

秸秆与沼肥同步翻埋还田对秸秆腐解特性的影响

王忠江^{1,2} 王泽宇¹ 司爱龙¹ 张正¹ 吴婧¹ 王丽丽^{1,3}

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部生猪养殖设施工程重点实验室, 哈尔滨 150030;
3. 寒地农业可再生资源利用技术与装备黑龙江省重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探讨秸秆和沼肥同步翻埋还田对秸秆腐解的影响规律,在室温条件下,105 d 试验周期内,采用网袋法模拟翻埋还田,系统研究添加沼肥和自来水对秸秆腐解的影响,以及添加沼肥后不同土壤类型和不同秸秆长度对秸秆腐解过程各主要参数的影响规律。结果表明,沼肥对秸秆腐解具有显著的促进作用,添加自来水组的秸秆降解率为 33.61%,而添加沼肥组的秸秆降解率则达到 42.37%;配施沼肥后,秸秆的降解主要集中在前 70 d,试验结束时各试验组的秸秆降解率均高于 42%,秸秆长度 20 mm 试验组的秸秆降解率高于 10 mm 秸秆,试验结束时 20 mm 试验组的秸秆降解率达到 52%;秸秆长度对半纤维素的降解影响较明显,而土壤类型则对纤维素和木质素降解具有较显著的影响。

关键词: 沼肥; 秸秆还田; 土壤种类; 秸秆长度; 秸秆腐解

中图分类号: S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0271-07

Effect of Synchronously Burying and Returning Straw and Biogas Slurry to Soil on Straw Decomposition

WANG Zhongjiang^{1,2} WANG Zeyu¹ SI Ailong¹ ZHANG Zheng¹ WU Jing¹ WANG Lili^{1,3}

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Pig-breeding Facilities Engineering, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China

3. Heilongjiang Key Laboratory of Technology and Equipment for the Utilization of Agricultural Renewable Resources, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to make an investigation on the effect of synchronously burying and returning straw and biogas slurry to the soil on straw decomposition, the research was conducted under normal condition at 20℃ by simulating burying and returning to soil by net bag method. In the 105 d experimental period, effects of biogas slurry produced by anaerobic fermentation of cattle manure or tape water on straw decomposition were systematically studied; influences of different soil types and different straw lengths on the decomposition rate of straw, the contents of cellulose, hemicelluloses, and lignin in straw decomposition after adding biogas slurry were also explored. The experimental results showed that biogas slurry could greatly accelerate straw decomposition. The straw decomposition rate in groups of tape water added was 33.61%, while that in groups of biogas slurry added was 42.37%. The straw decomposition mainly occurred in the first 70 d after adding biogas slurry. When the experiment was over, the straw decomposition rate of each experimental group was higher than 42%. The straw decomposition rate in the experimental groups of straw length being 20 mm was higher than that of being 10 mm. When the experiment was over, the straw decomposition rate in the experimental groups of straw length being 20 mm could reach 52%. Hemicelluloses decomposition could apparently be affected by straw lengths, and the shorter the straw length was, the quicker hemicelluloses decomposition was. However, cellulose and lignin decomposition could obviously be influenced by soil types. Compared with black loam soil, sandy loam soil was more active for the decomposition of cellulose and lignin in straw after its returning to soil. This research may lay a theoretical foundation for quick decomposition of straw in its returning to soil, as well as promote the widespread application of technique in straw returning to soil.

Key words: biogas slurry; straw returning; soil types; straw lengths; straw decomposition

收稿日期: 2017-04-13 修回日期: 2017-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51406032)、黑龙江省自然科学基金项目(E201406)、教育部留学回国人员科研启动基金项目(20131792)和黑龙江省博士后科研启动基金项目(LBH-Q10148)

作者简介: 王忠江(1978—),男,教授,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail: neauwzj@126.com

引言

我国是一个农业大国,每年产生约 7 亿 t 的农作物秸秆亟待处理和利用^[1-3]。针对这一问题近年来人们加大了对秸秆利用的研究力度,开发出一系列秸秆利用技术^[4-7],如秸秆厌氧发酵技术、秸秆压块技术等,在众多的秸秆利用技术中秸秆还田由于同时具有增加土壤有机质含量,改善土壤肥力状况,提高农田生态环境质量和利用量大等特点,成为近年来应用和研究的热点^[7-10]。但目前秸秆还田技术仍存在秸秆分解腐熟速度慢、影响后续耕作等问题,阻碍了秸秆还田技术的应用和推广,造成在部分地区,尤其在一些城郊地区农作物秸秆被大量无效焚烧,致使土壤肥力逐年下降,农田生态平衡遭受破坏,空气质量下降,农业生态环境不断恶化^[11-15],因此,探索加快秸秆还田后腐解速率的方法成为一个亟待解决的问题。造成秸秆分解腐熟速度慢的原因,一方面是由于收获后的秸秆碳氮比较高^[16-19],需要施入一定的氮素来调整碳氮比,但由于成本原因,在秸秆还田时很少有农户同时施用尿素等氮素肥料^[20-21];另一方面是由于作物收割时秸秆中的水分较少^[4],加之收割后秸秆并没有立即翻入土中,而是粉碎以后覆盖于地表,使秸秆中残留的水分很快散失,待秸秆翻入土壤后秸秆不易腐烂,影响后续耕作。所以秸秆还田过程中补水、补氮并及时翻入土壤成为加快秸秆腐解速度的关键。

目前我国已建成 2 万余处大中型沼气工程^[22-23],这些沼气工程在处理废弃物并产生新能源沼气的同时,也产生大量的发酵后副产物——沼肥^[24],这些沼肥因未达到直接排放河道的国家标准而需要作进一步处理,进而增加了相应的处理成本。另一方面,虽然沼肥中养分全面,含有丰富的腐殖酸等有机质,是一种优质的有机肥料源^[25-27],但由于目前普遍推广规模化沼气工程,沼肥的产生量非常大^[28],而且沼肥的施用具有明显的季节性,施用时间主要集中在春季和夏季,秋季的施用量很少,进而造成秋季时沼肥的大量累积,如果得不到及时处理和利用,将使沼肥这种水分含量较高并富含氮素等营养物质的资源变成污染源,对周边环境造成潜在威胁,进而阻碍沼气工程的应用和推广进程。所以如何拓宽沼肥的利用途径,实现沼肥周年利用,成为沼肥资源化的关键。

本文针对目前秸秆还田和沼肥利用过程中存在的关键问题,利用沼肥水分含量大并富含氮素的特点,通过秸秆和沼肥的同步翻埋还田,实现对还田后秸秆的补水补氮,加快秸秆的腐解速度,同时还可以拓宽沼

肥施用淡季的利用途径,充分实现沼肥的资源化。

1 材料与方法

1.1 试验时间及供试材料

试验于 2016 年 5—8 月份在东北农业大学能源实验室进行,室温为 20℃。试验所用黑壤土取自东北农业大学东门农学院实验田(45°42′6.71″N、126°46′39.71″E),砂壤土取自肇源县茂兴镇幸福村(45°53′00″N、125°07′00″E),采样深度均为地表耕作层 5~25 cm,采集后的土壤进行破块,并剔除作物根系、石块等杂物。所用沼肥取自哈尔滨良大集团双城市杏山镇沼气工程,沼气发酵原料为牛粪,沼气发酵时间为 30 d,沼肥的相关理化指标为:总固体质量分数为 3.07%,pH 值为 7.75,粘度为 1.58 mPa·s,总氮质量浓度为 997.50 mg/L,NH₄⁺-N 质量浓度为 883.45 mg/L。供试土壤基本性质见表 1。

表 1 土壤特性参数

Tab. 1 Characteristics of soils

参数	黑壤土	砂壤土
总固体质量分数/%	79.70	88.23
pH 值	7.54	7.62
有机质质量比/(g·kg ⁻¹)	30.42	16.54
总氮质量比/(mg·kg ⁻¹)	1507.46	1266.15
硝态氮质量比/(mg·kg ⁻¹)	16.92	46.26
铵态氮质量比/(mg·kg ⁻¹)	7.64	19.68
总磷质量比/(mg·kg ⁻¹)	6.93	50.25
总钾质量比/(mg·kg ⁻¹)	12.53	324.96

1.2 供试秸秆

试验用玉米秸秆取自东北农业大学东门实验田,玉米品种为东农 253。用粉碎机将取回后的秸秆粉碎成 10 mm 和 20 mm 长的秸秆段,风干,贮存备用。试验前测定的供试秸秆相关理化指标为:总固体质量分数 93.58%、碳质量分数 44.01%、氮质量分数 0.69%。

1.3 试验设计

在室温 20℃ 条件下,采用尼龙网袋法进行不同长度秸秆在不同土壤中的腐解试验。尼龙网袋的长和宽分别为 25 cm 和 20 cm。根据不同长度秸秆对自来水、沼肥的吸附能力,测得每 100 g 秸秆可吸附 200 g 自来水或沼肥。将不同长度秸秆分别与自来水、沼肥混合后,装入尼龙网袋并封口。每袋装混合秸秆 100 g,埋入试验土槽 5~15 cm 处。试验共设 5 个处理,试验各处理如下:①10 mm 秸秆 600 g + 沼肥 1 200 g + 黑壤土。②20 mm 秸秆 600 g + 自来水 1 200 g + 黑壤土。③20 mm 秸秆 600 g + 沼肥 1 200 g + 黑壤土。④10 mm 秸秆 600 g + 沼肥 1 200 g + 砂壤

土。⑤20 mm 秸秆 600 g + 沼肥 1 200 g + 砂壤土。其中沼肥和水对秸秆腐解的影响研究部分采用的秸秆长度为 20 mm,所用土壤为黑壤土。

1.4 试验方法

试验采用 2 个 3 cm 厚的聚氯乙烯板制成的长 120 cm、宽 50 cm、高 60 cm 的土槽,均用聚氯乙烯板隔成 3 个区域,分别填入供试黑壤土和砂壤土,底土厚度为 30 cm。将装有秸秆和沼肥(或自来水)混合物的尼龙网袋封口并朝上竖直埋入土壤中,上层覆土 5 cm。试验过程中每隔 7 d 取样,共取 15 次。取样后将尼龙网袋加套网袋,在蒸馏水中上下浸提 50 次,冲洗干净并在 100℃ 条件下干燥(纤维素等组分的测定需要 100℃ 高温干燥),之后测定秸秆质量以及纤维素、半纤维素、木质素质量分数。定期用喷壶向试验土壤表面喷施自来水,保持土壤表面湿润、不板结。

秸秆质量用烘干法测定^[29];秸秆中的纤维素、半纤维素和木质素质量分数用 ANKOM 半自动纤维分析仪测定。

数据处理与分析软件为 Microsoft Excel 2013、Origin 9.1 和 SPSS 22.0。

2 结果与讨论

2.1 沼肥和水对秸秆腐解的影响

2.1.1 玉米秸秆降解率

还田后秸秆降解率随时间的变化如图 1 所示。

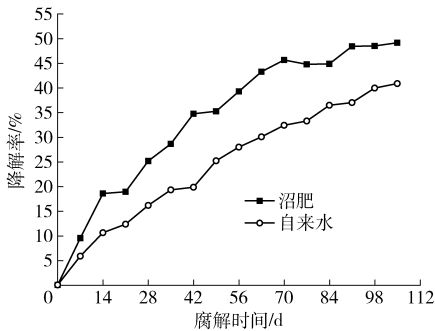


图 1 20 mm 秸秆降解率变化曲线

Fig. 1 Changing curves of degradation rate of straw with length of 20 mm

从图中可以看出,两组的秸秆降解率变化规律基本一致,即试验开始后先快速上升,在试验的中后期秸秆降解速度逐渐减慢,降解率缓慢上升并逐渐趋于稳定。从图中还可以看出,添加沼肥组的秸秆降解率从还田开始就高于自来水组,试验中期 2 组的差距逐渐增大,试验结束时添加自来水的秸秆降解率为 33.61%,添加沼肥组的降解率达到 42.37%。这主要是由于沼气发酵是在厌氧条件下进行的,而且厌氧微生物主要利用发酵原料中的碳素,致使氮元素在厌氧发酵系统中累积,而且氮素主

要是以铵态氮的形式存在^[17,30],所以厌氧发酵后沼肥中的氮氮含量较高,这些富含氮素的沼肥与碳素含量较高的秸秆混合后起到调节还田秸秆碳氮比的作用,利于后续秸秆降解微生物的代谢,进而加快秸秆的降解,而添加自来水的对照组仅有补水的作用而没有补氮的作用,所以出现添加沼肥组的秸秆降解率明显高于添加自来水的现象。

2.1.2 玉米秸秆残余半纤维素含量

还田后秸秆的半纤维素质量分数随时间的变化如图 2 所示。

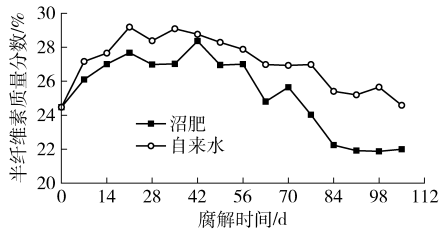


图 2 20 mm 秸秆残余半纤维素质量分数变化曲线

Fig. 2 Changing curves of content of residual hemicellulose in straw with length of 20 mm

从图中可以看出,沼肥组和自来水的半纤维素质量分数的变化规律基本一致,呈现先上升后稳定再下降的趋势,这与王旭东等^[31]发现的半纤维素的变化规律相一致,这主要是由于秸秆中除纤维素、半纤维素和木质素以外,还含有一定比例的淀粉、蔗糖、低聚糖、果糖和氨基酸等水溶性组分,这些水溶性组分与纤维素、半纤维素和木质素相比更容易被微生物降解和利用,所以试验初期这些物质迅速被微生物降解,其质量分数迅速降低,使试验初期秸秆中较难降解的半纤维素、纤维素和木质素的相对质量分数均出现升高的现象,而试验的中后期较容易降解的水溶性组分已经降解殆尽,而此时相对比较容易降解的半纤维素得到迅速降解,使剩余秸秆中的半纤维素质量分数又呈现逐渐下降的趋势。从图中还可以看出,在整个试验过程中沼肥组的半纤维素含量均低于对应的自来水组,试验开始时各试验组秸秆的半纤维素质量分数为 24.47%,而试验结束时添加沼肥组的半纤维素质量分数为 19.71%,添加自来水的半纤维素质量分数为 22.59%,两个试验组的半纤维素质量分数均低于试验开始时的半纤维素质量分数,这说明秸秆还田后秸秆中的半纤维素相对比较容易降解^[31],而且添加沼肥能显著加快半纤维素的降解。

2.1.3 玉米秸秆残余纤维素含量

还田后秸秆的纤维素质量分数随时间的变化如图 3 所示。

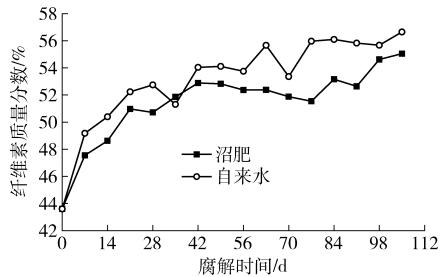


图3 20 mm 秸秆残余纤维素质量分数变化曲线
Fig.3 Changing curves of content of residual cellulose in straw with length of 20 mm

由图中可以看出,2 个试验组纤维素质量分数的变化规律基本一致,即试验前期迅速上升,试验中后期纤维素质量分数变化较小,基本保持稳定。从图中还可以看出,在整个试验过程中除第 35 天时自来水组的纤维素质量分数略低于沼肥组,在其他的试验过程中自来水组的纤维素质量分数均高于沼肥组,试验结束时自来水组和沼肥组的纤维素质量分数由试验开始的 43.59% 变化为 58.39% 和 56.18%,相对含量略有上升,说明纤维素在秸秆还田后也容易降解,但与半纤维素相比,半纤维素更容易降解^[32]。

2.1.4 玉米秸秆残余木质素含量

还田后秸秆的木质素质量分数随时间的变化如图 4 所示。

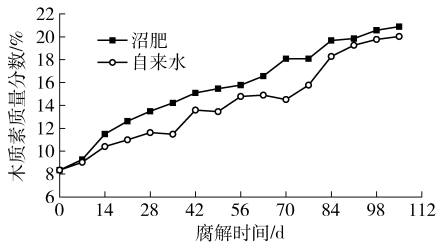


图4 20 mm 秸秆残余木质素质量分数变化曲线
Fig.4 Changing curves of content of residual lignin in straw with length of 20 mm

从图中可以看出,沼肥组和自来水的木质素质量分数的变化规律基本一致,沼肥组从试验开始后木质素质量分数呈现较稳定的上升趋势,而自来水组除第 35 天和第 70 天木质素质量分数略有下降之外,其他时间均保持上升趋势。试验开始时 2 个试验组的木质素质量分数为 8.34%,而试验结束时沼肥组的木质素质量分数为 20.45%,自来水的木质素质量分数为 17.78%,2 个试验组的木质素相对质量分数在整个试验过程中均显著增加,这主要是由于秸秆还田后,秸秆中较容易降解的半纤维素等首先降解,使剩余秸秆中的半纤维素质量分数下降,而较难降解的木质素质量分数相对升高,这与匡恩俊等^[33]的研究结果一致。

2.2 秸秆长度和土壤类型对秸秆腐解的影响

在添加沼肥条件下对比研究长度为 10 mm 和 20 mm 的秸秆在黑壤土和砂壤土中的腐解特性。图 5 ~8 中 B + 10 mm 表示黑壤土、秸秆长度 10 mm; B + 20 mm 表示黑壤土、秸秆长度 20 mm; S + 10 mm 表示砂壤土、秸秆长度 10 mm; S + 20 mm 表示砂壤土、秸秆长度 20 mm。

2.2.1 玉米秸秆降解率

还田后秸秆降解率的变化如图 5 所示。

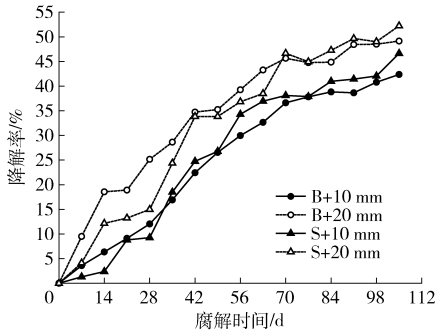


图5 不同长度秸秆在不同土壤中的降解率
Fig.5 Degradation rate of straw of different sizes returning to different soils

从图 5 中可以看出,4 个试验组的整体变化规律基本一致,即试验开始后先快速上升,70 d 后秸秆降解速度减慢,降解率缓慢上升并逐渐趋于稳定,试验结束时各试验组的秸秆降解率维持在 42% ~ 52%。从图中还可以看出在整个试验过程中秸秆长度为 20 mm 的 2 个试验组的秸秆降解率均高于其他 2 个秸秆长度为 10 mm 的试验组,试验结果表明在配施沼肥的条件下并不是秸秆长度越小秸秆降解速度越快,这可能是由于翻埋还田后的秸秆降解是一个兼氧过程,氧气的参与可以显著加快秸秆的降解速度,但由于翻埋后秸秆的上部覆盖 5 cm 土壤使秸秆无法与空气中的氧气充分接触,而 10 mm 的秸秆与 20 mm 的秸秆相比尺寸更小,秸秆间的空隙也更小,进一步阻碍了秸秆降解微生物与氧气的接触机会,进而阻碍了秸秆降解进程,所以才会出现 20 mm 秸秆试验组的秸秆降解速率高于 10 mm 秸秆试验组的现象。

2.2.2 玉米秸秆残余半纤维素含量

还田后秸秆半纤维素质量分数的变化如图 6 所示。

从图中可以看出,黑壤土 2 个试验组和砂壤土 2 个试验组的半纤维素质量分数变化规律基本一致,即试验开始后各试验组的半纤维素质量分数先上升,之后达到各组的较高值后又开始逐渐下降,84 d 之后各试验组的半纤维素质量分数逐渐趋于稳定。从图中还可以看出,秸秆长度为 10 mm 的 2 个

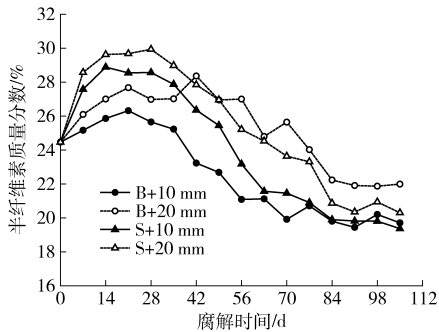


图 6 不同长度秸秆在不同土壤中的残余半纤维素质量分数变化曲线

Fig. 6 Changing curves of content of residual hemicellulose in different sizes straw returning to different soils

试验组秸秆的半纤维素质量分数在整个试验过程中均低于秸秆长度为 20 mm 的对照组,经显著性分析,其差异达到极显著($P < 0.01$)。此外从图中还可以看出,砂壤土 2 个试验组秸秆的半纤维素质量分数在整个试验过程中变化规律及差值的差异均较小,而黑壤土 2 个试验组秸秆的半纤维素质量分数在整个试验过程中的差值则较大,特别是试验的中后期,经显著性分析,其差异达到极显著($P < 0.01$),所以在黑壤土中进行秸秆还田时应对秸秆的长度进行合理的选择。试验结束时 4 个试验组的半纤维素质量分数从试验开始时的 24.47% 下降到 19% ~ 22%,含量有所下降。

2.2.3 玉米秸秆残余纤维素含量

还田后秸秆纤维素质量分数的变化如图 7 所示。

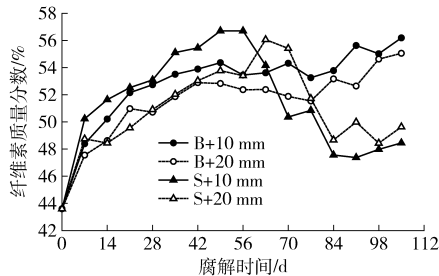


图 7 不同长度秸秆在不同土壤中的残余纤维素质量分数变化曲线

Fig. 7 Changing curves of content of residual cellulose in different sizes straw returning to different soils

从图中可以看出,黑壤土 2 个不同长度试验组在整个试验过程中均呈现 10 mm 试验组秸秆的纤维素质量分数高于 20 mm 试验组的现象,而砂壤土 2 个不同长度试验组则在试验前 56 d 呈现 10 mm 试验组秸秆的纤维素质量分数高于 20 mm 试验组的现象,而 56 d 之后则呈现出 20 mm 试验组秸秆的纤维素质量分数高于 10 mm 试验组的现象。从图中还可以看出,砂壤土试验组和黑壤土试验组在试验

中后期秸秆的纤维素质量分数变化规律存在一定差异,黑壤土试验组秸秆的纤维素质量分数呈现平稳小幅上升的趋势,而砂壤土试验组秸秆的纤维素质量分数则呈现先快速下降后逐渐趋于稳定的趋势,这与王旭东等^[31]研究中发现的不同肥力土壤对纤维素降解率的影响规律相一致,主要是由于秸秆在还田后的 180 d 内纤维素在低肥力的砂壤土中的矿化分解速度高于高肥力的黑壤土,进而出现本试验的现象。试验结束时两个黑壤土试验组秸秆的纤维素质量分数维持在 56% 附近,而砂壤土两个试验组则维持在 49% 附近,但 4 个试验组的纤维素质量分数均较试验开始时有所上升。

2.2.4 玉米秸秆残余木质素含量

还田后秸秆木质素质量分数的变化如图 8 所示。

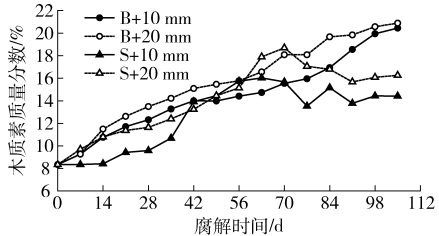


图 8 不同长度秸秆在不同土壤中的残余木质素质量分数变化曲线

Fig. 8 Changing curves of content of residual lignin in different sizes straw returning to different soils

从图中可以看出,黑壤土 2 个试验组秸秆的木质素质量分数在整个试验过程均呈现出 20 mm 试验组高于 10 mm 试验组的现象,而砂壤土 2 个试验组秸秆的木质素质量分数除在 42 ~ 56 d 间 10 mm 试验组高于 20 mm 试验组外,在其他的试验时间内均呈现 20 mm 试验组高于 10 mm 试验组的现象。从图中还可以看出,砂壤土 2 个试验组和黑壤土 2 个试验组秸秆的木质素质量分数的整体变化规律在试验的中后期存在一定差异,黑壤土 2 个试验组秸秆的木质素质量分数在试验的中后期出现小幅上升,而砂壤土 2 个试验组则呈现小幅下降趋势,试验结束时黑壤土 2 个试验组秸秆的木质素质量分数维持在 20% 左右,而砂壤土 2 个试验组则维持在 15% 左右,但 4 个试验组试验结束时的木质素质量分数均高于试验开始时的 8.34%。

3 结论

(1) 沼肥对秸秆还田后的腐解具有显著的促进作用,在 105 d 的试验周期内添加自来水组的秸秆降解率为 33.61%,而添加沼肥组的秸秆降解率则达到 42.37%,秸秆和沼肥同步还田能显著加快秸

秆的腐解速率,且腐解后添加沼肥试验组秸秆的纤维素和半纤维素质量分数低于添加自来水组,而木质素质量分数则高于自来水组。

(2) 配施沼肥后,秸秆的降解主要集中在前 70 d,试验结束时各试验组的秸秆降解率均高于 42%,且秸秆长度 20 mm 试验组的秸秆降解率高

于 10 mm 秸秆,试验结束时 20 mm 试验组的秸秆降解率达到 52%;秸秆长度对半纤维素的降解影响较明显,长度越小半纤维素降解速度越快;而土壤类型则对纤维素和木质素降解具有较显著的影响,砂壤土更利于还田后秸秆中纤维素和木质素的降解。

参 考 文 献

1 ZHANG H F, HU J, QI Y X, et al. Emission characterization, environmental impact, and control measure of PM2.5 emitted from agricultural crop residue burning in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,149:629 – 635.

2 毕于运,高春雨,王亚静,等. 中国秸秆资源数量估算[J]. *农业工程学报*,2009,25(12):211 – 217.
BI Yuyun, GAO Chunyu, WANG Yajing, et al. Estimation of straw resources in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12):211 – 217. (in Chinese)

3 韩鲁佳,闫巧娟,刘向阳,等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. *农业工程学报*,2002,18(3):87 – 91.
HAN Lujia, YAN Qiaojuan, LIU Xiangyang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(3):87 – 91. (in Chinese)

4 YANG H S, FENG J X, ZHAI S L, et al. Long-term ditch-buried straw return alters soil water potential, temperature, and microbial communities in a rice – wheat rotation system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163:21 – 31.

5 霍丽丽,赵立欣,姚宗路,等. 秸秆能源化利用的供应模式研究[J]. *可再生能源*,2016,34(7):1072 – 1078.
HUO Lili, ZHAO Lixin, YAO Zonglu, et al. Study on the mode of straw supply in the energy utilization[J]. *Renewable Enery Resources*, 2016, 34(7):1072 – 1078. (in Chinese)

6 霍丽丽,吴娟娟,赵立欣,等. 华北平原地区玉米秸秆连续供应模型的建立及应用[J]. *农业工程学报*,2016,32(19):203 – 210.
HUO Lili, WU Juanjuan, ZHAO Lixin, et al. Establishment and application of crops straw supply model for north China plain area [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(19):203 – 210. (in Chinese)

7 顾美英,唐光木,葛春辉,等. 不同秸秆还田方式对和田风沙土壤微生物多样性的影响[J]. *中国生态农业学报*,2016, 24(4):489 – 498.
GU Meiying, TANG Guangmu, GE Chunhui, et al. Effects of straw incorporation modes on microbial activity and functional diversity in sandy soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4):489 – 498. (in Chinese)

8 WU H T, LU X G, YANG Q, et al. Early-stage litter decomposition and its influencing factors in the wetland of the Sanjiang Plain, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10):4027 – 4035.

9 SINGH P, HEIKKINEN J, KETOJA E, et al. Tillage and crop residue management methods had minor effects on the stock and stabilization of topsoil carbon in a 30-year field experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2015,518 – 519:337 – 344.

10 王金洲,卢昌艾,张文菊,等. 中国农田土壤中有机物料腐解特征的整合分析[J]. *土壤学报*,2016,53(1):16 – 27.
WANG Jinzhou, LU Chang’ ai, ZHANG Wenju, et al. Decomposition of organic materials in cropland soils across China: a meta-analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016,53(1):16 – 27. (in Chinese)

11 ALMAGRO M, MARTINEZ M M. Litter decomposition rates of green manure as affected by soil erosion, transport and deposition processes, and the implications for the soil carbon balance of a rainfed olive grove under a dry Mediterranean climate[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 196:167 – 177.

12 CHEN J M, LI C L, RISTOVSKI Z, et al. A review of biomass burning: emissions and impacts on air quality, health and climate in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579:1000 – 1034.

13 GU Y F, ZHANG T, CHE H, et al. Influence of returning corn straw to soil on soil nematode communities in winter wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2):52 – 56.

14 戴志刚,鲁剑巍,李小坤,等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. *农业工程学报*,2010,26(6):272 – 276.
DAI Zhigang, LU Jianwei, LI Xiaokun, et al. Nutrient release characteristic of different crop straws manure[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010,26(6):272 – 276. (in Chinese)

15 王金武,唐汉,王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL]. *农业机械学报*,2017,48(5):1 – 21.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170501&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001.
WANG Jinwu,TANG Han,WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in northeast China[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2017,48(5):1 – 21. (in Chinese)

16 JIN K, SLEUTEL S, BUCHAN D, et al. Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 104(1):115 – 120.

17 WANG Z J, XU F Q,LI Y B. Effects of total ammonia nitrogen concentration on solid-state anaerobic digestion of corn stover[J].

- Bioresource Technology, 2013, 144:281 – 287.
- 18 曹莹菲,张红,刘克,等. 不同处理方式的作物秸秆田间腐解特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):212 – 219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160930&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.030.
- CAO Yingfei, ZHANG Hong, LIU Ke, et al. Decomposition characteristics of crop residues among different agricultural treatments [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):212 – 219. (in Chinese)
- 19 张珺瑾,王婧,张莉,等. 理化预处理方式对玉米秸秆腐解与养分释放特征的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(23):226 – 232.
- ZHANG Juntong, WANG Jing, ZHANG Li, et al. Effect of physical and chemical pretreatment on decomposition and nutrient release characteristics of maize straw[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23):226 – 232. (in Chinese)
- 20 MALHI S S, KUTCHER H R. Small grains stubble burning and tillage effects on soil organic C and N, and aggregation in northeastern Saskatchewan[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(2):353 – 361.
- 21 李涛,何春娥,葛晓颖,等. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016,24(12):1633 – 1642.
- LI Tao, HE Chun'e, GE Xiaoying, et al. Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016,24(12):1633 – 1642. (in Chinese)
- 22 杜龙龙,张智烨,王蒙,等. 沼液一体化综合处理与循环利用工艺[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊2):207 – 212.
- DU Longlong, ZHANG Zhiye, WANG Meng, et al. Research on comprehensive integration process and recycling technologies of biogas slurry[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.2):207 – 212. (in Chinese)
- 23 杨艳丽,李光全,张培栋. 中国沼气产业对减排 CO₂ 的模拟与预测[J]. 农业工程学报,2013,29(15):1 – 9.
- YANG Yanli, LI Guangquan, ZHANG Peidong. Simulation and prediction of CO₂ emission reductions of biogas industry in China [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15):1 – 9. (in Chinese)
- 24 宋成芳,单胜道,张妙仙,等. 畜禽养殖废弃物沼液的浓缩及其成分[J]. 农业工程学报,2011,27(12):256 – 259.
- SONG Chengfang, SHAN Shengdao, ZHANG MiaoXian, et al. Concentration and determination of composition of biogas slurry [J]. Transactions of the CSAE,2011,27(12):256 – 259. (in Chinese)
- 25 王忠江,蔡康妮,王丽丽,等. 施灌沼肥对土壤氨挥发和氮素下渗规律的影响[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(5):139 – 144. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140522&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.022.
- WANG Zhongjiang, CAI Kangni, WANG Lili, et al. Influence of biogas slurry application on ammonia volatilization and nitrogen infiltration[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):139 – 144. (in Chinese)
- 26 吴树彪,崔畅,张笑千,等. 农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(8):118 – 125, 179. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130821&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.021.
- WU Shubiao, CUI Chang, ZHANG Xiaoqian, et al. Effect of biogas slurry on yield increase, quality improvement, water and soil environment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):118 – 125,179. (in Chinese)
- 27 张无敌,尹芳,李建昌,等. 沼液对土壤有机质含量和肥效的影响[J]. 可再生能源,2008,26(6):45 – 47.
- ZHANG Wudi, YIN Fang, LI Jianchang, et al. Influence of biogas fluid on the organic matter content in soil and its fertilization effect[J]. Renewable Energy Resource, 2008,26(6):45 – 47. (in Chinese)
- 28 CHEN L, ZHAO L X, REN C S, et al. The progress and prospects of rural biogas production in China[J]. Energy Policy, 2012, 51:58 – 63.
- 29 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- 30 GAO L H, LI P, WEI X L, et al. Effects of crops, soil types and irrigation methods on digestion capacity of biogas slurry[J]. Agricultural Science & Technology, 2015,16(8):1712 – 1715.
- 31 王旭东,陈鲜妮,王彩霞,等. 农田不同肥力条件下玉米秸秆腐解效果[J]. 农业工程学报,2009,25(10):252 – 257.
- WANG Xudong, CHEN Xianni, WANG Caixia, et al. Decomposition of corn stalk in cropland with different fertility [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(10):252 – 257. (in Chinese)
- 32 ZHENG A Q, ZHAO Z L, CHANG S, et al. Comparison of the effect of wet and dry torrefaction on chemical structure and pyrolysis behavior of corncobs[J]. Bioresource Technology, 2015, 176:15 – 22.
- 33 匡恩俊,迟凤琴,宿庆瑞,等. 三江平原地区不同有机物料腐解规律的研究[J]. 中国生态农业学报,2010,18(4):736 – 741.
- KUANG Enjun, CHI Fengqin, SU Qingrui, et al. Decomposition regularity of organic materials in Sanjiang Plain region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010,18(4):736 – 741. (in Chinese)