

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素

李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志*

(西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要:以无定河流域为研究区,分析地下水和地表水水化学特征,讨论溶质来源及其控制因素,为水质管理提供参考依据。考虑季节效应,在枯水期和汛期分别进行水样采集,综合运用图解法、相关性分析和正向推演模型分析水化学时空演化特征,探讨水化学形成机制并定量不同来源对溶质的贡献率。结果表明,无定河流域水体整体呈弱碱性,主要的阴、阳离子分别为 HCO_3^- 和 Na^+ ,水化学类型多数地区呈现 $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型。水质自西向东沿河道逐渐变差,超Ⅲ类水集中分布在枯水期支流和汛期下游。阳离子交换作用导致水中 Na^+ 和 K^+ 浓度增多,不同时期水体的 NO_3^- 和 HCO_3^- 浓度差异性显著,可能受季节降水淋溶土壤与土地利用类型的影响。蒸发岩风化和硅酸盐岩风化对无定河流域水体溶质贡献较大,枯水期分别为 35.0% 和 46.5%,汛期分别为 46.7% 和 42.3%。

关键词:无定河;水化学;时空差异;离子来源;控制因素

中图分类号: X143; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0220-10 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202103039

Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin

Li Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, LI Zhi*

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Taking Wuding River as the research object, the study explored the hydrochemical characteristics and discussed the source of solute and control factors of groundwater and surface water in the basin, in order to provide a reference for water quality management. Considering the seasonal differences, water samples were collected during the dry season and the flood season. By comprehensively using graphic methods, correlation analysis, and forward deduction models, we analyzed the temporal and spatial evolution characteristics of water chemistry, explored the formation mechanism of water chemistry, and quantified the contribution rates of different sources to solutes. The results showed that the overall water quality was weakly alkaline in Wuding River basin. HCO_3^- and Na^+ were the main anions and cations in the water, respectively, and the main water chemistry type was $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Ca}$. The water quality gradually deteriorated along the river course from west to east, and the sampling points that exceeded the level III water were mainly distributed in tributaries during the dry season and downstream during the flood season. The cation exchange effect increased the Na^+ and K^+ in the water, and NO_3^- and HCO_3^- differed significantly in different seasons, which may be affected by seasonal precipitation leaching soil and land use types. Evaporite weathering and silicate weathering were the main sources of solute contribution in the Wuding River basin, which were 35.0% and 46.5% in the dry season and 46.7% and 42.3% in the flood season, respectively.

Key words: Wuding River; water chemistry; spatiotemporal variation; ion source; control factors

水资源不仅是维持生命的必要因素,更是维系人类社会正常发展的重要资源^[1]。受自然和人为因素影响,自然水的循环模式和溶质来源也趋于复杂化^[2]。近年来,频繁的人为活动(例如人口增长、水资源过度开发和农业集约化扩张等)引起水量减少和水质恶化,对水环境造成诸多负效益,这些问题在干旱和半干旱地区则显得更为严重^[3,4]。例如在陕北的无定河流域,水资源短缺状态等问题制约着经济发展与生产生活等^[5]。加之人为污染和水资源管理不善导致水质逐步下降,使原本稀缺的水源变得更少,从而加剧了旱区缺水状况^[6]。因此,要想综合治理流域水质和有效指导水资源分配,研究水化学特征及其控制因素则必不可少。

自然条件下的水质状况可通过河流水化学特征反映出来,溶质受岩石风化、地质地貌和大气沉降等诸多因素影响^[7]。Piper图^[8]、Gibbs图^[9]和Na端元图^[10]等传统水化学研究方法的出现,为溶质来

源的定性分析提供了便利^[11~13];李洲等^[14]运用正向推演模型,定量计算出蒸发盐、硅酸盐和碳酸盐等岩石风化作用对黄土塬区地下水溶质的贡献比重;马艳华等^[15]利用 $\delta^{34}\text{S}$ 同位素示踪技术,对岩溶地下水中硫酸盐进行溯源分析,发现主要来源除了矿石溶解等自然因素外,还存在工业废水入渗等人为因素。人类活动对于流域地表水和地下水的溶质贡献是不容忽视的,以渭河流域为例,人类活动贡献率可达3%~10%^[16]。此外,流域水化学特征还存在着较大的季节差异,这与枯汛期降水量不同等原因有关。Li等^[17]的研究认为,汛期暴雨加剧了渭河流域的水土流失,使径流和泥沙携带大量溶质进入河流,导致河水硝酸盐升高。何姜毅等^[18]通过比较

收稿日期: 2021-03-04; 修订日期: 2021-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071043)

作者简介: 李书鉴(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为旱区水环境演变, E-mail: lishujian817@163.com

* 通信作者, E-mail: lizhibox@126.com

黄河流域多个时期的溶解性离子浓度,发现丰水期的河水溶解性离子浓度普遍低于其他时期,推测相对清洁的雨水对地表径流起到了一定的稀释作用.可见,季节影响在不同流域产生的效应存在差异.

黄土高原为中国干旱-半干旱过渡区,其各个河流的水文过程备受关注^[19].已有学者对渭河^[17]、泾河^[20]、窟野河^[21]和汾河^[22]等流域的水化学特征展开了大量的研究.无定河位于黄土高原中部,长期处在严重的水土流失^[23]和水资源分布不均等窘境^[24],对综合水质管理有着迫切的需求.但目前对无定河流域水化学控制机制的研究尚少,季节变化对溶质的影响机制也尚未明晰.因此,本研究采集无定河流域枯、汛期水样,对流域水化学特征及时空差异性进行分析,对水化学控制因素及溶质来源展开讨论,旨在为无定河流域的综合治理和旱区水资源统筹利用提供合理的依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

无定河位于陕西北部,属于黄河一级支流,为半干旱大陆季风性气候,流域大多位于内陆地区,水流

自西北向东南汇入黄河[图 1(a)].发源于榆林—延安交界处的白于山^[25].河流干流全长 491.2 km,平均比降 1.79‰,流域面积约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[26].支流多且分散,整体呈现树状.根据地貌形态景观,流域可分为西北风沙区和东南黄土区(覆盖 50 ~ 100 m 黄土)^[27],是陕西输出粗砂最多河流.风沙区支流稀少且短小,黄土区支流多且长.降水集中在汛期且多为暴雨,年均降水量为 409.1 mm^[28].土地利用类型以农地(28.6%)、林地(5.6%)、草地(44.0%)、水域(0.8%)、居民区(0.5%)和荒地(20.6%)为主.未利用土地占比大,水域面积小,且城市农田沿河修建,提高了潜在污染风险[图 1(b)].

1.2 样品采集与分析

考虑季节效应,于 2013 年 4 月采集枯水期水样 30 个(地表水 19 个,地下水 11 个),2019 年 8 月采集汛期水样 35 个(地表水 23 个,地下水 12 个),探究水化学的时间差异.虽然两次取样的年份间隔 6 a,但仍可很好代表枯水期和汛期两个季节,因为年内季节变化对溶质的影响远大于年际变化的影响.例如,黄河流域在 1958 ~ 1984 年间主要离子的年际变化系数小于 0.23,但年内变化系数在 0.64 左右^[29].

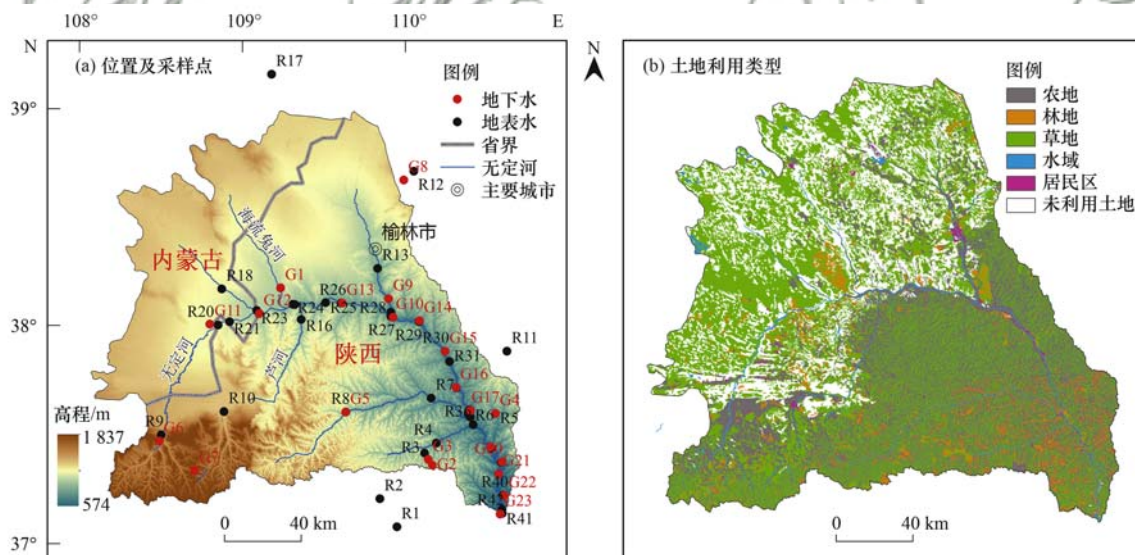


图 1 无定河流域位置、采样点和土地利用类型

Fig. 1 Location, sampling point, and land use type of Wuding River basin

水样采集瓶使用的是 150 mL 的 PE 瓶,采集前保证清洁干燥,采集时先用水样对取样瓶进行多次润洗,以减小误差.采取地表水时,尽量选择有明显水流处的位置,回避水库及明显的人为污染点.地下水一般采河流附近的井水或泉水,抽取半小时后进行采样,以保证所采集水样为新鲜地下水.现场测定记录样点经纬度位置和高程,采用便携式多参数仪(SG78-FK-CN)测定水样 pH 值、温度(T)和溶解性总固体(TDS),仪器精度分别为 0.1、0.1℃ 和 1

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.采样后用封口膜封紧瓶盖,防止空气进入.通过快递将当天采集的样品送回实验室,运输过程中储存在 0 ~ 4℃ 恒温箱中,并在样品收集的当天或后一天测定主离子浓度.所有水样经 0.45 μm 尼龙过滤器(Whatman)原位过滤后,用美国 ThermoFisher Scientific 生产的全谱等离子体生成谱仪(ICAP-6300)测定 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 和 K^{+} 等阳离子,检测下限为 1 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;采用美国 Thermo Fisher Scientific 生产的离子色谱仪(ICS-1100)测定 SO_4^{2-} 、 Cl^{-} 和 NO_3^{-} 等阴离

子,检测下限为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;采用盐酸滴定法测定 HCO_3^- ,阴、阳离子的测定误差低于 0.1% [30].

1.3 数据分析方法

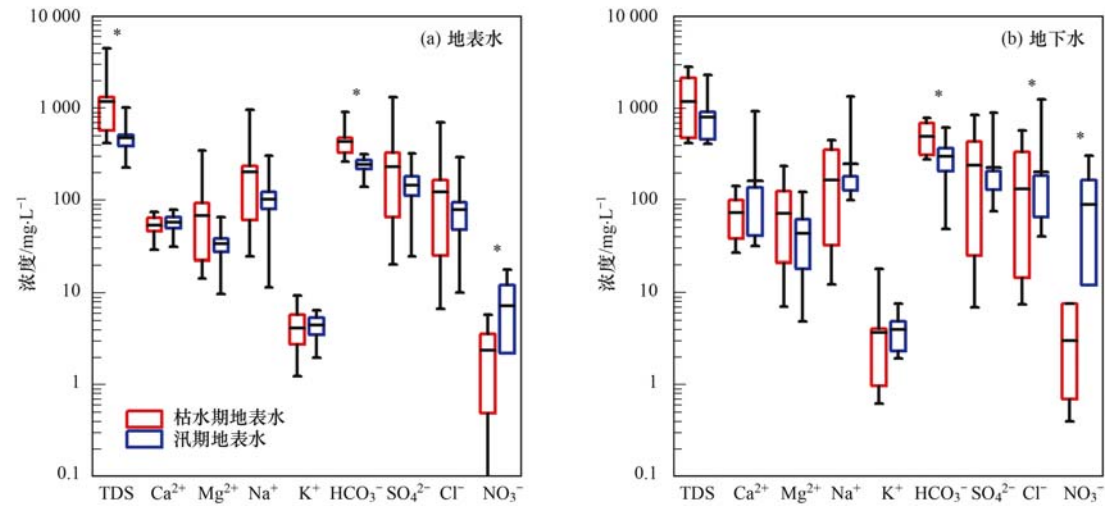
基于文献[31,32],结合 ArcGIS 技术,对流域内水质进行评价并分析其的空间变化;使用 Piper 图确定流域内水化学类型,以 Gibbs 图、端元图和相关性分析等方法定性描述水化学特征及演变机制,基于正向推演模型[33,34]定量计算各个因素对离子来源的贡献率.

2 结果与分析

2.1 主要离子特征

无定河流域地表水和地下水的 pH 平均值均在 8 以上(表 1),整体呈弱碱性.图 2 显示不同时期各

离子浓度的变化范围.在枯水期,地表水 $\rho(\text{TDS})$ 介于 $424\sim 4\,503\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $1\,186\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高于渭河[17]、泾河[20]和汾河[35]等其他黄河支流,与同为旱区的喀什噶尔河[36]、Tigris[37]和 Euphrates[37]等河流的 TDS 值相近,且 Na^+ 都占据较高的比重.枯水期地下水 $\rho(\text{TDS})$ 为 $419\sim 2\,826\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $1\,200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远高于汛期地下水 $\rho(\text{TDS})$ 的平均值 $802\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.汛期地表水 $\rho(\text{TDS})$ 为 $230\sim 1\,020\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均 $479\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在 4 组样品中最低,但依旧高于 Nile River[38]和世界其他河流的平均水平[10].除枯水期地表水外,其他各个时期地下水、地表水阴阳离子浓度均值大小呈: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ 和 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$.枯水期地表水的 Mg^{2+} 高于 Na^+ .



* 表示 $P < 0.05$,枯、汛期差异显著

图 2 不同季节下地表水、地下水浓度变化箱形图

Fig. 2 Box plots showing variations in surface water and groundwater in different seasons

表 1 无定河流域地表水、地下水水化学参数统计

Table 1 Statistics of hydrochemical parameters of surface water and groundwater in Wuding River basin

地点	pH	$\rho(\text{TDS})$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{HCO}_3^-)$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{NO}_3^-)$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{Cl}^-)$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{K}^+)$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{Ca}^{2+})$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{Na}^+)$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	文献
2013 年地表水	8.8	1 186	440.0	233.0	2.4	123.8	4.1	53.3	205.1	68.9	本研究
2013 年地下水	8.2	1 200	501.3	239.0	3.0	132.0	3.7	73.8	166.3	71.7	本研究
2019 年地表水	8.4	479	232.3	146.2	7.5	78.6	4.4	57.7	101.9	33.8	本研究
2019 年地下水	8.1	802	297.4	229.8	91.0	205.5	4.0	164.7	248.2	43.9	本研究
渭河	8.1	666.4	— ¹⁾	—	—	—	—	—	—	—	[17]
泾河	8.6	317.4	321.8	104.9	4.0	19.0	2.7	47.4	62.5	28.6	[20]
汾河	—	588.0	477.9	213.7	14.4	69.8	8.3	160.3	59.7	42.8	[35]
喀什噶尔河	8.0	923.5	195.4	406.6	—	130.1	—	87.6	120.5	64.6	[36]
其他旱区河流	8.2	278.1	—	30.1	—	36.4	5.7	40.0	39.1	16.6	[38]
Nile River	7.7	1 015.5	—	264.6	4.7	233.5	4.4	114.0	154.7	40.2	[37]
Tigris River	7.6	1 373.9	—	408.9	3.7	120.4	8.4	140.7	234.1	62.9	[37]
Euphrates River	—	65	30.5	4.9	1	3.9	0.1	8	4.7	2.4	[10]
世界平均水平	—	65	30.5	4.9	1	3.9	0.1	8	4.7	2.4	[10]

1) “—”表示文章中没有相关数据

2.2 水化学相

如 Piper 三线图所示(图 3),阳离子三角图中,多数样点远离 Mg^{2+} 端而集中于 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 端,且

主离子为 Na^+ .虽然 Ca^{2+} 占比大于 50% 的样点仅 10 个,仅占样点数的 15.4%,但有以 Ca^{2+} 为主导阳离子的样品存在,例如 G8 和 G22.阴离子三角图中,

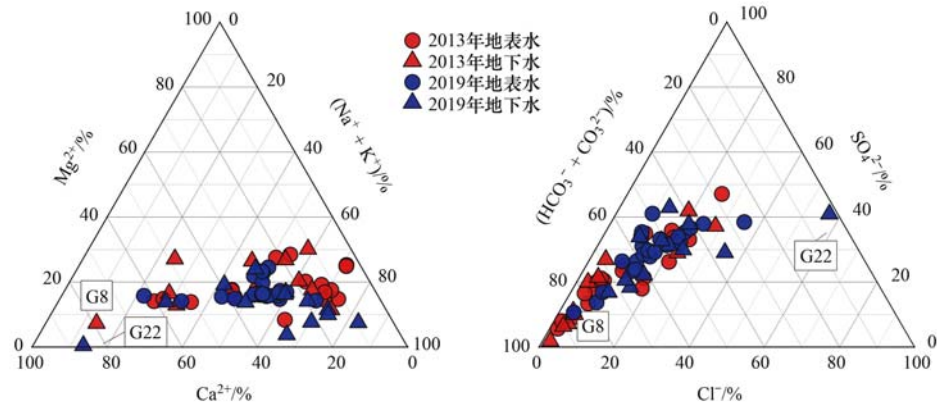


图3 无定河流域地下水和地表水 Piper 三线图

Fig. 3 Three-line diagram of groundwater and surface water in Wuding River basin

样点主要集中在 $(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ 端元处,除 G22 以外, Cl^- 和 SO_4^{2-} 占阴离子的比重均低于 50%.

据表 2 所示, $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型的水样总占 比为 27.7%,为流域内最主要的水化学类型.其次为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Na}$ 型, 分别占比 23.1%、15.4% 和 13.8%.

表 2 水化学类型统计
Table 2 Statistics of hydrochemical types

水化学类型	编号	数量	占比/%
$\text{HCO}_3 \cdot \text{Ca}$	R12、R23 和 G8	3	4.6
$\text{HCO}_3 \cdot \text{Na}$	R1、R2、R5、R16、G2、G4、G9、G13 和 G17	9	13.8
$\text{HCO}_3 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$	R6、R13~15、R17~19、R28、R29、R31、R38、G1、G10、G15 和 G18	15	23.1
$\text{HCO}_3 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$	G3	1	1.5
$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$	G11	1	1.5
$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na}$	R7、R8、R10、R20、R41、G5、G12 和 G19~21	10	15.4
$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$	R11、R21、R22、R24~27、R30、R32、R34~37、R39、R40、R42、G16 和 G23	18	27.7
$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$	R3、R4 和 G7	3	4.6
$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na}$	R33	1	1.5
$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$	G14	1	1.5
$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$	R9 和 G6	2	3.1
$\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Ca}$	G22	1	1.5

2.3 水质特征

根据文献[31,32]中对人体健康的要求,将 TDS 分为 V 级.据图 4,枯水期有 13 个样品为超Ⅲ类水,占枯水期的 43.3%,主要分布在主河道以南的县城城区附近,如子长县(R2)、子洲县(R7)、靖边县(R10)和横山县(R16)等,R3、R4、R9 和 G6 等样点主要分布在农业区;汛期仅有 3 个超标样,编号分别为 R33、G19 和 G22,均分布在无定河流域下游,样点附近的土地利用类型为农地和居民区.各地 TDS 值差异较大,最小值位于纳林河入无定河口[R23, $\rho(\text{TDS}) = 230 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$],最大值位于无定河上游的红柳河段[R9, $\rho(\text{TDS}) = 4\,503 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$].

3 讨论

3.1 时空差异分析

流域内的水化学类型存在 12 种(表 2),说明各地区的水化学类型存在着一定的差异.造成水化学

类型空间差异的原因有多种,包括河水流经基岩的成分、地下水滞留时间等自然因素,以及周边农业、工业等人为因素影响.如位于河道下游的 G22($\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Ca}$ 型地下水),水位位于地下 102 m,有较高的 TDS 和 NO_3^- 浓度,水化学主要受地质背景影响.

通过 Kruskal-Wallis 检验法分析枯、汛期相同离子间的时间差异(图 2).阴离子中, NO_3^- 和 HCO_3^- 在地下水和地表水中均存在显著差异,且汛期 NO_3^- 远高于枯水期,说明汛期人为输入的比重大. HCO_3^- 的差异可能导致不同时期蒸发盐和硅酸盐等岩石风化对溶质的贡献比重有所不同.如汛期 HCO_3^- 的浓度远低于枯水期,而 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度则较高,汛期的蒸发盐风化贡献比重高于枯水期.

TDS 可以反映水样整体溶质浓度情况,而 NO_3^- 浓度反映人类活动对水域的影响.对这两者参数进行时空差异分析(图 5).其中, Δ 表示“汛期浓度 - 枯水期浓度”,例如 $\Delta\text{TDS} = \text{TDS}_{\text{汛期}} - \text{TDS}_{\text{枯水期}}$.枯水

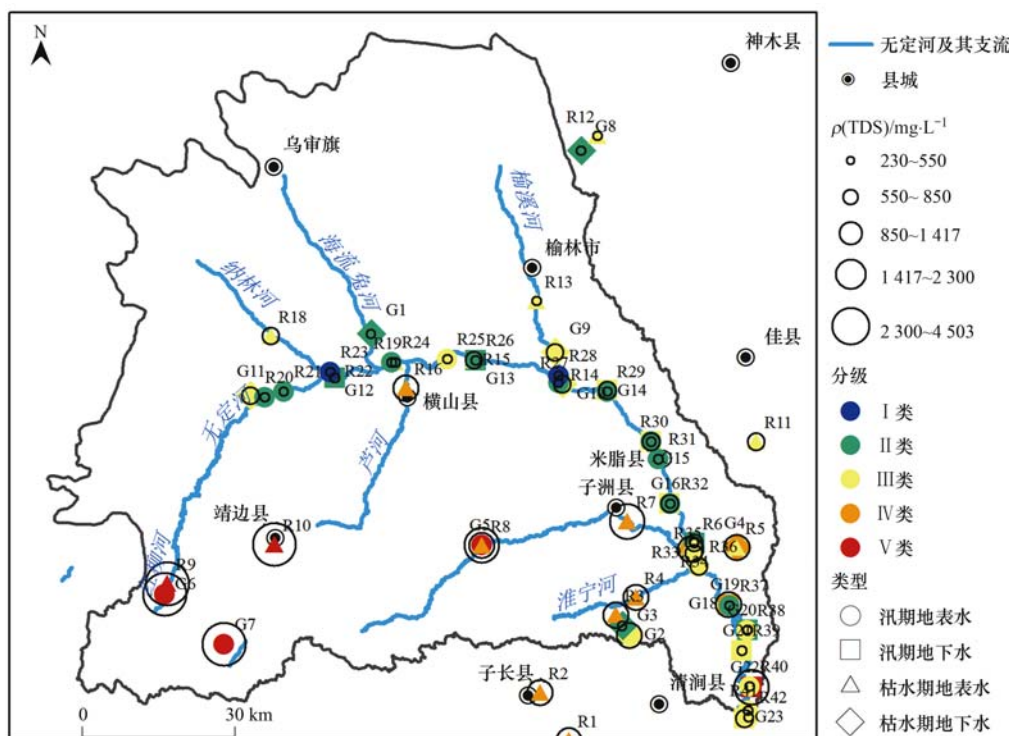


图4 无定河流域枯水期和汛期水质样点分布

Fig. 4 Sample point distribution map of water quality in Wuding River basin during dry season and flood season

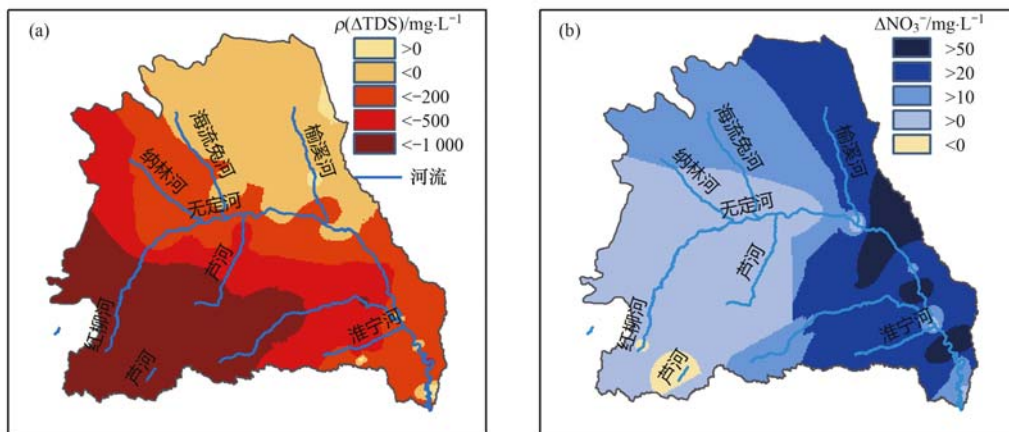
期多数地区的TDS值高于汛期,说明降水对径流溶质的稀释效应较为明显.在无定河中上游和附近的红柳河、芦河等支流差异较大 $\rho(\Delta\text{TDS}) < -1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;榆溪河差异较小,但多数河段的 $\rho(\Delta\text{TDS})$ 在 $-200 \sim 0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间;主河道下游有个别地区 $\rho(\Delta\text{TDS}) > 0$.

ΔNO_3^- 浓度情况与 ΔTDS 相反,高差异地区在下游,而上游的差异较小.除芦河外,区域内多数 $\rho(\Delta\text{NO}_3^-) > 0$,说明汛期硝酸污染高于枯水期[图5(b)].高硝酸盐污染物区多位于居民区和农田等土地利用类型附近,受人为影响较大.根据Li等^[17]和Ji等^[29]的研究,导致汛期硝酸盐升高的原因可能为大量雨水冲刷河岸,使得粪便和农药等污染物随地

表径流汇入河水.

3.2 水化学控制因素

利用Gibbs关系图可以判断河水离子的主要控制类型,而干旱-半干旱区域集中性降水较少不宜补给,且蒸发量较大,对于一些浅水位地下水而言Gibbs图仍具有一定的适用性^[39].如图6(a),水化学组成的因素分区主要为大气降水、岩石风化和蒸发溶解,无定河流域样点主要分布在岩石风化和蒸发溶解区,受大气沉降的影响较小.通过Na标准化的端元摩尔比值混合图进一步识别岩石风化主导类型.在以硅酸盐为主要地质特征的河流中, Ca^{2+} 比 Na^+ 的溶解性要低,因而水体中 Ca/Na 比值会更低,硅酸盐端元被赋予的化学组分为 Ca/Na

图5 无定河流域地表水和地下水中 $\rho(\Delta\text{TDS})$ 和 $\rho(\Delta\text{NO}_3^-)$ 的空间变化Fig. 5 Spatial changes in $\rho(\Delta\text{TDS})$ and $\rho(\Delta\text{NO}_3^-)$ of surface water/groundwater in the Wuding River basin

$=0.35 \pm 0.15$, $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+ = 2 \pm 1$. 由图 6(b) 可知, 无定河流域枯水期及汛期, 大部分样点落在硅酸盐区域, 但个别地区也受到不同程度碳酸盐岩及蒸发盐岩的影响.

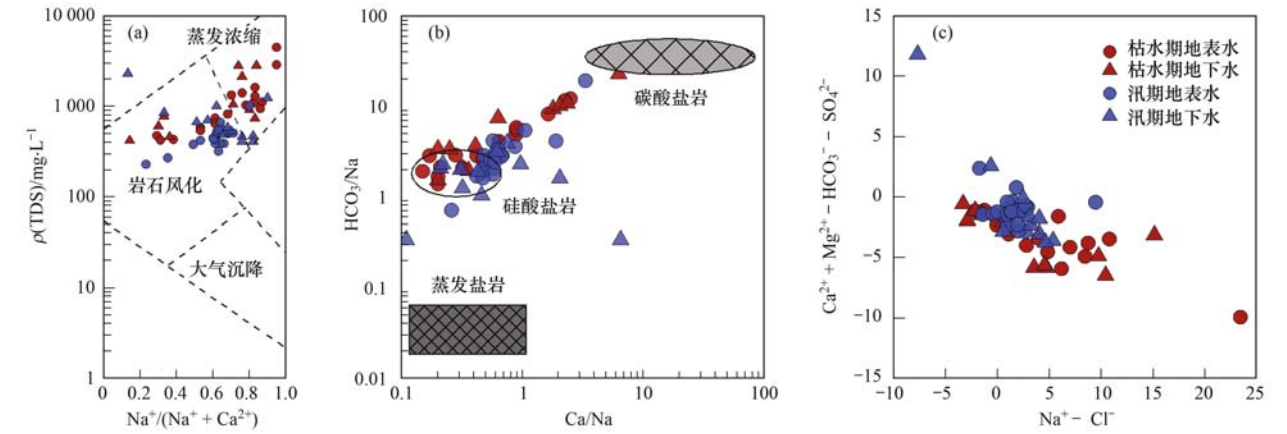


图 6 溶质来源机制
Fig. 6 Solute source mechanism diagram

阳离子交替吸附现象会改变水化学组分, 图 6(c) 反映阳离子交换过程对河水矿化的贡献作用. 当样点分布在第四象限, 则吸附含水层岩石和土壤表面的 Na^+ 和 K^+ 会与水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 发生交换作用. 样点分布在第二象限, 则情况相反, 即岩石和土壤表面的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与水中 Na^+ 和 K^+ 进行交换, 称之为反阳离子交换作用. 枯水期绝大多数采样点在阳离子交换区, 由此可得出枯水期的主要离子

交换形式为岩石中 Na^+ 和 K^+ 与水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 发生交换. 部分汛期样点与岩石中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 发生交换, 可能是黄土高原黄土中粘土矿物相对丰度高, 为这种阳离子交换提供了条件.

3.3 离子间相关性分析

为了进一步分析不同种类岩石风化对流域内离子浓度的影响, 需对各离子参数进行相关性分析^[40] (表 3).

表 3 汛期和枯水期无定河流域水化学参数相关系数分析¹⁾

Table 3 Correlation coefficient analysis of water chemical parameters in Wuding River basin during flood season and dry season									
	TDS	HCO_3^-	NO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
TDS		0.885 **	0.269	0.972 **	0.986 **	0.525 **	0.978 **	0.284	0.987 **
HCO_3^-	0.008		0.269	0.809 **	0.829 **	0.504 **	0.840 **	0.305	0.843 **
NO_3^-	0.355 *	0.472 **		0.365 *	0.263	0.403 *	0.182	0.576 **	0.242
Cl^-	0.935 **	-0.264	0.095		0.960 **	0.542 **	0.943 **	0.321	0.971 **
SO_4^{2-}	0.936 **	-0.216	0.091	0.964 **		0.463 **	0.951 **	0.331	0.990 **
K^+	0.070	0.242	0.267	-0.107	0.005		0.534 **	0.278	0.460 *
Na^+	0.407 *	0.401 *	0.613 **	0.162	0.243	0.449 **		0.112	0.951 **
Ca^{2+}	0.896 **	-0.274	0.172	0.970 **	0.911 **	-0.190	0.104		0.288
Mg^{2+}	0.304	0.613 **	0.754 **	0.001	0.098	0.629 **	0.699 **	-0.052	

1) 左下部分数据对应汛期, 右上部分数据对应枯水期; * 表示在 0.05 水平上相关性显著, ** 表示在 0.01 水平上相关性显著

枯水期 TDS 与 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 极显著相关, 汛期 TDS 与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 极显著相关并与 NO_3^- 和 Na^+ 显著相关, 表明水中离子总浓度与这些离子关系密切. Ca^{2+} 与 HCO_3^- 在两个时期均无显著性相关, 说明方解石 (CaCO_3) 对水中 HCO_3^- 的贡献较小. 图 7(a) 进一步证明, 大部样点均高于方解石的溶解线, 仅汛期少数样点趋近于方解石溶解线, 说明方解石溶解对离子的贡献在汛期的个别地区存在, 但总体作用甚小. 图 7(b) 中, 枯水期大部分样点趋近于白云石溶解线, 说明枯水期碳酸盐岩风化作用由白云石

[$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] 溶解所主导. 而汛期样点大多数低于白云石溶解线且高于方解石的溶解线的样点, 说明汛期流域溶质可能受到白云石和方解石的共同风化作用. 汛期部分样点的 Ca^{2+} 存在过剩现象 (低于方解石溶解线), 盈余的 Ca^{2+} 需要其他阴离子平衡, 而汛期的 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 相关性显著 ($r = 0.970$), 说明石膏 (CaSO_4) 贡献了汛期地下水、地表水离子. 若水中溶质仅来自白云石、方解石及石膏的风化溶解, 则水中离子呈现 ($\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$): ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) = 1:1, 如图 7(c) 所示多数样点高于 1:1, 说明 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 过剩, 需要其

他阳离子进行平衡. 枯水期 Na^+ 与 SO_4^{2-} ($r = 0.943$) 和 HCO_3^- ($r = 0.840$) 极显著相关, 汛期 Na^+ 与 HCO_3^- ($r = 0.401$) 显著相关, 说明以钠长石 ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) 为代表的硅酸盐岩风化过程为各时期提供了溶质. 流域上游红柳河段接近盐池-定边池

区半咸水场^[41], 含水层存在芒硝 ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 和石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 等矿物组分, 这些蒸发盐岩的溶解为无定河流域提供了大量的硫酸盐离子. 除此之外, 枯水期 Na^+ 与 Cl^- 也极显著相关 ($r = 0.943$), 说明盐岩溶解也为枯水期提供了离子.

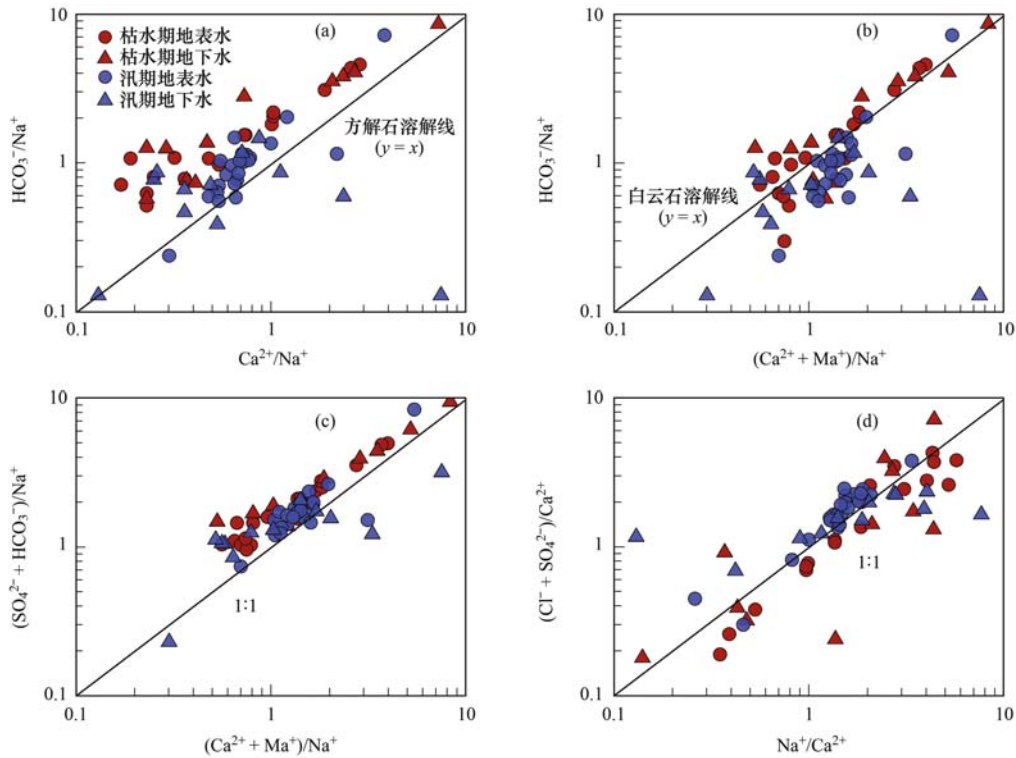


图7 无定河流域水化学计量

Fig. 7 Stoichiometry plots of water in Wuding River basin

3.4 离子来源分析

定性分析已基本确定了河流水化学溶质的来源及主要控制过程, 为更详细认识流域河水基础离子的成因, 有必要进一步量化岩石风化、大气沉降和人为输入等对河水溶解质的贡献占比. 利用正向推演模型来定量计算不同来源的贡献率, 其质量守恒方程式为:

$$X_{\text{water}} = X_{\text{atm}} + X_{\text{evap}} + X_{\text{sil}} + X_{\text{carb}} + X_{\text{anth}} \quad (1)$$

式中, X 表示任意元素, X_{water} 、 X_{atm} 、 X_{evap} 、 X_{sil} 、 X_{carb} 和 X_{anth} 分别表示水样离子测定浓度、大气降水、蒸发盐岩贡献、硅酸盐岩贡献、碳酸盐岩贡献和人为来源贡献. 各元素质量守恒方程式如下:

$$\text{Cl}^-_{\text{water}} = \text{Cl}^-_{\text{atm}} + \text{Cl}^-_{\text{evap}} \quad (2)$$

$$\text{NO}_3^-_{\text{water}} = \text{NO}_3^-_{\text{atm}} + \text{NO}_3^-_{\text{anth}} \quad (3)$$

$$\text{K}^+_{\text{water}} = \text{K}^+_{\text{atm}} + \text{K}^+_{\text{sil}} \quad (4)$$

$$\text{SO}_4^{2-}_{\text{water}} = \text{SO}_4^{2-}_{\text{atm}} + \text{SO}_4^{2-}_{\text{evap}} \quad (5)$$

$$\text{Na}^+_{\text{water}} = \text{Na}^+_{\text{atm}} + \text{Na}^+_{\text{evap}} + \text{Na}^+_{\text{sil}} + \text{Na}^+_{\text{carb}} \quad (6)$$

$$\text{Mg}^{2+}_{\text{water}} = \text{Mg}^{2+}_{\text{atm}} + \text{Mg}^{2+}_{\text{sil}} + \text{Mg}^{2+}_{\text{carb}} \quad (7)$$

$$\text{Ca}^{2+}_{\text{water}} = \text{Ca}^{2+}_{\text{atm}} + \text{Ca}^{2+}_{\text{evap}} + \text{Ca}^{2+}_{\text{sil}} + \text{Ca}^{2+}_{\text{carb}} \quad (8)$$

式中, 大气数据来源于东亚酸雨网^[42] (表4). 比较而言, 2013年枯水期的湿沉降离子浓度高于2019年汛期1.2~14.6倍, 大气输入对于枯水期溶质的贡献更高. 雨水浓度较低, 一定程度上稀释河水^[43]. 无定河流域降水集中在夏季, 而冬季降水少, 也是枯水期TDS高于汛期的原因(图5). 由于无定河流域无自然富集而成的硝酸盐矿床^[44], 因此, 硝酸盐浓度可很好指示人为来源贡献. 汛期 NO_3^- 浓度远高于枯水期, 可能是因为夏季雨水冲刷两岸的污染物, 高温及强光促进水草植物体腐烂, 使得河流底质高营养盐浓度释放, 进而加强了硝化作用^[45], 增大了汛期人为输入的占比.

图6结果显示, 岩石风化为溶质最主要的来源, 而硅酸盐岩和蒸发盐岩占据其主导因素. 根据Xiao等^[7]的研究, 黄河流域基岩中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 平均值介于0.24~0.31, $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 平均值介于0.3~0.51. 此处取 $(\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+)_{\text{硅酸盐岩}} = 0.26$, $(\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+)_{\text{硅酸盐岩}} = 0.47$. 通过计算, 各个端元的贡献率为: 枯水期大气来源贡献率2.3%, 人为来源贡献率几乎为0, 蒸发盐岩来源贡献率为35.0%, 硅酸盐岩

表 4 枯、汛期湿沉降主要离子浓度及不同端元的贡献率

Table 4 Concentrations of main ions and contribution of different end members in wet precipitation during dry and flood seasons

时期	湿沉降主要离子浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$							来源贡献率/%				
	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	大气来源	人为输入	蒸发盐岩溶解	硅酸盐岩风化	碳酸盐岩风化
枯水期	101	32.4	32.0	113	7.41	107	18.2	2.3	0.0	35.0	46.5	16.7
汛期	31.9	15.5	15.5	7.72	6.08	20.7	3.95	0.4	3.5	46.7	42.3	7.1

来源贡献率 46.5%，碳酸盐岩来源贡献率为 16.7%。汛期大气来源贡献率为 0.4%，人为来源贡献率为 3.5%，蒸发盐岩风化的贡献率达到 46.7%，硅酸盐岩来源贡献率 42.3%，碳酸盐岩风化贡献比重较小，仅为 7.1%。

4 结论

无定河流域水体均呈弱碱性，水化学类型季节差异不明显，以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型为主。中上游干流水质较好，枯水期的支流和汛期的矿化度较高，不宜人类饮用。枯、汛期水体的 NO_3^- 和 HCO_3^- 浓度差异显著。受季节降水的稀释作用，汛期 TDS 低于枯水期；而 NO_3^- 情况不同，受季节降水淋溶、土地利用类型等因素的综合作用，使得汛期的 NO_3^- 浓度高于枯水期。蒸发岩风化和硅酸盐岩风化对无定河流域水体溶质的贡献较大，在枯水期分别为 35% 和 46.5%，在汛期分别为 46.7% 和 42.3%。人为输入和大气降水对流域溶质的贡献占比较小，但依旧存在季节差异。因此，对于流域河水和地下水的管理而言，应注重季节差异和地理位置因素，严格把控河道两岸的农田施肥和城市排污状况。

参考文献：

[1] Li P Y, Qian H. Water resources research to support a sustainable China[J]. International Journal of Water Resources Development, 2018, **34**(3): 327-336.

[2] 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.

[3] Ismail A H, Hassan G, Sarhan A H. Hydrochemistry of shallow groundwater and its assessment for drinking and irrigation purposes in Tarmiah district, Baghdad governorate, Iraq [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2020, **10**, doi: 10.1016/j.gsd.2019.100300.

[4] Li P Y, He S, Yang N N, et al. Groundwater quality assessment for domestic and agricultural purposes in Yan'an City, northwest China: implications to sustainable groundwater quality management on the Loess Plateau [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, **77**(23), doi: 10.1007/s12665-018-7968-3.

[5] 杨立彬, 贾新平, 李清杰, 等. 黄河流域水资源利用与保护现状评价[J]. 人民黄河, 2011, **33**(11): 55-57.

Yang L B, Jia X P, Li Q J, et al. Assessment of water resources

utilization and protection of the Yellow River basin[J]. Yellow River, 2011, **33**(11): 55-57.

[6] Mateo-Sagasta J, Zadeh S M, Turral H. More people, more food, worse water? a global review of water pollution from agriculture[M]. Rome, Colombo: FAO, IWMI, 2018.

[7] Xiao J, Zhang F, Jin Z D. Spatial characteristics and controlling factors of chemical weathering of loess in the dry season in the middle Loess Plateau, China[J]. Hydrological Processes, 2016, **30**(25): 4855-4869.

[8] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1944, **25**: 914-923.

[9] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.

[10] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 1999, **159**(1-4): 3-30.

[11] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5428-5439.

Liu J T, Cai W T, Cao Y T, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River[J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5428-5439.

[12] 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.

[13] 张杰, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1706-1713.

Zhang J, Zhou J L, Zeng Y Y, et al. Hydrochemical characteristic and their controlling factors in the Yarkant River basin of Xinjiang[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1706-1713.

[14] 李洲, 李晨曦, 华琨, 等. 黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3559-3567.

Li Z, Li C X, Hua K, et al. Groundwater chemistry characteristics and the analysis of influence factors in the Luochuan loess tablelands[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3559-3567.

[15] 马燕华, 苏春利, 刘伟江, 等. 水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4690-4699.

Ma Y H, Su C L, Liu W J, et al. Identification of sulfate sources in the groundwater system of Zaozhuang: evidences from isotopic and hydrochemical characteristics[J]. Environmental Science, 2016, **37**(12): 4690-4699.

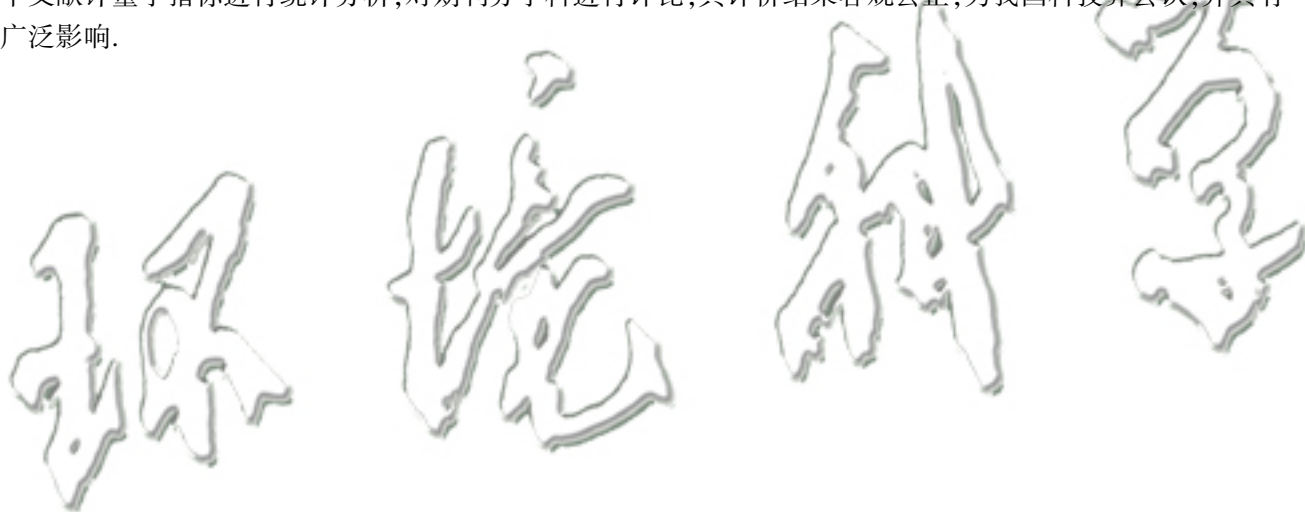
[16] Kou Y C, Li Z, Hua K, et al. Hydrochemical characteristics, controlling factors, and solute sources of streamflow and groundwater in the Hei River Catchment, China [J]. Water,

- 2019, **11**(11), doi: 10.3390/w11112293.
- [17] Li Z, Xiao J, Evaristo J, *et al.* Spatiotemporal variations in the hydrochemical characteristics and controlling factors of streamflow and groundwater in the Wei River of China[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113006.
- [18] 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.
- [19] 华琨. 黄土高原主要河流水化学和水质的时空特征及其影响因素[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Hua K. Spatiotemporal characteristics and controlling factors of water chemistry and water quality in the main rivers of the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [20] 寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3142-3149.
Kou Y C, Hua K, Li Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the surface water and groundwater of the Jinghe River[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3142-3149.
- [21] 郭巧玲, 熊新芝, 姜景瑞. 窟野河流域地表水-地下水的水化学特征[J]. *环境化学*, 2016, **35**(7): 1372-1380.
Guo Q L, Xiong X Z, Jiang J R. Hydrochemical characteristics of surface and ground water in the Kuye River Basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(7): 1372-1380.
- [22] 刘鑫, 向伟, 司炳成. 汾河流域浅层地下水水化学和氧氧稳定同位素特征及其指示意义[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1739-1749.
Liu X, Xiang W, Si B C. Hydrochemical and isotopic characteristics in the shallow groundwater of the Fenhe River basin and indicative significance [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1739-1749.
- [23] 张琳琳, 徐春燕, 雷波, 等. 陕西省无定河流域水土流失状况分析[J]. *陕西水利*, 2020, (12): 142-143, 146.
- [24] 曲艳, 刘俊, 徐春燕, 等. 陕西省无定河流域水量分配方案研究[J]. *陕西水利*, 2019, (3): 5-7.
Qu Y, Liu J, Xu C Y, *et al.* Study on water allocation scheme of Wuding River Basin in Shaanxi[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2019, (3): 5-7.
- [25] 张艳玲, 席志军. 榆林市境内无定河流域水质现状评价[J]. *农业工程*, 2019, **9**(2): 31-33.
Zhang Y L, Xi Z J. Assessment of water quality of Wuding River basin in Yulin city[J]. *Agricultural Engineering*, 2019, **9**(2): 31-33.
- [26] 李晓刚, 黄春长, 张玉柱. 基于 HEC-RAS 模型的无定河万年尺度洪水水文学研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, **29**(2): 526-534.
Li X G, Huang C C, Zhang Y Z. Study on flood hydrology at ten thousand years scale in the Wuding River based on HEC-RAS model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(2): 526-534.
- [27] Ran L S, Tian M Y, Fang N F, *et al.* Riverine carbon export in the arid to semiarid Wuding River catchment on the Chinese Loess Plateau [J]. *Biogeosciences*, 2018, **15**(12): 3857-3871.
- [28] 李夏隆. 无定河流域稻蟹生态共养技术创新性研究[J]. *现代农业研究*, 2020, **26**(3): 114-115.
Li X L. Innovative research on ecological co-culture technology of rice and crab in Wuding River basin [J]. *Modern Agriculture Research*, 2020, **26**(3): 114-115.
- [29] Ji W J, Xiao J, Toor G S, *et al.* Nitrate-nitrogen transport in streamwater and groundwater in a loess covered region: sources, drivers, and spatiotemporal variation [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **761**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143278.
- [30] Mitamura O, Seike Y, Kondo K, *et al.* First investigation of ultraoligotrophic alpine Lake Puma Yumco in the pre-Himalayas, China[J]. *Limnology*, 2003, **4**(3): 167-175.
- [31] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [32] 胡译水, 齐实, 李昱彤, 等. 污泥堆肥施用对土壤及地下水影响研究[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 2157-2166.
Hu Y S, Qi S, Li Y T, *et al.* Effects of sludge composting products on soil and groundwater [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 2157-2166.
- [33] Noh H, Huh Y, Qin J H, *et al.* Chemical weathering in the Three Rivers region of Eastern Tibet [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, **73**(7): 1857-1877.
- [34] Moon S, Huh Y, Qin J H, *et al.* Chemical weathering in the Hong (Red) River basin: rates of silicate weathering and their controlling factors [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, **71**(6): 1411-1430.
- [35] Hua K, Xiao J, Li S J, *et al.* Analysis of hydrochemical characteristics and their controlling factors in the Fen River of China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, **52**, doi: 10.1016/j.scs.2019.101827.
- [36] 孙英, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆喀什噶尔河流域地表水水化学季节变化特征及成因分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, **33**(8): 128-134.
Sun Y, Zhou J L, Nai W H, *et al.* Seasonal variation characteristics and causes of surface water chemistry in Kashgar River Basin, Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, **33**(8): 128-134.
- [37] Al-Ansari N, Jawad S, Adamo N, *et al.* Water quality and its environmental implications within Tigris and Euphrates Rivers [J]. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 2019, **9**(4): 57-108.
- [38] Taher M E S, Ghoneim A M, Hopcroft R R, *et al.* Temporal and spatial variations of surface water quality in the Nile River of Damietta Region, Egypt [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, **193**(3), doi: 10.1007/s10661-021-08919-0.
- [39] Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram[J]. *Applied Geochemistry*, 2018, **97**: 209-212.
- [40] 翟大兴, 杨忠芳, 柳青青, 等. 鄱阳湖流域水化学特征及影响因素分析[J]. *地学前缘*, 2012, **19**(1): 264-276.
Zhai D X, Yang Z F, Liu Q Q, *et al.* Major ion chemistry and influencing factors of rivers in Poyang Lake Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, **19**(1): 264-276.
- [41] 叶阳, 常园. 鄂尔多斯盆地盐池-定边地区水化学场分布特征及形成机理[J]. *地质与资源*, 2020, **29**(3): 260-265, 293.
- Ye Y, Chang Y. Distribution characteristics and formation mechanism of hydrochemical field in Yanchi-Dingbian area of Ordos Basin[J]. *Geology and Resources*, 2020, **29**(3): 260-265, 293.
- [42] Network Center for EANET, Wet Monthly 2019 [EB/OL]. <https://monitoring.eanet.asia/document/public/index#view-2019>, 2020-04-11.
- [43] 张红波. 桂江流域水化学与岩溶碳汇动态变化特征[D]. 重

- 庆: 西南大学, 2013.
- Zhang H B. Water chemistry and characteristics of dynamic changes of carbon sinks in Guijiang basin [D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [44] 秦燕. 新疆吐—哈地区硝酸盐矿床氮、氧同位素研究及矿床成因[D]. 北京: 中国地质科学院, 2010.
- Qin Y. Nitrogen, oxygen isotope characters and genesis of nitrate deposits in Turpan-Hami area in Xinjiang [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2010.
- [45] 周绪申, 李慧峰, 潘曼曼, 等. 海河蓝藻暴发期间浮游植物群落结构分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(1): 63-65.
- Zhou X S, Li H F, Pan M M, *et al.* Study on phytoplankton community during the cyanobacteria bloom in Haihe River [J]. Yellow River, 2013, 35(1): 63-65.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2020 年 12 月 29 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续 19 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.



CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)