

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势	杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测	郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
基于扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解的碳排放脱钩因素	张江艳 (1888)
基于 LEAP 模型的工业园区碳达峰路径: 以南京某国家级开发区为例	李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
高校碳排放核算与分析: 以北京 A 高校为例	曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素	俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
碳排放权交易价格与全要素生产率: 来自中国的证据	吴雪萍 (1926)
中国城市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 时空分布特征和影响因素分析	李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)
2017~2021 年苏皖鲁豫交界区域 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空变化特征及影响因素	陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
疫情管控期西安 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染特征及成因分析	原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
苏南五市秋冬季 PM _{2.5} 化学组成特征和空间差异	冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
湖北咸宁细颗粒物 PM _{2.5} 来源	罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
邢台氨减排对京津冀 PM _{2.5} 改善的溢出效益	边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
聊城市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析	张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
高原城市拉萨典型 VOCs 排放源成分谱特征	郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
北京市工业园区 VOCs 污染特征及健康风险评估案例: 高新技术产业的环境影响	王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析	雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险	葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险	王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤峰 (2054)
藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素	李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源	张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程	孟令华 (2096)
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素	张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素	王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价	刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征	许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析	王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
过氧化钙/海泡石海藻酸钠凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能	曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应	刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展	孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制	练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制	马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应	郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度	喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系	刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响	郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能	胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制	郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
基于连续小波变换、SHAP 和 XGBoost 的土壤有机质含量高光谱反演	叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响	叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响	王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
土壤盐分变化对 N ₂ O 排放影响: 基于 Meta 分析	黄艺华, 余冬立, 史祺琦, 胡磊, 潘春春 (2313)
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测	郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
基于 InVEST 模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟	张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系	徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力	赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和 AMF 多样性的影响	鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应	周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征	张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响	柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征	马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法	张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
西南不同类型紫色土 pH 变化、重金属累积与潜在生态风险评估	张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析	廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果	刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响	张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素

王晓燕¹, 韩双宝^{1,2}, 张梦南¹, 尹德超¹, 吴玺¹, 安永会¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051; 2. 南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518055)

摘要: 为研究金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素, 采集浅层地下水(201组)和中深层地下水(5组)样品, 综合运用Piper三线图、Gibbs图、离子比值关系和因子分析方法, 分析了该区地下水水化学特征、水文地球化学过程以及影响因素。结果表明, 研究区浅层孔隙水整体呈弱碱性, $\rho(\text{TDS})$ 变化范围328.4~12 400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 阴阳离子分别以 SO_4^{2-} 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 为主。研究区地下水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Mg}$ 型、 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Mg}$ 型、 $\text{SO}_4\text{-Mg}\cdot\text{Na}$ 型和 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Mg}$ 型。中深层孔隙水pH均值为8.47, 较浅层孔隙水高, 属弱碱性水, $\rho(\text{TDS})$ 变化范围339.0~493.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Mg}$ 型。研究区地下水水化学特征受控于多种自然因素, 包括岩石风化、蒸发浓缩和阳离子交换等, 其中浅层孔隙水主要控制因素有溶滤和蒸发浓缩作用(贡献率为71.46%)、人类活动影响和碳酸盐岩溶解作用(贡献率为17.07%)。

关键词: 地下水; 水化学特征; 离子来源; 控制因素; 金塔盆地

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2118-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305010

Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin

WANG Xiao-yan¹, HAN Shuang-bao^{1,2}, ZHANG Meng-nan¹, YIN De-chao¹, WU Xi¹, AN Yong-hui¹

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, Baoding 071051, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In order to study the groundwater chemical characteristics and control factors of Yuanyangchi Irrigation area in Jinta Basin, shallow groundwater samples of 201 sites and middle-deep groundwater samples of five sites were collected. Piper triangular diagrams, Gibbs plot, ion ratio relationship, and factor analysis were used to analyze and discuss the chemical characteristics, control process, and influencing factors of groundwater. The results showed that the shallow pore water in the study area was weakly alkaline, with $\rho(\text{TDS})$ ranging from 328.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to 12 400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The major anions and cations of the shallow pore water were SO_4^{2-} and $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$, respectively, and the chemical types were mainly $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Mg}$, $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Mg}$, $\text{SO}_4\text{-Mg}\cdot\text{Na}$, and $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Mg}$. The average pH of middle-deep pore water was 8.47, which was larger than that of shallow pore water, characterized as weakly alkaline water. The middle-deep pore water $\rho(\text{TDS})$ range was 339.0~493.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the chemical type was mainly $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Mg}$. The chemical characteristics of groundwater in the study area were controlled by a variety of natural factors, including rock weathering, evaporative concentration, cation exchange, etc., among which the main controlling factors of shallow pore water were leaching and evaporative concentration (contribution rate of 71.46%), anthropogenic activities, and carbonate rock dissolution (contribution rate of 17.07%).

Key words: groundwater; chemical characteristics; ion source; control factors; Jinta Basin

水是生命之源, 尤其在生态脆弱的西北内陆干旱盆地, 地下水更是必不可少^[1]。金塔盆地位于甘肃省西北部黑河流域中下游, 东西两侧分布有黑河灌区和鸳鸯池灌区, 地下水是当地工业农业及居民生活用水的重要供水水源。地下水组分可以指示地下水的径流路径, 反映地下水流特征, 查明研究区地下水水化学特征及形成机制可为区域地下水资源合理开发利用以及综合管理提供重要依据^[2,3]。前人研究发现地下水水化学特征及演化规律与周围环境密切相关, 主要受水文地质条件、水岩相互作用等自然环境和生活污水及地下水超采等人类活动等影响^[4~7]。Yidana等^[8]和Pazand等^[9]对内陆盆地开展地球化学研究, 认为地下水演化的主要控制因素包括: 可溶盐溶解和离子交换作用、人类活动、硅酸盐矿物风化及蒸发作用等。有学者在黑河流域就地下水化学演化规律开展了相关研究。文献[10~12]对酒泉-嘉峪关流域到金塔流域的水化学特征进行研究, 认为浅

层地下水水化学特征随着地下水流路径由 HCO_3^- 占主导过渡到以 SO_4^{2-} 占主导, 径流过程中发生了方解石沉淀及白云石、石膏和盐岩溶解。吴玺等^[13]分析了金塔盆地鼎新谷地浅层地下水化学组分主要受岩石风化和蒸发浓缩作用控制, 并伴有一定的阳离子交换作用。王文祥等^[14]通过黑河中游盆地两个典型剖面的水化学和同位素特征揭示了溶滤作用是流域补给区和径流区地下水TDS升高的主要原因, 而蒸发对排泄区地下水咸化影响更大。对地下水水化学特征及控制因素的研究, 目前较为成熟的方法为水文地球化学理论与多元统计分析方法相结合, 分析其控制因素及成因来源^[15,16]。

鸳鸯池灌区位于金塔盆地西侧, 地下水是当地

收稿日期: 2023-05-03; 修订日期: 2023-06-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2503001); 中国地质调查局项目(12120114018401, DD20230077)

作者简介: 王晓燕(1986~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水文地质和水文地球化学, E-mail: wxyhappygirl@163.com

居民生活及农业灌溉的主要供水水源, 随着工农业的发展, 地下水开采增加导致地下水位下降, 金塔县以北鸳鸯池灌区含水层逐渐变薄, 浅表地下水蒸发强烈, TDS 增高, 水质变差, 地下水资源合理分配及用水安全等问题显得尤为突出^[17,18]. 目前针对金塔盆地鸳鸯池灌区地下水研究较少, 已有研究多是作为金塔盆地或北大河流域的一部分来分析浅层地下水资源和水质化学特征, 缺乏鸳鸯池灌区地下水水质组成及控制因素深入研究. 本文以金塔盆地鸳鸯池灌区地下水为研究对象, 重点对浅层孔隙水开展水化学分析, 并采取少量中深层样品开展垂向特征及与浅层水化学特征对比分析, 进一步结合当地地质和水文地质条件, 确定研究区内地下水的补给特

征, 识别地下水主要组分物质来源和判断发生水岩作用过程, 以为金塔鸳鸯池灌区生态环境建设等提供基础依据.

1 研究区概况

金塔盆地位于黑河流域中下游, 南起金塔南山, 北至马鬃山, 西侧与花海盆地相邻以分水岭为界, 东侧与巴丹吉林沙漠相连. 金塔盆地鸳鸯池灌区位于金塔盆地西部的南北两山之间扇形平原区, 区内沙丘农田交错相间分布^[18]. 鸳鸯池灌区隶属金塔县, 主要包括: 金塔镇、城关镇、中东镇、东坝镇、羊井子湾乡、三合乡、古城乡、西坝乡、大庄子乡及生地湾农场等(图1).

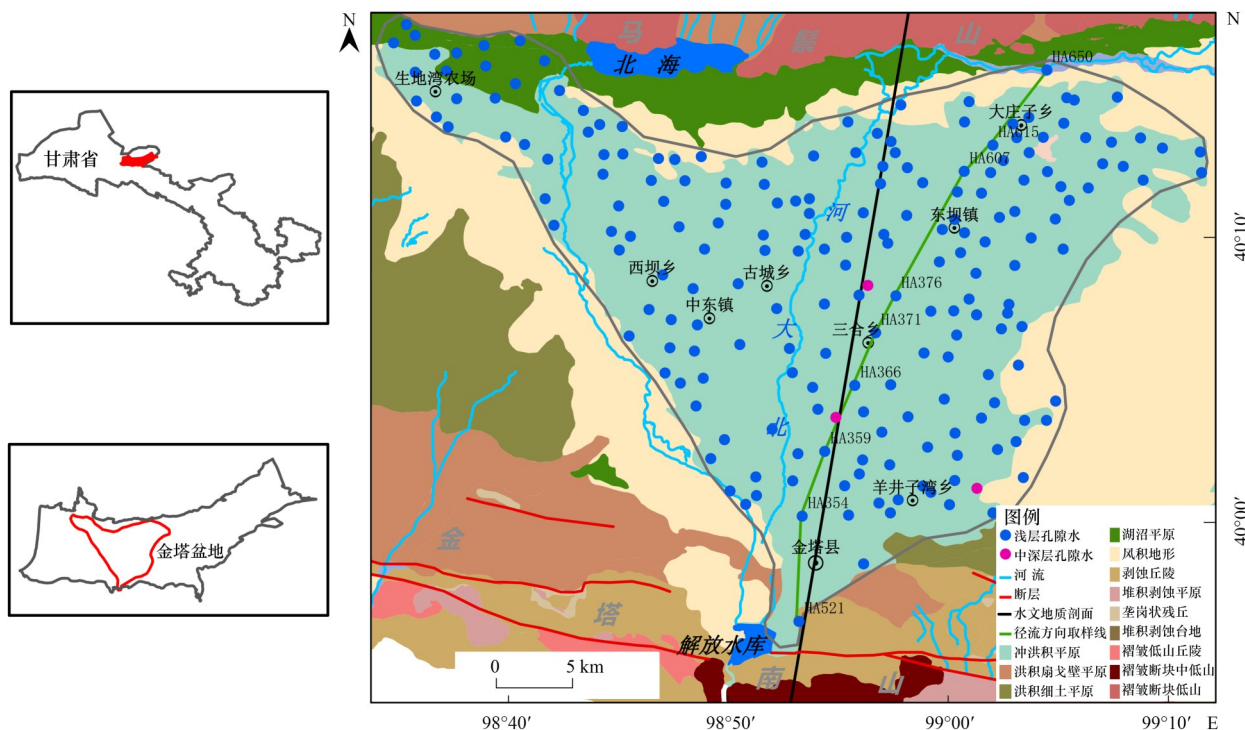


图1 金塔盆地鸳鸯池灌区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of groundwater sampling locations for the Yuanyangchi Irrigation area in Jinta Basin

金塔盆地深处西北内陆腹地, 冬季寒冷, 夏季炎热, 降雨稀少, 蒸发强烈, 属温带荒漠气候向暖湿气候过渡交替带. 本区多年平均气温为 9.1°C , 最高气温为 40.5°C , 最低气温为 -29.6°C , 多年平均降雨量为 68 mm , 多年平均蒸发量为 $2\,538.6\text{ mm}$. 区内过境河流为发源于祁连山中段的北大河下游段, 北大河从酒泉城北侧流下后进入鸳鸯池水库, 再经解放村水库、板滩水库调蓄后供金塔盆地农业灌溉和人畜生活用水^[18]. 金塔盆地为断陷类型盆地, 边缘分布有巨大断裂, 以新第三系为基底, 上部覆盖有厚度较小的第四系沉积物, 受基底断块升降运动控制, 盆地内部为北大河冲洪积扇形平原和风积地

貌. 区内金塔县城以南第四系岩性以砂卵砾石为主, 颗粒较粗, 向北含水层颗粒变细, 第四系岩性为砂砾石、中粗砂与粉质粘土互层, 根据钻探资料, 地层中的矿物以正长石、斜长石、石英、云母为主, 成分以硅铝酸盐为主. 研究区内自南向北含水层类型由潜水过渡到上部潜水下部承压水的多层结构, 如谭家湾村附近存在两层较稳定隔水层, 根据含水层类型和埋藏深度可将孔隙水大致分为浅层(埋藏深度 $<100\sim120\text{ m}$)、中层(埋藏深度约介于 $120\sim220\text{ m}$)和深层(埋藏深度约介于 $220\sim310\text{ m}$)(图2). 区内潜水位埋深 $5\sim10\text{ m}$, 地下水整体由西南向东北方向径流^[10,19].

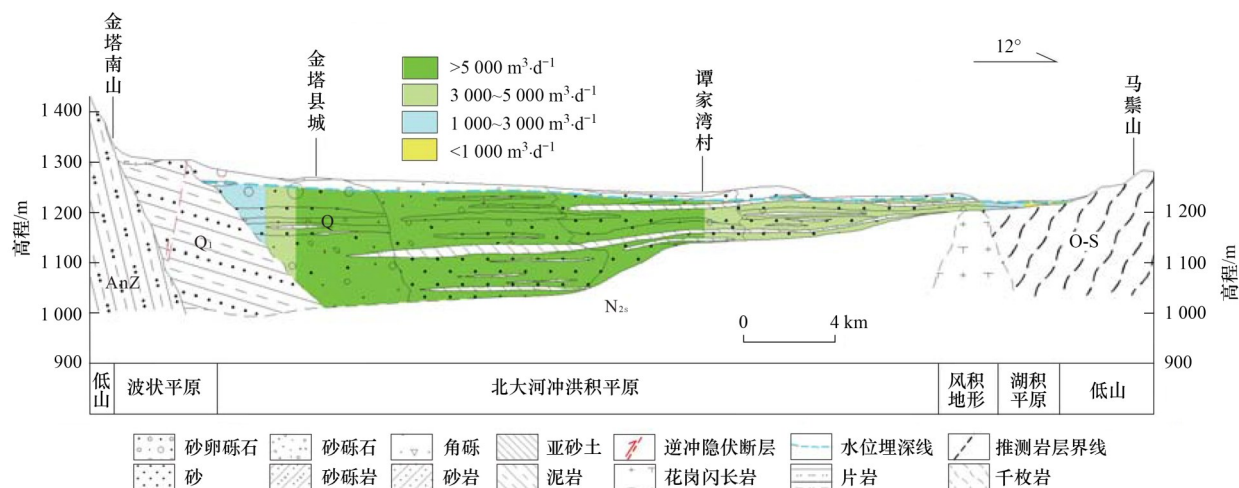


图2 研究区水文地质剖面

Fig. 2 Hydrogeological profile for the study area

2 材料与方法

2.1 采样点分布

为研究金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及成因, 2017~2018年共采集浅层孔隙水样品201组, 中深层孔隙水5组, 采样点分布位置如图1. 本研究采样工作充分考虑该区水文地质条件、城镇分布和地质地貌条件, 所采集样品尽量能代表鸳鸯池灌区的地下水特征.

2.2 样品采集与测试分析

地下水样品取自研究区的机民井和农业灌溉井, 浅层孔隙水取样井深为10~120 m, 水位埋深5~30 m; 中深层孔隙水取样井深为180~310 m. 浅层孔隙水采样过程采用潜水泵抽水, 中深层孔隙水采样过程采用封隔分层抽水技术利用潜水泵抽水, 采样前洗井大于30 min, 以实现获取能够真实代表研究区地下水水化学特征的水样. 样品采集时用水样冲洗采样瓶3次后装入水样, 每个采样点均采集3瓶水样, 一瓶水样经过滤并加硝酸保护用于进行阳离子测试, 另外两瓶用于阴离子和稳定同位素的测定, 水样均使用封口胶密封, 避光保存并及时送样. 水化学样品和氡氧同位素样品分别由甘肃省地矿局水文地质工程地质勘察院实验室和中国地质调查局水文地质环境地质调查中心实验室进行测试. 水中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度采用电感耦合等离子体发射光谱仪(iCAP7000型)测定, 水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的浓度采用离子色谱仪(IC-8628型)测定, HCO_3^- 采用酸碱滴定法测试, pH采用玻璃电极法测定, 总硬度(以 CaCO_3 计)和溶解性总固体(TDS)分别采用乙二胺四乙酸二钠滴定法和重量法测定, 氡氧同位素样品采用Picarro质谱仪测试, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测量

精度分别为0.1‰和0.025‰, 分析结果以VSMOW标准表示.

3 结果与讨论

3.1 水化学组成特征

所采集水样均为金塔盆地鸳鸯池灌区第四系孔隙水, 测试结果见表1. 研究区内浅层孔隙水pH介于7.23~8.91之间, 均值为7.82, 整体上属于弱碱性水, pH值变异系数最小, 为4.22%, 表明pH值在空间上分布均匀, 空间变异性较小; NO_3^- 、 Cl^- 和 Na^+ 变异系数大, 属强变异; K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 变异系数范围在67.17%~97.47%之间, 为中等变异; HCO_3^- 变异系数34.07%, 属低等变异; ρ (TDS) 介于328.4~12 400.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为2 116.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总硬度介于157.6~6 004.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为1 215.10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水质较差, 表明受蒸发浓缩影响较大, TDS和总硬度变异系数较为接近, 均属中等变异, 说明空间分布特征也较为一致. 中深层孔隙水pH介于8.1~8.8之间, 均值为8.47, 较浅层孔隙水大, 属弱碱性水; ρ (TDS) 介于339.0~493.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为398.66 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总硬度介于218.7~295.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为265.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 整体水质较好.

浅层孔隙水中阴离子以 SO_4^{2-} 为主, 阳离子以 Mg^{2+} 和 Na^+ 为主, 其中 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 均值为1 086.37 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 均值为221.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{Na}^+)$ 均值为238.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 主要阴离子浓度存在 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$ 的关系, 而阳离子浓度表现为: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ (表1), 其中 SO_4^{2-} 的浓度占较明显优势, SO_4^{2-} 占阴离子总量的比例为20.1%~79.95%, 平均值为58.9%. 中深层孔隙水中阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为

主, 阳离子以 Mg^{2+} 为主, 其中 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 均值为 $198.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 均值为 $131.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 均值为 $43.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 主要阴离子浓度存在 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 的关系, 而阳离子浓度表现为: $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ (表1), 其中 K^+ 和 Cl^- 的占比明显较小, 均不足 10%.

表1 研究区地下水水化学特征统计¹⁾

Table 1 Hydrochemistry statistical characteristics of different groundwater in the study area

分类	项目	pH	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	TH	TDS
浅层 孔隙水($n=201$)	Max	8.91	2 023.00	62.20	550.90	1 124.00	2 508.00	6 519.00	702.90	75.11	6 004.00	12 400.00
	Min	7.23	18.40	3.80	23.40	14.50	17.70	93.70	68.30	0.00	157.60	328.40
	Mean	7.82	238.61	14.31	121.81	221.25	262.15	1 086.37	293.35	10.03	1 215.10	2 116.61
	Std	0.33	272.15	9.61	84.51	182.8	301.6	1 058.86	99.63	12.14	948.71	1 884.82
	Cv	4.22	114.06	67.17	69.38	82.62	115.05	97.47	34.07	121.09	78.08	89.05
中深层 孔隙水($n=5$)	Max	8.80	46.10	9.30	36.50	50.40	37.60	187.80	212.30	4.75	295.70	493.80
	Min	8.10	23.80	5.50	31.80	33.80	20.60	96.50	178.20	1.57	218.70	339.00
	Mean	8.47	34.12	6.88	34.46	43.52	25.42	131.80	198.68	2.79	265.40	398.66
	Std	0.09	88.14	2.20	2.97	48.95	55.81	1 316.28	183.17	1.48	1 008.70	4 190.55
	Cv	1.06	258.32	31.98	8.62	112.48	219.55	998.69	92.19	52.97	380.07	1 051.16

1) Min 表示最小值, Max 表示最大值, Mean 表示均值, Std 表示标准差, Cv 表示变异系数(%), pH 无量纲, 其余数值单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

从金塔县南部解放水库附近沿地下水径流方向选取9个浅层孔隙水采样点(图1), 依据这9个地下水样品水化学特征来判断各项指标从上游到下游的空间演化特征. TDS、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 等浓度从上游到下游呈明显增加趋势, HCO_3^- 和 K^+ 浓度从上游到下游没有明显变化, NO_3^- 整体上浓度较低, 呈两端低中间高的分布情况(图3). 其中主要水化学离子与TDS浓度沿径流路径不断增加, 是研究区地下水在径流过程中持续发生水岩相互作用使矿物不断溶解所致^[20].

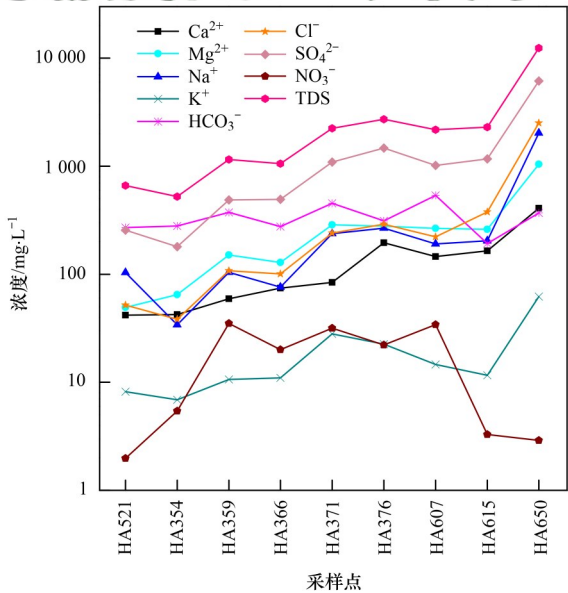


图3 研究区地下水水化学参数沿流向变化情况

Fig. 3 Variations in hydrochemical parameters along the flow direction in the study area

采用研究区内3个分层勘探孔不同层段采取的8组地下水样点(浅层3个、中层2个和深层3个)来分析不同深度地下水样品的水化学特征变化情况,

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 与TDS浓度随着井深增加呈明显减小趋势, K^+ 、 Cl^- 和 HCO_3^- 浓度整体上占比较小, 也呈现出随井深增加小幅度波动减小趋势(图4). 研究区中深层孔隙水主要离子和TDS浓度明显低于浅层孔隙水, 侧面反映了区内埋深较浅的区域受到较强的蒸发浓缩作用^[21].

3.2 水化学类型

利用Piper三线图可以分析地下水化学组分特征及演化规律^[22,23]. 由图5可知金塔盆地鸳鸯池灌区浅层孔隙水水化学类型较为多样, 阳离子主要以 Mg^{2+} 为主, 阴离子以 SO_4^{2-} 为主, 从金塔县城南部扇形平原的顶部至北部前缘, 阳离子由 Mg^{2+} 逐渐向 Na^+ 变化, 阴离子由 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 逐渐向 SO_4^{2-} 和 Cl^- 变化, 水化学类型由 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Mg}$ 型和 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Mg}$ 型逐渐向 $\text{SO}_4\text{-Mg}\cdot\text{Na}$ 型演化, 随着地下水在径流过程中持续发生水岩相互作用加上北部山前浅埋区强烈的蒸发作用, 出现 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 型水, $\rho(\text{TDS})$ 也由小于 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 过渡到 $1\sim3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 北部山前浅埋区 $\rho(\text{TDS})$ 大于 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 中深层孔隙水阳离子以 Mg^{2+} 为主, 阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主, 水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Mg}$ 型, $\rho(\text{TDS})$ 小于 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

3.3 水化学组分控制因素

3.3.1 地下水水化学主要离子来源分析

(1) 水岩模型

大气降水、气温及地表岩性等多种因素共同影响着地下水中离子含量等特征, 同时也与水体所处的区域水文地质环境等因素相关^[24]. 通常采用Gibbs图来研究水岩作用对地下水化学的影响, 主要离子来源控制作用分为3个类型: 蒸发结晶作用、大气降水作用和岩石风化作用^[25,26]. 通过绘制Gibbs图对

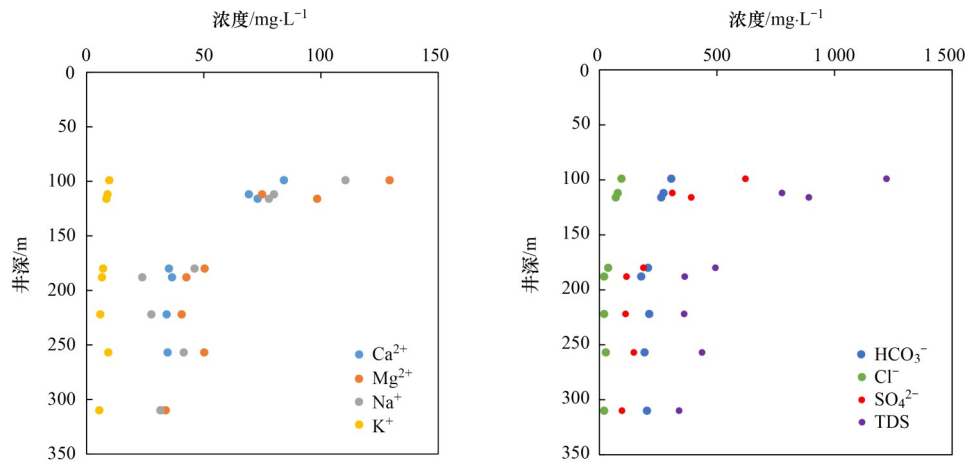


图 4 研究区地下水中主要水化学组分含量的垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of main hydrochemical components in groundwater in the study area

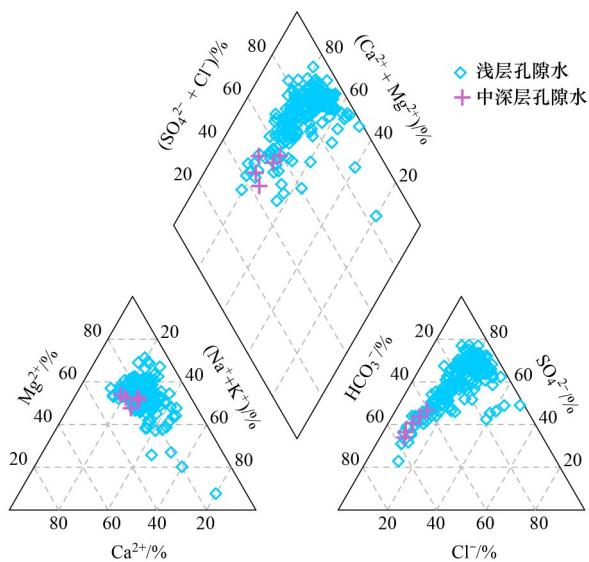


图 5 研究区地下水化学 Piper 三线图

Fig. 5 Piper for ions in groundwater in the study area

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水样品进行分析, 区内浅层孔隙水近 95% 地下水样品点落于 $\rho(\text{TDS})$ 为 500~

10 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 这一区间, 部分浅层孔隙水样品 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$ 小于 0.5, 落在岩石风化作用控制区, 部分浅层孔隙水样品 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$ 大于 0.5, 表现为逐渐延伸至蒸发浓缩作用控制区; 大多数浅层孔隙水样品中 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 大于 0.5 (图 6), 说明该区浅层孔隙水的主要离子组成主要受岩石风化作用和蒸发浓缩作用控制; 所采集浅层孔隙水样点均远离“大气降水”控制区, 表明大气降水作用对研究区内浅层孔隙水主要离子组成贡献较小. 中深层孔隙水样品 $\rho(\text{TDS})$ 均小于 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在图 6 中多数样品落在岩石风化控制区, 说明区内中深层孔隙水主要离子组成主要受岩石风化作用控制, 少量样品出现 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 大于 0.5, 说明除了受到岩石风化作用影响外, 还可能受到地质环境等其他因素的影响. 图 6 揭示了蒸发浓缩作用对研究区浅层孔隙水水化学特征影响显著. 浅层孔隙水 TDS 明显高于中深层地下水, 从侧面也反映出研究区浅层孔隙水受蒸发浓缩作用强烈.

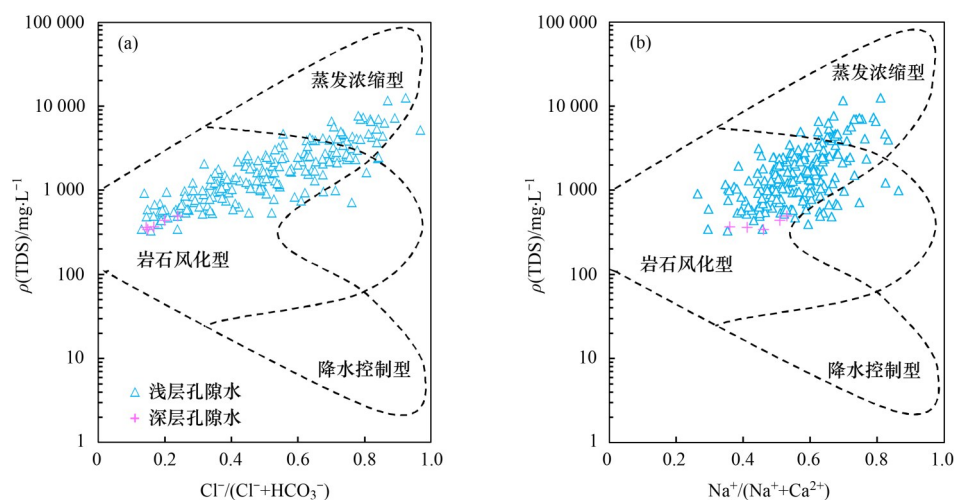


图 6 金塔盆地鸳鸯池灌区地下水 Gibbs 图

Fig. 6 Gibbs plots of the Yuanyangchi Irrigation area in Jinta Basin

地下水中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ (量浓度比值关系) 常用来研究地下水中离子成因^[22,24]。由图 7 可知, 区内浅层和中深层孔隙水样品点集中分布在硅酸盐岩控制端元附近, 少部分样点分

别向两端的硅酸盐岩和蒸发盐岩方向延伸, 表明硅酸盐矿物在岩石风化过程中起主要影响作用, 而碳酸盐岩和蒸发盐岩在岩石风化过程也有一定的贡献。

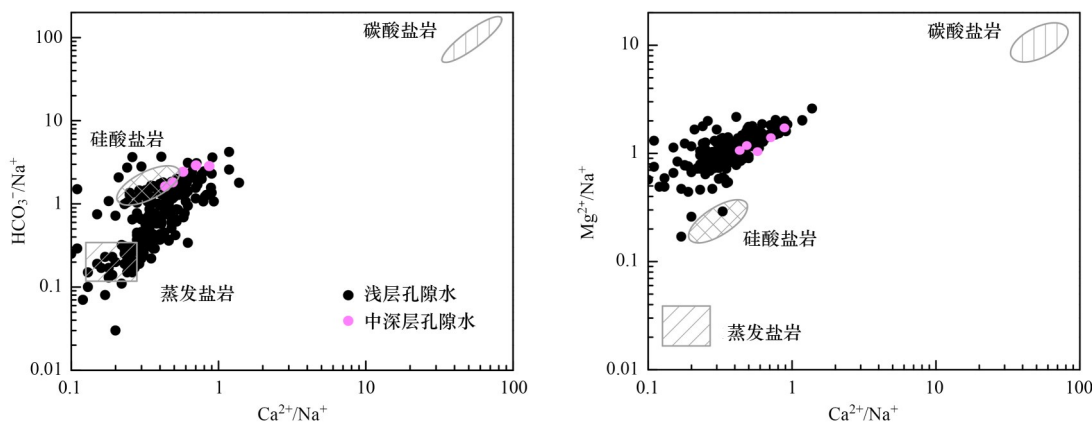


图 7 研究区地下水中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 关系

Fig. 7 Plots of $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ versus $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ and $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ versus $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ in the study area

(2) 阳离子交换作用

在地下水与地层岩土长期接触的相互作用过程中, 阳离子交换吸附作用对地下水化学成分的形成和演变起到重要的作用^[27], 通常用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 的毫克当量浓度比值关系来反映, 若发生阳离子交换作用, 两者比值在 -1 左右^[28,29]。金塔盆地鸳鸯池灌区地下水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 与 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 有着较强的相关关系 ($R^2 = 0.90$), 且比值接近于 -1 (图 8), 说明研究区内地下水中存在一定的阳离子交换作用。

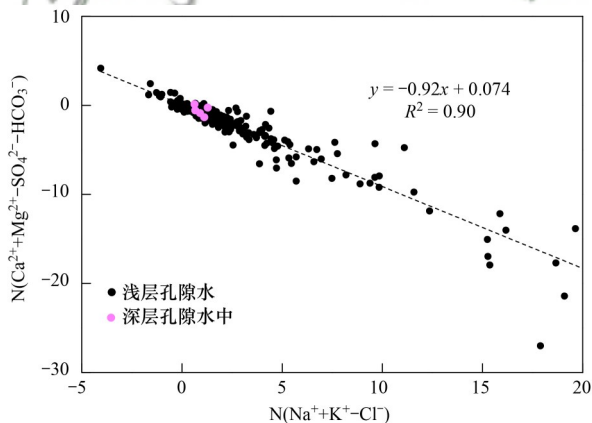


图 8 研究区地下水中 $\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$ 与 $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 关系

Fig. 8 Plots of relationship between $\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$ and $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ in groundwater in study area

为了进一步分析阳离子交替吸附的方向和强度, 可采用氯碱指数 (CAI) 进行分析^[30-32], 通常当地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与含水层颗粒表面吸附的 Na^+ 和 K^+ 进行交换时, 即发生正阳离子交换作用, CAI-I 和 CAI-II 均为负值, 反之, 其 CAI-I 和 CAI-II 值

将会为正值^[33]。如图 9 所示, 92% 的地下水样点氯碱指数为负值, 说明研究区地下水中主要发生正阳离子交换作用, 使地下水中 Na^+ 和 K^+ 浓度升高, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度降低。

$$\text{CAI-I} = \frac{N(\text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{K}^+)}{N(\text{Cl}^-)} \quad (1)$$

$$\text{CAI-II} = \frac{N(\text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{K}^+)}{N(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{NO}_3^-)} \quad (2)$$

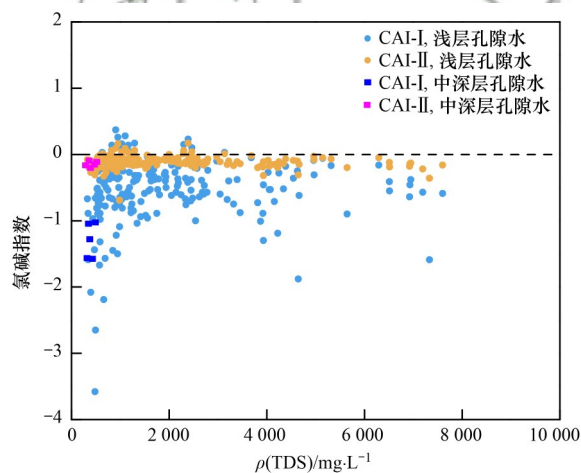


图 9 研究区地下水氯碱指数与 TDS 关系

Fig. 9 Relationship between CAI and TDS of groundwater in the study area

(3) 地下水水化学主要离子来源分析

离子之间的比例关系常用来揭示地下水中离子来源和水文地球化学过程^[32,34]。利用 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 与 Cl^- 比值关系 (毫克当量, 下同) 可判断水体中的 Na^+ 与 K^+ 的主要来源, 盐岩溶解产生 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 与 Cl^- 比值为 1, 而硅酸盐岩风化产生的 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 与 Cl^- 比值大于 1^[32,35]。由图 10(a) 可以看出, 区内孔隙水样点绝大

多数落在岩盐溶解线上方, 且大部分水样点大幅度偏离 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{Cl}^- = 1$ 线, 说明研究区地下水除受岩盐溶解作用影响外, 还受硅酸盐风化作用的强烈影响。

天然水体中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来自碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化及蒸发盐岩(石膏)的溶解, 因此地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 的来源通常采用 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 比值关系来分析。若地下水中 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 全部来自碳酸盐岩风化及蒸发盐岩(石膏)矿物溶解作用, 地下水样点 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 将沿着1:1线分布^[36]。如图10(b)大部分地下水样点沿着1:1线分布, 说明区内地下水中 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐和蒸发岩的风化, 另有少部分地下水样点分布在1:1线下方, 还需要有 Na^+ 、 K^+ 等阳离子来平衡阴离子, 说明区内还同时发生正阳离子交换作用^[34]。

通过进一步使用 PHREEQC 软件对地下水中主要矿物的饱和指数(SI)进行计算, 由图 11 可知地下水中石膏和岩盐的 SI 值与 TDS 呈明显正相关关系, 尤其在 $\rho(\text{TDS})$ 小于 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围相关性极为显著[图 11(a)], SI 值均小于零, 处于未饱和状态, 仍具有一定的溶解能力; 而地下水中白云石和方解石饱和指数均大于零, 表明碳酸盐岩类矿物在地下水中处于饱和状态并发生沉淀反应析出。

通常可采用 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 与 HCO_3^- 比值模型来分析碳酸盐岩矿物方解石和白云石风化溶解对水体中主要物质组成的贡献关系^[30], 当水中仅白云石溶解时 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+} = 1$, 仅方解石溶解时 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+} = 0$, 两者同时参与溶解时, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+} = 0.5$ ^[37]。在图 10(c)中, 区内浅层和中深层孔隙水采样点全部分布在 0.5 比值以上, 说明白云石是区内参与碳酸盐岩溶解的主要矿物组分。

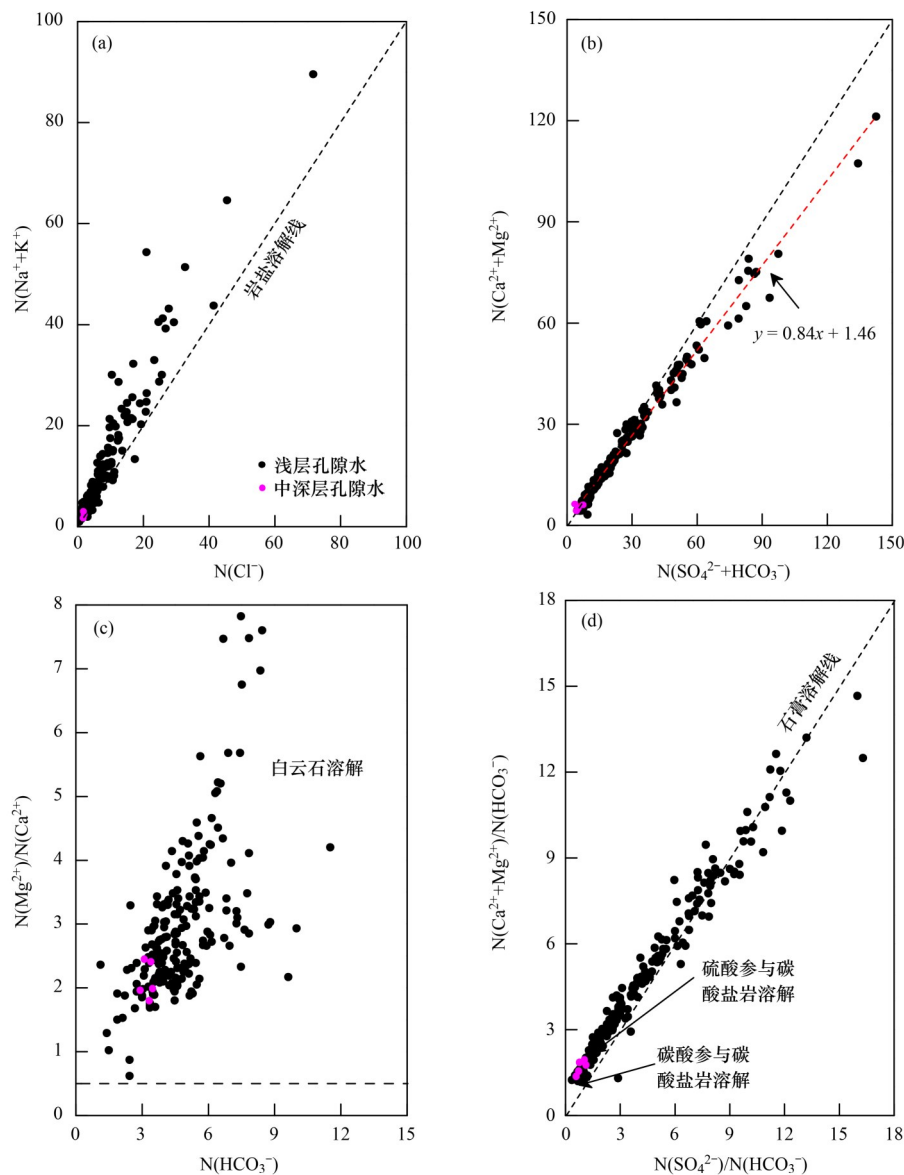


图 10 研究区地下水主要离子比关系

Fig. 10 Relationship between ion concentrations of groundwater in the study area

$(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 与 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 常用来分析碳酸、硫酸参与地下水碳酸盐岩溶解情况. 仅有碳酸参与碳酸盐岩溶解时, $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^- = 1$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^- = 0$; 仅有硫酸参与碳酸盐岩溶解时, $\text{SO}_4^{2-}/$

$\text{HCO}_3^- = 1$, $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^- = 2$ ^[38,39]. 如图 10(d)中, 区内大部分采样点位于 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^- = 2$ 的上方且沿石膏溶解线分布, 说明在碳酸和硫酸参与碳酸盐岩矿物溶解中, 硫酸作用明显多于碳酸作用.

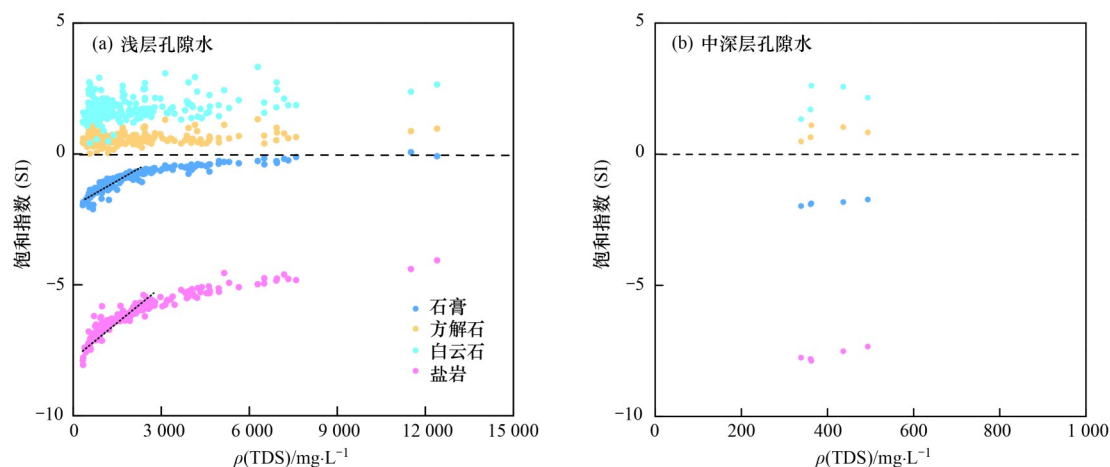


图 11 地下水中主要矿物饱和指数

Fig. 11 Main mineral saturation index in groundwater

(4) 地下水补给来源分析

氧同位素是识别地下水来源的有效手段之一^[40~42]. 本研究利用氧同位素信息对鸳鸯池灌区地下水补给来源开展分析. 当地大气降水线 LMWL: $\delta\text{D} = 6.763\delta^{18}\text{O} - 4.501\text{‰}$ 引自张掖站观测数据. 由图 12 看出, 金塔盆地鸳鸯池灌区地下水氧同位素相关性较好, 但大部分取样点落在当地降水线左上方且偏离较远, 表明金塔盆地鸳鸯池灌区地下水直接接受大气降水补给较少. 进一步以 δD 为特征值对鸳鸯池灌区地下水来源进行分析, 鸳鸯池水库的 δD 值为 -61.47‰ , 鸳鸯池灌区地下水取样 δD 平均值为 -58.82‰ , 两者数值接近, 表明地表水与地下水之间存在密切水力联系, 符合水循环规律^[19].

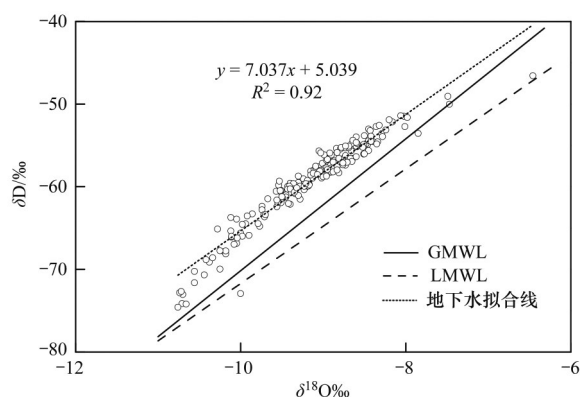


图 12 研究区氧同位素关系

Fig. 12 Plots of D-¹⁸O in groundwater of the study area

3.3.2 地下水化学控制分析

皮尔逊相关分析和因子分析相结合常用于研究变量间的关系, 并进一步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^[43~46]. 本研究选取 TDS、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 NO_3^- 等 9 项指标对金塔盆地鸳鸯池灌区浅层孔隙水中主要离子之间相关关系进行分析(中深层孔隙水样本总量少, 不适宜开展相关分析), 结果见图 13. 相关性分析显示 TDS 与 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 都存在显著正相关关系($P < 0.01$), 相关系数均在 0.75 以上, 说明这些离子是 TDS 的主要来源, 特别是 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 相关系数均大于 0.95, 说明这些离子对 TDS 的贡献较大; SO_4^{2-} 与 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 存在显著正相关关系($P < 0.01$), 相关系数均在 0.75 以上, 说明这 6 种离子可能有共同的来源, 主要来源于如钠长石、钾长石等硅酸盐岩和石膏、芒硝、岩盐等蒸发盐的溶解^[47]. 因子分析前对实测数据进行标准化处理, 然后进行 KMO-Bartlett 球形检验, 结果显示 KMO 值为 0.737, 显著性水平接近于 0, 满足检验标准, 可以开展因子分析. 本研究基于特征值大于 1 的筛选要求, 识别出影响金塔盆地浅层孔隙水水质演化的 2 个主成分因子 F1 和 F2, 累计方差贡献率为 88.53%, 能较好地反映研究区浅层孔隙水水化学数据信息. 进一步对 201 组浅层孔隙水样点的公因子的因子得分采用反距离加权插值法(IDW)进行空间分析, 各公因子在区内空间分布规律如图 14.

F1 方差贡献率为 71.46%, 是研究区内浅层孔隙水水化学组分的主要影响因素, 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 TDS 相关性最大. 研究区内硅酸盐(钾长石、钠长石及云母等)和蒸发盐(石膏等)类矿

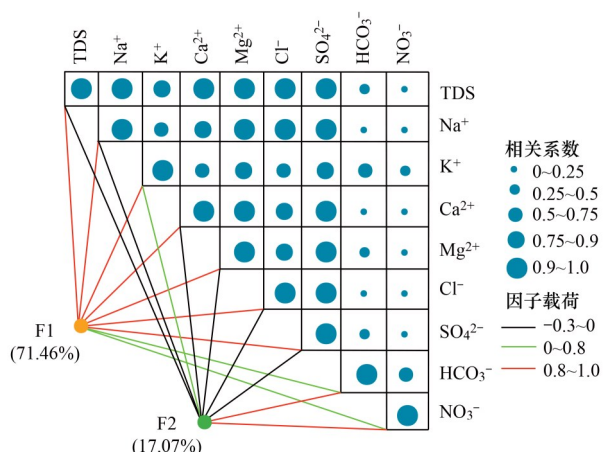


图 13 结合相关分析和因子分析确定离子之间的相关性
Fig. 13 Identifying the correlations between ions by combining correlation analysis and factor analysis

物丰富^[48], 且地下水循环中硅酸盐和蒸发盐岩的风化溶解起主要控制作用, 在地下水径流过程中 TDS 值会随着地下水的溶滤和蒸发不断增大, Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 离子在径流过程中由于溶解度大逐渐成为地下水中主要组分. Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 因子载荷较高推测是

由于区内白云石在碳酸盐岩溶解中贡献较大. 因此, F1 代表溶滤和蒸发浓缩作用. 从图 14(a) 的 F1 得分空间分布来看, F1 得分较高区域主要集中在鸳鸯池灌区扇形平原北部. 研究区第四系浅层孔隙水由金塔县城南部径流携带易溶组分向东北方向运动, 径流过程中不断发生溶滤作用, 至扇形平原北部地下水埋深较浅区域, 蒸发作用进一步导致北部山前地下水离子富集.

F2 方差贡献率为 17.07%, 与 NO_3^- 和 HCO_3^- 的正相关性最大. NO_3^- 可间接反映水体受人类活动影响程度^[44], 研究区内农业活动频繁, 含氮化肥、农药以及未经处理的人畜粪便、生活污水等会对地下水造成一定影响, 从 F2 得分空间分布来看[图 14(b)], 得分较高区域主要集中在金塔县城周边及主要乡镇人口密集地区, 总体上向四周逐渐降低, 从南向北呈递减趋势. 地下水中的 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩矿物的风化溶解, 是由于 F2 得分高值区发生着碳酸盐岩溶解作用. 因此 F2 代表人类活动影响和碳酸盐岩矿物风化溶解作用.

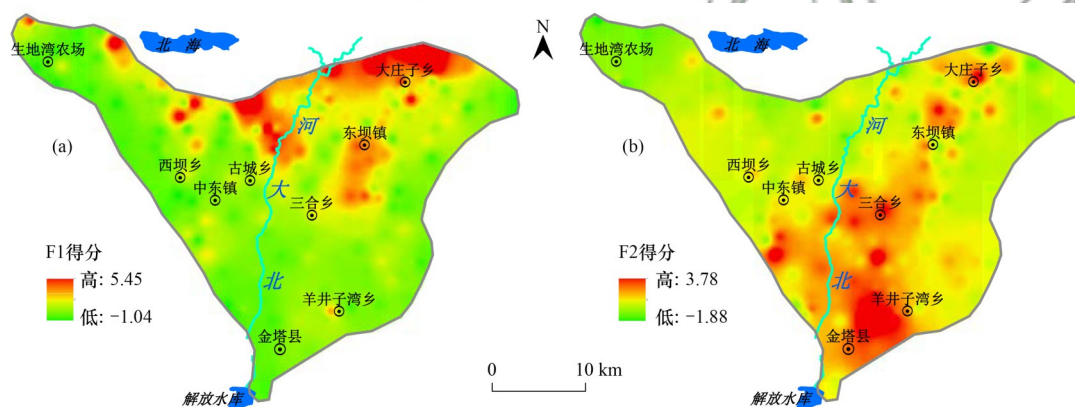


图 14 F1 和 F2 公因子得分空间分布特征

Fig. 14 Spatial distribution characteristics of F1 and F2 common factor scores

4 结论

(1) 金塔盆地鸳鸯池灌区浅层孔隙水阳离子以 Na^+ 和 Mg^{2+} 为主, 两者占阳离子总量的 74% 以上, 阴离子以 SO_4^{2-} 为主, 占阴离子总量的 58% 以上; $\rho(\text{TDS})$ 变化范围为 328.4~12 400.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 2 116.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 中深层孔隙水阳离子以 Mg^{2+} 为主, 阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主; $\rho(\text{TDS})$ 均值为 398.66 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 明显小于浅层孔隙水. 研究区地下水 pH 介于 7.23~8.91 之间, 整体上属于弱碱性水.

(2) 金塔盆地鸳鸯池灌区浅层孔隙水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Mg}$ 型、 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Mg}$ 型、 $\text{SO}_4\text{-Mg}\cdot\text{Na}$ 型和 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Mg}$ 型, 地下水水化学组分主要受岩石风化与蒸发浓缩作用共同控制, 主要离子

来源于硅酸盐和碳酸盐矿物风化溶解, 其中 Na^+ 、 K^+ 主要来源于硅酸盐岩的溶解, SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 主要来源于白云岩等碳酸盐岩风化及硫酸盐溶解, 且地下水中普遍发生了正向阳离子交换作用; 中深层孔隙水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Mg}$ 型, 地下水化学组分主要受岩石风化作用控制.

(3) 相关分析和因子分析结果显示金塔盆地鸳鸯池灌区浅层孔隙水水化学特征主要有两个控制因素: F1(溶滤和蒸发浓缩作用)和 F2(人类活动影响和碳酸盐岩溶解作用)贡献率分别为 71.46% 和 17.07%.

致谢: 感谢何锦、徐蓉桢和周殷竹博士对本论文写作过程中提供的宝贵建议和指导.

参考文献:

[1] 李文鹏, 郝爱兵. 中国西北内陆干旱盆地地下水形成演化模

- 式及其意义[J]. 水文地质工程地质, 1999, **26**(4): 28-32.
- Li W P, Hao A B. The formation and evolution model of groundwater and its significance in Inland Arid Basin, Northwest China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, **26**(4): 28-32.
- [2] Kreins P, Henseler M, Anter J, *et al.* Quantification of climate change impact on regional agricultural irrigation and groundwater demand[J]. Water Resources Management, 2015, **29**(10): 3585-3600.
- [3] 郝爱兵, 康卫东, 黎志恒, 等. 河西走廊张掖盆地含水层的水资源调节能力分析[J]. 地学前缘, 2010, **17**(6): 208-214.
- Hao A B, Kang W D, Li Z H, *et al.* The aquifer's capability of regulating water resources in Zhangye Basin, Hexi Corridor, Gansu Province, China [J]. Earth Science Frontiers, 2010, **17**(6): 208-214.
- [4] Ren C B, Zhang Q Q. Groundwater chemical characteristics and controlling factors in a region of northern China with intensive human activity[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, **17**(23), doi: 10.3390/ijerph17239126.
- [5] 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 等. 雷州半岛地下水水化学特征及控制因素分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5375-5383.
- Peng H X, Hou Q Q, Zeng M, *et al.* Hydrochemical characteristics and controlling factors of groundwater in the Leizhou Peninsula [J]. Environment Science, 2021, **42**(11): 5375-5383.
- [6] 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.
- [7] 何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 等. 鲜水河断裂带虾沱盆地断面地下水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1236-1244.
- He J, Zhang Y K, Zhao Y Q, *et al.* Hydrochemical characteristics and possible controls of groundwater in the Xialatuo Basin section of the Xianshui River [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1236-1244.
- [8] Yidana S M, Bawoyobie P, Sakyi P, *et al.* Evolutionary analysis of groundwater flow: application of multivariate statistical analysis to hydrochemical data in the Densu Basin, Ghana [J]. Journal of African Earth Sciences, 2018, **138**: 167-176.
- [9] Pazand K, Khosravi D, Ghaderi M R, *et al.* Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater in a semi-arid region using major ion chemistry: a case study of Ardestan basin in Central Iran [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2018, **6**: 245-254.
- [10] 何建华, 付素静, 马金珠, 等. 北大河流域地下水化学演化与补给特征[J]. 中国沙漠, 2011, **31**(6): 1630-1638.
- He J H, Fu S J, Ma J Z, *et al.* Groundwater recharge and geochemical evolution in quaternary aquifer of Beidahe River watershed [J]. Journal of Desert Research, 2011, **31**(6): 1630-1638.
- [11] 周鲲鹏, 马金珠, 魏国孝, 等. 酒泉—金塔盆地水化学特征及其演化规律[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, **45**(1): 31-36.
- Zhou K P, Ma J Z, Wei G X, *et al.* Geochemical characteristics and evolution of groundwater in Jiuquan-Jinta Basin [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, **45**(1): 31-36.
- [12] 张清寰, 张瑞瑞, 赵艳萍, 等. 金塔盆地地下水演化及地球化学模拟[J]. 干旱区地理, 2011, **34**(5): 772-778.
- Zhang Q H, Zhang Y R, Zhao Y P, *et al.* Geochemical evolution of groundwater and hydrogeochemical modeling in Jinta Basin [J]. Arid Land Geography, 2011, **34**(5): 772-778.
- [13] 吴玺, 安永会, 魏世博, 等. 黑河下游鼎新谷地浅层地下水水化学特征及演化规律[J]. 干旱区资源与环境, 2021, **35**(9): 103-109.
- Wu X, An Y H, Wei S B, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution of shallow groundwater in Dingxin valley, lower reaches of Heihe River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, **35**(9): 103-109.
- [14] 王文祥, 李文鹏, 蔡月梅, 等. 黑河流域中游盆地水文地球化学演化规律研究[J]. 地学前缘, 2021, **28**(4): 184-193.
- Wang W X, Li W P, Cai Y M, *et al.* The hydrogeochemical evolution of groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2021, **28**(4): 184-193.
- [15] Güler C, Thyne G D. Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA [J]. Journal of Hydrology, 2004, **285**(1-4): 177-198.
- [16] Ma R, Shi J S, Liu J C, *et al.* Combined use of multivariate statistical analysis and hydrochemical analysis for groundwater quality evolution: a case study in North Chain Plain [J]. Journal of Earth Science, 2014, **25**(3): 587-597.
- [17] 何世水, 葛生年. 金塔鸳鸯池灌区地下水动态演变及其对环境影响[J]. 中国沙漠, 1986, **6**(3): 37-51.
- He S S, Ge S N. The change of underground water in Jinta Yuanyangchi Irrigation area and its influence on the environment [J]. Journal of Desert Research, 1986, **6**(3): 37-51.
- [18] 李胜双. 金塔盆地水资源承载力分析及其调控模式研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- Li S S. Study on water resources carrying capacity and regulation model in Jinta Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [19] 吴玺, 安永会, 尹德超, 等. 河西走廊黑河流域 1: 5 万水文地质调查二级项目成果报告[R]. 保定: 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 2019.
- [20] 张涛, 何锦, 李敬杰, 等. 蛤蟆通河流域地下水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.
- [21] 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 等. 雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4924-4935.
- Zhang H X, Wu Y, Luo W Y, *et al.* Hydrogeochemical investigations of groundwater in the Lingbei area, Leizhou Peninsula [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4924-4935.
- [22] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4537-4545.
- Zhang T, Cai W T, Li Y Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River Basin [J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4537-4545.
- [23] 何锦, 张怀胜, 蔡五田, 等. 衡水市桃城区浅层地下水咸化成因[J]. 环境科学, 2023, **44**(8): 4314-4324.
- He J, Zhang H S, Cai W T, *et al.* Mechanism of salinization of shallow groundwater in Taocheng District, Hengshui City [J]. Environmental Science, 2023, **44**(8): 4314-4324.
- [24] Fan B L, Zhao Z Q, Tao F X, *et al.* Characteristics of carbonate, evaporite and silicate weathering in Huanghe River basin: a comparison among the upstream, midstream and downstream [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, **96**: 17-26.
- [25] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [26] Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs

- Diagram[J]. *Applied Geochemistry*, 2018, **97**: 209-212.
- [27] 沈照理, 朱宛华, 钟佐荣. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [28] 刘元晴, 周乐, 吕琳, 等. 牟汶河上游孔隙水化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1429-1439.
- Liu Y Q, Zhou L, Lv L, *et al.* Hydrochemical characteristics and control factors of pore-water in the middle and upper reaches of Muwen River[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1429-1439.
- [29] Xiao J, Jin Z D, Wang J, *et al.* Hydrochemical characteristics, controlling factors and solute sources of groundwater within the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau[J]. *Quaternary International*, 2015, **380-381**: 237-246.
- [30] 董维红, 孟莹, 王雨山, 等. 三江平原富锦地区浅层地下水水化学特征及其形成作用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, **47**(2): 542-553.
- Dong W H, Meng Y, Wang Y S, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation of the shallow groundwater in Fujin, Sanjiang Plain[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, **47**(2): 542-553.
- [31] Thakur T, Rishi M S, Naik P K, *et al.* Elucidating hydrochemical properties of groundwater for drinking and agriculture in parts of Punjab, India[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(6), doi: 10.1007/s12665-016-5306-1.
- [32] 刘元晴, 周乐, 吕琳, 等. 河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2601-2612.
- Liu Y Q, Zhou L, Lv L, *et al.* Hydrochemical characteristics and control factors of groundwater in Shunping County, Hebei Province[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2601-2612.
- [33] Charfi S, Zouari K, Feki S, *et al.* Study of variation in groundwater quality in a coastal aquifer in north-eastern Tunisia using multivariate factor analysis[J]. *Quaternary International*, 2013, **302**: 199-209.
- [34] 张景涛, 史浙明, 王广才, 等. 柴达木盆地大柴旦地区地下水水化学特征及演化规律[J]. *地质前缘*, 2021, **28**(4): 194-205.
- Zhang J T, Shi Z M, Wang G C, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the Dachaidan area, Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28**(4): 194-205.
- [35] 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.
- [36] Ma R, Wang Y X, Sun Z Y, *et al.* Geochemical evolution of groundwater in carbonate aquifers in Taiyuan, northern China[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(5): 884-897.
- [37] Pu J B, Yuan D X, Xiao Q, *et al.* Hydrogeochemical characteristics in karst subterranean streams: a case history from Chongqing, China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2015, **30**(3): 307-319.
- [38] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3220-3229.
- Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Influence of sulfuric acid to karst hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the upper and middle reaches of the Wujiang River[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3220-3229.
- [39] 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.
- [40] 李广, 章新平, 张立峰, 等. 长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2094-2101.
- Li G, Zhang X P, Zhang L F, *et al.* Stable isotope characteristics in different water bodies in Changsha and implications for the water cycle[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2094-2101.
- [41] 王广才, 王焰新, 刘菲, 等. 基于文献计量学分析水文地球化学研究进展及趋势[J]. *地质前缘*, 2022, **29**(3): 25-36.
- Wang G C, Wang Y X, Liu F, *et al.* Advances and trends in hydrogeochemical studies: insights from bibliometric analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, **29**(3): 25-36.
- [42] Li Y H, Bian J M, Li J L, *et al.* Hydrochemistry and stable isotope indication of natural mineral water in Changbai Mountain, China[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, **40**, doi: 10.1016/j.ejrh.2022.101047.
- [43] Yang W J, Zhao Y, Wang D, *et al.* Using principal components analysis and IDW Interpolation to determine spatial and temporal changes of surface water quality of Xin'anjiang River in Huangshan, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(8), doi: 10.3390/ijerph17082942.
- [44] 艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 等. 西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2023, **44**(12): 6767-6777.
- Yan Y, Gao R Z, Liu T X, *et al.* Hydrochemical characteristics and control factors of groundwater in the Northwest Salt Lake Basin[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(12): 6767-6777.
- [45] 刘春燕, 于开宁, 张英, 等. 西宁市浅层地下水化学特征及形成机制[J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3228-3236.
- Liu C Y, Yu K N, Zhang Y, *et al.* Characteristics and driving mechanisms of shallow groundwater chemistry in Xining City[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(6): 3228-3236.
- [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] 杨郢城, 沈照理, 文冬光, 等. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地硫酸盐的水文地球化学特征及来源[J]. *地球学报*, 2008, **29**(5): 553-562.
- Yang X C, Shen Z L, Wen D G, *et al.* Hydrochemical characteristics and sources of sulfate in groundwater of the Ordos Cretaceous Groundwater Basin[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2008, **29**(5): 553-562.
- [48] 陈建龙. 甘肃金塔盆地地下水水化学特征及其演化模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- Chen J L. Hydrochemical characteristics and its evolution modeling of groundwater in Jinta Basin, Gansu[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiang, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)