

青海省北川河流域地下水水化学特征与水质评价

朱亮¹, 刘景涛^{1,2}, 杨明楠^{1,2}, 刘春燕^{1,2}, 周冰^{1,3}, 解飞¹, 李备¹

[1.中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2.中国地质调查局/河北省地下水污染机理与修复重点实验室, 河北 石家庄 050061; 3.中国地质大学(北京), 北京 100083]

摘要: [目的] 分析北川河流域地下水水化学特征, 从地下水的资源属性角度出发客观评价流域地下水水质状况, 为区域地下水环境保护提供数据支撑。[方法] 利用 2019 年北川河流域水文地质水资源调查所获取的 189 组地下水化学数据分析流域地下水化学成分分布特征和来源。依据地下水富水性分级对单个样品点的水质类型赋予不同的系数, 构建基于地下水富水性分级的区域水质评价方法。[结果] 北川河流域地下水化学分布具有较大的空间变化。上游丘陵山区和河谷平原区广泛分布 HCO₃⁻ 型淡水, 向下游逐渐出现 SO₄²⁻, Cl⁻ 类型的微咸水、咸水以及指示人类活动影响的 HCO₃⁻ · Cl-Na 型淡水; 碳酸盐岩和硅酸盐岩风化溶解对地下水水化学组分来源具有控制作用, 局部区域因蒸发浓缩而富集; Al, Fe, Th 等天然背景元素是造成流域地下水水质超标的主要指标, Pb, CCl₄, NO₃⁻ 等典型污染组分在工业区和人口集中区地下水中超标更加明显, 在人为污染及天然高背景双因素驱动下河谷区地下水水质更加复杂; 基于采样点数量统计的丘陵山区和河谷平原区地下水超标率分别为 57.0%, 27.1%, 而基于富水性分区的水质评价结果中, 超标率分别降为 29.4% 和 12.6%。[结论] 北川河流域大部分地区地下水化学受自然背景因素控制, 人为污染的影响主要集中在中下游河谷平原区; 基于地下水富水性分级的区域水质评价方法能够突出优质地下水富水地带在区域地下水水质评价中的比重, 实现了水质评价结果与水量的结合, 有效降低区域地下水水质评价结果中超标率过高的问题。

关键词: 地下水; 水化学; 富水性; 水质评价; 污染

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0235-07

中图分类号: P641

文献参数: 朱亮, 刘景涛, 杨明楠, 等. 青海省北川河流域地下水水化学特征与水质评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 235-241. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.032; Zhu Liang, Liu Jingtao, Yang Mingnan, et al. Chemical characteristics and quality evaluation of groundwater in Beichuan River basin in Qinghai Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 235-241.

Chemical Characteristics and Quality Evaluation of Groundwater in Beichuan River Basin in Qinghai Province

Zhu Liang¹, Liu Jingtao^{1,2}, Yang Mingnan¹, Liu Chunyan¹, Zhou Bing^{1,3}, Xie Fei¹, Li Bei¹

[1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 50061, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Contamination and Remediation, China Geological Survey & Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: [Objective] The chemical characteristics of groundwater in Beichuan River basin were analysed, and groundwater quality was evaluated objectively from the perspective of resource attributes of groundwater in order to provide data support for regional groundwater environmental protection. [Methods] 189 sets of groundwater chemical data acquired by hydrogeological surveys in 2019 were selected to analyze the distribution characteristics and sources of groundwater chemical composition in Beichuan River basin. An evaluation method for regional groundwater quality was constructed by assigning different coefficients for water quality

收稿日期: 2021-11-09

修回日期: 2021-12-10

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目“湟水河流域水文地质调查”(DD20190331)

第一作者: 朱亮(1984—), 男(汉族), 河南省平顶山市人, 博士, 研究方向为地下水资源与水环境。Email: liangzhuz@163.com。

通讯作者: 刘景涛(1981—), 男(汉族), 河北省石家庄市人, 研究员, 博士生导师, 研究员, 主要从事地下水污染调查方面的研究工作。Email: 444751823@qq.com。

type to a single sampling point. [Results] The groundwater chemical distribution of Beichuan River basin exhibited a large spatial variability. HCO_3^- -type freshwater was widely distributed in the upstream sections of the hilly mountainous area and the valley plain area, and SO_4^{2-} , Cl-type brackish and salt water, as well as $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl-Na}$ type freshwater gradually appeared downstream, indicating human activities. Weathered dissolution of carbonate rock and silicate rock controlled the source of groundwater chemical components, but local areas were enriched due to evaporation concentration. Natural background elements such as Al, Fe, and Th were the main influencing indicators that had exceeded the underground water quality standard in the study area, but typical contamination components such as Pb, NO_3^- , and carbon tetrachloride were more obvious in the industrial zone and the population-concentrated area. Under the driving influences of human pollution and naturally high background conditions, the underground water quality in the river valley plain was more complicated. The over-standard ratios of the hilly mountainous region and the valley plain region based on the quantity of sampling points were 57.0% and 27.1% respectively, but these values were reduced to 29.4% and 12.6% according to the new evaluation method proposed in this study. [Conclusion] The impact of human pollution on the chemical components of groundwater was mainly concentrated in middle and lower reaches of the valley plain zone, and chemical components of groundwater in most other regions were controlled by natural background conditions. Through the newly proposed regional groundwater quality evaluation method, groundwater quality evaluation results and groundwater resources were combined, and the proportion of abundant high quality groundwater area was highlighted in the whole area. Finally, the problem of excessive over-standard rate in the regional groundwater quality evaluation results was effectively resolved.

Keywords: groundwater; hydrochemistry; groundwater abundance grade; water quality evaluation; pollution

地下水是中国水资源的重要组成部分。据统计中国 20%左右的供水水源来自于地下水,地下水水质状况对保障供水安全、促进生态文明建设具有重要意义^[1-2]。通过 2005—2015 年开展的全国地下水污染调查评价工作,基本掌握了东北平原、华北平原、长三角、珠三角、东南地区、西南地区、西北地区和西藏地区等主要平原盆地区的地下水水质及污染状况,根据近 3 万组浅层地下水水质评价的统计结果,大部分区域地下水样品超标率较大,其中,西北地区、东北地区的超标率都在 80%以上^[3]。2019 年,全国 10 168 个国家级地下水水质监测点中,Ⅰ—Ⅲ类水所占比例仅为 14.4%^[4]。以上水质评价结果显示中国区域地下水水质超标率高,这与我们普遍认为的地下水水质相对较好,可作为优良的供水水源的大众认知相悖,这可能与评价方法的选取有关。不同评价方法的评价结果之间存在着一定程度的差异。从最直观的单因子污染指数法^[5],到较为复杂的数学表达和计算步骤的神经网络法^[6]、模糊综合评价法^[7]、物元可拓法^[8]、主成分分析法及综合污染指数法等^[9],再到《区域地下水污染调查评价规范(DZT0288-2015)》推荐的层级阶梯评价方法^[10],随着水质评价方法不断改进,对单个采样点的水质评价结果也更加科学,尤其是层级阶梯评价方法,区分了人为污染和天然背景对水质的影响作用,成为科学评价单点水质及污染状况

的有效方法^[11-12]。以上各种方法基本是针对单个采样点水质评价结果的改进,而在区域地下水水质状况评价上,仍是简单地基于单个采样点水质分类结果的数学统计。这种基于样品点数量的统计结果,其问题在于只是将地下水样品作为一个单纯的环境要素,而忽略了不同样品点的资源属性,因此,不能从量的角度表达可用于供水的地下水水质状况。事实上,受水文地质条件限制,一个区域内水量丰富且水质优良的地下水分布面积往往不大,比如,在北方地区多集中在山前冲洪积扇的后缘或第四系厚度较大的河谷平原内,在统一的采样精度控制下,这些优质富水地带的采样点数量在整个区域内采样点数量中的比例非常小,因此,单纯基于样品点数量的统计结果就弱化了优质地下水富水带在区域地下水水质中的比重,这是导致目前区域地下水水质评价结果中超标率过高的关键。

本文结合“湟水河流域水文地质调查”项目中的地下水化学测试数据,在流域地下水水化学特征和水化学成因分析的基础上探讨劣质地下水的分布和成因,进一步结合单个地下水采样点的水质分类,提出基于富水性分区的区域地下水水质表达方法,并在北川河流域地下水水质评价中进行检验,旨在提高区域地下水水质评价结果表达的科学性和应对社会大众对目前地下水超标率过高的舆情具有理论和现实意义。

1 研究区概况

北川河位于青海省东部青藏高原与黄土高原的接壤地带,是湟水河一级支流,黄河二级支流,全长149 km,流域总面积3 371 km²,地形上从西北向东南呈C字形,气候上属大陆性半干旱气候,且具有典型的垂直分带性。地貌类型上可分为基岩山区、黄土丘陵区 and 河谷平原区3种地貌单元。基岩山区大气降水入渗补给地下水后沿构造断裂、裂隙运移,大部分以泉的形式排泄于冲沟中,少部分以地下潜流的形式补给干流河谷潜水;黄土丘陵区地下水主要接受基岩裂隙水的侧向补给及少量大气降水入渗补给,一部分以沟间分水岭为界,向两侧冲沟流泄,一部分顺坡降向干流河谷平原区排泄,但由于径流量较小,因此对于干流河谷潜水无实际补给意义;河谷区潜水主要接受上游地下水径流补给、河水渗漏补给、大气降水入渗补给以及农田灌溉水入渗补给,受基地起伏的影响,河谷潜水与河水互为补给和排泄,转换频繁,关系密切。

流域地下水资源量为 4.60×10^8 m³/a,其中河谷区面积占流域总面积的18.1%,而地下水资源量占流域地下水资源总量的50%左右。地下水水量极丰富和丰富的地段主要分布于大通县以北至城关镇及黄家寨至二十里铺一带的河漫滩和I, II级阶地内,含水层岩性均为第四系砂砾卵石层,地下水主要接受河水和地下径流补给,多个地下水水源地均分布在该区域内,供水量可达到 2.00×10^5 m³/d。

2 评价方法与评价数据

2.1 评价方法

假设一个区域内的地下水采样点数量为 n 个,其中,根据单个样品点水质的评价结果,第 K ($K = I, II, III, IV, V$)类水的数量为 m 个,目前所用的区域水质表达方法中,第 K 类水所占比例即为 m 和 n 的比值。基于富水性分级的区域地下水水质表达方法中,依据富水性特征对单个样品点的水质类型赋予不同的系数,用地下水富水系数来表征不同样品点所代表的地下水的供水能力,则第 K 类水的所占比例计算公式为:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^m \gamma_j}{\sum_{i=1}^n \gamma_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为该区域 K 类水的比例(%); γ_j 为第 j 个 K 类水样品点处地下水的富水系数; γ_i 为第 i 个样

品点处地下水的富水系数; m 为第 K 类水的数量; n 为采样点数量。

根据公式(1)计算的 K 类水的统计结果已经不再是简单的样品点数量的比值,而是样品点所代表的地下水供水能力的比值,该结果强化了优质地下水富水区在区域地下水水质中所占的比重,能够更好地从水量的角度表达区域地下水作为供水水源的水质状况。

2.2 评价数据

2019年在北川河流域开展水文地质调查的基础上,综合考虑流域水文地质条件、地下水开发利用状况及主要污染源分布等,以满足区域地下水水质控制、兼顾主要污染源及重要地下水水源地的原则布设地下水采样点,取样点类型包括居民分散开采井、集中供水水源井、地下水环境监测井和天然出露的泉水。其中,地下水环境监测井采样时,提前一天进行抽水洗井,第二天待水位恢复后再进行取样,其他采样点则直接采样。本次共采集地下水样品189组,其中,丘陵山区96组,多以泉水的形式在沟谷坡脚及沟脑处出露,地下水类型包括基岩裂隙水、黄土底砾石潜水和碎屑岩类裂隙孔隙水;河谷平原区93组,地下水类型以砂卵砾石潜水为主,井深多在30 m以内,地下水位埋深小于10 m。重金属指标加入0.1%体积的1:1硝酸作为保护剂,挥发性有机指标加入0.25%体积的1:1盐酸作为保护剂。有机测试样品采集后放入保温箱冷藏保存,并在7 d之内送至实验室完成前处理。所有样品由自然资源部地下水矿泉水与环境检测中心测试完成,测试指标共66项,包括无机28项、微量有机38项。

3 结果与分析

3.1 地下水化学特征

3.1.1 地下水化学分布 从主要水化学指标的统计结果来看(表1),研究区地下水pH值介于6.4~8.8,平均值为7.71,整体呈弱碱环境;溶解性总固体(TDS)介于75~3 710 mg/L,平均值为482.43 mg/L,其中,淡水、微咸水、咸水的所占比例分别为90.7%, 8.2%, 1.1%;从各组分含量的变异系数来看,阴阳离子中 Cl^- , Na^+ 的变异系数最大,说明其在流域内含量分布差异最为明显,可能与人类活动影响有关。在不同地貌分区上,丘陵山区地下水宏量组分 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- 及TDS普遍小于河谷平原区。地下水化学指标的分布特征反映出含水介质、地下水径流路径和人类活动等综合因素对流域地下水化学形成的控制作用。

表 1 北川河流域主要地下水化学组分统计结果

分区	指标	pH 值	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
丘陵山区 n=96	最大值/(mg·L ⁻¹)	8.60	3 592	7.96	968.2	180.4	123.3	618	1 320	604.10	96.543
	最小值/(mg·L ⁻¹)	6.86	75	0.56	2.47	17.49	3.16	1.75	9.67	43.32	0
	平均值/(mg·L ⁻¹)	7.76	397.45	1.99	44.24	71.52	18.13	32.79	80.75	238.81	17.48
	变异系数/%	5.01	108.97	58.11	278.40	42.88	88.91	252.01	192.94	45.29	100.96
河谷平原区 n=93	最大值/(mg·L ⁻¹)	8.80	3 710	14.05	1139	219.9	211	1 744	1 136.5	689.50	268.59
	最小值/(mg·L ⁻¹)	6.40	89	0.87	3.23	12.77	2.91	2.45	10.01	61.02	0
	平均值/(mg·L ⁻¹)	7.64	603.63	3.85	82.33	87.93	31.23	87.57	145.34	272.52	36.14
	变异系数/%	5.22	90.93	72.12	172.09	44.15	106.16	219.72	126.99	45.88	101.79
全区 n=189	最大值/(mg·L ⁻¹)	8.80	3 710	14.05	1 139.0	219.9	211.0	1 744.0	1 320	689.50	268.59
	最小值/(mg·L ⁻¹)	6.40	75	0.56	2.47	12.77	2.91	1.75	9.67	43.32	0
	平均值/(mg·L ⁻¹)	7.71	482.43	2.84	57.21	79.10	23.61	50.54	107.13	253.90	25.38
	变异系数/%	5.17	103.65	80.15	232.59	45.14	111.76	291.37	160.95	46.32	116.88

在地下水水化学 Piper 三线图上(图 1),地下水水化学类型沿地下水流向上存在明显的变化特征,上游地区地下水水化学类型均以 HCO₃-Ca 型水为主,随着地下水径流路径增加,SO₄²⁻,Cl⁻,Mg²⁺,Na⁺ 的所占比例逐渐增加。受沉积地层中石膏、芒硝等易溶盐分布的影响,在下游红层丘陵区出现 SO₄Cl-Na 型水;河谷平原区水化学类型相对于丘陵山区而言更加

复杂,在中下游河谷区,受红层丘陵区地下水侧向补给和人类活动的双重影响,出现 Cl-Na 型、SO₄-Na 型水,尤其是低矿化度的 HCO₃Cl-Na 型水,明确指示了人类活动对地下水化学的影响作用^[13-15]。总体来看,北川河地下水水化学特征具有明显的空间分布特征,中上游的丘陵山区和河谷平原区广泛分布 HCO₃ 型淡水,向下游逐渐出现 SO₄,Cl 类型的微咸水、咸水。

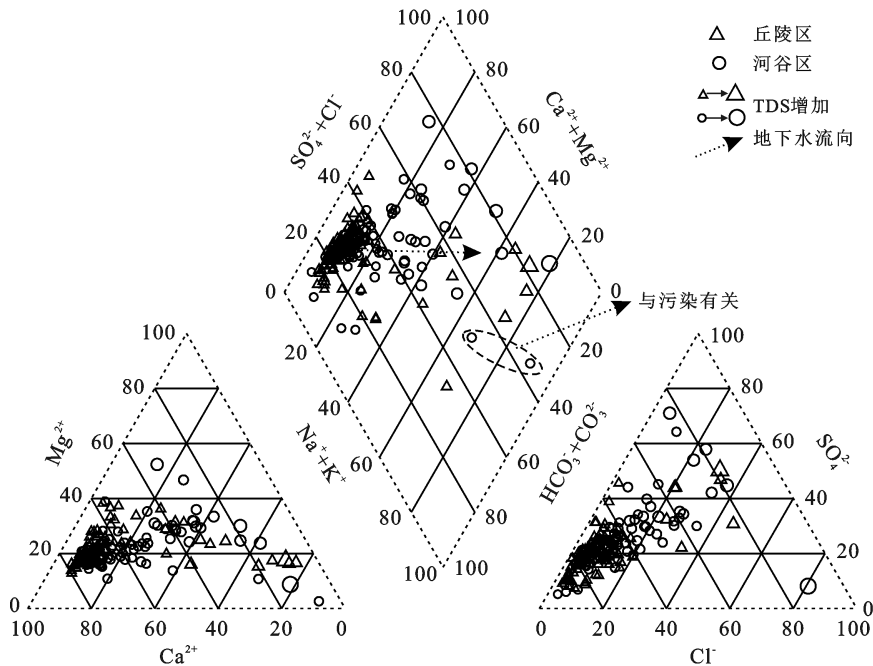


图 1 北川河流域地下水化学 Piper 图

3.1.2 水化学成因及主要离子的来源分析 Gibbs 图通过 TDS 与 Na⁺,Ca²⁺ 的摩尔比值 { $\rho(\text{Na}^+)/[\rho(\text{Na}^+)+\rho(\text{Ca}^{2+})]$ } 的关系可以指示大气降水、蒸发浓缩及岩石风化溶解作用对水化学过程的控制作用^[16]。

从本次地下水 Gibbs 图中可以看出(图 2),总体上流域内的地下水样品点主要集中在模型的中部,其

次是中上部,这一分布特征表明,研究区地下水水化学特征主要受岩石风化作用控制,其次是蒸发浓缩作用控制,其中,丘陵山区与河谷平原区地下水 $\rho(\text{Na}^+)/[\rho(\text{Na}^+)+\rho(\text{Ca}^{2+})]>0.5$ 的样品比例分别为 9.3%和 27.5%,说明蒸发浓缩作用对河谷平原区地下水的控制作用明显大于丘陵山区,这与河谷区地下水埋深浅、蒸发强度大等因素相关。

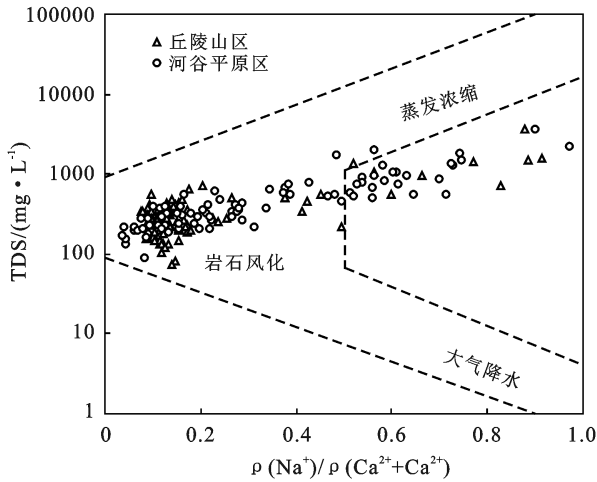


图 2 北川河流域地下水化学 Gibbs 图

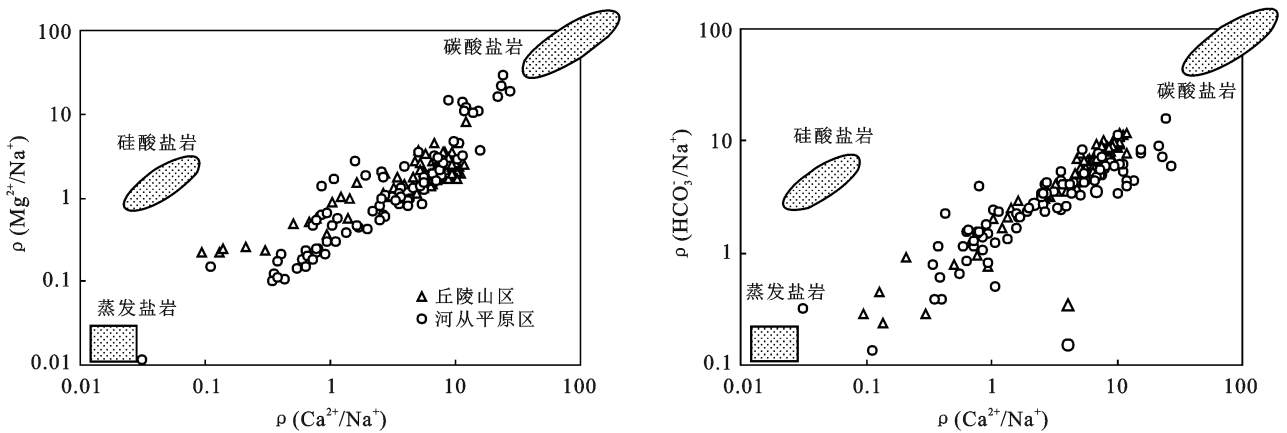


图 3 北川河流域地下水化学端元比值

$\rho(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\rho(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ 可以表示地下水中 Ca^{2+} , Mg^{2+} 的来源^[19-20]。除个别样品点外, 丘陵山区绝大部分地下水中 $\rho(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\rho(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ 的接近 1 : 1 (图 4), 说明 Ca^{2+} , Mg^{2+} 主要来源于石膏、方解石和白云石的风化溶解^[16]; 而河谷平原区地下水中 $\rho(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\rho(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ 的分布分散于 1 : 1 线的两侧, 说明河谷区地下水补给来源复杂及受人类活动影响的特征。 $\rho\text{Na}^+/\rho\text{Cl}^-$ 可以表示 Na^+ 的来源, 一般地大气降水的 $\rho\text{Na}^+/\rho\text{Cl}^-$ 约为 0.86, 盐岩溶解 $\rho\text{Na}^+/\rho\text{Cl}^-$ 接近 1^[21], 而研究区内 $\rho\text{Na}^+/\rho\text{Cl}^-$ 以大于 1 为主 (图 4), 说明大气降水及盐岩溶解对地下水化学成分的影响相对较弱, Na^+ 一方面来源于硅酸盐溶解, 另一方面还可能来源于人为排放的高 Na^+ 渗入水的影响, 比如, 工业废水中除垢所产生的 Na^+ 交换废液等^[22]。 NO_3^- 主要来源于农业及城市生活污染物的排放, 是典型的人为污染组分, 而 SO_4^{2-} , Cl^- 主要来源于沉积物中矿物的风化溶解, 但也可能受到人为污染物输入的影响, 因此 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 和 $\rho(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$

地下水中的宏量组分一方面受沉积环境、含水层介质、地下水径流路径等天然条件的影响, 另一方面还受地表污染物排放影响。 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$, $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 及 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 等离子比值与水岩作用程度密切相关^[17-18], 通过地下水不同岩性端元间的对比可以判别流域不同岩石风化类型对地下水中溶质的影响^[19]。由图 3 可知, 丘陵山区样品点在碳酸盐岩端元的集中程度更明显, 且有一小部分略偏向于硅酸盐岩端元, 指示了丘陵山区地下水中离子的来源以碳酸盐岩溶解为主, 其次是硅酸盐岩; 而河谷平原区样品点主要在硅酸盐岩和碳酸盐岩之间分布较为平均, 说明河谷平原区地下水中离子受碳酸盐岩和硅酸盐岩分化解作用共同控制。

的关系可以表示人为污染对 SO_4^{2-} , Cl^- 的影响, 丘陵山区和河谷平原区 $\rho(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ 均存在随 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 增加而增大的趋势, 且河谷平原区的增加趋势更加明显 (图 4), 这一变化关系明确指示了污染物输入的影响。

3.2 地下水质量空间分布

依据《地下水质量标准 (GB/T14848-2017)》中的水化学指标分类标准, 采用单指标评价方法对 189 个地下水中样品进行水质分类, 结果显示 (图 5), 全区未超标的地下水样品点 109 组, 主要分布在外围的基岩山区和干流上游及各大支流河谷区, 这些地区降水充分, 地下水接受大气降水补给后以泉水的形式排泄, 地下水径流路径短、循环周期快, 不利于矿物元素在地下水中的富集; 另外, 在中下游的石家庄水源地、塔尔水源地等傍河水源地开采段, 第四系松散沉积层厚度大, 河水大量入渗形成了地下水最主要的补给源, 由于河水水质优良且河谷阶地上无明显的污染源分布, 因此, 在这些区段河谷区形成了水量丰富的优质地下水水源。

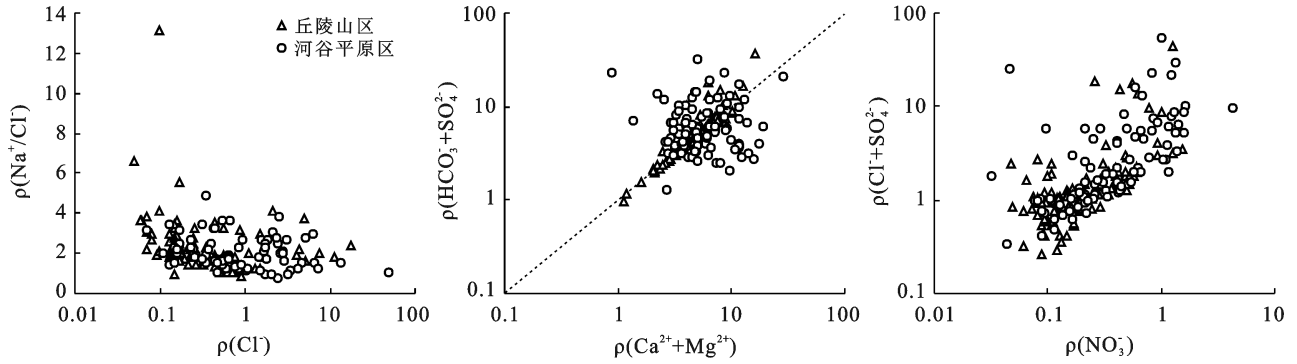


图 4 北川河流域地下水主要离子的比值关系

全区共有超标样品点 80 个,其中,丘陵山区和河谷平原区超标点数量分别为 26 个和 54 个,超标点主要分布在中下游河谷区、两岸的黄土丘陵地区以及上游支流宝库河、黑林河两岸的基岩山区(图 5)。

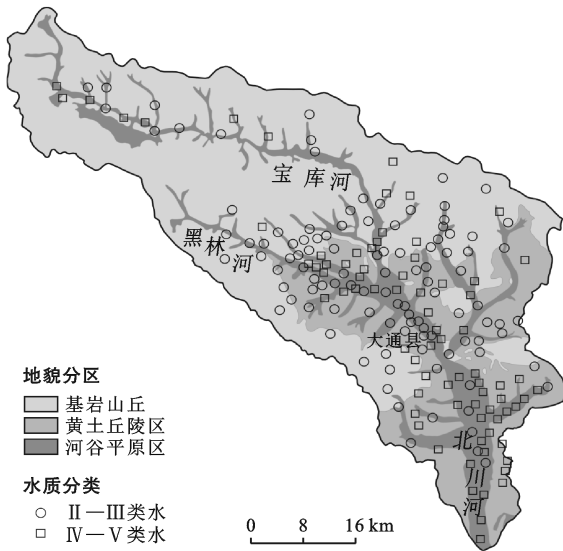


图 5 北川河流域地下水水质等级分布

超标指标包括铝、铁、总硬度、硫酸根、溶解性总固体、钠、锰、氯离子、耗氧量等 9 项无机常规指标,砷、氟、铅、镉、硝酸盐、铵根、六价铬等 7 项无机毒理指标和氯乙烯、四氯化碳、苯并(a)芘等 3 项微量有机质标,从各指标的超标贡献率(图 6)可以看出,铝、铁、总硬度、砷、硫酸根、溶解性总固体等的超标贡献率远大于其他指标,这些指标一般来源于地层中矿物成分的溶解、富集,说明天然背景值是决定北川河流域地下水质量超标程度的主要指标;各指标在河谷区的超标贡献率远大于丘陵山区,这一方面是由于河谷区地下水矿物元素随径流路径的增加而富集,另一方面,河谷区的人类活动污染物排放加剧了地下水水质恶化,尤其是在大通县城以南的河谷区内,由于阶地中后缘分布着众多的化工、冶金等重污染企业,且在

基底抬升的作用下上游河谷区地下水开始溢出补给河水,水位埋深变浅,在径流过程中极易受地表污染物入渗影响,导致整个河谷区地下水出现不同程度的污染,河谷区地下水中铅、四氯化碳、硝酸盐、氯乙烯等典型污染指标的超标贡献率明显大于丘陵山区,且这些污染指标与周边的主要污染源类型相一致,这也是人类活动加剧河谷区地下水水质恶化的直接证据。

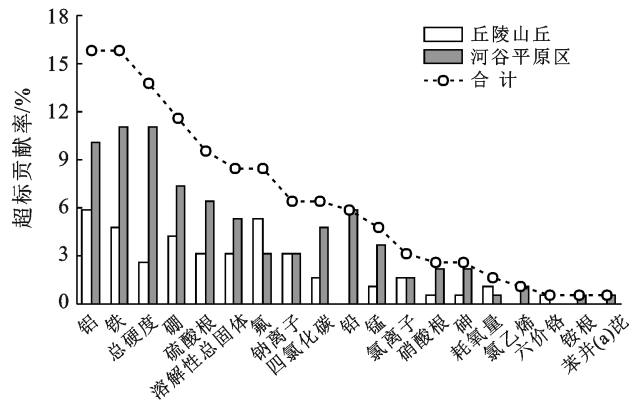


图 6 北川河流域不同地貌单元水化学指标超标贡献率

3.3 基于资源属性的水质评价

按照目前基于样品点数量进行区域水质评价的统计方法,北川河流域丘陵山区和河谷平原区地下水超标率为分别为 27.1%,57.0%。这一评价结果表示的是不同地貌单元上超标地下水的分布状况,其问题在于仅将地下水作为一个单一的环境要素来看待,未能从水量层面上反映地下水的资源属性,而基于地下水富水性分级的区域水质评价方法则能够解决上述问题。

公式(1)中,地下水富水系数 γ 是根据地下水富水性分级进行赋值的。由于在地下水富水性分区图上,河谷平原区和丘陵山区地下水富水性分级的计量单位不同且无法进行统一,所以,不同区域采用不同的富水系数赋值体系。河谷平原区单井涌水量 $< 100, 100 \sim 1000, 1000 \sim 5000, > 5000 \text{ m}^3/\text{d}$ 的水井采样点数量所占比例分别为 51.6%,30.1%,12.9%和

5.4%,结合收集的钻孔抽水试验资料,按照不同富水性等级内的单井涌水量特征值的大小,将河谷区平原区不同地下水富水性分级的富水系数分别赋值为 1, 10, 50, 120;泉水采样点中,流量 $<0.1, 0.1\sim 1, >1$ L/s 的泉点所占比例分别为 11.5%, 73.9%和 14.6%,其中

流量 >1 L/s 的泉多为黄土底砾石大泉或泉群,流量多大于 3 L/s。例如,三角镇山前泉群流量为 11.6 L/s,结合泉流量大小,将丘陵山区地下水富水系数分别赋值为 1, 5 和 30,并对各富水分区内的样品点进行逐一筛选统计(表 2)。

表 2 研究区地下水富水系数赋值

项目	河谷平原区/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)			丘陵山区/($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)			
	水量贫乏	水量中等	水量丰富	水量极丰富	水量贫乏	水量中等	水量丰富
富水性分级							
富水系数赋值	1	10	50	120	1	5	30
样品点数量	48	27	13	5	11	71	14

在使用单指标评价方法评价得到的各地下水样品点水质分类结果的基础上,采用目前常用的基于样品点数量统计的方法计算得到河谷平原区和丘陵山区地下水超标率分别为 57.4%和 26.3%,全区地下水超标率为 41.8%。根据本文提出的基于地下水富水性分区的改进方法计算得到河谷平原区和丘陵山区地下水超标率分别为 29.4%和 12.0%。按照河谷平原区和丘陵山区地下水资源数量基本相当的比例换算,全区地下水超标率仅为 20.7%(表 3)。从数值上来看,使用该方法的地下水水质评价结果中超标率基本是常规方法计算结果的 1/2,而且结合富水性分级的评价结果突出了地下水的资源属性。

表 3 不同计算方法的区域水质超标率对比

水质分类结果	河谷平原区		丘陵山区	
	样品点合计	富水系数合计	样品点合计	富水系数合计
I, II类水	7	162	11	150
III类水	33	945	59	559
IV类水	32	328	17	79
V类水	21	133	9	23
超标率/%	57.0	29.4	27.1	12.6

4 结论

(1) 北川河流域地下水化学受天然背景和人为因素控制,具有明显的空间分布特征。中上游的丘陵山区和河谷平原区广泛分布 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型淡水,下游红层丘陵区河谷平原区受含石膏地层及污染物排放的影响,出现 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na}$ 型的微咸水、咸水及水 Cl-Na 型淡水;丘陵山区地下水化学组分主要以硅酸盐岩风化溶解为主,河谷平原区受硅酸盐岩和碳酸盐岩风化溶解共同控制,局部区域在蒸发浓缩作用下富集。

(2) 北川河流域超标地下水分布范围较广,但重要地下水水源地均符合 III类水标准,水质优良。水质

超标的主要影响指标为铝、铁、总硬度、氟、硼等天然背景指标,铅、四氯化碳、硝酸根等人为污染指标集中在城镇及工矿企业周边,局部呈重金属、有机物等多指标的复合污染态势。

(3) 本文提出的基于地下水富水性分区的区域地下水水质表达方法实现了水质评价和水量的结合。与目前单纯基于样品点数量的超标率统计结果相比,一方面,该方法依据富水性特征对单个样品点的水质类型赋予不同的系数,据此得到的地下水水质统计结果所表达的意义更加符合地下水资源属性。另一方面,该方法突出了大型优质地下水水源地在区域地下水资源评价中的比重,降低了区域地下水水质超标率的统计数值,有效解决了目前评价结果中超标率普遍较高的问题,可以作为区域地下水水质评价的一种参考方法。

[参 考 文 献]

- [1] 文冬光,林良俊,孙继朝,等.中国东部主要平原地下水质量与污染评价[J].地球科学:中国地质大学学报,2012,37(2):220-228.
- [2] 吴爱民,荆继红,宋博.略论中国水安全问题与地下水的保障作用[J].地质学报,2016,90(10):2939-2947.
- [3] Wu Aimin, Hao Aibin, Guo Haipeng, et al. Main progress and prospect for China's hydrogeological survey [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2020,8(3):195-209.
- [4] 中华人民共和国生态环境部.2019 中国生态环境状况公报[R].北京:中华人民共和国生态环境部,2020.
- [5] 张兆吉,费宇红,郭春艳,等.华北平原区域地下水污染评价[J].吉林大学学报(地球科学版),2012(5):1456-1461.
- [6] 杨永宇,尹亮,刘畅,等.基于灰关联和 BP 神经网络法评价黑河流域水质[J].人民黄河,2017,39(6):58-62.
- [7] Dahiya S, Singh B, Gaur S, et al. Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007,147(3):938-946.

- 植被物候时空变化特征分析[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(4):125-131.
- [25] 朱娅坤, 秦树高, 张宇清, 等. 毛乌素沙地植被物候动态及其对气象因子变化的响应[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(9):98-106.
- [26] 王静璞, 刘连友, 贾凯, 等. 毛乌素沙地植被物候时空变化特征及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3):624-631.
- [27] Zhu Wenbo, Zhang Xiaodong, Zhang Jingjing, et al. A comprehensive analysis of phenological changes in forest vegetation of the Funiu Mountains, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(1):131-145.
- [28] 王涛, 杨梅焕. 榆林地区植被指数动态变化及其对气候和人类活动的响应[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5):1133-1140.
- [29] 王旭洋, 李玉霖, 连杰, 等. 半干旱典型风沙区植被覆盖度演变与气候变化的关系及其对生态建设的意义[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1):183-194.
- [30] Du Jun, He Zhibin, Kathryn B P, et al. Interacting effects of temperature and precipitation on climatic sensitivity of spring vegetation green-up in arid mountains of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269/270:71-77.
- [31] Luo Zhaohui, Yu Shixiao. Spatiotemporal variability of land surface phenology in China from 2001—2014 [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(1):65.
- [32] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, et al., Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169(3):156-173.
- [33] Zhu Z, Piao S, Myneni R B, et al. Greening of the earth and its drivers [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8):791-796.
- [34] 闫峰, 吴波. 近 40 年毛乌素沙地荒漠化过程研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(6):987-996.
- [35] Feng Xiaoming, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11):1019-1022.
- [36] Sun Wenyi, Song Xiaoyan, Mu Xingmin, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209(1):87-99.

(上接第 241 页)

- [8] Liu Fan, Huang Guanxing, Sun Jichao, et al. A new evaluation method for groundwater quality applied in Guangzhou region, China: Using fuzzy method combining toxicity index [J]. *Water Environment Research*, 2016, 88(2):99-106.
- [9] Zhang Bing, Song Xianfang, Zhang Yinghua, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen Plain, Northeast China [J]. *Water Research*, 2012, 46(8):2737-2748.
- [10] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T0288-2015 区域地下水污染调查评价规范[S]. 北京:地质出版社, 2015.
- [11] 李巧, 周金龙, 高业新, 等. 新疆北部平原区 2003—2011 年地下水水质变化特征[J]. 地学前缘, 2014, 21(4):124-134.
- [12] 许真, 何江涛, 马文洁, 等. 地下水质量指标分类综合评价方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6):6-12.
- [13] 朱亮, 刘景涛, 周冰, 等. 1998 年以来兰州市地下水环境变化及驱动因素[J]. 中国地质, 2020, 47(6):1677-1687.
- [14] 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.
- [15] 高存荣, 刘文波, 冯翠娥, 等. 干旱、半干旱地区高砷地下
- 下水形成机理研究:以中国内蒙古河套平原为例[J]. 地学前缘, 2014, 21(4):13-29.
- [16] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, 170:1088-1090.
- [17] Fan Bailing, Zhao Zhiqi, Tao Faxiang, et al. Characteristics of carbonate, evaporite and silicate weathering in Huanghe River basin: A comparison among the upstream, midstream and downstream [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 96(15):17-26.
- [18] 吕晓立, 刘景涛, 朱亮, 等. 甘肃省榆中盆地地下水化学演化特征及控制因素[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(2):194-201.
- [19] 张福初, 吴彬, 高凡, 等. 奎屯河流域平原区地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7):1663-1671.
- [20] 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 等. 滦河流域中上游富锶地下水成因类型与形成机制[J]. 地球学报, 2020, 41(1):65-79.
- [21] 朱亮, 杨明楠, 张玉玺, 等. 东胜城区及周边地区浅层地下水硝酸盐分布及影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5):37-41.
- [22] 朱亮, 康卫东, 王润兰, 等. 人类活动对榆林地区地下水水质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2014(11):54-59.