

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第45卷 第4期 2024年4月15日

目 次

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏,李荔,殷茵,何文太,宿杰,赵秋月 高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿,封莉,张立秋 北京市制造业减污降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊,韩玉花,牟洁,张双,张增杰 碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 中国城市 PM_5和 PM_0时空分布特征和影响因素分析 李江苏,段良荣,张天娇 2017~2021 年苏皖鲁豫交界区域 PM_5和 0,时空变化特征及影响因素 陈伟,徐学哲,刘文清 疫情管控期西安 PM_5和 0,污染特征及成因分析 原晓红,张强,李琦,谢文豪,刘跃廷,樊亭亭,姜旭朋	(1869) (1879) (1888) (1898) (1907) (1917) (1926) (1938) (1950) (1963) (1975)
那台氨减排对京津冀PM2.5改善的溢出效益	(1985)
聊城市冬季PM2.5载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析	(2003)
高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 ····································	(2011)
王洁,姚震,王敏燕,陈速敏,龙腾,王海林,李红,郭秀锐,郝江虹,聂磊	(2019)
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析雷丽娟,张懿,罗伊娜,张潇,冯森	(2028)
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险	(2039)
黄河小浪低水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险	(2054)
藏乐多出河流域锶晶集水化字符值及控制因系	(2067)
四北内栖区碑小梞疋回位系可至万印付征及共小代木砾 "你说我们这些有些有些有些有些有些有些有些有些。""你不是是这些有些有些有些。""你们还是不是是这些"你是不是是这些问题,你们还是不是不是是不是我们的是不是不是不是我们的是不是不是不是我们的问题。""你们还是你们还是不是你的问题。""你们还是你们还是你们还是你们的是你们还是你们的是你们还是你们还是你们还是你们的吗?""你们还是你们的话题。""你们还是你们还是你们的是你们的是你们的是你们的是你们的是你们的是你们的是你们的是你们的是你们的	(2080)
至了小化于和氢氧固位系的家女须应有招地下小作用木协及很化过程	(2090)
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素	(2107)
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价	(2129)
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征	(2142)
抚仙湖子流域尺度氮排放清单构建及关键源解析	(2150)
过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能曲思彤,单苏洁,王崇铭,吴玲予,李大鹏,黄勇	(2160)
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应	(2171)
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展	(2185)
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制	(2195)
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制	(2203)
土地利用影响下无定河流域浮游植物群落与环境因子响应	(2211)
	()
御阳御健地细菌研络多杆性种肉石养细菌肉肥糕包干皮	(2223)
御闲砌湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能差凶手度	(2223) (2233) (2246)
御闲砌湿地细菌杆落多杆住和可培养细菌功能基因半度	(2223) (2233) (2246) (2250)
御闲砌湿地细菌杆落多杆住和可培养细菌切能基因半度************************************	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268)
御闲湖征地细菌杆落多杆住和可培养细菌功能基因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2268)
御闲湖征地细菌杆落多杆住和可培养细菌功能基因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2268) (2280) (2292)
御闲湖湿地细菌杆落多杆住和可培养细菌功能基因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304)
御闲御湿地细菌杆落多杆住和可垢养细菌功能基因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313)
師闲御徑地细菌杆落多样住和可培养细菌功能基因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2321)
御闲湖征地细菌杆落多样住和可培养细菌功能基因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2321) (2332)
御闲湖征地细菌杆落多样住和可培养细菌功能基因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2313) (2321) (2332) (2342)
御闲湖征地细菌杆落多样住和可培养细菌功能基因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2321) (2332) (2342) (2353)
御闲湖盈地细菌杆落多样住和可培养细菌功能基因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2313) (2321) (2332) (2342) (2353)
御闲湖迎电细菌群落多样住和可培养细菌切能蒸因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2321) (2332) (2332) (2342) (2353)
師內涵並地抽菌許落多祥性和可培养和菌功能茲因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2321) (2332) (2332) (2342) (2353) (2363) (2373) (2385)
師问師徑地和圖群落多件性和可培养和國功能差因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2313) (2313) (2321) (2332) (2342) (2353) (2363) (2373) (2385) (2394)
師內加亞地爾爾萨洛多祥住和可培养细菌功能茲因羊皮	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2313) (2321) (2332) (2342) (2353) (2363) (2373) (2385) (2394) (2406)
邮内调速地和菌杆落多件往和可培养和菌功能基因半皮 與农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 方水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 新亚平,张俊华,田惠文,朱航成,刘舒、丁亚鹏 基于连续小波变换,SHAP和XCBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶子壮,王松燕,陆潇,史多鹏,吕慎强,李嘉,杨泽字,王林权 长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 土壤盐分变化对 N_0 排放影响:基于 Meta分析 基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量时空变化模拟 影響,影響峰 基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量时空变化模拟 长期、时振软,朱文博,孙梓欣,赵体侠,邓文萍,刘志强 防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 修风罩,黄懿梅,黄倩,申继凯 长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 修风罩,黄懿梅,黄倩,申继凯 长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 一般生,陈佳钰,李智贤,李永梅,罗志章,杨锐,田明洋,赵吉霞,范茂攀 辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 子服子,陈佳钰,李智贤,李永梅,罗志章,杨锐,田明洋,赵吉霞,范茂攀 红河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 子、陈优、肖启涛,谢晖,刘臻靖,邱银国,罗菊花,徐向华,段洪涛 生物发与不同类型氮肥配施成菜地土壤反硝化细菌群落的影响 新路、高世臣,赵亚楠,景胜强,周艳兵,都允兵	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2313) (2313) (2313) (2313) (2321) (2332) (2342) (2353) (2363) (2373) (2385) (2394) (2406) (2417)
師內爾德地理問輯辞答時作和可培养細菌勿能整因半度	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2313) (2313) (2321) (2332) (2342) (2353) (2363) (2373) (2385) (2394) (2406) (2417)
師时前遲迎祖酒醉落多件往和可培非祖因功能並與主要。 與太河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 污水处理厂尾水排放对受纳可流细菌和真菌微生物群落的影响 基里因学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 为別以区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶子壮、玉松燕、陆潇、史多鹏、吕慎强、李嘉、杨泽字、玉林权 长期施用有机肥对土壤微型料赋存及迁移特征的影响 土壤盐分变化对 N_O 排放影响:基于 Meta 分析 基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 基于上地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 基于LuxEST 模型的伏牛山地区生态系统碳储量时分与预测 基于LvEST 模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 长期能秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 修凤環、黄鳞梅、黄倩、中缝凯 长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 修用、黄花、桃菜、紫皙、时振软、朱文博、孙梓成、赵本段、邓文萍、刘志强 防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 全绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和 AMF 多样性的影响 一个资源、紫水梅、罗志章、杨锐、田明洋、赵吉霞、范茂攀 了河流域氯素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 一个资源、紫水悦、肖启涛、谢晖、刘臻靖、邱银调、罗菊花、徐向华、段洪涛 生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤及硝化细菌群落的影响 大蛋山、两体龄人工油松林土壤微生物特征 基于称疏样点的土壤截全属含量模拟方法 不能,添香、香油香、高世臣、赵亚楠、景胜强、周艳兵、部允兵 基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 "你说,对有代、影响	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2321) (2332) (2342) (2342) (2353) (2363) (2373) (2385) (2394) (2406) (2417) (2428)
邮冲制速地细菌样落多样性和可培养细菌功能整固半皮。如果不用、现象化、季香菜、兔菌松、丁、味 與农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系。 一、如果不要。如果和,蒙俊杰,即小琮、周瑞娟、李霖 为水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 家基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 引健双、王燕、周或、汪雅琴、王乘政、李激 大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演。 叶子壮、玉松燕、陆潇、史多鵰、吕慎强、李嘉、杨泽字、王林校 长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 土壤盐分变化对N,0排放影响:基于 Meta分析 基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 基于上地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 基于L地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量时空变化模拟 账排秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力。 "参花"、般生纸、熟活"、胡雪纯、解文艳、刘志平、周怀平、杨振兴 冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和 AMF多样性的影响 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2321) (2332) (2342) (2342) (2353) (2363) (2373) (2385) (2394) (2406) (2417) (2428) (2440)
師中兩種地理相關科格多样性和可培养相關功能整因半皮	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2313) (2313) (2313) (2321) (2332) (2342) (2342) (2353) (2363) (2373) (2385) (2394) (2406) (2417) (2428) (2428) (2440) (2450)
御田朝經地理相關許容多样性和同培养相關初比ᆇ四半後 期在, 王库, 凡木, 州页化, 手茶杰, 池固枚, 门 柴子 與衣河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 方水处理厂 民水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 力期工, 定身, 人水因, 蒙俊杰, 部小琮, 周瑞娟, 李霖 大別山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚聘 基于连续小波变换, SHAP和XCBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈落落, 李欢 精杯还田、覆膜和施窥对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松杰, 陆潇, 史多疇, 吕慣溫, 李嘉, 杨泽字, 王林衣 长期施用有机肥对土壤微型料赋存及迁移特征的影响 土壤盐分变化对 N, 0.排放影响, 基于 Meta 分析 畫子上地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量时空变化模拟 张哲, 时振软, 朱文博, 孙梓成, 赵体侯, 邓文萍, 刘志强 基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量时空变化模拟 张哲, 时影软, 朱文博, 孙梓成, 赵体侯, 邓文萍, 刘志强 基定 新华、 新校, 秋田, 北市, 黄常, 部露, 那德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 基于推动用人覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量时空变化模拟 张楷和建微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 长期枯秆还围褐土有机碳矿化特征及其驱动力 ● 常子, 陈佳纸, 奉智贤, 李永楠, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范震, 范震, 龙岳霞, 范蒙, 北市, 二、李贵, 小紫和, 黄常, 郑银国, 罗菊花, 徐向, 郑寿学, 郑相影 近河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 ● 常社, 陈佳任, 奉智贤, 李永楠, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范震, 范蒙, 李贵, 大岳山, 同市洋, 秋田, 其使, 常寿, 新朝臣, 雷坤, 高强度, 台震, 北梁, 於明, 和县, 李贵, 春, 赤石, 李龙章, 小银, 小古, 高洁, 李贵春, 太岳山, 同龄, 小县、黄田, 小县, 北市, 李志, 李忠, 北市, 赤、黄市, 北市, 北市, 北市, 北市, 北市, 北市, 北市, 北市, 北市, 北	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2313) (2313) (2321) (2332) (2342) (2342) (2353) (2363) (2373) (2385) (2394) (2406) (2417) (2428) (2440) (2450) (2450)
咖啡面喻迎迎和商评各步件任和句后养细菌初距差四半段 "加工,工学,之养、	(2223) (2233) (2246) (2259) (2268) (2280) (2292) (2304) (2313) (2321) (2332) (2342) (2342) (2353) (2363) (2373) (2363) (2373) (2385) (2394) (2406) (2417) (2428) (2440) (2450) (2461) (2473) (2473)

藏东多曲河流域锶富集水化学特征及控制因素

李敬杰,连晟*,王明国*,张智印,张涛

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,保定 071051)

摘要:分析高原河流地表水中锶(Sr)富集的水化学特征及其影响因素,有助于指导水资源的合理开发利用和生态环境保护.以 金沙江多曲河流域地表水为例,采集地表水样品23组,综合利用相关分析、主成分分析、Gibbs模型和离子比等方法,分析 该区地表水中Sr²⁺富集的水化学特征及控制因素,识别主要离子的物质来源.结果表明,多曲河流域地表水阳离子主要以Ca²⁺ 和Mg²⁺为主,阴离子以HCO₃为主.该流域水化学类型以HCO₃-Ca型为主,其次为HCO₃-Ca·Mg型.主成分分析揭示了影响多曲 河水质演化的3个主成分因子,碳酸盐岩风化溶解是控制多曲河水化学组成的主要因素. $\rho(Sr^2+)$ 超过0.40 mg·L⁻¹的富Sr水点占 样品总量的30.43%.区内分布的闪长岩及花岗岩为多曲河流域Sr²⁺富集提供了物质基础.Sr²⁺与Ca²⁺相关性较高,二者存在伴生 和共同富集现象.地表水在发生一定的反向离子交换作用Sr²⁺从围岩中的释出是水体中Sr²⁺富集的来源之一.工矿活动辰砂矿物 的开采是造成附近地表水点SO²⁺升高的主要因素,同时也促进了Sr²⁺在水环境中的富集.受控于岩石风化作用、人类活动及 工矿活动的综合影响,沿程Sr²⁺质量浓度整体上呈现增加趋势.

关键词:多曲河; Sr富集; 水化学特征; 离子来源; 风化溶解; 人类活动

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2067-13 DOI: 10. 13227/j. hjkx. 202305227

Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang

LI Jing-jie, LIAN Sheng*, WANG Ming-guo*, ZHANG Zhi-yin, ZHANG Tao

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, China)

Abstract: The analysis of hydrochemical characteristics and influencing factors of strontium (Sr) enrichment in surface water of plateau rivers is helpful for guiding the rational development and utilization of water resources and ecological environment protection. In this study, surface water in the Duoqu Basin of Jinsha River located in Eastern Tiber was selected as the representative case. Twenty-three groups of surface water samples were collected to analyze the hydrochemical characteristics and control factors of Sr²⁺ enrichment based on correlation analysis, principal component analysis, a Piper trigram, and the Gibbs model. The results showed that the cations in the Duoqu River Basin were mainly Ca²⁺ and Mg²⁺, and the anions were mainly HCO₃⁻. The hydrochemical type of this basin was mainly HCO₃-Ca, followed by HCO₃-Ca⁺Mg. Principal component analysis revealed three principal component factors affecting the evolution of water quality in the Duoqu River, with weathering and dissolution of carbonate rocks being the main factors controlling the chemical composition of the Duoqu River. The water points with Sr²⁺ mass concentration over 0. 40 mg⁺L⁻¹ accounted for 30. 43%. Diorite and granite distributed in this area provided a material basis for Sr²⁺ enrichment in the surface water during certain reverse ion exchanges. Mining of cinnabar minerals was the main factor causing the increase in SO²₄⁻⁻ in nearby surface water points, which also promoted the enrichment of Sr²⁺ in the water environment. Controlled by the comprehensive impact of rock mineral weathering, human activities, and industrial and mining activities, Sr²⁺ mass concentration sing trend along the river.

Key words: Duoqu River; Sr enrichment; hydrochemistry characteristics; ion source; weathering dissolution; human activities

锶(Sr)是人体必须的微量元素之一,其对人体 生理机能具有重要生物学意义^[1].Sr广泛分布在自然 界中,是岩石圈上部含量最大的微量元素^[2],但其 分布非常不均,Sr存在形态及其分布规律受到自然 条件和人类活动等多种因素的影响,导致Sr在分布 上存在富集或贫化现象^[3].

地表水中Sr元素富集的水化学特征受到自然因素(降水、沉积环境、地下水等)和人为因素(人为 污染、矿山开采等)的综合影响,是地表水与环境 长期作用的产物,主要离子组分常被用于地表水中 Sr元素物质来源分析^[4,5].已有研究主要应用Sr同位 素技术探究Sr的地球化学特征,且多数集中在大流 域、大范围和多流域的地表水^[6-11],而对青藏高原 小流域地表水中Sr富集机制及控制因素的研究却鲜 有报道.

多曲河位于西藏东部横断山脉上段,属于金 沙江一级支流.基于上述因素,本文以金沙江多 曲河流域为研究对象,在该流域采集地表水样品 23组,结合相关分析、主成分分析、Gibbs模型和 离子比等方法,识别该流域地表水水化学特征及 离子来源,分析Sr富集机制及控制因素,以期为 多曲河流域地表水资源的科学开发和合理利用提 供支持.

收稿日期: 2023-05-26;修订日期: 2023-06-30

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20230456, DD20230424)

作者简介: 李敬杰(1985~), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为 流域水文地球化学, E-mail: lijingjie@mail. cgs. gov. cn

^{*} 通信作者, E-mail: liansheng@mail. cgs. gov. cn; wangmingguo@ mail. cgs. gov. cn

1 研究区概况

多曲河属于金沙江一级支流,主要流经藏东地 区的江达县东部,流向由北西向南东,最后在波罗 乡汇入金沙江,全长12.65 km.多曲河流域位于横断 山脉上段,在构造单元上属于泛华夏大陆与冈瓦纳 大陆的结合部位.多曲河流域内地形起伏大,地势 整体表现为北高南低,最高海拔为5153 m,最低海 拔 2907 m,相对高差约为 2246 m,平均坡降约 47.2‰.在气候带上,多曲流域处于高原寒温带半湿 润气候区[12].

研究区由南到北主要出露的地层大区属于昌 都-思茅地层区和西金乌兰-金沙江地层区.主要出露 的地层为中元古界、古生界二叠系及泥盆系和中生 界三叠系地层为主.岩石类型主要为辉长岩、玄武 岩、闪长岩、花岗岩、灰岩、白云岩和火山岩等. 流域流经江达县县城、东独乡和同普乡(图1).研究 区以牧业为主,农业为辅.牲畜以绵羊和牦牛为主, 矿产以金矿及辰砂矿为主,分布着少量的铜矿和 铅矿.





2 材料与方法

2.1 样品采集

综合考虑多曲河流域地表水水化学演化情况, 于 2020年7月共采集 23组样品,采样点分布相对均 匀,尽量分布在不同的地质地貌单元,确保样品点 具有一定代表性.采样点分布见图 1.水样采集一般 在水面 10 cm 以下,每处采样点使用 250 mL 聚氯乙 烯采样瓶采集样品 3 瓶,样品全部经 0.45 μm 滤膜过 滤,其中测试阳离子水样加入 5 mL的 1% 硝酸保护 液,使水样 pH < 2,其余 2 瓶不酸化,用于测试阴 离子.

2.2 样品分析方法

所采集水样测试项目为: pH、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、 Mg²⁺、Sr²⁺、CO₃²⁻、HCO₃、CI⁻、SO₄²⁻、NO₃和TDS. 阳离子Ca²⁺、Na²⁺、Mg²⁺和K⁺浓度采用火焰原子吸收 光谱仪(contrAA300,德国耶拿公司)进行测定;阴 离子CO₃²⁻和HCO₃⁻采用滴定分析法进行测定;CI⁻、 SO₄²⁻和NO₃采用离子色谱仪(883,瑞士万通公司)进 行测试分析;Sr²⁺采用电感耦合等离子体质谱仪 (NexION350X)进行测定;pH采用Insitu水质多参数 分析仪进行测定;溶解性总固体(TDS)通过干燥法 进行测定.

3 结果与讨论

3.1 水化学组成特征

表1为研究区23组地表水水样理化性质统计情况.结果表明多曲河流域地表水整体呈弱碱性,阳离子以Ca²⁺和Mg²⁺为主,阴离子以HCO₃为主.该流域地表水水质组分较稳定,TDS的质量浓度[ρ (TDS)]平均值为135.26 mg·L⁻¹,高于世界河流的平均值(115.00 mg·L⁻¹)^[13],水体呈现低矿化度偏碱性的状态,该结果与张涛等在然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素中的研究成果相近^[14]. ρ (Sr²⁺)为0.09~0.72 mg·L⁻¹,平均值为0.32 mg·L⁻¹,与世界河流平均

值(0.078 mg·L⁻¹)相比,多曲河流域具有较高的Sr²⁺质 量浓度,这与流域所分布的岩性和相应的化学风化 强度有关^[15,16].参照饮用天然矿泉水国家标准(GB 8537-1995),地下水中 ρ (Sr²⁺)达到0.2 mg·L⁻¹(在0.2 ~ 0.4 mg·L⁻¹范围时,水温须在25℃以上)即可命名为天 然矿泉水.因研究区地表水水温平均值为15℃,故水 样中 ρ (Sr²⁺)达到0.4 mg·L⁻¹以上即符合富Sr水界限值. 样品中 ρ (Sr²⁺)超过0.20 mg·L⁻¹的水点有15处,占全 部水样的65.22%.其中0.2 mg·L⁻¹ ≤ ρ (Sr²⁺) ≤ 0.4 mg·L⁻¹水点有8处,占全部水样的34.78%,0.4 mg·L⁻¹ ×点有8处,占全部水样的30.43%.

表1 研究区水样理化性质统计1)

			Table	1 Statist	ics of physic	cal and ch	emical pro	operties in	the study a	rea			
项目	$_{\rm pH}$	TDS	Na^+	K^+	${\rm Mg}^{2+}$	Ca ²⁺	Sr^{2+}	Cl	SO_4^2 -	HCO_3^-	NO_3^-	Cl-	CO ₃ ^{2 -}
最小值	7.25	49.22	1.07	0.57	1.75	12.34	0.09	0.36	2.67	43.65	0.02	0.36	5.00
最大值	8.62	205.74	6.60	1.85	21.10	51.30	0.72	1.84	38.19	196.44	1.84	1.84	8.70
中值	8.50	138.64	1.77	0.91	3.82	44.30	0.29	0.68	10.00	130.00	1.08	0.68	5.00
均值	8.18	135.26	2.16	0.98	4.87	41.03	0.32	0.73	11.53	131.01	0.98	0.73	-5.69
标准差	0.45	31.15	1.47	0.32	3.65	9.51	0.19	0.33	6.75	30.33	0.45	0.33	1.21

1)pH无量纲,其余单位为mg·L⁻¹

图 2 为研究区地表水主要阴阳离子占比情况.阳 离子占比呈现 $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+ > St^{2+}$ 的关系, Ca^{2+} 在阳离子组成中优势明显,其当量浓度占阳离 子总量的 49.07%~87.06%,平均值为 79.82%,其次 为 Mg^{2+} ,其当量浓度占阳离子总量的 10.45%~ 43.67%,平均值为 15.10%, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 约占阳离子 总量的 94.92%.地表水阴离子以 HCO_3^- 为主,阴离子 占比呈现 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > CO_3^{2-} > NO_3^- > CI⁻$ 的关系, HCO_3^- 占阴离子总量的 65.12%~86.64%,平均值为 81.61%,其次为 SO_4^{2-} ,占阴离子总量的 2.77%~ 19.30%,平均值为 9.13%,二者约占阴离子总量的 90.74%.

3.2 水化学类型

通常利用主要阴阳离子的毫克当量百分比点投 到 Piper 三线图中,来评价该区水化学演化及水化学 类 型^[17,18]. 以 ρ (Sr²⁺) < 0.2 mg·L⁻¹, 0.2 mg·L⁻¹ \leq ρ (Sr²⁺) < 0.4 mg·L⁻¹, 0.4 mg·L⁻¹ $\leq \rho$ (Sr²⁺) < 1.0 mg·L⁻¹ 为标准将水样进行分组,进行 Piper 三线图的绘制. 从图 3 中可以看出所有水样点分布较为集中.图 3(a) 上大部分水样点落在左下角靠近 Ca²⁺和 Mg²⁺轴分布, 表明该区地表水阳离子以 Ca²⁺为主,其次是 Mg²⁺, 主要来自于岩石的风化溶解;图 3(b)上所有水样点 靠近左下角 CO₃²⁺+HCO₃ 区域,表明阴离子以 HCO₃ 为主,按舒卡列夫分类法,该区地表水水化学类型 以 HCO₃-Ca 型为主,占所有水化学类型的 95.65%,





其次为 HCO₃-Ca·Mg型,占所有水化学类型的 4.35%.

3.3 主要离子控制因素分析

3.3.1 聚类分析与相关性分析

系统聚类分析和相关性分析常用来研究水化学 组分的相关性,有助于揭示各离子之间是否具有相 同来源,同一来源的组分相关性较强,不同来源的 组分相关性较差^[19,20].通过系统聚类和 Pearson 相关 性分析得到研究区内 Sr²⁺与主要水化学组分的系统 聚类树状图和相关性热点图(图4)^[21],其中相关性



Fig. 3 Piper diagram for chemical composition of the surface water in Duoqu River Basin

热点图中圆形大小与相关系数绝对值成正比.系统 聚类树状图中将主要离子分成3组,TDS与Ca²⁺、 Mg²⁺、HCO₃、SO₄²⁻和NO₃为第一组,CI⁻与Na⁺和K⁺ 为第二组,CO₃²⁻与Sr²⁺为第三组.推测同一组的组 分相关性较强,其可能具有相同来源.相关性热 点图表明TDS与Ca²⁺、Mg²⁺和HCO₃极显著正相关, 相关系数分别为0.84、0.67和0.95,与SO₄²⁻显著正 相关,相关系数为0.51,表明水体TDS主要由 Ca²⁺、Mg²⁺和HCO₃贡献;HCO₃与Ca²⁺和Mg²⁺相关 程度较高,相关系数分别为0.77和0.66,推测其 可能有共同的物质来源,主要是来源于方解石和 白云岩等碳酸盐岩的风化溶解;SO₄²⁻与Mg²⁺极显







Fig. 4 Clustering dendrogram and correlation heat map of hydrochemical parameters in the study area

3.3.2 水化学主成分分析 利用主成分分析可以提取出对河水水化学形成

起主导作用的主要离子,并通过因子分析确定出影 响水化学类型形成的主要风化过程^[23,24].为进一步探 讨多曲河河水主要离子组成及控制因素,对研究区 23 组水样的11 项指标进行主成分分析.基于特征值 大于1的筛选要求,识别出影响多曲河水质演化的 3个主成分因子,累计方差贡献率为74.80%,主成 分分析对主要离子提取的因子载荷矩阵见表2;根 据主成分因子得分绘制多曲河流域水样主成分因子 得分载荷图(图5).由表2可知,第一主成分因子F1 具有较高正载荷值的是 HCO₃、SO₄⁻、Mg²⁺和 TDS, 方差贡献率为38.46%,与图5显示的结果一致,推 测主成分因子F1受白云石为主的碳酸盐矿物及硫酸 盐矿物风化的影响; 第二主成分因子 F2具有较高正 载荷值的是CO3-和Ca2+,方差贡献率为24.46%,与 图5表示的结果一致,推测主成分因子F2受碳酸盐 矿物风化溶解的影响.第三主成分因子F3具有较高 正载荷值的是 NO₃、 Cl⁻和 Sr²⁺, 方差贡献率为 11.89%,说明它们环境地球化学行为较为一致,同 源性较高,与图5表示的结果一致,推测主成分因 子F3同时受盐岩风化溶解及人类活动的影响.根据 表2中因子累计方差贡献率可以看出,代表碳酸盐 岩溶解的第一因子 F1 和第二因子 F2 累计方差贡献 率达62.92%,表明碳酸盐岩风化溶解是控制多曲河 河水水化学组成的主要影响因素 岩盐溶解及人类 活动影响次之

根据主成分因子得分绘制多曲河流域水样主成 分因子得分(图6).从图6中可知,金沙江多曲河 95.65%样点主要离子浓度受主成分因子F1、F2和

1)

 Table 2
 Factor loading of the principal component analysis for major ions

<i>全粉</i>	主成分因子				
<i>②</i> 奴	F1	F2	F3		
NO ₃	-0.29	0.44	0.48		
SO ₄ ^{2 -}	0.75	-0.30	-0.43		
CO ₃ ² -	0.07	0.66	0.14		
HCO ₃	0.86	0.36	-0.04		
Cl	0.64	-0.25	0.58		
Na^+	0.46	-0.64	0.24		
K^+	0.57	-0.54	0.32		
Ca ²⁺	0.46	0.83	-0.09		
Mg^{2+}	0.88	-0.22	-0.27		
TDS	0.84	0.50	-0.17		
Sr^{2+}	0.46	0.30	0.52		
因子方差贡献率%	38.46	24.46	11.89		
因子累计方差贡献率%	38.46	62.92	74.80		

F3的影响, 仅字曲河支流上 D12点受除 F1、F2 和 F3以外其他因素的影响.其中, 69.56% 水点主要离 子浓度受 F1 的影响, 21.74% 水点同时受主成分因 子 F1 和 F2 的影响, 进一步说明碳酸盐岩风化溶解 是控制多曲河流域水化学组成的主要因素.且多曲 河上的富 Sr 水点[0.4 mg·L⁻¹ < ρ(Sr²⁺) < 1.0 mg·L⁻¹] D9、D10、D17和D18, 及字曲河支流上的富 Sr 水点 D11受 F1影响程度更大,字曲河支流上的富 Sr 水点 D13和D15主要离子受 F3影响程度更大.





3.3.3 水岩作用分析

Gibbs 图常用来推断自然水中的水文地球化学过

程^[25,26],利用Gibbs 图对研究区内地表水样品进行分析,该图分为3个端元,分别为蒸发-结晶型、岩石



得分划分为4个区域,以图(a)为例,右上角表示河水主要离子浓度同时受主成分因子F1和F2的影响,右下角表示主要离子浓度受F1的影响, 左上角表示主要离子浓度受F2的影响,左下角表示主要离子浓度受除F1和F2以外其他因素的影响

图6 多曲河流域水样主成分因子得分

Fig. 6 Principal component factor scores of water samples in Duoqu River Basin

风化型和大气降水型(图7).大气降水作用控制区分 布在Gibbs图的右下角,具有较低的 ρ (TDS),较高 的 ρ (Na⁺)/ ρ (Na⁺+Ca²⁺)和 ρ (CГ)/ ρ (Cl+HCO₃);岩石 风化作用区位于左中部;蒸发结晶控制区位于图7 的右上角,该区具有较高的 ρ (TDS)和较高的 ρ (Na⁺) / ρ (Na⁺+Ca²⁺)和 ρ (Cl⁻)/ ρ (Cl⁻+HCO₃).将多曲河流域水





Fig. 7 Gibbs diagram of surface water in Duoqu River Basin

不同岩石的风化会产生不同的离子, HCO₃主 要来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化溶解, SO₄⁻和 Cl⁻主要来源于蒸发岩的溶解, Na⁺和K⁺主要来自于 硅酸盐岩和蒸发岩的风化溶解, Ca²⁺和 Mg²⁺主要来源 于碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发岩的风化作用, 通常 用混合图来揭示流域中化学风化作用产生的离子的 来源.由于N(Mg²⁺)/N(Na⁺)、N(Ca²⁺)/N(Na⁺)和N(HCO₃)/N(Na⁺)(毫克当量比值,下同)不受流速、稀释和蒸发作用的影响^[27,28],它们的关系可以用来揭示水化学成因,推测主要离子来源于何种矿物的溶解.从图8可以看出多曲河及字曲河支流上的水样 点落在硅酸盐岩和碳酸盐岩之间且偏向碳酸盐岩控 制端元,且富Sr水点相比较更加靠近碳酸盐岩风化



端元,这表明多曲河流域地表水主要受碳酸盐岩的 风化溶解作用控制,其次是来自硅酸盐岩风化作用 的贡献,这与研究区地层岩性中主要含有以方解石 为主要成分的碳酸盐岩,及以硅酸盐为主要成分的 花岗岩和闪长岩相对应.样品点均远离蒸发盐岩风 化溶解控制端元,说明该区地表水离子组分受蒸发 盐岩风化作用影响较小.





3.3.4 离子比分析主要离子来源 通过水体中离子比分析可以研究区域的浸出效 应,进而推断主要离子来源^[29,30].利用N(Na⁺+K⁺)/ N(Cl⁻)关系可判断水体中Na⁺与K⁺的主要来源,如果 地表水体中Na⁺和K⁺均由盐岩溶解提供,那么盐岩 溶解产生的N(Na⁺+K⁺)/N(Cl⁻)=1,而硅酸盐岩风化 溶解产生的N(Na⁺+K⁺)/N(Cl⁻)>1^[31].图9(a)显示该 区所有水样点位于N(Na⁺+K⁺)/N(Cl⁻)=1等量线的上 方,表明Na⁺和K⁺浓度高于Cl⁻浓度,还应该有其它 阴离子来平衡多出来的Na⁺和K⁺,这说明钠长石和 钾长石等硅酸盐岩的风化溶解是该区地表水中Na⁺ 和K⁺的主要来源.

通常利用N(Mg²⁺)/N(Ca²⁺)与N(HCO₃)关系来 揭示碳酸盐岩矿物中白云石和方解石风化溶解对水 体中主要组分的贡献当N(Mg²⁺)/N(Ca²⁺)=0时,水 体中仅存在方解石溶解,当N(Mg²⁺)/N(Ca²⁺)=1时, 仅存在白云石溶解,当N(Mg²⁺)/N(Ca²⁺)=0.5时,两 者同时参与溶解^[32].在图9(b)中,除多曲河上D22 水样点外,其余全部分布在N(Mg²⁺)/N(Ca²⁺)=0.5比 值线以下,说明方解石是该区碳酸盐岩溶解的主要 矿物.

N(Ca²⁺+Mg²⁺)/N(HCO₃)与N(SO₄²⁻)/N(HCO₃) 常用来分析碳酸、硫酸参与水体碳酸盐岩溶解情 况^[33]. 当 N(SO₄²⁻)/N(HCO₃⁻)=0, N(Ca²⁺+Mg²⁺)/ N(HCO₃⁻)=1时,表明仅有碳酸参与碳酸盐岩溶解; 当N(SO₄²⁻)/N(HCO₃⁻)=1,N(Ca²⁺+Mg²⁺)/N(HCO₃⁻)= 2时,表明仅有硫酸参与碳酸盐岩溶解.图9(c)中除 了字曲河上D12水样点分布在硫酸参与碳酸盐岩溶 解端元外侧,其余全部分布在碳酸和硫酸参与碳酸 盐岩溶解之间,说明碳酸和硫酸共同参与了碳酸盐 岩溶解作用.

N(HCO₃⁺+SO₄²⁻)/N(Ca²⁺+Mg²⁺)常用于研究流域 尺度的水文地球化学过程,可以判断该区水化学是 否受硅酸盐岩、碳酸盐岩及蒸发盐岩(石膏)的溶解 控制^[34].若地表水中Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃和SO₄²⁻全部 来自碳酸盐岩及蒸发盐岩(石膏)矿物风化溶解作 用,则水样点将沿着1:1等量线分布^[35].图9(d)中显 示研究区21.74%水点沿着1:1等量线分布;30.43% 水点分布在N(HCO₃⁺+SO₄²⁻)/N(Ca²⁺+Mg²⁺)的1:1等量 线上方,表现出HCO₃和SO₄²⁻相对盈余;47.83%水 点分布在N(HCO₃⁺+SO₄²⁻)/N(Ca²⁺+Mg²⁺)的1:1等量线 下方,表现出Ca²⁺和Mg²⁺相对盈余,特别是富Sr水 点具有更高的N(HCO₃⁻+SO₄²⁻)/N(Ca²⁺+Mg²⁺)比值.前 文分析已证实,多曲河流域地表水离子组分受蒸发 盐岩风化作用影响较小,因此推测Ca²⁺和Mg²⁺表现 出的相对盈余除受碳酸盐岩矿物风化作用影响外, 还应存在其他因素如硅酸盐岩溶解及阳离子交替吸附作用等所产生的影响^[36].

 Sr^{2+} 为二价碱金属离子离子半径与 Ca^{2+} 相近在矿 物溶解-沉淀水岩作用过程中, Sr^{2+} 取代岩石矿物中 Ca^{2+} 的分配系数较小,水岩反应平衡时,水体中 Sr^{2+} 含量总体趋于升高^[37]. Sr^{2+} 与 Mg^{2+} 具有类似的水化学 行为,基于以上 Sr^{2+} 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的水文地球化学特 性,常用 $N(Sr^{2+}) / N(Ca^{2+}) 和 N(Mg^{2+}) / N(Ca^{2+})$ 比值 关系推测判断水体中 Sr^{2+} 的主要来源^[38].由图9(e) 可知, Sr^{2+} 与 Ca^{2+} 呈正相关关系,且以 $\rho(Sr^{2+}) < 0.2$ $mg·L^{-1}$ 、0.2 $mg·L^{-1} \leq \rho(Sr^{2+}) < 0.4$ $mg·L^{-1}$ 和 0.4 $mg·L^{-1} \leq \rho(Sr^{2+}) < 1.0$ $mg·L^{-1}$ 为标准将水样进行 分组,相关系数分别为0.75、0.69和0.97,说明 Sr^{2+} 与 Ca²⁺具有相似来源,与前文相关性分析结果一致.Sr²⁺的地球化学特点决定了其能经常进入到各种 富钙或钾矿物中,经过流体的淋滤作用,由离子半 径较为接近的 Ca²⁺将 Sr²⁺从围岩中置换出来,当其 富集到相当程度时,形成富 Sr 水^[39].本研究区富 Sr 水点与 Ca²⁺具有更高的相关系数,同时 N(Sr²⁺)/ N(Ca²⁺)总体较高,说明该组水岩作用强烈,水样 中 Sr²⁺相对富集.由图 9(f)可知,该区水样点均分布 在方解石与白云石溶解平衡线以下,碳酸盐岩的不 一致性溶解对水体 Ca²⁺的影响较小由此可导致水体 N(Sr²⁺)/N(Ca²⁺)随着 Ca²⁺浓度的增加而升高^[40].碳 酸盐分布区岩石矿物晶格中的 Sr²⁺得到释放致使水 体中 Sr²⁺增加并富集.





3.3.5 阳离子交替吸附作用分析

阳离子交替吸附作用是在一定条件下,颗粒 将吸附水中某些阳离子,而将其原来吸附的部分 阳离子转化为水中的组分^[41].N(Na⁺-Cl⁻)/N(Ca²⁺+ $Mg^{2+} = SO_4^2 - HCO_3^-$)关系可以反映阳离子交换作用 强度^[42],如果水文地球化学过程主要是以阳离子 交换过程为主,那么这些参数之间的关系应该是 线性的, N(Na⁺-Cl⁻)/N(Ca²⁺+Mg²⁺-SO_4^2 - HCO_3^-) 应该分布在1:1线附近.氯碱指数可以决定地下 水中阳离子交换的方向和强度.其计算方法如式 (1)、(2)所示,当CAI1、CAI2均为正值时,说明 水体中 Na⁺和 K⁺与围岩中 Ca²⁺和 Mg²⁺发生交换作 用,当CAI1和 CAI2同时为负值时,则发生反向 交换,即水体中 Ca²⁺和 Mg²⁺与围岩中 Na⁺和 K⁺发生 交换作用,CAI1和 CAI2绝对值越大,阳离子交 换作用越易发生^[43].与此同时,氯碱指数可以识 别判断地表水 Sr²⁺含量与阳离子交换吸附强度的 关系^[44].

$$CAI1 = N(Cl^{-}-Na^{+}-K^{+}) / N(Cl^{-})$$
(1)

 $CAI2 = N(CI^{-}-Na^{+}-K^{+}) / N(SO_{4}^{2}+HCO_{3}^{+}+CO_{3}^{2}+NO_{3}^{-})$ (2)

离子交换过程.氯碱指数计算结果表明CAI1值介于 -9.97~-0.90,平均值为-3.53,CAI2值介于 -0.0064~-0.063,平均值为-0.018.水体中CAI1和 CAI2均为负值,说明多曲河流域地表水发生了一定 的反向阳离子交替吸附作用,即地表水碳酸盐岩中 溶解的 Mg²⁺和 Ca²⁺与周围岩石中的 Na⁺和 K⁺发生了交 换.图 10(b)显示水中 Sr²⁺浓度愈高,氯碱指数 CAI1 负值越小,即其绝对值愈大,阳离子交换吸附作用 越强,而氯碱指数 CAI2接近 0值,表现不明显.表 明地表水中 Mg²⁺和 Ca²⁺与围岩中 K⁺和 Na⁺发生反向离 子交换作用时 Sr²⁺从围岩中的释出也是水体中 Sr²⁺的 重要来源之一^[45].



如图 10(a) 所示,多曲河流域仅部分水样的

3.3.6 人类活动影响

人类活动能够改变水体形成与运动条件,同时 影响水体化学组成.Cl⁻和NO₃受水岩作用影响小, Cl⁻属于相对稳定的保守离子,NO₃是人为污染的特 征离子.人类活动如施肥、污水及家禽家畜粪便排 放等产生较多Cl⁻和NO₃⁻等,改变水化学组分,形成 较高的N(Cl⁻)/N(Na⁺)和N(NO₃⁻)/N(Na⁺)^[46],因此, 可用它们的比值来研究人类活动对地表水体的影 响.在图11(a)中可以看出,多曲河流域地表水样点 多数位于降水、生活污水和农业活动端元内部,但 N(Cl⁻)/N(Na⁺)和N(NO₃⁻)/N(Na⁺)比值都比较低, 这说明生活污水及农业活动参与了该研究区地表水 化学组分的形成,但水质受其影响较小,主要是自 然状况下的水化学演化.

SO₄⁻通常来源于石膏溶解、硫化物氧化、农业 施肥等,采用N(SO₄⁻)/N(Na⁺)和N(NO₃⁻)/N(Ca²⁺)

离子比值关系可以指示水体 SO₄⁻和 NO₅ 的来源^[47]. 由图 11(b)可知,研究区 N(NO₃⁻) / N(Ca²⁺)离子比值 较低,说明该区域农牧业活动、生活污水对其水质 影响较小.部分水样点表现为N(NO₅)/N(Ca²⁺)低而 $N(SO_4^2)/N(Na^+)$ 高的特点,如多曲河上的D18和 D17,据图1中分布的矿点显示,其南北两侧均有辰 砂矿点分布, 辰砂矿物主要成分是硫化汞(HgS)矿 物,可风化溶解释放 SO₄⁻离子.D18点的 N(SO₄⁻) / N(Na⁺)比值尤其高,分析原因可能是该点不仅仅受 到辰砂矿点的影响,其位于色容寺下游,该寺是西 藏东部著名的寺庙,如游客过多,也可能造成水质 的不正常. 且富 Sr 水点具有更高的 N (SO_4^{2-}) / N(Na⁺), 推测辰砂矿床开发造成的表土剥离, 基岩 裸露,一定程度上增强了岩石风化作用,导致地表 水中SO₄⁻含量的升高,也增加了锶元素在土壤、水 环境中的富集[45].

农业活动





D17



3.3.7 Sr²⁺沿地表水流向路径上的分布特征

为研究多曲河流域 Sr²⁺沿地表水流向上的空间 变化特征,选取2条沿地表水流向的路径,分别为 自西南向东北的字曲河及自北向南的多曲河, 二者 在 D9 与 D10 之间汇聚. 绘制了 Sr²⁺沿流程变化规律曲 线(图 12).结果表明研究区ρ(Sr²⁺)沿地表水流向呈现 先升高后降低的趋势,随着径流途径延长,水-岩相 互作用时间增加, $\rho(Sr^{2+})$ 整体上呈现增加趋势

字曲河流向上, ρ(Sr²⁺)出现了3处高点,分别 为 D11、D13 和 D15, ρ(Sr²⁺)分别为 0.41、0.49 和 0.52 mg·L⁻¹. 与上游的 D12 相比, D11 的ρ(Sr²⁺)增加 了 20.58%(从 0.34 mg·L⁻¹增加到 0.41 mg·L⁻¹),与上 游的 D16 相比, D15 的 $\rho(Sr^{2+})$ 增加了 420% (从 0.10 mg·L⁻¹增加到 0.52 mg·L⁻¹). 结合多曲河流域地层及 采样点分布(图1), D11点位于瓦拉寺寺庙附近, D15点位于江达县城内,D11和D15两个点 $\rho(Sr^{2+})$ 突 然增高,分析原因可能是寺庙及县城人口密级,如 访客过多和人为活动频繁会造成水质不正常, Takano 等^[48]研究也表明人类活动以及施肥等农业活 动所产生的硫、氮和有机化合物可以在水中产生硫 化物、含氮化合物以及有机酸等,这3种物质可以 加速岩床中Sr的提取,从而导致区域河流水中Sr²⁺ 质量浓度的增加.与上游的D14相比,D13的p(Sr²⁺) 增加了145%(从0.20 mg·L⁻¹增加到0.49 mg·L⁻¹),结 合多曲河流域地层及采样点分布图(图1)发现D13 处地层岩性为黑云母花岗岩,在花岗岩中Sr主要以 分散形式以类质同象存在于钙长石矿物中,随着钙 长石、钾长石以及角闪石等矿物的水解作用,部分 Sr以离子态溶于水中^[49~51].





多曲河流向上, $\rho(Sr^{2+})$ 出现了4处高点, 分别 为D9、D10、D17和D18, ρ(Sr²⁺)分别为0.63、0.72、 0.61 和 0.63 mg·L⁻¹,为富 Sr 水点.结合多曲河流域地 层及采样点分布(图1)发现, D9和D10处地层岩性 为闪长岩, D17和D18处分布大面积的英云闪长岩. Sr 是碱土金属元素,在富含 Sr 的闪长岩及花岗岩 中,其含量相对集中^[52,53],为地表水中富含Sr²⁺提供 了物质基础. 天然条件下, 地表水中 Sr²⁺主要来源于 水岩相互作用^[54], D10点位于同普乡内, D18位于 色容寺寺庙下游且附近分布有辰砂矿物, 推测这两 个点除了受到岩石矿物风化作用、水解溶滤作用影 响外[45,55],同时也受到了人类活动以及矿业活动的 影响.

10

V(NO₃⁻)/N(Na⁺

(a)

 $\rho(Sr^{2+}) \le 0.2 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \leq \rho(\text{Sr}^{2+}) < 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \\ 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \leq \rho(\text{Sr}^{2+}) < 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

4 结论

(1)多曲河流域地表水整体呈弱碱性,水中阳 离子以Ca²⁺和Mg²⁺为主,阴离子以HCO₃为主;样品 中质量浓度超过0.40 mg·L⁻¹的富Sr水点占30.43%; 该区地表水水化学类型以HCO₃-Ca型为主,占所有 水化学类型的95.65%,其次为HCO₃-Ca·Mg型,占 所有水化学类型的4.35%.

(2)水体 TDS 主要由 Ca²⁺、Mg²⁺和 HCO₃ 贡献, HCO₃与Ca²⁺、Mg²⁺相关程度较高;主成分分析揭示 了影响多曲河水质演化的 3 个主成分,因子累计方 差贡献率为 74.80%,代表碳酸盐岩溶解的第一因子 F1 和第二因子 F2 累计方差贡献率达 62.92%,碳酸 盐岩风化溶解是控制多曲河水化学组成的主要影响 因素.

(3)水岩作用及离子比分析等综合研究表明, 多曲河流域主要受岩石风化作用的控制,特别是富 Sr水点主要受碳酸盐岩风化溶解作用的控制.富Sr 水点与Ca²⁺具有更高的相关系数,水岩作用愈强烈, 水样中Sr²⁺相对愈富集.多曲河流域地表水发生了一 定的反向阳离子交替吸附作用,在一定的反向阳离 子交换过程中Sr²⁺从围岩的释出是水体中Sr²⁺的来源 之一.

(4)农牧业活动、生活污水等人类活动对该区 水质影响较小,工矿活动辰砂矿物的开发是造成附 近地表水点 SO²,升高的主要因素,同时也增加了 Sr²⁺在水环境中的富集.该区分布的闪长岩及花岗岩 为地表水中 Sr²⁺富集提供了物质基础.受控于岩石矿 物风化作用、人类活动及工矿活动的综合影响,沿 程 Sr²⁺含量整体上呈现增加趋势.

参考文献:

- 苏春田,黄晨晖,邹胜章,等.新田县地下水锶富集环境及来源分析[J].中国岩溶,2017,36(5):678-683.
 Su C T, Huang C H, Zou S Z, *et al.* Enrichment environment and sources of strontium of groundwater in Xintian county, Hunan Province[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(5): 678-683.
- [2] 黄奇波,康志强,覃小群,等. 习水县岩溶水系统ρ(Sr²⁺)、 ρ(Sr)/ρ(Ca)、ρ(Sr)/ρ(Mg)分布特征及其应用[J]. 地质科技情报, 2011, 30(4): 98-103.
 Huang Q B, Kang Z Q, Qin X Q, et al. Distribution characteristics of Sr²⁺, Sr/Mg, Sr/Ca and its applications in karst water system of Xishui County[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(4): 98-103.
- [3] 陆石基,周宏,刘伟,等.秭归岩溶流域锶的分布特征与富集规律[J].中国地质,2021,48(6):1865-1874.
 Lu S J, Zhou H, Liu W, et al. Distribution and enrichment of strontium in the Zigui karst watershed[J]. Geology in China, 2021,48(6):1865-1874.
- [4] 张涛,何锦,李敬杰,等.蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素[J].环境科学,2018,39(11):4981-4990.
 Zhang T, He J, Li J J, et al. Major ionic features and possible

controls in the groundwater in the Hamatong River Basin [J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4981-4990.

- [5] 郑涛, 焦团理, 胡波, 等. 涡河流域中部地区地下水化学特征 及其成因分析[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 766-775.
 Zheng T, Jiao T L, Hu B, *et al.* Hydrochemical characteristics and origin of groundwater in the Central Guohe River basin [J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 766-775.
- [6] Li Y P, Jiang S Y. Sr isotopic compositions of the interstitial water and carbonate from two basins in the Gulf of Mexico: Implications for fluid flow and origin[J]. Chemical Geology, 2016, 439: 43-51.
- Singh S K, Kumar A, France-Lanord C. Sr and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr in waters and sediments of the Brahmaputra River system: silicate weathering, CO₂ consumption and Sr flux [J]. Chemical Geology, 2006, 234(3-4): 308-320.
- [8] Dalai T K, Krishnaswami S, Kumar A. Sr and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr in the Yamuna River System in the Himalaya: sources, fluxes, and controls on Sr isotope composition [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(16): 2931-2948.
- [9] 李建森,凌智永,山发寿,等.东昆仑山南、北两侧富锂盐湖成因的氢、氧和锶同位素指示[J].湿地科学,2019,17(4): 391-398.
 Li J S, Ling Z Y, Shan F S, et al. Hydrogen, oxygen and strontium isotopes' indication on origin of lithium-rich Salt Lakes in Eastern Kunlun Mountains[J]. Wetland Science, 2019, 17(4): 391-398.
- [10] 王中良,刘丛强.长江河口区水体的锶同位素地球化学一对水与沉积物相互作用过程的反映[J].地球与环境,2004,32 (2):26-30.
 Wang Z L, Lhu C Q. Strontium isotope geochemistry of Changjiang (Yangtze River) estuarine waters: implications for water-sediment interaction[J]. Earth and Environment, 2004, 32(2):26-30.
 [11] 王兵,李心清,周会、等,黄河、淮河及长江流域地表水环境
- 中锶的地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26 (S1): 578-579.
- [12] 贾利蓉.藏东地区藏曲流域复杂古堆积体稳定性研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2017.
 Jia L R. Study on the stability of complex ancient deposits in the Zangqu River Basin, East Tibet [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 王兵,李心清,袁洪林,等.中国中东部地区地表水环境锶元 素地球化学特征研究[J].地球与环境,2009,37(1):42-49.
 Wang B, Li X Q, Yuan H L, *et al.* Study on Sr geochemistry of surface waters in Mid-Eastern China[J]. Earth and Environment, 2009,37(1):42-49.
- [16] Palmer M R, Edmond J M. The strontium isotope budget of the modern ocean [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1989, 92 (1): 11-26.
- [17] Li C Z, Li B H, Bi E P. Characteristics of hydrochemistry and nitrogen behavior under long-term managed aquifer recharge with reclaimed water: a case study in north China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 1030-1037.

- [18] Qi H H, Ma C M, He Z K, et al. Lithium and its isotopes as tracers of groundwater salinization: a study in the southern coastal plain of Laizhou Bay, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 878-890.
- [19] 王剑,罗朝晖,陈植华,等. 滇东北毛坪铅锌矿区水化学特征 及成因[J]. 环境化学, 2018, 37(6): 1421-1431.
 Wang J, Luo Z H, CHEN Z H, *et al.* Characteristics and controlling factors of water chemistry in Maoping lead-zinc mine area, Northeastern Yunnan, China[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(6): 1421-1431.
- [20] 杨雪,胡俊良,刘劲松,等.湖南香花岭矿区地下水的水文地 球化学特征及形成机制[J].环境科学学报,2018,38(7): 2575-2585.
 Yang X, Hu J L, Liu J S, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Xianghualing Mining

area, Hunan Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(7): 2575-2585.
[21] 孙厚云, 王晨昇, 卫晓锋, 等. 大兴安岭南段巴音高勒流域水

- [21] 新序公, 1.展开, 1.照开, 1.照开, 4. 八只女呵丽汉口首间朝加或水 化学特征及驱动因子[J]. 环境化学, 2020, 39(9): 2507-2519. Sun H Y, Wang C S, Wei X F, et al. Hydrochemical characteristics and driving factors in the water of the Bayingaole Basin, Southern Great Xing'an Range [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(9): 2507-2519.
- [22] 刘庆宣,王贵玲,张发旺.矿泉水中微量元素锶富集的地球化 学环境[J].水文地质工程地质,2004,31(6):19-23.
 Liu Q X, Wang G L, Zhang F W. Geochemical environment of trace element strontium (Sr) enriched in mineral waters [J].
 Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(6):19-23.
- [23] Ewaid S H, Abed S A, Al-Ansari N, et al. Development and evaluation of a water quality index for the Iraqi Rivers [J].
 Hydrology, 2020, 7(3), doi: 10.3390/hydrology7030067.
- [24] Mgbenu C N, Egbueri J C. The hydrogeochemical signatures, quality indices and health risk assessment of water resources in Umunya district, southeast Nigeria [J]. Applied Water Science, 2019, 9(1): 22.
- [25] Jasrotia A S, Taloor A K, Andotra U, et al. Monitoring and assessment of groundwater quality and its suitability for domestic and agricultural use in the Cenozoic rocks of Jammu Himalaya, India: a geospatial technology based approach[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2019, 8: 554-566.
- [26] 刘元晴,周乐,吕琳,等.河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析[J].环境科学,2023,44(5):2601-2612.
 Liu Y Q, Zhou L, Lü L, *et al.* Hydrochemical characteristics and control factors of groundwater in Shunping County, Hebei Province
 [J]. Environmental Science, 2023,44(5): 2601-2612.
- [27] Jiang L G, Yao Z J, Liu Z F, et al. Hydrochemistry and its controlling factors of rivers in the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 155: 76-83.
- [28] Thomas J, Joseph S, Thrivikramji K P. Hydrochemical variations of a tropical mountain river system in a rain shadow region of the southern Western Ghats, Kerala, India [J]. Applied Geochemistry, 2015, 63: 456-471.
- [29] 何锦,张幼宽,赵雨晴,等.鲜水河断裂带虾拉沱盆地断面地 下水化学特征及控制因素[J].环境科学,2019,40(3):1236-1244.

He J, Zhang Y K, Zhao Y Q, *et al.* Hydrochemical characteristics and possible controls of groundwater in the Xialatuo basin section of the Xianshui River [J]. Environmental Science, 2019, **40** (3) : 1236-1244.

- [30] Mukherjee A, Fryar A E. Deeper groundwater chemistry and geochemical modeling of the arsenic affected western Bengal basin, west Bengal, India [J]. Applied Geochemistry, 2008, 23 (4) : 863-894.
- [31] Fu C C, Li X Q, Ma J F, et al. A hydrochemistry and multiisotopic study of groundwater origin and hydrochemical evolution in the middle reaches of the Kuye River basin [J]. Applied Geochemistry, 2018, 98: 82-93.
- [32] Pu J B, Yuan D X, Xiao Q, et al. Hydrogeochemical characteristics in karst subterranean streams: a case history from Chongqing, China[J]. Carbonates and Evaporites, 2015, 30(3): 307-319.
- [33] 王攀, 靳孟贵, 路东臣. 河南省永城市浅层地下水化学特征及 形成机制[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 2232-2244.
 Wang P, Jin M G, Lu D C. Hydrogeochemistry characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Yongcheng City, Henan Province[J]. Earth Science, 2020, 45(6): 2232-2244.
- [34] Maurya P, Kumari R, Mukherjee S. Hydrochemistry in integration with stable isotopes (δ¹⁸O and δD) to assess seawater intrusion in coastal aquifers of Kachchh district, Gujarat, India[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, **196**: 42-56.
- [35] Ma R, Wang Y X, Sun Z Y, et al. Geochemical evolution of groundwater in carbonate aquifers in Taiyuan, northern China [J].
 Applied Geochemistry, 2011, 26(5): 884-897.
- [36] 刘元晴,周乐,吕琳,等,牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素[J].环境科学,2023,44(3):1429-1439.
 Liu Y Q, Zhou L, Lü L, *et al.* Hydrochemical characteristics and control factors of pore-water in the middle and upper reaches of Muwen River[J]. Environmental Science, 2023, 44(3): 1429-1439.
- [37] Katz B G, Bullen T D. The combined use of ⁸⁷Sv/⁸⁶Sr and carbon and water isotopes to study the hydrochemical interaction between groundwater and lakewater in mantled karst [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(24): 5075-5087.
- [38] 王增银,刘娟,崔银祥,等.延河泉岩溶水系统Sr/Ca、Sr/Mg分布特征及其应用[J].水文地质工程地质,2003,30(2):15-19.
 Wang Z Y, Liu J, Cui Y X, et al. Distribution characteristics of Sr/Mg、Sr/Ca and applications in Yanhe spring karst water system[J].
 Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, 30(2):15-19.
- [39] 廖先远,胡雨柔.青海曲海天然饮用富锶型矿泉水形成机制 分析[J].四川地质学报,2017,37(4):592-595.
 Liao X Y, Hu Y R. Genetic mechanism for the Sr-rich mineral water in Quhai, Qinghai [J]. Acta Geologica Sichuan, 2017, 37 (4):592-595.
- [40] 刘丛强.生物地球化学过程与地表物质循环:西南喀斯特流 域侵蚀与生源要素循环[M].北京:科学出版社,2007.
- [41] 王晓曦,王文科,王周锋,等.滦河下游河水及沿岸地下水水 化学特征及其形成作用[J].水文地质工程地质,2014,41
 (1):25-33,73.

Wang X X, Wang W K, Wang Z F, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of river water and groundwater along the downstream Luanhe River, northeastern China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 25-33, 73.

- [42] 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.
- [43] Peng C, Liu Y M, Chen H Y, et al. Analysis of hydrogeochemical characteristics of tunnel groundwater based on multivariate

statistical technology[J]. Geofluids, 2021, 2021: 4867942.

- [44] Schoeller H. Qualitative evaluation of ground water resources [A]. In: Schoeller H (Ed.). Methods and Techniques of Groundwater Investigation and Development[M]. Paris: UNESCO, 1967. 44-52.
- [45] 孙厚云,卫晓锋,甘凤伟,等.滦河流域中上游富锶地下水成 因类型与形成机制[J].地球学报,2020,41(1):65-79.
 Sun H Y, Wei X F, Gan F W, *et al.* Genetic type and formation mechanism of strontium-rich groundwater in the upper and middle reaches of Luanhe River Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020,41(1):65-79.
- [46] Li C C, Gao X B, Liu Y S, et al. Impact of anthropogenic activities on the enrichment of fluoride and salinity in groundwater in the Yuncheng Basin constrained by Cl/Br ratio, δ¹⁸O, δ²H, δ¹³C and δ⁷Li isotopes[J]. Journal of Hydrology, 2019, **579**, doi: 10.1016/ j.jhydrol.2019.124211.
- [47] 蒲俊兵,袁道先,蒋勇军,等.重庆岩溶地下河水文地球化学特征及环境意义[J].水科学进展,2010,21(5):628-636.
 Pu J B, Yuan D X, Jiang Y J, et al. Hydrochemistry and environmental meaning of Chongqing subterranean karst streams in China[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(5): 628-636.
- [48] Nakano T, Tayasu I, Wada E, et al. Sulfur and strontium isotope geochemistry of tributary rivers of Lake Biwa: implications for human impact on the decadal change of lake water quality [J]. Science of the Total Environment, 2005, 345(1-3): 1-12.
- [49] 杨艳林,邵长生,靖晶,等.长江中游城市群矿泉水资源勘查 与发现一以咸宁市汀泗桥幅1:50000水文地质调查数据集为 例[J].中国地质,2019,46(S2):74-94,
 - Yang Y L, Shao C S, Jing J, et al. Exploration of mineral water resources in city clusters along the middle reaches of the Yangtze and discoveries-A case study of the dataset of the hydrogeological survey in the 1: 50000 Tingsiqiao Map-sheet, Xianning City [J]. Geology in China, 2019, 46(S2): 74-94.
- [50] 李状, 苏晶文, 董长春, 等. 安徽马鞍山市当涂地区地下水水 化学特征及演化机制[J]. 中国地质, 2022, **49**(5): 1509-1526.

Li Z, Su J W, Dong C C, *et al.* Hydrochemistry characteristics and evolution mechanisms of the groundwater in Dangtu area, Ma'anshan City, Anhui Province[J]. Geology in China, 2022, **49** (5): 1509-1526.

[51] 孙岐发,孙茁桉,贾林刚,等.吉林省长春莲花山地区地下水 中锶及偏硅酸的形成机理研究[J].中国地质,2023,50(1): 181-190.

Sun Q F, Sun Z A, Jia L G, et al. Formation mechanism of strontium and metasilicic acid groundwater in the Lianhuashan area, Changchun, Jilin Province[J]. Geology in China, 2023, 50 (1): 181-191.

- [52] 金阳,姜月华,董贤哲,等.浙江宁波平原地下水水化学特征 及其生态环境效应[J].中国地质,2022,49(5):1527-1542.
 Jin Y, Jiang Y H, Dong X Z, et al. Chemical characteristics and eco-environmental effect of groundwater in Ningbo Plain, Zhejiang Province[J]. Geology in China, 2022,49(5):1527-1542.
- [53] 孙岐发,杨柯,孙茁桉,等.长春新区地下水水质特征及其对 生态健康的评价[J].中国地质,2022,49(3):834-848. Sun Q F, Yang K, Sun Z A, et al. Characteristics of groundwater quality in Changchun New Area and its evaluation on ecological health[J]. Geology in China, 2022, 49(3):834-848.
- [54] 苏春田,张发旺,夏日元,等.湖南新田发现大型富锶矿泉水及机理研究[J].中国地质,2017,44(5):1029-1030.
 Su C T, Zhang F W, Xia R Y, et al. A study of the water-rock interaction of large rich Sr mineral spring in Xintian, Hunan Province[J]. Geology in China, 2017, 44(5): 1029-1030.
- [55] 范伟,杨悦锁, 治雪艳,等.青肯泡地区地下水中锶富集的水 文地球化学环境特征及成因分析[J].吉林大学学报(地球科 学版), 2010, 40(2): 349-355, 367.
 Fan W, Yang Y S, Ye X Y, et al. Hydrogeochemical and environmental characteristics of strontium enrichment in groundwater and its genesis in Qingken Lake Area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(2): 349-355, 367.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	······YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, et al.	(1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	······ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie	(1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	·····ZHANG Jiang-yan	(1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, et al.	(1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	······CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu	(1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, et al.	(1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping	(1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao	(1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Hen	ian from 2017 to 2021	(1050)
An line of the Channel of the and Channel O Belline in View Davies the Friday in Laboratory David and	CHEN Wei, XU Xue-zne, LIU Wen-qing	(1930)
Analysis of the Characteristics and Causes of I m _{2.5} and 0 ₃ foliution in Ar an During the Epidemic Lockdown Ferior		(1903)
I m _{2.5} chemical composition and Spatial variability in the Five clues of southern grangsu During Fair and white	TENG WEI, DING FENG, SHANG TUE, et al.	(1973)
Source Apportumment of Fine Farteries in Ataning, Huber Spillover Banafits of Ammonia Emission Reduction in Vinetai Area to the Improvement of Atmospheric PM – Concentration in the Beijin.	g-Tianiin-Hebei Region	(1905)
opinoter belefits of Anniolita Emission reduction in Aringan Area to the improvement of Atmospherice Par _{2.5} concentration in the beijing	BIAN Ze-iun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, et al.	(1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM. , During Winter in Liaocheng City		(2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, et al.	(2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing : Environmental Impact of High and N	ew Technology Industries	(=)
	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-van, et al.	(2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, et al.	(2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, et al.	(2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River ·····	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, et al.	(2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, et al.	(2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	"ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, et al.	(2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen	Isotopes ······MENG Ling-hua	(2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Bas	sin	
	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, et al.	(2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta BasinWANG	Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, et al.	(2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, et al.	(2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	······XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin	(2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, et al.	(2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performa	ince for Endogenous Phosphorus	
יייייין אין אין אין אין אין אין אין אין	···QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, et al.	(2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultratine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, et al.	(21/1)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	····SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KUNG Qiang, et al.	(2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in water and its Mechanism	LIAN Jian-Jun, AIE Shi-ting, WU Pei, et al.	(2193)
mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Upronoxacin by Nano-Diochar		(2203)
Response of Fnytopiankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Watland of Poyang Lake		(2211)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	"LIU Shuang-yu, MENG Jun-ije, OIU Xiao-cong, et al.	(2223)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Nicrobial Communities in Beceiving Rivers		(2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, et al.	(2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain AreaZF	HENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, et al.	(2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, et al.	(2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	······YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, et al.	(2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	"WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, et al.	(2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission : A Meta-analysis	······HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, et al.	(2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Ba	ıy Area ······ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng	(2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, et al.	(2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	····XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, et al.	(2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	·····ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, et al.	(2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, et al.	(2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, et al.	(2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	······ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, et al.	(2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	····LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, et al.	(2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabuliformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, et al.	(2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	·····ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAU Shi-chen, et al.	(2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Kisk	Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzh	10U
Houry Motel Accounted Accounter of Determined Production Production Production Content of Determined Accounter of Determined Production Content of Determined Product	Li Jun, Li Au, Li Kai-ming, et al.	(2428)
neavy metal Accumulation and Assessment of Folential Ecological NISK Gaused by 5011 pH Changes in Different Types of Purple Solls in	Journwest Unina	(2110)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Aroha Land Around an Iron Oro Mining Aroa in Changeing	LIANG Harmin, LIANG TU, WANG Ding, et al.	(2440)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crons Around Metal Mines		(2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-vu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-vu et al	(2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, et al.	(2480)