

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020 年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的城市大气颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳峰, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 李璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钲, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	
信息(6743, 6846, 6856)	

西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素

艳艳¹, 高瑞忠^{1,2*}, 刘廷玺^{1,2}, 房丽晶¹, 王银龙¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 黄河流域内蒙古水资源与水环境综合治理自治区协同创新中心, 呼和浩特 010018)

摘要: 以内蒙古吉兰泰盐湖盆地图格力高勒流域为研究对象, 2021 年丰、枯水期采集 22 组地下水样品并测定主要水化学特征指标, 综合运用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 图、离子比值和因子分析等方法对不同时期地下水化学特征和主要控制因素进行了分析和探讨, 利用水质指数(WQI)法评价了地下水水质, 并综合健康风险评价模型对地下水 Cr^{6+} 和 F^- 的潜在风险进行了评估。结果表明, 研究区内地下水整体呈弱碱性, 不同时期地下水中的优势阴、阳离子均为 Cl^- 和 Na^+ , 水化学类型均以 Cl^- - Na^+ 型为主; 研究区地下水水质整体较好, 在丰水期和枯水期水质差异不显著; 健康风险评价表现为成人和儿童在枯水期均有较高的致癌风险, 儿童的健康风险明显高于成人, 成人和儿童由 Cr^{6+} 经饮水途径暴露的致癌健康风险最大值均高于最大可接受风险水平(5×10^{-5}); 研究区地下水化学演化过程主要受蒸发浓缩作用、蒸发盐岩溶解和阳离子交换作用综合影响, 主要控制因素分别是蒸发浓缩作用(贡献率为 54.19%)、原生地质环境因子(贡献率为 12.99%)和碳酸盐岩溶解作用(贡献率为 11.66%)。研究成果对盐湖流域地下水资源可持续开发利用和环境保护具有重要意义。

关键词: 水化学; 控制因素; 水质指数; 健康风险; 吉兰泰盐湖盆地

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6767-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202212192

Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin

YAN Yan¹, GAO Rui-zhong^{1,2*}, LIU Ting-xi^{1,2}, FANG Li-jing¹, WANG Yin-long¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Autonomous Region Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Reaches of the Yellow River, Hohhot 010018, China)

Abstract: Taking the Tugeligaole sub-basin of the Jilantai Salt Lake Basin in Inner Mongolia as the typical study area, the groundwater samples of 22 points were collected, and their main characteristic indexes were tested during the wet season and the dry season separately in 2021. Mathematical statistics, Piper triangular diagrams, a Gibbs plot, ionic relations, and factor analysis were used to analyze and discuss the hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in different periods. Based on the evaluation of the groundwater quality using the water quality index(WQI) method, the potential risks of groundwater Cr^{6+} and F^- were evaluated using the health risk evaluation model. The results showed that the groundwater was overall weakly alkaline; the dominant anions and cations during the different periods were Cl^- and Na^+ , and the water chemistry type was mainly Cl^- - Na^+ ; the groundwater quality was generally good, and the difference in water quality between the wet season and the dry season was not significant; adults and children had higher carcinogenic health risks in the dry season than that in the wet season, and the health risks of children were significantly higher than those in adults. The maximum carcinogenic health risk of drinking water exposure to Cr^{6+} in adults and children was higher than the maximum acceptable risk level(5×10^{-5}). The chemical evolution of groundwater was mainly affected by evaporative concentration, evaporative salt rock dissolution, and cation exchange, and the main control factors were evaporative concentration(contribution rate of 54.19%), native geological environment factors(contribution rate of 12.99%), and carbonate rock dissolution(contribution rate of 11.66%). The study results have significance to some degree to the sustainable exploitation and utilization of groundwater resources and environmental protection of the salt lake basin.

Key words: hydrochemistry; control factors; water quality index; human health risks; Jilantai Salt Lake Basin

地下水对于维持陆地生态系统和满足干旱地区日益增长的农业和生活用水需求至关重要^[1,2]。受限于地理位置,西北地区常年面临着干旱缺水的窘境,因此水质状况的优劣将直接影响到居民的健康^[3]。地下水化学是地下水在循环过程中不断与周围的岩石圈、生物圈和大气圈相互进行着极其复杂的物质、能量和信息交换作用的结果,地下水中的化学组分是地下水演化的直接结果,它的特征及成因可以帮助了解地下水的起源与演变规律,还能反映各种因素对地下水的影响。如果能对其进行有效的利用,则不仅能促进水资源的开发利用,而且对保护生态环境、实现人与自然的和谐共处具有重要

意义^[4-7]。

迄今为止,有诸多学者开展了关于地下水水文地球化学特征及健康风险评价研究^[8-10]。张涛等^[8]利用 Piper 三线图和 Gibbs 图等图解法开展然乌湖流域地表水水化学特征研究,认为岩石风化作用是其重要的控制因素,人类活动影响效果不甚明显;

收稿日期: 2022-12-26; 修订日期: 2023-03-06

基金项目: 国家重点研发计划专项(2022YFC3204400); 内蒙古科技攻关项目(2019GG141); 国家自然科学基金项目(52169004, 51969022)

作者简介: 艳艳(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为干旱半干旱地区地下水水化学特征分析与模拟, E-mail: 1347138525@qq.com

* 通信作者, E-mail: ruizhonggao@qq.com

沈回归等^[9]利用商值水质指数开展格尔木河流域地下水水质评价,发现流域中西部工农业区地下水水质较差;谢浩等^[10]利用健康风险模型开展重庆东南部分散式岩溶水对儿童和成人引起的健康风险进行评估,指出 Cr 元素是引起健康总风险的决定元素.然而,在西北干旱地区这方面的研究较薄弱,因此,深入了解该地区地下水水化学特征、控制因素及其健康风险,是当前亟需开展的工作.

吉兰泰盐湖是我国重要的盐化工业基地,近年来,盐湖盆地周边环境污染问题越来越受到重视,尽管已有了部分研究成果^[11~13],但是对于重点风险区域水质的深入研究明显存在不足,且水质评价方法运用的都是较传统的单因子评价法等.因此,本文以吉兰泰盐湖盆地图格力高勒流域为研究对象,综合分析不同时期地下水的水化学特征及其主要控制因素,开展水质评价,并针对关键指标进行健康风险评价,以期对盐湖流域地下水资源合理开发与保护提

供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

吉兰泰盐湖盆地位于中国最大的沙尘暴发源地内蒙古阿拉善高原东南部,其地下水化学风险区域主要分布在盐湖流域西南地区,因此,选取图格力高勒流域为研究区域,地理坐标 39°06'N ~ 39°48'N, 104°55'E ~ 105°47'E,流域总面积 1 894 km² (图 1). 由于受地理位置和水汽条件的影响,研究区多年平均降水量 117.1 mm,蒸发量为 3 006 mm,形成了降水量少、蒸发量大的典型大陆性干旱气候.盐湖走向为东北至西南,最高海拔 1 459 m,最低海拔 1 010 m,区域植被稀疏,以琵琶柴、梭梭和蛇麻黄等为主要植被,存在侵蚀地形、剥蚀地形、堆积地形、风成地形和其他微地形五大地貌单元^[13],生态环境敏感脆弱^[14].

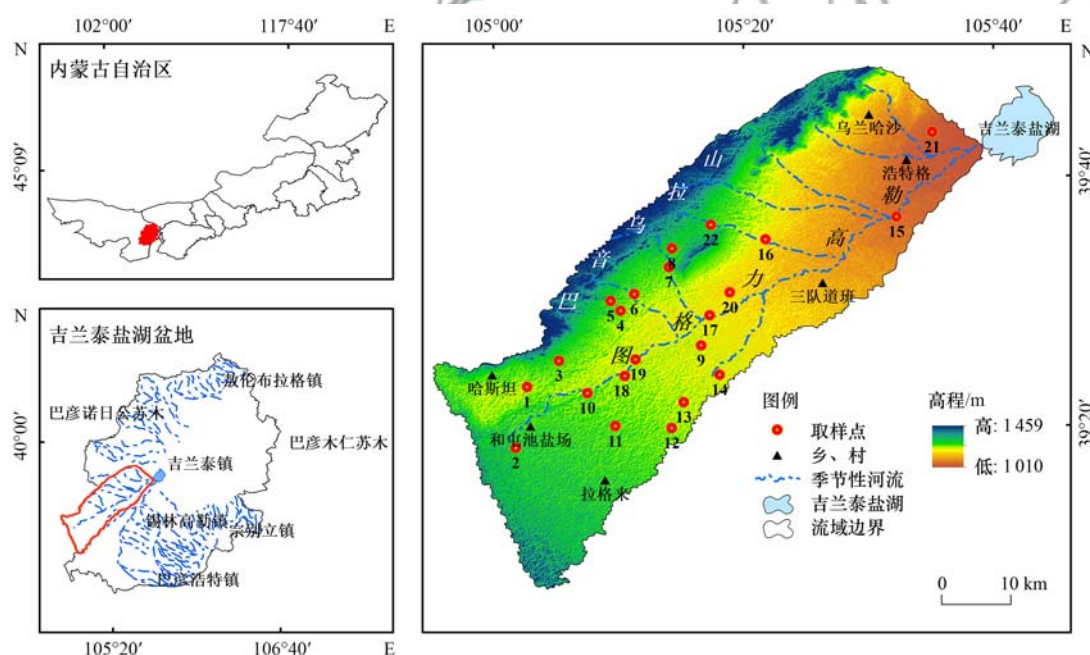


图 1 研究区位置及采样点分布示意

Fig. 1 Location of the study area and the distribution of sampling sites

1.2 样品的采集与测试

本研究于 2021 年丰水期和枯水期在图格力高勒流域共采集 22 处地下水 44 个水样 (图 1). 采样前,利用奥维地图和 GPS (全球定位系统, Global Position System) 进行采样点的定位,使用 500 mL 已用蒸馏水清洗干净并干燥的聚乙烯瓶采取水样,采样时用原样水冲洗 3 次,并确保采样瓶不含气泡.用于测定阳离子的样品使用孔径为 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜进行过滤,再经 1:1 的超纯 HNO₃ 酸化至 pH < 2,用于测定阴离子的水样不作酸化处理.所有样品均使用封口膜将瓶口封紧,贴好标签,放置于

4℃ 的冰箱中冷藏待测^[15]. 现场使用 PB-21 酸度计测定 pH,精度为 0.01; TDS 通过电导率仪 DDSJ-308A 测定,测量范围为 0 ~ 19 990 mg·L⁻¹; K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、F⁻、Cl⁻、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 通过赛默飞离子色谱仪 ICS-5000 测定; HCO₃⁻ 采用酸碱滴定法测定; Cr⁶⁺ 通过 TU-1810PC 紫外可见分光光度计测定,检出限为 0.004 mg·L⁻¹. 为检验数据可靠性,采用公式(1)进行检验^[16]:

$$E = \frac{\sum z \cdot m_c - \sum z \cdot m_a}{\sum z \cdot m_c + \sum z \cdot m_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中, E 为相对误差; z 为离子电荷数; m_a 、 m_c 为阴、阳离子量浓度,单位为 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. 经计算,所有水样阴阳离子电荷平衡误差均低于 5%.

1.3 水质指数(WQI)

水质指数(WQI) 能够反映不同水质参数综合影响的等级^[17]. 根据《地下水质量标准》GB/T 14848-2017^[18],采用 WQI 法对研究区地下水进行饮用适宜性评价,计算公式如式(2):

$$\text{WQI} = \sum \left[W_i \times \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \times 100 \right] \quad (2)$$

式中, $W_i = w_i / \sum w_i$ 为相对权重; w_i 为参数的权重^[19]; C_i 为各参数的测定值; S_i 为各参数的饮用水标准^[20,21], $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,所选取参数及其取值如表 1 所示. 根据 WQI 值将水质划分为 5 类^[22,23],详见

表 2.

表 1 各水质参数的取值

Table 1 Values of each water quality parameter

参数	S_i	w_i	W_i
pH	8.5	4	0.1
TDS	1 000	5	0.125
K^+	12	2	0.05
Na^+	200	3	0.075
Ca^{2+}	200	3	0.075
Mg^{2+}	150	3	0.075
Cl^-	250	3	0.075
SO_4^{2-}	250	4	0.1
NO_3^-	20	5	0.125
HCO_3^-	500	3	0.075
F^-	1	5	0.125
		$\sum w_i = 40$	$\sum W_i = 1$

1) w_i 、 W_i 和 pH 无量纲,其余参数对应 S_i 的单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

表 2 水质指数评价分级

Table 2 Water quality index evaluation grading

项目	WQI				
	<50	50~100	100~200	200~300	>300
水环境标准	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
水质情况	优秀	良好	中等	差	极差

1.4 人类健康风险评估(HHRA)

饮用摄入和皮肤接触是地下水污染物健康风险的主要暴露途径,以往的研究表明由皮肤接触带来的健康风险较小^[24]. 因此,采用美国环保局提出的健康风险评估数学模型(HHRA),评估了地下水中致癌因子 Cr^{6+} 和非致癌因子 F^- 通过饮水途径的暴露健康风险^[25].

暴露剂量,计算公式如下:

$$\text{ADD} = \frac{c \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (3)$$

式中,ADD 为饮水摄入途径日均暴露剂量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; c 为地下水元素的实测浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; IR 为平均摄入率,成人 1.5 $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$,儿童 0.7 $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$; EF 为平均暴露频率,通常为 365 $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$; ED 为暴露持续时间,成人的暴露时间为 30 a,儿童为 6 a; BW 为居民的平均体重,成人 65 kg,儿童 15 kg; AT 为平均暴露时间,对于致癌风险,AT 为 70 a $\times$ 365 d; 对于非致癌风险,AT 为 ED $\times$ 365 d^[26,27].

非致癌健康风险:

$$\text{HQ} = \frac{\text{ADD}}{\text{RfD}} \quad (4)$$

式中,HQ 为非致癌风险值; RfD 为某化学元素推荐的每日平均摄入量, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, F^- 的 RfD 值为 0.06 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; 当 $\text{HQ} > 1$ 时,表明该水样对人体具有较大的潜在影响^[28,29].

致癌健康风险:

$$\text{CR} = \text{ADD} \cdot \text{SF} \quad (5)$$

式中,CR 为致癌风险值; SF 为致癌斜率系数, $(\text{kg}\cdot\text{d})\cdot\text{mg}^{-1}$, Cr^{6+} 的 SF 值为 0.5 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$. 当 CR 值大于 5×10^{-5} 时则具有较高的致癌健康风险^[30].

2 结果与分析

2.1 地下水化学特征

研究区丰、枯水期地下水的化学参数统计特征见表 3 和图 2. 根据我国《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) 中 III 类水标准进行分析比较,结果表明,研究区地下水 pH 值在 7.56~8.83 之间,丰、枯水期均值分别为 8.38 和 8.12,整体呈现弱碱性环境,丰水期 pH 值略高于枯水期,变异系数为 0.04,表明地下水 pH 值较为稳定,其余离子浓度的变异系数相对 pH 值较大,体现出较为明显的空间变异性. $\rho(\text{TDS})$ 普遍较高,在丰、枯水期均值分别为 1 630 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1 958 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均大于 1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,为微咸水,枯水期 $\rho(\text{TDS})$ 均值略高于丰水期. 地下水阴离子浓度关系为: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{F}^-$,阴离子以 Cl^- 为主,68.18% 的 Cl^- 超过了地下水质量 III 类标准值(250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),13.64% 的 F^- 超过 III 类标准值(1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 阳离子浓度关系为: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Cr}^{6+}$,阳离子以 Na^+ 为

主, 59.09% 的 Na^+ 超过了Ⅲ类标准值 ($200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 13.64% 的 Cr^{6+} 超过Ⅲ类标准值 ($0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 地下水中主要离子变异系数在 0.04 ~

1.67 范围内, Cl^- 和 Cr^{6+} 的变异系数均大于 1, 表明存在明显的点源污染, 可能是受人类活动的影响^[31].

表 3 地下水化学参数统计¹⁾

Table 3 Statistics of groundwater chemical parameters

时间	统计值	检测项目											
		K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	HCO_3^-	TDS	pH	Cr^{6+}
丰水期	最大值	16.33	1 235.53	81.98	70.56	1.09	2 206.66	176.94	4.93	250.17	4 378	8.83	0.052
	最小值	1.88	69.31	14.10	7.10	0.10	61.50	28.48	0.10	112.71	288	7.80	0.001
	平均值	6.27	378.35	47.07	24.93	0.60	572.28	101.05	1.67	173.94	1 630	8.38	0.010
	标准差	3.00	356.74	23.43	18.11	0.30	620.89	38.80	1.24	32.53	1125	0.37	0.016
	变异系数	0.48	0.94	0.50	0.73	0.50	1.08	0.38	0.75	0.19	0.69	0.04	1.64
枯水期	最大值	18.64	1 214.53	125.98	104.84	1.18	2 184.48	207.94	6.34	265.76	4 580	8.53	0.069
	最小值	2.25	95.77	12.10	9.38	0.16	98.70	42.48	0.16	143.56	312	7.56	0.002
	平均值	6.82	400.05	58.98	35.14	0.69	611.21	126.80	1.95	196.21	1 958	8.12	0.012
	标准差	3.39	355.51	30.97	27.06	0.29	625.42	51.29	1.51	29.46	1 258	0.30	0.019
	变异系数	0.50	0.89	0.53	0.77	0.43	1.02	0.40	0.77	0.15	0.64	0.04	1.67

1) pH 和变异系数无量纲,其余数值的单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

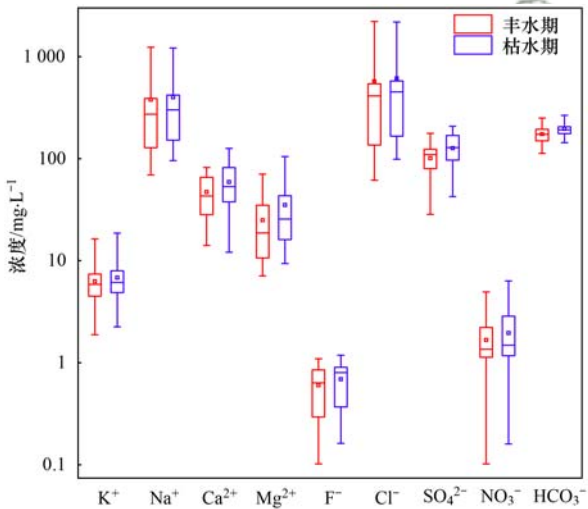


图 2 丰水期和枯水期地下水化学参数箱线图

Fig. 2 Box-plot of groundwater chemical parameters in the wet and dry seasons

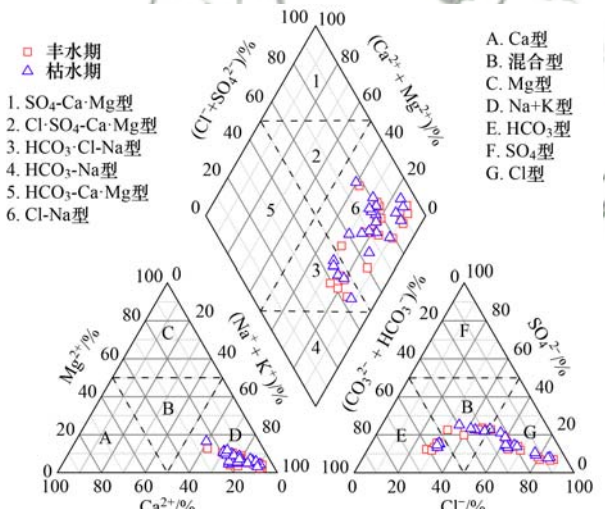


图 3 地下水水化学 piper 三线图

Fig. 3 Piper diagram of groundwater hydrochemistry

2.2 地下水水化学类型

Piper 三线图能直观反映地下水主要离子的化学组成特征(图 3), 并对其一般化学性质及控制单元有明显的辨别作用^[32]. 研究区地下水样中阳离子主要集中在 D 区, 说明优势阳离子为 Na^+ , 阴离子分布较为分散, 多集中在 Cl^- 端元, 部分点位在 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4$ 区域, 说明优势阴离子为 Cl^- . 研究区地下水水化学类型以 $\text{Cl}\text{-Na}$ 型为主, 同时存在 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\text{-Na}$ 、 $\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 和 $\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 型. 虽然研究区水化学类型构成繁杂多样, 但丰、枯水期离子浓度总体变化差异较小.

2.3 水质评价

选取地下水参数 pH、TDS、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 HCO_3^- 共 11 项指标

参与 WQI 计算评价. 由 WQI 空间分布可知(图 4), 研究区地下水水质整体较好, 丰水期地下水水样 WQI 在 25.73 ~ 190.53 范围变化, I ~ Ⅲ类地下水的占比分别为 31.82%、45.45% 和 22.73%; 枯水期地下水水样 WQI 在 30.35 ~ 197.55 范围变化, I ~ Ⅲ类地下水的占比分别为 27.27%、50% 和 22.73%, I ~ Ⅲ类地下水可直接饮用. 从 Gibbs 结果表明, 研究区年降水量少, 降水对本地区地下水离子的影响不大, 这就解释了 WQI 在丰水期和枯水期差异不显著的原因.

2.4 人类健康风险评估(HHRA)

长期饮用 Cr^{6+} 或 F^- 含量高的水会严重影响居民的身体健康. 过量摄入 Cr^{6+} 会导致急性呼吸道刺激、过敏性哮喘甚至肺癌等疾病的产生, 而骨骼损害、氟斑牙和氟骨症等症状与吸收高浓度 F^- 有

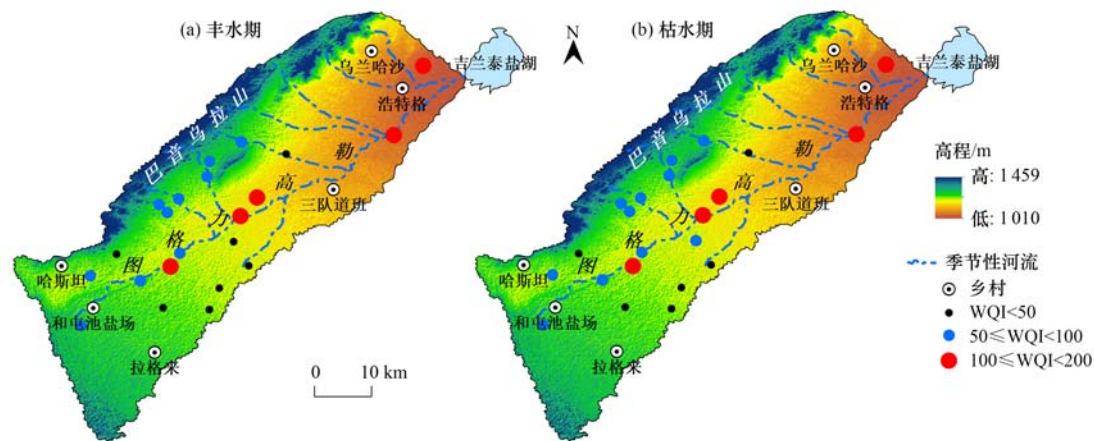


图 4 基于 WQI 的地下水水质空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of groundwater quality based on WQI value

关^[33,34]. 因此,评估研究区地下水致癌因子 Cr^{6+} 和非致癌因子 F^{-} 对人类健康风险十分必要.

丰水期儿童和成人 F^{-} 的 HQ (非致癌风险值) 值分别在 $7.93 \times 10^{-2} \sim 8.51 \times 10^{-1}$ 和 $3.92 \times 10^{-2} \sim 4.21 \times 10^{-1}$ 之间; 枯水期儿童和成人 F^{-} 的 HQ 值分别在 $1.26 \times 10^{-1} \sim 9.20 \times 10^{-1}$ 和 $6.24 \times 10^{-2} \sim 4.55 \times 10^{-1}$ 之间(表 4). 季节上,枯水期人们面临非致癌健康风险更大; 年龄上,儿童更容易遭受非致癌健康风险,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. 儿童和成人 F^{-} 的 HQ 值在丰、枯水期均低于限值 ($\text{HQ} = 1$), 因此, F^{-} 对人体健康暂无危害. 但研究区少数地下水样品 F^{-} 含

量超过Ⅲ类水标准,未来可能有非致癌健康风险.

丰水期儿童和成人 Cr^{6+} 的 CR (致癌风险值) 值分别为 $3.29 \times 10^{-6} \sim 1.21 \times 10^{-4}$ 和 $1.63 \times 10^{-6} \sim 5.99 \times 10^{-5}$; 枯水期儿童和成人 Cr^{6+} 的 CR 值分别为 $4.55 \times 10^{-6} \sim 1.61 \times 10^{-4}$ 和 $2.25 \times 10^{-6} \sim 7.96 \times 10^{-5}$. 季节和年龄上 Cr^{6+} 与 F^{-} 呈现相同规律. 丰、枯水期儿童和成人 Cr^{6+} 经饮水途径暴露的致癌健康风险最大值均超过国际辐射防护委员会(ICRP)公布的 5×10^{-5} . 饮用含有高浓度 Cr^{6+} 的水会导致很多器官功能衰竭,因此,应尽快采取措施加强对高浓度 Cr^{6+} 地下水区域的管控,降低 Cr^{6+} 摄入带来的健康风险.

表 4 人类健康风险评估结果统计

Table 4 Statistics of human health risk assessment results

时期	项目	F^{-}		Cr^{6+}	
		HQ (儿童)	HQ (成人)	CR (儿童)	CR (成人)
丰水期	最小值	7.93×10^{-2}	3.92×10^{-2}	3.29×10^{-6}	1.63×10^{-6}
	最大值	8.51×10^{-1}	4.21×10^{-1}	1.21×10^{-4}	5.99×10^{-5}
	平均值	4.67×10^{-1}	2.31×10^{-1}	2.30×10^{-5}	1.14×10^{-5}
	标准差	2.29×10^{-1}	1.16×10^{-1}	3.77×10^{-5}	1.87×10^{-5}
枯水期	最小值	1.26×10^{-1}	6.24×10^{-2}	4.55×10^{-6}	2.25×10^{-6}
	最大值	9.20×10^{-1}	4.55×10^{-1}	1.61×10^{-4}	7.96×10^{-5}
	平均值	5.36×10^{-1}	2.65×10^{-1}	2.70×10^{-5}	1.33×10^{-5}
	标准差	2.32×10^{-1}	1.13×10^{-1}	4.51×10^{-5}	2.23×10^{-5}

3 讨论

3.1 地下水的主要离子来源及成因

Gibbs 图有助于定性分析地下水化学组来源,通过 $\rho(\text{TDS})$ 、 $\text{Na}^{+}/(\text{Na}^{+} + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^{-}/(\text{Cl}^{-} + \text{HCO}_3^{-})$ 的半对数图,将地下水主要离子来源分为 3 种控制类型:岩石风化控制型、大气降水控制型和蒸发浓缩控制型^[35,36]. 通过绘制地下水 Gibbs 图可知(图 5),研究区丰、枯水期地下水样品位于 Gibbs 图右上角, $\rho(\text{TDS})$ 范围为 288 ~ 4 580

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Na}^{+}/(\text{Na}^{+} + \text{Ca}^{2+})$ 范围为 0.67 ~ 0.93, $\text{Cl}^{-}/(\text{Cl}^{-} + \text{HCO}_3^{-})$ 范围为 0.43 ~ 0.96,表明地下水化学组成主要受蒸发浓缩作用的影响,部分地下水样品趋于岩石风化作用控制端元,说明部分地下水还受到了岩石风化作用的影响,所有地下水样品均远离大气降水作用控制区域,结合研究区的实际情况,因其较低的年降水量表明地下水离子组成受大气降水作用的影响不显著. 此外,还有个别地下水样品落在虚线外,说明除了受到上述作用影响以外,还可能受到人为因素、地质环境等其他因素的影

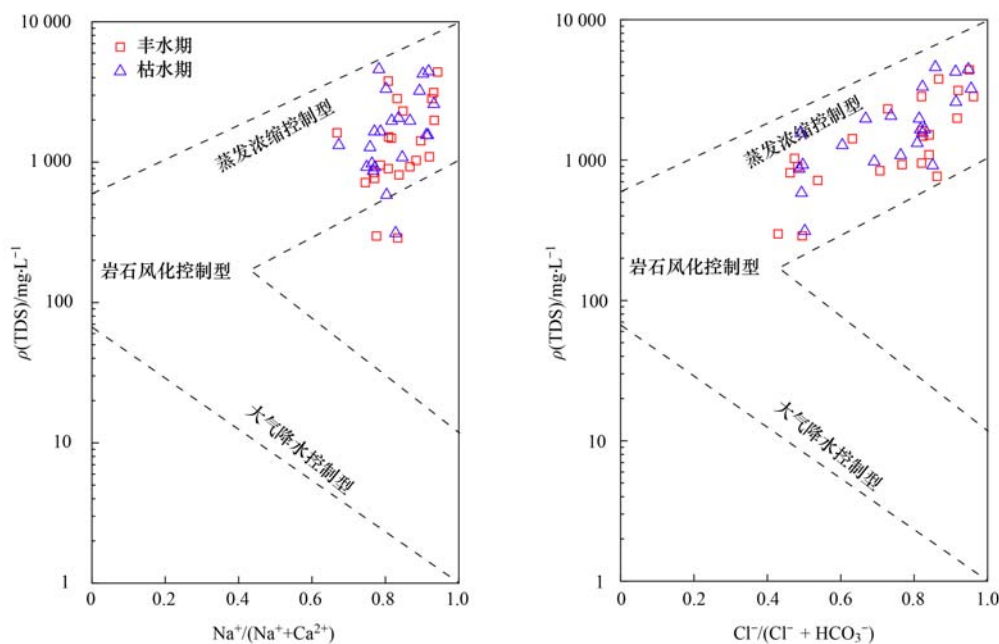


图5 地下水水化学 Gibbs 图

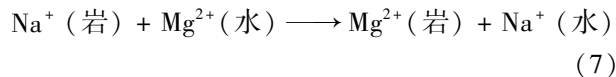
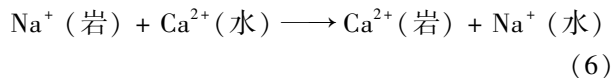
Fig. 5 Gibbs diagram of groundwater chemistry

响^[37].

利用 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 的量比值关系可定性判别蒸发盐岩、硅酸盐岩和碳酸盐岩风化溶解作用对地下水溶质的影响^[38,39]. 研究区丰、枯水期地下水样品集中在蒸发盐岩和碳酸盐岩连线中间且更靠近蒸发盐岩风化控制端元[图 6(a)], 说明研究区地下水主要离子受蒸发盐岩的风化溶解影响更大, 碳酸盐岩矿物风化次之, 这与研究区分布大量的石盐、芒硝和石膏等蒸发盐类岩石有关.

碳酸盐岩风化溶解产生 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- , 硅酸盐岩风化溶解产生 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 和 HCO_3^- , 蒸发岩风化溶解产生 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- . 换言之, Na^+ 和 K^+ 主要来源于硅酸盐岩和蒸发岩的溶解, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发岩的溶解, HCO_3^- 主要来自碳酸盐岩和硅酸盐岩的溶解, SO_4^{2-} 和 Cl^- 主要来自蒸发岩溶解^[40,41]. 用离子比值图和线性拟合图来进一步分析研究区化学风化作用的地下水主要离子来源^[1,42]. $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{Cl}^-$ 的毫克当量比值等于 1 时说明地下水中 Na^+ 和 K^+ 来源于岩盐的溶解, 大于 1 时来源于硅酸盐岩的溶解^[43]. 由图 6(b) 可知, 研究区丰、枯水期多数地下水样品位于 1:1 当量线的两侧, 说明地下水中 Na^+ 和 K^+ 可能除了受蒸发盐岩和硅酸盐岩的溶解作用外, 阳离子交换作用和人为污染等其它因素也有一定的影响. 水体中是否存在阳离子交换吸附作用可以用 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)/[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{SO}_4^{2-} +$

$\text{HCO}_3^-)]$ 的毫克当量比值关系来判断^[44]. 由图 6(c) 可知, 研究区丰、枯水期地下水样品的斜率分别为 -0.53 ($R^2 = 0.81$) 和 -0.76 ($R^2 = 0.85$), 呈负相关关系, 表明阳离子交换作用发生在地下水与土壤表面之间, 枯水期较丰水期阳离子交换过程更明显. 研究区地下水的弱碱性环境能促进阳离子交换作用, 同时, 地下水具有强吸附力的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 置换出了土壤表面的 Na^+ [式(6)和式(7)], 导致地下水样品的 Na^+ 升高, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 降低.



利用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的毫克当量比值关系可以判断碳酸盐岩或蒸发盐岩及硅酸盐岩的溶解对离子组分的影响^[45,46], 研究区 61% 的地下水样品分布在 1:1 线下方[图 6(d)], 39% 的地下水样品分布在 1:1 线上方, 说明地下水中蒸发盐岩及硅酸盐岩溶解占主导作用, 而碳酸盐岩溶解只占次要作用. 蒸发盐岩和碳酸盐岩的溶解对离子组分的影响可用 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)/\text{HCO}_3^-$ 的毫克当量比值关系来判断^[47,48], 研究区地下水样品多位于 1:1 线上方[图 6(e)], 表示地下水中离子主要来源于蒸发盐岩的溶解, 且研究区内芒硝、石膏和岩盐等蒸发盐类集聚, 由此推断地下水中离子以蒸发盐岩的风化溶解为主, 碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化溶解作用较小. 利用 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 的毫克当量比值关系可以

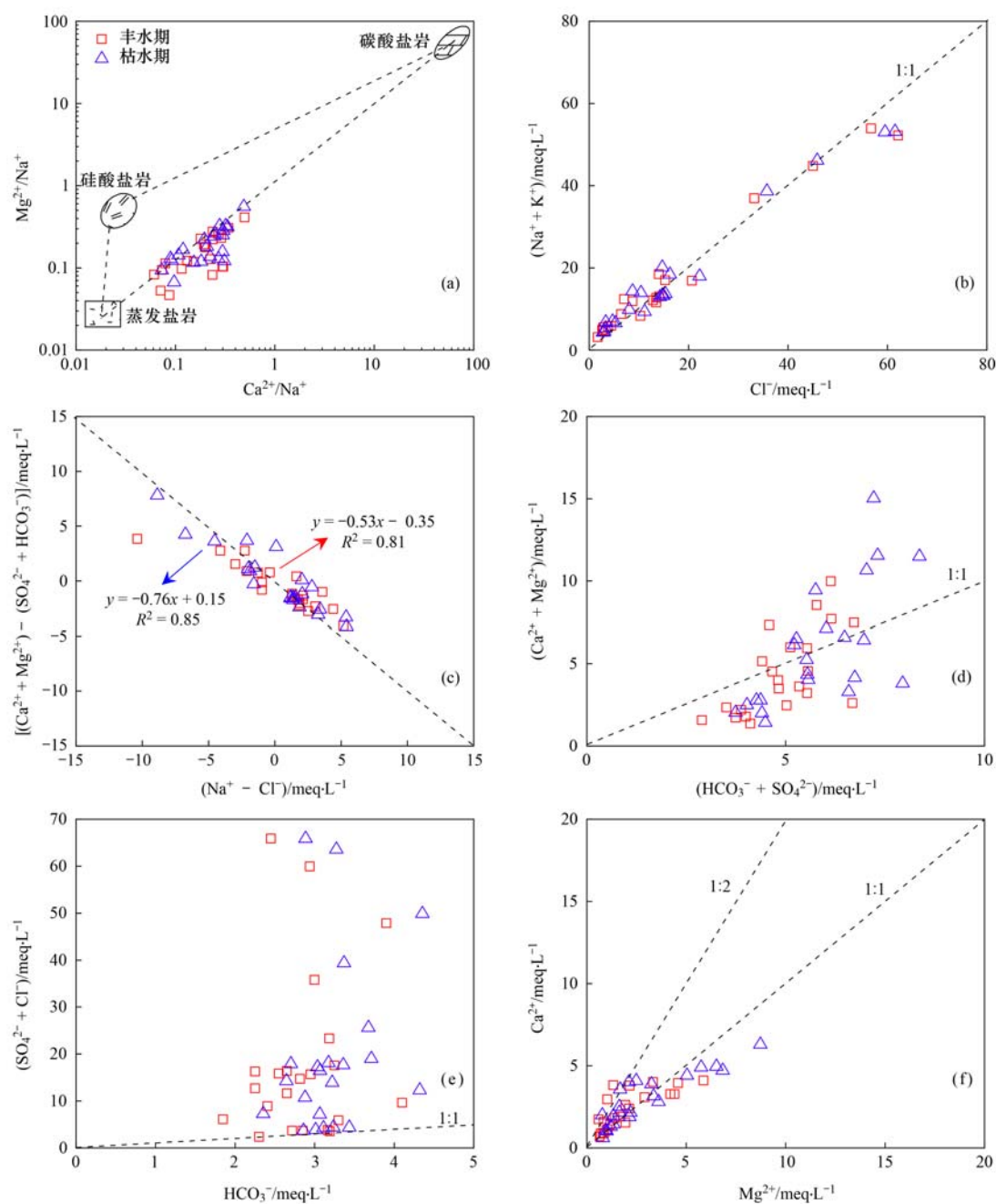


图6 研究区地下水中主要离子之间关系

Fig. 6 Relationship between major ions in groundwater in the study area

判断离子组分受方解石和白云石的溶解程度[图6(f)],地下水样品主要集中在1:1和1:2线之间,表明地下水中离子主要来源于方解石溶解^[49]。

3.2 地下水化学控制因素分析

结合皮尔逊相关分析和因子分析,选取10项水化学指标(HCO_3^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、TDS)对研究区地下水主要离子间的相关关系进行分析(图7),并对数据进行KMO-Bartlett球形检验,其显著性水平接近于0,认为数据满足因子分析的检验标准,本研究共提取3个公因子,其累计方差贡献率为78.84%,能较好地反映研究区水化学数据的信息。通过对所有采样点的3个

公因子的因子得分进行反距离权重插值分析,得出各公因子在研究区内的空间分布规律(图8)。

F1作为研究区内地下水的首要因素,其综合贡献率为54.19%,以 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和TDS为主要代表变量,且相互之间相关性较强。研究区内石膏(硫酸钙)、芒硝(硫酸钠)、岩盐(氯化钠)等蒸发盐类矿物丰富,且地下水循环中蒸发盐岩的溶解占主导作用,说明该地区内具备形成蒸发浓缩作用的先决条件。TDS值会随着地下水的蒸发排泄量大而不同程度地增大,地下水中溶解度较小的盐类相继达到饱和而析出,溶解度较大的 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 离子得以保留。此外,因地下水中有关

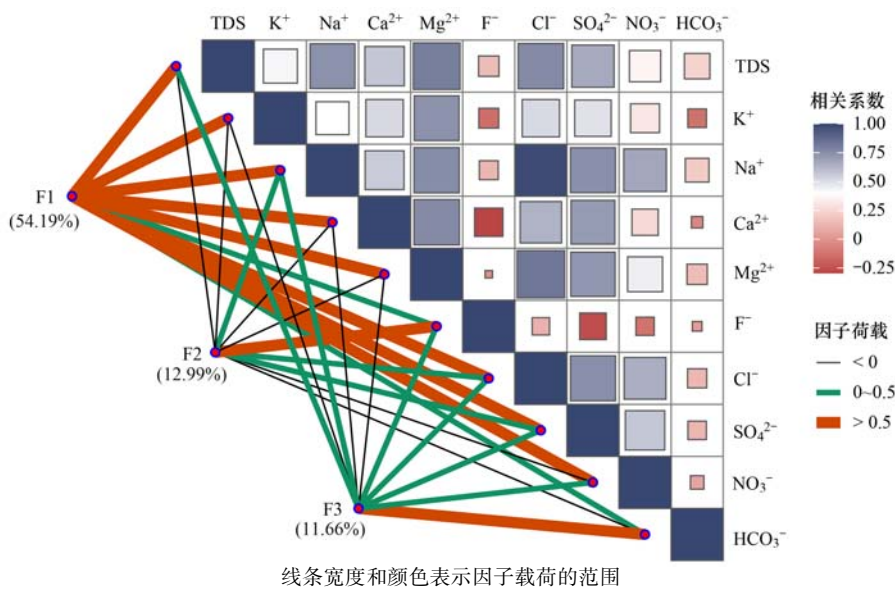


图 7 结合 Pearson 相关分析和因子分析确定离子之间的相关性

Fig. 7 Identifying the correlations between ions by combining Pearson correlation analysis and factor analysis

碳酸盐的沉淀较少,而使 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 因子载荷较高. 因此,F1 代表的是蒸发浓缩作用. 从 F1 得分空间分布来看 [图 8(a)],F1 得分较高区域主要集中在图格力高勒西北侧. 研究区为第四系松散岩类孔隙潜水含水层,岩性为湖积砂质黏土、黏质砂土夹粉细砂,含水层颗粒松散、粒度粗、连续性较好,盐湖上游图格力高勒地下水径流携带易溶组分向乌兰泰盐湖运动,下游地下水埋深浅,蒸发强烈,导致下游地下水靠近盐湖附近出现富集现象.

F2 综合贡献率为 12.99%, F^- 与其正相关性最高. 研究区典型的大陆性干旱气候和沙漠盆地封闭式地下水系统中 F^- 富集程度较高,与岩石土壤、地形地貌及地下水径流条件因素有着密切关系. 而研究区高氟水的产生与多个因素相关,如低洼的地形条件、潜水蒸发强烈,土壤盐渍化加剧等. 因此,F2 代表的是原生地质环境因子. 从 F2 得分空间分布来看[图 8(b)],F2 得分较高区域主要分布在盐湖盆地西南走向一带. 研究区第四系含水层岩性以黏土

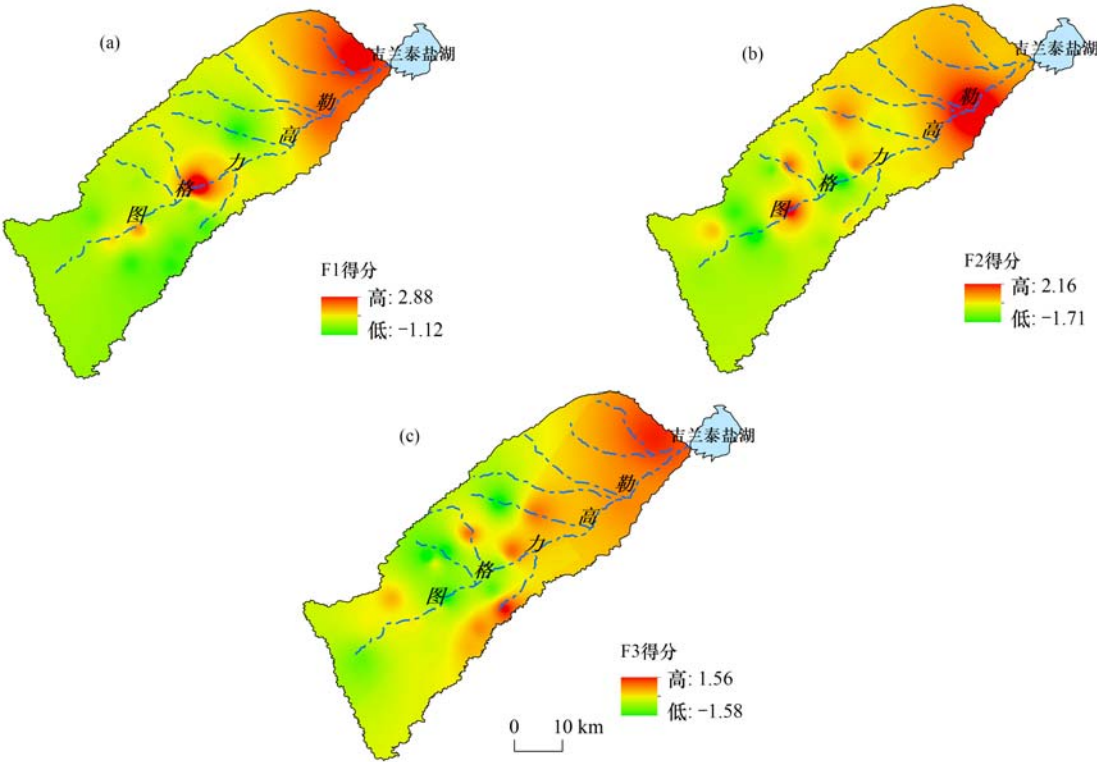


图 8 公因子得分空间分布特征

Fig. 8 Spatial distribution characteristics of common factor scores

为主,加上盐湖西南部地下水埋深相对较浅,严重的土壤盐渍化和高含量的水溶氟会促使土壤氟迁移和富集于地下水中,使该区域污染程度变大。

F3 综合贡献率为 11.66%, HCO_3^- 与其正相关性最高。由于地下水中的 HCO_3^- 主要来源于如方解石和白云石等碳酸盐岩矿物的风化溶解,因此,F3 代表的是碳酸盐岩溶解作用。从 F3 得分空间分布来看[图 8(c)],F3 得分较高区域主要分布在盐湖上游图格力高勒沟谷一带,是由于该区域存在碳酸盐岩,碳酸盐岩溶解作用使得地下水中 HCO_3^- 偏高。

4 结论

(1)研究区地下水为弱碱性水,阳离子浓度顺序为: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Cr}^{6+}$,阴离子浓度顺序为: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{F}^-$,占优势的阴、阳离子为 Cl^- 和 Na^+ ,地下水水化学类型丰水期与枯水期离子浓度变化不明显,以 Cl^- - Na^+ 型占主导, $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$ - Na^+ 、 Cl^- - $\text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 和 Cl^- - $\text{Na}^+ \cdot \text{Mg}^{2+}$ 型等多种共存。

(2)研究区地下水水质整体较好,在丰水期和枯水期水质差异不显著。根据地下水健康风险评估, F^- 对人体健康暂无危害,但丰、枯水期儿童和成人 Cr^{6+} 经饮水途径暴露的致癌健康风险最大值均超过国际辐射防护委员会(ICRP)公布的 5×10^{-5} ,儿童受到污染物危害的潜在风险较成人更大,需加强对儿童饮用水安全的关注。

(3)研究区地下水离子组分主要受蒸发浓缩作用、蒸发盐岩溶解以及阳离子交换作用的影响;蒸发盐岩矿物溶解(芒硝、石膏和岩盐等蒸发盐类矿物)是地下水中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 的主要来源。皮尔逊相关分析和因子分析结果显示地下水化学组成主要受控于 F1(蒸发浓缩作用)、F2(原生地质环境因子)和 F3(碳酸盐岩溶解作用)等 3 个因素的影响,贡献率分别为 54.19%、12.99% 和 11.66%。

参考文献:

- [1] 崔佳琪,李仙岳,史海滨,等.河套灌区地下水化学演变特征及形成机制[J].环境科学,2020,41(9):4011-4020.
Cui J Q, Li X Y, Shi H B, et al. Chemical evolution and formation mechanism of groundwater in Hetao Irrigation Area[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4011-4020.
- [2] 刘鑫,向伟,司炳成.渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素[J].环境科学,2021,42(6):2817-2825.
Liu X, Xiang W, Si B C. Hydrochemistry and its controlling factors and water quality assessment of shallow groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments[J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 2817-2825.
- [3] Shao Z F, Huq M E, Cai B W, et al. Integrated remote sensing and GIS approach using Fuzzy-AHP to delineate and identify groundwater potential zones in semi-arid Shanxi Province, China [J]. Environmental Modelling & Software, 2020, 134, doi: 10.1016/j.envsoft.2020.104868.
- [4] 唐春雷,赵春红,申豪勇,等.娘子关泉群水化学特征及成因[J].环境科学,2021,42(3):1416-1423.
Tang C L, Zhao C H, Shen H Y, et al. Chemical characteristics and causes of groups water in Niangziguan Spring [J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1416-1423.
- [5] 孔晓乐,常玉儒,刘夏,等.淳沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源[J].环境科学,2023,44(8):4292-4303.
Kong X L, Chang Y R, Liu X, et al. Spatial variation characteristics, influencing factors, and sources of hydrogeochemical of surface water and groundwater in Mountainous Area of Hutuo River[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4292-4303.
- [6] 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估[J].中国环境科学,2019,39(11):4762-4768.
Zhang Y, Guo C Q, Sun P A, et al. Groundwater health risk assessment based on spatial analysis in the Qiaomaidi Watershed [J]. China Environmental Science, 2019, 39(11): 4762-4768.
- [7] 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 Journal, 2019, 25(1-2): 250-270.
- [8] 张涛,王明国,张智印,等.然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素[J].环境科学,2020,41(9):4003-4010.
Zhang T, Wang M G, Zhang Z Y, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Ranwu Lake Basin[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4003-4010.
- [9] 沈回归,饶文波,谭红兵,等.高寒区典型流域地下水水化学特征、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 H G, Rao W B, Tan H B, 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.
- [10] 谢浩,邹胜章,李军,等.重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评估[J].环境科学,2023,44(8):4304-4313.
Xie H, Zou S Z, Li J, et al. Spatial distribution, source analysis, and health risk assessment of metal elements in Karst Water in Southeastern Chongqing [J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4304-4313.
- [11] 秦子元.内蒙古吉兰泰盐湖盆地地下水水化学特征及控制因素[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
Qin Z Y. Groundwater chemical characteristics and controlling factors in Jilantai Salt Lake Basin, Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [12] 高瑞忠,秦子元,张生,等.吉兰泰盐湖盆地地下水 Cr^{6+} 、As、Hg 健康风险评估[J].中国环境科学,2018,38(6):2353-2362.
Gao R Z, Qin Z Y, Zhang S, et al. Health risk assessment of Cr^{6+} , As and Hg in groundwater of Jilantai Salt Lake Basin, China [J]. China Environmental Science, 2018, 38(6): 2353-2362.
- [13] 于志同,刘兴起,王永,等.13.8ka 以来内蒙古吉兰泰盐湖

- 的演化过程[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(4): 629-636.
- Yu Z T, Liu X Q, Wang Y, *et al.* Evolution of Jilantai Salt Lake, Inner Mongolia in the last 13.8ka[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(4): 629-636.
- [14] 张阿龙, 高瑞忠, 张生, 等. 吉兰泰盐湖盆地土壤铬、汞、砷污染的负荷特征与健康风险评价[J]. 干旱区研究, 2018, **35**(5): 1057-1067.
- Zhang A L, Gao R Z, Zhang S, *et al.* Pollution load characteristics and health risk assessment of heavy metals Cr, Hg and As in the Jilantai Salt Lake Basin[J]. Arid Zone Research, 2018, **35**(5): 1057-1067.
- [15] 李洲, 李晨曦, 华琨, 等. 黄土区洛川塬地下水水化学特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3559-3567.
- Li Z, Li C X, Hua K, *et al.* Groundwater chemistry characteristics and the analysis of influence factors in the Luochuan Loess Tablelands[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3559-3567.
- [16] 武亚遵, 潘春芳, 林云, 等. 典型华北型煤矿区主要充水含水层水文地球化学特征及控制因素[J]. 地质科技情报, 2018, **37**(5): 191-199.
- Wu Y Z, Pan C F, Lin Y, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and controlling factors of main water filled aquifers in the Typical North China Coalfield[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, **37**(5): 191-199.
- [17] Nong X Z, Shao D G, Zhong H, *et al.* Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method [J]. Water Research, 2020, **178**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115781.
- [18] GB/T 14848-2017, 地下水质量标准[S].
- [19] Rabeiy R E. Assessment and modeling of groundwater quality using WQI and GIS in Upper Egypt area[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(31): 30808-30817.
- [20] WHO. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum[R]. Geneva: World Health Organization, 2017.
- [21] Zhang Q Y, Xu P P, Qian H. Assessment of groundwater quality and human health risk (HHR) evaluation of nitrate in the central-western Guanzhong basin, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(21), doi: 10.3390/ijerph16214246.
- [22] Xiao J, Wang L Q, Deng L, *et al.* Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 2004-2012.
- [23] Gao Y Y, Qian H, Ren W H, *et al.* Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated-weight water quality index in a concentrated urban area [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121006.
- [24] Chai N P, Yi X, Xiao J, *et al.* Spatiotemporal variations, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in the Fen River[J]. Science of the Total Environment, 2021, **757**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143882.
- [25] Liang H T, Wang W, Li J L, *et al.* Hydrochemical characteristics and health risk assessment of groundwater in Dingbian county of the Chinese Loess Plateau, northwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2022, **81**(11), doi: 10.1007/s12665-022-10442-5.
- [26] Wang X D, Zheng W D, Tian W, *et al.* Groundwater hydrogeochemical characterization and quality assessment based on integrated weight matter-element extension analysis in Ningxia, upper Yellow River, northwest China[J]. Ecological Indicators, 2022, **135**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108525.
- [27] Li P Y, Li X Y, Meng X Y, *et al.* Appraising groundwater quality and health risks from contamination in a semiarid region of northwest China[J]. Exposure and Health, 2016, **8**(3): 361-379.
- [28] Adimalla N. Spatial distribution, exposure, and potential health risk assessment from nitrate in drinking water from semi-arid region of South India [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020, **26**(2): 310-334.
- [29] Narsimha A, Rajitha S. Spatial distribution and seasonal variation in fluoride enrichment in groundwater and its associated human health risk assessment in Telangana State, South India [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2018, **24**(8): 2119-2132.
- [30] Zakir H M, Sharmin S, Akter A, *et al.* Assessment of health risk of heavy metals and water quality indices for irrigation and drinking suitability of waters: a case study of Jamalpur Sadar area, Bangladesh[J]. Environmental Advances, 2020, **2**, doi: 10.1016/j.envadv.2020.100005.
- [31] 王攀, 靳孟贵, 路东臣. 河南省永城市浅层地下水化学特征及形成机制[J]. 地球科学, 2020, **45**(6): 2232-2244.
- Wang P, Jin M G, Lu D C. Hydrogeochemistry characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Yongcheng City, Henan Province[J]. Earth Science, 2020, **45**(6): 2232-2244.
- [32] Liu J T, Gao Z J, Wang Z Y, *et al.* Hydrogeochemical processes and suitability assessment of groundwater in the Jiaodong Peninsula, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, **192**(6), doi: 10.1007/s10661-020-08356-5.
- [33] 张欣怡, 李洪兴. 饮用水六价铬暴露健康效应的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2020, **37**(4): 369-372.
- Zhang X Y, Li H X. Health effects of hexavalent chromium exposure in drinking water: a review of recent studies [J]. Journal of Environment and Health, 2020, **37**(4): 369-372.
- [34] González-Horta C, Ballinas-Casarrubias L, Sánchez-Ramírez 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): 4587-4601.
- [35] Wu C, Wu X, Qian C, *et al.* Hydrogeochemistry and groundwater quality assessment of high fluoride levels in the Yanchi endorheic region, northwest China [J]. Applied Geochemistry, 2018, **98**: 404-417.
- [36] Zhou B, Wang H W, Zhang Q Q. Assessment of the evolution of groundwater chemistry and its controlling factors in the Huangshui River Basin of northwestern China, using hydrochemistry and multivariate statistical techniques [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, **18**(14), doi: 10.3390/ijerph18147551.
- [37] 李永柳, 周忠发, 孔杰, 等. 喀斯特地区河流水化学季节变化特征及成因分析——以平寨水库上游流域为例[J]. 环境化学, 2023, **42**(2): 478-486.
- Li Y L, Zhou Z F, Kong J, *et al.* Seasonal variation characteristics and causes of river water chemistry in Karst——Taking the area of Pingzhai Reservoir as an example [J]. Environmental Chemistry, 2023, **42**(2): 478-486.
- [38] Jiang L G, Yao Z J, Liu Z F, *et al.* Hydrochemistry and its controlling factors of rivers in the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geochemical

- Exploration, 2015, **155**: 76-83.
- [39] 任孝宗, 李建刚, 刘敏, 等. 浑善达克沙地东部地区天然水体的水化学组成及其控制因素[J]. 干旱区研究, 2019, **36**(4): 791-800.
- Ren X Z, Li J G, Liu M, *et al.* Hydrochemical composition of natural waters and its affecting factors in the East Hunshandak Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2019, **36**(4): 791-800.
- [40] Thomas J, Joseph S, Thirivikramji K P. Hydrochemical variations of a tropical mountain river system in a rain shadow region of the southern Western Ghats, Kerala, India [J]. Applied Geochemistry, 2015, **63**: 456-471.
- [41] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2132-2142.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Regional evolution and control factors of karst groundwater in Liulin Spring catchment [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2132-2142.
- [42] Mukherjee A, Fryar A E. Deeper groundwater chemistry and geochemical modeling of the arsenic affected western Bengal basin, west Bengal, India[J]. Applied Geochemistry, 2008, **23**(4): 863-894.
- [43] 栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J]. 环境化学, 2017, **36**(2): 380-389.
- Luan F J, Zhou J L, Jia R L, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu Basin, Xinjiang [J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(2): 380-389.
- [44] Xiao J, Jin Z D, Ding H, *et al.* Geochemistry and solute sources of surface waters of the Tarim river basin in the extreme arid region, NW Tibetan plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, **54-55**: 162-173.
- [45] Li C C, Gao X B, Wang Y X. Hydrogeochemistry of high-fluoride groundwater at Yuncheng Basin, northern China [J]. Science of the Total Environment, 2015, **508**: 155-165.
- [46] 姜凤, 周金龙, 周殷竹, 等. 巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别[J]. 环境科学, 2023, **44**(11): 6050-6061.
- Jiang F, Zhou J L, Zhou Y Z, *et al.* Hydrochemical Characteristics and Pollution Sources Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin [J]. Environmental Science, 2023, **44**(11): 6050-6061.
- [47] Mao M, Wang X, Zhu X Q. Hydrochemical characteristics and pollution source apportionment of the groundwater in the east foothill of the Taihang Mountains, Hebei Province [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, **80**(1), doi: 10.1007/s12665-020-09341-4.
- [48] 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 the Longzici Spring Catchment [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2087-2095.
- [49] Liu J T, Gao Z J, Wang M, *et al.* Hydrochemical characteristics and possible controls in the groundwater of the Yarlung Zangbo River Valley, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, **78**(3), doi: 10.1007/s12665-019-8101-y.

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)