

真菌及混合菌对玉米秸秆类腐殖质形成和转化的影响

王 帅^{1,2}, 窦 森^{1*}, 王晓平¹, 朱伟宁¹, 邵 晨¹

(1.吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2.吉林市农业技术推广中心, 吉林 132013)

摘 要:针对 3 类真菌(木霉、黑曲霉和青霉)及混合菌在液体培养条件下对玉米秸秆类腐殖质形成和转化的影响,重点研究接种后秸秆类腐殖质组成的变化情况,以期对秸秆的生物降解、转化与土壤有机质的形成、更新提供理论参考和依据。结果表明:(1)接种可迅速减少代谢液和增加菌体-秸秆残留物的含碳量,随菌体繁殖,代谢液中含碳量持续降低,随后,降解作用促使小分子进入代谢液使其碳量增加,后期呼吸作用显著,代谢液碳量再度降低。此外,残留物可被黑曲霉和混合菌有效降解,木霉和青霉在培养初期的较强繁殖能力使残留物中碳量先增加,后又被降解。(2)培养初期,木霉、青霉和混合菌对残留物中有机碳组分的降解使小分子物质进入 WSS(水溶性物质),随后菌体的繁殖迫使 WSS 再度降低,而黑曲霉则以利用 WSS 合成其自身组分为主。(3)起初,FLA(类富里酸)的形成速度大于 HLA(类胡敏酸),而后 FLA 逐渐向 HLA 转化,木霉处理 HLA 在类腐植酸中所占比例最大。(4)培养过程中,FLA 分子向简单化方向发展,而 HLA 分子先简单,而后渐变复杂。HLA 单位碳芳香环的缩合程度随培养进行先逐渐降低而后增大,总趋势为增大,木霉处理 HLA 的复杂程度最高。(5)残留物 HLu(类胡敏素)的碳含量在整个培养过程中先增高后降低,最终均有“净损失”,损失最大的为木霉处理。

关键词:混合菌;真菌;玉米秸秆;类腐殖质

中图分类号:X172 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)04-0773-07

Effect of Fungi and Mixed Strains on the Formation and Transformation of Humic-like Substances of the Corn Stalks

WANG Shuai^{1,2}, DOU Sen^{1*}, WANG Xiao-ping¹, ZHU Wei-ning¹, SHAO Chen¹

(1.College of Resource and Environmental Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2.Popularization Center of Agricultural Technology of Jilin City, Jilin 132013, China)

Abstract: This paper discussed the effects of three kinds of fungus (*Trichoderma*, *Aspergillus* and *Penicillium*) and mixed strains on the formation and transformation of the humic-like substances of corn stalks under the condition of liquid culture. Primary focus was on the changes of humus compositions from thalli-corn stalk residue after inoculation. Its objective was that it could provide a theoretical reference and basis for the biodegradation and transformation of corn stalks, besides, also for the formation and update of soil organic matter. The results showed that: (1) The inoculation of four microbial suspensions could rapidly decrease the C content of metabolic liquid and increase the C content of thalli-corn stalk residue. Along with the tested strains reproducing, the C content of metabolic liquid was consumed continuously. Then the small molecules came into the liquid as a result of the microbial degradation, which resulted in the increase of C content of metabolic liquid, at last, the enhanced respiration promoted the C content decreasing again. In addition, the residue could be decomposed by *Aspergillus* and mixed strains effectively. The increasing amounts of *Trichoderma* and *Penicillium* could increase the C content of residue respectively, then whose contents were reduced by the biodegradation. (2) At the initial stage, the transformation of other organic components to the water soluble substances (WSS) in the residue was caused by *Trichoderma*, *Penicillium* and mixed strains, whose propagations could reduce the C contents of WSS later, while *Aspergillus* could take advantage of WSS fraction to synthesize its components. (3) At first, the formed rate of fulvic-like acid (FLA) was faster than humic-like acid (HLA), and then FLA was gradually transformed to HLA. The role of *Trichoderma* was the

收稿日期:2011-10-25

基金项目:973 项目(2011CB100503);国家自然科学基金(40871107,40971141)

作者简介:王 帅(1982—),男,吉林通化人,博士研究生,主要从事土壤生物及环境化学方面的研究。E-mail:wangshuai419@126.com

* 通讯作者:窦 森 E-mail:dousen@tom.com

largest in increasing the proportion of HLA in humic-like acids.(4)The simplification of FLA molecules happened after the culture, while HLA experienced the conversion process of simplification into complication. The condensation of aromatic rings of HLA was lowered first and enhanced later, which could be increased finally. The HLA molecule treated by the *Trichoderma* was the most complicated.(5)The C content of humin-like(HLu) in the thalli-corn stalk residue was increased firstly and then decreased, finally “net loss” was found, of which the biggest effect was *Trichoderma* treatment.

Keywords: mixed strains; fungi; corn stalks; humic-like substances

土壤微生物群落分解植物残体是控制养分循环和土壤腐殖质形成的重要过程^[1]。植物物料在分解期间,一方面本身构成物质被逐渐分解矿化,另一方面,木质素或其分解的中间产物(多元酚、多元醌、氨基酸等)经腐殖化作用可进一步缩合成为高分子的腐殖物质^[2]。

玉米秸秆是一种天然的纤维原料,主要成分为纤维素、半纤维素和木质素,在秸秆中木质素将纤维素、半纤维素牢固地缠裹在一起,其通过酯键与纤维素、半纤维素相结合,该结构使玉米秸秆坚硬且难于降解^[3]。因此,若要降解、利用和转化玉米秸秆,就必须打破木质素所构成的壁垒,而真菌在降解木质素过程中,菌丝的穿插能力为胞外酶与基质的有效结合提供了可能,细菌在初级代谢阶段可降解木质素,促使木质纤维物质发生改性,以利于后续真菌的有效降解,也可在降解后期代谢真菌降解木质素所产生的低分子量物质^[4]。McCarthy 等^[5]也论述了放线菌降解木质纤维素类物质的可能性。可见木质素的完全降解是真菌、细菌及相应微生物群落共同作用的结果,其中真菌起主要作用,据此可推测,真菌和混合菌可利用玉米秸秆,在特定培养条件下形成维系土壤肥力的腐殖质或其中间组分。腐殖质形成学说中的木质素学说也表明,木质素降解与腐殖质形成有密切联系^[6]。

鉴于玉米秸秆在真菌和混合菌作用下形成腐殖质的可能,本文主要探讨真菌及混合菌在液体培养条件下类腐殖质各组分数量的动态变化规律,为阐明土壤腐殖质形成与转化机制、调控土壤肥力提供科学依据,也为微生物在有机培肥中所起的驱动作用提供新的资料。

1 材料与方法

1.1 材料

玉米秸秆,于 2009 年 11 月采自吉林农业大学校区区长伊公路东侧试验田,含有机碳 $442.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $5.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,C/N 为 79。

供试菌种均源于暗棕壤(2009 年 8 月采自吉林

农业大学玉米试验田),其中 3 类真菌分别归属于木霉属(*Trichoderma viride*)、青霉属(*Penicillium*)和黑曲霉属(*Aspergillus niger*)。混合菌除包含上述 3 类真菌外,还包括 2 类细菌和 2 类放线菌,其中细菌为枯草芽孢杆菌(*Brevibacterium* sp)和巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*),放线菌为孢囊链霉菌(*Streptosporangium* sp)和链霉菌(*Streptomyces* sp)。

1.2 方法

1.2.1 培养实验

首先配制液体培养液,配方参照察氏培养基进行配制,具体为:NaNO₃ 2.0 g、K₂HPO₄ 1.0 g、KCl 0.5 g、MgSO₄ 0.5 g、FeSO₄ 0.01 g、水 1 000 mL、pH 自然。将 100 mL 培养液按照 50:1 的比例注入装有 2 g 秸秆粉末(细度为 0.25 mm)的 150 mL 三角瓶中,塞上棉塞后进行灭菌(121 °C 条件下湿热灭菌 60 min),直至灭菌彻底。

将 3 类真菌(木霉、黑曲霉和青霉)和混合菌(真菌、细菌和放线菌悬液间等比例混合)分别制成悬液。试验共设 5 个处理:Z1,接种木霉悬液;Z2,接种黑曲霉悬液;Z3,接种青霉悬液;Q,接种混合菌悬液;CK,无菌处理。处理 Z1、Z2、Z3、Q 悬液接种量均为每三角瓶 10 mL,CK 仅加入 10 mL 无菌水。接种实验均在无菌条件下操作,每个处理 3 次重复,均在 28 °C 条件下培养,定期按重补水确保反应体系含水量恒定。动态采样时间分别设为 0、30、60、90、120 d,达培养时间后取样,离心(转速为 $12\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)20 min,上清液为代谢液,沉淀即为菌体-秸秆残留物,沉淀于 55 °C 烘干,磨细过 0.25 mm 筛,备用。

1.2.2 菌体-秸秆残留物类腐殖质的提取和测定

首先称量 0.25 g 残留物,参照土壤腐殖质组成修改法^[7]进行组分(水溶性物质 WSS、类富里酸 FLA、类胡敏酸 HLA 和类胡敏素 HLu)提取。代谢液、残留物及其类腐殖质提取物的含碳量均采用重铬酸钾容量法^[8]测定。

1.2.3 相关参数的计算方法

(1)PQ 值=HLA/(HLA+FLA)

(2) 色调系数 $\Delta \lg k = \lg E_{400} - \lg E_{600}$

E_{400} 和 E_{600} 分别为 HLA 溶液在 400 nm 和 600 nm 处的吸光值, 单位为 $\text{L}^2 \cdot \text{g}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

(3) 相对吸光值 $A = E_{600}/C$

C 为 HLA 溶液的含碳量, 单位为 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 各处理对代谢液和菌体-秸秆残留物含碳量的影响

从图 1 可以看出, 接种菌液可迅速减少代谢液中的含碳量, 由 Z1 至 Q 分别减少了 0.282、1.063、0.726、0.882 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 随培养的延续 (0~30 d), 微生物活性增大, 致使代谢液中碳的损耗从 Z1 到 Q 分别减少了 44.4%、40.3%、48.8% 和 42.0%, 这是因为初始阶段霉菌生长旺盛, 所形成的菌球在液体环境下对可溶性有机碳是有固定和吸附作用的^[9]。培养持续 60 d 后, 所有处理代谢液中碳含量均有增大趋势, 这是由于微生物的降解作用致使秸秆中较不易溶的有机碳组分进入到易溶态有机碳组分中所致, 随后, 微生物的呼吸作用再次降低了代谢液中的碳含量。培养结束后, 与 CK (2.44 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 相比, Z1、Z2、Z3 和 Q 处理分别减少了 0.82、1.00、1.43、1.13 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

由图 2 可知, 起始阶段 (0 d) 菌液的接入可增加残留物的碳含量, 增幅最大的是黑曲霉处理 (青霉、曲霉自身可提取出类腐殖质^[10]), 其原因是菌液本身含微生物量碳, 另外, 菌体对代谢液中碳有吸附和固定作用。从单个处理来看, Z2 和 Q 处理残留物碳含量随培养时间的延续呈下降趋势, 表明残留物可被黑曲霉和混合菌降解, 而 Z1 和 Z3 处理的残留物碳含量在整个培养过程中呈先缓慢上升后逐渐下降的趋势。这是因为木霉和青霉在培养初期繁殖能力较强, 微生物量碳不断进入残留物所致, 而后期降解作用突显促使残留物碳含量下降。培养结束后, 与 CK 相比, 各处理残留物的碳含量均有净损失, 损失最大的是黑曲霉。李丹等^[9]研究认为, 黑曲霉对木质素的降解能力比较强, 其降解效率可达 90% 以上。

2.2 各处理对菌体-秸秆残留物类腐殖质组成的影响

2.2.1 各处理对水溶性物质 (WSS) 的影响

玉米秸秆本身含有较多 WSS^[7], 这是土壤中微生物降解有机质的关键组分, 土壤中 CO_2 的释放很大程度上受 WSS 含量降低的影响^[11]。另外, 接种微生物可在室内培养条件下分解土壤中 4%~93% 的 WSS^[12]。

由图 3 所示, 培养初期菌液的加入增大了 WSS

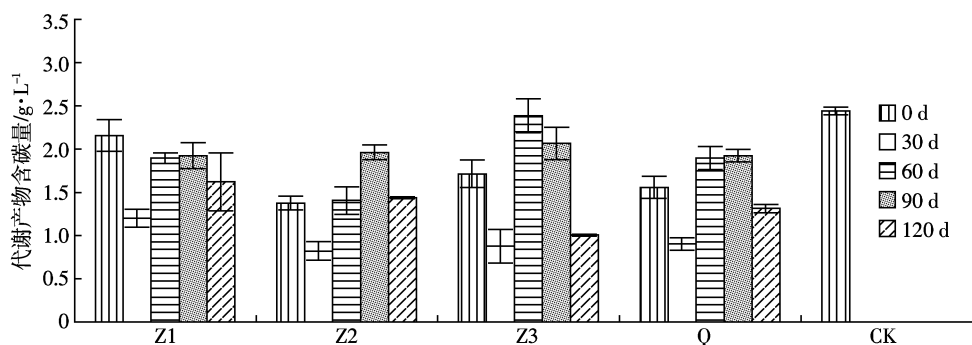


图 1 代谢液含碳量随时间的变化情况

Figure 1 The organic carbon content changes of metabolic liquid at different incubation time

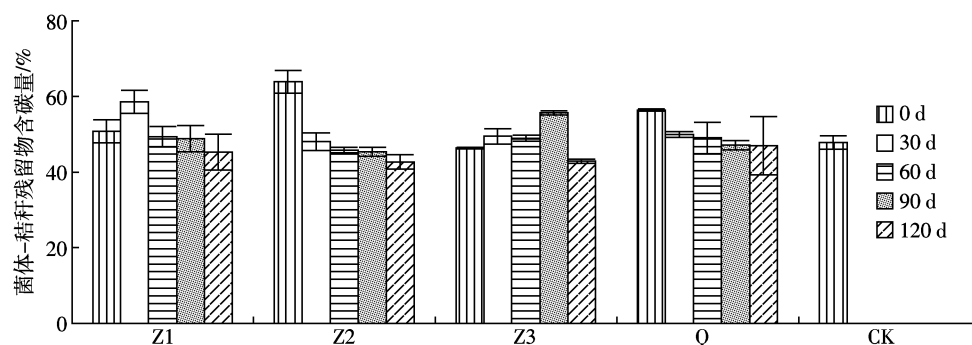


图 2 残留物含碳量随时间的变化情况

Figure 2 The organic carbon content changes of thalli-corn stalk residue at different incubation time

的数量,黑曲霉处理的涨幅最大,随培养延续,Z1、Z3 和 Q 处理的 WSS 数量开始增大,随后又逐渐降低,而 Z2 处理 WSS 数量在整个培养过程中均呈下降趋势。由于培养初期(30 d)木霉、青霉和混合菌对残留物中有机碳组分的降解作用占优势,使其所产小分子物质进入 WSS 中,致使 WSS 数量增大,而后随微生物活性降低,对除 WSS 外的有机组分降解能力减弱,微生物仅能利用 WSS 中的小分子碳,造成 WSS 含碳量的再度降低。黑曲霉则以利用 WSS 为主,合成其自身组分。培养结束后,Z1、Z2、Z3 和 Q 处理 WSS 的“净损失”分别为 22.09、21.78、12.48、14.03 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,这与微生物降解和转化作用密不可分。Gregorich 等^[13]在研究中指出,WSS 是微生物重要的基质,在接种后不久就会被快速消耗。

2.2.2 各处理对 PQ 值的影响

PQ 值可作为腐殖化程度的指标,据其变化可了解 HLA 和 FLA 形成的相对速度及其相互转化关系。

如图 4 所示,随培养进行,各处理 PQ 值均表现为先降低后升高的规律,这表明初始阶段 FLA 的形成速度大于 HLA,或者说 HLA 的降解速度大于 FLA (Gramss 等认为 HA 比 FA 更易于降解^[14]),而后,FLA

逐渐向 HLA 转化。培养结束后,与 CK 相比,PQ 值由 Z1 至 Q 分别增长了 23.36%、9.25%、5.48%和 20.10%。可见,木霉处理 HLA 所占的比例最大。张晋京等^[15]认为,玉米秸秆在暗棕壤中分解 1~15 d,最初 FA 的形成速度大于 HA,随培养延续,FA 转化为 HA。Tuomela 等^[16]研究认为,不成熟堆肥中 FA 含量高而 HA 含量低。随堆腐过程进行,FA 含量下降或保持不变,而 HA 含量增加。黄红丽^[17]认为,黄孢原毛平革菌对木质素的降解发生在次级代谢阶段,降解主要发生氧化反应,它能使稻草秸秆首先转化成分子量相对较小的 FA 或直接被分解为 CO_2 ,进而由 FA 转化为 HA。

2.2.3 各处理对 FLA 和 HLA 光学性质的影响

腐植酸的颜色与其化学结构密切相关,尤其是其所含的发色基团^[18]。

由图 5 可见,各处理 FLA 的色调系数($\Delta\lg k$)随培养进行呈增大趋势,这表明 FLA 分子向简单化方向发展,其中,混合菌作用最大。图 6 为 HLA 的 $\Delta\lg k$ 值随时间的变化情况,其表现为先增加后下降的趋势,意味着 HLA 分子先简单化,而后变得复杂。培养结束后,与 CK 相比,所有处理 HLA 的 $\Delta\lg k$ 值均有所减少,即 HLA 分子结构变复杂了,其中木霉处理

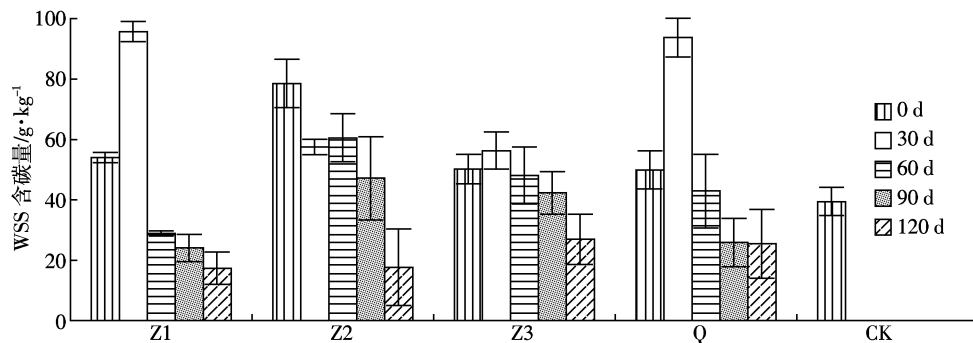


图 3 残留物 WSS 组分随时间的变化情况

Figure 3 The WSS changes of the thalli-corn stalk residue at different incubation time

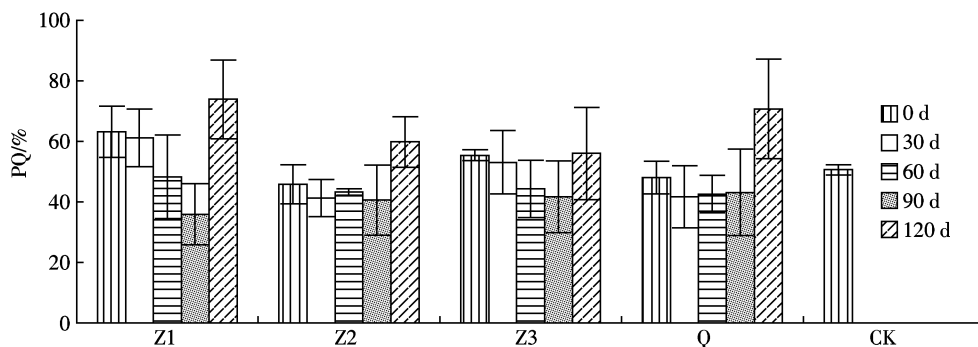
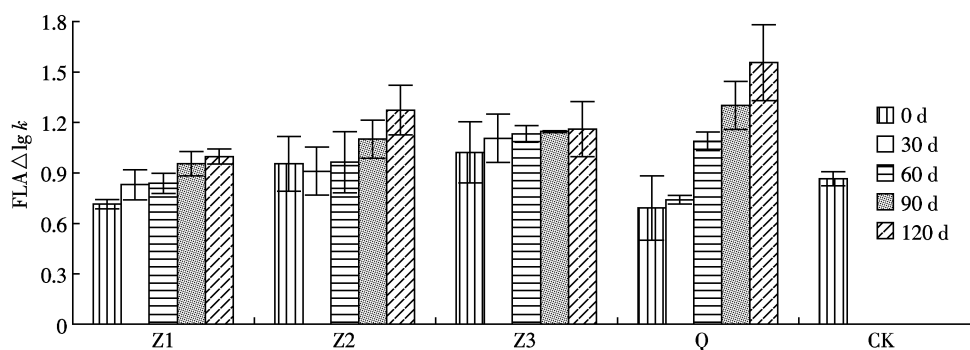
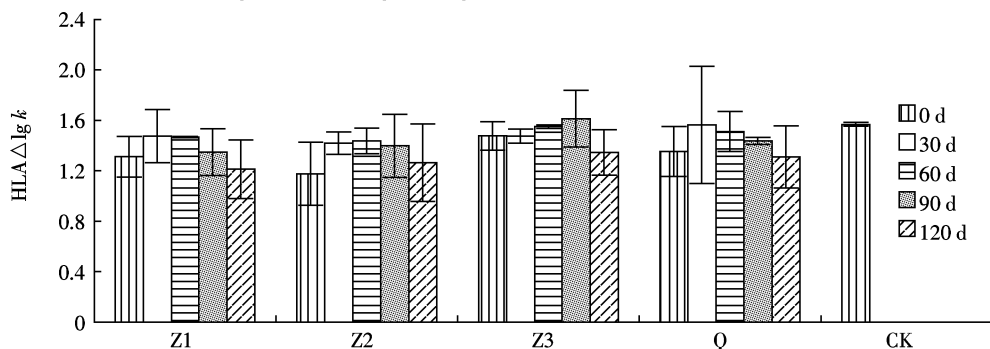


图 4 残留物 PQ 值随时间的变化情况

Figure 4 The PQ value changes of thalli-corn stalk residue at different incubation time

图 5 FLA 色调系数($\Delta \lg k$)随着时间的变化情况Figure 5 The $\Delta \lg k$ changes of FLA at different incubation time图 6 HLA 色调系数($\Delta \lg k$)随着时间的变化情况Figure 6 The $\Delta \lg k$ changes of HLA at different incubation time

HLA 的分子最复杂。王旭东等^[19]研究认为,秸秆腐解过程木质素或其分解的中间产物(如多元酚、多元醌)经腐殖化作用可形成腐殖物质,新缩合而成的 HA 分子结构尚未缩合到与原土 HA 相同的芳构化程度,即新形成的 HA 结构较原土 HA 简单,而本文中微生物可利用的唯一碳源即为玉米秸秆,其本身 HLA 就没有土壤 HA 复杂,因此经缩合和微生物合成作用后 HLA 变复杂是合乎常理的。他还认为腐殖物质中 HA 的形成前期以木质素衍生为主,后期以缩合作用为主,玉米秸秆在腐解后期,HA 结构渐趋于复杂^[20]。付杰奇^[10]通过向混有秸秆、草炭或葡萄糖的土壤中接种

木霉、青霉和曲霉,结果发现:高 C/N 有利于 HA 结构复杂化,同样有利于腐殖质积累,各处理在接种后 FA 结构趋于简单。张晋京等^[21]研究认为:玉米秸秆分解初期,HA 的氧化和芳构化程度较低,分子结构较简单,随培养进行,HA 的氧化和芳构化程度逐渐增加,分子结构渐变复杂。这也与本研究结论一致。

由图 7 所示,A 值先降低后升高,培养结束后,与 CK 相比,A 值均有不同程度增大,这意味着 HLA 单位碳芳香环的缩合程度随培养时间的进行先逐渐降低后又增大,这也验证了 HLA 分子在微生物作用下先被降解后被缩合的推测。培养结束后,木霉处理

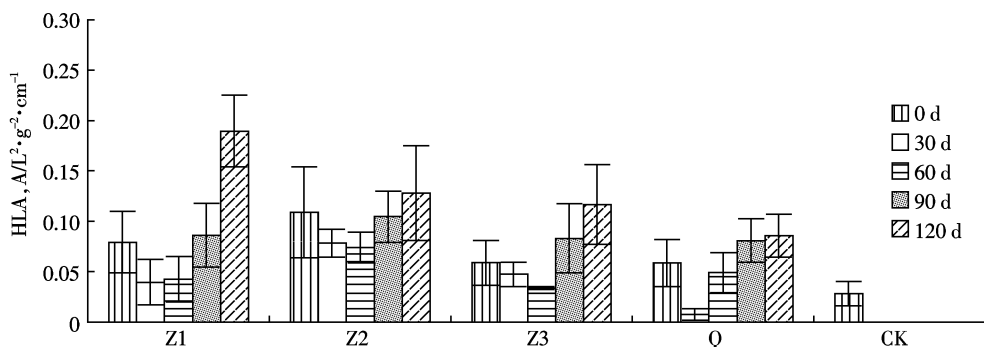


图 7 HLA 绝对吸光值(A)随着时间的变化情况

Figure 7 The absolute absorbed value(A) changes of HLA at different incubation time

HLA 单位碳芳香环的缩合程度增幅最大。

2.2.4 各处理对 HLu 的影响

由图 8 可见,所有处理残留物所提取的 HLu,其数量在整个培养期间均呈先增高后降低的趋势,培养结束后与 CK 相比,Z1、Z2、Z3 和 Q 处理 HLu 的数量均有“净损失”,依次为 5.29%、3.14%、2.74%和 3.98%,可见,木霉利用和转化 HLu 的能力最强。培养中前期各处理 HLu 的略增可能与菌体在培养初期的快速繁殖有关,部分微生物量碳随菌体残渣进入 HLu 中。Paul^[22]也认为未被微生物利用的死亡微生物残体成分可以进入腐殖物质。随后,HLu 的数量渐趋下降,这是由于培养后期微生物在碳源极度缺乏的情况下利用了 HLu 碳所致。

3 结论

菌液的加入可迅速扰乱代谢液和残留物之间的碳平衡,它的存在可减少代谢液和增加残留物中的碳含量,其中,黑曲霉作用最大。培养一段时间后,菌体的繁殖可致使代谢液中碳含量继续降低,随降解作用的增强,残留物中小分子不断进入代谢液使其碳量增加,而后微生物的呼吸作用占优势,代谢液碳含量经历了再度降低。此外,残留物可被黑曲霉和混合菌有效降解,而木霉和青霉在培养初期繁殖能力较强,残留物中碳含量先增加、后降低。

培养初期,木霉、青霉和混合菌对残留物中有机碳组分的降解促使小分子物质进入 WSS,使其数量增加,而后菌体的继续繁殖消耗了 WSS,使其数量降低,而黑曲霉则以利用 WSS 合成其自身组分为主。

在腐殖质组分形成方面,起初 FLA 的形成速度大于 HLA,或者说 HLA 的降解速度大于 FLA,随后 FLA 逐渐向 HLA 转化,其中,木霉处理 HLA 在类腐植酸中所占比例最大。从分子复杂程度上看,FLA 分

子向简单化方向发展,而 HLA 分子先简单化,而后渐变复杂。HLA 单位碳芳香环的缩合程度随培养进行先逐渐降低后又增大。最终,HA 的缩合度提高,木霉处理 HLA 的复杂程度最高。

残留物 HLu 在整个培养过程中均呈先增高后降低的趋势,最终其数量均有“净损失”,损失最大的也是木霉处理。

参考文献:

- [1] Di Nardo C, Cinquegrana A, Papa S, et al. Laccase and peroxidase isoenzymes during leaf litter decomposition of *Quercus ilex* in a Mediterranean ecosystem[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(10): 1539–1544.
- [2] Stevenson F J. Humus chemistry[M]. USA: John Wiley & Sons, 1982: 195–220.
- [3] 高明军. 不同菌种对玉米秸秆处理利用的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
GAO Ming-jun. Study on disposal and utilization of cornstalk with different microorganisms[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [4] 黄红丽, 曾光明, 黄国和, 等. 堆肥中木质素降解微生物对腐殖质形成的作用[J]. 中国生物工程杂志, 2004, 24(8): 29–31.
HUANG Hong-li, ZENG Guang-ming, HUANG Guo-he, et al. Current study on the effect of lignolytic organisms on humus formation in composting[J]. *Progress in Biotechnology*, 2004, 24(8): 29–31.
- [5] McCarthy J. Lignocellulose-degrading actinomycetes[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 1987, 46(2): 145–163.
- [6] 陈芙蓉, 曾光明, 郁红艳, 等. 堆肥中木质素的生物降解[J]. 微生物学杂志, 2008, 28(1): 88–93.
CHEN Fu-rong, ZENG Guang-ming, YU Hong-yan, et al. Biodegradation of lignin in compost environment[J]. *Journal of Microbiology*, 2008, 28(1): 88–93.
- [7] 窦 森, 于水强, 张晋京. 不同 CO₂ 浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 458–466.
DOU Sen, YU Shui-qiang, ZHANG Jin-jing. Effects of carbon dioxide concentration on humus formation in corn stalk decomposition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 458–466.

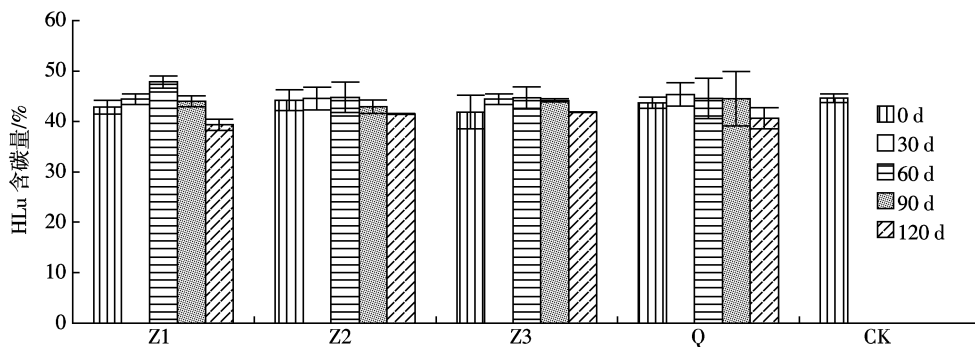


图 8 残留物 HLu 组分随时间的变化情况

Figure 8 The HLu changes of the thalli-corn stalk residue at different incubation time

- [8] 劳家桢. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1988: 203–298.
LAO Jia-cheng. Analytical notebooks of agricultural chemistry in soil [M]. Beijing: Press of Chinese Agriculture, 1988: 203–298.
- [9] 李 丹, 段舜山, 侯红漫, 等. 白腐菌对木质素降解能力的测定[J]. 生态科学, 2002, 21(4): 346–347.
LI Dan, DUAN Shun-shan, HOU Hong-man, et al. A preliminary investigation on the degradation of lignin by white rot fungi[J]. *Ecologic Science*, 2002, 21(4): 346–347.
- [10] 付杰奇. 有机物料及微生物对土壤腐殖质转化的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2004.
FU Jie-qi. The Study on the effect of organic matter and microorganisms on the formation of soil humus[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2004.
- [11] Kalbitz K, Schwesig D, Schmerwitz J, et al. Changes in properties of soil-derived dissolved organic matter induced by biodegradation[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(8): 1129–1142.
- [12] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, et al. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3–4): 273–291.
- [13] Gregorich E G, Beare M H, Stoklas U, et al. Biodegradability of soluble organic matter in maize-cropped soils[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3–4): 237–252.
- [14] Gramss G, Ziegenhagen D, Sorge S. Degradation of soil humic extract by wood- and soil-associated fungi, bacteria, and commercial enzymes[J]. *Microbial Ecology*, 1999, 37(2): 140–151.
- [15] 张晋京, 窦 森. 玉米秸秆分解期间胡敏酸、富里酸动态变化的研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(1): 134–136.
ZHANG Jin-jing, DOU Sen. Dynamic change of humic and fulvic acid during corn stalk decomposition[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(1): 134–136.
- [16] Tuomela M, Vikman M, Hatakka A, et al. Biodegradation of lignin in a compost environment: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 72(2): 169–183.
- [17] 黄红丽. 堆肥中木质素的生物降解及其与腐殖质形成关系的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
HUANG Hong-li. Lignin biodegradation and its relationship with humus formation in composting[D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [18] 贺 婧, 颜 丽, 杨 凯, 等. 不同来源腐植酸的组成和性质的研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(4): 343–345.
HE Jing, YAN Li, YANG Kai, et al. Study on component and character of humic acids from different sources[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(4): 343–345.
- [19] 王旭东, 胡田田, 张一平. 不同腐解期玉米秸秆对壤土胡敏酸基本性质及级分变异的影响[J]. 生态学报, 2001a, 21(6): 988–992.
WANG Xu-dong, HU Tian-tian, ZHANG Yi-ping. Effect of corn straw on the fraction variation and properties of humic acid in loess soil during different decaying periods[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001a, 21(6): 988–992.
- [20] 王旭东, 关文玲, 殷宪强. 玉米秸秆腐解过程物质组成以及胡敏酸的动态变化 II: 胡敏酸性性质及组成变异[J]. 干旱地区农业研究, 2001b, 19(4): 11–15.
WANG Xu-dong, GUAN Wen-ling, YIN Xian-qiang. Dynamic change of chemical composition of corn straw and humic acid during different decomposition period II: Change of humic acid properties and fractions[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001b, 19(4): 11–15.
- [21] 张晋京, 窦 森. 灼烧土中玉米秸秆分解期间胡敏酸、富里酸动态变化的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2002, 24(3): 60–64.
ZHANG Jin-jing, DOU Sen. Dynamic changes of humic acid and fulvic acid in ignited soil during corn stalk decomposition[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2002, 24(3): 60–64.
- [22] Paul S. Humus: Still a Mystery[M]. *Northeast Organic Farming Association*, 2002.