

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

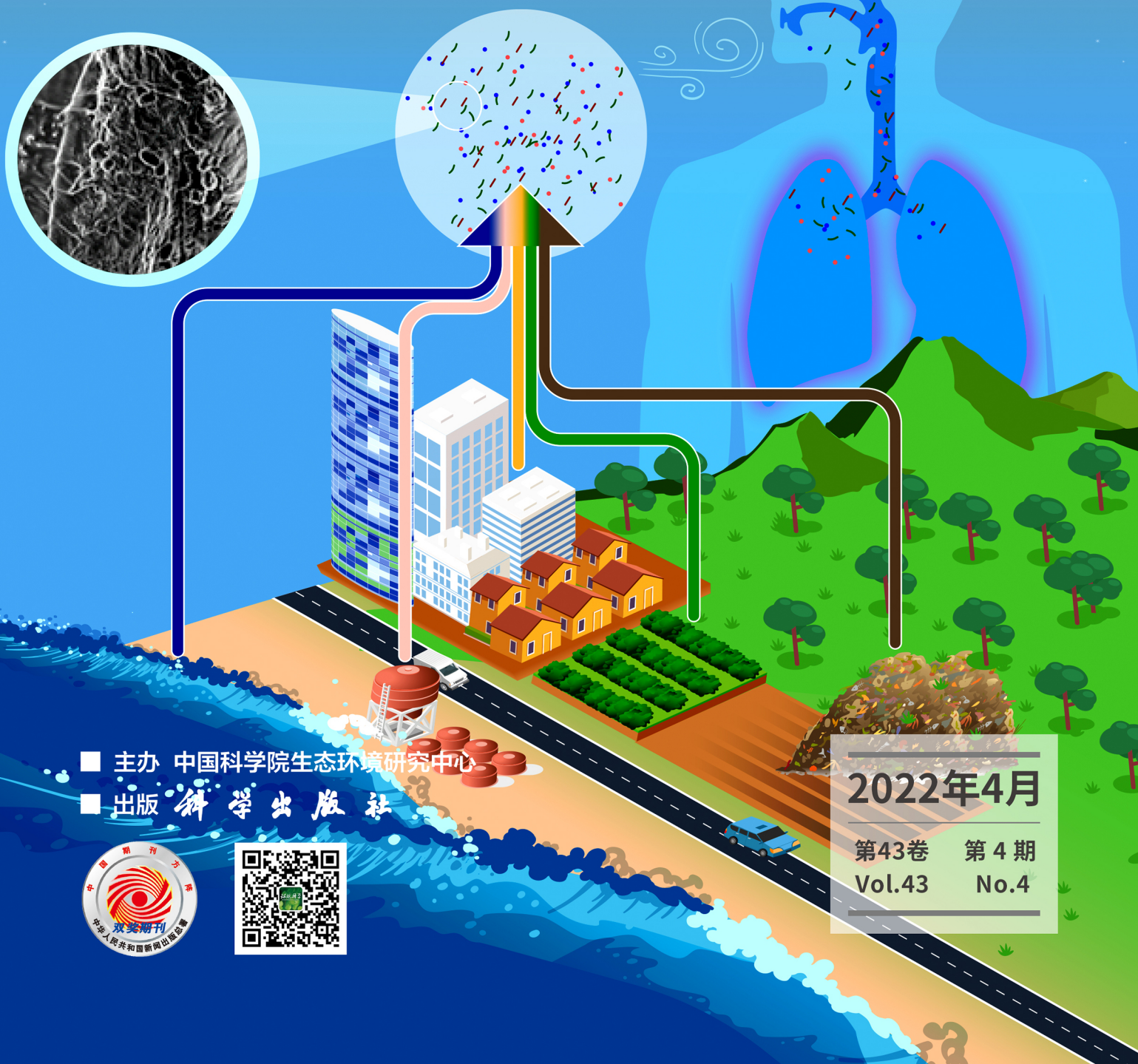
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
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	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游沿岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

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

雷米^{1,2,3}, 周金龙^{1,2,3*}, 张杰⁴, 陈亚鹏⁵, 滕杰⁵, 吴彤⁵, 徐东升⁵, 孙英^{1,2,3}, 纪媛媛^{1,2,3}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 4. 南宁师范大学地理科学与规划学院, 南宁 530001; 5. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要: 博尔塔拉河流域地质条件复杂, 地表水与地下水转化频繁, 研究地表水与地下水水化学特征及转化关系对流域水资源合理开发和配置具有重要意义。基于2021年4~5月采集的15组地表水样和39组地下水样, 采用APCS/MLR模型和稳定氢氧同位素与水化学相结合的方法, 分析了地表水和地下水水化学类型和氢氧同位素分布特征、水化学组分源贡献率和地表水与地下水转化关系。结果表明, 地表水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca型和 HCO_3 -Ca型, 地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca·Na型、 HCO_3 -Ca型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca型; 溶滤-迁移-富集因子、人类活动因子、环境因子和原生地质因子对地表水和地下水中离子的平均贡献率分别为28.8%、17.7%、12.0%和6.5%; 博尔塔拉河河水中D和 ^{18}O 沿程呈富集趋势, 北岸地下水中D和 ^{18}O 整体丰于南岸; 在地质构造和水文地质条件等地质条件因素控制下, 河水与地下水转化集中在博尔塔拉河中游, 总体表现为河流两侧潜水和泉水溢出补给河水, 补给比例范围为1.0%~70.9%。

关键词: 地表水; 地下水; 水化学特征; 转化关系; 博尔塔拉河流域

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1873-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108055

Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang

LEI Mi^{1,2,3}, ZHOU Jin-long^{1,2,3*}, ZHANG Jie⁴, CHEN Ya-peng⁵, TENG Jie⁵, WU Tong⁵, XU Dong-sheng⁵, SUN Ying^{1,2,3}, JI Yuan-yuan^{1,2,3}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China; 4. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 5. China Water Resources Beifang Investigation Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: The geological conditions of the Bortala River basin are complex, and the transformation of surface water and groundwater is frequent. It is great significance to study the hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater for the reasonable development and allocation of water resources in the basin. Based on 15 surface water samples and 39 groundwater samples collected in April and May 2021, the APCS/MLR model and the combination of stable hydrogen and oxygen isotopes with hydrochemistry were used in this study to analyze the hydrochemical types and the distribution characteristics of hydrogen and oxygen isotopes, the source contribution of chemical components, and the transformation relationship between surface water and groundwater. The results showed that the surface water was mainly $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca type and HCO_3 -Ca type, and the groundwater was mainly $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca·Na type, HCO_3 -Ca type, and $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca type. The contribution rates of the dissolution-migration-enrichment factor, human activities factor, environment factor, and native geological factor to the chemical components were 28.8%, 17.7%, 12.0%, and 6.5%, respectively. Bortala River water D and ^{18}O was enriched along the distance, and groundwater D and ^{18}O in the north bank was generally more enriched than groundwater in the south bank as a whole. Under the control of geological conditions such as geological structure and hydrogeological conditions, the transformation of river water and groundwater was concentrated in the middle reaches of the Bortala River, which was generally manifested in both unconfined groundwater and spring overflow in the sides of the recharge river water, and the recharge proportion ranged from 1.0% to 70.9%.

Key words: surface water; groundwater; hydrochemical characteristics; transformation relationship; Bortala River basin

地表水与地下水之间的转化是流域水循环过程的重要环节, 准确掌握其机制和转化过程是流域水资源管理与保护的基础^[1~3]。地质条件(地质构造、地层岩性)^[4,5]、河流特性(河流几何形态、河流与含水层水力特征)^[6,7]、季节性降水^[8]和人类活动^[9,10]等因素控制着地表水和地下水转化的空间分布、转化的形式和水量。天然水体的水化学组分是在水循环过程中与周围环境长期相互作用的产物, 在一定程度上记录着水体的形成、运移和转化途

径。而在水文地球化学作用和人为因素的影响下, 利用水化学特征来表征地表水与地下水之间的转化关系具有不确定性^[11,12]。

氢氧稳定同位素因分馏作用, 不同成因的水源

收稿日期: 2021-08-06; 修订日期: 2021-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007161); 新疆维吾尔自治区寒旱区水资源与生态水利工程研究中心(院士专家工作站)新疆水专项(2020-C-005)

作者简介: 雷米(1992~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为地下水水资源利用与保护, E-mail: 178445085@qq.com

* 通信作者, E-mail: zjzhoujl@163.com

具有特征性同位素且含量相对稳定^[13]. 因此将水化学方法与同位素相结合是目前判定地表水与地下水转化关系的一种有效示踪技术手段^[12,14,15]. 在水化学组分来源分析中更多是利用因子分析^[16]、聚类分析^[17]和相关性分析^[11]等多元统计方法来定性地识别水化学组分来源和迁移转化过程的常规信息, 但却难以定量厘定复杂地质条件下水岩作用程度以及人类活动对水中水化学组分的影响. 绝对主成分/多元线性回归模型 (APCS/MLR) 是解析大气^[18,19]和土壤重金属^[20,21]等污染源常用的受体模型, 该模型基于主成分分析将未知源成分的样本数据进行降维, 根据样本数据与因子绝对真实得分 (APCS) 关系, 提取水化学组分源贡献率.

博尔塔拉河地处准噶尔盆地西缘, 是我国西北干旱区典型咸水湖——艾比湖的主要补给源之一^[22]. 在新构造运动影响下, 博尔塔拉河流域形成两个隆起带和三个断陷盆地, 地质构造对径流起着调节作用和滞后影响, 使地表与地下径流呈现 3 次转化^[23]. 以往多侧重在地表水水质评价^[24,25]、地表水水资源评价^[23,26]和大气降水、地表水与地下水的氢氧同位素季节性特征^[27,28]等方面的研究, 而对于该流域水化学组分来源、地表水与地下水转化关系的研究仍显不足. 本文以博尔塔拉河流域平原区为研究区, 采用 APCS/MLR 模型定量解析地表水与地下水水化学组分来源; 结合地质构造、水文地质等地质条件, 运用水文地球化学与同位素方法探讨地表水与地下水之间的转化关系, 以期为该流域水资源合理开发和配置提供科学依据.

1 研究区概况

博尔塔拉河流域位于博尔塔拉蒙古自治州, 东临艾比湖, 西、北与哈萨克斯坦接壤, 南与伊犁哈萨克自治州相连. 研究区属于博尔塔拉河流域平原区 (图 1), 地理坐标介于 $80^{\circ}24' \sim 82^{\circ}47'E$, $44^{\circ}13' \sim 45^{\circ}09'N$, 谷地平原南侧为别珍套山、汗吉杂山和科古琴山, 北侧为阿拉套山, 具有三面环山、一面开阔呈喇叭形谷地的地形特点. 流域总体地势西高东低, 由西向东、东北倾斜, 艾比湖为流域最低处, 山区、谷地平原和赛里木高山湖泊区构成流域内三大地貌单元. 流域内呈大陆性干旱气候, 降水少、蒸发强, 年平均气温 $3.5 \sim 6.0^{\circ}C$, 年降水量为 180.0 mm , 年蒸发量为 1569.2 mm . 区内水系发育, 主要包括博尔塔拉河、哈拉吐鲁克河、大河沿子河和沃托格塞尔河等众多山溪性河流. 其中, 博尔塔拉河发源于阿拉套山的艾生达坂, 全长 252.0 km , 据文献^[29], 博乐水文站年径流量 $5.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 流量随季节性变化,

经温泉县和博乐市后注入艾比湖, 以温泉县和博乐市为界, 分为上游、中游和下游.

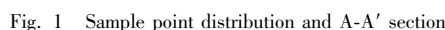
在南北向应力作用下, 流域内形成一系列平行的褶皱和断裂, 以博尔塔拉河断裂为界将南北分为天山褶皱带和别珍套山褶皱带, 研究区位于二者之间, 地质构造单元自西向东依次为沙尔提山前断陷盆地、温泉隆起、昆屯仑断陷盆地、博乐断隆和精河山前断陷盆地^[30]. 研究区出露地层主要为: 古近系-新近系, 地层岩性主要为泥岩、泥灰岩和石膏等; 第四系以冲积和冲-洪积为主, 岩性主要由粘土和砾石等组成. 研究区水文地质条件受地质构造控制, 其分布规律与地貌、岩相分布带相适应, 自西向东由单一结构潜水向上部潜水-下部承压含水层过渡. 地下水主要受积雪消融水、河道水、渠系水和暴雨洪流入渗等方式补给; 总体自西向东径流, 水力坡度为 $0.6\% \sim 9.6\%$; 排泄方式主要为蒸发蒸腾、人工开采、泉水溢出和侧向排出等.

2 材料与方法

2.1 样品采集与测试

2021 年 4~5 月在博尔塔拉河流域平原区采集地表水样 15 组、地下水样 39 组 (潜水 28 组、泉水 9 组和承压水 2 组), 地下水取样井深 $\leq 200.0 \text{ m}$. 取样前用待取水润洗高密度聚乙烯 (HDPE) 取样瓶 3~5 次, 采用 $0.22 \mu\text{m}$ 微孔滤膜对所取水样进行过滤, 检测阳离子的水样加硝酸酸化至 $\text{pH} < 2$, 所有样品经 parafilm 封口膜密封后, $4.0^{\circ}C$ 冷藏保存. 现场采用 HANNA (HI9829) 高精度便携式多参数水质分析仪对 pH 、水温 (T) 和电导率 (EC) 等指标进行测定.

K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、总硬度 (TH, 以 $CaCO_3$ 计) 和溶解性总固体 (TDS) 等离子指标均由新疆地矿局第二水文工程地质大队按《生活饮用水标准检验法》(GB/T 5750-2006) 测试完成. 其中, K^+ 和 Na^+ 测定方法为火焰原子吸收分光光度法, 检出限分别为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 TH 采用乙二醇四乙酸二钠滴定法测定, 检出限为 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Cl^- 采用硝酸银容量法测定, 检出限为 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; SO_4^{2-} 采用硫酸钡比浊法测定, 检测限为 $5.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 采用酸碱滴定法测定, 检测限为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TDS 采用重量法测定, 检测限为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 所有检测样品阴阳离子平衡误差绝对值均小于 5%. 氢氧稳定同位素 (D 和 ^{18}O) 由中国科学院新疆生态与地理研究所测定, 测试仪器为液态水同位素分析仪 (DEL-100), 测试结果以相对维也纳标



式中, C_j 为第 j 个指标浓度, B_i 为多元线性回归系数, B_0 为多元线性回归常数项(一般认为是未被识别源的贡献值), $B_i \times \text{APCS}_{ji}$ 为主成分 i 对指标

浓度 C_j 的贡献(其平均值即为主成分的平均贡献率)。

在回归方程中各指标线性拟合 R^2 在 0.62 ~ 0.99 之间,且预测值与实测值比值均在 1.0 左右,表明 APCS/MLR 模型对地下水中组分来源识别和贡献分配准确度较高。

2.2.2 同位素模型

依据同位素质量平衡原理,不同水源混合前后同位素总量保持不变,可以通过不同补给水源的稳定氢氧同位素之间的差异来定量分析混合水体中的贡献比例。采用二端元混合模型^[31](水源个数 $n < 3$)和 IsoSource 模型^[32](水源个数 $n \geq 3$)计算混合水体中各水源的贡献比例,模型表示为:

$$\delta = \sum_{i=1}^n f_i \delta_i \tag{5}$$

$$1 = \sum_{i=1}^n f_i \tag{6}$$

式中, i 为补给水源, f_i 为补给水源贡献比例, δ 为稳定氧同位素值。IsoSource 模型中增量参数设置为 1%,质量平衡允许度为 0.01‰~0.05‰。

根据各水体之间的转化比例,采用 PHREEQC 软件对水中水化学组分进行混合模拟,将不同比例下生成的模拟值与真实值对比,以此来探讨水体在径流过程中所经历的水文地球化学作用,模拟准确度采用均方根误差(RMSE)表示:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \tag{7}$$

式中, y_i 为样本实测浓度值; $\hat{y}$ 为模拟计算的样本浓度值, n 为 7 大主要阴阳离子。

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

由博尔塔拉河流域地表水和地下水水化学参数统计(表 1)可以看出:研究区地表水 pH 和 TDS 变化范围分别为 7.8~8.7 和 96.6~1 049.1 mg·L⁻¹, 平均值分别为 8.1 和 310.7 mg·L⁻¹,水质整体呈弱碱性;阳离子以 Ca²⁺ 为主,阴离子以 HCO₃⁻ 为主,平均值分别为 51.5 mg·L⁻¹和 145.1 mg·L⁻¹。地下水 pH 范围为 7.2~8.6,平均值为 7.8,水质整体呈弱碱性,TDS 变化范围为 136.9~2 735.0 mg·L⁻¹,平均值为 471.0 mg·L⁻¹,水样多为低矿化度淡水(TDS < 1 000 mg·L⁻¹)。其中,潜水中 EC 和 TDS 变化范围较大,分别为 195.0~3 540.0 μS·cm⁻¹和 136.9~2 735.0 mg·L⁻¹,表明潜水径流条件复杂,水岩相互作用较强,易溶盐含量较高。高 As 水主要分布于承压含水层,最大值达 81.7 μg·L⁻¹。潜水和泉水阳离子均以 Ca²⁺ 为主,阴离子以 HCO₃⁻ 为主;承压水阳离子以 Na⁺ 为主,阴离子以 HCO₃⁻ 为主。

表 1 地表水和地下水水化学参数特征¹⁾

Table 1 Characteristics of surface water and groundwater hydrochemical parameters

指标	地表水(N=15)		地下水					
			潜水(N=28)		泉水(N=9)		承压水(N=2)	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
<i>T</i>	3.8~17.6	10.9	7.4~17.1	11.7	3.5~12.4	9.2	10.9~18.6	14.8
EC	131.0~1 511.0	450.3	195.0~3 540.0	747.0	215.0~1 046.0	442.3	389.0~754.0	571.5
高锰酸盐指数	0.5~2.8	1.4	0.5~2.5	0.7	0.5~1.4	0.8	0.5~0.6	0.55
pH	7.8~8.7	8.1	7.2~8.1	7.8	7.3~8.0	7.8	8.0~8.6	8.3
TH	55.2~490.1	174.7	85.4~1 662.0	307.2	97.4~291.2	177.0	43.2~108.5	75.8
TDS	96.6~1 049.1	310.7	136.9~2 735.0	543.9	152.1~751.3	300.7	236.6~441.5	339.1
K ⁺	2.6~6.7	3.4	2.6~20.2	4.2	2.8~3.2	3.0	3.0	3.0
Na ⁺	7.9~147.9	33.0	11.0~256.0	55.7	5.7~126.6	29.3	32.2~129.8	81.0
Ca ²⁺	17.3~116.6	51.5	28.2~518.4	91.3	35.8~92.9	56.1	13.3~38.2	25.7
Mg ²⁺	1.0~48.3	11.2	2.0~153.4	19.2	2.0~17.3	8.9	2.4~3.2	2.8
Cl ⁻	2.8~126.2	25.4	5.7~957.2	84.3	7.1~35.5	13.4	14.2~63.8	39.0
SO ₄ ²⁻	6.2~452.2	94.8	13.7~752.8	166.7	20.3~259.6	75.0	47.5~165.7	106.6
HCO ₃ ⁻	70.8~241.7	145.1	98.9~332.1	176.7	116.0~291.8	177.8	79.6~142.8	111.1
NH ₄ ⁺	ND.~0.5	0.2	ND.~3.1	0.6	ND.~0.1	0.1	ND.~0.1	—
NO ₃ ⁻	2.6~20.1	9.1	0.6~96.5	19.4	2.2~51.1	13.8	4.3~7.6	5.9
NO ₂ ⁻	ND.~1.0	0.2	ND.~0.9	0.2	ND.~0.5	0.2	0.1	0.1
F ⁻	0.2~1.6	0.6	0.2~1.9	0.6	0.2~1.1	0.5	0.4~1.0	0.7
As	ND.~8.7	4.0	1.4~8.9	3.4	1.3~7.5	3.2	4.0~81.7	42.8
δD	-88.78~-69.27	-77.5	-83.98~-68.46	-75.61	-82.65~-70.14	-75.13	-80.06~-72.15	-76.10
δ ¹⁸ O	-12.65~-10.23	-11.20	-12.12~-10.01	-11.02	-12.18~-10.38	-11.01	-11.12~-10.67	-0.89

1) 单位说明: *T* 为℃, EC 为 μS·cm⁻¹, pH 无量纲, As 为 μg·L⁻¹, δD 和 δ¹⁸O 为‰, 其余为 mg·L⁻¹; ND. 表示未检出

由地表水和地下水水样 Durov 图可以看出(图 2),地表水中阳离子在三角图中靠近($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)- Ca^{2+} 线并偏向 Ca^{2+} 一端,阴离子靠近($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$)- SO_4^{2-} 线并偏向($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$)一端,水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca 型和 HCO_3 -Ca 型,个别为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca·Na 型、 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ -Ca·Na·Mg 型和 SO_4 -Na·Ca·Mg 型,其中以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ (HCO_3) 型为主导的地表水主要分布于博尔塔拉河中上游, $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ (SO_4) 型分布于博尔塔拉河下游. 地下水中阳离子在三角图中靠近($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)- Ca^{2+} 线并偏向 Ca^{2+} 一端,阴离子分布在三角图中央并偏向($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$)一端,潜水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca·Na 型和 HCO_3 -Ca 型;泉水

水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca 型;承压水为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca·Na 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ -Na 型. 复杂的地质条件决定了流域地下水水化学类型的空间差异,同一区域相同水化学类型的地表水与地下水体现出统一联系性^[33]. 地表水 S4 中 F^- 浓度较高,达 $1.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与邻近潜水 G7 中 F^- 浓度一致,表明此处地表水与潜水经历了相同的水化学作用过程. 博尔塔拉河水 S3 到 S5 水化学类型由 HCO_3 -Ca·Na 型转为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca 型,到 S6 水化学类型为 HCO_3 -Ca 型,这与沿河潜水 G5 ($\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca 型)到 G11 (HCO_3 -Ca 型)水化学类型空间变化一致,表明地表水与地下水之间存在一定的水力联系.

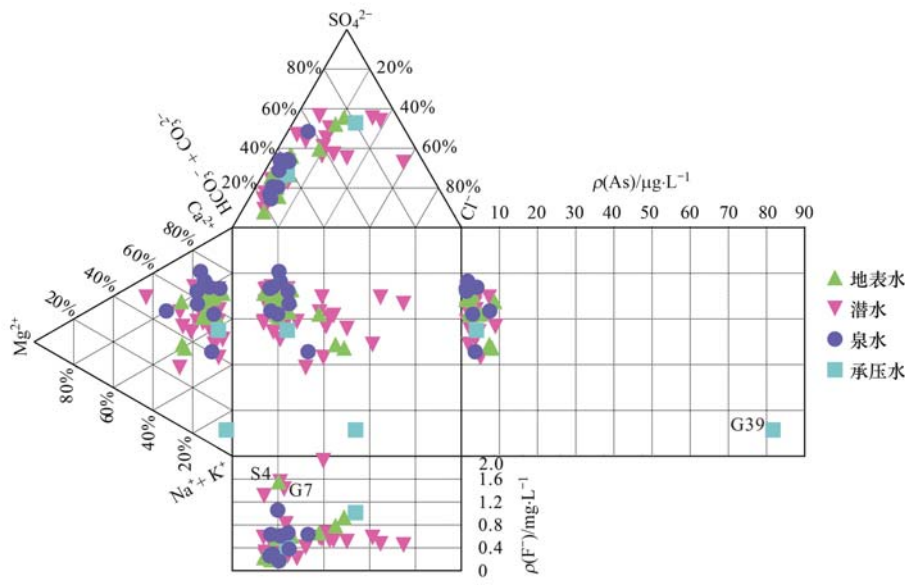


图 2 地表水和地下水 Durov 图

Fig. 2 Durov diagram of surface water and groundwater

3.2 水化学控制因素和来源解析

3.2.1 水化学控制因素分析

Gibbs 图将天然水体水化学演化过程划分为 3

种主要控制因素,即大气降水、岩石溶滤和蒸发浓缩^[34]. 由研究区地表水和地下水 Gibbs 图可以看出(图 3),地表水和地下水中 $\gamma\text{Na}^+/\gamma(\text{Na}^+ +$

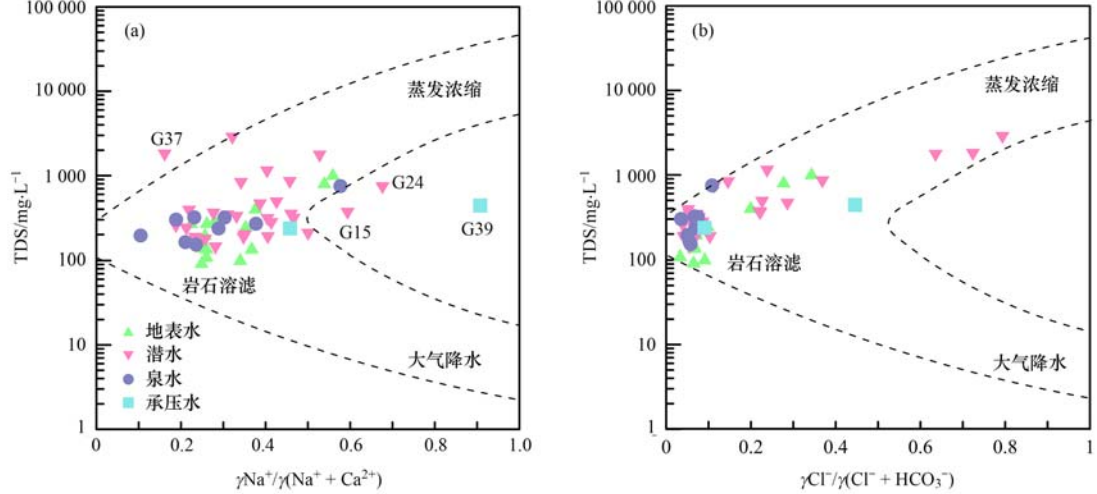


图 3 地表水与地下水 Gibbs 图

Fig. 3 Gibbs diagram of surface water and groundwater

Ca²⁺) 的范围分别为 0.22 ~ 0.56 和 0.10 ~ 0.91, $\gamma\text{Cl}^-/\gamma(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的范围分别为 0.03 ~ 0.34 和 0.04 ~ 0.79, 其中泉水点分布较为集中, 主要分布在岩石溶滤区附近, 地表水和潜水点分布分散, 落在岩石溶滤区并向蒸发浓缩区偏移, 表明流域内地表水和地下水中离子主要来源于岩石溶滤作用, 同时受到了蒸发浓缩作用的影响. 部分潜水 (G15、G24 和 G37) 和承压水 (G39) 点落在控制区虚线外围, 这可能与人类活动、阳离子交换作用等

因素有关.

3.2.2 水化学来源解析

对研究区 54 组水样 17 项指标进行主成分分析, 检验结果得到 KMO 值为 0.66, 接近 0.70, 适合做主成分分析. Bartlett 球形检验量为 2 590.70, *P* 值为 0.00, 表明各指标间存在较强的相关关系^[35]. 本次共提取 4 个特征值大于 1 公因子 (F1、F2、F3 和 F4), 累计方差贡献率为 80.17%, 各公因子提取结果与成分矩阵见表 2.

表 2 公因子特征值和成分矩阵¹⁾

Table 2 Common factor eigenvalues and component matrix

解释的总方差				成分矩阵				
公因子	初始特征值			化学指标	公因子			
	合计	方差贡献率/%	累计贡献率/%		F1	F2	F3	F4
1	8.55	50.28	50.28	EC	0.92	0.26	0.28	0.04
2	2.05	12.08	62.36	高锰酸盐指数	0.22	0.65	-0.09	0.19
3	1.65	9.69	72.05	pH	-0.27	-0.15	-0.47	0.56
4	1.38	8.12	80.17	TH	0.96	0.10	0.17	-0.11
5	0.88	5.20	85.37	TDS	0.93	0.25	0.27	0.00
6	0.69	4.07	89.44	K ⁺	0.51	0.82	0.11	-0.04
7	0.58	3.43	92.87	Na ⁺	0.67	0.47	0.39	0.24
8	0.47	2.76	95.63	Ca ²⁺	0.92	0.16	0.25	-0.14
9	0.40	2.36	97.99	Mg ²⁺	0.90	-0.04	0.00	-0.05
10	0.21	1.21	99.20	Cl ⁻	0.92	0.15	0.07	-0.05
11	0.08	0.49	99.69	SO ₄ ²⁻	0.89	0.34	0.20	0.04
12	0.03	0.18	99.87	HCO ₃ ⁻	0.33	0.00	0.81	-0.07
13	0.02	0.10	99.97	NH ₄ ⁺	0.17	0.89	-0.04	-0.09
14	0.01	0.03	100.00	NO ₃ ⁻	0.23	-0.03	0.88	-0.02
15	0.00	0.00	100.00	NO ₂ ⁻	-0.04	0.74	0.11	-0.12
				F ⁻	-0.13	0.14	0.35	0.62
				As	0.11	-0.10	-0.18	0.80

1) 黑体数字表示在该因子中具有较高影响的化学指标

在主成分分析的基础上得到各水化学指标贡献率, 根据成分矩阵 (表 2) 和指标贡献率 (图 4) 可以看出, 公因子 F1 的主要荷载为 EC、TH、TDS、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 这 8 项指标, 均呈正相关, 贡献率分别是 56.4%、45.4%、63.6%、20.7%、41.9%、51.8%、68.5% 和 49.6%. 研究区地层岩性多为第四系松散冲洪积物, 颗粒松散, 水岩作用使盐岩 (Na⁺、Cl⁻)、石膏 (Ca²⁺、SO₄²⁻)、白云石 (Ca²⁺、Mg²⁺) 等矿物溶解、迁移, 水中离子浓度增加, EC、TH 和 TDS 随之变化. 再者, 强烈的蒸发作用也会导致地表水和地下水中各离子富集. 因此将公因子 F1 定义为溶滤-迁移-富集因子.

公因子 F2 的主要荷载为高锰酸盐指数、K⁺、NH₄⁺ 和 NO₂⁻, 均呈正相关, 贡献率分别为 42.1% 和 43.3%、64.2% 和 49.8%. 高锰酸盐指数是反映有机物含量特征指标, NH₄⁺、NO₂⁻ 属于人类活动输入因子^[36,37]. 研究区地表水中有有机物、NH₄⁺ 和 NO₂⁻ 主要来源生活和工业废水的排放^[27], 未经处理的废

液排入河流, 在地表水与地下水交互作用下, 有机物、含氮污染物的渗入导致地下水中高锰酸盐指数、NH₄⁺ 和 NO₂⁻ 浓度增大. 同时, 农业耕作中含氮、含钾化肥的使用也是水中 K⁺、NH₄⁺ 和 NO₂⁻ 富集的原因之一^[38], 因此将公因子 F2 定义为人类活动因子.

公因子 F3 的主要荷载为 HCO₃⁻ 和 NO₃⁻, 均呈正相关, 贡献率分别为 29.4% 和 48.9%. 水中 HCO₃⁻ 主要来源于碳酸盐岩溶解, 对水中酸碱度具有调节作用. 研究区水质整体处于弱碱性氧化环境, 生活、工业废水中 NH₄⁺、NO₂⁻ 在氧化环境中转化为 NO₃⁻. 另外, 外界环境也会影响水中 NO₃⁻ 浓度, 如: 固氮菌固氮作用^[39], 农业生产输入^[37], 因此将公因子 F3 定义为环境影响因子.

公因子 F4 的主要荷载为 F⁻ 和 As, 均呈正相关, 贡献率分别为 20.9% 和 22.6%. 碱性环境、含氟矿物的溶解为水中 F⁻ 的富集提供了条件, 研究区北部阿拉套山花岗岩分布广泛, 花岗岩中含有丰富

的萤石等原生矿物^[40]. As 多来源于硫化物氧化、铁氧化物还原,研究区存在含硫、铁等多金属硫化物矿床^[41,42]. 含氟、砷矿物经溶滤作用进入地表水和地下水. 因此将公因子 F4 定义为原生地质影响因子.

综上,溶滤-迁移-富集因子(F1)、人类活动因子(F2)、环境因子(F3)和原生地质因子(F4)对研究区地表水和地下水离子的平均贡献率分别为28.8%、17.7%、12.0%和6.5%. 其它因子平均贡献率为35.0%.

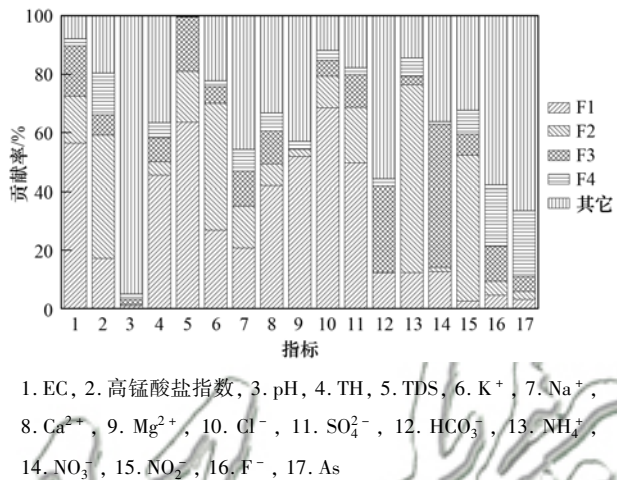


图4 各因子中指标源贡献率
Fig. 4 Index source contribution rate in each factor

3.3 同位素特征

博尔塔拉河流域地表水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值变化范围分别为 $-88.78‰ \sim -69.27‰$ 和 $-12.65‰ \sim -10.23‰$, 平均值分别为 $-79.18‰$ 和 $-11.37‰$. 博尔塔拉河上游河水 δD 和 $\delta^{18}O$ 平均值分别为 $-84.74‰$ 和 $-12.20‰$; 中游河水 δD 和 $\delta^{18}O$ 平均值分别为 $-79.01‰$ 和 $-11.46‰$; 下游河水 δD 和 $\delta^{18}O$ 平均值分别为 $-75.33‰$ 和 $-10.52‰$. 在 δD - $\delta^{18}O$ 关系中[图5(a)], 博尔塔拉河上游地表水样点

落在大气降水线附近,中、下游逐渐偏离,地表水同位素拟合方程 $\delta D = 6.9 \delta^{18}O - 0.2$ ($R^2 = 0.84$) 的斜率接近于流域降水线 $\delta D = 6.6 \delta^{18}O - 4.9$ 斜率,南北两岸支流河水(S4、S7和S8)的D和¹⁸O均丰于博尔塔拉河河水,表明博尔塔拉河河水初始补给来源于大气降水,沿程经历了蒸发作用,但在地下水补给影响下,其D和¹⁸O同位素仍表现为贫化. 博尔塔拉河流域地表水 δD 、 $\delta^{18}O$ 值变化范围在流域春季(3~5月)大气降水 δD 、 $\delta^{18}O$ ($-98.38‰ \sim -78.43‰$ 和 $-12.89‰ \sim -9.32‰$)^[28] 和地下水 δD 、 $\delta^{18}O$ 值变化范围之间,由此进一步说明流域内地表水来源于大气降水和地下水补给.

博尔塔拉河流域地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值变化范围分别为 $-83.98‰ \sim -68.46‰$ 和 $-12.18‰ \sim -10.01‰$, 平均值分别为 $-75.52‰$ 和 $-11.01‰$. 在 δD - $\delta^{18}O$ 关系中[图5(b)], 地下水点均落在大气降水线附近. 其中,博尔塔拉河南岸地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 平均值分别为 $-76.99‰$ 和 $-11.10‰$, 同位素拟合方程斜率为6.5,接近大气降水线斜率; 北岸地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 平均值分别为 $-73.62‰$ 和 $-10.84‰$, 同位素拟合方程斜率为4.9,小于大气降水线斜率,说明流域内地下水均来源于大气降水,而北岸D和¹⁸O整体丰于南岸,这和地表水补给有关. 例如,潜水G8的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别为 $-83.33‰$ 和 $-12.12‰$, G9的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别为 $-81.91‰$ 和 $-11.92‰$,与河水S6的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值($-81.92‰$ 和 $-11.80‰$)接近,水化学类型均为HCO₃-Ca型,受上层河水的补给影响南岸地下水D和¹⁸O趋于贫化. 另一方面,由于新近系-古近系杂岩隆起,在温泉与博乐之间的阿拉套山山前带形成阻水屏障,地下水位抬升,在缺口处汇集溢出,部分以地表径流形式进入南部洪积平原,粗颗粒

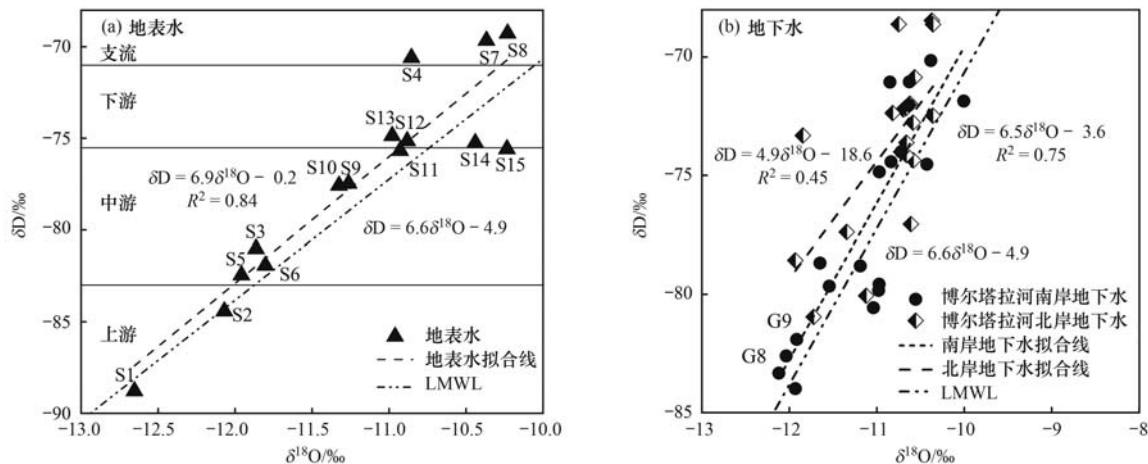


图5 地表水和地下水 δD - $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 5 Relationship between surface water and groundwater δD - $\delta^{18}O$

粒的冲洪积物为水循环提供良好的通道,地表水进入洪积平原再次潜流补给地下水^[43],在水循环过程中,受蒸发的作用 D 和¹⁸O 同位素富集,而南岸山脉直接与平原相连,基岩裂隙水直接通过孔隙或裂隙进入地下水,汇入山前平原,水中 D 和¹⁸O 同位素贫化.

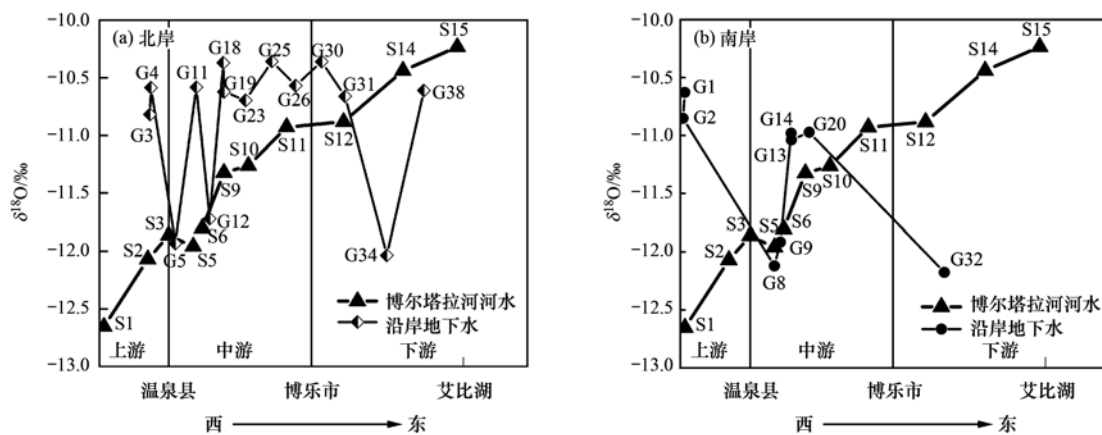


图 6 博尔塔拉河水和地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 沿程变化

Fig. 6 Variation in Bortala River water and groundwater $\delta^{18}\text{O}$ along the distance

博尔塔拉河上游河谷宽小于 5.0 km,平均坡降 21.2‰,河流下切深度一般大于 10.0 m^[23],地下水以泉(G3)和侧向径流(G4)形式排泄补给河水,由图 6(a)可以看出,上游泉水 G3($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.82‰)至 G4($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.59‰)与河水 S2($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -12.07‰)到 S3($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -11.86‰)的 $\delta^{18}\text{O}$ 值均呈增加趋势,河水 S2 和 S3 水化学类型分别为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Na}$ 型,而泉水 G3 和潜水 G4 水化学类型均为 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Na}$ 型,认为河水 S2 受到了泉水 G3 和潜水 G4 补给,补给比例分别为 6.9% 和 8.2%. 中游河流主槽单一,河道束窄,切割深度为 5.0 ~ 10.0 m,平均水力坡度为 8.1‰,地下水以泉或泉群形式排泄补给地表水. 潜水 G5($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -11.93‰)和河水 S5($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -11.96‰)的水化学类型均为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型且 $\delta^{18}\text{O}$ 值较为接近,说明中游河水 S5 受到潜水 G5 补给,同时也受到支流河水 S4($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.86‰)补给,补给比例分别为 70.9% 和 1.0%. 泉水 G12 和河水 S9 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近,但水化学类型分别为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,推测泉水 G12 可能受到河水灌溉补给影响,中游北岸农业灌溉区主要通过位于 S5 上游 2.0 km 处昆仑渠首引博尔塔拉河河水进行灌溉,灌溉水渗漏补给地下水并在溢出带溢出. 受河水灌溉影响的泉水 G12 与河水 S5 水化学类型相同, $\delta^{18}\text{O}$ 值接近,现场测得泉水 G12 的流量为 $0.45 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$. 由于受到潜水 G18($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.37‰)、G23($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.70‰)和泉水 G19

3.4 博尔塔拉河河水与地下水转换关系

稳定同位素¹⁸O 作为天然环境示踪剂,广泛用于量化地下水补给、排泄和蒸发量等^[44,45]. 本文以¹⁸O 为示踪剂,分析博尔塔拉河河水与地下水之间的转化关系,博尔塔拉河河水与地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 沿程变化如图 6 所示.

($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.62‰) 补给影响,河水 S9($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -11.33‰)到 S10($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -11.26‰)的 $\delta^{18}\text{O}$ 值增加趋势变缓,且潜水 G18、G23 和河水 S10 化学类型均为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Na}$ 型,现场测得泉水 G19 流量大于 $1.0 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$,计算得到潜水 G18、G23 和泉水 G19 补给比例分别为 1.7%、2.9% 和 2.4%. 同理,河水 S11($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.93‰)到 S12($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.88‰)受到 G26($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.57‰)补给,水化学类型均为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Na}$ 型,补给比例为 13.9%. 下游地势平坦开阔,含水介质逐渐由砂砾石变为砂、黏土和粉土,强蒸发影响下河水和地下水中¹⁸O 富集,但河水与地下水之间转化较弱.

由图 6(b)可以看出,博尔塔拉河南岸上、下游河水与地下水相互转化较弱. 中游地势相对平坦,流水地质作用形成宽阔的冲洪积扇,岩性多为级配不良砾、卵石混合土(卵石含量 60.0% ~ 80.0%),平均水力坡度为 2.3‰,渗透系数为 $20.0 \sim 30.0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. 现场测得潜水 G8 和 G9 的埋深分别为 22.4 m 和 33.9 m,受地表水补给影响,水化学类型与河水 S6 相同, $\delta^{18}\text{O}$ 值接近. 据地下水水流场和水文地质条件推测潜水 G9 不仅接受河水(取 S5 和 S6 平均值 -11.88‰)补给,还受到潜水 G8 和 G6($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.88‰)的侧向径流补给,补给比例分别为 43.5%、47.8% 和 8.7%. 潜水 G13、泉水 G14 的水化学类型与河水 S9 均为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,现场测得潜水 G13 的埋深为 6.9 m,泉水 G14 流量为 $0.83 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$,认为河水 S9($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -11.33‰)受到了潜

水 G13($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.98‰) 和泉水 G14($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -11.04‰) 的补给, 补给比例分别为 1.0% 和 32.0%。同理, 河水 S10 还受到了潜水 G20($\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.97‰) 的补给, 补给比例为 5.3%。

3.5 地表水与地下水混合模拟

在地表水与地下水转化分析的基础上, 采用 PHREEQC 软件对水化学成分进行定量模拟。以补给予端元中 T 、 pH 、主要离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^-) 和同位素 (D 和 ^{18}O) 作为输入变量, 按相互转化比例混合, 输出混合后水中主要离子。本文选取河水 S3、S5、S9、S10 和地下水 G9 作为补给末端元, 模拟结果如表 3 所示。

混合模拟结果可以看出(表 3), 各水样点的实测和模拟离子浓度均方差较小, 表明模拟值与实测值较为接近, 氢氧同位素能够准确地划分水体不同补给源所占的比例。混合模拟中未考虑沿程水岩相互作用结果, 因此可以通过模拟值和实测值之间的离子浓度差异来推断水化学反应过程, 河水 S9 和 S10 中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量增幅较大, 这主要是河水 S6 到 S10 流动路径较长, 岩盐、石膏、白云石和长石等矿物溶解, 水中离子浓度增加, 混合模拟的水化学成分与实测值之间出现差异。另一方面, 可能还受到除文中分析的补给源(G13、G14、G15、G18、G19、G20 和 G23)外其它水源混合补给。

表 3 地表水与地下水混合作用模拟结果¹⁾/mg·L⁻¹
Table 3 Simulation results of surface water and groundwater mixing/mg·L⁻¹

编号	项目	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
S3	实际值	2.7	16.3	28.2	2.4	6.4	22.4	90.3
	模拟值	2.7	9.9	25.7	3.4	4.9	28.3	95.1
	相对误差	0.0	0.4	0.1	-0.4	0.2	-0.3	-0.1
	均方差				0.9			
S5	实际值	2.8	10.0	30.2	5.6	7.1	29.0	97.7
	模拟值	2.9	14.0	40.0	5.5	9.9	41.3	146.1
	相对误差	0.0	-0.4	-0.3	0.0	-0.4	-0.4	-0.5
	均方差				0.3			
S9	实际值	3.2	15.3	44.2	4.9	11.3	33.5	147.7
	模拟值	2.8	10.7	32.1	2.8	7.1	20.2	130.5
	相对误差	0.1	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.1
	均方差				9.8			
S10	实际值	3.1	25.9	47.5	7.1	17.0	52.8	156.3
	模拟值	3.2	17.2	42.5	4.9	11.7	33.0	179.6
	相对误差	0.0	0.3	0.1	0.3	0.3	0.4	-0.1
	均方差				12.3			
G9	实际值	3.0	12.1	39.8	3.4	5.7	23.2	131.9
	模拟值	2.9	13.5	29.9	4.5	7.3	20.3	139.1
	相对误差	0.1	-0.1	0.3	-0.3	-0.3	0.1	-0.1
	均方差				4.9			

1) 相对误差为无量纲

3.6 地表水与地下水交换模式

通过上述分析, 博尔塔拉河河水与地下水转化集中在河流中游, 故以中游为例建立博尔塔拉河流域地表水与地下水转化概念模型(图 7)。博尔塔拉河中游构造上位于昆屯坳陷盆地, 南北向的别珍套山和阿拉套山褶皱带为地表水和地下水提供了补给源, 东西向的博乐断隆和温泉隆起阻碍了地下水径流, 为中游地表水与地下水之间的转化提供了有利条件。博尔塔拉河北岸新近系-古近系地层隆起, 隆起南北侧分别为洪积平原和山前洼地, 山区积雪融水、降水和基岩裂隙水形成的地表径流在山前洼地补给地下水, 地下水由隆起构造缺口处汇入洪积平原。平原地形坡度大, 岩性以砂砾石层为主, 地表水再次补给地下水, 水资源呈现第二次循环, 循环过

程中因蒸发作用导致地下水中 D 和 ^{18}O 整体丰于南岸。受地质条件影响, 部分支流进入洪积平原后, 地表水逐渐向地下水转化, 再加上水库、水渠等引水工程的修建, 造成如图尔根河等多条支流流量明显减小, 甚至断流。北岸洪积扇规模较小, 地下水在博尔塔拉河河流阶地以泉水形式补给或直接泄入河水, 补给比例范围为 1.7%~70.9%。博尔塔拉河南岸山区降水和基岩裂隙入渗补给地下水, 地下水以泉水形式在河流阶地溢出补给河水, 补给比例范围为 1.0%~32.0%。南岸山前平原地形坡度缓, 洪积扇规模较大, 地表覆盖多为坡积、洪积物, 沿河地下水埋深较大(16.6~33.9 m), 地下水受到了上层河水的补给, 补给比例为 43.5%。在地下水补给影响下, 博尔塔拉河河水水化学类型沿程不断变化。

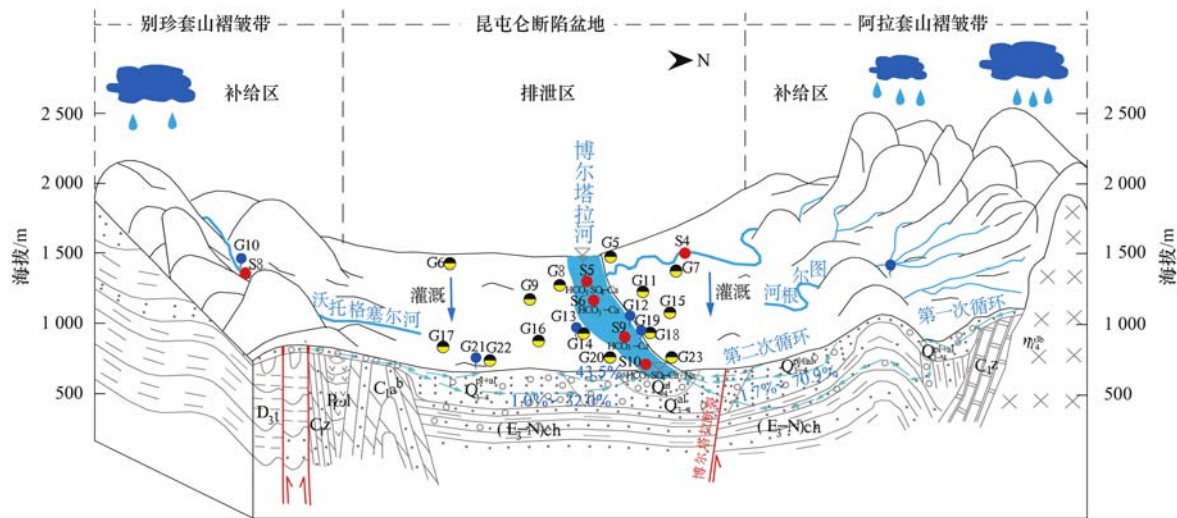


图7 博尔塔拉河流域中游地表水与地下水转化概念模型

Fig. 7 Conceptual model of surface water and groundwater transformation in the middle reaches of Bortala River basin

4 结论

(1) 博尔塔拉河流域地表水和地下水整体均呈弱碱性淡水, TDS 变化范围分别为 $96.6 \sim 1049.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $136.9 \sim 2735.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。地表水与地下水中潜水、泉水阳离子均以 Ca^{2+} 为主, 阴离子以 HCO_3^- 为主; 承压水阳离子以 Na^+ 为主, 阴离子以 HCO_3^- 为主。地表水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca 型和 HCO_3 -Ca 型, 地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca · Na 型、 HCO_3 -Ca 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ -Ca 型。

(2) 地表水与地下水水中离子主要来源于岩石溶滤作用。溶滤-迁移-富集因子、人类活动因子、环境因子和原生地质因子对地表水和地下水中离子的平均贡献率分别为 28.8%、17.7%、12.0% 和 6.5%。

(3) 博尔塔拉河流域地表水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围分别为 $-88.78\text{‰} \sim -69.27\text{‰}$ 和 $-12.65\text{‰} \sim -10.23\text{‰}$, 地下水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $-83.98\text{‰} \sim -68.46\text{‰}$ 和 $-12.18\text{‰} \sim -10.01\text{‰}$ 。博尔塔拉河水中 D 和 ^{18}O 值沿程呈富集趋势, 北岸地下水中 D 和 ^{18}O 整体丰于南岸。

(4) 受地质构造和水文地质条件等地质条件因素影响, 河水与地下水转化集中在博尔塔拉河中游, 河流中游南、北岸转化关系主要为潜水和泉水溢出补给河水, 补给比例范围分别为 1.0% ~ 32.0% 和 1.0% ~ 70.9%。

参考文献:

- [1] 朱金峰, 刘悦忆, 章树安, 等. 地表水与地下水相互作用研究进展[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 3002-3010.
Zhu J F, Liu Y Y, Zhang S A, et al. Review on the research of surface water and groundwater interactions [J]. China

Environmental Science, 2017, 37(8): 3002-3010.

- [2] Ochoa C G, Sierra A M, Vives L, et al. Spatio-temporal patterns of the interaction between groundwater and surface water in plains [J]. Hydrological Processes, 2020, 34(6): 1371-1392.
- [3] Kalbus E, Reinstorf F, Schirmer M. Measuring methods for groundwater-surface water interactions: a review [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 10(6): 873-887.
- [4] Vereecken H, Döring U, Hardelauf H, et al. Analysis of solute transport in a heterogeneous aquifer: the Krauthausen field experiment [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000, 45(3-4): 329-358.
- [5] Song J X, Cheng D D, Zhang J L, et al. Estimating spatial pattern of hyporheic water exchange in slack water pool [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(3): 377-388.
- [6] 靳孟贵, 鲜阳, 刘延锋. 脱节型河流与地下水相互作用研究进展[J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 149-160.
Jin M G, Xian Y, Liu Y F. Disconnected stream and groundwater interaction: a review [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 149-160.
- [7] Song J X, Zhang G T, Wang W Z, et al. Variability in the vertical hyporheic water exchange affected by hydraulic conductivity and river morphology at a natural confluent meander bend [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(19): 3407-3420.
- [8] Dudley-Southern M, Binley A. Temporal responses of groundwater-surface water exchange to successive storm events [J]. Water Resources Research, 2015, 51(2): 1112-1126.
- [9] Woessner W W. Stream and fluvial plain ground water interactions: rescaling hydrogeologic thought [J]. Groundwater, 2000, 38(3): 423-429.
- [10] Schmalz B, Springer P, Fohrer N. Variability of water quality in a riparian wetland with interacting shallow groundwater and surface water [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009, 172(6): 757-768.
- [11] Lamontagne S, Leane F W, Herczeg A L. Groundwater-surface water interactions in a large semi-arid floodplain: implications for salinity management [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(16): 3063-3080.
- [12] 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.
- [13] 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3030-3038.
- Zhang H H Z, Yu K X, Li Z B, *et al.* Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in different water bodies in hilly and gully regions of the Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3030-3038.
- [14] Zhang B, Song X F, Zhang Y H, *et al.* A study of the interrelation between surface water and groundwater using isotopes and chlorofluorocarbons in Sanjiang plain, Northeast China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **72**(10): 3901-3913.
- [15] 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.
- [16] Dong J Y, Quan Q, Zhao D, *et al.* A combined method for the source apportionment of sediment organic carbon in rivers [J]. Science of the Total Environment, 2021, **752**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141840.
- [17] Awomeso J A, Ahmad S M, Taiwo A M. Multivariate assessment of groundwater quality in the basement rocks of Osun State, Southwest, Nigeria [J]. Environmental Earth Sciences, 2020, **79**(5), doi: 10.1007/S12665-020-8858-Z.
- [18] Fei L L, Chan L Y, Bi X H, *et al.* Effect of cloud-to-ground lightning and meteorological conditions on surface NO_x and O_3 in Hong Kong [J]. Atmospheric Research, 2016, **182**: 132-141.
- [19] Luo X S, Ip C C M, Li W, *et al.* Spatial-temporal variations, sources, and transport of airborne inhalable metals (PM_{10}) in urban and rural areas of northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(9): 13133-13165.
- [20] Jin G Q, Fang W, Shafi M, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soil with application of APCS-MLR model: A pilot study for restoration of farmland in Shaoxing City Zhejiang, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **184**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109495.
- [21] 杨安, 王艺涵, 胡健, 等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 886-894.
- Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al.* Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 886-894.
- [22] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 490-496.
- Zhang Z Y, Jilili A, Jiang F Q. Sources, pollution statue and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Aibi Lake, Northwest China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 490-496.
- [23] 曾庆江. 博尔塔拉谷地对径流的调节作用[J]. 干旱区地理, 1994, **17**(4): 9-14.
- Zeng Q J. Regulation of Bortala Valley on runoff [J]. Arid Land Geography, 1994, **17**(4): 9-14.
- [24] Zhang Z Y, Li J Y, Mamat Z, *et al.* Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River, Northwest China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **126**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.12.025.
- [25] 李巧. 准噶尔盆地平原区地下水水质时空演化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.
- Li Q. Spatial and temporal evolution of groundwater quality in the plain area of Jungar Basin [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014.
- [26] 王月健. 干旱区湖泊流域水资源变化及其对生态安全的影响研究——以新疆艾比湖流域为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- Wang Y J. Study on the influence of the change of water resources and its impact on ecological security in the arid; an example of Ebinur Lake Basin in Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018.
- [27] 朱世丹, 张飞, 张海威, 等. 新疆艾比湖主要入湖河流同位素及水化学特征的季节变化[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1707-1721.
- Zhu S D, Zhang F, Zhang H W, *et al.* Seasonal variation of the isotope and hydrochemical characteristics of the main lake rivers in Lake Ebinur, Xinjiang [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(6): 1707-1721.
- [28] Hao S, Li F D, Li Y H, *et al.* Stable isotope evidence for identifying the recharge mechanisms of precipitation, surface water, and groundwater in the Ebinur Lake basin [J]. Science of the Total Environment, 2019, **657**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.102.
- [29] 朱永生. 2018 年博尔塔拉蒙古自治州地下水水位动态监测分析报告[R]. 博尔塔拉蒙古自治州: 博尔塔拉水文勘测局, 2019. 13-14.
- [30] 赵顺阳, 王文科, 乔冈, 等. 地质构造对生态环境的控制作用分析——以博尔塔拉河为例[J]. 新疆地质, 2006, **24**(1): 67-70.
- Zhao S Y, Wang W K, Qiao G, *et al.* Analysis the control of geotectonic on flow and eco-environment in Bortala River [J]. Xinjiang Geology, 2006, **24**(1): 67-70.
- [31] 张兵, 宋献方, 张应华, 等. 第二松花江流域地表水与地下水相互关系[J]. 水科学进展, 2014, **25**(3): 336-347.
- Zhang B, Song X F, Zhang Y H, *et al.* Relationship between surface water and groundwater in the second Songhua River basin [J]. Advances in Water Science, 2014, **25**(3): 336-347.
- [32] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources [J]. Oecologia, 2003, **136**(2): 261-269.
- [33] 谷洪彪, 迟宝明, 王贺, 等. 柳江盆地地表水与地下水转化关系的氢氧稳定同位素和水化学证据[J]. 地球科学进展, 2017, **32**(8): 789-799.
- Gu H B, Chi B M, Wang H, *et al.* Relationship between surface water and groundwater in the Liujiang Basin—Hydrochemical constrains [J]. Advances in Earth Science, 2017, **32**(8): 789-799.
- [34] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [35] Ravish S, Setia B, Deswal S. Groundwater quality analysis of Northeastern Haryana using multivariate statistical techniques [J]. Journal of the Geological Society of India, 2020, **95**(4): 407-416.
- [36] Yu S L, Li X Y, Wen B L, *et al.* Characterization of water quality in Xiao Xingkai Lake; implications for trophic status and management [J]. Chinese Geographical Science, 2021, **31**(3): 558-570.
- [37] Peng C, He J T, Wang M L, *et al.* Identifying and assessing human activity impacts on groundwater quality through hydrogeochemical anomalies and NO_3^- , NH_4^+ , and COD contamination: a case study of the Liujiang River Basin, Hebei Province, P. R. China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(4): 3539-3556.
- [38] 李军, 邹胜章, 赵一, 等. 会仙岩溶湿地地下水主要离子特

- 征及成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1750-1760.
- Li J, Zou S Z, Zhao Y, *et al.* Major ionic characteristics and factors of karst groundwater at Huixian Karst Wetland, China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1750-1760.
- [39] Archana A, Thibodeau B, Geeraert N, *et al.* Nitrogen sources and cycling revealed by dual isotopes of nitrate in a complex urbanized environment[J]. Water Research, 2018, **142**, doi: 10.1016/j.watres.2018.06.004.
- [40] 罗照华, 陈必河, 江秀敏, 等. 利用宽谱系岩墙群进行勘查靶区预测的初步尝试: 以南阿拉套山为例[J]. 岩石学报, 2012, **28**(7): 1949-1965.
- Luo Z H, Chen B H, Jiang X M, *et al.* A preliminary attempt for targeting prospecting districts using the wide composition-spectrum dike swarms: an example of the South Alatau Mountains, Xinjiang, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, **28**(7): 1949-1965.
- [41] 郭华明, 倪萍, 贾永锋, 等. 原生高砷地下水的类型、化学特征及成因[J]. 地学前缘, 2014, **21**(4): 1-12.
- Guo H M, Ni P, Jia Y F, *et al.* Types, chemical characteristics and genesis of geogenic high-arsenic groundwater in the world [J]. Earth Science Frontiers, 2014, **21**(4): 1-12.
- [42] 王核, 夏斌, 彭省临, 等. 西天山北部地区成矿规律初探[J]. 大地构造与成矿学, 2002, **26**(4): 363-369.
- Wang H, Xia B, Peng S L, *et al.* Metallogenic regularity of Northern West Tianshan: a preliminary discussion [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2002, **26**(4): 363-369.
- [43] 董新光, 郭西万. 新疆博尔塔拉河干流段地表水地下水转化关系的系统分析法[J]. 干旱区地理, 1996, **19**(4): 45-50.
- Dong X G, Guo X W. Systematical analysis method of transformational relationship between surface water and groundwater along main stream of the Bortala River in Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 1996, **19**(4): 45-50.
- [44] 高宏斌, 李畅游, 孙标, 等. 水位波动下的呼伦湖上覆水体与沉积物间隙水之间溶质的运移特征[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(6): 1331-1341.
- Gao H B, Li C Y, Sun B, *et al.* Solutes transport between lake water and sediment pore water during the lake water level fluctuation in Lake Hulun[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(6): 1331-1341.
- [45] 谢先军, 甘义群, 刘运德, 等. 环境同位素原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019. 39-41.



CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)