

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

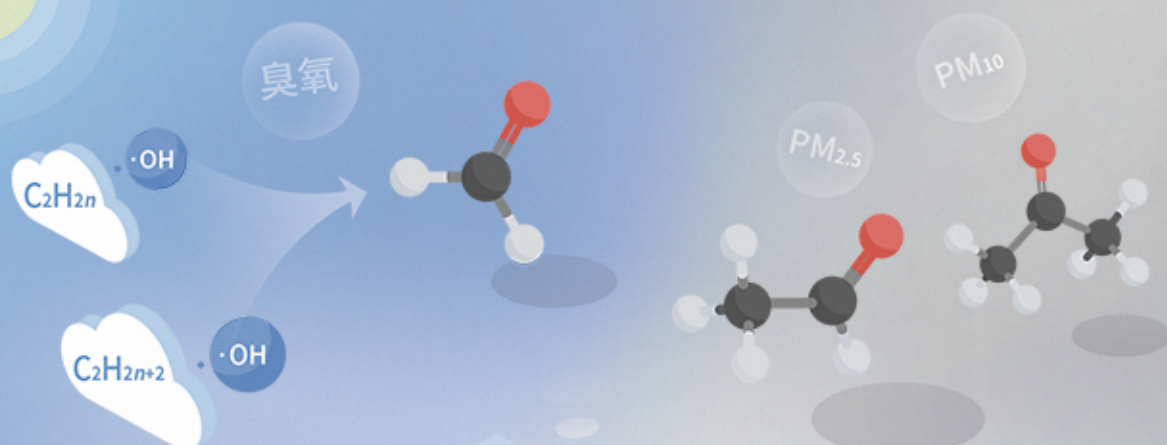
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年1月

第42卷 第1期
Vol.42 No.1

目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测	顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆(1)
基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析	杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨(9)
中原城市群典型城市秋冬季大气 PM _{2.5} 污染特征及溯源	苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文(19)
沈阳市冬季大气 PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析	王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀(30)
保定地区 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐(38)
基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析:以南京市观测为例	胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东(45)
2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源	高璟贇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐邈, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁(55)
柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析	刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽(65)
天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析	罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂(75)
2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林(88)
2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势	赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳(97)
大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析	李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城(106)
叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比	岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国(114)
东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟	张冰, 张芊芊, 应光国(127)
松花江哈尔滨段及阿什河抗生菌的分布规律与生态风险评估	杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨(136)
东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估	李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮(147)
河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估	周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫(159)
无锡-常州地下水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估	王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波(166)
清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估	刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛(175)
会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险	李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹尼(184)
三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化	陈昭宇, 李思悦(195)
不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布	岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花(204)
基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险	张红娜, 崔娜, 申红妙(211)
分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制	闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜(221)
丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素	郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进(234)
太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应	郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆(242)
石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量	邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王莹燕, 王子芳(251)
前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响	陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪(263)
浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制	陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然(274)
填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响	刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励(283)
FeMnNi-LDHs 对水中 As(Ⅲ) 的吸附性能与机制	廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂(293)
硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制	张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌(305)
某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征	颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远(315)
不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替	李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送(323)
天然富硒土地划定的富硒阈值	王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃(333)
融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测	高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴伟杰, 刘楚藩(343)
南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟	戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平(353)
闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险	林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌(359)
干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响	杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵(368)
三元复合调理剂对土壤镉赋存形态和糙米镉累积的调控效应	蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宁, 周航, 廖柏寒(378)
风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响	郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星(386)
不同施肥措施对水稻土壤微生物拮抗性的影响	郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷(394)
氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性	张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希(403)
黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征	钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(411)
生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制	冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺(422)
植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响	张瑞海, 宋振, 付卫东, 郭玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良(433)
黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应	史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太(443)
等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响	何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华(450)
秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响	孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔(459)
生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响	杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明(467)
氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响	俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红(477)
微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累	赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇(485)
无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟	阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞(492)
基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析	孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超(501)

不同施肥措施对水稻土壤微生物镉抗性的影响

郑开凯^{1,2}, 马志远¹, 孙波¹, 梁玉婷^{1*}

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 镉(Cd)是最常见的土壤重金属污染物之一,对植物和人体具有毒害作用,研究不同施肥条件下的土壤微生物 Cd 抗性水平,可以为有机肥改良重金属污染提供一定的理论依据.为了探讨施无机肥和有机肥对于微生物 Cd 抗性水平的影响,在中国江苏常州、江西上高和福建福州水稻种植区采集了施有机肥(猪粪)和无机肥的土壤样品及猪粪样品,利用功能基因芯片(GeoChip 5.0)技术,研究了土壤微生物 Cd 抗性功能基因的响应及影响 Cd 抗性功能微生物群落互作的因素.结果表明,施有机肥土壤中有有效态 Cd 含量 $[(1.08 \pm 0.70) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 显著低于施无机肥土壤 $[(3.75 \pm 1.22) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ ($P < 0.05$).土壤及猪粪样品中共检测到 639 个 Cd 抗性功能基因,施有机肥土壤中微生物 Cd 抗性基因丰度高于施无机肥土壤;有效态 Cd 含量、含水率、pH 和铵态氮含量是影响 Cd 抗性微生物分布的重要环境因素.对 Cd 抗性微生物分子生态网络分析表明,施无机肥条件下,pH、含水率和有效态 Cd 含量是影响功能微生物潜在互作关系的主要因素;施有机肥条件下,主要影响因素是全钾和含水率.相比较无机肥,施有机肥提高了土壤中微生物的 Cd 抗性水平及耐 Cd 微生物分子生态网络中的正相互作用.

关键词: 镉; 有机肥; 无机肥; 镉抗性; 功能基因

中图分类号: X171.5; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0394-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006154

Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms

ZHENG Kai-kai^{1,2}, MA Zhi-yuan¹, SUN Bo¹, LIANG Yu-ting^{1*}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Cadmium (Cd) is one of the commonly found heavy metal contaminants in soil and has a toxic effect on plants and humans. Understanding the Cd resistance of soil microorganisms under different fertilization regimes can provide a theoretical basis for controlling heavy metal pollution by organic fertilizers. In order to investigate the effects of inorganic and organic fertilizers on the Cd resistance level of soil microorganisms, paddy soil samples were taken in Changzhou, Shanggao, and Fuzhou. A functional gene array (GeoChip 5.0) was used to investigate the distribution of microbial Cd resistance genes. The results indicated that the content of available Cd in soil with organic fertilizer $[(1.08 \pm 0.70) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ was significantly lower than that in soils with inorganic fertilizer $[(3.75 \pm 1.22) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ ($P < 0.05$). A total of 639 Cd resistance genes were detected. The abundance of microbial Cd resistance gene in soil with organic fertilizer was higher than that of inorganic soil. The content of available Cd, moisture content, pH, and ammonium nitrogen were important environmental factors affecting the distribution of Cd resistant microorganisms. Analysis of the molecular ecological network of Cd resistant microorganisms showed that pH, moisture content, and the effective state of the Cd content were the main factors affecting the potential interaction of functional microorganisms with inorganic fertilizer, and the main factors were total potassium and moisture content with organic fertilizer. Compared with inorganic fertilizers, the application of organic fertilizers can improve the Cd resistance level of microorganisms in soil and promote positive relationships among Cd resistant soil microorganisms.

Key words: cadmium; organic fertilizer; inorganic fertilizer; cadmium resistance; functional genes

镉(Cd)在土壤中具有较强的化学活性,与其他重金属相比,有着更强的生物可利用性,更易被植物吸收^[1],存留在植物的可食用部分,毒性较强且易生物富集,并通过食物链在人体中累积,从而危害人体健康^[2].大量的 Cd 存在于土壤中会影响作物的生长,导致农作物产量和质量降低,造成严重的土壤质量退化,并限制了土壤的可持续发展^[3],对生态环境及人类健康造成严重威胁^[4].据文献[5,6],我国耕地土壤环境质量堪忧,其中 Cd 污染点位超标率达到 7.0%,调查显示我国的土壤 Cd 污染涉及 11 个省市的 25 个地区.因此研究重金属 Cd 在农田土

壤的含量及其影响因素对于维持土壤健康发展至关重要.

土壤微生物是土壤生态系统中最活跃的部分,在促进土壤质量和植物健康方面发挥着重要的作用,被认为是最敏感的土壤质量生物学指标^[7-9].微生物对土壤有机质的周转和营养元素的循环有重要意义^[10].土壤重金属含量增加会影响甚至抑制微生

收稿日期: 2020-06-15; 修订日期: 2020-07-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200309); 国家自然科学基金项目(41877060)

作者简介: 郑开凯(1993~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤微生物与物质转化,E-mail: zhengkai16@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者,E-mail: ytliang@issas.ac.cn

物的生长及代谢活动^[11]. 但有些微生物与重金属接触后, 能尽量减少毒害或受毒后迅速恢复生长, 对重金属有一定的耐受性. 研究者通过含 Cd 培养基进行耐 Cd 微生物的筛选, 并通过 16S rRNA 基因序列比对进行耐 Cd 微生物进行初步鉴定^[12~14]. 微生物 Cd 抗性基因含量与丰度可以作为其对 Cd 耐受性的评价指标, 目前主要采用实时荧光定量 PCR 进行分析, 但存在通量较低等问题, 需要基于宏基因组测序或基因芯片等高通量手段进行耐 Cd 微生物的研究, 以更直观地反映出耐 Cd 微生物携带的功能基因与环境的关系.

施肥方式对土壤微生物群落结构与多样性有重要的影响^[15]. 有研究表明^[16~19], 相比较无机肥, 在 Cd 污染土壤上施入有机肥, 不仅可改良土壤性状, 提高土壤肥力, 还可降低 Cd 的生物有效性, 显著降低 Cd 对作物的毒害程度. 为了进一步研究不同施肥措施下农田土壤微生物 Cd 抗性功能基因的分布及影响因素, 选取了华东地区江苏、江西和福建典型水稻土土壤进行研究; 3 个地区土壤类型不同, 江苏常州为黄褐土, 江西上高为棕红壤, 福建福州为赤红壤, 且土壤的理化性质和气候条件具有差异; 本

研究测定了土壤中有有效态 Cd 的含量, 利用功能基因芯片^[20] (GeoChip 5.0) 测定了微生物 Cd 抗性基因. 本研究目标为: ①比较不同施肥方式下土壤有效态 Cd 含量及微生物 Cd 抗性基因; ②比较不同施肥方式下携带 Cd 抗性功能基因微生物群落分子网络特征; ③分析理化因子等对携带 Cd 抗性功能基因微生物群落分子生态网络的影响.

1 材料与方法

1.1 样点概况与样品采集

本研究在中国江苏常州, 江西上高, 福建福州水稻种植区进行采样, 采样地区位于亚热带, 年均温度跨度在 4℃ 以内, 年均降雨量的变化范围为 1 080 ~ 1 720 mm (表 1). 采样点分布在养殖场厂区内及附近的水稻种植区, 处理分为无机施肥和有机施肥 (猪粪), 在 50 m × 50 m 的范围内采集表层 (0 ~ 20 cm) 新鲜土壤, 并混合均匀, 每个样点平行采样 13 次, 共计 78 个样品. 土壤样品分两部分保存, 一部分在 -80℃ 条件下保存, 用于土壤微生物测序分析; 另一部分在自然条件下风干, 4℃ 密封保存, 用于测定土壤的理化性质. 采样时间为 2013 年 10 月.

表 1 采样区域的气候条件

Table 1 Climate conditions in the sampling area

采样点	经纬度	平均海拔/m	年均温度/℃	年均降雨量/mm
江苏常州	119.97°E, 31.8°N	15	16.5	1 080
江西上高	114.47°E, 28.03°N	25	17.6	1 720
福建福州	119.28°E, 26.08°N	84	19.8	1 340

1.2 分析方法

土壤基本理化性质测定参照文献 [21]. 土壤 pH 采用电位法进行测定, 水土比为 2.5:1, 静置 30 min 后测定土壤 pH; 含水率采用 105℃ 烘干法测定; 土壤总有机碳采用低温外热重铬酸钾氧化-比色法测定; 全磷采用酸溶-钼锑抗比色法测定; 有效磷采用碳酸氢钠浸提法测定; 全钾采用碳酸氢钠法测定; 土壤全氮采用微波消解-纳氏试剂分光光度法测定; 总有机氮采用酸水解-蒸馏法测定; 土壤硝态氮采用酚二磺酸比色法测定; 铵态氮采用中性盐 (KCl) 浸提比色法测定; 硫酸盐含量采用乙二醇四乙酸 (EDTA) 间接滴定法测定; 土壤中有有效态 Cd 以二乙烯三胺五乙酸 (DTPA) 为提取剂, 用原子吸收分光光度计进行测定^[22].

土壤 DNA 的提取采用 MO BIO 试剂盒结合液氮冷冻研磨的方法, 并用琼脂糖凝胶电泳法进行纯化, 然后用苯酚-氯仿-正丁醇提取法萃取微生物基因组 DNA. 取约 800 ng 纯化的全基因组 DNA 用于 Cy-3 (GE Healthcare, CA, USA) 荧光标记, 标记后的

DNA 置于杂交缓冲液中, 溶液于 95℃ 变性 3 min, 37℃ 下孵育 30 min, 然后进行纯化和真空浓缩干燥, 再将标记后的 DNA 与 GeoChip 5.0 (180 K, 安捷伦科技公司, Santa Clara, CA) 进行杂交, 杂交后使用安捷伦洗涤缓冲液在室温下洗涤. 杂交阵列干燥后由 NimbleGen MS200 微阵列芯片扫描仪 (Roche NimbleGen, Inc., Madison, WI, USA) 扫描, 扫描时采用 100%, 633 nm 波长激光和 75% 光电倍增管获取信号. 图像数据通过安捷伦特征提取程序获取. 微阵列数据提交至环境基因组学研究所 (IEG) 网站 (<http://ieg.ou.edu/microarray>) 的微阵列数据管理系统进行预处理. 统计分析之前将信噪比小于 2 的点删除.

1.3 数据处理

通过非度量多维度 (NMDS) 分析土壤理化性质的差异; 基于 SPSS 20.0, 利用方差分析法 (ANOVA) 和 LSD 法 ($P < 0.05$) 进行功能基因及物种的丰度差异分析; 采用皮尔逊相关系数法 (Pearson) 进行相关分析; 以测定的土壤环境因子

(Cd 含量、理化指标)及检测的土壤 Cd 抗性微生物矩阵为基础进行冗余分析 (redundancy analysis, RDA); 利用随机森林 (random forest analysis) 的方法,探究土壤理化因子和 Cd 含量等对施无机肥和有机肥网络参数的贡献程度. NMDS、RDA 和 Random forest analysis 使用 R 语言生态学函数包进行运算. 最后,使用 R 语言、Sigmaplot14.0 等软件进行科学绘图. 网络分析方法现已经被广泛用于微生物之间潜在的相互作用研究^[23~26]. 在这里利用微生物共生网络来比较施无机肥和有机肥下携带 Cd 抗性基因的微生物之间的相互作用及其与环境因子的联系. 微生物共生关系利用 Cytoscape 插件 CoNet 进行分析^[27]. 然后导出网络文件用 Gephi 进行作图.

2 结果与分析

2.1 施无机肥和有机肥土壤的理化性质

研究样地施无机肥和施有机肥土壤的基本理化性质见表 2,施加无机肥的土壤中常州和上高两地的样品呈酸性,施加有机肥后土壤的 pH 都有所升高;福州在施加有机肥后土壤的 pH 都有所降低. 结果表明相比较施无机肥的土壤,施加有机肥的土壤中 pH 更接近中性. 另外,3 个研究样地中施有机肥

土壤的有机氮含量显著高于施无机肥土壤中有有机氮的含量 ($P < 0.01$). 有机肥的施加使常州和上高的土壤样品中硝态氮的含量以及上高和福州样品中的铵态氮有了明显的提高. 通过非度量多维度 (NMDS) 排序对典型农耕地施无机肥和有机肥样品的理化性质进行分析 (图 1),发现施无机肥与施有机肥的土壤样品理化性质差异明显,不同的施肥措施下不同的施肥地点都有明显的区分,说明不同的施肥方式,不同的采样地点其理化性质具有一定的差异.

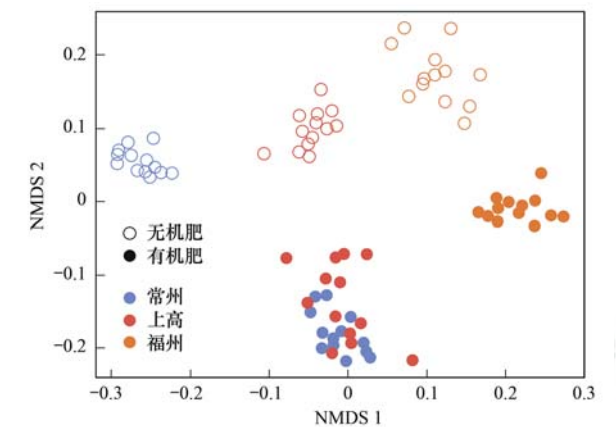


图 1 施无机肥与有机肥土壤理化指标 NMDS 排序
Fig. 1 NMDS sorting of the soil physical and chemical index of applied organic fertilizer and inorganic fertilizer

表 2 施无机肥和施有机肥土壤的基本理化性质¹⁾

项目	常州		上高		福州	
	无机肥	有机肥	无机肥	有机肥	无机肥	有机肥
pH	6.82 ± 0.07b	7.01 ± 0.08a	5.58 ± 0.19 *	7.02 ± 0.13 **	7.25 ± 0.07A	7.09 ± 0.33B
含水率/%	18.15 ± 1.82b	21.17 ± 2.18a	26.70 ± 2.58 **	23.13 ± 2.57 *	5.86 ± 0.70B	8.44 ± 0.75A
有机碳/mg·kg ⁻¹	96.40 ± 9.06a	45.27 ± 9.37b	56.45 ± 17.00	56.74 ± 18.85	88.55 ± 14.82B	120.88 ± 25.72A
全磷/g·kg ⁻¹	0.42 ± 0.04b	0.69 ± 0.05a	0.93 ± 0.08 **	0.63 ± 0.17 *	1.53 ± 0.32	1.62 ± 0.21
有效磷/mg·kg ⁻¹	0.47 ± 0.12b	0.79 ± 0.26a	3.04 ± 0.48 **	1.77 ± 1.18 *	3.29 ± 1.22B	7.93 ± 2.65A
全钾/g·kg ⁻¹	12.26 ± 0.27b	17.66 ± 0.82a	18.92 ± 0.95 **	16.14 ± 0.50 *	44.47 ± 1.99B	52.89 ± 2.64A
全氮/g·kg ⁻¹	1.03 ± 0.11	1.10 ± 0.17	1.46 ± 0.10 **	1.01 ± 0.30 *	1.32 ± 0.30	1.44 ± 0.36
有机氮/mg·kg ⁻¹	6.07 ± 4.84b	161.61 ± 41.87a	23.37 ± 6.78 *	105.52 ± 30.17 **	26.73 ± 11.51B	33.94 ± 7.65A
硝态氮/mg·kg ⁻¹	2.89 ± 2.37b	129.42 ± 43.58a	9.88 ± 2.28 *	101.36 ± 30.53 **	21.54 ± 10.76	30.12 ± 12.17
铵态氮/mg·kg ⁻¹	47.76 ± 8.17a	31.88 ± 11.98b	20.93 ± 8.33 *	35.36 ± 12.24 **	15.92 ± 5.92B	22.78 ± 7.19A
硫酸盐/mg·kg ⁻¹	91.24 ± 21.92a	76.40 ± 15.91b	58.52 ± 17.51	43.90 ± 20.51	46.52 ± 26.37	37.99 ± 22.88

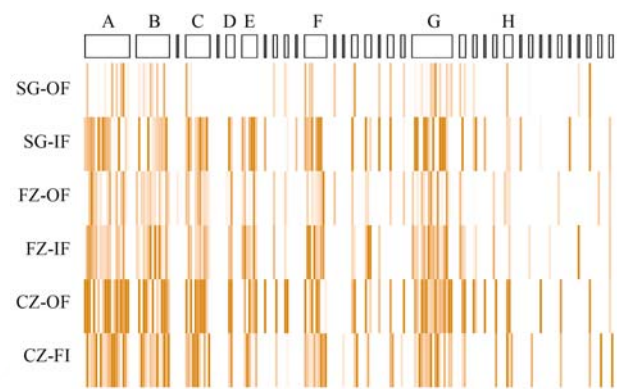
1) 表内数值为平均值 ± 标准偏差; 不同大小写字母和 *、** 均表示相同采样点施有机肥与无机肥间的差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 施无机肥和有机肥土壤的有效态 Cd 含量及 Cd 抗性基因丰度分析

在施无机肥、有机肥的农耕土壤样品中有效态 Cd 含量分别为 $[(3.75 ± 1.22) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 和 $[(1.08 ± 0.070) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$, 并且 3 个研究样地中施有机肥土壤有效态 Cd 的含量均显著低于施无机肥土壤中有有效态 Cd 的含量 ($P < 0.05$), 即施加有机肥显著降低了土壤中有有效态 Cd 的含量 (图 2). 在施无机肥和有机肥的土壤中共检测到 638

个抗 Cd 功能基因,施无机肥土壤与施有机肥土壤中的微生物 Cd 抗性基因丰度不同,且施有机肥土壤微生物 Cd 抗性基因丰度高于施无机肥土壤 (图 3). 进一步分析施无机肥和有机肥土壤的 Cd 抗性基因发现:在表层土壤及猪粪样品中检测到的重金属 Cd 抗性基因主要有两类,分别是 *cadA* (563 个) 和 *cadBD* (75 个). 根据图 4 发现 3 个采样区域里猪粪中的 Cd 抗性基因均显著低于无机肥和有机肥土壤 ($P < 0.05$), 而无机肥土壤中的 Cd 抗性

基因均显著低于有机肥土壤 ($P < 0.001$), 表明土壤中的 Cd 抗性基因与施加猪粪关系不大. 上高、福州地区有机肥土壤 Cd 抗性基因比施无机肥土壤中的 Cd 抗性基因分别高出了 26.5% 和 27.9%, 而常州地区有机肥土壤的 Cd 抗性基因的上升比例较小, 约为 6.6%. 所有样品中基因 *cadA* 的丰度均显著高于基因 *cadBD* ($P < 0.001$), 约占总量的 88%. 根据 Pearson 相关性分析 (表 3) 发现土壤理化性质和 Cd 抗性基因有一定的关联, 结果显示 *cadA* 和 *cadBD* 与含水率 (r 为 0.330 和 0.333, $P < 0.01$)、有机氮 (r 为 0.283 和 0.312, $P < 0.05$)、硝态氮 (r 为 0.342 和 0.347, $P < 0.01$) 呈正相关关系, 与硫酸盐 (r 为 -0.351 和 -0.244, $P < 0.05$) 和有效态 Cd (r 为 -0.280 和 -0.297, $P < 0.05$) 表现出负相关关系.



A: Actinobacteria; B: α -Proteobacteria; C: Bacilli; D: δ -Proteobacteria; E: β -Proteobacteria; F: Clostridia; G: γ -Proteobacteria; H: Bacteroidia; 不同的分类代表该纲所携带的 Cd 抗性功能基因 (热图数据进行了 0, 1 标准化处理); 不同小写字母表示同一地点施无机肥和有机肥携带 Cd 抗性基因丰度具有显著差异 ($P < 0.05$); CZ、SG 和 FZ: 分别代表采样地常州、上高和福州; IF 和 OF: 分别代表施无机肥和有机肥处理, CZ-IF: 常州无机肥, 以此类推

图 3 施无机肥和有机肥土壤携带抗 Cd 微生物的功能基因丰度

Fig. 3 Functional gene abundance of inorganic and organic fertilizer soils carrying anti-Cd microorganisms

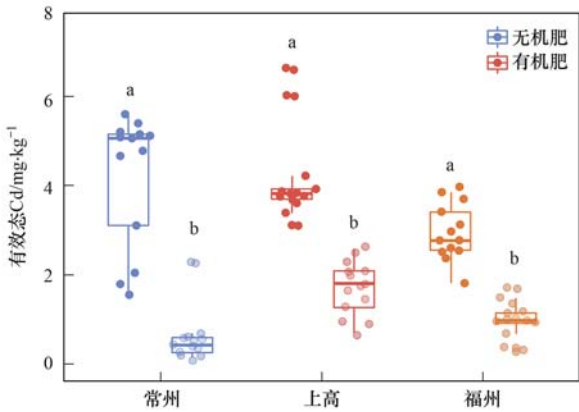
表 3 携带 Cd 抗性基因的微生物与环境因子的 Pearson 相关性检验¹⁾

项目	pH	含水率	有机碳	全磷	有效磷	全钾	全氮	硝态氮	铵态氮	有机氮	硫酸盐	有效态 Cd
<i>cadA</i> (563 个)	-0.029	0.330 **	-0.15	-0.155	0.153	-0.124	-0.157	0.342 **	0.082	0.283 *	-0.351 **	-0.280 *
<i>cadBD</i> (75 个)	0.023	0.333 **	-0.139	-0.238 *	0.079	-0.194	-0.239 *	0.347 **	0.152	0.312 *	-0.244 *	-0.297 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, 表示理化因子和功能基因显著相关

2.3 施无机肥和有机肥土壤中 Cd 抗性微生物的群落分布及其影响因子

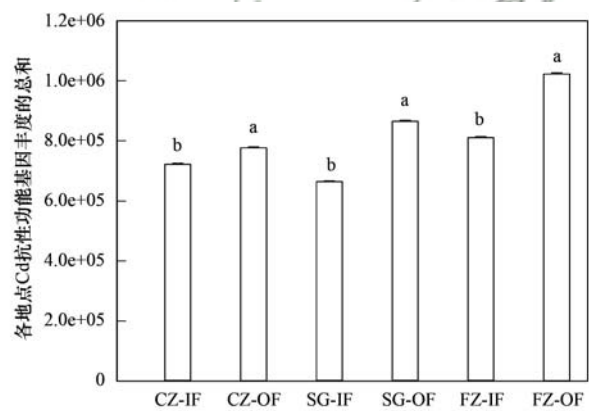
在所有土壤样品 Cd 抗性微生物中变形菌门的丰度最高, 约占 Cd 抗性细菌的 42% 左右; 其次是放线菌门, 占总量 31% 左右; 厚壁菌门、拟杆菌门和异常球菌-栖热菌所占比例分别为 19%、2% 和 1%. 虽然各门类的细菌在相应样品中所占比例均无显著差异, 但它们的丰度在有机肥土壤和无机肥土壤中表现出一定的差异性 (图 3). 利用冗余分析 (RDA)



不同小写字母表示相同采样点施无机肥与有机肥间有效态 Cd 含量具有差异 ($P < 0.05$)

图 2 施无机肥与有机肥土壤有效态 Cd 的含量

Fig. 2 Content of cadmium in the effective state of the inorganic fertilizer and the organic fertilizer soil



各地点Cd抗性功能基因丰度的总和

CZ-IF CZ-OF SG-IF SG-OF FZ-IF FZ-OF

方法分析了环境因子对施无机肥和有机肥表层土壤 Cd 抗性微生物群落的影响 (图 5), 第一轴与全磷、全钾、有机碳呈正相关, 与含水率呈负相关; 第二轴与有效态 Cd、全氮呈正相关, 与硝态氮、铵态氮、有机氮、pH 呈负相关. 除有效态 Cd 之外, 含水率、铵态氮和 pH 也是影响施无机肥和有机肥表层土壤微生物群落的主要影响因素. 另外, 从图 5 中还可以得到: 相同施肥方式的土壤样品更多地聚集在一起, 说明基于不同的施肥方式对微生物群落有一定的影响.

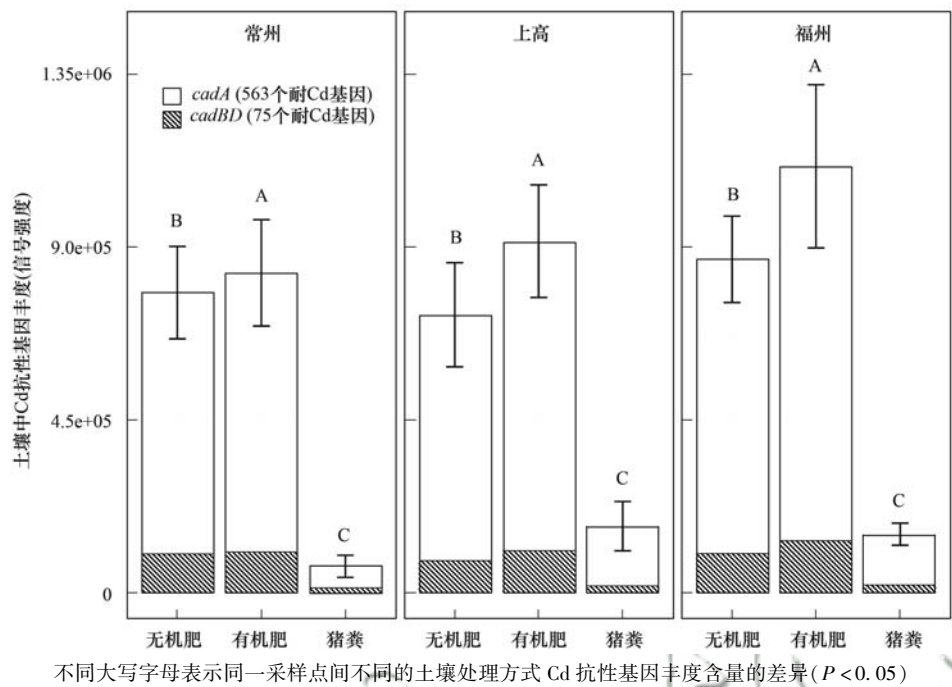


图 4 施无机肥、有机肥与猪粪土壤中微生物所携带的 Cd 抗性基因丰度

Fig. 4 Cadmium-resistant gene abundance carried by microorganisms in inorganic fertilizer, organic fertilizer, and pig manure soil

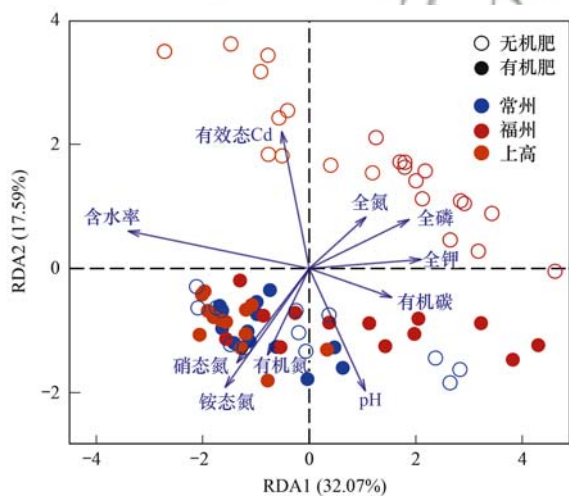


图 5 施无机肥和有机肥土壤中微生物所携带的 Cd 抗性功能基因的 RDA 排序

Fig. 5 RDA sequencing of a cadmium resistance gene carried by microorganisms in soil with inorganic fertilizer and organic fertilizer

2.4 施无机肥和有机肥土壤中携带 Cd 抗性基因的微生物共生网络及环境因子对网络的贡献

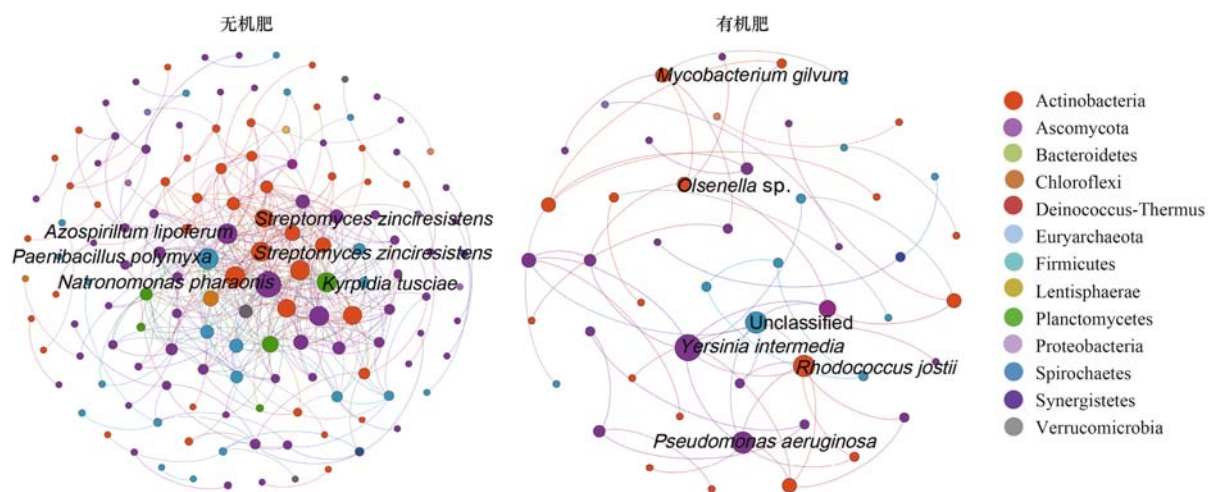
通过对无机肥和有机肥土壤中携带 Cd 抗性基因的微生物群落进行共生网络的构建,发现无机肥进入网络的节点数大于有机肥的群落,无机肥网络较有机肥复杂(表 4 和图 6),通过比较无机肥和有机肥的连线数,发现,有机肥网络的正连线比例(71.4%)高于施无机肥的微生物群落(61.4%). 在 39 个土壤样本中使用了 635 个 OTU,用于检测微生物的潜在相互作用. 施无机肥网络总共获得了 143 个 OTU(节点)和 464 个关联(连线),其中 61.4% 为正连线,38.6% 为负连线;施有机肥网络总共获得了 50 个 OTU(节点)和 56 个关联(连线),其中 71.4% 为正连线,28.6% 为负连线(表 4). 结果表明施有机肥的微生物正相互作用比例大于施无机肥的微生物群落,可能施有机肥的群落之间更能够发挥微生物功能,表现出更多的协同合作的关系.

表 4 施无机肥和有机肥土壤中携带 Cd 抗性基因的微生物共生网络拓扑参数

项目		连线数			网络密度	聚类系数	网络集中度	平均相邻数目	网络异构性	特征路径长度
		总连线	正连线(占比)	负连线(占比)						
无机肥	143	464	285(61.4%)	179(38.6%)	0.046	0.269	0.239	6.490	1.230	3.470
有机肥	50	56	40(71.4%)	16(28.6%)	0.046	0.256	0.122	2.240	0.750	2.965

为了了解环境因子和有效态 Cd 含量对于携带 Cd 抗性微生物网络的贡献,挑选了施无机肥和有机肥条件下携带 Cd 抗性微生物的共生网络的网络参数. 通过理化因子等对网络参数的随机森林模型发现:环境因子对于网络参数的贡献在施无机肥和

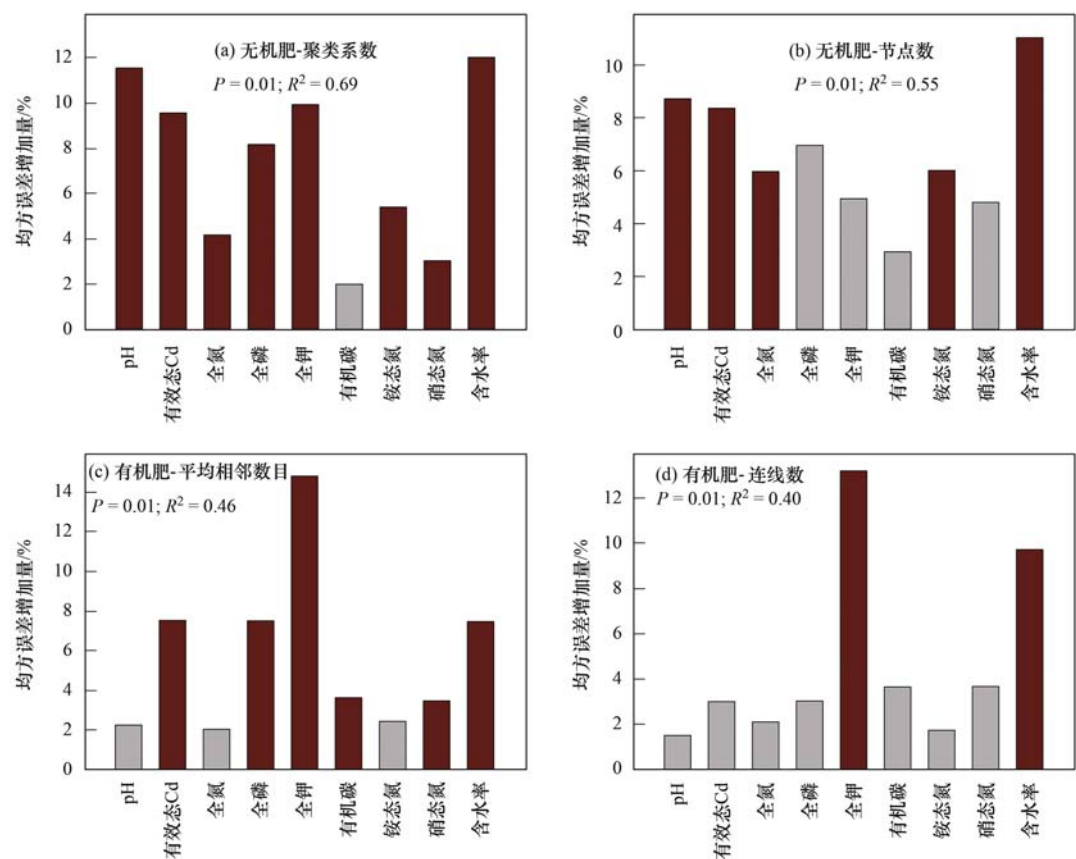
有机肥的条件下不同;在施无机肥条件下,影响网络参数的主要是 pH,含水率,有效态 Cd 含量;在施有机肥条件下,影响网络参数的主要是全钾和含水率(表 5 和图 7). 影响携带 Cd 抗性基因微生物群落的因素在无机肥和有机肥的条件下有所不同.



不同的分类代表该门所携带的 Cd 抗性功能基因(图上按照种的水平进行的标注)

图 6 施无机肥和有机肥土壤中携带 Cd 抗性基因的微生物共生网络

Fig. 6 Microbial symbiosis network symbiosis of cadmium-resistant genes in inorganic and organic fertilizer soils



图中红色表示该因素对于网络参数的贡献显著($P < 0.05$)

图 7 理化因子等对 Cd 抗性功能基因共生网络参数的贡献

Fig. 7 Contribution of physical and chemical factors to the parameters of the gene symbiosis network of cadmium resistance

3 讨论

3.1 施有机肥的土壤有效态 Cd 含量低于施无机肥的土壤

通过比较施无机肥和有机肥的土壤有效态 Cd 含量,发现施有机肥的土壤有效态 Cd 含量低于施

无机肥土壤 Cd 含量. 分析主要原因可能如下:一是非生物因素,土壤 pH 是影响镉形态的最重要因素之一^[28],通过比较无机肥土壤和有机肥土壤的 pH 发现,施加有机肥使土壤的酸碱度趋于中性,这可能是由于动物粪便含有的碳酸氢盐和有机酸缓冲作用的结果^[29]. Cd在酸性条件下,活性更高,当土壤pH

表 5 理化因子等对网络参数的贡献¹⁾

Table 5 Contribution of physical and chemical factors and other factors to network parameters

类型	项目	网络集中度	特征路径长度	平均相邻数目	网络密度	网络异构性	连线数
无机肥	pH	2.37	7.55 **	1.94	9.07 **	9.33 **	5.51 *
	有效态 Cd	8.36 **	3.08	8.24 *	10.67 **	7.27 *	2.18
	全氮	6.98 *	6.45 *	3.81 *	5.72 **	1.05	5.49
	全磷	7.6 *	8.83 **	3.15	8.85 **	9.15 **	5.9 *
	全钾	6.11 *	4.56 *	2.04	6.03 **	8.41 *	3.54
	有机碳	0.42	1.81	2.65	2.36 **	1.44	3.06
	铵态氮	3.78	7.21 *	0.2	5.06 **	2.35	6.95 *
	硝态氮	5.19 *	2.39	3.7	5.58 **	2.16	6.17
	含水率	1.04	6.01 *	0.35	10.68 **	9.51 **	11.29 **
	解释量	0.39	0.51	0.02	0.54	0.50	0.43
类型	项目	网络集中度	特征路径长度	聚类系数	网络密度	网络异构性	节点数
有机肥	pH	1.35 **	1.59 **	1.64	0.94	1.01	0.10
	有效态 Cd	4.58 **	4.63 **	2.99	3.28	6.17 *	3.25
	全氮	0.48	1.97 **	0.27	0.60	4.10 **	1.32
	全磷	1.34 **	1.32	1.73	1.75	5.92 **	1.02
	全钾	13.93 **	1.77	12.21 **	3.75	12.93 **	10.73 *
	有机碳	3.99 **	1.07	4.68	3.20	2.69	3.83
	铵态氮	4.24 **	3.21 **	5.86	2.23	2.16	4.33
	硝态氮	3.09 **	1.16	2.07	1.43	1.87	1.32
	解释量	0.33	0.10	0.23	0.04	0.33	0.27

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, 表示理化性质对于网络参数的贡献满足显著性条件

>6.5 时,随着土壤 pH 的增加有效态镉含量呈下降趋势^[30],施加有机肥使酸性土壤 pH 升高,降低了有效态 Cd 的活性^[31]. 另外,有机肥土壤中的有机氮含量明显高于施无机肥土壤中的含量,施加有机肥能够补充和保持土壤中氮库的供应能力,也能够增加土壤中硝态氮及铵态氮的含量^[32],土壤中微生物携带的 Cd 抗性基因均与有机氮、硝态氮呈显著正相关关系,土壤有机肥的施加增加了土壤中的有机氮和硝态氮含量,可能更加有利于微生物对有效态 Cd 的吸收和转化,从而降低土壤中有效态 Cd 的含量;其次添加有机物料可能增加了土壤表面能够与有效态 Cd 产生络合作用的有机基团,提高了对有效态 Cd 的专性吸附能力,降低了土壤有效态 Cd 含量^[17]. 二是生物因素,土壤微生物活性与群落结构受各种因素影响,环境条件和土壤管理方式在很大程度上决定了土壤微生物群落的结构^[33,34]. 通过比较携带 Cd 抗性微生物功能基因发现,施有机肥土壤的基因丰度大于施无机肥的土壤,而功能基因是确定群落功能的理想指标^[35,36],功能基因的丰度与相应微生物的生态功能高度相关^[37],更高的基因丰度可能更加有利于耐 Cd 基因发挥作用;另外网络的拓扑属性可以表示群落的稳定性或其功能的多样性^[38,39],本研究中施无机肥网络的正连线比例低于施有机肥网络的正连线比例,更多的正连线比例可能代表着更高的互利协作关系,微生物之间更多的互利协助关系可能更加有利于微生物功能的发

挥^[24].

3.2 不同的施肥方式对于 Cd 抗性基因的影响

通过对不同地理位置的土壤样品研究,发现携带 Cd 抗性基因的微生物在 Cd 的胁迫下表现出不同的分布特征,不同的施肥方式对于 Cd 抗性基因有很大影响. 施肥作为一种重要的增产措施会显著影响土壤中重金属化学行为. 土壤理化性状、植被类型以及管理措施均是影响土壤微生物群落变化的主要因素^[40]. Sun 等^[41]的研究发现,经过有机肥处理的与传统化肥处理的土壤微生物多样性差异明显;陶梦慧等^[42]通过盆栽试验,研究不同的施肥措施对土壤中微生物数量的影响,发现施用生物有机肥的土壤中细菌数量比施用化肥和有机肥处理的土壤微生物数量更多,施用生物有机肥可以更好地改善土壤微生物区系,增加土壤肥力. 不同的施肥方式会改变土壤的理化性质和营养元素,本研究中施无机肥和有机肥土壤的理化性质差异显著,可能会影响 Cd 抗性微生物的丰度水平,进而可能会影响土壤中携带 Cd 抗性微生物的群落和功能^[43]. 不同地区土壤 Cd 抗性基因也具有一定的差异(图 5),这可能是由于不同地区的气候和环境条件不同所导致的. 生境的异质性特征决定了土壤群落的相似度,会直接影响微生物群落结构及其分布^[44],微生物所携带的 Cd 抗性功能基因,会直接受微生物群落分布的影响;同时,有研究表明,功能基因的分布也受地理环境的影响^[45],根据已有的研究结果发现理化性质对

于 Cd 抗性基因微生物共生关系也有一定的影响; 微生物群落和地理环境的差异可能导致不同地区的土壤 Cd 抗性基因也具有一定的差异。

3.3 不同施肥方式对携带 Cd 抗性功能基因网络的影响

微生物间相互作用已证明影响微生物分布和生态功能^[46]。网络的拓扑属性(例如复杂性和模块化)可能表示社区的稳定性或其功能的多样性^[39]。理化性质和有效态 Cd 含量对于网络参数的贡献在施无机肥和有机肥条件下不同, 在施无机肥条件下, 影响网络参数的主要是 pH、含水率、有效态 Cd 含量; 在施有机肥条件下, 影响网络参数的主要是全钾和含水率, 表明在施无机肥和有机肥条件下环境因子对于携带 Cd 抗性微生物群落的影响不同。含水率能够影响土壤养分组成及农作物根系的生长, 间接影响了土壤微生物^[47]; 含水率和硫酸盐通过影响土壤微生物及酶活, 进而可能影响抗重金属功能基因的传播^[48,49], pH 对于微生物营养的利用、吸附、胞外酶的产生与分泌都会产生不同的影响; 施加有机肥增加了土壤 Cd 的抗性水平, 使重金属对微生物产生强烈的选择性压力不同, 可能导致了 Cd 抗性微生物群落结构和网络互作发生显著的变化^[50,51], 致使携带 Cd 抗性基因的微生物在不同施肥方式下对 Cd 的耐受性不同。

4 结论

研究了施用无机肥和有机肥条件下水稻土中携带 Cd 抗性基因的微生物分布特征及影响因素。结果表明施无机肥和有机肥土壤中微生物携带 Cd 抗性基因的丰度存在显著差异, 施用有机肥能够显著提高土壤中微生物的 Cd 抗性基因的丰度。与施无机肥微生物分子生态网络相比, 施有机肥提高了群落的正连线比例, 可能提高了群落的功能, 增强了群落的 Cd 抗性水平。Cd 是农耕土壤中最典型的污染物, 利用功能基因芯片技术能够较直观地反映 Cd 抗性基因分布, 可以为应对土壤重金属 Cd 污染下的农耕土壤可持续管理提供一定依据。

参考文献:

- [1] 刘利, 郝小花, 田连福, 等. 植物吸收、转运和积累镉的机理研究进展[J]. 生命科学研究, 2015, **19**(2): 176-184.
- [2] 薛永, 王苑娜, 姚泉洪, 等. 植物对土壤重金属镉抗性的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(3): 528-534.
- [3] 杨蕾. 我国土壤重金属污染的来源、现状、特点及治理技术[J]. 中国资源综合利用, 2018, **36**(2): 151-153.
- [4] 刘沙沙, 付建平, 蔡信德, 等. 重金属污染对土壤微生物生态特征的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(6): 1173-1178.
- [5] 环境保护部, 国土资源部. 环境保护部国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部, 国土资源部, 2014.
- [6] Tang X, Li Q, Wu M, *et al.* Review of remediation practices regarding cadmium-enriched farmland soil with particular reference to China[J]. Journal of Environmental Management, 2016, **181**: 646-662.
- [7] 孙波, 赵其国, 张桃林, 等. 土壤质量与持续环境——Ⅲ. 土壤质量评价的生物学指标[J]. 土壤, 1997, **29**(5): 225-234.
- [8] Dong W Y, Zhang X Y, Dai X Q, *et al.* Changes in soil microbial community composition in response to fertilization of paddy soils in subtropical China[J]. Applied Soil Ecology, 2014, **84**: 140-147.
- [9] 张俊伶, 张江周, 申建波, 等. 土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策[J]. 土壤学报, 2020, **57**(4): 783-796.
- [10] Zhang J L, Zhang J Z, Shen J B, *et al.* Soil health and agriculture green development: opportunities and challenges[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, **57**(4): 783-796.
- [11] 张超兰, 徐建民. 外源营养物质对表征土壤质量的生物学指标的影响[J]. 广西农业生物科学, 2004, **23**(1): 81-85.
- [12] 李静, 程雪芬, 廖萍, 等. 攀枝花矿区糙野青茅根际耐铬放线菌筛选及促生能力评价[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 1197-1206.
- [13] Li J, Cheng X F, Liao P, *et al.* Chromium-resistant rhizosphere actinomycetes from *Deyeuxia scabrescens* in Panzhihua mine area: Isolation, screening and plant growth promoting [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(3): 1197-1206.
- [14] 张旭辉, 孙斌, 魏志敏, 等. 2 株耐镉微生物的筛选及其对镉的吸附钝化差异机制[J]. 南京农业大学学报, 2019, **42**(5): 869-876.
- [15] Zhang X H, Sun B, Wei Z M, *et al.* Screening of two cadmium tolerant microorganisms and their differences in adsorption and immobilization of cadmium[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2019, **42**(5): 869-876.
- [16] 沈秋悦, 曹志强, 朱月芳, 等. 一株耐镉细菌的分离鉴定及其吸附条件的优化[J]. 土壤, 2016, **48**(3): 615-620.
- [17] Zhang W L, Du Y, Zhai M M, *et al.* Cadmium exposure and its health effects: a 19-year follow-up study of a polluted area in China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **470-471**: 224-228.
- [18] Broeckling C D, Broz A K, Bergelson J, *et al.* Root exudates regulate soil fungal community composition and diversity [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, **74**(3): 738-744.
- [19] 华路, 陈世宝, 白玲玉, 等. 有机肥对镉锌污染土壤的改良效应[J]. 农业环境保护, 1998, **17**(2): 55-59.
- [20] 张大庚, 依艳丽, 李亮亮, 等. 水分和有机物料对土壤镉-镉形态及化学性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(4): 939-944.
- [21] 罗琼, 王昆, 许靖波, 等. 我国稻田镉污染现状·危害·来源及其生产措施[J]. 安徽农业科学, 2014, **42**(30): 10540-10542.
- [22] 汪鹏, 王静, 陈宏坪, 等. 我国稻田系统镉污染风险与阻控[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(7): 1409-1417.
- [23] Wang P, Wang J, Chen H P, *et al.* Cadmium risk and mitigation in paddy systems in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(7): 1409-1417.
- [24] Tu Q C, Yu H, He Z L, *et al.* GeoChip 4: a functional gene-array-based high-throughput environmental technology for microbial community analysis[J]. Molecular Ecology Resources, 2014, **14**(5): 914-928.

- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] 刘铭, 刘凤枝, 刘保峰. 土壤中有毒态铅和镉的测定[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(S1): 300-302.
- [23] Ma B, Wang H Z, Dsouza M, *et al.* Geographic patterns of co-occurrence network topological features for soil microbiota at continental scale in eastern China[J]. The ISME Journal, 2016, **10**(8): 1891-1901.
- [24] Morriën E, Hannula S E, Snoek L B, *et al.* Soil networks become more connected and take up more carbon as nature restoration progresses[J]. Nature Communications, 2017, **8**: 14349.
- [25] Williams R J, Howe A, Hofmockel K S. Demonstrating microbial co-occurrence pattern analyses within and between ecosystems[J]. Frontiers in Microbiology, 2014, **5**: 358.
- [26] Faust K, Raes J. Microbial interactions: from networks to models[J]. Nature Reviews Microbiology, 2012, **10**(8): 538-550.
- [27] 顾静馨. 土壤微生物生态网络的构建方法及其比较[D]. 扬州: 扬州大学, 2015. 11-12.
- Gu J X. The methods of constructing soil microbial ecological network and its comparison [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015. 11-12.
- [28] 窦伟强, 安毅, 秦莉, 等. 土壤 pH 对镉形态影响的研究进展[J]. 土壤, 2020, **52**(3): 439-444.
- [29] Yoon K P, Misra T K, Silver S. Regulation of the *cadA* cadmium resistance determinant of *Staphylococcus aureus* plasmid p1258[J]. Journal of Bacteriology, 1991, **173**(23): 7643-7649.
- [30] 康六生. 土壤 pH·淹水调控与低镉积累品种在水稻大田生产上的降镉效果[J]. 安徽农业科学, 2018, **46**(20): 110-112.
- [31] 赵方杰, 谢婉滢, 汪鹏. 土壤与人体健康[J]. 土壤学报, 2020, **57**(1): 1-11.
- Zhao F J, Xie W Y, Wang P. Soil and human health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, **57**(1): 1-11.
- [32] Whalen J K, Chang C, Clayton G W, *et al.* Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, **64**(3): 962-966.
- [33] Steenwerth K L, Jackson L E, Calderón F J, *et al.* Soil microbial community composition and land use history in cultivated and grassland ecosystems of coastal California[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(3): 489-500.
- [34] Wu M N, Qin H L, Chen Z, *et al.* Effect of long-term fertilization on bacterial composition in rice paddy soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, **47**(4): 397-405.
- [35] Xue K, Yuan M M, Shi Z J, *et al.* Tundra soil carbon is vulnerable to rapid microbial decomposition under climate warming[J]. Nature Climate Change, 2016, **6**(6): 595-600.
- [36] Wang M M, Ding J J, Sun B, *et al.* Microbial responses to inorganic nutrient amendment overridden by warming: consequences on soil carbon stability[J]. Environmental Microbiology, 2018, **20**(7): 2509-2522.
- [37] Zhao M X, Sun B, Wu L W, *et al.* Zonal soil type determines soil microbial responses to maize cropping and fertilization[J]. Msystems, 2016, **1**(4): e00075-16.
- [38] Dickie I A, Cooper J A, Bufford J L, *et al.* Loss of functional diversity and network modularity in introduced plant-fungal symbioses[J]. AoB Plants, 2017, **9**(1), doi: 10.1093/aobpla/plw084.
- [39] Coux C, Rader R, Bartomeus I, *et al.* Linking species functional roles to their network roles[J]. Ecology Letters, 2016, **19**(7): 762-770.
- [40] 胡亚林, 汪思龙, 颜绍旭. 影响土壤微生物活性与群落结构因素研究进展[J]. 土壤通报, 2006, **37**(1): 170-176.
- [41] Sun H Y, Deng S P, Raun W R. Bacterial community structure and diversity in a century-old manure-treated agroecosystem[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, **70**(10): 5868-5874.
- [42] 陶梦慧, 索全义, 张曙光, 等. 不同施肥对土壤微生物量和酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2017, (9): 154-159.
- Tao M H, Suo Q Y, Zhang S G, *et al.* Effects of different fertilization on the number of soil microbiologic and soil enzyme activities[J]. Northern Horticulture, 2017, (9): 154-159.
- [43] Beauregard M S, Hamel C, Atul-Nayyar, *et al.* Long-term phosphorus fertilization impacts soil fungal and bacterial diversity but not AM fungal community in Alfalfa[J]. Microbial Ecology, 2010, **59**(2): 379-389.
- [44] Ranjard L, Dequiedt S, Prévost-Bouré N C, *et al.* Turnover of soil bacterial diversity driven by wide-scale environmental heterogeneity[J]. Nature Communications, 2013, **4**: 1434.
- [45] 丁浩, 徐慧敏, 苏芮, 等. 若尔盖花湖沉积物氨氧化与反硝化功能基因丰度垂向分布特征及其环境响应[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(10): 3482-3491.
- [46] Barberán A, Bates S T, Casamayor E O, *et al.* Using network analysis to explore co-occurrence patterns in soil microbial communities[J]. The ISME Journal, 2012, **6**(2): 343-351.
- [47] 来雪慧, 李丹, 于波峰, 等. 东北农场农作物生长季土壤呼吸对温度和含水量的响应[J]. 水土保持研究, 2016, **23**(1): 117-122.
- [48] Xue K, van Nostrand J D, Vangronsveld J, *et al.* Management with willow short rotation coppice increase the functional gene diversity and functional activity of a heavy metal polluted soil[J]. Chemosphere, 2015, **138**: 469-477.
- [49] Roosa S, Wattiez R, Prygiel E, *et al.* Bacterial metal resistance genes and metal bioavailability in contaminated sediments[J]. Environmental Pollution, 2014, **189**: 143-151.
- [50] Bååth E. Effects of heavy metals in soil on microbial processes and populations (a review)[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1989, **47**(3-4): 335-379.
- [51] Giller K E, Witter E, Mcgrath S P. Toxicity of heavy metals to microorganisms and microbial processes in agricultural soils: a review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, **30**(10-11): 1389-1414.

CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i>	(1)
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i>	(9)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(19)
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM _{2.5} in Winter in Shenyang	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i>	(30)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Baoding	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i>	(38)
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(45)
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i>	(55)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i>	(65)
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(75)
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i>	(88)
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i>	(97)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i>	(106)
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i>	(114)
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo	(127)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i>	(136)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i>	(147)
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i>	(159)
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i>	(166)
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i>	(175)
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i>	(184)
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue	(195)
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i>	(204)
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao	(211)
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(221)
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i>	(234)
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i>	(242)
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(251)
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i>	(263)
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i>	(274)
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i>	(283)
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(293)
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(305)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i>	(315)
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i>	(323)
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i>	(333)
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i>	(343)
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i>	(353)
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i>	(359)
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i>	(368)
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(378)
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i>	(386)
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i>	(394)
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i>	(403)
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i>	(411)
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i>	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i>	(433)
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i>	(443)
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i>	(450)
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i>	(459)
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i>	(467)
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i>	(477)
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i>	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i>	(485)
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i>	(492)
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i>	(501)