

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张蕴凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062)	《环境科学》征稿简则(3116)
信息(3164, 3259, 3572)	

西宁市浅层地下水化学特征及形成机制

刘春燕^{1,2}, 于开宁^{3*}, 张英^{1,2}, 荆继红^{1,2}, 刘景涛^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 河北省地下水污染机理与修复重点实验室, 石家庄 050061; 3. 河北地质大学河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 石家庄 050031)

摘要: 地下水是西部干旱地区重要的供水水源, 随着西部大开发战略的深入, 工业化和城市化发展加大了西宁市对地下水资源量的需求, 不合理的开发利用已引起地下水环境发生变化, 探明地下水化学演化特征及形成机制, 对防止其恶化, 确保可持续利用至关重要. 运用水化学和多元统计技术相结合的方法, 分析了西宁市地下水化学特征, 探讨了地下水的形成机制和不同因子的影响程度. 结果表明, 西宁市浅层地下水化学类型多达 36 种, 以 $\text{HCO}_3\text{-Ca(Mg)}$ (占比 60.00%) 和 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca(Mg)}$ (占比 11.81%) 为主, 草地、林地和裸地中地下水化学类型 5~6 种, 建设用地和耕地中地下水化学类型复杂, 多达 21 种, 表明受到人类活动影响较强. 研究区地下水化学演化过程主要受岩石风化溶滤、蒸发结晶和阳离子交换作用综合影响, 主要控制因素分别是水-岩相互作用 (贡献率为 27.56%)、工业废水排放 (贡献率为 16.16%)、酸碱环境 (贡献率为 16.00%)、化肥、农药的过量施用 (贡献率为 13.11%) 和生活污水 (贡献率为 8.82%). 针对西宁市地下水化学特征及其人类活动影响, 提出了地下水资源开发利用方面的管控建议.

关键词: 西宁市; 地下水; 水化学特征; 形成机制; 多元统计; 控制因素

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3228-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202203297

Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City

LIU Chun-yan^{1,2}, YU Kai-ning^{3*}, ZHANG Ying^{1,2}, JING Ji-hong^{1,2}, LIU Jing-tao^{1,2}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 2. Hebei Key Laboratory of Groundwater Remediation, Shijiazhuang 050061, China; 3. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Groundwater is one of the major sources of water supply, especially in the western arid regions. However, with the deepening of the western development strategy, industrialization and urbanization have increased groundwater resource demands in Xining City. Overexploitation and utilization have led to a series of changes in the groundwater environment. Identifying the chemical evolution characteristics and formation mechanism of groundwater is crucial for preventing its deterioration and ensuring sustainable use. By combining hydrochemistry and multivariate statistical techniques, the chemical characteristics of groundwater in Xining City were analyzed, and the formation mechanism of groundwater and the influence of different factors were discussed. The results showed that there were as many as 36 chemical types of shallow groundwater in Xining City, mainly $\text{HCO}_3\text{-Ca(Mg)}$ (60.00%) and $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca(Mg)}$ (11.81%). There were 5-6 types of groundwater chemical types in bare land, grassland, and woodland. Groundwater chemical types in construction land and cultivated land were more complex, up to 21 types, indicating that they were strongly affected by human activities. The chemical evolution process of groundwater in the study area was mainly affected by rock weathering and leaching, evaporative crystallization, and cation exchange. The main controlling factors were water-rock interaction (contribution rate 27.56%) and industrial wastewater discharge (contribution rate 16.16%), acid-base environment (contribution rate 16.00%), excessive application of chemical fertilizers and pesticides (contribution rate 13.11%), and domestic sewage (contribution rate 8.82%). On account of the chemical characteristics of groundwater in Xining City and the influence of human activities, the management and control suggestions on the development and utilization of groundwater resources were put forward.

Key words: Xining City; groundwater; hydrochemical characteristics; formation mechanism; multivariate statistics; control factors

水资源是保障人类生存和维持生态环境健康的重要因子^[1], 我国西北地区干旱少雨, 地下水是当地的重要供水资源, 随着西部大开发战略的深入, 工业化和城市化快速发展大大增加了地下水资源量的需求, 而不合理的开发利用已引起部分地区生态环境发生变化, 故探明其地下水化学特征及演化机制, 可为地下水水质监管提供重要信息, 为社会经济、工农业和生态健康发展提供重要保障^[2,3].

地下水化学演变往往受控于多种自然因素. 例如, 水-岩相互作用会导致各种矿物的溶滤, 引起地下水化学组分变化^[4]; 海水入侵会增加地下水钠离子和氯化物等特征组分的占比^[5]. 另一方面, 伴随

社会经济、工农业和城市化等的快速发展, 复杂的人类活动对地下水化学的影响也已逐渐加重. 例如, 珠江三角洲等快速城市化地区受工业废水、生活污水和农业污染等人类活动的影响, 地下水化学类型已增加到 89 种^[6]. 由于人类活动的影响, 致使地下水化学演化变得复杂, 仅仅采用传统的水化学分析方法、简易的数理统计等难以明晰其主要受控因

收稿日期: 2022-03-31; 修订日期: 2022-08-11

基金项目: 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心开放研究基金项目 (JSYF-Z202102); 中国地质调查局项目 (DD20221752-3, DD20190331)

作者简介: 刘春燕 (1980~), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为地下水环境演化, E-mail: ley566@163.com

* 通信作者, E-mail: 1211931193@qq.com

素^[7-9]. 目前, 相关研究多采用主成分分析等多元统计方法与传统水化学方法相结合研究区域地下水化学的主要控制因素^[10-14], 定量解释各因素对地下水化学演化的影响程度.

西宁市位于青海省东北部, 是青海省政治、经济和文化的中心, 是青藏高原人口最多, 社会经济最发达的省会城市^[15]. 工业化和城市化的快速发展使地下水面临着被污染的风险^[16], 制约了其社会经济的可持续发展, 亟需了解其地下水化学演化特征及形成机制. 然而, 近年来这方面的研究鲜见报道. 本研究分析了西宁市地下水化学特征, 探讨了其成因, 揭示了西宁市工业化、城市化对地下水组分的影响; 利用因子分析法确定了影响地下水化学的主要自然因素和人为因素, 定量分析自然过程和人类活动对地下水环境的影响, 以期干旱地区地下水资源合理开发与保护提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西宁市位于青海高原东北部, 湟水中游河谷盆地, 面积 7 679 km², 地理坐标东经 100°54′~101°55′, 北纬 36°13′~37°25′. 2019 年末全市常住人口 231.08 万人, 湟水河自西向东贯穿市区, 在西宁市境内汇入湟水的各主要支流约有 56 条^[17], 地势西南高、东北低(图 1). 气候属高原半干旱大陆性气候, 具有寒长暑短、温差大、降水量随地形的增高而增加, 多年平均降水量 380.1 mm. 蒸发量与降雨量的变化规律相反, 盆地中央蒸发量最大, 达 1 763 mm.

1.2 水文地质条件

西宁市处于北川河、南川河与湟水河交汇的河谷平原地带. 受地形地貌、地层岩性等自然因素的制约, 该区地下水可划分松散岩类孔隙水、碎屑岩裂隙孔隙水、碳酸盐岩类裂隙岩溶水、基岩裂隙水和冻土层水这 5 种类型. 松散地层孔隙水广泛分布于山前倾斜平原及河谷平原区, 主要以第四系砂砾卵石层潜水为主. 河谷潜水主要呈条带状分布于湟水干流及其支流的河漫滩和 I、II 级阶地的砂砾卵石层中, 各自形成一个由补给、径流到排泄相对独立的水文地质单元, 河谷潜水与河水有着密切的水力联系; 碎屑岩类裂隙孔隙水主要赋存于侏罗系、白垩系、古近系和新近系碎屑岩储水构造中, 含水层岩性为砂质页岩、页岩夹泥灰岩和砂岩, 底部为砾岩和泥灰岩, 白垩系和古近系碎屑岩构成了西宁向斜承压自流水盆地; 碳酸盐岩裂隙岩溶水主要呈条带状分布于拉鸡山北坡中、西段. 含水层岩性主要为青石坡组和克素尔组白云岩、结晶灰岩. 基岩

裂隙水主要赋存于丘陵区新生界碎屑岩、元古界变质岩以及各期侵入岩风化裂隙和构造裂隙中, 补给条件和富水性差异较大; 冻土层主要分布在西宁市的西部及北部, 含水层厚度小于 5 m.

山区地下水接受大气降水的渗入补给, 相邻地区基岩裂隙水和地表水的补给, 并沿沟谷方向向下游径流. 以泉的形式向沟谷泄出; 河谷区潜水主要接受河水入渗和基岩山区、丘陵山区侧向补给, 另外在部分地段还接受大气降水入渗补给, 以及渠道水渗漏和农田灌溉水入渗补给, 纵向上水力坡度一般在 5‰~10‰, 地下水溢出沿河漫滩及 II 级阶地前缘以泉的形式呈线状排泄, 最终流入湟水河.

1.3 土地利用类型与人类活动特征

随着西部大开发和青藏铁路等重大战略的实施, 经济快速增长, 城市化进程发展迅速, 从 2008 年的 61.02% 上升到 2018 年的 72.11%^[18]. 西宁市是一个典型的河谷型城市, 土地资源紧缺, 但存在粗放利用现象, 导致人地矛盾突出. 《青海省土地利用总体规划(2006~2020 年)》明确提出, “保持农用地和建设用规模适度扩大, 在不影响生态环境的前提下, 适度开发未利用地”^[19], 城市化地区的特点是人口稠密, 企业众多, 生活污水和工业废水大量排出. 西宁市人口空间分布呈郊区化趋势明显^[20], 城市周边郊区分布大量工厂, 与主城区相比, 郊区缺乏完善的排水系统, 调查发现当地自行挖井排放污水现象普遍存在.

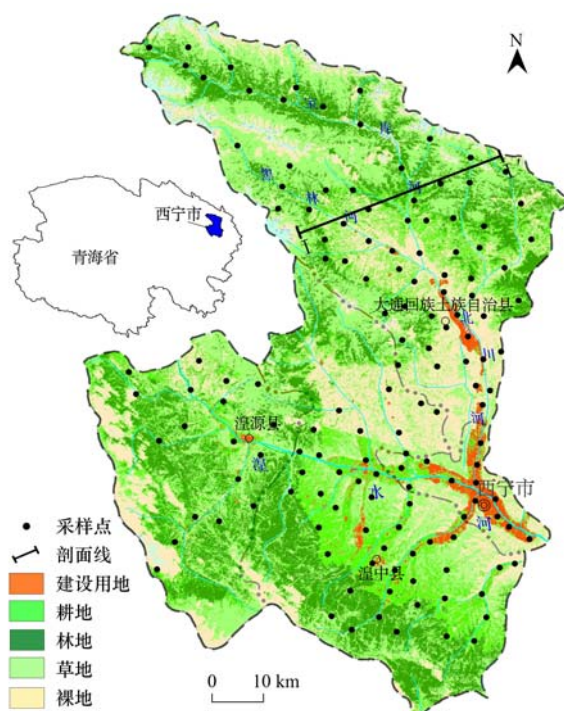


图 1 西宁市地下水采样点分布示意

Fig. 1 Location of the groundwater sampling sites in Xining City

1.4 样品的采集与处理

2019 年 6 月至 2020 年 7 月共采集浅层地下水样品 144 组(图 1).以潜水为主,采样密度为每千平方公里 16~20 组,采样井井深 4~56 m,主要是用于饮用和农业灌溉,水位埋深在 3.0~45.0 m.采样深度在水位下 1 m 左右,采集样品前先清井 5 min,样品储存在 2.5 L 高密度聚乙烯瓶中,低温保存并

送中国地质科学院地下水矿泉水与环境监测中心的实验室进行分析.检测标准参照《饮用天然矿泉水检验方法》(GB/T 8538-2016),分析指标、分析方法及检测限等信息见表 1.样品的溶解氧(DO)和 pH 值使用 anHQ40D 多参数仪器(美国科罗拉多州洛夫兰市 Hach)在现场测试得到.研究区水文地质剖面见图 2.

表 1 水化学指标分析方法、使用仪器和方法检出限¹⁾

Table 1 Hydrochemical parameters, analytical method, equipment, and detection limits			
指标	分析方法	使用仪器	方法检出限/mg·L ⁻¹
COD	碱性高锰酸盐氧化法	Hach, USA, DRB200	0.05
K ⁺	感应耦合等离子体法	Agilent 7500ce ICP-MS, Tokyo, Japan	0.05
Ca ²⁺			4.0
Na ⁺			0.01
Mg ²⁺			3.0
TFe			0.004 5
Mn ²⁺			0.000 5
CO ₃ ²⁻	酸碱滴定法	—	5.0
HCO ₃ ⁻			5.0
SO ₄ ²⁻	离子色谱法	Shimadzu LC-10ADvp, Japan	0.75
Cl ⁻			1.0
NO ₃ ⁻			0.664
NH ₄ ⁺			0.025
TDS	重量法	—	—

1) “—”表示没有相关数据; TFe 表示总铁

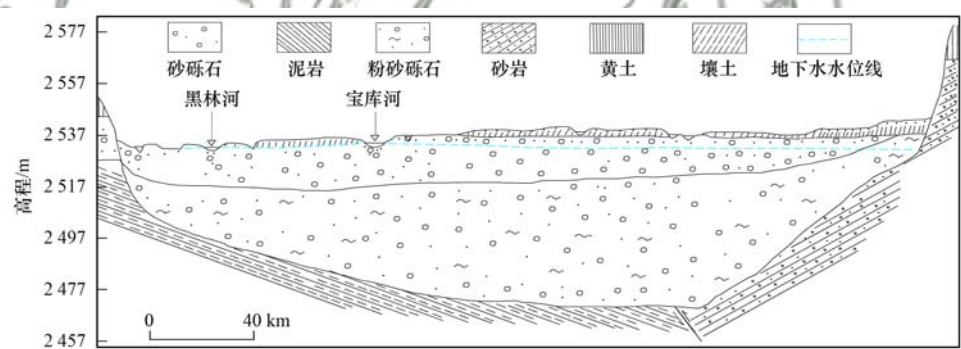


图 2 I-I'水文地质剖面

Fig. 2 Hydrogeological cross-section of transect I-I' in the study area

1.5 数据分析

采用 Origin 9.0 绘制 Gibbs 图和离子比例关系图,应用 AqQA 软件绘制 Piper 三线图,使用 SPSS 19.0(美国伊利诺伊州芝加哥 SPSS 公司)对地下水化学数据进行多变量统计分析. Pearson 相关分析用于确定地下水指标之间的重要关系;因子分析用于提取变量和推断控制地下水化学的潜在主要自然或人为因素,识别其来源.

2 结果与讨论

2.1 地下水化学参数特征

在该地区地下水中,CO₃²⁻ 浓度均小于检测限, pH 值在 6.4~8.8 之间,平均值为 7.7,呈中性-弱

碱性,超标率为 3.50%. TDS 在 75~3 694 mg·L⁻¹ 之间,平均值为 570.57 mg·L⁻¹,超标率为 13.99%. 溶解氧(DO)范围为 0.2~14.60 mg·L⁻¹,平均值为 5.67 mg·L⁻¹,含水层处于氧化环境中. 主要阳离子浓度大小顺序为:Ca²⁺>Na⁺>Mg²⁺>K⁺,阴离子浓度大小顺序为:HCO₃⁻>SO₄²⁻>Cl⁻>NO₃⁻. 地下水样品中 NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 浓度超标率分别为 6.29%、13.99% 和 2.80%. 这表明,地下水受到人类活动的影响,如工农业废水、生活污水排放和化肥的过量施用^[21]. 通常地下水受人类活动影响输入的物质具有空间离散度高、波动性大的特征^[22],从表 2 中可以看出 NH₄⁺、TFe、Mn²⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、

表 2 研究区地下水理化指标特征¹⁾

Table 2 Characteristics of physical and chemical indexes of groundwater in the study area							
统计指标	最小值	最大值	平均值	标准差	标准值	变异系数/%	超标率/%
pH	6.4	8.8	7.7	0.39	6.5~8.5	5.06	3.5
DO	0.2	14.6	5.67	3.61	—	63.76	—
COD	0.31	3.46	1.19	0.62	3	52.33	2.1
K ⁺	0.78	42.2	3.65	4.99	—	136.79	—
Ca ²⁺	2.06	547.4	87.11	65.14	—	74.77	—
Na ⁺	2.47	1 074	64.6	134.6	200	208.36	7.69
Mg ²⁺	1.17	292.1	31.57	39.28	—	124.4	—
SO ₄ ²⁻	9.76	2 221	158.01	293.98	250	186.06	13.99
Cl ⁻	2.1	905.5	54.69	113.53	250	207.61	2.8
HCO ₃ ⁻	43.32	591.3	271.8	116.5	—	42.86	—
NO ₃ ⁻ -N	ND	60.03	5.95	7.84	20	131.66	6.29
NH ₄ ⁺ -N	ND	9.68	0.13	0.89	0.5	679.07	2.8
TFe	ND	100.8	1.52	9.25	0.3	609.69	6.99
Mn ²⁺	ND	4.21	0.08	0.39	0.1	499.94	0.7
TDS	75	3 694	570.57	605.07	1 000	106.05	13.99

1) pH 无量纲,其余单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; TFe 表示总铁; 标准值为《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)^[23]规定的限值; ND 表示未检出,计算时 ND 作 0 处理; “—”表示没有相关数据

NO_3^- 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 TDS 的变异系数较大,可认为是受人类活动影响所致。

2.2 地下水化学类型及成因

Piper 图可清晰呈现地下水化学类型^[24,25],为探究人类活动对地下水的影响,本文将 NO_3^- 作为主要离子参与地下水化学命名。西宁市地下水化学类型多达 36 种,主要水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca(Mg)}$ 型(占比 60.00%),其次为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca(Mg)}$ 型(占比 11.81%),其余水化学类型均 $<3\%$ 。没有出现硝酸型水。水化学类型呈现多样性(见图 3),除 $\text{HCO}_3\text{-Ca(Mg)}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca(Mg)}$ 广泛分布外,其余水化学类型点呈斑块状散布于西宁市城区及周边(见图 1 和图 4)。表明随着西宁市社会经济的发展,受人类活动(如生活污水、工业废水和化肥)等因素的综合影响,地下水化学场已经发生了变化。土地利用类型直接反映人类活动对地下水化学成分的影响^[26]。由表 3 可知,建设用地中地下水化学类型多达 21 种,耕地中地下水化学类型为 17 种,而草地、林地和裸地中的地下水化学类型分别为 5、6 和 6 种,反映了强烈的人类活动(如生活污水、工业废水和化肥农药)对这些地区地下水化学成分的影响。水文地质条件也影响地下水化学成分的变化,由图 4 可

知分布在松散岩类含水层的地下水化学类型复杂多样,而分布在其它含水层的地下水化学类型较少,这是因为松散岩类含水层主要分布于山前倾斜平原及河谷平原区,属径流-排泄区,以第四系砂砾卵石层潜水为主,河谷潜水与河水水力联系密切,易受河水水化学成分影响。

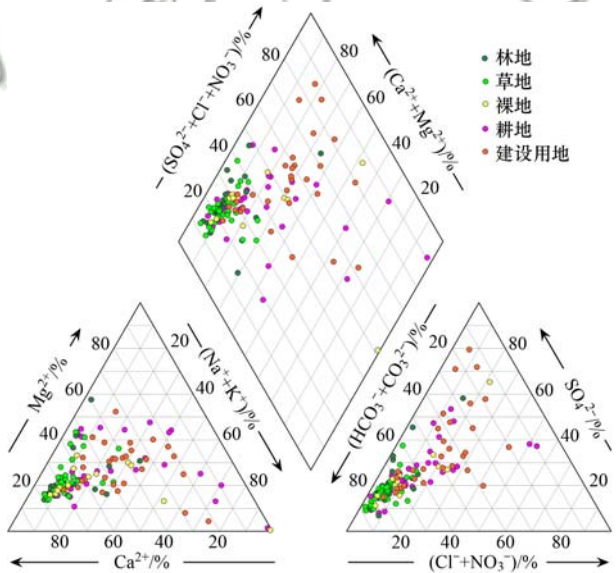


图 3 西宁市地下水化学 Piper 三线图

Fig. 3 Piper diagrams of groundwater in Xining City

表 3 不同土地利用类型地下水化学类型统计表

Table 3 Statistic table of groundwater hydrochemistry type of different land uses in this region			
土地利用类型	样品(组)	水化学类型种类	主要水化学类型
建设用地	30	21	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$
耕地	39	17	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 和 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$
草地	35	5	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$
林地	26	6	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$
裸地	14	6	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$

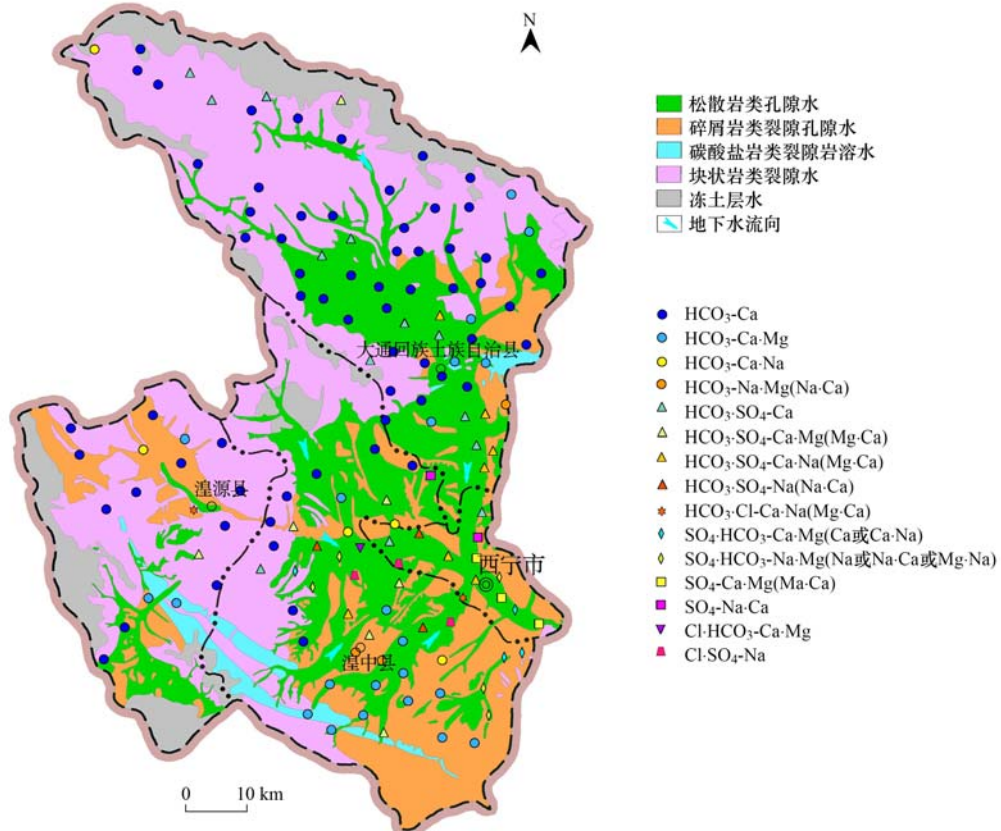


图4 西宁市地下水采样点水化学类型

Fig. 4 Hydrochemical type of groundwater for the sampling sites in Xining City

2.3 地下水离子组分的自然来源

探讨水-岩作用,对了解地下水化学演化有重要作用^[27,28]. Gibbs 图可以宏观解释地下水中主要离子的控制因素:大气降水、岩石溶滤和蒸发结晶^[29,30].从图 5 中可以看出,阳离子 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ +$

$\text{Ca}^{2+})$ 在 0.06 ~ 1.00 之间,阴离子 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 在 0.01 ~ 0.79 之间,地下水样品点主要分布在“岩石溶滤作用”和“蒸发结晶作用”范围内.主要受“岩石溶滤”和“蒸发结晶”综合作用影响,个别出模型范围的样点(分布在建设用地和耕地中)推

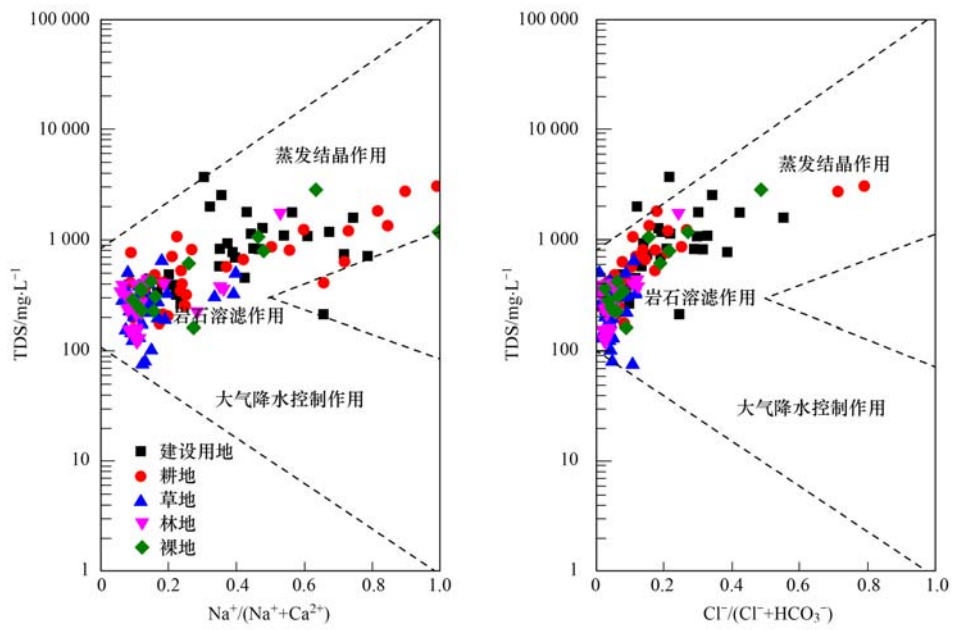
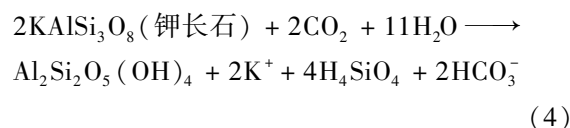
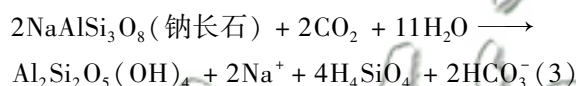
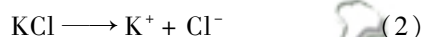
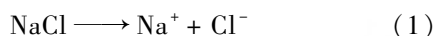


图 5 研究区地下水 Gibbs 图

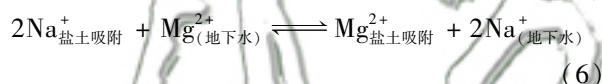
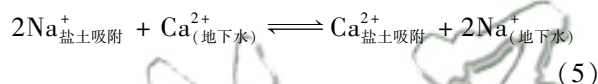
Fig. 5 Gibbs diagram of groundwater in the study area

测是受强烈的人类活动影响所致. 研究还发现分布在较高海拔的林地和草地中地下水样点主要受岩石溶滤作用影响, 而分布在相对较低海拔的建设用地、耕地及裸地区的地下水样点受“岩石溶滤”和“蒸发结晶”综合作用的影响, 推测是随海拔降低, 影响地下水化学组分的主要因素由“岩石溶滤作用”向“蒸发结晶作用”过渡, 这一观点有待进一步论证.

离子比例关系图有助于确定主要离子的来源^[31]. $n(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/n(\text{Cl}^-)$ (毫克当量比, 下同) 关系可推测 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 Cl^- 的来源. 由图 6(a) 可以看出, 西宁市地下水样点基本位于 1:1 分界线上, 说明 Na^+ 和 K^+ 还有其他来源, 除了受蒸发岩盐与硅酸盐的溶滤作用外, 还可能受阳离子交换作用等因素的影响^[27]. 可能存在的反应机制如式 (1) ~ (4) 所示.



阳离子交换作用强弱可用 $n(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)/n[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)]$ 来反映. 从图 6(b) 可看出, 地下水样点 $n(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)/n[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)]$ 表现出明显的负相关性, 较为集中分布在 $y = -0.7857x + 4.5135$ 的直线周围, 证明地下水中有阳离子交换作用的发生. 过量 Na^+ 的存在推测是发生阳离子交换作用产生, 常见的阳离子交换是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 交换, 在一定条件下, 地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 交换吸附盐土颗粒表面的 Na^+ , 阳离子交换过程如式 (5) 和式 (6) 所示.



$n(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/n(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 可以推测

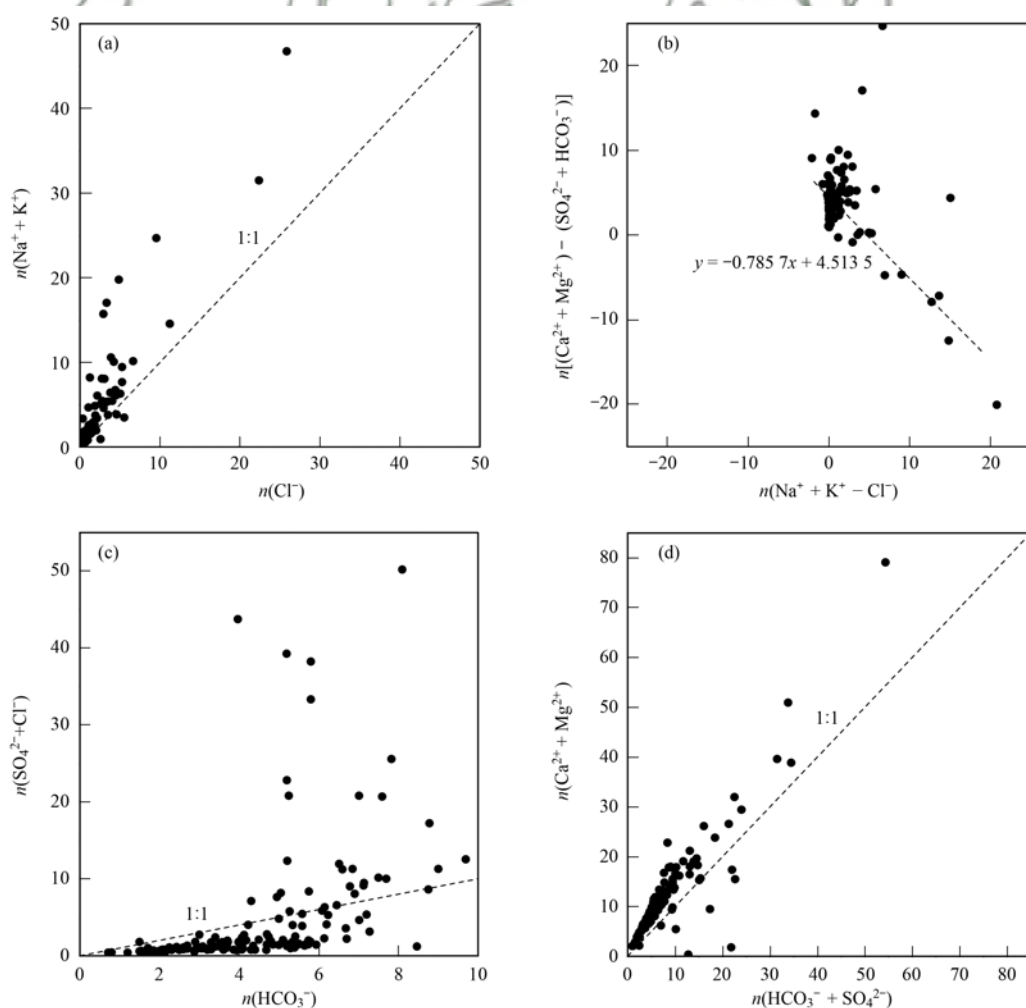
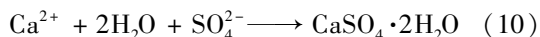
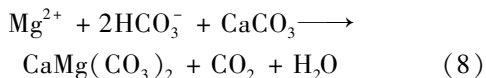
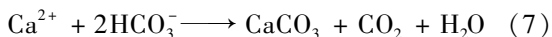


图 6 主要离子比例

Fig. 6 Ionic ratio plots of the major ions

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 的来源^[32]. 如图 6(d) 所示, 大多数样品的比值在 1:1 关系线的上方, 说明 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 主要来源于碳酸盐风化溶滤控制. 此外, 样品近似呈直线分布并偏离至 1:1 线以上, 表明有污染物或其他水体混入^[33]. 如图 6(c) 所示, 大部分样品分布在 1:1 直线下方, 证实地下水化学形成的控制因素为碳酸盐矿物的溶滤, 分布在 1:1 直线上方的样点可能伴随有蒸发岩的溶滤^[34]. 相关反应机制如式(7)~(10)所示.



2.4 地下水化学的控制因素

因子分析 (factor analysis) 是通过降维的思想, 把一些隐藏着复杂关系的变量化为少数综合性指标的多元统计学方法, 在水文地球化学研究中, 因子分析常用于研究变量间的关系, 提取相关变量以解释地下水化学特征的控制因素及影响程度.

利用 SPSS 软件, 对西宁市 144 组地下水样品的 14 项水化学指标进行因子分析, 采用方差最大旋转法对成分矩阵进行旋转, 目的是使各公因子的典型代表变量突出, 便于解释现实意义. 得到了 5 个主因子 F1、F2、F3、F4 和 F5, 累计方差贡献率为 81.66%, 见表 4.

主因子 1 (F1) 的综合贡献率为 27.56%, 以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 TDS 为主. 由地下水离子组分的自然来源分析可知, 地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 主要来源于碳酸盐风化溶滤, 故 F1 主要反映水-岩作用对地下水化学的影响.

主因子 2 (F2) 的综合贡献率为 16.16%, 以铁 (TFe) 和锰 (Mn^{2+}) 为主. 有研究发现, 地下水中高浓度的 TFe 和 Mn^{2+} 可反映含水层处于还原环境^[35], 或是受到工业废水的影响^[36]. 西宁市地下水的 DO 平均值为 $5.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 指示地下水环境具有氧化性. 因此, 地下水中较高浓度的 TFe 和 Mn^{2+} 可能来源于工业废水排放. 结合行业类型来看, 主要源于炼钢、有色金属冶炼类企业、电镀企业废水排放^[37]. 工业区与其它区相比采集的地下水样品中 $\rho(\text{TFe})$ 和 $\rho(\text{Mn}^{2+})$ 的平均值最高分别是 $11.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.531 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这进一步验证了笔者的推断.

主因子 3 (F3) 的综合贡献率为 16.00%, 以 pH、 Cl^- 和 Na^+ 为主. 由离子比例关系可知 Na^+ 和 Cl^- 的主要来源是蒸发盐岩作用和阳离子交换作用[图 6

(a) 和 6(b)]. 因此, F3 表示酸碱演化环境对蒸发盐岩作用和阳离子交换作用的影响.

主因子 4 (F4) 的综合贡献率为 13.12%, 以 K^+ 和 NO_3^- 为主. 表示化肥的过量施用. 西宁市所在的湟水河流域农业化肥以施用氮肥、磷肥、钾肥和复合肥为主, 农药以化学农药为主, 2017 年化肥施用总量达 41 964.06 t, 其中氮肥施用量为 18 640.05 t, 磷肥施用量为 7 757.26 t, 钾肥施用量为 1 688.21 t, 复合肥施用量为 14 138.30 t, 农药使用量为 1 294.64 t^[38]. 但化肥利用率只有 30%~40%^[39], 农药利用率仅为 35%, 大量含高 NO_3^- 和高 K^+ 的农业废水流入地表河流并下渗至浅层地下水.

主因子 5 (F5) 的综合贡献率为 8.82%, 以 COD 和 NH_4^+ 为主, 主要来源于生活污水. 生活污水中含氮有机物渗入浅层地下水后, 在有氧条件下经微生物分解形成氨氮. 在研究区调查期间, 发现农村居民习惯于打井排放生活污水, 这很容易导致地下水中 COD 和 NH_4^+ 的增加^[40].

表 4 研究区地下水各指标旋转因子载荷矩阵¹⁾

Table 4 Rotation factor loading matrix of groundwater indicators in the study area

变量	成分				
	F1	F2	F3	F4	F5
pH	-0.19	0.14	0.62	-0.13	0.13
COD	0.07	-0.13	-0.05	0.03	0.87
K^+	0.15	0.30	0.09	0.79	0.22
Ca^{2+}	0.93	-0.03	-0.07	0.03	0.04
Na^+	0.37	-0.03	0.85	0.23	-0.04
Mg^{2+}	0.89	0.01	0.07	0.27	0.05
SO_4^{2-}	0.89	0.04	0.36	0.09	0.10
Cl^-	0.36	-0.05	0.84	0.16	-0.14
HCO_3^-	0.61	-0.13	0.01	0.51	-0.03
NO_3^-	0.22	-0.12	0.08	0.84	-0.12
NH_4^+	0.06	0.48	0.08	0.02	0.60
TFe	-0.07	0.97	0.03	0.02	-0.04
Mn^{2+}	0.000	0.97	0.02	0.02	0.03
TDS	0.81	-0.01	0.52	0.25	0.01
贡献率/%	27.56	16.16	16.00	13.12	8.82
累计贡献率/%	27.56	43.72	59.72	72.84	81.66

1) 黑体字为各主成分主要影响指标

2.5 地下水环境管理建议

人类活动对地下水化学组分造成的影响有: ①工业废水的不当排放; ②生活污水排放不当; ③农业区化肥农药的过量施用. 为了保护重要的地下水资源免受进一步恶化, 建议政府、环保部门可采取以下措施控制地下水污染源: ①加强对废水排放的监督, 防止排放不符合排放标准的废水; ②在城郊 (建设用地区边缘区) 修建排水系统, 禁止在村庄和工业园区挖井排放废水; ③推广优化施肥策略, 根据合理的肥料标准调节化肥的数量和类型^[41].

3 结论

(1) 西宁市浅层地下水呈中性-弱碱性, 地下水 pH、TDS、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 存在超标现象, 其超标率分别是 3.50%、13.99%、6.29%、13.99% 和 2.80%。地下水化学类型达 36 种, 主要水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}(\text{Mg})$ (占比 60.00%), 其次为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}(\text{Mg})$ (占比 11.81%), 主要分布于西宁市草地、林地和裸地中, 而其它多种地下水水化学类型主要分布在建设用地和耕地中, 特别是建设用地中地下水化学类型达 21 种, 反映了强烈的人类活动 (如生活污水、工业废水和化肥农药) 对这些地区地下水化学成分的影响。

(2) 自然条件下, 西宁市地下水主要离子组分来源于岩石风化溶滤和蒸发结晶作用, 蒸发盐岩溶解和阳离子交换作用是研究区 Na^+ 和 Cl^- 积聚的重要来源。碳酸盐矿物和蒸发岩的溶滤是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 的主要来源, 并探讨了主要离子来源可能存在的反应机制。

(3) 因子分析结果显示西宁市地下水化学主要受控于 5 个主因素。F1 主要反映水-岩作用的影响, 贡献率为 27.56%; F2 主要反映工业废水排放的影响, 贡献率为 16.16%; F3 主要反映酸碱环境的影响, 贡献率为 16.00%; F4 主要反映化肥、农药的过量施用的影响, 贡献率为 13.12%; F5 主要反映生活污水的影响, 贡献率为 8.82%。针对 F2、F4 和 F5 等人类活动因素对地下水化学的影响, 建议环境保护部门出台一些措施, 如禁止村庄和工业园区挖井排放生活和工业废水, 在农业部门推广优化施肥策略等, 以保护地下水资源合理开发利用。

参考文献:

- [1] Ma B, Jin M G, Liang X, *et al.* Groundwater mixing and mineralization processes in a mountain-Oasis-Desert basin, northwest China: Hydrogeochemistry and environmental tracer indicators [J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, **26** (1): 233-250.
- [2] 於昊天, 马腾, 邓娅敏, 等. 江汉平原东部地区浅层地下水水化学特征[J]. *地球科学*, 2017, **42**(5): 685-692.
Yu H T, Ma T, Deng Y M, *et al.* Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in eastern Jiangnan Plain [J]. *Earth Science*, 2017, **42**(5): 685-692.
- [3] 孙厚云, 毛启贵, 卫晓锋, 等. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. *中国地质*, 2018, **45**(6): 1128-1141.
Sun H Y, Mao Q G, Wei X F, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin [J]. *Geology in China*, 2018, **45**(6): 1128-1141.
- [4] Yan J H, Chen J S, Zhang W Q. Study on the groundwater quality and its influencing factor in Songyuan City, Northeast China, using integrated hydrogeochemical method [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **773**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.144958.
- [5] 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.
- [6] Huang G X, Liu C Y, Sun J C, *et al.* A regional scale investigation on factors controlling the groundwater chemistry of various aquifers in a rapidly urbanized area: a case study of the Pearl River Delta [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 510-518.
- [7] Kundu N, Panigrahi M, Tripathy S, *et al.* Geochemical appraisal of fluoride contamination of groundwater in the Nayagarh district of Orissa, India [J]. *Environmental Geology*, 2001, **41** (3-4): 451-460.
- [8] Noori R, Sabahi M S, Karbassi A R, *et al.* Multivariate statistical analysis of surface water quality based on correlations and variations in the data set [J]. *Desalination*, 2010, **260** (1-3): 129-136.
- [9] Sunkari E D, Abu M, Bayowobie P S, *et al.* Hydrogeochemical appraisal of groundwater quality in the Ga west municipality, Ghana: implication for domestic and irrigation purposes [J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2019, **8**: 501-511.
- [10] Batabyal A K. Hydrogeochemistry and quality of groundwater in a part of Damodar Valley, Eastern India: an integrated geochemical and statistical approach [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2018, **32**(8): 2351-2368.
- [11] Chung S Y, Venkatramanan S, Kim T H, *et al.* Influence of hydrogeochemical processes and assessment of suitability for groundwater uses in Busan City, Korea [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2015, **17**(3): 423-441.
- [12] 雷米, 周金龙, 张杰, 等. 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1873-1884.
Lei M, Zhou J L, Zhang J, *et al.* Hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater in the plain area of Bortala River Basin, Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1873-1884.
- [13] 邱瑀, 卢诚, 徐泽, 等. 湟水河流域水质时空变化特征及其污染源解析 [J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(8): 2829-2837.
Qiu Y, Lu C, Xu Z, *et al.* Spatio-temporal variation characteristics and water pollution sources in the Huangshui River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(8): 2829-2837.
- [14] 张涛, 何锦, 李敬杰, 等. 蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4981-4990.
Zhang T, He J, Li J J, *et al.* Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong River Basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4981-4990.
- [15] 刘峰, 陈惠娟, 王士东, 等. 西宁市主要地质灾害成因及变形破坏模式分析 [J]. *地下水*, 2015, **37**(3): 175-177.
Liu F, Chen H J, Wang S D, *et al.* Analysis on main geological disasters formation causes & deformation failure mode in Xining [J]. *Ground water*, 2015, **37**(3): 175-177.
- [16] 梅兴新, 娄华君, 张征, 等. 湟水河小流域地下水脆弱性评价 [J]. *环境保护科学*, 2013, **39**(4): 48-52, 56.
Mei X X, Lou H J, Zhang Z, *et al.* Groundwater vulnerability assessment on small watershed scale of the Huangshui River [J]. *Environmental Protection Science*, 2013, **39**(4): 48-52, 56.
- [17] 王宏伟, 张鑫, 邱俊楠, 等. 基于多目标遗传算法的西宁市水资源优化配置研究 [J]. *水土保持通报*, 2012, **32**(2): 150-153.

- Wang H W, Zhang X, Qiu J N, *et al.* Optimal deployment of water resources based on multi-objective genetic algorithm in Xining City[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, **32**(2): 150-153.
- [18] 李梦洁. 基于 TOD 模式的西宁市土地利用效益评价研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2020.
- [19] 规划科技处国土规划研究院. 《青海省土地利用总体规划》(2006 年-2020 年) 具体内容[J]. *青海国土经略*, 2010, (4): 6-8.
- [20] 马晓帆, 张海峰, 高子铁, 等. 改革开放以来西宁市主城区人口空间分布变动趋势研究[J]. *现代城市研究*, 2019, (11): 20-25.
- Ma X F, Zhang H F, Gao Z Y, *et al.* Study on the trend of population spatial distribution in the main urban area of Xining since the reform and opening-up[J]. *Modern Urban Research*, 2019, (11): 20-25.
- [21] Güler C, Kurt M A, Alpaslan M, *et al.* Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **414-415**: 435-451.
- [22] Zhang B, Song X F, Zhang Y H, *et al.* Hydrochemical Characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen Plain, Northeast China [J]. *Water Research*, 2012, **46**(8): 2737-2748.
- [23] GB/T 14848-2017, 地下水质量标准[S].
- [24] Zhang Q Q, Miao L P, Wang H W, *et al.* How rapid urbanization drives deteriorating groundwater quality in a provincial capital of China[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, **29**(1): 441-450.
- [25] 程东会, 陈鸿汉, 何江涛, 等. 北京城近郊区地下水人为影响和水-岩作用指示性指标研究[J]. *水文地质工程地质*, 2007, **34**(5): 37-42.
- Cheng D H, Chen H H, He J T, *et al.* A study of indicators of anthropogenic influence and water-rock interaction in groundwater system in the urban region of Beijing [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, **34**(5): 37-42.
- [26] Li Z J, Yang Q C, Yang Y S, *et al.* Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **576**: 685-697.
- [27] 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.
- [28] 万利勤, 徐慧珍, 殷秀兰, 等. 济南岩溶地下水化学成分的形成[J]. *水文地质工程地质*, 2008, **35**(3): 61-64.
- Wan L Q, Xu H Z, Yin X L, *et al.* Formation of hydrochemistry components of karst groundwater in Jinan[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, **35**(3): 61-64.
- [29] Lockhart K M, King A M, Harter T. Identifying sources of groundwater nitrate contamination in a large alluvial groundwater basin with highly diversified intensive agricultural production [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2013, **151**: 140-154.
- [30] 洪涛, 谢运球, 喻崎雯, 等. 乌蒙山重点地区地下水水化学特征及成因分析[J]. *地球与环境*, 2016, **44**(1): 11-18.
- Hong T, Xie Y Q, Yu Q W, *et al.* Hydrochemical characteristics study and genetic analysis of groundwater in a key region of the Wumeng Mountain, Southwestern China [J]. *Earth and Environment*, 2016, **44**(1): 11-18.
- [31] 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.
- [32] Li P Y, Wu J H, Qian H. Assessment of groundwater quality for irrigation purposes and identification of hydrogeochemical evolution mechanisms in Pengyang County, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **69**(7): 2211-2225.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Kim K H, Yun S T, Choi B Y, *et al.* Hydrochemical and multivariate statistical interpretations of spatial controls of nitrate concentrations in a shallow alluvial aquifer around oxbow lakes (Osong area, central Korea) [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, **107**(3-4): 114-127.
- [36] Zhang Q Q, Wang L, Wang H W, *et al.* Spatio-temporal variation of groundwater quality and source apportionment using multivariate statistical techniques for the Hutuo River Alluvial-Pluvial Fan, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(3), doi: 10.3390/ijerph17031055.
- [37] Huang F, Wang X Q, Lou L P, *et al.* Spatial variation and source apportionment of water pollution in Qiantang River (China) using statistical techniques [J]. *Water Research*, 2010, **44**(5): 1562-1572.
- [38] 张艳娇. 湟水河流域农业面源污染与经济发展关系的实证研究[D]. 西宁: 青海大学, 2019.
- [39] 张光辉, 刘中培, 连英立, 等. 河北平原地下水水质变及农药化肥施用量变化影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, **7**(2): 50-54.
- Zhang G H, Liu Z P, Lian Y L, *et al.* Variation of groundwater quality and influence of pesticide and fertilizer on Hebei Plain [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, **7**(2): 50-54.
- [40] Gu H B, Chi B M, Li H J, *et al.* Assessment of groundwater quality and identification of contaminant sources of Liujiang basin in Qinhuangdao, North China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(10): 6477-6493.
- [41] Peña-Haro S, Llopis-Albert C, Pulido-Velazquez M, *et al.* Fertilizer standards for controlling groundwater nitrate pollution from agriculture: El Salobral-Los Llanos case study, Spain [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **392**(3-4): 174-187.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wen, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)