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

卞荣超[1] 杨铧淼[1] 辛寒晓[2] 孙国科[2] 刘丽英[1] 孙中涛[1*]

1 山东农业大学生命科学学院 泰安 271018

2 山东佐田氏生物科技有限公司 济南 250000

摘 要：为加快蔬菜瓜果秸秆分解，提高腐熟质量，提升其综合利用水平，本文筛选蔬菜瓜果秸秆高效降解菌株并构建出复合菌群 YC-M，其菌系组成为空气芽孢杆菌（*Bacillus aerius*）、枯草芽孢杆菌（*Bacillus subtilis*）和贝莱斯芽孢杆菌（*Bacillus velezensis*）。复合菌群 YC-M 具有较强的产纤维素酶能力，其羧甲基纤维素酶（CMCase）、滤纸酶（FPAase）和 β 葡萄糖苷酶（β-Gase）酶活力分别可达 21.71 U/mL、17.98 U/mL 和 12.56 U/mL，42 h 内可将滤纸完全崩解，秸秆腐熟 30 d 失重率可达 49.21%。蔬菜瓜果秸秆堆肥时，接种复合菌群 YC-M 可提高堆肥温度和加快总有机碳（TOC）下降速度，促进腐植酸的合成，提高成熟堆肥中总腐植酸、游离腐植酸和黄腐酸的含量，这有利于加速堆肥进程和提高肥力。复合菌群 YC-M 综合应用效果优于市售腐熟剂和接种成熟堆肥的传统堆肥方式，其推广应用有助于提升蔬菜瓜果秸秆的综合利用水平。

关键词：蔬菜瓜果秸秆；腐熟剂；复合菌群；堆肥；综合利用

中图分类号：S141.4 **文章编号：**1671-9212(2024)03-0031-11

文献标识码：A **DOI：**10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2024.03.006

Development of Efficient Decomposition Agent for Vegetable and Melon Straws and Its Effects on the Formation of Humic Acid during Composting

Bian Rongchao[1], Yang Huamiao[1], Xin Hanxiao[2], Sun Guoke[2], Liu Liying[1], Sun Zhongtao[1*]

1 College of Life Science, Shandong Agricultural University, Tai'an, 271018

2 Shandong Ztser Biological Technology Co. Ltd., Jinan, 250000

Abstract: In order to accelerate the decomposition of vegetable and melon straws, improve the quality of composting, and enhance its comprehensive utilization level, efficient degradation strains of vegetable and melon straw was screened and a composite microbial group YC-M including *Bacillus aerius*, *Bacillus subtilis*, and *Bacillus velezensis* was constructed. YC-M exhibited a strong ability to produce cellulase, and its carboxymethyl cellulase (CMCase), filter paper enzyme (FPAase), and β-glucosidase (β-Gase) activity reached 21.71 U/mL, 17.98 U/mL and 12.56 U/mL, respectively. The filter paper could be completely disintegrated within 42 hours, and the weight loss rate of the straw within 30 days of maturity reached 49.21%. The inoculation of YC-M increased the temperature and TOC decrease rate during vegetable and melon straw composting, promoted the synthesis of humic acids, and increased the content of total humic

[基金项目] 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目：小麦专用生物有机肥料研制与产业化应用（项目编号 2023TSGC0171）；山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目：连作障碍土壤改良菌剂生产和应用技术研究与示范（项目编号 2022TSGC1008）；山东省济南市农业应用技术创新项目：新型蔬菜抗重茬生物有机水溶肥生产技术研究与产业化应用（项目编号 CX202213）。

[收稿日期] 2023-09-27

[作者简介] 卞荣超，女，1999 年生，硕士研究生，主要从事微生物肥料的生产与应用技术研究，E-mail：bianrongchao2023@163.com。*通讯作者：孙中涛，男，副教授，E-mail：zhtsun@sdau.edu.cn。

acids, free humic acids, and fulvic acids in mature compost, which all was beneficial for accelerating the composting process and improving fertility. The comprehensive application effect of the YC-M was better than that of traditional composting methods such as the inoculation of commercial decomposition agent and mature compost. Its promotion and application contributed to improving the comprehensive utilization level of vegetable and melon straws.

Key words: vegetable and melon straw; decomposition agent; compound microbial communities; composting; comprehensive utilization

近年来，我国蔬菜瓜果种植面积逐渐扩大，随之产生的蔬菜瓜果秸秆也越来越多。蔬菜瓜果秸秆中除含有纤维素、半纤维素和木质素外，还含有蛋白质、小分子碳水化合物和无机盐等化学成分，是一种优质的生物质资源。但因其综合利用不及时，大量蔬菜瓜果秸秆被遗弃在田间地头，不仅造成环境污染，也严重影响蔬菜瓜果产业的可持续发展。秸秆还田与堆肥处理是蔬菜瓜果秸秆综合利用的主要方式。秸秆还田可以提高土壤养分，改善土壤生态[1]。直接粉碎还田是最经济的秸秆还田方式[2]，但还田数量过多会影响土壤墒情，而且秸秆中的虫卵和病原菌等有害生物还会危害下茬作物[3]。与秸秆还田相比，高温堆肥可杀死有害生物，加速秸秆有机质的腐殖化，是更科学、更安全的秸秆综合利用方式[4]。

无论是秸秆还田还是堆肥处理，腐熟剂均得到了广泛使用。秸秆还田时使用秸秆腐熟剂可显著加快秸秆腐熟速度，减轻秸秆囤积对作物生长的不利影响，为作物的生长提供更多营养物质[5，6]。秸秆堆肥时使用腐熟剂可提高堆肥温度，缩短堆肥周期，促进腐植酸的合成，提高堆肥质量[7]。但目前市售腐熟剂主要是针对小麦、玉米等粮食作物秸秆而研发，针对蔬菜瓜果秸秆研发的产品较少。蔬菜瓜果秸秆与粮食作物秸秆在化学成分和组织结构上都存在一些差别，开发蔬菜瓜果秸秆专用腐熟剂有助于提高腐熟效率，对提高蔬菜瓜果秸秆的综合利用水平具有重要意义。

本研究针对西瓜、甜瓜、番茄等蔬菜瓜果秸秆筛选高效降解菌株，并进行优化组合，研制高效复合菌群腐熟剂，并通过堆肥试验验证其应用效果。

1 材料与方法

1.1 材料

供试秸秆：西瓜、甜瓜、番茄、小油菜等蔬菜瓜果秸秆，采集于泰安市农田。堆肥试验所用西瓜、甜瓜、番茄等蔬菜瓜果的混合秸秆养分含量为有机质 77.48%、总氮 1.62%、碳氮比 27.843。试验所用成熟堆肥是以西瓜、甜瓜、番茄等蔬菜瓜果秸秆为原料，接种市售腐熟剂经 60 d 腐熟而制备。市售腐熟剂购自当地市场，有效微生物为枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、黑曲霉和酵母菌等木质纤维素降解菌株，总有效活菌数为 2×10^8 cfu/g。其菌系组成和有效活菌数具有代表性，这是因为目前我国市场上的腐熟剂产品在农业农村部登记的有效微生物种类 50% 以上均为枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、黑曲霉和酵母菌等微生物的一种或多种；其有效活菌数符合 NY 609—2002《有机物料腐熟剂》的要求。

1.2 蔬菜瓜果秸秆降解菌株的筛选与鉴定

采用 CMC-Na 培养基从土壤中分离木质纤维素降解菌株，记录所分离菌株的透明圈直径（D）和菌落直径（d），优选 D/d 值较大的菌株。初筛出 10 株纤维素降解菌，编号分别为 YC1、YC2、YC3、YC5、YC8、YC23、YC29、YCB1、YCB2、YCB3。然后再依次通过滤纸崩解试验、产纤维素酶试验和秸秆腐熟试验进行复筛，优选蔬菜瓜果秸秆高效降解菌株，对所筛菌株采用 16S rRNA 测序法进行鉴定[8]。

1.2.1 滤纸崩解试验

将所筛菌株于液体 LB 培养基中培养完成后，

用移液枪吸取 3 mL 菌液于 100 mL 滤纸崩解培养基中，以 3 mL 无菌水接入培养基作对照，37 ℃、150 r/min 振荡培养一周，观察滤纸的完整度。

1.2.2 产纤维素酶试验

将菌液按 5% 接种量接入到发酵产酶培养基中，37 ℃、180 r/min 培养 3 d 后，离心，获得上清液，即为粗酶液。采用 DNS 显色法测定粗酶液中的羧甲基纤维素酶（CMCase）、滤纸酶（FPAase）和 β 葡萄糖苷酶（β-Gase）的酶活力 [9]。

1.2.3 秸秆腐熟试验

选取粗细接近，质地均匀的小油菜秸秆，将其剪成 3 ~ 5 cm 的小段，用千分之一浓度的尿素溶液浸泡过夜，以补充氮源，调节 C/N 比 [10]。烘干后称取 10 g 置于封口玻璃罐中，每罐加入 20 mL 水和 0.5 mL 的对应菌液，接种等量无菌水作为空白对照，混匀后置于培养箱中培养，20 d 后测定其失重率。

小油菜秸秆失重率 P：P（%）=（M_0–M）/ M_0 × 100%

其中，M_0 为装入玻璃罐中油菜秸秆初始干重，M 为降解后的小油菜秸秆残渣干重。

1.3 蔬菜瓜果秸秆高效降解菌群的构建

采用十字交叉划线平板培养法检测不同菌株之间是否存在拮抗性。选取互不拮抗的菌株进行组合，构建复合菌群，并通过滤纸崩解试验、产纤维素酶试验和 30 d 的秸秆腐熟试验（方法同 1.2），筛选蔬菜瓜果秸秆高效降解菌群。

1.4 蔬菜瓜果秸秆堆肥试验

将西瓜、甜瓜和番茄秸秆粉碎、混合，调整初始水分为 60%，置于 36 cm × 45 cm × 70 cm 的泡沫箱内进行堆肥，在泡沫箱四周及底部打孔以方便其透气与测温。试验设置 5 组，每组设 3 个堆肥箱。其中对照组 3 个：CK0 不接种菌剂，CK1 接种 20% 成熟堆肥，CK2 接种市售腐熟剂。处理组 2 个：T1 接种复合菌群 YC-M（上文选出的复合菌群）；T2 先接种复合菌群 YC-M，在高温期后接种黑曲霉，其目的是探讨复合菌剂 YC-M 与黑曲霉等丝状真菌联用（复合菌群 YC-M 中无真菌），是否能进一步提高腐熟效果 [11]。为避免黑曲霉被高温灭活，应在堆肥高温期结束后添加。菌剂接种量均为 0.1%。

每天测温 1 次，选用 35 cm 堆肥专用温度计在不同位置多次测量并取平均值。每 4 d 翻堆一次并取样，用于测定总有机碳（TOC）、腐植酸和黄腐酸含量。TOC 含量测定参照国家标准 NY/T 525—2021《有机肥料》。总腐植酸含量测定采用焦磷酸钠（$Na_4P_2O_7$）浸提 - 重铬酸钾（$K_2Cr_2O_7$）容量法，游离腐植酸含量测定采用 1% 氢氧化钠浸提 - 重铬酸钾容量法（GB/T 11957—2001《煤中腐植酸产率测定方法》）。黄腐酸含量测定采用 1% 稀硫酸浸提 - 重铬酸钾容量法 [8]。

2 结果与分析

2.1 蔬菜瓜果秸秆高效降解菌株的筛选

根据初筛菌株在 CMC-Na 培养基上产生的透明圈直径与菌落直径比（D/d），初筛出 10 株纤维素降解菌，其中菌株 YCB1 的最大，YC23 和 YC29 的次之（表 1）。各初筛菌株均可对滤纸进行不同程度分解，其中以菌株 YC5、YC8、YC23、YC29、YCB1、YCB3 效果最好，滤纸完全崩解为糊状（图 1）。不同菌株的产纤维素酶能力如图 2 所示，产 CMCase 酶和产 FPAase 酶能力最强的菌株均为 YC23，其次为 YC8，再次为 YCB1；产 β-Gase 酶能力最强的菌株为 YC23，其次为 YCB1，再次为 YC8。综合各菌株的产酶能力，YC23 菌株表现最为出色，其 CMCase、FPAase、β-Gase 酶活力分别为 11.42 U/mL、12.99 U/mL 和 7.31 U/mL。综上试验结果，筛选出 YC5、YC8、YC23、YC29、YCB1、YCB3 等 6 株木质纤维素降解菌，继续进行蔬菜瓜果秸秆腐熟试验。

蔬菜瓜果秸秆腐熟试验结果如表 2 所示，经 30 d 降解，各菌株的油菜秸秆失重率从大到小依次为 YC23>YCB1>YC5>YC8>YCB3>YC29，其中前 4 个处理分别比 CK 组增加了 27.90%、19.17%、17.88% 和 16.38%，明显高于其他处理。综合上述试验结果，优选 YC5、YC8、YC23 和 YCB1 为蔬菜瓜果秸秆高效降解菌株。

表 1 初筛菌株在 CMC-Na 培养基上产生的 D/d

Tab.1 D/d of primary screening strains on the CMC-Na medium

菌株编号	透明圈直径（D，cm）	菌落直径（d，cm）	D/d
YC1	3.45	0.51	6.67
YC2	1.12	0.22	5.09
YC3	2.23	0.45	4.96
YC5	2.40	0.50	4.80
YC8	2.25	0.40	5.63
YC23	3.22	0.35	9.20
YC29	2.10	0.25	8.40
YCB1	1.52	0.15	10.13
YCB2	0.91	0.35	2.60
YCB3	2.21	0.55	4.02

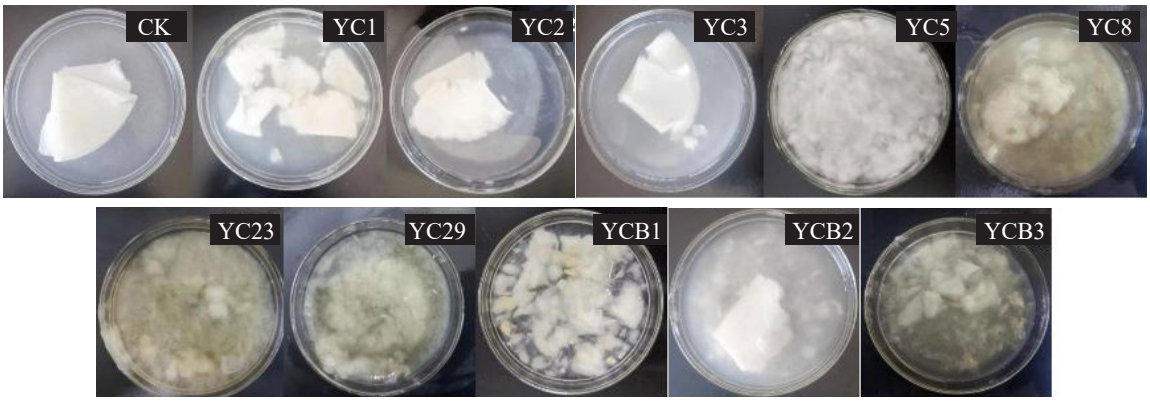


图 1 初筛菌株的滤纸崩解情况

Fig.1 Disintegration condition of filter paper by primary screening strains

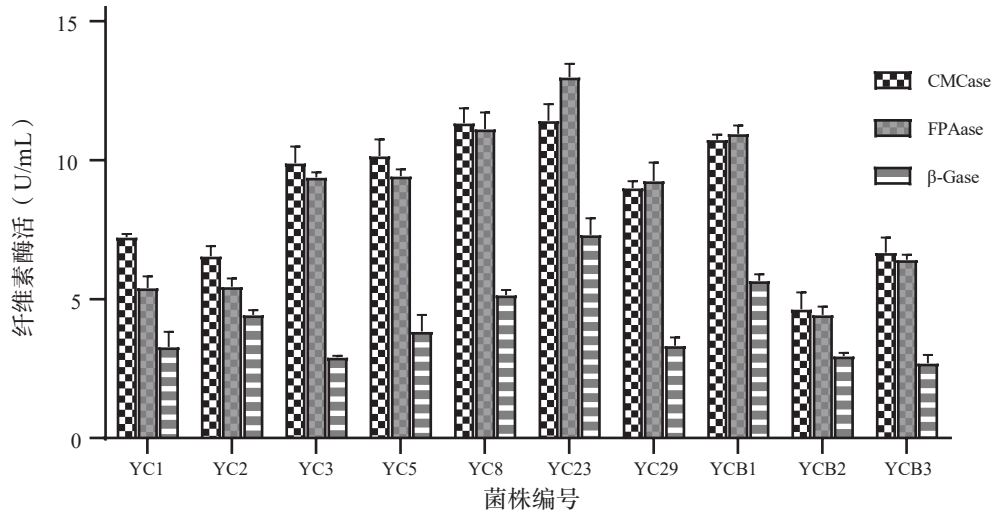


图 2 初筛菌株的产纤维素酶能力

Fig.2 Cellulase production ability of primary screening strains

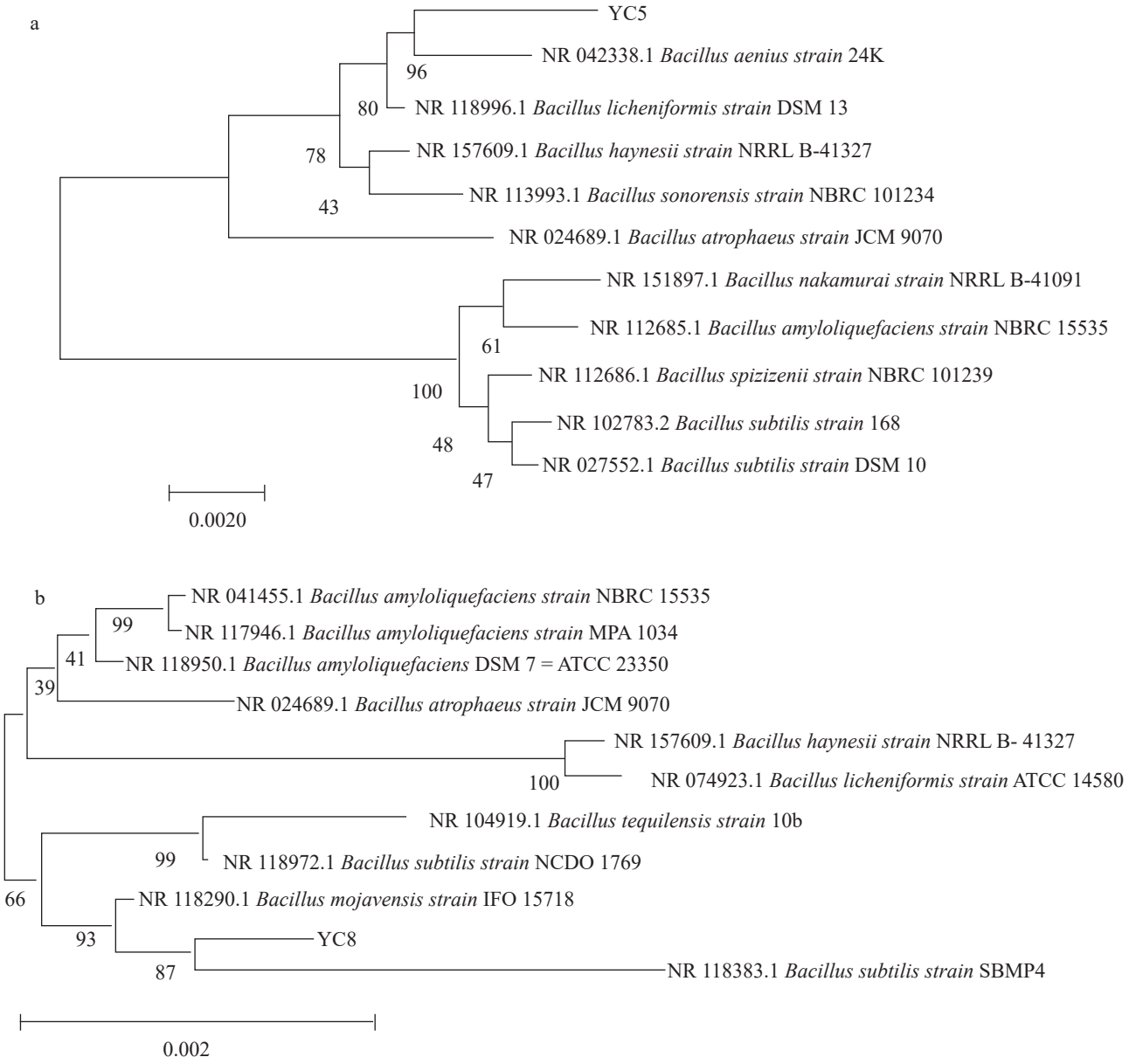
表 2 不同菌株的秸秆失重率

Tab.2 Weight loss rate of straw caused by different strains

菌株编号	腐熟前（g）	腐熟后（g）	失重率（%）
CK	10.01	9.07	9.39
YCB3	9.98	7.81	21.74
YC5	10.01	7.28	27.27
YC8	10.01	7.43	25.77
YC23	10.11	6.34	37.29
YC29	10.12	8.39	17.09
YCB1	10.12	7.23	28.56

2.2 蔬菜瓜果秸秆高效降解菌株的鉴定

采用 16S rRNA 对优选出的 4 株蔬菜瓜果秸秆高效降解菌株进行测序，根据 16S rRNA 测序结果构建出了 4 株蔬菜瓜果秸秆高效降解菌株的系统发育树（图 3）。根据该发育树对 4 株蔬菜瓜果秸秆高效降解菌株进行鉴定，可将 YC5、YC8、YC23 和 YCB1 分别鉴定为空气芽孢杆菌（*Bacillus aerius*）、枯草芽孢杆菌（*Bacillus subtilis*）、贝莱斯芽孢杆菌（*Bacillus velezensis*）和短小芽孢杆菌（*Bacillus pumilus*）。



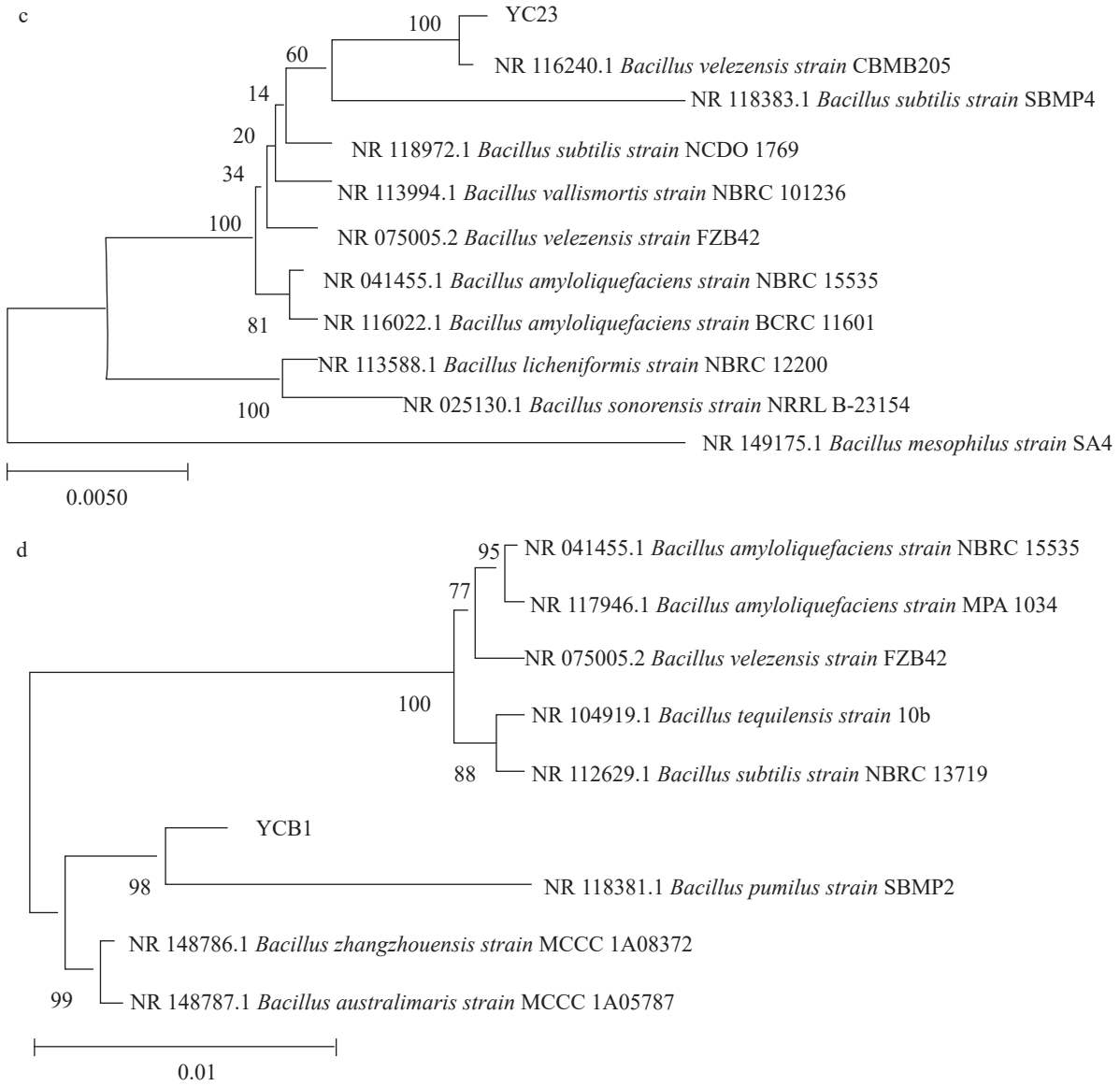


图 3 蔬菜瓜果秸秆高效降解菌株的系统发育树

Fig.3 Phylogenetic tree of efficient degradation strains of vegetable and melon straws

注：a，YC5；b，YC8；c，YC23；d，YCB1。

2.3 蔬菜瓜果秸秆高效降解菌群的构建

所构建的各复合菌群均可使滤纸条溃烂至糊状，但开始崩解时间和完全崩解时间存在差异。由 YC5、YC8 和 YC23 等菌株组成的复合菌群与由 YC5、YC23 和 YCB1 等菌株组成的复合菌群开始崩解时间最早，但由 YC5、YC8 和 YC23 等组成的复合菌群所需的完全崩解时间最短（表 3）。与单菌株相比，复合菌群的产纤维素酶能力明显增大，其中由 YC5、YC8 和 YC23 菌株等组成的复合菌群纤维素酶产生能力最强，其 CMCase、FPAase 和 β-Gase 酶活力分别为 21.71 U/mL、17.98 U/mL 和 12.56 U/mL（图 4）。不同菌群对秸秆的降解能力不同，其中，由 YC5、YC8 和 YC23 菌株组成的复合菌群秸秆失重率最高，比对照组提高了约 5 倍（表 4）。因此，选用 YC5、YC8 和 YC23 菌株组成的复合菌群为最佳菌群，命名为 YC-M。

2.4 堆肥过程中温度的变化

不同处理堆肥温度的变化如图 5 所示。第 1 ~

2 d 为升温期，由于环境温度较高，各处理堆肥温度均可快速升至 50 ℃以上。第 3 ~ 12 d 为高温期，各处理高温期持续时间均为 10 d，接种复合菌群 YC-M 的处理 T1 平均堆肥温度高于空白对照 CK0 和接种市售秸秆腐熟剂的对照 CK2，这说明复合菌群 YC-M 具有提高堆肥温度的作用，且效果优于市售腐熟剂。第 13 ~ 45 d 为后熟期，各处理温度降至 45 ℃以下，并随着时间的延长逐渐降低并趋于平稳。这与蔡瑞等 [12] 采用羊粪进行堆肥时的温度变化规律一致，但因堆肥物料的不同，本试验高温期平均温度略高。T2 处理后熟期温度略高于 T1 处理，这说明高温期后接种黑曲霉可以提高腐熟效果，这意味着复合菌群 YC-M 和黑曲霉联合使用可获得更好的应用效果。值得注意的是，CK1 在整个堆肥过程中平均温度最高，这是由于其接种了 20% 的成熟堆肥。成熟堆肥中含有大量微生物，在农业生产中常作为接种剂使用 [13, 14]。接种成熟堆肥虽然可有效提高堆肥温度，但因成熟堆肥接种量过大，导致蔬菜瓜果秸秆的处理效率远低于其他处理。

表 3 不同复合菌群的滤纸崩解时间

Tab.3 Disintegration time of filter paper by different compound microbial communities　　h

菌群组成	开始崩解时间	完全崩解时间
YC5、YC8、YC23、YCB1	30	50
YC5、YC8、YC23	27	42
YC8、YC23、YCB1	30	51
YC5、YC8、YCB1	32	52
YC5、YC23、YCB1	27	45
YC5、YC23	29	55
YC5、YC8	30	53
YC5、YCB1	32	55
YC8、YC23	30	47
YC8、YCB1	34	59
YC23、YCB1	28	51

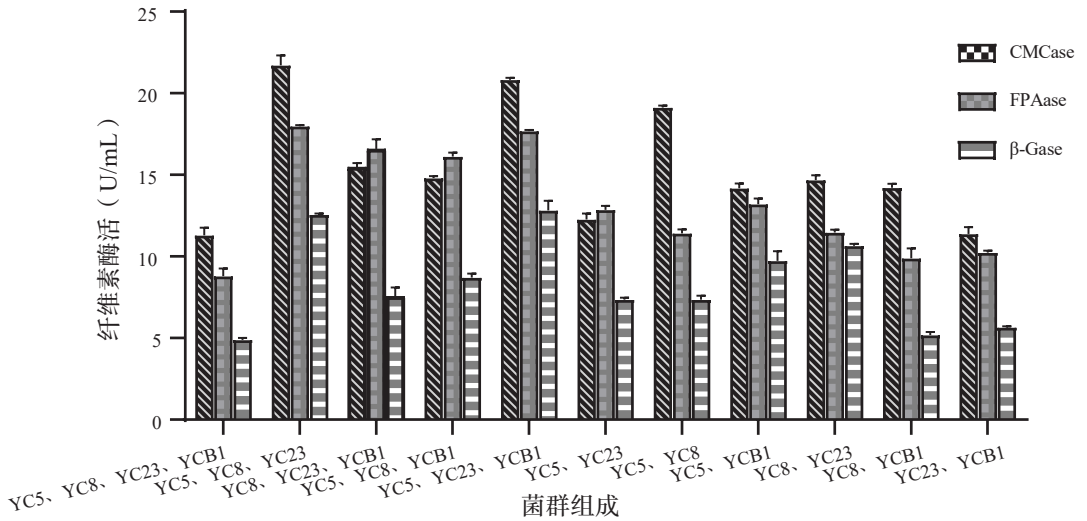


图 4 不同复合菌群的产纤维素酶能力

Fig.4 Cellulase production ability of different compound microbial communities

表 4 不同复合菌群对秸秆失重率的影响

Tab.4 Weight loss rate of straw caused by different compound microbial communities

菌群组成	初始质量（g）	腐熟后质量（g）	失重率（%）
CK	10.02	9.06	9.58
YC5、YC8、YC23、YCB1	10.11	5.86	42.04
YC5、YC8、YC23	10.10	5.13	49.21
YC8、YC23、YCB1	10.00	6.01	39.90
YC5、YC8、YCB1	10.00	5.95	40.50
YC5、YC23、YCB1	10.02	5.48	45.31
YC5、YC23	10.03	5.84	41.77
YC5、YC8	10.01	6.18	38.26
YC5、YCB1	10.01	6.32	36.86
YC8、YC23	10.11	6.86	32.15
YC8、YCB1	10.08	6.71	33.43
YC23、YCB1	10.01	6.22	37.86

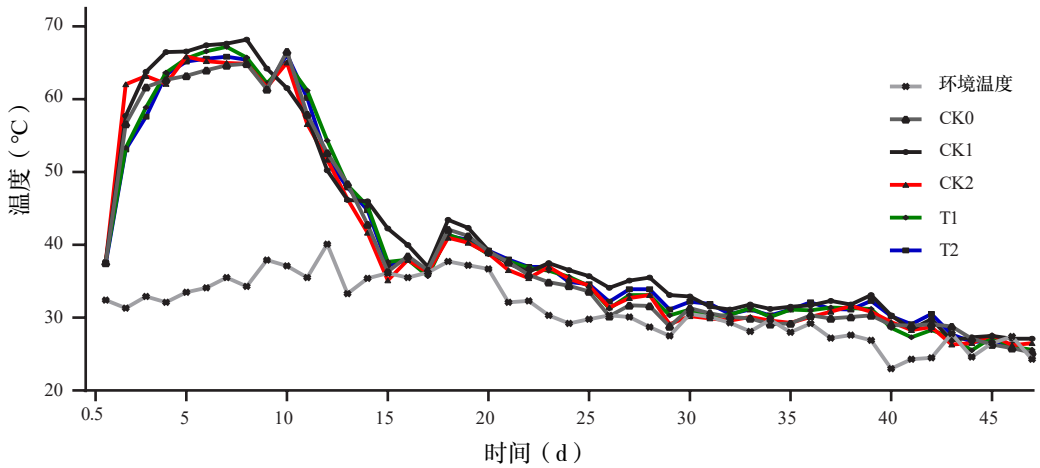


图 5 堆肥过程中温度的变化

Fig.5 Change of temperature during composting

2.5 堆肥过程中 TOC 含量的变化

蔬菜瓜果秸秆中的 TOC 含量丰富，是堆肥微生物的碳源和能源，其变化情况直接反应微生物新陈代谢的强度。堆肥过程中总有机碳含量的变化见图 6。由图可知，堆肥初始时各处理 TOC 含量均为 45.06%，但 CK1 因接种大量的成熟堆肥，TOC 含量降至 39.75%，低于其他处理组。堆肥过程中，所有处理的 TOC 含量均不断降低。第 0 ~ 16 d 下降速度最快，这是因为高温期堆肥微生物生命活动较剧烈，消耗了大量有机碳。此后，TOC 含量下降速度变缓。在所有处理中，T1 与 T2 处理的 TOC 含量下降最快，这说明接种复合菌群 YC-M 可提高堆肥微生物的代谢强度，加速堆肥进程，且其效果优于接种市售腐熟剂和成熟堆肥的处理。T1 与 T2 处理堆肥后期 TOC 含量无显著差异，这说明高温期后接种黑曲霉不会导致 TOC 过度消耗。Hu 等 [15] 在蘑菇渣和猪粪混合堆肥时，接种由包括短芽孢杆菌（*Brevibacillus*）、类芽孢杆菌

（*Paenibacillus*）、芽孢杆菌（*Bacillus*）和赖氨酸芽孢杆菌（*Lysinibacillus*）等在内的超过 30 个属的微生物组成的木质纤维素降解菌群，提高了堆肥真菌群落的多样性，纤维素、半纤维素、木质素的降解率分别提高了 19.64%、8.77% 和 34.45%。其研究结果与本研究具有一致性，均表明接种木质纤维素降解菌可以促进秸秆、蘑菇渣等高木质纤维素有机废弃物的腐熟。

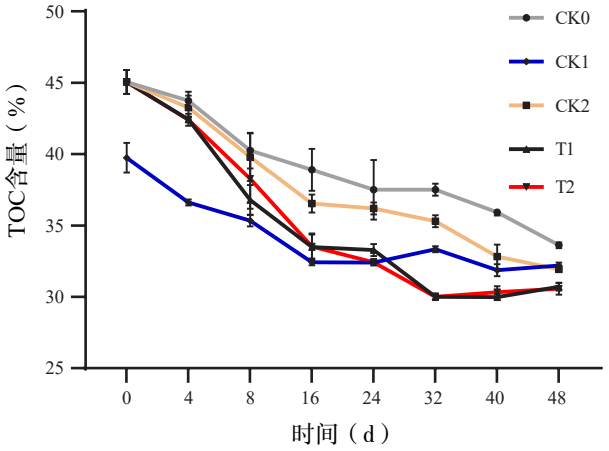


图 6 堆肥过程中总有机碳含量的变化

Fig.6 Change of total organic carbon content during composting

2.6 堆肥过程中总腐植酸和游离腐植酸含量的变化

堆肥过程也是腐植酸合成与积累的过程，各处理总腐植酸和游离腐植酸含量整体呈上升趋势（图 7）。堆肥结束后，T1 与 T2 处理的总腐植酸和游离腐植酸含量显著高于其他处理（$P < 0.05$），这说明接种复合菌群 YC-M 可促进腐植酸的合成，提高堆肥质量，且其效果优于接种市售腐熟剂和成熟堆肥的处理。这与 Zhao 等 [16] 的研究结果一致，在牛粪和玉米秸秆混合堆肥时接种耐热纤维素降解菌链霉菌（*Streptomyces* sp.）H1、G1、G2 和放线菌 T9，可促进纤维素降解，提高纤维素降解产物转化为腐殖质的效率，增加堆肥中腐殖质的含量。与 T1 处理相比，T2 处理的总腐植酸和游离腐植酸含量有所提高，但差异并不显著（$P > 0.05$），这说明高温期后接种黑曲霉对腐植酸的合成有一定的促进作用，但并不明显。

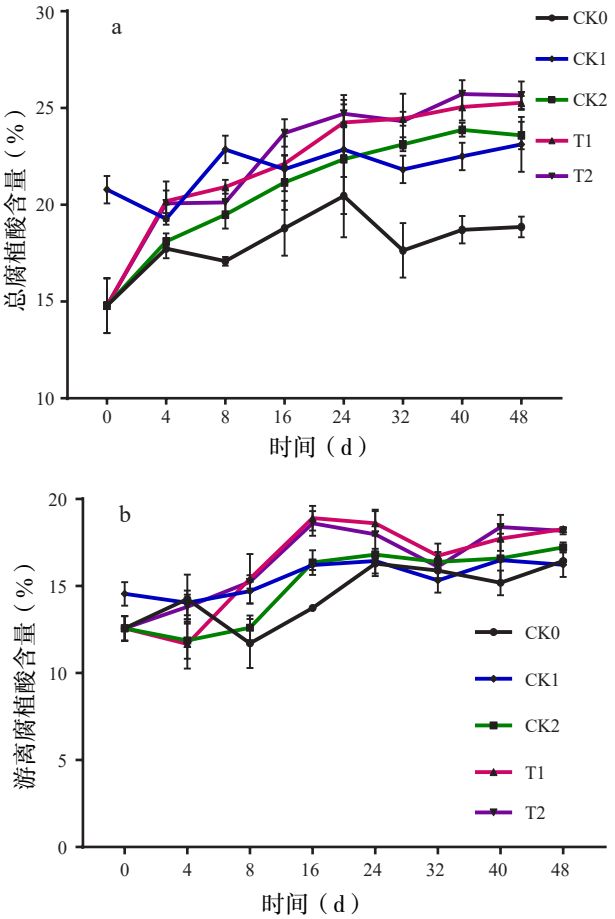


图 7 堆肥过程中总腐植酸（a）和游离腐植酸（b）含量的变化

Fig.7 Change of total humic acids (a) and free humic acids (b) content during composting

2.7 堆肥过程中黄腐酸含量的变化

堆肥原料初始黄腐酸含量为 8.21%，但对照 CK1 因接种了 20% 成熟肥堆，导致黄腐酸含量降至 6.71%。在整个堆肥过程中，各处理黄腐酸含量呈堆肥初期下降、堆肥中期上升、堆肥中后期又下降的趋势（图 8）。堆肥初期，黄腐酸中不稳定的组分被微生物作为碳源和能源消耗，导致其含量降低。堆肥中期是微生物生命活动最旺盛的时期，分解代谢旺盛，大量纤维素、半纤维素和木质素等大分子物质被分解，同时合成部分黄腐酸，导致黄腐酸含量上升。堆肥中后期，堆料中易于利用的养分减少，而腐植酸合成旺盛，部分黄腐酸被微生物分解利用，从而导致黄腐酸含量逐渐降低。堆肥结束后，T1 和 T2 处理黄腐酸含量均高

于其他处理（$P < 0.05$），其原因是接种复合菌群 YC-M 提高了堆肥中期黄腐酸的生成量，这有利于提高堆肥质量。与 T1 处理相比，T2 处理的黄腐酸含量相对较低（$P < 0.05$），其原因是高温期后接种黑曲霉，黑曲霉的生长繁殖导致部分黄腐酸被消耗。

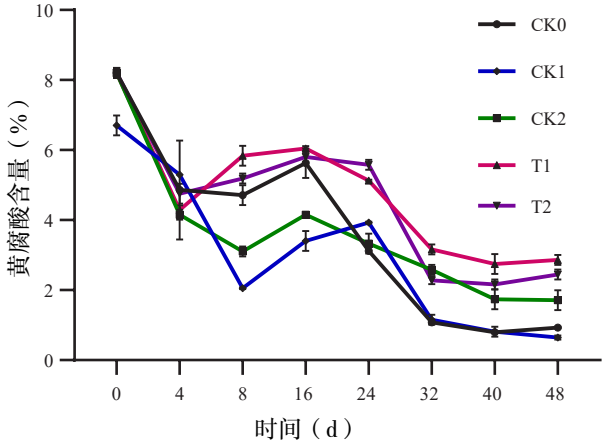


图 8 堆肥过程中黄腐酸含量的变化

Fig.8 Change of fulvic acid content during composting

值得讨论的是本研究提取腐植酸和黄腐酸的方法参考的是从煤炭和土壤中提取的方法，堆肥中有些非腐植酸物质也可能被提取出来，因此，测量值略高于腐植酸和黄腐酸的真实含量。但由于腐植酸和黄腐酸组分复杂，缺少更为科学的测定方法，这些测定方法在堆肥研究中仍然普遍采用。一般而言，虽然腐植酸和黄腐酸含量的测定值高于真实值，但二者呈正相关，测量值的变化规律可以反映真实值的变化规律。

3 结论

本文筛选出 4 株蔬菜瓜果秸秆高效降解菌株 YC5、YC8、YC23 和 YCB1，并将其分别鉴定为空气芽孢杆菌（*Bacillus aerius*）、枯草芽孢杆菌（*Bacillus subtilis*）、贝莱斯芽孢杆菌（*Bacillus velezensis*）和短小芽孢杆菌（*Bacillus pumilus*）。将 4 株蔬菜瓜果秸秆高效降解菌株进行不同组合，并通过滤纸崩解试验、产纤维素酶试验和秸秆腐熟试验优选出最佳复合菌群 YC-M，其菌株组成为 YC5、YC8 和 YC23。复合菌群 YC-M 具有较强的产纤维素酶能力，CMCase、FPAase 和 β-Gase 酶活力分别可达 21.71 U/mL、17.98 U/mL 和 12.56 U/mL，42 h 可将滤纸完全崩解，秸秆腐熟 30 d 失重率可达 49.21%。蔬菜瓜果秸秆堆肥时接种复合菌群 YC-M 可提高堆肥微生物的代谢强度，堆肥最高温度、平均温度和 TOC 下降速度均高于空白对照和市售腐熟剂，这有利于促进秸秆腐熟，加速堆肥进程。复合菌群 YC-M 可促进腐植酸和黄腐酸的合成，堆肥过程结束后得到的堆肥中的总腐植酸、游离腐植酸和黄腐酸含量均高于空白对照、接种市售腐熟剂和接种成熟堆肥的处理，这有利于提高堆肥质量。在接种复合菌群 YC-M 的基础上，在堆肥高温期过后接种黑曲霉虽然可能有助于提高堆肥后期的品温，但并未显著提高成熟堆肥中的腐植酸含量。与黑曲霉等真菌配合使用是否有意义，还需进一步研究。

总之，本文所研制的蔬菜瓜果秸秆复合菌群 YC-M 腐熟剂对蔬菜瓜果秸秆的腐熟效果优于市售腐熟剂和接种成熟堆肥的传统堆肥方式，其推广应用有助于提升蔬菜瓜果秸秆的综合利用水平。使用复合菌群 YC-M 对西瓜、甜瓜、番茄等蔬菜瓜果秸秆进行堆肥时，每吨秸秆接种腐熟剂 1 kg，堆肥前期每 4 d 翻堆一次。堆料初始状态对堆肥进程有较大影响，建议调节初始含水量 50% ~ 60%、C/N 20 ~ 40，pH 5 ~ 8，以获得最佳腐熟效果 [17]。

参考文献

[1] Guo X Y, Liu W Z, Li X Q, et al. A novel fungal agent for straw returning to enhance straw decomposition and nutrients release[J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 30: 103064.

[2] 韩哲，潘凯 . 秸秆还田及其在蔬菜生产中的应用 [J]. 农业与技术，2022，42（20）：61 ~ 64.

[3] 董志辉，周常艳，曲丽晶 . 吉林舒兰秸秆还田技术应用及利弊探究 [J]. 特种经济动植物，2022，25（4）：122 ~ 123.

[4] 杜鹏祥，龚建英，韩雪，等 . 蔬菜废物高温堆肥作为黄瓜育苗基质的生物毒性评估 [J]. 北方园艺，2014（24）：168 ~ 172.

[5] 匡恩俊，迟凤琴，宿庆瑞，等 . 3 种腐熟剂促进玉米秸秆快速腐解特征 [J]. 农业资源与环境学报，2014（5）：432 ~ 436.

[6] 杨笑莹，辛寒晓，孙国科，等 . 不同腐熟剂对堆肥腐植酸含量及肥力的影响 [J]. 腐植酸，2021（5）：21 ~ 29.

[7] Jusoh M L C, Manaf L A, Latiff P A. Composting of rice straw with effective microorganisms (EM) and its influence on compost quality[J]. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering, 2013, 10(1): 17.

[8] Sun C Y, Wei Y B, Kou J N, et al. Improve spent mushroom substrate decomposition, bacterial community and mature compost quality by adding cellulase during composting[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 299(25): 126928.

[9] 温国琴 . 土壤中纤维素分解菌的分离与产酶条件测定 [J]. 佳木斯大学学报（自然科学版），2022，40（2）：106 ~ 108，151.

[10] 罗超文 . 白星花金龟幼虫与不同菌剂联合处理小麦和玉米秸秆的效果研究 [D]. 山东农业大学硕士学位论文，2023.

[11] 秦雪丽 . 水稻秸秆快速降解的应用基础研究 [D]. 浙江大学硕士学位论文，2019.

[12] 蔡瑞，张帅，崔欣雨，等 . 添加高温期堆料对青藏高原羊粪堆肥有机成分降解及酶活性的影响 [J]. 中国畜牧兽医，2022，49（7）：2831 ~ 2841.

[13] Kato K, Miura N. Effect of matured compost as a bulking and inoculating agent on the microbial community and maturity of cattle manure compost[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(9): 3372 ~ 3380.

[14] Tian W, Li L Z, Liu F, et al. Assessment of the maturity and biological parameters of compost produced from dairy manure and rice chaff by excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. Bioresource Technology, 2012, 110: 330 ~ 337.

[15] Hu T, Wang X, Zhen L, 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.

[16] Zhao Y, Zhao Y, Zhang Z, et al. Effect of thermo-tolerant actinomycetes inoculation on cellulose degradation and the formation of humic substances during composting[J]. Waste Management, 2017, 68: 64 ~ 73.

[17] Jing H, Nengmin Z, Yansheng X, et al. The microbial mechanisms of enhanced humification by inoculation with *Phanerochaete chrysosporium* and *Trichoderma longibrachiatum* during biogas residues composting[J]. Bioresource Technology, 2022, 351: 126973.

（上接第 25 页）食品中淀粉的测定：GB 5009.9—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2016.

[14] 国家市场监督管理总局，中华人民共和国国家卫生健康委员会 . 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定：GB 5009.6—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2016.

[15] 张素梅，张瑞栋，李靖涛，等 . 腐殖酸钾对谷子产量和品质的影响 [J]. 山西农业科学，2014，42（9）：968 ~ 970.

[16] 刘伟，刘景辉，萨如拉，等 . 腐殖酸水溶肥料对水分胁迫下小麦光合特性及产量的影响 [J]. 中国农学通报，2014，30（3）：196 ~ 200.

[17] 孟丽霞 . 腐植酸钾对烤烟主要生理指标及钾含量的影响 [D]. 云南农业大学硕士学位论文，2009.

[18] 张沁怡，李文蔚，阳晶，等 . 腐殖酸对水稻剑叶光合特性、必需元素和产量的影响及其相关性研究 [J]. 云南农业大学学报（自然科学），2015，30（2）：185 ~ 191.

[19] 项国栋，邹德乙 . 不同浓度腐植酸叶面肥对甘蓝产量与品质的影响 [J]. 腐植酸，2017（2）：37 ~ 40.

[20] 董向阳，王翼飞，余进洋，等 . 含腐殖酸复合肥对大蒜产量和品质的影响 [J]. 肥料与健康，2022，49（5）：52 ~ 54.