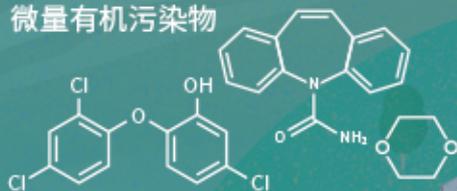


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路  
王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



## 深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

污水达标排放

下游城市水源地

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期  
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

城市环境生物安全研究的进展与挑战 ..... 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)  
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 ..... 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)  
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 ..... 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

北京大气 PM<sub>2.5</sub> 携带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 ..... 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)  
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度特征及相关性分析 ..... 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)  
天津市 PM<sub>2.5</sub> 中二次硝酸盐形成及防控 ..... 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)  
南京市大气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 ..... 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)  
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 ..... 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)  
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析 .....  
..... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沫, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)  
气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 ..... 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)  
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析 .....  
..... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)  
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 ..... 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)  
基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 ..... 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)  
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 ..... 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)  
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 ..... 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)  
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 ..... 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)  
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 ..... 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)  
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 ..... 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)  
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 ..... 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)  
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 ..... 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)  
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 ..... 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)  
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 ..... 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)  
不同流域水陆过渡带磷有效态的特征对比及环境意义 ..... 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)  
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析 .....  
..... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)  
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 ..... 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)  
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 ..... 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)  
太湖流域上游南苕溪水夏季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素 .....  
..... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)  
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 ..... 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)  
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 ..... 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)  
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 ..... 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)  
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 ..... 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)  
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 ..... 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)  
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs ..... 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)  
pg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 ..... 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)  
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 ..... 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 牟诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)  
超顺磁性纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 功能化材料对镉的吸附机制 ..... 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)  
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 ..... 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)  
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 ..... 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)  
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 ..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)  
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 ..... 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)  
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 ..... 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)  
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 ..... 黄福义, 周曙仝, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)  
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 ..... 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)  
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响 .....  
..... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)  
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 ..... 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)  
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 ..... 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)  
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 ..... 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)  
调理剂对磷镉富集土壤中两种元素交互作用的影响 ..... 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)  
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 ..... 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)  
连续 4 个生长季大气 CO<sub>2</sub> 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征 .....  
..... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)  
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 ..... 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)  
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 ..... 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤祿, 蒋敏, 宋琪 (3063)  
罗红霉素对大型溛孳殖生长及抗氧化系统的影响 ..... 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)  
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染响应关系 ..... 冯兆忠, 彭金龙 (3084)  
《环境科学》征订启事 (2698) 《环境科学》征稿简则 (2712) 信息 (3027, 3055, 3073)

# 不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性

黄福义<sup>1,2</sup>, 周曙仡<sup>1,2</sup>, 王佳妮<sup>1</sup>, 苏建强<sup>1,2</sup>, 李虎<sup>1,2\*</sup>

(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:** 土壤作为地球关键带最为活跃的组成部分, 在保障粮食安全和维持生态环境平衡中发挥着重要作用. 农田土壤抗生素抗性基因(antibiotic resistance genes, ARGs)污染特征和传播扩散机制受到了广泛的关注. 为全面探究不同作物种植情况下农田土壤抗生素抗性基因污染特征, 明确不同作物农田土壤抗性基因的多样性及其影响因素, 本文采用抗生素抗性基因高通量qPCR技术(HT-qPCR), 对不同作物农田土壤抗生素抗性基因的多样性展开了研究. 结果表明, 农田土壤总计检出187种抗生素抗性基因, 种植柑橘(GJ)、花生(HS)、水稻(SD)、甘蔗(GZ)和香蕉(XJ)的土壤中分别检测出抗生素抗性基因89、147、143、157和159种, 它们的丰度介于 $6.47 \times 10^9 \sim 1.41 \times 10^{10}$  copies·g<sup>-1</sup>之间, 其中多重耐药抗性基因在农田土壤中占据显著优势. 基于R软件的envfit分析显示, As、Co、Cr、Mo、Ni和Pb显著影响农田土壤抗生素抗性基因组成( $P < 0.05$ ), 冗余分析(RDA)显示这些重金属元素对农田土壤抗生素抗性基因变化的总解释量达到了59.3%. 本研究证明, 农田土壤是抗生素抗性基因的重要存储库, 不同作物农田土壤抗性基因组成有显著差异( $P < 0.05$ ), 重金属元素对土壤抗性基因的赋存和扩散可能具有重要作用, 种植不同作物对农田土壤抗生素抗性基因多样性产生了显著影响.

**关键词:** 抗生素抗性基因; 土壤; 作物; 重金属; 多样性

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2975-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009091

## Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands

HUANG Fu-yi<sup>1,2</sup>, ZHOU Shu-yi-dan<sup>1,2</sup>, WANG Jia-ni<sup>1</sup>, SU Jian-qiang<sup>1,2</sup>, LI Hu<sup>1,2\*</sup>

(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:** Soil is the primary interface of Earth's critical zone and plays an important role in food security and sustaining environmental balance. Antibiotic resistance genes (ARGs) pose significant threat to human health and ecosystems, with croplands being intensively affected via planting patterns and the application of fertilizers. The transmission of ARGs in croplands remains largely unknown. Using high throughput quantitative Polymerase Chain Reaction (HT-qPCR) techniques, we investigated the occurrence and diversity of ARGs and their association with heavy metals in different croplands in China. A total of 187 ARGs were identified, ranging from 89 to 159 in agricultural soils. The abundance of ARGs ranged from  $6.47 \times 10^9$  to  $1.41 \times 10^{10}$  copies·g<sup>-1</sup> with multidrug resistance genes being the most abundant. Heavy metals including As, Co, Cr, Mo, Ni, and Pb were correlated with ARGs using the R package 'envfit'. Furthermore, redundancy analysis (RDA) revealed that the heavy metals explained 59.3% of the variability of ARGs in the different croplands, indicating that heavy metals might exert an important influence on the composition and transmission of ARGs. Croplands soils act as a vital reservoir and reaction media for ARGs. Different crop cultivation coupled with selection pressure of heavy metals from fertilizers could have potential impacts on the prevalence, diversity, and distribution of ARGs.

**Key words:** antibiotic resistance genes (ARGs); soil; crops; heavy metals; diversity

抗生素在20世纪被人类发现并利用以来,在医疗卫生领域能够防治相关疾病,在畜牧水产养殖业中能够提高饲料利用率和加快动物生长,因此在人类发展史上具有重要的里程碑意义. 抗生素抗性基因(antibiotic resistance genes, ARGs)在地球环境中属于古老的存在<sup>[1]</sup>,但人类活动(抗生素滥用、禽畜养殖、城市污水排放和人口全球迁徙等)加剧了环境中抗生素抗性的产生和传播<sup>[2]</sup>,甚至一些具有多重耐药性的“超级细菌”在全球不断出现<sup>[3,4]</sup>,这些致病细菌可能会引发无法医治的传染病<sup>[5]</sup>. 因此,抗生素抗性基因被认为是一种新型的具有微生物特点的环境污染物<sup>[3,6]</sup>. 过去30a,通过常规筛选培养方法,全球没有发现新的抗生素<sup>[7]</sup>,部分抗生素的效用不断降低,与此同时抗生素抗性基因在环境中

的污染与传播却越来越严重,生态环境和人类健康面临着严峻挑战.

农田土壤对保障粮食安全和生态平衡具有重要的基础性作用,目前全球都非常关注土壤安全议题<sup>[8]</sup>. 有研究表明,施用城市污泥会增加农田土壤中抗生素抗性基因丰度<sup>[9]</sup>,农田土壤施用猪粪后,水稻和小麦叶际微生物抗生素抗性基因也会显著增加<sup>[10]</sup>. 同时施用污泥和有机肥也会增加玉米叶际微生物抗生素抗性基因的种类和丰度<sup>[11]</sup>. 土壤动物的肠道微生物也会受到有机肥的影响,加快了抗生素

收稿日期: 2020-09-09; 修订日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807460, 41701280); 国家重点研发计划项目(2020YFC1806902)

作者简介: 黄福义(1987~),博士研究生,工程师,主要研究方向为环境科学与工程, E-mail: fyhuang@iue.ac.cn

\* 通信作者, E-mail: hli@iue.ac.cn

抗性基因在土壤和植物叶际的传播和扩散<sup>[12,13]</sup>. 另外,污水灌溉的农田土壤,作物摄取的抗生素及叶表具有抗性基因的微生物,可经由食物链改变人体肠道微生物组<sup>[14]</sup>. 可以看出,农作物叶际和果实的微生物组和抗生素抗性基因分布特征和驱动机制研究也成为了土壤安全和粮食安全相关研究的重要内容,特别是抗生素抗性基因可以基于农田土壤,通过土壤-微生物-动物-植物进行传播扩散<sup>[15~17]</sup>,突显了继续深入研究农田土壤抗生素抗性基因来源、污染状况和驱动机制的重要性.

农田土壤受到了自然环境和人为耕种活动的双重影响,研究种植不同作物的土壤微生物抗生素抗性基因的多样性和驱动机制具有重要意义. 目前针对稻田土壤中抗生素抗性基因污染研究相对比较多,但是对不同作物种植情况的农田土壤的相关研究则相对匮乏. 不同作物农田土壤抗生素抗性基因的污染特征和传播扩散机制还不甚明确. 本研究基于福建省龙岩市农作物种植情况,采集了本地区典型作物的农田土壤,采用高通量 qPCR 方法,从抗生素抗性基因谱的角度,综合分析了种植不同作物农田土壤的抗生素抗性基因的种类组成和丰度水平,结合相关环境因子,探究不同作物农田土壤中抗生素抗性基因的多样性、分布特征和驱动机制,以期为农田土壤的潜在微生物污染评估和土壤风险防控政策制定提供理论支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域背景与样品采集

研究区域位于福建省龙岩市雁石镇,分别采集了种植柑橘、花生、水稻、甘蔗和香蕉的土壤样品(图1),5个采样点分布在九龙江两侧,属于相对同质的地理小单元,可以避免因农田土壤背景值差异过大而不利于比较研究的问题. 基于网格布点法,对每个采样点进行土壤样品采集,每个点位采集3个重复样品. 采集的新鲜土壤及时送回实验室,一部分自然风干,用于后续的重金属元素分析;一部分直接放置于-20℃冰箱冻存,用于后续的土壤微生物组DNA的提取.

### 1.2 农田土壤样品重金属元素分析

农田土壤在实验室自然通风晾干后,用玛瑙研钵进行充分研磨,后用200目(保证样品的均匀度,提高样品密度)尼龙网筛过滤得到土壤样品约20g,装入自封袋干燥保存. 每个土壤样品称重约4g,添加硼酸粉末进行压片制作上机土壤样品,采用X射线荧光光谱仪(XRF, Axios mAX, PANalytical, 荷兰)测定农田土壤中的Ag、As、Cd、Co、Cr、Cu、

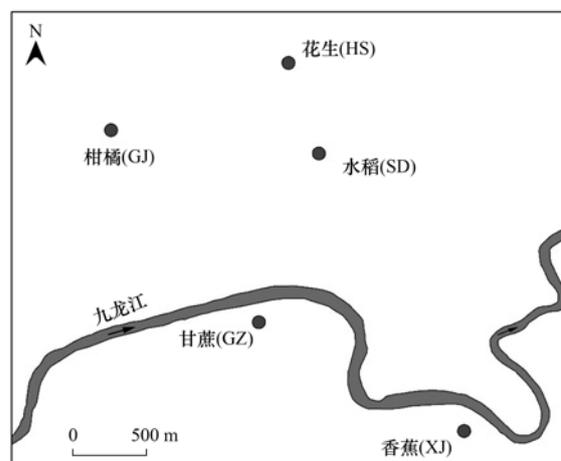


图1 不同作物农田土壤采样点地理位置分布示意

Fig. 1 Sampling sites in different croplands

Mo、Ni、Pb和Zn等重(类)金属元素含量.

### 1.3 农田土壤微生物组DNA提取

将实验室保存的农田土壤样品,室温解冻后,精确称取重约0.5g的土样,选用FastDNA spin kit for soil (MP Biomedicals, 美国)试剂盒,按照说明书的标准流程方法提取农田土壤微生物组总DNA, DNA洗脱体积统一为100 μL,提取所得DNA样品存储在-80℃冰箱超低温冻存.

### 1.4 常规定量PCR与高通量定量PCR

细菌16S rRNA基因的常规定量PCR扩增分析是使用LightCyclerRR 480 SYBRRR I Master试剂(Roche Diagnostics, 美国)在LightCyclerRR 480 II荧光定量PCR仪(Roche Diagnostics Ltd., 瑞士)上进行. 用于做标准曲线的16S rRNA质粒初始浓度为 $1.5 \times 10^{10}$  copies·μL<sup>-1</sup>, 浓度变化范围为 $10^3 \sim 10^9$  copies·μL<sup>-1</sup>. 常规定量PCR反应体系为20 μL, 其中包括10 μL的SYBRRR I Master试剂, 7 μL的PCR级超纯水, 上、下游引物各1 μL, 农田土壤DNA样品1 μL.

高通量qPCR (HT-qPCR) 系统平台是日本TaKaRa集团公司旗下的SmartChip Real-Time PCR Systems, 选择的目标基因、PCR反应条件和数据初筛参考文献[18]. 该HT-qPCR平台单孔PCR反应体积为100 nL, 最大通量为5184个PCR, 具有样品组合灵活、平均成本低和通量高的优势. HT-qPCR反应结束后, 自动进行熔解曲线分析, 获得PCR效率介于1.85~2.15的有效Ct值.

### 1.5 数据统计与分析

HT-qPCR得到的16S rRNA基因Ct值, 计算其相应的拷贝数(丰度), 与常规定量PCR的16S rRNA基因丰度结合分析, 得到农田土壤中各抗生素抗性基因的绝对丰度<sup>[18]</sup>. HT-qPCR的数据通过

Microsoft 公司的 Excel 2019 计算整理, 采用 IBM SPSS 22.0 进行显著性和普通相关性分析, 采用 OriginPro 9.1 进行直方图等作图, 采用 R 4.0.1 软件版本进行了热图分析(heatmap)和环境因子冗余分析(redundancy analysis, RDA).

## 2 结果与分析

### 2.1 不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性

不同作物农田土壤总共检测出 187 种抗生素抗性基因, 11 种可移动遗传元件 (mobile genetic elements, MGEs), MGEs 包含有 8 个转座子基因和 3 个整合子基因(图 2). 各个不同作物的农田土壤平均检测出 139 种抗生素抗性基因, 种植柑橘(GJ)的土壤最少, 为 89 种, 种植香蕉(XJ)的土壤最多, 为 159 种. 检测出可移动遗传元件的数量范围为 4~9 种, 其中种植甘蔗(GZ)和香蕉(XJ)的都检测到了 9 种可移动遗传元件. 农田土壤中, 抗生素抗性基因类型比较多样, 主要有多重耐药类抗性基因 (multidrug, 22.73%)、四环素类抗性基因 (tetracycline, 16.55%)、 $\beta$ -内酰胺类抗性基因 ( $\beta$ -lactam, 15.83%)、MLS B 类抗性基因 (MLS B, 14.96%)、氨基糖苷类抗性基因 (aminoglycoside, 13.81%)、万古霉素类抗性基因 (vancomycin, 8.35%)、FCA 类抗性基因 (FCA, 3.60%)、磺胺类抗性基因 (sulfonamide, 2.45%) 和其它类抗性基因 (others, 1.73%).

### 2.2 不同作物农田土壤抗生素抗性基因的丰度水平

对土壤中抗生素抗性基因的丰度水平进行分析(图 3), 结果表明不同作物农田土壤抗生素抗性基因丰度的范围为  $6.47 \times 10^9 \sim 1.41 \times 10^{10}$  copies  $\cdot$  g $^{-1}$

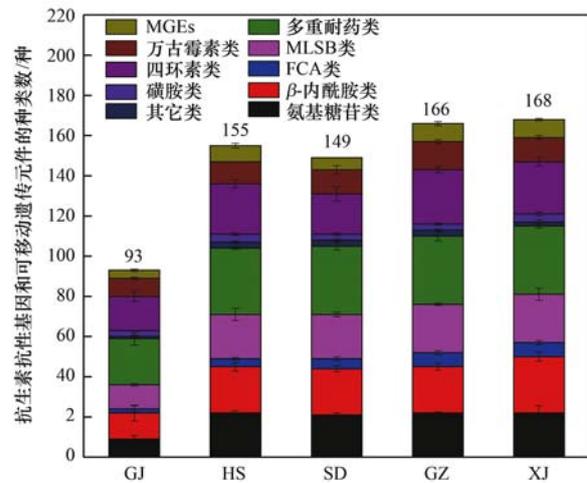


图 2 不同作物农田土壤抗生素抗性基因和可移动遗传元件的种类分布

Fig. 2 Number of ARGs and MGEs in different croplands

之间. 方差分析 (ANOVA) 表明, 不同作物农田土壤抗生素抗性基因的丰度有显著差异 ( $P < 0.05$ ). 5 个不同农田土壤中, 种植香蕉(XJ)的农田土壤丰度最高, 为  $1.41 \times 10^{10}$  copies  $\cdot$  g $^{-1}$ , 种植柑橘的土壤抗性基因为最低, 为  $6.47 \times 10^9$  copies  $\cdot$  g $^{-1}$ , 这与两者抗生素抗性基因种类数高低相一致; 但是种植甘蔗(GZ)的土壤抗性基因丰度为  $7.96 \times 10^9$  copies  $\cdot$  g $^{-1}$ , 相对较低, 而其相应的抗生素抗性基因种类数则相对较高. 此外, 种植花生(HS)和水稻(SD)的农田土壤抗生素抗性基因分别为  $1.10 \times 10^{10}$  和  $1.28 \times 10^{10}$  copies  $\cdot$  g $^{-1}$ . 不同作物农田土壤中各类抗性基因丰度占据显著优势的是多重耐药抗性基因 (multidrug), MLS B 类和万古霉素类抗性基因 (vancomycin) 在农田土壤中的丰度相对其它类型抗性基因也处于比较高的水平(图 3). 此外, 土壤中可

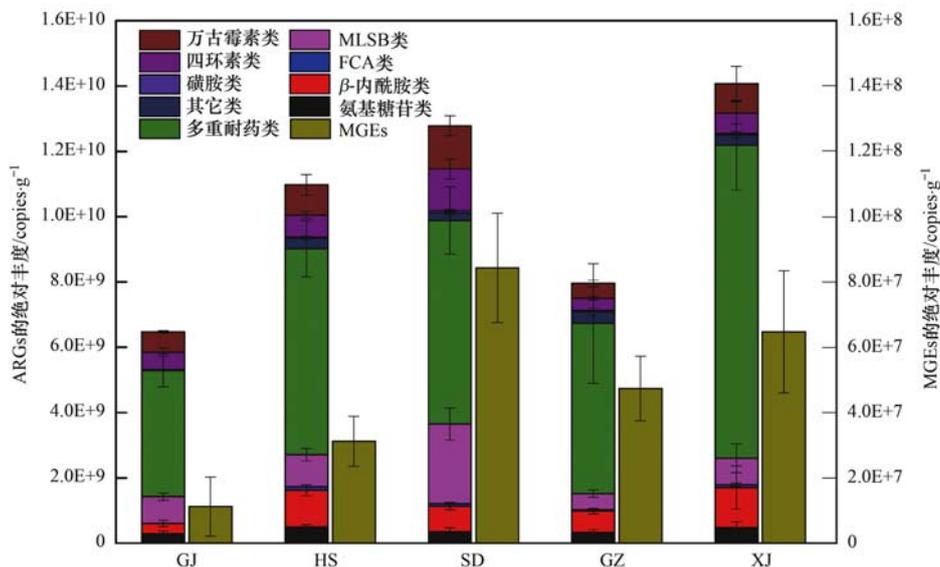


图 3 不同作物农田土壤抗生素抗性基因和可移动遗传元件的丰度

Fig. 3 Abundance of ARGs and MGEs in different croplands

移动遗传元件的丰度分布,整体上与其抗生素抗性基因丰度相一致,范围为  $1.12 \times 10^7 \sim 8.43 \times 10^7$  copies·g<sup>-1</sup>之间,总体比对应的农田土壤抗生素抗性基因低 2~3 个数量级.

### 2.3 不同作物农田土壤抗生素抗性基因的组成比较分析

基于种植不同作物农田土壤中抗生素抗性基因的组成和丰度,经聚类热图分析可以很好展示抗生素抗性基因的组成差异和相互关系(图4).结果表明,农田土壤中抗生素抗性基因根据不同的类型,聚类成了 A、B 和 C 这 3 大簇,形成了不同作物种植模式下的农田土壤抗生素抗性基因的总体分布格局.

农田土壤中,多重耐药内抗生素抗性的丰度(multidrug)与总体抗性基因关系最为密切(B簇),由于其丰度在不同作物农田土壤中都是最高的,暗示着多重耐药基因在农田土壤中的主导优势地位.而 C 簇,氨基糖苷类抗性基因(aminoglycoside)、β-内酰胺类抗性基因(β-lactam)、MSLB 类抗性基因、四环素类抗性基因(tetracycline)和万古霉素类(vancomycin)抗性基因这 5 类抗性基因的数量级差异不大,在农田土壤抗性基因种类数最多,各类抗性基因关系可能比较密切,因此聚类成同一簇. A 簇中的抗性基因总体丰度较低,种类较少,与 B 簇和 C 簇有显著差异而独自聚类成簇; A 簇主要有磺胺类抗性基因(sulfonamide)和 FCA 类抗生素抗性基因组成,不同作物农田土壤差异显著,特别是种植柑橘的农田土壤(GJ)抗性基因丰度最低;此外,可移动遗传元件(MGEs)也聚类在此处,暗示着在抗性基因丰度相对较低的情况下,这三者存在一定相关关系.

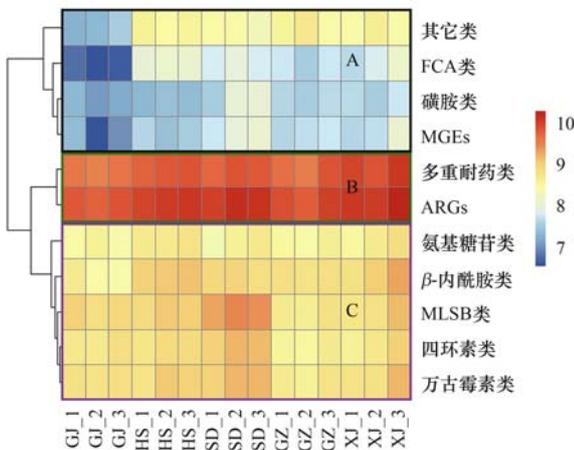


图 4 不同作物农田土壤抗生素抗性基因组成分布特征  
Fig. 4 Patterns of ARGs in different croplands

### 2.4 农田土壤中重(类)金属元素与抗生素抗性基因的冗余分析

根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控

标准(试行)》(GB 15618-2018),本研究中的农田土壤中重(类)金属元素的浓度低于该标准中农用地土壤污染风险筛选值,显示土壤质量较好.进一步对各采样点农田土壤抗生素抗性基因与重(类)金属元素进行冗余分析(RDA),得到在不同农作物种植模式下,农田土壤抗生素抗性基因与 As、Co、Cr、Mo、Ni 和 Pb 这 6 种重(类)金属元素显著相关的结果( $P < 0.05$ ).这些重(类)金属元素对农田土壤抗生素抗性基因的多样性变化的总解释量为 59.3%,在第一轴和第二轴的解释量分别为 26.75% 和 10.95%.图 5 可以看出,种植柑橘的农田土壤(GJ)抗生素抗性基因与 As、Mo 和 Cr 显著正相关;种植花生(HS)、甘蔗(GZ)和香蕉(XJ)的土壤与 Co 和 Pb 元素含量显著正相关;种植水稻的土壤与 Ni 含量显著正相关.因此,重(类)金属元素对农田土壤中抗生素抗性基因赋存和演变可能有着密切关系.

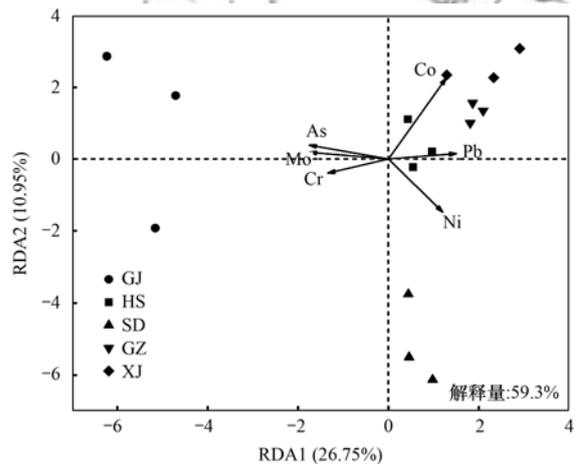


图 5 土壤重金属元素与抗生素抗性基因的冗余分析  
Fig. 5 Redundancy analysis depicting the relationship between ARGs and heavy metals

### 3 讨论

本研究采用高通量 qPCR 技术对农田土壤抗生素抗性基因进行了检测与定量,用以评估不同作物种植模式下农田土壤抗生素抗性基因的多样性、分布特征和影响因素.不同作物(5 种作物,图 1)农田土壤中检出种类和丰度最高的均是多重耐药抗性基因(图 3 和图 4).这可能是由于长期施用猪粪堆肥等有机肥料所造成的.有机肥和化肥的施用(不同的氮磷元素营养水平,也可能引入各类重金属元素)对农田土壤抗生素抗性基因的赋存与演变有重要影响<sup>[11]</sup>.据走访调查,本研究中的农田土壤(除了种植柑橘土壤)在 2003 年以前长期使用猪粪堆肥等有机肥料,后续慢慢转变成施用化肥为主,种植柑橘的地块以前是次生林地,2014 年开荒为种植柑橘的果园地,主要使用化肥.猪粪等有机肥在农田土壤

中的施用是我国农业的一个显著特点,但是有机肥施用也给农田土壤引入了多重耐药类等抗性基因和重金属元素<sup>[9,19]</sup>。Du 等<sup>[20]</sup>的研究也发现,种植玉米和大豆的农田土壤,占据主导优势的也是多重耐药基因。因此不同作物的农田土壤可能都有此相似特征。多重耐药基因一般与禽畜动物肠道微生物组密切相关<sup>[21]</sup>,施用禽畜粪肥等有机肥的农业生产实践活动,可能使得土壤微生物通过水平基因转移机制,加快了微生物抗生素抗性基因在土壤中的增殖扩散<sup>[22]</sup>,并可能传递到作物叶际表面<sup>[12]</sup>,抗生素抗性基因在土壤-植物系统的传递给农田土壤生态系统带来了环境风险<sup>[17]</sup>。多重耐药基因的存在使得很多抗生素的治疗效果大为降低,含有多重耐药基因的微生物在环境中的增殖和扩散现象,对人类和禽畜的健康是重要的威胁<sup>[23]</sup>。此外,不同作物根系分泌物会影响根系土壤及微生物<sup>[24]</sup>,不同作物与土壤类型的组合也会显著改变根际微生物群落结构<sup>[25]</sup>,进而影响农田土壤抗生素抗性基因的组成。

金属元素(特别是 Cu 和 Zn)和抗生素对抗性基因的赋存和进化可能存在共选择的关系<sup>[22,26,27]</sup>。但本研究中,Cu 和 Zn 与不同作物农田土壤抗生素抗性基因相关关系不显著( $P > 0.05$ ),可能与土壤中这类金属元素处于极低水平有关。图 5 显示,种植柑橘土壤(GJ)与砷(As)、钼(Mo)和铬(Cr)显著正相关,种植花生(HS)、甘蔗(GZ)和香蕉(XJ)的土壤与钴(Co)、镍(Ni)、铅(Pb)元素含量显著正相关,种植水稻的土壤与 Ni 含量显著正相关。砷抗性基因和抗生素抗性基因具有共选择/共抗性的特点<sup>[22,28]</sup>,而 Co、Cr、Ni、Pb 和微量元素 Mo 的相关研究比较少。本研究显示金属元素与抗生素抗性基因关系很密切,可能需要根据重(类)金属元素在土壤中的转化形态与功能,结合不同作物种植、施肥措施等对土壤的理化性质和土壤微生物群落结构的影响,做进一步深入研究。

#### 4 结论

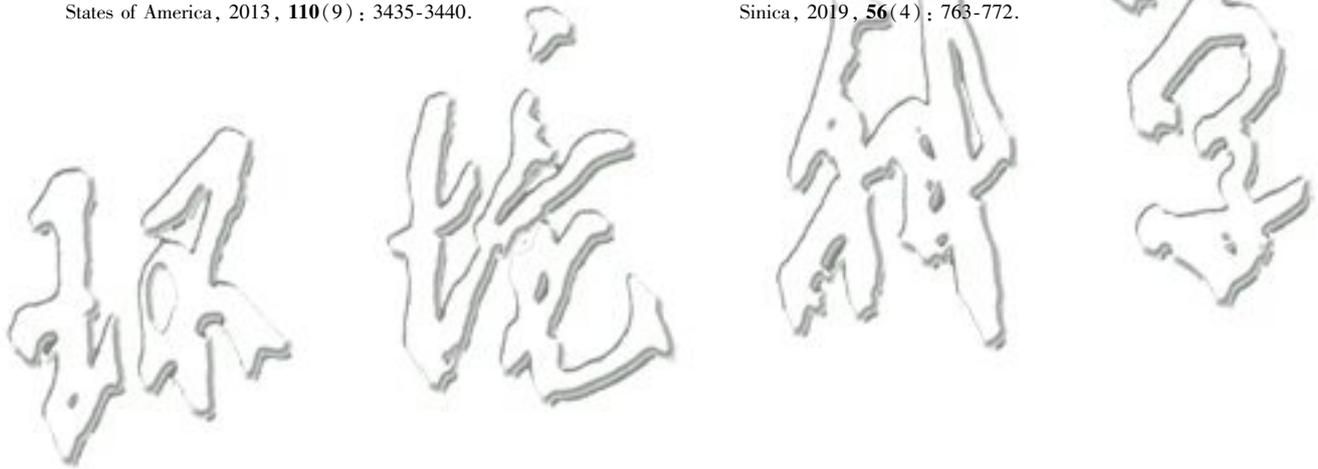
(1) 农田土壤是环境抗生素抗性基因的一个重要存储库,不同作物农田土壤抗生素抗性基因的种类和丰度有显著差异,种植不同作物的农业生产活动影响了农田土壤抗生素抗性基因的赋存和演变。

(2) 农田土壤抗生素抗性基因与砷(As)、钴(Co)、铬(Cr)、钼(Mo)、镍(Ni)和铅(Pb)这 6 种元素显著相关,重(类)金属可能促进抗生素抗性基因的富集与传播,增加了农田土壤抗生素抗性基因污染的生态风险。

#### 参考文献:

- [ 1 ] D'Costa V M, King C E, Kalan L, *et al.* Antibiotic resistance is ancient[J]. *Nature*, 2011, **477**(7365): 457-461.
- [ 2 ] Zhu Y G, Penuelas J. Changes in the environmental microbiome in the Anthropocene[J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(6): 3175-3177.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] Zhu Y G, Gillings M, Simonet P, *et al.* Microbial mass movements[J]. *Science*, 2017, **357**(6356): 1099-1100.
- [ 5 ] MacLean R C, San Millan A. The evolution of antibiotic resistance[J]. *Science*, 2019, **365**(6458): 1082-1083.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] Lewis K. The science of antibiotic discovery [J]. *Cell*, 2020, **181**(1): 29-45.
- [ 8 ] 沈仁芳, 颜晓元, 张甘霖, 等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. *土壤学报*, 2020, **57**(5): 1051-1059.  
Shen R F, Yan X Y, Zhang G L, *et al.* Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(5): 1051-1059.
- [ 9 ] Chen Q L, An X L, Li H, *et al.* Long-term field application of sewage sludge increases the abundance of antibiotic resistance genes in soil [J]. *Environment International*, 2016, **92-93**: 1-10.
- [ 10 ] Zhou S Y D, Zhu D, Giles M, *et al.* Phyllosphere of staple crops under pig manure fertilization, a reservoir of antibiotic resistance genes[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **252**: 227-235.
- [ 11 ] Chen Q L, An X L, Zheng B X, *et al.* Long-term organic fertilization increased antibiotic resistome in phyllosphere of maize [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **645**: 1230-1237.
- [ 12 ] Zhou S Y D, Zhu D, Giles M, *et al.* Does reduced usage of antibiotics in livestock production mitigate the spread of antibiotic resistance in soil, earthworm guts, and the phyllosphere? [J]. *Environment International*, 2020, **136**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105359.
- [ 13 ] Zhu D, Ding J, Yin Y, *et al.* Effects of earthworms on the microbiomes and antibiotic resistomes of detritus fauna and phyllospheres[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(10): 6000-6008.
- [ 14 ] Gudda F O, Waigi M G, Odinga E S, *et al.* Antibiotic-contaminated wastewater irrigated vegetables pose resistance selection risks to the gut microbiome [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114752.
- [ 15 ] Chen Q L, Cui H L, Su J Q, *et al.* Antibiotic resistomes in plant microbiomes[J]. *Trends in Plant Science*, 2019, **24**(6): 530-541.
- [ 16 ] He J Z, Yan Z Z, Chen Q L. Transmission of antibiotic resistance genes in agroecosystems: an overview[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, **7**(3): 329-332.
- [ 17 ] 朱冬, 陈青林, 丁晶, 等. 土壤生态系统中抗生素抗性基因与星球健康: 进展与展望[J]. *中国科学: 生命科学*, 2019, **49**(12): 1652-1663.  
Zhu D, Chen Q L, Ding J, *et al.* Antibiotic resistance genes in the soil ecosystem and planetary health: Progress and prospect [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2019, **49**(12): 1652-1663.

- [18] Zhao Y, Su J Q, An X L, *et al.* Feed additives shift gut microbiota and enrich antibiotic resistance in swine gut [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **621**: 1224-1232.
- [19] 何燕, 朱冬, 王东, 等. 四川省稻田土壤的抗生素抗性基因多样性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(6): 1249-1258.  
He Y, Zhu D, Wang D, *et al.* Diversity of antibiotic resistance genes in paddy soils in Sichuan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(6): 1249-1258.
- [20] Du S, Shen J P, Hu H W, *et al.* Large-scale patterns of soil antibiotic resistome in Chinese croplands [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **712**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136418.
- [21] Kent A G, Vill A C, Shi Q J, *et al.* Widespread transfer of mobile antibiotic resistance genes within individual gut microbiomes revealed through bacterial Hi-C [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**, doi: 10.1038/s41467-020-18164-7.
- [22] 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.
- [23] Tanwar J, Das S, Fatima Z, *et al.* Multidrug resistance: an emerging crisis [J]. *Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases*, 2014, **2014**, doi: 10.1155/2014/541340.
- [24] Hartmann A, Schmid M, van Tuinen D, *et al.* Plant-driven selection of microbes [J]. *Plant and Soil*, 2009, **321**(1-2): 235-257.
- [25] Berg G, Smalla K. Plant species and soil type cooperatively shape the structure and function of microbial communities in the rhizosphere [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, **68**(1): 1-13.
- [26] Poole K. At the nexus of antibiotics and metals: the impact of Cu and Zn on antibiotic activity and resistance [J]. *Trends in Microbiology*, 2017, **25**(10): 820-832.
- [27] Dickinson A W, Power A, Hansen M G, *et al.* Heavy metal pollution and co-selection for antibiotic resistance: A microbial palaeontology approach [J]. *Environment International*, 2019, **132**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105117.
- [28] 薛喜枚, 朱永官. 土壤中砷的生物转化及砷与抗生素抗性的关联[J]. *土壤学报*, 2019, **56**(4): 763-772.  
Xue X M, Zhu Y G. Arsenic biotransformation in soils and its relationship with antibiotic resistance [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(4): 763-772.



## CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments .....	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i>	(2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation .....	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i>	(2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant .....	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i>	(2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs .....	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i>	(2595)
MAIAC AOD and PM <sub>2.5</sub> Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas .....	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i>	(2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM <sub>2.5</sub> in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> of Nanjing, China .....	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i>	(2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain .....	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i>	(2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer .....	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i>	(2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols .....	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i>	(2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data .....	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i>	(2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O <sub>3</sub> and NO <sub>2</sub> in Shijiazhuang .....	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i>	(2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan .....	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization .....	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i>	(2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations .....	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i>	(2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration .....	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan	(2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing .....	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i>	(2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources .....	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i>	(2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks .....	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i>	(2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model .....	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i>	(2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality .....	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i>	(2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model .....	WANY Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i>	(2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance .....	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i>	(2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods .....	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i>	(2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands .....	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui	(2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments .....	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng	(2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantiaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn .....	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i>	(2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake .....	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang	(2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping .....	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i>	(2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment .....	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i>	(2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River .....	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua	(2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands .....	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i>	(2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs .....	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i>	(2885)
Preparation of pg-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole .....	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i>	(2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water .....	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jian, <i>et al.</i>	(2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> Functionalized Materials .....	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i>	(2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants .....	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i>	(2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors .....	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i>	(2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules .....	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i>	(2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge .....	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge .....	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yang, <i>et al.</i>	(2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i>	(2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia .....	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure .....	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i>	(2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices .....	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i>	(3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone .....	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i>	(3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas .....	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i>	(3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium .....	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i>	(3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings .....	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO <sub>2</sub> on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils .....	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i>	(3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i> .....	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i>	(3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities .....	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i>	(3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i> .....	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i>	(3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China .....	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long	(3084)