

添加剂对不同还田深度秸秆腐解及周际土壤环境的影响

曲晓晶¹, 孙大雁¹, 吴南¹, 张冲², 张小峰³

(1. 吉林市农业科学院, 吉林 吉林 132101; 2. 吉林省农业机械研究院, 长春 130022; 3. 上海创博土壤修复工程有限公司, 上海 201101)

摘要: 探讨添加剂对秸秆腐解及其形成的土壤环境的影响, 以明确促进秸秆腐解的同时, 利于土壤固碳的添加剂最佳配方。以玉米秸秆为供试材料, 进行了 150 天的田间原位埋袋腐解试验, 对比研究 3 种类型添加剂(尿素、生物菌腐解剂和微量元素调理剂)对 15、30 cm 还田秸秆腐解过程及其形成的土壤环境因素的影响。结果表明: (1) 添加剂极显著影响碳损失量($p < 0.01$), 直接影响秸秆腐解程度及其释放碳素在土壤中的固持, 还田深度则通过影响含水量影响失重, 含水量与失重显著负相关($r = -0.51$), SOC 与碳损失量接近于线性负相关($r = -0.94$), 与 C/N 极显著正相关($r = 0.72$), C/N 与碳损失量极显著负相关($r = -0.53$); (2) 微量元素添加剂既提高了前期土壤的含水量, 又减缓了后期水分的散失, 但添加剂有加速土壤酸化的趋势, 15 cm 还田时微量元素添加剂表现更明显, 30 cm 还田时生物菌添加剂表现更明显; (3) 添加剂加速了秸秆的腐解, 但减少了碳损失量, 150 天时, 15、30 cm 还田其碳损失量平均值分别比对照减少 3.4% 和 4.8%, 有利于土壤固碳, 其中, 生物菌添加剂更有利于 15 cm 还田秸秆的腐解, 氮素添加剂有利于 30 cm 还田秸秆的腐解; (4) 添加剂减缓了秸秆腐解产物的流失, 尤其是生物菌添加剂和微量元素添加剂, 15 cm 还田时生物菌添加剂有利于土壤固碳, 微量元素添加剂更利于有机碳的更新, 而 30 cm 还田时则相反。

关键词: 添加剂; 秸秆还田; 腐解; 周际土壤

中图分类号: S154

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0261-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.02.037

Effects of Additives on Straw Decomposition and Its Surrounding Soil Environment Under Different Returning Depths

QU Xiaojing¹, SUN Dayan¹, WU Nan¹, ZHANG Chong², ZHANG Xiaofeng³

(1. Jilin City Academy of Agricultural Sciences, Jilin, Jilin 132101; 2. Jilin Agricultural Machinery

Research Institute, Changchun 130022; 3. Shanghai Chuangbo Ecological Engineering Co., Ltd., Shanghai 201101)

Abstract: In order to explore the optimum additive formula that promotes straw decomposition and soil carbon sequestration, the effects of additives on the straw decomposition and its surrounding soil environment were studied. We chose corn stalks as test materials to carry out the burial bag in-situ decomposition experiment for 150 days. The effects of three types of additives (urea, biological bacteria decomposition accelerator and trace element conditioner) on the decomposing process of 15 cm and 30 cm depth returning straw and the soil environmental factors were studied. The results showed that: (1) Additives significantly affected the amount of carbon loss ($p < 0.01$), directly affecting the degree of straw decomposing and the release of carbon in the soil. The depth of returning to the field affected the weight loss by affecting the water content, and the water content was significantly negatively correlated with the weight loss ($r = -0.51$). SOC and carbon loss were close to a linear negative correlation ($r = -0.94$), and SOC was significantly positively correlated with C/N ($r = 0.72$), and C/N was significantly negatively correlated with carbon loss ($r = -0.53$). (2) The trace element additive not only improved soil water content in the early stage, but also slowed the loss of water in the later stage. However, the additive had the tendency to accelerate soil acidification. The effect of trace element additive was more obvious at the depth of 15 cm, but the biological additive worked better at 30 cm depth. (3) The additives accelerated the decomposition of the straw but reduced the carbon loss. After 150 days, the average carbon loss of 15 cm and 30 cm depth returning to the field were reduced by 3.4% and

收稿日期: 2019-08-16

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0300205); 农业部重点实验室开放基金项目(KLPN201801-03); 吉林省科技发展计划项目(20170204018NY)

第一作者: 曲晓晶(1980—), 女, 副高级研究员, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: qxj8111@126.com

通信作者: 孙大雁(1966—), 女, 高级研究员, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: sundayan1966@163.com

4.8%, respectively, which was conducive to soil carbon sequestration. Among them, the biological bacteria additive was more conducive to the decomposing of 15 cm returning straw, and the nitrogen additive was more conducive to the decomposing of 30 cm depth returning straw. (4) The additives slowed down the loss of the straw decomposing products, especially the biological bacteria additives and trace element. When the 15 cm depth returning field was used, the biological bacteria additive was more conducive to soil carbon sequestration, and the trace element additive was more conducive to the renewal of organic carbon, while the 30 cm depth returning was the opposite.

Keywords: additive; straw returning; decomposition; surrounding soil

有机物料的添加是改良土壤、提高土壤肥力的重要手段,一直倍受广大科研工作者的关注。多数研究^[1-2]表明,有机物料能够提高土壤有机碳量,但随着有机物料研究种类的增加及研究的深入,学者们^[3]发现有机物料对土壤有机碳的作用取决于有机物料的使用量及物料的稳定性和持久性。秸秆含有大量的碳、氮、磷、钾等可被利用的元素,是最大的固体废弃物有机养分资源^[4],秸秆还田是目前我国土壤改良及农业循环利用的一项重要措施^[5]。

由于我国农业大面积机械化耕作进程较慢,无法实现秸秆的机械化粉碎推广,导致其还田后腐解较慢,土壤孔隙度过大,影响春季作物出苗,尤其是北方寒冷区域^[6]。秸秆腐熟剂能够加快秸秆腐解速度,提高腐解率,改善秸秆还田后的土壤微环境,但登记的腐熟剂有 40 余种^[7-8],尚未明确适用于秸秆还田的最佳腐熟剂配方。有研究^[9]显示,微量元素(Fe 和 Zn)的添加也能够促进秸秆腐解;同时,补充了土壤的微量元素,平衡了土壤的养分结构,优化了土壤养分供应环境。据此,可以推测多种微量元素的添加可能更有利于秸秆的腐解,改良土壤养分状况,提高土壤固碳能力。因此,本文选择了尿素、生物菌腐解剂和微量元素调理剂 3 种添加剂,进行玉米秸秆田间尼龙网袋原位混土掩埋腐解试验,对比研究其对秸秆腐解过程及其形成的土壤环境的影响,以期明确能够促进秸秆腐解的同时,利于土壤固碳的添加剂配方,为大面积推广玉米秸秆全量还田技术提供一定的理论支撑及参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验设计

试验区位于吉林省长春市农安县开安镇,地处松辽平原腹地(44°10'N, 120°10'E),大陆性季风气候,年均降水量 535 mm,无霜期 138 天,有效积温 2 810 °C,土壤类型为黑钙土。试验区为长期施用化肥的玉米连作耕地,其土壤(0—30 cm)基本性质为:pH 7.01, SOC 含量 14.61 g/kg,全氮含量 794.1 mg/kg,碱解氮含量 141.6 mg/kg,速效磷含量 24.7 mg/kg,速效钾含量 151.5 mg/kg,含水量 13.5%。

本试验为田间尼龙网袋原位混土掩埋腐解试验,

腐解时间为 150 天。供试玉米秸秆为试验区 2017 年秋季玉米收获后自然风干的秸秆,其主要性质为: SOC 含量 413.1 g/kg, C/N 为 73.3, 全氮含量 5.64 g/kg, 含水量 11.1%。试验包括 2 个还田深度(15, 30 cm)及 4 个处理:对照(秸秆还田, CK)、氮素处理(秸秆还田添加尿素, SN)、生物菌处理(秸秆还田添加尿素及生物菌腐解剂, DN)和微量元素处理(秸秆还田添加尿素、生物菌腐解剂及微量元素调理剂, CDN)。其中,尿素(N 含量为 46.7%)为吉林市吉九肥料有限公司生产,生物菌腐解剂为上海创博土壤修复工程有限公司生产,微量元素调理剂(矿物元素总量 ≥ 430 g/L)为天津易亩伯牙肥业有限公司生产。

选取垄沟为原位掩埋试验点,包括 15, 30 cm 2 个还田深度对比小区,每小区包括 4 个试验点,每个试验点间隔 6 条垄,每条垄沟 9 个掩埋点(3 次重复 × 3 个取样时间段),试验点间距离 5 m,共 72 个试验点。2018 年 5 月,试验区玉米播种后,按“S”形取样法取试验区垄沟 0—30 cm 土层 5 个点的土壤混合均匀,称取 3 kg,将供试玉米秸秆粉碎至 5 cm,称取 150 g 与 3 kg 土壤混合均匀后装入 300 目的尼龙网袋(30 cm × 20 cm),共称取 72 份。秸秆最佳腐解的 C/N 为 25~28^[10],因此,尿素的添加量按 C/N 为 25 计算,即每袋添加 2 g,生物菌腐解剂及微量元素调理剂按说明书计算使用量,生物菌腐解剂每袋添加 60 mL,微量元素调理剂每袋添加 6 mL,3 种添加剂各添加 18 袋。处理完的混合样品水平掩埋于试验点,深度分别为 15, 30 cm,覆土与地面平齐。

1.2 样品采集与分析

埋袋后分别在 60, 90, 150 天于各小区随机取 3 个尼龙网袋,称总重后,每个尼龙网袋中的土壤混合样品分成 2 部分:一部分鲜土直接测定土壤含水量及 pH,一部分自然风干后过 2 mm 筛,用于测定 SOC 及 C/N。土壤含水量采用烘干法测定, SOC 采用常规重铬酸钾氧化外加加热法测定^[11]。

1.3 数据计算及处理

$$C/N = SOC / \text{全氮含量}$$

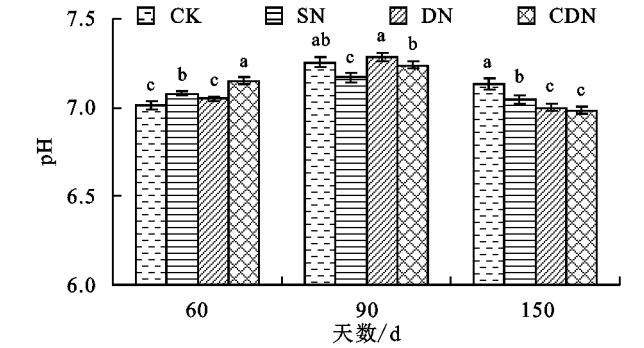
碳损失量 = 埋袋前土壤混合样品有机碳量 - 取袋时有机碳量

试验数据采用 Excel 2016 及 SPSS v25.0 软件进行整理和分析,方差分析多重比较采用 LSD 法,在 $p<0.05$ 水平下检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同还田深度添加剂对秸秆腐解过程土壤 pH 的影响

2.1.1 添加剂对 15 cm 还田秸秆腐解过程土壤 pH 的影响 从图 1 可以看出,秸秆腐解过程中,各处理的 pH 为 6.9~7.3(中性范围),均表现为先升高后降低,90 天时各处理 pH 最高,CK、SN、DN 和 CDN 分别比 60 天时提高 0.24,0.09,0.24,0.09 个单位,而与 60 天相比,150 天时 CK 的 pH 提高 0.12 个单位,SN、DN 和 CDN 则分别下降 0.04,0.05,0.17 个单位。60,90,150 天各处理的 pH 分别表现为 $CDN>SN>DN>CK$ 、 $DN>CK>CDN>SN$ 和 $CK>SN>DN>CDN$ 。可见,秸秆在腐解中期,土壤环境呈弱碱性,尤其是添加了生物菌腐解剂后,而微量元素处理有减缓其碱化的作用,随腐解时间的延长,各处理均趋于弱酸性,尤其是微量元素处理,其次是生物菌处理。



注:CK 为对照;SN 为氮素处理;DN 为生物菌处理;CDN 为微量元素处理;不同字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 不同处理 15 cm 还田秸秆腐解过程的 pH 变化

2.1.2 添加剂对 30 cm 还田秸秆腐解过程土壤 pH 的影响 从图 2 可以看出,各处理的 pH 为 7.0~7.3,属于中性偏弱碱性。CK、SN、DN 和 CDN 在秸秆腐解过程中的平均 pH 分别为 7.14,7.14,7.11,7.12。60,90,150 天各处理的 pH 分别表现为 $DN>SN>CDN>CK$ 、 $CK>CDN>DN>SN$ 和 $SN>CK>CDN>DN$ 。其中,CK 和 CDN 的 pH 在秸秆腐解过程中先升高后下降,SN 则先下降后升高,而 DN 随腐解时间的延长其 pH 大幅度下降。与当地耕地初始 pH(6.91)相比,150 天时 CK、SN、DN 和 CDN 的 pH 分别提高 0.23,0.29,0.11,0.16 个单位。可见,秸秆还田同时抑制了 30 cm 土层土壤的酸化,尤其是氮素的添加,生物菌剂相对来说效果较小,但随腐解时间的延长,添加氮素对壤酸化的抑制土作用更加显著,其他处理则表现出加剧土壤酸化的趋势,尤其是添加生物菌剂,

其次是调理剂。

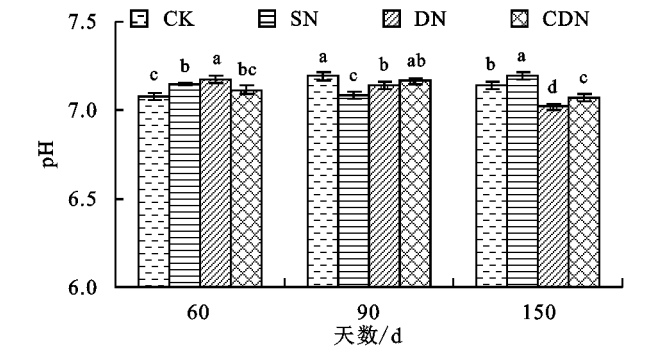


图 2 不同处理 30 cm 还田秸秆腐解过程的 pH 变化

2.2 不同还田深度添加剂对秸秆腐解过程含水量的影响

2.2.1 添加剂对 15 cm 还田秸秆腐解过程土壤含水量的影响 从图 3 可以看出,各处理的土壤含水量在秸秆腐解过程中均表现为先上升后下降,除 CK 整体呈显著的下降趋势外(150 天比 60 天时含水量低 2.1%),其他处理均呈上升趋势,与 60 天时相比,150 天时 SN、DN 和 CDN 含水量分别上升 1.8%,4.2% 和 4.1%。可见,与对照相比,添加剂提高了土壤的保水性,尤其是生物菌剂和调理剂。其中,仅 150 天处理间的差异达到显著水平,表现为 $CDN>DN>SN>CK$,除 60 天时 DN 显著低于其他处理外(平均低 0.8%),各处理间差异均较小,尤其是 90 天时。与埋袋前袋中混合物的初始含水量(13.5%)相比,秸秆腐解过程中,混合物含水量最高时(90 天),CK、SN、DN 和 CDN 分别增长 7.8%,8.1%,8.2% 和 8.0%,而与 90 天相比,150 天时其含水量分别下降 6.2%,2.5%,1.2% 和 0.1%。可见,添加剂改善了土壤的孔隙度,提高了土壤吸水率及其保水性,尤其是微量元素处理,添加氮素的保水性相对来说略弱。

2.2.2 添加剂对 30 cm 还田秸秆腐解过程土壤含水量的影响 从图 4 可以看出,各处理 30 cm 还田的含水量,秸秆腐解过程中,除 CDN 呈增长趋势外,其 90,150 天的增长率分别为 1.8% 和 0.2%,其他处理均先上升后下降,但整体均呈上升趋势。与埋袋土壤混合物初始含水量(13.5%)相比,90 天时 CK、SN、DN 和 CDN 含水量分别上升 7.0%,6.8%,6.6% 和 5.5%,150 天时分别上升 6.8%,6.5%,5.6% 和 5.8%。秸秆腐解过程中,各处理间差异基本不明显,整体来看,CK 与 SN 相近,DN 与 CDN 相近,其中,60 天时,CK 的含水量显著高于其他处理,平均提高 0.8%,90 天时,CDN 显著低于其他处理,平均降低 1.3%,150 天时,CK 和 SN 显著高于 DN 和 CDN,约提高 1%。可见,与 CK 相比,整体来看,添加剂提高了土壤的透水性,尤其是 DN,其次是 CDN,其中,与 CDN 相比,SN 和 DN 更利于提高腐解前期土壤的保水性,尤其是 SN,但后期失水率也

大幅度增加,尤其是 DN,而 CDN 提高土壤透水性的同时,在腐解后期有提高土壤保水性的趋势。

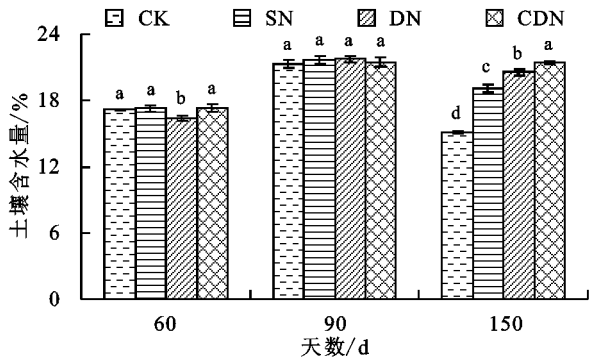


图 3 不同处理 15 cm 还田秸秆腐解过程土壤含水量

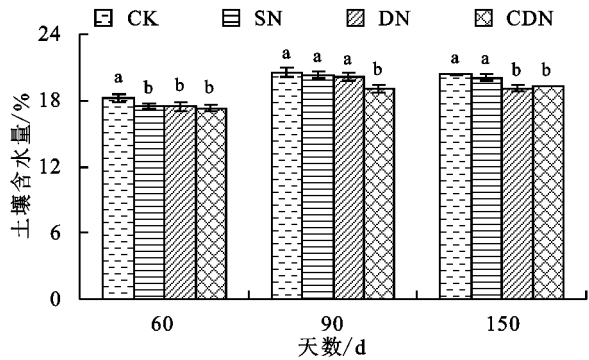


图 4 不同处理 30 cm 还田深度秸秆腐解过程土壤含水量

2.3 不同还田深度添加剂对秸秆腐解过程失重的影响

2.3.1 添加剂对 15 cm 还田秸秆腐解过程失重的影响

与埋袋前相比,腐解过程中各处理均明显失重(图 5)。其中,60 天时,CK、SN、DN 和 CDN 分别失重 101.2,73.9,136.9,118.1 g,处理间差异显著;90 天时,CK、SN、DN 和 CDN 分别失重 38.3,8.7,50.7,46.6 g,DN 和 CDN 差异不明显,但与其他处理间差异显著,与 60 天相比,各处理干物质的损失量均显著减少,分别减少 63.0,65.1,86.2,71.5 g;150 天时,CK、SN、DN 和 CDN 分别失重 105.8,45.5,77.5,57.6 g,处理间差异显著,与 90 天相比,各处理干物质损失量均增加,但与 60 天相比,除 CK 的干物质损失量增加 4.6 g 外,其他处理均显著减少,SN、DN 和 CDN 分别减少 28.3,59.4,60.5 g。可见,腐解中期(玉米吐丝期)埋袋混合物的干物质量处于累积状态,尤其是生物菌处理和微量元素处理,其次是氮素处理;腐解后期(玉米成熟期),与对照相比,氮素、生物菌剂及微量元素调理剂的添加均促进了干物质量的累积,尤其是调理剂的添加,其次是生物菌剂。

2.3.2 添加剂对 30 cm 还田秸秆腐解过程失重的影响

从图 6 可以看出,与埋袋前相比,腐解过程中各处理均明显处于失重状态,且处理间差异显著。其中,60 天时,损失量为 DN>CK>CDN>SN,CK、SN、DN 和 CDN 分别失重 97.7,76.7,133.8,89.8 g;90 天时,损失量为 CK>DN>CDN>SN,CK、SN、

DN 和 CDN 分别失重 106.4,31.6,69.1,53.3 g,与 60 天相比,除 CK 的干物质损失量增加 8.7g 外,其他处理损失量均显著减少,SN、DN 和 CDN 分别减少 45.0,64.7,36.6 g;150 天时,与 60,90 天相比,除 CK 的干物质损失量略有下降外,其他处理均显著增加,其损失量为 DN>CDN>SN>CK,CK、SN、DN 和 CDN 分别失重 96.7,134.5,174.0,160.1 g,与 60 天相比,CK 的干物质损失量减少 1.0 g,SN、DN 和 CDN 分别增加 57.9,40.2,70.2 g。可见,与 15 cm 还田的结果基本一致,腐解中期干物质量处于累积状态,尤其是生物菌处理,其次是氮素处理;腐解后期与 15 cm 还田的结果则相反,氮素、生物菌剂及微量元素调理剂的添加加快了干物质量的损失,尤其是调理剂的添加,其次是氮素。

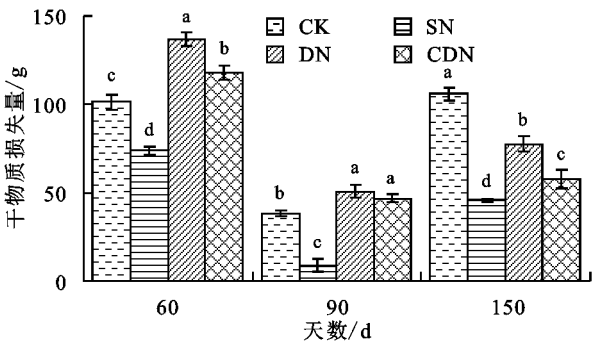


图 5 不同处理 15 cm 还田秸秆腐解过程的干物质损失

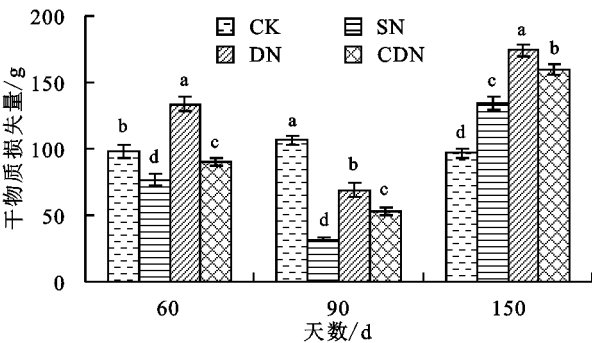


图 6 不同处理 30 cm 还田秸秆腐解过程的干物质损失

2.4 不同深度还田添加剂对秸秆腐解过程有机碳及 C/N 的影响

2.4.1 添加剂对 15 cm 还田秸秆腐解过程有机碳及 C/N 的影响

从表 1 可以看出,随腐解时间的延长,各处理 SOC 呈降低趋势,CK、SN、DN 和 CDN 在 90,150 天时的下降率分别为 4.0%,8.2%,3.4%,2.9%和 6.0%,5.2%,1.6%,8.6%,其中,CK 和 CDN 的下降率升高,尤其是 CDN,升高 5.7%,而 SN 和 DN 的下降率则显著降低,其中 SN 降低 3.0%。60,90,150 天各处理的 SOC 分别表现为 SN>CDN>DN>CK、CDN>DN>CK>SN 和 DN>CDN>CK>SN。可见,秸秆腐解过程中,碳处于损失状态。其中,对照和氮素处理的 SOC 在秸秆腐解前期迅速流失,尤其是氮素处理,随腐解时间的延长,对照和微量元素处理 SOC 加速流失,而氮素和生物菌处理 SOC 流失速度减缓。

表 1 不同深度还田秸秆腐解过程有机碳及 C/N 变化

项目	腐解 时间/d	SOC/(g·kg ⁻¹)		碳损失量/g		C/N	
		15 cm	30 cm	15 cm	30 cm	15 cm	30 cm
CK	60	20.55c	19.87b	39.5a	41.2b	11.2b	10.8a
	90	19.73c	19.31b	40.4a	42.8b	10.2a	10.4a
	150	18.55bc	18.10d	44.8a	45.9a	10.1b	9.8c
SN	60	21.29a	19.44c	36.9c	41.9a	10.3c	10.7a
	90	19.54d	20.98a	40.3a	36.9c	10.2a	10.6a
	150	18.51c	18.56c	43.8b	45.3b	9.8c	10.3b
DN	60	20.56c	19.36d	39.1a	42.2a	11.5a	10.1c
	90	19.85b	18.08d	39.3b	44.4a	10.2a	9.1c
	150	19.53a	19.41a	43.4b	42.9c	10.9a	11.0a
CDN	60	20.93b	19.96a	37.6b	39.7c	11.4ab	10.4b
	90	20.32a	18.42c	37.8c	43.1b	11.0a	9.4b
	150	18.57b	19.27b	42.8c	42.9c	10.2b	10.5b

注:字母不同代表不同处理间 $p<0.05$ 水平下差异显著。

随腐解时间的延长,碳损失量呈增长趋势,CK、SN、DN 和 CDN 在 90,150 天时的增长率分别为 2.2%,9.2%,0.4%,0.4% 和 11.0%,8.6%,10.5%,13.2%,除 SN 的增长率下降 0.6% 以外,其他处理均升高,CK、DN 和 CDK 分别升高 8.7%,10.1% 和 12.8%。60,90,150 天各处理的碳损失量分别表现为 CK>DN>CDN>SN、CK>SN>DN>CDN 和 CK>SN>DN>CDN,其中,60 天时 CK 与 DN 相近,90 天时 CK 与 SN 相近,150 天时 SN 与 DN 差异不明显,其他处理差异达到显著水平。可见,腐解过程中,碳处于损失状态,添加剂减缓了秸秆腐解过程中碳的损失,其中,氮素对碳损失的减缓效果主要在腐解后期体现,生物菌剂和微量元素调理剂对碳损失的减缓效果主要在腐解前期体现,其腐解后期有提高碳损失速度的趋势,但其碳损失量最低。

随腐解时间的延长,C/N 除了 DN 先下降后升高外(下降 11.0% 后增长 6.8%),其他处理均呈下降趋势,其中,SN 和 CDN 的下降率显著增长,分别增长 3.5% 和 4.8%,CK 的下降率则降低 7.3%。各处理 150 天时的 C/N 表现为 DN>CDN>CK>SN,与 60 天时相比,CK、SN、DN 和 CDN 的 C/N 分别下降 10.2%,5.5%,4.9% 和 10.2%。可见,C/N 的变化基本与 SOC 一致,与对照相比,微量元素调理剂对 C/N 变化的影响较小,尤其是生物菌剂,氮素和生物菌剂则减小了其变化。

2.4.2 添加剂对 30 cm 还田秸秆腐解过程有机碳及 C/N 的影响 随腐解时间的延长(表 1),CK 的 SOC 呈降低趋势,平均下降率为 4.5%;SN 先升高 7.9%,后下降 11.5%,整体下降 4.5%;DN 和 CDN 则先下降后升高,其中,DN 下降 6.6% 后升高 7.3%,整体略有升高(0.2%),CDN 下降 7.7% 后升高 4.6%,整体下降 3.5%。60,90,150 天各处理的 SOC 分别表现为 CDN>CK>SN>DN、SN>CK>CDN>DN 和 DN>CDN>SN>CK。可见,腐解过程中秸秆整体

来说处于碳损失的状态,尤其是 CK 和 SN,其次是 CDN,DN 的 SOC 有增加的趋势。

随腐解时间的延长,仅 CK 的碳损失量呈增长趋势,平均增长率为 5.5%,SN 的碳损失量先减少后增加,DN 和 CDN 则先增加后减少,但 150 天时的碳损失量均显著高于 60 天时,CK、SN、DN 和 CDN 碳损失量分别增加 4.6,3.4,0.7,3.2 g。60 天时,CDN 的碳损失量显著低于其他处理,约降低 5%,SN 和 DN 的碳损失量相近,平均损失量为 42.1 g,比 CK 提高 2.0%;90 天时,SN 的碳损失量出现负增长,而其他处理的碳均处于损失状态,其平均损失量为 43.5 g,其碳损失量表现为 DN>CDN>CK>SN,其中,仅 CK 与 CDN 的差异不明显;150 天时,与 90 天时相比,CK 和 SN 碳损失量增长,尤其是 SN,增长 22.8%,DN 和 CDN 碳损失量显著减少,其中 DN 减少 3.5%,各处理碳损失量表现为 CK>SN>DN>CDN,仅 DN 与 CDN 差异不明显。可见,整体来说,添加剂减缓了秸秆腐解过程中碳的损失,尤其是生物菌剂和微量元素调理剂,腐解后期有促进碳增加的趋势,而氮素对碳损失的减缓作用主要在腐解中前期,后期碳损失量的变化接近于对照。

随腐解时间的延长,CK 和 SN 的 C/N 呈显著下降趋势,其平均下降率分别为 4.4% 和 1.9%,150 天时分别比 60 天时下降 8.7% 和 3.9%,DN 和 CDN 先下降后升高,其下降率分别为 10.1% 和 9.1%,升高率分别为 21.3% 和 11.6%,60 天时各处理 C/N 相近(平均为 10.5),90 天时 CK 和 SN 的 C/N 略有下降,而 DN 和 CDN 则大幅度下降,150 天时分别比 60 天时升高 9.1% 和 1.4%,各处理的 C/N 为 DN>CDN>SN>CK。可见,腐解过程中,DN 和 CDN 的 C/N 波动显著大于 CK 和 SN,尤其是 DN。

2.5 相关性分析

由表 2 可知,失重与含水量呈显著负相关($r =$

−0.51);SOC 与 C/N 呈极显著正相关($r=0.72$),与碳损失量呈极显著负相关($r=-0.94$);C/N 与碳损失量呈极显著负相关($r=-0.53$)。由还田深度和添加剂的双因子方差分析(表 3)可以看出,添加剂对碳损失量的影响达到极显著水平($p<0.01$),但对 C/N 的影响不明显;还田深度对碳损失量及 C/N 均无显著影响。其中,失重和 SOC 的变化均显著影响碳损失量及 C/N,尤其是对碳损失量的影响达到极显著水平($p<0.01$)。可见,添加剂对秸秆的腐解程度及其有机产物在土壤中的固持状态影响极显著,还田深度对秸秆腐解程度及固碳效果无显著影响。

表 2 Pearson 相关性						
项目	失重	pH	含水量	SOC	C/N	碳损失量
失重	1					
pH	−0.27	1				
含水量	−0.51 *	0.31	1			
SOC	−0.01	−0.06	−0.22	1		
C/N	0.39	−0.28	−0.26	0.72 **	1	
碳损失量	0.25	−0.09	0.70	−0.94 **	−0.53 **	1

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; * * 表示在 0.01 水平上显著相关; $N=24$ 。

3 讨论

与当地耕地初始 pH 相比,秸秆还田有抑制土壤酸化的作用^[12]。秸秆腐解过程中,还田深度为 15 cm 时,各处理的 pH 处于中性范围,添加了生物菌剂后,在秸秆腐解中期,土壤环境呈弱碱性^[4],微量元素调理剂有减缓其碱化的作用,随腐解时间的延长,各处理均趋于弱酸性。可见,秸秆快速腐解期基本处于弱碱性环境,随着腐解的完成逐渐形成弱酸性环境^[13],添加剂参与腐解过程后,微量元素处理酸性最强。还田深度为 30 cm 时,各处理 pH 略高于 15 cm 还田时,其土壤为中性偏弱碱。可见,秸秆还田同样抑制 30 cm 土层土壤的酸化,且随腐解时间的延长,添加氮素对土壤酸化的抑制作用更加显著,而其他处理则有加剧土壤酸化的趋势,尤其是生物菌处理,其次是微量元素处理。说明添加剂有加速秸秆腐解的作用^[7],15 cm 还田时生物菌剂的效果最明显,30 cm 还田时氮素的效果最明显,且 30 cm 还田更利于秸秆的快速腐解,但添加剂有加速土壤酸化的趋势,15 cm 还田时微量元素处理土壤酸化趋势更明显,30 cm 还田时生物菌处理则更明显。可能是由于微量元素调理剂含有大量阳离子,浅层土壤(20 cm 以上)含水量显著低于深层土壤^[14],导致其浅层离子浓度高于深层土壤,更易促使土壤酸化。

表 3 双变量双因子方差分析效应检验						
源	因变量	III 类平方和	自由度	均方	<i>F</i>	显著性
修正模型	碳损失量	160.446 ^a	11	14.586	49.907	0
	C/N	6.678 ^b	11	0.607	6.217	0.002
截距	碳损失量	31.235	1	31.235	106.873	0
	C/N	0.282	1	0.282	2.891	0.115
pH	碳损失量	1.244	1	1.244	4.257	0.061
	C/N	0.217	1	0.217	2.223	0.162
含水量	碳损失量	0.169	1	0.169	0.579	0.462
	C/N	0.073	1	0.073	0.751	0.403
失重	碳损失量	5.715	1	5.715	19.554	0.001
	C/N	0.844	1	0.844	8.644	0.012
SOC	碳损失量	109.012	1	109.012	372.996	0
	C/N	2.197	1	2.197	22.495	0.000
深度	碳损失量	0.075	1	0.075	0.256	0.622
	C/N	0.316	1	0.316	3.237	0.097
添加剂	碳损失量	5.334	3	1.778	6.083	0.009
	C/N	0.060	3	0.020	0.206	0.890
深度×添加剂	碳损失量	1.008	3	0.336	1.150	0.369
	C/N	0.688	3	0.229	2.349	0.124
误差	碳损失量	3.507	12	0.292		
	C/N	1.172	12	0.098		
总计	碳损失量	41397.398	24			
	C/N	2617.853	24			
修正后总计	碳损失量	163.953	23			
	C/N	7.850	23			

注: a 表示 $R^2=0.979$ (调整后 $R^2=0.959$); b 表示 $R^2=0.851$ (调整后 $R^2=0.714$)。

秸秆腐解过程中,不同深度还田各处理含水量间差异基本不明显,尤其是 60,90 天,可能是由于该时期处于雨季,降水旺盛,各处理土壤长期处理湿润储水的状态,导致其差异不显著^[14]。整体来看,添加剂改善了土壤的孔隙度^[15-16],提高土壤的保/透水性^[17],15 cm 还田时添加剂主要表现出较好的保水性,尤其是微量元素调理剂,30 cm 还田时则表现出较好的透水性,尤其是生物菌剂。其中,氮素和生物菌剂提高秸秆腐解前期土壤的保水性,但腐解后期其保水性显著弱于调理剂,调理剂既提高前期土壤的含水量,又减缓后期水分的散失,显著改善土壤的通透性。

腐解中期,不同深度还田,埋袋混合物的干物质质量基本处于累积状态,雨季降水高峰期,秸秆还田的土壤更易保水^[18],促进了埋袋混合物与周围土壤间的理化反应及物质交换作用,累积了一定量的干物质,且生物菌剂促进秸秆腐解过程中形成的土壤微环境更利于干物质的累积^[19],其中,15 cm 还田时微量元素调理剂与生物菌剂的协同作用效果更明显,而调理剂可能更利于 30 cm 土层中微生物群落的繁殖,为秸秆腐解提供一定量的分解者,导致其干物质累积量最

少;腐解后期,15 cm 还田时,仅对照的干物质损失量有所增加,添加剂均促进干物质质量的累积,尤其是调理剂,而 30cm 还田时则相反,尤其是生物菌剂添加剂加快干物质质量的损失。秸秆腐解程度主要受添加剂的影响,还田深度主要通过影响含水量影响失重,多数研究^[20]表明,土壤含水量与 SOC 正相关,而本文显示含水量仅与失重显著负相关。可见,秸秆还田影响土壤固有有机碳的固持与更新。说明微量元素调理剂可能促进简单有机化合物通过凝聚胶结作用,形成更多的团聚体,提高其保水性,导致其失重低于生物菌处理,秸秆腐解形成的有机化合物可能以易降解化合物为主^[21],尤其是易溶解有机物^[22],在腐解前期易累积,后期易流失,添加剂减缓了该流失。有研究^[23]表明,秸秆还田促进土壤中微团聚体向大团聚体的转化,有利于耕层大团聚体的形成^[24],添加生物菌剂和调理剂后形成的土壤微环境可能更利于小分子有机化合物发生络合等化学反应,形成复杂不易降解流失的大分子有机化合物,或形成大团聚体而固定,尤其是调理剂,其含有大量阳离子,易为团聚体提供凝结核,更利于土壤固碳,这与 Six 等^[25]的研究结果相似。

SOC、碳损失量及 C/N 变化反应的结果基本一致, SOC 与碳损失量接近于线性负相关($r = -0.94$), C/N 的变化基本与 SOC 一致,而与碳损失量基本成反比。随腐解时间的延长, SOC 和 C/N 整体呈降低趋势,碳损失量则呈增加趋势。秸秆腐解过程是 SOC 流失的过程,碳处于损失的状态,添加剂减缓了不同深度还田秸秆腐解过程中碳的损失,且还田深度对秸秆腐解及土壤固碳的影响并不明显。15 cm 还田时,对照和氮素处理的 SOC 在秸秆腐解前期迅速流失,尤其是氮素处理,生物菌剂和微量元素调理剂对碳损失的减缓效果主要在腐解前期体现,腐解后期,氮素减缓 SOC 的流失/碳损失,而生物菌剂和调理剂有提高碳损失速度的趋势,但其碳损失量最低,尤其是调理剂使 SOC 流失速度减缓。可见,对照和氮素处理 SOC 的损失主要来自于腐解前期碳的流失^[26],尤其是氮素处理,其在腐解后期有减缓碳流失的趋势,生物菌处理和微量元素处理 SOC 的损失则主要来自于腐解后期。添加剂对 C/N 的影响同样表明,生物菌剂更利于碳的增加。30 cm 还田时,对照和氮素处理 SOC 大幅流失,生物菌剂和调理剂减少碳损失量,且腐解后期,有促进碳增加的趋势,而氮素在腐解中期显著提高 SOC 含量,但在后期其碳损失量又接近于对照。有研究^[27]显示,外源氮的添加对秸秆腐解率的影响并不显著,徐学池等^[10]的研究显示,氮素的引入对秸秆还田正激发效应的减缓效果与氮素施用量相关,而本研究结果与其结论相近。生物菌处理的 C/N 波动

显著大于对照和氮素处理,腐解前期,生物菌剂促进秸秆的快速腐解,形成大量小分子有机化合物,但随腐解时间的延长,秸秆腐解形成的小分子有机化合物可能通过络合等作用形成大团聚体或结构复杂的有机化合物^[21],从而促进 SOC 的增加。说明添加剂促进秸秆腐解的同时,减缓了其分解产物的流失,尤其是生物菌剂和调理剂,其在加速秸秆腐解的同时,促进结构简单的有机碳向复杂转化,或者形成大分子有机络合物,利于土壤固碳,更新了土壤固有有机碳库,15 cm 还田时生物菌剂有利于土壤固碳,微量元素调理剂有利于有机碳的更新,而 30 cm 还田时则相反。这可能是由于土壤团聚体水稳性随土层深度增加而降低导致的生物菌处理与微量元素处理间的差异^[28]。

4 结论

添加剂加速秸秆的腐解,其腐解程度主要受添加剂种类的影响,还田深度主要通过影响土壤含水量调控土壤有机碳循环,进而影响干物质累积。添加剂既提高前期土壤的含水量,又减缓后期水分的散失,尤其是微量元素调理剂。添加剂减少秸秆腐解周际土壤的碳损失,利于土壤固碳,生物菌剂更利于 15 cm 还田时秸秆的腐解,氮素更利于 30 cm 还田时秸秆的腐解,但添加剂有加速土壤酸化的趋势,15 cm 还田时微量元素处理土壤酸化趋势更明显,30 cm 还田时生物菌处理表现更明显。

SOC 与碳损失量极显著负相关,与 C/N 极显著正相关, C/N 与碳损失量极显著负相关。添加剂减缓秸秆腐解产物的流失,尤其是生物菌剂和微量元素调理剂,促进土壤有机碳累积的同时,更新土壤固有有机碳库,15 cm 还田时生物菌剂更利于土壤固碳,微量元素调理剂更利于有机碳的更新,而 30 cm 还田时则相反。

参考文献:

- [1] 张杰. 秸秆、木质素及生物炭对土壤有机碳氮和微生物多样性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院, 2015.
- [2] Humberto B C, Lal R. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 95: 240-254.
- [3] Van Z L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [4] 翟修彩. 不同化学添加剂对秸秆腐解产物的影响及其应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [5] 曲晓晶, 吴景贵, 李建明, 等. 外源有机碳对黑土有机碳及颗粒有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5):

278-286.

- [6] 匡恩俊,迟凤琴,宿庆瑞,等.3 种腐熟剂促进玉米秸秆快速腐解特征[J].农业资源与环境学报,2014,31(5):432-436.
- [7] 孙旭,汝超杰,苏良湖,等.3 种秸秆腐熟剂微生物组成及其腐熟效果[J].江苏农业科学,2018,46(3):212-215.
- [8] Jusoh M L C, Manaf L A, Latiff P A. Composting of rice straw with effective microorganisms (EM) and its influence on compost quality[J].Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering,2013,10:17-25.
- [9] 庞赅估,李腾飞,陈义胜,等.矿物质添加剂对玉米秸秆粉末催化热解特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(14):221-226.
- [10] 徐学池,苏以荣,王桂红,等.秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响[J].环境科学,2019,40(6):2912-2919.
- [11] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [12] 翟修彩,刘明,李忠佩,等.不同添加剂处理秸秆腐解产物对土壤生物活性和花生苗生长的影响[J].土壤通报,2014,45(4): 925-929.
- [13] Smider B, Singh B. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2014,191:99-107.
- [14] 姚名泽,成自勇,王峰,等.不同灌溉制度对机采棉水分运移、产量及品质的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(6): 67-72.
- [15] 冉冬梅,白善军,曹炳宏.4 种秸秆腐熟剂的腐熟效果比较[J].现代农业科技,2017(13):193-194.
- [16] Fernández-Gálvez J, Gálvez A, Peña A, et al. Soil hydrophysical properties resulting from the interaction between organic amendments and water quality in soils from Southeastern Spain: A laboratory experiment[J]. Agricultural Water Management,2012,104:104-112.
- [17] 马斌,刘景辉,杨彦明.连续施用保水材料对旱作条件

下土壤特性及燕麦生长的影响[J].生态学报,2017,37(17):5650-5661.

- [18] 陈天助.深埋秸秆和覆膜对田间土壤水分分布及玉米产量的影响研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [19] 董博,周欢,蔡立群,等.免耕条件下不同有机物料还田对土壤有机碳及微生物量碳含量的影响[J].甘肃农业科技,2015(1):12-14.
- [20] 薄欣,臧淑英,张玉兰,等.松嫩平原北部不同含水量梯度下土壤有机碳含量空间特征分析[J].城市地理,2017(4):130.
- [21] Qu X J, Wu J G, Zhao J H, et al. Effects of solid organic wastes on soil particulate organic carbon structure under different water conditions[J].Clean Soil Air Water,2019,47(8):1-9.
- [22] 张莉,李玉义,逢焕成,等.玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响[J].农业资源与环境学报,2019,36(2):160-168.
- [23] 张先凤,朱安宁,张佳宝,等.耕作管理对潮土团聚体形成及有机碳累积的长期效应[J].中国农业科学,2015,48(23):4639-4648.
- [24] 高洪军,彭畅,张秀芝,等.不同秸秆还田模式对黑钙土团聚体特征的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):75-79.
- [25] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J].Soil Biology and Biochemistry,2000,32:2099-2103.
- [26] 田平,姜英,孙悦,等.不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J].中国生态农业学报,2019,27(1):100-108.
- [27] 张经廷,张丽华,吕丽华,等.还田作物秸秆腐解及其养分释放特征概述[J].核农学报,2018,32(11):2274-2280.
- [28] 李艳,李玉梅,刘峥宇,等.秸秆还田对连作玉米黑土团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J].土壤与作物,2019,8(2):129-138.

(上接第 244 页)

- [15] 肖红浪.甘肃秦王川大规模农垦中土壤风蚀与养分、盐分变化[J].土壤通报,1998,29(4):148-150.
- [16] 李昂,吴应珍,叶鹤琳,等.种植小麦与牧草对西北风蚀区秦王川灌区粉砂壤土风蚀的影响[J].生态与农村环境学报,2018,34(6):535-540.
- [17] 缙倩倩,韩致文,屈建军,等.秦王川灌区农田土壤盐分离子特征分析[J].土壤,2014,46(1):100-106.
- [18] 李昂,张鸣,张建,等.西北干旱灌区种植春小麦和牧草对耕地盐渍化的影响[J].水土保持通报,2018,38(3):32-37.
- [19] Li A, Niu K C, Du G Z. Resource availability, species composition and sown density effects on productivity of

experimental plant communities [J]. Plant and Soil, 2011,344(1):177-186.

- [20] 海春兴,刘宝元,赵焯.土壤湿度和植被盖度对土壤风蚀的影响[J].应用生态学报,2002,13(8):1057-1058.
- [21] 赵彩霞,郑大玮,何文清.植被覆盖度的时间变化与其防风蚀效应[J].植物生态学报,2005,29(1):68-73.
- [22] 彭佳佳,胡玉福,肖海华,等.生态修复对川西北草地土壤有机质和氮素的影响[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):149-153.
- [23] 陈林,杨新国,宋乃平,等.荒漠草原区不同粒径土壤理化性质对苜蓿种植年限的响应[J].水土保持学报,2014,28(2):105-111.