

# 谷子抽穗期与农艺性状的相关与回归分析

贾小平<sup>1</sup>, 李剑峰<sup>1</sup>, 赵渊<sup>1</sup>, 全建章<sup>2</sup>, 董志平<sup>2</sup>, 戴凌峰<sup>1</sup>, 张小梅<sup>1</sup>, 张博<sup>1</sup>, 袁玺垒<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 河南科技大学农学院, 洛阳 471023; <sup>2</sup> 河北省农林科学院谷子研究所 / 国家谷子改良中心, 石家庄 050035)

**摘要:** 抽穗期是农作物的重要性状, 决定着作物的地区和季节适应性。明确不同谷子品种适合的种植区域, 对生产实践具有重要意义。在海南、洛阳、吉林 3 个地区连续 2 年调查了 160 份谷子资源的抽穗期、株高、穗长、穗重等 9 个主要性状。相关性分析发现 3 个地区抽穗期与千粒重均呈负相关, 而在海南、洛阳 2 个地区抽穗期与株高、叶片数、穗长、穗粗、穗重、穗码数、穗粒重均呈正相关, 吉林地区抽穗期与穗粒重呈负相关, 说明随着抽穗期的适当延长, 谷子主要通过增加子粒数目提高产量, 而抽穗期过度推迟, 则可能导致产量潜力下降; 方差分析表明, 3 个地区抽穗期对千粒重、株高、叶片数、穗长、穗粗、穗重、穗粒重、穗码数均有显著影响 ( $P < 0.05$ )。在海南, 随着抽穗期的延长穗粒重递增, 抽穗期 40 d 以上品种穗粒重最大; 在洛阳, 抽穗期 50~60 d 的品种穗粒重最高; 在吉林, 抽穗期 70~80 d 的品种穗粒重最高。求得每个品种在 3 个地区的穗粒重均值, 以此为依据筛选出 53 份广生态适应性品种, 在 3 个地区成功建立了叶片数、株高、穗码数对抽穗期的最佳回归方程。本研究表明确定一定抽穗期范围内谷子主要通过增加穗粒数而不是千粒重来实现增产, 筛选出的广生态适应性谷子资源以及建立的回归方程为开展广适应育种、利用抽穗期信息对叶片数、株高、穗码数进行准确选择奠定了基础。

**关键词:** 谷子; 抽穗期; 地区适应性; 农艺性状; 回归分析

## Correlation and Regression Analysis between Heading Date and Agronomic Traits in Foxtail Millet

JIA Xiao-ping<sup>1</sup>, LI Jian-feng<sup>1</sup>, ZHAO Yuan<sup>1</sup>, QUAN Jian-zhang<sup>2</sup>, DONG Zhi-ping<sup>2</sup>, DAI Ling-feng<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-mei<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, YUAN Xi-lei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023; <sup>2</sup> Institute of Millet, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences / National Millet Improvement Center, Shijiazhuang 050035)

**Abstract:** Heading date is an important character, which determines the region and season adaptability of crops. Making clear the suitable planting regions for different foxtail millet cultivars is very important to production practice. 160 foxtail millet resources were investigated for nine traits (e.g. heading date, plant height, panicle length, panicle weight and so on) at Hainan, Luoyang and Jilin in two consecutive years. Correlation analysis showed that a negative correlation was existed between heading date and 1000-grain weight across three regions, but a positive correlation was existed between heading date and plant height, leaf number, panicle length, panicle diameter, panicle weight, branch number per panicle and grain weight per panicle at Hainan and Luoyang, a minor negative correlation was existed between heading date and grain weight per panicle at Jilin, which indicated that with the proper delay of heading date, the grain yield of foxtail millet could be increased by grain number increasement, while excessive delay of heading date might lead to decline of production potential. Variance analysis showed that heading date had significant effect on plant height, leaf number, panicle length, panicle diameter, panicle weight, branch number per panicle, grain weight per panicle and 1000-grain weight ( $P < 0.05$ ) across three regions. At Hainan, with the delay of heading date, grain weight per panicle gave an increasing trend. The cultivars with their heading date longer than 40 d possessed the largest grain weight per panicle. At Luoyang,

收稿日期: 2018-10-14 修回日期: 2018-11-12 网络出版日期: 2018-12-28

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20181227.1012.001.html>

第一作者研究方向为谷子资源评价与分子育种, E-mail: jiaxiaoping2007@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (31471569)

Foundation project: National Natural Science Foundation of China (31471569)

the cultivars with their heading date ranged from 50 d to 60 d possessed the highest grain weight per panicle. At Jilin, the cultivars with their heading date ranged from 70 d to 80 d possessed the highest grain weight per panicle. The average grain weight per panicle of each variety across three regions was measured and based on which 53 broad ecological adaptability foxtail millet varieties were screened out. The optimum regression equations between plant height, leaf number, branch number per panicle and heading date were established across three regions. This study concluded that within a certain heading date range, the yield of foxtail millet was increased by increasing grain number but not 1000-grain weight. The selected broad ecological adaptability resources and the established regression equations provided foundation for broad-adaptability cultivar breeding and accurately selection of plant height, leaf number and branch number per panicle by heading date information.

**Key words:** *Setaria italica* (L.) P.Beauv.; heading date; regional adaptability; agronomic traits; regression analysis

抽穗期是作物重要农艺性状之一,和生育期长短直接相关,对维持产量稳定性具有重要意义<sup>[1]</sup>。光温等环境因素对抽穗期有明显的影响,随着光温环境条件的改变作物对抽穗期做出适当调整从而实现特定生态区的适应。目前抽穗期在禾本科作物水稻中进行了深入的研究,发现其长短受内部发育机制和外部环境因素共同作用,遗传基础较复杂。通过 QTL 定位研究获得了大量控制抽穗期的基因位点,克隆了一些关键基因,如 *Ghd7*、*Hd3a*、*Ehd1*、*Hd1* 等<sup>[2-5]</sup>。谷子 (*Setaria italica* (L.) P.Beauv.) 是我国传统的粮食作物,具有营养均衡、高光合效率、耐瘠薄、基因组小等优点,近些年被作为 C<sub>4</sub> 作物和能源作物的模式作物受到国内外广泛重视<sup>[6]</sup>,中国的华大基因公司和美国能源部分别完成了谷子全基因组序列的测定<sup>[7-8]</sup>。近些年谷子基因组水平的研究已有大量报道,如基于重测序的主要农艺性状的全基因组关联分析研究<sup>[9-10]</sup>、基于杂交分离群体的主要性状的 QTL 定位研究<sup>[11-13]</sup>以及逆境胁迫相关基因的克隆及功能分析<sup>[14-15]</sup>。然而作为一种短日照喜温作物,谷子对光温较敏感,表现出明显的区域性特点,因此对谷子资源进行合理的生态适应性评价,明确不同谷子品种最适的种植区域对生产实践具有重要指导意义,同时通过生态适应性评价也可以筛选出一些广生态适应性的品种资源,对选育跨区域、广适应性的谷子新品种具有重要现实意义。抽穗期是一个受光温等环境影响明显、能够反映作物生态适应性的重要性状<sup>[16-17]</sup>,研究其在不同光温环境条件下的表现及与其他重要农艺性状的关系,建立抽穗期与适应地区的对应关系,就可实现对谷子资源生态适应性进行合理评价。然而目前有关谷子抽穗期与生态适应性对应关系方面的研究还未见报道,少数学者研究了逆境胁迫或者特定栽培条件谷子抽穗期形态及生理生化指标变化特点<sup>[18-19]</sup>、抽穗期与形

态性状、光合性状及产量间的相关性分析<sup>[20-21]</sup>、基于数据库性状信息揭示生育期对茎秆、穗部性状的影响<sup>[22]</sup>。上述研究存在所用品种数量有限、选择的生态区域单一等问题,还不能充分确定谷子抽穗期与主要产量性状的关系,本研究在海南、洛阳、吉林 3 个不同的光温环境下连续 2 年调查了 160 份谷子资源的抽穗期、千粒重、株高、叶片数、穗长、穗粗、穗重、穗粒重、穗码数 9 个主要性状,通过分析不同光温条件下谷子资源抽穗期的表现规律及其与 8 个农艺性状的相关性,揭示谷子抽穗期与生态适应性之间存在的特定关系,对 160 份谷子资源生态适应性进行了评价。

## 1 材料与方法

### 1.1 谷子的种植

本研究所用的 160 份谷子材料包括来自中国的河南、河北、山东、山西、陕西、黑龙江、吉林、辽宁、新疆、内蒙古、甘肃、青海、宁夏、西藏及国外等地区的品种资源。2015 年 5 月中旬至 10 月中旬、2016 年 5 月中旬至 10 月中旬将 160 份谷子材料种植于河南科技大学试验田 (34°37' N, 112°26' E) 和吉林市农业科学院试验田 (42°31' N, 125°40' E)。2015 年 11 月中旬至 2016 年 2 月中旬、2016 年 11 月中旬至 2017 年 2 月中旬将 160 份谷子材料种植于海南乐东县九所镇 (18°45' N, 109°10' E)。种植方式为每品种 (系) 种植 1 行,行长 2 m,行距为 60 cm,株距为 3~5 cm,地两头设 3 行保护行,管理方式按当地常规方法。

### 1.2 性状调查

抽穗期调查方式为记录每个品种的出苗期和 50% 植株抽穗的日期,抽穗期 (d) = 抽穗期日期 - 出苗日期,成熟期每个品种选择行中部 10 株调查株高、叶片数、主穗长和主穗粗,将 10 株谷穗收获后进

行自然风干,风干后的谷穗测量穗重、穗码数、穗粒重和千粒重。

### 1.3 数据处理方法

将抽穗期划分7个组:20 d组(抽穗期 <30 d), 30 d组(30 d ≤ 抽穗期 <40 d), 40 d组(40 d ≤ 抽穗期 <50 d), 50 d组(50 d ≤ 抽穗期 <60 d), 60 d组(60 d ≤ 抽穗期 <70 d), 70 d组(70 d ≤ 抽穗期 <80 d), 80 d组(抽穗期 ≥ 80 d),利用 SPSS 软件完成多因素方差分析,包括抽穗期组、年份(2015年、2016年)、地区(海南、洛阳、吉林)、品种(160份谷子品种)等因素对谷子农艺性状的影响,抽穗期对各个农艺性状的多重检验用邓肯多重比较法。此外用线性、二次方、幂函数3种回归模型进行了各个农艺性状对抽穗期的回归分析,并从中筛选出最佳回归方程。

## 2 结果与分析

### 2.1 谷子抽穗期与农艺性状的相关分析

谷子抽穗期与农艺性状的相关系数见表1,从

表中发现3个不同的生态区谷子抽穗期均与千粒重呈负相关,其中在海南地区抽穗期与千粒重达到显著负相关( $P<0.05$ ),而在洛阳、吉林地区抽穗期与千粒重达到极显著负相关( $P<0.01$ )。除了与千粒重存在负相关外,海南、洛阳生态区抽穗期与株高、叶片数、穗长、穗粗、穗重、穗粒重、穗码数均存在极显著正相关( $P<0.01$ ),而吉林生态区抽穗期与株高、穗粗、穗码数3个性状存在极显著正相关( $P<0.01$ ),说明谷子抽穗期对千粒重具有负向效应,而对其他7个重要农艺性状在海南、洛阳生态区均具有正向效应,适当延长抽穗期虽然减少了单位子粒重量,但是可以通过增加穗长、穗粗和穗码数来增加子粒数目,提高穗粒重,实现稳产和丰产。在吉林生态区抽穗期只对株高、穗粗、穗码数有极显著正向效应,与穗重略呈正相关,但与穗粒重略呈负相关,说明长日照延长抽穗期虽然增加了穗重,但有效子粒重没有增加,产量潜能实际上降低了。

表1 抽穗期与农艺性状的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between heading date and agronomic traits

地区 Region	性状 Traits	千粒重 1000-grain weight	株高 Plant height	叶片数 No. of leaves	穗长 Panicle length	穗粗 Panicle diameter	穗重 Spike weight	穗粒重 Grain weight per panicle	穗码数 Spikelet number
海南 Hainan	抽穗期	-0.123*	0.404**	0.191**	0.645**	0.470**	0.585**	0.525**	0.429**
	千粒重		-0.029	0.001	-0.020	0.004	-0.004	0.011	-0.017
	株高			0.784**	0.592**	0.557**	0.608**	0.628**	0.629**
	叶片数				0.304**	0.601**	0.552**	0.605**	0.607**
	穗长					0.590**	0.760**	0.717**	0.568**
	穗粗						0.869**	0.856**	0.551**
	穗重							0.982**	0.656**
洛阳 Luoyang	抽穗期	-0.207**	0.634**	0.810**	0.397**	0.326**	0.245**	0.175**	0.587**
	千粒重		-0.096	-0.173**	0.021	0.068	0.294**	0.325**	-0.010
	株高			0.709**	0.649**	0.320**	0.353**	0.274**	0.588**
	叶片数				0.384**	0.528**	0.496**	0.420**	0.581**
	穗长					0.224**	0.304**	0.184**	0.503**
	穗粗						0.703**	0.633**	0.417**
	穗重							0.961**	0.415**
吉林 Jilin	抽穗期	-0.377**	0.391**	0.110	0.082	0.260**	0.119	-0.009	0.262**
	千粒重		0.123	-0.230**	0.274**	0.108	0.304**	0.317**	-0.235**
	株高			-0.511**	0.461**	0.340**	0.500**	0.396**	-0.005
	叶片数				-0.092	-0.077	-0.182**	-0.171**	0.358**
	穗长					0.241**	0.390**	0.297**	0.263**
	穗粗						0.664**	0.562**	-0.177**
	穗重							0.956**	-0.097
	穗粒重								-0.139*

\*表示相关系数显著( $P<0.05$ ), \*\*表示相关系数极显著( $P<0.01$ )

\* indicates that the correlation coefficient is significant ( $P<0.05$ ), \*\* indicates that the correlation coefficient is very significant ( $P<0.01$ )

## 2.2 抽穗期对谷子农艺性状的影响

抽穗期对谷子农艺性状的影响见表 2。在海南地区,随着抽穗期的延长,谷子的千粒重表现出先增高后降低的趋势,抽穗期为 30 d 组品种千粒重略高于抽穗期为 20 d 组,但是两者间差异不显著 ( $P>0.05$ ),两组的千粒重均显著高于 40 d 组品

种 ( $P<0.05$ );而株高、叶片数、穗长、穗粗、穗重、穗粒重、穗码数 7 个性状随抽穗期的延长表现为逐步增高的趋势,20 d 组、30 d 组、40 d 组两两之间差异显著 ( $P<0.05$ )。以穗粒重为评价指标,海南地区抽穗期在 40 d 以上的品种表现最好,其次是 30 d 组品种,20 d 组品种表现最差。

表 2 抽穗期对农艺性状的影响

Table 2 Effect of heading date on agronomic traits of millet

地区 Region	抽穗期 (d) Heading date	千粒重 (g) 1000-grain weight	株高 (cm) Plant height	叶片数 No. of leaves	穗长 (cm) Panicle length	穗粗 (cm) Panicle diameter	穗重 (g) Spike weight	穗粒重 (g) Grain weight per panicle	穗码数 Spikelet number per panicle
海南 Hainan	20	3.22+0.05a	89.54+1.60c	7.81+0.16c	10.31+0.21c	5.43+0.10c	5.62+0.25c	4.72+0.23c	46.54+1.40c
	30	3.24+0.04a	104.09+1.39b	8.81+0.16b	13.98+0.28b	6.69+0.09b	10.46+0.33b	8.49+0.28b	61.44+1.34b
	40	2.77+0.19b	125.75+3.89a	9.51+0.38a	18.45+0.72a	7.43+0.39a	12.69+1.33a	9.77+1.14a	70.80+4.03a
洛阳 Luoyang	20	2.56+0.20a	71.32+4.11e	5.00+0.26e	9.79+1.12c	4.09+0.33 d	2.13+0.56c	1.52+0.45c	34.02+5.6d
	30	2.60+0.08a	101.57+2.31d	7.21+0.22d	15.61+0.53b	5.16+0.15c	5.43+0.43b	3.74+0.32b	67.80+2.9c
	40	2.68+0.05a	118.28+1.22c	9.08+0.10c	17.25+0.30b	6.00+0.08ab	8.11+0.26a	6.01+0.22a	88.31+1.54b
	50	2.50+0.06a	131.30+1.84b	10.52+0.11b	17.60+0.39b	6.43+0.10a	8.46+0.29a	6.13+0.24a	97.42+1.74ab
吉林 Jilin	60	1.99+0.23b	144.36+6.49a	12.59+0.61a	22.88+1.12a	5.43+0.25bc	6.29+0.91b	3.61+0.57b	108.33+3.5a
	40	2.91+0.14ab	104.54+6.60d	14.98+1.65c	21.93+1.71b	6.74+0.53 d	9.98+1.54c	7.41+1.17c	84.80+8.82c
	50	3.12+0.10a	138.36+3.62c	15.22+0.66bc	25.83+0.94a	8.11+0.25c	16.75+1.01b	13.27+0.85b	104.65+3.57b
	60	2.93+0.07ab	155.20+3.63b	15.86+0.46ab	26.85+0.60a	8.76+0.17bc	19.30+0.83b	14.24+0.67ab	111.64+2.58ab
	70	2.74+0.05bc	166.24+3.61a	15.92+0.36ab	26.46+0.50a	9.69+0.17a	22.51+0.69a	16.37+0.57a	115.90+2.76ab
	80	2.48+0.08c	170.85+5.01a	16.84+0.53a	26.47+0.73a	9.14+0.27ab	17.53+1.17b	11.30+0.89b	123.17+4.22a

同列不同小写字母为差异显著 ( $P<0.05$ ),相同小写字母为差异不显著 ( $P>0.05$ )

The mean lower characters of the peer mean difference is significant ( $P<0.05$ ), the same lowercase letter is not significant ( $P>0.05$ )

在洛阳地区,随着抽穗期的延长,株高、叶片数、穗码数和穗长均表现出递增的趋势,其中株高、叶片数在各抽穗期组之间差异显著 ( $P<0.05$ ),穗码数在 50 d、40 d、60 d 三个组间差异不显著 ( $P>0.05$ ),其他各组之间差异显著 ( $P<0.05$ ),穗长在 60 d 组显著高于其他抽穗期组 ( $P<0.05$ ),30 d、40 d、50 d 组的穗长显著高于 20 d 组 ( $P<0.05$ )。穗粗、穗重、穗粒重在 20~50 d 抽穗期范围内随着抽穗期的延长表现递增趋势,但在 60 d 组时又表现下降,其中 50 d 组的穗粗要显著高于 20 d、30 d、60 d ( $P<0.05$ ),40 d 和 50 d 的穗重、穗粒重显著高于其他抽穗期组 ( $P<0.05$ )。千粒重在 20~40 d 抽穗期范围内表现递增趋势,50 d 开始到 60 d 表现为递减趋势,也就是 40 d 组品种千粒重最高。综合评价,抽穗期 40 d、50 d 两组品种穗粒重最高,在洛阳地区表现最好。

在吉林地区,株高、叶片数、穗码数随着抽穗期的延长而呈现递增的趋势,抽穗期为 70 d、80 d 两

个组的品种的株高显著高于抽穗期为 40 d、50 d、60 d 三个组的品种 ( $P<0.05$ );80 d 组的叶片数显著高于 40 d 和 50 d 组 ( $P<0.05$ ),与 60 d、70 d 的叶片数差异不显著 ( $P>0.05$ );抽穗期为 80 d 组的穗码数显著高于 40 d 和 50 d 组 ( $P<0.05$ ),与 60 d、70 d 的穗码数差异不显著 ( $P>0.05$ )。穗粗、穗重、穗粒重在 40~70 d 抽穗期范围内随着抽穗期的延长表现递增的趋势,到 80 d 时减小,70 d 组的穗粗显著高于 40 d、50 d、60 d 组 ( $P<0.05$ ),与 80 d 组的穗粗差异不显著 ( $P>0.05$ );70 d 组的穗重显著高于 40 d、50 d、60 d、80 d 组 ( $P<0.05$ );70 d 组的穗粒重显著高于 40 d、50 d、80 d 组 ( $P<0.05$ ),与 60 d 组穗粒重差异不显著 ( $P>0.05$ )。50 d、60 d、70 d、80 d 组的穗长显著高于 40 d 组 ( $P<0.05$ ),50 d、60 d、70 d、80 d 组的穗长两两组之间差异不显著 ( $P>0.05$ )。千粒重在抽穗期 40~50 d 之间表现上升,但是在 50~80 d 之间随着抽穗期的延长千粒重表现递减趋

势,也就是 50 d 组的千粒重最高。

### 2.3 广生态适应性谷子资源的筛选

本研究表明穗粒重对产量的贡献要高于千粒重,因此以穗粒重作为指标,以每个品种在海南、洛阳、吉林穗粒重的均值作为衡量该品种生态适应能力的标准,从 160 份谷子资源中筛选出生态适应性强的材料 53 份,其中排在前 10 位的有 5 个品种来自河南,包括豫谷 11、豫谷 18、豫谷 3、豫谷 2 和

豫谷 16,排在第 1 位的是白米 1 号,来自辽宁,剩余 4 个品种是来自山西的汾选 5 号,来自河北的 15HN-206、坝谷 210 和来自吉林的公谷 66。总体看筛选出的 53 份材料多数为育成品种,也有少数农家品种表现较广适应性,如红腿谷、钱串子、拔谷、白罗砂、沙粒滚、大九根齐、小金苗、大王国、皇龙谷、早白糯。53 份广适应性资源的具体信息见表 3。

表 3 筛选出广生态适应性谷子资源

Table 3 The broad-ecological adaptability foxtail millet resources identified within this study

适应性排序 Adaptability rank	品种 Variety	抽穗期 (d) Heading date	适应性排序 Adaptability rank	品种 Variety	抽穗期 (d) Heading date
1	白米 1 号	海南 (37), 洛阳 (50.5), 吉林 (75)	27	2013	海南 (33.5), 洛阳 (48), 吉林 (72)
2	豫谷 11	海南 (36), 洛阳 (51), 吉林 (75)	28	谷丰 2 号	海南 (36), 洛阳 (51.5), 吉林 (71)
3	豫谷 18	海南 (39), 洛阳 (51.5), 吉林 (76)	29	冀谷 15	海南 (37), 洛阳 (47), 吉林 (71)
4	豫谷 3	海南 (34.5), 洛阳 (49), 吉林 (78)	30	晋汾 13	海南 (34), 洛阳 (43.5), 吉林 (68)
5	15HN-206	海南 (33.5), 洛阳 (52), 吉林 (76)	31	钱串子	海南 (37), 洛阳 (50.5), 吉林 (75)
6	公谷 66	海南 (31.5), 洛阳 (40), 吉林 (67)	32	拔谷	海南 (35.5), 洛阳 (47.5), 吉林 (73.5)
7	豫谷 2 号	海南 (32.5), 洛阳 (46), 吉林 (85)	33	白罗砂	海南 (30), 洛阳 (37), 吉林 (63.5)
8	坝谷 210	海南 (28.5), 洛阳 (50.5), 吉林 (70.5)	34	鲁谷 3 号	海南 (34), 洛阳 (42.5), 吉林 (73)
9	汾选 5 号	海南 (37), 洛阳 (46), 吉林 (71)	35	冀谷 18	海南 (35), 洛阳 (47), 吉林 (75)
10	豫谷 16	海南 (38), 洛阳 (52.5), 吉林 (78.5)	36	赤谷 6 号	海南 (29), 洛阳 (39), 吉林 (61.5)
11	六十日	海南 (40), 洛阳 (58.5), 吉林 (87)	37	冀谷 22	海南 (32), 洛阳 (44.5), 吉林 (68)
12	衡谷 9 号	海南 (32), 洛阳 (47), 吉林 (63)	38	15HN-79	海南 (37), 洛阳 (52), 吉林 (75)
13	冀谷 26	海南 (35.5), 洛阳 (51), 吉林 (75)	39	冀特 5 号	海南 (33.5), 洛阳 (47), 吉林 (77.5)
14	11 邻 1071	海南 (39), 洛阳 (50.5), 吉林 (73)	40	沙粒滚	海南 (25), 洛阳 (38), 吉林 (56.5)
15	白谷 9 号	海南 (33), 洛阳 (41.5), 吉林 (64.5)	41	郑谷 2	海南 (32), 洛阳 (43), 吉林 (82)
16	坝谷 6	海南 (29), 洛阳 (51), 吉林 (74.5)	42	承谷 11	海南 (31), 洛阳 (46.5), 吉林 (76.5)
17	安 5424	海南 (29.5), 洛阳 (44), 吉林 (84)	43	大九根齐	海南 (28), 洛阳 (45.5), 吉林 (62.5)
18	532	海南 (37.5), 洛阳 (54.5), 吉林 (75.5)	44	冀谷 24	海南 (35), 洛阳 (48), 吉林 (73.5)
19	红腿谷	海南 (29), 洛阳 (40), 吉林 (68)	45	公谷 69	海南 (32), 洛阳 (47), 吉林 (73)
20	豫谷 6 号	海南 (35), 洛阳 (50), 吉林 (78)	46	冀谷 29	海南 (36.5), 洛阳 (58.5), 吉林 (84)
21	郑州 12	海南 (37.5), 洛阳 (49), 吉林 (73)	47	小金苗	海南 (30), 洛阳 (46.5), 吉林 (70)
22	晋谷 35 号	海南 (34.5), 洛阳 (54), 吉林 (80.5)	48	冀谷 17	海南 (30), 洛阳 (52.5), 吉林 (83)
23	06-766	海南 (32.5), 洛阳 (48), 吉林 (73)	49	郑 06-6	海南 (37), 洛阳 (51.5), 吉林 (78)
24	郑 05-2	海南 (37), 洛阳 (54.5), 吉林 (80)	50	大王国	海南 (30.5), 洛阳 (44), 吉林 (74)
25	豫谷 15	海南 (31.5), 洛阳 (48), 吉林 (76)	51	铁 7924	海南 (37), 洛阳 (53), 吉林 (89)
26	铁谷 4 号	海南 (37.5), 洛阳 (51.5), 吉林 (75)	52	皇龙谷	海南 (29.5), 洛阳 (52.5), 吉林 (71)
			53	早白糯	海南 (29.5), 洛阳 (47), 吉林 (79)

### 2.4 谷子农艺性状对抽穗期的回归分析

以抽穗期为自变量,然后分别以千粒重、株高、叶片数、穗长、穗粗、穗重、穗粒重和穗码数为因变量,利用 SPSS 软件作出线性、二次、幂

函数的回归曲线见图 1~图 8。可以看出,谷子的株高、叶片数、穗码数、千粒重的线性、二次、幂函数回归曲线在海南、洛阳、吉林 3 个地区较相近。

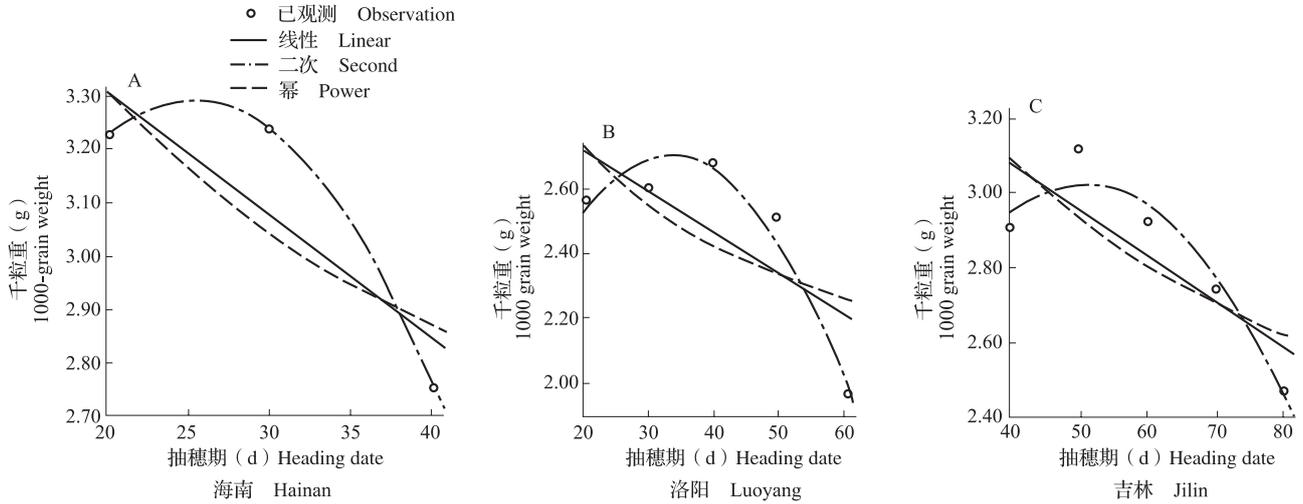


图 1 千粒重对抽穗期的回归曲线

Fig.1 Regression curves between 1000 grain weight and heading date

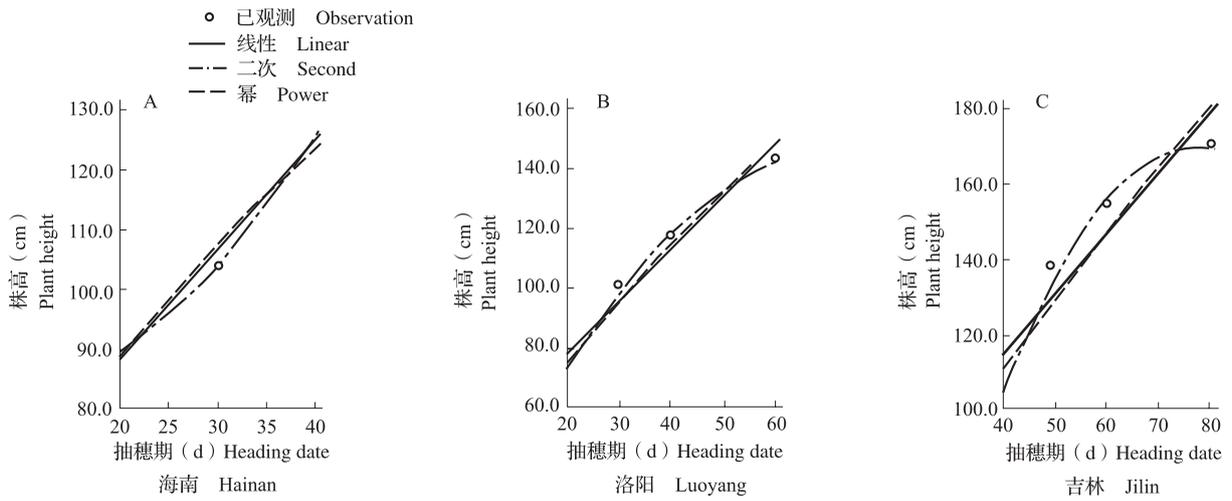


图 2 株高对抽穗期的回归曲线

Fig.2 Regression curves between plant height and heading date

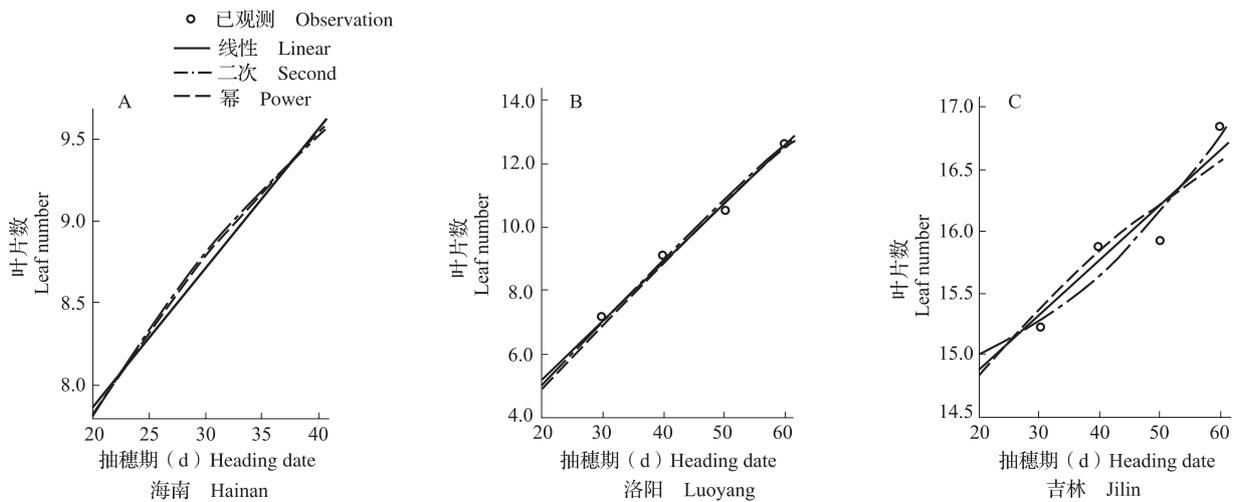


图 3 叶片数对抽穗期的回归曲线

Fig.3 Regression curves between leaf number and heading date

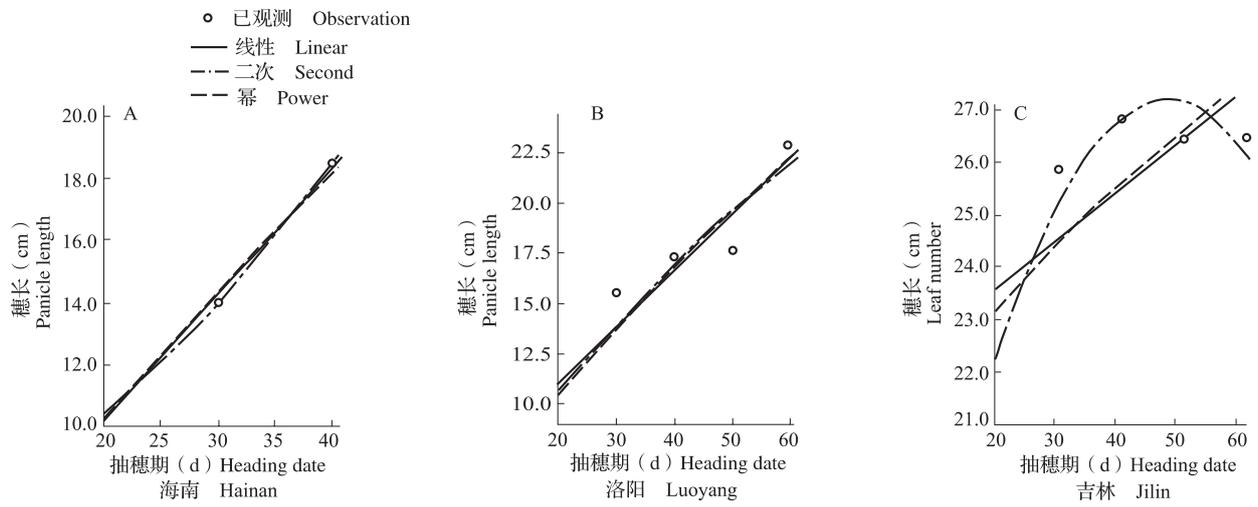


图4 穗长对抽穗期的回归曲线

Fig.4 Regression curves between panicle length and heading date

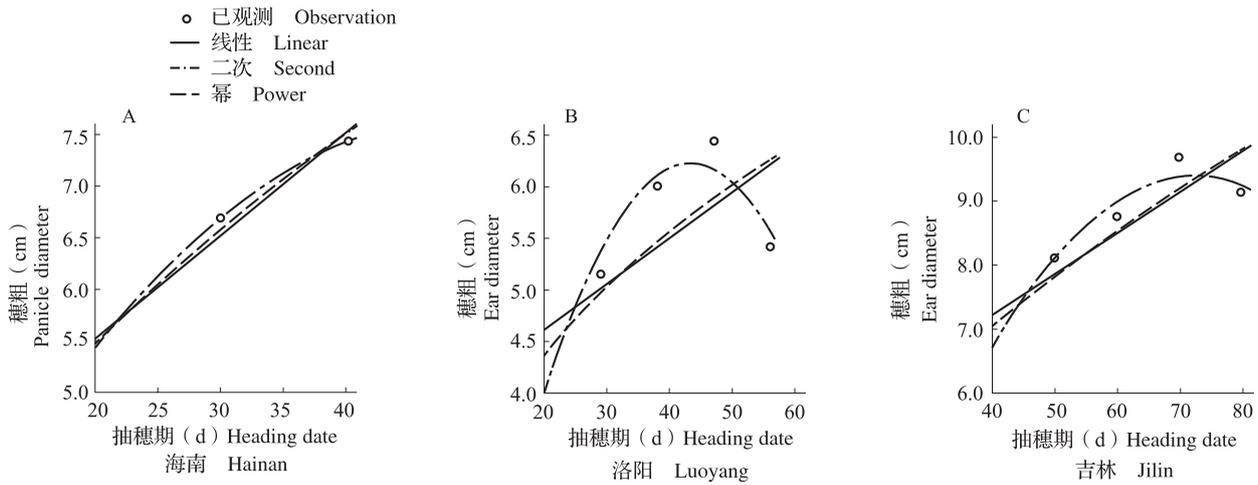


图5 穗粗对抽穗期的回归曲线

Fig.5 Regression curves between panicle diameter and heading date

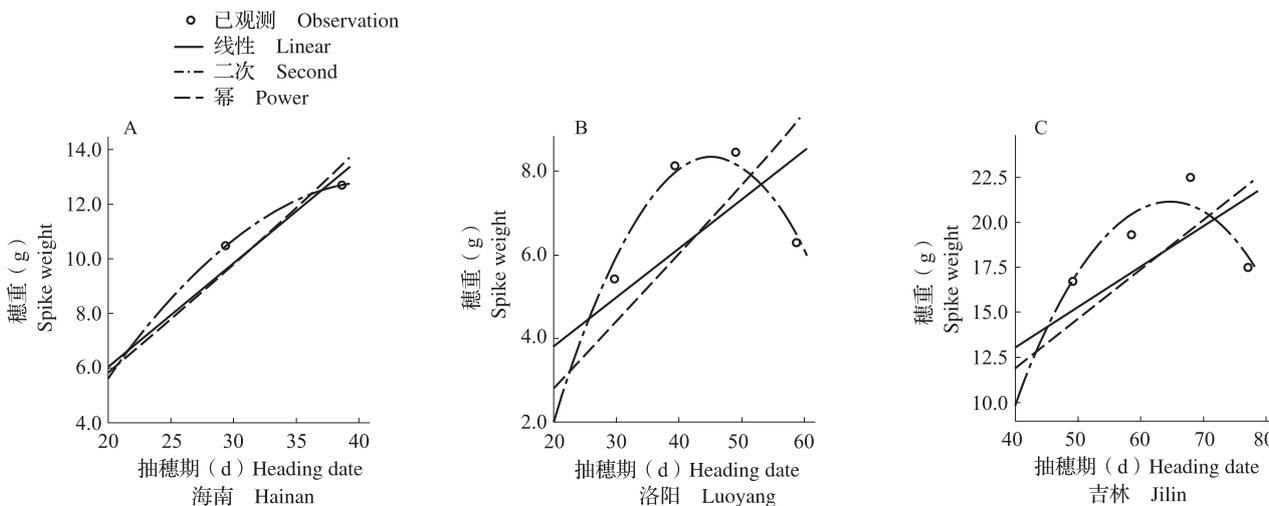


图6 穗重对抽穗期的回归曲线

Fig.6 Regression curves between spike weight and heading date

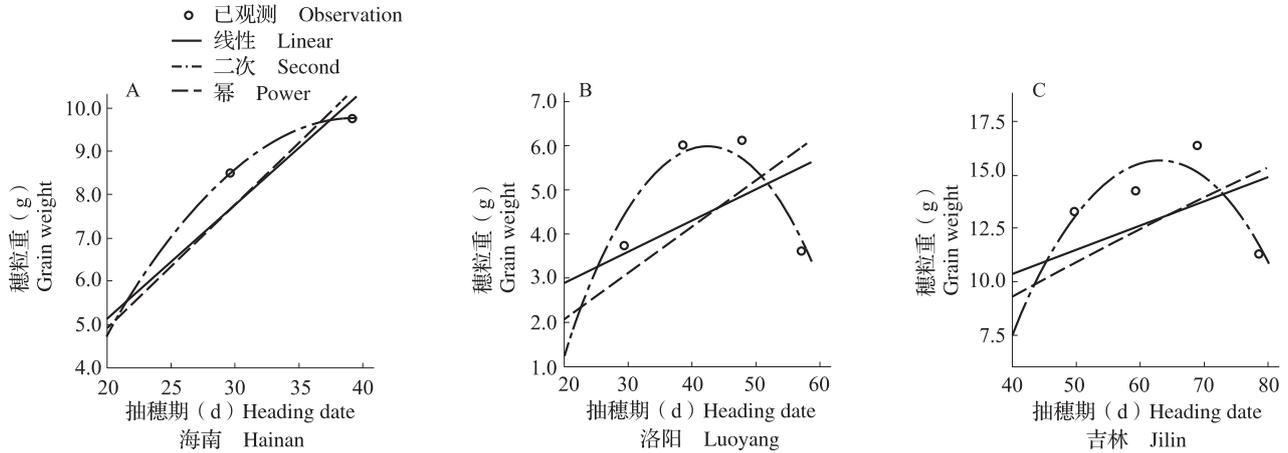


图 7 穗粒重对抽穗期的回归曲线

Fig.7 Regression curves between grain weight and heading date

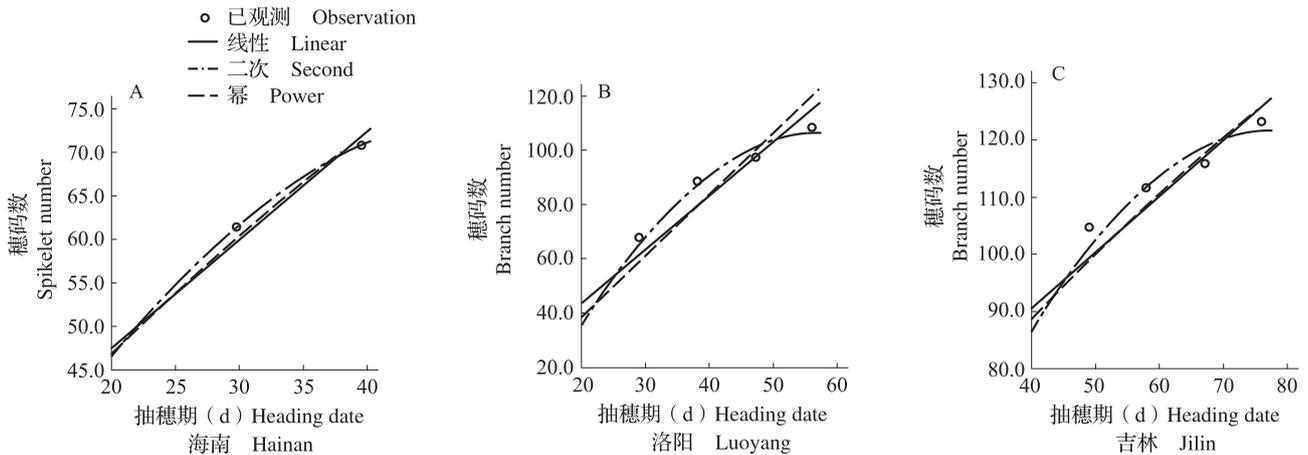


图 8 穗码数对抽穗期的回归曲线

Fig.8 Regression curves between spikelet number and heading date

由表 4 可以看出,株高、叶片数、穗码数对抽穗期回归的 3 种模型中,多数以二次方回归方程拟合效果最好,如 3 个地区的株高对抽穗期的二次回归方程分别为,海南地区:  $Y=81.790-0.324X+0.036X^2$ , 拟合度为 0.988, 回归关系显著 ( $P<0.05$ ); 洛阳地区:  $Y=4.958+3.934X-0.027X^2$ , 拟合度为 0.994, 回归关系极显著 ( $P<0.01$ ); 吉林地区:  $Y=-105.250+7.111X-0.046X^2$ , 拟合度为 0.995, 回归关系极显著 ( $P<0.01$ ); 海南、洛阳地区的叶片数对抽穗期的二次回归方程分别为,海南地区:  $Y=4.917+0.174X-0.001X^2$ , 拟合度为 1.000, 回归关系极显著 ( $P<0.01$ ); 洛阳地区:  $Y=0.758+0.226X+0.001X^2$ , 拟合度为 0.997, 回归关系极显著 ( $P<0.01$ ); 3 个地区的穗码数对抽穗期的回归方程分别为: 海南地区:  $Y=0.111+2.875X-0.028X^2$ , 拟合度为 0.994, 回归关系显著 ( $P<0.05$ ); 洛阳地区:  $Y=-49.276+5.048X-0.041X^2$ , 拟合度为 0.993, 回归关系极显著 ( $P<0.01$ ); 吉林地区:  $Y=-$

$12.555+3.273X-0.020X^2$ , 拟合度为 0.970, 回归关系显著 ( $P<0.05$ )。

在 3 个地区的谷子穗重对抽穗期的回归的 3 种模型中,均以二次方回归方程拟合效果最好,但是在海南地区中,谷子穗重对抽穗期的二次回归方程未达到显著水平 ( $P>0.05$ )。洛阳地区的谷子穗重对抽穗期的二次回归方程为:  $Y=-11.712+0.871X-0.009X^2$ , 拟合度为 0.985, 回归关系显著 ( $P<0.05$ ); 吉林地区的回归方程为:  $Y=-50.764+2.166X-0.016X^2$ , 拟合度为 0.950, 回归关系显著 ( $P<0.05$ )。谷子穗粗对抽穗期的回归的 3 种模型中,洛阳和吉林地区以二次方回归方程的拟合度最好,且回归关系达到显著水平 ( $P<0.05$ ), 洛阳地区的谷子穗粗对抽穗期的二次回归方程为:  $Y=-0.718+0.300X-0.003X^2$ , 拟合度为 0.953; 吉林地区的谷子穗粗对抽穗期的二次回归方程为:  $Y=-4.009+0.370X-0.003X^2$ , 拟合度为 0.969;

表4 谷子农艺性状对抽穗期的回归分析

Table 4 Regression analysis of heading characters of millet with agronomic traits

性状 Traits	种植地区 Plant region	回归模型 Regression model	显著性 <i>P</i> 值 Saliency <i>P</i> value	拟合度 $R^2$ Fitting degree $R^2$	回归方程 Regression equation	
千粒重 1000-grain weight	海南	线性	0.349	0.728	$Y=3.760-0.003X$	
		二次方	0.357	0.900	$Y=1.749+0.122X-0.003X^2$	
		幂函数	0.410	0.639	$Y=6.109(\ln X)^{-0.205}$	
	洛阳	线性	0.171	0.516	$Y=2.964-0.012X$	
		二次方	0.053	0.947	$Y=1.623+0.164X-0.001X^2$	
		幂函数	0.269	0.379	$Y=4.529(\ln X)^{-0.170}$	
	吉林	线性	0.091	0.668	$Y=3.576-0.012X$	
		二次方	0.059	0.094	$Y=1.305+0.068X-0.001X^2$	
		幂函数	0.134	0.581	$Y=7.495(\ln X)^{-0.240}$	
株高 Plant height	海南	线性	0.072	0.987	$Y=52.145+1.811X$	
		二次方	0.049	0.988	$Y=81.790-0.324X+0.036X^2$	
		幂函数	0.104	0.974	$Y=20.844(\ln X)^{0.488}$	
	洛阳	线性	0.003	0.962	$Y=43.042+1.758X$	
		二次方	0.006	0.994	$Y=4.958+3.934X-0.027X^2$	
		幂函数	0.001	0.978	$Y=11.304(\ln X)^{0.629}$	
	吉林	线性	0.015	0.893	$Y=50.741+1.605X$	
		二次方	0.005	0.995	$Y=-105.250+7.111X-0.046X^2$	
		幂函数	0.011	0.916	$Y=8.487(\ln X)^{0.698}$	
	叶片数 No. of leaves	海南	线性	0.064	0.990	$Y=6.155+0.085X$
			二次方	0.001	1.000	$Y=4.917+0.174X-0.001X^2$
			幂函数	0.004	0.999	$Y=3.327(\ln X)^{0.285}$
洛阳		线性	0.000	0.996	$Y=1.476+0.185X$	
		二次方	0.003	0.997	$Y=0.758+0.226X+0.001X^2$	
		幂函数	0.000	0.997	$Y=0.427(\ln X)^{0.825}$	
吉林		线性	0.008	0.928	$Y=13.112+0.044X$	
		二次方	0.051	0.949	$Y=15.011-0.023X+0.001X^2$	
		幂函数	0.013	0.902	$Y=8.275(\ln X)^{0.158}$	
穗长 Panicle length		海南	线性	0.036	0.991	$Y=2.039+0.407X$
			二次方	0.021	0.999	$Y=5.410+0.164X+0.004X^2$
			幂函数	0.046	0.995	$Y=0.841(\ln X)^{0.833}$
	洛阳	线性	0.014	0.899	$Y=5.363+0.282X$	
		二次方	0.096	0.904	$Y=2.976+0.418X-0.002X^2$	
		幂函数	0.011	0.915	$Y=1.351(\ln X)^{0.684}$	
	吉林	线性	0.140	0.570	$Y=19.687+0.097X$	
		二次方	0.066	0.934	$Y=-2.580+0.883X-0.007X^2$	
		幂函数	0.094	0.661	$Y=9.226(\ln X)^{0.250}$	
	穗粗 Panicle diameter	海南	线性	0.096	0.977	$Y=3.512+0.100X$
			二次方	0.068	0.978	$Y=1.314+0.258X-0.003X^2$
			幂函数	0.059	0.991	$Y=1.389(\ln X)^{0.457}$
洛阳		线性	0.191	0.486	$Y=3.846+0.039X$	
		二次方	0.047	0.953	$Y=-0.718+0.300X-0.003X^2$	
		幂函数	0.097	0.655	$Y=1.660(\ln X)^{0.324}$	
吉林		线性	0.043	0.792	$Y=4.657+0.064X$	
		二次方	0.031	0.969	$Y=-4.009+0.370X-0.003X^2$	
		幂函数	0.024	0.856	$Y=1.219(\ln X)^{0.475}$	
穗重 Spike weight		海南	线性	0.134	0.956	$Y=-1.014+0.353X$
			二次方	0.063	0.970	$Y=-11.905+1.138X-0.013X^2$
			幂函数	0.118	0.962	$Y=0.161(\ln X)^{1.198}$

表 4(续)

性状 Traits	种植地区 Plant region	回归模型 Regression model	显著性 $P$ 值 Saliency $P$ value	拟合度 $R^2$ Fitting degree $R^2$	回归方程 Regression equation	
穗重 Spike weight	洛阳	线性	0.183	0.499	$Y=1.545+0.113X$	
		二次方	0.015	0.985	$Y=-11.712+0.871X-0.009X^2$	
		幂函数	0.078	0.697	$Y=0.111(\ln X)^{1.077}$	
	吉林	线性	0.174	0.512	$Y=4.688+0.209X$	
		二次方	0.049	0.950	$Y=-50.764+2.166X-0.016X^2$	
		幂函数	0.107	0.633	$Y=0.441(\ln X)^{0.893}$	
穗粒重 Grain weight per panicle	海南	线性	0.177	0.924	$Y=0.083+0.253X$	
		二次方	0.078	1.000	$Y=-10.348+1.004X-0.013X^2$	
		幂函数	0.155	0.942	$Y=0.196(\ln X)^{1.077}$	
	洛阳	线性	0.345	0.294	$Y=1.572+0.066X$	
		二次方	0.052	0.948	$Y=-10.041+0.729X-0.008X^2$	
		幂函数	0.156	0.542	$Y=0.117(\ln X)^{0.960}$	
	吉林	线性	0.382	0.258	$Y=5.989+0.109X$	
		二次方	0.076	0.924	$Y=-44.260+1.882X-0.015X^2$	
		幂函数	0.258	0.392	$Y=0.713(\ln X)^{0.697}$	
	穗码数 Spikelet number	海南	线性	0.083	0.983	$Y=23.194+1.213X$
			二次方	0.048	0.994	$Y=0.111+2.875X-0.028X^2$
			幂函数	0.055	0.992	$Y=7.536(\ln X)^{0.611}$
洛阳		线性	0.009	0.925	$Y=7.877+1.782X$	
		二次方	0.007	0.993	$Y=-49.276+5.048X-0.041X^2$	
		幂函数	0.008	0.930	$Y=1.749(\ln X)^{1.033}$	
吉林		线性	0.013	0.905	$Y=55.236+0.880X$	
		二次方	0.030	0.970	$Y=-12.555+3.273X-0.020X^2$	
		幂函数	0.009	0.926	$Y=13.768(\ln X)^{0.505}$	

X 为抽穗期, Y 为每个谷子农艺性状

X is heading stage and Y is the corresponding agronomic trait

而海南地区的谷子穗粗对抽穗期的 3 种回归方程中以幂函数回归方程为最优, 拟合度为 0.991, 回归方程为  $Y=1.389(\ln X)^{0.457}$ , 但是未达到显著水平 ( $P>0.05$ )。谷子穗长对抽穗期的回归的 3 种模型中, 海南地区以二次方回归方程的拟合度最好, 且回归关系达到显著水平 ( $P<0.05$ ), 二次方回归方程为  $Y=5.410+0.164X+0.004X^2$ , 拟合度为 0.999; 洛阳地区以幂函数回归方程的拟合度最好, 且回归关系达到显著水平 ( $P<0.05$ ), 幂函数回归方程为  $Y=1.351(\ln X)^{0.684}$ , 拟合度为 0.915; 吉林地区的 3 种模型均未达到显著水平 ( $P>0.05$ )。在海南、洛阳、吉林这 3 个地方的千粒重和穗粒重对抽穗期的回归模型中均未达到显著水平 ( $P>0.05$ )。

### 3 讨论

抽穗期是决定作物品种地区适应性和季节适应性的关键因素, 对作物产量的形成有重要作用。研究表明抽穗期对光周期、逆境胁迫较敏感<sup>[16-17]</sup>。在谷子抽穗期相关研究中, 多数集中在逆境胁迫或特

定栽培条件下抽穗期生理生化指标的测定, 如徐丽霞等<sup>[18]</sup>研究了干旱胁迫条件下 3 个谷子品种抽穗期旗叶相对含水量、气孔导度、过氧化氢酶、叶绿素含量等指标的变化, 筛选出过氧化氢酶、光合速率、可溶性糖等抽穗期抗旱性品种筛选的指标。石建军等<sup>[19]</sup>研究了不同地膜处理对谷子抽穗期叶片叶绿素荧光参数的影响, 发现塑料地膜和液体地膜处理提高了杂交谷子抽穗期的光合效率。有关谷子抽穗期对其他主要农艺性状作用的报道较少, 李卫明<sup>[20]</sup>研究了 21 个谷子品种生育期、形态性状、品质性状、光合指标、产量之间的关系, 发现产量与抽穗期呈极显著正相关, 抽穗期分别与出苗期、苗期、拔节期、孕穗期、成熟期对产量的的互作效应比其他各生育期的主效应还大。赵禹凯等<sup>[21]</sup>对东北春谷区中晚熟谷子品种单株产量构成的主要农艺性状进行了相关和通径分析, 发现穗粒重、单穗重、亩穗数是构成单株产量的主要因素, 其次是抽穗期、株高等因素。杨慧卿等<sup>[22]</sup>对西北春谷中晚熟品种产量构成的主要农艺性状进行了相关和通径分析, 结果发现生育期、

穗粒重和单穗重是构成单株产量的主要因素,其次是株高和抽穗期。元旭朝等<sup>[23]</sup>利用中国作物种质资源网数据库获得的谷子资源生育期及主要性状信息,统计了740份谷子资源茎秆和穗部性状指标,发现主茎长度、主茎直径、单株穗重、单株粒重等性状指标随着生育期的增加而增加,千粒重随着生育期的增加呈现出正态分布。上述研究虽然揭示了谷子抽穗期与产量的关系,但是所用品种数量有限,且为同一生态类型,试验地点单一,生态区域差异不大,因此很难充分揭示谷子抽穗期与其他主要农艺性状的关系。本研究在环境差异较大的海南、洛阳、吉林3个地区连续2年调查了包括中国各生态区及国外共计160份谷子资源的抽穗期、株高等8个性状,揭示了谷子抽穗期对千粒重具有负效应,而对株高、穗长、穗粗、穗码数、穗重、穗粒重6个性状具有正效应的规律,说明随着抽穗期的延长谷子平均子粒重呈下降趋势,而穗长、穗粗、穗码数、穗粒重呈上升趋势,也说明目前多数谷子育成品种是通过适当延长抽穗期增大穗部来增加子粒数目实现稳产高产的,穗粒重应是高产育种必须重视的性状。

鉴于穗粒重对谷子产量贡献较大,本研究计算了160份谷子资源海南、洛阳、吉林三地穗粒重的均值,根据均值进行排序,筛选出生态适应性较强的品种资源53份。分析这些品种在三地的抽穗期,发现这些品种在海南表现较长的抽穗期,普遍在30d以上,极少数在28~29d,只有一个农家品种沙粒滚抽穗期在25d;在洛阳抽穗期集中在40~59d,个别品种少于40d;吉林抽穗期多数集中在70~80d之间,只有少数低于70d或者高于80d。对于春谷材料,来自张家口、山西、内蒙古的品种如坝谷210、坝谷6、红腿谷、赤谷6、沙粒滚、大九根齐、皇龙谷,海南抽穗期集中在29d左右,而来自山西、辽宁、吉林的育成品种如白米1号、公谷66、白谷9号、汾选5号、晋谷35、铁谷4、公谷69、晋汾13,海南抽穗期都在30d以上,与多数夏谷育成品种抽穗期一致。由于筛选出的53份材料在洛阳、吉林抽穗期变化范围较大,洛阳抽穗期在37~58d之间,吉林抽穗期在56~89d之间,因此以海南抽穗期表现为主要判断标准,参考洛阳、吉林抽穗期表现可以实现对谷子资源生态适应能力的判断,即:在海南,春谷区的农家品种和部分育成品种(张家口、内蒙古)抽穗期在29d左右,春谷区的育成品种和夏谷区的农家品种、育成品种抽穗期在30~40d之间,这些品种只要在洛阳抽穗期不超过59d,在吉林抽穗期不超过87d,应该

表现较好的生态适应性。本研究筛选出的53份广生态适应性资源来源于不同生态区,为开展谷子广生态适应性育种提供了丰富的亲本材料。

#### 参考文献

- [1] 胡时开,苏岩,叶卫军,郭龙彪. 水稻抽穗期遗传与分子调控机理研究进展. 中国水稻科学, 2012, 26(3): 373-382  
Hu S K, Su Y, Ye W J, Guo L B. Advances in genetic analysis and molecular regulation mechanism of heading date in rice (*Oryza sativa* L.). Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26(3): 373-382
- [2] Xue W Y, Xing Y Z, Weng X Y, Zhao Y, Tang W J, Wang L, Zhou H J, Yu S B, Xu C G, Li X H, Zhang Q F. Natural variation in *Ghd7* is an important regulator of heading date and yield potential in rice. Nature Genetics, 2008, 40(6): 761-767
- [3] Kojima S, Takahashi Y, Kobayashi Y, Monna L, Sasaki T, Araki T, Yano M. *Hd3a*, a rice ortholog of the Arabidopsis *FT* gene, promotes transition to flowering downstream of *Hd1* under short-day conditions. Plant Cell Physiology, 2002, 43(10): 1096-1105
- [4] Doi K, Izawa T, Fuse T, Yamanouchi U, Kubo T, Shimatani Z, Yano M, Yoshimura A. *Ehd1*, a B-type response regulator in rice, confers short-day promotion of flowering and controls *FT*-like gene expression independently of *Hd1*. Genes Development, 2004, 18(8): 926-936
- [5] Yano M, Katayose Y, Ashikari M, Yamanouchi U, Monna L, Fuse T, Baba T, Yamamoto K, Umehara Y, Nagamura Y, Sasaki T. *Hd1*, a major photoperiod sensitivity quantitative trait locus in rice, is closely related to the Arabidopsis flowering time gene *CONSTANS*. Plant Cell, 2000, 12(12): 2473-2484
- [6] Li P, Brutnell T P. *Setaria viridis* and *Setaria italica*, model genetic systems for the Panicoid grasses. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(9): 3031-3037
- [7] Zhang G Y, Liu X, Quan Z W, Cheng S F, Xu X, Pan S K, Xie M, Zeng P, Yue Z, Wang W L, Tao Y, Bian C, Han C L, Xia Q J, Peng X H, Cao R, Yang X H, Zhan D L, Hu J C, Zhang Y X, Li H N, Li H, Li N, Wang J Y, Wang C C, Wang R Y, Guo T, Cai Y J, Liu C Z, Xiang H T, Shi Q X, Huang P, Chen Q C, Li Y R, Wang J, Zhao Z H, Wang J. Genome sequence of foxtail millet (*Setaria italica*) provides insights into grass evolution and biofuel potential. Nature Biotechnology, 2012, 30(6): 549-556
- [8] Bennetzen J L, Schmutz J, Wang H, Percifield R, Hawkins J, Pontaroli A C, Estep M, Feng L, Vaughn J N, Grimwood J, Jenkins J, Barry K, Lindquist E, Hellsten U, Deshpande S, Wang X W, Wu X M, Mitros T, Triplett J, Yang X H, Ye C Y, Mauro-Herrera M, Wang L, Li P H, Sharma M, Sharma R, Ronald P C, Panaud O, Kellogg E A, Brutnell T P, Doust A N, Tuskan G A, Rokhsar D, Devos K M. Reference genome sequence of the model plant *setaria*. Nature Biotechnology, 2012, 30(6): 555-564
- [9] Jia G, Huang X, Zhi H, Zhao Y, Zhao Q, Li W, Chai Y, Yang L, Liu K, Lu H, Zhu C, Lu Y, Zhou C, Fan D, Weng Q, Guo Y, Huang T, Zhang L, Lu T, Feng Q, Hao H, Liu H, Lu P, Zhang N, Li Y, Guo E, Wang S, Wang S, Liu J, Zhang W, Chen G, Zhang B, Li W, Wang Y, Li H, Zhao B, Li J, Diao X, Han

- B.A haplotype map of genomic variations and genome-wide association studies of agronomic traits in foxtail millet (*Setaria italica*). *Nature Genetics*, 2013, 45(8): 957-961
- [ 10 ] 贾小平, 张博, 董志平, 全建章, 王永芳, 张小梅, 袁玺垒, 李剑峰, 戴凌峰. 海南短日照条件谷子穗部性状的全基因组关联分析. *河南农业科学*, 2018, 47(9): 33-40  
Jia X P, Zhang B, Dong Z P, Quan J Z, Wang Y F, Zhang X M, Yuan X L, Li J F, Dai L F. Genome-wide association analysis of panicle traits in foxtail millet under Hainan short-day condition. *Journal of Henan Agricultural sciences*, 2018, 47(9): 33-40
- [ 11 ] Fang X M, Dong K J, Wang X Q, Liu T P, He J H, Ren R Y, Zhang L, Liu R, Liu X Y, Li M, Huang M Z, Zhang Z S, Yang T Y. A high density genetic map and QTL for agronomic and yield traits in foxtail millet [*Setaria italica* (L.) P.Beauv.]. *BMC Genomics*, 2016, 17(1): 336
- [ 12 ] Wang J, Wang Z L, Du X F, Yang H Q, Han F, Han Y H, Yuan F, Zhang L Y, Peng S Z, Guo E H. A high-density genetic map and QTL analysis of agronomic traits in foxtail millet [*Setaria italica* (L.) P.Beauv.] using RAD-seq. *PLoS One*, 2017, 12(6): e0179717
- [ 13 ] Zhang K, Fan G Y, Zhang X X, Zhao F, Wei W, Du G H, Feng X L, Wang X M, Wang F, Song G L, Zou H F, Zhang X L, Li S D, Ni X M, Zhang G Y, Zhao Z H. Identification of QTLs for 14 agronomically important traits in *Setaria italica* based on SNPs generated from high-throughput sequencing. *G3*, 2017, 7(5): 1587-1594
- [ 14 ] 元香梅, 禾璐, 张凯焯, 武雪, 马芳芳, 王军, 韩渊怀. 谷子 XTH 基因家族与抗旱相关基因的分析. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2017, 37(1): 1-6  
Yuan X M, He L, Zhang K Y, Wu X, Ma F F, Wang J, Han Y H. Analysis of XTH genes that related to drought stress in foxtail millet. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2017, 37(1): 1-6
- [ 15 ] 程璐, 张彬, 张耀元, 苏彦冰, 魏东, 郭展, 李红英. 谷子 MYB 转录因子家族与抗旱关系的研究. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2016, 36(12): 846-849, 867  
Cheng L, Zhang B, Zhang Y Y, Su Y B, Wei D, Guo Z, Li H Y. MYB transcription factors and their relationship with drought tolerance in foxtail millet. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2016, 36(12): 846-849, 867
- [ 16 ] 贾小平, 李剑峰, 全建章, 王永芳, 董志平, 张博, 袁玺垒. 不同光周期条件下谷子农艺性状的光周期敏感性评价. *植物遗传资源学报*, 2018, 19(5): 919-924  
Jia X P, Li J F, Quan J Z, Wang Y F, Dong Z P, Zhang B, Yuan X L. Evaluation of photoperiod sensitivity of agronomic traits of foxtail millet varieties (*Setaria italica* L.) under different photoperiod conditions. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(5): 919-924
- [ 17 ] 普晓英, 曾亚文, 申时全, 李绅崇. 低速磷胁迫对云南地方稻种核心种质抽穗期的影响. *植物遗传资源学报*, 2004, 5(3): 271-275  
Pu X Y, Zeng Y W, Shen S Q, Li S C. Effect of low phosphorus stress on heading date of the core collection for Yunnan rice landrace (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Genetic Resources*, 2004, 5(3): 271-275
- [ 18 ] 徐丽霞, 仪慧兰, 郭二虎, 张艾英. 干旱胁迫对谷子抽穗期生理生化和产量的影响. *山西大学学报: 自然科学版*, 2016, 39(4): 672-678  
Xu L X, Yi H L, Guo E H, Zhang A Y. Influence of drought stress on physiology characteristics and agronomic traits at heading stage of *Setaria italica* L. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2016, 39(4): 672-678
- [ 19 ] 石建军, 祁祥. 地膜覆盖对杂交谷子抽穗期叶片叶绿素荧光参数的影响. *山西农业科学*, 2015, 43(11): 1389-1392  
Shi J J, Qi X. Effect of film mulch on chlorophyll fluorescence parameters in leaves of hybrid millet at heading stage. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2015, 43(11): 1389-1392
- [ 20 ] 李卫明. 不同品种谷子生育期、品质性状、光合特性与产量的关系研究. 太谷: 山西农业大学, 2016  
Li W M. Study on the relationship between growth period, quality characters, photosynthetic characteristics and yield of different foxtail millet cultivars. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2016
- [ 21 ] 赵禹凯, 王显瑞, 陈高勋, 赵敏, 李书田. 谷子主要农艺性状的相关和通径分析. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2014(2): 35-38  
Zhao Y K, Wang X R, Chen G X, Zhao M, Li S T. Correlation and path analysis of main agronomic traits in foxtail millet. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2014(2): 35-38
- [ 22 ] 杨慧卿, 王军, 袁峰, 郭二虎. 西北春谷区中晚熟组谷子主要农艺性状的相关和通径分析. *河北农业科学*, 2010, 14(11): 105-106, 111  
Yang H Q, Wang J, Yuan F, Guo E H. Correlation analysis and path analysis on major agronomic traits of middle and late mature group of regional test in spring millet area of northwest China. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2010, 14(11): 105-106, 111
- [ 23 ] 元旭朝, 张耀元, 苏彦冰, 刘晓东, 刘龙龙, 杜婧婧, 邓楠, 韩渊怀. 谷子生育期与茎秆以及穗部性状的关系. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2016, 36(6): 391-394, 399  
Yuan X Z, Zhang Y Y, Su Y B, Liu X D, Liu L L, Du J J, Deng N, Han Y H. The relationship between growth period and traits of stem and panicle in foxtail millet. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2016, 36(6): 391-394, 399