

DOI: 10.11766/trxb202203030009

吴怡慧, 王鸿飞, 张瑞, 安晶, 张玉玲, 虞娜, 邹洪涛. 稻秆碳氮在黑土种稻土壤颗粒有机质中的分配特征[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1430–1441.

WU Yihui, WANG Hongfei, ZHANG Rui, AN Jing, ZHANG Yuling, YU Na, ZOU Hongtao. Incorporation of Carbon and Nitrogen from Rice Straw into Particulate Organic Matter in Black Soil with Rice Planting[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1430–1441.

## 稻秆碳氮在黑土种稻土壤颗粒有机质中的分配特征\*

吴怡慧, 王鸿飞, 张瑞, 安晶, 张玉玲<sup>†</sup>, 虞娜, 邹洪涛

(沈阳农业大学土地与环境学院, 农业农村部东北耕地保育重点实验室, 土肥资源高效利用国家工程研究中心, 沈阳 110866)

**摘要:** 颗粒有机质是土壤活性有机质的重要组成部分, 是评估土壤有机质变化的敏感指标。东北地区气候寒冷, 稻田土壤淹水期短, 非淹水期长且多处于冻结状态, 水稻秸秆碳氮在黑土不同种稻年限土壤颗粒有机质中的分配如何尚不清楚。通过室内培养试验, 将 1% 双标记 ( $^{13}\text{C}/^{15}\text{N}$ ) 水稻秸秆添加到不同种稻年限 (0、12、35、62 和 85 a) 土壤, 淹水培养 150 d (培养温度 20 °C, 淹水层 1 cm), 去除淹水层后冻结培养 150 d (培养温度 -15 °C, 饱和水分状态), 研究水稻秸秆碳 (氮) 在不同种稻年限土壤颗粒有机碳 (Particulate organic carbon, POC) 和颗粒有机氮 (Particulate organic nitrogen, PON) 中的分配特征。结果表明, 在培养过程中, 未添加和添加水稻秸秆处理, 各年限稻田土壤 POC 和 PON 含量均低于对照土壤 (0 a), 添加秸秆处理的各年限土壤 POC 和 PON 含量在淹水培养 5 d 时明显增加, 但其后并未表现出一致的增加趋势。秸秆碳 (氮) 对各年限土壤 POC (PON) 的相对贡献率为 0.2% ~ 13.9% (0.4% ~ 3.8%), 分配进入到各年限土壤 POC (PON) 中的比率为 0.7% ~ 13.8% (1.4% ~ 9.9%); 经随后 150 d 冻结后, 秸秆碳分配进入到 0 a 和 12 a 土壤 POC 和 PON 中的比率明显下降, 秸秆氮分配进入到 0 a 和 85 a 土壤 PON 中的比率明显下降, 而分配进入到其他年限土壤 POC (PON) 中的比率仍有增加。秸秆碳在土壤 POC 中的分配比率与土壤有机碳、全氮和碱解氮含量呈显著负相关, 与土壤 C/N、有效磷和微生物生物量碳含量呈显著正相关, 秸秆氮在土壤 PON 中的分配比率与土壤有机碳含量呈显著负相关。研究表明东北典型黑土开垦种稻年限越长, 土壤有机碳、全氮和碱解氮含量相对较低, 而土壤 C/N、有效磷和微生物生物量碳含量相对较高, 秸秆碳氮在土壤颗粒有机质中的分配比率越大, 土壤颗粒有机质对水稻秸秆添加的响应越为敏感。

**关键词:** 双标记 ( $^{13}\text{C}/^{15}\text{N}$ ) 水稻秸秆; 颗粒有机碳 (氮); 稻田土壤; 黑土

中图分类号: S158.5 文献标志码: A

## Incorporation of Carbon and Nitrogen from Rice Straw into Particulate Organic Matter in Black Soil with Rice Planting

WU Yihui, WANG Hongfei, ZHANG Rui, AN Jing, ZHANG Yuling<sup>†</sup>, YU Na, ZOU Hongtao

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University / Key Laboratory of Northeast Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang)

\* 国家重点研发计划项目 (2017YFD0300707-A04) 和国家自然科学基金项目 (41571280、41101276、41907005) 共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program (No. 2017YFD0300707-A04) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41571280, 41101276, 41907005)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangyuling@syau.edu.cn

作者简介: 吴怡慧 (1996—), 女, 黑龙江大连池市人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良与土壤培肥方面研究。E-mail: 694241004@qq.com

收稿日期: 2022-03-03; 收到修改稿日期: 2022-06-10; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-08-29

110866, China)

**Abstract:** 【 Objective 】 Particulate organic matter is an important component of soil labile organic matter and a sensitive index to evaluate a change of the soil organic matter. The climate in Northeast China is very cold, so, paddy fields therein have a short flooding period and a long non-flooding period since the soil is frozen for most of the time. However, little research has been carried out on the incorporation of exogenous rice straw carbon (C) and nitrogen (N) into particulate organic matter in black soil with different rice planting years. 【 Methods 】 A 300-day incubation experiment was conducted, in which dual-isotope-labeled ( $^{13}\text{C}/^{15}\text{N}$ ) rice straw was added to a cultivation chronosequence of paddy soils ranging from 0 to 85 years (0 a, 12 a, 35 a, 62 a and 85 a). Flooding incubation experiments were conducted at a temperature of 20 °C and a 1 cm water-flooded layer in a laboratory for 150 days while the freezing incubation experiments were also carried out for 150 days under a soil temperature of -15 °C and water-saturated. 【 Result 】 Throughout the entire incubation period, the contents of particulate organic carbon (POC) and particulate organic nitrogen (PON) in all paddy soils from the samples with and without rice straw were lower than that in the control soil (0 a). The contents of POC and PON in all soils from the samples with rice straw increased after 5 days of flooding incubation, but they did not show a consistently increasing trend in the subsequent incubation period. For paddy soils of different rice planting years, the relative contribution of the added rice straw C (N) to POC (PON) was 0.2%–13.9% (0.4%–3.8%), 0.7%–13.8% (1.4%–9.9%). At the end of freezing incubation, incorporation of the rice straw C into POC in control soil (0 a) and 12-year paddy soil (12 a) decreased significantly compared with that at the end of flooding incubation. Also, the added rice straw N into PON in control soil (0 a) and 85-years paddy soil (85 a) decreased while the added rice straw C (N) into POC (PON) in other rice cultivating years was still increasing. The incorporation of the added rice straw C into POC was significantly negatively correlated with soil organic C, total N and alkaline N, and significantly positively correlated with soil C/N, available phosphorus and microbial biomass C. In addition, the incorporation of straw N into soil PON showed a significant negative correlation with soil organic C content. 【 Conclusion 】 The study showed that the longer the years of rice planting in a typical black soil of northeast China, the contents of soil organic C, total N and alkaline N were relatively low, while the soil C/N, available phosphorus and microbial biomass C contents were relatively high. The greater the incorporation of straw C and N into soil particulate organic matter, the more the response of soil particulate organic matter to rice straw addition.

**Key words:** Double labeled ( $^{13}\text{C}/^{15}\text{N}$ ) rice straw; Particulate organic carbon (nitrogen); Paddy soil; Black soil

我国水稻种植面积大，稻田面积约占世界稻田面积的 20%<sup>[1]</sup>，水稻生产中产生大量水稻秸秆<sup>[2]</sup>。秸秆还田不仅可以解决秸秆焚烧造成的环境污染问题，而且也是提升土壤肥力的重要农业措施<sup>[3]</sup>。我国东北地区黑土自然肥力高，有机质含量丰富、结构良好且适于耕作，开垦种稻是黑土主要利用方式之一<sup>[4]</sup>。土壤活性有机质周转时间短，能够快速响应土壤管理措施及环境条件的变化<sup>[5-6]</sup>。颗粒有机质 (Particulate organic matter, POM) 是土壤活性有机质的重要组成部分，能够在土壤中快速周转，受土地利用变化<sup>[7-8]</sup>和种稻年限<sup>[9-11]</sup>影响较大，是评估表层土壤有机质变化的敏感性指标<sup>[12]</sup>，也是评估农业生态系统复原力的主要土壤质量指标<sup>[13]</sup>。长期植稻年限序列水稻土 POM 含量随水稻种植年限增加而减少<sup>[9]</sup>。本课题组前期研究发现，旱地 (种植大豆)

改种稻田后土壤 POM 含量随水稻种植年限延长呈先下降后增加趋势，POM 含量与土壤有机质含量呈显著正相关<sup>[10]</sup>，但自然黑土开垦种稻 85 年间土壤粗颗粒有机质则呈先增加后逐渐下降趋势，粗颗粒有机碳含量下降是导致长期种稻土壤有机碳含量下降的主要原因<sup>[11]</sup>。土壤中 > 1 mm 水稳定性团聚体与颗粒有机碳 (Particulate organic carbon, POC) 含量呈正相关<sup>[14]</sup>。黑土开垦种稻后土壤环境发生明显变化，种稻年限对土壤性质及养分状况产生较大影响<sup>[11, 15]</sup>，在种稻 12~85 年间，土壤有机碳含量和粗颗粒有机碳含量均呈显著下降趋势<sup>[11]</sup>。因此，开展秸秆碳氮在黑土不同种稻年限土壤 POM 中分配的研究，对于我国黑土有机质提升和秸秆合理利用具有重要科学意义。

秸秆还田条件下，秸秆经过腐解形成的有机化

合物能够与土壤颗粒 (>0.053 mm) 紧密地胶结, 不仅可以提高土壤有机质含量<sup>[16-17]</sup>, 也可以提高土壤 POM 含量<sup>[18]</sup>。长期定位秸秆还田有利于土壤有机碳及其组分含量的增加, 其中水溶性有机碳和 POC 含量增加最为明显<sup>[19-20]</sup>。土壤大团聚体中有机碳的积累与高生物量碳的输入相关, 进而导致 5~20 cm 表层土壤 POC 储量更高<sup>[21]</sup>, 土壤表面作物残茬归还也可促进土壤 8~19 mm 大团聚体中 POC 含量增加<sup>[22]</sup>。Su 等<sup>[18]</sup>将 <sup>13</sup>C 标记小麦秸秆添加到小麦收获后土壤进行室内好氧培养 180 d, 结果发现约有 19.82% 的秸秆碳转化为土壤 POC。尤锦伟等<sup>[23]</sup>研究表明水稻秸秆还田能够显著提高土壤微生物活性, 进而提高土壤 POC 含量, 在水稻不同生长期土壤 POC 含量增幅 8.5%~30.9%。Yan 等<sup>[3]</sup>对东北地区 10 年定位水稻秸秆还田试验的研究发现, 低量秸秆还田与高量秸秆还田较秸秆不还田相比土壤 POC 含量分别显著增加 69.3% 和 107.3%。我国东北黑土区气候寒冷, 稻田土壤休耕期长, 水稻生长期短。在这一特殊气候条件下, 不同水稻种植年限土壤 POM 对水稻秸秆添加的响应如何目前尚不完全清楚。研究以典型黑土不同种稻年限土壤为研究对象, 利用双标记 (<sup>13</sup>C/<sup>15</sup>N) 水稻秸秆示踪技术, 探讨水稻秸秆碳氮在黑土不同种稻年限土壤 POC 和颗粒有机氮 (Particulate organic nitrogen, PON) 中的分配特征, 以期为黑土稻田土壤有机碳 (氮) 转化与循环及稻田土壤肥力培育与水稻秸秆合理利用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤

供试土壤样品采自于黑龙江省绥化市庆安县勤劳镇张家炉村。研究区域土壤为典型黑土, 黄土性沉积物发育而成, 分布于漫岗丘陵区。

于 2015 年 10 月对研究区域进行详细的实地田间调查, 确定并选取以自然草甸植被为主的未开垦黑土 (0 a, 作为对照土壤) 及其开垦种稻年限分别 12、35、62 和 85 a 水稻田块作为研究土壤样本采集区域, 其中开垦种稻 12、35、62 和 85 a 水稻田分别自 2003 年、1980 年、1953 年和 1930 年以来, 连续种植水稻。对照土壤和不同种稻年限土壤采样区域的坡度 (小于 3°)、气候和地形条件几乎一致,

各年限水稻田块均不施有机肥, 地上部秸秆均不还田, 每年化学肥料 (氮、磷、钾肥) 施用量大致相同, 但各年限间化学肥料的品种、用量存在一定差异, 水分管理措施大致相同<sup>[15]</sup>。供试水稻田块的水稻种植为一年一熟制, 水稻产量平均范围为 9 000~10 000 kg·hm<sup>-2</sup>。不同种稻年限土壤样本采集区域距离较近, 其地理坐标范围为 47.026°~47.033°N、127.466°~127.479°E。

2015 年 10 月水稻收获后进行土壤样本采集, 在各年限采样区内选取面积大约相同 (0.13~0.20 hm<sup>2</sup>) 的 3 个采样单元, 作为 3 次采样重复; 采样深度 0~20 cm, 各采样单元通过“S”形布设 5~7 采样点, 均匀混合为一个重复样本。剔除水稻根系和杂物、鲜土样和自然风干密封保存备用。同时环刀法采集土壤样本进行土壤容重测定, 3 次重复。

### 1.2 供试秸秆

通过 <sup>13</sup>C 脉冲标记技术 (以 <sup>13</sup>C 丰度为 97% 的 Na<sub>2</sub><sup>13</sup>CO<sub>3</sub> 脉冲标记 6 次) 和 <sup>15</sup>N 示踪标记技术 (以 <sup>15</sup>N 丰度为 10.5% 的 (<sup>15</sup>NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 分底肥、分蘖肥和穗粒肥均匀喷施) <sup>[24-25]</sup>, 获得水稻收获时双标记 (<sup>13</sup>C/<sup>15</sup>N) 秸秆。供试双标记 (<sup>13</sup>C/<sup>15</sup>N) 水稻秸秆的有机碳和 δ<sup>13</sup>C 分别为 419.3 g·kg<sup>-1</sup> 和 433.5‰、全氮和 δ<sup>15</sup>N 分别为 9.2 g·kg<sup>-1</sup> 和 17 008.2‰。

### 1.3 试验设计

2020 年 10 月至 2021 年 10 月进行室内培养试验。5 个年限供试土壤均设不添加水稻秸秆处理 (CK) 和添加 1% 双标记 (<sup>13</sup>C/<sup>15</sup>N) 水稻秸秆处理 (S), 共计 10 个处理, 分别记为 CK<sub>0</sub>、CK<sub>12</sub>、CK<sub>35</sub>、CK<sub>62</sub>、CK<sub>85</sub>、S<sub>0</sub>、S<sub>12</sub>、S<sub>35</sub>、S<sub>62</sub>、S<sub>85</sub>, 各处理 18 个重复。培养试验首先进行淹水过程培养 150 d, 土壤温度和水分条件分别设置为 20 °C、1 cm 淹水层; 随后去除淹水层进行冻结过程培养 150 d, 土壤温度和水分条件分别设置为 -15 °C 和饱和水分状态, 总计培养 300 d。淹水和冻结过程土壤温度以黑龙江绥化市地区水稻生长期 (5 月初—9 月末) 和稻田土壤休耕期 (11 月初—次年 3 月末) 近 5 年的月平均气温为依据而设置。

将过 5 mm 筛的风干土样, 用蒸馏水将土壤水分调节至达 40%WFPS (土壤充水孔隙度), 置于 25 °C 黑暗培养箱进行预培养 14 d, 以恢复和稳定土壤微生物群落。WFPS (%) 的计算如式 (1) <sup>[26-27]</sup>:

$$WFPS = \frac{\theta_v}{1 - \left(\frac{BD}{PD}\right)} \times 100 \quad (1)$$

式中,  $\theta_v$ 、BD 和 PD 分别为土壤体积含水量、土壤容重和土壤颗粒密度 ( $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )。

再将预培养结束后的供试土壤 80 g(以干土计)装入 400 mL 塑料瓶中(高 7 cm、直径 8 cm),按设计的双标记水稻秸秆(60 °C 烘干,剪成小于 1 cm 小段)用量将秸秆平铺在培养瓶中土层中间(充分与土壤接触,避免秸秆浮在水面);随后按照水土比 1.25 : 1 的比例向培养瓶中加入蒸馏水以形成 1 cm 淹水层,用保鲜膜封口,扎若干等数量小孔通气,将所有培养瓶置于 20 °C 恒温培养箱中进行室内培养 150 d。150 d 淹水培养结束后,取出培养瓶,去除淹水层,再将培养瓶置于 -15 °C 培养箱中继续培养 150 d(每隔 3 ~ 7 d 用称重法补充土壤水分,以维持土壤培养期间所设置的土壤水分条件)。

在培养过程的 5、15、30、60、150 和 300 d 进行破坏性取样,各处理每次取样 3 次重复。取样时将培养瓶中土壤转移至专用晾土盆中,剔除可见秸秆,样本自然风干。随后使用玛瑙研钵将一部分风干土研磨过 20 目筛,采用  $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  六偏磷酸钠分散法提取颗粒有机物<sup>[28]</sup>;一部分风干土研磨过 100 目筛用于土壤有机碳测定。

#### 1.4 测定项目与方法

土壤有机碳(全氮)和颗粒有机物样本中有机碳(氮)含量及其  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ ) 均采用元素分析仪—稳定同位素比例质谱仪(Elementar vario PYRO cube-IsoPrime100 Isotope Ratio Mass Spectrometer, 德国)测定。

$\delta^{13}\text{C}$  或  $\delta^{15}\text{N}$  ( $\delta$ , ‰)、 $^{13}\text{C}$  丰度或  $^{15}\text{N}$  丰度 ( $F$ , %) 计算:

$$\delta = \frac{R - R_{\text{标}}}{R_{\text{标}}} \times 1000 \quad (2)$$

$$F = \frac{(\delta + 1000) \times R_{\text{标}}}{(\delta + 1000) \times R_{\text{标}} + 1000} \times 100 \quad (3)$$

式中,  $R$  和  $R_{\text{标}}$  分别代表样本和标准物质的  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  或  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  原子比值;碳标准物质为美国南卡罗来纳州白垩纪皮狄组层位中的拟箭石化石(Peedee Belemnite,

PDB),  $R_{\text{标}}$  为 0.011 237 2,氮标准物质为纯净大气氮,  $R_{\text{标}}$  为 0.003 676 5<sup>[25, 27]</sup>。

微生物生物量碳氮采用氯仿熏蒸— $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提(液土比 5 : 1),浸提液中有机碳含量采用 TOC 仪(Elementar Vario EL III, 德国)测定,浸提液中总氮含量采用 3%碱性过硫酸氧化—AA3 流动分析仪(Bran+Luebbe, 德国)测定<sup>[29]</sup>。其他指标均采用常规方法进行。

#### 1.5 数据计算与统计分析

水稻秸秆碳(氮)对土壤或土壤颗粒有机碳(氮)的相对贡献率( $f$ , %) <sup>[30]</sup>:

$$f = (\delta_S - \delta_{\text{CK}}) / (\delta_R - \delta_{\text{CK}}) \times 100 \quad (4)$$

式中,  $\delta_S$  和  $\delta_{\text{CK}}$  分别表示培养后添加和未添加秸秆处理土壤或土壤颗粒有机碳(氮)中的  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ ) (‰),  $\delta_R$  表示添加双标记水稻秸秆的初始  $\delta^{13}\text{C}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ ) (‰)。

水稻秸秆碳(氮)在土壤或土壤颗粒有机碳(氮)中的分配量 ( $C_{\text{S-straw}}$ ,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) <sup>[30]</sup>:

$$C_{\text{S-straw}} = C_S \times f \quad (5)$$

式中,  $C_S$  表示培养后添加秸秆处理土壤或土壤颗粒有机碳(氮)含量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

水稻秸秆碳(氮)在土壤或土壤颗粒有机碳(氮)中的分配率 ( $P$ , %):

$$P = C_{\text{S-straw}} / C'_R \times 100 \quad (6)$$

式中,  $C'_R$  表示添加到土壤后初始的水稻秸秆有机碳(全氮)含量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

采用 WPS office 11.1.0.11045 进行数据处理与分析,采用 Origin 2017 进行绘图。使用 SPSS Statistics 22 软件进行统计分析,采用双因素方差分析和单因素方差分析,邓肯法(Duncan)进行多重比较 ( $P < 0.05$ )。无特殊说明试验数据均为 3 次重复的平均值。

## 2 结果

### 2.1 不同种稻年限土壤基本性质

不同种稻年限土壤基本性质存在明显差异(表 1)。与对照土壤(0 a)相比,开垦种稻 12 a 土壤容重、pH、有机碳含量、C/N 和有效磷含量均显著增加 ( $P < 0.05$ ),其中土壤容重和有效磷含量随种稻年限延长无显著变化,土壤 pH 和有机碳含量随种稻年限

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of the soil samples

年限 Year	pH	有机碳 Organic carbon / (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen / (g·kg <sup>-1</sup> )	C/N	$\delta^{13}\text{C}$ /‰	$\delta^{15}\text{N}$ /‰
0 a	5.02c	38.84bc	3.81a	10.20d	-24.06a	6.63a
12 a	5.61a	44.16a	3.67a	12.45bc	-26.79c	3.83bc
35 a	5.42ab	39.32ab	3.32a	12.80a	-26.69c	3.67c
62 a	5.52ab	35.82cd	2.74b	12.69ab	-26.00b	3.84bc
85 a	5.38b	32.54d	2.52b	12.35c	-25.52b	4.82b

年限 Year	碱解氮 Alkaline nitrogen / (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available phosphorous / (mg·kg <sup>-1</sup> )	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon / (mg·kg <sup>-1</sup> )	微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen / (g·kg <sup>-1</sup> )	容重 Bulk density / (g·cm <sup>-3</sup> )
0 a	324.22a	19.25b	512.89c	102.64b	0.90b
12 a	267.34b	34.66ab	339.92d	81.90bc	0.97a
35 a	238.43c	35.49a	668.92a	144.72a	1.04a
62 a	218.00d	34.56ab	644.78ab	149.88a	1.01a
85 a	163.55e	37.28a	524.07bc	83.95bc	1.16a

注：不同小写字母表示样本间差异达 0.05 显著水平。Note: Different lowercase letters indicate a difference between the samples at 0.05 significant level.

延长呈显著下降趋势，C/N 则随种稻年限延长呈先增加后下降趋势；种稻土壤全氮和碱解氮含量随种稻年限延长呈下降趋势，其中在种稻 85 a 时全氮含量下降显著 ( $P < 0.05$ )，各年限种稻土壤间碱解氮含量均有显著差异 ( $P < 0.05$ )；种稻 12 a 土壤微生物量碳含量显著低于对照土壤 ( $P < 0.05$ )，而种稻 35 a 和 62 a 土壤微生物生物量碳氮含量则显著高于对照土壤 ( $P < 0.05$ )。各年限种稻土壤  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  均显著低于对照土壤 ( $P < 0.05$ )。由此可见，自然黑土开垦种稻后土壤基本性质发生了较大变化，不同种稻年限间土壤养分含量、微生物生物量碳氮含量以及  $^{13}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}$  同位素富集的变化尤为明显。

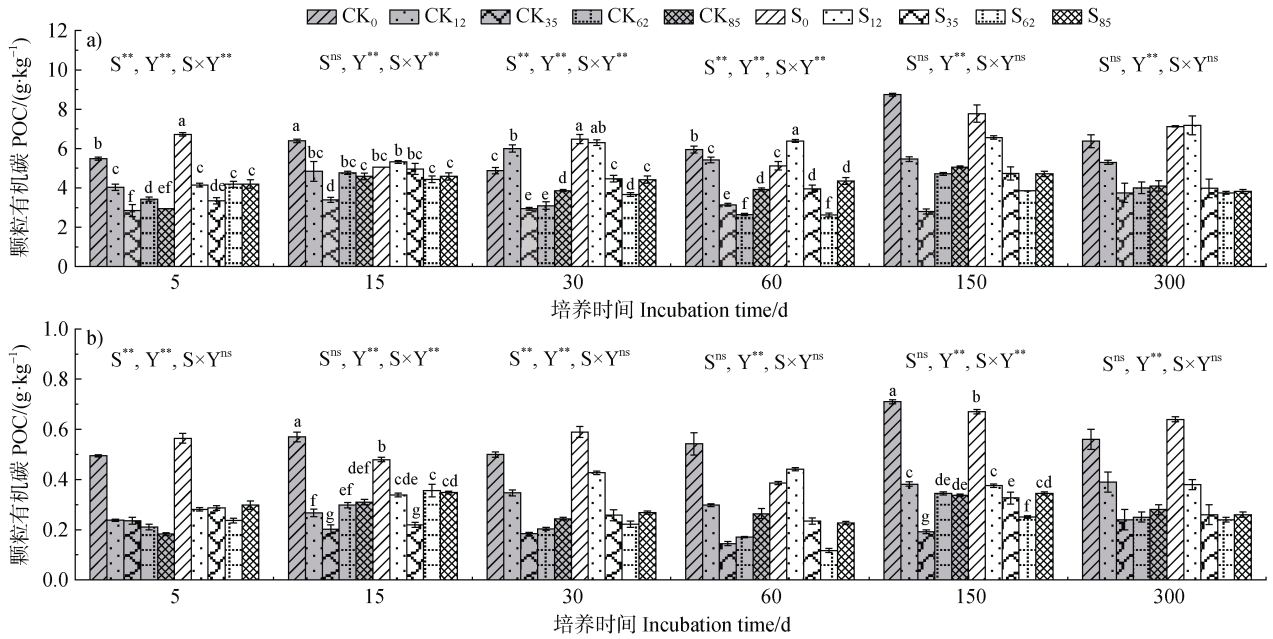
## 2.2 水稻秸秆添加对不同种稻年限土壤颗粒有机质含量的影响

总体上，淹水培养 60 d，水稻秸秆添加和种稻年限及其二者交互作用对土壤颗粒有机碳含量影响显著 ( $P < 0.01$ )，淹水培养 60 ~ 150 d 和冻结培养 150 d 时，各处理土壤颗粒有机碳含量仅受种稻年限的显著影响 ( $P < 0.01$ ) (图 1a)。在整个培养期

间，种稻年限显著影响土壤颗粒有机氮含量 ( $P < 0.01$ )，在淹水培养 5 d 和 30 d 时，秸秆添加对土壤颗粒有机氮含量有显著影响，在淹水培养 30 a 和 150 a 时，秸秆添加和种稻年限对土壤颗粒有机氮有显著交互作用 (图 1b)。总体上，未添加和添加秸秆处理土壤颗粒有机碳(氮)含量在淹水培养的 60 d 内呈波动变化，在淹水培养的 60~150 d 期间有所增加，在随后冻结培养 150 d 期间又有所下降 (图 1)。

## 2.3 水稻秸秆碳氮在不同种稻年限土壤颗粒有机质中的分配

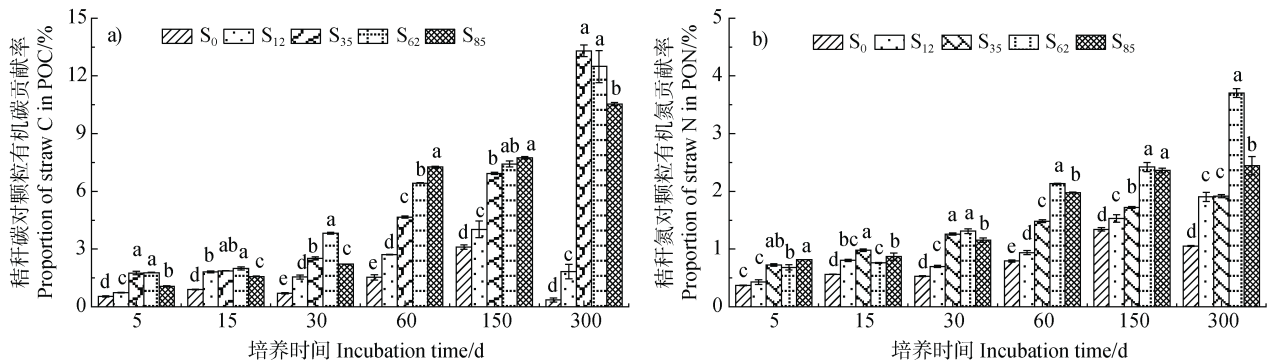
在淹水培养过程中，水稻秸秆碳(氮)对土壤颗粒有机质的相对贡献率均随培养时间的延长而增加；在淹水培养 30 d 内，秸秆碳对颗粒有机碳(POC)的相对贡献率随种稻年限增加呈先增加后下降趋势，在淹水培养 60~150 d 期间，秸秆碳对 POC 的相对贡献率则随种稻年限的增加而增加；秸秆氮对颗粒有机氮(PON)的相对贡献率在淹水培养过程中随种稻年限增加呈先增加后下降趋势 (图 2)。在随后冻结培养过程中，秸秆碳对 0 a 和 12 a 土壤



注：S、Y、S×Y 分别表示秸秆、种稻年限、二者的交互作用；\*\*和 ns 分别表示差异达 0.01 显著水平和不显著；不同小写字母表示在交互作用显著下相同培养时间不同处理间差异达 0.05 显著水平。Note: S, Y and S×Y indicate difference between the rice straw (S), the rice planting years (Y) and the interaction between S and A, respectively. \*\* and ns indicate a difference is 0.01 significant level and not significant, respectively. Different lowercase letters indicate a difference between different treatments and the same in sampling time under the interaction between S and Y at a 0.05 significant level.

图 1 土壤颗粒有机碳(氮)含量

Fig. 1 Contents of soil particulate organic carbon (POC) and particulate organic nitrogen (PON)



注：不同小写字母表示相同培养时间不同处理间差异达 0.05 显著水平。Note: Different lowercase letters indicate a difference between different treatments the same in sampling time at 0.05 significant level.

图 2 水稻秸秆碳(氮)对土壤颗粒有机碳(氮)的相对贡献率

Fig. 2 Relative contributions of the added rice straw carbon and nitrogen to particulate organic Carbon (POC) and particulate organic nitrogen (PON)

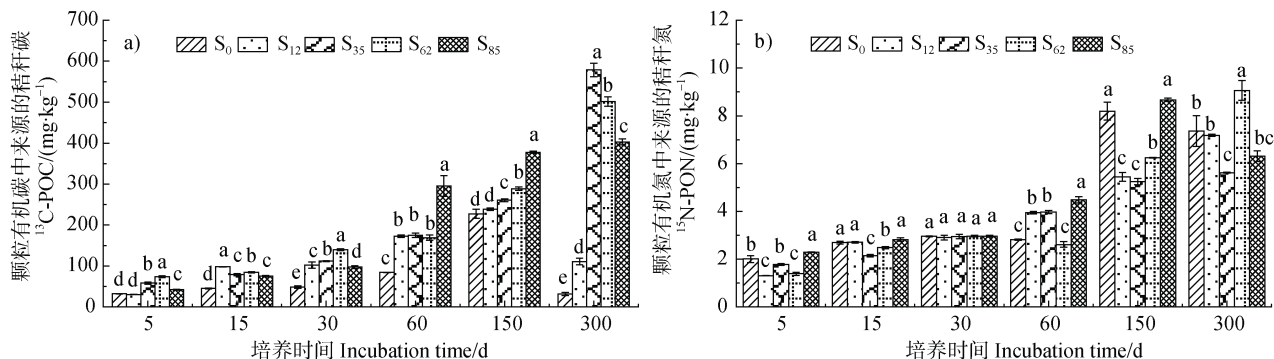
POC 的相对贡献率明显下降, 而对其他 3 种土壤 POC 的相对贡献率明显增加, 且随种稻年限增加而下降 (图 2a); 秸秆氮对 PON 的相对贡献率除对照土壤 (0 a) 外, 其他 4 种稻田土壤均明显增加, 以 62 a 土壤增加幅度最大 (图 2b)。在淹水培养 150 d 结束时和冻结 150 d 结束时, 秸秆碳对各年限土壤

POC 的相对贡献率分别为 3.1%~7.7%和 0.4%~13.3%, 秸秆氮对各年限土壤 PON 的相对贡献率分别为 1.3%~2.4%和 1%~3.7%, 各年限之间秸秆碳(氮)对 POC (PON) 的相对贡献率有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

在淹水培养 150 d 期间, 秸秆碳氮分配进入到

各年限土壤 POC、PON 中的数量分别为 227.4~377.5 mg·kg<sup>-1</sup>、5.2~8.7 mg·kg<sup>-1</sup>，其含量均随培养时间的延长而增加，在随后冻结培养 150 d 期间，其分配进入到各年限土壤 POC、PON 中的数量分别

为 31.4~578.4 mg·kg<sup>-1</sup>、5.6~9.1 mg·kg<sup>-1</sup>；在淹水培养 150 d 结束时和冻结 150 d 结束时，秸秆碳氮在各年限土壤颗粒有机质中分配数量有显著差异 ( $P < 0.05$ ，图 3)。



注：不同小写字母表示相同培养时间不同处理间差异达 0.05 显著水平。Note: Different lowercase letters indicate a difference between different treatments the same in sampling time at 0.05 significant level.

图 3 土壤颗粒有机碳 (氮) 中来源的秸秆碳 (氮)

Fig. 3 Straw-derived particulate organic carbon (<sup>13</sup>C-POC) and straw-derived particulate organic nitrogen (<sup>15</sup>N-PON) in soil with double labelled (<sup>13</sup>C/<sup>15</sup>N) rice straw

在淹水培养过程中，秸秆碳氮分配进入到土壤颗粒有机质和土壤有机质中的比率均随培养时间的延长呈逐渐增加趋势；其中秸秆碳分配进入到土壤 POC 和土壤有机碳中的比率分别为 0.7%~9.0% 和 7.9%~23.6%，秸秆氮分配进入到土壤 PON 和土壤全氮中的比率分别为 1.4%~9.5% 和 37.5%~76.3% (图 4)。在随后冻结培养 150 d 结束时，秸秆碳分配进入到 0 a 和 12 a 土壤 POC 中的比率快速下降，而分配到 35 a、62 a 和 85 a 土壤 POC 中的比率仍在增加，其比率则随种稻年限增加而下降，秸秆氮进入到 0 a 和 85 a 土壤 PON 中的比率下降，而分配到 12 a、35 a 和 62 a 土壤 PON 中的比率增加；秸秆碳分配进入到土壤有机碳中的比率仍在增加，且分配进入到种稻土壤的比率大于对照土壤，秸秆氮分配进入到土壤全氮中的比率下降，且分配进入到种稻土壤的比率低于对照土壤，以 85 a 的比率降幅最大 (图 4)。总体上，与对照土壤 (0 a) 相比，秸秆碳在各年限种稻土壤 POC 中的分配比率均有所增加，其中在种稻 12 a 和 35 a 土壤中增加显著 ( $P < 0.05$ )，秸秆氮在种稻 12 a 和 35 a 土壤 PON 中的分配比率显著下降 ( $P < 0.05$ )，在 85 a 土壤 PON 中的分配比率显著增加 ( $P < 0.05$ )；秸秆碳在各年限种稻土壤有机碳中的分配比率均显著增加 ( $P < 0.05$ )，其大小依次为 62 a、12 a、35 a 和 85 a，秸秆氮在种

稻 12 a 和 35 a 土壤全氮中的分配比率均显著增加 ( $P < 0.05$ )，在种稻 62 a 和 85 a 土壤全氮中的分配比率则显著下降 ( $P < 0.05$ ) (图 5)。相关分析发现，秸秆在土壤 POC 中的分配比率与在土壤有机碳中的分配比率具有显著正相关 ( $r = 0.645$ ,  $P < 0.01$ )，秸秆氮在土壤 PON 中的分配比率与在土壤全氮中的分配比率具有显著负相关 ( $r = -0.827$ ,  $P < 0.01$ )。

进一步相关分析表明，秸秆碳在土壤 POC 中的分配比率与土壤有机碳、全氮和碱解氮含量均呈显著负相关，相关系数分别为 -0.546 ( $P < 0.05$ )、-0.779 ( $P < 0.01$ ) 和 -0.885 ( $P < 0.01$ )，而与土壤 C/N、有效磷和微生物生物量碳含量呈显著正相关，相关系数分别为 0.697 ( $P < 0.01$ )、0.591 ( $P < 0.05$ ) 和 0.543 ( $P < 0.05$ )；秸秆氮在土壤 PON 中的分配比率仅与土壤有机碳含量呈显著负相关，相关系数分别为 -0.614 ( $P < 0.05$ )。由此可见，黑土不同种稻年限 C/N、有机碳、全氮、碱解氮、有效磷和微生物生物量碳含量有明显差异，这些差异是影响秸秆碳氮向土壤 POC 和 PON 分配的重要因素。

### 3 讨论

颗粒有机质对土地利用、作物栽培年限和种植

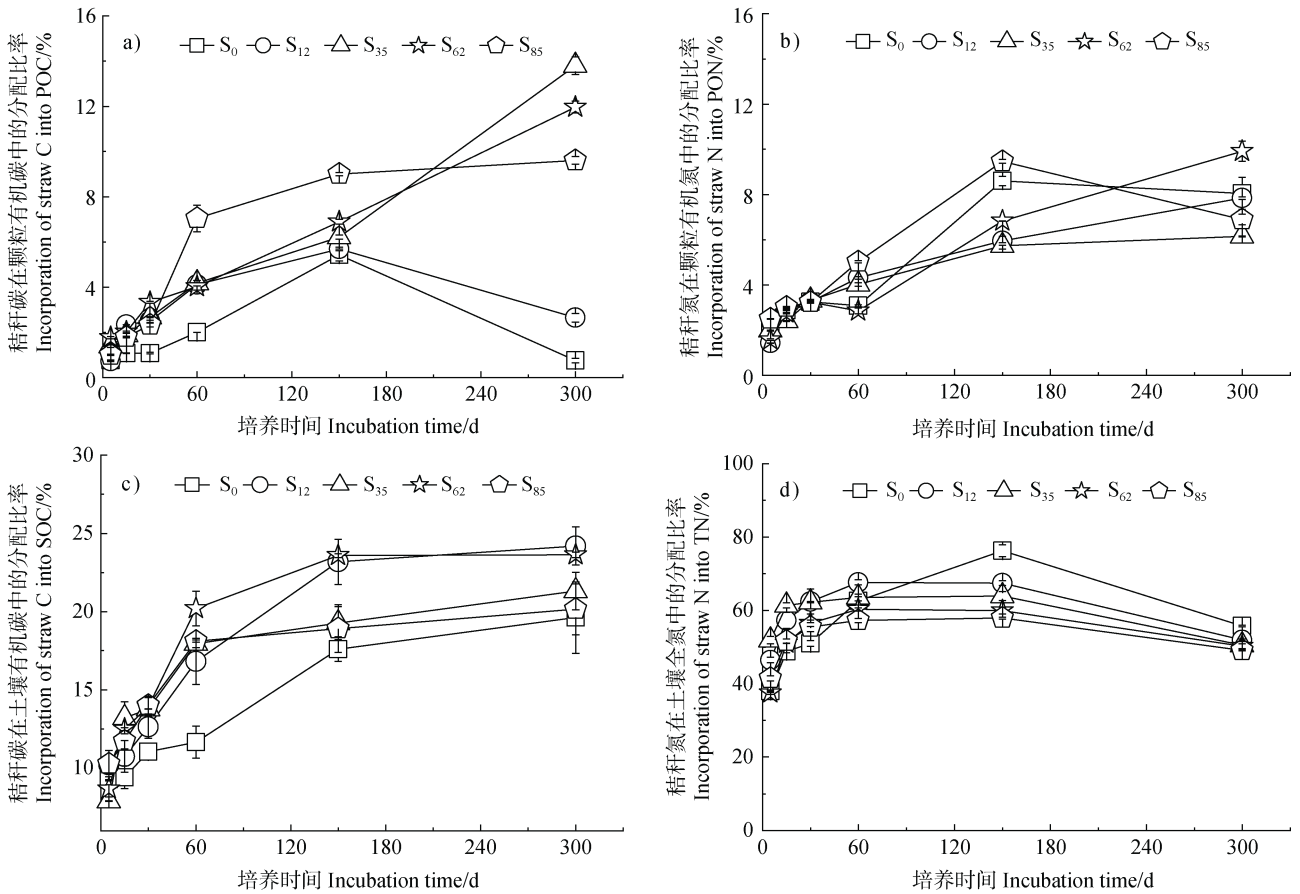
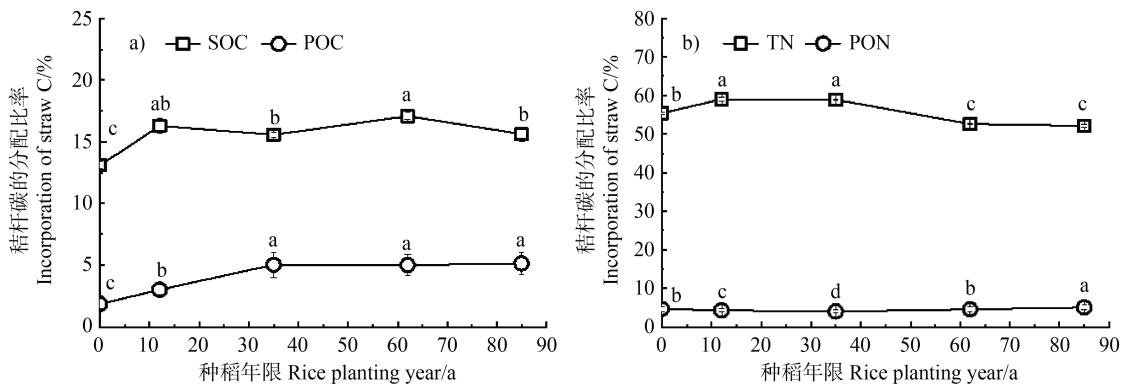


图 4 水稻秸秆碳 (氮) 在土壤颗粒有机碳 (氮)、土壤有机碳 (全氮) 中的分配比率

Fig. 4 Incorporations of the added rice straw carbon and nitrogen into particulate organic C (POC) and particulate organic N (PON), and soil organic C (SOC) and total N (TN)



注：数据为六次取样平均值；不同小写字母表示不同种稻年限处理间差异达 0.05 显著水平。Note: The data were based on the mean of the six samplings; Different lowercase letters indicate a difference between different rice planting ages at 0.05 significant level.

图 5 水稻秸秆碳 (氮) 在不同种稻年限土壤颗粒有机碳 (氮)、土壤有机碳 (全氮) 中的分配比率

Fig. 5 Incorporations of the added rice straw carbon and nitrogen into particulate organic C (POC) and particulate organic N (PON), and soil organic C (SOC) and total N (TN) in different rice planting years

模式的变化更为敏感<sup>[9-11, 14, 31-33]</sup>。颗粒态有机物是植物残体向土壤腐殖质转化的活性中间产物，主要由碳水化合物和木质素构成，易被微生物分解利用，

其分解对于反映土壤中植株残体的变化具有积极意义<sup>[34]</sup>。Su 等<sup>[18]</sup>将 <sup>13</sup>C 标记小麦秸秆添加到旱地土壤进行好氧培养 180 d，秸秆碳在土壤颗粒有机碳中的



分配比率从培养 7 d 的 9.8% 上升到培养 180 d 结束时的 19.8%。本研究显示,  $^{13}\text{C}/^{15}\text{N}$  标记水稻秸秆添加到各年限土壤, 在淹水培养 5 d 时土壤颗粒有机碳(氮)含量明显增加, 但其后并未表现出一致的增加趋势(图 1); 土壤颗粒有机质中  $\delta^{13}\text{C}$  及  $\delta^{15}\text{N}$  值在淹水培养期间表现出持续增加的趋势, 秸秆碳(氮)在土壤颗粒有机碳(氮)中的分配比率从培养 5 d 的 0.8%~1.8% (1.4%~2.5%) 增加至 150 d 结束时的 5.4%~9.0% (5.7%~9.5%) (图 4)。这表明随着水稻秸秆的腐解, 秸秆碳(氮)会逐渐向土壤颗粒有机质中赋存与分配, 但在土壤颗粒有机质中的分配比率低于 Su 等<sup>[18]</sup>对旱地土壤的研究结果, 这说明淹水条件影响了土壤微生物的组成, 降低了微生物活性, 水稻秸秆腐解速率相对缓慢<sup>[25, 35]</sup>。此外, 本研究还显示, 在淹水培养 150 d 结束后继续进行冻结培养 150 d, 总体上秸秆碳(氮)在种稻 35 a、62 a 和 85 a 土壤颗粒有机质中的分配比率仍在增加, 达 9.6%~13.8% (6.9%~9.9%), 这说明东北地区冻结环境条件下, 水稻秸秆在土壤中仍进行缓慢腐解<sup>[22]</sup>, 但秸秆碳对未开垦种稻土壤(0 a)和种稻 12 a 土壤颗粒有机碳的贡献率显著下降(图 2), 其在土壤颗粒有机碳中的分配比率也明显降低(图 4), 这主要是由于冻结条件下土壤微生物活性显著下降, 但由于土壤中可溶性有机碳含量显著高于其他年限土壤(结果在文中未列出), 土壤微生物更易于利用土壤可溶性有机碳源, 而对秸秆碳源的利用明显下降, 进而降低了秸秆碳对土壤颗粒有机碳的相对贡献。

秸秆碳(氮)在土壤中的固存与转化受土壤肥力水平影响<sup>[30, 36-38]</sup>。何振超等<sup>[37]</sup>将  $^{13}\text{C}$  标记小麦秸秆添加到旱地土壤进行好氧培养 60 d 研究发现, 秸秆碳对低肥力、中肥力土壤颗粒有机碳的相对贡献率显著高于高肥力土壤, 而秸秆碳的分配率则表现为中肥力土壤大于高肥力和低肥力土壤。在本研究中, 不同种稻年限土壤养分含量和微生物生物量碳氮含量具有明显差异, 土壤有机碳含量随种稻年限延长呈先增加后降低趋势(表 1), 种稻年限越长, 其土壤有机碳含量越低, 则秸秆碳氮在土壤颗粒有机质中的分配比率越大(图 5), 这与何振超等<sup>[37]</sup>在旱田的研究结果不完全一致。这主要是由于黑土开垦种稻年限越长, 土壤中粗颗粒有机质含量越少<sup>[11]</sup>, 更有利于秸秆碳氮在土壤颗粒有机质中赋存与分

配。本研究还显示, 秸秆碳在不同种稻年限土壤颗粒有机碳中的分配比率随土壤全氮和碱解氮含量的减少而增加, 而随土壤 C/N、有效磷和微生物生物量碳含量的增加而增加。这说明黑土种稻年限较长时, 秸秆中易分解有机碳为微生物生长和活性提供了基质, 可使土壤中分解新鲜有机物的微生物活性和种群增加, 进而能够增加秸秆碳向土壤颗粒有机碳中的分配及其在土壤中的残留<sup>[23, 38-39]</sup>, 对秸秆中碳在土壤中的固定起到积极作用<sup>[30, 40]</sup>。种稻年限较短时, 土壤有机碳、全氮、碱解氮含量相对较高, C/N、有效磷和微生物生物量碳含量相对较低, 土壤中丰富的有机质仍然能够为微生物的生长和活性提供合适的基质; 同时土壤中微生物生长代谢更加旺盛, 导致更多的活性有机质组分被微生物代谢转化进入其他有机质库<sup>[37]</sup>, 从而降低了秸秆碳向土壤颗粒有机碳中的分配及其在土壤中的固持<sup>[36, 38, 41]</sup>。

本研究中, 自然黑土具有较高的有机碳含量(表 1), 在开垦种稻年限较短的时间(12 a)内, 土壤中抗分解的老碳对土地利用变化的响应低于水稻植株残留在土壤中的新碳<sup>[42-43]</sup>, 同时每年水稻生长期的淹水环境也降低了土壤有机碳的分解<sup>[44]</sup>。但由于每年稻田不施有机肥且地上部水稻秸秆不还田, 仅水稻根茬归还土壤, 致使黑土开垦种稻 12 a 后土壤有机碳矿化量和移除的生物碳量大于外源输入有机碳量(主要为水稻根茬归还), 进而使土壤有机碳处于亏损状态。因此, 黑土开垦种稻后应注视土壤有机质的盈亏平衡问题, 水稻秸秆还田是土壤有机质维持和提升的重要措施。

## 4 结 论

双标记( $^{13}\text{C}/^{15}\text{N}$ )水稻秸秆添加到黑土不同种稻年限土壤中, 淹水培养 150 d 和冻结培养 150 d 期间, 秸秆碳(氮)对各年限土壤颗粒有机碳(氮)的相对贡献率为 0.2%~13.9% (0.4%~3.8%), 分配进入到各年限土壤颗粒有机碳(氮)的比率为 0.7%~13.8% (1.4%~9.9%)。黑土开垦种稻年限越长, 土壤有机碳、全氮和碱解氮含量相对较低, 而土壤 C/N、有效磷和微生物生物量碳含量相对较高, 秸秆碳(氮)分配进入到土壤颗粒有机质的比率越大, 土壤颗粒有机质对水稻秸秆添加的响应越为敏感。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] FAO. FAOSTAT database[DB]. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.
- [ 2 ] Jia W, Qin W, Zhang Q, et al. Evaluation of crop residues and manure production and their geographical distribution in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 188: 954—965.
- [ 3 ] Yan S S, Song J M, Fan J S, et al. Changes in soil organic carbon fractions and microbial community under rice straw return in Northeast China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e00962.
- [ 4 ] Ma Y, Chi M J, Zhang Y L, et al. Change characteristics of organic carbon and total nitrogen in water-stable aggregate after conversion from upland to paddy field in black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(8): 1594—1605. [马原, 迟美静, 张玉玲, 等. 黑土旱地改稻田土壤水稳性团聚体有机碳和全氮的变化特征[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(8): 1594—1605.]
- [ 5 ] Chen Z M, Wang H Y, Liu X W, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 165: 121—127.
- [ 6 ] Yan D Z, Wang D J, Yang L Z. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(1): 93—101.
- [ 7 ] Liu J, Xu S J, Liu L F. Effect of different reforestation patterns on soil particulate organic carbon content in loess hilly region of western Henan[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(5): 72—76. [刘晶, 徐少君, 刘丽芬. 不同退耕方式对豫西黄土丘陵区土壤颗粒有机碳含量的影响[J]. *河南农业科学*, 2015, 44(5): 72—76.]
- [ 8 ] Motavalli P P, Discekici H, Kuhn J. The impact of land clearing and agricultural practices on soil organic C fractions and CO<sub>2</sub> efflux in the Northern Guam aquifer[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 79(1): 17—27.
- [ 9 ] Wang X X, Fu J R, Zou P, et al. Distribution characteristics of aggregates organic carbon in a paddy soil chronosequence[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3): 719—724. [王欣欣, 符建荣, 邹平, 等. 长期植稻年限序列水稻土团聚体有机碳分布特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 719—724.]
- [ 10 ] Zhang J N. Change characteristics on soil organic carbon (nitrogen) after conversion from upland to paddy field in black soil region of northeast China[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. [张佳楠. 东北黑土区旱田改种稻田后土壤有机碳(氮)的变化特征[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.]
- [ 11 ] Chi M J. Change characteristics of organic carbon in soil aggregates and aggregate fractions of reclamation for rice in mollisol[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019. [迟美静. 黑土开垦种稻土壤团聚体及其组分有机碳的变化特征[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.]
- [ 12 ] Chen Z M, Wang Q, Wang H Y, et al. Crop yields and soil organic carbon fractions as influenced by straw incorporation in a rice-wheat cropping system in southeastern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 112(1): 61—73.
- [ 13 ] Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Cantero-Martínez C. Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 139: 19—22.
- [ 14 ] Zhang L Q, Zhang M K. Effects of land use on particulate organic carbon and black carbon accumulation in red and yellow soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 662—665. [张履勤, 章明奎. 土地利用方式对红壤和黄壤颗粒有机碳和碳黑积累的影响[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 662—665.]
- [ 15 ] Chi M J, Hou W, Sun Y, et al. Characteristics of soil nutrients and pH value of paddy fields with different planted years in black soil region of northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(3): 546—551. [迟美静, 侯玮, 孙莹, 等. 东北黑土区荒地开垦种稻后土壤养分及pH值的变化特征[J]. *土壤通报*, 2018, 49(3): 546—551.]
- [ 16 ] Cui T T. Effect of straw returning on characteristics of soil organic matter[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017. [崔婷婷. 秸秆还田对土壤有机质特征的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.]
- [ 17 ] Poirier V, Angers D A, Whalen J K. Formation of millimetric-scale aggregates and associated retention of <sup>13</sup>C-<sup>15</sup>N-labelled residues are greater in subsoil than topsoil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 75: 45—53.
- [ 18 ] Su Y, He Z C, Yang Y H, et al. Linking soil microbial community dynamics to straw-carbon distribution in soil organic carbon[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 5526.
- [ 19 ] Huangfu C H, Sun X L, Liu S T, et al. Effect of long-term straw returning to field on soil aggregates and organic carbon components[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(3): 153—159. [皇甫惠惠, 孙筱璐, 刘树堂, 等. 长期定位秸秆还田对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. *华北农学报*, 2020, 35(3): 153—159.]
- [ 20 ] Liang Q, Chen H Q, Gong Y S, et al. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China

- Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 92 (1): 21—33.
- [ 21 ] Tivet F, de Moraes Sá J C, Lal R, et al. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 126: 203—218.
- [ 22 ] de Oliveira Ferreira A, de Moraes Sá J C, Lal R, et al. Macroaggregation and soil organic carbon restoration in a highly weathered Brazilian Oxisol after two decades under no-till[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 1559—1567.
- [ 23 ] You J W, Wang J, Hu H Q, et al. Effects of straw returning on soil organic carbon components in ratoon rice field[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (8): 1451—1458. [尤锦伟, 王俊, 胡红青, 等. 秸秆还田对再生稻田土壤有机碳组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (8): 1451—1458.]
- [ 24 ] Yu P, Zhang Y L, Wang C X, et al. Distribution of photosynthetic carbon in rice-soil system relative to rice growth stage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (5): 1218—1229. [于鹏, 张玉玲, 王春新, 等. 不同生育期光合碳在水稻-土壤系统中的分配[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (5): 1218—1229.]
- [ 25 ] Liu H, Liu J, Zhang Y L, et al. Release of exogenous carbon and nitrogen in rice root, stem and leaf in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (4): 989—997. [刘晖, 刘杰, 张玉玲, 等. 外源水稻根系和茎叶碳氮在稻田土壤中释放的特征[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (4): 989—997.]
- [ 26 ] Tang S R, Cheng W G, Hu R G, et al. Simulating the effects of soil temperature and moisture in the off-rice season on rice straw decomposition and subsequent CH<sub>4</sub> production during the growth season in a paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52 (5): 739—748.
- [ 27 ] Zhang Y L, Hou W, Chi M J, et al. Simulating the effects of soil temperature and soil moisture on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions in rice straw-enriched paddy soil[J]. *Catena*, 2020, 194: 104677.
- [ 28 ] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56 (3): 777—783.
- [ 29 ] de Troyer I, Amery F, Moorleghem C V, et al. Tracing the source and fate of dissolved organic matter in soil after incorporation of a <sup>13</sup>C labelled residue: A batch incubation study[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43 (3): 513—519.
- [ 30 ] Chen X F, Liu M, Kuzyakov Y, et al. Incorporation of rice straw carbon into dissolved organic matter and microbial biomass along a 100-year paddy soil chronosequence[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 130: 84—90.
- [ 31 ] Mao Y L, Yang Y S, Cui J C. Response of land use on soil particulate organic carbon in aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (4): 188—191, 196. [毛艳玲, 杨玉盛, 崔纪超. 土壤团聚体颗粒有机碳对土地利用变化的响应[J]. *水土保持学报*, 2011, 25 (4): 188—191, 196.]
- [ 32 ] Chen S, Xu C M, Yan J X, et al. The influence of the type of crop residue on soil organic carbon fractions: An 11-year field study of rice-based cropping systems in southeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 223: 261—269.
- [ 33 ] Kantola I B, Masters M D, DeLucia E H. Soil particulate organic matter increases under perennial bioenergy crop agriculture[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 113: 184—191.
- [ 34 ] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241 (2): 155—176.
- [ 35 ] Khan M I, Hwang H Y, Kim G W, et al. Microbial responses to temperature sensitivity of soil respiration in a dry fallow cover cropping and submerged rice mono-cropping system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 128: 98—108.
- [ 36 ] An T T, Schaeffer S, Zhuang J, et al. Dynamics and distribution of <sup>13</sup>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.
- [ 37 ] He Z C, Su Y, Yu M, 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. [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.]
- [ 38 ] Wang S Y, Li X H, Cheng N, et al. Effects of plastic film mulching and fertilization on the sequestration of carbon and nitrogen from straw in soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54 (2): 345—356. [王淑颖, 李小红, 程娜, 等. 地膜覆盖与施肥对秸秆碳氮在土壤中固存的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54 (2): 345—356.]
- [ 39 ] Zheng L H, Pei J B, Jin X X, et al. Impact of plastic film mulching and fertilizers on the distribution of straw-derived nitrogen in a soil-plant system based on <sup>15</sup>N-labeling[J]. *Geoderma*, 2018, 317: 15—22.
- [ 40 ] 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: 892—902.
- [ 41 ] Majumder B, Kuzyakov Y. Effect of fertilization on decomposition of  $^{14}\text{C}$  labelled plant residues and their incorporation into soil aggregates[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 109 ( 2 ): 94—102.
- [ 42 ] O'Brien S L, Jastrow J D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 61: 1—13.
- [ 43 ] Hao X X, You M Y, Han X Z, et al. Redistribution of different organic carbon fractions in the soil profile of a typical Chinese mollisol with land-use change[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, 48 ( 20 ): 2369—2380.
- [ 44 ] Sahrawat K L. Fertility and organic matter in submerged rice soils[J]. *Current Science*, 2005, 88: 735—739.

( 责任编辑：卢 萍 )