

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



2020

Vol.41 No.11  
第41卷 第11期

目次

中国工业源挥发性有机物排放清单 ..... 梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 叶代启, 陈来国(4767)

中国水泥排放清单及分布特征 ..... 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 郭静, 王鹏, 翟文慧, 崔维庚, 汪寿阳, 李时蓓, 董广霞(4776)

环境空气 PM<sub>2.5</sub> 化学组分监测数据审核指标的建立:以长三角地区为例 ..... 张哲, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 郭会琴, 王红丽, 楼晟荣, 陶士康, 陈长虹(4786)

南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征 ..... 张毓秀, 于兴娜, 刘偲嘉, 安俊琳, 张程(4803)

郑州市 PM<sub>2.5</sub> 化学组分的季节变化特征及来源解析 ..... 张剑飞, 姜楠, 段时光, 孙有昌, 郝祺, 张瑞芹(4813)

山西大学城 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征、来源及健康风险评估 ..... 李雪梅, 牟玲, 田妹, 郑利荣, 李杨勇(4825)

2000~2019年中国 PM<sub>2.5</sub> 时空演化特征 ..... 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 程先富(4832)

北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异 ..... 尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 郭恒, 刘湘雪, 熊亚军(4844)

基于天气背景天津大气污染输送特征分析 ..... 蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 姚青, 刘敬乐(4855)

基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件 ..... 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 朱晓婉, 董璠(4864)

基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源 ..... 孙佳宁, 谢绍东(4874)

芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析 ..... 高亢, 章慧, 刘梦迪, 赵晓宇, 吴婷, 贾其娜(4885)

密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应 ..... 张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双(4895)

北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探 ..... 陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 陶蕾, 荆红卫(4905)

2009~2018年太湖湖泛强度变化及其影响因素 ..... 辛华荣, 朱广伟, 王雷松, 李骏, 陆隽(4914)

雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征 ..... 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 陈雯, 刘怀庆(4924)

基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪 ..... 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 李健, 李霞, 殷志强(4936)

会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价 ..... 李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一(4948)

太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征 ..... 张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 郝强州, 李喜梅, 高鹏程(4958)

强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响 ..... 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海(4970)

长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序 ..... 苏超, 崔严(4981)

嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评价 ..... 杨延梅, 赵航晨, 孟睿, 何连生, 赵昊, 杜士林, 丁婷婷(4989)

污水处理厂对漓江桂林市河段淡水生物中微塑料累积的影响 ..... 谢元沅, 张清科, 张漓杉, 钟山, 刘俊勇, 侯晓映, 王华, 冯静培, 梁祖鸿, 陈舞阳(4999)

村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律 ..... 卢亚楠, 郭雅妮, 王坤, 陆伟东, 王拓, 柴玉峰, 柳蒙蒙, 钟慧, 陈梅雪, 魏源送(5008)

冬季小流域水体微生物多样性及影响因素 ..... 朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 王宝珍, 高润霞, 郭锐利, 李武斌(5016)

水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响 ..... 王彤, 文刚, 黄廷林, 司凡, 王晨旭, 路林超, 林薇(5027)

长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析 ..... 韩文杰, 吴迪, 周家中, 何强, 阚渝姣(5037)

类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响 ..... 郭芳, 顾继光, 赵剑, 余华章, 肖利娟(5050)

基于决策树的城市黑臭水体遥感分级 ..... 李玲玲, 李云梅, 吕恒, 徐杰, 杨子谦, 毕顺, 许佳峰(5060)

纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制 ..... 潘阳, 牛承鑫, 支忠祥, 王建辉, 陆雪琴, 戴金山, 甄广印, 孙彤彤, 康娜英(5073)

温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N<sub>2</sub>O 释放的影响 ..... 王丝可, 于恒, 左剑恶(5082)

以污泥发酵液与尾水混合液为补碳源的 A<sup>2</sup>/O 污染物去除特性 ..... 荣懿, 邵劲博, 于优城, 石恒, 金鹏康(5089)

不同曝气比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响 ..... 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清(5097)

中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响 ..... 田中科, 王芬, 闫钊(5106)

基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价 ..... 韩琳, 徐夕博(5114)

再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险 ..... 沈城, 刘霞雯, 吴健, 黄沈发, 王敏, 黄波涛(5125)

有机改性蒙脱土对苯的吸附机制和影响因子 ..... 侯静雯, 施维林, 高娟(5133)

硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉迁移的影响 ..... 李义纯, 陈勇, 唐明灯, 李林峰, 林晓扬, 王艳红, 许迪豪, 艾绍英(5143)

叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响 ..... 闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰(5151)

重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应 ..... 王晓宇, 韩辉(5160)

油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响 ..... 赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君(5168)

氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发影响 ..... 张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔(5176)

生物炭影响下土壤呼吸温度敏感性及细菌群落结构的变化 ..... 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 黄洋(5185)

铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响 ..... 贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰(5193)

典型水环境微生物源异味物研究进展 ..... 张海涵, 苗雨甜, 黄廷林, 刘凯文, 刘祥, 黄鑫, 杨尚业, 司凡, 李程遥(5201)

广告:国家微生物科学数据中心 ..... (前插)

《环境科学》征订启事(4785) 《环境科学》征稿简则(4947) 信息(5015, 5124, 5132)

## 村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律

卢亚楠<sup>1,2,3</sup>, 郭雅妮<sup>1</sup>, 王坤<sup>4</sup>, 陆伟东<sup>4</sup>, 王拓<sup>2,3</sup>, 柴玉峰<sup>3</sup>, 柳蒙蒙<sup>2,3</sup>, 钟慧<sup>2,3</sup>, 陈梅雪<sup>2,3\*</sup>, 魏源送<sup>2,3</sup>

(1. 西安工程大学环境与化学工程学院, 西安 710048; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院生态环境研究中心水污染控制实验室, 北京 100085; 4. 北京中斯水灵水处理技术有限公司, 北京 100048)

**摘要:** 抗生素的大量使用和直接排放已引起环境耐药性的增加, 村镇生活污水处理设施来源的抗生素尚未引起重视. 本文以 4 类(喹诺酮类、四环素类、大环内酯类和  $\beta$ -内酰胺类) 抗生素为研究对象, 采用超高效液相色谱和串联质谱法, 考察了不同规模村镇生活污水处理设施进出水中的抗生素浓度分布和去除情况, 并与城市生活污水厂进行了比较. 结果表明, 村镇生活污水处理设施中喹诺酮类氧氟沙星的进水排入浓度最高, 可达 32 663.5  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 随污水排放至环境的风险应引起重视. 与城市生活污水厂的水质稳定性、处理工艺、排放要求及管理水平不同, 仅有 33% 的村镇生活污水处理设施的检出抗生素去除率达到 60% 以上. 村镇生活污水处理设施保持常规污染物的达标排放可以实现部分抗生素的有效去除.

**关键词:** 农村; 生活污水处理设施; 去除率; 抗生素; 浓度分布

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)11-5008-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003143

## Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns

LU Ya-nan<sup>1,2,3</sup>, GUO Ya-ni<sup>1</sup>, WANG Kun<sup>4</sup>, LU Wei-dong<sup>4</sup>, WANG Tuo<sup>2,3</sup>, CHAI Yu-feng<sup>3</sup>, LIU Meng-meng<sup>2,3</sup>, ZHONG Hui<sup>2,3</sup>, CHEN Mei-xue<sup>2,3\*</sup>, WEI Yuan-song<sup>2,3</sup>

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Department of Water Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. Beijing Zhongsi Shuiling Water Treatment Technology Co., Ltd., Beijing 100048, China)

**Abstract:** Antibiotics discharged into the environment cause increased environmental resistance. Four types of antibiotics (quinolones, tetracyclines, macrolides, and  $\beta$ -lactams) were selected for this study. In a comparison with the municipal wastewater plant, the concentration and removal of antibiotics in influent and effluent of domestic wastewater treatment facilities of different scales in villages and towns was investigated using high-performance liquid chromatography (HPLC) and tandem mass spectrometry (MS). The results showed that the highest amount of ofloxacin in rural wastewater treatment facilities reached 32 663.5  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . Due to the different situations of influent fluctuation, discharge requirements, and management between urban and rural wastewater plants, only 33% of the rural domestic wastewater facilities detected an antibiotics removal rate of more than 60%. The effective removal of some antibiotics can be achieved when the rural domestic wastewater treatment facilities maintain the standard discharge of conventional pollutants.

**Key words:** rural; domestic wastewater treatment facilities; removal rate; antibiotic; concentration distribution

我国是抗生素消费的大国, 据统计 2013 年消耗的抗生素就高达 92 700 t<sup>[1]</sup>. 然而, 进入人或动物体内的抗生素未被完全吸收或降解, 残留的抗生素以粪便等形式进入到环境中<sup>[2]</sup>. Zhang 等<sup>[3]</sup>的研究表明我国 2013 年约有 36 种、共计 53 800 t 抗生素被排泄到环境中. 抗生素在土壤、沉积物、地表水和地下水等环境介质及饮用水系统均被检出<sup>[4-6]</sup>, 抗生素物质的健康风险值得关注<sup>[7]</sup>. 污水处理工艺是抗生素进入环境的途径之一<sup>[8]</sup>, 目前的研究大多关注城市污水厂新型污染物的迁移转化规律<sup>[9]</sup>. 虽然城镇居民对抗生素的使用已日趋规范, 但农村地区抗生素滥用现象仍然普遍<sup>[10]</sup>. 我国村镇人口居住分散、

污水水质水量变化系数大, 生活污水排放总量占全国生活污水排放量的 50% 以上<sup>[11,12]</sup>, 村镇分散型污水处理设施来源的抗生素应引起关注.

本文以 4 类(喹诺酮类、四环素类、大环内酯类和  $\beta$ -内酰胺类) 常见的 12 种抗生素作为研究对象, 选择 9 座不同规模村镇生活污水处理设施, 考察目标抗生素在进出水中的浓度分布和去除情况, 比较

收稿日期: 2020-03-21; 修订日期: 2020-04-29

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07106003)

作者简介: 卢亚楠(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制及持久性污染物的检测与分析, E-mail: 870677630@qq.com

\* 通信作者, E-mail: mxchen@rcees.ac.cn

村镇生活污水处理设施和城市生活污水处理厂对目标抗生素的去除效果, 以期为评价村镇生活源污水抗生素分布及赋存特征提供基础。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 仪器与试剂

本研究使用的甲醇、乙酸乙酯均为色谱纯, 购于美国 Fisher 公司;  $\text{Na}_2\text{EDTA}$ 、甲酸和盐酸均为分析纯, 纳氏试剂和酒石酸等药剂购于国药集团化学试剂有限公司; 超纯水由 Milli-Q 系统 (Advantage A10, Millipore) 制取。

1260/6420 型超高效液相色谱-质谱联用仪 (安捷伦科技有限公司); 超临界固相萃取装置 (美国 Waters 公司); Oasis HLB 型固相萃取柱 (美国 Waters 公司); SE812 型氮吹仪 (北京帅恩科技有限责任公司); 2-16P 高速离心机 (Sigma 公司); 便携式 pH 计 (德国 WTW 公司)。

### 1.2 样品采集

样品采集于 2019 年 1 月, 9 座村镇生活污水处理设施和 1 座城市生活污水处理厂的进水和出水 (进水取自格栅后原水, 城市污水厂和村镇污水处理设施的出水分别取自二沉池出水及设施出口)。用卡盖式采水器和 500 mL 气密性好的聚乙烯瓶分别进行 3 d 连续采样, 每 24 h 采集样品一次, 每次采集 500 mL, 共 1.5 L 将水样混合均匀。采样时, 选择水力紊流的位置, 样品瓶与水面保持一定的距离, 确保瓶中无气泡产生。样品采集后, 4℃ 低温避光保存, 并在 24 h 内进行样品处理。

9 座村镇生活污水处理设施的工艺均为 A/O 工艺, 处理规模如表 1 所示。W1 ~ W9 为不同规模的村镇生活污水处理设施, W10 为某城市生活污水处理厂。9 座村镇生活污水处理设施依次位于平原-山前-山区。从平原到山区, 由于人口聚集程度不同, 污水处理设施的规模从  $1\,500\ \text{t}\cdot\text{d}^{-1}$  减少至  $20\ \text{t}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

表 1 污水处理设施处理工艺和处理规模  
Table 1 Treatment process and treatment scale of sewage treatment facilities

序号	污水处理工艺	处理规模/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$
W1	A/O	1 000
W2	A/O	1 000
W3	A/O	1 500
W4	A/O	600
W5	A/O	500
W6	A/O	500
W7	A/O	50
W8	A/O	20
W9	A/O	20
W10	A <sup>2</sup> /O	200 000

### 1.3 处理设施常规水质测定

对采回的水样进行常规水质分析, 包括 COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP 以及  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  等, 分析方法参照文献 [13] 中的标准方法。

村镇生活污水处理设施对常规污染物的去除效果如表 2 所示。按照不同处理规模, W1 ~ W4 执行《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890-2012) 一级 A 排放标准, W5 和 W6 执行《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 11/1612-2019) 二级排放 A 标准, W7 ~ W9 执行《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 11/1612-2019) 二级排放 B 标准。根据不同排放标准, 9 处设施出水 COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 等主要指标已达到排放要求。

### 1.4 进出水中抗生素的分析

本研究选择北方冬季常用的 4 类 12 种抗生素为研究对象, 包括喹诺酮类: 氧氟沙星 (ofloxacin, OFX)、诺氟沙星 (norfloxacin, NOR)、恩诺沙星 (enrofloxacin, ENR) 和环丙沙星 (ciprofloxacin, CIP); 四环素类: 差向土霉素 (epi-oxytetracycline, EOTC)、土霉素 (oxytetracycline, OTC)、差向四环素 (epi-tetracycline, ETC) 和四环素 (tetracyclines, TC); 大环内酯类: 红霉素 (erythromycin, ERY) 和罗红霉素 (roxithromycin, ROX);  $\beta$ -内酰胺类: 青霉素 (penicillin, PCN) 和头孢噻肟 (cefotaxime, CFX), 根据前期研究抗生素同步检测方法 [14], 将采集的 400 mL 水样通过固相萃取提取和纯化, 并通过超高效液相色谱和串联质谱法进行测定。平行样品 3 次测定。

### 1.5 抗生素检测方法验证

抗生素检测结果的精准性和可靠性需要标准曲线、检测极限 (limit of detection, LOD)、定量限 (limit of quantitation, LOQ)、样品实际回收率和样品相对浓度标准偏差 (relative standard deviation, RSD) 的验证 [15]。采用外标法和内标法对样品中抗生素进行定量分析, 外标法即将不同梯度的目标抗生素标准液进行 LC-MS 分析绘制标准曲线, 内标法即将添加抗生素标准液的样品与未加入抗生素标准液的空白样品同时进行 SPE 和 LC-MS 分析, 检测两类样品中的抗生素浓度。基于标准曲线的相关性系数 ( $R^2$ ) 来评估, 每个化合物的 LOD 和 LOQ 定义是分别由最低浓度的 3 倍和 10 倍信噪比 (S/N) 产生 [14]。SPE 回收率是通过检测加标污水和基质匹配标准品的峰面积的比值来确定。

分析方法验证的结果见表 3, 12 种抗生素的相关性系数均  $R^2 \geq 0.99$ 。根据此方法确定了 12 种抗

表 2 污水处理设施的基本水质参数

Table 2 Basic water quality parameters of sewage treatment facilities

项目	COD		TN		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	
	浓度/mg·L <sup>-1</sup>	去除率/%	浓度/mg·L <sup>-1</sup>	去除率/%	浓度/mg·L <sup>-1</sup>	去除率/%
W1 进水	432.33 ± 429.86	95.76	29.22 ± 12.25	80.42	13.51 ± 7.37	95.19
W1 出水	18.33 ± 2.52		5.72 ± 3.94		0.65 ± 0.27	
W2 进水	171.33 ± 230.53	78.21	29.22 ± 12.59	49.31	10.64 ± 3.13	32.89
W2 出水	37.33 ± 8.5		14 ± 5.07		7.14 ± 5.74	
W3 进水	180.67 ± 71	92.62	22.81 ± 14.41	35.38	9.29 ± 5.04	75.98
W3 出水	13.33 ± 4.51		14.74 ± 3.23		2.23 ± 6.92	
W4 进水	102 ± 75.94	92.48	31.78 ± 7.61	44.49	19.15 ± 4.36	61.78
W4 出水	7.67 ± 8.62		17.64 ± 5.98		7.32 ± 5.15	
W5 进水	266.67 ± 314.73	92.38	28.91 ± 5.8	27.74	16.07 ± 4.13	96.58
W5 出水	20.33 ± 7.77		20.89 ± 11.25		0.55 ± 0.57	
W6 进水	221.33 ± 7.37	87.95	42.59 ± 5.9	15	38.5 ± 20.74	84.96
W6 出水	26.67 ± 4.04		36.1 ± 4.94		5.79 ± 9.2	
W7 进水	51 ± 48.66	81.71	17.05 ± 10.34	54.08	5.59 ± 3.98	88.01
W7 出水	9.33 ± 2.08		7.83 ± 4.03		0.67 ± 0.64	
W8 进水	60 ± 75.02	84.45	19.57 ± 10.06	71	4.91 ± 0.36	67
W8 出水	9.33 ± 2.52		5.6 ± 2.61		1.59 ± 1.94	
W9 进水	118.33 ± 33.72	83.67	34.38 ± 7.81	3.78	7.7 ± 1.32	92.47
W9 出水	19.33 ± 4.72		33.08 ± 6.28		0.58 ± 0.47	
W10 进水	320 ± 80	87.81	83 ± 21	85.54	55.05 ± 8.7	92.73
W10 出水	39 ± 12.5		12 ± 5.4		4 ± 2.3	
项目	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N /mg·L <sup>-1</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P 浓度/mg·L <sup>-1</sup>	去除率/%	TP 浓度/mg·L <sup>-1</sup>	去除率/%	pH
W1 进水	0.74 ± 1.05	0.77 ± 0.5	96.1	13.32 ± 4.63	95.72	6.74
W1 出水	3.92 ± 3.75	0.03 ± 0.01		0.57 ± 0.39		6.8
W2 进水	0.29 ± 0.51	0.45 ± 0.14	71.11	5.28 ± 2.36	91.67	7.05
W2 出水	8.66 ± 3.07	0.13 ± 0.17		0.44 ± 0.39		7.21
W3 进水	0.96 ± 2.36	1.7 ± 1.57	81.18	25.74 ± 15.73	96.5	6.65
W3 出水	8.04 ± 8.69	0.32 ± 0.03		0.9 ± 0.41		6.64
W4 进水	0.53 ± 0.56	1.2 ± 0.72	62.5	15.87 ± 5	95.27	6.61
W4 出水	13.86 ± 2.3	0.45 ± 0.18		0.75 ± 0.09		7.06
W5 进水	0.31 ± 0.12	1.75 ± 1.71	72.58	16.19 ± 17.67	97.76	6.75
W5 出水	7.46 ± 1.37	0.08 ± 0.06		0.33 ± 0.68		6.7
W6 进水	0.54 ± 0.16	2.04 ± 1.78	98.04	25.6 ± 12.59	98.67	6.59
W6 出水	0.34 ± 0.13	0.04 ± 0.02		0.34 ± 0.1		6.73
W7 进水	1.02 ± 0.71	1.03 ± 0.57	46.62	6.32 ± 4.74	86.71	6.7
W7 出水	5.78 ± 1.79	0.55 ± 0.18		0.84 ± 0.82		6.85
W8 进水	4.22 ± 0.27	0.1 ± 0.17	78.57	1.41 ± 0.31	71.63	6.93
W8 出水	4.96 ± 1.43	0.03 ± 0.01		0.4 ± 0.12		7.03
W9 进水	0.8 ± 0.34	1.18 ± 0.52	48.31	7.53 ± 20.35	87.25	6.82
W9 出水	14.5 ± 3.53	0.61 ± 0.08		0.96 ± 0.58		6.82
W10 进水	0.156 ± 0.07	5.03 ± 0.64	98.21	5.75 ± 3.8	96.52	6.7
W10 出水	7.5811 ± 3.2	0.09 ± 0.02		0.2 ± 0.04		7.17

生素的加标回收率范围为 76.8% ± 0.25% ~ 159.17.10% ± 1.12%。除 PCN 和 CFX 两种抗生素的回收率分别为 78.01% 和 76.80% 以外,大部分抗生素的回收率都在 80% 以上。

## 2 结果与讨论

### 2.1 进出水抗生素浓度分布

不同污水处理设施的进出水抗生素浓度如图 1

表 3 目标抗生素的相关系数、线性范围、回收率和检出限

Table 3 Correlation coefficient, linear range, recovery rate and detection limit of targeted antibiotics

抗生素类别	目标物	相关系数	LOD/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	LOQ/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	回收率/%	RSD/%
喹诺酮类	OFX	0.998	0.14	0.46	98.00 ± 0.85	0.97
	NOR	0.999	0.75	3.00	84.97 ± 0.16	0.18
	ENR	0.997	0.24	0.79	110.58 ± 0.64	0.68
	CIP	0.998	0.68	2.25	104.06 ± 1.00	1.17
四环素类	EOTC	0.999	2.00	5.00	159.17 ± 1.11	1.12
	OTC	0.999	1.70	6.00	150.67 ± 0.03	0.03
	ETC	0.995	0.50	1.50	92.96 ± 1.38	1.56
	TC	0.990	2.80	9.00	119.90 ± 1.04	1.25
大环内酯类	ERY	0.994	0.08	0.27	95.84 ± 0.08	0.59
	ROX	0.998	0.20	0.80	89.51 ± 0.60	0.60
$\beta$ -内酰胺类	PCN	0.992	0.40	1.30	78.01 ± 0.19	0.25
	CFX	0.993	0.60	2.00	76.80 ± 0.94	0.98

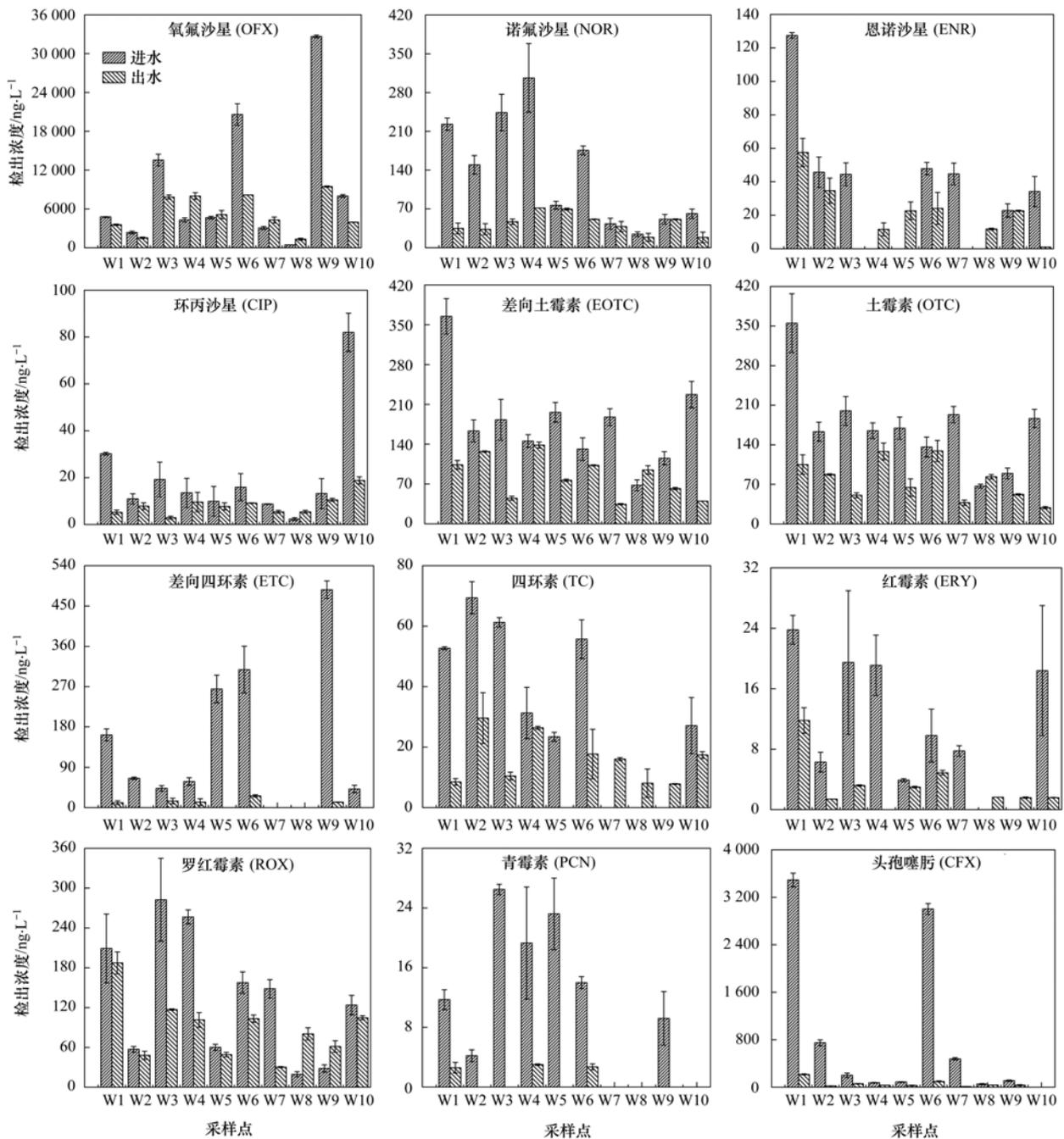


图 1 污水处理设施进出水的抗生素浓度

Fig. 1 Antibiotic concentration in the sewage treatment facility

所示. 喹诺酮类抗生素药物是应用最广泛的广谱抗菌药之一<sup>[16-18]</sup>, 其中 OFX 在人体内的代谢量有限, 大部分摄入体内的药物以原药排出. 本研究喹诺酮类药物中特别是 OFX 在村镇和城市污水厂中进水检出浓度均最高, 可分别达到  $32\,663.5\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $8\,011.12\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . 大部分村镇生活污水处理设施进水中的 NOR 浓度高于城市生活污水厂进水 1.25 ~ 5 倍, ENR 浓度高于城市生活污水厂进水 1.3 ~ 3.73 倍. CIP 在城市生活污水厂中的进水浓度高于村镇生活污水处理设施进水 2.72 ~ 35.5 倍. 四环素类药物中, ETC 在村镇生活污水处理设施中进水检出浓度最高, 可达到  $486.6\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ; EOTC 在城市生活污水厂中进水检出浓度最高, 可达到  $227.2\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . TC 的进水检出浓度最低, 在村镇生活污水处理设施的进水浓度高于城市生活污水厂进水 1.15 ~ 2.06 倍. 在城市生活污水厂中的进水浓度高于大部分村镇生活污水处理设施进水 1.1 ~ 2.79 倍. 大环内酯类药物中, ROX 在村镇和城市污水厂中进水检出浓度均最高, 可分别达到  $282.52\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $123.7\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . ERY 在城市生活污水厂中的进水浓度高于大部分村镇生活污水处理设施进水 1.88 ~ 4.72 倍.  $\beta$ -内酰胺类药物中, PCN 和 CFX 在城市生活污水厂中未检出. CFX 在村镇生活污水处理设施中进水的检出浓度可高达  $3\,003.7\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 而 PCN 在村镇生活污水处理设施中进水的检出浓度最高达到  $26.49\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ .

同时发现某些村镇生活污水处理设施出水抗生素浓度大于进水抗生素浓度, 例如喹诺酮类药物 OFX 在 W4、W5、W7 和 W8 中, CIP 与四环素类药物 EOTC 和 OTC 在 W8 中, 大环内酯类药物 ROX 在 W8 和 W9 中的出水浓度都高于进水浓度. 这可能与村镇生活排水的不稳定性相关, 由于村镇生活污水排放的总变化系数较大, 瞬时采样可能造成结果误差<sup>[19]</sup>. 同时, 村镇生活污水处理设施的运行管理水平显著低于城市生活污水厂, 出水吸附在悬浮物或污泥中的抗生素释放到水体中, 可能导致水中抗生素含量上升<sup>[20]</sup>.

总体而言, 除 CIP、EOTC 和 ERY 外, 村镇生活污水处理设施中的喹诺酮类、四环素类、大环内酯类和  $\beta$ -内酰胺类抗生素在进水中的检出浓度显著高于城镇生活污水厂进水中的浓度, 农村社区的抗生素规范用药问题值得关注. 同时, 村镇生活污水排放具有分散性特征, 但是从总量上来说, 我国村镇生活污水的年排放量达到 20 亿  $\text{t}^{[21]}$ , 而 2017 年建制镇和村庄污水处理设施建设率仅为 47.06% 和 22%<sup>[22]</sup>. 因此, 抗生素随村镇生活污水排放应引起

重视.

## 2.2 村镇生活污水处理设施对抗生素的去除

由于不同污水设施水质和水量差异较大, 村镇生活污水处理设施的抗生素去除率波动也大. 除 NOR、TC 和 ROX 外, 其他 9 种检出抗生素在村镇生活污水处理设施的去除普遍低于城市生活污水厂的去 除效果.  $\beta$ -内酰胺类药物 PCN 和 CFX 在城市生活污水厂进水中无检出, 但在村镇生活污水处理设施中有较好的去除率, 由于  $\beta$ -内酰胺类药物在水中易分解<sup>[23-25]</sup>, 因此虽然在收集距离较短的村镇生活污水处理设施进水中可以被检测出, 也会随着处理过程进行降解.

根据表 4 可知, 尽管村镇生活污水处理设施的常规污染物指标都能达到相应的排放标准, 但是不同设施对抗生素的去除效率相差较大. 只有 3 座村镇污水设施 (W1、W3 和 W7) 对所有检出抗生素的去除率能达到 60% 以上, 除 W3 和 W7 外, 其他 7 座村镇生活污水处理设施的检出抗生素去除率均低于城市生活污水厂. 村镇污水处理设施对抗生素的去除能力有待提升.

村镇生活污水处理设施的进水水质波动较大, 其中 COD 在  $51.0\sim 432.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TN 在  $17.05\sim 42.59\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在  $4.91\sim 38.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  在  $0.1\sim 2.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TP 在  $1.41\sim 25.74\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 从常规污染物去除率来看, 9 座村镇生活污水处理设施的 COD 均能达到 78% 以上的去除, 小规模村镇生活污水处理设施的 COD 去除率略低于城市污水厂; 村镇生活污水处理设施的 TN 去除效果明显低于城市污水厂, 除 W1 的 TN 去除率达 80% 以上, W2 ~ W9 的 TN 去除率在 3% ~ 71% 之间; 村镇生活污水处理设施的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除效果有较大的差别, W1 的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率达 95% 以上, W2 仅有 33% 的去除; 村镇生活污水处理设施的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率均低于城市污水厂, 小型规模污水站的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除效果不佳; 污水站的 TP 均能达到 70% 以上的去除. COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 以及  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  等指标也影响着抗生素的去除<sup>[26]</sup>.

图 2 采用冗余分析 (RDA) 可以看出, W1 ~ W6 设施的 COD、TP 和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除与 12 类目标抗生素的降解率均存在相关性. 村镇生活污水处理设施的排放以 COD 为主要控制指标, 主要采用 A/O 工艺, 在达到 COD 良好去除的情况下, 包括四环素类 (EOTC、OTC、ETC、TC)、喹诺酮类 (OFX、NOR、ENR、CIP)、大环内酯类 (ERY、ROX) 和  $\beta$ -内酰胺类 (PCN) 等大部分抗生素可以得到有效去除. W10 污

表 4 污水处理设施的抗生素去除率/%

Table 4 Antibiotic removal rate of sewage treatment facilities/%

抗生素	化合物	W1	W2	W3	W4	W5
喹诺酮类	OFX	25.14 ± 1.52	34.87 ± 1.03	42.09 ± 1.62	— <sup>1)</sup>	—
	NOR	84.35 ± 3.57	77.89 ± 4.17	80.76 ± 0.60	76.57 ± 4.93	8.90 ± 6.29
	ENR	54.90 ± 6.02	24.07 ± 1.35	100 ± 0	—	—
	CIP	82.78 ± 2.66	28.44 ± 1.68	84.90 ± 3.24	28.89 ± 3.00	22.22 ± 14.84
四环素类	EOTC	71.63 ± 0.36	22.17 ± 8.67	75.53 ± 2.97	4.88 ± 3.77	60.97 ± 2.47
	OTC	70.43 ± 0.56	46.35 ± 4.73	74.66 ± 1.08	22.20 ± 2.38	62.04 ± 4.83
	ETC	93.29 ± 2.11	100 ± 0	65.92 ± 9.77	78.79 ± 10.22	100 ± 0
	TC	83.87 ± 1.94	57.35 ± 8.91	82.98 ± 1.68	15.65 ± 11.85	100 ± 0
大环内酯类	ERY	50.42 ± 3.21	77.78 ± 4.82	83.51 ± 10.26	100 ± 0	23.08 ± 1.38
	ROX	10.38 ± 8.09	15.76 ± 4.40	58.54 ± 9.33	60.44 ± 2.70	18.11 ± 0.64
β-内酰胺类	PCN	77.78 ± 3.49	100 ± 0	100 ± 0	84.46 ± 6.67	100 ± 0
	CFX	93.78 ± 0.05	97.02 ± 0.15	70.19 ± 3.83	56.69 ± 2.08	66.51 ± 4.45
总和		66.56	56.79	76.59	52.86	56.18
抗生素	化合物	W6	W7	W8	W9	W10
喹诺酮类	OFX	60.43 ± 3.20	—	—	71.04 ± 0.14	50.88 ± 1.05
	NOR	70.86 ± 1.04	11.99 ± 1.66	22.92 ± 17.53	0.39 ± 9.14	69.98 ± 11.81
	ENR	49.69 ± 16.06	100 ± 0	—	0.44 ± 9.72	97.08 ± 0.84
	CIP	42.77 ± 23.87	37.93 ± 6.18	—	20.45 ± 16.20	77.07 ± 0.47
四环素类	EOTC	21.72 ± 11.43	81.64 ± 0.87	—	46.22 ± 3.81	82.48 ± 1.77
	OTC	5.07 ± 1.57	80.59 ± 0.99	—	41.43 ± 5.11	84.50 ± 0.31
	ETC	91.49 ± 0.66	—	—	97.49 ± 0.22	100 ± 0
	TC	68.22 ± 11.24	—	—	—	35.79 ± 20.77
大环内酯类	ERY	50.00 ± 17.32	100 ± 0	—	—	91.30 ± 5.17
	ROX	34.50 ± 3.32	79.55 ± 1.46	—	—	15.36 ± 7.76
β-内酰胺类	PCN	80.71 ± 1.76	—	—	100 ± 0	—
	CFX	96.76 ± 0.17	97.63 ± 0.34	28.38 ± 9.15	68.21 ± 4.82	—
总和		56.02	73.67	25.65	49.52	70.45

1) “—”表示文章中没有相关数据 2.3 抗生素去除与常规污染物去除的相关性

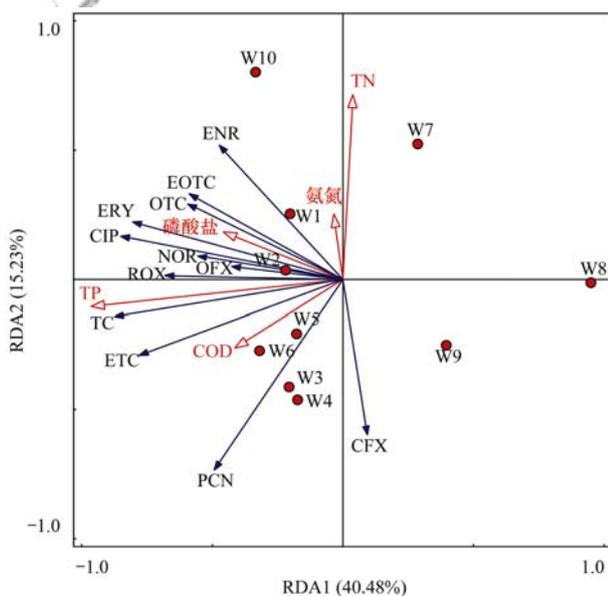


图 2 抗生素的去除率与基本水质参数的去除率的相关性分析  
Fig. 2 Correlation analysis between the removal rate of antibiotics and the removal rate of basic water quality parameters

工艺,脱氮效果较好,四环素类(OTC、EOTC)和喹诺酮类(ENR)的去除效果也较好.表明保持较好的常规污染物去除可以同时实现部分抗生素的有效去除.

### 3 结论

(1)村镇生活污水处理设施的进出水的常规水质均能分别满足排放标准.村镇生活污水处理设施的 OFX 进水浓度最高.除 CIP、EOTC 和 ERY 外,村镇生活污水处理设施中的喹诺酮类、四环素类、大环内酯类和 β-内酰胺类抗生素在进水中的检出浓度显著高于城镇生活污水厂进水中的浓度.

(2)除 NOR、TC 和 ROX 外,其他检出抗生素在村镇生活污水处理设施的去除普遍低于城市生活污水处理厂的去除效果.仅 33% 的村镇污水设施的抗生素去除率达到 60% 以上.村镇污水处理设施对抗生素的去除能力有待提升.

(3)将抗生素去除率和基本水质参数(COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)去除率进行相关性分析,村镇生活污水处理设施中 COD 的去除与四环素类

水厂的 TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除与 OTC、EOTC 和 ENR 的降解效率呈正相关性,城镇生活污水处理厂采用 A<sup>2</sup>/O

(ETC、TC)、喹诺酮类(OFX、NOR、ENR)、大环内酯类(ERY)和 $\beta$ -内酰胺类(PCN、CFX)等抗生素的去除效率呈正相关性. 加强村镇生活污水处理设施的运行维护保证常规污染物排放达标可以实现大部分抗生素的有效去除.

#### 参考文献:

- [1] Michael I, Rizzo L, McArdell C S, *et al.* Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of antibiotics in the environment: a review [J]. *Water Research*, 2013, **47**(3): 957-995.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Gao J, Pedersen J A. Adsorption of sulfonamide antimicrobial agents to clay minerals [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(24): 9509-9516.
- [5] 王双玲, 王礼, 周贺, 等. 饮用水系统中抗生素抗性基因的研究进展[J]. *环境化学*, 2017, **36**(2): 229-240.  
Wang S L, Wang L, Zhou H, *et al.* An overview on antibiotic resistance genes in drinking water systems [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(2): 229-240.
- [6] 刘昔, 王智, 王学雷, 等. 我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2094-2100.  
Liu X, Wang Z, Wang X L, *et al.* Status of antibiotic contamination and ecological risks assessment of several typical Chinese surface-water environments [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2094-2100.
- [7] Xie W Y, Shen Q, Zhao F J. Antibiotics and antibiotic resistance from animal manures to soil: a review [J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, **69**(1): 181-195.
- [8] 周海东, 黄霞, 文湘华. 城市污水中有关新型微污染物PPCPs归趋研究的进展[J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(12): 1-9.  
Zhou H D, Huang X, Wen X H. Progress of the studies on occurrence and fate of new emerging micro-pollutants-PPCPs in municipal wastewaters [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, **1**(12): 1-9.
- [9] Sun Q, Li M Y, Ma C, *et al.* Seasonal and spatial variations of PPCP occurrence, removal and mass loading in three wastewater treatment plants located in different urbanization areas in Xiamen, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **208**: 371-381.
- [10] 刘叶, 杨悦. 我国抗生素滥用现状分析及建议[J]. *中国现代医生*, 2016, **54**(29): 160-164.  
Liu Y, Yang Y. The analysis and suggestion about antibiotics abuse in China [J]. *China Modern Doctor*, 2016, **54**(29): 160-164.
- [11] Lu M Q, Niu X J, Chen W Y, *et al.* Phosphine production in anaerobic wastewater treatment under tetracycline antibiotic pressure [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **69**: 239-250.
- [12] 周文理, 柳蒙蒙, 柴玉峰, 等. 我国村镇生活污水治理技术标准体系构建的探讨[J]. *给水排水*, 2018, **44**(2): 9-14.  
Zhou W L, Liu M M, Chai Y F. Discussion on establishment of technical standard system of domestic wastewater in villages and towns of China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, **44**(2): 9-14.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 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.
- [15] March-Rosselló G A. Rapid methods for detection of bacterial resistance to antibiotics [J]. *Enfermedades Infecciosas Y Microbiología Clínica (English ed.)*, 2017, **35**(3): 182-188.
- [16] 洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 等. 固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的10种磺胺类抗生素[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 652-657.  
Hong L J, Shi L, Zhang Y L, *et al.* Simultaneous determination of 10 sulfonamide antibiotics in water by solid-phase extraction and high performance liquid chromatography [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 652-657.
- [17] 汪昆平, 章琴琴, 郭劲松, 等. 环境中氟喹诺酮类抗生素残留检测和去除研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2012, **12**(2): 104-110.  
Wang K P, Zhang Q Q, Guo J S, *et al.* Review of the determination of fluoroquinolones in the environment and its removal from the sewage [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, **12**(2): 104-110.
- [18] 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.
- [19] 江珊. 废水水质检测化验误差分析与质控措施[J]. *中国资源综合利用*, 2018, **36**(1): 162-164.  
Jiang S. Analysis of error analysis and data processing of wastewater quality testing [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2018, **36**(1): 162-164.
- [20] 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.
- [21] 陈子爱, 贺莉, 施国中, 等. 农村生活污水排放量及特性分析[J]. *中国沼气*, 2016, **34**(4): 67-69.  
Chen Z A, He L, Shi G Z, *et al.* Analysis of domestic wastewater emissions in rural area and characteristics [J]. *China Biogas*, 2016, **34**(4): 67-69.
- [22] 薛利. 关于村镇污水处理以及利用方式的探讨研究[J]. *中国资源综合利用*, 2018, **36**(10): 84-86.  
Xue L. The research and analysis on sewage treatment and utilization in villages and towns [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2018, **36**(10): 84-86.
- [23] 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.
- [24] 佟娟, 王元月, 魏源送. 城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(10): 3814-3820.  
Tong J, Wang Y Y, Wei Y S. Distribution and removal of anaerobic antibiotic resistant bacteria during mesophilic anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(10): 3814-3820.
- [25] 潘祖亭, 王润涛, 颜承农. 金属离子催化 $\beta$ -内酰胺类抗生素水解的荧光光谱研究[J]. *分析试验室*, 2001, 20(4): 1-5.  
Pan Z T, Wang R T, Yan C N. Study on catalyzed hydrolysis of  $\beta$ -lactams antibiotics by metal ions with spectrofluorimetry [J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2001, 20(4): 1-5.
- [26] 陈燕. 我国农村生活污水的治理[J]. *环境与发展*, 2018, 30(3): 76, 78.  
Chen Y. China's rural sewage treatment [J]. *Inner Mongolia Environmental Sciences*, 2018, 30(3): 76, 78.

## 《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2019年11月19日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续18次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.

环境科学

## CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China .....	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, <i>et al.</i> (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China .....	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient PM <sub>2.5</sub> : A Case Study of the Yangtze River Delta .....	..... ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area .....	ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, <i>et al.</i> (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Zhengzhou .....	ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, <i>et al.</i> (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in PM <sub>2.5</sub> in Shanxi University Town .....	LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, <i>et al.</i> (4825)
Spatio-temporal Evolution of PM <sub>2.5</sub> Concentration During 2000-2019 in China .....	XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, <i>et al.</i> (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing .....	YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, <i>et al.</i> (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background .....	CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification .....	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data .....	SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu .....	GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, <i>et al.</i> (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir .....	ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, <i>et al.</i> (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer .....	CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, <i>et al.</i> (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018 .....	XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, <i>et al.</i> (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula .....	ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, <i>et al.</i> (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes .....	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, <i>et al.</i> (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China .....	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, <i>et al.</i> (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve .....	ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain .....	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin .....	SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network .....	YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, <i>et al.</i> (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section .....	..... XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, <i>et al.</i> (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns .....	LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, <i>et al.</i> (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter .....	ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, <i>et al.</i> (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier .....	WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta .....	HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China .....	..... GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree .....	LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism .....	..... PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, <i>et al.</i> (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N <sub>2</sub> O Release of ANAMMOX Process .....	WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A <sup>2</sup> /O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source .....	..... RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, <i>et al.</i> (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules .....	..... ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge .....	TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics .....	HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites .....	SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, <i>et al.</i> (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors .....	HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System .....	LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (5143)
Effects of Intercropping of <i>Brassica chinensis</i> L. and <i>Tagetes patula</i> L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants .....	YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides .....	WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation .....	ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, <i>et al.</i> (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China .....	ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, <i>et al.</i> (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure .....	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings Area .....	..... JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, <i>et al.</i> (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems .....	ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5201)