

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)	

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*

(北京市生态环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制中心, 北京 100037)

摘要: 为评价北京市北运河水体中抗生素的污染特征和风险水平, 采用固相萃取-高效液相色谱-串联质谱联用技术 (SPE-HPLC-MS/MS), 对北运河流域水体中的抗生素浓度进行了分析. 结果表明, 12 个采样点总浓度为 59.19 ~ 703.44 ng·L⁻¹, 共检出 4 类 7 种抗生素, 包括磺胺吡啶、克拉霉素、阿奇霉素、罗红霉素、红霉素、氧氟沙星和林可霉素. 其中, 克拉霉素、阿奇霉素、罗红霉素、氧氟沙星和林可霉素的检出率为 100%, 红霉素的检出率为 41.67%, 磺胺吡啶的检出率为 33.33%. 与国内部分流域相比, 北运河流域水体中阿奇霉素、红霉素和克拉霉素处于较高水平. 生态风险评估结果表明, 抗生素对藻类的风险为高风险. 健康风险评估结果表明, 磺胺吡啶、林可霉素、罗红霉素、阿奇霉素和红霉素无潜在健康风险, 克拉霉素的人体健康风险为低风险.

关键词: 抗生素; 北运河流域; 污染特征; 生态风险; 健康风险

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3198-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207051

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing

JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, WANG Ya-ling, JING Xiang-long, LING Wen-cui, LI Shan-shan, LI Guo-ao*

(National Urban Environmental Pollution Control Engineering Research Center, Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: To investigate the pollution characteristics and risk levels of antibiotics in water of the Beiyun River Basin in Beijing, the concentration of antibiotics was analyzed by using the solid-phase extraction and high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (SPE-HPLC-MS/MS) method. The results showed that seven types of four categories of antibiotics were detected in the samples from 12 sampling points; the total concentration of antibiotics including sulfapyridine, clarithromycin, azithromycin, roxithromycin, erythromycin, ofloxacin, and lincomycin ranged from 59.19 to 703.44 ng·L⁻¹. Among these antibiotics, the detection rate of clarithromycin, azithromycin, roxithromycin, ofloxacin, and lincomycin was 100%; that of erythromycin was 41.67%; and that of sulfapyridine was 33.33%. Compared with that in some rivers in China, the Azithromycin, Erythromycin, and Clarithromycin in the Beiyun River Basin were at a relatively high level. The ecological risk assessment results showed that the most sensitive species was algae. The health risk quotients indicated that sulfapyridine, lincomycin, roxithromycin, azithromycin, and erythromycin presented no risk for every age group, whereas the health risk of clarithromycin was at a low level.

Key words: antibiotics; Beiyun River Basin; pollution characteristic; ecological risk; health risk

抗生素作为一类可以选择性抑制或杀死其他生物体活性的微生物次级代谢产物或人工合成的类似物, 被广泛应用于人类疾病的预防与治疗、畜牧业与水产养殖业等^[1]. 我国作为抗生素的生产和使用大国^[2], 据估计, 2013 ~ 2018 年, 我国抗生素年产量达 19.3 万 t (包括药用和农用), 人均抗生素消耗量是美国的 10 倍^[3]. 由于抗生素不能被人或动物完全代谢, 因此大多数抗生素在使用后以其原始形态或活性代谢产物形式排放到环境中. 我国多处河流及饮用水源地均检出不同水平的抗生素, 给水生态系统和人体健康带来了潜在风险. 秦延文等^[4]从大辽河的表层水体中共检测出 10 种抗生素; 罗丽娟^[5]在深圳市的雨水径流中检测到诺氟沙星和氧氟沙星等 8 种不同类型的新型污染物; 魏红等^[6]在渭河关中段 (咸阳至西安) 表层水体中共检测出 5 类 15 种抗生素, 检出率在 12.5% ~ 100%. 由于各种污水处理过程对抗生素不起作用或作用很小, 抗生素随着人们的消耗逐渐增加, 导致抗生素在环境中出现

“假持久性”的状态^[7], 根据近年来的研究, 水体中的植物、动物和微生物都会受到抗生物的急性或慢性毒性影响, 脱水红霉素对蛋白核小球藻的生长具有抑制作用^[8]; 联合抗生素毒性会影响斑马鱼的生殖发育和代谢系统^[9]; 抗生素通过影响细胞膜、蛋白质和核酸 (DNA/RNA) 的合成来影响微生物群落^[10], 微生物群落也会因抗生素的增加产生抗性基因^[11].

北运河水系是北京市的五大水系之一, 属海河支流, 是唯一一条发源于北京市境内的水系, 上游为山区丘陵地带, 下游为城市平原区, 作为北京市的主要排洪通道, 每年承纳市区约 90% 的排洪量、80% 以上的 GDP, 服务全市 70% 的人口, 是北京城市的

收稿日期: 2022-07-05; 修订日期: 2022-09-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07111-002); 北京市生态环境保护科学研究院院基金项目 (Y2020-014, Y2022-009)

作者简介: 蒋宝 (1988 ~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为环境污染风险评估与修复, E-mail: jiangbao@cee.cn

* 通信作者, E-mail: liguoao@cee.cn

重要增长极和联结京津冀地区的天然纽带,对于京津冀城市群自然-经济-社会的可持续发展有重要意义^[12],但是近年来北运河河道水体污染严重,水生生态系统退化明显^[13],水质问题也成为制约北运河流域生态环境改善和流域生态健康发展的重要问题. 为了加强北运河流域水环境总和治理的统筹领导,围绕“溯源治污、提升水质、提高水循环利用”进行北运河流域生态治理^[14],经过三轮“三年污水治理行动计划”自 2006 年以来有所改善^[15]. 但是,目前对于北运河流域的抗生素污染研究并未展开系统且深入的分析,仅在有限的研究中对北运河流域抗生素的存在特征进行了描述^[16,17],并发现北运河水体中的抗生素浓度依然高于其他地表水,黑臭河水治理过程中抗生素的去除也是亟需关注的问题^[16].

本研究基于北运河流域抗生素污染状况的摸底需求,开展抗生素的污染特征分析,探索抗生素快速准确的定性筛选和定量检测分析技术,通过分析 5

类 19 种抗生素在不同河段的分布特征,明确北运河流域抗生素的时空分布特征,并采用风险商值法评估北京市重要地表水流域水体中抗生素的生态和人体健康的潜在风险,以期为北京市抗生素环境管理提供依据.

1 材料与方法

1.1 样品准备

1.1.1 样品采集

根据《水质采样方案设计技术规定》(HJ 495-2009)^[18]选取北运河北京市辖区段(82 km)的干流设置监测断面及采样点,自上游开始延河流流向设置 12 个采样点采样(图 1). 根据《水质采样样品的保存和管理技术规定》(HJ 493-2009)^[19]进行样品的保存、运输、接收和质量控制. 每个采样点取水样 500 mL 于棕色玻璃瓶中,采用稀硫酸调节 pH 至 3.0 左右,4℃ 冷藏保存,并于 48 h 内完成检测.

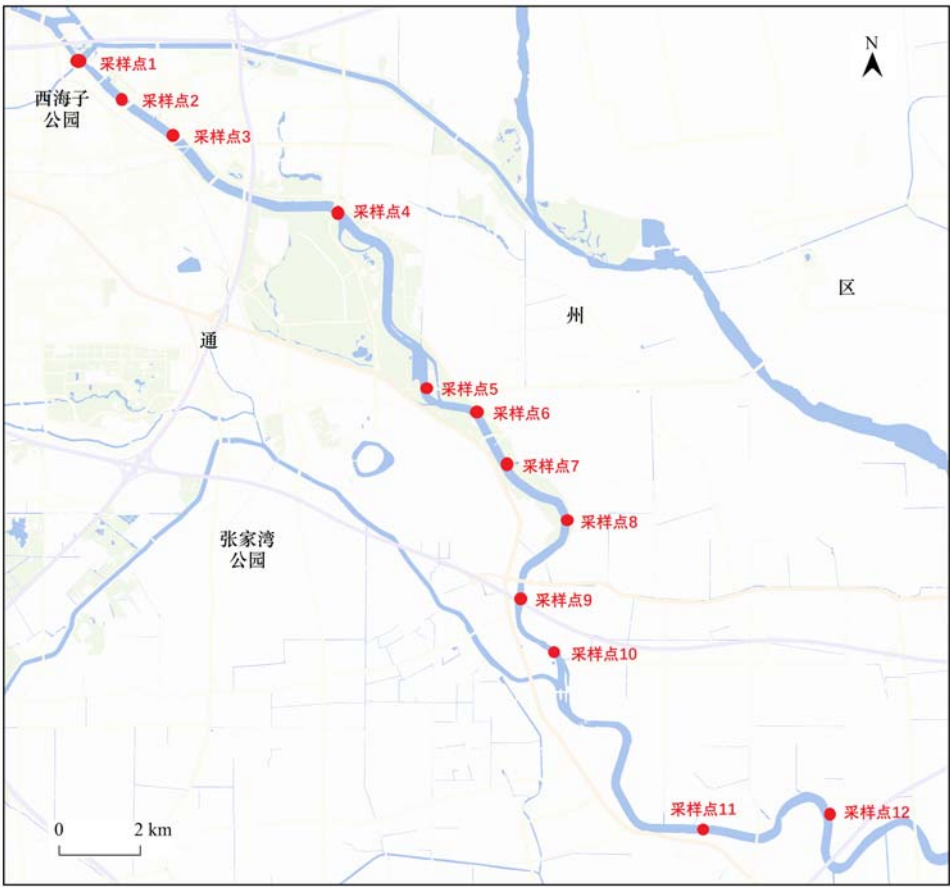


图 1 北运河流域采样点位置示意

Fig. 1 Map of the Beiyun River Basin and sampling sites

1.1.2 样品前处理

取保存于棕色玻璃瓶中的 500 mL 水样,使用孔径为 0.45 μm 水相滤膜进行抽滤,在滤液中加入 0.5 g 乙二胺四乙酸二钠(99%,上海安谱实

验科技股份有限公司),充分溶解. 依次用 5 mL 甲醇、5 mL 超纯水活化 HLB 萃取柱,活化后使水样以 6 mL·min⁻¹ 的流速匀速通过 HLB 萃取柱,上样完成后用 10 mL 超纯水冲洗 HLB 萃取

柱,在氮气保护下干燥萃取柱 30 min,用 10 mL 的甲醇进行洗脱,流速为 0.5 mL·min⁻¹,将洗脱液收集在收集管(带有 1 mL 刻度)中,-4℃保存待检测.

1.2 抗生素的定量-定性分析

1.2.1 目标抗生素的确定

根据当前国内外抗生素研究成果,本研究中选择 5 类(磺胺类、大环内酯类、喹诺酮类、青霉素类和林可酰胺类)19 种典型抗生素为研究对象,具体的基本参数见表 1.

表 1 目标抗生素基本参数

Table 1 Parameters of target antibiotics					
类别	中文名称	英文名称	缩写	相对分子量	化学式
磺胺类	磺胺醋酰	sulfacetamide	SA	214.22	C ₈ H ₁₀ N ₂ SO ₃
磺胺类	磺胺二甲异嘧啶钠	sulfisomidins sodium	SM2	300.3	C ₁₂ H ₁₃ N ₄ NaO ₂ S
磺胺类	磺胺吡啶	sulfapyridine	SPD	249.29	C ₁₁ H ₁₁ N ₃ O ₂ S
磺胺类	磺胺对甲氧嘧啶	sulfameter	SMT	280.3	C ₁₁ H ₁₂ N ₄ O ₃ S
磺胺类	磺胺甲噻二唑	sulfamethizol	SMTZ	270.33	C ₉ H ₁₀ N ₄ O ₂ S ₂
磺胺类	磺胺氯吡嗪	sulfachloropyridazine	SCPD	284.74	C ₁₀ H ₉ C ₁ N ₄ O ₂ S
磺胺类	磺胺间二甲氧嘧啶	sulfadimethoxine	SDM	310.3	C ₁₂ H ₁₄ N ₄ O ₄ S
大环内酯类	阿奇霉素	azithromycin	ZAM	748.98	C ₃₈ H ₇₂ N ₂ O ₁₂
大环内酯类	螺旋霉素	spiramycin	SPI	843.06	C ₄₃ H ₇₄ N ₂ O ₁₄
大环内酯类	罗红霉素	roxithromycin	ROX	837.05	C ₄₁ H ₇₆ N ₂ O ₁₅
大环内酯类	红霉素	erythromycin	ERY	733.93	C ₃₇ H ₆₇ NO ₁₃
大环内酯类	克拉霉素	clarithromycin	CLA	747.95	C ₃₈ H ₆₉ NO ₁₃
喹诺酮类	盐酸环丙沙星	ciprofloxacin hydrochloride	CIP	367.8	C ₁₇ H ₁₈ FN ₃ O ₃ ·HCl
喹诺酮类	氧氟沙星	ofloxacin	OFL	361.37	C ₁₈ H ₂₀ FN ₃ O ₄
喹诺酮类	加替沙星	gatifloxacin	GFLX	375.39	C ₁₉ H ₂₂ FN ₃ O ₄
青霉素类	苯唑西林钠	oxacillin sodium	OXS	441.44	C ₁₉ H ₁₈ N ₃ NaO ₅ S
青霉素类	头孢拉定	cephradine	RAD	349.4	C ₁₆ H ₁₉ N ₃ O ₄ S
青霉素类	头孢氨苄一水合物	cephalexin monohydrate	CLR	365.4	C ₁₆ H ₁₉ N ₃ O ₅ S
林可酰胺类	林可霉素	lincomycin	LIN	406.54	C ₁₈ H ₃₄ N ₂ O ₆ S

1.2.3 方法检出限的确定

配置浓度为:1、2、5、15、20、50、100、200、250、400、500 和 1 000 μg·L⁻¹的 19 种抗生素混标.每个浓度标准样品平行测定 3 次,对峰面积分别积分处理后得到不同浓度下不同种类抗生素的信噪比.以高于 3 的信噪比下的最低浓度为该种抗生素的检出限,以高于 10 的信噪比的最低浓度为该种抗生素的定量限(表 2),19 种抗生素的检出限为 1~3 ng·L⁻¹,回收率在 55.5%~117.0%.

1.2.4 质量控制

所有分析数据的获得均严格执行 QA/QC 程序,方法空白用来控制整个实验过程中是否有人为或环境因素所带来的污染;空白加标用于控制整个实验过程的准确性.每次测定样品前均重新配制工作液作标准曲线,前后两次相差均不超过 10%.抗生素加标回收率在 50.0%~117.0%.

1.2.2 仪器参数的确定

仪器采用 Waters ACQUITY UPLC BEH C18 (2.1×50 mm×1.7 μm)色谱分析柱;流动相 A 和流动相 B 分别为 0.1% 甲酸-水溶液和甲醇/乙腈(1:1,体积比)(含 0.1% 甲酸),流速为 0.20 mL·min⁻¹;色谱柱温度为 40℃;样品进样量为 10 μL.采用多反应选择监测(Multiple Reaction Monitoring,MRM)模式检测,离子源温度为 150℃;毛细管电压为 3.2 V;碰撞气和脱溶剂气流量分别为 50 L·h⁻¹和 550 L·h⁻¹,去溶剂温度为 500℃.

表 2 目标抗生素的方法检出限和回收率

Table 2 Recoveries and method detection limits (MDLs) of the target antibiotics		
抗生素	方法检出限/ng·L ⁻¹	回收率/%
磺胺醋酰	1	99.7
磺胺二甲异嘧啶钠	1	106.0
磺胺吡啶	1	95.6
磺胺对甲氧嘧啶	2	88.5
磺胺甲噻二唑	1	112.0
磺胺氯吡嗪	1	117.0
磺胺间二甲氧嘧啶	1	100.0
阿奇霉素	1	101.0
螺旋霉素	1	89.2
罗红霉素	1	115.0
红霉素	1	50.5
克拉霉素	1	116.3
盐酸环丙沙星	1	93.3
氧氟沙星	1	103.0
加替沙星	1	71.3
苯唑西林钠	1	73.3
头孢拉定	1	70.0
头孢氨苄一水合物	2	62.9
林可霉素	1	117.0

1.3 抗生素风险评估

1.3.1 生态风险评估

根据欧洲评估技术指导文件(European commission technical guidance document, TGD)中不同环境风险评估方法,可以采用风险商值法(risk quotient, RQ)对北京市永定河流域水体中抗生素的生态风险进行评估^[20],生态风险商值(RQ_E)计算公式如下:

RQ_E = MEC/PNEC

式中,MEC(measured environmental concentration)为抗生素的测定浓度,PNEC(predicted no effect concentration)为预测无效浓度.PNEC值是慢性毒性数据(最低观察浓度效应或无效应浓度,NOEC)或急性毒性数据(半数致死浓度LC₅₀或半数有效浓度EC₅₀)与评估因子的比值,一般情况下认为急性评估因子为1 000,慢性评估因子为100.

1.3.2 健康风险评估

根据人体对抗生素的日均可接受量(ADI),计算抗生素对人体健康风险商值(RQ_H).计算公式如下:

RQ_H = MEC/DWEL

式中,RQ_H为单一抗生素的健康风险商,MEC为抗生素的测定浓度(μg·L⁻¹),DWEL为饮用水当量值(μg·L⁻¹).饮用水当量值DWEL=ADI×BW×HQ/(DWI×AB×FOE),其中ADI是日均可接受量;BW是人均体重(kg),HQ为最高风险,按1计算,DWI是每日饮水量,AB是肠胃吸收率,按1计算,FOE是暴露频率(350 d·a⁻¹),按0.96计算.不同年龄段人群的人均体重及每日饮水量见表3^[21].

表3 成人及儿童平均体重以及每日饮水量

Table 3 Average body weights (BW) and drinking water intakes (DWI) of children and adults

研究对象	性别	人均体重/kg	每日饮水量/L·d ⁻¹
儿童	男	24	0.81
	女	23	0.76
成人	男	66.1	2.48
	女	57.8	2.12

当RQ_H<0.01时,表明抗生素对人体健康造成的风险水平可忽略不计;当0.01≤RQ_H<0.1时,表明抗生素对人体健康造成的风险属于低等水平;当0.1≤RQ_H<1时,表明抗生素对人体健康造成的风险属于中等水平;当RQ_H≥1时,表明抗生素对人体健康造成的风险属于高等水平

2 结果与讨论

2.1 北京市北运河流域水体中抗生素污染状况

在北运河12个采样点中,共检测出4类7种抗

生素,结果如图2所示.其中5种抗生素在12个采样点中均有检出,检出率为100%,分别为克拉霉素、阿奇霉素、罗红霉素、氧氟沙星和林可霉素,其检出浓度由高到底依次为:克拉霉素>阿奇霉素>罗红霉素>氧氟沙星>林可霉素,对应的浓度平均水平分别为67.99、61.12、38.39、26.41和5.18 ng·L⁻¹.另外,红霉素的检出率为41.67%,对应浓度平均水平为304.99 ng·L⁻¹,磺胺吡啶的检出率为33.33%,对应浓度平均水平为4.14 ng·L⁻¹.可检出的抗生素类别主要为大环内酯类抗生素,占有抗生素总量的70%以上.作为治疗和预防各种组织传染的有效药物,大环内酯类抗生素自1952年推出以来,其种类和数量不断扩增,除用作人类药物外,还被作为一种增长剂广泛用于家禽和水产养殖中^[22].其中红霉素和罗红霉素是比较典型的大环内酯类抗生素^[23],在本研究中红霉素虽然检出率仅占41.67%,但其浓度为可检出的7中抗生素中浓度最高的一种.红霉素在酸性条件下不稳定,因为口服后容易被胃酸破坏,发生分子内脱水环合反应,生成脱水红霉素^[22],因此检测出的红霉素多以脱水红霉素形式存在.

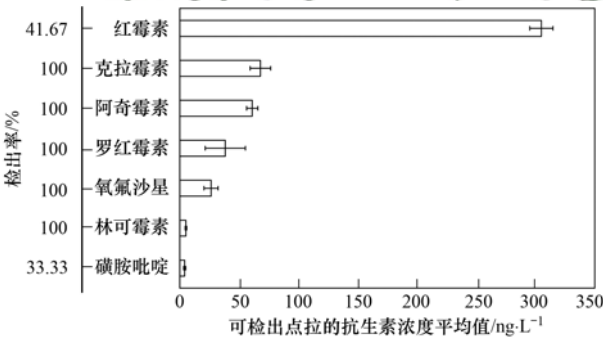


图2 北运河中抗生素的检出率及其检出浓度

Fig. 2 Detection rate and concentration of antibiotics in Beiyun River Basin

从图3可以看出,抗生素的累积浓度在北运河河段呈现出中段累积浓度高,上游和下游浓度低的分布特征,其中阿奇霉素、罗红霉素、克拉霉素和氧氟沙星总体上都是呈现了从上游到下游逐渐降低的趋势,但是磺胺吡啶、红霉素和林可霉素在下游第11个采样点开始出现了升高的现象,在进行了周围环境调研后发现,存在这一现象的原因可能有两个:第一,中间采样点4~10的大部分区域属于生态公园区域,人口密度低,且以生态涵养为主要功能;第二,附近有再生水厂的水体补入,根据调研再生水厂的水质在近年来有大幅度提升,且在处理工艺中有部分抗生素可以被去除;第三,在下游区域,由于河流进入村庄,人口密度又再次提升,导致部分抗生

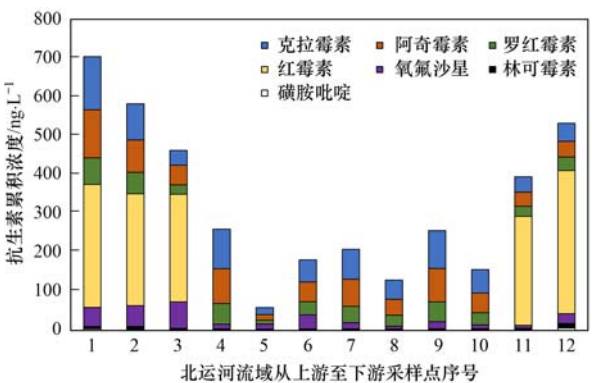


图3 北运河不同采样点的抗生素累积浓度

Fig. 3 Cumulative concentration of antibiotics in different sampling sites of Beiyun River Basin

表4 北运河流域与国内其他流域水体抗生素对比¹⁾/ng·L⁻¹

Table 4 Comparison of antibiotics in BeiyunRiver Basin and other water bodies in China/ng·L⁻¹

流域	区域	磺胺吡啶	阿奇霉素	罗红霉素	红霉素	克拉霉素	氧氟沙星	林可霉素	文献
海河流域	北运河	4.14	61.12	38.39	304.99	67.99	26.41	5.18	本研究
	白洋淀	—	—	ND~302	—	—	2.02~71.5	—	[30]
	温榆河	—	—	—	—	—	25.1~1213.6	—	[28]
	潮白河	ND~10.29	ND~12.48	—	—	—	ND~137.81	ND~4.31	[24]
	海河	—	—	ND~40.2	—	—	ND~95.2	—	[31]
	海河	—	—	—	—	—	192*	—	[7]
长江流域	巢湖	—	—	—	—	—	ND~182.7	—	[32]
	江西锦江	ND~0.69	—	—	ND~83.6	—	ND~7.36	—	[26]
	南明河	—	—	102*	—	—	83.70*	63.70*	[33]
	长江南京段	—	9.13*	—	—	—	15.26*	—	[34]
	长江南京段	—	4.25*	2.04*	—	—	0.14*	7.97*	[35]
黄河流域	黄河	—	—	<LOQ~95	—	—	<LOQ~264	—	[36]
	渭河关中段	—	—	1.57~59.5	—	—	ND~72.0	3.63~125	[6]
辽河流域	辽河	ND~0.96	—	ND~741	—	—	ND~633	—	[27]
珠江流域	东江	—	2.00*	—	—	—	—	—	[37]
	东江东莞段	—	—	ND~5.5	—	—	—	ND~20.6	[38]
	深圳河	—	—	—	—	—	16~110	—	[39]
	深圳河	—	—	58.4*	13*	29.2*	—	49*	[25]
	珠江广州段	—	—	<LOQ~169	—	—	<LOQ~108	—	[40]
太湖流域	黄浦江	1.14~57.39	—	0.13~9.93	—	—	<8.34	—	[41]
	苕溪	—	—	—	—	—	1.2*	—	[42]
	太湖	—	—	ND~35.6	—	—	ND~26.3	ND~53.8	[43]
四湖流域	洪湖	—	—	—	—	—	36.60*	—	[44]

1) “—”表示未检出或数据缺失; ND 表示未检出; * 表示平均值

条(白洋淀、温榆河、潮白河、海河、巢湖、江西锦江、南明河、长江南京段、黄河、渭河关中段、辽河、深圳河、珠江广州段、黄浦江、苕溪、太湖、洪湖)河流/段中有检出,且浓度最高达到了741 ng·L⁻¹^[27]和1 213.6 ng·L⁻¹^[28],差异较大,可能是由于环境条件和使用量的差异引起的,这些结果都说明了阿奇霉素、红霉素和克拉霉素是我国流域抗生素污染中需要关注的3种抗生素,根据流域周边特征罗红霉素和氧氟沙星也是水质抗生素污染的重要污染物.与文献[24,28]中关于北京市其他两条流域(潮白河和温榆河)的研究结果相比,本研究中的磺胺吡啶和氧氟沙星与其无显著性差异,阿奇霉素

素随生活污水进入河道.

我国的大量流域中均检测出了抗生素的存在,而且由于各地区人口密度、农业养殖产业和环境条件的差异,不同调查的结果中抗生素的浓度、种类和分布的差异也较大(表4).以本研究中北运河主干道检测出的7种抗生素为目标抗生素进行文献调研发现,本研究中北运河流域的阿奇霉素、红霉素和克拉霉素比调研中的流域抗生素浓度数据^[24~26]要高;罗红霉素和氧氟沙星在我国不同流域中的检出率较高,分别在12条(包括白洋淀、海河、南明河、长江南京段、黄河、渭河关中段、辽河、东江东莞段、深圳河、珠江广州段、黄浦江和太湖)和17

和林可霉素浓度与潮白河相比偏高,而在检出率方面,潮白河的研究中阿奇霉素和林可霉素均有较高的检出率(62.00%~95.00%),这两种抗生素均是属于我国使用量较大的一类抗生素,且阿奇霉素的最高浓度出现在采样点1(123.47 ng·L⁻¹),林可霉素的最高浓度出现在采样点2(7.16 ng·L⁻¹),前两个采样点位于居民区周边,附近有学校和人流量较大的公园,人口密度较大导致了该河段的抗生素浓度较高.磺胺吡啶作为本研究中北运河流域唯一检出的磺胺类抗生素,其浓度和检出率都较低,且本研究中的采样时间为冬季,根据李明亮^[29]的研究,磺胺类抗生素在>25℃降解加快,因此,磺胺类抗生素

在夏季气温升高后其浓度会进一步降低。

2.2 北京市北运河流域水体中抗生素的生态风险评估

由于单一抗生素的生态风险不能充分反映抗生素对环境的潜在危害,因此采用联合风险商值法进行评估。根据欧盟的技术指导文件中关于环境风险评价的方法,北运河流域水体中抗生素的生态风险分别以藻类、无脊椎动物和水生植物为受试物种进行生态风险评估,通过文献调研^[45,46],收集了3种不同敏感度的受试物种以其预测无效应浓度(PNEC)为毒性终点来进行计算5大类可检出抗生素的生态风险商值(表5)^[45]。

按照 Hemando 等^[47]提出的风险商值分类方法,可把生态风险分为3个环境风险等级,即 RQ_E

值在 0.01 ~ 0.1 之间为低环境风险,在 0.1 ~ 1 间为中等环境风险,大于 1 为高环境风险。从表 5 结果中可以看出,磺胺吡啶和林可霉素对于 3 个物种终点均无风险,一方面是由于这两种抗生素在北运河中的浓度较低,更重要的 3 种受试物种对磺胺吡啶的敏感性较低,其中磺胺吡啶对藻类的 PNEC 值为 $5\,280\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[45],林可霉素对无脊椎动物的 PNEC 值为 $50\,000\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[45]。3 种受试物种对氧氟沙星的敏感度的顺序为:藻类 > 水生植物 > 无脊椎动物,并且以最为敏感的藻类 PNEC 为毒性终点的前提下,北运河流域的氧氟沙星为高风险污染物。同样的,同属大环内酯类的罗红霉素和红霉素均对藻类最为敏感,且在以最为敏感的物种为指示生物的前提下,均为高风险污染物。

表 5 5 种检出抗生素的生态风险商值¹⁾

抗生素	藻类		无脊椎动物		水生植物	
	PNEC	RQ_E	PNEC	RQ_E	PNEC	RQ_E
磺胺吡啶	5.28×10^3	7.84×10^{-4}	0	0	460	9.00×10^{-3}
林可霉素	1.44×10^3	3.60×10^{-3}	5.00×10^5	1.04×10^{-5}	0	0
氧氟沙星	21	1.26***	1.74×10^4	1.52×10^{-3}	126	0.21**
罗红霉素	4.3	8.93***	7.10×10^3	5.41×10^{-3}	1.0×10^4	3.84×10^{-3}
红霉素	20	15.25***	940	0.32**	1.0×10^4	0.03*

1) *** 表示高风险; ** 表示中风险; * 表示低风险; 未标记表示无风险

2.3 北京市北运河流域水体中抗生素的人体健康风险评估

如图 4 所示,为了更好地评估北运河流域水体中抗生素的风险水平,选取了最大抗生素检出

浓度,根据不同年龄层次人群通过饮用水摄入抗生素当量,评价北运河流域水体对人体的健康风险,当 $RQ_H < 0.01$ 时,表明抗生素对人体健康造成的风险水平可忽略不计,磺胺吡啶、林可霉素、罗红霉素、阿奇霉素和红霉素的 RQ_H 值在 $4.14 \times 10^{-6} \sim 6.16 \times 10^{-3}$ 之间,低于 0.01,表明北运河流域水体中该 5 种抗生素无潜在健康风险。克拉霉素的 RQ_H 值在 $2.17 \times 10^{-2} \sim 2.46 \times 10^{-2}$ 之间,高于 0.01 但低于 0.1,对成人和儿童健康造成的风险为低风险。

3 结论

(1)北运河流域水体中共检出 4 类 7 种抗生素,其检出浓度平均水平由高到底依次为:红霉素 > 克拉霉素 > 阿奇霉素 > 罗红霉素 > 氧氟沙星 > 林可霉素 > 磺胺吡啶,对应的浓度平均值水平分别为:304.99、67.99、61.12、38.39、26.41、5.18 和 $4.14\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(2)对比国内其他流域,北运河流域水体中检出的阿奇霉素、红霉素和克拉霉素比我国其他流域研究中的抗生素浓度偏高。磺胺类抗生素(磺胺吡啶)处于较低水平,与其他流域的结果一致。

(3)通过生态风险评估,除磺胺吡啶外,藻类为抗生素污染较为敏感的物种,以最为敏感的藻类 PNEC 为毒性终点的前提下,北运河流域的氧氟沙

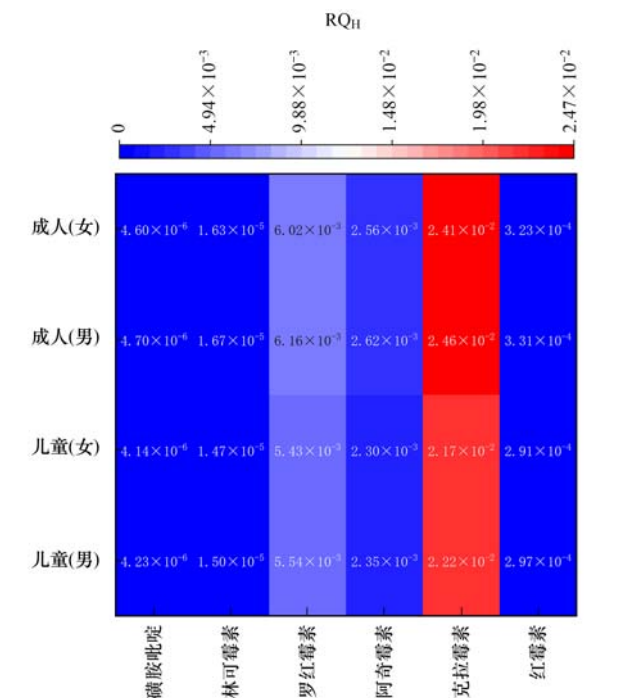


图 4 以检出浓度最大值计算得到的人体健康商值

Fig. 4 Human health risk quotient of five detected antibiotics based on the maximum concentration

星、罗红霉素和红霉素为高风险污染物,林可霉素为无风险污染物。

(4)以抗生素的可检出最高浓度为指标进行人体健康风险评估,结果显示,磺胺吡啶、林可霉素、罗红霉素、阿奇霉素和红霉素无潜在健康风险,克拉霉素的人体健康风险为低风险。

参考文献:

- [1] Qiao M, Ying G G, Singer A C, *et al.* Review of antibiotic resistance in China and its environment [J]. *Environment International*, 2018, **110**: 160-172.
- [2] Song Y, Han Z Y, Song K M, *et al.* Antibiotic consumption trends in China: evidence from six-year surveillance sales records in Shandong province[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2020, **11**, doi: 10.3389/fphar.2020.00491.
- [3] Jiang Y H, Li M X, Guo C S, *et al.* Distribution and ecological risk of antibiotics in a typical effluent-receiving river (Wangyang River) in North China [J]. *Chemosphere*, 2014, **112**: 267-274.
- [4] 秦延文, 张雷, 时瑶, 等. 大辽河表层水体典型抗生素污染特征与生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(3): 361-368.
- Qin Y W, Zhang L, Shi Y, *et al.* Contamination characteristics and ecological risk assessment of typical antibiotics in surface water of the Daliao River, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(3): 361-368.
- [5] 罗丽婵. 城市环境中雨水径流 PPCPs 污染特性及其控制的研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [6] 魏红, 王嘉玮, 杨小雨, 等. 渭河关中段表层水中抗生素污染特征与风险[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(6): 2255-2262.
- Wei H, Wang J W, Yang X Y, *et al.* Contamination characteristic and ecological risk of antibiotics in surface water of the Weihe Guanzhong section[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2255-2262.
- [7] Chen H Y, Jing L J, Teng Y G, *et al.* Characterization of antibiotics in a large-scale river system of China: Occurrence pattern, spatiotemporal distribution and environmental risks[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **618**: 409-418.
- [8] 朱津辉, 郑泽欣, 李吉平, 等. 脱水红霉素对蛋白核小球藻的生态毒性效应研究[J]. *生态毒理学报*, 2019, **14**(5): 257-266.
- Zhu J H, Zheng Z X, Li J P, *et al.* Ecotoxicological effects of dehydroerythromycin on *Chlorella pyrenoidosa*[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, **14**(5): 257-266.
- [9] Qiu W H, Liu X J, Yang F, *et al.* Single and joint toxic effects of four antibiotics on some metabolic pathways of zebrafish (*Danio rerio*) larvae [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **716**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137062.
- [10] Le Page G, Gunnarsson L, Snape J, *et al.* Integrating human and environmental health in antibiotic risk assessment: a critical analysis of protection goals, species sensitivity and antimicrobial resistance[J]. *Environment International*, 2017, **109**: 155-169.
- [11] Xu Y, Guo C S, Luo Y, *et al.* Occurrence and distribution of antibiotics, antibiotic resistance genes in the urban rivers in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **213**: 833-840.
- [12] 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 等. 北京北运河河流生态系统健康评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2576-2587.
- Gu X Y, Xu Z X, Liu L F, *et al.* Health assessment of the stream ecosystem in the North Canal River basin, Beijing, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2576-2587.
- [13] 单保庆, 营宇翔, 唐文忠, 等. 北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 352-358.
- Shan B Q, Jian Y X, Tang W Z, *et al.* Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment in downstream river network areas of North Canal River watershed [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 352-358.
- [14] 王志丹, 高福栋, 方升华. 北运河流域水系综合治理研究[J]. *北京水务*, 2010, (4): 19-20, 26.
- [15] 郭婧, 荆红卫, 李金香, 等. 北运河系地表水近10年来水质变化及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1511-1518.
- Guo J, Jing H W, Li J X, *et al.* Surface water quality of Beiyun Rivers Basin and the analysis of acting factors for the recent ten years[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1511-1518.
- [16] 高凯, 孟祥峰, 杨永顺, 等. 高效液相色谱法同时测定黑臭水体中的7种抗生素[J]. *广东化工*, 2019, **46**(16): 174-177.
- Gao K, Meng X F, Yang Y S, *et al.* Simultaneous analysis of multiple classes of 7 antibiotics in black-odor river by high performance liquid chromatography [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2019, **46**(16): 174-177.
- [17] 秦伟, 白文荣, 周明月, 等. 北运河表层水体中微量有机污染物分布特征及潜在风险[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(3): 649-658.
- Qin W, Bai W R, Zhou M Y, *et al.* Potential risk and distribution characteristics of trace organic pollutants in surface water of Beiyun River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 649-658.
- [18] HJ 495-2009, 水质采样方案设计技术规范[S].
- [19] HJ 493-2009, 水质采样样品的保存和管理技术规范[S].
- [20] Papageorgiou M, Zioris I, Danis T, *et al.* Comprehensive investigation of a wide range of pharmaceuticals and personal care products in urban and hospital wastewaters in Greece [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **694**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.371.
- [21] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [22] 刘茂胜, 周志洪, 刘叶新, 等. 珠江局部流域抗生素分布特征[J]. *广州化工*, 2017, **45**(11): 159-162.
- Liu M S, Zhou Z H, Liu Y X, *et al.* Distribution characteristics of antibiotics in part of Pearl River [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2017, **45**(11): 159-162.
- [23] 刘昔, 王智, 王学雷, 等. 我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2094-2100.
- Liu X, Wang Z, Wang X L, *et al.* Status of antibiotic contamination and ecological risks assessment of several typical Chinese surface-water environments[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2094-2100.
- [24] 任娇阳. 北京市潮白河流域抗生素污染分布与风险评估[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [25] 王卓. 典型PPCPs在深圳河流域分布迁移特征及控制技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [26] 李佳乐, 王萌, 胡发旺, 等. 江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 4046-4073.
- Li J L, Wang M, Hu F W, *et al.* Antibiotic pollution characteristics and ecological risk assessment in Jinjiang River

- Basin, Jiangxi province[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4046-4073.
- [27] 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 等. 辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4553-4561.
- Zhang X J, Bai Y W, Zhang Y, *et al.* Occurrence, distribution, and ecological risk of antibiotics in surface water in the Liaohe River Basin, China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4553-4561.
- [28] 章琴琴. 北京温榆河流域抗生素污染分布特征及源解析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [29] 李明亮. 环境中磺胺类药物的降解行为及影响因素的研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2012.
- [30] Luo Y, Xu L, Rysz M, *et al.* Occurrence and transport of tetracycline, sulfonamide, quinolone, and macrolide antibiotics in the Haihe River Basin, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(5): 1827-1833.
- [31] Gao L H, Shi Y L, Li W H, *et al.* Occurrence of antibiotics in eight sewage treatment plants in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2012, **86**(6): 665-671.
- [32] Tang J, Shi T Z, Wu X W, *et al.* The occurrence and distribution of antibiotics in Lake Chaohu, China: Seasonal variation, potential source and risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2015, **122**: 154-161.
- [33] 王娅南, 黄合田, 彭洁, 等. 贵州草海喀斯特高原湿地水环境中典型抗生素的分布特征[J]. *环境化学*, 2020, **39**(4): 975-986.
- Wang Y N, Huang H T, Peng J, *et al.* Occurrence and distribution of typical antibiotics in the aquatic environment of the wetland karst plateau in Guizhou[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(4): 975-986.
- [34] 李辉, 陈瑀, 封梦娟, 等. 南京市饮用水源地抗生素污染特征及风险评估[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(4): 1269-1277.
- Li H, Chen Y, Feng M J, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of antibiotics in Nanjing drinking water sources [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(4): 1269-1277.
- [35] 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 等. 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5286-5293.
- Feng M J, Zhang Q, Song N H, *et al.* Occurrence characteristics and risk assessment of antibiotics in source water of the Nanjing reach of the Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5286-5293.
- [36] Xu W H, Zhang G, Zou S C, *et al.* A preliminary investigation on the occurrence and distribution of antibiotics in the Yellow River and its tributaries, China [J]. *Water Environment Research*, 2009, **81**(3): 248-254.
- [37] Zhang X X, Zhang T. Occurrence, abundance, and diversity of tetracycline resistance genes in 15 sewage treatment plants across China and other global locations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(7): 2598-2604.
- [38] 麦永乐. 东江东莞段表层水体抗生素污染特征与风险[J]. *广东化工*, 2020, **47**(10): 26-27, 13.
- Mai Y L. Characteristics and risks of antibiotic pollution in surface water of Dongguan section of Dongjiang River [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, **47**(10): 26-27, 13.
- [39] Xue B M, Zhang R J, Wang Y H, *et al.* Antibiotic contamination in a typical developing city in South China: occurrence and ecological risks in the Yongjiang River impacted by tributary discharge and anthropogenic activities [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **92**: 229-236.
- [40] Xu W H, Zhang G, Zou S C, *et al.* Determination of selected antibiotics in the Victoria Harbour and the Pearl River, South China using high-performance liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **145**(3): 672-679.
- [41] Jiang L, Hu X L, Yin D Q, *et al.* Occurrence, distribution and seasonal variation of antibiotics in the Huangpu River, Shanghai, China[J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(6): 822-828.
- [42] 徐磊, 叶雪平, 郝贵杰, 等. 苕溪表层水体典型抗生素污染特征与生态风险评价[J]. *现代农业科技*, 2020, (7): 180-183, 187.
- Xu L, Ye X P, Hao G J, *et al.* Typical antibiotic pollution characteristics and ecological risk assessment of surface water in Tiaoxi River[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020, (7): 180-183, 187.
- [43] 武旭跃, 邹华, 朱荣, 等. 太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4596-4604.
- Wu X Y, Zou H, Zhu R, *et al.* Occurrence, distribution and ecological risk of antibiotics in surface water of the Gonghu Bay, Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4596-4604.
- [44] Wang Z, Du Y, Yang C, *et al.* Occurrence and ecological hazard assessment of selected antibiotics in the surface waters in and around Lake Honghu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **609**: 1423-1432.
- [45] Huang F Y, Zou S Z, Deng D D, *et al.* Antibiotics in a typical karst river system in China: spatiotemporal variation and environmental risks [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 1348-1355.
- [46] Huang F Y, An Z Y, Moran M J, *et al.* Recognition of typical antibiotic residues in environmental media related to groundwater in China (2009-2019) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **399**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122813.
- [47] Hernando M D, Mezcuca M, Fernández-Alba A R, *et al.* Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments[J]. *Talanta*, 2006, **69**(2): 334-342.

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-wen, 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)