

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202005035

京津冀水源涵养区水化学环境分析 ——以承德市兴隆县为例

鲁重生¹, 刘文波², 李志明², 武 雄¹, 康 伟², 任玉祥³

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081;
3. 承德市自然资源和规划局, 河北 承德 067000)

摘要: 水环境及其水质特征是水源涵养的主控因素。选取承德南部京津冀水源主要发源地——兴隆县为典型研究区, 利用 2019 年实地采集的 79 组水样(井水占 31.6%, 泉水占 58.3%, 地表水占 7.6%, 尾矿水占 2.5%)测试结果, 采用统计分析、GIS 空间分析及水文地球化学图解法, 综合分析了区内水化学空间分布特征、主要组分的物源及成生条件等, 旨在结合岩性从水化学角度分析水源涵养状况。研究表明: 研究区的水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{—Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主(占 62%), 主要受碳酸盐岩展布控制; 地下水水化学组分主要来源于大气降水淋滤过程中水岩相互作用的产物; 区域水质涵养条件总体优良, 但有 3 组 SO_4^{2-} (占 3.80%)、2 组 NO_3^- (占 2.53%) 超限, 与局部矿业活动和人为活动有关; 研究区水样 TDS 总体较低, 变质岩及侵入岩分布区富集 Sr、Se 等有益元素, 形成京津冀水源涵养的优势条件。

关键词: 水环境; 水化学; 水源涵养; 水岩作用; 兴隆县

中图分类号: P621.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)06-0132-10

Hydrochemical environment in a typical conservation area in the Beijing-Tianjin-Hebei region: A case study in Xinglong County of Chengde

LU Chongsheng¹, LIU Wenbo², LI Zhiming², WU Xiong¹, KANG Wei², Ren Yuxiang³

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;
2. China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081, China; 3. Chengde natural resources
and Planning Bureau, Chengde, Hebei 067000, China)

Abstract: Characteristics of water environment and quality are the main controlling factors of water conservation and are of important significance in the rational utilization of regional water resources and ecologically sustainable development. To promote the overall utilization and protection of water resources in the Chengde area and its downstream area, the Xinglong county, a major source of water resources in the south of Chengde, is selected as a typical research area in this paper. Statistical analysis and GIS spatial analysis were used to adopt the 79 water samples collected in 2019, and hydrogeochemical graphic method was employed to comprehensively understand the spatial distribution characteristics of water chemistry, the provenance basis of major components, and the formation conditions and water conservation conditions. The research results indicate that the hydrochemical type in the study area is mainly of $\text{HCO}_3\text{—Ca}\cdot\text{Mg}$ type (62%) and is controlled by the widespread distribution of dolomite carbonate. The groundwater is generally in an oxidizing environment with good connectivity to the atmosphere, and hydrochemical compositions mainly come from the

收稿日期: 2020-05-12; 修订日期: 2020-06-14

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190311)

第一作者: 鲁重生(1995-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水文地质。E-mail: cugblcs4515@163.com

通讯作者: 刘文波(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、水资源与环境工作。E-mail: 106690009@qq.com

water-rock interactions in the process of leaching of atmospheric precipitation. The regional water quality conservation conditions are generally excellent. However, there are 3 groups of samples (SO_4^{2-} concentrations higher than the national standard, accounting for 3.80%) and 2 groups of samples (NO_3^- concentrations higher than the national standard, accounting for 2.53%) in the main ionic components, which are related to local mining activities and human activities and should be paid attention to. The TDS in the water in the area is low, and the beneficial elements such as Sr and Se are rich in the distribution areas of metamorphic rocks and intrusive rocks, forming advantageous conditions for water conservation in the Beijing-Tianjin-Hebei region.

Keywords: water environment; water chemistry; water conservation; water-rock interaction; Xinglong County

地处承德西南端的兴隆县毗邻京津唐承四市,是距离京津冀^[1]最近的水源涵养区,境内发育多支河流并向京津地区输送水源。兴隆县以发展工、农、矿、果林、旅游业为重心,用水需求量大,然而,区内多年年均降水量呈下降趋势,年内季节性用水紧张^[2];且鹰手营子矿区排污、农业果林业用肥、矿山废渣堆放及农村生活污水使地表河流及地下水环境恶化。目前,已有学者对兴隆县典型河流和水库及其周边水体进行了污染物检测与源解析^[3-4]、水质评价^[5]及氮、磷输出的风险评价^[6],指出污染源主要是工厂“三废”和农药化肥,应进一步加强氮、磷输出的管理与治理,但水流自净能力强,水质尚好。已有研究着重于工作区及周边地表水体质量的评估,未将地表水、地下水和岩性条件作为相互关联的水体来研究^[7],更未从小流域尺度剖析水源涵养状况。

基于前人研究,本文以地质条件为背景,采用GIS空间分析方法,揭示了区内水环境的成生条件、主控地质因素^[8]和水岩相互作用过程,旨在从水化学角度分析水源涵养状况,同时,还分析了区内地下水中锑、硒、矿泉元素富集特征^[9],指出其独特的水源涵养条件,服务于安全供水^[10],为京津冀协同发展进程中城市发展、水资源配置及功能区划提供数据支撑。

1 研究区概况

1.1 自然地理条件

兴隆县位于承德市域西南端,北与承德县相望,东临滦河与宽城满族自治县毗邻,西接北京市密云县与平谷县,南与天津交界,县境东西长86 km,南北宽57 km,总面积3 123 km²。因研究区独特的地质构造与地形地貌,发育了柳河、清水河、沟河、澈河及沙河等主要水系,流入北京、天津及省内临县,对京津冀水源涵养具有重要意义(图1)。

研究区属半湿润半干旱大陆性季风型山地气候,降水和蒸发具有明显的季节性差异,年均降水量为

715.5 mm,年均月蒸发量为117 mm;降水集中在5—9月,占全年的71%;蒸发量集中在4—8月,占全年的63.9%;年平均气温为5.6℃,极端最高气温36.6℃,极端最低气温-28.6℃。

1.2 水文地质条件

区内含水岩组主要有碳酸盐岩裂隙岩溶类、变质岩孔隙-裂隙类、岩浆岩裂隙类、碎屑岩孔隙-裂隙类及松散岩孔隙类。碳酸盐岩类主要分布在中部,沿东西向展布,以长城系(Ch)白云岩、白云质灰岩及蓟县系(Jx)的灰质白云岩和白云岩为主,局部地区出露奥陶系(O)灰岩,富水性较好;变质岩分布在南部,东西向展布,主要以太古界(Ar)的斜长角闪岩和黑云斜长片麻岩为主,富水性一般;各期侵入岩则为早白垩纪(K₁)侵入石英二长岩、太古代(Ar)侵入二长花岗岩、燕山期侵入正长斑岩、中元古界侵入花岗斑岩,富水性随储水构造不同呈现出较大差异性;碎屑岩分布在北部,东西向展布,中部地区零星分布,以长城系的石英砂岩、中侏罗纪(J₂)的粉砂岩夹砂岩及砾岩为主,富水性一般;松散岩类沿柳河、清水河、沙河等河流沟谷分布,以第四系(Q)砂砾石、卵砾石为主,与地表水关系密切,富水性随所处地貌部位不同而变化。

区内地下水来源以降水入渗补给为主,渗入地下的水随地形在基岩风化裂隙、构造裂隙或溶隙中径流,最终以泉流或侧向渗流方式进入沟谷,汇成河流出境,形成京津冀水源涵养区。

2 样品采集与测试

2019年6—8月,在研究区内采集水样共计79组,其中井水采样25组,泉水采样46组,地表水采样6组,尾矿水样2组(图1)。水样现场测试项目:气温、水温、pH、电导率(EC)、氧化还原电位(Eh)、溶解氧、TDS。现场对用于金属元素分析的水样进行加硝酸处理。

阴离子采用离子色谱仪(型号ICS-1100)测试;阳离子采用电感耦合等离子体发射光谱仪(型号ICP-



图1 研究区地理位置及水样点分布图

Fig.1 Geographical location and distribution of the water samples

OES(ICAP6300))测试;微量元素采用电感耦合等离子体质谱仪(型号 ICP-MS(Agilent 7700))测试。误差控制在5%以内,测试精度为 ± 0.001 mg/L。水样测试在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成。

3 结果与讨论

3.1 水化学类型及分布

参照舒卡列夫分类,区内共有 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 HCO_3-Ca 、 $\text{HCO}_3-\text{Mg} \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 SO_4-Ca 等9种水化学类型。以 HCO_3^- 为主导的水化学类型占总体的89.8%,以 SO_4^{2-} 为主导的水化学类型占10.2%(图2)。

地表水、泉水和地下水水化学类型均以 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型为主,表现出同源性特征。地表水样品中, $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水占66.7%;地下水样品中, $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水15组(占60%),其余合计占40%;泉水样品中 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水30组(占65.2%),其余类型合计占34.8%;泉水中有2组尾矿出流水样,均为 $\text{SO}_4-\text{Mg} \cdot \text{Ca}$ 型水(表1)。

Piper 三线图能直观反映水中阴阳离子组分的相对含量及化学特征^[12-13]。图中A区揭示水化学组分

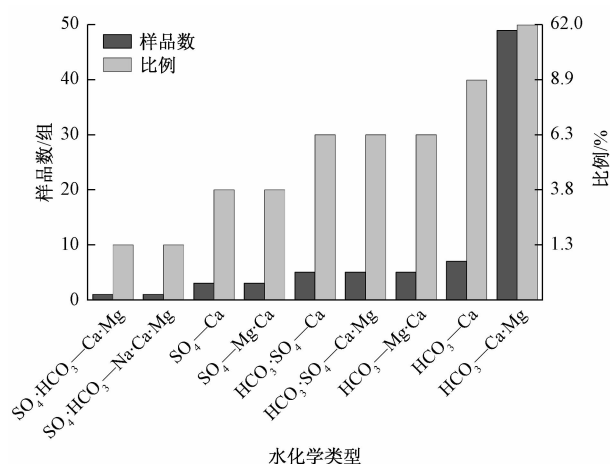


图2 研究区水化学类型统计柱状图

Fig.2 Statistical histogram of hydrochemical types

中阳离子以 Ca^{2+} 为主导, Mg^{2+} 占比较少;E区反映出明显的 HCO_3^- 主导型特征;通过对比图中1区的样品聚集状况,泉水和地下水中的各主要离子组分相对含量接近,进一步说明二者的同源性特征(图3)。水样WR-149、WR-151、2XL-142、2XL-144、2XL-147水化学类型均为 $\text{SO}_4-\text{Mg} \cdot \text{Ca}$ 型,阴阳离子含量接近,均分布在安子岭乡废弃矿区;位于鹰手营子矿区以北柳河流域下段的2XL-28水样, Na^+ 和 SO_4^{2-} 含量较高,为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3-\text{Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型,受矿业活动及水岩作用双重

影响。

表 1 各类取样点中水化学类型数量统计表

Table 1 Statistics of hydrochemical types in various sampling points

水化学类型	地表水	地下水	泉水	尾矿水	总计
$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca}$	0	2	3	0	5
$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$	0	3	2	0	5
$\text{HCO}_3 - \text{Ca}$	0	2	5	0	7
$\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$	4	15	30	0	49
$\text{HCO}_3 - \text{Mg} \cdot \text{Ca}$	0	2	3	0	5
$\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$	0	0	1	0	1
$\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$	1	0	0	0	1
$\text{SO}_4 - \text{Ca}$	0	1	2	0	3
$\text{SO}_4 - \text{Mg} \cdot \text{Ca}$	1	0	0	2	3
总计	6	25	46	2	79

进一步的 GIS 空间分析^[13]结果表明(图 4),水化学类型为 $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ 的水样多位于灰岩或白云岩为主的碳酸盐岩地区,沿北马圈子镇、上石洞乡、陡子峪乡、大水泉乡、南木门一带分布; $\text{SO}_4 - \text{Ca}$ (泉水 2XL-63)、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca}$ (泉水 2XL-34、井水 2XL-61)、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ (井水 XL-52、井水 2XL-153)、 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ (泉水 2XL-61)型水分布在变质岩及侵入岩地区,沿茅山镇—八卦岭—半壁山镇一带分布; $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ (地表水 2XL-28)、

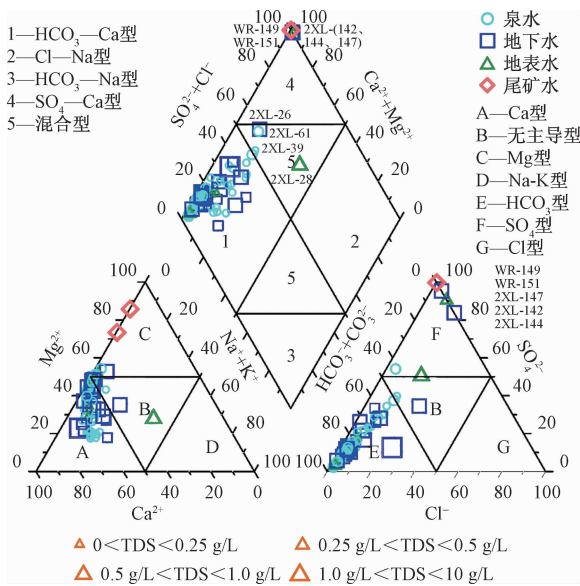


图 3 研究区水化学 Piper 图

Fig. 3 Piper diagram of hydrochemistry in the study area

$\text{SO}_4 - \text{Ca}$ (泉水 2XL-139)型水分布在鹰手营子矿区以北碳酸盐岩和碎屑岩地区,主要受工矿活动控制; $\text{SO}_4 - \text{Mg} \cdot \text{Ca}$ (尾矿水 WR-149、WR-151 及地表水 2XL-104)型水集中在安子岭乡刘家庄废弃硫铁、铅锌矿周边。

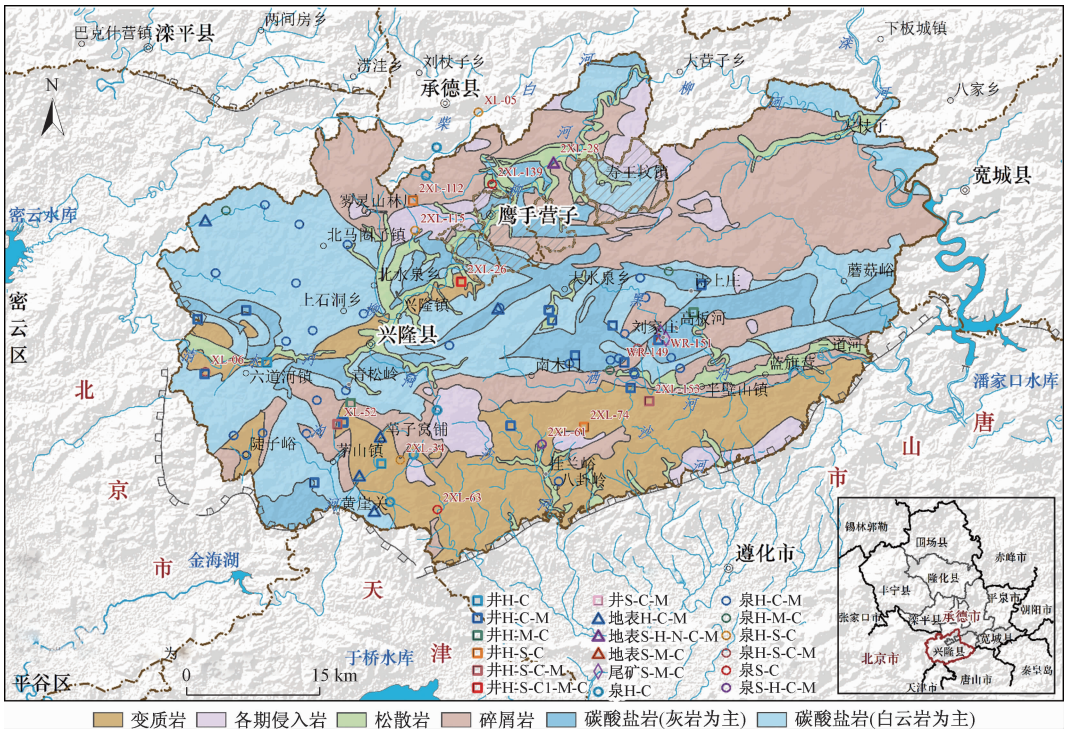


图 4 岩性与水化学类型分布图

Fig. 4 Distribution map of lithology and hydrochemistry types

注:图中 H、C、M、N、Cl、S 分别代表 HCO_3 、Ca、Mg、Na、Cl、 SO_4 。

研究区水化学类型与岩性展布状况有高度一致性,工矿活动对水化学类型产生一定的影响。

3.2 水化学环境及成因

钠氯系数($r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$)及脱硫酸系数($r(\text{SO}_4^{2-}) \times 100/r(\text{Cl}^-)$)用于揭示水文地球化学环境封闭程度、开启程度及水岩作用强度^[14]。

针对 79 组水样进行分析,钠氯系数的最大值为 6.87,最小值为 0.27,均值为 0.98(表 2)。14 组水样(地表水 1 组、井水 5 组、泉水 8 组)落在钠氯系数值大于 1 区域,为大气降水淋滤所致,其中,井水水样 2XL-57、XL-52 受大气降水淋滤作用影响最大,说明其含水岩体的开启程度较高,与周边岩层裂隙发育相关,更易携带易溶盐。14 组水样(地表水 3 组、井水 3 组、泉水 8 组)的钠氯系数值在 1 附近,为岩盐层溶滤作用的结果。48 组水样(地表水 2 组、井水 16 组、泉水 30 组)

散布在海水钠氯系数线(0.85)下方,表明这部分水非本地来源,而是处于径流途中,水岩作用和阳离子交替吸附作用较充分,2XL-97 为断层泉水,沿破碎带运移距离较长,水岩作用造成矿物质聚集;2XL-53 取自大口井,出露岩性为石英砂岩,较高的 TDS 反映出脆性岩石发育的裂隙为地下水运移和水岩相互作用提供了条件(图 5a)。

研究区水样中的脱硫酸系数普遍较大,最大值为 2727.46,最小值为 73.08,均值为 528.31(表 2),均超过当今海水的脱硫酸系数(10.20)(图 5b),表明研究区基本上无脱硫酸作用,含水岩组开启性良好,水体交替循环快,处于与大气连通的氧化环境中^[15]。位于安子岭乡刘家庄的废弃硫铁矿及铅锌矿区的水样 2XL-147、2XL-142 及青松岭镇北三岔口村银矿附近的水样 XL-52 中的 SO_4^{2-} 含量均较高,局部地下水受到矿业活动影响。

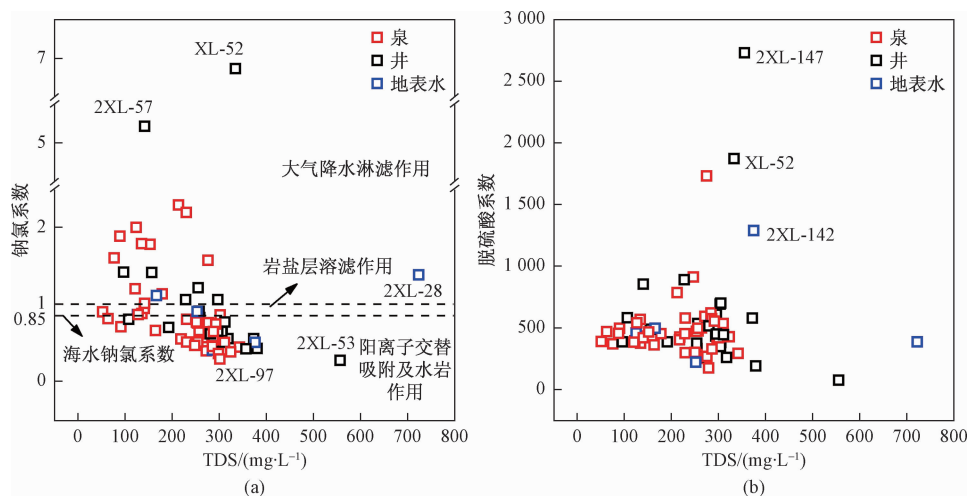


图 5 研究区离子比例系数与 TDS 关系图

Fig. 5 Relationship between ion proportional coefficient and TDS in the study area

表 2 离子比例系数统计表

Table 2 Statistics of ion proportional coefficients

离子系数	钠氯系数(0.85)	脱硫酸系数(10.20)
最大值	6.87	2 727.46
最小值	0.27	73.08
平均值	0.98	528.31

基于以上研究,进一步采用氯碱指数(CAI)确定离子交换的方向和强度^[17-18],以讨论地下水、泉水是否与所流经的岩石发生 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 Na^+ 、 K^+ 交替吸附作用。表达式为:

$$\text{CAI-I} = [r(\text{Cl}^-) - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)]/r(\text{Cl}^-) \quad (1)$$

$$\text{CAI-II} = [r(\text{Cl}^-) - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)]/$$

$$[r(\text{SO}_4^{2-}) + r(\text{HCO}_3^-) + r(\text{NO}_3^-)] \quad (2)$$

区内多数水样 CAI-I、CAI-II 值小于或等于 0(图 6),表明地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与含水岩组中 Na^+ 、 K^+ 发生交换,使水中的 Na^+ 、 K^+ 含量增高。

相比于 Na^+/Cl^- 比值(图 7a)关系曲线, $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{Cl}^-$ 比值(约为 1.75)集中在 $y = x$ 线上方(图 7b),说明除岩盐溶解外,含钠、钾的硅铝酸盐矿物(钠长石、钾长石),或蒸发岩盐矿物(芒硝)在径流途中不断被水解、溶滤,阳离子交换促进 Na^+ 、 K^+ 从岩浆岩的长石类矿物中释放出来^[18-19]。

$\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的比值关系(图 7c)显示地下水组分多受控于白云石和方解石溶解^[20]。 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值关系(图 7d)显示 Ca^{2+} 、

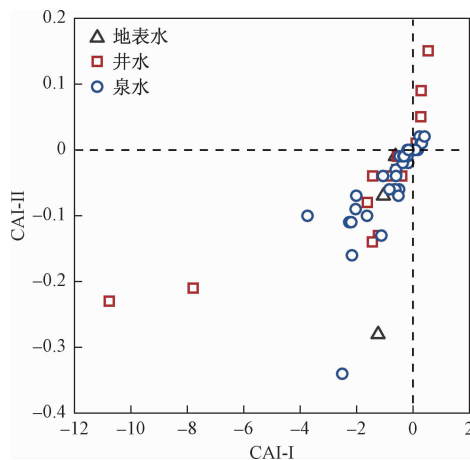


图6 研究区氯碱指数分布图

Fig. 6 Distribution map of chlor-alkali index in the study area

Mg^{2+} 主要源于碳酸盐岩的风化溶解^[21], 仅极少部分水样位于 $y=x$ 以下, 受到含钙镁硅铝酸盐矿物溶解的影响。因硫酸盐溶解时所产生的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 相平衡, 采用 $(Ca^{2+} + Mg^{2+} - SO_4^{2-})/HCO_3^-$ 曲线关系 (图 7e) 表征碳酸盐岩溶解和硅酸盐岩溶解的主体地位, 约 92% 的水样点落在 $y=x$ 以上, 说明研究区碳酸盐岩的溶解是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的主要来源, 也是 HCO_3^- 的来源之一, 部分水样离子比值远大于 1, 可能与人为活动有关。 $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ 与 $(SO_4^{2-} + Cl^- + HCO_3^- + NO_3^-)$ 的比值关系 (图 7f) 显示, 水样分布在 $y=x$ 线附近, 且相关性较好, 表明溶滤作用外所产生的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 是人为活动的结果^[22], 人为活动已经影响到地下水的化学组成。

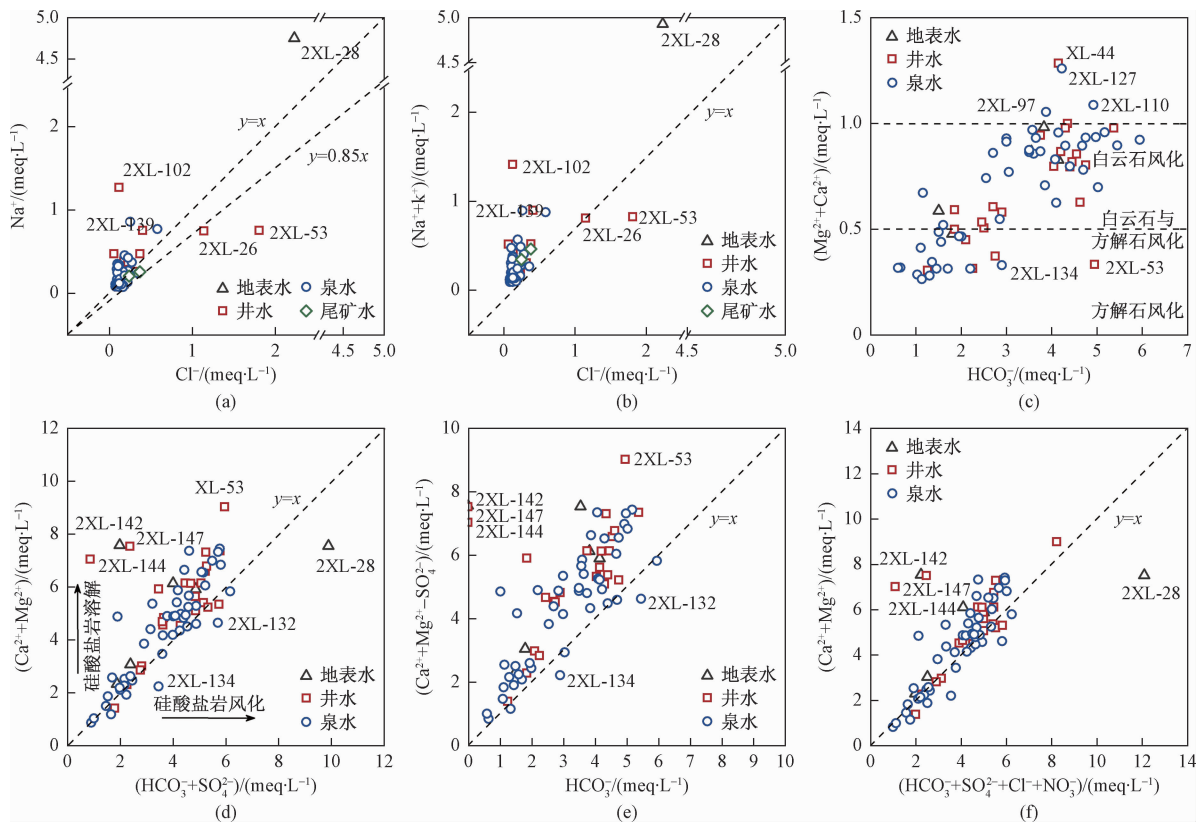


图7 离子比值关系图

Fig. 7 Relationship among ion ratios

3.3 水源涵养条件分析

筛除尾矿水异常指标值, 对研究区 77 组水样进行描述性统计 (表 3), 研究区水样 pH 值在 7.3 ~ 9.0 之间, 均值为 8.04, 为弱碱性环境, 氧化还原电位 (Eh) 在 79.5 ~ 120.0 mV 之间, 均值为 94.6 mV, 变异程度小 ($C_v = 0.09$), 表明涵养区的地下水环境^[23]为稳定的

氧化环境。

研究区内水化学样品 TDS 值域范围为 0 ~ 0.25 g/L, 少部分水样 TDS 值域为 0.25 ~ 0.50 g/L, 均值约为 0.25 g/L, 变异程度较小 ($C_v = 0.42$), 为低矿化度淡水。 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 均未超限^[24], Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 变异系数较小且相近, 表明

三种离子在空间上的分布具有一致性,主要受控于碳酸盐岩溶解。安子岭乡刘家庄尾矿区 WR-149、WR-151 水样 SO_4^{2-} 含量分别高达 13.35 g/L、2.61 g/L,远超 III 类水限值,可能与硫铁矿及铅锌矿采矿活动及尾矿堆放有关,应引起注意;2XL-28 河水样取于柳河流域鹰手营子矿区附近, SO_4^{2-} 含量达到 302.6 mg/L,可能受到鹰手营子长期矿业活动影响。六道河镇马圈子 2XL-53 水样 NO_3^- (以 N 计) 含量为 30.81 mg/L,平安堡镇东南沟村 2XL-26 浅层井水样 NO_3^- (以 N 计) 含量为 26.42 mg/L,均超 III 类水限值,其中 2XL-26 为第四系砂卵石层地下水,与河流水力联系紧密,是否受到上游果品(山楂)加工生产活动影响应进一步研究,而 2XL-53 浅层水超限可能与村庄人蓄活动有关。

表 3 研究区测试指标含量描述性统计
Table 3 Descriptive statistics of test index content in the study area

统计指标	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数 C_v	III 类 水限值
Na^+	1.74	109.25	7.09	12.77	1.80	200
K^+	0.50	9.42	1.70	1.40	0.82	
Ca^{2+}	12.82	135.21	54.59	19.93	0.37	
Mg^{2+}	2.45	47.70	24.31	12.71	0.52	
HCO_3^-	0.00	363.07	188.45	90.44	0.48	
SO_4^{2-}	0.00	302.62	34.96	38.06	1.09	250
Cl^-	0.00	79.20	8.03	11.64	1.45	250
$\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$	0.00	30.81	4.78	4.71	0.98	20
pH	7.30	9.00	8.04	0.28	0.03	>8.5 & <6.5
Eh	79.50	120.00	94.06	8.54	0.09	
TDS	52.20	723.80	246.68	103.95	0.42	1 000

注:pH、标准差、变异系数无量纲;样品数单位为个;Eh 单位为 mV;其余单位为 mg/L。

沿各个流域内主要河流流向分别选取 4 组典型水样(图 8),绘制 Stiff 离子多边形图(图 9)。清水河流域是北京密云水库的重要汇流与涵养源区,水化学条件总体优良;而涵养天津地区的柳河流域中近矿区的 2XL-28 水样 SO_4^{2-} 含量超限,应引起水资源规划部门的重视;沟河流域流入北京平谷区金海湖,流域内紧邻银矿开采区的 XL-52 水样 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{SO}_4^{2-}$ 含量偏高,可能受到采矿活动影响;沙河流域挂兰峪镇火石台子 2XL-61 水样 SO_4^{2-} 含量高于其他阴离子, Fe^{2+} 含量为 0.22 mg/L,高于其他地区,与周边地层中黄铁矿分布及铁选厂选矿活动有关。

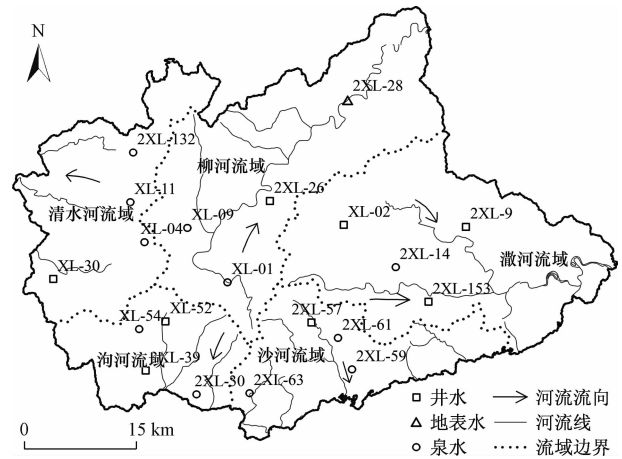


图 8 各流域典型样点分布图

Fig. 8 Distribution of the typical samples in various watersheds

水中适量的锶(Sr)和硒(Se)是有益于人体的“健康”元素。研究区的地下水和泉水中,均检测到 Sr 元素和 Se 元素富集。79 组水样中,富 Sr 水样 (≥ 0.4 mg/L) 5 组,富 Se 水样 (0.01 ~ 0.05 mg/L) 12 组,同时富 Sr、Se 水样 5 组,富 Sr 或富 Se 但含超限指标 ($\text{Se} > 0.05$ mg/L、 $\text{Sb} > 0.005$ mg/L、 $\text{Br} > 0.01$ mg/L) 水样 21 组^[25](图 10)。富 Sr、Se 的水样多分布在研究区南部青松岭、大碌洞等变质岩区及东部诗上庄、羊羔峪等碳酸盐岩下伏侵入岩区(图 11)。Sr、Se 等有益元素富集体现出京津冀水源涵养的优势水化学背景,目前对于其富集的初步研究为矿泉水利用开发提供数据支撑。Sr、Se 元素富集与水岩作用的关系还在进一步研究中。

4 结论

(1) 研究区各水化学类型分布与地层岩性分布具有明显一致性,尤其受到区内碳酸盐岩连片出露控制,水化学类型以 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型(62%) 为主。

(2) 研究区内水环境总体处于开启程度较好的氧化环境中,地下含水岩组与大气连通性好;主要组分来源于天然径流途中与岩石矿物发生的阳离子交替等水岩相互作用的产物;局部极个别水样 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 含量较高,与矿业活动及生产加工活动有关。

(3) 研究区水化学特征总体呈现出优良的涵养特征。水中总溶解性固体(TDS)含量较低(均值 246.68 mg/L),pH 均值 8.04,为弱碱性水;区内裸露及下伏侵入岩、古老变质岩分布区,“健康”

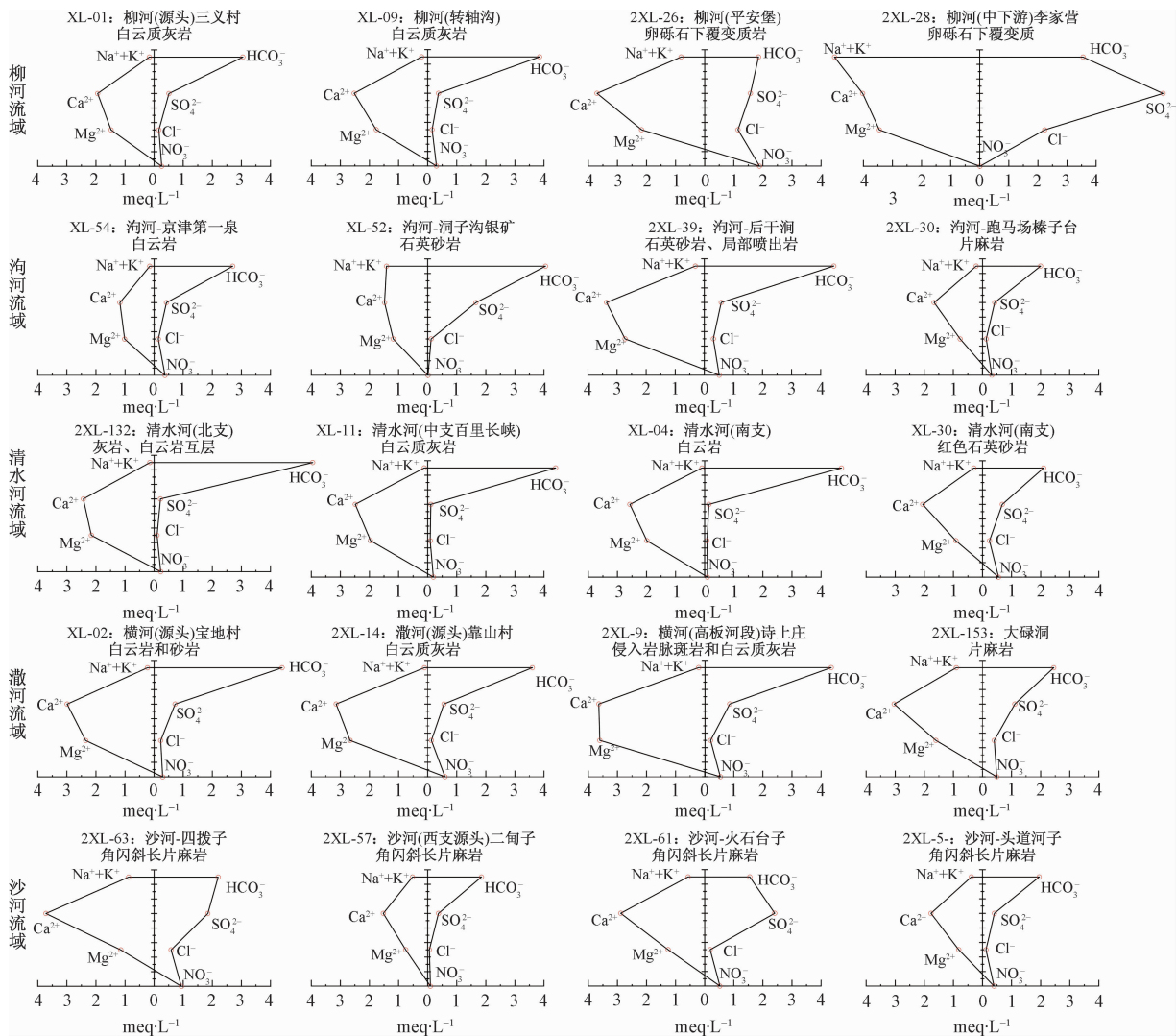


图 9 各流域水样 Stiff 图

Fig. 9 Stiff diagram of the water samples in various watersheds

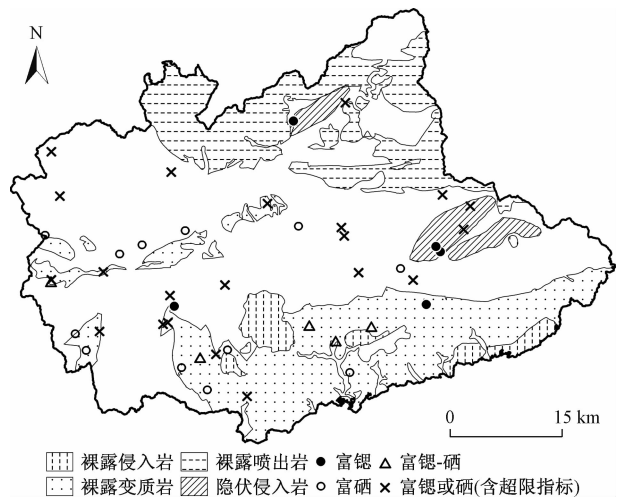


图 10 矿泉水点分布图

Fig. 10 Distribution map of mineral spring water

元素 Sr、Se 富集, 形成京津冀水源涵养的天然优势条件。

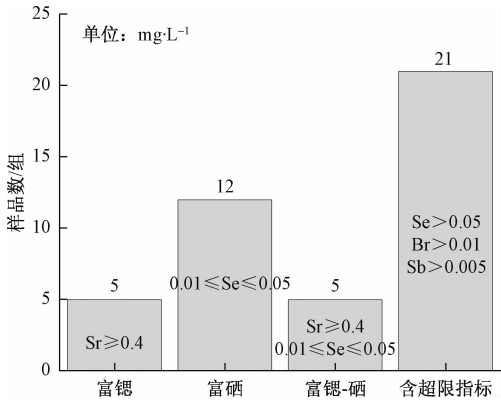


图 11 Sr、Se 矿泉达标统计柱状图

Fig. 11 Statistic histogram of mineral spring water of Sr and Se concentrations up to the national standards

参考文献 (References):

- [1] 曹晓峰,胡承志,齐维晓,等. 京津冀区域水资源及水环境调控与安全保障策略[J]. 中国工程科学, 2019,21(5):130-136. [CAO X F, HU C Z, QI W X, et al. Strategies for water resources regulation and water environment protection in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Strategic Study of CAE, 2019,21(5):130-136. (in Chinese)]
- [2] 李杰,谭国明,丁力. 承德市降水特征分析与地表水资源利用分析[J]. 南水北调与水利科技, 2008,6(6):109-111. [LI J, TAN G M, DING L. Analysis of precipitation features and surface water resources in Chengde City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008,6(6):109-111. (in Chinese)]
- [3] 张睿昊,朱龙基,王佰梅. 柳河流域特征污染物负荷模拟及污染源解析[J]. 南水北调与水利科技, 2018,16(4):120-127. [ZHANG R H, ZHU L J, WANG B M. Simulation of characteristic pollutant load and analysis of pollution source in Liuhe River basin [J]. South - to - North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018,16(4):120-127. (in Chinese)]
- [4] 孙厚云,卫晓锋,贾凤超,等. 基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪[J/OL]. 环境科学. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202004142>. [SUN H Y, WEI X F, JIA F C, et al. Source of groundwater nitrate in Luanping Basin based on multi-environment media nitrogen cycle and isotopes[J/OL]. Environmental Science. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202004142>. (in Chinese)]
- [5] 李生志,钱金平. 滦河中上游环境质量评价[J]. 农业环境科学学报, 1988(5):39-42. [LI S P, QIAN J P. Environmental quality assessment of the middle and upper reaches of Luan River[J]. Journal of Agro-Environment Science, 1988(5):39-42 (in Chinese)]
- [6] 王珊. 潘家口水库上游非点源污染输出风险分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2020,43(6):53-55. [WANG S. Risk assessment of non-point source pollution export in the upstream of Panjiakou Reservoir [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020,43(6):53-55. (in Chinese)]
- [7] 石建省,马荣,马震. 区域地球多圈层交互带调查探索研究[J]. 地球学报, 2019,40(6):767-780. [SHI J S, MA R, MA Z. Regional investigation of the earth's critical zone[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2019,40(6):767-780. (in Chinese)]
- [8] LI Z, XIAO J, EVARISTO J, et al. Spatiotemporal variations in the hydrochemical characteristics and controlling factors of streamflow and groundwater in the Wei River of China [J]. Environmental Pollution, 2019, 254(Pt A).
- [9] 苏宏建,杨瑞,多晓松,等. 承德市矿泉水资源分布规律及其形成的地球化学条件[J]. 化工矿产地质, 2019,41(1):27-34. [SU H J, YANG R, DUO X S, et al. Distribution rules and geochemical conditions of mineral water resources in Chengde city [J]. Geology of Chemical Minerals, 2019,41(1):27-34. (in Chinese)]
- [10] 牛兆轩,蒋小伟,胡云壮. 滦河三角洲地区深层地下水化学演化规律及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2019,46(1):27-34. [NIU Z X, JIANG X W, HU Y Z. Characteristics and causes of hydrochemical evolution of deep groundwater in the Luanhe Delta [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1):27-34. (in Chinese)]
- [11] 张人权,梁杏,靳孟贵,等. 水文地质学基础[M]. 7版. 北京:地质出版社, 2018:66-68. [ZHANG R Q, LIANG X, JIN M G, et al. Fundamentals of hydrogeology [M]. 7th ed. Beijing: Geological Publishing House, 2018:66-68. (in Chinese)]
- [12] ZHANG Y X. Hydrochemical characteristics of groundwater in Tongchuan City, China[J]. Scientific Research and Essays, 2014, 9(9):343-351.
- [13] 刘文波. 河套平原地下水化学特征研究[D]. 北京:中国地质大学, 2015. [LIU W B. Groundwater hydro-chemical characteristics study in Hetao Plain [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese)]
- [14] 曾溅辉,吴琼,杨海军,等. 塔里木盆地塔中地区地层水化学特征及其石油地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2008(2):223-229. [ZENG J H, WU Q, YANG H J, et al. Chemical characteristics of formation water in Tazhong area of the Tarim Basin and their petroleum geological significance [J]. Oil & Gas Geology, 2008(2):223-229. (in Chinese)]
- [15] 张汪明,曾溅辉,李飞,等. 柴西地区古近系和新近系地层水化学特征及其成因[J]. 地球科学与环境学报, 2016,38(4):558-568. [ZHANG W M, ZENG J H, LI F, et al. Hydrochemistry characteristics and origin of formation water of Paleogene and Neogene in the western Qaidam Basin [J]. Journal of Earth

- Sciences and Environment, 2016, 38(4): 558 – 568. (in Chinese)]
- [16] 党慧慧,董军,岳宁,董阳,等. 贺兰山以北乌兰布和沙漠地下水水化学特征演化规律研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 793 – 802. [DANG H H, DONG J, YUE N, et al. Study of the evolution of hydrochemical properties of groundwater in Ulan Buh Desert in the north of the Helan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 793 – 802. (in Chinese)]
- [17] 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. [WANG X X, WANG W K, WANG Z F, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of river water and groundwater along the downstream Luanhe River, northeastern China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 25 – 33. (in Chinese)]
- [18] 孙英,周金龙,魏兴,等. 巴楚县平原区地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境化学, 2019, 38(11): 2601 – 2609. [SUN Y, ZHOU J L, WEI X, et al. Hydrochemical characteristics and cause analysis of groundwater in the plain area of Bachu County [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(11): 2601 – 2609. (in Chinese)]
- [19] 张涛,何锦,李敬杰,等. 蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 4981 – 4990. [ZHANG T, HE J, LI J J, et al. Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong River Basin [J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 4981 – 4990. (in Chinese)]
- [20] 唐金平,张强,胡漾,等. 巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4543 – 4552. [TANG J P, ZHANG Q, HU Y, et al. Hydrochemical characteristics of karst groundwater in the mountains of northern Bazhong City, China [J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4543 – 4552. (in Chinese)]
- [21] 唐春雷,郑秀清,梁永平. 龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2087 – 2095. [TANG C L, ZHENG X Q, LIANG Y P. Hydrochemical characteristics and formation causes of ground karst water systems in Longzici Spring catchment [J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2087 – 2095. (in Chinese)]
- [22] 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 controlling factors analysis in alluvial fan of Jianjiang River [J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3089 – 3098. (in Chinese)]
- [23] 刘文波,高存荣,刘滨,等. 河套平原浅层地下水水化学成分及其相关性分析[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 816 – 823. [LIU W B, GAO C R, LIU B, et al. Hydro – chemical constituents and correlation analysis of shallow groundwater in the Hetao Plain [J]. Geology in China, 2010, 37(3): 816 – 823. (in Chinese)]
- [24] 中华人民共和国国土资源部,中华人民共和国水利部. 地下水水质标准: GB/T14848—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for groundwater quality: GB/T 14848 – 2017 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2017. (in Chinese)]
- [25] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准饮用天然矿泉水: GB 8537 – 2018 [S]. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National Food Safety Standard Drinking Natural Mineral Water: GB 8537 – 2018 [S]. (in Chinese)]