

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM_{2.5} 时空演变格局及其影响因素 张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)

中原城市群 PM_{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响 周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)

长株潭城市群 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)

张掖市城区大气细颗粒物 PM_{2.5} 的化学组成及来源解析 潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)

2018 ~ 2019 年冬季天津和青岛 PM_{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估 赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)

青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析 孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)

2015 ~ 2021 年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)

海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别 杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)

缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测 严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)

长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送 刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱军, 冉祥滨 (5478)

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析 郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)

磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化 张坤锋, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)

疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估 樊月婷, 昌盛, 张坤锋, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估 昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤锋, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)

平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因 孙龙, 刘廷奎, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)

三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响 张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)

不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环 刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)

2011 ~ 2019 年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评估 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)

生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制 苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)

锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用 高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)

KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除 徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)

改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI) 的吸附机制 练建军, 邹洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)

桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI) 刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢颖辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)

镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb²⁺ 和 Zn²⁺ 的去除 吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)

钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析 程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评估 李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)

重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析 马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)

典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析 官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)

地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析: 以重庆城口地区为例 刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估 杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果 伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 唯福庆, 赵鹏 (5769)

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 姬明飞, 吴雪姣, 李晚哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉 (5778)

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制 高羽, 刘雨辰, 郭晓芳, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响 王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性 竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)

添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)

基于 g-C₃N₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性 朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测 杨旭, 刘贤赵 (5850)

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)

《环境科学》第43卷(2022年)总目录 (5873)

《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607, 5741, 5768)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系

肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦*, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨

(河南理工大学资源环境学院, 焦作 454003)

摘要:以小浪底水库下游武陟湿地为研究区,综合运用数理统计、水文地球化学和同位素技术相结合的方法,研究了小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系.结果表明,小浪底水库调水调沙期间下游水体阳离子以 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主,阴离子以 HCO_3^- 为主.调水调沙初期河水水化学类型为 HCO_3^- - $\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,地下水水化学类型为 HCO_3^- - $\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 型;调水调沙中期和末期河水均为 HCO_3^- - SO_4 - $\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型,地下水均为 HCO_3^- - $\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型.水库水沙调控过程中,水体的水化学组分从受碳酸盐和硅酸盐矿物溶解的共同作用过渡到以碳酸盐岩溶解为主.随着调水调沙的进行,河水与近岸带地下水的氢氧同位素组成逐渐富集,表明河水来源于上游水库表层水和大气降水,地下水则受到河水与大气降水的共同补给.在上游来水与水文地质条件等因素影响下,滨河湿地地下水与河水之间的转化主要发生在近岸带(距离河岸0~100 m内),表现为河水补给地下水,随着调水调沙的进行,河水对地下水的补给增强.

关键词:水沙调控;水化学;氢氧稳定同位素;转化关系;小浪底水库

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5499-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112130

Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River

XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian*, GUO Xiao-ming, CHEN Fei-hong, YANG Chen

(Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: The influences from the dam and water and sediment regulation of Xiaolangdi Reservoir on the transformation relationship of groundwater and river water in the lower Yellow River remain unknown. Here, the riparian wetlands downstream of Xiaolangdi Reservoir were selected as the study area, located in Wuzhi, Henan province. To illustrate the relationship between groundwater and river water conversion in the riparian wetland during the water and sediment regulation of Xiaolangdi Reservoir, methods including mathematical statistics, hydrogeochemistry, and isotope techniques were comprehensively used. The results showed that the main cations and anions of the river water and groundwater were Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , and HCO_3^- during water and sediment regulation. The river water and groundwater were HCO_3^- - $\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ type and HCO_3^- - $\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ type during the early period of water and sediment regulation and HCO_3^- - SO_4 - $\text{Na}\cdot\text{Mg}$ and HCO_3^- - $\text{Na}\cdot\text{Mg}$ type during the middle and late period of water and sediment regulation, respectively. The major chemical processes of river water and groundwater were controlled by carbonate and silicate rock weathering during the early water and sediment regulation period. In contrast, they were mainly derived from the dissolution of carbonate rocks during the middle and late water and sediment regulation period. Hydrogen and oxygen isotopes in river water and groundwater in the riparian zone within 100 meters of the river were relatively enriched during the middle and late period of water and sediment regulation, thus indicating that downstream river water was mainly controlled by surface water of the upstream reservoir and atmospheric deposition recharge, whereas groundwater was recharged by a mixture of river water and atmospheric deposition. Under upstream runoff and hydrogeological conditions, river water and groundwater transformation were concentrated in the riparian zone within 100 meters of the river, generally manifested in river water recharge groundwater. The recharge increased obviously during the middle and late water and sediment regulation period. These hydrochemical and isotopic characteristics of the groundwater and river water interaction in the riparian wetland contribute toward the ecological conservation of the Yellow River.

Key words: water and sediment regulation; hydrochemistry; hydrogen and oxygen stable isotopes; transformation relationship; Xiaolangdi Reservoir

滨河湿地是河岸带的重要组成部分,水陆界面特征典型,是地下水与地表水之间典型的水文过渡带^[1].大坝建设改变了河流的自然季节流量模式,引起河流水文、洪水频率、洪水峰值水位、沉积物输送和河岸地下水流动等一系列河流水文过程与特征的变化^[2~4].滨河湿地与河流直接连通,河流水文情势的变化导致河流与滨河湿地地下水之间水力交换增强,同时也影响了河流廊道的生物地球化学过程以及化学组分的传输过程^[5~7].因此,研究滨河湿地水体的水化学特征及补给来源,揭示地下水与地表水之间的转化关系及其机制,是探索变化环境下湿地生态系统保护与恢复的关键与核心问题.

天然水体的水化学组分记录了水体的形成、运

移和转化途径^[8],氢氧稳定同位素因分馏作用揭示了不同水体的补给来源及相互转化关系^[9].因此,将水化学方法与氢氧同位素技术相结合是判定地下水与地表水转化关系的一种有效示踪技术手段^[10,11].目前国内外学者对流域地下水与地表水的水化学和氢氧同位素特征进行了大量研究,探讨了流域水体水化学的主要控制因素、补给来源和水循环过程中的相互作用机制^[12~16].有研究发现,受气

收稿日期: 2021-12-13; 修订日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007175, 41371501, U1704241); 高校基本科研业务费(NSFRF200326); 河南理工大学博士基金项目(B2017-64)

作者简介: 肖春艳(1980~),女,博士,副教授,主要研究方向为湿地水文过程, E-mail: xiaochunyan@hpu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhaotq@hpu.edu.cn

候、地质条件和河流水文情势等共同影响,水体的水化学特征、补给规律和转化关系在时间和空间上均具有差异性^[17,18]。滨河湿地在涨水、丰水和退水等河流水文变化的影响下,地下水与地表水转化关系更加密切,水体离子以及水分补给来源愈加多变^[19,20]。因此,结合水化学组成及氢氧同位素特征可以更好地理解全球变化和人类活动对滨河湿地水文过程的影响,为区域水资源管理与可持续利用提供科学依据^[21,22]。

近年来,黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略^[23],沿黄湿地生态保护是黄河流域生态保护的重要组成部分。水文过程是湿地生态保护与修复的关键,而地下水与地表水相互作用又是研究湿地水文过程的关键环节^[24~26]。目前关于黄河流域湿地水文过程方面的研究工作主要集中在黄河三角洲湿地^[27]以及黄河源区高寒湿地^[28],针对黄河中下游湿地的研究相对较少。小浪底水库水沙调控过程改变了下游黄河湿地的水文过程,导致河流与滨河湿地地下水之间的相互作用愈加频繁^[29]。本文以小浪底大坝下游黄河武陟湿地为研究区,采用水化学和氢氧同位素分析相结合的方法,考察小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水的转化关系,以期为黄河中下游滨河湿地生态保护与恢复提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄河中游小浪底大坝下游约 100 km 处的河南省武陟县嘉应观乡东营村的河滩湿地内(112°21' ~ 113°45'E, 34°42' ~ 34°59'N)。该区域属中纬度暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均降雨量为 324 ~ 998 mm,暴雨多集中在 7 月中旬至 8 月中旬。该区域位于广阔的冲积平原,属黄河河床地貌,地势平坦,土壤主要由砂土、细砂土和黏土组成。该区域含水层底板埋深 45.0 ~ 69.0 m,层厚 18.6 ~ 54.8 m,其中砂层厚度 20 ~ 35 m。随着小浪底水库的建成,原黄河滩区自然湿地大规模开发利用,大面积的滩地转变为人工林和旱地等。目前,滩区土地几乎已经全部开发成农业用地,主要种植小麦、玉米和花生等农作物,零星种植地黄和牛膝等经济作物,滩区湿地退化现象严重。

1.2 样品采集与分析

在河漫滩上沿垂直河岸线方向上按 50、100、200、400、600、800、1 000、2 000 和 3 000 m 布设了 9 口地下水观测井,观测井编号分别用 1 ~ 9 表示(图 1)。地下水观测井为武陟黄河滩地国土土地整

理项目的农田灌溉井,井深 50 m,单井出水量为 33 m³·h⁻¹,过滤器长度为 0.35 m,沉淀管长度 3 m,井管高出地面 0.3 m。在距离河岸 0 m 开凿了 0 号观测井用来监测河水水位。0 号观测井采用 PVC 管开凿,直径 2.0 cm,埋深 50 m,管下部开 3 排孔径 1 cm、间距 10 cm 的入水孔,并用过滤纱网包裹。

于 2021 年小浪底水库调水调沙期间进行水样采集。2021 年小浪底水库调水调沙分为两个阶段,其中 6 月 19 日至 7 月 3 日为小浪底水库泄水阶段(6 月 19 日以 2 000 m³·s⁻¹ 的流量开始泄水,之后每天逐渐增加泄水流量,6 月 25 日增加至最大泄水流量 4 500 m³·s⁻¹); 7 月 4 ~ 9 日为小浪底水库排沙阶段,整个水沙调控过程历时 21 d。根据调水、调沙阶段和泄水流量,将小浪底水库水沙调控分为 3 个时期,即调水调沙初期(6 月 19 ~ 24 日)、调水调沙中期(6 月 25 日至 7 月 3 日)和调水调沙末期(7 月 4 ~ 9 日)。小浪底水库调水调沙期间每天进行 1 次采样分析,分别采集河水和地下水水样,共采集了 21 个河水水样和 189 个地下水水样。检测测试指标包括:阳离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)、阴离子(Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、HCO₃⁻)、总溶解固体(TDS)、电导率(EC)、pH 和同位素丰度值(δD、δ¹⁸O)。

在河边水流速度较大的地方采集河水水样,一般选取远离河岸 20 cm 的区域,每个样品用 2 个 1 000 mL 的聚乙烯采样瓶装满。采样时首先用河水将采样瓶冲洗 3 遍,然后用采水器(3 L 有机玻璃采水器)将河水提上来,采水器上有两个单向阀门,提水时阀门自动关闭,下放时阀门打开,立即将水样装入采样瓶,采样瓶装满后马上盖好瓶盖,最后用胶带密封瓶口,防止与空气交换。用同样的方法采集地下水,每次采集地下水水样时将采水器标定长度的绳索下降至 25 m 附近,确保每次采集相同埋深的地下水样品。

水化学测试样品采用 1000 mL PET 塑料瓶采集,取样后采用封口膜进行密封;氢氧同位素测试样品采用 100 mL PET 棕色塑料瓶采集,取样后快速用封口膜密封。水样采集后,加酸调节至 pH < 2.0,置于 4℃ 的保温箱内冷藏保存,当天运回实验室后采用 0.45 μm 的微孔滤膜过滤,置于 4℃ 条件下冷藏保存,24 h 内完成各项指标的测定。

TDS、EC 和 pH 采用手持哈希便携式水质分析仪(HQ40d)在采集现场进行检测;阳离子(K⁺、Na⁺、Ca⁺、Mg⁺)和阴离子(Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻)采用离子色谱仪(ICS-2100, USA)进行测定, HCO₃⁻ 采用盐酸滴定法进行测定; δD、δ¹⁸O 采用液态水和水汽同位素分析仪(L2130-I, USA)进行测定。



图1 采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling sites in the study area

1.3 数据处理

采用描述性统计分析各水体参数,讨论水化学组成及氢氧同位素的时空变化特征;制作 Piper 三线图判断水化学类型;利用 Gibbs 图和主要离子的比值图分析水化学组来源;利用氢氧同位素 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系分析地下水与河水的补给来源. Piper 三线图使用 Aquachem 软件绘制,其他图例使用 Origin 软件绘制.

2 结果与分析

2.1 水化学特征

小浪底水库调水调沙期间研究区地下水与河水水化学参数特征统计结果如表 1 所示. 从中可知,研究区河水与地下水 pH 值分别介于 8.11 ~ 8.20 和 7.67 ~ 8.17 之间,水质整体呈弱碱性. TDS 在河水中介于 363.13 ~ 431.22 $mg \cdot L^{-1}$ 之间,在地下水中介于 260.13 ~ 477.64 $mg \cdot L^{-1}$ 之间,均为低矿化度淡水 ($TDS < 1000 mg \cdot L^{-1}$). EC 在河水中介于 805.78 ~ 956.88 $\mu S \cdot cm^{-1}$ 之间,在地下水中介于 577.22 ~ 1059.89 $\mu S \cdot cm^{-1}$ 之间. 总体上,水体中阳离子浓度大小依次为: $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$, 在河水中的浓度平均值分别为 79.58、29.74、27.03 和 3.14 $mg \cdot L^{-1}$, 在地下水中的浓度平均值分别为 46.57、36.47、30.75 和 1.34 $mg \cdot L^{-1}$; 水体中阴离

子浓度大小依次为: $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$, 在河水中的浓度平均值分别为 190.70、130.00、69.89 和 6.96 $mg \cdot L^{-1}$, 在地下水中的浓度平均值分别为 334.35、58.95、42.20 和 0.75 $mg \cdot L^{-1}$. 随着小浪底水库调水调沙的进行,距离河岸 100 m 内,地下水的 EC、阳离子 (Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+) 和 HCO_3^- 浓度变化均表现为先下降后上升的趋势; 河水中 EC、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 以及 HCO_3^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 则均呈现下降趋势.

Piper 三线图直观反映了水体的化学组成特征^[30]. 根据研究区不同采样时期水体的 Piper 三线图可以看出(图 2), 研究区水体中阳离子以 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主, 阴离子以 HCO_3^- 为主. 调水调沙初期、中期以及末期地下水中阳离子主要是 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 分别占阳离子总浓度的 31.56%、44.23% 和 23.30%, 49.79%、18.59% 和 30.21% 以及 47.30%、21.93% 和 29.41%; 河水中阳离子以 Na^+ 为主, 分别占阳离子总浓度的 51.99%、65.18% 以及 55.56%. 调水调沙初期、中期以及末期地下水中阴离子以 HCO_3^- 为主, 分别占阴离子总浓度的 75.82%、75.90% 以及 78.25%; 河水中阴离子主要是 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- , 分别占阴离子总浓度的 49.25%、29.45% 和 19.01%, 46.42%、32.34% 和 19.25% 以及 48.11%、36.82% 和 14.19%. 调水调沙初期河水水化学类型为 $HCO_3^- \cdot Na \cdot Ca \cdot Mg$ 型, 地下水水化学类型为 $HCO_3^- \cdot Ca \cdot Mg \cdot Na$ 型; 调水调沙中期和末期河水均为 $HCO_3^- \cdot SO_4 \cdot Na \cdot Mg$ 型, 地下水均为 $HCO_3^- \cdot Na \cdot Mg$ 型.

2.2 水体氢氧同位素特征

水体氢氧稳定同位素 (δD 和 $\delta^{18}O$) 是水循环过程的重要示踪剂, 常用来指示水分来源和运动过

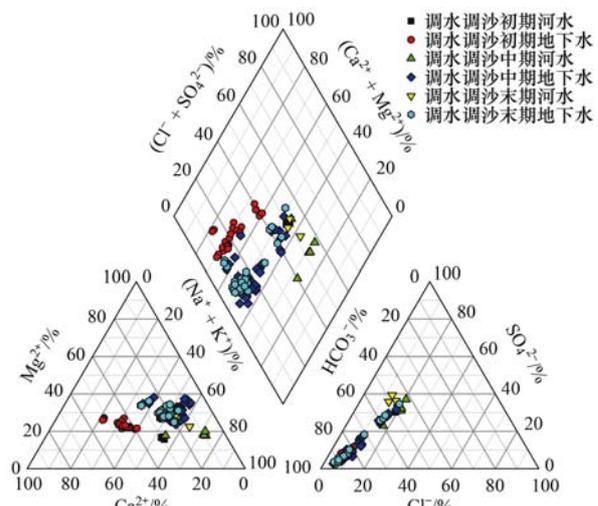


图2 研究区地下水与河水 Piper 三线图

Fig. 2 Piper three-line figure of groundwater and river water in the study area

表 1 研究区地下水与河水化学参数特征¹⁾

Table 1 Characteristics of groundwater and river water hydrochemical parameters in the study area

时期	井编号	pH	EC /μS·cm ⁻¹											TDS /mg·L ⁻¹	δD /‰	δ ¹⁸ O /‰
			Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻						
河水		8.18±0.25	956.88±46.80	93.11±0.89	3.73±0.37	29.45±1.63	52.81±1.79	211.77±7.38	81.72±2.60	126.65±1.56	9.84±0.34	431.22±21.09	-64.10±2.44	-9.36±0.67		
	1	7.99±0.04	1003.23±10.83	75.41±4.58	2.68±0.55	44.12±2.24	83.24±3.82	317.55±6.70	79.38±1.14	135.79±8.40	0.43±0.11	452.11±4.88	-62.85±1.62	-9.00±0.54		
	2	7.96±0.09	993.62±11.14	71.73±8.61	2.32±0.09	45.06±2.69	84.03±5.98	309.91±0.82	79.21±3.38	136.42±3.77	—	447.78±5.02	-62.99±0.48	-9.02±0.40		
	3	7.98±0.09	797.36±11.57	47.69±1.94	1.39±0.22	39.40±1.01	74.75±4.29	354.18±3.58	49.23±4.35	63.94±7.74	—	359.33±5.21	-68.75±2.31	-9.93±0.66		
	4	7.98±0.08	669.40±39.84	38.40±1.79	1.11±0.17	32.74±1.42	56.24±3.75	360.00±13.98	25.28±2.13	14.54±1.41	0.09±0.06	301.67±17.95	-73.00±2.33	-10.41±0.65		
	5	7.99±0.06	746.08±16.16	47.09±2.46	0.96±0.25	37.54±2.97	70.20±3.06	390.93±17.98	36.07±3.50	36.94±6.23	—	336.22±7.28	-72.12±2.52	-10.32±0.67		
	6	8.07±0.08	721.17±12.22	48.46±1.39	0.97±0.26	34.77±1.59	69.45±3.3	357.58±0.60	36.79±2.94	43.61±4.81	2.45±0.93	325.00±5.51	-71.58±2.24	-10.28±0.63		
	7	8.04±0.08	842.73±6.17	57.37±3.26	2.46±1.60	38.70±3.39	78.90±8.17	363.64±5.66	51.70±3.46	82.97±7.19	—	379.78±2.78	-71.54±2.49	-10.40±0.72		
	8	7.96±0.08	658.55±5.28	45.32±1.57	1.00±0.09	32.37±1.97	62.62±3.92	334.19±4.84	29.12±5.53	34.12±1.04	0.90±0.09	296.78±2.38	-75.91±2.45	-10.88±0.69		
9	7.93±0.11	695.54±25.22	33.46±1.56	0.73±0.09	38.63±2.56	72.28±4.38	378.32±11.97	25.39±0.87	40.85±2.51	0.67±0.33	313.45±11.37	-73.35±0.62	-10.51±0.43			
河水		8.20±0.29	914.80±79.51	85.60±2.35	3.17±0.28	24.10±3.39	18.45±14.34	180.90±16.65	75.01±8.82	126.01±4.40	7.76±1.48	412.26±35.83	-62.06±0.67	-8.88±0.01		
	1	7.93±0.20	1052.73±32.66	62.59±12.75	1.38±0.49	28.97±6.57	21.49±61.89	307.86±16.63	74.36±15.90	163.37±6.36	—	474.42±14.72	-60.45±0.04	-8.58±0.01		
	2	7.98±0.17	1054.40±16.48	61.54±4.04	1.79±0.42	35.85±3.39	27.51±3.11	281.00±41.42	81.97±3.06	140.57±4.33	—	475.17±7.43	-62.06±0.04	-8.83±0.02		
	3	8.00±0.21	693.10±43.46	37.10±3.73	1.70±1.04	23.93±3.02	10.41±3.39	299.21±36.03	32.68±7.78	36.97±2.82	—	321.22±9.26	-68.96±0.87	-9.87±0.02		
	4	8.00±0.15	640.67±34.42	34.56±2.92	1.14±0.07	23.78±2.69	9.84±5.85	317.38±35.20	21.49±4.04	13.48±2.72	0.52±0.21	288.72±15.51	-72.02±0.11	-10.17±0.03		
	5	8.16±0.28	709.47±42.48	38.50±4.03	0.92±0.16	24.81±2.90	15.70±5.30	348.91±29.46	30.33±4.80	23.25±7.54	0.30±0.08	319.73±19.14	-71.97±0.00	-10.21±0.04		
	6	8.17±0.22	722.87±23.94	39.91±3.70	0.93±0.20	22.98±3.11	12.95±3.88	316.64±23.53	32.63±3.55	32.30±5.64	1.89±0.87	325.76±10.79	-72.76±0.74	-10.46±0.02		
	7	8.13±0.18	712.53±67.04	39.47±2.75	1.11±0.15	22.25±1.07	14.83±2.56	318.12±17.54	39.41±6.15	36.68±15.69	—	321.10±30.21	-74.75±0.02	-10.58±0.01		
	8	7.97±0.15	659.87±11.92	38.70±1.52	1.02±0.08	21.61±1.41	14.05±3.72	303.79±17.48	31.71±1.82	31.38±1.70	0.70±0.50	297.37±5.37	-70.85±0.79	-10.22±0.03		
9	8.03±0.18	717.47±24.07	28.35±3.42	0.83±0.24	26.79±3.18	15.33±4.17	324.80±31.87	25.36±2.68	39.22±5.50	0.61±0.26	323.33±10.85	-71.21±0.10	-10.07±0.02			
河水		8.11±0.20	805.78±25.95	60.03±10.26	2.52±0.60	27.53±0.43	17.96±0.47	179.44±0.95	52.93±6.59	137.35±8.61	3.28±0.58	363.13±11.70	-61.50±0.13	-8.58±0.03		
	1	7.78±0.08	1058.56±10.24	82.58±0.92	2.03±0.05	39.34±1.04	30.97±0.85	317.89±2.98	72.89±16.06	130.89±33.29	—	477.04±4.61	-59.70±0.03	-8.26±0.03		
	2	7.75±0.02	1059.89±6.80	71.07±1.47	2.23±0.17	41.07±1.39	38.02±1.97	323.06±2.28	102.18±23.19	181.55±47.55	—	477.64±3.06	-60.76±0.10	-8.39±0.04		
	3	7.68±0.03	633.78±11.42	38.85±1.87	1.37±0.07	26.52±1.51	15.18±0.97	338.08±4.45	22.28±1.01	23.63±1.08	0.49±0.01	285.61±5.14	-68.39±1.11	-9.54±0.01		
	4	7.67±0.05	577.22±1.75	34.12±1.72	0.96±0.05	24.95±1.23	13.32±1.39	331.93±0.35	16.46±0.45	13.36±0.21	—	260.13±0.79	-70.43±0.03	-9.69±0.02		
	5	7.89±0.13	659.11±24.64	37.13±2.18	0.95±0.05	25.25±1.23	20.07±1.90	366.89±6.94	25.96±2.44	14.24±2.84	0.34±0.01	297.03±11.11	-71.64±0.08	-9.86±0.01		
	6	7.88±0.04	710.00±59.00	39.05±5.70	0.91±0.22	23.92±2.94	17.96±4.68	357.04±14.60	29.85±6.15	29.88±13.57	—	319.96±26.59	-71.26±0.39	-9.84±0.02		
	7	7.79±0.03	660.89±4.23	38.46±1.34	1.15±0.06	22.93±0.93	16.84±3.97	332.03±8.82	31.11±0.70	25.13±0.20	0.35±0.01	297.83±1.91	-73.15±0.89	-10.33±0.04		
	8	7.71±0.02	634.22±2.73	39.17±1.51	1.13±0.13	22.60±1.11	16.73±1.31	313.95±9.96	30.32±2.09	28.89±2.21	—	285.81±1.23	-75.37±0.05	-10.59±0.01		
9	7.74±0.02	700.00±28.96	31.24±0.87	1.03±0.01	29.37±1.10	21.78±5.55	362.46±8.79	26.16±0.49	37.75±4.71	—	315.46±13.05	-71.97±0.31	-9.97±0.04			

1) “—”表示未检出

程^[31].小浪底水库调水调沙期间研究区河水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值变化范围分别为 $-64.10\text{‰} \sim -61.50\text{‰}$ 和 $-9.36\text{‰} \sim -8.58\text{‰}$, 平均值分别为 -62.55‰ 和 -8.94‰ ; 调水调沙初期河水 δD 和 $\delta^{18}O$ 平均值分别为 -64.10‰ 和 -9.36‰ , 调水调沙中期分别为 -62.06‰ 和 -8.88‰ , 调水调沙末期分别为 -61.50‰ 和 -8.58‰ . 地下水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值变化范围分别为 $-75.91\text{‰} \sim -59.70\text{‰}$ 和 $-10.88\text{‰} \sim -8.26\text{‰}$, 平均值分别为 -69.62‰ 和 -9.86‰ ; 调水调沙初期地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 平均值分别为 -70.23‰ 和 -10.08‰ , 调水调沙中期分别为 -69.45‰ 和 -9.89‰ , 调水调沙末期分别为 -69.19‰ 和 -9.61‰ . 由表 1 可以看出, 近岸带(距离河岸 $0 \sim 100 \text{ m}$ 内)河水同位素与地下水接近, 而在离河岸较远处(距离河岸 200 m 之外)河水同位素较地下水富集. 随着小浪底水库调水调沙的进行, 近岸带地下水氢氧同位素逐渐富集, 距离河岸较远处地下水氢氧同位素变化较小.

3 讨论

3.1 基于水化学特征的地下水与河水成因分析

Gibbs 图是区分地下水和河水水化学影响因素的重要手段, 可以较直观地反映其水化学组分受大气降水, 风化和蒸发结晶作用的影响程度, 定性判断水化学组分来源^[32,33]. 一般而言, 以大气降水作用为主导因素的样点分布在 Gibbs 图右下角, 受岩石风化作用影响的样点分布在中部偏左侧, 受蒸发结晶作用影响的样点分布在右上角^[21]. 由研究区地下水与河水水化学 Gibbs 图可知(图 3), 除少量阳离子外, 研究区水样的阴离子和绝大部分阳离子落在

Gibbs 分布模型内, 大部分样点分布在岩石风化控制区, 部分分布在蒸发控制区, 且 TDS 在 $100 \sim 1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 说明研究区地下水与河水水化学组成主要受到岩石风化和蒸发浓缩作用的共同影响, 并以岩石风化控制为主. 小浪底水库调水调沙期间河水中 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 与 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值分别介于 $0.63 \sim 0.89$ 与 $0.20 \sim 0.32$ 之间, 表明河水中阳离子主要受蒸发浓缩影响, 阴离子则主要受岩石风化控制. 地下水中 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 与 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值在调水调沙期间变化较大, 调水调沙初期地下水中 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 与 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值分别介于 $0.28 \sim 0.49$ 与 $0.06 \sim 0.21$ 之间, 调水调沙中期和末期则均分别介于 $0.52 \sim 0.87$ 与 $0.02 \sim 0.28$ 之间, 说明调水调沙初期地下水的阴阳离子均主要受岩石风化作用影响, 调水调沙中期和末期地下水中阳离子主要受蒸发浓缩影响, 阴离子则主要受岩石风化控制, 也反映出调水调沙中期和末期的地下水的水化学离子来源与河水一致. 调水调沙中期和末期部分点落在岩石风化和蒸发浓缩作用的影响范围之外, 表明该时期研究区水体还可能受到了人类活动或阳离子交换作用的影响^[8,34]. 研究区水体中阳离子变化幅度较大, 以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 为主; 阴离子变化幅度相对较小, 以 HCO_3^- 为主, 阴阳离子之间比例的不一致性也反映出存在阳离子交换作用^[15]. 随着调水调沙的进行, 地下水中 Na^+ 浓度增加, 可能与含水层中 Na^+ 交换了地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 使得含水层中 Na^+ 进入地下水有关.

天然水一直与周围岩石或沉积物发生水岩作

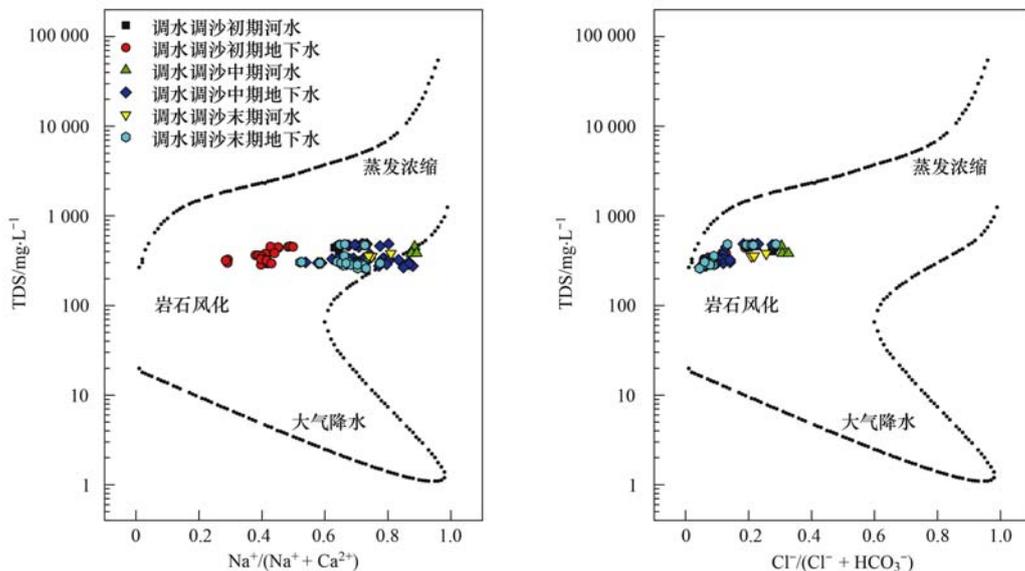


图 3 研究区地下水与河水水化学 Gibbs 图

Fig. 3 Gibbs diagram of groundwater and river water chemistry in the study area

用,不同的岩性会造成天然水化学成分的差异,水中主要离子的比例可以表征不同岩石风化对天然水化学组分的影响^[35]. Na^+/Cl^- 的关系可以判断水体中 Na^+ 的主要来源,受硅酸盐岩风化或阳离子交换作用控制的 Na^+ ,其水样的取值点位于 Na^+/Cl^- 等值线上方,而蒸发盐岩溶解产生的 Na^+ 其水样的取值点位于 Na^+/Cl^- 等值线附近^[35]; $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 反映了岩盐的溶解特征,水样取值点位于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 等值线上,说明仅有碳酸盐参与溶解,位于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 等值线上方及附近,则说明受到碳酸盐和硅酸盐矿物溶解作用的共同影响^[15]; $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})/(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 关系能判断水体中阳离子交替吸附作用的影响,若 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})/(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 接近 -1 ,说明该点的阳离子交替吸附作用较强烈,反之则认为阳离子交替吸附作用不明显^[36]. 研究区地下水与河水中不同离子之间的关系如图 4 所示. 由图 4(a)可知,小浪底水库调水调沙期间,地下水与河水的 Na^+/Cl^- 均大于 1,表明研究区水体

中 Na^+ 主要来源于硅酸盐矿物释放或阳离子交换作用的影响. 河水中 Na^+/Cl^- 高于地下水,且调水调沙初期地下水与河水的 Na^+/Cl^- 较中期和末期更远离等值线,也进一步说明地下水与河水中含量增加受到岩石风化控制,且调水调沙初期水化学组分受硅酸盐矿物风化的影响高于调水调沙中期和末期. 调水调沙初期地下水与河水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 位于等值线上方或附近,而调水调沙中期和末期则位于等值线附近或下方[图 4(b)],说明调水调沙初期地下水与河水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 除了来自碳酸盐岩溶解外,还受到了其他含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 矿物溶解的影响,而调水调沙中期和末期则主要来源于碳酸盐岩的风化溶解. 调水调沙初期地下水与河水的取样点位于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 等值线上或附近,而在调水调沙中期和末期则主要位于等值线下方[图 4(c)],也进一步表明初期研究区水体的水化学组分受碳酸盐和硅酸盐矿物溶解作用的共同影响,且影响程度高于调水调沙中期和末期. 黄河中下游泥沙主要来自黄土高原的黄土母质,其碳酸盐含量丰富,当水体中泥沙含量较高时,其碳酸盐含量也相应升高^[37]. 小浪底水库水沙调控过程

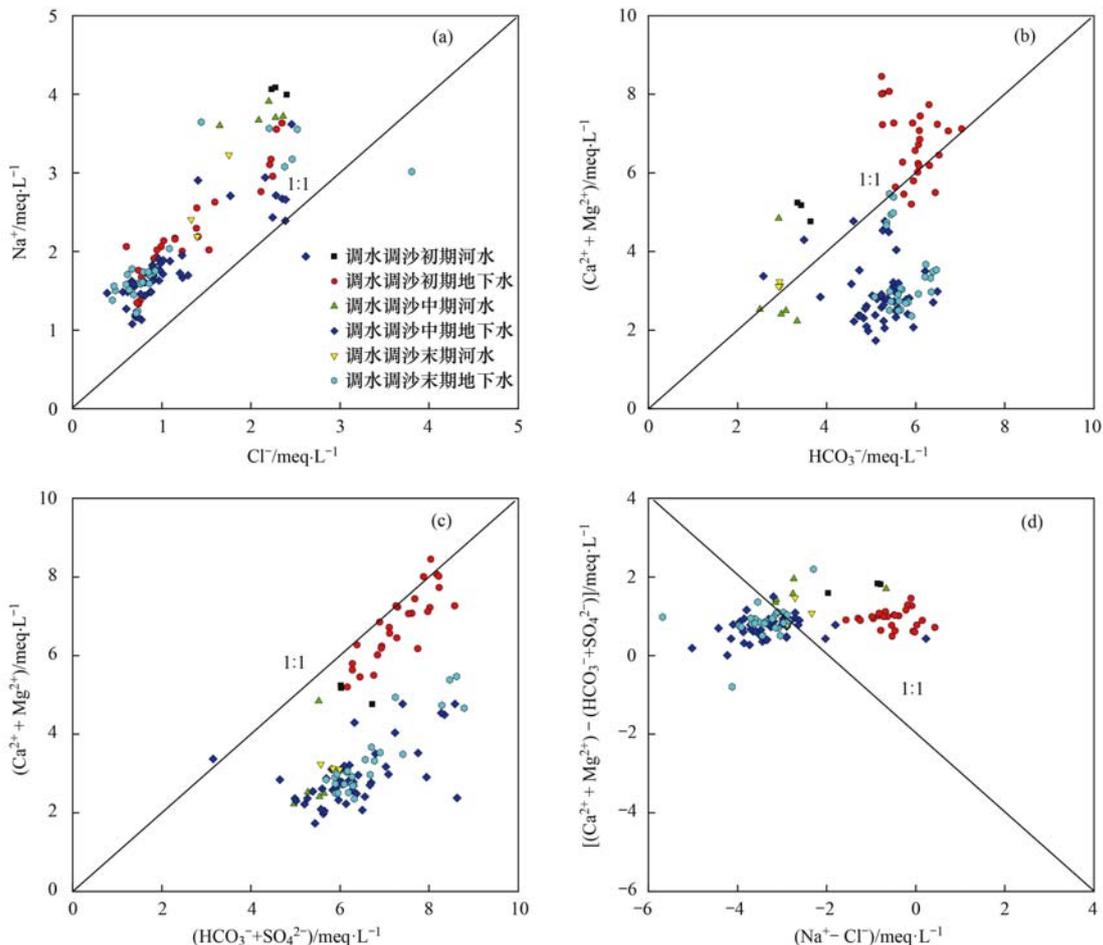


图 4 研究区地下水与河水主要离子比值关系

Fig. 4 Stoichiometric relation among major ions of the groundwater and river water in the study area

将水库中沉积泥沙向下游输送,使得原本沉积在泥沙中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 等水化学离子在水流扰动下进入水体,流量越大对水库及河流沉积物的冲刷能力就越强,水体中相应的水化学离子含量也越高^[37,38],因而调水调沙中期和末期水库下游河水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 等水化学离子主要来源于碳酸盐岩溶解.在小浪底水库调水调沙过程中,下游滨河湿地地下水中水化学离子的比值关系表现出与河水相同的变化规律,也进一步表明上游水库调水调沙过程使得下游地下水与河水水力联系更加密切.调水调沙初期地下水与河水的取样点偏离了 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}) / (\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 等值线,调水调沙中期和末期则分布在斜率 -1 处两侧或附近[图 4(d)],说明地下水与河水在调水调沙中期和末期发生了较为强烈的阳离子交换作用,在调水调沙初期阳离子交换作用不明显.

3.2 基于稳定同位素的地下水与河水补给来源

氢氧同位素 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系常用来分析水体的来源. Craig^[39] 构建了全球大气降水线(global meteoric water line, GMWL),即 $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$,郑淑蕙等^[40] 建立了中国大气降水线(China meteoric water line, CMWL),即 $\delta\text{D} = 7.9\delta^{18}\text{O} + 8.2$,本研究采用裴建国等^[41] 统计得到的焦作地区的大气降水线即 $\delta\text{D} = 8.032\delta^{18}\text{O} + 12.68$,作为当地大气降水线(local meteoric water line, LMWL)进行分析.大气降水线可用于识别起源于大气降水的地下水与地表水的水循环相关过程,斜率反映了氢氧同位素分馏程度的大小,截距表示氘相对于平衡状态的偏离程度^[42].本文研究区域的当地大气降水线的斜率和截距均大于全球及中国大气降水线,表明研究区蒸发作用不强烈,这与水化学分析的结果一致.

由小浪底水库调水调沙期间地下水与河水水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的实测值绘制成 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系可知(图 5),调水调沙初期河水的同位素数据点分布在当地大气降水线两侧,调水调沙中期和末期河水的同位素数据点均位于当地大气降水线的右下方,说明大气降水是研究区河水的重要来源^[43].随着小浪底水库调水调沙的进行,调水调沙中期和末期河水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素向重同位素方向逐渐富集,一方面表明河水在蒸发的过程中发生了动力学分馏,另一方面也说明该时期下游河水主要来源于小浪底水库蓄积的表层水.调水调沙初期地下水的同位素数据点大部分分布在当地大气降水线两侧,部分点接近或处于当地大气降水线上;调水调沙中期地下水的同位素数据点大部分位于当地大气降水线的左下方,部分点位于当地大气降水线上或附近;调水调

沙末期,地下水的同位素数据点位于当地大气降水线下方,表明大气降水仍是研究区地下水的重要来源.调水调沙初期地下水接受大气降水补给后,地下水径流交替循环较为强烈,径流时间短,未发生氢氧同位素交换以及同位素分馏,从而使得地下水与大气降水的氢氧同位素值接近.调水调沙中期和末期地下水受汛期影响,与河水强烈的水力联系使其存在明显的蒸发分馏,且该时期在距离河流 100 m 范围内地下水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素数值与河水接近,表明地下水受到了河水的补给.此外,调水调沙中期部分地下水同位素数据点处于河水同位素点与当地大气降水线之间,也进一步说明地下水受降水和河水的共同影响.地下水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成在调水调沙初期靠近 LMWL,表明该时期地下水与降水补给关系较强;在调水调沙中期和末期靠近 GMWL 和 CMWL,表明该时期地下水与降水补给关系较弱.随着小浪底水库调水调沙的进行,研究区地下水与降水补给联系存在差异,也反映出上游小浪底水库水沙调控使得下游河水对地下水的补给作用加强.

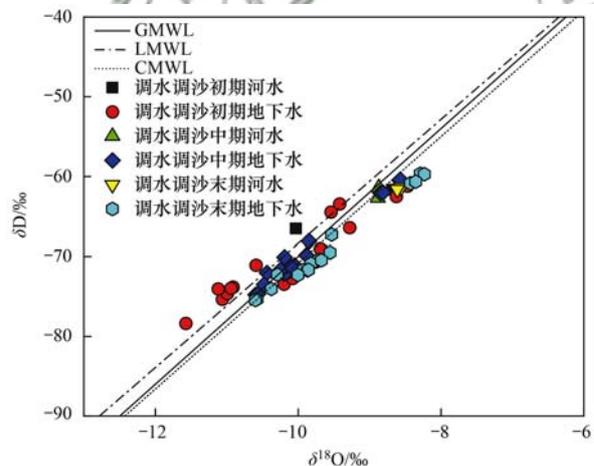


图 5 研究区地下水和河水 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 组成关系

Fig. 5 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD for groundwater and river water in the study area

3.3 地下水与河水转化关系

地下水与地表水的氢氧同位素变化差异可以表征区域水体的补给关系,地表水同位素值小于地下水时,表明地表水补给地下水;反之,则以地下水补给地表水为主^[44].氢氧同位素特征反映了地下水与河水之间相互作用的外在联系,水文地质条件则是控制两者补排关系的内在因素,地下水与河水之间的水头差决定了源、汇项和水流路径^[45].因此,通过分析地下水与河水氢氧稳定同位素组成特征,结合研究区地形地貌水文地质条件,可以探究地下水与河水的相互转化关系.通过对研究区地下水与和

河水的氢氧同位素特征研究发现,近岸带(距离河岸 0~100 m 内)湿地地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值与河水相近且略低于河水的同位素数值,而离河岸较远处(距离河岸 200 m 之外),地下水同位素逐渐贫化,远低于河水的同位素值,说明滨河湿地地下水与河水之间的水力联系主要发生在近岸带,且表现为河水补给地下水;随着远离黄河水体,湿地地下水受河水的影响减弱.随着小浪底水库调水调沙的进行,地下水与河水的同位素逐渐富集,调水调沙初期地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 同位素值小于河水,调水调沙中期和末期地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 同位素值与河水接近.河水从水库流出后,沿程蒸发浓缩,至下游采样点时氢氧重同位素进一步富集.小浪底水库水沙调控使得下游河水水量在短时间内增大,造成河水对地下水补给也迅速增强,尤其是对距离河流 100 m 范围内地下水的补给增强,使得近岸带地下水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 同位素值在调水调沙中期和末期呈增加趋势,也进一步表明河水对地下水的补给主要发生在距离河流 100 m 范围内,水沙调控期河水对地下水的补给增加.根据野外观测发现,小浪底水库调水调沙期间滨河湿地地下水平均水位在 87.16~93.32 m 之间,河水平均水位为 93.47 m,且滨河湿地土壤主要为细砂和黏土,降水有效补给地下水的量较少,因而河水与地下水之间的水头差对滨河湿地地下水的影响更大.根据 Jolly 等^[46]基于水力特征划分的湿地作用模式,研究区滨河湿地地下水与河水的相互作用模式呈现时间分异,整个调水调沙过程中,河水均以饱和流-补给型作用模式补给地下水,但在调水调沙中期和末期补给量增加,补给强度取决于河流的水文情势.此外,由于水在运动过程中发生了可溶性矿物溶解的离子与邻近岩层和土壤的交换,导致水体的 EC 随着径流途径和滞留时间的延长而增大,因此 EC 也可以用来定性判断地下水与河水的转化关系^[34].研究区近岸带(距离河岸 0~100 m 内)湿地地下水 EC 值(993.62~1 059.89 $\mu S \cdot cm^{-1}$)高于河水 EC 值(805.78~956.88 $\mu S \cdot cm^{-1}$),而离河岸较远处(距离河岸 200 m 之外)湿地地下水 EC 值(577.22~797.36 $\mu S \cdot cm^{-1}$)远远低于河水,且随着调水调沙的进行,地下水 EC 值逐渐升高,进一步印证了在该时期河水侧渗补给地下水,在补给的过程中不断溶解土壤中的溶解性盐类,从而使得近岸带地下水中 EC 值增大,而与距离河岸较远处地下水的水力联系则较弱.此外,小浪底水库调水调沙初期河水水化学类型为 $HCO_3^- \cdot Na \cdot Ca \cdot Mg$ 型,调水调沙中期和末期均为 $HCO_3^- \cdot SO_4^{2-} \cdot Na \cdot Mg$ 型,说明在小浪底水库调水调沙过程中输出了水库底部沉积物孔隙

水经历硫酸盐细菌还原而后被重新氧化的硫酸盐^[47],使得下游河水中 SO_4^{2-} 浓度增加.调水调沙中期和末期虽然地下水水化学类型为 $HCO_3^- \cdot Na \cdot Mg$ 型,但观测井 1 和观测井 2 中地下水 SO_4^{2-} 浓度(148.09 $mg \cdot L^{-1}$)接近河水中的(130.00 $mg \cdot L^{-1}$)而远高于其他观测井(33.48 $mg \cdot L^{-1}$),且随着调水调沙的进行,近岸带地下水中 SO_4^{2-} 浓度呈增加趋势,这与河水仅补给近岸带地下水有关,也从侧面印证了河水对滨河湿地地下水的补给主要发生在近岸带.

4 结论

(1)小浪底水库调水调沙期间下游滨河湿地水体整体呈弱碱性淡水,TDS 变化范围为 260.13~477.64 $mg \cdot L^{-1}$,阳离子以 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主,阴离子以 HCO_3^- 为主.调水调沙初期河水水化学类型为 $HCO_3^- \cdot Na \cdot Ca \cdot Mg$ 型,地下水水化学类型为 $HCO_3^- \cdot Ca \cdot Mg \cdot Na$ 型;调水调沙中期和末期河水均为 $HCO_3^- \cdot SO_4^{2-} \cdot Na \cdot Mg$ 型,地下水均为 $HCO_3^- \cdot Na \cdot Mg$ 型.

(2)研究区水体的水化学离子主要受到岩石风化和蒸发浓缩作用的共同影响,以岩石风化控制为主.小浪底水库水沙调控过程中研究区水体的水化学组分从受碳酸盐和硅酸盐矿物溶解的共同作用过渡到以碳酸盐岩溶解为主,在调水调沙中期和末期受到蒸发浓缩和阳离子交换作用的影响.

(3)小浪底水库水沙调控过程中河水氢氧同位素组成逐渐富集且同位素数据点位于当地大气降水线的右下方,表明下泄河水来源于小浪底水库蓄积的表层水和大气降水,以水库表层水为主,且在流动的过程中发生了蒸发分馏.近岸带(距离河岸 0~100m 内)地下水氢氧同位素组成与河水接近,部分地下水同位素数据点处于河水同位素点与当地大气降水线之间,表明地下水受河水和降水补给的共同影响.

(4)小浪底水库水沙调控期间下游滨河湿地地下水与河水之间的转化主要发生在近岸带,距离河岸较远处(距离河岸 200 m 之外)地下水与河水的水力联系减弱.河水以饱和流-补给型作用模式补给地下水,随着调水调沙的进行,河水对地下水的补给增强.

参考文献:

- [1] Naiman R J, Décamps H. The ecology of Interfaces: riparian zones[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1997, 28: 621-658.
- [2] Braatne J H, Rood S B, Goater L A, et al. Analyzing the impacts of dams on riparian ecosystems: a review of research

- strategies and their relevance to the Snake River through Hells Canyon[J]. *Environmental Management*, 2008, **41**(2): 267-281.
- [3] Yuan R Q, Wang S Q, Wang P, *et al.* Changes in flow and chemistry of groundwater heavily affected by human impacts in the Baiyangdian catchment of the North China Plain [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, **76**(16), doi: 10.1007/s12665-017-6918-9.
- [4] Zema D A, Bombino G, Denisi P, *et al.* Evaluating the effects of check dams on channel geometry, bed sediment size and riparian vegetation in Mediterranean mountain torrents[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 327-340.
- [5] Shuai P, Chen X Y, Song X H, *et al.* Dam operations and subsurface hydrogeology control dynamics of hydrologic exchange flows in a regulated river reach[J]. *Water Resources Research*, 2019, **55**(4): 2593-2612.
- [6] Siergieiev D, Widerlund A, Ingri J, *et al.* Flow regulation effects on the hydrogeochemistry of the hyporheic zone in boreal rivers [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **499**: 424-436.
- [7] Mayfield K K, Eisenhauer A, Ramos D P S, *et al.* Groundwater discharge impacts marine isotope budgets of Li, Mg, Ca, Sr, and Ba[J]. *Nature Communications*, 2021, **12**(1), doi:10.1038/s41467-020-20248-3.
- [8] 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.
- [9] Liao F, Wang G C, Shi Z M, *et al.* Estimation of groundwater discharge and associated chemical fluxes into Poyang Lake, China: approaches using stable isotopes (δD and $\delta^{18}\text{O}$) and radon[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, **26**(5): 1625-1638.
- [10] Kong X L, Wang S Q, Liu B X, *et al.* Impact of water transfer on interaction between surface water and groundwater in the lowland area of North China Plain[J]. *Hydrological Processes*, 2018, **32**(13): 2044-2057.
- [11] Freitas J G, Furquim S A C, Aravena R, *et al.* Interaction between lakes' surface water and groundwater in the Pantanal wetland, Brazil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, **78**(5), doi: 10.1007/s12665-019-8140-4.
- [12] Chai Y X, Xiao C L, Li M Q, *et al.* Conversion relationship between groundwater and surface water in the Taizi River Basin in China based on geochemical and isotopic characteristics [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(16): 20045-20057.
- [13] Mirzavand M, Ghasemieh H, Sadatinejad S J, *et al.* Delineating the source and mechanism of groundwater salinization in crucial declining aquifer using multi-chemo-isotopes approaches [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, **586**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124877.
- [14] 刘鑫, 向伟, 司炳成. 汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1739-1749.
- Liu X, Xiang W, Si B C. Hydrochemical and isotopic characteristics in the shallow groundwater of the Fenhe River basin and indicative significance [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1739-1749.
- [15] 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 等. 永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4202-4210.
- Kong X L, Yang Y H, Cao B, *et al.* Hydrochemical characteristics and factors of surface water and groundwater in the upper Yongding River basin[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4202-4210.
- [16] 刘松韬, 张东, 李玉红, 等. 伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1184-1196.
- Liu S T, Zhang D, Li Y H, *et al.* Water sources and factors controlling hydro-chemical compositions in the Yiluo River basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1184-1196.
- [17] Zhang L, Li P Y, He X D. Interactions between surface water and groundwater in selected tributaries of the Wei River (China) revealed by hydrochemistry and stable isotopes[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2022, **28**(1): 79-99.
- [18] Li P Y, Wu J H, Qian H, *et al.* Hydrogeochemical characterization of groundwater in and around a wastewater irrigated forest in the southeastern edge of the Tengger Desert, Northwest China[J]. *Exposure and Health*, 2016, **8**(3): 331-348.
- [19] Lucía S, Romina S, Eleonora C, *et al.* Using H, O, Rn isotopes and hydrometric parameters to assess the surface water-groundwater interaction in coastal wetlands associated to the marginal forest of the Río de la Plata [J]. *Continental Shelf Research*, 2019, **186**: 104-110.
- [20] 许秀丽, 李云良, 高博, 等. 黄河中游汾河入黄口湿地水源组成与地表-地下水转化关系[J]. *湖泊科学*, 2022, **34**(1): 247-261.
- Xu X L, Li Y L, Gao B, *et al.* Composition of water sources and transformation relationship between surface water and groundwater in the Fenhe River estuarine wetland of the middle Yellow River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(1): 247-261.
- [21] 何明霞, 张兵, 夏文雪, 等. 天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 776-785.
- He M X, Zhang B, Xia W X, *et al.* Hydrochemical characteristics and analysis of the Qilihai wetland, Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 776-785.
- [22] Melendi E, Tanjal C, Borzi G, *et al.* Hydrodynamic and hydrochemistry of wet meadows and shallow lakes in areas of the Patagonian basaltic plateaus, Argentina[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140897.
- [23] 董战峰, 璩爱玉, 冀云卿. 高质量发展战略下黄河下游生态环境保护[J]. *科技导报*, 2020, **38**(14): 109-115.
- Dong Z F, Qu A Y, Ji Y Q. On ecological environment protection of lower reaches of Yellow River with high-quality development strategy[J]. *Science & Technology Review*, 2020, **38**(14): 109-115.
- [24] de Graaf I E M, Gleeson T, van Beek L P H, *et al.* Environmental flow limits to global groundwater pumping [J]. *Nature*, 2019, **574**(7776): 90-94.
- [25] Medjani F, Djidel M, Labar S, *et al.* Groundwater physico-chemical properties and water quality changes in shallow aquifers in arid saline wetlands, Ouargla, Algeria[J]. *Applied Water Science*, 2021, **11**(5), doi: 10.1007/s13201-021-01415-3.
- [26] 章光新, 武瑶, 吴燕锋, 等. 湿地生态水文学研究综述[J]. *水科学进展*, 2018, **29**(5): 737-749.
- Zhang G X, Wu Y, Wu Y F, *et al.* A review of research on wetland ecohydrology[J]. *Advances in Water Science*, 2018, **29**(5): 737-749.
- [27] Xia C C, Liu G D, Xia H Y, *et al.* Influence of saline intrusion

- on the wetland ecosystem revealed by isotopic and hydrochemical indicators in the Yellow River Delta, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **133**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108422.
- [28] Li M N, Zeng Y J, Lubczynski M W, *et al.* A first investigation of hydrogeology and hydrogeophysics of the Maqu catchment in the Yellow River source region[J]. *Earth System Science Data*, 2021, **13**(10): 4727-4757.
- [29] Zhao T Q, Richards K S, Xu H S, *et al.* Interactions between dam-regulated river flow and riparian groundwater; a case study from the Yellow River, China [J]. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(10): 1552-1560.
- [30] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1944, **25**(6): 914-928.
- [31] Clark I D, Fritz P. *Environmental isotopes in hydrogeology* [M]. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [32] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [33] 唐春雷, 郑秀清, 梁永平. 龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2087-2095.
Tang C L, Zheng X Q, Liang Y P. Hydrochemical characteristics and formation causes of ground karst water systems in the Longzici spring catchment [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2087-2095.
- [34] 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 等. 南小河沟流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 682-690.
Guo Y W, Tian F Q, Hu H C, *et al.* Characteristics and significance of stable isotopes and hydrochemistry in surface water and groundwater in Nanxiaohogou basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 682-690.
- [35] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5428-5439.
Liu J T, Cai W T, Cao Y T, *et al.* Hydrochemical characteristics of groundwater and the origin in alluvial-proluvial fan of Qinhe River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5428-5439.
- [36] Zhang J W, Liang X, Jin M G, *et al.* Identifying the groundwater flow systems in a condensed river-network interfluvial between the Han River and Yangtze River (China) using hydrogeochemical indicators [J]. *Hydrogeology Journal*, 2019, **27**(7): 2415-2430.
- [37] 张永领, 张东, 毛宇翔. 小浪底水库水沙调控影响下的黄河 POC 输送特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1721-1727.
Zhang Y L, Zhang D, Mao Y X. Study on POC transport characteristics in Yellow River impacted by runoff and sediment control of the Xiaolangdi reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1721-1727.
- [38] 张东, 刘松韬, 张永领, 等. 黄河水沙调控过程中河水溶解性硫酸盐硫和氧同位素组成特征[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(3): 723-733.
Zhang D, Liu S T, Zhang Y L, *et al.* Characteristics of sulfur and oxygen isotopes of dissolved sulfate in response to water-sediment controlling in the Yellow River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(3): 723-733.
- [39] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [40] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. *科学通报*, 1983, (13): 801-806.
- [41] 裴建国, 陶友良, 童长水. 焦作地区天然水环境同位素组成及其在岩溶水文地质中的应用[J]. *中国岩溶*, 1993, **12**(1): 45-53.
Pei J G, Tao Y L, Tong C S. Environmental isotope of natural water and its application in karst hydrogeology in Jiaozuo area [J]. *Carsologica Sinica*, 1993, **12**(1): 45-53.
- [42] 杨婷, 王阳, 徐静怡, 等. 河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3695-3708.
Yang T, Wang Y, Xu J Y, *et al.* Differentiation of hydrogen and oxygen isotopes in the water source treatment wetlands of stream networks [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3695-3708.
- [43] 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 等. 白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1920-1929.
Wang Y S, Yin D C, Qi X F, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopic characteristics of different water and indicative significance in Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1920-1929.
- [44] 汪少勇, 何晓波, 丁永建, 等. 长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 166-172.
Wang S Y, He X B, Ding Y J, *et al.* Characteristics and influencing factors of stable hydrogen and oxygen isotopes in groundwater in the permafrost region of the source region of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 166-172.
- [45] Zhang J, Chen L W, Hou X W, *et al.* Multi-isotopes and hydrochemistry combined to reveal the major factors affecting Carboniferous groundwater evolution in the Huaibei coalfield, North China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **791**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148420.
- [46] Jolly I D, McEwan K L, Holland K L. A review of groundwater-surface water interactions in arid/semi-arid wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology [J]. *Ecohydrology*, 2008, **1**(1): 43-58.
- [47] 张东, 朱双双, 赵志琦, 等. 黄河小浪底水库水沙调控与流域硫循环[J]. *地球科学*, 2022, **47**(2): 589-606.
Zhang D, Zhu S S, Zhao Z Q, *et al.* The water-sediment regulation scheme at Xiaolangdi Reservoir and its impact on sulfur cycling in the Yellow River Basin [J]. *Earth Science*, 2022, **47**(2): 589-606.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i> (5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning (5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i> (5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i> (5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu (5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i> (5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i> (5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i> (5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i> (5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i> (5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i> (5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i> (5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i> (5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i> (5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i> (5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i> (5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i> (5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i> (5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i> (5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i> (5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i> (5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i> (5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i> (5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i> (5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i> (5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i> (5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i> (5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i> (5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i> (5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i> (5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i> (5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i> (5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i> (5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i> (5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i> (5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i> (5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i> (5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i> (5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i> (5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i> (5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin (5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao (5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i> (5861)