

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险

杨钊¹, 李江^{1,2*}, 张圣虎³, 向福亮¹, 唐涛涛¹, 杨娅男¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省喀斯特环境生态工程研究中心, 贵阳 550025; 3. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 为了解贵阳市污水处理厂对进水中典型抗生素的去除情况及污水处理厂出水对受纳水体中水生生物的影响, 对贵阳市两座污水处理厂进出水及受纳水体中9种典型抗生素进行调查。结果表明, 污水处理厂进出水中抗生素均有不同程度检出, 进出水中抗生素的浓度范围在 $ND \sim 835.60 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $ND \sim 286.60 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 其中氧氟沙星(OFX)浓度最高, 进水分别为 $835.60 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $539.00 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水分别为 $11.74 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $286.60 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。污水处理厂对抗生素的去除率为 $-42.29\% \sim 100\%$, 其中四环素(TC)被完全去除。进出水中抗生素的浓度与国内外其它地区污水处理厂相比处于较低水平。通过对受纳水体中抗生素的检测分析发现, 受纳水体中 OFX 的浓度最高, 污水处理厂出水是受纳水体中抗生素的来源之一。通过生态风险评估也发现 OFX 对受纳水体中水生生物存在高风险($RQ > 1$)。

关键词: 抗生素; 污水处理厂; 受纳水体; 污染水平; 生态风险

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3249-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201812025

Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants

YANG Zhao¹, LI Jiang^{1,2*}, ZHANG Sheng-hu³, XIANG Fu-liang¹, TANG Tao-tao¹, YANG Ya-nan¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Karst Eco-environmental Engineering Research Center of Guizhou Province, Guiyang 550025, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China)

Abstract: To determine the removal efficiency of typical antibiotics in Guiyang wastewater treatment plants (WWTPs) and the impact of effluent on aquatic organisms in receiving waters, nine antibiotics in the influent, effluent, and receiving water of two WWTPs in Guiyang City were investigated. The concentrations of antibiotics in the influent and effluent ranged from 0 to $835.60 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and 0 to $286.60 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, and the concentration of ofloxacin (OFX) was highest. Its concentration in the influent was $835.60 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and $539.00 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and in the effluent was $11.74 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and $286.60 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The removal rate of antibiotics in the WWTPs ranged from -42.29% to 100% , and tetracycline (TC) was completely removed. The concentrations of antibiotics in the influent and effluent of the WWTPs in Guiyang City was less than in other regions of China and in other counties. Through the analysis of the antibiotics in the receiving waters, it was found that the concentrations of OFX were higher than other antibiotics, and the WWTPs effluent was one source of antibiotics in the receiving waters. OFX showed a high risk ($RQ > 1$) for aquatic organisms in the receiving waters, as determined by an ecological risk assessment.

Key words: antibiotics; wastewater treatment plant; receiving water; pollution level; ecological risk

抗生素是由微生物、植物和动物生物过程中产生的有机代谢产物^[1]。在过去的一个世纪里, 抗生素被广泛用于治疗人和动物的各种疾病。欧盟每年消耗的抗生素约为 5460 t ^[2]。据报道我国抗生素原材料年使用量约为 $18 \times 10^4 \text{ t}$; 人均抗生素消耗量为 138 g , 是美国的 10 倍^[3]。这些抗生素被消耗后, 大多数以其原始形态随医疗废物、工业废水、动物粪便及污水排放到环境^[4]。当前已在城市污水^[5]、污泥^[5]、地表水^[6]、地下水^[7]、土壤^[8]及沉积物^[9]中检测到残留抗生素及其代谢产物。大量研究表明, 抗生素在人体和动物体内并未被完全吸收和代谢, 大量药物及其代谢产物随排泄物进入污水处理厂^[10]。然而, 传统的污水处理工艺并不能完全去除抗生素^[11], 残留的抗生素会随出水进入受纳水体,

并在受纳水体中进一步发生迁移转化, 使得残留抗生素可能成为二次污染物, 对水生生物构成严重威胁^[12, 13]。环境中残留的抗生素可通过食物链和饮用水进入人体并产生选择性压力, 诱导体内病原体产生抗性, 从而降低抗生素治疗疾病的能力, 已成为全球关注的安全问题^[14]。

当前关于贵阳市水体中抗生素的研究主要集中在自然水体中抗生素的分布特征和生态风险^[15, 16]。但有关贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平

收稿日期: 2018-12-03; 修订日期: 2019-01-17

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); 贵州省重点学科建设计划项目(黔学位合字 ZDXK[2016]11 号); 贵州省普通高等学校工程研究中心建设项目(黔教合 KY 字[2016]011)

作者简介: 杨钊(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为有机污染效应及控制, E-mail: 1209162545@qq.com

* 通信作者, E-mail: jli82@gzu.edu.cn

及出水对受纳水体中水生生物的生态风险鲜见报道. 故本研究选取贵阳市两座典型污水处理厂进出水及受纳水体中 9 种典型抗生素(5 种磺胺类药物、3 种四环素类药物和 1 种喹诺酮类药物)进行调查, 并对其受纳水体中水生生物带来的生态风险进行评估, 揭示抗生素在污水处理厂中的去除情况, 以期为该地区水环境中抗生素的削减提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

HPLC-MS/MS (LC: Agilent Technologies 1290 Infinity; MS/MS: AB SCIEX QTRAP 4500, 美国); 色谱柱 (Poroshell120 EC-C18 2.7 μm 2.1 $\times$ 75 mm Column, Agilent Technologies); 电子天平(上海精科雷磁化学仪器公司, 中国); 旋转蒸发仪(Heidolph, 德国); 固相萃取装置(24 孔, Waters, 美国); HLB 固相萃取柱(6 mL/500 mg, Waters, 美国).

甲醇(色谱纯, MERCK, 德国); 氨水(色谱纯, MERCK, 德国); 抗生素标准品包括磺胺甲基噁唑(sulfamethoxazole, SMX)、磺胺间甲氧嘧啶(sulfamonomethoxine, SMM)、磺胺对甲氧嘧啶(sulfameter, SMD)、磺胺二甲嘧啶(sulfamethazine, SMZ)、磺胺嘧啶(sulfadiazine, SD)、盐酸四环素(tetracycline hydrochloride, TC)、土霉素(oxytetracycline dihydrate, OTC)、金霉素(chlortetracycline hydrochloride, CTC)和氧氟沙星(ofloxacin, OFX), 纯度 >99.0%, 均购置于百灵威科技有限公司. 乙二胺四乙酸二钠、磷酸和磷酸二氢钠为分析纯, 购置于百灵威科技有限公司. 本实验用水为超纯水(Milli-Q 超纯水系统, Waters, 美国), 0.45 μm 尼龙滤膜购自 Millipore 公司.

1.2 样品采集

选取贵阳市两座典型污水处理厂(WWTP-1 和 WWTP-2)为研究对象. WWTP-1 是贵阳市最早投入运行的污水处理厂, 服务人口 25.8 万人, 处理规模 $8 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 采用“SBR + 活性砂滤 + 紫外消毒”工艺; WWTP-2 为贵阳市污水处理规模最大的污水处理厂, 服务人口 136 万人, 处理规模 $25 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 采用“A²/O + 高效沉淀 + 紫外消毒”工艺; 两座污水处理厂出水水质执行国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 标准. 采集污水处理厂进出水水样, 受纳水体采样点分别设置在排污口上游 0.2 km、排污口、排污口下游 0.5、1.0、1.5 和 2.0 km 处. 污水处理厂和受纳水体水样的采集在中午进行, 分别采集 3 次并混合均匀, 每次采集 500 mL, 共 1.5 L 水样. 所有采

集水样均为瞬时水样, 使用有机玻璃采水器采集表层水样(采集深度为水面以下 0.3 ~ 0.5 m), 储存于预先洗净的棕色采样瓶, 低温避光保存, 并尽快运回实验室, 保存在 4℃ 的冰箱内待测.

1.3 样品处理

水样经 0.45 μm 尼龙滤膜过滤去除颗粒物, 然后加入适量磷酸水溶液, 调节水样 pH = 3, 每 200 mL 水样加入 1 mL 的 Na_2EDTA ($100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$). 富集前, HLB 固相萃取柱依次用 6 mL 甲醇、3 mL 超纯水和 6 mL pH 约为 3 的磷酸-磷酸二氢钠水溶液 ($100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 活化. 准确量取预处理水样 500 mL, 采用经活化后的 HLB 固相萃取柱进行富集, 流速控制在 $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 富集完成后用 10 mL 超纯水淋洗进样瓶和 HLB 固相萃取柱, 随后在负压条件下对 HLB 固相萃取柱真空干燥 50 min. 然后依次用 6 mL 甲醇和 6 mL 2% 氨水甲醇(2 mL 氨水 + 98 mL 甲醇)洗脱 HLB 固相萃取柱, 洗脱速度为 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 洗脱液用鸡心瓶接收. 洗脱液在 45 ~ 50℃ 水浴条件下经旋转蒸发仪旋蒸至干, 然后用甲醇溶液 1 mL 复溶, 经 0.22 μm 的有机针头滤器过滤后装入棕色进样小瓶, 涡旋振荡 1 min 后, 采用 HPLC-MS/MS 定量分析.

1.4 样品的测定

HPLC 条件: 柱温 40℃; 流速 $0.3 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 流动相 A 为乙腈, 流动相 B 为 0.2% 甲酸/水, 进样体积 5 μL , 梯度洗脱. HPLC-MS/MS 质谱测定条件: 采用电喷雾离子源(ESI)正离子模式、多反应离子监测扫描定量分析目标物.

1.5 质量控制(QA/QC)

为保证实验数据的可靠性, 本次实验设置回收率实验以保证实验测定的准确性. 在不含目标化合物的超纯水水样中添加抗生素标样溶液, 按照前述样品处理方法对样品进行前处理. 经检测空白水样中目标物回收率为 61.92% ~ 113.64%, 相对标准偏差为 1% ~ 10%, 各目标化合物的检出限为 0.1 ~ 1.6 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 采用外标法对样品进行定量分析, 线性方程浓度范围为 0 ~ 200 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 相关系数(R^2)值均大于 0.99.

1.6 生态风险评估

当污水处理厂出水中残留抗生素进入受纳水体后, 可能会对受纳水体中的水生生物带来风险, 并且还可能对人类的健康产生不利影响^[17]. 因此, 评估受纳水体中抗生素的生态风险是必要的. 根据欧洲技术指导文件(European commission technical guidance document, TGD)中关于环境风险的评价方法, 污染物对水生环境造成的生态风险可以采用风

险熵数(RQ)进行评价. 风险熵值法(RQ)公式如下:

$$RQ = MEC/PNEC$$

式中, MEC(measured environmental concentration)和 PNEC(predicted no effect concentration)分别是抗生素的测定浓度和预测无效浓度. 依据环境风险评价方法^[18]:RQ < 0. 1, 低风险; 0. 1 < RQ < 1, 中等风险; RQ > 1, 高风险.

2 结果与讨论

2.1 污水处理厂进出水中抗生素污染水平及去除情况

污水处理厂进出水中 9 种目标抗生素的浓度见表 1. WWTP-1 进水中 9 种抗生素仅 SMX、TC 和 OFX 被检出, 浓度分别为 83. 36、128. 66 和 835. 60 ng·L⁻¹, 其余 6 种抗生素均未检出; WWTP-2 进水中 9 种抗生素中 SD、SMX、SMZ、TC 和 OFX 被检出, 浓度范围在 1. 75 ~ 539. 00 ng·L⁻¹之间, 其中 OFX 浓度最高为 539. 00 ng·L⁻¹, 其余 4 种抗生素均未检出. WWTP-1 和 WWTP-2 进水中 OFX 的浓度最高, 这与柴玉峰等^[19]和甘秀梅等^[20]的研究结果相似. TC 和 SMX 在两厂进水中均被检出, 其中 TC 在 WWTP-1 和 WWTP-2 中的浓度分别为 128. 66 ng·L⁻¹和 114. 96 ng·L⁻¹, 均高于 Ben 等^[21]的研究结果. WWTP-1 出水中仅检出 2 种抗生素, SMX 和 OFX, 浓度在 2. 02 ~ 11. 74 ng·L⁻¹之间; WWTP-2 出水中检出 5 种抗生素, SD、SMX、SMZ、SMD 和 OFX, 浓度在 2. 02 ~ 286. 60 ng·L⁻¹之间; WWTP-1 和 WWTP-2 出水中 OFX 的检出浓度最高, 分别为 11. 74 ng·L⁻¹和 286. 60 ng·L⁻¹; SMX 次之, 分别为 2. 02 ng·L⁻¹和 166. 44 ng·L⁻¹. WWTP-1 和 WWTP-2 出水中 SMX 和 OFX 的浓度均低于 Xu 等^[22]的研

究结果, 而 WWTP-2 出水中 SMX 的浓度高于 Li 等^[23]的研究结果. 污水处理厂进出水中抗生素的浓度差异较大, 这可能与污水处理厂服务范围、污水处理工艺、污水来源等因素有关.

污水处理厂最初的设计构想是高效去除污水中的有机物、氮和磷, 并非用于去除抗生素等微量有机污染物, 因此污水处理厂对抗生素的去除能力有限^[24]. 目标抗生素在污水处理厂中的去除情况见表 1. WWTP-1 对目标抗生素的去除率在 97. 59% ~ 100% 之间, WWTP-2 对目标抗生素的去除率在 -42. 29% ~ 100% 之间, 其中 TC 在 WWTP-1 和 WWTP-2 的去除率可达 100%, 这可能是由于 TC 很容易吸附在污泥或悬浮颗粒物上, 使得水相中大部分 TC 转移到固相中, 降低了水相中 TC 的浓度^[25]. 从对目标抗生素的去除效果来看, WWTP-1 的“SBR + 活性砂滤 + 紫外消毒”处理工艺较 WWTP-2 的“A²/O + 高效沉淀 + 紫外消毒”处理工艺更好. 高俊红等^[25]以 14 种典型抗生素(9 种磺胺类、4 种氟喹诺酮类和 1 种氯霉素)为目标物, 对兰州市两座污水处理厂(处理工艺为 A²/O)的研究表明, 14 种目标抗生素的去除率在 15. 39% ~ 100% 之间, 整体去除效果低于 WWTP-1, 但优于 WWTP-2. 在 WWTP-2 中 SD、SMX 和 SMZ 的去除出现负迁移现象, 这可能是由于进水中存在 SD、SMX 和 SMZ 的代谢产物, 随后在生物处理过程中转化为其母体化合物^[26], 且污泥成分、污泥龄及好氧或厌氧条件的差异可能是造成这种现象的另一个原因^[24]; 这与以往的研究结果相似^[24, 26]. 邯郸市 2 座污水处理厂(三沟式氧化沟工艺和曝气生物滤池工艺)中磺胺类抗生素平均去除率在 60% 以上^[27], 高于 WWTP-2, 低于 WWTP-1.

表 1 进出水抗生素的浓度

Table 1 Concentrations of antibiotics influent and effluent waters						
抗生素	WWTP-1			WWTP-2		
	进水/ng·L ⁻¹	出水/ng·L ⁻¹	去除率/%	进水/ng·L ⁻¹	出水/ng·L ⁻¹	去除率/%
SD	ND ¹⁾	ND	—	3. 00	3. 50	- 16. 67
SMX	83. 68	2. 02	97. 59	116. 16	166. 44	- 42. 29
SMZ	ND	ND	—	1. 75	2. 02	- 15. 43
SMD	ND	ND	—	ND	1. 66	—
SMM	ND	ND	—	ND	ND	—
OTC	ND	ND	—	ND	ND	—
CTC	ND	ND	—	ND	ND	—
TC	128. 66	ND	100. 00	114. 96	ND	100. 00
OFX	835. 60	11. 74	98. 60	539. 00	286. 60	46. 83

1) ND 表示未检出

2.2 国内外不同地区污水处理厂中抗生素的浓度比对

将本研究的两座污水处理厂进出水中抗生素的

浓度与国内外其它地区的污水处理厂进行比对, 结果见表 2. 磺胺类抗生素是一类含对氨基苯磺酰胺结构的衍生物, 在污水处理厂进出水中以 SD、SMX

和 SMZ 的检出率较高^[28]. 在 WWTP-2 进水中 SD、SMX 和 SMZ 的浓度分别为 3.00、116.16 和 1.75 ng·L⁻¹, WWTP-1 中仅检出了 SMX, 浓度为 83.68 ng·L⁻¹; WWTP-1 和 WWTP-2 进水中 SD 和 SMZ 的浓度均低于上海、安徽和深圳某厂; 对于 SMX 来说, 广州、安徽、深圳、巴西、瑞典和克罗地亚某厂进水中浓度均高于 WWTP-1 和 WWTP-2. OFX 在 WWTP-1 和 WWTP-2 进水中被检出, 浓度均低于兰州、上海和巴西某厂. OTC、TC 和 CTC 是四环素类抗生素中检出率最高的 3 种抗生素^[29], 但在 WWTP-1 和 WWTP-2 的进水中仅有 TC 被检出, 浓度低于威宁、厦门和深圳某厂, 表明该区域内四环素类抗生素的使用量较少. 厦门、上海和巴西某厂出水中均检出 SMX 和 OFX, 浓度高于 WWTP-1, 低于 WWTP-2, 这可能是由于进水中目标抗生素浓度差异较大或不同处理工艺对目标抗生素的去除效果不同所致. WWTP-2 出水中 SD 和 SMZ 的浓度低于上海和深圳某厂, 高于厦门某厂. 在兰州、上海、深

圳和 WWTP-2 中 SMZ 的浓度出现不降反增的情况, 这可能是由于进水中存在目标抗生素的代谢产物, 随后在生物处理过程中转化为其母体化合物^[26]; 或是在 pH 呈中性的污水中, SMZ 主要为阴离子或中性形态, 阴离子形态的 SMZ 会与表面呈电负性的活性污泥产生静电排斥作用, 从而阻碍吸附的发生^[30]; 同时紫外线 (UV) 照射可能使 SMZ 的羟基代谢物由共轭形态转化为游离形态, 使水相中的 SMZ 从结合态释放到溶解态中, 从而增加出水中 SMZ 的浓度^[31]. SMD 属于长效磺胺类药物, 用于控制畜禽细菌性疾病和鸡球虫病^[30], 在 WWTP-2 进水中未检出, 但在出水检出, 这可能是共轭形态向游离形态转化的结果^[10]; 在广州某厂出水中检出了 SMD, 远高于 WWTP-2. 综上, 贵阳市两座污水处理厂进出水中目标抗生素的浓度低于国内外其它地区, 且不同地区污水处理厂进出水中检出抗生素的种类存在一定的差异, 这可能与不同区域抗生素的使用情况和污水处理工艺差异等因素相关.

表 2 国内外不同地区污水处理厂进出水中抗生素污染水平比较¹⁾/ng·L⁻¹
Table 2 Comparison of antibiotic pollution levels in influent and effluent waters of wastewater treatment plants in different regions in China and in other countries/ng·L⁻¹

研究区域		SAs					TCs			OFX (FQs)	处理工艺	文献
		SD	SMX	SMZ	SMM	SMD	OTC	CTC	TC			
广州	进水	NA	413.40	2 055.20	NA	3 497.80	NA	NA	NA	NA	改良 A/O	[32]
	出水	NA	91.20	104.20	NA	1 259.70	NA	NA	NA	NA		
兰州	进水	260.00	NA	ND	830.00	NA	NA	NA	NA	21 050.00	A ² /O	[25]
	出水	220.00	NA	160.00	230.00	NA	NA	NA	NA	8 700.00		
威宁	进水	NA	NA	2 935.40	213.87	NA	196.32	254.96	478.64	328.64	—	[10]
	出水	NA	NA	1 065.77	155.36	NA	24.12	17.76	20.52	58.64		
厦门	进水	10.60	47.90	1.32	ND	NA	293.00	NA	179.00	495.00	A ² /O	[12]
	出水	2.95	23.10	0.81	ND	NA	22.70	NA	18.00	129.00		
上海	进水	544.29	55.64	7.26	NA	NA	125.75	NA	ND	2 936.94	—	[24]
	出水	10.13	39.55	7.27	NA	NA	ND	NA	ND	195.88		
安徽	进水	80.34	129.80	2.13	NA	ND	20.48	ND	ND	ND	氧化沟	[33]
	出水	38.29	55.30	ND	NA	ND	9.48	ND	ND	ND		
深圳	进水	269.70	154.70	4.78	5.80	NA	266.70	218.70	276.50	NA	改良 A ² /O	[34]
	出水	253.20	99.10	6.50	2.00	NA	244.00	198.70	217.20	NA		
巴西	进水	NA	279.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2 275.00	A ² /O	[35]
	出水	NA	17.30	NA	NA	NA	NA	NA	NA	64.10		
瑞典	进水	NA	337.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	213.00	—	[36]
	出水	NA	304.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	52.00		
克罗地亚	进水	ND	194.00	ND	NA	NA	NA	NA	NA	NA	—	[37]
	出水	ND	67.00	ND	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
WWTP-1	进水	ND	83.68	ND	ND	ND	ND	ND	128.66	835.6	SBR	本研究
	出水	ND	2.02	ND	ND	ND	ND	ND	ND	11.74		
WWTP-2	进水	3.00	116.16	1.75	ND	ND	ND	ND	114.96	539.00	A ² /O	
	出水	3.50	166.44	2.02	ND	1.66	ND	ND	ND	286.60		

1) NA 表示无数据, ND 表示未检出

2.3 受纳水体中抗生素的浓度水平及生态风险评估

2.3.1 受纳水体中目标抗生素的浓度水平

污水处理厂无法将污水中所有抗生素完全去

除, 将它们排放到环境后会在受纳水体中随水流扩散^[38]. WWTP-1 和 WWTP-2 受纳水体中目标抗生素的浓度如图 1 所示. WWTP-1 受纳水体采样点处

共检出 5 种抗生素, SD、CTC、OTC 和 TC 未检出; 5 种检出抗生素中浓度最高的为 OFX, 浓度范围为 23.64 ~ 90.12 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 占总抗生素浓度的 50.78%; SMX 次之, 浓度范围为 21.88 ~ 93.56 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 占抗生素总浓度的 35.62%, 两者共占总浓度的 86.40%。5 种检出抗生素浓度水平为: OFX > SMX > SMD > SMM > SMZ, 排污口处的浓度最高。WWTP-2 受纳水体 6 个采样点处共检出 4 种抗生素。4 种检出抗生素中浓度最高的为 OFX, 浓度范围为 238.00 ~ 269.2 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 占总浓度的 80.65%; SMX 次之, 浓度范围为 17.32 ~ 275.80 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 占总浓度的 19.19%, 两者共占总浓度的 99.84%。4 种检出抗生素浓度水平为: OFX > SMX > SMD > SMZ, 排污口处的浓度最高。WWTP-2 排污口处

OFX 的浓度低于上下游采样点, 这可能是因为该河段上游中 OFX 的本地值较高所致; 据报道, OFX 广泛用于兽用领域^[39], WWTP-2 服务范围内养殖场中兽用抗生素的使用^[40]可能是该区域河流中 OFX 本地值较高的原因之一。排污口上游抗生素有不同程度的检出, 可能是由污水处理厂出水或周边其它排放源中残留的抗生素排放后经水流扩散所致; 也可能是由于存在于水体、沉积物中的抗生素发生迁移转化所致^[25]。除 WWTP-2 排污口处 SMD 和 OFX 的浓度低于上游采样点外, WWTP-1 和 WWTP-2 排污口处其余检出抗生素浓度均高于上游采样点, 表明 WWTP-1 和 WWTP-2 出水中残留抗生素增加了受纳水体中抗生素浓度, 成为该受纳水体中抗生素的来源之一。

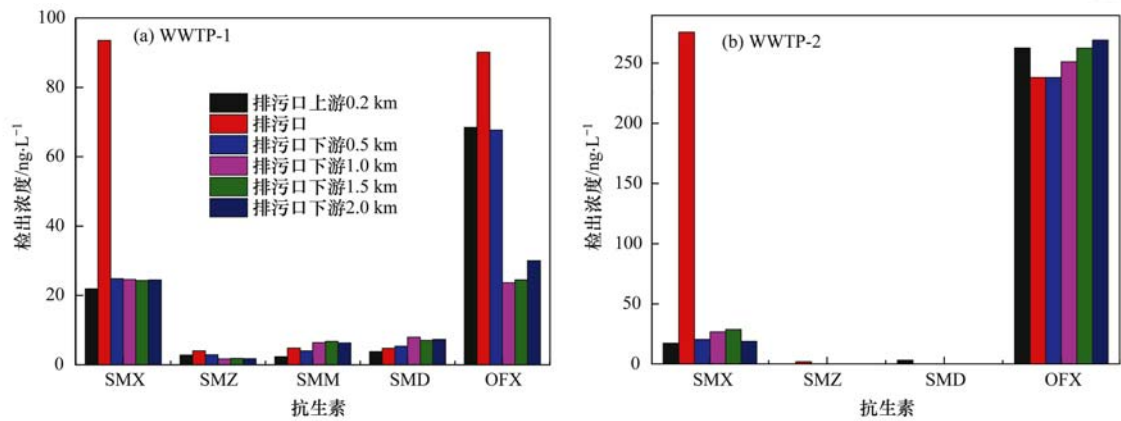


图1 受纳水体中抗生素的浓度
Fig. 1 Concentrations of antibiotics in the receiving waters

2.3.2 潜在生态风险

从污水转移到受纳水体中的抗生素可能会对水生生物构成潜在生态风险, 并对生态系统和人类健康产生不利影响^[41]。不断向水生环境中输入的抗生素会对细菌群体施加选择性压力, 从而导致抗菌

素耐药性的普遍存在^[42]。因此, 评估水生环境中抗生素的环境风险至关重要。WWTP-1 和 WWTP-2 受纳水体中选定 4 种常见抗生素 (SMX、SMZ、SMM 和 OFX) 进行生态风险评估, 最敏感物种的毒性数据见表 3。

表3 4种抗生素最敏感毒性数据

Table 3 Most sensitive toxicity data for four antibiotics

抗生素	最敏感物种	毒性类别	评价因子	PNEC/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	文献
SMX	<i>S. leopoliesis</i>	急性	1 000	27.00	[43]
SMZ	<i>Microcystis aeruginosa</i>	急性	1 000	1.60×10^6	[44]
SMM	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	急性	1 000	1.72×10^6	[45]
OFX	<i>P. subcapitata</i>	慢性	100	11.30	[46]

由表 4 可见, 两座污水处理厂出水中目标抗生素对受纳水体中水生生物存在不同程度的生态风险。WWTP-1 和 WWTP-2 受纳水体中采样点处 OFX 的 RQ 值均大于 1, 表明对水生生物存在高风险; SMX 除在 WWTP-1 和 WWTP-2 排污口及 WWTP-2 下游 1.5 km 处的 RQ 值均大于 1 外, 其余采样点处的 RQ 值均小于 1, 表明对水生生物存在中等风险和高风险; 在受纳水体中 SMZ 和 SMM 的 RQ 值均小于

0.1, 对水生生物存在低风险; 可见, 在 WWTP-1 和 WWTP-2 的受纳水体中, 目标抗生素对受纳水体中水生生物产生相对较高的急性或慢性毒理学风险。对比上下游 RQ 值发现, WWTP-1 排污口处 OFX、SMX、SMZ 和 SMM 的 RQ 值均高于上游 0.2 km 和下游 0.5 km 处, WWTP-2 排污口处 SMX 和 SMZ 的 RQ 值均高于上游 0.2 km 和下游 0.5 km 处, 表明 WWTP-1 和 WWTP-2 出水中残留的抗生素是其受纳

表 4 目标抗生素在水体中的风险熵(RQ)

Table 4 Risk entropy (RQ) of target antibiotics in test waters

项目	抗生素	排污口上游 0.2 km	排污口	排污口下游 0.5 km	排污口下游 1 km	排污口下游 1.5 km	排污口下游 2 km
WWTP-1	SMX	0.81	3.47	0.93	0.91	0.9	0.9
	SMZ	1.72×10^{-6}	2.51×10^{-6}	1.90×10^{-6}	1.05×10^{-6}	1.13×10^{-6}	1.06×10^{-6}
	SMM	1.35×10^{-6}	2.80×10^{-6}	2.30×10^{-6}	3.71×10^{-6}	3.93×10^{-6}	3.65×10^{-6}
	OFX	6.23	7.98	6.06	2.09	2.23	2.73
WWTP-2	SMX	0.64	10.21	0.76	0.99	1.07	0.7
	SMZ	0	1.25×10^{-6}	0	0	0	0
	SMM	0	0	0	0	0	0
	OFX	23.87	21.06	22.71	22.84	23.85	24.47

水体中生态风险的来源之一。因此,可以考虑将抗生素类药物列入污水控制指标,并开发经济有效的处理工艺或处理设备,降低出水中抗生素的浓度,减少抗生素的排放总量,降低环境风险。

3 结论

(1) 贵阳市两座污水处理厂(WWTP-1 和 WWTP-2)进出水中均有多种抗生素检出,其中 OFX 浓度最高,进水分别达 $835.60 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $539.00 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,出水分别达 $11.74 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $286.60 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。两座污水处理厂对目标抗生素的去除率在 $-42.29\% \sim 100\%$ 之间,其中对 TC 完全去除,总体上去除效果 WWTP-1 优于 WWTP-2。

(2) 受纳水体中目标抗生素均有不同程度的检出。在 WWTP-1 受纳水体中,目标抗生素的污染水平为: $\text{OFX} > \text{SMX} > \text{SMD} > \text{SMM} > \text{SMZ}$,在 WWTP-2 受纳水体中,目标抗生素的污染水平为: $\text{OFX} > \text{SMX} > \text{SMD} > \text{SMZ}$,其余抗生素均低于检出限;表明贵阳市两座污水处理厂(WWTP-1 和 WWTP-2)的受纳水体中 OFX 的污染较严重。生态风险评估也表明,OFX 对受纳水体中水生生物存在高风险。

参考文献:

[1] Zhou L J, Ying G G, Liu S, *et al.* Occurrence and fate of eleven classes of antibiotics in two typical wastewater treatment plants in South China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **452-453**: 365-376.

[2] Mao D Q, Yu S, Rysz M, *et al.* Prevalence and proliferation of antibiotic resistance genes in two municipal wastewater treatment plants[J]. *Water Research*, 2015, **85**: 458-466.

[3] Jiang Y H, Li M X, Guo C S, *et al.* Distribution and ecological risk of antibiotics in a typical effluent-receiving river (Wangyang River) in North China[J]. *Chemosphere*, 2014, **112**: 267-274.

[4] Kümmerer K. Antibiotics in the aquatic environment-a review-Part II[J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(4): 435-441.

[5] Lindberg R H, Fick J, Tysklind M. Screening of antimycotics in Swedish sewage treatment plants-waters and sludge[J]. *Water Research*, 2010, **44**(2): 649-657.

[6] Zhang D D, Lin L F, Luo Z X, *et al.* Occurrence of selected antibiotics in Jiulongjiang River in various seasons, South China

[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, **13**(7): 1953-1960.

[7] López-Serna R, Jurado A, Vázquez-Suñé E, *et al.* Occurrence of 95 pharmaceuticals and transformation products in urban groundwaters underlying the metropolis of Barcelona, Spain[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **174**: 305-315.

[8] Christian T, Schneider R J, Färber H A, *et al.* Determination of antibiotic residues in manure, soil, and surface waters[J]. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 2003, **31**(1): 36-44.

[9] Pei R T, Kim S C, Carlson K H, *et al.* Effect of river landscape on the sediment concentrations of antibiotics and corresponding antibiotic resistance genes (ARG)[J]. *Water Research*, 2006, **40**(12): 2427-2435.

[10] Hu J, Zhou J, Zhou S Q, *et al.* Occurrence and fate of antibiotics in a wastewater treatment plant and their biological effects on receiving waters in Guizhou[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, **113**: 483-490.

[11] Mulla S I, Hu A Y, Sun Q, *et al.* Biodegradation of sulfamethoxazole in bacteria from three different origins [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **206**: 93-102.

[12] Ashfaq M H, Li Y, Wang Y W, *et al.* Occurrence, fate, and mass balance of different classes of pharmaceuticals and personal care products in an anaerobic-anoxic-oxic wastewater treatment plant in Xiamen, China[J]. *Water Research*, 2017, **123**: 655-667.

[13] Garcia-Segura S, Ocon J D, Chong M N. Electrochemical oxidation remediation of real wastewater effluents-a review[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, **113**: 48-67.

[14] Li W H, Shi Y L, Gao L H, *et al.* Occurrence, distribution and potential affecting factors of antibiotics in sewage sludge of wastewater treatment plants in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **445-446**: 306-313.

[15] 刘虹, 张国平, 刘丛强, 等. 贵阳城市污水及南明河中氯霉素和四环素类抗生素的特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 687-692.

[16] Liu H, Zhang G P, Liu C Q, *et al.* Characteristics of chloramphenicol and tetracyclines in municipal sewage and Nanming river of Guiyang city, China [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(3): 687-692.

[17] 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.

[18] 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.

[19] de Souza S M L, de Vasconcelos E C, Dziedzic M, *et al.* Environmental risk assessment of antibiotics: an intensive care unit analysis[J]. *Chemosphere*, 2009, **77**(7): 962-967.

- [18] 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.
- [19] 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 等. 冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2724-2731.
- Chai Y F, Zhang Y X, Chen M X, *et al.* Distribution and treatment of antibiotics in typical WWTPs in small towns in China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2724-2731.
- [20] 甘秀梅, 严清, 高旭, 等. 典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1817-1823.
- Gan X M, Yan Q, Gao X, *et al.* Occurrence and fate of typical antibiotics in a wastewater treatment plant in Southwest China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1817-1823.
- [21] Ben W W, Zhu B, Yuan X J, *et al.* Occurrence, removal and risk of organic micropollutants in wastewater treatment plants across China; Comparison of wastewater treatment processes[J]. *Water Research*, 2018, **130**: 38-46.
- [22] Xu J, Xu Y, Wang H M, *et al.* Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in a sewage treatment plant and its effluent-receiving river[J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1379-1385.
- [23] Li W H, Shi Y L, Gao L H, *et al.* Occurrence and removal of antibiotics in a municipal wastewater reclamation plant in Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2013, **92**(4): 435-444.
- [24] Wu M H, Que C J, Xu G, *et al.* Occurrence, fate and interrelation of selected antibiotics in sewage treatment plants and their receiving surface water [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **132**: 132-139.
- [25] 高俊红, 王兆炜, 张涵瑜, 等. 兰州市污水处理厂中典型抗生素的污染特征研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(10): 3765-3773.
- Gao J H, Wang Z W, Zhang H Y, *et al.* Occurrence and the fate of typical antibiotics in sewage treatment plants in Lanzhou[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(10): 3765-3773.
- [26] Göbel A K, 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.
- [27] 李清雪, 刘含雨, 刘娟, 等. 邯郸市两座污水处理厂中磺胺类和 β -内酰胺类抗生素迁移转化特征[J]. *环境化学*, 2018, **37**(8): 1738-1745.
- Li Q X, Liu H Y, Liu J, *et al.* Occurrence and fate of sulfonamide and β -lactam antibiotics in wastewater treatment plants in Handan[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(8): 1738-1745.
- [28] 周佳虹, 张翔宇, 李茹莹. 抗生素在污水处理系统中的迁移分布研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(8): 77-86.
- Zhou J H, Zhang X Y, Li R Y, *et al.* Research progress of distribution and migration of antibiotics in wastewater treatment system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(8): 77-86.
- [29] 金彩霞, 陈秋颖, 吴春艳, 等. 环境条件对土壤中磺胺间甲氧嘧啶降解的影响[J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(9): 10-14.
- Jin C X, Chen Q Y, Wu C Y, *et al.* Effect of environmental condition on the degradation of sulfamonomethoxine in soil[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2009, **31**(9): 10-14.
- [30] 张翔宇, 李茹莹, 季民. 污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 5276-5288.
- Zhang X Y, Li R Y, Ji M. Mechanisms and influencing factors of antibiotic removal in sewage biological treatment [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 5276-5288.
- [31] Miao X S, Yang J J, Metcalfe C D. Carbamazepine and its metabolites in wastewater and in biosolids in a municipal wastewater treatment plant [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(19): 7469-7475.
- [32] 陈涛, 李彦文, 莫测辉, 等. 广州污水厂磺胺和喹诺酮抗生素污染特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(6): 144-147, 180.
- Chen T, Li Y W, Mo C H, *et al.* Screening of sulfonamide and fluoroquinolone antibiotics in wastewater of sewage treatment plants in Guangzhou, South China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(6): 144-147, 180.
- [33] 王莹. 安徽部分饮用水源及污水中9种抗生素的污染分布特征[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.
- [34] 张金, 宗栋良, 常爱敏, 等. 水环境中典型抗生素 SPE-UPLC-MS/MS检测方法的建立[J]. *环境化学*, 2015, **34**(8): 1446-1452.
- Zhang J, Zong D L, Chang A M, *et al.* Determination of common antibiotics in aquatic environment by solid-phase extraction and ultra pressure liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(8): 1446-1452.
- [35] Rosal R, Rodríguez A, Perdígón-Melón J A, *et al.* Occurrence of emerging pollutants in urban wastewater and their removal through biological treatment followed by ozonation [J]. *Water Research*, 2010, **44**(2): 578-588.
- [36] Lindberg R H, Wennberg P, Johansson M I, *et al.* Screening of human antibiotic substances and determination of weekly mass flows in five sewage treatment plants in Sweden [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(10): 3421-3429.
- [37] Senta I, Terzić S, Ahel M. Simultaneous determination of sulfonamides, fluoroquinolones, macrolides and trimethoprim in wastewater and river water by LC-Tandem-MS [J]. *Chromatographia*, 2008, **68**(9-10): 747-758.
- [38] Rodríguez-Mozaz S, Chamorro S, Martí E, *et al.* Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in hospital and urban wastewaters and their impact on the receiving river[J]. *Water Research*, 2015, **69**: 234-242.
- [39] Chen G L, Liu X, Tartakovsky D, *et al.* Risk assessment of three fluoroquinolone antibiotics in the groundwater recharge system [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **133**: 18-24.
- [40] 刘艳萍, 刘鸿雁, 吴龙华, 等. 贵阳市某蔬菜地养殖废水污染土壤重金属、抗生素复合污染研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(3): 1074-1082.
- Liu Y P, Liu H Y, Wu L H, *et al.* Co-contamination of heavy metals and antibiotics in soils under husbandry wastewater irrigation in Guiyang City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(3): 1074-1082.
- [41] Isidori M, Nardelli A, Pascarella L, *et al.* Toxic and genotoxic impact of fibrates and their photoproducts on non-target organisms [J]. *Environment International*, 2007, **33**(5): 635-641.
- [42] Yan Q, Gao X, Chen Y P, *et al.* Occurrence, fate and ecotoxicological assessment of pharmaceutically active compounds in wastewater and sludge from wastewater treatment plants in Chongqing, the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 618-630.

- [43] 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.
- [44] Kümmerer K, Henninger A. Promoting resistance by the emission of antibiotics from hospitals and households into effluent [J]. *Clinical Microbiology and Infection*, 2010, **9**(12): 1203-1214.
- [45] Lee Y J, Lee S E, Lee D S, *et al.* Risk assessment of human antibiotics in Korean aquatic environment [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2008, **26**(2): 216-221.
- [46] 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.

《环境科学》连续 7 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2018 年 12 月,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2018 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2018 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 7 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)