

大豆脂肪酸组分的胚、细胞质和母体遗传效应分析

宁海龙* 李文霞 李文滨

(大豆生物学教育部重点实验室/东北农业大学大豆研究所, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘 要: 利用 5 个大豆品种配制 20 个杂交组合, 采用广义种子遗传模型分析了大豆脂肪酸组分的胚、细胞质和母体植株等 3 套遗传体系的基因主效应和基因型 × 环境效应。棕榈酸含量、硬脂酸含量和亚油酸含量是以基因型 × 环境互作效应为主。亚麻酸和油酸的遗传主效应和基因型 × 环境互作效应相近。在脂肪酸组分的遗传主效应中, 棕榈酸、硬脂酸和亚油酸含量是以胚主效应为主。油酸含量和亚麻酸含量以细胞质主效应为主。在基因型 × 环境互作方差中, 脂肪酸组分以极显著的胚互作方差为主。亚麻酸含量是以基因的加性效应和加性 × 环境互作效应为主, 棕榈酸含量、硬脂酸含量、油酸含量和亚油酸含量以基因的显性和显性 × 环境互作效应为主。棕榈酸含量和油酸含量是以普通狭义遗传率为主。硬脂酸、亚油酸含量和亚麻酸含量以互作狭义遗传率为主。在普通狭义遗传率中, 棕榈酸含量、油酸含量和亚麻酸含量以细胞质普通遗传率和母体普通遗传率为主。在互作狭义遗传率中, 油酸含量和亚麻酸含量以胚互作狭义遗传率为主, 亚油酸含量以母体植株互作遗传率为主。棕榈酸含量、硬脂酸含量、油酸含量和亚油酸含量以细胞质及母体选择响应和互作选择响应为主, 亚麻酸含量的胚普通选择响应和互作选择响应为主。

关键词: 大豆; 脂肪酸组分; 胚遗传效应; 细胞质遗传效应; 母体遗传效应; 遗传率
中图分类号: S565

Analysis of Embryo, Cytoplasmic and Maternal Effects on Fatty Acid Components in Soybean (*G. max* Merrill)

NING Hai-Long*, LI Wen-Xia and LI Wen-Bin

(Key Laboratory of Soybean Biology of Ministry of Education/Soybean Research Institute, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China)

Abstract: Quality of oil determined by the constituents and proportion of fatty acid components, and the understanding of heredity of fatty acid components is of importance to breeding for good quality soybean varieties. Embryo, cytoplasmic and maternal effects and genotype × environment interaction effects for quality traits of soybean (*G. max* Merrill) seeds were analyzed using a general genetic model for quantitative traits of seeds with parents, F_1 and F_2 of 20 crosses from a diallel mating design of 5 parents planted in the field in 2003 and 2004 in Harbin, China. The interaction effects of palmitic, stearic and linoleic acids contents were larger than genetic main effects, while genetic main effects were equal to interaction effects for linolenic and oleic acids content. Among all kinds of genetic main effects, the embryo effects were the largest for palmitic, stearic and linoleic acids, and cytoplasm effects were the largest for oleic and linolenic acids. Among all kinds of interaction effects, the embryo interaction effects were the largest for fatty acids. The sum of additive and additive × environment effects were larger than that of dominance and dominance × environment effects for linolenic acids content, but not for other quality traits. The general heritabilities were the main parts of heritabilities for palmitic acids content and oleic acids content, but the interaction were more important for stearic, linoleic and linolenic acids contents. For the general heritability, maternal and cytoplasm heritabilities were the main components for palmitic, oleic and linolenic acids contents. It was shown for the interaction heritabilities that embryo interaction heritabilities were more important for oleic and linolenic acids contents, while maternal interaction heritabilities were more important for linoleic acids content. Among selection response components, maternal and cytoplasm general responses and/or interaction responses were more important for palmitic, stearic, oleic and linoleic acids contents. The main selection response components were from embryo general response and/or interaction response for linolenic acid content. It suggested that the selection of palmitic, stearic, oleic and linoleic acids contents in offspring should be in maternal plants, while linolenic acids content should be improved screening

基金项目: 黑龙江省教育厅项目(10531003)和大豆生物学教育部重点实验室开放基金项目资助。
作者简介: 宁海龙(1975-), 博士, 副教授, 主要从事大豆遗传育种与生理生态研究。

* 通讯作者(Corresponding author). E-mail: ninghailong1975@163.com; Tel: 0451-55191042

Received(收稿日期): 2005-11-28; Accepted(接受日期): 2006-04-03.

the single seed or selected in higher generations.

Key words: Soybean; Fatty acid; Embryo effect; Cytoplasmic effect; Maternal effect; Heritability

大豆是主要的油料作物之一,大豆油份的品质主要取决于脂肪酸的组成及其配比。品种改良是改进大豆脂肪酸的重要途径,明确脂肪酸组分的遗传变异规律对于品种选育具有重要意义。有关大豆脂肪酸组分的遗传规律已有较多报道。脂肪酸组分表现为数量性状, F_2 代均属常态分布,而且普遍存在正向或负向超亲遗传现象,油酸含量低于平均值的植株最多,亚油酸高于群体平均值的植株多,亚麻酸含量多数接近中亲值^[1-3]。有关脂肪酸组分是否存在母体效应和细胞质效应存在争议,Brim等^[4]和Singh等^[5]认为脂肪酸含量遗传呈很强的母体效应,但Martin等^[1]、Wilson等^[6]、Primomo等^[7]和付玉清等^[8]得出相反结论。胡明祥等^[2]和刘显华^[9]估算了脂肪酸含量遗传力。以上遗传理论多为单一环境下的研究结果。由于受气象因素的影响^[10-11],脂肪酸组分在不同地点和年份表现不一致^[12-16],朱军将混合模型方法引入植物遗传学研究,并提出了包含胚、细胞质和母体植株的遗传效应的模型^[17]。这些遗传理论已在水稻、油菜和棉花等主要农作物上得以应用,并取得了很好结果^[18-20]。本研究采用广义种子遗传模型分析了大豆脂肪酸组分的胚、细胞质和母体植株等3套遗传体系的基因主效应和基因型×环境效应,旨在为大豆优质品种选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 遗传材料

用品质差异较大的5个大豆品种(系),东农42、东农46、东农7819、农大5129和黑农35,2002年配制双列杂交组合20个。2003年和2004年将亲本 F_1 、 F_2 种植于东北农业大学校内试验地。采用随机区组设计,3个重复,每小区1行,行长3m,行距0.65m,株距8cm。成熟时,每小区收获中间15株,自然风干后,单株脱粒。采用气相色谱分析仪测定^[21]小区混合种子的脂肪酸组分。

1.2 统计分析方法

采用包括胚、细胞质和母体植株等3套遗传体系的基因主效应以及基因型×环境互作效应在内的双子叶二倍体种子遗传模型及统计分析方法^[17],分析大豆品质性状的2年资料。

用MINQUE(0/1)法和世代平均数估算各品质性

状的方差和协方差分量;以Jackknife数值抽样技术对各世代平均数进行抽样,计算各方差分量、遗传效应值的标准差,并用调整无偏预测(AUP)方法,预测各项效应值及总遗传效应值。全部数据统计分析用朱军提供的软件,在PC微机上运行^[17]。

2 结果与分析

2.1 方差分量分析

大豆脂肪酸含量的遗传主效应方差分量、基因型×环境互作方差分量和剩余方差分量的估计值列于表1。

从表1可以发现,棕榈酸含量、硬脂酸含量和亚油酸含量是以基因型×环境互作效应为主,基因型×环境互作方差(V_{GE})占各性状方差总量($V_G + V_{GE}$)的59.5%、86.2%和72.5%,而遗传效应方差(V_G)占方差总量($V_G + V_{GE}$)的40.5%、13.7%和27.5%。说明遗传主效应对棕榈酸含量、硬脂酸含量和亚油酸含量的遗传变异起作用较小,基因型×环境互作效应的影响较大,异地或异年的不同环境下选择效果差。亚麻酸和油酸的遗传主效应和基因型×环境互作效应相近,遗传效应方差(V_G)约各占方差总量($V_G + V_{GE}$)的50%。

在脂肪酸组分含量的遗传主效应中,棕榈酸含量、硬脂酸含量和亚油酸含量是以胚主遗传效应为主,胚遗传方差分别占遗传主效应方差的67.9%、100%和100%,油酸含量和亚麻酸含量以细胞质遗传效应为主,细胞质遗传方差占遗传主效应方差的57.5%和64.7%,其次为母体主效应,母体遗传方差占遗传主效应方差的29.2%和35.3%。

在基因型×环境互作方差(V_{GE})中,脂肪酸组分的含量以极显著的胚互作方差为主,分别占基因型×环境互作方差(V_{GE})的96.6%、52.3%、100%、73.4%和100%,是遗传变异中环境互作效应的主要部分。除胚互作效应外,硬脂酸还受控于母体互作效应,母体互作方差占基因型×环境互作方差(V_{GE})的38.6%,亚油酸还受控于细胞质互作效应,细胞质互作方差占基因型×环境互作方差(V_{GE})的26.6%。说明在控制脂肪酸组分含量表现的胚、细胞质和母体植株等3套遗传体系中,胚遗传体系更易受到环

境条件的影响,而细胞质基因和母体植株基因在不同环境中表达的稳定性因性状而有差异。

表 1 大豆脂肪酸组分含量的方差分量估计值
Table 1 Estimation of variance components for genetic main effects and genotype × environment interaction effects of fatty acid components content in soybean seeds

参数 Parameter	棕榈酸 Palmitic	硬脂酸 Stearic	油酸 Oleic	亚油酸 Linoleic	亚麻酸 Linolenic
基因型方差 V_G					
胚加性方差 V_A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
胚显性方差 V_D	0.055**	0.007**	0.518**	0.924**	0.000
细胞质方差 V_C	0.026**	0.000	2.243**	0.000	0.495**
母体加性方差 V_{Am}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
母体显性方差 V_{Dm}	0.000	0.000	1.137**	0.000	0.269**
基因型 × 环境互作方差 V_{GE}					
胚加性互作方差 V_{Ae}	0.000	0.000	0.654**	0.000	0.759**
胚显性互作方差 V_{De}	0.115**	0.023**	3.305**	1.785**	0.000
细胞质互作方差 V_{Ce}	0.000	0.004**	0.000	0.647**	0.000
母体加性互作方差 V_{AmE}	0.000	0.017**	0.000	0.000	0.000
母体显性互作方差 V_{DmE}	0.004**	0.000	0.000	0.000	0.000
机误方差 V_e	0.059**	0.071**	1.186**	0.727**	0.686**
表现型方差 V_P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注: **表示 0.01 显著性水平。Note: ** significant at 0.01 probability level.

通过表 1 中各方差分量的分析,可以发现除亚麻酸含量以外,其他 4 种脂肪酸含量的基因加性效应和基因的加性 × 互作效应较小。胚加性方差(V_A)、细胞质方差(V_C)、母体加性方差(V_{Am})、胚加性互作方差(V_{Ae})、细胞质加性互作方差(V_{Ce})和母体加性互作方差(V_{AmE})的总和占总遗传方差($V_G + V_{GE}$)的比率低于 50%。可见,棕榈酸含量、硬脂酸含量、油酸含量和亚油酸含量在低世代选择效果不好。亚麻酸含量以基因加性效应和基因的加性 × 互作效应为主,加性方差和加性互作方差分别占总遗传方差($V_G + V_{GE}$)的 32.5% 和 49.8%,说明在低世代选择的效果好。基因型 × 环境互作效应明显大于遗传主效应,故在异地选择或异年环境条件有所变

化的情况下其选择效果差异较大。试验结果也表明,各种脂肪酸含量存在着较为明显的基因显性效应和基因显性 × 互作效应,棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和亚麻酸各含量的显性方差($V_{De} + V_{Dm}$)与显性互作方差($V_{DeE} + V_{DmE}$)之和占总遗传方差总量($V_G + V_{GE}$)的 87%、58.9%、63.2%、80.7% 和 17.7%,表明基因的显性效应可以影响大豆杂交组合的脂肪酸含量的表现,在选配组合时可加以利用,但在一定程度上干扰选择效果。

2.2 遗传率分析

大豆脂肪酸组分含量的遗传率分量估计值列于表 2。

表 2 大豆脂肪酸含量的遗传率分量(%)估计值
Table 2 Estimation of heritability components(%) for fatty acid contents

	普通遗传率 h^2_G			互作遗传率 h^2_{GE}		
	胚遗传率 h^2_A	细胞质遗传率 h^2_C	母体遗传率 h^2_{Am}	胚互作遗传率 h^2_{Ae}	细胞质互作遗传率 h^2_{Ce}	母体互作遗传率 h^2_{AmE}
棕榈酸 Palmitic	0.0	10.0**	0.0	0.0	0.0	0.0
硬脂酸 Stearic	0.0	0.0	0.0	0.0	13.8**	2.9
油酸 Oleic	0.0	24.8**	0.0	7.2*	0.0	0.0
亚油酸 Linoleic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.8**
亚麻酸 Linolenic	0.0	22.4**	0.0	34.4**	0.0	0.0

注: *, ** 分别表示 0.05 和 0.01 显著性水平。下同。Note: *, ** significant at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. The same below.

遗传率估计值(表 2)表明,亚麻酸含量的狭义遗传率(h^2)较高,为 56.8%,棕榈酸含量、硬脂酸含量、油酸含量、亚油酸含量的狭义遗传率(h^2)较低,分别为 10%、16.7%、32% 和 15.8%。从普通狭义遗传率和互作狭义遗传率两方面来看,棕榈酸含量和

油酸含量是以普通狭义遗传率为主,因此在不同年份或环境条件下的选择效果均较好。硬脂酸、亚油酸含量和亚麻酸含量是明显以互作狭义遗传率为主,其改良效果易受到选择环境的影响,不同年份或不同环境下的选择效果会有较大的差异。

在普通狭义遗传率中,棕榈酸含量、油酸含量和亚麻酸含量以细胞质遗传率为主,母体遗传率分别为10%、25%和22%,因此,根据母体植株上品质性状的总体表现进行选择,能取得较好的改良效果,并能够简化选择过程以及节约时间和劳力;硬脂酸含量和亚油酸含量的普通狭义遗传率均未达到显著水平,说明在早期对这两个性状进行选择,效果不好。在互作狭义遗传率中,油酸含量和亚麻酸含量以胚互作狭义遗传率为主,硬脂酸含量以细胞质互作

遗传率为主,亚油酸含量以母体植株互作狭义遗传率为主,棕榈酸的互作狭义遗传率分量均未达到显著水平,说明油酸含量和亚麻酸含量的胚加性效应最易受到环境条件的影响,但硬脂酸含量的母体加性效应最易受到环境条件的影响,亚油酸含量的母体植株加性效应最易受到环境条件的影响。棕榈酸含量的选择效果表达不受环境条件的影响。

2.3 大豆化学品质的选择响应分析

大豆脂肪酸含量的选择响应估计值列于表3。

表3 大豆脂肪酸含量的选择响应(%)分量估计值
Table 3 Estimation of response (%) components for fatty acid contents

选择响应 Response	R_C		R_{Cm}	R_{CE}		
	R_{Cm}	R_C		R_{CE}	R_{CE}	R_{CE}
棕榈酸 Palmitic	0.00	0.97*	0.00	0.00	0.00	0.00
硬脂酸 Stearic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	2.02*
油酸 Oleic	0.00	6.62**	0.00	1.93	0.00	0.00
亚油酸 Linoleic	0.00	0.00	0.00	0.00	1.28*	0.00
亚麻酸 Linolenic	0.00	7.36**	0.00	11.29**	0.00	0.00

表3表明,棕榈酸含量、硬脂酸含量、油酸含量、亚油酸含量和亚麻酸含量的总选择响应分别为0.97%、2.45%、8.55%、1.28%和18.65%,说明对上述品质性状进行选择可以获得较好的选择效果和遗传进展。其中以亚麻酸含量的选择响应最大,预期遗传进展可以达到18%以上,通过选择有可能在较大程度上提高亚麻酸含量,硬脂酸含量、油酸含量和亚油酸含量亦可通过选择获得良好的遗传进展。

从各性状中普通选择响应与互作选择响应的比例来看,棕榈酸含量、油酸含量和亚麻酸含量是以普通选择响应为主,其普通选择响应分别为0.97%、6.62%和7.36%,环境条件的变化对这些品质性状影响较小,在不同环境中进行选择可以取得较好的改良效果;而硬脂酸含量和亚油酸含量则是以互作选择响应为主, R_{CE} 分别为2.45%和1.28%,因此,环境条件对硬脂酸含量和亚油酸含量遗传变异的影响较大,进而会影响到硬脂酸含量和亚油酸含量选择的遗传进展,异年异地的选择效果会有较大的差异。

在选择方法上,由于棕榈酸含量、硬脂酸含量、油酸含量和亚油酸含量的细胞质普通选择响应、母体普通选择响应、细胞质互作选择响应和母体互作选择响应之和明显大于胚普通选择响应和胚互作选择响应之和,分别为0.97%、2.02%、6.62%和1.28%,说明这些性状的表现主要是受控于母体植株基因和细胞质基因的遗传效应,对这些品质性状的选择应根据母体植株上籽粒的总体表现采取单株选择法。而亚麻酸含量的胚普通选择响应和胚互作

选择响应之和明显高于细胞质普通选择响应、母体普通选择响应、细胞质互作选择响应和母体互作选择响应之和,说明亚麻酸含量的表现主要是受控于胚基因的遗传效应,对亚麻酸含量的选择应采取单粒选择法。

3 讨论

大豆品质性状的遗传改良已成为大豆主产国的重要育种目标之一,遗传规律的研究与大豆品质性状改良的结合将有助于提高品质育种的效率。以往关于脂肪酸组分含量的遗传研究多是以胚的核基因为主要研究对象^[2,9],混淆了细胞质和母体植株效应,研究方法主要是比较正反交表现的差异^[1,4,6]。研究表明,大豆品质性状受到胚、细胞质和母体3套遗传体系的遗传主效应和基因型×环境互作效应控制。在品质性状的遗传主效应中,棕榈酸含量、硬脂酸含量和亚油酸含量是以胚主效应为主。油酸含量和亚麻酸含量以细胞质主效应为主。在基因型×环境互作方差中,脂肪酸组分以极显著的胚互作方差为主。胚和母体遗传效应易受到环境条件的影响,而细胞质效应受环境影响较小。在选择育种中,当一个品质性状以母体加性遗传和/或细胞质遗传为主以及母体和/或细胞质遗传率较高时,其杂种后代单株上的大豆品质变异不大,可以根据其母体植株的总体遗传表现进行选择,并能获得明显的选择效果(选择响应),对于这些品质性状在配制杂交组合时双亲的选择特别是母本尤为重要。如本研究中

的大豆油酸含量和亚麻酸含量以细胞质主效应为主,根据母体植株的品质的总体表现选择植株,可以获得良好的选择效果。此方法可以测定单株上的部分种子,另一部分入选种子仍可保留种植。而对于以胚加性遗传效应为主以及胚遗传率较高的品质性状,则应以单粒种子选择为主或在高世代进行选择。如棕榈酸含量、硬脂酸含量和亚油酸含量是以胚主效应为主,在杂种后代中,同一大豆植株上不同籽粒之间品质的差异将较为明显,产生粒与粒之间的分离,故大豆棕榈酸含量、硬脂酸含量和亚油酸含量的选择以粒为单位进行选择可能更能取得较好的改良效果。对于以显性效应为主或显性效应较大的一些品质性状,在直接选择时应采取中高世代选择为主的育种方法。在大豆杂交代育种中,显性效应的不同也会导致不同的育种效果。当一个品质性状是以母体显性效应和细胞质效应为主时,长在 F_1 植株上的 F_2 种子的品质性状将不会有大的分离;而以胚显性效应为主时, F_1 植株上的 F_2 种子就会出现分离,所收获的将是由不同基因型组成的混合种子。

4 结论

大豆籽粒中,棕榈酸含量、硬脂酸含量和亚油酸含量是以基因型×环境互作效应为主,亚麻酸和油酸的遗传主效应和基因型×环境互作效应相近。在脂肪酸组分的遗传主效应中,棕榈酸、硬脂酸和亚油酸含量是以胚主效应为主。油酸含量和亚麻酸含量以细胞质主效应为主。在基因型×环境互作方差中,脂肪酸组分以极显著的胚互作方差为主。亚麻酸含量是以基因型的加性效应和加性×环境互作效应为主,棕榈酸含量、硬脂酸含量、油酸含量和亚油酸含量以基因的显性和显性×环境互作效应为主。棕榈酸含量和油酸含量是以普通狭义遗传率为主。硬脂酸、亚油酸含量和亚麻酸含量以互作狭义遗传率为主。在普通狭义遗传率中,棕榈酸含量、油酸含量和亚麻酸含量以细胞质普通遗传率和母体普通遗传率为主。在互作狭义遗传率中,油酸含量和亚麻酸含量以胚互作狭义遗传率为主,亚油酸含量以母体植株互作遗传率为主。棕榈酸含量、硬脂酸含量、油酸含量和亚油酸含量以细胞质及母体选择响应和互作选择响应为主,亚麻酸含量的胚普通选择响应和互作选择响应为主。

References

[1] Martin B A, Carver B F, Burton J W, Wilson R F. Inheritance of fatty acid composition in soybean seed oil. *Soybean Genet Newsletter*, 1983, 10: 89-92

- [2] Hu M-X(胡明祥), Meng X-X(孟祥钧), Li A-P(李爱萍), Wang S-M(王曙明), Hu C-P(胡传璞). An inheritance of the fatty acid composition of soybean seed in the F_2 generation. In: Gai J-Y(盖钧镛) ed. *Advance of Basic and Technological Aspects in Breeding for Soybean (大豆育种应用基础和技术研究进展)*. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1990. pp 124-131 (in Chinese)
- [3] Zhang Z-Y(张志永). A study on inheritance of fatty acid contents in soybean seed oil. *Oil Crops China(中国油料)*, 1991, (3): 16-19
- [4] Brim C A, Schuutz W M, Collins F I. Maternal effect on fatty acid composition and oil content of soybean. *Crop Sci*, 1968, 8: 517-518
- [5] Singh L, Hadley H H. Maternal control of oil synthesis in soybeans *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Sci*, 1968, 8: 622-625
- [6] Wilson R F, Burton J W, Brim C A. Progress in the selection for altered fatty acid composition in soybeans. *Crop Sci*, 1981, 21: 788-791
- [7] Primomo V S, Falk D E, Ahlett G R, Tanner J W, Rajcan I. Inheritance and interaction of low palmitic and low linoleic soybean. *Crop Sci*, 2002, 42: 31-36
- [8] Fu Y-Q(付玉清), Yang Q-K(杨庆凯). Analysis of reciprocal cross effect and combining ability of fatty acid composition of soybean. *Soybean Sci(大豆科学)*, 1994, 13(1): 9-14 (in Chinese with English abstract)
- [9] Liu X-H(刘显华). Analysis of the combining ability and heritability of protein, oil and their components in F_2 of soybean. *Acta Agron Sin(作物学报)*, 1988, 14(4): 303-307 (in Chinese with English abstract)
- [10] Ma S-Y(马淑英), Liang Q(梁秋), Song H(宋娟), Chen S-N(陈树宁), Zhang M-D(张鸣镛). The formation of fatty acid of extra-early soybean and correlation with meteorological element. *Sci Agric Sin(中国农业科学)*, 1999, 32 (suppl): 69-76 (in Chinese with English abstract)
- [11] Rennie B D, Tanner J W. Fatty acid composition of oil from soybean seeds grown at extreme temperatures. *J Am Oil Chem Soc*, 1989, 66: 1622-1624
- [12] Nian H(年海), Wang J-L(王金波), Yang X-X(杨晓新), Yang Q-K(杨庆凯), Chen Y(陈怡), Luan X-Y(梁晓燕), Liu Z-T(刘忠堂), Wang D-Q(王大秋), Zhang R-S(张仁双), Wang Y-Z(王雅珍), Liu G-F(刘国范), Cui Y-G(崔玉娥). Study on stability of main chemical traits in soybean. *Soybean Sci(大豆科学)*, 1997, 16(2): 118-124 (in Chinese with English abstract)
- [13] Primomo V S, Falk D E, Ahlett G R, Tanner J W, Rajcan I. Genotype × environment interaction, stability, and agronomic performance of soybean with altered fatty acid profiles. *Crop Sci*, 2002, 42: 37-44
- [14] Rebetzke, G J, Pantalone V R, Burton J W, Carter T E Jr, Wilson R F. Genetic background and environment influence palmitate content of soybean seed oil. *Crop Sci*, 2001, 41: 1731-1736
- [15] Schnebly S R, Fehr W R. Effect of years and planting dates on fatty acid composition of soybean genotypes. *Crop Sci*, 1993, 33: 716-719
- [16] Zhang G-D(张国栋), Wang J-L(王金波), Meng Q-X(孟庆喜), Yang Q-K(杨庆凯), Wu Z-P(吴忠朴), Gao F-L(高凤兰), Ma Z-F(马占峰), Zhao S-W(赵淑文), Wu T-L(武天龙). Varietal and environmental variations of fatty acid compositions in soybean seed oil. In: Gai J-Y(盖钧镛) ed. *Advance of Basic and Technological Aspects in Breeding for Soybean (大豆育种应用基础和技术研究进展)*. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1990. pp 124-131 (in Chinese)
- [17] Zhu J(朱军). *Analysis Methods for Genetic Models(遗传模型分析方法)*. Beijing: China Agriculture Press, 1997 (in Chinese)
- [18] Wu J-X(吴吉祥), Wang C-J(王国建), Zhu J(朱军), Xu F-H(许繁华), Ji D-F(季道禧). Genetic analysis on direct and maternal effects of seed traits in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Acta Agron Sin(作物学报)*, 1995, 21(6): 659-664 (in Chinese with English abstract)
- [19] Shi C H, Xue J M, Yu Y G, Yang X E, Zhu J. Analysis of genetic effects on nutrient quality traits in indica rice. *Theor Appl Genet*, 1996, 92: 1099-1102
- [20] Wang R(王瑞), Li J-N(李加纳), Chen L(谏利), Tang Z-L(唐章林), Zhang X-K(张学昆). Genetic analysis for seed colour in yellow-seeded rape-seed lines (*Brassica napus* L.). *Chin J Oil Crop Sci(中国油料作物学报)*, 2003, 25(4): 1-4 (in Chinese with English abstract)
- [21] Wang J(王静), Xiang W-S(向文胜). *Application Technique of Modern Agricultural Apparatus Determination(现代农业仪器分析应用技术)*. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2000. pp 61-62 (in Chinese)