环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 45 卷　第 1 期
2024 年 1 月 15 日

目　次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测 ……陈镇，刘润，罗征，薛鑫，汪瑶，赵志军（ 1 ）
粤港澳大湾区大气$PM_{2.5}$浓度的遥感估算模型 ……代园园，龚绍琦，张存杰，闵爱莲，王海君（ 8 ）
典型输送通道城市冬季$PM_{2.5}$污染与传输变化特征 ……代武俊，周颖，王晓琦，齐鹏（ 23 ）
郑州市夏季$PM_{2.5}$中二次无机组分污染特征及其影响因素 ……和兵，杨洁茹，徐艺斐，袁明浩，翟诗婷，赵长民，王申博，张瑞芹（ 36 ）
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析 ……彭超，李振亮，向英，王晓宸，汪凌韬，张晟，翟崇治，陈阳，杨复沫，翟天宇（ 48 ）
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析 ……陈木兰，李振亮，彭超，邓也，宋丹林，谭钦文（ 61 ）
2020年“三连击”台风对我国东部地区O_3污染的影响分析 ……花丛，尤媛，王靖，张碧辉（ 71 ）
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析 ……张博韬，景宽，王琴，安欣欣，鹿海峰，王陈婧，王友峰，刘保献（ 81 ）
机动车减污降碳综合评价体系综述 ……范朝阳，佟惠，梁晓宇，彭剑飞（ 93 ）
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景 ……杨峰，张贵驰，孙佶，谢放尖，揣小伟，孙瑞玲（ 104 ）
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力 ……翁淑娟，刘颖颖，唐凤，沙青娥，彭勃，王烨嘉，陈诚，张雪驰，李京洁，陈豪琪，郑君瑜，宋献中（ 115 ）
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素 ……张翔宇，胡建坤，马凯，高欣慰，魏月华，韩宏大，李克勋（ 123 ）
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价 ……窦殿程，齐嵘，肖淑敏，苏高新，郭宇新（ 131 ）
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评估 ……张成诺，钟琴，栾博文，周涛，顾帆，李祎飞，邹华（ 140 ）
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价 ……张楷文，张海燕，孔聪，顾润润，田良良，杨光昕，王媛，陈冈，沈晓盛（ 151 ）
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析 ……娄保锋，谢卫民，黄波，刘旻璇（ 159 ）
珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用 ……李睿，梁作兵，伍祺瑞，杨晨晨，田帝，高磊，陈建耀（ 173 ）
富春江水库浮游植物功能群变化的成因 ……张萍，王炜，朱梦圆，国超旋，邹伟，许海，朱广伟（ 181 ）
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制 ……陈雯，吴亚，张宏鑫，刘怀庆（ 194 ）
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素 ……李军，欧阳宏涛，周金龙（ 207 ）
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素 ……李魁明，王晓燕，姚罗兰（ 218 ）
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析 ……王耕，张芙榕（ 228 ）
光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望 ……田政卿，张勇，刘向，陈生云，柳本立，吴纪华（ 239 ）
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因 ……石淞，李文，曲琛，杨子仪（ 248 ）
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究 ……徐勇，郑志威，孟禹弛，盘钰春，郭振东，张炎（ 262 ）
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响 ……崔嵩，贾朝阳，郭亮，付强，刘东（ 275 ）
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测 ……帕茹克·吾斯曼江，艾东，方一舒，张益宾，李牧，郝晋珉（ 287 ）
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 ……石晶，石培基，王梓洋，程番苑（ 300 ）
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态 ……胡丹阳，张欢，宿宝巍，张娅璐，王永宏，纪佳辰，杨洁，高超（ 314 ）
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子 ……申楷慧，魏识广，李林，储小雪，钟建军，周景钢，赵毅（ 323 ）
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响 ……陈坚淇，贾亚男，贺秋芳，江可，陈畅，叶凯（ 335 ）
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征 ……李子阳，陈露，赵鹏，周明华，郑静，朱波（ 343 ）
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响 ……薛欣欣，任常琦，罗雪华，王文斌，赵春梅，张永发（ 354 ）
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析 ……梁涛，赵敬坤，李红梅，王妍，曹中华，张务帅，王孝忠，郭超仪，石孝均，陈新平（ 364 ）
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展 ……刘浩然，邢静怡，任文杰（ 376 ）
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测 ……解雪峰，郭炜炜，濮励杰，缪源卿，蒋国俊，张建珍，徐飞，吴涛（ 386 ）
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析 ……马杰，葛淼，王胜蓝，邓力，孙静，蒋月，周林（ 396 ）
铜陵某废弃硫铁矿区土壤重金属污染特征及来源解析 ……李如忠，刘宇昊，黄言欢，吴鸿飞（ 407 ）
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价 ……李春艳，王新民，王海，吕晓斌（ 417 ）
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应 ……唐乐斌，刘新彩，宋波，马丽钧，黄凤艳（ 429 ）
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值 ……胡秀芝，宋毅，王天雨，蒋珍茂，魏世强（ 439 ）
生物质炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复 ……吴秋产，吴骥子，赵科理，连斌，袁峰，孙淇，田欣（ 450 ）
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展 ……马敏东，赵洋尘，朱龙，王伟平，康玉麟，安立会（ 459 ）
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(*Lactuca sativa*)生理生态的影响 ……牛佳瑞，邹勇军，简敏菲，黄楚红，李金燕，穆霆，刘淑丽（ 470 ）
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制 ……刘泳岐，赵锶禹，任学敏，李玉英，张英君，张浩，韩辉，陈兆进（ 480 ）
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响 ……赵群芳，褚龙威，丁原红，王发园（ 489 ）
微塑料和菲对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响 ……刘沙沙，秦建桥，吴贤格（ 496 ）
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测 ……王安林，马瑞，马彦军，吕彦勋（ 508 ）
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应 ……郑志玉，郭晓雯，闵伟（ 520 ）
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响 ……刘美灵，汪益民，金文豪，王永冉，王嘉和，柴一博，彭丽媛，秦华（ 530 ）
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征 ……陈芬，余高，王谢丰，李廷亮，孙约兵（ 543 ）
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响 ……梁胜贤，刘春成，胡超，崔二苹，李中阳，樊向阳，崔丙健（ 555 ）
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析 ……王秋水，程波，刘悦，邓婕，徐岩，孙朝徽，袁立艳，左嘉，司飞，高丽娟（ 567 ）
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征 ……黄福义，周曙仡聃，潘婷，周昕原，苏建强，张娴（ 576 ）
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素 ……刘可，童蕾，甘翠，王逸文，张嘉越，何军（ 584 ）
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制 …刘总堂，孙玉凤，费正皓，沙新龙，温小菊，钱彬彬，陈建，谷成刚（ 594 ）
CO_2气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb^{2+}吸附性能对比 ……江豪，陈瑞芝，朱自洋，王琳，段文焱，陈芳媛（ 606 ）
《环境科学》征订启事(70)　《环境科学》征稿简则(193)　信息(334,554,605)

新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素

李军[1,2,3,4], 欧阳宏涛[5], 周金龙[1,2,3*]

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 4. 河北建筑工程学院河北省水质工程与水资源综合利用重点实验室, 张家口 075000; 5. 新疆巴音郭楞蒙古自治州水文水资源勘测局, 库尔勒 841099)

摘要: 车尔臣河流域绿洲带地下水是当地居民生产生活的重要水源,查明地下水咸化和污染的控制因素,对可持续开发利用地下水资源和保护沙漠绿洲带生态环境具有重要意义. 在该区共采集36组单一结构潜水样品和54组多层结构潜水-承压水样品,在确定地下水主要离子分布特征和污染现状基础上,应用水文地球化学方法(Piper图、多元统计、Gibbs模型和离子间内联关系)综合揭示地下水咸化和污染的主控因素. 研究区地下水从山前倾斜平原单一结构潜水至冲洪积平原多层结构潜水-承压水具有一定分带性,Cl-Na水(87.8%)是研究区地下水主要的水化学类型. 单一结构潜水水质明显优于多层结构潜水-承压水,多层结构潜水-承压水咸化主要由Na^+(均值9 969 mg·L^{-1})、Cl^-(均值13 687 mg·L^{-1})和SO_4^{2-}(均值5 840 mg·L^{-1})导致,自然的水文地球化学过程是导致地下水水质恶化的主要原因. 地下水化学主要受水岩作用和蒸发-浓缩作用控制,硅酸盐岩和蒸发盐岩矿物溶解是地下水化学组分的重要来源,而强烈的蒸发盐岩溶解过程对冲洪积平原区多层结构潜水-承压水的控制程度更高,加之在蒸发-浓缩和阳离子交换作用共同影响下,冲洪积平原区多层结构潜水-承压水咸化现象更为严重. 此外,农田集中区农业施肥对地下水NO_3^-产生一定影响.

关键词: 车尔臣河流域; 地下水; 咸化; 污染; 控制因素

中图分类号: X523 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2024)01-0207-11 **DOI:** 10.13227/j.hjkx.202303177

Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang

LI Jun[1,2,3,4], OUYANG Hong-tao[5], ZHOU Jin-long[1,2,3*]

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China; 4. Hebei Key Laboratory of Water Quality Engineering and Comprehensive Utilization of Water Resources, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China; 5. Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Korla 841099, China)

Abstract: Groundwater is a vital resource for local human life and production in the oasis zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang. Understanding the controlling factors of groundwater salinization and pollution is of great significance for the sustainable utilization of groundwater resources and protection of the ecological environment in desert oasis areas. In light of this, a total of 36 single structure unconfined groundwater samples and 54 multi-layered structure unconfined and confined groundwater samples were collected from the oasis zone of the Cherchen River Basin and evaluated for the distribution characteristics and pollution status of major ions. Hydrogeochemical methods (e.g., Piper diagram, multivariate statistics, Gibbs model, and relationships among ions) were used to determine the main controlling factors of groundwater salinization and pollution. Differences in hydrogeochemical zonation were found from the single structure unconfined aquifers in sloping plains of piedmont areas to the multi-layered structure unconfined and confined aquifers in alluvial-proluvial plain areas, and Cl-Na (87.8%) was the main hydrochemical type in the groundwater of the study area. The quality of single structure unconfined groundwater was starkly better than that of the multi-layered unconfined and confined groundwater, which was mainly caused by Na^+ (mean value of 9 969 mg·L^{-1}), Cl^- (13 687 mg·L^{-1}), and SO_4^{2-} (5 840 mg·L^{-1}). Moreover, the natural hydrogeochemical process was the main reason for the deterioration of groundwater quality. The hydrochemistry was mainly controlled by the water-rock interaction and evaporation processes. The mineral dissolution of silicates and evaporites was an important source of chemical ions in the groundwater. Furthermore, the chemical weathering of evaporites combined with the processes of evaporation and cation exchange had a significant influence on the salinization of multi-layered unconfined and confined groundwater in alluvial-proluvial plain areas. In addition, synthetic fertilizers were the main pollution sources of NO_3^- in groundwater in the intensive agricultural zones.

Key words: Cherchen River Basin; groundwater; salinization; pollution; controlling factors

地下水是全球水文循环的一个重要组成部分[1],其水质的好坏直接影响着生态系统中物质循环、能量转换和信息传递. 然而,地下水环境在受原生地质背景影响或人类活动干扰时,水化学组分随之发生相应的响应变化,即被干扰的元素地球化学循环过程在一定程度会富集某些化学物质[2-4]. 显然,地下水中毒害组分富集到一定程度会导致其失去原有的水资源功能,进而间接减少了可利用地下水资源量[5]. 水质型缺水现象在国内外均有报道,特别是在地表水资源相对匮乏的干旱半干旱地区,地下水咸化与污染问题已经对这些地区的人类健康、经济生产和生态环境产生了不利影响[6,7],进一步加剧了人

收稿日期: 2023-03-21; **修订日期:** 2023-04-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(42067035)
作者简介: 李军(1990~),男,博士研究生,研究实习员,主要研究方向为地下水环境,E-mail:lipshydro@163.com
* 通信作者,E-mail:zjzhoujl@163.com

类活动与水资源短缺之间的矛盾. 深入揭示地下水咸化与污染的主控机制,不仅为劣质地下水治理提供有力的科学依据,同时对促进干旱半干旱地区人类-社会-环境可持续发展具有深远的现实意义.

地下水化学组分主要受来源和迁移转化过程控制[8],就水化学组分来源而言,总体可划分为自然背景输入和人类活动排放这2大类[1],同时部分来源受自然因素和人类活动双重影响,如酸性污染物参与的水岩作用过程[9];水化学组分迁移转化过程相对来源更为复杂,地下水在下渗途径和水平运移过程中,通常会发生一系列的水文地球化学作用,如水岩作用、蒸发-浓缩作用、氧化还原作用和阳离子交换作用等[10],并伴随着外源物质的进一步入渗. 面对地下水化学复杂的形成机制,国内外在揭示地下水化学特征基础上,逐渐探索出一系列较为可靠的研究体系,这为探索干旱半干旱地区地下水咸化与污染成因机制提供了方法学基础.

车尔臣河流域是我国塔里木盆地南缘较大的内陆河流域,绿洲带多与荒漠相邻,并与其它绿洲带相隔[11],强蒸发和弱降水的干旱炎热气候迫使当地居民不得不开发利用地下水资源. 据已有研究,车尔臣河流域地下水存在一定咸化现象[7],同时地表水受生活污水、农业化肥和畜禽粪便等多种污染排放影响[12]. 据δ^2H-H_2O和$\delta^{18}O$-H_2O证据,该流域地下水主要接受地表河水、灌溉水和大气降水等补给[11],在补给水下渗过程中,污染物通常随补给来源一同进入含水层,这为地下水带来了潜在的污染风险[8]. 然而,当前车尔臣河流域绿洲带地下水咸化和污染的控制机制研究相对有限. 基于此,本文利用车尔臣河流域90组地下水化学样品(36组单一结构潜水样品和54组多层结构浅层潜水-承压水样品),在调查地下水化学分布特征基础上,利用PIG(pollution index of groundwater)对该区地下水进行污染评价,利用水文地球化学方法和多元统计方法综合确定地下水咸化的主控因素,以期为车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染防治提供科学基础.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区主要位于新疆巴音郭楞蒙古自治州若羌县和且末县域内,地理位置为东经83.75°~89.67°,北纬36.19°~39.81°(图1). 本区属温带大陆性干旱气候,年均气温约为10.1℃,日均温差达15.9℃. 年均降水量仅为18.6 mm,其中最小年降水量低至1.9 mm,干旱指数为77,属极端干旱区. 干旱炎热的气候条件,导致年均蒸发量高达2 506.9 mm. 匮乏的降水量和巨大的蒸发量,加之全年盛行的东北风,直接导致研究区呈现多风沙、浮尘和沙暴天气,这进一步加块了沙漠向西南地区推进的速度,一定程度恶化了若羌县和且末县绿洲带生态环境. 车尔臣河是塔里木盆地东南最大的河流,多年平均径流量为8亿m^3[13],其补给来源主要为冰雪融化水和地下水.

车尔臣河流域地势总体呈南高北低,由南至北分别为山区、冲洪积扇、冲洪积平原和沙漠地貌. 区内除现代河床和沟谷外,多被第四系松散堆积物覆盖,岩性主要为上细下粗的亚砂土、卵砾石,底部多分布西域砾岩和泥岩(图1). 据含水层类型地下水可划分为山前倾斜平原的单一结构潜水和冲洪积平原的多层结构潜水-承压水,地下水位埋深多介于0.8~165 m[11],地下水位埋深≤5 m的区域占区内总面积的64.6%. 潜水分布于山前倾斜平原,承压区分布于冲洪积平原,接近沙漠区. 地下水主要补给来源为河道水下渗、渠系水和灌溉水入渗,径流方向与地形坡向和河流流向基本一致,受气候条件和低洼地形控制,浅层地下水蒸发和补给河道是主要的排泄方式. 此外,冲洪积平原区承压水循环速率整体偏慢.

1.2 样品采集与测试

车尔臣河流域西北为塔克拉玛干沙漠,西南毗邻荒漠和山区,仅车尔臣河流域呈长条形绿洲带,这为地下水样品采集带来了极大困难,近年来整个流域同期地下水化学资料极其有限. 在收集研究区水文地质资料基础上,本着尽可能覆盖全流域原则,于2014~2021年共采集地下水化学样品90组,其中单一结构潜水样品36组(山前倾斜平原),这部分样品可反映人类活动极弱区地下水化学特征;多层结构潜水-承压水区样品54组(冲洪积平原),这部分样品一定程度反映出生活和农业活动区地下水化学特征(图1). 主要离子检测工作由新疆地质矿产局第二水文地质工程地质大队化验室完成. 采用多参水质检测仪(HANNA,HI9828)原位检测pH指标,采用火焰原子吸收分光光度法检测K^+和Na^+,采用乙二胺四乙酸二钠滴定法检测Ca^{2+}和Mg^{2+},采用硝酸银容量法检测Cl^-,采用硫酸钡比浊法检测SO_4^{2-},采用酸碱滴定法检测HCO_3^-,采用紫外分光光度法检测NO_3^-,采用离子选择电极法检测F^-,采用干燥-比重法检测溶解性总固体(TDS). 水化学样品设有空白样、空白加标样以及平行样,确保主要离子检测结果的可靠度. 水化学数据采用电荷平衡误差[%CBE,式(1)]检验检测结果的准确性:

$$\%CBE = \frac{\sum 阳离子 - \sum 阴离子}{\sum 阳离子 + \sum 阴离子} \times 100 \quad (1)$$

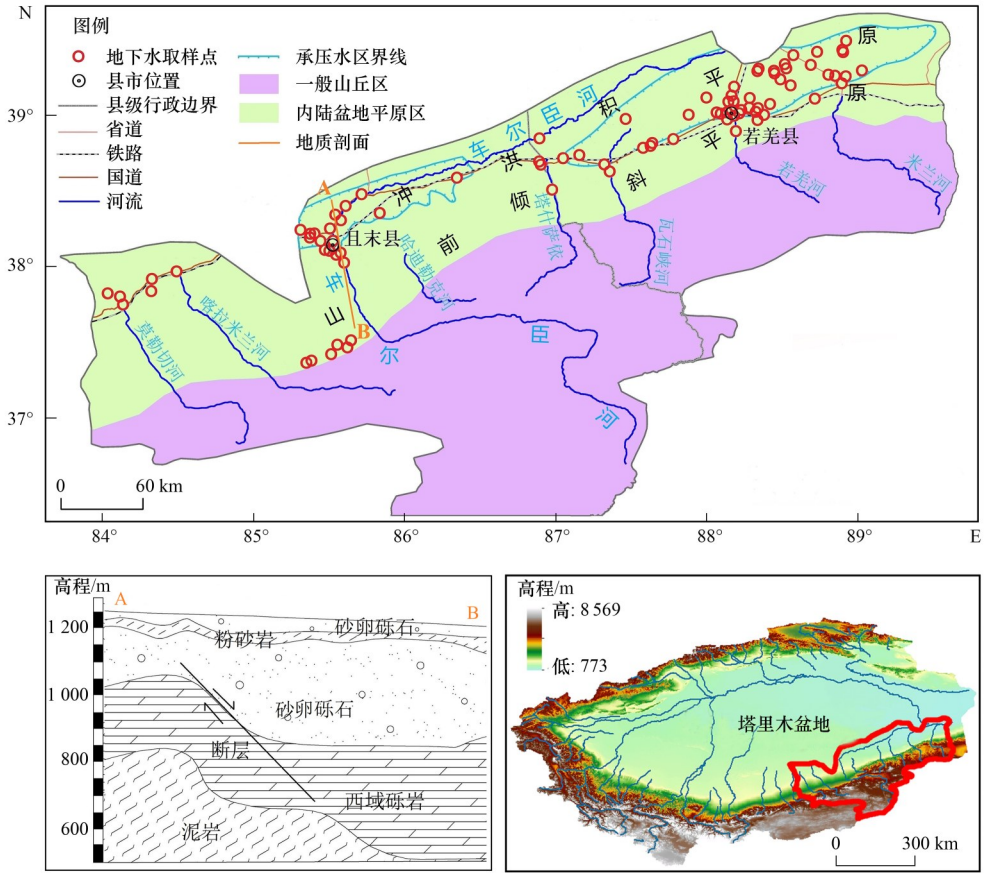

图 1　车尔臣河流域地下水采样点分布及水文地质示意

Fig. 1　Distribution map of groundwater sampling sites and hydrogeological diagram of Cherchen River Basin

式中，$\sum$阳离子表示地下水中 K^+、Na^+、Ca^{2+}和 Mg^{2+}浓度累加值，$\sum$阴离子表示地下水中 Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、NO_3^-和 F^-浓度累加值，地下水样品的%CBE（-6.4%～4.2%）绝对值均低于 10%[14].

1.3　地下水污染评价

PIG 评价法最早由 Subba Rao 于 2012 年提出[15]，该方法主要用于评价多种水文地球化学作用导致的地下水水质变化[16]，具体过程划分为 5 步. 首先确定各水化学指标的 RW（relative weight），据各水化学指标对人体的毒害特性，于 1～5 之间赋值，本研究的 RW 值参考文献[15]；其次，确定 WP（weight parameter），各水化学指标的 WP 值计算如下：

$$WP = \frac{RW}{\sum RW} \tag{2}$$

第 3 步确定 SC（status of concentration）：

$$SC = \frac{C_i}{DS_i} \tag{3}$$

式中，C_i表示各评价指标的实际检测浓度，DS_i表示饮用水标准限值，各评价指标的 DS_i值参考《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017）Ⅲ类水限值和《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2022）限值[17,18]，我国水质标准无对应参考值时，DS_i值取自文献[15].

第 4 步，利用各水化学指标计算的 WP 和 SC 值，确定 OW（overall groundwater quality）值：

$$OW = WP \times SC \tag{4}$$

最后，将被评价的每种水化学指标的 OW 值进行累加，获得地下水样的最终 PIG 值：

$$PIG = \sum OW \tag{5}$$

相应的计算参数取值见表 1. 据 Subba Rao 给出的地下水污染等级划分标准[15]，单个水化学指标（OW）和地下水总体评价结果（PIG）可划分为：OW/PIG < 1.0 时为无明显污染；1.0 ≤ OW/PIG < 1.5 时为低污染；1.5 ≤ OW/PIG < 2.0 时为中污染；2.0 ≤ OW/PIG < 2.5 时为高污染；2.5 ≤ OW/PIG 时为重污染.

2　结果与分析

2.1　地下水化学特征

研究区地下水化学特征统计见表 2. 地下水 pH 总体介于 6.30～8.43，均值为 7.85，多属中性至弱碱性水，单一结构潜水 pH（8.05）略高于多层结构潜水-承压水（7.72）. ρ（TDS）总体介于 423～359 376

表 1 PIG 计算涉及的相关参数取值[1)]

Table 1 Values of parameters related to PIG

指标	pH	TDS	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	F^-	合计
RW	5	5	1	4	2	2	4	5	3	5	5	41
WP	0.122	0.122	0.024	0.098	0.049	0.049	0.098	0.122	0.073	0.122	0.122	1.000
DS	7.5	1000	10	200	75	30	250	250	300	45	1.0	/

1)"/"表示没有相关数据

$mg\cdot L^{-1}$,均值为 31 407 $mg\cdot L^{-1}$,其中,单一结构潜水样品中淡水[ρ(TDS) < 1 000 $mg\cdot L^{-1}$]占比为 33.3%,多层结构潜水-承压水样品中淡水占比仅为 6.0%,车尔臣河流域地下水多为微咸水及以上级别,且多层结构潜水-承压水的咸化程度高于单一结构潜水. 由表 2 可知,研究区地下水较高的 TDS 主要由 Na^+(均值 9 969 $mg\cdot L^{-1}$)、Cl^-(均值 13 687 $mg\cdot L^{-1}$)和 SO_4^{2-}(均值 5 840 $mg\cdot L^{-1}$)引起,这在一定程度反映出蒸发-浓缩作用对冲洪积平原区地下水化学的影响特征.

研究区地下水阳离子浓度平均值顺序为:$Na^+ > Mg^{2+} > K^+ > Ca^{2+}$,其中多层结构潜水-承压水阳离子浓度平均值顺序与研究区地下水保持一致,单一结构潜水阳离子浓度平均值顺序与多层结构潜水-承压水略有差异,即:$Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$. 地下水中阴离子浓度平均值顺序为:$Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^- > NO_3^- > F^-$,单一结构潜水和多层结构潜水-承压水阴离子浓度顺序保持一致. 变异系数可反映地下水主要离子的空间分布差异[19],研究区地下水阳离子 K^+(4.33,变异系数)和 Mg^{2+}(3.22,变异系数)以及阴离子 Cl^-(2.58,变异系数)和 SO_4^{2-}(2.15,变异系数)受空间尺度影响较大,这些离子的空间变异性与研究区不同地貌类型分布相关.

Piper 图是水文地球化学分析常用的一种工具[20],为进一步突出主导离子和主要水化学类型,部分研究对 Piper 图进行分区和优化,即依据地下水中主要离子的毫克当量百分比是否高于 50% 来确定主导离子和主要水化学类型[4,21,22]. 由图 2 可知,车尔臣河流域地下水主导阳离子主要为 K^++Na^+型(84.4%),无主导型(14.4%)和 Mg^{2+}型(1.1%)占比并不大,主导阴离子主要为无主导型(55.6%),其次为 Cl^-型(22.2%)和 SO_4^{2-}型(22.2%). 单一结构潜水和多层结构潜水-承压水主导阳离子类型相似,主导阴离子类型存在一定差异,单一结构潜水(30.6%)中 SO_4^{2-}型水样比例较多层结构潜水-承压水(16.7%)高,多层结构潜水-承压水(31.5%)Cl^-型水样比例较单一结构潜水(8.3%)高. 研究区地下水化学类型为:Cl-Na 水(87.8%) > Cl-Ca·Mg 水(10.0%) > SO_4-Ca 水(2.2%),表明车尔臣河流域地下水中 Na^+和 Cl^-富集

表 2 车尔臣河流域地下水水质常规指标数理统计[1)]

Table 2 Statistics of regular ions in groundwater of the Cherchen River Basin

类型	统计量	pH	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	F^-	TDS
单一结构潜水	最大值/$mg\cdot L^{-1}$	8.43	722	5 906	562	1 095	10 310	6 236	757	32.0	14.7	25 407
	最小值/$mg\cdot L^{-1}$	7.14	4.96	39.2	16.7	9.57	35.4	105	45.5	0.36	0.34	423
	平均值/$mg\cdot L^{-1}$	8.05	40.2	483	111	102	711	667	221	9.08	1.69	2 345
	标准偏差/$mg\cdot L^{-1}$	0.31	119	989	117	183	1 703	1 098	166	8.84	2.52	4 240
	变异系数	0.04	2.96	2.05	1.06	1.79	2.40	1.65	0.75	0.97	1.50	1.81
多层结构潜水-承压水	最大值/$mg\cdot L^{-1}$	8.34	17 898	115 621	1 102	25 366	172 922	54 148	1 428	138	8.27	359 376
	最小值/$mg\cdot L^{-1}$	6.30	5.33	109	36.9	34.3	149	211	96.5	0.03	0.07	829
	平均值/$mg\cdot L^{-1}$	7.72	734	16 293	318	1 499	22 337	9 288	295	16.8	1.38	50 781
	标准偏差/$mg\cdot L^{-1}$	0.49	2 530	30 880	292	3 815	43 642	15 267	230	24.8	1.40	94 091
	变异系数	0.06	3.45	1.90	0.92	2.54	1.95	1.64	0.78	1.47	1.02	1.85
地下水	最大值/$mg\cdot L^{-1}$	8.43	17 898	115 621	1 102	25 366	172 922	54 148	1 428	138	14.7	359 376
	最小值/$mg\cdot L^{-1}$	6.30	4.96	39.2	16.7	9.57	35.4	105	45.5	0.03	0.07	423
	平均值/$mg\cdot L^{-1}$	7.85	458	9 969	235	940	13 687	5 840	266	13.53	1.50	31 407
	标准偏差/$mg\cdot L^{-1}$	0.45	1 983	25 078	258	3 025	35 339	12 543	209	19.9	1.92	76 476
	变异系数	0.06	4.33	2.52	1.10	3.22	2.58	2.15	0.79	1.47	1.28	2.43
地下水质量标准(Ⅲ类)		6.5 ~ 8.5	/	200	/	/	250	250	/	88.57	1.00	1 000
生活饮用水卫生标准		6.5 ~ 8.5	/	200	/	/	250	250	/	44.29	1.00	1 000

1)"/"为无水质标准参考值,pH 和变异系数无量纲

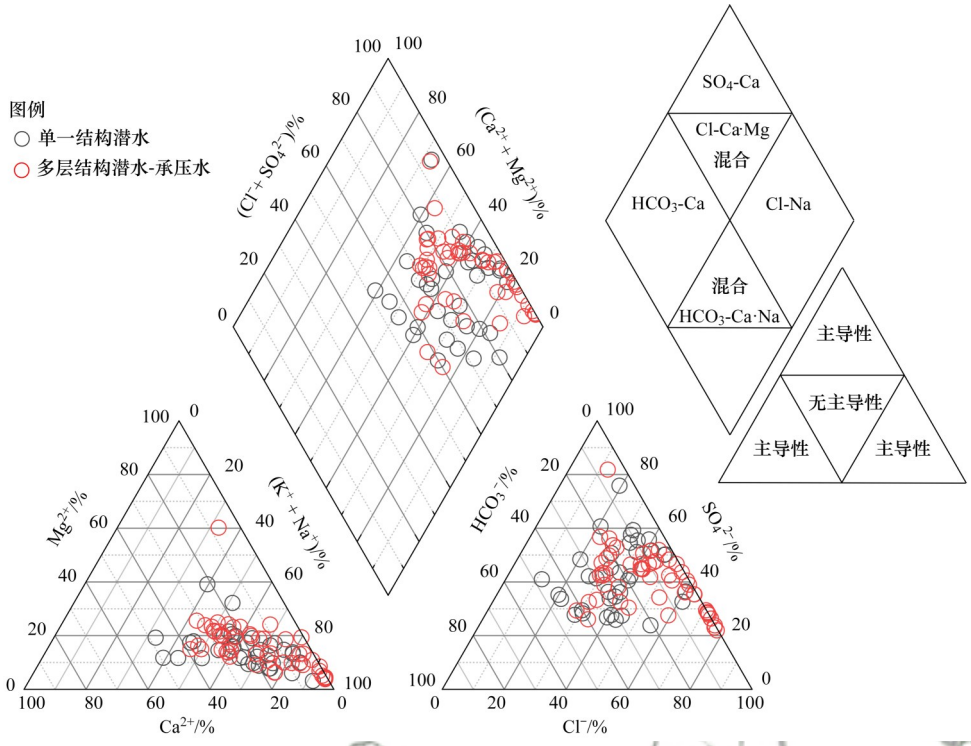

图 2　车尔臣河流域地下水主要离子 Piper 图

Fig. 2　Piper diagram of the major ionic concentrations in groundwater of the Cherchen River Basin

程度较高，其次为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}. 因此，矿物溶解和阳离子交换可能是控制研究区地下水化学类型的重要因素[21].

2.2　地下水污染评价

车尔臣河流域地下水污染评价结果见图 3. 由 OW 值可知[图 3(a)]，引起地下水污染的主要水化学指标有 TDS、K^+、Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 和 F^-，其中，部分多层结构潜水-承压水受 Cl^-(67.8，OW 值)、Na^+(56.7，OW 值)、K^+(43.0，OW 值)、Mg^{2+}(41.4，OW 值)和 SO_4^{2-}(26.4，OW 值)的极大值影响，表现为重污染等级，多层结构潜水-承压水中这些水化学指标的 OW 值比单一结构潜水高 8.7 ~ 24.9 倍. 单一结构潜水 PIG 值介于 0.45 ~ 19.1，平均值为 1.88[图 3(b1)和 3(b2)]，属无明显污染、低污染、中污染、高污染和重污染等级的样品占比分别为 38.9%、33.3%、11.1%、11.1% 和 5.6%. 多层结构潜水-承压水 PIG 值介于 0.82 ~ 266，平均值为 32.3[图 3(c1)和 3(c2)]，属无明显污染、低污染、中污染、高污染和重污染等级的样品占比分别为 11.1%、24.1%、11.1%、5.6% 和 48.2%. 显然，多层结构潜水-承压水水质较单一结构潜水差. 据水文地质调查结果，承压区位于冲洪积平原区，而潜水区则分布于山前倾斜平原区(图 1)，Cl^-、Na^+ 和 K^+ 而非具有典型农业和生活排放特征的 NO_3^- 是导致劣质多层结构潜水-承压水的主要化学组分[23]. 因此，劣质多层结构潜水-承压水可能由矿物溶解、蒸发浓缩和阳离子交换等水文地球化学作用综合导致.

3　讨论

3.1　多元统计分析

研究区地下水主要离子相关性分析结果见图 4(a). 单一结构潜水 TDS、K^+、Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 和 F^- 间的相关系数 r 值介于 0.91 ~ 1.00，呈强正相关关系，多层结构潜水-承压水 TDS、Na^+、Cl^- 和 SO_4^{2-} 以及 K^+ 和 Mg^{2+} 间的 r 值介于 0.97 ~ 1.00，呈强正相关关系，说明这些离子具有相同的来源和迁移转化途径[24,25]. 多层结构潜水-承压水中 NO_3^- 与 K^+ 呈一定正相关关系(r = 0.72)，这在一定程度反映出农业种植区地下水可能受农业施肥的影响[19].

主成分分析(PCA)通过降低自变量或数据集的维数，以解释大数据集内相关变量的方差[26,27]，该方法已被广泛用于地下水化学成因分析研究中[28~30]. 为进一步揭示影响车尔臣河流域绿洲带地下水化学的控制因素，分别对单一结构潜水[图 4(b)]和多层结构潜水-承压水[图 4(c)]主要离子进行 PCA. 单一结构潜水和多层结构潜水-承压水均获得 2 个 PCs，单一结构潜水中，PC1 解释度为 74.1%，PC2 解释度为 10.3%，累计解释度为 84.4%；多层结构潜水-承压水中，PC1 解释度为 59.5%，PC2 解释度为 13.8%，累计解释度为 73.3%. PCA 分析结果与相关性分析结果基

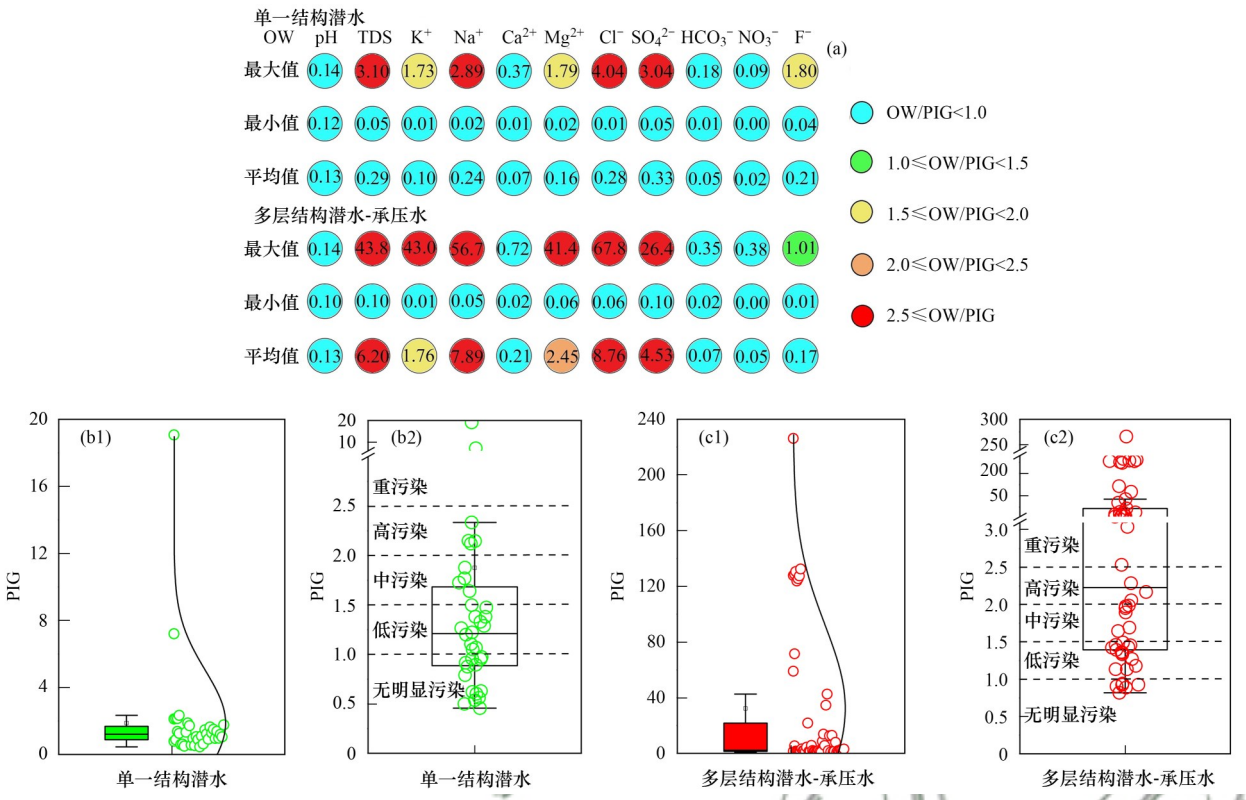

图 3 车尔臣河流域地下水 PIG 指数评价

Fig. 3 Evaluation of PIG index of groundwater in the Cherchen River Basin

本一致，总体看，多层结构潜水-承压水化学成因机制相对单一结构潜水更为复杂. 就单一结构潜水而言，PC1可解释 pH、TDS、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}和 F^-，这主要反映出地质背景对地下水化学的控制；PC2可解释 NO_3^-和 HCO_3^-，且二者呈相互抑制关系，这反映出人类活动对地下水化学的影响. 就多层结构潜水-承压水，PC1 可解释 pH、TDS、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-和 SO_4^{2-}；PC2可解释 NO_3^-、HCO_3^-和 F^-，反映出多层结构潜水-承压水化学组分受地质背景和人类活动双重控制，且位于农业活动相对集中的冲洪积平原区，这类水受农业活动排放影响更大.

3.2 地下水化学成因解析

3.2.1 水岩作用

Gibbs模型最早由 Gibbs 于 1970 年提出[31,32]，此模型主要依据地表水中 Cl^-、HCO_3^-、Na^+和 Ca^{2+}与 TDS 间的内联关系，将地表水化学控制机制划分为蒸发-浓度作用、水岩作用和降水作用这 3 大类. 相对地表水，地下水水岩作用过程更为充分，为更真实地反映出地下水化学控制机制，将 Gibbs 模型中反映水岩作用的控制区域进行适当优化，改进后的 Gibbs 模型在地下水化学成因控制解析中得以广泛应用[33~35]. 由图 5(a)和 5(b)可知，车尔臣河流域绿洲带地下水化学主要受水岩作用和蒸发-浓缩作用双重控制，而研究区极低的降水量(年均 18.6 mm)对地下水化学成因几乎不产生影响，这与塔里木盆地其它流域研究结果是一致的[7,35]. 结合主成分分析结果和研究区水文地质条件，PC1中多数离子[图 4(b)和 4(c)]主要来源于可溶性盐岩(如蒸发盐岩、硅酸盐岩和碳酸盐岩等)溶解. 在干旱炎热气候条件下，加之区内地下水位埋深普遍较浅，较大的蒸发量(年均 2 506.9 mm)对地下水多数离子具有明显的浓缩作用，特别是冲洪积平原多层结构潜水-承压水表现更为明显. 车尔臣河流域地下水中 TDS、K^+、Na^+、Cl^-和 SO_4^{2-}浓度普遍高于我国东北平原、华北平原、云贵高原和内蒙古高原等地[4,22,36,37]，水岩作用和强烈的蒸发-浓缩作用是导致这一差异的重要原因.

水岩作用是一个自然发生的化学风化和矿物溶解过程，可溶性盐岩因矿物组成差异释放出的水化学组分各不相同，如盐岩(Na^+和 Cl^-)、石膏(Ca^{2+}和 SO_4^{2-})、方解石(Ca^{2+}和 HCO_3^-)、白云石(Ca^{2+}、Mg^{2+}和 HCO_3^-)[4,38]. 含水层中不同矿物溶解释放出的离子具有各自的比例关系[19]，因此可利用这一关系来解析不同盐岩对地下水化学的控制作用. 由图 5(c)和 5(d)可知，绝大多数单一结构潜水和多层结构潜水-承压水样点接近全球硅酸盐岩平均风化端元，说明车尔臣河流域含水层中发生的水岩作用主要表现为硅酸盐岩化学风化. 部分多层结构潜水-承压水样点接近蒸发盐岩化学风化端元，说明这类水受蒸发盐岩

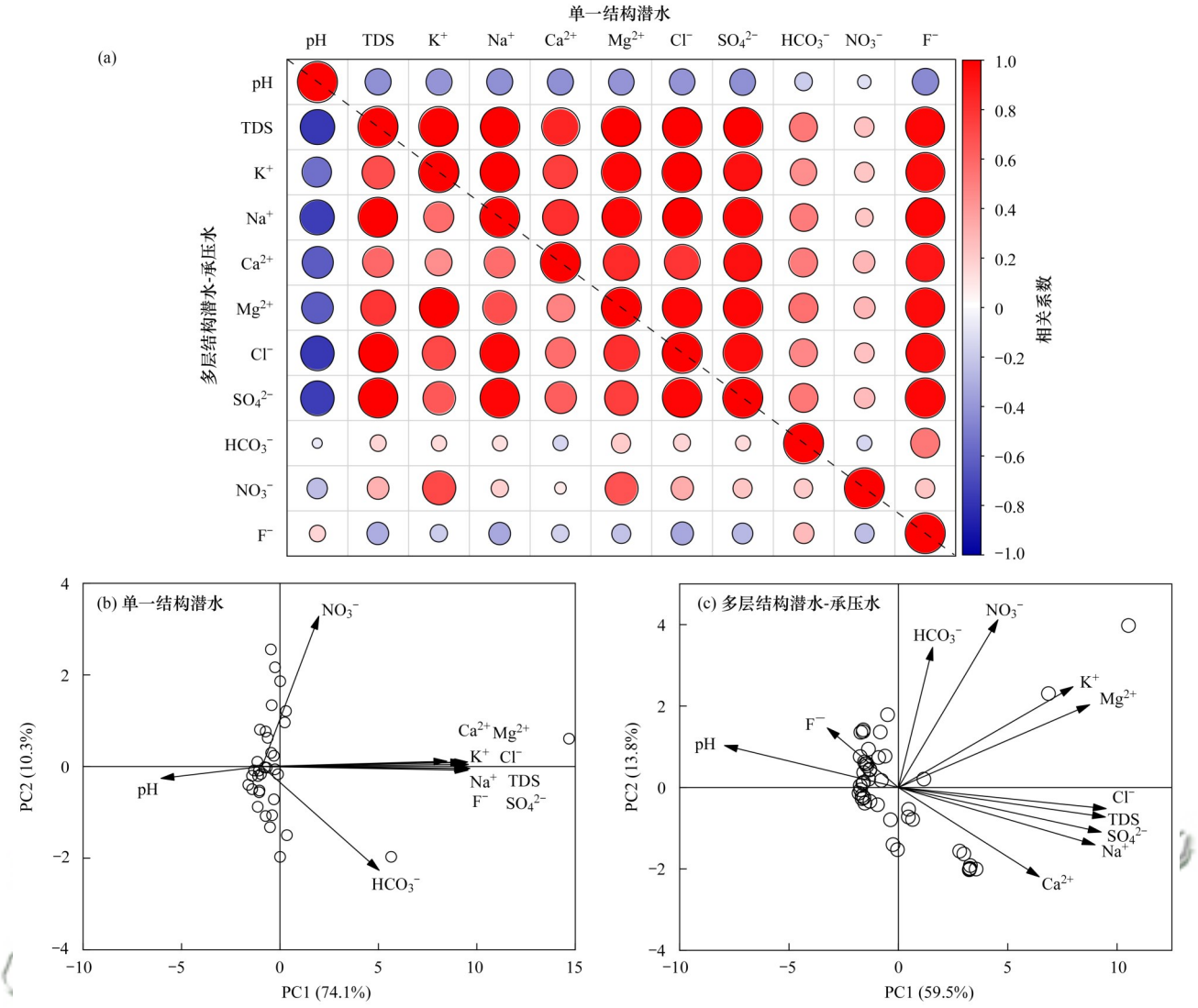

图 4　车尔臣河流域地下水主要离子多元统计

Fig. 4　Statistical analysis of major compositions in groundwater of the Cherchen River Basin

化学溶解影响比单一结构潜水强，这与多层结构潜水-承压水中 K^+（734 mg·L^{-1}）、Na^+（16 293 mg·L^{-1}）和 Cl^-（22 337 mg·L^{-1}）浓度平均值均高于单一结构潜水中 K^+（40.2 mg·L^{-1}）、Na^+（483 mg·L^{-1}）和 Cl^-（711 mg·L^{-1}）的结果是一致的（表 2）. 同时，冲洪积平原区多层结构潜水-承压水成化与强烈的蒸发-浓缩作用和较慢的地下水循环速率也存在一定关系. 此外，部分山前平原区单一结构潜水样点偏向碳酸盐岩溶解端元，说明含水层中少量的碳酸盐岩（如方解石和白云石）也参与了化学风化过程.

3.2.2　阳离子交换

在地下水化学演化过程中，阳离子交换作用是影响地下水化学组成的另一个重要因素[35]，当阳离子发生正向交换时，含水层中矿物颗粒将原本吸附的 K^+ 和 Na^+ 解吸，而电荷较强的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 被吸附，从而提高地下水 K^+ 和 Na^+ 浓度. 利用（$Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-$）与（$Na^+-Cl^-$）间的线性拟合关系可解释地下水中阳离子交换作用发生的水平，即（$Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-$）和（$Na^+-Cl^-$）值均为 0 meq·L^{-1} 时，说明地下水主要离子来源于矿物溶解，（$Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-$）值低于（$Na^+-Cl^-$）值时，说明地下水发生阳离子正向交换，若两者相反则发生阳离子负向交换，当（$Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-$）/（$Na^+-Cl^-$）值接近 1 时，说明阳离子交换作用是控制地下水化学成因的重要因素[39,40]. 车尔臣河流域地下水中（$Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-$）与（$Na^+-Cl^-$）拟合关系如图 6(a)，全部的单一结构潜水样点和 72.2% 的多层结构潜水-承压水样点分布于 0 点附近，表明地下水中主要离子来源于矿物化学溶解，这与 Gibbs 分析结果一致[图 5(a)和 5(b)]. （$Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-$）与（$Na^+-Cl^-$）的拟合斜率为 −0.76（$R^2$ = 0.98），表明研究区地下水已经发生了明显的阳离子交换作用，且 22.2% 的多层结构潜水-承压水样点受阳离子正向交换影响而富集低电荷离子（K^+ 和 Na^+），而阳离子逆向交换作用对研究区地下水化学的控制

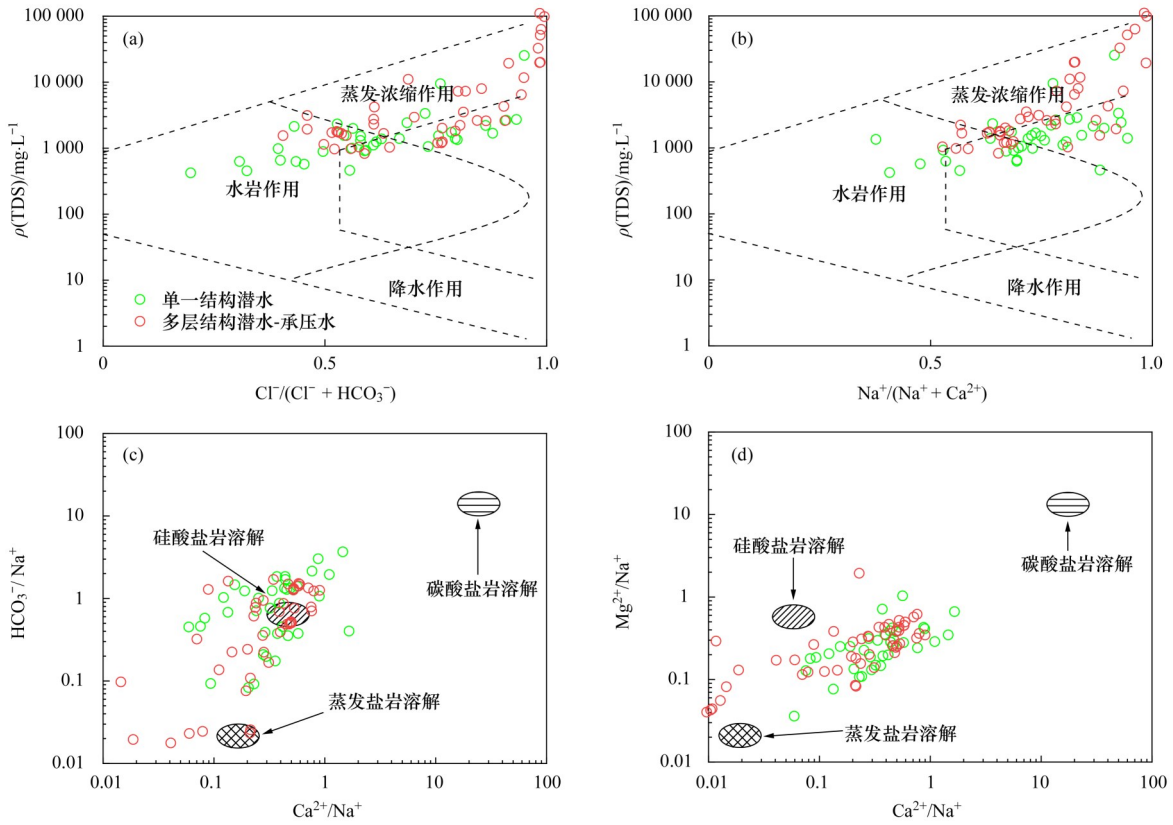

图 5 车尔臣河流域地下水主要离子 Gibbs 图与矿物溶解作用

Fig. 5 Gibbs diagram of the major compositions and processes of water-rock interaction in groundwater of the Cherchen River Basin

并不明显.

CAI 指数(chloro-alkaline index, meq·L^{-1})可用于分析地下水中阳离子发生的交替吸附作用[35,41],计算公式如下:

$$CAI1 = \frac{Cl^- - (K^+ + Na^+)}{Cl^-} \quad (6)$$

$$CAI2 = \frac{Cl^- - (K^+ + Na^+)}{SO_4^{2-} + HCO_3^-} \quad (7)$$

当地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 被吸附,K^+ 和 Na^+ 被解吸时,CAI 均表现为负值,反之亦然,当 CAI 值接近 0 时,说明阳离子交换作用对地下水化学影响较小,而 CAI 的绝对值越大说明阳离子交换程度越高[42]. 由图 6(b)可知,80.6% 的单一结构潜水样点和 66.7% 的多层结构潜水-承压水样点 CAI1 和 CAI2 值小于 0,表明在地下水演化过程中阳离子发生了正向交换作用,结果导致地下水中 K^+ 和 Na^+ 浓度升高,Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 因被矿物颗粒吸附而浓度降低. 研究区地下水中 CAI1 和 CAI2 值域分布较大,这可能与山前至平原的不同水文地质条件相关[35],含水层由山区至冲洪积平原,粉砂颗粒逐渐增加,地下水流速随之缓慢,地下水位埋深变浅,冲洪积平原地下水具有更长的水岩作用时间,也更易发生蒸发-浓缩和阳离子交换作用,从而明显提高了冲洪积平原区多层结构潜水-承压水中 K^+ 和 Na^+ 浓度,这是导致研究区地下水咸化的重要原因.

3.2.3 人类活动影响

据水文地质调查结果,车尔臣河流域绿洲带共涉及且末县和若羌县 2 个行政区,区内主要以农业活动为主,工业活动分布较少. 地下水中 NO_3^- 浓度超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)的采样点仅 3 组[18],均位于若羌县农业集中区. 因此,有必要利用地下水中具有典型农业排放特征的 NO_3^- 和相对稳定且具有人类活动排放特征的 Cl^- 建立关系[23,43~45],以分析人类活动对地下水污染的影响. 由图 7(a)可知,研究区地下水受自然来源和人类活动排放综合影响. 利用 Cl^-/Na^+ 和 NO_3^-/Na^+ 间的关系进一步验证人类活动排放对地下水化学的影响[图 7(b)],尽管多数地下水样点集中在可溶性盐岩控制端元,但仍然存在部分样点偏向农业活动端元,这说明除蒸发盐岩、硅酸盐岩和碳酸盐岩溶解对车尔臣河流域地下水化学起主控作用外,农业活动排放也在一定程度影响着地下水水质. 通常,农业集约区农业化肥、生活污水、人畜粪便和土壤有机氮是地下水 NO_3^- 的典型污染来源[23,46,47],然而本研究中 3 组 NO_3^- 超标样点均位于若羌县农田集中区,同时该区域多层结构潜水-承压水中 NO_3^- 与 K^+ 呈一定正相关关系[图 4(a)],这反映出地下水很可能受农业施肥影响[19]. 此外,且末县

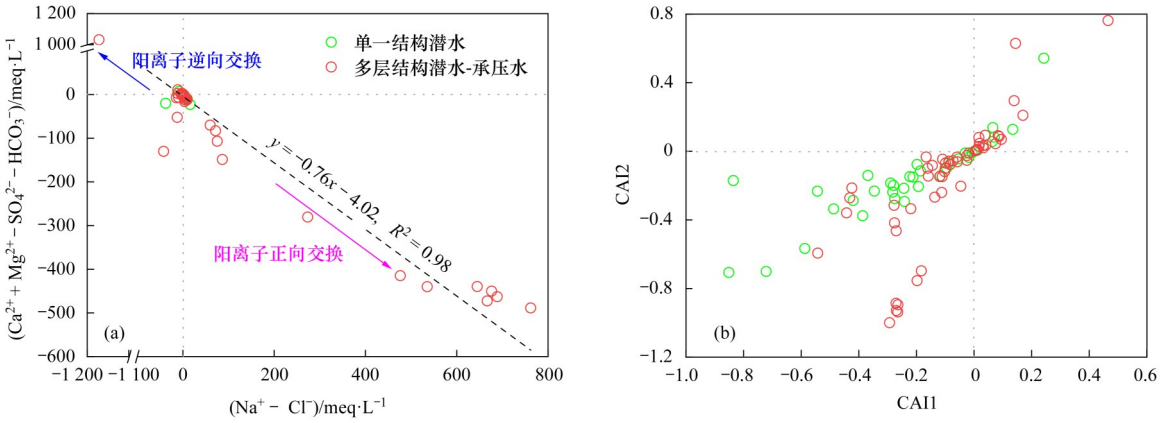

图 6　车尔臣河流域地下水阳离子交换过程

Fig. 6　Processes of cation exchange in groundwater of the Cherchen River Basin

和若羌县农业种植区主要分布在冲洪积平原的承压区(图 1),冲洪积平原多层结构潜水-承压水中 NO_3^- 浓度[(16.8 ± 24.8) mg·L^{-1}]整体高于山前平原单一结构潜水中 NO_3^- 浓度[(9.08 ± 8.84) mg·L^{-1}](表 2),且冲洪积平原多层结构潜水-承压水中 NO_3^- 浓度[(16.8 ± 24.8) mg·L^{-1}]也高于地下水 NO_3^- 浓度背景值(13.53 mg·L^{-1})[8],而山前平原单一结构潜水中 NO_3^- 浓度[(9.08 ± 8.84) mg·L^{-1}]接近地下水 NO_3^- 浓度背景值,这进一步说明农业施肥是冲洪积平原区地下水 NO_3^- 污染的主要来源.

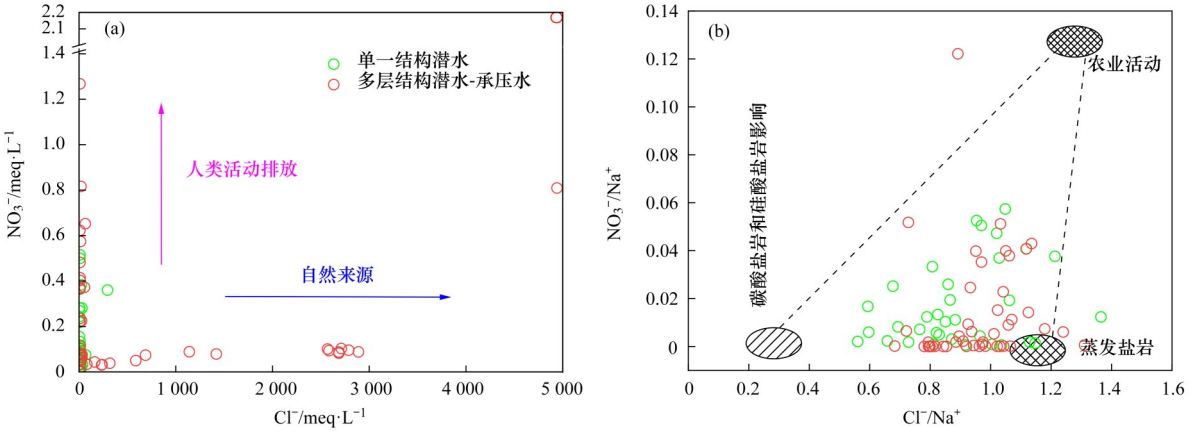

图 7　人类活动对车尔臣河流域地下水主要离子影响

Fig. 7　Influence of anthropogenic activities on major compositions in groundwater of the Cherchen River Basin

4　结论

(1)车尔臣河流域地下水多属中性至弱碱性水,阳离子浓度平均值顺序为:$Na^+ > Mg^{2+} > K^+ > Ca^{2+}$,阴离子浓度平均值顺序为:$Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^- > NO_3^- > F^-$,主导阳离子为 K^++Na^+型(84.4%),主导阴离子为无主导型(55.6%)、Cl^- 型(22.2%)和 SO_4^{2-} 型(22.2%),地下水化学类型为:Cl-Na 水(87.8%) > Cl-Ca·Mg 水(10.0%) > SO_4-Ca 水(2.2%). 地下水咸化主要由 Na^+(均值 9 969 mg·L^{-1})、Cl^-(均值 13 687 mg·L^{-1})和 SO_4^{2-}(均值 5 840 mg·L^{-1})引起.

(2)据 PIG 评价结果,研究区单一结构潜水和多层结构潜水-承压水属于无明显污染和低污染等级,占比分别为 72.2% 和 35.2%,单一结构潜水水质明显优于多层结构潜水-承压水水质. 引起多层结构潜水-承压水污染的主要水化学指标为 Cl^-、Na^+和 K^+,而非 NO_3^-,说明自然的水文地球化学过程而非人类活动排放是导致车尔臣河流域绿洲带地下水水质恶化的主要原因.

(3)水岩作用和蒸发-浓缩作用是控制研究区地下水化学的主要因素. 硅酸盐岩和蒸发盐岩的矿物溶解是地下水化学组分的重要来源,且蒸发盐岩溶解对冲洪积平原区多层结构潜水-承压水影响更大. 由于炎热干旱的气候条件,蒸发-浓缩作用和阳离子交换作用进一步提高了冲洪积平原区多层结构潜水-承压水 K^+和 Na^+浓度,很大程度加剧了这类地下水咸化程度. 此外,部分农业区地下水受农业施肥影响而出现 NO_3^- 超标现象.

参考文献:

[1]　周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,等. 崇左响水地区岩溶地下水主要

离子特征及控制因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2143-2151.
Zhou J M, Jiang Z C, Xu G L, *et al*. Major ionic characteristics and controlling factors of karst groundwater at Xiangshui, Chongzuo [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2143-2151.

[2] 丁启振, 周金龙, 季彦桢, 等. 石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1440-1451.
Ding Q Z, Zhou J L, Ji Y Z, *et al*. Spatial-temporal variation in groundwater quality and the contamination source analysis in Shihezi-Changji area[J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1440-1451.

[3] Ren K, Pan X D, Yuan D X, *et al*. Nitrate sources and nitrogen dynamics in a karst aquifer with mixed nitrogen inputs (Southwest China): revealed by multiple stable isotopic and hydro-chemical proxies[J]. Water Research, 2022, 210, doi: 10.1016/j.watres.2021.118000.

[4] Li J, Yang G L, Zhu D N, *et al*. Hydrogeochemistry of karst groundwater for the environmental and health risk assessment: the case of the suburban area of Chongqing (Southwest China)[J]. Geochemistry, 2022, **82**(2), doi: 10.1016/j.chemer.2022.125866.

[5] 谢浩, 李军, 邹胜章, 等. 基于文献计量学的地下水污染研究现状[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, **19**(1): 168-178.
Xie H, Li J, Zou S Z, *et al*. Research status of groundwater pollution based on bibliometrics [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, **19**(1): 168-178.

[6] Chen J, Wu H, Qian H. Groundwater nitrate contamination and associated health risk for the rural communities in an agricultural area of Ningxia, Northwest China [J]. Exposure and Health, 2016, **8**(3): 349-359.

[7] 孙英, 周金龙, 杨方源, 等. 塔里木盆地南缘绿洲带地下水砷氟碘分布及共富集成因[J]. 地学前缘, 2022, **29**(3): 99-114.
Sun Y, Zhou J L, Yang F Y, *et al*. Distribution and co-enrichment genesis of arsenic, fluorine and iodine in groundwater of the oasis belt in the southern margin of Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2022, **29**(3): 99-114.

[8] Li J, Zou S Z, Wang J W, et al. Spatiotemporal variability and control factors of NO_3^- in a polluted karst water system of an agricultural wetland in South China [J]. Chemosphere, 2023, **313**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.137435.

[9] Xie Y C, Huang F, Yang H, *et al*. Role of anthropogenic sulfuric and nitric acids in carbonate weathering and associated carbon sink budget in a karst catchment (Guohua), southwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2021, **599**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126287.

[10] 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.

[11] 王旭东, 李升, 郭新, 等. 基于同位素技术的且末车尔臣河流域地下水补给来源分析[J]. 中国农村水利水电, 2020, (2): 23-28, 33.
Wang X D, Li S, Guo X, *et al*. An analysis of the groundwater recharge source of Cherchen River Basin in Qianma County[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, (2): 23-28, 33.

[12] 苏海波. 车尔臣河流域面源污染负荷量分析[J]. 水利技术监督, 2021, (9): 107-111.

[13] 袁志毅, 张向萍, 王远见, 等. 车尔臣河诸小河流域水资源统一管理存在的问题及对策[J]. 人民黄河, 2022, **44**(S1): 23-24, 27.

[14] Adimalla N, Qian H, Nandan M J. Groundwater chemistry integrating the pollution index of groundwater and evaluation of potential human health risk: a case study from hard rock terrain of south India[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 206, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111217.

[15] Subba Rao N. *PIG*: a numerical index for dissemination of groundwater contamination zones [J]. Hydrological Processes, 2012, **26**(22): 3344-3350.

[16] Subba Rao N, Chaudhary M. Hydrogeochemical processes regulating the spatial distribution of groundwater contamination, using pollution index of groundwater (*PIG*) and hierarchical cluster analysis (HCA): a case study[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2019, 9, doi: 10.1016/j.gsd.2019.100238.

[17] GB/T 14848-2017, 地下水质量标准[S].

[18] GB 5749-2022, 生活饮用水卫生标准[S].

[19] 李军, 邹胜章, 赵一, 等. 会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1750-1760.
Li J, Zou S Z, Zhao Y, *et al*. Major ionic characteristics and factors of karst groundwater at Huixian karst wetland, China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1750-1760.

[20] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1944, **25**(6): 914-928.

[21] Askri B. Hydrochemical processes regulating groundwater quality in the coastal plain of Al Musanaah, Sultanate of Oman [J]. Journal of African Earth Sciences, 2015, **106**: 87-98.

[22] 张恒星, 张翼龙, 李政红, 等. 基于主导离子分类的呼和浩特盆地浅层地下水化学特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, **33**(4): 189-195.
Zhang H X, Zhang Y L, Li Z H, *et al*. Chemical characteristics of shallow groundwater in Hohhot basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, **33**(4): 189-195.

[23] Li J, Zhu D N, Zhang S, *et al*. Application of the hydrochemistry, stable isotopes and MixSIAR model to identify nitrate sources and transformations in surface water and groundwater of an intensive agricultural karst wetland in Guilin, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, **231**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113205.

[24] Zhu X Q, Liu L, Lan F N, *et al*. Hydrogeochemistry characteristics of groundwater in the Nandong karst water system, China [J]. Atmosphere, 2022, **13**(4), doi: 10.3390/atmos13040604.

[25] 朱丹尼, 邹胜章, 李军, 等. 会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2240-2250.
Zhu D N, Zou S Z, Li J, *et al*. Pollution and irrigation applicability of surface water from wet, normal, and dry periods in the Huixian karst wetland, China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2240-2250.

[26] Li P Y, He X D, Li Y, *et al*. Occurrence and health implication of fluoride in groundwater of loess aquifer in the Chinese Loess Plateau: a case study of Tongchuan, Northwest China [J]. Exposure and Health, 2019, **11**(2): 95-107.

[27] Shafiullah G, Al-Ruwaih F M. Spatial-multivariate statistical analyses to assess water quality for irrigation of the central part of

Kuwait[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, **79**: 27-37.

[28] Huang G X, Sun J C, Zhang Y, *et al*. Impact of anthropogenic and natural processes on the evolution of groundwater chemistry in a rapidly urbanized coastal area, South China[J]. Science of the Total Environment, 2013, **463-464**: 209-221.

[29] Tian H, Du J Z, Sun Q F, *et al*. Evaluation of shallow groundwater for drinking purpose based on water quality index and synthetic pollution index in Changchun New District, China [J]. Environmental Forensics, 2021, **22**(1-2): 189-204.

[30] Sun Y, Zhou Y Z, Zhou J L, *et al*. Distribution and hydrogeochemical characteristic of high iodine groundwater in oasis zone in the Tarim Basin in Xinjiang, P. R. China[J/OL]. Journal of Earth Science, https://kns. cnki. net/kcms/detail/42. 1788. P. 20220714. 1401. 002. html, 2022-08-02.

[31] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.

[32] Feth J H. Mechanisms controlling world water chemistry: evaporation-crystallization process [J]. Science, 1971, **172**(3985): 870-871.

[33] Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram[J]. Applied Geochemistry, 2018, **97**: 209-212.

[34] Jampani M, Liedl R, Hülsmann S, *et al*. Hydrogeochemical and mixing processes controlling groundwater chemistry in a wastewater irrigated agricultural system of India[J]. Chemosphere, 2020, **239**, doi: 10. 1016/j. chemosphere. 2019. 124741.

[35] Zhang J, Zhou J L, Chen Y F, *et al*. Identifying the factors controlling surface water and groundwater chemical characteristics and irrigation suitability in the Yarkant River Basin, Northwest China[J]. Environmental Research, 2023, **223**, doi: 10. 1016/j. envres. 2023. 115452.

[36] 王明君，梁秀娟，肖长来. 双辽市地下水化学特征及成因分析[J]. 水利水电技术，2019, **50**(3): 124-131.
Wang M J, Liang X J, Xiao C L. Analysis on chemical characteristics and genesis of groundwater in Shuangliao City[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, **50**(3): 124-131.

[37] 李军，张翠云，蓝芙宁，等. 区域地下水不同深度微生物群落结构特征[J]. 中国环境科学，2019, **39**(6): 2614-2623.
Li J, Zhang C Y, Lan F N, *et al*. Structure characteristics of microbial community at different depths of groundwater[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(6): 2614-2623.

[38] Bahir M, Ouazar D, Ouhamdouch S. Characterization of mechanisms and processes controlling groundwater salinization in coastal semi-arid area using hydrochemical and isotopic investigations (Essaouira Basin, Morocco)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(25): 24992-25004.

[39] Argamasilla M, Barberá J A, Andreo B. Factors controlling groundwater salinization and hydrogeochemical processes in coastal aquifers from southern Spain [J]. Science of the Total Environment, 2017, **580**: 50-68.

[40] Saha N, Bodrud-Doza M, Islam A R M T, *et al*. Hydrogeochemical evolution of shallow and deeper aquifers in central Bangladesh: arsenic mobilization process and health risk implications from the potable use of groundwater [J]. Environmental Earth Sciences, 2020, **79**(20), doi: 10. 1007/s12665-020-09228-4.

[41] Liu F, Zou J W, Liu J R, *et al*. Factors controlling groundwater chemical evolution with the impact of reduced exploitation[J]. CATENA, 2022, **214**, doi: 10. 1016/j. catena. 2022. 106261.

[42] Huang L W, Sun Z Y, Zhou A G, *et al*. Source and enrichment mechanism of fluoride in groundwater of the Hotan Oasis within the Tarim Basin, northwestern China[J]. Environmental Pollution, 2022, **300**, doi: 10. 1016/j. envpol. 2022. 118962.

[43] Zhang Q Q, Wang H E. Assessment of sources and transformation of nitrate in the alluvial-pluvial fan region of North China using a multi-isotope approach[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, **89**: 9-22.

[44] Torres-Martínez J A, Mora A, Mahlknecht J, *et al*. Estimation of nitrate pollution sources and transformations in groundwater of an intensive livestock-agricultural area (Comarca Lagunera), combining major ions, stable isotopes and MixSIAR model[J]. Environmental Pollution, 2021, **269**, doi: 10. 1016/j. envpol. 2020. 115445.

[45] 陈清飞，陈安强，崔荣阳，等. 滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别[J]. 环境科学，2023, **44**(11): 6062-6070.
Chen Q F, Chen A Q, Cui R Y, *et al*. Identification of nitrate source and transformation process in shallow groundwater around Dianchi Lake[J]. Environmental Science, 2023, **44**(11): 6062-6070.

[46] Xue D M, Botte J, de Baets B, *et al*. Present limitations and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface- and groundwater[J]. Water Research, 2009, **43**(5): 1159-1170.

[47] Zhang H, Xu Y, Cheng S Q, *et al*. Application of the dual-isotope approach and Bayesian isotope mixing model to identify nitrate in groundwater of a multiple land-use area in Chengdu Plain, China [J]. Science of the Total Environment, 2020, **717**, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2020. 137134.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 45 No. 1

Jan. 15, 2024

CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning ····· CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, *et al.* (1)

Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric $PM_{2.5}$ Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area ····· DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, *et al.* (8)

Variation Characteristics of $PM_{2.5}$ Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter ····· DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, *et al.* (23)

Characteristics of Secondary Inorganic Ions in $PM_{2.5}$ and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou ····· HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, *et al.* (36)

Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter ····· PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, *et al.* (48)

Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022 ····· CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, *et al.* (61)

Analysis of O_3 Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China ····· HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, *et al.* (71)

Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer ····· ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, *et al.* (81)

Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction ····· FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, *et al.* (93)

Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model ····· YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, *et al.* (104)

Driving Forces and Mitigation Potential of CO_2 Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China ····· WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, *et al.* (115)

Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant ····· ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, *et al.* (123)

Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years ····· DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, *et al.* (131)

Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment ····· ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, *et al.* (140)

Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment ····· ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, *et al.* (151)

Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment ····· LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, *et al.* (159)

"Load-Unload" Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary ····· LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-rui, *et al.* (173)

Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir ····· ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, *et al.* (181)

Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City ····· CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, *et al.* (194)

Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang ····· LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)

Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region ····· LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)

Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years ····· WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)

Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect ····· TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, *et al.* (239)

Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone ····· SHI Song, LI Wen, QU Chen, *et al.* (248)

Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China ····· XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, *et al.* (262)

Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin ····· CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, *et al.* (275)

Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model ····· Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, *et al.* (287)

Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model ····· SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, *et al.* (300)

Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain ····· HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, *et al.* (314)

Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors ····· SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, *et al.* (323)

Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region ····· CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, *et al.* (335)

Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area ····· LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, *et al.* (343)

Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations ····· XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, *et al.* (354)

Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing ····· LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, *et al.* (364)

Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils ····· LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)

Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model ····· XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, *et al.* (386)

Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented ····· MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, *et al.* (396)

Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China ····· LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, *et al.* (407)

Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City ····· LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, *et al.* (417)

Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials ····· TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, *et al.* (429)

Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety ····· HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, *et al.* (439)

Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic ····· WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, *et al.* (450)

Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks ····· MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, *et al.* (459)

Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of *Lactuca sativa* ····· NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, *et al.* (470)

Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum ····· LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, *et al.* (480)

Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil ····· ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, *et al.* (489)

Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities ····· LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)

Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial *Haloxylon ammodendron* Forest ····· WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, *et al.* (508)

Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity ····· ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)

Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function ····· LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, *et al.* (530)

Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper ····· CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, *et al.* (543)

Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water ····· LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, *et al.* (555)

Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County ····· WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, *et al.* (567)

High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks ····· HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, *et al.* (576)

Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas ····· LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, *et al.* (584)

Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw ····· LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, *et al.* (594)

Comparison of Pb^{2+} Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO_2 Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid ····· JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, *et al.* (606)