

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

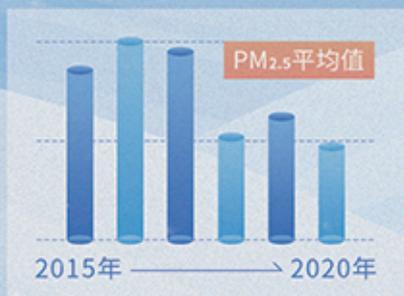
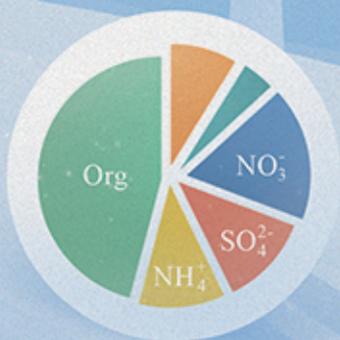
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裘彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM_{2.5} 污染特征分析..... 刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏(3895)

天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析..... 郝困, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青(3903)

长江中游地区 PM_{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响..... 王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲(3913)

滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价..... 范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海(3923)

典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性..... 秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓雨, 徐勃, 耿春梅(3934)

大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源..... 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉(3944)

河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径..... 刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克(3953)

京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估..... 朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍(3966)

2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征..... 王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙(3977)

钢铁生产行业二氧化硫污染特征变化及其排放因子..... 杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔(3990)

长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价..... 胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静(3998)

基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析..... 鹿阔, 李敏, 刘璐, 杨璐璐, 赵洪军(4008)

梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例..... 王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武(4018)

基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算..... 王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生(4032)

河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响..... 李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波(4042)

联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源..... 张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿(4054)

江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价..... 李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯(4064)

天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策..... 吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰(4074)

宁夏第三排水沟中药物和个人护理品(PPCPs)的污染特征与生态风险评估..... 李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦(4087)

再生水河道浮游微生物多样性季节变化分析: 以北运河为例..... 袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽(4097)

太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析..... 杜瑛琦, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙(4108)

太湖氧化亚氮(N₂O)排放特征及潜在驱动因素..... 刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强(4118)

海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价..... 雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博(4127)

玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果..... 胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜(4136)

环境 pH 条件下 Fe²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素..... 刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎(4146)

新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价..... 谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫(4154)

宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征..... 沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞(4166)

宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素..... 王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红(4179)

地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法..... 王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(4190)

姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评估..... 于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳(4199)

基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测..... 杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥(4212)

柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险..... 朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波(4219)

不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性..... 任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞瑛, 赵海洋(4232)

橡胶草(TKS)对铅镉污染农田土壤的修复潜力..... 张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥(4253)

3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力..... 张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚(4262)

连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响..... 彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉(4271)

改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响..... 杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良(4282)

不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响..... 张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春(4292)

水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系..... 李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强(4301)

外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响..... 郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉(4313)

不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响..... 冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌(4322)

基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响..... 鹿发虎, 李晓琦, 段荆阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进(4333)

汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子..... 陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓(4342)

岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较..... 冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松(4353)

戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素..... 吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚(4364)

长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响..... 刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹(4372)

秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N₂O 排放的影响..... 白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠(4379)

聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响..... 邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙(4387)

微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响..... 王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平(4394)

氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比..... 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩(4402)

《环境科学》征订启事(4211) 《环境科学》征稿简则(4312) 信息(3922, 4031, 4107)

江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价

李佳乐^{1,2}, 王萌^{1,2}, 胡发旺^{1,2}, 董一慧^{1,2}, 孙占学^{1,2*}, 王瑶^{1,2}, 卫承芳^{1,2}, 燕雯¹

(1. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 南昌 330013; 2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013)

摘要: 利用固相萃取-超高效液相色谱串联质谱法, 测定分析了江西省锦江流域地表水、地下水、生活污水和养殖废水中 8 种磺胺类、9 种喹诺酮类、4 种四环素类、4 种大环内酯类和 2 种硝基咪唑类共 27 种抗生素的浓度和分布特征。结果表明, 锦江流域水体存在抗生素的污染, 地表水中共检出 20 种抗生素, 浓度范围为 32.3 ~ 280 ng·L⁻¹。地下水中检出 15 种抗生素, 浓度范围为 28.4 ~ 55.8 ng·L⁻¹。废水中检出 21 种抗生素, 浓度范围为 231 ~ 8.71 × 10⁴ ng·L⁻¹。与国内外河流湖泊中 8 种常见抗生素浓度进行对比表明, 锦江流域污染程度处于中等水平。对比国内外地下水中磺胺甲噁唑浓度可知, 锦江流域地下水中磺胺甲噁唑污染程度中等偏下。与国内外养殖厂废水中 3 种抗生素浓度对比可知, 锦江流域养殖废水中磺胺嘧啶的污染程度较高。生态风险评价结果表明, 研究区中高风险抗生素有 9 种, 分别是克拉霉素、红霉素、环丙沙星、磺胺噻唑、罗红霉素、四环素、氧氟沙星、恩诺沙星和磺胺甲噁唑, 其余为低风险或无风险。

关键词: 锦江流域; 抗生素; 水体; 分布; 生态风险评价

中图分类号: X52; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4064-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111078

Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province

LI Jia-le^{1,2}, WANG Meng^{1,2}, HU Fa-wang^{1,2}, DONG Yi-hui^{1,2}, SUN Zhan-xue^{1,2*}, WANG Yao^{1,2}, WEI Cheng-fang^{1,2}, YAN Wen¹

(1. School of Water Resources & Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: The concentration and distribution characteristics of 27 antibiotics, including 8 sulfonamides, 9 quinolones, 4 tetracyclines, 4 macrolides, and 2 nitroimidazoles, in the surface water, groundwater, and wastewater of the Jinjiang River basin in Jiangxi province were determined using solid-phase extraction combined with ultra-performance liquid chromatography-tandem triple quadrupole mass spectrometry. The results showed that there was antibiotic pollution in the waters of the Jinjiang River basin. A total of 20 antibiotics were detected in the surface water, with a concentration range of 32.3-280 ng·L⁻¹. There were 15 types of antibiotics detected in the groundwater, and the concentration range was 28.4-55.8 ng·L⁻¹. Twenty-one types of antibiotics were detected in the wastewater, with a concentration range of 231-8.71 × 10⁴ ng·L⁻¹. A comparison with the concentrations of eight common antibiotics in rivers and lakes in China and abroad showed that the pollution level in the Jinjiang River basin was at a medium level. By comparing the concentrations of sulfamethoxazole in groundwater from domestic and international samples, the groundwater pollution in the Jinjiang River basin was clearly in the middle and lower range. A comparison of the concentrations of the three antibiotics in the aquaculture wastewater from domestic and abroad samples indicated that the pollution level of sulfadiazine in the aquaculture wastewater from the Jinjiang River basin was relatively high. The ecological risk assessment results showed that there were nine medium- and high-risk antibiotics, which were clarithromycin, erythromycin, ciprofloxacin, sulfathiazole, roxithromycin, tetracycline, ofloxacin, enrofloxacin, and sulfamethoxazole; the rest were low-risk or no-risk antibiotics.

Key words: Jinjiang River basin; antibiotics; water body; distribution; ecological risk assessment

抗生素是生物在生命活动中产生的, 具有抗病原体并影响其他细胞生长发育的化学物质^[1]。因其具有治疗和预防各种细菌和致病微生物感染疾病的功能, 被广泛应用于医疗、畜牧业和水产养殖等领域^[2,3]。一方面, 用于人类医疗和养殖业的抗生素主要通过粪便和尿液的形式排放到土壤和水体环境中^[4,5]。另一方面, 工业废水中的抗生素经污水处理厂处理后, 因常规处理技术不能将抗生素有效去除^[6], 剩余的抗生素被直接排放到地表水中。我国在抗生素生产能力方面居世界领先地位, 年产量约为 210 000 t, 其中 86% 用于动物农业和医药^[7]。随着抗生素的大量生产与使用, 越来越多的抗生素进入到水体环境当中, 我国的地表水和地下水均有抗生素的检出, 甚至部分居民的饮用水中也检出微量抗生素^[8,9]。

抗生素对环境的危害越发突出, 国家对抗生素污染方面的关注也逐渐加强。抗生素污染方面的研究越来越多, 但对江西锦江流域抗生素的研究几乎空白。赣江是江西省第一大河, 也是鄱阳湖流域的最大支流。锦江位于江西省西北角, 是长江水系赣江的支流, 源出于赣湘两省交界的幕阜山脉东麓, 向东流经万载县、上高县和高安市, 于新建区厚田镇境内汇入赣江, 流域面积 7 886 km², 流域年均降水量为

收稿日期: 2021-11-08; 修订日期: 2021-12-29

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作研究项目(51861145308); 江西省科技厅自然科学基金项目(20202BAB213015); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200769); 俄罗斯基础研究基金会项目(RFBR18-55-80015); 印度金砖国家科技和创新框架计划合作研究项目(DST/IMRCD/Pilot Call 2/Enviroganic/2018(G))

作者简介: 李佳乐(1986~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为抗生素环境地球化学行为和治理, E-mail: lijiale@ecut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhxsun@ecut.edu.cn

1 617.5 mm^[10]. 锦江流域是鄱阳湖流域重要的一环,其范围内分布多家养殖场,锦江的水质情况对鄱阳湖生态安全极其重要,甚至会对江西饮用水安全造成一定影响. 本文研究了锦江流域 27 种抗生素的浓度、分布特征并初步评价其生态风险,以期对锦江地区抗生素污染防治及水环境管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2019 年 6 月 7~8 日在赣江支流的锦江上采集了 16 个水样,其中河水水样 9 个,污水水样 4 个,地下水水样 3 个. 采样点分布如图 1,其中,地表水采样点由东向西依次为 R1~R9,采集位置依次为靖州大

桥东侧、靖州大桥下方、上高县明旺养猪场下游、上高县锦江大桥、镇渡镇锦江、万载收费站以西、谭埠镇锦江大坝东侧、谭埠镇锦江和谭埠镇白水河;地下水为 G1~G3,分别位于上高镇鳌拜村村民家水井、镇渡镇镇南村居民饮用水水井和谭埠镇谭埠村山腰水井;污水水样位置依次为 W1~W4,分别为高安靖州大桥东侧高安市生活污水处理厂排污口、上高县明旺养猪场旁水库、万载收费站以西和谭埠镇谭埠村养猪场.

每个采样点采集水样 1 L,用棕色瓶装满且无气泡,加入 50 mL 甲醇抑菌,加入 100 μ L 浓硫酸调节水样 pH 至 3 左右,以此抑制细菌降解抗生素并提高提取效率,在低温条件下保存并运回实验室,24 h 内测试完毕.

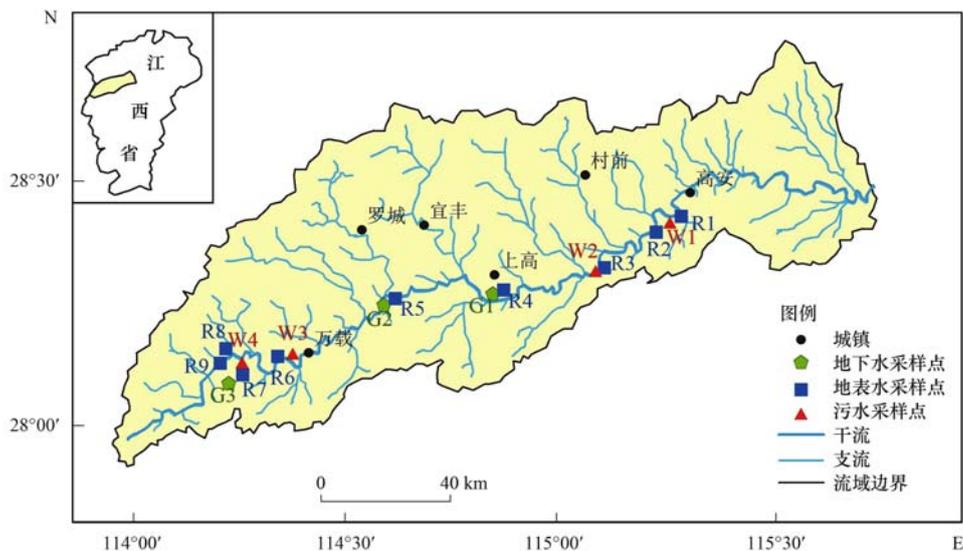


图 1 锦江流域采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Jinjiang River basin

1.2 仪器与试剂

仪器包括: Agilent 1290-6460 液质联用仪(安捷伦科技有限公司)、UVS-3 涡旋混合仪(北京优晟联合科技有限公司)、AR224CN 电子天平(奥豪斯仪器有限公司)、SCAA-SF1000 溶剂过滤器(上海安谱实验科技有限公司)、GM-0.33A 隔膜真空泵(天津市津腾实验设备有限公司)和 Direct-Q[®] 5UV 超纯水机(德国默克密理博公司).

27 种抗生素标准品: 罗红霉素(roxithromycin, RTM)、阿奇霉素(azithromycin, AZM)、克拉霉素(clarithromycin, CTM)、红霉素(erythromycin, ERY)、金霉素盐酸盐(chlortetracycline hydrochloride, CTC)、土霉素盐酸盐(oxytetracycline hydrochloride, OTC)、盐酸强力霉素(doxycycline hydrochloride, DOC)、四环素盐酸盐(tetracycline hydrochloride, TC)、恩诺沙星(enrofloxacin, ENR)、环丙沙星盐酸

盐(ciprofloxacin hydrochloride, CIP)、氧氟沙星(ofloxacin, OFL)、依诺沙星(enoxacin, ENO)、诺氟沙星(norfloxacin, NOR)、司帕沙星(sparfloxacin, SPA)、加替沙星(gatifloxacin, GAT)、氟罗沙星(fleroxacin, FLE)、洛美沙星(lomefloxacin, LOM)、甲硝唑(metronidazole, MDZ)、二甲硝咪唑(dimetridazole, DMZ)、磺胺嘧啶(sulfadiazine, SDZ)、磺胺甲噁唑(sulfamethoxazole, SMX)、磺胺噻唑(sulfathiazole, STZ)、磺胺喹啉(sulfaquinolone, SQX)、磺胺对甲氧嘧啶(sulfameter, SFM)、磺胺二甲基嘧啶(sulfamethazine, SMZ)、磺胺甲氧吡嗪(sulfamethoxypyridazine, STP)和磺胺吡啶(sulfapyridine, SPD)均进口自德国 Dr. Ehrenstorfer 公司.

4 种回收率指示剂: 磺胺甲基嘧啶-D4

(sulfamerazine-D4, SMR-D4)、盐酸环丙沙星-D8 (ciprofloxacin-D8 hydrochloride, CIP-D8)、盐酸去甲基金霉素 (demeclocycline hydrochloride, DTC) 和红霉素- ^{13}C , D3 (erythromycin- ^{13}C , D3, ERY- ^{13}C , D3) 均进口自德国 Dr. Ehrenstorfer 公司。

Waters Oasis HLB (6 mL, 500 mg) 固相萃取小柱、甲醇、乙腈、甲酸、乙酸乙酯、二氯甲烷、乙酸铵、硫酸、乙二胺四乙酸二钠盐 ($\text{Na}_2\text{EDTA}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和盐酸均购自上海安谱实验科技有限公司, 0.7 μm (φ 70 mm) GF/F 玻璃微纤维滤纸购自美国 Millipore 公司。

1.3 样品分析

水样加入回收率指示剂, 经 0.7 μm (φ 70 mm) GF/F 玻璃微纤维滤膜过滤, 采用 Waters Oasis HLB (6 mL, 500 mg) 固相萃取小柱进行萃取, 使用甲醇、乙酸乙酯和二氯甲烷洗脱, 氮吹至近干, 使用 1 mL 甲醇水溶液溶解并过 0.22 μm 的有机滤膜待测。采用本实验室的超高效液相色谱-三重四级杆串联质谱联用仪 (Agilent 1290-6460) 对样品进行测定。具体方法见文献 [11~13]。

1.4 生态风险评价方法

本文对抗生素的风险评价方法按照欧盟技术指导文件 [14] 进行, 具体计算公式如下:

$$\text{RQ}_s = \text{MEC}/\text{PNEC} \quad (1)$$

$$\text{PNEC} = \text{L(E)}\text{C}_{50}/\text{AF} \quad (2)$$

式中, RQ_s 为风险商值, MEC 为污染物实际监测浓度 ($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$), PNEC 为预测无效应浓度 ($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{L(E)}\text{C}_{50}$ 为急性和慢性毒性数据 (其中, LC_{50} 为最低效应浓度, EC_{50} 为半效应浓度), AF 为评估因子。毒性数据通过文献搜集获得, AF 数值根据欧盟技术指导文中生物毒性数据情况选取, 急性毒性数据 AF 取值 1000; 慢性毒性数据 AF 取值 100。据 Hernando [15] 提出的 RQ 分类方法, 表征生态风险的不同程度可将 RQ 分为 4 类: $\text{RQ} < 0.01$ 为无风险, $0.01 \leq \text{RQ} < 0.1$ 为低风险, $0.1 \leq \text{RQ} < 1$ 为中等风险, $\text{RQ} \geq 1$ 为高风险。

2 结果与讨论

2.1 抗生素的浓度特征

地表水、地下水和废水共 16 个采样点的总检出率如图 2, 可知水样中共检出抗生素 24 种, 3 种抗生素未检出, 分别为阿奇霉素、加替沙星和甲硝唑。大环内酯类除了阿奇霉素未检出外, 其他 3 种抗生素检出率为 31.25%~62.5%; 4 种四环素类抗生素均被检出, 检出率为 25%~81.25%; 喹诺酮类除了加替沙星未检出外, 其他 8 种抗生素均有检出, 检

出率为 6.25%~62.5%; 硝基咪唑类只有二甲硝咪唑检出, 检出率为 62.5%; 磺胺类均被检出, 除磺胺嘧啶检出率低外, 其他 7 种抗生素检出率极高, 磺胺甲噁唑检出率甚至高达 100%。

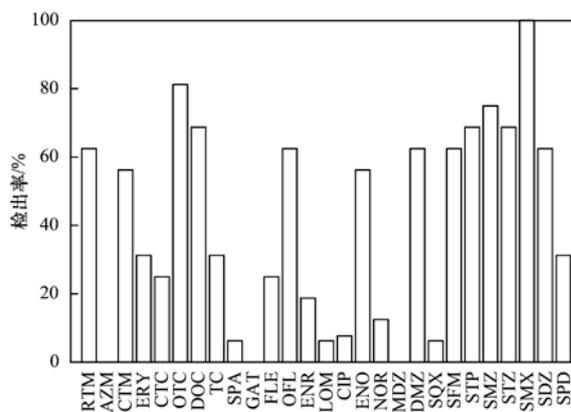


图 2 锦江流域水体中抗生素检出率
Fig. 2 Detection rate of antibiotics in waters of the Jinjiang River basin

地表水、地下水和废水中各抗生素浓度和检出率见表 1, 可知地表水中共检出抗生素 20 种, 浓度范围为 32.3~280 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 108 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。检出率超过 50% 的抗生素有 12 种, 检出浓度最高为磺胺甲噁唑、土霉素和环丙沙星。其中磺胺类 (SAs) 检出 7 种抗生素, 检出浓度和检出率最高, 浓度范围为 16.8~142 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 44.7 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。除了磺胺嘧啶未检出外, 其它检出率范围为 33.3%~100%, 磺胺甲噁唑、磺胺二甲嘧啶和磺胺甲氧嘧啶这 3 种均为 100% 检出; 喹诺酮类 (FQs) 检出 6 种抗生素, 浓度范围为 ND~86.0 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 12.6 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 检出率为 11.11%~55.56%。除了氟诺沙星和依诺沙星检出率均为 55.56% 外, 其他几种抗生素检出率均较低; 大环内酯类 (MLs) 检出 3 种抗生素, 浓度范围为 ND~108 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 18.0 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中, 红霉素检出最高浓度为 83.6 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 罗红霉素和强力霉素的检出率均超过 50%; 四环素类 (TCs) 检出 3 种抗生素, 浓度范围为 ND~92.0 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 27.1 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中, 土霉素最高检出浓度为 86.1 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 强力霉素的检出率超过 50%; 硝基咪唑类 (NDs) 只检出二甲硝咪唑这 1 种抗生素, 检出浓度低, 范围为 ND~32.0 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 5.53 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

3 个地下水采样点共检出抗生素 15 种, 浓度范围为 28.4~55.8 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 37.9 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。检出率超过 50% 的抗生素有 9 种, 磺胺甲噁唑检出浓度最高, 检出率最大。磺胺类 (SAs) 检出 4 种抗生素, 浓度范围为 18.1~31.0 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 24.9 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。磺胺甲噁唑的检出浓度最高为 29.7 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,

检出率为 100%; 其他 4 类抗生素检出浓度较低, 硝基咪唑类 (NDs) 的二甲基咪唑最高检出浓度为 $11.6 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 检出率为 66.67%; 喹诺酮类 (FQs) 抗生素检出 5 种, 检出浓度均较低, 氧氟沙星和依诺沙星检出

率均为 66.67%; 四环素类 (TCs) 检出 3 种抗生素, 检出浓度均较低, 土霉素和强力霉素检出率均为 66.67%; 大环内酯类 (MLs) 检出罗红霉素和克拉霉素, 检出率为 66.67%, 检出浓度较低。

表 1 地表水、地下水和废水水体中各种抗生素浓度和检出率¹⁾

Table 1 Concentrations of various antibiotics in surface water, groundwater, and wastewater

项目	地表水 (n=9)			地下水 (n=3)			废水 (n=4)			
	范围 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	检出率 /%	范围 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	检出率 /%	范围 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	检出率 /%	
MLs	RTM	ND ~ 10.1	1.55	66.67	ND ~ 0.07	0.03	66.67	ND ~ 8.20	2.20	50
	AZM	ND	0	0	ND	0	0	ND	0	0
	CTM	ND ~ 14.8	3.80	66.67	ND ~ 5.10	2.06	66.67	ND ~ 10.0	2.50	25
	ERY	ND ~ 83.6	12.7	33.33	ND	0	0	ND ~ 389	105	50
	∑ MLs	ND ~ 108	18.0	66.67	0.03 ~ 5.10	2.09	100	ND ~ 389	110	75
TCs	CTC	ND	0	0	ND ~ 4.18	1.39	33.33	ND ~ 58.6	35.9	75
	OTC	ND ~ 86.1	21.5	77.78	ND ~ 2.65	1.00	66.67	$54.0 \sim 2.72 \times 10^3$	738	100
	DOC	ND ~ 5.92	1.71	66.67	ND ~ 1.56	0.89	66.67	10.9 ~ 49.3	22.3	100
	TC	ND ~ 29.8	3.93	44.44	ND	0	0	ND ~ 27.4	6.85	25
	∑ TCs	ND ~ 92.0	27.1	88.89	0.36 ~ 8.39	3.28	100	$123 \sim 2.80 \times 10^3$	803	100
FQs	SPA	ND	0	0	ND ~ 0.23	0.08	33.33	ND	0	0
	GAT	ND	0	0	ND	0	0	ND	0	0
	FLE	ND ~ 0.52	0.09	22.22	ND ~ 0.35	0.12	33.33	ND ~ 1.30	0.32	25
	OFL	ND ~ 7.36	1.65	55.56	ND ~ 1.81	0.65	66.67	ND ~ 38.8	10.5	75
	ENR	ND ~ 12.1	1.35	11.11	ND ~ 1.91	0.64	33.33	ND ~ 7.96	1.99	25
	LOM	ND	0	0	ND	0	0	ND ~ 5.65	1.41	25
	CIP	ND ~ 78.6	8.74	11.11	ND	0	0	ND	0	0
	ENO	ND ~ 4.73	0.81	55.56	ND ~ 3.02	1.60	66.67	ND ~ 6.97	3.12	50
	NOR	ND ~ 0.08	0.01	11.11	ND	0	0	ND ~ 2.53	0.63	25
	∑ FQs	ND ~ 86.0	12.6	88.89	1.93 ~ 4.83	3.08	100	1.61 ~ 56.3	18.0	100
NDs	MDZ	ND	0	0	ND	0	0	ND	0	0
	DMZ	ND ~ 32.0	5.53	77.78	ND ~ 11.6	4.61	66.67	ND ~ 10.9	2.73	25
	∑ NDs	ND ~ 32.0	5.53	77.78	ND ~ 11.6	4.61	66.67	ND ~ 10.9	2.73	25
SAs	SQX	ND	0	0	ND ~ 0.14	0.05	33.33	ND	0	0
	SFM	ND ~ 10.5	4.79	88.89	ND	0	0	$ND \sim 3.78 \times 10^4$	9.45×10^3	50
	STP	0.02 ~ 9.51	5.03	100	ND	0	0	$ND \sim 3.17 \times 10^4$	7.94×10^3	50
	SMZ	0.01 ~ 8.63	3.62	100	ND ~ 0.26	0.09	33.33	$ND \sim 3.79 \times 10^3$	951	50
	STZ	ND ~ 46.1	5.83	77.78	ND ~ 1.15	0.76	66.67	ND ~ 71.0	19.1	50
	SMX	11.1 ~ 71.5	22.7	100	18.1 ~ 29.7	24.0	100	12.0 ~ 31.6	21.8	100
	SDZ	ND ~ 6.52	2.63	77.78	ND	0	0	$ND \sim 1.08 \times 10^4$	2.71×10^3	100
	SPD	ND ~ 0.69	0.12	33.33	ND	0	0	ND ~ 16.9	4.88	33.33
	∑ SAs	16.8 ~ 142	44.7	100	18.1 ~ 31.0	24.9	100	$19.0 \sim 8.43 \times 10^4$	2.11×10^4	100
	∑ 27 种抗生素	32.3 ~ 280	108	100	28.4 ~ 55.8	130	100	$231 \sim 8.71 \times 10^4$	2.20×10^4	100

1) ND 表示未检出 (not detected)

废水中共检出抗生素 21 种, 浓度范围为 $231 \sim 8.71 \times 10^4 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $2.20 \times 10^4 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 检出率超过 50% 的抗生素有 13 种, 磺胺类的检出浓度最高, 其次是四环素类. 磺胺类 (SAs) 共检出 8 种抗生素, 浓度范围为 $19.0 \sim 8.43 \times 10^4 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $2.11 \times 10^4 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 其中, 磺胺嘧啶、磺胺对甲氧嘧啶、磺胺二甲氧嘧啶和磺胺甲氧嘧啶的检出浓

度最高. 除了磺胺吡啶检出率小于 50% 外, 其他 7 种抗生素检出率均大于 50%, 磺胺嘧啶和磺胺甲氧嘧啶检出率均为 100%. 四环素类 (TCs) 抗生素全部检出, 浓度范围为 $123 \sim 2.80 \times 10^3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 土霉素最高检出浓度为 $2.72 \times 10^3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 土霉素和强力霉素检出率均为 100%, 且与地表水相比多了金霉素的检出; 大环内酯类 (MLs) 检出 3 种抗生素, 浓度范

围为 ND ~ 389 ng·L⁻¹. 红霉素的检出浓度最高, 红霉素和罗红霉素检出率均为 50%; 喹诺酮类 (FQs) 检出 6 种抗生素, 浓度范围为 1.61 ~ 56.3 ng·L⁻¹. 相比地表水多了洛美沙星的检出, 其余抗生素检出浓度均较低, 氧氟沙星和依诺沙星检出率均超过 50%; 硝基咪唑类 (NDs) 的检出浓度均较低.

2.2 抗生素的分布规律

由图 3 可知, 顺着河流由西向东, 不同种类的抗生素呈现不同的变化规律. R7、R2 和 R1 抗生素总浓度增高, R7 靠近 W4 养殖场, R2 靠近生活污水排污口, R1 靠近工业废水排污口, 证明养殖场废水、污水处理厂的出水和工业废水中含有较高浓度的抗生素. 四环素类抗生素常被用于畜禽养殖, R7 和 R2 有明显的四环素类抗生素检出, 周围生活区密集, 可能与养殖场或生活污水厂有关. 伴随着多条河流汇入的稀释作用, R7 ~ R3 四环素类抗生素浓度逐渐降低; R9 ~ R2 都有较高浓度的磺胺类抗生素检出, 磺胺类为人工合成抗菌药, 产量大, 使用广泛, 不易降解, 因此其浓度变化规律不明显. 在 R1 检出浓度最大, 可能与工业废水排污有关; R9 ~ R3 大环内酯类检出浓度低, 在 R2 和 R1 检出浓度增高, 可能与工业排污和生活排污有关; R9 ~ R3 硝基咪唑类和喹诺酮类抗生素检出浓度低, 在 R2 这两类抗生素均有明显检出, 可能与生活污水排污有关, 随后随着河流的稀释作用, 浓度又开始降低.

图 4 为河流中 9 个采样点共检测出的 20 种抗

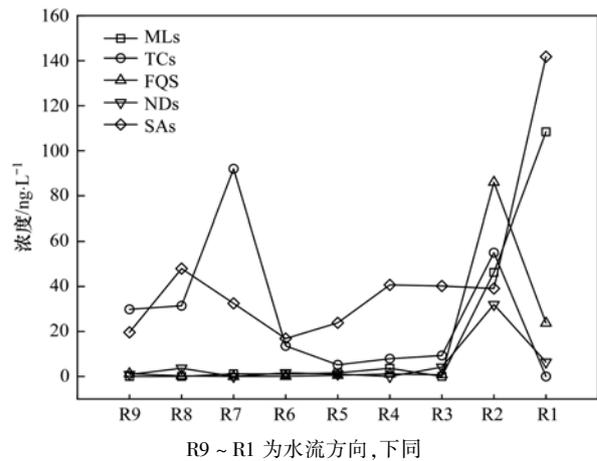


图 3 沿河流流向各种类抗生素浓度

Fig. 3 Concentrations of various antibiotics along the river flow direction

生素随河流流向的浓度变化, 由图 4(a) 可知, 自西向东, 截至 R3, 大环内酯类的罗红霉素、红霉素和克拉霉素浓度均较小且近未检出, 在 R2 处出现明显的增高, 在 R1 达到最高浓度, 此处红霉素浓度已高于罗红霉素和克拉霉素, 达 83.6 ng·L⁻¹, 说明生活污水和工业废水中均含有红霉素、罗红霉素和克拉霉素, 且红霉素的浓度大于其他两种; 二甲硝咪唑开始一直在极低浓度状态起伏, 在 R2 出现明显的增高, 检出最大浓度为 32.0 ng·L⁻¹, 之后开始降低, 说明二甲硝咪唑在生活污水中有残留, 在工业废水中没有明显检出.

由图 4(b) 可知, 土霉素由 R7 检出的最高浓度

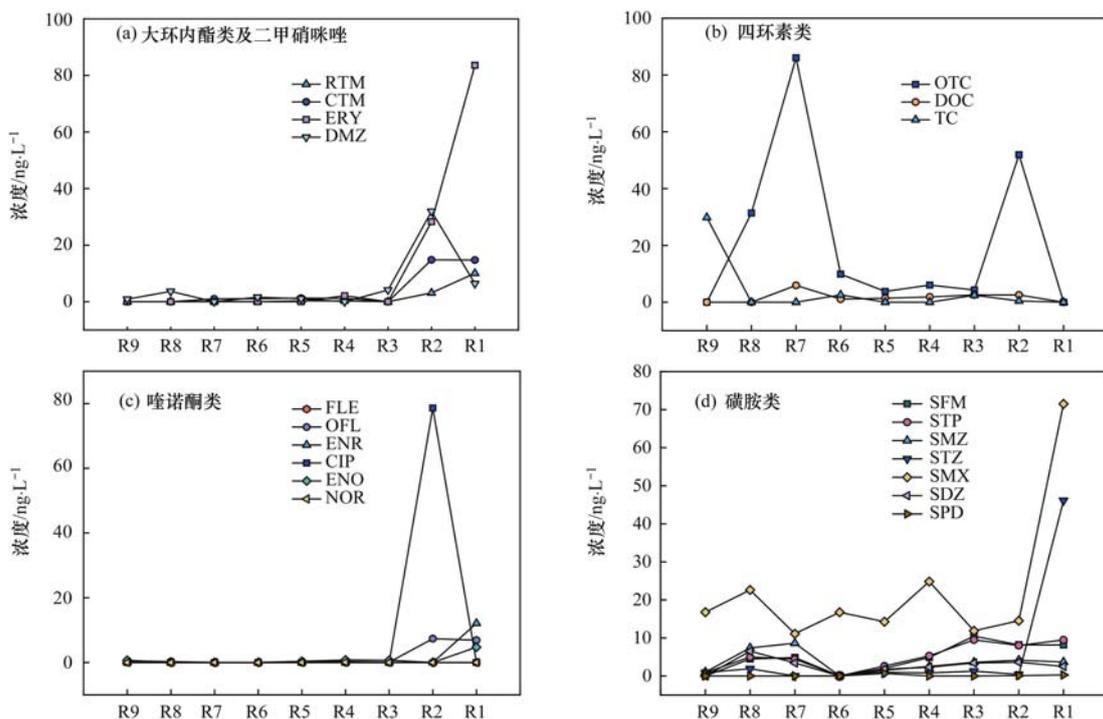


图 4 沿河流流向 20 种抗生素浓度

Fig. 4 Concentration of antibiotics along the river flow direction

(86.1 ng·L⁻¹) 逐渐降低, 在 R2 又骤增. 土霉素常作为饲料添加剂用于畜禽与水产养殖的疾病治疗, 说明锦江流域在畜禽养殖上对土霉素的用量较大, 且生活污水中也有检出; 强力霉素开始有低浓度检出 (5.92 ng·L⁻¹), 随后检出浓度一直不大, 接近未检出; 四环素只在 R9 点有检出 (29.8 ng·L⁻¹), 其他位置皆为未检出或检出浓度不大. 由图 4(c) 可知, 喹诺酮类的波动只出现在 R2 和 R1, 环丙沙星只在 R2 点检出 (78.6 ng·L⁻¹), 其余均未检出; 氧氟沙星在 R2 有低浓度检出, 且在 R1 的浓度不变; 依诺沙星和恩诺沙星波动规律类似, 只在 R1 有低浓度检出; 诺氟沙星一直没有波动, 浓度处于较低水平.

由图 4(d) 可知, 磺胺甲噁唑和磺胺噻唑的波动规律与其他 4 种抗生素有明显不同, 磺胺甲噁唑浓度一直比其他 6 种抗生素要高, 沿河流流向自西向东一直在 10.0~30.0 ng·L⁻¹ 的范围内上下波动, 在 R1 达到最大浓度 (71.5 ng·L⁻¹). 根据废水数据对比可知, 磺胺甲噁唑的地表水与废水浓度接近, 说明

磺胺甲噁唑降解能力弱, 且锦江流域在磺胺甲噁唑的使用上非常普遍; 磺胺噻唑一直处于低浓度接近未检出状态, 受工业排污的影响, 在 R1 出现高浓度检出 (46.1 ng·L⁻¹); 磺胺对甲氧嘧啶、磺胺甲氧哒嗪、磺胺嘧啶和磺胺二甲基嘧啶变化规律基本一致, 一直处在低浓度范围内波动; 磺胺吡啶检出浓度很低.

2.3 锦江抗生素浓度与其他流域对比

2.3.1 地表水抗生素浓度对比分析

与国内外其他地区地表水体抗生素浓度对比见表 2, 其中选取了 8 个检出浓度较大或检出率较高的抗生素进行了对比. 大环内酯类抗生素属于快速抗菌剂, 主要用于人类疾病的治疗. 国内对克拉霉素的检测较少, 但国外对于该抗生素的检测较多且检出浓度较高, 比锦江高出了两个数量级, 说明锦江克拉霉素污染较轻; 红霉素属于第一代大环内酯类抗生素, 广泛用于上呼吸道感染, 且具有酸不稳定性. 锦江红霉素浓度与国内外其他河流处于一个数量级, 属于一般污染.

表 2 部分河流湖泊中抗生素浓度水平¹⁾/ng·L⁻¹

Table 2 Antibiotic concentration levels in selected rivers and lakes/ng·L⁻¹

项目	时间(年-月)	CTM	ERY	TC	OTC	OFL	SDZ	SMX	SMZ
中国锦江(本研究)	2019-06	ND~14.8	ND~83.6	ND~29.8	ND~86.1	ND~7.36	ND~6.52	11.1~71.5	0.01~8.63
中国南四湖 ^[16]	2019-04	—	ND~9.9	10.8~126	ND~5.87	ND~10.3	ND	ND~19.4	ND~0.48
中国太湖 ^[17]	2013-08	—	—	ND~1850	ND~4720	14~474	—	ND~7	—
中国白洋淀 ^[20]	2016-08	—	ND~121	—	—	0.38~32.6	0.86~505	ND~940	ND~16.1
中国伊通河 ^[19]	2008~2010	—	—	ND	ND	17~557	113~439	ND~186	—
中国开阳河流 ^[18]	12月(旱季)	—	ND~103	ND~184	ND~237	5.6~1200	—	—	—
法国弧形河 ^[23]	2007~2008	790~1830	—	ND	—	—	—	ND~1310	—
法国塞纳河 ^[21]	2006-01~2006-06	—	—	—	—	30	ND	40	—
越南湄公河 ^[22]	2005-07	ND	9~41	9~41	—	—	—	20~174	15~328
日本多摩川 ^[22]	2005-11	168	78	—	—	—	—	19	ND
纽约尼亚加拉河 ^[24]	—	1100	ND	—	ND	—	—	ND	—

1) ND 表示未检出(not detected); “—”表示数据缺失

四环素由于其不良反应、化学性质不稳定与耐药性, 已逐渐退出临床应用, 现在主要作为生长促进剂投放给动物, 用于畜牧业的养殖上. 四环素在锦江、南四湖^[16]、太湖^[17]和开阳^[18]地区检出浓度较高, 说明该地区畜牧业养殖中使用量大. 但是在伊通河^[19]检出浓度不高或未检出, 说明不同地区畜牧业养殖的使用状况不同; 土霉素在国内应用广泛, 锦江土霉素的检出浓度要高于南四湖^[16]和伊通河^[19], 低于开阳^[18]和太湖^[17].

喹诺酮类抗生素是具有吸收快、分布广且不良反应少的新型抗菌剂. 氧氟沙星在国内外使用广泛, 锦江流域氧氟沙星的检出浓度与南四湖^[16]和白洋淀^[20]相当, 低于太湖^[17]、开阳喀斯特河流^[18]和伊通河^[19] 1~3 个数量级, 说明国内部分地区对氧氟

沙星的使用量较大.

磺胺类抗生素使用量大, 且具有高水溶性, 对地表水的污染能力也较强. 锦江的磺胺嘧啶与山东南四湖^[16]的浓度大致相当, 检出浓度都不高或者未检出, 对水环境影响不大. 而河北白洋淀^[20]和吉林伊通河^[19]检出浓度比锦江高出了两个数量级, 在塞纳河^[21]中并未检出; 磺胺甲噁唑在中国的锦江、南四湖^[16]、太湖^[17]、白洋淀^[20]和伊通河^[19]以及法国塞纳河^[21]、越南湄公河^[22]和日本多摩川^[22]中均有检出, 说明了各国对磺胺甲噁唑的使用量均较大. 近几年, 磺胺甲噁唑的研究和检测在国内是比较热门的, 在水体、土壤和沉积物中广泛存在, 说明国内对于磺胺甲噁唑的使用量大, 且可能存在滥用情况. 锦江的磺胺甲噁唑浓度与法国塞纳河^[21]相当, 介于南四

湖^[16]和太湖^[17]与白洋淀^[20]和伊通河^[19]之间,大于南四湖^[16]和太湖^[17]一个数量级但低于伊通河^[19]和白洋淀^[20]一个数量级,污染浓度依然属于较高水平;磺胺二甲基嘧啶在锦江、南四湖^[16]和白洋淀^[20]的检出浓度相差不大,越南湄公河^[22]中检出浓度较大.磺胺二甲基嘧啶主要产生于牲畜粪便中,锦江河流中磺胺二甲基嘧啶浓度大于南四湖^[16],小于白洋淀^[20],污染程度中等.

2.3.2 地下水抗生素浓度对比分析

由于土壤层的净化作用,地下水中检测到的抗生素普遍种类少,浓度低^[25].由表1可知,锦江流域的抗生素对地下水的污染较小,除磺胺甲噁唑外,其他抗生素检出浓度范围均处于低水平.通过对比各地地下水中磺胺甲噁唑最高浓度可知:中国北京^[26]($8.4 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) < 中国锦江($29.7 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) < 美国^[27]($220 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) < 中国崇明岛^[28]($241.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) < 西班牙加泰罗尼亚^[29]($312.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) < 德国巴符州^[30]($410 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$),因此锦江流域地下水中磺胺甲噁唑的污染程度中等偏下.

2.3.3 养殖场废水抗生素浓度对比分析

废水采样点包括生活污水采样点和养猪场废水采样点.其中,生活污水采样点 W1 的抗生素浓度和污染特征接近地表水采样点 R1 和 R2.养殖场废水采样点 W2 和 W4 中大量检出的抗生素有 5 种,分别是四环素类的土霉素,磺胺类的磺胺嘧啶、磺胺对甲氧嘧啶、磺胺二甲基嘧啶和磺胺甲氧哒嗪,说明这 5 种抗生素在锦江流域的养殖场最常用.从这 5 种中选出研究较多的土霉素、磺胺二甲基嘧啶和磺胺嘧啶与国内外抗生素数据进行对比(表 3).土霉素是各地常用抗生素之一,锦江的土霉素浓度要低于江苏、杭州、北京和山东^[31~33],略大于美国 Nebraska 地区^[34],对比之下,锦江流域废水中土霉素的污染程度属于中等偏下;与中国的重庆、杭州、长江三角洲、美国的 Iowa 和 Ohio 地区^[32,35~37]比较,锦江流域废水中磺胺二甲基嘧啶的污染程度属于中等;与重庆、杭州、北京、山东和长江三角洲^[32,33,35,36]对比,锦江流域废水中磺胺嘧啶的污染程度较高.

表 3 部分地区养殖废水中抗生素浓度水平¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Concentration level of antibiotics in aquaculture wastewater in some areas/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	OTC	SMZ	SDZ
中国锦江(本研究)	0.100~2.73	0.0130~3.79	ND~10.9
中国江苏 ^[31]	0.07~72.9	—	—
中国重庆 ^[35]	—	ND~2.92	ND~0.115
中国杭州 ^[32]	0.17~12.1	0.07~0.67	0.009~0.028
中国北京 ^[33]	6.18~25.4	—	ND
中国山东 ^[33]	3.5~387.1	—	ND
中国长江三角洲 ^[36]	27.5	ND~5	ND~5
美国 Nebraska ^[34]	1.3	—	—
美国 Iowa 和 Ohio ^[37]	—	2.5~400	—

1) ND 表示未检出(not detected);“—”表示数据缺失

2.4 生态风险评价

本研究的生态风险评价中 PENC 是根据已有研究中抗生素对一些物种的急性和慢性毒理数据求出的,基于最坏情况考虑,PENC 根据最敏感物种计算,河流中实测抗生素浓度选择最大值,计算结果见表 4.

根据风险商值(RQ_s)的计算评价方法,计算得锦江地表水检测出的抗生素 RQ_s 如表 5.可知,高风险抗生素有 4 种,分别是克拉霉素、红霉素、环丙沙星和磺胺嘧啶,说明锦江中 2 种大环内酯类、1 种喹诺酮类和 1 种磺胺类对河流中相应敏感水生生物存在慢性或急性毒性风险;中风险抗生素有 5 种,分别是罗红霉素、四环素、氧氟沙星、恩诺沙星和磺胺甲噁唑;低风险抗生素有 3 种,分别是土霉素、强力霉素和依诺沙星;无风险抗生素有 4 种,分别是诺氟沙星、磺胺二甲基嘧啶、磺胺嘧啶和磺胺吡啶.

结合抗生素浓度水平与生态风险评价结果可知,锦江流域水体中中高风险抗生素有 9 种,分别为罗红霉素、红霉素、克拉霉素、四环素、氧氟沙星、恩诺沙星、环丙沙星、磺胺嘧啶和磺胺甲噁唑.大环内酯类共检测 4 种,除了 1 种未检出外,其他 3 种均为中高风险,虽然没有其他抗生素的浓度高,但却对敏感水生生物的影响极大,因此有较高的 RQ_s 值.四环素类只有四环素处于中风险,其他 2 种都是低风险,土霉素的检出浓度高于四环素,但土霉素对于藻类的影响要小于四环素,因此四环素属于中风险.喹诺酮类抗生素相比其他类抗生素更容易在沉积物中富集,具有较强的疏水性,容易从水相向固相迁移^[31].因此,除环丙沙星外,喹诺酮类抗生素的检出浓度普遍比其他类抗生素的检出浓度低,但是仍然有恩诺沙星和氧氟沙星属于中风险,说明喹诺酮类对水生生物的敏感性更高.磺胺类抗生素检出 2

种,磺胺噻唑和磺胺甲噁唑的检出浓度均较高,磺胺甲噁唑浓度更高,对于同种受试藻类而言,磺胺噻唑

的毒理数据要小于磺胺甲噁唑,因此磺胺噻唑属于高风险,而磺胺甲噁唑属于中风险。

表 4 地表水中抗生素生态风险评价

Table 4 Ecological risk assessment of antibiotics in surface water

抗生素	物种	毒理数据/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	毒性类型	评估因子(AF)	PENC/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$
RTM	<i>P. subcapitata</i>	0.01 (NOEC) ^[38]	慢性	100	100
CTM	<i>P. subcapitata</i>	0.002 (EC ₅₀) ^[39]	急性	1 000	2
ERY	<i>P. subcapitata</i>	0.02 (EC ₅₀) ^[21]	急性	1 000	20
OTC	<i>P. subcapitata</i>	1.04 (EC ₅₀) ^[40]	急性	1 000	1 040
DOC	<i>Algae</i>	0.316 (EC ₅₀) ^[41]	急性	1 000	316
TC	<i>M. aeruginosa</i>	0.09 (EC ₅₀) ^[42]	急性	1 000	90
OFL	<i>P. subcapitata</i>	0.001 13 (NOEC) ^[43]	慢性	100	11.3
ENR	<i>M. aeruginosa</i>	0.049 (EC ₅₀) ^[44]	急性	1 000	49
CIP	<i>M. aeruginosa</i>	0.005 (EC ₅₀) ^[45]	急性	1 000	5
ENO	<i>V. fischeri</i>	0.049 33 (EC ₅₀) ^[44]	急性	1 000	49.33
NOR	<i>V. fischeri</i>	0.010 38 (NOEC) ^[46]	慢性	100	103.8
SMZ	<i>L. minor</i>	1.277 (EC ₅₀) ^[47]	急性	1 000	1 277
STZ	<i>S. leopoliensis</i>	0.027 (EC ₅₀) ^[48]	急性	1 000	27
SMX	<i>S. leopoliensis</i>	0.46 (EC ₅₀) ^[38]	急性	1 000	460
SDZ	<i>S. capricornutum</i>	2.2 (EC ₅₀) ^[49]	急性	1 000	2 200
SPD	<i>L. minor</i>	0.46 (EC ₅₀) ^[49]	急性	1 000	460

表 5 锦江流域抗生素风险商值

Table 5 Antibiotic risk quotient in Jinjiang River basin

抗生素	实测浓度最大值 (MEC)/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	风险商值 (RQ _s)	风险等级
RTM	10.1	1.006×10^{-1}	中风险
CTM	14.8	7.415	高风险
ERY	83.6	4.180	高风险
OTC	86.1	8.270×10^{-2}	低风险
DOC	5.92	1.870×10^{-2}	低风险
TC	29.8	3.326×10^{-1}	中风险
OFL	7.36	6.513×10^{-1}	中风险
ENR	12.1	2.471×10^{-1}	中风险
CIP	78.6	15.73	高风险
ENO	4.73	9.590×10^{-2}	低风险
NOR	0.08	7.000×10^{-4}	无风险
SMZ	8.63	6.700×10^{-3}	无风险
STZ	46.1	1.709	高风险
SMX	71.5	1.555×10^{-1}	中风险
SDZ	6.52	2.900×10^{-3}	无风险
SPD	0.69	1.500×10^{-3}	无风险

3 结论

(1) 锦江流域水体存在抗生素污染,地表水中共检出 20 种抗生素,浓度范围为 $32.3 \sim 280 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。地下水中共检出 15 种抗生素,浓度范围为 $28.4 \sim 55.8 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。废水中共检出 21 种抗生素,浓度范围为 $231 \sim 8.71 \times 10^4 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中,红霉素、土霉素、环丙沙星、磺胺噻唑和磺胺甲噁唑在锦江流域检出浓度较高。

(2) 与国内外河流湖泊、地下水和养殖场废水对比,锦江流域地表水处于中等污染水平,地下水处于中等偏下水平,废水的污染程度较高。

(3) 基于最严重的情况来考虑抗生素的生态风险,结果表明,锦江流域水体中的中高风险抗生素有 9 种,其中大环内酯类 3 种,四环素类 1 种,喹诺酮类 3 种,磺胺类 2 种。克拉霉素、红霉素、环丙沙星和磺胺噻唑等抗生素的生态风险应引起充分重视。

参考文献:

- [1] 章强, 辛琦, 朱静敏, 等. 中国主要水域抗生素污染现状及生态环境效应研究进展[J]. 环境化学, 2014, 33(7): 1075-1083.
Zhang Q, Xin Q, Zhu J M, et al. The antibiotic contaminations in the main water bodies in China and the associated environmental and human health impacts [J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(7): 1075-1083.
- [2] Murata A, Takada H, Mutoh K, et al. Nationwide monitoring of selected antibiotics: distribution and sources of sulfonamides, trimethoprim, and macrolides in Japanese rivers[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(24): 5305-5312.
- [3] Zhang M, Cai Z X, Zhang G F, et al. Effectively reducing antibiotic contamination and resistance in fishery by efficient gastrointestinal-blood delivering dietary millispheres[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 409, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.125012.
- [4] Guo J H, Selby K, Boxall A B A. Assessment of the risks of mixtures of major use veterinary antibiotics in European surface waters[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(15): 8282-8289.
- [5] 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.
- [6] 程宪伟, 梁银秀, 于翔霏, 等. 水体中抗生素污染及其处理技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(S1): 125-132.
Cheng X W, Liang Y X, Yu X F, et al. The contamination and treatment technologies for antibiotics in water: a review [J].

- Environmental Science & Technology, 2017, **40**(S1): 125-132.
- [7] 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.
- [8] 武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 等. 长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 2996-3004.
- Wu J M, Wei L, Peng J Q, *et al.* Spatiotemporal distribution and risk assessment of pharmaceuticals in typical drinking water sources in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 2996-3004.
- [9] 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.
- [10] 黄旭华, 王永文, 李喻鑫. 江西省锦江流域降水变化特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2020, (1): 100-105.
- Huang X H, Wang Y W, Li Y X. Research on the precipitation variation characteristics of Jinjiang River basin in Jiangxi province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, (1): 100-105.
- [11] 胡发旺. 鄱阳湖流域典型抗生素分布规律及吸附行为研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2020.
- Hu F W. Study on the distribution and adsorption behavior of typical antibiotics in Poyang Lake basin[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2020.
- [12] Li J L, Dong Y H, Hu F W, *et al.* Occurrence of antibiotics in water in Xiaodian Sewage Irrigation Area, Northern China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, **146**, doi: 10.1088/1755-1315/146/1/012028.
- [13] 李佳乐. 污灌区土壤—地下水系统中典型有机污染物的环境地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2015.
- Li J L. Environmental Geochemistry of typical organic contaminants in the soil-groundwater system of sewage irrigation area[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2015.
- [14] European Chemicals Bureau. Technical guidance document on risk assessment[R]. Luxembourg: European Commission—Joint Research Centre Institute for Health and Consumer Protection European Chemicals Bureau (ECB), Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [15] Hernando M D, Mezcuca M, Fernández-Alba A, *et al.* Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments[J]. Talanta, 2006, **69**(2): 334-342.
- [16] 张慧, 郭文建, 刘绍丽, 等. 南四湖和东平湖表层水体中抗生素污染特征和风险评价[J]. 环境化学, 2020, **39**(12): 3279-3287.
- Zhang H, Guo W J, Liu S L, *et al.* Contamination characteristics and risk assessment of antibiotics in surface water of Nansi Lake and Dongping Lake[J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(12): 3279-3287.
- [17] 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.
- [18] Zou S Z, Huang F Y, Chen L, *et al.* The occurrence and distribution of antibiotics in the Karst river system in Kaiyang, Southwest China [J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2018, **18**(6): 2044-2052.
- [19] Yu Y Y, Wu G L, Wang C Z, *et al.* Pollution characteristics of antibiotics and antibiotic resistance of coliform bacteria in the Yitong River, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, **191**(8), doi: 10.1007/s10661-019-7660-4.
- [20] 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.
- [21] Tamtam F, Mercier F, Le Bot B, *et al.* Occurrence and fate of antibiotics in the Seine River in various hydrological conditions [J]. Science of the Total Environment, 2008, **393**(1): 84-95.
- [22] Managaki S, Murata A, Takada H, *et al.* Distribution of macrolides, sulfonamides, and trimethoprim in tropical waters: Ubiquitous occurrence of veterinary antibiotics in the mekong delta [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(23): 8004-8010.
- [23] Feitosa-Felizzola J, Chiron S. Occurrence and distribution of selected antibiotics in a small Mediterranean stream (Arc River, Southern France)[J]. Journal of Hydrology, 2009, **364**(1-2): 50-57.
- [24] Batt A L, Aga D S. Simultaneous analysis of multiple classes of antibiotics by Ion Trap LC/MS/MS for assessing surface water and groundwater contamination[J]. Analytical Chemistry, 2005, **77**(9): 2940-2947.
- [25] 叶必雄, 张岚. 环境水体及饮用水中抗生素污染现状及健康影响分析[J]. 环境与健康杂志, 2015, **32**(2): 173-178.
- Ye B X, Zhang L. Analysis of the pollution status and health risk of antibiotics in water environment and drinking water [J]. Journal of Environment and Health, 2015, **32**(2): 173-178.
- [26] 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 等. 北京市地下水中典型抗生素分布特征与潜在风险[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5074-5080.
- Chen W P, Peng C W, Yang Y, *et al.* Distribution characteristics and risk analysis of antibiotic in the groundwater in Beijing [J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5074-5080.
- [27] Lindsey M E, Meyer M, Thurman E M. Analysis of trace levels of sulfonamide and tetracycline antimicrobials in groundwater and surface water using solid-phase extraction and Liquid Chromatography/Mass spectrometry [J]. Analytical Chemistry, 2001, **73**(19): 4640-4646.
- [28] 洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 等. 固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的10种磺胺类抗生素[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 652-657.
- Hong L J, Shi L, Zhang Y L, *et al.* Simultaneous determination of 10 sulfonamide antibiotics in water by solid-phase extraction and high performance liquid chromatography [J]. Environmental Science, 2012, **33**(2): 652-657.
- [29] García-Galán M J, Garrido T, Fraile J, *et al.* Simultaneous occurrence of nitrates and sulfonamide antibiotics in two ground water bodies of Catalonia (Spain) [J]. Journal of Hydrology, 2010, **383**(1-2): 93-101.
- [30] Sacher F, Lange F T, Brauch H J, *et al.* Pharmaceuticals in groundwaters: analytical methods and results of a monitoring program in Baden-Württemberg, Germany [J]. Journal of

- Chromatography A, 2001, **938**(1-2): 199-210.
- [31] 魏瑞成, 葛峰, 陈明, 等. 江苏省畜禽养殖场水环境中四环素类抗生素污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(6): 1205-1210.
Wei R C, Ge F, Chen M, *et al.* Pollution of tetracyclines from livestock and poultry farms in aquatic environment in Jiangsu Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(6): 1205-1210.
- [32] 陈永山, 章海波, 骆永明, 等. 典型规模化养猪场废水中兽用抗生素污染特征与去除效率研究[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2205-2212.
Chen Y S, Zhang H B, Luo Y M, *et al.* A preliminary study on the occurrence and dissipation of antibiotics in swine wastewater [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(11): 2205-2212.
- [33] 柴玉峰, 冯玉启, 张玉秀, 等. 猪场废水中 24 种抗生素同时检测方法优化[J]. 环境化学, 2017, **36**(10): 2147-2154.
Chai Y F, Feng Y Q, Zhang Y X, *et al.* Optimization of an analytical method for the simultaneous determination of 24 antibiotics in swine wastewater [J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(10): 2147-2154.
- [34] Zhu J, Snow D D, Cassada D A, *et al.* Analysis of oxytetracycline, tetracycline, and chlortetracycline in water using solid-phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2001, **928**(2): 177-186.
- [35] 余伟铎. 重庆市养殖与生活废水中抗生素污染特征研究[D]. 广州: 广州大学, 2020.
She W D. Study on the characteristics of antibiotic pollution in aquaculture and domestic wastewater in Chongqing [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020.
- [36] 姜蕾, 陈书怡, 杨蓉, 等. 长江三角洲地区典型废水中抗生素的初步分析[J]. 环境化学, 2008, **27**(3): 371-374.
Jiang L, Chen S Y, Yang R, *et al.* Occurrence of antibiotics in the aquatic environment of the Changjiang Delta, China [J]. Environmental Chemistry, 2008, **27**(3): 371-374.
- [37] Campagnolo E R, Johnson K R, Karpati A, *et al.* Antimicrobial residues in animal waste and water resources proximal to large-scale swine and poultry feeding operations [J]. Science of the Total Environment, 2002, **299**(1-3): 89-95.
- [38] Ferrari B, Mons R, Bernard V, *et al.* Environmental risk assessment of six human pharmaceuticals: are the current environmental risk assessment procedures sufficient for the protection of the aquatic environment? [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2004, **23**(5): 1344-1354.
- [39] Holten Lutzhoft H C, Halling-Sørensen B, Jørgensen S E. Algal toxicity of antibacterial agents applied in Danish fish farming [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1999, **36**(1): 1-6.
- [40] Kolar B, Arnus L, Jeretin B, *et al.* The toxic effect of oxytetracycline and trimethoprim in the aquatic environment [J]. Chemosphere, 2014, **115**: 75-80.
- [41] Deng W J, Li N, Zheng H L, *et al.* Occurrence and risk assessment of antibiotics in river water in Hong Kong [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **125**: 121-127.
- [42] González-Pleiter M, Gonzalo S, Rodea-Palomares I, *et al.* Toxicity of five antibiotics and their mixtures towards photosynthetic aquatic organisms: implications for environmental risk assessment [J]. Water Research, 2013, **47**(6): 2050-2064.
- [43] Robinson A A, Belden J B, Lydy M J. Toxicity of fluoroquinolone antibiotics to aquatic organisms [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2005, **24**(2): 423-430.
- [44] Backhaus T, Scholze M, Grimme L H. The single substance and mixture toxicity of quinolones to the bioluminescent bacterium *Vibrio fischeri* [J]. Aquatic Toxicology, 2000, **49**(1-2): 49-61.
- [45] Chokwe T B, Okonkwo J O. Occurrence, distribution and ecological risk assessment of organophosphorus flame retardants and plasticizers in sediment samples along the Vaal River catchment, South Africa [J]. Emerging Contaminants, 2019, **5**: 173-178.
- [46] Halling-Sørensen B, Lutzhoft H C H, Andersen H R, *et al.* Environmental risk assessment of antibiotics: comparison of mecillinam, trimethoprim and ciprofloxacin [J]. Journal of Antimicrobial Chemotherapy, 2000, **46**(S1): 53-58.
- [47] Biak-Bielińska A, Stolte S, Arming J, *et al.* Ecotoxicity evaluation of selected sulfonamides [J]. Chemosphere, 2011, **85**(6): 928-933.
- [48] Grung M, Källqvist T, Sakshaug S, *et al.* Environmental assessment of Norwegian priority pharmaceuticals based on the EMEA guideline [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, **71**(2): 328-340.
- [49] Zha D P, Li Y, Yang C M, *et al.* Assessment of organophosphate flame retardants in surface water and sediment from a freshwater environment (Yangtze River, China) [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, **190**(4), doi: 10.1007/s10661-018-6587-5.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water; A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)