;第Ⅳ承压含水层组岩性为灰黄色粉细砂、含砾粗砂,富水性较差。通州区仅有极少量钻孔揭露地层发育情况,可用资料有限,故本文主要研究对象为潜水含水层,第Ⅰ承压含水层和第Ⅲ承压含水层。

通州区地下水总体流向自西向东,主要补给来源为大气降水和地表水入渗,排泄方式以蒸发为主。

2 取样与测试

2.1 采样点分布

为探究通州区松散孔隙含水层地下水化学特征,选取 2016—2023 年地下水进行测试分析。其中,2016 年、2018 年和 2023 年的数据来源于系统性采样;2016 年 6 月分别取第Ⅰ承压含水层和第Ⅲ承压含水层水样 6 件;2018 年 4 月分别取第Ⅰ承压含水层和第Ⅲ承压含水层水样 6 件和 3 件;2023 年 3 月分别取潜水含水层、第Ⅰ承压含水层和第Ⅲ承压含水层水样 37 件、6 件和 17 件(图 1)。取样点密度符合 SL 183—2005《地下水监测规范》中水质监测井的布设要求。各离子测定在江苏省地质工程勘察院测试中心完成。

2.2 分析方法

水样的化学组分测定参照 DZ/T 0064—2021《地下水水质分析方法》进行。水样分析 2016 年和 2018 年采用简分析法,2023 年采用全分析法。

具体测试方法如下:使用 pH 计测定 pH 值;使用离子色谱法测定 Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Cl⁻、F⁻、NO₃⁻和 SO₄²⁻质量浓度;使用酸碱滴定法测定 HCO₃⁻质量浓度,使用溴酚红分光光度法测定 Br⁻质量浓度;使

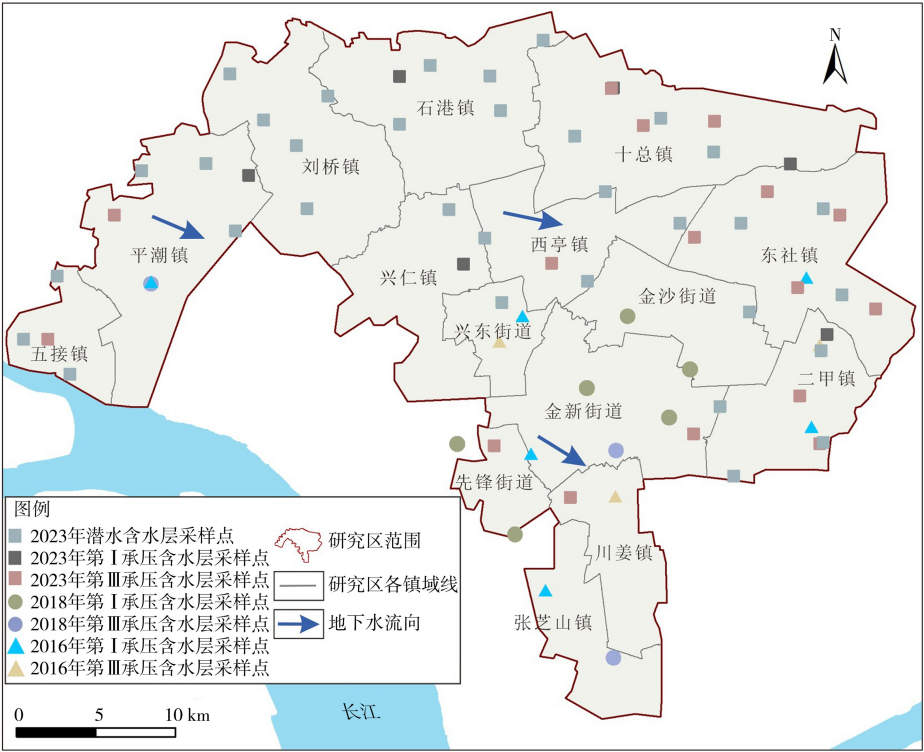


图 1 通州区松散孔隙含水层地下水采样点示意图

用重量法测定总溶解固体 (TDS) 质量浓度。每种离子的测量误差要求小于 2%。

在整理已有数据和测定结果的基础上,运用 SPSS 软件对水化学参数进行特征统计分析,利用 AqQA 软件绘制 Piper 三线图,并利用 Surfer 软件进行克里金空间插值,获取主要含水层离子空间分布

图,Origin 软件绘制 Gibbs 图和主要离子关系图。

3 结果与分析

3.1 地下水化学主要离子时空演化特征

历年水样测试结果见表 1。

a. pH 值。通州区地下水介于 6.41~8.42 之

表 1 样品水化学特征统计

Table 1 Statistics of hydrochemical characteristics of samples													
年份	含水层	项目	质量浓度/(mg/L)										pH 值
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	TDS	
2023	潜水含水层	最大值	163.00	84.80	1 222.00	40.70	2 740.00	192.00	824.00	120.00	0.67	1 479.00	8.42
		最小值	43.10	12.40	20.80	0.29	24.80	26.40	174.00	0.11	0.11	368.00	7.16
		平均值	96.72	43.80	112.42	13.17	87.88	85.08	473.81	25.43	0.33	930.27	7.51
	第Ⅰ承压含水层	最大值	997.00	766.00	5 846	260.00	10 945.00	778.00	1 074.00	6.46	0.18	19 926.00	7.48
		最小值	124.00	31.90	53.90	3.43	70.90	5.76	323.00	0.89	0.09	941.00	7.26
		平均值	496.43	401.70	2 973.84	87.82	5 822.70	443.57	641.57	3.41	0.12	10 954.43	7.34
	第Ⅲ承压含水层	最大值	110.20	48.60	199.00	11.00	249.00	81.65	519.00	0.10	0.46	1 016.00	8.17
		最小值	48.10	24.90	100.00	1.60	78.00	7.20	395.00	0.10	0.11	853.00	7.30
		平均值	63.61	30.89	169.65	5.25	182.06	36.76	440.41	0.10	0.28	956.88	7.69
2018	第Ⅰ承压含水层	最大值	758.50	749.10	5 580.00	60.00	10 600.00	564.35	1 001.00	5.64	0.29	19 129.00	7.46
		最小值	297.60	149.60	910.00	15.00	1 999.40	12.00	256.00	0.25	0.13	4 136.00	6.41
		平均值	496.32	404.73	2 958.33	42.50	6 094.93	233.35	661.03	3.01	0.21	10 981.00	7.15
	第Ⅲ承压含水层	最大值	70.90	24.30	160.00	3.00	140.00	41.80	476.00	2.48	0.92	946.00	7.89
		最小值	46.10	19.10	137.00	1.50	90.00	38.40	385.00	0.20	0.34	752.00	7.47
		平均值	55.70	21.93	149.00	2.50	112.23	40.03	435.27	1.09	0.53	845.33	7.68
2016	第Ⅰ承压含水层	最大值	229.70	713.90	5 627.90	107.00	11 032.00	1 098.20	716.80			19 393.00	
		最小值	80.48	42.50	46.50	1.40	384.00	757.70	67.90			602.00	
		平均值	173.03	274.58	2 034.87	26.75	4 156.37	927.95	469.83			7 455.50	
	第Ⅲ承压含水层	最大值	66.90	55.90	340.00	22.00	678.90	25.90	850.00	1.28	0.32	1 424.00	7.90
		最小值	36.10	5.00	8.60	2.40	19.90	2.00	99.50	0.00	0.08	158.00	6.90
		平均值	49.90	30.13	188.65	10.30	324.30	16.48	436.60	0.59	0.16	934.33	7.43

间,整体呈中性至弱碱性状态。其中:①2023 年,潜水含水层 pH 平均值为 7.51,反映了较强的大气补给和生物作用影响;第 I、Ⅲ承压含水层 pH 平均值分别为 7.34、7.69;②2018 年,第 I、Ⅲ承压含水层 pH 平均值分别为 7.15、7.68;③2016 年,第Ⅲ承压含水层 pH 平均值为 7.43。总体而言,第 I 承压含水层的 pH 值随时间呈小幅度下降趋势,而第Ⅲ承压含水层 pH 值虽在中期有所波动,但整体呈上升趋势。

b. TDS 质量浓度。①2023 年,潜水含水层 TDS 质量浓度平均值为 930.27 mg/L,第 I、Ⅲ承压含水层分别为 10954.43、956.88 mg/L;②2018 年,第 I、Ⅲ承压含水层 TDS 质量浓度平均值分别为 10981、845.33 mg/L;③2016 年,第I、Ⅲ承压含水层 TDS 质量浓度平均值分别为 7455.5、934.33 mg/L。整体上,第 I 承压含水层 TDS 质量浓度远高于第Ⅲ承压含水层,且随时间呈显著增加趋势,2023 年略有缓和;第Ⅲ承压含水层 TDS 质量浓度平均值在 845.33~956.88 mg/L 波动,2018 年达到最低值,2023 年小幅度回升,整体波动较小,表明其地下水动力条件存在短期变化。

c. 主要阳离子质量浓度。第 I 承压含水层阳离子质量浓度整体变化幅度较大,年际波动明显。 Ca^{2+} 质量浓度呈现明显上升趋势,2016 年平均值不足 200 mg/L,至 2023 年则超过 400 mg/L,表明该含水层可能存在碳酸盐类矿物溶解; Mg^{2+} 质量浓度相对稳定,年度最大值与最小值较为接近; Na^{+} 质量浓度在各年份均表现出高质量浓度水平,2016 年最高值接近 6000 mg/L,2018 年虽略有下降,但整体仍处于高值区,分析其原因,该离子可能受蒸发浓缩等作用影响; K^{+} 质量浓度总体较低,但 2023 年数值升高,最大值达 250 mg/L。第Ⅲ承压含水层阳离子质量浓度与第 I 承压含水层相比较低,变化趋势平缓。

d. 主要阴离子质量浓度。第 I 承压含水层中 Cl^{-} 质量浓度在 2016 年普遍偏高,推测其受到了蒸发浓缩以及海水入侵的影响。随着时间推移,2018 年和 2023 年 Cl^{-} 质量浓度有所下降,表明区域环境治理对地下水环境产生了良好的影响,但 2023 年 Cl^{-} 质量浓度较 2018 年有所上升,推测可能受到水岩作用的影响,导致土壤中的 Cl^{-} 向地下水释放。 SO_4^{2-} 质量浓度与 Cl^{-} 质量浓度呈相同变化趋势。 HCO_3^{-} 质量浓度变化相对平稳,整体呈轻微升高趋势,反映出通州区碳酸盐岩溶解作用持续存在。 NO_3^{-} 和 F^{-} 质量浓度均处于较低水平,可能是地表农业活动对地下水化学组成影响较小。相比之下,第Ⅲ承压含水层的阴离子质量浓度总体低于第 I 承压含水层,波动幅度也较小,表明该含水层受地表外源输入干扰较弱。2016 年 Cl^{-} 与 NO_3^{-} 质量浓度略高于后期年份,表明早期通州区可能存在越流补给影响。2023 年 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 与 HCO_3^{-} 质量浓度较 2018 年呈现轻微的上升趋势,表明第Ⅲ承压含水层中的水岩相互作用可能有所增强。

通州区各含水层的 pH 值变异系数 C_v 最小(表 2),表明其空间变化的稳定性。第 I 承压含水层 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^{-} 多项离子 C_v 较高,表明这些离子质量浓度在区域范围内变化较大,可能与其复杂的水动力条件和化学环境有关。第 I 承压含水层 TDS 的 C_v 较高,表明其水质在空间上差异显著;而第Ⅲ承压含水层 TDS 的 C_v 较低,表明其水质在区域范围内较为均匀。

通州区含水层的阴、阳离子特征存在明显的垂向分异性和时间动态变化。潜水含水层的优势阴、阳离子为 HCO_3^{-} 和 Na^{+} ,主要阴离子质量浓度均值从大到小排序为 HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 F^{-} ,阳离子质量浓度均值从大到小排序为 Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 。第I承压含水层优势阴、阳离子分别为 Cl^{-} 和 Na^{+} ,主要阴离子质

表 2 样品水化学指标离散程度统计特征值

Table 2 Statistical characteristic values of dispersion degree for sample hydrochemical indices

水质 指标	潜水含水层		第 I 承压含水层						第Ⅲ承压含水层					
	2023 年		2023 年		2018 年		2016 年		2023 年		2018 年		2016 年	
	$C_v/\%$	标准差	$C_v/\%$	标准差	$C_v/\%$	标准差	$C_v/\%$	标准差	$C_v/\%$	标准差	$C_v/\%$	标准差	$C_v/\%$	标准差
	$C_v/\%$	标准差	$C_v/\%$	标准差	$C_v/\%$	标准差	$C_v/\%$	标准差	$C_v/\%$	标准差	$C_v/\%$	标准差	$C_v/\%$	标准差
Ca^{2+}	0.29	28.02	0.64	317.77	0.33	161.40	0.34	59.33	14.13	0.22	0.24	13.31	0.26	12.86
Mg^{2+}	0.40	17.68	0.66	266.40	0.54	219.52	1.06	290.81	6.40	0.21	0.12	2.63	0.75	22.54
Na^{+}	1.74	195.18	0.75	2220.03	0.62	1822.09	1.21	2470.79	27.30	0.16	0.08	11.53	0.84	157.64
K^{+}	0.70	9.21	1.04	91.13	0.47	19.94	1.51	40.29	2.96	0.56	0.35	0.87	0.92	9.47
Cl^{-}	0.73	64.57	0.69	4041.32	0.54	3293.50	1.13	4694.55	63.41	0.35	0.23	25.46	0.80	258.75
SO_4^{2-}	0.73	40.38	0.75	332.39	0.92	213.75	0.26	240.77	20.44	0.56	0.04	1.70	0.70	11.48
HCO_3^{-}	0.28	133.84	0.38	246.27	0.42	275.98	0.55	258.78	47.94	0.11	0.12	46.24	0.71	309.74
NO_3^{-}	1.26	32.05	0.65	2.23	0.62	1.88			0.00	0.00	1.12	1.22	1.08	0.64
F^{-}	0.40	0.13	0.30	0.04	0.31	0.07			0.11	0.39	0.63	0.33	0.72	0.11
TDS	0.28	257.06	0.65	7093.63	0.52	5700.69	1.14	8519.14	47.05	0.05	0.11	97.21	0.53	491.58
pH 值	0.03	0.25	0.01	0.08	0.05	0.39			0.34	0.04	0.03	0.21	0.06	0.41

量浓度均值从大到小排序为 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 F^- ；阳离子质量浓度均值在 2016 年从大到小排序为 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ ，而 2018 年和 2023 年 Ca^{2+} 质量浓度上升，阳离子质量浓度均值从大到小排序变为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 。第Ⅲ承压含水层优势阴、阳离子分别为 HCO_3^- 和 Na^+ ，2016 年和 2018 年主要阴离子质量浓度均值从大到小排序为 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 F^- ，2023 年 NO_3^- 质量浓度有所降低，阴离子质量浓度均值从大到小排序变为 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 、 NO_3^- ，反映出该层受到的人为因素影响有所减弱。第Ⅲ承压含水层阳离子质量浓度均值排序与潜水含水层一致。

3.2 地下水化学类型时空演化特征

Piper 三线图常用于分析水文化学特征及其演化规律，通州区地下水 Piper 三线图见图 2。可见，通州区地下水化学类型复杂。从时间维度看，第Ⅰ承压含水层在 2016—2023 年的地下水化学类型稳定在 Cl-Na 型，而第Ⅲ承压含水层从 2016 年和 2018 年以 HCO_3-Na 型为主，逐渐向 Cl-Na 型地下水化学类型转变。空间分布上，不同含水层之间差异显著，潜水含水层地下水化学类型主要为 HCO_3-Ca 型，反映出大气降水补给的影响；第Ⅰ承压含水层地下水化学类型以 Cl-Na 型为主；第Ⅲ承压含水层的地下水化学类型分布较为分散，主要有 HCO_3-Na 型、 HCO_3-Ca 型和 Cl-Na 型。该时空演变特征可能受水岩相互作用与含水层之间越流补给的双重影

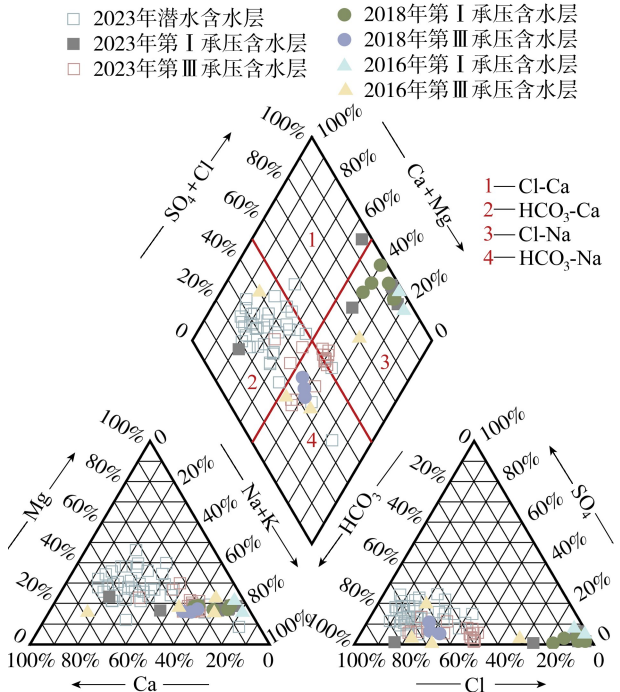


图2 地下水 Piper 三线图

Fig. 2 Piper trilinear diagram of groundwater

响。第Ⅰ承压含水层的高矿化度咸水通过越流补给作用进入第Ⅲ承压含水层，导致后者 Cl^- 质量浓度在部分区域升高，并引发水化学类型的改变。

3.3 地下水化学特征量相关性

水化学离子间的相关性分析是揭示地下水化学特征及其形成机制的关键方法。当离子来源相同或受到类似外部环境因素作用时，离子之间往往会表现出较高的相关性。本文通过对地下水水化学离子进行皮尔逊相关分析，揭示不同地下水化学指标之间的相互关系，进而推断其来源、相似性及差异性。相关性分析结果表明（图 3，图中*、**、*** 分别表示 $p \leq 0.05$ 、 $p \leq 0.01$ 、 $p \leq 0.001$ 上显著）， NO_3^- 与通州区其他地下水化学离子均呈负相关关系，表明地下水化学特征受 NO_3^- 的影响较小，进一步证实农业污染对通州区地下水水质的影响有限。相比之下， Cl^- 和 TDS 表现出极强的正相关性，其皮尔逊相关系数高达 0.998，表明 Cl^- 是控制地下水 TDS 质量浓度变化的主要离子，同时也反映出海水入侵对地下水化学特征的显著影响。 Cl^- 质量浓度及其空间分布对 TDS 具有重要影响，因此在区域水资源管理过程中，需重点关注 Cl^- 的空间变化及其对地下水水质的潜在影响。

基于 Surfer 软件对 2016—2023 年监测数据进行克里金插值分析（由于 2016 年度平潮镇与五接镇附近缺少取样点数据，未对该区域进行插值计算）。空间分布特征分析表明（图 4），通州区 Cl^- 质量浓度在整体上均呈现东高西低的分布特征，其中第Ⅰ承压含水层远高于第Ⅲ承压含水层。

从时间变化趋势来看，两个含水层均表现出 Cl^- 质量浓度 2016—2018 年下降、2023 年回升的变化趋势，其中，第Ⅰ承压含水层高值区主要分布在东社镇与二甲镇附近，最高值 2016 年达 11 032 mg/L，2018 年为 10 600 mg/L，2023 年 Cl^- 质量浓度仍维持较高水平，为 10 945 mg/L，分析其原因，东社镇与二甲镇作为通州区距离黄海最近的区域，受海水入侵影响最为严重。第Ⅲ承压含水层 Cl^- 质量浓度空间分布特征与第Ⅰ承压含水层具有一定的相似性，2016 年高值区与第Ⅰ承压含水层分布一致，为 678.9 mg/L；2018 年最高值为 140 mg/L，数值小于 2016 年第Ⅲ承压含水层；2023 年最大值位于东社镇，数值为 249 mg/L。这种时空分布特征可能与海水入侵、水岩相互作用等密切相关，还需进一步分析其地下水化学组分来源。

3.4 地下水化学组分控制因素及来源

3.4.1 水岩相互作用

Gibbs 模型用于划分 3 类主要的水化学控制机

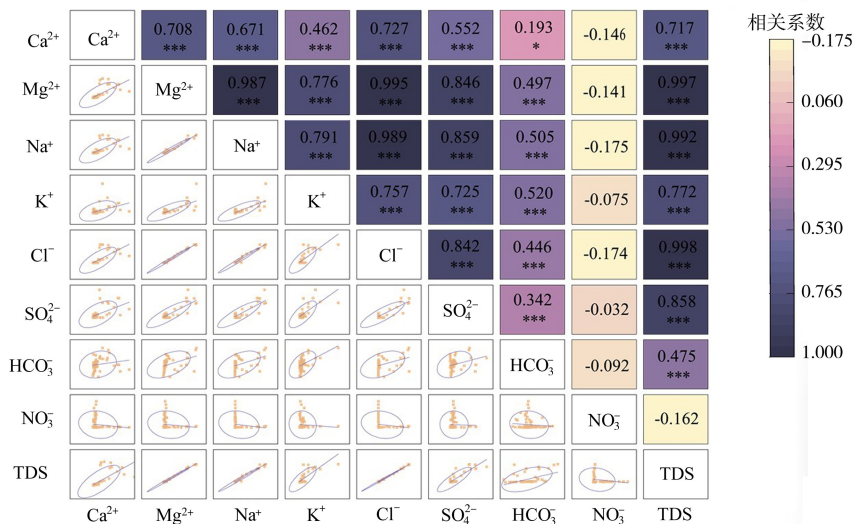


图3 水化学离子指标皮尔逊相关性分析

Fig. 3 Pearson correlation analysis of hydrochemical ion indices

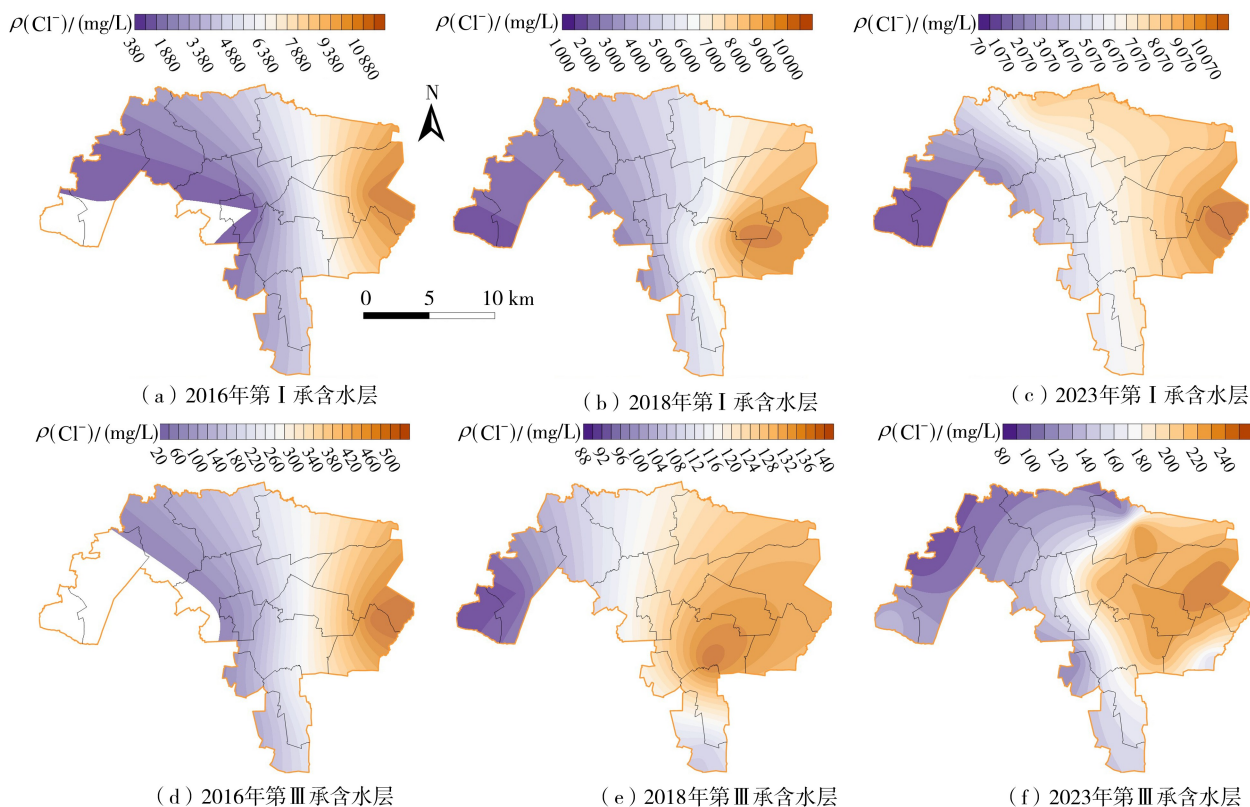


图4 地下水 Cl⁻ 质量浓度变化趋势

Fig. 4 Variation trend of groundwater Cl⁻ mass concentration

制(蒸发结晶、岩石风化和大气降雨),为判断地下水化学特征的主要控制因素提供了有效工具^[18-20]。由图5可见,通州区地下水采样点主要分布在岩石风化型和蒸发浓缩型端元,表明岩石风化和蒸发浓缩作用是地下水化学特征的主要控制机制。其中,潜水含水层与第Ⅲ承压含水层的地下水采样点主要位于岩石风化端元附近,表明其水化学组分主要受岩石风化作用的影响;而第Ⅰ承压含水层 $c(\text{Na}^+)/[c(\text{Na}^+)+c(\text{Ca}^{2+})]$ 与 $c(\text{Cl}^-)/[c(\text{Cl}^-)+c(\text{HCO}_3^-)]$

接近于1,反映出该层地下水同时受到蒸发浓缩作用和咸淡水混合过程的双重影响。通州区地下水采样点远离大气降雨控制型端元,说明大气降雨对地下水化学组分的贡献较小。从时间变化来看,不同年份的地下水化学控制机制基本一致,未发生显著变化。部分地下水采样点分布在模型之外,可能与人类活动的干扰有关。

通过分析 $c(\text{Mg}^{2+})/c(\text{Na}^+)$ 、 $c(\text{HCO}_3^-)/c(\text{Na}^+)$ 和 $c(\text{Ca}^{2+})/c(\text{Na}^+)$ 的关系,可以定性研究碳

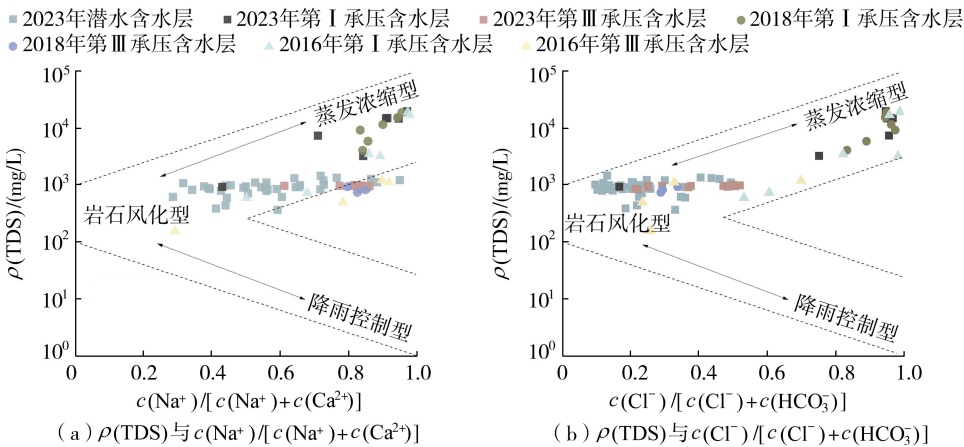


图 5 地下水化学 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs diagram of groundwater chemistry

酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩的风化溶解作用对地下水水质的影响^[21-23]。由图 6 可知,通州区地下水采样点主要分布在硅酸盐岩和蒸发盐岩端元,且有向碳酸盐岩区域发展的趋势,表明通州区含水层中水岩作用主要受硅酸盐岩和蒸发盐岩的控制,碳酸盐岩的影响相对较小。潜水含水层与第Ⅲ承压含水层的地下水采样点多靠近硅酸盐岩区域,这与通州区含水层介质中广泛发育长石、石英、云母等硅酸盐矿物密切相关;而第Ⅰ承压含水层的地下水采样点则主要分布在蒸发岩盐区域,反映其受到了蒸发盐岩风化作用的显著影响。从时间变化来看,与 2016 年相比,2018 年和 2023 年第Ⅲ承压含水层受硅酸盐岩控制作用的影响有所增强,而第Ⅰ承压含水层受蒸发盐岩控制作用的影响有所减弱。

3.4.2 主要离子来源控制因素分析

通过区地下水化学特征的形成主要受水岩作用和海水入侵的共同影响。图 7 为主要阴、阳离子比值关系,由图 7 可分析通州区地下水主要离子来源控制因素。

a. $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ 可以表征地下水中 Na^+ 的富

集程度^[24]。由图 7(a) 可知,2023 年潜水含水层中 $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ 小于 0.85 的样品占比为 43.2%,多数样品的比值大于 0.85 且超过 1,说明 2023 年潜水含水层地下水的补给来源以地层溶滤作用为主。2016—2023 年,第Ⅰ承压含水层中 $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-) < 0.85$ 的样品占比为 100%,表明该含水层已遭受严重的海水入侵影响。2016 年,第Ⅲ承压含水层中 $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-) < 0.85$ 的样品占比为 33.3%,说明海水入侵现象已波及该含水层;2018 年采集的第Ⅲ承压含水层地下水样品 $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ 均大于 1,而 2023 年该比值大于 1 的样品占比降至 35.29%,这一变化或许与 2018 年的样品量不足相关。

b. 海水中 $\rho(\text{B}^{3+})/\rho(\text{Cl}^-)$ 约为 2.2×10^{-4} 。由图 7(b) 可以看出,潜水含水层与历年第Ⅲ承压含水层 B^{3+} 与 Cl^- 水样点大多分布在直线 $y = 2.2 \times 10^{-4}$ 上方,且地下水 Cl^- 质量浓度明显低于海水,表明含水层中 B^{3+} 相对富集,可能与地下水淋滤地层盐分有关。然而,第Ⅰ承压含水层却表现出相反的规律, B^{3+} 与 Cl^- 水样点大多分布于直线下方, Cl^- 质量浓度偏高,表明含水层受到海水入侵的影响。

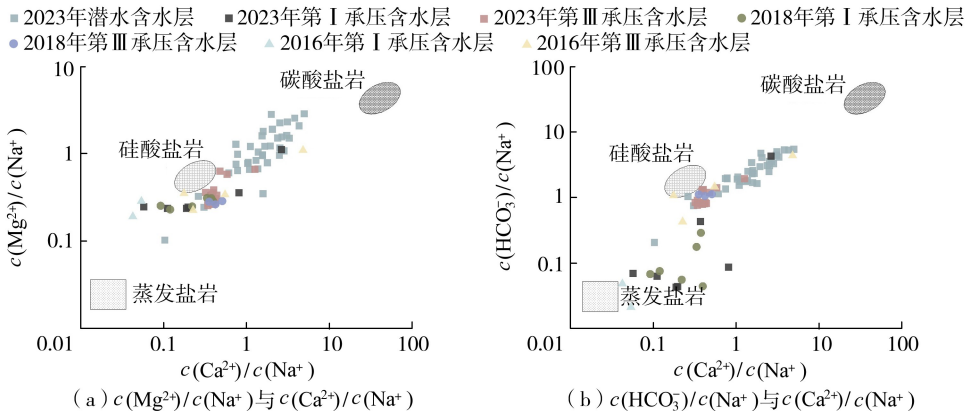


图 6 地下水 $c(\text{Mg}^{2+})/c(\text{Na}^+)$ 、 $c(\text{HCO}_3^-)/c(\text{Na}^+)$ 和 $c(\text{Ca}^{2+})/c(\text{Na}^+)$ 关系

Fig. 6 Relations of $c(\text{Mg}^{2+})/c(\text{Na}^+)$, $c(\text{HCO}_3^-)/c(\text{Na}^+)$ and $c(\text{Ca}^{2+})/c(\text{Na}^+)$ of groundwater

■ 2023年潜水含水层 ■ 2023年第Ⅰ承压含水层 ■ 2023年第Ⅲ承压含水层 ● 2018年第Ⅰ承压含水层
● 2018年第Ⅲ承压含水层 ▲ 2016年第Ⅰ承压含水层 ▲ 2016年第Ⅲ承压含水层

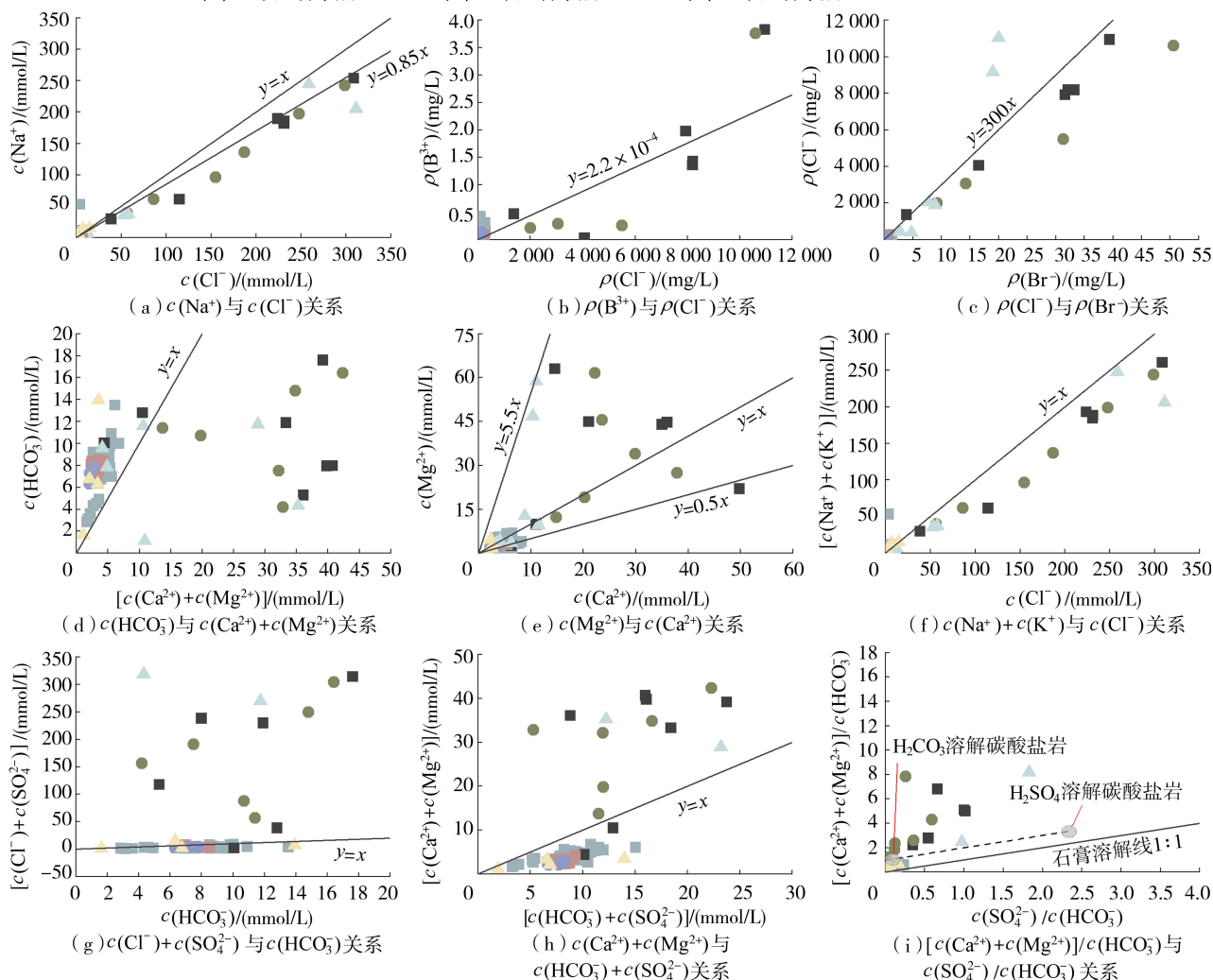


图 7 地下水主要离子比值关系

Fig. 7 Relations of main ion ratio in groundwater

c. Cl^- 和 Br^- 都是卤族元素,化学性质稳定,淡水中 Br^- 的含量很低,而海水中 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 约为 300^[24]。通州区能检测出一定含量的 Br^- ,表明该区域的地下水化学成分与海水相关,有可能来自古海水残留、现代海水入侵或古海相沉积溶滤。由图 7(c)可知,2023 年潜水含水层 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-) < 300$ 的比例为 54.1%;2016 年第Ⅰ承压含水层 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-) < 300$ 的样品占比为 66.7%,2018 年该含水层 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Br}^-)$ 全部小于 300,表明该含水层咸化主要为古海水残留影响。

d. 利用 $c(\text{HCO}_3^-)/[c(\text{Ca}^{2+})+c(\text{Mg}^{2+})]$ 可以揭示地下水化学成分的成因机制及水岩相互作用特征^[25]。在碳酸盐岩溶解作用下, $c(\text{HCO}_3^-)/[c(\text{Ca}^{2+})+c(\text{Mg}^{2+})]$ 约为 1。从图 7(d)可以看出,2023 年潜水含水层和历年第Ⅲ承压含水层水样点分布在 $y=x$ 直线周围,表明其除碳酸盐岩溶解作用外,还存在阳离子吸附交换等作用。

e. 海水入侵会导致含水层中 Mg^{2+} 含量显著增加。从图 7(e)可以看出,2023 年潜水含水层 $c(\text{Mg}^{2+})/c(\text{Ca}^{2+})$ 范围为 0.22~1.75;2016 年第Ⅰ承压含水层 $c(\text{Mg}^{2+})/c(\text{Ca}^{2+})$ 最高达 5.34,位于东社镇,也是最靠近黄海的位置,可见该含水层已受到海水入侵的影响。2023 年第Ⅰ承压含水层 $c(\text{Mg}^{2+})/c(\text{Ca}^{2+})$ 最高为 4.39,较 2016 年稍有下降,表明海水入侵的影响有所减弱。历年第Ⅲ承压含水层 $c(\text{Mg}^{2+})/c(\text{Ca}^{2+})$ 远小于 5.5,表明其 Ca^{2+} 主要来源于含钙矿物的风化溶解或阳离子交替吸附作用。

f. 通过 $[c(\text{Na}^+)+c(\text{K}^+)]/c(\text{Cl}^-)$ 可以判断硅酸盐岩和盐岩的溶解对地下水离子组分的影响^[26-27]。由图 7(f)可知,水样点均落在 $y=x$ 直线附近,表明该区域地下水中 Na^+ 、 K^+ 与 Cl^- 主要来源于硅酸盐岩溶解和盐岩溶解。2023 年大部分潜水含水层水样点位于 $y=x$ 直线上方,表明在 2023 年潜水含水层主要受到盐岩溶解的影响。2016—

2023 年第 I 承压含水层全部分布在 $y=x$ 直线下方, 表明其主要受硅酸盐岩溶解的影响; 第 III 承压含水层水样点位于 $y=x$ 直线上方, 与 2023 年潜水含水层水样点分布一致, 都受到盐岩的影响。潜水含水层样和第 III 承压含水层水样大多分布在直线上方, 也表明含水层 Na^+ 、 K^+ 与 Cl^- 除了来自盐岩溶解外, 可能还存在阴、阳离子交换作用。

g. 通过 $[c(\text{Cl}^-)+c(\text{SO}_4^{2-})]/c(\text{HCO}_3^-)$ 可以判断蒸发盐岩和碳酸盐岩溶解对地下水离子组分的影响。由图 7(g) 可知, 潜水含水层和第 III 承压含水层大多分布在直线 $y=x$ 下方, 表明其受碳酸盐岩溶解的影响较大。第 I 承压含水层分布在直线上方, 说明其主要受蒸发盐岩溶解的作用。

h. $[c(\text{Ca}^{2+})+c(\text{Mg}^{2+})]/[c(\text{HCO}_3^-)+c(\text{SO}_4^{2-})]$ 可以用来分析影响地下水中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 来源的碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩的溶解比例。从图 7(h) 可以看出, 各类型地下水样离子围绕 $y=x$ 直线两侧均有分布, 其中潜水含水层和第 III 承压含水层水样分布在直线附近且在下方居多, 表明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 不足以平衡 $(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$, 发生了钙镁硅酸盐岩溶解或蒸发盐岩溶解。理论上, 水样点分布在直线上方会受到碳酸盐岩溶解的作用。通州区第 I 承压含水层水样点分布在远离直线的上方, 但由于其受到海水入侵的显著影响, 故并不能单纯归因于碳酸盐岩的溶解, 这与前文的结论一致。

i. 地下水中碳酸盐岩溶解受硫酸、碳酸参与程度的影响可以通过 $[c(\text{Ca}^{2+})+c(\text{Mg}^{2+})]/c(\text{HCO}_3^-)$ 与 $c(\text{SO}_4^{2-})/c(\text{HCO}_3^-)$ 来判断。由图 7(i) 可以看出, 地下水样多分布于石膏溶解线上方, 主要分布在两个端元中间并偏向 H_2CO_3 溶解碳酸盐岩部分, 表明就碳酸盐岩而言, 碳酸对其溶解是地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 HCO_3^- 的主要来源。

3.4.3 阳离子交替吸附作用

在岩石与地下水长期相互作用过程中, 岩石表面所携带的负电荷可以吸附地下水中的阳离子, 从而将原先携带的阳离子释放到地下水中, 这一过程称为阳离子交替吸附作用^[28-30]。

采用氯碱指数(CAI-1 和 CAI-2)可进一步分析地下水中阳离子交换作用的强度与方向^[31-32]。当地下水中 Na^+ 和 K^+ 与土中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 交换值均显示正值时, 表明发生正阳离子交换作用。当地下水中 Na^+ 和 K^+ 与土中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 交换值均显示负数时, 表明发生反阳离子交换作用^[33-35]。氯碱指数的绝对值越大, 表明其离子交换作用强度越高。研究表明(图 8), 2023 年潜水含水层氯碱指数均为负值的水样占比为 83.8%, 表明其主要发生反

向阳离子交换作用; 第 I 承压含水层在 2016 年、2018 年和 2023 年的氯碱指数均为正值的水样占比分别为 100%、100%和 90.9%, 表明其主要发生正阳离子交换作用。相比之下, 第 III 承压含水层在 2016 年、2018 年和 2023 年的氯碱指数均为负值的水样占比分别为 75%、100%和 100%, 表明其主要发生反向阳离子交换作用。

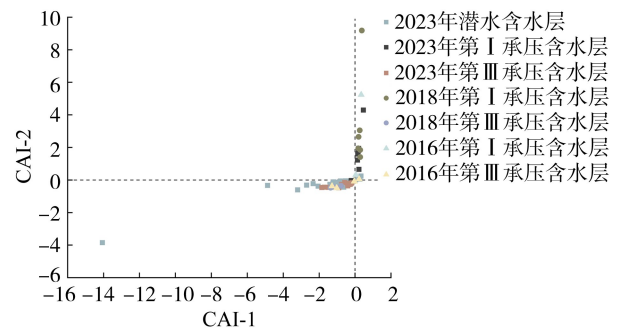


图 8 氯碱指数关系

Fig. 8 Chloro-Alkaline indice relationship

3.4.4 人类活动影响

NO_3^- 和 SO_4^{2-} 是地下水中具有明显人类活动影响特征的离子。 NO_3^- 主要来源于农业活动中含硝酸盐化肥的使用以及生活污水的排放, 而 SO_4^{2-} 则主要来源于工业矿业活动、大气沉降以及硫化矿物的溶解。通常状态下, 农业活动影响的水体中 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{Ca}^{2+})$ 值较高, 而工业活动影响的水体中 $\rho(\text{SO}_4^{2-})/\rho(\text{Ca}^{2+})$ 值较高。从图 9 可以看出, 通州区受工业活动的影响较为显著, 受农业活动的影响相对较小。

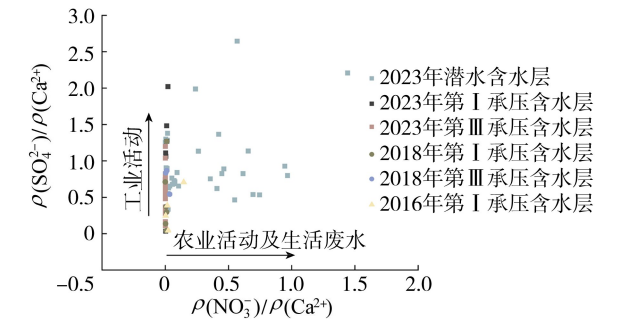


图 9 地下水中 $\rho(\text{SO}_4^{2-})/\rho(\text{Ca}^{2+})$ 与 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{Ca}^{2+})$ 关系

Fig. 9 Relationship between $\rho(\text{SO}_4^{2-})/\rho(\text{Ca}^{2+})$ and $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{Ca}^{2+})$ in groundwater

4 结 论

a. 通州区地下水整体呈弱碱性。2016—2023 年第 I 承压含水层水化学类型未发生明显变化, 但第 III 承压含水层水化学类型由 HCO_3^- -Na 型逐渐转为 Cl -Na 型。第 I 承压含水层 TDS 质量浓度在 2016—2023 年呈逐年增加的趋势, 2023 年虽有所下

降,但降幅较小;第Ⅲ承压含水层 TDS 质量浓度均值在 845.3~956.9 mg/L 之间波动,未呈现明显的规律性变化,整体上第Ⅲ承压含水层可能已受到上覆含水层的咸化越流补给影响。

b. 2016—2023 年通州区主要含水层水化学组成的影响因素未发生显著变化。潜水含水层和第Ⅲ承压含水层受水岩作用影响,第Ⅰ承压含水层受海水入侵与蒸发浓缩的影响,表现出高矿化度咸水特征。第Ⅰ承压含水层 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 各离子组成不仅来源于海水入侵的影响,还受硅酸盐岩溶解的影响。潜水含水层和第Ⅲ承压含水层 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 受到硅酸盐岩溶解的作用, Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 受到碳酸盐岩溶解的作用;且潜水含水层和第Ⅲ承压含水层还存在反阳离子交换作用,第Ⅰ承压含水层则表现出正阳离子交换作用。人类活动在一定程度上影响了通州区地下水化学组成,其中以工业活动影响较大,农业活动对地下水化学组成基本没有影响。

c. 通州区 TDS 与 Cl^- 质量浓度相关性显著, Cl^- 质量浓度大小决定了 TDS 质量浓度的高低。尽管在通州区实施了地下水控制开采措施,但 2016—2023 年第Ⅰ承压含水层地下水咸化效应依然显著,表明在地下水位恢复过程中,第Ⅰ承压含水层地下水水岩作用强烈;另外通州区土壤具有显著的盐碱化现象,地下水与含水层岩土体发生了阴、阳离子交换作用,进一步加剧了咸化效应。因此,建议南通市通州区进一步控制地下水开采量和开采强度,制定科学的地下水开采规划;同时,应加强土壤盐碱化的治理,为地下水水质的恢复创造有利条件。

参考文献:

[1] 宋子奕,鲁程鹏,吴成城,等. 2009—2019 年河西走廊地下水位时空分布及演变趋势[J]. 水资源保护,2023,39(2):160-167. (Song Ziyi, Lu Chengpeng, Wu Chengcheng, et al. Spatiotemporal distribution and evolution trend of groundwater level in Hexi Corridor from 2009 to 2019[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):160-167. (in Chinese))

[2] 徐丽丽,束龙仓,李伟,等. 2000—2020 年中国地下水开采时空演变特征[J]. 水资源保护,2023,39(4):79-85. (Xu Lili, Shu Longcang, Li Wei, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020 [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):79-85. (in Chinese))

[3] 束龙仓,徐丽丽,袁亚杰,等. 三江平原典型区地下水流场变化及主要影响因素分析[J]. 水利学报,2022,53(6):644-654. (Shu Longcang,Xu Lili,Yuan Yajie,et al. Analysis on variation of groundwater flow field and its

main influencing factors in the typical district of Sanjiang Plain[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(6):644-654. (in Chinese))

[4] 邓晓颖,简康,齐玉峰,等. 河南省沿黄区地下水水化学特征分析及形成机理研究[J]. 水资源保护,2025,41(4):135-143. (Deng Xiaoying,Jian Kang, Qi Yufeng, et al. Analysis of the hydrochemical characteristics and its formation mechanism of groundwater along the Yellow River in Henan Province [J]. Water Resources Protection,2025,41(4):135-143. (in Chinese))

[5] 谢浩,申豪勇,张海岛,等. 清江流域不同类型岩溶地下水化学分布特征及成因机制[J]. 环境科学,2025,46(3):1417-1426. (Xie Hao, Shen Haoyong, Zhang Haidao, et al. Distributions and driving factors of hydrochemical compositions in different types of karst groundwater in Qingjiang River Basin[J]. Environmental Science,2025,46(3):1417-1426. (in Chinese))

[6] 朱珂冰,孙涛,辛存林,等. 秦巴山区地下水水化学特征与控制因素分析:以紫阳县为例[J]. 环境科学,2025,46(11):6870-6879. (Zhu Keping, Sun Tao, Xin Cunlin, et al. Hydrochemical characteristics and health risk assessment of groundwater in Qinba Mountains: a case study of Ziyang County[J]. Environmental Science,2025,46(11):6870-6879. (in Chinese))

[7] Shang Tongxiao, Xu Zhenwei, Gong Xulong, et al. Application of electrical sounding to determine the spatial distribution of groundwater quality in the coastal area of Jiangsu Province, China[J]. Journal of Hydrology,2021,599:126348.

[8] 束龙仓,温中琦,张岩,等. 苏北沿海地区潜水水化学特征及形成机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2022,52(4):1223-1233. (Shu Longcang, Wen Zhongqi, Zhang Yan, et al. Chemical characteristics and formation mechanism of phreatic water in coastal area of Northern Jiangsu[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2022,52(4):1223-1233. (in Chinese))

[9] 方运海,汤海松,郑天元,等. 潮汐作用下分层非均质含水层海水入侵的渗流试验和数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):23-29. (Fang Yunhai,Tang Haisong,Zheng Tianyuan,et al. Infiltration experiments and numerical simulations of seawater intrusion in stratified heterogeneous aquifers affected by tides[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2024,52(6):23-29. (in Chinese))

[10] 苟富刚,龚绪龙,刘源. 长江三角洲北翼更新世以来的水土环境地球化学特征及其环境指示意义[J]. 海洋学报,2024,46(3):33-53. (Gou Fugang, Gong Xulong, Liu Yuan. Geochemical characteristics of water and soil environment and its environmental indicating significances since the Pleistocene in the northern flank of the Changjiang River Delta [J]. Acta Oceanologica Sinica,

- 2024,46(3):33-53. (in Chinese))
- [11] 苟富刚,龚绪龙. 长江河口地区全新世以来的弱透水层孔隙水地球化学特征及成因分析[J]. 地球学报, 2023, 44(6):1063-1075. (Gou Fugang, Gong Xulong. Analysis of geochemical characteristics and genesis of aquitard in the Yangtze Estuary since the Holocene [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44 (6): 1063-1075. (in Chinese))
- [12] 周慧芳,谭红兵,张文杰. 南通地区地下水循环与水化学时空变化规律研究[J]. 人民长江, 2014, 45(23): 103-108. (Zhou Huifang, Tan Hongbing, Zhang Wenjie, et al. Groundwater circulation and temporal and spatial variation of hydrogeological chemistry in Nantong area, Jiangsu Province[J]. Yangtze River, 2014, 45(23): 103-108. (in Chinese))
- [13] 徐玉琳. 江苏省南通市深层含水系统地下水水质咸化特征及成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002(2): 47-51. (Xu Yulin. The salted properties and its origin for deep aquifer system in Nantong City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002(2):47-51. (in Chinese))
- [14] 周慧芳,谭红兵,高将,等. 南通地区地下水咸化机理分析及改良措施[J]. 水资源保护, 2015, 31(4): 70-76. (Zhou Huifang, Tan Hongbin, Gao Jiang, et al. Analysis of salinization mechanism of groundwater in Nantong area and its improvement measures [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(4): 70-76. (in Chinese))
- [15] 李进,龚绪龙,刘彦,等. 浅层地下水水化学特征与土体盐分相关性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(1): 89-96. (Li Jin, Gong Xulong, Liu Yan, et al. Correlation between shallow groundwater hydrochemical characteristics and soil salinity [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(1): 89-96 (in Chinese))
- [16] 陆玮,李兆,骆祖江. 南通市地下水压缩开采对水质咸化的控制效应[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 85-91. (Lu Wei, Li Zhao, Luo Zujiang. Control effect of groundwater compression mining on water salinization in Nantong City [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2):85-91 (in Chinese))
- [17] Mao Changping, Tan Hongbing, Song Yinxian, et al. Evolution of groundwater chemistry in coastal aquifers of the Jiangsu, east China: insights from a multi-isotope ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, and $\delta^{11}\text{B}$) approach[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2020, 235: 103730.
- [18] Chen Weifan, Wu Chu, Pan Shibin, et al. Analysis on the spatiotemporal evolutions of groundwater hydrochemistry and water quality caused by over-extraction and seawater intrusion in eastern coastal China [J]. Frontiers in Earth Science, 2024, 12: 1391235.
- [19] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, 170: 1088-1090.
- [20] Qiu Yang, Zhou Aiguo, Gao Lin, et al. Cation exchange and leakage as dominant processes in controlling salinity and strontium in sandy and argillaceous coastal aquifer: insights from hydrochemistry and multi-isotopes [J]. Journal of Hydrology, 2024, 638: 131529.
- [21] 艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 等. 西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6767-6777. (Yan Yan, Gao Ruizhong, Liu Tingxi, et al. Hydrochemical characteristics and control factors of groundwater in the northwest salt lake basin [J]. Environmental Science, 2023, 44(12): 6767-6777. (in Chinese))
- [22] 陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 等. 合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制[J]. 环境科学, 2024, 45(1): 194-206. (Chen Wen, Wu Ya, Zhang Hongxin, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in the western region of Hepu Basin, Beihai City [J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 194-206. (in Chinese))
- [23] Hao Qicheng, Li Yasong, Xiao Yong, et al. Hydrogeochemical fingerprint, driving forces and spatial availability of groundwater in a coastal plain, Southeast China [J]. Urban Climate, 2023, 51: 101611.
- [24] 周慧芳,谭红兵,张西营,等. 江苏南通地下水补给源、水化学特征及形成机理[J]. 地球化学, 2011, 40(6): 566-576. (Zhou Huifang, Tan Hongbing, Zhang Xiyang, et al. Recharge source, hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Nantong, Jiangsu Province [J]. Geochimica, 2011, 40(6): 566-576. (in Chinese))
- [25] Zainudin A M I, Zulkefli S N, Looi L J, et al. Spatial and temporal evaluation of groundwater hydrochemistry in an active phreatic zone of developed basin in selangor, Malaysia [J]. Applied Geochemistry, 2023, 154: 105656.
- [26] 卞跃跃, 赵丹, 韩永. 兖州煤田奥陶系灰岩地下水水化学特征及其形成机理[J]. 地球学报, 2017, 38(2): 236-242. (Bian Yueyue, Zhao Dan, Han Yong. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of ordovician limestone groundwater in the Yanzhou coalfield [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38 (2): 236-242. (in Chinese))
- [27] 张文琦, 董少刚, 马铭言, 等. 岱海盆地地下水化学特征及成因[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1546-1555. (Zhang Wenqi, Dong Shaogang, Ma Mingyan, et al. Chemical characteristics and origin of groundwater in the Daihai Basin [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1546-1555. (in Chinese))
- [28] 范立民, 马万超, 常波峰, 等. 榆神府矿区地下水水化学特征及形成机理[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 383-394. (Fan Limin, Ma Wanchao, Chang Bofeng, et al.

Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yushenfu Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 383-394. (in Chinese))

[29] 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. (Liu Hai, Song Yang, Li Yingchun, et al. Hydrochemical characteristics and control factors of shallow groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin[J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1525-1538. (in Chinese))

[30] 吴嘉铃, 王莹, 胡倩, 等. 雷州半岛地下水水化学特征及成因分析[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(1): 145-153. (Wu Jialing, Wang Ying, Hu Qian, et al. Hydrochemical characteristics and genetic analysis of groundwater in Leizhou Peninsula[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(1): 145-153. (in Chinese))

[31] Xie Zhan, Liu Weiting, Chen Si, et al. Machine learning approaches to identify hydrochemical processes and predict drinking water quality for groundwater environment in a metropolis[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 58: 10227.

[32] Hu Xi, Li Bo, Zhang Beibei, et al. Hydrochemical analysis and quality comprehensive assessment of groundwater in the densely populated coastal industrial city[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 63: 105440.

[33] 范祖金, 魏兴, 李佳文, 等. 重庆市万州区浅层地下水水化学特征及控制因素[J]. 环境化学, 2023, 42(1): 113-124. (Fan Zujin, Wei Xing, Li Jiawen, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of shallow groundwater in Wanzhou District, Chongqing[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(1): 113-124. (in Chinese))

[34] 杨思敏, 李井峰, 白璐. 神东矿区典型矿井水中氟的分布特征及形成机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 246-256. (Yang Simin, Li Jingfeng, Bai Lu. Distribution characteristics and formation mechanism of fluoride in typical mine water in Shendong Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 246-256. (in Chinese))

[35] 郑涛, 秦先燕, 吴剑雄. 店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2024, 45(2): 813-825. (Zheng Tao, Qin Xianyan, Wu Jianxiang. Hydrochemical characteristics and its origin of surface water and groundwater in Dianbu River Basin[J]. Environmental Science, 2024, 45(2): 813-825. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-18 编辑: 胡新宇)

(上接第 231 页)

[19] 徐腾, 王以鹏, 叶逾, 等. 地下水超采管控及水量-水位双控体系研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 27-35. (Xu Teng, Wang Yipeng, Ye Yu, et al. Research progress on groundwater over-exploitation control and dual-control system of water quantity and water level[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 27-35. (in Chinese))

[20] 薛联青, 廖淑敏, 刘远洪, 等. 基于地下水动态模拟的生态输水累积效应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 322-328. (Xue Lianqing, Liao Shumin, Liu Yuanhong, et al. Cumulative ecological effects of water transfer based on groundwater dynamic simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 322-328. (in Chinese))

[21] Hu Zhanming, Guo Kaiyuan, Yang Yongjun, et al. Field survey and analysis of water flux and salinity gradients considering the effects of sea ice coverage and rubber dam; a case study of the Liao River Estuary, China[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1154150.

[22] 魏钢毅, 伊飞, 张卓, 等. 牟汶河流域地表水化学特征及影响因素分析[J]. 山东国土资源, 2024, 40(7): 8-14. (Wei Gangyi, Yi Fei, Zhang Zhuo, et al. Analysis of surface water chemical characteristics and influencing factors in the Mouwen River Basin[J]. Shandong Land and Resources, 2024, 40(7): 8-14. (in Chinese))

[23] 张婧, 马贵宏, 高雅, 等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 21-28. (Zhang Jing, Ma Guihong, Gao Ya, et al. Analysis of factors affecting groundwater level changes in a typical well-irrigation area on the North China Plain[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 21-28. (in Chinese))

[24] 李晓波, 李杭, 杨宝萍, 等. 泰安市旧县水源地水化学特征及成因分析[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(6): 2002-2010. (Li Xiaobo, Li Hang, Yang Baoping, et al. Analysis of the hydrochemical characteristics and causes of the Jiuxian water source in Tai'an City[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6): 2002-2010. (in Chinese))

[25] 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. (Liu Yuanqing, Zhou Le, Lyu Lin, et al. Pore water chemical characteristics and controlling factors in the middle and upper reaches of the Mouwen River[J]. Environmental Science, 2023, 44(3): 1429-1439. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-02-28 编辑: 胡新宇)