

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM_{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM_{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM_{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO₂/膨润土复合材料对 Hg²⁺ 的吸附性能研究 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H₂O₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N₂O 的产生特性 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体神累积与生物转化的影响 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响

罗路云^{1,2}, 金德才³, 左晖⁴, 张卓², 谭新球², 张德咏², 卢向阳¹, 刘勇^{2*}

(1. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128; 2. 湖南省农业科学院植物保护研究所, 园艺作物病虫害治理湖南省实验室, 长沙 410125; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 中国科学院环境生物技术重点实验室, 北京 100085; 4. 湖南生物机电职业技术学院, 长沙 410127)

摘要: 生物农药的使用极大地减少了对环境的污染, 探究生物农药对致病菌的细菌多样性及群落分布将为后续研究生物农药对致病菌的微生物生态调控提供理论依据. 本研究运用 Illumina MiSeq 高通量测序技术分析比较辣椒健康植株与疫病发病植株根际土壤微生物多样性, 以及研究沼泽红假单胞菌 PSB06 对植株根际土壤的微生物多样性影响, 探究沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒疫病的微生物生态调控机制. 结果显示, 在第 7 d 和第 14 d 的来自同一处理的根际土壤细菌群落多样性变化没有显著差异, 辣椒疫病发病植株根际土壤微生物多样性均小于健康植株根际土壤微生物多样性且喷洒沼泽红假单胞菌 PSB06 发酵液的土壤微生物多样性最高; 辣椒疫病发病植株根际土壤中放线菌丰度均小于健康植株且喷洒沼泽红假单胞菌菌剂 PSB06 的土壤中放线菌的丰度最高. 辣椒发病植株与健康植株根际土壤中微生物多样性存在显著差异. 施用沼泽红假单胞菌可以改善土壤微生物区系, 提高土壤微生物群落丰富性以及土壤中放线菌所占的丰度.

关键词: 沼泽红假单胞菌 PSB06; 辣椒疫病; 微生物多样性; 微生物群落结构; 微生物生态调控

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0735-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201606059

Effects of *Rhodopseudomonas palustris* PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure

LUO Lu-yun^{1,2}, JIN De-cai³, ZUO Hui⁴, ZHANG Zhuo², TAN Xin-qiu², ZHANG De-yong², Lu Xiang-yang¹, LIU Yong^{2*}

(1. College of Bioscience & Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Key Laboratory of Pest Management of Horticultural Crop of Hunan Province, Institute of Hunan Plant Protection, Hunan Academy of Agricultural Science, Changsha 410125, China; 3. Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Environmental Biotechnology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. Hunan Biological and Electromechanical Polytechnic, Changsha 410127, China)

Abstract: The use of biological pesticide can greatly reduce the soil pollution in the environment. Exploring the effect of biological pesticide on community diversity and distribution of pathogenic bacteria will provide theoretic basis for subsequent researches on biological pesticide micro-ecological control. In order to explore the microbial ecological mechanism of pepper phytophthora blight, this research compared the difference of microbial diversity between rhizosphere soil of infected and healthy plants, and the effects of *Rhodopseudomonas palustris* PSB06 on microbial diversities of plant rhizosphere soil were investigated using Illumina MiSeq sequencing technology. The results showed that there was less difference in the microbial diversity from the same soil between the seventh day and the fourteenth day. The microbial diversity of rhizosphere soil of healthy plants was higher than that of rhizosphere soil of infected plants. The soil sprayed with *Rhodopseudomonas palustris* PSB06 exhibited the highest diversity. Moreover, the abundance of Actinomycetes in the rhizosphere soil of healthy plants was higher than that of infected plants, and the highest abundance of Actinomycetes was observed in the soil sprayed with *Rhodopseudomonas palustris* PSB06. The microbial diversity between rhizosphere soil of infected and healthy plants was significantly different. Spraying *Rhodopseudomonas palustris* PSB06 could significantly alter the microbial community structure of the soil. It could also increase the diversity of microorganism and the abundance of Actinomycetes in the soil.

Key words: *Rhodopseudomonas palustris* PSB06; phytophthora blight; microbial diversity; microbial community structure; micro-ecological mechanism

收稿日期: 2016-06-11; 修订日期: 2016-09-05

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD19B06, 2014BAD05B04-4); 国家自然科学基金项目(31501696)

作者简介: 罗路云(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物和植物病理学, E-mail: luoluyun1992@163.com

* 通信作者, E-mail: haoasliu@163.com

近几十年来,农业经营方式发生巨大的转变,精密密集农业经过不断地发展,世界上农药的使用量逐年显著增加。同时随着经济的发展和社会的进步,人类生活水平逐步提高,环境保护意识逐渐增强,营养价值高、无污染、无公害的农产品越来越受到人们的青睐。农药污染危害极大,污染生存环境,破坏生态平衡,损伤种群群落,威胁生物多样性,威胁食品安全,危害人体健康^[1]。我国四大流域中,珠江流域由于经济发展较快,农业相对处于次要地位,因此农药的使用相对较少,污染较少;长江流域、黄淮海流域和松辽流域等地农业发达,农药的使用量较大,对环境的污染较大^[2]。农药被施用后,一是作用于靶标生物,并对靶标生物起着控制作用;二是被非靶标生物所接受,其余则是进入环境中。由于大部分农作物生长于土壤中,将农药施用于农作物时不可避免地撒落、飘逸、渗漏进入土壤环境中,有一些农药靶标生物本来就生活在土壤中,农药必须直接施用于土壤,因而土壤成为农药污染最大的目标^[3]。例如喷施的农药一般有40%~60%直接降落、残留在土壤中,5%~30%的农药飘浮于大气中,最终也通过降水返回地面,进入土壤^[4]。另外一方面,农药在被施用于水生作物时直接污染水体,或者通过因降水等对土壤的渗透而间接污染水体。生物农药是自然界本身存在的微生物或其产物,对人类和环境的潜在危害比有机农药小,因其种类丰富、分布广泛、适应性强和代谢途径多样的特点显现出自身在农药污染治理方面的优势^[5]。大力开发和推广生物农药,减少农业对有机农药的依赖,有利于逐步建立现代环保农业生产模式,实现农业的可持续发展,有效减少对环境的污染。研究生物农药对致病菌的作用机制有助于开发新的和有效的生物农药。

辣椒疫病(phytophthora blight)是由辣椒疫霉菌引起的一种全球性病害,对辣椒产生重大危害,现已在世界各辣椒产区普遍发生,经常造成辣椒的大量减产甚至颗粒无收。为了达到控制辣椒疫病的发生,只有采取高效可操作的方法防治辣椒疫病。由于辣椒疫病病原菌的传播途径多样,常呈暴发式发生,唯有采取多种防治方法才能有效地防治辣椒疫病。参考综合国内外文献,防治辣椒疫病主要采取以下几种方法:通过农业栽培措施防治辣椒疫病^[6,7],采用合适的肥料和选择适当的灌溉方式以及改进栽培措施和种植结构均可以促进辣椒生长,提高辣椒的抗病性,同时也可抑制病原菌生长和繁

殖,推迟或减轻病害的发生。目前生产上主要是使用化学药剂,然而化学药剂的大量使用使病菌的抗性逐渐增强、造成环境污染。生物防治被认为是持续控制疫霉菌病害发生的有效途径^[8],对环境无污染,具有很大的发展潜力,越来越受到生产者和研究者的青睐。辣椒疫病的生防资源比较丰富,已筛选并确定许多真菌^[9,10]、细菌^[11,12]、放线菌^[13,14]、植物提取物^[15]等均对辣椒疫病有拮抗作用。微生物农药是生物农药中重要组成部分,随着微生物农药研究的深入和应用技术的不断发展,大量微生物农药被用于防治辣椒疫病。光合细菌(photosynthetic bacteria, PSB)是一类在厌氧光照下进行不产氧光合作用的原核生物的总称^[16],广泛地分布于土壤、水田、沼泽、湖泊、江河、海洋等处^[17]。近年来,光合细菌在产氢固氮^[18,19]、医药^[20]、降解农药^[21]、处理工业废水^[22]、促进作物增产^[23]、水产养殖业^[24]等方面进行的大量的应用。微生物在生态系统物质循环和能量流动过程中起重要作用,维持土壤生态系统功能的稳定^[25]。土壤-作物系统与土壤微生物之间存在相互作用、互为条件的关系。根际土壤与根系密切接触,根际土中的微生物数量与种类受根系的影响较大,根系分泌物对于生物地球化学循环、根际生态过程调控、植物生长发育等均具有重要功能,尤其是在调控根际微生态系统结构与功能方面发挥着重要作用,调节着植物-植物、植物-微生物、微生物-微生物间复杂的互作过程^[26],而根际土壤微生物对根系的生长发育也产生了明显影响。本试验从样品及分析方法上对根际土壤微生物进行16S rDNA测序,研究辣椒疫病病株与健康植株的微生物多样性,探究沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒疫病根际微生物多样性的影响,有助于从更精确的微观分析中发现作物根部病害与微生物生态的关系,以期为进一步研究光合细菌对辣椒疫病的抗病机制研究提供新的思路,也为光合细菌的制备提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试菌株为保存在湖南省植物保护研究所的沼泽红假单胞菌 PSB06。

1.2 试验方法

1.2.1 试验地点

试验在位于湖南省长沙市长沙县榔梨镇花垣村的湖南省植物保护研究所基地进行,试验田为常年

种植辣椒且辣椒疫病发生严重的田块。

1.2.2 试验设计

试验设 3 个处理,处理 1: PSB06 发酵液;处理 2: PSB06 灭活发酵液;处理 3: 清水为空白对照(CK),每个处理 4 次重复,共计 12 个小区,随机排列,试验小区面积为 12 m²。

1.2.3 施药方法

施药采用根部喷施处理。在辣椒疫病发病初期喷药,连续喷施 3 次,分别在喷药后 7 d、14 d 后采用 5 点取样法^[27],随机抽取 5 个点采用抖落法采集辣椒根际土样后,将同一处理 4 次重复混合后并编号(表 1),采集土样 -80℃ 冰箱保存。土样采集时间为 6 月 26 日和 7 月 3 日。

表 1 供试土壤处理¹⁾

Table 1 Origin of the tested soil

| 来源 | 样品名 |
|------------------------|-------|
| PSB06 发酵液(发病植株根际土壤) | S1/F1 |
| PSB06 发酵液(健康植株根际土壤) | S2/F2 |
| 灭活 PSB06 发酵液(发病植株根际土壤) | S3/F3 |
| 灭活 PSB06 发酵液(健康植株根际土壤) | S4/F4 |
| 清水(发病植株根际土壤) | S5/F5 |
| 清水(健康植株根际土壤) | S6/F6 |

1) S1 ~ S6 表示第 7 d 的 6 种不同土壤样品,分别是 S1: 喷洒 PSB06 发酵液的发病辣椒植株根际土壤, S2: 喷洒 PSB06 发酵液的健康辣椒植株根际土壤, S3: 喷洒灭活 PSB06 发酵液的发病辣椒植株根际土壤, S4: 喷洒灭活 PSB06 发酵液的发病辣椒植株根际土壤, S5: 喷洒清水的发病辣椒植株根际土壤, S6: 喷洒清水的健康辣椒植株根际土壤; F1 ~ F6 表示第 14 d 的 6 种不同土壤样品,分别是 F1: 喷洒 PSB06 发酵液的发病辣椒植株根际土壤, F2: 喷洒 PSB06 发酵液的健康辣椒植株根际土壤, F3: 喷洒灭活 PSB06 发酵液的发病辣椒植株根际土壤, F4: 喷洒灭活 PSB06 发酵液的发病辣椒植株根际土壤, F5: 喷洒清水的发病辣椒植株根际土壤, F6: 喷洒清水的健康辣椒植株根际土壤

1.3 样品处理

1.3.1 样品土壤 DNA 提取

土壤 DNA 的提取采用 FastDNA SPIN Kit for soil 试剂盒(MP Biomedicals, 美国),具体步骤参照试剂盒使用说明书。取 5 μL 基因组 DNA 使用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测,采用 NanoDrop2000 (Thermo Scientific, 美国)测定浓度, -20℃ 冰箱保存。

1.3.2 16S rDNA 的 V4 区 PCR 扩增和测序

以样品 DNA 为模板,利用细菌 16S rDNA 基因的通用引物 515F (5'-GTGCCAGCMGCCGCGGTAA-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 进行 PCR 扩增^[28]。50 μL PCR 反应体系: 5 μL 10 × PCR buffer (含 20 mmol·L⁻¹ MgCl₂), 4 μL dNTP

(10 mmol·L⁻¹), 1 U *Taq* DNA 聚合酶, 1 μL DNA 模板, 灭菌的 ddH₂O 补至 50 μL。

PCR 反应条件: 95℃ 预变性 10 min; 95℃ 变性 45 s, 55℃ 退火 1 min, 72℃ 延伸 45 s, 循环 35 次; 最后 72℃ 延伸 10 min, 4℃ 保持。PCR 扩增产物用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测。PCR 产物送湖南长沙市中南大学生物冶金教育部重点实验室进行高通量测序。

1.4 数据分析

原始数据的处理通过 Galaxy 平台及其集成软件(<http://recc.ou.edu>)完成。通过唯一的 barcode 标记将序列分配到单独的样品上,使用 Brim^[29] 去除小于 200 bp 的序列。使用 FLASHv1.2.5^[30] 对所得到的序列进行拼接。Uchime (usearch v5.2.3)^[31] 使用参考序列去除内嵌子序列。调用 UPARSE^[32] 程序划分 OUT, 在 97% 的序列相似度水平下对序列进行归并。通过 RDP-Classifer 软件完成样品序列的分类注释,置信度参数设置为 50%。一般认为遗传距离小于 3% 的序列对应微生物属于同一物种。使用 Mothur 软件构建稀释曲线用来评估各样品在测序强度之间的差异。根据每个样品文库的 OTU 丰度信息,完成 α 和 β 多样性分析。通过香农指数多样性和辛普森指数多样性评估序列文库的多样性。通过 DCA (detrended correspondence analysis) 和 NMDS (non-metric multidimensional scaling) 来分析 3 组不同处理之间的微生物群落结构之间的差异。

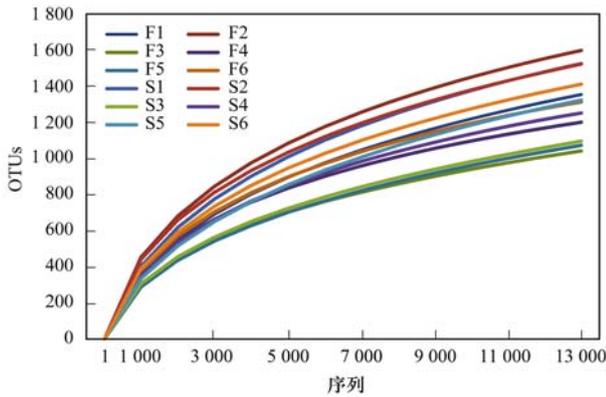
2 结果与分析

2.1 高通量测序数据预处理结果

本研究利用高通量测序方法,原始数据在 Galaxy 网站处理得到各样品序列测序量在 13 671 和 130 336 条之间,平均为 61 637 条。如图 1 所示,各样品的稀释曲线趋于平缓,也就可以认为测序深度已经基本覆盖到样品中所有的物种,测序数据量足以反映样品中的物种多样性。

2.2 Alpha 多样性分析

目前普遍认可种 (species) 的分类水平为 97% 序列相似度^[33],在该相似度水平下使用获取的 OTU 计算了各样本的 α 多样性。本研究共鉴定到 3 851 个 OTUs, 在 97% 的序列相似度水平下,使用 Shannon 指数、Simpson 指数对土壤微生物多样性进行评估。如图 2 和图 3 所示: 在第 7 d 和第 14 d, CK 发病土样多样性指数均最低, PSB06 发酵液健康植株土样微生物多样性最高且 Simpson 指数远远高于



图例含义同表 1

图 1 稀释曲线

Fig. 1 Rarefaction curves for OTUs

其他不同处理的样品. 分别对第 7 d 和第 14 d 喷洒 PSB06 发酵液、PSB06 灭活发酵液和清水健康植株的 Shannon 指数和 Simpson 指数比较, PSB06 发酵液微生物多样性均最高, 而灭活发酵液和清水健康植株相比多样性较低, 两者差异不显著; 分别对第 7 d 和第 14 d 喷洒 PSB06 发酵液、PSB06 灭活发酵液和清水健康植株和相对应的发病植株的 Shannon 指数和 Simpson 指数比较, 健康植株的微生物多样性均大于发病植株, 且各样品在第 7 d 和第 14 d 的微生物多样性无明显差异.

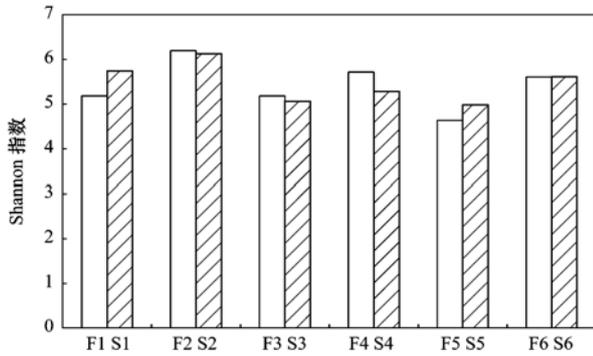


图 2 各样品香农指数对比

Fig. 2 Shannon index of different samples

2.3 Beta 多样性分析

Beta 多样性指标用来比较多组样品之间差异, DCA 分析结果(图 4)表明: 在第 7 d 和第 14 d 采集的相同处理的样品均能较紧密的结合在一起, 有很高的相似性, 几种不同处理的菌群群落可以明显地区分开来. 非度量多维尺度分析结果(图 5)表明, 除了清水处理的发病土样在第 7 d 和第 14 d 两个样品稍有差异外, 其他来自同一处理的样品均能聚在一起, 相似性较高, 几种不同处理的菌群群落可以明

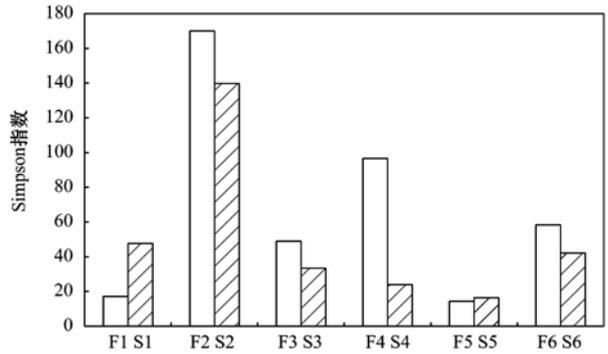


图 3 各样品辛普森指数对比

Fig. 3 Simpson index of different samples

显地区分开来, 并且来自同种环境的样本基本聚集紧密. 这说明相同处理的微生物群落结构在第 7 d 和第 14 d 群落结构变化不大, 而不同处理的样品间微生物群落结构有明显差异.

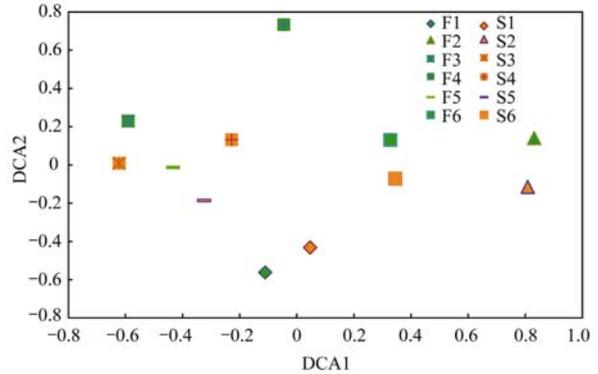


图 4 去趋势对应分析

Fig. 4 Detrended correspondence analysis(DCA)

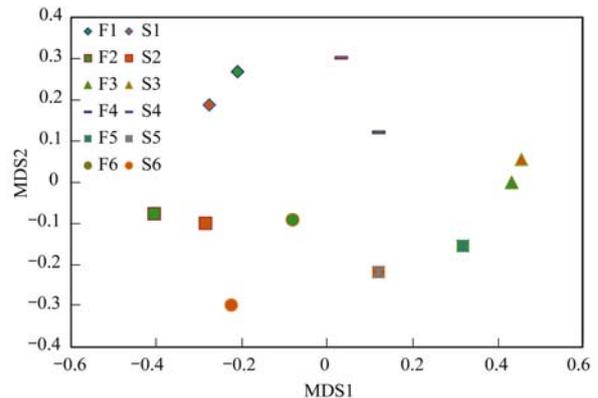


图 5 非度量多维尺度分析

Fig. 5 Non-metric multi-dimensional scaling(NMDS)

2.4 高通量测序分析土壤菌落结构

采用 RDP classifier 对序列进行分类地位的鉴定, 共鉴定到微生物的 22 个门, 如图 6, 其中主要的门包括 Proteobacteria (变形菌门)、Thaumarchaeota (奇古菌门)、Acidobacteria (酸杆菌门)、

Planctomycetes (浮霉菌门)、Actinobacteria (放线菌门)、Bacteroidetes (拟杆菌门) 和 Gemmatimonadetes (芽单胞菌门) 等。

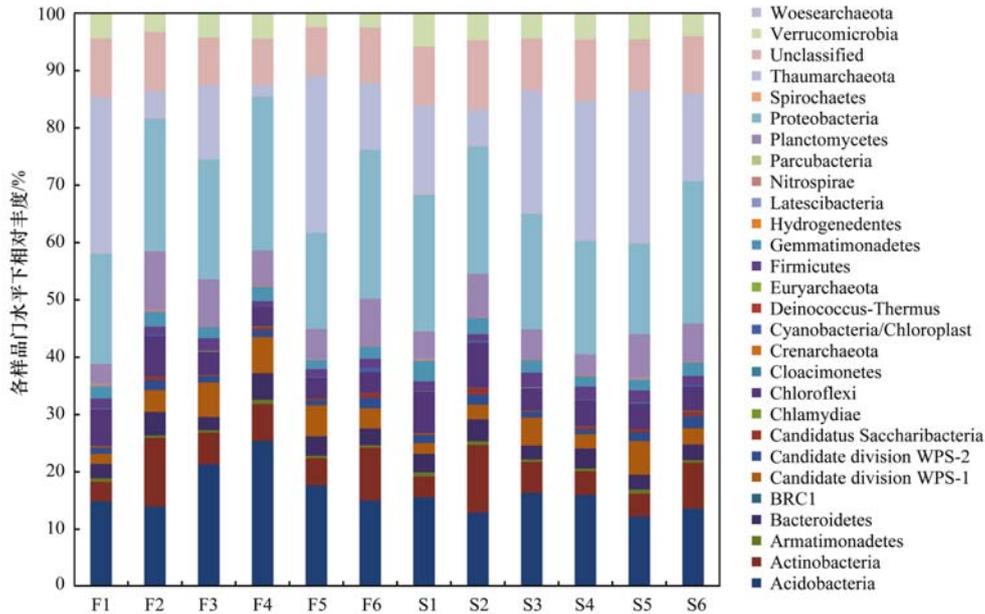


图 6 各样品在门水平的群落相对丰度

Fig. 6 Relative abundance of different samples at phylum level

进一步对各样品在属水平 (OUT 条数丰度大于 1.5%) 相对丰度研究, 结果表明不同样品的主要土壤微生物群落结构存在显著差异 (图 7)。在门水平下, PSB06 发酵液健康植株土样相比较其他样品, 在第 7 d 和第 14 d 中 Actinobacteria (放线菌门) 分别占 11.8% 和 12%, 发生了明显的增加, 而其他样品

均在 10% 以下 (图 8)。分别对喷洒 PSB06 发酵液, PSB06 发酵液灭活液, 清水健康植株土样进行比较, 在第 7 d 和第 14 d 之间放线菌没有显著, 且其中 Actinobacteria (放线菌) 丰度从大到小依次为: PSB06 发酵液 > 清水 > PSB06 发酵液灭活液。在属水平上, 其中 Nitrososphaera、Subdivision3_Genera_

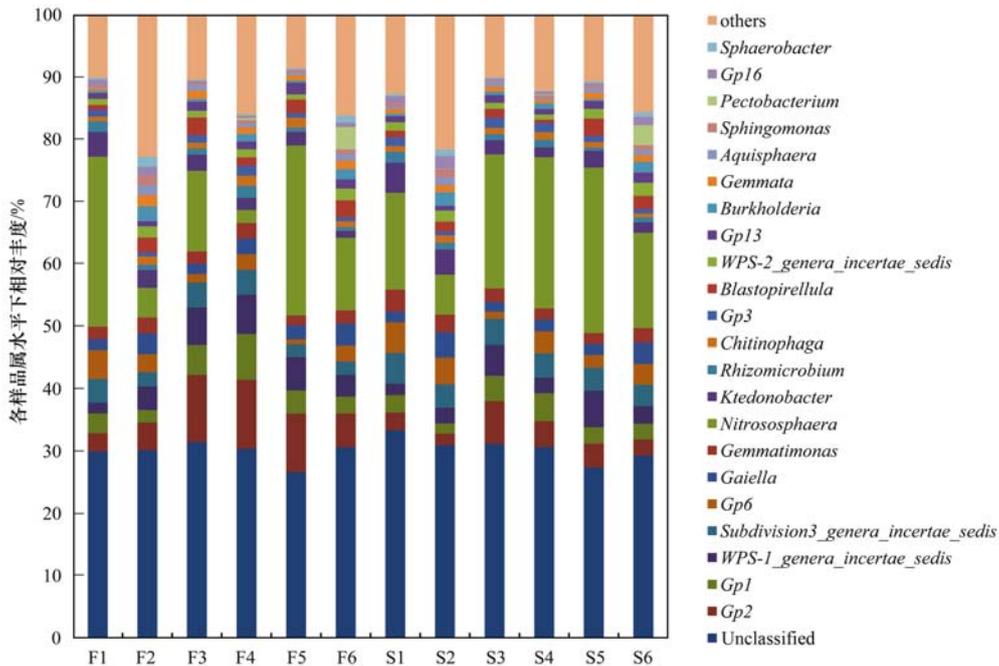


图 7 各样品在属水平的群落分布

Fig. 7 Relative abundance of different samples at genus level

incertae_sedis、*Gemmatimonas* 在各样品中均占优势地位。

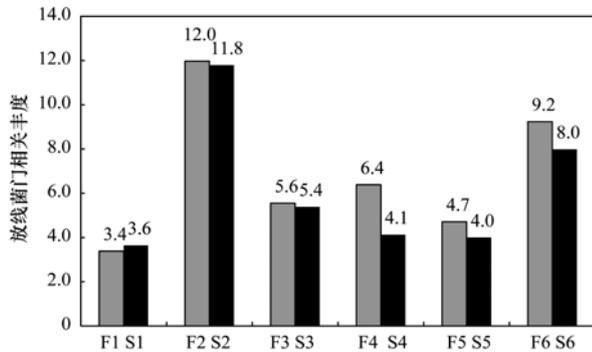


图8 各样品第7 d 和第14 d 放线菌门相对丰度

Fig. 8 Relative abundance of Actinobacteria in different samples on the seventh day and fourteenth day

3 讨论

从以上分析结果可知,同一处理的第7 d 的和第14 d 的样品的分类鉴定结果表明,来自同一处理的样品间差异不大. 在 β 多样性分析中,来自同一处理的样品间相似性显著高于不同处理间的微生物群落相似性,说明该数据集是可靠的,分析结果也合理可信. α 多样性分析和 β 多样性分析结果表明:在第7 d 和第14 d 来自同一处理样品之间的为微生物群落结构没有显著差异,而不同处理间的微生物群落结构相差较大. 喷洒 PSB06 发酵液、PSB06 灭活发酵液和清水健康植株和相对应的发病植株的 Shannon 指数和 Simpson 指数比较,发现健康植株的土壤微生物多样性均大于发病植株. 在对分别喷洒 PSB06 发酵液、PSB06 灭活发酵液、清水的健康土壤的 Alpha 多样性分析中发现,喷洒 PSB06 发酵液的多样性最高,并且远远高于 PSB06 灭活发酵液和清水健康植株土壤微生物多样性. 结果表明沼泽红假单胞菌 PSB06 能明显提高土壤微生物多样性,有助于下一步研究沼泽红假单胞菌抗辣椒疫病的抗病机制.

微生物群落遗传多样性分析结果表明:高通量测序共鉴定到 22 个门,其中主要的门包括 Proteobacteria (变形菌门)、Thaumarchaeota (奇古菌门)、Acidobacteria (酸杆菌门)、Planctomycetes (浮霉菌门)、Actinobacteria (放线菌门)、Chloroflexi(绿弯菌门)、Verrucomicrobia (疣微菌门)、Bacteroidetes(拟杆菌门)和 Gemmatimonadetes (芽单胞菌门). 尹敬芳等^[34]在辣椒上的研究及段春梅等^[35]、王玲娜等^[36]和段佳丽等^[37]在其他作物

上的研究表明发病植株和健康植株根际土壤的微生物群落的数量和种类发生了变化,与本研究得出的结论一致. 放线菌在健康植株根际土壤中丰度均高于发病植株根际土壤,PSB06 发酵液健康植株根际土壤中微生物中放线菌的丰度远远高于其他样品,这一结果也与杨芳等^[38]和张信娣等^[39]在光合细菌上的研究相一致. 郭小强等^[40]和张鹏等^[41]对连作辣椒的微生物数量做了研究,马云艳等^[42]进一步对病株和健株根区土中的可培养微生物进行测序并对其群落多样性进行比较,但是只对其中可培养微生物的多样性进行比较,并未对总体微生物进行多样性分析. 本研究运用高通量测序技术检测样品中群落结构,有助于深层次地探明辣椒疫病病株与健株的微生态差异,精准地探明辣椒疫病发生的微生态机制.

4 结论

(1) 光合细菌菌剂 PSB06 能显著提高土壤中放线菌的丰度.

(2) 同等条件处理,辣椒疫病发病植株根际土壤微生物多样性均小于正常植株土壤微生物多样性.

(3) 通过对不同处理的土壤根际微生物的 α 和 β 多样性分析表明,不同处理样品之间的微生物群落结构存在显著差异,喷洒光合细菌 PSB06 发酵液的土壤根际微生物多样性最高,能显著提高土壤微生物群落多样性.

参考文献:

- [1] 乔广浩,刘欣. 浅析农药使用与环境管理[J]. 农业环境与发展, 2010, 27(3): 74-77.
Qiao G H, Liu X. Analysis of pesticide use and environmental management [J]. Agro-Environment and Development, 2010, 27(3): 74-77.
- [2] 王未,黄从建,张满成,等. 我国区域性水体农药污染现状研究分析[J]. 环境保护科学, 2013, 39(5): 5-9.
Wang X, Huang C J, Zhang M C, et al. Study on status of regional water pollution by pesticides in China [J]. Environmental Protection Science, 2013, 39(5): 5-9.
- [3] Miller Jr G T. Sustaining the earth: an integrated approach[M]. California: Thomson Brooks Cole, 1994.
- [4] 沈德中. 污染环境的生物修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [5] 崔中利,崔利霞,黄彦,等. 农药污染微生物降解研究及应用进展[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(5): 93-102.
Cui Z L, Cui L X, Huang Y, et al. Advances and application of microbial degradation in pesticides pollution remediation [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012, 35(5): 93-102.
- [6] Förster H, Adaskaveg J E, Kim D H, et al. Effect of phosphite

- on tomato and pepper plants and on susceptibility of pepper to phytophthora root and crown rot in hydroponic culture[J]. Plant Disease, 1998, **82**(10): 1165-1170.
- [7] Xie J H, Cardenas E S, Sammis T W, *et al.* Effects of irrigation method on Chile pepper yield and *Phytophthora* root rot incidence[J]. Agricultural Water Management, 1999, **42**(2): 127-142.
- [8] 司美茹, 薛泉宏, 余博, 等. 辣椒疫霉生防菌的双重筛选[J]. 植物保护学报, 2006, **33**(1): 41-46.
- Si M R, Xue Q H, Yu B, *et al.* The selection of biocontrol actinomycetes against *Phytophthora capsici* by the method assessed inhibiting zones and root-colonizing capacity[J]. Acta Phytophylacica Sinica, 2006, **33**(1): 41-46.
- [9] Roberts D P, Maul J E, McKenna L F, *et al.* Selection of genetically diverse *Trichoderma* spp. isolates for suppression of *Phytophthora capsici* on bell pepper[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2010, **56**(10): 864-873.
- [10] 刘永亮, 尹成林, 田叶韩, 等. 拮抗真菌 HTC 的鉴定及其对辣椒疫病的生物防治潜力[J]. 植物保护学报, 2013, **40**(5): 437-444.
- Liu Y L, Yin C L, Tian Y H, *et al.* Identification of the antagonistic fungus strain HTC and its potential for biocontrol of pepper phytophthora blight[J]. Acta Phytophylacica Sinica, 2013, **40**(5): 437-444.
- [11] Kim H S, Sang M K, Jung H W, *et al.* Identification and characterization of *Chryseobacterium wanjuae* strain KJ9C8 as a biocontrol agent of Phytophthora blight of pepper[J]. Crop Protection, 2012, **32**: 129-137.
- [12] Sang M K, Kim K D. Plant growth-promoting rhizobacteria suppressive to Phytophthora blight affect microbial activities and communities in the rhizosphere of pepper (*Capsicum annuum* L.) in the field[J]. Applied Soil Ecology, 2012, **62**: 88-97.
- [13] Kim H S, Sang M K, Jeun Y C, *et al.* Sequential selection and efficacy of antagonistic rhizobacteria for controlling Phytophthora blight of pepper[J]. Crop Protection, 2008, **27**(3-5): 436-443.
- [14] 李永强, 杨建飞, 张平, 等. 2 株塔里木盆地土壤放线菌发酵产物抑菌作用初探[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, **32**(5): 83-87.
- Li Y Q, Yang J F, Zhang P, *et al.* Antifungal activity and control effects of the fermentation products produced by two soil actinomycete strains from Tarim Basin[J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2010, **32**(5): 83-87.
- [15] Khan M A, Cheng Z H, Xiao X M, *et al.* Ultrastructural studies of the inhibition effect against *Phytophthora capsici* of root exudates collected from two garlic cultivars along with their qualitative analysis[J]. Crop Protection, 2011, **30**(9): 1149-1155.
- [16] 武丽娜. 光合细菌对水培黄瓜苗期生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(11): 6409-6410, 6477.
- Wu L N. Influence of PSB (Photosynthetic Bacteria) on the growth of hydroponic cucumber seedlings[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, **40**(11): 6409-6410, 6477.
- [17] Hohmann-Marriott M F, Blankenship R E. The photosynthetic world[M]. Netherlands: Springer, 2012. 3-32.
- [18] Adessi A, De Philippis R. Photobioreactor design and illumination systems for H₂ production with anoxygenic photosynthetic bacteria: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, **39**(7): 3127-3141.
- [19] Abo-Hashesh M, Sabourin-Provost G, Hallenbeck P C. RrHydA is inactive when overexpressed in *Rhodospirillum rubrum* but can be matured in *Escherichia coli* [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, **38**(26): 11233-11240.
- [20] Wu H S, Tsai J J. Separation and purification of coenzyme Q₁₀ from *Rhodobacter sphaeroides*[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2013, **44**(6): 872-878.
- [21] Zhang S B, Zhu C H, Liu Y, *et al.* Biodegradation of fenpropathrin by a novel *Rhodopseudomonas* sp. strain PSB07-8 [J]. International Journal of Environmental Engineering, 2014, **6**(1): 55-67.
- [22] Liu G F, Zhou J T, Wang J, *et al.* Bacterial decolorization of azo dyes by *Rhodopseudomonas palustris* [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2006, **22**(10): 1069-1074.
- [23] Tian Y T, Yue T L, Yuan Y H, *et al.* Tobacco biomass hydrolysate enhances coenzyme Q₁₀ production using photosynthetic *Rhodospirillum rubrum* [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(20): 7877-7881.
- [24] Zhang J, Zhang W X, Li S Z, *et al.* A two-step fermentation of distillers' grains using *Trichoderma viride* and *Rhodopseudomonas palustris* for fish feed [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2013, **36**(10): 1435-1443.
- [25] 李晶, 刘玉荣, 贺纪正, 等. 土壤微生物对环境胁迫的响应机制[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(4): 959-967.
- Li J, Liu Y R, He J Z, *et al.* Insights into the responses of soil microbial community to the environmental disturbances[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(4): 959-967.
- [26] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J]. 植物生态学报, 2014, **38**(3): 298-310.
- Wu L K, Lin X M, Lin W X. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, **38**(3): 298-310.
- [27] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, *et al.* Large-scale pattern of biomass partitioning across China's grasslands [J]. Global Ecology and Biogeography, 2010, **19**(2): 268-277.
- [28] Wang X, Van Nostrand J D, Deng Y, *et al.* Scale-dependent effects of climate and geographic distance on bacterial diversity patterns across northern China's grasslands [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2015, **91**(12), doi: 10.1093/femsec/fiv133.
- [29] Kong Y. Btrim: a fast, lightweight adapter and quality trimming program for next-generation sequencing technologies [J]. Genomics, 2014, **98**(2): 152-153.
- [30] Magoč T, Salzberg S L. FLASH: fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies[J]. Bioinformatics, 2011, **27**(21): 2957-2963.
- [31] Edgar R C, Haas B J, Clemente J C, *et al.* UCHIME improves sensitivity and speed of chimera detection[J]. Bioinformatics, 2011, **27**(16): 2194-200.
- [32] Edgar R C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads[J]. Nature Methods, 2013, **10**(10): 996-998.
- [33] McKenna P, Hoffmann C, Minkah N, *et al.* The macaque gut microbiome in health, lentiviral infection, and chronic

- enterocolitis[J]. *PLoS Pathogens*, 2008, **4**(2): e20.
- [34] 尹敬芳, 张文华, 李健强, 等. 辣椒疫病生防菌的筛选及其抑菌机制初探[J]. *植物病理学报*, 2007, **37**(1): 88-94.
Yin J F, Zhang W H, Li J Q, *et al.* Screening and antagonistic mechanism of biocontrol agents against pepper *Phytophthora blight*[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2007, **37**(1): 88-94.
- [35] 段春梅, 薛泉宏, 呼世斌, 等. 连作黄瓜枯萎病株、健株根域土壤微生物生态研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, **38**(4): 143-150.
Duan C M, Xue Q H, Hu S B, *et al.* Microbial ecology of *Fusarium wilt* infected and healthy cucumber plant in root zone of continuous cropping soil [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2010, **38**(4): 143-150.
- [36] 王玲娜, 薛泉宏, 唐明, 等. 内蒙古芹菜根腐病病株和健株根域土壤的微生物生态研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, (8): 167-172, 181.
Wang L N, Xue Q H, Tang M, *et al.* Microbial ecological study about the root-zone soil of the healthy and diseased celery plant in inner Mongolia [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2010, (8): 167-172, 181.
- [37] 段佳丽, 舒志明, 魏良柱, 等. 丹参红叶病发生的微生态机制[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(7): 1991-1999.
Duan J L, Shu Z M, Wei L Z, *et al.* Microecological mechanisms of red-leaf disease occurrence in *Salvia miltiorrhiza* Bge[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(7): 1991-1999.
- [38] 杨芳, 田俊岭, 杨盼盼, 等. 高效光合细菌菌剂对番茄品质、土壤肥力及微生物特性的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2014, **35**(1): 49-54.
Yang F, Tian J L, Yang P P, *et al.* Effects of inoculant of photosynthetic bacteria on tomato quality, soil fertility and soil microbial characteristics[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2014, **35**(1): 49-54.
- [39] 张信娣, 曹慧, 徐冬青, 等. 光合细菌和有机肥对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响[J]. *土壤*, 2008, **40**(3): 443-447.
Zhang X T, Cao H, Xu D Q, *et al.* Effects of photosynthetic bacteria and organic fertilizer on soil microorganisms and soil enzyme activities[J]. *Soils*, 2008, **40**(3): 443-447.
- [40] 郭小强, 毛宁, 张希彪, 等. 不同施肥处理对辣椒根际土壤微生物区系和酶活性的影响[J]. *作物杂志*, 2014, (6): 123-126.
Guo X Q, Miao N, Zhang X B, *et al.* Effects of different fertilizer treatments on soil microbial community and enzyme activities in hot pepper[J]. *Crops*, 2014, (6): 123-126.
- [41] 张鹏, 韦中, 朱震, 等. 生物有机肥对连作番茄和辣椒根际土壤微生物区系及茄科雷尔氏菌的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2013, **36**(4): 77-82.
Zhang P, Wei Z, Zhu Z, *et al.* Effect of a bio-organic fertilizer on microbial flora and *Ralstonia solanacearum* population in rhizosphere soils of continuous cropping tomato and pepper[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, **36**(4): 77-82.
- [42] 马云艳, 王东胜, 李玉龙, 等. 辣椒疫病病株与健株根区土壤微生态研究[J]. *西北农业学报*, 2015, **24**(4): 129-137.
Ma Y Y, Wang D S, Li D L, *et al.* Micro-ecology in the rhizosphere soil of the *phytophthora blight* infected plants and healthy plants [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, **24**(4): 129-137.

CONTENTS

| | |
|---|---|
| Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing | YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423) |
| Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China | CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429) |
| Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region | CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438) |
| Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan | MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445) |
| Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing | ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453) |
| Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region | YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461) |
| Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing | ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469) |
| Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014 | ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476) |
| Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou | GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485) |
| Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing | ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495) |
| Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong | FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502) |
| Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations | GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510) |
| Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century | WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517) |
| Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge | LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527) |
| Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors | ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535) |
| Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer | QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547) |
| Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone | LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555) |
| Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water | JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563) |
| Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO | WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572) |
| Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland | WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580) |
| Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants | YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589) |
| Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir | HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600) |
| Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite | TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608) |
| Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control | WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616) |
| Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks | WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622) |
| Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite | ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629) |
| Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation | HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640) |
| Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes | GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647) |
| Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources | GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654) |
| Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System | WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665) |
| Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance | SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672) |
| Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge | DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679) |
| Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i> | GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688) |
| Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge | WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697) |
| Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City | WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703) |
| Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China | CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711) |
| Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes | YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721) |
| Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil | YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728) |
| Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure | LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735) |
| Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment | DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743) |
| Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas | HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752) |
| Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils | LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760) |
| Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances | ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769) |
| Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity | NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783) |
| Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain | CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792) |
| Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics | YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802) |
| Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain | TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809) |
| Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat | SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815) |
| Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat | CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825) |
| Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure | LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832) |
| Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures | MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei (837) |

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172