

东北春大豆“三合结构”定量方程确立及其高产途径分析

肖佳雷^{1,2}, 赵明³, 王贵江², 李炜², 毕影东², 来永才², 刘淼², 刘明²

(1. 沈阳农业大学农学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 黑龙江省农业科学院耕作栽培研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086; 3. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 选用抗旱性品种抗线7号、黑农65、绥农15为试材, 利用全生育期大豆相对化LAI动态模型归一法, 分析大豆抗旱品种“三合结构”定量方程及参数间函数关系。结果表明: 3个品种相对LAI动态定量方程均符合 $y = (a + bx) / (1 + cx + dx^2)$, 同一品种动态模型、光合参数及产量构成参数变化趋势年际间相同, 而同一年内不同品种间各参数差异达极显著水平; 高产品种具有较高的单株粒数和平均净同化率; 3个抗旱品种产量与平均作物生长率、收获指数、平均净同化率、单位面积粒数、单株粒数和单株粒重均呈正相关, 且产量主要决定于前两个因素。因此, 通过改变外界栽培条件, 提高群体平均生长率和单位面积粒数, 保证群体具有较高收获指数, 可最终实现大豆高产。

关键词: 春大豆; “三合结构”; 产量性能

中图分类号: S565.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-9841(2013)06-0773-05

Establishment of Quantitative Equation of ‘Three Combination Structure’ and Its High-yield Pathway for Northeast Spring Soybeans

XIAO Jia-lei^{1,2}, ZHAO Ming³, WANG Gui-jiang², LI Wei², BI Ying-dong², LAI Yong-cai², LIU Miao², LIU Ming²

(1. Agronomy College of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 2. Crop Tillage and Cultivation Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 3. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The high-yield pathway has been put forward for grain crops such as maize (*Zea mays* L.), rice (*Oryza sativa* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) with the concept of ‘three combination structure quantitative expression’. In this paper, we analyzed the quantitative equation and relationship between its parameters ‘three combination structures’ using the normalized dynamic models of relative LAI, with three drought resistant variety Kangxian 7, Heinnong 65 and Suinong 15 as materials. The relative LAI dynamic quantitative equation were all accorded with $y = (a + bx) / (1 + cx + dx^2)$ in three varieties. The dynamic models, photosynthetic and yield component parameters had the same tendency in different years in the same variety, while varied significantly among varieties. High-yield varieties had higher seed No. per plant (SN) and mean net assimilation rate (MNAR). Seed yield positively correlated with mean crop growth rate (MCGR), harvest index (HI), MNAR, total seed number per m² (TSN), SN and seed weight per plant, especially for MCGR and HI. Hence, it is possible to enhance soybean yield by increasing mean crop growth rate and harvest index.

Key words: Spring soybeans; Three combination structure; Yield performance

作物产量高低是作物光合性能指标与产量性能指标是否协调的最终体现, 作物群体结构合理与否与作物最终产量密切相关。量化分析作物产量形成是作物栽培学与作物生理学领域的重要研究方向^[1-2]。抗旱高产目标下的大豆群体要求通过精确的外界环境调控措施实现物质生产因素与产量构成因素间的高效协调, 而精确的调控则需要相对具体的量化指标理论来指导^[3]。作物“三合结构”模式以源库为中心, 将源与光合性能因素相联系, 库与产量构成因素相对应, 以流(物质、能量、信息)连接各有关性状, 构成产量形成的网络关系, 使人们能够较全面系统地认识产量形成, 弥补了3个

理论各自独立存在的不足与缺陷^[4-7]。前人以东北平原春玉米、华北平原冬小麦、夏玉米以及长江中下游平原稻麦、双季稻和再生稻为研究对象, 对高产作物群体源库关系以及产量形成生态条件进行了初步量化分析^[8-10]。作物“三合结构”理论及定量方程的提出, 确定了作物的品种改良和栽培技术改进主要是沿着从源库的数量性能提高向着质量性能提高的方向发展, 为作物建立高产合理群体提供了新的思路和途径^[11-12]。本研究应用“三合结构”理论对东北春大豆抗旱品种的群体生理指标进行定量分析, 以期明确春大豆产量性能定量方程主要参数动态特征以及参数间的相互关系, 初步探索

收稿日期: 2013-06-29

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(200903007-09, 200903040); 国家自然科学基金(31101171)。

第一作者简介: 肖佳雷(1978-), 在读博士, 副研究员, 主要从事作物高产理论与栽培生理研究。E-mail: j_l_x@163.com。

通讯作者: 赵明(1956-), 男, 研究员, 主要从事作物高产、高效生产和高光效、抗逆生理研究。E-mail: zhaomingcau@vip.tom.com。

大豆产量进一步提高的关键限制性因素及其变化特点,为实现大豆高产突破提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于 2010 ~ 2011 年在黑龙江省甘南县音河镇兴十四村黑龙江省(兴十四)现代农业示范园区进行。供试材料为前期试验筛选出的 3 个抗旱性大豆品种抗线 7 号、黑农 65 和绥农 15。每品种播 0.2 hm², 不设重复, 采用大区对比试验, 垄宽 65 cm, 垄上双行精量点播, 2010 年 5 月 10 日播种, 2011 年 5 月 12 日播种, 保苗 23 万~26 万株·hm⁻²。施磷酸二铵 150 kg·hm⁻², 尿素 75 kg·hm⁻², 硫酸钾 45 kg·hm⁻²。常规田间管理。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 生育时期 采用 Fehr 等^[13]提出的大豆生育时期鉴定方法, 调查大豆出苗期(VE)、始花期(R1)、始荚期(R3)、鼓粒期(R6)及始熟期(R7)。

1.2.2 单株叶面积及净同化率 在 R1、R3、R6 及 R7 期每处理连续取 5 株, 利用比叶重法测量单株叶面积。

净同化率(MNAR): 在大田取一定土地面积上大豆植株 5 株为一组, 取 3 组, 用叶面积仪测定叶面积。然后将植株放入 105℃烘箱内 30 min 杀青, 在 80℃下 24 h 烘干, 称重。3 组平均叶面积记为 L_{A1}, 3 组平均干重记为 W₁, 时间记为 T₁; 若干天后重复上述测定得 L_{A2} 和 W₂, 时间记为 T₂。MNAR = (1/L_A)(W₂ - W₁)/(T₂ - T₁), 其中 L_A = (L_{A1} +

L_{A2})/2。

1.2.3 产量及其构成因素 大豆成熟后每处理取 1 m², 统计株数后实收测产, 并折算为公顷产量。同时每处理选取有代表性的 10 株室内人工考种, 测定单株重、单株荚数、单株粒数和单株粒重, 并计算收获指数(单株粒重/单株重)。

1.2.4 大豆相对化 LAI 动态模型 不同生育时期的大豆叶面积和出苗—成熟的天数分别进行归一化处理, 将最大叶面积指数(LAI_{max})和出苗至成熟天数分别定为 1, 得到相对 LAI(L_R)(取值范围[0-1])和相对时间(取值范围[0-1]), 然后利用 Curve Expert 1.38 对相对 LAI 和相对时间进行模拟。

1.3 数据分析

利用 Excel 2003 和 DPS 7.05 进行分析统计。

2 结果与分析

2.1 大豆相对化 LAI 动态模型的建立

不同品种相对 LAI 动态方程均符合 $y = (a + bx)/(1 + cx + dx^2)$, 且相关系数都在 0.996 以上, 达到差异极显著水平; 同一个品种动态方程中的相应系数年际间变化不大, 而同一年内品种间相关系数差异明显(表 1)。由图 1 可知, 同一品种不同年际间相对 LAI 动态模型变化存在一定差异, 同一年内不同品种相对 LAI 动态模型变化差异极显著, 不同品种出现波峰时间不同, 波峰宽度和高度存在明显差异。进一步表明, 不同抗旱品种叶面积变化规律差异较大, 是导致其产量高低的一个原因。

表 1 不同品种群体的 LAI 模拟方程参数值

Table 1 Parameters for LAI simulation model on population of different soybean cultivars

年份 Year	品种 Cultivar	密度 Density/ × 10 ⁴ plants·hm ⁻²	产量 Yield/kg·hm ⁻²	最大 LAI LAI _{max}	参数 Parameter				相关系数 r
					a	b	c	d	
2010	抗线 7 号 Kangxian 7	23.0	1480.5	1.89	-0.1153	0.5066	-3.0185	2.7669	0.9965**
	黑农 65 Heinong 65	23.0	2140.5	1.54	-0.0498	0.2041	-2.827	2.169	0.9989**
	绥农 15 Suinong 15	25.0	1222.5	2.06	-0.0083	0.1108	-0.3080	2.525	0.9987**
2011	抗线 7 号 Kangxian 7	24.0	1774.5	1.92	-0.1035	0.4999	-3.2636	3.1907	0.9990**
	黑农 65 Heinong 65	24.0	2440.5	1.56	-0.0490	0.2041	-2.827	2.169	0.9995**
	绥农 15 Suinong 15	26.0	1668.0	1.98	-0.0037	0.1079	-3.1876	2.7058	0.9985**

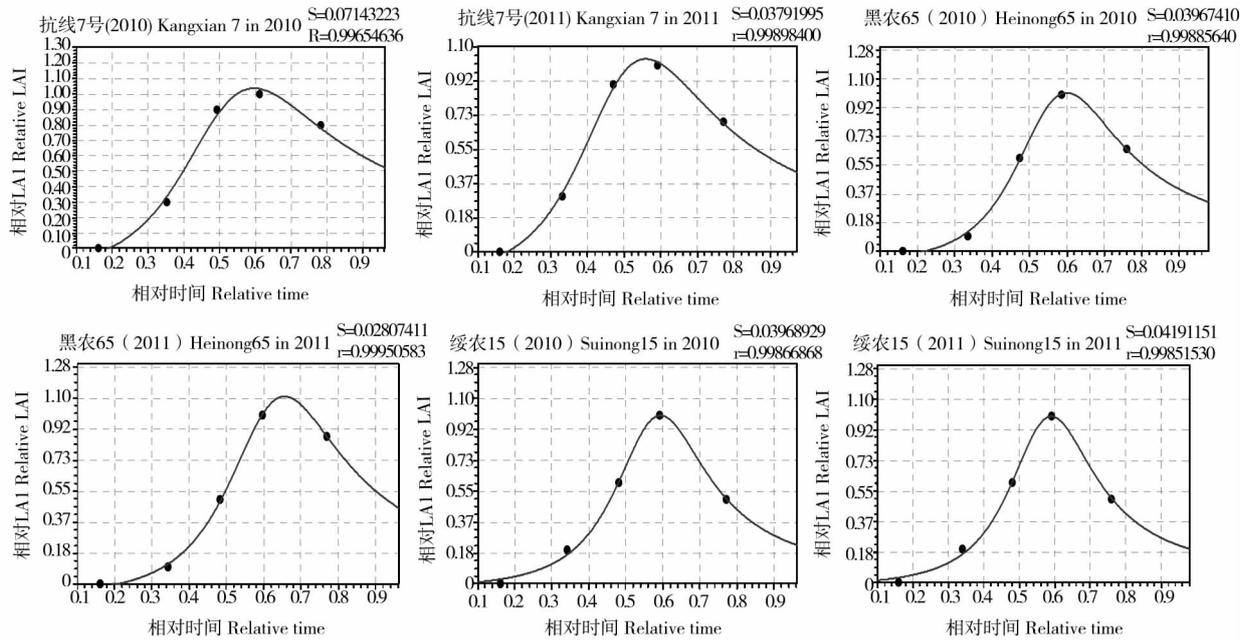


图 1 不同品种群体的相对 LAI 动态模型

Fig. 1 Relative LAI dynamic model on population of different soybean cultivars

2.2 不同品种“三合结构”定量表达式参数

由表 2 可知,不同品种“三合结构”定量参数年际间变化趋势基本相同,而同一年内品种间参数变化相差较大。产量高的品种具有较高的单株粒数(SN)和平均净同化率(MNAR),例如,黑农 65 产量最高,极显著高于抗线 7 号和绥农 15,其 SN 和 MNAR 也较其他 2 个品种明显增高。而产量与平均叶面积指数(MLAI)和单株粒重(SW)变化没有明显规律性。

2.3 不同品种“三合结构”定量方程参数间的相关分析

抗旱品种光合参数和产量构成因素之间存在

相关性,且不同指标间的相关性年际间有一定差异(表 3)。两年数据中,产量 Y 与 MCGR,TSN 与 SN 均呈极显著正相关;而 MCGR 与 TSN,SN,MNAR 与 SN,Y 与 TSN 和 SN 均呈显著正相关。另外,2010 年 MNAR 与 TSN 不显著,而 2011 年变为显著,说明气候条件对 MNAR 和 TSN 影响较大。综合以上结果,初步认为大豆产量水平首先决定于 MCGR,其次为 TSN 和 SN。因此,可以通过改变外部环境提高大豆群体 MCGR,促使单位面积有效 TSN 增加,最终获得高产。

表 2 不同品种“三合结构”定量表达式

Table 2 Parameters for “three combination structure” quantitative equations of different soybean cultivars

年份 Year	品种 Cultivar	光合参数 Photosynthetic parameters				产量构成参数 Yield components			产量 Y
		MLAI	D	MNAR	HI	PN	SN	SW	
2010	抗线 7 号 Kangxian 7	1.89	113	3.70	0.41	23.0	65.6	21.5	1480.5 bB
	黑农 65 Heinnong 65	1.54	115	8.19	0.41	23.0	127.3	20.3	2140.5 aA
	绥农 15 Suinong 15	2.06	115	3.29	0.43	25.0	65.7	20.4	1222.5 bB
2011	抗线 7 号 Kangxian 7	1.92	115	3.81	0.43	24.0	67.0	22.5	1774.5 bB
	黑农 65 Heinnong 65	1.56	116	8.10	0.45	24.0	129.0	21.3	2440.5 aA
	绥农 15 Suinong 15	1.98	117	3.91	0.43	26.0	70.0	21.4	1668.0 bB

MLAI:生育期内平均叶面积指数;MNAR:平均净同化率;D:光合时间;HI:收获指数;Y:籽粒产量;PN:株数;SW:单株粒重;SN:单株粒数。

MLAI: Mean leaf area index; MNAR: Mean net assimilation rate ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); D: Duration of photosynthesis (d); HI: Harvest index; Y: Seed yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); PN: Plant No. per m^2 ; SW: Seed weight per plant (g); SN: Seed No. per plant.

表3 不同品种“三合结构”定量方程参数间的相关系数

Table 3 The correlation coefficients between parameters of quantitative equation for different soybean cultivars

年份 Year		MCGR	HI	MNAR	PN	TSN	SN	SW	Y
2010	MLAI	0.1700	0.5300	-0.5700	0.7300 *	-0.0400	-0.1700	0.5200	0.1000
	MCGR		0.5200	0.6900	-0.1600	0.8100 *	0.8300 *	0.4700	0.9300 **
	HI			-0.0500	0.2100	0.2200	0.1800	0.7500 *	0.6700
	MNAR				-0.6600	0.6600	0.7800 *	0.0000	0.6300
	PN					-0.0300	-0.2000	-0.0400	-0.3000
	TSN						0.9800 **	-0.1100	0.7100 *
	SN							-0.0900	0.7500 *
	SW								0.5400
2011	MLAI	0.2300	0.2100	-0.5400	0.5200	-0.0900	-0.1700	0.5100	0.1100
	MCGR		0.8100 *	0.6700	0.0100	0.8100 *	0.7900 *	0.5100	0.9500 **
	HI			0.5500	0.0700	0.3500	0.3400	0.8600 **	0.8800 **
	MNAR				-0.4000	0.7300 *	0.7800 *	0.0900	0.6900
	EN					-0.1100	-0.2500	0.1800	-0.1400
	TSN						0.9900 **	-0.0900	0.6900 *
	SN							-0.1000	0.7000 *
	SW								0.6000

MCGR:平均作物生长率;TSN:单位面积粒数。其他缩写同表2。

MCGR:Mean crop growth rate;TSN:Total seed No. per m²;Other abbreviations were the same with table 2. * P<0.05, ** P<0.01.

3 结论与讨论

前人通过研究玉米、小麦和水稻的产量构成、光合性能及源库理论等提出了作物产量“三合结构”模式,同时指出了作物产量提高过程中源库性状的变化趋势,使其在作物品种改良及生产调控理论指导中得到较广泛的应用^[14-15]。作物不同产量水平“三合结构”方程各项参数的配置上不同,既有反映物质生产的主要指标,也有反映产量构成的关键参数,参数间的函数关系式基本涵盖了以往此类源库研究提出的关键指标^[16-17]。所以,明确产量形成各指标的调节效应和定量关系,优化各参数构成是高产突破的重要途径。

本研究建立大豆抗旱品种“三合结构”定量方程,初步实现了大豆群体源库概念的数量化、指标化和方程化。本研究表明,产量与MCGR、HI、MNAR、TSN、SN和SW均呈正相关,且产量主要决定于MCGR和HI,其次为MNAR、TSN和SW。因此,通过改变大豆群体的外界条件,提高大豆MCGR,进一步增加单位面积TSN,使群体获得较高的收获指数,可实现大豆高产的目标。

参考文献

[1] 金剑,刘晓冰,王光华,等.大豆高产群体的生态生理特征[J].

中国油料作物学报,2003,25(3):109-114. (Jin J, Liu X B, Wang G H, et al. Eco-physiological characters of high yielding population in soybean [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2003, 25(3):109-114.)

[2] 刘丽君,林浩,唐晓飞,等.干旱胁迫对不同生育阶段大豆产量形态建成的影响[J].大豆科学,2011,30(3):405-412. (Liu L J, Lin H, Tang X F, et al. Drought stress influence soybean yield morphogenesis in different growth stages [J]. Soybean Science, 2011, 30(3):405-412.)

[3] 赵双进,张孟臣,杨春燕,等.栽培因子对大豆生长发育及群体产量的影响Ⅱ.肥水、生长调控措施对产量的影响[J].中国油料作物学报,2003,25(2):48-51. (Zhao S J, Zhang M C, Yang C Y, et al. Effect of culture factors on growth and yield of soybean II. Effect of fertilizer application, watering, growth regulate measures on yield [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2003, 25(2):48-51.)

[4] 赵明,王树安,李少昆,等.论作物产量研究的“三合结构”模式[J].北京农业大学学报,1995,21(4):359-363. (Zhao M, Wang S A, Li S K, et al. Model of the three combination structure of crop yield analysis [J]. Journal of Beijing Agricultural University, 1995, 21(4):359-363.)

[5] 赵明,李少昆.作物产量研究“三合理论”及其应用与发展[J].北京农业大学学报,1995,21(增刊):70-75. (Zhao M, Li S K. 'Three Combination Structure' of crop yield and its application and development [J]. Journal of Beijing Agricultural University, 1995, 21(Suppl.):70-75.)

[6] 赵明,付金东.玉米高产性能量化分析及其技术途径[J].玉米科学,2008,16(4):8-12,16. (Zhao M, Fu J D. Quantitative a-

- analysis and technical approaches to high-yield performance in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(4): 8-12, 16.)
- [7] Toll M, Lee E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize[J]. *Field Crops Research*, 2002, 88: 161-169.
- [8] 东先旺, 刘绍棣, 刘培利. 光温条件对高产夏玉米产量及产量性状的影响[J]. *莱阳农学院学报·社会科学版*, 1991, 8(3): 192-195. (Dong X W, Liu S D, Liu P L. Effects of light and temperature on yield and its components of high yielding summer corn (*Zea mays* L.) [J]. *Journal of Laiyang Agricultural College (Social Science)*, 1991, 8(3): 192-195.)
- [9] 孙锐, 彭畅, 丛艳霞, 等. 不同密度春玉米叶面积系数动态特征及其对产量的影响[J]. *玉米科学*, 2008, 16(4): 61-65. (Sun R, Peng C, Cong Y X, et al. Dynamic characteristics of leaf area index and their effects on yield in different density spring-maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(4): 61-65.)
- [10] 陈国庆, 朱艳, 曹卫星. 冬小麦叶片生长特征的动态模拟[J]. *作物学报*, 2005, 31(11): 1524-1527. (Chen G Q, Zhu Y, Cao W X. Modeling leaf growth dynamics in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(11): 1524-1527.)
- [11] 赵全志, 高尔明, 黄丕生, 等. 源库质量与作物超高产栽培及育种[J]. *河南农业大学学报*, 1999, 33(3): 226-230. (Zhao Q Z, Gao E M, Huang P S, et al. The relationship between source-sink quality and crop cultivation and breeding for maximum yield[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Henanensis*, 1999, 33(3): 226-230.)
- [12] 赵明, 李建国, 张宾, 等. 论作物高产挖潜的补偿机制[J]. *作物学报*, 2006, 32(10): 1566-1573. (Zhao M, Li J G, Zhang B, et al. The compensatory mechanism in exploring crop production potential[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(10): 1566-1573.)
- [13] Fehr W R, Caviness C E, Burmood D T, et al. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill [J]. *Crop Science*, 1971, 11: 929-931.
- [14] 张宾, 赵明, 董志强, 等. 作物高产群体 LAI 动态模拟模型的建立与检验[J]. *作物学报*, 2007, 33(4): 612-619. (Zhang B, Zhao M, Dong Z Q, et al. Establishment and test of LAI dynamic simulation model for high yield population[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(4): 612-619.)
- [15] 侯玉虹, 陈传永, 郭志强, 等. 作物高产群体干物质积累动态模型的构建及生长特性分析[J]. *玉米科学*, 2008, 16(6): 90-95. (Hou Y H, Chen C Y, Guo Z Q, et al. Establishment of dry matter accumulation dynamic simulation model and analysis of growth characteristics for high-yielding population of spring maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(6): 90-95.)
- [16] Brassard J P, Singh B. Impacts of climate change and CO₂ increase on agricultural production and adaptation options for Southern, Canada [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 13: 241-265.
- [17] 张宾, 赵明, 董志强, 等. 作物产量“三合结构”定量表达及高产分析[J]. *作物学报*, 2007, 33(10): 1674-1681. (Zhang B, Zhao M, Dong Z Q, et al. ‘Three Combination Structure’ quantitative expression and high yield analysis in crops [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(10): 1674-1681.)
-
- (上接第 772 页)
- [9] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 169-172. (Li H S. The principles and technology of physiological and biochemical experiments of plants [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 169-172.)
- [10] Gove J P, Hoyle M C. The isozymic similarity of IAA oxidase to peroxidase in birch and horseradish [J]. *Plant Physiology*, 1975, 56(5): 684-687.
- [11] 郑光华, 史忠礼, 赵同芳. 实用种子生理学 [M]. 北京: 农业出版社, 1990: 18-28. (Zhen G H, Shi Z L, Zhao T F. Practical seed physiology [M]. Beijing: Agriculture Press, 1990: 18-28.)
- [12] Kermode A R, Dumbroff E B, Bewley J D. The role of maturation drying in the transition from seed development to germination VII [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1989, 40: 303-313.
- [13] Kermode A R, Bewley J D, D Gupta J, et al. The transition from seed development to germination; a key role for desiccation [J]. *Horticulture Science*, 1986, 21 (Special supplement): 1113-1118.
- [14] Syankwilimba I S K, Cochrane M P, Duffus C M. Precocious germination of barley (*Hordeum vulgare* L.) as affected by elevated temperature during grain development [J]. *Seed Science and Technology*, 1999, 27: 427-432.
- [15] Styer R C, Cantliffe D J. Dependence of seed vigor during germination on carbohydrate source in endosperm mutants of maize [J]. *Plant Physiology*, 1984, 76: 196-200.
- [16] 杨浚, 陆建飞. 水稻穗发芽与籽粒内可溶性糖和 α-淀粉酶活性的品种差异 [J]. *南京农业大学学报*, 1991, 14(1): 17-21. (Yang J, Lu J F. Soluble sugar level and alpha-amylase activity in grains of some rice varieties with distinguishable viviparity during grains developing [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1991, 14(1): 17-21.)
- [17] 张海峰, 卢荣禾. 小麦穗发芽抗性机理与遗传研究 [J]. *作物学报*, 1993, 19(6): 523-524. (Zhang H F, Lu R H. Study on the mechanism of the resistance to pre-harvest sprouting and inheritance in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1993, 19(6): 523-524.)
- [18] 沈正兴, 俞世蓉, 吴兆苏. 小麦品种抗穗发芽性的研究 [J]. *中国农业科学*, 1991, 24(5): 44-50. (Shen Z X, Yu S R, Wu Z S. Study on pre-harvest sprouting resistance in wheat cultivars [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1991, 24(5): 44-50.)
- [19] 张瑞茂, 侯国佐, 朱永生. 甘蓝型油菜芽粒形成的时期及对发芽出苗率影响的研究 [J]. *中国油料作物报*, 1991(4): 26-28, 35. (Zhang R M, Hou G Z, Zhu Y S. Formative period of bud grain in *B. napus* L. and effect on seedling germination rate [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 1991(4): 26-28, 35.)