

刘学彤,郑春莲,曹彩云,等. 长期秸秆还田对潮土水稳性团聚体的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(24):215-220.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.24.037

# 长期秸秆还田对潮土水稳性团聚体的影响

刘学彤<sup>1</sup>, 郑春莲<sup>1</sup>, 曹彩云<sup>1,2</sup>, 党红凯<sup>1</sup>, 马俊永<sup>1,2</sup>, 李科江<sup>1,2</sup>

(1. 河北省农林科学院旱作农业研究所, 河北衡水 053000; 2. 河北省农作物抗旱研究重点实验室, 河北衡水 053000)

**摘要:**为探究潮土区长期秸秆还田土壤水稳性团聚体的分布及稳定性,以河北省低平原潮土区小麦-玉米轮作系统为研究对象,利用 38 年化肥与秸秆配施长期定位试验,研究了不施肥(CK)和等量氮、磷肥用量为 0 kg/hm<sup>2</sup>(S0)、2 250 kg/hm<sup>2</sup>(S1)、4 500 kg/hm<sup>2</sup>(S2)和 9 000 kg/hm<sup>2</sup>(S3)下的秸秆还田量、土壤团聚体分布特征及其稳定性。结果表明,与 CK 相比,长期施肥与秸秆还田可以降低耕层土壤容重与 pH 值,而对土壤颗粒组成没有显著影响。试验区土壤水稳性团聚体主要集中在 >0.250 mm 粒径中,在 0~10 cm 土层,S1、S2、S3 秸秆还田处理土壤 >0.250 mm 团聚体含量均显著高于 S0 无秸秆处理,微团聚体(0.053~0.250 mm 粒径)含量显著小于 S0 处理,<0.053 mm 团聚体含量无显著差异,秸秆还田使表层土壤微团聚体向大团聚体团聚,增加了大团聚体含量。长期施肥与秸秆还田可以增加 0~10 cm 土层的平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD),提高表层土壤有机碳含量;多元回归方程表明,0~10 cm 土层土壤有机碳含量与 MWD 值极显著相关。秸秆还田可以增强表层土壤团聚体稳定性,改善土壤结构。

**关键词:**秸秆还田;潮土;水稳性团聚体;氮;磷;MWD;GWD

**中图分类号:** S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)24-0215-06

土壤团聚体是土壤结构的重要组成部分,也是土壤肥力的物质基础,其分布可以表征土壤结构稳

定性,是评价土壤肥力和土壤质量的重要指标<sup>[1-2]</sup>。有研究表明,黑土区农田生态系统土壤团聚体的主要组成集中在 0.25~2.00 mm 和 0.053~0.250 mm 粒级<sup>[3]</sup>;红壤稻田土壤水稳性团聚体组成以 <0.25 mm 团聚体为主<sup>[4]</sup>。土壤团聚体的分布差异与研究区域的土壤类型、生态环境、土壤动物和微生物及耕作管理措施等有很大关系。土壤有机碳是土壤团聚体形成的重要胶结物质,其含量影响团聚体的稳定性,而土壤团聚体是有机碳贮存的主体,可以保护有机碳减少分解<sup>[5]</sup>,二者紧密联系。

收稿日期:2021-03-25

基金项目:河北省农林科学院创新工程项目(编号:2021-4-6-3);  
河北省现代农业产业技术体系小麦产业创新团队项目;河北省重点研发计划(编号:19226438D)。

作者简介:刘学彤(1991—),女,河北平山人,硕士,助理研究员,研究方向为作物养分资源管理与土壤肥力培育。E-mail: liuxuetong349@163.com。

通信作者:李科江,硕士,研究员,研究方向为农田节水技术研究。  
E-mail: nkyllkj@126.com。

2011,79(1):82-89.

[5] Mangus D L, Sharda A, Zhang N Q. Development and evaluation of thermal infrared imaging system for high spatial and temporal resolution crop water stress monitoring of corn within a greenhouse [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121: 149-159.

[6] 刘茂成. 植物叶片氮营养手持诊断仪的设计与研发[D]. 长春:吉林农业大学,2017:35-36.

[7] 程 坤. 基于 STM32 的叶绿素含量光电检测仪设计[J]. 电子技术与软件工程,2014(20):143-145.

[8] 刘 青. 基于 WSN 的温室无线监测系统研究[D]. 天津:天津科技大学,2018:42-44.

[9] Liang M H, He Y F, Chen L J, et al. Greenhouse Environment dynamic Monitoring system based on WIFI [J]. IFAC - Papers OnLine, 2018, 51(17):736-740.

[10] Croft H, Chen J M, Zhang Y. The applicability of empirical vegetation indices for determining leaf chlorophyll content over different leaf and canopy structures [J]. Ecological Complexity, 2014, 17:119-130.

[11] 阙玲丽. 基于计算机视觉技术的玉米植株高度检测的研究[J]. 农机化研究,2017,39(12):219-223.

[12] 杭 腾,毛罕平,张晓东,等. 基于机器视觉的番茄长势信息无损检测的研究[J]. 农机化研究,2015,37(11):192-197.

[13] 张铁民,黄 翰,黄鹏焕. 电动轮式移动小车控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(19):11-18.

[14] 孙意凡,孙建桐,赵 然,等. 果实采摘机器人设计与导航系统性能分析[J]. 农业机械学报,2019,50(增刊1):8-14.

[15] 王 康,梁秀英,周风燃,等. 基于磁导引的履带式小车作物图像自动采集系统设计与试验[J]. 华中农业大学学报,2020,39(2):141-149.

秸秆还田作为一种保护性耕作措施,同时也是改善土壤结构,增加土壤肥力的有效措施之一,近年来被广泛推广利用。据报道,河北省秸秆循环利用效率已从 1996 年的 58.1% 提高到了 2016 年的 85.9%<sup>[6]</sup>。秸秆还田不仅可以提高土壤肥力,增加土壤有机质含量<sup>[7-8]</sup>,同时也增加了土壤大团聚体含量和稳定性<sup>[9-11]</sup>。崔荣美等在渭北旱塬以秸秆还田 9 000 kg/hm<sup>2</sup> 和 13 500 kg/hm<sup>2</sup> 发现,连续秸秆还田 3 年后 0~20 cm 土层土壤有机质含量分别较对照提高了 8.92% 和 9.85%,且 >0.25 mm 团聚体含量显著高于对照<sup>[12]</sup>。孟庆英等在辽宁半干旱地区秸秆深还田条件下的研究发现,土壤水稳性团聚体主要集中在 <0.25 mm 粒级<sup>[13]</sup>。秸秆还田后对土壤团聚体影响的差异,可能是由研究区土壤类型、生态环境、耕作措施等不同引起的。河北省低平原潮土是河北省耕作土壤中面积最大的土壤类型,土壤肥力较低,属中低产田,近年河北省低平原区小麦—玉米轮作系统秸秆还田已全面普及,秸秆还田后对土壤碳氮的固持,有机质含量的增加以及作物产量的提高已有研究<sup>[14]</sup>,而对该区域长期秸秆还田土壤团聚体的分布及稳定性的研究甚少。本试验以河北省农林科学院旱作农业研究所的深州旱作试验站的长期化肥与秸秆配施定位试验为平台,探讨长期秸秆还田对土壤团聚体的分布以及团聚体稳定性的影响,以期为合理长期耕作农田培肥土壤、改善土壤结构提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

肥料长期定位试验位于河北省农林科学院旱作农业研究所衡水深州试验站(37°53'N,115°42'E)。试验始于 1981 年。该区属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温 12.4℃,年平均降水量 550 mm,降雨集中在 6—9 月。供试土壤为壤质底黏潮土,种植制度为冬小麦—夏玉米轮作,0~20 cm 土层土壤的基本理化性状为 pH 值 8.7、有机质含量 11.5 g/kg、全氮含量 0.83 g/kg、全磷含量 1.03 g/kg、全钾含量 20.31 g/kg、碱解氮含量 51.3 mg/kg、速效磷含量 12.3 mg/kg、速效钾含量 109.8 mg/kg。

1.2 试验设计

试验以化肥用量为主处理,秸秆还田量为副处理,1981 年开始布置化肥用量分别为 0 kg/hm<sup>2</sup> (N) + 0 kg/hm<sup>2</sup> (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、90 kg/hm<sup>2</sup> (N) + 60 kg/hm<sup>2</sup>

(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、180 kg/hm<sup>2</sup> (N) + 120 kg/hm<sup>2</sup> (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、360 kg/hm<sup>2</sup> (N) + 240 kg/hm<sup>2</sup> (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 和秸秆还田量分别为 0、2 250、4 500、9 000 kg/hm<sup>2</sup>,进行复因子试验,共 16 个处理。本试验采用其中的不施肥对照(CK)和化肥用量 360 kg/hm<sup>2</sup> (N) + 240 kg/hm<sup>2</sup> (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 的不同秸秆还田量 [0 kg/hm<sup>2</sup> (S0)、2 250 kg/hm<sup>2</sup> (S1)、4 500 kg/hm<sup>2</sup> (S2)、9 000 kg/hm<sup>2</sup> (S3)] 处理(表 1)。田间试验采用随机区组设计,每个处理重复 3 次,小区面积 34 m<sup>2</sup> (7.5 m×4.5 m)。磷肥和玉米秸秆均在小麦播种整地前一次性底施,玉米秸秆粉碎后还田,旋耕到土壤中;化肥氮冬小麦、夏玉米季各半,其中小麦季氮肥底追各半,追肥在拔节期撒施后浇水;玉米季氮肥全部用作追肥,在大喇叭口期撒施后浇水。其他管理同一般田间管理。

表 1 试验处理			kg/hm <sup>2</sup>
处理	N 施用量	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 施用量	玉米秸秆还田量
CK	0	0	0
S0	360	240	0
S1	360	240	2 250
S2	360	240	4 500
S3	360	240	9 000

1.3 样品采集与分析

2019 年 9 月 30 日玉米收获后,每小区采集 3 个点的 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的原状土,同层土壤混合后组成 1 个土壤样品,同时用环刀法测定每个小区 0~10、10~20 cm 土层土壤容重。将采集的原状土自然风干,取一部分测定土壤团聚体;剩余土样研磨过筛测定土壤基本理化性状。团聚体分级采用 Cambardella 和 Elliott 的方法,将水稳性团聚体分为大团聚体(>0.250 mm)、微团聚体(0.250~0.053 mm)和<0.053 mm 团聚体,其湿筛方法为:分别称取 2 份 100 g 风干原状土于培养皿中,加 30 mL 水,使得水顺着土壤孔隙自然湿润,然后将湿润的土壤完全倒于盖过土壤约 2.00 cm 的 0.25 mm 套筛中,在 2 min 内上下振荡 50 次,用水慢慢淋洗筛子上的土,收集未过筛子的土(粒径>0.25 mm)于小烧杯中,然后将<0.25 mm 的土样过 0.053 mm 筛子,并分别收集 0.053~0.250 mm 与<0.053 mm 的土样于烧杯中,加入适量氯化钙溶液澄清,于 60℃ 下烘箱中烘干、称质量并收集<sup>[15]</sup>。土壤颗粒组成采用比重计法,按中国制(1987)分为沙粒(>0.050 mm)、粉粒(0.002~0.050 mm)和黏粒

( $<0.002\text{ mm}$ ); 土壤 pH 值用 pH 计测定, 水土比  $2\text{ mL}:1\text{ g}$ ; 土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定<sup>[16]</sup>。

#### 1.4 结果计算

团聚体的平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)计算公式如下:

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

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

式中:  $w_i$  为  $i$  粒径团聚体的质量百分比, %;  $x_i$  为  $i$  粒径团聚体的平均直径, mm。

利用 Excel 2007 作图, 采用 SPSS 22.0 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期秸秆还田对土壤容重、pH 值和颗粒组成的影响

长期施肥与秸秆还田会降低耕层土壤容重与 pH 值, 而对土壤颗粒组成没有显著影响(表 2)。由土壤颗粒组成可以看出, 粉粒( $0.002 \sim 0.050\text{ mm}$ )含量较高, 达到  $58\% \sim 62\%$ , 黏粒含量为  $17\% \sim 24\%$ , 属于黏壤土, 与 CK 相比, 长期施肥与秸秆还田对土壤质地没有显著影响。与 CK 相比, 各施肥处理的  $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20\text{ cm}$  土壤容重和 pH 值均有所降低, 其中施肥与秸秆还田处理下  $0 \sim 10\text{ cm}$  土层土壤容重和 pH 值显著降低, 不同秸秆还田量处理间没有显著差异。在  $10 \sim 20\text{ cm}$  土层, S0 处理的土壤容重显著低于 CK 处理, 其余处理与 CK 处理无显著性差异; 处理间 pH 值均无显著性差异。  $0 \sim 10\text{ cm}$  土层, 土壤容重均小于  $10 \sim 20\text{ cm}$  土层; 除 CK 处理外,  $0 \sim 10\text{ cm}$  土层土壤 pH 值均小于  $10 \sim 20\text{ cm}$

土层。

### 2.2 长期秸秆还田对土壤水稳性团聚体分布的影响

由图 1 可以看出, 各处理  $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20\text{ cm}$  土层土壤水稳性团聚体多集中于大团聚体( $>0.250\text{ mm}$  粒径)中, 其含量占到  $53\% \sim 62\%$ , 而  $<0.053\text{ mm}$  粒径的水稳性团聚体最少, 其含量为  $13\% \sim 18\%$ 。在  $0 \sim 10\text{ cm}$  土层, S2 中秸秆还田量和 S3 高秸秆还田量处理土壤  $>0.250\text{ mm}$  团聚体含量显著高于 CK 不施肥处理, 且 S1、S2、S3 秸秆还田处理土壤  $>0.250\text{ mm}$  团聚体含量均显著高于 S0 无秸秆还田处理, 但各含秸秆处理间差异不显著; 同时,  $0 \sim 10\text{ cm}$  土层 S1、S2 和 S3 处理的微团聚体( $0.053 \sim 0.250\text{ mm}$  粒径)含量显著小于 S0 处理, 而各处理  $<0.053\text{ mm}$  团聚体含量无显著性差异。这表明, 秸秆还田有利于表层土壤微团聚体团聚成更大粒径的团聚体。

在  $10 \sim 20\text{ cm}$  土层, 同一粒径不同处理间水稳性团聚体含量均无显著差异, 表明秸秆还田对  $10 \sim 20\text{ cm}$  土层水稳性团聚体的分布无显著影响。田慎重等的研究也表明, 对  $10 \sim 20\text{ cm}$  土层水稳性团聚体的分布, 秸秆还田和无秸秆还田处理之间没有表现出明显的规律性<sup>[17]</sup>。

综合分析, 秸秆还田对土壤水稳性团聚体分布的影响主要发生在  $0 \sim 10\text{ cm}$  的表层土壤, 秸秆还田使表层土壤微团聚体向大团聚体团聚, 增加大团聚体含量, 对  $<0.053\text{ mm}$  团聚体含量无显著影响。

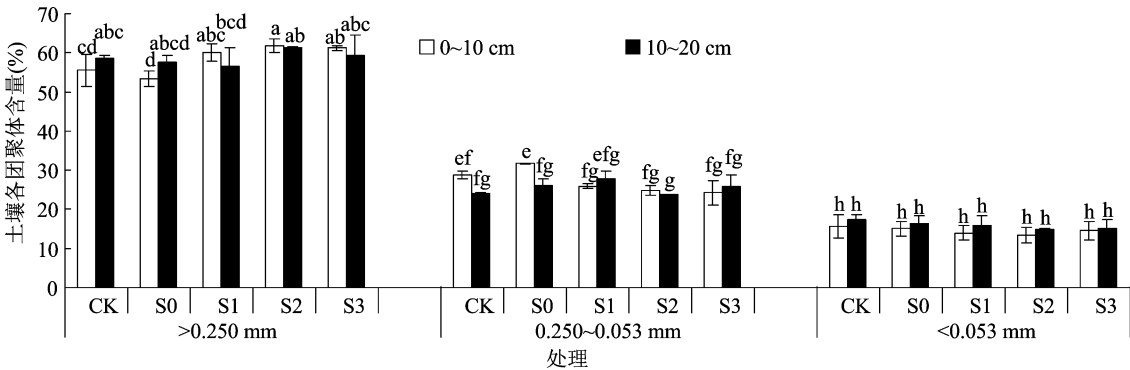
### 2.3 长期秸秆还田对土壤团聚体稳定指数的影响

长期秸秆还田潮土土壤 MWD 和 GWD 有相同的变化趋势(表 3), 均表现为 CK 和 S0 的无秸秆处理  $0 \sim 10\text{ cm}$  土层小于  $10 \sim 20\text{ cm}$  土层, 而 S1、S2、S3 含秸秆处理  $0 \sim 10\text{ cm}$  土层高于  $10 \sim 20\text{ cm}$  土层。在  $0 \sim 10\text{ cm}$  土层, S1、S2 和 S3 含秸秆的处理 MWD

表 2 不同处理土壤容重、pH 值和颗粒组成

处理	容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		pH 值		土壤颗粒组成(%)					
	0 ~ 10 cm    10 ~ 20 cm		0 ~ 10 cm    10 ~ 20 cm		0 ~ 10 cm			10 ~ 20 cm		
					沙粒	粉粒	黏粒	沙粒	粉粒	黏粒
CK	1.42a	1.59a	8.40a	8.37a	19.4a	61.7a	18.9a	18.4a	58.0a	23.5a
S0	1.35ab	1.39b	8.17b	8.26a	22.7a	60.4a	16.9a	20.4a	60.4a	19.2a
S1	1.26bc	1.46ab	8.23b	8.33a	19.4a	61.3a	19.2a	18.0a	59.7a	22.2a
S2	1.24c	1.47ab	8.29b	8.33a	19.4a	60.2a	20.4a	16.4a	59.7a	23.9a
S3	1.25bc	1.54ab	8.19b	8.30a	21.5a	61.3a	17.2a	19.6a	60.5a	19.8a

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下表同。



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下图同  
图1 不同处理 0~10、10~20 cm 土层土壤水稳性团聚体分布

和 GWD 均高于 CK 不施肥处理,且显著高于 S0 无秸秆处理,但含秸秆的 3 个处理间无显著差异;在 10 ~ 20 cm 土层,各处理间 MWD 和 GWD 均无显著差异。其中,0 ~ 10、10 ~ 20 cm 土层的 MWD 和 GWD 均表现为 S2 处理最高,其值分别为 2.59、0.93 mm 和 2.57、0.89 mm。表明秸秆还田可以增强表层 0 ~ 10 cm 土壤团聚体的稳定性,其在 S2 处理秸秆还田量时效果较好。

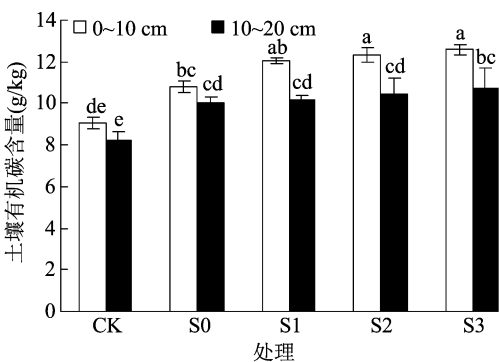


图2 不同处理土壤有机碳含量

表 3 不同处理土壤水稳性团聚体 MWD 和 GMD

处理	MWD(mm)		GWD(mm)	
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm
CK	2.34bc	2.46a	0.73bc	0.77a
S0	2.25c	2.42a	0.68c	0.77a
S1	2.52ab	2.38a	0.87ab	0.76a
S2	2.59a	2.57a	0.93a	0.89a
S3	2.56a	2.49a	0.89ab	0.83a

2.4 土壤有机碳含量及其与团聚体稳定性的多元回归分析

长期秸秆还田对潮土土壤有机碳含量有显著影响(图 2)。各处理 0 ~ 10 cm 土层土壤有机碳含量高于 10 ~ 20 cm 土层;其中,S1、S2 和 S3 秸秆还田处理有机碳含量在两土层间有显著差异。S0、S1、S2 和 S3 施肥处理有机碳含量在 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 土层均显著高于 CK 处理。在 S0、S1、S2 和 S3 施肥处理中,随着秸秆还田量的增加,两土层土壤有机碳含量逐渐增加;其中,在 0 ~ 10 cm 土层,S2 和 S3 处理土壤有机碳含量显著高于 S0 处理,其余处理间无显著差异。表明秸秆还田对土壤有机碳的富集主要发生在 0 ~ 10 cm 的表层土壤,且有机碳含量随秸秆还田量的增加而逐渐增加。

如图 3 所示,在 0 ~ 10 cm 土层,有机碳含量与 MWD 的多元回归方程为  $y = 0.062x^2 - 1.258x + 8.64$ , [ $r^2 = 0.925 (P < 0.01)$ ],土壤有机碳含量对土壤团聚体的稳定性有显著影响。而在 10 ~ 20 cm 土层,有机碳含量与 MWD 的多元回归方程为  $y = 0.073x^2 - 1.362x + 8.685$ ,  $r^2 = 0.330$ ,在这一土层,土壤有机碳含量不是影响土壤团聚体稳定性的主要因素。

3 讨论与结论

随着秸秆还田的大面积推广,农业秸秆还田已成为目前秸秆的主要利用方式,也是土壤培肥、改良的重要手段<sup>[18]</sup>。已有研究表明,秸秆还田可以改善土壤理化性状<sup>[19]</sup>。本试验表明,长期秸秆还田并配施适量化肥可以降低 0 ~ 10 cm 土层的土壤容重,这与张亚丽等的研究结果<sup>[20]</sup>相似。土壤容重可以反映土壤的孔隙度和透气性,土壤容重的降低一般表明土壤结构的改善,本研究秸秆还田后 0 ~ 10 cm 土层土壤容重在 1.25 g/cm<sup>3</sup> 左右,土壤结构较好;而 10 ~ 20 cm 土层土壤容重大于 1.38 g/cm<sup>3</sup>,土壤孔隙度和透气性较差。这可能与耕作方式有关,本

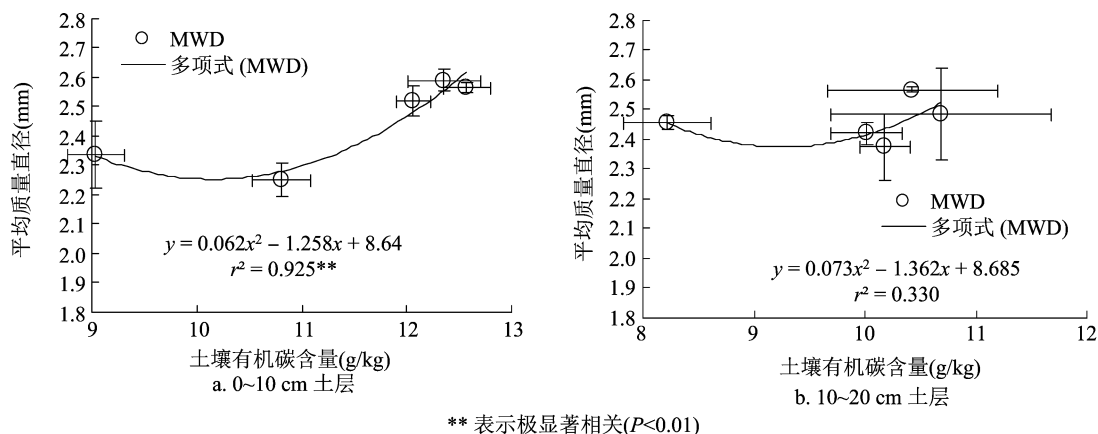


图3 土壤有机碳含量与 MWD 的多元回归分析

研究秸秆还田后耕作方式为旋耕,耕作深度在 10 ~ 15 cm 左右,由于土壤耕作深度的降低,耕作层逐渐浅化,秸秆大多集中在表层 0 ~ 10 cm 土层,使得犁底层厚度增加,从而 10 ~ 20 cm 土层土壤容重较大,土壤紧实度增加。本研究中,与不施肥相比,秸秆还田配施化肥 0 ~ 10 cm 土层的 pH 值显著降低,而不同秸秆还田量处理之间没有显著性差异,因此 pH 值的降低可能与化肥的施用有关。20 世纪 80 年代至 21 世纪初有研究报道,我国主要产区土壤 pH 值显著下降<sup>[21]</sup>。土壤颗粒组成是土壤重要的物理特性之一,对土壤肥力状况、水分特征等有着明显影响<sup>[22]</sup>。本研究中,潮土区农田土壤颗粒组成以粉粒 (0.002 ~ 0.050 mm) 为主,属于黏壤土,土壤的颗粒组成继承了成土母质的特征<sup>[23]</sup>,受秸秆还田影响很小。

土壤团聚体的水稳性是评价土壤物理性及抗侵蚀能力的重要指标<sup>[24-25]</sup>,是影响土壤肥力和作物生长的重要因素之一,其形成和特性既受土壤本身物质组成的影响,还受人为活动等因素的影响<sup>[26]</sup>。本试验结果表明,秸秆还田有助于增加大团聚体 (>0.250 mm) 的含量,而减少微团聚体 (0.053 ~ 0.250 mm) 含量,对 <0.053 mm 团聚体无显著影响。这主要是因为秸秆还田后增加了土壤中有有机物质的投入,而有机物质分解过程中形成的腐殖质是土壤团聚体形成的重要胶结物质,其含量的增加有利于大团聚体的形成<sup>[26]</sup>。Six 等认为,新的植物残体可以促进土壤团聚体中颗粒有机质的形成,颗粒有机质被土壤中的黏土矿物以及微生物分泌物包裹形成新微团聚体核心,在土壤有机质胶结作用下形成大团聚体<sup>[27]</sup>。孙汉印等在壤土上的研究同样发现秸秆还田有利于大团聚体 (>0.250 mm) 含量的增加,但是他们也发现秸秆还田有利于微团聚

体 (0.053 ~ 0.250 mm) 含量的增加,而减少了 <0.053 mm 团聚体含量;这种差异可能是由土壤自身特性差异以及耕作措施引起的。本研究中,玉米秸秆还田方式为粉碎还田,孙汉印等研究还认为,不同还田秸秆模式对团聚体影响有差异,整体表现为粉碎还田对大团聚体有增加效果<sup>[28]</sup>。张志毅等在稻麦轮作下的研究认为,秸秆还田配合旋耕有助于提高土壤水稳性团聚体含量<sup>[29]</sup>。

团聚体的平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 可以反映团聚体的分布状况和稳定性,大团聚体含量越多, MWD 值越大;团聚体越稳定, GMD 值越大<sup>[30]</sup>。本研究中,施用秸秆的处理 0 ~ 10 cm 土层 MWD 和 GWD 均高于 CK 不施肥处理以及 S0 无秸秆处理,表明施用秸秆后表层土壤结构稳定性增强。大量研究表明,团聚体的 MWD 与土壤有机碳含量有显著相关关系<sup>[28,31]</sup>,本研究中多元回归分析表明,0 ~ 10 cm 土层的土壤有机碳含量与 MWD 的回归关系达到极显著水平,但在 10 ~ 20 cm 土层无显著性关系,说明秸秆还田通过影响表层土壤有机碳含量进而影响该层团聚体的稳定性。有机质是土壤团聚体的重要胶结剂,团聚体对有机碳具有物理保护作用,秸秆还田后团聚体有机碳的含量与分布以及土壤固碳机制将是接下来进一步研究的重点内容,对农田土壤固碳减排具有重要意义。

与 CK 不施肥相比,长期施肥与秸秆还田可以降低耕层土壤容重与 pH 值,而对土壤颗粒组成没有显著影响。其中,施肥配合秸秆还田显著降低了 0 ~ 10 cm 土层土壤容重和 pH 值,而不同秸秆还田量处理间没有显著差异。所有试验处理土壤团聚体主要集中在 >0.250 mm 中,秸秆还田使表层土壤微团聚体向大团聚体团聚,增加了大团聚体含量。

在 0 ~ 10 cm 土层, S1、S2、S3 秸秆还田处理土壤 >0.250 mm 团聚体含量均显著高于 S0 无秸秆处理, 微团聚体 (0.053 ~ 0.25 mm) 含量显著小于 S0 处理, <0.053 mm 团聚体含量无显著差异。施肥配合秸秆还田可以增加 0 ~ 10 cm 土层 MWD 值和 GMD 值, 提高团聚体稳定性。多元回归方程表明, 0 ~ 10 cm 土层土壤有机碳含量与 MWD 值极显著相关。秸秆还田可以提高表层土壤有机碳含量, 增强土壤团聚体稳定性, 改善土壤结构。

## 参考文献:

- [1] Lal R. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21 st century[J]. *Soil Science*, 2000, 165(3): 191 – 207.
- [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] 窦 森, 郝翔翔. 黑土团聚体与颗粒中碳、氮含量及腐殖质组成的比较[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(5): 970 – 977.
- [4] 安婉丽, 高灯州, 潘 婷, 等. 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[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(5): 1833 – 1840.
- [5] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 3 – 22.
- [6] 李雨濛, 张建安, 崔石磊, 等. 河北省县域农业绿色发展指标时空变化特征[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(8): 1168 – 1180.
- [7] Borie F, Rubio R, Rouanet J L, et al. Effects of tillage systems on soil characteristics, glomalin and mycorrhizal propagules in a Chilean Ultisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 88(1/2): 253 – 261.
- [8] Arai M, Tayasu I, Komatsuzaki M, et al. Changes in soil aggregate carbon dynamics under no – tillage with respect to earthworm biomass revealed by radiocarbon analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126(1): 42 – 49.
- [9] 郝翔翔, 杨春葆, 苑亚茹, 等. 连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(35): 263 – 269.
- [10] Zhang P, Wei T, Jia Z K, et al. Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China[J]. *Geoderma*, 2014, 230/231(7): 41 – 49.
- [11] 王 峻, 薛 永, 潘剑君, 等. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 121 – 127.
- [12] 崔荣美, 李 儒, 韩清芳, 等. 不同有机肥培肥对旱作农田土壤团聚体的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(11): 124 – 132.
- [13] 孟庆英, 邹洪涛, 韩艳玉, 等. 秸秆还田量对土壤团聚体有机碳和玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 119 – 125.
- [14] 赵士诚, 曹彩云, 李科江, 等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1441 – 1449.
- [15] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(4): 1071 – 1076.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30 – 34.
- [17] 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.
- [18] 申源源, 陈 宏. 秸秆还田对土壤改良的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(19): 291 – 294.
- [19] 李 玮, 乔玉强, 陈 欢, 等. 秸秆还田和施肥对砂姜黑土理化性质及小麦—玉米产量的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 5052 – 5061.
- [20] 张亚丽, 吕家珑, 金继运, 等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 307 – 314.
- [21] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008 – 1010.
- [22] 杨 婷, 景 航, 姚 旭, 等. 黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 1 – 5, 24.
- [23] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. *地理研究*, 2007, 26(3): 518 – 525.
- [24] Cammeraat L H, Imeson A C. Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France[J]. *Geomorphology*, 1998, 23(2/3/4): 307 – 321.
- [25] 王 斌, 何文寿, 耿世杰. 粉垄耕作对土壤水分利用效率和马铃薯产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(21): 93 – 96.
- [26] 霍 琳, 武天云, 蔺海明, 等. 长期施肥对黄土高原旱地黑垆土水稳性团聚体的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 545 – 550.
- [27] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367 – 1377.
- [28] 孙汉印, 姬 强, 王 勇, 等. 不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(2): 369 – 376.
- [29] 张志毅, 熊桂云, 吴茂前, 等. 有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(3): 405 – 412.
- [30] Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Hajabbasi M A. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(2): 227 – 234.
- [31] 赵 红, 袁培民, 吕貽忠, 等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(2): 306 – 311.