

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.06.002

高寒区典型流域地下水化学特征、影响因素及健康风险

沈回归¹, 饶文波¹, 谭红兵¹, 郭宏业², 温川³, 张西营⁴, 拓万全⁵

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 青海省水文地质工程地质环境地质调查院, 青海 西宁 810008;
3. 青海省水文水资源测报中心格尔木分中心, 青海 格尔木 816099;
4. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 5. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为深入理解高寒区地下水化学演化并科学指导地下水资源管理, 以典型高寒区流域格尔木河流域为研究对象, 对其 2019 年地下水化学特征及其影响因素进行了分析, 基于熵值水质指数、Durov 图和钠吸附比对融雪期、丰水期和枯水期地下水水质进行了评价, 并利用健康风险评估模型对地下水 NO₃⁻ 和 F⁻ 的潜在健康风险进行了评估。结果表明: 3 个时期地下水化学类型变化不大, 山区潜水以 HCO₃⁻ 型为主, 平原区潜水以 Cl⁻ 型为主, 而承压水以 HCO₃⁻ 型为主, 高离子浓度的地下水分布在平原溢出带; 潜水化学成分融雪期主要受春耕施肥的影响, 枯水期受工业废水、生活污水排放的影响, 丰水期受水岩作用的影响; 流域大部分潜水不适合灌溉, 细土平原溢出带少数潜水不适合饮用; F⁻ 对人体健康的非致癌风险大于 NO₃⁻ 并已危及儿童, 此外, 两者对人体健康的非致癌风险枯水期比其他时期更严重。减少生活污水和工农业废水排放等人为输入是当前流域地下水水质保护的关键举措。

关键词: 地下水; 水化学; 影响因素; 熵值水质指数; 健康风险; 格尔木河流域

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)06-0009-09

Chemical characteristics, influencing factors and human health risks of groundwater in a typical alpine watershed

SHEN Huigui¹, RAO Wenbo¹, TAN Hongbing¹, GUO Hongye², WEN Chuan³, ZHANG Xiying⁴, TUO Wanquan⁵
(1. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. Hydrogeology and Engineering Geology Environmental Geology Prospecting Institute of Qinghai Province, Xining 810008, China;
3. Qinghai Golmud Hydrology and Water Resources Survey Sub-center, Golmud 816099, China;
4. Qinghai Institute of Salt Lakes, CAS, Xining 810008, China;
5. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to deeply understand the chemical evolution of groundwater and scientifically guide the groundwater resource management in the alpine region, this study took the Golmud River Watershed as the typical alpine watershed, investigated the groundwater chemistry and explored the influencing factors in 2019. Meanwhile, the groundwater quality in the snowmelt, wet season and dry season was evaluated using the entropy water quality index, Durov diagram and sodium sorption ratio, and potential risks posed by nitrate and fluoride in the groundwater to human health were assessed using the mathematical model of health risk assessment. Hydro chemical results showed that chemical type of groundwater had little change with periods but varied greatly in space: HCO₃⁻ type for phreatic groundwater in the mountain area, Cl⁻ type for phreatic groundwater in the plain area and HCO₃⁻ type for confined groundwater in the plain area. The high ion concentrations of groundwater occurred mainly in the overflow zone of plain. Phreatic groundwater chemistry was mainly affected by the fertilizer use of spring tillage during the snowmelt season, by the industrial wastewater and domestic sewage discharge during the dry season, and by the water-rock interaction during the wet season. The results of water quality assessment indicated that shallow groundwater was not mostly suitable for irrigation in the watershed, and some was not suitable for drinking in the plain. The health risk evaluation found that the non-carcinogenic risk of fluoride was greater than that of nitrate to

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0406601)
作者简介: 沈回归(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文地球化学研究。E-mail: shenhuigui@qq.com
通信作者: 饶文波(1973—), 男, 教授, 博士, 主要从事同位素水文与环境地球化学研究。E-mail: raowenbo@163.com
引用本文: 沈回归, 饶文波, 谭红兵, 等. 高寒区典型流域地下水化学特征、影响因素及健康风险[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 9-17.
SHEN Huigui, RAO Wenbo, TAN Hongbing, et al. Chemical characteristics, influencing factors and human health risks of groundwater in a typical alpine watershed [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(6): 9-17.

human health, and has already endangered children, and the non-carcinogenic risks of fluoride and nitrate were severer to human health during the dry period than other periods. Therefore, it is currently urgent to reduce the anthropogenic input such as domestic sewage, industrial discharge and agricultural discharge to protect the groundwater quality in the watershed.

Key words: groundwater; water chemistry; influencing factor; entropy water quality index; health risk; Golmud River Watershed

过去几十年,随着经济的高速发展,工矿企业大量的废水排放、不合理的农业活动(施肥、杀虫等)及混乱的生活污水倾倒等现象日益加剧,中国地下水水质明显下降^[1]。近年来,随着“一带一路”倡议的实施和西部大开发进程的推进,这一问题在中国高寒的西北地区逐渐显现^[2]。地下水是中国西北地区水资源的关键组成部分,绝大部分居民饮水、工业用水、农业灌溉及生态需水都依赖于地下水^[3-6]。由于降水少、蒸发大,西北地区干旱缺水,其地下水水质的下降甚至恶化使得该地区的用水形势更加严峻。同时,地下水水质下降对人体健康和生态环境构成了潜在风险^[7-9]。因此,开展高寒缺水地区的地下水水质研究十分必要且极为紧迫。

迄今为止,对地下水水质的研究已取得了大量成果^[10-13]。如:刘江涛等^[10]利用 Piper 图、Schoeller 图等图解法开展沁河冲洪积扇地区地下水化学特征研究,认为矿物风化、离子交换和蒸发作用是其重要的控制因素;方运海等^[12]利用模糊综合优化模型开展青岛市大沽河地区地下水水质评价,发现水源地南部地区地下水水质较差;张勇等^[7]利用健康风险评估模型开展荞麦地流域地下水对人体健康的风险评估,指出当地 Cr 的健康风险最高。这些研究成果大大提高了对地下水水质演变规律及影响机制的认识,但高寒区相关研究还比较薄弱^[11-12]。

格尔木河流域是中国高寒区的代表性流域,维系着格尔木市的工农业健康发展。由于气候干旱,其水资源处于短缺状态^[14]。目前格尔木河流域地下水研究多数侧重在地下水化学特征、补给来源及水循环等方面^[14-16],少数学者对地下水水质有所关注,但集中于局部区域^[11,15],且水质评价方法运用的是单因子评价法等较传统的方法。本文对格尔木河流域 2019 年的融雪期、丰水期和枯水期地下水化学特征开展研究,对地下水水质状况进行评价并评估地下水 NO₃⁻ 与 F⁻ 对人体健康的潜在风险。

1 研究区概况

格尔木河流域位于中国青藏高原柴达木盆地南缘(92°30'E~96°57'E,34°59'N~37°42'N),流域面积约 45 000 km²^[17],海拔 2 442~6 212 m,地势由南向北逐渐降低(图 1)。该流域气候干旱少雨、蒸发强烈,年均降水量约 42.47 mm,约 70% 集中在 6—8 月,年平均蒸发量为 1 540.95 mm^[14]。格尔木河是柴达木盆地内的第二大河流,发源于东昆仑北坡,其上游主要由西支昆仑河和东支雪水河构成,由南向北进入格尔木市区后分为东、西两支,最终注入达布逊湖(图 1)。

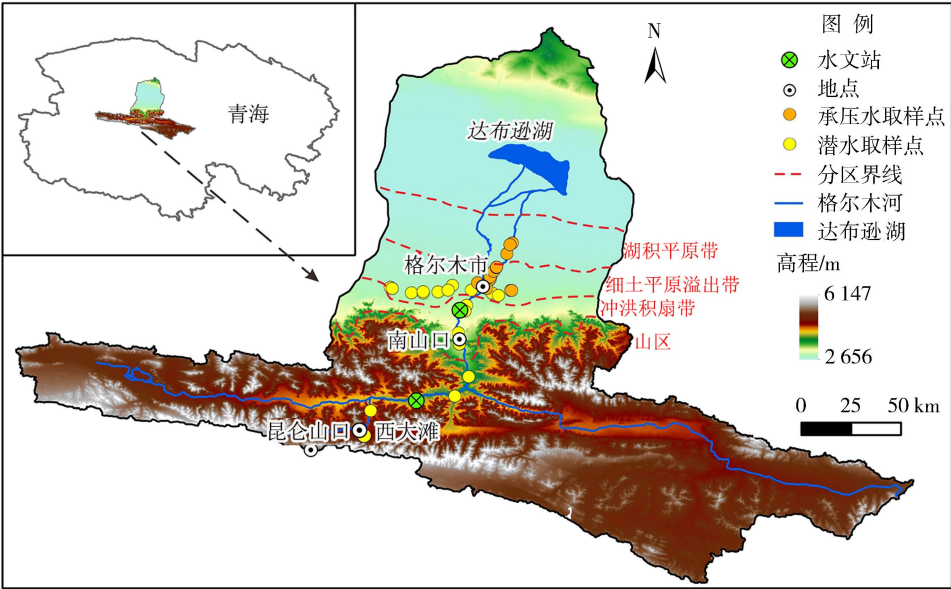


图 1 格尔木河流域及地下水取样点分布

Fig.1 Map of Golmud River Watershed and groundwater sampling locations

格尔木河流域地下水系统呈环带状结构^[18],从上游至达布逊湖依据地貌差异可划分为几个子区域:山区、冲洪积扇带、细土平原溢出带、湖积平原带(图 1)。冲洪积扇带存在巨厚的砾卵石层,为强富水淡-微咸水潜水深藏带。细土平原溢出带含水层以多层状砂砾石为主,为中等富水淡-微咸潜水、半承压水-自流水交叠带。湖积平原带含水层厚度薄,岩性以粉砂、砾岩为主,盐类富集,为微咸潜水及半承压咸-卤水潜埋带^[16]。

流域人口主要集中在格尔木市(图 1)。格尔木市是柴达木盆地的新兴石化、盐化工业重镇,2019 年人口总数约 13.8 万人。该市工农业较发达,2019 年 GDP 为 398.07 亿元,农业主要分布在河东、河西农场,工业园坐落于格尔木市区的东南部^[19]。该流域多年平均地下水资源量为 6.35 亿 m³,可开采量为 1.46 亿 m³/a,约占水资源总量的 23%,为工农业及居民生活等用水提供了重要支撑^[19]。

2 研究方法

2.1 样品采集与测试方法

分别于 2019 年融雪期(4 月)、丰水期(7 月)和枯水期(12 月)在格尔木河流域采集地下水样品,其中潜水 50 组,承压水 44 组。取样前洗井,电导率(EC)保持稳定后采样。样品运回实验室经 0.45 μm 滤膜过滤后倒入清洗好的 500 mL 高密度聚乙烯瓶,采用分子生化级封口膜对瓶口密封,贴好标签。样品采集后保存于 4℃ 的冰箱内。

现场使用便携式多参数分析仪(PONSEL)测量水温、pH 值和溶解性总固体(TDS)值。阴离子(Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻和 F⁻)和阳离子(Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺和 B³⁺)浓度测定在离子色谱仪(ICS-2000)和电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES, Thermo iCAP 6300)上进行,误差小于 5%。通过 Ca²⁺和 Mg²⁺的总量计算得到总硬度(TH),基于电荷平衡计算得到 HCO₃⁻浓度。

2.2 数据处理

采用 Excel 2019 软件统计地下水化学数据。采用 Surfer13 软件绘制不同季节主要化学和水质指标的空间变化图。采用 Origin2021b 绘制 Gibbs 图和离子比值图。

2.3 熵权水质指数

熵权水质指数评价方法是将信息熵引入水质指标中的一种定量评价方法,可以避免主观因素的影响,相较于传统评价方法,其获得的结果更合理^[20]。熵权水质指数 X 的计算公式为

$$X = \sum_{j=1}^m \left(W_j \frac{C_j}{s_j} q_j \right)$$

(1)

式中: m 为地下水样品数量; W_j 为利用公式客观分配的第 j 个评估参数权重,能反映每个参数对人体健康的重要性和影响,具体计算公式见文献[20]; C_j 为第 j 个评估参数浓度; s_j 为第 j 个评估参数在 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》中的标准值; q_j 为水化学指标定量分级尺度。根据 X 值将水质分为 5 类:优秀($X \leq 50$)、良好($50 < X \leq 100$)、中等($100 < X \leq 150$)、差($150 < X \leq 200$)和极差($X > 200$)^[20]。

2.4 人类健康风险评估

美国环境保护局提出的健康风险评估数学(HHRA)模型考虑了不同的人群和暴露途径,可客观识别污染物风险,已被广泛应用于地下水潜在风险评估^[4]。HHRA 模型采用以下公式计算健康风险:

$$R_n = \frac{\rho_i IFE}{WAR_{fd}}$$

(2)

式中: R_n 为直接摄入引起的非致癌风险指数,若 $R_n > 1$,表明污染物对人体健康造成的风险达到不可接受的范围; ρ_i 为地下水元素 i 的实测质量浓度; I 为平均摄入量; F 为平均暴露频率; E 为暴露持续时间; W 为居民的平均体重; A 为平均暴露时间; R_{fd} 为化学非致癌物经直接摄入途径的参考剂量。地下水 NO₃⁻和 F⁻是非致癌有毒物质,主要通过直接饮用危害人类健康^[9]。本文基于表 1^[21-23]中的参数使用 HHRA 模型评估 NO₃⁻和 F⁻直接摄入对儿童和成人的潜在非致癌风险。

表 1 人类健康风险评估中涉及的暴露参数

Table 1 Exposure parameters involved in human health risk assessment

类型	A/d	E/a	$I/$ (L · d ⁻¹)	W/kg	$F/$ (d · a ⁻¹)	$R_{fd}/(mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1})$	
						NO ₃ ⁻	F ⁻
儿童	2 190 ^[21]	6 ^[21]	1.5 ^[23]	30 ^[23]	365 ^[23]	1.6 ^[22]	0.06 ^[22]
成人	25 550 ^[21]	70 ^[21]	2 ^[23]	65 ^[23]	365 ^[23]	1.6 ^[22]	0.06 ^[22]

3 结果与分析

3.1 地下水化学特征

格尔木河流域地下水 pH 值在 8.09 ~ 10.79 之间,呈弱碱至强碱性,见表 2。TDS 在融雪期、丰水期和枯水期的质量浓度变化都较大,其范围分别为 254 ~ 963 mg/L、244 ~ 2 200 mg/L 和 238 ~ 2 165 mg/L,随沿程增加而增大。这与王宇航^[11]的研究结果类似;TH 质量浓度在 24.9 ~ 727.3 mg/L 之间,值得注意的是融雪期、丰水期和枯水期样品的 TH 质量浓度均超过我国饮用水标准。

地下水中阳离子质量浓度顺序为 $\rho(\text{Na}^+) > \rho(\text{Ca}^{2+}) > \rho(\text{Mg}^{2+}) > \rho(\text{K}^+) > \rho(\text{B}^{3+})$ 。Na⁺ 为最丰富的阳离子;Ca²⁺ 仅次于 Na⁺,Mg²⁺、K⁺ 和 B³⁺ 的质量浓度较低,其范围分别为 4.7 ~ 90.5 mg/L、2.7 ~ 21.9 mg/L 和 0.1 ~ 1.7 mg/L。阴离子质量浓度顺序为 $\rho(\text{HCO}_3^-) > \rho(\text{Cl}^-) > \rho(\text{SO}_4^{2-}) > \rho(\text{NO}_3^-) > \rho(\text{F}^-)$ (表 2)。HCO₃⁻ 为最丰富的阴离子;Cl⁻ 质量浓度在 37.4 ~ 1 209.0 mg/L 之间,在阴离子总量中的占比仅次于 HCO₃⁻;SO₄²⁻、NO₃⁻ 及 F⁻ 含量较少,但对地下水环境污染和人类健康影响较大^[24],最大值超过 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》(表 2)。

表 2 格尔木河流域地下水化学参数统计

Table 2 Statistical summary of groundwater chemical parameters in Golmud River Watershed														
时期	统计 指标	pH 值	质量浓度/(mg · L ⁻¹)											
			TH	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	B ³⁺
融雪期 (4 月)	最大值	10.6	523.4	963	15.7	267.9	90.3	72.6	230.2	494.5	424.1	20.2	0.8	1.7
	最小值	7.9	24.9	254	2.7	35	2.2	4.7	31.2	37.4	64.8	0.02	0.1	0.4
	平均值	8.5	270.3	448.6	5.9	105	45.8	37.9	81.5	155.2	245.8	3.7	0.3	0.8
	标准差	0.6	105.2	197.7	2.7	57.5	24.7	12.2	52.7	105.4	80.9	4.1	0.2	0.3
丰水期 (7 月)	最大值	9.8	529.3	2 200	15.7	957.5	96.4	70.1	762.0	1 202.0	333.6	14.0		1.2
	最小值	7.4	25.3	244	2.9	34	1.5	5.2	32.1	59.1	24.6	0.01		0.3
	平均值	8.0	265.3	472.8	6.3	136.6	44.0	37.7	137.5	193.1	187.2	4.4		0.7
	标准差	0.5	110.6	356.1	3.1	158.4	24.6	13.3	140.4	202.0	64.8	4.0		0.2
枯水期 (12 月)	最大值	10.8	727.3	2 165	21.9	954	142.0	90.5	780.0	1 209.0	361.9	4.8	1.3	1.4
	最小值	8.1	33.2	238	3.8	52.4	5.4	4.8	9.5	79.5	7.4	0.4	0.2	0.1
	平均值	8.8	233.7	443.4	7	135.1	41.7	31.5	129.9	172.5	193.6	1.3	0.4	0.8
	标准差	1.2	128.5	361.4	3.4	156.5	28.2	15.0	169.5	199.7	84.2	1.0	0.2	0.2
中国饮用水标准		6.5 ~ 8.5	450	1 000		200			250	250		20	1	1

融雪期、丰水期和枯水期地下水化学类型变化较小,样品点逐渐趋向于阳离子交换和岩盐溶解,Na⁺ 和 K⁺ 主导逐渐明显(图 2)。自上而下,地下水整体由 HCO₃⁻ 型淡水逐渐转化为 Cl⁻ 型卤水。山区潜水主要为 HCO₃ · Cl-Ca · Mg · Na 型。随着流程增加,潜水埋深逐渐变浅,在出山口为 Cl · HCO₃-Na · Ca · Mg 型水,在冲洪积扇带经过溶滤作用后变为 Cl · HCO₃-Na · Mg 型水,在细土平原溢出带转化为 Cl · HCO₃-Na · Mg 型和 Cl · SO₄-Na 型水。承压水化学类型随季节和流程变化较稳定:细土平原溢出带基本以 HCO₃ · Cl-Na-Mg · Ca 或 Cl · HCO₃-Na · Mg · Ca 型为主,湖积平原带以 HCO₃ · Cl-Na · Mg · Ca 或 HCO₃ · Cl-Na · Ca · Mg 为主。

3.2 地下水主要离子的空间与季节特征

地下水 TDS、SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 质量浓度的高值区从融雪期、丰水期到枯水期逐渐变大,不过其在 3 个季节的空间变化规律一致(图 3(a)(d)(e))。TH 和 NO₃⁻ 质量浓度的变化也相似,但两者在融雪期和丰水期高于枯水期(图 3(b)(c))。

地下水 TDS 质量浓度范围为 200 ~ 1 000 mg/L,

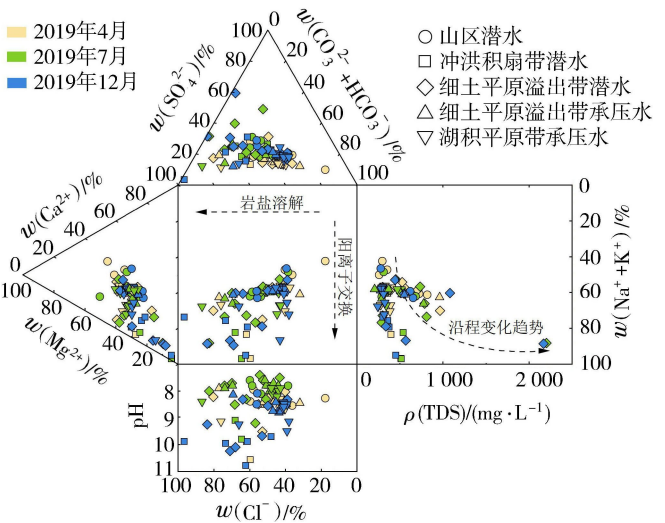


图 2 格尔木河流域地下水化学 Durov 图
Fig. 2 Durov diagram of groundwater chemistry in Golmud River Watershed

$\rho(\text{TDS}) > 1\,000\text{ mg/L}$ 部分的水样点位于流域中西部(图 3(a))。 SO_4^{2-} 和 Cl^- 质量浓度高值区也在该区域(图 3(d)(e))。不同的是, NO_3^- 质量浓度高值区($\rho(\text{NO}_3^-) > 8\text{ mg/L}$) 位于中东部(图 3(c))。TH 质量浓度低于 50 mg/L 的区域在格尔木河冲洪积扇带附近,而高于 450 mg/L 的区域在流域中西部、中东部以及昆仑河和雪水河交汇处(图 3(b))。总体上,地下水主要离子浓度高值区位于流域中西部或中东部(图 3)。格尔木河流域中西部和中东部工农业较发达,有大型农场(河西农场等)和盐湖工矿企业(格尔木钾肥厂等)。这些地区工农业活动对地下水水质有一定的影响^[25]。

3.3 地下水化学影响因素

3.3.1 自然因素

如图 4 所示,融雪期、丰水期和枯水期样品点落在水岩作用和蒸发-结晶作用区域,表明流域地下水化学特征主要受水岩作用和蒸发-结晶作用的影响^[11,16]。山区潜水样品落在图 4 中部,受水岩作用影响。冲洪积扇带潜水大部分在水岩作用区域,少数在蒸发-结晶作用范围,表明其主导因素由水岩作用向蒸发-结晶作用过渡。细土平原溢出带潜水样品多数落在蒸发-结晶作用范围,这与该区域潜水埋深浅、蒸发-结晶作用强有关。细土平原溢出带和湖积平原带承压水样品基本在图 4 中部,表明承压水化学特征仅与水岩作用有关^[11]。落在虚线外的样品点可能受人为因素的影响。

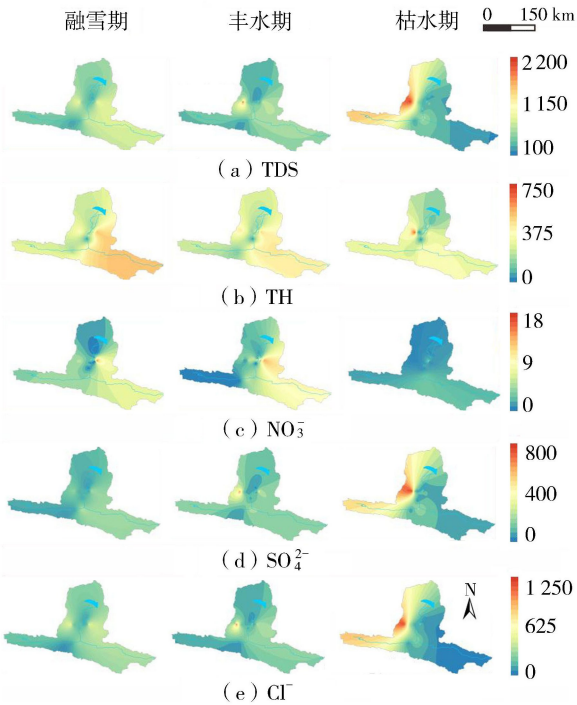


图 3 不同时期格尔木河流域地下水主要离子质量浓度的空间变化(单位:mg/L)

Fig.3 Spatial variation of major ion concentrations of groundwater in Golmud River Watershed during different periods (unit: mg/L)

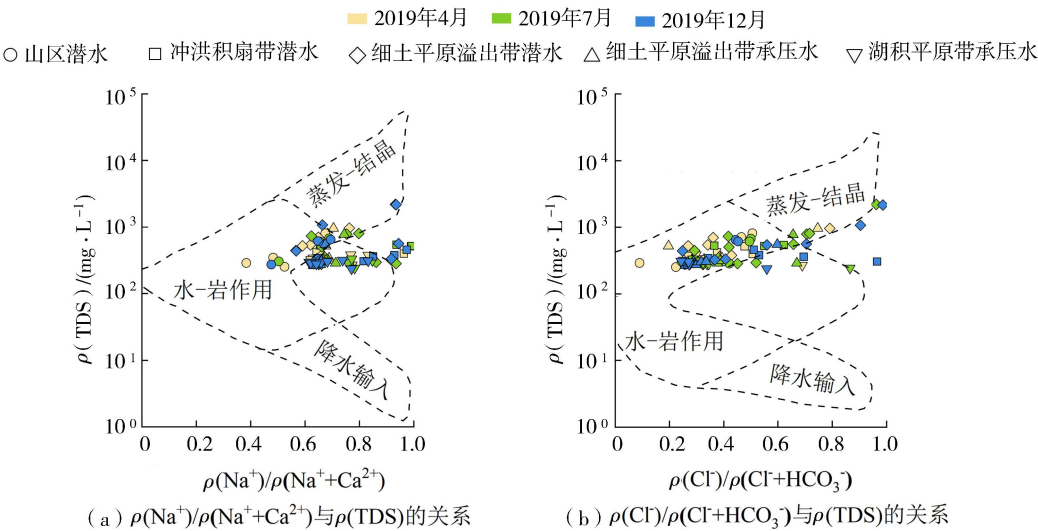


图 4 格尔木河流域地下水化学 Gibbs 图

Fig.4 Gibbs diagram of groundwater chemistry in Golmud River Watershed

离子比值有助于加深了解地下水地球化学过程^[25]。如图 5(a) 所示,从上游至下游大部分样品在硅酸盐端元附近,这与格尔木河流域基岩以花岗岩、辉绿岩为主的地质岩性相吻合^[17]。冲洪积扇带和细土平原溢出带少部分潜水样品靠近蒸发盐端元,受蒸发或蒸发盐影响^[11]。多数样品沿 Na^+ 与 Cl^- 浓度的 1 : 1 线下方分布(图 5(b)),表明过量 Na^+ 与硅酸盐风化有关^[25]。

如图 5(c) 所示,多数地下水样品沿 1 : 1 线分布,表明阳离子交换过程对地下水化学性质有影响。氯碱指数(CAI-1 和 CAI-2)已被证明可作为确定阳离子交换的方式^[26]。研究区大部分样品 CAI 值为正

(图5(d)),表明地下水系统中正阳离子交换反应的存在^[27]。

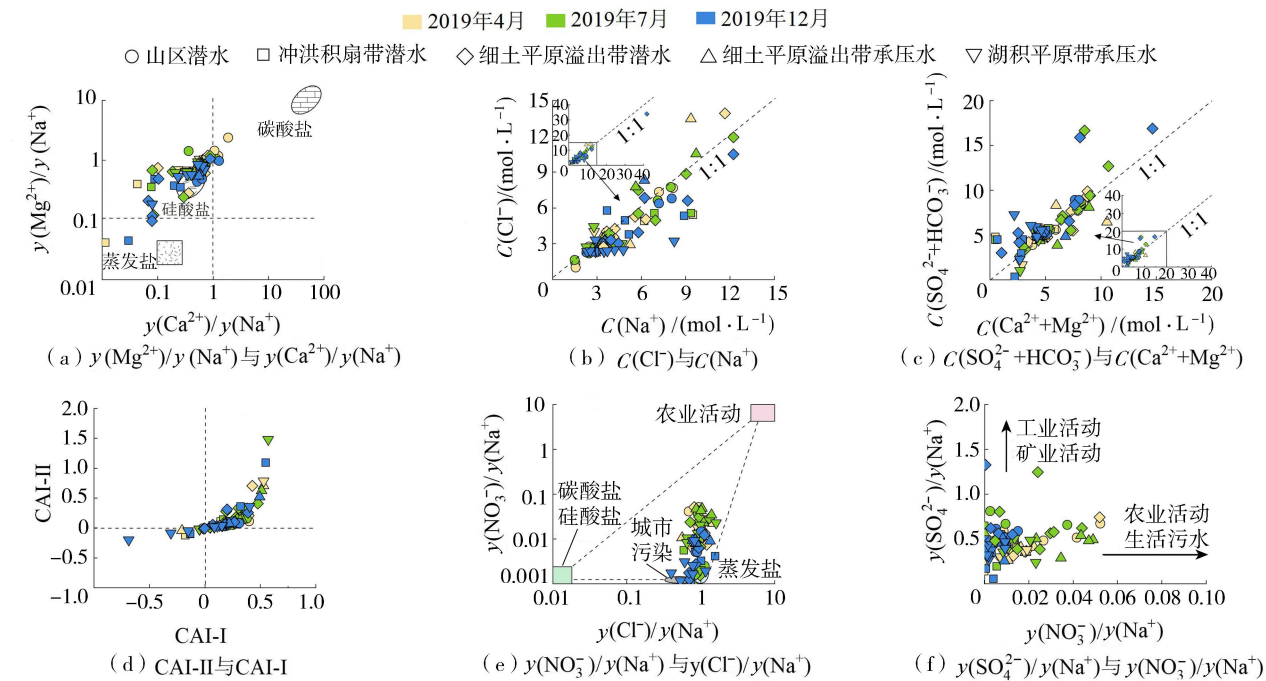


图5 格尔木河流域地下水中主要离子之间关系

Fig.5 Relationship between major ions in the groundwater of Golmud River Watershed

3.3.2 人为因素

随着一带一路等政策的推进,格尔木市 2012—2019 年 GDP 增长 37.2%,人为输入对地下水环境的负面影响也越来越大^[19]。少数样品中 Cl^- 相对于 Na^+ 过量表明流域地下水受到人为污染的影响^[24](图 5(a))。人类活动密集区地下水 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 含量往往较高^[28]。通常, Cl^- 和 SO_4^{2-} 受到自然和人为因素的共同影响,如蒸发盐溶解、工业活动等,但地下水 NO_3^- 主要来自农业活动、生活污水等人为输入^[24]。如图 5(e)(f) 所示,地下水样品趋向城市污染区域,污染影响程度为枯水期大于丰水期大于融雪期,因为城市人口聚集,受到人类排泄物、生活污水等人为因素影响较大。农业活动影响大小为融雪期大于丰水期大于枯水期。融雪期雪水补给稀释了地下水中城市污染的影响,但该季节正是春耕时期,农业活动增加,化肥农药使用可能导致污染物输入地下水。另外,细土平原溢出带和湖积平原带地下水样品更靠近城市污染区域, NO_3^- 质量浓度受到城市污染的一定影响。此外,潜水在融雪期和丰水期比枯水期更容易受到农业和生活污水的影响(图 5(f))。

3.4 水质评价

根据盐度危害和钠吸附比进行灌溉水水质评价,结果见图 6(a)。由图 6(a)可见,灌溉水盐分过高会影

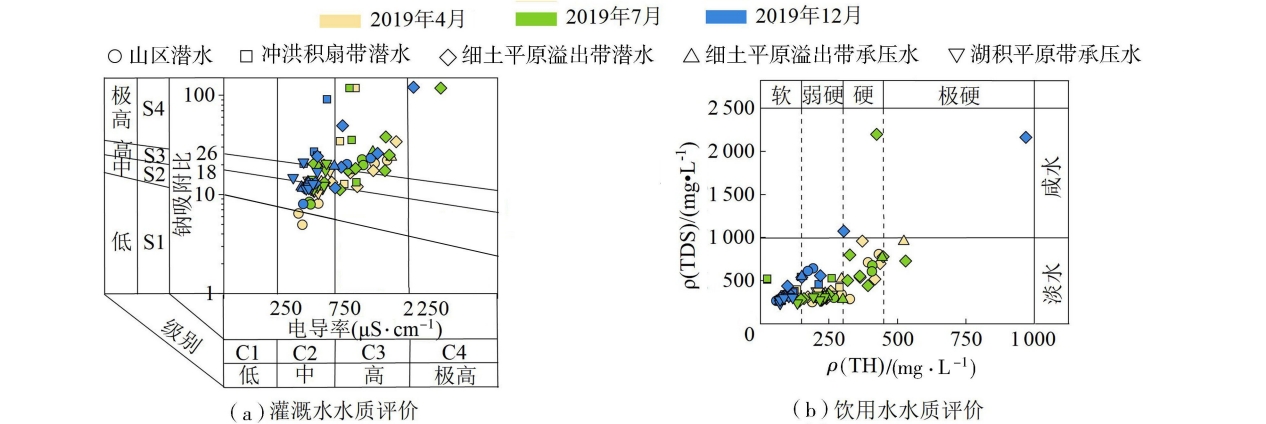


图6 地下水水质评价结果

Fig.6 Evaluation results of groundwater quality

响土壤结构,使农作物难以生长,甚至会危害人体健康^[11]。应用美国盐度实验图(USSL)的分类方法对格尔木河流域地下水水质进行评价。融雪期、丰水期和枯水期地下水钠吸附比值分别在 5.0~117.6、8.0~118.7 和 8.0~121.3 之间。65% 的承压水样品在 C2S2 区域,水质良好,适合灌溉半耐盐植物^[3]。其余承压水样品落在 C2S3(49.4%)、C2S4(8.9%) 和 C3S4(6.7%) 高碱度或高盐度危险区,不适合灌溉。

根据 TH 和 TDS 对地下水进行饮用水水质评价,结果见图 6(b)。由图 6(b)可见,潜水水质明显劣于承压水,一部分山区潜水样品在 C2S1 和 C2S2 区,水质中等良好,84% 的潜水具有高盐度甚至极高盐度危害,不适合作为灌溉水源。值得注意的是,潜水水质从上游至下游逐渐变差,与中下游区域农业活动密集有关。

高寒流域,地下水除了用于灌溉,更重要的是为当地居民提供饮用水。根据 TH 和 TDS 对地下水水质进行评估,结果(图 7)表明:融雪期,10.3% 的地下水为软淡水,62.1% 为微硬淡水;丰水期,15.2% 的地下水为软淡水,51.5% 的为微硬淡水;枯水期,81.3% 的地下水为软淡水,15.2% 为微硬淡水;融雪期、丰水期和枯水期 27.6%、33.3% 和 6.1% 的地下水为硬至极硬的微咸水,主要为细土平原溢出带潜水。

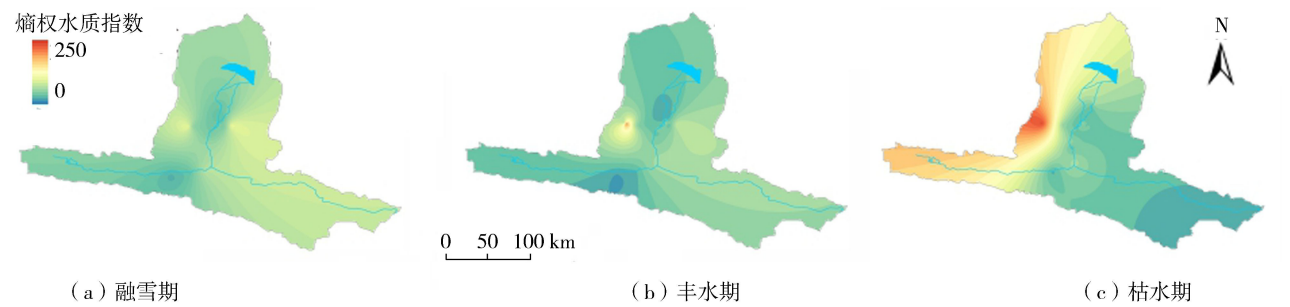


图 7 不同时期格尔木河流域地下水水质指标的空间变化

Fig. 7 Spatial variations of groundwater quality index in Golmud River Watershed during different periods

以 TDS、TH、pH、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、B³⁺ 和 F⁻ 为评价因子,使用熵权水质指数评价法进一步评估格尔木河流域地下水水质。结果(图 7)显示,96.8% 的地下水为优秀和良好,符合我国饮用水水质标准。此外,2 个枯水期和 1 个丰水期的地下水样品 X 值高于 100,均为细土平原溢出带潜水,不适合饮用。季节上,融雪期、丰水期和枯水期 X 值分别在 22.6~98.6、18.1~219.2 和 26.6~243.0 之间(图 7),表明地下水水质枯水期比丰水期差,融雪期最佳。这是融雪期和丰水期地下水补给(雪水、降水)增加产生稀释的缘故。空间上,从山区、冲洪积扇带至细土平原溢出带潜水 X 均值融雪期分别为 44.1、44.8 和 55.6;丰水期分别为 42.1、42.2 和 65.8;枯水期分别为 49.9、41.0 和 75.0,表明上游水质总体优于下游,而中下游受人类活动影响较大(图 7)。值得注意的是,水质较差(X>100)的地下水出现在中西部呈点射状分布,该地区正是河西农场、钾肥厂等工农业区。因此,高 X 值与农田施肥和工业排污有关^[4]。这些水质差的水体若被饮用可能影响人体健康。

3.5 人类健康风险评估

长期饮用含高浓度 NO₃⁻ 或 F⁻ 的地下水会影响人体健康。高浓度 NO₃⁻ 会引起胃癌、蓝婴综合征等疾病^[9]。高浓度 F⁻ 则会造成骨骼氟中毒、损害肾脏等健康风险^[8]。因此,评估格尔木河流域地下水 NO₃⁻ 和 F⁻ 对人类健康风险十分必要。

年龄上,儿童更容易遭受非致癌健康风险;季节上,丰水期人们面临非致癌健康风险更大(表 3)。所幸,儿童和成人 NO₃⁻ 的 R_n 值在 3 个季节均小于限值(R_n=1)。因此,NO₃⁻ 对人体健康暂无危害。但细土平原溢出带少数潜水样品 NO₃⁻ 含量已超过我国《生活饮用水卫生标准》,未来可能有非致癌健康风险。

融雪期儿童和成人 F⁻ 的 R_n 值分别在 0.045~0.675 和 0.028~0.416 之间;枯水期均值分别为 0.374 和 0.230。季节上,儿童和成人在枯水期比融雪期更容易受到 F⁻ 的影响。年龄上,F⁻ 和 NO₃⁻ 呈现相同的规律,与印度、墨西哥等国和中国其他地区所报道的儿童比成年人更容易受到非致癌危害结果相似^[8-9]。这是因为儿童的身体器官和系统不成熟,受环境污染影响较大。枯水期湖积平原带局部地区儿童的 R_n 值已超过允许限值(R_n=1)。饮用含有高浓度 F⁻ 的水会造成儿童智力下降、免疫力降低等后果^[8]。因此,宜尽快采取措施加强对含高浓度 F⁻ 地下水区域的管控,减少 F⁻ 摄入带来的健康风险。

表3 人类健康风险评估结果

Table 3 Evaluation result of human health risk

指标	统计指标	R_n					
		融雪期(4月)		丰水期(7月)		枯水期(12月)	
		儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人
NO_3^-	最小值	5.0×10^{-4}	3.1×10^{-4}	1.6×10^{-4}	9.6×10^{-5}	1.1×10^{-2}	6.7×10^{-3}
	最大值	6.3×10^{-1}	3.9×10^{-1}	4.4×10^{-1}	2.7×10^{-1}	1.5×10^{-1}	9.3×10^{-2}
	平均值	1.2×10^{-1}	7.1×10^{-1}	1.4×10^{-1}	8.5×10^{-2}	4.2×10^{-2}	2.6×10^{-2}
	标准差	1.3×10^{-1}	7.8×10^{-1}	1.3×10^{-1}	7.7×10^{-2}	3.1×10^{-2}	1.9×10^{-2}
F^-	最小值	4.5×10^{-2}	2.8×10^{-2}			1.3×10^{-1}	7.7×10^{-2}
	最大值	6.8×10^{-1}	4.2×10^{-1}			1.083	6.7×10^{-1}
	平均值	2.9×10^{-1}	1.8×10^{-1}			3.7×10^{-1}	2.3×10^{-1}
	标准差	1.4×10^{-1}	8.5×10^{-1}			2.0×10^{-1}	1.2×10^{-1}

4 结 论

- a. Na^+ 和 HCO_3^- 分别是地下水主要的阳离子和阴离子。地下水化学类型季节变化不明显,上游至下游潜水经历 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\text{-Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 向 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型的变化;承压水化学类型稳定,以 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Ca}$ 型为主。
- b. TDS、TH、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度高值区集中在流域工农业活动活跃的中西部和中东部。影响流域地下水化学成分的主要因素是硅酸盐风化、阳离子交换以及人为输入。
- c. 流域大部分潜水不适合灌溉,细土平原溢出带的少数潜水不适合饮用。总体上,潜水水质枯水期比丰水期差,融雪期最佳,上游优于下游,差于承压水。
- d. 根据地下水健康风险评估, NO_3^- 对人体健康暂不构成危害。但枯水期湖积平原带局部地区地下水 F^- 的 R_n 超过儿童的允许限值。因此,减少生活污水和工农业废水排放并改善中下游潜水水质非常必要。

参考文献:

[1] 苏耀明,苏小四. 地下水水质评价的现状与展望[J]. 水资源保护,2007,23(2):4-9. (SU Yaoming, SU Xiaosi. Present situation and prospecting of groundwater quality evaluation[J]. Water Resources Protection,2007,23(2):4-9. (in Chinese))

[2] 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 effects of ecological water conveyance based on groundwater dynamic simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):322-328. (in Chinese))

[3] 栗晓玲,姜田亮,牛纪苹. 生态干旱的概念及研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(4):15-21. (SU Xiaoling, JIANG Tianliang, NIU Jiping. Concept and research progress of ecological drought[J]. Water Resources Protection,2021,37(4):15-21. (in Chinese))

[4] XIAO Jun, WANG Lingqing, CHAI Ningpan, et al. Groundwater hydrochemistry, source identification and pollution assessment in intensive industrial areas, eastern Chinese loess plateau[J]. Environmental Pollution,2021,278:116930.

[5] 凌敏华,陈万贺. 地下水资源对新疆经济社会支撑作用的定量评价[J]. 水资源保护,2021,37(2):49-54. (LING Minhua, CHEN Wanhe. Quantitative evaluation of groundwater resources supporting economy and society in Xinjiang[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):49-54. (in Chinese))

[6] 栗晓玲,褚江东,张特,等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护,2022,38(1):34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in northwest China[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):34-42. (in Chinese))

[7] 张勇,郭纯青,孙平安,等. 基于空间分析荞麦地流域地下水健康风险评价[J]. 中国环境科学,2019,39(11):4762-4768. (ZHANG Yong, GUO Chunqing, SUN Pingan, et al. Groundwater health risk assessment based on spatial analysis in the Qiaomaidi Watershed[J]. China Environmental Science,2019,39(11):4762-4768. (in Chinese))

[8] GONZALEZ-HORTA C, BALLINAS-CASARRUBIAS L, SANCHEZ-RAMIREZ B, et al. A concurrent exposure to arsenic and fluoride from drinking water in Chihuahua, Mexico[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2015,12(5):4587-601.

[9] KARUNANIDHI D, ARAVINTHASAMY P, SUBRAMANI T, et al. Potential health risk assessment for fluoride and nitrate

contamination in hard rock aquifers of Shanmuganadhi River Basin, South India[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International, 2019, 25(1/2): 250-70.

[10] 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 Jiangtao, CAI Wutian, CAO Yueting, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater and the origin in alluvial-proluvial fan of Qinhe River[J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5428-5439. (in Chinese))

[11] 王宇航. 格尔木河流域地下水化学演化规律和水循环模式[D]. 西安: 长安大学, 2014.

[12] 方运海,郑西来,彭辉,等. 基于模糊综合优化模型的地下水质量评价[J]. 地学前缘, 2019, 26(4): 301-306. (FANG Yunhai, ZHENG Xilai, PENG Hui, et al. Groundwater quality assessment based on optimization of fuzzy synthrtic evaluation[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(4): 301-306. (in Chinese))

[13] 谢纪强,游进军,姜纪沂. 基于级差最大化组合赋权法的地下水功能评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 54-59. (XIE Jiqiang, YOU Jinjun, JIANG Jiyi. Using level difference maximization method to calculate combined weights for groundwater function evaluation[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 54-59. (in Chinese))

[14] 饶文波,李焱炜,谭红兵,等. 高寒干旱区降水氢氧稳定同位素组成及其水汽来源:以昆仑山北坡格尔木河流域为例[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1116-1125. (RAO Wenbo, LI Yaowei, TAN Hongbing, et al. Stable hydrogen-oxygen isotope composition and atmospheric moisture sources of precipitation in an arid-alpine region: a case study of the Golmud River Watershed on the north slope of the Kunlun Mountains[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1116-1125. (in Chinese))

[15] 谭红兵,刘兴起,于升松,等. 格尔木河中下游—达布逊湖段水化学变化特征研究[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 43-50. (TAN Hongbing, LIU Xingqi, YU Shengsong, et al. Character of hydrochemistry in Golmud River—Dabsan Lake water[J]. Journal of Lake Sciences, 2001, 13(1): 43-50. (in Chinese))

[16] 汪生斌,肖勇,王万平,等. 青海省格尔木山前平原区地下水动态特征分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 241-247. (WANG Shengbin, XIAO Yong, WANG Wanping, et al. Groundwater table dynamics in Golmud piedmont plain of Qinghai Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 241-247. (in Chinese))

[17] AN Fuyuan, CHEN Tianyuan, LI Xiangzhong, et al. Formation, mechanism and significance of alluvial-dammed lakes in Golmud River catchment, north-eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2021, 46(12): 2421-2436.

[18] HAO Qichen, LU Chuan, ZHU Yuchen, et al. Numerical investigation into the evolution of groundwater flow and solute transport in the eastern Qaidam Basin since the Last Glacial Period[J]. Geofluids, 2018(1): 1-12.

[19] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.

[20] ZHANG Yunhui, DAI Yongsheng, WANG Ying, et al. Hydrochemistry, quality and potential health risk appraisal of nitrate enriched groundwater in the Nanchong area, Southwestern China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 784: 147186.

[21] AGENCY E P. Risk assessment guidance for superfund: volume II environmental evaluation manual, interim final[J]. Saúde Pública, 1989, 804(7): 636-640.

[22] COUNCIL N R. Review of EPA's integrated risk information system (IRIS) process[M]. Washington DC: National Academies Press, USA, 2014.

[23] LIU Jiutan, PENG Yuming, LI Changsuo, et al. An investigation into the hydrochemistry, quality and risk to human health of groundwater in the central region of Shandong Province, North China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 282: 125416.

[24] RAO Wenbo, ZHENG Fangwen, TAN Hongbing, et al. Major ion chemistry of a representative river in South-central China: runoff effects and controlling mechanisms[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 378: 120755.

[25] 汪生斌,祁泽学,王万平,等. 格尔木河水化学特征及成因[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 93-98. (WANG Shengbin, QI Zexue, WANG Wanping, et al. Hydrochemical characteristics and causes of formation of the Golmud River[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 93-98. (in Chinese))

[26] 林晓英,曾溅辉,杨海军,等. 塔里木盆地哈得逊油田石炭系地层水化学特征及成因[J]. 现代地质, 2012, 26(2): 377-383. (LIN Xiaoying, ZENG Jianhui, YANG Haijun, et al. Geochemical characteristics and origin of formation water from the carboniferous in Hadson Oil Field, Tarim Basin[J]. Geoscience, 2012, 26(2): 377-383. (in Chinese))

[27] ZHU G F, LI Z Z, SU Y H, et al. Hydrogeochemical and isotope evidence of groundwater evolution and recharge in Minqin Basin, northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2/3/4): 239-251.

[28] RHODES A L, NEWTON R M, PUFALL A. Influences of land use on water quality of a diverse new England Watershed[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(18): 3640-3645.