

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示  
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期  
Vol.43 No.2

# 目次

## 综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 ..... 李勤之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 ..... 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

## 研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 ..... 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的  $PM_{2.5}$  来源解析对比 ..... 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季  $PM_{2.5}$  中水溶性离子污染特征及来源分析 ..... 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博2021年元宵节  $PM_{2.5}$  水溶性离子污染特征 ..... 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物  $PM_{2.5}$  中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 ..... 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019年气象条件对江苏省  $PM_{2.5}$  分布的影响 ..... 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域  $PM_{2.5}$  预报比较分析 ..... 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 ..... 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 ..... 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 ..... 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 ..... 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 ..... 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 ..... 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 ..... 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 ..... 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 ..... 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 ..... 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 ..... 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流水污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 ..... 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 ..... 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 ..... 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 ..... 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 ..... 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 ..... 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 ..... 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 ..... 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 ..... 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 ..... 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 ..... 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 ..... 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 ..... 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 ..... 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 ..... 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 ..... 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 ..... 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 ..... 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 ..... 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 ..... 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 ..... 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 ..... 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 ..... 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 ..... 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 ..... 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 ..... 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 ..... 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 ..... 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 ..... 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 ..... 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 ..... 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 ..... 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 ..... 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 ..... 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) ..... 信息(685, 935, 956)

# 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子

韩柳<sup>1</sup>, 楼倩<sup>1</sup>, 乔敏<sup>2</sup>, 刘梦婷<sup>1</sup>, 钟家有<sup>1</sup>, 丁惠君<sup>1\*</sup>

(1. 江西省水利科学院江西省鄱阳湖水资源与环境重点实验室, 南昌 330029; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 环境抗生素抗性基因( ARGs)污染作为一类新型污染物受到广泛关注. 本研究采用高通量荧光定量 PCR( HT-qPCR) 技术, 研究了江西省德兴铜矿区周边 7 个采样点 ARGs 和可移动遗传元件( MGEs) 的种类、丰度和影响因素. 结果表明, 德兴铜矿区具有多样的 ARGs, 个别点位 ARGs 最大检出数达 70 种. 在相对丰度水平上, 个别点位 ARGs 相对丰度达到 0.085. ARGs 与 MGEs 相对丰度呈显著正相关( $P < 0.05$ ), *TnpA04* 和 *Int1* 是德兴铜矿最主要的 MGEs, 推测水平基因转移是采样区环境 ARGs 传播的重要机制. Pearson 相关性分析和 RDA 分析结果表明, 重金属 Cu 含量与 ARGs 检出种类和丰度均呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ), 提示德兴铜矿区 Cu 的高含量存在可能是该区域 ARGs 形成的重要驱动因子.

**关键词:** 德兴铜矿; 重金属; 抗生素抗性基因( ARGs); 驱动因子; 高通量荧光定量 PCR( HT-qPCR)

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-1089-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105243

## Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine

HAN Liu<sup>1</sup>, LOU Qian<sup>1</sup>, QIAO Min<sup>2</sup>, LIU Meng-ting<sup>1</sup>, ZHONG Jia-you<sup>1</sup>, DING Hui-jun<sup>1\*</sup>

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment of Poyang Lake, Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Environmental antibiotic resistance genes (ARGs) are a type of emerging pollutant that has been widely concerning. However, investigations into the contamination of ARGs in mining areas have been scarce. Here, the types, abundances, and influencing factors of ARGs and mobile genetic elements (MGEs) were investigated in soil/sediment of the Dexing copper mine area in June 2019 by using high-throughput quantitative polymerase chain reaction (HT-qPCR). Furthermore, the influence of heavy metals and MGEs factors on ARGs was studied using the multivariate statistical analysis method. The results showed that there were a variety of ARGs in the Dexing copper mining area, and the maximum detected number of ARGs was 70. At the relative abundance level, the relative abundance of individual sites reached 0.085. In the Dexing copper mine, multidrug, MLSB,  $\beta$ -lactamases, tetracycline, and aminoglycoside resistance genes were the dominant ARG classes based on their numbers. The efflux pump was the most dominant resistance mechanism, followed by antibiotic deactivation and cellular protection. There was a significant positive correlation between the abundance of ARGs and MGEs ( $P < 0.05$ ), and *TnpA04* and *Int1* were the most important MGEs in Dexing copper mine samples, indicating that horizontal gene transfer might be an important mechanism for the spread of environmental ARGs. The results of Pearson correlation analysis and RDA analysis showed that the content of Cu was significantly positively correlated with the detected numbers and abundance of ARGs ( $P < 0.05$ ), suggesting that the high content of Cu in the Dexing copper mining area might be an important driving factor for the formation of ARGs.

**Key words:** Dexing copper mine; heavy metals; antibiotic resistance genes (ARGs); driving factors; high-throughput quantitative polymerase chain reaction (HT-qPCR)

早在 1943 年,青霉素就被引入临床治疗. 到目前为止,已有数千种抗生素被应用于医疗、水产养殖和动植物生产等领域. 然而,由于抗生素的不合理应用导致的细菌耐药性增强和抗生素抗性基因(antibiotic resistance genes, ARGs)加速传播日益严重<sup>[1]</sup>. 全球因微生物耐药性引起的健康问题,导致每年需要花费大约 1 万亿欧元支出<sup>[2]</sup>. 预测到 2050 年,每年因耐药性微生物感染致死的人数将达上千万人<sup>[3]</sup>. 2006 年 Pruden 等<sup>[4]</sup>的研究第一次将 ARGs 作为新型环境污染提出之后,许多学者在医疗废水<sup>[5]</sup>、养殖废水<sup>[6,7]</sup>、污水处理厂<sup>[8~10]</sup>、地下水<sup>[11]</sup>、河流海洋<sup>[12]</sup>、地表水<sup>[13]</sup>、沉积物<sup>[14~16]</sup>、土壤<sup>[17~20]</sup>和空气中<sup>[21,22]</sup>都检测到 ARGs 的存在,而一旦含有 ARGs 的菌群成为优势菌种,将对当地生态环境安全和人类健康造成极大的危害.

土壤中含有种类丰富的微生物,也是 ARGs 巨大的储存库,研究者们从远离人类活动干扰的北极、阿拉斯加冻土中提取到的 DNA 中发现存在对  $\beta$ -内酰胺类、四环素类、糖肽类和氯霉素类等抗性的基因<sup>[23~25]</sup>,说明 ARGs 存在于原始的自然环境中. 林岚等<sup>[15]</sup>的研究通过分析西太平洋深海和黄海沉积物中抗性基因含量的差别,发现人类活动导致的环境变化会使微生物在面对环境选择压力时能够产生耐受性,加速 ARGs 的传播.

抗生素是环境抗生素抗性的选择压力已经成为

收稿日期: 2021-05-24; 修订日期: 2021-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51869006); 江西省自然科学基金项目(20171BAB216050); 江西省水利科技项目(KT201702, 202124ZDKT10); 江西省鄱阳湖水资源与环境重点实验室开放研究基金项目(2020GPSYS03)

作者简介: 韩柳(1987~),女,硕士研究生,工程师,主要研究方向为生态环境治理, E-mail: chinahanliu@163.com

\* 通信作者, E-mail: dingdinghuijun@163.com

普遍共识<sup>[26]</sup>,而重金属近年来也作为环境微生物抗生素抗性选择压力而被大量研究.有研究表明,土壤中的重金属 Cu 会提高大环内酯类抗性基因<sup>[27]</sup>、四环素类抗性基因和万古霉素抗性基因<sup>[28]</sup>的丰度,土壤中 Zn 和 Cu 的累积可能导致磺胺类与四环素类抗性基因的丰度增加<sup>[29]</sup>.基因水平转移是 ARGs 在环境中传播扩散的重要机制<sup>[30]</sup>,可移动的基因元件可通过接合、转化和转导等方式将 ARGs 从一株菌转移到另一株菌中,从而使后者获得抗性.矿区环境受到采矿活动影响,重金属污染较严重,目前针对矿区土壤环境 ARGs 的相关研究还比较少,本研究通过高通量荧光定量 PCR (HT-qPCR) 技术,对亚洲最大露天铜矿——江西省德兴铜矿周边土壤和沉积物环境中 ARGs 和可移动元件 (mobile genetic elements, MGEs) 的种类和丰度进行分析,并探究环境重金属和 MGEs 对检出抗性基因种类和丰度的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

德兴铜矿位于江西省上饶市德兴市信江流域乐安河附近,是亚洲最大的铜矿之一<sup>[31]</sup>,也是第一大伴生金矿和伴生银矿,目前生产规模为处理矿石 10 万 t·d<sup>-1</sup>.德兴市素有“铜都”、“银城”和“金山”之称.自唐、宋以来,德兴铜矿区域就开始了铜矿开采,粗放式开采导致整个区域内零星遍布了数以百万方计的历史遗留酸性废渣和逾千个废弃矿洞<sup>[32]</sup>.

### 1.2 样品采集

2019 年 6 月,在江西省德兴市德兴铜矿区设置 7 个采样点,编号 1~7,7 个采样点布设如表 1 和图 1 所示.每个采样点采集表层 (0~10 cm) 土壤 1 kg,装入灭菌塑料袋,放置低温箱带回实验室进行下一步处理.

表 1 德兴铜矿区土壤/沉积物采样点情况

Table 1 Soil/sediment sampling sites of Dexing copper mine

| 采样点 | 名称           | 经纬度                           |
|-----|--------------|-------------------------------|
| 1   | 富家坞采矿场附近菜地土  | 117°42'42.17"E, 29°00'57.21"N |
| 2   | 富家坞采矿场山脚土    | 117°42'41.03"E, 29°00'58.38"N |
| 3   | 富家坞采矿场大坞河沉积物 | 117°42'41.63"E, 29°00'58.25"N |
| 4   | 德兴铜矿中学附近土    | 117°42'37.3"E, 29°02'16.96"N  |
| 5   | 德兴铜矿住宅小区土    | 117°41'12.74"E, 29°03'31.77"N |
| 6   | 大坞河入乐安河口沉积物  | 117°40'29.72"E, 29°04'24.62"N |
| 7   | 德兴铜矿尾矿库尾沙    | 117°44'09.55"E, 29°03'41.41"N |

### 1.3 土壤重金属含量测定

称取土壤或沉积物样品 0.5 g,浓硝酸-浓盐酸-氢氟酸-高氯酸消解后,Pb 和 Cd 用石墨炉进行测定,Cu 和 Zn 用火焰原子吸收分光光度法进行测定.

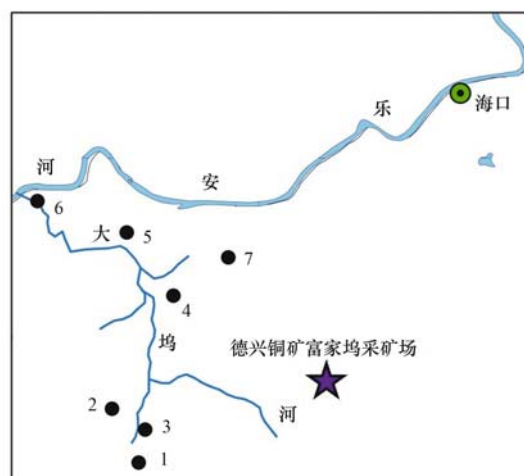


图 1 德兴铜矿区采样点分布示意

Fig. 1 Map of sampling sites of Dexing copper mine

### 1.4 DNA 提取

将采回土样充分混匀并除去土壤中的植物根系和砾石,每个编号取 2 个平行样, -80℃ 下保存至 DNA 提取.使用 FastDNA® SPIN kit for Soil 试剂盒 (MP Biomedical, 美国) 提取总 DNA,实际操作参照试剂盒内说明书,提取的 DNA 采用 Nano Drop 2000 (Thermo) 进行检测. DNA 样品于 -20℃ 下保存备用.

### 1.5 ARGs 测定

利用 Waforgen SmartChip 实时 PCR 系统 (Waforgen, Fremont, CA),采用 HT-qPCR 方法,检测各样品中的 ARGs,使用了 296 对引物,包括 283 个 ARGs、12 个 MGEs 和 1 个 16S rRNA 基因. HT-qPCR 实验操作和相对基因拷贝数计算方法等见文献[10].将每个 ARGs 的相对基因拷贝数分别除以 16S rRNA 基因的相对基因拷贝数,得到每个 ARGs 的相对丰度.

### 1.6 数据分析

处理 HT-qPCR 数据时,利用 OriginPro 2017 进行 ANOVA 分析、Pearson 相关性分析和热图分析 (Heatmap),利用 Rstudio 软件进行冗余分析 (RDA).

## 2 结果与分析

### 2.1 重金属检出含量

样品中 4 种被测重金属含量见表 2 和图 2. 7 个采样点中,Zn、Cu、Cd 和 Pb 均有超背景值的点位.其中,6 号点位  $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$  和  $\omega(\text{Cd})$  均为各点位最大值,分别为 83.73、630.50 和 1.54  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\omega(\text{Pb})$  也很高,仅次于 5 号采样点的样品,为 36.3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 6、3 和 7 号采样点  $\omega(\text{Cu})$  分别达到 630.50、506.58 和 440.99  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分别超

背景值的 31、25 和 22 倍. 6 号采样点为大坞河入乐安河口沉积物, 3 号采样点为大坞河沉积物, 7 号采样点为德兴铜矿尾矿库尾沙, 德兴铜矿区这些采样点位的 Cu 含量远超背景值, 说明人为采矿活动加剧了土壤中重金属 Cu 的污染程度, 德兴铜矿区的重金属 Cu 污染不容忽视.

表 2 德兴铜矿区土壤/沉积物指标检测结果<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>

| Table 2 Heavy metal contents of Dexing copper mine sampling sites/mg·kg <sup>-1</sup> |         |          |         |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|---------|---------|
| 采样点                                                                                   | ω( Zn)  | ω( Cu)   | ω( Cd)  | ω( Pb)  |
| 1                                                                                     | 53. 87c | 94. 04f  | 0. 24ef | 25. 52c |
| 2                                                                                     | 52. 23c | 40. 98g  | 0. 36e  | 23. 67c |
| 3                                                                                     | 43. 27d | 506. 58b | 0. 39e  | 11. 41e |
| 4                                                                                     | 67. 85b | 130. 76e | 0. 52d  | 11. 64e |
| 5                                                                                     | 81. 58a | 211. 44d | 1. 08c  | 49. 11a |
| 6                                                                                     | 83. 73a | 630. 50a | 1. 54a  | 36. 30b |
| 7                                                                                     | 46. 12d | 440. 99c | 1. 26b  | 15. 68d |
| 江西省土壤元素背景值                                                                            | 69. 4   | 20. 3    | 0. 108  | 32. 3   |

1) 不同字母小写字母表示采样点间差异显著( $P < 0.05$ )

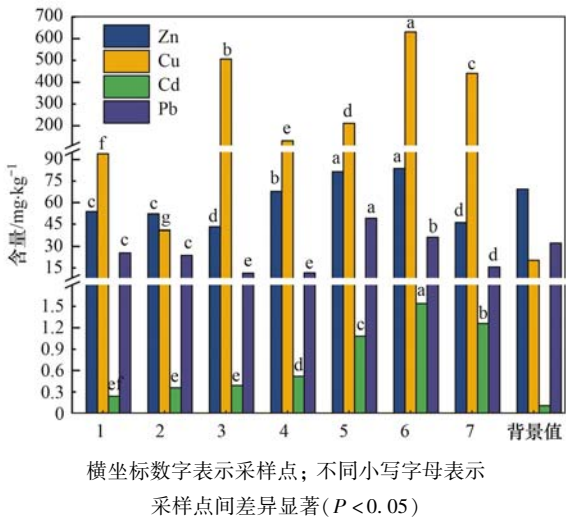
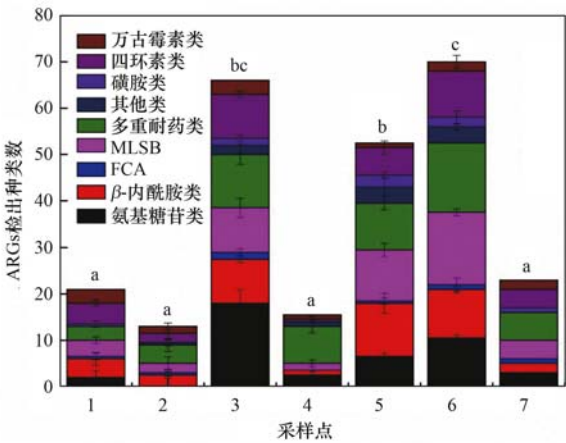


图 2 德兴铜矿区土壤重金属指标检测结果

Fig. 2 Heavy metal contents of Dexing copper mine sampling sites

2.2 ARGs 检出种类

德兴铜矿 7 个采样点中,共检测到 9 类主要类型的 ARGs,包括氨基糖苷类(aminoglycosides)、β-内酰胺类(β-lactamases)、喹诺酮类氯霉素类(FCA)、大环内酯类林肯酰胺类链阳性菌素 B 抗性基因(MLSb)、多重耐药类(multidrug)、磺胺类(sulfonamide)、四环素类(tetracycline)、万古霉素类(vancomycin)和其他类(others). 各采样点 ARGs 检出种类数分别为 21、13、66、15.5、52.5、70 和 23,均值为 37,检出数量显著高于其他点位的是 6、3 和 5( $P < 0.05$ ,图 3). 6 号采样点为大坞河入乐安河口沉积物, 3 号采样点为大坞河沉积物, 5 号采样点为德兴铜矿住宅小区土壤. 6 和 3 号采样点检出数量相对较高,可能与样品中 Cu 含量较高有关.



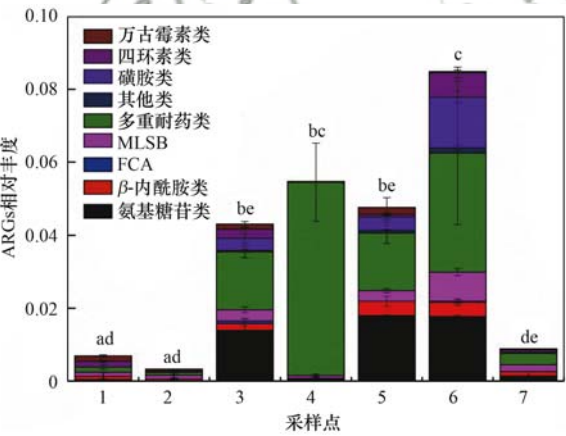
不同小写字母表示采样点间差异显著( $P < 0.05$ )

图 3 德兴铜矿样品中检测到的 ARGs 种类数

Fig. 3 Number of ARGs detected in Dexing copper mine sampling sites

2.3 ARGs 检出相对丰度

对德兴铜矿中 ARGs 的相对丰度水平进行分析(图 4),结果表明,各样点中 ARGs 相对丰度范围为  $0.3 \times 10^{-2} \sim 8.5 \times 10^{-2}$ ,其中 6 号采样点的 ARGs 相对丰度显著高于其他点位( $P < 0.05$ ),其相对丰度达到  $8.5 \times 10^{-2}$ ,其次是 4、5 和 3 号采样点,其相对丰度分别为  $5.5 \times 10^{-2}$ 、 $4.8 \times 10^{-2}$ 和  $4.3 \times 10^{-2}$ .



不同小写字母表示采样点间差异显著( $P < 0.05$ )

图 4 德兴铜矿样品中 ARGs 相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of ARGs in Dexing copper mine sampling sites

从 ARGs 对应的抗生素来看,德兴铜矿区检出的 ARGs 主要类别为多重耐药类、MLSb、β-内酰胺类、四环素类和氨基糖苷类抗性基因(图 5). 从 ARGs 所对应的抗性机制来看,外排泵为主要的抗性机制,其次是抗生素失活机制(图 6).

2.4 ARGs 组成比较分析

基于德兴铜矿土壤中 ARGs 的组成和丰度,经热图分析可以很好地展示 ARGs 组成差异与分布(图 7). 由图 7 可以看出,ARGs 丰度最高的 3 个采样点分别是 6 号(大坞河入乐安河口沉积物)、5 号

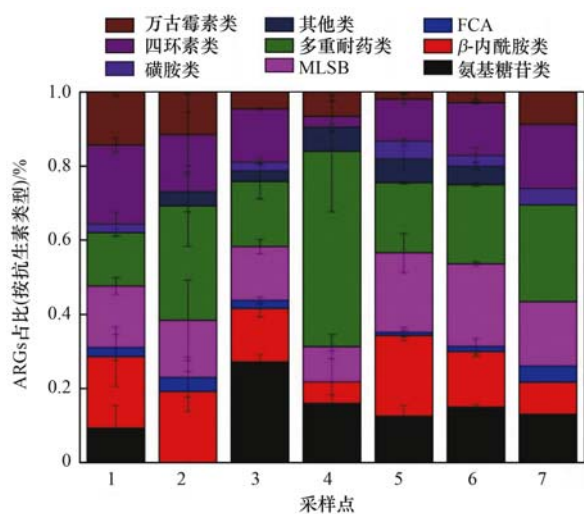


图5 德兴铜矿样品中检测到的各类 ARGs 所占比例

Fig. 5 Proportion of various types of ARGs detected in Dexing copper mine sampling sites

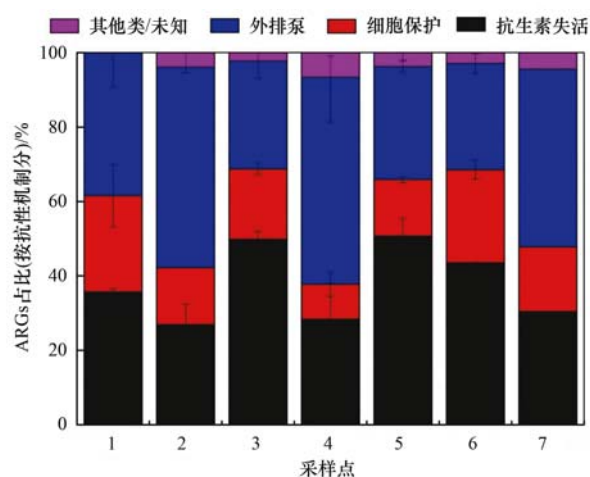


图6 德兴铜矿样品中检测到的各类 ARGs 所占比例

Fig. 6 Proportion of various types of ARGs detected in Dexing copper mine sampling sites

(德兴铜矿住宅小区土壤)和3号(大坞河沉积物). 6号采样点中氨基糖苷类、 $\beta$ -内酰胺酶类、MLSB、磺胺类、四环素类抗性基因的相对丰度都较高,5号采样点中氨基糖苷类、 $\beta$ -内酰胺酶类和万古霉素类的抗性基因相对丰度较高,3号采样点中多重耐药类抗性基因相对丰度较高.

## 2.5 MGEs 相对丰度及其与 ARGs 的相关关系

德兴铜矿各采样点 MGEs 检出相对丰度如图8所示. 从中可知,各采样点中6号采样点 MGEs 相对丰度显著高于其他点位,其次是5和3号采样点. 各采样点 MGEs 相对丰度与 ARGs 相对丰度检出规律基本一致. MGEs 与 ARGs 检出丰度的 Pearson 相关性分析见表3. 从中可知, MGEs 总丰度与 ARGs 总丰度显著正相关( $P < 0.05$ ),其 Pearson 相关系数  $r$  为 0.79. 其中,磺胺类、MLSB 和四环素类这3类抗性基因与 MGEs 丰度呈极显著相关关系( $P < 0.01$ ),

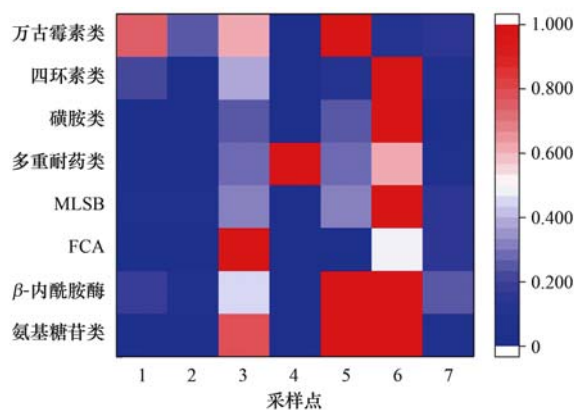
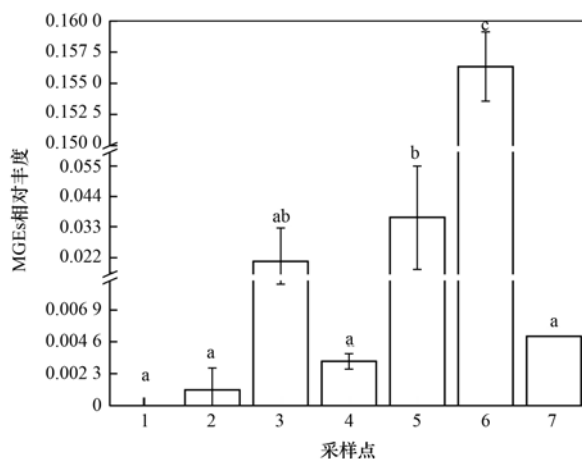


图7 德兴铜矿采样点 ARGs 分布 heatmap

Fig. 7 Heatmap of ARGs of Dexing copper mine sampling sites



采样点1的相对丰度为0;不同小写字母表示采样点间差异显著( $P < 0.05$ )

图8 德兴铜矿采样点 MGEs 相对检出丰度

Fig. 8 Relative abundance of MGEs in Dexing copper mine sampling sites

提示这3类 ARGs 的丰度可能与 MGEs 介导的水平基因转移密切相关. 同时,部分抗性基因类别之间也存在极显著的相关关系( $P < 0.01$ ),包括 $\beta$ -内酰胺酶类和氨基糖苷类( $r = 0.94$ ),磺胺类和 MLSB( $r = 0.99$ ),四环素类和 MLSB( $r = 0.95$ ),磺胺类和四环素类( $r = 0.95$ ).

本研究中共检出12种 MGEs,其组成比例如图9所示. 从中可知,占比最高的 MGEs 为 *TnpA04*,占比47%,其次为 *Int1* 占比26%.

## 2.6 ARGs 检出丰度与重金属含量的相关性

对德兴铜矿采样点各重金属浓度与 ARGs 检出丰度和种类进行 Pearson 相关性分析,结果见表4. 从中可知,重金属 Cu 含量与 ARGs 的检出种类数呈显著正相关( $P < 0.05$ ),Pearson 相关系数达0.79.

进一步对德兴铜矿采样点 ARGs 相对丰度与4种重金属含量进行 RDA 分析. 结果表明,RDA1 与 RDA2 两个排序轴的解度分别为44.05%和38.37%,累积解度达到82.42%. 4种重金属中,只

有 Cu 对 ARGs 的检出丰度表现出显著影响 ( $P < 0.05$ ,图 10). 德兴铜矿采样点主要检出的 ARGs 类型

中,氨基糖苷类和磺胺类与 Cu 含量呈正相关性. 采样点 3、5 和 6 号与重金属 Cu 和 Cd 含量呈正相关性.

表 3 MGEs 与 ARGs 检出丰度的 Pearson 相关性分析<sup>1)</sup>

| Table 3 Pearson correlation analysis between concentrations of ARGs and MGEs |      |        |       |               |      |         |        |         |         |       |
|------------------------------------------------------------------------------|------|--------|-------|---------------|------|---------|--------|---------|---------|-------|
|                                                                              | MGEs | ARGs   | 氨基糖苷类 | $\beta$ -内酰胺类 | FCA  | MLSB    | 多重耐药类  | 磺胺类     | 四环素类    | 万古霉素类 |
| MGEs                                                                         | 1    | 0.79 * | 0.71  | 0.76 *        | 0.34 | 0.98 ** | 0.35   | 0.99 ** | 0.93 ** | -0.17 |
| ARGs                                                                         |      | 1      | 0.73  | 0.65          | 0.37 | 0.76 *  | 0.79 * | 0.80 *  | 0.68    | -0.15 |
| 氨基糖苷类                                                                        |      |        | 1     | 0.94 **       | 0.53 | 0.78 *  | 0.21   | 0.76 *  | 0.63    | 0.41  |
| $\beta$ -内酰胺类                                                                |      |        |       | 1             | 0.27 | 0.80 *  | 0.10   | 0.79 *  | 0.64    | 0.41  |
| FCA                                                                          |      |        |       |               | 1    | 0.49    | 0.06   | 0.44    | 0.55    | 0.06  |
| MLSB                                                                         |      |        |       |               |      | 1       | 0.25   | 0.99 ** | 0.95 ** | -0.09 |
| 多重耐药类                                                                        |      |        |       |               |      |         | 1      | 0.33    | 0.22    | -0.43 |
| 磺胺类                                                                          |      |        |       |               |      |         |        | 1       | 0.95 ** | -0.12 |
| 四环素类                                                                         |      |        |       |               |      |         |        |         | 1       | -0.13 |
| 万古霉素类                                                                        |      |        |       |               |      |         |        |         |         | 1     |

1) \* 表示在 0.05 水平 (双侧) 显著相关, \*\* 表示在 0.01 水平 (双侧) 极显著相关

表 4 重金属含量与 ARGs 检出种类和丰度的 Pearson 相关性分析<sup>1)</sup>

| Table 4 Pearson correlation analysis between ARGs and heavy metals |    |      |      |        |         |         |
|--------------------------------------------------------------------|----|------|------|--------|---------|---------|
|                                                                    | Zn | Cu   | Cd   | Pb     | ARGs 种类 | ARGs 丰度 |
| Zn                                                                 | 1  | 0.11 | 0.57 | 0.76 * | 0.35    | 0.74    |
| Cu                                                                 |    | 1    | 0.67 | 0.00   | 0.79 *  | 0.57    |
| Cd                                                                 |    |      | 1    | 0.48   | 0.46    | 0.52    |
| Pb                                                                 |    |      |      | 1      | 0.36    | 0.29    |
| ARGs 种类                                                            |    |      |      |        | 1       | 0.70    |
| ARGs 丰度                                                            |    |      |      |        |         | 1       |

1) \* 表示在 0.05 水平 (双侧) 显著相关

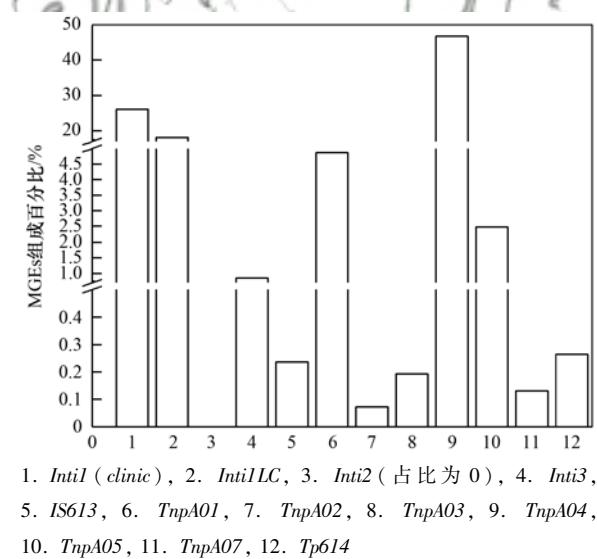


图 9 德兴铜矿 MGEs 组成

Fig. 9 MGEs composition of Dexing copper mine sampling sites

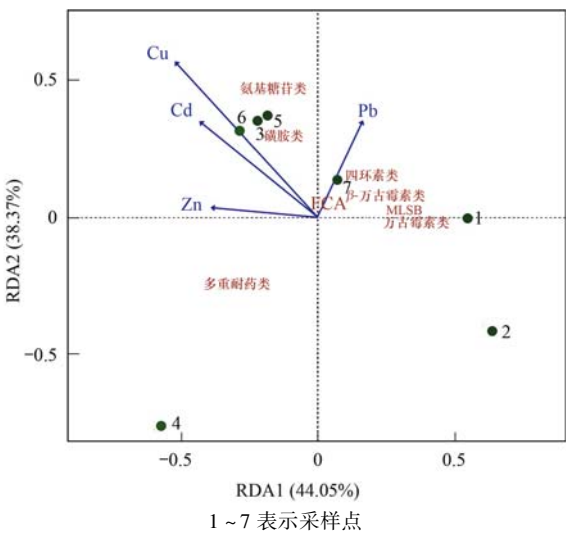


图 10 ARGs 相对丰度与重金属含量的 RDA 分析

Fig. 10 Redundancy analysis (RDA) of the relative abundance of ARGs and heavy metals

3 讨论

本研究采用 HT-qPCR 对德兴铜矿周边土壤和沉积物中 ARGs 进行了检测与定量分析. 从 ARGs 的检出种类来看,共检出 70 种 ARGs,这与在绵阳市的紫土丘陵区畜禽养殖土壤检出 79 种 ARGs 种类结果相似<sup>[19]</sup>,高于沈阳蔬菜地土壤中检测出的 21

种抗性基因<sup>[17]</sup>,但低于福建省岩市境内山谷型尾矿库水体中检测的 106 种 ARGs<sup>[33]</sup>.  
在抗性基因相对丰度方面,本研究中德兴铜矿 ARGs 相对丰度介于  $0.3 \times 10^{-2} \sim 8.5 \times 10^{-2}$ ,全球土壤 ARGs 的相对丰度水平约在  $10^{-7} \sim 10^{-2}$ <sup>[34]</sup>,由此可见德兴铜矿的 ARGs 相对丰度属于较高水平,

与沈阳<sup>[17]</sup>和北京<sup>[18]</sup>蔬菜地土壤因过度施肥以及抗生素残留土壤中的 ARGs 相对丰度结果类似,说明土壤中 Cu 含量升高也可能导致 ARGs 相对丰度升高.由图 3 和图 4 可以看出,6 号采样点的 ARGs 种类和相对丰度最高,其次是 3 号采样点,这两个采样点与其他采样点不同,他们汇集了大坞河旁德兴铜矿采矿场的排水,可能形成了一个重金属元素高并含有复杂成分的采矿工艺废液沉积的土壤环境,进而影响了土壤中微生物的分布与结构,从而导致了 ARGs 种类和丰度的增加,4 和 5 号采样点为人口活动密集点,分别位于中学附近和住宅小区,其土壤 ARGs 的丰度仅次于 6 号采样点,这可能是由于人类活动和上游铜矿排水的共同影响,导致抗生素抗性基因的丰度提高.Ji 等<sup>[35]</sup>对上海养殖场畜禽粪便和周围土壤抗生素抗性基因研究表明,重金属 Cu 与人类活动都有可能通过改变土壤微生物的多样性,从而影响土壤中抗生素抗性基因的种类和丰度.

本研究中,ARGs 与 MGEs 丰度呈显著正相关(表 3),这与 Ma 等<sup>[36]</sup>的研究通过高通量测序技术和宏基因组学分析不同生态系统中 ARGs 与 MEGs 丰度之间相关性得出的结论相似.由图 9 可知,转座酶基因 *TnpA04* 和一类整合子基因 *Int1* 是德兴铜矿最主要的 2 种 MGEs,而 *TnpA04* 基因和 *Int1* 基因是常见的可能参与基因水平转移的一类 MGEs,这与乌鲁木齐公园土壤 MGEs 的研究结果类似<sup>[37]</sup>,说明 *TnpA04* 基因和 *Int1* 基因有可能参与了 ARGs 的传播扩散.有研究表明,一类整合子的 *Int1* 基因与磺胺类<sup>[38,39]</sup>和四环素类<sup>[40]</sup>等多种抗性基因存在相关性,本研究中磺胺类、四环素类和 MLSB 这 3 类抗性基因与 MEGs 丰度呈极显著相关关系( $P < 0.01$ ),由此可以推测,水平基因转移可能是采样区磺胺类、四环素类和 MLSB 等 3 类抗性基因传播扩散的重要机制.

土壤成分复杂而多样,作为重金属和 ARGs 的储存库,土壤重金属可以综合多种土壤环境因子(如营养盐含量和 pH 值等)共同影响土壤中微生物群落结构,从而影响 ARGs 种类和丰度.有研究表明,在污水处理厂周边土壤<sup>[8,9]</sup>和养殖厂沉积物<sup>[7]</sup>等土壤环境中,重金属含量与 ARGs 丰度存在极显著的相关性,说明重金属污染可能是影响 ARGs 丰度的一个主要原因.He 等<sup>[39]</sup>通过研究养鸡场粪便、土壤、沉积物和水样中 ARGs 的含量与重金属环境参数的关系,间接揭示了重金属对 ARGs 的存在和分布起到联合筛选作用.Zhao 等<sup>[7]</sup>的研究通过分析黄河三角洲沉积物中 ARGs 与沉积物中重金属和养分的关系,直接证实了营养物和重金属的协同筛选

对海水养殖沉积物中 ARGs 动力学变化起到重要作用.黄福义等<sup>[33]</sup>对尾矿水体环境中 ARGs 污染研究发现,Cu、TOC 和 MGEs 对尾矿库水体环境抗生素抗性基因的赋存和演变可能具有重要作用.Cu 是德兴铜矿区土壤和沉积物中高富集重金属元素,重金属 Cu 含量与 ARGs 检出种类和丰度均呈显著正相关关系,提示德兴铜矿区 Cu 的高含量存在可能是该区域抗生素抗性基因形成的重要驱动因子.

重金属对 ARGs 的影响机制主要分为 4 大类,即协同抗性、交叉抗性、共调控和生物膜反应<sup>[41]</sup>.有研究表明,Cu、Cd、Pb 和 Zn 这 4 种重金属,会促进淡水细菌中的 RP4 质粒的结合转移<sup>[42]</sup>,而该质粒包含多种耐药性基因,包括氨基糖苷类耐药基因、卡那霉素耐药基因和四环素耐药性基因.重金属 Cu 可以破坏细菌细胞膜从而促进质粒 DNA 通过菌膜,促使 ARGs 在细胞间传播.不同的重金属离子还会导致细胞内活性氧(reactive oxygen species,ROS)的生成和细胞膜通透性的增强,ROS 响应以及改变共轭转移和调节基因 mRNA 的表达,从而促进抗性基因的共轭转移<sup>[43~46]</sup>.

## 4 结论

(1)德兴铜矿区土壤/沉积物环境中存在着种类较丰富和丰度水平较高的 ARGs,大坞河入乐安河口和富家坞采矿场大坞河两个采样点检测的 ARGs 种类和丰度都最高,德兴铜矿区检出的 ARGs 主要类别为多重耐药类、MLSB、 $\beta$ -内酰胺类、四环素类和氨基糖苷类抗性基因,外排泵为主要的抗性机制,其次是抗生素失活机制.

(2)Pearson 相关性分析和 RDA 分析表明,重金属 Cu 含量与 ARGs 检出种类和丰度均呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),提示德兴铜矿区 Cu 的高含量存在可能是该区域抗生素抗性基因形成的重要驱动因子.

(3)德兴铜矿各采样点共检测了 12 种 MEGs,其中 *TnpA04* 和 *Int1* 是德兴铜矿最主要的 MEGs,ARGs 与 MGEs 丰度呈显著正相关( $P < 0.05$ ),推测水平基因转移是采样区环境 ARGs 产生的重要机制.

## 参考文献:

- [1] Wright G D. Antibiotic resistance in the environment: a link to the clinic? [J]. Current Opinion in Microbiology, 2010, 13 (5): 589-594.
- [2] 苗荪,陈磊,左剑恶.环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析:基于 Web of Science 数据库检索[J].环境科学,2021,42(10):4925-4932.
- Miao S, Chen L, Zuo J E. Correlation analysis among environmental antibiotic resistance genes abundance, antibiotics

- concentration, and heavy metals concentration based on web of science search[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4925-4932.
- [3] Ying G G, He L Y, Ying A J, *et al.* China must reduce its antibiotic use[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(3): 1072-1073.
- [4] 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.
- [5] Wang Q, Wang P L, Yang Q X. Occurrence and diversity of antibiotic resistance in untreated hospital wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **621**: 990-999.
- [6] Lan L H, Kong X W, Sun H X, *et al.* High removal efficiency of antibiotic resistance genes in swine wastewater via nanofiltration and reverse osmosis processes [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **231**: 439-445.
- [7] Zhao Z L, Wang J, Han Y, *et al.* Nutrients, heavy metals and microbial communities co-driven distribution of antibiotic resistance genes in adjacent environment of mariculture [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 909-918.
- [8] Di Cesare A, Eckert E M, D'Urso S, *et al.* Co-occurrence of integrase 1, antibiotic and heavy metal resistance genes in municipal wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2016, **94**: 208-214.
- [9] Xu Y, Xu J, Mao D Q, *et al.* Effect of the selective pressure of sub-lethal level of heavy metals on the fate and distribution of ARGs in the catchment scale [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 900-908.
- [10] Ding H J, Qiao M, Zhong J Y, *et al.* Characterization of antibiotic resistance genes and bacterial community in selected municipal and industrial sewage treatment plants beside Poyang Lake [J]. *Water Research*, 2020, **174**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115603.
- [11] Szekeres E, Chiriac C M, Baricz A, *et al.* Investigating antibiotics, antibiotic resistance genes, and microbial contaminants in groundwater in relation to the proximity of urban areas[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **236**: 734-744.
- [12] Zhou Z C, Zheng J, Wei Y Y, *et al.* Antibiotic resistance genes in an urban river as impacted by bacterial community and physicochemical parameters [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(30): 23753-23762.
- [13] Luo Y, Mao D Q, Rysz M, *et al.* Trends in antibiotic resistance genes occurrence in the Haihe River, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(19): 7220-7225.
- [14] 姜春霞, 黎平, 李森楠, 等. 海南东寨港海水和沉积物中抗生素抗性基因污染特征研究[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(1): 128-135.
- Jiang C X, Li P, Li S N, *et al.* Pollution characteristics of antibiotic resistance genes in seawater and sediment of Dongzhai harbor, Hainan province [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2019, **28**(1): 128-135.
- [15] 林岚, 林琳, 陈恩中, 等. 宏基因组方法比较分析深海和珠江口沉积物中抗生素抗性基因的特征[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2017, **56**(2): 112-116.
- Lin L, Lin L, Chen E Z, *et al.* Metagenomic analysis on characteristics of antibiotic resistance genes in the deep ocean and Pearl River Estuary sediments[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2017, **56**(2): 112-116.
- [16] Goethem M, Pierneef R, Bezuidt O, *et al.* A reservoir of 'historical' antibiotic resistance genes in remote pristine Antarctic soils [J]. *Microbiome*, 2018, **6**, doi: 10.1186/s40168-018-0424-5.
- [17] 王百羽, 张珣, 王宝玉, 等. 沈阳蔬菜土壤中典型抗生素抗性基因与可移动元件分布特征[J]. *生态学杂志*, 2021, **40**(7): 2113-2119.
- Wang B Y, Zhang X, Wang B Y, *et al.* Distribution of typical antibiotic resistance genes and mobile genetic elements in vegetable soils of Shenyang [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(7): 2113-2119.
- [18] 张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 等. 北京蔬菜土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 385-393.
- Zhang R F, Song Y, Gao H Z, *et al.* Distribution characteristics of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements in Beijing vegetable base soils[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 385-393.
- [19] 程建华, 唐翔宇, 刘琛. 紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 3257-3262.
- Cheng J H, Tang X Y, Liu C. Characteristics of antibiotic resistance genes in various livestock feedlot soils of the hilly purple soil region [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3257-3262.
- [20] 黄福义, 周曙屹聃, 王佳妮, 等. 不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2975-2980.
- Huang F Y, Zhou S Y D, Wang J N, *et al.* Profiling of antibiotic resistance genes in different croplands [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2975-2980.
- [21] 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.
- [22] Echeverria-Palencia C M, Thulsiraj V, Tran N, *et al.* Disparate antibiotic resistance gene quantities revealed across 4 major cities in California: a survey in drinking water, air, and soil at 24 public parks[J]. *ACS Omega*, 2017, **2**(5): 2255-2263.
- [23] Allen H K, Moe L A, Rodbumer J, *et al.* Functional metagenomics reveals diverse  $\beta$ -lactamases in a remote Alaskan soil[J]. *The ISME Journal*, 2009, **3**(2): 243-251.
- [24] Lang K S, Anderson J M, Schwarz S, *et al.* Novel florfenicol and chloramphenicol resistance gene discovered in Alaskan soil by using functional metagenomics[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(15): 5321-5326.
- [25] D'Costa V M, King C E, Kalan L, *et al.* Antibiotic resistance is ancient[J]. *Nature*, 2011, **477**(7365): 457-461.
- [26] 葛林科, 任红蕾, 鲁建江, 等. 我国环境中新兴污染物抗生素及其抗性基因的分布特征[J]. *环境化学*, 2015, **34**(5): 875-883.
- Ge L K, Ren H L, Lu J J, *et al.* Occurrence of antibiotics and corresponding resistance genes in the environment of China[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(5): 875-883.
- [27] 程晨, 张璐璐, 赵晓祥. 重金属铜对养殖场周边土壤菌群及其大环内酯类抗生素抗性水平相关基因的影响[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2019, **45**(6): 943-950.
- Cheng C, Zhang L L, Zhao X X. Effects of copper on microflora and macrolide resistance genes in soil surrounding the farm[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2019, **45**(6): 943-950.
- [28] Berg J, Thorsen M K, Holm P E, *et al.* Cu exposure under field conditions coselects for antibiotic resistance as determined by a novel cultivation-independent bacterial community tolerance assay

- [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44** (22): 8724-8728.
- [29] Muhammad J, Khan S, Su J Q, *et al.* Antibiotics in poultry manure and their associated health issues: a systematic review [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(1): 486-497.
- [30] Darmon E, Leach D R F. Bacterial genome instability [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2014, **78**(1): 1-39.
- [31] 王晓雪. 铜矿采矿运输设备可持续发展分析[J]. *设备管理与维修*, 2021, (3): 13-14.
- [32] 刘栎灵. 乐安河(德兴段)重金属污染的调查现状及治理措施[J]. *中国资源综合利用*, 2017, **35**(10): 82-84.  
Liu L L. Investigation status and control measures of heavy metal pollution in Le'an river (Dexing section) [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2017, **35**(10): 82-84.
- [33] 黄福义, 朱永官, 苏建强. 尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 761-765.  
Huang F Y, Zhu Y G, Su J Q. Diversity and abundance of antibiotic resistance genes in tailings ponds [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 761-765.
- [34] Knapp C W, Dolfing J, Ehlert P A I, *et al.* Evidence of increasing antibiotic resistance gene abundances in archived soils since 1940 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44** (2): 580-587.
- [35] Ji X L, Shen Q H, Liu F, *et al.* Antibiotic resistance gene abundances associated with antibiotics and heavy metals in animal manures and agricultural soils adjacent to feedlots in Shanghai; China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **235**: 178-185.
- [36] Ma L P, Li A D, Yin X L, *et al.* The prevalence of integrons as the carrier of antibiotic resistance genes in natural and man-made environments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(10): 5721-5728.
- [37] Wang F H, Qiao M, Su J Q, *et al.* High Throughput profiling of antibiotic resistance genes in urban park soils with reclaimed water irrigation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(16): 9079-9085.
- [38] Lu Z H, Na G S, Gao H, *et al.* Fate of sulfonamide resistance genes in estuary environment and effect of anthropogenic activities [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 429-438.
- [39] He L Y, Liu Y S, Su H C, *et al.* Dissemination of antibiotic resistance genes in representative broiler feedlots environments: identification of indicator ARGs and correlations with environmental variables [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(22): 13120-13129.
- [40] Liu M M, Zhang Y, Yang M, *et al.* Abundance and distribution of tetracycline resistance genes and mobile elements in an oxytetracycline production wastewater treatment system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46** (14): 7551-7557.
- [41] 张佳奇, 徐艳, 罗义, 等. 重金属协同选择环境细菌抗生素抗性及其机制研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35** (3): 409-418.  
Zhang J Q, Xu Y, Luo Y, *et al.* Co-selection mechanisms of bacterial resistance to heavy metals and antibiotics [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(3): 409-418.
- [42] Wang Q, Liu L, Hou Z L, *et al.* Heavy metal copper accelerates the conjugative transfer of antibiotic resistance genes in freshwater microcosms [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137055.
- [43] Lu J, Wang Y, Jin M, *et al.* Both silver ions and silver nanoparticles facilitate the horizontal transfer of plasmid-mediated antibiotic resistance genes [J]. *Water Research*, 2020, **169**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115229.
- [44] Luo Y, Wang Q, Lu Q, *et al.* An ionic liquid facilitates the proliferation of antibiotic resistance genes mediated by class I integrons [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2014, **1**(5): 266-270.
- [45] Qiu Z G, Yu Y M, Chen Z L, *et al.* Nanoalumina promotes the horizontal transfer of multiresistance genes mediated by plasmids across genera [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109** (13): 4944-4949.
- [46] Zhang Y, Gu A Z, Cen T Y, *et al.* Sub-inhibitory concentrations of heavy metals facilitate the horizontal transfer of plasmid-mediated antibiotic resistance genes in water environment [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **237**: 74-82.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                     |                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China .....                                                             | LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> ( 577 )            |
| Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability .....                                                                                                                        | ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo ( 586 )                          |
| Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou .....                                                           | HUANG Wen, WANG Sheng-li ( 597 )                                       |
| PM <sub>2.5</sub> Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models .....                                                                                                              | WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> ( 608 )             |
| Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM <sub>2.5</sub> During Summer in Central China .....                                                                  | SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> ( 619 )                |
| Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City .....                                                                         | CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> ( 629 )                    |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM <sub>2.5</sub> in Zhejiang Province .....                                                                    | LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> ( 639 )     |
| Impact of Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> in Jiangsu Province from 2001 to 2019 .....                                                                                                | PAN Chen, KANG Zhi-ming ( 649 )                                        |
| Comparison and Analysis of PM <sub>2.5</sub> Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model .....                                                                      | GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> ( 663 )           |
| Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020 .....                                                                                                | FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> ( 675 )               |
| Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O <sub>3</sub> Pollution Event in Ji'nan .....                                                                                              | SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> ( 686 )          |
| Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong .....                                                                    | YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> ( 696 )                 |
| Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass .....                                                     | ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> ( 707 )                |
| Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer .....                                                                             | YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> ( 714 )           |
| Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China .....                                                                                                      | ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> ( 723 )              |
| Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts .....                                                                                                                  | ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> ( 735 )             |
| Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 .....                                                                                   | TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao ( 743 )                        |
| Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China .....                                            | XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun ( 752 )                                 |
| Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake .....                                                                       | XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> ( 762 )        |
| Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events .....                                                                | ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> ( 770 )             |
| Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen .....                                                    | BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> ( 782 )             |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City .....                                                                               | PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> ( 795 )              |
| Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River .....                                                                           | GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> ( 803 )           |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example ..... | CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> ( 813 )     |
| Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai .....                                                                                         | YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> ( 826 )         |
| Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang .....                                                        | GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> ( 837 )         |
| Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake .....                                                                                                            | LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> ( 847 )          |
| Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake .....                                                                                       | LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> ( 859 )  |
| Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation .....                                                     | WANG Zi-qiao, LI Xu-yong ( 867 )                                       |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic .....                                                                  | ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> ( 878 )           |
| Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration .....                                             | QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> ( 887 )                   |
| Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar .....                                                                                           | CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> ( 896 )                      |
| Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water .....                                                                                       | ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> ( 907 )           |
| Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge .....                                                         | HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> ( 920 )            |
| Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance .....                                                                                       | FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> ( 928 )            |
| Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan .....                                                                                                   | LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> ( 936 )              |
| Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain .....                                                   | ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song ( 946 )                           |
| Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example .....                                        | JU Tie-nan, LEI Mei ( 957 )                                            |
| Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China .....                                                             | MU De-miao, SUN Yue-bing ( 965 )                                       |
| Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area .....                                                        | HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> ( 975 )    |
| Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas .....                                            | ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> ( 985 )          |
| Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years .....                                                                           | REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> ( 995 )         |
| Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth .....                                                                                                   | CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> ( 1004 )                |
| Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments .....                                                         | WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> ( 1015 )           |
| Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation .....                                                              | CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> ( 1023 )          |
| Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat .....                                                              | LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> ( 1031 )       |
| Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers .....                             | YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> ( 1040 )              |
| Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i> .....                          | LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> ( 1050 )      |
| Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas .....                                                            | JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> ( 1059 )            |
| Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils .....                                                                                                 | DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> ( 1069 ) |
| Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil .....                                                                         | HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> ( 1077 )             |
| Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine .....                                                                                            | HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> ( 1089 )                    |
| Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province .....                                                                                               | WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> ( 1097 )                |
| Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta .....                                           | XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> ( 1108 )          |