

百方知库  
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.2  
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 ..... 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)

珠三角地区利用 PM<sub>2.5</sub> 反演气溶胶数浓度谱方法 ..... 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)

广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性 ..... 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)

扬州市 PM<sub>2.5</sub> 中重金属来源及潜在健康风险评估 ..... 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)

聊城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 ..... 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)

博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源 ..... 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)

某集约化肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 中抗生素抗性基因的分布特征 ..... 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)

水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响 ..... 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)

滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 ..... 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)

基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析 ..... 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 ..... 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)

异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 ..... 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林祺, 王荣, 沈吉 (614)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素 ..... 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评估 ..... 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)

氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 ..... 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)

磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响 ..... 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)

钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响 ..... 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 对镁改性生物炭除磷效果的影响 ..... 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)

3种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 ..... 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)

硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制 ..... 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 郅超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)

ZnTiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 ..... 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)

高指数晶面 TiO<sub>2</sub> 对铬的吸附及光催化去除 ..... 钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)

Fe<sup>0</sup>/海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B ..... 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)

不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制 ..... 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何睿, 董杨, 王海港 (717)

SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能 ..... 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)

一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 ..... 薛文清, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺通量及膜污染分析 ..... 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)

多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除 ..... 刘淑惠, 田伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程 ..... 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)

从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水 ..... 袁文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法 ..... 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)

硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性 ..... 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)

乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性 ..... 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 ..... 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷 (791)

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 ..... 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 ..... 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)

进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响 ..... 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)

ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性 ..... 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 ..... 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)

调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 ..... 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响 ..... 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性 ..... 王杨, 朱斌, 董俊, 白晓慧 (853)

黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征 ..... 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)

基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化 ..... 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)

硝化作用对盐碱湿地 N<sub>2</sub>O 排放的影响及其环境因子分析 ..... 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)

长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N<sub>2</sub>O 和 NO 排放的影响 ..... 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)

地膜覆盖和施肥对菜地 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系 ..... 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响 ..... 李亚森, 丁松爽, 殷金玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征 ..... 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)

工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 ..... 李锋, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 ..... 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 ..... 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献 ..... 张彦军, 郭胜利 (961)

不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征 ..... 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓悟悟, 葛东达, 吴金水 (970)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评估 ..... 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 ..... 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响 ..... 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)

热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜粪混合物料及其甲烷高值化条件 ..... 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

《环境科学》征订启事(547) 《环境科学》征稿简则(828) 信息(581, 933, 952)

# 某集约化肉鸡饲养场 $PM_{2.5}$ 中抗生素抗性基因的分布特征

刘菲<sup>1</sup>, 许霞<sup>1</sup>, 屠博文<sup>2</sup>, 汪楚乔<sup>1</sup>, 江晓栋<sup>1</sup>, 王利平<sup>1\*</sup>, 薛银刚<sup>1,3\*</sup>

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 常州 213164; 2. 常州市疾病预防控制中心, 常州 213022; 3. 江苏省常州环境监测中心, 江苏省环境保护水环境生物监测重点实验室, 常州 213001)

**摘要:** 集约化家禽饲养场是抗生素抗性基因 (ARGs) 的重要来源, 而  $PM_{2.5}$  作为 ARGs 可能向人体暴露的重要途径还未得到很好地研究. 本文采集了集约化肉鸡饲养场舍内  $PM_{2.5}$  和粪便以及舍外  $PM_{2.5}$  样品, 利用荧光定量 PCR (qPCR) 进行一类整合子 (*intI1*)、总细菌 (16S rDNA) 和 6 类共 19 种 ARGs 丰度的检测. 结果显示, 除 *bla*<sub>GES-1</sub> 和 *bla*<sub>SHV-1</sub> 之外, 其余 17 种 ARGs 在 6 类样品中均有检出. 磺胺类、四环素类、大环内酯类和氨基糖苷类抗性基因在舍内粪便中丰度较高, 达到  $1.04 \times 10^9 \sim 3.27 \times 10^{10}$  copies·g<sup>-1</sup>, 粪便是饲养场  $PM_{2.5}$  中 ARGs 的主要来源. 舍内  $PM_{2.5}$  中以磺胺类和大环内酯类抗性基因丰度较高, 分别为  $(8.9 \pm 1.9) \times 10^7$  copies·m<sup>-3</sup> 和  $(5.6 \pm 3.1) \times 10^7$  copies·m<sup>-3</sup>, 且舍内  $PM_{2.5}$  中 ARGs 丰度明显高于舍外.  $PM_{2.5}$  质量浓度与 16S rDNA、*intI1* 和 ARGs 丰度呈显著正相关, 表明集约化饲养场中  $PM_{2.5}$  是空气传播细菌、ARGs 和 *intI1* 的储存库和传播者. 6 类样品中 *intI1* 丰度均高于 ARGs, 同时 *intI1* 和 ARGs 的共存关系表现出了多药耐药性的威胁, 易对饲养人员和家禽健康及周边空气环境造成危害.

**关键词:** 肉鸡饲养场;  $PM_{2.5}$ ; 抗生素抗性基因; 粪便; 一类整合子

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0567-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201808017

## Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in $PM_{2.5}$ of a Concentrated Broiler Feeding Operation

LIU Fei<sup>1</sup>, XU Xia<sup>1</sup>, TU Bo-wen<sup>2</sup>, WANG Chu-qiao<sup>1</sup>, JIANG Xiao-dong<sup>1</sup>, WANG Li-ping<sup>1\*</sup>, XUE Yin-gang<sup>1,3\*</sup>

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Changzhou Centers for Disease Control and Prevention, Changzhou 213022, China; 3. Key Laboratory of Environmental Protection of Water Environment Biological Monitoring of Jiangsu Province, Changzhou Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Changzhou 213001, China)

**Abstract:** Concentrated poultry feeding operations are an important source of antibiotic resistance genes (ARGs). Little attention has been given to  $PM_{2.5}$  as a mechanism for exposing ARGs to humans. In this study,  $PM_{2.5}$  and fecal samples from inside the broiler feeding operation and  $PM_{2.5}$  samples from outside the broiler feeding operation were collected. All samples were subjected to the determination of class I integrin (*intI1*), total bacterial gene (16S rDNA), and 19 ARGs of six types by quantitative real-time PCR (qPCR). The results indicated that, excluding *bla*<sub>GES-1</sub> and *bla*<sub>SHV-1</sub>, the remaining 17 ARGs were detected in all six samples. Sulfonamide resistance genes, tetracycline resistance genes, macrolide resistance genes, and aminoglycoside resistance genes were abundant in the feces, reaching  $1.04 \times 10^9 \sim 3.27 \times 10^{10}$  copies·g<sup>-1</sup>, while feces was an important source of antibiotic resistance genes in  $PM_{2.5}$  of the broiler feeding operation. There were high abundances of sulfonamide resistance genes and macrolide resistance genes in  $PM_{2.5}$  from inside the broiler feeding operation, reaching  $(8.9 \pm 1.9) \times 10^7$  copies·m<sup>-3</sup> and  $(5.6 \pm 3.1) \times 10^7$  copies·m<sup>-3</sup>, respectively. The abundance of ARGs in the  $PM_{2.5}$  samples from inside the broiler feeding operation was significantly higher compared to the outside  $PM_{2.5}$  samples. There was a significant positive correlation between  $PM_{2.5}$  mass concentration and 16S rDNA, *intI1*, and ARGs abundance, indicating that  $PM_{2.5}$  was the reservoir and disseminator of airborne bacteria, ARGs, and *intI1* in the broiler feeding operation. The abundance of *intI1* was higher than ARGs among all samples, and the co-occurring relationship between *intI1* and ARGs demonstrates the threat of multi-drug resistance, which is harmful to the surrounding air environment and the health of the breeder and poultry.

**Key words:** broiler feeding operation;  $PM_{2.5}$ ; antibiotic resistance genes; feces; class I integrin

抗生素是用来预防和治疗细菌感染的药物, 长期以亚治疗剂量添加于动物饲料中以预防动物疾病

和刺激动物生长<sup>[1,2]</sup>. 据统计, 我国每年兽用抗生素使用量高达 9 万 t, 约占年产抗生素原料的一

收稿日期: 2018-08-02; 修订日期: 2018-08-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(21607016); 常州市科技局科技支撑(社会发展)项目(CE20175022); 环境基准与风险评估国家重点实验室开放课题项目(SKLECR20160FP20); 上海市大气颗粒物污染防治重点实验室开放课题项目(FDLAP17005); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150250)

作者简介: 刘菲(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为气溶胶环境效应及抗性基因污染特征, E-mail: ly\_fhy@126.com

\* 通信作者, E-mail: wlpcz@163.com; yzyg@126.com

半<sup>[3]</sup>. 当抗生素进入动物体内, 会诱导产生抗性菌株, 提供潜在的抗性传播储库<sup>[4]</sup>; 而由动物肠道排出的耐药菌, 会通过移动遗传元件驱动抗生素抗性基因 (antibiotic resistance genes, ARGs) 水平转移<sup>[5]</sup>; 同时, 大部分抗生素作为未代谢的母体化合物也会随动物粪便和尿液排出体外, 对粪便和尿液中的细菌耐药性具有选择压力<sup>[6]</sup>; 这些都加剧了养殖环境中 ARGs 的传播和扩散. 目前, 在集约化养殖环境的粪便、土壤、废水和周边环境中共检出多种 ARGs, 主要检出种类有四环素类、磺胺类和大环内酯类 ARGs 等<sup>[1-4]</sup>.

为了满足对肉类产品不断增长的需求, 我国家禽生产行业已形成集约化养殖模式, 以提高效率并降低生产成本<sup>[7]</sup>. 据联合国统计, 家禽集中饲养占集约化动物养殖场的 72%, 根据世界观察研究所的统计数据, 2000 ~ 2016 年畜禽饲养数量上升 60%, 增至 240 亿只, 其中大部分鸡肉是由集约化饲养场生产<sup>[8]</sup>. 而家禽集中在小型密闭空间中, 每天产生大量含有高浓度微生物的动物粪便, 在粪便处理和动物移动期间很容易被气溶胶化<sup>[9]</sup>, 而集约化家禽饲养场所也被认为是室外空气污染的重要点源, 可能对公共健康造成严重问题<sup>[7]</sup>.

近来, 研究者们越来越关注集约化养殖环境空气中 ARGs 的环境风险<sup>[9]</sup>, 但目前关于该方面的研究还较少, 且较多集中于总悬浮颗粒物 (total suspended particulate, TSP) 中 ARGs 的检测<sup>[7, 10, 11]</sup>和生物气溶胶中耐药菌携带 ARGs 种类的研究<sup>[12-15]</sup>. 细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 不仅可显著影响空气质量、能见度、人类健康和地球气候, 由于其可以深入渗透到人肺的肺泡区域从而更有可能是 ARGs 向人体暴露的重要途径<sup>[3]</sup>. Xie 等<sup>[16]</sup>研究了工业-城市-农村地区 PM<sub>2.5</sub> 中 ARGs 的年度差异, 并统计了 ARGs 与移动遗传元件 (*intI1*) 的关系, 结果表明 PM<sub>2.5</sub> 在 ARGs 的环境传播和人体暴露途径中具有重要意义. 本文对集约化肉鸡饲养场舍内 PM<sub>2.5</sub> 和粪便以及舍外 PM<sub>2.5</sub> 中 ARGs 进行研究, 以期为集约化家禽饲养环境中 ARGs 的传播及环境风险提供研究基础, 并评价集约化饲养场 PM<sub>2.5</sub> 对人体健康和环境污染的潜在危害.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品来源与采集

采样地点位于常州市某集约化肉鸡饲养场 (119°29'26"E, 31°48'59"N), 鸡舍内分为公鸡区和母鸡区, 各饲养 5 000 只, 密度为 14 只·m<sup>-2</sup>. 肉鸡类型为黄麻鸡, 存栏时间约为 75d, 出栏后进行粪

便清理, 采样时鸡龄为 52d. 养殖室内相对密闭, 通风方式为自然通风.

采样时间为 2018 年 2 月, 采集样本包括 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物和粪便. 其中 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物分别采集于鸡舍内母鸡区 (C1-PM<sub>2.5</sub>)、公鸡区 (C2-PM<sub>2.5</sub>), 舍外 20 m 处 (C3-PM<sub>2.5</sub>) 和舍外 50 m 处 (C4-PM<sub>2.5</sub>); 粪便样品采集于鸡舍内母鸡区 (C1-F) 和公鸡区 (C2-F), 每类采集 3 份作为平行样品. 颗粒物采样仪器为中流量崂应 2050 型智能空气采样器 (青岛崂山应用技术研究), PM<sub>2.5</sub> 的采集采用多级切割组合 (崂应 1071 型 TSP/PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 采样头, 青岛崂山应用技术研究), 流量设定为 100 L·min<sup>-1</sup>. 采样所用滤膜为石英滤膜 (φ90 mm, Pall Life Science), 滤膜在采样前均使用马弗炉 500℃ 煅烧 5 h 进行灭菌, 之后用铝箔纸包装将其放入密封袋中. 采样前, 采样头、镊子和膜托均用 75% 酒精进行擦拭. 待采样完成后立即将滤膜运回实验室称重并计算 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度 (为防止微生物污染, 滤膜在运回实验室后未进行恒温恒湿处理<sup>[17]</sup>), 之后将滤膜保存于 -20℃, 用于后续 DNA 提取.

### 1.2 DNA 提取

DNA 提取所用试剂盒为 DNeasy PowerSoil Kit (Qiagen, Germany), 参考文献 [11] 将每类采集的 3 份平行样本分别混合后进行 DNA 提取. 空气样品用无菌牙刷签小心刮取表层滤膜并保证取样完整, 后用灭菌的剪刀将刮取的表层膜尽量剪碎, 再加入试剂盒提供的研磨珠套管, 并按照试剂盒说明书方法提取样品总 DNA; 粪便样品直接按照试剂盒说明书方法提取样品总 DNA. 使用 NanoDrop2000 微量蛋白质核酸分析仪 (Thermo Fisher, USA) 测定提取 DNA 的质量浓度和纯度, 将提取成功的 DNA 置于 -20℃ 中保存.

### 1.3 荧光定量检测

实时定量 PCR (quantitative real-time PCR, qPCR) 用于测定肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 和粪便 DNA 样品的总细菌基因 (16S rDNA)、一类整合子的整合酶基因 (*intI1*) 和针对 6 类抗生素的 19 种 ARGs: 磺胺类 (*sul1*、*sul2*、*sul3*)、四环素类 (*tetA*、*tetW* 和 *tetX*)、大环内酯类 (*ermB*、*ermC*)、喹诺酮类 (*qnrS*、*qnrA*、*qepA*)、β-内酰胺类 (*ampC*、*bla<sub>TEM-1</sub>*、*bla<sub>OXA-1</sub>*、*bla<sub>OXA-2</sub>*、*bla<sub>GES-1</sub>*、*bla<sub>SHV-1</sub>*) 和氨基糖苷类 (*aacC2*、*aacC3*), 相关的引物序列、退火温度和目的基因长度参照文献 [18, 19].

使用 Bio-Rad iQ5 实时荧光定量 PCR 仪 (Bio-Rad, USA) 产生阳性对照的校准标准曲线<sup>[9]</sup>, 标准曲线扩增效率在 92.1% ~ 108.8% 之间. 之后利用

标准曲线分析各类样品的 DNA 以评估样品中 qPCR 抑制剂的存在并确定合适的模板 DNA 的质量浓度。所有 qPCR 测定在 96 孔板中进行, 试验中使用的 qPCR 反应体系为 20  $\mu\text{L}$ , 包括 0.20  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的正向引物和反向引物各 0.4  $\mu\text{L}$ , 10  $\mu\text{L}$  的 2  $\times$  TransStart™ Top Green q-PCR SuperMix (TransGen, 北京), 1  $\mu\text{L}$  模板 DNA 和 8.2  $\mu\text{L}$  灭菌超纯水。qPCR 反映程序参照文献[19], 每个样品做 3 个平行, 标准偏差小于 0.3, 每次设置阴性对照。

#### 1.4 数据分析

将目的基因达到设定阈值所经历的循环数 (Ct) 代入相应基因的校准标准曲线以计算相应基因的绝对丰度。本试验数据经 Origin (2017 版) 和 R 语言 (2.5.1 版) 处理并绘制图形。Spearman 相关系数运用 SPSS (22.0 版) 计算, 显著性水平设定为  $P < 0.01$  和  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度及 16S rDNA 丰度

由于所研究肉鸡饲养场鸡舍内相对密闭, 空气密度大, PM<sub>2.5</sub> 质量浓度分别高达 643.67  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (母鸡区) 和 989.03  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (公鸡区), 见图 1。导致两区域 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度有所差异的原因可能是公鸡较母鸡更为活跃, 在动物活动期间使密闭鸡舍内的废物气溶胶化的程度更大。母鸡区和公鸡区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度分别超过《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 规定日均值浓度的 8 倍和 13 倍, 同时超过《世卫组织空气质量准则》规定日均值浓度的 25 倍和 39 倍<sup>[20]</sup>。长期暴露于集约化养殖舍内空气, 会给动物和人类带来许多健康问题<sup>[9]</sup>; 据报道, 与其他农业工人相比, 家禽饲养工人的眼睛疾病、呼吸系统疾病、皮肤病的患病率更高<sup>[21]</sup>。舍外 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度相比舍内显著降低 ( $P < 0.01$ ), 舍外 20 m 和 50 m 处 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度分别为 130.30  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 106.73  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (图 1), 约为以往研究的 1.46 ~ 1.78 倍<sup>[22]</sup>。

经 qPCR 测定, 养殖舍内母鸡区和公鸡区 PM<sub>2.5</sub> 中 16S rDNA 丰度分别为  $9.75 \times 10^8$  copies $\cdot\text{m}^{-3}$  和  $2.13 \times 10^9$  copies $\cdot\text{m}^{-3}$  (图 1); 较以往关于中国蛋鸡和肉鸡舍内空气中 16S rDNA 检出丰度高出 2 ~ 3 个数量级<sup>[11]</sup>, 这主要是由于两处养殖环境的通风换气系统、温度、湿度及粪便处理方式都有所差异。Ling 等<sup>[23]</sup> 比较了集中动物饲养舍内环境 (猪和奶牛)、人类居住的室内环境 (诊所和收容所) 和室外环境 (城市、半城市、畜牧业和高山森林地区) 气溶胶样品的 16S rDNA 丰度, 发现集中动物饲养舍内气溶胶中 16S rDNA 丰度显著高于另外两类环境 ( $P$

$< 0.01$ )。本研究中舍外 20 m 和 50 m 处 PM<sub>2.5</sub> 中 16S rDNA 丰度较养殖舍内低 2 ~ 3 个数量级 (图 1), 与以往关于养殖舍内空气中 16S rDNA 检出丰度相当<sup>[11,23]</sup>。经分析, PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与 16S rDNA 丰度呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 可见集约化肉鸡饲养环境是高浓度空气传播细菌的来源, 会对饲养人员健康和周边空气环境造成危害。

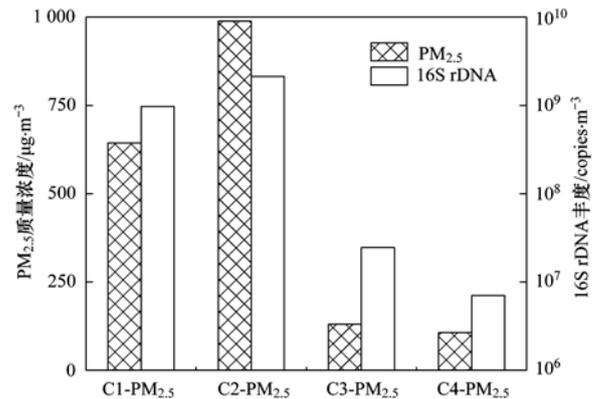


图 1 肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度和 16S rDNA 丰度

Fig. 1 PM<sub>2.5</sub> mass concentration and 16S rDNA abundance from the broiler feeding operation

### 2.2 肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 和粪便中 ARGs 丰度及多样性

经 qPCR 对肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 和粪便中 *intI1* 和 19 种 ARGs 进行定量检测。除 *bla*<sub>GES-1</sub> 和 *bla*<sub>SHV-1</sub> 之外, 其余 17 种 ARGs 在六类样品中均有检出 (图 2), 部分种类在各类集约化养殖环境的土壤<sup>[1,2]</sup>、水体<sup>[2,24]</sup> 和空气<sup>[10~15,23]</sup> 中也均有分布。在鸡舍粪便中检出的 ARGs 种类, 也均存在于 PM<sub>2.5</sub> 样品中, 而粪便中未检出的 ARGs, 在舍内和舍外 PM<sub>2.5</sub> 中也均未检出, 揭示粪便可能是 PM<sub>2.5</sub> 中 ARGs 的重要来源, 而舍内 PM<sub>2.5</sub> 也会传播至舍外, 并在风力的作用下将源于饲养场环境的 PM<sub>2.5</sub> 进行远距离传播<sup>[3]</sup>。PM<sub>2.5</sub> 由于粒径小、在大气中的存留时间长、传播距离远<sup>[25]</sup>, 使集约化饲养场所成为环境中 ARGs 污染的重要点源<sup>[23]</sup>。将 6 类样品中 ARGs/16S rDNA, 即各样品中 ARGs 的相对丰度进行相关性分析 (表 1), 结果显示粪便与 PM<sub>2.5</sub> 中 ARGs 相对丰度均呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 进一步表明粪便是该肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 中 ARGs 的主要来源。

经 qPCR 测定, 舍内粪便中磺胺类、四环素类、大环内酯类和氨基糖苷类抗性基因丰度较高, 达到  $1.04 \times 10^9 \sim 3.27 \times 10^{10}$  copies $\cdot\text{g}^{-1}$  (图 3), 主要原因可能是饲料中添加相应的抗生素, 并且该肉鸡饲养场粪便清理周期较长。据研究发现四环素类、磺胺类和大环内酯类抗生素是集约化家禽饲养业中最常用的抗生素种类, 而相应的抗性基因种类在动物粪便中普遍存在, 丰度达到  $2.44 \times 10^7 \sim 7.29 \times 10^9$

copies·g<sup>-1</sup>[1,26]. 在此次研究的粪便样品中, 母鸡区和公鸡区的 ARGs 丰度有所差异, 但最高相差不超过 1 个数量级(图 2). *sul1* 和 *tetW* 平均丰度最高, 分别为  $(9.54 \pm 8.57) \times 10^{10}$  copies·g<sup>-1</sup> 和  $(1.09 \pm 0.28) \times 10^{10}$  copies·g<sup>-1</sup>; *sul2*、*ermB*、*ermC* 和 *aacC3*

平均丰度均超过 10<sup>9</sup>copies·g<sup>-1</sup>; *bla*<sub>OXA-2</sub> 和 *qnrA* 平均丰度相对较低, 分别为  $(8.89 \pm 8.92) \times 10^5$  copies·g<sup>-1</sup> 和  $(1.07 \pm 0.33) \times 10^5$  copies·g<sup>-1</sup>; 其余检出 ARGs 的丰度在  $6.25 \times 10^6 \sim 6.93 \times 10^8$  copies·g<sup>-1</sup>之间.

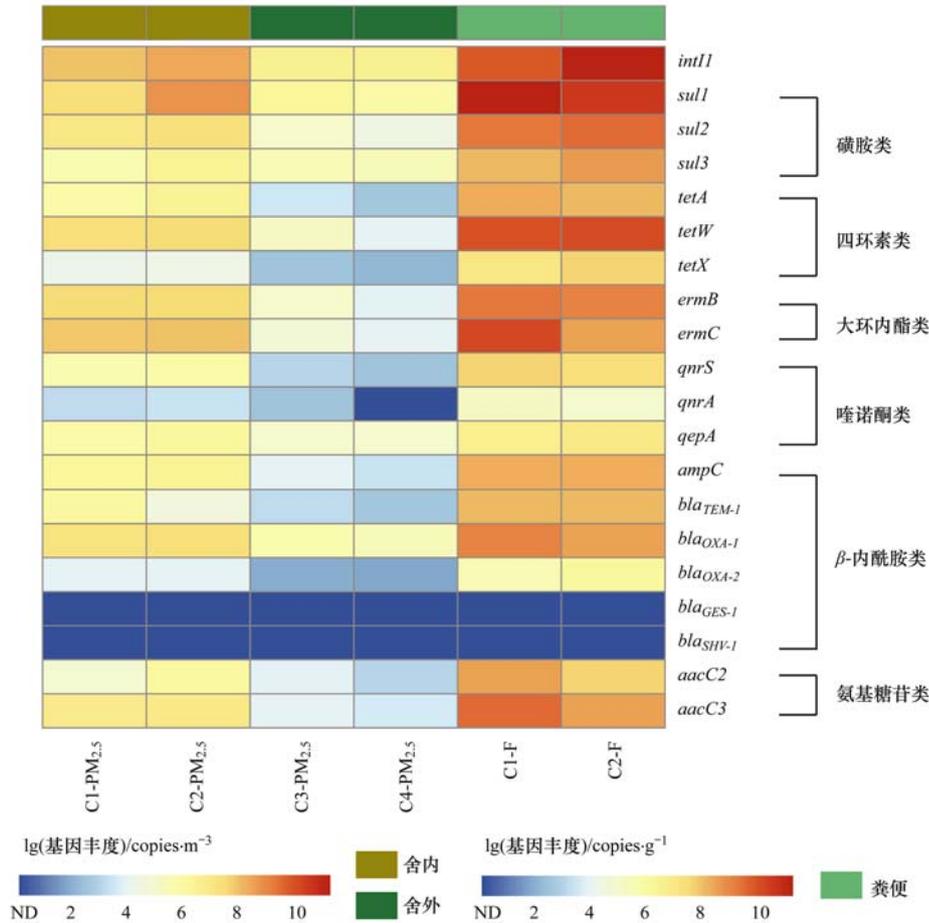


图 2 肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub>和粪便中 ARGs 丰度分布

Fig. 2 Distribution of ARGs abundance in PM<sub>2.5</sub> and feces from the broiler feeding operation

表 1 肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub>和粪便中 ARGs/16S rDNA 的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 1 Correlation analysis of ARGs/16S rDNA between PM<sub>2.5</sub> and feces from the broiler feeding operation

	C2-PM <sub>2.5</sub>	C3-PM <sub>2.5</sub>	C4-PM <sub>2.5</sub>	C1-F	C2-F
C1-PM <sub>2.5</sub>	0.924 **	0.765 **	0.698 **	0.919 **	0.840 **
C2-PM <sub>2.5</sub>	—	0.841 **	0.791 **	0.889 **	0.915 **
C3-PM <sub>2.5</sub>	—	—	0.962 **	0.701 **	0.849 **
C4-PM <sub>2.5</sub>	—	—	—	0.650 **	0.827 **

1) \* 为 P < 0.05, \*\* 为 P < 0.01

如图 2 所示, 鸡舍内 PM<sub>2.5</sub> 中相应 ARGs 丰度明显高于舍外 PM<sub>2.5</sub> 样品, 对应的 ARGs 种类, 舍内与舍外丰度相差 1~4 个数量级. 除 *bla*<sub>TEM-1</sub> 外, 鸡舍内公鸡区 PM<sub>2.5</sub> 中相应的 ARGs 丰度均高于母鸡区, 这主要是由于两区域 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度有所差异(图 1). 舍内 PM<sub>2.5</sub> 中平均丰度最高的为磺胺类和大环内酯类抗性基因, 分别达到  $(8.9 \pm 1.9) \times 10^7$  copies·m<sup>-3</sup> 和  $(5.6 \pm 3.1) \times 10^7$  copies·m<sup>-3</sup>, 其余检

出 4 类 ARGs 的丰度在  $5.14 \times 10^5 \sim 9.50 \times 10^6$  copies·m<sup>-3</sup> 之间, 且舍内 PM<sub>2.5</sub> 中 6 类 ARGs 丰度变化与粪便中一致(图 3). 随着距离的增加, 舍外 50 m 处 ARGs 检出丰度较 20 m 处有所减少(图 2); 除磺胺类抗性基因的平均丰度为  $(1.6 \pm 0.93) \times 10^6$  copies·m<sup>-3</sup>, 其余 5 类检出 ARGs 在舍外 PM<sub>2.5</sub> 样品中的丰度在  $4.52 \times 10^3 \sim 5.58 \times 10^4$  copies·m<sup>-3</sup> 之间(图 3), 表明含有 ARGs 的 PM<sub>2.5</sub> 可以有效转移至附

近的环境<sup>[9]</sup>. 有研究表明源自肉牛饲养厂的颗粒物 (TSP) 也会促进兽用抗生素和含有 ARGs 的细菌群落的传播<sup>[10]</sup>. Gao 等<sup>[9]</sup> 采用 8 级 Andersen 采样器进行采样以研究生物气溶胶粒度分布对 ARGs 的影响, 结果表明 ARGs 更倾向于分布在粒径更大的颗粒物中. 本研究在集约化肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 中检出多种 ARGs, 与以往关于 TSP 及生物气溶胶中的 ARGs 研究 (涉及鸡、牛和猪饲养场) 相比, 涉及种类较多、检出丰度较高<sup>[3, 10-15, 23]</sup>, 而由此释放到环境中的 PM<sub>2.5</sub> 可能对抗生素耐药性的传播产生重大而深远的影响.

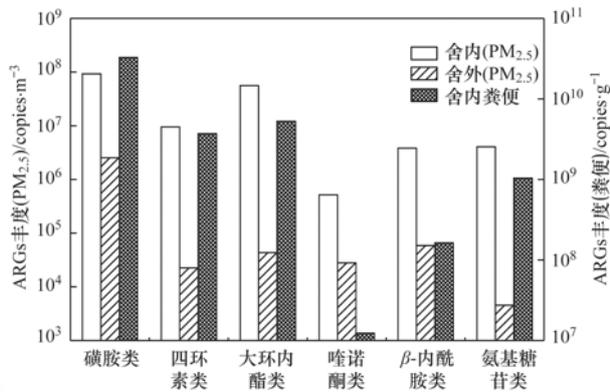


图3 肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 和粪便中 6 类 ARGs 的平均丰度

Fig. 3 Average abundance of six types of ARGs in PM<sub>2.5</sub> and feces from the broiler feeding operation

### 2.3 ARGs 丰度与 *intI1* 丰度、PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的相关性

作为传播抗生素抗性的主要参与者, *intI1* 在集约化养殖环境的土壤, 粪便、废水及空气中均有检出<sup>[11, 23, 27-29]</sup>. 本研究中, 6 类样品中的 *intI1* 丰度均高于其它 ARGs, 这与以往关于堆肥厂大气环境中的研究结果一致<sup>[30]</sup>. 公鸡粪便中 *intI1* 丰度高达  $1.83 \times 10^{11}$  copies·g<sup>-1</sup>, 在舍内 PM<sub>2.5</sub> 样品中丰度在  $10^8$  copies·m<sup>-3</sup> 左右, 而在舍外 PM<sub>2.5</sub> 样品中丰度也均超过  $10^6$  copies·m<sup>-3</sup> (图 2). 抗生素抗性环境传播的一个重要机制就是水平基因转移, 而集约化家禽饲养环境则很有可能是 *intI1* 的重要储存库<sup>[23]</sup>.

有研究表明 1 类整合子标记基因 *intI1* 与多重耐药性相关<sup>[23]</sup>, 而多重耐药基因的出现和传播给重大疾病的治疗提出了严峻的挑战<sup>[31]</sup>. 经分析, 除 *bla*<sub>TEM-1</sub> 丰度与 *intI1* 丰度呈显著正相关 ( $r = 0.886$ ,  $P < 0.05$ ), 其余检出 ARGs 丰度均与 *intI1* 丰度呈显著正相关 ( $r > 0.99$ ,  $P < 0.01$ ), 表明 *intI1* 在 ARGs 的传播中起重要作用 (图 4). 可见, 该肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 中 *intI1* 与 ARGs 存在密切关联, 而这种共存关系可能是由于集约化饲养环境中普遍存在的 *intI1* 中存在多个 ARGs<sup>[30]</sup>. 同时, PM<sub>2.5</sub> 质量浓

度越高, *intI1* 和 ARGs 丰度也越高 ( $P < 0.01$ ), 表明该肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 可作为多药耐药性的储库. 因为空气中的微生物通常附着在颗粒物表面<sup>[17]</sup>, 而高浓度的 PM<sub>2.5</sub> 可能会导致高丰度的 ARGs 及 *intI1*.

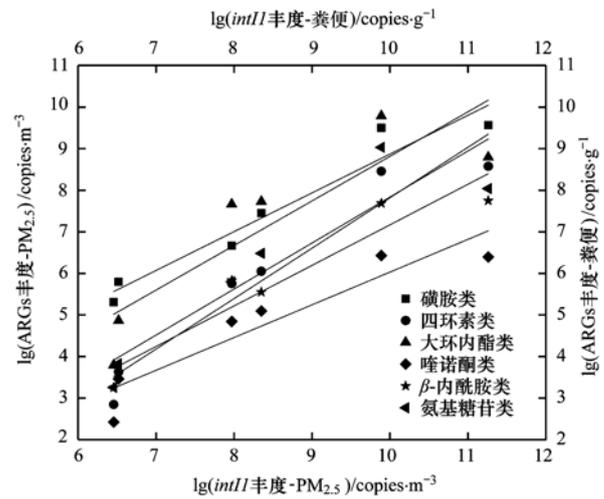


图4 6 类 ARGs 丰度与 *intI1* 丰度的关系

Fig. 4 Relationship between the abundance of six types of ARGs and *intI1*

### 3 结论

(1) 经 qPCR 检测, 除 *bla*<sub>GES-1</sub> 和 *bla*<sub>SHV-1</sub> 之外, 其余 17 种 ARGs 在肉鸡饲养场 PM<sub>2.5</sub> 和粪便样品中均有分布, 而粪便是养殖环境 PM<sub>2.5</sub> 中 ARGs 的主要来源.

(2) 所研究的集约化肉鸡饲养场中 PM<sub>2.5</sub> 是空气传播细菌的来源以及 *intI1* 和 ARGs 的重要储存库.

(3) ARGs 与 *intI1* 的共存关系表明 PM<sub>2.5</sub> 可以作为养殖环境多药耐药性的储库, 同时 PM<sub>2.5</sub> 是 ARGs 和 *intI1* 进行传播的重要媒介, 可能对饲养人员及家禽健康和周边空气环境造成重要影响.

致谢: 感谢南开大学环境科学与工程学院罗义老师课题组对本研究提供的帮助.

#### 参考文献:

- [1] Ben W W, Wang J, Pan X, et al. Dissemination of antibiotic resistance genes and their potential removal by on-farm treatment processes in nine swine feedlots in Shandong Province, China [J]. Chemosphere, 2017, **167**: 262-268.
- [2] Wang J, Ben W W, Yang M, et al. Dissemination of veterinary antibiotics and corresponding resistance genes from a concentrated swine feedlot along the waste treatment paths [J]. Environment International, 2016, **92-93**: 317-323.
- [3] 薛银刚, 刘菲, 王利平, 等. 气溶胶中抗生素抗性基因研究进展: 以养殖场和医院为例 [J]. 生态毒理学报, 2017, **12** (6): 27-37.
- Xue Y G, Liu F, Wang L P, et al. Progress in research on antibiotic resistance genes in aerosols: take farms and hospitals as examples [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, **12** (6): 27-37.

- [4] Wu N, Qiao M, Zhang B, *et al.* Abundance and diversity of tetracycline resistance genes in soils adjacent to representative swine feedlots in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(18): 6933-6939.
- [5] Pal C, Bengtsson-Palme J, Kristiansson E, *et al.* The structure and diversity of human, animal and environmental resistomes [J]. *Microbiome*, 2016, **4**: 54.
- [6] 隋倩雯, 张俊亚, 魏源送, 等. 畜禽养殖过程抗生素使用与耐药病原菌及其抗性基因赋存的研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(5): 20-34.
- Sui Q W, Zhang J Y, Wei Y S, *et al.* Veterinary antibiotics use, occurrence of antibiotic resistance pathogen and its antibiotic resistance genes in animal production; an overview [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(5): 20-34.
- [7] Hong P Y, Li X Z, Yang X F, *et al.* Monitoring airborne biotic contaminants in the indoor environment of pig and poultry confinement buildings [J]. *Environmental Microbiology*, 2012, **14**(6): 1420-1431.
- [8] The Guardian. Rise of mega farms: how the US model of intensive farming is invading the world [EB/OL]. [https://www.theguardian.com/environment/2017/jul/18/rise-of-mega-farms-how-the-us-model-of-intensive-farming-is-invading-the-world?](https://www.theguardian.com/environment/2017/jul/18/rise-of-mega-farms-how-the-us-model-of-intensive-farming-is-invading-the-world?CMP=Share_AndroidApp_Tweet) CMP = Share\_AndroidApp\_Tweet, 2017-07-18.
- [9] Gao M, Jia R Z, Qiu T L, *et al.* Size-related bacterial diversity and tetracycline resistance gene abundance in the air of concentrated poultry feeding operations [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 1342-1348.
- [10] McEachran A D, Blackwell B R, Hanson J D, *et al.* Antibiotics, bacteria, and antibiotic resistance genes: aerial transport from cattle feed yards via particulate matter [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, **123**(4): 337-343.
- [11] 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 等. 养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 510-516.
- Gao M, Qiu T L, Qin Y C, *et al.* Sources and pollution characteristics of antibiotic resistance genes and conditional pathogenic bacteria in concentrated poultry feeding operations [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 510-516.
- [12] Sapkota A R, Ojo K K, Roberts M C, *et al.* Antibiotic resistance genes in multidrug-resistant *Enterococcus* spp. and *Streptococcus* spp. recovered from the indoor air of a large-scale swine-feeding operation [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2006, **43**(5): 534-540.
- [13] Liu D J, Chai T J, Xia X Z, *et al.* Formation and transmission of *Staphylococcus aureus* (including MRSA) aerosols carrying antibiotic-resistant genes in a poultry farming environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **426**: 139-145.
- [14] Létourneau V, Nehmé B, Mériaux A, *et al.* Human pathogens and tetracycline-resistant bacteria in bioaerosols of swine confinement buildings and in nasal flora of hog producers [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2010, **213**(6): 444-449.
- [15] Just N A, Létourneau V, Kirychuk S P, *et al.* Potentially pathogenic bacteria and antimicrobial resistance in bioaerosols from cage-housed and floor-housed poultry operations [J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2012, **56**(4): 440-449.
- [16] Xie J W, Jin L, Luo X S, *et al.* Seasonal disparities in airborne bacteria and associated antibiotic resistance genes in PM<sub>2.5</sub> between urban and rural sites [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(2): 74-79.
- [17] Cao C, Jiang W J, Wang B Y, *et al.* Inhalable microorganisms in Beijing's PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> pollutants during a severe smog event [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1499-1507.
- [18] Mao D Q, Yu S, Rysz M, *et al.* Prevalence and proliferation of antibiotic resistance genes in two municipal wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2015, **85**: 458-466.
- [19] Tan L, Li L Y, Ashbolt N, *et al.* Arctic antibiotic resistance gene contamination, a result of anthropogenic activities and natural origin [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **621**: 1176-1184.
- [20] Xiao K, Wang Y K, Wu G, *et al.* Spatiotemporal characteristics of air pollutants (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, and CO) in the inland basin city of Chengdu, Southwest China [J]. *Atmosphere*, 2018, **9**(2): 74.
- [21] Just N, Kirychuk S, Gilbert Y, *et al.* Bacterial diversity characterization of bioaerosols from cage-housed and floor-housed poultry operations [J]. *Environmental Research*, 2011, **111**(4): 492-498.
- [22] Ye Z L, Li Q, Ma S S, *et al.* Summertime day-night differences of PM<sub>2.5</sub> components (inorganic ions, OC, EC, WSOC, WSON, HULIS, and PAHs) in Changzhou, China [J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(10): 189.
- [23] Ling A L, Pace N R, Hernandez M T, *et al.* Tetracycline resistance and Class 1 integron genes associated with indoor and outdoor aerosols [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(9): 4046-4052.
- [24] He L Y, Ying G G, Liu Y S, *et al.* Discharge of swine wastes risks water quality and food safety: antibiotics and antibiotic resistance genes from swine sources to the receiving environments [J]. *Environment International*, 2016, **92-93**: 210-219.
- [25] 靳璐滨, 臧增亮, 潘晓滨, 等. PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>2.5-10</sub>资料同化及在南京青奥会期间的应用试验 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(2): 331-341.
- Jin L B, Zang Z L, Pan X B, *et al.* Data assimilation and application experiments of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>2.5-10</sub> during Nanjing Youth Olympic Games [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 331-341.
- [26] Luby E M, Moorman T B, Soupir M L. Fate and transport of tylosin-resistant bacteria and macrolide resistance genes in artificially drained agricultural fields receiving swine manure [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **550**: 1126-1133.
- [27] Zhang Y J, Li H C, Gu J, *et al.* Effects of adding different surfactants on antibiotic resistance genes and *intI1* during chicken manure composting [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **219**: 545-551.
- [28] Qian X, Sun W, Gu J, *et al.* Variable effects of oxytetracycline on antibiotic resistance gene abundance and the bacterial community during aerobic composting of cow manure [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **315**: 61-69.
- [29] Cheng W X, Chen H, Su C, *et al.* Abundance and persistence of antibiotic resistance genes in livestock farms; a comprehensive investigation in eastern China [J]. *Environment International*, 2013, **61**: 1-7.
- [30] Gao M, Qiu T L, Sun Y M, *et al.* The abundance and diversity of antibiotic resistance genes in the atmospheric environment of composting plants [J]. *Environment International*, 2018, **116**: 229-238.
- [31] WHO. WHO Director-general delivers lecture at Georgetown university's global futures initiative [EB/OL]. <http://www.who.int/dg/speeches/2015/georgetown-university-lecture/en/>, 2015-09-30.

## CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	( 513 )
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i>	( 525 )
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i>	( 532 )
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i>	( 540 )
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i>	( 548 )
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i>	( 558 )
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM <sub>2.5</sub> of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i>	( 567 )
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i>	( 573 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	( 582 )
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i>	( 590 )
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i>	( 603 )
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i>	( 614 )
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i>	( 625 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i>	( 633 )
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i>	( 640 )
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	( 649 )
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i>	( 658 )
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i>	( 669 )
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i>	( 677 )
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	( 685 )
Preparation of ZnTiO <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	( 693 )
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO <sub>2</sub> Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i>	( 701 )
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i>	( 708 )
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	( 717 )
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i>	( 724 )
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Jian, <i>et al.</i>	( 730 )
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i>	( 738 )
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i>	( 747 )
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i>	( 754 )
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i>	( 761 )
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i>	( 768 )
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i>	( 774 )
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i>	( 783 )
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i>	( 791 )
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i>	( 799 )
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	( 808 )
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i>	( 816 )
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i>	( 823 )
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	( 829 )
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	( 837 )
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i>	( 845 )
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i>	( 853 )
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i>	( 859 )
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i>	( 869 )
Effect of Nitrification on N <sub>2</sub> O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i>	( 876 )
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N <sub>2</sub> O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i>	( 885 )
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N <sub>2</sub> O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i>	( 893 )
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i>	( 904 )
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i>	( 915 )
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i>	( 924 )
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i>	( 934 )
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i>	( 945 )
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i>	( 953 )
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i>	( 961 )
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	( 970 )
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i>	( 978 )
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i>	( 987 )
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i>	( 994 )
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i>	( 1003 )