

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM_{2.5} 清除作用 孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)

降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)

北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)

浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)

2014 年 APEC 期间北京市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 氧化性损伤能力研究 郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)

武汉市洪山区夏季 PM_{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 翟程凯 (3714)

基于快速聚类方法分析常州市区 PM_{2.5} 的统计特性 王振, 余益军, 徐圃青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)

PM_{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)

树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)

轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴焯, 胡京南, 郝吉明 (3743)

基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)

西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)

生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)

三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)

城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)

基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)

贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)

多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 钱锋, 吴婕贻, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)

地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)

昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)

滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)

紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)

排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)

快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 李洁, 肖琳 (3850)

一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)

生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性 宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)

聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)

典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)

O₃/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)

蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)

2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)

不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)

长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)

焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)

黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)

苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)

城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)

菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)

生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)

模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)

生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)

土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)

土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)

组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)

几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)

蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)

不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)

黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)

挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)

中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)

《环境科学》征订启事 (3827) 《环境科学》征稿简则 (4053) 信息 (3736, 3930, 4043)

城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究

黄福义¹, 李虎^{1,2}, 安新丽^{1,2}, 欧阳纬莹^{1,2}, 苏建强^{1*}

(1. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为研究城市生活污水(接收生活垃圾渗滤液后合并进入污水厂处理)和垃圾渗滤液中抗生素抗性的分布格局,采用高通量荧光定量 PCR 技术对城市生活污水和生活垃圾渗滤液中的抗生素抗性基因的多样性和丰度进行了分析. 结果表明,生活垃圾渗滤液中检测出 39 种抗性基因,城市生活污水中检测出 187 种抗性基因,两者检出的抗生素抗性种类有显著差异($P < 0.05$);相对于垃圾渗滤液,城市生活污水抗生素抗性基因有 119 种显著增加($P < 0.05$),其中增加倍数最大的是转座子 *tnpA-04* 基因, *bla_{VEB}* 基因,分别达到了 3 338 倍和 1 061 倍,表明可移动元件转座子基因和 β -内酰胺类抗生素抗性基因在城市生活污水中得到有效富集和传播;城市生活污水是环境抗生素抗性基因的重要存储库.

关键词: 城市生活污水; 生活垃圾渗滤液; 抗生素; 抗生素抗性基因; 高通量定量 PCR

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3949-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.037

Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate

HUANG Fu-yi¹, LI Hu^{1,2}, AN Xin-li^{1,2}, OUYANG Wei-ying^{1,2}, SU Jian-qiang^{1*}

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The increasing output of wastewater and landfill leachate during the rapid urbanization exacerbated the human health risks induced by antibiotic resistance genes (ARGs). For further insight into antibiotic resistance genes (ARGs) of wastewater (adding leachate before treatment) and landfill leachate, high-throughput qPCR technique was used to investigate their abundance and diversities. A total of 187 unique ARGs were detected in wastewater, which was significantly higher than that in leachate (39 unique ARGs were detected) ($P < 0.05$). A total of 119 antibiotic resistance genes were significantly enriched in wastewater compared with the landfill leachate ($P < 0.05$), especially the *tnpA-04* and *bla_{VEB}*, which belongs to mobile gene elements (MGEs) and β -Lactamase, increased by 3 338-fold and 1 061-fold, respectively. Our results showed that the profile of ARGs was significantly different between the wastewater and leachate, and the wastewater was the important reservoir of ARGs.

Key words: wastewater; landfill leachate; antibiotic; antibiotic resistance genes; high-throughput qPCR

随着我国新型城镇化的不断推进以及城市人口的持续增加,城市生活污水和生活垃圾的产生量也不断增加. 城市生活污水和生活垃圾填埋场产生的垃圾渗滤液是城市环境保护工作的重点和难点. 抗生素在养殖、医疗保健等行业被广泛使用,并存在着过度使用、长期滥用等现象,并且产生了严重的环境抗生素抗性的问题,抗生素抗性基因在环境中不断传播与富集,严重危害人类健康与环境安全. 各种环境介质中,包括猪场土壤^[1,2]、污泥堆肥^[3,4]、城市河流水体^[5]、施用猪粪水稻土^[6],甚至自来水^[7,8]中也检测出环境抗生素抗性基因,环境抗生素抗性基因研究取得了一些进展^[9]. Pruden 等^[10]2006 年首次提出将抗生素抗性基因作为一种新型环境污染物,逐渐引起全球科学家和公众的高度关注.

城市生活污水主要是指城市生活中的各种餐厨污水、垃圾、粪便、洗涤剂等各种污染水体形成的混合污水,氮、磷、硫等营养元素含量较高,微生物含量高,并且含有病原微生物^[11,12]. 生活垃圾填埋场是城市生活垃圾、污水厂的处置污泥、电子废弃物、垃圾焚烧厂飞灰残渣等固体废弃物的主要最终堆放场所. 垃圾渗滤液是伴随垃圾填埋场运营整个生命周期的“二次污染物”. 生活垃圾渗滤液具有污染物成分复杂,污染物浓度高的特点,相较于城市生活污水,其高浓度的氨氮、有毒有害物质,重金属离

收稿日期: 2016-03-04; 修订日期: 2016-05-16

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFD0800205); 国家自然科学基金项目(31270153); 国家自然科学基金国际(地区)合作交流项目(21210008)

作者简介: 黄福义(1987~),男,硕士,助理工程师,主要研究方向环境抗生素抗性基因污染, E-mail: fyhuang@iue.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: jqsu@iue.ac.cn

子等特征形成了一个特殊环境,尤其是场龄大于 5 a 的垃圾渗滤液可生化性差^[13]. 受人类生产生活的影 响,城市生活污水和垃圾渗滤液中含有抗生素残留以及抗生素抗性的微生物,被认为是环境抗生素抗性的一个重要存储库^[14~16].

由于垃圾渗滤液深度处理后产生了难以处理的浓缩液,垃圾渗滤液(包括浓缩液)往往被运送到城市生活污水处理厂进行合并处理^[13,17]. 目前,城市生活污水处理过程中的抗生素抗性基因污染分布及演变有较多相关研究^[18,19],并且主要是针对磺胺类、四环素类等少数几种抗生素抗性基因. 针对城市生活污水(接收垃圾渗滤液进行合并处理)和生活垃圾渗滤液环境抗生素抗性的对比研究,从抗生素抗性谱的角度全面研究这两者间的抗性基因污染还没有或者比较少相关研究报道. 因此,对城市生活污水和生活垃圾渗滤液中抗生素抗性种类、分布格局开展对比研究,比较两者之间的异同,综合分析研究城市生活污水和垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染状况,对于加强城市生活污水和垃圾渗滤液管理与处置,评估两者的生态安全情势和环境风险显得十分必要.

1 材料与方 法

1.1 样品采集及前处理

城市生活污水样品于 2015 年 7 月采集自厦门市某污水处理厂(接收厦门市东部固废处理中心生活垃圾填埋场部分的垃圾渗滤液和垃圾渗滤液处置后浓缩液)的进水样品 1 L(3 个采样平行样品),其中添加了终浓度为 50% 乙醇进行预处理,用于固定污水中微生物. 生活垃圾渗滤液采样地点位于厦门市东部固废处理中心生活垃圾填埋场,于 2015 年 7 月采集了垃圾渗滤液调节池末端,也是渗滤液处理站污水进口端样品 1 L(3 个采样平行样品),同样在采集样品中添加了乙醇进行预处理. 所采集的城市生活污水和生活垃圾渗滤液,存放在低温采样箱中并迅速转移至实验室的 -20°C 冰箱中保存,用于环境样品的 DNA 提取.

1.2 城市生活污水和生活垃圾渗滤液 DNA 提取

量取城市生活污水(raw wastewater, RW)和生活垃圾渗滤液(raw leachate, RLC)各 40 mL,分装到 50 mL 离心管中,使用 $12\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速离心 10 min,倒掉上清液,每个离心管中再加入 1 mL 生理盐水,振荡并悬浮起离心管底部固体,从而达到清洗效果. 再将离心管中的全部样品分别转移至新的 1.5

mL 离心管中, $18\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速离心后,弃去上清液. 然后加入 FastDNA[®] Spin Kit for Soil 试剂盒(MP Biomedicals, 美国)中的 PBS 缓冲液(978 μL).

随后将上述含有采集样品的 PBS 缓冲液转移至试剂盒中的 Lysing Matrix E tube,按照生产商提供的方法提取样品中的总 DNA,然后用 1% 的琼脂糖凝胶进行电泳验证. 样品所提取的 DNA 样品用 QuantiFluor[®] dsDNA System (Promega Corporation, 美国)试剂盒测定双链 DNA 浓度. 根据测定的样品 DNA 浓度,实验样品用灭菌的超纯水统一稀释至 $50\text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$.

1.3 高通量荧光定量 PCR

采用 SmartChip Real-Time PCR Systems (WaferGen Inc., 美国)高通量荧光定量反应平台. 研究中所采用的 293 对引物在先前的相关的研究中被有效验证过^[1]. 此外另外添加了 1 对用于检定超级细菌抗生素抗性基因 *bla*_{NDM-1} 的引物^[20], 1 对 *intI1* 整合子基因(class 1 integron)引物^[21]和 1 对 *CintII* 临床医学意义上的整合子基因(clinical class 1 integron)引物^[22].

PCR 扩增反应的体积为 100 nL. 反应体系中各试剂的终浓度为: $1\times$ 的 LightCycler 480 SYBR[®] Green I Master Mix (Roche, 美国), nuclease-free PCR-grade water, $1\text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ 的 BSA, $5\text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ 的 DNA 模板, $1\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的上下游引物. PCR 反应条件为: 95°C 预变性 10 min; 95°C 变性 30 s, 60°C 退火延伸 30 s, 总共 40 个循环; 仪器程序自动升温进行熔解曲线分析. 高通量定量 PCR 每个芯片都有不添加 DNA 模板的阴性对照. qPCR 反应得到的数据通过 Cyclor 预设定的筛选条件(扩增效率介于 1.8 ~ 2.2)进行导出. 根据 SmartChip Real-Time PCR Systems 的灵敏度和精确度,确定循环次数 C_T 值为 31 时作为仪器的检测限. 每个样品都进行 3 次技术重复实验,当 3 次技术重复都被扩增出来时认为是阳性扩增,3 个采样平行样品都是阳性扩增时,认为样品的目的基因被有效检出.

1.4 数据分析

基因的相对拷贝数(gene relative copy number)参照 Looft 等^[23]的研究,用公式(1)进行估算. 根据 Schmittgen 等^[24]关于相对定量分析方法,用 FC (fold change) 值,采用公式(2)来计算表征相对于城市生活污水对照样品,生活垃圾渗滤液的抗生素抗性的富集或者衰减状况.

$$\text{基因的相对拷贝数} = 10^{[(31 - C_T)/(10/3)]} \quad (1)$$

$$\Delta C_T = C_{T(\text{ARG})} - C_{T(16S)}$$

$$\Delta\Delta C_T = \Delta C_{T(\text{Target})} - \Delta C_{T(\text{Ref})} \quad (2)$$

$$FC = 2^{(-\Delta\Delta C_T)}$$

式中, C_T 是 PCR 反应收集到特定荧光时的循环次数, ARG 代表抗生素抗性基因, 16S 是代表 16S rDNA 基因, Target 是环境实验样品, Ref 是对照样品, FC 是 ARGs 拷贝数的富集或衰减程度. 当 $FC = 2^{[-(\Delta\Delta C_T + 2.5)]} > 1$ 时, 且 student t 检验具有显著性时, 认为环境实验样品相对于对照样品显著富集.

2 结果与讨论

2.1 城市生活污水和垃圾渗滤液中抗生素抗性基因的多样性

根据实验中使用的 296 对引物, 按照基因对应抗生素类型分为氨基糖苷类抗生素 (Aminoglycoside)、 β -内酰胺类抗生素 (β -Lactamase)、氯霉素类抗生素 (Chloramphenicol)、大环内脂类-林肯酰胺类-链阳性菌素 B 类抗生素 (MLSB)、磺胺类抗生素 (Sulfonamide)、四环素类抗生素 (Tetracycline)、万古霉素类抗生素 (Vancomycin) 和其他类或者发挥外排泵作用 (other/efflux) 这 8 类抗生素抗性基因. 城市生活污水 (RWW) 检测出 187 抗生素抗性基因, 垃圾渗滤液检测出 39 中抗生素抗性基因 (图 1). 其中, 城市生活污水检测到的抗生素抗性基因涵盖了以上全部 8 类抗生素类型, 而垃圾渗滤液检测到的抗性基因类型只含有氨基糖苷类抗生素 (Aminoglycoside)、大环内脂类-林肯酰胺类-链阳性菌素 B 类抗生素 (MLSB)、四环素类抗生素 (Tetracycline) 和其它类或者发挥外排泵作用 (other/efflux) 这 4 类抗生素抗性类型. 有研究表明, 垃圾渗滤液中四环素类抗生素类型在中国 6 个不同地理位置的垃圾填埋场渗滤液中被有效检出^[25, 26], 与本研究结果一致. 此外, 垃圾渗滤液检测到的 4 类抗生素抗性类型中的抗性基因数目均小于生活污水中的对应类型抗性基因数目. 抗生素抗性基因按照抗性机制可以分成抗生素失活 (deactivation)、外排泵作用机制 (efflux)、核糖体保护机制 (protection) 和未知抗性机制 (unkown) 四大类. 将检测到的抗生素抗性基因从抗生素抗性机制归类分析, 抗生素失活 (deactivation) 是两种污水微生物抗生素抗性最主要机制, 比例分别为 48.13% 和 51.28% (图 2). 垃圾渗滤液检测到的 39 种抗生素抗性基因中只有 *erm*₍₃₅₎ 基因仅在垃圾渗滤液中检出, 其余 38 种抗性基因在城市生活污水同时

被有效检出. 总体结果表明, 城市生活污水和垃圾渗滤液检测到的抗生素抗性种类有显著差异 ($P < 0.05$).

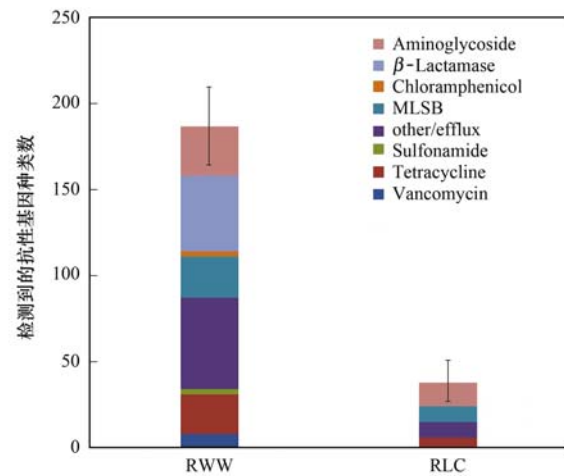


图 1 检测到的抗生素抗性基因种类数

Fig. 1 Number of detected antibiotic resistance genes

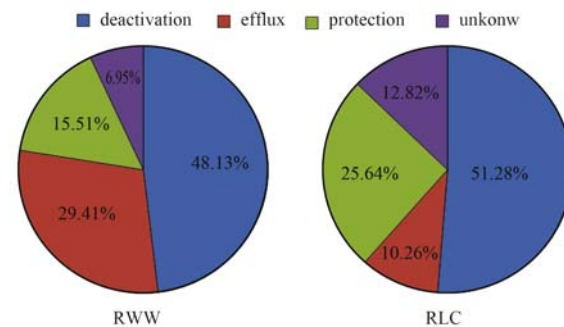


图 2 抗生素抗性机制的相对比例

Fig. 2 Ratios of mechanism in detected antibiotic resistance genes

2.2 抗生素抗性基因在城市生活污水和垃圾渗滤液中的污染分布格局

主成分分析表明, 城市生活污水和垃圾渗滤液抗生素抗性基因结构不同, PCA1 解释了抗性基因结构变化的 98.8%, 城市生活污水和垃圾渗滤液抗性基因沿第一轴分为两个簇, 表明抗生素抗性基因在两种城市污水有着不同的分布格局 (图 3). 城市生活污水抗生素抗性基因分布相较于垃圾渗滤液更具有有一致性.

Auerbach 等^[27] 的研究表明, 城市生活污水 (污水处理厂进水) 四环素类抗生素抗性基因的丰度高达 $10^9 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$ 数量级. 相较于垃圾渗滤液, 热图分析表明 (图 4), 城市生活污水的抗生素抗性基因丰度和多样性均显著大于垃圾渗滤液 ($P < 0.05$). 图 4 中 A 簇代表抗生素抗性基因在城市生活污水和垃圾渗滤液中均有检出, 主要类型是氨基糖苷类和四环素类抗生素抗性基因, 并且 A1 簇的抗生素

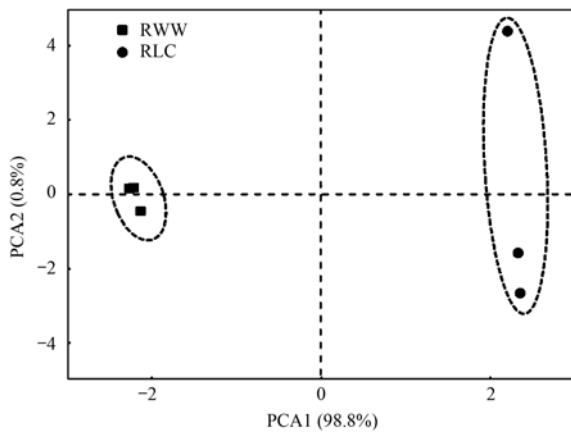


图3 城市生活污水和垃圾渗滤液抗生素抗性基因多样性主成分分析

Fig. 3 Principle component analysis of ARGs in wastewater and landfill leachate

抗性相对于 A2 簇显著富集. B 簇和 C 簇中的抗生素抗性基因仅在城市污水中检出,垃圾渗滤液中未检出(D 簇),并且抗生素抗性潜在表达强度 B 簇大于 C 簇. 垃圾渗滤液是垃圾填埋体产生的“二次污染物”^[28],运营时间 5 a 以上的垃圾填埋场产生的垃圾渗滤液含有多种有毒有害物质,并且氨氮浓度高,可生化性差^[13],高通量定量 PCR 结果表明垃圾渗滤液抗生素抗性类型和抗性基因丰度低于城市生活污水,热图分析总体结果显示,城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗性基因污染分布格局显著不同.

2.3 抗生素抗性基因丰度与城市生活污水抗性基因的富集

广州、福州等地的污水厂接纳当地生活垃圾填埋场垃圾渗滤液进行合并处理,普通生活污水污水处理厂承担部分垃圾渗滤液的处理任务已经成为垃圾渗滤液处理的“新常态”,实践证明是一种经济有效的方式^[13, 17]. 本研究中采集的城市生活污水样品中含有一定量的垃圾渗滤液(浓缩液),因此可以将垃圾渗滤液作为对照样品,研究抗生素抗性基因的在这两种城市污水的异同. 根据 Schmittgen 等^[24]关于基因拷贝数(gene copy number)的计算(估算)方法,得到了抗生素抗性基因的基因拷贝数(图 5). 抗生素抗性基因在城市生活污水抗性基因拷贝数最高是 others 类(包含多重耐药基因、转座子基因、整合子基因等)抗性基因,除此之外,氨基糖苷类抗生素和四环素类的抗性基因的基因拷贝数分别达到了 $1.4 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $3.6 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$. 垃圾渗滤液中检测到的 39 种抗性基因,分为 4 大类,基因拷贝数最高的是氨基糖苷类抗生素抗性基因,达到

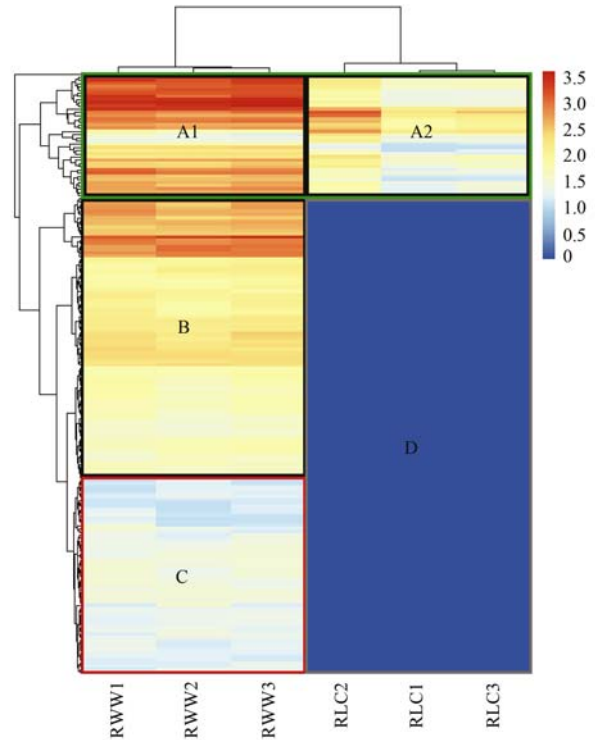


图4 城市生活污水和垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染分布格局

Fig. 4 Pollution profile of ARGs in wastewater and landfill leachate

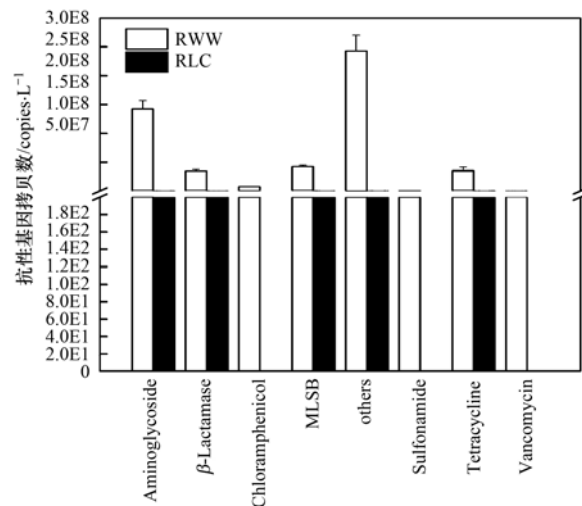


图5 城市生活污水和垃圾渗滤液抗生素抗性基因丰度

Fig. 5 Abundance of ARGs in wastewater and landfill leachate

$1.1 \times 10^5 \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$,显著低于生活污水中的抗性基因丰度($P < 0.05$).

城市生活污水氮磷等营养元素丰富,相对于垃圾渗滤液其有毒有害物质浓度较低,微生物数量多,世代更新快,并且微生物种类繁多等特性,两者合并处理有一定优势^[13]. 城市生活污水检出富集的抗性基因总共有 7 大类,其中 119 种抗生素抗性基因

和可移动元件显著增加 ($P < 0.05$), 富集倍数前三的基因是转座子 *tnpA*-04 基因、*bla*_{VEB} 和 *bla*_{OXAI0}-01, 分别达到了 3 338、1 061 和 1 001 倍 (图 6), 表明转座子基因和 β -内酰胺类抗生素抗性基因在城市生活污水中显著富集. 环境抗生素抗性基因在微生物中存在着水平基因转移机制 (horizontal gene transfer, HGT), 可移动元件 (MGEs) 与总抗生素抗性存在线性相关^[7], 可能是污水厂的进水普遍有较高的检出率和富集现象的原因之一. 抗生素残留和重金属离子对抗生素抗性具有共选择或者诱导作用, 导致了特定类型的抗生素抗性基因的出现和富集^[10, 29]. 城市生活污水和垃圾渗滤液都是人类生产生活末端的“副产物”, 含有一定量的抗生素残留和重金属离子, 在分子机制上进一步研究它们与抗生素抗性基因的关系, 分析抗性基因在环境物质胁迫下的演变传播显得十分必要.

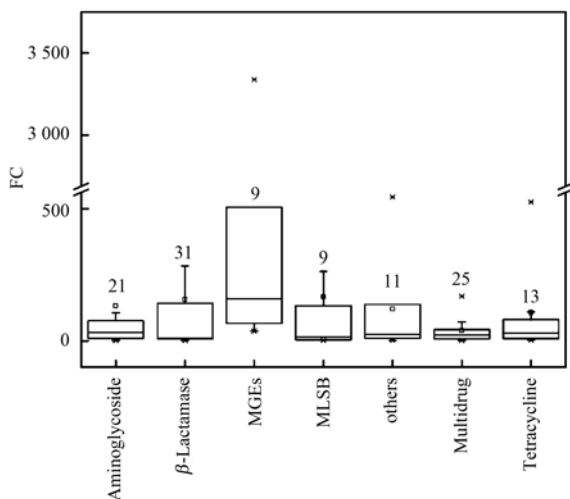


图 6 城市生活污水富集的抗生素抗性基因

Fig. 6 Enriched ARGs in wastewater

虽然 Wang 等^[25] 和 Wu 等^[26] 的研究表明垃圾渗滤液可以检测出四环素类和磺胺类等少量几种抗生素抗性基因, 但是本研究的结果表明垃圾渗滤液抗性基因丰度并不高, 垃圾渗滤液可以跟城市生活污水合并处理, 但是还需考虑高浓度抗生素残留和重金属等可能促进城市生活污水抗生素抗性的潜在影响. 此外, 城市生活污水中高丰度和多类型的抗生素抗性基因对于人工湿地处理生活污水等处理方式可能潜在的生态环境安全风险也提供了新的考量和评价视角.

3 结论

(1) 垃圾渗滤液抗生素抗性基因丰度不高, 可

以接入城市生活污水厂合并处理, 城市生活污水是环境抗生素抗性的一个重要存储库.

(2) 抗生素抗性基因在城市生活污水和生活垃圾渗滤液中既有区别又有联系, 有着显著不同的分布格局.

参考文献:

- [1] Zhu Y G, Johnson T A, Su J Q, *et al.* Diverse and abundant antibiotic resistance genes in Chinese swine farms [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, **110**(9): 3435-3440.
- [2] 吴柄, 乔敏, 朱永官. 猪场土壤中 5 种四环素抗性基因的检测和定量[J]. 生态毒理学报, 2009, **4**(5): 705-710.
Wu B, Qiao M, Zhu Y G. Quantification of five tetracycline resistance genes in soil from a swine feedlot[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2009, **4**(5): 705-710.
- [3] Su J Q, Wei B, Ouyang W Y, *et al.* Antibiotic resistome and its association with bacterial communities during sewage sludge composting[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(12): 7356-7363.
- [4] Rahube T O, Marti R, Scott A, *et al.* Impact of fertilizing with raw or anaerobically digested sewage sludge on the abundance of antibiotic-resistant coliforms, antibiotic resistance genes, and pathogenic bacteria in soil and on vegetables at harvest [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, **80**(22): 6898-6907.
- [5] Ouyang W Y, Huang F Y, Zhao Y, *et al.* Increased levels of antibiotic resistance in urban stream of Jiulongjiang River, China [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, **99**(13): 5697-5707.
- [6] 黄福义, 李虎, 韦蓓, 等. 长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3869-3873.
Huang F Y, Li H, Wei B, *et al.* Long-term manure application induced shift of diversity and abundance of antibiotic resistance genes in paddy soil[J]. Environmental Science, 2014, **35**(10): 3869-3873.
- [7] Xu L K, Ouyang W Y, Qian Y Y, *et al.* High-throughput profiling of antibiotic resistance genes in drinking water treatment plants and distribution systems [J]. Environmental Pollution, 2016, **213**: 119-126.
- [8] Xi C W, Zhang Y L, Marrs C F, *et al.* Prevalence of antibiotic resistance in drinking water treatment and distribution systems [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, **75**(17): 5714-5718.
- [9] 苏建强, 黄福义, 朱永官. 环境抗生素抗性基因研究进展 [J]. 生物多样性, 2013, **21**(4): 481-487.
Su J Q, Huang F Y, Zhu Y G. Antibiotic resistance genes in the environment [J]. Biodiversity Science, 2013, **21**(4): 481-487.
- [10] Pruden A, Pei R T, Storteboom H, *et al.* Antibiotic resistance genes as emerging contaminants: studies in northern Colorado [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(23): 7445-7450.
- [11] 魏东斌, 胡洪营. 污水再生回用的水质安全指标体系 [J]. 中国给水排水, 2004, **20**(1): 36-39.
Wei D B, Hu H Y. Safety index system of reclaimed and reused

- water quality[J]. *China Water & Wastewater*, 2004, **20**(1): 36-39.
- [12] Molleda P, Blanco I, Ansola G, *et al.* Removal of wastewater pathogen indicators in a constructed wetland in Leon, Spain[J]. *Ecological Engineering*, 2008, **33**(3-4): 252-257.
- [13] 乔勇, 赵国志. 垃圾渗滤液接入城市污水处理厂存在的问题探讨[J]. *给水排水*, 2006, **32**(2): 13-16.
Qiao Y, Zhao G Z. Discussion on refuse leachate diverting into urban wastewater treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2006, **32**(2): 13-16.
- [14] 李蕾, 徐晶, 赵由才, 等. 垃圾填埋场抗生素抗性基因初探[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1769-1775.
Li L, Xu J, Zhao Y C, *et al.* Investigation of antibiotic resistance genes (ARGs) in landfill [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1769-1775.
- [15] Schwartz T, Kohnen W, Jansen B, *et al.* Detection of antibiotic-resistant bacteria and their resistance genes in wastewater, surface water, and drinking water biofilms [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, **43**(3): 325-335.
- [16] Rizzo L, Manaia C, Merlin C, *et al.* Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment; a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **447**: 345-360.
- [17] 余建恒, 赵淑贤, 夏耿东, 等. 接入垃圾渗滤液对城市污水处理厂运行的影响与对策[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(4): 95-97.
Yu J H, Zhao S X, Xia G D, *et al.* Impact and countermeasures of treating landfill leachate in municipal sewage treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, **26**(4): 95-97.
- [18] Ghosh S, Ramsden S J, LaPara T M. The role of anaerobic digestion in controlling the release of tetracycline resistance genes and class 1 integrons from municipal wastewater treatment plants [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, **84**(4): 791-796.
- [19] Diehl D L, LaPara T M. Effect of temperature on the fate of genes encoding tetracycline resistance and the integrase of class 1 integrons within anaerobic and aerobic digesters treating municipal wastewater solids [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(23): 9128-9133.
- [20] Ahammad Z S, Sreekrishnan T R, Hands C L, *et al.* Increased waterborne *bla*_{NDM-1} resistance gene abundances associated with seasonal human pilgrimages to the Upper Ganges River [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(5): 3014-3020.
- [21] Stokes H W, Nesbø C L, Holley M, *et al.* Class 1 integrons potentially predating the association with Tn402-like transposition genes are present in a sediment microbial community [J]. *Journal of Bacteriology*, 2006, **188**(16): 5722-5730.
- [22] Gillings M R, Gaze W H, Pruden A, *et al.* Using the class 1 integron-integrase gene as a proxy for anthropogenic pollution [J]. *The ISME Journal*, 2015, **9**(6): 1269-1279.
- [23] Looft T, Johnson T A, Allen H K, *et al.* In-feed antibiotic effects on the swine intestinal microbiome [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(5): 1691-1696.
- [24] Schmittgen T D, Livak K J. Analyzing real-time PCR data by the comparative C_T method [J]. *Nature Protocols*, 2008, **3**(6): 1101-1108.
- [25] Wang Y Q, Tang W, Qiao J, *et al.* Occurrence and prevalence of antibiotic resistance in landfill leachate [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(16): 12525-12533.
- [26] Wu D, Huang Z T, Yang K, *et al.* Relationships between antibiotics and antibiotic resistance gene levels in municipal solid waste leachates in Shanghai, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(7): 4122-4128.
- [27] Auerbach E A, Seyfried E E, McMahon K D. Tetracycline resistance genes in activated sludge wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2007, **41**(5): 1143-1151.
- [28] 陈家军, 张俊丽, 裴照滨. 垃圾填埋二次污染的危害与防治 [J]. *安全与环境学报*, 2002, **2**(3): 27-30.
Chen J J, Zhang J L, Pei Z B. Hazard and control of secondary pollution in sanitary refuse landfilling [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2002, **2**(3): 27-30.
- [29] Chen S C, Li X M, Sun G X, *et al.* Heavy metal induced antibiotic resistance in bacterium LSJC7 [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2015, **16**(10): 23390-23404.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN Yu-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行