

DOI: 10.11766/trxb201907150244

丛萍, 逢焕成, 王婧, 刘娜, 李玉义, 张莉. 粉碎与颗粒秸秆高量还田对黑土亚耕层土壤有机碳的提升效应[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 811–823.

CONG Ping, PANG Huancheng, WANG Jing, LIU Na, LI Yuyi, ZHANG Li. Effect of Returning Chopped and Pelletized Straw at A High Rate Enhancing Soil Organic Carbon in Subsoil of Farmlands of Black Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 811–823.

粉碎与颗粒秸秆高量还田对黑土亚耕层土壤有机碳的提升效应*

丛萍^{1, 2}, 逢焕成^{1†}, 王婧¹, 刘娜¹, 李玉义¹, 张莉¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 中国农业科学院烟草研究所, 山东青岛 266100)

摘要: 针对东北黑土亚耕层有机碳匮乏, 且秸秆体量大、利用困难的问题, 于 2015—2018 年开展田间定位实验, 以秸秆不还田为对照 (CK), 探究粉碎秸秆 (FS) 与秸秆颗粒 (KL) 处理下 1 倍量 ($15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、3 倍量 ($45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、5 倍量 ($75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的深埋还田对土壤有机碳含量、有机碳结构以及土壤养分比例的影响, 旨在通过“变废为宝”促进黑土地可持续发展。结果表明: 1) 秸秆还田对 20–40 cm 土壤亚耕层有机碳提升效果显著, 随着秸秆倍量的增加, 亚耕层土壤有机碳在 2%–20% (1 a)、5%–27% (2 a)、1%–18% (3 a) 之间变化, 高倍量还田优势显著; 秸秆还田 2 a 土壤有机碳增长率最高, 表明还田第 2 年是有有机碳的主要积累时期, 且秸秆倍量是影响有机碳变化更重要的因素。2) 秸秆还田 3 a 后, FS5 处理的脂化度较高而 KL5 处理的芳香度较高, 粉碎秸秆高量还田更易促进烷基碳链型有机碳合成, 而 KL5 处理易促进芳香烃类有机碳合成。3) 高量还田后亚耕层土壤碳氮比与碳磷比增幅大于 10%, 碳钾比增幅大于 20%, 且秸秆颗粒还田对养分元素比例的提高具有短期快速效应, 而粉碎秸秆具有长期缓释效应。秸秆高量深埋还田显著提高亚耕层土壤有机碳含量, 平衡碳与氮、磷、钾养分元素比例关系, 是增厚培肥黑土层以及解决东北秸秆还田问题的可行方法。

关键词: 秸秆还田; 高量; 黑土; 有机碳; 亚耕层; 秸秆颗粒

中图分类号: S153 文献标志码: A

Effect of Returning Chopped and Pelletized Straw at A High Rate Enhancing Soil Organic Carbon in Subsoil of Farmlands of Black Soil

CONG Ping^{1, 2}, PANG Huancheng^{1†}, WANG Jing¹, LIU Na¹, LI Yuyi¹, ZHANG Li¹

(1. Institute of Agriculture Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Science, Beijing 100081, China; 2. Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agriculture Science, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: [Objective] To solve the problems of soil organic carbon deficiency in the subsoil layer and the yield of crop straw being too large in volume to make full use of in farmlands of black soil in Northeast China, a long-term (2015–2018) field

* 国家重点研发计划项目 (2016YFD0300804) Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0300804)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: panghuancheng@caas.ac.cn

作者简介: 丛萍 (1989—), 女, 山东省胶州市人, 博士, 从事土壤耕作与培肥研究。E-mail: cpqjz@126.com

收稿日期: 2019–07–15; 收到修改稿日期: 2019–10–31; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019–12–26

experiment was carried out. 【Method】 The field experiment was designed to have three treatments, i.e., CK (no straw returned), FS (returning of chopped straw) and KL (returning of pelletized straw), and three straw returning rates, i.e., Rate 1 ($15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$), Rate 2 ($45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 3 times as high as Rate 1) and 3 ($75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 5 times as high as Rate 1). The straw was deeply incorporated into the subsoil layer. Soil samples were collected from all the plots separately each year for analysis of soil organic carbon content, organic carbon structure and soil nutrient ratio in an attempt to find out a way to turn waste into treasure and hence to promote sustainable development of black soil. 【Result】 Results show: 1. Organic carbon content in the subsoil of the treatment plots varied in the range of 2%-20% (1 a), 5%-27% (2 a) and 1%-18% (3 a). The effect of straw returning raising organic carbon content in the subsoil was significant and improved with increasing returning rate and the effect of the treatments the highest in returning rate were the most significant and particularly in the second year, which indicates that organic carbon accumulation occurred mainly in the second year. Two-way variance analysis shows that straw returning rate was an important factor affecting soil organic carbon; 2. Nuclear magnetic resonance test shows that at the end of the experiment, the organic carbon in Treatment FS5 was found the highest in aliphaticity, while that in Treatment KL5 the highest in aromaticity, indicating that chopped straw is more likely to promote formation of organic carbon of alkyl carbon chain, while pelletized straw is to promote formation of organic carbon of aromatic hydrocarbon type; 3. In Treatments FS5 and KL5, soil C/N and C/P ratios increased by >10%, and C/K ratio did by >20%. The effect in Treatments KL was short and instant, while that in Treatments FS was long and slow. 【Conclusion】 In a conclusion, deep incorporation of processed straw at a high rate can significantly increase organic carbon in the subsoil layer and help keep soil carbon in balance with nitrogen, phosphorus and potassium. It is, therefore, a feasible way to build up the black soil in thickness and fertility and to solve the difficult problem of straw returning in Northeast China.

Key words: Straw returning; High dosage; Black soil; Organic carbon; Subsoil; Pelletized straw

土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 占土壤有机质的 60%~80%, 是土壤的重要组成部分, 其在土壤肥力、环境保护、农业可持续发展等方面均起着极其重要的作用^[1-2]。然而我国黑土地由于长期施用化肥, 重用轻养, 导致地力下降。一是长期浅耕导致的亚耕层有机碳匮乏问题突出, 黑土层“上肥下瘦”, 亚耕层有机碳含量仅为耕层的 1/3~1/2; 二是“碳饥渴”问题显现, 导致有机碳营养与其他养分比例失衡^[3]。亚耕层作为联结表土层与心土层的重要耕作层, 对于土壤养分供应以及作物根系生长具有至关重要的作用, 对于黑土地地力提升亦有重要意义。

许多研究表明, 秸秆还田是培肥土壤、提升土壤有机碳的有效手段, 秸秆中含有 C、N、P、K 等营养元素, 施入到土壤中可以培肥土壤^[4], 最终提高作物产量。我国东北地区玉米秸秆体量大, 其总量可达 1.4 亿 t, 然而肥料化利用率仅为 36%^[5], 玉米秸秆体量大、产量多, 还田困难, 因此创新秸秆还田方式从而快速提高黑土层有机碳水平成为关键。

国内外研究表明, 在秸秆还田的同时加入微生物腐熟剂、秸秆堆沤、增大秸秆粉碎程度以及适当增加秸秆用量均能提高土壤有机碳的积累速率以及

累积量^[6-8]。本课题组前期基于秸秆形态以及用量开展研究, 一方面研制了秸秆颗粒肥产品, 其堆积密度约为常规粉碎秸秆的 5 倍, 具有体积小、施用方便、与土壤接触性好的优点^[9]; 与粉碎秸秆相比最大可提高腐解速率 31.7%, C 和 N 的累积释放率提高 11.0%和 13.2%^[9]; 当以 $6\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 进行浅耕还田时能较粉碎秸秆更快、更高地增加土壤有机质含量^[10], 为解决大量秸秆的消纳问题提供新的技术手段。另一方面研发了秸秆翻埋机具, 直接将田间大量的玉米秸秆深翻至亚耕层范围实施培肥, 摆脱了还田量的限制。前期研究表明, 当粉碎秸秆由 $6\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增至 $12\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $18\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 土壤有机碳含量逐渐提高, 且高量还田可多年维持较高的土壤肥力^[11], 然而目前颗粒肥以及高量还田措施尚未应用于黑土亚耕层培肥。前人对于亚耕层有机碳提升效应的研究较少, 窦森^[12]在东北地区运用风力注入法实施秸秆“富集深还”技术, 使亚耕层土壤有机碳增加 10%~15%; 闫洪亮等^[13]运用翻转犁开沟 40 cm 将秸秆埋入 2 年后亚耕层有机碳增加约 20%; 韩晓增等^[14]在 20~35 cm 土层中掺入秸秆和有机肥, 以在我国黑土地地区建立肥沃耕作层, 然而这些研究仍以秸秆常量还田为主, 也未涉

及到秸秆形态的比较。此外, 土壤亚耕层的水、气、热等环境均异于耕层, 秸秆颗粒与粉碎秸秆还田后可能会因降解速率以及投入碳量不同而影响亚耕层有机碳的累积。鉴于此, 本试验设置低、中、高三不同用量的秸秆颗粒与粉碎秸秆深埋还田试验, 连续 3 年观察其对亚耕层土壤有机碳及有机碳与养分比例的影响, 从而为解决东北地区玉米秸秆利用难以及亚耕层肥力低下问题找到可行途径。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

田间定位试验于 2015—2018 年在吉林省公主岭市朝阳坡镇 (124°43'E、43°36'N) 进行, 该地处于吉林省中西部, 东辽河中游右岸。当地以雨养农业为主, 种植作物主要为玉米、大豆。属温带大陆性季风气候, 年均气温 5.6℃, 年均降水量 594.8 mm, 无霜期 144 d。试验地土壤类型为典型黑土, 耕作方

式以旋耕、翻耕为主。土壤基础理化性状如表 1。

1.2 试验设计

本试验设置玉米粉碎与颗粒两种秸秆形态, 以当地常量还田的秸秆用量为基准 (玉米收获后剩余地上部的总量, 每年约为 15 t·hm⁻²), 分别设置 1 倍量 (15 t·hm⁻²)、3 倍量 (45 t·hm⁻²)、5 倍量 (75 t·hm⁻²) 3 种梯度处理, 并以秸秆不还田 (CK) 为对照, 共计 7 个处理, 每个处理 3 次重复, 共设 21 个田块, 随机区组排列, 每个田块为长 4 m、宽 4 m (6 垄) 共计 16 m²。供试秸秆取自当地玉米收获时随收割机粉碎后的玉米秸秆, 长度为 10~15 cm, 倍量增加的秸秆主要来自当年不翻耕的邻近田块。将收集起来的秸秆分为两部分, 一部分风干后用作玉米粉碎秸秆还田处理 (FS), 另一部分收集起来用 HC-2000 型粉碎机粉碎后过 2 mm 筛, 按照 30%~35% 比例添加蒸馏水, 搅拌均匀后用 FTHBCX350 型环模秸秆颗粒机挤压制得直径 4 mm、长度 4~6 cm 的棒状固体, 即秸秆颗粒 (KL)。各试验处理编号以及用量如表 2 所示。

表 1 试验地土壤基本理化性状

Table 1 Basic soil properties of the experiment field (Oct. 2015)

土壤	土层	pH	容重	有机碳	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾
Soil	Soil layer/cm		Bulk density/ (g·cm ⁻³)	Organic carbon / (g·kg ⁻¹)	Total N / (g·kg ⁻¹)	Hydro-N / (mg·kg ⁻¹)	Available P / (mg·kg ⁻¹)	Available K / (mg·kg ⁻¹)
黑土	0~20	5.94	1.40	11.40	1.02	120.80	22.26	138.5
Black soil	20~40	6.70	1.53	7.31	0.75	94.12	11.28	129.4

表 2 不同处理的秸秆还田方式与用量

Table 2 Method and rate of straw returning relative to treatment

处理	还田方式	秸秆用量
Treatment	Way of straw returning	Straw rate/ (t·hm ⁻²)
CK	秸秆不还田	0
FS1	玉米秸秆粉碎还田	15
FS3	玉米秸秆粉碎还田	45
FS5	玉米秸秆粉碎还田	75
KL1	玉米秸秆颗粒还田	15
KL3	玉米秸秆颗粒还田	45
KL5	玉米秸秆颗粒还田	75

在 2015 年 10 月前茬玉米收获后实施秸秆翻埋, 将收集到的粉碎秸秆以及秸秆颗粒按设计用量均匀铺于各个小区地表, 用秸秆翻埋犁 (功率 > 92 kW) 将其翻埋进入 30~40 cm 土层深度, 使粉碎秸秆以及秸秆颗粒直接到达亚耕层范围, 此后 3 年试验期间不再进行任何秸秆还田, 每年玉米播种前需清除地表残留秸秆。当地种植制度为玉米连作一年一熟制, 供试玉米品种为奇玉 8 号, 于 2016—2018 年 5 月初进行播种, 种植密度为 67 500 株·hm⁻², 播种前进行侧面深施基肥, 施用量为纯 N 225 kg·hm⁻²、P₂O₅ 75 kg·hm⁻² 和 K₂O 225 kg·hm⁻²。其中磷肥、钾肥一次播施, 氮肥 30% 基施, 70% 拔节施, 各处理的田间管理与普通高产玉米相似。于当年 10 月初收

获,并在收获期进行玉米测产以及土壤样品的采集。

1.3 测定指标与方法

2016—2018年连续3年在夏玉米成熟期(10月初),按照对角线法用不锈钢土钻分别采取0~20 cm、20~40 cm土层的土样,剔除可见的掉落物和根系后,田间过2 mm筛^[15],装入自封袋带回实验室风干备用。在土壤理化指标的测定中,土壤有机质采用重铬酸钾外加热法;全氮采用半微量凯氏法;碱解氮采用扩散法;有效磷采用钼锑抗比色法;速效钾采用火焰光度计法^[16]。

土壤有机碳结构的测定运用¹³C核磁共振法。其主要原理是根据各种碳核所处的化学环境不同,具有不同的共振频率,从而产生了化学位移(符号 δ)现象^[17-18]。本试验中用AV400型核磁共振仪(Bruker, Switzerland)测定,¹³C的共振频率为100.68 MHz,魔角自旋频率为5.0 KHz,接触时间为2 ms,循环时间为5s,数据点为2048,峰面积计算用核磁共振分析软件TopSpin 3.5.b.91p17。其中(0~45) δ 代表烷基碳,(45~110) δ 代表氧烷基碳,(110~160) δ 代表芳香碳,(160~220) δ 代表羧基碳^[19],对位移范围内的峰值进行积分判断腐殖质中不同含碳官能团类型占比。用烷基碳/氧烷基碳(Alkyl C: O-alkyl C)表示腐殖化指数(HI)。芳香度和脂化度的计算公式^[20]如下:

$$\text{芳香度}(\%) = \frac{\text{Aromatic C}(110-160)\delta}{\text{C signal}(110-160)\delta} \times 100$$

$$\text{脂化度}(\%) = \frac{\text{Aliphatic C}(0-110)\delta}{\text{C signal}(110-160)\delta} \times 100$$

2 结 果

2.1 秸秆还田对土壤有机碳含量的影响

表3为秸秆还田3 a不同处理下0~20 cm与20~40 cm两个土层SOC的变化情况。比较发现,秸秆还田3年间对0~20 cm SOC有不同程度影响,2016年即秸秆还田1a后,仅FS5处理SOC含量显著高于CK 10.52% ($P < 0.05$),而此外5种秸秆还田处理与CK并无显著差异;2017年FS5、FS3、KL5、KL3均显著提高SOC含量,增幅约为5.5%~7.5%;

2018年仅FS5处理显著高于CK 8.22% ($P < 0.05$)。FS5处理能够在0~20 cm土层实现较高的SOC增长率主要是由于土体对大量秸秆的容纳能力有限,翻入到亚耕层的秸秆由于量太大而延伸到表层范围,从而促进0~20 cm土层SOC的提高。

秸秆深埋还田对20~40 cm土层有机碳提升效应更显著。2016年,与CK相比,除KL1外,其余5种秸秆还田处理均显著提高SOC含量,其中KL5的SOC增长率最高为21.31% ($P < 0.05$),FS1增长率最低为5.35% ($P < 0.05$);2017年,20~40 cm土层SOC增幅高于2016年,秸秆还田处理SOC含量均显著高于CK,其增长率以KL1最低为5.85% ($P < 0.05$),FS5最高为27.33% ($P < 0.05$);2018年,仅FS5、FS3、KL5显著高于CK,其增长率分别为18.37% ($P < 0.05$)、11.60% ($P < 0.05$)、11.73% ($P < 0.05$)。由不同年份SOC增长率变化看,2017年各秸秆还田处理增长率普遍最高,表明秸秆还田后第2年是土壤有机碳的主要积累时期。

2.2 秸秆形态对土壤有机碳的影响

对相同用量不同秸秆形态的处理进行比较可以看出(表3),当还田量为均为1倍量时,0~20 cm土层SOC含量在秸秆颗粒与粉碎秸秆间并无显著差异,对于20~40 cm土层而言,仅2017年粉碎秸秆还田SOC含量显著高于秸秆颗粒还田,增幅为11.5% ($P < 0.05$)。当还田量均为3倍量时,0~20 cm土层SOC含量在秸秆颗粒与粉碎秸秆间仍无显著差异,而对于20~40 cm土层,粉碎秸秆还田在2017、2018年显著高于秸秆颗粒还田9.8% ($P < 0.05$)、8.7% ($P < 0.05$),秸秆颗粒还田下SOC含量虽在2016年较粉碎秸秆还田有提高但差异不显著;当还田量均为5倍量时,0~20 cm土层仅2016年表现出粉碎秸秆还田下的SOC含量显著高于秸秆颗粒还田,增幅为8.1% ($P < 0.05$),对于20~40 cm土层,粉碎秸秆还田在2017、2018年显著高于秸秆颗粒还田7.6% ($P < 0.05$)、5.9% ($P < 0.05$),秸秆颗粒还田SOC含量虽在2016年较粉碎秸秆还田有提高但差异不显著。由此可见在20~40 cm土壤亚耕层范围内,随着还田时间的延长,粉碎秸秆还田更易在还田后期大幅提高土壤有机碳。

表 3 不同处理下土壤有机碳含量及有机碳增长率

Table 3 Soil organic carbon content and its increase rate relative to treatment

土层 Soil layer/ cm	处理 Treatment	2016 年		2017 年		2018 年	
		SOC / (g·kg ⁻¹)	增长率 Increase rate /%	SOC / (g·kg ⁻¹)	增长率 Increase rate /%	SOC / (g·kg ⁻¹)	增长率 Increase rate /%
0~20	CK	11.06±0.08b	—	11.31±0.06c	—	10.71±0.22b	—
	FS1	10.85±0.25b	-1.93	11.60±0.16bc	2.56	11.25±0.14ab	5.01
	FS3	11.34±0.08b	2.50	12.07±0.11a	6.75	11.30±0.17ab	5.54
	FS5	12.22±0.08a	10.52	12.15±0.12a	7.46	11.59±0.32a	8.22
	KL1	11.13±0.17b	0.66	11.54±0.14c	2.00	10.85±0.17b	1.28
	KL3	11.21±0.19b	1.33	11.94±0.17ab	5.54	10.78±0.23b	0.62
	KL5	11.30±0.20b	2.14	12.10±0.10a	6.96	11.10±0.04ab	3.64
20~40	CK	7.29±0.11e	—	8.61±0.06e	—	7.84±0.22c	—
	FS1	7.68±0.10cd	5.35	10.16±0.08b	18.04	8.22±0.07c	4.89
	FS3	7.92±0.10bc	8.69	10.34±0.11b	20.05	8.75±0.15b	11.60
	FS5	8.76±0.12a	20.12	10.96±0.12a	27.33	9.28±0.07a	18.37
	KL1	7.43±0.07de	1.92	9.11±0.06d	5.85	7.91±0.18c	0.89
	KL3	8.12±0.10b	11.39	9.42±0.09c	9.41	8.05±0.14c	2.64
	KL5	8.84±0.06a	21.31	10.19±0.06b	18.35	8.76±0.08b	11.73

注: 同一土层无相同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同。Note: Lowercase letters represent difference between treatments at level of 0.05. The same below.

2.3 秸秆用量对土壤有机碳的影响

当秸秆形态相同时, 比较不同用量对 SOC 的影响可以看出 (表 3), 0~20 cm 土层, SOC 含量基本呈现随秸秆用量增大而升高的状态, 其中 2016 年 FS5 较 FS3 与 FS1 高 7.8% ($P<0.05$)、12.6% ($P<0.05$); 2017 年, FS5 与 FS3 分别较 FS1 高 4.7% ($P<0.05$)、4.1% ($P<0.05$), KL5 与 KL3 分别较 KL1 高 4.9% ($P<0.05$)、3.5% ($P<0.05$); 2018 年相同秸秆形态不同用量间无显著差异。20~40 cm 土层, SOC 含量随秸秆用量均增加显著 ($P<0.05$), 表现为在 2016 年, FS5 分别较 FS3 与 FS1 高 10.6%、14.1%, KL5 分别较 KL3 与 KL1 高 8.9%、18.9%, 而 KL3 也较 KL1 高 9.3%; 2017 年, FS5 分别较 FS3 与 FS1 高 6.0%、7.9%, KL5 分别较 KL3 与 KL1 高 8.2%、11.9%, 而 KL3 也较 KL1 高 3.4%; 2018 年, FS5 分别显著高于 FS3 与 FS1 6.1%、12.9%, FS3 也较 FS1 高 6.4%, 而 KL5 分别较 KL3 与 KL1 高 8.8%、10.7%。可见, 随着秸秆用量的成倍增加, 土壤有机碳提升幅度越显著, 且

高量还田有较长期期的有机碳提升效应。

2.4 秸秆形态与秸秆用量的交互效应

对秸秆形态与秸秆用量两种影响因素进行交互分析, 由表 4 可见, 2016 年, 相较于秸秆形态, 秸秆用量对 2 个土层有机碳的影响极为显著 ($P<0.01$), 这也与前文秸秆高量还田显著提高土壤有机碳含量相符, 秸秆形态与用量对 2 个土层有机碳的交互影响亦为显著 ($P<0.05$)。2017 年, 秸秆形态对 20~40 cm 土层影响极显著 ($P<0.01$), 秸秆用量对 0~20 cm 与 20~40 cm 土层影响极显著 ($P<0.01$), 这是由于秸秆深埋的位置恰好在 20~40 cm 土层范围内, 而高量还田时会致使部分秸秆残留在 0~20 cm 土层内, 因而对 0~20 cm 土层亦有显著影响。2018 年, 秸秆形态、秸秆用量与秸秆形态×用量仅对 20~40 cm 土层有机碳含量影响极显著 ($P<0.01$), 表明秸秆深埋还田后对亚耕层土壤有机碳影响更显著, 一次性秸秆还田 3 年后仍能保持亚耕层有机碳的持续提高。

表 4 双因素方差分析秸秆形态与秸秆用量交互作用对土壤有机碳的影响

Table 4 Two-way ANOVA analysis of the effect of the interaction between straw morphology and straw returning rate on SOC

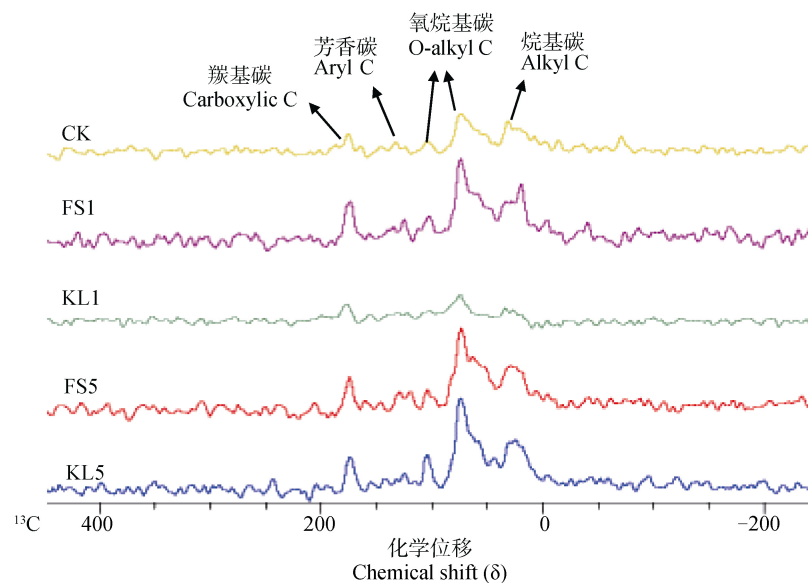
年份 Year	土层 Soil layer/cm	秸秆形态 Straw morphology		秸秆用量 Straw returning rate		秸秆形态×用量 Straw morphology × Straw returning rate	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
		2016	0~20	6.66	0.027 4	20.47	0.000 3
	20~40	0.03	0.862 2	135.54	<0.000 1	4.64	0.037 6
2017	0~20	0.50	0.495 9	7.81	0.009 1	0.04	0.956 4
	20~40	245.90	<0.000 1	93.40	<0.000 1	1.88	0.202 6
2018	0~20	8.97	0.013 5	1.63	0.244 5	0.06	0.944 9
	20~40	73.64	<0.000 1	65.40	<0.000 1	7.90	0.008 8

2.5 ^{13}C 核磁共振技术对土壤有机碳结构的表征

利用核磁共振技术对秸秆还田 3 年后高、低倍量处理下的土壤有机碳结构进行表征, 图 1 的结果表明, 秸秆高量还田特征峰高度高于低量还田, 高量还田能够明显增加有机碳含量。亚耕层土壤有机碳的 ^{13}C -NMR 的化学位移范围在 0~250 之间, 这符合固体土壤 ^{13}C -NMR 的化学位移范围, 在此范围内主要有 4 种含碳官能团的特征峰, 即在位移 0~45 表示烷基碳, 45~110 表示氧烷基碳, 110~160 表示芳香碳, 160~220 表示羧基碳, 图 1 表明脂肪碳以及含氧脂肪碳信号最强, 其次为羧基(羧基)

碳, 芳香碳信号最弱, 说明当地土壤有机碳是以脂族结构为主, 芳香碳并未在有机碳中占有主要地位, 这一方面可能是由于当地土地利用方式长期以农田为主, 类似于木质素的降解产物相对较少, 芳香结构的来源较少, 另一方面是由于当地年均气温低, 尤其是亚耕层土壤微生物活性低, 导致合成芳香化合物并与有机碳发生聚合反应的速率降低^[17]。

结合图 1 对土壤有机碳中不同结构进行定性分析, 结果如表 5 所示, 与 CK 相比, 秸秆深埋还田 3 年增加了氧烷基碳在土壤有机碳结构中的占比而降低了烷基碳占比, 这与秸秆中烷氧碳比例较高

图 1 不同处理下亚耕层 (20~40 cm) 土壤有机碳的 ^{13}C 核磁共振图谱Fig. 1 ^{13}C NMR atlas of soil organic carbon in the subsoil (20-40 cm) relative to treatment

有关^[21]。此外, FS5 处理还在一定程度上降低了羧基(羧基)碳与芳香碳的占比, 表明大量粉碎秸秆还田对土壤有机碳起到更新作用, 在一定程度上活化了有机碳中的稳定组分, 然而 KL5 还田与之相反, 它能够提高羧基(羧基)碳与芳香碳的占比, 使得芳香度较高而脂化度降低, 表明秸秆颗粒更利于还田后土壤有机碳结构的稳定。低倍量秸秆还田 3 年后有机碳的芳香度以及脂化度虽较 CK 有所降低但差异较小。烷基碳与氧烷基碳的比值反映了腐殖化指数(HI)的高低, 秸秆还田后均会导致 HI 的降低,

表明秸秆还田后增加了不稳定碳组分的占比, 其中粉碎秸秆处理的降低幅度高于秸秆颗粒, 高量还田的降低幅度高于低量还田。

2.6 不同处理下土壤 SOC 与 TN、TP、TK 比例关系

土壤内部碳氮磷钾养分元素的化学计量比也是反映土体内养分循环的主要指标^[22], 秸秆还田后 SOC 大量增加, 会对养分元素比例平衡造成影响。通过对不同处理下各生长季的土壤碳氮比(C/N)、碳磷比(C/P)、碳钾比(C/K)的比较分析如图 2 所示。

表 5 核磁共振技术测定亚耕层(20~40 cm)土壤有机碳官能团相对含量比较

Table 5 Relative abundances of organic carbon functional groups in subsoil (20–40 cm) determined by ¹³C-NMR

处理 Treatments	羧基碳 Carbonylic C [220–160]δ	芳香碳 Aryl C [160–110]δ	氧烷基碳 O-Alkyl C [110–45]δ	烷基碳 Alkyl C [45–0]δ	芳香度 Aromaticity	脂化度 Aliphaticity	烷基碳: 氧烷基碳 Alkyl C : O-Alkyl C
CK	10.8	7.0	46.6	35.6	7.8	92.2	0.76
FS1	12.7	5.9	58.1	23.3	6.8	93.2	0.40
KL1	20.3	4.9	47.5	27.2	6.2	93.8	0.57
FS5	9.5	5.1	63.2	22.3	5.6	94.4	0.35
KL5	12.9	11.1	52.6	23.4	12.7	87.3	0.44

2016 年, 0~20 cm 土层, 仅 FS5 处理显著提高土壤 C/N, 与 CK 相比增幅 7.8% ($P<0.05$), 而 20~40 cm 土层则表现为 KL3、KL5 显著提高土壤 C/N 7.5% ($P<0.05$)、13.2% ($P<0.05$), 可见高量还田在第 1 年即表现出显著提高土壤 C/N 的优势; 2017 年, 秸秆还田对 0~20 cm 土壤 C/N 无显著影响, 这与第一年秸秆还田对上层土壤扰动较大有关, 20~40 cm 土层虽然随着秸秆倍量的增加土壤 C/N 比有提高, 但仅 FS5 与 KL5 与 CK 有显著差异, 增幅达到 6.8% ($P<0.05$)、6.1% ($P<0.05$); 2018 年, 0~20 cm 土壤 C/N 随秸秆用量的增加而提高, 但与 CK 并无显著差异, 20~40 cm, 仅 FS5 处理显著提高土壤 C/N 12.3% ($P<0.05$), 这是因为大量粉碎秸秆还田导致腐解期延长, 后期仍有纤维素、木质素等物质大量分解, 为土壤提供有机碳营养。2016 年与 2018 年 0~20 cm、20~40 cm 2 个土层 C/N 约在 9~10 范围内, 而 2017 年 20~40 cm 土壤 C/N 较 0~20 cm 有所提高, 一方面是由于作物种植前在表土层施入的底肥

有关, 另一方面是因为大量秸秆埋入亚耕层范围, 显著提高亚耕层有机碳含量, 增大了 C/N。

2016 年秸秆深埋还田对 0~20 cm 土层 C/P 无显著影响, 而 20~40 cm 土层仅有 FS5 显著提高土壤 C/P, 增幅为 8.8% ($P<0.05$); 2017 年, 秸秆还田对 0~20 cm 土壤 C/P 亦无显著影响, 对于 20~40 cm, 与 CK 相比, FS3、FS5 及 KL5 均能显著提高土壤 C/P, 增幅分别达 11.5% ($P<0.05$)、10.4% ($P<0.05$)、9.9% ($P<0.05$); 2018 年, 仅 FS3 与 FS5 处理显著提高土壤 C/P 14.2% ($P<0.05$)、19.7% ($P<0.05$), 可见 C/P 的增幅随还田时间逐渐提高。

秸秆高量还田对 C/K 提升具有显著优势。2016 年, FS5 处理显著提高 0~20 cm 土层土壤 C/K 11.9% ($P<0.05$), 而 20~40 cm 土层, FS5、KL3、KL5 均较 CK 显著提高土壤 C/K 11.9% ($P<0.05$)、8.5% ($P<0.05$)、8.3% ($P<0.05$); 2017 年各处理对 0~20 cm 土层土壤 C/K 无显著影响, 对于 20~40 cm 土层而言, 仅 FS5 显著提高土壤 C/K 22.3%

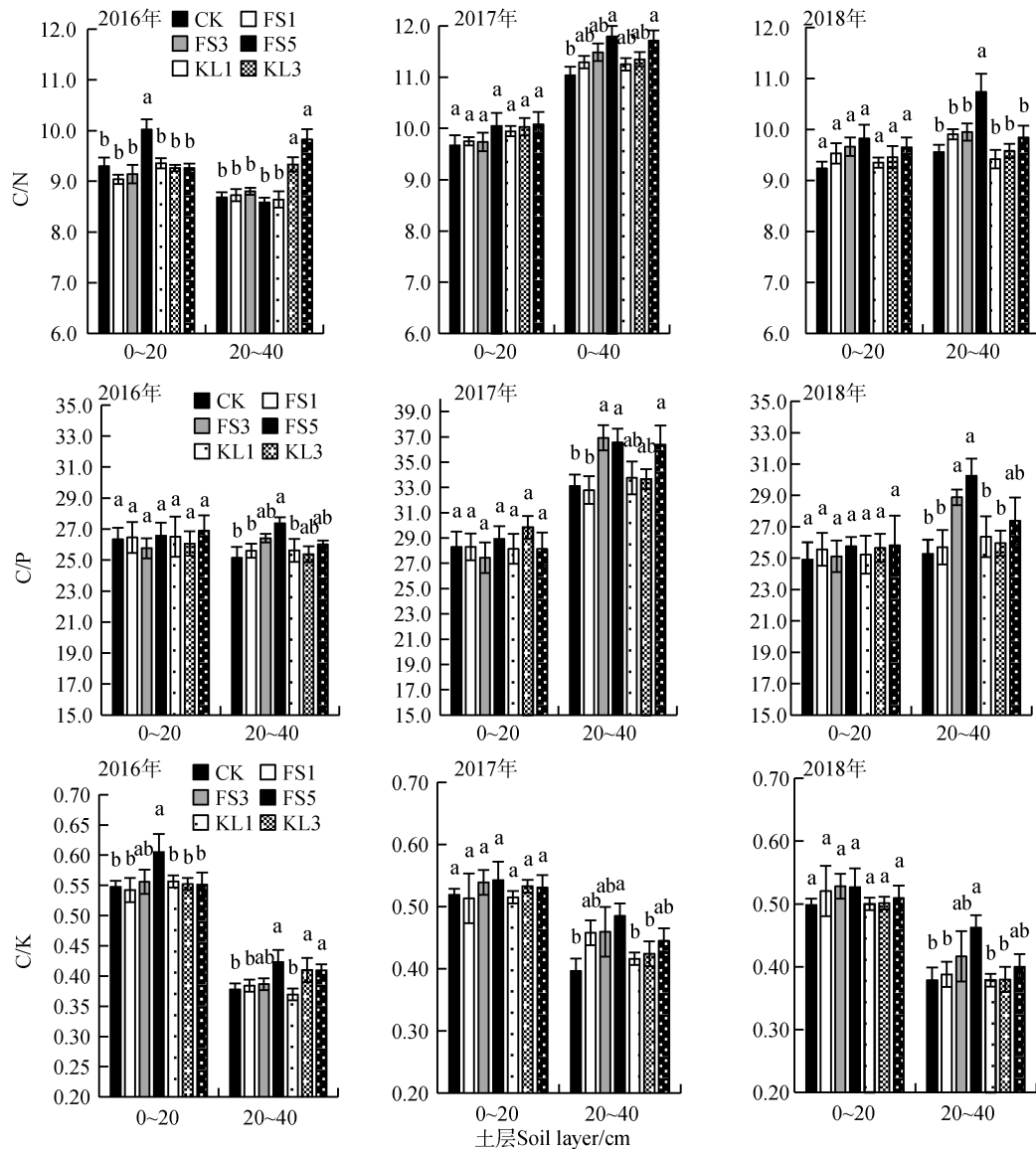


图2 不同处理对0~20 cm与20~40 cm土层C/N、C/P、C/K的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on C/N, C/P and C/K in 0-20 cm and 20-40 cm soil layers

($P < 0.05$); 2018年, 仅FS5对20~40 cm土壤C/K有显著提高, 其增幅为22.1% ($P < 0.05$)。综上所述, 土壤养分元素比例(C/N、C/P、C/K)随秸秆还田时间的延长以及秸秆用量的增加而逐渐增大, 表明一次性秸秆高量还田对土壤有机碳的提升具有长期效应。

2.7 有机碳与养分指标的相关性

将土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、C/N、C/P、C/K各指标进行相关性分析(表6), 其中0~20 cm土层SOC与TN、C/N、

C/P有极显著($P < 0.01$)正相关, 与TK以及C/K有显著($P < 0.05$)正相关, TN与C/K、TK与C/N及C/K、C/N与C/P均有极显著($P < 0.01$)相关, 而TK与C/P亦有显著($P < 0.05$)相关, 表明秸秆还田后各养分均有提高, 由于秸秆含碳量较高, 腐解转化后提高土壤中碳的比例相对较高。20~40 cm土层SOC与TK、C/N、C/P、C/K均有极显著($P < 0.01$)正相关, TK与C/K、C/N与C/P亦有极显著($P < 0.01$)正相关, 表明秸秆深还更有利于亚耕层养分元素比例平衡。

表 6 0~20 cm 与 20~40 cm 土层土壤养分指标间的 Pearson 相关

Table 6 Pearson's correlation analysis of soil nutrient indexes in 0-20 cm and 20-40 cm soil layer

土层 Soil layer /cm	指标 Index	SOC	TN	TP	TK	C/N	C/P	C/K
0~20	SOC	1						
	TN	0.550 7**	1					
	TP	0.181 9	0.235 5	1				
	TK	0.435 2*	-0.270 7	-0.176 3	1			
	C/N	0.823 9**	-0.019 0	0.053 8	0.706 0**	1		
	C/P	0.673 3**	0.260 0	-0.603 9**	0.491 1*	0.633 3**	1	
	C/K	0.472 9*	0.752 0**	0.338 7	-0.587 1**	0.055 0	0.122 5	1
	20~40	SOC	1					
TN		0.367 2	1					
TP		-0.081 6	0.528 2*	1				
TK		0.876 0**	0.071 0	-0.205 5	1			
C/N		0.871 5**	-0.132 4	-0.382 6	0.902 9**	1		
C/P		0.874 2**	0.039 4	-0.553 0**	0.840 6**	0.920 0**	1	
C/K		0.965 1**	0.496 9*	0.008 5	0.720 3**	0.763 1**	0.796 8**	1

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

3 讨 论

3.1 秸秆高量还田对土壤有机碳的快速提升作用

玉米秸秆约含有 40%~50% 的碳元素, 是土壤有机碳的重要来源^[23]。本研究表明, 秸秆深埋还田对 2 个土层土壤有机碳均有提高, 但对 20~40 cm 的提升更为显著, 还田第一年提升幅度约在 2%~20%, 提升幅度受秸秆用量的影响更显著。不少学者的研究也证实了增加秸秆用量可提高土壤有机碳含量, 钟杭等^[24]发现秸秆连续两年还田后, 全量与半量还田分别较秸秆不还田提升土壤有机质 7.09%、5.87%, 路文涛等^[25]进行了 3 年的秸秆还田试验发现 13 500 kg·hm⁻² 还田较 4 500 kg·hm⁻² 还田大幅提高土壤总有机碳含量, 徐萌等^[26]研究发现 3~5 cm 的粉碎秸秆以 18 000 kg·hm⁻² 还田时能更显著地提高土壤有机质以及全氮含量, 均与本研究中的结果近似。这主要是因为秸秆的碳氮比 (65~85) 较高, 土壤的碳氮比 (10~12) 偏低, 将含碳量低的土壤和含氮量低的植物残体混合时使碳氮比接近于适宜微生物生长的碳氮比, 能加快秸秆的分解^[27], 产生更多腐殖物质, 从而提高土壤有机质含量^[28-29]。

总结前人研究发现, 秸秆常量年年还田时, 亚耕层土壤有机碳约增加 10%~20%, 且在还田前几年提升幅度逐年增加^[30], 而本文研究发现, 当一次性实施 3 倍量还田时亚耕层土壤有机碳提高 3%~20%, 5 倍量还田时提高 12%~27%, 且第 2 年增幅最高, 第 3 年开始下降, 可见增加秸秆倍量与秸秆年年还田对土壤有机碳的提升范围基本一致, 优势之处在于一方面在还田前 2 年即表现出对土壤有机碳的大幅提高, 具有快速效应; 另一方面, 一次性实施高倍量还田避免了年年翻耕对土壤的扰动与破坏, 且节省人力物力等, 提高经济效益。

秸秆还田量的阈值问题一直备受争议, 一是大量秸秆还田造成土壤虚而不实, 不利于作物扎根以及出苗^[31], 二是秸秆属于高碳氮比有机物, 微生物降解时要消耗土壤氮素, 影响了作物对氮素的利用。本研究的深埋还田措施很好地解决了第一个问题, 将大量秸秆直接还至深层, 相当于直接施入碳源, 不影响作物出苗同时培肥了亚耕层。对于第二个问题, 我们在当地农户正常施基肥的条件下进行的试验, 且以年为取样周期进行研究时并未发现土壤氮素的显著下降, 原因可能在于土壤氮素下降的主要

时期为秸秆还田初期, 待到第一次取样时, 土壤生态系统已经向原有的平衡恢复, 在今后的研究中我们会进一步密集取样, 并对微生物群落结构的变化进行监测。

对比发现, 同样实施秸秆深埋还田, 东北地区有机碳增幅高于黄淮海地区^[32], 这与东北地区气候类型有关, 吉林省的冻土期通常为 10 月末至次年 4 月初, 平均冻土深度 ≥ 120 cm^[33], 冻结过程会导致一部分微生物脱水死亡, 另一部分微生物的活性也会因低温而受到抑制, 使可溶性有机质、微生物生物量碳氮以及其他易降解性有机质增加, 有机质的矿化作用减弱^[34], 最终有机质得以大量累积。另一

方面, 秸秆颗粒处理 (中高量) 的土壤有机碳含量仅在还田第 1 年略高于粉碎秸秆, 但差异不显著, 且第 2、第 3 年均低于粉碎秸秆, 这与黄淮海地区的试验结果不同, 秸秆颗粒未较粉碎秸秆表现出对土壤有机碳的快速提升效应, 一是由于秸秆颗粒在土壤中降解较快, 有机质的积累—矿化速率也较快; 二是颗粒状的秸秆肥易滚动, 当在大田经过撒施于地面—翻埋入土下的过程后在土壤剖面中呈现“上疏下密”的点状分布, 而粉碎秸秆由于体积大, 移动性差, 翻埋时恰好集中在了亚耕层 (图 3), 因而粉碎秸秆处理的亚耕层有机碳含量相对较高, 所以秸秆颗粒施用建议以高量密集还田为主。

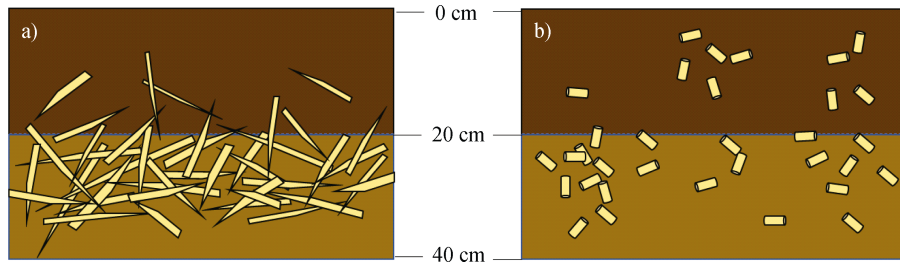


图 3 深埋还田后粉碎秸秆 (a) 与秸秆颗粒 (b) 在土壤中的分布示意图

Fig. 3 Distribution of chopped straw (a) and pelletized straw (b) in soil after deep-buried

3.2 秸秆高量还田对有机碳结构的影响

^{13}C 核磁共振波谱已成为有机碳研究中主要的分析手段之一, 从核磁共振波谱能获得许多关于有机碳的结构信息, 从化学位移值可推测碳核所处的官能团; 从各种峰的积分高度比可求得对应的碳核个数比^[17]。本研究中高量还田在亚耕层土壤核磁共振图谱上普遍具有较强的烷基碳与氧烷基碳信号, 说明秸秆还田能够提高土壤有机碳在核磁共振中的响应灵敏度。KL1 处理的核磁共振波谱曲线与 CK 较为相似, 含碳官能团吸收峰普遍较低, 这也表明了秸秆还田多年后对土壤有机碳的影响效果逐渐减弱, 最终与土壤原本的有机碳组成结构相一致, 即出现“趋同特征”, 这主要与土壤本身的成土过程、土壤质地、土地利用方式以及植被等有关^[17, 21, 35]。李娜等^[21]指出, 土壤有机质是在特定气候和生物环境条件下不断形成有机化合物的长期演变过程, 它包括了植物腐解过程产生的多糖、木质素、蛋白质以及角质等材料, 还包括动物以及微生物残体、分泌物以及排泄物等, 是处于不同分解阶段的有机物质集合体^[36], 与原本土壤有机质的组成及结构密切

相关。本试验中供试土壤为黑土, 所测得的有机碳的腐殖化指数 (HI) 在 0.3~0.8 之间, 这符合世界土壤腐殖化指数范围 (0.2~1.11)^[21], 秸秆还田后降低了腐殖化指数, 这表明秸秆在土壤中参与了这一新的成土过程, 有待于聚合的不稳定的有机碳增多。此外, 土地利用方式以及植被也对各含碳官能团的占比有很大影响, 本试验田长期用作农业生产, 且种植作物较为单一 (玉米), 耕作方式以及外源有机质的加入成为对土壤有机碳影响较大的因素。本研究中除 KL5 处理外, 秸秆还田使芳香碳占比降低, 这可能是由于存在于土壤有机质脂肪连上的芳香基不稳定, 易转化形成含氧脂肪烃或者羰基等更稳定的脂肪链^[37], 而秸秆颗粒还田的芳香度较高是因为秸秆颗粒在土壤中的腐解速率快^[9], 不稳定的有机碳生成后又经过了一段时间的转化, 最终形成更加稳定的芳香碳。同时由于玉米茎中的碳水化合物含量较高, 玉米叶中脂肪族碳含量较高, 施入到土壤中后碳水化合物很快被消耗掉, 脂肪族碳含量相对增加^[38], 可见玉米叶的施入更有利于有机碳的稳定。综上所述, 粉碎秸秆高量还田虽然能在数量上提高

土壤有机碳水平, 但是对土壤有机碳的扰动期较长, 不利于短期内转化成稳定的土壤有机碳, 而秸秆颗粒虽然在还田 3 年后对土壤有机碳含量提升幅度较低, 但能使土壤有机碳结构稳定性更高。

3.3 秸秆高量还田对土壤养分比例的影响

近些年化肥的过量施用造成土壤养分不均衡发展, “碳短板”现象存在。玉米秸秆作为高碳源有机物质 (C/N 约为 65~85) 施入到土壤中, 会对土壤氮、磷、钾等养分元素平衡造成影响^[39]。本研究同样发现施入高量秸秆后土壤 C/N、C/P、C/K 有一定程度提高, 尤其对 20~40 cm 亚耕层有显著的提升效应, 其中, 土壤 C/N 由原来 9.0 左右上升至 10.0~11.0, 表明土壤肥力提升。一般而言, 土壤较适宜的 C/N 在 15~25, 此时有机质供肥条件优越, 而在本研究中土壤 C/N 低于该范围, 在一定程度上利于有机质的积累^[40], 其中 C/N 较低的另一原因是种植玉米前底肥的施入使得土壤氮含量整体增加, 因而 C/N 较低。此外, 秸秆的施入促进了微生物对氮素的有效利用, 避免了氮素流失, 这对于土壤地下水硝酸盐污染以及大气 N₂O 温室效应的缓解均具有重要意义。秸秆深还在各生长季均能大幅度提升土壤 C/P, 波动范围在 25~35, 说明在该地区磷的有效性仍然偏低^[41]。高量还田亦能大幅提高亚耕层土壤 C/K, 亚耕层养分比例的显著提高与秸秆中 C 元素占比最高有关。由于浅施化肥, 氮磷钾养分在 0~20 cm 表层积累, 因而表层各处理的 C 与其他元素比例并无显著差异。由 Pearson 相关分析可以看出, 各元素比例间呈现显著正相关, 表明通过增加秸秆用量提高土壤有机碳含量可以促进养分元素平衡, 最终提高土壤肥力水平。

4 结 论

黑土亚耕层有机碳含量的提升幅度随秸秆倍量的增加而增加, 秸秆还田第 2 年是有机碳的主要积累时期, 且土壤有机碳受秸秆倍量的影响更显著。粉碎秸秆与秸秆颗粒分别易促进烷基碳链型与芳香烃型有机碳分子的形成。秸秆高量还田利于促进碳与氮、磷、钾养分元素平衡, 秸秆颗粒还田具有短期快速效应, 而粉碎秸秆具有长期缓释效应。可见, 秸秆高量还田是缓解黑土地力下降, 同时解决玉米

秸秆利用难问题的可行途径。

参考文献 (References)

- [1] Li C S. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: A comparison on agroecosystem carbon pool in China and the U.S. [J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20 (4): 345—350. [李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究[J]. 第四纪研究, 2000, 20 (4): 345—350.]
- [2] Su Y Z, Zhao H L. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22 (3): 220—228. [苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22 (3): 220—228.]
- [3] Zhao J H, Zhang C Z, Zhang J B. Effect of straw returning via deep burial coupled with application of fertilizer as primer on soil nutrients and winter wheat yield[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 438—449. [赵金花, 张丛志, 张佳宝. 激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53 (2): 438—449.]
- [4] Beare M H, Wilson P E, Fraser P M, et al. Management effects on barley straw decomposition, nitrogen release, and crop production[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66 (3): 848—856.
- [5] Shi Z L, Jia T, Wang Y J, et al. Comprehensive utilization status of crop straw and estimation of carbon from burning in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38 (9): 32—37. [石祖梁, 贾涛, 王亚静, 等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38 (9): 32—37.]
- [6] Sun Y, Cheng J Y. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 83 (1): 1—11.
- [7] Chang J, Lu M, Yin Q Q, et al. Progress of research on pretreatment of corn stover[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28 (11): 1—8. [常娟, 卢敏, 尹清强, 等. 秸秆资源预处理研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28 (11): 1—8.]
- [8] Koullas D P, Christakopoulos P, Kekos D, et al. Correlating the effect of pretreatment on the enzymatic hydrolysis of straw[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1992, 39 (1): 113—116.
- [9] Wang J, Zhang L, Pang H C, et al. Returning granulated straw for accelerating decomposition rate and improving soil fertility[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33 (6): 177—183. [王婧, 张莉, 逢焕成, 等. 秸秆颗粒化还田加速腐解速率提高培肥效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33 (6): 177—183.]
- [10] Zhang L, Wang J, Pang H C, et al. Effect of granulated

- straw incorporation on soil nutrient and grain yield of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25 (12): 1770—1778. [张莉, 王婧, 逢焕成, 等. 秸秆颗粒还田对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25 (12): 1770—1778.]
- [11] Cong P, Li Y Y, Wang J, et al. The feasibility of improving the subsoil fertility quality by incremental-deep straw application. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, DOI: 10.11674/zwyf.19048. [丛萍, 李玉义, 王婧, 等. 不同用量秸秆深还对提高亚表层土壤肥力质量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2019, DOI: 10.11674/zwyf.19048.]
- [12] Dou S. Improving subsoil fertility through a new technology of continuous in belt and deep incorporation of corn stover[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23 (6): 1670—1675. [窦森. 玉米秸秆“富集深还”与土壤亚表层培肥[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (6): 1670—1675.]
- [13] Yan H L, Wang S N, Zou H T, et al. Effects of two years of stalk deeply returned to the field on soil microaggregates and soil organic matter and pH value after in semiarid region of the northeastern China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20 (4): 44—48. [闫洪亮, 王胜楠, 邹洪涛, 等. 秸秆深还田两年对东北半干旱区土壤有机质、pH 值及微团聚体的影响[J]. *水土保持研究*, 2013, 20 (4): 44—48.]
- [14] Han X Z, Zou W X, Wang F X, et al. Construction effect of fertile cultivated layer in black soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20 (12): 2996—3002. [韩晓增, 邹文秀, 王凤仙, 等. 黑土肥沃耕层构建效应[J]. *应用生态学报*, 2009, 20 (12): 2996—3002.]
- [15] Ren C J, Zhao F Z, Kang D, et al. Linkages of C: N: P stoichiometry and bacterial community in soil following afforestation of former farmland[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 376: 59—66.
- [16] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [17] Liang C S, Dang Z. Application of NMR spectroscopy in research of humic materials[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20 (4): 277—279. [梁重山, 党志. 核磁共振波谱法在腐殖质研究中的应用[J]. *农业环境保护*, 2001, 20 (4): 277—279.]
- [18] Liu X C, Li J, Xie L, et al. Characterization methods of humic acid: A review[J]. *Water Purification Technology*, 2009, 28 (3): 6—9, 22. [刘新超, 李俊, 谢丽, 等. 腐殖酸表征方法研究进展[J]. *净水技术*, 2009, 28 (3): 6—9, 22.]
- [19] Kölbl A, Kögel-Knabner I. Content and composition of free and occluded particulate organic matter in a differently textured arable Cambisol as revealed by solid-state ^{13}C NMR spectroscopy[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167 (1): 45—53.
- [20] Zhang Q. Transformation of carbon and nitrogen in soil aggregates as affected by long-term fertilization in A rice-wheat rotation system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. [张倩. 长期施肥下稻麦轮作体系土壤团聚体碳氮转化特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.]
- [21] Li N, Sheng M, You M Y, et al. Advancement in research on application of ^{13}C NMR techniques to exploration of chemical structure of soil organic matter[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (4): 796—812. [李娜, 盛明, 尤孟阳, 等. 应用 ^{13}C 核磁共振技术研究土壤有机质化学结构进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (4): 796—812.]
- [22] Xu J L, Hu N J, Zhu L Q. Effect of amount of annual straw returning on soil nutrients and yield in winter wheat field[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36 (2): 215—222. [徐蒋来, 胡乃娟, 朱利群. 周年秸秆还田量对麦田土壤养分及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36 (2): 215—222.]
- [23] Pan J L, Dai W A, Shang Z H, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21 (5): 526—535. [潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21 (5): 526—535.]
- [24] Zhong H, Zhang Y Y, Lin C L, et al. Means of all wheat and rice straw application without chopping and cultivating and its effect on crop yield and soil fertility[J]. *Soils and Fertilizers*, 2003 (3): 34—37. [钟杭, 张勇勇, 林潮澜, 等. 麦稻秸秆全量整草免耕还田方法和效果[J]. *土壤肥料*, 2003 (3): 34—37.]
- [25] Lu W T, Jia Z K, Zhang P, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30 (3): 522—528. [路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30 (3): 522—528.]
- [26] Xu M, Zhang Y L, Huang Y, et al. Effects of returning straw to field on soil nutrient content and corn photosynthesis in semiarid region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30 (4): 153—156. [徐萌, 张玉龙, 黄毅, 等. 秸秆还田对半干旱区农田土壤养分含量及玉米光合作用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30 (4): 153—156.]
- [27] Parnas H. A theoretical explanation of the priming effect based on microbial growth with two limiting substrates[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1976, 8 (2): 139—144.

- [28] Zhu P L, Wang Z M, Huang D M, et al. Effect of inorganic nitrogen on mineralization of organic carbon ($^{14}\text{C}+^{12}\text{C}$) in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38 (4): 457—463. [朱培立, 王志明, 黄东迈, 等. 无机氮对土壤中有机碳矿化影响的探讨[J]. *土壤学报*, 2001, 38 (4): 457—463.]
- [29] Heitkamp F, Wendland M, Offenberger K, et al. Implications of input estimation, residue quality and carbon saturation on the predictive power of the Rothamsted Carbon Model[J]. *Geoderma*, 2012, 170: 168—175.
- [30] Hong C L, Wei Y Z, Huang J F, et al. Effects of total crop straw return on soil fertility and field ecological environment[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science)*, 2003, 29(6): 627—633. [洪春来, 魏幼璋, 黄锦法, 等. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2003, 29(6): 627—633.]
- [31] Li S K, Wang K R, Feng J K, et al. Factors affecting seeding emergence in winter wheat under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 463—465, 478. [李少昆, 王克如, 冯聚凯, 等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. *作物学报*, 2006, 32(3): 463—465, 478.]
- [32] Cong P, Li Y Y, Gao Z J, et al. High dosage of pelletized straw returning rapidly improving soil organic carbon content and wheat-maize yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(1): 148—156. [丛萍, 李玉义, 高志娟, 等. 秸秆颗粒化高量还田快速提高土壤有机碳含量及小麦玉米产量[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1): 148—156.]
- [33] Yan X Y, Wang D N, Yuan F X. Temporal and spatial variation characteristics of frozen soil in Jilin Province in recent 52 years[J]. *Meteorological Disaster Prevention*, 2018, 25(4): 44—48. [晏晓英, 王冬妮, 袁福香. 吉林省近 52 年冻土时空变化特征[J]. *气象灾害防御*, 2018, 25(4): 44—48.]
- [34] Gao M, Li Y X, Zhang X L, et al. Influence of freeze-thaw process on soil physical, chemical and biological properties: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12): 2269—2274. [高敏, 李艳霞, 张雪莲, 等. 冻融过程对土壤物理化学及生物学性质的影响研究及展望[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(12): 2269—2274.]
- [35] Krosshavn M, Southon T E, Steinnes E. The influence of vegetational origin and degree of humification of organic soils on their chemical composition, determined by solid-state ^{13}C NMR[J]. *Journal of Soil Science*, 1992, 43(3): 485—493.
- [36] Dungait J A J, Kemmitt S J, Michallon L, et al. Variable responses of the soil microbial biomass to trace concentrations of ^{13}C -labelled glucose, using ^{13}C -PLFA analysis[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1): 117—126.
- [37] Cook R L, Langford C H. Structural characterization of a fulvic acid and a humic acid using solid-state ramp-CP-MAS ^{13}C nuclear magnetic resonance[J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32(5): 719—725.
- [38] Clemente J S, Simpson M J, Simpson A J, et al. Comparison of soil organic matter composition after incubation with maize leaves, roots, and stems[J]. *Geoderma*, 2013, 192: 86—96.
- [39] Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937—3947. [王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937—3947.]
- [40] Gao H, Wang H Y, Li C B, et al. Effects of different maize straw returning modes on C/N ratios in mollisol[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 1392—1397. [高寒, 王宏燕, 李传宝, 等. 玉米秸秆不同腐解处理还田对黑土碳氮比的影响研究[J]. *土壤通报*, 2013, 44(6): 1392—1397.]
- [41] Wang J L, Zhong Z M, Wang Z H, et al. Soil C/P distribution characteristics of alpine steppe ecosystems in the Qinhai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 9—19. [王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 9—19.]

(责任编辑: 卢萍)