

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

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

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周嫻, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响

杨萍萍¹, 尹华^{1*}, 彭辉², 唐少宇¹, 卢妙¹, 刘皓¹

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室; 广东省环境风险防控与应急处置工程技术研究中心, 广州 510006; 2. 暨南大学化学系, 广州 510632)

摘要: 以污泥、锯末、蘑菇渣为堆肥原料, 分阶段添加高温复合菌和白腐真菌, 通过测定温度、pH、有机质、水溶性有机碳、含水率、总氮、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和种子发芽率, 比较了外接菌种对堆肥效能的影响。利用高通量测序技术, 研究了污泥堆肥过程中细菌群落结构变化及外接菌种对细菌群落的影响。结果表明, 外接菌种可以延长堆体高温持续时间, 降低氮损失, 加快堆体腐熟脱毒。在整个堆肥过程中, 细菌群落结构发生了较大的演变, 同一堆肥的不同阶段的细菌群落结构相似性较低, 同一时期不同堆肥的细菌群落结构相似性较高。外接菌种提高了堆体中细菌群落的丰富度, 增加了高温期优势菌的所占比例, 但未改变优势菌的种类。典型对应分析(CCA)表明 pH 对细菌群落结构的影响最大, 温度主要与 9 个菌属呈正相关关系。

关键词: 高温菌; 污泥堆肥; 效能; 高通量测序; 细菌群落

中图分类号: X172; X712 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3536-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702176

Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting

YANG Ping-ping¹, YIN Hua^{1*}, PENG Hui², TANG Shao-yu¹, LU Miao¹, LIU Hao¹

(1. Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center for Environmental Risk Prevention and Emergency Disposal, School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Department of Chemistry, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: In this study, municipal sludge, sawdust, and mushroom residues were used as raw materials for composting, and thermophiles and white-rot fungi were added into the compost in stages. By measuring physicochemical factors, including temperature, pH value, organic matter, water-soluble organic carbon, moisture content, total nitrogen, NH_4^+-N , NO_3^--N , and germination index during the composting process, the effect of exogenous bacteria inoculation on the efficiency of compost was determined. By means of high-throughput sequencing technology, the variation of bacterial community structure and the impact of exogenous bacteria inoculation on bacterial community structure during sludge composting were also investigated. The results showed that the inoculation extended the high temperature duration, decreased the nitrogen loss, and accelerated the decomposition and detoxification of the compost. During the entire period of composting, the structure of bacterial community changed significantly. There was low similarity of bacterial community structure among different stages of the same composting, but high similarity was observed in different composting of the same period. The inoculation of thermophilic bacteria improved the abundance of bacterial community and increased the proportions of dominant genera in thermophilic phase, but changed no species of dominant genera. Canonical correspondence analysis showed that pH had the highest influence on the structure of bacterial community and that temperature possessed positive correlation with nine genera.

Key words: thermophilic bacteria; sludge composting; efficiency; high-throughput sequencing; bacterial community

近年来,随着城市污水量的增多,城市污水处理厂规模和数量在不断扩大,产生的剩余污泥越来越多。污泥中含有大量的有机质和营养物质(如 N、P、K 等),同时还含有病原微生物、重金属及其它有害物质,如果得不到合理的处理和处置,必然会导致二次污染^[1]。堆肥因对环境危害小,又符合可持续发展战略,在实现污泥资源化方面受到广泛的关注。传统的污泥堆肥主要是利用堆肥原料中的土著微生物降解有机物,但堆肥初期微生物量少,繁殖较慢,因此存在发酵时间长、产生臭味且肥效低等问题,在产业化利用中受到限制^[2]。近年来,添加外源

微生物因对堆肥腐熟进程和堆肥产品质量有着积极的作用而备受关注。Sarkar 等^[3]在剩菜剩叶堆肥高温期添加培养好的嗜热菌,细菌数量的增加提高了高温期微生物的活性,加快了腐熟进程。Hachicha 等^[4]发现在橄榄油厂废水污泥的堆肥中接种变色栓菌可以增强腐殖酸的芳香化,从而加速堆体腐熟。

收稿日期: 2017-02-26; 修订日期: 2017-03-17

基金项目: 广东省科技厅公益研究与能力建设专项重点项目(2015B020215006); 广州市科信局产学研协同创新重大专项(2014Y2-00523)

作者简介: 杨萍萍(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为污泥资源化利用, E-mail: 2217125895@qq.com

* 通信作者, E-mail: huayin@scut.edu.cn

Zhang 等^[5]在园林废弃物的堆肥中添加白腐真菌,发现可以提高堆体温度,加快有机质的分解,并且高温后再接种更利于堆体有机质的降解^[6]。

由于堆肥物料成分复杂,外源微生物菌剂与堆肥土著微生物之间存在竞争,致使二者均不能充分地发挥其作用^[7],因此,了解堆肥过程中的微生物动态变化对充分发挥菌剂在堆肥中的作用显得尤为重要。目前多是采用 PCR-DGGE 技术来分析堆肥过程微生物群落变化,通过电泳图谱中的几十个条带信息对微生物群落多样性进行定性或半定量的分析,但这种技术对于群落中相对丰度低于 1.00% 的非优势微生物检测效果甚微^[8]。高通量测序技术可以对相对丰度 0.01% ~ 0.10% 的微生物进行定性和定量的检测,具有分析结果准确、高速、高灵敏度和高自动化等特点,近年来已逐渐被应用到包括堆肥领域的微

生物群落分析中^[9]。目前,对污泥接菌堆肥过程微生物多样性及群落结构及其理化参数之间关系的研究还十分缺乏。本研究通过外接菌种,并利用高通量测序技术,从分子生态学的角度研究接菌对堆肥过程中的微生物群落多样性及群落结构的影响,同时对理化参数进行监测,并分析微生物群落与理化参数之间的关系,以期优化工艺参数及研究堆肥过程中微生物的作用机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 堆肥原料

本实验以城市污水处理厂剩余污泥为堆肥基质,锯末和蘑菇渣为辅料,污泥取自广州市某污水处理厂,锯末取自广州瑞兴木质加工厂,蘑菇渣购自安徽六安心农园艺。实验所采用物料的性质见表 1。

表 1 堆肥原料的主要成分

Table 1 Primary composition of the composting materials					
物料	含水率/%	有机质(占干重)/%	C 含量/g·kg ⁻¹	N 含量/g·kg ⁻¹	C/N
污泥	77.09(±0.01)	34.72(±0.20)	152.50(±0.14)	26.90(±0.28)	5.67(±0.01)
蘑菇渣	17.49(±0.08)	64.50(±1.28)	253.50(±0.42)	23.75(±0.49)	10.67(±0.02)
锯末	9.57(±0.05)	98.78(±0.69)	445.95(±0.78)	0.70(±0.00)	637.07(±1.11)
堆肥原料	65.07(±0.04)	65.23(±0.14)	296.85(±2.05)	20.70(±0.13)	14.41(±0.10)

1.2 微生物菌剂的制备

高温菌的制备:污泥堆肥过程中,在高温期取适量堆肥新鲜样,加入 0.85% 生理盐水,堆肥新鲜样与生理盐水的重量体积比(g·mL⁻¹)为 1:10,放入 60℃ 恒温培养箱,转速为 160 r·min⁻¹,培养时间为 24 h。取部分液体置于营养培养基中,培养基组成为:牛肉膏 3 g·L⁻¹,蛋白胨 10 g·L⁻¹, NaCl 15 g·L⁻¹,蒸馏水 1 000 mL, pH 为 7.4 ~ 7.6。培养条件与之前相同,培养时间为 48 h,得到高温菌,稳定传至 4 代,用于接种堆肥。

黄孢原毛平革菌孢子液的制备:黄孢原毛平革菌购自广东省微生物菌种保藏中心,4℃ 斜面保存的菌种转接于 PDA 平板,37℃ 培养 5 ~ 7 d 后,平板表面形成丰富的白色粉状孢子,用无菌水将孢子洗到灭菌的三角瓶中,形成孢子悬液。PDA 培养基组成为:20% 马铃薯汁,20 g·L⁻¹ 葡萄糖,3 g·L⁻¹ KH₂PO₄, 1.5 g·L⁻¹ MgSO₄, 8 mg·L⁻¹ 盐酸硫胺,20 g·L⁻¹ 琼脂,剩余为蒸馏水, pH 为 6.0。

1.3 堆肥实验设计

堆肥反应器为 D 40 cm, H 40 cm 的不锈钢桶,在反应器外壁包一层厚度约为 5 cm 的保温棉。污泥与锯末、蘑菇渣按质量比 10:2:1 混合均匀,采用

间歇通风,通风量为 0.36 m³·h⁻¹。堆肥设计 2 个处理:T1 为接菌堆肥,在第 0 d 接种高温菌,接种量为 2 g·kg⁻¹,以提高堆体温度,在第 12 d 时接种黄孢原毛平革菌孢子液,接种量为 20 mL·kg⁻¹,使纤维素、木质素等难降解物质得到分解。T2 为对照,不加菌,只添加等体积的无菌水。堆肥总时间为 40 d,取样时进行人工翻堆。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 理化指标分析

堆体温度采用多点监测取平均值的方法每天监测。新鲜堆样用去离子水按 1:10(g·mL⁻¹)浸提后,滤液中的水溶性有机碳用 TOC 仪进行测定, pH 用 pH 计进行测定。堆体含水率的测定采用恒重法。总氮通过元素分析仪测定,新鲜堆样经 KCl 浸提后采用连续流动分析仪测定滤液中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N^[10]。堆体有机质含量通过马弗炉 550℃ 灼烧 6 h 进行测定。种子发芽指数(GI)的测定:新鲜堆样用去离子水按照固液比 1:10 浸提 1 h,吸取 5 mL 滤液注入到底部铺有滤纸的 9 cm 培养皿中,并在培养皿中均匀放置 20 颗白菜种子,用去离子水作对照,每个处理设 3 个重复,在 25℃ 黑暗条件下培养 48 h,用公式(1)测定种子发芽率^[11]。

$$GI(\%) = 100\% \times \frac{\text{堆肥处理的种子发芽率}(\%) \times \text{种子根长}}{\text{对照的种子发芽率}(\%) \times \text{种子根长}} \quad (1)$$

1.4.2 微生物群落结构分析

分别取第 0、4、19、33 d 的堆肥样品,进行高通量测序分析. 采用 Powersoil 土壤 DNA 提取试剂盒对堆肥样品的细菌基因组 DNA 进行提取,对 16S V4 高变区进行 PCR 扩增,细菌的通用引物序列为 515F (5'-CAATTCMTTTRAGTTT-3') 和 806R (5'-GTGCCAGCMGCCGCGGTAA-3').

测序结果分析:利用 Trimmomatic 软件对原始数据进行质量过滤,得到质控后的有效数据. 利用 Mothur 及 Flash 等软件对每对 PE reads 进行拼接,获得原始的拼接序列. 再利用 Mothur 对拼接后的序列进行质量控制及过滤,得到有效的拼接片段. 根据 barcode 及引物信息等,利用 Qiime 将拼接后序列分配至相应的样品中.

多样性及群落结构分析:微生物群落的 α 多样性分析,通常计算的参数包括 Chao1、observed_

species、Shannon、Simpson 等. 用 unifracs 的方法来计算加权矩阵以进行 β 多样性的分析. 利用 Qiime 对每个 OTU 的代表序列进行物种分类,生成不同分类水平上的物种丰度表. 利用典型对应分析(CCA)研究堆体微生物群落和理化参数之间的关系.

2 结果与讨论

2.1 堆肥过程中理化参数的变化

2.1.1 温度、pH、有机质、WSOC、含水率的变化

温度是反映堆体内微生物活性变化的一个重要指标,如图 1(a)所示,T1 和 T2 的温度在第 2 d 达到最高,分别是 70.75℃ 和 68.10℃. 两堆体在第 12 d 开始二次升温,T1 和 T2 的温度在 55℃ 以上分别持续了 7 d 和 5 d,因此两堆体符合无害化标准^[12]. T1 和 T2 的 pH 在第 12 d 达到最大,分别为 8.43 和 8.32[图 1(b)]. 到堆肥结束,两堆体的 pH 分别为 8.08、8.13. 两堆体的有机质有一个明显的降低趋势[图 1(c)],T1 和 T2 的有机质分别减少了 9.23%、6.67%. 堆肥中水溶性有机碳(WSOC)是

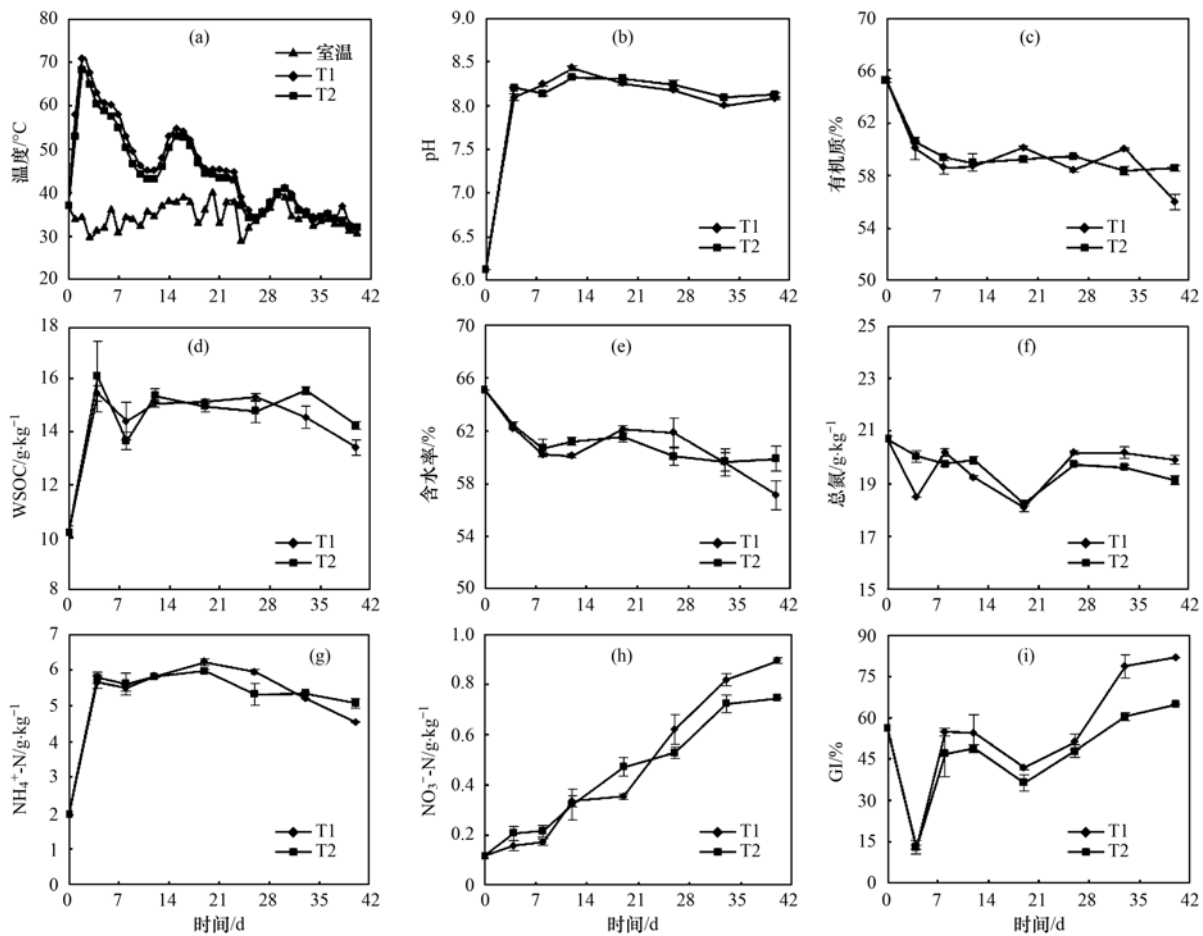


图 1 堆肥过程理化参数的变化

Fig. 1 Changes of physicochemical parameters during the sludge composting

能被微生物优先利用来进行新陈代谢的重要物质,如图 1(d),堆肥初期由于温度升高,有机碳快速分解,WSOC 的含量急剧增加^[13]。之后,随着微生物的生长繁殖,微生物大量消耗 WSOC,堆体中的 WSOC 含量开始降低,接菌可以促进堆肥基质中水溶性有机碳的生物降解。堆肥结束,T1 和 T2 的含水率分别减少了 7.93% 和 5.19% [图 1(e)],因反应器是密封的,只在盖子上留有出气口,产生的水蒸气不能完全排出,使得堆体的含水率变化不明显。

2.1.2 氮素变化

总氮的变化如图 1(f) 所示,随着堆肥的进行,堆体中的氮含量有所降低,氮损失主要发生在高温期^[9]。到堆肥结束,T1 和 T2 的氮含量分别损失了 3.82% 和 7.54%。如图 1(g) 所示,在堆肥高温阶段,高的氨化速率使得 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度快速增加^[14],随着温度的降低,积累的高浓度 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 开始逐渐下降,减少的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 部分以氨气的形式挥发损失,部分经硝化细菌的作用转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,部分被微生物固定转化为有机氮^[15]。在图 1(h) 中,两堆体中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量在整个堆肥阶段呈上升趋势。在最初阶段,由于高温和高浓度的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,抑制了硝化细菌的活性,所以堆肥初始阶段 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度增加缓慢。随着温度的降低,硝化反应增强,生成的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度开始增加^[16]。在两次接种的共同作用下,T1 中硝态氮的含量增加得比 T2 中的多。

2.1.3 种子发芽率

种子发芽率(GI)是评价最终堆肥产品毒性的评价指标^[17]。当 GI 大于 80% 时,可以认为堆肥完全腐熟^[18]。由图 1(i) 可知,堆肥初期有机质的分

解,产生了大量的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和小分子有机酸,且堆体本身含有一些有害于作物生长的物质,抑制了种子的发芽。随着堆肥进行,小分子有机酸被分解,或者转化成高分子腐殖酸,同时氨的挥发和重金属固定使得 GI 升高^[19]。堆肥结束后,T1 和 T2 的 GI 分别为 81.86% 和 64.87%。

2.2 细菌群落相似性和多样性分析

细菌群落相似性可以通过 PCoA 和 UPGMA 聚类进行分析。细菌群落的分布主要包括三块[图 2(a)],堆肥初期的样品(第 0 d)、高温期的样品(第 4 d)、降温期和腐熟期的样品(第 19、33 d)。第 0、4、19 d 的样品相距较远,说明堆肥过程尤其是在前 19 d 两堆体中细菌群落发生了较大的演变。而堆肥 19 d 后样品聚在一起,说明这些样品中细菌群落有高度的相似性,降温腐熟阶段的细菌群落结构有着高度稳定性^[20]。T1 和 T2 在相同时期的样品相距很近,说明添加的菌剂不会对细菌群落结构造成明显的改变。从 UPGMA 聚类分析[图 2(b)]也可以看出,同一堆肥的不同阶段的细菌群落结构相似性较低,如 T1 的高温期和降温期的相似性系数为 78.00%。同一时期不同堆肥的细菌群落结构相似性较高^[21],比如 T1、T2 的高温期的相似性系数为 96.50%。

observed_species 指数和 Chao1 指数反映样品中群落的丰富度。Shannon 指数和 Simpson 指数反映的是群落的多样性,受样品群落中物种丰富度和物种均匀度的影响。如表 2 所示,随着堆肥的进行,两个堆体的 observed_species 值和 Chao1 值降低,说明堆肥会降低群落的丰富度,OUT 数量的变化也印证了这个结果。在第 4 d,T2 中细菌群落的丰富度和多样性都

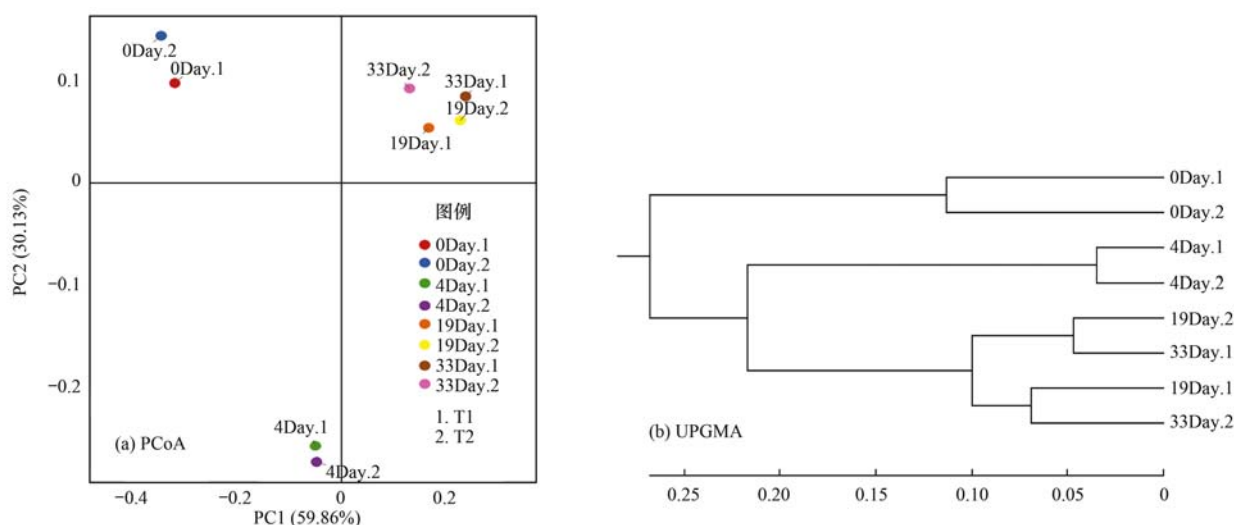


图2 PCoA 和 UPGMA 聚类分析

Fig. 2 Analysis of principal coordinates and arithmetic mean clustering

比 T1 大,这是因为 T1、T2 都处于高温期,且 T1 温度比 T2 高,能杀死更多的微生物,使得群落的丰富度和多样性降低得更多. 在第 0、19 d,因为外源菌种的添

加,T1 细菌群落的丰富度和多样性高于 T2 的. 堆肥至第 33 d,T1 群落的丰富度高于 T2 的,但受物种均匀度的影响,T2 群落的多样性高于 T1.

表 2 各个样品细菌群落多样性
Table 2 Diversity of bacterial community in each sample

时间/d	OUT 数量		Chao1 指数		observed_species 指数		Shannon 指数		Simpson 指数	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
0	1 038	912	1 226. 80	1 170. 17	800	763	6. 58	6. 01	0. 97	0. 92
4	837	847	1 098. 42	1 122. 10	752	777	5. 99	6. 01	0. 94	0. 95
19	632	563	903. 53	810. 60	589	545	6. 19	4. 98	0. 96	0. 87
33	620	586	880. 78	794. 99	528	513	5. 03	6. 10	0. 88	0. 97

2.3 堆体细菌群落分布

如图 3(a)所示,在门分类水平上,所有样品中主要的 8 个门为放线菌门(Actinobacteria)、装甲菌门(Armatimonadetes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、厚壁菌门(Firmicutes)、浮霉菌门(Planctomycetes)、变形菌门(Proteobacteria)和互养菌门(Synergistetes). 不同时期在门水平各细菌群落的相对丰度不同,第 0 d 时,T1 和 T2 中拟杆菌门(12. 75%、31. 11%)、厚壁菌门(22. 28%、17. 87%)、浮霉菌门(18. 38%、11. 02%)、变形菌门(17. 48%、17. 87%)比较丰富. 第 4 d(高温期)T1 和 T2 中厚壁菌门相对丰度大量增加,分别为 74. 66%、72. 49%,有研究报道显示厚壁菌门在高温期是最优势菌门,这主要与厚壁菌门可以在高温下(> 55℃)存活,并能参与各种代谢活动有关^[9,22]. 与堆肥初始期相比,高温期除了厚壁菌门和放线菌门,其它菌门的相对丰度都降低了. 且随着温度的降低,微生物的活性开始再次增强,厚壁菌门所占比例下降,放线菌门、变形菌门所占比例增加. 第 19 d(降温期)时,T1 和 T2 中放线菌门(30. 17%、51. 51%)、厚壁菌门(32. 50%、27. 91%)、变形菌门(27. 36%、12. 69%)占有较大比例. 堆肥至第 33 d(腐熟期)时,T1 和 T2 中放线菌门(57. 85%、27. 86%)、厚壁菌门(19. 21%、29. 13%)、变形菌门(11. 16%、19. 31%)是优势菌. 随着堆肥的进行,放线菌门的相对丰度呈上升趋势,放线菌门可以通过分泌各种抗生素抑制病原微生物^[22],因此,放线菌门的增多利于堆肥产品生物毒性的降低. 从图 1(i)也可以看出,第 19 d 后,两堆体的种子发芽率快速增加.

在属水平上,各样品中细菌群落的相对丰度分布如图 3(b)所示,堆肥初期,T1 中优势细菌主要为 *Mangroviflexus*、*Exiguobacterium*、*Zavarzinella*、*Caldilinea*, 其中 *Mangroviflexus* (9. 67%)、

Zavarzinella(9. 87%)的相对丰度较高,分别属于拟杆菌门、浮霉菌门, T2 中优势细菌为 *Mangroviflexus*、*Zavarzinella*、*Caldilinea*、*Rikenella*, 其中 *Mangroviflexus* (25. 23%) 相对丰度较高. *Mangroviflexus* 是一种可以发酵各种底物产生乙酸、丙酸、琥珀酸的厌氧嗜温菌^[23],主要存在于污泥中. 进入高温期后,堆肥初期的优势细菌的相对丰度降低,新的优势细菌出现. *Ureibacillus*、*Symbiobacterium* 是 T1、T2 中主要优势细菌,属于厚壁菌门,耐高温,两者的相对丰度在 T1 中更高,分别是 12. 94%、11. 88%. *Ureibacillus* 既能分解可溶性有机物,同时可以产生胞外水解酶,分解纤维素、半纤维素大分子化合物^[24],经常在堆肥高温阶段被检测到. *Symbiobacterium* 常从堆肥、土壤、动物粪便中分离出^[25]. 在降温期,T1、T2 中优势细菌主要为 *Actinomadura*、*Alkalilimnicola*、*Paenibacillus*、*Calditerricola*. T1 中 *Alkalilimnicola* (8. 51%) 所占比例较高,属于变形菌门. T2 中 *Calditerricola* (9. 44%) 所占比例较高,属于厚壁菌门. *Alkalilimnicola* 是好氧菌,但在厌氧条件下,可以将硝酸盐或 N₂O 作为电子受体生长^[26]. 随着堆体温度降至与室温接近,堆肥进入腐熟期. T1、T2 中优势细菌主要为 *Actinomadura*、*Alkalilimnicola*、*Persicitalea*、*Paenibacillus*. 在两个堆体中,属于放线菌门的 *Actinomadura* 所占比例最大,分别为 17. 81%、9. 48%. 有学者发现在堆肥后期 *Actinomadura* 会出现,因此提出可以将 *Actinomadura* 作为评价堆体腐熟的相关指标之一^[27]. 在本研究中,第 19 d 时,*Actinomadura* 是优势菌属,且 T1 和 T2 中第 33 d 与第 19 d 样品中的优势菌门一致,说明在 19 d 时,堆体可能已开始腐熟. 在不同时期,厚壁菌门一直是优势菌门,而接种的高温菌中的厚壁菌门的相对丰度为 99. 06% [图 4(a)],高温菌的接入增加了 T1 厚壁菌门的相对丰度,使 T1 中厚壁菌

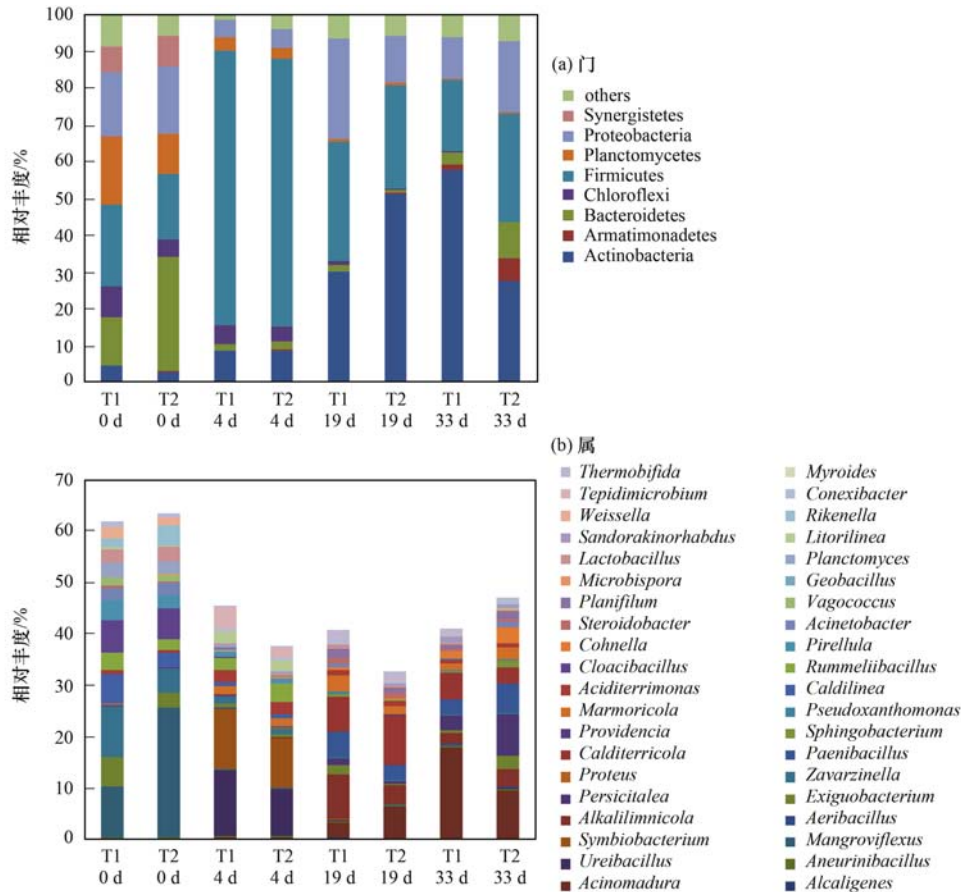


图3 样品中门和属水平细菌群落相对丰度
Fig. 3 Relative abundances of phyla and genera in each sample

门的相对丰度在前 19 d 比 T2 高,而且高温菌的优势菌属 *Ureibacillus* 在堆肥高温期也是优势菌属[图 4(b)]. 菌剂的添加会影响优势菌所占比例,但不会改变优势菌的种类.

2.4 细菌群落结构与理化参数之间的相关性分析

采用 CCA 分析堆体理化参数(温度、pH、有机质、WSOC、含水率、TN)与主要菌属之间的关系. 如图 5, CCA1 和 CCA2 分别解释了 43.78% 和 35.45% 的样品差异,前 2 个排序轴共解释了 79.23% 的细菌种群结构变化,说明这 6 个理化参数

对堆肥过程中细菌群落结构的变化有显著的影响. 可把图中主要菌属分为 3 簇(I、II、III),从理化参数和主要菌属与原点连线之间的夹角可以看出理化参数与细菌群落的关系,第 I 簇内的 6 个菌属与温度呈正相关关系;第 II 簇内的 12 个菌属与含水率、有机质、总氮呈正相关,与 WSOC、pH 呈负相关;第 III 簇内的 21 个菌属与 WSOC、pH 呈正相关关系,另外第 III 簇内的 *Aciditerrimonas*、*Aeribacillus*、*Aneurinibacillus* 还与温度呈正相关. T1 中与温度相关的 9 个菌属的总相对丰度在 4 个样品中都比 T2

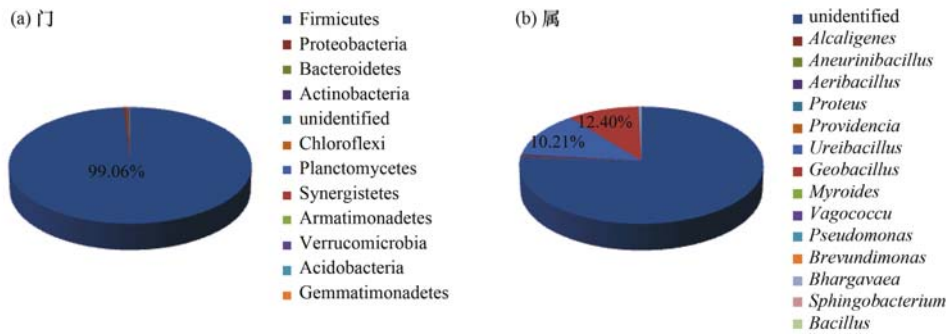


图4 门和属水平高温菌群落相对丰度

Fig. 4 Relative abundances of phyla and genera in the thermophilic bacteria

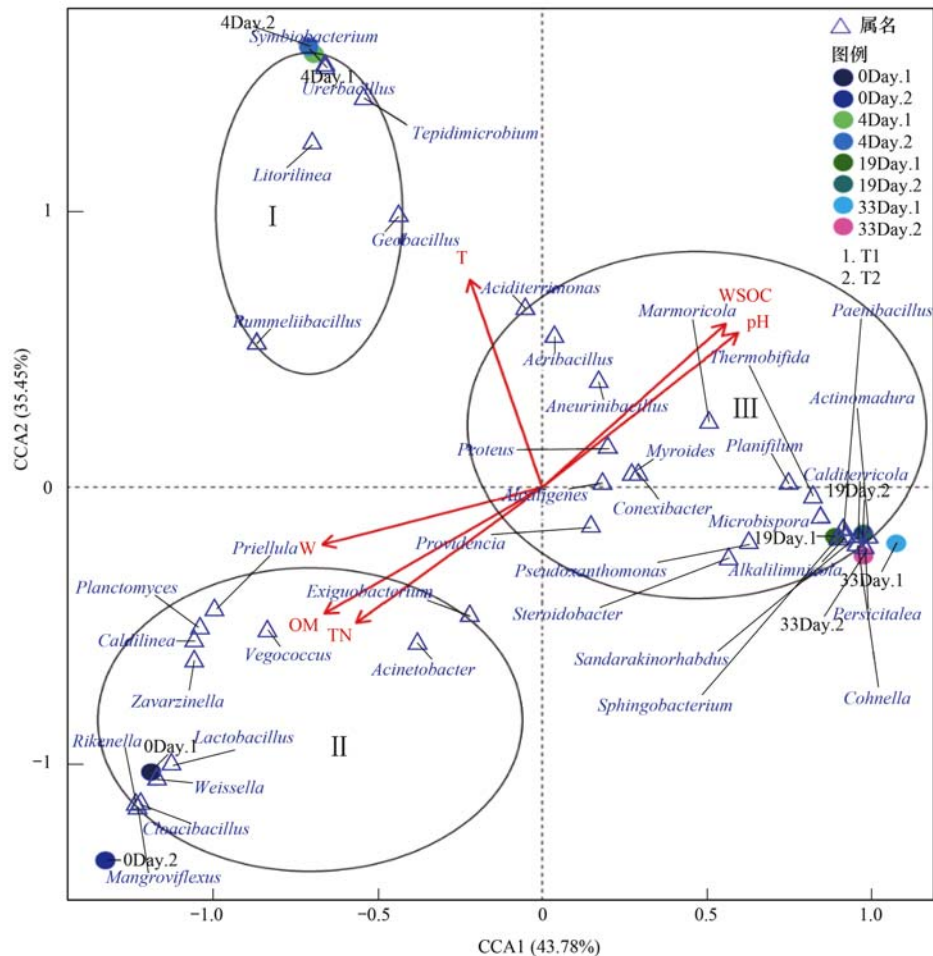


图5 细菌群落与理化参数的典型对应分析

Fig. 5 CCA of physicochemical parameters and bacterial community structure

多,且在第4 d的样品中最多,这是出现T1温度高于T2,并在第4 d(与第0、19、33 d相比)温度达最高的原因。T1和T2堆肥原料一样,有无菌剂添加是二者唯一的差异,因此可知外接菌种是引起T1温度高于T2的主要原因。由理化参数箭头的连线长度可知,不同的理化参数对细菌群落结构的影响不同,pH对细菌群落结构影响最大,其次是WSOC、有机质和温度,含水率和TN的影响稍弱。因此可通过改变堆体pH来影响微生物群落结构,从而改善堆肥质量,有学者就通过在污泥堆肥中添加不同pH的锯末来降低氮损失^[16]。

3 结论

(1)外接菌种可以提高堆体温度,延长高温持续时间,降低氮损失,加快堆肥腐熟,提高堆体中细菌群落的丰富度。在整个堆肥过程中,细菌群落结构发生了较大的演变,同一堆肥的不同阶段的细菌群落结构相似性较低,同一时期不同堆肥的细菌群

落结构相似性较高。

(2)在不同时期,厚壁菌门一直是优势菌门,高温菌的接入增加了堆体中厚壁菌门的相对丰度,使得T1中厚壁菌门的相对丰度在前19 d比T2高,且添加的高温菌中优势菌属*Ureibacillus*在堆肥高温期也是优势菌属。菌剂的添加会影响优势菌所占比例,但不会改变优势菌的种类。

(3)不同的理化参数对细菌群落结构影响不同,pH对细菌群落结构影响最大,其次是WSOC、有机质和温度,含水率和TN的影响稍弱。温度主要与9个菌属呈正相关关系。

参考文献:

- [1] Wu C D, Li W G, Wang K, et al. Usage of pumice as bulking agent in sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **190**: 516-521.
- [2] 张陇利, 刘青, 徐智, 等. 复合微生物菌剂对污泥堆肥的作用效果研究[J]. *环境工程学报*, 2008, **2**(2): 266-269.
Zhang L L, Liu Q, Xu Z, et al. Research on effect of compound microbial inoculant on sewage sludge composting[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, **2**(2): 266-269.

- [3] Sarkar S, Banerjee R, Chanda S, *et al.* Effectiveness of inoculation with isolated *Geobacillus* strains in the thermophilic stage of vegetable waste composting[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(8): 2892-2895.
- [4] Hachicha R, Rekik O, Hachicha S, *et al.* Co-composting of spent coffee ground with olive mill wastewater sludge and poultry manure and effect of *Trametes versicolor* inoculation on the compost maturity[J]. *Chemosphere*, 2012, **88**(6): 677-682.
- [5] Zhang J C, Zeng G M, Chen Y N, *et al.* Impact of *Phanerochaete chrysosporium* inoculation on indigenous bacterial communities during agricultural waste composting[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, **97**(7): 3159-3169.
- [6] Varma V S, Ramu K, Kalamdhad A S. Carbon decomposition by inoculating *Phanerochaete chrysosporium* during drum composting of agricultural waste[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(10): 7851-7858.
- [7] 徐智, 张隲利, 张发宝, 等. 接种内外源微生物菌剂对堆肥效果的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(8): 856-860.
Xu Z, Zhang L L, Zhang F B, *et al.* Effects of indigenous and exogenous microbial inocula on composting in a bioreactor[J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(8): 856-860.
- [8] 宋云龙, 张金松, 朱佳, 等. 基于高通量测序的微生物强化污泥减量工艺中微生物群落解析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(7): 2099-2107.
Song Y L, Zhang J S, Zhu J, *et al.* Analysis of microbial community in in-situ sludge reduction process by bioaugmentation using high-throughput sequencing technology [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 2099-2107.
- [9] Ren G M, Xu X H, Qu J J, *et al.* Evaluation of microbial population dynamics in the co-composting of cow manure and rice straw using high throughput sequencing analysis [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2016, **32**(6): 101.
- [10] Jiang J S, Liu X L, Huang Y M, *et al.* Inoculation with nitrogen turnover bacterial agent appropriately increasing nitrogen and promoting maturity in pig manure composting [J]. *Waste Management*, 2015, **39**: 78-85.
- [11] Zucconi F, Pera A, Forte M, *et al.* Evaluating toxicity of immature compost[J]. *BioCycle*, 1981, **22**(2): 54-57.
- [12] GB 7959-1987, 粪便无害化卫生标准[S].
GB 7959-1987, Sanitary standard for the non-hazardous treatment of night soil[S].
- [13] 张雪辰, 邓双, 杨密密, 等. 畜禽粪便堆腐过程中有机碳组分与腐熟指标的变化[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(10): 2559-2565.
Zhang X C, Deng S, Yang M M, *et al.* Changes of organic carbon fractions and maturity index during composting of manure [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(10): 2559-2565.
- [14] Zhang L, Sun X Y. Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **171**: 274-284.
- [15] Rashad F M, Saleh W D, Moselhy M A. Bioconversion of rice straw and certain agro-industrial wastes to amendments for organic farming systems: 1. composting, quality, stability and maturity indices[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(15): 5952-5960.
- [16] Li Y B, Li W G. Nitrogen transformations and losses during composting of sewage sludge with acidified sawdust in a laboratory reactor[J]. *Waste Management & Research*, 2015, **33**(2): 139-145.
- [17] Awasthi M K, Pandey A K, Bundela P S, *et al.* Co-composting of gelatin industry sludge combined with organic fraction of municipal solid waste and poultry waste employing zeolite mixed with enriched nitrifying bacterial consortium [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **213**: 181-189.
- [18] Wu D L, Liu P, Luo Y Z, *et al.* Nitrogen transformations during co-composting of herbal residues, spent mushrooms, and sludge [J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2010, **11**(7): 497-505.
- [19] Banegas V, Moreno J L, Moreno J I, *et al.* Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust[J]. *Waste Management*, 2007, **27**(10): 1317-1327.
- [20] 张晶, 孙照勇, 钟小忠, 等. 奶牛粪条垛式模拟堆肥腐熟度及微生物群落结构变化[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, **22**(3): 423-429.
Zhang J, Sun Z Y, Zhong X Z, *et al.* Maturity and microbial community structure dynamics during simulated windrow composting of solid fraction of dairy manure[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, **22**(3): 423-429.
- [21] 党秋玲, 李鸣晓, 席北斗, 等. 堆肥过程多阶段强化接种对细菌群落多样性的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2689-2695.
Dang Q L, Li M X, Xi B D, *et al.* Effects of multi-stage strengthening inoculation on bacterial community diversity during composting[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9): 2689-2695.
- [22] Tian W, Sun Q, Xu D B, *et al.* Succession of bacterial communities during composting process as detected by 16S rRNA clone libraries analysis [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, **78**: 58-66.
- [23] Ziganshina E E, Belostotskiy D E, Ilinskaya O N, *et al.* Effect of the organic loading rate increase and the presence of zeolite on microbial community composition and process stability during anaerobic digestion of chicken wastes [J]. *Microbial Ecology*, 2015, **70**(4): 948-960.
- [24] Zhang J Y, Cai X, Qi L, *et al.* Effects of aeration strategy on the evolution of dissolved organic matter (DOM) and microbial community structure during sludge bio-drying [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(17): 7321-7331.
- [25] Nakasaki K, Tran L T H, Idemoto Y, *et al.* Comparison of organic matter degradation and microbial community during thermophilic composting of two different types of anaerobic sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(2): 676-682.
- [26] Sorokin D Y, Zhilina T N, Lysenko A M, *et al.* Metabolic versatility of haloalkaliphilic bacteria from soda lakes belonging to the *Alkalispirillum-Alkalilimnicola* group [J]. *Extremophiles*, 2006, **10**(3): 213-220.
- [27] Xu S W, Reuter T, Gilroyed B H, *et al.* Microbial communities and greenhouse gas emissions associated with the biodegradation of specified risk material in compost [J]. *Waste Management*, 2013, **33**(6): 1372-1380.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)