



# 黑龙江省不同大豆品种根系分布特征及与产量的关系

周 行<sup>1</sup>, 龚 岫<sup>1</sup>, 郑殿峰<sup>1,2</sup>, 冯乃杰<sup>1</sup>, 齐德强<sup>1</sup>, 赵海东<sup>1</sup>, 梁晓燕<sup>1</sup>, 李 冰<sup>1</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江八一农垦大学 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江 大庆 163319)

**摘 要:**为明确黑龙江省大豆根系的分布特征以及大豆根系与产量的关系,本研究以黑龙江省主栽大豆品种合丰 55 和嫩丰 18 为材料,采用水平分层和垂直分段两种不同的栽培装置,对两个大豆品种的根表面积、根干物质、根比表面积、根系伤流量、产量和产量构成因素进行了分析和比较。结果表明:大豆根系的 80.6% 存在于垂直 0 ~ 20 cm 土层内,55.6% 存在于水平 0 ~ 5 cm 土层内。大豆的根系伤流重量分布范围是 0.5 ~ 6.4 g,比表面积分布范围是 17.6 ~ 67.9 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>。合丰 55 和嫩丰 18 的单株荚数与其单株产量分别呈显著正相关(0.710<sup>\*</sup>)和极显著正相关(0.908<sup>\*\*</sup>)。在 R5 期,大豆在垂直 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层内的根表面积分别与单株产量呈显著负相关(-0.794<sup>\*</sup>)和显著正相关(0.837<sup>\*</sup>),在垂直 120 ~ 140 cm 土层内的根干重与单株产量呈极显著正相关(0.904<sup>\*\*</sup>)。大豆产量的提高主要依靠单株荚数的增加来实现;提高 R5 期垂直 20 ~ 40 cm 土层内的根表面积和垂直 120 ~ 140 cm 土层内的根干重、降低 R5 期垂直 0 ~ 20 cm 土层内的根表面积,对提高大豆产量具有重要意义。

**关键词:**大豆;根表面积;根干物质;比表面积;产量

## Root Distribution Characteristics of Different Soybean Varieties in Heilongjiang Province and the Relationship with Yield

ZHOU Hang<sup>1</sup>, GONG Shen<sup>1</sup>, ZHENG Dian-feng<sup>1,2</sup>, FENG Nai-jie<sup>1</sup>, QI De-qiang<sup>1</sup>, ZHAO Hai-dong<sup>1</sup>, LIANG Xiao-yan<sup>1</sup>, LI Bing<sup>1</sup>

(1. Agronomy College of Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. National Coarse Cereals Engineering Research Center, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

**Abstract:** Root system is an important organ that determines crop yield. It is of great significance to define root distribution characteristics in guiding agricultural production and cultivating new crop varieties. In order to clarify the distribution characteristics of soybean roots and the relationship between soybean roots and yield in Heilongjiang province, this study used Hefeng 55 and Nenfeng 18, main soybean varieties of Heilongjiang province, as experimental materials, which used two different cultivation devices: Horizontal device and vertical device in 2015 at the Lindian County Test Base in Daqing city, Heilongjiang province with completely random block design. The root surface area, root dry weight, specific surface area, root bleeding sap weight, yield and yield components of two soybean varieties were analyzed and compared. The results showed that 80.6% of the soybean root was in the vertical 0-20 cm soil layer, and 55.6% was in the horizontal 0-5 cm soil layer. The distribution range of root bleeding sap weight of soybean was 0.5-6.4 g. The distribution range of specific surface area of soybean was 17.6-67.9 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>. The number pods per plant of Hefeng 55 and Nenfeng 18 were significantly (0.710<sup>\*</sup>) and highly significantly (0.908<sup>\*\*</sup>) positively correlated with yield, respectively. In R5, the root surface area of soybean in the vertical soil layer of 0-20 cm and 20-40 cm showed significant negative correlation (-0.794<sup>\*</sup>) and significant positive correlation (0.837<sup>\*</sup>) with the yield per plant, respectively; the root dry weight in the vertical soil layer of 120-140 cm was significantly positively correlated with the yield per plant (0.904<sup>\*\*</sup>). The increase of soybean yield mainly depended on the increase of the number pods per plant. It is of great significance to increase the root surface area in the vertical soil layer of 20-40 cm and the dry weight in the vertical soil layer of 120-140 cm and reduced the root surface area in the vertical soil layer of 0-20 cm for improving the soybean yield in R5. This study aims to provide theoretical reference for soybean breeding and water and fertilizer management in Heilongjiang province.

**Keywords:** Soybean; Root surface area; Root dry weight; Root surface area to weight ratio; Yield

根系是作物重要的营养器官,具有吸收养料和  
水分的生理功能,还可以起到支持并固定植株形态

的作用<sup>[1-3]</sup>,是作物产量的主要贡献者<sup>[4-5]</sup>。作物根  
系的分布特征是生育时期的一个基本属性<sup>[6]</sup>,黑龙

收稿日期:2018-12-30

基金项目:黑龙江省杰出青年基金项目(JC201309)。

第一作者简介:周行(1991-),男,硕士,主要从事绿豆和大豆化学调控研究。E-mail:18346662760@163.com。

通讯作者:郑殿峰(1969-),男,教授,博导,主要从事作物化控及大豆生理研究。E-mail:byndzdf@126.com。

江省不同大豆根系的分布特征是一个重要的科学问题。

根系的水平和垂直分布特征决定了可被利用的土壤体积的大小<sup>[7]</sup>,在一定程度上反映根系吸收能力的强弱<sup>[8]</sup>。比较不同品种间根系的分布特征可以明确根系分布差异,探索不同品种根系对土壤环境的适应性<sup>[9-10]</sup>。前人研究发现,一个更深、水平扩展更广的根系统可以增加根系吸收水分的能力和范围<sup>[11-12]</sup>。Liu 等<sup>[13]</sup>研究表明,豆科作物的根系主要集中在地表以下 0~60 cm 土层中。Hati 等<sup>[14]</sup>研究发现,随着土层深度的加深,大豆在花期的根干重密度大幅度减小。孙广玉等<sup>[15]</sup>研究了 R3 期的大豆根系,发现 85% 的根干重分布在水平 0~12.7 cm 土层,85% 的根系分布在垂直 0~10 cm 土层。金剑等<sup>[16]</sup>研究发现,高产大豆和低产大豆在 R5 期的根系分布有较大差异,高产大豆在 0~45 cm 土层的根长高于低产大豆。张志强等<sup>[17]</sup>研究发现,大豆结荚初期的根干重与产量在 0.05 水平上呈显著正相关,并将其作为判断大豆产量的重要指标。张含彬等<sup>[18]</sup>研究发现,R5 期大豆的根干重与产量呈显著正相关。杨光等<sup>[19]</sup>研究发现,超高产大豆在 R2 和 R5 期的根系伤流重量和根干重均极显著高于普通大豆,并与产量呈显著正相关。

本研究总结前人经验,通过采用水平分层和垂直分段两种不同的栽培装置,探究黑龙江省大豆根系分布特征、比较不同品种大豆根系分布差异和产量差异、分析大豆根系分布与产量的关系,为培育大豆新品种和农业生产过程中的水肥管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2015 年在黑龙江省大庆市林甸县宏伟

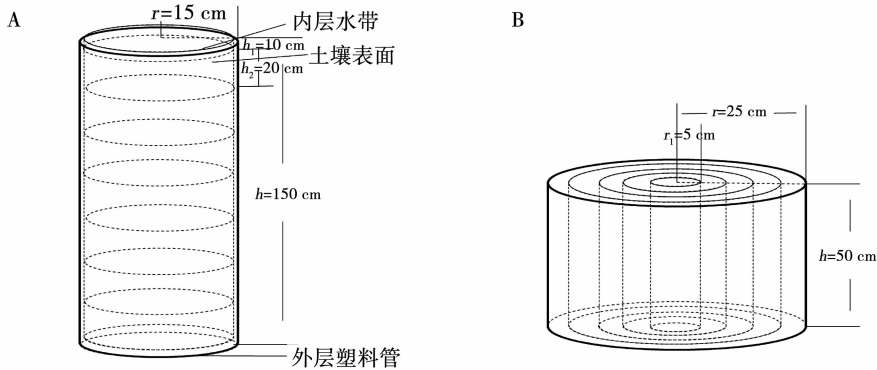
乡吉祥村黑龙江八一农垦大学试验基地(47°12′57.95″N,124°59′42.62″E)进行,土壤类型为草甸黑钙土,该地区气候属于温带大陆性季风气候,冬季寒冷,夏季多高温,雨热同季,年降雨量 508.7 mm,年均气温 5.60℃,有效积温 2 900~3 000℃,日照时数 1 158 h。试验土壤理化性状为:有效磷 13.69 mg·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 134 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 204 mg·kg<sup>-1</sup>,pH7.8,有机质 32.8 g·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

供试品种为黑龙江省主栽品种合丰 55(HF55)和嫩丰 18(NF18),由国家杂粮工程技术研究中心提供。合丰 55 分布于黑龙江省第二积温带,嫩丰 18 分布于黑龙江省第一积温带。播种前对大豆种子进行人工筛选,筛除破损、变质及发育不成熟的种子。

试验装置分为横向分层装置(H)和纵向分段装置两种(V)(图 1):横向分层装置为直径 50 cm,高 50 cm 的圆柱体铁桶,铁桶上下两面各用长 54 cm 的十字钢架固定,内部设有直径分别为 10,20,30,40 cm 的铁丝网,铁丝网之间距离为 5 cm,并用尼龙扎带固定在十字钢架上;纵向分段装置为直径 30 cm、高 150 cm 的圆柱体塑料桶,桶内附有直径 30 cm 的塑料水带,水带下端封口,并用剪刀在水带下端各剪 4 个圆孔。水带上端高出塑料桶 10 cm,并用钢钉将水带上端固定。

种前将土壤进行筛选,去除草根、树根等杂质,并将筛选后的土壤与沙子以 3:1 的比例混合均匀。反复灌注土壤并注水,使土壤紧实,直至灌满。每个试验装置种植 5 粒种子,苗期间苗,最终保留两株,每个处理设置 4 次重复,采用完全随机区组设计。



A:纵向分段装置;B:横向分层装置。

A: Vertical device; B: Horizontal device.

图 1 盆栽装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pot

1.3 测定项目与方法

1.3.1 株高、茎粗、伤流测定 分别在大豆 R2 期(盛花期)和 R5 期(灌浆初期)取样,每次横向分层装置与纵向分段装置各取 8 组。在取样前进行株高、茎粗和伤流量测定。伤流量的测定:用剪刀在子叶痕处将植株剪断,将内部含有脱脂棉的离心管套在子叶痕下部的茎上,并用塑料袋将离心管密封,防止外部水分进入离心管内,第 2 天早上将离心管收集并称重。

1.3.2 根系形态指标测定 横向分层装置以圆柱横截面中心为起点,分别获取水平方向 0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm 和 20~25 cm 土层的大豆根系;纵向分段装置以土壤表面为起点,分别获取垂直方向 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm、100~120 cm 和 120~140 cm 土层的大豆根系。将根系表面的土和杂质用清水去除,清洗干净后用吸水纸将根系表面的水分吸干,迅速装入密封袋中,置于冰箱中冷藏备用。将获得的大豆根系样品置于 28 cm×20 cm×2 cm 的玻璃水槽中,向水槽内注入 6~7 mm 深清水,使根系完全淹没,并用镊子将水槽中的根系完全展开。用扫描仪(Epson V700)对大豆根系进行扫描,所获得的图片利用软件 WinRhizoPro-2014a 分析获得根表面积指标。扫描处理后的根系置于 75 ℃烘箱中

烘干至恒重,并通过分析天平测定根干重。获得根表面积和根干重后分析其在时间和空间上的分布特征。

1.3.3 产量及其构成因素测定 于大豆 R8 期(完熟期)进行产量及产量构成因素的测定。将每个栽培装置中的两棵大豆的产量及产量构成因素求平均值,分别获得相应大豆品种的单荚粒数、百粒重、单株荚数和单株产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 Origin 2017 软件进行试验数据处理及绘图,利用 SPSS 22.0 软件对数据进行方差分析和相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同大豆品种株高、茎粗及伤流量变化

由表 1 可知,在水平装置中,嫩丰 18 在 R2 期和 R5 期的伤流量分别比合丰 55 高 5.6% 和 64.1%,R5 期差异达到显著水平;在垂直装置中,嫩丰 18 在 R2 期和 R5 期的伤流量分别比合丰 55 高 66.7% 和 71.4%,差异均达到显著水平。从 R2 期到 R5 期,合丰 55 的株高变化范围是 56.5~76.1 cm,茎粗变化范围为 9.1~12.7 mm;嫩丰 18 的株高变化范围是 55.4~79.6 cm,茎粗变化范围是 9.4~13.6 mm。

表 1 不同大豆品种在 R2 和 R5 期株高、茎粗及伤流量变化

Table 1 Plant height, stem diameter and root bleeding sap weight changes of different soybeans in R2 and R5 stages					
设备 Devices	生育时期 Growth stages	品种 Varieties	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	伤流量 BSW /g
水平装置 Horizontal device	R2	合丰 55	56.6±1.5 a	9.1±0.4 a	3.6±1.0 a
		嫩丰 18	55.4±1.4 a	9.5±0.4 a	3.8±1.1 a
	R5	合丰 55	72.8±1.2 a	9.8±0.4 a	3.9±0.5 a
		嫩丰 18	72.1±1.9 a	9.4±0.4 a	6.4±0.3 b
垂直装置 Vertical device	R2	合丰 55	59.1±2.2 a	11.4±0.4 a	1.8±0.5 a
		嫩丰 18	59.6±2.3 a	10.7±0.4 a	3.0±0.6 a
	R5	合丰 55	76.1±1.0 a	12.7±0.6 a	0.5±0.03 a
		嫩丰 18	79.6±3.2 a	13.6±0.5 a	1.2±0.7 a

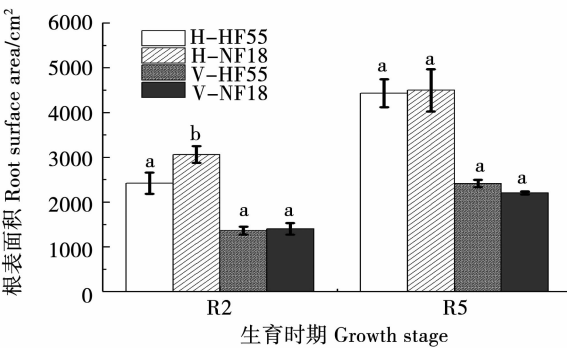
不同字母表示  $P\leq 0.05$  水平差异显著。下同。  
Different lowercase indicates there is significant difference at  $P\leq 0.05$  level. The same below.

2.2 不同大豆品种根表面积

2.2.1 根系总表面积变化 由图 2 可知,嫩丰 18 在 R2 期水平装置中的根表面积比合丰 55 高

26.5%,达到显著水平,而 2 个大豆品种在垂直装置中的根表面积无显著差异。在 R5 期,嫩丰 18 在水平装置中根表面积略大于合丰 55,而合丰 55 在垂

直装置中的根表面积略大于嫩丰 18。合丰 55 在 R2 和 R5 期的根表面积分布范围是1 363.9 ~4 430.3 cm<sup>2</sup>,嫩丰 18 的根表面积分布范围是1 400.3 ~4 497.1 cm<sup>2</sup>。2 个大豆品种在 R5 期的根表面积均高于 R2 期。



H-HF55: 水平装置中的合丰 55; H-NF18: 水平装置中的嫩丰 18; V-HF55: 垂直装置中的合丰 55; V-NF18: 垂直装置中的嫩丰 18。  
H-HF55: Hefeng 55 in horizontal device; H-NF18: Nenfeng 18 in horizontal device; V-HF55: Hefeng 55 in vertical device; V-NF18: Nenfeng 18 in vertical device.

图 2 不同大豆品种在 R2 和 R5 期的总根表面积变化

Fig. 2 Total root surface area changes of different soybeans in R2 and R5 stages

2.2.2 根系表面积密度垂直空间分布 由图 3 可知,大豆根系在垂直 0~20 cm 土层中的根系表面积密度最大,随着土层不断加深,根系表面积密度呈下降趋势。在 R2 期,合丰 55 和嫩丰 18 在 0~20 cm 土层中的根表面积分别占据总根表面积的 54.7% 和 43.3%;合丰 55 在 0~20 cm 土层中根表面积密度比嫩丰 18 高 23.5%,达到显著水平。在 R5 期,

合丰 55 和嫩丰 18 在 0~20 cm 土层中的根表面积分别占据总根表面积的 49.2% 和 72.5%;嫩丰 18 在 0~20 cm 土层中的根表面积密度比合丰 55 高 34.9%,达到显著水平;而合丰 55 在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层中的根表面积密度分别比嫩丰 18 高 213.6% 和 202.5%,均达到显著水平。

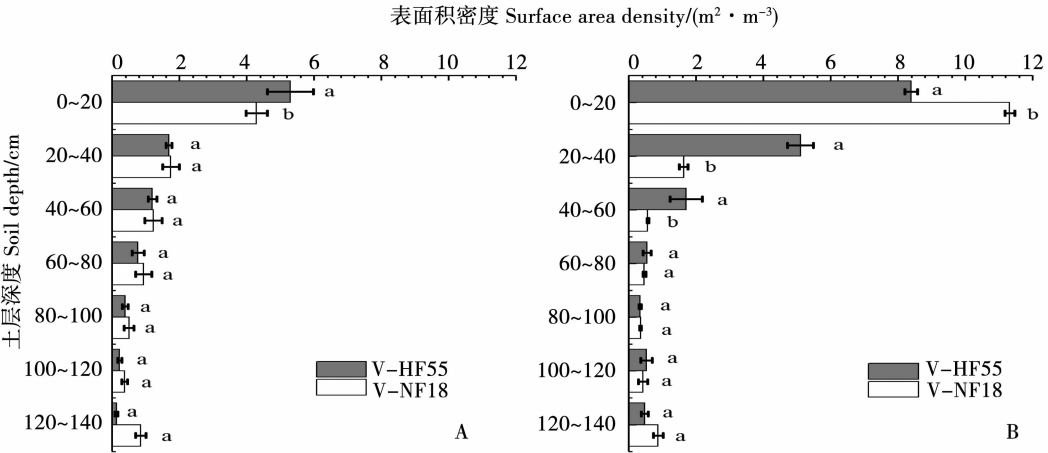


图 3 不同大豆品种在 R2 (A) 和 R5 (B) 期的根表面密度垂直空间分布变化  
Fig. 3 Changes in vertical distribution of root surface area density of different soybeans in R2 (A) and R5 (B) stages

2.2.3 根系表面积密度水平空间分布 由图 4 可知,两个大豆品种在水平 0~5 cm 土层的根表面积密度最大,20~25 cm 土层最小。在 R2 期,合丰 55 在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层的根表面积密度分别比嫩丰 18 高 42.1% 和 7.4%,在 0~5 cm 土层达到显著水平;嫩丰 18 在 10~15 cm、15~20 cm 和 20~25 cm 土层的根表面积密度均大于合丰 55,分别比

合丰 55 高 25.4%、55.5% 和 64.3%。在 R5 期,嫩丰 18 在 0~5 cm、15~20cm 和 20~25 cm 土层中的根表面积密度均大于合丰 55,分别比合丰 55 高 4.2%、4.7% 和 26.1%;而合丰 55 在 5~10 cm 和 10~15 cm 土层中的根表面积密度分别比嫩丰 18 高 11.8% 和 58.8%。

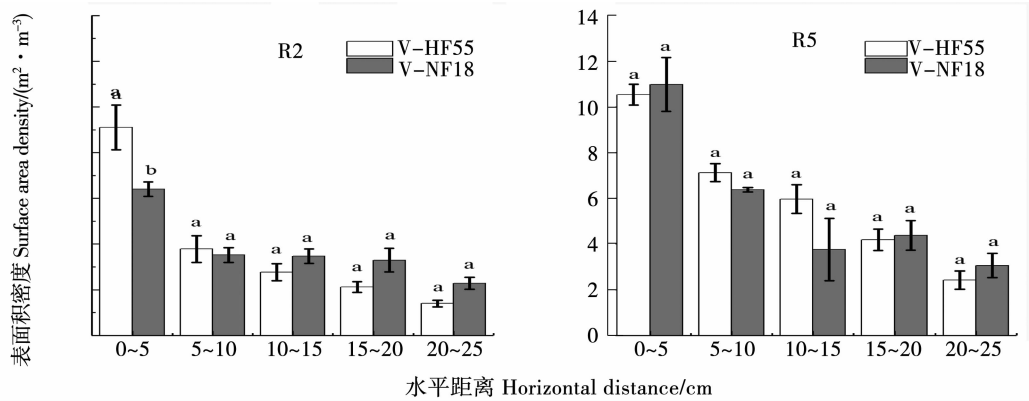


图4 不同大豆品种在 R2 和 R5 期根表面密度水平空间分布变化  
Fig. 4 Changes in horizontal distribution of root surface area density of different soybeans in R2 and R5 stages

2.3 不同大豆品种根干重

2.3.1 总根干重变化 由图5可知,两个大豆品种在 R2 期的根干重无显著差异,而嫩丰 18 在 R5 期垂直装置中的根干重比合丰 55 高 19.1%,达到显著水平。合丰 55 的根干重变化范围为 4.5 ~ 10.6 g,嫩丰 18 的根干重范围为 4.2 ~ 12.6 g。

2.3.2 根干重密度垂直空间变化 由图6可知,两个大豆品种在垂直 0 ~ 20 cm 土层的根干重密度均大于其它土层。在 R2 期,合丰 55 在 0 ~ 20 cm 土层中的根干重密度比嫩丰 18 高 14.5%,达到显著水平;合丰 55 和嫩丰 18 在 0 ~ 20 cm 土层中的根干重分别占总根系干重的 80.5% 和 78.7%。在 R5 期,合丰 55 在 0 ~ 20 cm 土层中的根系干重密度比嫩丰 18 高 20.4%,达到显著水平;合丰 55 和嫩丰 18 在 R5 期 0 ~ 20 cm 土层中的根系干重分别占总根系干

重的 80.6% 和 79.7%。在垂直 20 cm 以下的土层中,两个大豆品种的根干重密度无显著差异。

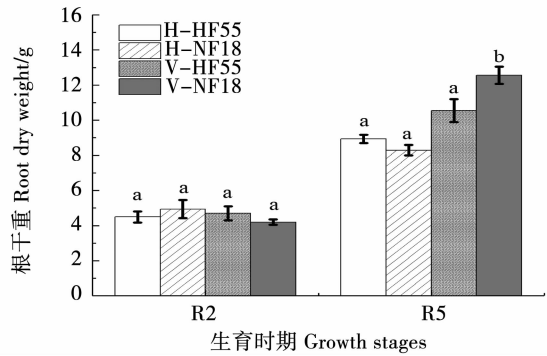


图5 不同大豆品种在 R2 和 R5 期的总根干重变化  
Fig. 5 Total root dry weight changes of different soybeans in R2 and R5 stages

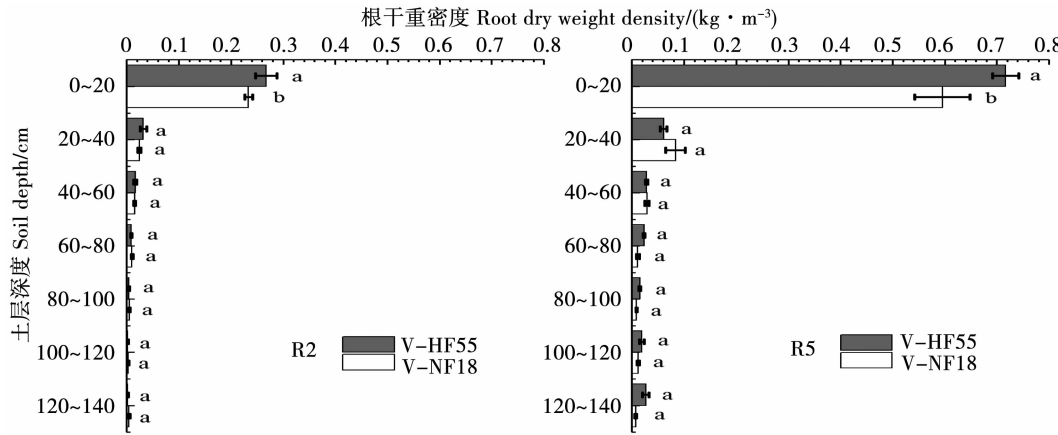


图6 不同大豆品种在 R2 和 R5 期的根干重密度垂直空间分布变化  
Fig. 6 Changes in vertical distribution of root dry weight density of different soybeans in R2 and R5 stages

2.3.3 根干重密度水平空间变化 由图 7 可知,两个大豆品种在 0~5 cm 土层中的根干重密度均大于其它土层。随着与主根距离的增加,各土层中的根干重密度逐渐减小。在 R2 期,合丰 55 和嫩丰 18 在 0~5 cm 土层中的根干重分别占总根系干重的 55.6% 和 49.2%;合丰 55 在 0~5 cm 土层内的根干重密度略大于嫩丰 18,而在 5~10 cm,10~15 cm,

15~20 cm 和 20~25 cm 土层内,嫩丰 18 的根干重密度均大于合丰 55。在 R5 期,合丰 55 和嫩丰 18 在 0~5 cm 土层中的根干重分别占总根系干重的 47.8% 和 42.1%。合丰 55 在 0~5 cm 土层内的根干重密度比嫩丰 18 高 22.3%,达到显著水平,两个大豆品种在其它土层中的根干重密度无显著差异。

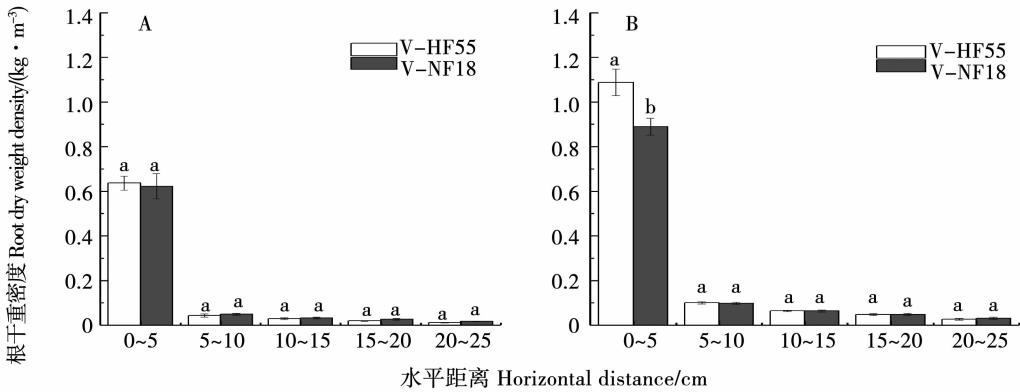


图 7 不同大豆品种在 R2(A) 和 R5(B) 期的根干重密度水平空间分布变化

Fig. 7 Changes in horizontal distribution of root dry weight density of different soybeans in R2 (A) and R5 (B) stages

2.4 不同大豆品种根系比表面积变化

由图 8 可知,两个大豆品种在 R2 期的比表面积均高于 R5 期。在 R2 期,嫩丰 18 在水平装置和垂直装置中的比表面积分别比合丰 55 高 21.5% 和 10.6%,未达显著水平。在 R5 期,嫩丰 18 在水平装置中的比表面积比合丰 55 高 8.5%,合丰 55 在垂直装置中的比表面积比嫩丰 18 高 31.5%。合丰 55 的比表面积分布范围是 23.1~55.9 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>,嫩丰 18 的比表面积分布范围是 17.6~67.9 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>。

2.5 产量及产量构成因素

有表 2 可知,嫩丰 18 在水平装置和垂直装置中的单株荚数分别比合丰 55 高 11.9% 和 25.8%,在垂直装置达到了显著水平;单荚粒数分别比合丰 55 高 22.7% 和 35.0%,均达显著水平;单株产量分别比合丰 55 高 15.6% 和 43.6%,在垂直装置达到显著水平。合丰 55 在水平装置和垂直装置中的百粒重分别比嫩丰 18 高 20.2% 和 17.7%,均达到显著水平。

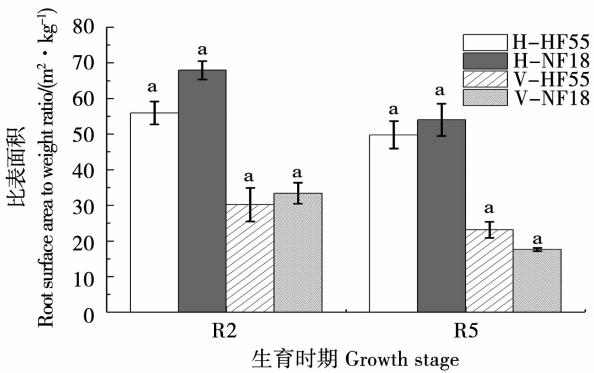


图 8 不同大豆品种在 R2 和 R5 期的比表面积变化

Fig. 8 Root surface area to weight ratio changes of different soybeans in R2 and R5 stages

表 2 不同大豆品种在 R2 和 R5 产量和产量构成因素

Table 2 Yield and yield component factors of different soybeans at R2 and R5 growth stage

设备 Device	品种 Variety	单株荚数 Number of pods per plant	单荚粒数 Number of seeds per pod	百粒重 100-seed weight/g	单株产量 Yield per plant/g
水平装置 Horizontal device	合丰 55	54.4 ± 5.8 a	2.2 ± 0.08 a	24.4 ± 0.9 a	27.5 ± 1.3 a
	嫩丰 18	60.9 ± 6.4 a	2.7 ± 0.1 b	20.3 ± 1.3 b	31.8 ± 2.6 a
垂直装置 Vertical device	合丰 55	73.0 ± 13.0 a	2.0 ± 0.07 a	23.3 ± 0.9 a	33.5 ± 2.2 a
	嫩丰 18	91.8 ± 5.9 b	2.7 ± 0.07 b	19.8 ± 0.3 b	48.1 ± 3.2 b

2.6 产量与产量构成因素相关分析

由表 3 可知,合丰 55 的单荚粒数与单株荚数呈显著负相关,单株产量和单株荚数呈显著正相关,百粒重与单荚粒数和单株产量呈不显著正相关;嫩丰 18 单株产量和单株荚数呈极显著正相关,与单荚粒数和百粒重呈不显著正相关。

表 3 产量及其构成因素的相关性分析

Table 3 Correlation coefficient of yield and its components

因素 Yield component	单株荚数 Number of pods per plant	单荚粒数 Number of seeds per pod	百粒重 100-seed weight/g	单株产量 Yield per plant/g
单株荚数 Number of pods per plant		0.244	-0.039	0.908 **
单荚粒数 Number of seeds per pod	-0.718 *		0.417	0.537
百粒重 100-seed weight/g	-0.225	0.548		0.27
单株产量 Yield per plant/g	0.710 *	-0.097	0.252	

右上角为嫩丰 18 相关系数,左下角为合丰 55 相关系数; \* 在 0.01 水平上显著相关, \* 在 0.05 水平上显著相关。下同。

The upper right corner are correlation coefficient of Nenfeng 18, the lower left corner are correlation coefficient of Hefeng 55; \*\* Significant at 0.01 level, \* Significant at 0.05 level. The same below.

2.7 产量与不同土层根系指标相关分析

由表 4 可知,在 R2 期,水平 0 ~ 15 cm 各土层内根干重与单株产量呈不显著负相关,15 ~ 25 cm 各土层内根干重与单株产量呈不显著正相关;水平 0 ~ 5 cm 土层内根表面积与单株产量呈不显著正相关,其余土层内根表面积与单株产量均呈不显著负相关。

表 4 大豆产量与不同水平土层根系参数在 R2 和 R5 期相关性分析

Table 4 Correlation coefficient of yield and root dry weight and root surface area in different horizontal soil layer in R2 and R5 stages

生育时期 Growth stage	根系指标 Root indicator	水平距离 Horizontal distance/cm				
		0 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25
R2	根干重 Root dry weight	-0.212	-0.124	-0.113	0.038	0.427
	根表面积 Root surface area	0.316	-0.386	-0.482	-0.403	-0.538
R5	根干重 Root dry weight	-0.498	-0.475	-0.692	-0.127	0.102
	根表面积 Root surface area	0.026	-0.024	0.066	0.429	0.135

由表 5 可知,在 R2 期,垂直 0 ~ 60 cm 各土层内的根干重与单株产量呈不显著负相关,垂直 60 ~ 140 cm 各土层内的根干重与单株产量呈不显著正相关;垂直 0 ~ 40 cm 各土层内的根表面积与单株产量呈不显著正相关,40 ~ 140 cm 各土层内的根表面积与单株产量呈不显著负相关。在 R5 期,大豆在

垂直 0 ~ 20 cm 土层内的根表面积与单株产量呈显著负相关( -0. 794 \* ),而 20 ~ 40 cm 土层与单株产量呈显著正相关(0. 837 \* );大豆在 120 ~ 140 cm 土层内的根干重与单株产量呈极显著正相关(0. 904 \* \* )。

表 5 大豆产量与不同垂直土层根系参数在 R2 和 R5 期相关性分析  
Table 5 Correlation coefficient of yield and root dry weight and root surface area in different vertical soil layer in R2 and R5 stages

生育时期 Growth stages	根系指标 Root indicator	土层深度 Soil depth/cm						
		0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	100 ~ 120	120 ~ 140
R2	根干重 Root dry weight	-0. 492	-0. 368	-0. 416	0. 52	0. 248	0. 409	0. 548
	根表面积 Root surface area	0. 591	0. 073	-0. 286	-0. 024	-0. 368	-0. 586	-0. 698
R5	根干重 Root dry weight	0. 18	-0. 414	-0. 15	0. 685	0. 664	0. 563	0. 904 * *
	根表面积 Root surface area	-0. 794 *	0. 837 *	0. 524	-0. 269	-0. 54	0. 299	-0. 429

3 讨 论

作物根系伤流量是根系生理活动强弱的重要指标<sup>[20-21]</sup>。本研究发现,嫩丰 18 在 R2 期和 R5 期的根系伤流重量均大于合丰 55,这说明嫩丰 18 在 R2 期和 R5 期的根系活力和代谢运输能力均强于合丰 55。

根表面积是作物根系主要的形态指标之一<sup>[22]</sup>,豆科作物的根表面积可以作为抗逆性筛选和鉴定的重要指标<sup>[23]</sup>,它的大小对通过扩散作用运输到根系的养分的吸收具有重要影响<sup>[24]</sup>。本研究发现大豆在 R5 期的根表面积高于 R2 期,这与龚岫等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。大豆根表面积密度垂直空间分布表明,0 ~ 20 cm 土层的根系表面积密度最大,占据总根表面积的 43. 3% ~ 72. 5%,这与林蔚刚等<sup>[26]</sup>和 Mitchell 等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。在不同的生长时期,上层土壤中的大豆根系表面积占总根表面积的比例发生变化,合丰 55 在 R2 期 0 ~ 20 cm 土层中的根表面积占总根表面积的 54. 7%,而在 R5 期则下降到 49. 2%;与此相反,嫩丰 18 在 R2 期 0 ~ 20 cm 土层中的根表面积占总根表面积的 43. 3%,而在 R5 期提高到 72. 5%,这表明合丰 55 深层土壤中的根表面积所占比例在 R5 期减小,而嫩丰 18 深层土壤中的根表面积所占比例在 R5 期却大幅提高。大豆根表面积密度水平空间分布表明,大豆的根表面

积在水平 0 ~ 5 cm 土层中最密集,在水平 20 ~ 25 cm 的土层中密集程度最小;在 R2 和 R5 生育时期中,嫩丰 18 在水平 5 ~ 10 cm、15 ~ 20 cm 和 20 ~ 25 cm 土层中的根表面积比合丰 55 优势更大。

根干重是反映根系的生长状况的重要指标<sup>[28]</sup>,根干重密度可以反映根系的扩展与分布<sup>[29]</sup>。本研究中,大豆根系干物质在 R2 期后不断积累,R5 期的根干重均大于 R2 期,这与张伟等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。大豆根系干重密度垂直空间分布表明,0 ~ 20 cm 土层中的根系干重所占比例最大,占据总干重的 78. 7% ~ 80. 6%,这与傅金民等<sup>[31]</sup>研究结果一致。从 R2 期到 R5 期,各土层中根表面积所占总干重的比例基本一致。大豆在水平 0 ~ 5 cm 土层中的根系干重密度最大,随着与主根距离的增加,干重密度呈递减趋势。在 R2 期,嫩丰 18 在距离主茎水平 5 ~ 25 cm 土层内的干物质含量均大于合丰 55,这说明嫩丰 18 在该土层内根系的生长能力强于合丰 55。

较高的比表面积表明作物拥有更细的根系统或较低的比密度<sup>[32]</sup>。两个大豆品种根系在 R5 期的比表面积均大于 R2 期,这表明大豆在 R2 期的根系统比在 R5 期更细,随着大豆不断生长,R2 期后的根系不断加粗。与合丰 55 相比,嫩丰 18 的根系在 R2 期的拥有更大的比表面积,从生根的角度来看,嫩丰 18 在 R2 期的抗旱能力可能强于合丰 55。



作物根系与产量的相关性、作物产量构成因素与产量的相关性是作物高产育种过程中的重要参照手段<sup>[33-35]</sup>。本研究结果显示,大豆单株荚数与产量呈显著正相关;在R5期,大豆在垂直120~140 cm土层中的根干重与产量呈极显著正相关,在垂直0~20 cm和20~40 cm土层中的根表面积分别与产量呈显著负相关和显著正相关。这表明这些指标是大豆最重要的产量贡献因素,对提高大豆产量具有重要意义。

## 4 结 论

大豆根系在水平0~5 cm土层和垂直0~20 cm土层内的密度最大,大约80.6%的大豆根系存在于垂直0~20 cm土层内,55.6%的根系存在于水平0~5 cm土层内。

基于根系的分布特征,嫩丰18拥有较大的比表面积和深层根系的比例,可能比合丰55更适合在水分匮乏的环境中生长,并且具有更高的根系活力。

在大豆高产育种中,可以增加大豆单株荚数、提高大豆R5期垂直120~140 cm土层中的根干重和垂直20~40 cm土层中的根表面积、降低大豆R5期垂直0~20 cm土层中的根表面积,以达到增加产量的目的。

## 参考文献

- [1] 杨秀红,吴宗璞,张国栋. 大豆根系的研究[J]. 东北农业大学学报, 2002, 33(2): 203-208. (Yang X H, Wu Z P, Zhang G D. Study on soybean root system[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2002, 33(2): 203-208.)
- [2] Kiba T, Kudo T, Kojima M, et al. Hormonal control of nitrogen acquisition: Roles of auxin, abscisic acid, and cytokinin[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(4): 1399-1409.
- [3] 徐国伟,王贺正,翟志华,等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 132-141. (Xu G W, Wang H Z, Zhai Z H, et al. Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 132-141.)
- [4] 王法宏,王旭清,刘素英,等. 根系分布与作物产量的关系研究进展[J]. 山东农业科学, 1997(4): 48-51. (Wang F H, Wang X Q, Liu S Y, et al. Research progress on relationship between root distribution and crop yield[J]. Shandong Agricultural Sciences, 1997(4): 48-51.)
- [5] 王法宏,赵君实. 作物根系的研究进展[J]. 莱阳农学院学报, 1991(3): 198-201. (Wang F H, Zhao J S. Research progress on crop roots[J]. Journal of Laiyang Agricultural College, 1991(3): 198-201.)
- [6] Berntson G M. Modelling root architecture: Are there tradeoffs between efficiency and potential of resource acquisition? [J]. New Phytologist, 1994, 127(3): 483-493.
- [7] Pearson C J, Jacobs B C. Root distribution in space and time in *Trifolium subterraneum*[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1985, 36(4): 601-614.
- [8] Gahoonia T S, Nielsen N E. Barley genotypes with long root hairs sustain high grain yields in low-P field[J]. Plant and Soil, 2004, 262(1-2): 55-62.
- [9] Fageria N K. Influence of dry matter and length of roots on growth of five field crops at varying soil zinc and copper levels[J]. Journal of Plant Nutrition, 2005, 27(9): 1517-1523.
- [10] Gan Y, Campbell C A, Liu L, et al. Water use and distribution profile under pulse and oilseed crops in semiarid northern high latitude areas[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(2): 337-348.
- [11] Passioura J B. Soil structure and plant growth[J]. Australian Journal of Soil Research, 1991, 29(6): 717-728.
- [12] Kirkegaard J A, Lilley J M, Howe G N, et al. Impact of subsoil water use on wheat yield[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2007, 58(4): 303-315.
- [13] Liu L, Gan Y, Bueckert R, et al. Rooting systems of oilseed and pulse crops. II: Vertical distribution patterns across the soil profile [J]. Field Crops Research, 2011, 122(3): 248-255.
- [14] Hati K M, Mandal K G, Misra A K, et al. Effect of inorganic fertilizer and farmyard manure on soil physical properties, root distribution, and water-use efficiency of soybean in Vertisols of central India[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(16): 2182-2188.
- [15] 孙广玉,张荣华. 大豆根系在土层中分布特点的研究[J]. 中国油料作物学报, 2002, 24(1): 45-47. (Zhang G Y, Zhang R H. Soybean root distributions in meadow-blackland and albic-soil [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2002, 24(1): 45-47.)
- [16] 金剑,王光华,刘晓冰,等. 东北黑土区高产大豆R5期根系分布特征[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(3): 266-271. (Jin J, Wang G H, Liu X B, et al. Characteristics of root distribution at R5 stage in high yielding soybean in black soil[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(3): 266-271.)
- [17] 张志强,严红,王帆. 硼处理下大豆根系性状与产量关系的研究[J]. 大豆科学, 2007, 26(1): 111-114. (Zhang Z Q, Yan H, Wang F. Relationship between root character and yield of soybean under the condition of boron[J]. Soybean Science, 2007, 26(1): 111-114.)
- [18] 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. Study on the relationship between root establishment and yield of soybean intercropping under nitrogenous fertilizer[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007(2): 46-49.)
- [19] 杨光,张惠君,宋书宏,等. 超高产大豆根系相关性状的比较研究[J]. 大豆科学, 2013, 32(2): 176-181. (Yang G, Zhang H J, Song S H, et al. Comparison on some root related traits of super-high-yielding soybean[J]. Soybean Science, 2013, 32(2):

176-181.)

[20] 常江, 张自立, 郜红建, 等. 外源稀土对水稻伤流组分的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2004, 10(5):522-525. (Chang J, Zhang Z L, Gao H J, et al. Effect of rare earth on composition of bleeding sap of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(5): 522-525.)

[21] 梁建生, 曹显祖. 杂交水稻叶片的若干生理指标与根系伤流强度关系[J]. 江苏农学院学报, 1993, 14(4):25-30. (Liang J S, Cao X Z. Studys on the relationship between several physiological characteristics of leaf and bleeding rate of roots in hybrid rice (*O. Sativa*, L) [J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1993, 14(4):25-30.)

[22] Vamerali T, Saccomani M, Bona S, et al. A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two maize hybrids[J]. Plant and Soil, 2003, 255(1):157-167.

[23] 蒲伟凤, 李桂兰, 张敏, 等. 干旱胁迫对野生和栽培大豆根系特征及生理指标的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(4):615-622. (Pu W F, Li G L, Zhang M, et al. Effects of drought stress on root characteristics and physiological indexes of *Glycine soja* and *Glycine max*[J]. Soybean Science, 2010, 29(4):615-622.)

[24] 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.)

[25] 龚龢, 张盼盼, 冯乃杰, 等. 不同结荚习性大豆品种根系的时空分布特征[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(4):431-442. (Gong S, Zhang P P, Feng N J, et al. Root spatial and temporal distribution characteristics of soybean cultivars with different growth habits[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2016, 38(4):431-442.)

[26] 林蔚刚, 吴俊江, 董德健, 等. 不同秸秆还田模式对大豆根系分布的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(4): 584-588. (Lin W G, Wu J J, Dong D J, et al. Impact of different residue retention system on soybean root distribution in soil profile [J]. Soybean Science, 2012, 31(4): 584-588.)

[27] Mitchell R L, Russell W J. Root development and rooting patterns of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] evaluated under field conditions[J]. Agronomy Journal, 1971, 63(2):313-316.

[28] 张瑞富, 杨恒山, 高聚林, 等. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5):78-84. (Zhang R F, Yang H S, Gao J L, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5):78-84.)

[29] Adiku S G K, Ozier-Lafontaine H, Bajazet T. Patterns of root growth and water uptake of a maize-cowpea mixture grown under greenhouse conditions[J]. Plant and Soil, 2001, 235(1):85-94.

[30] 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 Q, et al, Relationship between root morphological characters and yield of hybrid soybeans[J]. Soybean Science, 2014, 33(3): 347-352.)

[31] 傅金民, 董钻. 大豆根系生长及其与产量的关系[J]. 大豆科学, 1987, 6(4):261-271. (Fu J M, Dong Z. Relationship between soybean root growth and yield[J]. Soybean Science, 1987, 6(4):261-271.)

[32] Benjamin J G, Nielsen D C. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea [J]. Field Crops Research, 2006, 97(2-3):248-253.

[33] Ehdaie B, Layne A P, Waines J G. Root system plasticity to drought influences grain yield in bread wheat [J]. Euphytica, 2012, 186: 219-232.

[34] Kashiwagi J, Krishnamurthy L, Crouch J H, et al. Variability of root length density and its contributions to seed yield in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under terminal drought stress [J]. Field Crops Research, 2006, 95: 171-181.

[35] Tabasum A, Saleem M, Aziz I. Genetic variability, trait association and path analysis of yield and yield components in mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek][J]. Pakistan Journal of Botany, 2010, 42: 3915-3924.