

目次

2020~2021年新冠疫情期间南京市PM _{2.5} 化学组成与来源变化特征	华楠, 尚玥, 谢鸣捷	(593)
郑州市大气PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及来源解析	张俊美, 陈仕霖, 王乾恒, 姚森, 杨书中	(602)
太原市PM _{2.5} 浓度的气象特征影响分析及预报	李明明, 王雁, 闫世明, 陈玲, 韩照宇	(611)
黄石市大气PM _{2.5} 中碳氮组分的污染特征及来源解析	王赐晖, 邓萌杰, 陈雨, 王祖武, 成海容	(626)
长三角地区典型PM _{2.5} 污染过程和跨区域传输对宁波污染贡献评估模拟	潘勇, 郑捷, 肖航	(634)
长三角地区2017~2020年非极性有机化合物组成特征及来源	吴长流, 曹芳, 贾小芳, 张煜烟, 谢添, 任磊, 章炎麟	(646)
北京城区不同组分PM _{2.5} 散射特性及来源分析	曹阳, 王陈婧, 景宽, 王琴, 刘保献, 安欣欣	(658)
排放和气象对疫情前后武汉不同类型点位大气污染物的影响	熊江荷, 孔少飞, 郑煌, 肖婉, 刘傲, 朱明铭	(670)
2019~2022年成都市春节期间烟花爆竹燃放对空气质量影响分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅	(680)
北京市城区秋季O ₃ 污染过程VOCs污染特征及反应活性	孙雪松, 张蕊, 王裕, 袁滕	(691)
郑州市多站点大气VOCs变化特征及源解析	王冰, 尹沙沙, 黄爱枝, 张栋, 卢轩, 张瑞芹	(699)
加油站油气处理装置VOCs化学组成及二次污染生成贡献	胡玮, 黄玉虎, 梁文俊, 刘明宇, 杨天昇, 任碧琪	(709)
长三角地区2017~2020年臭氧浓度时空分布与人群健康效益评估	程育恺, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 安静宇, 黄成	(719)
典型农药制造企业废气污染物排放特征及风险评估	翟增秀, 肖成德, 孟洁, 王静, 杨伟华, 李伟芳	(730)
黔西拖长江流域水化学演化特征及驱动因素	涂春霖, 杨润柏, 马一奇, 令狐昌卫, 赵瑞刚, 和成忠	(740)
高寒干旱区地表水与地下水水化学特征及转换关系:以大通河流域为例	易冰, 刘景涛, 吕晓立, 何伟, 朱亮, 张玉玺, 杨明楠	(752)
黄土高原沟壑区典型城郊流域地表水硝酸盐来源示踪	李欢玮, 赵广举, 李明, 穆兴民, 田鹏	(761)
长江中上游表层沉积物重金属形态分布特征及风险评价	张志永, 万成炎, 胡红青, 杨中华, 袁玉洁, 朱稳	(770)
鄱阳湖典型湿地土壤-植物系统重金属沿湖向富集及迁移转换特征分析	曹欢, 张华, 丁明军, 王鹏, 黄高翔, 彭翔, 秦瑗, 杨越, 邹天娥, 徐欢, 黄鹏	(781)
石期河南南子流域地下水重金属来源解析及健康风险评价	付蓉洁, 辛存林, 于爽, 李笑	(796)
河北省某大型焦化厂地下水中多环芳烃的污染特点、源解析及生态风险评价	张千千, 邢锦兵, 王慧玮, 刘景涛, 陈玺	(807)
鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析	田智慧, 尹传鑫, 王晓蕾	(816)
底泥疏浚对太湖内源及底栖生物恢复的影响	张建华, 殷鹏, 张雷, 尹洪斌	(828)
金沙江底栖真核微生物地理分布特征及生态学机制	崔戈, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 张波, 吴程	(839)
西安市景观湖泊水体细菌群落结构分析与代谢功能预测	王敏, 张雨桐, 黄晨, 任杰辉, 万甜, 程文	(847)
三峡水库蓄水对支流浮游植物功能群的影响及与资源利用效率的关系	赵璐, 欧阳添, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴	(857)
施肥和秸秆覆盖对成都平原区农田氮和磷流失的影响	王宏, 姚莉, 张奇, 林超文, 刘海涛, 罗付香, 王谢, 杨璇, 翟丽梅	(868)
O ₃ -SBBR联合工艺深度处理印染工业园生化尾水的效能和机制	罗新浩, 胡勇有, 陈元彩, 程建华, 姚颖, 钱原铭	(878)
低温下磁性载体MBBR系统微生物群落特征和功能预测分析	刘超, 李奇, 宋子洋, 胡鹏, 敬双怡, 李卫平	(889)
基于空间尺度效应的西南地区植被NPP影响因子探测	徐勇, 黄雯婷, 郑志成, 戴强玉, 李欣怡	(900)
基于MGWR的黄河流域土壤有机碳密度和影响因素分析	南富森, 李宗省, 张小平, 崔乔, 李玉辰, 熊雪婷, 杨雪杰, 杨安乐	(912)
土壤功能与环境因素在海拔梯度上的耦合关系:以梅里雪山为例	赵冬辉, 申聪聪, 张志明, 刘四义, 陈保冬, 孙东丽, 王继琛, 葛源	(924)
洞庭湖南缘农田土壤重金属特征及源解析	肖凯琦, 许安, 郭军, 李毅, 卢永兴, 邢新丽, 董好刚	(932)
南京城郊不同土地利用类型农业土壤多环芳烃污染特征及风险评价	张秀秀, 朱昌达, 王飞, 魏宇宸, 潘剑君	(944)
福州滨海地区菜地和果园土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征	侯宁, 黑杰, 金强, 刘旭阳, 黄佳芳, 林少颖, 黄庄, 谢杨阳, 王维奇	(954)
铁修饰生物炭的制备及在砷污染土壤修复中的应用	韦婧, 刘映吟, 涂晨, 邓绍坡, 郝丹丹, 校亮, 毛萌	(965)
锰铝双氧化物改性生物炭减缓土壤重金属对黑麦草的毒性作用	林鹏程, 尹华, 刘晓菲, 刘航, 晏才雅, 戚鑫	(975)
田间施用锌肥对小麦籽粒镉累积的影响及施用风险	牛硕, 王天齐, 杨阳, 许群, 王美娥, 陈卫平	(984)
不同性质硅肥影响土壤生物有效态镉的主要元素	黄蕊, 魏维, 谢运河, 柳赛花, 陈豪宇, 彭华, 纪雄辉	(991)
不同外源硒在土壤中的有效性变化及其对小麦硒累积的影响	魏玮, 李平, 周志高, 王兴祥, 丁昌峰	(1003)
pH、钙和磷对砷在水稻土中溶解度的影响及表面络合机制解析	邓迎璇, 翁莉萍, 朱桂芬, 李永涛	(1012)
土壤中磺胺二甲嘧啶赋存对水稻生长的影响	章威, 王沛芳, 金秋彤, 胡斌	(1021)
江苏产区大蒜中邻苯二甲酸酯含量检测及溯源分析	王亚, 肖霞霞, 杨云, 冯发运, 宋立晓, 陈小龙, 孙星, 李勇, 曾晓萍, 马金骏, 余向阳	(1029)
河南省部分市售农用化肥中溶解性离子浓度及同位素组成	张东, 薛天, 秦勇, 刘运涛, 陈昊, 高振朋, 黄兴宇, 麻冰涓	(1040)
控氧热解过程中污染稻草生物炭的组分特性及其重金属累积特征	徐智, 郭朝晖, 徐锐, 肖细元, 谢慧民, 胡玉莲	(1051)
长期施肥对农牧交错带旱地土壤微生物多样性及群落结构的影响	高日平, 段玉, 张君, 任永峰, 梁俊梅, 景宇鹏, 赵沛义	(1063)
化肥减量配施有机肥对柠檬根际/非根际土壤细菌群落结构的影响	邓正昕, 高明, 王莹燕, 谢永红, 熊子怡, 王子芳	(1074)
秸秆还田下不同追氮量对麦田土壤真菌群落结构和生态网络的影响	靳海洋, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 岳俊芹, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰	(1085)
粉垄耕作对耕地土壤细菌群落多样性及微生物网络结构的影响	夏皖豫, 陈彦云	(1095)
基于宏基因组学揭示咸水滴灌对棉田土壤微生物的影响	杜思焱, 陈静, 刘佳炜, 郭晓雯, 闵伟	(1104)
双碳约束下煤化工行业节能降碳减排协同	张鸿宇, 王媛, 郝成亮, 卢亚灵, 金玲, 连超, 蒋洪强, 吴立新, 曹东	(1120)
“双碳”目标下:中国CCUS发展现状、存在问题及建议	赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 王小龙	(1128)
粉煤灰用于碳捕集、利用及封存的研究进展	姜龙, 何川, 李金晶	(1139)
中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力	杨传文, 邢帆, 朱建康, 李荣华, 张增强	(1149)
污水处理过程N ₂ O排放:过程机制与控制策略	郝晓地, 杨振理, 于文波, 刘然彬	(1163)
市政污水厂典型A ² O工艺低碳运行的系统性评估	孟红旗, 李红霞, 赵爱平, 原建光, 张东	(1174)
城市污泥不同处理处置工艺路线碳排放比较	李哲坤, 张立秋, 杜子文, 封莉, 刘永泽	(1181)
基于群决策和层次分析法的长江中游地区农村污水处理技术评价及优选	刘璐, 张文强, 胡飞超, 庞阔, 郭亚丽, 张婷, 李敏	(1191)
《环境科学》征订启事(815)	《环境科学》征稿简则(846)	信息(856, 899, 1028)

高寒干旱区地表水与地下水水化学特征及转换关系：以大通河流域为例

易冰^{1,2}, 刘景涛¹, 吕晓立^{3*}, 何伟², 朱亮^{1,4}, 张玉玺¹, 杨明楠¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 4. 中国地质调查局河北省地下水污染机理与修复重点实验室, 石家庄 050061)

摘要: 全球气候变暖 and 区域极端气候会导致高寒干旱山区平原降雨失衡、冰川融化和冻土退化, 进而改变区域水文循环。其中, 地表水与地下水转化关系是高寒干旱区水文循环气候响应的重要科学问题之一。以祁连山南麓大通河流域为研究区, 基于 119 组基本水化学参数和 38 组氘氧同位素数据, 利用多元统计分析和同位素技术, 研究了流域地表水与地下水的化学特征及其相互转化过程。结果表明, 流域地表水以 $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 型水为主, 受控于岩石风化作用; 地下水以 $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 型和 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型水为主, 受岩石风化作用和蒸发浓缩共同控制。上游地下水存在少量钙、镁长石的溶解, 中游地下水化学组分主要为碳酸盐岩的风化溶解, 下游地下水中各离子组分蒸发富集使地下水溶解性总固体升高。风化溶滤、人为活动、原生沉积环境、阳离子交替吸附及其他因素对研究区地表水和地下水化学组分的贡献率依次为 39.1%、15.0%、12.6%、13.8% 和 19.5%。 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素测试结果表明, 沿地下水流向大通河河水氘氧同位素含量呈富集到贫化的变化趋势, 大通河上、中游地区河水主要受大气降水补给, 而下游河段受地质构造和水文地质条件等影响, 主要为潜水和泉水溢出补给河水, 为地下水排泄区。

关键词: 地表水; 地下水; 水化学特征; 氢氧稳定同位素; 转化关系; 大通河流域

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)02-0752-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204232

Hydrochemical and Isotopic Evidence for Groundwater Conversion of Surface Water in Alpine Arid Areas: A Case Study of the Datong River Basin

YI Bing^{1,2}, LIU Jing-tao¹, LÜ Xiao-li^{3*}, HE Wei², ZHU Liang^{1,4}, ZHANG Yu-xi¹, YANG Ming-nan¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, 050061, China; 2. College of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China; 4. Hebei Key Laboratory of Groundwater Remediation, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Global warming and regional extreme climates will lead to unbalanced rainfall, melting glaciers, and permafrost degradation in alpine and arid mountain plains, thereby changing the regional hydrological cycle. The relationship between surface water and groundwater conversion is one of the important scientific issues of hydrological cycle climate response in alpine arid areas. Taking the Datong River Basin at the southern foot of the Qilian Mountains as the study area, based on 119 sets of basic hydrochemical parameters and deuterium-oxygen isotope data, using multivariate statistical analysis and isotopic techniques, the hydrochemical characteristics of surface water and groundwater in the basin and their mutual transformation process were studied. The results showed that the surface water was $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ type, which was mainly controlled by rock weathering, whereas the groundwater was $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ type and $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ type, which was controlled by rock weathering and evaporation concentration. There was a small amount of calcium and magnesium feldspar dissolved in the upstream groundwater, and the chemical components of the midstream groundwater were mainly the weathering and dissolution of carbonate rocks. The contribution rates of weathering filtration, anthropogenic activities, native sedimentary environment, alternating adsorption of cations, and other factors to the chemical components of surface water and groundwater in the study area were 39.1%, 15.0%, 12.6%, 13.8%, and 19.5%, respectively. The deuterium and oxygen isotope contents of Datong River water showed a trend of enrichment to depletion along the groundwater flow direction. The δD and $\delta^{18}\text{O}$ isotope test results showed that the deuterium and oxygen isotope content in the Datong River along the groundwater flow showed a trend of enrichment to depletion. The upper and middle reaches of the Datong River were mainly recharged by atmospheric precipitation, whereas the lower reaches were affected by geological structure and influenced by hydrogeological conditions, which was mainly due to diving and spring water overflow to supply river water, as the discharge area of groundwater.

Key words: surface water; groundwater; hydrochemical characteristics; oxygen and hydrogen isotopes; transformation relationship; Datong River Basin

近年来,全球气候变暖和区域极端气候导致中国西部高寒干旱地区山区降雨量增多而平原区减少^[1]、冰川融化^[2,3]和冻土退化^[4,5]等,进而改变水文循环过程和水资源量^[6]。地表水与地下水的转化是流域水循环过程的重要组成部分,影响水资源量和水化学组分的时空分布与演化。因此,研究极端气候下地表水与地下水的转化对于改善高原水资源可持续性 and 生态系统健康具有重要意义^[7~9]。

基于传统基本水化学参数记录水体来源、运移和转化,是目前国内外用于判定地表水与地下水转化关系的重要手段之一,然而,水文地质条件^[10]、河流特性^[11]、季节性降水^[12]和人类活动^[13]

收稿日期: 2022-04-20; 修订日期: 2022-05-16

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190331)

作者简介: 易冰 (1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水循环与水质演化, E-mail: 793833881@qq.com

* 通信作者, E-mail: 2767398591@qq.com

等因素会影响基本水化学参数的指示精度,而且传统方法在定量溯源方面存在不足.为了解决上述问题,能够反映地表水与地下水相互转化量化关系的同位素技术被广泛应用^[14].苏小四等^[15]、雷义珍等^[16]和聂振龙等^[17]分别对马莲河、青海湖沙柳河和黑河流域河水 and 地下水的水化学和同位素特征进行了分析,以确定二者的转化关系.马莲河中游河水和地下水之间存在着微弱的水力联系;海湖沙柳河的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值在消融期最大,而在冰冻期最小;黑河流域位于祁连山区,主要受地下水补给,而在祁连山南麓山前戈壁,则是由出山河水入渗转换成地下水.刘双等^[18]对河流与地下水的 $\delta^{18}O$ 值和水化学特征进行了定量分析,确定了三江平原挠力河干流和地下水转换量.

本文以我国典型高寒干旱区祁连山南麓大通河流域为研究区,基于 119 组基本水化学参数和 38 组水氧同位素数据,利用 Piper 图、Gibbs 图和同位素技术,并结合多元统计分析方法对流域地表水与地下水的补排关系和相互转过程进行了研究,通过揭示高寒区河流水循环过程,以期在水资源的合理利用提供科学支撑.

1 研究区概况

大通河是黄河水系——湟水的一级支流,地处

祁连山南麓.位于北纬 $36^{\circ}30' \sim 38^{\circ}25'$ 和东经 $98^{\circ}30' \sim 103^{\circ}15'$ 之间,海拔为 $1\,592.58 \sim 4\,420.79\text{ m}$,全长为 560.7 km ,流域面积为 $15\,130\text{ km}^2$ ^[19].研究区属大陆高原性气候,多年平均气温为 $3.3 \sim 8.1^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量为 494.1 mm ^[20],多年平均径流量为 $28.95 \times 10^8\text{ m}^3$ ^[21],流域内水资源丰富,已建纳子峡和石头峡两座大型水库和“引大入秦”、“引疏济金”和“引大济湟”这 3 项大型调水工程^[22],水库和调水工程对地表径流、地下水动力场和化学场均有较大影响,导致生态环境及地质环境恶化^[23].

大通河流域以尕大滩、连城为界,划分为上、中和下游这 3 个区段^[23],见图 1,河水和地下水流向均为自西北向东南,上游河岸两侧山地分布着碎屑岩类裂隙水,大气降水和冰雪融水形成基岩裂隙水或补给河水,此外,河谷和山前平原有第四系松散孔隙水分布,粗颗粒的冲洪积物为水循环提供良好的通道,使地表水和地下水转化频繁;流域中游海拔 $3\,800\text{ m}$ 以下非冻土区,以基岩裂隙水为主,因受大气降水和少量冻结层上水补给,含水岩组为三叠系及古生界、下元古界变质岩,侵入岩,富水性极不均匀;下游低山区分布着碎屑岩裂隙潜水和变质岩裂隙水,部分丘陵台地有风化裂隙水,泉水流量小于 $0.5\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[19].该流域是一个半干旱地区,生态系统脆弱,区内地表水和地下水转化频繁^[23].

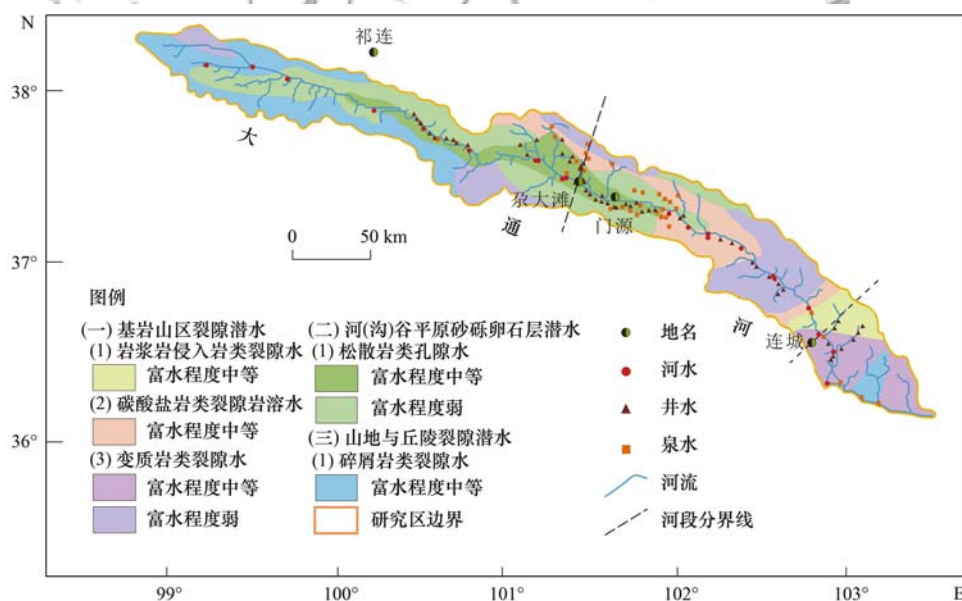


图 1 研究区地下水类型与采样点分布示意

Fig. 1 Distribution map of groundwater types and sampling sites in the study area

2 材料与方法

2.1 样品采集与测试

2021 年 6 ~ 8 月于大通河流域共采集样品 119 组.其中,地表水 27 组,浅层地下水 59 组,泉水 33

组(图 1).大通河流域共采集河水、地下水稳定同位素水样 38 组(其中河水样 10 组,地下水样 28 组),分别用 550 mL 和 2 L 的塑料瓶收集了水化学法和氧同位素分别法测定的样品,并在取样前用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的滤膜进行过滤.用 $3\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸酸化阳

离子至 $\text{pH} < 2$, 采集的样品用 Parafilm 封口膜密封后放置于 $4 \sim 5^\circ\text{C}$ 环境中. 采用便携式野外测量仪 (HACH DR2800) 现场测量 pH 、 DO 、水温和电导率等指标.

室内实验执行标准参照文献[24], 用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-MS, Varian820-ms, 美国) 对水样的阳离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 进行测定. 使用离子色谱仪 (ICS1500) 对阴离子 (SO_4^{2-} 、 NO_3^-) 测定. NO_2^- 和 NH_4^+ 分别用紫外分光光度法和纳氏试剂光度法测定. Cl^- 、 HCO_3^- 和总硬度分别采用 AgNO_3 滴定法、酸标准溶液滴定法和乙二胺四乙酸二钠滴定法测定. TDS 采用烘干测量法. 水样中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 由水同位素分析仪 (L2130i, 皮卡罗, 美国) 测定, 精度分别为 $\pm 0.1\text{‰}$ 和 $\pm 0.8\text{‰}$, 测定结果均经过 Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW) 转化.

2.2 数据分析

利用 Piper 图法可以有效判定水体中水化学类型及各离子含量占比[25], 故用 Piper 图对各河段水化学类型进行对比分析. 主成分分析 (PCA) 是一种有效简化数据而不丢失重要信息的方法, 可以帮助识别水质变量之间的关联, 找到相同的来源并对水质参数进行分组[26,27]. 若成分矩阵中 PC 为正相关, 通常表示相同来源或相似的地球化学行为[28,29]. 因此, 本文采用主成分分析 (PCA) 对水化学参数分类以确定地表水、地下水的来源及贡献率. 利用稳定氮氧同位素方法, 可以分析河流径流的来源、河流径流的分布、地表水与地下水的转化. 采用孙从建等[29]提出的祁连山大气降水方程作为研究区大气降水线. 根据同位素质量守恒和地表水补给来源的差异, 利用二端元混合模型计算了各水源对地表水量的补给比例[31].

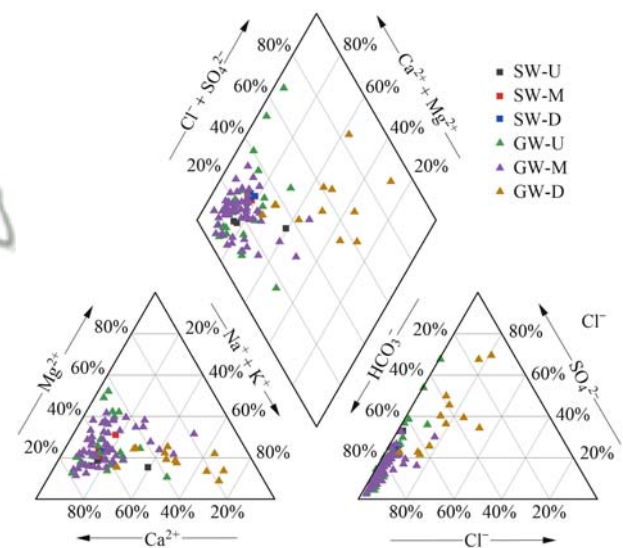
3 结果与分析

3.1 地表水和地下水水化学特征

大通河流域地表水为弱碱性水, 地下水为中性偏碱性水 (表 1). 地表水各河段均以 HCO_3^- - $\text{Mg} \cdot \text{Ca}$ 型水为主, 大通河流域地下水上游、中游以 HCO_3^- - $\text{Mg} \cdot \text{Ca}$ 型水为主, 下游以 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4$ - Na 型水为主 (图 2). 沿地下水流向, 上游地下水中 Mg^{2+} 浓度随白云石和高镁方解石的溶解而增加, 而 Ca^{2+} 浓度保持相对稳定. 在门源盆地东南侧进入碳酸盐岩的深埋区, 由于径流不畅, 水中石膏溶解已达到饱和, 并出现盐岩溶解 (Na^+ 和 Cl^- 升高) 的现象, SO_4^{2-} 浓度随着石膏的溶解而增加. 最后逐渐过渡到碎屑岩地层, 由于水位升高, 蒸发作用增强[20], 发生水岩作用导致水中

Na^+ 浓度升高, 而钙镁离子沉淀. 同时, 上游地表水 H148 中 $\rho(\text{F}^-)$ 为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与其周边潜水 J070 中 F^- 浓度相近; 中游地表水 H160 的 F^- 浓度与邻近地下水 J017 和下游 J156、J015 相近. 上述表明, 研究区地表水与地下水具有相似的水化学特征, 水力联系密切[32].

研究区地表水 TDS 和 EC 值分布较为集中; 地下水 TDS 和 EC 值分布较离散, 具有明显的径流分区特征; 地下水中 TDS 值明显高于地表水 [图 3 (a)]. 地下水在径流过程中, 不断地与土壤和围岩中的溶解性盐类发生离子交换, 且在蒸发浓缩作用下, 地下水中的 TDS 逐渐升高[33]. 根据电导特性可推测地下水在河道中的停留时间[34]; 根据 TDS [图 3(a)] 和 EC 值 [图 3(b)] 在流域内的分布特征, 可以推断出流域内地表水与地下水的转换关系. 各河段地下水 TDS 和 EC 不是单调增加的, 而在中游降低, 中游地下水可能受到 TDS 和 EC 值较低的河水的补给.



SW 和 GW 分别表示地表水和地下水;

U、M 和 D 分别表示上、中和下游

图 2 地表水和地下水 Piper 图

Fig. 2 Piper plots of surface water and groundwater

3.2 水化学组分控制因素和来源解析

3.2.1 水化学组分控制因素分析

基于 Gibbs 图分析了各区地表水和地下水针对岩石风化、降水和蒸发浓缩这 3 个控制因子的分布特征 (图 4)[35]. 结果显示, 地表水当量浓度分布比较集中, 主要落在岩石风化区; 地下水分散分布在岩石风化区和蒸发浓缩区, 其中, 下游地下水大部分落在蒸发浓缩区, 表明受蒸发浓缩因素影响较大, 可能因地下水水位抬升, 地下水排泄地表, 出露地表的泉受到地表的蒸发作用. 部分地下水点落在控制

表 1 地表水和地下水水化学指标特征¹⁾

指标	地表水 (N = 27)		地下水			
			井水 (N = 62)		泉水 (N = 33)	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
EC	302.0 ~ 599.0	442.9	181.0 ~ 8 180.0	1 080.1	342.0 ~ 4 070.0	852.1
pH	8.0 ~ 8.7	8.5	5.6 ~ 8.4	7.5	6.0 ~ 8.2	7.6
TH	143.8 ~ 283.7	219.7	193.7 ~ 1 821.0	392.2	197.0 ~ 3 068.0	553.1
TDS	172.0 ~ 355.0	279.6	216.0 ~ 6 180.0	638.5	181.3 ~ 1 665.0	413.7
K ⁺	1.24 ~ 2.54	1.8	0.9 ~ 26.8	4.2	0.9 ~ 8.8	2.6
Na ⁺	8.4 ~ 34.6	13.8	4.2 ~ 1 394.0	75.6	4.4 ~ 390.1	38.1
Ca ²⁺	39.7 ~ 61.6	55.8	36.8 ~ 285.4	88.6	35.7 ~ 324.3	88.4
Mg ²⁺	9.8 ~ 34.5	19.5	11.5 ~ 268.8	41.5	14.4 ~ 207.7	46.8
Cl ⁻	5.6 ~ 12.3	8.5	2.1 ~ 896.3	60.9	2.1 ~ 360.6	28.9
SO ₄ ²⁻	21.3 ~ 89.3	64.5	14.2 ~ 2 980.0	163.8	6.1 ~ 1 470.0	144.5
HCO ₃ ⁻	151.0 ~ 257.3	202.2	143.8 ~ 688.6	330.8	180.6 ~ 961.1	331.8
NO ₃ ⁻	0.4 ~ 4.4	0.9	ND. ~ 26.1	8.4	0.3 ~ 52.9	5.4
F ⁻	0.1 ~ 0.2	0.1	0.1 ~ 3.0	0.4	0.1 ~ 0.4	0.2

1) 单位说明: EC 为 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, pH 无量纲, 其余指标单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; ND. 表示未检出

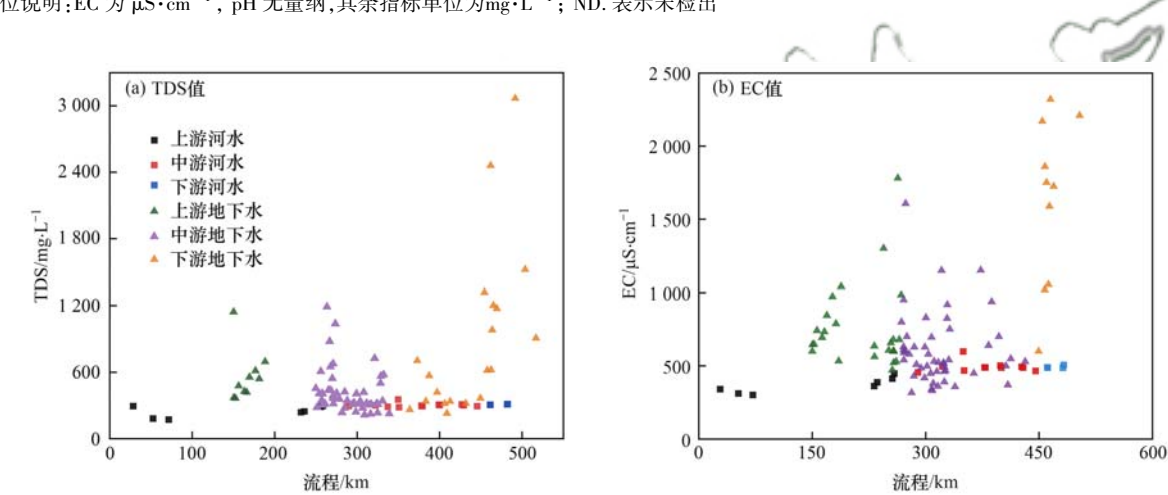


图 3 不同区域地表水和地下水中 TDS 和 EC 值分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of TDS and EC values of surface water and groundwater in different regions

区虚线外,可能与人类活动、阳离子交换作用等因素有关^[36].研究区内地表水和地下水的离子主要由岩体的自然风化和蒸发浓缩引起,离子来源相似,表明二者之间存在某种转换关系.

3.2.2 水化学来源解析

通过对研究区 119 组水样 17 个水化学指标的主成分分析,检验结果得到 KMO 值接近 0.70, Bartlett 球形检验量为 2 964.49 ($P < 0.001$),适宜做主成分分析^[37].本次共提取 4 个特征值大于 1 的公因子(PC1、PC2、PC3 和 PC4),累计方差贡献率为 80.47%.其中,水化学指标特征值大于 0.60 的 3 个主成分占总荷载的 76.50%.

据成分矩阵可知(表 2),主成分 1(PC1)的主要载荷指标为 EC、TH、TDS、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 这 9 项指标,均呈正相关.研究区地层岩性以第四系松散沉积岩为主^[15],水岩作用较强,溶解和迁移的源生矿物,如盐岩(Na⁺、Cl⁻)、

石膏(Ca²⁺、SO₄²⁻)和白云石(Ca²⁺、Mg²⁺)等,导致水中离子浓度增加,并使 EC、TH 和 TDS 发生变化^[38].在氧化-还原反应和阳离子交换作用下,水体中 NH₄⁺ 和 NO₂⁻ 向 NO₃⁻ 转变.此外,由于强烈的蒸发作用,使地表水和地下水中的离子富集.故将 PC1 定义为溶滤-迁移-富集因子.

主成分 2(PC2)的主要载荷指标为高锰酸盐指数和 NH₄⁺,均呈正相关.高锰酸盐指数是反映有机物含量特征参数,NH₄⁺ 属于人为活动输入指标^[38],可能由于生活污水和工业废水排入地表水中,在地表水和地下水交换作用下,有机物和含氮污染物渗入地下,使地下水中高锰酸盐指数和 NH₄⁺ 浓度升高.故将 PC2 定义为人为活动因子.

主成分 3(PC3)的主要载荷指标为 As 和 F⁻,均呈正相关.含氟矿物在碱性条件下的溶解为 F⁻ 的富集提供了条件,硫化物氧化、铁氧化物还原是 As 的主要来源,而研究区存在含硫、铁等多金属硫化物

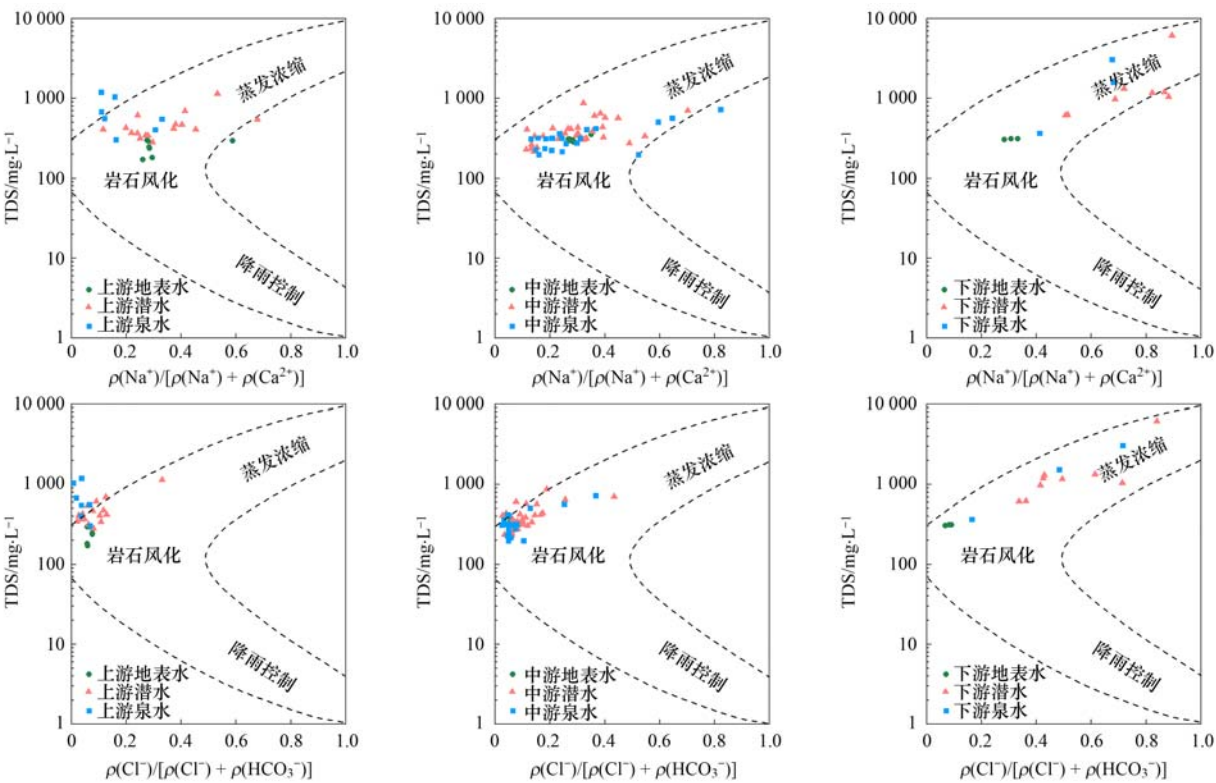


图4 不同区域地表水和地下水水化学组分 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs graphs of water chemistry composition in surface water and groundwater in different regions

表2 研究区地表水和地下水化学主要指标主成分分析¹⁾

Table 2 Principal component analysis of main chemical indexes of surface water and groundwater in the study area

水化学指标	主成分			
	PC1	PC2	PC3	PC4
EC	0.979	0.112	0.047	-0.057
高锰酸盐指数	-0.172	0.636	-0.352	0.543
pH	-0.434	0.506	0.278	-0.397
TH	0.939	-0.083	-0.245	-0.066
TDS	0.980	0.115	-0.004	-0.106
K ⁺	0.587	0.324	-0.186	0.233
Na ⁺	0.932	0.206	0.141	-0.107
Ca ²⁺	0.795	-0.246	-0.368	0.049
Mg ²⁺	0.943	0.062	-0.113	-0.152
Cl ⁻	0.930	0.182	0.033	-0.143
SO ₄ ²⁻	0.931	0.199	0.060	-0.174
HCO ₃ ⁻	0.344	-0.559	-0.362	0.424
NH ₄ ⁺	-0.159	0.724	-0.211	0.432
NO ₃ ⁻	0.615	0.009	-0.138	-0.108
NO ₂ ⁻	-0.122	0.402	0.081	-0.307
F ⁻	0.536	-0.014	0.673	0.466
As	0.499	-0.115	0.729	0.416
特征值	8.559	1.989	1.657	1.475
方差贡献率/%	50.348	11.700	9.748	8.676
累计贡献率/%	50.348	62.047	71.795	80.471

1) 黑体字表示对该因素影响较大的化学指标

矿床^[39]. 煤炭工业基地建在流域中上游, 煤炭中含 As 和 F⁻ 矿物经溶滤作用进入地表水和地下水^[40,41]. 故将 PC3 定义为原生沉积环境因子.

综上所述, 溶滤-迁移-富集因子 (PC1)、人为活动因子 (PC2) 和原生沉积环境因子 (PC3) 对研究区地表水和地下水离子的平均贡献率分别为 39.1%、15.0% 和 12.6%, 阳离子交替吸附 (PC4) 和其他离子平均贡献率分别为 13.8% 和 19.5%. 结果与 Gibbs 图得出的主要控制因素一致.

4 讨论

由于本文未采集降水样, 在考虑降雨频次、观测距离等条件的情况下, 以刘芳等^[42]所确定的 3 组大气降水点作为参考. 不同水体 δ¹⁸O 值和 δD 值变化范围较大 (表 3), δ¹⁸O 值变化幅度为 5.62‰, 标准差为 0.61; δD 值变化幅度为 30.01‰, 标准差为 4.85. 由此看出, δ¹⁸O 值较 δD 值更稳定, 因此以水体 δ¹⁸O 值进行补给来源分析. 所有水体 d-excess 均值为

表3 大通河流域稳定氢氧同位素取值/‰

Table 3 Values of stable hydrogen and oxygen isotopes in Datong River Basin/‰

类型	δ ¹⁸ O		δD		d-excess	
	均值 ± 标准差	取值范围	均值 ± 标准差	取值范围	均值 ± 标准差	取值范围
降水	-6.92 ± 0.41	-7.34 ~ -6.52	-42.73 ± 6.45	-49.99 ~ -37.63	12.64 ± 3.36	8.76 ~ 14.62
地下水	-7.86 ± 1.08	-9.82 ~ -4.2	-48.4 ± 5.91	-60.90 ~ -30.89	14.45 ± 3.43	2.71 ~ 18.06
河水	-7.57 ± 0.33	-8.07 ~ -7.04	-46.38 ± 2.18	-50.01 ~ -43.23	14.16 ± 0.83	12.73 ~ 15.90

13.75‰, 大于全球均值(10‰), 表明夏季流域受强烈的蒸发作用^[43].

4.1 同位素端元混合模型

河水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 均值(-7.57‰)介于地下水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{GW}}$ (-7.86‰)值和降水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PW}}$ (-6.92‰)值之间, 表现河水由降水和地下水混合补给特征, 故利用二端元混合模型计算河水不同补给源的贡献率. 结果显示, 流域上游降水贡献率为77.57%, 地下水贡献率为22.43%. 此河段地下水同位素较贫化($\delta^{18}\text{O}_{\text{GW}} = -8.72\text{‰}$), 降水同位素较富集($\delta^{18}\text{O}_{\text{PW}} = -6.9\text{‰}$), 因此, 该河段河水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 值较高的主要原因是受到稳定同位素值较大的降水补给, 且降水补给比例也较大. 中游降水量占73.46%, 地下水占26.54%, 作为该河段河水的主要补给源, 降水对河水补给速率快, 使河水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 值较高. 下游降水和地下水对河水的补给比例分别为38.91%和61.09%, 此外, 与中游相比, 下游地下水的稳定同位素值水平降低($\delta^{18}\text{O}_{\text{GW}} = -8.31\text{‰}$), 降水同位素值升高($\delta^{18}\text{O}_{\text{PW}} = -6.52\text{‰}$), 而河流 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 值下降, 故下游地下水是河流主要的补给源.

4.2 稳定同位素特征及沿程变化

大通河河水氧同位素关系线斜率小于当地大气降水线(LMWL)和全球大气降水线(GMWL), 表明河流不仅受大气降水的补给, 且受蒸发影响(图5). 河水与地下水大多位于降水线方程上方, 这是因为降水的补给作用, 虽会受到蒸发的影响, 但其补给速度更快. 流域河水点与地下水点沿LMWL两侧分布, 表明地表水和地下水总补给来源为当地降水. 除受降水补给外, 流域河水氧同位素关系线更靠

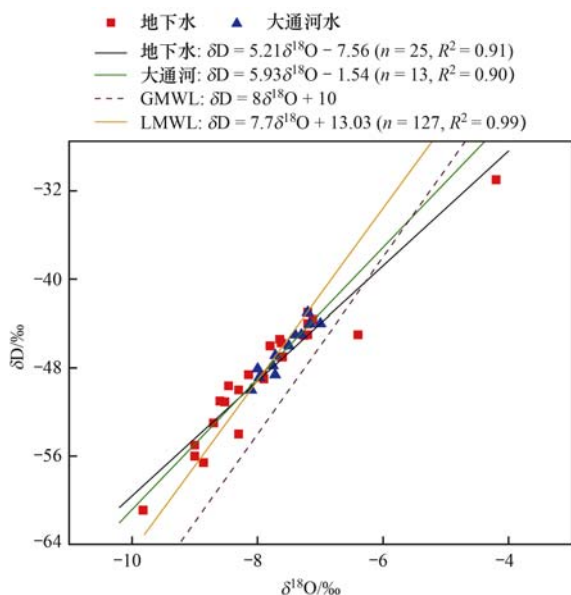


图5 研究区 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的关系

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

近地下水线, 显示河水更易受地下水影响.

河水自上而下流动的过程中, 由于受其他水源补给和环境等因素的影响, 造成了不同的补排关系, 从而使河流中的稳定氧同位素值发生了变化. 由图6(a)可知, 不同河段河水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 值随着流程(至河源的距离)的增大而有显著差异: 流域 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 值以点H028为界, 先增大, 随后以点H151为界起伏减小, 其 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 值呈富集到贫化的变化趋势. 上游点H32~H28受偏正降水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PW}}$ 值的补给较大, 而靠近下游的点H149受贫化地下水($\delta^{18}\text{O}_{\text{GW}}$ 均值 -7.7‰)补给较大, 结果表明河水最初补给源为降水, 流动过程中经历了蒸发作用, 最后因受地下水补给, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 呈贫化特征. 此外, H151为纳子峡水库水, 与库前河水相比, 水库水由于蒸发作用 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 同位素富集, 由TDS计算得出蒸发损失可达2.7%~14.8%, 故水库蓄水会导致地表水分的大量蒸发, 在干旱地区是一种极大的水资源浪费. 下游低海拔区地势平坦开阔, 地下水以泉的方式补给河水, 但由于水电站蓄水致使区内部分河段断流^[44], 河水与地下水之间转化较弱[图6(c)].

由图6(b)可知, 大通河流域河水 $d\text{-excess}$ 值随海拔升高而波动降低的特点, 采样时间段为夏季(6~8月), 该区河水 $d\text{-excess}$ 值均高于全球雨水 $d\text{-excess}$

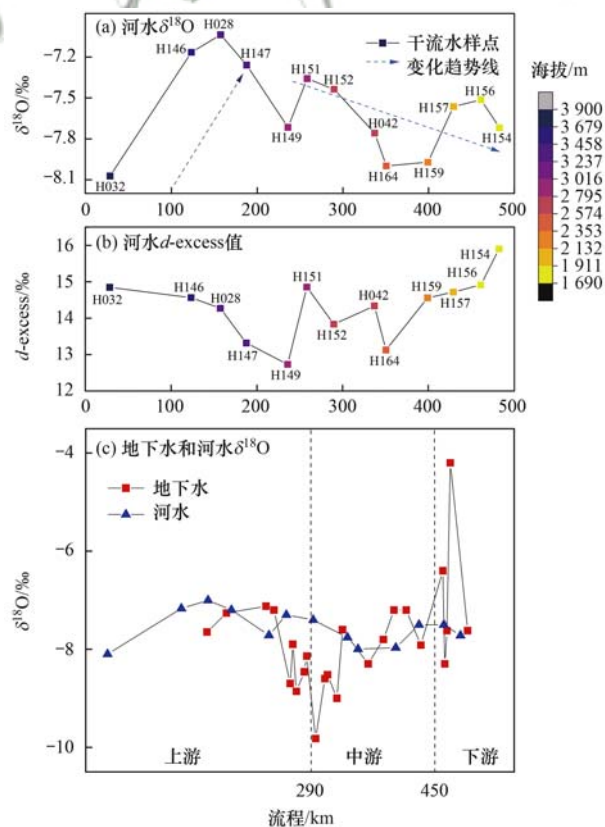


图6 稳定同位素沿流程变化

Fig. 6 Variation in stable isotopes along the distance

excess 均值(10‰),夏季气温较高,河流蒸发强烈,因此,当地蒸发的水汽会对降水补给产生一定的影响.此外,由于河流自高海拔向低海拔区流动,地下水与河流间存在着紧密的补排关系,从而导致了 $d\text{-excess}$ 值在沿程发生了明显的变化.

5 地表水与地下水的转化关系

大通河上游分布海拔3 000 m以上的高山,区内冰雪融水、降水和基岩裂隙水形成的地表径流在山前补给地下水,氡氧稳定同位素结果表明降水是河段地表水和地下水总的补给来源,补给比例为77.57%.而中游地下水 TDS 和 EC 值沿程减小,表明地下水受到了地表水的补给稀释,这与二端元模型结果一致,河段地表水和地下水均为 $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 型.冲洪积扇区降水和基岩裂隙水入渗补给地下水,由于中新世中晚期祁连山地区进入了隆升期,盆山高差较大^[45],山前地下水因构造影响,径流受阻,地下水位升高,以泉的形式溢出补给河水,使河水 TDS 值增加,氡氧同位素值贫化.下游由于水电站蓄水使区内部分河段断流,河水与地下水之间转化较弱,河水为 $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 型,地下水为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型.此外,随着路径的增长,河水和地下水的蒸发浓缩作用强烈,河水在下游蒸发比例达 2.7%~14.8%.根据二端元模型结果显示,流域上、中游地区河水主要受大气降水补给,平均补给比例分别为77.57%和73.46%;下游河段主要为潜水和泉水溢出补给河水,平均补给比例为61.09%.河流自上游至下游,降雨补给比例减小,地下水补给比例增加,除受构造运动影响外,可能与海拔变化有关,高海拔山区地下水埋深大于海拔低的地区,地下水在高海拔区更易形成山间径流,低海拔区易溢出地表.根据地表水和地下水的水文地球化学特征可知,上、中游为地表水补给径流区,下游为地下水的排泄区.

6 结论

(1) 大通河流域地表水为偏碱性淡水,以 $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 型为主;地下水为偏碱性微咸水,上游和中游主要为 $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Ca}$ 型,下游为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型.溶滤-迁移-富集因子、人类活动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39.1%、15.0%、12.6%.上游地下水存在少量钙、镁长石的溶解,中游地表水和地下水主要来自碳酸盐岩的溶解,下游地下水消耗有机物产生较多的 CO_2 溶解到水里使碳酸盐含量升高,导致碳酸钙较多的溶解.

(2) 大通河河水氡氧同位素含量沿地下水流向

呈富集到贫化的变化趋势,中上游 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 较下游富集;大通河上、中游地区河水主要受大气降水补给,平均补给比例分别为77.57%和73.46%,均为地表水补给区;下游河段受地质构造和水文地质条件等影响,主要为潜水和泉水溢出补给河水,平均补给比例为61.09%,为地下水排泄区.

参考文献:

- [1] 饶文波,李焱炜,谭红兵,等.高寒干旱区降水氢氧稳定同位素组成及其水汽来源:以昆仑山北坡格尔木河流域为例[J].水利学报,2021,52(9):1116-1125.
Rao W B, Li Y W, Tan H B, et al. Stable hydrogen-oxygen isotope composition and atmospheric moisture sources of precipitation in an arid-alpine region: a case study of the Golmud River Watershed on the north slope of the Kunlun Mountains[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1116-1125.
- [2] Chen J H, Mei Y D, Xiao W H. Establishment of the ecological relationships and properties of the Lhasa River basin water resources system, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 47, doi: 10.1016/j.scs.2019.101477.
- [3] 牟建新,李忠勤,张慧,等.中国西部大陆性冰川与海洋性冰川物质平衡变化及其对气候响应——以乌源1号冰川和帕隆94号冰川为例[J].干旱区地理,2019,42(1):20-28.
Mu J X, Li Z Q, Zhang H, et al. Mass balance variation of continental glacier and temperate glacier and their response to climate change in western China: taking Urumqi glacier No. 1 and Parlun No. 94 glacier as examples[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 20-28.
- [4] 王生廷,盛煜,吴吉春,等.祁连山大通河源区冻土特征及变化趋势[J].冰川冻土,2015,37(1):27-37.
Wang S T, Sheng Y, Wu J C, et al. The characteristics and changing tendency of permafrost in the source regions of the Datong River, Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 27-37.
- [5] An B S, Wang W C, Yang W, et al. Process, mechanisms, and early warning of glacier collapse-induced river blocking disasters in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon, southeastern Tibetan Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2022, 816, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151652.
- [6] 韦虹,吴锦奎,沈永平,等.额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征[J].环境科学,2016,37(4):1345-1352.
Wei H, Wu J K, Shen Y P, et al. Hydrochemical characteristics of snow meltwater and river water during snow-melting period in the headwaters of the Ertis River, Xinjiang[J]. Environmental Science, 2016, 37(4): 1345-1352.
- [7] Langridge R, Daniels B. Accounting for climate change and drought in implementing sustainable groundwater management[J]. Water Resources Management, 2017, 31(11): 3287-3298.
- [8] 吴斌,王赛,王文祥,等.基于地表水-地下水耦合模型的未来气候变化对西北干旱区水资源影响研究——以黑河中游为例[J].中国地质,2019,46(2):369-380.
Wu B, Wang S, Wang W X, et al. Impact of future climate change on water resources in the arid regions of Northwest China based on surface water-groundwater coupling model: a case study of the middle reaches of the Heihe River[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 369-380.
- [9] Gui J, Li Z J, Yuan R F, et al. Hydrograph separation and the influence from climate warming on runoff in the north-eastern

- Tibetan Plateau[J]. Quaternary International, 2019, **525**: 45-53.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 赵玮, 马金珠, 何建华. 党河流域敦煌盆地地下水补给与演化研究[J]. 干旱区地理, 2015, **38**(6): 1133-1141.
- Zhao W, Ma J Z, He J H. Groundwater recharge and geochemical evolution in the Dunhuang basin of Danghe River, northwest China[J]. Arid Land Geography, 2015, **38**(6): 1133-1141.
- [15] 苏小四, 万玉玉, 董维红, 等. 马莲河河水与地下水的相互关系: 水化学和同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, **39**(6): 1087-1094.
- Su X S, Wan Y Y, Dong W H, *et al.* Hydraulic relationship between Malianhe River and groundwater: hydrogeochemical and isotopic evidences[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, **39**(6): 1087-1094.
- [16] 雷义珍, 曹生奎, 曹广超, 等. 青海湖沙柳河流域不同时期地表水与地下水的相互作用[J]. 自然资源学报, 2020, **35**(10): 2528-2538.
- Lei Y Z, Cao S K, Cao G C, *et al.* Study on surface water and groundwater interaction of Shaliu River basin in Qinghai Lake in different periods[J]. Journal of Natural Resources, 2020, **35**(10): 2528-2538.
- [17] 聂振龙, 陈宗宇, 程旭学, 等. 黑河干流浅层地下水与地表水相互转化的水化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, **35**(1): 48-53.
- Nie Z L, Chen Z Y, Cheng X X, *et al.* The chemical information of the interaction of unconfined groundwater and surface water along the Heihe River, northwestern China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2005, **35**(1): 48-53.
- [18] 刘双, 刘海星, 杜新强, 等. 三江平原挠力河干流水与地下水转化关系分析[J]. 水资源研究, 2020, **9**(2): 159-168.
- Liu S, Liu H X, Du X Q, *et al.* Relationship between river water and groundwater in the main stream of Naoli River in Sanjiang Plain[J]. Journal of Water Resources Research, 2020, **9**(2): 159-168.
- [19] 杨珍. 青海省门源盆地水文特征与降雨型滑坡稳定性分析[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- Yang Z. The hydrological characteristics and rainfall landslides stability analysis of Menyuan basin, Qinghai Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [20] 张金艳. 大通河流域河流水文健康评价及生态流量研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- Zhang J Y. Study on hydrological health assessment and ecological flow in Datong River basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [21] 崔腾科, 张德栋. 大通河流域降水量及地表和地下水资源分析与评价[J]. 中国水利, 2017, (3): 41-43.
- Cui T K, Zhang D D. Precipitation in Datonghe River basin and assessment of surface and groundwater resources[J]. China Water Resources, 2017, (3): 41-43.
- [22] 白雁翎, 王芳, 刘扬. 大通河上游径流演变及驱动因素定量分析[J]. 南水北调与水利科技, 2021, **19**(1): 103-110, 167.
- Bai Y L, Wang F, Liu Y. Quantitative analysis of runoff evolution and driving factors in the upper reaches of Datong River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, **19**(1): 103-110, 167.
- [23] 李万寿, 陈爱萍, 李晓东, 等. 大通河流域水资源外调及其对生态环境的影响[J]. 干旱区研究, 1997, (1): 8-16.
- Li W S, Chen A P, Li X D, *et al.* The water resource transfer of Datong river valley and its effects on ecological environment[J]. Arid Zone Research, 1997, (1): 8-16.
- [24] 宋献方, 刘相超, 夏军, 等. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, **37**(1): 102-110.
- Song X F, Liu X C, Xia J, *et al.* A study of interaction between surface water and groundwater using environmental isotope in Huaisha River basin[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, **49**(12): 1299-1310.
- [25] Brindha K, Pavelic P, Sotoukee T, *et al.* Geochemical characteristics and groundwater quality in the Vientiane plain, Laos[J]. Exposure and Health, 2017, **9**(2): 89-104.
- [26] Gaikwad S, Gaikwad S, Meshram D, *et al.* Geochemical mobility of ions in groundwater from the tropical western coast of Maharashtra, India: implication to groundwater quality[J]. Environment, Development and Sustainability, 2020, **22**(3): 2591-2624.
- [27] Huang G X, Zhang M, Liu C Y, *et al.* Heavy metal(loid)s and organic contaminants in groundwater in the Pearl River Delta that has undergone three decades of urbanization and industrialization: distributions, sources, and driving forces[J]. Science of the Total Environment, 2018, **635**: 913-925.
- [28] Zhang F E, Huang G X, Hou Q X, *et al.* Groundwater quality in the Pearl River Delta after the rapid expansion of industrialization and urbanization: distributions, main impact indicators, and driving forces[J]. Journal of Hydrology, 2019, **577**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124004.
- [29] 孙从建, 张子宇, 陈伟, 等. 亚洲中部高山降水稳定同位素空间分布特征[J]. 干旱区研究, 2019, **36**(1): 19-28.
- Sun C J, Zhang Z Y, Chen W, *et al.* Spatial distribution of precipitation stable isotopes in the alpine zones in central Asia[J]. Arid Zone Research, 2019, **36**(1): 19-28.
- [30] Pearce A J, Stewart M K, Sklash M G. Storm runoff generation in humid headwater catchments: 1. Where does the water come from? [J]. Water Resources Research, 1986, **22**(8): 1263-1272.
- [31] 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.
- [32] Mogheir Y, Singh V P, de Lima J L M P. Spatial assessment and redesign of a groundwater quality monitoring network using entropy theory, Gaza Strip, Palestine[J]. Hydrogeology Journal, 2006, **14**(5): 700-712.
- [33] 侯光才, 苏小四, 林学钰, 等. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地

- 天然水体环境同位素组成及其水循环意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, **37**(2): 255-260.
- Hou G C, Su X S, Lin X Y, *et al.* Environmental isotopic composition of natural water in ordos cretaceous groundwater basin and its significance for hydrological cycle[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, **37**(2): 255-260.
- [34] Korbek K L, Rutledge H, Hose G C, *et al.* Dynamics of microbiotic patterns reveal surface water groundwater interactions in intermittent and perennial streams[J]. Science of the Total Environment, 2022, **811**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152380.
- [35] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 李文渊. 祁连山岩浆作用有关硫化金属矿床成矿与找矿[D]. 西安: 西北大学, 2004.
- Li W Y. Metallogenic process and exploration of magmatic-association metallic sulfide deposits of Qilian Mountain, Northwest China[D]. Xi'an: Northwest University, 2004.
- [40] Wang Z X, Li X Q, Hou X W. Hydrogeochemistry of river water in the upper reaches of the Datong River basin, China: implications of anthropogenic inputs and chemical weathering [J]. Acta Geologica Sinica, 2021, **95**(3): 962-975.
- [41] 王振兴, 李向全, 侯新伟, 等. 祁连山煤炭基地地下水质量及健康风险评估[J]. 环境影响评价, 2019, **41**(3): 50-54.
- Wang Z X, Li X Q, Hou X W, *et al.* Groundwater quality and the health risk assessment of Qilian Mountains large coal base [J]. Environmental Impact Assessment, 2019, **41**(3): 50-54.
- [42] 刘芳, 曹广超, 曹生奎, 等. 祁连山南坡主要流域河水稳定同位素特征及补给关系[J]. 中国沙漠, 2020, **40**(6): 151-161.
- Liu F, Cao G C, Cao S K, *et al.* Research on stable isotope characteristics and recharge relationship of the main river on the southern slope of Qilian Mountains [J]. Journal of Desert Research, 2020, **40**(6): 151-161.
- [43] 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.
- [44] 黄维东, 牛最荣, 马正耀, 等. 大通河流域水能水资源开发对河流水文过程和环境的影响[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(6): 1573-1581.
- Huang W D, Niu Z R, Ma Z Y, *et al.* Impact of hydropower and water resources development on hydrological processes and ecology in the Datong River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(6): 1573-1581.
- [45] 戚帮申, 胡道功, 杨肖肖, 等. 祁连山新生代古海拔变化的碳氧同位素记录[J]. 地球学报, 2015, **36**(3): 323-332.
- Qi B S, Hu D G, Yang X X, *et al.* Paleoelevation of the Qilian Mountain inferred from carbon and oxygen isotopes of cenozoic strata[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2015, **36**(3): 323-332.

CONTENTS

Variations in PM _{2.5} Composition and Sources During 2020-2021 COVID-19 Epidemic Periods in Nanjing	HUA Nan, SHANG Yue, XIE Ming-jie	(593)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou City	ZHANG Jun-mei, CHEN Shi-lin, WANG Qian-heng, <i>et al.</i>	(602)
Meteorological Characteristics, Influence Analysis and Prediction of PM _{2.5} Concentration in Taiyuan City	LI Ming-ming, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(611)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Carbon and Nitrogen Components in Ambient PM _{2.5} in Huangshi City	WANG Ci-mou, DENG Meng-jie, CHEN Yu, <i>et al.</i>	(626)
Simulation Evaluation of the Contribution of Typical PM _{2.5} Pollution and Trans-regional Transport to Ningbo Pollution in the Yangtze River Delta	PAN Yong, ZHENG Jie, XIAO Hang	(634)
Composition Characteristics and Sources of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} in the Background Atmosphere of Yangtze River Delta	WU Chang-liu, CAO Fang, JIA Xiao-fang, <i>et al.</i>	(646)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} and Its Light-scattering Properties with Different Chemical Compositions in Urban Area of Beijing	CAO Yang, WANG Chen-jing, JING Kuan, <i>et al.</i>	(658)
Impacts of Emission and Meteorological Conditions on Air Pollutants at Various Sites Around the COVID-19 Lockdown in Wuhan	XIONG Jiang-he, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(670)
Analysis of the Impact of Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in Chengdu from 2019 to 2022	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i>	(680)
Ambient VOCs Characteristics and Reactivity During O ₃ Pollution in Autumn in Urban Beijing	SUN Xue-song, ZHANG Rui, WANG Yu, <i>et al.</i>	(691)
Variation Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs at Multi-sites in Zhengzhou	WANG Bing, YIN Sha-sha, HUANG Ai-zhi, <i>et al.</i>	(699)
Chemical Composition of VOCs from Service Stations Vapor Processing Device and Associated Contributions to Secondary Pollution	HU Wei, HUANG Yu-hu, LIANG Wen-jun, <i>et al.</i>	(709)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Population Health Benefit Assessment in the Yangtze River Delta Region from 2017 to 2020	CHENG Yu-kai, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i>	(719)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Gas Pollutants in Typical Pesticide Manufacturing Enterprises	ZHAI Zeng-xiu, XIAO Xian-de, MENG Jie, <i>et al.</i>	(730)
Characteristics and Driving Factors of Hydrochemical Evolution in Tuochangjiang River Basin, Western Guizhou Province	TU Chun-lin, YANG Run-bai, MA Yi-qi, <i>et al.</i>	(740)
Hydrochemical and Isotopic Evidence for Groundwater Conversion of Surface Water in Alpine Arid Areas: A Case Study of the Datong River Basin	YI Bing, LIU Jing-tao, LÜ Xiao-li, <i>et al.</i>	(752)
Identification of Nitrate Source of Surface Water in a Typical Peri-urban Watershed in the Tableland of the Loess Plateau, China	LI Huan-wei, ZHAO Guang-ju, LI Ming, <i>et al.</i>	(761)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Middle and Upper Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(770)
Enrichments, Migrations, and Conversions of Heavy Metal in the Soil/Sediment-Plant System Towards the Lake in Typical Poyang Lake Wetland	ZENG Huan, ZHANG Hua, DING Ming-jun, <i>et al.</i>	(781)
Analysis of Heavy Metal Sources in Groundwater and Assessment of Health Risks: An Example from the Southwest Sub-basin of the Shiqi River	FU Rong-jie, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i>	(796)
Analysis on Contamination Characteristics, Pollution Source Identification and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons of Groundwater in a Large Coking Plant Site of Province	ZHANG Qian-qian, XING Jin-bing, WANG Hui-wei, <i>et al.</i>	(807)
Dynamic Monitoring and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Poyang Lake Basin	TIAN Zhi-hui, YIN Chuan-xin, WANG Xiao-lei	(816)
Effects of Sediment Dredging on the Reduction in Sediment Internal Loading of Lake Taihu and the Self-recovery Ability of Benthic Organism	ZHANG Jian-hua, YIN Peng, ZHANG Lei, <i>et al.</i>	(828)
Biogeographic Distribution Patterns and Ecological Mechanisms of Benthic Eukaryotic Microorganisms in Jinsha River	CUI Ge, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i>	(839)
Bacterial Community Structure and the Prediction of Metabolic Function in Landscape Lake Water in Xi'an	WANG Min, ZHANG Yu-tong, HUANG Chen, <i>et al.</i>	(847)
Impounding Impacts of the Three Gorges Reservoir on Phytoplankton Function Groups and Its Relationship with Resource Use Efficiency	ZHAO Lu, OUYANG Tian, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(857)
Effects of Fertilization and Straw Mulching on Nitrogen and Phosphorus Loss in Chengdu Plain	WANG Hong, YAO Li, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(868)
Efficiency and Mechanism of O ₃ -SBBR Combined Process for Advanced Treatment of Biochemical Effluent from Printing and Dyeing Industrial Park	LUO Xin-hao, HU Yong-you, CHEN Yuan-cai, <i>et al.</i>	(878)
Analysis of Microbial Community Characteristics and Function Prediction of MBBR with Magnetic Biocarriers at Low Temperature	LIU Chao, LI Qi, SONG Zi-yang, <i>et al.</i>	(889)
Detecting Influencing Factor of Vegetation NPP in Southwest China Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, HUANG Wen-ting, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i>	(900)
Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Soil Organic Carbon Density in Yellow River Basin Based on MGWR Model	NAN Fu-sen, LI Zong-xing, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i>	(912)
Coupling Relationship Between Soil Functions and Environmental Factors Along an Altitudinal Gradient: A Case Study of the Meili Mountain	ZHAO Dong-hui, SHEN Cong-cong, ZHANG Zhi-ming, <i>et al.</i>	(924)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil on the South of Dongting Lake	XIAO Kai-qi, XU An, GUO Jun, <i>et al.</i>	(932)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils of Different Land Use Types in Nanjing Suburbs	ZHANG Xiu-xiu, ZHU Chang-da, WANG Fei, <i>et al.</i>	(944)
Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Ecological Stoichiometry in Vegetable Fields and Orchard in the Coastal Area of Fuzhou	HOU Ning, HEI Jie, JIN Qiang, <i>et al.</i>	(954)
Preparation of Iron-modified Biochar and Its Application in Arsenic Contaminated Soil Remediation	WEI Jing, LIU Yi-han, TU Chen, <i>et al.</i>	(965)
Mn/Al-layered Double Oxide-loaded Biochar Reduced the Toxic Effects of Heavy Metals on Ryegrass in Soil	LIN Peng-cheng, YIN Hua, LIU Xiao-fei, <i>et al.</i>	(975)
Effect of Zinc Fertilizer Application on Cadmium Accumulation in Wheat Grain and Its Application Risk	NIU Shuo, WANG Tian-qi, YANG Yang, <i>et al.</i>	(984)
Primary Factors Affecting Soil Bioavailable Cadmium and Arsenic by Different Properties of Silicon Fertilizer	HUANG Rui, WEI Wei, XIE Yun-he, <i>et al.</i>	(991)
Availability Changes in Different Exogenous Selenium Fertilizers in Soil and Their Effects on Selenium Accumulation in Wheat	WEI Wei, LI Ping, ZHOU Zhi-gao, <i>et al.</i>	(1003)
Effects of pH, Calcium, and Phosphate on the Solubility of Arsenic in Paddy Soil Based on Surface Complexation Modeling	DENG Ying-xuan, WENG Li-ping, ZHU Gui-fen, <i>et al.</i>	(1012)
Effects of Sulfamethazine in Soil on Rice Growth	ZHANG Wei, WANG Pei-fang, JIN Qiu-tong, <i>et al.</i>	(1021)
Determination and Traceability Analysis of Phthalic Acid Esters in Garlic (<i>Allium stium</i> L.) from Jiangsu Province, China	WANG Ya, XIAO Xia-xia, YANG Yun, <i>et al.</i>	(1029)
Dissolved Ion Concentrations and Isotope Values in Agricultural Fertilizer Locally Applied in Henan Province	ZHANG Dong, XUE Tian, QIN Yong, <i>et al.</i>	(1040)
Component Properties and Heavy Metal Accumulation Characteristics of Contaminated Rice Straw Biochar During Oxygen-controlled Pyrolysis	XU Zhi, GUO Zhao-hui, XU Rui, <i>et al.</i>	(1051)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Microbial Diversity and Community Structure in the Agro-pastoral Ecotone	GAO Ri-ping, DUAN Yu, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(1063)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer Application on Bacterial Community Structure in Rhizosphere/Non-Rhizosphere Soil of Lemon	DENG Zheng-xin, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i>	(1074)
Effects of Different Topdressing Nitrogen Rates on Soil Fungal Community Structure and Ecological Network in Wheat Field Under Crop Residue Retention	JIN Hai-yang, YAN Ya-qian, ZHANG De-qi, <i>et al.</i>	(1085)
Effect of Deep Vertical Rotary Tillage on Soil Bacterial Community Diversity and Microbial Network Structure in Cultivated Land	XIA Wan-yu, CHEN Yan-yun	(1095)
Revealing the Effect of Saline Water Drip Irrigation on Soil Microorganisms in Cotton Fields Based on Metagenomics	DU Si-yao, CHEN Jing, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(1104)
Coal-carbon-pollutant Coordinated Control of Coal Chemical Industry Under Carbon Peak and Carbon Neutrality Constraints	ZHANG Hong-yu, WANG Yuan, HAO Cheng-jiang, <i>et al.</i>	(1120)
Under Goals of Carbon Peaking and Carbon Neutrality: Status, Problems, and Suggestions of CCUS in China	ZHAO Zhen-yu, YAO Shun, YANG Shuo-peng, <i>et al.</i>	(1128)
Research Progress on CO ₂ Capture, Utilization, and Storage of Fly Ash	JIANG Long, HE Chuan, LI Jin-jing	(1139)
Temporal and Spatial Distribution, Utilization Status, and Carbon Emission Reduction Potential of Straw Resources in China	YANG Chuan-wen, XING Fan, ZHU Jian-chun, <i>et al.</i>	(1149)
N ₂ O Emission from the Processes of Wastewater Treatment: Mechanisms and Control Strategies	HAO Xiao-di, HONG Zhen-li, YU Wen-bo, <i>et al.</i>	(1163)
Systematic Evaluation of Low-carbon Operation of Typical A ² O Processes in Municipal Sewage Plant	MENG Hong-qi, LI Hong-xia, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i>	(1174)
Comparison of Carbon Emissions in Different Treatment and Disposal Process Routes of Municipal Sludge	LI Zhe-kun, ZHANG Li-qiu, DU Zi-wen, <i>et al.</i>	(1181)
Evaluation and Optimization of Rural Sewage Treatment Technologies in the Middle Reaches of the Yangtze River Based on Group Decision Making and Analytic Hierarchy Process	LIU Lu, ZHANG Wen-qiang, HU Fei-chao, <i>et al.</i>	(1191)