

不同年代大豆品种根系活力的变化及其与植株生物量的关系

董雅致, 徐克章, 崔喜艳, 季平, 陈展宇, 李大勇, 张治安*

吉林农业大学农学院, 长春130118

摘要: 为探索不同年代大豆品种根系活力的变化及其与植株各器官生物量和根系伤流液重量的关系。以吉林省1923~2009年间育成的27个大豆品种为材料进行田间试验, 在四叶期(V4), 盛花期(R2), 结荚盛期(R4)和鼓粒盛期(R6)测定根系活力、伤流液重量和植株各器官生物量。结果表明, 随生育期的推进, 植株器官生物量不断增加, 而根系活力和伤流液重量则呈单峰曲线变化, 在R4期达到最大。在R4期, 植株根系活力、根系伤流液重量和器官生物量与育成年代均呈显著或极显著正相关, 但在V4、R2和R6期均未达到显著水平。在R4期, 根系活力与根系伤流液重量、植物器官茎、叶和根生物量呈显著或极显著正相关; 各品种间地上部器官生物量与根系活力的比值差异不显著。大豆的遗传改良使地上部器官与根系活力协同演进, 在根系活力增强的同时植株器官生物量和根系伤流液重量也增加, 且在R4期, 根系活力与植物器官生物量和根系伤流液重量相关最为密切; 可以把R4期的根系活力作为高产育种的指标之一。

关键词: 大豆; 遗传改良; 根系活力; 伤流液重量; 器官生物量

Changes of Root Activity and Its Correlation with Plant Biomass of Soybean Cultivars Released in Different Years

DONG Ya-Zhi, XU Ke-Zhang, CUI Xi-Yan, JI Ping, CHEN Zhan-Yu, LI Da-Yong, ZHANG Zhi-An*

College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China

Abstract: In order to understand the changes of root activity (RA), and their correlation with organ biomass, root bleeding sap weight (BSW), during the genetic improvement of 27 soybean cultivars released in 1923 to 2009 were bred in Jilin province. The RA, BSW and organs biomass were studied at four-leaves stage (V4), flowering stage (R2), pod setting (R4) and seed filling stage (R6). With increasing growth period, plant organ biomass increased, while RA and BSW were observed unimodal curve changes and highest at R4 stage. Only in R4 stage, but no in V4, R2 and R6 period, RA, BSW, organ biomass and release year were exhibited significant or extremely significant positive correlation. In R4 stage, RA and BSW, stem, leaf and root biomass were displayed significant or extremely significant positive correlation. There were no significant differences in the ratio between aboveground organs biomass and RA. The RA, BSW and organs biomass were increased with genetic improvement of soybean. RA was closely related to organs biomass and BSW at R4 stage. Therefore, the RA was considered to be the important index in high-yield breeding at R4 stage.

Key words: soybean; genetic improvement; root activity; bleeding sap weight; biomass of organs

通过遗传改良使大豆产量每年以0.5%~1%的速度增长, 并且植株各项生理性状和抗倒伏能力明显增强(Kumudini等2001; Wilcox 2001; Liu等2005; Katsura等2007), 所以, 研究一定历史时期育成大豆品种生物性状的变化是非常必要的, 将有助于发现影响产量的重要因子(Specht等1999; Richards 2000; Ustun等2001)。虽然对大豆品种遗传改良过程中地上部农艺性状(丁雪丽等2006; 张伟等2010)、生物学性状(任海洋等2009; 毕影东2014)和生理特性变化(谢甫绋等2010; 刘鑫磊2014)进行了比较系统的研究。但是, 由于生长环境的复杂性和较大的

取样误差影响了根系研究的准确性和稳定性(Ryser 2006), 明显增加了根系研究的难度。根系是作物生长发育的基础器官、感受器官和控制中心, 许多生长发育的信息是通过根系传递到地上部分来调控作物生长发育进程的(Smith等2005; Wang等2009)。杨秀红等(2001)研究表明, 大豆品种根

收稿 2014-12-11 修定 2015-02-09

资助 国家自然科学基金(31171478)和吉林省自然科学基金(20140101143JC)。

* 通讯作者(E-mail: 1500986720@qq.com; Tel: 0431-84533061)。

系的演化向根重增加、根体积扩大、根表面积增加和侧根长度增长的方向发展,并与产量呈正相关;姚琳等(2009)研究发现大豆品种根系根瘤数量、根瘤体积、根瘤鲜重和干重与品种的育成年份呈正相关变化;作为研究根系活力最可靠方法和重要指标之一的伤流液重量也有较多研究(Dieleman等1998;段留生等2008;Guan等2014),孙苗苗等(2011)认为大豆的遗传改良导致了根系伤流液量的增加,根系伤流液重量可以作为净光合速率的一个参考指标。

但是,大豆品种遗传改良使地上部农艺性状和生理性状变化的同时,根系活力和根系生物量发生了哪些变化,根系活力的变化与植株各器官生物量和根系伤流液重量有何关系,目前尚未明确,本文以吉林省1923~2009年间育成的27个大豆品种为材料,研究了不同生育时期根系活力、伤流液重量和植株各器官生物量的变化及其相互关系,期望明确大豆品种遗传改良过程中根系活力的变化及其对植株生物量和根系伤流液重量的影响,从而为大豆高产栽培技术提供理论依据。

材料与方 法

1 试验材料

供试大豆[*Glycine max* (L.) Merr.]品种为吉林省于1923~2009年间育成的27个品种(表1)。其中‘长农13号’、‘长农16号’由长春市农业科学院选育,‘吉农7号’、‘吉农11号’、‘吉农15号’、‘吉农19号’和‘欧科豆25号’由吉林农业大学选育,其余参试大豆品种由吉林省农业科学院选育。

2 试验设计

试验在吉林农业大学试验田(43.53°N, 125.1°E)进行,试验地土壤为黑壤土,含有机质26.9 g·kg⁻¹、全氮1.645 g·kg⁻¹、全磷0.86 g·kg⁻¹、碱解氮0.12 g·kg⁻¹、速效磷16.1 mg·kg⁻¹、速效钾122 mg·kg⁻¹, pH为6.8。试验地区年生长季节为5~9月份,年平均降雨量为645 mm, ≥10 °C的积温为2 860 °C,年平均温度为4.6 °C,无霜期140 d左右。每个品种种植5行,行距0.65 m,行长5 m,种植密度为20万株·hm⁻²,随机区组设计,3次重复,各品种于苗期间苗,正常田间管理。

3 测定项目与方法

根系伤流液重量的测定:在大豆植株的四叶

表1 供试的27个大豆品种

Table 1 The list of 27 soybean cultivars

品种	育成年代	品种	育成年代
‘黄宝珠’	1923	‘吉林36号’	1996
‘满仓金’	1929	‘吉林38号’	1998
‘元宝金’	1929	‘吉农7号’	1999
‘金元1号’	1941	‘吉林45号’	2000
‘集体5号’	1956	‘吉林58号’	2001
‘吉林3号’	1963	‘长农13号’	2002
‘吉林1号’	1963	‘吉农11号’	2002
‘吉林5号’	1963	‘吉育66号’	2002
‘吉林6号’	1963	‘长农16号’	2003
‘吉林8号’	1971	‘吉农15号’	2004
‘吉林16号’	1978	‘吉农19号’	2006
‘吉林20号’	1984	‘吉育95号’	2008
‘吉林26号’	1991	‘欧科豆25号’	2009
‘吉林35号’	1995		

期(V4期)、盛花期(R2期)、结荚盛期(R4期)和鼓粒盛期(R6期)采取伤流液。选择晴朗天气的上午9:00~11:00时进行,先将脱脂棉、塑料袋和橡皮套称重,记为W1,将27个品种进行编号,选取长势较为一致的植株3株,在子叶节韧皮部处剪断,在根桩用脱脂棉收集木质部伤流液,立即用塑料袋密封脱脂棉,并用橡胶皮套将塑料袋扎紧包裹住,防止水分蒸发,2 h后即在根桩处取下脱脂棉带回实验室测定伤流液重量,记为W2。单株根系伤流液重量按以下公式计算:单株根系伤流液重量(g·h⁻¹)=(W2-W1)/2。

地上部植株生物量的测定:将上步试验后的地上部植株剪下立即放入由苯板制成低温保温箱中,带回实验室,分别测定叶片、叶柄、茎、荚的鲜重与干重。

根生物量的测定:采用系统挖掘法,在取走上部植株的部位挖30 cm×30 cm×30 cm的土方,直接在田间用水快速冲洗干净后,用滤纸吸干多余水分,立即放入由苯板制成低温保温箱中,带回实验室测定根的鲜重与干重。

根系活力的测定:采用TTC氧化还原法,称取根尖0.5 g,浸没在由0.4% TTC和磷酸缓冲液(pH 7.0)各5 mL的溶液内,在37 °C下暗保温2 h,此后加入1 mol·L⁻¹硫酸2 mL停止反应。将根放入研钵中,加乙酸乙酯3~4 mL充分研磨,将红色提取液移入刻度试管,用乙酸乙酯冲洗数次并定容至10 mL,用分光光度计在波长485 nm下比色,以空白试验

(将根先用硫酸处理)作参比测出吸光度,查标准曲线,即可求出TTC还原量(张治安和陈展宇2008)。

4 数据处理

采用Excel进行数据处理。应用DPS软件进行方差分析和差异显著性测验。

实验结果

1 大豆品种根系活力、根系伤流液重量和植株器官生物量随生育期的变化

将27个大豆按年代进行分类,1920~1980年代品种作为早期品种,1990~2000年代品种作为现代品种,对其根系活力、根系伤流液重量和植株器

官生物量随生育期的变化进行研究(图1)。结果表明,在4个生育时期内,早期品种和现代品种根系活力和伤流液重量随生育的变化趋势基本一致,均呈单峰曲线变化,由V4期开始不断增加,在R4期达到最大值,随后又有所下降,其中现代品种和早期品种根系活力R6期比R4期分别下降51%和58%,根系伤流液R6期比R4期分别下降32%和35%,可见根系活力下降率明显高于根系伤流液下降率。大豆品种的单株生物量、地上部生物量和根生物量均随生育时期的推进不断增加,除根生物量从R4期到R6期的增加较小外,其余指标在各生育期间均呈显著差异。

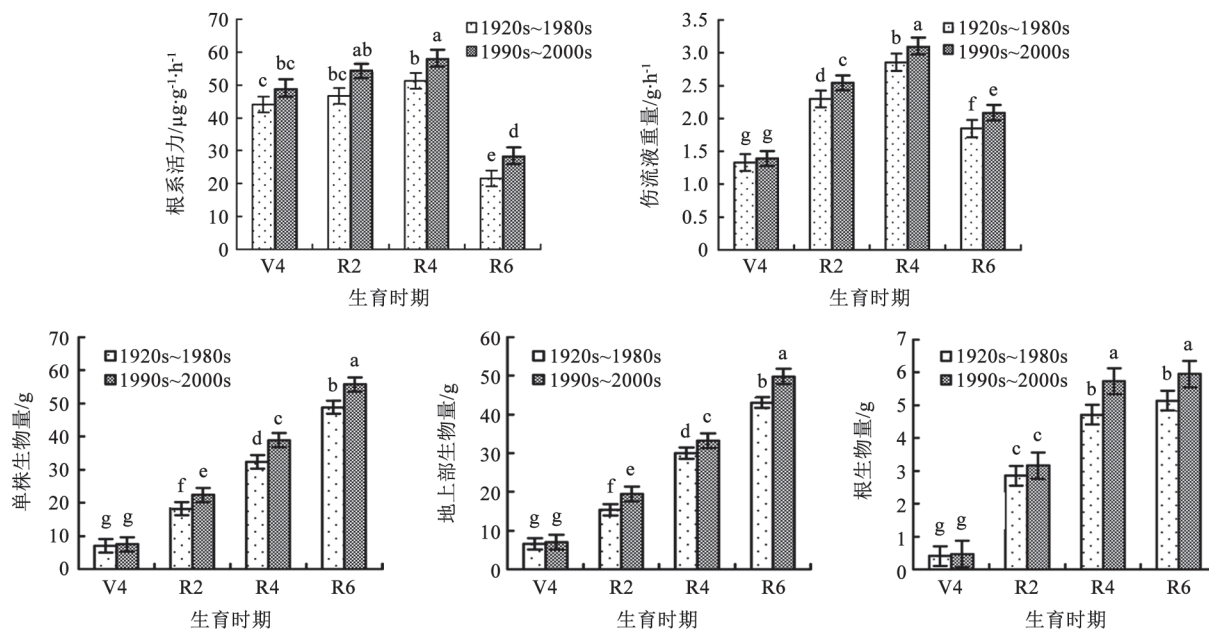


图1 大豆品种不同生育时期根系伤流液重量、根系活力和植株器官生物量的变化

Fig.1 Changes of bleeding sap weight, root activity and organ biomass with soybean cultivars at different growth stages

各柱形上不同小写字母表示0.05水平上的差异显著性。

2 不同年代大豆品种根系活力和伤流液重量的变化

根系活力和根系伤流液重量与育成年代的变化趋势一致(图2),在大豆各生育期间,两者与育成年代均呈正相关,在R4期达到了显著水平,在V4、R2和R6期均未达到显著水平。根据回归方程计算,大豆根系活力在R4期达到最大值,1986年的增长率达到42.13%,在V4、R2和R6期增长率分别为5.40%、10.15%和2.50%;大豆根系伤流液重量在R4期也达到最大值,1986年的增长率达到27.17%,在V4、R2和R6期增长率分别为20.34%、16.67%

和14.36%。

3 不同年代大豆品种植株器官生物量的变化

从植株器官生物量随年代的变化来看(图3),在R4期根生物量、地上部生物量和单株生物量86年的增长率分别达到13.51%、25.24%和23.78%,均与育成年代呈正相关,且达到显著水平或极显著水平。V4、R2和R6期品种间器官生物量变化与育成年代虽也呈正相关,但均未达到显著水平。结果表明,大豆品种遗传改良提高了植株器官生物量。

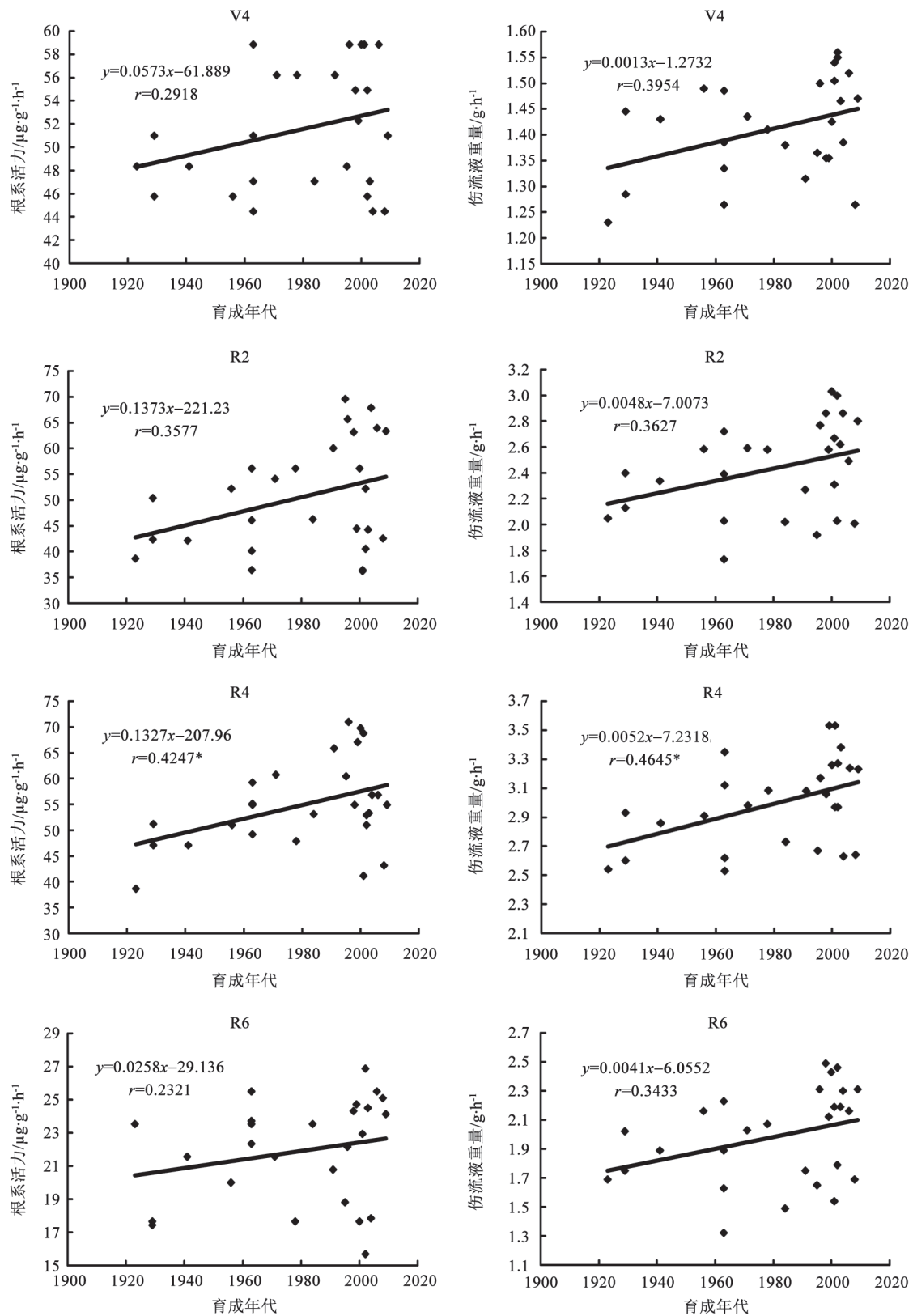


图2 不同年代大豆品种根系活性和伤流液重量的变化

Fig.2 Changes of bleeding sap weight and root activity of soybean released cultivars from 1923 to 2009

*表示达5%显著水平。

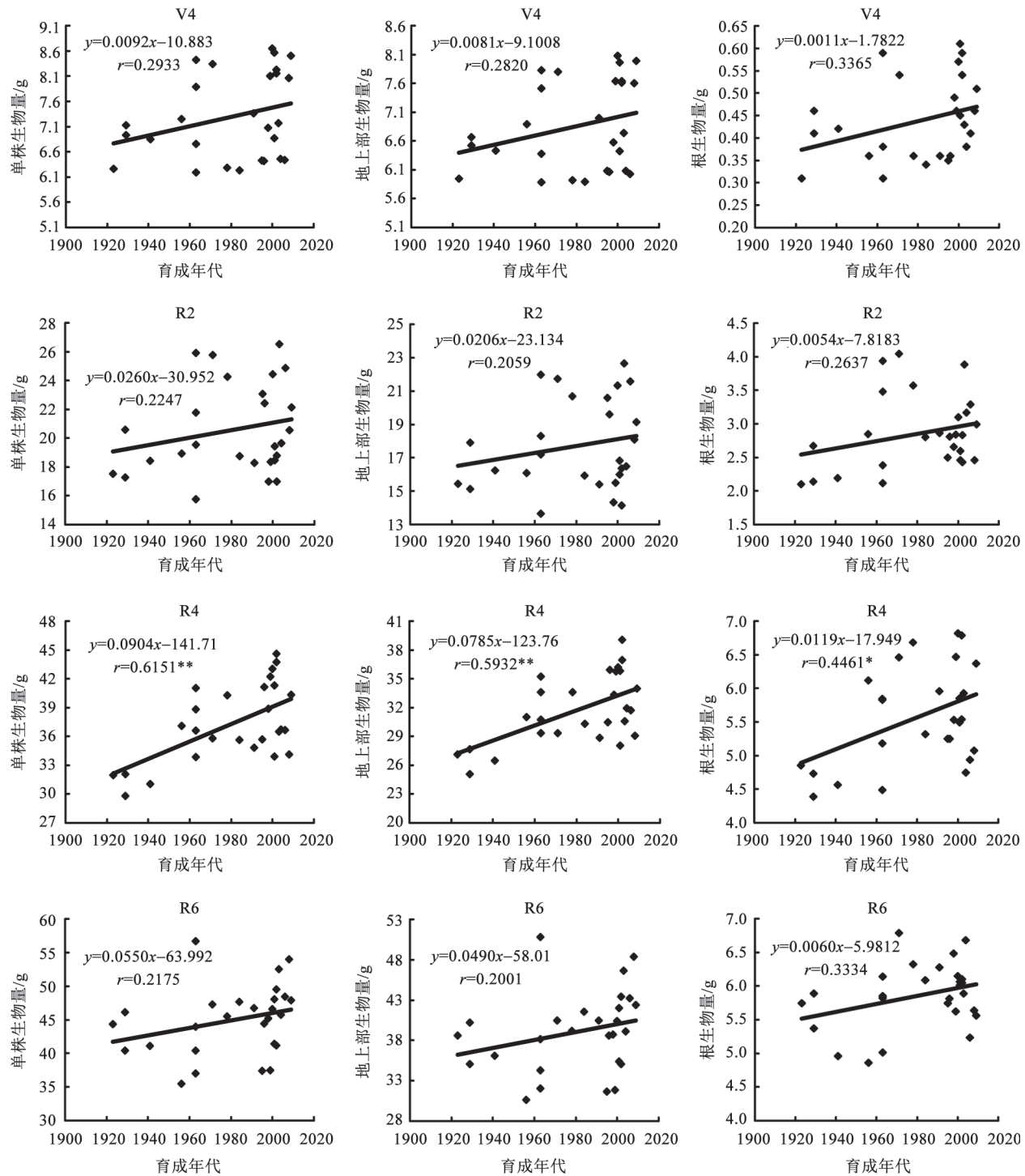


图3 不同年代大豆种植株器官生物量的变化

Fig.3 Changes of organ biomass of soybean released cultivars from 1923 to 2009

*和**分别表示达5%与1%显著水平, 图4、表1同。

4 不同年代大豆品种在R4期的根系活力和伤流液重量与植株器官生物量的关系

从R4期根系活力和伤流液重量与植株器官生

物量二者的相关分析来看(图4), 随着根系活力的增强, 单株生物量、地上部生物量和根生物量明显增加, 且两者相关均达到了显著水平; 随着伤流

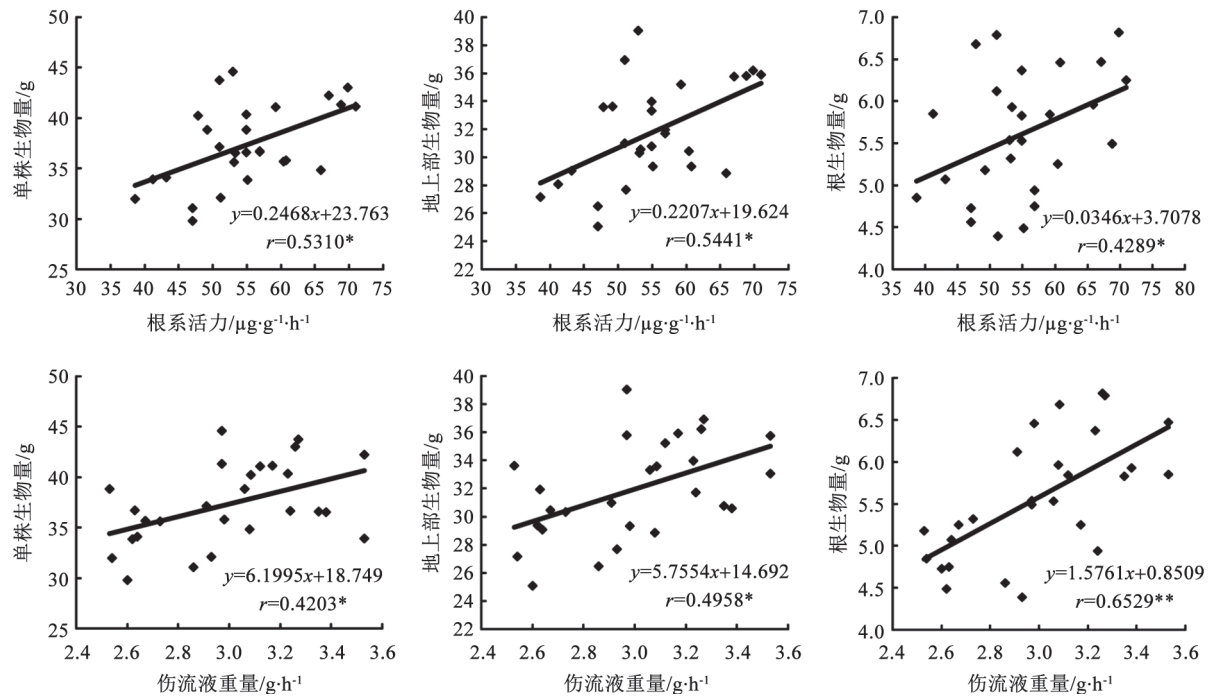


图4 在R4期27个大豆品种根系活力、伤流液重量与植株器官生物量之间的关系

Fig.4 Correlation of bleeding sap weight and root activity with organ biomass of soybean released cultivars at R4 stages

液重量的增加, 植株各器官生物量也呈增长趋势, 伤流液重量与单株生物量和地上部生物量的相关达显著水平, 与根生物量的相关达极显著水平。

5 不同年代大豆品种地上部生物量与根系活力比值的变化

图5是27个大豆品种植株地上部器官生物量和根系活力的比值与育成年代的关系。从图中可以看出, 随着生育期的推进比值不断增加, 但不同年代间的差异不显著。除R2期比值与育成年代呈负相关外, V4、R4和R6期变化均呈正相关, 但均未达显著水平。

6 不同年代大豆品种根系活力与植株各器官生物量和伤流液重量的关系

根系活力与植株各器官生物量和伤流液重量相关分析(表2)表明, 在R2期, 根系活力与根系伤流液重量呈显著正相关; 在R4期, 根系活力与植株茎生物量和伤流液重量均呈极显著正相关, 与叶片生物量和根生物量呈显著正相关; 在R6期, 根系活力与莢生物量达到显著正相关。其余生育时期, 根系活力与植株各器官生物量和伤流液重量虽呈正相关, 但均未达到显著水平。

植物根系伤流液重量可以反映植物吸收水

分、养分状况, 以及根系活力及根系物质代谢。从表2可以看出, 根系活力和伤流液重量在4个生育时期均具有正相关性, 且相关程度随生育时期呈单峰曲线变化, 从V4期不断增大, 在R2期达显著水平, 在R4期达极显著水平, 到R6期相关不显著。说明R4期大豆品种根系活力和伤流液重量相关最为密切。

讨 论

大豆产量的提高可能是由于改进了农艺特性, 也可能是在品种选育过程中获得了具有某些优良性状的大豆基因型, 或是二者共同的作用(Karmakar和Bhatnagar 1996)。研究认为, 根系遗传性状的研究和利用是作物品种改良的一次机遇, 将成为又一次绿色革命(Herder等2010; Wu和Cheng 2014)。黄中文等(2009)研究发现, 地下部生物量和地上部生物量与产量显著相关, 随生长进程, 相关系数逐渐增加, 至鼓粒期达到最大。本文结果也表明, 大豆的遗传改良使根生物量得以增加, 根系活力得以增强, 同时植株器官生物量也相应增加。这可能是由于遗传改良显著提高了叶片光合生产能力(李大勇等2007), 增加了光合产物向根系

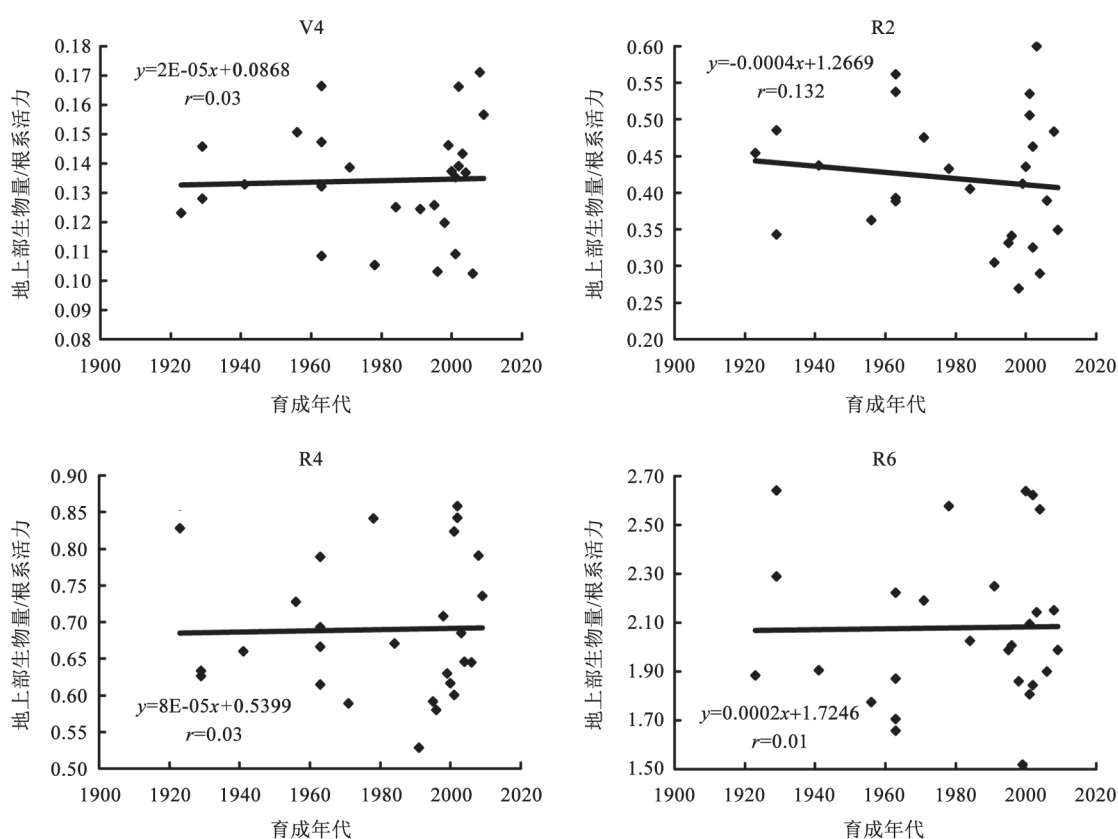


图5 不同年代育成大豆品种地上部生物量与根系活力比值的变化

Fig.5 Changes of aboveground biomass to root activity ratio of soybean released cultivars from 1923 to 2009

的供应能力(王智权等2006; 邓宏中等2013), 从而促进了根系的代谢活动(邓宏中等2013; 张玉姣等2014), 提高了根系对土壤中水分、矿物质的吸收和利用(Gowda等2011; Zhang等2013), 使植株地上部器官和根系干物质积累都明显增加(金剑等2003; 赵婧等2012)。孙彪等(2012)研究表明, 大豆品种改良过程中伤流液的增加与地上部各器官生物量的增加是同步的, 增加率相同。本文结果也表明, 随着育成年代的推进, 不同大豆品种地上部生物量与根系活力的比值变化很小, 说明在遗传改良过程中, 地上部器官与根系活力是共同进化, 协同演进的。

Kumudini等(2001)指出, 大豆植株单株干物质在R4和R5期(鼓粒初期)达到最大值, 随后由于豆荚的成熟与叶片衰老, 籽粒干物质积累期呈下降趋势。徐仲伟等(2011)研究表明, R4期现代品种植株生物量比早期品种提高了51.2%, 达到了显著水平。杨秀红等(2001)研究发现, 在R4~R5期根系性状与地上部性状间的相关关系比花期和苗期明

显。Guan等(2014)研究表明, 通过短期的旋耕和翻耕可增加根系生物量和提高根系伤流液, 最终导致玉米植株生物量和籽粒产量的显著提高。Zhang等(2009)也认为, 在水稻灌浆期, 较高的根系活力能明显促进水稻籽粒的灌浆, 两者间具有显著相关性。本文结果表明, 在R4期大豆根系活力与根系伤流液重量、器官生物量和育成年代均呈显著正相关, 在R6期根系活力与莢生物量呈显著正相关。从R4期至R6期根重增加放缓, 根系活力呈下降变化, 进而影响了根系伤流液重量, 说明根系的限制作用可能是导致植株衰老的原因之一, 为进一步明确是否是由于根系的早衰导致了植株衰老, 需要深入开展衰老期根系活力与地上部干物质积累关系的研究。但从本文结果可以看出, R4期大豆根系活力的增强, 是地上部干物质迅速积累的可靠保障, 是进一步提高大豆增产潜力的有效指标。Hammer等(2009)利用模拟方法对美国玉米带产量更替过程中根系构型变化及其与产量关系的研究表明, 玉米根系构型的优化对玉米品

表2 不同年代育成大豆品种根系活力与植株各器官生物量和伤流液重量的关系

Table 2 Correlation of root activity with organ biomass and bleeding sap weight of soybean cultivars at different growth stages

各器官生物量	生育期	根系活力	
		回归方程	相关系数
茎	V4	$y=0.0023x+0.761$	0.0502
	R2	$y=0.0093x+1.6845$	0.2233
	R4	$y=0.1013x+5.028$	0.5378**
叶	R6	$y=0.0989x+6.0381$	0.2691
	V4	$y=0.0126x+1.4783$	0.1435
	R2	$y=0.0199x+2.3437$	0.3162
叶柄	R4	$y=0.1153x+5.291$	0.4418*
	R6	$y=0.0828x+7.2361$	0.1624
	V4	$y=0.0005x+0.8256$	0.0201
荚	R2	$y=0.0022x+1.7849$	0.0977
	R4	$y=0.0375x+3.2871$	0.3561
	R6	$y=0.0835x+3.3419$	0.3322
根	R4	$y=0.0317x+2.0945$	0.4018
	R6	$y=0.3875x+8.8138$	0.5567*
	V4	$y=0.004x+0.2317$	0.2481
伤流液重量	R2	$y=0.0183x+1.9302$	0.3539
	R4	$y=0.0346x+3.7078$	0.4289*
	R6	$y=0.0203x+6.3016$	0.1322
	V4	$y=0.0071x+0.9988$	0.4081
	R2	$y=0.0167x+1.5886$	0.4942*
	R4	$y=0.0227x+1.7494$	0.6412**
R6	$y=0.0433x+1.0275$	0.4186	

种产量潜力的增加要高于地上部冠层的改变。因此我们建议在育种上,应注重选择生育中后期根系活力强的亲本。研究表明,控制与产量相关的农艺性状、叶片持绿性、氮素吸收及抗病的数量性状位点(QTL)相继被发现,还有几个主要的QTL被克隆(吴秋平等2011; Uga等2013; 毕影东等2014),加速了品种的改良和产量的提高。杨建昌(2011)认为,优良品种的产量提升需要通过进一步提高根系活力来实现。我们也认为可以把R4和R6期的根系活力作为大豆高产育种的指标之一,有目的地发现并控制相关的性状基因,通过改善中后期根系活力,促进根系营养物质向籽粒的运转,增加器官的生物量来进一步提高大豆的增产潜力。

参考文献

毕影东,李炜,肖佳雷,李婉,刘明,刘淼,张必弦,林红,来永才

(2014). 大豆分子育种现状、挑战与展望. 中国农学通报, 30 (6): 33~39

邓宏中,李鑫,徐克章,李大勇,孙苗苗,张治安(2013). 不同年代大豆品种根系伤流液中可溶性糖含量的变化及与叶片光合的关系. 华南农业大学学报, 34 (2): 197~202

段留生,张明才,董学会,田晓莉,李召虎(2008). 等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测定玉米和大豆根系伤流液中无机元素流量. 光谱学与光谱分析, 28 (11): 2671~2678

丁雪丽,谢甫绵,王海英,王智权,谢志涛,Steven SM (2006). 中美不同年代大豆品种农艺性状的比较. 沈阳农业大学学报, 37 (4): 565~568

黄中文,赵团结,盖钧镒(2009). 大豆不同产量水平生物量积累与分配的动态分析. 作物学报, 35 (8): 1483~1490

金剑,刘晓冰,王光华,潘相文,周克琴(2003). 美国大豆品种改良过程中生理特性变化的研究进展. 大豆科学, 22 (2): 137~141

李大勇,徐克章,张治安,赵颖君,陆静梅(2007). 新老大豆品种叶片光合特性的比较. 中国油料作物学报, 29 (3): 281~285

刘鑫磊,栾晓燕,王蕊,马岩松,刘琦,马长友(2014). 不同育成年大豆品种光合速率及农艺性状分析. 黑龙江农业科学, (10): 9~12

任海祥,王全伟,满为群,栾晓燕,邵广忠,徐香玲,杜维广(2009). 大豆抗旱性的遗传改良研究. 大豆科学, 28 (3): 537~542

孙彪,孙苗苗,徐克章,李大勇,张志安,武志海(2012). 不同年代大豆品种根系伤流液重量的变化及其与地上生物量的关系. 大豆科学, 31 (4): 579~583

孙苗苗,邓宏中,徐克章,张治安,李大勇,徐仲伟,袁野(2011). 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. 大豆科学, 30 (5): 795~799

王智权,谢甫绵,王海英,丁雪丽,谢志涛,张惠君,Steven SM (2006). 不同年代大豆品种(系)根系生长动态的比较研究. 辽宁农业科学, (4): 9~12

吴秋平,陈范骏,陈延玲,袁力行,张福锁,米国华(2011). 1973~2009年中国玉米品种演替过程中根系性状及其对氮的响应的变化. 中国科学: 生命科学, 41 (6): 472~480

谢甫绵,包雪艳,郭小红,张惠君,敖雪,王海英(2010). 不同年代大豆品种叶片部分生理指标的比较研究. 大豆科学, 29 (5): 772~776

徐仲伟,徐克章,张治安,李大勇,孙苗苗(2011). 吉林省不同年代大豆品种植株地上器官生物量的变化. 南京农业大学学报, 34 (3): 7~12

杨建昌(2011). 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系. 中国农业科学, 44 (1): 36~46

杨秀红,吴宗璞,张国栋(2001). 不同年代大豆品种根系性状演化的研究. 中国农业科学, 34 (3): 292~295

姚琳,徐克章,张治安,李大勇,刘国宁(2009). 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. 中国油料作物学报, 31 (2): 196~201

张伟,王曙明,邱强,张鸣浩,闫晓艳,李伟,徐洪庆,李岩(2010). 从品种志分析吉林省大豆八十五年来育种方法及农艺特性演变. 大豆科学, 29 (1): 18~21, 32

张玉姣,徐克章,陈展宇,李大勇,赵新宇,张治安(2014). 不同年代大豆品种根系伤流液含氮化合物的变化. 中国油料作物学报, 36 (4): 469~475

张治安,陈展宇(2008). 植物生理学实验指导. 长春: 吉林大学出版

- 社, 60~62
- 赵婧, 张伟, 邱强, 张鸣浩, 张吉选, 闫晓艳(2012). 不同熟期大豆品种遗传改良过程中光合特性和冠层农艺性状的变化. 大豆科学, 31 (4): 568~574
- Dieleman JA, Verstappen FWA, Kuiper D (1998). Bud break and cytokinin concentration in bleeding sap of *Rosa hybrida* as affected by the genotype of the rootstock. J Plant Physiol, 152: 468~472
- Gowda VRP, Henry A, Yamauchi A, Shashidhar HE, Serraj R (2011). Root biology and genetic improvement for drought avoidance in rice. Field Crops Res, 122: 1~13
- Guan DH, Al-Kaisi MM, Zhang YS, Duan LS, Tan WM, Zhang MC, Li ZH (2014). Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize. Field Crops Res, 157: 89~97
- Hammer GL, Dong Z, McLean G, Doherty A, Messina C, Schussler J, Zinselmeier C, Paszkiewicz S, Cooper M (2009). Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the U.S. Corn Belt? Crop Sci, 49: 299~312
- Herder GD, Van Isterdael G, Beeckman T, De Smet I (2010). The roots of a new green revolution. Trends Plant Sci, 15 (11): 600~607
- Karmakar PG, Bhatnagar PS (1996). Genetic improvement of soybean varieties released in India from 1969 to 1993. Euphytica, 90: 95~103
- Katsura K, Maeda S, Horie T, Shiraiwa T (2007). Analysis of yield attributes and crop physiological traits of Liangyoupeijiu, a hybrid rice recently bred in China. Field Crops Res, 103: 170~177
- Kumudini S, Hume DJ, Chu G (2001). Genetic improvement in short season soybean: I. Dry matter accumulation, partitioning, and leaf area duration. Crop Sci, 41: 391~398
- Liu XB, Jin J, Herbert SJ, Zhang QY, Wang GH (2005). Yield components, dry matter, LAI and LAD of soybeans in Northeast China. Field Crops Res, 93: 85~93
- Richards RA (2000). Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops. J Exp Bot, 51: 447~458
- Ryser P (2006). The mysterious root length. Plant Soil, 286 (1-2): 1~6
- Smith DM, Inman-Bamber NG, Thorburn PJ (2005). Growth and function of the sugarcane root system. Field Crops Res, 92 (2-3): 169~183
- Specht JE, Hume DJ, Kumudini SV (1999). Soybean yield potential—A genetic and physiological perspective. Crop Sci, 39: 1560~1570
- Uga Y, Sugimoto K, Ogawa S, Rane J, Ishitani M, Hara N, Kitomi Y, Inukai Y, Ono K, Kanno N et al (2013). Control of root system architecture by *DEEPER ROOTING 1* increases rice yield under drought conditions. Nat Genet, 45: 1097~1102
- Ustun A, Allen FL, English BC (2001). Genetic progress in soybean of the U.S. Midsouth. Crop Sci, 41: 993~998
- Wang B, Lai T, Huang QW, Yang XM, Shen QR (2009). Effect of N fertilizers on root growth and endogenous hormones in strawberry. Pedosphere, 19 (1): 86~95
- Wilcox JR (2001). Sixty years of improvement in publicly developed elite soybean lines. Crop Sci, 41: 1711~1716
- Wu WM, Cheng SH (2014). Root genetic research, an opportunity and challenge to rice improvement. Field Crops Res, 165: 111~124
- Zhang H, Xue Y, Wang Z, Yang J, Zhang J (2009). Morphological and physiological traits of roots and their relationships with shoot growth in “super” rice. Field Crops Res, 113: 31~40
- Zhang YK, Chen FJ, Chen XC, Long LZ, Gao K, Yuan LX, Zhang FS, Mi GH (2013). Genetic improvement of root growth contributes to efficient phosphorus acquisition in maize (*Zea mays* L.). J Integr Agric, 12 (6): 1098~1111