

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062)	
《环境科学》征稿简则(3116)	
信息(3164, 3259, 3572)	

雅鲁藏布江水化学演变规律

江平¹, 张全发², 李思悦^{1*}

(1. 武汉工程大学环境生态与生物工程学院, 武汉 430205; 2. 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074)

摘要: 为探究 1973 ~ 2020 年雅鲁藏布江流域水化学演变规律, 利用 Piper 图、Gibbs 图、离子比值和相关性分析研究水化学特征及离子来源, 并采用钠吸附比(SAR)、钠百分比(Na^+ %) 和渗透性指数(PI)评价雅江河水的灌溉适用性。结果表明, TDS 均值为 $(208.30 \pm 58.26) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随时间呈增加趋势; Ca^{2+} 是优势阳离子, 占阳离子总量的 $(65.49 \pm 7.67)\%$, HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 是优势阴离子, 分别占主要阴离子的 $(68.56 \pm 9.84)\%$ 和 $(26.85 \pm 9.82)\%$; Ca^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 的年代增幅率分别为 2.07、3.19 和 $4.70 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot 10 \text{ a})^{-1}$; 雅江水化学类型是 HCO_3^- -Ca 型, 主要离子化学受碳酸盐岩化学风化控制, 1973 ~ 1990 年碳酸盐岩风化主要受碳酸作用, 而 2001 ~ 2020 年间主要受碳酸和硫酸共同作用; 雅江干流水体的主要离子浓度均在饮用水标准范围内; SAR 在 0.11 ~ 0.93 之间, Na^+ % 在 8.00 ~ 36.73 之间, PI 值在 0.39 ~ 0.87 之间, 适合灌溉。评价结果对雅江流域水资源保护和可持续发展具有重大意义。

关键词: 雅鲁藏布江; 水化学特征; 离子来源; 岩石风化; 水质

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3165-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202206297

Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin

JIANG Ping¹, ZHANG Quan-fa², LI Si-yue^{1*}

(1. School of Environmental Ecology and Biological Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China; 2. Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to explore the hydro-chemical evolution law of the Yarlung Zangbo River Basin from 1973 to 2020, the hydro-chemical characteristics and major ion sources were studied using a Piper diagram, Gibbs diagram, ion ratio, and correlation analysis, and the irrigation applicability of the Yarlung Zangbo River was evaluated using the sodium adsorption ratio (SAR), sodium percentage (Na^+ %), and permeability index (PI). The results showed that the mean value of TDS was $(208.30 \pm 58.26) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which increased with time. Ca^{2+} was the dominant cation, accounting for $(65.49 \pm 7.67)\%$ of the total cations. HCO_3^- and SO_4^{2-} were the dominant anions, accounting for $(68.56 \pm 9.84)\%$ and $(26.85 \pm 9.82)\%$ of the main anions, respectively. The annual growth rates of Ca^{2+} , HCO_3^- , and SO_4^{2-} were respectively 2.07, 3.19, and $4.70 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot 10 \text{ a})^{-1}$. The hydro-chemical type of the Yarlung Zangbo River was HCO_3^- -Ca type, and the main ionic chemistry was controlled by the chemical weathering of carbonate rocks. The weathering of carbonate rocks during the period of 1973 to 1990 was mainly controlled by carbonation, whereas from 2001 to 2020 it was mainly controlled by both carbonation and sulfuric acid. The main ion concentrations in the mainstream of Yarlung Zangbo River were within the range of drinking water standards, with SAR between 0.11-0.93, Na^+ % between 8.00-36.73, and PI values between 0.39-0.87, demonstrating that the waters were suitable for drinking and irrigation. The results were of great significance to the protection and sustainable development of water resources in the Yarlung Zangbo River Basin.

Key words: Yarlung Zangbo River; hydro-chemical characteristics; ion source; rock weathering; water quality

河流是连接陆海两大生态系统的主要通道, 是进行物质交换和能量传递的重要枢纽^[1]。河流水化学成分对水文气象以及流域环境具有重要指示意义, 流域气候、岩石风化和人类活动是河流水文及水化学特征的主要控制因素^[2,3]。因此, 河流主要离子化学在一定程度上能够反映流域水环境状况、大气沉降输入、岩石风化作用和土地利用变化等, 水体中的主要离子视为“天然示踪剂”^[4]。国内外学者对水体中的化学成分进行了大量研究, 讨论河流中主要离子的来源以及流域水化学的主要控制机制。Piper^[5]于1994年提出了三线图, 以主要离子每升毫克当量百分比来反映河流溶质来源离子的相对比例关系^[6]; 1970年, Gibbs通过研究世界范围内的100多条河流水体中阴阳离子组分, 提出河流水化学成分主要受大气降水、岩石风化以及蒸发-结晶控制^[7,8]; Meybeck^[9]提出岩石风化和地质特征是河

流水化学组成的重要控制因素; Gaillardet等^[10]量化了碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发岩对流域化学风化的贡献。我国河流水化学研究始于文献^[11]; 陈静生等^[12]对黄河流域进行了水化学特征分析, 表明离子浓度呈上升趋势; 随着我国社会经济的快速发展, 主要离子浓度有继续增加的趋势。

雅鲁藏布江(以下简称雅江)位于青藏高原的南部, 发源于喜马拉雅山脉北麓的杰马央宗冰川, 平均海拔大于4 000 m, 是中国最长的高原河流; 雅江自西向东横贯西藏南部, 绕过南迦巴瓦峰转向南流, 形成雅鲁藏布大峡谷, 在巴昔卡出境, 流入印度洋的孟加拉湾^[13-15]。近年来, 关于雅江的研究多集中在

收稿日期: 2022-06-27; 修订日期: 2022-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670473); 武汉工程大学高层次人才启动项目

作者简介: 江平(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物与水环境演变, E-mail: jiangping0624@163.com

* 通信作者, E-mail: syli2006@163.com

大气降水^[16,17]和水文径流^[18~20]变化方面. 雅江流域水化学研究也取得了系列进展. 如 Li 等^[21]研究了 1956 ~ 2000 年雅江中段关键水文要素变化; Huang 等^[22]发现雅江雨季河水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 是优势离子; Jiang 等^[23]分析了雅江中上游河水的化学成分及水化学类型,发现雅江中上游化学风化过程主要由碳酸盐和硅酸盐风化控制;刘昭^[24]、包宇飞^[25]和严宇鹏等^[26]研究了雅江流域的水化学特征及离子来源. 上述研究探究了雅江流域水化学组成、离子来源及其控制因素等问题,但长时间序列流域水化学演变规律和空间格局研究几乎空白.

近年来,雅江流域人类活动不断加剧,此外,全球气候变暖导致青藏高原的冰川面积减少,雅江流域水文水生态环境发生变化^[27]. 因此,分析雅江流域近 50 年的水化学时空变化特征、主要离子来源及影响因素和水质状况,对认识全球变化下雅江流域水资源演变规律具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

1.1.1 流域概况

雅鲁藏布江是流经中国、印度和孟加拉国的跨境河流,雅江在中国境内地处北纬(N) $28^{\circ}00'$ ~ $31^{\circ}16'$,东经(E) $82^{\circ}00'$ ~ $97^{\circ}07'$ 之间,全长 2 057 km,流域面积约 $24.05 \times 10^4 \text{ km}^2$,占西藏总面积的 20.0%^[28]. 雅江流域水系发达,流域面积大于 10 000 km^2 的支流有 5 条,分别是多雄藏布江(DX)、年楚河(NC)、拉萨河(LS)、尼洋河(NY)和帕隆藏布江(PL)(图 1). 多雄藏布江是雅江上游最大的支流,平均海拔为 4 700 m,自西向东流,全长 309.8 km,位于冈底斯-念青唐古拉地质构造区与雅江缝合带,含大量岩浆岩^[29]. 年楚河是雅江中游南岸最大的支流,由东南流向西北,全长 223 km,位于喜马拉雅地质构造区中段,含大量沉积岩^[30]. 拉萨河是最长且流域面积最大的支流,由东北流向西南,

全长 551 km,流域内有石炭与二叠纪地层、三叠纪地层、白垩纪地层和第四纪地层^[31,32]. 尼洋河全长 309 km,由西北流向东南,上游主要是花岗岩,中游主要是板岩和闪长岩,下游主要是片麻岩^[33]. 帕隆藏布江是雅江北岸水量最大的支流,由西北流向东南,全长 265 km,位于东喜马拉雅构造结北端,主要分布花岗岩和片岩^[34].

1.1.2 气候特征

雅江流域自然地理条件十分复杂,地势为东低西高,雅江东部海拔约 100 ~ 2 900 m,河长约 500 km;中部海拔约 2 800 ~ 4 600 m,河长约 1 340 km;西部海拔约 4 530 ~ 5 590 m,河长约 268 km. 流域空间上气候差异较大,沿东南至西北气温递减,随海拔升高而降低^[35];受印度洋暖湿气流和喜马拉雅山屏障作用影响,上游属内陆高原寒带气候,中游属内陆高原温带气候,下游属亚热带气候^[36].

雅鲁藏布江流域上、中、下游多年的月、年和年代降水变化特征如图 2 所示. 受印度洋暖湿气流及喜马拉雅山屏障作用,明显的季风特征导致月降水量变化显著^[16],降水主要分布在 5 ~ 9 月,上、中、下游 5 ~ 9 月降雨量分别占全年降水量的 $(78.08 \pm 4.86)\%$ (范围: 68.97% ~ 91.18%)、 $(94.65 \pm 3.41)\%$ (范围: 81.42% ~ 98.52%) 和 $(77.00 \pm 6.89)\%$ (范围: 57.89% ~ 89.83%) [图 2(a)]. 由雅江流域 1961 ~ 2016 年降水变化可知[图 2(b)],上游至下游的年降水量呈逐渐递增趋势. 1961 ~ 2016 年上游和中游年平均降水量(范围)(mm)分别是: 390.99 ± 54.65 (212.32 ~ 500.60) 和 492.62 ± 110.39 (278.30 ~ 880.42),年降水量在平均值上下振荡,无显著变化趋势. 雅江下游年降水量在 1998 年最大,达 1 810.23 mm. 从雅江流域降水量年代变化来看[图 2(c)],近 55 年来上、中、下游年代平均降水量(范围)(mm)分别为: 387.43 ± 33.42 (337.49 ~ 439.72)、 492.88 ± 34.86 (429.13 ~ 537.67) 和 $1\,325.24 \pm 111.34$ (1 163.67 ~

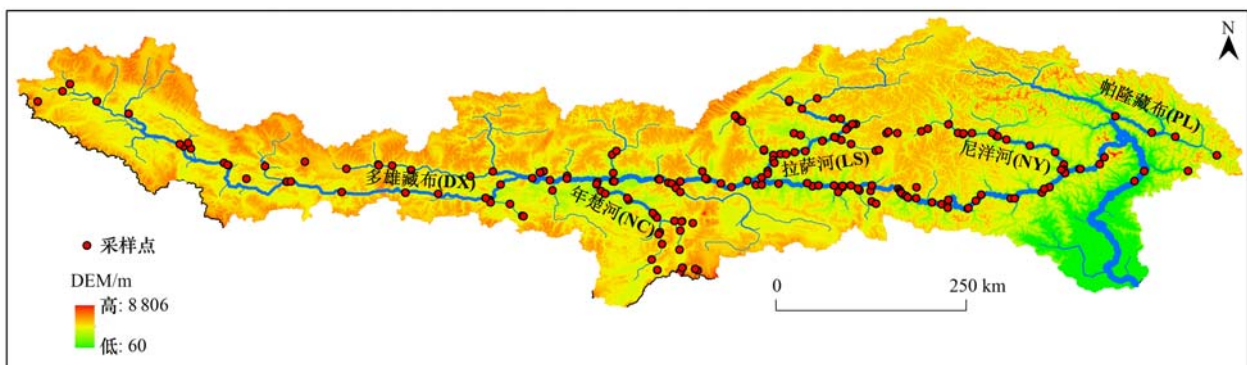
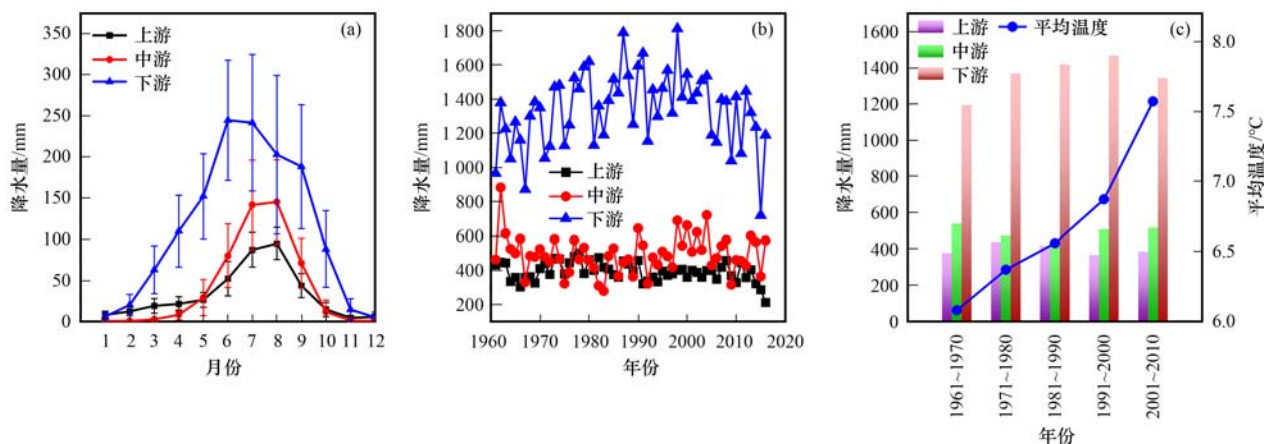


图 1 雅鲁藏布江流域主要数据采样点分布

Fig. 1 Distribution of some sampling points in the Yarlung Zangbo River Basin

1 467.14), 上、中、下游年代降水量无明显变化; 由于印度洋强烈的西南季风以及地形的抬升作用, 降水量随着海拔的降低而增加, 下游流域潮湿多雨。

1961~2010 年间雅鲁藏布江流域的平均气温从 6.08°C 上升到 7.57°C [图 2(c)], 平均增温率约为 $0.3^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。



(a) 月平均降水量, (b) 年降水量, (c) 年代平均降水量和气温

图 2 雅鲁藏布江流域平均降水量和平均温度变化

Fig. 2 Variation in average precipitation and average temperature in the Yarlung Zangbo River Basin

1.2 数据收集与分析

本文以雅江干、支流为研究对象, 在国家青藏高原科学数据中心 (data.tpdc.ac.cn) 提取雅江流域: 上(日喀则萨嘎县)、中(拉萨曲水县)、下游(林芝墨脱县) 1961~2016 年的逐日降水数据。在中国知网、维普、万方、谷歌学术、Web of Science、Citexs、Engineering Village 和 Springer 等数据库查找雅江流域水化学相关文献资料, 输入“雅鲁藏布江”、“水化学”、“主要离子”、“Yarlung Zangbo River”、“hydrochemistry”或“major ions”等关键词和篇名搜集雅江流域水化学数据, 共搜索到 183 篇中文文献和 39 篇英文文献, 其中有 22 篇中文文献和 12 篇英文文献记录了雅江干支流水化学数据。本文收集得到雅江目前最全的主要离子化学数据(1973~2020 年), 其中雅江干流有 160 组、共 1552 个数据, 拉萨河有 117 组、共 1103 个数据, 尼洋河有 54 组、共 504 个数据, 年楚河有 32 组、共 298 个数据, 多雄藏布江有 30 组、共 294 个数据, 帕隆藏布江有 8 组、共 82 个数据, 采样点如图 1 所示。利用 SPSS24.0 进行统计分析, 利用 Origin2021 制图。

2 结果与讨论

2.1 水化学特征

2.1.1 主要离子组成

雅江干流的 pH 值介于 7.39~8.95 之间, 平均值为 8.33 ± 0.31 , 整体上呈弱碱性; TDS 变化幅度较大, 介于 $81.64 \sim 371.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(208.30 \pm 58.26) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高于世界河流 TDS 均值 ($150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[37], 在一定程度上反映雅江流域较强

烈的水岩作用^[38]。雅江 1973~1980、1981~1990、2001~2010 和 2011~2020 年 TDS 平均值(范围) ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 依次为: 142.27 ± 17.57 ($124.70 \sim 159.83$)、 153.67 ± 29.17 ($124.5 \sim 182.83$)、 186.87 ± 43.66 ($84.62 \sim 277.00$) 和 233.76 ± 60.23 ($81.64 \sim 371.27$), TDS 含量呈显著增加的趋势, 这与环境变化下岩石化学风化增强及人类活动输入有关^[39]。DX 的 pH 值介于 6.52~8.70 之间, 平均值为 7.68 ± 0.73 ; TDS 介于 $98.70 \sim 375.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(193.26 \pm 72.34) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。NC 的 pH 值介于 7.70~8.70 之间, 平均值为 8.27 ± 0.30 ; TDS 介于 $53.00 \sim 329.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(194.58 \pm 93.32) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。LS 的 pH 值介于 7.63~8.95 之间, 平均值为 8.36 ± 0.28 ; TDS 介于 $106.90 \sim 784.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(205.89 \pm 105.60) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。NY 的 pH 值介于 6.90~9.00 之间, 平均值为 8.00 ± 0.41 ; TDS 介于 $53.80 \sim 165.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(88.92 \pm 30.65) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。PL 的 pH 值介于 5.70~9.20 之间, 平均值为 8.08 ± 1.03 ; TDS 介于 $65.95 \sim 171.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(98.16 \pm 34.05) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

雅江干流主要阳离子浓度大小依次为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$, $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 介于 $16.54 \sim 54.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(32.62 \pm 6.96) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{Na}^{+})$ 介于 $1.84 \sim 18.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $(9.00 \pm 3.44) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Ca^{2+} 是优势阳离子, 占阳离子总量的 $(65.49 \pm 7.67)\%$ (范围: $42.17\% \sim 76.72\%$), 其次是 Na^{+} , 占阳离子总量的 $(17.72 \pm 5.49)\%$ (范围: $8.53\% \sim 37.89\%$)。主要阴离子浓度

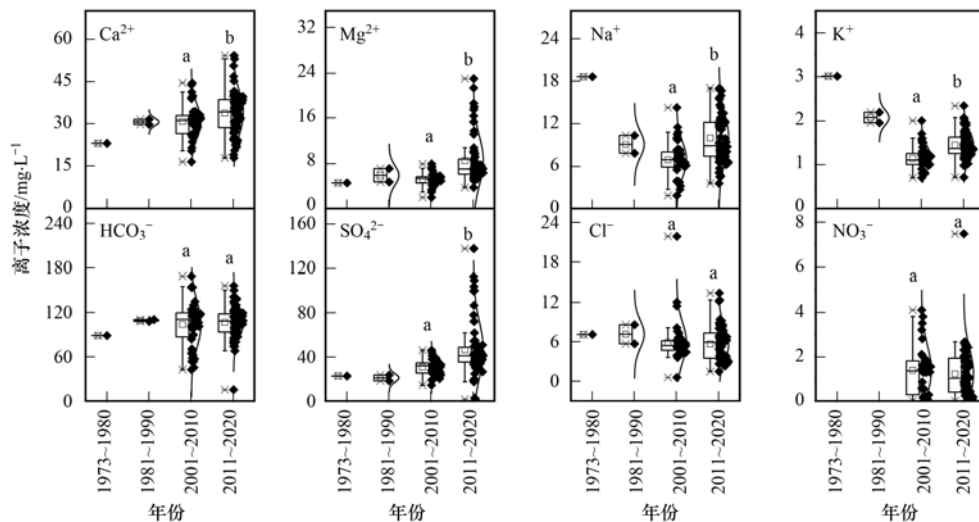
大小依次为: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 介于 $15.31 \sim 168.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $(105.44 \pm 23.85) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 介于 $1.72 \sim 137.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $(40.36 \pm 21.53) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主, 分别占阴离子总量的 $(68.56 \pm 9.84)\%$ (范围: $35.42\% \sim 95.80\%$) 和 $(26.85 \pm 9.82)\%$ (范围: $1.16\% \sim 61.12\%$)。DX 和 LS 主要阳离子浓度顺序均为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, NC、NY 和 PL 主要阳离子浓度顺序均为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, Ca^{2+} 是优势阳离子。支流中主要阴离子浓度顺序均为: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, HCO_3^- 是优势阴离子。

2.1.2 主要离子时空分布特征

1973~2020 年雅江干流主要离子浓度如图 3 所示, 主要阳离子 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 呈显著的上升趋势, 近 50 年来从 $24.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $33.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 年代增幅率为 $2.07 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot 10 \text{ a})^{-1}$; $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 也显著增加, 从 $4.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $8.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 年代增幅率为 $0.81 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot 10 \text{ a})^{-1}$ 。 Na^+ 和 K^+ 浓度均呈先降后升的趋势, 这与汪磊^[40] 研究的结果一致。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ 浓度从 2001~2010 年和 2011~2020 年均显著增加, 年代增幅率分别为 1.44、

1.66、1.53 和 $0.155 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot 10 \text{ a})^{-1}$ 。主要阴离子 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 近 50 年来从 $91.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $106.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 年代增幅率为 $3.19 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot 10 \text{ a})^{-1}$; $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 从 $24.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $46.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均增幅为 $4.70 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot 10 \text{ a})^{-1}$, 但从 2001~2010 年和 2011~2020 年年增幅率更大, 达到 $7.86 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot 10 \text{ a})^{-1}$, HCO_3^- 、 Cl^- 和 NO_3^- 浓度变化在统计学上不显著。

在空间上, 由于流域岩性、地理和气候等因素的不同, 主要离子浓度存在很大差异, 通过对雅江干流(GL)和 5 条支流的主要离子浓度分析可知(图 4), HCO_3^- 和 Ca^{2+} 是雅江流域主要的阴阳离子。通过非参数检验分析可知, 雅江干流 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度显著高于 PL, 极显著高于 LS 和 NY, 其原因主要是随着降水径流的增大, 稀释效应显著, 使下游支流主要离子浓度降低。雅江干流 Mg^{2+} 与 NC 有统计学差异, 显著高于 DX 和 PL, 极显著高于 LS 和 NY; 雅江干流 SO_4^{2-} 与 NC 和 PL 有差异, 极显著高于 LS 和 NY; 雅江干流 Na^+ 极显著高于 LS、NY 和 PL; 雅江干流 Cl^- 显著高于 PL, 极显著高于 LS 和 NY; 雅江干流 K^+ 与 LS 存在差异, 极显著高于 NY; 雅江干流 NO_3^- 与 NC 有差异, 极显著低于 LS。



由于数据样本量的关系, 对近 20 年的数据做了统计性差异分析; 不同小写字母表示有显著性差异; 1973~1990 年间缺少 NO_3^- 数据

图 3 1973~2020 年雅鲁藏布江干流主要离子浓度

Fig. 3 Main ion concentrations in the main stream of the Yarlung Zangbo River from 1973 to 2020

2.2 主要离子来源及影响因素

Gibbs 图能够定性判断出主要离子化学的主控因素: 蒸发浓缩、岩石风化和大气降水。雅江干流河水中 TDS 介于 $81.64 \sim 371.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $(208.30 \pm 58.26) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的变化范围介于 $0.16 \sim 0.58$, 平均值为 0.30 ± 0.07 ; $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 在 $0.02 \sim 0.20$ 的范围内, 平均值为

0.09 ± 0.03 (图 5)。雅江河水离子浓度点均分布在 Gibbs 图的中部左侧, 说明雅江主要离子化学受岩石的化学风化及其溶解过程控制。近 50 年来, TDS 的含量增加, 但雅江水化学的主控因素未发生改变。

构建 Piper 三线图分析主要离子的相对含量, 评价雅江干流水化学类型及演变规律。阳离子分布在 Ca^{2+} 端, Ca^{2+} 占比介于 $0.36 \sim 0.75$ 之间, 平均占

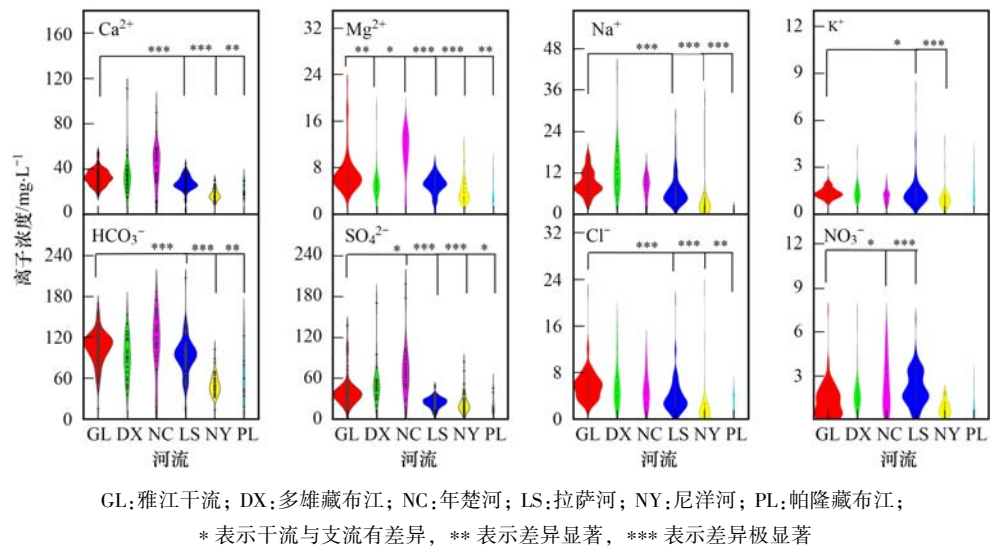


图4 雅鲁藏布江干流及5大支流主要离子浓度

Fig. 4 Main ion concentrations in the main stream and five tributaries of the Yarlung Zangbo River

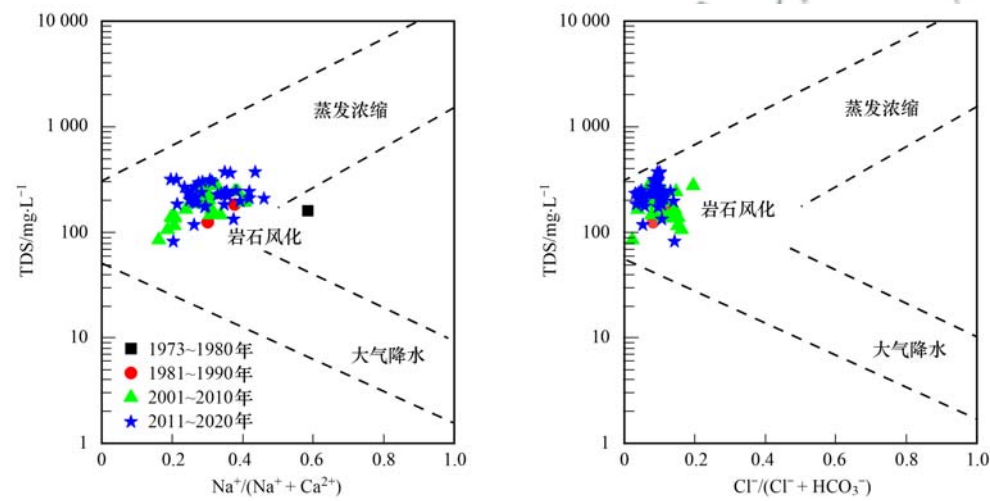


图5 1973 ~ 2020 年雅鲁藏布江干流 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs plots of the main stream in the Yarlung Zangbo River from 1973 to 2020

比为 0.62 ± 0.08 ; 阴离子主要分布在 HCO_3^- 端, HCO_3^- 占比介于 $0.30 \sim 0.94$ 之间, 平均占比为 0.64 ± 0.10 [图 6(a)]; 表明雅江干流水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型. 2001 年以来, Ca^{2+} 、 HCO_3^- 和 Cl^- 的占比均在减小, Ca^{2+} 的占比从 0.67 降至 0.60 , HCO_3^- 的占比从 0.67 降至 0.62 , Cl^- 的占比从 0.07 降至

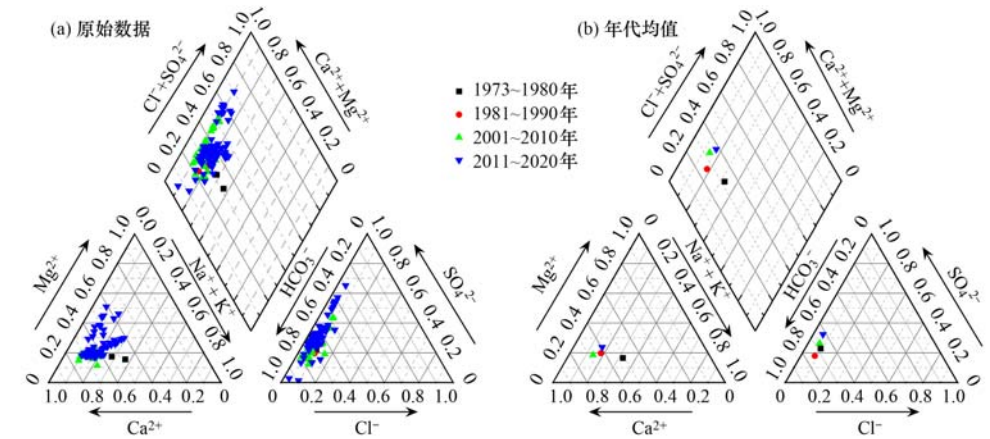


图6 1973 ~ 2020 年雅鲁藏布江干流水化学 Piper 图

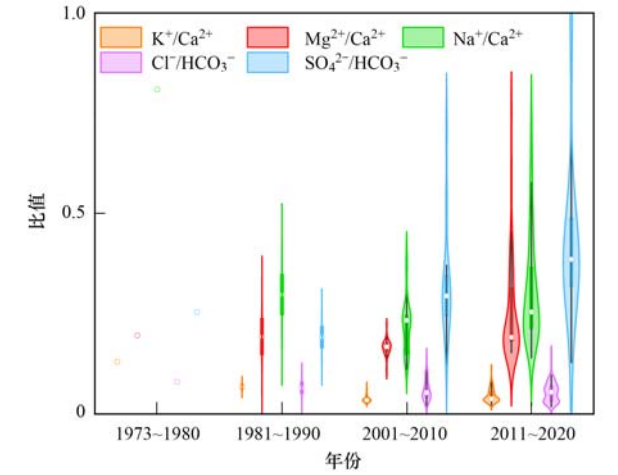
Fig. 6 Piper chart of water chemistry in the Yarlung Zangbo River from 1973 to 2020

0.06; SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 的占比在增大, SO_4^{2-} 的占比从 0.26 增长至 0.32, Mg^{2+} 的占比从 0.19 增长至 0.24 [图 6(b)]。

雅江干流离子主要来源于岩石化学风化, 不同类型岩石的风化产生的离子不同^[41]。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩的风化作用, Na^+ 和 K^+ 主要来源于蒸发岩和硅酸盐的风化作用, HCO_3^- 主要来源于碳酸盐和硅酸盐, SO_4^{2-} 和 Cl^- 主要来自蒸发岩。雅江干流优势阴阳离子分别是 HCO_3^- 和 Ca^{2+} , 因此雅江干流主要受碳酸盐岩风化的影响, 碳酸盐岩的风化是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的重要来源, 并且 1973~1990 年 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ (当量浓度比, 下同) 为 1.09 ± 0.05 , 比值位于 1 附近, 表明雅江干流主要受碳酸作用的碳酸盐岩风化影响; $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 值为 3.19 ± 0.55 , 比值大于 2, 表明雅江碳酸盐岩风化的主要是方解石。2001~2020 年 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 值为 1.36 ± 0.51 , 表明河水中除了 HCO_3^- 外还有其他阴离子来平衡 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ; $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 值为 0.88 ± 0.12 , 表明硫酸也参与了碳酸盐岩的风化^[42,43]。

用主要阴、阳离子 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 校正的元素比值可以有效消除水文的影响, 通过 $\text{K}^+/\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 来判断雅江干流水化学变化及溶质来源。从图 7 可知, Mg^{2+} 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 呈增加趋势, K^+ 和 Cl^- 无明显变化。 Mg^{2+} 主要来源于白云石等碳酸盐岩风化, Na^+ 主要来源于硅酸盐岩的风化, 由于地质构造运动等原因使新鲜的岩石暴露, 加速了岩石风化的速度。 SO_4^{2-} 一般来源于石膏溶解和硫化物(黄铁矿)的氧化、大量含 S 农药化肥的使用以及工业

燃煤等人类活动引起的 SO_2 沉降, 随着人类活动的不断加剧, 农业、工业和城镇废水汇入雅江河流中, 导致 SO_4^{2-} 的含量不断增加^[44]。



1973~1980 年只显示一组数据
图 7 1973~2020 年雅鲁藏布江干流主要离子比值
Fig. 7 Ratio of main ions in the mainstream in the Yarlung Zangbo River from 1973 to 2020

相关性分析能较好揭示离子的来源关系, 相关性好的离子一般具有相同的来源或相似的地球化学过程, 雅江干流主要离子水化学相关分析表明(表 1), TDS 与 SO_4^{2-} 呈弱相关, 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 呈显著正相关, TDS 反映了河流中溶解性固体的总量, 说明岩石风化是雅江河水中主要离子的关键来源。 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 之间呈显著的正相关关系, 表明 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 的来源相同; Cl^- 与 Mg^{2+} 呈弱相关, 与 Na^+ 和 K^+ 呈显著的正相关, 且 Na^+ 和 K^+ 呈显著正相关, 表明两者主要来源于硅酸岩和蒸发盐岩的风化^[45]。

表 1 雅鲁藏布江干流主要离子水化学成分相关分析¹⁾

Table 1 Correlation analysis of main water ions in the mainstream in the Yarlung Zangbo River

	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	TDS
Ca^{2+}	1								
Na^+	0.06	1							
Mg^{2+}	0.39 **	0.23 **	1						
K^+	0.02	0.76 **	0.21 *	1					
HCO_3^-	0.61 **	0.12	0.17 *	0.04	1				
SO_4^{2-}	0.54 **	0.17 *	0.85 **	0.12	0.06	1			
Cl^-	0.12	0.36 **	0.20 *	0.33 **	0.26 **	0.10	1		
NO_3^-	0.07	-0.15	-0.33 **	-0.20 *	0.34 **	-0.33 **	-0.01	1	
TDS	0.41 **	0.18	0.29 **	0.08	0.36 **	0.24 *	0.19	0.19	1

1) ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

2.3 水质评价

水质是影响人类和生态系统健康的重要参数之一, 饮用水和灌溉用水的适宜性对流域发展和人类

健康有决定性的影响。

世界卫生组织推荐标准及我国饮用水标准中主要离子浓度的范围是: $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $\rho(\text{Cl}^-)$ 和

$\rho(\text{NO}_3^-)$ 分别低于 250、250 和 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [43,46]。雅江干流河水中 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 介于 1.72 ~ 137.55 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 (40.36 ± 21.53) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\rho(\text{Cl}^-)$ 介于 0.57 ~ 21.90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 (5.78 ± 2.60) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\rho(\text{NO}_3^-)$ 介于 0.01 ~ 7.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 (1.27 ± 1.10) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 因此, 主要离子浓度在饮用水标准范围内。

溶解盐的种类及浓度决定了灌溉用水的适宜性, SAR 能够反映河水中 Na^+ 与土壤中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的交换作用, Na^+ 在其中起了重要作用, 当河水中 Na^+ 的含量过高时, Na^+ 就会与土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 发生置换, 使土壤的渗透性降低, 导致缺钙、反絮凝和耕地受损, 从而影响植物的生长; 同时, 渗透性受土壤中 Na^+ 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的影响, 长期使用高含盐量灌溉水会影响土壤渗透性。本文利用钠吸附比 (SAR)、钠百分比 ($\text{Na}^+\%$) 和渗透性指数 (PI) 评估雅江干流河水的灌溉适宜性[47]。

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / \sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2} \quad (1)$$

$$\text{Na}^+\% = \left[\frac{\text{Na}^+ + \text{K}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+} \right] \times 100 \quad (2)$$

$$\text{PI} = \frac{\text{Na}^+ + \sqrt{\text{HCO}_3^-}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+} \quad (3)$$

式中, Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 HCO_3^- 为离子当量浓度 ($\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$)。

根据 SAR 可将灌溉用水分为 4 类, 依次是: 低 ($\text{SAR} \leq 10$)、中等 ($10 < \text{SAR} \leq 18$)、高 ($18 < \text{SAR} \leq 26$)、非常高 ($\text{SAR} > 26$); 根据 $\text{Na}^+\%$ 可将灌溉用水分为 5 类, 依次是: 优 ($\text{Na}^+\% < 20$)、良 ($20 \leq \text{Na}^+\% < 40$)、一般 ($40 \leq \text{Na}^+\% < 60$)、差 ($60 \leq \text{Na}^+\% < 80$)、极差 ($\text{Na}^+\% \geq 80$); 根据 PI 值可分为 3 类: 不适宜 ($\text{PI} < 0.25$)、基本适宜 ($0.25 \leq \text{PI} < 0.75$)、很适宜 ($\text{PI} \geq 0.75$) [48~50]。

雅江干流河水的 SAR 在 0.11 ~ 0.93 之间, 平均值为 0.37 ± 0.14, 远远低于 10, 雅江干流河水具有很低的 SAR 值; 河流的 SAR 值越低, 越适合灌溉, 当 SAR 值高于 18 时, 河流的水质便不满足灌溉要求。 $\text{Na}^+\%$ 在 8.00 ~ 36.73 之间, 平均值为 16.06 ± 4.97, 属于优, 表明雅江干流河水 Na^+ 的含量低, 发生置换过程较少, 适合灌溉, 对人类和农作物的健康没有危害。 PI 值在 0.39 ~ 0.87 之间, 平均值为 0.66 ± 0.10, 表明雅江干流流域水质基本适宜灌溉。

3 结论

(1) 1973 ~ 2020 年雅江干流 pH 值和 TDS 的平

均值分别是 8.33 ± 0.31 和 (208.30 ± 58.26) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 雅江干支流河水中的优势阴阳离子均为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} ; 近 50 年来雅江 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 的年代增幅率分别为: 2.07、0.81、3.19 和 4.70 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot 10\text{a})^{-1}$; 除 NO_3^- 外, 雅江干流的离子浓度均高于下游支流的离子浓度。

(2) 雅江水化学类型为 HCO_3^- -Ca 型, 水化学组分主要受碳酸盐岩化学风化控制, 雅江干流在 1973 ~ 1990 年间主要受碳酸作用的碳酸盐岩风化, 2001 ~ 2020 年间受碳酸和硫酸共同作用的碳酸盐岩风化。

(3) 雅江干流河水中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 远低于饮用水标准; SAR 值低、 $\text{Na}^+\%$ 属于优、PI 为基本适宜, 表明雅江河水适合灌溉。

参考文献:

- [1] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, et al. Global carbon dioxide emissions from inland waters [J]. *Nature*, 2013, **503** (7476): 355-359.
- [2] 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 等. 珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 [J]. *环境科学*, 2022, **43** (4): 1885-1897.
Tu C L, Yin L H, He C Z, et al. Hydrochemical composition characteristics and control factors of Xiaohuangni River basin in the Upper Pearl River [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (4): 1885-1897.
- [3] Meybeck M. Global occurrence of major elements in rivers [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, **5**: 207-223.
- [4] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China [J]. *Chemical Geology*, 2004, **204** (1-2): 1-21.
- [5] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1944, **25** (6): 914-928.
- [6] 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.
- [7] Nguyen T T, Kawamura A, Tong T N, et al. Clustering spatio-seasonal hydrogeochemical data using self-organizing maps for groundwater quality assessment in the Red River Delta, Vietnam [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **522**: 661-673.
- [8] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170** (3962): 1088-1090.
- [9] Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads [J]. *American Journal of Science*, 1987, **287** (5): 401-428.
- [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] 乐嘉祥, 王德春. 中国河流水化学特征 [J]. *地理学报*, 1963, **29** (1): 1-13.

- [12] 陈静生, 李荷碧, 夏星辉, 等. 近 30 年来黄河水质变化趋势及原因分析[J]. 环境化学, 2000, **19**(2): 97-102.
Chen J S, Li H B, Xia X H, *et al.* A study on water-quality trend in the Yellow River system from 1960's to 1990's [J]. Environmental Chemistry, 2000, **19**(2): 97-102.
- [13] 王欣, 覃光华, 李红霞. 雅鲁藏布江干流年径流变化趋势及特性分析[J]. 人民长江, 2016, **47**(1): 23-26.
Wang X, Qin G H, Li H X. Analysis on characteristics and variation trend of annual runoff of mainstream of Yarlung Tsangpo River [J]. Yangtze River, 2016, **47**(1): 23-26.
- [14] 刘佳驹, 郭怀成. 雅鲁藏布江河水氢氧同位素时空变化特征[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(11): 5194-5200.
Liu J J, Guo H C. Temporal and spatial variation characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in Yarlung Zangbo River [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(11): 5194-5200.
- [15] 刘天仇. 雅鲁藏布江水文特征[J]. 地理学报, 1999, **54**(S1): 157-164.
Liu T C. Hydrological characteristics of Yalungzangbo River [J]. Acta Geographica Sinica, 1999, **54**(S1): 157-164.
- [16] 杨浩, 崔春光, 王晓芳, 等. 气候变暖背景下雅鲁藏布江流域降水变化研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, **38**(6): 565-575.
Yang H, Cui C G, Wang X F, *et al.* Research progresses of precipitation variation over the Yarlung Zangbo River Basin under global climate warming [J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, **38**(6): 565-575.
- [17] 张仪辉, 刘昌明, 梁康, 等. 雅鲁藏布江流域降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2022, **77**(3): 603-618.
Zhang Y H, Liu C M, Liang K, *et al.* Spatio-temporal variation of precipitation in the Yarlung Zangbo River basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, **77**(3): 603-618.
- [18] 陈卓瑜, 陈旻, 张陵蕾, 等. 雅鲁藏布江中游径流历史演变特性及记忆性研究[J]. 人民长江, 2021, **52**(S1): 56-62.
Chen Z Y, Chen M, Zhang L L, *et al.* Study on runoff historical evolution characteristics and memory in middle stream of Yarlung Zangbo River [J]. Yangtze River, 2021, **52**(S1): 56-62.
- [19] 李浩, 牛乾坤, 王宣宣, 等. 1961-2015 年雅鲁藏布江流域径流演变规律分析[J]. 水土保持学报, 2021, **35**(1): 110-115.
Li H, Niu Q K, Wang X X, *et al.* Variation characteristics of runoff in the Yarlung Zangbo River basin from 1961 to 2015 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, **35**(1): 110-115.
- [20] 王珍, 宋进喜, 段孟辰. 雅鲁藏布江径流变化的影响因素分析研究[J]. 环境科学与管理, 2016, **41**(3): 53-57.
Wang Z, Song J X, Duan M C. Research on influencing factors of runoff changes of Yarlung Zangbo River basin [J]. Environmental Science and Management, 2016, **41**(3): 53-57.
- [21] Li D, Li J, Zhang L L, *et al.* Variations in the key hydrological elements of the Yarlung Zangbo River basin [J]. Water Supply, 2019, **19**(4): 1088-1096.
- [22] Huang X, Sillanpää M, Gjessing E T, *et al.* Water quality in the southern Tibetan Plateau: chemical evaluation of the Yarlung Tsangpo (Brahmaputra) [J]. River Research and Applications, 2011, **27**(1): 113-121.
- [23] Jiang L G, Yao Z J, Wang R, *et al.* Hydrochemistry of the middle and upper reaches of the Yarlung Tsangpo River system: weathering processes and CO₂ consumption [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **74**(3): 2369-2379.
- [24] 刘昭. 雅鲁藏布江拉萨—林芝段天然水水化学及同位素特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
Liu Z. The characterization of hydrochemistry and isotopic in the natural water of the Yarlung Tsangpo Lhasa-Nyingchi [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [25] 包宇飞. 雅鲁藏布江水文水化学特征及流域碳循环研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
Bao Y F. The study of hydrochemical characteristics and carbon cycles in the Yarlung Zangbo River basin [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.
- [26] 严宇鹏, 牛凤霞, 刘佳, 等. 雅鲁藏布江上游夏季水化学特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(2): 815-825.
Yan Y P, Niu F X, Liu J, *et al.* Hydrochemical characteristics and sources of the upper Yarlung Zangbo River in summer [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(2): 815-825.
- [27] Wang S L, Jin H J, Li S X, *et al.* Permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau and its environmental impacts [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2000, **11**(1): 43-53.
- [28] 刘剑, 姚治君, 陈传友. 雅鲁藏布江径流变化趋势及原因分析[J]. 自然资源学报, 2007, **22**(3): 471-477.
Liu J, Yao Z J, Chen C Y. Evolution trend and causation analysis of the runoff evolution in the Yarlung Zangbo River basin [J]. Journal of Natural Resources, 2007, **22**(3): 471-477.
- [29] 韩宇平, 王兆涵, 汪磊, 等. 多雄藏布流域水化学特征及化学风化特征的分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, **42**(2): 1-9.
Han Y P, Wang Z H, Wang L, *et al.* Analysis on hydrochemical characteristics and chemical weathering of Doxung Tsangpo basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, **42**(2): 1-9.
- [30] 仁增拉姆, 罗珍, 陈虎林, 等. 西藏年楚河流域水化学特征分析[J]. 地球与环境, 2021, **49**(4): 358-366.
Renzeng L M, Luo Z, Chen H L, *et al.* Hydrochemical characteristics of Nyangchu River basin in Tibet [J]. Earth and Environment, 2021, **49**(4): 358-366.
- [31] 彭定志, 徐宗学, 巩同梁. 雅鲁藏布江拉萨河流域水文模型应用研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008, **44**(1): 92-95.
Peng D Z, Xu Z X, Gong T L. Application of hydrological models to the Lhasa River basin of the Yalu Zangbo River [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2008, **44**(1): 92-95.
- [32] 任培. 拉萨河流域农用地土壤重金属污染现状调查分析[D]. 拉萨: 西藏大学, 2021.
Ren P. Investigation and analysis of the status of heavy metal pollution in agricultural land in Lhasa River basin [D]. Lhasa: Tibet University, 2021.
- [33] 孟俊伦, 郭建阳, 吴婕, 等. 青藏高原原洋河流域化学风化的季节变化特征和影响因素[J]. 地球环境学报, 2020, **11**(2): 190-203.
Meng J L, Guo J Y, Wu J, *et al.* Seasonal variations of chemical weathering and its controlling factors of Nyang River in the Tibetan Plateau [J]. Journal of Earth Environment, 2020, **11**(2): 190-203.
- [34] 黄亮. 藏东南帕隆藏布中段第四纪沉积物特征及成因分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
Huang L. Characteristic and cause analysis of quaternary sediments in the middle part of the Palongzangbo River valley in Southeast Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [35] 黄俊雄, 徐宗学, 巩同梁. 雅鲁藏布江径流演变规律及其驱动因子分析[J]. 水文, 2007, **27**(5): 31-35.
Huang J X, Xu Z X, Gong T L. Characteristics and driving factors of the runoff variations in the Yarlung Zangbo River [J]. Journal of China Hydrology, 2007, **27**(5): 31-35.

- [36] 张小侠. 雅鲁藏布江流域关键水文要素时空变化规律研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
Zhang X X. Spatial-temporal evolutionary laws of the key hydrological elements in Yarlung Zangbo River basin [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [37] 刘敏, 赵良元, 李青云, 等. 长江源区主要河流水化学特征、主要离子来源 [J]. 中国环境科学, 2021, **41** (3): 1243-1254.
Liu M, Zhao L Y, Li Q Y, *et al.* Hydrochemical characteristics, main ion sources of main rivers in the source region of Yangtze River [J]. China Environmental Science, 2021, **41** (3): 1243-1254.
- [38] 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.
- [39] 左禹政, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 贵州省都柳江流域水化学特征研究 [J]. 中国环境科学, 2017, **37** (7): 2684-2690.
Zuo Y Z, An Y L, Wu Q X, *et al.* Study on the hydrochemical characteristics of Duliu River basin in Guizhou Province [J]. China Environmental Science, 2017, **37** (7): 2684-2690.
- [40] 汪磊, 杨剑, 王兆涵, 等. 近 50 年来雅鲁藏布江流域水化学特征变化及成因分析 [J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 2021, **42** (2): 10-16.
Wang L, Yang J, Wang Z H, *et al.* Study on the variation of water chemistry characteristics and causes of the Yarlung Tsangpo River basin in recent 50 years [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, **42** (2): 10-16.
- [41] Chen J S, Wang F Y, Xia X H, *et al.* Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River) [J]. Chemical Geology, 2002, **187** (3-4): 231-255.
- [42] Li S Y, Xu Z F, Wang H, *et al.* Geochemistry of the upper Han River basin, China: 3; anthropogenic inputs and chemical weathering to the dissolved load [J]. Chemical Geology, 2009, **264** (1-4): 89-95.
- [43] Li S Y, Zhang Q F. Geochemistry of the upper Han River basin, China, 1; spatial distribution of major ion compositions and their controlling factors [J]. Applied Geochemistry, 2008, **23** (12): 3535-3544.
- [44] Li S Y, Lu X X, He M, *et al.* Major element chemistry in the upper Yangtze River: a case study of the Longchuanjiang River [J]. Geomorphology, 2011, **129** (1-2): 29-42.
- [45] Li Y Z, Gao Z J, Liu J T, *et al.* Hydrogeochemical and isotopic characteristics of spring water in the Yarlung Zangbo River basin, Qinghai-Tibet Plateau, Southwest China [J]. Journal of Mountain Science, 2021, **18** (8): 2061-2078.
- [46] 李思悦, 谭香, 徐志方, 等. 湖北丹江口水库主要离子化学季节变化及离子来源分析 [J]. 环境科学, 2008, **29** (12): 3353-3359.
Li S Y, Tan X, Xu Z F, *et al.* Seasonal variation in the major ion chemistry and their sources in the Hubei Danjiangkou reservoir, China [J]. Environmental Science, 2008, **29** (12): 3353-3359.
- [47] Raju N J, Shukla U K, Ram P. Hydrogeochemistry for the assessment of groundwater quality in Varanasi: a fast-urbanizing center in Uttar Pradesh, India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **173** (1-4): 279-300.
- [48] Ebadati N, Hooshmandzadeh M. Water quality assessment of river using RBF and MLP methods of artificial network analysis (case study: Karoon River Southwest of Iran) [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, **78** (17), doi: 10.1007/s12665-019-8472-0.
- [49] Sivasankar V, Omine K, Msagati T A M, *et al.* Evaluation of groundwater quality in Madurai City, South India for drinking, irrigation and construction purposes [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, **7** (8): 3093-3107.
- [50] 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.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non- Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)