

王 砚, 李念念, 朱端卫, 等. 水稻秸秆预处理对猪粪高温堆肥过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 2021–2028.

WANG Yan, LI Nian-nian, ZHU Duang-wei, et al. Influence of straw pretreatment on the thermophilic composting process with pig manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 2021–2028.

水稻秸秆预处理对猪粪高温堆肥过程的影响

王 砚^{1,2,3}, 李念念¹, 朱端卫^{1,2,3}, 周文兵^{1,2,3}, 陈焰鑫^{1,3}, 伍玉鹏^{1,2,3*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070; 3. 生猪健康养殖协同创新中心, 武汉 430070)

摘 要:通过预处理技术打破秸秆中的木质纤维素复杂结构,能够有效加速秸秆的分解过程。为了探讨不同秸秆预处理方法对秸秆与畜禽粪便混合堆肥效率的影响,通过添加秸秆腐熟剂(B)和氢氧化钙(C)分别对水稻秸秆进行10 d(B1、C1)和20 d(B2、C2)的预处理静态堆置,以无预处理的秸秆为对照(CK),与猪粪按比例混合后进行好氧堆肥。运用红外光谱(IR)、扫描电镜(SEM)对预处理前后的水稻秸秆进行了分析,并通过比较不同处理堆肥过程中温度、pH、水溶性铵态氮/水溶性硝态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$)、电导率(EC)、T值[(C/N)终点/(C/N)起点]和种子发芽率(GI)的变化来研究不同预处理方法对堆肥腐熟过程的影响,通过对比堆肥产物总养分含量来进一步确定最优的秸秆预处理方式。结果显示,秸秆腐熟剂预处理能够有效破坏水稻秸秆细胞壁和复杂的纤维结构,使其内部组织暴露,出现大量的孔隙和微孔道。氢氧化钙预处理也能对水稻秸秆结构产生破坏,但其内部组织暴露较少,几乎没有微孔;秸秆腐熟剂对水稻秸秆进行预处理,其破坏性强于氢氧化钙处理,且处理时间越长效果越好。相比对照,秸秆腐熟剂处理后能够缩短堆肥高温期8~13 d。堆肥结束后,所有秸秆预处理的堆体pH均降至8.5以下;B1、B2、C2的 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 小于0.5,符合腐熟评价标准,但CK和C1未达到腐熟标准;除B2外各处理T值均低于0.6,所有处理的GI均在堆肥第28 d达到50%。秸秆预处理后的堆体总养分含量均高于CK(CK、B1、B2、C1、C2的总养分分别为11.09%、11.49%、13.29%、11.75%、11.37%),其中B2总养分含量显著高于其他处理。总体来看,秸秆预处理可以加快堆体的腐熟过程,提高堆肥产物质量,其中采用秸秆腐熟剂预处理20 d的效果最为明显。

关键词:水稻秸秆;生物预处理;化学预处理;堆肥腐熟度;堆肥质量

中图分类号:X71 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)09-2021-08 doi:10.11654/jaes.2017-1719

Influence of straw pretreatment on the thermophilic composting process with pig manure

WANG Yan^{1,2,3}, LI Nian-nian¹, ZHU Duang-wei^{1,2,3}, ZHOU Wen-bing^{1,2,3}, CHEN Yan-xin^{1,3}, WU Yu-peng^{1,2,3*}

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China; 3. The Cooperative Innovation Center for Sustainable Pig Production, Wuhan 430070, China)

Abstract: Breaking up the complex structure of lignocelluloses in straw by using pretreatment technology is an effective method for accelerating straw decomposition. Thus, in the present study, rice straw was pretreated by a straw decomposing agent (B) and calcium hydroxide (C), for 10 days (B1, C1), and 20 days (B2, C2). Rice straw without pretreatment was set as the control (CK). The above straw was then mixed with pig manure for the thermophilic composting process. Infrared spectroscopy (IR) and scanning electron microscopy (SEM) showed that the cell wall and fiber structure of rice straw was destroyed by the straw decomposing agent, leading to the exposure of internal tissues, and generating micro-pores on the straw. However, lesser internal tissues were exposed, and fewer micro-pores were generated, on

收稿日期:2017-12-15 录用日期:2018-02-13

作者简介:王 砚(1975—),女,副教授,主要从事固体废物处理与资源化研究。E-mail:windy@mail.hzau.edu.cn

*通信作者:伍玉鹏 E-mail:wp19851205@126.com

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0202000);国家自然科学基金项目(41401267)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0202000); The National Natural Science Foundation of China (41401267)

straw pretreated with calcium hydroxide. Overall, pretreatment with the straw decomposing agent for 20 days showed the most destructive effects on rice straw. Compared with the control, the period of high temperature can be shortened by 8~13 days after pretreatment with the straw decomposing agent. At the end of composting, the pH in all the pretreated compost was below 8.5; $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ of B1, B2, and C2 was less than 0.5 and met the requirements of the maturity evaluation standard. The T values [$(\text{C}/\text{N}$ at the beginning of composting) / $(\text{C}/\text{N}$ at the end of composting)] of B1, C1, and C2 were less than 0.6. Pretreated straw showed a higher total nutrient content than CK, and B2 showed a significantly higher total nutrient content than all the other treatments. In summary, straw pretreatment can accelerate the composting process and improve the quality of composting products. Pretreatment with the straw decomposing agent for 20 days showed the best results.

Keywords: rice straw; biological pretreatment; chemical pretreatment; compost maturity; compost quality

我国是世界上农作物秸秆和畜禽粪便产出量最大的国家之一。据统计,目前全国年农作物秸秆总量约为9.3亿t,年畜禽粪污总量约为38亿t,但二者的综合利用率均不足70%^[1-2]。将秸秆和畜禽粪便混合后进行堆肥是农业废弃物资源循环利用的重要方式,腐熟的堆肥是一种优质的有机肥,农田施用后不仅可以替代部分外来化肥养分的投入,也能提高作物的产量和品质,改善土壤的物理化学性质^[3-4],符合农业部《到2020年化肥使用量零增长行动方案》的要求。

作物秸秆在畜禽粪便堆肥中既可作为高碳源的物质用来平衡堆肥的总C/N,也具有调节堆肥孔隙率与含水率的作用,对堆肥品质起着非常重要的作用^[5]。然而,秸秆中的纤维素、半纤维素和木质素形成了结晶度和聚合度较高的晶体结构,在自然条件下晶体结构很难被打破,导致秸秆分解速率十分缓慢,进而拖慢了与畜禽粪便混合堆肥的整体速度,甚至在堆肥完成后秸秆仍以整块的形式保留在堆肥产物中,降低了堆肥品质^[6-8]。

为加速作物秸秆的分解,提高秸秆与畜禽粪便混合堆肥的效率,必须解除上述不利于秸秆迅速分解的限制因素,即通过秸秆预处理技术将与纤维素物质紧密相联的木质素分解掉,打断木质素与纤维素相连的氢键,降低纤维素的结晶程度^[7-9]。一般认为,碱处理能快速有效地破坏木质纤维素的复杂结构,但成本较高且环境污染严重^[10-11]。生物处理秸秆尽管处理时间长,但是处理条件温和,成本低,且不存在环境污染,从而成为近年来的研究热点^[8,12]。总体来说,不同的预处理方法有其各自的优缺点,因此大量研究针对不同预处理方式下的秸秆厌氧发酵过程进行了比较^[13-15],但秸秆不同方式预处理后与畜禽粪便高温堆肥的过程研究却较少。

本研究分别用氢氧化钙和秸秆腐熟剂对水稻秸秆进行化学的和生物的预处理,并与猪粪按比例混合进行堆肥。通过比较堆体温度、pH值、水溶性铵态

氮/水溶性硝态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$)、电导率(EC)、T值 $[(\text{C}/\text{N})\text{终点}/(\text{C}/\text{N})\text{起点}]$ 和种子发芽率(GI)等指标探讨不同秸秆预处理方式对腐熟进程的影响,结合堆肥产物总养分含量,以期优选出对猪粪-水稻秸秆堆肥最有利的秸秆预处理工艺,为提高农业废弃物的利用率提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 实验材料

水稻秸秆收集自农田干稻草,破碎机粉碎成1~3 cm小段后备用,其含水率为5.9%,总碳(TC)含量为404.60 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总氮(TN)含量为5.10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总磷(TP)含量为4.49 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总钾(TK)含量为0.83 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,C/N为79.33。猪粪收集自武汉市新洲区某养猪厂,其含水率为73.1%,TC含量为359.42 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,TN含量为31.01 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,TP含量为12.65 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,TK含量为12.50 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,C/N为11.59。秸秆腐熟剂为湖北启明生物工程有限公司市售菌剂,主要成分包括芽孢杆菌、放线菌、酵母菌、丝状真菌等多种微生物及其胞外酶,有效活菌数 ≥ 200 亿 $\cdot\text{g}^{-1}$ 。

1.2 实验设计及堆肥过程

1.2.1 实验设计

采用双因素设计开展实验,包括两种秸秆预处理方式和两种预处理时间,分别为化学预处理10 d(C1)、化学预处理20 d(C2)、生物预处理10 d(B1)、生物预处理20 d(B2),同时设置未经任何处理的水稻秸秆为对照(CK)。

1.2.2 水稻秸秆预处理及堆肥管理

(1) 水稻秸秆预处理

按照实验设计分别用氢氧化钙和秸秆腐熟剂对水稻秸秆进行不同时间的预处理。C1:水稻秸秆+5%氢氧化钙,调节水分70%左右,静态堆置10 d;C2:水稻秸秆+5%氢氧化钙,调节水分70%左右,静态堆置20 d;B1:水稻秸秆+1%尿素+0.5%秸秆腐熟

剂,调节水分70%左右,静态堆置10 d;B2:水稻秸秆+1%尿素+0.5%秸秆腐熟剂,调节水分70%左右,静态堆置20 d;CK:水稻秸秆不经任何处理。

(2)堆肥的管理

在室内利用保温桶开展为期38 d的发酵实验。保温桶由80 L大桶套50 L小桶组成,两桶之间塞入保温材料,桶高50 cm。分别将预处理的水稻秸秆和未处理的水稻秸秆与猪粪按质量比1:7(因水稻秸秆预处理后质量可能发生变化,故按照水稻秸秆与猪粪的原始状态计算混合比例)的比例进行混合,加水调节堆体水分含量至55%。将混匀的堆料32 kg分别放入保温桶中进行堆制,并分别命名为B1、B2、C1、C2和CK组(与水稻秸秆的预处理相对应)。由于实验体系较大,每个处理仅设置两个重复。在堆肥过程中,根据堆体的实际情况,高温期每1~3 d进行一次人工翻堆,降温期则每5 d进行一次人工翻堆。

1.3 取样及测定

1.3.1 预处理水稻秸秆样品的测定

分别在水稻秸秆预处理前后进行扫描电镜(SEM)分析和红外光谱(IR)分析。SEM分析在超高分辨率场发射扫描电子显微镜(SU8010, HITACHI, 日本)上进行;IR分析在FTIR光谱仪(VERTEX 70, BRUKER, 德国)上进行。

1.3.2 堆肥参数的测定

(1)样品采集处理

在堆肥开始后的第0、3、7、13、18、23、28、33、38 d采集堆肥样品。在翻堆充分搅拌均匀后进行五点采样,混合缩分后保留200 g样品,其中100 g作为鲜样保存于4℃的冰箱中,另外100 g置于室内风干,磨细过100目筛待用。

(2)参数测定方法

本研究分别从温度、pH值、水溶性铵态氮/水溶性硝态氮($\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$)、电导率(EC)、T值[(C/N)终点/(C/N)起点]和种子发芽率(GI)几个方面来评价不同水稻秸秆预处理对堆体腐熟过程的影响,从总养分含量($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$)来评价堆肥产物的质量。堆肥温度通过插于堆体中心的温度计和室内温度计记录。鲜样经去离子水浸提、离心后得到的上清液用于测定pH、EC、GI等,上清液过0.45 μm 纤维树脂滤膜得到的滤液用于水溶性 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的分析。pH值用pH计测定,EC用电导仪测定,GI采用滤纸培养法测定,水溶性 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 分别采用钠氏试剂分光光度法和紫外分光光度法测定。风干样通过 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$

消煮完全后,利用凯氏定氮法测定TN,钼锑抗比色法测定TP,火焰分光光度法测定TK。

1.4 统计与分析

实验数据均以均值表示,采用SPSS 17.0(IBM, USA)统计软件对不同处理进行相关的统计分析、差异检验等(显著水平为0.05)。

2 结果与讨论

2.1 不同预处理方式对水稻秸秆的影响

图1A显示,水稻秸秆中硅酸沉积于叶表皮形成的硅化细胞包裹着组织,表面平滑、有蜡质层,无微孔,结构紧凑,内部结构无裸露(CK)。经过预处理后,水稻秸秆表面凸起的球状结构均明显缩小(B1、C1和C2),有的甚至消失且表面凹凸不平(B2)。经过秸秆腐熟剂处理的水稻秸秆细胞壁和复杂的纤维结构被明显破坏,内部组织暴露、出现了大量的孔隙和微孔道(B1和B2),尤其以处理20 d的水稻秸秆最为明显(B2)。经过氢氧化钙处理的水稻秸秆虽然结构也有一定程度的破坏,但其内部组织暴露较少,几乎没有微孔(C1、C2)。这表明,秸秆腐熟剂对水稻秸秆进行预处理,其破坏性强于化学处理,且处理时间越长效果越好;而氢氧化钙对水稻秸秆致密的结构虽有一定的破坏作用,但仅限于秸秆表面,可能是由于氢氧化钙在秸秆堆置的过程中形成了碳酸钙结晶附着在秸秆表面从而阻碍了其降解。

图1B为水稻秸秆预处理前后的红外光谱对比图。波数3300~3500 cm^{-1} 处表征分子内羟基-OH(主要来自纤维素、半纤维素、多糖和单糖)伸缩振动谱带,而波数2915 cm^{-1} 是纤维素中 $-\text{CH}_2-$ 反对称伸缩振动的吸收峰,表征秸秆外表面亲脂类物质碳链上的烷基结构^[16]。本研究中不论化学预处理还是生物预处理,均未明显改变3300~3500 cm^{-1} 和2915 cm^{-1} 处的峰强度,说明不同预处理方式并未造成秸秆中纤维素的损失。1431 cm^{-1} 和1163 cm^{-1} 处是纤维素结构的特征吸收峰^[17],此吸收峰在不同预处理后变化不大,说明不同预处理方式对纤维素大分子结构的影响不大。1732 cm^{-1} 的吸收峰表征与木质素或半纤维素有关的羧酸脂类化合物以及酮类化合物中羰基 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动^[18]。未经处理的秸秆此峰较为明显,而秸秆经过氢氧化钙和秸秆腐熟剂处理后,该峰的强度明显减弱至几乎完全消失,表明羰基 $\text{C}=\text{O}$ 被破坏。1235 cm^{-1} 的吸收峰归因于乙酰酯键^[19],经过预处理后,该峰减弱或消失,说明木质素与碳水化合物之间的酯键发生了

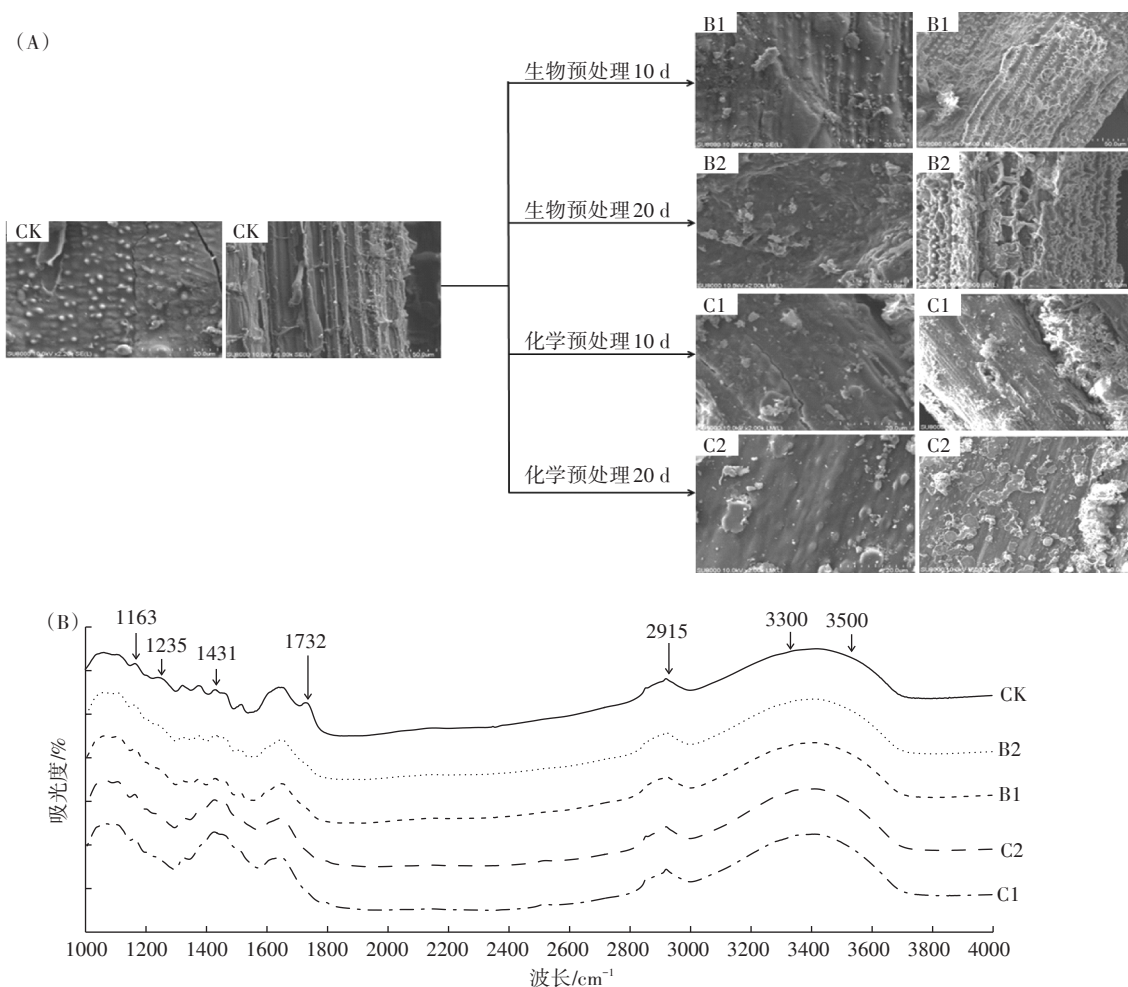


图1 水稻秸秆预处理前后扫描电镜(A)分析和红外光谱(B)分析图

Figure 1 The SEM image(A) and infrared spectra(B) of the rice straw before and after pretreatment

断裂,木质素与纤维素、半纤维素之间的部分连接键受到了破坏,这有利于让纤维素和半纤维素从木质素的包裹中释放出来。

总体来看,秸秆腐熟剂进行预处理的效果优于氢氧化钙预处理的效果,且秸秆腐熟剂处理的时间越长其破坏力越大。从电镜扫描可以看出,预处理可去除表面蜡质层和硅酸盐物质,在一定程度上破坏秸秆的形态结构,增加秸秆的孔隙率;由红外光谱图可知,秸秆预处理能破坏木质素-纤维素-半纤维素之间的连接,使其在堆肥过程中更容易被微生物分泌的纤维酶水解为小分子化合物而得到充分利用。

2.2 不同水稻秸秆预处理对堆体腐熟过程的影响

腐熟度作为衡量堆肥产品的质量指标,是评价堆肥产品是否会对环境、土壤和作物产生不良影响的概念性参数。由于腐熟度指标繁多且堆肥产品本身成分的复杂性和多样性,目前并没有固定统一的参数作

为腐熟度评价标准。本研究以我国农业行业有机肥料标准(NY 525—2012)为指导,结合前人研究^[20-21],分别从温度、pH值、 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、EC、T值和GI几个方面来评价不同水稻秸秆预处理对堆体腐熟过程的影响。

堆肥温度是微生物活动及物料氧化综合作用的结果,通过堆温的升降完成有机物的分解,从而实现堆肥的腐熟和无害化过程。因此,温度是评价堆肥腐熟程度的一个重要指标^[22]。图2A显示,本试验中五个处理堆体温度的升降过程符合堆肥温度的三段变化,即升温期、高温持续期和降温过程。所有处理均在堆置完成后快速升温至70℃,并迅速地进入堆肥高温期。从第14 d开始各处理堆体温度逐渐下降,其中B1、B2温度下降最快,C1、C2略慢,而CK则持续保持一段时间高温后缓慢下降。之后进行了翻堆,堆体温度再次快速上升,仍以B1和B2的温度上升最剧

烈,至25 d后进入腐熟阶段,C1、C2与CK则在第33、33 d与38 d时陆续进入腐熟阶段。这说明对水稻秸秆进行生物处理可使堆肥高温期缩短8~13 d,而化学处理对缩短堆肥进程效果并不十分明显。一般认为,堆体起始阶段的温度之所以上升较快,是因为堆制初期原料中易被微生物利用的物质较多,加快了微生物新陈代谢进程,从而产生大量的热,直至堆体中易分解和部分较容易分解的有机物消耗殆尽时,仅剩下少量难降解的物质,微生物活动减弱,堆体才开始降温^[22]。本研究中对水稻秸秆进行生物预处理后有利于其中的纤维素、木质素、半纤维素水解形成大量的

易分解有机物,有利于加快堆体中有机物的降解,从而缩短原料的发酵进程。若能在堆肥过程中针对秸秆预处理后大部分难分解物质已转化为易分解有机物的特性添加适当的菌剂,并提高通风效果,将有助于进一步缩短堆肥时间,提高堆肥效率^[21]。

pH值是影响堆肥微生物生长的重要因素,不但影响矿物质的溶解、氧化还原,而且影响微生物的活动强度^[23]。试验中物料没有进行初始pH值的调节,但所有堆体pH值皆随时间的变化呈现出先上升后下降的趋势(图2B)。这是因为堆肥初期随着温度升高,有机酸产生量逐渐降低且分解为CO₂,同时NH₄⁺-N不

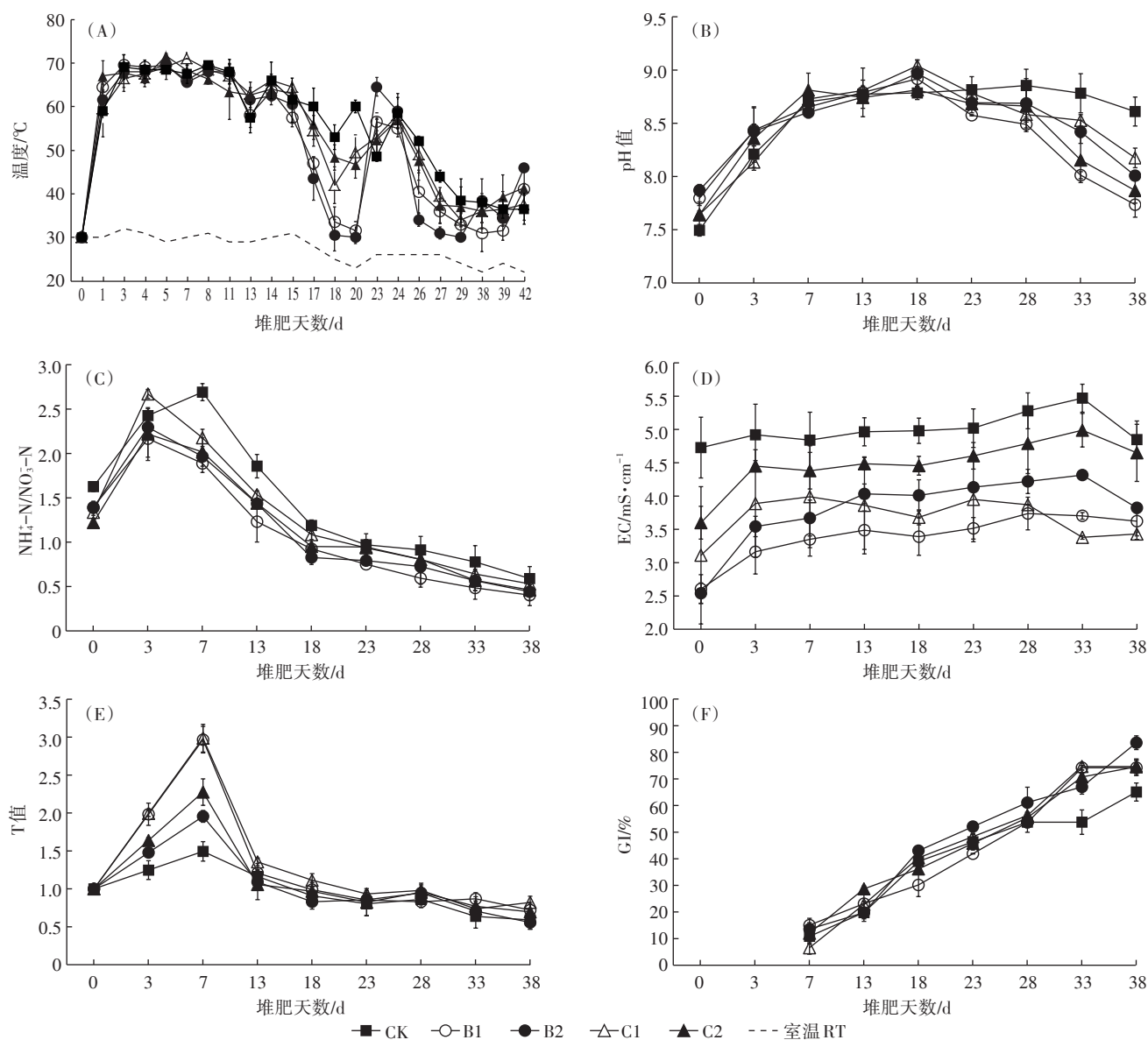


图2 不同秸秆预处理方式对猪粪堆肥过程中温度(A)、pH值(B)、NH₄⁺-N/NO₃⁻-N(C)、EC(D)、T值(E)和GI(F)的影响

Figure 2 Changes of temperature(A), pH(B), NH₄⁺-N/NO₃⁻-N(C), EC(D), T value(E) and GI during the composting

断积累,从而使pH值不断升高。堆肥后期,随着堆体温度的下降和易分解有机质的减少,活跃的反硝化细菌促使堆体发生反硝化作用, NO_3^- -N增加,加之 NH_4^+ -N积累后的氨挥发,使pH下降。然而,整体来看,堆肥过程中pH值均维持在7~9之间,可满足一般微生物生长适宜的pH值。堆肥初期(前18 d),所有预处理组的pH值皆高于CK,且在第18 d后快速下降,而CK组pH值则在27 d时才开始缓慢下降。秸秆预处理后的堆体pH值快速下降,有利于减少堆肥过程中氨的挥发和氮素的保存。根据有机肥料的国家标准,要求堆肥产品的pH应在5.5~8.5之间,截至实验结束所有秸秆预处理的堆体均符合标准,而CK堆体的pH值为8.61,仍未达标。

堆肥过程中氮素形态之间的变化是一个复杂的过程,各阶段微生物伴随着明显的氨化和硝化反应过程,因此 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N的变化趋势可以作为判断堆肥腐熟度的依据^[24]。图2C显示,不同处理堆体的 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N变化趋势一致,即先上升后下降,这说明堆肥初期 NH_4^+ -N急剧上升而 NO_3^- -N含量较低,随着堆肥的进行, NO_3^- -N含量逐渐增加, NH_4^+ -N含量降低。总体来说, NH_4^+ -N/ NO_3^- -N的值在高温期(0~18 d)变化剧烈,腐熟期(18~38 d)变化趋势平缓。利用 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N作为腐熟度指标已得到了广泛的应用,Bernai等^[24]提出,当堆肥中 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N的比值小于0.16时,表明堆肥达到腐熟,而鲍艳宇等^[25]认为 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N ≤ 0.5 适宜作为畜禽粪便的腐熟评价标准。按照鲍艳宇等^[25]提出的标准,堆肥结束后B1、B2、C2均达到要求,而CK和C1未达到腐熟标准。

EC值是反映堆肥可溶性盐含量的指标,是评价堆肥是否对植物产生毒害作用的重要参数,在一定程度上表示堆肥对植物的毒性以及对植物生长抑制作用的大小。本研究中各处理的堆体EC值变化趋势一致(图2D),与堆肥初始相比都有所增加,可能是微生物分解有机物产生磷酸盐、铵盐等可溶性盐的结果。在堆肥后期,由于氨的挥发以及微生物自身生长对磷酸盐的消耗,使后期EC略有下降。堆肥结束后,秸秆预处理的堆体EC皆低于CK,且B1、B2、C1的电导率皆降至 $4 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以下,达到安全使用标准^[26]。

堆肥处理是微生物在适宜条件下,利用其中可降解的碳源作为能源的反应过程,因此,C/N是评价堆肥腐熟度的直观的化学指标之一。良好的堆肥过程其C/N应是持续下降的,普遍认为腐熟的堆肥C/N应小于20^[27]。按照这一标准,本研究中各处理均在第

13 d时即达到了腐熟标准。而由于不同物料特性不同,Garcia等^[28]则建议采用T值[T=(C/N)终点/(C/N)起点]这一指标来评价,并认为当T<0.6时堆肥达到腐熟,由此来看,在堆肥完成后仅有B2处理达到腐熟标准(图2E)。

通过对堆肥毒性敏感植物种子的毒性研究,不但可以检测堆肥样品中的残留植物毒性,而且也能预计毒性的发展。一般认为,当GI>50%时,说明堆肥已腐熟并达到了可接受的程度,即基本没有毒性;当GI达到80%时,就可认为堆肥产品是没有植物毒性的,或者说堆肥已达到腐熟^[29-30]。图2F显示,所有处理的GI均呈上升趋势,且都在堆肥第28 d达到50%,至堆肥结束(满38 d),CK、B1、B2、C1、C2的种子发芽率分别为65.1%、74.2%、83.6%、74.7%、74.57%,因此与CK相比,秸秆预处理有利于降低猪粪堆肥的毒性。

2.3 不同水稻秸秆预处理方式下堆肥产物的养分含量

根据有机肥料行业标准(NY 525—2012),有机肥料中总养分(N+ P_2O_5 + K_2O)的质量分数(以烘干基计)应 $\geq 5\%$ 。本研究中各处理堆置38 d后按N+ P_2O_5 + K_2O 计算总养分含量均已符合标准要求(图3)。秸秆预处理后的堆体总养分含量均高于CK(CK、B1、B2、C1、C2的总养分含量分别为11.09%、11.49%、13.29%、11.75%、11.37%),其中B2总养分含量要显著高于其他处理,而B1、C1、C2与CK之间并无显著差别。这一差别可归结于预处理对秸秆木质纤维素复杂结构的破坏作用,尤其是B2因处理时间较B1更长,水稻秸秆细胞壁和复杂的纤维结构被明显破坏,内部组织暴露,出现了大量的孔隙和微孔道(图1),更有利于促进堆体中难分解物质的快速降解,并促进“浓缩效应”而提高堆肥产物的养分含量^[31-32]。此外,本研究在进行秸秆与猪粪混合堆肥时按照水稻秸秆与猪粪

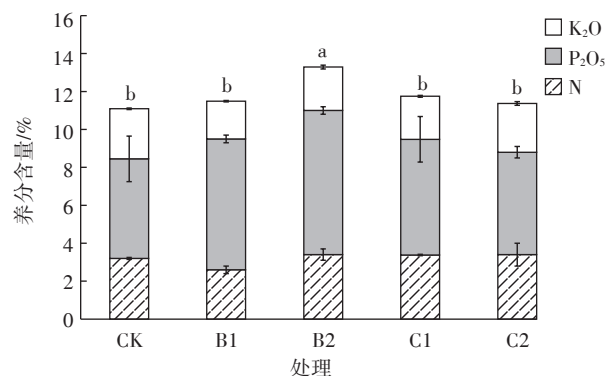


图3 不同处理下堆肥产物的总养分含量

Figure 3 The total nutrient content in different composting product

的原始状态计算配比,水稻预处理导致的附带效果“减量化”也可能有利于后期堆肥中总养分含量的提升。

本研究在室内利用保温桶开展实验,与工厂化堆肥相比,过小的堆肥规模可能由于存在保温效果差、取样缺乏代表性等缺陷,致使其运行参数和工况与实际工厂化运行存在较大差异^[3]。此外,堆肥工厂化生产要求场地面积小,土建设施投资少。而堆肥前的秸秆预处理这一环节则可能会增加额外的场地面积、土建设施和设备的投入,从而降低秸秆预处理带来的堆肥优势。因此,进一步开展秸秆预处理堆肥的中试研究及秸秆预处理与堆肥的工艺整合可能是未来的研究重点之一。

3 结论

(1) 秸秆腐熟剂对水稻秸秆进行预处理,其破坏性强于氢氧化钙处理,且处理20 d的效果优于10 d。

(2) 秸秆预处理可以加快堆体的腐熟过程,提高堆肥产物的总养分含量,其中采用秸秆腐熟剂预处理20 d的效果最为明显,相比对照能够缩短堆肥高温期8~13 d,提高堆肥产物总养分含量2.2%。

参考文献:

- [1] 陶秀萍,董红敏. 畜禽废弃物无害化处理与资源化利用技术研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 37-42.
TAO Xiu-ping, DONG Hong-min. Research progress on animal waste treatment and recycling technology[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(1): 37-42.
- [2] 张国,逮非,赵红,等. 我国农作物秸秆资源化利用现状及农户对秸秆还田的认知态度[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 981-988.
ZHANG Guo, LU Fei, ZHAO Hong, et al. Residue usage and farmers' recognition and attitude toward residue retention in China's croplands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 981-988.
- [3] 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(增刊2): 260-267.
LI Dan-yang, LI Shu-yan, LI Guo-xue, et al. Effects of additive on nitrogen loss during composting of pig manure and corn straw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl 2): 260-267.
- [4] Xia L, Lam S, Yan X, et al. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(13): 7450-7457.
- [5] 江君,靳红梅,常志州,等. C/N对蓝藻好氧堆肥腐熟及无害化进程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 2031-2038.
JIANG Jun, JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, et al. Influence of C/N ratio on the composting effect and secure utilization of cyanobacteria[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10): 2031-2038.
- [6] Gould J. Studies on the mechanism of alkaline peroxide delignification of agricultural residues[J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 1985, 27(3): 225-231.
- [7] 李贵桐,张宝贵,李保国. 秸秆预处理对土壤微生物量及呼吸活性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2225-2228.
LI Gui-tong, ZHANG Bao-gui, LI Bao-guo. Effect of straw pretreatment on soil microbial biomass and respiration activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2225-2228.
- [8] 常娟,卢敏,尹清强,等. 秸秆资源预处理研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(11): 1-8.
CHANG Juan, LU Min, YIN Qing-qiang, et al. Progress of research on pretreatment of corn stover[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(11): 1-8.
- [9] 胡秋龙,熊兴耀,谭琳,等. 木质纤维素生物质预处理技术的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(10): 1-7.
HU Qiu-long, XIONG Xing-yao, TAN Lin, et al. Advances in pretreatment technologies of lignocellulosic biomass[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(10): 1-7.
- [10] Sun R, Lawther J, Banks W. Influence of alkaline pre-treatments on the cell wall components of wheat straw[J]. *Industrial Crops & Products*, 1995, 4(2): 127-145.
- [11] Kim S, Holtzapfel M. Delignification kinetics of corn stover in lime pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(5): 778-785.
- [12] Kerem Z, Hadar Y. Effect of manganese on preferential degradation of lignin by *Pleurotus ostreatus* during solid-state fermentation[J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 1995, 61(8): 3057-3062.
- [13] 焦翔翔,靳红燕,王明明. 我国秸秆沼气预处理技术的研究及应用进展[J]. 中国沼气, 2011, 29(1): 29-33.
JIAO Xiang-xiang, JIN Hong-yan, WANG Ming-ming. Research progress of straw pretreatment for anaerobic fermentation producing biogas in China[J]. *China Biogas*, 2011, 29(1): 29-33.
- [14] 李萍,韦秀丽,蒋滔,等. 不同预处理方式对玉米秸秆结构及产气特性的模拟研究[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(1): 84-89.
LI Ping, WEI Xiu-li, JIANG Tao, et al. Simulation of structure and biogas production properties of corn stalk relative to pretreatment method[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(1): 84-89.
- [15] 李平,龙翰威,高立洪,等. 不同预处理方式下水稻秸秆厌氧消化性能比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 200-205.
LI Ping, LONG Han-wei, GAO Li-hong, et al. Comparison of anaerobic digestion capability of rice straw with different pretreatment methods[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(12): 200-205.
- [16] 于旻,何春霞,张还,等. 预处理对麦秸/聚丙烯复合材料摩擦磨损性能影响实验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 138-143.
YU Min, HE Chun-xia, ZHANG Huan, et al. Effect of different pre-treatments on tribological properties of wheat straw / polypropylene composites[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Ma-*

- chinery, 2013, 44(7):138-143.
- [17] 鲁杰, 石淑兰, 杨汝男, 等. 纤维素酶解苇浆纤维微观结构和结晶结构的变化[J]. 中国造纸学报, 2005, 20(2):85-90.
- LU Jie, SHI Shui-lan, YANG Ru-nan, et al. Modification of reed cellulose microstructure and IT change in enzymatic hydrolysis of reed pulp[J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2005, 20(2):85-90.
- [18] Gastaldi G, Capretti G, Focher B, et al. Characterization and proprieties of cellulose isolated from the *Crambe abyssinica* hull[J]. *Industrial Crops & Products*, 1998, 8(3):205-218.
- [19] 何建新, 唐予远, 王善元. 醋酸纤维素的结晶结构与热性能[J]. 纺织学报, 2008, 29(10):12-16.
- HE Jian-xin, TANG Yu-yuan, WANG Shan-yuan. Crystalline structure and thermal property of cellulose acetate[J]. *Journal of Textile Research*, 2008, 29(10):12-16.
- [20] 李洋, 席北斗, 赵越, 等. 不同物料堆肥腐熟度评价指标的变化特性[J]. 环境科学研究, 2014, 27(6):623-627.
- LI Yang, XI Bei-dou, ZHAO Yue, et al. Study of maturity parameter characteristics in composting process using different materials[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(6):623-627.
- [21] Bernal M, Alburquerque J, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22):5444-5453.
- [22] 张永涛, 张增强, 孙西宁, 等. 不同 C/N 污泥堆肥温度的空间变化特征[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6):125-136.
- ZHANG Yong-tao, ZHANG Zeng-qiang, SUN Xi-ning, et al. Studies on characteristics of spatial variation of compost temperature using two different C/N sewage sludges[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2009, 37(6):125-136.
- [23] Ghorpade V, Gennadios A, Hanna M. Laboratory composting of extruded poly (lactic acid) sheets[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 76(1):57-61.
- [24] Bernai M, Paredes C, Sánchez-Monedero M, et al. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes[J]. *Bioresource Technology*, 1998, 63(1):91-99.
- [25] 鲍艳宇, 周启星, 颜丽, 等. 畜禽粪便堆肥过程中各种氮化合物的动态变化及腐熟度评价指标[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2):374-380.
- BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing, YAN Li, et al. Dynamic changes of nitrogen forms in livestock manure during composting and relevant evaluation indices of compost maturity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2):374-380.
- [26] Cáceres R, Flotats X, Marfà O. Changes in the chemical and physico-chemical properties of the solid fraction of cattle slurry during composting using different aeration strategies[J]. *Waste Management*, 2006, 26(10):1081-1091.
- [27] 史殿龙, 张志华, 李国学, 等. 堆高对生活垃圾中 15 mm 筛下物堆肥腐熟的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1):324-329.
- SHI Dian-long, ZHANG Zhi-hua, LI Guo-xue, et al. Effect of stacking height on maturity during composting of municipal solid waste under 0~15 mm sieved[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1):324-329.
- [28] Garcia C, Hernandez T, Costa F, et al. Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1992, 23(13):1501-1512.
- [29] Zucconi F, Monaco A, Forte F, et al. Phytotoxins during the stabilization of organic matter[J]. *Plos One*, 1985, 9(11):e112085.
- [30] 王定美, 武丹, 李季, 等. 猪粪及其堆肥不同水浸提比对种子发芽特性指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3):579-584.
- WANG Ding-mei, WU Dan, LI Ji, et al. Effects of water extraction ratio of pig manure and its compost on seed germinative indicators[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):579-584.
- [31] 黄华, 黄懿梅, 刘学玲, 等. 覆盖处理对猪粪秸秆堆肥中氮素转化和堆肥质量的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3):780-786.
- HUANG Hua, HUANG Yi-mei, LIU Xue-ling, et al. Effect of covering on nitrogen transformation and the quality of pig manure-straw compost[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(3):780-786.
- [32] 夏芸, 林辉, 王强, 等. 有机生活垃圾堆肥中物质组分减量差异及变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12):2463-2471.
- XIA Yun, LIN Hui, WANG Qiang, et al. Differential reduction of different components of domestic organic wastes during composting process[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12):2463-2471.
- [33] 周辉宇, 陆文静, 王洪涛, 等. 高效纤维素分解菌生物强化技术在工厂化好氧堆肥中的应用初探[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1):182-186.
- ZHOU Hui-yu, LU Wen-jing, WANG Hong-tao, et al. Application of high efficient cellulolytic microorganisms in plant-scale aerobic composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1):182-186.