

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.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM_{2.5}中元素浓度特征及其源分析 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM_{2.5}浓度分阶段改善目标情景分析 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM_{2.5}排放特征及减排潜力估算 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑颗粒物排放特征及清单 赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
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 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险 李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制 吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氯效能 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃ SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪光,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施氮对菜地CH₄排放的影响 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH₄和N₂O排放的影响 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响 曾蔓蔓,慈思,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜评价多环芳烃污染土壤的农用风险 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)

《环境科学》征订启事(2018) 《环境科学》征稿简则(2042) 信息(2114, 2348, 2393)

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

刘昔^{1,2}, 王智¹, 王学雷^{1*}, 李珍^{2,3}, 杨超¹, 厉恩华¹, 位慧敏^{1,2}

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所环境与灾害监测评估湖北省重点实验室, 武汉 430061; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430061)

摘要: 为了解我国典型地表水环境中抗生素污染现状与生态风险, 本文通过历史数据收集, 利用风险商评价模型(RQ)与风险简单叠加模型(RQ_{SUM})对我国5个典型地表水环境中丰水期的抗生素污染进行生态风险评价。结果表明:①5个区域内地表水在丰水期(4~9月)主要受到8种抗生素污染的生态风险, 分别是磺胺甲基异噁唑(SMX)、磺胺甲基嘧啶(SM)、红霉素(ETM)、罗红霉素(RTM)、四环素(TC)、氧土霉素(OTC)、诺氟沙星(NOR)和氧氟沙星(OFL);②5个区域内首要的抗生素污染类型为SMX和ETM, SMX对长江三角洲和巢湖流域的RQ_{SUM}贡献率分别为91.1%和98.5%, ETM对江汉平原、珠江三角洲和黄河三角洲的RQ_{SUM}贡献率分别为94.4%、81.8%和60%;③根据RQ_{SUM}值大小对5个区域内受到抗生素污染的生态风险由高到低排序为:江汉平原(20.204) > 长江三角洲(8.769) > 巢湖流域(2.692) > 黄河三角洲(1.943) > 珠江三角洲(1.222)。

关键词: 地表水; 污染现状; 抗生素; 生态风险; 风险商; 贡献率

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2094-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201808105

Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments

LIU Xi^{1,2}, WANG Zhi¹, WANG Xue-lei^{1*}, LI Zhen^{2,3}, YANG Chao¹, LI En-hua¹, WEI Hui-min^{1,2}

(1. Key Laboratory for Environment and Disaster Monitoring and Evaluation of Hubei Province, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430061, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430061, China)

Abstract: To learn about the status of antibiotic contamination and their ecological risks in Chinese surface-water environments, the risk quotient (RQ) and joint risk quotient (RQ_{SUM}) methods were applied to assess the ecological risks of five typical surface-water environments in China during the flood season. The results showed that the main types of antibiotic contamination in the five regions were sulfamethoxazole (SMX), sulfamethazine (SM), erythromycin (ETM), roxithromycin (RTM), tetracycline (TC), oxytetracycline (OTC), norfloxacin (NOR), and ofloxacin (OFL). Among eight types of antibiotic contamination, sulfamethoxazole (SMX) and erythromycin (ETM) occupied a dominant position. The contribution rate of SMX in the Yangtze River Delta and Chaohu Basin was 91.1% and 98.5%, respectively. Meanwhile, the contribution rates of ETM in Jiangnan Plain, Pearl River Delta, and Yellow River Delta were 94.4%, 81.8%, and 60%, respectively. Based on the joint risk quotients (RQ_{SUM}), the order of ecological risks in the research areas was: Jiangnan Plain (20.204) > Yangtze River Delta (8.769) > Chaohu Basin (2.692) > Yellow River Delta (1.943) > Pearl River Delta (1.222).

Key words: surface-water; pollution status; antibiotics; ecological risks; the risk quotient; contribution rate

抗生素是一类具有抵抗微生物活性的天然、半合成或人工合成的化合物, 大量应用于人和动物的感染性疾病的预防与治疗中^[1,2]。与对其他环境污染物, 如重金属、化学肥料、农药、多环芳烃等的高认知程度不同, 抗生素污染作为一类新型污染物在近年来才受到国内外学者的重视^[3]。有研究表明^[4-6], 随着抗生素的大量生产与广泛使用, 其环境污染与生态毒理效应已不容忽视, 成为全球面临的重大环境问题之一。

我国是抗生素的生产和使用大国, 医用和畜牧业抗生素滥用情况严重^[7], 年均使用量约2.5万t,

占到全球总使用量的20%左右^[8,9]。在我国, 抗生素大量进入环境中形成“假持久性”现象^[10,11], 诱导环境中耐药性致病菌的出现, 对人体健康和生态环境产生威胁^[12]。目前国内外对于含抗生素废水的治理技术不多且不成熟, 污水处理厂常用的活性污泥法或生物滤池法对于废水中抗生素的处理效果

收稿日期: 2018-08-13; 修订日期: 2018-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571202, 41601545, 41801100); 湖北省自然科学基金项目(2015CFA132); 中国科学院青年创新促进会项目(2018369)

作者简介: 刘昔(1994~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为湿地生态学, E-mail: liuxi162@mails.ucas.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xlwang@whigg.ac.cn

不明显^[13],葛峰等^[14]对南京市4个污水处理厂活性污泥中细菌的抗生素耐药性进行分析,结果表明活性污泥中细菌耐药性严重,危害水产养殖业的多种细菌具有严重的多重耐药性,对人体健康和生态系统稳定性构成潜在威胁。

我国的抗生素污染问题在近年来才逐步受到学者的重视并对其进行报道。章强等^[15]的研究表明,目前已经在我国地表水(河流、湖泊)、地下水及水体沉积物中检测出抗生素残留,养殖业废水和城市污水是抗生素的主要污染源;Zhang等^[16]于2015年发布我国首份抗生素污染排放地图,揭示了我国抗生素污染的空间分布格局,我国京津地区及东部沿海地区受抗生素污染最为严重;王敏等^[17]对5种典型滨海养殖水体(鱼塘、螃蟹池、蛭池、虾池、鸭池)中抗生素的残留类型和浓度进行了研究,结果表明螃蟹养殖中抗生素残留最少,虾养殖水体中最多;有学者也对我国地表水及沉积物中的抗生素污染进行了生态风险评价,如北京清河^[18]、大辽河^[19]、深圳铁岗水库^[20]、洪湖^[21]和辽河^[22]等,这些研究结果表明其环境风险与生态毒理效应不容忽视。

目前,水体污染物生态风险评价主要有3种方法:风险商值法(risk quotient, RQ)、概率生态风险法(probabilistic ecological risk assessment, PERA)和物种敏感性分布法(species sensitivity distribution, SSD)^[23]。本研究中采用的风险商值法(RQ)是一种常用方法,其对毒理数据的要求较少。本文在已有研究基础上综述了我国5个典型地表水环境中抗生素的污染现状,采用风险商值法评估其潜在的生态环

境风险,通过全面了解中国水体抗生素污染现状及其生态风险,以期为抗生素污染防治提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

本文选取长江三角洲、珠江三角洲、黄河三角洲及江汉平原、巢湖流域等地区为研究区域,综述国内外文献,分析我国水环境中的抗生素污染现状。研究区域选取的依据是:长江三角洲和珠江三角洲是我国经济发展最快的地区之一;江汉平原位于素有“千湖之省”美称的湖北省,是我国水资源和水产资源最为丰富地区之一;黄河三角洲位于黄河入海口,是我国最大的三角洲,自然资源丰富;巢湖位于安徽合肥,连淮通江,是我国第五大淡水湖泊。

针对中国典型地表水环境,本文收集并整理了近5年以来国内外公开发表的相关资料,包括5个区域内5大类17小类抗生素含量的数据。数据的筛选遵循以下原则:资料中抗生素的测定方法为美国EPA推荐的标准方法或根据标准方法修订的方法;分析方法遵循质量保证和控制程序,使用空白、重复和标准物质对测量的精度进行控制。不同种类抗生素的毒理数据参考美国环保署EPA ECTOX数据库(<http://www.epa.gov/ecotox/>)。

我国水环境中存在的抗生素主要包括5大类20种,分别为四环素类(TCs)、氯霉素类(CPs)、磺胺类(SAs)、氟喹诺酮类(FQs)和大环内酯类(MLs)。其中,磺胺类(SAs)药物广泛应用于畜牧生产中,能有效防治动物疾病^[24]。抗生素具体种类见表1。

表1 我国水环境中主要存在的抗生素种类

Table 1 Main types of antibiotics in China's water environment

抗生素种类	化合物名称	英文缩写	相对分子质量	分子式
氯霉素类(CPs)	氯霉素	CAP	323.13	$C_{11}H_{12}Cl_2N_2O_5$
	甲砜霉素	TAP	356.22	$C_{12}H_{15}Cl_2NO_5S$
	氟苯尼考	FF	358.21	$C_{12}H_{14}Cl_2FNO_4S$
磺胺类(SAs)	磺胺嘧啶	SD	250.28	$C_{10}H_{10}N_4O_2S$
	磺胺吡啶	SP	249.29	$C_{11}H_{11}N_3O_2S$
	磺胺甲基异噁唑	SMX	253.28	$C_{10}H_{11}N_3O_3S$
	磺胺噻唑	ST	255.32	$C_9H_9N_3O_2S_2$
	磺胺甲基嘧啶	SM	264.30	$C_{11}H_{12}N_4O_2S$
	磺胺甲噻唑	SMT	278.34	$C_{12}H_{14}N_4O_2S$
	磺胺喹噁啉	SQ	300.34	$C_{14}H_{12}N_4O_2S$
氟喹诺酮类(FQs)	诺氟沙星	NOR	319.33	$C_{16}H_{18}FN_3O_3$
	环丙沙星	CIP	331.34	$C_{17}H_{18}FN_3O_3$
	恩氟沙星	ENR	359.4	$C_{19}H_{22}FN_3O_3$
	氧氟沙星	OFL	331.34	$C_{18}H_{20}FN_3O_4$
大环内酯类(MLs)	红霉素	ETM	731.95	$C_{38}H_{69}NO_{12}$
	罗红霉素	RTM	837.05	$C_{41}H_{76}N_2O_{15}$
四环素类(TCs)	四环素	TC	444.43	$C_{22}H_{24}N_2O_8 \cdot HCl$
	氧土霉素	OTC	496.90	$C_{22}H_{24}N_2O_9 \cdot HCl$
	多西环素	DXC	544.98	$C_{24}H_{32}N_2O_{10} \cdot HCl$
	金霉素	CTC	515.34	$C_{22}H_{23}ClN_2O_8 \cdot HCl$

1.2 评价模型与方法

水环境中残留抗生素的生态风险可以用风险商值(RQ)来进行评价,根据 RQ 值可评价其在水环境中的生态风险大小^[25].有研究表明^[26],当 $0.01 < RQ < 0.1$ 时,为低风险;当 $0.1 < RQ < 1$ 时,为中风险;当 $RQ > 1$ 时,为高风险. RQ 计算公式如下:

$$RQ = MEC/PNEC \quad (1)$$

式中,MEC 为实测浓度, $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; PNEC 为预测无效应浓度,即在目前的研究中尚未发现其对生态系统产生不利影响的最高浓度, $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

$$PNEC = LC_{50}(\text{或 } EC_{50})/AF \quad (2)$$

式中, LC_{50} 为半致死浓度, EC_{50} 为最大半效应浓度,两者单位均为 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; LC_{50} 和 EC_{50} 的值从美国环保署的 EPA ECTOX 数据库中获得,当存在多个值时,取最小值^[20]; AF 为评价因子,取欧盟水框架指令的推荐值(1000).

$$RQ_{\text{SUM}} = \sum RQ_i \quad (3)$$

式中, RQ_{SUM} 为联合毒性风险商, RQ_i 为某种抗生素 i 的 RQ 值.

有研究表明^[27,28],当多种抗生素共同存在于水环境中时,其生态毒理效应和环境危害程度会加强.然而,目前关于抗生素环境风险的研究多集中

于单一药品,缺乏对其联合生态效应的考察.因此,本文采用简单叠加模型计算抗生素的联合毒性风险商^[29].

2 结果与讨论

2.1 污染现状

在未受人类活动影响的自然环境介质中,微生物是抗生素的生产者,但微生物产生的抗生素含量极低,属于微生物自然防御机制^[30],因此,人为活动影响是我国水环境抗生素的主要来源.目前,医用抗生素和兽用抗生素在我国使用频繁,而传统的污水处理厂工艺不能有效去除微量污染物,含有抗生素废水经城市集污系统进入污水处理厂而进入水环境^[31].

5 个不同地区地表水中抗生素的污染类型与污染水平如表 2. 不同地区所表现出的主要抗生素污染种类有差异,相同地区不同月份间的抗生素污染水平也呈现差异化.

比较相同地区丰水期与枯水期水体中的抗生素污染水平.在江汉平原地区,丰水期(5 月)大部分抗生素的浓度较枯水期(10 月)有明显升高,磺胺类抗生素含量在两个时期差别不明显,但大环内酯类 ETM 丰水期浓度为 $381.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,枯水期为 4.0

表 2 地表水中主要抗生素的污染水平¹⁾/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Pollution levels of major antibiotics in surface water/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

抗生素	地表水									
	长江三角洲		江汉平原		珠江三角洲		巢湖流域		黄河三角洲	
	2012-07	2011-10	2014-05	2011-02	2011-09	2012-09	2013-01	2014-04	2014-09	
磺胺类(SAs)										
SD	53.6	37.4	5.5	18.0	2.3	6.2	8.4	/	/	/
SP	24.1	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SMX	259.6	5.9	13.4	218.0	3.6	79.6	171.6	/	/	/
ST	34.1	0.5	3.7	/	/	/	/	/	/	/
SM	188.9	44.8	24.5	37.6	9.36	5.5	9.9	/	/	/
SQ	21.5	/	/	/	/	/	/	/	/	/
大环内酯类(MLs)										
ETM	3.9	4.0	381.5	121	20	/	/	4.38	23.3	/
RTM	0.9	9.8	6.7	/	/	/	/	14.1	17.9	/
四环素类(TCs)										
TC	4.2	15.8	137.4	13.1	5.9	7.2	7.5	64.9	48.1	/
OTC	78.3	4.5	61.8	/	/	/	2.5	67.6	83.5	/
DXC	11.3	/	/	/	/	/	/	/	/	/
CTC	3.6	122.3	34.8	/	/	/	4.0	/	/	/
氟喹诺酮类(FQs)										
NOR	2.7	6.9	134.2	136	121	/	70.2	55.7	79.0	/
ENR	6.5	53.1	6.2	/	/	10.8	4.7	20.9	19.6	/
CIP	2.8	18	12.5	/	/	/	23.2	41.5	70.4	/
OFL	/	23	135.1	15.8	10.7	27.3	50.6	23.4	4.8	/
氯霉素类(CPs)										
FF	116.3	/	/	/	/	/	/	/	/	/
文献	[32]	[33]	[33]	[34]	[34]	[35]	[35]	[36]	[36]	

1) “/”表示未检出或文献中未报道

ng·L⁻¹, 四环素类 TC 丰水期和枯水期浓度分别为 137.4 ng·L⁻¹ 和 15.8 ng·L⁻¹, 其他各类抗生素浓度在两季中也呈现差异, 最大差值达到近百倍, 总体上来看丰水期高于枯水期; 在珠江三角洲和巢湖流域地区, 丰水期(9 月)各类抗生素含量均低于枯水期(1 月或 2 月), 磺胺类抗生素含量差别尤为明显, 在江汉平原 SMX 枯水期为 218 ng·L⁻¹, 丰水期仅为 3.6 ng·L⁻¹, 在巢湖流域 SMX 枯水期为 171.6 ng·L⁻¹, 丰水期为 79.6 ng·L⁻¹, 其他各类抗生素含量枯水期略高于丰水期, 相差约 1.5~8.0 倍; 在黄河三角洲, 除 TC、ENR 和 OFL 等 3 种抗生素外, 丰水期(9 月)抗生素含量高于枯水期(4 月), 但两个时期抗生素含量差别不明显, 在 1.3~30.9 ng·L⁻¹. 丰水期与枯水期抗生素污染水平的差异, 可能与农田播种、水产养殖投苗, 病虫害防治时抗生素药物的使用方式与时期密切相关。

比较 5 个地区丰水期水体中的抗生素污染水平. 如图 1 所示, 黄河三角洲、巢湖流域、珠江三角洲、江汉平原和长江三角洲这 5 个地区的抗生素总含量分别为 256.6、119.6、170.56、894.6 和 538.5 ng·L⁻¹, 其中江汉平原作为密集农业区污染水平最高, 巢湖流域污染水平最低, 这可能与不同地区抗生素的使用种类与用量、水产养殖施用量、环境条件差异有关^[37]. 按照抗生素污染水平由高到低排序为: 江汉平原 > 长江三角洲 > 黄河三角洲 > 珠江三角洲 > 巢湖流域, 抗生素总含量在 119.6~894.6 ng·L⁻¹.

2.2 生态效应与评价体系

目前, 有大量研究表明, 抗生素对水生生物、土壤生物和植物造成不利影响, 具有毒性效

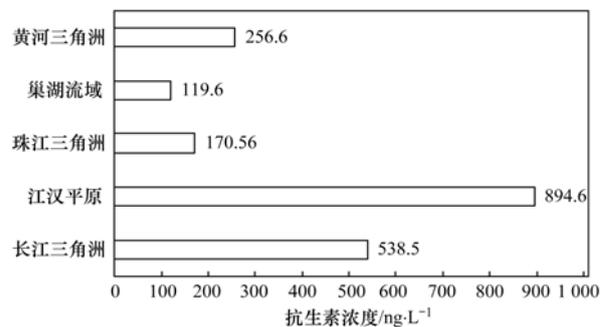


图 1 5 个地区丰水期水环境中抗生素污染水平

Fig. 1 Antibiotic concentration in different surface-water environments during the wet season

应^[12]. 抗生素对水生生物产生直接影响, Wollenberger 等^[38]测试了 9 种兽用抗生素对淡水水蚤的急性毒理效应, 结果表明, 最大半效应浓度最低仅为 4.6 mg·L⁻¹; 抗生素对土壤生物和植物的影响可能是间接的, 因为实际中土壤环境较为复杂, 土壤生物和植物还有可能受到重金属污染等其他方面的影响, 有待进一步研究^[12].

通过表 3 可以看出, 在本文 5 个研究区域内检测出的 17 种目标抗生素中, 主要受到其中 8 种抗生素污染的生态风险, 分别是磺胺甲基异噁唑 (SMX)、磺胺甲基嘧啶 (SM)、红霉素 (ETM)、罗红霉素 (RTM)、四环素 (TC)、氧土霉素 (OTC)、诺氟沙星 (NOR) 和氧氟沙星 (OFL), 其无效应浓度 PNEC 值分别为 30、1 740、20、150、415、170、1 600 和 1 440 ng·L⁻¹, 一般来说, 在相同暴露浓度下, 无效应浓度 PNEC 值越大其潜在生态风险越小, 故本文将重点讨论这 8 种抗生素在 5 个研究区域内的生态风险, 其在丰水期的浓度与组成如图 2.

表 3 目标抗生素的 PNEC 值¹⁾/ng·L⁻¹

Table 3 PNEC values of target antibiotics/ng·L⁻¹

名称	SD	SP	SMX	ST	SM	SQ	ETM	RTM	TC	OTC	DXC	CTC	NOR	ENR	CIP	OFL	FF
PNEC 值	*	*	30	*	1 740	*	20	150	415	170	*	*	1 600	*	*	1 440	*

1) 当 PNEC 值大于 20 000 ng·L⁻¹ 时用 “*” 表示, 代表生态风险极低; 数据来源: 美国环保署的 EPA ECTOX 数据库 (<http://www.epa.gov/ecotox/>)

2.3 风险评价

本文基于前人研究成果和国内外研究报道, 对选取 5 个区域的丰水期(4~10 月)抗生素污染进行风险评价, 污染现状见表 2. 长江三角洲选取 2012 年 7 月数据, 江汉平原选取 2014 年 5 月数据, 珠江三角洲选取 2011 年 9 月数据, 巢湖流域选取 2012 年 9 月数据, 黄河三角洲选取 2014 年 9 月数据, 具体的生态风险 RQ 计算结果见表 4.

长江三角洲水体中 RTM、TC 和 NOR 的 RQ 低

于 0.01, 无明显生态风险; SM、ETM 和 OTC 的 RQ 高于 0.1 但低于 1, 处于中风险; 而 SMX 的 RQ 高达 7.987, 远高于 1, 对 RQ_{SUM} 的贡献率为 91.1%, 说明该类抗生素为该地区的主要污染物, 处于高风险, 其对生态环境的危害作用较大.

江汉平原地区水体中 SM、RTM、NOR 和 OFL 的 RQ 高于 0.01 但低于 0.1, 该地区受到这 4 类抗生素的威胁很小, 处于低风险; SMX、TC 和 OTC 的 RQ 高于 0.1 但低于 1, 其污染水平属于中风险;

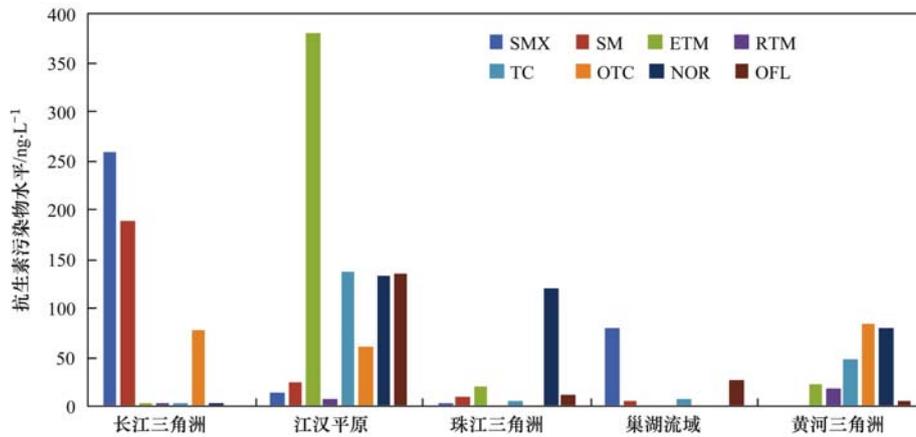


图 2 主要目标抗生素丰水期浓度与组成

Fig. 2 Concentration and composition of target antibiotics during the wet season

表 4 丰水期不同地表水体中抗生素生态风险商¹⁾

Table 4 Risk quotients in different surface-water environments during the wet season

位置	RQ								RQ _{SUM}	RQ 贡献率 /%
	SMX	SM	ETM	RTM	TC	OTC	NOR	OFL		
长江三角洲	7.987	0.109	0.195	0.006	0.009	0.461	0.002	/	8.769	91.1 (SMX)
江汉平原	0.197	0.014	19.075	0.045	0.331	0.364	0.084	0.094	20.204	94.4 (ETM)
珠江三角洲	0.120	0.005	1.000	/	0.014	/	0.076	0.007	1.222	81.8 (ETM)
巢湖流域	2.653	0.003	/	/	0.017	/	/	0.019	2.692	98.5 (SMX)
黄河三角洲	/	/	1.165	0.119	0.116	0.491	0.049	0.003	1.943	60.0 (ETM)

1) “/”表示未检测出或数据缺失

ETM 的 RQ 值高达 19.075，对 RQ_{SUM} 的贡献率为 94.4%，为该地区的主要抗生素污染物类型，处于高风险。

珠江三角洲水体中 SM 和 OFL 的 RQ 低于 0.01，生态风险商结果显示无风险；TC 和 NOR 的 RQ 高于 0.01 但低于 0.1，处于低风险；SMX 的 RQ 高于 0.1 但低于 1，处于中风险；ETM 的 RQ 为 1，对 RQ_{SUM} 的贡献率为 81.8%，是该地区的主要抗生素污染类型，处于高风险临界值。

巢湖流域水体中 SM 的 RQ 低于 0.01，不受到该类抗生素的生态威胁；TC 和 OFL 的 RQ 高于

0.01 低于 0.1，风险商结果表明该地区受到这两类抗生素的威胁较低，处于低风险；SMX 的 RQ 高于 1，对 RQ_{SUM} 的贡献率高达 98.5%，是该地区的首要抗生素污染类型，处于高风险。

黄河三角洲水体中 OFL 的 RQ 低于 0.01，无明显生态风险；NOR 的 RQ 高于 0.01 低于 0.1，处于低风险；RTM、TC 和 OTC 的 RQ 高于 0.1 低于 1，这 3 类抗生素对该地区的生态风险程度为中；ETM 的 RQ 高于 1 为 1.165，对 RQ_{SUM} 的贡献率为 60.0%，是主要抗生素污染类型且处于高风险。

由图 3 可以看出，长江三角洲和巢湖流域 RQ

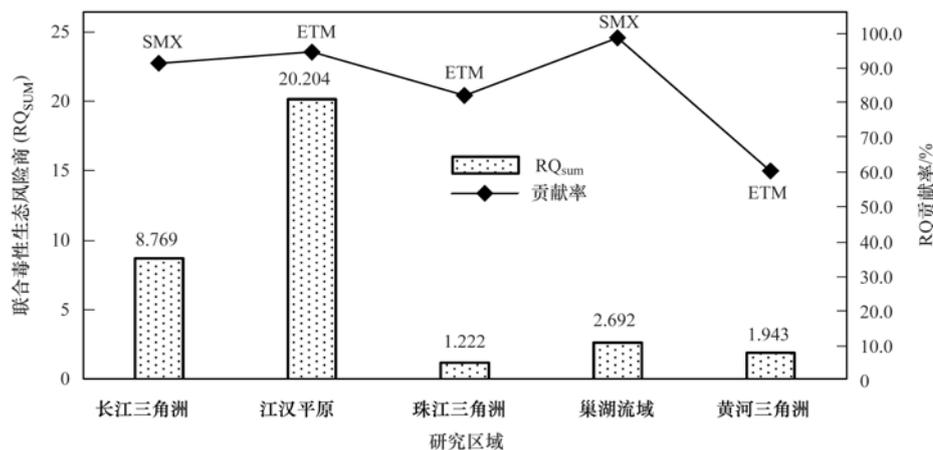


图 3 联合毒性生态风险商 RQ_{SUM} 及主要抗生素 RQ 贡献率

Fig. 3 Joint toxicity ecological risk quotient and contribution rates of selected antibiotics

贡献率最高的抗生素污染物类型为 SMX, 贡献率分别为 91.1% 和 98.5%; 江汉平原、珠江三角洲和黄河三角洲 RQ 贡献率最高的抗生素污染物类型为 ETM, 贡献率分别为 94.4%、81.8% 和 60.0%; 同时, 根据风险商计算结果, 5 个研究区域均受到抗生素污染的高生态风险 ($RQ_{SUM} > 1$), 生态风险由大到小排序为: 江汉平原 (20.204) > 长江三角洲 (8.769) > 巢湖流域 (2.692) > 黄河三角洲 (1.943) > 珠江三角洲 (1.222), 首要抗生素污染物类型为 SMX 和 ETM.

3 结论

(1) 5 个研究区域内地表水环境在丰水期 (4~9 月) 主要受到 8 种抗生素污染的生态风险, 分别是磺胺甲基异噁唑 (SMX)、磺胺甲基嘧啶 (SM)、红霉素 (ETM)、罗红霉素 (RTM)、四环素 (TC)、氧土霉素 (OTC)、诺氟沙星 (NOR) 和氧氟沙星 (OFL).

(2) 生态风险商评价结果表明, 5 个研究区域内的首要抗生素污染类型为 SMX 和 ETM, 其对 RQ_{SUM} 贡献率在 60% 以上.

(3) 对生态风险商应用简单叠加模型计算得到 RQ_{SUM} , 由大到小排序为: 江汉平原 (20.204) > 长江三角洲 (8.769) > 巢湖流域 (2.692) > 黄河三角洲 (1.943) > 珠江三角洲 (1.222).

参考文献:

- [1] Halling-Sørensen B, Nors Nielsen S, Lanzky P F, *et al.* Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment-A review[J]. *Chemosphere*, 1998, **36**(2): 357-393.
- [2] Martinez J L. Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(11): 2893-2902.
- [3] Bound J P, Voulvoulis N. Predicted and measured concentrations for selected pharmaceuticals in UK rivers; implications for risk assessment[J]. *Water Research*, 2006, **40**(15): 2885-2892.
- [4] Schwaber M J, Cosgrove S E, Gold H S, *et al.* Fluoroquinolones protective against cephalosporin resistance in gram-negative nosocomial pathogens[J]. *Emerging Infectious Diseases*, 2004, **10**(1): 94-99.
- [5] Zanetti G, Bally F, Greub G, *et al.* Cefepime versus imipenem-cilastatin for treatment of nosocomial pneumonia in intensive care unit patients: a multicenter, evaluator-blind, prospective, randomized study[J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 2003, **47**(11): 3442-3447.
- [6] Arias C A, Murray B E. Antibiotic-resistant bugs in the 21st century--a clinical super-challenge[J]. *New England Journal of Medicine*, 2009, **360**(5): 439-443.
- [7] 俞慎, 王敏, 洪有为. 环境介质中的抗生素及其微生物生态效应[J]. *生态学报*, 2011, **31**(15): 4437-4446.
Yu S, Wang M, Hong Y W. Antibiotics in environmental matrices and their effects on microbial Ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(15): 4437-4446.
- [8] Wise R. Antimicrobial resistance: priorities for action [J]. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 2002, **49**(4): 585-586.
- [9] Xu W H, Zhang G, Zou S C, *et al.* Determination of selected antibiotics in the Victoria Harbour and the Pearl River, South China using high-performance liquid chromatography-electrospray ionization tandem mass spectrometry [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **145**(3): 672-679.
- [10] 徐维海, 张干, 邹世春, 等. 典型抗生素类药物在城市污水处理厂中的含量水平及其行为特征[J]. *环境科学*, 2007, **28**(8): 1779-1783.
Xu W H, Zhang G, Zou S C, *et al.* Occurrence, distribution and fate of antibiotics in sewage treatment plants [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(8): 1779-1783.
- [11] Gulkowska A, Leung H W, So M K, *et al.* Removal of antibiotics from wastewater by sewage treatment facilities in Hong Kong and Shenzhen, China[J]. *Water Research*, 2008, **42**(1-2): 395-403.
- [12] 高立红, 史亚利, 厉文辉, 等. 抗生素环境行为及其环境效应研究进展[J]. *环境化学*, 2013, **32**(9): 1619-1633.
Gao L H, Shi Y L, Li W H, *et al.* Environmental behavior and impacts of antibiotics [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(9): 1619-1633.
- [13] 张玮玮, 弓爱君, 邱丽娜, 等. 废水中抗生素降解和去除方法的研究进展[J]. *中国抗生素杂志*, 2013, **38**(6): 401-410.
Zhang W W, Gong A J, Qiu L N, *et al.* Processes of degradation and removal methods of antibiotics from waste water[J]. *Chinese Journal of Antibiotics*, 2013, **38**(6): 401-410.
- [14] 葛峰, 郭坤, 周广灿, 等. 南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1646-1651.
Ge F, Guo K, Zhou G C, *et al.* Isolation and identification of bacteria in the activated sludge from four sewage treatment plants in Nanjing City and its antibiotic resistance analysis [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1646-1651.
- [15] 章强, 辛琦, 朱静敏, 等. 中国主要水域抗生素污染现状及其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.
- [16] Zhang Q Q, Ying G G, Pan C G, *et al.* Comprehensive evaluation of antibiotics emission and fate in the river basins of China: source analysis, multimedia modeling, and linkage to bacterial resistance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(11): 6772-6782.
- [17] 王敏, 俞慎, 洪有为, 等. 5 种典型滨海养殖水体中多种类抗生素的残留特性[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(5): 934-939.
Wang M, Yu S, Hong Y W, *et al.* Residual characterization of multi-categorized antibiotics in five typical aquaculture waters [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(5): 934-939.
- [18] 朱琳, 张远, 渠晓东, 等. 北京清河水体及水生生物体内抗生素污染特征[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(2): 139-146.
Zhu L, Zhang Y, Qu X D, *et al.* Occurrence of antibiotics in aquatic plants and organisms from Qing River, Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(2): 139-146.
- [19] 秦延文, 张雷, 时瑶, 等. 大辽河表层水体典型抗生素污染

- 特征与生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(3): 361-368.
- Qin Y W, Zhang L, Shi Y, *et al.* Contamination characteristics and ecological risk assessment of typical antibiotics in surface water of the Daliao River, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(3): 361-368.
- [20] 朱婷婷, 段标标, 宋战锋, 等. 深圳铁岗水库水体中抗生素污染特征分析及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(7): 1175-1180.
- Zhu T T, Duan B B, Song Z F, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of antibiotics in Tiegang Reservoir in Shenzhen[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(7): 1175-1180.
- [21] Wang Z, Du Y, Yang C, *et al.* Occurrence and ecological hazard assessment of selected antibiotics in the surface waters in and around Lake Honghu, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **609**: 1423-1432.
- [22] 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 等. 辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4553-4561.
- Zhang X J, Bai Y W, Zhang Y, *et al.* Occurrence, distribution, and ecological risk of antibiotics in surface water in the Liaohe River Basin, China [J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4553-4561.
- [23] 刘昔, 王智, 王学雷, 等. 应用物种敏感性分布评价中国湖泊水体中重金属污染的生态风险[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(5): 1206-1217.
- Liu X, Wang Z, Wang X L, *et al.* Ecological risks assessment of selected heavy metals in the waters of Chinese lakes based on species sensitivity distributions[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(5): 1206-1217.
- [24] Zhao J L, Liu Y S, Liu W R, *et al.* Tissue-specific bioaccumulation of human and veterinary antibiotics in bile, plasma, liver and muscle tissues of wild fish from a highly urbanized region[J]. Environmental Pollution, 2015, **198**: 15-24.
- [25] Vryzas Z, Alexoudis C, Vassiliou G, *et al.* Determination and aquatic risk assessment of pesticide residues in riparian drainage canals in northeastern Greece [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, **74**(2): 174-181.
- [26] 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.
- [27] Cleuvers M. Aquatic ecotoxicity of pharmaceuticals including the assessment of combination effects[J]. Toxicology Letters, 2003, **142**(3): 185-194.
- [28] Cleuvers M. Mixture toxicity of the anti-inflammatory drugs diclofenac, ibuprofen, naproxen, and acetylsalicylic acid [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2004, **59**(3): 309-315.
- [29] Quinn B, Gagné F, Blaise C. An investigation into the acute and chronic toxicity of eleven pharmaceuticals (and their solvents) found in wastewater effluent on the cnidarian, *Hydra attenuata* [J]. Science of the Total Environment, 2008, **389**(2-3): 306-314.
- [30] Alonso A, Sánchez P, Martínez J L. Environmental selection of antibiotic resistance genes [J]. Environmental Microbiology, 2001, **3**(1): 1-9.
- [31] Hirsch R, Ternes T, Haberer K, *et al.* Occurrence of antibiotics in the aquatic environment [J]. Science of the Total Environment, 1999, **225**(1-2): 109-118.
- [32] 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.
- [33] Lei T, Huang S B, Wang Y X, *et al.* Occurrence of antibiotics in the aquatic environment of Jiangnan Plain, central China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **497-498**: 180-187.
- [34] Liang X M, Chen B W, Nie X P, *et al.* The distribution and partitioning of common antibiotics in water and sediment of the Pearl River Estuary, South China[J]. Chemosphere, 2013, **92**(11): 1410-1416.
- [35] Tang J, Shi T Z, Wu X W, *et al.* The occurrence and distribution of antibiotics in Lake Chaohu, China: Seasonal variation, potential source and risk assessment [J]. Chemosphere, 2015, **122**: 154-161.
- [36] Zhao S N, Liu X H, Cheng D M, *et al.* Temporal-spatial variation and partitioning prediction of antibiotics in surface water and sediments from the intertidal zones of the Yellow River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **569-570**: 1350-1358.
- [37] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall A B A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment [J]. Chemosphere, 2006, **65**(5): 725-759.
- [38] Wollenberger L, Halling-Sørensen B, Kusk K O. Acute and chronic toxicity of veterinary antibiotics to *Daphnia magna* [J]. Chemosphere, 2000, **40**(7): 723-730.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly-and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoideis</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, GUO Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiang, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)