

外源新碳在不同肥力土壤中的分配与固定*

谢柠桢 安婷婷 李双异 孙良杰 裴久渤 丁凡 徐英德
付时丰 高晓丹 汪景宽[†]

(沈阳农业大学土地与环境学院土壤肥力研究室, 沈阳 110866)

摘要 外源新碳加入土壤后, 传统技术尚无法区分其与原土壤有机碳的不同。利用¹³C稳定同位素方法, 通过室内培养实验, 探讨玉米秸秆和根茬添加到不同肥力水平土壤后外源新碳在土壤中分配与固定的差异。结果表明: (1) 低肥土壤添加叶28 d后土壤有机碳(SOC)含量高于添加根和茎的; 高肥土壤添加叶在整个培养期间(1~180 d) SOC含量都高于添加根和茎; 两种肥力水平土壤在添加玉米根、茎、叶180 d后SOC含量均接近相等。(2) 玉米根、茎、叶的添加对SOC中外源新碳含量以及残体残留率的影响不同, 28 d前低肥土壤外源新碳含量高于高肥土壤, 28 d后结果与之相反; 低肥土壤在培养28 d后添加根的残留率比添加茎和叶的低, 高肥土壤在培养7 d后添加叶的残留率比添加根和茎的低。以上结果表明, 外源新碳在土壤中的固定受其来源和土壤肥力水平的影响与制约。

关键词 肥力; 玉米秸秆和根茬; $\delta^{13}\text{C}$; 外源新碳

中图分类号 S158.3 **文献标识码** A

碳是土壤有机质的主要组成部分, 作物残体是土壤有机碳的主要来源^[1]。我国秸秆资源丰富, 但作为秸秆还田的比例很小, 绝大部分作为燃料或在田间直接燃烧, 浪费了大量的有机碳资源^[2-3]。不少研究表明, 秸秆还田有利于提高土壤有机质含量, 且随着秸秆不断分解, 土壤中有机碳不断得到补充^[4-6]。Puget和Drinkwater^[7]研究发现, 虽然秸秆施入土壤后能迅速分解, 但根茬可能更有利于短期土壤结构的改善及长期土壤有机质的累积。残体组成成分中各类型化合物所占的相对比例影响其降解速率^[8]。植物根、茎、叶所含的物质各不相同, 其中叶中含有的几乎均是易分解的非木质化物质, 例如糖类和氨基酸等; 茎是相对容易降解的器官, 主要由纤维素和半纤维素组

成; 根为难降解的物质, 含有较多的角质和木质素类物质^[9-10]。然而关于秸秆和根茬添加到不同肥力水平土壤后有机碳分配与固定的差异以及外源新碳(本研究将秸秆来源碳和根茬来源碳统称为“外源新碳”)对土壤有机碳的相对贡献不是很清楚。

传统方法不能区分外源新碳与原土壤来源的有机碳^[11], 而同位素方法可以解决此问题。本研究通过室内培养, 结合¹³C同位素分析技术, 分别将玉米秸秆和根茬加入不同肥力水平的土壤, 旨在探讨秸秆和根茬的加入对土壤有机碳含量的影响以及不同肥力水平土壤外源新碳分配的差异, 以为土壤有机碳的固定和肥力的提高提供理论依据和技术支持^[12]。

* 国家自然科学基金项目(31330011, 41171237)和国家公益性行业(农业)科研专项(201303126)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 31330011 and 41171237) and the National Agro-scientific Research Programs in Public Interest (No. 201303126)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: j-kwang@163.com

作者简介: 谢柠桢(1991—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力与土壤生态研究。E-mail: xieninghui16@163.com

收稿日期: 2015-12-24; 收到改稿日期: 2016-02-29; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-03-18

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤采自沈阳农业大学棕壤长期定位试验站 (41°49'N, 123°34'E)。该站处于大陆季风区, 年均温为8.0℃, 年均降水量为705 mm, 海拔为75 m, 土壤属中厚层棕壤 (筒育淋溶土)。该长期定位试验开始于1987 年春天, 当时土壤有机质含量为15.6g kg⁻¹, 全氮为1.0 g kg⁻¹, 全磷为0.5 g kg⁻¹, 碱解氮为67.4 mg kg⁻¹, 有效磷为8.4 mg kg⁻¹。连作作物为玉米 (当地常用品种)。本试验共选用2个肥力水平土壤, 即低肥 (连续27年未加任何肥料的土壤, LF) 和高肥 (年施有机肥折合

N 270 kg hm⁻², HF) 土壤。施用的有机肥为猪厩肥, 其有机质含量为150 g kg⁻¹左右, 全氮为10 g kg⁻¹左右。2014年11月采集表层0~20 cm 土壤, 轻轻掰碎, 过2 mm筛, 风干后做培养实验。

所用材料为标记有¹³C的玉米植株。2014年5月在沈阳农业大学棕壤长期定位试验站种植玉米 (玉米品种为丹玉606), 用¹³CO₂进行标记。具体标记过程见安婷婷等^[11]。2014年10月收获后, 在105℃杀青30 min, 然后60℃烘干8 h。玉米根、茎、叶分别被剪成2 cm小段, 磨碎, 过40目筛, 保存在密闭干燥的容器中备用。试验所用土壤及标记材料理化性质见表1。

表1 各肥力土壤及¹³C标记玉米植株基本理化性质 (2014年)

Table 1 Basic physico-chemical properties of soils different in fertility and ¹³C labeled maize plant samples (in 2014)

	有机碳 Soil organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	碳氮比 C/N	δ ¹³ C值 δ ¹³ C value (‰)
低肥土壤 (LF) Low fertility soil	10.10	1.10	8.78	-17.88
高肥土壤 (LF) High fertility soil	17.80	2.20	8.08	-19.45
根 Root	400.8	12.55	31.94	393.9
茎 Shoot	440.1	14.45	30.46	696.4
叶 Leaf	420.8	12.70	33.14	662.4

1.2 培养实验

本研究采用恒温培养法分析外源新碳加入后土壤有机碳的变化过程。首先称取相当于120 g烘干土重的风干土样, 并将含水量调节到7%左右, 预培养7 d。培养期间用帕拉膜封口并在膜上扎几个小孔, 既能减缓水分散失又能防止帕拉膜对空气流通产生阻碍^[13-14]。将粉碎的根、茎和叶 (按烘干土质量的1%计算) 分别与预培养土壤充分混匀。然后调节土壤含水量至田间持水量的60%^[15], 25℃下恒温恒湿培养180 d^[16]。同时设不加秸秆和根茬的土样作为对照, 每个处理设3次重复。分别在培养的第1、7、28、56和180天破坏性取样, 然后将土样风干, 用研钵研磨 (过100目筛), 供测土壤有机碳 (SOC) 含量及其δ¹³C值。

1.3 测定分析方法

土壤有机碳含量及其δ¹³C值利用元素分析-稳定同位素比例质谱联用仪 (EA-IRMS, Elementanalysis-Stable100 Isotope Ratio Mass Spectrometer, 德国) 测定。其基本原理和测定过程为: 样品经高温燃烧后 (燃烧管温度为920℃, 还原管温度为600℃), 通过TCD (Thermal conductivity detector) 检测器测定有机碳、氮含量, 剩余气体经CO₂/N₂排出口 (Vent) 通过稀释器进入质谱仪, 在质谱仪上测定δ¹³C值^[11]。

1.4 数据处理

土壤有机碳中外源新碳在SOC中所占比例 (F_{maize}) 的计算公式^[17]:

$$F_{\text{maize}} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{contro10}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{maize0}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{contro10}}) \quad (1)$$

式中, $\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}}$ 代表添加玉米根、茎、叶处理土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, $\delta^{13}\text{C}_{\text{contro10}}$ 代表培养之前不添加秸秆和根茬土壤样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 本研究发现在整个培养时期不加秸秆的对照处理土壤同位素值 (数据未列出) 与培养之前土壤同位素值的误差范围在 $\pm (0.2\% \sim 0.6\%)$ 之间, 所以用培养之前土壤同位素值代替每一个时期对照处理土壤同位素值, $\delta^{13}\text{C}_{\text{maize0}}$ 代表培养之前添加秸秆和根茬的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

土壤有机碳中外源新碳 (C_{maize} , g) 含量的计算公式如下^[18]:

$$C_{\text{maize}} = C_{\text{sample}} \times F_{\text{maize}} \quad (2)$$

式中, C_{sample} (g) 代表土壤总有机碳含量。

秸秆和根茬来源的有机碳残留率 (R_{maize} , %) 公式:

$$R_{\text{maize}} = F_{\text{maize}} \times C_{\text{sample}} \times 100 / C_{\text{maize0}} \quad (3)$$

式中, C_{maize0} (g) 代表玉米秸秆和根茬的含碳量。

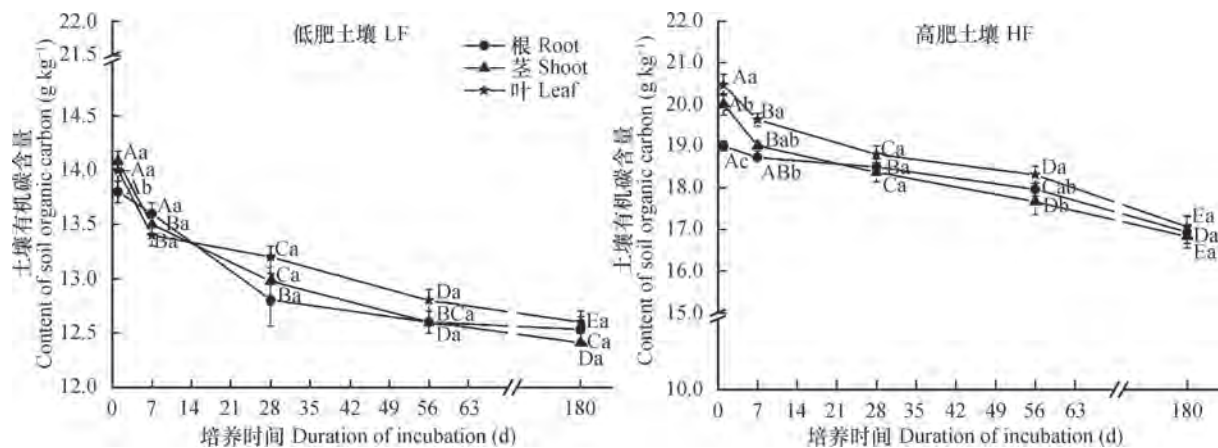
所有数据采用 Microsoft Office Excel 2010 和 Origin 9.1 进行处理和绘图, SPSS 19.0 统计分析软

件对数据进行差异显著性检验 (邓肯法)。

2 结果

2.1 土壤有机碳含量变化

整个培养期间 LF 和 HF 未添加玉米秸秆和根茬的处理 SOC 含量平均值分别为 $10.07 \pm 0.2 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $17.80 \pm 0.5 \text{ g kg}^{-1}$ 。秸秆和根茬的添加使 SOC 含量提高 1.10 倍 ~ 1.29 倍 (图 1)。培养 7 d 后添加叶处理 SOC 含量均大于添加根和茎的处理 ($p < 0.05$), 且 SOC 含量均随时间的延长而降低, HF 处理高于 LF 处理。LF 添加茎和叶后 SOC 含量在培养第 1 ~ 7 天下降了 0.6 g kg^{-1} , 与培养 7 d 后相比变化较快; 添加根的处理在 7 ~ 28 d 下降了 0.2 g kg^{-1} , 与其他时间段相比下降较快 (图 1)。HF 添加茎和叶后在 1 ~ 7 d SOC 含量变化与 LF 一致; 加根处理在第 7 天和第 28 天无显著性差异 ($p > 0.05$), 28 d 后三种处理均下降缓慢 (图 1)。



注: 不同大写字母表示不同时间相同处理土壤有机碳含量差异显著 ($p < 0.05$), 不同小写字母表示同一时间不同处理土壤有机碳含量差异显著 ($p < 0.05$)。下同 Note: Different uppercase letters mean significant differences ($p < 0.05$) in organic carbon content between soils in different incubation duration and the same in treatment; and different lowercase letters mean significant differences ($p < 0.05$) in organic carbon content between soils different in treatments and the same in incubation duration. HF means high fertility soil. LF means low fertility soil. The same below

图1 不同肥力水平添加¹³C标记玉米根、茎、叶后土壤有机碳变化

Fig. 1 Change in total soil organic carbon in the soils different in fertility added with ¹³C-labeled maize root, shoot and leaf

2.2 土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化

在整个培养期间 LF 和 HF 未添加玉米根茎叶 SOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 $-18.49\% \pm 0.31\%$ 和 $-19.45\% \pm 0.15\%$, 变化幅度不大。由图 2 可以看出, 添加秸秆和根茬的两种肥力土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显增加。整个培养期间, LF 添加根、茎

和叶处理 SOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值分别较 HF 高 19.22% 、 41.61% 和 49.87% ; 180 d 时, LF 和 HF 添加根的处理 SOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值接近相等。两种肥力土壤添加玉米植株根、茎、叶的土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值在培养 7 d 之后为茎 > 叶 > 根, 且 $\delta^{13}\text{C}$ 值均在 1 ~ 7 d 下降速度最快。

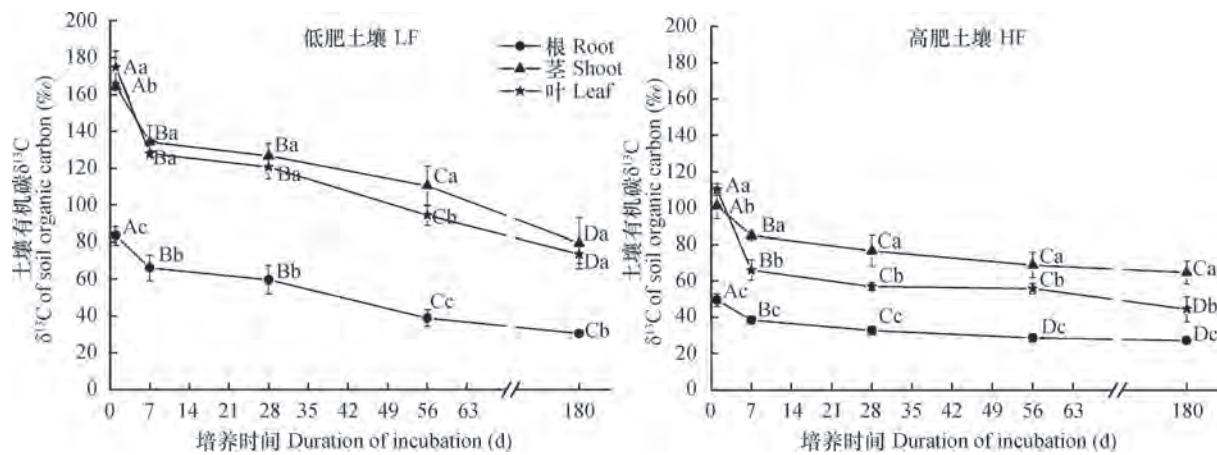


图2 不同肥力水平添加标记玉米根、茎、叶后土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化

Fig. 2 Changes in $\delta^{13}\text{C}$ value of total soil organic carbon in soils different in fertility added with ^{13}C -labeled maize root, shoot and leaf, respectively

2.3 土壤有机碳中外源新碳含量

随着时间的延长, 两种肥力土壤SOC中外源新碳的含量与土壤总有机碳含量变化趋势一致(图3)。在整个培养期间, LF添加根处理外源新碳含量低于添加茎和叶的处理, 而HF添加叶处理外源新碳含量低于添加根和茎的处理。LF添加根、茎、叶后外源新碳含量从第1 d至第180 d下降了

$12\% \pm 1\%$, 而HF下降了 $7\% \pm 1\%$ 。在1~7d时两种肥力外源新碳含量均下降较快, LF添加根、茎和叶的外源新碳含量第7 d较第1天分别减少了4%、3%和6%, HF第7天较第1天分别减少了3%、2%和6%。培养结束时(第180 d), 两种肥力土壤外源新碳含量接近, LF外源新碳含量为 $1.8 \pm 0.1 \text{ g kg}^{-1}$, HF外源新碳含量为 $1.5 \pm 0.1 \text{ g kg}^{-1}$ 。

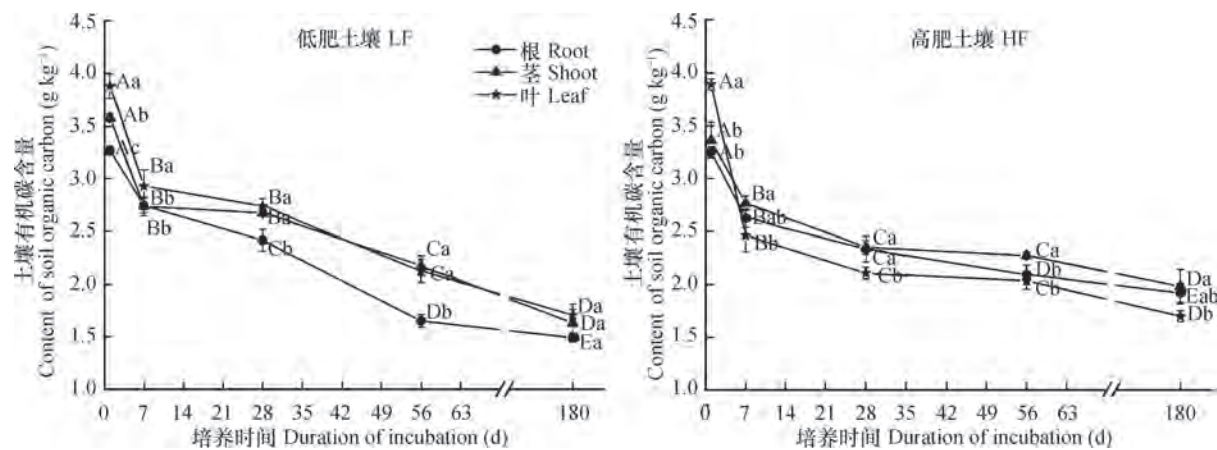


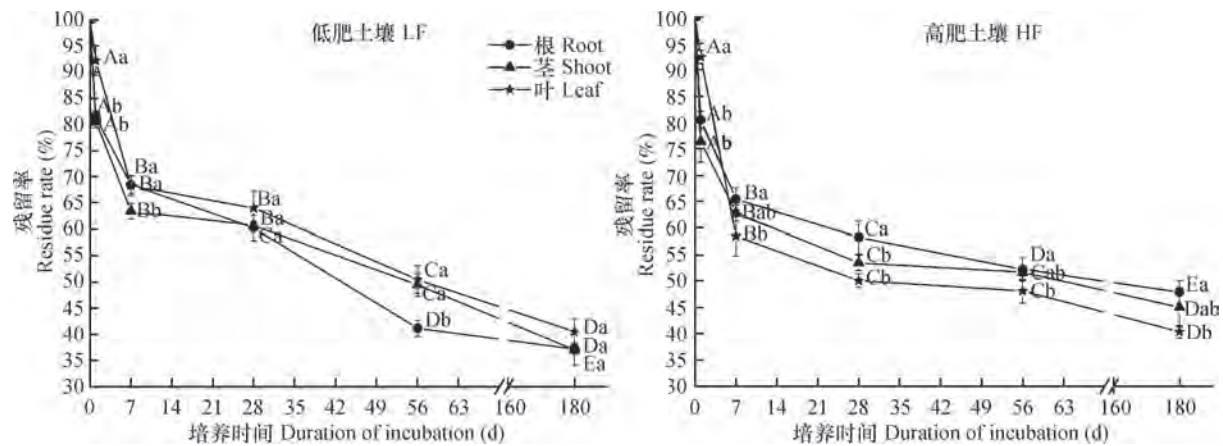
图3 不同肥力水平土壤添加标记玉米根、茎、叶后外源新碳的变化

Fig. 3 Change in extraneous carbon in soils different in fertility added with ^{13}C -labeled maize root, shoot and leaf, respectively

2.4 玉米秸秆和根茬残留率

随着时间的延长, 两种肥力土壤添加玉米根、茎和叶后秸秆和根茬残留率逐渐降低。培养第1天时, LF处理添加根、茎和叶的残留率分别为81.49%、80.76%和92.17%; HF处理分别为

80.49%、76.38%和92.45%。培养180 d时, LF处理添加根、茎和叶的残留率分别为37.20%、37.03%和40.51%; HF处理分别为47.89%、45.00%和40.35%。两种肥力添加根、茎和叶的残留率仍然在1~7d下降最快; 7d后残留率下降趋于缓慢(图4)。

图4 不同肥力水平土壤¹³C标记玉米秸秆和根茬残留率变化Fig. 4 Change in residue rate of ¹³C-labeled maize root, shoot and leaf in soils different in fertility

3 讨论

添加玉米秸秆和根茬后, 两种肥力水平土壤有机碳及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值随时间变化不断降低, 这与Gerzabek等^[19]以及窦森和张晋京^[20]的结果一致。窦森和张晋京^[15]添加12%标记秸秆进行室内培养研究有机质数量动态变化, 发现土壤有机碳及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值在1 h~15 d下降较快, 15 d后下降缓慢。而本研究培养试验仅添加1%的秸秆和根茬, 并且在添加玉米秸秆和根茬之前将土壤预培养了一星期, 这可能是导致土壤有机碳及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值在1~7 d下降较快的原因。本研究在7~15 d期间没有进行取样, 此阶段土壤有机碳及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化趋势不清楚。试验培养初期(7 d之前)添加玉米茎和叶的两种肥力水平土壤有机碳及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降较快, 而添加根处理在培养初期变化相对较缓慢, 这是因为茎和叶中含有易分解的可溶性物质, 例如纤维素、半纤维素和糖类物质, 而根中含有更多的角质和木质素^[21-22], 较难分解。培养期间两种肥力水平土壤添加叶的SOC含量比添加根和茎的高, 可能是因为叶中可溶性物质较多, 分解较快^[23], 微生物可能优先固定。培养结束(180 d)时添加根、茎和叶的SOC含量已经接近相等。尹云峰和蔡祖聪^[24]研究表明所添加秸秆的量影响有机碳的分解快慢, 且Hallam和Bartholomew^[25]研究得到¹⁴C标记玉米和大豆秸秆加入量越多, 其在土壤中的残留亦越大。而本试验所添加秸秆和根茬的用量较少, 随着培养时间的延长, 茎和叶中可溶性组分分解释放, 但是秸秆中仍有一部分物质残留在土壤中,

虽然根中含有更多的木质素较难分解, 但是随着培养时间的延长也逐渐被微生物分解, 所以培养180 d时根、茎和叶贡献给土壤后SOC含量接近相等。Samul等^[22]研究表明, 从长远来看, 根茬碳对土壤的贡献应该较植物其他部位对土壤的贡献更为重要。

培养7 d后, 土壤添加茎处理有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高, 茎中可溶性组分在初期迅速分解, 纤维素和半纤维素含量相对增加^[26]; 随着培养时间的延长, 纤维素和半纤维素也开始分解, 但是其里面一部分化合物选择性保持下来^[15]。低肥土壤添加秸秆和根茬处理土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于高肥土壤处理(在180 d低肥土壤添加根处理除外), 这与吕元春等^[27]结果一致。低肥土壤有机碳含量较低, 新加入的秸秆和根茬进入土壤, 含有¹³C的物质增多, 使¹³C比例增大。高肥土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低是因为高肥土壤中SOC含量较高, 微生物种类较多, 活性较高, 促进了秸秆和根茬的分解。

土壤由于秸秆和根茬的添加, 总有机碳的含量发生变化, 其中SOC中来源于秸秆和根茬的碳即为外源新碳。残茬残留率是秸秆和根茬添加到土壤后, 经过一段时间的分解, SOC中来源于秸秆和根茬的碳量占初始加入土壤的秸秆和根茬碳量的比例。这两个指标都可以用来表征秸秆碳和根茬碳。吕元春等^[27]研究不同土壤类型外源新碳在土壤中的分配, 发现土壤初始有机碳含量越低, 进入土壤中的外源新碳就越多, 而且外源新碳进入的多少与土壤初始有机碳含量有关。这与本研究培养56 d前的结果相似, 低肥力水平土壤初始有机碳含量低于

高肥力水平土壤，而土壤中外源新碳含量却高于高肥。56 d后高肥土壤外源新碳含量高于低肥土壤，这可能与土壤分解过程中氮的供应情况有关^[24]。高肥土壤添加根的处理外源新碳含量高于添加茎和叶的处理，这与王旭东等^[26]研究不同肥力条件下玉米秸秆腐解变化结果相一致，腐解一段时间后，在高肥力土壤中半纤维素、纤维素矿化分解的多，而木质素分解的较少，所以根在土壤中残留率高于茎和叶。低肥土壤添加根处理外源新碳含量低于茎和叶的，这与王旭东等^[26]的研究结果不一致。其中李世朋等^[28]和汪景宽等^[29]研究表明不同肥力土壤微生物种群和生物多样性存在较大的差异，这可能是导致不同肥力土壤茎、叶和根分解的差异，其原因有待进一步研究。180 d时，低肥土壤添加根、茎和叶的秸秆和残茬的残留率接近相等，所添加的秸秆和残茬进入土壤量趋于稳定，被微生物固定，从而提高有机碳含量，而高肥土壤添加秸秆和根茬的残留率之间还存在一定差异，需要通过更长时间的培养进一步探讨。

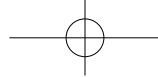
4 结 论

秸秆还田是农业土壤有机碳增加的主要措施。整个培养时期（180 d）不同肥力土壤添加根后外源新碳的含量下降了 $1.33 \sim 1.78 \text{ g kg}^{-1}$ ，添加叶的外源新碳含量下降了 2.19 g kg^{-1} ，添加根的外源新碳含量变化较添加茎和叶的缓慢。培养一个月内（28 d），与高肥土壤相比，低肥土壤外源新碳的含量增加了 $0.12 \sim 0.63 \text{ g kg}^{-1}$ 。外源新碳在土壤中的固定受其来源和土壤肥力水平的影响和制约。本研究仅对短期（180 d）外源新碳在不同肥力水平土壤固定的差异进行了研究，而关于不同肥力水平土壤对外源新碳的长期影响仍需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 暴春平, 郭岩彬, 孟凡乔, 等. ^{13}C 标记玉米秸秆分解过程中有机碳变化规律研究//第四届全国农业环境科学学术研讨会论文集. 2011: 651—660
Bao C P, Guo Y B, Meng F Q, et al. Organic carbon change during decomposition of ^{13}C labeled maize straw (In Chinese) //The conference essay of the 4th agriculture environment science. 2011: 651—660
- [2] 闫贵龙, 曹春梅, 孟庆祥, 等. 玉米秸秆不同部位主要化学成分和活体外消化率比较. 中国农业大学学报, 2006, 11 (3) : 70—74
Yan G L, Cao C M, Meng Q X, et al. Comparison of main chemical composition and in vitro digestibility in various sections of corn stalks (In Chinese) . Journal of China Agricultural University, 2006, 11 (3) : 70—74
- [3] 朱姝, 窦森, 关松, 等. 秸秆深还对土壤团聚体中胡敏素结构特征的影响. 土壤学报, 2016, 53 (1) : 127—136
Zhu S, Dou S, Guan S, et al. Effect of deep application of straw on composition of humin in soil aggregates (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (1) : 127—136
- [4] 周敏, 陈华林, 唐东民, 等. 秸秆施用后土壤溶解性有机质的动态变化. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (4) : 678—684
Zhou M, Chen H L, Tang D M, et al. Dynamic changes of dissolved organic matter in the soils amended with rice straw (In Chinese) . Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14 (4) : 678—684
- [5] Jawson M D, Elliott L F. Carbon and nitrogen transformation during wheat straw and root decomposition. Soil Biology & Biochemistry, 1986, 18 (1) : 15—22
- [6] Sariyildiz T, Anderson J M. Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: A laboratory study. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35: 391—399
- [7] Puget P, Drinkwater L E. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65 (3) : 771—779
- [8] Rubino M, Lubritto C, Contrufo M F, et al. An isotopic method for testing the influence of leaf quality on carbon fluxes during decomposition. Oecologia, 2007, 154 (1) : 155—166
- [9] 孙波, 廖红, 苏彦华, 等. 土壤-根系-微生物系统中影响氮磷利用的一些关键协同机制的研究进展. 土壤, 2015, 47 (2) : 2102—219
Sun B, Liao H, Su Y H, et al. Advances in key coordinative mechanisms in soil-root-microbe systems to affect nitrogen and phosphorus utilization (In Chinese) . Soils, 2015, 47 (2) : 210—219
- [10] Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology. New York: Springer, 2002
- [11] 安婷婷, 李双异, 汪景宽, 等. 用 ^{13}C 脉冲标记方法研究施肥与地膜覆盖对玉米光合碳分配的影响. 土壤学报, 2013, 50 (5) : 948—955
An T T, Li S Y, Wang J K, et al. Effect of fertilization and plastic film mulching on distribution of photo

- synthetically fixed carbon in maize: Explored with ^{13}C pulse labeling technique (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (5): 948—955
- [12] 李忠佩, 刘明, 江春玉. 红壤典型区土壤中有有机质的分解、积累与分布特征研究进展. *土壤*, 2015, 47 (2): 220—228
Li Z P, Liu M, Jiang C Y. Decomposition, accumulation and distribution of soil organic matter in typical red soil region of China (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (2): 220—228
- [13] Wang H, Boutton T W, Xu W, et al. Quality of fresh organic matter affects priming of soil organic matter substrate utilization patterns of microbes. *Scientific Reports*, 2015, Article number: 10102
- [14] Wang H, Xu W, Hu G, et al. The priming effect of soluble carbon inputs in organic and mineral soils from a temperate forest. *Oecologia*, 2015, 178 (4): 1239—1250
- [15] 窦森, 张晋京. 用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究玉米秸秆分解期间土壤有机质数量动态变化. *土壤学报*, 2003, 40 (3): 328—334
Dou S, Zhang J J. Study on dynamic change of soil organic matter during corn stalk decomposition by $\delta^{13}\text{C}$ method (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (3): 328—334
- [16] 赵伟, 梁斌, 周建斌. 施入 ^{15}N 标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用. *土壤学报*, 2015, 52 (3): 587—596
Zhao W, Liang B, Zhou J B. Residual of applied ^{15}N in soils under long-term different patterns of fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (3): 587—596
- [17] de Troyer L, Amery F, Merckx R. Tracing the source and fate of dissolved organic matter in soil after incorporation of ^{13}C labelled residue: A batch incubation study. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43 (3): 513—519
- [18] Bland A, Lerch T Z, Brauman A. Dynamics of bacterial communities in relation to soil aggregate formation during the decomposition of ^{13}C -labelled rice straw. *Applied Soil Ecology*, 2012, 53 (1): 1—9
- [19] Gerzabek M H, Haberhauer G, Kirchmann H. Soil organic matter pools and carbon-13 natural abundances in particle-size fractions of a long-term agricultural field experiment receiving organic amendments. *Soil Science Society of American Journal*, 2001, 65 (2): 352—358
- [20] 窦森, 张晋京. 长期施肥对土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响的初步研究//首届全国农业环境科学学术研讨会论文集. 2005: 279—284
Dou S, Zhang J J. An preliminary study of long-term fertilization impact on $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic matter (In Chinese) //The Conference Essay of the 1st Agriculture Environment Science. 2005: 279—284
- [21] Joyce S C, Myrna J S, Andre J S. Comparison of soil organic matter composition after incubation with maize leaves, roots, and stems. *Geoderma*, 2013, 192 (1): 86—96
- [22] Samul A, Sylvie R, Victor R, et al. Mine realisation of C and N from root, stem and leaf residues in soil and role of their biochemical quality. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 42 (2): 119—128
- [23] Kammer A, Hagedorn F. Mineralization, leaching and stabilization of ^{13}C -labelled leaf and twig litter in a beach forest soil. *Biogeosciences*, 2011, 8 (8): 2195—2208
- [24] 尹云峰, 蔡祖聪. 利用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究添加玉米秸秆下红壤总有机碳和重组有机碳的分解速率. *土壤学报*, 2007, 44 (6): 1022—1027
Yin Y F, Cai Z C. Decomposition rates of organic in whole soil and heavy fraction of red soil incorporated with maize stalks using carbon ^{13}C natural abundance (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (6): 1022—1027
- [25] Hallam M J, Bartholomew W V. Influence of rate of plant residue addition in accelerating the decomposition of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 1953, 17 (4): 365—368
- [26] 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. *农业工程学报*, 2009, 25 (10): 252—257
Wang X D, Chen X N, Wang C X, et al. Decomposition of corn stalk in cropland with different fertility (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25 (10): 252—257
- [27] 吕元春, 薛丽佳, 尹云峰, 等. 外源新碳在不同类型土壤团聚体中的分配规律. *土壤学报*, 2013, 50 (3): 534—539
Lv Y C, Xue L J, Yin Y F, et al. Distribution of fresh carbon in aggregate fractions on different soil types (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (3): 534—539
- [28] 李世朋, 蔡祖聪, 汪景宽, 等. 长期定位施肥与地膜覆盖对土壤肥力和生物学性质的影响. *生态学报*, 2009, 29 (5): 2489—2498
Li S P, Cai Z C, Wang J K, et al. Effects of long-term fertilization and plastic film covering on some soil fertility and microbial properties (In Chinese). *Acta*



- Ecologica Sinica, 2009, 29 (5) : 2489—2498
- [29] 汪景宽, 李丛, 于树, 等. 不同肥力棕壤溶解性有机碳、氮生物降解特性. 生态学报, 2008, 28 (12) : 6165—6171

Wang J K, Li C, Yu S, et al. The biodegradation of dissolved organic carbon and nitrogen in brown earth with different fertility levels (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (12) : 6165—6171

Distribution and Sequestration of Exogenous New Carbon in Soils Different in Fertility

XIE Ninghui AN Tingting LI Shuangyi SUN Liangjie PEI Jiubo DING Fan XU Yingde
FU Shifeng GAO Xiaodan WANG Jingkuan[†]

(Research Laboratory of Soil Fertility, College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University,
Shenyang 110866, China)

Abstract 【Objective】 Carbon (C) is a major component of soil organic matter, and crop residues are the main source of soil organic C (SOC) . A large volume of studies have demonstrated that straw incorporation into the field is conducive to accumulation of soil organic matter and build-up of soil fertility. However, it is still not yet very clear how incorporation of corn stalk and stubble affects distribution and fixation of SOC in soils different in fertility, and how much extraneous new C contribute relatively to SOC. Once extraneous new carbon is amended into soil, it is very hard for researchers to distinguish new carbon from native organic carbon in the soil with traditional techniques. Therefore the stable isotope labeling technique is applied to an in-lab incubation experiment to explore for differences between soils different in fertility in distribution and fixation of extraneous new carbon after incorporation of corn stalk and stubble. 【Method】 Soil samples were collected from the topsoil layers (0 ~ 20 cm) of two fields different in soil fertility, LF and HF in the long-term experimental station of the Shenyang Agricultural University, Liaoning Province, China, in November 2014. The field LF had never been applied with any fertilizer for 27 years, while the field HF had been applied annually with fertilizer equaling to N 270 kg hm⁻². The soil samples were crushed gently into bits to pass through a 2 mm sieve and then air-dried to get ready for the incubation experiment. The ¹³C labeled maize leaf, stalk and root were cut into 2 cm sections, crushed to pass a 40 mesh sieve and mixed at a rate of 1% of the dried soil sample in weight separately with the prepared soil samples that had already been incubated for 7 days as pre-treatment. The mixtures were regulated in moisture content till 60% of field water holding capacity and then put into an incubator for incubation under a constant temperature (25℃) for 180 days. Each treatment had three replicates. During the period of incubation, the mixtures were sampled destructively on D1, D7, D28, D56 and D180 for analysis. 【Result】 Results show that (1) SOC content was found higher in the LF soils amended with maize leaf than in those amended with maize root and stalk after 28 days of incubation, while it was found higher too in the HF soils amended with maize throughout the whole incubation period; and after 180 days of incubation, the two groups of soils were quite similar in SOC content regardless of type of amendment; (2) the effects of the amendments of maize root, stalk and leaf on content of extraneous new C and residual rate of the substances varied sharply. The content of extraneous new C was found higher during the initial period of the incubation (before D28) in the low fertility soil than in the high fertility soil, while during the later half, an opposite trend was found. The residual rate of root residue was found lower than that of stalk or leaf residue in the low fertility soil during the



later half period, while the residual rate of leaf was found lower than that of root or stalk residue in the high fertility soil. 【Conclusion】 All the above-described findings indicate that the sequestration of extraneous new C was governed by its source and soil fertility level.

Key words Fertility; Corn stalk and stubble; $\delta^{13}\text{C}$ value; Extraneous new carbon

(责任编辑: 陈荣府)