

文章编号: 1005-0906(2014)02-0057-09

# 玉米基因型 × 密度互作及耐密 育种策略研究

杨锦忠, 赵延明, 宋希云

(青岛农业大学农学与植保学院 / 山东省旱作农业技术重点实验室, 青岛 266109)

**摘要:** 在假定玉米产量与密度关系为抛物线基础上, 以已发表文献所反映的基因型 × 密度互作研究结果为基础, 选取历史数据的平均数, 以高产基因型的目标密度为参照, 按照“正确、错误、漏选”的选择结果, 分析基因型差异的 27 个可能组合。根据基因型之间产量关系以及对选择的干扰程度, 将玉米基因型 × 密度互作划为 3 种类别, 即交点干扰型、产量差干扰型、无干扰型, 进一步细分为 14 种亚类。高密度育种和低密度育种各受到交点干扰型 3 个亚类的影响, 其中只有第 8 亚类同时影响两种育种策略; 高密度育种和低密度育种各受到产量差干扰型 2 个亚类的影响, 其中只有第 3 亚类同时影响两种育种策略。产量曲线交点的存在, 严重干扰杂交组合的单密度选择效果。虽然从产量 - 密度数量关系看两种育种策略的优劣相当, 但是, 高密度育种具有逆境选择优势。正偏移密度加目标密度的双密度选择, 能够进一步降低杂交组合和品种筛选阶段的选择风险。

**关键词:** 玉米; 耐密性; 抛物线模型; 组合筛选; 基因型 × 密度互作

**中图分类号:** S513.035

**文献标识码:** A

## Genotype × Density Interaction and Its Application in High Density Breeding Strategy in Maize

YANG Jin-zhong, ZHAO Yan-ming, SONG Xi-yun

(Agronomy College, Qingdao Agricultural University / Shandong Provincial Key Laboratory of  
Dry Farming Techniques, Qingdao 266109, China)

**Abstract:** Based on historical summaries of genotype × density interactions associated in published papers, parabola models were used to set the reference to target plant density for higher crop yield in cultivar screening in maize. Output for screening was denoted as correct, wrong and missing. Genotypic difference in model parameters displayed 27 combinations, which fell into 14 cases. Genotype × density interactions were classified into 3 categories, namely cross interference, yield gap interference and non-interference, according to their interference to screening and genotypic difference in crop yield. For high density breeding strategy, the category of cross interference was limited to cases 5, 7 and 8, the category of yield gap interference to cases 2 and 3. For low density breeding strategy, the category of cross interference was limited to cases 4, 6 and 8, the category of yield gap interference to cases 1 and 3. Selection based on a single plant density was heavily disturbed because of yield cross between two genotypes. High density breeding strategy in maize had an advantage of simultaneous selection for stress tolerance over low density breeding strategy although risks of both strategies seemed the same in terms of yield-density relationship. Selection risks may lower down further when double densities of target density plus positive offset were applied to breeding program.

**Key words:** Maize; Density tolerance; Parabola model; Hybrid screening; Genotype × density interaction

收稿日期: 2012-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31271658)、山东省泰山学者建设项目、山东省旱地作物水分高效利用创新团队

作者简介: 杨锦忠(1963-), 男, 山西介休人, 博士, 教授。主要从事玉米生理生态和数字农业研究。

玉米产量是基因型、生产环境和栽培管理措施共同作用的结果, 密度与基因型和生产环境都存在互作。育种就是针对一定的生产环境和栽培管理模式, 组装、筛选和固定高产基因型。目前, 分子遗传对互作的机制认识还不是很清楚。早在上世纪 60 年

代,人们已经认识到增施肥料、提高生产水平都可以使适宜密度增加,从而实现玉米增产<sup>[1]</sup>。经过半个世纪的深入研究,玉米密度与基因型和生产环境的互作关系愈加明确,为充分发挥互作对生产的指导作用,我国栽培界将之总结为合理密植的原则,即早熟、矮秆、紧凑品种宜密,晚熟、高秆、松散品种宜稀;在肥力较高的田块上适宜的密度范围较宽,在中低肥力土地上适宜的密度范围较窄;施肥较多可密些,施肥较少可稀些;灌溉条件好的地区可适当密些,干旱或者水浇条件差的地区可适当稀些;夏播可密些,春播可稀些。不同生态气候地区因纬度、地势、温度、日照等自然因素不同,适宜的密度范围也不同<sup>[2]</sup>。

Tokatlidis 等研究了玉米的基因型 × 水分互作<sup>[3]</sup>。Liu 等在高低相差 3 倍的两种密度条件下研究玉米杂种优势的基因型 × 密度互作<sup>[4]</sup>。Sarlanguea 等在 3 种或者 6 种密度条件下,从生物产量和收获指数角度分析玉米产量的基因型 × 密度互作<sup>[5]</sup>。Tokatlidis 等在 3 种密度条件下考察玉米稳产性的基因型 × 密度互作<sup>[6]</sup>。胡昌浩等在 30 000、52 500 和 75 000 株  $\text{hm}^2$  密度条件下,对上世纪 50 年内 3 个年代各 1 个品种的产量进行了分析<sup>[7]</sup>。Duvick 在前后 10 年期间每年 3 个地点,在 10 000、30 000 和

79 000 株  $\text{hm}^2$  密度下比较了 1930 ~ 1991 年期间推出的 50 余个杂交种产量<sup>[8]</sup>。谢振江等在两个生态区研究了基因型 × 密度的互作,基因型为华北地区 4 个年代有代表性的 23 个单杂交种,密度分别为 30 000、45 000 和 60 000 株  $\text{hm}^2$ <sup>[9]</sup>。这些试验研究设置的密度绝大多数为 2 或者 3 个,数目有限,无法建立产量 - 密度数量方程,更无法得到最高产量的最佳密度信息,不适合对基因型 × 密度互作进行分类。通过互作分类加深玉米产量 - 密度关系认识,为育种选择提供理论依据就显得更为重要。在明确中国玉米产量 - 密度数量方程及其参数相互关系的基础上<sup>[10,11]</sup>,本文通过分类解析基因型 × 密度的互作,剖析基因型 × 密度互作与高低密度育种策略的关系,探讨高低密度育种策略的优劣。

1 材料与方法

1.1 基本假定及演绎

收集近 60 年来我国公开发表的玉米密度试验(涉及 98 篇文献,文后列出 11 篇参考文献<sup>[12~21]</sup>),共 349 个数据集。逐一为数据集拟合产量 - 密度曲线,先拟合常用的抛物线模型,拟合失败后再拟合直线模型。

表 1 玉米密度试验数据集的若干类型

Table 1 Dataset groups according yield-density curve fitting for plant density experiments in maize

| 序 号<br>No. | 拟合结果描述<br>Fitting result    | 数目(个)<br>Count       | 比例(%)<br>Percentage |
|------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|
| 1          | 抛物线模型拟合度高,开口向下,极值点合理        | 155                  | 44.4                |
| 2          | 抛物线模型显著,开口向下,极值点密度越界        | 15                   | 4.3                 |
| 3          | 排除第 1 和 2 条,抛物线模型显著,开口向上    | 10                   | 2.9                 |
| 4          | 排除第 1、2 和 3 条,直线模型显著,直线上升   | 56                   | 16.0                |
| 5          | 排除第 1、2、3 和 4 条,直线模型显著,直线下降 | 2                    | 0.6                 |
| 6          | 不属于上述 5 种类型中任何 1 种。         | 111(其中 80 个只有 3 个密度) | 31.8                |

由表 1 可知,拟合抛物线和直线都失败的数据集有 111 个,占总数的 31.8%。其中,密度数目等于 3 的数据集共 80 个,占该类型数据集总数的 72.1%,这些试验由于试验密度数目过少,不宜分析其产量与密度的数量关系。若删除只有 3 个密度的数据集以及开口向上的抛物线数据集(产量有极小值,与实际不符),则符合抛物线关系的数据集占总数比例由原来的 48.7% 上升到 65.6%。

出现直线模型的原因是密度范围过窄,未能包括最大值点或者偏离最大值点。通过秩和检验,密度范围过窄的猜测得到验证( $P \leq 0.013$ )。如果这些试

验密度范围再大一些,就可以拟合抛物线模型,这样符合抛物线关系的比例将进一步上升到 88.0%。

单株产量 = 产量 / 密度,据此,从产量 - 密度抛物线模型中导出试验密度下的单株产量与实际值进行比较,发现模拟值与实测值非常接近,二者吻合程度达到 98.9%,这说明抛物线模型能够精确地模拟单株产量。

综合上述分析可以认为,抛物线模型作为统一理论模型用于反映玉米产量 - 密度关系是合理的。

产量与密度的抛物线模型由 3 个彼此独立参数确定,即最高产量  $Y_m$ 、最佳密度  $D_m$  和二次项系数  $a$ 。

两个基因型的差异表现为抛物线的差异,通过抛物线方程的 3 个参数体现。因此,比较两个基因型时,可以直接比较这 3 个参数。每个参数有大于、小于和相等 3 种关系,所以 A 和 B 两个基因型的差异共有 27 种可能的组合,这些组合包含基因型×密度互作的全部可能表现,可以归纳为 14 种亚类。玉米密度试验文献验证了这种分类方法的合理性。经过对文献重新分析结果的比较(比较的总数目为 11 935),发现

任意两个数据集的模型参数之间确实存在广泛的组合关系,这说明玉米的基因型×密度互作有广泛的变化。基因型×密度互作的 3 种类别在实践中都出现过,而且除第 3 亚类外,其余 13 种亚类全部在实践中出现过(表 2)。美国高密度育种成功的品种与密度的互作类型属于本文提出的第 1 亚类和第 4 亚类,分别属于低密度育种的产量差干扰型和交点干扰型。

表 2 玉米两个基因型间差异的 3 大类别 14 种亚类 27 个组合及文献结果比较

Table 2 Twenty-seven combinations of differences in yield-density model parameters between 2 genotypes of maize, classified into 14 cases among 3 categories, and their distribution in citations

| 关系类别<br>Category | 亚类<br>Case | 基因型 A 和 B 模型参数的对比<br>Contrast in parameter of genotypes |     |     | 文献结果出现次数<br>Occurrence number of literature results |
|------------------|------------|---------------------------------------------------------|-----|-----|-----------------------------------------------------|
|                  |            | Ym                                                      | Dm  | a   |                                                     |
| 产量差干扰            | 1          | A<B                                                     | A<B | A<B | 3 072                                               |
|                  |            | A>B                                                     | A>B | A>B |                                                     |
| 产量差干扰            | 2          | A<B                                                     | A>B | A<B | 734                                                 |
|                  |            | A>B                                                     | A<B | A>B |                                                     |
| 产量差干扰            | 3          | A=B                                                     | A=B | A<B | 0                                                   |
|                  |            | A=B                                                     | A=B | A>B |                                                     |
| 交点干扰             | 4          | A<B                                                     | A<B | A=B | 643                                                 |
|                  |            | A>B                                                     | A>B | A=B |                                                     |
| 交点干扰             | 5          | A<B                                                     | A>B | A=B | 210                                                 |
|                  |            | A>B                                                     | A<B | A=B |                                                     |
| 交点干扰             | 6          | A<B                                                     | A<B | A>B | 3 518                                               |
|                  |            | A>B                                                     | A>B | A<B |                                                     |
| 交点干扰             | 7          | A<B                                                     | A>B | A>B | 3 594                                               |
|                  |            | A>B                                                     | A<B | A<B |                                                     |
| 交点干扰             | 8          | A<B                                                     | A=B | A>B | 75                                                  |
|                  |            | A>B                                                     | A=B | A<B |                                                     |
| 无干扰              | 9          | A<B                                                     | A=B | A=B | 13                                                  |
|                  |            | A>B                                                     | A=B | A=B |                                                     |
| 无干扰              | 10         | A=B                                                     | A<B | A<B | 28                                                  |
|                  |            | A=B                                                     | A>B | A>B |                                                     |
| 无干扰              | 11         | A=B                                                     | A<B | A>B | 12                                                  |
|                  |            | A=B                                                     | A>B | A<B |                                                     |
| 无干扰              | 12         | A=B                                                     | A<B | A=B | 7                                                   |
|                  |            | A=B                                                     | A>B | A=B |                                                     |
| 无干扰              | 13         | A<B                                                     | A=B | A<B | 25                                                  |
|                  |            | A>B                                                     | A=B | A>B |                                                     |
| 无干扰              | 14         | A=B                                                     | A=B | A=B | 4                                                   |

注:产量-密度的抛物线模型为  $Y = a \times (D - D_m)^2 + Y_m$ ,  $a < 0$ 。

Note: parabola equation of crop yield as a function of plant density is  $Y = a \times (D - D_m)^2 + Y_m$ ,  $a < 0$ .

## 1.2 高低密度育种方法的界定

本研究统一以高产基因型的目标密度为参照点,在高于目标密度条件下进行选择称为高密度育种,反之,为低密度育种。选择密度偏离目标密度的

幅度是有界的。

## 1.3 选择标准及影响因素

本研究分析限定在玉米育种最后阶段,即选择目标密度的高产杂交组合(基因型)。可以合理假定

候选玉米种群基因型是均质的,即1个种群内全部个体有相同的基因型。

选择的标准为产量高者入选。两个组合在同一密度条件下比较时,由于选择密度与目标密度之间留有间隔,因此,选择的结果有3种:(1)正确,即入选基因型的遗传产量在一定密度范围内确实高;(2)错误,即入选基因型的遗传产量反而低;(3)漏选,尽管两者的遗传产量明显不同,无法作出非此即彼的选择。推断法则1:在较大的密度范围内,总能够鉴别高产基因型,则认为成功机会大;推断法则2:产量差越大,越容易鉴别基因型优劣,即成功机会大;产量相等或者接近时,由于随机误差的干扰,容易出现漏选。

## 2 14种互作亚类的高低密度育种效果分析

### 2.1 亚类1

高产基因型的抛物线3个参数总是大于低产基因型,两线永不相交(图1)。从目标密度开始,密度越高产量差越大。高密度育种的优势在于增加了找到高产基因型的机会;低密度育种则更容易漏选,低密度区域两个基因型的产量差变小,选择容易受到试验随机误差的干扰。

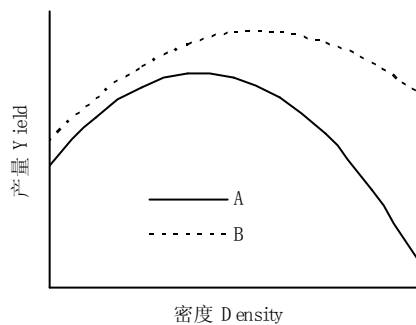


图1 玉米基因型×密度互作亚类1

Fig.1 Genotype × plant-density interaction case 1

### 2.2 亚类2

高产基因型的最佳密度小于低产基因型,但是,二次项系数却大于后者,两线永不相交(图2)。从目标密度开始,密度越低产量差越大。低密度育种的优势在于增加了找到高产基因型的机会;高密度育种则更容易漏选,高密度区域两个基因型的产量差变小,选择容易受到试验随机误差的干扰。

### 2.3 亚类3

两个基因型的遗传产量和最佳密度都相等,只是二次项系数不同,两线仅在目标密度处重合,其他位置永不相交(图3)。从目标密度开始,距离越远产

量差异越大,选择越容易,高密度育种和低密度育种的效果相同。

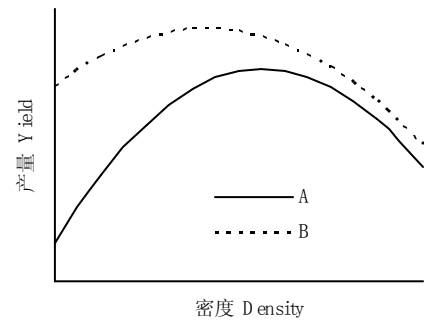


图2 玉米基因型×密度互作亚类2

Fig.2 Genotype × plant-density interaction case 2

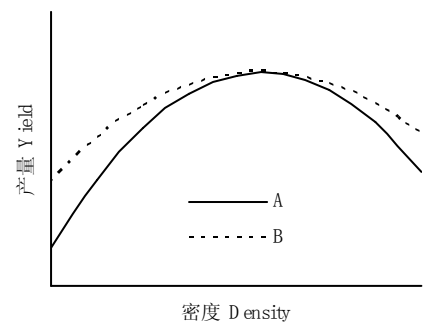


图3 玉米基因型×密度互作亚类3

Fig.3 Genotype × plant-density interaction case 3

### 2.4 亚类4

两基因型的二次项系数相等,高产基因型的最佳密度大于低产基因型,两线相交于目标密度的左侧(图4)。在高于交点密度条件下选择,密度越高产量差越大,选择越容易。如果在交点左边低密度条件下选择,则选择失败;若在交点附近选择则发生漏选。高密度育种的优势在于增加了找到高产基因型的机会,低密度育种的劣势在于存在错误和漏选风险。

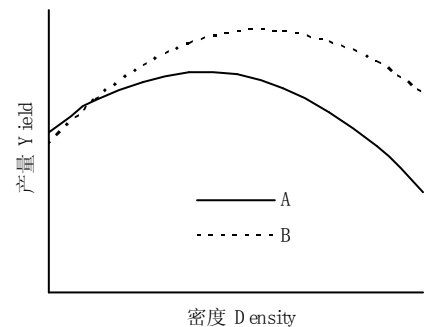


图4 玉米基因型×密度互作亚类4

Fig.4 Genotype × plant-density interaction case 4

### 2.5 亚类5

两基因型的二次项系数相等,高产基因型的最

佳密度小于低产基因型,两线相交于目标密度的右侧(图 5)。在低于交点密度条件下选择,容易获得高产基因型。如果在交点右边高密度条件下选择,则选择失败;在交点附近选择则漏选。低密度育种的优势在于增加了找到高产基因型的机会,高密度育种的劣势在于存在错误和漏选风险。

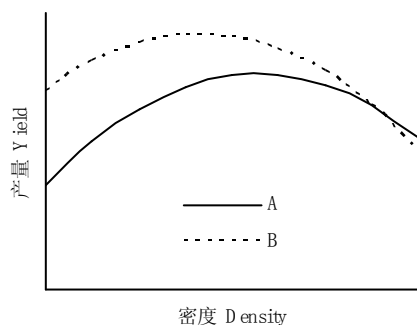


图 5 玉米基因型×密度互作亚类 5

Fig.5 Genotype × plant-density interaction case 5

## 2.6 亚类 6

高产基因型的最佳密度大于低产基因型,二次项系数却小于后者,两线相交于两点(图 6),一点在目标密度的近左侧,另一点在目标密度的远右侧(图外)。在高于交点密度条件下选择,容易获得高产基因型。如果在交点左边低密度条件下选择,则选择失败;在近交点附近选择则漏选。高密度育种的优势在于增加了找到高产基因型的机会,低密度育种的劣势在于存在失败和漏选风险。

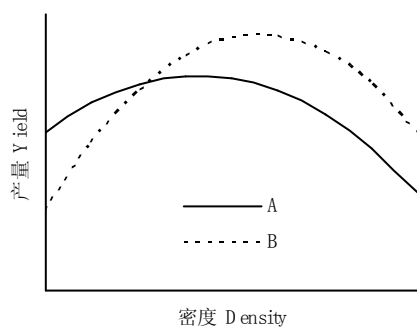


图 6 玉米基因型×密度互作亚类 6

Fig.6 Genotype × plant-density interaction case 6

## 2.7 亚类 7

高产基因型的最佳密度和二次项系数都大于低产基因型,两线相交于两点(图 7),一点在目标密度的近右侧,另一点在目标密度的远左侧(图外)。在低于近交点密度条件下选择,容易获得高产基因型。如果在近交点右边选择,则选择失败;在近交点附近选择则会发生漏选。低密度育种的优势在于保证获得高产基因型,高密度育种的劣势在于存在错误和漏

选风险。

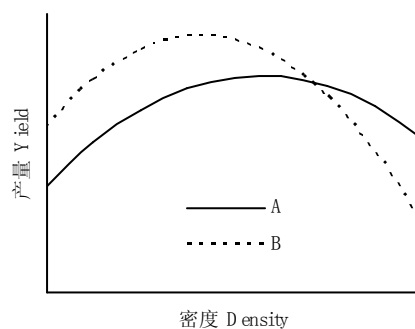


图 7 玉米基因型×密度互作亚类 7

Fig.7 Genotype × plant-density interaction case 7

## 2.8 亚类 8

两个基因型的最佳密度相同,高产基因型的二次项系数小于低产基因型,两线相交于两个点,交点在目标密度两侧,左右对称(图 8)。在目标密度附近选择,容易成功。若在交点附近选择,则高低密度育种都会漏选;若密度超出交点范围之外,无论高密度还是低密度,选择都失败。此时,高密度育种和低密度育种的优劣相当。

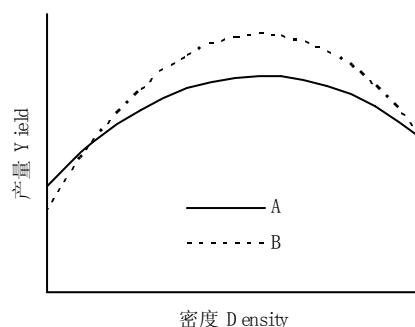


图 8 玉米基因型×密度互作亚类 8

Fig.8 Genotype × plant-density interaction case 8

## 2.9 亚类 9

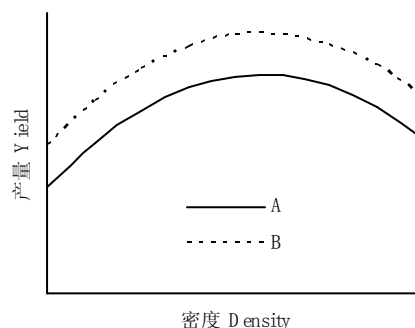


图 9 玉米基因型×密度互作亚类 9

Fig.9 Genotype × plant-density interaction case 9

两个基因型的最佳密度和二次项系数都相等,两线平行无交点(图 9),二者的产量差是一个常数。

高密度育种和低密度育种的效果完全相同。

### 2.10 亚类 10

两个基因型的遗传产量相等,两个基因型的最佳密度和二次项系数都不相等,两线相交于两个最佳密度之间(图 10),尽管还有另一交点,却在远左侧(图外)。以近交点为界,密度越高,产量差越大;反之,产量差不明显。高密度育种的优势在于更容易获得高最佳密度的基因型,低密度育种的劣势在于存在漏选风险。

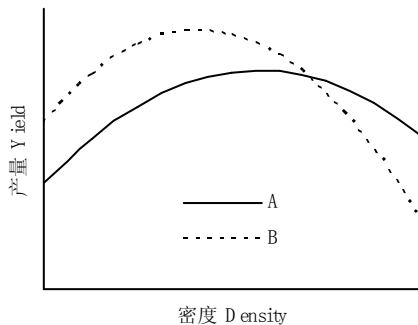


图 10 玉米基因型×密度交互亚类 10

Fig.10 Genotype × plant-density interaction case 10

### 2.11 亚类 11

两个基因型的遗传产量相等,它们的最佳密度和二次项系数都不相等,两线相交于两个最佳密度之间(图 11),尽管还有另一交点,却在远右侧(图外)。以近交点为界,密度越低,产量差越大;反之,产量差不明显。低密度育种的优势在于更容易获得低最佳密度的基因型,高密度育种的劣势在于存在漏选风险。

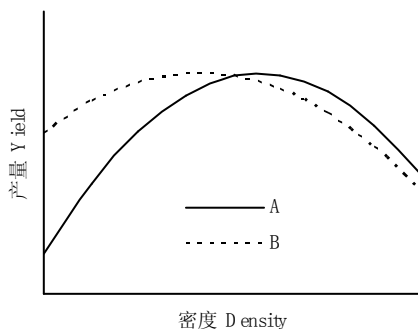


图 11 玉米基因型×密度交互亚类 11

Fig.11 Genotype × plant-density interaction case 11

### 2.12 亚类 12

两个基因型的遗传产量和二次项系数都相等,只是最佳密度不同,两线相交于两个最佳密度的中点(图 12)。以交点为界,偏离越远产量差越大,等距离处的产量差绝对值相同,正负号相反。高密度育种

和低密度育种的效果完全相同。

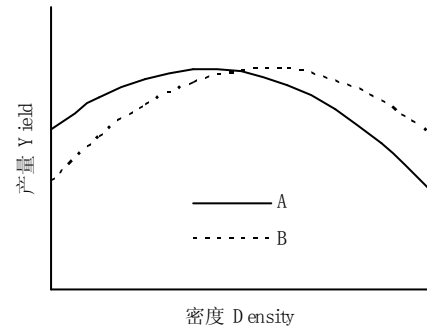


图 12 玉米基因型×密度交互亚类 12

Fig.12 Genotype × plant-density interaction case 12

### 2.13 亚类 13

高产基因型的最佳密度与低产基因型相等,并且二次项系数大于后者,两线永不相交(图 13)。从目标密度开始,距离越远产量差异越大,选择越容易。高密度育种和低密度育种的效果完全相同。

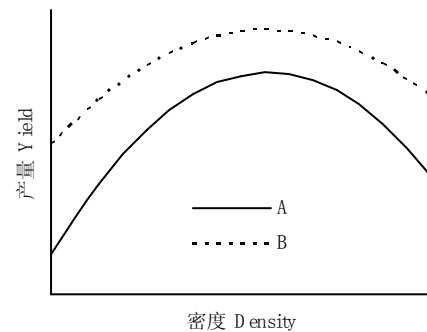


图 13 玉米基因型×密度交互亚类 13

Fig.13 Genotype × plant-density interaction case 13

### 2.14 亚类 14

两个候选基因型的抛物线 3 个参数彼此都相等,两线完全重合(图 14)。一个基因型与另一基因型的产量差总是等于零。高密度育种和低密度育种结果相同。

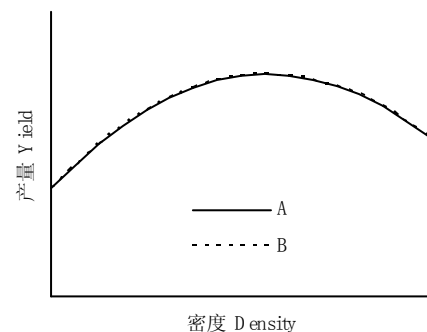


图 14 玉米基因型×密度交互亚类 14

Fig.14 Genotype × plant-density interaction case 14

### 3 高低密度育种选择

#### 3.1 玉米基因型×密度互作的分类

在玉米产量上存在基因型×密度的互作。胡昌浩等、Duvick 和谢振江等在现代生产环境与管理水平下,设置高中低 3 种不同密度,发现互作表现为不同年代玉米品种获得最高产量的密度不同,密度越高品种间产量差异越大,地点影响基因型×密度互作。

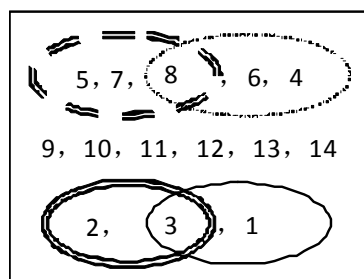
根据对育种选择的影响特点,把玉米基因型×密度互作的 14 种亚类进一步划分为 3 种类别,即交点干扰型(亚类 4~亚类 8)、产量差干扰型(亚类 1~亚类 3)、无干扰型(亚类 9~亚类 14)。交点干扰型有选择失败的风险,产量差干扰型有漏选风险,只有无干扰型才是零风险。在综合前人研究的基础上,通过数学排列组合方法实现玉米基因型×密度互作的全面系统解析,符合逻辑学关于划分的完备性、互斥性和统一性要求。

#### 3.2 高、低密度育种的优劣

本研究发现,对于高密度育种策略,交点干扰型只限于亚类 5、亚类 7 和亚类 8,产量差干扰型只限于亚类 2 和亚类 3;对于低密度育种策略,交点干扰型只限于亚类 4、亚类 6 和亚类 8,产量差干扰型只

限于亚类 1 和亚类 3。除亚类 3 和 8 外,高密度育种的风险互作就是低密度育种的无风险互作,反之亦然(图 15)。高、低密度育种的风险种类数目对称,只是风险条件不同,从产量-密度数量关系看,高密度育种和低密度育种的优劣相当。但是,考虑到高密度比低密度带来更大的逆境选择压力<sup>[2]</sup>,选择高密度育种更有优势。也有报道高密度育种选择自交系,所配制组合在高密度(97 500 株/hm<sup>2</sup>)条件下产量高于低密度育种组合,施肥量越小效果越明显<sup>[23]</sup>。

本研究假定选择发生在育种的最后阶段,即杂交组合筛选或者品种比较,因此,高密度育种的应用范围也局限于此,不能简单推广到自交系选育阶段。面对同样的高密度选择压力,选组合和选系面临的植株间生长竞争性质不同<sup>[28]</sup>。对于选组合,由于一个组合内个体基因型是同质的,因此,田间相邻个体之间的竞争是平等的;对于选系,特别是早代选单株,田间相邻个体的基因型是异质的,因此,个体之间的竞争是不平等的,根据表现型选择有利于竞争力强的基因型,存在漏选真正高产基因型的风险。如果基础群体中诸多耐密基因的频率很高,那么,个体间不平等竞争的机会就会大大减少,高密度选系也能够成功。



注:虚线椭圆表示交点干扰型,实线椭圆表示产量差干扰型;双线椭圆表示高密度育种的干扰型,单线椭圆表示低密度育种的干扰型。

Note: Those circled by dotted lines are cross interference type and those circled by solid lines are gap interference type. Those inside single lines are only for low density breeding and those inside double lines are only for high density breeding. All others are of null ones.

图 15 产量的基因型×密度互作 14 种亚类的分类图

Fig.15 Three categories of yield × plant-density interactions in maize

### 4 讨论

#### 4.1 生产密度作为玉米育种的目标密度

生产实践和文献综述都证实,任一玉米品种只是在一定密度范围内有生产价值,存在能够实现遗传产量的最佳密度。在基因型×环境互作机制不明

的情况下,在新品种推向生产环境之前,必须检验其在生产密度的产量表现。生产密度因农民种植习惯、自然条件 and 生产条件而异,所以,无法将密度的育种目标设置为绝对不变的数值。育种家常根据经验提出一定时期与地区的育种目标密度<sup>[24~27]</sup>。本文分析表明,若目标密度与生产密度一致,对于选择是有

益的。

## 4.2 双密度选择

交点干扰型互作即产量曲线交叉点的存在,严重干扰单密度选择,存在选择失败风险;产量差干扰型互作的存在,存在漏选风险。降低风险的途径就是实行双密度选择,即正偏移加目标双密度法,或者正负等距偏移双密度法。对于正偏移加目标双密度法,目标密度取值目标地区农民生产常用密度或者区域试验密度。正偏移密度即在目标密度基础上增加一定株数,也就是高密度育种的选择密度。密度偏移量取决于两个因素,一是播种机播种作业精度和生产田出苗率,二是预期的合理密度区间。前者决定了偏移的下限值,根据经验取 7 500 株  $\text{hm}^2$ ;后者规定了偏移的上限值,数值等于 1/2 区间长度。

正负等距偏移双密度法则以目标密度为中心,左右偏移相同距离作为选择密度,确定偏移量上下限的原则与正偏移加目标双密度法相同。采用正负等距偏移双密度育种法后,结合分析可知,干扰选择的基因型  $\times$  密度互作仅仅剩余亚类 3 和亚类 8,因此,更容易选出稳产型品种;正偏移加目标双密度育种法则更容易选出高产型品种。

耐密性是一个重要的育种目标,应根据玉米生产条件和亲本耐密性确定合理的密度目标值。仅从产量-密度数量关系看,高密度育种和低密度育种的优劣相当,综合考虑高密度育种具有的逆境放大效应,推荐实施高密度育种策略。交点干扰型基因型  $\times$  密度互作的存在,导致单密度选择失败,可以进行正负等距偏移或者正偏移加目标密度值的双密度选择,以降低选择风险。

## 参考文献:

- [1] 范福仁,莫惠栋,秦泰辰,等. 玉米密植程度研究[J]. 作物学报, 1963, 2(4): 381-398.
- [2] Fan F R, Mo H D, Qing T H, et al. Studies of the planting rate of corn [J]. Acta Agronomica Sinica, 1963, 2(4): 381-398. (in Chinese)
- [3] 李少昆,王崇桃. 玉米生产技术创新与扩散[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] Tokatlidis I S, Has V, Melidis V, et al. Maize hybrids less dependent on high plant densities improve resource-use efficiency in rainfed and irrigated conditions[J]. Field Crops Research, 2011, 120(3): 345-351.
- [5] Liu W D, Tollenaar M. Response of yield heterosis to increasing plant density in maize [J]. Crop Science, 2009, 49(5): 1807-1816.
- [6] Sarlanguea T, Andrade F H, Calviño P A, et al. Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density[J]. Agronomy Journal, 2006, 99(4): 984-991.
- [7] Tokatlidis I S, Koutsika-Sotiriou M, Tamoutsidis E. Benefits from using maize density-independent hybrids[J]. Maydica, 2005, 50: 9-17.
- [8] 胡昌浩,董树亭,王空军,等. 我国不同年代玉米品种生育特性演进规律研究 I 产量性状的演进[J]. 玉米科学, 1998, 6(2): 44-48.
- [9] Hu C H, Dong S T, Wang K J, et al. Yield advances of maize introduced in decades in China[J]. Journal of Maize Sciences, 1998, 6(2): 44-48. (in Chinese)
- [10] Duvick D N. The contribution of breeding to yield advances in maize[J]. Advances in Agronomy, 2005, 86: 83-145.
- [11] 谢振江,李明顺,徐家舜,等. 遗传改良对中国华北不同年代玉米单交种产量的贡献[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 781-789.
- [12] Xie Z J, Li M S, Xu J S, et al. Contributions of genetic improvement to yields of maize hybrids during different eras in North China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(3): 781-789. (in Chinese)
- [13] 杨锦忠,陈明利,张洪生. 中国 1950s 到 2000s 玉米产量-密度关系的 Meta 分析[J]. 中国农业科学, 2013, 46(17): 3562-3570.
- [14] Yang J Z, Chen M L, Zhang H S. Meta-analysis of the relationship between maize crop yield and plant density from 1950s to 2000s in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(17): 3562-3570. (in Chinese)
- [15] 杨锦忠,张洪生,杜金哲. 玉米产量-密度关系年代演化趋势的 Meta 分析[J]. 作物学报, 2013, 39(3): 515-519.
- [16] Yang J Z, Zhang H S, Du J Z. Meta-analysis of evolution trend from 1950s to 2000s in the relationship between crop yield and plant density in maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(3): 515-519. (in Chinese)
- [17] 河南省玉米协作组. 一九七五年河南省夏玉米密度试验总结[J]. 河南农业大学学报, 1977(1): 22-26.
- [18] Maize Program of Henan Province. Summary of plant density experiments of summer maize in 1975[J]. Journal of Henan Agricultural University, 1977(1): 22-26. (in Chinese)
- [19] 尹枝瑞,田海云. 种植密度对玉米产量及生长发育的影响[J]. 吉林农业科学, 1987(1): 12-17.
- [20] Yin Z R, Tian H Y. The influence of plant density on growth and yield in maize[J]. Jilin Agricultural Sciences, 1987(1): 12-17. (in Chinese)
- [21] 刘克礼,李春林,刘国清,等. 春玉米高产的适宜密度与氮素施用量研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 1987, 8(1): 99-105.
- [22] Liu K L, Li C L, Liu G Q, et al. A study on optimum plant density and nitrogen rate for spring maize[J]. Journal of Inner Mongolia College of Agriculture and Animal Husbandry, 1987, 8(1): 99-105. (in Chinese)
- [23] 王懿波,陆利行,王文贤,等. 六个玉米杂交种在不同条件下丰产潜力的初步研究[J]. 河南农业科学, 1991(5): 3-5, 8.
- [24] Wang Y B, Lu L X, Wang W X, et al. A study on yield potentials of 6 maize hybrids grown different conditions[J]. Journal of Henan Agricultural University, 1991(5): 3-5, 8. (in Chinese)
- [25] 鲍巨松,薛吉全,杨成书,等. 不同株型玉米品种高产潜力及特征的研究[J]. 玉米科学, 1994, 2(2): 48-51.
- [26] Bao J S, Xue J Q, Yang C S, et al. Studies on high-yield potential and its characteristics of corn varieties with different plant-type[J]. Journal of Maize Sciences, 1994, 2(2): 48-51. (in Chinese)
- [27] 陈建生,陈秀道,杨少海,等. 选用良种和合理密植对粤西玉米的增产效果[J]. 广东农业科学, 1994(1): 12-13.
- [28] Chen J S, Chen X D, Yang S H, et al. Yielding effects of cultivars and plant densities in maize in western Guangdong Province[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 1994(1): 12-13. (in Chinese)
- [29] 赵久然,孙政才,陈国平,等. 紧凑型玉米适宜密植定额研究[J].



- 北京农业科学, 1995, 13(6): 10-12.
- Zhao J R, Sun Z C, Chen G P, et al. A study of optimum plant density for compact type maize[J]. Beijing Agricultural Sciences, 1995, 13(6): 10-12. (in Chinese)
- [19] 刘伟, 吕鹏, 苏凯, 等. 种植密度对夏玉米产量和源库特性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1737-1743.
- Liu W, Lü P, Su K, et al. Effects of planting density on the grain yield and source-sink characteristics of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1737-1743. (in Chinese)
- [20] 史振声, 孙萌, 李凤海, 等. 辽宁西部地区玉米密植潜力研究[J]. 玉米科学, 2010, 18(4): 99-102.
- Shi Z S, Sun M, Li F H, et al. Study on potential densities of maize in the west of Liaoning Province[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(4): 99-102. (in Chinese)
- [21] 李向岭, 李从锋, 葛均筑, 等. 播期和种植密度对玉米产量性能的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(2): 95-100.
- Li X L, Li C F, Ge J Z, et al. Effects of planting date and planting density on yield performance of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(2): 95-100. (in Chinese)
- [22] 张世煌. 论玉米高密度育种和生产上的密植[J]. 北京农业, 2009(29): 1-2.
- Zhang S H. On high plant population in maize production and high plant population breeding[J]. Beijing Agriculture, 2009(29): 1-2. (in Chinese)
- [23] 高瑞景, 张仁和, 毛建昌. 两种密度选育的玉米自交系对不同肥力的反应[J]. 西北农业学报, 2010, 19(3): 93-97.
- Gao R J, Zhang R H, Mao J C. Response of maize inbred lines bred in two planting densities to different fertilizer levels[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(3): 93-97. (in Chinese)
- [24] 汪黎明, 郭庆法, 高新学, 等. 黄淮海夏玉米的育种目标及品种选育方法改良[J]. 山东农业科学, 2005(6): 21-24.
- Wang L M, Guo Q F, Gao X X, et al. Breeding objective and selecting method improvement of Huang-huai-hai summer maize[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2005(6): 21-24. (in Chinese)
- [25] 赵久然, 王荣焕. 再议玉米耐密型品种的选育鉴定及配套栽培技术[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 5-7.
- Zhao J R, Wang R H. Further Discussion on the breeding and cultivation techniques for high density tolerant maize cultivars[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 5-7. (in Chinese)
- [26] 李登海, 杨今胜, 柳京国, 等. 对超级玉米杂交种的选育与推广的思考[J]. 玉米科学, 2008, 16(5): 1-2.
- Li D H, Yang J S, Liu J G, et al. Proposal on hybrid breeding and popularization of super maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(5): 1-2. (in Chinese)
- [27] 杨克诚, 苟才明, 荣廷昭, 等. 西南地区玉米育种现状及发展对策[J]. 玉米科学, 2008, 16(3): 8-11.
- Yang K C, Gu C M, Rong T Z, et al. Discuss on present situation of maize breeding and countermeasure in southwest region[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(3): 8-11. (in Chinese)
- [28] Bos I, Caligari P. Selection methods in plant breeding[M]. 2nd Edition. Springer, 2008: 381-403.

(责任编辑:高阳)

(上接第 56 页)

- Lei Y, Jiang C Y, Li Y L. Synthesis of nicosulfuron[J]. Agrochemicals Research and Application, 2010, 14(3): 19-21.
- [3] Stephen O D. Overview of herbicide mechanisms of action[J]. Environmental Health Perspectives, 1990, 87: 263-271.
- [4] Preston C, Powles S B. Evolution of herbicide resistance in weeds: initial frequency of target site-based resistance to acetolactate synthase inhibiting herbicides in *Lolium rigidum*[J]. Heredity, 2002, 88: 8-13.
- [5] 董晓雯, 王金信. 不同玉米品种对烟嘧磺隆的敏感性差异[J]. 植物保护学报, 2007, 34(2): 182-186.
- Dong X W, Wang J X. The sensitivity of different maize varieties to the nicosulfuron[J]. Acta Phytolacica Sinica, 2007, 34(2): 182-186.
- [6] 罗仕丽. 玉米苗期使用的新型除草剂[J]. 植保技术科技, 2008(10): 39.
- Luo S L. Application of new herbicide in maize growing[J]. Acta Phytolacica Technology, 2008(10): 39.
- [7] 李致闻, 史振声, 吕香玲, 等. 玉米抗烟嘧磺隆基因研究进展[J]. 辽宁农业科学, 2011, 6: 32-35.
- Li Z W, Shi Z S, Lü X L, et al. A review on research and development of maize resistant to nicosulfuron[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2011, 6: 32-35.
- [8] 郑忠培, 沈健英. 乙酰乳酸合成酶抑制剂的种类及其耐药性研究[J]. 杂草科学, 2009, 2: 8-12.
- Zheng Z P, Shen J Y. Research of species and resistance to Acetolactate Synthase Inhibitors[J]. Weed Technology, 2009, 2: 8-12.

(责任编辑:高阳)