

宾琳,段明利,王亚丰,等.白菜废弃物加菌堆肥产物及其微生物特征分析[J].环境科学与技术,2025,48(6):65-75. Bin Lin, Duan Mingli, Wang Yafeng, et al. Analysis of microbial composting products of Chinese cabbage waste and microbial characteristics of the products[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(6): 65-75.

白菜废弃物加菌堆肥产物及其微生物特征分析

宾琳, 段明利, 王亚丰, 陈全,
吴敏*, 潘波

(昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南省土壤固碳与污染控制重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘要:建立适用于蔬菜废弃物的堆肥工艺,减少蔬菜废弃物处置不当造成的资源浪费和环境污染,对于推动农业产业的可持续发展具有重要意义。文章以废弃白菜叶作为研究对象,以1:500的质量比添加EM堆肥菌和光能活菌母进行堆肥实验,分析加入不同菌剂的白菜叶堆肥产物的结构特性和微生物组成。结果表明:堆肥完成时,堆体C/N范围在9.29~12.11,有机质含量为36.10%~43.76%。类富里酸、类可溶性微生物代谢物和类腐殖酸物质的荧光光强明显增强,说明添加2种外源菌剂的堆体均达到高水平腐化,其堆肥产物含有丰富的富里酸和腐殖酸。微生物测序结果显示,添加2种菌剂的堆肥产物中优势菌群主要属于厚壁菌门、变形菌门和放线菌门。光能菌组中能对难降解有机质进行有效利用的假单胞菌属以及对类腐殖酸物质的生成有促进作用的产碱杆菌属的相对丰度均高于EM菌组,这可能是造成光能菌组腐殖化程度和芳香性更高的原因。此外,在EM菌和光能菌处理的堆肥产物中含有对植物生长具有促进效果的芽孢杆菌属(17.8%)和假单胞菌属细菌(29.3%)。综上,实验中的堆肥产物能够为植物生长提供所需养分,并且含有一定数量的有益细菌,具备生产优质有机肥的潜力。

关键词:蔬菜废弃物; 堆肥; 腐殖质; 微生物

中图分类号:X712 文献标志码:A doi:10.19672/j.cnki.1003-6504.1928.24.338 文章编号:1003-6504(2025)06-0065-11

Analysis of Microbial Composting Products of Chinese Cabbage Waste and Microbial Characteristics of the Products

BIN Lin, DUAN Mingli, WANG Yafeng, CHEN Quan,
WU Min*, PAN Bo

(Yunnan Provincial Key Laboratory of Soil Carbon Sequestration and Pollution Control, Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Establishing a composting process for vegetable waste to reduce resource waste is crucial for minimizing resource waste and mitigating environmental pollution resulting from improper disposal methods. This study focuses on waste Chinese cabbage leaves as the research subject, incorporating EM composting bacteria and Guangneng bacteria at a mass ratio of 1:500, to evaluate the structural characteristics and microbial composition of cabbage leaf compost products added with different bactericides. The results showed that upon completion of the composting process, the C/N ratio ranged to 9.29~12.11, with the organic matter content between 36.10% and 43.76%. Additionally, the fluorescence intensity of fulvic acid-like substances, soluble microbial metabolites, and humic acid-like substances was significantly enhanced, indicating that the composts enriched with the two exogenous bacterial agents achieved a high level of decomposition and were abundant in fulvic and humic acids. Microbial sequencing results revealed that the dominant microbial communities in the compost products containing the two bacterial agents were primarily composed of bacteria from the phylum Firmicutes, Proteobacteria, and Actinobacteria. Furthermore, the relative abundance of *Pseudomonas*, which can effectively utilize refractory organic matter, and *Alcaligenes*, which promotes the production of humic acid-like substances, is higher in the Guangneng bacteria group than in the EM bacteria group. This difference may explain why the Guangneng bacteria group exhibits a greater degree of humification and aromaticity. In addition, the compost products treated with EM bacteria and Guangneng bacteria contained 17.8% *Bacillus* and 29.3% *Pseudomonas*, respectively, which had the effect of promoting plant growth. Therefore, it can be concluded that the

compost products in this experiment not only contain essential nutrients for plant growth but also exhibit beneficial bacteria, thereby demonstrating potential for producing high-quality organic fertilizers.

Key words: vegetable waste; composting; humus; microorganism

随着农业产业结构调整 and 居民生活水平的不断提高,我国的蔬菜作物种植规模仅次于粮食生产,其产量和种植面积也逐年增长^[1,2]。由于蔬菜的含水率高,叶片容易变形破损,常温下易腐烂,不可避免地产生蔬菜废弃物。据统计,从蔬菜收获到作为商品销售的整个过程中,有占总量30%左右的蔬菜废弃物产生^[3,4]。目前,我国的大部分省份还没有完全建立起高效的垃圾分类回收系统,蔬菜垃圾大多与其他垃圾混合处理,这不仅会对周围的水土气产生污染,菜叶所含的病原菌、虫卵等还会对人体产生危害^[5]。此外,废弃蔬菜同样含有丰富的蛋白、纤维素、木质素等大分子有机物,尚未得到充分利用^[6]。因此,探索恰当高效的蔬菜废弃物处理措施,既能削弱废弃蔬菜对环境的不良影响,也能减少资源浪费。

现有的众多蔬菜废弃物处理方式中,堆肥处理广受关注^[7-9]。堆肥处理通过微生物的代谢活动,达到废弃蔬菜无害化和资源化的双重作用^[10]。然而,由于废弃物碳氮比低、含水率高等特性,导致堆体腐熟缓慢、堆肥产品腐殖度低,难以进行高质量发酵,限制了废弃蔬菜堆肥的应用推广^[11]。因此,探究在适宜微生物催化菌作用下,提高堆体中有机质转化率、堆肥的腐殖化程度有利于提高堆肥产物的品质,推动废弃蔬菜堆肥技术的发展。本文利用废弃蔬菜添加催化菌剂进行堆肥实验,并对废弃蔬菜堆肥产物的理化性质和细菌群落分布进行探讨分析,评估其产物作为有机肥料的可行性,以期为蔬菜废弃物的无害化处理和资源化利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验用于堆肥的蔬菜废弃物由云南昆明呈贡蔬菜冷库提供,主要成分为不符合产品标准的白菜叶,含水率为95.1%,C/N为12.92。添加的催化菌剂有2种,分别是EM堆肥菌和光能活菌母,均为市面上容易获取的粉末状催化发酵菌剂,其中EM堆肥菌所含微生物主要有光合菌、乳酸菌、酵母菌、发酵丝状菌和放线菌;光能活菌母的主要成分为枯草芽孢杆菌、酵母菌、乳酸菌、木霉菌和光合菌群,2种菌剂的有效活菌数均 ≥ 0.50 亿/g。反应容器是具有取样口和排气口的20 L塑料密封发酵桶。

1.2 实验设计

废弃蔬菜堆肥实验包含分别添加等量EM堆肥菌和光能活菌母的两批堆体,每批堆体包含4个重复,记为E1、E2、E3、E4和G1、G2、G3、G4。

用铡刀将25 kg废弃白菜叶制成1~3 cm碎块备用,菌种与白菜碎块按照1:500的质量比混匀,考虑到实验所用废弃白菜叶C/N不高,向各处理的白菜堆添加葡萄糖将物料的C/N调节到25:1,并控制物料含水率为65%。分别称取3 kg调配好的物料放入20 L反应容器,用软管连接排气口和装有2%硼酸溶液的集气瓶以处理堆肥过程产生的气体。关闭桶盖,将发酵桶置于实验基地厂房内以防太阳暴晒。

堆肥总时长为63 d,每7 d翻堆一次,每次取样采集液体样品5 mL和固体样品50 g。妥善保存于-20 ℃和-80 ℃冰箱供理化性质检测和微生物测序。

1.3 基础理化性质测定

废弃白菜含水率的测定采用烘干法测得。样品pH值使用pH计测定。堆体温度使用温度计水银头测定,在堆体上、中、下三部分的中心位置停留数分钟,读数稳定后记录温度并取平均值。

1.4 堆肥样品的处理及测定

固态样品冷干磨碎混匀后取 (2 ± 0.15) mg,用锡舟包裹经元素分析仪(Elementar Vario Micro Cube,德国)测定样品的元素组成。液态样品过0.45 μm 滤膜后分成3份,分别用于样品总有机碳含量(TOC)、紫外-可见光光谱和三维荧光光谱的测定。过膜后的样品用超纯水稀释到10 mg/L以下^[12],通过总有机碳分析仪(Liquid TOC II,德国)测定样品TOC;用超纯水稀释至20 mg/L,通过紫外分光光度计(岛津UV-2600)扫描获得样品在200~600 nm范围的紫外光谱以及分子荧光分光光度计(LS55,Perkin Elmer)扫描测得样品的三维荧光光谱。取堆肥结束后的样品,采用烘干法测定其含水率;采用重铬酸钾容量法测定其有机质含量。

1.5 种子发芽指数的测定

取堆肥结束后的样品,参照NY/T 525-2021《有机肥料》中的方法及计算公式,以萝卜种子为实验对象进行种子发芽指数测试,以超纯水做对照,每个处理组设3个平行。

1.6 微生物多样性测序

选取堆肥前已加菌剂的物料和堆肥结束时的样

品送至北京百迈客生物科技有限公司进行16S rRNA测序。

1.7 数据分析

使用Excel 2019对相关数据进行统计和表格绘制,SPSS 27进行数据分析,Origin 2024作图。

2 结果与讨论

2.1 堆肥过程中温度和pH值的变化

2.1.1 堆肥过程中的温度变化

堆肥温度的变化可以标志性显示堆肥所处的不

同阶段,普遍认为堆体温度大于45℃时进入高温阶段,最高堆温处于50~60℃较好^[13]。与其他生物质堆肥过程类似,白菜叶堆肥也经历了升温阶段、高温阶段、腐熟阶段^[14,15]。由图1可知,在堆肥前期的升温阶段,适宜的温湿度和密封环境为微生物发酵创造了良好条件,堆体温度迅速上升;到第5天,EM堆肥菌和光能活菌母处理的堆体均进入45℃以上的高温阶段,最高温分别达到了65℃和57℃;在堆肥后期,堆体温度逐渐降低,进入腐熟阶段,直至30d后堆体温度趋近室温,表明废弃菜叶已经腐熟。

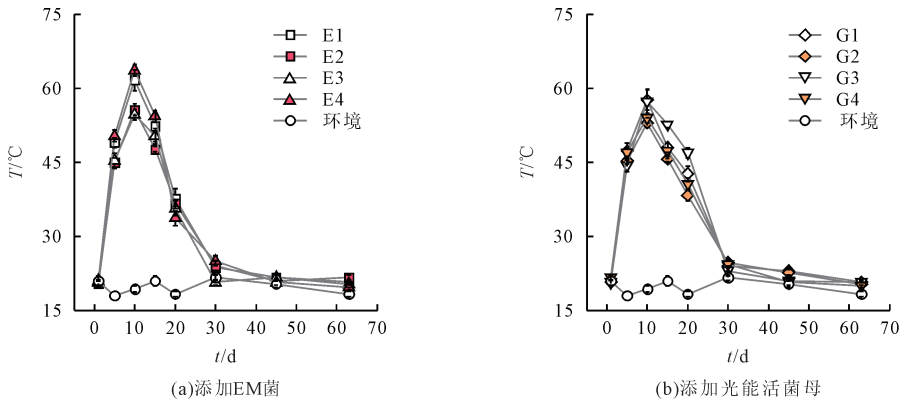


图1 堆肥过程中温度的变化
Fig.1 Changes of temperature during composting

堆体温度也是判定堆肥是否达到无害化要求的指标之一。发酵桶内高温阶段持续了10d左右,其中至少连续5d在50℃以上,满足GB/T 36195-2018《畜禽粪便无害化处理技术规范》中堆肥过程杂草种子和病原体的卫生要求。

2.1.2 堆肥过程中的pH值变化

2种菌剂处理的堆体在堆肥过程中pH值的变化如图2所示。可以看出,堆肥前期2种堆肥产品的pH值从5.3~5.8迅速下降至4.4~4.8,而后开始缓慢上升,最终呈弱碱性。这是因为堆肥初始时嗜温

菌将白菜中的蛋白、糖等有机物水解成小分子有机酸,这一阶段的反应迅速,容易造成有机酸堆积,因此在堆肥的前10天内pH值迅速下降^[16];而水解生成的有机酸会被大量繁殖的微生物消耗转化为碳酸盐,这一过程使得pH值轻微回升^[17];同时含氮有机物也在被分解利用,产生NH₄⁺-N导致pH值逐渐升高^[18]。且7d一次翻堆使得发酵桶中好氧-厌氧交替出现,NH₄⁺-N与NO₃⁻-N相互转化^[19]。堆肥后期pH值维持在中性至弱碱性,与Nakasaki等的研究结果一致^[20]。

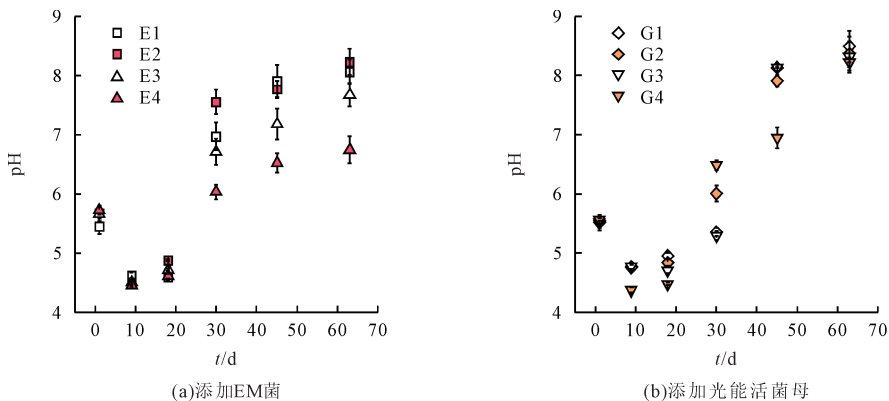


图2 堆体堆肥过程中pH值的变化
Fig.2 Changes of pH value during composting

2.2 堆肥产物的有机质含量、含水率和种子发芽指数

2.2.1 堆肥产物的有机质含量

有机质含量是有机肥的重要指标,根据 NY/T 525-2021《有机肥料》的要求,有机肥的有机质含量应

≥30%。本实验中堆肥产物的有机质含量如表1所示,其中有机质含量最高的是G4组,有机质含量为43.76%,最低的是E4组,有机质含量为36.10%,所有处理组的有机质含量均达到有机肥料的要求。

表1 堆肥产物的有机质含量、含水率和种子发芽指数
Table 1 Organic matter content, moisture content and seed germination index of compost products

样品	E1	E2	E3	E4	G1	G2	G3	G4
有机质含量/%	38.04±0.53	36.37±1.07	37.20±0.89	36.10±0.98	41.94±1.50	43.13±0.97	42.85±1.09	43.76±1.08
含水率/%	41.86±1.50	43.46±1.74	44.28±2.12	41.23±2.22	48.74±0.89	49.98±1.57	48.09±0.81	47.34±0.72
种子发芽指数GI/%	87.61±3.51	85.08±1.28	87.92±2.84	91.07±3.01	95.48±3.41	96.43±2.84	98.32±2.18	96.74±2.69

2.2.2 堆肥产物的含水率

本实验在堆肥前调整各处理的含水率为65%,堆肥终点的含水率在41.23%~49.98%之间,较初始时下降了15.02%~24.72%,是因为在堆肥过程中,水分参与微生物的代谢和有机质的分解,而微生物活动和有机质的分解使得堆体温度升高,水分也会随之蒸发^[21]。添加2种菌剂的堆肥产物含水率存在差异,EM组的含水率更低,可能是因为EM组的堆体温度总体上略高于光能菌处理组,蒸发的水分更多。根据 NY/T 525-2021《有机肥料》中的要求,有机肥的含水率应≤30%,实验所得堆肥产物均未达到这一要求。虽然堆肥前控制了含水率,但是因为堆肥原料白菜废弃物在堆肥过程中还会析出水分,导致堆肥结束时的含水率偏高^[22]。

2.2.3 堆肥产物的种子发芽率

种子发芽指数(GI)是判断堆肥物料是否腐熟以及堆肥产物对种子毒性大小的指标,通常认为GI≥80%时物料完全腐熟且对种子几乎没有毒性^[23,24]。2种菌剂处理的堆体中,GI最高的是G3组,达到98.32%;最低的是E2组,GI为85.08%。从表1可以看出,所有处理组的GI均大于80%,可以认为废弃蔬菜堆肥结束时已完全腐熟,且对植物种子毒性极低,可以作为有机肥料对植物施用。

2.3 堆肥过程元素含量变化

2.3.1 堆肥前后样品的元素含量变化

C、N、H、O元素含量及其比值,尤其是C/N很大程度上能反映堆肥过程中有机化合物的变化。C、N元素是微生物进行能量生产和繁殖活动的营养支撑,堆肥过程中易降解有机质几乎被微生物消耗殆尽,只剩下微生物难以利用的难降解有机质。C素被转化为腐殖质、甲烷、CO₂,N素则是转化为NH₄⁺-N与NO₃⁻-N^[19]。其中气体产物逸散或被收集,部分铵态氮、硝态氮流失到液体产物中导致堆体的C/N发生较大变化。普遍认为,C/N是可以用来评估堆肥腐熟程度的化学指标^[25,26],C/N越低说明堆肥后的腐殖质具有较高的稳定性,腐殖化程度高。表2所示为堆肥实验开始前和结束后样品的元素分析数据。本实验堆肥前C/N调至25:1,堆肥结束时C/N范围在9.29~12.11,说明堆肥过程中微生物生长旺盛,活性高,消耗转化了大量的C源。固相C/N比小于20也是堆肥达到腐熟的必要条件^[27]。

此外,C/H比越大则表明腐殖质中存在越多的芳香结构^[28]。如表2所示,堆肥后各组的C/H比均大于初始的6.09,说明在堆肥过程中生成了更多的芳香族化合物,堆体中的分子缩合度有所提升^[29]。O/C的数值也有升高,意味着堆体的腐殖质中出现了更多含氧官能团^[25]。

表2 堆肥前后样品的元素组成
Table 2 Elemental composition of samples before and after composting

样品	元素组成					质量比		
	C/%	N/%	H/%	S/%	O/%	C/N	C/H	O/C
初始物料	38.21	1.53	6.27	0.34	36.50	24.97	6.09	0.96
E1	32.61	2.79	4.96	0.73	36.13	11.70	6.58	1.11
E2	31.96	2.75	4.80	0.97	39.22	11.62	6.66	1.23
E3	31.43	2.60	4.93	0.38	39.06	12.11	6.38	1.24
E4	30.56	2.59	4.79	1.22	35.32	11.79	6.39	1.16
G1	30.71	3.31	4.52	0.88	38.40	9.29	6.79	1.25
G2	31.75	3.38	4.53	0.54	34.70	9.39	7.01	1.09
G3	30.34	3.04	4.29	0.98	32.53	9.98	7.07	1.07
G4	32.87	2.99	4.82	0.72	34.57	11.01	6.82	1.05

2.3.2 堆肥过程中样品TOC的变化

如图3所示,2种催化菌剂处理的白菜堆肥产物中的TOC均呈下降趋势。TOC含量从45~55 g/L降至20 g/L左右,添加2种菌剂的堆体总有机碳均消耗了50%~60%。堆肥前10天,其TOC迅速下降,说明堆体有机质丰富且微生物活性高,各种生化反应强烈,有机碳分解速度快,对应其pH值在前10天迅

速降低以及温度迅速升高。随后TOC降低趋势减缓甚至趋于稳定,结合堆肥过程中pH及温度变化可知,此时堆体pH值由酸性转为中性或弱碱性,高温阶段也已经结束,有机物的分解接近尾声^[16]。在这个过程中TOC含量出现波动,这可能是翻堆时桶内好氧和厌氧环境交替出现使得堆体中微生物群落变化所致。

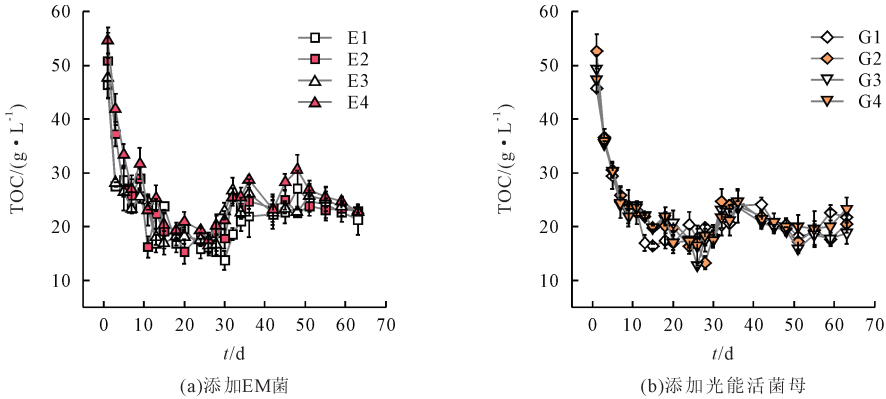


图3 堆肥过程中TOC的变化
Fig.3 Changes of TOC during composting in reactor

2.4 堆肥前后紫外特征波长吸收值的变化

紫外特征波长吸收值 $SUVA_{254} (=A_{254} \times 100/TOC)$ 与有机质的芳香化程度呈正相关,可以在一定程度上表征堆体有机质的结构与组成^[30,31]。通过对比特定波长的紫外-可见光吸光度比值可获得有机质的官能团、分子量大小和腐殖化程度信息^[32,33]。由图4(a)可知,堆体的 $SUVA_{254}$ 值较堆肥前有较大提升,说明在堆肥过程中微生物活动导致有机质结构发生变化,堆体的有机质分子量变大,芳香程度加深。图4(b)所示的 E_{250}/E_{365} 值也是由堆肥初期的5.8~6.3降低至EM组的2.5~3.5和光能菌组的1.5~2,分别下降了46%和65%,说明废弃蔬菜中的有机质经过堆肥逐渐转变为稳定的腐殖质。此外,添加光能活菌母分组的 $SUVA_{254}$ 的平均值和最大值明显高于添加EM菌的分组,而 E_{250}/E_{365} 值则明显低于EM组,说明光能活菌母处理的堆体整体腐殖化程度更高,堆体的芳香程度

也较EM菌组更高,这与前文中元素分析所得的C/H结果一致。

E_{253}/E_{203} 可以反映芳香环上的取代基种类及取代程度,当 E_{253}/E_{203} 增大时,芳香环上的取代基中羟基、羰基、羧基和酯类的含量增加,反之则是取代基中脂肪链含量增多^[34]。如图4(c)所示,在堆肥前期, E_{253}/E_{203} 值不到0.1,说明取代基中的官能团多为脂肪链;堆肥结束时, E_{253}/E_{203} 值达到0.35左右,说明取代基中出现了更多的含氧官能团,微生物活动使得芳香环上的脂肪链烃被脱氢加氧生成 $C=O$ 、 $-OH$ 、 $-COOH$ 等含氧官能团^[35]。

2.5 堆肥过程中不同时期样品的三维荧光光谱

三维荧光光谱能获得 λ_{Ex} 和 λ_{Em} 同时变化时的荧光强度信息,特定类型DOM分子会在不同区域产生特定荧光峰^[27];根据 λ_{Ex} 和 λ_{Em} 的积分区域, EEM 光谱划分为5个区域,区域 I~V 分别为类酪氨酸、类色氨酸

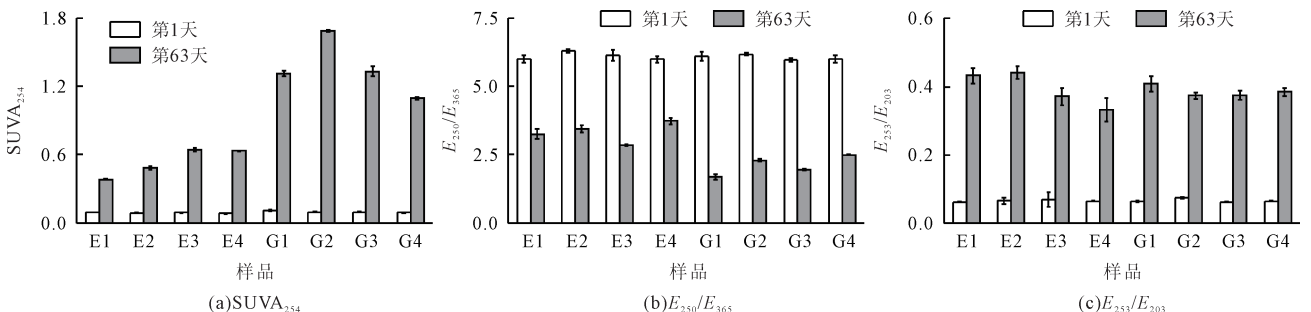
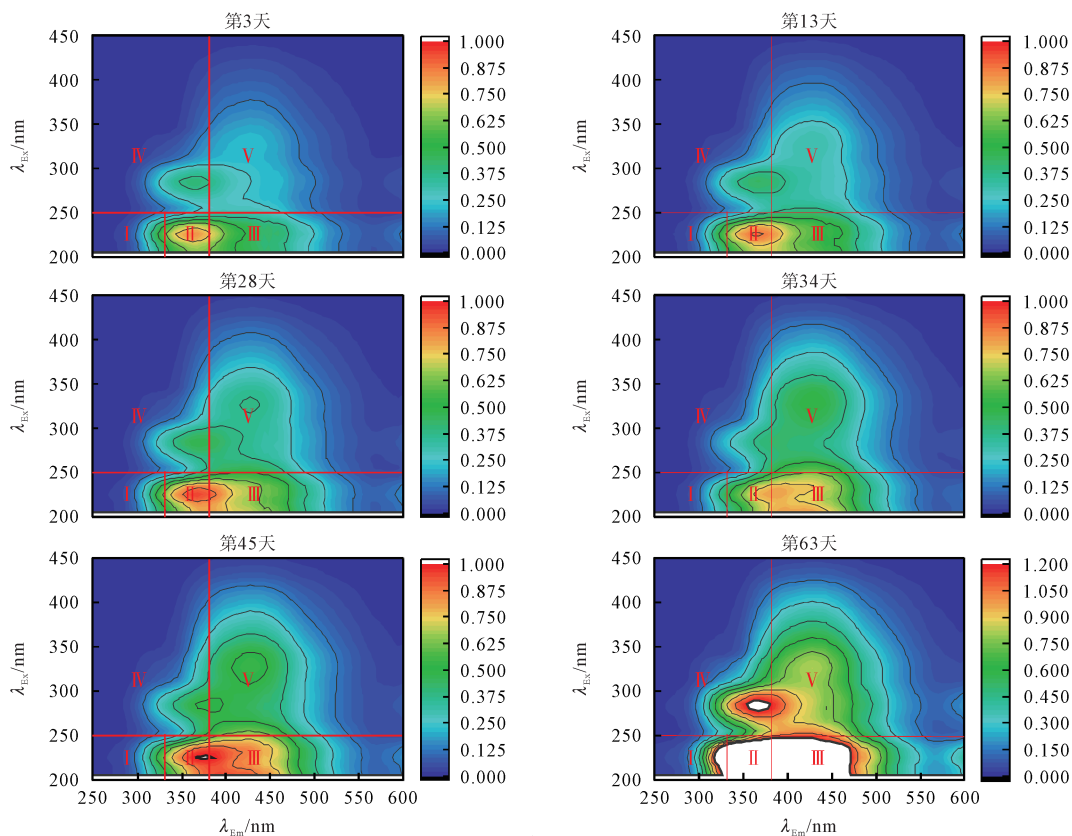


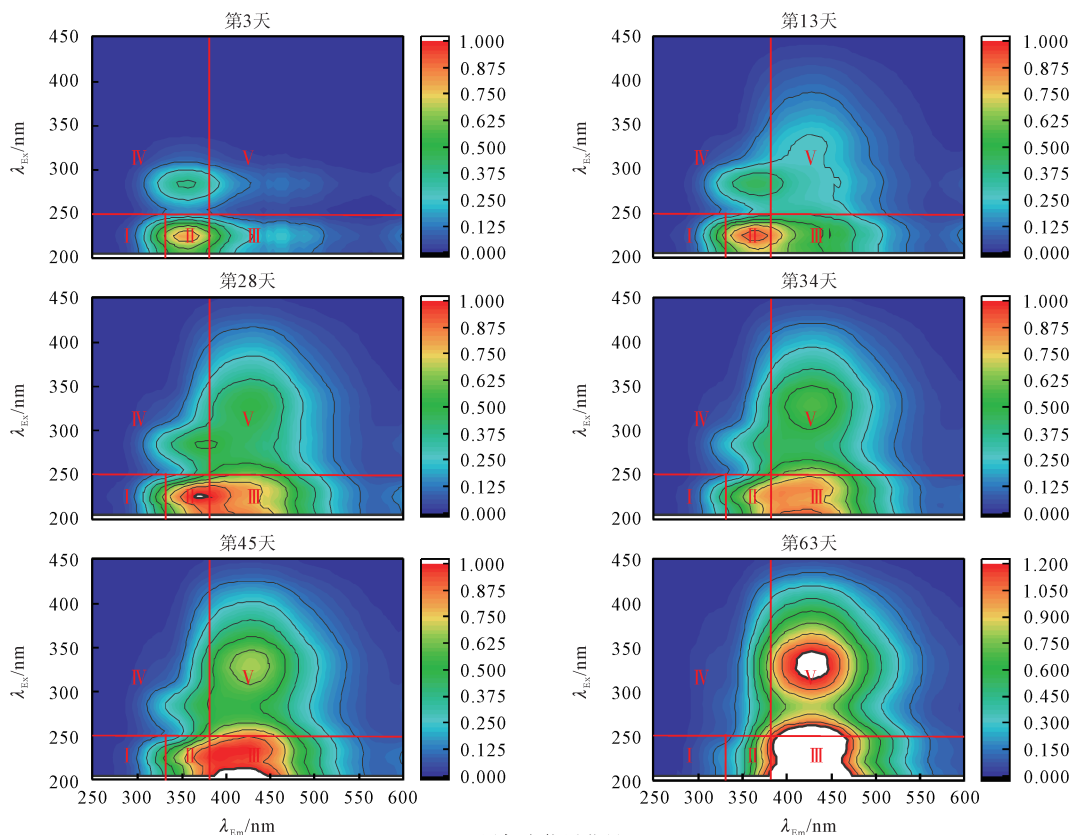
图4 堆肥前后紫外特征值
Fig.4 UV characteristic values before and after composting

酸、类富里酸、类可溶性微生物代谢物和类腐殖酸物质^[36]。

由图5可知,堆肥初期,堆体样品的荧光峰主要出现在区域 I (类酪氨酸)和II (类色氨酸),而V区(类



(a)添加EM菌



(b)添加光能活菌

图5 堆肥产品三维荧光光谱
Fig.5 Three-dimensional fluorescence spectra of compost products

腐殖酸)基本没有出现荧光峰,随着发酵的进行,Ⅲ区、Ⅳ区、Ⅴ区逐步出现荧光峰。这是因为废弃白菜中类酪氨酸等类蛋白质被微生物降解,微生物在分解这些有机物的同时也利用其中的C、N等元素生长繁殖,微生物代谢物的荧光峰也逐渐增强,到堆肥后期大部分易降解有机物逐渐合成分子量更大的类富里酸和类腐殖酸物质,堆体更加稳定^[37,38]。此时,类富里酸和类腐殖酸物质成为主体部分,微生物代谢产物也不断堆积。结合紫外特征波长的数据,进一步说明堆肥过程中有机化合物中的分子量增大,芳香化程度增高^[39,40]。

通过对比图5(a)、5(b)可知,在相同堆肥时间下,添加光能活菌母的处理在Ⅴ区的荧光强度明显高于添加EM菌的分组,而在Ⅳ区则是添加EM菌的分组荧光强度更高,说明2种菌剂处理下堆肥产物的类可溶性微生物代谢物和类腐殖酸物质的浓度存在较大

差异。结合前文中TOC和紫外光谱的信息可以认为2种菌在堆肥过程中降解有机质的速率没有太大差别,但是在聚合有机质分子和推进堆体腐化程度的能力上,光能活菌母优于EM菌剂。

2.6 添加2种菌剂的堆体细菌群落分布

由表3可知,样品的有效序列覆盖率均大于0.99,说明样品的测序结果可以代表堆体微生物群落的真实情况^[41]。Alpha多样性可以反映微生物群落的丰度和多样性,Chao1指数与微生物群落丰度正相关;Simpson与Shannon指数则用于衡量物种多样性,受样品群落中物种丰富度和物种均匀度的影响。从表3可以看出,添加EM菌剂的堆体不论堆肥前后,其Chao1指数、Shannon指数都比光能活菌母处理组的数值高,说明前者堆肥前后的产物中微生物数量和种类都要比添加光能活菌母的多。

表3 Alpha多样性指数
Table 3 Alpha diversity index

样品	Chao1 指数	Simpson 指数	Shannon-Wiener 指数	Coverage
EM 菌组堆肥前	1 163.43	0.968 2	6.574 9	0.999
光能活菌母组堆肥前	1 024.93	0.954 5	6.299 1	0.998
EM 菌组堆肥后	311.00	0.949 1	5.484 8	1.000
光能活菌母组堆肥后	179.00	0.938 3	4.872 7	1.000

由图6可知,堆肥前EM菌组堆肥物料中含有46.22%的变形菌门(Proteobacteria)、25.67%的厚壁菌门(Firmicutes)、17.12%的拟杆菌门(Bacteroidota)和10.96%的放线菌门(Actinobacteria);光能菌组含有48.01%的变形菌门、29.71%的厚壁菌门、16.69%的拟杆菌门和5.56%的放线菌门。而堆肥结束时添加2种菌剂的堆肥产品中微生物群落相对丰度较高的菌群为厚壁菌门、变形菌门和放线菌门,在EM菌处理的堆体中厚壁菌门、变形菌门和放线菌门的相对丰度分别为62.1%、11.3%、11.2%,在光能菌处理的堆体中它们的相对丰度分别为厚壁菌门37%、变形菌门50.1%、放线菌门12.1%。这几个菌门在之前的研究中也是作为堆肥的优势菌群被报道^[42,43]。厚壁菌门中耐热的枯草芽孢杆菌能在高温堆肥中有效降解蛋白质、多糖、木质素等有机物,变形菌门和放线菌门中的一些细菌能够有效降解纤维素和木质素^[15,44]。厚壁菌门通常在嗜热阶段增加,这表明厚壁菌门能够很好地适应高温环境,但在冷却和成熟阶段其丰度将会减少,而变形菌门则会在温度降低时被观察到丰度增加,放线菌门通常出现在整个堆肥过程^[45,46],正是它们之间的交替和演变使得堆体中有机物能被充分利用。有研究认为厚壁菌门的芽孢杆菌属(*Bacillus*)能够分泌多种酶以促进纤维素和木质素的分解,变形菌门的假单胞菌属

(*Pseudomonas*)同样被认为能够高效降解木质素和纤维素类物质^[47]。在图6(b)中,EM菌组中厚壁菌门的芽孢杆菌属相对丰度为5.74%,变形菌门的假单胞菌属的相对丰度为0.82%;光能菌组中芽孢杆菌属相对丰度为16.87%,假单胞菌属的相对丰度为2.34%。图6(d)中,EM菌组中芽孢杆菌属相对丰度为17.81%,假单胞菌属的相对丰度为1.73%;光能菌组中芽孢杆菌属相对丰度为0.02%,假单胞菌属的相对丰度为29.30%。显然堆肥前后光能菌组中能降解难降解有机物的细菌的相对丰度均高于EM菌组,可以推测在前期易降解有机物利用完后,拥有更多具有降解纤维素和木质素细菌的光能菌组对剩余的难降解有机物进行了更深入的利用,这或许能够解释为何EM菌组细菌数量和种类均比光能菌母组高,但是腐殖化程度却更低。

堆肥前2个处理中的微生物的种类在属水平上差距并不大(图6(b)),丰度前10的属中有8个菌属是2个处理中都存在的,其中芽孢杆菌属(EM菌组5.74%,光能菌组16.87%)、假单胞菌属(EM菌组0.82%,光能菌组2.34%)和葡萄球菌属(EM菌组20.28%,光能菌组8.73%)在丰度上有明显差距。堆肥结束后,2个堆肥产品中微生物在属水平上的种类差别很大(图6(d))。在添加EM菌处理的堆肥产物中,



注: EM为添加EM菌剂的处理组, GN为添加光能活菌母的处理组。

图6 堆肥前后样品中门和属水平细菌群落分布

Fig.6 Bacterial community distribution in before and after composting at the phylum and genus level

厚壁菌门的芽孢杆菌属(*Bacillus*)丰度最高,达到17.8%;而在光能菌处理的堆肥产物中,相对丰度最高的是变形菌门的假单胞菌属(*Pseudomonas*),其相对丰度为29.3%。2种菌都是堆肥中常见的促进纤维素和木质素降解的细菌^[48]。芽孢杆菌属和假单胞菌属的细菌不仅对有机物有强降解能力,还会在堆肥过程中产生对多种植物病原菌有抑制作用的抗菌性次级代谢产物,具有优良的生物防治效果^[49,50]。此外,芽孢杆菌属和假单胞菌属被鉴定为植物根际促生菌(PG-PR),对植物生长表现出促进功效^[51,52],因而本实验的堆肥产物中含有多种高丰度有益细菌。

堆肥结束后样品的微生物在相对丰度前10的属中,仅棒状杆菌属(*Corynebacterium*)和产碱杆菌属(*Alcaligenes*)同时出现在添加这2种菌剂的堆肥产品中。其中,棒状杆菌属的相对丰度差别不大,分别为EM菌组的11.0%和光能菌组的11.8%;然而,产碱杆菌属的相对丰度差异较大,EM菌组仅为5.9%,而光能菌组则为10.9%。有研究指出^[53],产碱杆菌属与类腐殖酸物质的生成呈正相关关系。光能菌组中产碱杆菌属的相对丰度比EM菌组高出近一倍,这可能与EM菌处理堆体的微生物丰度和多样性均高于光能菌母处理的堆体,而在三维荧光中V区(类腐殖酸物质)

的荧光强度却低于光能菌组有关。

3 结论

(1)加入EM催化菌剂和光能活菌母的废弃蔬菜堆肥产物符合堆肥无害化的国家标准,有机质含量和种子发芽指数符合有机肥料的要求。2种菌剂的添加使堆体的降解效果良好,腐熟程度和芳香化程度较高。堆肥结束后,产品中富含大量富里酸和腐殖酸,可以作为有机肥对作物喷施或灌根。

(2)EM菌组的堆肥产物中细菌总数和种类更多,但是光能活菌母处理的堆体腐殖化程度和堆肥产物的芳香性更高,原因可能是光能菌处理组中对难降解有机物具有更强降解能力的芽孢杆菌属(*Bacillus*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)细菌占比更大,可以促进类腐殖酸物质生成的产碱杆菌属(*Alcaligenes*)细菌的相对丰度也比EM菌组高。

(3)厚壁菌门的芽孢杆菌属(*Bacillus*)和变形菌门的假单胞菌属(*Pseudomonas*)分别是添加EM菌剂和光能活菌母处理的堆肥产物中属水平相对丰度最高的细菌。芽孢杆菌属和假单胞菌属均含有利于植物生长的植物根际促生菌,因而本实验的堆肥产品有望成为含有高丰度有益菌群的有机肥。

[参考文献]

- [1] 韩雪,常瑞雪,杜鹏祥,等. 不同蔬菜种类的产废比例及性状分析[J]. 农业资源与环境学报, 2015,32(4):377-382.
Han Xue, Chang Ruixue, Du Pengxiang, et al. Straw coefficient and properties of different vegetable wastes[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(4): 377-382.
- [2] 辛竹琳,崔彦娟,杨小微,等. 全球蔬菜产业现状及中国蔬菜育种发展路径研究进展[J]. 分子植物育种, 2022,20(9): 3122-3132.
Xin Zhulin, Cui Yanjuan, Yang Xiaowei, et al. Current situation of global vegetable industry and research progress of vegetable breeding development path in China[J]. Molecular Plant Breeding, 2022,20(9):3122-3132.
- [3] Li J P, Wan D D, Jin S R, et al. Fast treatment and recycling method of large-scale vegetable wastes[J]. Science of the Total Environment, 2023,892:164308.
- [4] Lu X L, Yang Y X, Hong C L, et al. Optimization of vegetable waste composting and the exploration of microbial mechanisms related to fungal communities during composting[J]. Journal of Environmental Management, 2022,319:115694.
- [5] Sánchez M, Laca A, Laca A, et al. Value-added products from fruit and vegetable wastes: a review[J]. CLEAN – Soil, Air, Water, 2021,49(8):2000376.
- [6] Zhang Q, Lu Y, Zhou X N, et al. Effect of different vegetable wastes on the performance of volatile fatty acids production by anaerobic fermentation[J]. Science of the Total Environment, 2020,748:142390.
- [7] 杜鹏祥,韩雪,高杰云,等. 我国蔬菜废弃物资源化高效利用潜力分析[J]. 中国蔬菜, 2015(7):15-20.
Du Pengxiang, Han Xue, Gao Jieyun, et al. Potential analysis on high efficient utilization of waste vegetable resources in China[J]. China Vegetables, 2015(7):15-20.
- [8] Jiang X R, Xie Y D, Liu M G, et al. Study on anaerobic co-digestion of municipal sewage sludge and fruit and vegetable wastes: methane production, microbial community and three-dimension fluorescence excitation-emission matrix analysis[J]. Bioresource Technology, 2022,347:126748.
- [9] 罗娟,赵立欣,于佳动,等. 我国蔬菜废弃物利用研究进展[J]. 中国瓜菜, 2024,37(3):1-8.
Luo Juan, Zhao Lixin, Yu Jiadong, et al. Advances on utilization of vegetable waste in China[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2024,37(3):1-8.
- [10] Hu N J, Wang B J, Gu Z H, et al. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016,223:115-122.
- [11] Meng X Y, Yan J, Zuo B, et al. Full-scale of composting process of biogas residues from corn stover anaerobic digestion: physical-chemical, biology parameters and maturity indexes during whole process[J]. Bioresource Technology, 2020,302:122742.
- [12] 段明利. 废弃蔬菜叶厌氧堆肥产品分析及其对植物的促生效应[D]. 昆明:昆明理工大学, 2023:24-25.
Duan Mingli. Analysis of Anaerobic Composting Products of Waste Vegetable Leaves and Their Growth-promoting Effect on Plants[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023: 24-25.
- [13] 梅娟,段恩帅,苏良湖,等. 过硫酸钾强化蔬菜废弃物好氧堆肥的通风速率优化及其微生物特征[J]. 江苏农业科学, 2023,51(24):203-211.
Mei Juan, Duan Enshuai, Su Lianghu, et al. Ventilation rate optimization and microbial characteristics of vegetable waste aerobic composting enhanced with potassium persulfate[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023,51(24):203-211.
- [14] Henry A B, Maung C E H, Kim K Y. Metagenomic analysis reveals enhanced biodiversity and composting efficiency of lignocellulosic waste by thermoacidophilic effective microorganism (tEM)[J]. Journal of Environmental Management, 2020,276:111252.
- [15] 武肖莎,李再兴,黄亚丽,等. 高温木质纤维素降解菌的筛选鉴定及其堆肥应用[J]. 安徽农业科学, 2021,49(20):68-71.
Wu Xiaosha, Li Zaixing, Huang Yali, et al. Screening, identification and its composting application of high-temperature strain for degrading lignocellulose[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021,49(20):68-71.
- [16] 马闯,扈斌,刘福勇,等. 有机废弃物好氧堆肥过程中微生物及酶活性变化状况综述[J]. 环境工程, 2019,37(9):159-164.
Ma Chuang, Hu Bin, Liu Fuyong, et al. Review on changes of microorganisms and enzyme activities during aerobic composting of organic waste[J]. Environmental Engineering, 2019,37(9):159-164.
- [17] Yan H L, Yang H X, Li K C, et al. Biochar addition modified carbon flux and related microbiota in cow manure composting[J]. Waste and Biomass Valorization, 2023, 14(3): 847-858.
- [18] Xu Z C, Li G X, Huda N, et al. Effects of moisture and carbon/nitrogen ratio on gaseous emissions and maturity during direct composting of cornstalks used for filtration of anaerobically digested manure concentrate[J]. Bioresource Technology, 2020,298:122503.
- [19] 李丹阳,李恕艳,李国学,等. 添加剂对猪粪秸秆堆肥的氮素损失控制效果[J]. 农业工程学报, 2016,32(S2):260-267.
Li Danyang, Li Shuyan, Li Guoxue, et al. Effect of additives on nitrogen loss control of pig manure straw compost[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(S2):260-267.
- [20] Nakasaki K, Yaguchi H, Sasaki Y, et al. Effects of pH con-

- trol on composting of garbage[J]. Waste Management & Research, 1993,11(2):117-125.
- [21] 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 Dekun, Zhang Longli, Li Yongbin, 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.
- [22] 刘文杰,王黎明,沈玉君,等. 碳氮比对蔬菜废弃物好氧发酵腐熟度及臭气排放的影响[J]. 环境工程, 2020,38(6):233-239.
- Liu Wenjie, Wang Liming, Shen Yujun, et al. Effects of carbon to nitrogen ratio on maturity and odor emission in aerobic fermentation of vegetable waste[J]. Environmental Engineering, 2020,38(6):233-239.
- [23] 罗渊,袁京,李国学,等. 种子发芽试验在低碳氮比堆肥腐熟度评价方面的适用性[J]. 农业环境科学学报, 2016,35(1): 179-185.
- Luo Yuan, Yuan Jing, Li Guoxue, et al. Applicability of seed germination test to evaluation of low C/N compost maturity[J]. Journal of Agro-environment Science, 2016,35(1): 179-185.
- [24] Wang H B, Han L R, Feng J T, et al. Evaluation of microbially enhanced composting of *Sophora flavescens* residues[J]. Journal of Environmental Science and Health-Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2016,51(2):63-70.
- [25] Ngo P T, Rumpel C, Ngo Q A, et al. Biological and chemical reactivity and phosphorus forms of buffalo manure compost, vermicompost and their mixture with biochar[J]. Bioresource Technology, 2013,148:401-407.
- [26] Yang Y J, Du W, Ren X N, et al. Effect of bean dregs amendment on the organic matter degradation, humification, maturity and stability of pig manure composting[J]. Science of the Total Environment, 2020,708:134623.
- [27] Onwosi C O, Igbokwe V C, Odimba J N, et al. Composting technology in waste stabilization: on the methods, challenges and future prospects[J]. Journal of Environmental Management, 2017,190:140-157.
- [28] 李丹,何小松,席北斗,等. 堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究[J]. 环境科学, 2016,37(9):3660-3669.
- Li Dan, He Xiaosong, Xi Beidou, et al. Composition and evolution characteristics of dissolved organic matter during composting process[J]. Environmental Science, 2016,37(9): 3660-3669.
- [29] Pietronave S, Fracchia L, Rinaldi M, et al. Influence of biotic and abiotic factors on human pathogens in a finished compost[J]. Water Research, 2004,38(8):1963-1970.
- [30] 程澳,陈丹,任兰天,等. 蘑菇渣和稻秸堆肥中不同分子量水溶性有机物含量分布和光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2024,44(5): 1330-1337.
- Cheng Ao, Chen Dan, Ren Lantian, et al. The distributions and spectral characteristics of molecular weight-fractionated dissolved organic matter derived from mushroom residue and rice straw compost[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024,44(5): 1330-1337.
- [31] 张桐,何小松,李猛,等. 开垦和长期施肥下青海黑钙土中腐殖质的光谱特征[J]. 土壤学报, 2019,56(2):398-407.
- Zhang Tong, He Xiaosong, Li Meng, et al. Spectral characteristics of humus in chernozem in Qinghai-Tibet Plateau under reclamation and long-term fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019,56(2):398-407.
- [32] 崔东宇,何小松,席北斗,等. 牛粪堆肥过程中水溶性有机物演化的光谱学研究[J]. 中国环境科学, 2014,34(11):2897-2904.
- Cui Dongyu, He Xiaosong, Xi Beidou, et al. Spectrum analysis on the evolution of dissolved organic matter during cattle manure composting[J]. China Environmental Science, 2014,34(11):2897-2904.
- [33] Liu R B, Hao X D, van Loosdrecht M C M, et al. Dynamics of humic substance composition during anaerobic digestion of excess activated sludge[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2019,145:104771.
- [34] Ren X N, Wang Q, Li R H, et al. Effect of clay on greenhouse gas emissions and humification during pig manure composting as supported by spectroscopic evidence[J]. Science of the Total Environment, 2020,737:139712.
- [35] Sun B, Li Y S, Song M J, et al. Molecular characterization of the composition and transformation of dissolved organic matter during the semi-permeable membrane covered hyperthermophilic composting[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022,425:127496.
- [36] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. Environmental Science and Technology, 2003,37(24):5701-5710.
- [37] 陈丹,程澳,余旭芳,等. 不同类型堆肥中腐殖酸与富里酸的光谱特性和分子量分布[J]. 生态与农村环境学报, 2024,40(2): 276-284.
- Chen Dan, Cheng Ao, Yu Xufang, et al. Spectral characteristics and molecular weight distribution of humic acid and fulvic acid derived from different composts[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(2): 276-284.
- [38] 赵芹,程东会,王燕,等. 不同物料堆肥过程中溶解性有机质和腐殖酸的物质结构演化时序差异分析[J]. 环境工程技术学报, 2023,13(4):1514-1524.
- Zhao Qin, Cheng Donghui, Wang Yan, et al. Analysis of the time series difference of the material structure evolution of

- DOM and humic acid during composting of different materials[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023,13(4):1514-1524.
- [39] 卞荣超,杨铎森,辛寒晓,等. 蔬菜瓜果秸秆高效腐熟剂研制及其对堆肥腐植酸形成的影响[J]. *腐植酸*, 2024(3): 31-41.
- Bian Rongchao, Yang Huamiao, Xin Hanxiao, et al. Development of efficient decomposition agent for vegetable and melon straws and its effects on the formation of humic acid during composting[J]. *Humic Acid*, 2024(3): 31-41.
- [40] 张强,席北斗,杨津津,等. 不同物料堆肥富里酸的结构特征的研究[J]. *中国环境科学*, 2021,41(2):763-770.
- Zhang Qiang, Xi Beidou, Yang Jinjin, et al. Structural characteristics of fulvic acid composted with different materials [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(2):763-770.
- [41] 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 Yanan, Wang Xiaohui, Cao Qi, 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.
- [42] 张宏. 整合多组学探究高温堆肥和低温高原生境微生物群落及功能适应机制[D]. 济南:山东大学, 2023:25-27.
- Zhang Hong. Integrating Multiomics to Explore Microbial Communities and Functional Adaptation Mechanism in High Temperature Composting and Low Temperature Plateau Habitat[D]. Jinan: Shandong University, 2023:25-27.
- [43] Zhu P C, Li Y C, Gao Y F, et al. Insight into the effect of nitrogen-rich substrates on the community structure and the co-occurrence network of thermophiles during lignocellulose-based composting[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 319:124111.
- [44] 邹秀琴,赵承森,娄钰静,等. 不同碳氮比杨梅枝条堆肥的养分含量和细菌群落变化[J]. *中国南方果树*, 2024,53(2): 103-111.
- Zou Xiuqin, Zhao Chengsen, Lou Yujing, et al. Effects of different carbon and nitrogen ratios on nutrient content and bacterial community changes in compost made from *Morella rubra* branches[J]. *South China Fruits*, 2024,53(2): 103-111.
- [45] Greff B, Szigeti J, Nagy Á, et al. Influence of microbial inoculants on co-composting of lignocellulosic crop residues with farm animal manure: a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,302:114088.
- [46] Wu Y P, Chen Y X, Shaaban M, et al. Evaluation of microbial inoculants pretreatment in straw and manure co-composting process enhancement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,239:118078.
- [47] 王懿颖,李家辉,张惠,等. 蔬菜废弃物堆肥中耐高温菌 QK 降解木质纤维素的特征[J]. *河北农业大学学报*, 2024,47(2): 65-72.
- Wang Yiyang, Li Jiahui, Zhang Hui, et al. Characteristics of lignocellulose degradation by thermotolerant bacteria QK in vegetable waste composting[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2024,47(2): 65-72.
- [48] Mao H, Lyu 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.
- [49] Dionne A, Tweddell R J, Antoun H, et al. Effect of non-aerated compost teas on damping-off pathogens of tomato[J]. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2012,34(1):51-57.
- [50] 韩超,赵青松,李欣欣,等. 堆肥提取液的高效利用研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(1):8-16.
- Han Chao, Zhao Qingsong, Li Xinxin, et al. Research progress on efficient utilization of compost extract[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(1):8-16.
- [51] Basu A, Prasad P, Das S N, et al. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: recent developments, constraints, and prospects[J]. *Sustainability*, 2021,13(3):1140.
- [52] 康贻军,程洁,梅丽娟,等. 植物根际促生菌作用机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 232-238.
- Kang Yijun, Cheng Jie, Mei Lijuan, et al. Action mechanisms of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 232-238.
- [53] 余英兰. 类芬顿联合 EM 菌强化蝇沙堆肥腐殖质的形成[D]. 雅安:四川农业大学, 2023:37-39.
- Yu Yinglan. Fenton-like Bacteria Combined with EM Bacteria Enhancing the Formation of Humus in Fly Sand Compost[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2023:37-39.