

不同施肥处理土壤覆膜后秸秆碳对土壤有机碳的贡献

程娜¹, 李双异¹, 安婷婷¹, 彭畅², 朱平²,
葛壮¹, 刘旭¹, 张维俊¹, 郭昆³, 汪景宽¹

(1.沈阳农业大学土地与环境学院, 农业部东北耕地保育重点实验室, 土肥资源高效利用国家工程实验室, 沈阳 110866;

2.吉林省农业科学院, 农业资源与环境研究所, 长春 130033; 3.赤峰市核与辐射环境监测站, 内蒙古 赤峰 024000)

摘要: 基于公主岭黑土长期定位试验站, 利用¹³C 标记的玉米秸秆进行田间原位培养试验, 分析不同施肥处理土壤覆膜后秸秆碳在土壤的转化及其对土壤总有机碳(SOC)的贡献, 以期对东北黑土区土壤培肥和碳的固存提供依据。结果表明: 裸地土壤添加秸秆后不施肥(CK)与单施化肥(NPK)处理 SOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于有机肥配施化肥(MNPK)处理($P<0.05$); 覆膜土壤添加秸秆第 360 天 SOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-18.27\text{‰} \sim -17.19\text{‰}$, 且各施肥处理间差异不显著($P>0.05$)。覆膜条件下土壤有机碳中秸秆碳(¹³C—SOC)含量显著高于($P<0.05$)裸地, 尤其在第 60 天覆膜处理是裸地处理的 1~3 倍, 说明覆膜改善了土壤的水热条件, 促进了秸秆碳在土壤中的积累。裸地条件下 CK、NPK 和 MNPK 处理秸秆碳对土壤有机碳的贡献率平均分别为 1.28%, 1.32% 和 0.46%; 覆膜条件下分别为 0.81%, 1.51% 和 0.97%。由上可以看出, 无机氮、磷和钾养分的供应有利于秸秆碳在土壤的积累, 对土壤有机碳库固定起着正反馈作用。

关键词: 秸秆碳; 地膜覆盖; 施肥; 土壤有机碳; 东北黑土

中图分类号: S158

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0195-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.02.028

Contribution of Straw Carbon to Soil Organic Carbon Indifferent Fertilization Treatments with Plastic Film Mulching

CHENG Na¹, LI Shuangyi¹, AN Tingting¹, PENG Chang², ZHU Ping²,

GE Zhuang¹, LIU Xu¹, ZHANG Weijun¹, GUO Kun³, WANG Jingkuan¹

(1.Key Laboratory of Cultivated Land Conservation in Northeast Ministry of Agriculture, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866; 2.Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033; 3.Chifeng Nuclear and Radiation Environmental Monitor Station, Chi Feng, Inner Mongolia 024000)

Abstract: Based on long-term experiment of Black soil in Gongzhuling, ¹³C labeled corn straw was incorporated to the field and incubated in-situ. The turnover of straw C in soil and its contribution to total SOC in different fertilization treatments with mulching were investigated, in order to provide a reference for soil fertility improvement and C sequestration in the Black soil region. The results showed that after straw returning to soil under no-mulching, the $\delta^{13}\text{C}$ values of SOC was significantly higher ($P<0.05$) in the treatments of no fertilizer (CK) and chemical fertilizer (NPK) than that in the treatment of combination of organic manure (MNPK) and chemical fertilizer. The $\delta^{13}\text{C}$ values of SOC after straw returning to soil under mulching ranged from -18.27‰ to -17.19‰ and were not significant different ($P>0.05$) among different fertilization treatments on the 360th day. Content of straw C in SOC (¹³C—SOC) was significantly higher ($P<0.05$) under mulching than that under no-mulching. Especially, the content of ¹³C—SOC under mulching treatment was 1~3 times that under no-mulching treatments on the 60th day, which indicated the soil moisture and thermal conditions under mulching promoted the accumulation of straw C in soil. The average contribution percentage of straw C to SOC in the treatments of CK, NPK, and MNPK under no-mulching was 1.28%,

收稿日期: 2019-09-12

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41771328); 国家重点研发计划项目“耕地地力对化肥养分利用的影响机制与调控”(2016YFD0200304); 辽宁省教育厅科学研究一般项目(LSNBY201615); 吉林省重大科技招标专项“玉米、水稻氮磷面源污染防控技术集成研究与示范”(20170203002NY)

第一作者: 程娜(1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤肥力研究。E-mail: 15754909309@163.com

通信作者: 李双异(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤肥力研究。E-mail: lishuangyi1979@163.com

1.32%, and 0.46%, and was 0.81%, 1.51% and 0.97% in those treatments under mulching, respectively. The results implicated that the supply of chemical nutrients of nitrogen, phosphorus and potassium promoted the accumulation of straw C in soil, which played a positive feedback for soil C sequestration.

Keywords: straw carbon; mulching; fertilization; soil organic carbon; Black soil in Northeast China

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是土壤有机质的重要组成部分,对于提高土壤肥力具有重要意义,可作为反映土壤质量和农业可持续性的一个重要指标^[1-2]。秸秆还田是我国近年来大力推进的培肥土壤的措施。有研究^[3-4]表明,施肥和秸秆还田均显著增加土壤有机碳库。长期施肥与秸秆还田能够有效提高土壤中有机碳的累积速率且都是向土壤中添加有机质,都显著增加土壤有机碳含量^[5-6]。

东北黑土以其土质肥沃和有机质丰富而闻名。过去几十年来,农业开垦,加之不合理的农田管理措施导致黑土有机质大量损失,严重影响和制约了粮食生产。地膜覆盖能使土壤保持适宜的温度和湿度,使地温下降慢、持续时间长,利于肥料的腐熟和分解,提高土壤肥力^[7]。秸秆还田后秸秆在土壤中分解与转化受土壤温度、湿度和肥力水平等因素的影响^[8-11],然而关于不同施肥处理土壤覆膜后秸秆来源碳在土壤的固定及其对 SOC 含量的贡献不很清楚。传统的研究未能区分秸秆来源碳和原土壤来源碳,而利用同位素技术可以解决此问题。¹³C 稳定同位素技术被广泛应用于土壤学研究中,克服了很多放射性同位素研究的不足,被证明是一种研究土壤有机碳周转较可靠的技术手段^[12]。因此,本研究以公主岭黑土长期定位试验为平台,利用¹³C 标记秸秆进行田间原位培养试验,通过分析土壤有机碳中秸秆碳的含量,探讨不同施肥处理土壤覆膜后秸秆来源碳对土壤有机碳的贡献,以其为东北黑土区合理培肥和农业可持续发展提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究基于农业部公主岭黑土生态环境重点野

外科学观测试验站(43°30′N,124°48′E)进行。试验地土壤类型为中层黑土,成土母质为第四纪洪积黄土状黏土。试验站气候类型为温带半湿润季风气候,年均温 4~5℃,年降水量 450~600 mm。该试验站始建于 1990 年,长期定位试验前耕层(0—20 cm)土壤的基本理化性质为:有机质含量 22.8 g/kg,全氮含量 1.40 g/kg,有效磷含量 11.79 mg/kg,速效钾含量 158.33 mg/kg,pH 7.6^[13]。

1.2 试验设计与样品采集

试验选取 3 个典型施肥处理:不施肥(CK),单施化肥(NPK,施 N 165 kg/(hm²·a)、P₂O₅ 82.5 kg/(hm²·a)和 K₂O 82.5 kg/(hm²·a))和有机肥配施化肥(MNPK,施有机肥折合 N 115 t/(hm²·a)、施化肥 N 50 kg/(hm²·a)、P₂O₅ 82.5 kg/(hm²·a)和 K₂O 82.5 kg/(hm²·a))。试验施用的有机肥为猪粪,施用量为 23 t/hm²;施用氮肥为尿素(含 N 0.5%),磷肥为磷酸二铵(含 P₂O₅ 0.4%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 0.49%)。

在 3 个处理小区设置覆膜和不覆膜(裸地)的微区试验。每个微区的面积为 0.60 m²。试验前将长、宽、高分别为 1.0,0.6,0.6 m 的 PVC 盒子埋入对应小区内,且盒顶端高出地表 20 cm。微区表层土壤(0—20 cm)与¹³C 标记的玉米秸秆(秸秆剪成 0.5~1 cm 大小,施用量按当地全量还田计)充分混合,同时设置不加秸秆的对照处理;然后对覆膜处理的微区进行地膜覆盖。标记玉米秸秆的基本性质:δ¹³C 值为 246.9‰,全碳含量 355.85 g/kg,全氮含量 10.20 g/kg。每个处理 3 次重复。试验前土壤的基本理化性状见表 1。

表 1 2018 年供试土壤的基本理化性质

施肥处理	土壤有机碳/ (g·kg ⁻¹)	δ ¹³ C 值/ ‰	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碳氮比	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
CK	14.95±0.09b	-18.78±0.01a	1.42±0.06c	10.57±0.37a	15.32±0.75c	65.04±3.18c
NPK	14.98±0.09b	-19.37±0.03c	1.55±0.01b	9.67±0.05b	20.90±0.70b	81.42±1.40b
MNPK	25.17±0.23a	-19.13±0.06b	2.60±0.02a	9.67±0.02b	80.66±2.56a	137.37±3.87a

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示不同施肥处理间的差异显著(P<0.05)。

分别于秸秆添加后第 1 天(2018 年 5 月 6 日)、20 天(2018 年 5 月 25 日)、60 天(2018 年 7 月 4 日)、150 天(2018 年 10 月 2 日)和 360 天(2019 年 5 月 5 日)采集表层 0—20 cm 土壤。新鲜土壤样品中未完全分解的秸秆(>0.5 cm)被挑出,剩余土样自然风干后研磨过筛,分析土壤样品总有机碳含量及其 δ¹³C

值。δ¹³C 值以美国南卡罗来纳州白垩纪皮狄组层位中的拟箭石化石(Pee DeeBelemnite, PDB)为标准物质,采用元素分析仪(EA)—稳定同位素比例质谱联用仪(IRMS)测定。

1.3 计算公式

土壤有机碳中不同来源的碳含量计算公式

为^[14-15]:

$$\begin{aligned} F_m &= (\delta^{13}C_{sm} - \delta^{13}C_s) \times 100 / (\delta^{13}C_m - \delta^{13}C_s) \\ F_s &= 100 - F_m \\ C_m &= C_{sm} \times F_m / 100 \\ C_s &= C_{sm} \times F_s / 100 \end{aligned}$$

式中: F_m 为秸秆碳对土壤总有机碳的贡献率(%); $\delta^{13}C_{sm}$ 为添加秸秆处理土壤有机碳的 $\delta^{13}C$ 值(‰); $\delta^{13}C_s$ 为不添加秸秆处理土壤有机碳的 $\delta^{13}C$ 值(‰); $\delta^{13}C_m$ 为初始添加秸秆的 $\delta^{13}C$ 值(‰); F_s 为原土壤有机碳对土壤总有机碳的贡献率(%); C_m 为玉米秸秆来源碳含量(g/kg); C_{sm} 为添加秸秆土壤有机碳含量(g/kg); C_s 为原土壤来源有机碳含量(g/kg)。

1.4 数据处理

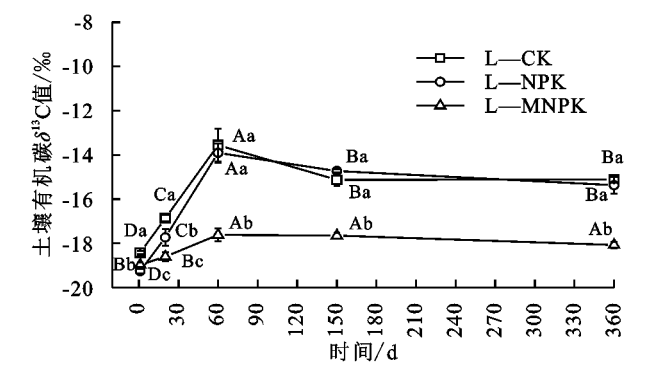
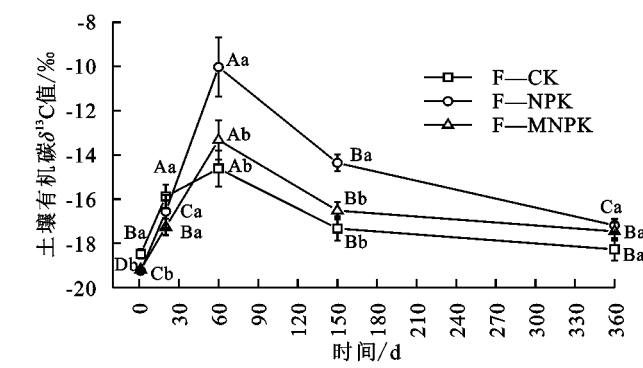
采用 Excel 2019、Origin 9.1 和 SPSS 20.0 软件进行数据处理、统计分析和绘图。处理间差异采用单因素邓肯(Duncan)法进行方差分析,显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳 $\delta^{13}C$ 值

裸地和覆膜条件下不添加秸秆各处理土壤有机碳 $\delta^{13}C$ 值为 $-19.93\text{‰} \sim -18.92\text{‰}$, 整个培养期间变

化幅度不大。添加秸秆处理土壤有机碳 $\delta^{13}C$ 值随培养时间的延长呈先增加后降低的趋势(图 1), 且受施肥、覆膜、时间及其交互作用影响显著($P < 0.05$)(表 2)。无论覆膜或裸地, 60 天时 $\delta^{13}C$ 值达到最大, 裸地不施肥(L-CK)、裸地单施化肥(L-NPK)和裸地有机肥配施化肥(L-MNPK)处理分别为 -13.56‰ , -13.91‰ 和 -17.62‰ ; 覆膜不施肥(F-CK)、覆膜单施化肥(F-NPK)和覆膜有机肥配施化肥(F-MNPK)处理分别为 -14.62‰ , -10.03‰ 和 -13.33‰ 。同一裸地条件下, 第 20~360 天 CK 与 NPK 处理的 $\delta^{13}C$ 值显著高于 MNPK 处理($P < 0.05$); 60~360 天 CK 与 NPK 处理接近相等。覆膜后不同施肥处理添加秸秆土壤有机碳 $\delta^{13}C$ 值在 60~360 天表现为 $\text{NPK} > \text{MNPK} > \text{CK}$, 秸秆添加 360 天, 各施肥处理间差异不显著($P > 0.05$)。覆膜后土壤微生物种类丰富且活性增强, 促进了秸秆碳的累积, 特别是 NPK 和 MNPK 处理为微生物提供了养分。随着培养时间的延长, 秸秆中易于被微生物分解的可溶性物质被微生物优先利用转化^[16], 之后开始对难分解的物质进行分解利用, 所以土壤总有机碳的 $\delta^{13}C$ 值在秸秆添加 360 天, 各施肥处理间开始趋于一致。



注:L 和 F 分别代表裸地和覆膜;不同大写字母表示相同施肥处理不同培养时间之间的差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示相同培养时间不同施肥处理之间的差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同覆膜和施肥方式下土壤添加标记玉米秸秆后土壤有机碳 $\delta^{13}C$ 值

2.2 土壤总有机碳含量

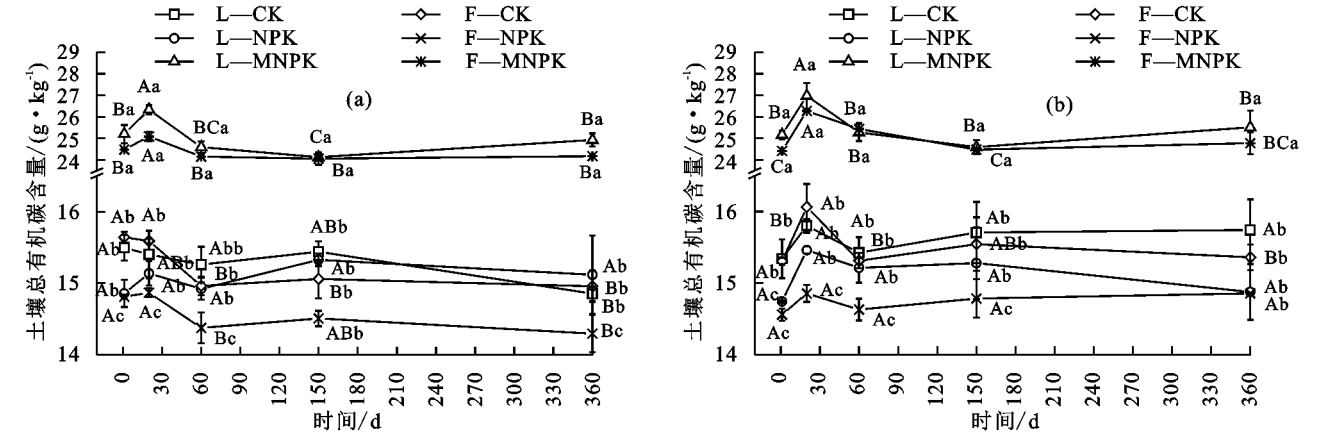
整个培养期间,L-CK、L-NPK 和 L-MNPK 处理不加秸秆土壤总有机碳含量平均值分别为 15.29 ± 0.2 , 15.07 ± 0.1 , 25.03 ± 0.6 g/kg(图 2a)。土壤覆膜 1 年后,F-CK、F-NPK 和 F-MNPK 处理不加秸秆土壤总有机碳含量平均值分别为 15.24 ± 0.2 , 14.57 ± 0.2 , 24.39 ± 0.3 g/kg(图 2a)。长期有机肥配施化肥显著增加作物产量,从而增加土壤中有机碳的输入量,而且有机物料本身增加了土壤中有机碳的输入量,促进有机碳在土壤中的积累^[8]。而单施化肥单纯依靠作物根系的输入不足以补充抵消有机碳矿化损失量^[17],这与张淑香等^[18]的研究结果一致。但也有研究^[19]表明,在单施化肥的情况下,与 CK 相比,NP 和 NPK 处理显著增加 SOC 含量,这可能与当地的气候条件、

土壤状况、耕作制度与施肥量的多少有关^[20]。崔志强等^[21]研究发现,长期覆膜是提高土壤有机碳含量的有效途径,而本研究发现覆膜 1 年并没有对土壤有机碳含量变化产生明显的影响。

作物秸秆作为土壤有机碳的另一来源,秸秆还田显著提高土壤总有机碳含量。与不添加秸秆处理相比,添加秸秆处理土壤总有机碳含量增加 $1\% \sim 6\%$ (图 2b)。无论覆膜或裸地,不同施肥处理添加秸秆后对 SOC 含量的影响表现为 $\text{MNPK} > \text{CK} > \text{NPK}$,且 F-NPK 处理显著低于其他处理。覆膜对土壤水热条件的影响再加上无机养分的供应,可能会产生正激发效应,导致土壤有机碳含量的降低。土壤添加秸秆后,施肥与覆膜交互作用、覆膜与时间交互作用及三因素之间的交互作用对 SOC 含量的影响不显著

($P>0.05$,表 2)。秸秆添加 360 天后,同一施肥处理 SOC 含量表现为裸地高于覆膜(图 2b),但处理间差异不显著($P>0.05$)。地膜覆盖具有保水保温作用,促进了微生物活动及有机物质的分解^[22-23]。但短期地膜覆盖并没有对秸秆添加后土壤总有机碳的含量产生显著的影响,这与 An 等^[24]的研究结果相反。L-CK 处理和 F-CK 处理土壤添加秸秆后 SOC 含量随时间的变化趋势一致;与第 1 天相比,秸秆添加 20 天后 SOC 含量增加 3%~5%,第 150 天时 SOC 含量分别为 15.71,15.55 g/kg,较第 60 天均增加 2%,150 天后 SOC 含量随时间的变化趋于稳定。本

研究是在田间进行秸秆原位还田试验,因此秸秆在土壤的分解及转化主要受季节的影响^[25]。秸秆添加前期秸秆碳的分解转化率可达最大,此后秸秆碳的转化速率逐渐下降并趋于稳定^[26-27]。F-NPK 处理添加秸秆后 SOC 含量随时间变化的趋势与 L-CK 和 F-CK 处理的变化趋势基本相同。L-NPK 处理添加秸秆 1~150 天与 F-NPK 处理相似,但在第 360 天 SOC 含量较第 150 天降低 3%。L-MNPK 和 F-MNPK 处理土壤添加秸秆 20 天后 SOC 含量最高,分别为 26.98,26.27 g/kg,呈现降低趋势,但处理间差异不显著。



注:a 图为不添加玉米秸秆处理,b 图为添加玉米秸秆处理。

图 2 不同覆膜和施肥方式下土壤总有机碳含量的变化

表 2 秸秆添加后各因子对土壤有机碳影响的方差分析

因子	自由度	$\delta^{13}\text{C}$ $F(P)$	SOC $F(P)$	^{13}C —SOC $F(P)$	F_m $F(P)$	F_s $F(P)$
施肥	2	46.1(<0.001)	515(<0.001)	9.71(<0.001)	70.0(<0.001)	61.3(<0.001)
覆膜	1	6.27(0.015)	10.2(0.002)	7.89(0.007)	2.25(0.139)	1.88(0.176)
时间	4	139(<0.001)	13.2(<0.001)	137(<0.001)	144(<0.001)	142(<0.001)
施肥×覆膜	2	28.6(<0.001)	1.33(0.273)	39.6(<0.001)	31.2(<0.001)	32.1(<0.001)
施肥×时间	8	9.08(<0.001)	4.86(<0.001)	5.23(<0.001)	10.8(<0.001)	10.6(<0.001)
覆膜×时间	4	21.4(<0.001)	0.153(0.961)	20.6(<0.001)	19.5(<0.001)	19.9(<0.001)
施肥×覆膜×时间	8	5.93(<0.001)	1.09(0.385)	7.71(<0.001)	6.35(<0.001)	6.27(<0.001)

注:施肥为不施肥、单施化肥和有机肥配施化肥;覆膜为覆膜与不覆膜;时间为第 1,20,60,150,360 天; $\delta^{13}\text{C}$ 为土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值;SOC 为土壤总有机碳; ^{13}C —SOC 为土壤总有机碳中秸秆碳含量; F_m 为秸秆碳的贡献率; F_s 为老有机碳的贡献率。

2.3 土壤总有机碳中秸秆碳含量

在农田生态系统中,土壤有机碳积累水平主要依赖于输入(如田间作物残体和外源有机物料添加等)与输出(土壤原有有机质分解)之间的平衡^[28]。施肥、覆膜、时间及其交互作用显著影响($P<0.05$,表 2)土壤总有机碳中秸秆碳(^{13}C —SOC)的含量。覆膜处理 ^{13}C —SOC 含量高于裸地处理(图 3),尤其是在 60 天覆膜处理是裸地处理的 1~3 倍。覆膜改善土壤的水热条件,促进秸秆碳在土壤中的积累。裸地条件下, ^{13}C —SOC 含量随时间呈先上升的趋势;第 60 天时 ^{13}C —SOC 含量达到最高,CK、NPK 和 MNPK 处理分别为 333,329,164 mg/kg;60 天后 ^{13}C —SOC

含量随时间略有降低,但处理间差异不显著。覆膜条件下, ^{13}C —SOC 含量在第 60 天达到最大值,CK、NPK 和 MNPK 处理分别为 248,514,562 mg/kg,而在 60 天后随时间呈显著降低趋势,第 360 天各处理较第 60 天降低 75%,72%和 67%。同一裸地条件下,不同施肥处理对 ^{13}C —SOC 含量的影响总体表现为 NPK>CK>MNPK;而在同一覆膜条件下,60~360 天 CK 处理 ^{13}C —SOC 含量显著低于 NPK 和 MNPK 处理($P<0.05$)。覆膜条件下,有机和无机肥料在土壤的分解为微生物提供了 N、P 和 K 养分,提高微生物活性,促进秸秆碳在土壤中的累积;而在裸地条件下,有机肥发挥肥效作用滞后,这可能是导致

有机肥处理¹³C—SOC 含量低于其他处理的原因。

2.4 不同来源碳对土壤总有机碳的贡献

秸秆碳和原土壤来源有机碳(老有机碳)对土壤总有机碳的贡献见表 3。施肥、时间及其交互作用显著影响不同来源碳对土壤总有机碳的贡献率($P < 0.05$,表 2)。秸秆添加 60 天时,秸秆碳对土壤总有机碳的贡献率为 0.65%~3.51%,360 天时秸秆碳的贡献率降低到 0.40%~1.71%。裸地条件下 CK 和 NPK 处理秸秆的贡献率高于 MNPK 处理,在第 360 天时秸秆碳的贡献率分别为 1.46%,1.71%和 0.52%。裸地条件下 CK 和 NPK 处理由于土壤养分的缺乏,微生物优先利用秸秆来源碳,从而增加其在土壤中固持的比例。而在覆膜条件下 NPK 和 MNPK 处理秸秆碳的贡献率高于 CK 处理,在第 360 天时秸秆碳的贡献率分别

为 0.97%,0.74%和 0.40%。覆膜使土壤温度和湿度增加,微生物活性增强,且有机和无机肥料的施入为微生物生长提供充足的养分,促进秸秆碳在土壤中的累积。老有机碳对土壤总有机碳的贡献受覆膜与施肥的影响与秸秆碳对总有机碳贡献的影响正好相反。有研究^[29-30]表明,高肥力水平的土壤可以固定更多的秸秆碳,在低肥力土壤中,秸秆碳的掺入率较高,可能是由于初始有机碳较低,微生物可以在饥饿状态下被激活,并通过秸秆碳的输入保持生长;杨艳华等^[31]研究表明,同类型土壤在不同肥力水平下秸秆碳的转化与分配也存在差异,相较于中、高肥力土壤,虽然秸秆碳在低肥力土壤中的转化速率较慢,但其对 SOC 的贡献比例却更高;裴久渤^[32]研究发现,秸秆碳对低肥土壤总有机碳的贡献高于高肥土壤,与本研究结果相似。

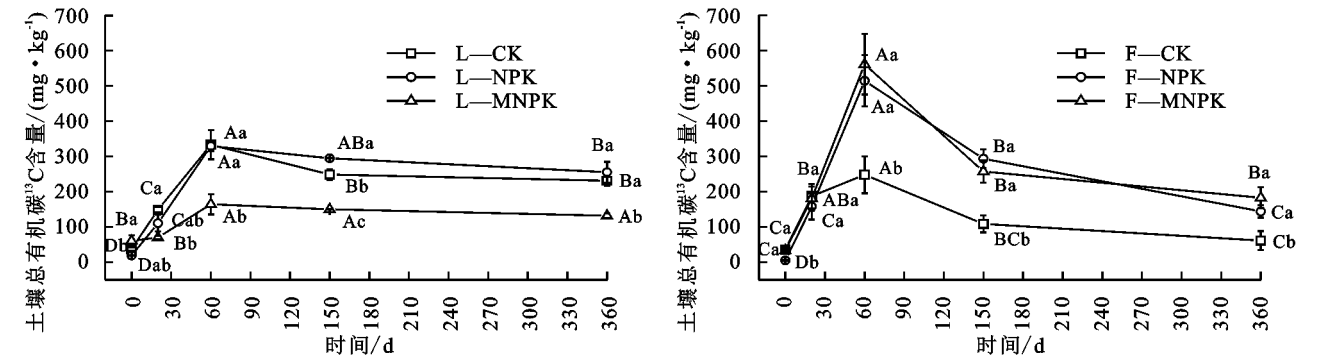


图 3 不同覆膜和施肥方式下土壤总有机碳中¹³C 含量的变化

表 3 不同覆膜及施肥方式下秸秆碳和老有机碳对土壤总有机碳的贡献 单位: %

碳来源种类	处理	1 d	20 d	60 d	150 d	360 d
秸秆碳	L—CK	0.24±0.03Da	0.94±0.05Cab	2.14±0.24Ab	1.61±0.08Bb	1.46±0.05Ba
	L—NPK	0.13±0.00Dab	0.72±0.15Cb	2.14±0.10Ab	1.91±0.06ABa	1.71±0.16Ba
	L—MNPK	0.24±0.03Ba	0.26±0.02Bc	0.65±0.10Ac	0.62±0.00Ad	0.52±0.04Acd
	F—CK	0.17±0.05Ca	1.16±0.19ABa	1.62±0.35Ab	0.70±0.17BCd	0.40±0.09Cd
	F—NPK	0.04±0.01Db	1.06±0.25Cab	3.51±0.53Aa	1.98±0.14Ba	0.97±0.12Cb
	F—MNPK	0.14±0.01Cab	0.69±0.13Bb	2.22±0.33Ab	1.05±0.13Bc	0.74±0.11Bbc
老有机碳	L—CK	99.76±0.03Ab	99.06±0.05Bbc	97.86±0.24Db	98.39±0.08Cc	98.54±0.05Cd
	L—NPK	99.87±0.00Aab	99.28±0.15Bb	97.86±0.10Db	98.09±0.06CDd	98.29±0.16Cd
	L—MNPK	99.76±0.03Ab	99.74±0.02Aa	99.35±0.10Ba	99.38±0.00Ba	99.48±0.04Bab
	F—CK	99.83±0.05Aab	98.84±0.19BCc	98.38±0.35Cb	99.30±0.17ABa	99.60±0.09Aa
	F—NPK	99.96±0.01Aa	98.94±0.25Bbc	96.49±0.53Dc	98.02±0.14Cd	99.03±0.12Bc
	F—MNPK	99.86±0.01Aab	99.31±0.13Bb	97.78±0.33Cb	98.95±0.13Bb	99.26±0.11Bbc

注:L 和 F 分别代表裸地和覆膜;不同大写字母表示相同施肥处理不同培养时间之间的差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示相同培养时间不同施肥处理之间的差异显著($P < 0.05$)。

3 结论

秸秆还田是东北黑土区培肥地力和作物增产的一种关键技术措施。添加秸秆后不同施肥处理短期覆膜对土壤有机碳的影响不明显。覆膜与裸地相比增加了土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和¹³C—SOC 含量(除第 360 天),而秸秆碳对土壤有机碳的贡献相对较低,说明覆膜虽增加了秸秆碳在土壤的积累量,但其对土壤有机

碳固定的贡献较低。NPK 处理无论覆膜与否, $\delta^{13}\text{C}$ 值、¹³C—SOC 含量和秸秆碳对土壤有机碳的贡献率高于不施肥和有机肥配施化肥处理。因此,无机氮、磷和钾养分的供应有利于秸秆碳在土壤的积累,对土壤有机碳库固持起着正反馈作用。然而关于不同施肥处理覆膜后秸秆碳在土壤的转化和固定机制需要通过长期试验做进一步研究。

参考文献:

- [1] 何莹莹,张海林,孙国锋,等.耕作措施对双季稻田土壤碳及有机碳储量的影响[J].农业环境科学报,2010,29(1):200-204.
- [2] Reeves D W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems[J].Soil and Tillage Research,1997,43(1/2):131-167.
- [3] 张鹏鹏,刘彦杰,濮晓珍,等.秸秆管理和施肥方式对绿洲棉田土壤有机碳库的影响[J].应用生态学报,2016,27(11):3529-3538.
- [4] 吴其聪,张丛志,张佳宝,等.不同施肥及秸秆还田对潮土有机质及其组分的影响[J].土壤,2015,47(6):1034-1039.
- [5] 马力,杨林章,肖和艾,等.施肥和秸秆还田对红壤水稻土有机碳分布变异及其矿化特性的影响[J].土壤,2011,43(6):883-890.
- [6] 卜洪震,王丽宏,尤金成,等.长期施肥管理对红壤稻田土壤微生物量碳和微生物多样性的影响[J].中国农业科学,2010,43(16):3340-3347.
- [7] 周健民.土壤学大词典[M].北京:科学出版社,2013:10.
- [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.
- [9] 江晓东,迟淑筠,王芸,等.少免耕对小麦/玉米农田玉米还田秸秆腐解的影响[J].农业工程学报,2009,25(10):247-251.
- [10] 王宏燕,彭驰,侯中田.降水和地积温对有机肥腐解的动态分析[J].东北农业大学学报,1996,27(1):20-25.
- [11] 谢柠桢,安婷婷,李双异,等.外源新碳在不同肥力土壤中的分配与固定[J].土壤学报,2016,53(4):942-950.
- [12] 刘微,吕豪豪,陈英旭,等.稳定碳同位素技术在土壤—植物系统碳循环中的应用[J].应用生态学报,2008,19(3):674-680.
- [13] 贺美.秸秆还田对黑土有机质变化的影响效应[D].北京:中国农业科学院,2016.
- [14] Coleman D C, Fry B. Carbon isotope techniques[M]. California, San Diego: Academic Press, Inc.,1991.
- [15] Conrad R, Klose M, Yuan Q, et al. Sable carbon isotope fractionation, carbon flux partitioning and priming effects in anoxic soils during methanogenic degradation of straw and soil organic matter[J].Soil Biology and Biochemistry,2012,49:193-199.
- [16] 解丽娟.长期施肥下我国典型农田土壤有机碳与全氮分布特征[D].北京:中国农业科学院,2011.
- [17] 柳影,彭畅,张会民,等.长期不同施肥条件下黑土的有机质含量变化特征[J].中国土壤与肥料,2011(5):7-11.
- [18] 张淑香,张文菊,沈任芳,等.我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1389-1393.
- [19] 何伟,王会,韩飞,等.长期施用有机肥显著提升潮土有机碳组分[J].土壤学报,2019,DOI: 10.11766/trxb201902180011.
- [20] 李新爱,童成立,蒋平,等.长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响[J].土壤,2006,38(3):298-303.
- [21] 崔志强,汪景宽,李双异,等.长期地膜覆盖与不同施肥处理对棕壤活性有机碳的影响[J].安徽农业科学,2008,36(19):233-235.
- [22] Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter[J].Soil Biology and Biochemistry,2010,42(9):1363-1371.
- [23] 曹玉军,魏雯雯,徐国安,等.半干旱区不同地膜覆盖滴灌对土壤水温变化及玉米生长的影响[J].玉米科学,2013,21(1):107-113.
- [24] An T, Schaeffer S, Li S, et al. Carbon fluxes from plants to soil and dynamics of microbial immobilization under plastic film mulching and fertilizer application using ^{13}C pulse-labeling[J].Soil Biology and biochemistry,2015,80:53-61.
- [25] An T, Schaeffer S, Zhuang J, et al. Dynamics and distribution of ^{13}C -labeled straw carbon by microorganisms as affected by soil fertility levels in the Black Soil region of Northeast China[J].Biology and Fertility of Soils,2015,51(5):605-613.
- [26] 暴春平,郭岩彬,杨景娜,等. ^{13}C 标记玉米秸秆分解过程中有机碳变化规律研究[C].第四届全国农业环境科学学术研讨会论文集,呼和浩特,2011:651-660.
- [27] Kristiansen S M, Brandt M, Hansen E M. ^{13}C signature of CO_2 evolved from incubated maize residues and maize derived sheep faeces[J].Soil Biology and biochemistry,2004,36:99-105.
- [28] 潘根兴,周萍,李恋卿,等.固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J].土壤学报,2007,44(2):327-337.
- [29] Bastida F, Torres I F, Hernández T, et al. Can the labile carbon contribute to carbon immobilization in semiarid soils? Priming effects and microbial community dynamics[J].Soil Biology and Biochemistry,2013,57:892-902.
- [30] Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? [J]. Soil Biology and Biochemistry,2003,35:837-843.
- [31] 杨艳华,苏瑶,何振超,等.还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J].应用生态学报,2019,30(2):668-676.
- [32] 裴久渤.玉米秸秆碳在东北旱田土壤中的转化与固定[D].沈阳:沈阳农业大学,2015.