

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价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 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)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 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 N ₂ O 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, 李宇, 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价	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, 郭逍宇 (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 株氨基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增殖与生物转化的影响	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)	

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^{1,2}, 戚志萍^{2,4}, 冯海玮², 孙玉静³, 支月娥², 张进忠^{1*}, 张丹^{2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 上海交通大学农业与生物学院, 农业部都市农业(南方)重点实验室, 上海 200240; 3. 上海市金山区山阳镇农业技术推广服务中心, 上海 201518; 4. 中新农业泰生示范农场, 上海 202161)

摘要: 秸秆资源化利用对于农业环境保护和可持续农业发展具有重要意义。利用实验室分离获得的 15 株高效纤维素降解菌, 筛选出可有效降解秸秆的复合菌剂 JFB-1, 研究了复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响。结果表明, 接种该复合菌剂能将秸秆堆肥的单个发酵周期缩短 1~2 d, 堆肥中有机质含量达到 403.5~515.1 g·kg⁻¹, C/N 比降低至 15.30~10.53。盆栽试验发现, 施用水稻秸秆堆肥的效果总体好于相应的芦笋秸秆堆肥。与水稻秸秆对照堆肥比较, 施用复合菌剂处理的水稻秸秆堆肥 150 g·kg⁻¹ 时, 土壤中有机质和全氮含量分别提高 33.5% 和 7.3%, 土壤脲酶和纤维素酶活性分别提高 16.7% 和 30.8%; 与不施肥处理比较, 施用秸秆堆肥可改善土壤微生物群落结构, 增加微生物多样性指数。当施用复合菌剂处理的水稻秸秆堆肥 100 g·kg⁻¹ 时, 栽培 30 d 的普通白菜生物量比水稻秸秆对照堆肥提高 46.4%, 表明复合菌剂 JFB-1 在秸秆堆肥中具有很大的应用潜力。

关键词: 秸秆堆肥; 复合菌剂; 土壤养分; 土壤酶活性; 土壤微生物群落

中图分类号: X144; X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0783-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607140

Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity

NIE Wen-han^{1,2}, QI Zhi-ping^{2,4}, FENG Hai-wei², SUN Yu-jing³, ZHI Yue-e², ZHANG Jin-zhong^{1*}, ZHANG Dan^{2*}

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Urban Agriculture (South), Ministry of Agriculture, School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Agro-technical Extension and Service Center of Shanyang Town, Jinshan District, Shanghai 201518, China; 4. Sino-Singapore Thaisheng Agricultural Demonstration Farm, Shanghai 202161, China)

Abstract: The utilization of straw resources is of great significance to agricultural environmental protection and sustainable agricultural development. Based on the isolated 15 high-efficient cellulose degrading bacteria in the laboratory, the composite inoculants (JFB-1) which can effectively degrade crop straw were screened, and the effects of straw composts with the composite inoculants on soil carbon and nitrogen contents and enzyme activity were studied. The results showed that the composite inoculants could accelerate straw decomposition for 1-2 d during single fermentation period, and the organic matter contents in straw composts reached 403.5-515.1 g·kg⁻¹, while the ratio of carbon and nitrogen decreased from 10.53 to 15.30. The pot experiments found that the application effects of rice straw composts were generally better than those of corresponding asparagus straw composts. Compared with the control compost of rice straw, when the application amount of rice straw compost using the composite inoculants was 150 g·kg⁻¹, the contents of soil organic matter and total nitrogen increased by 33.5% and 7.3%, and soil urease and cellulase activities increased by 16.7% and 30.8%, respectively. Compared with no fertilization treatment, the application of straw composts could improve soil microbial community structure, and increase microbial diversity indices. When the application amount of rice straw compost using the composite inoculants was 100 g·kg⁻¹, the biomass of common Chinese cabbage cultivated for 30 d increased by 46.4% compared to the control compost of rice straw. These results indicated that the composite inoculants have great application potential in straw composts.

Key words: straw compost; composite inoculants; soil nutrient; soil enzyme activity; soil microbial community

秸秆资源化利用对于治理农业污染、应对食品短缺和能源危机都有重要意义。据统计,我国每年产生作物秸秆约 8 亿 t,其中水稻秸秆产量最高,占作物秸秆总量的 31.6%^[1]。由于秸秆产量大、分布广,难以有效回收利用,直接燃烧或自然腐解会造成空气污染、传播病害和影响下一茬作物等问题。目

前,秸秆的主要处理方法有物理法、化学法和生物

收稿日期: 2016-07-21; 修订日期: 2016-09-02

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2016590362); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA101405)

作者简介: 聂文翰(1991~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境生物技术, E-mail: wenhannpaper@hotmail.com

* 通信作者, E-mail: jzhzhang@swu.edu.cn; zhdsjtu@sjtu.edu.cn

法,物理法通过除去硅层,降低纤维素的结晶度,再用纤维素酶、半纤维素酶和木质素酶进行处理,存在成本高、能耗大和操作复杂等问题^[2];化学法利用酸碱浸泡处理纤维素的成本高,容易造成二次污染;生物法具有无污染、成本低和操作简单等优点,环境中的微生物可以破坏秸秆木质素、纤维素和半纤维素之间的紧密结构^[3],秸秆堆肥还田能够减少化肥用量、改善土壤理化性质、提高作物产量,成为秸秆资源化利用的研究热点。在堆肥处理中添加微生物能加快纤维素分解,缩短发酵周期,提高堆肥产品质量^[4]。目前,应用于高温堆肥的微生物菌剂主要有单菌剂和复合菌剂,其中单菌剂主要为耐热能力较强的芽孢杆菌和放线菌等。然而,单一菌种的木质纤维素酶系不全,在高温环境活性降低,限制了单菌剂在堆肥中的应用效果。基于菌株间的互利共生效应,复合菌剂适应高温堆肥环境的能力强,应用效果显著好于接种单一菌株的堆肥处理^[5],能够杀死大量的寄生虫卵和病原微生物,

大幅缩短堆肥时间,提高有机肥的产量和质量^[6]。

本研究利用实验室分离获得的 15 株高效纤维素降解菌,通过正交试验,筛选出可高效降解秸秆的复合菌剂 JFB-1^[7],并与 6 株辅助菌结合,应用于水稻秸秆和芦笋秸秆堆肥。盆栽试验证实,施用秸秆堆肥可以显著提高土壤有机质和总氮含量,改善土壤酶活性和土壤微生物群落结构,提高普通白菜产量。

1 材料与方法

1.1 供试菌种

所有供试菌种信息如表 1 所示。18 株菌为实验室分离并保藏,其中 15 株核心菌株(JSD-1 ~ JSD-26)均分离自土壤,3 株辅助菌(F-4 ~ F-6)分离自有机肥,其余 3 株辅助菌(F-1 ~ F-3)购自中国工业微生物菌种保藏中心。选用的辅助菌不与核心菌株产生拮抗作用,单独使用时几乎不能降解秸秆,与核心菌株共同作用可促进核心菌株对秸秆的降解能力^[8]。

表 1 秸秆堆肥供试菌种

Table 1 Strains used in straw composting

菌株编号	中文名称(拉丁文名称)	菌株来源
JSD-1	灰略红链霉菌(<i>Streptomyces griseorubens</i>)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-3	芽孢杆菌(<i>Bacillus</i> sp.)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-5	链霉菌(<i>Streptomyces</i> sp.)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-8	黄单胞菌(<i>Xanthomonas</i> sp.)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-10	克雷伯氏菌(<i>Pseudomonas</i> sp.)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-12	芽孢杆菌(<i>Bacillus</i> sp.)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-15	青霉(<i>Penicillium</i> sp.)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-17	青霉(<i>Penicillium</i> sp.)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-18	根霉(<i>Rhizopus</i> sp.)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-19	黑曲霉(<i>Aspergillus niger</i>)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-20	木霉(<i>Trichoderma</i> sp.)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-21	木霉(<i>Trichoderma</i> sp.)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-22	黑曲霉(<i>Aspergillus niger</i>)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-24	木霉(<i>Trichoderma</i> sp.)	分离自施用堆肥后的土壤
JSD-26	青霉(<i>Penicillium</i> sp.)	分离自施用堆肥后的土壤
F-1	产朊假丝酵母(<i>Candida utilis</i>)	工业微生物菌种保藏中心
F-2	紫色变异链霉菌(<i>Streptomyces violovariabilis</i>)	工业微生物菌种保藏中心
F-3	黄孢原毛平革菌(<i>Phanerochaete chrysosporium</i>)	工业微生物菌种保藏中心
F-4	纳豆芽孢杆菌(<i>Bacillus natto</i>)	分离自有机肥
F-5	高温放线菌(<i>Thermoactinomyces</i> sp.)	分离自有机肥
F-6	珊瑚色诺卡氏菌(<i>Nocardia coralline</i>)	分离自有机肥

1.2 培养基

马铃薯葡萄糖培养基:去皮马铃薯 200 g,葡萄糖 20 g,蒸馏水 1 000 mL,琼脂 20 g,自然 pH。

牛肉膏蛋白胨培养基:牛肉膏 3 g,蛋白胨 5 g,NaCl 5 g,蒸馏水 1 000 mL,琼脂 20 g,pH 7.0 ~ 7.2。

高氏 I 号培养基:KNO₃ 1 g,NaCl 5 g,FeSO₄ ·

7H₂O 0.01 g,MgSO₄ · 7H₂O 0.5 g,K₂HPO₄ 0.5 g,淀粉 20 g,蒸馏水 1 000 mL,琼脂 20 g,pH 7.2。

滤纸崩解培养基:牛肉膏 1.5 g,蛋白胨 1 g,CaCO₃ 2 g,蒸馏水 1 000 mL。

1.3 优化菌种配方

将 2.5 g 定量滤纸(杭州沃华滤纸有限公司,中

国)剪成 10 cm × 1 cm 的滤纸条,加入 100 mL 滤纸崩解培养基,按照正交试验,接种每种菌液 0.5 mL,置于 30℃ 恒温摇床,120 r·min⁻¹ 振荡培养 3 d,观察各瓶中滤纸的崩解程度,筛选出可有效分解滤纸的复合菌剂.

1.4 秸秆腐熟复合菌剂的制备

根据微生物种类,将真菌(JSD-15 ~ JSD-26 和 F-1、F-3)接种于马铃薯葡萄糖培养基,细菌(JSD-3、JSD-8 ~ JSD-12 和 F-6)接种于牛肉膏蛋白胨培养基,放线菌(JSD-1、JSD-5、F-2 和 F-5)接种于高氏 I 号

培养基,于 30℃ 摇床 150 r·min⁻¹ 振荡培养 2 d,使菌液浓度在 2 × 10⁹ cfu·mL⁻¹ 以上. 根据正交试验筛选出的菌剂组合,将不同菌液分别与麦麸载体混合,30℃ 发酵 3 d,得到秸秆降解复合菌剂 JFB-1.

1.5 秸秆堆肥实验

供试水稻秸秆和芦笋秸秆均采自上海市崇明县中新农场,采用氧化还原滴定法分别测定秸秆中纤维素、半纤维素和木质素含量,K₂Cr₂O₇ 滴定法秸秆有机质含量,凯氏定氮法测定秸秆的总氮含量,获得如表 2 所示的结果.

表 2 供试秸秆的理化特性

Table 2 Physicochemical characteristics of the tested straws						
秸秆类型	纤维素/%	半纤维素/%	木质素/%	有机质含量/g·kg ⁻¹	总氮含量/g·kg ⁻¹	碳氮比
水稻秸秆	44.61	11.35	29.30	724.8	5.9	84:1
芦笋秸秆	41.79	10.85	33.53	676.7	3.1	127:1

将水稻秸秆粉碎至粒径为 5 ~ 10 cm 的小段,称取干重为 200 kg 的水稻秸秆小段,加入 4.85 kg 尿素,混匀,以调节初始 C/N 比为 25:1,设置接种秸秆重量 1% 的 JFB-1 复合菌剂和 1% 的辅助菌、1% 的商业菌剂(EM 菌剂,湖北启明生物工程有限公司)和 1% 的辅助菌、只接种 1% 的辅助菌 3 种处理,调节堆体初始含水量在 65% 左右,堆成 2 m × 2 m × 2 m 的堆体,进行好氧堆肥,供氧方式为翻堆和鼓风供氧相结合,每 7 ~ 9 d 翻堆 1 次^[9],共发酵 26 d,分别得到接种 JFB-1 复合菌剂的水稻秸秆堆肥(RSJ)、接种商业菌剂的水稻秸秆堆肥(RSC)和只接种辅助菌的水稻秸秆对照堆肥(RS).

按照上述步骤,在干重为 200 kg 的芦笋秸秆中添加 5.57 kg 尿素,制得接种 JFB-1 复合菌剂的芦笋秸秆堆肥(ASJ)、接种商业菌剂的芦笋秸秆堆肥(ASC)和只接种辅助菌的芦笋秸秆对照堆肥(AS).

1.6 秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响

供试土壤为上海交通大学浦江绿谷试验基地的荒地土壤,一部分直接测定土壤理化性质,另一部分用于盆栽试验. 盆栽试验所用盆钵上口直径为 20 cm、下口直径为 12 cm、高为 18 cm,每盆装土 2.5 kg,施肥处理如表 3 所示,播种普通白菜(*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* Makino),间苗后每盆定苗 5 株,每个处理重复实验 3 次.

定苗 30 d 后采集土壤和白菜样品,白菜样品在 106℃ 杀青 0.5 h,75℃ 烘干至恒重后称量. 风干土壤样品,过 0.25 mm 筛,采用 K₂Cr₂O₇ 滴定法测定土壤有机质含量;浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,AA3 流动注射分析仪(SEAL Analytical,德国)测定土壤总氮含

量. 新鲜土样用于测定土壤酶活性,采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法^[10]测定纤维素酶活性,以每克土壤催化羧甲基纤维素钠水解 24 h 时生成的葡萄糖质量(μg)表示;用靛酚比色法^[11]测定脲酶活性,以每克土壤催化尿素水解 24 h 时生成的氨气质量(μg)表示.

表 3 盆栽试验设计

Table 3 Design of pot experiment			
肥料类型	肥料用量/g·kg ⁻¹		
接种 JFB-1 菌剂的水稻秸秆堆肥(RSJ)	50	100	150
接种商业菌剂的水稻秸秆堆肥(RSC)	50	100	150
水稻秸秆对照堆肥(RS)	50	100	150
接种 JFB-1 菌剂的芦笋秸秆堆肥(ASJ)	50	100	150
接种商业菌剂的芦笋秸秆堆肥(ASC)	50	100	150
芦笋秸秆对照堆肥(AS)	50	100	150
不施肥	0		

1.7 BIOLOG 测定土壤微生物种群多样性

称取 10 g 新鲜土壤样品,加入 90 mL 质量分数为 0.85% 的灭菌生理盐水,在 250 r·min⁻¹ 摇床中振荡 30 min,静置 5 min,转移 10 mL 土壤浸提液到另一 90 mL 灭菌生理盐水中,如此进行 10 倍梯度稀释直至稀释 1 000 倍. 将 BIOLOG-ECO 板在 25℃ 下预热 30 min,每个孔接种 150 μL 上清液,用保鲜袋密封,置于 25℃ 的微生物培养箱中,每隔 12 h 用酶标仪测定 590 nm 处吸光度.

BIOLOG-ECO 微平板每孔的平均吸光值计算公式为:

$$AWCD = \sum_{i=1}^n \frac{(A_i - R)}{n}$$

(1)

式中, A_i 为上清液的吸光值; R 为对照孔的吸光值; n 取 31, 每个实验重复 3 次.

根据 BIOLOG-ECO 微平板孔中吸光值计算土壤微生物群落利用碳源多样性指数, 即 Shannon 指数(H)、Simpson 指数(D)和 McIntosh 指数(U), 计算公式分别为:

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \times \ln P_i \tag{2}$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^n P_i^2 \tag{3}$$

$$U = \sum_{i=1}^n \sqrt{A_{ii}} \tag{4}$$

式中, P_i 为第 i 孔的相对吸光值($A_i - R$)与整个微平板相对吸光值总和的比值; A_{ii} 为第 i 孔的相对吸光值.

1.8 数据处理与分析

采用Excel 2016、SPSS 19.0软件处理和分析实

验数据, 用单因素方差分析法检验数据的显著性.

2 结果与讨论

2.1 秸秆腐熟复合菌剂的筛选

利用 15 株高效降解纤维素核心菌, 进行正交试验, 考察菌剂组合对滤纸片的降解能力, 筛选出合适的复合菌剂. 正交试验设计及菌剂组合对滤纸的降解效果如表 4 所示. 从中可以看出, 组合 5 和组合 7 对滤纸的分解效果最佳, 3 d 内即可将滤纸分解至糊状. 堆肥是一个高温发酵过程, 真菌类微生物的耐高温能力普遍较差^[12]; 另一方面, 现有堆肥大多以畜禽粪便为原料, 粪便中含有大量的抗生素^[13], 以细菌和放线菌为优势菌种的堆肥可以有效降低抗生素污染的风险^[14]. 因此, 选择真菌比例较低的组合 5 (含菌株 JSD-1、JSD-8、JSD-10、JSD-17、JSD-18、JSD-21 和 JSD-22), 并将该组合命名为 JFB-1.

表 4 筛选复合菌剂的正交试验 ($L_{16} 2^{15}$)¹⁾

Table 4 Orthogonal experimental design to screen composite inoculants

组合	JSD-1	JSD-3	JSD-5	JSD-8	JSD-10	JSD-12	JSD-15	JSD-17	JSD-18	JSD-19	JSD-20	JSD-21	JSD-22	JSD-24	JSD-26	降解效果
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	a
2	+	+	+	+	+	+	+									a
3	+	+	+					+	+	+	+					b
4	+	+	+									+	+	+	+	c
5	+			+	+			+	+			+	+			d
6	+			+	+					+	+			+	+	a
7	+					+	+	+	+					+	+	d
8	+					+	+			+	+	+	+			c
9		+		+		+		+		+		+		+		a
10		+		+		+			+		+		+		+	b
11		+			+		+	+		+			+		+	a
12		+			+		+		+		+	+		+		e
13			+	+			+	+			+	+			+	e
14			+	+			+		+	+			+	+		e
15			+		+	+		+					+	+		a
16			+		+	+			+	+	+	+			+	a

1) “+”代表组合中添加了此种微生物, 降解效果列中的字母表示滤纸的崩解程度; a 表示滤纸条有轻微破损; b 表示滤纸条被分解成片段状; c 表示滤纸条被分解成小碎片状; d 表示滤纸条被分解成糊状; e 表示微生物可以生存但不能分解滤纸条

2.2 秸秆堆肥过程中的温度变化

水稻秸秆堆肥过程中, 每天 14:00 定时测定堆体温度, 获得发酵周期的温度变化曲线(图 1). 从图 1 中可以看出, 接种 JFB-1 菌剂的水稻秸秆堆体温度高于其它处理, 最高温度达到 68℃, 高于接种商业菌剂的 60℃和只接种辅助菌的 59.9℃, 且接种 JFB-1 菌剂的单个发酵周期约为 7 d, 少于接种商业菌剂的 8 d 和只接种辅助菌的 9 d.

类似地, 测得芦笋秸秆堆肥过程中的温度变化

曲线(图 2). 从图 2 中可以看出, 接种 JFB-1 菌剂的堆体温度明显高于其它处理, 最高温度达到 72.5℃, 在 3 个处理中最高. 接种 JFB-1 菌剂的单个发酵周期为 7 d, 少于接种商业菌剂和只接辅助菌的 8 d. 因此, 接种 JFB-1 菌剂进行秸秆堆肥, 可以显著提高堆肥温度, 缩短发酵周期.

温度是堆肥过程中的一项重要指标, 较高的温度有利于堆肥过程的进行, 并杀灭植物残体中的有害微生物. 水稻秸秆和芦笋秸秆堆肥均能较快达到

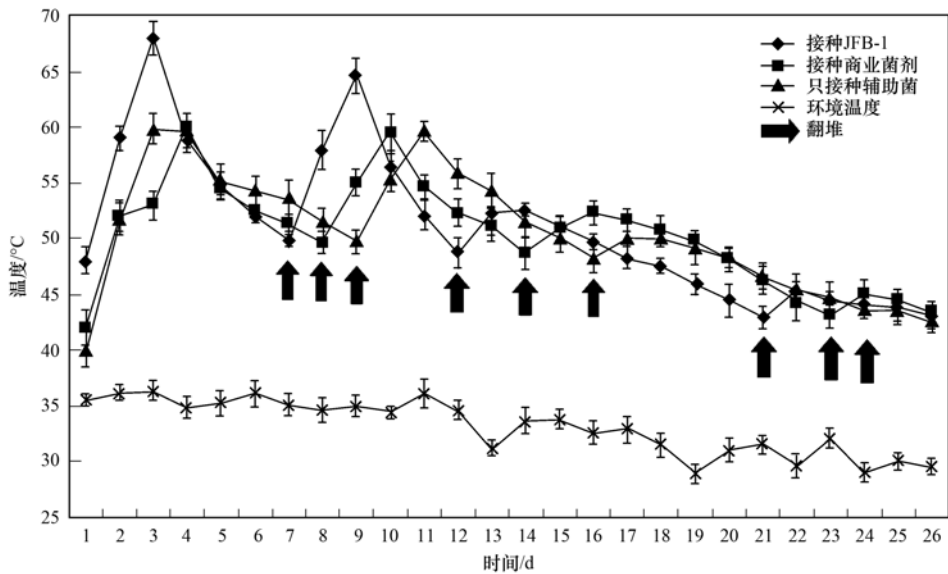


图1 水稻秸秆堆肥过程中的温度变化

Fig. 1 Variations of temperature during the composting process of rice straw

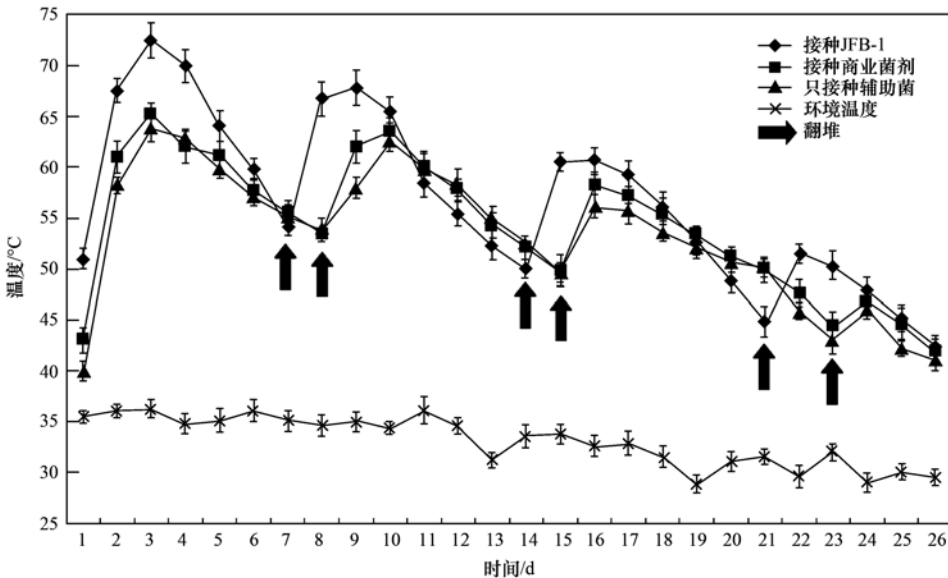


图2 芦笋秸秆堆肥过程中的温度变化

Fig. 2 Variations of temperature during the composting process of asparagus straw

最高温度,接种 JFB-1 菌剂堆肥的最高温度分别达到 68℃ 和 72.5℃,且高温期(>50℃)分别为 12 d 和 18 d,芦笋秸秆堆肥甚至高于猪粪和玉米秸秆堆肥的 13 d^[15].

2.3 秸秆堆肥的理化指标

收集秸秆堆肥样品,测定理化指标,获得如表 5 所示的结果.

从表 5 可以看出,接种 JFB-1 菌剂获得的水稻秸秆堆肥的含水率、有机质含量和碳氮比均低于对照堆肥和接种商业菌剂堆肥,但总氮和灰分含量均高于对照堆肥和接种商业菌剂堆肥,3 种处理获得

的堆肥 pH 均在 7 附近. 同样地,接种 JFB-1 菌剂获得的芦笋秸秆堆肥也有类似的结果. 本研究接种 JFB-1 菌剂的秸秆堆肥在 26 d 内已经充分腐熟,堆肥所需时间远低于玉米秸秆堆肥的 90 d^[16],堆肥结束时的碳氮比也远低于蔬菜副产物和玉米秸秆堆肥的 20 左右^[17],制得有机肥的理化指标均符合我国有机肥料农业行业标准(NY525-2012)^[18].

由 2.2 和 2.3 节可以看出,只接种辅助菌的对照堆肥(AS、RS)在一定程度上也达到与接种 JFB-1 菌剂类似的堆肥效果,这可能是 6 种辅助菌之间或者是辅助菌与环境微生物之间的相互作用促进了秸

表 5 秸秆堆肥的理化指标

Table 5 Physicochemical indices of straw composts						
秸秆堆肥	pH	鲜样含水率/%	有机质含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总氮含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	灰分含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碳氮比
AS	6.79	32.3	515.1	19.8	125.3	15.30
ASC	6.92	28.4	484.8	21.9	132.4	13.0
ASJ	6.88	23.9	460.6	25.7	150.6	10.53
RS	6.72	36.0	451.2	18.7	88.9	14.19
RSC	6.80	31.4	435.4	19.9	100.1	12.86
RSJ	6.83	28.5	403.5	22.5	115.2	10.54

秆的降解,但是菌株之间相互作用的具体机制非常复杂,有待开展进一步研究.

2.4 施用秸秆堆肥对土壤碳氮含量的影响

盆栽试验结束后,分别测定施用秸秆堆肥和不施肥土壤中的有机质和全氮含量,考察施用秸秆堆肥对土壤碳氮含量的影响,获得如图 3 和图 4 所示的结果.

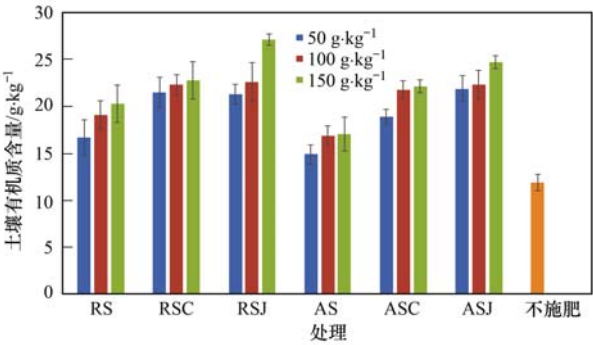


图 3 不同施肥处理下的土壤有机质含量
Fig. 3 Soil organic matter contents under different fertilization treatments

一般来说,土壤有机质含量越高,作物生长越旺盛. 有机质不仅为植物生长提供养分,还可以活跃土壤微生物,增加微生物多样性. 从图 3 可以看出,与不施肥比较,施用秸秆堆肥的土壤有机质含量均显著增加 ($P < 0.01$),其中最高的是施用 $150\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ RSJ 的土壤,有机质含量增加 127.7%. 总体来看,土壤有机质含量随堆肥用量的增加而增加,相同用量下水稻秸秆堆肥的效果好于芦笋秸秆堆肥. 当施用量为 $150\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,与 RS 比较,施用 RSC 和 RSJ 的土壤有机质含量分别提高 12.3% 和 33.5%; 与 AS 比较,施用 ASC 和 ASJ 的土壤有机质含量分别提高 29.2% 和 44.4%.

比较表 5 和图 3 可以看出,对照堆肥 (AS、RS) 中有机质含量高于接种 JFB-1 菌剂的秸秆堆肥 (ASJ、RSJ),但是接种 JFB-1 菌剂的堆肥还田后土壤中有有机质含量 (ASJ、RS) 高于对照堆肥,其原因是在对照堆肥样品中测得的有机质包含相当部分未

被分解的秸秆有机质,还田后这部分有机质不能直接转化为土壤有机质,由此间接说明接种 JFB-1 菌剂的秸秆腐解得更彻底,复合菌剂对秸秆的腐解能力强于其它处理.

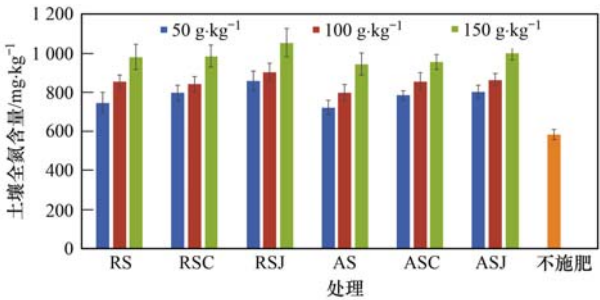


图 4 不同施肥处理下的土壤全氮含量
Fig. 4 Soil total nitrogen contents under different fertilization treatments

从图 4 可以看出,与不施肥土壤比较,施用秸秆堆肥的土壤全氮含量均显著增加 ($P < 0.01$),其中最高的是施用 $150\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 RSJ,全氮含量增加 80.0%. 同样地,土壤全氮含量随堆肥用量的增加而增加,相同用量下水稻秸秆堆肥的效果好于芦笋秸秆堆肥. 当施用量为 $150\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,与 RS 比较,施用 RSJ 的土壤全氮含量提高 7.3%,而施用 RSC 的土壤全氮含量没有增加; 与 AS 比较,施用 ASJ 的土壤全氮含量提高 5.7%,而施用 ASC 的土壤全氮含量增加较少. 施用水稻秸秆堆肥的土壤全氮含量比芦笋秸秆堆肥高的原因可能是水稻秸秆堆肥中的微生物群落更加活跃,提高了土壤微生物代谢氮素的能力,减少了氮素流失,达到了保氮的效果^[19].

2.5 施用秸秆堆肥对土壤酶活性的影响

施用有机肥可增加土壤脲酶、纤维素酶的活性^[20]. 本研究分别测定施用秸秆堆肥和不施肥土壤中的土壤脲酶和纤维素酶活性,考察施用秸秆堆肥对土壤酶活性的影响,获得如图 5 和图 6 所示的结果.

土壤脲酶能够催化土壤中的尿素水解为 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$,进一步转化为 NH_3 和 CO_2 ,常用脲酶

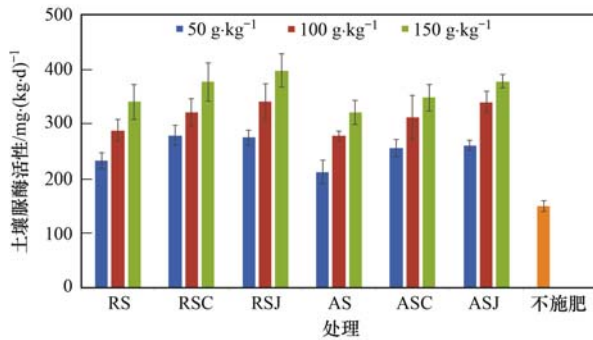


图5 不同施肥处理下的土壤脲酶活性

Fig. 5 Soil urease activity under different fertilization treatments

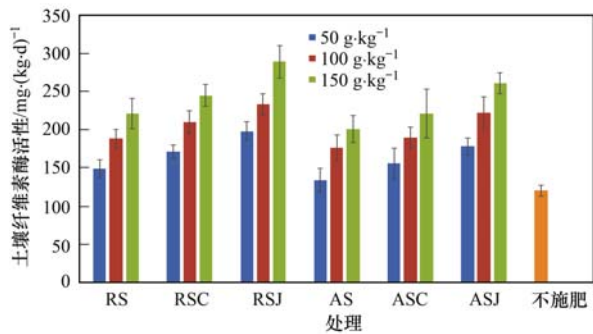


图6 不同施肥处理下的土壤纤维素酶活性

Fig. 6 Soil cellulase activity under different fertilization treatments

活性表征土壤的供氮能力^[21],脲酶活性的提高有利于土壤中有机氮向植物可吸收利用的有效氮转化.从图5可以看出,土壤脲酶活性随堆肥用量的增加而增加,相同用量下水稻秸秆堆肥的效果好于芦笋秸秆堆肥.与不施肥比较,施用秸秆堆肥的土壤脲酶活性显著增加($P < 0.01$),其中最高的是施用150 g·kg⁻¹ RSJ的土壤,脲酶活性增加163.5%.当施用量为150 g·kg⁻¹时,与RS比较,施用RSC和RSJ的土壤脲酶活性分别提高10.6%和16.7%;与AS比较,施用ASC和ASJ的土壤脲酶活性分别提高8.4%和17.8%.

土壤中的纤维素酶可以促进纤维素转化为纤维二糖和葡萄糖,其中 β -糖苷酶与土壤呼吸作用关系密切,提高土壤纤维素酶活性对于进一步分解土壤中的植物残体、提高土壤呼吸、促进植物对土壤养分的吸收具有重要作用^[22].从图6可以看出,土壤纤维素酶活性随堆肥用量的增加而增加,相同用量下水稻秸秆堆肥的效果好于芦笋秸秆堆肥.与不施肥比较,施用秸秆堆肥的土壤纤维素酶活性显著增加($P < 0.01$),其中最高的是施用150 g·kg⁻¹ RSJ的土壤,纤维素酶活性增加138.8%.当施用量为150 g·kg⁻¹时,与RS比较,施用RSC和RSJ的土壤

纤维素酶活性分别提高10.9%和30.8%;与AS比较,施用ASC和ASJ的土壤纤维素酶活性分别提高10.0%和29.9%.施用水稻秸秆堆肥的土壤纤维素酶活性比相应芦笋秸秆堆肥高的原因可能是水稻秸秆中纤维素组分含量明显高于芦笋秸秆^[23].

2.6 施用秸秆堆肥对白菜生物量的影响

分别施用50、100和150 g·kg⁻¹的秸秆堆肥,考察施用秸秆堆肥对栽培30 d的普通白菜生物量的影响.由于每盆定苗5株,用单株白菜的平均干重表示生物量,获得如图7所示的结果.

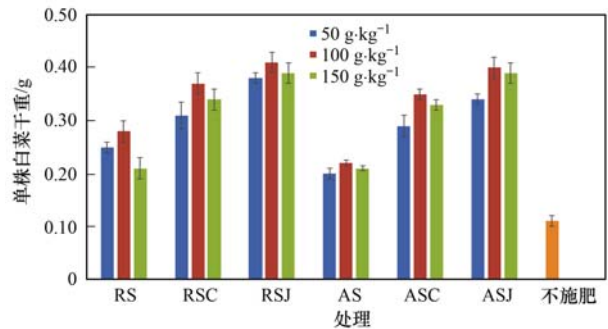


图7 不同施肥处理下单株白菜的生物量

Fig. 7 Biomass of single cabbage under different fertilization treatments

不施肥时普通白菜生长萎靡,植株矮小,单株干重仅为0.11 g;在3个施肥水平中,施用100 g·kg⁻¹秸秆堆肥时白菜的生物量最高.从图7可以看出,当施肥量为100 g·kg⁻¹时,与RS比较,施用RSC和RSJ的白菜生物量分别提高32.1%和46.4%;与AS比较,施用ASC和ASJ的白菜生物量分别提高59.1%和81.8%.但是,施用150 g·kg⁻¹秸秆堆肥对白菜生长的促进作用比100 g·kg⁻¹低,其原因可能是过高的养分和含盐量导致白菜生长受阻.总体来说,施用水稻秸秆堆肥的白菜生物量比相应芦笋秸秆堆肥高,这是由于芦笋秸秆中更难降解的木质素含量较高,使得堆肥的腐熟效果较差^[24].施用有机肥还可以提高土壤的代谢强度^[25, 26],秸秆堆肥中的大量氮素能够激活土壤中与氮循环有关的酶(如硝酸盐还原酶和脲酶)^[27],堆肥中大量降解纤维素的微生物可以提高土壤纤维素酶活性^[28],这些因素促进了白菜对养分的吸收,有利于白菜的生长.施用AS和RS时普通白菜生长较慢,这是因为秸秆中的纤维素未得到充分分解,堆肥中的营养成分相对较少,使得普通白菜植株矮小,生物量低下.

2.7 施用秸秆堆肥对土壤微生物多样性的影响

当施用秸秆堆肥100 g·kg⁻¹时,利用BIOLOG-ECO平板^[29, 30]测定土壤微生物利用碳源多样性指

数,获得如表 6 所示的结果. 从中可以看出,与不施肥和 AS 比较,施用接菌处理的芦笋秸秆堆肥,土壤微生物多样性指标均显著增加 ($P < 0.01$),但施用 ASJ 的效果好于施用 ASC; 同样地,施用 RSJ 的效果好于施用 RSC. 结果表明,施用秸秆堆肥可以明显提高土壤微生物对碳源的利用率,又以接种复合菌剂 JFB-1 的秸秆堆肥效果最好; 施用水稻秸秆堆肥的土壤微生物代谢多样性指数比相应芦笋秸秆堆肥高,更适合土壤微生物的生长代谢. 施用秸秆堆肥可以显著提高土壤微生物多样性^[31],其原因可能是秸秆堆肥中含有丰富的有机质、铵态氮和硝态氮,这些养分会间接影响土壤微生物群落功能的多样性^[32],同时堆肥中的大量微生物也会影响土壤微生物群落的代谢活性.

表 6 土壤微生物代谢多样性指数¹⁾

Table 6 Diversity indices of soil microbial metabolism

处理	Shannon 指数	Simpson 指数	McIntosh 指数
不施肥	4.09 ± 0.09 ^d	26.77 ± 2.23 ^d	1.81 ± 0.22 ^d
AS	4.83 ± 0.21 ^c	34.46 ± 1.82 ^c	2.39 ± 0.19 ^c
ASC	5.44 ± 0.25 ^{bc}	41.61 ± 1.47 ^b	2.55 ± 0.22 ^{bc}
ASJ	5.85 ± 0.17 ^b	43.11 ± 2.22 ^{ab}	2.84 ± 0.10 ^{ab}
RS	5.72 ± 0.22 ^b	40.74 ± 1.59 ^{bc}	2.71 ± 0.15 ^b
RSC	6.08 ± 0.18 ^{ab}	45.13 ± 1.18 ^a	3.01 ± 0.11 ^a
RSJ	6.38 ± 0.21 ^a	47.58 ± 2.15 ^a	3.13 ± 0.17 ^a

1) 同列的不同字母表示显著性差异 ($P < 0.01$)

3 结论

(1) 以纤维素降解菌株为基础,筛选获得可高效降解水稻秸秆和芦笋秸秆的复合菌剂 JFB-1.

(2) 复合菌剂秸秆堆肥可以缩短发酵周期,提高堆体温度和堆肥养分含量.

(3) 施用复合菌剂秸秆堆肥能够显著提高土壤养分含量,活跃土壤酶活性,改善土壤微生物群落结构,提高普通白菜产量,水稻秸秆堆肥的效果好于相应的芦笋秸秆堆肥.

参考文献:

- [1] Wang Y J, Bi Y Y, Gao C Y. The assessment and utilization of straw resources in China [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, **9**(12): 1807-1815.
- [2] Schneider L, Dong Y, Haverinen J, *et al.* Efficiency of acetic acid and formic acid as a catalyst in catalytical and mechanocatalytical pretreatment of barley straw [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2016, **91**: 134-142.
- [3] Broda P. Biotechnology in the degradation and utilization of lignocellulose [J]. *Biodegradation*, 1992, **3**(2-3): 219-238.
- [4] 冯致, 李杰, 张国斌, 等. 不同微生物菌剂对玉米秸秆好氧堆肥效果的影响 [J]. *中国蔬菜*, 2013, (12): 82-87.
Feng Z, Li J, Zhang G B, *et al.* Effects of different microbial inoculants on aerobic composting of corn stalk [J]. *China Vegetables*, 2013, (12): 82-27.
- [5] Laslo É, György É, Mara G, *et al.* Screening of plant growth promoting rhizobacteria as potential microbial inoculants [J]. *Crop Protection*, 2012, **40**: 43-48.
- [6] 刘佳, 李婉, 许修宏, 等. 接种纤维素降解菌对牛粪堆肥微生物群落的影响 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 3073-3081.
Liu J, Li W, Xu X H, *et al.* Effect of cellulose-decomposing strain on microbial community of cow manure compost [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 3073-3081.
- [7] 支月娥, 周培, 冯海玮, 等. 一种高效秸秆降解复合菌剂及其有机肥制备方法 [P]. 中国专利: CN 102676492B, 2014-03-05.
- [8] 郑世仲. 高产纤维素酶真菌的筛选、鉴定及其在畜禽粪便处理中的应用 [D]. 福州: 福建师范大学, 2010. 68-69.
Zheng S Z. Screening of high-yield cellulase fungus, identification and its application in the processing of domestic animal manure [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2010. 68-69.
- [9] 赵晨阳, 李洪枚, 魏源送, 等. 翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 533-540.
Zhao C Y, Li H M, Wei Y S, *et al.* Effects of turning frequency on emission of greenhouse gas and ammonia during swine manure windrow composting [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 533-540.
- [10] Smogyi M. Notes on sugar determination [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 1952, **195**(1): 19-23.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986. 294-297.
- [12] Fraç M, Jezierska-Tys S, Yaguchi T. Occurrence, detection, and molecular and metabolic characterization of heat-resistant fungi in soils and plants and their risk to human health [J]. *Advances in Agronomy*, 2015, **132**: 161-204.
- [13] 潘兰佳, 唐晓达, 汪印. 畜禽粪便堆肥降解残留抗生素的研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(12Q): 191-198.
Pan L J, Tang X D, Wang Y. Research progress of residual antibiotics degradation in livestock and poultry feces composting [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(12Q): 191-198.
- [14] Zhang Z H, Zhao J, Yu C G, *et al.* Evaluation of aerobic co-composting of penicillin fermentation fungi residue with pig manure on penicillin degradation, microbial population dynamics and composting maturity [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **198**: 403-409.
- [15] 任丽梅, 李国学, 沈玉君, 等. 鸟粪石结晶反应在猪粪和玉米秸秆堆肥中的应用 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(7): 2165-2173.
Ren L M, Li G X, Shen Y J, *et al.* Application of struvite crystallization on co-composting of swine manure and cornstalk [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(7): 2165-2173.
- [16] 陈亚楠, 张长华, 梁永江, 等. 玉米秸秆堆肥的田间积制和原位还田肥效 [J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(12): 3507-3513.
Chen Y N, Zhang C H, Liang Y J, *et al.* Corn straw composting in the field and in situ fertilizer effect [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(12): 3507-3513.
- [17] 劳德坤, 张陇利, 李永斌, 等. 不同接种量的微生物秸秆腐

- 熟剂对蔬菜副产物堆肥效果的影响[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(6): 2979-2985.
- Lao D K, Zhang L L, Li Y B, *et al.* Effect of different inoculation amounts of microbial straw decomposition agents on vegetable byproducts composting [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(6): 2979-2985.
- [18] NY 525-2012 有机肥料[S].
- [19] Pandey A K, Gaiind S, Ali A, *et al.* Effect of bioaugmentation and nitrogen supplementation on composting of paddy straw[J]. Biodegradation, 2009, **20**(3): 293-306.
- [20] 黄继川, 彭智平, 于俊红, 等. 施用玉米秸秆堆肥对盆栽芥菜土壤酶活性和微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(2): 348-353.
- Huang J C, Peng Z P, Yu J H, *et al.* Impacts of applying corn-straw compost on microorganisms and enzyme activities in pot soil cultivated with mustard [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, **16**(2): 348-353.
- [21] 孙约兵, 王朋超, 徐应明, 等. 海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4720-4726.
- Sun Y B, Wang P C, Xu Y M, *et al.* Immobilization remediation of Cd and Pb contaminated soil: remediation potential and soil environmental quality [J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4720-4726.
- [22] 曹湛波, 王磊, 李凡, 等. 土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1908-1914.
- Cao Z B, Wang L, Li F, *et al.* Response of soil respiration and organic carbon to returning of different agricultural straws and its mechanism[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1908-1914.
- [23] Guillén R, Sánchez C, Jiménez A, *et al.* Dietary fibre in white asparagus before and after processing [J]. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung, 1995, **200**(3): 225-228.
- [24] Adani F, Genevini P, Ricca G, *et al.* Modification of soil humic matter after 4 years of compost application [J]. Waste Management, 2007, **27**(2): 319-324.
- [25] 王冬梅, 王春枝, 韩晓日, 等. 长期施肥对棕壤主要酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2006, **37**(2): 263-267.
- Wang D M, Wang C Z, Han X R, *et al.* Effects of long-term application of fertilizers on some enzymatic activities in brunisolic soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, **37**(2): 263-267.
- [26] 白震, 张明, 宋斗妍, 等. 不同施肥对农田黑土微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(7): 3244-3253.
- Bai Z, Zhang M, Song D Y, *et al.* Effect of different fertilization on microbial community in an arable mollisol[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(7): 3244-3253.
- [27] Lu L H, Zeng G M, Fan C Z, *et al.* Characterization of a laccase-like multicopper oxidase from newly isolated *Streptomyces* sp. C1 in agricultural waste compost and enzymatic decolorization of azo dyes [J]. Biochemical Engineering Journal, 2013, **72**: 70-76.
- [28] Yeh Y F, Chang S C Y, Kuo H W, *et al.* A metagenomic approach for the identification and cloning of an endoglucanase from rice straw compost[J]. Gene, 2013, **519**(2): 360-366.
- [29] 王光华, 刘俊杰, 齐晓宁, 等. Biolog 和 PCR-DGGE 技术解析施肥对德惠黑土细菌群落结构和功能的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(1): 220-226.
- Wang G H, Liu J J, Qi X N, *et al.* Effects of fertilization on bacterial community structure and function in a black soil of Dehui region estimated by Biolog and PCR-DGGE methods[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(1): 220-226.
- [30] Hadwin A K M, Del Rio L F, Pinto L J, *et al.* Microbial communities in wetlands of the Athabasca oil sands: genetic and metabolic characterization [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2006, **55**(1): 68-78.
- [31] Trasar-Cepeda C, Leirós M C, Seoane S, *et al.* Limitations of soil enzymes as indicators of soil pollution[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(13): 1867-1875.
- [32] 白震, 张明, 闫颖, 等. 长期施肥对农田黑土微生物活力与群落结构的影响[J]. 土壤学报, 2009, **46**(1): 107-116.
- Bai Z, Zhang M, Yan Y, *et al.* Effect of long-term fertilization on activity and community structure of soil microbe in farmland mollisol[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, **46**(1): 107-116.

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>Rhodopseudomonas 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, <i>et al.</i> (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

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172