

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

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

赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评价

吴天宇¹, 李江^{1,2*}, 杨爱江^{1,2}, 李彦澄^{1,2}, 陈瑀¹, 何强^{3*}, 马凯⁴, 胡霞^{1,2}, 王斌⁵, 艾佳¹, 钟雄¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025; 2. 贵州喀斯特环境生态系统教育部野外科学观测研究站, 贵阳 550025; 3. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 4. 贵州省分析测试研究院, 贵阳 550000; 5. 贵州大学土木工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 为了初步探究贵州赤水河流域地表水的抗生素浓度分布特征及潜在生态风险, 利用固相萃取-液相色谱串联质谱法 (SPE-LC-MS) 对地表水样品中 21 种抗生素进行检测分析。结果表明, 赤水河地表水共检出 12 种抗生素, 总浓度水平为 ND ~ 1 166.97 ng·L⁻¹, 氧氟沙星、甲氧苄啶和磺胺嘧啶的检出率均为 100%。平均检出浓度最高的 3 种抗生素分别是氧氟沙星 (221.59 ng·L⁻¹)、四环素 (13.18 ng·L⁻¹) 和磺胺嘧啶 (4.11 ng·L⁻¹), 抗生素浓度分布呈现: 下游 (359.41 ng·L⁻¹) > 中游 (224.59 ng·L⁻¹) > 上游 (179.72 ng·L⁻¹)。生态环境风险评估结果表明, 下游点位 W21 具有最大的风险商值, 其中四环素、强力霉素、恩诺沙星、诺氟沙星、红霉素和林可霉素的风险商值具有中风险水平, 氧氟沙星具有高风险水平, 这说明赤水河流域水体抗生素可能会造成一定的生态风险。

关键词: 抗生素; 地表水; 赤水河; 污染; 生态风险

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0210-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103089

Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China

WU Tian-yu¹, LI Jiang^{1,2*}, YANG Ai-jiang^{1,2}, LI Yan-cheng^{1,2}, CHEN Yu¹, HE Qiang^{3*}, MA Kai⁴, HU Xia^{1,2}, WANG Bin⁵, AI Jia¹, ZHONG Xiong¹

(1. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Karst Environmental Ecosystem Observation and Research Station, Ministry of Education, Guiyang 550025, China; 3. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 4. Guizhou Academy of Testing and Analysis, Guiyang 550000, China; 5. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To preliminarily explore the antibiotic concentration distribution characteristics of Guizhou Chishui River basin surface water and potential ecological risks, we used solid phase extraction liquid chromatography tandem mass spectrometry (SPE-HPLC-MS) to analyze 21 types of antibiotics in surface water samples. Twelve types of antibiotics were detected in the Chishui River basin surface water, and the total concentrations of ofloxacin, sulfadiazine, and trimethoprim ranged from ND-1 166.97 ng·L⁻¹, with a detection rate of 100%. On average, the highest concentration of the three types of antibiotics detected were ofloxacin (221.59 ng·L⁻¹), tetracycline (13.18 ng·L⁻¹), and sulfadiazine (4.11 ng·L⁻¹), and the antibiotic concentration distribution showed the following order of characteristics: downstream (359.41 ng·L⁻¹) > midstream (224.59 ng·L⁻¹) > upstream (179.72 ng·L⁻¹). The ecological environment risk assessment results indicated the largest risk for downstream W21, tetracycline, doxycycline, enrofloxacin, norfloxacin, and erythromycin. The risk quotient revealed that lincomycin had a medium-risk level, and ofloxacin had a high-risk level. This shows that antibiotics in the waters of the Chishui River basin may cause certain ecological risks.

Key words: antibiotic; surface water; Chishui River; contamination; ecological risk

抗生素是一种由细菌和真菌产生或人工合成的、具有抑制微生物活性的一类抗菌药物^[1], 自世界上第一种抗生素青霉素产生以来, 大量抗菌药物被广泛应用于人类医疗和畜禽养殖^[2]。据报道, 2013 年我国的抗生素使用量为 16.2 万 t, 占全球抗生素使用量的一半以上, 比英国和北欧大部分国家的使用量 (规定的日标准剂量) 高出 6 倍^[3]。但是抗生素在大多数生物体内并没有被完全代谢吸收, 摄入后大约有 30%~90% 会以母体化合物及代谢产物的形式排出体外^[4]。现有研究表明目前的污水处理工艺不能对抗生素进行有效去除^[5,6], 其会随污水处理厂出水排入水体, 抗生素的化学稳定性和生物

积累能力将导致环境中的低浓度抗生素对水生生物甚至整个水生态环境带来潜在风险^[7,8]。此外, 水体残留的抗生素还会促进耐药菌 (antibiotic resistance bacteria, ARB) 和抗性基因 (antibiotic resistance genes, ARGs) 的形成^[9]。近年来抗生素作为一类新兴污染物在国内天然水体中广泛检出, 如长江 (ND

收稿日期: 2021-03-10; 修订日期: 2021-06-02

基金项目: 贵州省普通高等学校科技拔尖人才支持计划项目 (黔教合 KY 字 [2017] 060); 贵州省科学技术基金项目 (黔科合基础 [2020] 1Z051); 国家自然科学基金项目 (31700115)

作者简介: 吴天宇 (1996~), 女, 硕士, 主要研究方向为有机污染效应、控制及资源化, E-mail: 1061663561@qq.com

* 通信作者, E-mail: jli82@gzu.edu.cn; Hq0980@126.com

~ 1 490 ng·L⁻¹)^[10]、珠江 (ND ~ 1 139.4 ng·L⁻¹)^[11]、黄河 (ND ~ 3 474 ng·L⁻¹)^[12]、松花江 (ND ~ 73.1 ng·L⁻¹)^[13] 和太湖 (ND ~ 94.91 ng·L⁻¹)^[14] 等。

赤水河处于川、滇、黔三省接壤地带,是长江上游唯一没有建坝的河流,干流总长 444.5 km,流域面积 20 440 km²,赤水河流域作为长江上游珍稀鱼类的自然保护水域及重要的水源地涵养区,具有重大的水生态环境保护意义,其主要支流包括五马河、古蔺河、盐津河、白沙河和桐梓河等^[15]。近年来,随着赤水河流域内经济、城镇化和工业化的快速发展,水环境质量面临较大威胁。当前对赤水河流域污染的报道多集中在氮素和重金属等常规污染物特征的研究^[16,17],对于抗生素这一新兴有机污染物的研究较少。因此,本文以赤水河流域地表水作为研究对象,选择贵州省内水环境中检出率较高的四大类抗生素:磺胺类(SAs)8种、四环素类(TCs)4种、喹诺酮类(QNs)5种和大环内酯类(MLs)4种共21种抗生素作为目标污染物,分析这4类抗生素在该流域的污染水平及空间分布规律,初步评价抗生素对水体的生态环境风险,以期对赤水河流域的抗生素污染防治提供数据参考和决策依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

仪器与耗材:LC-MS (LC: Agilent Technologies 1290 Infinity; MS: AB SCIEX QTRAP 6470)、色谱柱 (ZORBAX Eclipse Plus C18 1.8 μm 3.0 mm × 50 mm Column, Agilent Technologies)、24孔固相萃取装置 (Waters, 美国)、HLB小柱 (6 mL/500 mg, Waters, 美国)、旋转蒸发仪 (Heidolph, 德国)、电子分析天平 (上海精科雷磁化学仪器公司, 中国) 和 0.45 μm 微孔滤膜 (玻璃纤维, 美国 Millipore 公司)。

试剂: 抗生素标准品包括磺胺类 8 种: 磺胺嘧啶 (sulfadiazine, SDZ)、磺胺甲噁唑 (sulfamethoxazole, SMX)、甲氧苄啶 (trimethoprim, TMP)、磺胺甲基嘧啶 (sulfamerazine, SMR)、磺胺吡啶 (sulfapyridine, SD)、磺胺二甲嘧啶 (sulfadimidine, SMZ)、磺胺对甲氧嘧啶 (sulfamethoxydiazine, SMD) 和磺胺间甲氧嘧啶 (sulfamonomethoxine, SMM); 四环素类 4 种: 四环素 (tetracycline, TC)、土霉素 (oxytetracycline dihydrate, OTC)、强力霉素 (doxycycline, DOX) 和金霉素 (chlorotetracycline hydrochloride, CTC); 喹诺酮类 5 种: 氧氟沙星 (ofloxacin, OFL)、诺氟沙星 (norfloxacin, NOR)、恩诺沙星 (enrofloxacin, ENR)、环丙沙星 (Ciprofloxacin, CIP) 和依诺沙星 (enoxacin,

ENX); 大环内酯类 4 种: 红霉素 (erythrocin, ERY)、螺旋霉素 (spiramycin, SPI)、泰乐菌素 (tylosin, TYL) 和林可霉素 (lincomycin, LIN) 均购自北京百灵威科技有限公司, 纯度大于 99%; 甲醇 (色谱纯, MERCK, 德国)、磷酸二氢钠 (分析纯) 和乙二胺四乙酸二钠盐 (色谱纯) 购自北京百灵威科技有限公司; 本实验用水均为超纯水 (Milli-Q 超纯水系统, Waters, 美国)。

1.2 样品采集与预处理

于 2020 年 11 月对赤水河进行水样采集, 参考贵州省赤水河流域主要河流考核断面, 在赤水河干流、主要支流 (二道河、五马河、桐梓河等) 一共设置 25 个采样点, 其中干流 16 个, 支流 9 个, 见图 1。采用有机玻璃采水器采集赤水河表层水样 2 L (采集深度为水面以下 0.5 m), 加入 2 mL 甲醇抑制微生物活性, 避光保存, 24 h 内尽快运回实验室进行提取分析。

采用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜对水样进行过滤以除去大颗粒物质, 加入适量磷酸水溶液 (体积比为 50%) 调至 pH = 3 左右, 再加入 2.5 mL Na₂EDTA (100 g·L⁻¹) 溶液摇匀。首先对 HLB 小柱进行活化: 依次向 HLB 小柱内加入 6 mL 甲醇、3 mL 超纯水和 6 mL 磷酸二氢钠水溶液活化小柱, 调节小柱流速为 5 mL·min⁻¹ (2 滴·s⁻¹), 活化完成后以相同流速进行水样的富集, 水样富集结束后用 10 mL 超纯水淋洗进样瓶以确保水样的完全富集, 随后在负压条件下对 HLB 固相萃取小柱进行真空干燥 60 min 保证抽干水分。然后依次用 6 mL 甲醇和 2% 氨水甲醇 (体积比为 2%) 洗脱固相萃取小柱, 洗脱速度控制在 1 mL·min⁻¹, 用 50 mL 鸡心瓶收集洗脱液, 在 45 ~ 50℃ 下旋转蒸发近干, 用甲醇复溶至 1 mL, 经过 0.22 μm 的有机针头过滤器过滤后移入棕色进样小瓶, 使用 LC-MS 上机分析。抗生素固相萃取过程和参数见表 1。

表 1 抗生素固相萃取过程和参数

Table 1 Processes and parameters of solid phase extraction of antibiotics

操作命令	溶剂	流速/mL·min ⁻¹	体积/mL
活化	甲醇	2	6
活化	超纯水	2	3
活化	磷酸二氢钠	2	6
富集	—	5	—
抽干	—	—	—
洗脱	甲醇	1	6
洗脱	2% 氨水甲醇	1	6

1.3 仪器分析条件

LC 检测条件: 进样量为 5 μL; 设置柱温为 40℃; 流动相 A 为 0.1% 甲酸水; 流动相 B 为乙腈;

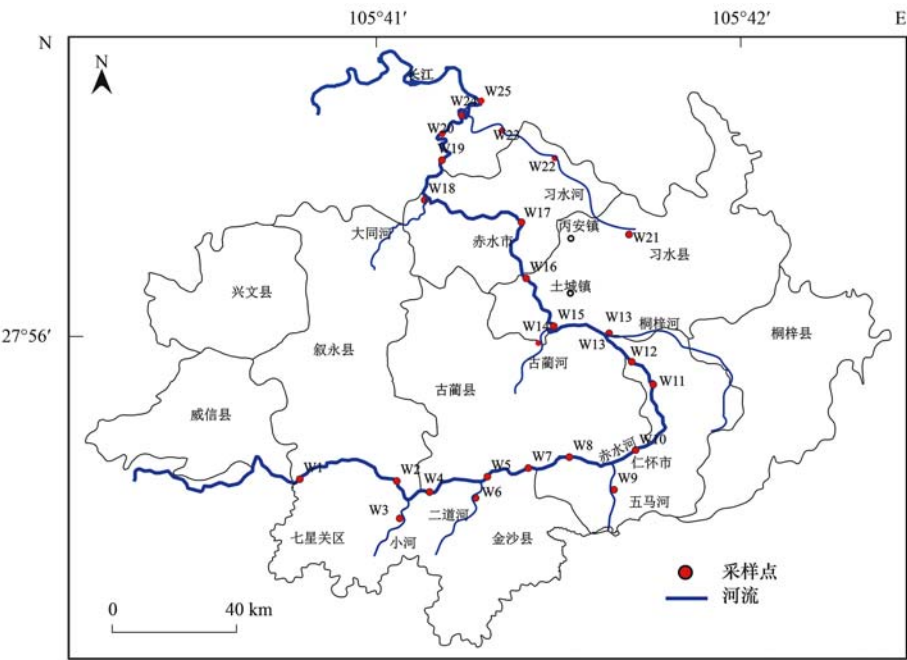


图 1 赤水河流域采样点示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points in Chishui River basin

梯度洗脱分离步骤见表 2. 质谱测定条件:采用电喷雾离子源 (ESI) 正离子模式、多反应离子监测 (MRM) 模式进行检测,雾化器压强为 40 psi (40 × 6.9 kPa), 4 000 V 毛细管电压,气体干燥的流速和温度分别为 6 L·min⁻¹ 和 300℃.

表 2 梯度洗脱分离步骤

Table 2 Gradient elution separation step			
时间 /min	流速 /mL·min ⁻¹	流动相 A (体积比)/%	流动相 B (体积比)/%
1	0.3	90	10
5	0.3	70	30
7	0.3	40	60
12	0.3	10	90
15	0.3	90	10

1.4 质量控制

本实验的仪器分析流程遵守美国 EPA 的要求进行严格质量控制与保证,采用外标法对本次的样品进行定量分析,每隔 10 个样品对 80 μg·L⁻¹ 的标样进行一次测定,以保证仪器在使用过程中测试性能未产生较大误差.用甲醇配制抗生素混标,然后经逐级稀释配制成 0、10、50、80、100、150 和 200 μg·L⁻¹ 的 7 个质量浓度的系列标准溶液,标准曲线的相关系数均大于 0.99,用 200 mL 超纯水做空白对照实验,加入质量浓度为 200 μg·L⁻¹ 作空白加标回收实验,每个样品设置 3 个平行样,结果表明空白组样品中无目标化合物检出. 21 种抗生素的空白加标回收率为 81.7%~132.7%,加标平行样和样品平行样的相对标准偏差 RSD 在 0.58%~14.54% 之间,目标抗生素的检出限为 0.027~1.268 ng·L⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 赤水河流域抗生素浓度污染水平

各种抗生素的浓度水平如表 3 所示,通过对赤水河流域地表水中 4 类 21 种抗生素进行测定分析可知,21 种抗生素中一共检出 12 种抗生素,其中 TMP、SDZ 和 OFL 的检出率最高,为 100%,ENR、ERY 和 LIN 的检出率在 25%~62.5%,其余抗生素的检出率均低于 20%.四环素类抗生素检出 2 种,磺胺类抗生素检出 3 种,喹诺酮类抗生素检出 3 种,大环内酯类抗生素检出 4 种,总浓度水平在 ND~1 166.97 ng·L⁻¹.

在赤水河地表水样品中磺胺类抗生素 SDZ 和 TMP 的检出率均为 100%,其中 SDZ 的检出浓度范围为 2.54~16.00 ng·L⁻¹,据研究报道,磺胺类抗生素大多具有良好的水溶性,使其易于在水体中赋存并扩散^[18],其中 SMX 是由美国食品及药物管理局规定的需要优先被检测的 14 种磺胺类药物中的一种^[19,20],在 2014 年我国地表水环境中的检出报道次数最多已达到 10 次^[21],且检出率均大于 60%.甲氧苄啶(TMP)作为一种磺胺类增效剂,通常会与磺胺类抗生素联合使用以增加治疗效果,这可能是导致其在本次研究区域中的频繁检出的原因.四环素类抗生素总体上在本次研究区域类的检出率和检出浓度均较低,这可能是由于大多数 TCs 是聚酮类化合物且在水中溶解性较低,且其容易发生光降解^[22].喹诺酮类抗生素的总检出浓度范围在 ND~

表 3 赤水河流域地表水中抗生素的浓度与检出率

Table 3 Concentration and detection rate of antibiotics in the surface water of Chishui River basin

分类	英文名称	缩写	CAS 编号	最大值 /ng·L ⁻¹	平均值 /ng·L ⁻¹	最小值 /ng·L ⁻¹	检出率 /%
TCs	tetracycline	TC	60-54-8	329.45	13.18	ND	3.1
	doxycycline	DOX	564-25-0	24.58	0.98	ND	3.1
SAs	sulfadiazine	SDZ	68-35-9	16.00	4.11	2.54	100
	trimethoprim	TMP	738-70-5	4.89	2.92	1.94	100
	sulfamethoxazole	SMX	723-46-6	2.25	0.13	ND	12.5
QNs	ofloxacin	OFL	82419-36-1	732.36	221.59	87.65	100
	norfloxacin	NOR	70458-96-7	7.41	0.86	ND	9.3
	enrofloxacin	ENR	93106-60-6	8.14	1.62	ND	25
MLs	erythrocine	ERY	114-07-8	9.07	3.76	ND	50
	tylosin	TYL	1401-69-0	4.11	0.57	ND	15.6
	spiramycin	SPI	8025-81-8	15.82	1.58	ND	9.3
	lincomycin	LIN	154-21-2	12.89	1.91	ND	62.5
总和				1 166.97	253.21	92.13	

732.36 ng·L⁻¹,其中氧氟沙星的检出浓度在本研究中的所有抗生素中处于首位,最高检出浓度732.36 ng·L⁻¹,平均检出浓度为221.59 ng·L⁻¹,这与Zhen等^[23]对珠海市河流中抗生素浓度水平的研究结果一致;其次是恩诺沙星(ENR),为ND~8.14 ng·L⁻¹,平均检出浓度为1.62 ng·L⁻¹,该浓度值低于我国库尔勒地区孔雀河中^[24]的平均检出浓度(36.64 ng·L⁻¹),这可能与不同地区使用该种抗生素的数量和频率有关.喹诺酮类抗生素是我国临床应用最广泛、生产量最大的抗生素之一,因其具有价格便宜、与其他药物之间无交叉耐药性的特性被大量用于人类医疗和畜禽养殖^[25].此外,该类抗生素在水中半衰期较长且不易降解,而当前污水处理工艺对喹诺酮类抗生素的去除效果较低,使污水处理厂出水中仍然含有较高浓度残留^[26],造成其在水环境中检出率和检出浓度均较高.大环内酯类抗生素是典型的人畜共用抗生素,其检出浓度和检出率在本次研究中处于中等水平,平均检出浓度从大到小依次为:红霉素(3.76 ng·L⁻¹)>林可霉素(1.91 ng·L⁻¹)>螺旋霉素(1.58 ng·L⁻¹)>泰乐菌素(0.57 ng·L⁻¹),其中 ρ (红霉素)的检出范围为ND~9.07 ng·L⁻¹,远低于张干等^[27]对珠江广州段河流(ND~105 ng·L⁻¹).有研究表明,红霉素是我国水环境中检出率较高的大环内酯类抗生素,然而在一些欧洲发达国家,克拉霉素才是最常检出的抗生素,这说明不同国家对该类抗生素的使用存在一定的差异性^[28];林可霉素的检出率和检出浓度范围分别为62.5%和ND~12.89 ng·L⁻¹,平均检出浓度为1.91 ng·L⁻¹,低于王娅南等^[29]对贵阳南明河抗生素报道的平均检出浓度(63.7 ng·L⁻¹),其在国内主要应用于畜禽养殖业,据2015年张芊芊^[30]对我

国36种抗生素用量水平的研究,发现该种抗生素的使用量位居第一.

2.2 赤水河流域地表水抗生素与国内外河流对比分析

与国内外地表水中抗生素检出浓度相比,赤水河流域水体的氧氟沙星(OFL)平均检出浓度高于我国的海河、渭河、长江三角洲水域及埃塞俄比亚的阿瓦什河流域,与珠江广州段的抗生素平均检出浓度相当,略低于北京温榆河的抗生素浓度;磺胺嘧啶(SDZ)略高于金沙江,与珠江流域处于同一污染水平;甲氧苄啶(TMP)的浓度水平与长江三角洲河流一致均处于较低的检出水平,低于我国珠江、海河、渭河、温榆河和胶州湾水体抗生素检出浓度;大环内酯类(MLs)抗生素的检出浓度普遍低于国内外河流.总的来说,除了氧氟沙星(OFL)和四环素(TC)处于较高的检出水平外,其余抗生素基本为中等及以下污染水平(表4),这与每种抗生素在流域内不同区域的使用类型和数量存在差异有关.

2.3 赤水河流域抗生素空间分布特征及相关性分析

赤水河流域地表水各采样点的抗生素浓度分布如图2所示,总浓度范围为105.00~753.50 ng·L⁻¹.对于赤水河的分段,一般以仁怀市二郎镇以上为上游段,二郎镇至赤水市丙安镇复兴场为中游段,丙安镇复兴场以下为下游段^[42].总体上看,抗生素平均浓度分布遵循:下游(359.41 ng·L⁻¹)>中游(224.59 ng·L⁻¹)>上游(179.72 ng·L⁻¹),抗生素在支流的检出浓度大于干流抗生素浓度.

赤水河上游段(W1~W8)主要分布于毕节市七星关区周围的一些农村地区,如岔河村、倒角头村和纳坡村等,不管是从人口数量还是经济发展速度明显低于中下游的仁怀和赤水等人为活动频繁的地

表 4 国内外部分河流抗生素污染水平¹⁾

Table 4 Concentration level of antibiotics in some rivers in China and foreign areas

水体	项目	抗生素质量浓度/ng·L ⁻¹												文献
		TC	DOX	SDZ	TMP	SMX	OFL	NOR	ENR	ERY	TYL	SPI	LIN	
赤水河流域	Max	329.45	24.58	16	4.89	2.25	732.36	7.41	8.14	9.07	4.11	15.82	12.89	本研究
	Mean	13.18	0.98	4.11	2.92	0.13	221.59	0.86	1.62	3.76	0.57	1.58	1.1	
	Freq/%	3.1	3.1	100	100	12.5	100	9.3	25	50	15.6	9.3	65.5	
长江三角洲	Max	94.66	—	—	4.41	51.86	18.95	48.39	19.33	—	—	—	—	[31]
	Mean	21.39	—	—	0.37	14.52	9.87	32.39	1.32	—	—	—	—	
	Freq/%	75.83	—	—	72.7	100	72.4	97.85	26.48	—	—	—	—	
珠江,广州段	Max	349.7	ND	18.7	46.3	210	703.4	54.2	—	—	ND	—	53.4	[32]
	Mean	32.55	ND	7.78	8.02	21.45	62.95	6.76	—	—	ND	—	20.45	
	Freq/%	31	0	100	100	100	85	38	—	—	0	—	100	
汉江	Max	6.4	7.2	16	5.7	13	7.6	6.4	2.8	—	—	—	—	[33]
	Mean	2.7	2.2	1.9	1.2	3	2	0.61	0.81	—	—	—	—	
	Freq/%	98	98	85	90	96	92	79	83	—	—	—	—	
渭河,陕西	Mean	—	—	5.41	2.25	70.81	17.08	18.21	—	83.99	—	—	23.81	[34]
	Freq/%	—	—	87.5	100	100	75	37.5	—	100	—	—	100	
金沙江	Max	17.62	8.3	0.4	—	2.92	13.1	24.77	7.85	1.12	ND	—	1.2	[35]
	Mean	0.52	0.74	0.04	—	1.04	0.56	0.87	1.52	0.45	ND	—	0.37	
	Freq/%	3.64	21.82	16.36	—	96.36	29.09	7.27	60	41.82	0	—	67.27	
湟水河,青海	Max	ND	ND	58.9	—	552	—	—	—	—	16.6	—	—	[36]
温榆河,北京	Max	16.15	—	256.6	73	128	1270	113	ND	—	—	—	—	[37]
	Freq/%	43	—	100	43	100	100	71	0	—	—	—	—	
黄海	Max	—	—	ND	95.8	48.1	497.6	21.1	121.2	—	—	—	—	[38]
胶州湾,山东	Max	—	—	5.95	113.83	—	254.74	173.44	18.81	—	—	—	—	[39]
	Mean	—	—	2.56	33.05	—	102.6	54.68	13.5	—	—	—	—	
	Freq/%	—	—	33	50	—	100	100	100	—	—	—	—	
阿瓦什河,埃塞俄比亚	Max	—	—	0.58	17.2	7.24	—	—	—	—	16.68	—	—	[40]
	Mean	—	—	0.09	3.06	1.39	—	—	—	—	2.52	—	—	
	Freq/%	—	—	50	95	70	—	—	—	—	60	—	—	
恒河,印度	Max	98.6	—	—	—	—	1.4	—	—	33.1	—	—	—	[41]
	Mean	26.9	—	—	—	—	1	—	—	14.5	—	—	—	
	Freq/%	100	—	—	—	—	11.1	—	—	56.7	—	—	—	

1) “—”表示未检测,Max 表示最大值,Mean 表示平均值,Freq(detection frequency)表示检出率,ND 表示未检出

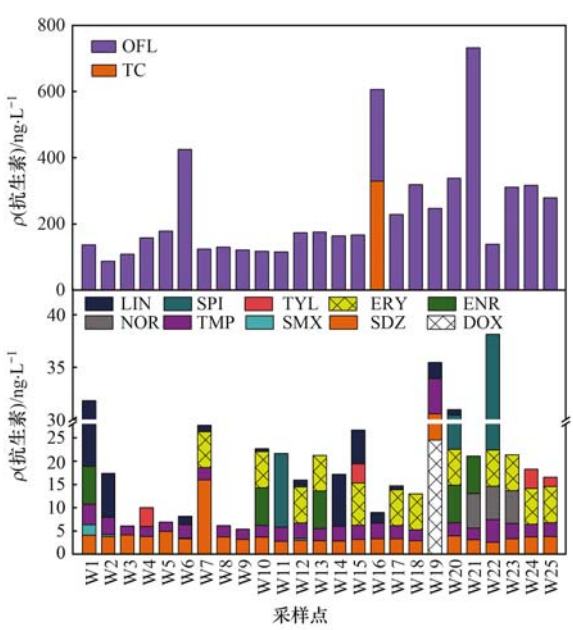


图 2 赤水河流域地表水中 21 种抗生素浓度分布
Fig. 2 Concentration distribution of 21 antibiotics
in the surface water of Chishui River basin

区.上游段的 W7 点位的磺胺嘧啶为 16 ng·L⁻¹,高于其它采样点的检出浓度,磺胺嘧啶是典型的农用及兽用抗生素,W7 附近多为赤水河岸边的农用耕地,存在个体家禽散养户,农田作物耕作过程中经常会施用动物养殖粪便作为肥料.据研究报道,由于抗生素在动物体内的不完全代谢,使得畜禽粪便中往往含有较高浓度的抗生素,如 Zhou 等^[43]对江苏省畜禽粪便有机肥中 32 种常用兽药抗生素的残留状况进行了研究,发现大部分畜禽粪便有机肥中存在磺胺甲噁和四环素(TC),其含量分别高达5 650 μg·kg⁻¹和1 920 μg·kg⁻¹,含有较高浓度抗生素粪肥通过土壤的渗透作用汇集至赤水河周围的支流中,这可能是该种抗生素检出浓度较高的原因.

赤水河中游(W9~W17)处于仁怀市至赤水市丙安镇段,抗生素检出浓度从大到小依次为:W16>W17>W13>W15>W12>W14>W10>W11>W9,该区域段附近有较多旅游景区、居民生活居住区和酿酒工业区,人为活动较为频繁.W16 点位于土城

镇,是唯一检出四环素的采样点,检出浓度为 $329.45\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,四环素在我国主要作为兽用抗生素,该点位附近分布着养殖场,这可能是造成该点位四环素检出浓度较高的原因. W13 和 W14 均处于赤水河流域的支流,分别为桐梓河和古蔺河,造成其检出浓度高于干流的原因可能是该支流段有生活污水或者养殖废水的排入口^[44],其次可能是由于支流段水量和流速均很低,导致抗生素在水体中的持续累积和难迁移.

赤水河下游(W18~W25)主要流经赤水市金华镇、先市镇、长沙镇和四川省合江县等,除 W22 采样点外其余 6 个采样点的抗生素总检出浓度都高于赤水河中上游流域段. W21 点处的抗生素检出浓度最高,其次是 W20,浓度分别为 $753.5\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $368.9\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,W21 位于赤水河的主要支流习水河,该采样点位氧氟沙星的抗生素检出浓度($732.36\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)处于本次抗生素检出浓度最大值,W21 和 W20 点位周围受人为活动因素影响较大,其中 W20 点位处于四川省泸州市先市镇某中学附近,人口分布较为密集. 因此,生活污水的排放可能是抗生素检

出浓度较高的主要原因. 此外,W25 采样点位于赤水河汇入长江前 1 km 位置,其抗生素总检出浓度($295.1\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)低于处于习水河与赤水河汇合处上游 1 km 位置的 W23($332.5\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)采样点的抗生素浓度,这可能是由于赤水河干流段在汇入长江附近水量和流速较大以及河流存在一定的自净功能、对支流较高浓度的抗生素有稀释和降解作用的缘故.

采用 Pearson 相关系数法对赤水河流域地表水的抗生素与常规水质指标 pH、电导率(EC)和总固体溶解度(TDS)进行分析,结果如表 5 所示,可以看出,TMP 与 SMX 和 LIN 存在极显著正相关关系($P<0.01$),相关系数分别是 0.510 和 0.509; SMX 与 LIN 之间呈极显著正相关($P<0.01$),相关性系数为 0.657,这种抗生素之间的相关性分析可能表明 TMP 与 SMX 和 LIN,以及 SMX 与 LIN 可能存在相同的来源. NOR 与电导率之间呈显著负相关($P<0.05$),而与总固体溶解度之间呈极显著负相关($P<0.01$),SPI 与 pH 之间呈显著负相关($P<0.05$). 该结果表明,在复杂的水环境中,抗生素的浓度容易受多种水质因素的影响.

表 5 赤水河流域地表水中抗生素浓度与水质参数的 Pearson 相关性分析¹⁾

Table 5	Pearson correlation analysis of antibiotic concentration and water quality parameters in the surface water of Chishui River basin														
	TC	DOX	SPD	TMP	SMX	OFL	NOR	ENX	ERY	TYL	SPI	LIN	pH	EC	TDS
TC	1														
DOX	-0.042	1													
SPD	-0.058	0.154	1												
TMP	0.132	0.133	-0.122	1											
SMX	-0.06	-0.06	-0.022	0.510 **	1										
OFL	0.081	0.037	-0.161	-0.127	-0.16	1									
NOR	-0.075	-0.075	-0.154	0.341	-0.108	0.477 *	1								
ENX	-0.102	-0.102	-0.098	0.033	0.358	0.285	0.132	1							
ERY	-0.196	-0.196	0.109	0.097	-0.202	0.003	0.125	0.109	1						
TYL	-0.086	-0.086	-0.076	-0.155	-0.123	0.001	-0.156	-0.211	0.231	1					
SPI	-0.072	-0.072	-0.156	0.406 *	-0.103	-0.14	0.303	-0.001	0.08	-0.149	1				
LIN	0.013	-0.028	-0.032	0.509 **	0.657 **	-0.248	-0.205	0.105	-0.244	0.005	0.186	1			
pH	0.275	0.169	-0.36	-0.054	0.06	0.049	-0.213	0.168	0.117	0.082	-0.428 *	0.15	1		
EC	0.198	-0.198	0.066	-0.132	0.09	-0.365	-0.500 *	0.064	-0.291	0.065	-0.174	0.339	-0.044	1	
TDS	0.179	-0.141	0.085	-0.159	0.087	-0.366	-0.526 **	0.08	-0.285	0.087	-0.211	0.33	-0.015	0.996 **	1

1) * 表示 $P<0.05$,显著相关, ** 表示 $P<0.01$,极显著相关

2.4 抗生素生态风险评价

当前国内外暂未制定对抗生素这类新兴污染物的环境限制浓度标准,因此为了评估赤水河流域水体抗生素暴露而产生的潜在生态风险,根据欧洲技术指导文件(TGD)里关于污染物环境风险的评价方法,采用风险商值法评估抗生素对水环境的生态风险,即环境实际测定浓度与预测无效应浓度的比值^[45],计算公式如下:

$$RQ = MEC/PNEC \tag{1}$$
$$PNEC = EC_{50} \text{ 或 } LC_{50}/AF \tag{2}$$

式中,RQ 为在环境中的实际检出浓度(measured environmental concentration, MEC)与预测无效应浓度(predicted no effect concentration, PNEC)的比值, EC_{50} (半数效应浓度, $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)或者 LC_{50} (半数致死浓度, $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)与评价因子(assessment factors, AF)的比值. 本研究的水生生物毒理数据库资料主要从美国 ECOSAR 数据库(<https://cfpub.epa.gov/ecotox/>)和部分已有研究中查找确定. 基于最严重的情况考虑,环境中实测浓度(MEC)选择最大值计算,每种抗生素对应的水生生物毒性敏感数据如表 6 所示.

表 6 抗生素对应最敏感物种的毒理数据

Table 6 Aquatic toxicity data of antibiotics to the most sensitive aquatic species

抗生素	对应敏感生物	毒性	EC ₅₀ /mg·L ⁻¹	AF	PNEC /ng·L ⁻¹	文献
SDZ	<i>S. capricornutum</i>	急性	2.2	1 000	2 200	[46]
SD	<i>Lemna minor</i>	急性	0.46	1 000	460	[47]
SMX	<i>S. leopoliesis</i>	急性	0.27	1 000	270	[48]
SMM	<i>Lemna minor</i>	急性	1.277	1 000	1 277	[49]
SMZ	<i>Lemna gibba</i>	急性	300	1 000	300 000	[50]
SMM	<i>Alage</i>	急性	8.56	1000	8 560	[51]
TMP	<i>R. salina</i>	急性	16	1000	16 000	[52]
OFL	<i>P. subcapitata</i>	慢性	0.00 113	100	11.3	[53]
NOR	<i>V. fischeri</i>	慢性	0.013 08	100	103.8	[53]
ENR	<i>V. fischeri</i>	慢性	0.002 88	100	28.8	[53]
CIP	<i>M. aeruginosa</i>	急性	0.005	1 000	5	[54]
TC	<i>P. subcapitata</i>	急性	3.31	1 000	3 310	[55]
OTC	<i>P. subcapitata</i>	急性	1.04	1 000	1 040	[55]
CTC	<i>Chlorella vulgaris</i>	急性	0.05	1 000	50	[56]
DOX	<i>Green algae</i>	急性	0.32	1 000	320	[57]
ERY	<i>Anabaena</i> sp.	急性	0.022	1 000	22	[57]
SPI	<i>Algae</i>	急性	0.69	1 000	690	[58]
TYL	<i>Algae</i>	急性	0.95	1 000	950	[59]
LIN	<i>Daphnia</i>	急性	0.35	1 000	350	[60]

Hernando 等^[61]提出的 RQs 分类方法来评估生态风险等级:低风险($0.01 \leq RQs < 0.1$)、中等风险($0.1 \leq RQs < 1$)和高风险($RQs \geq 1$)。根据计算的 RQ 值绘制赤水河流域水体抗生素的风险热度分布,从图 3 可以看出,研究区域抗生素生态风险基本处于低风险范围,但是也发现有 6 种抗生素处于中风险,其中包括 2 种四环素类(TC 和 DOX)、2 种喹诺酮类(ENR、NOR)、1 种大环内酯类(ERY)和 1 种林可霉素类(LIN)。除此之外,处于高风险水平的抗生素为氧氟沙星(OFL),RQ 值均大于 1,平均值为 19.61,对研究区地表水中相对应的敏感生物造

成了严重生态风险,在本研究区域内其高风险点位所占比例为 100%,是主要的生态风险因子。该种抗生素具有较低的最大无效应浓度值($11.3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$),易对水环境造成危害,有研究发现,在西方国家,具有较高生态风险的氧氟沙星已经被列为水环境中优先控制的抗生素。虽然大部分抗生素处于低风险范围,但是抗生素在水体的长时间残留除了对水生生物引发一定的急性或者慢性毒性效应以外,还会刺激水环境中的病原微生物体内产生抗性基因,降低抗生素的治疗效果,同时对原有的水生态平衡系统产生不利影响^[62]。综合分析可知,赤水河流域地表水中抗生素存在一定的生态风险。

3 结论

(1)赤水河流域地表水中共检出 12 种抗生素,总浓度检出水平为 ND~1 166.97 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,检出率为 3.1%~100%。平均检出浓度最高的抗生素为 OFL,为 221.59 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,其次是 TC、SDZ、ERY 和 TMP,平均检出浓度分别是 13.18、4.11、3.76 和 2.92 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,对比国内外研究的地表水抗生素浓度,氧氟沙星和四环素处于较高的污染检出水平,其余抗生素处于中低等污染水平。

(2)地表水抗生素浓度的空间分布表现为:下游>中游>上游的分布趋势,在人为活动密集、畜禽养殖聚集、经济发展快的地区抗生素检出浓度较高。相关性结果分析表明,水体抗生素浓度与 pH、EC 和 TDS 之间存在显著相关性。

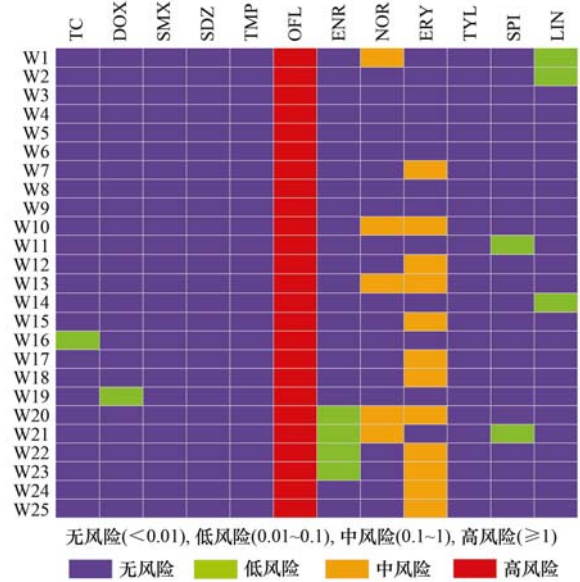


图 3 赤水河流域地表水抗生素 RQ 值
Fig. 3 RQ values of antibiotics in Chishui River basin

(3)生态环境风险评价结果表明,在检出的 12 种抗生素中,包括高风险 1 种,中风险 6 种,氧氟沙星在所有点位均处于高风险水平,其对水生生物的生态毒性风险应引起重视。

参考文献:

- [1] Danner M C, Robertson A, Behrends V, *et al.* Antibiotic pollution in surface fresh waters: occurrence and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **664**: 793-804.
- [2] Liu X H, Lu S Y, Guo W, *et al.* Antibiotics in the aquatic environments: a review of lakes, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1195-1208.
- [3] 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.
- [4] Zhou L J, Ying G G, Zhao J L, *et al.* Trends in the occurrence of human and veterinary antibiotics in the sediments of the Yellow River, Hai River and Liao River in northern China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(7): 1877-1885.
- [5] Rodriguez-Mozaz S, Vaz-Moreira I, Giustina S V D, *et al.* Antibiotic residues in final effluents of European wastewater treatment plants and their impact on the aquatic environment [J]. *Environment International*, 2020, **140**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105733.
- [6] Wang J L, Chu L B, Wojnárovits L, *et al.* Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic resistant genes (ARGs) and antibiotic resistant bacteria (ARB) in municipal wastewater treatment plant: an overview [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140997.
- [7] Li Y, Zhang L Y, Liu X S, *et al.* Ranking and prioritizing pharmaceuticals in the aquatic environment of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 333-342.
- [8] Qiu W H, Sun J, Fang M J, *et al.* Occurrence of antibiotics in the main rivers of Shenzhen, China: association with antibiotic resistance genes and microbial community [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **653**: 334-341.
- [9] Chen Y H, Su J Q, Zhang J Y, *et al.* High-throughput profiling of antibiotic resistance gene dynamic in a drinking water river-reservoir system [J]. *Water Research*, 2019, **149**: 179-189.
- [10] Wang G A, Zhou S H, Han X K, *et al.* Occurrence, distribution, and source track of antibiotics and antibiotic resistance genes in the main rivers of Chongqing city, southwest China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **389**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122110.
- [11] Li S, Shi W Z, Li H M, *et al.* Antibiotics in water and sediments of rivers and coastal area of Zhuhai City, Pearl River estuary, south China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 1009-1019.
- [12] Feng J L, Liu Q, Ru X L, *et al.* Occurrence and distribution of priority pharmaceuticals in the Yellow River and the Huai River in Henan, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(14): 16816-16826.
- [13] Wang W H, Zhang W F, Liang H, *et al.* Seasonal distribution characteristics and health risk assessment of typical antibiotics in the Harbin section of the Songhua River basin [J]. *Environmental Technology*, 2019, **40**(20): 2726-2737.
- [14] Li L, Zhao X L, Liu D, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of PPCPs in typical inflow rivers of Taihu Lake, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **285**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112176.
- [15] 任奕蒙, 岳甫均, 徐森, 等. 利用氮氧同位素解析赤水河流域水体硝酸盐来源及其时空变化特征 [J]. *地球与环境*, 2019, **47**(6): 820-828.
- Ren Y M, Yue F J, Xu S, *et al.* Temporal and spatial variation of nitrate sources in the Chishui River watershed based on isotope approach [J]. *Earth and Environment*, 2019, **47**(6): 820-828.
- [16] 于霞, 安艳玲, 吴起鑫. 赤水河流域表层沉积物重金属的污染特征及生态风险评价 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1400-1407.
- Yu X, An Y L, Wu Q X. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Chishui River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1400-1407.
- [17] 秦立, 付宇文, 吴起鑫, 等. 赤水河流域土地利用结构对氮素输出的影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, **28**(1): 175-183.
- Qin L, Fu Y W, Wu Q X, *et al.* Effects of land use structure on nitrogen export in Chishui River watershed of southwest China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(1): 175-183.
- [18] 丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 等. 太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1811-1819.
- Ding J N, Liu S J, Zou J M, *et al.* Spatiotemporal distributions and ecological risk assessments of typical antibiotics in surface water of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1811-1819.
- [19] 银仁莉. 超声联合臭氧技术降解磺胺甲恶唑的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- Yin R L. Study on sulfamethoxazole degradation by ultrasound/ozone oxidation process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [20] 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.
- [21] 王丹, 隋倩, 赵文涛, 等. 中国地表水环境中药物和个人护理品的研究进展 [J]. *科学通报*, 2014, **59**(9): 743-751.
- Wang D, Sui Q, Zhao W T, *et al.* Pharmaceutical and personal care products in the surface water of China: a review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(9): 743-751.
- [22] Chen Y, Hu C, Qu J H, *et al.* Photodegradation of tetracycline and formation of reactive oxygen species in aqueous tetracycline solution under simulated sunlight irradiation [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2008, **197**(1): 81-87.
- [23] Zhen Y. Distribution and ecological risk assessment of typical antibiotics in surface waters of seven major rivers, China [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2021, **8**, doi: 10.1039/D1EM00079A.
- [24] 杨媛. 新疆巴州地区水环境中多种抗生素的浓度水平与分布特征 [D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
- Yang Y. Concentration levels and distribution characteristics of various antibiotics in Kaidu River and Kongque River in Bazhou area, Xinjiang [D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.
- [25] 张力媛, 马秀兰, 王富民, 等. 喹诺酮类抗生素在水环境中危害及降解特性研究进展 [J]. *广州化工*, 2016, **44**(10): 22-23, 26.
- Zhang L Y, Ma X L, Wang F M, *et al.* Research progress on quinolone antibiotics harm in the water environment and degradation characteristics [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2016, **44**(10): 22-23, 26.

- [26] 杨钊, 李江, 张圣虎, 等. 贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3249-3256.
Yang Z, Li J, Zhang S H, *et al.* Pollution level and ecological risk of typical antibiotics in Guiyang wastewater treatment plants [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3249-3256.
- [27] 徐维海, 张干, 邹世春, 等. 香港维多利亚港和珠江广州河段水体中抗生素的含量特征及其季节变化[J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2458-2462.
Xu W H, Zhang G, Zou S C, *et al.* Occurrence and seasonal changes of antibiotics in the Victoria Harbour and the Pearl River, South China [J]. Environmental Science, 2006, **27**(12): 2458-2462.
- [28] Göbel A, Thomsen A, McArdell C S, *et al.* Occurrence and sorption behavior of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in activated sludge treatment [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(11): 3981-3989.
- [29] 王娅南, 彭洁, 黄合田, 等. 贵阳市城市河流典型抗生素的分布特征[J]. 环境化学, 2018, **37**(9): 2039-2048.
Wang Y N, Peng J, Huang H T, *et al.* Distribution characteristics of typical antibiotics in urban rivers of Guiyang City [J]. Environmental Chemistry, 2018, **37**(9): 2039-2048.
- [30] 张芊芊. 中国流域典型新型有机污染物排放量估算、多介质归趋模拟及生态风险评估[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2015.
Zhang Q Q. Emission estimation, multimedia fate modeling and risk assessment of typical emerging pollutants at river basin scale in China [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [31] Cui C Z, Han Q, Jiang L, *et al.* Occurrence, distribution, and seasonal variation of antibiotics in an artificial water source reservoir in the Yangtze River delta, East China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(20): 19393-19402.
- [32] 周志洪, 赵建亮, 魏晓东, 等. 珠江广州段水体抗生素的复合污染特征及其生态风险[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(6): 1034-1041.
Zhou Z H, Zhao J L, Wei X D, *et al.* Co-occurrence and ecological risk of antibiotics in surface water of Guangzhou section of Pearl River [J]. Ecology and Environment Sciences, 2017, **26**(6): 1034-1041.
- [33] Hu Y, Yan X, Shen Y, *et al.* Antibiotics in surface water and sediments from Hanjiang River, Central China: occurrence, behavior and risk assessment [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **157**: 150-158.
- [34] Wang J W, Wei H, Zhou X D, *et al.* Occurrence and risk assessment of antibiotics in the Xi'an section of the Weihe River, northwestern China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **146**: 794-800.
- [35] Liu S, Wang C, Wang P F, *et al.* Anthropogenic disturbances on distribution and sources of pharmaceuticals and personal care products throughout the Jinsha River Basin, China [J]. Environmental Research, 2021, **198**, doi: 10.1016/j.envres.2020.110449.
- [36] 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.
- [37] Liu X H, Zhang G D, Liu Y, *et al.* Occurrence and fate of antibiotics and antibiotic resistance genes in typical urban water of Beijing, China [J]. Environmental Pollution, 2019, **246**: 163-173.
- [38] Lang H, Chen L, Hou G H, *et al.* Impact of coastal environmental factors on quinolone distribution in intertidal surface sediments of the Bohai Sea and Yellow Sea, China [J]. Water Supply, 2019, **19**(2): 482-491.
- [39] Lu S, Lin C Y, Lei K, *et al.* Occurrence, spatiotemporal variation, and ecological risk of antibiotics in the water of the semi-enclosed urbanized Jiaozhou Bay in eastern China [J]. Water Research, 2020, **184**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116187.
- [40] Ergie A A, Leng Y F, Wang J. Antibiotics and resistance genes in awash river basin, Ethiopia [J]. EcoHealth, 2019, **16**(3): 441-453.
- [41] Singh V, Suthar S. Occurrence, seasonal variations, and ecological risk of pharmaceuticals and personal care products in River Ganges at two holy cities of India [J]. Chemosphere, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129331.
- [42] 任晓冬. 赤水河流域综合保护与发展策略研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [43] Zhou X, Wang J, Lu C, *et al.* Antibiotics in animal manure and manure-based fertilizers: occurrence and ecological risk assessment [J]. Chemosphere, 2020, **255**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127006.
- [44] Chen K, Zhou J L. Occurrence and behavior of antibiotics in water and sediments from the Huangpu River, Shanghai, China [J]. Chemosphere, 2014, **95**: 604-612.
- [45] Guérit I, Bocquené G, James A, *et al.* Environmental risk assessment: a critical approach of the European TGD in an *in situ* application [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, **71**(1): 291-300.
- [46] Eguchi K, Nagase H, Ozawa M, *et al.* Evaluation of antimicrobial agents for veterinary use in the ecotoxicity test using microalgae [J]. Chemosphere, 2004, **57**(11): 1733-1738.
- [47] Białk-Bielińska A, Stolte S, Arning J, *et al.* Ecotoxicity evaluation of selected sulfonamides [J]. Chemosphere, 2011, **85**(6): 928-933.
- [48] Ferrari B, Mons R, Vollat B, *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.
- [49] Turkdogan F I, Yetilmezsoy K. Appraisal of potential environmental risks associated with human antibiotic consumption in Turkey [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **166**(1): 297-308.
- [50] Brain R A, Johnson D J, Richards S M, *et al.* Effects of 25 pharmaceutical compounds to *Lemna gibba* using a seven-day static-renewal test [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2004, **23**(2): 371-382.
- [51] Ma R X, Wang B, Yin L N, *et al.* Characterization of pharmaceutically active compounds in Beijing, China: occurrence pattern, spatiotemporal distribution and its environmental implication [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **323**: 147-155.
- [52] Lützhøft H C H, 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.
- [53] 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.

- [54] Kolar B, Arnuš L, Jeretin B, *et al.* The toxic effect of oxytetracycline and trimethoprim in the aquatic environment[J]. Chemosphere, 2014, **115**: 75-80.
- [55] Bona M D, Di Leva V, De Liguoro M. The sensitivity of *Daphnia magna* and *Daphnia curvirostris* to 10 veterinary antibacterials and to some of their binary mixtures[J]. Chemosphere, 2014, **115**: 67-74.
- [56] Guo R X, Chen J Q. Phytoplankton toxicity of the antibiotic chlortetracycline and its UV light degradation products [J]. Chemosphere, 2012, **87**(11): 1254-1259.
- [57] Yan Z H, Yang H H, Dong H K, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of organic micropollutants in the lower reaches of the Yangtze River, China; a case study of water diversion[J]. Environmental Pollution, 2018, **239**: 223-232.
- [58] 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.
- [59] Lei K, Zhu Y, Chen W, *et al.* Spatial and seasonal variations of antibiotics in river waters in the Haihe River Catchment in China and ecotoxicological risk assessment [J]. Environment International, 2019, **130**, doi: 10.1016/j.envint. 2019.104919.
- [60] 封丽, 程艳茹, 封雷, 等. 三峡库区主要水域典型抗生素分布及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(7): 1031-1040.
- Feng L, Cheng Y R, Feng L, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of typical antibiotics in the main waters of the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science Research, 2017, **30**(7): 1031-1040.
- [61] 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.
- [62] 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.



CONTENTS

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