

## 油菜籽硫代葡萄糖苷含量的胚、细胞质、母体遗传效应分析

张海珍 石春海\* 吴建国 任玉玲 李长涛\*

(浙江大学农学院农学系, 浙江杭州 310029)

**摘要** 采用双子叶作物种子数量性状遗传模型和统计分析方法, 分析了油菜籽硫代葡萄糖苷(硫苷)含量的胚、细胞质和母体植株等不同遗传体系的基因效应以及环境互作效应。结果发现油菜籽硫苷含量的表现主要受制于母体遗传效应, 其次为细胞质效应, 胚(子叶)效应对其影响较小。不同遗传体系的基因主效应明显大于环境互作效应。硫苷含量的母体显性互作效应较大, 说明该效应更易受到环境条件变化影响。亲本遗传效应分析的结果表明, 选用 Tower 或华双 3 号亲本有利于降低杂种后代油菜籽的硫苷含量, 提高品质改良的效果。胚杂种优势主要表现为增加油菜籽硫苷的含量, 而母体显性效应引起的杂种优势则有利于降低硫苷的含量。

**关键词** 油菜; 品质; 硫苷; 遗传效应; 杂种优势

中图分类号: S565

## Genetic Analysis of Embryo, Cytoplasm and Maternal Plant Effects for Glucosinolates Content in Rapeseed

ZHANG Hai-Zhen, SHI Chun-Hai\*, WU Jian-Guo, REN Yu-Ling, LI Chang-Tao

(Department of Agronomy, Zhejiang University, Hangzhou 310029, Zhejiang, China)

**Abstract** Effects of embryo, cytoplasm, maternal plant and their environment interaction on glucosinolates content (GSL) in rapeseed was analyzed by using a full genetic model for quantitative traits of seed for diploid plant. It was found that GSL in rapeseed was mainly controlled by maternal and cytoplasmic effects, followed by embryo effects. The main effects of different genetic systems on GSL trait were more important than environment interaction effects. The strong dominance effects on GSL from maternal plant was easy affected by environment conditions. Based on the predicated genetic effects, Tower and Huashuang 3 were better than other parents for reducing GSL in progeny and improving the quality of rapeseed. The maternal heterosis could decrease GSL in rapeseed, and the embryo heterosis was on the contrary.

**Key words** Rapeseed; Quality; Glucosinolates; Genetic effect; Heterosis

甘蓝型油菜是我国主要油料作物之一, 其种子榨油后的菜粕富含蛋白质。由于菜粕中含有的硫苷类物质水解后会产生异硫氰酸盐等有毒物质, 对牲畜会产生较大的毒害作用<sup>[1,2]</sup>。降低菜粕中的硫苷含量已成为油菜品质育种工作的主要目标之一<sup>[3]</sup>。菜粕品质的优劣是品种遗传特性和环境因素共同作用的结果<sup>[4]</sup>, 并可能受到胚、细胞质和母体植株遗传效应以及环境互作效应的共同影响, 因此有必要对油菜籽硫苷含量的遗传规律作进一步的分析。

本文采用新近提出的双子叶植物种子数量性状的遗传模型和统计分析方法<sup>[5~9]</sup>, 以甘蓝型油菜亲本及组合为材料, 分析控制油菜籽硫苷含量的胚(子叶)、细胞质和母体植株等不同遗传体系基因效应以及各种环境互作效应, 预测各遗传体系的基因效应值, 进而评估亲本的遗传潜力和杂交组合的杂种优势, 进一步明确该性状在多遗传体系影响时的遗传规律, 为油菜品质数量性状的遗传改良进一步提供理论依据。

\*基金项目: 教育部高等学校骨干教师资助计划项目(317102 G70024)和浙江省“151人才工程”资助项目。

作者简介: 张海珍(1975-), 女, 山东人, 博士生, 主要从事作物遗传育种研究。\*通讯作者(Author for correspondence): 石春海。

Received(收稿日期): 2002-08-05, Accepted(接受日期): 2003-01-13.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验材料为油菜籽硫苷含量差异较大的8个油菜品种:油菜 601 (P1)、高油 605 (P2)、华双 3 号 (P3)、云油 8 号 (P4)、中油 821 (P5)、鄂油长莱 (P6)、中 R-888 (P7) 和 Tower (P8), 其硫苷含量分别为 88.86、92.33、22.48、97.99、116.41、132.17、129.26 和  $87.57 \mu\text{mol g}^{-1}$ 。

### 1.2 试验方法

1997 年利用上述亲本采用完全双列杂交的方法配置杂交组合。1998—1999 和 1999—2000 年分别在浙江大学实验农场种植亲本和  $F_1$ , 两年均为 10 月 7 日播种, 11 月 6 日移栽, 单株种植, 随机区组设计, 3 次重复, 各小区种 24 株。开花前期, 在种植亲本和  $F_1$  的小区套袋 6 株, 成熟时各小区收取套袋自交的亲本和  $F_2$  种子; 在开花期间利用亲本配制相应的杂交组合, 获得当代杂交的  $F_1$  种子。利用美国马里兰州生产的 NIR System 5000 型近红外分析仪分析油菜籽中硫苷含量 ( $\mu\text{mol g}^{-1}$ )<sup>[10,11]</sup>。分析时取 3 g 左右的完整油菜籽用 35 mm 圆杯收集样品光谱, 利用定标方程计算硫苷含量。定标方程中的回归统计方法采用改良最小二乘法 (MPLS), 利用“标准正态变量转换 (SNV) + 趋势变换法 (De-trending) / 2, 4, 4, 1 / MPLS”的组合建立回归方程, 检验平均偏差 (Bias) 为 0.315, 检验决定系数 (RSQ) 达到 0.972<sup>[11]</sup>。

### 1.3 统计分析

采用包括胚 (子叶)、细胞质和母体植株三套遗传体系的基因主效应以及基因型  $\times$  环境互作效应在内的双子叶植物种子遗传模型和统计分析方法<sup>[5-9]</sup>, 分析了油菜籽硫苷含量的两年材料。利用世代平均数估算各性状的遗传主效应方差、环境互作效应方差和机误方差等方差分量以及胚效应与母体效应间的遗传协方差。采用调整无偏预测法<sup>[5,6]</sup> 预测胚加性效应 (A)、胚显性效应 (D)、细胞质效应 (C)、母体加性效应 (Am)、母体显性效应 (Dm) 及其相应的环境互作效应 (AE、DE、CE、AmE 和 DmE) 等, 根据预测值的大小和方向, 评判亲本的育种价值和预测杂交组合的杂种优势表现。

## 2 结果与分析

### 2.1 方差分量的估算

油菜籽硫苷含量的各项遗传主效应方差分量和

基因型  $\times$  环境互作方差分量的估计值列于表 1。两年数据的分析结果表明, 硫苷含量除了受到遗传主效应的影响外, 还不同程度上受到基因型与环境互作效应的影响。由于遗传主效应方差 ( $V_G = V_A + V_D + V_C + V_{Am} + V_{Dm}$ ) 和环境互作方差 ( $V_{GE} = V_{AE} + V_{DE} + V_{CE} + V_{AmE} + V_{DmE}$ ) 分别占遗传方差总量 ( $V_G = V_G + V_{GE}$ ) 的 73.28% 和 26.72%, 说明油菜籽硫苷含量性状的表现主要受制于基因的遗传主效应, 基因型  $\times$  环境互作效应对其影响相对较小。在胚 (子叶)、细胞质和母体植株三套遗传体系的基因效应中, 可以发现多数遗传方差分量已达极显著水平, 说明油菜籽中硫苷含量性状的表现同时受制于上述 3 套不同遗传体系基因效应的影响。而且硫苷含量的表现是以母体遗传效应 ( $V_{Am} + V_{Dm} + V_{AmE} + V_{DmE}$ ) 为主, 占  $V_G$  的 60.90%; 其次为细胞质效应 ( $V_C + V_{CE}$ ), 占  $V_G$  的 34.61%; 胚效应 ( $V_A + V_D + V_{AE} + V_{DE}$ ) 对该性状的影响相对较小, 仅占  $V_G$  的 2.52%。不同环境条件下的胚加性效应以及母体加性效应最为稳定, 未测到相应的环境互作效应。由于表 1 中母体显性互作方差较大, 说明环境条件的变化可以对母体植株基因显性效应的表现产生特别明显的影响。由于各种加性效应部分在选择过程中可以累加, 细胞质效应也可通过母本得以传递, 因此这两种效应的大小将会直接影响到选择效果的好坏。表 1 结果表明, 加性效应和细胞质效应方差总量 ( $V_A + V_C + V_{Am} + V_{AE} + V_{CE} + V_{AmE}$ ) 占  $V_G$  的 66.43%, 说明基因的加性效应和细胞质效应是控制硫苷含量表现的主要遗传效应, 对该性状进行早代选择可望取得较好的效果。

此外, 各协方差分量 (包括胚与母体加性效应 ( $C_{A-Am}$ ) 或显性效应 ( $C_{D-Dm}$ ) 间的遗传协方差、胚与母体加性互作效应 ( $C_{AE-AmE}$ ) 或显性互作效应 ( $C_{DE-DmE}$ ) 间的遗传协方差) 均未达到显著水平 (表中未列出), 说明控制硫苷含量性状表现的胚效应与母体效应间以及相应的环境互作效应间关系均不明显。由于硫苷的机误方差 ( $V_e$ ) 已达到显著水平, 所以油菜籽硫苷含量还受到环境机误或抽样误差的影响。但其值较小, 故该性状的表现主要受制于胚、细胞质和母体植株基因的各种遗传主效应以及基因型  $\times$  环境的互作效应。

表1 油菜硫苷含量的遗传方差分量估计值

Table 1 Estimation of genetic variance components for glucosinolates content in rapeseed ( $\times 10^3$ )

参数 Parameter	方差 Variance	参数 Parameter	方差 Variance
胚加性方差 ( $V_A$ )	0.019 **	胚加性互作方差 ( $V_{AE}$ )	0.000
胚显性方差 ( $V_D$ )	0.112 **	胚显性互作方差 ( $V_{DE}$ )	0.064 **
细胞质方差 ( $V_C$ )	2.143 **	细胞质互作方差 ( $V_{CE}$ )	0.544 **
母体加性方差 ( $V_{Am}$ )	2.452 **	母体加性互作方差 ( $V_{AmE}$ )	0.000
母体显性方差 ( $V_{Dm}$ )	0.964 **	母体显性互作方差 ( $V_{DmE}$ )	1.315 **
		机误差 ( $V_e$ )	0.151 **

注: \*\* 为达到 0.01 显著水平。

Notes: \*\* standing for significant difference at 0.01 level.  $V_A$  = Embryo additive variance,  $V_D$  = Embryo dominance variance,  $V_C$  = Cytoplasmic variance,  $V_{Am}$  = Maternal additive variance,  $V_{Dm}$  = Maternal dominance variance,  $V_{AE}$  = Embryo additive interaction variance,  $V_{DE}$  = Embryo dominance interaction variance,  $V_{CE}$  = Cytoplasmic interaction variance,  $V_{AmE}$  = Maternal additive interaction variance,  $V_{DmE}$  = Maternal dominance interaction variance and  $V_e$  = Residual variance.

## 2.2 亲本遗传效应值的预测

杂交亲本育种价值的大小直接关系到油菜品质改良的效果。表 2 结果表明,多数亲本的胚加性效应、细胞质效应和母体加性效应已达到显著水平,说明这些亲本不同遗传体系的基因效应具有明显增加或降低杂种后代硫苷含量的作用,特别是各遗传体系的基因主效应尤为明显。各个亲本中以 P8 表现为最好,不同年份的遗传总效应均可以明显降低杂

交后代的硫苷含量 ( $G_t = A + AE + C + CE + Am + AmE$  和  $G_t = A + AE + C + CE + Am + AmE$  分别为 - 78.52 和 - 28.41  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ); P3 亲本的  $G_t$  和  $G_t$  也分别达到 - 12.17 和 - 10.91  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ , 这些亲本在不同环境中的遗传效应具有较好的稳定性。P1、P5 和 P6 等亲本则会明显增加后代的硫苷含量,不同环境中的  $G_t$  和  $G_t$  分别达到 71.39、24.34、18.65  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  (1999 年) 和 10.12、25.82、0.18  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  (2000 年)。亲本 P2 和 P7 的遗传效应在不同环境中具有不同的表现,在一年中表现增值作用,另一年为减值作用。油菜品质育种中的目标之一是降低油菜种子的硫苷含量,所以 P8 和 P3 作为“双低”油菜育种中改良硫苷含量的亲本可能可以取得较好的效果。

## 2.3 杂交组合显性效应预测和杂种优势分析

利用杂种优势是提高油菜产量和品质的有效措施之一。在  $F_2$  油菜籽 ( $F_1$  植株上的种子) 硫苷含量的遗传变异中,除了一部分由胚加性效应和细胞质效应引起的遗传变异外,还有一部分变异是由不同遗传体系基因显性效应所引起的,这是产生  $F_2$  油菜籽硫苷含量等品质性状杂种优势的重要原因。所以,根据  $F_2$  显性效应值可以判断其杂种优势的大小。表 3 结果表明油菜籽硫苷含量可以产生较为明显的杂种优势,受到胚优势和母体优势的共同作用。

表2 油菜硫苷含量的遗传效应预测值

Table 2 Predicating genetic effects of glucosinolates content in rapeseed

亲本 Parent	胚加性效应 Embryo additive effect			细胞质效应 Cytoplasmic effect			母体加性效应 Maternal additive effect			$G_t$	$G_t$
	A	AE	AE	C	CE	CE	Am	AmE	AmE		
	P1	87.52 **	-	-	- 131.65 **	4.31	- 56.96	111.21 **	-		
P2	- 17.18 **	-	-	34.53 *	- 6.03	15.31	- 21.91 +	-	-	- 10.59	10.75
P3	5.57 **	-	-	- 4.06	0.32	1.58	- 14.00	-	-	- 12.17	- 10.91
P4	- 27.16 **	-	-	52.11 *	21.21	1.80	- 37.30 **	-	-	8.85	- 10.56
P5	- 22.36 **	-	-	58.85 *	11.20	12.68	- 23.35 *	-	-	24.34	25.82
P6	9.41 **	-	-	- 1.71	6.61	- 11.87	4.34	-	-	18.65	0.18
P7	- 27.85 **	-	-	33.71	- 6.06	18.91	- 21.76 +	-	-	- 21.95	3.02
P8	- 7.95 *	-	-	- 41.78	- 31.56	18.55	2.78	-	-	- 78.52	- 28.41

注: +, \* 和 \*\* 分别为达到了 0.10、0.05 和 0.01 显著水平。  $G_t$  = 总遗传效应值, 和 分别指 1999 和 2000 年。

Notes: +, \* and \*\* standing for significant difference at 0.10, 0.05 and 0.01 level, respectively. P1 = Youcai 601, P2 = Gaoyou 605, P3 = Huanshuang 3, P4 = Yunyou 8, P5 = Zhongyou 821, P6 = Eyouchangjia, P7 = Zhong R-888, P8 = Tower. A = Embryo additive main effect, AE = Embryo additive interaction effect, C = Cytoplasm main effects, CE = Cytoplasmic interaction effect, Am = Maternal additive main effects, AmE = Maternal additive interaction effects.  $G_t$  = Total genetic effect, and referred to 1999 and 2000, respectively.

表3 F<sub>2</sub> 硫苷显性效应预测值(极差)Table 3 Predicating dominance effects (range) for glucosinolates content of F<sub>2</sub> generation

参数 Parameter	显性效应 Dominance effects		显性互作效应 Dominance interaction effects			
	组合数 Crosses	平均值(极差) Mean (range)	1999		2000	
			组合数 Crosses	平均值(极差) Mean (range)	组合数 Crosses	平均值(极差) Mean (range)
胚显性效应 D 或 DE	总值 Total	28 (- 27.57 ~ 38.80)	28 (- 28.61 ~ 24.95)	2.23 (- 28.61 ~ 24.95)	28 (- 12.49 ~ 13.83)	1.50 (- 12.49 ~ 13.83)
	正值 Positive	20 (0.41 ~ 38.80)	15 (1.71 ~ 24.95)	10.81 (1.71 ~ 24.95)	13 (0.41 ~ 13.83)	6.79 (0.41 ~ 13.83)
	负值 Negative	8 (- 27.57 ~ - 0.60)	13 (- 28.61 ~ - 0.19)	- 5.20 (- 28.61 ~ - 0.19)	15 (- 12.49 ~ - 0.02)	- 4.61 (- 12.49 ~ - 0.02)
母体显性效应 Dm 或 DmE	总值 Total	28 (- 55.94 ~ 46.60)	28 (- 177.65 ~ 75.70)	- 7.71 (- 177.65 ~ 75.70)	28 (- 51.40 ~ 109.70)	7.50 (- 51.40 ~ 109.70)
	正值 Positive	15 (0.71 ~ 46.60)	13 (1.11 ~ 75.70)	34.38 (1.11 ~ 75.70)	12 (4.65 ~ 109.70)	51.00 (4.65 ~ 109.70)
	负值 Negative	13 (- 55.94 ~ - 1.70)	15 (- 177.65 ~ - 0.99)	- 43.07 (- 177.65 ~ - 0.99)	16 (- 51.40 ~ - 1.69)	- 25.13 (- 51.40 ~ - 1.69)

由表3可知,甘蓝型油菜28个组合的胚显性效应平均值为 $6.05 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ,变异范围为 $-27.57 \sim 38.80 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ,说明由胚显性效应引起的杂种优势在总体上会增加F<sub>2</sub>油菜籽中的硫苷含量。但仍可发现有8个组合的胚显性效应表现为负值( $-27.57 \sim -0.60 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ),这些组合的胚优势会降低F<sub>2</sub>硫苷含量。由于1999和2000两年的显性互作效应平均值均表现为正值(2.23和 $1.50 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ),说明胚互作优势也主要表现为增加F<sub>2</sub>油菜籽中的硫苷含量。在28个杂交组合中,P3 × P4组合的胚显性效应为 $-12.87 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ,而1999和2000两年的胚显性互作效应也分别为 $-0.19$ 和 $-7.31 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ,故其胚优势和胚互作优势均能降低硫苷含量。P2 × P8和P6 × P7两个组合也具有类似结果。

在由母体植株基因型引起的显性效应中,28个组合的平均值为 $-0.27 (-55.94 \sim 46.60 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1})$ ,说明母体优势在总体上能够降低F<sub>2</sub>硫苷含量。其中母体显性效应表现为负值的有13个组合,负向的母体优势可以明显减少F<sub>2</sub>硫苷含量( $-55.94 \sim -1.70 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ )。母体显性互作效应分析表明,1999年的母体显性互作效应可以降低硫苷含量( $-7.71 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ),而2000年则表现为增加硫苷含量( $7.50 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ),说明母体互作优势对油菜籽硫苷含量的影响在不同环境条件下会有所差异。其中P5 × P6组合的母体显性效应( $-52.77 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ )以及两年母体显性互作效应分别为 $-30.01$ 和 $-38.37 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ,均能明显降低油菜籽硫苷含量。P2 × P7、P2 × P8和P4 × P5也有类似的

表现,在低硫代杂交组合选配中可以利用。

综合考虑油菜硫苷含量的胚显性效应和母体显性效应表现,可以发现P2 × P8组合同时具有较好的胚优势和母体优势,两者均表现为降低杂交组合的硫苷含量,在低硫代组合选配中可能可以加以利用。

### 3 讨论

胚(子叶)是双子叶作物种子的主要部分。油菜籽品质数量性状遗传表现的复杂性就体现在它可能会同时受到多套不同遗传系统基因效应的控制,增加了品质性状遗传分析和遗传改良的困难。从遗传组成来看,二倍体胚是不同于母体植株的遗传世代,其营养物质来自于二倍体母体植株。由合子分化发育而成的胚胎是油菜发育成正常植株的雏形个体,含有全部遗传信息,在种子发育过程中胚基因的表达会影响油菜籽品质性状的表现。此外,二倍体母体植株可以通过提供胚(子叶)营养物质来影响品质性状的表现,细胞质基因也可通过叶绿体(或线粒体)的作用而影响植株的光合(或呼吸)作用,从而间接影响性状表达。基因型 × 环境互作效应是一部分可以遗传的基因效应,许多数量性状的表现也同时受到基因型与环境互作的影响。一般来说,环境互作效应强的种子性状表现容易受到环境条件变化的影响,通过选择只能获得适应某一种环境条件的特殊育种材料;而环境互作效应小的性状通过选择后可以获得适应不同环境的育种材料,进而育成可以适应不同地区种植的新品种。因此,多数油菜籽品质数量性状的表现可能会同时受到上述不同遗传

体系基因效应以及环境互作效应的共同影响,在育种工作中,进行油菜籽品质性状的多种遗传效应定量分析是很有必要的,有利于提高油菜杂交后代的选择效率。

本试验中发现母体植株遗传效应对油菜籽硫苷含量表现的影响要大于细胞质效应,胚(子叶)效应的影响相对较小。试验结果还进一步发现硫苷的母体遗传是以加性效应为主,母体加性效应和细胞质效应的总和达到总遗传效应的 67.43%,说明杂种后代同一株上的油菜籽硫苷含量在种子间分离不大。根据母体植株的总体表现进行选择可以取得明显的效果,选择过程较为简单,特别是在低世代选择中的作用尤为明显。由于试验发现硫苷含量的遗传受细胞质效应的影响较大,因此细胞质的差异可能会显著影响不同组合或杂交后代的硫苷含量,育种中可以采用正反交的方法,筛选出细胞质效应良好的组合和后代,进而提高品质育种的改良效果。因此,进行不同遗传体系基因效应的分析更能明确油菜品质性状的遗传规律,排除环境因素和显性效应对直接或间接选择的干扰,取得更好的育种效果。

Kondra 等<sup>[12]</sup>、周永明等<sup>[13]</sup>、Krzymanski<sup>[14]</sup>、Morice<sup>[15]</sup>、张书芬等<sup>[16]</sup>的研究结果已经发现油菜籽硫苷含量会单独或同时受到胚(子叶)、细胞质或母体等不同遗传体系基因效应的影响,但尚未明确环境互作效应在控制硫苷含量中的作用。利用油菜完全双列杂交的 3 个世代(亲本、 $F_1$  和  $F_2$ ) 在不同环境中,可以有效地分析出控制油菜籽硫苷含量表现的遗传主效应以及基因型与环境互作效应值,同时定量分解出胚、细胞质和母体植株等不同遗传体系的遗传效应分量,进一步阐明油菜籽品质性状的遗传机制。Shi 等在油菜籽芥酸含量的试验中已发现芥酸含量同时受到胚、细胞质和母体效应以及环境互作效应的影响<sup>[17]</sup>。本研究的结果也进一步证实了母体植株基因型的遗传效应在油菜籽硫苷含量表现中起着主要作用,细胞质效应对品质性状的表现也不可忽视。由于存在着明显的基因型与环境的互作效应影响,因此在油菜品质育种中需要注意各种基因效应在不同环境下表达水平上的差异,进而育成可以适应不同地区或某一特定地区种植的新品种。同时选用遗传主效应表现良好以及在不同环境条件下互作效应表现较为稳定的优良亲本如 P8(Tower) 和 P3(华双 3 号) 亦能提高品质改良效果。

致 谢 本研究的分析软件由朱军教授提供;供试

材料中油菜 601、高油 605 和 Tower 由周伟军教授提供;华双 3 号、云油 8 号、鄂油长英、中油 821 和中 R-888 由吴江生老师提供,特此致谢!

## References

- [1] Mbu T-M (牟同敏), Liu H-L (刘后利). Genetic and analysis on the total content of glucosinolates in seeds of rape (*Brassica napus* L.). *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 1990, **16**(2): 97—105
- [2] Mawson R, Heaney R K, Zdunczyk Z, Kozłowska H. Rapeseed meal-glucosinolates and their antinutritional effects. Part 5. Animal reproduction. *Nahrung*, 1994, **38**(6): 588—598
- [3] Naczki M, Amaroeicz R, Sullivan A, Shahidi F. Current research developments on polyphenolics of rapeseed/canola: a review. *Food Chemistry*, 1998, **62**(4): 489—502
- [4] Phillip S. Proceedings of the 7th International Rapeseed Congress, 1987. 516—520
- [5] Zhu J. Analytic methods for seed models with genotype  $\times$  environment interactions. *Acta Genetica Sinica* (遗传学报), 1996, **23**(1): 56—68
- [6] Zhu J. Methods of predicting genotype value and heterosis for offspring of hybrids. *J Biomath*, 1993, **8**(1): 32—44
- [7] Zhu J, Weir B S. Diallel analysis for sex-linked and maternal effects. *Theor Appl Genet* 1996, **92**: 1—9
- [8] Zhu J, Weir B S. Analysis of cytoplasmic and maternal effects. I. A genetic model for diploid plant seeds and animals. *Theor Appl Genet*, 1994, **89**: 153—159
- [9] Miller R G. The Jackknife, A review. *Biometrika*, 1974, **61**: 1—15
- [10] Leonardo V, Becker H C. Analysis of total glucosinolate content and individual glucosinolates in *Brassica* spp. by near-infrared reflectance spectroscopy. *Plant Breeding*, 1998, **117**: 97—102
- [11] Wu J-G (吴建国), Shi C-H (石春海), Fan L-J (樊龙江). Calibration optimization for analyzing erucic acid and glucosinolate content of rapeseed by Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS). *J Chin Cer Oils Assoc* (中国粮油学报), 2002, **17**(2): 59—62
- [12] Kondra I P, Stefason B R. Inheritance of the major glucosinolates of rapeseed (*Brassica napus*). *Canad J Plant Sci*, 1970, **50**: 643—647
- [13] Zhou Y-M (周永明), Liu H-L (刘后利). The heredity of the total glucosinolate content in rapeseed (*B. napus*). *Oil Crops of China* (中国油料), 1987, **9**(1): 15—18
- [14] Krzymanski J. Inheritance of glucosinolates content of rapeseed (*Brassica napus*). *J Intern Sur Colza*, Paris, 1970. 2—3
- [15] Morice J. Selection of a variety of rapeseed without erucic acid and without glucosinolates. *Proc 4th Intern Rapeseed Cong*, Paris, 1974. 31—37
- [16] Zhang S-F (张书芬), Song W-G (宋文光), Ren R-J (任乐见), Tian B-M (田保明), Wen Y-C (文雁成), Liu J-M (刘建民), Wang J-P (王建平). Studies on hereditary capacity of quantitative characters and gene effects of CMS double low *Brassica napus*. *Oil Crops of China* (中国油料), 1996, **18**(3): 1—3
- [17] Shi C H, Zhang H Z, Wu J G, Li C T, Ren Y L. Genetic and genotype  $\times$  environment interaction effects analysis for erucic acid content in rapeseed (*Brassica napus* L.). *Euphytica*, 2003, **130**: 249—254