

何振超, 苏瑶, 喻曼, 等. 秸秆碳对不同施肥水平低肥力土壤碳组分的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 304-312.
HE Zhen-chao, SU Yao, YU Man, et al. Effect of straw-derived carbon on carbon component of the low fertility soil at different nitrogen application rates[J].
Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(3): 304-312.

秸秆碳对不同施肥水平低肥力土壤碳组分的影响

何振超^{1,2}, 苏瑶^{1*}, 喻曼¹, 陈喜靖¹, 万美霞¹, 沈阿林^{1*}

(1. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探明不同施肥水平下秸秆碳对低肥力土壤溶解性有机碳(DOC)、微生物量碳(MBC)和颗粒有机碳(POC)含量的影响,采用碳化硅管原位法,向不同施肥水平(0、120、240 kg·hm⁻²,以纯氮计)的低肥力土壤添加¹³C标记小麦秸秆,定期取土样测定不同有机碳组分的含量及其δ¹³C值,并计算秸秆碳在各有机碳库中的转化及贡献比例。研究结果显示,秸秆添加后7 d是快速转化阶段,此后秸秆碳转化渐缓,以向POC转化为主。相较于DOC,秸秆碳更倾向转化为MBC和POC,秸秆添加60 d后的转化比例分别为0.12%~0.38%、4.01%~6.25%和4.74%~9.54%。秸秆添加后,土壤DOC、MBC和POC含量均显著增加,来自于秸秆碳的贡献分别为0.29%~15.01%、13.20%~32.85%和33.62%~59.69%。相较于0、240 kg·hm⁻²的施氮处理,施氮量为120 kg·hm⁻²时,秸秆添加能同时大幅提高试验土壤的活性和缓效性有机碳库含量。由此表明,秸秆还田条件下,适量施加氮肥更有利于低肥力土壤的培肥与固碳。

关键词:秸秆碳;溶解性有机碳;微生物量碳;颗粒有机碳;稳定同位素标记;¹³C

中图分类号:S158

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)03-0304-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0120

Effect of straw-derived carbon on carbon component of the low fertility soil at different nitrogen application rates

HE Zhen-chao^{1,2}, SU Yao^{1*}, YU Man¹, CHEN Xi-jing¹, WAN Mei-xia¹, SHEN A-lin^{1*}

(1. Environmental Resources and Soil Fertilizer Research Institute, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021;
2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100)

Abstract: In order to study the effects of straw C on the contents of dissolved organic carbon (DOC), microbial biomass carbon (MBC) and particulate organic carbon (POC) in low-fertility soil at different nitrogen application rates, ¹³C-labeled wheat straw was mixed with low fertility soils in the carborundum tube at different nitrogen application rates (0, 120, 240 kg·hm⁻², pure nitrogen content). Soils were sampled periodically to analyze carbon component contents and its relative δ¹³C value. Straw C transformation rate and contribution to soil C pool was also calculated. The results showed that straw C was transformed rapidly within the first 7 days, thereafter the decomposition rate slowed down and was dependent on transformation to POC. Compared with DOC, straw C preferred transforming into MBC and POC, with the transformation rate of 0.12%~0.38%, 4.01%~6.25% and 4.74%~9.54% on 60 d after straw addition, respectively. Soil DOC, MBC, and POC contents were increased significantly by straw addition, with 0.29%~15.01%, 13.20%~32.85% and 33.62%~59.69% of respective carbon derived from straw, respectively. Compared with 0, 240 kg·hm⁻² application rates, 120 kg·hm⁻² could increase the active and slow organic C pool of the experimental soil simultaneously. All results suggest that straw return with moderate nitrogen application is more conducive to both soil fertility improvement and C sequestration of low fertility soil.

Keywords: straw-derived carbon; dissolved organic carbon (DOC); microbial biomass carbon (MBC); particulate organic carbon (POC); stable isotope labeling; ¹³C

收稿日期:2018-05-12 录用日期:2018-08-01

作者简介:何振超(1992—),男,甘肃张掖人,硕士研究生,主要从事秸秆还田的产地环境效应研究。E-mail:HZChezhenchao@163.com

*通信作者:沈阿林 E-mail:shenalin_123@126.com;苏瑶 E-mail:suyao@zju.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800600);浙江省自然科学基金青年基金项目(LQ18D030001);浙江省重点研发计划项目(2018C02036);国家小麦产业技术体系项目(CARS-3)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2017YFD0800600); Zhejiang Natural Science Fund Youth Fund Project(LQ18D030001); The Key Research and Development Program of Zhejiang Province(2018C02036); China Modern Agricultural Industry System Construction Special Funds of Wheat(CARS-3)

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)在改善土壤肥力和维持土壤生产力方面发挥着重要作用^[1]。根据SOC的存在方式和稳定性,一般可将SOC分为活性有机碳、缓效性有机碳和稳定性有机碳。其中,土壤活性有机碳以溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)和微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)为主,缓效性有机碳指颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)和碳水化合物^[2-3]。从农田肥力角度考虑,活性有机碳含量高,有利于矿化和提高养分供给;从土壤固碳角度出发,提高稳定性有机碳含量则更有利于土壤有机碳固定^[4-5]。SOC组成及其含量的变化受到农田管理措施的强烈影响,包括秸秆还田、施肥和耕作方式等^[6]。

目前,有关秸秆碳在土壤中的转化分配及其对SOC的影响已成为农田土壤学研究热点之一。当前,国内外学者多通过将¹³C标记秸秆添加至土壤的方式展开相关研究,发现秸秆碳转化过程中约42%~79%的秸秆碳被转化为CO₂进入大气,其余部分碳均以微生物残体或代谢物形式进入土壤各有机碳库^[7-8]。还田秸秆碳在土壤不同有机碳库中的转化与分配受腐解时间、土壤类型、土壤肥力和施肥水平等的显著影响。Pei等^[9]研究指出秸秆碳在腐解前期更易腐解为DOC进入黑土,腐解后期则更多地进入到棕壤。低肥力黑土和棕壤中,秸秆对SOC的贡献分别为36%~59%和43%~63%,高肥力下,秸秆对两类土壤的贡献则分别为17%~41%和30%~53%,其中低肥力土壤MBC中来自于秸秆碳的比例为75%以上,而高肥力土壤仅为50%~60%。相较于高肥力土壤而言,秸秆的加入可更有效地促进低肥力土壤(有机质含量一般低于10 g·kg⁻¹^[10])微生物的活性和生长,但同时,土壤微生物的生长会进一步消耗土壤中的养分^[11]。由此,多数学者提出需采用秸秆与化肥配施的方式,以保障和促进土壤肥力的有效提升^[12-14]。

近年来,随着社会经济建设和发展,全国每年新增新垦农地约66.7万hm²以上,采用秸秆还田配施化肥成为提升这类低肥力土壤肥力水平的重要途径。

但目前,针对秸秆碳在不同施肥水平的低肥力土壤中的转化及其对SOC组成与含量影响的研究还相对缺乏,未能全面揭示秸秆还田对低肥力土壤增碳培肥的作用机制,难以为当前实际应用提供理论参考。故有必要进一步结合不同的施肥水平,研究秸秆碳对低肥力土壤SOC组成及其含量的影响,明确合理的施肥水平。鉴于此,本文选取小麦秸秆和低肥力土壤为研究对象,采用稳定性同位素示踪技术,跟踪标记秸秆碳在不同施肥水平下低肥力土壤各有机碳组分中的动态转化与分配,以综合分析施肥水平对小麦秸秆还田下低肥力土壤有机碳库的影响,并明确可有效促进土壤增碳培肥的合理施肥水平。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用土采自浙江省杭州市富阳区场口镇瓜田埠村不同施肥水平的耕层土壤,纯氮用量0、120、240 kg·hm⁻²,分别记为L、M和H处理,磷肥(P₂O₅)、钾肥(K₂O)施肥量一致,为90、150 kg·hm⁻²。各施肥水平土壤样品基本性状如表1所示。

标记秸秆获取方法:于小麦拔节期,将其置于充有¹³C-CO₂的密闭生长箱中,持续暴露15 d后收获,将茎秆部分风干粉碎过4 mm筛后备用。其中,¹³C-CO₂通过向装有Na₂¹³CO₃(1.0 mol·L⁻¹,¹³C丰度99%)的三角瓶中加入H₂SO₄(0.5 mol·L⁻¹)制得,保障密闭生长箱中¹³C-CO₂浓度维持在360~380 μL·L⁻¹。标记小麦秸秆含碳量为352.9 g·kg⁻¹,含氮量为6.38 g·kg⁻¹,C/N为55.31,δ¹³C值为357.48‰。

1.2 试验设计

实验采用砂滤管法。在3个施肥水平(L、M和H)下的低肥力土壤中添加¹³C标记秸秆,即:取100.0 g(相当于烘干土质量)土壤样品与3.0 g烘干过4 mm筛的¹³C标记小麦秸秆,充分混合,调节土壤含水率至最大田间持水量的75%后移入砂滤管(内径38 mm,高155 mm,管壁厚8.5 mm),盖上盖子并用胶带密封,浸泡于对应施肥水平土壤泥浆中24 h后取出,垂

表1 供试土壤基本性状

Table 1 Chemical properties of the experimental soil

施肥处理 N treatments	总有机碳 TOC/g·kg ⁻¹	总氮 TN/g·kg ⁻¹	δ ¹³ C/‰	碳氮比 C/N	溶解性有机碳 DOC/mg·kg ⁻¹	微生物量碳 MBC/mg·kg ⁻¹	颗粒有机碳 POC/mg·kg ⁻¹
L	5.7	0.89	-28.10	6.4	25.38	190.89	90.89
M	6.7	1.09	-27.78	6.1	26.64	357.26	49.52
H	7.6	1.32	-27.39	5.8	42.90	446.29	59.11

直埋于相应处理土壤 5~20 cm 深处。分别于埋管后第 7、14、30 d 和 60 d 进行破坏性取样,测定土壤样品 SOC、DOC、MBC、POC 含量及其对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,各处理不同取样点均设置 3 个重复。同时设置不加秸秆的对照组。

1.3 土壤碳库组分及其 $\delta^{13}\text{C}$ 的测定

土壤 SOC 采用重铬酸钾外加热法测定^[15]。土壤 DOC 采用去离子水浸提法提取^[16],其中,取 10 mL 滤液立即采用 MultiN/C®3100 分析仪测定有机碳含量,剩余滤液经冷冻干燥研磨过 0.15 mm (100 目)筛后,用于 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定。土壤 MBC 的提取采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 溶液浸提法^[17],取 10 mL 滤液测定其有机碳含量,其余滤液经冷冻干燥研磨过 0.15 mm (100 目)筛后,用于 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定。土壤 POC 采用六偏磷酸钠分散法获取,部分通过元素分析仪用于其含量测定,部分用于 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定。不同组分碳对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均采用元素分析-同位素比例质谱联用仪 (Elementar Isoprime 100) 测定。

1.4 数据分析

土壤 MBC 含量及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值计算如式(1)和(2)所示^[18]:

$$C_{\text{mbc}} = (C_t - C_{\text{nf}}) \times R_v / K_c \quad (1)$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{mbc}} = (\delta^{13}\text{C}_t \times C_t - \delta^{13}\text{C}_{\text{nf}} \times C_{\text{nf}}) / (C_t - C_{\text{nf}}) \quad (2)$$

式中: C_{mbc} 为土壤微生物量碳, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_t 为测定的熏蒸土壤有机碳浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_{nf} 为测定的未熏蒸土壤有机碳浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; R_v 为试验用 K_2SO_4 溶液与干土质量比例; K_c 为转换系数,本研究取 0.45; $\delta^{13}\text{C}_{\text{mbc}}$ 为土壤微生物量碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值,‰; $\delta^{13}\text{C}_t$ 为测定的熏蒸土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值,‰; $\delta^{13}\text{C}_{\text{nf}}$ 为测定的未熏蒸土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值,‰。

土壤不同组分碳库 ^{13}C 含量计算如式(3)所示:

$$M^{13}\text{C} = M_c \times R^{13}\text{C} \quad (3)$$

式中: $M^{13}\text{C}$ 为所测样品中 ^{13}C 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; M_c 为不同组分碳含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $R^{13}\text{C}$ 为所测样品中 ^{13}C 所占比例, %。

秸秆碳在土壤各有机碳库中所占比例计算如式(4)^[7,19-20]所示。

$$F_m = (\delta^{13}\text{C}_{\text{sm}} - \delta^{13}\text{C}_s) / (\delta^{13}\text{C}_m - \delta^{13}\text{C}_s) \times 100\% \quad (4)$$

式中: F_m 为添加小麦秸秆土壤中来自小麦秸秆碳的比例,即秸秆碳对土壤有机碳库的贡献比例; $\delta^{13}\text{C}_{\text{sm}}$ 为加小麦秸秆土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,‰; $\delta^{13}\text{C}_s$ 为不加小麦秸秆土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值,‰; $\delta^{13}\text{C}_m$ 为初始添加小麦秸秆的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,‰。

本研究数据采用 Microsoft Excel 2003 和 Sigma-plot 12.0 软件对数据进行处理和绘图,采用 SPSS 软件

对数据进行显著性差异分析及 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 小麦秸秆添加后低肥力土壤各有机碳库含量的动态变化

秸秆添加显著提高了 SOC 含量,与对照组相比,添加后 7、14、30、60 d 的 SOC 含量均极显著升高 ($P < 0.01$)。添加后第 7 d, L、M、H 处理组 SOC 较初始土样分别增长 44.85%、35.10% 和 22.18% (图 1B); 第 30 d, SOC 含量增至最高,此后有所下降,第 60 d, 秸秆添加处理组 SOC 含量较对照组增加 24.1%~28.9%。

秸秆添加后,土壤不同有机碳库含量均有所增加,但变化规律随培养时间存在一定差异(图 2)。其中,秸秆添加后 7~30 d, L、M、H 处理组土壤 DOC 呈现波动式增加,30 d 时达到最大,此后大幅下降至与对照组相当 ($P_L=0.246$, $P_M=0.103$, $P_H=0.182$, 图 2D)。各施肥水平土壤 MBC 含量在秸秆添加后第 7 d 达到最大,之后迅速下降,14 d 后基本趋于稳定,秸秆添加后

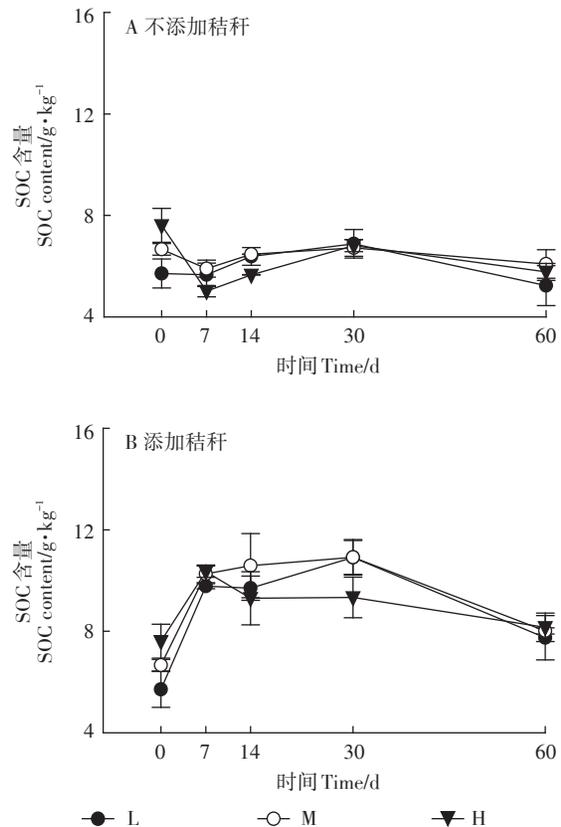


图 1 不同施肥水平下不添加秸秆和添加秸秆处理组 SOC 的变化

Figure 1 Variation of SOC in the treatment of without and with straw addition at different N application rates

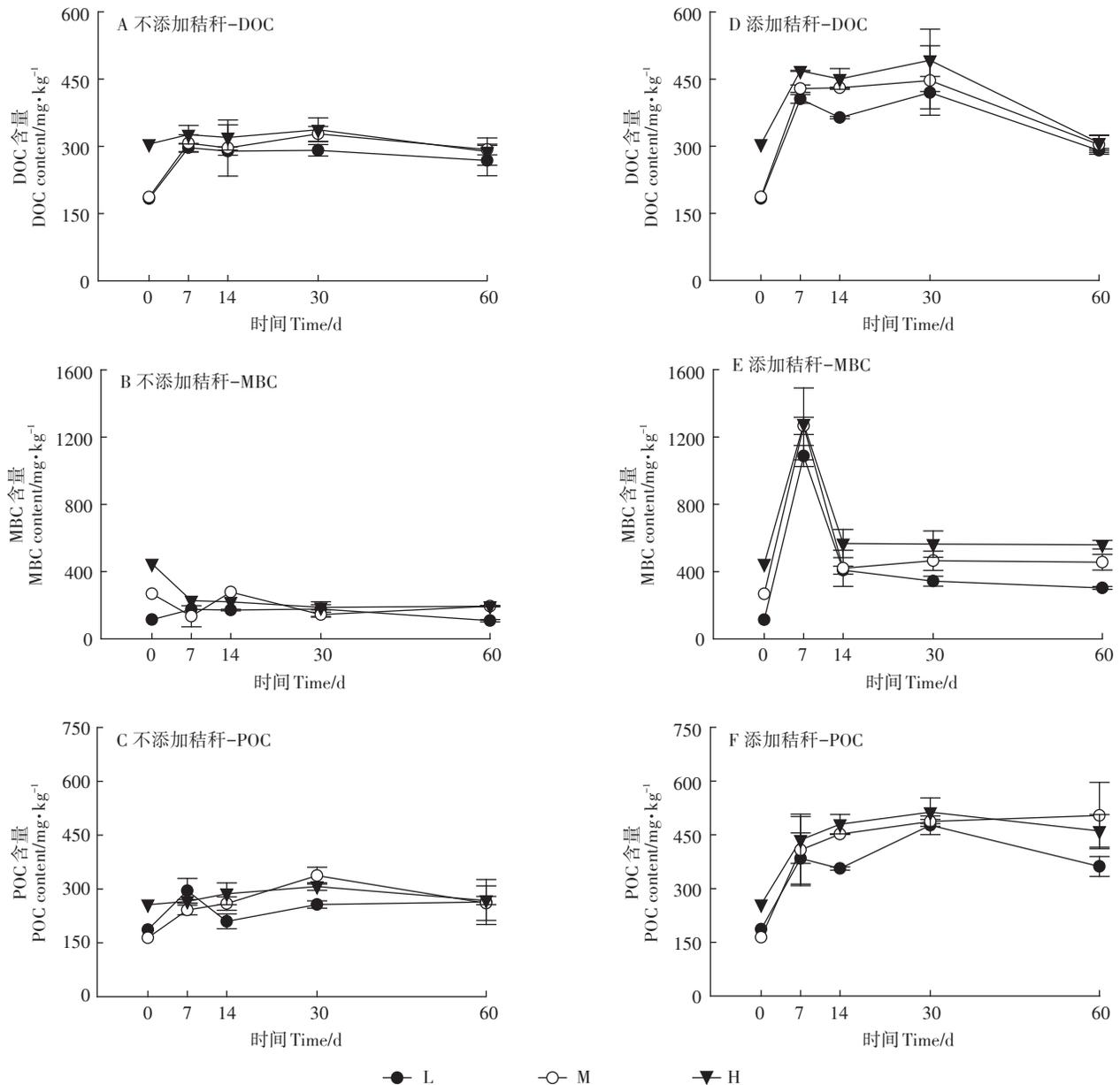


图2 不同施肥水平下不添加秸秆和添加秸秆处理组土壤 DOC、MBC 和 POC 的含量变化

Figure 2 Variation of soil DOC, MBC and POC in the treatment of without and with straw addition at different N application rates

30~60 d,高施肥水平土壤 MBC 含量显著高于低施肥水平($P<0.05$,图 2E)。秸秆添加对土壤 POC 含量的影响如图 2F 所示,H、M 和 L 处理组土壤 POC 最大含量均出现在秸秆添加后 30 d。随着培养的进行,土壤 POC 含量增幅逐渐减小。相较 L 和 H 处理组,M 处理组在整个培养期内,POC 含量呈现缓慢但持续的增长趋势。

2.2 小麦秸秆添加后低肥力土壤各有机碳库 $\delta^{13}\text{C}$ 值的动态变化

土壤各有机碳库 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化表征秸秆碳进入对

应土壤有机碳库的量,可反映秸秆碳转化后的动态分配。实验结果显示,各施肥水平处理组,添加 ^{13}C 标记秸秆后,SOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 93.83‰~146.72‰,显著高于对照组($P<0.05$,图 3),表明秸秆碳转化进入了土壤有机碳库。

^{13}C 秸秆的添加同样显著提高了土壤 DOC、MBC 和 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(图 4)。其中,土壤 DOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值于 ^{13}C 标记秸秆添加后 7 d 达到最大,此后持续下降,第 60 d 时,DOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值已与对照组无显著差异($P>0.05$),表明后期基本无秸秆碳转化为土壤 DOC。

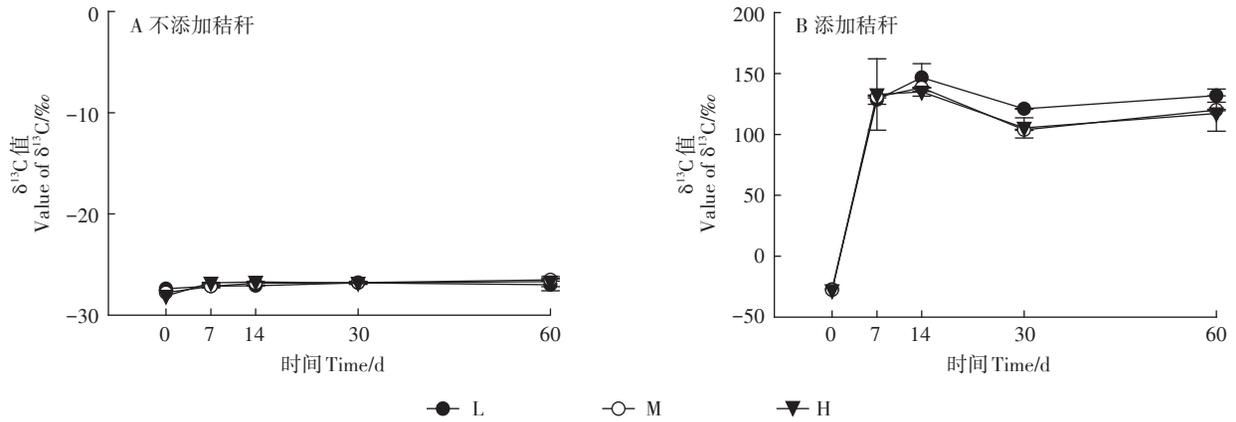


图3 不同施肥水平下不添加秸秆和添加秸秆处理组土壤SOC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化

Figure 3 Variation of $\delta^{13}\text{C}$ of SOC in the treatment of without and with straw addition at different N application rates

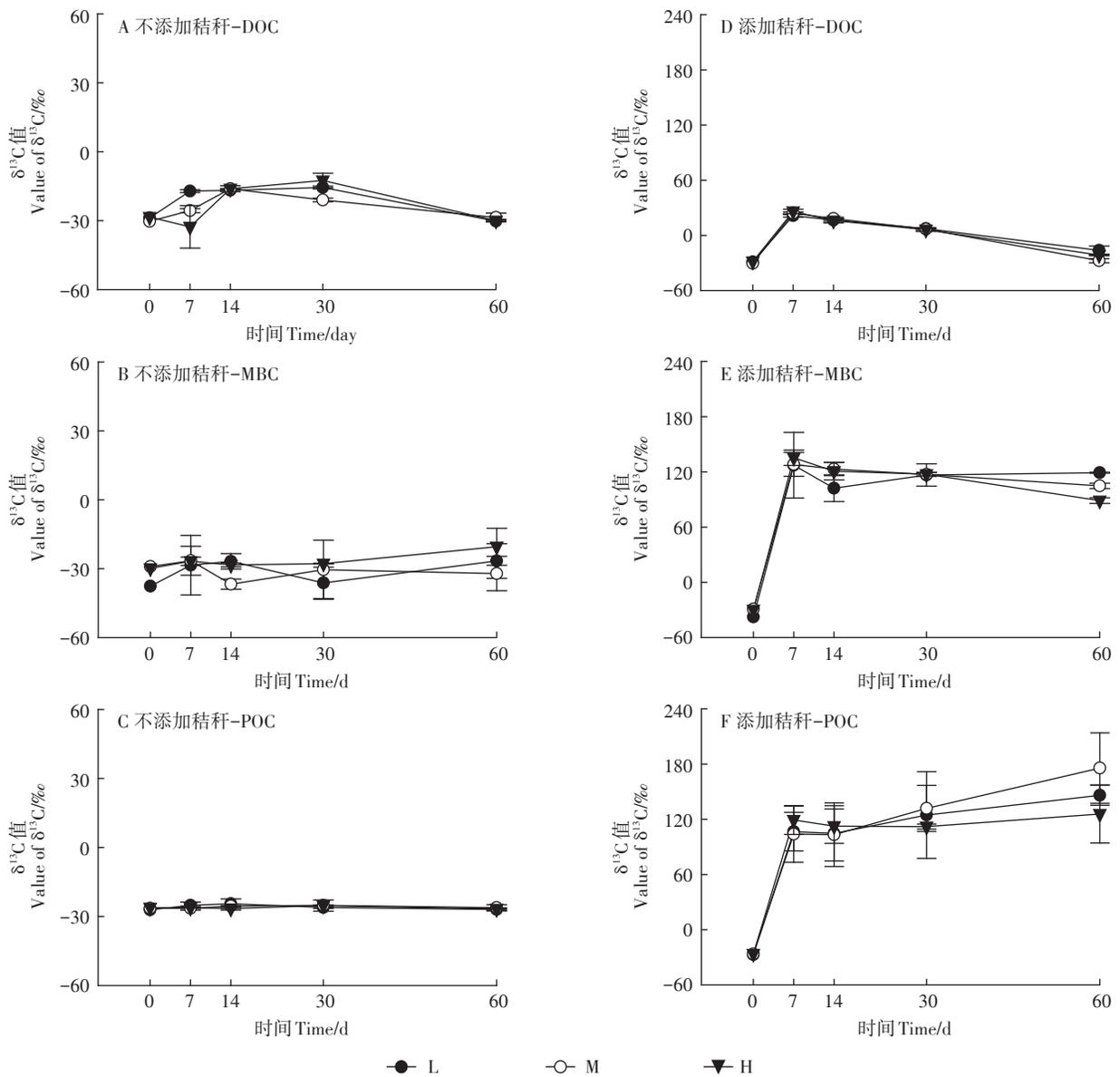


图4 不同施肥水平下不添加秸秆和添加秸秆处理组土壤DOC、MBC和POC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化

Figure 4 Variation of $\delta^{13}\text{C}$ of DOC, MBC and POC in the treatment without and with straw addition at different N application rates

各施肥水平土壤 MBC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均在秸秆添加后 7 d 升至最高,此后略有下降,第 60 d, L、M、H 处理组土壤 MBC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为 L 组显著高于 H、M 处理组 ($P < 0.001$),表明低施肥水平下土壤 MBC 中来自秸秆碳的量更多。 ^{13}C 标记秸秆添加后,土壤 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化表现为前期快速增加,后期缓慢增加的趋势,表明秸秆碳在后期持续转化进入土壤 POC。比较不同施肥水平, M 处理组土壤 POC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在后期相对更高。

2.3 小麦秸秆 ^{13}C 在低肥力土壤各有机碳库中的分配

根据测定的土壤各有机碳库含量及其对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,通过公式(3)计算实验期内小麦秸秆 ^{13}C 转化分配至土壤各有机碳库的比例(图 5),即 DOC、MBC、POC 的 ^{13}C 与秸秆总 ^{13}C 的比值。结果显示秸秆添加 60 d 内,不同取样时间点秸秆 ^{13}C 进入土壤 DOC、MBC 和 POC 的总比例变化范围为 8.11%~20.75%。其中,最大比例出现在秸秆添加后第 7 d,此时,秸秆 ^{13}C 分配到土壤各有机碳库比例次序为 MBC(13.69%~14.69%)>POC(2.69%~4.06%)>DOC(1.24%~1.99%);相较于 L 和 M 处理组,秸秆 ^{13}C 在 H 组土壤活性和缓效性有机

碳库的分配比例更高,约 20.75%,H 组与 M 组具有极显著差异 ($P=0.01$),H 组与 L 组具有显著差异 ($P=0.047$)。此后,秸秆 ^{13}C 分配进入到土壤活性和缓效性有机碳库的比例均有所下降,第 60 d, L、M、H 处理组分别为 9.13%、15.77% 和 12.84%,其中 ^{13}C 在各有机碳库中的分配比例表现为 POC(4.74%~9.54%)>MBC(4.01%~6.25%)>DOC(0.12%~0.38%)。

2.4 小麦秸秆碳对低肥力土壤有机碳不同组分的贡献

根据公式(4),计算了秸秆碳对土壤各有机碳的贡献,结果如表 2 所示。相较而言,秸秆碳对土壤 MBC 和 POC 的贡献均大于 DOC,实验期内各自变化范围分别在 13.20%~32.85%、33.62%~59.69% 和 0.29%~15.01%。其中,秸秆碳对土壤 DOC 和 MBC 的贡献随秸秆添加时间延长呈下降趋势,但对土壤 POC 的贡献则呈持续增加趋势。相较于 H 组,秸秆碳对 L 和 M 组土壤 POC 的贡献尽管在秸秆添加初期相对较低,但随培养的进行,贡献持续增加,在第 60 d 均显著高于 H 组。

3 讨论

本研究中秸秆添加可在短时间内有效增加低肥力土壤 SOC 含量 28.90%~33.30%。Liu 等^[21]对国内外 176 项秸秆还田试验数据的 Meta 分析结果显示,秸秆还田可使 SOC 含量平均提高 12.8%;相比而言,本实验结果偏高,但 Thomsen 等^[22]对低肥力土壤的相关研究指出,秸秆还田后(还田量 4~12 t·hm⁻²,约为 0.06%~0.2%),土壤 SOC 含量可增加 12%~30%。与本研究结果接近。因此,秸秆还田对低肥力土壤具有明显的增碳效果,但长期还田下的增碳效果还需进一步验证。

秸秆腐解过程中,秸秆碳在土壤中的转化直接影响土壤各有机碳库的含量。本实验中,小麦秸秆添加第 7 d,土壤 DOC、MBC 和 POC 含量及其对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均迅速增加,且二者间表现为显著正相关关系

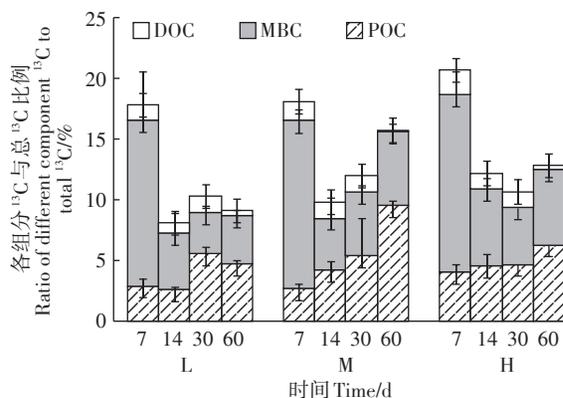


图 5 不同施肥水平下秸秆 ^{13}C 在土壤 DOC、MBC 和 POC 中的分配

Figure 5 The distribution of straw-derived ^{13}C in soil DOC, MBC and POC at different N application rates

表 2 不同施肥水平下秸秆碳对土壤 DOC、MBC 和 POC 的贡献

Table 2 Contribution of straw-derived carbon to soil DOC, MBC and POC at different N application rates

时间 Sampling time/d	DOC			MBC			POC		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H
7	10.31±0.25f	13.01±0.14f	15.01±2.63f	32.85±3.17d	25.54±1.36e	31.34±2.01d	34.42±1.73e	33.94±0.82d	37.90±1.10c
14	6.45±0.83g	6.72±0.12g	6.10±0.59g	17.51±1.24e	14.35±1.61f	20.51±1.68e	34.08±1.24c	33.62±2.05d	36.22±1.97c
30	6.14±0.05g	7.35±0.62g	5.06±1.32g	13.20±0.69f	14.32±0.34f	13.51±0.35f	39.27±2.34b	41.04±1.54b	35.88±0.39c
60	3.61±1.28h	0.29±0.10i	2.25±0.3h	15.54±2.88f	15.12±1.12f	15.50±0.17f	45.01±1.73b	59.69±0.32a	39.69±0.24c

注:不同小写字母代表在 $P < 0.05$ 水平下差异显著。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at the level of $P < 0.05$.

($R_{\text{DOC}}=0.857$, $R_{\text{MBC}}=0.519$, $R_{\text{POC}}=0.887$, $P<0.05$), 表明此时秸秆碳被迅速转化分配至土壤各有机碳库, 为小麦秸秆碳快速转化分解期^[23]。Cogle 等^[24]和 Esther 等^[25]研究发现小麦秸秆碳在添加后 4~15 d 内转化速率可达最大。实验中, 秸秆添加后 14 d, 土壤 SOC 对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值达到最大, 表明此时仍有秸秆碳被转化分配至土壤总有机碳库, 但分配到活性和缓效性有机碳库的比例较第 7 d 时有所下降, 表明小麦秸秆碳中的较易利用碳组分基本在快速腐解阶段被分解。此时, 微生物对秸秆中较难利用的有机质如纤维素、木质素等进行分解, 进入小麦秸秆碳缓慢转化阶段, 土壤微生物对秸秆碳转化形成的土壤活性和缓效性有机碳的利用速率大于对秸秆中难降解有机质的利用速率。相似地, 倪进治等^[26]在研究中发现, 小麦秸秆还田 7 d 后, 土壤 MBC 含量呈现下降趋势, 认为此时微生物能利用的易分解有机碳源已耗尽, 转入利用较难分解的有机碳。小麦秸秆添加后 14~30 d, 土壤 SOC 对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值略有下降, 但 30 d 后, 随着秸秆碳转化进入土壤 POC 过程的增强 (POC 对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值持续增加), 土壤 SOC 对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也在实验后期略有增加, 表明秸秆转化后期 SOC 的增加主要是秸秆碳持续转化进入土壤 POC 所致。姬强等^[27]和王虎等^[28]研究亦表明, 随秸秆碳转化进行, 秸秆碳进入 POC 及矿物结合态有机碳比例逐渐增加, 进而实现秸秆还田的增碳固碳作用。

秸秆 ^{13}C 转化分配到土壤 MBC 和 POC 的比例高于 DOC, 表明秸秆 ^{13}C 更易被固定为 MBC 和 POC。这与秸秆碳对土壤不同有机碳贡献的计算结果相符, 即相较于 MBC 和 POC 而言, 秸秆碳对土壤 DOC 的贡献比例最低 (0.3%~15.0%), 且随秸秆碳转化的进行明显下降, 说明土壤 DOC 主要来源于土壤老有机碳的矿化作用。秸秆添加后促进了土壤原有机质的矿化^[29], 引起土壤 DOC 中来自老有机质 ^{12}C 对 ^{13}C 丰度的稀释。若假设各有机碳库在固定 ^{12}C 和 ^{13}C 间的选择差异可忽略, 且 ^{13}C 在秸秆中分布均匀, 那么计算所得 DOC、MBC、POC 的 ^{13}C 占秸秆总 ^{13}C 的比例, 即相当于秸秆碳中可转化至土壤 DOC、MBC 和 POC 的比例。结合计算结果, 表明秸秆添加 60 d 后, 约 0.12%~0.38%、4.01%~6.25% 和 4.74%~9.54% 的秸秆碳分别转化为了土壤 DOC、MBC 和 POC。这与现有研究报道基本相符。其中, Bastida 等^[30]、Majumder 等^[31]和关桂红^[32]的研究结果显示, 秸秆碳转化过程中约 1.9%~10.63% 的秸秆碳可转化为土壤 MBC, 10% 左右的秸秆碳可转化为土壤 POC, 而转化进入土壤 DOC 的秸

秆碳仅占秸秆总碳量的 0.01%~3.3%。Poll 等^[7]将 ^{13}C 标记的黑麦草添加到表层土壤中后发现, 84 d 后 10% 的秸秆碳进入到土壤有机碳中, 仅有 3% 的秸秆碳进入到 MBC 中。De Troyer 等^[33]对玉米秸秆碳在土壤各有机碳库中分配的研究结果表明, 按 0.2% 秸秆量添加到土壤样品 240 d 后, 约 2.1% 和 0.01% 的秸秆碳分别以 MBC 和 DOC 的形式存留在土壤碳库。各报道中选用的土壤类型及肥力、秸秆类型及培养时间等均存在一定差异, 因此, 分析得出的秸秆碳的具体转化分配比例亦有所不同。

不同的施肥水平会影响秸秆碳在低肥力土壤中的转化与分配。相较而言, 秸秆碳快速转化期 (0~7 d), 施肥水平对土壤 DOC、MBC 和 POC 的影响不显著, 但在秸秆碳转化后期 (30~60 d), 施肥处理组 (H 和 M) 土壤中 MBC 含量显著高于不施肥处理组 (L), 主要是施肥可为土壤微生物提供充足的养分, 保障其生长代谢所需^[34-35]。相较于 L 和 H 处理组, 秸秆碳在 M 处理组对 POC 的分配比例最高, 对应其土壤 POC 含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 值也最高。一方面, 在不施肥处理组中, 随着秸秆的腐解, 土壤中的氮不能满足微生物生长所需, 进而降低了对秸秆碳的整体转化, 减少了可以转化进入到 POC 的量; 而在较高施肥处理组土壤中, 由于微生物生长代谢旺盛, 更多的活性碳组分被微生物代谢转化进入其他碳库, 而进入 POC 的碳量亦相对减少。相似地, 宋震震^[36]在研究中发现, 相较于高量肥料配施, 常规配施肥料处理组土壤 POC 含量增幅更大。由此可见, 秸秆还田条件下, 施肥较少不利于低肥土壤活性碳库的增加, 进而不利于土壤矿化和养分供给, 而过量施加肥料则不利于低肥力土壤固碳。

4 结论

本研究从小麦秸秆碳的转化与分配角度系统分析了小麦秸秆碳对低肥力土壤主要有机碳库的影响, 初步揭示了小麦秸秆碳转化过程对低肥力土壤增碳的贡献, 主要得到以下结论:

(1) 秸秆添加后, 0~7 d 为小麦秸秆碳快速转化阶段, 7~14 d 秸秆碳转化变缓, 14 d 后相较于土壤活性有机碳, 秸秆碳转化主要以形成土壤 POC 为主。

(2) 相较于 DOC, 秸秆碳更易转化为土壤 MBC 和 POC, 秸秆添加 60 d 后, 秸秆 ^{13}C 进入 DOC、MBC 和 POC 的比例分别为 0.12%~0.38%、4.01%~6.25% 和 4.74%~9.54%。

(3) 秸秆碳对土壤各有机碳库的贡献比例依次为

POC>MBC>DOC,其中,对土壤POC的贡献比例随秸秆碳转化的进行持续缓慢增加,是秸秆碳转化后期SOC增加的主要原因。

(4)秸秆添加后,土壤活性有机碳含量随施肥水平的增加而增加,但土壤POC含量则在适中施肥水平组(纯氮120 kg·hm⁻²)更高,更有利于实现土壤培肥与固碳的双重目标。

本研究结合不同施肥水平,分析了小麦秸秆碳对低肥力土壤主要活性和缓效性有机碳库的短期影响。今后,可结合长期秸秆还田定位实验,进一步说明秸秆碳转化与分配对不同肥力土壤有机碳库组成及含量的影响;同时,探究秸秆碳转化过程中的关键微生物组成,及其与环境因子的交互作用,以更深入地解析秸秆碳转化的内在驱动机制。

参考文献:

- [1] He Y T, Zhang W J, Xu M G, et al. Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532(1):635-644.
- [2] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(9): 1231-1243.
- [3] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(3):345-353.
- [4] 彭新华, 张 斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4):618-623.
PENG Xin-hua, ZHANG Bin, ZHAO Qi-guo. A review on relationship between soil organic carbon pool and soil structure stability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4):618-623.
- [5] Wei H, Guenet B, Vicca S, et al. High clay content accelerates the decomposition of fresh organic matter in artificial soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 77(7):100-108.
- [6] Zhu L, Hu N, Zhang Z, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system[J]. *Catena*, 2015, 135:283-289.
- [7] Poll C, Marhan S, Ingwersen J, et al. Dynamics of litter carbon turnover and microbial abundance in a rye detritusphere[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(6):1306-1321.
- [8] An T T, Schaeffer S, Zhuang J, et al. Dynamics and distribution of ¹³C-labeled straw carbon by microorganisms affected by soil fertility levels in the blank soil region of northeast China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(5):605-613.
- [9] Pei J, Li H, Li S, et al. Dynamics of maize carbon contribution to soil organic carbon in association with soil type and fertility level[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(3):e0120825.
- [10] 赵其国. 我国中低产土的类型分布与治理开发途径[J]. *土壤*, 1988, 20(6):3-7.
ZHAO Qi-guo. Type distribution and management development of medium- and low-yield soil in China[J]. *Soils*, 1988, 20(6):3-7.
- [11] Brookes P. The soil microbial biomass: Concept, measurement and applications in soil ecosystem research[J]. *Microbes & Environments*, 2001, 16(3):131-140.
- [12] 梁 斌, 赵 伟, 杨学云, 等. 氮肥及其与秸秆配施在不同肥力土壤的固持及供应[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(9):1750-1757.
LIANG Bin, ZHAO Wei, YANG Xue-yun, et al. Nitrogen retention and supply after addition of N fertilizer and its combination with straw in the soils with different fertilities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(9):1750-1757.
- [13] Rudrappa L, Purakayastha T J, Singh D, et al. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools in a Typic Haplustept of semi-arid sub-tropical India[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 88(1):180-192.
- [14] Iqbal M, vanEs H M, Hassan A U, et al. Soil health indicators as affected by long-term application of farm manure and cropping patterns under semi-arid climates[J]. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2014, 16(2):242-250.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 1981: 30-35.
BAO Shi-dan. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 1981:30-35.
- [16] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M. et al. Management induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26:88-94.
- [17] 吴金水. 土壤微生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006:7.
WU Jin-shui. Soil microbial biomass assay and its application[M]. Beijing: Meteorological Press, 2006:7.
- [18] Murage E W, Voroney P R. Modification of the original chloroform fumigation extraction technique to allow measurement of $\delta^{13}\text{C}$ of soil microbial biomass carbon[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(7): 1724-1729.
- [19] Wild B, Schneckner J, Alves R J E. et al. Input of easily available organic C and N stimulates microbial decomposition of soil organic matter in Arctic permafrost soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 75: 143-151.
- [20] Conrad R, Klose M, Yuan Q, et al. Stable carbon isotope fractionation, carbon flux partitioning and priming effects in anoxic soils during methanogenic degradation of straw and soil organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 49:193-199.
- [21] Liu C, Lu M, Cui J. et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5):1366-1381.
- [22] Thomsen I K, Christensen B T. Yields of wheat and soil carbon and nitrogen contents following long-term incorporation of barley straw and ryegrass catch crops[J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20(4):432-438.

- [23] 胡宏祥, 马中文, 邵致远, 等. 还田秸秆腐解特征研究[J]. 湖南农业科学, 2012(5):44-46.
HU Hong-xiang, MA Zhong-wen, SHAO Zhi-yuan, et al. Study on the decomposition characteristics of returning straw[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2012(5):44-46.
- [24] Cogle A L, Saffigna P G, Strong W M. Carbon transformations during wheat straw decomposition[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1989, 21(3):367-372.
- [25] Esther O J, Guo C H, Tian X H, et al. The effects of three mineral nitrogen sources and zinc on maize and wheat straw decomposition and soil organic carbon[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(12):2768-2777.
- [26] 倪进治, 徐建民, 谢正苗, 等. 有机肥料施用后潮土中活性有机质组分的动态变化[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4):416-419.
NI Jin-zhi, XU Jian-min, XIE Zheng-miao, et al. Effects of different organic manure on biologically active organic fractions of soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(4):416-419.
- [27] 姬强, 孙汉印, 王勇, 等. 土壤颗粒有机碳和矿质结合有机碳对4种耕作措施的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):132-137.
JI Qiang, SUN Han-yin, WANG Yong, et al. Responses of soil particulate organic carbon and mineral-bound organic carbon to four kinds of tillage practices[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2):132-137.
- [28] 王虎, 王旭东, 田宵鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12):3491-3498.
WANG Hu, WANG Xu-dong, TIAN Xiao-hong. Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12):3491-3498.
- [29] Karhu K, Hiltavuori E, Fritze H, et al. Priming effect increases with depth in a boreal forest soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 99:104-107.
- [30] 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 & Biochemistry*, 2013, 57(3):892-902.
- [31] Majumder B, Kuzyakov Y. Effect of fertilization on decomposition of ^{14}C labelled plant residues and their incorporation into soil aggregates[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 109(2):94-102.
- [32] 关桂红. ^{14}C 标记冬小麦秸秆分解过程中碳周转规律的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
GUAN Gui-hong. Study on carbon turnover during decomposition of ^{14}C labeled winter wheat straw[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006.
- [33] De Troyer I, Amery F, Van Moorleghe C, et al. Tracing the source and fate of dissolved organic matter in soil after incorporation of a ^{13}C labelled residue: A batch incubation study[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(3):513-519.
- [34] Jansen B, Kalbitz K, McDowell W H. Dissolved organic matter: Linking soils and aquatic systems[J]. *Vadose Zone Journal*, 2014, 13(7):51-54.
- [35] Zhao S, Li K, Zhou W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 216:82-88.
- [36] 宋震震. 不同施肥制度下潮土活性有机碳库的温变响应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
SONG Zhen-zhen. Soil labile organic carbon pool made response to temperature changes under different fertilization[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014.