



太子河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析

许 波, 田 野, 王 末, 唐文泰, 赵 男, 刘创创, 隋克林, 霍伟奇

中国地质调查局 廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065099

摘 要: 结合研究区已有的基础地质、水文地质资料, 基于水化学数据, 运用数理统计、舒卡列夫分类、Piper 三线图、Schoeller 图、Gibbs 图、离子比值等方法, 分析冲洪积扇不同区域地下水水化学特征, 讨论不同区域地下水演化的主要控制因素, 研究地下水水环境污染状况。结果表明: 太子河冲洪积扇地下水受人类活动影响较弱, 扇顶地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}$ 型, 扇中地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型, 扇缘地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型。太子河冲洪积扇不同部位地下水演化受到的岩石风化作用和离子交换作用影响的强度和方式不同。太子河冲洪积扇地下水中“三氮”污染问题主要受采矿、冶金、化工等工矿活动和农业活动的影响, 空间分布特征与人类活动密切相关。对太子河冲洪积扇地下水水化学类型和特征、水化学成因以及“三氮”污染现状的分析和研究, 可为下一步地下水源地开发利用和可持续发展提供科学依据。

关键词: 冲洪积扇; Piper 三线图; Gibbs 图; 地下水演化; “三氮”污染; 太子河

HYDROCHEMISTRY AND GENESIS OF GROUNDWATER IN THE ALLUVIAL-PROLUVIAL FAN OF TAIZI RIVER

XU Bo, TIAN Ye, WANG Mo, TANG Wen-tai, ZHAO Nan, LIU Chuang-chuang, SUI Ke-lin, HUO Wei-qi

Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Langfang 065099, Hebei Province, China

Abstract: Based on the existing basic geological and hydrogeological data of the study area as well as hydrochemical data, the paper uses multiple methods including mathematical statistics, Schukalev classification, Piper diagram, Schoeller diagram, Gibbs diagram and ion ratio analysis to analyze the hydrochemical characteristics of groundwater in different areas of alluvial-proluvial fan, discusses the main controlling factors of groundwater evolution in different areas, and studies the status of groundwater environmental pollution. The results show that the groundwater in alluvial-proluvial fan of Taizi River is weakly affected by human activities, with the main hydrochemical types of $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ and $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}$ in the root fan, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ and $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ types in the mid-fan and $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type in the end fan. The intensity and mode of rock weathering and ion exchange are various during groundwater evolution in different parts of Taizi River alluvial-proluvial fan. The nitrogen pollution in the groundwater is mainly affected by mining and metallurgical activities, chemical industry and agricultural activities, and its spatial distribution is closely related to human activities. The analysis and research on the hydrochemical types and characteristics, hydrochemical genesis of groundwater and the present situation of nitrogen pollution in Taizi River alluvial-proluvial fan can provide scientific basis for further exploitation and sustainable development of groundwater sources.

Key words: alluvial-proluvial fan; Piper diagram; Gibbs diagram; groundwater evolution; nitrogen pollution; Taizi River

收稿日期: 2023-06-12; 修回日期: 2023-08-31. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局项目“东部平原湖区北部湖泊调查”(DDR0230505).

作者简介: 许波(1993—), 男, 工程师, 主要从事水文地质工程地质研究工作, 通信地质 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号, E-mail//2516459149@qq.com

通信作者: 田野(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事城市地质、矿产勘查研究工作, 通信地址 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号, E-mail//tianye@mail.

cgs.gov.cn

0 引言

地下水是地球上最重要的淡水资源之一,对人类生活和经济发展具有重要意义。研究地下水的水化学特征及成因,对于地下水资源的管理和保护具有重要的参考价值^[1]。

冲洪积扇是由河流冲刷和沉积形成的特殊地貌,其地下水特征具有一定的特点。首先,冲洪积扇地下水具有较高的含水层厚度和丰富的水量储存能力,这与冲洪积扇的沉积特点密切相关^[2]。其次,冲洪积扇地下水受到降雨和河流水位变化的影响较大,具有较强的季节性变化特征。此外,冲洪积扇地下水还受到地下水补给和排泄的影响,其水质特征也会受到相应的影响^[3]。

地下水的化学成分是研究地下水特征的重要指标之一。地下水中溶解的无机离子、有机物和微量元素等成分可以反映地下水的来源、补给途径、水-岩相互作用以及水质状况等信息^[4]。不同地区的地下水化学成分存在一定的差异,这与地质背景、水文地质条件、人类活动等因素密切相关。因此,研究地下水的化学成分特点可以揭示地下水的来源和演化过程,对地下水资源的合理利用和保护具有重要意义^[5-7]。

本文将以太子河冲洪积扇地下水为研究对象,通过分析地下水的特征和化学成分,探讨其成因及其对地下水资源管理和保护的意义。

1 研究区概况

太子河冲洪积扇是太子河自西向东流经辽阳东部山地(首山-千山山地)后,其携带的大量冲洪积物在下辽河平原堆积形成的。研究区位于辽宁省辽阳市东部山区与平原的结合部,地形呈东南高、西北低^[8]。太子河冲洪积扇的形成与上游山区的地势陡峭和地质条件有关,太子河具有较强的侵蚀能力和搬运能力,能够搬运大量的泥沙。冲洪积扇主要由黏土、砂和卵石等沉积物组成。这些沉积物具有较高的孔隙度和含水量,地下水主要以孔隙水和裂隙水形式存在。由于冲洪积扇的沉积物层次复杂,地下水分布也存在一定的差异。冲洪积扇的地下水动态受到河流水位变化的影响较大,河水的涨落会引起地下水位的变化,形成季节性的地下水位变化。太子河冲洪积扇的地下水受到周围地表水和地下水的影响,水质可能受到农业和人类活动的影响而受到污染。常见的水质问题包

括硬度较高、氟化物和重金属超标等^[9-10]。

根据丁研等^[11]的观点,以河流冲刷和沉积作用的强弱,将太子河冲洪积扇划分为扇顶、扇中和扇缘。冲洪积扇的扇顶是指位于上游的最高部分,也是河流冲刷作用最强的区域。扇顶通常是由较大的岩石碎屑和粗糙的沉积物组成,河流在这里流速较快,冲刷力较强。扇中是冲洪积扇的中部区域,位于扇顶和扇缘之间。扇中的沉积物相对较细,主要由砂和黏土组成。河流在扇中的流速较扇顶较缓,沉积物开始沉积并堆积形成扇状沉积。扇缘是冲洪积扇的边缘部分,位于下游的最低部分。扇缘的沉积物相对较细,主要由黏土和细砂组成。河流在扇缘的流速最慢,沉积物沉积和堆积最多,形成了较厚的沉积层^[12]。

2 样品数据来源

在综合考虑水文、气象等条件后,选取研究区的127个采样点数据进行分析(见图1)。采样时间为2020年9—11月,均为水井样,水样采集与保存参照《水质采样技术指导》(GB12998—91)和《水质采样样品的保存和管理技术规定》(GB12999—91)相关规定执行,送辽宁省地质矿产研究院检测分析。

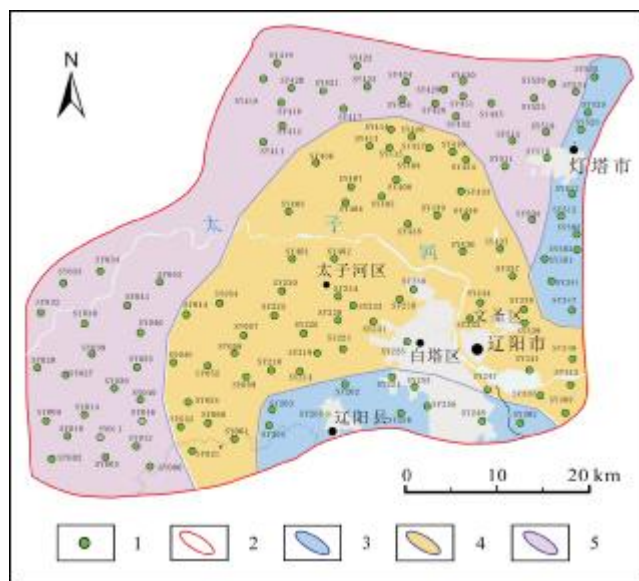


图1 太子河冲洪积扇地下水采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of groundwater sampling points in Taizi River alluvial-proluvial fan

1—采样点(sampling point); 2—冲洪积扇范围(fan area); 3—扇顶(root fan); 4—扇中(mid-fan); 5—扇缘(end fan)

根据太子河冲洪积扇地下水特点和环境特征,127组样品分别位于太子河冲洪积扇的不同部位,其中扇顶有20组样品,扇中有59组样品,扇缘有48组样品.本次研究选取8项基础指标和3项污染指标进行分析讨论.

3 地下水特征与成因分析

3.1 地下水水化学特征

3.1.1 地下水水化学组成

通过对表1数据分析可知,在扇区地下水中,阴阳离子质量浓度关系分别为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$.对比不同采样部位的样品的数值特征发现,扇顶地下水中除 HCO_3^- 外,其余离子质量浓度和溶解性总固体(TDS)明显高于其他部位.

通过Schoeller图所示的离子物质的量浓度变化趋势,可以反映不同采样点地下水补给来源是否相同^[13-14],每条折线代表一个水样,折线反映了各离子间物质的量浓度相对关系,折线变化趋势相同说明采样

点地下水补给来源相同^[15].如图2所示,通过对扇区地下水样品的Schoeller图分析可知,大多数水样的折线变化趋势相近,且随着地下水的流动,物质的量浓度逐渐变高,说明冲洪积扇大部分地下水补给来源相同,受人类活动影响的程度较小^[3].扇顶的SY508、SY502、SY512、SY526、SY535和扇中上游的SY348、SY341以及扇缘的SY006采样点地下水中 SO_4^{2-} 物质的量浓度偏高,分析可能是部分炼钢厂排放的污水进入地下水导致的;扇缘的SY002、SY038、SY422、SY455地下水中 Cl^- 物质的量浓度偏高,分析可能是上游城市生活污水及工业废水中携带的氯化物进入地下水导致的.这些点受外界因素干扰导致地下水中某些离子的浓度异常,致使折线变化趋势有别于其他采样点.

3.1.2 地下水水化学类型

如图3所示,扇区地下水水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{·SO}_4\text{-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{·SO}_4\text{·Cl-Ca}$ 型.太子河上游扇顶两侧山前地带受化工企业影响,地下水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{·SO}_4\text{·Cl-Ca}$ 型,扇顶中部地下水化学类型

表 1 主要离子质量浓度统计
Table 1 Mass concentration statistics of major ions

采样位置	样本数/个	项目	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	TDS
扇顶	20	均值	7.54	50.61	111.26	29.94	144.45	192.09	72.22	713.87
		中值	3.28	41.53	111.05	27.12	109.53	179.10	66.97	690.88
		标准差	11.63	33.76	53.43	17.99	108.23	84.90	50.91	304.27
		最小值	0.49	8.18	30.79	7.24	32.59	72.77	13.31	294.89
		最大值	49.42	122.20	249.00	77.11	429.60	417.79	228.80	1496.22
扇中	59	均值	2.91	27.83	89.10	18.62	82.62	199.90	43.49	431.04
		中值	1.55	23.66	79.31	16.21	66.85	207.10	38.97	383.73
		标准差	6.49	17.06	50.05	10.98	80.53	70.62	37.91	202.00
		最小值	0.13	7.77	29.92	5.70	1.72	60.07	2.36	157.36
		最大值	50.83	76.39	251.40	58.09	384.76	393.21	210.03	1186.40
扇缘	48	均值	1.40	28.80	88.33	16.70	50.56	238.32	48.43	401.43
		中值	0.91	22.88	72.51	14.43	14.05	229.44	23.39	354.15
		标准差	2.75	14.04	46.65	8.90	62.83	77.56	51.47	184.25
		最小值	0.13	10.50	24.00	3.95	0.02	76.46	3.75	156.08
		最大值	19.69	68.00	215.00	48.97	241.44	440.60	214.44	968.00

含量单位: mg/L.

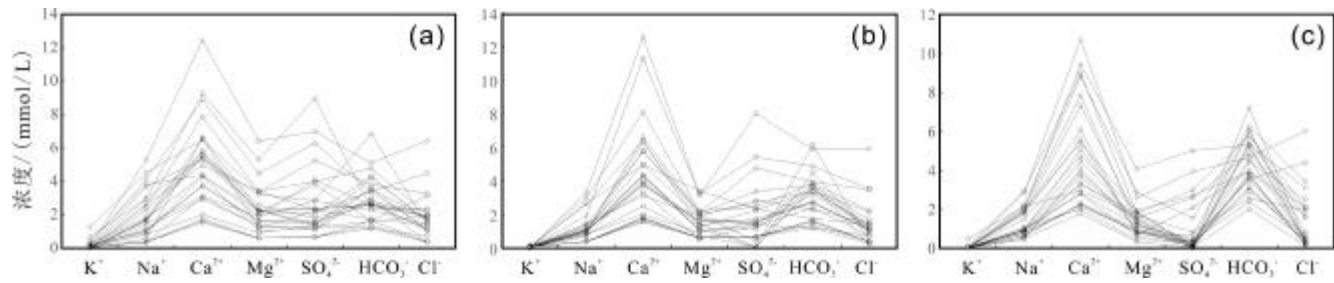


图 2 太子河冲洪积扇地下水主要离子 Schoeller 图

Fig. 2 The Schoeller diagrams for major ions in groundwater of Taizi River alluvial-proluvial fan

a—扇顶(root fan); b—扇中(mid-fan); c—扇缘(end fan)

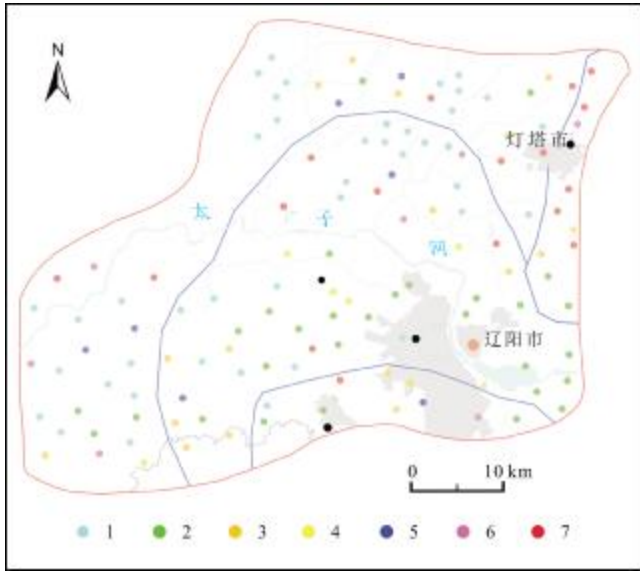


图 3 太子河冲洪积扇地下水水化学类型分布图

Fig. 3 Distribution map of hydrochemical types of groundwater in Taizi River alluvial-proluvial fan

1— $\text{HCO}_3\text{-Ca}$; 2— $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$; 3— $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}$; 4— $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$; 5— $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}$; 6— $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$; 7—其他(other) 为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型; 在扇中太子河以北地区地下水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 以南地区受钢铁厂影响, 地下水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型; 在扇缘水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 个别地区地下水呈 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型。

通过 Piper 三线图可以了解地下水主要离子组成及水化学演化特征^[16-18]。由利用 Aquachem 绘制的 Piper 三线图(图 4)可知, 太子河冲洪积扇地下水水化学类型较集中, 阳离子集中在 Ca^{2+} , 阴离子在扇顶—扇中—扇缘由 $\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}$ 向 HCO_3^- 集中。这是由于太子河中游扇中区域第四系盖层下 20~50 m 的基岩多为寒武系灰岩, 地下水与碳酸盐矿物水化, 导致阴离子集中

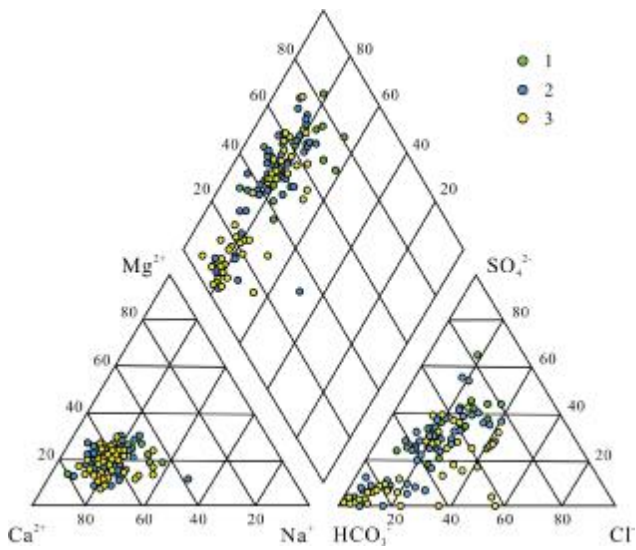


图 4 太子河冲洪积扇地下水 Piper 三线图

Fig. 4 Piper diagram of groundwater in Taizi River alluvial-proluvial fan

1—扇顶(root fan); 2—扇中(mid-fan); 3—扇缘(end fan)

在 HCO_3^- 。

3.2 地下水水化学成因分析

3.2.1 地下水形成作用

通过 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 与溶解性总固体(TDS)关系绘制的 Gibbs 图, 可以很好地揭示地下水演化的主要控制因素。利用 Gibbs 图来反映地下水化学成分的形成作用时, 当水样点落于图上右下角表明大气降水作用为主导因素, 落于左中部表明岩石风化作用为主导因素, 落于右上角表明蒸发结晶作用为主导因素^[19-22]。

如图 5 所示, 太子河冲洪积扇地下水 TDS 范围在 156.08~1 496.22 mg/L, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 数值范围在 0.09~0.61, $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 数值范围在 0.01~0.52。扇

区多数地下水点位于图中岩石风化作用区间(即 TDS 中等且阴阳离子质量浓度比值小于等于 0.5)^[19], 扇顶的 SY212 和扇中的 SY406、SY437 位于图中蒸发结晶作用区间(即 TDS 较大且阴阳离子质量浓度比值大于 0.5)。因此, 扇区地下水形成作用主要是岩石风化作用。

3.2.2 地下水水化学演化过程

通过对水体中各种离子比值关系的分析, 进一步推断太子河冲洪积扇地下水水文地球化学过程^[23-25]。

$\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+-\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+-\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 关系图可以反映地下水成分主要与何种矿物风化有关^[26-28]。如图 6 所示, 扇区地下水点主要分布在硅酸盐矿物和碳酸盐矿物溶解之间的区域。由此可知, 扇区地下水成分主要与硅酸盐矿物和碳酸盐矿物风化有关。通过对扇区区域背景分析可知, 上游山区主要出露有寒武系灰岩和前震旦系变质岩及混合岩, 扇区第四系地层中砂砾以石英砂岩为主, 这与图 6 所反映的情况一致。

Na^+/Cl^- - Cl^- 关系图可以用来判断地下水成分是否

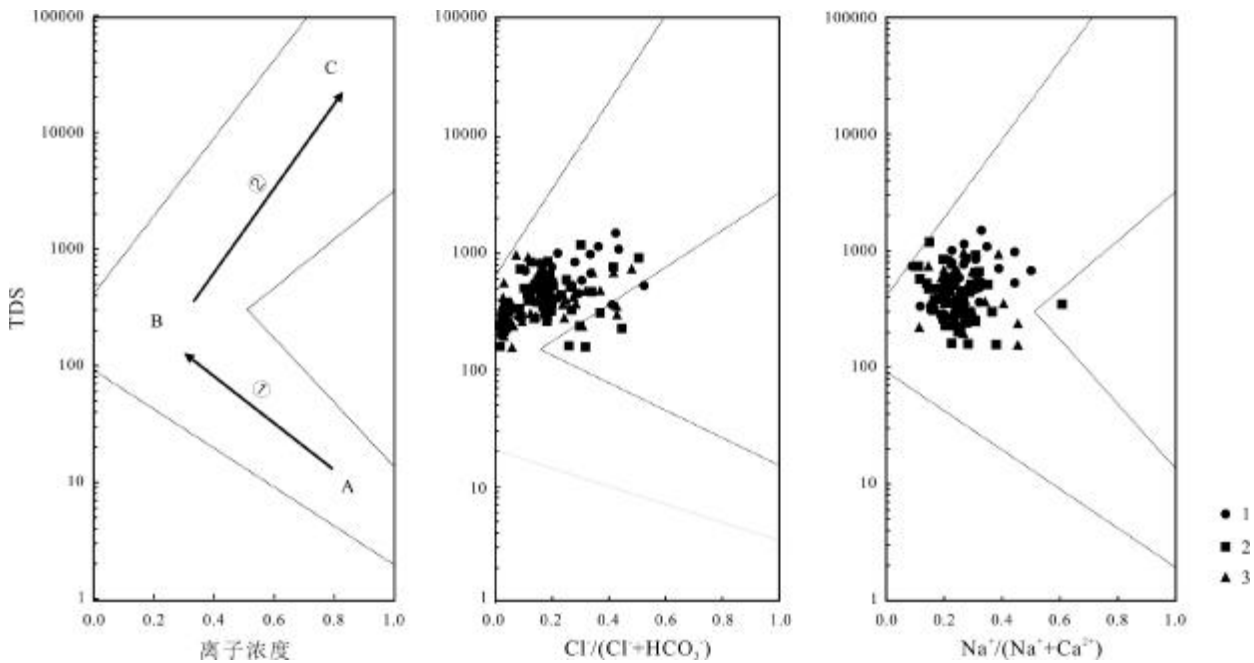


图 5 太子河冲洪积扇地下水 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs diagram of groundwater in Taizi River alluvial-proluvial fan

A—雨水(rainwater); B—岩石风化作用(rock weathering); C—海水(seawater); ①—降水作用(precipitation); ②—蒸发结晶作用(evaporative crystallization); 1—扇顶(root fan); 2—扇中(mid-fan); 3—扇缘(end fan)

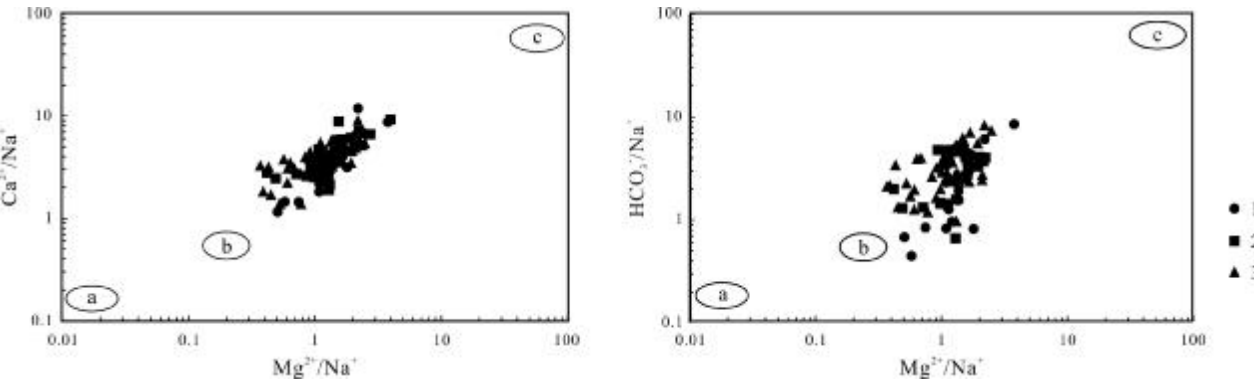


图 6 太子河冲洪积扇地下水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 摩尔浓度比值

Fig. 6 Molar concentration ratios of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ and HCO_3^- in groundwater of Taizi River alluvial-proluvial fan

a—蒸发盐岩(evaporite salt rock); b—硅酸盐岩(silicate rock); c—碳酸盐岩(carbonate rock); 1—扇顶(root fan); 2—扇中(mid-fan); 3—扇缘(end fan)

受到大气降水和盐岩溶解作用以外的因素干扰^[20, 29-30]。如图7所示,扇区地下水多数样品的 Na^+/Cl^- 比值在1附近,说明这些采样点 Na^+ 主要来源于大气降水和盐岩溶解。扇中和扇缘地下水部分样品的 Na^+/Cl^- 比值远大于1,说明这些采样点的地下水中 Cl^- 不足以平衡 Na^+ , 因此多出的 Na^+ 可能来源于其他岩石风化作用(含钠长石等矿物的硅酸盐岩类岩石的溶解)或离子交换作用。

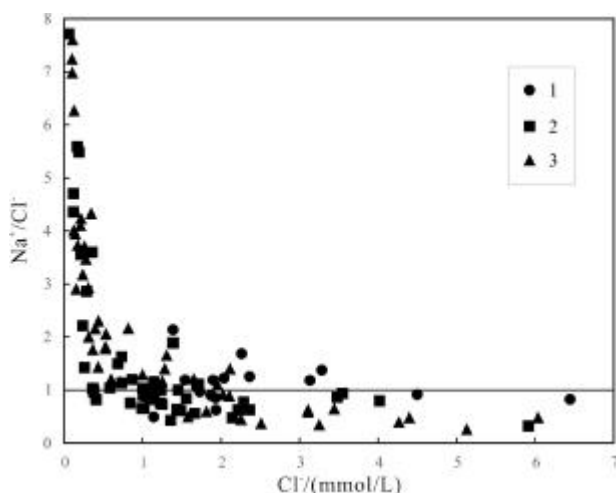


图7 太子河冲洪积扇地下水中 Na^+/Cl^- 与 Cl^- 的关系

Fig. 7 Relationship between Na^+/Cl^- and Cl^- in groundwater of Taizi River alluvial-proluvial fan

1—扇顶(root fan); 2—扇中(mid-fan); 3—扇缘(end fan)

$(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})-\text{HCO}_3^-$ 关系图可以反映地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 参与碳酸盐岩溶解的情况^[30-32]。如图8所示,扇缘地下水多数样品在 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-=1$ 附近,扇顶和扇中地下水多数样品位于 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^- > 1$ 的区域,说明在扇缘地下水中参与碳酸盐矿物溶解的主要离子有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- , 而在扇顶和扇中地下水中参与碳酸盐矿物溶解的还有其他离子。

据刘丛强^[33]研究可知,自然环境中,除了碳酸参与岩石风化外,硫酸也广泛参与碳酸盐矿物溶解。大气中 CO_2 溶解于水和碳酸盐岩溶解是碳酸的主要来源,矿床、煤层中的硫化物氧化、大气酸沉降和石膏的溶解是硫酸的主要来源^[32-34]。

碳酸盐矿物溶解过程反应方程式如下:

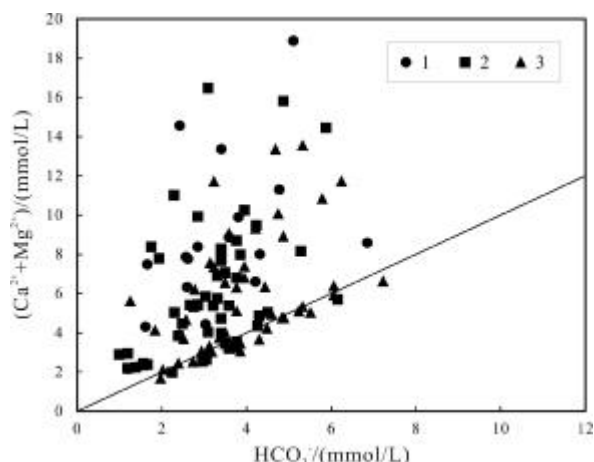
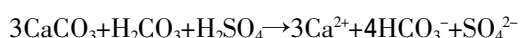
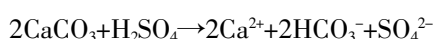
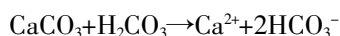
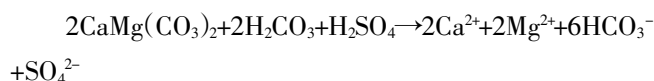
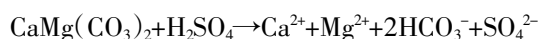
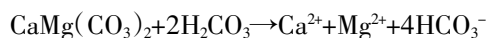


图8 太子河冲洪积扇地下水中 $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的关系

Fig. 8 Relationship between $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ and HCO_3^- in groundwater of Taizi River alluvial-proluvial fan

1—扇顶(root fan); 2—扇中(mid-fan); 3—扇缘(end fan)



为了研究碳酸和硫酸是否参与地下水碳酸盐岩溶解过程,根据碳酸盐矿物溶解反应公式内容可知,当仅有碳酸参与碳酸盐矿物溶解时, SO_4^{2-} 与 HCO_3^- 摩尔浓度应为0, $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 与 HCO_3^- 毫摩尔浓度比值为1;当仅有硫酸参与碳酸盐矿物溶解时,二者的数值分别为1和2;当碳酸和硫酸都参与碳酸盐矿物溶解时,二者的数值应该分别在0~1和1~2区间内。图9可以很好地反映碳酸和硫酸是否参与地下水碳酸盐岩溶解过程。如图9所示,扇顶和扇中地下水位于碳酸、硫酸共同参与碳酸盐岩溶解过程,扇缘地下水靠近碳酸参与碳酸盐岩溶解过程。

只考虑硫酸和碳酸参与地下水碳酸盐矿物溶解过程,利用图10中线性系数来判断岩盐溶解作用对地下水成分的影响程度。线性系数越接近1,说明地下水化学成分受盐岩溶解作用影响程度越大^[30]。如图10所示,除扇缘外,扇顶和扇中区域地下水中 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 与 $(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 毫摩尔浓度关系均为基本平衡(线性系数在0.8~0.9之间),线性系数分别为0.8418和0.806,而扇缘地下水线性系数为0.78,也接近基本平衡。由此可知,岩盐溶解作用是地下水中离子成分的主要影响因素,除此之外还有其他作用在影响水中离

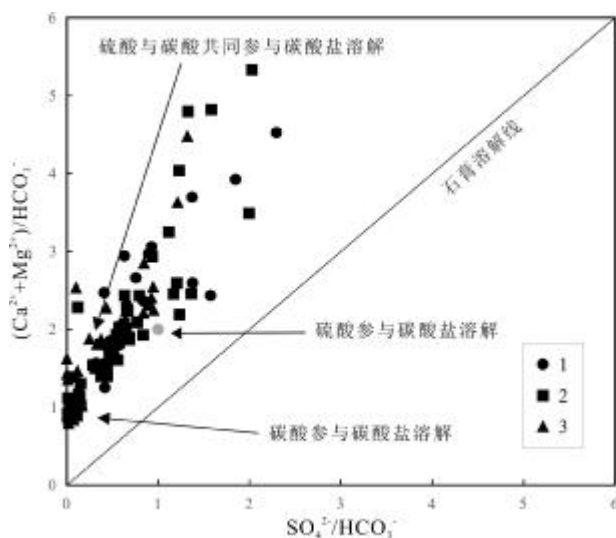


图9 太子河冲洪积扇地下水中 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 与 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 的关系

Fig. 9 Relationship between $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ and $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ in groundwater of Taizi River alluvial-proluvial fan
1—扇顶(root fan); 2—扇中(mid-fan); 3—扇缘(end fan)

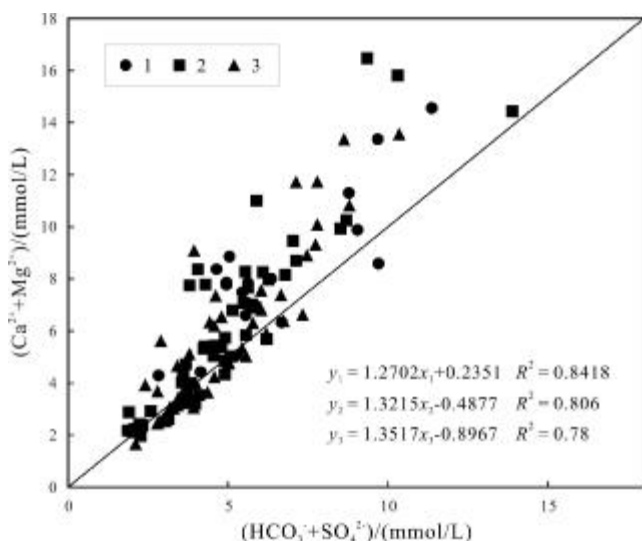


图10 太子河冲洪积扇地下水中 $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}$ 的关系

Fig. 10 Relationship between $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ and $\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}$ in groundwater of Taizi River alluvial-proluvial fan
1—扇顶(root fan); 2—扇中(mid-fan); 3—扇缘(end fan)

子成分。

自然条件下,岩石颗粒表面带有负电荷,当地下水经过带有岩石颗粒的土壤后,水中阳离子(主要是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+})被岩石颗粒表面吸附,而原来被吸附的阳离子(主要是 Na^+)被交换到地下水中,因此可以利用 $(\text{Ca}^{2+}+$

$\text{Mg}^{2+})-(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 与 Na^+-Cl^- 的毫摩尔浓度关系表示地下水中离子交换作用的强弱^[35]。如图11所示,扇区地下水水点靠近1:1线,其中扇顶水样点主要分布在左上区域,扇中和扇缘水样点主要分布在右下区域,说明扇顶地下水受离子交换作用影响较小,而扇中和扇缘地下水受离子交换作用影响较大。

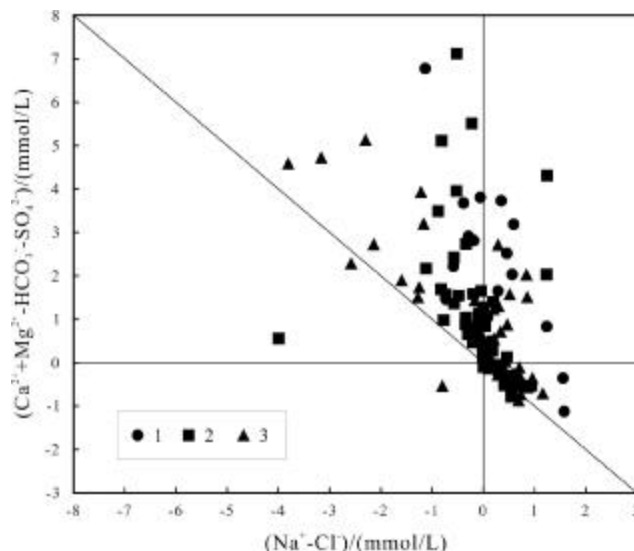


图11 太子河冲洪积扇地下水中 $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$ 与 Na^+-Cl^- 的关系

Fig. 11 Relationship between $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}-\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$ and Na^+-Cl^- in groundwater of Taizi River alluvial-proluvial fan
1—扇顶(root fan); 2—扇中(mid-fan); 3—扇缘(end fan)

图12可以反映地下水成分是否还受其他干扰因素影响^[38]。如图12所示,地下水中 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+\text{Na}^+)$ 与 $(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-)$ 的毫摩尔浓度关系在扇顶、扇中和扇缘分别为平衡、基本平衡和平衡,线性相关性分别为0.9596、0.8362和0.9417。由此可知,扇中地下水中主要离子可能还受其他因素干扰,但这种因素的影响较小。

3.3 人类活动影响

随着社会的不断发展,地下水污染问题日趋严重,其中氮污染是最常见的地下水污染问题之一,人类活动是主要影响因素。因此通过分析地下水中的“三氮”(硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮)分布特征,可以了解扇区地下水受人类活动影响的程度^[36-39]。

利用ArcGIS使用反距离权重插值法,绘制太子河冲洪积扇地下水“三氮”空间分布图^[40]。结合《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)评价研究区地下水

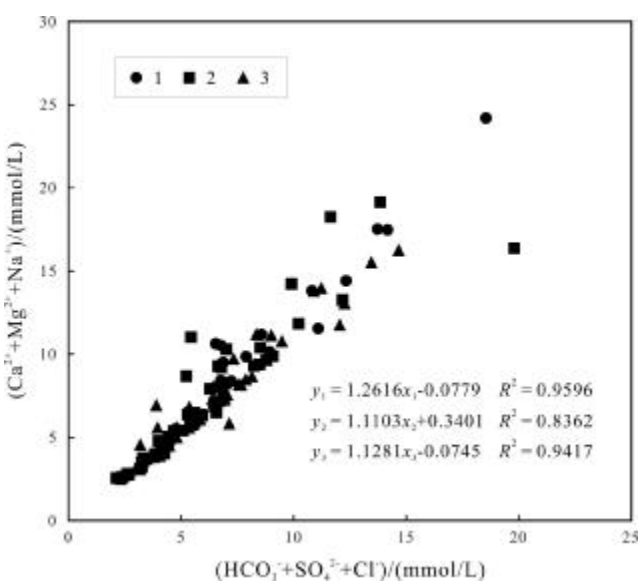


图 12 太子河冲洪积扇地下水中 $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+\text{Na}^{+}$ 与 $\text{HCO}_3^{-}+\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}$ 的关系

Fig. 12 Relationship between $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}+\text{Na}^{+}$ and $\text{HCO}_3^{-}+\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^{-}$ in groundwater of Taizi River alluvial-proluvial fan
1—扇顶(root fan); 2—扇中(mid-fan); 3—扇缘(end fan)

“三氮”的含量特征. 研究结果如下.

1)整个太子河冲洪积扇硝酸盐氮未达到Ⅲ类水标准的有 33.07%. 如图 13 所示,硝酸盐氮浓度偏高的地区主要在灯塔市张台子镇周边、文圣区西马峰镇南部区域以及辽阳县黄泥洼一带,是辽阳市重要煤炭矿区,地下水受煤炭采矿活动影响较大. 而辽阳县黄泥洼一

带主要是农业种植区,作物以玉米为主,地下水受农药化肥影响较大. 采矿和农业活动可能是导致这些地区地下水硝酸盐氮浓度偏高的主要原因.

2)亚硝酸盐氮和氨氮未达到Ⅲ类水标准的分别为 9.45%和 14.17%,表明扇区地下水受亚硝酸盐氮和氨氮污染均较轻. 如图 14 和图 15 所示,地下水中亚硝酸盐氮和氨氮浓度在空间分布特征上相似,主要位于首山镇—兰家镇一带,其他地区零星分布. 首山镇—兰家镇一带是当地重要钢铁厂分布区,地下水受冶金等

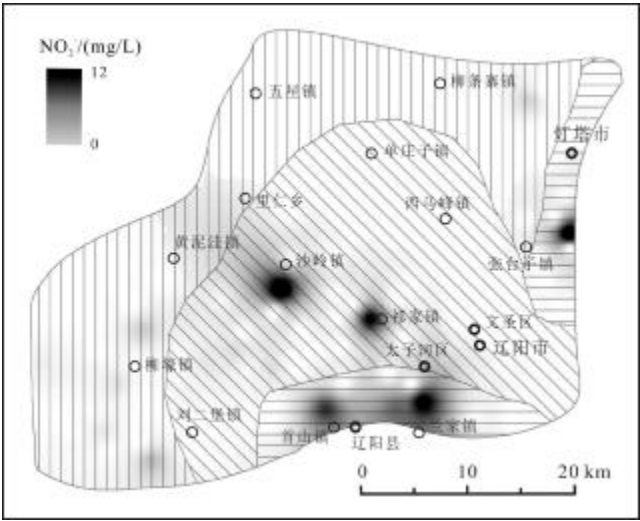


图 14 太子河冲洪积扇地下水亚硝酸盐氮浓度分布图

Fig. 14 Distribution map of nitrite nitrogen concentration in groundwater of Taizi River alluvial-proluvial fan

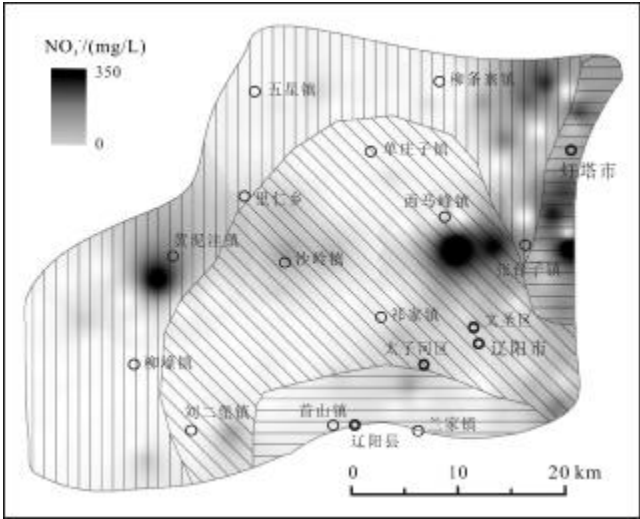


图 13 太子河冲洪积扇地下水硝酸盐氮浓度分布图

Fig. 13 Distribution map of nitrate nitrogen concentration in groundwater of Taizi River alluvial-proluvial fan

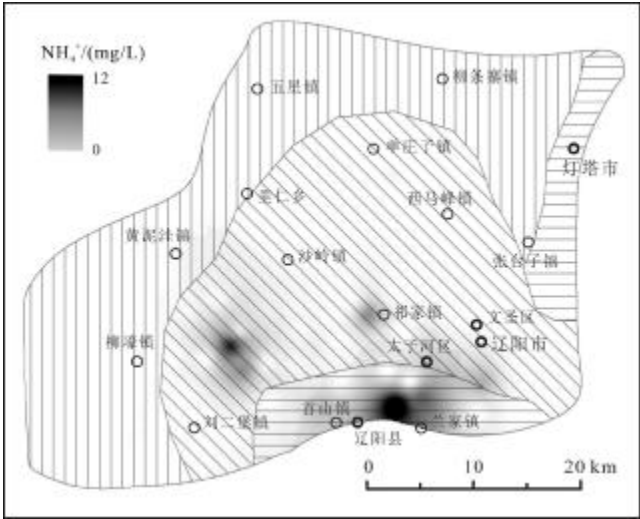


图 15 太子河冲洪积扇地下水氨氮浓度分布图

Fig. 15 Distribution map of ammonia nitrogen concentration in groundwater of Taizi River alluvial-proluvial fan

工业活动影响大,其他零星分布的点周边均存在化工、农药等污染源。由此可知,冶金、化工等工业活动是导致这些地区亚硝酸盐氮和氨氮浓度过高的主要原因。

4 结论

1)太子河冲洪积扇地下水受人类活动影响较弱,地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度较高;扇顶地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}$ 型,扇中地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型,扇缘地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型。

2)太子河冲洪积扇扇顶地下水演化主要受岩石风化作用(硫酸、碳酸共同参与的碳酸盐矿物溶解)控制;太子河冲洪积扇扇中地下水演化主要受岩石风化作用(硫酸、碳酸共同参与的碳酸盐矿物溶解)和离子交换作用共同控制,其中岩石风化作用为主要因素;太子河冲洪积扇扇前缘地下水演化主要受岩石风化作用(碳酸参与的碳酸盐矿物溶解)和离子交换作用共同控制,其中岩石风化作用为主要因素。

3)太子河冲洪积扇地下水中“三氮”污染问题主要受采矿、冶金、化工等工矿活动和农业活动的影响,空间分布特征与人类活动密切相关。

4)通过对太子河冲洪积扇地下水水化学类型和特征、水化学成因以及“三氮”污染现状的分析和研究,为下一步地下水水源地开发利用、地下水资源可持续开发等提供了科学依据。

致谢:中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心副主任、教授级高级工程师李铁锋对本文提出了建设性的意见,在此表示感谢。

参考文献(References):

- [1]王明君,梁秀娟,肖长来.双辽市地下水化学特征及成因分析[J].水利水电技术,2019,50(3):124-131.
Wang M J, Liang X J, Xiao C L. Analysis on chemical characteristics and genesis of groundwater in Shuangliao City[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(3): 124-131.
- [2]赵振,陈惠娟,段隆臣.巴音河冲洪积扇前缘地下水位上升灾害特征及影响因素[J].水资源保护,2023,39(3):142-147,169.
Zhao Z, Chen H J, Duan L C. Disaster characteristics and influencing factors of groundwater level rise in front edge of the Bayin River alluvial fan[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 142-147, 169.
- [3]段磊,王文科,曹玉清,等.天山北麓中段地下水水化学特征及其形成作用[J].干旱区资源与环境,2007,21(9):29-34.
Duan L, Wang W K, Cao Y Q, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanics of groundwater in the middle of northern slope of Tianshan Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(9): 29-34.
- [4]Reddy A G S, Kumar K N. Identification of the hydrogeochemical processes in groundwater using major ion chemistry: A case study of Penna-Chitravathi river basins in Southern India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 170(1/4): 365-382.
- [5]张人权,梁杏,靳孟贵,等.当代水文地质学发展趋势与对策[J].水文地质工程地质,2005,32(1):51-56.
Zhang R Q, Liang X, Jin M G, et al. The trends in contemporary hydrogeology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(1): 51-56.
- [6]Selvam S, Manimaran G, Sivasubramanian P, et al. GIS-based evaluation of water quality index of groundwater resources around Tuticorin coastal city, south India[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(6): 2847-2867.
- [7]Zhao X B, Guo H P, Wang Y L, et al. Groundwater hydrogeochemical characteristics and quality suitability assessment for irrigation and drinking purposes in an agricultural region of the North China Plain[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(4): 162.
- [8]薛超.辽宁省辽阳市水资源承载力评价[J].黑龙江水利科技,2020,48(1):25-28.
Xue C. Evaluation of water resources carrying capability of Liaoyang City in Liaoning Province[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020, 48(1): 25-28.
- [9]孙才志,胡冬玲,杨磊.下辽河平原地下水系统恢复力研究[J].水利水电科技进展,2011,31(5):5-10.
Sun C Z, Hu D L, Yang L. Recovery capacity of groundwater system in Lower Liaohe River Plain[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5): 5-10.
- [10]张国.辽阳市环境空气预警预报系统建设[J].科技展望,2017,27(9):312.
Zhang G. Construction of environmental air early warning and forecast system of Liaoyang City[J]. Technology Outlook, 2017, 27(9): 312. (in Chinese)
- [11]丁妍,李玉山,康荣秋.太子河冲积扇富水特征和富水地段分布规律[J].黑龙江水利科技,2011,39(3):15-17.
Ding Y, Li Y S, Kang R Q. Water-rich characteristics of alluvial fan of Taizi River and its distribution regularity in water-rich areas[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2011, 39(3): 15-17. (in Chinese)
- [12]杨劲松,姜高磊,赵华,等.内蒙古大青山山前第四纪冲洪积扇填图实践与思考[J].地质通报,2022,41(2/3):262-270.

- Yang J S, Jiang G L, Zhao H, et al. Geological mapping practice and exploration of Quaternary alluvial-pluvial fans along the Daqing Mountain, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(2/3): 262–270.
- [13]姜体胜, 曲辞晓, 王明玉, 等. 北京平谷平原区浅层地下水化学特征及成因分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(11): 122–127.
- Jiang T S, Qu C X, Wang M Y, et al. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater and the origin in the Pinggu Plain, Beijing[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(11): 122–127.
- [14]El Maghraby M M S. Hydrogeochemical characterization of groundwater aquifer in Al-Madinah Al-Munawarah City, Saudi Arabia[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(6): 4191–4206.
- [15]Sarikhani R, Ghassemi Dehnavi A, Ahmadnejad Z, et al. Hydrochemical characteristics and groundwater quality assessment in Bushehr Province, SW Iran[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(7): 6265–6281.
- [16]黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2016, 37(5): 1779–1787.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, et al. Major ionic features and their controlling factors in the upper-middle reaches of Wujiang River[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1779–1787.
- [17]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.
- Sun P A, Yu S, Mo F Z, et al. Hydrochemical characteristics and influencing factors in different geological background: A case study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(1): 123–131.
- [18]韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 等. 额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征[J]. *环境科学*, 2016, 37(4): 1345–1352.
- Wei H, Wu J K, Shen Y P, et al. Hydrochemical characteristics of snow meltwater and river water during snow-melting period in the headwaters of the Ertis River, Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(4): 1345–1352.
- [19]赵江涛, 周金龙, 梁川, 等. 新疆焉耆盆地平原区地下水演化的主要水文地球化学过程分析[J]. *环境化学*, 2017, 36(6): 1397–1406.
- Zhao J T, Zhou J L, Liang C, et al. Hydrogeochemical process of evolution of groundwater in plain area of Yanqi, Xinjiang [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(6): 1397–1406.
- [20]唐金平, 张强, 胡漾, 等. 漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析[J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3089–3098.
- Tang J P, Zhang Q, Hu Y, et al. Groundwater chemical characteristics and analysis of their controlling factors in an alluvial fan of Jianjiang River[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7): 3089–3098.
- [21]张英, 刘春燕, 王金翠, 等. 快速城镇化进程中典型冲洪积扇地下水化学演变特征及影响因素解析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(5): 172–179, 193.
- Zhang Y, Liu C Y, Wang J C, et al. Analysis of characteristics and influencing factors of groundwater chemical evolution of typical alluvial fans of rapid urbanization[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(5): 172–179, 193.
- [22]Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs diagram [J]. *Applied Geochemistry*, 2018, 97: 209–212.
- [23]Xing L N, Guo H M, Zhan Y H. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 70–71: 250–264.
- [24]Zhu B Q, Yang X P, Rioual P, et al. Hydrogeochemistry of three watersheds (the Erlqis, Zhungarar and Yili) in northern Xinjiang, NW China[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(8): 1535–1548.
- [25]马燕华, 苏春利, 刘伟江, 等. 水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用[J]. *环境科学*, 2016, 37(12): 4690–4699.
- Ma Y H, Su C L, Liu W J, et al. Identification of sulfate sources in the groundwater system of Zaozhuang: Evidences from isotopic and hydrochemical characteristics[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(12): 4690–4699.
- [26]Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1/4): 3–30.
- [27]吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应[J]. *环境科学*, 2016, 37(12): 4671–4679.
- Lü J M, An Y L, Wu Q X, et al. Rock weathering characteristics and the atmospheric carbon sink in the chemical weathering processes of Qingshuijiang River Basin[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(12): 4671–4679.
- [28]杜文越, 何若雪, 何师意, 等. 桂江上游水化学特征变化及离子来源分析——以桂林断面为例[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(2): 207–214.
- Du W Y, He R X, He S Y, et al. Variation of hydrochemical characteristics and the ion source in the upstream of Guijiang River: A case study in Guilin section[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(2): 207–214.
- [29]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.
- Zhang T, Cai W T, Li Y Z, et al. Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(11): 4537–4545.
- [30]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.
- Liu J T, Cai W T, Cao Y T, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater and the origin in alluvial-proluvial fan of Qinhe River[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12): 5428–5439.
- [31]Karim A, Veizer J. Weathering processes in the Indus River Basin: Implications from riverine carbon, sulfur, oxygen, and strontium isotopes[J]. *Chemical Geology*, 2000, 170(1/4): 153–177.

- [32]何朝鑫,陈翠华,李佑国,等.青海省都兰县双庆铁矿床金属硫化物地球化学特征及其指示意义[J].地球化学,2015,44(4):392-401.
- He C X, Chen C H, Li Y G, et al. Metal sulfides of the Shuangqing iron deposit in Dulan, Qinghai Province: Geochemical characteristics and implications[J]. *Geochimica*, 2015, 44(4): 392-401.
- [33]刘丛强,蒋颖魁,陶发祥,等.西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环[J].地球化学,2008,37(4):404-414.
- Liu C Q, Jiang Y K, Tao F X, et al. Chemical weathering of carbonate rocks by sulfuric acid and the carbon cycling in Southwest China[J]. *Geochimica*, 2008, 37(4): 404-414.
- [34]马秀平,井维鑫,王茜,等.丹河水系表层沉积物重金属污染及生态风险评价[J].农业环境科学学报,2010,29(6):1180-1186.
- Ma X P, Jing W X, Wang Q, et al. Heavy metal pollution in the surface sediment of Dan River and its ecological risk assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6): 1180-1186.
- [35]吕晓立,刘景涛,周冰,等.塔城盆地地下水氟分布特征及富集机理[J].地学前缘,2021,28(2):426-436.
- Lü X L, Liu J T, Zhou B, et al. Distribution characteristics and enrichment mechanism of fluoride in the shallow aquifer of the Tacheng Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(2): 426-436.
- [36]葛婷婷,周金龙,曾妍妍.新疆克里雅河流域平原区地下水“三氮”的空间分布特征及影响因素[J].干旱区资源与环境,2022,36(1):89-95.
- Ge T T, Zhou J L, Zeng Y Y. Spatial distribution characteristics of groundwater “three-nitrogen” in the plain area of the Keriya River basin in Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(1): 89-95.
- [37]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):145-153,162.
- Wu J L, Wang Y, Hu Q, et al. Hydrochemical characteristics and genetic analysis of groundwater in Leizhou Peninsula[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(1): 145-153, 162.
- [38]黄俊霖,郑明霞,苏婧,等.奎河河水入渗对河岸带地下水氨氮和硝酸盐氮浓度的影响[J].环境科学研究,2020,33(2):421-430.
- Huang J L, Zheng M X, Su J, et al. Effects of Kuihe River infiltration on the concentration of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in groundwater of riparian zone[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(2): 421-430.
- [39]李丽君,李旭光.西辽河平原浅层地下水中“三氮”分布特征及健康风险评价[J].地质与资源,2024,33(1):90-97. DOI:10.13686/j.cnki.dzyzy.2024.01.011
- Li L J, Li X G. Distribution of nitrogen in the shallow groundwater of West Liaohe River Plain and health risk assessment[J]. *Geology and Resources*, 2024, 33(1): 90-97. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2024.01.011
- [40]杨国华,冯文新,孟博.不同空间插值方法对某灌区地下水氮浓度分析结果的影响[J].成都理工大学学报(自然科学版),2021,48(4):488-496.
- Yang G H, Feng W X, Meng B. Influence of different spatial interpolation methods on the analysis results of groundwater nitrogen pollution in an irrigated area[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2021, 48(4): 488-496.