

复合菌剂对果树枝条发酵及白星花金龟幼虫转化效率的影响*

代黎明^{1**} 张广杰^{2,3} 陈爱松¹ 代凡蜃¹ 努尔姑丽·努尔麦麦提¹
刘玉升^{4***} 马德英^{1***}

(1. 新疆农业大学农学院, 农林有害生物监测与安全防护重点实验室, 乌鲁木齐 830052;

2. 吉林农业大学, 食药菌教育部工程研究中心, 长春 130118; 3. 玛纳斯县金昆虫生物科技有限公司, 昌吉 832205;

4. 新疆梦鲤农业科技开发有限公司, 策勒 848300)

摘要 【目的】为解决林果废弃物资源化利用效率低的问题, 探究不同复合菌剂处理下物料发酵及其对白星花金龟 *Protaetia brevitarsis* 幼虫的饲喂效果, 明确最优菌剂配比与适宜发酵周期。【方法】构建单菌、双菌、三菌组合, 利用白星花金龟幼虫分别取食不同发酵时间(10、15、20、25 d)的物料, 以虫体增重、取食量、转化率为指标, 筛选混合枝条-牛粪物料的最优菌剂组合与发酵时间。【结果】幼虫取食4个发酵时间点的物料后, 15 d和20 d发酵物料的饲喂效果均较优且差异不显著($P \geq 0.05$), 综合比较20 d效果略优于15 d。20 d发酵物料中, 三菌组合: JD 秸秆型降解菌剂(山东君德生物科技有限公司)+YM 秸秆型降解菌剂(河南省亿苗生物科技有限公司)+EM 秸秆型降解菌剂(郑州农富康生物科技有限公司), 在所有菌剂组合中效果最优, 其发酵温度、幼虫生长发育相关指标均达到最高: 升温期最高温达68.9 °C, 高温期达75.7 °C(>70 °C持续3 d以上), 显著高于单菌组合(65.7-69.1 °C)及双菌组合(67.3-70.4 °C), 且各处理升温效果均优于无菌对照(58.8 °C)。幼虫取食量表现为三菌组合(149.40 g)>双菌组合(139.10-144.20 g)>单菌组合(129.00-133.70 g)>无菌对照(129.50 g); 虫体增重表现为三菌组合(14.70 g)>双菌组合(10.10-13.30 g)>单菌组合(6.20-10.00 g)>无菌对照(6.40 g)。最优三菌组合的虫体转化率达80.06%, 饲料利用率达74.70%, 虫砂转化率达97.26%($P < 0.05$)。综上, 与单菌、双菌组合相比, 三菌组合可显著提升发酵温度、缩短发酵周期, 促进幼虫生长发育。【结论】本研究明确了一套高效完整的饲料制备方案: 三菌组合(JD+YM+EM)为最优菌剂组合, 综合生产效率与成本, 确定15-20 d为该体系下效果与效率兼顾的最佳发酵周期。该方案可显著促进白星花金龟幼虫生长发育, 为农业废弃物资源化利用及昆虫蛋白生产提供技术依据。

关键词 白星花金龟; 复合菌剂; 幼虫转化; 发酵天数; 协同效应

Effects of compound microbial inoculants on the fermentation of fruit tree branches and the conversion efficiency of *Protaetia brevitarsis* larvae

DAI Li-Ming^{1**} ZHANG Guang-Jie^{2,3} CHEN Ai-Song¹ DAI Fan-Shen¹
Nuerguli-Nuermaiti¹ LIU Yu-Sheng^{4***} MA De-Ying^{1***}

(1. Key Laboratory of Agricultural and Forest Pest Monitoring and Safety Control, College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Engineering Research Center of Edible and Medicinal Fungi, Ministry of Education, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 3. Manas Golden Insect Biotechnology Co., Ltd., Changji 832205, China;

4. Xinjiang Mengli Agricultural Science and Technology Development Co., Ltd., Cele 848300, China)

*资助项目 Supported project: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2024B04030)

**第一作者 First author, E-mail: 1435471430@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: ysl@sdau.edu.cn; mdyxnd@163.com

收稿日期 Received: 2026-01-22; 接受日期 Accepted: 2026-04-23

Abstract [Aim] To investigate the effects of different microbial inoculants on the fermentation of plant materials and on the breakdown of plant waste by *Protaetia brevitarsis* larvae, thereby improving the utilization of forest fruit waste [Methods] Single-, dual-, and triple-strain combinations were formulated. *P. brevitarsis* larvae were fed with plant material fermented for different durations (10, 15, 20 and 25 d). Using larval weight gain, feed intake, conversion rate, and other parameters as indicators, the optimal inoculant combination and fermentation time for a mixed fruit tree branch-cattle manure substrate were identified. [Results] Plant material that had been fermented for either 15 or 20 days was the most easily broken down by larvae. Although there was no significant difference between these fermentation durations, a comprehensive comparison indicated that the 20-day fermentation treatment was slightly better than the 15-day one. Among the 20-day fermented materials, the triple-strain combination (JD+YM+EM) outperformed all other inoculant treatments, achieving the highest fermentation temperatures and the best larval growth and development indicators. During the heating phase, the maximum temperature reached 68.9 °C, whereas during the thermophilic phase it peaked at 75.7 °C (remaining above 70 °C for more than three days), which was significantly higher than that of the single-strain (65.7-69.1 °C) and dual-strain combinations (67.3-70.4 °C). All inoculated treatments had better heating performance than the sterile control (58.8 °C). Larval feed intake ranked as follows: triple-strain combination (149.40 g) > dual-strain combinations (139.10-144.20 g) > single-strain combinations (129.00-133.70 g) > sterile control (129.50 g). Larval weight gain followed a similar order: triple-strain combination (14.70 g) > dual-strain combinations (10.10-13.30 g) > single-strain combinations (6.20-10.00 g) > sterile control (6.40 g). The optimal triple-strain combination achieved a larval biomass conversion rate of 80.06%, a feed utilization rate of 74.70% and a frass conversion rate of 97.26%. In conclusion, compared with single- and dual-strain combinations, the triple-strain combination had a significantly higher fermentation temperature, shorter fermentation period, and faster larval growth and development. [Conclusion] The triple-strain combination (JD+YM+EM) is the optimal inoculant formulation. Considering both production efficiency and cost, a fermentation period of 15-20 days is the optimal duration that balances effectiveness and efficiency under this system. This protocol markedly enhances the growth and development of *P. brevitarsis* larvae, and thereby provides a scientific basis for both the utilization of agricultural waste and insect protein production.

Key words *Protaetia brevitarsis*; compound microbial inoculant; larval conversion; fermentation duration; synergistic effect

农林废弃物是植物凋落产生的富含木质纤维的有机残体（如枯枝、落叶等），传统处理方式常伴随严重二次污染与资源浪费（赵恺凝等，2016）。因此，以农林废弃物为堆肥原料是实现其资源化利用的重要途径（史玉英等，1996）。通过微生物菌剂处理废弃物，再经资源昆虫过腹转化，可产出高价值昆虫蛋白与优质有机肥（Cickova *et al.*, 2015）。目前，生物转化已成为高效转化废弃物的重要渠道（马文珍，1995；Rehman *et al.*, 2017）。

我国自 20 世纪 40 年代开创性地应用高温富集培养纤维分解菌加速物料腐熟以来（胡春明等，2010），堆肥微生物技术持续发展。目前相关研究主要聚焦于菌剂效能优化：尹爽等（2016）证实，复合菌剂与白腐菌等比混合，在 30 °C 条件下发酵 17 d 效果最佳；另有研究创新性地将腐熟堆肥物料作为“腐料”型内源复合菌

剂使用，成功使新堆肥高温期提前 20 d（宋修超等，2019）；从堆肥环境中富集培养的高活菌数复合菌剂，其升温速度和腐熟效果均优（徐智等，2009）。席北斗等（2001）将多功能复合菌群应用于生活垃圾堆肥处理，实现发酵堆 24 h 内快速升温至 68 °C、15 d 内有机物降解率达 33.3%，并将腐熟周期显著缩短至 18 d，充分展现了复合菌剂的增效潜力。

除微生物直接降解技术外，昆虫转化农林废弃物的研究也取得了显著进展，其中白星花金龟 *Protaetia brevitarsis* 幼虫表现出突出优势：例如，白星花金龟幼虫转化棉秆发酵物料的能力达 27.41 倍，是黑水虻 *Hermetia illucens* 的近 6 倍（张广杰等，2022）。添加 40% 鸡粪与小麦秸秆堆肥腐熟后连续饲喂白星花金龟幼虫 7 d，虫体增重达 0.31 g，连续饲喂 30 d 饲料消耗量达 83.18 g（张雪等，2022）。发酵产物质量直接决

定其作为昆虫饲料的转化效率(杨昊庭, 2023)。已有研究利用玉米秸秆、棉秆明确最佳发酵时间约为 25 d(杨诚等, 2015; 赵威等, 2023)。尽管最佳发酵时间因物料体系不同而异, 但这表明发酵时间是“物料-菌剂-昆虫”体系中需精确优化的关键变量。上述研究均证实白星花金龟幼虫具有较强的农业废弃物转化能力, 但当前其转化周期仍相对较长, 制约了规模化应用, 因此进一步缩短转化周期成为提升该技术经济性的关键需求。

因此, 针对单一菌剂固有的功能局限性, 我们提出复合菌剂增效策略, 将 3 种高效菌剂进行组合, 旨在攻克单一菌剂难以协同优化混合物料高效降解的技术瓶颈。研究以显著提升白星花金

龟幼虫转化效率和缩短转化周期作为核心导向, 通过精心构建菌剂组合体系, 系统评价不同菌剂组合处理对发酵过程的温度动态以及虫砂量等终产物饲用价值的提升作用, 从而为开发高效、定向的农林废弃物生物转化技术提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试红枣枝条、桃树枝条、核桃枝条、苹果枝条均采自新疆维吾尔自治区和田地区策勒县新疆梦鲤农业科技开发有限公司果园, 供试牛粪取自和田地区策勒基地周边养殖户, 供试发酵菌剂如表 1 所示。

表 1 供试发酵菌剂基本情况
Table 1 Basic information of test decomposing microbial agents

腐解菌剂 Decomposing inoculants	品牌及生产公司 Brand and production company	主要功能菌 Primary functional bacteria	有效活菌数 (100 million·g ⁻¹) Number of viable bacteria (100 million·g ⁻¹)	推荐用量 (kg·t ⁻¹) Recommended dosage (kg·t ⁻¹)
EM*	秸秆型, 郑州农富康生物科技有限公司(中国河南) Straw type, Zhengzhou Nongfukang Biotechnology Co., Ltd. (Henan, China)	乳酸菌、芽孢杆菌、光合细菌、 酵母菌、放线菌、醋酸菌 Lactic acid bacteria (LAB), bacillus, photosynthetic bacteria, Saccharomyces cerevisiae, actinomycetes, acetobacter aceti	200	0.5
YM	有机物料腐熟剂, 秸秆型, 河南省亿苗生物科技有限公司(中国河南) Organic material decomposing agent, straw type, Henan Yimiao Biotechnology Co., Ltd. (Henan, China)	枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、 黑曲霉、啤酒酵母菌、纤维酶活 Bacillus subtilis, bacillus licheniformis, aspergillus niger, saccharomyces cerevisiae, cellulase activity	10	1.0
JD*	有机物料腐熟剂, 秸秆型, 山东君德生物科技有限公司(中国山东) Organic material decomposing agent, straw type, Shandong Junde Biotechnology Co., Ltd. (Shandong, China)	纳豆菌、芽孢杆菌、酵母菌、木 霉菌、固氮菌、乳酸菌 Bacillus subtilis var. natto, bacillus subtilis, saccharomyces cerevisiae, trichoderma viride, azotobacter chroococcum, lactobacillus acidophilus	200	0.2

: 需提前活化。: Need to be activated in advance.

1.2 试验处理

1.2.1 不同菌剂发酵处理方法 选取新疆南疆地区主要栽培果树(红枣、桃树、核桃、苹果)

的枝条作为供试材料(此类果树修剪废弃物产生量大), 粉碎晒干后备用。将 4 种枝条按各 15% 的比例混合(占总干重 60%), 与占总干重 40% 的未发酵牛粪均匀混合。按表 2 推荐用量分别添

加对应菌剂组合,以不添加菌剂为对照(CK)。充分混匀后,堆制成总干重 120 kg、含水量约 60%的圆锥形堆体。每日 15:00 测量堆体 20 cm 深处温度,每 5 d 翻堆 1 次。自发酵 10 d 起,每 5 d 采用五点取样法,从各点 20 cm 深处采集 3 kg 湿样,混匀后于 -20 °C 冷冻保存。发酵周期为 25 d。

表 2 菌剂组合设计

Table 2 Design of microbial agent combinations

处理组 Treatment group	菌剂组合 Bacteriological mixture	推荐用量 (kg·t ⁻¹) Recommended dosage (kg·t ⁻¹)
CK	无菌 (阴性对照) Sterility (negative control)	/
T1	JD	0.20
T2	YM	1.00
T3	EM	0.50
T4	YM+EM	0.50+0.25
T5	JD+EM	0.10+0.25
T6	JD+YM	0.10+0.50
T7	JD+YM+EM	0.07+0.33+0.17

CK: 添加等量水分, 无菌阴性对照; T1-T7: 处理 1-处理 7; JD: JD 菌剂, 公司名称缩写, 有机物料腐熟剂, 秸秆型, 河南省亿苗生物科技有限公司, 枯草芽孢杆菌等; YM: YM 菌剂, 公司名称缩写, 有机物料腐熟剂, 秸秆型, 山东君德生物科技有限公司, 纳豆菌等; EM: EM 菌剂, 有效微生物群, 有机物料腐熟剂, 秸秆型, 郑州农富康生物科技有限公司, 乳酸菌等。表 3 同。

CK: Addition of equal amount of water, sterile control; T1-T7: Treatment 1 to treatment 7; JD: JD microbial agent (abbreviation of company name), organic material decomposing inoculant (straw type), Henan Yimiao Biotechnology Co., Ltd., containing *Bacillus subtilis*, etc.; YM: YM microbial agent (abbreviation of company name), organic material decomposing inoculant (straw type), Shandong Junde Biotechnology Co., Ltd., containing *Bacillus subtilis* var. *natto*, etc.; EM: EM microbial agent (effective microorganisms), organic material decomposing inoculant (straw type), Zhengzhou Nongfukang Biotechnology Co., Ltd., containing lactic acid bacteria, etc. The same for Table 3.

1.2.2 白星花金龟转化发酵产物效率评价 白星花金龟 3 龄 15 日幼虫为供试虫源, 养殖盒规格为 19.5 cm×24 cm×12 cm, 每盒放入 20 头健康幼虫 (单头体重 2.1-2.4 g), 先称量每盒 20 头

幼虫总重。取分别发酵 10、15、20、25 d 的物料样品 (每份 3 kg, 解冻后每盒称取干重 200 g), 每个处理重复 5 次 ($n=5$)。试验持续 11 d (任一处理取食完毕即结束), 每 3 d 拍照记录转化情况。第 12 天用 12 目分离筛 (孔径 1.6 mm) 筛分虫砂与渣料, 挑出幼虫, 统计存活数量并称重。将各组分烘干至恒重, 计算虫体增重、取食量、虫体转化率、虫砂转化率、饲料利用率等指标 (均以干重计), 据此筛选最优腐解菌剂组合。

主要计算公式如下 (单位: g):

取食量=取食前物料重量-取食后剩余物料重量;

虫体增重=取食后虫重-初始虫重;

虫体转化率=虫增重/(取食量-虫砂重)×100%;

饲料利用率=(总物料量-剩余物料量)/总物料量×100%;

虫砂转化率=虫砂量/(取食量-虫体增重)×100%。

1.3 数据分析

运用 SPSS 27.0 软件对结果进行方差分析。并利用 Tukey 多重比较分析法 ($P<0.05$) 评估不同处理之间的差异。采用 Excel 2021 软件处理数据, 采用 Graphpad Prism 10.6 (2025), Origin 64 (2025) 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同菌剂组合对发酵过程中堆体的影响

2.1.1 不同菌剂对各堆体温度的影响 发酵 1 d 后, 各处理堆体温度均快速上升, 9 d 后整体呈缓慢下降趋势。其中, 各单一菌剂、双菌组合处理的发酵温度显著 ($P<0.05$) 低于 JD+YM+EM 复合菌剂处理, 且所有菌剂处理与 CK 的温度差异全程显著 ($P<0.05$)。JD+YM+EM 复合菌剂处理的堆体最高温达 75.7 °C, 其余各处理堆体温度均高于 CK、低于 JD+YM+EM 复合菌剂处理, 表明 JD+YM+EM 复合菌剂可显著提升物料发酵温度 (图 1)。

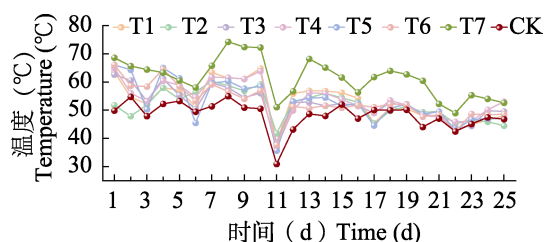


图1 复合菌剂-牛粪枝条组合物温度变化图

Fig. 1 Temperature variation chart of the composite bacterial agent-bull dung branch combination

T1 (处理1): JD 菌剂; T2 (处理2): YM 菌剂; T3 (处理3): EM 菌剂; T4 (处理4): YM 菌剂和 EM 菌剂二者混合; T5 (处理5): JD 菌剂和 EM 菌剂二者混合; T6 (处理6): JD 菌剂和 YM 菌剂二者混合; T7 (处理7): JD 菌剂和 YM 菌剂和 EM 菌剂三者混合; CK: 无菌对照, 添加等量水分。图4同。

T1 (Treatment 1): JD microbial agent; T2 (Treatment 2): YM microbial agent; T3 (Treatment 3): EM microbial agent; T4 (Treatment 4): Mixture of YM and EM microbial agents; T5 (Treatment 5): Mixture of JD and EM microbial agents; T6 (Treatment 6): Mixture of JD and YM microbial agents; T7 (Treatment 7): Mixture of JD, YM, and EM microbial agents; CK: Control, with equal amount of water added. The same for Fig. 4.

2.1.2 三菌组合对 25 d 物料颜色变化的影响

温度是衡量物料腐熟度的重要指标, JD+YM+EM 复合菌剂处理可显著提高混合物料温度, 其对应的物料颜色变化如下: 发酵 1 d 时, 物料为浅棕色, 散发清新木香 (图 2: A); 5 d 后, 物料变为深棕色且颜色持续加深, 出现土腥味; 10 d 时, 物料呈棕褐色; 15 d 时, 颜色进一步加深, 气味变为淡土腥味 (图 2: B); 18 d 时, 物料变为褐色, 出现淡酵母味; 25 d 时, 物料呈黑褐色, 无明显异味 (图 2: C)。



图2 混合枝条-牛粪物料 25 d 颜色变化过程

Fig. 2 Color change process of mixed branches and cow dung materials over 25 d

A. 1 d 未腐熟物料; B. 15 d 腐熟物料; C. 25 d 腐熟物料。
A. 1 d immature material; B. 15 d mature material; C. 25 d mature material.

2.2 不同发酵时间对白星花金龟幼虫转化效率的影响

结合前述温度及颜色变化结果可知, JD+YM+EM 复合菌剂处理对堆体升温及物料腐解的促进效果最为突出, 因此以该最优组合为研究对象, 进一步分析不同发酵时间对白星花金龟幼虫转化效率的影响。图3显示, 在 JD+YM+EM 复合菌剂处理下, 不同发酵时间对幼虫转化效率 3 项核心指标 (虫体增重、饲料利用率、虫砂转化率) 的影响存在差异: 发酵 15 d 时, 三项指标均显著 ($P < 0.05$) 提升; 20 d 时, 三项指标维持在较高水平; 25 d 时, 各项指标较 20 d 略有回落, 但仍高于 10 d。统计分析表明, 15-20 d 发酵物料的幼虫转化效果无显著差异 ($P \geq 0.05$), 说明此时间段内均可结束物料发酵。

2.3 不同菌剂处理下白星花金龟幼虫转化性能的多维雷达图分析

雷达图可将多维度指标映射到等角度坐标轴上, 各指标数值点连成闭合多边形, 用于直观对比不同处理的综合效能。图4展示了 8 个处理组 (CK 和 T1-T7) 在 4 项核心指标上的表现: 射线代表处理组, 越靠近外缘 (1.0) 效果越突出; 不同颜色曲线与射线的交点离中心越远, 指标表现越好 (红色: 虫体重量; 浅蓝: 虫体转化率; 浅黄: 饲料利用率; 绿色: 虫砂转化率)。由图4可知, T7 (JD+YM+EM) 的雷达图覆盖面积最大, 其虫砂转化率交点位于最外圈 (1.0), 其余 3 项指标交点也靠近外缘, 综合表现最优; CK 的 4 项指标交点均靠近中心 (0.4-0.6), 覆

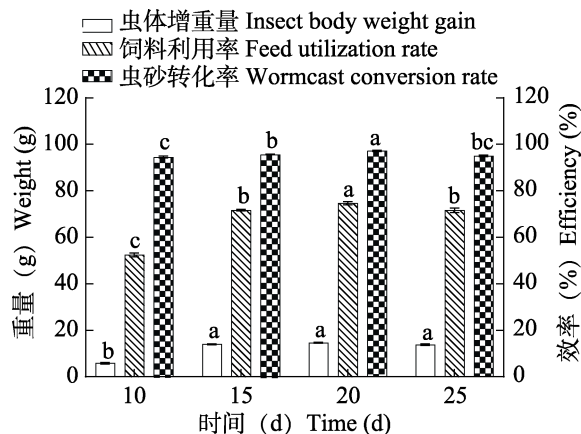


图3 不同发酵时间物料对白星花金龟幼虫转化效率影响

Fig. 3 Effect of substrate fermentation time on conversion efficiency of *Protactia brevitaris* larvae

柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$, Tukey 多重比较分析)。

Different lowercase letters above bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$, Tukey multiple comparison analysis).

盖面积最小, 综合表现最差; 其余处理综合表现介于两者之间, 各项指标的均衡性与数值水平均不及 T7, 且 T7 在虫砂转化率上的优势尤为显著 (图 4)。

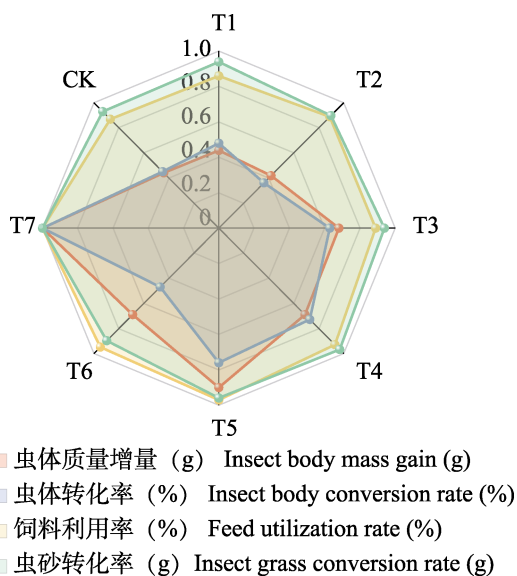


图4 不同菌剂下物料对白星花金龟幼虫转化的影响

Fig. 4 Effects of substrates treated with different microbial agents on the bioconversion by *Protactia brevitaris* larvae

2.4 白星花金龟转化三菌组合下混合枝条-牛粪物料形态变化

为进一步验证三菌组合的实际转化效果, 对混合枝条-牛粪物料的生物转化过程进行动态观察, 结果见图 5 (A-E)。转化第 3 天时, 各处理物料均处于初始混合状态, 处理间无明显差异; 第 6 天时, 物料出现少量虫砂, 可见被幼虫取食的痕迹; 第 9 天时, 虫砂量显著增多; 第 12 天取食结束时, 虫砂呈现高纯度状态, 幼虫大部分裸露。上述结果直观表明, 经 JD+YM+EM 三菌组合发酵的果树枝条-牛粪物料可被白星花金龟幼虫高效转化, 实现农林废弃物的快速无害化与资源化。

2.5 复合菌剂下枝条牛粪混合物对白星花金龟幼虫生长发育的影响

发酵菌剂可有效破解果树枝条木质纤维素降解瓶颈, 显著提升幼虫生长与物料转化性能, 复合菌剂协同增效优于单菌剂。全周期内除 10 d CK 组虫体增重略高外, 各菌剂处理的虫砂产量、取食量、饲料利用率及虫砂转化率均显著 ($P < 0.05$) 高于同期 CK。其中 YM+EM+JD 三菌组合处理效果最优, 10 d 时虫砂量达 93.70 g, 较 CK 差异显著 ($P < 0.05$); 20 d 时虫体增重达 14.70 g, 虫体转化率、饲料利用率、虫砂转化率分别达 80.06%、74.70%、97.26%, 均为全试验最高值, 较同期 CK 分别提升 129.69%、124.70%、15.37%、7.37%。单菌剂中 JD 前期表现突出, EM 中后期转化效率稳定, YM 整体较弱; 两菌复合处理整体优于对应单菌, JD+EM 和 YM+EM 转化效率更优, JD+YM 幼虫增重优势明显。各处理指标均随腐解时间延长呈先升后降趋势, 20 d 为最优腐解周期, 此后因可利用养分消耗及物料适口性下降导致效率回落。

3 结论与讨论

本研究旨在通过调控菌剂的总量来分析其协同效应, 筛选高效且经济的应用配方。结果表明 JD+YM+EM 复合菌剂处理可以显著优发酵进

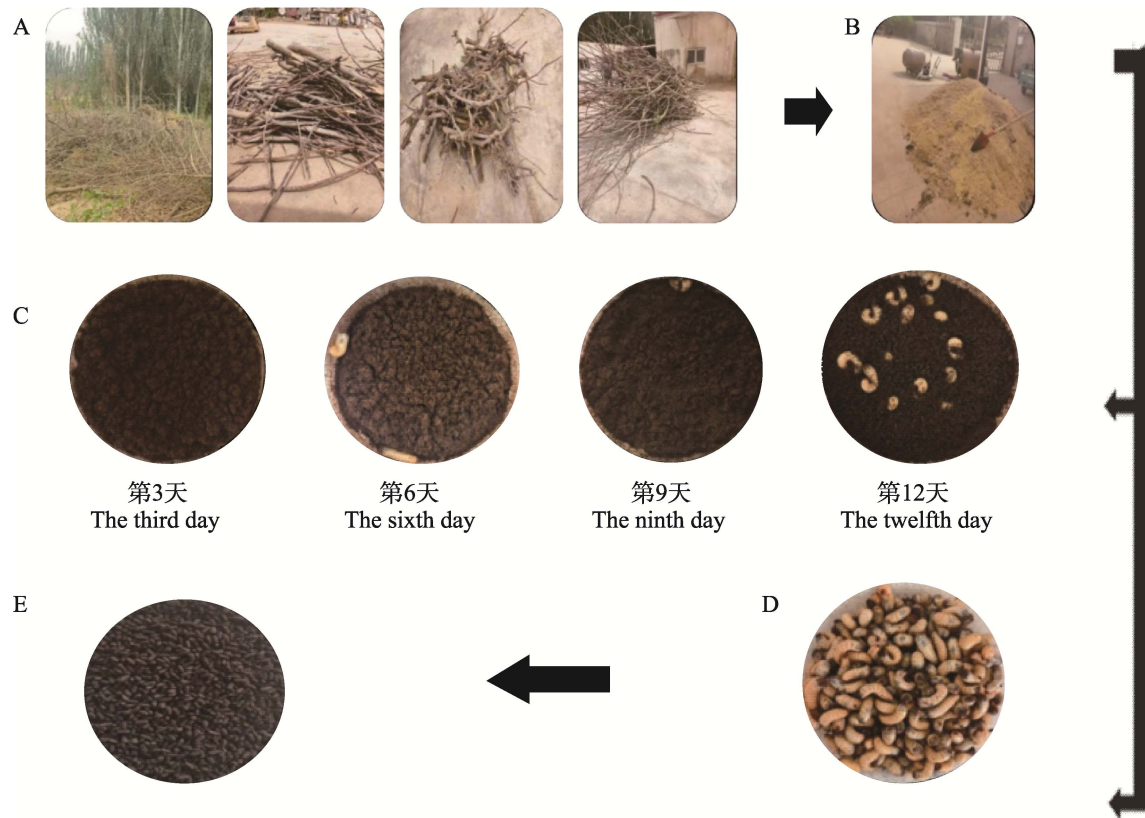


图 5 混合枝条-牛粪物料生物转化过程

Fig. 5 Bioconversion process of mixed branches and cow dung materials

A. 桃、核桃、枣、苹果枝条堆积; B. 混合枝条粉碎; C. 不同幼虫处理时间段物料状态;

D. 筛分后的虫体; E. 筛分后的虫砂。

A. Accumulation of peach, walnut, jujube, and apple branches; B. Crushing of mixed branches; C. Material status during different larval treatment periods; D. The screened insect bodies; E. Sieved insect sand.

表 3 复合菌剂-枝条牛粪混合物对白星花金龟转化效果的影响

Table 3 Effect of compound microbial agent-branch and cattle manure mixture on the conversion efficiency of *Protaetia brevitarsis*

因素和水平 Factor and level	虫砂量 (g·box ⁻¹) Dung-sand weight (g·box ⁻¹)	虫体重量 (g·box ⁻¹) Larvae weight gain (g·box ⁻¹)	取食量 (g·box ⁻¹) Food intake (g·box ⁻¹)	虫体转化率 (%) Insect transformation rate (%)	饲料利用率 (%) Feed utilization rate (%)	虫砂转化率 (%) Dung-sand conversion rate (%)
10 d						
JD	83.70±2.49 b	3.80±0.45 b	98.20±3.77 b	26.18±1.14 d	41.85±1.24 b	49.10±1.88 b
YM	68.70±1.48 e	2.00±0.35 d	77.10±2.61 d	24.22±4.16 d	34.35±0.74 e	38.55±1.30 d
EM	59.40±2.30 f	2.50±1.00 cd	71.00±5.96 e	21.47±4.03 d	29.70±1.15 f	35.50±2.98 e
YM+EM	78.50±1.22 c	3.40±1.08 bc	88.70±4.35 c	33.39±2.53 c	39.25±0.61 c	44.35±2.18 c
JD+EM	80.90±0.89 c	2.00±0.00 d	85.90±0.65 c	40.44±4.55 b	40.45±0.45 c	42.95±0.33 c
JD+YM	73.90±0.89 d	1.80±0.45 d	77.90±1.75 d	44.89±5.01 b	36.95±0.45 d	38.95±0.87 d
YM+EM+JD	93.70±2.28 a	5.90±0.74 a	105.00±3.94 a	52.50±2.55 a	46.85±1.14 a	52.50±1.97 a
CK	42.90±2.70 g	4.20±1.04 b	70.40±3.65 e	15.24±3.49 e	21.45±1.35 g	35.20±1.82 e

续表 3 (Table 3 continued)

因素和水平 Factor and level	虫砂量 (g·box ⁻¹) Dung-sand weight (g·box ⁻¹)	虫体重量 (g·box ⁻¹) Larvae weight gain (g·box ⁻¹)	取食量 (g·box ⁻¹) Food intake (g·box ⁻¹)	虫体转化率 (%) Insect transformation rate (%)	饲料利用率 (%) Feed utilization rate (%)	虫砂转化率 (%) Dung-sand conversion rate (%)
15 d						
JD	117.00±2.12 b	8.00±0.61 d	131.40±3.36 c	55.89±5.01 c	65.70±1.68 c	94.83±1.03 a
YM	101.50±1.58 e	4.10±0.22 e	126.50±2.18 d	16.45±1.16 f	63.25±1.09 d	82.93±1.19 d
EM	110.30±1.57 d	2.30±0.45 f	129.10±2.97 cd	12.17±1.54 g	64.55±1.48 cd	87.00±0.64 c
YM+EM	113.90±0.89 c	8.10±0.22 d	128.50±1.12 cd	55.69±4.20 c	64.25±0.56 cd	94.61±0.81 a
JD+EM	121.50±1.41 a	10.20±0.45 c	137.80±2.02 b	62.70±3.92 b	68.90±1.01 b	95.22±0.66 a
JD+YM	109.90±5.55 d	12.20±0.27 b	135.50±5.32 b	47.65±0.54 d	67.75±2.66 b	89.11±0.59 b
YM+EM+JD	123.90±0.89 a	14.00±0.35 a	143.50±1.41 a	71.47±2.02 a	71.75±0.71 a	95.68±0.39 a
CK	53.10±1.43 f	4.10±0.22 e	68.70±2.99 e	26.49±2.43 e	34.35±1.50 e	82.26±1.94 d
20 d						
JD	112.10±2.30 cd	6.50±0.87 d	129.00±2.76 e	38.49±4.99 d	64.50±1.38 e	91.51±0.89 c
YM	111.90±2.07 cd	6.20±0.27 d	133.70±2.28 d	28.44±1.05 e	66.85±1.14 d	87.76±0.28 d
EM	113.00±1.97 cd	10.00±0.35 c	133.10±3.40 d	50.38±6.03 c	66.55±1.70 d	91.82±1.85 c
YM+EM	121.80±1.52 b	10.10±0.22 c	139.10±1.60 c	58.81±5.58 b	69.55±0.80 c	94.43±1.24 b
JD+EM	122.10±3.09 b	13.30±0.97 b	144.20±1.79 b	60.49±5.42 b	72.10±0.89 b	93.27±1.57 b
JD+YM	114.70±0.84 c	10.10±0.22 c	141.40±2.04 bc	37.88±1.45 d	70.70±1.02 bc	87.37±0.69 d
YM+EM+JD	131.00±2.24 a	14.70±0.57 a	149.40±3.05 a	80.06±4.35 a	74.70±1.52 a	97.26±0.74 a
CK	111.50±1.22 d	6.40±0.65 d	129.50±2.18 e	35.63±3.67 d	64.75±1.09 e	90.58±0.90 c
25 d						
JD	108.30±1.48 c	12.10±1.43 b	131.00±3.67 c	53.38±3.36 b	65.50±1.84 c	91.10±1.23 b
YM	102.50±2.00 e	8.20±0.27 d	121.20±3.35 de	43.98±2.26 c	60.60±1.67 de	90.72±0.80 b
EM	106.30±1.10 cd	6.40±0.42 e	117.20±2.86 e	59.88±7.52 b	58.60±1.43 e	95.96±1.46 a
YM+EM	108.60±1.14 c	6.50±0.61 e	128.40±2.68 c	32.86±1.81 d	64.20±1.34 c	89.10±0.93 c
JD+EM	111.60±1.56 b	6.10±0.42 e	122.60±4.04 d	57.78±12.47 b	61.30±2.02 d	95.84±1.81 a
JD+YM	120.90±1.60 a	10.10±0.22 c	148.61±3.20 a	36.52±1.57 d	74.31±1.60 a	87.30±0.76 d
YM+EM+JD	123.20±2.39 a	13.80±0.84 a	143.40±4.10 b	68.46±2.40 a	71.70±2.05 b	95.07±0.67 a
CK	104.40±3.29 de	8.00±0.35 d	122.10±3.44 d	45.25±2.61 c	61.05±1.72 d	91.49±0.73 b

表中数据为平均值±标准差,同列数据后标有不同小写字母表示不同腐解菌剂下各参数上存在显著差异($P<0.05$, Tukey 多重比较分析)。

Data in the table are mean± SD, and followed by different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$) among parameters under different decomposing inoculants based on Tukey multiple comparison analysis.

程, 远超单一菌剂添加, 目前已有研究表明 EM 菌剂能显著加快堆肥升温, 缩短发酵周期, 最高温阶段为 68 ℃左右 (王玉军等, 2006; 鲁耀雄等, 2017; 郭利等, 2025)。YM 菌剂可有效促进升温并延长高温持续时间 (李尚民等, 2018), 二者的功能衔接与 JD 菌剂的底物降解能力相结

合, 形成了从升温、高温维持到深度腐解的前后接力, 效果叠加。正因如此, JD+YM+EM 复合菌剂处理也是唯一使白星花金龟幼虫在转化率的 3 项核心指标上均表现最佳的菌剂配方。在发酵时间方面: JD+YM+EM 复合菌剂处理发酵时间 15 和 20 d 的物料发酵温度、幼虫转化效果均最优且无显著差异。就转化效率指标而言, 虫体转化率、饲料利用率与虫砂转化率的变化趋势表现出较强的一致性, 即同一菌剂处理组的三类转化指标通常同步升高或降低。其中 JD+YM+EM 复合菌剂处理凭借菌种间的功能互补, 在降解底物、优化营养和促进生长方面展现出最强的协同效应, 实现了“1+1+1>3”的处理效果。综合生产效率与成本确定 15-20 d 为该体系下效果与效率的最佳发酵周期。这种功能上的接力与互补, 是维持堆体长期处于高效腐解温度区的关键。

从生产效率和成本角度考虑, 将发酵时间确定为 15-20 d 是一个科学与经济的最优选择。本研究在评价幼虫转化潜力时发现 JD+YM+EM 复合菌剂处理虫砂转化率在 97.26%, 显著高于饲料利用率 (74.70%)。这一数据特征并非异常, 恰恰是对前期研究的有力印证与重要深化。如杨磊磊等 (2024) 关于 LK 菌剂 (中农绿康生物技术有限公司) 的研究饲料利用率为 45.91%, 虫砂转化率为 87.51%, 已初步表明高效的菌剂处理会显著提升物料的过腹转化率, 导致虫砂大量产出。本研究结果与此共同证实了深度腐解促进高虫砂转化是后续高效复合菌剂处理得一个关键产出规律。本研究证明通过添加 JD+YM+EM 复合菌剂处理, 可改善农林废弃物的物理结构 (质地疏松) 与营养状况 (木质纤维素降解), 而显著提升后续白星花金龟幼虫的消化效率与取食转化, 最终实现废弃物高效资源化与昆虫蛋白生产。值得进一步探讨的是, 本研究主要基于幼虫生物学响应及发酵温度动态明确了 JD+YM+EM 复合菌剂的优势, 但尚未对发酵前后物料的纤维素、半纤维素、木质素含量及 C/N 比进行测定。这并不削弱现有结论的可靠性, 即幼虫的转化性能本身已充分证明了物料品质的改善。后续研究可在本工作基础上, 补充这些化学

指标的分析, 以更全面地揭示菌剂协同规律的内在机理, 为“微生物-昆虫”技术提供更完整的理论依据。

参考文献 (References)

- Cickova H, Newton GL, Lacy RC, Kozanek M, Szabova E, Gold M, Nagyova A, 2015. The use of fly larvae for organic waste treatment. *Waste Management*, 35: 68–80.
- Guo L, Yang ZJ, Wu YB, Wang YS, Wang HC, Liu XM, Wan GL, Zhu YX, Zhang ZW, 2025. Effect of adding EM microbial agent on the composting efficiency of chicken manure. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 40(4): 27–32. [郭利, 杨振军, 吴沿博, 王亚生, 王海川, 刘新明, 万国里, 朱永祥, 张志伟, 2025. 添加 EM 菌剂对鸡粪堆肥效果的影响. 生态产业科学与磷氟工程, 40(4): 27–32.]
- Hu CM, Yao B, Xi BD, Zhao Y, Wei ZM, Li MX, 2010. Study on optimized combination of complex functional bacteria in compost. *Research of Environmental Sciences*, 23(8): 1039–1043. [胡春明, 姚波, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李鸣晓, 2010. 堆肥复合功能菌剂的优化组合研究. 环境科学研究, 23(8): 1039–1043.]
- Li SM, Fan JH, Jiang YX, Dou XH, Qu L, Wang KH, 2018. Effects of different microbial agents on composting fermentation of chicken manure. *China Poultry*, 40(22): 45–47. [李尚民, 范建华, 蒋一秀, 窦新红, 曲亮, 王克华, 2018. 不同微生物菌剂对鸡粪堆肥发酵效果的影响. 中国家禽, 40(22): 45–47.]
- Lu YX, Cui XW, Long SP, Fan HS, Bian WL, Chen S, Peng FY, 2017. Study on effect of different decay agents on organic waste in composting process. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 54(4): 147–153. [鲁耀雄, 崔新卫, 龙世平, 范海珊, 边文亮, 陈山, 彭福元, 2017. 不同促腐菌剂对有机废弃物堆肥效果的研究. 中国土壤与肥料, 54(4): 147–153.]
- Ma WZ, 1995. Economic Insects of China. Volume 46, Coleoptera: Scarabaeidae, Chrysomelidae, and Other Families. Beijing: Science Press. 119–120. [马文珍, 1995. 中国经济昆虫志. 第四十六册, 鞘翅目: 花金龟科、斑金龟科、弯腿金龟科. 北京: 科学出版社. 119–120.]
- Rehman KU, Rehman A, Cai M, Xiang L, Wang H, Li W, Zhang J, Yu Z, 2017. Conversion of mixtures of dairy manure and soybean curd residue by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.). *Journal of Cleaner Production*, 154: 366–373.
- Shi YY, Shen QR, Lou WJ, Liu SH, Cui ZL, 1996. Isolation and screening of cellulose-decomposing microbial communities. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 41(3): 62–65. [史玉英, 沈其荣, 姜无忌, 刘生浩, 崔中利, 1996. 纤维素分解菌群的分离和筛选. 南京农业大学学报, 41(3): 62–65.]

- Song XC, Guo DJ, Ma Y, Luo J, Wang GF, Liu XH, 2019. Matured compost recycling enhances the efficiency of composting and improves the quality of end-products during composting of herb residues. *Journal of Agro-Environment Science*, 38(12): 2844–2851. [宋修超, 郭德杰, 马艳, 罗佳, 王光飞, 刘新红, 2019. 腐熟堆肥回流对中药渣好氧堆肥进程及堆肥品质的影响. 农业环境科学学报, 38(12): 2844–2851.]
- Wang YJ, Dou S, Cui JT, Zhang JJ, Gao JC, 2006. Effect of combined fungus on physical and chemical index during agricultural wastes composting. *Journal of Agro-Environment Science*, 26(5): 1354–1358. [王玉军, 窦森, 崔俊涛, 张晋京, 高吉昌, 2006. 复合菌剂对农业废弃物堆肥过程中理化指标变化的影响. 农业环境科学学报, 26(5): 1354–1358.]
- Xi BD, Liu HL, Meng W, Li HD, Wang QS, 2001. Composting process of municipal solid waste with high effective complex microbial community. *Environmental Science*, 26(5): 122–125. [席北斗, 刘鸿亮, 孟伟, 李捍东, 王庆生, 2001. 高效复合微生物菌群在垃圾堆肥中的应用. 环境科学, 26(5): 122–125.]
- Xu Z, Zhang LL, Zhang FB, Liang LN, Li J, 2009. Effects of indigenous and exogenous microbial inocula on composting in a bioreactor. *China Environmental Science*, 29(8): 856–860. [徐智, 张陇利, 张发宝, 梁丽娜, 李季, 2009. 接种内外源微生物菌剂对堆肥效果的影响. 中国环境科学, 29(8): 856–860.]
- Yang C, Liu YS, Xu XY, Zhao L, 2015. The study on the effect of *Protaetia brevitarsis* Lewis larvae transformation the corn straw. *Journal of Environmental Entomology*, 37(1): 122–127. [杨诚, 刘玉升, 徐晓燕, 赵莉, 2015. 白星花金龟幼虫对醇化玉米秸秆取食效果的研究. 环境昆虫学报, 37(1): 122–127.]
- Yang HT, 2023. Study on the conversion ability of *Protaetia brevitarsis* larvae to three kinds of spent mushroom substrates. *Contemporary Horticulture*, 46(21): 28–30. [杨昊庭, 2023. 白星花金龟幼虫对 3 种木腐菌糠的转化力研究. 现代园艺, 46(21): 28–30.]
- Yang LL, Du HY, Sheng Q, Wei ZP, Zhang GJ, Xu AD, Wang YF, Yang WJ, Wang Z, Ma DY, Huang W, 2024. Application of microorganism and insect composite technology in bio-transformation of pear branches infected by fire blight. *Journal of Agro-Environment Science*, 43(10): 2393–2400. [杨磊磊, 杜会英, 盛强, 魏志鹏, 张广杰, 徐安东, 王易芳, 杨文君, 王赞, 马德英, 黄伟, 2024. 菌虫复合技术在梨火疫病疫木生物转化中的应用. 农业环境科学学报, 43(10): 2393–2400.]
- Yin S, Wang XJ, Ma GY, Liu JH, Tian D, Wang JH, Yang ZB, 2016. Multi-microorganisms for cornstalk biodegradation. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 31(5): 532–537. [尹爽, 王修俊, 马桂英, 刘佳慧, 田多, 王纪辉, 杨志波, 2016. 复合菌剂对玉米秸秆的生物降解作用. 福建农业学报, 31(5): 532–537.]
- Zhang GJ, 2022. Effects of cotton stalk returned to field by insect-fungus complex technology on cotton growth and development and occurrence of verticillium wilt. Urumqi: Xinjiang Agricultural University. [张广杰, 2022. 虫菌复合技术转化棉秆还田对棉花生长发育及黄萎病发生的影响. 乌鲁木齐: 新疆农业大学.]
- Zhang X, 2022. Effect of microbial fermentation on the transformation of wheat straw by *Protaetia brevitarsis* larvae. Hefei: Anhui Agricultural University. [张雪, 2022. 微生物发酵对白星花金龟幼虫转化小麦秸秆的影响. 合肥: 安徽农业大学.]
- Zhao KN, Zhao GZ, Guo H, Wang XX, Zhu SN, Xu R, 2016. The function and role of microbial agents in composting technology of garden waste. *Biotechnology Bulletin*, 32(1): 41–48. [赵恺凝, 赵国柱, 国辉, 王晓旭, 朱胜男, 徐锐, 2016. 园林废弃物堆肥化技术中微生物菌剂的功能与作用. 生物技术通报, 32(1): 41–48.]
- Zhao W, Zhao CY, Kong H, Wang L, 2023. Transformation of the spent substrate of *Hypsizygus marmoreus* by *Protaetia brevitarsis* larvae. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 54(6): 865–872. [赵威, 赵传岳, 孔昊, 王丽, 2023. 白星花金龟幼虫转化蟹味菇菌糠的研究. 山东农业大学学报(自然科学版), 54(6): 865–872.]