

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.02.018

宋依依, 曹阳, 段鑫盈, 等. 秸秆还田深度对土壤团聚体组成及有机碳含量的影响. 土壤, 2022, 54(2): 344–350.

## 秸秆还田深度对土壤团聚体组成及有机碳含量的影响<sup>①</sup>

宋依依, 曹阳, 段鑫盈, 李嘉琦, 朱晓晴, 邹洪涛\*, 张玉龙

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

**摘要:**为探究玉米秸秆还田至不同深度后对土壤团聚体及有机碳含量的影响,采用田间微区试验,将秸秆磨碎后分别还田至0~10、10~20、20~30、30~40 cm 4个深度土层,同时设置不还田对照,共计5个处理,连续种植玉米两年后采集土壤样品,采用湿筛法将团聚体分为>2、2~0.25、<0.25 mm共3个粒级,测定了土壤及团聚体内有机碳含量。结果表明:①秸秆还田至不同深度后土壤的团聚体稳定性以及大粒级团聚体(>2 mm)含量均显著增加( $P<0.05$ ),秸秆还田至0~10 cm和30~40 cm后粒径>0.25 mm的团聚体含量增加幅度较大,对土壤结构的改善效果更佳;②粉碎状秸秆一次性还田至0~10、10~20、20~30 cm两年后土壤有机碳含量降低,还田至30~40 cm两年后土壤有机碳含量显著增加( $P<0.05$ );③秸秆的输入会促进土壤中团聚体的团聚化过程,不同深度还田后对团聚体有机碳分布的影响不同,但都增加了大粒级团聚体内有机碳的含量。以上结果表明,秸秆还田会改善土壤结构,促进有机碳的转化,还田至30~40 cm对土壤的团聚化过程促进作用更明显,土壤有机碳含量显著增加,因此,30~40 cm为更合理的秸秆还田深度。

**关键词:** 棕壤; 秸秆还田深度; 土壤团聚体; 有机碳

**中图分类号:** S147.35; S513 **文献标志码:** A

### Effects of Different Straw-Returning Depths on Soil Aggregate Composition and Organic Carbon Distribution

SONG Yiyi, CAO Yang, DUAN Xinying, LI Jiaqi, ZHU Xiaoqing, ZOU Hongtao\*, ZHANG Yulong  
(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of straw-returning depth on aggregate composition and organic carbon distribution in aggregates and soil, brown soil in Liaoning was used for a field micro-area experiment with crushed corn straw returning, in which 5 treatments were set up: CK (no straw returning) and four straw-returning depths of 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, and 30–40 cm. Corn was planted and soil was taken in 2 years after straw-returning. Wet sieve method was used to obtain soil aggregates of 3 particle sizes: > 2 mm, 2–0.25 mm and <0.25 mm, and organic carbon contents in soil and aggregates was determined. The results showed that: 1) The stability of aggregates and the content of large aggregates (>2 mm) were increased significantly after straw-returning to different soil depths ( $P<0.05$ ). Returning straw to 0–10 cm and 30–40 cm increased the content of >0.25 mm aggregates greatly, indicating the better improvement on soil structure; 2) Organic carbon content was reduced after straw-returning to 0–10 cm, 10–20 cm and 20–30 cm at one time two years later, and organic carbon content was significantly improved after straw-returning to 30–40 cm ( $P<0.05$ ); 3) The input of straw promoted soil agglomeration process. Straw-returning to different depths had different impact on the distribution of aggregate organic carbon, but they all increased the content of organic carbon in large aggregates. The above results show that straw-returning improves soil structure and promotes the conversion of organic carbon from small aggregates to large aggregates, straw-returning to 30–40 cm has a more obvious promotion effect on soil agglomeration process and increases significantly soil organic carbon, thus, 30–40 cm is the more reasonable depth for straw returning.

**Key words:** Brown soil; Straw returning depths; Soil aggregates; Organic carbon

①基金项目: 辽宁省重点研发计划项目(2019JH2/10200004)、辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC1905010)和辽宁省教育厅重点项目资助。

\* 通讯作者(zouhongtao2001@163.com)

作者简介: 宋依依(1997—), 女, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良研究。E-mail: yiyi9168@yeah.net

土壤结构破坏是土壤退化的一个重要因素。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,影响着土壤的水热传输、养分的蓄存、供应和转化。团聚体的稳定性是衡量土壤结构稳定性的重要标志<sup>[1]</sup>。良好的土壤结构稳定性可以提高土壤孔隙度,改良土壤肥力,并且防水蚀、风蚀,有利于水土保持。通常根据不同的稳定性将团聚体按如下分级: $>2$ 、 $0.25\sim 2$ 、 $<0.25$  mm<sup>[2]</sup>。土壤有机碳(SOC)是全球碳循环的主要来源,对维持土壤生产力至关重要<sup>[3]</sup>。有报道指出,团聚体和土壤有机碳固定之间是一个互相促进的过程<sup>[4]</sup>。土地管理方式对团聚体稳定性的影响被认为是决定土壤有机碳水平的关键因素。秸秆还田作为目前应用广泛的秸秆处理方式,可以改善土壤理化性状,提高土壤质量和养分循环效率,增加作物产量,促进农业可持续发展<sup>[5]</sup>。前人研究指出,秸秆还田能增强土壤团聚体的稳定性、改善土壤结构,但因还田模式、土壤类型和试验区所在地气候等条件不同得到的研究结果有所差异<sup>[6-8]</sup>。当下关于秸秆还田对土壤有机碳以及团聚体内有机碳含量影响的研究结果也不尽相同,多数研究认为秸秆还田会增加土壤有机碳含量<sup>[9-11]</sup>,但也有部分研究得出秸秆还田后土壤有机碳含量不一定显著增加。Pei等<sup>[12]</sup>通过同位素标记研究发现,玉米秸秆加入土壤后会使得土壤中原有有机碳显著减少。徐英德等<sup>[13]</sup>通过两年培养试验得出,在高肥力土壤上秸秆还田后各粒级团聚体内有机碳含量比对照显著增加,在低肥力土壤上秸秆还田后团聚体内有机碳含量与对照无明显差异。

目前,关于秸秆还田的研究主要基于秸秆覆盖、秸秆旋耕浅还和秸秆深还田,对于秸秆还田至 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30$ 、 $30\sim 40$  cm土层后土壤理化性质的变化还缺乏深入探讨。且当下秸秆还田相关试验多为连年还田,对于秸秆一次性还田两年后土壤团聚体和有机碳变化鲜有研究。因此,本研究以辽宁地区的棕壤为研究对象,通过田间微区试验,设置 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30$ 、 $30\sim 40$  cm 4个还田深度,将秸秆粉碎后还田,以揭示在粉碎状秸秆一次性还田至不同深度两年后土壤团聚体组成和有机碳含量的变化规律,探讨在辽宁棕壤旱田秸秆最佳的还田深度,以期构建科学合理的秸秆还田模式提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

试验在沈阳农业大学科研试验基地进行,该基地位于辽宁省沈阳市( $41.82^{\circ}$  N,  $123.56^{\circ}$  E, 海拔 43 m),

气候为温带半湿润大陆性气候,年平均气温  $7.9^{\circ}\text{C}$ ,农耕地 $\geq 7^{\circ}\text{C}$ 的平均积温为  $3\ 281^{\circ}\text{C}$ ,日照时数平均为  $2\ 372.5$  h,无霜期 160 d 左右,全年平均降水量  $714$  mm。供试土壤是典型棕壤, $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30$ 、 $30\sim 40$  cm 土层土壤基本理化性质如表 1 所示。

表 1 不同土层土壤基本理化性质  
Table 1 Soil properties in different soil layers

土壤深度 (cm)	pH	容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	有机碳 ( $\text{g}/\text{kg}$ )	全氮 ( $\text{g}/\text{kg}$ )
0~10	7.07	1.12	15.27	1.93
10~20	6.71	1.45	18.35	2.04
20~30	6.64	1.52	12.23	1.18
30~40	6.49	1.64	10.25	1.09

### 1.2 研究方法

**1.2.1 试验布置** 试验从 2018 年 5 月开始,在微区内进行,微区长、宽、高分别为  $75$ 、 $45$ 、 $50$  cm,用无底矩形 PVC 框将微区内土壤与外部土壤隔开,PVC 框埋深  $40$  cm,上沿露出地面  $10$  cm。试验设置 5 个处理,包括 4 个还田深度处理和 1 个对照,每个处理 3 次重复,共布置 15 个微区,随机排列,具体处理如下: T1,  $0\sim 10$  cm 土层土壤与秸秆混合; T2,  $10\sim 20$  cm 土层土壤与秸秆混合; T3,  $20\sim 30$  cm 土层土壤与秸秆混合; T4,  $30\sim 40$  cm 土层土壤与秸秆混合; CK, 不施秸秆对照,土壤深松后原位回填。

秸秆还田时,为保证土壤的均质性,划定微区后,将各微区土壤分  $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30$ 、 $30\sim 40$  cm 土层取出,然后将粉碎至粉末状的玉米秸秆与还田层次土壤混匀,最后将各小区土壤按层次原位回填。秸秆还田用量为  $12\ 000$   $\text{kg}/\text{hm}^2$ (全量还田),在还入秸秆的同时每个微区均加入  $57$  g 尿素,调整 C/N 为  $25:1$ 。每个微区内  $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30$ 、 $30\sim 40$  cm 分层埋设定位监测系统探针,监测土壤水分、温度动态变化。待土壤稳定两周后种植玉米,品种为京科 968;各处理施加氮、磷、钾肥量相同( $\text{N-P-K}=240-75-75$ ),均作为基肥一次性施用。在每个微区内等距播种 2 株玉米,田间管理按照当地常规管理模式进行,未进行灌溉,两季玉米种植方式相同。

**1.2.2 样品采集** 于 2019 年 9 月玉米收获时采集土样。采集 CK 的  $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30$ 、 $30\sim 40$  cm 土层,以及 T1 的  $0\sim 10$  cm 土层、T2 的  $10\sim 20$  cm 土层、T3 的  $20\sim 30$  cm 土层、T4 的  $30\sim 40$  cm 土层,分别记作 CK10、CK20、CK30、CK40、T10、T20、T30、T40。原状土样用取土盒储存运输,用于团聚体的筛分及容重等性质的测定;混合土样一部分在自

然条件下风干制样,用于土壤基本理化性质的分析,一部分置于冰箱冷藏保存待用。

**1.2.3 测定方法** 团聚体筛分采用湿筛法<sup>[14]</sup>,具体操作为:称取新鲜土样 50 g,将孔径分别为 2、0.25、0.53 mm 的套筛按顺序从上到下组合好,将称量好的土样均匀置于最上层筛子上,将筛子置于装有蒸馏水的水桶内且调整水面高度使其浸润土壤 5 min,然后以振幅 38 mm 进行筛分 15 min,将土壤筛分为 3 个粒级(>2、0.25 ~ 2、<0.25 mm)。将筛分后的土样风干、分别称重,用研钵研磨并过 100 目筛,用元素分析仪(Elementar II, 德国)进行有机碳的测定。

### 1.3 计算方法

湿筛法中不同粒级团聚体的质量分数按(1)式计算:

$$R_i = m_i / m \times 100 \quad (1)$$

式中:  $R_i$  为  $i$  粒级团聚体质量分数(%);  $m_i$  为  $i$  粒级团聚体质量(g);  $m$  为土壤各粒级团聚体质量的总和。

粒径>0.25 mm 的团聚体质量分数( $R_{0.25}$ )按周虎等<sup>[15]</sup>提供的公式(2)计算。

$$R_{0.25} = m_{r>0.25} / m \times 100 = [1 - m_{r<0.25} / m] \times 100 \quad (2)$$

式中:  $m_{r>0.25}$  为粒径>0.25 mm 团聚体质量(g);  $m_{r<0.25}$  为粒径<0.25 mm 团聚体质量(g)。

团聚体内有机碳贡献率按(3)式计算:

$$C_i = \text{SOC}_i \times R_i / \text{SOC} \quad (3)$$

式中:  $C_i$  为  $i$  粒级团聚体有机碳贡献率;  $\text{SOC}_i$  为  $i$  粒级团聚体中有机碳含量;  $R_i$  为  $i$  粒级团聚体质量分数;  $\text{SOC}$  为全土有机碳含量。

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理和均值、标准差计算;采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析,其中方差分析为单因素方差(One Way-ANOVA),不同

处理之间多重比较采用 Duncan 法;采用一般线性模型(GLM)分析土层深度对土壤团聚体的影响。采用 Origin 9.0 软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田深度对土壤水稳性团聚体粒级分布的影响

秸秆还田至不同深度后土壤团聚体组成与对照处理相比变化明显(表 2 和图 1)。无论是否添加玉米秸秆,土壤水稳性团聚体组成均以<0.25 mm 粒级为主,质量分数为 40.20% ~ 59.81%;不同粒级团聚体含量(以质量分数计)差异显著( $P<0.05$ ),且含量从大到小依次为粒级 <0.25、2 ~ 0.25、>2 mm。随着土层深度的增加,>2 mm 粒级含量增加,<0.25 mm 粒级含量减小。秸秆还田至不同深度后团聚体粒级分布变化规律不同。添加秸秆以后,>2 mm 粒级含量显著增加,其中以还田至 0 ~ 10 cm 和 30 ~ 40 cm 土层后大粒级团聚体含量增加幅度较大;>2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 粒级均在秸秆添加至 0 ~ 10 cm 土层时增加量最大,分别增加了 88.51% 和 16.87%;秸秆还田至 20 ~ 30 cm 后 >2 mm 粒级含量最高,达到 30.56%。秸秆还田至 0 ~ 10 cm 和 30 ~ 40 cm 后土壤  $R_{0.25}$  与对照相比增加最多,均达到极显著水平( $P<0.01$ )。

### 2.2 秸秆还田深度对土壤及团聚体有机碳含量的影响

**2.2.1 秸秆还田深度对土壤总有机碳含量的影响** 不同深度秸秆还田对土壤总有机碳含量影响不一致(图 2)。玉米秸秆一次性还田至 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 两年后,土层 T10、T20、T30 土壤有机碳含量均比对照有所减少,其中 T10 土壤有机

表 2 不同秸秆还田深度下土壤水稳性团聚体的组成  
Table 2 Composition of water-stable aggregates in different straw-returning layers

土层 (cm)	处理	各粒级团聚体质量分数(%)		
		>2 mm	0.25 ~ 2 mm	<0.25 mm
0 ~ 10	CK10	4.37 ± 0.19 eC	40.42 ± 0.92 bB	55.22 ± 0.73 bA
	T10	8.22 ± 0.89 deC	47.24 ± 0.25 aA	44.54 ± 0.65 efB
10 ~ 20	CK20	11.66 ± 0.26 dC	28.52 ± 2.57 efB	59.81 ± 2.76 aA
	T20	17.51 ± 1.30 cC	29.00 ± 0.30 efB	53.49 ± 1.59 bcA
20 ~ 30	CK30	22.11 ± 1.48 bC	30.48 ± 0.35 deB	47.403 ± 1.25 deA
	T30	30.56 ± 2.33 aB	26.22 ± 0.63 fB	43.22 ± 1.70 efA
30 ~ 40	CK40	16.83 ± 0.59 cC	32.83 ± 0.42 cdB	50.34 ± 0.88 cdA
	T40	25.63 ± 2.49 bB	34.17 ± 1.02 cA	40.20 ± 1.47 fA

注: 同列不同小写字母表示处理间同一粒级团聚体含量差异显著( $P<0.05$ ), 同行不同大写字母表示同一处理不同粒级团聚体含量差异显著( $P<0.05$ )。

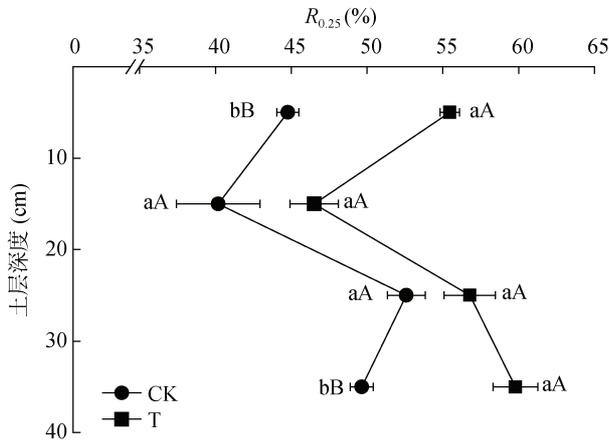


图1 不同秸秆还田深度下土壤 >0.25 mm 水稳性团聚体占比

Fig. 1 Proportions of water-stable aggregates larger than 0.25 mm in different straw-returning layers

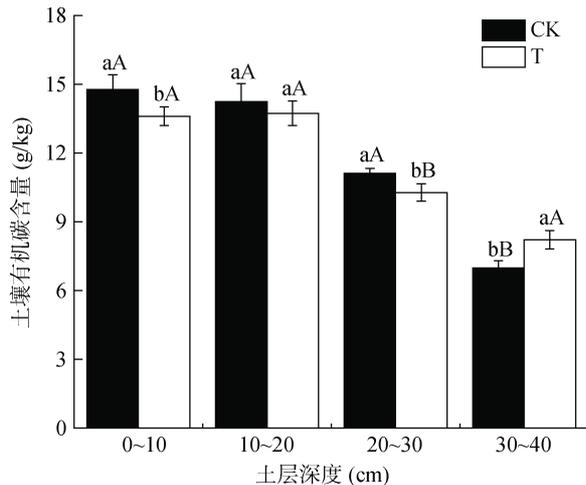


图2 不同秸秆还田深度下土壤有机碳含量的变化

Fig. 2 Contents of soil organic carbon in different straw-returning layers

碳含量减少量达到了显著水平( $P<0.05$ ), T30 土壤有机碳含量减少量达到了极显著水平( $P<0.01$ )。随着土层深度增加, 还田土层与对照土层土壤有机碳含量差值呈逐渐降低趋势, T10、T20、T30 分别减少了 1.16、0.52、0.84 g/kg, T40 土壤有机碳含量较对照处理提升了 17%, 增加量达到极显著水平( $P<0.01$ )。

**2.2.2 秸秆还田深度对土壤各粒级团聚体有机碳含量的影响** 玉米秸秆一次性还田至 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 两年后土壤团聚体内有机碳含量如图 3 所示。未添加秸秆土壤各土层中团聚体内有机碳含量除 0~10 cm 土层外均呈现随团聚体粒径减小而增加的趋势, 添加秸秆后的土壤各粒级团聚体有机碳含量较为均衡, 总体上有机碳含量随团聚体

粒径减小而降低。除 T10 土壤外, 其他土层秸秆还田后土壤 >2 mm 粒级中有机碳含量显著增加, 且在 T20、T30 土壤中差异达到极显著水平( $P<0.01$ ); <0.25 mm 粒级中有机碳含量减少, 差异均达到极显著水平( $P<0.01$ )。粉碎秸秆一次性还田后 T10 土壤 <0.25 mm 粒级的团聚体内土壤有机碳含量显著增加( $P<0.05$ ), >2 mm 和 2~0.25 mm 粒级内有机碳含量显著减少( $P<0.05$ )。随着土层深度的增加, 团聚体内的有机碳含量总体上呈现出逐渐减少的趋势。

秸秆还田至不同深度后土壤团聚体有机碳贡献率见图 4。总体上, 随着土层深度的增加, >2 mm 粒级团聚体有机碳贡献率增加, <0.25 mm 团聚体有机碳贡献率减小。秸秆还田至不同深度后, >2 mm 土壤团聚体有机碳贡献率均增加, 以还田至 20~30 cm 和 30~40 cm 时最高, 分别达到 31.87% 和 27.46%。

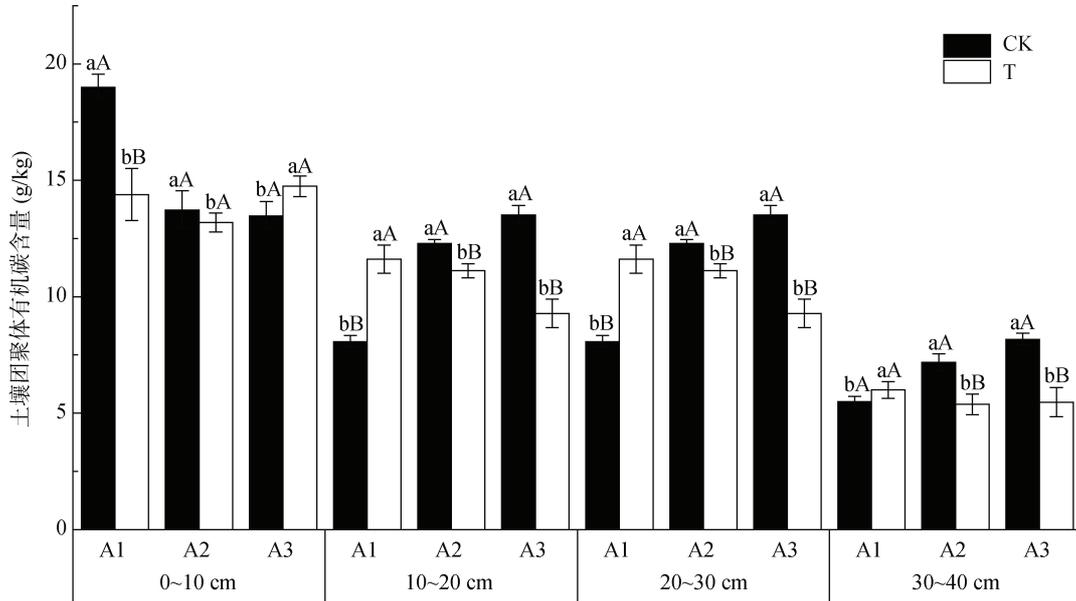
### 3 讨论

#### 3.1 秸秆还田深度与团聚体组成

秸秆还田至 0~10、10~20、20~30 cm 土层两年后均明显提高了 >0.25 mm 粒级占比, 这与前人研究结果一致<sup>[6]</sup>。秸秆还田带来的有机物料输入促进了土壤中小粒级团聚体向大粒级团聚体转化, 增强了团聚体稳定性, 改善了土壤结构。一方面, 向土壤中添加秸秆以后, 秸秆腐解产生腐殖质作为团聚体形成的胶结剂, 促进了大粒级团聚体的形成<sup>[16]</sup>。另一方面, 秸秆腐解后释放的营养促进植物根系发育, 植物通过根系吸收到更多的养分, 促进植物根系的代谢, 分泌更多促进团聚体胶结的化合物<sup>[17]</sup>。de Gryze 等<sup>[18]</sup>指出, 当新鲜植物残体输入土壤时, 大团聚体成为微生物活动的主要场所, 微生物的代谢也促进了大粒级团聚体生成。秸秆还田至 0~10 cm 和 30~40 cm 土层后, 土壤 >0.25 mm 粒级增加更为明显, 表明在相同还田量和还田时间条件下, 0~10 cm 和 30~40 cm 土层的土壤理化条件更适合大团聚体的形成。水分和温度是影响微生物活动的重要因素, 秸秆还至 0~10 cm 土层时, 氧气充分, 且表层土养分含量较高, 微生物有充足的氧气和碳氮源; 秸秆还田至 30~40 cm 时, 打破了犁底层, 土壤入渗能力增加, 增加了该层含水量, 使得微生物活性增加, 产生了更多的胶结物质, 更好地促进了小粒级团聚体向大粒级团聚体转化<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 秸秆还田深度与有机碳分布

本研究中, 玉米秸秆一次性还田至 0~10、10~



(A1 代表 >2 mm 团聚体, A2 代表 2~0.25 mm 团聚体, A3 代表<0.25 mm 团聚体; 下同)

图 3 不同秸秆还田深度下土壤团聚体有机碳含量的变化

Fig. 3 Contents of organic carbon in aggregates in different straw returning layers

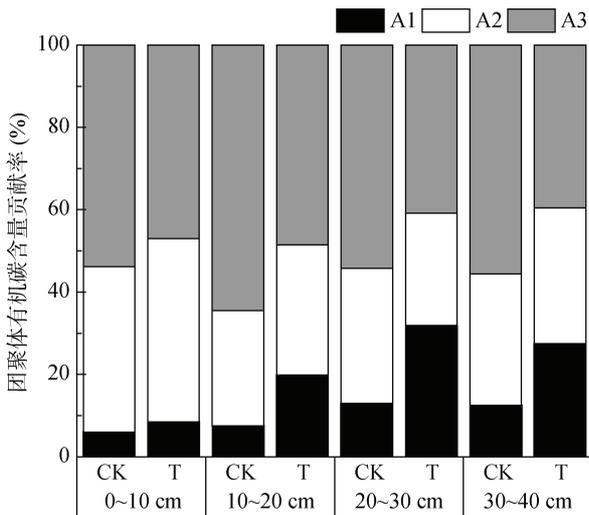


图 4 不同秸秆还田深度下土壤团聚体有机碳贡献率

Fig. 4 Contribution rates of aggregate organic carbon to soil organic carbon in different straw-returning layers

20、20 ~ 30 cm 土层两年后均降低了土壤有机碳含量,且与对照处理之间差值随着土层深度的增加而减少,这与前人研究结果<sup>[19]</sup>,即秸秆还田使土壤中的有机碳含量增加不一致;秸秆还田至 30~40 cm 后,还田层土壤有机碳含量大于未还田处理,与前人研究结果<sup>[20]</sup>相符。秸秆还田对土壤的影响与秸秆腐解速率密不可分,秸秆的腐解是一个复杂的过程,受多种因素影响。不同深度下土壤的理化性质不同,导致不同还田深度秸秆腐解速率不同,因而秸秆中养分释放程度不同。王蕾等<sup>[21]</sup>研究表明,玉米不同部位秸秆

以 5 cm 长度还田至不同深度一年后腐解率最高,能达到 60%,不能完全腐解。第二年秸秆还田时,第一年还田的秸秆未完全腐解,同时有新植物残体输入,因此有机碳含量增加。秸秆还田至不同深度后土壤的理化性质变化规律不同。汪玉芳<sup>[22]</sup>研究发现,油菜秸秆不同深度还田后,秸秆腐解率 10 cm<20 cm<0 cm 覆盖还田,表层土的温度、微生物活性都有利于秸秆分解。秸秆还田后,秸秆的腐解率随着土层深度的增加而减小<sup>[23]</sup>,这是因为土壤微生物在秸秆分解中起到关键作用,表层土壤中的微生物量通常高于深层土壤。土壤有机碳矿化受到多种因素以及它们之间的交互作用的影响。秸秆还田显著增加了土壤中 CO<sub>2</sub> 的排放,且秸秆掺入表层土壤比掺入下层土壤后 CO<sub>2</sub> 累计排放量高<sup>[24]</sup>。本研究结果与前人研究有出入,推测因为秸秆还田后第二年没有继续向土壤中补充秸秆,植物生长和土壤中的有机碳矿化消耗了土壤有机碳。秸秆还田改变了土壤的理化性质和微生物群落结构,使还田土壤中有机碳矿化量较对照处理大,且存在于下层土壤中的大部分碳被矿物所束缚,储存在黏土组分中,因此下层土壤中有机质矿化量比表层土壤低<sup>[25]</sup>。

### 3.3 秸秆还田深度与团聚体内有机碳分布

秸秆一次性还田至 10~20、20~30、30~40 cm 土层后, >2 mm 粒级团聚体内有机碳含量均增加,其余粒级团聚体内有机碳含量减少。秸秆还田促进了

有机碳从较小粒级内向较大粒级内转化,提高了大粒级团聚体中的有机碳贡献率。土壤中混合秸秆后,较小粒级团聚体有机碳占主导地位转化为 >2 mm 粒级团聚体有机碳占主导地位,表明 >2 mm 粒级团聚体对秸秆中碳的富集能力更强。秸秆还田至 30~40 cm 土层,大粒径团聚体内有机碳含量的提升不如其他土层明显,可能是因为下层土壤内有机碳更稳定,更不容易被微生物利用<sup>[26]</sup>。秸秆还田至 0~10 cm 土层,团聚体有机碳的变化规律与其他土层不同,推测是因为表层土壤中有机碳矿化作用更强,小粒级团聚体中有机碳较稳定,所以 >2 mm 粒级团聚体内有机碳含量减少。有研究指出<sup>[13]</sup>,玉米残体输入对土壤有机质的提升作用主要发生在还田后的第一年,在 720 d 的长期腐解过程中,由于秸秆自身较快的分解速率和对土壤原有有机碳产生的激发效应,会导致秸秆一次性还田至 0~30 cm 土层两年后土壤及团聚体内有机碳含量的研究结果与前人研究结果不一致。

#### 4 结论

秸秆还田可以改善土壤结构,添加秸秆至不同深度后土壤中 >2 mm 粒级团聚体含量均增加,团聚体稳定性提高。秸秆一次性还田至 0~10、10~20、20~30 cm 两年后,土壤中有机碳含量降低,还田至 30~40 cm 深度后土壤中有机碳含量显著增加。秸秆还田带来的外源有机残体输入促进了土壤中有机碳从较小粒级向较大粒级团聚体的转化,>2 mm 粒级团聚体内有机碳含量增加,有机碳贡献率增加。综合来看,粉碎状秸秆一次性还田至不同深度两年后,还田至 30~40 cm 深度对土壤改良效果最好,团聚体稳定性增强,土壤中有机碳含量显著增加。但秸秆一次性还田两年以上后土壤中团聚体分布和有机碳含量的响应、还田秸秆大小对土壤理化性质改变的影响以及生产实践中最有利于土壤改良的秸秆还田频率仍有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Zhu G Y, Shanguan Z P, Deng L. Variations in soil aggregate stability due to land use changes from agricultural land on the Loess Plateau, China[J]. CATENA, 2021, 200: 105181.
- [2] Devine S, Markewitz D, Hendrix P, et al. Soil aggregates and associated organic matter under conventional tillage, no-tillage, and forest succession after three decades[J]. PLoS One, 2014, 9(1): e84988.
- [3] González-Rosado M, Parras-Alcántara L, Aguilera-Huertas J, et al. Effects of land management change on soil aggregates and organic carbon in Mediterranean olive groves[J]. CATENA, 2020, 195: 104840.
- [4] Lin Y X, Ye G P, Kuzyakov Y, et al. Long-term manure application increases soil organic matter and aggregation, and alters microbial community structure and keystone taxa[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 134: 187-196.
- [5] 孙媛媛. 秸秆不同还田方式对北方稻田土壤理化性质及水稻产量的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [6] Zhao H L, Shar A G, Li S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 178-186.
- [7] 张奇, 陈桢, 陈效民, 等. 不同秸秆还田深度对黄棕壤土壤物理性质及其剖面变化的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 308-314.
- [8] 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 and Biochemistry, 2014, 75: 45-53.
- [9] Chen S Y, Zhang X Y, Shao L W, et al. Effects of straw and manure management on soil and crop performance in North China Plain[J]. CATENA, 2020, 187: 104359.
- [10] 丛萍, 李玉义, 王婧, 等. 秸秆一次性深埋还田量对亚表层土壤肥力质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(1): 74-85.
- [11] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期免耕和深松提高了土壤团聚体颗粒态有机碳及全氮含量[J]. 中国农业科学, 2021, 54(2): 334-344.
- [12] Pei J B, Li H, Li S Y, et al. Dynamics of maize carbon contribution to soil organic carbon in association with soil type and fertility level[J]. PLoS One, 2015, 10(3): e0120825.
- [13] 徐英德, 汪景宽, 王思引, 等. 玉米残体分解对不同肥力棕壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(7): 1029-1037.
- [14] 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.
- [15] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979.
- [16] 蔡立群, 齐鹏, 张仁陟. 保护性耕作对麦-豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 141-145.
- [17] 周萍, 潘根兴. 长期不同施肥对黄泥土水稳性团聚体颗粒态有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 256-261.
- [18] de Gryze S, Six J, Brits C, et al. A quantification of short-term macroaggregate dynamics: Influences of wheat residue input and texture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(1): 55-66.

- [19] 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 等. 2019. 秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 40(6):2912–2919.
- [20] Huang R, Tian D, Liu J, et al. 2018. Responses of soil carbon pool and soil aggregates associated organic carbon to straw and straw-derived biochar addition in a dryland cropping mesocosm system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 265(1):576–586.
- [21] 王蕾, 王福林, 段彤彤, 等. 黑龙江省玉米秸秆还田腐解规律的研究[J]. *农机化研究*, 2020, 42(9): 24–31.
- [22] 汪玉芳. 作物秸秆还田的腐解特征及培肥增产的效应[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- [23] Latifmanesh H, Deng A X, Li L, et al. How incorporation depth of corn straw affects straw decomposition rate and C&N release in the wheat-corn cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 300: 107000.
- [24] 朱晓晴, 安晶, 马玲, 等. 秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(5): 977–989.
- [25] Rukshana F, Butterly C R, Xu J M, et al. Soil organic carbon contributes to alkalinity priming induced by added organic substrates[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 65: 217–226.
- [26] 张延. 秸秆还田下耕作措施对农田黑土有机碳组分及其稳定性的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.