



# 耕地方式与有机肥配施对大豆产量及土壤养分特征的影响

匡恩俊<sup>1</sup>, 李梓瑄<sup>1</sup>, 迟凤琴<sup>1</sup>, 张久明<sup>1</sup>, 宿庆瑞<sup>1</sup>, 朱宝国<sup>2</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院 土壤肥料与环境资源研究所/黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室/黑龙江省肥料工程技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省农业科学院 佳木斯分院, 黑龙江 佳木斯 154007)

**摘要:**为探明不同耕地方式与有机肥配施对大豆产量及土壤养分的影响特征,选取3种不同耕作措施(免耕、浅翻、深翻)与有机肥相结合,分析不同层次土壤的养分、大豆根系形态以及大豆产量间的差异。结果表明:经过两个轮作周期,各处理的大豆产量无明显差异,仅表现为深翻和深翻+有机肥处理略高于其它处理。施入有机肥后大豆总根长、根系平均直径、根系表面积和根系体积分别增加了-1.2%~41.8%、5.0%~13.9%、3.7%~61.0%和8.9%~82.7%。有机肥配施,不同程度提高了0~20 cm和20~40 cm土层土壤微生物量碳、微生物量氮的含量,同时还有增加土壤速效养分含量的趋势,尤其是20~40 cm土层,但对碱解氮的影响不明显。深翻与有机培肥相结合时,利于增加深层土壤的养分含量,促进大豆根系发育,提高其自身缓冲性能。

**关键词:**大豆;耕地方式;有机肥;根系形态;土壤养分;产量

## Effect of Different Plough and Organic Fertilizer on Characteristics of Soybean Yield and Soil Nutrients

KUANG En-jun<sup>1</sup>, LI Zi-xuan<sup>1</sup>, CHI Feng-qin<sup>1</sup>, ZHANG Jiu-ming<sup>1</sup>, SU Qing-rui<sup>1</sup>, ZHU Bao-guo<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil Fertilizer and Environment Resource, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Soil Environment and Plant Nutrition of Heilongjiang Province/Heilongjiang Fertilizer Engineering Research Center, Harbin 1500862, China; 2. Jiamusi Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Jiamusi 154007, China)

**Abstract:** In order to verify the effects of different tillage methods combined with organic fertilizer on soybean yield and soil nutrients, three tillage methods (no-tillage, fellow tillage, and deep tillage) with organic fertilizers were chosen in the study. We analyzed the relationship between soil nutrients at different soil depths, morphological characteristics of soybean root system and yield. The results showed that, there was no significant difference on soybean yield after two rotation cycles. The total root length, root diameter, root projection area and other indicators of each treatment increased after the application of organic fertilizer, with -1.2% -48.9%, 5.0% ~13.9%, 3.7% ~61.0% and 8.9% ~82.7%, respectively. The combined application of organic fertilizer increased the contents of soil microbial carbon and nitrogen in 0-20 and 20-40 cm soil layers. There was also a tendency to increase the content of soil available nutrients, especially 20-40 cm soil nutrients, but the effect on alkaline hydrolysis nitrogen was not obvious. When combined with organic fertilizer, tillage method is beneficial to increase the nutrient content of the deep soil, promote the development of soybean roots and improve its own buffering performance.

**Keywords:** Soybean; Plough method; Organic fertilizer; Root morphology; Soil nutrition; Yield

玉米-大豆轮作是我国东北地区重要的耕作方式之一,能够改善土壤结构<sup>[1]</sup>,缓解连作障碍,可充分发挥大豆根瘤固氮的养地作用<sup>[2-3]</sup>。同时玉米-大豆轮作还可减少玉米对氮肥的依赖<sup>[4]</sup>,从而提高产量<sup>[5-6]</sup>。Ruan等<sup>[7]</sup>提出有机肥的施用可提高土壤有机质的含量,改善土壤理化性质及土壤肥力性状<sup>[8]</sup>。根系的生长发育在很大程度上影响着作物的吸收能力,是获得高产的重要保障<sup>[9-10]</sup>。很多学者通过肥料来影响根系<sup>[11-13]</sup>,增加根的干重、根体

积等<sup>[14]</sup>,李蕊等<sup>[15]</sup>研究则表明玉米-大豆轮作条件下,施用有机肥可增加表土层根重以及深土层根的长度,从而提高大豆的产量。而根系的生长和分布受到耕作和施肥的双重控制<sup>[16]</sup>。良好的土壤结构有利于根系下扎和利用深层土壤养分。张益望等<sup>[17]</sup>认为施肥水平是影响春玉米生长和产量的主要因素,其次是轮作和连作。周岚等<sup>[18]</sup>认为种植方式对于玉米农艺性状及产量的影响较小。有研究者认为免耕可降低耕层土壤的扰动及其结构的破

收稿日期:2019-05-02

基金项目:国家重点研发计划(2016YFDT300806-2)。

第一作者简介:匡恩俊(1982-),女,硕士,助理研究员,主要从事土壤肥力研究。E-mail: kuangenjun2002@163.com。

通讯作者:迟凤琴(1963-),女,博士,研究员,主要从事土壤肥力研究。E-mail: fqchi2013@163.com。

坏<sup>[19-20]</sup>,而另一些研究表明免耕会导致土壤容重和贯穿阻力增加<sup>[21]</sup>。关于免耕能否增产的结论不一。一般认为减产的主要原因是免耕造成土壤温度低,影响作物生长发育导致减产<sup>[22]</sup>。另有研究指出,免耕会使土壤容重增大,影响作物根系的生长发育以及对养分的吸收利用,使产量出现下降的趋势<sup>[23]</sup>。而盖志佳<sup>[24]</sup>比较连续4年大豆-玉米轮作免耕与垄作的结果表明免耕大豆年份增产16.4%和25.3%,免耕玉米年份增产0.88%和9.50%。同时也有研究表明耕翻可有效打破土壤犁底层,使根系下扎到深层土壤,从而增加作物产量<sup>[25]</sup>。以上研究均针对单一的种植结构,在轮作体系下不同耕作方式与施用有机肥相结合的研究却少有报道。本研

究基于玉米-大豆轮作体系,分析3种不同耕作措施(免耕、浅翻、深翻)与有机肥相结合对土壤养分、大豆根系形态和产量的影响,为鉴选东北地区适宜的耕作与培肥方式提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2017-2018年在嫩江县北方四场科技园区进行(49°33'35"N,125°27'5"E)。试验区平均气温-0.1℃,无霜期105 d,降水量570 mm,蒸发量719 mm,有效积温2 571.2℃。土壤为厚层粘底黑土,土壤理化性质如表1。

表1 试验地土壤基础肥力  
Table 1 The fertility of experiment soil

土层深度 Soil depth/ cm	有机碳 Organic C/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkaline N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH
0~20	18.01	2.31	0.89	27.10	60.19	25.01	167.70	5.09
20~40	17.24	2.28	0.88	27.23	58.31	24.12	182.56	5.13

1.2 试验设计

2017开始玉米-大豆轮作试验,共设6个处理:①深翻对照(DT);②深翻+有机肥(DM);③浅翻对照(ST);④浅翻+有机肥(SM);⑤免耕对照(NT);⑥免耕+有机肥(NM)。小区面积26 m<sup>2</sup>,3次重复,各处理小区种植密度和水肥管理一致。玉米收获后秸秆不还田,地表抛洒有机肥,施用量为15 t·hm<sup>-2</sup>,免耕区采用留茬播种,有机肥平铺于地表;耕翻区灭茬后用210 马力格兰翻转犁将有机肥翻到0~35 cm(浅翻区0~25 cm、深翻区0~35 cm)。第二年春播种大豆,供试大豆品种为黑河43,化肥基施用量325 kg·hm<sup>-2</sup>(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=2.0:1.0:0.5)。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及产量构成因素 成熟期收获时,连续选取每个小区的中间区域10株大豆植株考种并计算理论产量。

1.3.2 根系形态 开花期,以大豆植株为中心,采取20 cm×20 cm×60 cm的根土混合体。将根土混合体置60目筛中,以清水冲洗,将洗净的根于Epson Expression 10000XL仪扫描进行根系扫描,利用WinRHIZO根系分析系统分析扫描图片,计算大豆总根长、根系体积、根系直径及根系投影面积。

1.3.3 土壤养分含量 于播前和成熟期分别取0~

20 cm和20~40 cm土层的土壤样品,阴干,研磨备用。碱解氮含量用碱解扩散法测量,有效磷含量采用Olsen-钼锑抗法测量,速效钾含量采用乙酸铵浸提火焰光度法<sup>[26]</sup>测量,土壤微生物量碳、微生物量氮的测试方法为氯仿熏蒸-硫酸钾提取法<sup>[27]</sup>。

1.4 数据分析

采用Excel 2016、SPSS 17.0和Sigmaplot 12.5软件进行统计和作图,并通过ANOVA软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 耕作方式和有机肥配施对大豆产量的影响

由表2可知,免耕处理的瘪荚数略高于耕翻处理,具体表现为:免耕>浅翻>深翻;有机肥的施用提高了各处理的单株荚数,但处理间差异均不显著。与免耕处理相比,耕翻处理可以提高大豆的产量,ST、DT分别较NT提高10.8%和23.4%;施用有机肥后,NM、SM和DM分别比NT、ST、DT增加了7.8%、11.2%、3.4%,但未达到差异显著性。

2.2 耕作方式和有机肥配施对大豆根系形态的影响

由图1可知,3种耕作措施(NT、ST和DT)对大豆根系的投影面积、根直径以及根系体积的影响均表现为ST显著高于NT和DT,NT和DT之间无明

显差异。施用有机肥后 NM 和 DM 处理的大豆总根长分别比 NT、DT 增加了 27.6% 和 41.8%, SM 处理较 ST 处理减少了 1.2% (图 1c), 其中深翻处理的 DT 和 DM 差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ); NM、SM、DM 的根系投影面积 (图 1d) 分别较 NT、ST、DT 增

加了 44.9%、3.7% 和 61.0%; 根系平均直径 (图 1a) 分别增加了 13.5%、5.0%、13.9%; 根系体积 (图 1b) 分别增加 64.8%、8.9% 和 82.7%。施用有机肥能够增加大豆总根长、根系体积和根系投影面积, 增加幅度以深翻处理最大。

表 2 不同处理大豆产量及其构成因素

Table 2 The soybean yields and yield composition of different treatments

处理 Treatment	单株荚英 Flat pods per plant	单株荚数 Pods per plant	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )
NT	3.33 ± 0.58 a	30.67 ± 2.52 a	17.66 ± 0.87 a	2189 ± 573.47 a
NM	2.00 ± 1.00 a	31.67 ± 1.53 a	17.50 ± 0.12 a	2360 ± 535.01 a
ST	2.33 ± 1.53 a	30.00 ± 4.00 a	17.78 ± 0.90 a	2426 ± 330.20 a
SM	1.67 ± 2.08 a	33.00 ± 8.00 a	18.17 ± 0.30 a	2697 ± 181.15 a
DT	1.00 ± 1.00 a	31.67 ± 2.52 a	17.70 ± 0.44 a	2702 ± 133.90 a
DM	1.33 ± 1.15 a	32.33 ± 2.89 a	18.30 ± 0.40 a	2792 ± 590.66 a

同列不同字母表示  $P \leq 0.05$  水平差异显著。下同。  
Different lowercase in the same column indicates there is significant difference at  $P \leq 0.05$  level. The same below.

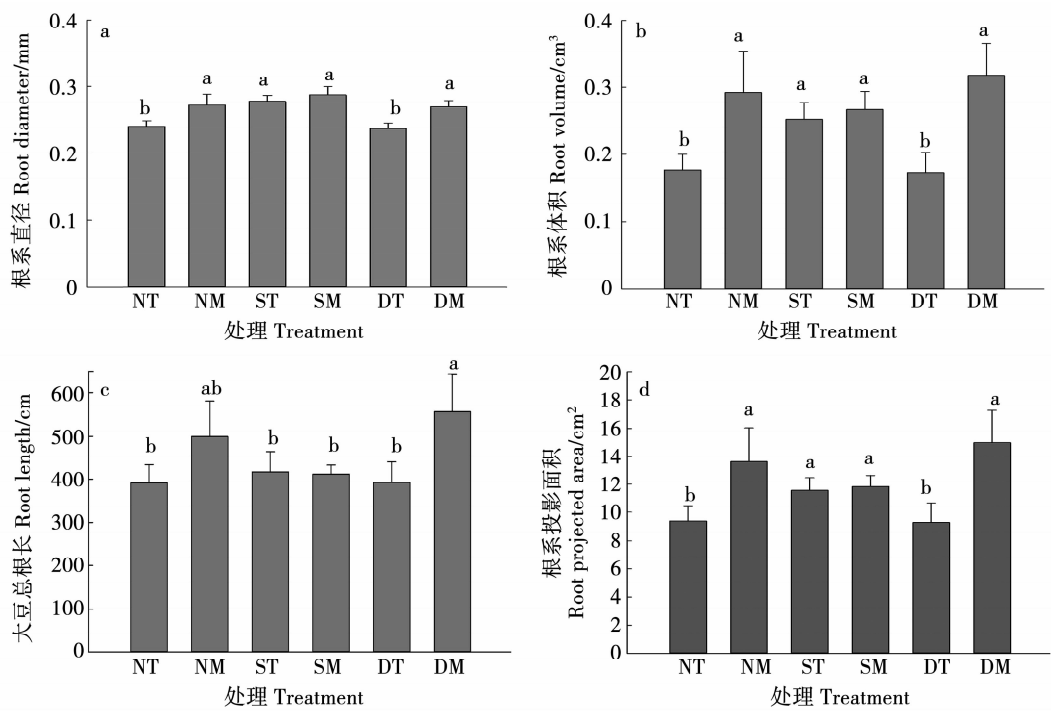


图 1 不同处理对大豆根系形态特征的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on the soybean root morphology

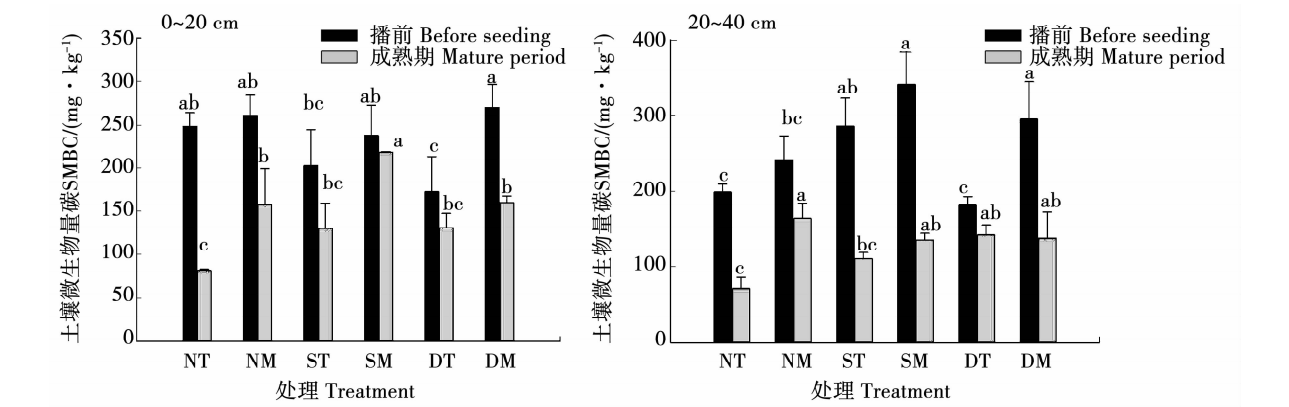
2.3 耕作方式和有机肥配施对土壤微生物量碳、微生物量氮的影响

2.3.1 土壤微生物量碳 由图 2 可知,不同处理的 SMBC 含量播前土壤高于成熟期土壤,施入有机肥不同程度地提高 SMBC 值。播前土壤 0~20 cm 土层,不施有机肥的 ST 和 DT 处理 SMBC 比 NT 低 18.6% 和 30.4%,施用有机肥后 NM、SM 和 DM 分别比 NT、ST 和 DT 高 5.2%、17.6% 和 56.1%。成

熟期,耕翻处理 ST 和 DT 的 SMBC 含量比 NT 增加 60.2% 和 61.2%,施用有机肥后 NM、SM 和 DM 分别比 NT、ST 和 DT 增加 94.4%、67.1% 和 22.0%。  
在 20~40 cm 土层,播前土壤 ST 较 NT 高 44.1%,DT 较 NT 低 8.3%;施用有机肥后,NM、SM 和 DM 比 NT、ST 和 DT 分别高 21.5%、19.1% 和 62.3%。成熟期,ST 和 DT 的 SMBC 含量比 NT 提

高 55.0% 和 99.6%, 施有机肥后 NM 和 SM 分别比 NT 和 ST 增加 130.3% 和 22.9%, DM 无明显影响, 其中 NM 与 NT 差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。对于播前土壤, 耕作方式并没有显著影响 SMBC 的含

量, 但是施用有机肥后, 各处理均有提升 SMBC 的趋势, 这说明有机肥的施入能明显增加各层次土壤的 SMBC 的含量, 且耕翻的提升效果好于免耕处理, 深翻配施有机肥的提升效果最明显。



差异显著性分析结果为同一时期不同处理间的分析结果。下同。  
The difference significance analysis result is the comparison result between different treatments in the same period. The same below.

图2 不同处理对土壤微生物量碳含量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on soil microbial biomass carbon in different soil depths

2.3.2 土壤微生物量氮 由图3可知,不同处理对土壤微生物量氮(SMBN)的影响不同。0~20 cm和20~40 cm的播前土壤,施用有机肥均能提升 SMBN 的含量。成熟期,0~20 cm 土层,NT、ST 和 DT 之间无明显差别,施用有机肥后 NM、SM 和 DM 分别比 NT、ST 和 DT 增加了 123.2%、43.1% 和 93.4%, 各

处理差异均达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。20~40 cm 土层, NM、SM 和 DM 分别比 NT、ST 和 DT 增加了 41.5%、122.6% 和 27.7%, 各处理差异均达显著性。说明施用有机肥可不同程度地提高各处理 SMBN 的含量。

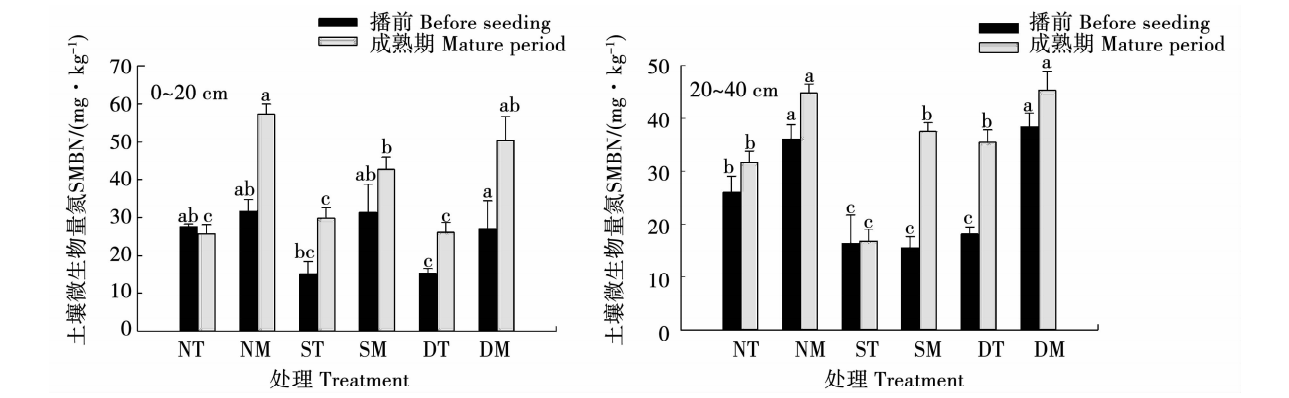


图3 不同处理对土壤微生物量氮含量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on soil microbial biomass nitrogen in different soil depths

2.4 耕作方式和有机肥配施对土壤速效养分的影响

2.4.1 土壤碱解氮 由表3可知,播种前,在0~20 cm 土层土壤不同处理间无明显差异,但在20~40 cm 土层,NT的碱解氮含量明显高于ST和DT处理。施用有机肥后,NM显著低于NT,但SM和DM较ST和DT处理均有提升的趋势。成熟期,0~20 cm 土层各处理以深翻处理碱解氮的含量最低,施用有机肥提升碱解氮的效果不明显。20~40 cm 土层, NM 略低于 NT, SM 和 DM, 分别比 ST 和 DT 高

10.4% 和 0.5%, 差异不显著。

2.4.2 土壤有效磷 由表4可知,对比不同耕作措施,耕翻处理略提升播前0~20 cm 土壤有效磷的含量,施入有机肥后以 NM 含量最低;20~40 cm 土层,施用有机肥增加了耕翻处理有效磷的含量,SM 和 DM 比 ST 和 DT 分别高 93.8% 和 9.2%。成熟期施用有机肥后 0~20 cm 各处理有效磷含量以 DM 含量最高,且与其它处理差异达到显著性;20~40 cm 土层, NM、SM 和 DM 分别较 NT、ST 和 DT 高 7.4%、86.1% 和 12.2%, 其中 SM 和 ST 差异显著。

表 3 不同处理对土壤碱解氮含量的影响

Table 3 Effects of different treatments on the soil alkaline N

(mg·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	0 ~ 20 cm		20 ~ 40 cm	
	播种前	成熟期	播种前	成熟期
	Before seeding	Mature period	Before seeding	Mature period
NT	92.40 ± 0.01 a	89.25 ± 1.48 a	89.25 ± 3.46 a	91.00 ± 1.98 a
NM	81.20 ± 8.91 b	88.90 ± 4.95 a	74.20 ± 3.96 cd	87.15 ± 6.43 a
ST	93.45 ± 1.48 a	89.60 ± 3.96 a	71.40 ± 0.99 d	80.85 ± 10.39 a
SM	91.70 ± 0.99 a	91.00 ± 0.00 a	87.50 ± 0.99 ab	89.25 ± 7.42 a
DT	92.40 ± 1.98 a	80.50 ± 2.97 b	80.50 ± 0.99 bc	74.90 ± 16.83 a
DM	87.50 ± 0.99 ab	79.10 ± 0.99 b	92.75 ± 4.45 a	75.25 ± 0.49 a

表 4 不同处理对土壤有效磷含量的影响

Table 4 Effects of different treatments on the soil available P

(mg·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	0 ~ 20 cm		20 ~ 40 cm	
	播种前	成熟期	播种前	成熟期
	Before seeding	Mature period	Before seeding	Mature period
NT	23.85 ± 0.54 a	25.37 ± 0.54 ab	19.31 ± 0.00 cd	22.91 ± 1.98 d
NM	19.31 ± 2.14 b	22.72 ± 0.54 b	17.04 ± 0.00 d	24.61 ± 0.54 cd
ST	24.42 ± 1.87 a	24.23 ± 1.61 b	12.31 ± 0.27 e	31.05 ± 1.61 b
SM	27.26 ± 2.68 a	23.10 ± 0.54 b	23.85 ± 1.61 a	52.25 ± 1.34 a
DT	25.56 ± 0.80 a	25.75 ± 0.54 ab	20.64 ± 1.34 bc	24.80 ± 0.54 cd
DM	24.99 ± 0.54 ab	28.78 ± 3.21 a	22.53 ± 0.27 ab	27.83 ± 0.80 c

2.4.3 土壤速效钾 由表 5 可知,不同耕作措施中播前土壤 0 ~ 40 cm 土层速效钾含量变化较大,仅 SM 处理增加了速效钾含量;成熟期 0 ~ 20 cm 速效钾含量表现为施用有机肥均低于不施有机肥处理,

但 SM 和 DM 与 NM 相比,提高了土壤速效钾的含量;20 ~ 40 cm 土层施用有机肥后,免耕和浅翻提高了土壤速效钾含量,且浅翻处理的效果较好。

表 5 不同处理对土壤速效钾含量的影响

Table 5 Effects of different treatments on the soil available K

(mg·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	0 ~ 20 cm		20 ~ 40 cm	
	播种前	成熟期	播种前	成熟期
	Before seeding	Mature period	Before seeding	Mature period
NT	277.85 ± 2.21 b	260.50 ± 5.44 b	191.22 ± 0.15 c	213.40 ± 7.93 bc
NM	198.46 ± 3.69 e	167.18 ± 2.22 e	188.95 ± 3.01 d	224.68 ± 3.67 b
ST	214.25 ± 8.51 d	304.82 ± 0.92 a	173.31 ± 1.89 d	206.32 ± 14.28 cd
SM	260.68 ± 8.59 c	256.34 ± 4.90 b	288.33 ± 6.48 a	271.78 ± 1.46 a
DT	326.33 ± 4.16 a	233.29 ± 1.34 c	219.71 ± 0.34 b	194.37 ± 0.45 d
DM	227.74 ± 7.98 d	204.76 ± 4.57 d	168.63 ± 7.47 d	143.86 ± 2.63 e

耕种措施和施用有机肥对土壤不同层次的养分的影响规律性不强,但施用有机肥后有增加速效养分的趋势,尤其对提升浅翻处理 20 ~ 40 cm 土层的速效养分效果明显,这为作物根系吸收深层次土壤的养料提供保障。

2.5 耕作方式和有机肥配施对各指标影响的分析  
2.5.1 对根系指标及大豆产量影响的方差分析 由表 6 可知,耕作方式和施肥对大豆的百粒重和产

量没有显著影响。大豆的总根长受耕作方式及有机肥的单方面因素影响较小,但二者的交互作用对其影响达到了极显著差异水平( $P < 0.01$ );根投影面积、平均根系直径和根的体积受耕作方式及施有机肥单方面的影响较大,均达到差异显著或极显著水平( $P < 0.05$ ),且根投影面积和根体积受二者的交互作用明显。可见,在大豆生育的前期,耕作方式与施有机物料的有效结合,明显促进根系的发育。

表 6 耕作和有机肥对大豆根系形态的方差分析  
Table 6 The variance analysis of tillage and manure on soybean root morphology

项目 Item	总根长 Total root length	根投影面积 Root projection area	根平均直径 Root mean diameter	根体积 Root volume	百粒重 100-seed weight	产量 Yield
耕作 Tillage	0.139	0.032 *	0.025 *	0.019 *	0.396	0.204
有机肥 Organic fertilizer	0.503	0.034 *	0.000 **	0.005 **	0.331	0.402
耕作×有机肥 Tillage×Organic fertilizer	0.000 **	0.000 **	0.786	0.001 **	0.513	0.936
$R^2$	0.7726	0.8136	0.7388	0.8094	0.2703	0.2737

\*表示在0.05水平显著,\*\*表示在0.01水平显著。下同。  
\* indicates significant at the level of 0.05, \*\* indicates significant at the level of 0.01. The same below.

2.5.2 对土壤速效养分和微生物量碳、微生物量氮影响的方差分析 由表7可知,土壤微生物量碳受耕作方式、施入的有机肥及二者的交互作用有极显著影响( $P<0.01$ ),同时受耕作和土壤层次的交互作用也达显著水平( $P<0.05$ );土壤微生物量氮受耕作和土壤层次单因素影响及二者的交互作用影响具有显著性( $P<0.01$ ),同时也受耕作和有机肥二者交互的极显著影响。土壤微生物量碳、微生物

量氮作为敏感的土壤肥力指标,施用有机物料后为微生物提供了丰富的碳源,促进微生物的繁殖,利于提高土壤微生物量碳、微生物量氮。当耕作、施肥和土壤层次单一因素及其交互作用改变时,土壤有效磷和速效钾的含量均受到极显著影响;而土壤中的碱解氮含量仅与耕作方式有极显著关系( $P<0.01$ )。

表 7 耕作方式和有机肥对土壤养分的方差分析  
Table 7 The variance analysis of tillage and organic fertilizer on soil nutrient

项目 Item	碱解氮 Alkaline N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	土壤微生物量碳 SMBC	土壤微生物量氮 SMBN
耕作 Tillage	0.009 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **
有机肥 Organic fertilizer	0.787	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.663
土层 Soil layer	0.250	0.000 **	0.000 **	0.087	0.045 *
耕作×有机肥 Tillage×Organic fertilizer	0.567	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.002 **
耕作×土层 Tillage×Soil layer	0.699	0.000 **	0.000 **	0.033 **	0.012 *
有机肥×土层 Organic fertilizer×Soil layer	0.756	0.000 **	0.000 **	0.818	0.675
耕作×有机肥×土层 Tillage×Organic fertilizer×Soil layer	0.743	0.000 **	0.000 **	0.060	0.714
$R^2$	0.6055	0.9835	0.9918	0.9569	0.8830

3 讨论

本研究中施用有机肥提高了大豆的单株荚数和百粒重,这与李蕊等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。研究表明在玉米-大豆轮作体系下,施用有机肥能提升大豆产量<sup>[15,28]</sup>。Zhou 等<sup>[29]</sup>研究发现,连续施用有机肥5年后,大豆的增产作用显著。本研究中耕翻处理和施用有机肥对大豆产量的提高有一定的促进作用,但不明显,这可能与试验的长短周期有关。黄丽芬等<sup>[30]</sup>进行了长达12年的免耕长期定位试验,表明小麦增产效果稳定,而本研究中翻耕处理的产量要高于免耕处理,可能是因为栽培作物特有属性及不同试验地点地理位置及气候的不同所致。耕翻能改善土壤孔隙分布特征,提高蓄水保墒能力,从而增强作物深层根系对水分的吸收利

用<sup>[31]</sup>。大豆生育前期良好的根系生长是大豆高产的重要保障<sup>[32-34]</sup>,良好的根系能够有效提高大豆对土壤养分的利用,进而达到增产的目的,也有研究表明施用有机肥并未影响到单条根的膨大生长,更多的是影响了根物质的积累和根的空间分布,在本研究中,翻耕处理仅浅翻明显提升了大豆根系直径、根体积和根系投影面积,而施用有机肥后,免耕和深翻提升的效果更为明显,这是因为施用有机肥能显著增加根系直径和根系体积,使根系更发达且不易倒伏。有机肥处理还能提高大豆鼓粒期0~30 cm平均根重密度<sup>[16]</sup>。土壤微生物在有机质的分解和养分循环的过程中起着重要的作用,有机肥的施入能够明显提高土壤微生物的数量<sup>[35]</sup>。同时,土壤耕作方式及环境条件等因素都能影响微生物数量和活性进而影响

土壤有机物的含量,施入有机肥有提升微生物量碳、氮的效果<sup>[36-37]</sup>,这是因为有机肥为土壤中的微生物提供了充足的碳、氮等养分,同时,其自身也带入了大量的微生物<sup>[38]</sup>。本研究中,施入有机肥能够不同程度提升土壤速效养分及微生物量碳、微生物量氮的含量,尤其是提升 20 ~ 40 cm 土层的效果明显。有机肥的施入不仅提高了土壤供肥容量,又增加了土壤缓冲能力而维持土壤较好养分供应能力<sup>[39]</sup>。而播前土壤免耕处理微生物量碳、微生物量氮及养分含量一直偏高,这可能是与温度有关,当秋季收获时温度很低,施肥整地后土壤已经冻住,导致有机肥没有充分的腐解;第二年早春土壤温度很低,微生物活动缓慢,随着温度的逐渐上升,有机肥料逐渐释放出养分。另一个原因是由于试验年份降雨量较大,随着土壤淋溶、挥发或作物生长带走部分养分,降低了成熟期土壤的养分含量,同时养分变化规律方面存在较大差异。有机肥一方面为土壤中的微生物提供了充足的碳、氮养分,提高了底物浓度;同时有机肥还通过生物量的提高增加了作物根系的生物量和根系的分泌物等,促进土壤微生物活性和群落结构<sup>[40]</sup>。

4 结 论

在玉米-大豆轮作体系下,不同耕作方式配合施用有机肥可以提高土壤中有效磷和速效钾、土壤微生物碳、微生物量氮的含量,耕作方式与有机肥交互作用效果明显,尤其是对 20 ~ 40 cm 土层;有机肥的施用对大豆根系的总根长、根系体积和根系投影面积等影响显著,耕作方式与施有机肥相结合对于根系生长有明显的促进作用。所以,有机肥和耕翻相结合,不仅能够促进大豆生育前期根系的生长,还能够提高深层次土壤的养分含量,为作物高产与土壤培肥提供重要的保障。

参考文献

[1] 任姗. 玉米-大豆轮作对黑土区作物-土壤碳氮循环的模拟研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2016. (Ren S. Simulating carbon and nitrogen cycle in soil-plant under maize-soybean crop rotation in black soil zones [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016. )

[2] Sanginga N. Role of biological nitrogen fixation in legume based cropping systems: A case study of West Africa farming systems [J]. Plant and Soil, 2003, 252(1): 25-39.

[3] 杨祥田, 周翠, 李建辉, 等. 不同轮作方式下大棚草莓产量及土壤生物学特性[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 312-315. (Yang X T, Zhou C, Li J H, et al. Effect of cropping system on yield of strawberry and soil biological property under plastic greenhouse condition [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 312-315. )

[4] Stella A E, Max D C. Effect of soybean plant populations in a soybean and maize rotation [J]. Agronomy Journal, 2001, 93: 396-403.

[5] Al-Kaisi M M, Yin X. Stepwise time response of corn yield and economic return to no tillage [J]. Soil Tillage Research, 2004, 78: 91-101.

[6] Wilhelm W W, Wortmann C S. Tillage and rotation interactions for corn and soybean grain yield as affected by precipitation and air temperature [J]. Agronomy Journal, 2004, 96: 425-432.

[7] Ruan W B, Ren T, Chen Q, et al. Effects of conventional and reduced N inputs on nematode communities and plant yield under intensive vegetable production [J]. Applied Soil Ecology, 2013, 66(2): 48-55.

[8] 郝丽娜, 吴海华, 刘廷, 等. 有机肥在农业和生态环境中的作用演变[J]. 农业研究与应用, 2017, 169(2): 57-60. (Hao L N, Wu H H, Liu Y, et al. The role of organic fertilizer in agriculture and ecological environment [J]. Agricultural research and application, 2017, 169(2): 57-60. )

[9] 董钻. 大豆产量生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 20-25. (Dong Z. Soybean yield physiological [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 20-25. )

[10] 张伟, 邱强, 赵婧, 等. 杂交大豆根系形态生理特性与产量的关系[J]. 大豆科学, 2014, 33(3): 347-352. (Zhang W, Qiu Q, Zhao J, et al. Relationship between root morphological characters and yield of hybrid soybeans [J]. Soybean Science, 2014, 33(3): 347-352. )

[11] Costa C, Dwyer L M, Hamilton R I, et al. A sampling method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis [J]. Agronomy Journal, 2000, 92: 621-627.

[12] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 施氮对大豆根系形态和氮素吸收积累的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1069-1073. (Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Root morphology and nitrogen accumulation in soybean (*Glycine max* L.) under different nitrogen application levels [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(6): 1069-1073. )

[13] 李彦生, 杜明, 刘晓冰, 等. 氮素用量对菜用大豆生殖生长期根系及鲜荚产量的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(1): 47-51. (Li Y S, Du M, Liu X B, et al. Effects of different nitrogen dosage on root morphology during reproductive stages and fresh pod yield in vegetable soybean [J]. Soybean Science, 2012, 31(1): 47-51. )

[14] 杨秀红, 吴宗璞, 张国栋. 大豆品种根系性状与地上部性状的相关性研究[J]. 作物学报, 2002, 28(1): 72-75. (Yang X H, Wu Z P, Zhang G D, et al. Correlations between characteristics of roots and those of aerial parts of soybean varieties [J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(1): 72-75. )

[15] 李蕊, 杨越, 李彦生, 等. 基于玉米-大豆轮作的不同施肥体系对大豆开花后根系形态及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(1): 64-73. (Li R, Yang Y, Li Y S, et al. Effects of different fertilization systems on characteristics of roots after flowering and yield in soybean based on corn-soybean rotation [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(1): 64-73. )

[16] Jan G, Jerzy L. Soil physical conditions and plant roots [J]. Soil Science, 1990, 45(5): 89.

[17] 张益望, 刘文兆, 王俊, 等. 轮作及不同施肥措施对春玉米生长、产量及水分利用的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30

- (2):124-128. (Zhang Y W, Liu W Z, Wang J, et al. Effects of long-term rotation and fertilization on the growth, yield and water use of spring maize[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2):124-128. )
- [18] 周岚, 姜英, 陈阜, 等. 玉米-大豆轮作及氮肥水平对玉米农艺性状及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 61-67. (Zhou L, Jiang Y, Chen F, et al. Effect of soybean-maize rotation and fertilization on the agronomic trait and grain yield of maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(6):61-67. )
- [19] 王幸, 王宗标, 齐玉军, 等. 保护性耕作研究与应用进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(5): 3-7. (Wang X, Wang Z B, Qi Y J, et al. Progress in research and application of conservation tillage[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(5): 3-7. )
- [20] 黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 不同耕作方式对旱作区冬小麦生产和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009(1): 50-54. (Huang M, Wu J Z, Li Y J, et al. Effects of different tillage management on production and yield of winter wheat in dry land[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1):50-54. )
- [21] 谷思玉, 朱玉伟, 郭兴军, 等. 不同耕作方式下黑土物理性状及其对玉米苗期生长的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(4): 226-231. (Gu S Y, Zhu Y W, Guo X J, et al. Effects of different tillage ways on seedling growth of maize and soil physical properties in mollisol region[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(4): 226-231. )
- [22] Chen Y, Liu S, Li H. Effects of conservation tillage on corn and soybean yield in the humid continental climate region of Northeast China[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 115(5):56-61.
- [23] 郭新荣. 土壤深松技术的应用研究[J]. 山西农业大学学报, 2005, 25(1):74-77. (Guo X R. Application study on technique of the soil deep loosening[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2005, 25(1):74-77. )
- [24] 盖志佳, 吴嘉彧, 张敬涛, 等. 大豆玉米持续轮作免耕对土壤养分及作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(5): 100-106. (Dai Z J, Wu J Y, Zhang J T, et al. Effects of continuous rotation and no-till of soybean-corn on soil nutrients and crop yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(5): 100-106. )
- [25] Johan A, Ararso E, Tomas R. Crop yield in Swedish experiments with shallow tillage and no-tillage 1983-2012[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 307-315.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. (Lu R K. Analytic technique of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2000. )
- [27] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [28] Lu X L, Lu X N, Cui Y, et al. Tillage and crop straw methods affect energy use efficiency, economics and greenhouse gas emissions in rainfed winter wheat field of Loess Plateau in China[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2018, 68(6):562-574.
- [29] Zhou K Q, Sui Y, Liu X B, et al. Crop rotation with 9-year continuous cattle manure addition restores farmland productivity of artificially eroded Mollisols in northeast China[J]. Field Crops Research, 2015, 171: 138-145.
- [30] 黄丽芬, 庄恒扬, 刘世平, 等. 长期少免耕对稻麦产量与土壤肥力的影响[J]. 扬州大学学报, 1999(11):48-52. (Huang L F, Zhuang H Y, Liu S P, et al. Effect of long-term minimal and no tillages on rice and wheat yields and soil fertility[J]. Journal of Yangzhou University Natural Science Edition, 1999(11):48-52. )
- [31] 王秋菊, 刘峰, 焦峰, 等. 深耕对黑土水分特征及动态变化影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 942-948. (Wang Q J, Liu F, Jiao F, et al. Effect of deep tillage on water characteristics in black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(4): 942-948. )
- [32] 张含彬, 任万军, 杨文钰. 氮肥处理下套作大豆根系建成与产量关系的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2007, 2: 46-49. (Zhang H B, Ren W J, Yang W Y, et al. Relationship between root characteristics and yield formation in relay-planting soybean under the nitrogen application[J]. China Soil and Fertilizer, 2007, 2: 46-49. )
- [33] 刘莹, 肖付明, 张孟臣. 冀南地区不同产量类型夏大豆根系空间分布变化[J]. 大豆科学, 2010, 29(1): 46-49. (Liu Y, Xiao F M, Zhang M C, et al. Root traits spatial distribution of different yield level summer soybean in the south of Heibei province[J]. Soybean Science, 2010, 29(1): 46-49. )
- [34] 郭小红, 王兴才, 孟田, 等. 中美大豆Ⅲ熟期组代表品种根系形态和活力的比较研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3821-3833. (Guo X H, Wang X C, Meng T, et al. Comparison of root morphological and activity of representative soybean cultivars (MG III) developed in the USA and China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(19):3821-3833. )
- [35] 曲成闯, 陈效民, 韩召强, 等. 生物有机肥对潮土物理性状及微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 70-76. (Qu C C, Chen X M, Han Z Q, et al. Effects of bioorganic fertilizer application on soil physical properties and microbial biomass carbon and nitrogen in fluvoaquic soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 70-76. )
- [36] Kandeler E, Palli S, Stemmer M, et al. Tillage changes microbial biomass and enzyme activities in particle-size fractions of ahaplic chorizema[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1999, 31: 1253-1264.
- [37] 周东兴, 李磊, 李晶, 等. 玉米/大豆轮作下不同施肥处理对土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1856-1864. (Zhou D X, Li L, Li J, et al. Effects of different fertilization treatments on soil microbial biomass and enzyme activities in maize-soybean rotation system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1856-1864. )
- [38] Gu Y F, Zhang X P, Tu S H, et al. Soil microbial biomass, crop yields, and bacterial community structure as affected by long-term fertilizer treatments under wheat-rice cropping[J]. European Journal of Soil Biology, 2009, 45(3): 239-246.
- [39] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 281-296. (Ju X T, Gu B J. Indexes of nitrogen management[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(2): 281-296. )
- [40] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1445-1451. (Zang Y F, Hao M D, Zhang L Q, et al. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5):1445-1451. )