

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 王斌涛, 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, 严仁嫦, 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 O₃ 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, 王洪杰 (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)

李家河水库春季分层期 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, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)

三峡库区万州段河流水-气界面 CO₂ 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 Pb²⁺ 的吸附行为 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱延省, 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)

浙中典型硫铁矿农区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区土壤重金属风险分区 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)

电子垃圾拆解固废渣-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, 张晗, 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 姜霓雯, 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 闫文豪, 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)

城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析

刘全忠¹, 彭柯¹, 苏振华², 邸琰茗³, 郭道宇^{1*}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国制浆造纸研究院, 北京 100020; 3. 北京市北运河管理处, 北京 101100)

摘要: 受城市污水处理厂处理工艺的限制和水源来源复杂等因素限制, 再生水中富含的无机氮和痕量持久性有机物在河湖补给过程中通过侧向渗漏或生物累积的方式造成潜在人体健康风险. 探究再生水补给河道不同类型再生水特征水质因子空间变异规律及其成因对于河湖管理具有重要意义. 以北运河京津冀段为研究区域, 借助于聚类、判别、主成分和方差分解等方法探究河道水质中常规理化指标、全量指标、无机氮指标、盐离子和抗生素的空间变化特征. 结果表明, 不同类型的水质因子虽然在空间分布格局模式具有一致性, 均呈现显著的中上游与下游分布, 但变异程度和变异机制存在较大差异. 无机氮和抗生素空间变化最为明显, 而常规理化指标和全量指标变异最弱, 盐离子表现为中等程度的变异. 常规理化指标空间变异机制主要体现在以微生物降解为主; 全量指标则是由微生物、扩散和二者的协同作用及一定程度源汇同质化效应综合作用的结果; 扩散是影响盐离子空间变异模式的主要作用机制; 无机氮空间变异机制主要体现在源汇同质化和微生物降解, 扩散作为无机氮空间变异的次要机制与微生物降解具有协同作用; 抗生素因化学结构稳定性和生物可降解性存在较大差异, 从而表现为较高的空间变异性, 且扩散与微生物协同作用最强. 成果是基于方差分解的水质空间变异机制的定量解析, 对河流污染物空间变异成因和河流管理具有实际指导意义.

关键词: 城市河道; 再生水; 无机氮; 抗生素; 空间变化

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0256-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202104244

Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water

LIU Quan-zhong¹, PENG Ke¹, SU Zhen-hua², DI Yan-ming³, GUO Xiao-yu^{1*}

(1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. China National Pulp and Paper Research Institute, Beijing 100020, China; 3. Beijing North Canal Manage Office, Beijing 101100, China)

Abstract: Due to the limitations of the treatment process of urban sewage treatment plants and the complexity of water sources, the rich inorganic nitrogen and trace persistent organic matter in the reclaimed water cause potential human health risks through lateral leakage or bioaccumulation during the replenishment process of rivers and lakes. Exploring the distribution law of different types of reclaimed water characteristic water quality factors and their formation in reclaimed water replenishment river channels is of great significance to river and lake management. This study takes the Beijing-Tianjin-Hebei section of the North Canal as the research area and explores the spatial variation characteristics of conventional physical parameters, full index, inorganic nitrogen, and salinity hydronium antibiotics in river water quality with the help of clustering, discrimination, principal components, and variance decomposition. The results showed that, although the spatial distribution patterns of different types of water quality factors were consistent, they all showed significant mid-upstream and downstream distribution; however, there were big differences in the degree of variation and the mechanism of variation. The spatial variation of inorganic nitrogen and antibiotics was the most obvious, whereas the variation in conventional physical parameters and the full index was the weakest, and the salinity hydronium showed moderate variation. The spatial variation mechanism of conventional physical parameters was mainly reflected in microbial degradation. The full index was the result of the combined effect of microorganisms, diffusion, the synergy of the two, and a certain degree of source-sink homogeneity. Diffusion was the main mechanism affecting the spatial variation in salinity hydronium. The spatial variation mechanism of inorganic nitrogen was mainly reflected in the source-sink homogenization and microbial degradation; as a secondary mechanism of the spatial variation of inorganic nitrogen, diffusion had a synergistic mode with microbial degradation. Antibiotics, which have great differences in chemical structural stability and biodegradability, showed high spatial variability and had the highest diffusion and microbial synergy mechanism. This research provides a quantitative analysis of the spatial variability mechanism of water quality based on variance decomposition, which has practical guiding significance for the causes of the spatial variability of river pollutants and river management.

Key words: urban river channel; reclaimed water; inorganic nitrogen; antibiotics; spatial variation

再生水在缓解城市生态用水方面具有水量优势显著的特点,但其水质本身存在不可忽视的问题.受城市污水处理厂处理工艺的限制,再生水含有较高氮磷营养元素、重金属、消毒副产物、多氯联苯、多环芳烃和抗生素等多种有毒有害物质^[1].通过绿化灌溉、河湖水源补给和地下水等方式回用的再生水存在潜在的环境风险和人体健康风险^[2].高含量的营养元素随再生水河湖补给进入天然水体,引起

藻类大量繁殖和水体富营养化^[3].“假持久性”抗生素经常在以再生水为补给水源的城市河流、湖泊、地下水、海水和饮用水等中被检出^[4],尤其是水体

收稿日期: 2021-04-23; 修订日期: 2021-06-08

基金项目: 北京市自然科学基金-北京市教育委员会联合重点项目 (KZ20190028042)

作者简介: 刘全忠(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染治理与环境微生物, E-mail: 18766953471@163.com

* 通信作者, E-mail: xiaoyu@126.com

中残留的抗生素会影响水生生物^[5],改变微生物活性和群落组成^[6]并导致病原菌耐药性的增加,并且耐药菌会通过食物链及其他一些途径进入人体对人类产生危害^[7].

城市河道是城市生态系统的重要组成部分,具有提供水源、便捷交通、防洪排水和城市景观等作用.此外,城市河道还可以调节气候,通过河流的自净能力削弱环境污染问题^[8~11].河网水系水动力不足,各类设施占用河道降低河网连通性,影响河道生物多样性,降低河道水体自净能力是大部分平原城市河道存在的普遍性问题^[12].衬砌或人工闸坝等大型工程措施阻断了自然河流与地下水的水文循环过程,进而改变水质特征.人工闸坝通过人为调节排水量、排水时间和排水频率,改变河流原本的自然水动力学机制,激流型的河流生态系统转变为静水型生态系统,河道颗粒物的沉降速率明显增加^[13,14],进而减弱物质在上下游之间的交换和污染物的扩散过程,进一步增加再生水补给型河湖富营养化风险和有毒有害物质环境风险与人体健康风险.不同类型的污染物因其化学物质结构特征、溶解性、吸附性和生物可利用性等存在较大差异^[15],对闸坝、衬砌和湿地等人工措施的响应模式也存在较大差异^[16~20],从而在空间尺度上随扩散表现出不同的变异模式^[21],但这方面研究尚未见报道.因此,本文拟在区域尺度上探究再生水补水的人工化河道中再生水典型特征污染物在空间上的变化规律及其相互作用,探究闸坝、扩散和微生物对特征污染物空间变化模式的影响,以期为控制再生水河湖水体富营养化治理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

北运河不但承担北京市防洪排涝的任务,也发挥了城市生态景观和休闲娱乐的功能,是北京市重点治理的城市污染河流^[22].北运河源于北京市昌平区及海淀区一带,后向南流入通州区,流经河北,在天津市汇入海河,全长 260 km.流域总面积为 6 166 km²,其中,山区面积 952 km²,占 16%,平原面积 5 214 km²,占 84%.研究区多年平均降雨量 643 mm,降雨主要集中在 6~9 月,约占全年的 84%^[23].作为京杭大运河的重要组成部分,北运河主要流经城市化水平高的北京和天津,人口产业密集,是海河流域骨干行洪排涝河道之一^[23].北运河流域土地利用类型和污染源差异导致河流地理空间尺度上存在潜在环境梯度,其次,上游流经北京城区,93%的水源来源于城市人口消耗的经处理废

水,4%是未经处理的废水;位于京津之间的中游地区主要流经农田,农业化肥和农药污染是中游地区主要的污染物;下游进入天津地区,接受来自天津经处理和未处理的废水^[24].由于地处平原地区,水流流速缓慢致使水流中裹挟的浊物逐步沉淀,最终导致河道淤积严重^[25].

1.2 采样点的布设和样品采集

考虑到夏季高温多雨,藻类生长繁殖旺盛,是河道水质治理重点时段.于 2019 年 9 月 3~4 日在高度人工化的北运河结合周边土地利用类型和均匀布点的基本原则设置样点 15 个,如图 1 所示.其中,1~5 号为上游样点、6~11 号为中游样点 (mid-upstream samples, MUS) 和 12~15 号为下游样点 (downstream samples, DS).每个采样点采集平行的 2L 混合均匀的水样 2 个,冰袋低温保存并快速运回实验室.同时,通过全球定位系统 (GPS, Garmin Legend, Garmin USA) 定位每个样点的坐标,并采用多参数水质测定仪 (AP-7000) 测定: pH、溶解性总固体 (TDS)、温度 (T)、氧化还原电位 (ORP)、电导率 (EC) 和浊度.

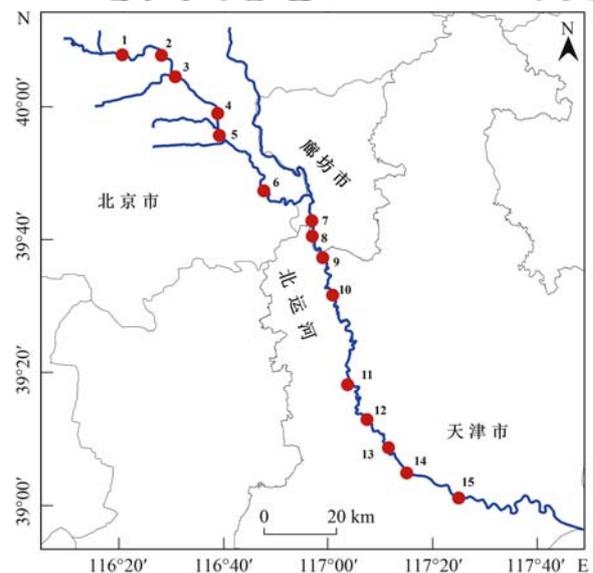


图 1 北运河采样点分布示意

Fig. 1 Sampling locations in the North Canal River

1.3 水质理化分析

带回室内的水质 24 h 内完成水质理化分析.测试的指标主要包括常规理化 (conventional physics, CP): T 、pH、ORP 和浊度; 全量指标 (full index, FI): 高锰酸盐指数、总氮 (TN)、总磷 (TP)、总有机碳 (TOC) 和总碳 (TC); 无机氮 (Inorganic nitrogen, IN): 氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝酸盐氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 和亚硝酸盐氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$); 盐离子 (salinity hydronium, SH): TDS、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} ;

抗生素(antibiotics, AB)包括磺胺类(sulfonamides, SAs):磺胺嘧啶(sulfadiazine, SDZ)、磺胺甲氧嘧啶(sulfamonomethoxine, SMM)、磺胺吡啶(sulfapyridin, SPD)、磺胺二甲嘧啶(suflamethazine, SMA)和磺胺甲噁唑(sulfamethoxazole, SMX);氟喹诺酮类(fluoroquinolones, FQs):环丙沙星(ciprofloxacin, CIP)、马波沙星(marbofloxacin, MBX)、氟罗沙星(fleroxacin, FLE)、诺氟沙星(norfloxacin, NOR)、达氟沙星(danofloxacin, DAN)、氧氟沙星(ofloxacin, OFL)、恩诺沙星(enrofloxacin, ENR)、加替沙星(gatifloxacin, GATI)、西诺沙星(cinoxacin, CIN)和萘啶酸(nalidixic acid, NDA);四环素类(tetracyclines, TCs):差向四环素(4-epitetracycline, ETC)、四环素(tetracycline, TC)、土霉素(oxytetracycline, OTC)和金霉素(chlortetracycline, CTC);大环内酯类(macrolides, MLs):奥美托普(ormetoprim, ORM)、林可霉素(lincomycin, LIN)、克林霉素(clindamycin hydrochloride, CLI)、替米考星(tilmicosin, TIL)、红霉素(erythromycin, ETM)、克拉霉素(clarithromycin, CTM)、罗红霉素(roxithromycin, ROY)和阿奇霉素(azithromycin, AZM)等。

水中高锰酸盐指数采用滴定法测定;氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)采用纳氏试剂分光光度法测定;硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)采用紫外分光光度法测定;亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)采用 N -(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定;总氮(TN)采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;总磷(TP)采用钼酸盐分光光度法测定;总有机碳(TOC)和总碳(TC)采用 TOC 测定仪测定,阴阳离子(Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-})采用离子色谱仪测定。抗生素采用超高效液相色谱串联三重四级杆质谱仪进行分析。水样全部采用玻璃纤维滤膜过滤(GF/F0.7 μm , Whatman, UK),滤膜使用前用超纯水浸泡至少 24 h,浸泡过程换水 2 次。取 2 L 滤液于干燥的棕色蓝盖玻璃瓶内,加入 100 μL 浓度为 500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的抗生素内标和 0.5 g 的 Na_2EDTA 。使用甲醇和超纯水清洗固相萃取装置和进样器,然后将 Oasis HLB 固相萃取小柱在固相萃取装置上进行活化,活化分别用 10 mL 甲醇和 10 mL 超纯水。将棕色玻璃瓶内滤液连接固相萃取装置上被活化后的 HLB 固相萃取小柱进行上样,水样上样速度 15 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。待滤液完全上样后,采用 10 mL 超纯水淋洗 HLB 固相萃取小柱,抽干 0.5 h。使用 10 mL 甲醇洗脱 HLB 小柱,用试管保证流速低于 1~2 $\text{s}\cdot\text{滴}^{-1}$,在 30 $^\circ\text{C}$ 条件下使用缓和高纯氮气流吹干甲醇,并用 1 mL 甲醇重新溶解,涡旋

后使用 2 mL 一次性注射器带 0.22 μm 滤头过滤保存在 1 mL 棕色液相小瓶中,置于 -20 $^\circ\text{C}$ 环境下保存^[26,27]。

水质指标均按照国家标准方法确保质量控制。校准曲线的相关系数 R^2 大于等于 0.999;每批样品做一个空白实验,空白实验不高于方法规定数值;每批样品至少测定 10% 的平行双样。抗生素采用外标和内标进行定量,配制 1、10、20、50、100、200 和 400 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的标准液,确定了校准曲线的线性关系($R^2 > 0.99$)。各抗生素的加标回收率为 73.8%~122.3%。每个采样点做两个平行样,相对标准偏差小于 15%,每批样品做 2 个超纯水的全过程空白样。

1.4 数据分析方法

利用 PRIMER5.0 计算 Bray-Curtis 相似性矩阵绘制聚类图和相似性百分比(SIMPER)分析组间和组内平均秩相似性差异。在此基础上,基于 Bray-Curtis 相似性的非度量多维尺度分析(NMDS)和 Global 检验。利用 SPSS 26.0 对水质参数进行判别分析并通过 Oringin 2018 绘制水质差异箱线图,同时利用 SPSS 26.0 对环境因子进行标准化的主成分分析(principal component analysis, PCA),在进行分析前,所有的环境因子需经过对数转换(除 pH 外)。基于环境因子矩阵利用 PRIMER5.0 计算欧式距离,利用 Arcgis 10.2 中提取的河网,手动获得样点间地理距离^[28,29],基于微生物 OTUs (operational taxonomic units) 数据矩阵利用 PRIMER 5.0 计算 Bray-Curtis 相似性。利用 Oringin 2018 绘制不同类环境因子的欧式距离分别与地理距离、闸坝数量和微生物相似性的斯皮尔曼相关性系数图。利用 Canoco5.0 对闸坝、扩散和微生物与水质参数矩阵进行方差分解分析。

2 结果与分析

2.1 不同类型水质因子空间变化模式分析

基于不同类型水质因子数据矩阵的样品空间聚类分析识别污染物空间变化模式,见图 2。从中可知,不同类型水质参数在空间分布模式上均表现出与地理距离相同或相似的分布格局,即整体上呈现出中上游和下游两组较为明显的类群。但不同类型的环境因子划分类群时所依赖的相似性标准系数的大小存在较大的差异。无机氮数据具有最高的空间变异性,在相似性系数为 48% 时划分为与地理空间具有一定吻合的中上游类群(样点 1、3~9)和下游类群(样点 12~15)。其次,基于抗生素数据矩阵的空间变异较为明显,在相似性系数为 65% 划分为较

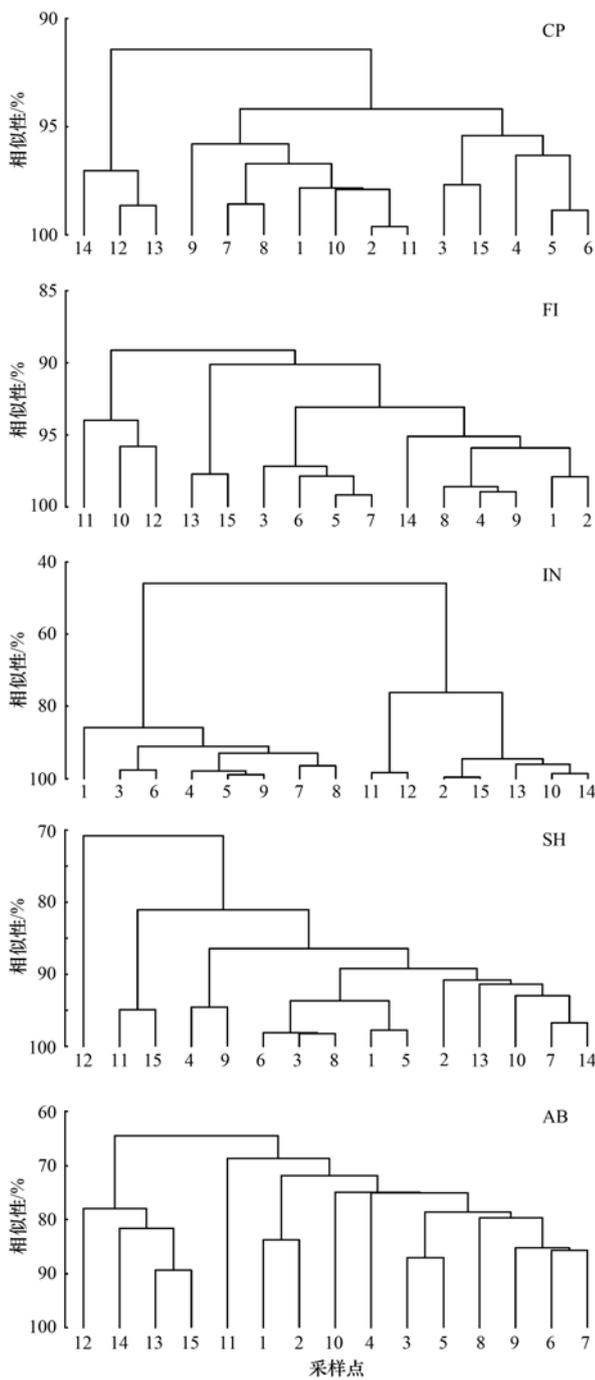


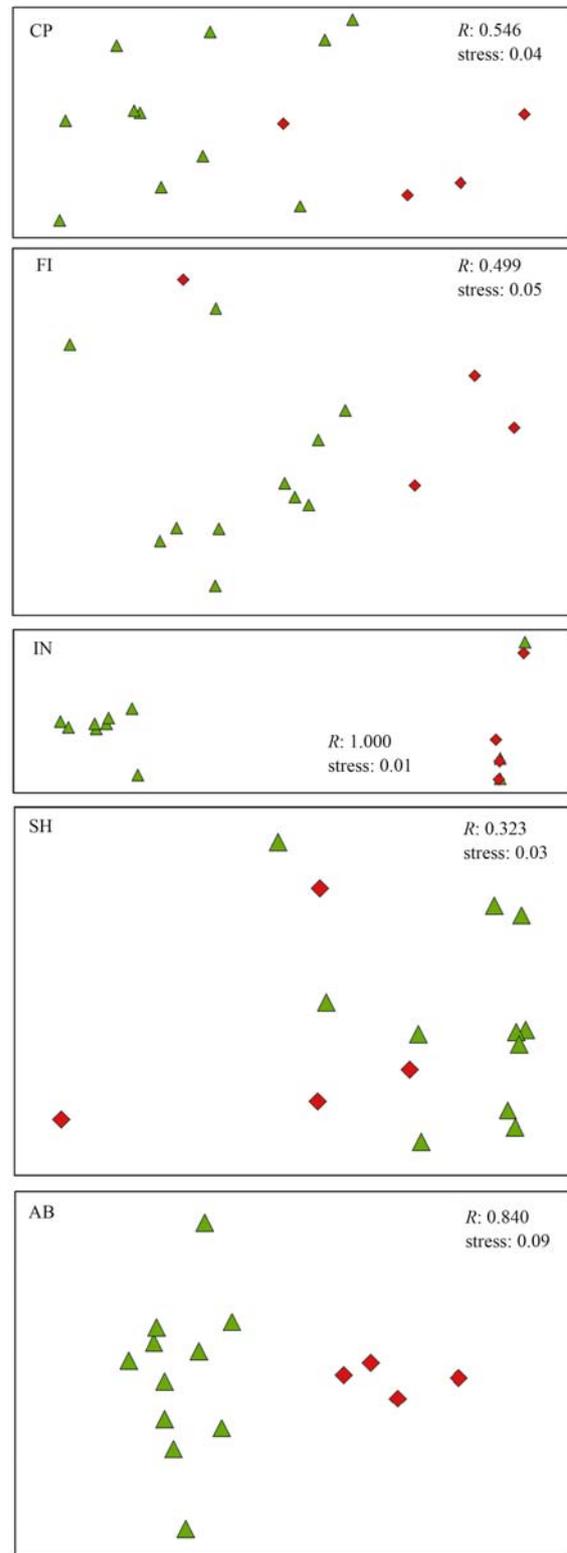
图 2 基于不同类型水质因子的样点空间聚类

Fig. 2 Spatial clustering map based on water quality sample points

为显著的中上游类群(样点 1 ~ 11)和下游类群(样点 12 ~ 15), 聚类和其分型特征显示其类内和类间均具有较强的空间变异性. 盐分离子数据矩阵在相似性系数为 71% 时剥离出样点 12, 进而在 81% 剥离出样点 11 和样点 15, 结合聚类图分型情况可知盐分离子虽在地理空间变异规律不显著, 但类内具有一定程度的变异. 与其他类型水质参数相比较, 常规理化指标和全量指标均具有较小的空间变异.

为进一步考察不同类型水质因子空间变化模式, 基于不同类型的水质参数绘制 NMDS 排序(图

3), 并借助于 Global test 比较其在中上游类群(样点 1 ~ 11)和下游类群(样点 12 ~ 15)间的显著性. 常规理化指标 (stress = 0.04, Global R = 0.546, P = 0.003)、全量指标 (stress = 0.05, Global R = 0.499,



绿色表示中上游样点 1 ~ 11; 红色表示下游样点 12 ~ 15

图 3 基于不同类型水质因子的样点 NMDS 排序

Fig. 3 NMDS sequence diagram based on water quality sample points

$P = 0.008$)、无机氮 (stress = 0.01, Global $R = 1.000$, $P = 0.001$)、盐分离子 (stress = 0.03, Global $R = 0.323$, $P = 0.033$) 和抗生素 (stress = 0.09, Global $R = 0.840$, $P = 0.001$) 均随地理距离的变化存在显著差异. 基于无机氮、抗生素的排序图中表现为中上游与下游各自样点间分布集中, 中上游与下游间具有清晰的分布界限和范围, 呈现出显著中上游与下游分布, 表明无机氮、抗生素的空间分布差异性较其他类型水质参数更为明显. 进一步结合类间差异性系数和类内相似性系数解析空间变化规律(表 1), 不同类型水质因子在中上游与下游均存

表 1 基于 Bray-Curtis 相异性的空间不同类水质指标变化分析

Table 1 Analysis of changes in different types of water quality indicators in space based on Bray-Curtis dissimilarity

水质指标	位置	组间差异 /%	Global 检验		位置	组内相似 /%
			R	P		
CP	UMS&DS	7.67	0.546	0.003	UMS	95.27
					DS	95.94
FI	UMS&DS	10.00	0.499	0.008	UMS	93.63
					DS	91.11
IN	UMS&DS	72.87	1.000	0.001	UMS	84.54
					DS	59.83
SH	UMS&DS	17.64	0.323	0.033	UMS	88.07
					DS	81.99
AB	UMS&DS	35.50	0.840	0.001	UMS	74.67
					DS	81.07

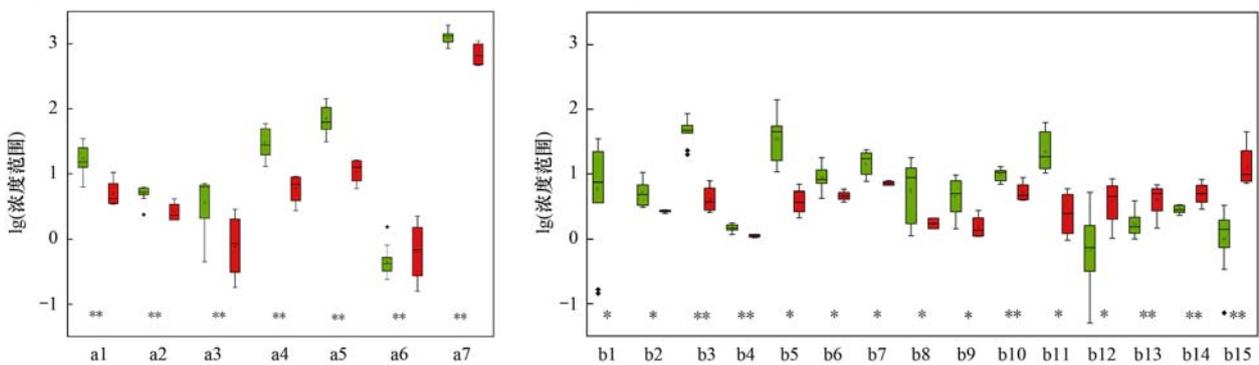
在显著差异 ($P < 0.05$). 其中, 无机氮数据矩阵具有最大的类间差异性 (72.87%), 其次为抗生素 (35.50%). 常规化因子则表现为最低的类间差异性 (7.67%) 和最高的类内相似性 (95.94%). 基于 NMDS 的分析结果与聚类具有一致的结果.

2.2 不同类型水质因子空间判别分析

在此基础上, 对不同类型水质因子在空间类群间的差异性进行判别分析(图 4). 浊度、高锰酸盐指数、TOC、TC、 NO_3^- -N 和 TDS 均表现出显著的空间差异 ($P < 0.01$), 并表现为中上游显著高于下游的空间变化模式(图 3). 抗生素中磺胺类的 SMX、氟喹诺酮类的 MBX 和大环内酯类的 ORM 均表现为中上游高于下游 ($P < 0.01$), 而四环素类的 ETC、TCs 和 CTC 均表现为与此相反, 表现为中上游显著低于下游 ($P < 0.01$).

2.3 不同类型水质因子主成分分析

为了进一步分析不同类型水质因子来源性的差异, 将有显著差异的水质因子进行主成分分析, 见表 2. 从中可知, 特征值大于 1 的 6 个旋转因子累积贡献率为 87.95%. PCA1 (45.98%) 与 TN、 NO_3^- -N、TOC 和 TC 相关性较高, 主要表明再生水补给过程中的无机氮污染和有机污染, 氟喹诺酮类抗生素 OFL 和它们具有同源性; PCA2 (11.79%) 与浊度、高锰酸盐指数和 TDS 相关性较高, 表征再生水补给



绿色表示中上游样点 1~11, 红色表示下游样点 12~15; a1. 浊度, a2. 高锰酸盐指数, a3. TN, a4. TOC, a5. TC, a6. NO_3^- -N, a7. TDS, b1. SPD, b2. SMA, b3. SMX, b4. MBX, b5. OFL, b6. ENR, b7. GATI, b8. CIN, b9. NDA, b10. ORM, b11. CLI, b12. TIL, b13. ETC, b14. TC, b15. CTC; ** 表示在 0.01 级别(双尾)显著; * 表示在 0.05 级别(双尾)显著

图 4 不同类别环境因子的空间分布差异性箱图

Fig. 4 Boxplots of spatial distribution differences of different types of environmental factors

口物理扰动对水文水质的间接影响, 大环内酯类 ORM 和其有同源性. PCA3 (10.25%) 与氟喹诺酮类 ENR、CIN 和 NDA 具有相关性, 同时 PCA6 (5.17%) 也与氟喹诺酮类 MBX 和 GATI 具有相关性, 医院、家庭和制药工业产生的废水是 FQs 释放到环境中的关键人为来源^[30]. PCA4 (8.69%) 主要与磺胺类 SDZ、大环内酯类 TIL 和四环素类 TCs 呈现显著负相关, 表明这三者之间具有同源性, 大多来

源于再生水补给. PCA5 (6.07%) 代表了磺胺类抗生素 SMX 和大环内酯类 CLI 的变化规律. 不同的主成分分析维度代表了不同类型水质因子因其化学结构特征、溶解性、吸附性和生物可利用性的不同, 从而产生不同的空间变异模式. 不同类型水质因子虽具有较为相似的空间分布格局, 但空间变化分异趋势存在明显差异. 抗生素类水质因子变异尺度较大, 分别分布于 PCA 的 6 个维度上, 其次是无机氮和全

表 2 环境因子主成分分析结果¹⁾

Table 2 Principal component analysis results of environmental factors

水质指标	主成分					
	1	2	3	4	5	6
浊度	-0.25	0.62	0.10	0.13	0.46	0.50
高锰酸盐指数	0.06	0.79	0.28	0.14	0.36	0.23
TN	0.92	0.09	0.04	0.00	0.25	0.09
TOC	0.66	0.48	0.27	0.30	0.01	-0.02
TC	0.65	0.52	0.18	0.32	0.03	0.00
NO ₃ ⁻ -N	0.92	0.04	0.10	0.16	0.11	0.18
TDS	0.31	0.63	0.59	0.08	-0.12	0.22
SMA	0.00	0.57	0.33	0.28	-0.17	0.42
SDZ	0.05	-0.14	-0.08	-0.78	0.47	-0.13
SMX	0.51	0.17	0.19	0.12	0.73	0.15
MBX	0.40	0.27	0.17	0.09	0.30	0.68
OFL	0.84	0.07	0.24	0.06	-0.03	0.26
ENR	0.00	0.17	0.88	0.16	0.06	0.22
GATI	0.26	0.32	0.13	0.17	-0.13	0.82
CIN	0.30	0.38	0.78	0.27	0.01	-0.19
NDA	0.36	0.30	0.77	0.00	-0.04	0.31
ORM	0.25	0.69	0.32	0.40	0.14	0.14
CLI	0.06	0.21	-0.12	0.09	0.89	0.00
TIL	-0.22	-0.11	-0.20	-0.82	-0.35	-0.02
ETC	-0.25	0.12	-0.49	-0.42	-0.35	-0.58
TC	-0.28	-0.11	-0.14	-0.81	-0.30	-0.34
CTC	-0.35	-0.73	-0.11	0.22	-0.28	-0.09
特征值	10.12	2.59	2.26	1.91	1.34	1.14
贡献率/%	45.98	11.79	10.25	8.69	6.07	5.17
累计贡献率/%	45.98	57.77	68.03	76.71	82.79	87.95

1) 黑体数字表示各环境指标最大因子载荷值

量因子表征的有机污染空间分异趋势相似, 常规理化因子中的浊度和温度则代表更小尺度的分异趋势。

2.4 不同类型水质因子空间变化机制

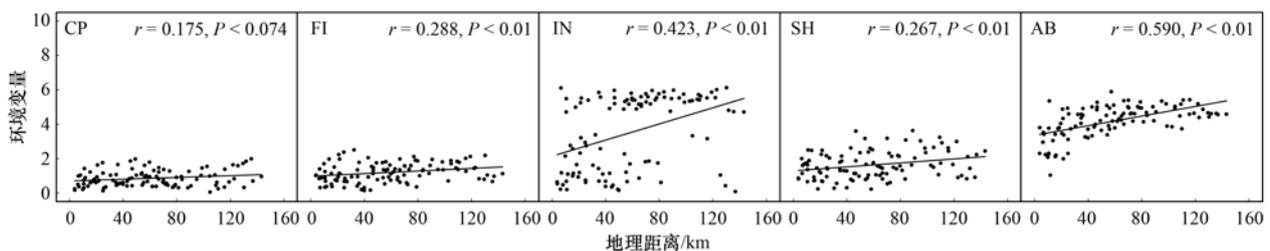
2.4.1 扩散对不同类型水质因子空间变化的贡献率

通过水质参数矩阵与地理距离的相关关系探究不同类型水质因子与扩散的关系(图 5)。除常规理化指标外, 其余水质因子矩阵均与地理距离的变化显著相关($P < 0.01$)。全量指标、无机氮、盐分离子和抗生素数据矩阵的相关系数依次为 0.288、0.423、0.267 和 0.590。结合方差分解结果定量评价扩散对不同类型水质因子的空间变异贡献率(表

3), 同样表明除常规理化指标外, 其他水质因子矩阵的空间变异均受到扩散作用的显著影响($P < 0.05$), 全量指标、无机氮、盐分离子和抗生素数据矩阵的贡献率依次为 28%、32.7%、10.4% 和 50.3%。对不同类型的水质因子的扩散显著性和贡献率进行比较, 抗生素与地理距离的变异具有最高相关性($r = 0.590, P = 0.002$), 其次为无机氮数据矩阵($r = 0.423, P = 0.016$), 证明无机氮和抗生素的空间变异较其他类型的水质因子更易受到地理扩散的影响。

2.4.2 闸坝对不同类型水质因子空间变化的贡献率

以闸坝为空间扩散模型的河流水质与闸坝个数



环境变量是指各环境指标的欧式距离矩阵, 下同

图 5 不同类型环境因子的欧式距离与地理距离的斯皮尔曼相关性

Fig. 5 Spearman's rank correlation between Euclidean distance and geographic distance of different types of environmental factors

的相关关系表明(图 6),仅基于无机氮和抗生素两大类的水质数据矩阵与闸坝数量变化显著相关($P < 0.01$),相关系数分别为 0.319 和 0.482. 进一步结合方差分解(表 3)可知,闸坝对全量指标、无机氮和抗生素类水质因子空间变异具有显著影响(P

< 0.05),解释率分别为 19.1%、23.5% 和 45.8%. 对不同类型的水质因子的闸坝显著性和贡献率进行比较,抗生素与闸坝仍然具有最高相关性($r = 0.482, P = 0.002$),其次为无机氮数据矩阵($r = 0.319, P = 0.038$). 表明闸坝与扩散存在趋同效应.

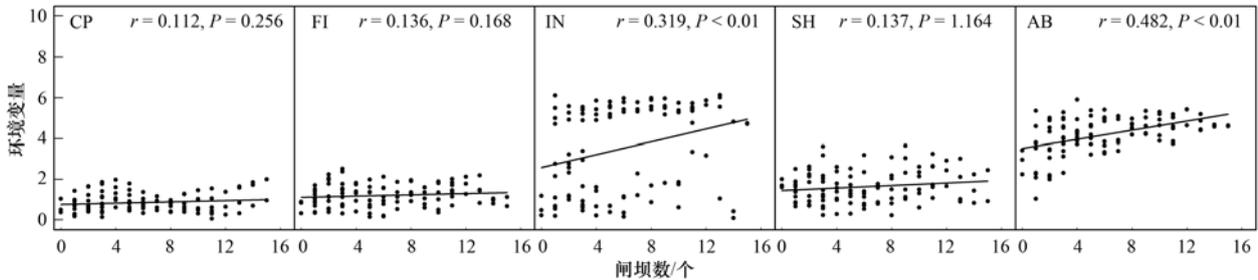


图 6 不同类型环境因子的欧式距离与闸坝数量的斯皮尔曼相关性

Fig. 6 Spearman's rank correlation between Euclidean distance and dam numbers of different types of environmental factors

2.4.3 微生物对不同类型水质因子空间变化的贡献率

通过水质参数矩阵与基于 Bray-Curtis 相似性的相关关系探究不同类型水质因子与微生物的关系(图 7). 除盐分离子外,其余水质因子矩阵均与微生物的变化显著相关($P < 0.01$). 抗生素、常规理化、全量指标和无机氮数据矩阵的相关系数依次为 -0.582、-0.402、-0.373 和 -0.281. 结合方差分解结果定量评价微生物对不同类型水质因子的空间变异贡献率(图 8 和表 3),同样表明除盐分离子

外,其他水质因子矩阵的空间变异均受到微生物作用的显著影响($P < 0.01$). 微生物对常规理化、无机氮、抗生素和全量指标的解释率分别为 70.4%、68.9%、50.4% 和 49.2%(图 8). 不同类型的水质因子相比较,抗生素($r = -0.582, P = 0.002$)和常规理化指标($r = -0.402, P = 0.002$)更易受到微生物的影响,其次是无机氮($r = -0.281, P = 0.002$). 与扩散和闸坝作用相比较,微生物与各类水质因子的负相关关系表明河流水质微生物净化在不同类型水质因子降解过程中发挥重要作用.

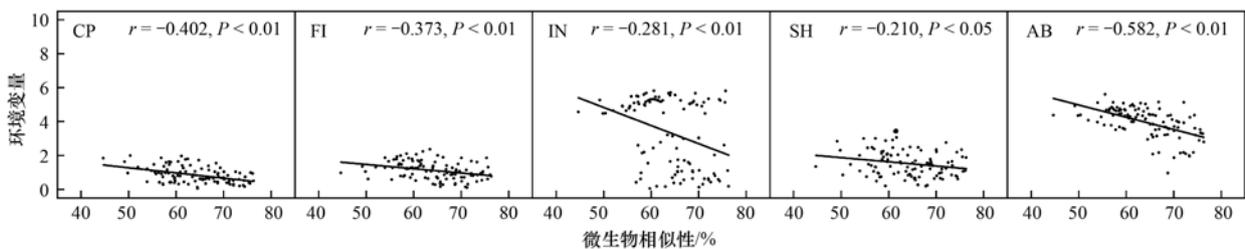


图 7 不同类型环境因子的欧式距离与微生物相似性的斯皮尔曼相关性

Fig. 7 Spearman's rank correlation between Euclidean distance and microbial similarity of different types of environmental factors

2.4.4 不同类型水质因子空间变化的方差分解

基于不同类型水质因子空间变化的方差分解的结果显示(图 8 和表 3),微生物对常规指标、全量指标、无机氮和抗生素具有显著的降解作用,扩散

和闸坝作用则主要影响全量指标、无机氮和抗生素的空间变异过程. 总的来看,闸坝和扩散具有较高的协同趋势,而微生物则与扩散和闸坝作用形成互补机制.

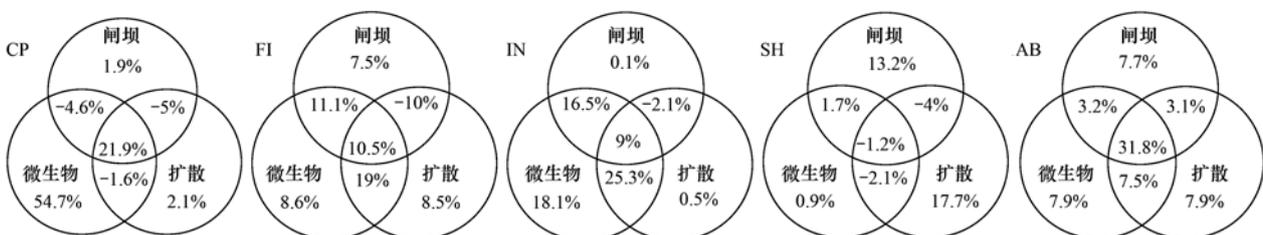


图 8 不同类水质指标同闸坝、地理扩散和微生物的方差分解

Fig. 8 Variance decomposition of different types of water quality indicators with dams, geographic diffusion, and microorganisms

表3 不同类水质指标同闸坝、地理扩散和微生物的方差分解的显著性¹⁾

水质指标	总	总 微生物	总 扩散	总 闸坝	闸坝	扩散	微生物
CP	0.008	0.130	0.006	0.006	0.076	0.050	0.002
FI	0.002	0.002	0.002	0.002	0.048	0.018	0.002
IN	0.002	0.006	0.002	0.002	0.038	0.016	0.002
SH	0.010	0.004	0.132	0.068	0.114	0.048	0.234
AB	0.002						

1) 黑体数字表示 $P < 0.05$; 总代表闸坝、扩散和微生物三者共同影响; A|B 代表从 A 中剔除 B 的影响

3 讨论

本文以典型的再生水补给型城市河流北运河为研究对象,探究城市河道再生水特征污染物的空间变化特征.点源和非点源污染是影响城市河道水质的主要因素^[31, 32].汛期一方面受到降雨地表冲刷过程,携带污染物进入河道,另一方面汛期高温促进河道内藻类的生长繁殖,快速消耗水体溶解氧,具有较高的水体富营养化风险.再加上高温条件下河道浮游细菌群落较高的新陈代谢过程决定了其对环境变化具有较高的敏感性,因此本文选取汛期作为研究时段.研究发现北运河水质整体上呈现出中上游和下游两组较为明显的类群.北运河北京段(上游和部分中游样点)无规则密布再生水补给口,并在上、中游集中补给后随径流径向渐变汇入下游海河(部分中游和下游样点).再生水水质中富含的特征水质因子的源汇同质化效应、非常规补给引起的河流水动力条件的变化、随地理距离产生的扩散效应和微生物对各类水质因子的降解综合作用下,使得不同类型的水质因子在空间上呈现与地理距离较为相似的中上游类群和下游类群.

已有研究表明,温度和浊度等常规水质因子主要表现为排污口附近的小尺度范围的变异^[33].较高温度的再生水汇入水体后迅速同化,不会发生较大尺度的空间变化.再生水汇入改变河流水动力条件,从而扰动河道底部表层污泥中的污染物向上覆水体释放,导致河道水体浊度增加^[27],伴随着城市河道缓慢水流引起的扩散作用,悬浮颗粒物发生二次沉降,最终表现为常规水质因子方差贡献率中的扩散作用不明显(2.1%和1.9%),且在区域尺度变异规律不明显.其次,较高水温促进水体中浮游细菌活性^[33],较高活性的浮游细菌反过来影响常规理化的空间变异,是导致常规理化因子中微生物在方差分解中贡献率较高的主要原因(54.7%).

全量指标具有明显的化学结构特征且生物可降解性较高.排污口尺度的物理扰动导致底泥颗粒物中携带的有机物二次释放,并表现为一定程度的源汇同质化效应和自由扩散稀释和降解.最终导致高

锰酸盐指数、TOC 和 TC 等全量指标空间变异程度介于常规理化指标和无机氮数据矩阵之间.与其它类型的水质因子相比较,全量指标的方差分解中微生物、扩散及二者的协同部分都具有中等程度的贡献率.

盐分离子是再生水水质特性的表征因子之一,以 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 为代表的盐分离子富集再生水中.这类离子的微生物可利用性和降解速率都较低,因此能较为稳定地存在于水环境中.扩散是影响盐分离子空间变异模式的主要作用机制,在方差分解中表现为较高单独的空间扩散解释率(17.7%和13.2%).微生物及微生物/空间协同的贡献率都极低.盐分离子空间变异与闸坝和微生物的距离衰减模式不显著,且在中上游和下游判别中不具有显著差异,说明该类水质因子的源汇同质化作用也相对较弱.与其他类型的水质因子相比较,盐分离子呈现中等程度的空间变异.

再生水中富含的无机氮元素是我国水环境污染排放总量控制中主要的约束性指标之一,对水生生物毒性效应明显^[34].较高浓度的无机氮在补给口形成明显的源汇同质化效应,中上游密布再生水补给口产生的多空间源汇同质化效应促进中上游无机氮数据矩阵显著区别于下游样点.水环境中无机氮作为生物生长的必需元素,生物可利用性较高,可通过微生物的氨氧化作用、硝化作用和反硝化作用等一系列的氮循环从水中释放到空气中^[35].已有研究表明北运河水生态系统中微生物主要由与氮的生物地化学循环相关的微生物类群组成^[36],与本研究微生物对无机氮数据矩阵单独的空间解释率较高(18.1%)相一致.此外,微生物对无机氮的降解过程与污染物在空间的扩散过程高度协同,从而在方差分解同样表现为较高的微生物/扩散共同解释率(25.3%和16.5%).而源汇同质化效应驱动的空间变异是造成单独扩散空间解释率较低(0.5%和0.1%)的主要原因.基于此,再生水中富含的无机氮空间变异机制主要体现为源汇同质化和微生物降解,扩散作为无机氮空间变异的次要机制与微生物降解和源汇同质化具有协同作用模式.

抗生素作为再生水水质特征的代表指标之一。因其来源复杂、化学结构和稳定性存在较大差异,从而表现为较高空间变异性。抗生素在水体的含量相对较低,有别于其他水质因子,源汇同质化的效应相对较弱,但三者较高的协同贡献率(31.8%)在一定程度上表明再生水非常规补给对水体的物理扰动、水体的稀释扩散和微生物的降解是导致抗生素发生空间变异的主要原因。但由于其含量较低,闸坝、扩散和微生物对其贡献率并不是很高(7.7%、7.9%和7.9%)。SMX、MBX、OFL和ORM均是再生水中上游频繁汇入,随河道水质的扩散和自净作用导致下游显著减小。FQs被大量地应用于临床医学、水产养殖、畜牧业和农业中^[37],主要来源于医院废水。FQs的化学结构中含有喹诺酮环,具有较强的化学稳定性,存在极性官能团导致其不易挥发^[38]。FQs分子结构式中含有哌嗪基和羧基,属于酸碱两性化合物,微溶于甲醇、水和乙醇等,易溶于冰醋酸^[39]。FQs在复杂的水体环境中可能会由于pH的差异发生水解,可能被光解,也有可能随水流扩散稀释。因此呈现复杂的空间变化机制。SAs抗生素具有较高的水溶性和较低的对土壤和环境的吸附亲和力,不易降解,因而在环境中具有较强的流动性^[40-42]。大尺度上SAs随水体流动扩散稀释。MLs是一类弱碱性的抗生素,具有亲脂性,同时在酸性环境下稳定性相对较差,不具有较强的代谢力^[43]。MLs极易受到河流pH的影响,从而可能表现为小尺度范围的空间变异。TCs吸附能力较强,可随再生水扰动过程携带的悬浮颗粒物或水生生物吸附^[44],这与浊度的物理扰动二次释放不同,而是会随颗粒物协同扩散至下游沉淀,从而导致ETC、TC和CTC等呈现下游显著高于中上游的变化趋势。

4 结论

(1)不同类型水质参数在空间分布模式上均表现出与地理距离相同或相似的分布格局,即整体上呈现出中上游和下游两组较为明显的类群。但不同类型的环境因子空间变异程度存在较大的差异,无机氮和抗生素数据矩阵具有最高的类间差异性,而常规理化因子则表现为最低的类间差异性和最高的类内相似性。

(2)浊度、高锰酸盐指数、TOC、TC、NO₃⁻-N和TDS表现为中上游显著高于下游的空间变化模式($P < 0.01$),抗生素中磺胺类的SMX、氟喹诺酮类的MBX和大环内酯类的ORM同样表现为中上游高于下游($P < 0.01$),而四环素类的ETC、TCs和CTC则表现为中上游显著低于下游($P < 0.01$)的变

化规律。

(3)常规理化因子空间变异机制主要表现为排污口较高水温促进微生物在方差分解中贡献率较高,但扩散作用不明显,最终体现为区域尺度的变异程度较弱。全量指标生物可降解性较高和排污口尺度的源汇同质化效应、自由扩散稀释是全量指标方差分解中微生物、扩散及二者的协同部分都具有中等程度的贡献率的主要原因。盐分离子能较为稳定地存在于水环境中,扩散是影响盐分离子空间变异模式的主要作用机制,微生物及微生物/空间协同的贡献率都极低,最终呈现中等程度的空间变异。再生水中富含的无机氮空间变异机制主要体现为源汇同质化和微生物降解,扩散作为无机氮空间变异的次要机制与微生物降解和源汇同质化具有协同作用模式。抗生素作为再生水水质特征的代表指标之一,来源复杂、化学结构稳定性和生物可降解性存在较大差异,从而表现为较高的空间变异性。

参考文献:

- [1] Chu J Y, Chen J N, Wang C, *et al.* Wastewater reuse potential analysis: implications for China's water resources management [J]. *Water Research*, 2004, **38**(11): 2746-2756.
- [2] Tzoraki O, Dokou Z, Christodoulou G, *et al.* Assessing the efficiency of a coastal managed aquifer recharge (MAR) system in Cyprus [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **626**: 875-886.
- [3] 赵忠明,陈卫平,焦文涛,等.再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响[J].*环境科学*,2012,**33**(12):4094-4099.
Zhao Z M, Chen W P, Jiao W T, *et al.* Effect of reclaimed water irrigation on soil properties and vertical distribution of heavy metal [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4094-4099.
- [4] Li S, Shi W Z, You M T, *et al.* Antibiotics in water and sediments of Danjiangkou Reservoir, China: spatiotemporal distribution and indicator screening [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **246**: 435-442.
- [5] Kotzerke A, Sharma S, Schauss K, *et al.* Alterations in soil microbial activity and N-transformation processes due to sulfadiazine loads in pig-manure [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **153**(2): 315-322.
- [6] Roose-Amsaleg C, Yan C, Hoang A M, *et al.* Chronic exposure of river sediments to environmentally relevant levels of tetracycline affects bacterial communities but not denitrification rates [J]. *Ecotoxicology*, 2013, **22**(10): 1467-1478.
- [7] 吴楠,乔敏.土壤环境中四环素类抗生素残留及抗性基因污染的研究进展[J].*生态毒理学报*,2010,**5**(5):618-627.
Wu N, Qiao M. Tetracycline residues and tetracycline resistance gene pollution in soil: a review [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2010, **5**(5): 618-627.
- [8] 梅玫.基于多元统计分析的景观水体表观污染影响因素研究[D].苏州:苏州科技大学,2012.
- [9] 樊秋芸.基于生态理念的成都府南河滨水景观修复与更新研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [10] 张超金.生态视角下的成都市内河廊道植物景观研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- [11] 张诗军.特色化城市河道规划方法探析——以成都市城市内

- 河为例[J]. 中国园艺文摘, 2012, **28**(10): 84-86.
- [12] 刘淑娟, 赵晓祥, 杜博涵, 等. 蓝藻浜宝山段河道污染负荷估算及来源分析[J]. 净水技术, 2013, **32**(6): 6-10.
Liu S J, Zhao X X, Du B H, *et al.* Load estimation and source analysis of river pollution for Baoshan section of Wenzaobang river [J]. Water Purification Technology, 2013, **32**(6): 6-10.
- [13] Straskraba M, Tundisi J G, Duncan A. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management [J]. Kluwer Academic Publishers, 1993, doi: 10.1007/978-94-017-1096-1_13.
- [14] Magilligan F J, Nislow K H. Changes in hydrologic regime by dams[J]. Geomorphology, 2005, **71**(1-2): 61-78.
- [15] 魏彬. 地表水表观污染特性及其污染物分布规律研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019.
- [16] 左其亭, 刘静, 窦明. 闸坝调控对河流水生态环境影响特征分析[J]. 水科学进展, 2016, **27**(3): 439-447.
Zuo Q T, Liu J, Dou M. Analysis of the impact of dam operations on the river water ecological environment [J]. Advances in Water Science, 2016, **27**(3): 439-447.
- [17] 王海森, 王伟龙, 冯岚. 闸坝建设后城市河流水质的变化特征研究——以无锡为例[J]. 环境科学与管理, 2020, **45**(6): 52-56.
Wang H S, Wang W L, Feng L. Research on changing characteristics of water quality in urban rivers after sluices construction—a case study of Wuxi [J]. Environmental Science and Management, 2020, **45**(6): 52-56.
- [18] 郑于聪. 污染河水的人工湿地净化特性及植物作用原理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [19] 刘慧杰. 红树林湿地微生物对典型有机物污染的响应及其在生物修复中的作用研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [20] 张译心. 丹汉江流域不同尺度景观格局变化对水沙及水质的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [21] 丁洋, 赵进勇, 张晶, 等. 松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2232-2239.
Ding Y, Zhao J Y, Zhang J, *et al.* Spatial differences in water quality and spatial autocorrelation analysis of eutrophication in Songhua lake [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2232-2239.
- [22] Heeb F, Singer H, Pernet-Coudrier B, *et al.* Organic micropollutants in rivers downstream of the megacity Beijing: sources and mass fluxes in a large-scale wastewater irrigation system [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(16): 8680-8688.
- [23] 李彦东, 李红有. 对北运河治理规划的思考[J]. 海河水利, 2006, (1): 24-27.
- [24] Yang Y Z, Gao Y C, Huang X N, *et al.* Adaptive shifts of bacterioplankton communities in response to nitrogen enrichment in a highly polluted river [J]. Environmental Pollution, 2019, **245**: 290-299.
- [25] 刘宇同, 杨伟超, 杨丽娜, 等. 北运河流域水生态恢复与保护的实践探索[J]. 北京水务, 2019, (3): 57-62.
- [26] Li S, Zhang R J, Hu J R, *et al.* Occurrence and removal of antibiotics and antibiotic resistance genes in natural and constructed riverine wetlands in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **664**: 546-553.
- [27] Kuang Y Z, Guo X Y, Hu J R, *et al.* Occurrence and risks of antibiotics in an urban river in northeastern Tibetan Plateau [J]. Scientific Reports, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-77152-5.
- [28] Jiao S, Yang Y F, Xu Y Q, *et al.* Balance between community assembly processes mediates species coexistence in agricultural soil microbiomes across eastern China [J]. The ISME Journal, 2020, **14**(1): 202-216.
- [29] 刘永霞. 基于不同扩散能力的底栖动物集合群落形成机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- [30] Riaz L, Mahmood T, Khalid A, *et al.* Fluoroquinolones (FQs) in the environment: a review on their abundance, sorption and toxicity in soil [J]. Chemosphere, 2018, **191**: 704-720.
- [31] 李华林, 张建军, 张耀方, 等. 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2796-2809.
Li H L, Zhang J J, Zhang Y F, *et al.* Analysis of spatial-temporal variation characteristics of potential non-point source pollution risk of the upper Beiyun River basin using different weighting methods [J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2796-2809.
- [32] 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 等. 三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1839-1846.
Li M L, Jia M D, Sun T C, *et al.* Spatiotemporal change and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus pollution loads in the Three Gorges Reservoir area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1839-1846.
- [33] 靳燕, 邱莹, 董志, 等. 北运河浮游细菌集合群落空间变化的环境解释[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(3): 1378-1386.
Jin Y, Qiu Y, Dong Z, *et al.* Environmental interpretation of spatial variation of planktonic bacterial communities in the North Canal River [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(3): 1378-1386.
- [34] 徐镜波, 马逊风, 侯文礼, 等. 温度、氨对鲢、鳙、草、鲤鱼的的影响[J]. 中国环境科学, 1994, **14**(3): 214-219.
Xu J B, Ma X F, Hou W L, *et al.* Effects of temperature and ammonia on silver carp, bighead carp, grass carp and common carp [J]. China Environmental Science, 1994, **14**(3): 214-219.
- [35] 肖晶晶, 朱昌雄, 郭萍, 等. 氮循环菌群的构建鉴定及其脱氮性能研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(12): 2680-2687.
Xiao J J, Zhu C X, Guo P, *et al.* Construction, identification and its denitrogenate ability of nitrogen-cycling bacterium functional group [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(12): 2680-2687.
- [36] 邱莹, 靳燕, 苏振华, 等. 城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2287-2295.
Qiu Y, Jin Y, Su Z H, *et al.* Analysis of the spatial changes in bacterial communities in urban reclaimed water channel sediments: a case study of the North Canal River [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2287-2295.
- [37] Luo Y, Mao D Q, Rysz M, *et al.* Trends in antibiotic resistance genes occurrence in the Haihe River, China [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(19): 7220-7225.
- [38] Li C, Wang Z L, Yang Y J, *et al.* Transformation of bisphenol A in water distribution systems: a pilot-scale study [J]. Chemosphere, 2015, **125**: 86-93.
- [39] Babić S, Periša M, Škorić I. Photolytic degradation of norfloxacin, enrofloxacin and ciprofloxacin in various aqueous media [J]. Chemosphere, 2013, **91**(11): 1635-1642.
- [40] Li N, Zhang X B, Wu W, *et al.* Occurrence, seasonal variation and risk assessment of antibiotics in the reservoirs in North China [J]. Chemosphere, 2014, **111**: 327-335.

- [41] Li W H, Shi Y L, Gao L H, *et al.* Occurrence of antibiotics in water, sediments, aquatic plants, and animals from Baiyangdian Lake in North China[J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(11): 1307-1315.
- [42] Bai Y W, Meng W, Xu J, *et al.* Occurrence, distribution and bioaccumulation of antibiotics in the Liao River Basin in China [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014, **16**(3): 586-593.
- [43] Rattanaumpawan P, Tolomeo P, Bilker W B, *et al.* Risk factors for fluoroquinolone resistance in Gram-negative bacilli causing healthcare-acquired urinary tract infections [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2010, **76**(4): 324-327.
- [44] Lin H, Chapman S J, Freitag T E, *et al.* Fate of tetracycline and sulfonamide resistance genes in a grassland soil amended with different organic fertilizers[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **170**: 39-46.

《环境科学》连续 10 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2021 年 12 月 6 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2021 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果。《环境科学》荣获“2021 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 10 次获此殊荣。评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5%(Top5%)的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”。

环 境 科 学

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	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i>	(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 Macroenthos 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 Gangan 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)
Nitritation 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-pei, 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, LU 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)