

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展 ..... 陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓(1201)

全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展 ..... 孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙(1214)

湖泊水质参数遥感监测研究进展 ..... 王思梦, 秦伯强(1228)

淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展 ..... 赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超(1244)

长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应 ..... 吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋(1258)

中国土地利用碳排放变化及协调分区 ..... 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯(1267)

基于 STIRPAT 模型天津减排降碳协同效应多维度分析 ..... 刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛(1277)

基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势 ..... 佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧(1287)

浙江省大气颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 化学组分污染特征分析 ..... 周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳锋, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静(1297)

南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源 ..... 徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕(1310)

洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献 ..... 闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思(1319)

江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征 ..... 宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜(1328)

珠三角典型工业区挥发性有机物(VOCs)组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性 ..... 宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏(1336)

2000~2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变 ..... 孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧(1346)

港口自有移动源大气污染物排放清单 ..... 徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺(1357)

基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控 ..... 欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙(1368)

黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估 ..... 曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建(1378)

桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征 ..... 余悦, 邢新丽, 程敏, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华(1387)

广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析 ..... 陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成(1397)

宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评估 ..... 徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军(1407)

典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析 ..... 王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫(1416)

牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素 ..... 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁(1429)

石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析 ..... 丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞(1440)

北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析 ..... 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞(1452)

拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价 ..... 单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文(1465)

南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素 ..... 高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔(1475)

调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素 ..... 丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文(1484)

典型城市内河菌群组成与氮循环功能垂向分布及溯源分析 ..... 谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晚艳, 郑蕾(1497)

滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算 ..... 郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中(1508)

窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制 ..... 曾少毅, 李坤权(1519)

高比表面硫脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附 ..... 闵炳坤, 李坤权(1528)

不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征 ..... 刘晨旭, 白晓慧(1537)

水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析 ..... 杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕(1542)

增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响 ..... 邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章(1553)

三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化 ..... 李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源(1562)

鄱阳湖平原直播稻 CH<sub>4</sub> 通量及其与 CO<sub>2</sub> 通量的综合温室效应 ..... 时元智, 崔远来, 才硕, 洪大林, 程婕(1572)

不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析 ..... 周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君(1583)

石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估 ..... 李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建清(1593)

南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价 ..... 杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清(1602)

三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析 ..... 石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然(1611)

兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析 ..... 康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(1620)

粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评估 ..... 王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨(1636)

三门峡某铝业厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 ..... 卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳(1646)

某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价 ..... 王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东(1657)

化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制 ..... 马强, 卫泽斌, 吴启堂(1668)

再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制 ..... 林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞(1678)

长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评估 ..... 刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红(1686)

稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应 ..... 张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚(1698)

巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性 ..... 冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕(1706)

蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与翅果菊修复镉污染土壤的影响 ..... 陈敏妮, 袁小奇, 张李峰, 何川黔, 高波(1714)

地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议 ..... 王锐, 李瑜, 余京, 周皎, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(1727)

张家口市北新屯地区蔬菜种植区微量元素富集特征及成因分析 ..... 安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原(1735)

三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化 ..... 谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓(1748)

黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响 ..... 张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平(1758)

化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响 ..... 王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明(1768)

鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化 ..... 张丹, 彭双, 王丹青, 王-明, 林先贵(1780)

牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响 ..... 张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林(1792)

《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)

# 典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析

王诗语<sup>1,2</sup>, 孙从建<sup>1,2\*</sup>, 陈伟<sup>1,2</sup>, 周思捷<sup>1,2</sup>, 张鑫<sup>1,2</sup>

(1. 山西师范大学地理科学学院, 太原 030031; 2. 山西师范大学黄河中游生态环境研究中心, 太原 030031)

**摘要:** 开都河流域是西北内陆区典型的山地绿洲系统, 其水化学信息对了解区域水文过程和优化水资源配置具有重要意义。基于2020年内不同季节山区、绿洲区多种水体样品的采集及测试, 分析了该区域水化学特征及其水力联系。结果表明: ①研究区水体整体呈微碱性, pH和TDS值呈现绿洲区高、山区低的分布特征;  $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 为主要的阴阳离子, 区域水化学类型多为 $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$ 型, 绿洲区地下水水化学类型较之山区更复杂; 区域水化学特征受岩石风化和人类活动影响较为明显。②河水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 值呈现夏季贫化、春季富集的季节变化特征, 而地下水为冬春贫化, 秋季富集; 降水和冰川水年内变化不显著; 河水及地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 值则表现为绿洲区富集、山区贫化的空间分布特征。③研究区地表水和地下水的相互关系密切, 且在夏季转化频繁; 绿洲区地表水与地下水的转化特征呈显著的时空差异性。研究结果对于我国西北内陆区水资源的优化配置具有重要意义。

**关键词:** 水化学; 稳定同位素; 地下水; 地表水; 时空变化

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1416-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205063

## Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area

WANG Shi-yu<sup>1,2</sup>, SUN Cong-jian<sup>1,2\*</sup>, CHEN Wei<sup>1,2</sup>, ZHOU Si-jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1,2</sup>

(1. School of Geographical Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China; 2. Research Center of Ecological Environment in the Middle Reaches of the Yellow River, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China)

**Abstract:** Kaidu River basin is a typical mountain oasis ecosystem in the northwest inland. Its hydrochemical environment information is of great significance to understand the regional hydrological process and optimize the allocation of water resources. Based on the collection of samples of various water bodies in mountainous and oasis areas in different seasons in 2020, this study analyzed the water chemical characteristics and hydraulic links in this region. The results showed that: ① the water body in the study area was slightly alkaline as a whole, and the pH and TDS values showed the spatial changes of low in the oasis area and high in the mountain area;  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$  were the main anions and cations. The regional hydrochemical type was mostly  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$ , and the hydrochemical type of groundwater in the oasis area was more complex than that in the mountainous area. Regional hydrochemical changes were mainly controlled by rock weathering and human disturbance. ② The  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  values of the river water showed the seasonal changes of dilution in summer and enrichment in spring, whereas groundwater was depleted in winter and spring and enriched in autumn. Precipitation and glacial water did not change significantly within a year. In space, the  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  values of river water and groundwater showed the law of enrichment in the oasis area and dilution in the mountainous area. ③ The relationship between surface water and groundwater in the study area was close, and the transformation was frequent in summer. The relationship between surface water and groundwater in the oasis area was closer than that in the mountainous area. Groundwater in the oasis area was recharged by groundwater in the previous period, river water, and precipitation, and the recharge rate was usually groundwater in the previous period > river water > precipitation.

**Key words:** hydrochemistry; stable isotopes; groundwater; surface water; temporal and spatial change

水资源作为区域重要的战略资源,对于区域的农业、工业和人类生活都具有重要的意义<sup>[1]</sup>。然而,随着全球气候变化和人口快速增长,区域水体环境发生急剧的变化,这严重影响了生态水文过程,进一步加剧了水资源的供需矛盾<sup>[2]</sup>,因此迫切需要系统地分析区域水环境变化情况<sup>[3]</sup>。分析天然水体的水化学组成及其成因对于查明区域水环境变化具有十分重要的意义<sup>[4]</sup>。部分学者通过对区域水化学组成的监测,先后对海河源区<sup>[5]</sup>、拉萨河流域<sup>[6]</sup>、松花江流域<sup>[7]</sup>和衢江流域<sup>[8]</sup>等区域的水体环境进行了定量评估,丰富了对区域水文过程的认识。水化学和稳定同位素联用方法是目前研究区域水文过程最为有效的方法之一<sup>[9]</sup>;应用此方法,部分学者先后在

流域径流组分<sup>[2]</sup>、离子来源<sup>[10]</sup>、地表水与地下水关系<sup>[11]</sup>和地下水补给<sup>[12]</sup>等方面开展研究,取得了一系列的研究成果,推动了区域水文学的研究进程。

西北内陆区环境恶劣,降水稀少,蒸发强烈,对气候变化响应明显,因此水资源时空分布不均,区域水资源的供需矛盾十分尖锐<sup>[13]</sup>。加之近年来人口快速增长、绿洲扩张和耕地面积增加带来的水资源的无序开发,导致西北内陆区生态水文过程日益复杂化<sup>[14]</sup>。已有研究对黑河<sup>[15]</sup>、塔里木河<sup>[16]</sup>和伊犁

收稿日期: 2022-05-06; 修订日期: 2022-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41901022)

作者简介: 王诗语(1999~),女,硕士研究生,主要研究方向为地表水地下水转化, E-mail: wangshiyuzuibang@sina.com

\* 通信作者, E-mail: suncongjian@sina.com

河<sup>[17]</sup>等西北内陆区的水化学特征开展了相关分析, 并发现西北内陆区水体中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  对不同水体的水化学组成影响显著, 碳酸岩风化作用及人类活动是区域水化学特征变化的重要驱动因素. 然而现有的研究多聚焦于绿洲或山区, 对比分析山地绿洲系统的水化学特征研究鲜有开展, 在西北水资源供需矛盾日益加剧的背景下, 亟须加强对山地绿洲系统水化学特征的深入认识.

山地和绿洲是西北内陆区的基本地理景观, 其组成的山地绿洲系统 (MOS)<sup>[18]</sup> 对区域气候条件、生态系统模式和人类活动影响深远<sup>[19]</sup>. 作为 MOS 的重要限制性资源和变异驱动因子, 水环境的变化对 MOS 系统影响深远. 近年来, 受气候变化及不合理的人类活动影响, 西北内陆区 MOS 的水环境变化显著, 地表水与地下水的转化关系日益复杂, 成为威胁 MOS 生态环境安全和经济社会可持续发展的重要因素<sup>[20,21]</sup>. 然而, 目前涉及西北内陆区山地绿洲系统的研究相对匮乏, 尤其是对于两种差异显著的地理景观下的水化学特征的认识有待进一步提高. 因此, 本文选取了西北内陆区典型的山地绿洲系统——开都河流域作为研究区, 通过全流域不同季节多种水体样本采集及测试, 系统地分析区域不同水体水化学特征及其相关关系, 探讨控制区域不同水体水化学特征的控制因素, 并进一步提升对西北内陆区 MOS 水文过程的认识, 以期对区域资源的有

效管理和合理利用提供理论支撑.

## 1 研究区概况

开都河流域位于中天山南坡、塔里木盆地北部、新疆巴音郭楞蒙古自治州境内, 地理位置  $80^{\circ}52' \sim 86^{\circ}55' \text{E}$ 、 $41^{\circ}47' \sim 43^{\circ}21' \text{N}$ , 地势西北高东南低<sup>[22]</sup>, 海拔在 1 050 ~ 4 800 m 之间 (图 1). 研究区分为山区和绿洲区两部分, 山区海拔为 2 400 ~ 4 800 m, 属于高寒气候, 夏季最高温为  $30^{\circ}\text{C}$ , 冬季最低温度低至  $-40^{\circ}\text{C}$ , 而绿洲区海拔较低, 属于温带大陆性气候, 夏季最高温高达  $38^{\circ}\text{C}$ , 冬季最低温为  $-18^{\circ}\text{C}$ , 山区与绿洲区的多年平均降水量差异显著, 山区多年平均降水量约为 300 mm, 而绿洲区仅为 70 mm<sup>[23]</sup>. 研究区主要河流与湖泊为开都河、黄水沟河和清水河以及尾间湖博斯腾湖, 均起源于天山中部, 高山降水、基岩地下水和冰雪融水是其补给<sup>[24]</sup>. 开都河流域外露的岩性主要为粘胶岩、泥质砂岩、泥岩和黏土, 富含碳酸盐和硫酸盐<sup>[24]</sup>. 研究区山区草地以及冰川广布, 而绿洲区是新疆人口、工业和灌溉农业的重要聚集区, 人类活动影响显著<sup>[25]</sup>. 近年来, 随着区域人口的快速增长、水土资源的不合理利用和区域气候变化造成的不利影响, 研究区生态环境日益脆弱, 水环境变化显著, 地表水与地下水转换关系复杂<sup>[26]</sup>.

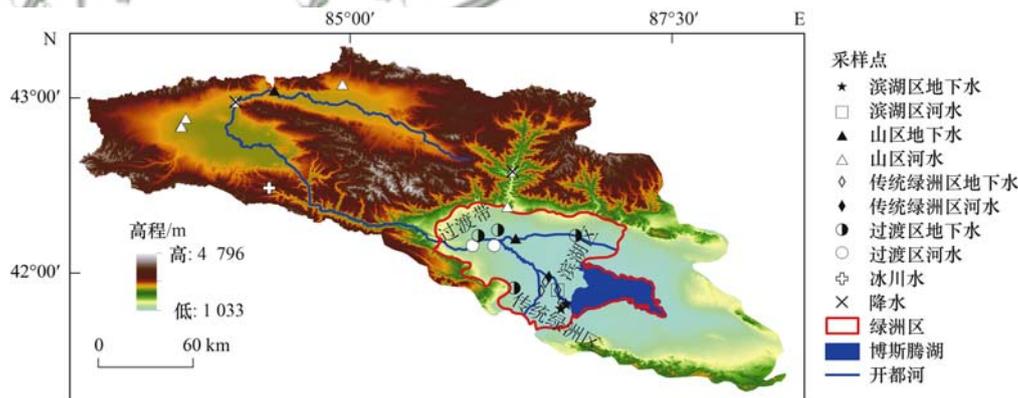


图 1 研究区位置和采样点分布示意

Fig. 1 Location of study area and sampling sites

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

本研究于 2020 年 1 月 (表示冬季)、2020 年 4 月 (表示春季)、2020 年 7 月 (表示夏季) 和 2020 年 9 月 (表示秋季) 在研究区山区及绿洲区采集地表水及地下水水样共 119 份, 其中绿洲区采样点根据位置将其分为 3 种类型, 即传统绿洲区 (表示老绿洲区)、滨湖区 (表示博斯腾湖附近新开的绿洲) 和过

渡带 (表示绿洲与山地过渡区), 具体采样点信息如表 1 所示. 地下水采集自研究区浅层地下水 ( $< 20$  m) 分布点; 河水采集自研究区流动的自然水面; 降水样品于研究区内水文站采集; 而冰川样品在天山冰川观测站采集, 采集冰川样品时, 选取冰川末端一段, 放入塑料袋中备用. 水体同位素样品采样后保存于 5 mL 玻璃瓶中, 并立即用 Parafilm 封口膜密封, 以减少蒸发. 采集水化学样品时, 先用待采样品清洗 100 mL 棕色聚乙烯瓶 3 次, 用封口膜密封并及时冷

表 1 研究区域采样点信息

Table 1 Sampling information of study area

区域	类型	样品编号	经度(E) /(°)	纬度(N) /(°)	样品数 (不同季节)		
绿洲区	河水	O1	86.55	42.05	4		
		传统绿洲区	La1	86.65	41.91	4	
	La2		86.50	41.97	4		
	La3		86.53	42.02	4		
	La4		86.62	41.98	4		
	滨湖区	河水	O2	86.62	41.98	4	
		地下水	Lb1	86.69	41.90	4	
	过渡带	河水	O3	86.14	42.23	4	
			O4	85.97	42.23	4	
		地下水	Lc1	86.76	42.29	4	
			Lc2	86.16	42.32	4	
			Lc3	86.01	42.29	4	
			Lc4	86.29	41.99	4	
		山区	河水	M1	86.24	42.45	4
				M2	86.27	42.65	4
	M3			84.95	43.13	4	
M4	84.95			43.13	4		
M5	84.13			43.01	4		
M6	83.72			42.87	4		
M7	83.75			42.91	3		
M8	83.72			42.86	3		
地下水	MG1		86.30	42.27	4		
	MG2		84.43	43.09	4		
降水	P1	86.27	42.65	7			
	P2	84.13	43.01	6			
冰川水	G1	84.41	42.53	12			

藏于4℃的冰箱,在7 d内送到实验室进行检测。

## 2.2 样品测定

水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 和主要离子值在中国科学院新疆生态地理研究所沙漠与绿洲生态国家重点实验室进行测定。 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 值由液态水同位素分析仪(DLT-100型)测定,其精度水平分别为0.1‰和0.3‰,测量结果以维也纳标准平均海水(VSMOW)为标准的千分差 $[\delta(\text{‰})]$ 表示。主要阳离子 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 采用电感耦合等离子体发射光谱仪(美国安捷伦735 ICP-OES)进行测定,阴离子 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 由离子色谱仪(美国戴安ICS-5000)测定, $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{CO}_3^{2-}$ 采用电位滴定法测定。在取样现场测量了所有样品的水温、pH值和总溶解固体(TDS)值。

## 2.3 水环境特征分析法

采用箱线图<sup>[27]</sup>观察水体pH、TDS、主要离子和氢氧稳定同位素值的分布特征,箱线图矩形盒上下分别为上、下四分位数,中间横线为中位数,两端分别为最大值和最小值。用Piper三线图确定水体的水化学类型<sup>[28]</sup>。用Gibbs图解法分析不同水体的水化学特征的影响因素<sup>[29]</sup>。

## 2.4 地表水与地下水转化分析

EMMA(端构件混合分析)方法被广泛用以定性分析不同水体之间的关系<sup>[30]</sup>,此外,多元混合模型被用以定量分析地表水与地下水相互关系<sup>[31]</sup>,其方程式如下:

$$Q = \sum_{m=1}^n Q_m$$

$$Q C_m^b = \sum_{m=1}^n Q_m C_m^b, \quad b = l, \dots, k \quad (1)$$

式中, $Q$ 为多种水源补给形成的总径流量; $Q_m$ 为第 $m$ 种径流; $C_m^b$ 为径流 $m$ 的示踪剂 $b$ ,其中参数 $C_m^b$ 在观测期间应为一个稳定的常量,并且为了避免误差需要选取两种示踪剂,在本研究选取 $\delta^{18}\text{O}$ 和TDS作为示踪剂。

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同水体的水化学特征及其影响因素

#### 3.1.1 pH和TDS

研究区不同水体的pH、TDS和主要离子等参数呈现明显的时空差异性(表2),不同地表水的pH值排序为:河水>冰川水>降水。其中,河水pH值

表 2 不同季节地表水和地下水水化学变量统计汇总<sup>1)</sup>

Table 2. Statistical summary of hydrochemical variables of surface water and groundwater in different seasons

项目	类型	春季			夏季			秋季			冬季		
		河水	地下水	冰川水	河水	地下水	冰川水	河水	地下水	冰川水	河水	地下水	冰川水
pH	最大值	8.23	8.22	7.68	8.19	8.10	6.73	7.99	7.92	6.47	6.91	8.30	8.23
	最小值	7.59	7.77	7.07	7.44	7.75	5.94	7.69	7.70	6.40	6.84	7.91	7.97
	平均值	8.01	8.01	7.38	7.80	7.97	6.18	7.87	7.81	6.43	6.87	8.16	8.11
TDS	最大值	444.00	771.00	141.40	353.00	645.00	75.20	434.00	1049.35	130.10	78.34	798.00	1 077.30
	最小值	255.00	204.00	56.20	114.80	137.90	18.30	142.10	149.50	70.60	60.84	64.45	119.58
	平均值	327.62	522.00	88.48	236.82	451.09	37.72	273.36	482.76	104.07	67.09	337.88	606.32
Ca <sup>2+</sup>	最大值	68.83	64.60	17.74	56.77	99.91	11.63	63.10	81.41	3.88	3.95	67.56	66.05
	最小值	33.32	4.31	10.32	13.99	18.93	2.85	31.42	15.21	3.76	3.05	21.41	19.91
	平均值	49.82	35.07	15.36	38.67	50.45	5.75	46.45	41.44	3.81	3.36	44.19	44.92
Mg <sup>2+</sup>	最大值	14.33	26.37	1.43	11.71	31.06	0.55	16.05	28.34	0.31	0.46	34.76	60.68
	最小值	7.39	2.15	0.39	1.34	5.43	0.13	2.91	4.87	0.14	0.34	0.52	2.14
	平均值	10.74	12.91	0.82	7.35	14.93	0.25	10.48	13.60	0.21	0.39	11.53	24.22
Na <sup>+</sup>	最大值	16.82	100.48	6.18	10.94	106.69	1.02	36.66	219.32	0.89	0.31	17.54	113.62
	最小值	6.74	4.96	1.09	0.68	6.23	0.09	5.29	5.37	0.16	0.12	2.52	6.27
	平均值	11.49	49.01	2.64	5.90	53.37	0.41	11.80	70.96	0.48	0.22	7.85	55.56
K <sup>+</sup>	最大值	2.45	5.54	2.87	1.86	5.01	1.27	3.17	7.57	3.06	0.56	2.35	5.49
	最小值	1.50	0.94	0.76	0.44	0.69	0.21	0.80	0.61	0.45	0.32	0.37	1.88
	平均值	2.46	3.01	1.31	1.23	2.73	0.67	1.64	2.68	1.59	0.41	1.61	3.62
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	最大值	217.40	305.95	52.00	188.65	313.89	41.43	275.44	182.10	63.58	35.66	214.63	314.23
	最小值	78.13	111.87	29.41	49.61	109.40	11.79	112.00	110.70	52.59	34.00	49.87	147.47
	平均值	180.83	193.94	37.85	137.54	189.22	22.66	170.40	159.57	58.77	34.70	170.83	225.33
Cl <sup>-</sup>	最大值	23.62	64.58	17.10	14.64	101.06	15.47	20.34	121.91	49.81	1.83	24.29	118.61
	最小值	6.13	2.85	7.13	0.82	2.74	0.93	1.74	2.61	6.84	1.28	0.0	9.77
	平均值	11.31	37.36	12.42	5.44	42.19	5.21	9.09	50.38	31.01	1.45	16.07	53.12
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	最大值	63.42	174.13	18.94	54.32	201.72	3.34	60.50	423.75	11.49	2.52	69.75	207.06
	最小值	15.93	10.99	4.20	8.98	11.24	1.02	8.41	12.16	1.68	1.41	7.49	38.63
	平均值	39.16	72.15	7.96	27.15	82.88	1.81	36.87	113.73	7.20	1.82	32.82	100.17
δD	最大值	-61.44	-59.60	-38.47	-58.35	-53.69	6.22	-57.52	-51.29	-13.79	-66.34	-61.41	-60.23
	最小值	-99.36	-94.24	-76.00	-71.06	-94.05	-56.90	-73.24	-69.63	-61.32	-70.20	-76.14	-75.81
	平均值	-79.49	-69.12	-60.95	-63.97	-68.55	-24.15	-66.76	-63.86	-40.13	-67.96	-70.69	-68.31
δ <sup>18</sup> O	最大值	-9.15	-9.01	-6.02	-9.34	-7.85	0.24	-9.39	-7.50	-2.70	-10.33	-9.52	-9.53
	最小值	-15.06	-13.86	-11.12	-11.01	-13.54	-9.49	-10.82	-10.75	-9.13	-10.80	-11.75	-11.70
	平均值	-11.62	-10.43	-8.74	-10.00	-10.33	-3.94	-10.35	-9.74	-6.74	-10.50	-10.75	-10.38

1) pH无量纲, δD和δ<sup>18</sup>O单位为‰, 其余单位为mg·L<sup>-1</sup>

介于 7.44 ~ 8.03 之间,偏碱性;冰川水 pH 值介于 6.73 ~ 7.68 之间,偏中酸性;大部分降水样品 pH 值 < 7,表明该区域降水有酸化特征.整体上,研究区地表水 pH 呈现春冬高、夏秋低、绿洲区高山区低的时空规律,尤其过渡带河水 pH 较高(图 2).地下水的 pH 值介于 7.70 ~ 8.23 之间,偏碱性.地下水 pH 时空变化与地表水基本一致,但传统绿洲区地下水

pH 较高,这可能与该区域灌溉过程中土壤中碱性物质被淋洗进入地下水系统有关<sup>[32]</sup>.

不同地表水的 TDS 值排序为:河水 > 降水 > 冰川水,其中河水 TDS 值波动较大,介于 64.45 ~ 798 mg·L<sup>-1</sup>之间,平均值为 293.92 mg·L<sup>-1</sup>,高于世界河流的平均值 (115 mg·L<sup>-1</sup>)<sup>[33]</sup>;降水和冰川水的 TDS 值 < 150 mg·L<sup>-1</sup>.整体上,地表水 TDS 值季节

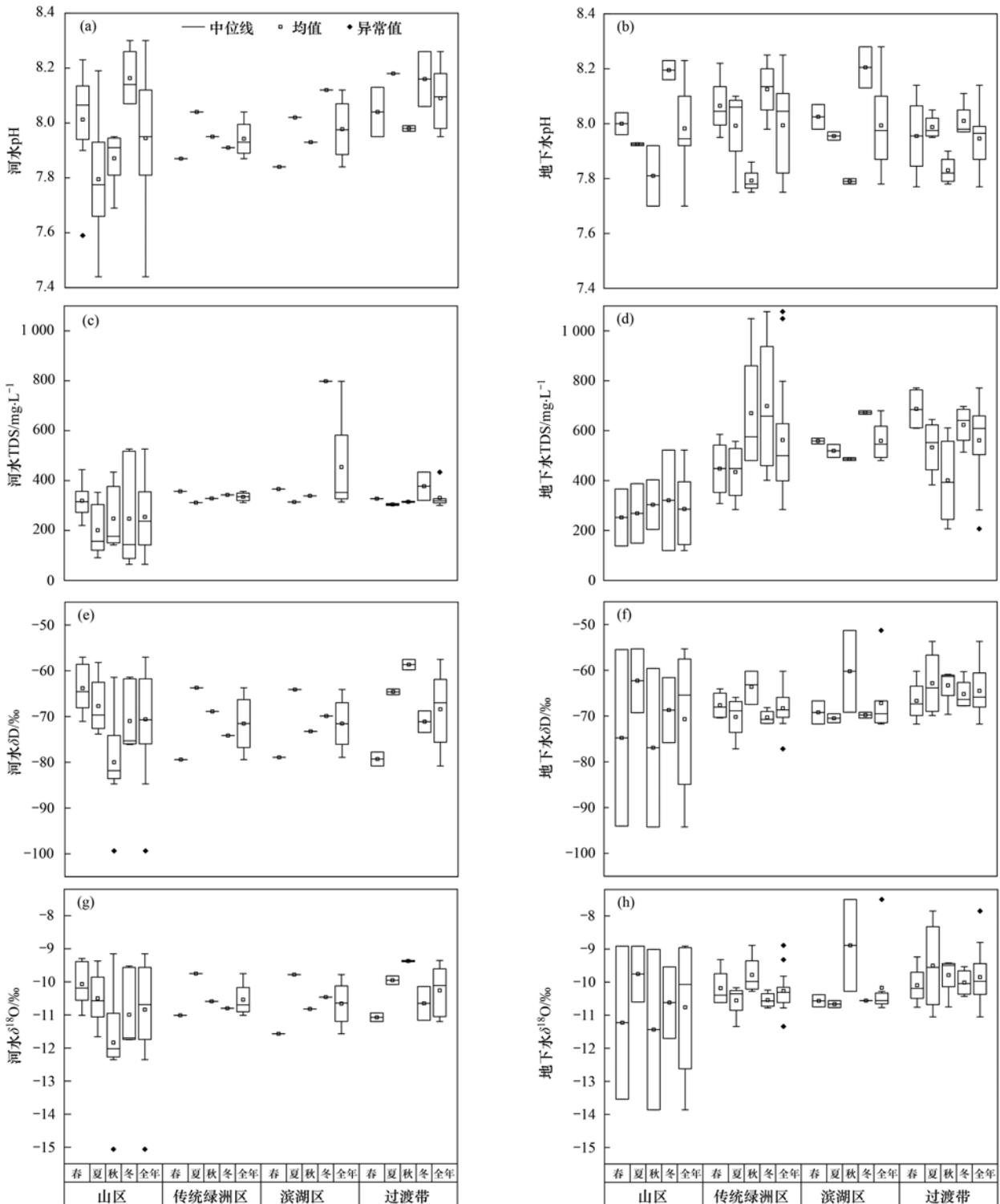


图 2 研究区地表水与地下水水化学特征箱线图

Fig. 2 Hydrochemical characteristic box diagram of surface water and groundwater in the study area

变化不明显,但在空间上,绿洲区 TDS 值明显高于山区,其中滨湖区河水在冬季 TDS 值异常升高,这可能是由于冬季湖水水位下降后盐分运移汇聚于河水中所致<sup>[34]</sup>. 地下水 TDS 值介于 64.45 ~ 1 049.35  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均值(515.54  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )高于地表水. 山区地下水 TDS 值季节变化较弱且低于绿洲区,而滨湖区与过渡带地下水 TDS 值季节变化相似,为春冬高、夏秋低,而传统绿洲区秋季 TDS 值较高.

### 3.1.2 不同水体主要离子变化特征

研究区河水离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{HCO}_3^{-}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  为主,其中  $\text{Ca}^{2+}$  为最主要的阳离子, $\text{HCO}_3^{-}$  为最主

要的阴离子,且滨湖区河水的  $\text{HCO}_3^{-}$  质量浓度略高于其他地区(图 3),这是由于滨湖区处于开都河与博斯腾湖交汇处,携带不同浓度化学离子和营养盐的河水、湖水与地下水交互作用,使该区域河水离子的质量浓度较其他区域更高<sup>[12]</sup>. 另外,降水与冰川水的主要阴阳离子也为  $\text{HCO}_3^{-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$ . 地下水中主要离子为  $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^{-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^{-}$ ; 空间上,过渡带地下水的  $\text{HCO}_3^{-}$  质量浓度远高于其他地区,是因为过渡带处于绿洲与山地的交界,地表水与地下水之间的相互作用复杂,离子之间的交换作用显著<sup>[35]</sup>.

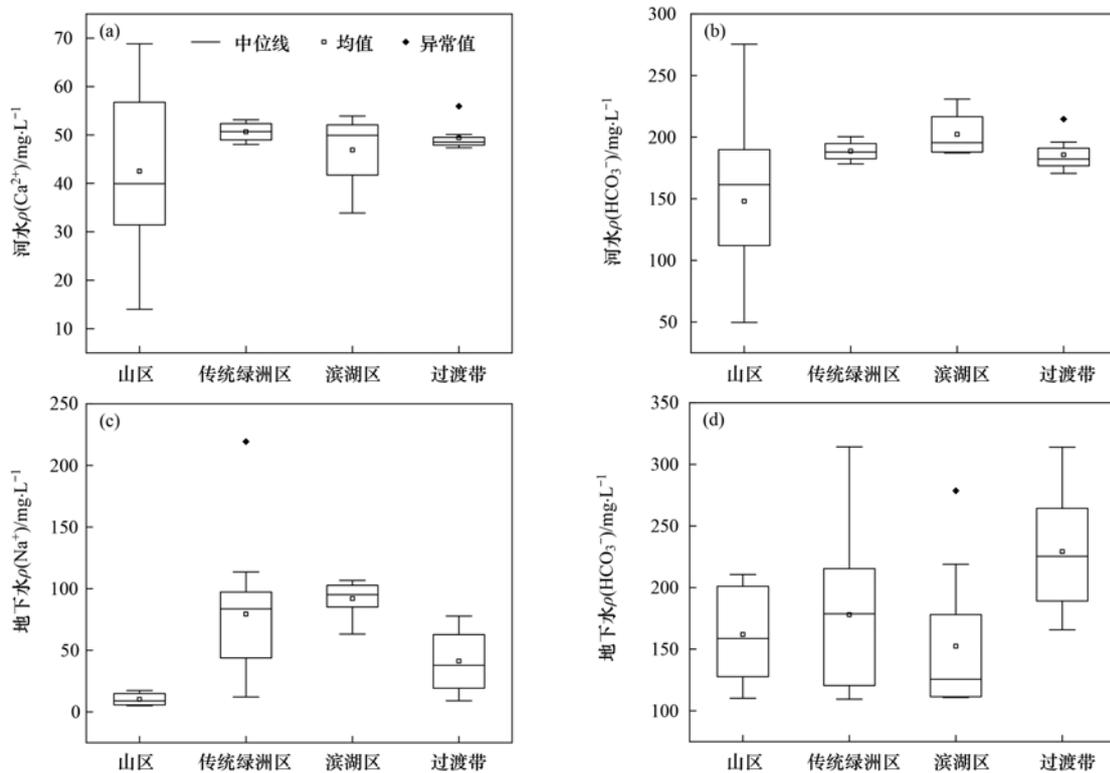


图3 山区与绿洲区河水、地下水主要离子分布箱线图

Fig. 3 Distribution box diagram of main ions in river water and groundwater in mountainous and oasis areas

整体上看,研究区水体主要阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Na}^{+}$  为主,阴离子以  $\text{HCO}_3^{-}$  为主, $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{K}^{+}$  离子在研究区水体主要离子中占比较小,离子的季节变化不明显,在空间上绿洲区各离子质量浓度要明显高于山区.

### 3.1.3 水化学类型

经阴阳离子平衡后,将主要离子的毫克当量数 (meq, %) 点投到 Piper 图中,来判断研究区水化学类型<sup>[36]</sup>(图 4). 阳离子图中,大部分河水样点落在左下角,表明  $\text{Ca}^{2+}$  在河水中占优势,而地下水样大部分位于右下角,说明  $\text{Na}^{+}$  在地下水中占比较大;从阴离子图中可知,除春季个别山区河水样点落在  $\text{SO}_4^{2-}$  区域外,其余均落在左下角的  $\text{HCO}_3^{-}$  一端,说

明  $\text{HCO}_3^{-}$  离子占主要优势,构成该区水化学类型主要是  $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}$  型(图 4),这与前人在博尔塔流域<sup>[4]</sup>和巴尔喀什湖流域<sup>[37]</sup>研究结果相似,表明西北内陆区水化学类型较为相似. 此外,研究区降水和冰川均属于  $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}$  型.

在空间上,山区水体水化学类型单一,多为  $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}$  型,而绿洲区水化学类型复杂且空间差异显著,尤其是地下水. 传统绿洲区地下水为  $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}\text{-Cl}^{-}$  和  $\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^{-}\text{-Na}^{+}$  型;滨湖区地下水多为  $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}$  和  $\text{Na}^{+}\text{-Cl}^{-}$  型;在过渡带,地下水除了  $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}^{2+}$  型外,还有其他混合型. 绿洲区地下水相对复杂的水化学类型表明该区域地下水补给来源复杂,比山区地下水更易受外界环境影

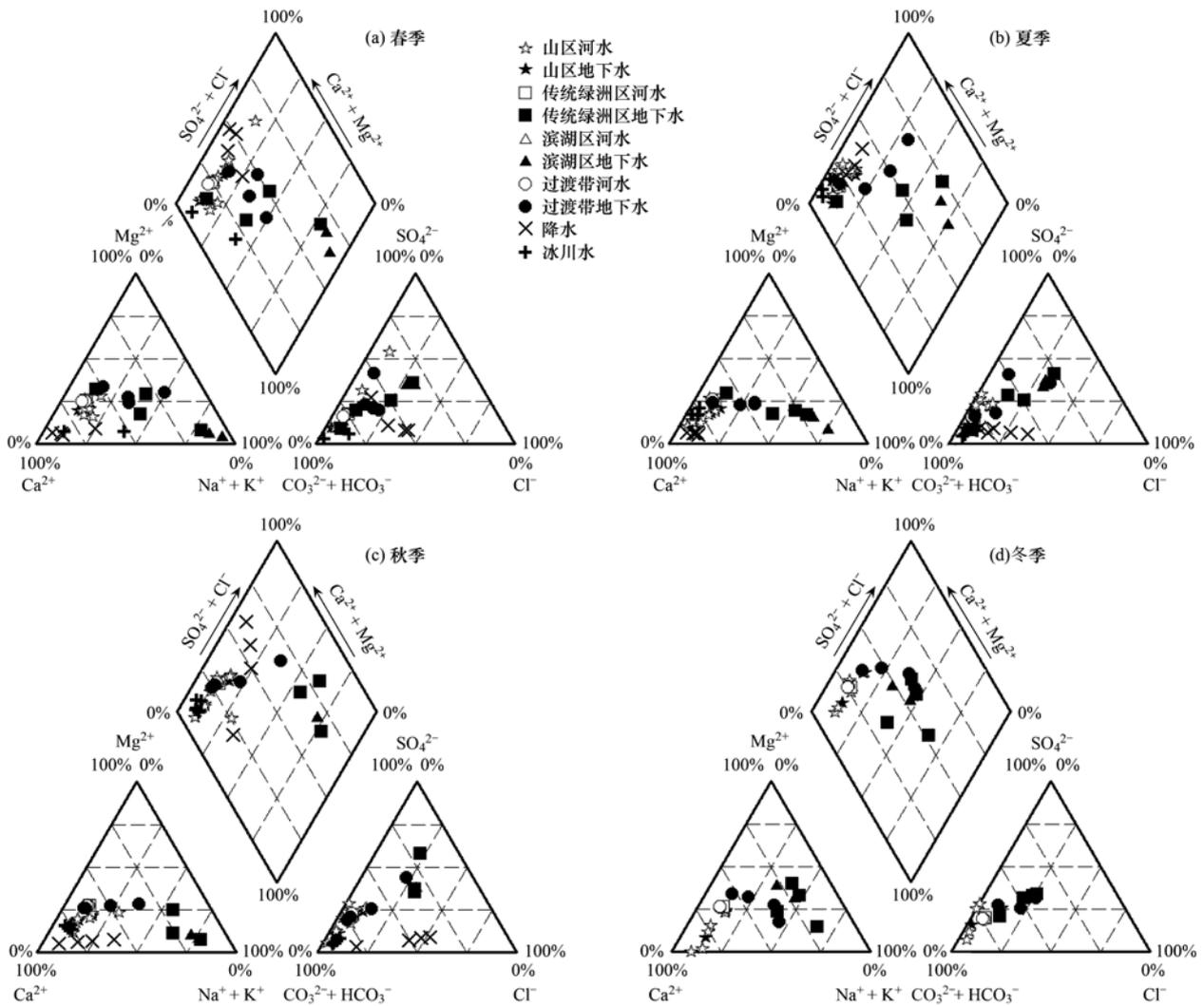


图 4 研究区不同季节地表水和地下水主要离子 Piper 图

Fig. 4 Piper diagram of main ions in surface water and groundwater in the study area in different seasons

响<sup>[31]</sup>. 总体上看, 研究区各类水体的水化学类型多为  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$  型, 且季节变化不明显, 绿洲区水体水化学类型比山区更为复杂, 尤其是地下水.

### 3.1.4 水化学影响因素

Gibbs 图是确定天然水中主要化学成分来源的重要方法<sup>[29]</sup>, 其可判读降水控制、岩石风化和蒸发浓缩对水化学的影响. 如图 5 所示, 研究区大部分的水样落在  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  的低值区域, 而 TDS 值分布在  $100 \sim 1100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间, 说明研究区地表水主要离子来源于岩石风化作用, 这与前人对于塔里木河流域出山径流中水化学特征分析结果一致<sup>[38]</sup>.

Gibbs 图显示山区的河水及地下水水化学组成较为相似, 其成分来源无显著的季节差异, 均主要受控于岩石风化作用. 在绿洲区, 影响地下水与河水水化学组成的控制因素呈现较为显著的差异性, 其中绿洲区河水与山区河水较为相似主要受控于岩石风化作用, 而绿洲区地下水的水化学组成的控制因素

呈显著的时空差异性, 绿洲地区的一些地下水样点 (主要为滨湖区地下水和传统绿洲区地下水) 落在 3 个典型的控制区之外, 这些样品的  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  的比值大于 0.5, 根据前人研究表明这一现象是由于人类活动的干扰引起的<sup>[21]</sup>, 绿洲区广泛分布的灌溉农业可能是其主要原因. 在 Gibbs 图的人为干扰区域中, 绿洲区和滨湖区地下水样本明显多于过渡带, 说明传统绿洲区和滨湖区地下水环境受到人类活动的干扰更显著.

### 3.2 不同水体稳定同位素变化特征

研究区河水  $\delta\text{D}$  值变化范围为  $-99.36\text{‰} \sim -61.44\text{‰}$ , 平均值为  $-70.39\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围为  $-15.06\text{‰} \sim -9.15\text{‰}$ , 平均值为  $-10.70\text{‰}$ . 河水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值呈现明显的季节变化: 夏季贫化、春季富集, 这可能是由于春季气候干旱、降水稀少、蒸发旺盛, 导致河水稳定同位素富集; 而夏季降水较多, 大量冰雪融水 (同位素较低) 补给河水稀释了河水稳定同位素<sup>[4,7]</sup>. 在空间上, 山区河水稳定同位素

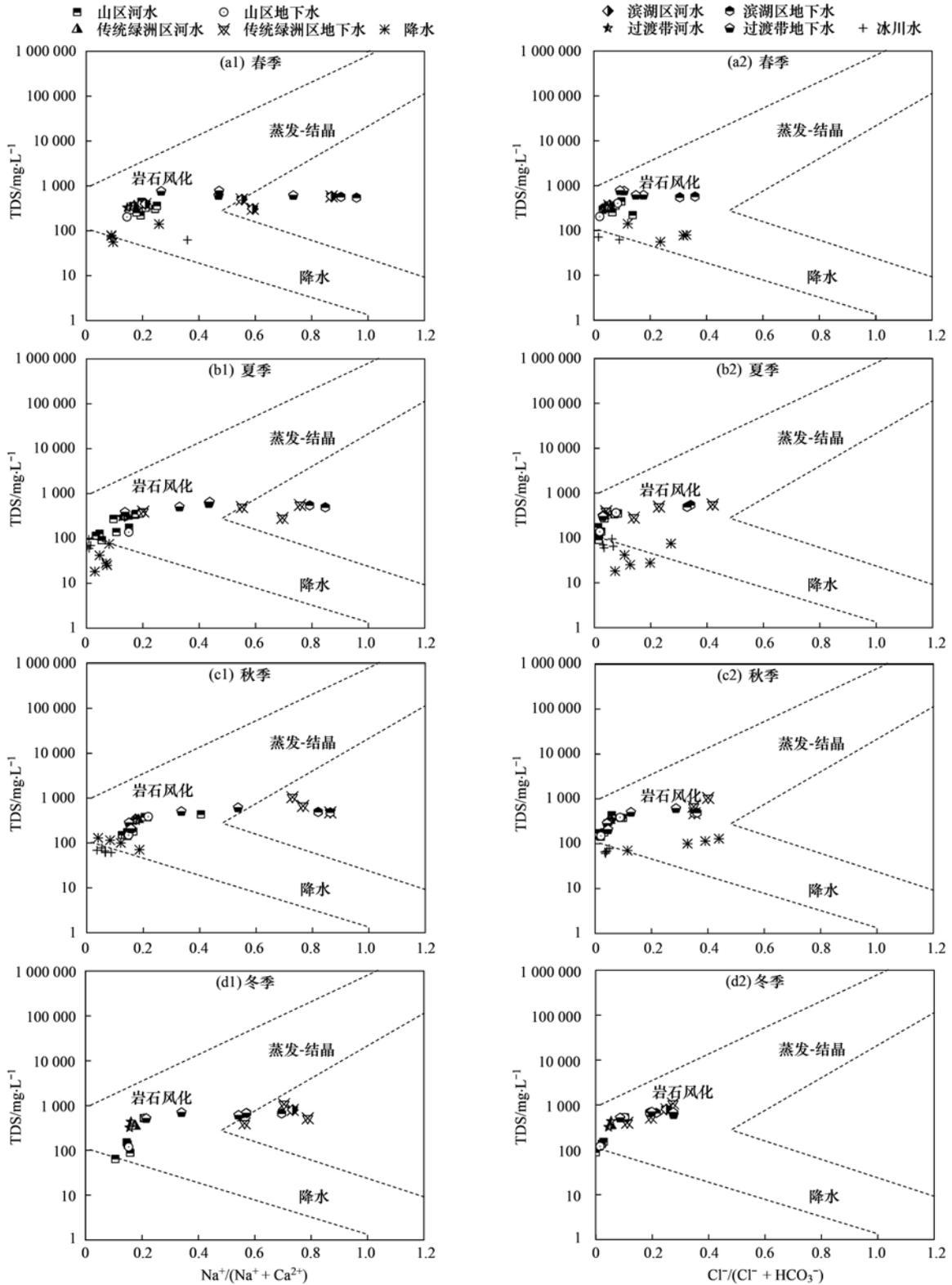


图5 研究区不同季节地表水与地下水 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs diagram of surface water and groundwater in the study area in different seasons

较为贫化,而绿洲区较为富集,过渡带河水的  $\delta^{18}\text{O}$  及  $\delta\text{D}$  均值又明显高于其他地区(图2). 另外,降水样品的  $\delta\text{D}$  值范围为  $-76.00\text{‰} \sim 6.22\text{‰}$ ,平均值为  $-41.74\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $-11.12\text{‰} \sim 0.24\text{‰}$ ,平均值为  $-6.47\text{‰}$ . 冰川水样品的  $\delta\text{D}$  值范围为  $-153.40\text{‰} \sim -60.19\text{‰}$ ,平均值为  $-80.93\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范

围为  $-120.31\text{‰} \sim -9.65\text{‰}$ ,平均值为  $-11.89\text{‰}$ . 降水和冰川水年内变化不显著.

地下水  $\delta\text{D}$  值变化范围为  $-51.29\text{‰} \sim -94.24\text{‰}$ ,平均值为  $-67.29\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围为  $-7.85\text{‰} \sim -13.86\text{‰}$ ,平均值为  $-10.19\text{‰}$ . 地下水稳定同位素的季节变化与河水不同,其呈现冬春

季节相对贫化,秋季相对富集的规律.地下水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值在夏季变化范围较大,这表明研究区地下水在夏季受地表水的影响显著,而冬季相对稳定,说明在冬季地表水和地下水的转化较弱.研究区地下水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值空间分布规律与河水一致,呈现绿洲区富集,山区贫化的规律,但滨湖区地下水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值明显高于其他地区.

### 3.3 不同水体相互关系

$\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  关系被证明是一种可靠的水体来源分析手段,通过判读不同水体与全球大气降水线 (GMWL) 的位置关系可以解析不同水体间的相互关系<sup>[12]</sup>.由研究区地表水和地下水  $\delta^{18}\text{O}$  及  $\delta\text{D}$  值关系

图可知,除山区地下水在春夏两季远离全球大气降水线 (GMWL) 外,其余各样点基本集聚于 GMWL 左侧附近 (图 6),在春夏两季地表河水、地下水的点较为聚集,而这一时期降水的样点位于 GMWL 线的右上角,表明这一时期降水受到较为强烈的蒸发作用.在秋冬季,地表水与地下水的样点分布较为离散.整体上,研究区不同水体的样点呈现出秋冬离散,春夏集聚的分布特征,且在夏季尤为集聚,这表明研究区地表水和地下水之间的转化在夏季更为频繁;而冬季水体样点  $\delta^{18}\text{O}$  及  $\delta\text{D}$  的取值范围尽管都较小,但地表水与地下水样点重合得并不明显,这与冬季水体之间的转换不明显有密切联系.

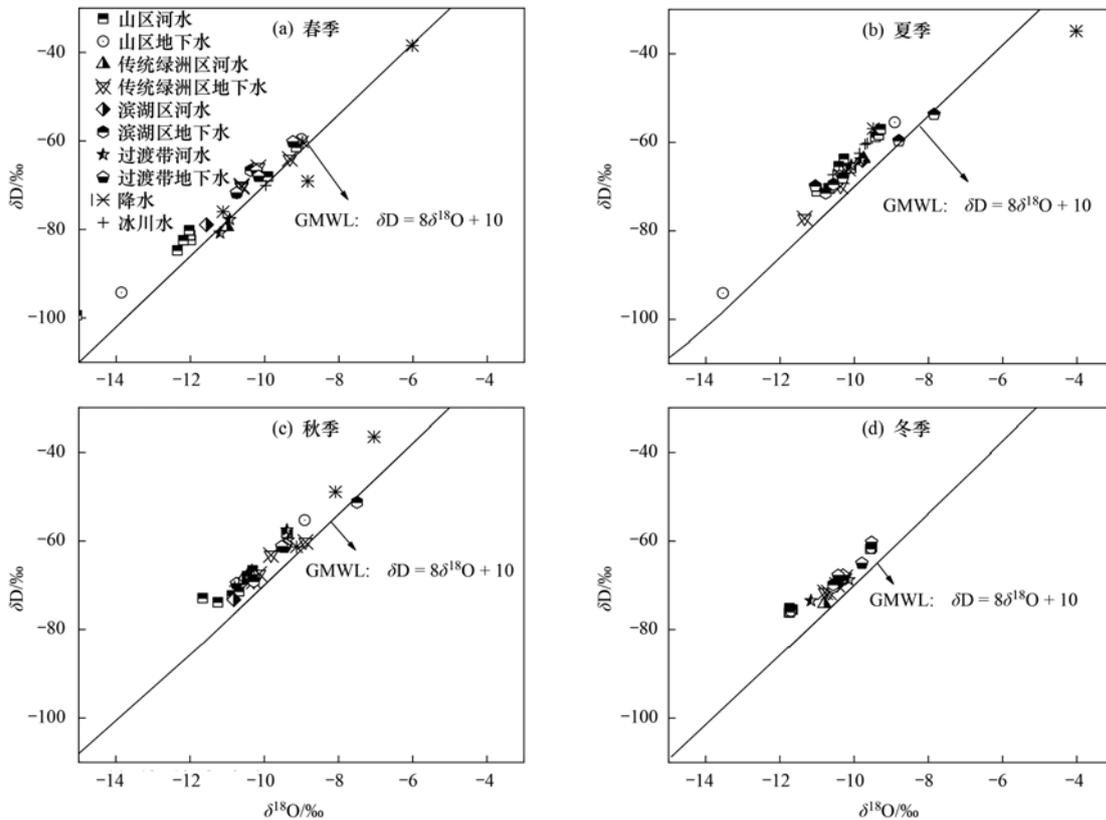


图 6 研究区不同季节地表水、地下水  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  关系

Fig. 6 Relationship of  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of surface water and groundwater in different seasons in the study area

为了进一步揭示区域水力联系,EMMA (end member mixing analysis) 图解法<sup>[39]</sup>被用以判读研究区地下水和地表水相互关系,图 7 所示,由于冬季水力联系较弱,仅对春夏秋三季讨论.总体来看,研究区的地下水主要受到冰川水、大气降水和河水的补给,这与前人对西北内陆区各大流域地下水补给源的分析结果一致<sup>[40]</sup>.其中,绿洲区的地下水与地表水之间的联系更密切(三角形区域越小,水力联系越紧密),而山区地下水样多位于三角区域(由地下水、河水和降水的 TDS 和  $\delta^{18}\text{O}$  示踪剂平均值构成)外,说明山区地下水与地表水之间的水力联系并不

十分显著.

基于多元混合模型,对绿洲区地下水补给源的定量分割的结果表明,整体上,绿洲区地下水主要受到前一期地下水、河水以及降水的补给,补给率的大小通常为:前一期地下水 > 河水 > 降水.春季绿洲区河水对地下水的平均补给率为 39.5%,降水对地下水的补给率为 3.1%;夏季河水对地下水的平均补给率为 21.9%,降水对地下水的补给率为 3.4%;秋季河水对地下水的平均补给率为 14.9%,降水对地下水的补给率为 12.2%.地下水在春季受到河水补给最大 (39.5%),在秋季受到降水补给最大

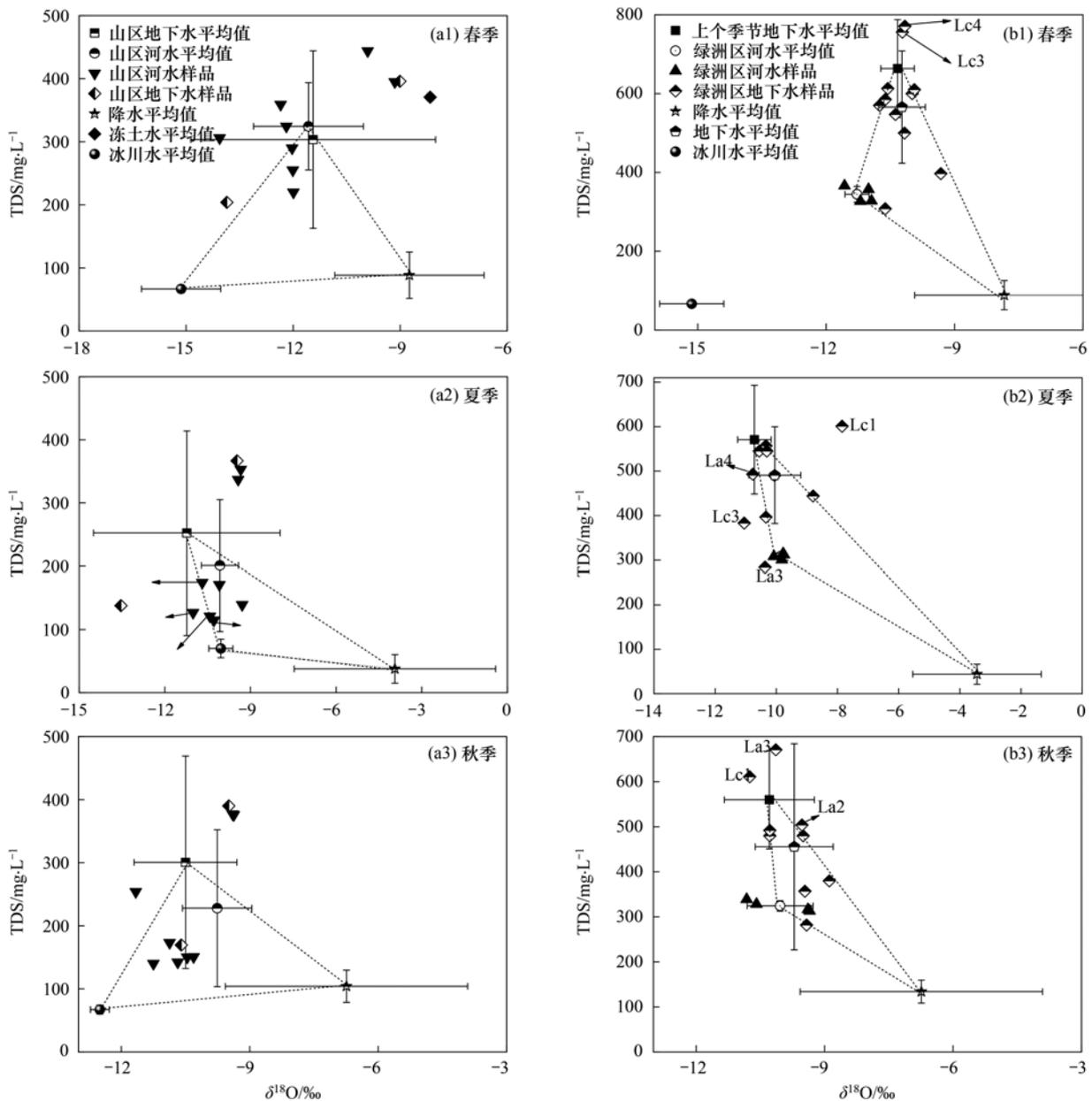


图7 研究区不同季节地表水与地下水 TDS 和  $\delta^{18}\text{O}$  的关系

Fig. 7 Relationship of TDS and  $\delta^{18}\text{O}$  of surface water and groundwater in different seasons in the study area

(12.2%)。由不同季节绿洲区地下水补给比例可知(图8),滨湖区地下水在春季受到河水的补给最大,其补给率高达78.9%;在夏季,降水对地下水补给较低(1.7%);而过渡带地下水在春季受到降水(4.9%)的补给大于河水(3.2%);传统绿洲区地下水在夏季几乎没有接受到降水补给,而在秋季接受了16.4%的降水补给,远超过河水对地下水的补给率(0.6%)。

为了更好地揭示研究区与邻近区域水体环境的异同,基于前人的研究<sup>[40]</sup>,将本研究结果分别与河西走廊(包括石羊河流域、黑河流域等)、塔里木河流域和新疆北部内陆河流域(乌鲁木齐河流域、伊犁河流域等)等西北内陆区流域进行对比,发现研

究区与上述地区的水化学特征较为相似:即水体多为碱性, $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 为其主要的阳离子和阴离子,地下水TDS值高于地表水;岩石风化和人类活动对区域水化学特征具有重要影响。

在水力联系方面,研究区及西北干旱区地下水均受到前一期地下水、河水、降水和冰雪融水等共同影响;而研究区河水与地下水之间转化频繁,转化率较高,这与新疆北部的研究结果较为相似<sup>[41]</sup>,新疆北部大部分内陆河流域对地下水补给依赖性较强,地下水对河流流量有重要的贡献。在春季,研究区地下水受到冰雪融水的影响较为显著,这与塔里木流域源流区较为相似,在塔里木河流域源流区,冰川融水和雪融水对河流径流的贡献约为41.5%,是

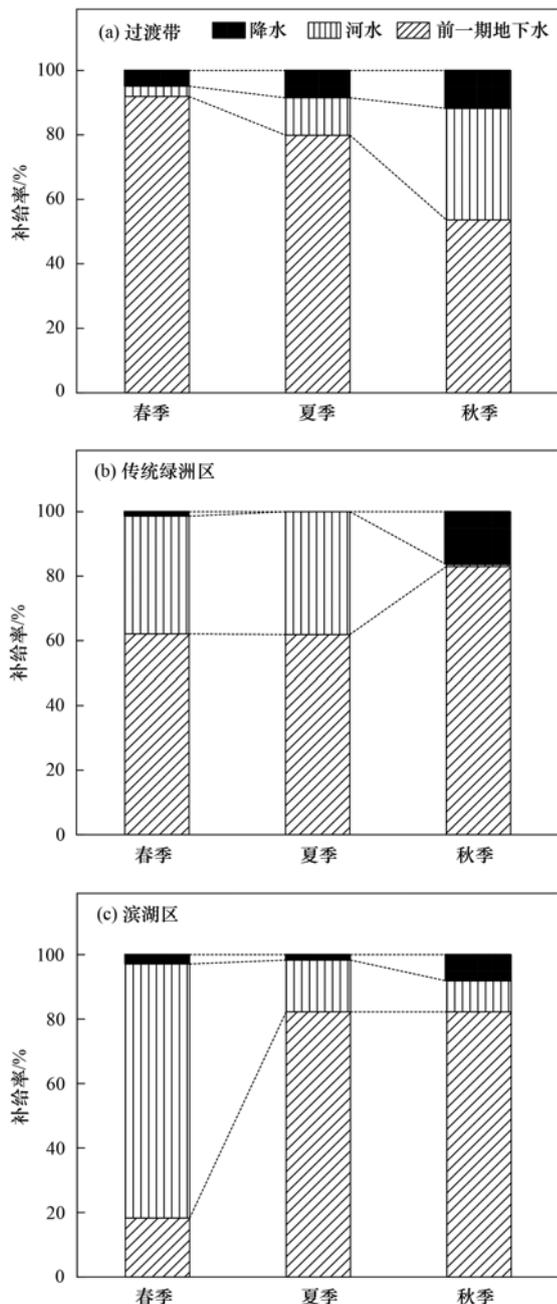


图 8 绿洲区不同季节地表水与地下水补给比例

Fig. 8 Recharge ratio of surface water and groundwater in oasis area in different seasons

区域地表水资源的重要组成部分<sup>[40,42,43]</sup>. 在秋季,传统绿洲区降水对地下水的补给率显著高于河水对地下水的补给率,这又与河西走廊黑河流域的地表水-地下水转换关系较为相似<sup>[44,45]</sup>. 较为复杂的区域地表水-地下水转化关系迫切要求在区域水资源开发利用过程中需统筹配置地表水-地下水,减少对水环境的干扰,以达到区域水资源的可持续利用.

#### 4 结论

(1)研究区河水与地下水都呈碱性,降水有酸化趋势,地表水与地下水 pH 值、TDS 值都呈现冬春

高、夏秋低,绿洲区、高山区低的时空变化. 水体主要阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Na}^{+}$  为主,阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主,绿洲区各离子质量浓度要明显高于山区. 区域水化学类型为  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$  型,绿洲区水化学类型较之山区更复杂. 区域水化学变化主要受岩石风化和人为干扰控制.

(2)河水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值呈现夏季贫化,春季富集的变化趋势,而地下水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值呈现冬春季相对贫化,秋季富集的特征. 降水和冰川水年内变化不显著. 在空间上,河水及地下水  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值都呈现绿洲区富集、山区贫化的规律,在绿洲区内部,过渡带河水与滨湖区地下水的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值都明显高于其他地区.

(3)研究区地表水与地下水的相互关系密切,且在夏季转化频繁. 绿洲区地表水和地下水之间的联系较山区更密切. 绿洲区地下水主要受到前一期地下水、河水和降水的补给,补给率的大小通常为前一期地下水 > 河水 > 降水. 而滨湖区地下水在春季受到河水的补给率最大,其补给率高达 78.9%; 传统绿洲区地下水则是在秋季接受了 16.4% 的降水补给,远超过河水的贡献(0.6%).

#### 参考文献:

- [1] Zhang Y H, Xu M, Li X, *et al.* Hydrochemical characteristics and multivariate statistical analysis of natural water system: a case study in Kangding County, Southwestern China[J]. *Water*, 2018, **10**(1): 80.
- [2] 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 等. 汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4440-4448.  
Zhao C H, Shen H Y, Wang Z H, *et al.* Hydrochemical and isotopic characteristics in the surface water of the Fenhe River basin and influence factors[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4440-4448.
- [3] Sun C J, Chen W, Shen Y J. The seasonal and spatial distribution of hydrochemical characteristics of groundwater and its controlling factors in the eastern Loess Plateau[J]. *Earth Science Informatics*, 2021, **14**(4): 2293-2308.
- [4] 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.
- [5] 孙从建, 陈伟. 基于稳定同位素的海河源区地下水与地表水相互关系分析[J]. *地理科学*, 2018, **38**(5): 790-799.  
Sun C J, Chen W. Relationship between groundwater and surface water based on environmental isotope and hydrochemistry in Upperstream of the Haihe River basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, **38**(5): 790-799.
- [6] 刘久潭, 李颖智, 高宗军, 等. 拉萨河流域中下游地区水化学及地表水-地下水转化关系研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2020, **39**(5): 10-20.  
Liu J T, Li Y Z, Gao Z J, *et al.* Hydrochemistry and relationship

- between groundwater and surface water in the middle and lower reaches of Lhasa River basin[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, **39**(5): 10-20.
- [7] 宫晓艳, 卞建民, 王宇, 等. 松花江吉林段傍河地带地下水化学特征及成因[J]. *人民长江*, 2018, **49**(11): 19-23, 28.
- Gong X Y, Bian J M, Wang Y, *et al.* Chemical characteristics and causes of riparian groundwater in Jilin section of Songhua River[J]. *Yangtze River*, 2018, **49**(11): 19-23, 28.
- [8] 王广昊, 张莹, 徐亮亮, 等. 衢江流域地表水与地下水的转化关系[J]. *科学技术与工程*, 2021, **21**(15): 6165-6174.
- Wang G H, Zhang Y, Xu L L, *et al.* Relationship between surface water and groundwater transformation in Qu River basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, **21**(15): 6165-6174.
- [9] 任孝宗, 杨小平. 鄂尔多斯沙区天然水体水化学组成及其成因[J]. *地理学报*, 2021, **76**(9): 2224-2239.
- Ren X Z, Yang X P. Hydrochemical compositions of natural waters in Ordos Deserts and their influencing factors[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(9): 2224-2239.
- [10] 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 等. 无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 220-229.
- Li S J, Han X, Wang W H, *et al.* Hydrochemical characteristics and controlling factors of surface water and groundwater in Wuding River basin[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 220-229.
- [11] 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 等. 南小沟流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 682-690.
- Guo Y W, Tian F Q, Hu H C, *et al.* Characteristics and significance of stable isotopes and hydrochemistry in surface water and groundwater in Nanxiaohogou basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 682-690.
- [12] 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.
- [13] Li Y, Wu P, Huang X Q, *et al.* Groundwater sources, flow patterns, and hydrochemistry of the Central Yinchuan Plain, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, **29**(2): 591-606.
- [14] Long M, Wu J L, Abuduwaili J. Hydrochemical and isotopic characters of surface water in agricultural oases of the Tianshan Mountains, Northwest China [J]. *Arid Land Research and Management*, 2016, **30**(1): 37-48.
- [15] Zhu G F, Su Y H, Feng Q. The hydrochemical characteristics and evolution of groundwater and surface water in the Heihe River basin, Northwest China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, **16**(1): 167-182.
- [16] Sun C J, Li X G, Chen Y N, *et al.* Spatial and temporal characteristics of stable isotopes in the Tarim River basin[J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2016, **52**(3): 281-297.
- [17] 张艺武, 苏小四, 王骞迎, 等. 伊犁河谷西部平原区地表水与地下水转化关系研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, **56**(5): 664-674.
- Zhang Y W, Su X S, Wang Q Y, *et al.* Surface water-groundwater interactions in the western plain of the Ili Valley [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, **56**(5): 664-674.
- [18] Wei H J, Xu Z, Liu H, *et al.* Evaluation on dynamic change and interrelations of ecosystem services in a typical mountain-oasis-desert region[J]. *Ecological Indicators*, 2018, **93**: 917-929.
- [19] Fu Q, Hou Y, Wang B, *et al.* Scenario analysis of ecosystem service changes and interactions in a mountain-oasis-desert system; a case study in Altay Prefecture, China[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-31043-y.
- [20] Zheng L L, Xia Z L, Xu J H, *et al.* Exploring annual lake dynamics in Xinjiang (China): spatiotemporal features and driving climate factors from 2000 to 2019[J]. *Climatic Change*, 2021, **166**(3), doi: 10.1007/s10584-021-03136-7.
- [21] Yao J Q, Chen Y N, Zhao Y, *et al.* Hydroclimatic changes of Lake Bosten in Northwest China during the last decades [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-27466-2.
- [22] 李建涛, 海米提·依米提, 魏彬, 等. 开都河流域中下游气候变化特征及其对径流的影响[J]. *干旱区研究*, 2015, **32**(2): 313-320.
- Li J T, Haimiti Y, Wei B, *et al.* Climate change in the middle and the lower reaches of Kaidu River and its impact on the runoff [J]. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(2): 313-320.
- [23] Lei X N, Lu J J, Liu Z L, *et al.* Concentration and distribution of antibiotics in water-sediment system of Bosten Lake, Xinjiang [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(3): 1670-1678.
- [24] Li D L, Chen H Y, Jia S F, *et al.* Possible hydrochemical processes influencing dissolved solids in surface water and groundwater of the Kaidu River basin, Northwest China [J]. *Water*, 2020, **12**(2), doi: 10.3390/w12020467.
- [25] Wang S X, Wu B, Yang P N. Assessing the changes in land use and ecosystem services in an oasis agricultural region of Yanqi basin, Northwest China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(12): 8343-8357.
- [26] 张发, 玉素甫江·如素力. 基于 LUCC 追踪分析的生态系统服务价值时空变化研究——以博斯腾湖流域为例[J]. *北京林业大学学报*, 2021, **43**(7): 88-99.
- Zhang F, Rusuli Y. Spatio-temporal variation of ecosystem service value based on LUCC trajectories: a case study of Bosten Lake Watershed [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, **43**(7): 88-99.
- [27] 张嘉欣, 朱秉启. 北疆地区的水化学组成特征及其影响因素[J]. *地理研究*, 2022, **41**(5): 1437-1458.
- Zhang J X, Zhu B Q. Hydrochemical characteristics and influencing factors in Northern Xinjiang: Research progress and overview [J]. *Geographical Research*, 2022, **41**(5): 1437-1458.
- [28] Karmegam U, Chidambaram S, Prasanna M V, *et al.* A study on the mixing proportion in groundwater samples by using Piper diagram and Phreeqc model [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2011, **30**(4): 490-495.
- [29] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [30] Peng T R, Huang C C, Chen J E, *et al.* Evaluating the relative importance of groundwater recharge sources in a subtropical alluvial plain using tracer-based ternary end member mixing analysis (EMMA) [J]. *Water Resources Management*, 2016, **30**(11): 3861-3878.
- [31] 孙从建, 陈伟, 王诗语. 气候变化下的塔里木盆地西南部内

- 陆河流域径流组分特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, **39**(1): 113-122.
- Sun C J, Chen W, Wang S Y. Stream component characteristics of the inland river basin of the Tarim basin under regional climate change[J]. Arid Zone Research, 2022, **39**(1): 113-122.
- [32] 孙从建, 杨伟, 陈若霞, 等. 开都河流域农业灌溉区地下水化学时空分布特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, **38**(7): 84-93.
- Sun C J, Yang W, Chen R X, *et al.* Spatiotemporal Changes in hydro-chemistry of groundwater in irrigation district within the Kaidu River basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, **38**(7): 84-93.
- [33] 张涛, 王明国, 张智印, 等. 然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4003-4010.
- Zhang T, Wang M G, Zhang Z Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Ranwu Lake basin[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4003-4010.
- [34] 刘祖汀, 王丽萍, 屈忠义, 等. 引黄春灌对盐碱土区地下水动态及理化性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, **41**(2): 101-108.
- Liu Z T, Wang L P, Qu Z Y, *et al.* The changes in depth and physicochemical properties of groundwater in response to spring irrigation in Hetao irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, **41**(2): 101-108.
- [35] 李升, 余斌, 陈锋, 等. 皮山河绿洲带地下水水化学及同位素特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, **35**(5): 116-122.
- Li S, Yu B, Chen F, *et al.* Analysis of hydrochemical and isotopic characteristics in Pishan river oasis zone[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, **35**(5): 116-122.
- [36] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water - analyses [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1944, **25**(6): 914-928.
- [37] 沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, 等. 巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 173-182.
- Shen B B, Wu J L, Abuduwaili J, *et al.* Hydrochemical and isotopic characteristics of the Lake Balkhash catchment, Kazakhstan[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 173-182.
- [38] 王建, 韩海东, 许君利, 等. 塔里木河流域出山径流水化学特征研究[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(4): 1576-1587.
- Wang J, Han H D, Xu J L, *et al.* Hydrochemical characteristics of the mountain runoff in Tarim River basin, China[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(4): 1576-1587.
- [39] Gui J, Li Z, Feng Q, *et al.* Contribution of cryosphere to runoff in the transition zone between the Tibetan Plateau and arid region based on environmental isotopes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, **27**(1): 97-122.
- [40] Chen Y N, Li B F, Fan Y T, *et al.* Hydrological and water cycle processes of inland river basins in the arid region of Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2019, **11**(2): 161-179.
- [41] 杨景燕, 杨余辉, 胡义成, 等. 新疆伊犁喀什河流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境化学, 2021, **40**(12): 3815-3827.
- Yang J Y, Yang Y H, Hu Y C, *et al.* Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Kashi River basin, Ili, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(12): 3815-3827.
- [42] 李林. 塔里木河流域地表水和地下水的转化关系[J]. 水土保持通报, 2021, **41**(6): 23-28.
- Li L. Transformation relationship between surface water and groundwater in Tarim River basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, **41**(6): 23-28.
- [43] 赵凯, 栾志刚, 周金玲, 等. 塔里木盆地北缘图木舒克绿洲区潜水水文及水化学特征研究[J]. 水文, 2020, **40**(4): 66-72, 21.
- Zhao K, Luan Z G, Zhou J L, *et al.* Study on hydrological and hydrochemical characteristics of phreatic water in Tumxuk Oasis area in the northern Tarim Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2020, **40**(4): 66-72, 21.
- [44] 陆峥, 胡锦华, 张圆, 等. 基于水文集成模型 ParFlow 的黑河流域下游地下水-地表水相互作用模拟研究[J]. 安全与环境工程, 2021, **28**(3): 7-15, 51.
- Lu Z, Hu J H, Zhang Y, *et al.* Simulating groundwater-surface water interaction using an integrated hydrologic model ParFlow in the downstream of the Heihe River basin [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, **28**(3): 7-15, 51.
- [45] 王文祥, 李文鹏, 蔡月梅, 等. 黑河流域中游盆地水文地球化学演化规律研究[J]. 地学前缘, 2021, **28**(4): 184-193.
- Wang W X, Li W P, Cai Y M, *et al.* The hydrogenochemical evolution of groundwater in the middle reaches of the Heihe River basin[J]. Earth Science Frontiers, 2021, **28**(4): 184-193.

## CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition .....	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) .....	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters .....	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment .....	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO <sub>2</sub> Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt .....	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China .....	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model .....	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis .....	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition in Zhejiang Province .....	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing .....	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution .....	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019 .....	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds .....	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020 .....	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-cla, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory .....	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model .....	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin .....	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin .....	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province .....	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo .....	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area .....	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River .....	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area .....	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir .....	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin .....	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-ni, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang .....	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs .....	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River .....	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau .....	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline .....	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper .....	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes .....	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis .....	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation .....	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region .....	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH <sub>4</sub> Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO <sub>2</sub> Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain .....	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types .....	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang .....	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China .....	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section) .....	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou .....	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province .....	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia .....	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range .....	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil .....	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process .....	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin .....	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation .....	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland .....	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i> .....	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning .....	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City .....	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area .....	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities .....	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality .....	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure .....	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland .....	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)