

DOI: 10.5846/stxb201805101034

刘秀, 司鹏飞, 张哲, 陈保青, 董雯怡, 严昌荣, 刘恩科. 地膜覆盖对北方旱地土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响. 生态学报, 2018, 38(21):

Liu X, Si P F, Zhang Z, Chen B Q, Dong W Y, Yan C R, Liu E K. Effects of film mulching on soil aggregations and organic carbon contents in Northern dryland regions. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21):

## 地膜覆盖对北方旱地土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响

刘 秀<sup>1,2</sup>, 司鹏飞<sup>3</sup>, 张 哲<sup>3</sup>, 陈保青<sup>1,2</sup>, 董雯怡<sup>1,2,\*</sup>, 严昌荣<sup>1,2</sup>, 刘恩科<sup>1,2</sup>

1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

2 农业农村部农膜污染防治重点实验室, 北京 100081

3 辽宁省农业科学院, 沈阳 110161

**摘要:** 研究不同地膜覆盖时间对北方旱作农田土壤团聚体粒级稳定性和有机碳的影响, 可为提升旱作农田生产力和保护农田环境选择合适的管理方式提供科学依据。以辽宁阜新 5 年秋覆膜 (AP)、春覆膜 (SP) 和不覆膜 (CK) 的定位试验为研究对象, 分析不同覆膜时间对 0—10 cm 和 10—20 cm 土层中 >2 mm、0.25—2 mm、0.053—0.25 mm 和 <0.053 mm 粒级的土壤水稳性团聚体的稳定性及有机碳的影响。结果表明, 在北方旱作农田, 连续 5 年的地膜覆盖可显著改变 0—10 cm 土层的土壤各级团聚体的分布、团聚体中有机碳的含量及其对土壤有机碳含量的贡献率, 进而增加土壤水稳性团聚体的稳定性, 而对 10—20 cm 土层影响不显著。与不覆膜相比, 秋覆膜和春覆膜可显著提高 0—10 cm 土层 >2 mm 的水稳性团聚体的含量, 分别提高了 36.3%、47.9% ( $P < 0.05$ ), 而对微团聚体无显著影响, 说明地膜覆盖有利于提高大团聚体数量及稳定性。在 0—10 cm 土层, 粒径 >2 mm 团聚体有机碳含量及储量表现为秋覆膜最高, 显著高于春覆膜和不覆膜处理 ( $P < 0.05$ )。与裸地不覆膜相比, 秋覆膜和春覆膜显著提高 >2 mm 团聚体中有机碳含量对土壤有机碳的贡献率, 分别提高了 37% 和 26.1% ( $P < 0.05$ )。而在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层中, 微团聚体中有机碳含量对土壤有机碳贡献率没有影响。在辽宁阜新土壤及种植条件下, 秋覆膜处理不仅显著提高 0—10 cm 土壤水稳性大团聚体的含量和稳定性, 还可以显著增加水稳性大团聚体有机碳含量及储量, 促进有机碳的固存。

**关键词:** 旱地农田; 耕作; 水稳性团聚体; 有机碳; 碳储量

## Effects of film mulching on soil aggregations and organic carbon contents in Northern dryland regions

LIU Xiu<sup>1,2</sup>, SI Pengfei<sup>3</sup>, ZHANG Zhe<sup>3</sup>, CHEN Baoqing<sup>1,2</sup>, DONG Wenyi<sup>1,2,\*</sup>, YAN Changrong<sup>1,2</sup>, LIU Enke<sup>1,2</sup>

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory for Prevention and Control of Residual Pollution in Agricultural Film, MOA, Beijing 100081, China

3 Liaoning Academic of Agricultural Sciences, Shenyang, Liaoning 110161, China

**Abstract:** Studying the effects of film mulching on soil aggregate stability and soil organic carbon distribution in different aggregate fractions can provide a scientific basis for exploring proper practices to improve the productivity and protect the environment in dryland farming. A long-term field experiment has been conducted in Fuxin, Liaoning province since 2012. Three treatments were carried out: non-mulching (CK), autumn plastic film mulching (AP), and spring plastic film

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (31470556, 31871575); 国家自然科学基金青年基金项目 (41601328); 公益性行业 (农业) 科研专项项目 (201503120) 中国农业科学院生物节水与旱作农业创新团队项目; 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目

收稿日期: 2018-05-10; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dongwenyi@caas.cn

mulching (SP). The soil aggregate and soil organic carbon (SOC) contents of different aggregates ( $>2$ ,  $0.25-2$ ,  $0.053-0.25$ , and  $<0.053$  mm) in 0—10 and 10—20 cm soil layers were measured using a wet sieving method. Our results showed that long-term plastic film mulching significantly affected the soil aggregate size distribution, aggregate stability, and organic carbon content in the 0—10 cm soil layer, especially under AP while there was no significant difference among treatments in the 10—20 cm soil layer. Compared to CK, the amounts of  $>2$  mm water-stable aggregates under AP and SP significantly increased by 36.3% and 26.7%, respectively. However, no obvious difference was observed in micro-aggregates. These results suggested that plastic film significantly affected the stability of soil aggregates and accumulation of aggregate into macro-aggregates. The mean weight diameter value of water-stable aggregate was significantly higher in AP and SP than in CK at 0—10 cm soil layer. Compared to CK, AP and SP significantly increased the total SOC contents and SOC in the aggregates  $>2$  mm in size at the 0—10 cm soil layer, increased by 8.2% and 47.9% as well as 4.6% and 29.2% ( $P < 0.05$ ), respectively. The contribution rate of the  $>2$  mm aggregate in total SOC was obviously increased by 37% and 26.1% in AP and SP ( $P < 0.05$ ), respectively. However, in the 0—10 and 10—20 cm soil layers, the SOC in the micro-aggregates ( $0.053-0.25$ ,  $<0.053$  mm) did not significantly affect the contribution rate of total organic carbon. The results indicated that film mulching promoted the accumulation of aggregates into macro-aggregates. Under the soil and planting conditions in Liaoning, Autumn plastic film mulching can improve the stability of 0—10 cm soil water-stable aggregates and increase the SOC contents of macro-aggregates, as well as further promote the sequestration of organic carbon.

**Key Words:** dry-farmland; film mulching; water-stable aggregates; organic carbon; carbon storage

土壤团聚体由有机物和无机物凝结而成,是土壤结构的基本单元,土壤团聚体稳定性和有机碳含量是农田生态系统的土壤质量和环境的可持续发展的关键指标<sup>[1-3]</sup>,而不同农田管理方式对土壤团聚体的组成及分布产生重要影响<sup>[4]</sup>。土壤团聚体作为土壤有机碳存在的重要场所,团聚体的稳定性大小和分布直接影响土壤有机碳的储备,不仅可通过降低土壤侵蚀减少碳损失,而且还可通过物理保护降低有机碳的分解<sup>[5]</sup>。与此同时,土壤团聚体的团聚过程是土壤固碳最重要的途径之一<sup>[6]</sup>,而土壤有机碳作为团聚体形成必不可少的胶结物质,是影响土壤团聚结构最重要的因素<sup>[7-8]</sup>。因此,土壤团聚体和有机碳的研究密不可分。近几十年来,随着温室效应加剧而引发的全球气候变暖等一系列环境问题的凸显,土壤团聚体与有机碳固持的研究越来越为人们所重视。

在旱作农业生产中,地膜覆盖对粮食增产做出了重大贡献<sup>[9]</sup>,主要由于地膜覆盖能减少土壤水分蒸发,提高土壤含水量,阻挡土壤热量散失,提高土壤温度<sup>[10-12]</sup>,进而促进种子萌发和作物根系生长<sup>[13]</sup>,提高作物对水分和养分的吸收能力<sup>[14-15]</sup>。而团聚体中有机碳的转化和形成时刻受发生在土壤耕层的农业管理措施的影响。刘希玉等<sup>[16]</sup>和 Guo 等<sup>[17]</sup>通过研究不同耕作措施对团聚体稳定性影响结果表明,秸秆还田显著提高水稳性团聚体含量和团聚体有机碳含量。付鑫等<sup>[18]</sup>通过研究陕西长武县进行秸秆覆盖和地膜覆盖对比试验,结果表明地膜覆盖和秸秆覆盖均提高了 0—10 cm 土层水稳性团聚体的平均重量粒径值,其中秸秆覆盖显著提高 0—10 cm 土壤团聚体(0.25—0.5 mm 粒径除外)有机碳含量,而地膜覆盖处理对土壤团聚体 10—40 cm 的团聚体有机碳有降低的趋势。因此,地膜覆盖作为主要的农业管理措施,可对土壤团聚体的稳定性和有机碳变化产生重要影响:首先地膜覆盖可减少干湿交替强度,影响土壤团聚体的再分配,其次地膜覆盖改变了碳输入和输出,改变了各级团聚体的有机碳的再分配。

辽宁阜新旱作农业区位于我国东北部,年均降雨量 350—500 mm,是典型的半干旱区域。秋覆膜作为新的覆膜方式,在春覆膜的基础上延长了覆膜时间,减少了作物在非生育期内的无效蒸发<sup>[19-20]</sup>,表现出良好的增产效果<sup>[21]</sup>,在此地区广泛应用。近年来,关于地膜覆盖对作物产量、水分等研究较多,但关于地膜覆盖措施尤其是不同覆膜时期对土壤团聚体碳固定机制及潜力方面研究涉及较少。探寻不同地膜覆盖措施对土壤团聚体稳定特征及其对有机碳保护机制,对明确人为干预下土壤有机碳固定的主导因素和主要途径,提高土壤

有机碳含量,提升土壤质量具有重要作用。为此,本文试图通过辽宁阜新地区 5 年不同时间覆膜定位试验,研究秋覆膜(AP, Autumn plastic film mulching)、春覆膜(SP, Spring plastic film mulching)和不覆膜(CK, Non-mulching)对土壤团聚体及有机碳的影响,以期为旱区农田土壤质量的改善和生产力的提高提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

该定位试验开始于 2012 年,试验地位于辽宁省西北部阜新市蒙古族自治县农业部阜新农业环境与耕地保育科学观测实验站。地理位置北纬 42°02',东经 121°67',年均温度 7.2℃,年均无霜期 135—165 d,年均降水 483 mm,年均蒸发量为 1727.3—1783.4 mm,属半干旱季风型大陆气候区。实行一年一熟制度,种植作物为春玉米,土壤类型为石灰性褐土,试验地势平坦,无灌溉条件,试验开始前的土壤有机质 10.52 g/kg,全氮 0.456 g/kg,全磷 0.66 g/kg,全钾 2.463 g/kg。

### 1.2 试验设计

共设 3 个试验处理,分别为:秋覆膜(AP)、春覆膜(SP)和不覆膜(CK),每个处理 3 次重复,共 9 个小区,每个小区面积 6 m×10 m,采用完全随机区组设计。秋覆膜处理于当年收获后,11 月底前覆膜,覆膜时一次性施肥。春覆膜于第二年 4 月进行整地、施肥和覆膜,覆膜方式统一为全覆膜平作方式。覆膜之后进行播种,种植方式为平作穴播。春玉米供试品种为郑单 958,种植密度 60000 株/hm<sup>2</sup>,行距 50 cm,株距 33.3 cm。各处理的肥料用量一致,分别为氮肥尿素 N 240 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 150 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥 K<sub>2</sub>O 75 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 测试指标与方法

本试验于 2017 年 9 月 28 日玉米收获后取样,每个小区按“M”型采样法分 5 个重复取样点,取样深度为 0—10 cm、10—20 cm。田间采原状土样,室内自然风干,当土壤含水量达到塑限时,沿土壤自然结构轻掰成直径约 1 cm 的小土块,剔除植物残体和石子等杂质,过 8 mm 筛后继续风干备用。

依据 Elliott 等<sup>[22]</sup>湿筛法测定土壤团聚体,共分为>2 mm、0.25—2 mm、0.053—0.25 mm 和<0.053 mm 四种级别的团聚体。具体操作为:将四个筛子从大到小依次叠放在一起,称取 100 g 自然风干土放置于最上层筛子,静置于水中浸泡 5 min,之后利用团聚体分析仪(型号 XY-100)以 40 次/min 运行速度震荡 10 min,振幅为 5 cm。将筛子从桶中缓慢取出,静置后转移至铝盒中,分级后收集各级团聚体,在 55℃ 下烘干,称重。测定团聚体的稳定性和有机碳含量,有机碳含量采用重铬酸钾容量法<sup>[23]</sup>测定。并根据 Tisdall 等<sup>[7]</sup>分级方法,把>0.25 mm 粒级的团聚体称为水稳性大团聚体(Macro-aggregate),<0.250 mm 粒级的团聚体称为水稳性微团聚体(Micro-aggregate)。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件包进行单因素方差(One-Way ANOVA)分析,不同处理之间多重比较采用 LSD(Least-significant difference)方法,然后经过 t 检验( $P<0.05$ )。绘图用 SigmaPlot 10.0 软件完成。

团聚体稳定性采用平均重量直径(mean weight diameter, MWD)计算<sup>[24]</sup>:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot W_i) \quad (1)$$

式中, $X_i$ 为第  $i$  个筛子上团聚体的平均直径, $W_i$ 为第  $i$  个筛子上团聚体重量百分比。

耕层团聚体的有机碳储量计算:

$$\begin{aligned} M_{\text{soc}} &= M_s \cdot C_c \cdot 0.001 \\ M_s &= \text{容重} \cdot \text{耕层体积} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $M_{\text{soc}}$ 为有机碳储量(kg/hm<sup>2</sup>), $M_s$ 为单位面积土壤质量(kg/hm<sup>2</sup>), $C_c$ 为土壤有机碳含量(g/kg)。

耕层团聚体中有机碳贡献率计算:

$$C_{\text{soc}} = \frac{G_s \cdot C}{M_c} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $C_{\text{SOC}}$  为团聚体中有机碳贡献率(%),  $G_s$  为该级别团聚体中有机碳含量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ),  $C$  为该级别团聚体的含量(%),  $M_c$  为耕层土壤中有机碳含量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同覆膜处理下土壤水稳性团聚体的分布及稳定性

经过 5 年连续地膜覆盖定位试验可以看出, 覆膜显著提高了 0—10 cm 土壤 >2 mm 的水稳性团聚体的含量 ( $P < 0.05$ ), 而覆膜对水稳性微团聚体在 0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层均没有明显影响 (表 1)。与不覆盖地膜 (CK) 土壤相比, 秋覆膜 (AP) 和春覆膜 (SP) 处理显著提高 0—10 cm 土层 >2 mm 水稳性大团聚体含量 ( $P < 0.05$ ), 且分别增加了 36.5% 和 26.7%, 但降低了 0.25—2 mm 的水稳性大团聚体含量。覆膜处理对土壤团聚体分布的影响主要集中在 0—10 cm 土层, 而对 10—20 cm 土层中土壤水稳性团聚体的分布没有显著影响 ( $P < 0.05$ )。

表 1 覆膜对土壤水稳性团聚体的分布影响

Table 1 Water-stable aggregate size distribution under plastic film mulching practices

| 土层/cm<br>Soil layer | 处理<br>Treatment | 水稳性大团聚体 Macro-aggregate/% |           |          | 水稳性微团聚体 Micro-aggregate/% |           |          |
|---------------------|-----------------|---------------------------|-----------|----------|---------------------------|-----------|----------|
|                     |                 | >2 mm                     | 0.25—2 mm | 合计 Total | 0.053—0.25 mm             | <0.053 mm | 合计 Total |
| 0—10                | CK              | 24.0b                     | 41.5a     | 65.5     | 15.2a                     | 19.3a     | 34.5     |
|                     | SP              | 30.4a                     | 36.2b     | 66.6     | 16.6a                     | 17.4a     | 34       |
|                     | AP              | 32.7a                     | 34.8b     | 67.6     | 16.8a                     | 15.7a     | 32.5     |
| 10—20               | CK              | 21.3a                     | 42.9a     | 64.1     | 22.0a                     | 14.0a     | 36       |
|                     | SP              | 25.6a                     | 39.5a     | 65.2     | 21.1a                     | 13.8a     | 34.8     |
|                     | AP              | 21.2a                     | 43.6a     | 64.8     | 21.3a                     | 13.9a     | 35.2     |

同一列上的不同小写字母表示同一层次不同处理在 5% 水平上的差异显著性 (LSD); CK: 不覆膜, Non-mulching; SP: 春覆膜, Spring plastic film mulching; AP: 秋覆膜, Autumn plastic film mulching

由图 1 可以看出, 地膜覆盖显著改变了 0—10 cm 土层的土壤团聚体平均重量直径 ( $P < 0.05$ ), 且不同处理 0—10 cm 土层团聚体平均直径大小依次为: AP > SP > CK, 而对 10—20 cm 土层的团聚体的平均重量直径没有显著影响 ( $P > 0.05$ )。说明与不覆盖地膜相比, 地膜覆盖显著提高了 0—10 cm 土壤团聚体的水稳性, 提高土壤团聚程度, 使得土壤结构得到改善。

### 2.2 不同覆膜处理下土壤水稳性团聚体中有机碳及碳储量的差异

不同覆膜处理对土壤各个粒级水稳性团聚体中有机碳含量及碳储量的影响如表 2 所示。在 0—10 cm 土层, >2 mm 和 0.25—2 mm 两个级别的水稳性大团聚体有机碳的含量显著高于 0.053—0.25 mm 和 <0.053 mm 水稳性微团聚体 ( $P < 0.05$ )。在 10—20 cm 土层上, >2 mm 土壤团聚体有机碳含量显著高于其他各级团聚体有机碳含量。而粒径 <0.25 mm 的土壤团聚体有机碳在

0—10 cm 和 10—20 cm 土层上均无显著性差异 ( $P < 0.05$ )。从同一级别水稳性团聚体中可以看出, 在 0—10 cm 土层, 粒径 >2 mm 团聚体有机碳含量表现为秋覆膜最高, 显著高于春覆膜和不覆膜处理 ( $P < 0.05$ ), 0.25—2 mm 土壤团聚体有机碳表现为秋覆膜和春覆膜显著高于裸地处理 ( $P < 0.05$ ), 秋覆膜和春覆膜之间没有显著

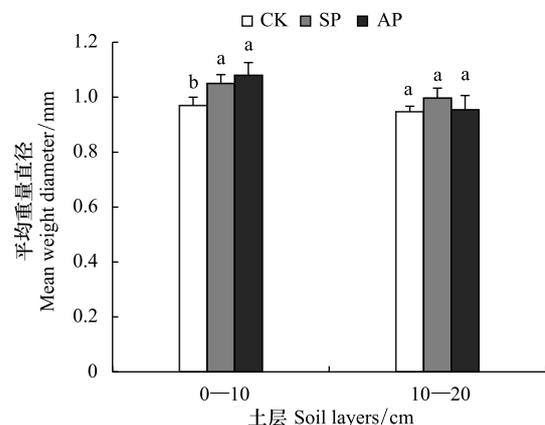


图 1 覆膜对团聚体的平均重量直径的影响

Fig. 1 Mean weight diameter (MWD) of aggregate under plastic film mulching practices

CK: 不覆膜, Non-mulching; SP: 春覆膜, Spring plastic film mulching; AP: 秋覆膜, Autumn plastic film mulching

性差异( $P<0.05$ )。与不覆膜相比,秋覆膜和春覆膜在 0—10 cm 土层 $>2$  mm 和 0.25—2 mm 两个级别有机碳含量分别增加了 8.2%、1.9%和 4.6%、4.4%。说明地膜覆盖可以显著增加 0—10 cm 土层土壤水稳性大团聚体有机碳的含量。

表 2 覆膜对土壤水稳性团聚体有机碳含量的影响

Table 2 The effect of plastic film mulching practices on SOC content of water stable aggregates

| 土层/cm<br>Soil layer | 处理<br>Treatment | 水稳性大团聚体<br>Macro-aggregate/(g/kg) |           | 水稳性微团聚体<br>Micro-aggregate/(g/kg) |             |
|---------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-------------|
|                     |                 | $>2$ mm                           | 0.25—2 mm | 0.053—0.25 mm                     | $<0.053$ mm |
| 0—10                | CK              | 8.93b                             | 7.87b     | 6.54a                             | 7.05a       |
|                     | SP              | 9.11b                             | 8.22a     | 6.22a                             | 7.10a       |
|                     | AP              | 9.67a                             | 8.23a     | 6.65a                             | 7.78a       |
| 10—20               | CK              | 7.49b                             | 6.63a     | 6.17a                             | 6.96a       |
|                     | SP              | 7.77ab                            | 6.78a     | 5.69a                             | 6.80a       |
|                     | AP              | 8.11a                             | 6.77a     | 6.07a                             | 6.92a       |

同一列上的不同小写字母表示同一层次不同处理在 5%水平上的差异显著性(LSD)

从表 3 中可以看出,在 0—10 cm 土层中,秋覆膜和春覆膜处理水稳性团聚体有机碳储量依次为[ $>2$  mm 团聚体] $>$ [0.25—2 mm 团聚体] $>$ [ $<0.053$  mm 团聚体] $>$ [0.053—0.25 mm 团聚体],而不覆膜处理水稳性团聚体有机碳储量依次为[0.25—2 mm 团聚体] $>$ [ $>2$  mm 团聚体] $>$ [ $<0.053$  mm 团聚体] $>$ [0.053—0.25 mm 团聚体],水稳性大团聚体有机碳储量显著高于水稳性微团聚体有机碳储量。从同一级别团聚体看,秋覆膜和春覆膜处理可以提高 0—10 cm 土层 $>2$  mm 团聚体有机碳储量( $P<0.05$ ),且表现为秋覆膜下的有机碳储量显著高于春覆膜且显著高于裸地( $P<0.05$ ),而降低了 0.25—2 mm 团聚体有机碳的储量。与不覆膜相比,秋覆膜和春覆膜处理 $>2$  mm 团聚体有机碳储量分别增加了 47.9%和 29.2%,且处理之间差异显著( $P<0.05$ )。而覆膜处理下 0.25—2 mm 团聚体有机碳储量则显著下降了 12.2%和 8.9%,说明地膜覆盖可促使土壤有机碳向 $>2$  mm 团聚体富集。

结合表 2 和表 3 可看出不同处理对各级别土壤水稳性团聚体的有机碳在 $>2$  mm 团聚体和 0.25—2 mm 团聚体中储量较高,且地膜覆盖主要影响 0—10 cm 土层各级团聚体有机碳储量( $P<0.05$ ),而对 10—20 cm 土层团聚体有机碳储量影响不显著。

表 3 覆膜对土壤水稳性团聚体有机碳储量的影响

Table 3 The effect of plastic film mulching practices on total amount of SOC of water stable aggregates

| 土层/cm<br>Soil layer | 处理<br>Treatment | 水稳性大团聚体 Macro-aggregate/% |           |          | 水稳性微团聚体 Micro-aggregate/% |             |          |
|---------------------|-----------------|---------------------------|-----------|----------|---------------------------|-------------|----------|
|                     |                 | $>2$ mm                   | 0.25—2 mm | 合计 Total | 0.053—0.25 mm             | $<0.053$ mm | 合计 Total |
| 0—10                | CK              | 2783c                     | 4248a     | 7031c    | 1292a                     | 1770a       | 3062a    |
|                     | SP              | 3594b                     | 3870b     | 7464b    | 1340a                     | 1606b       | 2946a    |
|                     | AP              | 4117a                     | 3730b     | 7846a    | 1452a                     | 1591b       | 3043a    |
| 10—20               | CK              | 2070c                     | 3693a     | 5763a    | 1761a                     | 1266a       | 3027a    |
|                     | SP              | 2588a                     | 3487a     | 6075a    | 1557a                     | 1218a       | 2775a    |
|                     | AP              | 2233b                     | 3840a     | 6073a    | 1679a                     | 1249a       | 2928a    |

同一列上的不同小写字母表示同一层次不同处理在 5%水平上的显著差异(LSD)

### 2.3 不同覆膜处理下水稳性团聚体中有机碳对土壤总有机碳贡献率的差异

对于不同土层,覆膜主要改变了 0—10 cm 土层中水稳性团聚体中有机碳含量对土壤总有机碳的贡献率(表 4),与裸地不覆膜相比,秋覆膜和春覆膜显著提高了 37%和 26.1%( $P<0.05$ ),而对 10—20 cm 土壤影响不显著。对于不同粒级团聚体,覆膜处理下微团聚体(0.053—0.25 mm 和 $<0.053$  mm)中有机碳含量对土壤有机碳贡献率没有显著影响。但是,覆膜处理显著提高了 $>2$  mm 团聚体中有机碳含量对土壤的贡献率( $P<0.05$ )。

表 4 土壤水稳性团聚体中有机碳含量对土壤总有机碳的贡献率

Table 4 Contributing rates of SOC of water-stable aggregates under plastic film mulching practices

| 土层/cm<br>Soil layer | 处理<br>Treatment | 水稳性大团聚体 Macro-aggregate/% |           |          | 水稳性微团聚体 Micro-aggregate/% |           |          |
|---------------------|-----------------|---------------------------|-----------|----------|---------------------------|-----------|----------|
|                     |                 | >2 mm                     | 0.25—2 mm | 合计 Total | 0.053—0.25 mm             | <0.053 mm | 合计 Total |
| 0—10                | CK              | 27.6b                     | 42.1a     | 69.7a    | 12.8a                     | 17.5a     | 30.3a    |
|                     | SP              | 34.5a                     | 37.2ab    | 71.7a    | 12.9a                     | 15.4a     | 28.3a    |
|                     | AP              | 37.8a                     | 34.2b     | 72.1a    | 13.3a                     | 14.6a     | 27.9a    |
| 10—20               | CK              | 23.5b                     | 42.0a     | 65.6a    | 20.0a                     | 14.4a     | 34.4a    |
|                     | SP              | 29.2a                     | 39.4a     | 68.6a    | 17.6a                     | 13.8a     | 31.4a    |
|                     | AP              | 24.8b                     | 42.7a     | 67.5a    | 18.7a                     | 13.9a     | 32.5a    |

同一列上的不同小写字母表示同一层次不同处理在 5% 水平上的差异显著性 (LSD)

### 3 讨论

#### 3.1 覆膜措施对土壤团聚体组成及稳定性的影响

土壤团聚体作为土壤结构稳定的重要指标,其大小和数量影响着土壤质量。吕欣欣等<sup>[25]</sup>研究表明,覆膜条件下高施肥量显著提高土壤团聚体的稳定性及团聚体平均重量直径。安婉丽等<sup>[26]</sup>研究发现秸秆还田显著增加土壤水稳性大团聚体。本研究发现,与不覆膜相比,秋覆膜和春覆膜可以显著提高 0—10 cm 土层水稳性大团聚体(粒径>2 mm)含量和该粒级团聚体平均重量直径,增加土壤团聚体的稳定性,而对土壤水稳性微团聚体影响不显著。这可能主要是由于与裸地不覆膜相比,地膜覆盖提高土壤含水量<sup>[27]</sup>,使得雨水慢速湿润土壤,从而有效降低干湿交替强度。Park 等<sup>[28]</sup>认为干湿强度增加通常降低团聚体的比例,引起团聚体的破坏。不覆盖处理土壤干湿交替强度较高,对粘粒部分产生不均匀的水合作用和膨胀作用,并且当水分快速进入土壤孔隙时,存在于毛细管孔隙中的闭蓄态空气被压缩<sup>[29]</sup>。而且毛细管变湿时,内部空气也可以扩散而导致团聚体微小的破坏。此外,地膜覆盖可有效提高玉米产量<sup>[15,30]</sup>,进而促进了外源有机碳的输入、根系分泌物以及根系残留量的增加,为土壤微生物活动提供了充足的能量,从而促进其生物活性,有助于在大团聚体内部形成微粒有机质,而有机质是土壤水稳性团聚体形成的主要凝胶剂<sup>[31]</sup>,从而增加团聚体结构稳定性<sup>[32]</sup>。地膜覆盖是否可持续提升土壤水稳性大团聚含量和稳定性,还需要长期的试验结果去验证。

#### 3.2 覆膜措施对土壤各级团聚体中有机碳含量及储量的影响

土壤有机碳在土壤团聚体的形成和稳定性中占有重要作用<sup>[33]</sup>。本研究结果表明,地膜覆盖措施不仅可以改变 0—10 cm 土层土壤水稳性团聚体分布及稳定性,在各级别团聚体有机碳的含量和储量方面也有较大的提高,这与刘哲等<sup>[34]</sup>研究结果一致。连续 5 年地膜覆盖结果表明,在 0—10 cm 土层,秋覆膜处理下>2 mm 土壤大团聚体有机碳和有机碳储量显著高于春覆膜和裸地不覆膜处理,而对土壤微团聚体无显著影响。大团聚体中有机碳含量对土壤的贡献率达到 70.0%,其中>2 mm 团聚体有机碳含量对土壤的贡献率达到 37%。引起地膜覆盖处理不同粒级团聚体固碳能力差异的主要因素可能有两点:一是较春覆膜而言,秋覆膜通过延长覆膜时间,减少土壤水分在作物非生育期的蒸发,维持土壤高贮水量<sup>[19]</sup>,从而大大减弱了土壤干湿交替强度。此外,不覆膜处理干湿交替强度较高,在毛细管变湿时,内部空气也可以扩散导致团聚体微小的破坏。团聚体的破坏能够释放物理保护的有机碳,使受物理保护的有机质暴漏,从而降低团聚体有机碳含量。此外,干湿交替影响土壤孔隙的大小和稳定性,尤其在含有较大孔隙的土壤中。与微孔隙相比,大孔隙含有较低的结合力,因为小的毛细管压力减小了土壤颗粒、有机质和团聚体的收缩<sup>[35]</sup>,减少有机碳含量和储量。二是与春覆膜和裸地不覆膜处理相比,秋覆膜处理下的作物地上部分和地下部分生物量较大,作物残体在表层土壤富集<sup>[36]</sup>,增加了碳的输入,当外源有机碳的输入增加后,释放出大量的活性有机碳可供微生物利用,从而加速有机质的分解和矿化,极大促进了耕层土壤生物的活性,包括真菌生长、根系延伸以及土壤动物活动等,有利于在大团聚体内部结合形成有机物,同时有机物的增加又会促进团聚体的形成<sup>[37]</sup>,大团聚体对有机碳有富集作

用,从而改变了土壤团聚体的有机碳含量和分配比例<sup>[38]</sup>,二者相互促进,逐渐形成固碳的良性循环<sup>[39]</sup>。

### 3.3 北方旱作农田有机碳提升的地膜措施探讨

我国北方旱区、半干旱地区耕地面积约占全国耕地面积的 52%,在我国农业生产中战略地位十分重要<sup>[40]</sup>。地膜覆盖技术在本区域已大面积使用,探讨覆膜时间对北方旱区土壤团聚体分布、稳定性以及有机碳的分布和储量,对实现该区域农业生产和环境保护协调具有重要意义。与不覆膜相比,本研究中秋覆膜和春覆膜均不同程度提高了在 0—10 cm 土层土壤的固碳潜力,尤其是秋覆膜处理,不仅可以提高土壤水稳性团聚体的稳定性,还可以有效提高 >2 mm 团聚体的分布和有机碳含量,从而增加土壤有机碳的储量。但是,覆膜是否长期的增加耕层土壤有机碳,也跟土壤本底有机碳含量有关,因此下一步需要多点长期试验去验证。

## 4 结论

连续 5 年的地膜覆盖措施对土壤水稳性团聚体的稳定性、有机碳在各级团聚体的分布具有重要影响。与传统不覆膜相比,秋覆膜、春覆膜措施对水稳性微团聚体没有显著影响,但是能显著提高 0—10 cm 土层 >2 mm 大团聚体含量及比例,进而增加了土壤团聚体的稳定性。同时,地膜覆盖处理尤其是秋覆膜处理还可显著提高土壤水稳性大团聚体有机碳含量,增加水稳性大团聚体有机碳储量及其对土壤有机碳的贡献率,有效促进土壤有机碳的固持。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384-393.
- [ 2 ] Abid M, Lal R. Tillage and drainage impact on soil quality: I. Aggregate stability, carbon and nitrogen pools. Soil and Tillage research, 2008, 100(1/2): 89-98.
- [ 3 ] Paul B K, Vanlauwe B, Ayuke F, Gassner A, Hoogmoed M, Hurisso T T, Koala S, Lelei D, Ndabamenye T, Six J, Pulleman M M. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 164: 14-22.
- [ 4 ] Du Z L, Zhao J K, Wang Y D, Zhang Q Z. Biochar addition drives soil aggregation and carbon sequestration in aggregate fractions from an intensive agricultural system. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(3): 581-589.
- [ 5 ] Six J, Bossuyt H, Degryse S, Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7-31.
- [ 6 ] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, Geng R L, Cai Z C. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil. Soil and Tillage Research, 2012, 124: 170-177.
- [ 7 ] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [ 8 ] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. Plant and Soil, 1984, 76(1/3): 319-337.
- [ 9 ] Liu J L, Zhu L, Luo S S, Bu L D, Chen X P, Yue S C, Li S Q. Response of nitrous oxide emission to soil mulching and nitrogen fertilization in semi-arid farmland. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 188: 20-28.
- [ 10 ] Sharma P, Abrol V, Sharma R K. Impact of tillage and mulch management on economics, energy requirement and crop performance in maize - wheat rotation in rainfed subhumid inceptisols, India. European Journal of Agronomy, 2011, 34(1): 46-51.
- [ 11 ] Gao Y H, Xie Y P, Jiang H Y, Wu B, Niu J Y. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching. Field Crops Research, 2014, 156: 40-47.
- [ 12 ] Zhou L M, Li F M, Jin S L, Song Y J. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China. Field Crops Research, 2009, 113(1): 41-47.
- [ 13 ] Maurya P R, Lal R. Effects of different mulch materials on soil properties and on the root growth and yield of maize (*Zea mays*) and cowpea (*Vigna unguiculata*). Field Crops Research, 1981, 4: 33-45.
- [ 14 ] Rockström J, Lannerstad M, Falkenmark M. Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(15): 6253-6260.
- [ 15 ] Ruidisch M, Bartsch S, Kettering J, Huwe B, Frei S. The effect of fertilizer best management practices on nitrate leaching in a plastic mulched ridge cultivation system. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 169: 21-32.
- [ 16 ] 刘希玉, 王忠强, 张心昱, 徐丽丽, 施瑶, 孙晓敏, 杨凤亭. 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响. 生态学报, 2013, 33

- (16): 4949-4955.
- [17] Guo Z C, Zhang Z B, Zhou H, Rahman M T, Wang D Z, Guo X S, Li L J, Peng X H. Long-term animal manure application promoted biological binding agents but not soil aggregation in a Vertisol. *Soil and Tillage Research*, 2018, 180: 232-237.
- [18] 付鑫, 王俊, 刘全全, 李蓉蓉. 秸秆和地膜覆盖对旱作玉米田土壤团聚体及有机碳的影响. *土壤通报*, 2016, 47(2): 405-413.
- [19] 王勇, 宋尚有, 樊廷录, 高育峰. 黄土高原旱地秋覆膜及氮肥秋基春追比例对春玉米产量和品质的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(3): 460-470.
- [20] 邹洪涛, 张玉龙, 黄毅, 虞娜, 张辉. 辽西半干旱区秋后覆膜保墒对翌年春玉米生长发育的影响. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(5): 25-28.
- [21] 牛芬菊, 张雷, 李小燕, 熊春蓉, 张成荣. 旱地全膜双垄沟播玉米秸秆还田对玉米生长及产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(3): 161-165, 188-188.
- [22] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution/Klute A, ed. *Methods of Soil Analysis, Part 1*. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986: 837-871.
- [25] 吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽. 长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(1): 1-10.
- [26] 安婉丽, 高灯州, 潘婷, 曾从盛, 王维奇. 水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响. *环境科学学报*, 2016, 36(5): 1833-1840.
- [27] Li C J, Wang C J, Wen X X, Qin X L, Liu Y, Han J, Li Y J, Liao Y C, Wu W. Ridge-furrow with plastic film mulching practice improves maize productivity and resource use efficiency under the wheat-maize double-cropping system in dry semi-humid areas. *Field Crops Research*, 2017, 203: 201-211.
- [28] Park E J, Sul W J, Smucker A J M. Glucose additions to aggregates subjected to drying/wetting cycles promote carbon sequestration and aggregate stability. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(11): 2758-2768.
- [29] Grant C D, Dexter A R. Air entrapment and differential swelling as factors in the mellowing of molded soil during rapid wetting. *Australian Journal of Soil Research*, 1990, 28(3): 361-369.
- [30] 信东旭, 张玉龙, 黄毅, 张玉玲, 张哲元, 崔宁, 宋文, 陈富强. 不同时期覆膜对辽西旱地农田土壤墒情及春玉米产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6): 114-118.
- [31] 田慎重, 王瑜, 李娜, 宁堂原, 王丙文, 赵红香, 李增嘉. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响. *生态学报*, 2013, 33(22): 7116-7124.
- [32] Kahlon M S, Lal R, Ann-Varughese M. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126: 151-158.
- [33] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, Hwat B S, 李秀英, 李娟. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响. *生态学报*, 2010, 30(4): 1035-1041.
- [34] 刘哲, 韩霁昌, 孙增慧, 余正洪, 张卫华, 高红贝. 外源新碳对红壤团聚体及有机碳分布和稳定性的影响. *环境科学学报*, 2017, 37(6): 2351-2359.
- [35] Peng X, Horn R. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 69(3): 584-592.
- [36] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 李洪杰, 仲惟磊, 李增嘉. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 373-378.
- [37] 孙元宏, 高雪莹, 赵兴敏, 隋标, 王鸿斌, 赵兰坡. 添加玉米秸秆对白浆土重组有机碳及团聚体组成的影响. *土壤学报*, 2017, 54(4): 1009-1017.
- [38] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 朱锦懋, 曾宏达, 杨智杰. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响. *生态学报*, 2008, 28(2): 702-709.
- [39] Blanco-Moure N, Angurel L A, Moret-Fernández D, López M V. Tensile strength and organic carbon of soil aggregates under long-term no tillage in semiarid Aragon (NE Spain). *Geoderma*, 2012, 189-190: 423-430.
- [40] 信乃途. 中国北方旱区农业研究. 北京: 中国农业出版社, 2002.