

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献	赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊 O ₃ 浓度时空分布及潜在源区分析	李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层 O ₃ 和前体物 HCHO 及 NO ₂ 的时空特征	王晓雯, 刘旻霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征	明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力	黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中碳组分特征	沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应	高爽, 凌超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系	裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价	陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险	张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)
太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析	王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献	李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估	宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应	李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析	于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群	张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响	李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响	辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茜, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 舒舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制	赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制	魏淑惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制	岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响	贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估	张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估	耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估	马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征	赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响	陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响	郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响	赵肖琼, 张恒慧, 赵润枝, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物对微塑料的迁移行为及模型计算	张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响	徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析	刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响	张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素	罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响	鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子	赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响	聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性	唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响	周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响	王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如苗, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性	刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
CuFeO ₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性	刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应	陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估	郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估	赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评估及土壤环境基准值推导	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析	贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估	杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征	周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO ₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析	张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例	陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)	

黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系

裴森森¹, 段利民^{1,2,3,*}, 苗平⁴, 潘浩¹, 崔彩琪¹, 张波¹, 籍健勋¹, 罗艳云^{1,2,3}, 刘廷玺^{1,2,3}

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018; 3. 黄河流域内蒙段水资源与水环境综合治理协同创新中心, 呼和浩特 010018; 4. 鄂尔多斯市河湖保护中心, 鄂尔多斯 017010)

摘要:以黄河流域内蒙古段为研究区,于2021年7月(丰水季)和10月(枯水季)采集降水、黄河干流、黄河支流与季节性河流、乌梁素海、哈素海、岱海、灌区渠系和地下水等水样,测试不同类型水体的水化学组成和氢氧同位素值.综合运用Piper三线图、Gibbs图、离子比例和MixSIAR混合模型等研究方法,分析了黄河流域内蒙古段水化学演变规律,并揭示降水、地表水和地下水的转化关系.结果表明,研究区地下水和地表水均偏弱碱性,水体中优势阴离子为 Cl^- ,优势阳离子为 Na^+ ,地表水水化学类型以 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 为主,地下水水化学类型以 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$.地下水 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于硅酸盐和蒸发岩的溶解,地表水 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要源于碳酸盐岩溶解,且水中碳酸和硫酸参与了碳酸盐矿物和硫化物溶解的过程,不同水体 Na^+ 和 Cl^- 均受人为污染源的影响.受季节效应影响,地表水和地下水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 丰水期较枯水期高,研究表明,地表水在接受大气降水补给后受到了蒸发分馏作用的影响,地下水补给源复杂. MixSIAR模型揭示出,研究区地表水是地下水的主要补给来源,占总补给量的52.4%~62.2%,大气降水是地表水的主要补给来源,占总补给量的85.4%~97.1%.

关键词:黄河流域; 水化学特征; 氢氧同位素; MixSIAR模型; 地下水

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-4863-11 DOI: 10.13227/j.hjlx.202210152

Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin

PEI Sen-sen¹, DUAN Li-min^{1,2,3,*}, MIAO Ping⁴, PAN Hao¹, CUI Cai-qi¹, ZHANG Bo¹, JI Jian-xun¹, LUO Yan-yun^{1,2,3}, LIU Ting-xi^{1,2,3}

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization, Hohhot 010018, China; 3. Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in Inner Mongolia Section of the Yellow River Basin, Hohhot 010018, China; 4. Ordos River and Lake Protection Center, Ordos 017010, China)

Abstract: The Yellow River in Inner Mongolia was selected as the study area in this study. In July (wet season) and October (dry season) of 2021, the acquisition of seasonal rivers, the Yellow River tributaries and precipitation, the Yellow River, Wuliangsuhai, Lake Hasuhai, Lake Daihai, an irrigation canal system, and underground water and sea water samples were collected to test the water chemical composition and hydrogen and oxygen isotopic values of different water types. Using the Piper triplot, Gibbs plot, ion ratio, and MixSIAR model methods, the evolution of water chemistry in the Mongolian section of the Yellow River Basin was analyzed, and the transformation relationship between precipitation, surface water, and groundwater was revealed. The results showed that both groundwater and surface water in the study area were slightly alkaline; the dominant anion in water was Cl^- , and the dominant cation was Na^+ . The main hydrochemical types of surface water were $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ and $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$, whereas those of groundwater were $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ and $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$. Groundwater Ca^{2+} and Mg^{2+} were primarily derived from the dissolution of silicate and evaporite, and surface water Ca^{2+} and Mg^{2+} were primarily derived from carbonate karst dissolution and carbonate and sulfuric acid in water participating in the dissolution process of carbonate and sulfide minerals. Na^+ and Cl^- in different water bodies were all affected by anthropogenic pollution sources. Owing to the seasonal effect, δD and $\delta^{18}\text{O}$ of surface water and groundwater were higher in the wet season than in the dry season. The results showed that surface water was affected by evaporative fractionation after receiving precipitation recharge, and the groundwater recharge sources were complex. The MixSIAR model revealed that surface water was the main recharge source of groundwater, accounting for 52.4%-62.2% of the total recharge, and atmospheric precipitation was the main recharge source of surface water, accounting for 85.4%-97.1% of the total recharge.

Key words: Yellow River Basin; hydrochemical characteristic; hydrogen and oxygen isotopes; MixSIAR model; groundwater

水是人类及一切生物赖以生存、不可或缺的重要资源.然而,随着经济的快速发展和生活方式的巨大变化,工业、农业和生活用水需求不断增加,导致全球范围的水危机^[1~3].尤其是在干旱半干旱地区,水资源短缺和水环境污染等问题凸显,已经成为制约区域经济社会发展的瓶颈^[4,5].在干旱半干旱地区,降水、地表水和地下水间的转化是水文循环的重要过程,是开展流域水资源管理与保护的前提基础^[6,7].

天然水体的水化学组分是水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^[8].氢氧稳定同位素受蒸发分馏、凝

收稿日期: 2022-10-15; 修订日期: 2022-11-30

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0009); 内蒙古自治区“科技兴安”行动重点专项(KJXM-EEDS-2020005); 国家重点研发计划项目(2021YFC3201201); 科技部重点领域创新团队项目(2015DFA00530); 教育部创新团队发展计划项目(IRT_17R60)

作者简介: 裴森森(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为流域水循环, E-mail: pss866@vip.qq.com

* 通信作者, E-mail: duanlimin820116@163.com

结和混合作用影响,不同成因的水源具有特征性同位素且含量相对稳定的特点^[9].因此,联合应用水化学与氢氧稳定同位素示踪技术是了解复杂水文过程的有效手段^[10~12].雷米等^[8]分析了新疆博尔塔拉河流域平原区地表水和地下水的水化学和氢氧同位素特征,揭示了地表水和地下水的相互转化关系;张荷惠子等^[13]分析了黄土丘陵沟壑区小流域不同水体的氢氧同位素特征,在此基础上,采用端元混合模型量化了不同水体的转化关系;Yang等^[14]测定了西北德令哈地区降水、河水及地下水中的水化学、稳定同位素(D-¹⁸O)和放射性同位素(²²²Rn),揭示了河水与地下水的补排关系;刘鑫等^[15]分析了汾河流域浅层地下水的水化学和氢氧同位素特征及其影响因素,阐明了流域水循环和水质的演化过程.

黄河是中华民族的母亲河,黄河流域生态保护和高质量发展已上升为重大国家战略^[16,17].水资源是黄河流域最关键的基础性资源要素^[18],在气候变化和人类活动的影响下,黄河上、中、下游面临着不同类型的水资源及环境生态问题^[19].黄河流域内蒙古段地处黄河最北端,具有承上启下的重要作用,由于受自然资源禀赋和承载能力的制约,流域水资源严重短缺,生态环境十分脆弱^[20,21].有研究分析了河套灌区和乌梁素海流域的水化学特征和利用稳

定同位素技术所揭示的地下水补给方式和来源^[22,23],但缺乏对整个黄河流域内蒙古段不同水体的同位素水化学类型和转化关系的研究.因此,本研究借助实用的水化学与氢氧稳定同位素分析方法,探究黄河流域内蒙古段水化学特征,揭示不同水体间复杂的转化关系,对于流域水资源开发利用、生态保护和修复等具有重要的支撑作用.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河流域内蒙古段是黄河“几”字弯的重要地带,地处东经 106°00′~113°00′,北纬 37°30′~42°00′,从宁夏石嘴山流入内蒙古,流经阿拉善盟、乌海市和巴彦淖尔市等 7 个盟市的 42 个旗县(市、区),在呼和浩特市清水河县老牛湾出境流入山西省.内蒙古段干流长度 843.5 km,占黄河总长的 1/7,如图 1.研究区属典型的大陆性季风气候区,多年平均降水量 270 mm,主要集中在 7~9 月,占全年降水量的 60%,多年平均蒸发量 1 500 mm.本文着眼于流域水体转化关系规律研究,因此,黄河内蒙古段空间范围的划定,南部是以东胜四十里梁分水岭为界,不包括分水岭南部由北向南径流,汇入不到黄河干流的地表水和地下水区域.

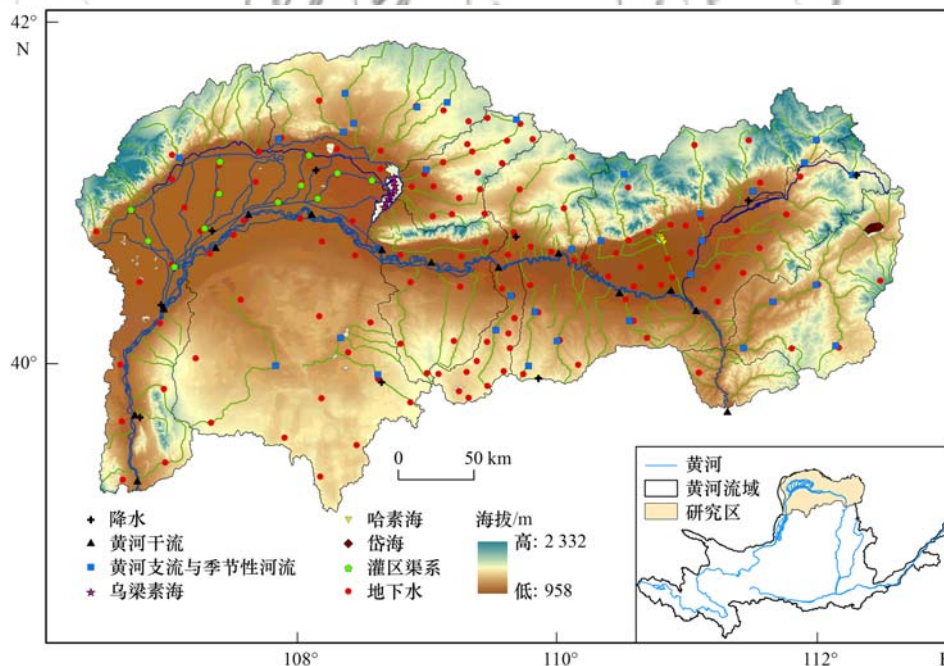


图1 研究区不同水体采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.2 样品采集与数据分析

于 2021 年 7 月(丰水期)和 10 月(枯水期)在整个黄河流域内蒙古段,布设地下水采样点 144 个、地表水采样点 62 个(其中,干流 14 个、支流与季节性河流 33 个、湖泊 3 个、灌区渠系 12 个)、降水采

样点 9 个;共采集样品 443 组,包括地下水 289 组、地表水 154 组(其中,干流 28 组、支流与季节性河流 59 组、湖泊 44 组、灌区渠系 23 组)、降水 81 组.不同水体采样点位置如图 1 所示.

使用便携式电导率仪(DDBJ-350)在野外现场

测定水样中的 pH 值、溶解性总固体(TDS), 采用离子色谱仪(USA, AQ-1200, Thermo Fisher)在实验室测定 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- , 阴阳离子电荷平衡差控制在 5% 以内。 HCO_3^- 离子浓度用盐酸滴定法测定。每个样品做 3 次重复测试, 平均误差 < 5%, 最终取平均值。应用 LGR (USA, LWIA-45-EP) 同位素分析仪测定 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$, 精度分别为 $\pm 0.1\text{‰}$ 和 $\pm 0.3\text{‰}$, 均满足测量的精度要求。

氢氧稳定同位素含量为 V-SMOW 的千分偏差, 表示为:

$$\delta = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, δ 为水样中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的组成相对于标样的变化方向和程度, ‰ ; R_{sample} 为水样中 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值; R_{standard} 为标样中 D/H 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比值。

采用贝叶斯模型识别计算多个源对混合物的贡献^[24], 该模型基于狄利克雷分布, 在贝叶斯框架下构建了一个逻辑先验分布。本文利用贝叶斯混合模型(MixSIAR 版本 3.1.13)^[25], MixSIAR 包含了与各种同位素组成、多种源和鉴别因子相关的不确定性^[26]。可表示为:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^K P_k (S_{jk} + C_{jk}) + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

$$S_{jk} \sim N(\mu_{jk}, \omega_{jk}^2) \quad (3)$$

$$C_{jk} \sim N(\lambda_{jk}, \tau_{jk}^2) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_j^2) \quad (5)$$

式中, X_{ij} 为混合物 i 的 j 同位素值($i = 1, 2, 3, \dots$, N ; $j = 1, 2, 3, \dots, J$); P_k 为源 k 的贡献率, 由该模型粗略计算。 S_{jk} 为源 k 的 j 同位素值($k = 1, 2, 3$,

$\dots, K$), 与平均值 μ_{jk} 和方差 ω_{jk}^2 呈正态分布; C_{jk} 为源 k 在 j 同位素上的分馏因子, 用平均值 λ_{jk} 和标准差 τ_{jk}^2 表示; ε_{ij} 为单个成分额外的非量化差异的残余误差, 用平均值 0 和标准差 σ_j^2 表示。

2 结果与讨论

2.1 不同水体水化学特征

黄河流域内蒙古段地表水、地下水水化学和氢氧同位素组成见表 1。不同水体的 pH、TDS 含量变化较大, 其离子组成具有明显的时空特征。其中黄河干流、支流与季节性河流、乌梁素海、哈素海、岱海和灌区渠系等地表水丰水期的 pH 变化范围为 6.99 ~ 8.04 偏弱碱性, 且大小为: 灌区渠系 > 乌梁素海 > 哈素海 > 岱海 > 支流与季节性河流 > 黄河干流, TDS 变化范围为 174.30 ~ 11 900 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且大小为: 岱海 > 乌梁素海 > 支流与季节性河流 > 哈素海 > 黄河干流 > 灌区渠系; 地表水枯水期 pH 变化范围为 7.07 ~ 8.30 偏碱性, 且大小为: 岱海 > 灌区渠系 > 乌梁素海 > 哈素海 > 黄河干流 > 支流与季节性河流, TDS 变化范围为 141.20 ~ 12 550 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且大小为: 岱海 > 乌梁素海 > 哈素海 > 支流与季节性河流 > 灌区渠系 > 黄河干流。地下水丰水期的 pH 和 TDS 变化范围分别为 6.43 ~ 8.46 和 155.50 ~ 1 451.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 枯水期变化范围分别为 6.60 ~ 8.61 和 158.00 ~ 8 340 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 整体呈中碱性, 多为低矿化度水。地表水 TDS 明显高于地下水, 说明地表水的水-岩相互作用强于地下水, 易溶盐含量较高^[27]。

图 2 为不同水体类型 Piper 三线图^[28]。可以发现丰水期不同地表水体和地下水的水化学离子分布在菱形区域较为集中, 说明离子来源较为一致, 联系

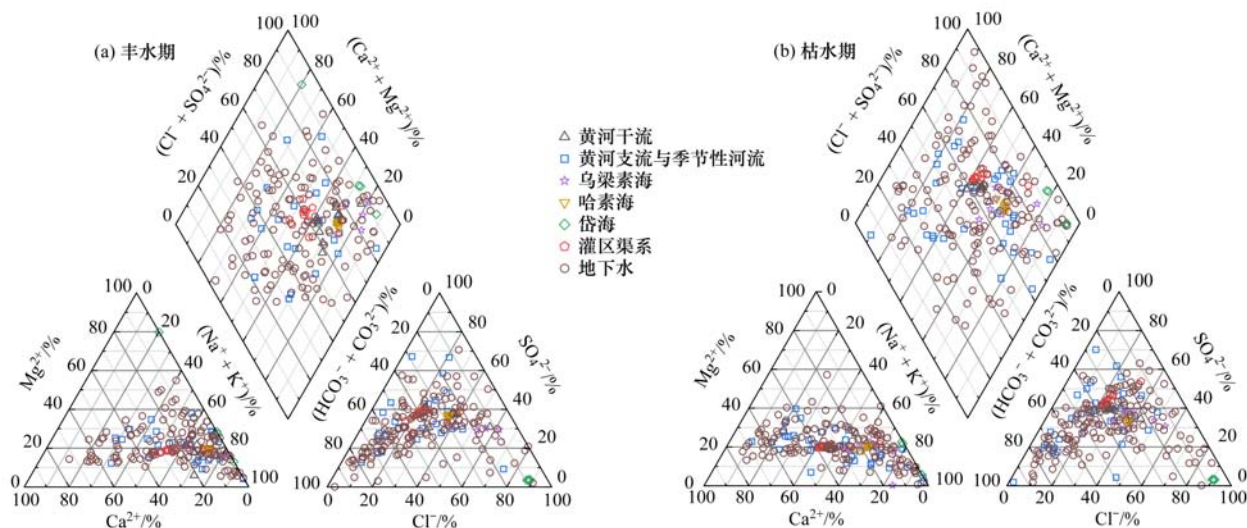


图 2 研究区丰枯水期不同水体 Piper 三线图

Fig. 2 Piper triplet diagram of two different water bodies in the study area

表 1 研究区丰枯两期不同水体水化学离子及同位素统计特征

Table 1 Statistical characteristics of chemical ions and isotopes in water in two periods of abundance and drought in the study area

时间	类型	项目	$\rho/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$										pH	δD /‰	$\delta^{18}\text{O}$ /‰	$d\text{-excess}$ /‰
			Na^{+}	K^{+}	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	NO_3^{-}	HCO_3^{-}	TDS				
2021 年 7 月 (丰水期)	黄河干流	平均值	135.55	4.58	36.19	24.23	0.90	278.13	275.74	13.46	195.79	521.14	7.34	-66.8	-9.4	8.6
		最大值	476.94	8.69	103.73	39.25	1.59	1 188.78	643.36	33.87	230.62	1 315.00	7.81	-54.1	-7.1	13.1
		最小值	69.95	2.84	6.06	14.21	0.36	100.36	157.31	4.23	169.90	335.00	6.99	-71.8	-10.1	2.4
		标准差	104.71	1.51	21.47	7.20	0.51	275.35	117.09	7.01	17.51	247.41	0.37	4.7	0.8	3.0
	支流与季节性河流	平均值	91.60	8.17	26.19	25.92	1.47	257.82	289.18	35.93	266.09	608.49	7.53	-58.7	-8.7	11.0
		最大值	449.27	34.27	50.92	64.48	4.74	2 846.37	1 861.49	127.68	1 094.83	5 110.00	8.04	-29.5	-2.2	20.3
		最小值	16.67	2.24	8.79	1.57	0.53	21.12	29.81	0.30	77.90	174.30	7.02	-71.8	-11.3	-12.0
		标准差	97.00	7.00	9.90	16.80	0.84	565.32	364.96	34.33	198.81	981.67	0.30	9.1	1.9	7.6
	乌梁素海	平均值	864.04	17.16	176.99	19.90	0.88	2 171.54	1 122.36	6.45	453.47	2 304.67	7.69	-38.4	-5.7	6.8
		最大值	1 041.08	21.13	218.91	41.69	1.84	2 955.35	1 410.14	8.64	490.68	2 870.00	7.84	-30.9	-3.2	17.9
		最小值	650.42	14.38	141.11	1.67	0.08	1 586.83	883.87	3.63	395.61	1 804.00	7.59	-52.1	-8.7	-5.2
		标准差	161.57	2.88	32.05	16.53	0.73	576.16	217.66	2.09	41.47	437.59	0.11	9.7	2.3	9.5
	哈素海	平均值	161.63	7.67	46.11	19.15	1.76	322.55	332.02	3.98	246.87	577.00	7.68	-37.2	-4.7	0.7
		最大值	166.24	8.34	47.57	21.58	1.99	336.88	339.14	6.14	263.74	599.00	7.82	-33.7	-4.0	7.8
		最小值	157.52	7.29	44.45	17.03	1.06	312.51	325.43	1.75	239.21	561.00	7.47	-44.5	-5.7	-5.5
		标准差	3.42	0.35	0.96	1.59	0.32	7.37	4.97	1.64	8.98	11.78	0.15	3.6	0.6	5.6
	岱海	平均值	746.58	34.21	320.93	1.11	6.85	16 193.03	646.71	9.83	1 191.43	11 858	7.58	-1.3	-1.7	-14.6
		最大值	983.33	36.82	366.06	2.09	7.38	16 887.24	706.44	17.09	1 228.54	11 900	7.62	0.0	2.0	-11.1
		最小值	58.05	30.06	132.39	0.03	5.12	13 764.86	556.45	1.31	1 153.71	11 750	7.51	-3.5	1.3	-18.5
		标准差	288.25	2.13	67.65	0.77	0.62	994.05	41.36	3.98	23.42	40.69	0.04	1.0	0.3	2.4
	灌区渠系	平均值	91.21	4.06	29.76	33.95	0.44	185.18	241.83	9.50	226.68	435.83	7.75	-70.4	-10.6	14.5
		最大值	254.69	5.77	74.23	58.59	1.26	662.93	651.73	30.15	349.61	979.00	7.90	-64.0	-9.4	17.0
		最小值	57.79	3.03	20.69	16.85	0.02	74.67	142.64	3.08	171.74	326.00	7.59	-72.8	-11.2	10.9
		标准差	59.05	0.76	14.68	10.34	0.39	166.79	132.78	6.93	63.09	185.17	0.10	2.7	0.5	1.8
	地下水	平均值	245.20	7.08	69.60	54.64	1.89	716.51	464.82	84.81	345.41	965.18	7.58	-71.3	-10.4	11.6
		最大值	2 103.22	188.98	674.36	445.92	12.95	19 902.65	4 747.87	578.51	1 367.16	14 510	8.46	-55.6	-7.4	19.6
		最小值	9.14	0.66	5.71	0.64	0.06	7.72	0.27	0.14	0.00	155.50	6.43	-91.9	-12.9	-9.1
		标准差	387.91	16.16	97.74	60.11	1.76	2 036.54	718.87	97.86	206.80	1 616.49	0.31	7.1	1.1	5.2
2021 年 10 月 (枯水期)	黄河干流	平均值	68.11	2.58	29.44	51.59	1.22	146.55	226.28	13.11	184.58	394.71	7.46	-69.1	-10.3	13.0
		最大值	154.93	4.87	49.77	56.06	1.70	390.09	318.50	15.65	198.55	634.00	7.66	-62.9	-9.2	15.9
		最小值	46.90	1.80	23.21	37.28	0.30	87.56	171.34	2.05	150.41	345.00	7.25	-70.8	-10.7	10.4
		标准差	25.61	0.76	6.07	5.18	0.49	70.68	30.54	3.29	13.67	69.59	0.11	1.9	0.4	1.3
	支流与季节性河流	平均值	127.78	8.34	35.29	50.39	2.12	184.09	252.67	44.77	224.12	514.97	7.42	-58.6	-7.4	0.3
		最大值	617.02	38.45	95.82	138.34	5.46	734.98	691.33	307.95	577.59	1 152.00	8.06	-16.3	1.0	11.2
		最小值	4.14	1.62	7.74	10.15	0.31	5.48	5.02	0.06	108.30	141.20	7.07	-78.0	-10.1	-24.6
		标准差	146.24	7.89	18.94	26.24	0.94	194.35	185.82	58.35	99.74	308.23	0.24	13.4	2.5	7.6
	乌梁素海	平均值	151.59	5.12	39.92	41.52	1.05	338.52	270.63	3.91	183.84	611.78	7.51	-64.0	-9.4	11.4
		最大值	395.63	9.34	93.66	54.39	1.53	1 053.75	587.31	10.99	246.68	1 202.00	7.66	-51.2	-6.5	16.9
		最小值	62.66	2.34	0.70	24.39	0.64	102.98	127.17	1.28	132.36	442.00	7.37	-68.5	-10.5	0.5
		标准差	95.37	1.88	23.51	8.91	0.27	282.53	132.66	2.82	29.63	234.12	0.09	4.9	1.1	4.5
	哈素海	平均值	129.98	6.46	44.19	40.69	1.96	307.94	283.67	5.22	235.65	545.17	7.46	-45.3	-4.5	-8.9
		最大值	144.22	9.51	48.85	50.20	2.10	338.17	299.71	9.49	261.72	570.00	7.77	-39.0	-3.0	0.7
		最小值	110.78	5.48	39.00	32.36	1.73	246.86	264.63	3.14	210.58	495.00	7.26	-55.8	-7.1	-14.6
		标准差	12.18	1.41	3.53	5.75	0.12	29.53	10.34	1.99	17.25	25.28	0.17	5.4	1.4	5.8
	岱海	平均值	3 666.46	42.71	335.99	11.02	7.44	17 419.12	597.88	12.17	816.45	12 424	8.28	0.1	2.8	-22.3
		最大值	5 520.26	43.63	337.15	14.09	7.79	18 099.10	620.25	14.33	1 004.77	12 550	8.30	1.3	3.9	-18.1
		最小值	139.32	41.21	332.07	8.59	6.74	15 413.21	551.03	7.38	709.96	12 320	8.24	-0.9	2.1	-31.7
		标准差	2 260.82	0.66	1.43	1.47	0.27	764.69	17.80	1.83	84.62	80.40	0.02	0.6	0.4	3.4
	灌区渠系	平均值	74.03	2.31	32.29	48.72	1.47	160.60	295.47	28.15	150.41	423.36	7.56	-68.5	-10.0	11.8
		最大值	269.44	3.47	87.30	55.43	1.68	609.16	996.17	158.69	210.58	1 142.00	7.65	-66.2	-9.8	15.5
		最小值	43.70	1.54	22.10	41.06	0.48	109.93	216.48	13.00	102.28	328.00	7.49	-71.3	-10.4	7.8
		标准差	61.93	0.46	17.49	5.21	0.32	141.87	221.64	41.29	29.03	227.46	0.05	1.5	0.3	2.3
	地下水	平均值	225.45	5.30	55.13	61.01	1.98	505.23	357.82	96.04	247.38	814.64	7.50	-69.8	-9.7	7.4
		最大值	3 688.33	51.40	419.01	651.41	13.82	10 238.12	3 196.47	2 514.90	1 263.48	8 340	8.61	-54.1	-7.2	19.6
		最小值	1.65	0.20	2.66	1.29	0.00	7.63	2.30	0.10	36.10	158.00	6.60	-87.7	-13.0	-9.6
		标准差	436.25	6.94	67.99	75.33	1.85	1 136.73	480.54	225.04	167.68	1 047.31	0.24	7.2	1.2	4.6

相对密切. 干流、乌梁素海、岱海和地下水的优势阴、阳离子分别为 Cl^- 和 Na^+ , 水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Mg}$, 这是由于干流中携带了大量泥沙造成的; 支流与季节性河流、哈素海和灌区渠系的优势阴、阳离子分别为 SO_4^{2-} 和 Na^+ , 水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Mg}$. 枯水期地下水水化学离子分布相对分散, 说明地表水和地下水间的联系不密切. 干流、支流与季节性河流、灌区渠系和地下水的优势阴、阳离子分别为 SO_4^{2-} 和 Na^+ , 水化学类型为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$, 这可能源于方解石 (CaCO_3) 等碳酸盐的溶解; 乌梁素海、哈素海和岱海的优势阴、阳离子为分别 Cl^- 和 Na^+ , 水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$. 丰、枯水期地表水体多数离子含量呈现出岱海

> 乌梁素海 > 哈素海 > 支流与季节性河流 > 灌区渠系 > 干流的规律, 这充分说明了流域内湖泊及河流自然水体水循环的活跃程度^[29~31], 湖水的矿化度比河水、地下水高, 这可能是由于湖泊水蒸发作用强烈导致湖泊中盐分含量累积, 并经过钙镁矿物沉淀析出和阳离子置换吸附等作用使得 Na^+ 成为水中优势离子.

2.2 不同水体水化学控制因素及离子来源分析

2.2.1 主控因素识别

Gibbs 模型^[32]是区分地表水及地下水水化学影响因素的直接方法, 分为大气沉降型、岩石风化型和蒸发浓缩型这 3 类^[33,34]. 如图 3 所示, 在丰水期, 干流、支流与季节性河流、哈素海、灌区渠系和大

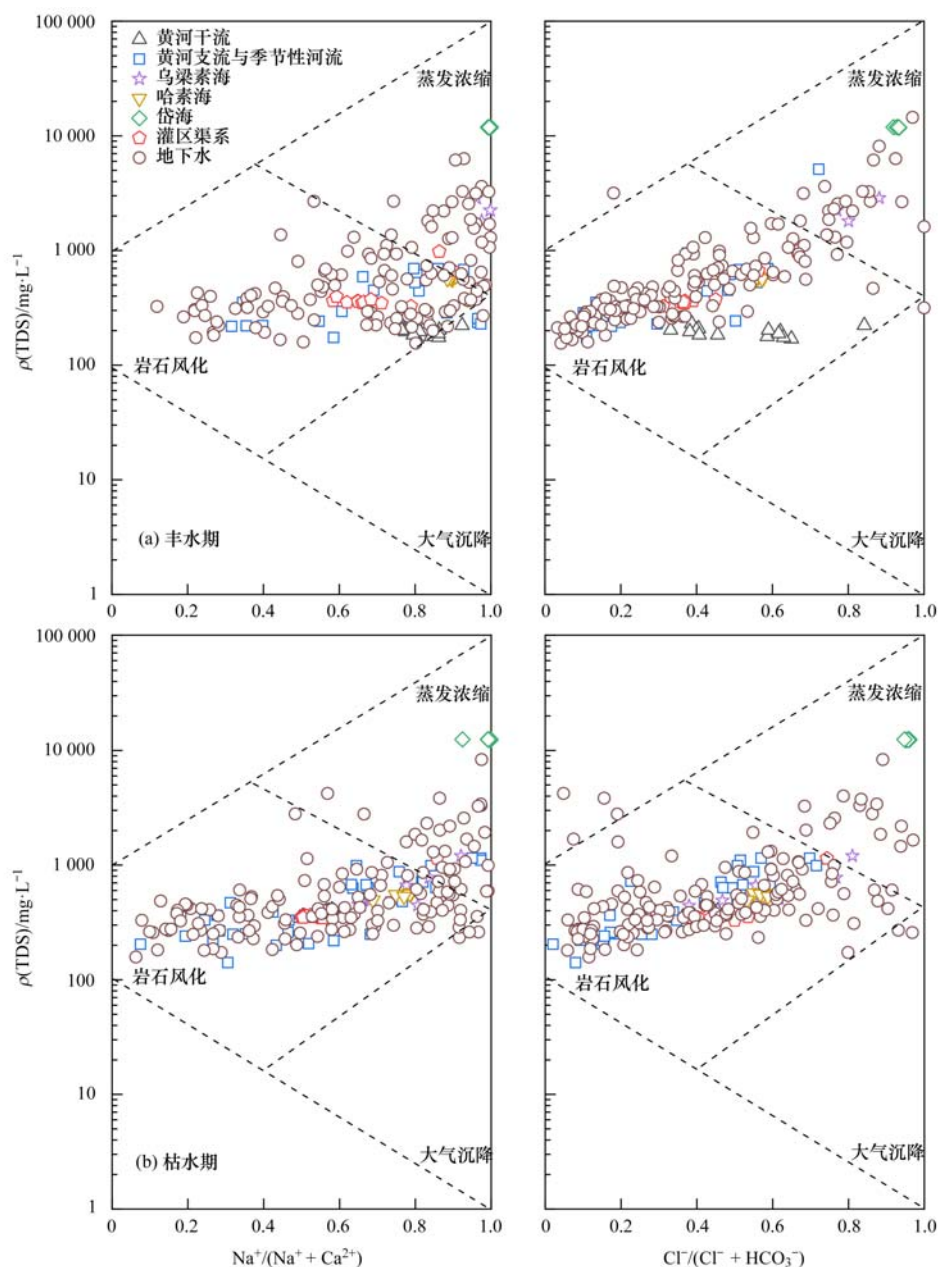


图 3 研究区丰枯水期不同水体 Gibbs 图

Fig. 3 Gibbs diagram of different water bodies in two periods of abundance and drought in the study area

部分地下水分布在岩石风化区,说明其水化学的主控因素为矿物溶解;乌梁素海、岱海和少部分地下水分布在蒸发浓缩区,说明其水化学的主控因素为蒸发,总体来看,矿物溶解占主导地位. 枯水期不同水体较丰水期变化小,说明地表水、地下水的化学组成、迁移转化和离子来源存在高度一致性.

由图 4(a)可知,丰水期黄河干流、支流与季节性河流、乌梁素海、哈素海、灌区渠系和地下水的氯-碱指数 CAI 均为负值,而仅有岱海的 CAI 为正值,表明正阳离子交换是丰水期水体中阳离子交换的主要类型,即含水层水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与介质骨架中的 Na^+ 交换,地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量减少,而 Na^+ 的含量增加,反应过程为: $2\text{NaX} + \text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+} \longrightarrow 2\text{Na}^+ + \text{Mg}/\text{CaX}_2$. 由图 4(b)可知,

枯水期黄河干流、哈素海、岱海和灌区渠系的氯-碱指数 CAI 均为正值,支流与季节性河流中 32.4% 和 67.6% 的样品的 CAI 值分别为正值和负值,乌梁素海中 66.7% 和 33.3% 的样品的 CAI 值分别为正值和负值,地下水中 59.6% 和 40.4% 的样品的 CAI 值分别为正值和负值,表明反阳离子交换是枯水期水体中阳离子交换的主要类型,即含水层中的 Na^+ 与介质骨架中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 交换,地表水及地下水中 Na^+ 含量减少, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量增加,反应过程为: $\text{Mg}/\text{CaX}_2 + 2\text{Na}^+ \longrightarrow \text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+} + 2\text{NaX}$, 其中 X 为黏土矿物^[35]. 丰水期相较于枯水期水体中 CAI 值负值更多,且绝对值更大,表明降水可以导致阳离子交换重新定向且交替更强.

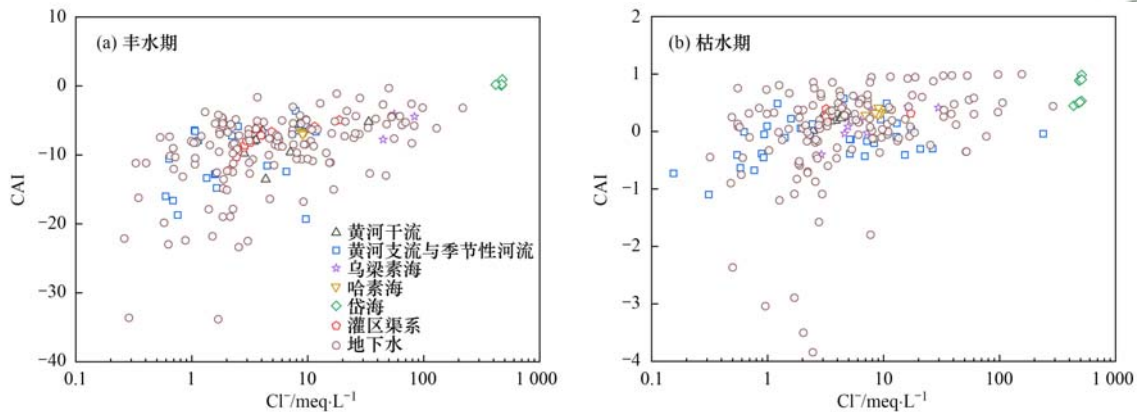


图 4 研究区丰枯水期不同水体 CAI

Fig. 4 CAI maps of different water bodies in the study area

2.2.2 离子来源分析

为了进一步分析地表水和地下水主要离子来源及水化学演化过程,利用 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 关系判断水循环过程中各离子的来源^[36,37]. 如图 5(a)所示,干流、部分支流与季节性河流、乌梁素海、哈素海、岱海、灌区渠系以及大部分地下水分布在蒸发盐岩和硅酸盐岩控制端元之间,说明其水化学主要是受蒸发盐岩和硅酸盐岩矿物溶解共同控制;其他取样点分布在硅酸盐岩和碳酸盐岩控制端元之间,说明其水化学主要是受酸盐岩和碳酸盐岩溶解共同控制.

Na^+ 和 K^+ 一般来源于大气沉降、硅酸盐矿物溶解以及蒸发盐矿物溶解^[38], Na^+/Cl^- (毫克当量浓度比值,下同)可揭示地下水系统中岩盐的溶解来源^[39]. 岩盐溶解会释放出 Na^+ 和 Cl^- 进入水体中,理论上来说 Na^+ 和 Cl^- 浓度相同. 如图 5(b)所示,可以看出丰水期地表水体及地下水 Na^+/Cl^- 在 1 左右,说明丰水期受人类影响不大,而枯水期除岱海以外的地表水体和地下水 Na^+/Cl^- 远大于 1,说

明枯水期地表水和地下水 Na^+ 来源不只有大气沉降和岩盐溶解,还有其他来源,部分采样点地下水 Na^+ 和 Cl^- 含量远高于其他地区,说明受到周边企业和农业生产的影响.

利用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ (毫克当量浓度比值,下同)可以确定 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的来源. 由图 5(c)可知,部分支流与季节性河流、地下水分布在 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^- = 1:1$ 比值线以下,说明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于硅酸盐和蒸发岩的溶解. 干流、部分支流与季节性河流、乌梁素海、哈素海、岱海、灌区渠系和大部分地下水采样点分布在 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^- = 1:1$ 比值线以上,说明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要源于碳酸盐岩溶解. 部分采样点 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 远大于 1,说明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 除了来自碳酸盐岩溶解外,还可能有碳酸、硫酸和硝酸等其他离子参与碳酸盐岩溶解^[40].

利用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 可以进一步分析碳酸和硫酸参与地表水及地下水碳酸盐岩溶解情况. 由图 5(d)可知,岱海和部分支流与季节性

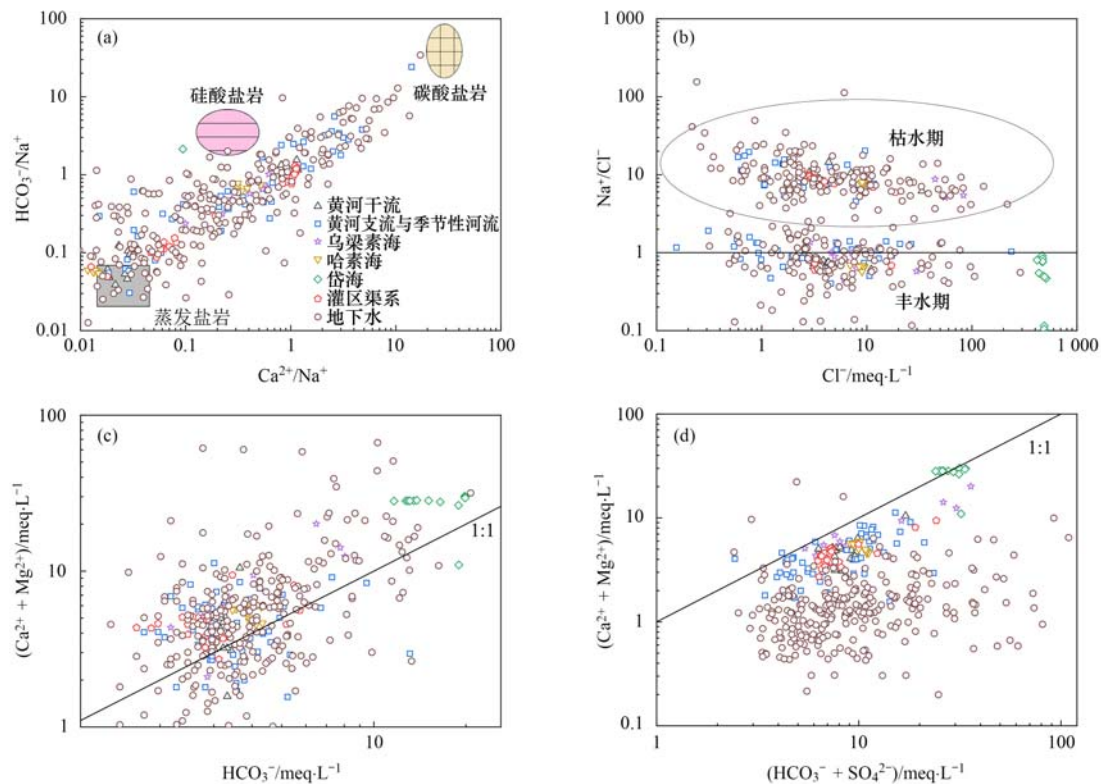


图5 研究区不同水体主要离子比值关系

Fig. 5 Relationship diagram of major ion ratios in different water bodies in the study area

河流、地下水采样点位于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1:1$ 比值线之上,说明 SO_4^{2-} 主要来源于碳酸盐岩地层中石膏的溶解.大部分干流、支流与季节性河流、乌梁素海、哈素海、灌区渠系和地下水采样点均分布在 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1:1$ 比值线以下,表示 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 浓度值小于 $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 浓度值,结合研究区地球化学背景, SO_4^{2-} 还可能来源于黄河周边黄土层中硫化矿物的溶解^[41].

2.3 不同水体氢氧同位素特征及水循环指示意义

2.3.1 降水方程线及特征

降水氢氧同位素组成在一定范围内变化不大,同一地区的降水线可以用一个方程表示^[42].利用实测数据建立了研究区大气降水线 LMWL: $\delta D = 5.94 \delta^{18}\text{O} - 7.97$ ($R^2 = 0.76$),全球降水线 GMWL 采用 1961 年 Craig^[43] 提出的 ($\delta D = 8.00 \delta^{18}\text{O} + 10$).由图 6 可见,LMWL 的斜率为 5.94,小于 GMWL 的斜率 8.00,说明研究区大气降水经历了较强的蒸发,这与当地干旱、少雨的水汽条件相吻合^[44].研究区纬度较高,降水过程受二次蒸发影响,氢氧同位素产生显著分馏,导致水汽 ^{18}O 比 D 含量更加富集,造成降水线斜率偏低^[45].

2.3.2 不同水体氢氧同位素的水循环指示意义

氢氧同位素 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系被证明是一种可靠

的水体来源分析手段^[46].地表水丰水期 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化关系为 $\delta D = 5.89 \delta^{18}\text{O} - 8.23$,枯水期为 $\delta D = 5.58 \delta^{18}\text{O} - 17.53$,由图 6 可知,两时期地表水线的斜率和截距均小于当地降水线的斜率和截距,说明地表水在接受降水补给后受到蒸发分馏作用的影响^[47].枯水期方程线的斜率和截距均小于丰水期,说明枯水期地表水的蒸发作用比丰水期更强.结合图 7 可知,丰水期地表水 δD 的范围为 $-72.77\text{‰} \sim -0.01\text{‰}$,平均值为 -51.49‰ ;枯水期地表水 δD 的范围为 $-78.03\text{‰} \sim 1.32\text{‰}$,平均值为 -54.19‰ ,丰水期较枯水期高;地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 丰水期也较枯水期高,且大小为:岱海 > 哈素海 > 支流与季节性河流 > 乌梁素海 > 干流 > 灌区渠系.地表水氢氧同位素季节变化特征是由于丰水期气温较高,地表水受蒸发分馏作用的影响,使同位素相对富集^[48].丰、枯水期干流和灌区渠系数据点均集中分布于 LMWL 下方,且较为集中,表明灌区渠系氢氧同位素受黄河控制,数值与干流接近,两种水体有强的水力联系, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 略贫化.支流与季节性河流氢氧同位素数值分布不均、变异性大,这是由于采样点空间分布广,其特征受所在区域气候及环境条件的影响,两时期的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系差异较大,受蒸发及补给来源影响明显.氢氧同位素在湖泊水中较为富集,这是由于湖水开阔的环境

决定了高强度的水域蒸发^[28]. 其中岱海 δD 和 $\delta^{18}O$ 丰枯水期差异性不明显, 且偏离于其他水体数据点, 氢氧同位素富集, 说明岱海蒸发能力强, 导致水域面积逐年缩小^[49]. 相比之下, 乌梁素海和哈素海同位素同样受蒸发效应影响, 但富集程度低于岱海, 而乌梁素海受河套灌区排水和引黄补水影响, 其同位素季节差异大、变化复杂.

地下水丰水期 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化关系为 $\delta D = 5.17 \delta^{18}O - 17.82\text{‰}$, 枯水期为 $\delta D = 5.07 \delta^{18}O - 20.90\text{‰}$, 由图 6 可知, 两时期的斜率和截距均小于当地降水线, 丰水期受降水补给影响大, 更靠近降水线. 两时期 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系斜率相差 0.10, 截距相差

3.08, 且 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化范围基本相近, 说明研究区地下水丰、枯水期变化不明显. 由于图 6 中地下水与黄河干流、支流与季节性河流和灌区渠系等地表水体同位素数据点分布接近, 可以看出研究区不同地段地下水与地表水存在明显的水力联系. 结合图 7 可知, 丰水期地下水的 δD 的范围为 $-91.94\text{‰} \sim -55.61\text{‰}$, 平均值为 -71.33‰ ; 枯水期地下水的 δD 的范围为 $-87.69\text{‰} \sim -54.07\text{‰}$, 平均值为 -69.78‰ , 枯水期较丰水期高, 地下水 $\delta^{18}O$ 也呈现相同的变化趋势. 两时期地下水同位素均值差异较小, 说明研究区地下水更新较慢, 滞留时间长, 季节变化不明显^[50].

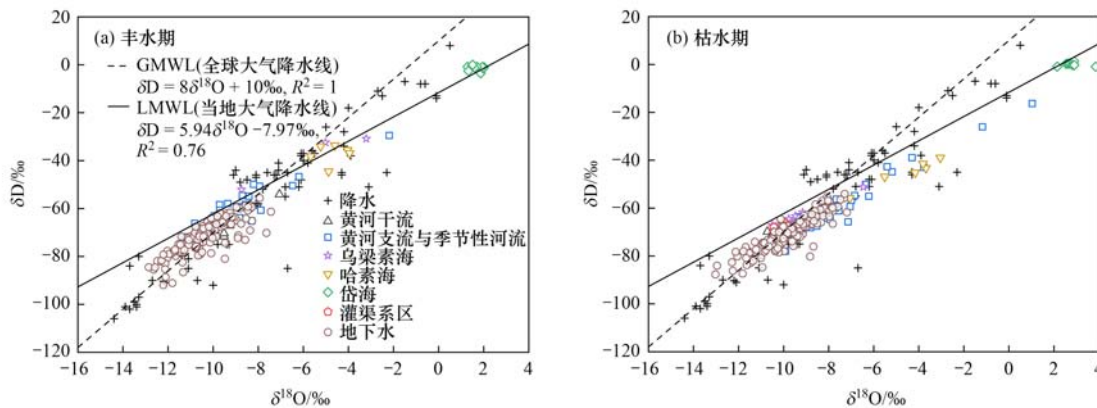
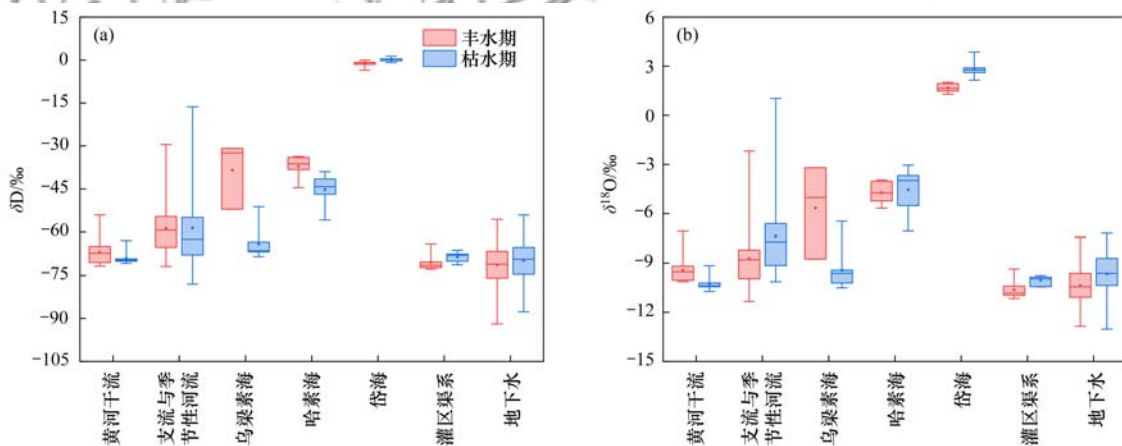


图 6 研究区丰枯水期不同水体 δD - $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 6 Relationship diagram of δD - $\delta^{18}O$ of different water bodies in two periods of abundance and drought in the study area



地表水包括黄河干流、支流与季节性河流、乌梁素海、哈素海、岱海和灌渠系

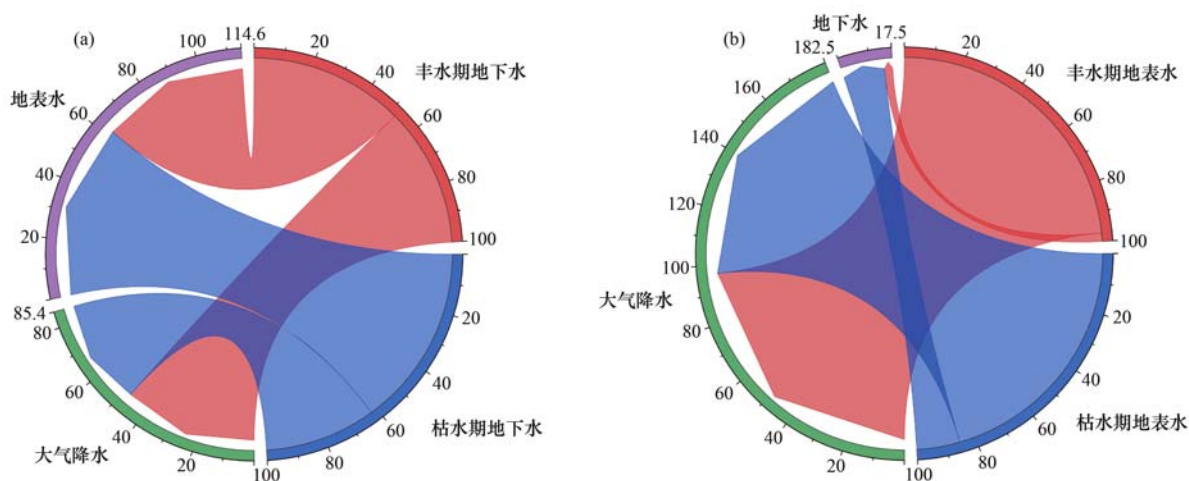
图 7 研究区不同水体氢氧同位素含量

Fig. 7 Box plots of hydrogen and oxygen isotopes in different water bodies in the study area

2.4 不同水体转化关系

同位素示踪剂通常比水化学方法较少受过程的影响, 因此, 同位素数据可以更好地辨别端元, 对混合过程的解释也比较清晰^[51]. 根据氢氧同位素质量守恒原理, 研究各类水体的相互转换关系, 利用贝叶斯混合模型 MixSIAR, 将研究区降水、地表水和地下水氢氧同位素数据的平均值和标准差输入模型,

计算各水体间的补给贡献比例. 结果发现, 黄河流域内蒙古段丰水期降水和地表水对地下水的贡献率分别为 47.6% 和 52.4%, 枯水期对地下水的贡献率分别为 37.8% 和 62.2%, 如图 8(a); 丰水期地表水中地下水占 2.9%, 大气降水占 97.1%, 枯水期地表水中地下水占 14.6%, 大气降水占 85.4%, 如图 8(b). 由此可见, 地表水是地下水的主要补给来源,



(a) 为研究区不同时期地表水和大气降水对地下水的贡献率, (b) 为研究区不同时期地下水和大气降水对地表水的贡献率

图 8 研究区不同水体转换关系及比例关系

Fig. 8 Conversion and proportion relationships of different water bodies in the study area

且枯水期补给比例大于丰水期. 大气降水是地表水的主要补给来源, 表现出丰水期补给比例大于枯水期, 这与研究区丰水期降水量大于枯水期是分不开的.

3 结论

(1) 黄河流域内蒙古段地下水和地表水均偏弱碱性, 地表水水-岩相互作用较强, 易溶盐含量较高. 地表水水化学类型以 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Mg}$ 为主, 地下水以 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 为主.

(2) 地表水 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要源于碳酸盐岩溶解, 地下水 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于硅酸盐和蒸发岩的溶解, 不同水体 Na^+ 和 Cl^- 均受人为污染源的影响.

(3) 丰水期地表水、地下水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 较枯水期高, 且大小为: 岱海 > 哈素海 > 支流与季节性河流 > 乌梁素海 > 干流 > 灌区渠系. 地表水在接受大气降水补给后, 明显受蒸发分馏作用影响, 地下水与地表水存在较强的水力联系.

(4) 通过贝叶斯混合模型 MixSIAR 分析, 揭示出地表水是地下水的主要来源, 占 52.4%~62.2%, 且丰水期补给比例大于枯水期; 大气降水为地表水的主要来源, 占 85.4%~97.1%.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wagh V M, Panaskar D B, Mukate S V, *et al.* Nitrate associated health risks from groundwater of Kadava River Basin Nashik, Maharashtra, India [J]. *Human and Ecological Risk*

- Assessment: An International Journal, 2020, **26**(3): 654-672.
- [3] Kadam A, Wagh V, Jacobs J, *et al.* Integrated approach for the evaluation of groundwater quality through hydro geochemistry and human health risk from Shivganga river basin, Pune, Maharashtra, India [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(3): 4311-4333.
- [4] Liu J G, Zang C, Tian S, *et al.* Water conservancy projects in China: achievements, challenges and way forward [J]. *Global Environmental Change*, 2013, **23**(3): 633-643.
- [5] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. *Science*, 2006, **313**(5790): 1068-1072.
- [6] Guzmán P, Anibas C, Batelaan O, *et al.* Hydrological connectivity of alluvial Andean valleys: a groundwater/surface-water interaction case study in Ecuador [J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, **24**(4): 955-969.
- [7] 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.
- [7] 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.
- [8] 雷米, 周金龙, 张杰, 等. 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1873-1884.
- [8] Lei M, Zhou J L, Zhang J, *et al.* Hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater in the plain area of Bortala River Basin, Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1873-1884.
- [9] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-468.
- [10] 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.
- [11] Li P Y, Wu J H, Qian H. Preliminary assessment of hydraulic connectivity between river water and shallow groundwater and estimation of their transfer rate during dry season in the Shidi River, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(2), doi: 10.1007/s12665-015-4949-7.
- [12] 黄静, 周忠发, 丁圣君, 等. 双河洞流域氢氧同位素特征及其指示意义 [J]. *地球与环境*, 2022, **50**(4): 516-525.
- [12] Huang J, Zhou Z F, Ding S J, *et al.* Hydrogen and oxygen isotope characteristics and their indicative significance in

- Shuanghe Cave Basin[J]. *Earth and Environment*, 2022, **50** (4): 516-525.
- [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] Yang N, Zhou P P, Wang G C, *et al.* Hydrochemical and isotopic interpretation of interactions between surface water and groundwater in Delingha, Northwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **598**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126243.
- [15] 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.
- [16] 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[N]. *人民日报*, 2021-10-09(001).
- [17] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]. *中国水利*, 2019, (20): 1-3.
- [18] Li Y J, Zhang Z Y, Shi M J. What should be the future industrial structure of the Beijing-Tianjin-Hebei city region under water resource constraint? An inter-city input-output analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **239**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118117.
- [19] Xia C C, Liu G D, Meng Y C, *et al.* Reveal the threat of water quality risks in Yellow River Delta based on evidences from isotopic and hydrochemical analyses [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, **177**, doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2022.113532.
- [20] 贾永峰, 赵萌, 尚长健, 等. 黄河流域地下水环境现状、问题与建议[J]. *环境保护*, 2021, **49**(13): 20-23.
- Jiang Y F, Zhao M, Shang C J, *et al.* Current situation and suggestions on groundwater environmental problems in the Yellow River Basin[J]. *Environmental Protection*, 2021, **49**(13): 20-23.
- [21] Li P Y. To make the water safer[J]. *Exposure and Health*, 2020, **12**(3): 337-342.
- [22] 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.
- [23] 耿悦, 吕喜玺, 于瑞宏, 等. 乌梁素海悬浮颗粒物 and 沉积物有机碳同位素特征及来源[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(6): 1753-1765.
- Geng Y, Lv X X, Yu R H, *et al.* Isotopic characteristics and sources of organic carbon in suspended particulates and sediments in lake Wuliangsuhai[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(6): 1753-1765.
- [24] Egbi C D, Anornu G K, Ganyaglo S Y, *et al.* Nitrate contamination of groundwater in the Lower Volta River Basin of Ghana: sources and related human health risks [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110227.
- [25] Stock B, Semmens B, Ward E, *et al.* MixSIAR: bayesian mixing models in R [EB/OL]. <https://CRAN.R-project.org/package=MixSIAR>, 2020-12-02.
- [26] Wang J, Lu N, Fu B J. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **666**: 685-693.
- [27] 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 等. 崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2143-2151.
- Zhou J M, Jiang Z C, Xu G L, *et al.* Major ionic characteristics and controlling factors of karst groundwater at Xiangshui, Chongzuo[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2143-2151.
- [28] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1944, **25**(6): 914-928.
- [29] 寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3142-3149.
- Kou Y C, Hua K, Li Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the surface water and groundwater of the Jinghe River[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3142-3149.
- [30] 马浩天, 甄志磊, 武小钢. 汾河源头水源稳定同位素特征及水源解析[J]. *环境化学*, 2021, **40**(11): 3432-3442.
- Ma H T, Zhen Z L, Wu X G. Stable isotope characteristics of the headstream region of Fenhe River and water resource analysis [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(11): 3432-3442.
- [31] 侯新伟, 李向全, 陈浩. 汾河中游干流河水与大气降水和浅层地下水的转化关系[J]. *水文地质工程地质*, 2008, **35**(6): 38-41, 49.
- Hou X W, Li X Q, Chen H. Study on transforming relationship among surface water, precipitation and groundwater along Fenhe River in Taiyuan Basin [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2008, **35**(6): 38-41, 49.
- [32] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [33] 唐春雷, 郑秀清, 梁永平. 龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2087-2095.
- Tang C L, Zheng X Q, Liang Y P. Hydrochemical characteristics and formation causes of ground karst water systems in the Longzici Spring Catchment [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2087-2095.
- [34] 华琨, 李洲, 李志. 黄土区长武塬地下水水化学特征及控制因素分析[J]. *环境化学*, 2020, **39**(8): 2065-2073.
- Hua K, Li Z, Li Z. The hydrochemical characteristics and controlling factors of groundwater in the Changwu loess tableland [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(8): 2065-2073.
- [35] Wang Z Y, Su Q, Wang S, *et al.* Coupling hydrochemistry and stable isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) to identify the major factors affecting the hydrochemical evolution of groundwater in the Western Yellow Sea Coast, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2022, **138**, doi: 10.1016/J.APGEOCHEM.2022.105221.
- [36] Xing L N, Guo H M, Zhan Y H. Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, **70-71**: 250-264.
- [37] 马燕华, 苏春利, 刘伟江, 等. 水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4690-4699.
- Ma Y H, Su C L, Liu W J, *et al.* Identification of sulfate sources in the groundwater system of Zaozhuang: evidences from isotopic and hydrochemical characteristics [J]. *Environmental Science*,

- 2016, **37**(12): 4690-4699.
- [38] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5428-5439.
Liu J T, Cai W T, Cao Y T, *et al.* Hydrochemical characteristics of groundwater and the origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River[J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5428-5439.
- [39] Han D M, Liang X, Jin M G, *et al.* Hydrogeochemical indicators of groundwater flow systems in the Yangwu River Alluvial Fan, Xinzhou Basin, Shanxi, China[J]. Environmental Management, 2009, **44**(2): 243-255.
- [40] 崔玉环, 王杰, 刘友存, 等. 升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3223-3231.
Cui Y H, Wang J, Liu Y C, *et al.* Hydro-chemical characteristics and ion origin analysis of surface groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface [J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3223-3231.
- [41] 张江华, 梁永平, 王维泰, 等. 硫同位素技术在北方岩溶水资源调查中的应用实例[J]. 中国岩溶, 2009, **28**(3): 235-241.
Zhang J H, Liang Y P, Wang W T, *et al.* A practical use of ^{34}S in the investigation of karst groundwater resource in North China [J]. Carsologica Sinica, 2009, **28**(3): 235-241.
- [42] 孙龙, 刘廷玺, 段利民, 等. 矿区流域不同水体同位素时空特征及水循环指示意义[J]. 水科学进展, 2022, **33**(5): 805-815.
Sun L, Liu T X, Duan L M, *et al.* Spatial and temporal characteristics of isotopes of different water sources and implications for water circulation in mining areas[J]. Advances in Water Science, 2022, **33**(5): 805-815.
- [43] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [44] Ge M Y, Chen B Z. Characteristics of δD and $\delta^{18}\text{O}$ of reclaimed mine soil water profile and its source water bodies in a coal mining subsidence area with high groundwater level—a case study from the Longdong coal mining subsidence area in Jiangsu Province, China[J]. Water, 2020, **12**(1): 274.
- [45] Yang Q C, Mu H K, Wang H, *et al.* Quantitative evaluation of groundwater recharge and evaporation intensity with stable oxygen and hydrogen isotopes in a semi-arid region, Northwest China [J]. Hydrological Processes, 2018, **32**(9): 1130-1136.
- [46] 张应华, 作彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展, 2006, **17**(5): 738-747.
Zhang Y H, Wu Y Q, Wen X H, *et al.* Application of environmental isotopes in water cycle[J]. Advances in Water Science, 2006, **17**(5): 738-747.
- [47] 束龙仓, 宫荣, 栾佳文, 等. 地下水与地表水水量交换识别及交换量计算——以新汴河宿州段为例[J]. 水科学进展, 2022, **33**(1): 57-67.
Shu L C, Gong R, Luan J W, *et al.* A integrated method to quantify flow exchanges between surface water and groundwater: take Suzhou section of the Xinbian River as an example [J]. Advances in Water Science, 2022, **33**(1): 57-67.
- [48] 许秀丽, 李云良, 谭志强, 等. 鄱阳湖典型湿地地下水——河湖水转化关系[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(4): 1824-1833.
Xu X L, Li Y L, Tan Z Q, *et al.* Groundwater, river water and lake water transformations in a typical wetland of Poyang Lake [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(4): 1824-1833.
- [49] 刘柏君, 夏军, 黄生志, 等. 岱海湖水位对气候要素与土地利用的响应研究[J]. 水资源保护, 2022, **38**(6): 64-70.
Liu B J, Xia J, Huang S Z, *et al.* Responses of Daihai Lake water level to climatic factors and land use[J]. Water Resources Protection, 2022, **38**(6): 64-70.
- [50] 詹泸成, 陈建生, 张时音. 洞庭湖湖区降水-地表水-地下水同位素特征[J]. 水科学进展, 2014, **25**(3): 327-335.
Zhan L C, Chen J S, Zhang S Y. Characteristics of stable isotopes in precipitation, surface water and groundwater in the Dongting Lake region[J]. Advances in Water Science, 2014, **25**(3): 327-335.
- [51] Guo Q L, Yang Y S, Han Y Y, *et al.* Assessment of surface-groundwater interactions using hydrochemical and isotopic techniques in a coalmine watershed, NW China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, **78**(3), doi: 10.1007/s12665-019-8053-2.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qi, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WSI for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ming, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)