

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机物的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁铖, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 小莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地区地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)
《环境科学》征订启事(553)	
《环境科学》征稿简则(655)	
信息(664, 755, 885)	

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群演替及其与环境因子的关系

蔡涵冰^{1,2}, 冯雯雯^{1,2}, 董永华³, 马中良¹, 曹慧锦^{1,2}, 孙俊松², 张保国^{2*}

(1. 上海大学生命科学学院, 上海 200444; 2. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210; 3. 上海市农产品质量安全中心, 上海 200335)

摘要: 为了解畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥中微生物群落的变化, 本研究以猪粪、桃树枝和腐熟有机肥为堆肥原料进行堆肥, 通过测定理化指标和利用高通量测序技术, 分析了堆肥中理化参数的变化和堆肥微生物群落结构变化。理化参数结果表明, 堆体于第2 d快速进入高温期, 整个高温期持续30 d; 堆肥过程中有机质含量呈波动性变化, 但总体下降; 堆肥结束时TN含量为20.58 g·kg⁻¹, 与堆肥初期相比损失了5.90%。α多样性分析表明, 不同好氧堆肥时期具有不同的微生物群落多样性。在细菌门水平上, 厚壁菌门(Firmicutes)和放线菌门(Actinobacteria)在整个堆肥过程中占主导地位, 其相对丰度所占比例分别为79.31%~95.09%和2.98%~19.70%; 此外, 在堆肥初期, 厚壁菌门(Firmicutes)和放线菌门(Actinobacteria)相对丰度分别为87.36%和9.66%, 在堆肥末期, 两者的相对丰度分别为79.38%和19.70%; 在细菌属水平上, 随着堆肥的进行, 优势类群从*Clostridium_sensu_stricto_1*、*Terrisporobacter*和*Bacillus*演变为*norank_f_Bacillaceae*、*Bacillus*、*Oceanobacillus*和*Pseudogracilibacillus*; 在真菌门水平上, Ascomycota始终为优势门类; 在真菌属水平上, *norank_c_Sordariomycetes*的比例逐渐增加, 在堆肥末期成为优势类群。冗余分析结果显示, 环境因子对细菌和真菌群落结构影响相关性排序均为pH > 铵态氮 > 温度 > TOC > TN, 其中pH对微生物群落组成影响最大。*norank_c_Sordariomycetes*、*norank_o_Sordariales*和*norank_c_Agaricomycetes*可能与铵态氮的挥发有关。

关键词: 畜禽粪便; 桃树枝; 工业化堆肥; 群落多样性; 冗余分析

中图分类号: X172; X713 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0997-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907153

Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors

CAI Han-bing^{1,2}, FENG Wen-wen^{1,2}, DONG Yong-hua³, MA Zhong-liang¹, CAO Hui-jin^{1,2}, SUN Jun-song², ZHANG Bao-guo^{2*}

(1. School of Life Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China; 3. Shanghai Agricultural Product Quality and Safety Center, Shanghai 200335, China)

Abstract: This study sets out to understand the evolution of the microbial community structure in industrial composting with livestock manure and peach branches. Pig manure, peach branches, and decomposed organic fertilizer were used as materials for composting. Changes in physical and chemical indicators and the evolution in the structure of the compost microbial community, determined by high-throughput sequencing, were analyzed. The results of physical and chemical parameters show that the pile reached the high-temperature stage on day 2, and the thermophilic period lasted for 30 days. The changes in total carbon were volatile, and there was an overall decline in the amount of TOC in the whole process of composting; The final content of TN was 20.58 g·kg⁻¹, which was 5.90% lower compared to the initial compost. Alpha analysis indicated that a different microbial community diversity existed at different times during aerobic composting periods. At the bacterial phyla level, Firmicutes and Actinobacteria were the dominant phyla, and the proportion of relative abundance were 79.31%-95.09% and 2.98%-19.70%, respectively, in the entire compost. The relative abundance of Firmicutes and Actinobacteria were 87.36% and 9.66%, respectively, and their respective relative abundances were 79.38% and 19.70% at the end of composting. At the bacterial genus level, the dominant group changed from *Clostridium_sensu_stricto_1*, *Terrisporobacter*, and *Bacillus* to *norank_f_Bacillaceae*, *Bacillus*, *Oceanobacillus*, and *Pseudogracilibacillus*; Regarding the fungus phyla, the Ascomycota was the dominant phylum. For the fungus genus, the relative abundance of *norank_c_Sordariomycetes* gradually increased during composting, and finally was predominant group. The redundancy analysis (RDA) showed that the correlation rank between environmental factors and microbial community structure was: pH > NH₄⁺-N > T > TOC > TN, where pH had the greatest impact on the microbial community composition. *norank_c_Sordariomycetes*, *norank_o_Sordariales*, and *norank_c_Agaricomycetes* may be related to the volatilization of ammonium nitrogen.

Key words: livestock manure; peach branch; industrial compost; microbial diversity; redundancy analysis

收稿日期: 2019-07-17; 修订日期: 2019-09-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800205)

作者简介: 蔡涵冰(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业固体废弃物资源化利用, E-mail: caihanbing@sari.ac.cn

* 通信作者, E-mail: zhangbg@sari.ac.cn

我国是畜禽养殖和果树种植大国,近年来随着规模化、集约化的畜禽养殖数量和果树栽培面积的数量不断增加,产生了大量的畜禽粪便和果树修剪枝条等农业有机固体废弃物^[1,2].这些农业有机废弃物如果不能及时有效加以处理,就会成为生态环境污染的重要来源,不仅造成了农业生态环境质量不断恶化,危害人们的身心健康,同时也导致大量附加值高的有用成分和养分资源流失,造成严重的农业面源污染,极大地削弱了我国现代农业可持续发展能力^[3].因此,切实有效地实现不同农业有机固体废弃物的减量化处理与资源化利用已经成为目前研究的重点和热点.

目前实现农业废弃物减量化、无害化和资源化的方式之一是进行好氧堆肥处理.好氧堆肥的本质是微生物分解和转化有机物的生化代谢过程,因此了解堆肥过程中不同时期微生物丰度、多样性以及群落演替规律对于揭示堆肥过程中的有机物降解机制和优化堆肥处理工艺具有重要理论意义和实践价值.常用的分析堆肥过程中微生物相对丰度和微生物群落结构组成的经典技术有克隆测序技术、PCR-DGGE 和 Illumina MiSeq 高通量测序技术^[4],其中 Illumina MiSeq 高通量测序技术可以更精确地分析堆肥过程中微生物相对丰度和微生物群落组成^[5].本文以典型的畜禽养殖粪便猪粪和果树修剪枝条桃树枝为主要原料进行堆肥,采用 Illumina MiSeq 高通量测序技术,研究堆肥过程中理化参数等环境因子和微生物相对丰度和微生物群落结构组成的变化,同时对理化指标进行监测,并分析理化指标与微生物之间的相关关系,揭示其微生物多样性及其变化规律,以期堆肥处理工艺的优化提供理论依据,整体提升我国农业废弃物资源化利用的理论和技术水平,并为实现我们农业面源农田综合防治与修复技术目标提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 堆肥实验

样本取自于北京市某有机肥厂,该厂采用槽式好氧堆肥工艺,将猪粪与桃树枝以及腐熟有机肥按体积比(立方):5:2.5:1的比例混合后进行槽式堆肥.其中猪粪来自于北京某农场,桃树枝来源于北京某果园枝条修剪废弃物,腐熟有机肥取自该有机肥厂上一批堆肥结束后的样品,腐熟有机肥的原料同为猪粪和桃树枝,堆肥原料的理化性质见表1.用铲车将猪粪和辅料均匀搅拌,每隔2d使用翻抛机进行翻堆,进行为期53d的好氧堆肥.调整水分含量为59.07%,有机碳(TOC)含量为390.28 g·kg⁻¹,总

氮(TN)含量为21.34 g·kg⁻¹.分别于第0、2、5、24、30、33、40和50d从反应堆顶部、中部和底部进行3点取样,均匀混合,作为代表性样品.样品编号分别为d0、d2、d5、d24、d30、d33、d40和d50.样品分成两份:一份于4℃保存,用于测定理化参数;一份储存于-20℃,用于微生物多样性分析.

表1 堆肥各原料的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of raw compost materials

原料	pH	EC /mS·cm ⁻¹	TOC /g·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹
猪粪	6.80	3.42	363.2	22.3
腐熟有机肥	8.25	2.65	332.98	23.5
桃树枝	—	—	41.23	9.02
混合原料	7.64	4.39	390.28	21.87

1.2 理化参数测定

用 DTSW-2 型数字电子温度计(泰安德图自动化仪器有限公司)测定堆体顶端、中部、底部这3个位置的温度.用水分测定仪 SH1 0A(上海菁海仪器有限公司)检测堆肥样品含水率.新鲜样品和蒸馏水按比例1:10(质量比)混合后用pH计PB-10(Sartorius 德国)和 DDS-307A 型电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)分别测定堆肥样品的pH和EC.将样品研磨并过筛(40目筛),按照国家标准^[6](HJ 615-2011),采用重铬酸钾-分光光度法测定TOC;TN含量参照国家标准^[7](HJ 714-2014)采用凯氏法测定.NH₄⁺-N含量参考国家标准^[8](HJ 535-2009),使用纳氏试剂分光光度法进行测定.种子发芽率采用Sun^[9]的方法进行测定.种子发芽率根据以下公式计算:

$$\text{种子发芽指数} = \frac{\text{堆肥处理的种子发芽率} \times \text{种子根长}}{\text{对照的种子发芽率} \times \text{对照的种子根长}} \times 100\%$$

1.3 微生物多样性分析

将堆肥样品送上海美吉生物医药科技有限公司进行16S rDNA和18S rDNA高通量测序,细菌的通用引物序列为:338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3');真菌的通用引物序列为SSU0817F(5'-TTAGCATGGAATAATRRAATAGGA-3')和1196R(5'-TCTGACCTGGTGAGTTTCC-3'),测序区域分别为V3-V4区和V5-V7区,测序平台为Illumina MiSeq.利用Usearch(vsesion 7.0)软件,对序列进行聚类,并将相似性大于0.97的序列定义为一个操作分类单元(OTU),得到OTU表,并进行生物信息统计分析.利用mothur(version v.1.30.1)进行微生物群落的α多样性分析,计算参数为Chao1、Shannon和Simpson. Chao1指数,由Chao于1984年提出,用于

计算微生物群落中含 OTU 数量^[10]. Shannon 指数用于提供物种丰富度^[11]. 利用 Qiime 平台进行物种分类,生成不同分类水平上的物种丰度表. 利用 R 语言软件中的 vegan 包进行群落组成分析. 采用 R 语言软件进行主坐标分析 (PCoA), 研究微生物群落结构相似性分析. 采用 R 语言 vegan 包进行冗余分析 (RDA), 研究微生物群落和环境因子之间的关系. 多样性指数计算公式如下:

$$S_{\text{Chao1}} = S_{\text{obs}} + \frac{n_1(n_1 - 1)}{2(n_2 + 1)} \quad (1)$$

式中, S_{Chao1} 表示估计的 OTU 数; S_{obs} 表示实际测得 OTU 数; n_1 表示只含一条序列的 OTU 数; n_2 表示只含两条序列的 OTU 数.

$$D_{\text{Simpson}} = \frac{\sum_{i=1}^{S_{\text{obs}}} n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (2)$$

式中, S_{obs} 表示实际测得 OTU 数; n_i 表示第 i 个 OTU 所含序列数; N 表示所有序列数.

$$H_{\text{Shannon}} = - \sum_{i=1}^{S_{\text{obs}}} \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N} \quad (3)$$

式中, S_{obs} 表示实际测得 OTU 数; n_i 表示第 i 个 OTU 所含序列数; N 表示所有序列数.

1.4 数据分析

应用统计软件 Excel 和 Origin 进行理化指标统计并绘制图表.

2 结果与讨论

2.1 堆肥温度、pH 和 EC 的变化

温度是评价好氧堆肥过程的重要指标. 由图 1 可知第 2 d 堆肥迅速进入高温期 ($>50^{\circ}\text{C}$), 这是由于好氧微生物快速降解有机物时产生了大量的热^[12]. 第 28 d 达到最高温 60.4°C , 并且高温期持续至第 32 d (高温持续时间 >7 d), 杀死大量的病原菌, 达到堆肥的卫生标准^[13]. 在堆肥高温阶段, 随着易分解物质的消耗, 微生物代谢强度降低, 导致温度下降, 但在转化成堆后, 高温好氧微生物再次繁殖, 开始缓慢消耗可分解的纤维素大分子, 从而温度上升^[14]. 从第 33 d 起, 堆体进入降温阶段.

pH 反映堆肥过程中微生物所处的酸碱环境, 过高或过低的 pH 都会影响微生物生长和有机物的分解, 影响堆肥的进程. 由图 2 可知, 堆体初始 pH 为 7.69, 随着堆肥进行 pH 不断上升, pH 于 30 d 达到最大值 8.87, 随后 pH 变化趋于平缓, 堆肥结束时 pH 为 8.81. 在堆肥初期, 一些易于分解的含氮有机物在微生物作用下发生氨化作用, 导致 pH 升高^[15]. 随着堆肥过程进行, 由于微生物氨化作用减

弱, 导致堆肥后期 pH 基本稳定不变^[16].

电导率反映了堆肥过程中可溶性盐的变化. 由图 2 可以看出, EC 值总体表现为先下降后升高的趋势, 这可能因为在堆肥初期至高温阶段, 由于有机质的快速分解, 微生物活动消耗堆体的有机质以及利用水溶性盐物质满足自身生长需求, 导致 EC 在高温堆肥过程中先减少^[17]. 随后, 由于堆肥过程中难降解物质的分解, 导致堆体的盐类物质产生使 EC 又逐渐上升^[18], 至堆肥结束, 堆体的 EC 达到最大值 $4.5 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, 符合中国固体废弃物处理标准 ($\text{EC} < 9 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$), 基本满足农田使用对 EC 要求^[19].

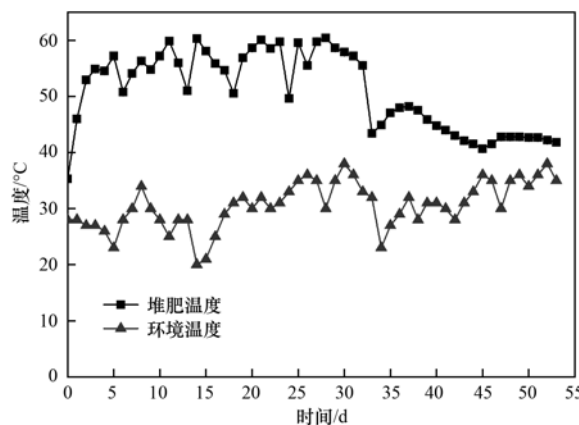


图 1 堆肥过程中温度的变化

Fig. 1 Temperature changes during composting

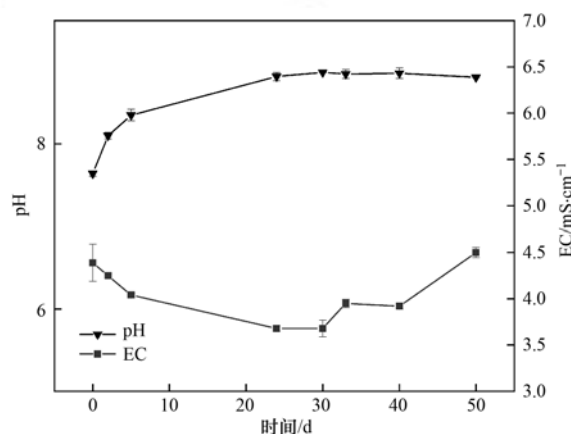


图 2 堆肥过程中 pH 和 EC 的变化

Fig. 2 Changes in pH and EC during composting

2.2 堆肥 NH_4^+-N 、TN 和 TOC 的变化

从图 3 可以看出, NH_4^+-N 含量整体呈现先上升后下降的趋势. 堆肥初期, NH_4^+-N 含量 $1.71 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 升高到 $5.62 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (5 d), 之后 NH_4^+-N 开始下降至堆肥结束, 堆体末期的 NH_4^+-N 含量为 $1.92 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 因为在堆肥初期, 微生物分解代谢堆肥中残留的有机氮类物质产生铵态氮, 导致 NH_4^+-N 含量升高; 而从堆肥的第 10 d 至 30 d, 由于高温和 pH 升高导致

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 以氨气的形式散失,从而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量逐渐下降^[20,21].与第30 d相比,第33 d的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量有所上升,分析可能与氨化细菌的活动有关^[22].此后,由于堆肥进入降温阶段, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量下降减缓.

堆肥过程中 TN 含量的变化如图 3 所示,堆肥初期 TN 快速下降,主要由于初期堆体温度升高较快,微生物大量消耗有机氮类物质以致产生高浓度的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 加强 NH_3 的挥发^[23],导致堆肥 TN 下降.随后由于堆肥有机质大量微生物降解导致堆肥浓缩效应使得堆肥 TN 逐渐缓慢呈增加趋势^[24].第 33 d, TN 含量为 $19.82 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,相比之前有所下降,可能是由于高温期结束,堆体的嗜温微生物活性增强,分解有机物产生了氨气.第 0 d 时 TN 含量为 $21.87 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,堆肥结束 TN 含量为 $20.58 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,堆体氮含量损失了 5.90%. TOC 含量随堆肥的进行呈波动性变化. TOC 含量下降可能是由于堆肥微生物分解碳水化合物并以 CO_2 的形式挥发^[25,26],以及类似总氮由于堆肥浓缩效应,所以导致堆肥总有机碳初期先下降,然后逐渐增加,总体下降的变化趋势(图 3).

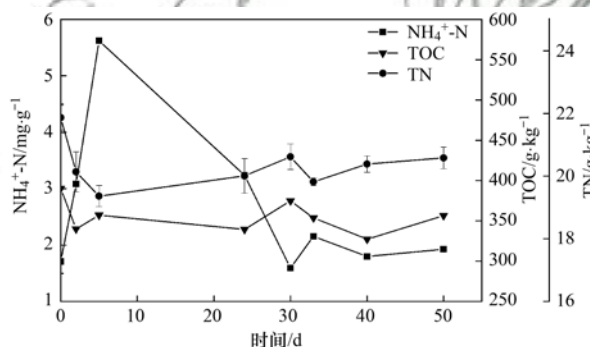


图 3 堆肥过程中铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、总有机碳(TOC)和总氮(TN)的变化

Fig. 3 Changes in $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TOC, and TN during composting

2.3 种子发芽指数(GI)变化

GI 是一种反映堆肥植物毒性和腐熟度的重要生物学指标^[27],GI 是植物对于堆肥低毒性(植物根长)和高毒性(发芽率)的综合反映.如图 4 所示,堆肥初期(0~5 d)的 GI 几乎为 0,这与堆肥物料本身具有严重的植物毒性有关^[28].在堆肥中后期(24~40 d),GI 出现了短暂的下降趋势,这与 Liu 等^[14]的研究结果相似,原因可能是堆肥产生了低分子量的酸或挥发性脂肪酸^[29].随着堆肥进行,堆肥中有害物质被逐渐降解,GI 逐渐上升,堆肥结束时,种子发芽指数为 73%.

2.4 堆肥过程中微生物群落相似性和多样性分析

2.4.1 微生物群落相似性分析

微生物群落相似性可以通过主坐标分析

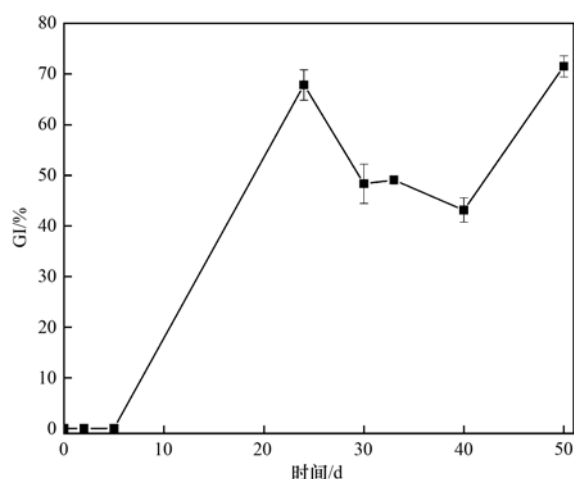


图 4 堆肥过程中种子发芽指数(GI)的变化

Fig. 4 Changes in GI during composting

(principal co-ordinates analysis, PCoA)^[30].堆肥过程中不同样品中细菌群落的相似性如图 5(a) 所示,结果表明堆肥初期的样品 d0、d2 和 d5 相距较近,说明堆肥前 5 d 细菌群落有高度的相似性;而堆肥高温期的样品(d24、d30、d33)相互间距离远,说明堆肥高温期细菌群落变化明显,可能是堆肥温度

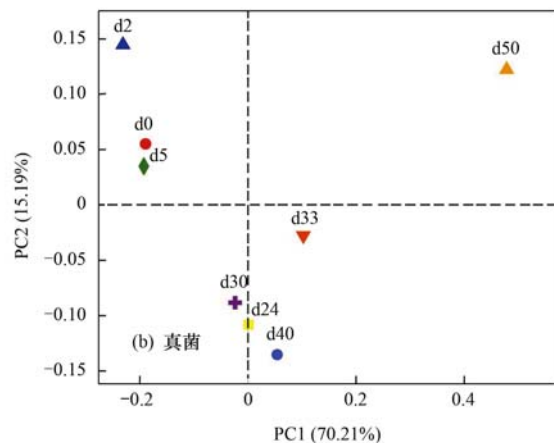
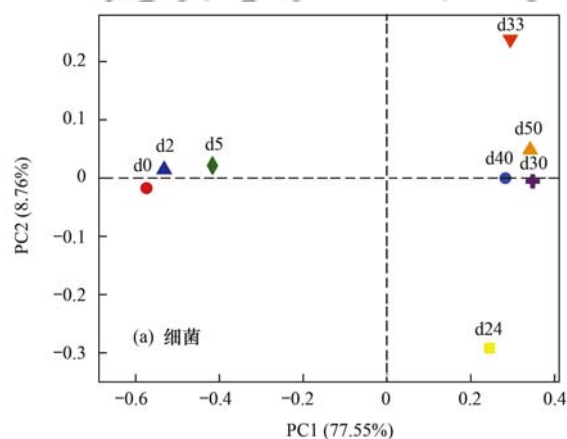


图 5 堆肥过程中各时间段细菌和真菌的 PCoA 分析

Fig. 5 PCoA analysis of bacteria and fungi at various time points during composting

影响细菌的生长繁殖.而在堆肥末期的样品(d40、d50)相聚较近,说明样品中的细菌群落有高度相似性,降温阶段和腐熟期的细菌群落结构有着高度稳定性.

堆肥过程中不同样品中真菌群落的相似性如图5(b)所示,堆肥初期的样品(d0、d2、d5)、高温期的样品(d24、d30、d33)和腐熟期的样品(d50)同细菌群落的相似性类似,第0、2、5 d的样品相距较近,说明堆肥前5 d真菌群落有高度的相似性,而与后期高温阶段的样品(d24、d30和d33)相距明显远,说明堆肥初期和高温期的真菌微生物发生了明显的群落演替现象.堆肥末期(50 d)的真菌组成与前两个时期发生了明显变化.

表 2 堆肥过程中不同时间点细菌群落和真菌群落的相对丰度和多样性指标

Table 2 Indices of relative bacterial and fungal abundances and diversity at different times during composting								
项目	d0	d2	d5	d24	d30	d33	d40	d50
细菌 Chao1 指数	358.5	319.307 7	352.5	284.04	281.035 7	310.121 2	374.823 5	359
真菌 Chao1 指数	29.5	35.5	32	38	28	29.5	35.5	28
细菌 Shannon 指数	3.219 788	2.851 634	3.330 901	2.997 379	3.231 737	3.650 301	3.511 426	3.458 467
真菌 Shannon 指数	1.388 013	1.334 36	1.482 551	1.925 251	1.776 095	1.696 824	1.891 112	1.386 371

2.5 堆肥过程中细菌群落结构的变化

通过高通量测序技术可获得环境中微生物群落在数量和结构方面的信息,分析细菌群落结构的动态变化,结果如图6(a)所示,在细菌门分类水平上,厚壁菌门(Firmicutes)和放线菌门(Actinobacteria)在整个堆肥过程中占主导地位,为整个堆肥过程中的优势门类,其相对丰度所占比例分别为79.31%~95.09%和2.98%~19.70%,在一些报道中,厚壁菌门(Firmicutes)、放线菌门(Actinobacteria)均为堆肥过程中的细菌优势门类的一部分^[12, 18, 32];其中, others 代表相对丰度小于0.01的物种集合.在不同的堆肥时期,细菌群落在各细菌门类上有不同的相对丰度:第0 d时,厚壁菌门(Firmicutes)、放线菌门(Actinobacteria)和变形菌门(Proteobacteria)所占比例分别为87.28%、9.64%和1.38%.随着堆肥的进

2.4.2 微生物群落多样性分析

Chao1 指数反映样品中群落的丰富度,Shannon 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,0~30 d堆体的细菌丰富度降低;堆肥30 d后,随着堆温下降,细菌丰富度增加,在第40 d丰富度最大.相比建堆初期,d5、d30、d33、d40和d50样品的细菌多样性升高.真菌群落的丰富度变化总体呈先上升后下降的趋势;与0 d相比,高温阶段的真菌群落多样性上升,第50 d多样性下降.这表明:①温度的变化会影响微生物群落多样性;②不同好氧堆肥时期的微生物群落多样性不同,这与王秀红等^[31]的研究结果一致.

行,厚壁菌门(Firmicutes)和变形菌门(Proteobacteria)的相对丰度在第24 d均达到最大值分别为95.09%和19.77%.厚壁菌门(Firmicutes)可以形成耐热孢子以抵抗高温,同时厚壁菌门(Firmicutes)在高温期是最优势菌门,其可以在高温下(>55℃)存活,并能参与各种代谢活动^[32].另外放线菌门(Actinobacteria)的相对丰度呈上升趋势,其可以通过分泌各种抗生素抑制病原微生物^[33].软壁菌门(Tenericutes)在堆肥第33 d时出现,相对丰度为1.11%.

在细菌属水平上,如图6(b)所示,堆肥初期,主要优势菌属为*Clostridium_sensu_stricto_1*,*Terrisporobacter*和*Bacillus*.从第24 d一直到堆肥结束,优势菌群为*norank_f_Bacillaceae*,*Bacillus*,*Oceanobacillus*和*Pseudogracilibacillus*,这

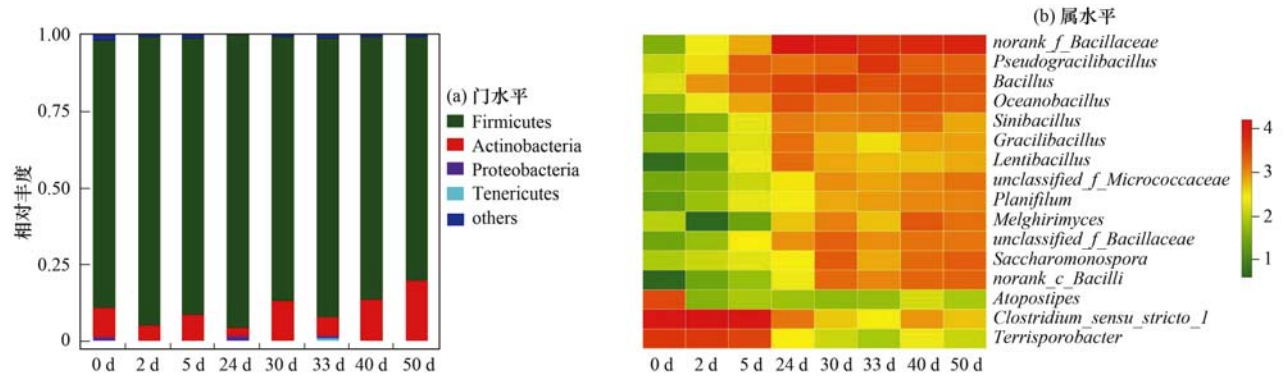


图 6 堆肥过程中细菌群落组成变化

Fig. 6 Changes in bacterial community composition during composting

说明堆肥过程中细菌群落组发生了明显变化。*Clostridium_sensu_stricto_1* 在堆肥过程中呈逐渐减少,而 *norank_f_Bacillaceae* 逐渐成为堆肥过程中的主导菌属,并且从堆肥初期至堆肥结束,*Bacillus* 呈现增加,然后维持相对稳定。*Oceanobacillus* 菌属的变化情况类似 *Bacillus*. 并且其他菌属在堆肥过程中总体逐渐减少. 而自动物肠道的微生物 (*Clostridium_sensu_stricto_1* 和 *Terrisporobacter* 菌属) 经过堆肥后相对丰度下降,这与黄雅楠等^[34]的研究结果一致.

2.6 堆肥过程中真菌群落结构的变化

如图 7(a), 在真菌门水平上,堆肥初期和高温期后主要真菌门类有 Ascomycota 和 Basidiomycota, 并且在整个堆肥过程中 Ascomycota 始终为优势门类,主要是因为 Ascomycota 能够分泌多种纤维素、半纤维素降解酶,能高效利用堆肥中的营养元素^[35]. 在整个堆肥过程中, Basidiomycota 相对丰度

呈现先上升后下降的趋势,在第 40 d 时其相对丰度达到最大值 13.71%.

从真菌属水平上看,堆肥过程中各时间点的真菌群落变化如图 7(b) 所示,堆肥过程中真菌优势类群分别为 *unclassified_f_Trichocomaceae*、*norank_c_Sordariomycetes*、*Scopulariopsis* 和 *norank_o_Sordariales*, 其中 *unclassified_f_Trichocomaceae* 比例在堆肥过程中基本呈现总体减少的趋势, *Scopulariopsis* 没有明显的变化,但是在堆肥过程中 *norank_c_Sordariomycetes* 的比例逐渐增加,在堆肥末期成为优势类群,据相关研究报道, *norank_c_Sordariomycetes* 是分解堆肥中有机质的主要真菌类群,可能由于 *Sordariomycetes* 具有耐高温和抗旱的微生物结构特征和孢子^[36,37]. 另外, *norank_o_Sordariales* 的比例在堆肥过程中逐渐增加,高温中期(24 d) 达到最大随后略减少比例维持稳定,研究表明在堆肥的嗜热阶段 *Sordariales* 有较高的相对丰度^[38].

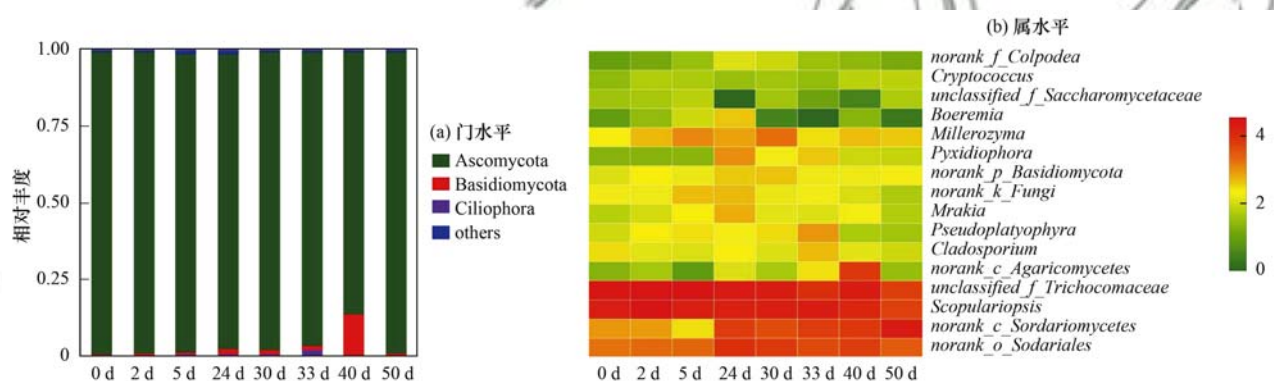


图 7 堆肥过程中真菌群落结构变化

Fig. 7 Changes in fungal community composition during composting

2.7 环境因子与微生物群落结构的相关关系

采用冗余分析(RDA)分析堆肥理化参数(温度、铵态氮、pH、TOC 和 TN)与主要菌属之间的关系. 两个排序轴分别解释种群与环境积累变化率为 85.10%、4.73% 和 69.14%、11.61%,理化参数分别共同解释 89.83% 和 80.75% 的样本信息,说明堆肥过程中理化参数与细菌和真菌群落结构变化有关. 如图 8 所示,环境因子对细菌和真菌群落结构影响相关性排序均为 pH > 铵态氮 > 温度 > TOC > TN,该结果表明一方面堆肥过程中的微生物会造成有机酸的积累^[39],另一方面 pH 的变化会导致堆肥中钙和镁的变化,从而间接影响微生物群落^[40]. 含碳物质与含氮物质与细菌群落结构的相关性表明,堆肥中的 C、N 含量会随着微生物代谢产物的不断转化而发生变化^[32];另外氮源的质量和数量也可以控制细菌的群落结构变化^[41]. 如图 8 所示,虽然温度不是与微生物群落结构变化相关性最大的环境因子,但

其仍可通过影响微生物的生物活性从而导致微生物群落结构的改变^[42]. 在堆肥初期(第 2 d 和第 5 d),细菌群落结构较为相似;高温阶段和降温阶段,细菌群落结构变化剧烈. 此外,在整个堆肥过程中,真菌群落结构变化明显,其中这可能与温度影响了真菌生长繁殖有关^[43];Duan 等^[44]的研究结果表明,温度在堆肥的高温期和腐熟阶段均会影响真菌的群落结构. 从图 8(a)可以看出,在细菌群落结构中,TOC、TN、铵态氮与 *Clostridium_sensu_stricto_1*、*Terrisporobacter* 呈正相关,与 *Bacillus* 和 *norank_f_Bacillaceae* 呈负相关,而 *Bacillus* 和 *norank_f_Bacillaceae* 与 pH 呈正相关. 如图 8(b) 中显示: *norank_c_Sordariomycetes*、*norank_o_Sordariales* 和 *norank_c_Agaricomycetes* 与 TN、pH 呈正相关,与 TOC、铵态氮呈负相关,说明 *norank_c_Sordariomycetes*、*norank_o_Sordariales* 和 *norank_c_Agaricomycetes* 可能与铵态氮的挥发有关.

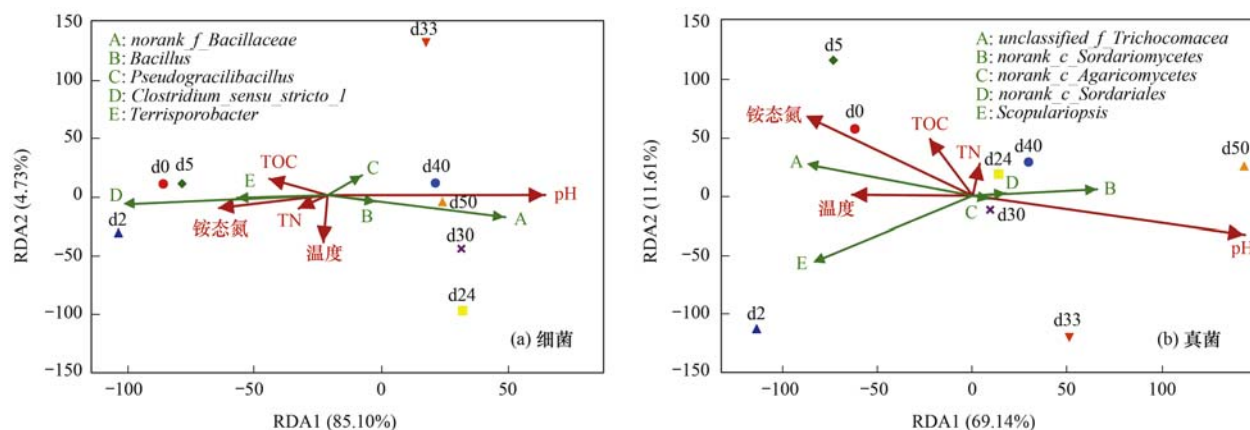


图8 堆肥过程中细菌和真菌群落结构与理化参数之间的冗余分析(属水平)

Fig. 8 Redundancy analysis (RDA) between bacterial and fungal community structure and physical and chemical parameters during composting (genus level)

3 结论

(1)堆肥高温期持续了30 d (>7 d),达到粪便处理卫生标准;堆肥结束时 EC 为 $4.5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,符合中国固体废弃物处理标准($\text{EC} < 9 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$).利用好氧堆肥工艺,以腐熟有机肥为外源添加物,实现了对畜禽粪便和桃树枝堆肥的无害化和资源化。

(2)利用高通量测序技术对堆肥过程中微生物的变化进行监测,结果显示,厚壁菌门和放线菌门是堆肥中的细菌优势门类;子囊菌门为真菌的优势门类;芽孢杆菌属是堆肥中后期的优势菌属。

(3)对堆肥的理化指标进行冗余分析,环境因子对细菌和真菌群落结构影响相关性排序均为 $\text{pH} > \text{铵态氮} > \text{温度} > \text{TOC} > \text{TN}$,其中 pH 对微生物群落组成影响最大。*norank_c_Sordariomycetes*、*norank_o_Sordariales* 和 *norank_c_Agaricomycetes* 可能与铵态氮的挥发有关,这为堆肥工艺的调节提供了理论参考。

参考文献:

[1] Yang X P, Li Q, Tang Z, *et al.* Heavy metal concentrations and arsenic speciation in animal manure composts in China [J]. Waste Management, 2017, **64**: 333-339.

[2] ten Hoeve M, Bruun S, Jensen L S, *et al.* Life cycle assessment of garden waste management options including long-term emissions after land application[J]. Waste Management, 2019, **86**: 54-66.

[3] 孙笑蕾, 胡正义, 刘莉, 等. 基于肥水资源化的河网区镇域农业面源污染控制系统的构建: 以太湖地区新建镇为例[J]. 生态与农村环境学报, 2019, **35**(5): 582-592.

Sun X L, Hu Z Y, Liu L, *et al.* Pollutant reduction systems for controlling agricultural non-point-source pollution in town district of river network area based on reuse of wastewater and nutrient: A case study in Xinjian town, Taihu Lake [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, **35**(5): 582-592.

[4] Lu C Y, Gu J, Wang X J, *et al.* Effects of coal gasification slag on antibiotic resistance genes and the bacterial community during swine manure composting [J]. Bioresource Technology, 2018,

268: 20-27.

[5] Tian X P, Yang T, He J Z, *et al.* Fungal community and cellulose-degrading genes in the composting process of Chinese medicinal herbal residues [J]. Bioresource Technology, 2017, **241**: 374-383.

[6] HJ 615-2011, 土壤 有机碳的测定 重铬酸钾氧化-分光光度法 [S].

[7] HJ 717-2014, 土壤质量 全氮的测定 凯氏法 [S].

[8] HJ 535-2009, 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法 [S].

[9] Sun Z Y, Zhang J, Zhong X Z, *et al.* Production of nitrate-rich compost from the solid fraction of dairy manure by a lab-scale composting system [J]. Waste Management, 2016, **51**: 55-64.

[10] Chao A N. Non-parametric estimation of the number of the classes in a population [J]. Scandinavian Journal of Statistics, 1984, **11**(4): 265-270.

[11] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: The University of Illinois Press, 1963.

[12] Wei H W, Wang L H, Hassan M, *et al.* Succession of the functional microbial communities and the metabolic functions in maize straw composting process [J]. Bioresource Technology, 2018, **256**: 333-341.

[13] Wu J, He S Z, Liang Y, *et al.* Effect of phosphate additive on the nitrogen transformation during pig manure composting [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(21): 17760-17768.

[14] Liu L, Wang S Q, Guo X P, *et al.* Succession and diversity of microorganisms and their association with physicochemical properties during green waste thermophilic composting [J]. Waste management, 2018, **73**: 101-112.

[15] Liu N, Zhou J L, Han L J, *et al.* Characterization of lignocellulosic compositions' degradation during chicken manure composting with added biochar by phospholipid fatty acid (PLFA) and correlation analysis [J]. Science of the Total Environment, 2017, **586**: 1003-1011.

[16] Liu N, Hou T, Yin H J, *et al.* Effects of amoxicillin on nitrogen transformation and bacterial community succession during aerobic composting [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, **362**: 258-265.

[17] Arab G, Razaviarani V, Sheng Z Y, *et al.* Benefits to decomposition rates when using digestate as compost co-feedstock: Part II-Focus on microbial community dynamics [J]. Waste Management, 2017, **68**: 74-84.

- [18] Zhou J M. Effect of turning frequency on co-composting pig manure and fungus residue [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2017, **67**(3): 313-321.
- [19] 聂永丰. 三废处理工程技术手册: 固体废物卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [20] Zhang L H, Zhang J C, Zeng G M, *et al.* Multivariate relationships between microbial communities and environmental variables during co-composting of sewage sludge and agricultural waste in the presence of PVP-AgNPs [J]. Bioresource Technology, 2018, **261**: 10-18.
- [21] Wang Q, Wang Z, Awasthi M K, *et al.* Evaluation of medical stone amendment for the reduction of nitrogen loss and bioavailability of heavy metals during pig manure composting[J]. Bioresource Technology, 2016, **220**: 297-304.
- [22] Qian X Y, Shen G X, Wang Z Q, *et al.* Co-composting of livestock manure with rice straw: characterization and establishment of maturity evaluation system [J]. Waste Management, 2014, **34**(2): 530-535.
- [23] Zhang L H, Zeng G M, Dong H R, *et al.* The impact of silver nanoparticles on the co-composting of sewage sludge and agricultural waste: evolutions of organic matter and nitrogen[J]. Bioresource Technology, 2017, **230**: 132-139.
- [24] Mao H, Lv Z Y, Sun H D, *et al.* Improvement of biochar and bacterial powder addition on gaseous emission and bacterial community in pig manure compost[J]. Bioresource Technology, 2018, **258**: 195-202.
- [25] Zhou J M, Wang L T, Wang H M, *et al.* Effects of different ratios of pig manure to fungus residue on physicochemical parameters during composting [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2016, **66**(5): 499-507.
- [26] Huang C, Zeng G M, Huang D L, *et al.* Effect of *Phanerochaete chrysosporium* inoculation on bacterial community and metal stabilization in lead-contaminated agricultural waste composting [J]. Bioresource Technology, 2017, **243**: 294-303.
- [27] Zhang D F, Luo W H, Li Y, *et al.* Performance of co-composting sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste at different proportions [J]. Bioresource Technology, 2018, **250**: 853-859.
- [28] Gong X Q, Cai L L, Li S Y, *et al.* Bamboo biochar amendment improves the growth and reproduction of *Eisenia fetida* and the quality of green waste vermicompost [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **156**: 197-204.
- [29] Paradelo R, Moldes A B, Barral M T. Evolution of organic matter during the mesophilic composting of lignocellulosic winery wastes[J]. Journal of Environmental Management, 2013, **116**: 18-26.
- [30] Hu T, Wang X J, Zhen L S, *et al.* Effects of inoculating with lignocellulose-degrading consortium on cellulose-degrading genes and fungal community during co-composting of spent mushroom substrate with swine manure[J]. Bioresource Technology, 2019, **291**: 121876.
- [31] 王秀红, 李欣欣, 史向远, 等. 好氧堆肥微生物代谢多样性及其细菌群落结构[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(8): 1457-1463.
- Wang X H, Li X X, Shi X Y, *et al.* Microbial metabolism diversity and bacterial flora structure during aerobic composting [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(8): 1457-1463.
- [32] Zhou G X, Xu X F, Qiu X W, *et al.* Biochar influences the succession of microbial communities and the metabolic functions during rice straw composting with pig manure [J]. Bioresource Technology, 2019, **272**: 10-18.
- [33] 杨萍萍, 尹华, 彭辉, 等. 外接种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3536-3543.
- Yang P P, Yin H, Peng H, *et al.* Effects of exogenous microorganism inoculation on efficiency and bacterial community structure of sludge composting [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3536-3543.
- [34] 黄雅楠, 王晓慧, 曹琦, 等. 高通量测序技术分析猪粪堆肥过程中微生物群落结构变化[J]. 微生物学杂志, 2018, **38**(5): 21-26.
- Huang Y N, Wang X H, Cao Q, *et al.* Analysis of microbial community changes in pig excrement during compost process based on high-throughput sequencing technology [J]. Journal of Microbiology, 2018, **38**(5): 21-26.
- [35] Singh S, Madlala A M, Prior B A. *Thermomyces lanuginosus*: properties of strains and their hemicellulases [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2003, **27**(1): 3-16.
- [36] Mbareche H, Veillette M, Bonifait L, *et al.* A next generation sequencing approach with a suitable bioinformatics workflow to study fungal diversity in bioaerosols released from two different types of composting plants [J]. Science of the Total Environment, 2017, **601-602**: 1306-1314.
- [37] Gu W J, Lu Y S, Tan Z Y, *et al.* Fungi diversity from different depths and times in chicken manure waste static aerobic composting[J]. Bioresource Technology, 2017, **239**: 447-453.
- [38] Morgenstern I, Powlowski J, Ishmael N, *et al.* A molecular phylogeny of thermophilic fungi[J]. Fungal Biology, 2012, **116**(4): 489-502.
- [39] López-González J A, Suárez-Estrella F, Vargas-García M C, *et al.* Dynamics of bacterial microbiota during lignocellulosic waste composting: Studies upon its structure, functionality and biodiversity [J]. Bioresource Technology, 2015, **175**: 406-416.
- [40] Lucas R W, Klaminder J, Futter M N, *et al.* A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: Implications for plants, soils, and streams[J]. Forest Ecology and Management, 2011, **262**(2): 95-104.
- [41] Wallenstein M D, McMahon S, Schimel J. Bacterial and fungal community structure in Arctic tundra tussock and shrub soils[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2007, **59**(2): 428-435.
- [42] Wang J Q, Liu Z P, Xia J S, *et al.* Effect of microbial inoculation on physicochemical properties and bacterial community structure of citrus peel composting [J]. Bioresource Technology, 2019, **291**: 121843.
- [43] 张文浩, 门梦琪, 许本妹, 等. 牛粪稻秸新型静态堆肥中真菌群落组成的动态特征[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(9): 2029-2036.
- Zhang W H, Men M Q, Xu B S, *et al.* Dynamic characteristics of the composition of the fungal community in a novel static composting system of dairy manure and rice straw[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(9): 2029-2036.
- [44] Duan Y M, Awasthi S K, Chen H Y, *et al.* Evaluating the impact of bamboo biochar on the fungal community succession during chicken manure composting[J]. Bioresource Technology, 2019, **272**: 308-314.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)