

生物炭对混施沼肥秸秆还田腐解特性的影响

王忠江^{1,2} 王泽宇¹ 张 正¹ 林贵英³ 刘 卓¹ 崔 峰¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 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;
3. 武汉光谷蓝焰新能源股份有限公司, 武汉 430070)

摘要: 为提高秸秆与沼肥同步翻埋还田的腐解效果,在室温条件下,秸秆中混施沼肥,采用网袋法模拟翻埋还田,在105 d的试验周期内,探讨在土壤中配施生物炭对秸秆与沼肥同步翻埋还田腐解的影响规律。结果表明,在土壤中配施生物炭能显著提高秸秆各指标的降解速度,且不同土壤之间玉米秸秆的降解率表现为砂土组大于壤土组,添加生物炭组大于未添加生物炭组,试验结束时,壤土组、壤土+生物炭组、砂土组、砂土+生物炭组的降解率分别为69.96%、74.63%、78.19%和79.14%;腐解前49 d为秸秆各组分的快速腐解期,后期腐解速率逐渐变慢;秸秆的降解率与纤维素降解率具有显著的相关性,添加生物炭对木质素的降解具有显著的促进作用,且木质素的降解与有机碳的降解呈正相关性。

关键词: 生物炭; 秸秆; 沼肥; 翻埋还田; 腐解率

中图分类号: S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0279-07

Effect of Biochar on Decomposition Characteristics of Corn Stover Presoaked with Digestate in Soil

WANG Zhongjiang^{1,2} WANG Zeyu¹ ZHANG Zheng¹ LIN Guiying³ LIU Zhuo¹ CUI Feng¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Heilongjiang Key Laboratory of Technology and Equipment for the Utilization of Agricultural Renewable Resources, Harbin 150030, China
3. Wuhan Optics Valley Bluefire New Energy Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: A great number of crop straws are produced each year in China. Among all the comprehensive utilizations of crop straw, the method of returning straw to soil has been paid attention and accepted as a recycle technology featuring with increasing the porosity of soil, improving the aggregate structure of soil and increasing the production of crops. The most important indicator to evaluate the effect of straw returning is the decomposition condition of straw. Biochar and digestate were combined as accelerants to expedite the decay of corn stover. The corn stover presoaked with digestate was buried into the soil added with biochar by mesh bag method at room temperature. The experimental process lasted 105 d. The decomposition ratio of corn stover and the characteristics of cellulose, hemicellulose, lignin, organic carbon and total cumulative nitrogen were investigated systematically to achieve the effect of biochar on the decomposition characteristics of corn stover presoaked with digestate in soil. The results indicated that the biochar increased the decomposition rate of corn stover significantly. The decomposition condition of corn stover in sandy loam was better than that in loamy soil. The decomposition ratios of comparison samples were 69.96% for the corn stover in loamy soil, 74.63% for the corn stover in loamy soil added with biochar, 78.19% for the corn stover in sandy loam and 79.14% for the corn stover in sandy loam added with biochar, respectively. Furthermore, the decomposition ratio of corn stover was increased as the increase of time. The decomposition rate was fast before 49 d and decreased gradually after 49 d. The decomposition ratios of cellulose, hemicellulose and total cumulative nitrogen were different significantly ($P < 0.05$). In addition, the decomposition ratio of corn stover was significantly correlated with the decomposition ratio of cellulose ($P < 0.05$). The research result can lay a theoretical foundation for the technology development of returning straw to soil and the comprehensive utilization of biochar.

Key words: biochar; corn stover; digestate; burying and returning; decomposition ratio

收稿日期: 2018-01-02 修回日期: 2018-01-25

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)、中央引导地方科技发展专项(ZY17C05)、黑龙江省博士后基金项目(LBH-13044Z)和教育部留学回国人员科研启动基金项目(20131792)

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

0 引言

我国是一个农业大国,每年产生大量的农作物秸秆,在众多的秸秆利用技术中^[1-4]秸秆还田以其能够提高土壤孔隙度、改善土壤团聚结构、利于下季作物增产,以及利用量大等特点成为近年来秸秆利用和研究的热点^[5-9]。但还田后秸秆由于其碳氮比过高等原因致使其降解速度缓慢,因此如何实现还田后秸秆的高效、快速腐解成为近年来科研工作者的关注焦点^[5,10-12]。目前,针对配施大量矿物氮肥降低秸秆还田后碳氮比^[13]所引起的环境污染和土壤质量下降等问题,已有部分科研工作者提出利用沼气厌氧发酵后富含氮素等营养物质的沼肥,进行秸秆配施沼肥还田的研究^[14-15],取得了较好的秸秆腐解效果,作为一种新的秸秆还田方式,其不仅加快了还田后秸秆的降解速度,而且充分利用了厌氧发酵后副产物——沼肥^[16]。然而,玉米秸秆主要由木质素、纤维素和半纤维素构成,木质素属于高分子芳香类聚合物,难以水解,而纤维素被木质素和半纤维素以共价键形式包围其中,难以被微生物利用^[3]。秸秆在配施沼肥还田后,虽然能够在一定程度上调节腐解过程中的碳氮比,但是沼肥在土壤中流失严重^[15-16],难以长时间维持较高的秸秆降解速率。

生物炭是生物质材料在完全或部分缺氧的情况下经高温慢热解(小于700℃)产生的一类高度芳香化、难熔性固态物质^[17],由于其疏松多孔的结构及巨大的表面积能够储存水分和养分,可以改善土壤的保肥能力和通透性,增加微生物活性等优点^[17-21],成为近年来配施有机肥料或化肥的研究热点^[21],也为秸秆配施沼肥还田的高效利用提供了新的研究方向。目前,生物炭的研究主要围绕在生物炭对作物生长^[17,21]、微生物群落结构^[6,22]、土壤团聚体和有机碳分布^[19,23]等方面的影响,并已经取得一定的成果,但是对于生物炭的配施对秸秆降解的影响研究较少,生物炭与沼肥配施同步玉米秸秆翻埋还田的研究未见报道。因此,本文在前期研究的基础上探讨生物炭对秸秆与沼肥同步翻埋还田腐解的影响规律,对试验过程中玉米秸秆降解率、纤维素、半纤维素、木质素、有机碳、总氮等累积降解特征进行研究。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2016年11月—2017年2月在东北农业大学能源实验室进行,室温维持在(16±1)℃。试

验所用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),砂土取自肇源县茂兴镇幸福村(45°32′41.95″N,124°32′49.28″E),土样采集地表耕层5~25 cm,采集后的土壤进行破块处理,并剔除石块、作物根系等杂物。所用沼肥取自哈尔滨市孟家乡养殖场,发酵原料为猪粪,沼肥的相关理化指标为:总固体质量分数为0.37%,pH值为7.22,粘度为1.58 mPa·s,总氮质量浓度为1 532.37 mg/L,NH₄⁺-N质量浓度为949.71 mg/L。供试土壤基本特性见表1。

表 1 土壤特性参数
Tab.1 Characteristics of soils

参数	壤土	砂土
总固体质量分数/%	79.70±0.03	88.23±0.02
pH 值	7.54±0.02	7.92±0.05
有机质质量比/(g·kg ⁻¹)	30.42±0.35	16.54±0.69
总氮质量比/(mg·kg ⁻¹)	1 507.46±242	1 266.15±151
硝态氮质量比/(mg·kg ⁻¹)	16.92±1.92	18.72±1.89
氨态氮质量比/(mg·kg ⁻¹)	7.64±0.73	19.68±0.99
速效磷质量比/(mg·kg ⁻¹)	6.93±0.89	7.88±1.46
速效钾质量比/(mg·kg ⁻¹)	12.53±1.39	76.18±7.88
砂粒质量分数/%	60.82±2.01	87.73±1.05
粉砂粒质量分数/%	27.34±1.27	11.21±0.32
黏粒质量分数/%	11.84±0.74	1.06±0.73

试验施用的生物炭由武汉光谷蓝焰新能源股份有限公司生产,为竹产品炭,竹炭的制备温度为620℃,BET 单点比表面积为(2.64±0.59) m²/g,BET 多点比表面积为(3.89±0.56) m²/g,单点吸附总孔体积为(0.013±0.002) cm³/g,吸附平均孔径为(13.74±0.70) nm,孔径分布曲线如图1所示,粉碎过40目筛后备用。

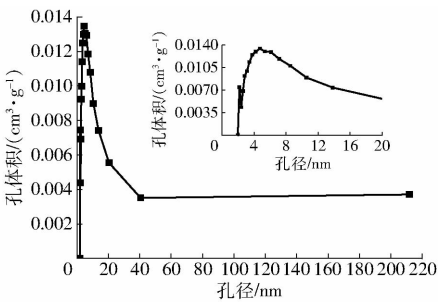


图 1 生物炭孔径分布曲线

Fig.1 Pore size distribution curves of biochar

试验用玉米秸秆取自东北农业大学东门农学院实验田,玉米品种为“东农253”。待玉米收获后,立即用镰刀割取玉米秸秆地上部分,均匀晾晒7 d后,使用9ZT-1型铡草机将玉米秸秆处理成2 cm长的秸秆段,并在试验前测定供试秸秆相关指标,见表2。

表 2 玉米秸秆特性参数
Tab.2 Characteristics of corn stover

参数	数值
总固体质量分数/%	71.51 ± 5.30
有机碳质量分数/%	66.41 ± 1.30
总氮质量分数/%	1.27 ± 0.09
半纤维素质量分数/%	25.53 ± 0.32
纤维素质量分数/%	34.43 ± 0.67
木质素质量分数/%	12.40 ± 0.27
粗脂肪质量分数/%	9.42 ± 0.39
碳氮比	52.23 ± 2.42

1.2 试验设计

在室温条件下,采用尼龙网袋(100 目)法进行试验。尼龙网袋的尺寸:长 20 cm、宽 15 cm。秸秆与沼肥按照 2:3 的比例均匀混合,静置 30 min,待玉米秸秆充分吸附沼肥后装入尼龙网袋并封口。每袋装秸秆和沼肥混合物(秸秆混合物)120 g,埋入试验土柱 15 cm 处。试验共设 4 个处理,各处理如下:秸秆混合物+壤土(B1)、秸秆混合物+壤土+生物炭(B2)、秸秆混合物+砂土(S1)、秸秆混合物+砂土+生物炭(S2)。其中 B2 和 S2 还田土壤中生物炭含量为 5%。

1.3 试验方法

试验采用 4 个 3 cm 厚的聚乙烯材料制成的长 80 cm、宽 60 cm、高 65 cm 的土槽,分别铺 20 cm 厚的壤土或砂土作为底土。将装有沼肥和秸秆混合物的尼龙网袋平铺在高 50 cm、直径 15 cm、厚度 1 mm 的聚乙烯土柱当中,尼龙网袋底层装土壤 4.2 kg 压实到土柱高度 20 cm 处,尼龙网袋上层装土壤 2.0 kg 压实到土柱高度 35 cm 处,确保所有土柱中土壤容重均为 1.05 g/cm³。土柱底部留漏水孔,竖直放入土槽中,土柱之间用土壤填满,保持土层温度及试验过程土柱侧面避光^[24]。试验过程中,每隔 7 d 取样一次,共取 15 次,每次取样后原来埋尼龙网袋处用试验土壤填平。取样后去除附着在尼龙网袋表面的泥土,然后将尼龙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^[14],之后用 JFSD-100 型粉碎机粉碎后测定秸秆中纤维素、半纤维素、木质素、总氮、有机碳质量分数,每个指标测定 3 次取平均值并计算标准差。每两次取样后向每个试验土柱表面均匀喷施 50 mL 自来水,保持土壤表面湿润、不板结。

秸秆中的纤维素、半纤维素和木质素含量采用 ANKOM A200i 型半自动纤维素分析仪(USA)测定^[4],将干燥后的玉米秸秆粉碎过 1 mm 筛孔,准确称取 0.5 g 筛下物,装入 F57 专用滤袋中,封口,根据改进的范氏洗涤法,用 ANKOM A200i 型半自动

纤维分析仪测定半纤维素、纤维素和木质素含量;秸秆质量采用干燥法测定^[25];有机碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热法^[25];秸秆总氮含量采用 Foss Kjeltec 2300 型全自动凯式定氮仪根据仪器标准分析方法测定^[16]。秸秆降解率计算式为

$$D_1 = \frac{M_0 - M_E}{M_0} \times 100\%$$
 (1)

式中 D_1 ——秸秆降解率,%
 M_0 ——秸秆降解前干质量,g
 M_E ——秸秆降解后干质量,g

组分累积降解率计算式为

$$D_2 = \frac{M_s - M_d X_d}{M_s} \times 100\%$$
 (2)

其中 $M_s = M_0 X_s$ (3)

式中 D_2 ——组分累积降解率,%
 M_s ——组分初始质量,g
 M_d ——降解时间 d 时秸秆干质量,g
 X_s ——组分初始含量,%
 X_d ——降解时间 d 时组分含量,%

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 玉米秸秆降解规律

还田后秸秆降解率随时间的变化如图 2 所示。

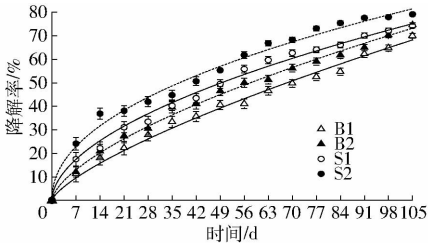


图 2 玉米秸秆降解率变化趋势

Fig.2 Variation trends of decomposition rate of corn stover

由图 2 可以看出,4 个试验组秸秆降解率的整体变化规律基本一致,秸秆的腐解过程主要分为 3 个时期:快速腐解期、腐解减缓期、腐解停滞期。不同处理秸秆各个时期所占时间不同,这与戴志刚等^[7]的研究结果一致,具体表现为:S2 在试验前期 14 d 腐解迅速,并在 49 d 时降解率达到 55.33%,而 S1、B2、B1 达到该降解率的时间分别为 56、70、84 d,在此之后各组降解率再次攀升并趋于稳定。形成这种现象主要是由于在秸秆降解过程中,秸秆中可溶性物质及半纤维素等组分首先降解,当降解到一定时间后难降解的木质素会阻碍降解的进行^[5],直到降解木质素的微生物破坏木质素结构后,秸秆的降解速率再次增加直至稳定^[11]。在整个降解过程中,

添加生物炭组的秸秆(B2、S2)降解率始终高于未添加生物炭组秸秆(B1、S1),且砂土试验组秸秆(S1、S2)降解率始终高于壤土试验组(B1、B2)秸秆的降解率,经过 105 d 的培养,B1、B2、S1、S2 秸秆的降解率分别为 69.96%、74.63%、78.19%、79.14%,各组降解率差异均达到显著水平($P < 0.05$)。

由图 2 还可以看出,在壤土的还田试验中秸秆降解率前期和后期差异较小,中期差异较大,这种差异主要是由于添加生物炭后提高了土壤的孔隙度,便于秸秆降解微生物与氧气的接触,同时生物炭为微生物的繁殖提供了较大的生存空间。此外,生物炭的吸附性使得沼肥能够长时间的在秸秆腐解层附近停留,为微生物的降解和繁殖营造了适宜的碳氮比^[13-14],促进了微生物的繁殖。而在砂土的还田试验中,S1 和 S2 的秸秆腐解率的差异较在壤土中 B1 和 B2 的秸秆腐解率差异明显,主要是由于砂土和壤土相比土壤间的空隙较大,沼肥中的氮素损失速度更快、损失比例更大,添加生物炭后由于生物炭高吸附性的特点使砂土的固氮效果得到极大改善,提高了土壤不同粒级团聚体的营养水平和水分条件^[26],促进了秸秆还田土壤微生物的群落演替^[22],利于秸秆的降解。

2.2 玉米秸秆半纤维素累积降解率

还田后秸秆的半纤维素累积降解率变化趋势如图 3 所示。

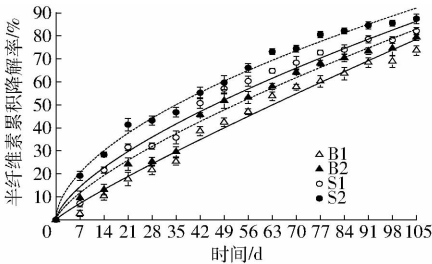


图 3 玉米秸秆半纤维素累积降解率变化趋势
Fig.3 Variation trends of cumulative decomposition rate of hemicellulose in corn stover

由图 3 可以看出,壤土 2 个试验组和砂土 2 个试验组半纤维素累积降解率变化规律基本一致,即试验开始后各试验组半纤维素累积降解率先快速上升,经历短暂的腐解减缓期后半纤维素再次快速腐解直至趋于稳定,在整个过程中添加生物炭组秸秆的半纤维素降解率始终高于各自对应的未添加生物炭组。具体表现为在壤土中前 42 d 秸秆的半纤维素降解率差异不显著,试验中期和后期差异较为明显,这主要是因为降解前期秸秆降解微生物主要生活在秸秆和秸秆所吸附的沼肥构成的环境中,随着微生物的不断繁殖、数量和种类的扩增,达到秸秆和

土壤单位面积所能承受的极限,而比表面积大的生物炭能够提高单位面积微生物的种群数量^[22],提高秸秆降解的速度,并能长期保持这种降解优势。而在砂土中 2 个试验组的差异在前期较为明显,且由于生物炭对沼肥有较好的保持能力,营造了适宜的腐解碳氮比,使得 S2 组半纤维素的降解率并未表现出明显的降解减缓的现象,由快速腐解期直接进入腐解停滞阶段;同时在 S1 组试验过程中,砂土和秸秆为微生物提供的生存空间有限,且沼肥在砂土中流失严重^[15-16],较长的木质素腐解时间使得降解半纤维素的微生物随沼肥在土壤中不断繁殖和扩散,当木质素与半纤维素解开共价键后,半纤维素与微生物得以充分接触,降解率将有一个明显的提升阶段^[5]。试验结束时,2 个壤土试验组秸秆半纤维素累积降解率维持在 75% 左右,而砂土的 2 个试验组秸秆半纤维素累积降解率维持在 85% 附近,且在壤土和砂土中,添加生物炭组降解率均比未添加组高出 5 个百分点。

2.3 玉米秸秆纤维素累积降解率

还田后秸秆纤维素累积降解率变化趋势如图 4 所示。

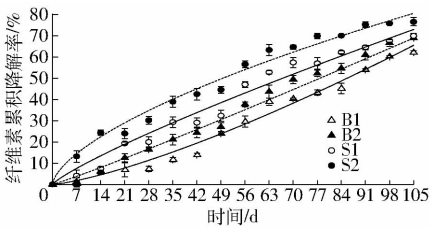


图 4 玉米秸秆纤维素累积降解率变化趋势
Fig.4 Variation trends of cumulative decomposition rate of cellulose in corn stover

由图 4 可以看出,砂土 2 个不同处理的试验组在整个试验过程中均呈现纤维素累积降解率高于壤土的 2 个试验组,且未添加生物炭组的降解率均低于对应的添加生物炭组。这种现象主要是因为降解纤维素的土壤纤维素酶是一种复合酶,其中土壤 β -葡萄糖苷酶是其重要的组成部分和限制因子,秸秆配施生物炭能显著提升土壤 2 种纤维素酶的活性^[21],从而促进纤维素的降解。从图 4 还可以看出,除 S2 组外,其他 3 组纤维素在试验初期降解缓慢,通过与秸秆的降解率对比后发现,各组纤维素累积降解率达到 50% 时所用的时间与秸秆的降解率基本一致,这说明秸秆的降解率与纤维素的降解率有显著的相关性($P < 0.05$),这与王旭东等^[8]的研究结果一致。经过 105 d 的腐解,各试验组纤维素的累积降解率由大到小排序为 S2 组(76.59%)、S1 组(73.99%)、B2 组(68.88%)、B1 组(62.10%)。

2.4 玉米秸秆木质素累积降解率

还田后秸秆木质素累积降解率变化趋势如图 5 所示。

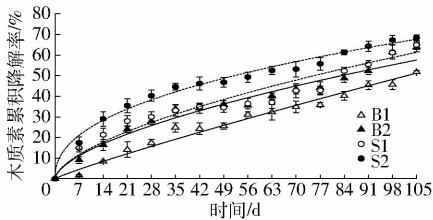


图 5 玉米秸秆木质素累积降解率变化趋势
Fig.5 Variation trends of cumulative decomposition rate of lignin in corn stover

由图 5 可以看出,4 个试验组木质素累积降解率规律基本一致,即试验前期木质素快速降解,试验中期木质素降解速度较慢,49 d 后木质素降解速度又开始逐渐增加,且添加生物炭组木质素的累积降解率显著高于对应的未添加生物炭组累积降解率 ($P < 0.05$)。这种现象的主要原因是由于木质素是秸秆中最稳定的组分,是秸秆降解的主要限制因素^[4,8],与半纤维素和纤维素相比,木质素分子结构复杂而且不规则,对酶水解作用呈抗性^[27]。随着试验的进行,玉米秸秆中致密的表皮组织和维管束遭到破坏,细胞壁变薄,内部结构疏松^[11,28],解除了木质素的包裹作用,进而促进了微生物对半纤维素和纤维素的降解,这与曹莹菲等^[29]的研究结果一致。而施用生物炭后提高了土壤微生物的活性和酶活性,对秸秆组织的降解程度更好,进而促进木质素的降解。试验结束时,4 个试验组木质素累积降解率分别为 B1 组 51.65%、B2 组 63.81%、S1 组 64.95% 和 S2 组 68.34%,且在壤土中添加生物炭能够显著提高秸秆木质素累积降解率 ($P < 0.05$)。从图 5 中还可以发现,B2 组降解率与 S1 组降解率差异不显著 ($P > 0.05$),这表明施加生物炭后能够显著改善土壤的空隙结构,使得壤土具有类似砂土疏松、透气的性质,促进微生物对木质素的降解。

2.5 玉米秸秆有机碳累积降解率

还田后秸秆有机碳累积降解率变化趋势如图 6 所示。

由图 6 可以看出,在腐解过程中,秸秆中有机碳呈现持续释放状态,试验前期 4 个试验组均保持较高的有机碳降解率,在试验中后期降解率维持在一个相对较低的水平并最终趋于稳定。这是因为秸秆还田增加了土壤中的腐殖酸等有机质,主要是通过秸秆中有机碳的矿质化作用^[9-10],秸秆中有机碳累积降解率越高,秸秆的腐解量越大,秸秆和生物炭配施增强了土壤微生物对秸秆的矿质化作用^[23],同时

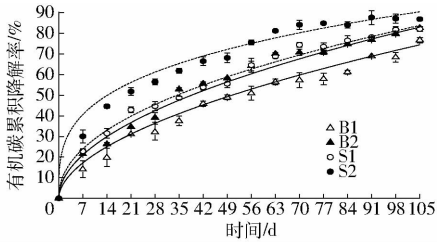


图 6 玉米秸秆有机碳累积降解率变化趋势
Fig.6 Variation trends of cumulative decomposition rate of organic carbon in corn stover

配施生物炭还田能够有效保持土壤的含水率及各种营养成分,使秸秆在多种酶的协同作用下转化为疏松多孔的腐殖质。此外,通过对比木质素累积降解规律不难发现,木质素累积降解率越高的试验组,其秸秆有机碳的累积降解率也越高,这与王旭东等^[8]研究的不同肥力条件下玉米秸秆腐解效果一致。在试验结束时,除 B1 试验组有机碳累积降解率为 76.67% 外,其他 3 个试验组累积降解率均维持在 85% 左右。

2.6 玉米秸秆总氮累积降解率

还田后秸秆的总氮累积降解率变化趋势如图 7 所示。

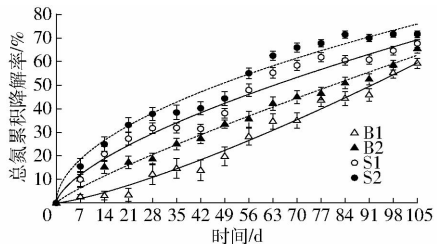


图 7 玉米秸秆总氮累积降解率变化趋势
Fig.7 Variation trends of cumulative decomposition rate of total nitrogen in corn stover

由图 7 可以看出,4 个试验组秸秆总氮累积降解规律总体上与有机碳类似,整体上呈现先快后慢的趋势,但同时也存在差异,B1 组秸秆在前 21 d 总氮释放缓慢,这主要由于氮素作为植物重要的结构物质,被微生物分解为可溶于水的氨态氮和硝态氮,壤土质地较其他试验组土壤黏重^[26],导致秸秆中氮素释放后流失缓慢,而添加了生物炭的 B2 组土壤由于生物炭改变了土壤的通透性并且具有较强的吸附作用,使得释放后的氮素能够相对比较容易地扩散到周围的土壤中。由图 7 还可以看出,累积降解率的拐点出现在第 49 天,4 个试验组在拐点处的累积降解率变幅介于 19.80% ~ 41.33%,这与代文才等^[3]的研究结果相符。在试验结束时,各试验组总氮累积降解率由大到小为 S2 组 (71.57%)、S1 组 (67.68%)、B2 组 (65.37%)、B1 组 (59.20%)。

3 结 论

(1) 土壤中添加生物炭对混施沼肥秸秆还田具有显著的促进作用,在 105 d 的试验周期内,秸秆混合物 + 壤土 (B1)、秸秆混合物 + 壤土 + 生物炭 (B2)、秸秆混合物 + 砂土 (S1)、秸秆混合物 + 砂土 + 生物炭 (S2) 的降解率分别为 69.96%、74.63%、78.19%、79.14%。

(2) 本试验条件下,培养前 49 d 均为秸秆各组分快速腐解期,并且半纤维素的快速腐解期出现得

较早。此外,秸秆降解各组分之间表现为秸秆的降解率与纤维素降解率具有显著的相关性;添加生物炭对秸秆木质素的降解具有显著的促进作用,而木质素的降解又与有机碳的降解具有正相关性。

(3) 在整个试验过程中,秸秆混合物 + 砂土 + 生物炭 (S2) 组秸秆各组分累积降解率均在 91 d 最先进入腐解停滞期;秸秆混合物 + 壤土 (B1) 组的各组分累积降解率均低于其他 3 个试验组,说明秸秆与沼肥同步翻埋还田后,土壤的透气性越好、养分保持越好的土壤环境更加利于秸秆的腐解。

参 考 文 献

1 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?flag=1&file_no=20170501&journal_id=jcsam. 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)

2 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.

3 代文才,高明,兰木羚,等. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]. 中国生态农业学报,2017,25(2):188-199.
DAI Wencai,GAO Ming,LAN Muling,et al. Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2017,25(2):188-199. (in Chinese)

4 郭建斌,郭亚琳,赵倩,等. 真菌固态载体预处理对不灭菌玉米秸秆降解的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):197-202. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160527&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.027.
GUO Jianbin, GUO Yalin, ZHAO Qian, et al. Effect of precolonized fungi carrier on lignin degradation of corn straw under unsterilized condition [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (5): 197 - 202. (in Chinese)

5 王婧,张莉,逢焕成,等. 秸秆颗粒化还田加速腐解速率提高培肥效果[J]. 农业工程学报,2017,33(6):177-183.
WANG Jing,ZHANG Li,PANG Huancheng,et al. Returning granulated straw for accelerating decomposition rate and improving soil fertility [J]. Transactions of the CSAE,2017,33(6):177-183. (in Chinese)

6 武爱莲,丁玉川,焦晓燕,等. 玉米秸秆生物炭对褐土微生物功能多样性及细菌群落的影响[J]. 中国生态农业学报,2016,24(6):736-743.
WU Ailian,DING Yuchuan,JIAO Xiaoyan,et al. Effect of corn-stalk biochar on soil microbial functional diversity and bacterial community in cinnamon soils [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2016,24(6):736-743. (in Chinese)

7 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 characteristics of different crop straws manure [J]. Transactions of the CSAE,2010,26(6):272-276. (in Chinese)

8 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)

9 陈曦,张敬智,张雅洁,等. 小麦-玉米秸秆连续还田对土壤有机质红外光谱特征及氮素形态的影响[J]. 中国生态农业学报,2015,23(8):973-978.
CHEN Xi,ZHANG Jingzhi,ZHANG Yajie,et al. Effect of continuous wheat and maize straw incorporation on soil nitrogen and Fourier transform infrared spectroscopic (FTIR) characterization of soil organic matter [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015,23(8):973-978. (in Chinese)

10 FINN D,PAGE K,CATTON K,et al. Effect of added nitrogen on plant litter decomposition depends on initial soil carbon and nitrogen stoichiometry [J]. Soil Biology and Biochemistry,2015,91:160-168.

11 迟凤琴,匡恩俊,宿庆瑞,等. 不同还田方式下有机物料有机碳分解规律研究[J]. 东北农业大学学报,2010,41(2):60-65.
CHI Fengqin,KUANG Enjun,SU Qingrui,et al. Study on organic carbon decomposition regularity of organic materials in different incorporation methods [J]. Journal of Northeast Agricultural University,2010,41(2):60-65. (in Chinese)

12 YAO Z S,YAN G G,ZHENG X H,et al. Straw return reduces yield-scaled N₂O plus NO emissions from annual winter wheat-based cropping systems in the North China Plain [J]. Science of the Total Environment,2017,590:174-185.

13 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)
- 14 王忠江, 王泽宇, 司爱龙, 等. 秸秆与沼肥同步翻埋还田对秸秆腐解特性的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 271–277. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170635&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.035.
- WANG Zhongjiang, WANG Zeyu, SI Ailong, et al. Effect of synchronously burying and returning straw and biogas slurry to soil on straw decomposition [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6):271–277. (in Chinese)
- 15 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?flag=1&file_no=20130821&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)
- 16 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?flag=1&file_no=20140522&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)
- 17 LUO X X, LIU G C, XIA Y, et al. Use of biochar-compost to improve properties and productivity of the degraded coastal soil in the Yellow River Delta, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(3):780–789.
- 18 ARIF M, ILYAS M, RIAZ M, et al. Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil [J]. *Field Crops Research*, 2017, 214:25–37.
- 19 KERRÉ B, HERNANDEZ-SORIANO M C, SMOLDERS E. Partitioning of carbon sources among functional pools to investigate short-term priming effects of biochar in soil: a ^{13}C study [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 547:30–38.
- 20 吴昱, 赵雨森, 刘慧, 等. 秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力影响分析与评价[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 247–256. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170731&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.031.
- WU Yu, ZHAO Yusen, LIU Hui, et al. Analysis and evaluation of influence of straw biochar on soil productivity of sloping land in black soil region [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7):247–256. (in Chinese)
- 21 张影, 刘星, 焦瑞锋, 等. 生物质炭与有机物料配施的土壤培肥效果及对玉米生长的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(9):1287–1297.
- ZHANG Ying, LIU Xing, JIAO Ruifeng, et al. Effects of combined biochar and organic matter on soil fertility and maize growth [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9):1287–1297. (in Chinese)
- 22 张玉洁, 吴婷, 赵娟, 等. 生物炭添加对秸秆还田土壤细菌群落结构和多样性影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(2):712–720.
- ZHANG Yujie, WU Ting, ZHAO Juan, et al. Effect of biochar amendment on bacterial community structure and diversity in straw-amended soils [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(2):712–720. (in Chinese)
- 23 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 等. 生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(6):2298–2303.
- ZHANG Ting, WANG Xudong, PANG Mengwen, et al. Impacts of biochar and straw application on soil organic carbon transformation [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(6):2298–2303. (in Chinese)
- 24 YANNI S F, SUDDICK E C, SIX J. Photodegradation effects on CO_2 emissions from litter and SOM and photo-facilitation of microbial decomposition in a California grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 91:40–49.
- 25 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- 26 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4):705–712.
- HOU Xiaona, LI Hui, ZHU Liubing, et al. Effects of biochar and straw additions on lime concretion black soil aggregate composition and organic carbon distribution [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4):705–712. (in Chinese)
- 27 席北斗, 刘鸿亮, 白庆中, 等. 堆肥中纤维素和木质素的生物降解研究现状[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3(3):19–23.
- XI Beidou, LIU Hongliang, BAI Qingzhong, et al. Study on current status of lignin and cellulose biodegradation in composting process [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(3):19–23. (in Chinese)
- 28 SEO D J, SAKODA A. Assessment of the structural factors controlling the enzymatic saccharification of rice straw cellulose [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 71:47–57.
- 29 曹莹菲, 张红, 赵聪, 等. 秸秆腐解过程中结构的变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(5):976–984.
- CAO Yingfei, ZHANG Hong, ZHAO Cong, et al. Changes of organic structures of crop residues during decomposition [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5):976–984. (in Chinese)