

农业废弃物堆腐过程中氧化还原酶活性的变化

高 华^{1,2}, 秦清军^{1,2}, 谷 洁^{1,2}, 贺 欢¹, 李生秀¹, 李鸣雷^{1,2}

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 陕西省循环农业工程研究中心, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] **【目的】**从酶学角度揭示好氧发酵的生物机理。**【方法】**选择在目前我国数量多、分布广的有机固体废弃物鸡粪和小麦秸秆及花椒籽粕为主要材料,采用堆腐装置,以未添加复合微生物菌剂作为对照(CK),研究复合微生物菌剂(加菌剂处理)对农业废弃物静态高温堆腐过程中氧化还原酶(过氧化氢酶、脱氢酶和多酚氧化酶)活性的影响。**【结果】**加菌剂处理和CK的过氧化氢酶活性分别在堆腐3和4 d达到峰值(1 705和1 697 mL/g);加菌剂处理和CK的脱氢酶活性分别在堆腐10和12 d达最大值(8.39和6.57 $\mu\text{L/g}$);加菌剂处理和CK的多酚氧化酶活性分别在堆腐18和32 d达峰值(7.33和6.65 mg/g)。从堆腐的整个过程看,随着堆腐时间的延长,加菌剂处理的过氧化氢酶、脱氢酶和多酚氧化酶活性上升较快,而且这3种酶活性的最大值均比CK高。**【结论】**添加复合微生物菌剂可以提高堆腐过程中氧化还原酶活性,使酶活性峰值出现的时间提前,对堆腐过程中的物质分解具有促进作用。

[关键词] 复合微生物菌剂;农业废弃物;堆腐;氧化还原酶活性

[中图分类号] S182

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2008)02-0222-07

Activity changes of oxidoreductase during composting of agricultural waste materials

GAO Hua^{1,2}, QIN Qing-jun^{1,2}, GU Jie^{1,2}, HE Huan¹, LI Sheng-xiu¹, LI Ming-lei^{1,2}

(1 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Shaanxi Province Cycle of Agricultural Engineering Research Center, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** An experiment was conducted with enzymology theory and analysis technique to study dynamic change of enzyme activity in the static temperature composting process to reveal further biological mechanism during the aerobic fermentation with oxygen. **【Method】** During the aerobic composting process of the agricultural waste material, microorganism plays an essential role. This experiment was conducted with a large amount of materials from chicken excrement and wheat straw in a wide range in China to study the activity changes of oxidoreductase during composting at high temperature and in a static state. **【Result】** The result showed temperatures of different positions of the treatments adding microorganism agent were higher than those of CK, and the temperatures rose more quickly than those of CK. The activity of enzyme of H_2O_2 in the materials adding microorganism agent reached the peak value by the third day 1 705 mL/g, while that of CK reached the peak value by the fourth day 1 697 mL/g; dehydrogenase activity, reached the peak value by the tenth day 8.39 $\mu\text{L/g}$ under the condition of adding microorganism agent, and the value of that of CK was by twelfth day 6.57 $\mu\text{L/g}$; the peak value of polyphenol oxidized activity was up to 7.33 mg/g by the eighteenth day, while that in CK was 6.65 mg/g by the 32 days. Through the study we could know enzyme under the condition of adding microorganism agent rose quickly and moreover

* [收稿日期] 2007-08-08

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40771109); 陕西省农业科技攻关项目(2004K012G15202, 2005K042G11); 科技部农业科技成果转化项目(05EFN 21601195)

[作者简介] 高 华(1956—), 男, 陕西咸阳人, 高级农艺师, 主要从事农业废弃物利用研究。

[通讯作者] 秦清军(1975—), 男, 陕西旬阳人, 讲师, 硕士, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: qinqingjun111@163.com

the maximum of enzyme was also higher than the value of that in CK. The activity of the enzyme of H_2O_2 was higher than CK in a basic level during the whole composting process. The dehydrogenase activity with microorganism agent in the middle period of composting was higher than CK. The polyphenol oxidized activity, 26 days before composting was higher than those in CK. 【Conclusion】 It is found that adding microorganism agent could improve the activity of oxidoreductase, promote the decomposition of composting, and promote degradation of lignin and its transformation.

Key words: microorganisms agent; agricultural waste materials; compost; activity of oxidoreductase

好氧堆肥法是目前普遍采用的一项有机固体废弃物生物处理技术。堆腐过程中的生化反应均是在生物酶催化作用下发生的,其中参与生化反应的生物酶类型很多,主要有水解酶和氧化还原酶。氧化还原酶主要包括过氧化氢酶、脱氢酶、多酚氧化酶。研究堆腐过程中氧化还原酶活性的变化,可推断腐殖质化的进程和强度^[1-3]。复合微生物菌剂是经分离、筛选的有效微生物,用来调节堆腐过程中菌群结构、提高微生物降解活性及微生物降解有机成分效率的复合制剂。目前,前人已对复合微生物菌剂在果渣、污泥堆肥上的应用效果,及其对牛粪、鸡粪堆肥中有机物变化的影响进行了研究^[4-7],但有关复合微生物菌剂对堆肥过程中氧化还原酶活性影响的研

究还较少。因此,本试验运用酶学原理^[8],在农业有机固体废弃物(由鸡粪、小麦秸秆和花椒籽粕组成)中添加复合微生物菌剂后,研究高温静态堆腐过程中过氧化氢酶、多酚氧化酶、脱氢酶活性的变化及其与温度的关系,旨在揭示堆腐好氧生物发酵的机理,为农业有机固体废弃物的再利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 堆腐材料与装置

1.1.1 堆腐材料 本试验中的农业有机固体废弃物包括鸡粪、小麦秸秆和花椒籽粕,其养分含量见表 1。复合微生物菌剂为本课题组筛选研制,由放线菌、细菌、酵母菌和霉菌组成。

表 1 鸡粪、小麦秸秆和花椒籽粕的养分含量
Table 1 Basic composition of experimentation materials

试验材料 Experiment material	有机碳/(g·kg ⁻¹) Organic C	全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	C/N	全磷/(g·kg ⁻¹) Total P	全钾/(g·kg ⁻¹) Total K ₂ O
小麦秸秆 Straw of wheat	396.0	6.3	62.9	18.6	12.4
鸡粪 Faeces of chicken	311.6	27.1	14.36	21.2	19.2
花椒籽粕 Pepper seed meal	393.2	19.6	20.06	2.32	22.8

1.1.2 堆腐装置 堆腐装置主要由两个高 1.0 m, 内径 0.6 m, 外径 0.7 m 的圆柱形发酵罐(反应器)组成。发酵罐由双层不锈钢构成外壳,层间有 0.5 cm 厚的保温材料;底部为带有小孔的不锈钢圆板,堆腐材料混匀置于其上。供应的空气从罐底部进入,通过圆板的透气小孔进入罐内,穿过堆腐物料后从上部排出(图 1)。

1.2 试验方法

首先将花椒籽粕、鸡粪和小麦秸秆按 1:3:2 比例(质量比)混合,使混合物中 C/N 为 30~35。然后加自来水,使堆料含水率为 55%~65%^[1]。试验设添加复合微生物菌剂(加菌剂处理)和不加菌剂(对照(CK))2 个处理,加菌剂处理中复合微生物菌剂用量为每 100 kg 混合物中添加 500 mL 复合微生物菌剂。将以上 2 个处理的混合物(200 kg)分别装入堆腐装置中(图 1)。堆料不同部位插有测温探头,用 ZDR-11 型温度记录仪测量和记录堆腐过程中堆料的温度变化。堆腐周期为 34 d,在堆腐的第

1 周每天采集 1 次堆腐样品,测定酶(过氧化氢酶、脱氢酶和多酚氧化酶)活性,之后每隔 1 d 采 1 次样品进行测定,采样时采用多点混合法进行。

1.3 测定项目及方法

过氧化氢酶、多酚氧化酶、脱氢酶活性测定均参照文献[9]的方法进行。过氧化氢酶活性测定方法是在样品中加入过氧化氢后于 37℃ 下培养 20 min,用高锰酸钾滴定,活性单位以 1 g 堆料在 20 min 消耗 0.001 mol/L KMnSO_4 的体积(mL)表示,即 mL/g。脱氢酶活性测定是在样品中加入氢的受体三苯基四唑氯化物,之后在 30℃ 下培养 24 h,用分光光度计测定脱氢酶作用下生成红色甲臢的量,活性单位以 1 g 堆料在 24 h 生成 H^+ 的体积(μL)表示,即 $\mu\text{L/g}$ 。多酚氧化酶测定是在样品中加入邻苯三酚振荡后于 30℃ 培养 2 h,邻苯三酚在多酚氧化酶作用下氧化生成紫色没食子素,用乙醚提取生成的紫色没食子素,比色着色的乙醚相,通过测定没食子素含量以表征多酚氧化酶活性,活性单位以 1 g 堆料

在 2 h 生成的没食子素质量(mg)表示,即 mg/g 。

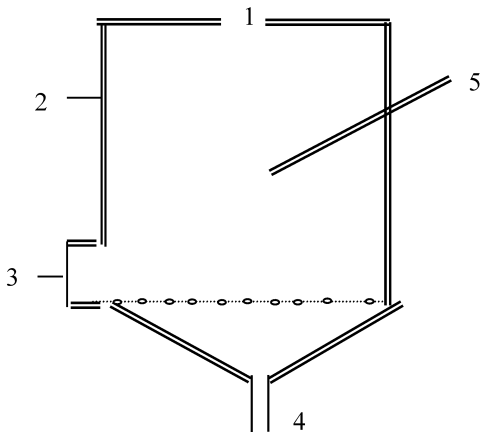


图 1 静态高温堆腐发酵装置平面图

1. 装料、排气口;2. 隔热层;3. 出口口;4. 进气口;5. 温度传感器
- Fig. 1 Diagram of composting device
1. Entrance of material and gas exit;2. Layer of heat insulation;
3. Exit of material;4. Entrence of air;5. Sensors of temperature

2 结果与分析

2.1 复合微生物菌剂对过氧化氢酶活性的影响

从图 2 可以看出,在堆腐过程中(0~34 d),除 0~

1,4~8 和 22~24 d 外,加菌剂处理的过氧化氢酶活性高于 CK。在堆腐开始的 0~1 d,CK 的过氧化氢酶活性较加菌剂处理高,这可能是因为加菌剂处理中的微生物需要一个适应期^[2,10-12]。堆腐 3 d 时,加菌剂处理的过氧化氢酶活性达到峰值(1 705 mL/g),而 CK 的过氧化氢酶活性在堆腐 4 d 时才达到峰值(1 697 mL/g)。在堆料温度达到最高值后,加菌剂处理和 CK 的过氧化氢酶活性均迅速降低,可能是因为高温使微生物种类和数量减少,进而对酶活性产生了影响。由此可知,无论加入复合微生物菌剂与否,过氧化氢酶活性在堆腐前期较高,后期较低。在堆腐起始的 0~2 d CK 和加菌剂处理的堆料温度变化趋势一致,2~6 d,加菌剂处理的堆料温度高于 CK,6~12 d CK 的堆料温度高于加菌剂处理,12~28 d 加菌剂处理的堆料温度高于 CK,之后 CK 的温度高于加菌剂处理。堆腐 4 d 时加菌剂处理的堆料温度达到峰值(67.2 ℃),而 CK 的堆料温度在堆腐 6 d 时达峰值(65.1 ℃)。

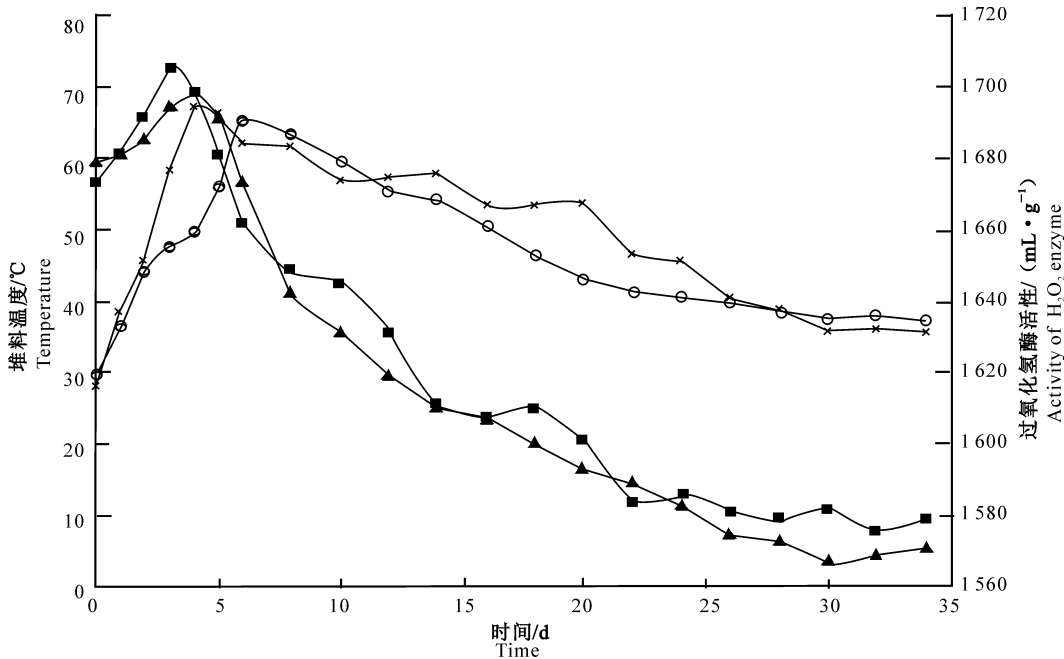


图 2 复合微生物菌剂对堆腐过程中过氧化氢酶活性的影响

- ×—, 堆料温度(加菌剂处理);—○—, 堆料温度(CK);—■—, 过氧化氢酶活性(加菌剂处理);—▲—, 过氧化氢酶活性(CK)
- Fig. 2 Changes of enzyme of H₂O₂ during composting after adding microorganism agent
- ×—, Temperature of materials(Agent);—○—, Temperature of materials(CK);—■—, Activity of H₂O₂ enzyme(Agent);
—▲—, Activity of H₂O₂ enzyme(CK)

在堆腐过程中,CK 高温腐解阶段持续时间较短(5~16 d),温度为 50.5~65.1 ℃,其余时间的腐解温度均低于 50 ℃。加菌剂处理高温腐解阶段持续时间较长(3~20 d),最高温度为 67.2 ℃,平均为

(58.9±4.5) ℃(图 2)。将 CK 和加菌剂处理的堆料温度与其过氧化氢酶活性进行相关分析,可以得到这 2 个处理在腐解达到高温阶段(55 ℃)后过氧化氢酶活性(y)与温度(x)的关系曲线(图 3 和 4)及

动态关系式:CK: $y=3.401\ 4x+1\ 443$, $R^2=0.784\ 6$; 加菌剂处理: $y=0.124\ 5x^2-8.977\ 1x+1.739\ 4$, $R^2=0.816\ 8$ 。

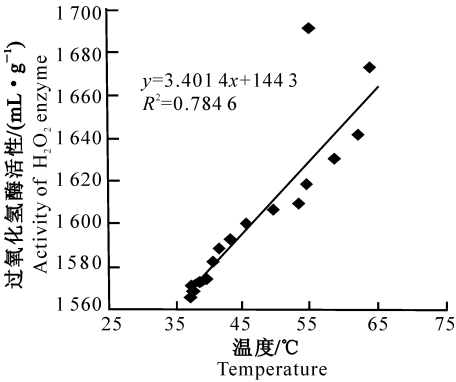


图 3 高温堆腐过程中(温度升至 55 ℃ 后到堆腐结束) CK 过氧化氢酶活性与温度的关系

Fig. 3 Relationship between temperature and activity of H₂O₂ enzyme during composting(after 55 ℃ to the end of experiment,CK)

2.2 复合微生物菌剂对脱氢酶活性的影响

脱氢酶属于氧化酶,其变化可以反映堆腐过程

图 3 和 4 显示,在高温堆腐阶段,随着堆料温度升高,CK 和加菌剂处理的过氧化氢酶活性均迅速升高,表明温度是影响过氧化氢酶活性的主要因子。

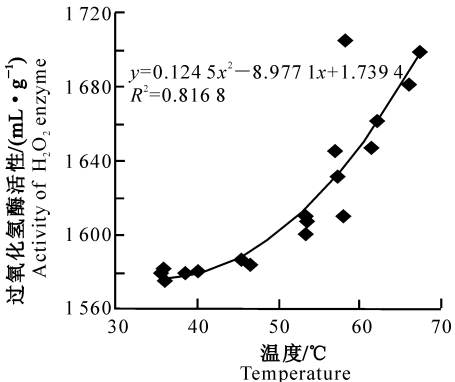


图 4 高温堆腐过程中(温度升至 55 ℃ 后到堆腐结束)加菌剂处理过氧化氢酶活性与温度的关系

Fig. 4 Relationship between temperature and activity of H₂O₂ enzyme during composting (after 55 ℃ to the end of experiment,Agent)

中的物质氧化程度。复合微生物菌剂对脱氢酶活性的影响见图 5。

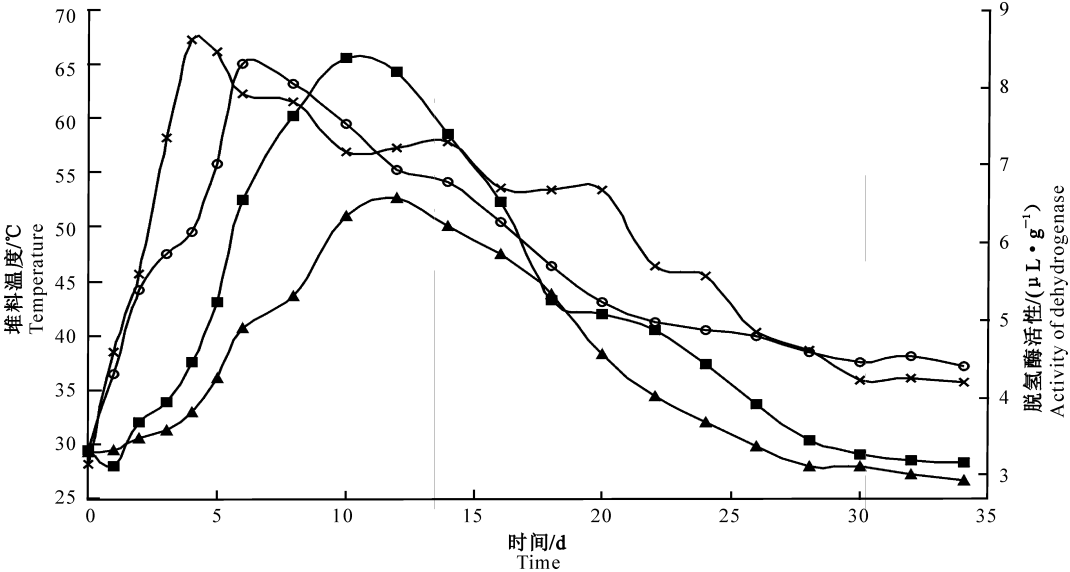


图 5 复合微生物菌剂对堆腐过程中脱氢酶活性的影响

—×—,堆料温度(加菌剂处理);—○—,堆料温度(CK);—■—,脱氢酶活性(加菌剂处理);—▲—,脱氢酶活性(CK)

Fig. 5 Change of dehydrogenase activity during composting after adding microorganism agent

—×—, Temperature of materials(Agent);—○—, Temperature of materials(CK);—■—, Activity of dehydrogenase(Agent); —▲—, Activity of dehydrogenase(CK)

从图 5 可以看出,在开始堆腐的 0~1 d,随温度升高加菌剂处理的脱氢酶活性从 3.31 μL/g 下降到 3.12 μL/g;在 1~10 d,随堆腐时间的延长,加菌剂处理的脱氢酶活性迅速升高,在堆腐 10 d 时达峰值 8.39 μL/g,10~34 d 加菌剂处理的脱氢酶活性随堆

腐时间的延长而降低,可见在堆腐的开始阶段,温度上升迅速,低温微生物不适应较高温度而活性降低,分泌的脱氢酶量减少^[13],之后随着堆料温度的升高,高温微生物活性升高,脱氢酶活性也随之增加。堆腐过程中,加菌剂处理的堆料温度达最高值(67.2

℃)之后,随着堆腐过程的进行,加菌剂处理的脱氢酶活性与温度间呈线性正相关关系(图 6),符合方程 $y=0.145\ 5x-1.869\ 6$, $R^2=0.672\ 1$ 。在开始堆腐的 0~5 d, CK 的脱氢酶活性上升较慢,在 5~12 d,随堆腐时间的延长,CK 的脱氢酶活性迅速增加,在堆腐 12 d 时达峰值 6.57 $\mu\text{L/g}$,之后随堆肥时间延长脱氢酶活性呈下降趋势。总体看,在达到堆腐高温阶段(55℃)后,CK 脱氢酶活性与温度间呈抛物线形关系(图 7),符合方程 $y=-0.009\ 6x^2+1.056\ 9x-23.297$, $R^2=0.842\ 3$ 。在堆腐 28~34 d,加菌剂处理和 CK 的脱氢酶活性均趋于稳定,为

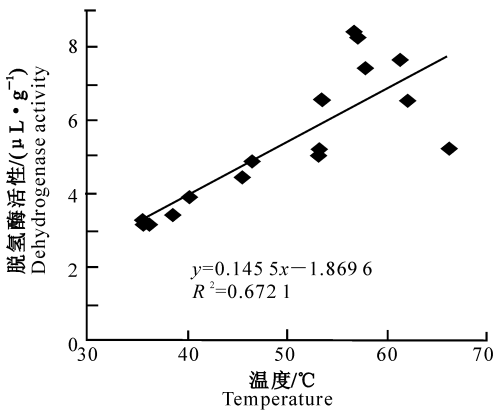


图 6 高温堆腐过程中(温度升至 67.2℃后到堆腐结束)加菌剂处理脱氢酶活性与温度的关系

Fig. 6 Relationship between temperature and activity of dehydrogenase during composting(after temperature get 67.2℃ to the end of experiment, Agent)

2.3 复合微生物菌剂对多酚氧化酶活性的影响

多酚氧化酶活性与有机质分解和发酵温度密切相关^[3]。木质素是农业废弃物中含量较高而又不易分解的一种物质。多酚氧化酶不仅能催化木质素降解,还能使木质素氧化后的产物醌与氨基酸缩合生成胡敏酸^[3,14]。多酚氧化酶直接参与环境中酚类物质转化生成醌的反应,而醌与氨基酸等通过一系列生物化学反应形成最初的腐殖酸分子^[15]。

图 8 显示,堆腐过程中,多酚氧化酶活性与过氧化氢酶和脱氢酶活性的动态变化不同。在堆腐初始阶段(0~4 d),加菌剂处理和 CK 的多酚氧化酶活性变化趋势一致;之后两者变化差异较大。4~32 d,CK 的多酚氧化酶活性随堆腐时间的延长而缓慢增加,于堆腐 32 d 时升至峰值(6.65 mg/g),之后基本维持稳定;4~18 d,加菌剂处理的多酚氧化酶活性随堆腐时间的延长而迅速增大,于堆腐 18 d 时(堆料温度为 53.4℃)达最大值(7.33 mg/g),之后随堆腐时间的延长而迅速下降,32 d 后基本维持稳

2.93~3.15 $\mu\text{L/g}$ 。在堆腐起始的 0~2 d,CK 和加菌剂处理的堆料温度相差不大;随堆腐时间的延长,分别在堆腐 4 和 6 d 时,加菌剂处理和 CK 的堆料温度均达最高值(67.2 和 65.1℃);之后随堆腐时间的继续延长,CK 和加菌剂处理的堆料温度均呈下降趋势,至 28 d 时均趋于稳定。在整个堆腐周期中,CK 和加菌剂处理的脱氢酶活性均表现为堆腐中期较高,反映了堆腐过程的氧化反应主要在堆腐中期进行。加菌剂处理的脱氢酶活性在堆腐中期明显高于 CK 处理,说明加入复合微生物菌剂对堆腐过程中的物质分解具有促进作用。

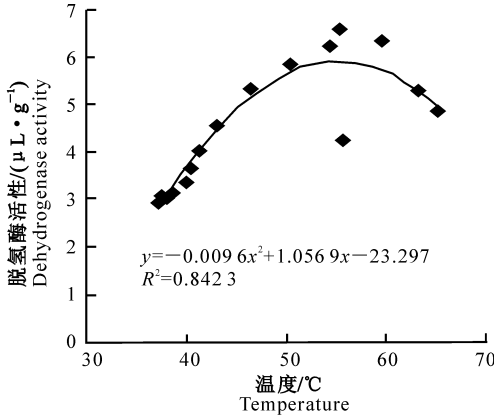


图 7 高温堆腐过程中(温度升至 55℃后到堆腐结束)CK 脱氢酶活性与温度的关系

Fig. 7 Relationship between temperature and activity of dehydrogenase during composting(after 55℃ to the end of experiment, CK)

定。在堆料温度达到 55℃的高温堆腐阶段后,CK 和加菌剂处理多酚氧化酶活性与温度间均呈显著的相关关系,CK 多酚氧化酶活性(y)与温度(x)间的关系符合方程式 $y=-3.411\ln(x)+18.774$, $R^2=0.887\ 6$ (图 9),加菌剂处理多酚氧化酶活性(y)与温度(x)间的关系符合方程式 $y=-0.009\ 3x^2+0.927\ 5x-16.565$, $R^2=0.680\ 2$ (图 10)。

图 8 显示,在堆腐中后期 CK 和加菌剂处理的多酚氧化酶活性均比堆腐前期高,可能与堆腐过程中木质素在中后期分解以及胡敏酸在中后期合成有关。在堆腐 0~26 d,加菌剂处理的多酚氧化酶活性高于 CK,可以更好的促进木质素的降解及其产物的转化;在 26~32 d,CK 的多酚氧化酶活性仍然呈现缓慢上升趋势,说明堆料还没有达到完全腐熟阶段,而加菌剂处理的多酚氧化酶活性逐渐降低;32~34 d,CK 和加菌剂处理的多酚氧化酶活性均趋于稳定,说明添加复合微生物菌剂的堆料较 CK 提前达到腐熟化程度。

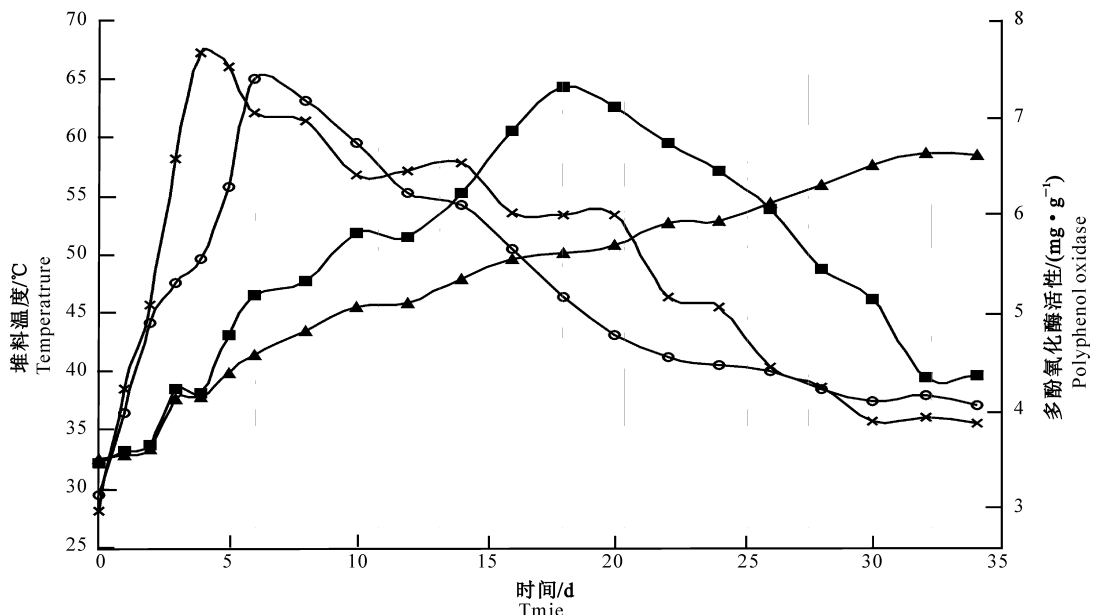


图 8 复合微生物菌剂对堆腐过程中多酚氧化酶活性的影响

—×—, 堆料温度 (加菌剂处理); —○—, 堆料温度 (CK); —■—, 多酚氧化酶活性 (加菌剂处理); —▲—, 多酚氧化酶活性 (CK)
Fig. 8 Change of polyphenol oxidase activity during composting after adding microorganism agent
—×—, Temperature of materials (Agent); —○—, Temperature of materials (CK); —■—, Activity of polyphenol oxidase (Agent);
—▲—, Activity of polyphenol oxidase (CK)

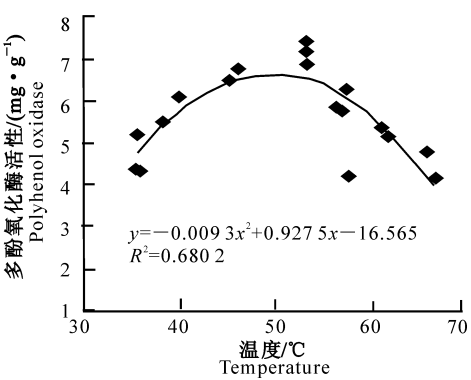
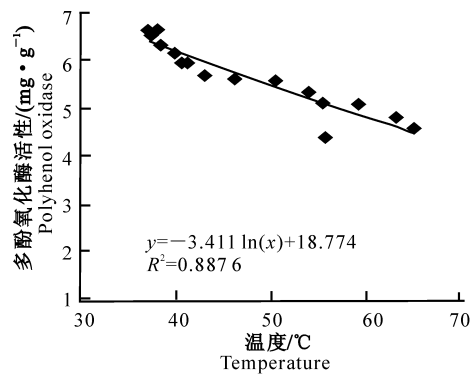


图 9 高温堆腐过程中(温度升至 55 °C 后到堆腐结束) CK 多酚氧化酶活性与温度的关系

Fig. 9 Relationship between temperature and activity of polyphenol oxidase during composting(after 55 °C to the end of experiment, CK)

图 10 高温堆腐过程中(温度升至 55 °C 后到堆腐结束)加菌剂处理多酚氧化酶活性与温度的关系

Fig. 10 Relationship between temperature and activity of polyphenol oxidase during composting(after 55 °C to the end of experiment, Agent)

3 讨论与结论

酶是生物产生的一些特殊物质,是一类具有高度专一性的生物催化剂^[16]。过氧化氢酶是一种保护酶,其活性与有机质含量及微生物数量有关^[9]。微生物分泌的过氧化氢酶与生物氧化反应密切相关,其活性大小反映堆腐中有机质转化的强度^[11-12]。本研究结果表明,在农业废弃物腐解过程中,过氧化氢酶活性在堆腐前期较高,在堆腐后期呈下降趋势,加菌剂处理的过氧化氢酶活性较 CK 高,说明加入复合微生物菌剂可以加快农业废弃物腐解。脱氢酶

属于氧化酶,其变化可以反映堆腐过程中的物质氧化程度。本试验中,在堆腐前期,脱氢酶活性呈上升趋势,在堆腐中期脱氢酶活性较高,堆腐后期脱氢酶活性下降;与加菌剂处理相比,CK 的脱氢酶活性峰值出现时间相对滞后,表明在农业废弃物腐解过程中加入复合微生物菌剂可以提高堆腐过程脱氢酶的活性。本研究中,多酚氧化酶活性变化与过氧化氢酶和脱氢酶活性不同,在堆腐初始阶段,加菌剂处理和 CK 的多酚氧化酶活性随着堆料温度的升高而增加;加菌剂处理和 CK 的多酚氧化酶活性与温度间均呈显著的相关关系,这与倪治华等^[15]的研究结果一致。

已有研究表明,单一的细菌、真菌、放线菌群体,无论其活性多高,在加快垃圾生物降解进程中的作用均不及复合微生物菌剂中菌群的共同作用^[17-18]。从本研究堆腐的整个过程可以看出,加菌剂处理的过氧化氢酶活性在整个堆腐过程中基本高于 CK;加菌剂处理的脱氢酶活性在堆腐中期高于 CK 处理,说明添加复合微生物菌剂对堆腐的物质分解具有促进作用;在堆腐的 0~26 d 加菌剂处理的多酚氧化酶活性高于 CK,表明微生物菌剂可以促进木质素降解及其产物的转化。

[参考文献]

[1] 戴芳,曾光明,牛承岗,等.堆腐化过程中生物酶活性的研究进展[J].中国生物工程杂志,2005(增刊):148-151.
Dai F, Zeng G M, Niu C G, et al. Advance in the studies on bioenzyme activity during the composting [J]. China Biotechnology, 2005(Supp.):148-151. (in Chinese)

[2] 谷洁,李生秀,秦清军,等.氧化还原类酶活性在农业废弃物静态高温堆腐过程中变化的研究[J].农业工程学报,2006,22(2):138-141.
Guo J, Li S X, Qin Q J, et al. Changes of oxidization and reduction enzymes of agricultural waste materials during composting at high temperature and static state [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2):138-141. (in Chinese)

[3] 谢春艳,宾宝华,陈兆平,等.多酚氧化酶及其生理功能[J].生物学学报,1999,34(6):11-13.
Xie C Y, Bin B H, Chen Z P, et al. Polyphenol oxidase and physiological function [J]. Biology Communication, 1999, 34(6):11-13. (in Chinese)

[4] 徐智,汤利,李少明,等.两种微生物菌剂对西番莲果渣高温堆肥腐熟进程的影响[J].应用生态学报,2007,18(6):1270-1274.
Xu Z, Tang L, Li S M, et al. Effects of two microbial agents on high temperature composting of passion fruit marc [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6):1270-1274. (in Chinese)

[5] 许晓英,李季.复合微生物菌剂在污泥高温好氧堆肥中的应用[J].中国生态农业学报,2006,14(3):64-66.
Xu X Y, Li J. Application of complex microbial inoculants in the high-temperature and aeration composting sewage sludge [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(3):64-66. (in Chinese)

[6] 李自刚,黄为一.微生物腐熟菌剂对牛粪堆肥产品中低分子量有机物的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(3):437-444.
Li Z G, Huang W Y. Effect on low-molecular weight organic matters of cow dung composted production by micro-inoculants [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(3):437-444. (in Chinese)

[7] 王卫平,薛智勇,朱凤香,等.不同微生物菌剂处理对鸡粪堆肥发酵的影响[J].浙江农业学报,2005,17(5):292-295.

Wang W P, Xue Z Y, Zhu F X, et al. Effects of inoculating different microorganism agents on composting of chicken manure [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2005, 17(5):292-295. (in Chinese)

[8] 杨万勤,王开运.土壤酶研究动态与发展[J].应用与环境生物学报,2002,8(5):564-570.
Yang W Q, Wang K Y. Advances on soil enzymology [J]. Chinese Journal Applied Environment Biology, 2002, 8(5):564-570. (in Chinese)

[9] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:中国农业出版社,1986:260-339.
Guan S Y. Soil enzymes and methodology [M]. Beijing: Agric Publishing House, 1986:260-339. (in Chinese)

[10] 杨柳燕,肖琳.环境微生物技术[M].北京:科学出版社,2003:257-265.
Yang L Y, Xiao L. Environmental microorganism technology [M]. Beijing: Science Press, 2003:257-265. (in Chinese)

[11] Connell D D. Compost application improves soil properties [J]. Biocycle, 1993, 34:61-63.

[12] Tiquia S M. Evolution of extracellular enzyme activities during manure composting [J]. Journal of Applied Microbiology, 2002, 92:764-775.

[13] 朴哲,崔宗均,苏宝林.高温堆腐的生物化学变化特征及植物抑制物质的降解规律[J].农业环境保护,2001,20(4):206-209.
Piao Z, Cui Z J, Su B L. Characterization of biochemistry and degradation of plant-inhibited materials during high-temperature composting [J]. Agro-environmental Protection, 2001, 20(4):206-209. (in Chinese)

[14] 王宜磊.白腐菌多酚氧化酶研究[J].山东理工大学学报:自然科学版,2003,17(1):100-102.
Wang Y L. Study on polyphenol oxidase of the white rot fungi [J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2003, 17(1):100-102. (in Chinese)

[15] 倪治华,薛智勇.猪粪堆制过程中主要酶活性变化[J].植物营养与肥料学报,2005,11(3):406-411.
Li Z H, Xue Z Y. Changes of main enzymes activities of pig manure during composting [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(3):406-411. (in Chinese)

[16] 孙铁珩,李培军,周启星,等.土壤污染形成机理与修复技术[M].北京:科学出版社,2005:440.
Sun T H, Li P J, Zhou Q X, et al. Formation mechanism and remediation of soil pollution [M]. Beijing: Science Press, 2005:440. (in Chinese)

[17] 席北斗,刘鸿亮,孟伟.垃圾堆腐高效复合微生物菌剂的制备[J].环境科学研究,2003,16(2):58-64.
Xi B D, Liu H L, Meng W. Study on preparation technology of complex microbial community in composting process [J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(2):58-64. (in Chinese)

[18] Klammer M, Baath E. Microbial community dynamics during composting of straw material studied using phospholipids fatty acid analysis [J]. FEMS Microbiology Ecology, 1998, 27:9-20.