

# 秸秆还田与长期连作棉田土壤 水稳性团聚体特征

曹晶晶, 魏 飞, 马芳霞, 刘 军, 黄金花, 刘建国

(石河子大学农学院, 新疆兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003)

**摘 要:** 以棉花长期连作定点试验田为研究对象, 研究秸秆还田对长期棉花连作土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响。试验设长期连作 5、10、20 a 和 30 a 的秸秆还田小区及长期棉花连作 5、10 a 和 20 a 无秸秆还田小区, 共计 7 个处理, 每个处理 3 个重复。结果显示: 无秸秆还田条件下, 随着连作年限的增加, 土壤 1~0.25 mm 水稳性团聚体含量和团聚体中有机碳含量逐渐降低, <0.053 mm 水稳性团聚体含量逐渐增加; 而秸秆还田可以显著提高长期连作棉田土壤中 1~0.25 mm 水稳性团聚体含量、团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)值及团聚体中有机碳含量; 秸秆还田条件下随着连作年限的增加, 土壤 1~0.25 mm 水稳性团聚体含量逐渐增加, <0.053 mm 水稳性团聚体含量逐渐降低, 且对 0~30 cm 耕作层土壤影响较大; 与无秸秆还田相比, 秸秆还田长期连作棉田, 随着连作年限的增加, 团聚体分形维数(D)逐渐降低, 而无秸秆还田分形维数(D)逐渐增加, 团聚体分形维数表现为随土层加深而增大, 最后在 20~30 cm 处趋于稳定。说明秸秆还田显著提高长期连作棉田水稳性团聚体的稳定性, 对改善土壤结构、提升土壤的肥力具有积极作用, 能够缓解长期连作对土壤物理性状产生的不利影响。

**关键词:** 秸秆还田; 长期连作; 棉田; 水稳性团聚体; 团聚体稳定性

**中图分类号:** S152.3      **文献标志码:** A

## Stalk returning and continuous cotton cropping on soil water stable aggregate

CAO Jing-jing, WEI Fei, MA Fang-xia, LIU Jun, HUANG Jing-hua, LIU Jian-guo

(Agricultural College, Shihezi University, Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

**Abstract:** The objective of the experiment is to study the effect of straw incorporation on water stable aggregate distribution and organic carbon in the continuous cropping cotton field, providing scientific basis for long-term continuous cropping of cotton. This experiment had seven treatments' of continuous cropping plots, four treatments of cotton straw returning. There were three replicates for each treatment, The four treatments with cotton straw included four continuous cropping plots, such as 5, 10, 20 and 30 years, the other three treatments were 5, 10 and 20 years continuous cropping plots. The results showed that under without straw returning, with the year of continuous cropping increasing, the percentage of 1~0.25 mm water stable aggregate and water stable aggregate organic carbon were remarkably decreased, the content of <0.053 mm water-stable aggregates was gradually increased. But straw returning could significantly improved the percentage of 1~0.25 mm water stable aggregate, as well as MWD, GMD and water stable aggregate organic carbon of long-term continuous cropping. Besides, with the year of continuous cropping increasing, the percentage of >0.25 mm water stable aggregate was remarkably increased, the content of <0.053 mm water-stable aggregates was gradually decreased. The largest impact was detected for the 0~30 cm soil layer. Compared with no straw returning, straw returning and long-term continuous cropping cotton fields, with the time of continuous cropping increasing, fractal dimension (D) was gradually reduced, and aggregates fractal dimension performance increases with depth, and finally stabilized at 20~30 cm soil layer. Straw returning significantly improved the stability of water stable aggregates under long-term continuous cropping. Straw returning has a positive effect of improve soil structure and enhance soil fertility, thus mitigating the negative effect of long-term continuous cropping on soil physical properties.

收稿日期: 2016-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(31260307)

作者简介: 曹晶晶(1989—), 女, 新疆塔城人, 硕士研究生, 研究方向为农田生态环境。E-mail: caojingjing1126@163.com。

通信作者: 刘建国(1968—), 男, 山东济宁人, 教授, 研究方向为农田生态环境与农作制度。E-mail: liujianguo@126.com。

**Keywords:** straw returning; long-term continuous cropping; cotton; water stable aggregate; stability of aggregate

土壤团聚体是评价土壤肥力和土壤质量的重要指标,其分布和稳定性直接影响了土壤的孔隙性、持水性、通透性和抗侵蚀性,从而影响农作物的生长<sup>[1]</sup>。团聚体的稳定性分为机械稳定性、水稳性和生物学稳定性。研究表明,土壤团聚体与有机碳是相互依存的,团聚体是有机碳存在的场所,有机碳是团聚体存在的胶结物质<sup>[2]</sup>。Oades 等试验研究表明,各个级别的团聚体中有机质含量影响着团聚体的稳定性,在水稳性团聚体形成过程中,有机胶结物质起着重要的作用<sup>[3]</sup>。土壤团聚体的形成、分布、作用功能及有机碳的分布不仅受土壤种类的影响,同时也受耕作方式、施肥、秸秆还田、种植模式等因素的影响<sup>[2]</sup>。

长期连作会导致作物减产、土壤理化性状变差等<sup>[4]</sup>连作障碍问题,而秸秆还田增加土壤中有机胶结物质的含量,改善土壤结构,增加土壤养分含量,秸秆还田还显著影响了土壤水稳性团聚体的数量及稳定性<sup>[5-6]</sup>。新疆棉区存在传统有机肥源不足、农田养分主要靠施用化肥、发展绿肥又受到水资源的制约等问题,秸秆还田作为培肥地力的重要措施之一,对土壤肥力、团聚体的形成、土壤孔隙度的增加具有很大的促进作用。近年来关于秸秆还田及长期连作对土壤环境的影响已有报道,但大多集中于土壤腐殖质组分、微生物量、土壤理化性状、有机碳组分等<sup>[7-9]</sup>方面,但关于秸秆还田对长期连作棉田土壤水稳性团聚体的研究却少有报道。因此,研究秸秆还田对长期连作棉田土壤水稳性团聚体特征具有十分重要的意义。

本文利用棉花长期连作定位试验,分析秸秆还田及长期连作棉田不同土层的各别水稳性团聚体的分布状况,以及土壤水稳性团聚体平均重量直径、几何平均直径、分形维数和水稳性团聚体中有机碳分布等指标。研究长期连作棉田水稳性团聚体的分布及有机碳的分布规律,为评价秸秆还田对长期连作棉田土壤结构的影响和新疆棉田土壤培肥制度的建立提供科学的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

本试验在石河子大学农学院试验站棉花长期连作定点试验田进行。试验设有长期连作 5、10、20 a 和 30 a 的秸秆还田小区,其分别标记为 5 a、10 a、20 a 和 30 a。另设有长期连作 5、10 a 和 20 a 无秸秆还

田小区,其分别标记为 CK5、CK10 和 CK20 共计 7 个处理,每个处理 3 个重复。秸秆还田长期连作小区是每年秋季棉花收获后将所有的棉花秸秆用铡刀切成 5~8 cm 小段还田,即模拟大田生产将棉花秸秆(6 000~7 500 kg·hm<sup>-2</sup>)全部机械还田,入冬前结合施用化肥翻入耕层,然后冬灌;无秸秆还田长期连作小区是棉花收获后将全部秸秆带出农田,然后施用化肥、翻耕、冬灌。每处理小区 1.5 m×1.5 m,不同处理间用厚塑料膜隔开,每处理三次重复。种植的棉花品种为“新陆早 46 号”,按“30 cm+60 cm+30 cm”宽窄行距配置,采用膜下滴灌,4 月 20 日播种,种植密度为每公顷 19.8 万株,7 月 8 日打顶。全生育期滴灌 12 次,滴灌总量 5 400 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,共施纯氮 495 kg·hm<sup>-2</sup>,30%基施,其余随水滴施,其他管理措施同大田管理。供试的土壤为草甸土。

### 1.2 土样采集

于 2015 年棉花播种前分别采集 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm 5 个土层剖面原状土样,每处理 3 个重复。土样采集后放入塑料盒内带回实验室,在运输过程中尽量减少对土样的扰动。然后放于实验室内自然风干并沿着土壤结构的自然剖面掰开,同时防止外力作用而变形。让土样自然风干,备用。

### 1.3 测试方法

土壤水稳性团聚体百分含量的测定采用湿筛法<sup>[10]</sup>,湿筛分析在团聚体分析仪上进行,套筛孔径依次为 1、0.25、0.053 mm。各处理取 100 g 土样倒入套筛中,浸润 10 min 后以 30 次·min<sup>-1</sup>(上下筛动时套筛不能露出水面)上下振荡 5 min。筛分后,拆开套筛,将留在套筛上的各级团聚体用水洗入铝盒中,待澄清后倒去上清液,烘箱 55℃烘干至恒重,各处理 3 次重复。

### 1.4 指标计算

(1) 不同级别水稳性团聚体的质量百分含量<sup>[11]</sup>

$$W_i = \frac{W_{wi}}{100} \times 100\%$$

式中, $W_i$  为某级水稳性团聚体的质量分数(%); $W_{wi}$  为该级水稳性团聚体的质量(g)。

(2) 平均重量直径(MWD)<sup>[12]</sup>

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

式中,MWD 为平均重量直径; $w_i$  为对应于  $x_i$  的团聚体的重量百分比; $x_i$  为各粒级的平均直径。

(3) 几何平均直径(GMD)<sup>[12]</sup>

$$\text{GMD} = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]$$

式中,GMD 为几何平均直径; $w_i$  为对应于  $x_i$  的团聚体的重量百分比; $x_i$  为各粒级的平均直径。

(4) 分形维数(D)的推导公式<sup>[13]</sup>:

$$\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} = \left[ \frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right]^{3-D}$$

式中, $\bar{x}_i$  为团聚体的平均直径; $M(r < \bar{x}_i)$  为粒径小于  $x_i$  的团聚体的重量; $x_{\max}$  为团聚体的最大粒径。

## 1.5 数据分析

运用 Excel 2003 及 SPSS19.0 对实验数据进行统计分析 & 绘图。

## 2 结果与分析

## 2.1 秸秆还田对长期连作棉田 0~50 cm 土层水稳性团聚体分布的影响

由图 1 可以看出,0~10 cm 土层和 10~20 cm

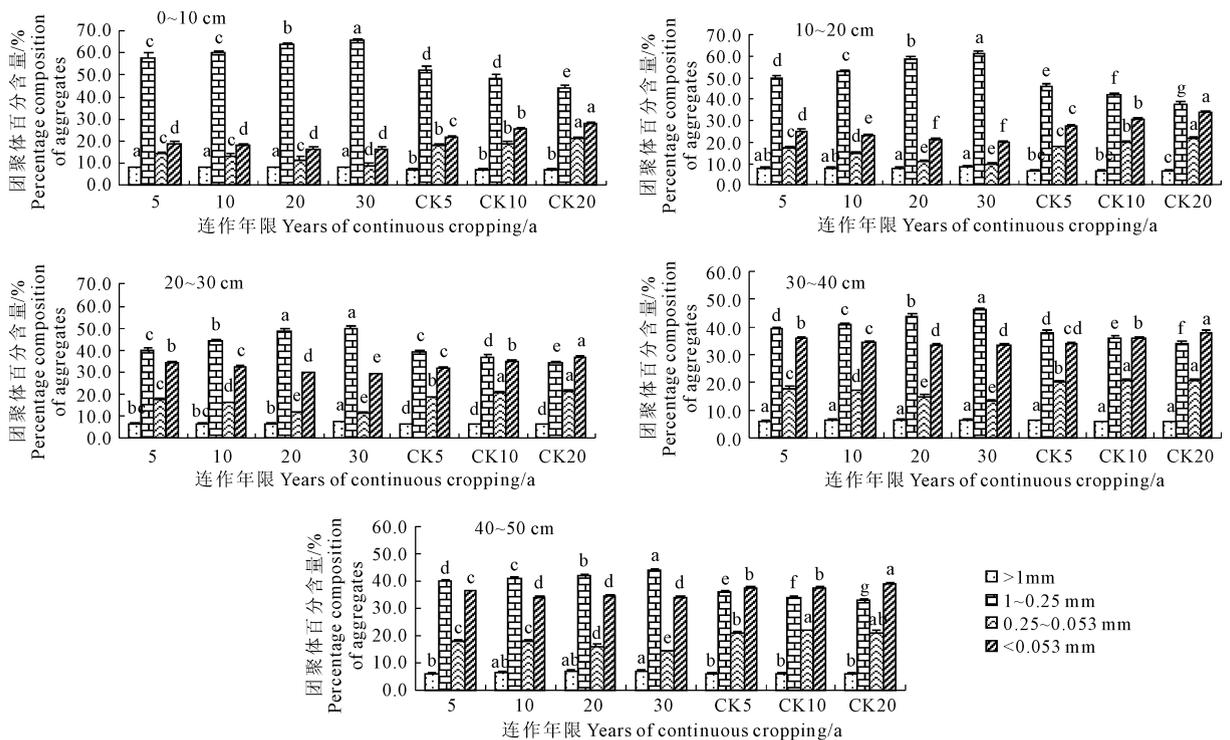


图 1 长期连作棉田 0~50 cm 土层水稳性团聚体分布

Fig.1 Soil water-stable aggregate distribution of long-term continuous cropping cotton field at 0~50 cm layer

同一处理下 20~30、30~40 cm 和 40~50 cm 土层团聚体含量变化趋势相似,与 0~20 cm 土层相比 1~0.25 mm 团聚体含量下降,而 <0.053 mm 团聚体含量上升明显,各土层 1~0.25 mm 团聚体含量分别占总量的 65.0%、61.0%、50.0%、46.0% 和 44.0%,

土层的变化趋势一致,秸秆还田与无秸秆还田,不同处理下 0~20 cm 土层的水稳性团聚体多集中于 1~0.25 mm 团聚体,占水稳性团聚体总量的 38.0%~65.3%,而 >1 mm 水稳性团聚体含量最少。同一处理各粒径水稳性团聚体含量由高到底的顺序为:1~0.25 mm, <0.053 mm, 0.25~0.053 mm, >1 mm。各处理 >1 mm 及 0.25~0.053 mm 水稳性团聚体分布较平均,没有表现出明显的规律。秸秆还田处理,1~0.25 mm 团聚体随着连作年限的增加呈现逐渐增加的趋势,<0.053 mm 水稳性团聚体随着连作年限的增加逐渐降低,而无秸秆还田处理与秸秆还田处理呈现相反的趋势,1~0.25 mm 团聚体随着连作年限的增加而下降,<0.053 mm 水稳性团聚体随着连作年限的增加逐渐增加。秸秆还田处理与无秸秆还田处理相比,1~0.25 mm 秸秆还田处理团聚体含量明显高于无秸秆还田处理,而 <0.053 mm 无秸秆还田处理高于秸秆还田处理,说明秸秆还田有利于土壤中水稳性微团聚体向较大的水稳性团聚体转化。

<0.053 mm 团聚体含量分别占总量的 16.5%、20.0%、30.4%、33.7% 和 34.6% (30a 为例)。在 20~30、30~40 cm 和 40~50 cm 土层秸秆还田处理随着连作年限的增加,1~0.25 mm 团聚体含量呈现增长的趋势,而 <0.053 mm 和 0.25~0.053 mm 团聚

体呈现下降的趋势。无秸秆还田处理与秸秆还田处理相比,相对应的粒径则呈现相反的变化趋势。同一处理各粒径水稳性团聚体含量由高到低的顺序为:1~0.25 mm, <0.053 mm, 0.25~0.053 mm, >1 mm。

无论秸秆还田还是无秸秆还田处理,不同土层间 1~0.25 mm 水稳性团聚体含量差异表现为 0~10 cm > 10~20 cm > 20~30 cm > 30~40 cm > 40~50 cm。而 <0.053 mm 水稳性团聚体含量刚好相反,在 0~50 cm 范围内,随土层深度增加 1~0.25 mm 水稳性团聚体含量降低。>1 mm 和 0.25~0.053 mm 土壤水稳性团聚体含量差异不明显。

在 0~30 cm 耕作层土壤,秸秆还田处理 1~0.25 mm 水稳性团聚体含量显著高于无秸秆还田处理,且随着连作年限的增加,其增长幅度逐渐变大。1~0.25 mm 水稳性团聚体含量在 0~10、10~20 cm 和 20~30 cm 土层连作 5、10、20 a 处理比 CK5、CK10、CK20 分别增加了 11.3%、25.0%、43.8%; 8.7%、26.2%、55.3% 和 2.6%、18.9%、44.1%。40~50 cm 土层差异不显著。<0.053 mm 水稳性团聚体含量在 0~10、10~20 cm 和 20~30 cm 土层连作 5、10、20 a 处理比 CK5、CK10、CK20 分别降低了 14.1%、29.4%、40.2%, 14.0%、22.6%、35.7% 和 1.0%、7.4%、16.7%。

## 2.2 秸秆还田对长期连作棉田土壤水稳性团聚体中有机碳的影响

由图 2 可以看出,长期连作棉田土壤水稳性团聚体中有机碳含量,随着水稳性团聚体级别的减小呈现先减小后增加的趋势;>1 mm 水稳性团聚体中秸秆还田长期连作 30 a 处理有机碳含量最多,为 15.28 g·kg<sup>-1</sup>; 0.25~0.053 mm 水稳性团聚体中无秸秆还田长期连作 CK20 处理有机碳含量最少,为 7.57 g·kg<sup>-1</sup>。无秸秆还田条件下,各个级别土壤团聚体中有机碳含量随着连作年限的增加而减少。秸

秆还田长期连作条件下,每个级别水稳性团聚体中有机碳含量随着连作年限的增加呈上升趋势。在所有级别的水稳性团聚体中,秸秆还田处理团聚体中的有机碳含量高于无秸秆还田长期连作棉田,且随着连作年限的增加,增加幅度不断增大,20 a 处理达到最大(除 30 a 以外)。在 >1 mm 水稳性团聚体有机碳含量中,连作 5、10、20 a 处理比 CK5、CK10、CK20 分别增加了 0.26%、22.04%、31.80%; 4.60%、23.37%、24.68%; 1.78%、17.85%、24.28%; 19.02%、29.30%、47.37% (以 >1 mm 团聚体有机碳含量为例)。说明秸秆还田能提高长期连作棉田水稳性团聚体中有机碳含量,且 <0.053 mm 水稳性团聚体含量增加幅度最大。秸秆还田与无秸秆还田各级水稳性团聚体中有机碳含量由高到低的顺序依次为: >1 mm, <0.053 mm, 1~0.25 mm, 0.25~0.053 mm。

## 2.3 秸秆还田对长期连作棉田土壤水稳性团聚体大小的影响

平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是评判土壤团聚体稳定性的可靠指标, MWD 和 GMD 值越大则表示团聚体的团聚程度越高,稳定性和抗侵蚀能力越强<sup>[14-17]</sup>。

由图 3 可知,随土层深度的增加,土壤水稳性团聚体 MWD 趋于减小。秸秆还田处理,随着连作年限的增加,土壤水稳性团聚体的 MWD 逐渐增大, 10~20、20~30 cm 土层差异显著。无秸秆还田处理,随着连作年限的增加土壤水稳性团聚体 MWD 逐渐减小。秸秆还田处理水稳性团聚体 MWD 高于无秸秆还田处理, 30~40、40~50 cm 土层差异不显著。这表明长期连作导致土壤水稳性团聚体 MWD 降低,而秸秆还田提高了长期连作棉田土壤水稳性团聚体的 MWD,且随着土层深度的增加,秸秆还田对土壤水稳性团聚体的 MWD 影响较小。

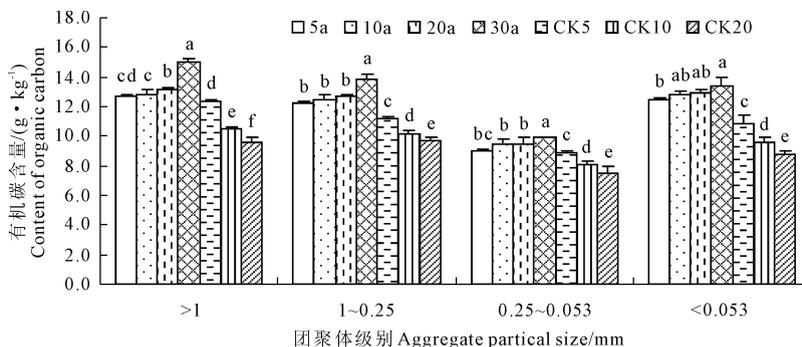


图 2 长期连作棉田土壤水稳性团聚体中有机碳的分布

Fig. 2 Organic carbon of soil water-stable aggregates under long-term continuous cropping cotton field

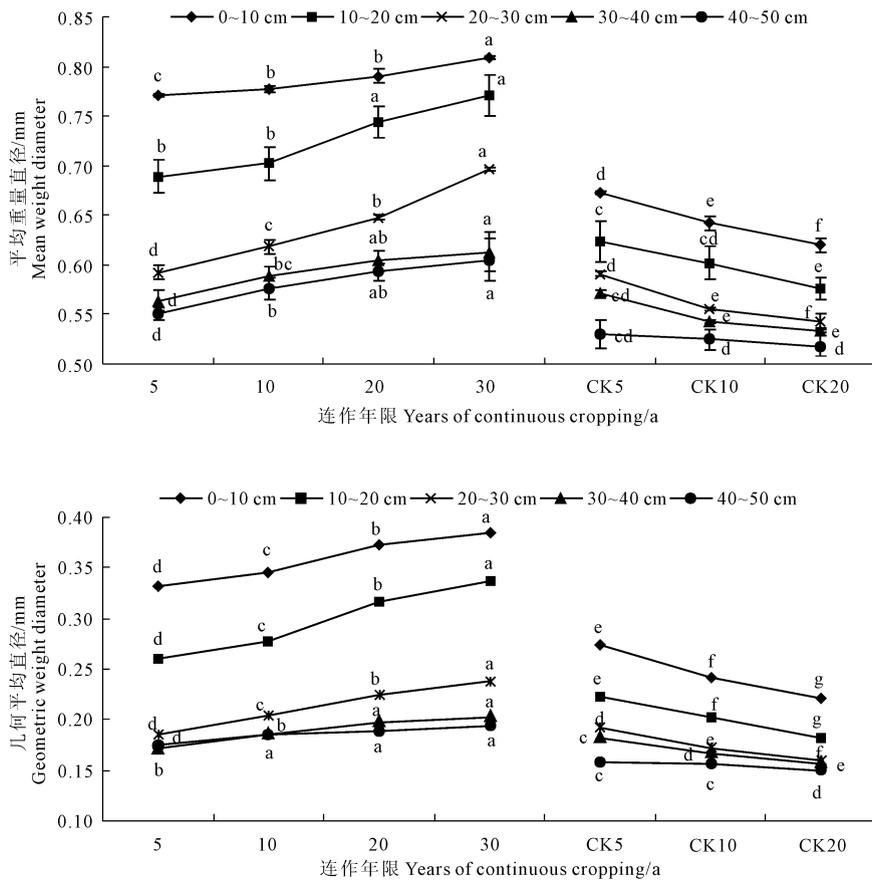


图 3 长期连作棉田土壤水稳性团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)

Fig. 3 Soil water-stable aggregate mean weight diameter and geometric weight diameter of long-term continuous cropping cotton field

由图 3 可知,随土层深度的增加,秸秆还田处理及无秸秆还田处理的土壤水稳性团聚体的 GMD 均呈降低趋势。秸秆还田处理,随连作年限的增加,土壤水稳性团聚体的 GMD 呈上升趋势。无秸秆还田处理,随着连作年限的增加,土壤水稳性团聚体的 GMD 呈下降的趋势。秸秆还田处理团聚体的 GMD 高于无秸秆还田处理。0~10、10~20 cm 和 20~30 cm 土层连作 5、10、20 a 处理与 CK5、CK10、CK20 相比分别增加了 20.7%、42.9%、68.8%, 17.3%、36.2%、73.5% 和 1.0%、18.1%、41.1%。30~40 cm 和 40~50 cm 土层之间差异不显著。这表明长期连作导致土壤水稳性团聚体的 GMD 降低,秸秆还田显著提高了长期连作棉田 0~30 cm 土层的土壤水稳性团聚体 GMD 和土壤的抗侵蚀能力。

#### 2.4 秸秆还田对长期连作棉田土壤水稳性团聚体分形特征的影响

杨培玲<sup>[13]</sup>等分析土壤分形特征时得出,分形维数越高,粘粒含量越多,土壤结构越紧实,通透性越差。吴承祯<sup>[18]</sup>等认为土壤结构越好,分形维数越低,团聚体越稳定。按照分形维数的公式对各处理团聚体分形维数进行数学拟合( $R^2 > 0.89$ ),结果表

明(图 4),秸秆还田与无秸秆还田长期连作棉田的土壤团聚体分形维数分别在 2.61~2.79 和 2.69~2.81 之间。在 0~10、10~20、20~30 cm 土层,土壤水稳性团聚体分形维数均表现为秸秆还田长期连作棉田显著低于无秸秆还田长期连作棉田。秸秆还田处理随着连作年限的增加,各处理的分形维数减小。无秸秆还田处理随着连作年限的增加,各处理的分形维数增大。说明长期连作增加了土壤水稳性团聚体分形维数,而秸秆还田能降低长期连作棉田的分

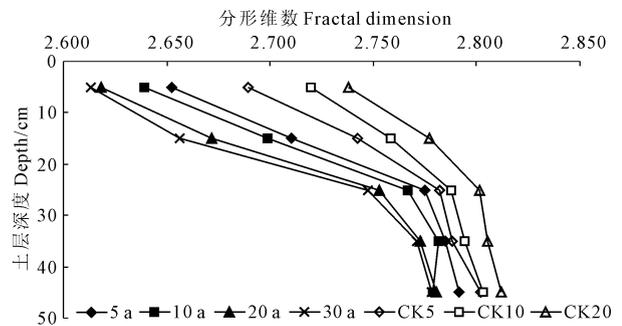


图 4 长期连作棉田土壤水稳性团聚体的分形维数

Fig. 4 Fractal dimension of soil water-stable aggregates under long-term continuous cropping cotton field

形维数。秸秆还田与无秸秆还田处理下,团聚体分形维数表现为随土层加深而增大,最后在 30 cm 处趋于稳定。这表明秸秆还田对长期连作棉田 30 cm 以下的土壤分形维数影响较小,但 30 cm 以下的土壤水稳性团聚体的分形维数最大,说明其颗粒最小,水稳性团聚体稳定性最低。

### 3 讨论

不同级别的团聚体对土壤养分的储备和供应、孔隙分布、持水性和生物活动具有不同的作用<sup>[19]</sup>。各级别水稳性团聚体的分配比例能较好地反映土壤团聚体的结构状况。刘威等<sup>[20]</sup>的试验表明秸秆还田和免耕相结合对土壤结构改良效果最好,这一措施可以增加农田表层土壤 > 0.25 mm 团聚体百分含量,提高团聚体的稳定性,改善土壤的结构。李涵<sup>[21]</sup>等研究了渭北旱塬区秸秆覆盖还田土壤团聚体的特征,发现秸秆还田能提高土壤总有机碳含量,且能提升 0~30 cm 土层土壤团聚体的稳定性。本试验中无秸秆还田长期连作棉田,随着连作年限的增加土壤 1~0.25 mm 水稳性团聚体含量及团聚体 MWD、GMD 值降低。而秸秆还田提高了长期连作棉田土壤 1~0.25 mm 水稳性团聚体含量及团聚体的 MWD、GMD 值。这可能是由于秸秆还田能不断为土壤供给腐殖质及有机质,使土壤中的腐殖质和有机质含量增加,加强了土壤颗粒之间有机质的胶结作用,从而导致土壤中较小团聚体向较大团聚体的转化<sup>[1]</sup>。秸秆还田使土壤养分丰富,微生物活动频繁,促进土壤较大水稳性团聚体的含量,从而增强土壤团聚体的稳定性,改善土壤的结构<sup>[21-22]</sup>。张鹏等<sup>[23]</sup>也认为适量的秸秆还田可以显著提高土壤 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量及团聚体的 MWD、GMD 值,这与本试验的研究结果基本一致。

无论秸秆还田还是无秸秆还田处理,1~0.25 mm 水稳性团聚体及团聚体的 MWD、GMD 值,随土层的加深而降低。对 0~30 cm 土层的影响比较显著(图 1,图 2)。这可能是由于秸秆还田后棉花秸秆位于耕层土壤中,通过长时间的微生物活动及耕作才能到达下层土壤,团聚体是土壤中有机的主要储存场所,表层土中近 90% 的土壤有机碳都位于团聚体中<sup>[24]</sup>。本试验中,0~30 cm 土壤中主要以 1~0.25 mm 水稳性团聚体为主,且随着土层的加深 1~0.25 mm 水稳性团聚体含量下降(图 1)。黄金花等<sup>[8]</sup>认为秸秆还田与无秸秆还田长期连作棉田,随着土层深度的增加土壤总有机碳含量逐渐减小。秸秆位于耕层土壤中,能够减小雨水的冲刷面积,缓解

外力对土壤结构的破坏。能够有效减少土壤出现“结皮”、“板结”等现象<sup>[25]</sup>。刘威等<sup>[20]</sup>认为秸秆还田和免耕会增加农田表层土壤 > 0.25 mm 水稳性团聚体及团聚体的 MWD、GMD 值,与本试验结果基本一致。但这与田慎重等<sup>[26]</sup>的研究结果相反,这可能与土壤耕作方式及农田管理措施的不同有关。

本试验中无秸秆还田长期连作棉田,随着连作年限的增加,各个级别水稳性团聚体中有机碳含量逐渐减小。秸秆还田处理随着连作年限的增加,各个级别水稳性团聚体中有机碳含量逐渐增大。这是由于秸秆还田后,不断向土壤输送有机物质。其中 > 1 mm 水稳性团聚体中有机碳含量最大,0.25~0.053 mm 水稳性团聚体中有机碳含量最小,呈现“V”型分布且差异显著( $P < 0.05$ )。这一研究结果与张风华<sup>[27]</sup>和王静娅<sup>[28]</sup>的研究结果基本一致。而与苑亚茹等<sup>[29]</sup>的研究结果相反,这可能是与土壤的类型及种植的作物有关。

### 4 结论

1) 秸秆还田对长期连作棉田的 1~0.25 mm 及 < 0.053 mm 土壤水稳性团聚体的分布产生显著( $P < 0.05$ )影响。而对 > 1 mm 和 0.25~0.053 mm 土壤水稳性团聚体分布的影响不显著。土壤团聚体的分形维数(D)与 > 1 mm、1~0.25 mm 两种团聚体含量呈极显著的负相关关系( $P < 0.01$ )。

2) 秸秆还田后长期连作棉田的 WMD、GMD 值增加,而分形维数(D)减小,且 0~30 cm 土层差异显著( $P < 0.05$ )。秸秆还田还显著增加了长期连作棉田水稳性团聚体中有机碳的含量,> 1 mm 水稳性团聚体中有机碳含量最大,0.25~0.053 mm 水稳性团聚体中有机碳含量最小。

3) 研究表明长期连作导致土壤水稳性团聚体的稳定性下降,而秸秆还田提高了长期连作棉田的土壤团聚体的水稳性,提高土壤的抗侵蚀能力。秸秆还田对改善土壤结构、提升土壤的肥力具有积极作用,能够缓解长期连作对土壤物理性状产生的不利影响。

#### 参考文献:

- [1] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [2] 刘中良,宇万太.土壤团聚体中有机碳研究进展[J].中国生态农业学报,2011,19(2):447-455.
- [3] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils[J]. Australian Journal of Soil Research, 1991,29(6):815-828.
- [4] 徐文修,罗明,李大平,等.不同连作年限棉田土壤理化性质

- 及微生物区系变化规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 134-138.
- [5] Chen D, Zhenxie Y I, Zhou W, et al. Effects of straw return on soil nutrients and microorganisms in late rice under different soil tillage systems[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(8): 1722-1728.
- [6] 王彩霞, 刘 帅, 王 勇, 等. 不同保护性耕作方式对微团聚体有机碳氧化稳定性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 149-155.
- [7] 刘 军, 唐志敏, 刘建国, 等. 长期连作及秸秆还田对棉田土壤微生物量及种群结构的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(8): 1418-1422.
- [8] 黄金花, 刘 军, 杨志兰, 等. 秸秆还田下长期连作棉田土壤有机碳活性组分的变化特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(3): 387-395.
- [9] 王喜艳, 张亚文, 冯 燕, 等. 玉米秸秆深层还田技术对土壤肥力和玉米产量的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 103-107.
- [10] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(1): 123-130.
- [11] 周 虎, 吕貽忠, 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.
- [12] Barreto R C, Madari B E, Maddock J E L, et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO<sub>2</sub> in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 132(3): 243-251.
- [13] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [14] 苏 静, 赵世伟. 土壤团聚体稳定性评价方法比较[J]. 水土保持学报, 2009, 29(5): 114-117.
- [15] 严 波, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不同耕作方式对宁南旱地土壤团聚体的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 58-63.
- [16] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregate stability and size distribution [J]. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, 2002, 4: 317-328.
- [17] 闫峰陵, 史志华, 蔡崇法, 等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 577-583.
- [18] 吴承祯, 洪 伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 162-167.
- [19] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure[J]. *Soil & Tillage Research*, 1988, 11(3/4): 199-238.
- [20] 刘 威, 张国英, 张 静, 等. 2 种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 117-122.
- [21] 李 涵, 张 鹏, 贾志宽, 等. 渭北旱塬区秸秆覆盖还田对土壤团聚体特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 27-33.
- [22] 高 飞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 有机肥不同施用量对宁南土壤团聚体粒级分布和稳定性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 100-106.
- [23] 张 鹏, 贾志宽, 王 维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1513-1520.
- [24] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665-676.
- [25] Abdullah A S. Minimum tillage and residue management increase soil water content, soil organic matter and canola seed yield and seed oil content in the semiarid areas of northern Iraq[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 144(4): 150-155.
- [26] 田慎重, 王 瑜, 李 娜, 等. 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[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7116-7124.
- [27] 张风华, 王建军. 不同轮作模式对土壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 113-116, 139.
- [28] 王静娅, 张风华. 干旱区典型盐生植物群落土壤团聚体组成及有机碳分布[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 600-607.
- [29] 苑亚茹, 韩晓培, 丁雪丽, 等. 不同植物根际土壤团聚体稳定性及其结合碳分布特征[J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 320-324.

(上接第 25 页)

- [6] 王玉荣, 贾鸿燕, 林春丽. 不同配方肥料在无土基质中对穴盘辣椒苗的影响[J]. 民营科技, 2007, (5): 77.
- [7] 郁继华, 闫晓花, 张洁宝, 等. 壳聚糖对低温胁迫下辣椒幼苗活性氧产生和保护酶活性的影响[J]. 植物生理学通讯, 2007, 43(4): 725-726.
- [8] 刘兰花, 张翠燕, 盖伟玲, 等. 不同基质配方对辣椒穴盘育苗质量的影响[J]. 北方园艺, 2011, (3): 26-28.
- [9] Poole H A. 王中强译. 椰糠与加拿大藓类泥炭作为园艺栽培基质的比较[J]. 腐植酸, 2003, (1): 35-38.
- [10] 李谦盛, 裴晓宝, 郭世荣, 等. 复配对芦苇末基质物理性状的影响[J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(3): 23-26.
- [11] 连兆煌, 李式军. 无土栽培原理与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 61-72.
- [12] 董爱香, 王 涛. 国内外草花育苗基质的性状比较[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(30): 13142-13143.
- [13] 张治安, 陈展宇. 植物生理学实验技术[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008: 100-125.
- [14] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 第二版. 北京: 中国农业出版社, 2011: 106-107.
- [15] 陈丽平, 赵方贵, 邹志荣, 等. 有机生态型无土栽培辣椒的研究初报[J]. 莱阳农学院学报, 2003, 20(2): 122-124.
- [16] 李 静, 赵秀兰, 魏世强, 等. 无公害蔬菜无土栽培基质理化特性研究[J]. 西南农业大学学报, 2000, 22(2): 113-115.
- [17] 刘超杰, 郭世荣, 束 胜, 等. 醋糟基质粉碎程度对辣椒幼苗生长和光合能力的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 330-334.
- [18] 甘小虎, 唐胜华, 阎庆九, 等. 不同基质对温室辣椒无土栽培效果的研究[J]. 蔬菜, 2013, (8): 10-12.
- [19] 吕祝章, 韩启秀, 庄颜军, 等. 利用废弃煤渣进行花生无土栽培研究初报[J]. 花生学报, 2003, 32(增刊): 477-478.