

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

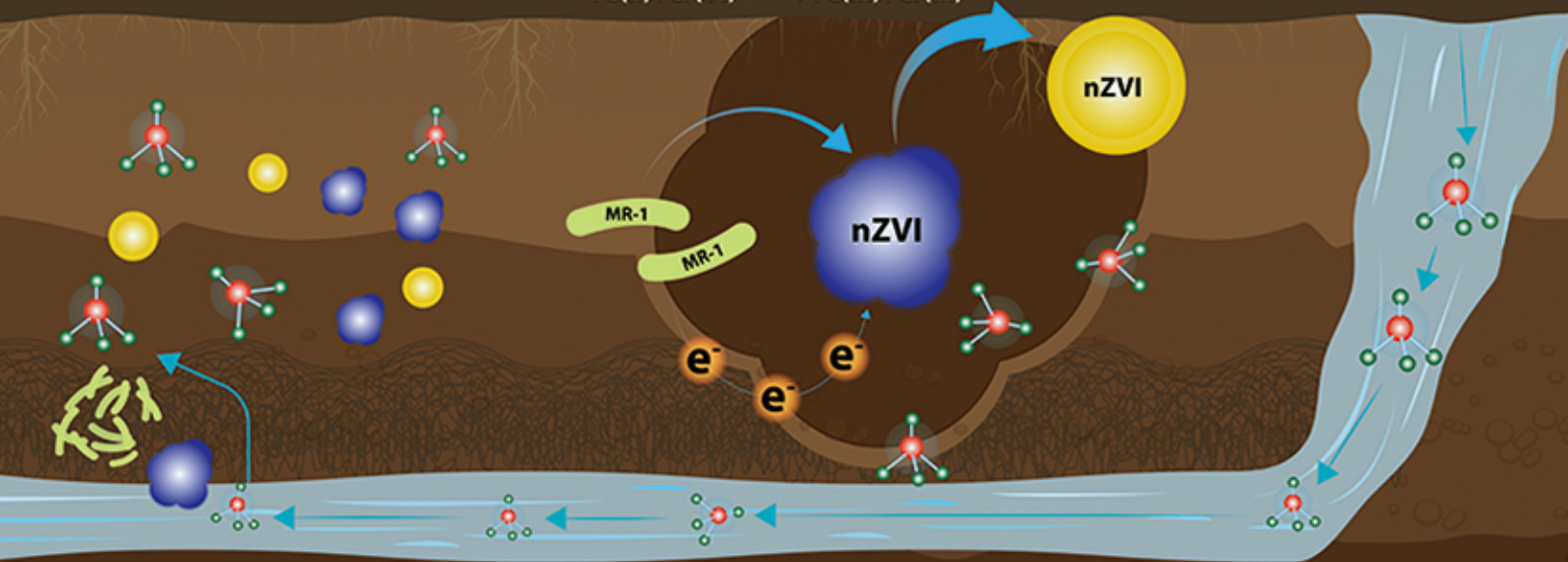
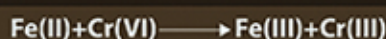
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空分布与健康效应评估	陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率 PM _{2.5} 浓度时空变化模拟与分析	杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM _{2.5} 污染影响	邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析	王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析	张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峰 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析	魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气 PM _{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险	刘恒嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化	袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源	李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素	何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邱彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究	张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源	云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析	孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别	程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估	赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价	张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价	师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价	谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源	任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别	拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析	李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析	齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除	马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果	陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应	周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性	孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用	王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (<i>Scenedesmus obliquus</i>) 生长的拮抗效应及其作用机制	王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析	武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
整合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响	廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响	池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性	于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析	张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价	杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价	张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响	王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响	周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响	魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响	鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应	李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征	刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验	邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系	马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制	廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响	蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N ₂ O 排放的影响	符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载 NH ₄ ⁺ -N 生物炭对土壤 N ₂ O-N 排放和 NH ₃ -N 挥发的影响	马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响	张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985~2019 年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析	王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事 (4201) 《环境科学》征稿简则 (4340) 信息 (4382, 4537, 4565)	

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析

孔晓乐¹, 杨永辉¹, 曹博^{1,2}, 王艺璇^{1,2}, 裴宏伟³, 沈彦军^{1*}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 农业水资源重点实验室, 河北省节水农业重点实验室, 石家庄 050021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河北建筑工程学院市政与环境工程系, 张家口 075000)

摘要: 永定河上游流域是冀西北重要的水源涵养区和生态屏障区, 受气候变化和高强度人类活动影响, 径流减少和水环境恶化问题日益突出。深入研究自然和人类活动共同影响下的地表水-地下水水化学特征及其成因, 可为区域水资源可持续利用提供科学参考。本研究利用($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$) 氢氧同位素关系明确地表水和地下水来源, 并在此基础上结合数理统计和水文地球化学方法, 分析水化学特征及其成因。结果表明, 地表水和地下水主要来源于降水。受自然因素及人类活动的共同影响, 洋河和桑干河流域水化学类型差异显著。整体上, 地表水离子浓度表现为: 桑干河 > 洋河。桑干河流域地表水主要阳离子为 Na^+ , 主要阴离子为 Cl^- 和 SO_4^{2-} , 且水化学类型多样; 洋河流域地表水主要阴阳离子分别为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} , 水化学类型分布相对集中。影响地表水水化学的自然因素主要为矿物溶解和蒸发, 但人类活动却体现出流域差异, 其中桑干河为支流的工业废水排放, 而洋河流域为农业生产和城市。然而, 由工业废水排放和酸雨输入导致的地表水 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度持续增加, 是地表水资源可持续利用的限制因素。因此, 未来桑干河流域地表水资源利用要综合考虑总盐分和水化学组成的影响, 而洋河流域主要考虑总盐分的影响。因地制宜地进行地表水资源利用, 是永定河上游水资源可持续利用和恢复地下水位行之有效的措施。

关键词: 半干旱区; 氢氧稳定同位素; 洋河; 桑干河; 水文地球化学过程

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4202-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012227

Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin

KONG Xiao-le¹, YANG Yong-hui¹, CAO Bo^{1,2}, WANG Yi-xuan^{1,2}, PEI Hong-wei³, SHEN Yan-jun^{1*}

(1. Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Hebei Key Laboratory of Agricultural Water-Saving, Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Municipal and Environmental Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: The Yongding River basin is an important water conservation and ecological barrier area in the Northwest of Hebei Province. Reduced runoff and deterioration of the water environment in this area have become increasingly prominent under the effects of climate change and intensive human activities. Clarifying the chemical characteristics and factors of surface water and groundwater in the upper Yongding River basin can provide data and support for the sustainable use of water resources. Stable isotopes of hydrogen and oxygen ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) were used to study the sources of surface water and groundwater. Mathematical statistics and hydrogeochemical methods were then used to analyze the regional hydrogeochemical processes and factors of surface water and groundwater. The results showed that precipitation was the main source of surface water and groundwater. Under the effects of natural factors and human activities, the Yang River and Sanggan River basins exhibited significant differences in surface water chemistry. The sub-basins were ranked by ion concentration as follows: Sanggan River > Yang River. The main cation and anions of the Sanggan River basin were Na^+ , Cl^- , and SO_4^{2-} , while in the Yang River basin, Ca^{2+} and HCO_3^- were the most common. The water chemistry of the Sanggan River exhibited greater variation than that of the Yang River. Surface water chemistry were mainly controlled by mineral dissolution and evaporation, but human activities were reflected in different sub-basins. Surface water in the Sanggan River basin was affected by industrial wastewater discharge, while that of the Yang River basin was affected by agricultural production and cities. However, the continuous increase of Cl^- and SO_4^{2-} concentrations, caused by industrial wastewater discharge and acid rain, was the limiting factor for sustainable use of surface water resources. In future, surface water in Sanggan River basin should be used with consideration to the effects of both total salinity and chemical composition of the water, while in Yang River, a focus should be placed on total salinity. The use of surface water resources in accordance with local conditions is an effective measure for the sustainable use of water resources and the restoration of groundwater levels in this region.

Key words: semi-arid area; stable isotopes of hydrogen and oxygen; Yanghe River; Sanggan River; hydrogeochemical process

干旱和半干旱地区地表水资源短缺是限制区域 社会经济发展的关键因素, 地下水往往是工农业生

收稿日期: 2020-12-24; 修订日期: 2021-02-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41807177); 中国科学院“百人计划”项目; 河北省教育厅青年拔尖人才项目(BJ2018027)

作者简介: 孔晓乐(1987~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为同位素水文学与包气带水盐运移, E-mail: xlkong@sjziam.ac.cn

* 通信作者, E-mail: shenyanjun@sjziam.ac.cn

产的主要水源^[1]. 人类活动对水资源的需求量远超出可利用量是水资源短缺的主要驱动因子, 而气候变化更加剧了水资源短缺的态势^[2,3]. 受水资源短缺和高强度人类开发的影响, 区域水文地球化学过程也发生了巨大变化.

永定河上游为农牧交错带, 经济欠发达, 贫困人口相对较多, 水资源需求大, 供需矛盾突出. 此外, 上游流域不仅是重要的水源地, 更是遏制沙尘和涵养水源的重要生态屏障及京津冀协同发展的生态大动脉. 过去几十年, 受气候暖干化、土地利用剧烈变化及工农业用水需求不断增加的影响, 流域供需水矛盾突出且水循环过程变得更加复杂, 出现了水域面积明显缩减、地下水位下降、径流量锐减乃至部分河道完全断流的现象, 且出现了水质恶化的现象^[4~7]. 除少数监测站点水生态状况为较清洁外, 轻度污染和中度污染站点占据了永定河流域的大部分^[8], 永定河河北段水体总磷现状负荷已超过允许负荷^[9], 上游支流清水河流域氨氮、总磷虽基本符合Ⅲ类水质标准, 但水体中总氮含量超标严重^[10]. 此外, 永定河不同支流的主要污染物以及来源也存在较大的差异^[11,12]. 虽然随着国家水污染治理政策的实施和对点源污染的管理, 洋河和桑干河流域水质均有极显著改善, 但部分河段仍存在不同程度的污染^[5].

综上, 以往的研究主要集中在永定河地表水污染物种类、污染状况以及来源方面, 然而针对自然和人为因素耦合作用下的地表水和地下水水化学特征及其影响因素的研究却相对缺乏. 而在其它地区已经有学者通过地统计学的方法, 研究自然和人为因素影响下的地下水的水化学特征及其形成机制, 并人为农业灌溉和干旱是地下水盐化的关键驱动因素^[13]. 而过去, 纵然有部分关于永定河地下水水文

地球化学过程的报道, 也主要集中在永定河下游北京段的平原区^[14]. 永定河上游肩负着上游经济发展和向下游持续供水的双重重任, 明确上游地表水和地下水的来源、水化学类型及其影响因素, 不仅可以为深入认识自然和人为耦合作用对地表水水化学特征的影响提供一些理论支持, 同时也可以为区域水资源可持续利用提供科学参考. 因此, 本文以永定河上游, 桑干河和洋河两个支流水体和地下水为研究对象, 利用氢氧同位素关系明确地表水和地下水主要来源, 并在此基础上结合数理统计和水文地球化学方法, 分析水化学特征及其成因.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

永定河流域是海河七大水系之一, 河流全长 747 km, 发源于内蒙古高原南缘和山西高原的北部, 流经山西、内蒙、河北、北京、天津五省市 ($112^{\circ} \sim 117^{\circ}45'E$, $39^{\circ} \sim 41^{\circ}20'N$). 流域东邻潮白河、北运河系, 西临黄河流域, 南为大清河系, 北为内陆河. 其上游流域横跨燕山山脉、内蒙古高原和华北平原, 以山区为主 (占 80%), 高程变化较大, 总体上地势自西北山区向东南倾斜, 主要包括桑干河和洋河两大支流. 洋河发源于内蒙古和山西省, 主要流经河北张家口境内, 总长度为 262 km, 流域面积约 15 078 km²; 桑干河主源发源于山西省宁武县, 流经山西和河北两省, 长度为 241 km, 流域面积约为 16 748.7 km²^[15,16]. 桑干河和洋河于河北省张家口怀来县朱官屯汇合后称永定河, 在官厅水库纳妫水河, 经官厅水库流入官厅山峡于三家店进入平原. 本研究区位于三家店以上的山区, 面积为 45 254 km², 其分布范围如图 1 所示, 其中河流汇流区土地利用主要为草

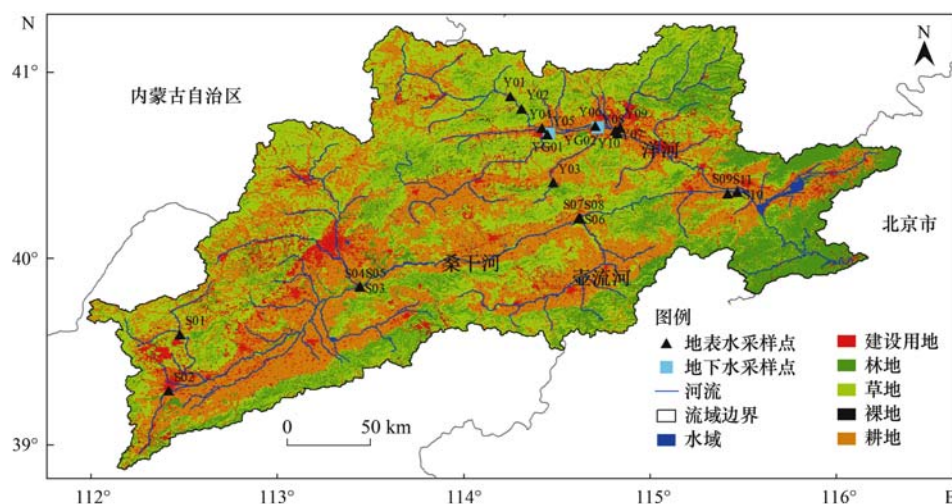


图 1 研究区采样点分布示意

Fig. 1 Location of water samples in the study area

地和林地,河谷地区主要为耕地和建设用地。

流域多年平均降水量不足 450 mm, 80% 径流量分布在雨季^[4], 年平均蒸发量为 1 182 mm^[17]。地质资料显示, 永定河大部分被第四系冲洪积层所覆盖, 其上游土壤多为褐土和碳酸盐褐土, 中游多为火山岩及碳酸岩的褐黄色的亚黏土, 下游以盐潮土为主^[18]。研究区北侧为内蒙古背斜, 以风化剥蚀为主, 第四系堆积厚度小, 地貌为低缓的丘陵和波状高原; 南侧为燕山沉降带, 构造变动强烈, 表现为沿盆地边缘断裂周边山区不断上升, 遭受侵蚀切割, 盆地相对沉降, 接受堆积, 形成了现代山间盆地的地貌景观。

1.2 样品采集和分析

分别于 2016 年 9 月和 2019 年 9 月在永定河两个主要支流——桑干河和洋河进行了地表水和地下水取样, 共取得 21 个地表水(河水)和 2 个浅层地下水水样。两个地下水采样点地下水埋深分别为 15 m 和 23 m。采用便携式参数仪现场测定 pH (pH/ORP/DO METER D-75, HORIBAR Scientific, 日本) 和电导率 (EC, COND METER ES-71, HORIBAR Scientific, 日本)。地下水采样前先抽水 3 min 左右, 然后用 100 mL 的塑料瓶采集水样装满并密封带回实验室, 放于 4℃ 冰箱保存。

室内分析均在中国科学院农业水资源重点实验室, 在采样一周之内完成。水样 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 采用离子色谱 (ICS-600, Dionex, 美国) 分析, HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 采用双指示剂滴定法测定, 所有水样进行阴阳离子平衡验证, 保证可信的误差范围在 $\pm 5\%$ 以内。 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 采用液态

水稳定性同位素分析仪 (L2120-i Isotopic H_2O ; Picarro 美国) 进行测定, 利用 VSMOW 标准, δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 的分析精度分别为 $\pm 0.5\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

1.3 数据分析方法

水蒸发过程中 2H 的动力分馏系数远大于 ^{18}O , 产生氘盈余。氘盈余基于全球大气降水线 (GMWL) 进行计算 [式 (1)], 当 $d\text{-excess} < 10\text{‰}$ 时代表水体存在二次蒸发^[19]。

$$d\text{-excess} = \delta^{18}O - 8 \times \delta^2H \quad (1)$$

钠吸附比 (SAR) 常用于灌溉水质评价, 确定钠引起的危害, 其计算公式如下:

$$SAR = c(Na^+) / [c(Ca^{2+}) + c(Mg^{2+})]^{1/2} \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 野外参数

地表水和地下水野外参数差异显著 (表 1)。整体上, 地表水和地下水呈碱性, 平均值分别为 8.42 和 8.35; 地表水 pH 变化幅度和标准差大于地下水。地表水和地下水 EC 平均值和变化幅度大于地下水, 其中, EC 平均值分别为 $1\,153\,\mu S \cdot cm^{-1}$ 和 $671\,\mu S \cdot cm^{-1}$, 变化范围分别为 $393 \sim 3\,180\,\mu S \cdot cm^{-1}$ 和 $458 \sim 885\,\mu S \cdot cm^{-1}$ 。地表水 DO 平均值小于地下水, 其中地表水和地下水 DO 值分别为 $2.46\,mg \cdot L^{-1}$ 和 $7.44\,mg \cdot L^{-1}$; 但地表水 DO 值变化范围大于地下水。地表水 ORP 平均值 (96 mV) 略大于地下水 (82 mV), 而地表水 ORP 的变化范围和标准差均大于地下水。地表水和地下水平均温度分别为 $20.59^\circ C$ 和 $23.44^\circ C$ 。

表 1 地表水和地下水野外参数、稳定同位素 (δ^2H 和 $\delta^{18}O$) 和氘盈余 ($d\text{-excess}$) 统计特征

Table 1 Statistical characteristics of field parameters, stable isotopes and deuterium excess in surface water and groundwater

水体类型	项目	pH	EC/ $\mu S \cdot cm^{-1}$	DO/ $mg \cdot L^{-1}$	ORP/mV	T/ $^\circ C$	$\delta^2H/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$	$d\text{-excess}/\text{‰}$
地表水 (n=21)	最小值	6.80	393	0.17	20	16.80	-110.0	-14.6	-0.9
	最大值	9.94	3 180	12.10	175	27.80	-53.9	-7.2	13.7
	平均值	8.42	1 153	2.46	96	20.59	-66.7	-9.1	6.2
	标准差	0.84	840	4.02	38	2.68	12.8	1.8	3.8
地下水 (n=2)	最小值	8.29	458	7.28	71	17.95	-68.9	-9.0	0.5
	最大值	8.40	885	7.60	93	28.93	-63.4	-8.0	3.3
	平均值	8.35	671	7.44	82	23.44	-66.2	-8.5	1.9
	标准差	0.08	302	0.23	16	7.76	3.9	0.7	1.9

2.2 地表水-地下水氢氧同位素关系

δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 稳定同位素是水分子的主要组成部分且受大气过程影响, 是水分来源和运动过程的理想示踪剂^[20]。永定河上游地表水和地下水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 稳定同位素均值接近, 但标准差和变化幅度差异明显 (表 1)。其中, 地表水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 稳定同位素平均值分别为 -66.7‰ 和 -9.1‰ , 与之对应的地下水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 稳定同位素平均值分别

为 -66.2‰ 和 -8.5‰ 。但地表水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 稳定同位素的标准差和变化幅度均大于地下水, 地表水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 分布范围分别为 $-110.0\text{‰} \sim -53.9\text{‰}$ 和 $-14.6\text{‰} \sim -7.2\text{‰}$, 而地下水 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 的分布范围则分别为 $-68.9\text{‰} \sim -63.4\text{‰}$ 和 $-9.0\text{‰} \sim -8.0\text{‰}$ 。此外, 地表水和地下水氘盈余的平均值均小于 10‰ , 说明二次蒸发作用影响区域地表水和地下水。地表水氘盈余结果远大于地

下水,地表水和地下水氘盈余平均值分别为 6.2‰和 1.9‰.

统计特征仅代表整体状况,为更好地表征地表水和地下水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素关系,分析了所有采样点的分布特征(图 2).所有地表水和地下水均位于全球大气降水线^[19]下方,说明降水是地表水和地下水的主要补给来源.地表水蒸发线为: $\delta^2\text{H} = 6.7811\delta^{18}\text{O} - 4.9195$ ($R^2 = 0.9411$),斜率为 6.7811,略小于全球大气降水线斜率 8,说明区域地表水受蒸发作用的影响.然而,虽然地表水和地下水 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素的分布范围接近,但地表水偏离降水线程度大于地下水.

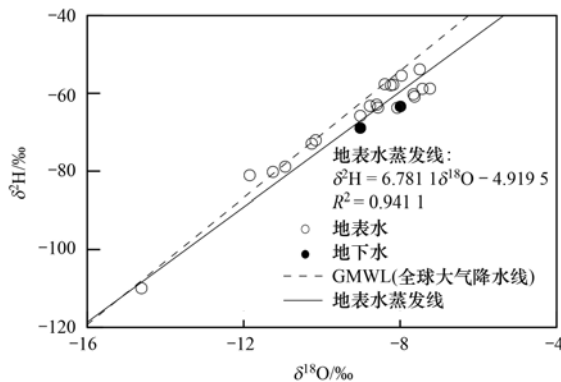


图 2 永定河上游流域地表水-地下水氢氧稳定同位素关系
Fig. 2 Relationship between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopes of surface water and groundwater in the upstream of the Yongding River

2.3 地表水-地下水水化学组成

地表水和地下水流在运动过程中与周围环境相互作用,导致其水化学组成变化^[21].表 2 为地表水和地下水主要离子和总溶解性固体(TDS)统计特征.地表水 TDS 变化范围和标准差均大于地下水,其中,地表水和地下水 TDS 平均值分别为 770 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 445 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变化范围分别为 239 ~ 2 386 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 323 ~ 568 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.与 TDS 类似,地表水 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 质量浓度平均值和标准差均大于地下水; NO_3^- 的变化特征则与 TDS 相反,其平均值和标准差均小于地下水;地表水 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 质量浓度平均值大于地下水,而 Mg^{2+} 标准差小于地下水.

地表水和地下水主要阴离子均为 HCO_3^- ,地表水主要阳离子为 Na^+ ,地下水主要阳离子为 Ca^{2+} 和 Na^+ (表 2).Piper 图显示(图 3),地表水分布在图的右上侧,表明地表水 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的百分比大于地下水.地表水主要水化学类型为 $\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{HCO}_3$ 、 $\text{Ca}\cdot\text{HCO}_3$ 、 $\text{Na}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Cl}\cdot\text{SO}_4$ 和 $\text{Mg}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{HCO}_3$;地下水主要化学类型为 $\text{Mg}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{HCO}_3$ 和 $\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{HCO}_3$.此外,两条支流的水化学类型也呈现出较大的差异.整体来看,洋河水化学类型集中分布于图 3 的 a 区域,而桑干河水分布在除 a 外的其它区域,且两条河流的水化学类型从上游到下游体现出较大的空间差异性,具体原因将在下面结合离子分布特征进行讨论.

表 2 地表水和地下水主要离子和 TDS 统计特征/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Statistical characteristics of major ions and TDS in surface water and groundwater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$										
水体类型	项目	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	HCO_3^-	TDS ¹⁾
地表水 ($n=21$)	最小值	25	2	15	30	21	60	0	120	239
	最大值	553	39	86	170	508	819	35	664	2 386
	平均值	139	12	39	72	121	209	10	332	770
	标准差	165	11	19	42	147	218	9	153	644
地下水 ($n=2$)	最小值	32	3	23	54	16	38	9	256	323
	最大值	66	6	53	76	52	91	28	403	568
	平均值	49	5	38	65	34	64	19	329	445
	标准差	24	2	21	15	26	37	14	104	173

1) TDS 为 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 与 $(1/2)\text{HCO}_3^-$ 的和

3 讨论

3.1 地表水和地下水主控因素识别

Gibbs 图是区分地表水和地下水水化学影响因素的重要手段,一般可分为:降水控制型、风化控制型和蒸发/结晶控制型等^[22].永定河上游地表水和地下水点大部分分布在岩石风化控制区,部分分布在蒸发控制区,说明地表水和地下水水化学的主控因素为矿物溶解和蒸发,其中矿物溶解占主导地位(图 4).阳离子变化幅度较大,部分采样点落在

$\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值大于 0.5 的范围内,阳离子以 Na^+ 为主,部分采样点分布在 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值小于 0.5 的范围内[图 4(a)];大部分阴离子分布在 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值小于 0.5 的范围内,阴离子以 HCO_3^- 为主[图 4(b)].阴阳离子之间比例的不一致性,反映了阳离子交换吸附作用.氯-碱指数 CAI-I 和 CAI-II 为负值时[图 5(a)和 5(b)]可以说明阳离子交换作用的存在,即含水层中 Na^+ 交换了地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,使得含水层中 Na^+ 进入水体,水体中 Na^+ 比例增加.反应过程

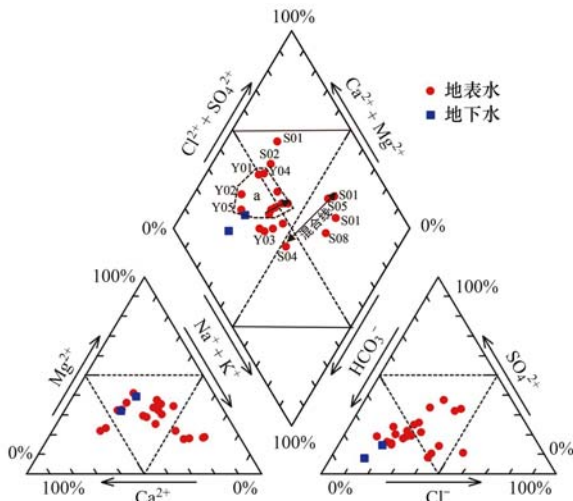


图3 研究区地表水和地下水 Piper 图

Fig. 3 Piper diagram displaying the distribution of surface water and groundwater samples

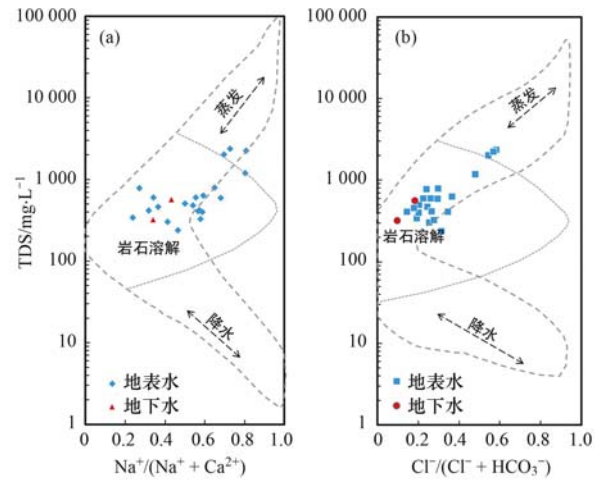


图4 永定河上游流域地表水-地下水 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs diagrams of surface water and groundwater in the upstream of the Yongding River

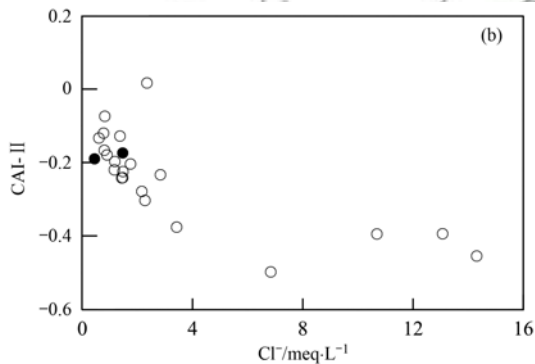
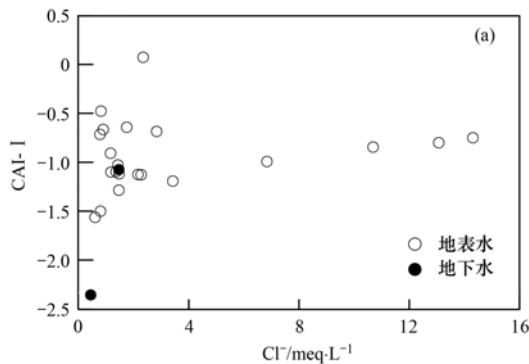


图5 永定河上游流域 CAI-I 和 CAI-II

Fig. 5 CAI-I and CAI-II for surface water and groundwater in the upstream of the Yongding River

如下:

$4\text{Na-X}_2 + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} \longrightarrow 4\text{Na}^+ + \text{Ca-X}_2 + \text{Mg-X}_2$
式中 X 为黏土矿物^[23].

离子关系是认识水文地球化学过程的依据,图6为永定河上游地表水和地下水不同离子之间关系。 Cl^- 和TDS关系可以很好地指示蒸发作用,但 Cl^- 和TDS之间无明显的线性相关关系[图6(a)],说明地表水和地下水除蒸发作用外,还受矿物溶解的影响。理论上,岩盐溶解会释放出等量 Na^+ 和 Cl^- 进入水体中,但大部分采样点 Na^+ 浓度大于 Cl^- 且位于 $\text{Na}^+:\text{Cl}^-$ 的1:1线左上方[图6(b)],大多数比值在1~2.5之间[图6(c)],说明除岩盐溶解外,还受含钠矿物溶解的影响。其中,含钠硅酸盐矿物溶解会导致 Na^+ 和 SO_4^{2-} 以2:1的比例释放进入水体,然而 Na^+ 和 SO_4^{2-} 之间的离子关系表明二者比例小于2:1[图6(d)],说明 SO_4^{2-} 存在其它溶解来源,如石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。大部分采样点分布在 $\gamma(\text{Ca})/\gamma(\text{SO}_4)$ 1:1线左上侧[图6(e)],说明研究区 Ca^{2+} 不止有石膏溶解还有碳酸盐矿物(方解石和白云石)

溶解。大部分采样点位于 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}:\text{HCO}_3^-$ 左上侧[图6(f)],说明碳酸盐和方解石溶解作用是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源。除了方解石 Calcite(CaCO_3)溶解外[图6(g)],当 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 等于1时,主要溶解矿物为白云石 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$,而图6(h)显示,地表水和地下水 Ca^{2+} 部分分布在1:1和2:1线之间,表明了方解石溶解作用;部分采样点位于2:1线的左上侧,说明了硅酸盐溶解作用;部分位于1:1线左侧,说明主要受到方解石和石膏等贫镁矿物影响,或是阳离子交换作用导致钙减少[图6(h)]。同时,大部分采样点都位于 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 为1:1平衡线上方及附近,表明碳酸盐和硅酸盐矿物溶解作用的共同影响[图6(i)]。

3.2 不同支流上下游主控因素及其水化学特征差异

为明晰地表水和地下水水化学空间分布特征及其主控因素的差异性,本研究从桑干河和洋河两个流域进行讨论。然而由于地下水数量的限制,以下部分的讨论以地表水为主。整体上来看,桑干河流域地表水各大离子均大于洋河流域(图7),且两流域地

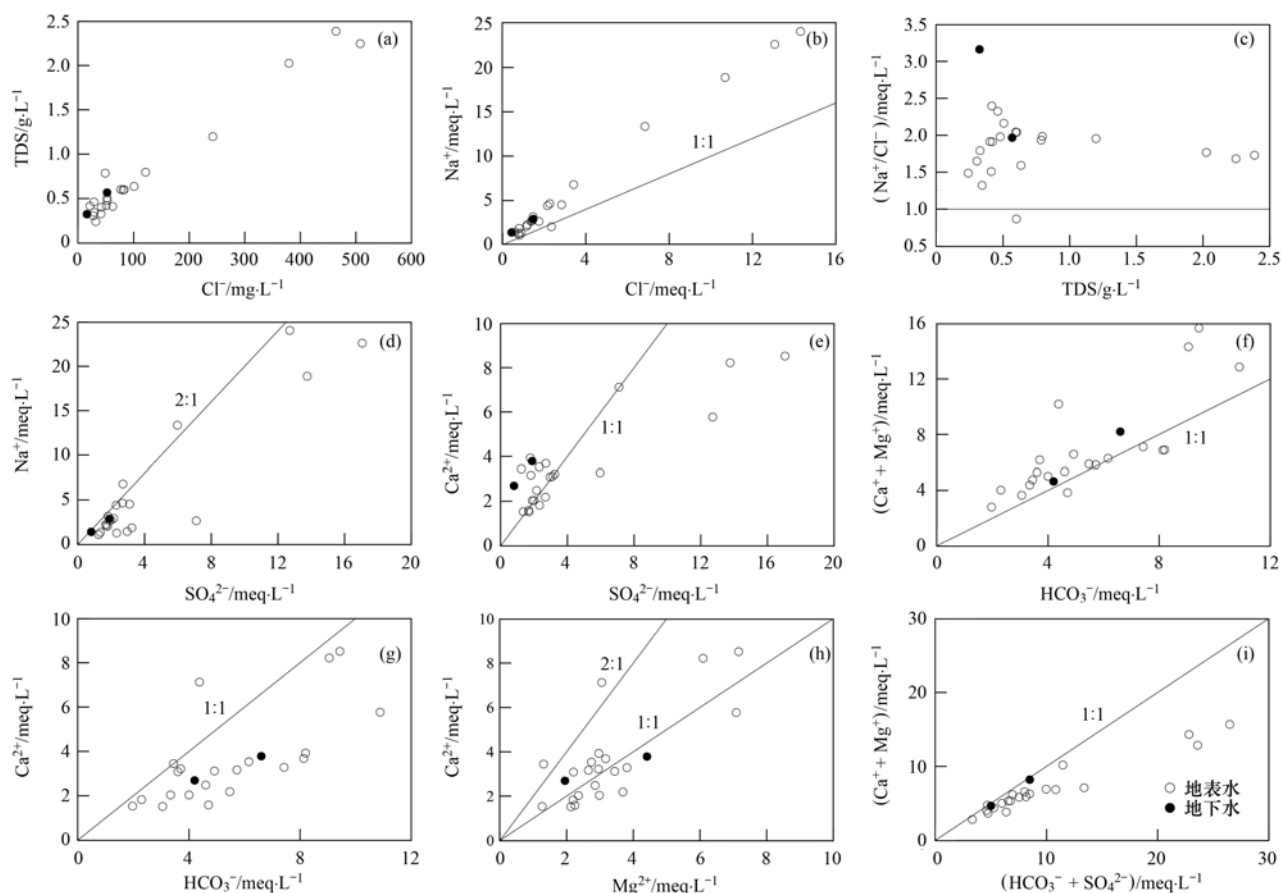


图6 地表水和地下水不同离子关系

Fig. 6 Relationship between different ions in surface water and groundwater

表水水化学特征存在较大差异. 桑干河流域地表水主要阴离子为 Cl^- 和 SO_4^{2-} 、主要阳离子为 Na^+ [图7(a)]; 而洋河流域主要阴离子分别为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} [图7(b)].

上游 S01 和 S02 分布在左上方, 体现了较大的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 百分比的特征 (图3). 整体上来看 S03 ~ S06 段, 八大离子之和较高, 除 S04 以外均在 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, 该段体现了支流污水对洋河的影响. S03 为污水河御河的采样点, 其八大离子之和为 $2\,670\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图8(a)], 水化学类型为 $\text{Na}-\text{SO}_4-\text{Cl}$; S04 为桑干河与御河汇流前的采样点, 其八大离子之和为 $1\,042\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水化学类型为 $\text{Na}-\text{Ca}-\text{HCO}_3$;

S05 为桑干河与御河汇流后的采样点, 混合后的桑干河水八大离子之和为 $2\,297\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水化学类型为 $\text{Na}-\text{SO}_4-\text{Cl}-\text{HCO}_3$, 位于图3的混合线上. 桑干河的污染在此段持续增加, 直至册田水库上游 S06, 八大离子之和仍然达到 $2\,575\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水化学类型为 $\text{Na}-\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{HCO}_3$. 在壶流河入口 (S08) 八大离子之和仍然大于 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其余采样点均小于 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图8(a)]. 除了受御河影响的河段外, 其余桑干河采样点从河流上游到下游, 地表水 TDS 变化不大, 但主要阳离子却发生了很大变化, 上游和下游主要阳离子分为 Ca^{2+} 和 Na^+ , 体现了上游产流区矿物溶解特征和下游汇流区流速慢的高矿化度水特

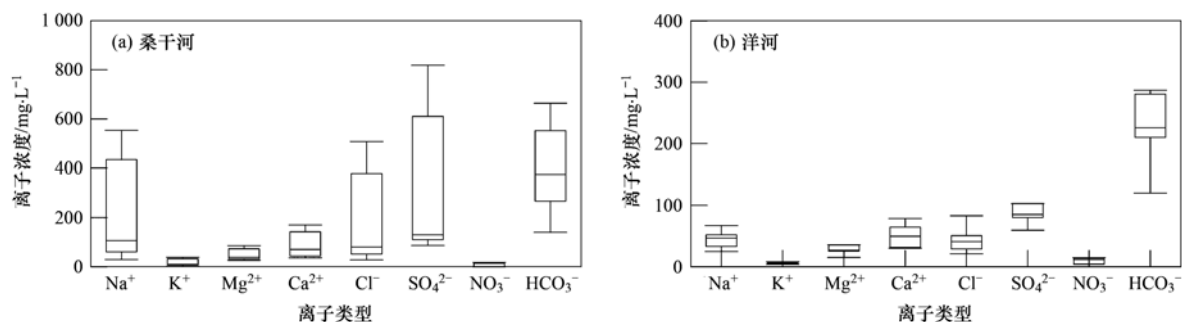


图7 桑干河和洋河地表水主要离子统计特征

Fig. 7 Statistical characteristics map of main ions in surface water of the Sanggan River and Yanghe River

征,其主要水化学类型分别为 $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$ 和 $\text{Na-Mg-Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$.

洋河流域从上游到下游, TDS 呈现先增加后减小, Na^+ 和 Cl^- 的百分比有增加的变化趋势 [图 8(b)], 其中, 上游水化学类型为 Ca-HCO_3 和 $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$, 中游为 $\text{Mg-Na-Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$, 下游为 $\text{Ca-Na-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$. 对洋河而言, Y03 支流和 Y01 支流的 Y01 ~ Y05 河段, 八大离子之和在 $448 \sim 850 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动 [图 8(b)], 但水化学类型差异较大. Y03 水化学类型为 Na-Mg-Ca-HCO_3 , Y01 ~ Y05 河段水化学类型由 $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ 过渡为 Ca-HCO_3 和 Ca-Mg-HCO_3 (图 3). 而 Y06 ~ Y10 河段, 虽然八大离子之和体现出了较大的差异在 $299 \sim 785 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 但主要离子却体现出了阳离子百分比变化不大, 而阴离子中的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 百分比增加的趋势 (图 3 中的箭头所示).

两支流水化学特征的差异也体现了人类活动的差异, 20 世纪 80 年代后, 高覆盖草地向旱地转化、城乡居民建设用地规模不断扩大^[4], 桑干河流域承载着重要的煤炭等能源化工基地, 如大同和朔州等, 虽然煤炭开采矿山已经关停, 但是大部分尾矿堆积^[24]; 而洋河流域主要为农业生产和城市. 研究认为该区域地表水质恶化的主要原因与工业废水的排放和集约化的农业生产活动有关, 且有证据认为 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的增加导致地表水水质恶化, 并且桑干河的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的含量已经超过了国家饮用水质量标准 (GB 5749-2006) 和灌溉水质量标准 (GB 5084-2005) 中规定的限值^[6]. 自然条件下, 地表水的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 与岩石风化有关, 然而该过程却比较缓慢, 且影响有限; 而工业废水中的 Cl^- 以及酸雨中包含的 SO_4^{2-} 是人为因素影响下, 地表水中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 增加的主要原因^[25-27].

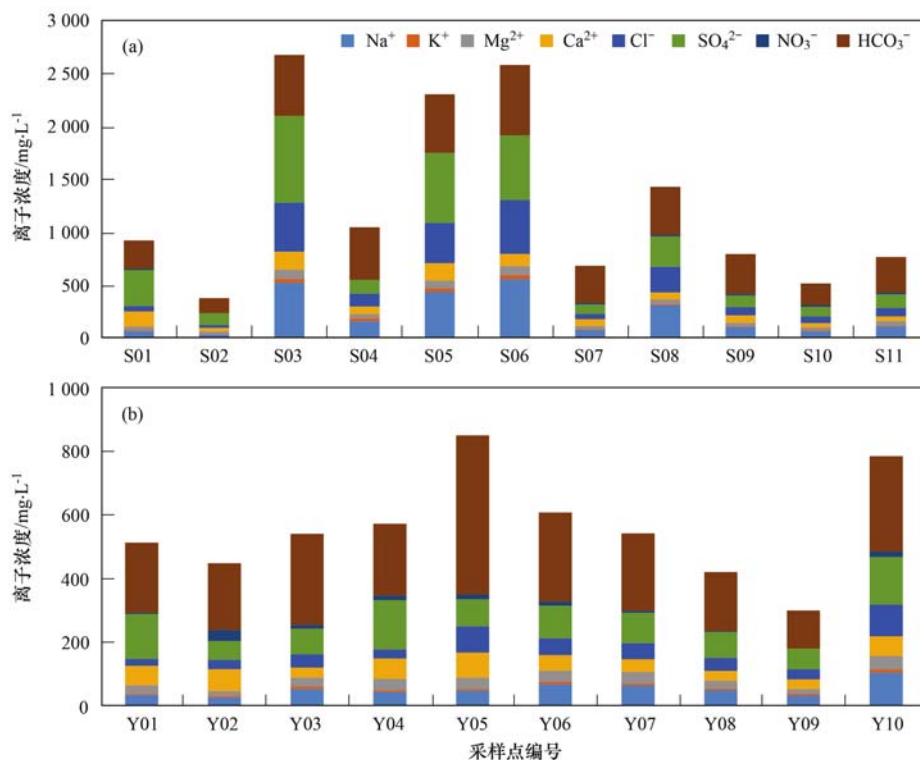
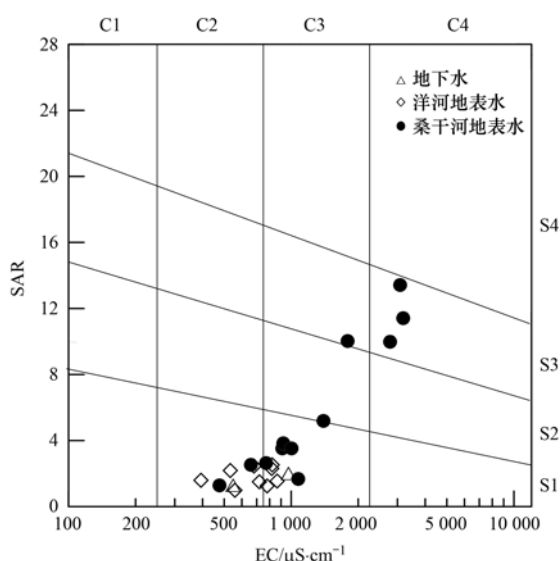


图 8 桑干河和洋河上游到下游离子浓度

Fig. 8 Ion content from upstream to downstream of the Sanggan River and Yanghe River

区域农业发展主要依赖地表水和地下水. 本研究采用钠吸附比 (SAR) 和 EC 之间的关系对灌溉水进行分级, 来评估钠离子毒害^[28]. 图 9 为地表水和地下水灌溉水水质分类, 整体来说, 洋河流域地表水 EC 值和 SAR 均较小, 是盐渍化风险较小的优质水源, 在排水条件良好时、适合耐盐度较好的作物土壤灌溉利用, 不会引起钠离子毒害效应. 洋河上游地表

水主要分布在 C2-S1 区域, 下游地表水主要分布在 C3-S1, 虽然从上游到下游地表水 EC 值增加, 但是 Na^+ 的风险没有明显地上升, 均处于低风险范围内. 桑干河流域, 地表水主要分布在 C3-S3 区和 C4-S3 区, 盐分和钠离子毒害风险较高, 在经过化学改良和淋滤条件很好的土壤中, 可直接灌溉利用. EC 值相差不大的地下水与地表水相比, SAR 值较低, 说明



C1、C2、C3 和 C4 区域分别对应低、中、高和很高的盐渍化风险；
S1、S2、S3 和 S4 分别对应低、中、高和很高的钠离子毒害风险

图9 地表水和地下水灌溉水水质分类

Fig. 9 Irrigation waters classification of surface water and groundwater

总盐分含量接近的情况下,用地表水灌溉的钠离子毒害风险大于地下水。

4 结论

(1) 永定河流域地表水和地下水主要来源于大气降水。大部分地表水和地下水均为淡水,其 TDS 变化范围分别为 $239 \sim 2\,386 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $323 \sim 568 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。地表水和地下水主要阴离子均为 HCO_3^- , 地表水主要阳离子为 Na^+ , 地下水主要阳离子为 Ca^{2+} 和 Na^+ 。不同支流离子含量也体现出较大差异,整体上桑干河流域大于洋河流域,桑干河流域地表水主要阴离子为 Cl^- 和 SO_4^{2-} 、主要阳离子为 Na^+ ; 而洋河流域主要阴阳离子分别为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 。

(2) 地表水的水化学特征受自然因素和人为因素的共同影响,其中自然因素包括岩石风化、碳酸盐、硅酸盐和岩盐等矿物溶解以及离子交换作用。而人为因素如工业废水和酸雨等导致该区域地表水中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 持续增加。

(3) 洋河和桑干河两个支流,主要离子组成特征及其主要影响因素存在显著差异。桑干河流域上游 S01 和 S02 处受自然因素影响, S03 至 S06 段体现了污水排放的影响, S08 以下的河段受自然因素和污水的共同影响。而洋河流域,受主要受农业耕作和城市的影响,并未体现出工业污染的特征。

(4) 虽然地表水和地下水仍然是良好的灌溉水源,灌溉不存在盐分和钠离子毒害风险,但 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的过高含量可能引起的离子毒害,需要引起足

够的重视。同时,对桑干河河水的利用还要注意工业废水排放的影响,从而实现流域地表水资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] Sun Z Y, Ma R, Wang Y X, *et al.* Hydrogeological and hydrogeochemical control of groundwater salinity in an arid inland basin: Dunhuang Basin, northwestern China[J]. *Hydrological Processes*, 2016, **30**(12): 1884-1902.
- [2] Flörke M, Schneider C, McDonald R I. Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth[J]. *Nature Sustainability*, 2018, **1**(1): 51-58.
- [3] Satoh Y, Kahil T, Byers E, *et al.* Multi-model and multi-scenario assessments of Asian water futures; the water futures and solutions (WFaS) initiative[J]. *Earth's Future*, 2017, **5**(7): 823-852.
- [4] 侯蕾, 彭文启, 刘培斌, 等. 永定河上游流域土地利用变化及生态环境效应研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2017, **15**(6): 430-438.
Hou L, Peng W Q, Liu P B, *et al.* Land-use change and its ecological environmental effect in the upstream of Yongding River [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2017, **15**(6): 430-438.
- [5] 张利平, 于松延, 段尧彬, 等. 气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究[J]. *气候变化研究进展*, 2013, **9**(6): 391-397.
Zhang L P, Yu S Y, Duan Y B, *et al.* Quantitative assessment of the effects of climate change and human activities on runoff in the Yongding River basin[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2013, **9**(6): 391-397.
- [6] Dai D, Xu X Q, Sun M D, *et al.* Decrease of both river flow and quality aggravates water crisis in North China: a typical example of the upper Yongding River watershed [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**(7), doi: 10.1007/s10661-020-08371-6.
- [7] Xia J, Zeng S D, Du H, *et al.* Quantifying the effects of climate change and human activities on runoff in the water source area of Beijing, China[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, **59**(10): 1794-1807.
- [8] 崔文彦, 刘得银, 梁舒汀, 等. 永定河流域水生态环境质量综合评价[J]. *水生态学杂志*, 2020, **41**(2): 23-28.
Cui W Y, Liu D Y, Liang S T, *et al.* Comprehensive evaluation of aquatic ecological quality in the Yongding River basin [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(2): 23-28.
- [9] 赵杰杰, 雷坤, 孙明东, 等. 基于负荷历时曲线法的永定河流域河北段磷纳污能力研究[J]. *环境工程技术学报*, 2020, **10**(3): 377-384.
Zhao J J, Lei K, Sun M D, *et al.* Application of load duration curve to analyze the phosphorus capacity of Hebei Section of Yongding River Basin[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, **10**(3): 377-384.
- [10] 云晋, 郝桂珍, 宋凤芝, 等. 永定河上游水质污染特征及评价[J]. *河北建筑工程学院学报*, 2018, **36**(4): 80-84.
Yun J, Hao G Z, Song F Z, *et al.* Characteristics and evaluation of water pollution in the upper reaches of Yongding River [J]. *Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering*, 2018, **36**(4): 80-84.
- [11] 邵志江, 刘莲, 汪涛. 永定河上游张家口地区主要河流污染物来源解析[J]. *环境污染与防治*, 2020, **42**(2): 204-211.
Shao Z J, Liu L, Wang T. Source analysis of main rivers' pollutants of the upper reaches of Yongding River in Zhangjiakou

- area[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, **42**(2): 204-211.
- [12] Guo W X, Fu Y C, Ruan B Q, *et al.* Agricultural non-point source pollution in the Yongding River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2014, **36**: 254-261.
- [13] 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区地下水化学演变特征及形成机制[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4011-4020.
Cui J Q, Li X Y, Shi H B, *et al.* Chemical evolution and formation mechanism of groundwater in Hetao irrigation area[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4011-4020.
- [14] 王新娟, 谢振华, 李世君, 等. 北京市城近郊区地下水的环
境同位素研究[J]. *地学前缘*, 2006, **13**(1): 205-210.
Wang X J, Xie Z H, Li S J, *et al.* A study of environmental
isotopes in groundwaters near the suburbs of Beijing[J]. *Earth
Science Frontiers*, 2006, **13**(1): 205-210.
- [15] 王绍瑛. 永定河的治理成就与存在问题[J]. *北京水利*,
1997, (3): 25-27.
- [16] 董霞. 桑干河干流河道治理水文分析[J]. *水科学与工程技
术*, 2015, (1): 30-33.
Dong X. Hydrologic analysis of Sanggan river channel regulation
[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2015, (1):
30-33.
- [17] Wang L, Wang Z J, Koike T, *et al.* The assessment of surface
water resources for the semi-arid Yongding River Basin from 1956
to 2000 and the impact of land use change[J]. *Hydrological
Processes*, 2010, **24**(9): 1123-1132.
- [18] 侯蕾. 北方水资源短缺流域生态-水文响应机制研究——以
永定河为例[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
Hou L. Study on mechanism of ecohydrological response at the
water resources shortage watershed in northern China-A case
study of Yongding River[D]. Beijing: China Institute of Water
Resources and Hydropower Research, 2019.
- [19] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*,
1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [20] Clark I, Fritz P. *Environmental isotopes in hydrogeology*[M].
New York: CRC Press, 1997. 328.
- [21] Appelo C A J, Postma D. *Geochemistry, groundwater and
pollution* (2nd ed.)[M]. New York: Balkema, 2005.
- [22] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J].
Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [23] Han Y, Wang G C, Cravotta III C A, *et al.* Hydrogeochemical
evolution of Ordovician limestone groundwater in Yanzhou, North
China[J]. *Hydrological Processes*, 2013, **27**(16): 2247-2257.
- [24] 张灵. 桑干河上游流域径流泥沙对气候要素与土地利用变化
的响应研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
Zhang L. Response of runoff and sediment to climatic variabilities
and land use change on the upper Sang-kan River basin[D].
Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [25] Chen J S, Wang F Y, Xia X H, *et al.* Major element chemistry
of the Changjiang (Yangtze River)[J]. *Chemical Geology*,
2002, **187**(3-4): 231-255.
- [26] Rhodes A L, Newton R M, Pufall A. Influences of land use on
water quality of a diverse New England watershed[J].
Environmental Science & Technology, 2001, **35**(18): 3640-
3645.
- [27] Yu T, Zhang Y, Wu F C, *et al.* Six-decade change in water
chemistry of large freshwater lake Taihu, China[J].
Environmental Science & Technology, 2013, **47**(16): 9093-
9101.
- [28] Richards L A. *Diagnosis and improvement of saline and alkali
soils*[M]. Washington: US Department of Agriculture, 1954.
60.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (<i>Nereididae</i>) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)