

朱建彬, 郭相平, 谢毅, 等. 秸秆隔层还田及水氮管理对设施土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(3): 632-638.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.03.011

## 秸秆隔层还田及水氮管理对设施土壤团聚体及固碳特征的影响

朱建彬, 郭相平, 谢毅, 陈盛, 曹克文, 王易天

(河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 利用田间试验, 探究了秸秆隔层还田及水氮管理对隔层以上土壤团聚体及有机碳含量的影响。结果表明: ①埋设秸秆隔层、90%田间最大持率灌水上限及 225 kg/hm<sup>2</sup> 氮素用量均显著提高土壤大团聚体含量及稳定性。②秸秆隔层还田配合高水高氮处理土壤有机碳含量最高, 秸秆隔层还田且水、氮用量较低处理的土壤有机碳含量与水、氮用量较高但未秸秆隔层还田处理间无显著差别。③随着土壤团聚体粒径增大其有机碳含量增加, 2.000~0.251 mm 团聚体对土壤有机碳贡献率最高。埋设秸秆隔层、90% $\theta_f$  灌水上限及 225 kg/hm<sup>2</sup> 氮素用量更有利于土壤大团聚体的形成, 提高团聚体稳定性, 增加土壤有机碳含量。

**关键词:** 秸秆隔层; 水氮管理; 土壤团聚体; 有机碳; 有机碳贡献率

**中图分类号:** S625.5<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)03-0632-07

## Effects of returning straw interlayer to the field, water and nitrogen management on aggregates and carbon sequestration of facility soil

ZHU Jian-bin, GUO Xiang-ping, XIE Yi, CHEN Sheng, CAO Ke-wen, WANG Yi-tian

(College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Effects of interlayer straw returning to the field, water and nitrogen management on soil aggregates and organic carbon content above the interlayer were explored using field experiments. The results showed that, firstly, the content and stability of big soil aggregates were significantly increased under the treatments of burying straw interlayer, 90%  $\theta_f$  irrigation upper limit and 225 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen dosage. Secondly, under the treatment of straw interlayer burying combined with high water and high nitrogen contents, the soil organic carbon content was the highest. The soil organic carbon content between straw interlayer burying and lower water, nitrogen dosage treatment and higher water, nitrogen dosage without straw interlayer treatment showed no significant difference. Thirdly, as the diameter of soil aggregates increased, the organic carbon content increased, and aggregates with 2.000–0.251 mm diameters showed the highest contribution rate to soil organic carbon. Large soil aggregates are easy to form under the treatments of burying straw interlayer, 90% $\theta_f$  irrigation upper limit and 225 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen dosage, besides, the stability of aggregates is improved and soil organic carbon content is increased.

**Key words:** straw interlayer; water and nitrogen management; soil aggregates; organic carbon; contribution rate of organic carbon

收稿日期: 2020-09-26

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFD0201507); 江苏省水利科技项目(2020049)

作者简介: 朱建彬(1995-), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉应用基础理论研究。(E-mail) 1719302794@qq.com

通讯作者: 郭相平, (Tel) 13851560470; (E-mail) xpguo@hhu.edu.cn

秸秆富含有机质及植物生长所需营养元素, 目前中国秸秆年产量已超过 $8 \times 10^9 \text{ t}^{[1]}$ 。研究发现, 将

秸秆浅埋入土壤一定深度形成秸秆隔层,配合使用滴灌技术,能有效减少秸秆隔层以上土壤水分及肥料的下渗,同时能抑制地下水蒸发以及由地下水引起的渍害<sup>[2]</sup>。目前关于传统秸秆还田对土壤团聚体及有机碳含量的影响研究较多,而鲜有浅埋秸秆隔层结合水氮管理对其影响的研究。本研究采用随机区组设计大田试验,将秸秆以隔层方式还田,配合水、氮管理,研究其对土壤团聚体及有机碳含量的影响,以期在设施蔬菜生产中为秸秆资源及水、氮资源的高效利用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在河海大学江宁节水园区(31°57'N,118°50'E)温室大棚内进行。土壤饱和含水率 $\theta_s=38.2\%$ ,田间最大持水率( $\theta_f$ )=30.6%,土壤干容质量( $\gamma$ )=1.33 g/cm<sup>3</sup>,有机碳含量为2.40 g/kg。试验蔬菜为美国903番茄,试验所用秸秆为节水园区上年水稻秸秆。定植前撒施腐熟有机质1560 kg/hm<sup>2</sup>,起垄后开始定植,番茄生育周期为2019年4月17日~7月23日。

### 1.2 试验设计

设置3个因素:秸秆隔层还田(S)、灌水上限(W)和氮素用量(N)。秸秆隔层分有、无2个水平;灌水上限分80% $\theta_f$ 、90% $\theta_f$ 2个水平,下限均为60% $\theta_f$ ;氮素用量分180 kg/hm<sup>2</sup>、225 kg/hm<sup>2</sup>2个水平。共9个处理(具体见表1),每个处理种植3垄番茄。各处理施加P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>112.5 kg/hm<sup>2</sup>,施加K<sub>2</sub>O135.0 kg/hm<sup>2</sup>。

对照沟灌方法:在种植行起0.15 m高垄,每条垄长5.0 m,宽0.2 m(上)~0.3 m(下),整平后按0.5 m间距定植番茄,每条垄为1次重复。水肥一体化滴灌方法:番茄种植方式与对照相同,另外每条垄铺设1条滴灌带,番茄定植后将其移至秧苗根部。滴灌并埋设秸秆隔层方法:在种植行挖深0.15 m、宽0.20 m的沟,将6 kg水稻秸秆剪成30 cm左右长,均匀铺放在每条垄沟内并压实覆土,覆土厚度为30 cm,其余与滴灌不埋设秸秆隔层相同。采用EM50数据采集器监测各处理土壤含水量。当土壤含水率降至60% $\theta_f$ 且番茄需要灌水时,灌水至对应的含水率上限。每条垄单次灌水量利用公式(1)计算,氮、磷、钾肥随番茄各个生长期施入。

$$S=abh\gamma\Delta\theta \quad (1)$$

式中, $S$ 表示每条垄单次灌水量,单位kg; $a$ 表示垄宽,本试验取0.2 m; $b$ 表示垄长,本试验取5 m; $h$ 表示计划湿润层深度,本试验取0.3 m; $\gamma$ 表示土壤干容质量,单位kg/m<sup>3</sup>, $\Delta\theta$ 表示灌水上下限差值。

表1 田间试验处理及水、氮用量

Table 1 Field experiment treatment and water, nitrogen dosage

处理	灌水下限~上限 (占 $\theta_f$ 百分比)	氮素施用量 (kg/hm <sup>2</sup> )	有无秸秆隔层	备注
CK	60%~90%	225	无	沟灌
W <sub>1</sub> N <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	60%~90%	225	有	滴灌
W <sub>1</sub> N <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	60%~90%	225	无	滴灌
W <sub>1</sub> N <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	60%~90%	180	有	滴灌
W <sub>1</sub> N <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	60%~90%	180	无	滴灌
W <sub>2</sub> N <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	60%~80%	225	有	滴灌
W <sub>2</sub> N <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	60%~80%	225	无	滴灌
W <sub>2</sub> N <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	60%~80%	180	有	滴灌
W <sub>2</sub> N <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	60%~80%	180	无	滴灌

处理中W代表灌水上限,N代表氮素用量,S代表秸秆隔层还田;处理中下标1代表高水平,下标2代表低水平。

### 1.3 样品采集与测定

待测土样于2019年7月23日采集,利用直径5 cm的土钻在每条垄两株番茄间从上至下依次取0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm土层的原状土壤,自然风干后沿土壤原状裂隙分成约1 cm<sup>3</sup>小土块,清除植物残体等杂质后过5 mm筛,每层过筛后的土壤各取50 g均匀混合作为一个待测土样。采用Elliott土壤团聚体的湿筛测定方法测定各粒级团聚体含量,利用重铬酸钾容量法-稀释热法<sup>[3]</sup>测定有机碳含量。

### 1.4 数据处理

用平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)、大团聚体含量( $R_{>0.250}$ )来表征土壤团聚体特性,计算公式如下:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (3)$$

$$R_{>0.25} = [1 - M_{x<0.250}/M_T] \times 100\% \quad (4)$$

各粒级团聚体的相对贡献率采用下列公式计算:

$$\text{贡献率} = (\text{该级团聚体有机碳含量} \times \text{该级团聚体含量}) / \text{土壤有机碳含量} \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $M_T$  为团聚体总质量(g);  $\bar{X}_i$  为各粒径范围内团聚体平均直径(mm);  $W_i$  为对应于  $\bar{X}_i$  的团聚体的百分含量(%);  $M_{R<\bar{X}_i}$  为粒径小于  $\bar{X}_i$  的团聚体质量(g);  $X_{\max}$  为团聚体最大粒径值(mm), 本研究中其值为 5 mm。

利用 Excel 2003 对数据进行处理, 利用 SPSS 25 进行方差分析, 采用 Duncan's 法进行多重比较 ( $P < 0.05$ ), 利用 Origin 2018 绘制图形。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆隔层还田及水氮管理对土壤各粒级团聚体含量分布的影响

随着团聚体粒径减小, 其含量先增加后降低

(表 2), 其中 5.000~2.001 mm 团聚体占比最小, 2.000~0.251 mm 团聚体占比最大。与沟灌相比, 滴灌显著提高了土壤 5.000~1.001 mm 团聚体含量, 且显著降低了 1.000~0.251 mm 团聚体含量。与不埋设秸秆隔层相比, 埋设秸秆隔层处理 2.000~1.001 mm 团聚体含量显著提高 11.33% ( $P < 0.05$ ), 同时  $\leq 0.250$  mm 团聚体含量显著降低 8.17% ( $P < 0.05$ )。与 80%  $\theta_f$  灌水上限相比, 90%  $\theta_f$  灌水上限处理 1.000~0.251 mm 团聚体含量显著提高 7.69% ( $P < 0.05$ ), 0.250~0.053 mm 团聚体含量则显著降低 13.80%。与氮素施用量 180 kg/hm<sup>2</sup> 处理相比, 225 kg/hm<sup>2</sup> 施用量处理显著提高土壤 2.000~1.001 mm 团聚体含量, 显著降低 1.000~0.251、<0.053 mm 团聚体含量。

表 2 秸秆隔层还田及水氮管理对土壤团聚体分布的影响

Table 2 Effects of returning straw interlayer to the field, water and nitrogen management on soil aggregates distribution

处理	各粒级团聚体含量 (%)				
	>2.000 mm	2.000~1.001 mm	1.000~0.251 mm	0.250~0.053 mm	<0.053 mm
W <sub>1</sub> N <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	4.65±0.06a	29.15±0.53a	29.40±0.64cd	20.73±1.47d	16.07±1.27c
W <sub>1</sub> N <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	3.22±0.15de	28.02±1.82a	26.52±1.06e	23.8±1.09bcd	18.45±1.43bc
W <sub>1</sub> N <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	3.55±0.05cd	23.68±0.88b	31.98±0.31b	20.28±1.74d	20.50±0.84b
W <sub>1</sub> N <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	3.93±0.20bc	23.07±1.50b	31.15±1.11bc	21.80±1.74cd	20.05±1.46b
W <sub>2</sub> N <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	4.32±0.52ab	28.18±2.21a	27.33±1.07de	23.20±1.76cd	16.97±2.07c
W <sub>2</sub> N <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	4.48±0.02a	23.87±0.59b	27.82±0.96de	27.00±3.01ab	16.83±0.78c
W <sub>2</sub> N <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	2.58±0.28f	28.41±1.61a	27.72±0.49de	25.57±1.67abc	15.73±0.81c
W <sub>2</sub> N <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	3.97±0.13b	23.08±0.12b	27.68±1.61de	24.72±0.90abc	20.55±1.78b
CK	2.85±0.09ef	5.00±0.10c	40.20±0.31a	27.80±0.80a	24.15±0.37a

各处理见表 1。不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 秸秆隔层还田及水氮管理对土壤水稳性团聚体的影响

由表 3 可以看出, 与沟灌相比, 水肥一体化滴灌显著提高土壤团聚体平均质量直径和平均几何直径。高水高氮有秸秆隔层处理 (W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>S<sub>1</sub>) 的平均质量直径 (MWD)、平均几何直径 (GMD) 及大团聚体含量 ( $R_{>0.250}$ ) 均最大, 分别较高水高氮无秸秆隔层的沟灌处理 (CK) 显著提高 14.80%、60.78%、50.00% ( $P < 0.05$ )。采用水肥一体化滴灌方式时, 埋设秸秆隔层和提高灌水上限均能显著提高土壤 MWD、GMD 及  $R_{>0.250}$ 。而 225 kg/hm<sup>2</sup> 氮素施用量相较于 180 kg/hm<sup>2</sup> 显著提高土壤 GMD 和  $R_{>0.25}$ , 对 MWD 的影响不显著。

表 3 不同处理土壤水稳性团聚体的特征

Table 3 Characteristics of water stable soil aggregates under different treatments

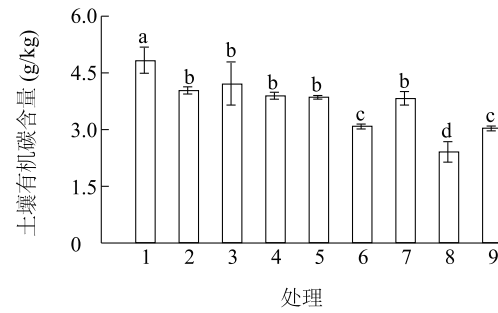
处理	大团聚体含量 ( $R_{>0.250}$ ) (%)	平均质量直径 (MWD) (mm)	平均几何直径 (GMD) (mm)
W <sub>1</sub> N <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	63.20±0.74a	0.82±0.04a	0.39±0.01a
W <sub>1</sub> N <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	57.75±0.26bc	0.74±0.03bc	0.35±0.01bcd
W <sub>1</sub> N <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	58.75±0.42b	0.73±0.01c	0.37±0.02ab
W <sub>1</sub> N <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	58.70±0.31b	0.71±0.01c	0.33±0.02cde
W <sub>2</sub> N <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	57.22±0.82c	0.78±0.01ab	0.36±0.02abc
W <sub>2</sub> N <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	57.17±0.33c	0.72±0.02c	0.32±0.01de
W <sub>2</sub> N <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	57.03±0.35c	0.70±0.01c	0.30±0.01e
W <sub>2</sub> N <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	54.73±0.31d	0.69±0.02c	0.30±0.02e
CK	55.05±0.12d	0.51±0.02e	0.26±0.02f

各处理见表 1。不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2.3 秸秆隔层还田及水氮管理对土壤有机碳含量的影响

2.3.1 秸秆隔层还田及水氮管理对土壤有机碳总量的影响 由图 1 可知,高水高氮有秸秆隔层处理( $W_1N_1S_1$ )的有机碳含量最高,较 CK 高出 59.41% ( $P<0.05$ )。秸秆隔层配合低水低氮处理( $W_2N_2S_1$ )土壤有机碳含量与无秸秆隔层但水、氮用量较高的处理( $W_1N_1S_2$ 、 $W_1N_2S_2$ )间无显著差异。采用水肥一体化滴灌时,秸秆隔层处理的土壤有机碳含量较无秸秆隔层显著提高 24.44% ( $P<0.05$ );90% $\theta_f$  灌水上限处理的土壤有机碳含量比 80% $\theta_f$  灌水上限处理显著高出 28.96% ( $P<0.05$ );相较于 180 kg/hm<sup>2</sup>的氮素用量,225 kg/hm<sup>2</sup>用量土壤有机碳含量提高 10.25% ( $P<0.05$ )。可见提高水氮用量和埋设隔离层有利于增加土壤有机碳。

2.3.2 秸秆隔层还田及水氮管理对土壤团聚体有机碳含量及贡献率的影响 秸秆还田能向土壤输入有机碳,但团聚体对有机碳的结合能力与粒径大小有关,随着团聚体粒径的增加,其有机碳含量增加(表 4)。其他条件相同时,水肥一体化滴灌( $W_1N_1S_2$ )较沟灌(CK)5 级团聚体含碳量均显著提高。高灌水上限处理相对于低灌水上限处理、高氮施用量处理相对于低氮施用量处理均显著提高土壤各粒级团聚体有机碳含量;埋设秸秆隔层处理5.000~0.251 mm 团聚体含碳量显著高于不埋设秸秆隔离层处理,两者间 $\leq 0.250$  mm 团聚体有机碳含量无显著差别。



1:  $W_1N_1S_1$ ; 2:  $W_1N_1S_2$ ; 3:  $W_1N_2S_1$ ; 4:  $W_1N_2S_2$ ; 5:  $W_2N_1S_1$ ; 6:  $W_2N_1S_2$ ; 7:  $W_2N_2S_1$ ; 8:  $W_2N_2S_2$ ; 9: CK;各处理见表 1。不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 1 不同处理土壤有机碳含量

Fig.1 Soil organic carbon content under different treatments

利用公式(4)计算有机碳的相对贡献率(表 5),发现2.000~1.001 mm、1.000~0.251 mm 2 个粒级团聚体有机碳相对贡献率显著高于其余 3 个粒级团聚体 ( $P<0.05$ ),说明土壤有机碳主要存在于 2.000~0.251 mm 粒级团聚体内。高灌水上限处理较低灌水上限处理0.250~0.053 mm 团聚体有机碳贡献率显著降低 21.92% ( $P<0.05$ )。225 kg/hm<sup>2</sup>氮素用量处理较 180 kg/hm<sup>2</sup>氮素用量处理>2.000 mm、2.000~1.001 mm 团聚体有机碳贡献率分别显著提高 32.94%、26.25% ( $P<0.05$ )。而有秸秆隔层处理较无秸秆隔层处理显著降低了1.000~0.251 mm、0.250~0.053 mm、<0.053 mm 团聚体有机碳贡献率。

表 4 不同处理土壤团聚体有机碳含量

Table 4 Organic carbon content in soil aggregates under different treatments

处理	团聚体有机碳含量 (g/kg)				
	>2.000 mm	2.000~1.001 mm	1.000~0.251 mm	0.250~0.053 mm	<0.053 mm
$W_1N_1S_1$	5.82±0.14a	5.39±0.13a	5.18±0.24a	2.94±0.15d	2.20±0.07c
$W_1N_1S_2$	5.73±0.18ab	5.39±0.37a	4.68±0.45b	3.16±0.05bcd	2.54±0.15a
$W_1N_2S_1$	5.23±0.61bc	4.74±0.45bc	4.24±0.14c	3.30±0.11bc	2.31±0.16bc
$W_1N_2S_2$	4.65±0.33d	4.41±0.12cd	4.23±0.08c	3.46±0.18ab	2.48±0.04ab
$W_2N_1S_1$	5.10±0.12cd	4.92±0.02ab	4.02±0.10c	3.71±0.10a	2.14±0.04c
$W_2N_1S_2$	4.85±0.05cd	4.15±0.13d	3.92±0.16c	3.12±0.04cd	2.63±0.09a
$W_2N_2S_1$	3.81±0.06ef	3.50±0.19e	3.40±0.08d	2.28±0.12e	1.77±0.05e
$W_2N_2S_2$	3.37±0.09f	3.15±0.10e	2.87±0.22e	1.99±0.24f	1.37±0.17f
CK	3.99±0.30e	3.55±0.07e	2.89±0.05e	2.47±0.10e	1.92±0.09e

各处理见表 1。不同字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

表 5 不同处理土壤团聚体有机碳相对贡献率

Table 5 Relative contribution rate of organic carbon in soil aggregate under different treatments

处理	团聚体有机碳相对贡献率 (%)				
	>2.000 mm	2.000~1.001 mm	1.000~0.251 mm	0.250~0.053 mm	<0.053 mm
W <sub>1</sub> N <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	5.64±0.60b	32.73±2.87ab	31.58±0.69bcd	12.63±0.81g	7.38±0.91e
W <sub>1</sub> N <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	4.55±0.19c	37.32±3.73a	30.52±1.49cd	18.55±1.05de	11.59±1.21c
W <sub>1</sub> N <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	4.42±0.20c	26.79±2.39c	32.62±3.58bc	15.96±0.59ef	11.38±1.32c
W <sub>1</sub> N <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	4.67±0.32c	26.08±1.93c	33.78±1.93bc	19.32±2.04cd	12.73±0.93bc
W <sub>2</sub> N <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	5.70±0.75b	35.80±2.28ab	28.37±0.75d	22.24±1.84bc	9.39±1.23d
W <sub>2</sub> N <sub>1</sub> S <sub>2</sub>	7.04±0.19a	32.13±1.72ab	35.37±1.45ab	27.25±2.36a	14.35±0.49ab
W <sub>2</sub> N <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	2.58±0.33d	25.94±1.25c	24.70±1.31e	15.25±1.04fg	7.27±0.39e
W <sub>2</sub> N <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	5.59±0.47b	30.48±2.63bc	33.06±0.90bc	20.39±0.66bcd	11.59±0.40c
CK	3.75±0.28c	5.86±0.10d	38.41±1.08a	22.68±1.35b	15.26±0.39a

各处理见表 1。不同字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 秸秆隔层还田及水氮管理对设施土壤团聚体形成和稳定性的影响

团聚体为土壤的基本组成结构,团聚体的性质是表征土壤结构的重要标志<sup>[4]</sup>。本研究结果表明,与沟灌相比,滴灌显著提高 2.000~1.001 mm 团聚体含量,显著降低 1.000~0.251 mm、<0.053 mm 团聚体含量。这是因为沟灌和滴灌时水分自地表进入土壤,在其下渗过程中会对土壤结构产生一定的破坏作用并使土壤被压实。相比于滴灌,沟灌时单次进入土壤的水分多且快,使其对土壤的破坏和压实更为严重<sup>[5]</sup>。由于秸秆腐解所产生的有机胶结物质会在土壤动物及微生物的搬运作用下迁移至上层土壤<sup>[6]</sup>,将上层土壤中直径较小的土粒胶结成更大粒级的颗粒,从而提高大团聚体的含量<sup>[7]</sup>。本试验发现,秸秆隔层还田能提高土壤大团聚体的比例,减少微团聚体数量。土壤水分含量会影响秸秆分解速度<sup>[8]</sup>,进而影响土壤团聚体组分,这是因为当含水率较低时,不利于土壤和秸秆中微生物的生长并且抑制其活性,使得秸秆分解较慢<sup>[9]</sup>,产生的胶结物质较少,不利于微小团聚体转变成更大粒级的团聚体。在本试验中,80% $\theta_f$  灌水上限处理 1.000~0.251 mm 团聚体含量显著低于 90%  $\theta_f$  灌水上限处理,0.250~0.053 mm 团聚体含量则显著高于 90%  $\theta_f$  灌水上限处理,说明高灌水上限处理更有利于土壤大团聚体的形成。

施加氮素可以提高土壤的有效含氮量,并有效

改良地下微生物与植物的生长环境等,从而影响土壤中团聚体的形成。施加氮素能提高土壤>0.250 mm 团聚体含量,但是过量施用氮素对提升土壤大团聚体含量的效果反而不明显<sup>[10]</sup>。本研究结果显示,氮素施用量 225 kg/hm<sup>2</sup> 处理>2.000 mm、2.000~1.001 mm 团聚体含量显著高于氮素施用量 180 kg/hm<sup>2</sup> 处理,1.000~0.251 mm、<0.053 mm 团聚体含量则显著低于氮素施用量 180 kg/hm<sup>2</sup> 处理。这与本试验土壤氮素含量偏低有关,因为秸秆碳含量较高,增加氮素施用量能改善土壤碳氮比,加速微生物对秸秆的分解作用,有利于土壤大团聚体的形成。

大团聚体含量 ( $R_{>0.250}$ )、平均质量直径 ( $MWD$ ) 越大,说明大团聚体含量越高;平均几何直径 ( $GMD$ ) 越大,说明团聚体结构越稳定。本研究结果表明,在相同的水肥条件下,滴灌的  $MWD$ 、 $GMD$  和  $R_{>0.25}$  均显著高于沟灌。这是因为沟灌时水分下渗较快,土壤干湿交替更为明显,土壤水吸力变化幅度大,使部分土壤团聚体破裂而降低其稳定性<sup>[5]</sup>。采用水肥一体化灌溉方式时,灌水上限为 90%  $\theta_f$  处理的  $R_{>0.250}$ 、 $MWD$  和  $GMD$  均高于灌水上限为 80%  $\theta_f$  处理。因为团聚体  $R_{>0.250}$ 、 $MWD$  和  $GMD$  随着含水率增大呈单峰型变化,本试验所用土壤田间最大持水率为 30.6%,90% $\theta_f$ 、80% $\theta_f$  灌水上限使得单次灌水后土壤含水率分别约为 27%、24%,均处于单峰型曲线上升段<sup>[11]</sup>,所以 90%  $\theta_f$  灌水上限处理的  $R_{>0.250}$ 、 $MWD$  和  $GMD$  均高于 80% $\theta_f$  灌水上限处理。秸秆还田配施氮肥也能促使微团聚体转化成更大粒级团聚体,从而提高土壤团聚体稳定性<sup>[12]</sup>。本研究

发现埋设秸秆隔层后  $R_{>0.250}$ 、 $MWD$  和  $GMD$  均显著增加,氮素施用量  $225\text{ kg/hm}^2$  处理的  $R_{>0.250}$ 、 $MWD$  和  $GMD$  均显著高于氮素施用量  $180\text{ kg/hm}^2$  处理。这是由于秸秆腐解产生的部分可溶性有机物能随溶液蒸发向上扩散<sup>[13]</sup>,土壤结构在有机胶结物质的粘结作用下变得更为紧密,提高其稳定性<sup>[14-15]</sup>。而施用氮肥则能提高土壤微生物的代谢和对碳源利用能力<sup>[16]</sup>,使得其对秸秆的分解作用更加彻底,产生的有机胶物质更多,更有利于提高土壤稳定性。

### 3.2 秸秆隔层还田及水氮管理对设施土壤团聚体有机碳含量及分配的影响

本试验中土壤碳元素增加主要是由于秸秆在微生物的作用下分解产生了有机碳<sup>[17]</sup>。埋设秸秆隔层显著提高了秸秆隔层以上土壤有机碳含量,这是因为微生物分解产生的碳可在土壤动物的搬运或者土壤水分的蒸发作用下迁移至秸秆隔层以上的土壤。而秸秆还田配施氮肥能为微生物提供良好的生存环境,有利于提高微生物对秸秆的利用率,加快秸秆腐解,进一步提高土壤有机碳含量<sup>[18]</sup>。本研究中施用  $225\text{ kg/hm}^2$  氮素处理的有机碳含量显著高于施用  $180\text{ kg/hm}^2$  氮素处理,这与秸秆和土壤碳氮比的改善促进了秸秆与土壤中微生物生长,使得秸秆分解速率更高有关。

$90\%\theta_f$  灌水上限处理的土壤有机碳含量显著高于  $80\%\theta_f$  灌水上限处理。这是由于灌水上限较低时秸秆隔层能有效抑制灌溉水分的下渗和土壤硝态氮的渗漏<sup>[19]</sup>,而微生物的生长及活性受水分含量影响。灌水上限为  $80\%\theta_f$  处理的秸秆隔层以上土壤中的水分和氮素下渗到秸秆隔层的量少于灌水上限为  $90\%\theta_f$  处理,加上秸秆层抑制下层土壤水分的补给,使得秸秆层微生物活性受到抑制,秸秆分解减缓。可见在埋设秸秆隔层条件下,  $90\%$  田间最大持水量的灌水上限配合  $225\text{ kg/hm}^2$  氮素用量,更有利于提高土壤有机碳含量。

本研究中,采用水肥一体化滴灌时有机碳主要储存在  $2.000\sim 0.251\text{ mm}$  粒级团聚体内,CK 的有机碳主要储存在  $1.000\sim 0.053\text{ mm}$  粒级团聚体内,而  $5.000\sim 2.001\text{ mm}$  粒级团聚体内有机碳储量最低。由公式(4)可知,团聚体有机碳含量和团聚体含量决定团聚体对土壤总有机碳的贡献率。在本研究中有有机碳含量最高的为  $5.000\sim 2.001\text{ mm}$  粒级团聚体,但由于其占比最低,使得该粒级团聚体中有机碳对

土壤总有机碳的贡献率最低。 $2.000\sim 1.001\text{ mm}$ 、 $1.000\sim 0.251\text{ mm}$ 、 $0.250\sim 0.053\text{ mm}$  3 个粒级团聚体有机碳含量低于  $5.000\sim 2.001\text{ mm}$  团聚体,但由于其团聚体含量显著高于  $5.000\sim 2.001\text{ mm}$  团聚体,使其成为土壤有机碳的主要储存场所。这可能是由于本试验在准备阶段对试验土壤进行机械翻耕以保证初始土壤条件的均匀性,使得  $>2.000\text{ mm}$  团聚体破碎成较小粒径团聚体<sup>[20]</sup>,经一个试验周期后不同处理对土壤恢复作用不同。说明在本次试验中团聚体的相对贡献率主要受团聚体含量的影响。另外,相较于沟灌,水肥一体化滴灌显著提高了  $2.000\sim 1.001\text{ mm}$  团聚体对有机碳的贡献率,显著降低了  $1.000\sim 0.251\text{ mm}$  团聚体对有机碳的贡献率。

本次试验着重研究了秸秆隔层还田配合水氮管理对  $0\sim 30\text{ cm}$  土层土壤团聚体及有机碳的影响,未来将在埋设秸秆隔层条件下,针对秸秆隔层不同厚度、埋深、种类、排列方式等对秸秆隔层腐解速率进行深入研究,以了解秸秆腐解速率对土壤含碳量的影响。

### 参考文献:

- [1] 南雄雄,田霄鸿,张琳,等.小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):626-633.
- [2] ZHAO Y G, LI Y Y, WANG J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 363-370.
- [3] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:30-33.
- [4] PETH S, HORN R, BECKMANN F, et al. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using Synchrotron-radiation-based microtomography[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(4): 897-907.
- [5] 袁德玲,张玉龙,唐首峰,等.不同灌溉方式对保护地土壤水稳性团聚体的影响[J].水土保持学报,2009,23(3):125-128,134.
- [6] 张东辉,施明恒,金峰,等.土壤有机碳转化与迁移研究概况[J].土壤,2000(6):305-309.
- [7] 赵继浩,李颖,钱必长,等.秸秆还田与耕作方式对麦后复种花生田土壤性质和产量的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):272-280,287.
- [8] 张素瑜,杨习文,李向东,等.土壤水分对玉米秸秆还田腐解率、土壤肥力及小麦籽粒蛋白质产量的影响[J].麦类作物学报,2019,39(2):186-193.
- [9] 蒋胜亮,罗佳佳,金中财,等.氮肥处理下高寒草甸土壤水稳性

- 团聚体的季节性变化特征[J].土壤通报,2018,49(2):329-335.
- [10] 刘晓东,尹国丽,武均,等.青藏高原东部高寒草甸草地土壤物理性状对氮元素添加的响应[J].草业学报,2015,24(10):12-21.
- [11] 朱梅珂,孔范龙,李悦,等.不同水盐条件下胶州芦苇盐沼土壤水稳性团聚体的室内模拟实验研究[J].湿地科学,2019,17(2):228-236.
- [12] 吴鹏年,王艳丽,侯贤清,等.秸秆还田配施氮肥对宁夏扬黄灌区滴灌玉米产量及土壤物理性状的影响[J].土壤,2020,52(3):470-475.
- [13] 孟勇,艾文胜,漆良华,等.土壤有机碳损失及影响因子研究进展[J].湖南林业科技,2010,37(4):29-35.
- [14] 杨苍玲,李成学,杨鸿,等.不同施肥处理对红壤坡耕地土壤团聚体的影响[J].江苏农业科学,2019,47(5):256-259.
- [15] 冉颖杭,谢天铎,霍连飞,等.农田背景噪声下的土壤结构体数字图像信息特征[J].江苏农业学报,2019,35(2):313-320.
- [16] 李美霖,陈宇眺,洪晓富,等.不同氮肥管理方式对稻田土壤微生物群落结构的影响[J].浙江农业学报,2020,32(2):308-316.
- [17] 罗天相,谢芳芳.秸秆及植物残体还田对土壤 $N_2O$ 排放的影响综述[J].江苏农业科学,2019,47(18):1-5.
- [18] GUAN X K, WEI L, TURNER N C, et al. Improved straw management practices promote in situ straw decomposition and nutrient release, and increase crop production[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 250(20):1-13.
- [19] 吴烽,张林瑄,郭相平,等.秸秆隔层及不同灌水上限对土壤水氮分布的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(6):73-78.
- [20] 徐国鑫,王子芳,高明,等.秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J].环境科学,2018,39(1):355-362.

(责任编辑:张震林)