

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
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	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素

张杰^{1,2}, 周金龙^{1,2*}, 曾妍妍^{1,2}, 涂治^{1,2}, 纪媛媛^{1,2}, 孙英^{1,2}, 雷米^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 本文运用 Piper 三线图、Gibbs 图、饱和指数和离子比例关系等方法分析新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及其控制因素, 对流域地表水资源合理开发利用具有重要意义。结果表明, 地表水 pH 范围为 7.40 ~ 8.33, 均值为 7.92, 整体呈弱碱性。河水、渠水和水库水的溶解性总固体(TDS)均值呈现依次递增的趋势, 其中河水的 TDS 均值为 429.24 mg·L⁻¹, 高于世界河流的平均值(115 mg·L⁻¹)。河水的水化学类型主要为 HCO₃·SO₄-Ca·Na 和 SO₄·HCO₃·Cl-Ca·Na·Mg 型。渠水的水化学类型主要为 HCO₃·SO₄-Cl-Ca·Na 型。水库水的水化学类型主要为 SO₄·Cl-Na·Ca 型。叶尔羌河沿程河水 TDS 呈连续增加趋势, 提孜那甫河沿程河水 TDS 呈连续波动变化, 而主要离子的变化趋势较为复杂。地表水体离子主要受岩石风化、蒸发结晶和阳离子交换作用影响, 其中岩石风化作用过程中以石膏和岩盐的溶解为主。此外, 人类活动对下游地表水水化学组分具有重要影响。

关键词: 地表水; 水化学; 离子来源; 化学成因; 叶尔羌河流域

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1706-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009136

Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang

ZHANG Jie^{1,2}, ZHOU Jin-long^{1,2*}, ZENG Yan-yan^{1,2}, TU Zhi^{1,2}, JI Yuan-yuan^{1,2}, SUN Ying^{1,2}, LEI Mi^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China)

Abstract: In this study, the hydrochemical characteristics of surface water in the Yarkant River Basin of Xinjiang and their controlling factors were analyzed using a Piper trilinear diagram, Gibbs diagram, saturation index, ion proportional relationship, and other methods. The study has significance to the surface water resources in the basin for development and utilization. The results indicated that the pH of the surface water ranged from 7.40 to 8.33, with a mean value of 7.92, which was weakly alkaline. The mean value of the total dissolved solids (TDS) of the river, canal, and reservoir water exhibited an increasing trend. The TDS mean of the river was 429.24 mg·L⁻¹, higher than the average value of rivers worldwide (115 mg·L⁻¹). The hydrochemical types of the river water were predominantly HCO₃·SO₄-Ca·Na and SO₄·HCO₃·Cl-Ca·Na·Mg types, of the canal water was mainly HCO₃·SO₄-Cl-Ca·Na type, and of the reservoir water was mostly the SO₄·Cl-Na·Ca type. The TDS of the river water along the Yarkant River and Tiznap River demonstrated a continuous increase and fluctuation trend, respectively, while the variation of the primary ions was relatively complex. The primary ions of surface water were mostly influenced by rock weathering, evaporation crystallization, and cation exchange, in which gypsum and rock salt were predominantly dissolved in the process of rock weathering. In addition, human activities had significant effects on the chemical composition of the surface water downstream.

Key words: surface water; hydrochemistry; ion source; chemical origin; Yarkant River Basin

河流是海陆间进行物质和能量交换的重要通道, 其水化学组成受流域的地质条件、大气降雨、气候以及人类活动等多重因素的影响^[1~3]。研究流域地表水化学特征及空间分布能够阐释流域内水化学演化的控制因素。国内外学者在这方面已经开展了大量研究, Kattan^[4]对叙利亚 Euphrates 河水化学进行了分析, 表明河流中离子组分受岩石风化溶解、水温和蒸发的影响。Pant 等^[5]的研究认为碳酸盐风化溶解和蒸发结晶作用是尼泊尔 Gandaki 河水离子的主要控制因素。对我国东部湿润地区主要河流长江、黄河、珠江及其重要支流等的水化学研究表明^[3,6~9], 大气降水和岩石风化是其水化学的主要控制因素。不同学者对我国西北干旱半干旱地区的主要河流的地表水水化学特征也进行了一定的研究, 如: 甘肃省疏勒河^[10]、青海省格尔木河^[11]以及新疆

维吾尔自治区艾比湖流域^[12]、榆树沟流域^[13]、额尔齐斯河^[14,15]、乌鲁木齐河^[16]、吉木乃诸河^[17]、阿克苏河^[18]和塔里木盆地^[19,20]的水化学特征表明, 岩石风化和蒸发结晶作用是西北干旱地区地表水水化学的主要贡献源, 人类活动是影响水化学的重要因素。

与我国东部湿润地区相比, 内陆河流域的地表水水化学研究程度相对较低, 特别是新疆叶尔羌河流域。叶尔羌河流域是人类活动影响较强的地区之一, 其地表水和地下水资源的数量和质量, 制约着平原区社会经济的发展, 进而影响着生态环境条件的变

收稿日期: 2020-09-14; 修订日期: 2020-10-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41662016); 新疆自治区高校科研计划项目(XJEDU2018Y020)

作者简介: 张杰(1991~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为干旱区水资源与环境, E-mail: zj4537@126.com

* 通信作者, E-mail: zjzhoujl@163.com

化. 前期对叶尔羌河流域水化学特征的研究集中于地下水方面^[21~23], 而对地表水水化学特征和控制因素的研究较为薄弱. 因此, 本文对叶尔羌河流域地表水水化学数据进行分析, 探讨人类活动影响下叶尔羌河流域地表水水化学特征, 以期为该地区地表水资源的合理开发和利用提供参考.

1 研究区概况

叶尔羌河流域位于新疆塔里木盆地的西部, 地处欧亚大陆腹地, 南部为喀喇昆仑山脉, 北部为平原区. 南部山区出露地层主要由元古界、古生界和中生界的变质岩、碳酸岩、砂岩及碎屑岩所组成, 广泛出露中性及中酸性岩浆岩, 以花岗岩为主, 具有多期活动性质(图 1). 平原区主要出露第四系冲洪积层和风积层, 沉积物颗粒由南向北逐渐变细, 厚度一般在 200~400 m, 表现为东北薄、西南厚的特点. 流域内呈典型的大陆性暖温带气候, 气温年变化较大, 空气干燥, 降水量稀少, 蒸发强烈; 多年年均气温 11.9℃, 年降水量 52.7 mm, 年蒸发量为 2454 mm^[22]. 叶尔羌河流域南部为终年积雪的昆仑山, 大量冰雪融水和大气降水是本区地表水的补给源. 流域内主要河流由西至东有叶尔羌河、提孜那甫河、柯克亚河和乌鲁克河等 4 条. 其中, 叶尔羌河全长 1180 km, 多年平均年径流量 65.21 亿 m³, 提孜那甫河河流全长 335 km, 径流量为 8.83 亿 m³, 乌鲁克河平均年径流量为 1.59 亿 m³, 柯克亚河平均年径流量为 0.78 亿 m³.

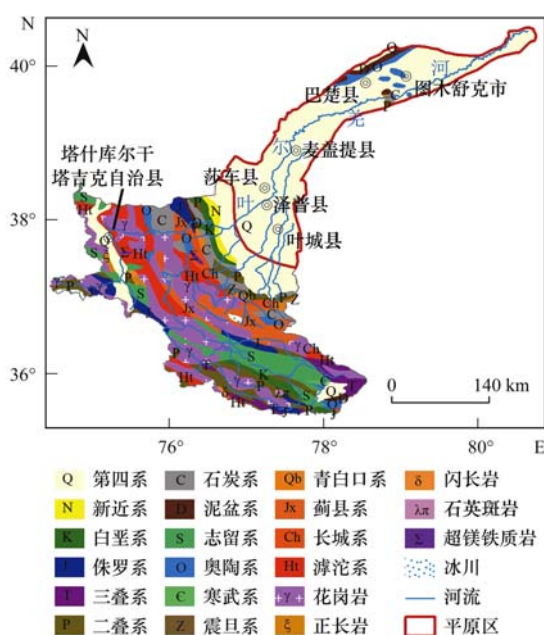


图 1 叶尔羌河流域地质示意

Fig. 1 Map of the geology of the Yarkant River Basin

2 材料与方法

2.1 地下水采样与测试

2020 年 7 月在叶尔羌河流域平原区采集地表水水样 26 组(采样点位置及编号如图 2), 其中河水水样 11 组, 渠水水样 8 组, 水库水(水库出水口)样 7 组. 由哈纳(HANNA) HI98121 笔式测定仪现场测定地表水的 pH、水温. 取样前, 用所取水样润洗聚乙烯塑料瓶 3 次, 用 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤, 阳离子分析的水样加硝酸酸化至 pH < 2, 贴好标签密封保存.

地表水化学指标测试由新疆地矿局第二水文地质工程地质大队实验室完成. K⁺ 和 Na⁺ 采用火焰原子吸收分光光度法测定, Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、CO₃²⁻ 和总硬度(TH, 以 CaCO₃ 计)采用乙二胺四乙酸二钠滴定法, Cl⁻ 为硝酸银容量法, SO₄²⁻ 为硫酸钡比浊法测定, 检测下限均为 0.05 mg·L⁻¹; 溶解性总固体(TDS)使用电子天平 MP8-1 测定, 检出限为 0.1 mg·L⁻¹.

2.2 研究方法

运用 Excel 电子表格软件对数据进行统计分析, 利用阴阳离子平衡法检验数据的可靠性. 计算结果显示所有水样的阴阳离子平衡误差绝对值小于 5%, 均可用于分析. 为进一步研究该区水化学成因, 运用 PHREEQC 软件计算矿物饱和指数(SI), 并采用 Origin 软件绘制 Piper 三线图、Gibbs 图和离子比例图等, 综合利用矿物饱和指数和离子比探讨地表水水化学的主要控制因素.

3 结果与讨论

3.1 地表水水化学特征

分别对河水、渠水和水库水各化学指标数据做统计分析, 结果如表 1. 研究区地表水 pH 范围为 7.40~8.33, 均值为 7.92, 其中河水、渠水和水库水的 pH 均值分别为 7.97、8.01 和 7.73, 整体上呈弱碱性. 地表水 TDS 范围为 273.10~3344.45 mg·L⁻¹, 均值为 631.10 mg·L⁻¹; TH 范围为 138.33~1175.32 mg·L⁻¹, 均值为 293.34 mg·L⁻¹; TDS 和 TH 均值呈现河水 < 渠水 < 水库水的趋势, 其中河水 TDS 均值为 429.24 mg·L⁻¹, 高于世界河流的平均值(115 mg·L⁻¹)^[24]. 河水、渠水和水库水中主要阳离子平均值均呈现: Na⁺ + K⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺, 在渠水和水库水中 Na⁺ 浓度占主要阳离子的优势尤为明显. 主要阴离子平均值在 3 种地表水类型中呈现不同的趋势, 河水、渠水和水库水中主要阴离子平均值分别呈现: HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻、Cl⁻ > SO₄²⁻ > HCO₃⁻ > NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ > Cl⁻ > HCO₃⁻ > NO₃⁻.

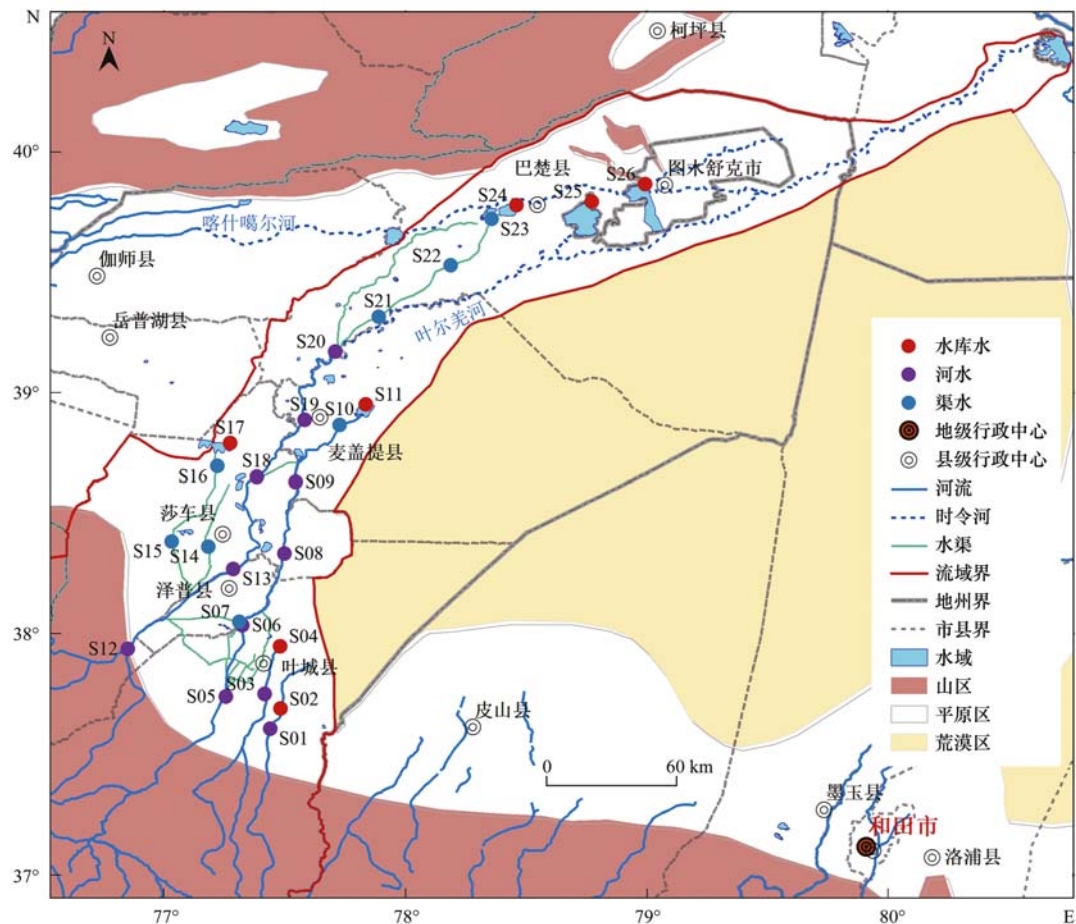


图 2 叶尔羌河流域地表水取样点分布示意

Fig. 2 Sketch map of the surfer water samples sites in the Yarkant River Basin

表 1 叶尔羌河流域地表水水化学统计¹⁾

Table 1 Statistics of the hydrochemical composition of the surface water in the Yarkant River Basin

指标	河水			渠水			水库水		
	均值	极小值	极大值	均值	极小值	极大值	均值	极小值	极大值
pH	7.97	7.65	8.33	8.01	7.72	8.19	7.73	7.40	8.05
TDS	429.24	274.42	1 039.64	614.88	273.10	2 696.54	966.85	428.72	3344.45
TH	232.47	138.33	494.18	276.66	157.38	952.28	408.05	212.51	1 175.32
K ⁺ + Na ⁺	65.81	38.19	184.13	123.35	36.33	660.54	196.09	69.45	791.46
Ca ²⁺	60.07	40.55	116.82	62.22	28.10	156.56	85.02	46.17	207.75
Mg ²⁺	20.03	9.01	49.18	29.46	6.33	136.35	47.55	22.40	159.49
Cl ⁻	72.58	35.51	255.70	175.17	28.41	1 118.69	269.29	63.92	1242.98
SO ₄ ²⁻	135.06	66.42	344.21	150.27	71.54	547.05	306.43	157.83	902.27
HCO ₃ ⁻	142.57	108.79	231.02	141.95	122.24	204.13	119.27	74.56	156.46
NO ₃ ⁻	3.63	1.96	5.60	2.63	2.25	3.14	1.88	0.14	7.45

1) pH 为无量纲; 其余指标单位为mg·L⁻¹

利用 Piper 图可以表明不同水体化学组成特征,其以主要阳离子(Na⁺ + K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)和阴离子(Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻)的毫克当量百分数来表示^[25].从图 3 可以看出,叶尔羌河流域地表水的阳离子主要分布在三角图的中央并偏向 Ca²⁺ 轴线,阴离子分布在三角图的中央并偏向 HCO₃⁻ 轴线.河水的阳离子 Na⁺ + K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 分别占阳离子总量的 34.72%、42.93% 和 22.35%,阴离子 Cl⁻、

SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 分别占阴离子总量的 25.83%、38.01% 和 36.16%,水化学类型主要为 HCO₃·SO₄-Ca·Na 和 SO₄·HCO₃·Cl-Ca·Na·Mg 型.渠水的阳离子 Na⁺ + K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 分别占阳离子总量的 36.44%、41.95% 和 21.61%,阴离子 Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 分别占阴离子总量的 26.85%、34.92% 和 38.23%,水化学类型主要为 HCO₃·SO₄·Cl-Ca·Na 型.水库水的阳离子 Na⁺ + K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 分别占

阳离子总量的 42.98%、31.28% 和 25.73%，阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 分别占阴离子总量的 35.76%、44.17% 和 20.07%，水化学类型主要为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型。

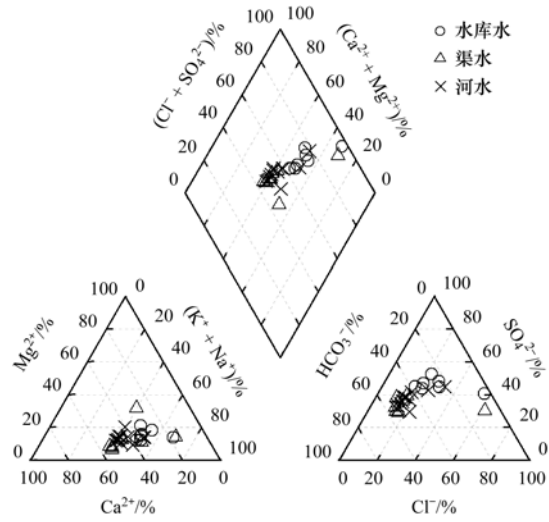


图3 研究区地表水水化学 Piper 图

Fig. 3 Piper diagram of the hydrochemistry of the surface water of the study area

3.2 地表水水化学空间分布特征

叶尔羌河(S12)、提孜那甫河(S05)、柯克亚河(S03)和乌鲁克河(S01)出山口的 TDS 分别为 281.68、274.42、1 039.64 和 330.23 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TH 分别为 168.40、138.33、494.18 和 183.43 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 图 4 为 4 条主要河流出山口的离子特征, S12、S05 和 S01 的主要离子浓度差异较小, 而 S03 的主要离子浓度较高, 特别是 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度远高于其他 3 条河流. S12 和 S05 的化学类型均为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$, S03 的水化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4-\text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型, S01 的水化学类型为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Na}$. 4 条河流的 NO_3^- 浓度范围为 2.38 ~ 5.54 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明河流受到一定程度的人为污染影响. 柯克亚河的

主要离子浓度高于其他 3 条河流是地质条件所致. 柯克亚河上游主要流经含松软膏盐层的以细砂岩为主地层, 地表裸露, 风化侵蚀相当严重, 加气候干燥、蒸发量大, 易于盐分聚集, 因此河水在汇流过程中溶解了大量易溶盐类; 同时山区分布有较多的硫铁矿, 由于金属硫化物氧化物溶于河水中, 使河水含有较多的 SO_4^{2-} [26].

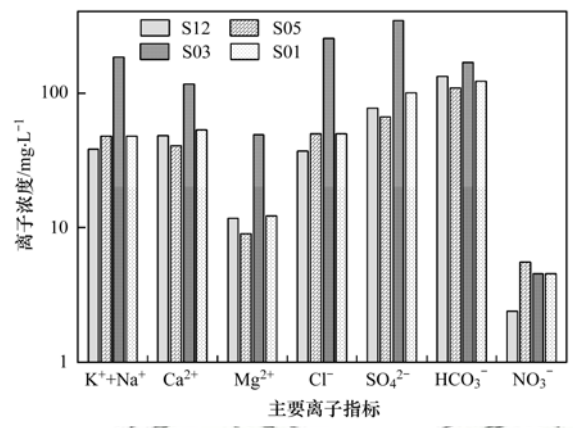


图4 主要河流离子浓度

Fig. 4 Ion concentration of major rivers

图 5 为叶尔羌河和提孜那甫河主要离子的沿程变化, 其中采样点从左至右为河流出口至河流尾间的分布. 由图 5(a) 可见, 叶尔羌河出口 S12 经河道流至 S20 时, 除 Ca^{2+} 呈波动增加外, 其余主要离子均呈连续增加趋势. S12 ~ S18 的 TDS 呈微弱增加趋势, S18 的 TDS 为 288.14 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与 S12 和 S13 相比分别增加了 6.46 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 1.25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; S19 和 S20 的 TDS 分别增加为 323.36 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 335.57 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 此后河水经民生闸口转入渠道输水至喀什地区巴楚县, 渠水(S21 ~ S23) TDS 逐渐增加, S21 ~ S22 的 TDS 增加趋势相对平缓, 其 TDS 分别增加为 359.24 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 434.17 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. S22 ~ S23 (红海水库入水口) TDS 呈现剧烈增加趋势, S23 的 TDS 为 2 696.54 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

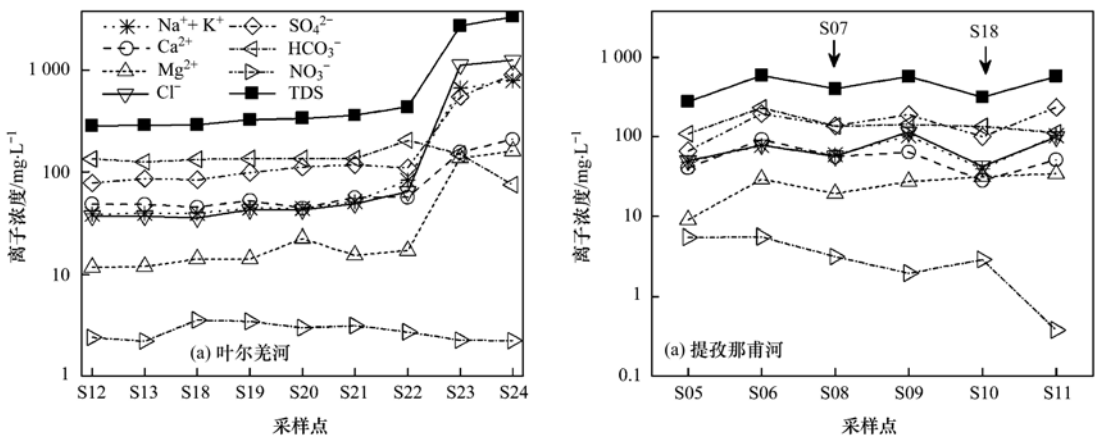


图5 河流沿程采样点离子浓度

Fig. 5 Ion concentration of sampling points along the river

除 HCO_3^- 呈现降低趋势外,其余离子均呈现急剧增加趋势. S23 至红海水库出水口 (S24) 除 HCO_3^- 呈现降低趋势外,其余离子和 TDS 仍呈增加趋势,其 TDS 增至 $3\,344.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

由图 5(b) 可见,提孜那甫河沿程水化学与叶尔羌河沿程水化学变化趋势不同. 提孜那甫河流经至 S06 时, TDS 由 S05 的 $274.42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 $592.42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 主要离子浓度均呈现增加趋势. 叶尔羌河水经东岸大渠 (S07 的 TDS 为 $276.81\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 汇入提孜那甫河后流经至 S08, 其 TDS 降低为 $398.31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 主要离子均呈现降低趋势; 流经至 S09 时, 其 TDS 增加至 $571.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 主要阴阳离子均呈增加趋势. 之后叶尔羌河水 (S18) 再次经渠道引水至提孜那甫河, 提孜那甫河水流经至前进水库入水口 (S10) 时, TDS 降为 $312.43\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 除 Mg^{2+} 增加外 (由 S09 的 $27.27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $31.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 其余主要离子均呈现降低趋势; 前进水库出水口 (S11) 的 TDS 增加为 $578.76\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 除 HCO_3^- 浓

度降低外,其余主要离子均呈现增加趋势.

3.3 水化学控制因素分析

3.3.1 主要离子来源分析

利用 Gibbs 图分析地表水水化学的控制因素, 该图分为 3 个端元, 即蒸发-结晶、岩石风化和大气降水, 分别对应 3 种因素对主要离子的影响程度^[27]. 由图 6 可知, 大部分水样点位于虚线内, 且介于岩石风化作用和蒸发结晶作用控制区之间, 说明叶尔羌河流域地表水主要离子是由岩石风化作用和蒸发结晶作用控制. 地表水 Cl^-/Na^+ 平均值为 0.74, 远低于世界平均降水比值 ($\text{Cl}^-/\text{Na}^+ = 1.15$), 表明大气降水对叶尔羌河流域地表水离子组分贡献较小^[28]. 河水 and 大部分渠水靠近岩石风化端元, 而大部分水库水靠近蒸发-结晶端元, 表明岩石风化作用对河水和渠水的水化学离子浓度影响较大, 蒸发结晶作用对水库水化学离子浓度影响较大. 此外部分样点位于虚线外 [图 6 (b)], 表明人类活动对地表水化学成分具有一定影响^[29].

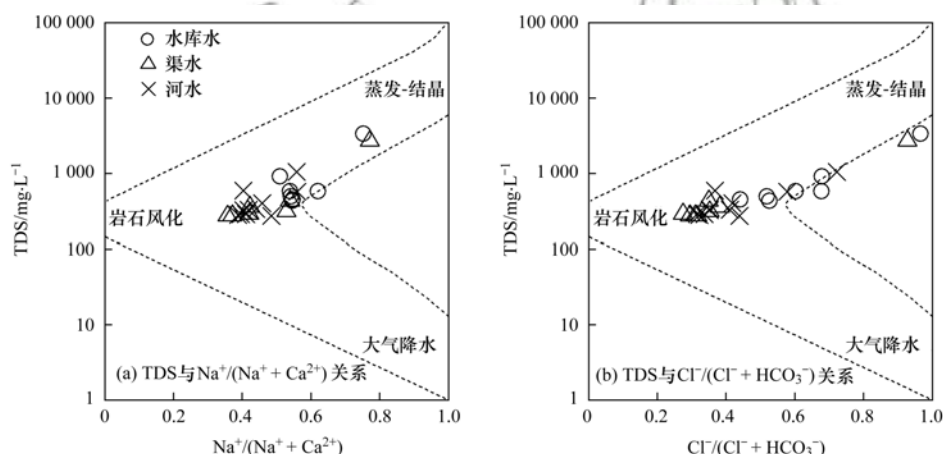


图 6 研究区地表水 Gibbs 图

Fig. 6 Gibbs diagram of the surface water in the study area

研究区气候干旱、降水稀少, 大气降水输入的可溶性离子可忽略不计, 地表水化学成分主要来源于矿物的风化溶解. Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 主要来源于硅酸盐岩和蒸发岩的风化溶解, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于含镁和钙的碳酸盐和硅酸盐的溶解, SO_4^{2-} 主要来源于蒸发岩矿物的溶解, HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩的溶解^[24,30]. 水化学成分受何种矿物溶解作用控制通过 SI 值进行判断, 当 $\text{SI} < 0$ 时, 表示该矿物处于不饱和状态; $\text{SI} > 0$, 表示该矿物处于饱和状态; $\text{SI} = 0$, 表示水溶液与矿物正好处于平衡状态^[25]. 图 7 显示方解石、白云石、石膏和岩盐的饱和指数均小于零, 其饱和指数整体随 TDS 增加呈现指数上升趋势, 表明水体中离子浓度增加受蒸发岩和碳酸岩等矿物的溶解控制. 其中岩盐饱和指数与

TDS 的指数拟合曲线决定系数最大 ($R^2 = 0.98$), 其次是石膏 ($R^2 = 0.94$), 表明水体离子以岩盐和石膏类矿物溶解为主.

3.3.2 阳离子交换作用

由于风化带中水的移动, Ca^{2+} 和 Na^+ 之间的离子交换可能导致水化学离子浓度的变化. ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$) 与 ($\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$) 的关系可以判断阳离子交换反应的发生, 如果阳离子交换是控制水化学离子组成的重要过程, 则 ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$) 与 ($\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$) 的关系应为线性关系且斜率应为 -1.0 ^[31]. 图 8(a) 显示 ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$) 和 ($\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$) 之间呈明显的负相关 ($R^2 = 0.999$), 表明 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 参与离子交换反应, 离子交换对水样中 Na^+ 的贡献起作用.

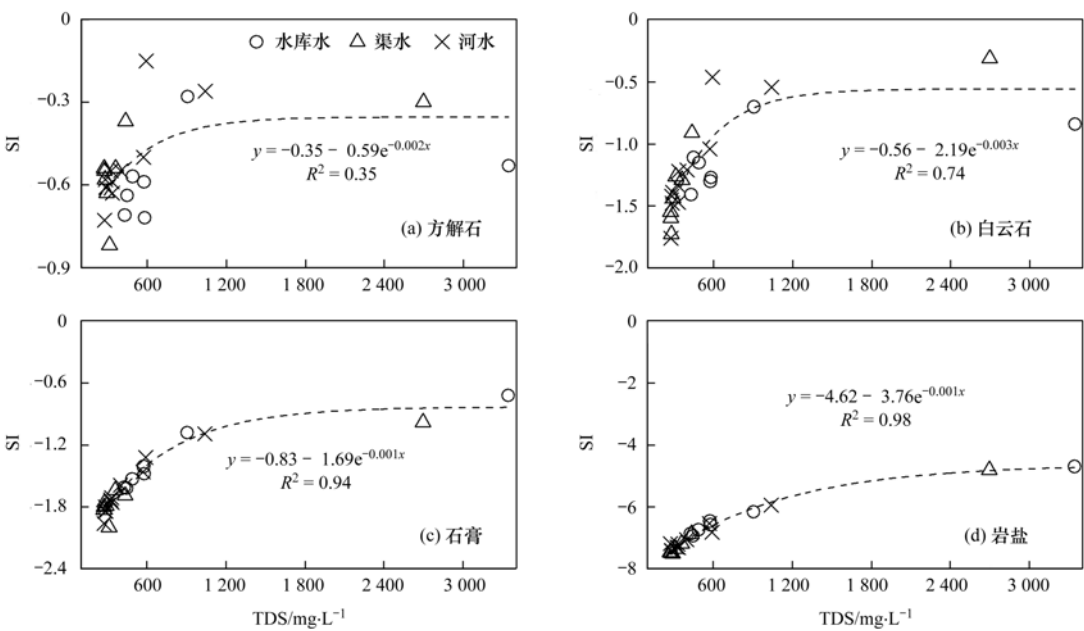


图 7 地表水的矿物饱和指数

Fig. 7 Saturation index of the minerals in surface water of the study area

钠吸附比(SAR)可以反映地表水中 Na^+ 与黏土中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 发生离子交换作用,SAR值越大,则阳离子交换作用越明显^[32].地表水TDS与SAR呈正相关关系,随着TDS增加,SAR不断增大[图8(b)],说明阳离子交替吸附作用逐渐增强.从出山口到河流下游,流速变缓,叶尔羌河水化学类型由 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 过渡为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型,阳离子中 Mg^{2+} 毫克当量浓度先增后减, Ca^{2+} 毫克当量浓度相对减少, Na^+ 毫克当量浓度相对增加,也表明阳离子交替吸附作用逐渐增强.河流下游径流变缓,沉积颗粒较细,吸附在黏土矿物表面的 Na^+ 与水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 之间的交替吸附作用更加明显,导致水中 Na^+ 升高.

3.3.3 人类活动影响

人类活动强烈的地区对水化学演化影响非常重要,废水、废物和废气的输送会带入较多的 NO_3^- 、

Cl^- 和 SO_4^{2-} 等离子导致地表水水化学组分浓度的改变^[24].S01和S02分别为宗朗水库上游10 km处和宗朗水库出水口取样点,TDS分别为 $330.24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $905.39\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,S02的 NO_3^- 为 $7.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高于S01的 $4.54\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明地表水受到了人为污染的影响.宗朗乡位于S01与S02之间,乡镇生活污水以及农业灌溉用水渗入河中使得该段河流离子浓度升高,与S01相比,S02的 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 HCO_3^- 分别增加了142.05、223.58和 $34.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.此外,用水方式和引水工程的修建对下游地表水水化学组分也会产生影响.为解决地区缺水问题及提高下游灌溉用水保证率,先后在叶尔羌河修建了卡群和民生渠首等引水枢纽工程.这些工程运行之后,导致叶尔羌河下游径流量大幅度减少,使得部分地表水水化学成分发生变化.提孜那甫河地表水离子浓度呈现增加趋势,当离子浓度较低的叶

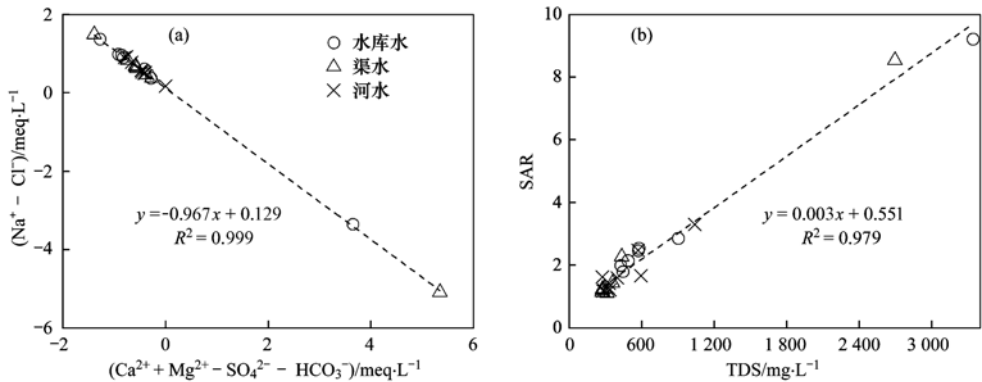


图 8 地表水 $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$ 关系和SAR与TDS的关系

Fig. 8 Relationships of $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ vs. $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ and SAR vs. TDS in the surface water of the study area

尔羌河水经渠道汇入后,提孜那甫河离子浓度又呈现降低趋势。叶尔羌河流域平原区采用地表水和地下水混合用水方式也会导致部分河水 and 渠水离子浓度增加。叶尔羌河沿程河水 S12 至 S22 的离子浓度呈现缓慢增加趋势,但流经至 S23 和 S24 时,离子浓度急剧增加,这是由于地下水混入地表水所致。巴楚县西部附近承压含水层 TDS、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度分别超 4 000、2 000 和 1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[22],为满足灌溉需水而抽取高离子浓度的地下水排入渠道与地表水混合后使得地表水离子浓度升高。

4 结论

(1) 叶尔羌河流域地表水 pH 范围为 7.40 ~ 8.33,均值为 7.92,整体上呈弱碱性。地表水 TDS 和 TH 均值呈现河水 < 渠水 < 水库水的趋势,其中河水 TDS 均值为 429.24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高于世界河流的平均值(115 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。河水的水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型,渠水的水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}\cdot\text{Na}$ 型,水库水的水化学类型主要为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Ca}$ 型。

(2) 叶尔羌河沿程河水 TDS 呈连续增加趋势,河水中主要离子与 TDS 的变化趋势一致,进入渠道后变化较为复杂。提孜那甫河沿程河水 TDS 呈连续波动趋势, Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 与 TDS 的变化趋势一致。

(3) 地表水主要离子受到岩石的风化作用控制,水化学离子主要来源于石膏和盐岩的风化溶解;蒸发结晶作用和阳离子交换作用对离子组分变化具有重要贡献。此外,引水工程的修建以及地表水-地下水混合用水方式对下游地表水离子组分影响较大。

参考文献:

- [1] Tang C G, Liu C Q. Characteristics and driving factors of surface water chemistry of Wujiang watershed[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **64**(5): 1445-1453.
- [2] 黄奇波,覃小群,刘朋雨,等. 乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1779-1787.
Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Major ionic features and their controlling factors in the upper-middle reaches of Wujiang River[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1779-1787.
- [3] 何姜毅,张东,赵志琦. 黄河流域河水水化学组成的时间和空间变化特征[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(5): 1390-1401.
He J Y, Zhang D, Zhao Z Q. Spatial and temporal variations in hydrochemical composition of river water in Yellow River Basin, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(5): 1390-1401.
- [4] Kattan Z. Chemical and isotopic characteristics of the Euphrates River water, Syria: factors controlling its geochemistry[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(8): 4763-4778.
- [5] Pant R R, Zhang F, Rehman F U, *et al.* Spatiotemporal variations of hydrogeochemistry and its controlling factors in the Gandaki River Basin, Central Himalaya Nepal[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **622-623**: 770-782.
- [6] 陈静生,王飞越,夏星辉. 长江水质地球化学[J]. *地学前缘*, 2006, **13**(1): 74-85.
Chen J S, Wang F Y, Xia X H. Geochemistry of water quality of the Yangtze River basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, **13**(1): 74-85.
- [7] 张旺,王殿武,雷坤,等. 黄河中下游丰水期水化学特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2020, **27**(1): 380-386, 393.
Zhang W, Wang D W, Lei K, *et al.* Hydrochemical characteristics and impact factors in the middle and lower reaches of the the Yellow River in the wet season[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(1): 380-386, 393.
- [8] 刘松韬,张东,李玉红,等. 伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1184-1196.
Liu S T, Zhang D, Li Y H, *et al.* Water sources and factors controlling hydro-chemical compositions in the Yiluo River Basin[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1184-1196.
- [9] 褚映雪,唐常源,曹英杰,等. 北江流域水化学时空变化及化学风化特征[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(6): 1078-1087.
Xuan Y X, Tang C Y, Cao Y J, *et al.* Spatial and temporal variation of hydro-chemistry and chemical weathering characteristics in the Beijiang River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(6): 1078-1087.
- [10] 周嘉欣,丁永建,曾国雄,等. 疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3315-3324.
Zhou J X, Ding Y J, Zeng G X, *et al.* Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule River Basin and the possible controls[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3315-3324.
- [11] 汪生斌,祁泽学,王万平,等. 格尔木河水化学特征及成因[J]. *水资源保护*, 2020, **36**(5): 93-98.
Wang S B, Qi Z X, Wang W P, *et al.* Hydrochemical characteristics and causes of formation of the Golmud River[J]. *Water Resources Protection*, 2020, **36**(5): 93-98.
- [12] 朱世丹,张飞,张海威,等. 新疆艾比湖主要入湖河流同位素及水化学特征的季节变化[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(6): 1707-1721.
Zhu S D, Zhang F, Zhang H W, *et al.* Seasonal variation of the isotope and hydrochemical characteristics of the main lake rivers in Lake Ebinur, Xinjiang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(6): 1707-1721.
- [13] 王晓艳,李忠勤,蒋缠文,等. 天山哈密榆树沟流域夏季洪水期河水水化学特征及其成因[J]. *冰川冻土*, 2016, **38**(5): 1385-1393.
Wang X Y, Li Z Q, Jiang C W, *et al.* Hydrochemical characteristics and causes of the summer river water in Yushugou basin, Eastern Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, **38**(5): 1385-1393.
- [14] 韦虹,吴锦奎,沈永平,等. 额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1345-1352.
Wei H, Wu J K, Shen Y P, *et al.* Hydrochemical characteristics of snow meltwater and river water during snow-melting period in the headwaters of the Ertis River, Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1345-1352.
- [15] 刘峰,李忠勤,郝嘉楠,等. 额尔齐斯河源春季水化学及稳

- 定同位素特征研究[J]. 冰川冻土, 2020, **42**(1): 234-242.
- Liu F, Li Z Q, Hao J N, *et al.* Study on the hydrochemical and stable isotope characteristics at the headwaters of the Irtysh River in spring[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, **42**(1): 234-242.
- [16] 吴丽娜, 孙从建, 贺强, 等. 中天山典型内陆河流域水化学时空特征分析[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(5): 149-156.
- Wu L N, Sun C J, He Q, *et al.* Analysis of temporal and spatial variation of hydrochemical characteristics of the typical inland river in the middle of Tianshan Mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **24**(5): 149-156.
- [17] 宋梦媛, 李忠勤, 王飞腾, 等. 新疆吉木乃诸河水体氢氧同位素和水化学特征[J]. 环境化学, 2020, **39**(7): 1809-1820.
- Song M Y, Li Z Q, Wang F T, *et al.* Hydrogen and oxygen isotopes and hydrochemical parameters of water samples from the Jimunai River Basin, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(7): 1809-1820.
- [18] Sun C J, Chen Y N, Li X G, *et al.* Analysis on the streamflow components of the typical inland river, Northwest China[J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, **61**(5): 970-981.
- [19] Xiao J, Jin Z D, Ding H, *et al.* Geochemistry and solute sources of surface waters of the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, **54-55**: 162-173.
- [20] 王建, 韩海东, 赵求东, 等. 塔里木河流域水化学组成分布特征[J]. 干旱区研究, 2013, **30**(1): 10-15.
- Wang J, Han H D, Zhao Q D, *et al.* Study on hydrochemical components of river water in the Tarim River Basin, Xinjiang, China[J]. Arid Zone Research, 2013, **30**(1): 10-15.
- [21] 栾凤娇, 周金龙, 曾妍妍, 等. 叶尔羌河流域平原区农村地下水水质安全评价[J]. 人民黄河, 2017, **39**(6): 68-71.
- Luan F J, Zhou J L, Zeng Y Y, *et al.* Evaluation of groundwater quality security in rural areas of Yarkant River Basin[J]. Yellow River, 2017, **39**(6): 68-71.
- [22] 张杰, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆叶尔羌河流域平原区浅层地下水水咸化空间分布及成因[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(23): 126-134.
- Zhang J, Zhou J L, Nai W H, *et al.* Spatial distribution and cause of salinization of shallow groundwater in plain terrain of the Yarkant River Basin, Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(23): 126-134.
- [23] 林丽, 曾妍妍, 周金龙, 等. 新疆叶尔羌河流域浅层地下水水化学特征及形成机制[J]. 干旱区资源与环境, 2020, **34**(6): 146-152.
- Lin L, Zeng Y Y, Zhou J L, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in the Yarkant River Basin, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, **34**(6): 146-152.
- [24] 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.
- [25] 张艳, 吴勇, 杨军, 等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3230-3237.
- Zhang Y, Wu Y, Yang J, *et al.* Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi Town, Langzhong City[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3230-3237.
- [26] 闫淑玉, 张进江, 王晓先, 等. 塔西南叶城地区新生代沉积物源分析: 来自碎屑锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 大地构造与成矿学, 2018, **42**(2): 392-402.
- Yan S Y, Zhang J J, Wang X X, *et al.* Provenance of cenozoic sediments in Yecheng, Southwest Tarim Basin: constraints from detrital zircons U-Pb geochronology[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018, **42**(2): 392-402.
- [27] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [28] 刘佳驹, 赵雨顺, 黄香, 等. 雅鲁藏布江流域水化学时空变化及其控制因素[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(11): 4289-4297.
- Liu J J, Zhao Y S, Huang X, *et al.* Spatiotemporal variations of hydrochemistry and its controlling factors in the Yarlung Tsangpo River[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(11): 4289-4297.
- [29] 朱世丹, 张飞, 张海威. 艾比湖流域河流水化学季节特征及空间格局研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 892-899.
- Zhu S D, Zhang F, Zhang H W. The seasonal and spatial variations of water chemistry of rivers in Ebinur Lake Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(3): 892-899.
- [30] 孙瑞, 张雪芹, 吴艳红. 藏南羊卓雍错流域水化学主离子特征及其控制因素[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(4): 600-608.
- Sun R, Zhang X Q, Wu Y H. Major ion chemistry of water and its controlling factors in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(4): 600-608.
- [31] Xiao J, Jin Z D, Zhang F. Geochemical controls on fluoride concentrations in natural waters from the middle Loess Plateau, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, **159**: 252-261.
- [32] Haque M M, Nahin M N, Omme, K N, *et al.* Variability of water quality and metal pollution index in the Ganges River, Bangladesh[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(34): 42582-42599.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)