

朱文玲, 李秀双, 田霄鸿, 等. 小麦与秋豆秸秆配施对土壤有机碳固持的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1952–1960.

ZHU Wen-ling, LI Xiu-shuang, TIAN Xiao-hong, et al. Effects of the combined amendment of wheat and huai bean straws on soil organic carbon sequestration[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1952–1960.

小麦与秋豆秸秆配施对土壤有机碳固持的影响

朱文玲, 李秀双, 田霄鸿*, 陈娟, 王松

(西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为揭示麦秸与豆科秸秆配合还田对黑垆土有机碳固持的影响, 尝试引入了自然 $\delta^{13}\text{C}$ 技术并结合双指数模型方法, 选取常年种植玉米的 C_4 土壤, 设不添加秸秆(CK)、添加小麦秸秆(W)、添加秋豆秸秆(L)、小麦秋豆秸秆组合添加(W+L)4个处理, 进行了80 d的恒温控湿室内培养试验。结果表明: 培养结束后, 秸秆添加处理(W+L、L、W)显著提高了 CO_2 累积释放量和有机碳含量, 分别比CK高5.63、2.90、2.60倍和22.3%、10.7%和12.5%; W+L处理显著提高了土壤微生物量碳及微生物熵, 分别比CK高39.5%和15.6%; 同时W+L、L、W处理也提高了土壤惰性碳库及其占总有机碳的比例, 分别比CK高2.82、0.756、1.98倍和2.27、0.569、1.64倍。较W处理, W+L处理的 CO_2 累积释放量、惰性碳库及其在土壤碳库所占比例和微生物量碳及微生物熵均明显增加, 增加幅度分别为84.4%、28.1%、23.9%、25.3%和14.5%; 同时, W+L处理明显提高了碳库中来自秸秆的新碳含量(C_{straw})及其所占比例(f), 分别比W高86.5%和79.8%, 且两种秸秆组合的土壤累积矿化量、有机碳含量和微生物量碳氮都表现出“加和效应”。综上, 相比于禾本科作物秸秆单独还田, 配施豆科绿肥秸秆会大幅提高土壤有机碳矿化量, 同时仍能形成更多来自秸秆的新碳和增加土壤碳库稳定性, 有利于土壤有机碳固持, 且两种秸秆组合的“加和效应”在土壤固碳过程中发挥重要作用。

关键词: 秋豆秸秆; 小麦秸秆; 双指数模型; $\delta^{13}\text{C}$ 技术; 土壤碳分配; 有机碳固持

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)09-1952-09 doi:10.11654/jaes.2018-0070

Effects of the combined amendment of wheat and huai bean straws on soil organic carbon sequestration

ZHU Wen-ling, LI Xiu-shuang, TIAN Xiao-hong*, CHEN Juan, WANG Song

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to investigate the effects of incorporation both wheat and leguminous straws on soil organic carbon (SOC) sequestration in dark loessial soils, incubation experiments were conducted in which the $\delta^{13}\text{C}$ technique combined with the double exponential model was applied, and the C_4 soil which had been used for years of maize cultivation was selected. There were four treatments: addition of no straw (CK), addition of wheat straw (W), addition of huai bean straw (L), addition of both wheat straw and huai bean straw (W+L), and each treatment had 6 replications. The results indicated that the cumulative CO_2 emissions of the soil and the SOC were significantly increased by W+L, L, and W treatments by 5.63, 2.90, 2.60 folds and 22.3%, 10.7%, 12.5%, respectively, relative to the CK. The W+L treatment markedly increased the microbial biomass carbon (MBC) content and microbial entropy (q_{MB}) by 39.5% and 15.6%, respectively, compared to CK. According to the results of the double exponential model, the addition of crop straws increased the recalcitrant organic carbon pool (C_2) and its proportion to the total organic carbon (C_2/SOC) under W+L, L, and W treatments by 2.82, 0.756, 1.98 folds and 2.27, 0.569, 1.64 folds, respectively, compared to CK. In addition, compared with W, the W+L treatment could significantly increase the cumulative CO_2

收稿日期: 2018-01-14 录用日期: 2018-03-12

作者简介: 朱文玲(1992—), 女, 甘肃定西人, 硕士, 主要从事废弃物资源农业循环利用研究。E-mail: zhuwenling09@126.com

*通信作者: 田霄鸿 E-mail: txhong@hotmail.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200308); 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B11)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2016YFD0200308); The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2012BAD14B11)

emissions of the soil, C_2 , C_2/SOC , MBC content, and q_{MB} , the increments being 84.4%, 28.1%, 23.9%, 25.3% and 14.5%, respectively. At the same time, W+L markedly increased the exogenous newly-formed carbon from crop straws (C_{straw}) and its proportion to the total organic carbon (f), and the increases were 86.5 % and 79.8 %, respectively. Additive effects were observed in the soil accumulation mineralization, SOC, and MBN. In conclusion, although the mixed addition of cereal and leguminous straws facilitate the rate and amount of SOC mineralization, larger amounts of C_{straw} are produced by this method compared to mineralization, and the stability of the SOC pool is also increased, which therefore promotes SOC sequestration. The "additive effects" of the two straws play an important role in SOC sequestration.

Keywords: huai bean straw; wheat straw; double exponential model; $\delta^{13}C$ technology; soil carbon distribution; soil organic carbon sequestration

土壤有机碳是土壤肥力水平的重要标志,不仅影响作物产量与农业生产可持续性,其固存对缓解温室气体排放及调节全球气候变化具有重要的生态意义^[1]。作物秸秆作为农田生态系统中土壤有机碳的重要来源之一,其还田措施是增加农田土壤有机碳投入,从而促进土壤碳固持最直接且有效的方式^[2-3]。不同作物秸秆性质不同,还田后其分解过程和土壤的碳源/碳汇性质均有差异^[4-5]。C/N低的豆科秸秆,施入土壤后分解较快,能够促进土壤养分矿化以及提高土壤微生物活性;而C/N高的禾本科秸秆,施入土壤后分解缓慢并且导致土壤养分的固持^[5]。因此,研究不同作物秸秆还田后对土壤有机碳转化与固持特征,无论对农业秸秆的科学管理,还是对土壤培肥机理研究都有重要的指导意义。

渭北旱塬区是我国黄土高原重要的旱作农业区,玉米和小麦是该区的主要粮食作物,但近年来由于忽视农田地力培肥,该区粮田已经普遍出现了土壤肥力降低等问题^[6-7]。冬小麦收获后保留麦茬,于夏休闲期硬茬播种豆科绿肥,而该时期由于高温干旱,麦茬不会马上腐解,待小麦播种前将绿肥与麦茬一起翻压,小麦秸秆和豆科绿肥残体会以混合物的形式共同还田腐解,这是该区粮食生产中通过秸秆还田来提升地力的主要方式。目前,已有大量的国内外研究发现,禾本科作物秸秆还田提高了土壤有机碳及活性碳组分含量^[8],有助于土壤团聚体稳定性提高^[9],而且能改善土壤的生物环境,有利于土壤有机碳的积累和保存^[10];豆科作物残体还田除了能提高土壤有机碳含量之外,还能提高土壤腐殖质含量^[11],改善土壤的结构性能^[12],有固碳潜力。且 Cong 等^[13-14]通过大田和室内培养试验确定,豆科禾本科作物间作比禾本科作物单作体系更有利于土壤有机碳积累,但其对于两种作物残体同时存在条件下的有机碳固持机制并没有进一步的说明。同时有大量报道称,植物残体以混合物的形式出现时,腐解过程中由于“混合分解效应”的存

在,相比于单一残体,混合组分中残体之间的相互作用会影响残体腐解以及土壤有机碳矿化过程^[15-16]。因此,虽然已有大量研究探讨了作物残体归还与土壤有机碳固持关系^[9-13,16],但两种残体配施的土壤固碳机理尚不明确,且大多未将土壤有机碳库中来源于外源作物残体的有机碳和土壤原有的有机碳区分开来。

所以,本研究结合自然 $\delta^{13}C$ 技术以及双指数模型,采用室内模拟培养方法主要探讨了以下两个问题:(1)探究禾本科与豆科秸秆组合和禾本科秸秆单独添加,在土壤有机碳固持方面有何差异;(2)两种秸秆组合以及禾本科秸秆单独添加,外源秸秆碳在土壤有机碳库中的分配上有何不同。本研究以期为豆科与禾本科秸秆配施的土壤固碳机理研究提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试土壤为黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,2016年采自长武农田生态系统国家野外科学观测研究站长期定位试验的传统耕作处理(无秸秆覆盖),该试验地有13年玉米连作历史。供试土壤的基本理化性质为:有机碳和全氮含量分别为 $11.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷和速效氮含量分别为 $18.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $63.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $152.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 为 8.41,土壤 $\delta^{13}C$ 值为 -1.652% 。

供试秸秆均采自陕西省长武县王东村,小麦 (*Triticum aestivum* L.) 秸秆于2016年6月小麦脱粒后随机抽取,秋怀豆 (*Glycine ussuriensis* Regel et Maack) 秸秆于2016年9月在绿肥翻压前采用“S”型多点采样法以整株形式采回,所有秸秆于 60°C 条件下烘干至恒质量,粉碎过 2 mm 筛备用,基本性质见表 1。

1.2 试验设计

试验共设4个处理:(1)对照(不添加秸秆,CK);(2)添加小麦秸秆(添加量为 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土,W);(3)添

表1 添加秸秆的基本性质

Table 1 Basic physico-chemical properties and $\delta^{13}\text{C}$ value of straws

秸秆类型 Straw types	有机碳 Soil organic carbon content/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 Total nitrogen/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碳氮比 C/N	$\delta^{13}\text{C}$ 值 $\delta^{13}\text{C}$ value/%
小麦秸秆 Wheat straw	419.10	3.58	117.07	-2.675
秋豆秸秆 Huai bean straw	443.00	13.67	34.24	-2.609
小麦秋豆组合 Wheat combined with huai bean straw	432.06	9.96	43.38	-2.628

加秋豆秸秆(添加量为 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土, L); (4) 添加小麦秋豆秸秆混合物(秸秆添加量均为 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土, 两种秸秆质量比 1:1, W+L)。各处理重复 6 次。

1.3 培养方法

采取室内模拟恒温 ($25\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) 培养的方法, 培养 80 d, 具体操作如下: 取 400 g 土(以烘干土计), 按处理将秸秆与土壤混匀置于 1 L 培养瓶中(高 15 cm、直径 9 cm 带密闭封盖的塑料圆瓶), 调节土壤含水率为田间持水量的 70%。将装有 20 mL $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液的 50 mL 塑料瓶置于培养瓶中加盖塑料薄膜密封, 收集排放的 CO_2 。在培养的第 1、2、3、5、7、14、21、28、42、80 d, 利用酸碱滴定法测定 CO_2 释放量。每次测定结束后, 更换 NaOH 溶液, 并用称量法补充损失的水分。

1.4 测定指标及方法

土壤有机碳测定: 培养结束后采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定^[17]。

土壤微生物生物量碳、氮(MBC、MBN)测定: 采用氯仿熏蒸浸提法^[18], 于培养结束后, 称取新鲜土壤 25.0 g 用去乙醇氯仿在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 黑暗条件下熏蒸 24 h, 随后除去土壤中多余氯仿, 加 K_2SO_4 浸提、过滤, 过滤液由 Multi N/C 2100/2100S TOC 和连续流动分析仪测定。

土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定: 于培养开始前和培养结束后采取土样, 去除其中残留的植物残体, 风干磨碎过 100 目筛, 用 Finnigan MAT-251 Mass Spectrometer 质谱仪测定。

秸秆 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定: 培养开始前取烘干秸秆若干, 磨碎过 100 目筛, 用 Finnigan MAT-251 Mass Spectrometer 质谱仪测定。

1.5 模型及有关计算

1.5.1 微生物熵的计算^[19]

微生物熵(q_{MB})=土壤微生物生物量碳/土壤总有机碳 $\times 100\%$

1.5.2 双指数模型

选用双指数模型以模拟秸秆腐解过程中土壤有

机碳矿化过程^[20], 模型如下:

$$C_t = C_1 \times (1 - e^{-k_1 t}) + C_2 \times (1 - e^{-k_2 t}) \quad (1)$$

式中: C_t 为培养时间 t (d) 时的累积矿化量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_1 表示土壤活性碳库, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; k_1 表示矿化速率; C_2 表示土壤惰性碳库, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; k_2 表示分解速率; $C_1 + C_2$ 为潜在矿化碳库, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.5.3 不同来源有机碳含量计算

根据培养前后土壤样品及秸秆的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 采用下列公式计算培养结束后土壤中来源于秸秆的有机碳(C_{straw})和土壤原有有机碳(C_{native})的含量^[21]:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{after}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{straw}} \times f + (1-f) \times \delta^{13}\text{C}_{\text{before}} \quad (2)$$

$$C_{\text{straw}} = f \times C_{\text{total}} \quad (3)$$

$$C_{\text{native}} = (1-f) \times C_{\text{total}} \quad (4)$$

式中: $\delta^{13}\text{C}_{\text{straw}}$ 表示秸秆有机碳的 ^{13}C 丰度, %; $\delta^{13}\text{C}_{\text{before}}$ 表示培养前土壤有机碳的 ^{13}C 丰度, %; $\delta^{13}\text{C}_{\text{after}}$ 表示培养结束土壤有机碳的 ^{13}C 丰度, %; f 表示培养结束秸秆碳所占比例, %; C_{total} 表示培养结束土壤有机碳含量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_{straw} 表示培养结束土壤有机碳中来源于秸秆的有机碳量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_{native} 表示培养结束土壤有机碳中原有有机碳量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.6 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行处理和绘图; 使用 SPSS 17.0 软件对数据进行差异显著性检验(LSD法, $\alpha=0.05$)及双指数模型的非线性回归分析。

小麦与秋豆秸秆组合处理的土壤累积矿化量、有机碳含量及土壤微生物碳、氮预测值为小麦秸秆和秋豆秸秆单独添加时的作用之和^[22]。

小麦秸秆作用 = W 处理的实测值 - CK 实测值

秋豆秸秆作用 = L 处理的实测值 - CK 实测值

实测值与预测值的比较采用 t 检验。根据 t 检验结果就可以对小麦秋豆混合分解是否存在相互作用进行判断(5% 水平)^[22]: (1) 若实测值与预测值无明显差异, 则两种秸秆间表现为加和作用; (2) 若实测值与预测值之间出现明显偏差, 则两种秸秆间表现非加和

作用。

2 结果与分析

2.1 小麦秋豆秸秆还田对土壤 CO₂-C 释放的影响

如图 1 所示,不同作物秸秆加入土壤后,CO₂-C 释放速率均在培养的第 2 d 出现高峰,而后随培养时间延长而逐渐下降,并在腐解 21 d 后逐渐趋于稳定。不同秸秆腐解过程中土壤有机碳矿化的变化规律基本一致。

而不同处理之间,在培养试验前期(0~21 d),CO₂-C 释放速率存在明显差异,其中以 W+L 处理最高,其次为 L 和 W 处理,且这 3 个秸秆添加处理的 CO₂-C 释放速率均明显高于 CK;而在培养试验中后期(21~80 d),各处理中 CO₂-C 释放速率均明显下降且趋于稳定,但 W+L 处理仍处于最高,其次为 W 和 L 处理。L 处理在 14 d 前明显高于 W 处理,但在 14 d 之后出现逆转,说明秋豆秸秆相比于小麦秸秆,在加入土壤后,在培养初期腐解更为快速。

从 CO₂-C 累积释放量来看(图 1),培养结束后,与 CK 相比,W、L 及 W+L 处理 CO₂-C 累积释放量均显著提高,提高幅度分别为 2.60、2.90 倍和 5.63 倍;而就 3 个秸秆添加处理而言,CO₂-C 累积释放量依次为 W+L>L>W。可见,无论小麦、秋豆秸秆单独还田及组合还田均明显提高有机碳的矿化量,而秋豆秸秆相比于小麦秸秆在加入土壤后更利于矿化。

2.2 土壤微生物生物量碳、氮含量和微生物熵的变化

如表 2 所示,添加秸秆 3 个处理(W、L、W+L)土壤

微生物量碳含量均高于 CK,其中 W+L>L>W,增加幅度分别为 39.5%、11.8% 和 11.3%。这说明,小麦秸秆和秋豆秸秆无论单独还是以组合的形式添加都能促进土壤微生物活动,进而增加土壤微生物量碳含量,但就提升效果而言,秸秆单独添加处理(W、L)不及秸秆组合添加处理(W+L)。

土壤微生物量碳(MBC)与土壤有机碳(SOC)的比值称为微生物熵(q_{MB}),它充分反映了土壤中活性有机碳所占的比例,从微生物学的角度揭示土壤肥力的差异,可以作为土壤碳动态研究的有效指标。本研究中,添加秸秆对土壤微生物熵的影响表现出不同趋势,其中 W+L 显著提高了微生物量熵(表 2),比 CK 高 15.6%,而 W 和 L 处理虽能提高微生物熵,但其提高幅度不明显。可见,小麦秋豆秸秆组合添加更有利于土

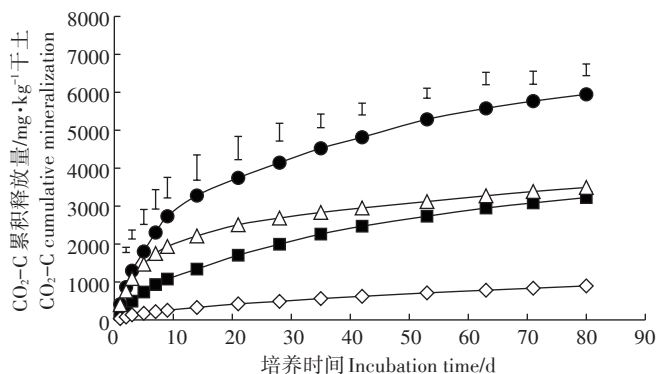
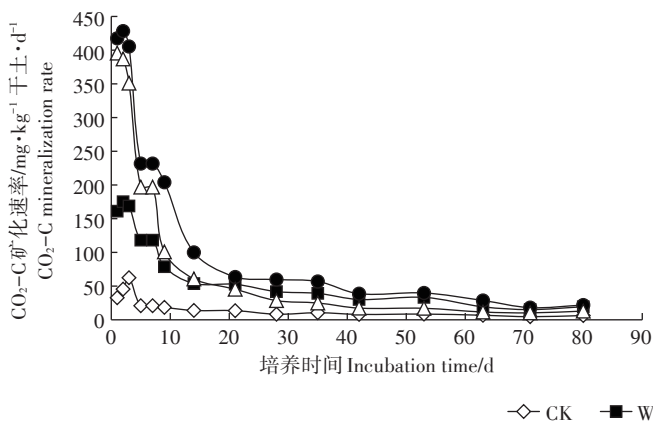
表 2 不同处理对土壤微生物生物量碳、氮和微生物熵的影响
(平均值±标准差)

Table 2 Effects of different treatments on soil microbial biomass carbon, nitrogen and microbial entropy (mean ± SD)

处理 Treatment	微生物量碳 Microbial biomass carbon/mg·kg ⁻¹	微生物量氮 Microbial biomass nitrogen/mg·kg ⁻¹	微生物熵 Microbial entropy/%
CK	123.7±2.36b	5.04±0.086c	1.09±0.047b
W	137.7±1.92b	7.83±0.250b	1.10±0.043b
L	138.3±5.64b	7.76±0.328b	1.15±0.023b
W+L	172.6±2.55a	10.7±0.391a	1.26±0.094a

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters meant significant difference at 0.05 level. The same below.



CK: 不加秸秆;W: 添加小麦秸秆;L: 添加秋豆秸秆;W+L: 小麦和秋豆秸秆组合添加。图中的误差线为添加秸秆各处理间 5% 水平的 LSD 值

CK: no straw; W: wheat straw addition; L: huai bean straw addition; W+L: combined application of wheat and huai bean straws. The bars represented LSD value(5%) between all straw corporation treatments in the figure

图 1 秸秆腐解过程中 CO₂-C 释放速率和累积释放量

Figure 1 CO₂-C emission rate and cumulative efflux from straw decomposition under different treatments

壤微生物对外源有机质的同化,进而加速土壤有机碳向土壤微生物量碳的转化。

对土壤微生物量氮来说,与CK相比,添加秸秆均显著提高了土壤微生物量氮含量。3个秸秆添加处理间相比,小麦秋豆组合添加处理显著高于小麦、秋豆单独添加处理,增幅分别为36.6%和37.9%,也说明了在添加小麦秸秆的基础上配以秋豆秸秆对土壤微生物活动有促进作用。

2.3 秸秆组合分解相互作用

将秸秆组合处理土壤累积矿化量、有机碳含量及土壤微生物碳、氮预测值与实测值进行比较(表3)发现,小麦秋豆组合(W+L)的实测土壤累积矿化量及土壤微生物碳、氮均高于预测值,其中土壤微生物碳含量的实测值显著高于预测值,高出约57.5%,即小麦秸秆和秋豆秸秆混合后在微生物量碳上表现出了明显的协同作用。而土壤累积矿化量、有机碳含量及土壤微生物氮均表现出实测值与期望值的趋势差异不明显(表3),即秸秆组合处理在土壤累积矿化量、有机碳含量及土壤微生物氮上表现为无交互的加和效应。

2.4 土壤有机碳矿化动力学模拟

为进一步研究秸秆腐解过程中土壤有机碳矿化过程,本研究利用二级动力学模型对有机碳矿化数据进行拟合。结果表明(表4),二级动力学模型能很好

地描述有机碳矿化动态($R^2 \geq 0.999$)。

根据模拟结果,土壤潜在矿化碳库(C_1+C_2)达1.41~6.95 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与CK相比,W、L和W+L的潜在矿化碳库分别增加了2.11、2.03倍和3.93倍。3个添加处理中,与W和W+L处理相比,L处理的土壤潜在矿化碳库有所降低,降低幅度分别为2.73%和38.5%。活性碳库(C_1)的变化幅度为0.18~2.24 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,占土壤总有机碳库(SOC)的1.61%~16.3%,秸秆添加处理均提高了土壤活性碳库,其中W+L处理最高,L处理次之,W处理最低。同样,3个秸秆添加处理也提高了土壤惰性碳库(C_2),分别提高了2.82、0.756、1.98倍(W+L、L和W)。从土壤惰性碳库占总有机碳比例(C_2/SOC)来看,添加秸秆处理(W+L、L、W)惰性碳库比例均有所提高,分别比CK高2.27、0.57倍和1.64倍。对土壤惰性碳库矿化速率(k_2),3个秸秆添加处理均高于CK,其中W+L>L>W,且3个秸秆添加处理间相差不大。

由此可见,一方面无论小麦和秋豆秸秆单独添加还是组合添加都能增加土壤潜在矿化碳库,另一方面,3个添加处理均提高了土壤惰性有机碳含量和其在土壤有机碳库中所占比例,有利于有机碳固持,其中以小麦秋豆组合添加提高效果最为明显。

2.5 土壤有机碳中外源新碳含量

由表5可以看出,在 C_3 作物秸秆(小麦、秋豆和小麦+秋豆)添加后, C_4 土壤的总有机碳含量(C_{total})均显著增加,与CK相比,W+L、L和W分别增加了22.3%、10.7%和12.5%。而土壤SOC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均明显降低,说明外源秸秆产生了新的有机碳(C_{straw})并保存在土壤碳库中。通过 ^{13}C 质量守恒定律计算可得,添加秸秆均增加了土壤有机碳中由外源秸秆产生新碳的含量(C_{straw})及其在土壤总有机碳中的比例(f),增加幅度表现为W+L>L>W,与总有机碳表现一致。和单独添

表4 土壤有机碳矿化动力学参数

处理 Treatment	$C_1+C_2/g \cdot kg^{-1}$	$C_1/g \cdot kg^{-1}$	$C_2/g \cdot kg^{-1}$	$(C_2/SOC)/\%$	k_1	k_2	R^2
CK	1.41	0.18	1.23	10.9	0.211	0.010	0.999
W	4.39	0.72	3.67	28.8	0.202	0.016	1.000
L	4.27	2.11	2.16	17.1	0.211	0.017	0.999
W+L	6.95	2.24	4.70	35.7	0.193	0.017	1.000

表3 秸秆组合添加对 CO_2 累积矿化量、土壤有机碳及微生物量碳、氮的混合分解效应分析

Table 3 The litter mixing effect of combined amendment treatments on CO_2 cumulative mineralization, soil organic carbon content, soil microbial biomass carbon and nitrogen

项目 Item	CO_2 累积矿化量 Cumulative $\text{CO}_2\text{-C efflux}/$ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{土}$	土壤有机碳含量 Soil organic carbon content/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	土壤微生物量碳含量 Soil microbial biomass carbon/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	土壤微生物量氮含量 Soil microbial biomass nitrogen/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
预测值 Expected value	4.91±0.035	2.53±0.27	31.1±4.81	5.50±0.49
实测值 Observed value	5.05±0.040 ^{NS}	2.44±0.32 ^{NS}	49.0±2.85 ^{**}	5.65±0.41 ^{NS}

注:表中数据为平均值±SD;NS、**分别表示 t 检验后预测值与实测值之间在5%水平上差异不显著和差异极显著。

Note: Data was shown with mean ± SD. NS and ** represents no significant difference and significant between expected and observed value at 5% levels after the t test.

表5 添加不同秸秆对土壤新碳的影响
Table 5 The effects of different treatments on extraneous new carbon

处理 Treatment	$\delta^{13}\text{C}$ 值 $\delta^{13}\text{C}$ value/%	$C_{\text{total}}/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$f/\%$	$C_{\text{straw}}/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$(1-f)/\%$	$C_{\text{native}}/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
CK	-1.645	11.2±0.101c	0	0	100	11.3
W	-1.753	12.6±0.067b	9.90	1.26	90.1	11.4
L	-1.761	12.4±0.141b	11.4	1.44	88.6	11.2
W+L	-1.826	13.7±0.376a	17.8	2.35	82.2	10.9

加处理(W、L)相比,W+L处理外源秸秆新碳的含量和比例(f)分别增加了86.5%、63.2%和79.8%、56.1%;同时土壤原有有机碳含量(C_{native})及其占土壤有机碳比例($1-f$)则均明显降低,降低幅度表现为W+L>L>W,组合添加处理降低幅度最大(表5)。这说明,无论秸秆单独添加(W、L)还是组合添加(W+L),均会促使土壤碳库中原有有机碳逐渐降低,来自外源秸秆中的新有机碳将逐渐替代土壤原有的碳,且就替代程度而言,W+L>L>W。

3 讨论

3.1 秸秆组合对土壤有机碳矿化和固持的加和效应的影响

植物残体进入土壤后,在土壤微生物作用下发生腐解,通过微生物将残体中的有机物转化成为土壤的组成成分,这是所有植物残体在土壤中均会经历的过程^[14]。不同质量的植物残体混合分解时,较高质量残体可以促进低质量残体的腐解,其中可能的机制有:(1)植物残体间发生了养分及物质迁移,缓和了微生物的养分限制^[23],这个过程中通常伴随着“混合分解效应”;(2)植物残体混合改变了土壤的分解微环境,形成更有利于土壤微生物活动的环境。同时,当残体混合物腐解过程在土壤中发生时,除了与物料本身质量有关外,土壤环境也会影响秸秆的腐解过程^[24]。

Bonanomi等^[23]研究发现,两种质量不同的植物残体以混合物的形式参与腐解时,由于残体间的养分和物质转移,混合物的腐解表现出明显的非加和的协同作用,促进了残体腐解。而本研究中,W+L处理的土壤累积矿化量、有机碳含量和微生物量氮均表现出加和效应(表2),与前人研究结果有所不同。我们推断可能与土壤环境有关,本研究供试土壤的养分环境较适宜,秸秆组合添加后土壤微生物活动未受限制,两种秸秆在腐解过程中无相互作用,所以秸秆组合添加与小麦秸秆单独添加处理在土壤有机碳矿化和固持上的差异主要受“加和效应”影响,即两种秸秆组合后

对土壤有机碳矿化和固持过程的影响等于它们各自单独作用的效果之和^[23],而他们的研究未将残体混合物混入土壤,忽视了土壤本身的养分条件在整个腐解过程中所发挥作用,故而会产生不同的结果。

3.2 土壤有机碳矿化

秸秆进入土壤后,其矿化过程可分为3个阶段,即前期快速矿化,中期逐渐变慢,后期达到相对稳定,这个过程主要受微生物代谢活性的影响,同时秸秆的化学组成也是影响矿化速率的重要因素。秸秆中的有机碳可分为淀粉、葡萄糖等易分解部分和木质素等难分解部分^[25],在培养前期由于大量易分解碳源的加入刺激了土壤微生物的代谢活动,会大幅提高CO₂释放量;而随着培养时间的推进,易分解组分逐渐消耗完毕,CO₂释放量逐渐降低,达到一个相对稳定的阶段。本研究各秸秆添加处理土壤有机碳矿化过程均包含快速矿化、逐渐变慢和后期稳定3个阶段(图1),这一点与前人研究结果是一致的^[25-27]。同时,本研究表明,与W处理相比,W+L处理明显提高了土壤CO₂累积释放量(图1),且显著增加了土壤微生物量碳、氮含量(表2),结合本文对秸秆组合加和效应的分析,我们推测秸秆组合处理显著提高CO₂累积释放量的原因有两方面:一是由于两种秸秆配施之后土壤有机碳矿化过程表现出“加和效应”,而本研究中,组合处理秸秆添加量比其他秸秆单独添加处理高1倍,所以秸秆添加量是影响W+L处理与W、L处理产生差异的重要因素之一。二是W+L处理显著提高了土壤微生物量碳、氮含量,而土壤微生物量碳、氮含量可间接反映土壤微生物活性^[24]。因此我们推测另一个可能原因是W+L处理为土壤微生物提供了更多的碳源和氮源,并且能够更持续地为微生物提供养分,影响了土壤微生物活性和群落多样性^[25-26]并维持了更长的土壤有机碳的快速矿化期^[27-28],进而显著提高CO₂累积释放量。此外,比较培养结束后各秸秆添加处理土壤有机碳含量变化(表5),两种秸秆组合添加高于秸秆单独添加,表明与单一秸秆添加相比W+L处理

更有利于土壤有机碳存储,但由于组合处理有机碳矿化更强烈(图1),增加的有机碳又很快地被矿化损失,因此有机碳增加程度并不明显^[29]。

3.3 土壤有机碳固持

通过动力学模型模拟土壤有机碳矿化过程,研究土壤有机碳分库大小,可为土壤有机碳稳定性及固持能力评价提供科学依据,其中惰性碳库含量越高说明有机碳越稳定,越有利于有机碳固持^[30]。本研究通过双指数模型模拟表明,W+L处理惰性碳库含量及其在土壤有机碳库中所占比例均表现为高于W处理(表4),说明小麦秋豆秸秆组合添加的土壤有机碳库比小麦秸秆单独添加时更稳定,更有利于有机碳固持。同时,已有研究发现^[31-32]禾本科与豆科绿肥轮作体系下,投入两种不同的作物残体时,其有机碳变化过程属于有机碳汇过程,有机碳固持能力优于禾本科单作系统,而且更有利于土壤有机碳积累和土壤培肥。因此,从有机碳稳定性角度评价秸秆添加对土壤有机碳固持的影响,小麦与秋豆秸秆组合添加土壤的有机碳库比小麦秸秆单独添加的更加稳定,土壤有机碳固持能力也更强。

除了运用上述双指数模型模拟土壤有机碳矿化过程,分库研究秸秆添加对土壤有机碳矿化影响之外,试验还运用了 $\delta^{13}\text{C}$ 自然丰度法,将土壤有机碳库中来源于秸秆的碳和土壤原有的碳进行量化和区分。结果表明,经过80 d的模拟培养,秸秆添加处理土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值均表现出下降趋势(表5),这与窦森等^[21]的研究结果一致,其主要原因是先前长期种植 C_4 作物(玉米)的土壤具有较高 $\delta^{13}\text{C}$ 值,施入有较低 $\delta^{13}\text{C}$ 值的 C_3 作物(小麦、秋豆)秸秆后,随着秸秆腐解,来源于 C_3 作物的新形成的有机碳逐渐变为土壤有机碳库的一部分,土壤原有有机碳逐渐被外源秸秆碳所替换,有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现出向 C_3 作物秸秆 $\delta^{13}\text{C}$ 值靠近的趋势^[33]。与W处理相比,W+L处理土壤碳库中外源新碳含量及比例均表现出高于单独添加处理的趋势(表5)。其可能原因是:第一,加和效应的影响。一般而言两种质量不同植物残体共同腐解时由于残体间相互作用会产生不同的混合分解效应,而本研究条件下,由于土壤环境等方面的影响,两种残体腐解时残体间的相互作用并不明显,从而表现出了加和效应。在加和效应的影响下秸秆添加量是影响外源秸秆新碳分配的重要因素,因此在本试验条件下秸秆组合处理中土壤有机碳库中的来源于秸秆的新有机碳高于秸秆单施处理。王志明等^[34]和Jenkinson^[35]也研究

发现,土壤碳库中来源于外源秸秆的新碳含量及比例与秸秆还田量有关,随秸秆还田量的增加,土壤原有有机碳分解速率增加,并且新碳残留量也增加,充分支持了本试验的观点。第二,添加到土壤中的秸秆会为土壤微生物提供生长繁殖的营养基质,这些秸秆经过微生物的“加工”后,以微生物代谢产物或其死亡之后残体的形式分布于土壤碳库之中,作为土壤有机碳库的组成部分^[36]。土壤中的微生物多种多样,不同的微生物群落对营养基质的要求不同,当添加性质不同的秸秆时土壤中微生物的响应机制也必然不同,相应的微生物对秸秆的代谢机制应当存在差异^[37-38],因此可以推断两种秸秆组合添加可能影响了土壤中某些功能微生物的活动和代谢机制,进而影响了外源秸秆新形成有机碳在土壤碳库中的分配,但在这方面还有待进一步研究。

通过双指数模型模拟,可以将土壤有机碳库分为活性碳库和惰性碳库,研究秸秆添加对不同土壤有机碳库的影响,尤其是对惰性碳库的影响,可以为秸秆还田有机碳稳定性及固持能力评价提供科学依据;采用 $\delta^{13}\text{C}$ 自然丰度法,可以将土壤有机碳库中外源秸秆新形成的有机碳和土壤原有有机碳区分开来,有助于从外源新碳在土壤碳库分配的角度分析秸秆对土壤有机碳固持的影响,两种方法各有所长。本研究将双指数模型与 $\delta^{13}\text{C}$ 自然丰度法相结合,研究了小麦、秋豆秸秆单独添加和二者组合添加对土壤固碳过程的影响,发现从土壤有机碳分库的角度来看,两种秸秆组合添加土壤有机碳库中惰性碳库含量和所占比例更高,说明组合条件下有机碳稳定性更好,有机碳固持能力更强;从外源秸秆有机碳在土壤有机碳库分配的角度来看,两种秸秆组合之后土壤有机碳库中有更多的来源于秸秆的有机碳。综合两种方法得出结论,小麦秋豆秸秆组合添加更有利于土壤有机碳固持,其原因是配施使得更多的来源于秸秆的新的有机碳固持在土壤碳库中,同时促进了土壤有机碳库的更新和周转,但要进一步揭示豆科禾本科秸秆配施还田对土壤不同碳库的影响机制,还需要在接下来的研究中探究土壤微生物在其中扮演的角色。

4 结论

通过80 d的培养试验发现,在小麦秸秆还田基础上配施豆科绿肥秋豆秸秆大幅度提高了土壤有机碳矿化量,同时显著增加了土壤有机碳固持量,这是由于配施有效增加了土壤惰性碳库含量及比例,且使得

更多的来源于秸秆的新的有机碳固持在土壤碳库中,并因此促进了土壤有机碳库的更新和周转,且在这个过程中两种秸秆组合的“加和效应”发挥了重要作用。

参考文献:

- [1] 李蓉蓉,王 俊,毛海兰,等. 秸秆覆盖对冬小麦农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 187-192.
LI Rong-rong, WANG Jun, MAO Hai-lan, et al. Effect of straw mulching on soil organic carbon and fractions of soil carbon in a winter wheat field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 187-192.
- [2] Silveira M L, Liu K, Sollenberger L E, et al. Short-term effects of grazing intensity and nitrogen fertilization on soil organic carbon pools under perennial grass pastures in the southeastern USA[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58(2): 42-49.
- [3] 裴鹏刚,张均华,朱练峰,等. 秸秆还田的土壤酶学及微生物学效应研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(18): 1-7.
PEI Peng-gang, ZHANG Jun-hua, ZHU Lian-feng, et al. Research progress of soil enzymology and microbiology effects affected by straw incorporation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(18): 1-7.
- [4] Santo A V D, Marco A D, Fierro A, et al. Factors regulating litter mass loss and lignin degradation in late decomposition stages[J]. *Plant and Soil*, 2009, 318(1/2): 217-228.
- [5] 曾 锋,邱治军,许秀玉. 森林凋落物分解研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 239-243.
ZENG Feng, QIU Zhi-jun, XU Xiu-yu. Review on forest litter decomposition[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(1): 239-243.
- [6] 徐 娜,党廷辉,刘文兆. 黄土高塬沟壑区农田土壤养分与作物产量变化的长期监测[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1240-1248.
XU Na, DANG Ting-hui, LIU Wen-zhao. Soil nutrient balance and crop yields after 10-years' fertilization in the gully area of the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(5): 1240-1248.
- [7] 赵如浪,冯佰利,蒋树怀,等. 黄土高原旱地保护性耕作农田土壤团聚体特性变化研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(4): 74-79.
ZHAO Ru-lang, FENG Bai-li, JIANG Shu-huai, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in dry land of loess plateau[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(4): 74-79.
- [8] 李新华,郭洪海,朱振林,等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 130-135.
LI Xin-hua, GUO Hong-hai, ZHU Zhen-lin, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 130-135.
- [9] 孙汉印,姬 强,王 勇,等. 不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 369-376.
SUN Han-yin, JI Qiang, WANG Yong, et al. The distribution of water-stable aggregate-associated organic carbon and its oxidation stability under different straw returning modes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2): 369-376.
- [10] Li S, Li Y B, Li X S, et al. Effect of straw management on carbon sequestration and grain production in a maize-wheat cropping system in anthrosol of the Guanzhong Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 157(303): 43-51.
- [11] 官会林,郭云周,张云峰,等. 绿肥轮作对植烟土壤酶活性与微生物量碳和有机碳的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2366-2371.
GUAN Hui-lin, GUO Yun-zhou, ZHANG Yun-feng, et al. Effect of green manure rotation soil enzyme activities and soil microbial biomass carbon and soil organic carbon in tobacco field[J]. *Ecology and Environment*, 2010, 19(10): 2366-2371.
- [12] 兰 延,黄国勤,杨滨娟,等. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 146-152.
LAN Yan, HUANG Guo-qin, YANG Bin-juan, et al. Effect of green manure rotation on soil fertility and organic carbon pool[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13): 146-152.
- [13] Cong W F, Hoffland E, Li L, et al. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1715-1726.
- [14] Cong W F, Ruijven J, Mommer L, et al. Plant species richness promotes soil carbon and nitrogen stocks in grasslands without legumes[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 102(5): 1163-1170.
- [15] Handa I T, Aerts R, Berendse F, et al. Consequences of biodiversity loss for litter decomposition across biomes[J]. *Nature*, 2014, 509(7499): 218-221.
- [16] Wu D D, Li T T, Wan S Q. Time and litter species composition affect litter-mixing effects on decomposition rates[J]. *Plant and Soil*, 2013, 371(1/2): 355-366.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2001: 30-34.
- [18] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [19] 张 帆,黄凤球,肖小平,等. 冬季作物对稻田土壤微生物量碳、氮和微生物熵的短期影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 734-739.
ZHANG Fan, HUANG Feng-qiu, XIAO Xiao-ping, et al. Short-term influences of winter crops on microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and C_{mic} -to- C_{org} in a paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 734-739.
- [20] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(6): 1169-1179.
- [21] 窦 森,张晋京, Lichtfouse E, 等. 用 $\delta^{13}C$ 方法研究玉米秸秆分解期间土壤有机质数量动态变化[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 328-334.

- DOU Sen, ZHANG Jin-jing, Lichtfouse E, et al. Study on dynamic change of soil organic matter during corn stalk decomposition by $\delta^{13}\text{C}$ method[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3):328-334.
- [22] 林开敏, 章志琴, 曹光球, 等. 杉木与楠木叶凋落物混合分解及其养分动态[J]. *生态学报*, 2006, 26(8):2732-2738.
- LIN Kai-min, ZHANG Zhi-qin, CAO Guang-qiu, et al. Decomposition characteristics and its nutrient dynamics of leaf litter mixtures of both Chinese fir and *Phoebe bournei*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8):2732-2738.
- [23] Bonanomi G, Capodilupo M, Incerti G, et al. Nitrogen transfer in litter mixture enhances decomposition rate, temperature sensitivity, and C quality changes[J]. *Plant and Soil*, 2014, 381(1/2):307-321.
- [24] Hobbie S E, Eddy W C, Buyarski C R, et al. Response of decomposing litter and its microbial community to multiple forms of nitrogen enrichment[J]. *Ecological Monographs*, 2012, 82(3):389-405.
- [25] Bending G D, Turner M K. Interaction of biochemical quality and particle size of crop residues and its effect on the microbial biomass and nitrogen dynamics following incorporation into soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(3):319-327.
- [26] Gartner T B, Cardon Z G. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter[J]. *Oikos*, 2004, 104(2):230-246.
- [27] 李 涛, 葛晓颖, 何春娥, 等. 豆科秸秆、氮肥配施玉米秸秆还田对秸秆矿化和微生物功能多样性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(12):2377-2384.
- LI Tao, GE Xiao-ying, HE Chun-e, et al. Effects of straw retention with mixing maize straw by alfalfa straw or N fertilizer on carbon and nitrogen mineralization and microbial functional diversity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12):2377-2384.
- [28] Henriksen T M, Breland T A. Nitrogen availability effects on carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities during decomposition of wheat straw in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(8):1121-1134.
- [29] Cong W F, Hoffland E, Li L, et al. Intercropping affects the rate of decomposition of soil organic matter and root litter[J]. *Plant and Soil*, 2015, 391(1/2):399-411.
- [30] Paul E A, Follett R F, Leavitt S W, et al. Radiocarbon dating for determination of soil organic matter pool sizes and dynamics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(4):1058-1067.
- [31] 赵 秋, 高贤彪, 宁晓光, 等. 华北地区春玉米-冬绿肥轮作对碳、氮蓄积和土壤养分以及微生物的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4):1005-1011.
- ZHAO Qiu, GAO Xian-biao, NING Xiao-guang, et al. Effects of spring maize and winter cover crop rotation on accumulation of carbon and nitrogen and soil nutrition and microbe in north China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4):1005-1011.
- [32] 姚致远, 王 峥, 李 婧, 等. 轮作及绿肥不同利用方式对作物产量和土壤肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(8):2329-2336.
- YAO Zhi-yuan, WANG Zheng, LI Jing, et al. Effects of rotations and different green manure utilizations on crop yield and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8):2329-2336.
- [33] An T 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.
- [34] 王志明, 朱培立, 黄东迈, 等. 秸秆碳的田间原位分解和微生物量碳的周转特征[J]. *土壤学报*, 2003, 40(3):446-453.
- WANG Zhi-ming, ZHU Pei-li, HUANG Dong-mai, et al. Straw carbon decomposition in situ in field and characteristics of soil biomass carbon turnover[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3):446-453.
- [35] Jenkinson D S. Studies on the decomposition of plant material in soil VI: The effect of rate of addition[J]. *European Journal of Soil Science*, 1997, 28(3):417-423.
- [36] Li S Y, Gu X, Zhuang J, et al. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility[J]. *Soil Tillage Research*, 2016, 155(2):199-206.
- [37] Blagodatskaya E, Yuyukina T, Blagodatsky S, et al. Turnover of soil organic matter and of microbial biomass under C_3 - C_4 vegetation change: Consideration of ^{13}C fractionation and preferential substrate utilization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(1):159-166.
- [38] Creamer C A, Menezes A B D, Krull E S, et al. Microbial community structure mediates response of soil C decomposition to litter addition and warming[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80:175-188.