

表土处理对大豆田土壤团聚体特征及产量的影响

何松榆¹, 刘建生², 张明聪¹, 金喜军¹, 胡国华¹, 战英策¹, 赵金星¹, 张玉先¹

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江省尖山农场, 黑龙江 嫩江 161442)

摘要:为揭示在常规耕作制度基础上大豆田表土处理对表层土壤物理性状及产量的影响, 试验采用大区对比法, 设置 2 个处理(T1: 当地常规耕作措施; T2: 当地常规耕作措施 + 表土破碎处理), 研究表土处理对 0 ~ 30 cm 土壤温湿度、容重、孔隙度、水稳定性团聚体及大豆产量的影响。结果表明: T2 处理显著降低 0 ~ 10 cm 土层容重, 降幅 6.0% ~ 13.8%, 显著提高 0 ~ 10 cm 土层孔隙度, 增幅 3.83% ~ 8.40%, 降低 5 ~ 15 cm 土层的温度, 降幅 0.2 ~ 1.3℃, 提高 5 ~ 15 cm 土层的湿度, 增幅 0.1% ~ 1.5%; 显著增加大团聚体($R > 0.25$ mm)数量, 增幅 9.02% ~ 20.30%, 增加土壤水稳定性团聚体的平均质量直径(MWD)与几何平均直径(GMD), 其中 MWD 和 GMD 增幅分别为 4.25% ~ 6.58% 和 28.4% ~ 30.3%, 产量提高 6.24%。结果表明, 常规耕作措施结合表土破碎处理能够降低表层土壤容重, 增加表层土壤孔隙度, 增加土壤大团聚体数量, 增加土壤水稳定性, 可为作物的生长提供较良好的土壤环境。

关键词:大豆; 表土处理; 水稳性团聚体; 产量

中图分类号:S565.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2018.02.0251

Effect of Topsoil Treatment on Characteristics of Soil Aggregates of Soybean Field and Soybean Yield

HE Song-yu¹, LIU Jian-sheng², ZHANG Ming-cong¹, JIN Xi-jun¹, HU Guo-hua¹, ZHAN Ying-ce¹, ZHAO Jin-xing¹, ZHANG Yu-xian¹

(1. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Jianshan Farm of Heilongjiang Province, Nenjiang 161442, China)

Abstract: In order to demonstrate the effect of conventional tillage system with topsoil treatment on the soil physical properties and soybean yield, adopting the method of regional contrast, setting two treatments (T1 represents local conventional tillage measures, T2 represents conventional tillage measures + topsoil soil crushing treatment) to analyze the influence on soil temperature and humidity, the bulk density, porosity, water stability, the aggregate in 0 – 30 cm soil depth and soybean yield. The results showed that T2 treatment significantly decreased 0 – 10 cm soil bulk density with a decline of 6% to 13.8%, significantly increased the porosity of soil layer between 0 – 10 cm, with 3.83% to 8.40%, reduced 5 – 15 cm soil temperature with a decline of 0.2 to 1.3 centigrade, improve 5 – 15 cm soil moisture with an increase from 0.1% to 1.5%, significantly increase the number of large aggregate ($R > 0.25$ mm) by 9.02% to 20.30%. The mean weight diameter(MWD) and the geometric mean diameter(GMD) of soil water stability agglomeration increased by 4.25% to 6.58% and 28.4% to 30.3% respectively, while soybean yield increased by 6.24%. The results showed that topsoil crushing treatment could reduce topsoil bulk density, increase topsoil porosity, increase soil bulk aggregate number, increase soil water stability and provide a better soil environment for crop growth.

Keywords: Soybean; Topsoil treatment; Water stability aggregate; Yield

土壤团聚体是土壤结构的基本单位^[1], 是评价土壤肥力和土壤质量的重要指标^[2], 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^[3]。Six 等^[4]认为 >0.25 mm 的团聚体即土壤团粒结构体, 是土壤中最好的结构体, 其数量与土壤的肥力状况呈正相关。李鉴霖等^[5]认为 $R > 0.25$ 大团聚体含量、土壤平均质量直径、几何平均直径越大, 土壤团聚体分布状况与稳定性越好, 有利于创造更好的土壤环境, 促进作物的生长发育。近几年, 通过基本耕作

收稿日期: 2017-11-21
基金项目: 黑龙江省自然基金面上项目(C2016042); 中国博士后科学基金(2016M591568); 国家科技支撑计划(2014BAD11B01-02); 大庆市指导性科技计划项目(zd-2016-107); 黑龙江八一农垦大学博士科研启动基金(XYB2014-04); 国家现代农业产业技术体系(CARS-04-01A)。
第一作者简介: 何松榆(1992 -), 男, 硕士, 主要从事大豆高产生理生态研究。E-mail: hsyspark@163.com。
通讯作者: 张玉先(1968 -), 男, 教授, 博导, 主要从事大豆高产生理生态研究。E-mail: zyx_lxy@126.com。

方式改善土壤团聚体的研究较多,Puget 等^[6]认为耕作方式会影响微团聚体与大团聚体之间的转化和再分布,梁爱珍等^[7]也认为耕作处理对 >1 mm 级团聚体影响显著,江恒等^[8]认为耕作显著影响水稳定性大团聚体(>0.25 mm)的含量,而关于大豆田耕作后进行表土耕作的研究报道较少。现阶段农业生产中由于宜耕期和农时的限制,耕作后土壤易形成大土块和土壤板结,对大豆出苗、土壤温度和保墒有较大影响,如何降低耕作后土壤对作物的不利影响,增加土壤的团聚体数量,是当前大豆生产急需解决的关键问题。因此,本试验以常规耕作措施为对照,在常规耕作措施的基础上进行表土处理,研究表土处理对土壤水稳定性团聚体、容重和孔隙度等理化性状以及大豆产量的影响,以期黑龙江西北部半干旱地区的大豆生产和农机装备改装提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

本试验以当地主栽大豆品种合丰 50 为供试材料,亚有限结荚习性。供试肥料采用尿素(含 N 46%)、磷酸二铵(含 N 18%,P₂O₅ 46%)、硫酸钾(含 K₂O 50%)。

1.2 试验地概况

试验于 2016 年在黑龙江省农垦总局北安分局建设农场科技园区试验区进行。供试土壤为黑土,土壤肥力为中等,壤土。0~20 cm 土壤基础肥力为:全氮 0.31%,全磷 0.19%,全钾 78.8%,硝态氮 51.77 mg·kg⁻¹,氨态氮 33.85 mg·kg⁻¹,速效磷 43.21 mg·kg⁻¹,速效钾 390.12 mg·kg⁻¹,有机质 4.15 g·kg⁻¹。前茬均为玉米,秋起垄。

1.3 试验设计

采用大区对比方法,设置 2 个处理,分别为当地常规耕作措施(T1)和常规耕作措施+表土处理(T2),表土处理每次耕作处理后,在垄沟用小型旋转破碎机打碎 0~10 cm 土壤。各处理基肥均施用 N 60 kg·hm⁻²,P₂O₅ 40 kg·hm⁻²,K₂O 40 kg·hm⁻²。保苗 30 万株·hm⁻²,每个大区 20 垄,垄宽 0.65 m,垄长 30 m,每个处理 3 次重复,随机区组排列。

1.4 测定项目与方法

(1)土壤容重及土壤孔隙度:采用环刀法。于 7 月 20 日、8 月 15 日和 9 月 21 日分别取 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 3 个土层土样,测定土壤容重,计算土壤孔隙度。

(2)土壤温湿度测定:每试验区选取代表性 3

点,将美国生产的 Stevens 品牌型号为 HydraProbe II 的土壤温度水分测定仪埋于垄上,于 7 月 20 日、8 月 15 日和 9 月 21 日从 0:00 开始,每 2 h 测定一次,5、15 和 25 cm 深度的土壤温度和湿度,共测定 12 次。

(3)土壤水稳定性团聚体的质量百分含量:采用湿筛法^[10]测定。

不同级别水稳定性团聚体的质量百分含量计算公式^[11]为: $W_i = \frac{W_{wi}}{100} \times 100\%$,式中 W_i 为某级水稳定性团聚体的质量分数(%); W_{wi} 为该级水稳性团聚体的质量(g)。

平均重量直径(MWD)计算公式^[12]为: $MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i$,式中 MWD 为平均重量直径(mm); 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(mm)。

几何平均直径(GMD)由计算公式^[12]为: $GMD = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right]$,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)收获测产:每小区取 2 m²考种测产。

1.5 数据分析

用 Excel 2013 进行原始数据的处理和制图,用 SPSS 17.0 数据处理软件进行相关的数据分析。

2 结果与分析

2.1 表土处理对土壤容重和孔隙度的影响

由土壤容重的结果(表 1)可以看出,0~10 cm 土层 T1 处理容重均大于 T2 处理,其中 7 月 20 日、8 月 15 日和 9 月 21 日 T1 较 T2 处理分别增加 13.8%、6.0% 和 10.8%,均达到 5% 的显著水平。10~20 cm 土层除 7 月 20 日外,T1 处理略大于 T2 处理,其中 9 月 21 日 T1 较 T2 处理增加 5.64%,存在显著差异,而深度增加到 20~30 cm 后,二者间无显著差别。从孔隙度的结果可以看出,0~10 cm 土壤孔隙度 T2 显著高于 T1 处理,其中 7 月 20 日、8 月 15 日和 9 月 21 日 T2 较 T1 处理分别增加 7.18%、3.83% 和 8.40%,均达到 5% 的显著水平,说明 T2 处理创造了良好的土壤耕层构造;10~20 cm 亦表现与 0~10 cm 相同的变化规律,其中 9 月 21 日 T2 较 T1 处理增加 4.52%,存在显著差异。而深度增加到 20~30 cm 时,两个处理在 3 个取样时间均无显著差别。

表 1 表土处理对土壤容重与孔隙度的影响

Table 1 Effects of topsoil treatment on soil bulk density and porosity

	日期(月-日) Date(month-day)	处理 Treatment	土层深度 Soil depth/cm		
			0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30
容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	07-20	T1	0.99 ± 0.02 c	0.87 ± 0.01 d	1.06 ± 0.01 c
		T2	0.87 ± 0.01 d	1.04 ± 0.01 d	1.08 ± 0.02 c
	08-15	T1	1.06 ± 0.01 b	1.15 ± 0.02 c	1.24 ± 0.03 b
		T2	1.00 ± 0.01 c	1.12 ± 0.01 c	1.22 ± 0.04 b
	09-21	T1	1.23 ± 0.01 a	1.31 ± 0.03 a	1.38 ± 0.01 a
		T2	1.11 ± 0.03 b	1.24 ± 0.02 b	1.37 ± 0.04 a
孔隙度 Porosity/%	07-20	T1	62.6 ± 0.59 b	59.2 ± 0.31 a	60.0 ± 0.24 a
		T2	67.2 ± 0.34 a	60.8 ± 0.19 a	59.2 ± 0.20 a
	08-15	T1	60.0 ± 0.10 c	56.6 ± 0.16 b	53.2 ± 0.31 b
		T2	62.3 ± 0.09 b	57.7 ± 0.12 b	54.0 ± 0.33 b
	09-21	T1	53.6 ± 0.19 d	50.9 ± 0.30 c	47.9 ± 0.18 c
		T2	58.1 ± 0.21 c	53.2 ± 0.21 b	48.3 ± 0.13 c

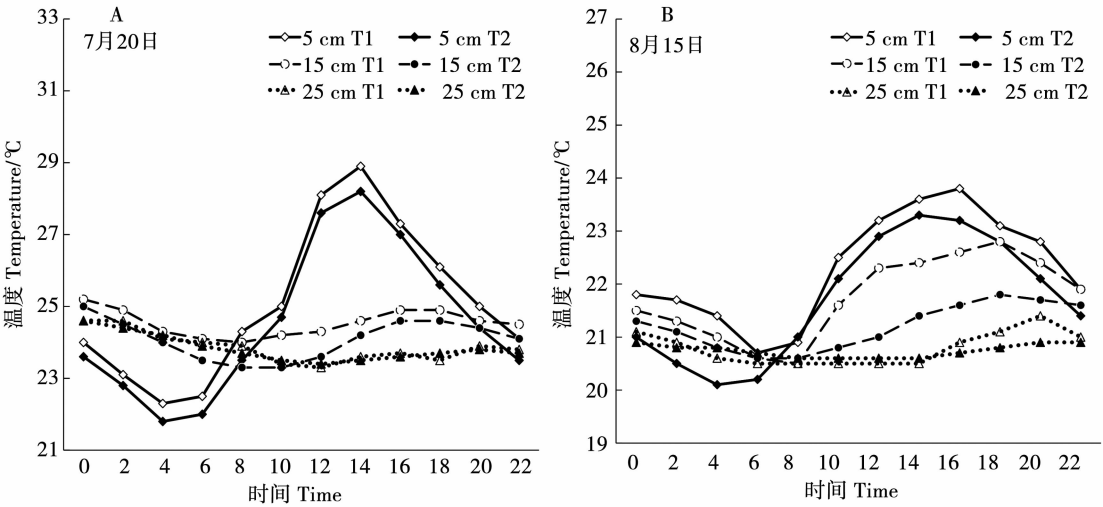
同一列中数据后不同小写字母表示不同土层间差异达到5%显著水平。下同。

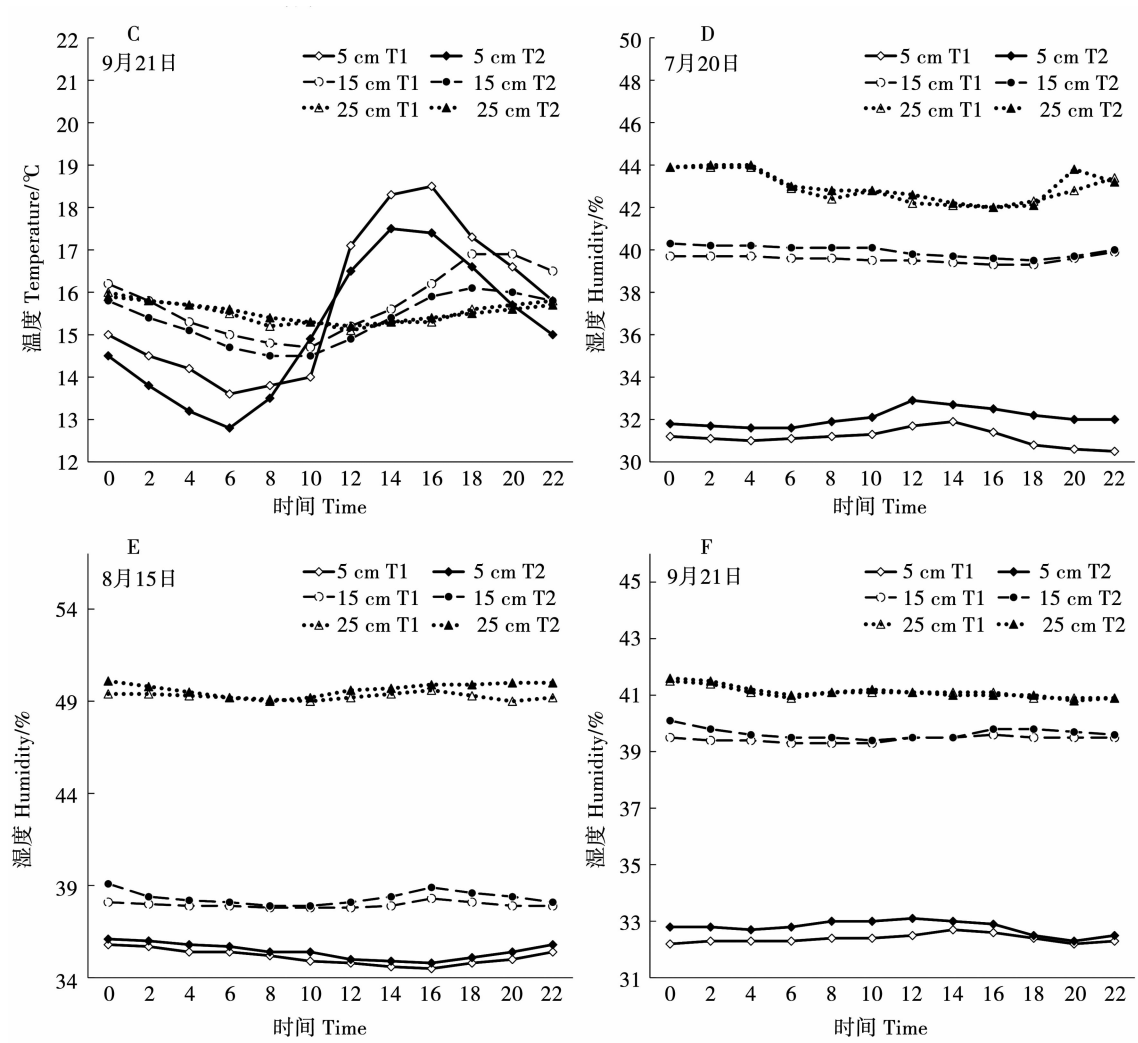
Different lowercase within a column indicate significant difference at 0.05 level. The same as below.

2.2 表土处理对土壤温湿度的影响

由图1-A、B和C可知,3个不同时期5 cm 土壤深度的温度日变化幅度最大,25 cm 深度的温度日变化最小。在5 cm 深度上,T1 处理下的土壤温度高于T2 处理,平均高2.91%;15 cm 深度的土壤温度与5 cm 土层的表现相似,T1 处理均高于T2 处理,平均高2.38%;而25 cm 深度的土壤温度T1 处理与T2 处理差异不大。由图1-D、E、F可知,各个土层中以25 cm 深度的土壤湿度最大,15 cm 深度

次之,最小的是土壤表层5 cm 深度;3个不同时期,5 cm 土层深度上,与T1 处理相比较,T2 处理下的土壤湿度高于T1 处理,平均高1.72%;15 cm 深度上,T2 处理下的土壤湿度也高于T1 处理,平均高0.83%;25 cm 土层深度的土壤湿度在T1 和T2 处理相差不大。由此可知,T2 处理提高了土壤表层的湿度,而湿度大,土壤比热容高,因此温度较T1 处理变化幅度小。





A ~ C: 土壤温度测定;D ~ F: 土壤湿度测定。
A-C: Soil temperature measurement; D ~ F: Soil humidity determination.

图 1 不同表土处理方式下的土壤温湿度
Fig. 1 Soil temperature and humidity under different topsoil treatment

2.3 表土处理对水稳性团聚体的影响

由表 2 可知,各粒级水稳定性团聚体总趋势表现为 T2 处理含量高于 T1 处理,其中,与 T1 处理相比较,7 月 20 日 T2 处理 > 5 mm、2 ~ 1 mm、1.0 ~ 0.5 mm、0.50 ~ 0.25 mm 粒级的团聚体含量分别提高了 6.52%、9.52%、47.3%、43.6%,其中 1.0 ~ 0.5 mm 粒级的团聚体含量提高得最明显,T2 处理土壤大团聚体 (R > 0.25 mm) 含量较 T1 处理高 19.1% (P < 0.01);8 月 15 日,T2 处理 > 5 mm、1.0 ~ 0.5 mm、0.50 ~ 0.25 mm 粒级的团聚体含量分别比 T1 处理提高了 15.1%、3.09%、18.4%,大团聚体

(R > 0.25 mm) 含量 T2 处理比 T1 处理提高了 9.02%,其中以 0.50 ~ 0.25 mm 粒级的团聚体含量提高的最明显;9 月 21 日,T2 处理的 5 ~ 2 mm 粒级比 T1 处理的团聚体含量低了 8.85%,但是其它粒级均比 T1 处理高,其中 > 5 mm、2 ~ 1 mm、1.0 ~ 0.5 mm、0.50 ~ 0.25 mm 粒级的团聚体含量与 T1 处理相比分别提高了 2.67%、56.1%、69.4%、28.7%,团聚体含量提升最明显的是 1.0 ~ 0.5 mm 粒级,其中 T2 处理的大团聚体 (R > 0.25 mm) 含量比 T1 处理高 20.3%。

表 2 不同表土处理方式下的土壤水稳性团聚体含量
Table 2 Soil water stability aggregate content in different topsoil treatment (%)

日期(月 - 日) Date (month-day)	处理 Treatment	各粒级水稳性团聚体的质量百分比 The proportion of different water-stable aggregate size					
		>5 mm	2 ~ 5 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1.0 mm	0.25 ~ 0.50 mm	≥0.25 mm
07 - 20	T1	13.8 ± 0.13 c	12.0 ± 0.03 a	8.4 ± 0.03 c	9.1 ± 0.02 c	10.1 ± 0.10 d	53.4 ± 3.06 b
	T2	14.7 ± 0.02 b	11.5 ± 0.14 b	9.2 ± 0.08 b	13.4 ± 0.03 a	14.5 ± 0.11 b	63.6 ± 2.01 a
08 - 15	T1	9.4 ± 0.10 e	4.8 ± 0.01 c	5.1 ± 0.02 d	8.1 ± 0.04 d	13.6 ± 0.10 bc	41.0 ± 1.63 c
	T2	10.8 ± 0.02 d	4.7 ± 0.02 c	4.8 ± 0.03 e	8.4 ± 0.06 d	16.1 ± 0.16 a	44.7 ± 1.60 c
09 - 21	T1	18.8 ± 0.06 a	12.3 ± 0.06 a	8.2 ± 0.10 c	6.2 ± 0.03 e	10.1 ± 0.09 d	55.6 ± 1.79 b
	T2	19.3 ± 0.12 a	11.3 ± 0.04 b	12.8 ± 0.02 a	10.5 ± 0.11 b	13.0 ± 0.03 c	66.9 ± 2.01 a

2.4 表土处理对土壤水稳定性团聚体 MWD 和 GMD 的影响

由图 2 可知,T2 处理的土壤 MWD 均高于 T1 处理,其中,7 月 20 日、8 月 15 日和 9 月 21 日 T2 处理的 MWD 值较 T1 处理分别高 4.34%、6.58% 和

4.25%。T2 处理的土壤 GMD 较 T1 处理高,3 个不同时期分别提高了 28.4%、28.5% 和 30.3%。表明中耕后表土处理能够普遍提高土壤水稳定性团聚体的 MWD 与 GMD,对于提高土壤的稳定性有促进作用。

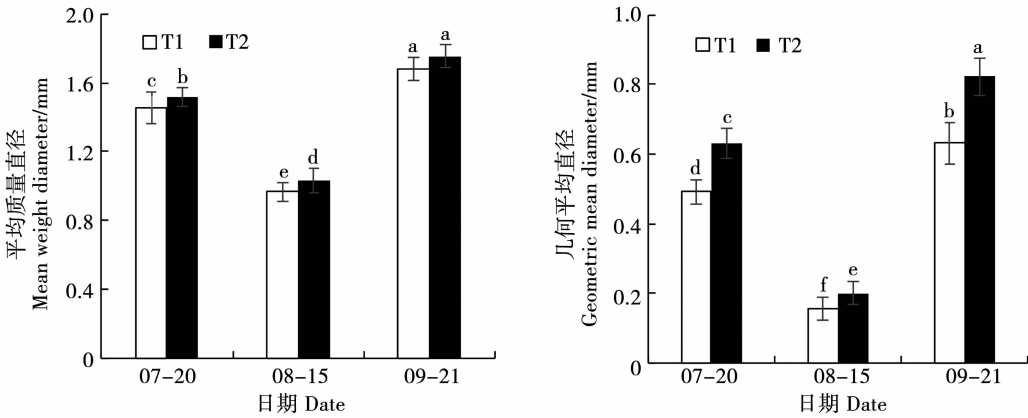


图 2 不同表土处理方式下的土壤水稳定性团聚体的 MWD 和 GMD
Fig. 2 MWD and GMD of soil water stability in different topsoil treatment

2.5 不同表土处理方式对产量的影响

不同表土处理方式下的大豆产量如表 3 所示,T1 处理的株高比 T2 处理高 3.8%。T2 处理的一粒荚、四粒荚均分别比 T1 处理高 4.56% 和 58.9%;而二粒荚和三粒荚则比 T1 处理分别降低 0.73% 和

2.88%。T2 处理下的总荚数、总粒数、百粒重以及产量分别比 T1 处理高 1.72%、5.97%、0.28% 和 6.24%。这表明中耕后表土处理能够增加总荚数和总粒数,进而提高大豆的产量。

表 3 不同表土处理方式下的大豆产量
Table 3 Soybean yield under different topsoil treatment

处理 Treatment	株高 PH/cm	一粒荚 One SP	二粒荚 Two SP	三粒荚 Three SP	四粒荚 Four SP	总荚数 TNP	总粒数 SPP	百粒重 100-SW/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
T1	114.5 a	2.85 a	8.27 a	11.08 a	1.92 b	25.65 a	60.31 a	17.94 a	2901.6 b
T2	110.3 a	2.98 a	8.21 a	10.77 a	3.05 a	26.09 a	63.91 a	17.99 a	3082.8 a

PH; Plant height; SP; Seed pod; TNP; Total number of pod; SPP; Seeds per plant; SW; Seed weight。

3 讨论

土壤容重反应土壤松紧程度,土壤质量下降与土壤孔隙度下降存在一定的关系^[13-15]。在本试验中,T2处理下不同土层的土壤容重均有降低,其中降低最明显的是0~10 cm土层;在孔隙度方面,T2处理能够提高土壤表层的孔隙度,提高最明显的是0~10 cm土层。曹立为^[14]的研究表明:土壤容重和孔隙状况对大豆干重和籽粒产量影响较大。本试验中T2处理能够降低土壤容重和提高孔隙度,促进了产量的提高。同时,耕作后进行表土处理能将耕作后形成的大土块打碎,使得土壤孔隙得到较均匀的分布,减缓了土壤水分的蒸发,增加土壤表层15 cm处的土壤湿度,提高了土壤水分的有效性,这与王珍等^[16]的研究结果一致。

土壤团聚体是土壤养分的贮藏库和各种微生物的生境^[17]。唐晓红等^[18]认为,保护性耕作增加了表层(0~10 cm)土壤大团聚体及其有机碳浓度。张旭辉等^[19]和李恋卿等^[20]研究发现,0.25~2.00 mm土壤团聚体含量与有机碳积累量密切相关。由此可见,土壤团聚体与土壤养分有着重要的联系。在本试验中,T2处理的土壤大团聚体($R > 0.25$ mm)含量均高于T1处理,表明T2处理易于土壤团粒结构的形成,能够对土壤温、湿度进行调节,促进了有机物质的分解,而有机质是土壤团聚体的胶结剂^[21],有机质多则土壤团聚体多,团聚体多反过来说明其有机质丰富,这样的土壤环境对作物的生长发育更加有利。

平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)值越大则表示团聚体的团聚程度越高^[22-24]。刘文利等^[25]研究表明越大的MWD和GMD值反映了土壤团聚体拥有更好的团聚度和稳定性。本研究中,T2处理的MWD值和GMD值均比T1处理有所提高,说明其团聚体稳定性要高于对照组,而团聚体的稳定性又影响到土壤结构的稳定性,从而增强了土壤抗侵蚀能力,使得T2处理的土壤对水分和养分的调节能力优于T1处理,提高了作物对水分的吸收利用效率,促进了大豆的生长发育,这与Nimmo等^[26]的研究结果相似。

4 结论

本试验结果表明,表土处理能够显著降低0~10 cm土层容重,显著提高0~10 cm土层孔隙度,降低5~15 cm土层的温度,提高5~15 cm土层的湿度,显著增加大团聚体($R > 0.25$ mm)数量,增加土壤水稳定性团聚体的平均质量直径(MWD)与几

何平均直径(GMD),经表土处理后大豆产量提高6.24%;综上所述,在播种和中耕过程中农机具可在垄沟处增加旋转破碎机,以便将垄沟土块打碎,改善土壤团聚体特征,降低土壤板结程度,提高土壤环境质量。

参考文献

[1] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 6218-6231. (Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A Review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 6218-6231.)

[2] 丁启朔. 耕作力学研究的土壤结构及其评价方法[D]. 南京: 南京农业大学, 2006. (Ding Q S. Assessment of soil structure for soil tillage research[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.)

[3] 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. (Wang Q K, Wang S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 415-421.)

[4] Six J, Elliot E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 1042-1049.

[5] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4696-4704. (Li J L, Jiang C S, Hao Q J. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun Mountain[J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4696-4704.)

[6] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamic of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregate[J]. European Journal of Soil Science, 2000, 51(4): 595-605.

[7] 梁爱珍, 杨学明, 范如芹, 等. 免耕对东北黑土水稳性团聚体中有机碳分配的短期效应[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2801-2808. (Liang A Z, Yang X M, Fan R Q, et al. Short-term impacts of no tillage on soil organic carbon associated with water-stable aggregates in black soil of Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2801-2808.)

[8] 江恒, 韩晓增, 邹文秀, 等. 黑土区短期免耕对大豆田土壤水分物理性质的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(3): 374-380. (Jiang H, Han X Z, Zou W X, et al. Effects of short-term no-tillage on soil moisture physical properties of soybean fields in black soil area[J]. Soybean Science, 2011, 31(3): 374-380.)

[9] 马仁明, 蔡崇法, 李朝霞, 等. 前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 95-103. (Ma R M, Cai C F, Li C X, et al. Effect of soil moisture content on stability and spatter of red soil aggregate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(3): 95-103.)

[10] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(1): 123-130.

[11] 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. (Zhou H, Lyu Y Z, Yang Z C, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei plain, China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 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 CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 132(3): 243-251.

[13] Vepra Skas M J. Plant response mechanisms to soil compaction [C]//Wilkinson E R. Plant-Environment interaction. New York: Marcel Dekker Incorporated, 1997: 263-287.

[14] 曹立为. 耕层深度及土壤容重大对大豆生长发育和产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015. (Cao L W. The effect of topsoil depth and bulk density on soybean growth and yield[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015.)

[15] Arshad M A, Coen G M. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria[J]. American Journal of Alternative Agriculture, 1992, 7(1-2): 25-31.

[16] 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤结构及土壤蒸发特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 224-228. (Wang Z, Feng H. Study on the influence of different straw-returning manners on soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 224-228.)

[17] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between(micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79: 7-31.

[18] 唐晓红, 邵景安, 高明, 等. 保护性耕作对紫色水稻土团聚体组成和有机碳储量的影响[J]. 应用生态学报, 2007(5): 1029-1034. (Tang X H, Shao J A, Gao M, et al. Effects of conservation tillage on aggregate composition and organic carbon storage in purplepaddy soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007(5): 1029-1034.)

[19] 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J]. 生态学杂志, 2001, 20(2): 16-19. (Zhang X H, Li L Q, Pan G X. Effect of different crop rotation systems on the aggregates and their SOC accumulation in paludals in North Huai Region, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2001, 20(2): 16-19.)

[20] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微生物团聚体及其有机碳的分布变化[J]. 土壤通报, 2000(5): 193-195. (Li L Q, Pan G X, Zhang X H. Changes in organic carbon storage in aggregates of the surface horizon in a degraded Paleudlt upon vegetation recovery[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2000(5): 193-195.)

[21] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982, 33: 141-163.

[22] 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. (Su J, Zhao S W. Comparison of the analysis methods for soil aggregate stability[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(5): 114-117.)

[23] 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. (Yan B, Jia Z K, Han Q F, et al. Effects of different tillage on soil aggregates in the arid areas of South Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 58-63.)

[24] 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. (Yan F L, Shi Z H, Cai C F, et al. Effects of topsoil aggregate stability on soil erosion at hillslope on ultisoils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4): 577-583.)

[25] 刘文利, 吴景贵, 傅民杰, 等. 种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 129-135. (Liu W L, Wu J G, Fu M J, et al. Effect of different cultivation years on composition and stability of soil aggregate fraction in orchard[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 129-135.)

[26] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregate stability and size distribution [J]. Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods, 2002, 4: 317-328.