

杂交大豆根系形态生理特性与产量的关系

张伟, 邱强, 赵婧, 王曙明, 张伟龙, 闫晓艳, 赵丽梅, 张鸣浩, 张春宝

(吉林省农业科学院大豆研究所/大豆国家工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要:以2个杂交大豆品种(杂交豆1号和杂交豆2号)以及同熟期组的2个常规品种(吉育72和吉林30)为试材,于2010~2011年通过盆栽和大田试验,分析不同时期品种根系发育形态、活力以及产量的差异。结果表明:杂交大豆比常规品种2年平均增产15.3%,分枝粒重显著增加;杂交大豆R2~R7期根系干重和体积显著增加,二者均在R5期有最大增幅;R2、R5和R7期杂交大豆平均主根长、一级侧根数和一级侧根总长较常规大豆增幅均达13%以上,并在R2期增幅最大;R2~R4期根瘤干重、根冠比及R2~R5期杂交大豆根系活力均显著增加;大田条件下,30~75 cm土层杂交大豆根系干重显著增加。生殖生长期杂交大豆根系主根长、一级侧根数、一级侧根总长、根瘤干重、根系活力及深层次根系重量的强优势,保障强大的根系生物积累,为杂交大豆高产奠定了基础。

关键词:杂交大豆;高产;根系形态;根系生理

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

DOI:10.11861/j.issn.1000-9841.2014.03.0347

Relationship between Root Morphological Characters and Yield of Hybrid Soybeans

ZHANG Wei, QIU Qiang, ZHAO Jing, WANG Shu-ming, ZHANG Wei-long, YAN Xiao-yan, ZHAO Li-mei, ZHANG Ming-hao, ZHANG Chun-bao

(Soybean Research Institute, Jinlin Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Research Center of Soybean, Changchun 130033, China)

Abstract: Two soybean hybrids (HybSoy-1 and HybSoy-2), and two conventional cultivars (CV) with the same maturity (Jiyu 72 and Jilin 30) were planted in pot and field experiments during 2010-2011, the differences in root morphological development and root activity at various growth stages were analyzed. Compared with CV, the average yield of soybean hybrids in two years enhanced by 15.3% due to the significant increment of seed weight on the branches. Root dry weight and root volume of soybean hybrids increased significantly at R2-R7 and maximized at R5. At R2, R5 and R7 stage, the increment of average taproot length, primary lateral root number and its overall length of soybean hybrids were all higher than 13%, and maximized at R5. Nodule dry weight and root to shoot ratio from R2 to R4, as well as root activity from R2 to R5 of soybean hybrids were all significantly increased. In field trials, root dry weight in 30-75 cm soil layer of soybean hybrids increased significantly. Therefore, these significant advantages of soybean hybrids at reproductive growth stage, such as taproot length, number of primary lateral roots, overall length of primary roots, dry weight of root nodule, root activity and root weight in deep soil layer, guaranteed the powerful biological accumulation of root, and laid the base for high yield of soybean hybrids.

Key words: Soybean hybrid; High yield; Root morphology; Root physiology

根系是作物干物质生产的基础,作物根系的发育动态、分布和活性与地上部的生长发育、植株形态、叶片光合特性及产量形成密切相关^[1-5]。作物根系明显的基因型差异是根系选择育种的依据^[6]。关于大豆根系特性与产量关系的研究表明,随着年代更替,大豆品种的根重、根体积、根表面积、侧根长度^[7]、根瘤干重、数量^[8]及根系活力^[9]均显著增加。高产类型大豆根冠比高,根干重在0~30 cm和较深的土层(>30 cm)均有较多分布^[10]。

大豆杂交种的应用显著提高了大豆产量^[11-12],吉林省审定的杂交大豆品种杂交豆1号和杂交豆2号比区试对照平均增产15%以上^[13-14]。但对杂交

大豆高产根系特征知之甚少。本研究以2个杂交大豆品种和同熟期组区域试验对照品种为试材,分析杂交大豆根系形态及活力的动态变化,揭示杂交大豆高产的根系特征。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2010~2011年在吉林省农业科学院公主岭试验基地进行。选择生育期相近(134 d左右),均为亚有限结荚习性的2个杂交大豆品种(杂交豆1号和杂交豆2号)和2个常规品种(吉育72和吉林30)为材料。分为大田试验和盆栽试验两部分。

收稿日期:2013-07-06

基金项目:国家自然科学基金(31101111);国家高技术研究发展计划“863计划”(2011AA10A105);吉林省自然科学基金(201115198);吉林省科技发展计划(20111817);吉林省现代农业产业技术体系(201208)。

第一作者简介:张伟(1979-),男,博士,副研究员,主要从事大豆栽培生理研究。E-mail:zw.0431@163.com。

通讯作者:闫晓艳(1960-),女,研究员,主要从事大豆栽培研究。E-mail:yanxy8548@163.com。

赵丽梅(1964-),女,研究员,主要从事大豆杂种优势利用研究。E-mail:l_mzhao@126.com.cn。

大田试验:土壤类型为薄层黑土,耕层土壤 pH 7.0,有机质 $28.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,氨态氮 $3.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,硝态氮 $2.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $45.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $136.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。小区为 6 行区,行长 5 m,行距 60 cm,密度 20 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$,小区按随机区组排列,3 次重复,5 月 1 日播种,10 月 5 日收获,正常田间管理。

盆栽试验:盆栽供试土壤为大田试验地块 0~25 cm 的土壤,采用 30 cm \times 30 cm 的大盆,随机排列,每盆保苗 2 株,每个品种种植 20 盆。2010 年分别于盛花期(R2)、盛荚期(R4)、满粒期(R6)、始熟期(R7)取样;2011 年分别于盛花期(R2)、始荚期(R3)、始粒期(R5)、始熟期(R7)取样,每品种每次取 3 盆。取样时,在子叶节处将植株剪断,分为根、冠两部分,然后用水充分浸泡盆土,将土坨轻轻倒出,用流水慢慢冲洗,洗净根上所有附泥,对根系性状进行测定。

1.2 大田试验根系指标测定

1.2.1 根系伤流量 2011 年,分别在 R2、R5 和 R7 期随机选择植株 3 株,在子叶节处切断主茎,将洁净的乳胶管套在根基部茎秆上,收集 12 h 内的伤流量,用量筒测量伤流液的体积。

1.2.2 不同层次根系干重 2011 年,于 R5 期采用钻土法对根系进行取样,每个小区取 3 点,应用 Eijkelkamp 根钻(钻头直径 8.0 cm,长度 15.0 cm)于垄间距离植株 30 cm 处,原位钻取 0~15 cm、15~30 cm、30~45 cm、45~60 cm 和 60~75 cm 土壤深度的根系样品。将土体用水浸泡 12 h,然后用流水缓缓将根系冲洗干净,再在 75 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重后称得干重。

1.3 盆栽试验根系指标测定

1.3.1 根体积 采用排水法测定。在量筒内预先

装入一定体积的水,记下水面刻度 A;将洗净的样品根系完全浸入量筒内,水面升到另一刻度 B,B、A 刻度值之差即为根体积值。

1.3.2 根长 2011 年采用直接测定法。将洗净的根系展开放试验台上,用镊子轻轻拉直根系,使彼此不重叠,用卷尺分别测得主根长度和上部最长侧根长度、下部最长侧根长度,下部最短侧根长度(下胚轴上发生的侧根为上部侧根和主根上发生的侧根为下部侧根)。侧根长度 = (最长侧根长度 + 最短侧根长度) / 2 \times 侧根条数 \times 0.618 (经验公式)^[15]。

1.3.3 根干重 将根系样品在烘箱中于 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘 2 h,然后于 75 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重。

1.3.4 根系活力 2010 年,分别在 R2、R5 和 R7 期取大豆根系,采用 α -萘胺氧化还原法测定根系活力。

1.3.5 根瘤干重 2010 年取得根系,用镊子将根瘤与根系分开,将根瘤在烘箱中于 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘 2 h,然后于 75 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重后称得干重。

1.4 数据分析

所有数据采用 Excel 2010 和 DPS 11.0 进行分析和处理。

2 结果与分析

2.1 产量特性

不同大豆品种产量及其相关性状见表 1。两年试验结果的趋势一致,2 个杂交大豆品种均显著高于常规品种,2010 和 2011 年杂交大豆品种平均产量比常规品种分别增产 16.7% 和 13.9%。从产量相关性状看,杂交大豆主茎粒重和百粒重与常规品种差异不显著,分枝粒重显著增加。

表 1 不同品种产量及产量相关性状

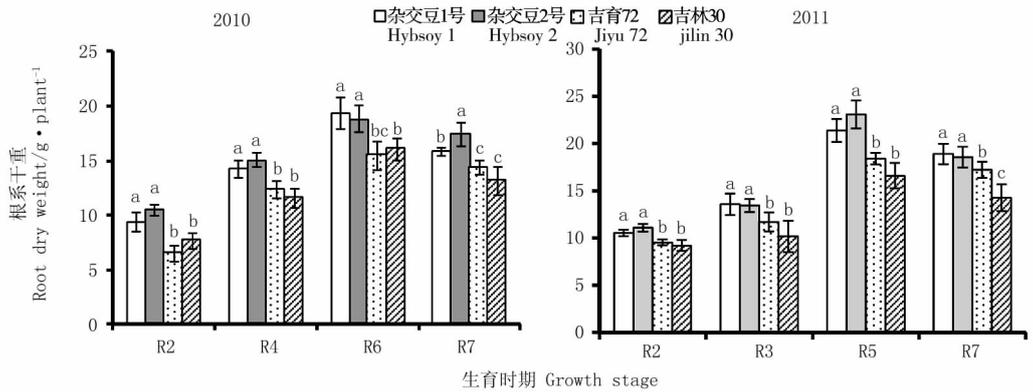
Table 1 The yield and its contributing traits of different soybean varieties

年份 Year	品种 Cultivar	主茎粒重 Seed weight of main stem/g	分枝粒重 Seed weight of branches/g	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield/kg $\cdot \text{hm}^{-2}$
2010	杂交豆 1 号 Hybsoy 1	22.9 \pm 0.46 ab	2.42 \pm 0.26 a	17.10 \pm 0.26 ab	3083.8 \pm 124.7 a
	杂交豆 2 号 Hybsoy 2	23.5 \pm 0.60 a	3.00 \pm 0.69 a	16.30 \pm 0.80 b	3160.2 \pm 80.7 a
	吉育 72 Jiyu 72	21.6 \pm 0.41 b	0.20 \pm 0.34 b	17.90 \pm 0.20 a	2685.7 \pm 103.7 b
	吉林 30 Jilin 30	22.4 \pm 0.45 ab	1.23 \pm 0.43 b	16.90 \pm 0.91 ab	2795.9 \pm 51.0 b
2011	杂交豆 1 号 Hybsoy 1	18.9 \pm 1.23 ab	3.82 \pm 0.64 a	17.13 \pm 0.70 b	2926.8 \pm 123.7 a
	杂交豆 2 号 Hybsoy 2	20.2 \pm 0.83 a	4.21 \pm 0.85 a	17.03 \pm 0.37 b	3022.3 \pm 148.5 a
	吉育 72 Jiyu 72	17.4 \pm 0.46 c	0.89 \pm 0.24 b	18.13 \pm 0.45 a	2546.4 \pm 156.1 b
	吉林 30 Jilin 30	17.9 \pm 0.63 bc	0.41 \pm 0.07 b	16.90 \pm 0.19 b	2554.7 \pm 94.2 b

2.2 根系干重和体积

健壮的根系是大豆高产的基础,根重和体积在一定程度上能够反映根系的生长状况。由图 1 和图 2 可知,杂交大豆在 R2 ~ R7 期的根系干重和体积显

著高于常规大豆品种,2011 年,R5 期杂交大豆的平均根系干重和体积最大,分别比常规品种增加 27.1% 和 27.5%。说明杂交大豆的根系在整个生殖生长期均有较高的干物质积累。



图中不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

Bars superscribed by different lowercase letters are significantly different at $P < 0.05$. The same below.

图 1 不同时期不同品种根系干重

Fig. 1 Root dry weight of each soybean cultivar at different growth stages

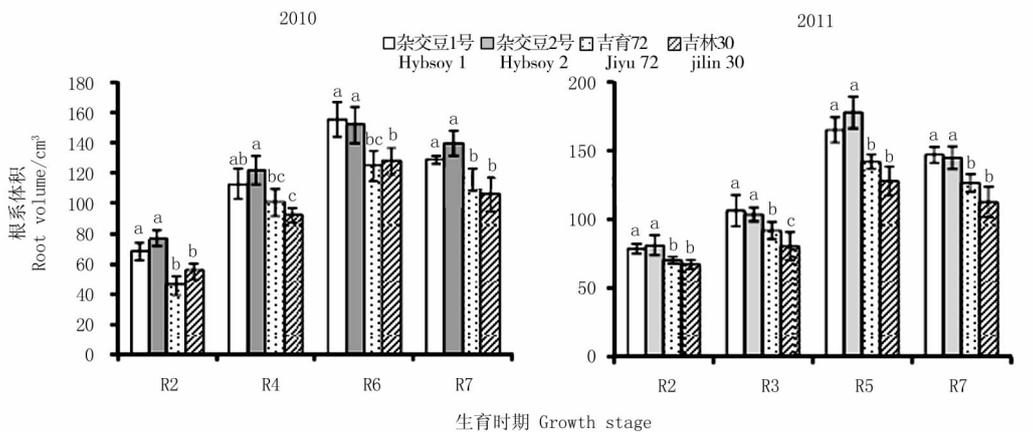


图 2 不同时期不同品种根系体积

Fig. 2 Root volume of each cultivar at different growth stages

2.3 根系形态

由表 2 可知,各品种主根长、一级侧根数及一级侧根总长最大值均出现在 R5 期。在 R2、R5 和 R7 期,与常规大豆相比,杂交大豆平均主根长分别增加 28.5%、13.0% 和 25.9%;平均一级侧根数分别

增加 29.9%、24.0% 和 25.7%;平均一级侧根总长分别增加 42.1%、28.4% 和 33.2%。不同时期杂交大豆 3 个性状平均值与常规大豆差异均达显著水平,并且 R2 期优势高于 R5 和 R7 期,说明杂交大豆生殖生长前期的优势更显著。

表 2 2011 年不同时期不同品种根系形态特性

Table 2 Root morphology of each soybean cultivar at different growth stages in 2011

性状 Trait	品种 Cultivar	R2	R5	R7
主根长 Root length/cm	杂交豆 1 号 Hybsoy 1	46.7 ± 4.2 a	74.0 ± 2.6 a	57.0 ± 2.6 a
	杂交豆 2 号 Hybsoy 2	42.0 ± 2.6 ab	71.0 ± 3.6 a	58.0 ± 3.6 a
	吉育 72 Jiyu 72	35.0 ± 4.5 b	67.3 ± 3.5 ab	46.7 ± 4.1 b
	吉林 30 Jilin 30	34.2 ± 4.0 b	61.0 ± 4.5 b	44.7 ± 5.1 b

续表 2

性状 Trait	品种 Cultivar	R2	R5	R7
一级侧根数 Number of primary lateral root	杂交豆1号 Hybsoy 1	48.6 ± 3.8 a	64.0 ± 4.0 ab	51.3 ± 3.0 a
	杂交豆2号 Hybsoy 2	52.7 ± 5.0 a	65.0 ± 5.0 a	53.0 ± 5.6 a
	吉育72 Jiyu 72	37.7 ± 2.5 b	55.7 ± 2.5 bc	40.0 ± 3.0 b
	吉林30 Jilin 30	40.3 ± 2.5 b	48.3 ± 3.5 c	43.0 ± 3.6 b
一级侧根总长 Overall length of primary lateral root/cm	杂交豆1号 Hybsoy 1	760.5 ± 57.6 a	1551.4 ± 55.3 a	972.4 ± 30.7 a
	杂交豆2号 Hybsoy 2	801.8 ± 50.1 a	1631.7 ± 113.8 a	1098.9 ± 102.3 a
	吉育72 Jiyu 72	535.5 ± 50.0 b	1327.3 ± 105.9 b	738.7 ± 79.0 b
	吉林30 Jilin 30	563.8 ± 37.3 b	1151.9 ± 92.5 b	816.7 ± 56.1 b

2.4 根瘤干重

由图3可知,各品种的根瘤干重均在R4期达最大值,然后呈下降趋势。杂交大豆品种R2和R4期单株根瘤平均干重分别达1.13和1.77g,显著高于常规大豆,R6期以后杂交大豆与常规大豆差异不显著。

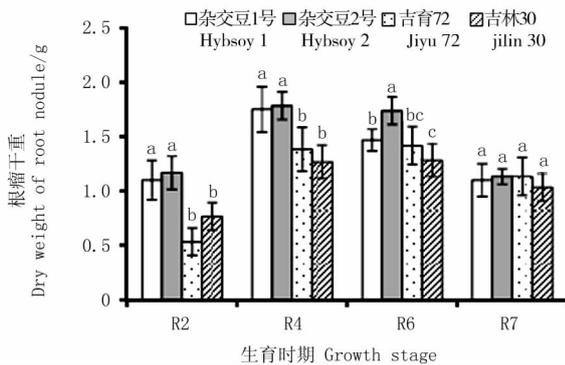


图3 不同时期不同品种根瘤干重

Fig.3 Dry weight of root nodules of each soybean cultivar at different growth stages

2.5 R5期不同层次根系干重

大田条件下R5期不同层次根系干重见图4,各品种根系干重随着深度增加而降低。其中杂交大豆2号各层次根系均显著高于常规品种,杂交豆1号30~75cm土层根系干重显著高于常规大豆。说明杂交大豆深层土壤的根量显著增加。

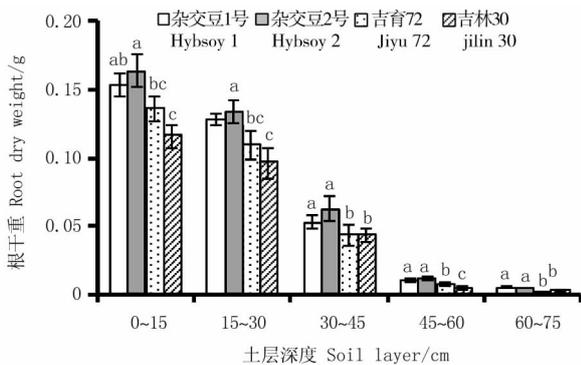


图4 R5期不同大豆品种各土层根系干重

Fig.4 Root dry weight in different soil layers of each cultivar at R5 stage

2.6 根冠比

大豆根冠比反映了根系与地上部干物质积累的协调情况。各品种根冠比均随生育进程推进而减小。杂交大豆R2~R4期根冠比显著高于常规品种,R6期以后与常规大豆差异不显著(图5)。

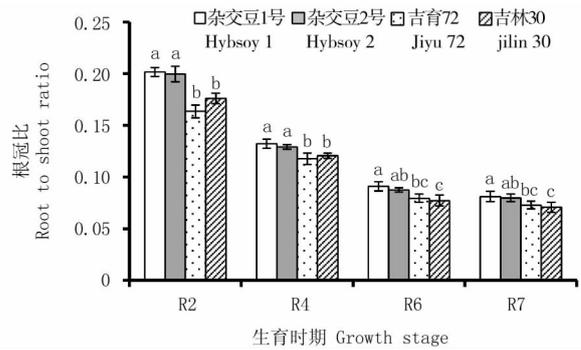


图5 2010年不同时期不同品种根冠比

Fig.5 The root to shoot ratio of each cultivar at different growth stages

2.7 根系活力

于2010年盆栽试验中测定了R2、R5和R7期的根系活力(图6),并于2011年大田试验中测定了对应时期的根系伤流液(图7)。根系伤流液的多少与根系活力密切相关,因此伤流液可作为衡量根系活力的指标。由图6和图7可以看出,根系活力总体上表现为先升高后下降的趋势,并于R5期达最

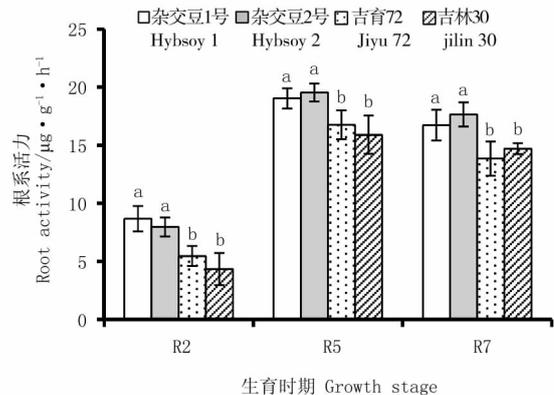


图6 2010年不同生育时期不同大豆品种的根系活力

Fig.6 Root activity of each soybean cultivar at different growth stages in 2010

大值;R2~R7 期杂交大豆根系活力均显著高于常规品种。说明杂交大豆在整个生殖生长期均维持较高的根系活性。

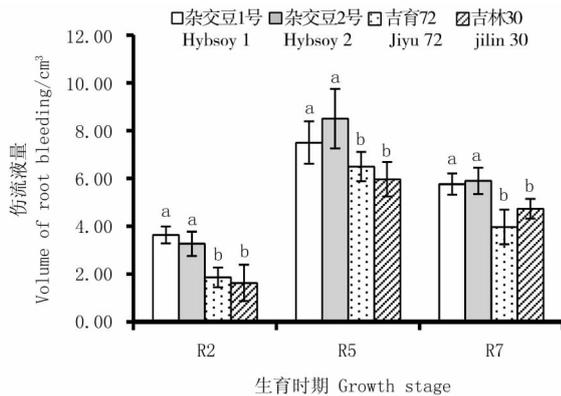


图 7 2011 年不同生育时期不同大豆品种根系伤流液
Fig. 7 Volume of root bleeding sap in each soybean cultivar at different growth stages in 2010

3 讨 论

3.1 根系形态及分布

强大的根系会促进地上部的光合作用^[16],从而增加干物质积累,获得较高产量^[17-19]。根系的形态与植物养分吸收密切相关^[20],根系所占据土壤空间大小和分布状况在很大程度上影响其所获得有限资源的多少^[21-22],其中根长是反映根系吸收能力的量化指标^[23]。相关研究表明高产作物具有较高的根冠比,并且根系纵向、侧向分布广,侧根总长度大^[24]。对玉米和水稻根系分布特征的研究表明,高产品种深层土壤的根重显著增加^[25-26]。本研究中杂交大豆生殖生长期根系干重和体积显著增加;R2~R4期杂交大豆根冠比也显著高于常规品种。说明杂交大豆根系发育、空间分布具有显著优势。深层土壤根系比率的增加,有利于大豆吸收深层土壤的水分和养分。

3.2 根瘤发育特征

大豆吸收积累的氮素约有一半来源于根瘤固氮,另一半来自土壤和肥料^[27-29]。根瘤固氮在满足大豆对氮素营养需求及提高产量方面都起着重要作用^[30]。相关研究表明大豆的籽粒产量与根瘤体积和根瘤干重呈正相关^[31]。大豆育种工作者对产量的遗传改良导致了 R2 和 R4 期根瘤数量、鲜重、体积的显著增加^[8]。本研究表明,在 R2~R4 期,杂交大豆根瘤干重显著高于常规大豆。说明杂交大豆品种在根瘤旺盛生长时期具有显著优势。

3.3 根系活力

根系活力是衡量作物根系对养分吸收能力的重要指标,根系活力大,生理活性强,可使作物在生

育中后期仍维持较强的生理功能,延缓叶片衰老、保证籽粒灌浆充足^[25]。王空军等^[32]研究发现,随品种更替,高产玉米根系活力逐步增强。孙苗苗^[9]研究表明,大豆根系伤流液重量与功能叶片功能呈显著正相关。本研究表明,R2~R5 期盆栽条件下杂交大豆根系活力和大田条件下根系伤流液量均显著增加,整个生殖生长期杂交大豆根系均具有较高的活性。

4 结 论

杂交大豆生殖生长期根系干重、体积、主根长、一级侧根数、一级侧根总长、根瘤重及根系活力均表现出较高优势,深层次根系比例大,根系旺盛生长时期根冠比高。说明良好的根系形态和强大的根系活力是杂交大豆高产的基础。

参考文献

- [1] 赵全志, 乔江方, 刘辉, 等. 水稻根系与叶片光合特性的关系 [J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 1064-1068. (Zhao Q Z, Qiao J F, Liu H, et al. Relationship between root and leaf photosynthetic characteristic in rice [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(5): 1064-1068.)
- [2] Kan S Y, Morita S, Yamazaki K. Root growth and distribution in some Japonica-indica hybrid and Japonica type rice (*Oryza sativa*) cultivars under field conditions [J]. Japanese Journal of Crop Science, 1994, 63(1): 118-124.
- [3] 凌启鸿, 陆卫平, 蔡建中, 等. 水稻根系分布与叶角关系的研究初报 [J]. 作物学报, 1989, 15(2): 123-131. (Ling Q H, Lu W P, Cai J Z, et al. The relationship between root distribution and leaf angle in rice plant [J]. Acta Agronomica Sinica, 1989, 15(2): 123-131.)
- [4] 王彦荣, 华泽田, 陈温福, 等. 粳稻根系与叶片衰老的关系及其对籽粒灌浆结实的影响 [J]. 作物学报, 2003, 29(6): 892-898. (Wang Y R, Hua Z T, Chen W F, et al. Relation between root and leaf senescence and their effects on grain-filling in Japonica rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(6): 892-898.)
- [5] 刘桃菊, 戚昌翰, 唐建军. 水稻根系建成与产量及其构成关系的研究 [J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1416-1419. (Liu T J, Qi C H, Tang J J. Studies on relationship between the character parameters of root and yield formation in rice [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(11): 1416-1419.)
- [6] 唐文帮, 邓化冰, 肖应辉, 等. 两系杂交水稻 C 两优系列组合的高产根系特征 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2859-2868. (Tang W B, Deng H B, Xiao Y H, et al. Root characteristics of high-yield C Liangyou rice combinations of two-line hybrid rice [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(14): 2859-2868.)
- [7] 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. Correlations between characteristics of roots and those of aerial parts of soybean varieties [J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(1): 72-75.)

- [8] 姚琳,徐克章,张治安,等. 吉林省不同年代育成大豆品种根瘤数量鲜重和体积的变化[J]. 中国油料作物学报,2009,31(2):196-201. (Yao L,Xu K Z,Zhang Z A, et al. Nodule number fresh weight and volume of soybean cultivars over the years in Jilin province [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2009, 31 (2):196-201.)
- [9] 孙苗苗,邓宏中,徐克章,等. 不同年代大豆品种根系伤流液重量变化及其与叶片光合的关系[J]. 大豆科学,2011,30(5):796-799. (Sun M M, Deng H Z, Xu K Z, et al. Nodule number fresh weight and volume of soybean cultivars over the years in Jilin province [J]. Soybean Science, 2011, 30 (5):796-799.)
- [10] 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.)
- [11] 盖钧镒,胡蕴珠,马育华. 中美大豆品种间 F₁ 和 F₃ 杂种优势与配合方分析[J]. 大豆科学,1984,3(3):183-191. (Gai J Y, Hu Y Z, Ma Y H. Heterosis and combining ability performed in F₁ and F₃ hybrids between soybean cultivars from the PRC and US [J]. Soybean Science, 1984, 3 (3):183-191.)
- [12] 王志新,郭泰,齐宁,等. 大豆杂种优势高优势组合筛选及稳定性分析[J]. 中国农学通报,2001,17(2):27-29. (Wang Z X, Guo T, Qi N, et al. Selection of high-superiority cross combination for soybean heterosis and its stability analysis [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2001, 17 (2):27-29.)
- [13] 彭宝,赵丽梅,王曙明,等. 高产杂交大豆新品种杂交豆2号制种技术[J]. 大豆科技,2008(4):46-47. (Peng B, Zhao L M, Wang S M, et al. High production hybrid soybean new variety Hyb-Soy 2 and hybrid seed production technology [J]. Soybean Science & Technology, 2008 (4):46-47.)
- [14] 赵丽梅,孙寰,王曙明,等. 大豆杂交种杂交豆1号选育报告[J]. 中国油料作物学报,2004,26(3):15-17. (Zhao L M, Sun H, Wang S M, et al. Breeding of hybrid soybean HybSoy 1 [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2004, 26 (3):15-17.)
- [15] 任冬莲,陆贵和,刘学义. 大豆成苗期抗旱性与根系生长关系研究[J]. 中国油料,1993(1):37-39. (Ren D L, Lu G H, Liu X Y. Study on the relationship between tolerance to drought and growth of roots of soybean in seedling stage [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 1993 (1):37-39.)
- [16] 董钻. 盆栽条件下大豆冠根比研究初报[J]. 吉林农业科学,1982(4):22-26. (Dong Z. Study on root/shoot ratio during pot experiment [J]. Jilin Agricultural Science, 1982 (4):22-26.)
- [17] Koutroubas S D, Papakosta D K, Gagianas A A. The importance of early dry matter and nitrogen accumulation in soybean yield [J]. European Journal of Agronomy, 1998, 9:1-10.
- [18] Specht J E, Hume D J, Kumudini S V. Soybean yield potential-a genetic and physiological perspective [J]. Crop Science, 1999, 39:1560-1570.
- [19] Liu X B, Jin J, Herbert S J, et al. Yield components, dry matter, LAI and LAD of soybeans in northeast China [J]. Field Crop Research, 2005, 93:85-93.
- [20] 王庆仁,李继云,李振声. 高效利用土壤磷素的植物营养学研究[J]. 生态学报,1999,19(3):417-421. (Wang Q R, Li J Y, Li Z S. Studies on plant nutrition of efficient utility for soil phosphorus [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19 (3):417-421.)
- [21] Lynch J. Root architecture and plant productivity [J]. Plant Physiology, 1995, 109:7-13.
- [22] 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, 262:55-62.
- [23] 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.
- [24] Graham R D. Breeding for nutritional characteristics in cereals [J]. Advances in Plant Nutrition, 1984 (1):57-102.
- [25] 张玉芹,杨恒山,高聚林,等. 超高产春玉米的根系特征[J]. 作物学报,2011,37(4):735-743. (Zhang Y Q, Yang H S, Gao J L, et al. Root characteristics of super high-yield spring maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37 (4):735-743.)
- [26] Monita S, Suga T, Yamazaki K. The relationship between root length density and yield in rice plants [J]. Japanese Journal of Crop Science, 1988, 57:438-443.
- [27] Bergersen F J, Turner G L, Gault R R, et al. The natural abundance of ¹⁵N in an irrigated soybean crop and its use for calculation of nitrogen fixation [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1985, 36:411-423.
- [28] Unkovich M J, Pate J S. An appraisal of recent field measurements of symbiotic N₂ fixation by annual legume [J]. Field Crops Research, 2000, 65:211-228.
- [29] 龚振平,金喜军,马春梅,等. 春大豆对不同来源氮素吸收利用的研究[J]. 土壤通报,2010,41(5):1138-1141. (Gong Z P, Jin X J, Ma C M, et al. Study on the absorption and utilization of various source nitrogen by spring soybean [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41 (5):1138-1141.)
- [30] 宋海星,申斯乐,马淑英,等. 硝态氮和氨态氮对大豆根瘤固氮的影响[J]. 大豆科学,1997,16(4):283-287. (Song H X, Shen S L, Ma S Y, et al. Effect of NO₃⁻-N and NH₄⁺-N on the nitrogen fixation of soybean nodules [J]. Soybean Science, 1997, 16 (4):283-287.)
- [31] Breias N, Planchon C. Increasing soybean productivity through selection for nitrogen fixation [J]. Agronomy Journal, 1990, 82:1031-1034.
- [32] 王空军,董树亭,胡昌浩,等. 我国玉米品种更替过程中根系生理特性的演进 I 根系活性与 ATPase 活性的变化[J]. 作物学报,2002,28(2):285-289. (Wang K J, Dong S T, Hu C H, et al. The evolution of physiological characteristics of maize root during varieties replacing in China, 1950s to 1990s: I. Changes of root vigor & ATPase activity [J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28 (2):285-289.)