

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2012.02278

施肥水平和种植密度对张杂谷 5 号产量及其构成要素的影响

杨艳君^{1,2} 郭平毅^{1,*} 曹玉凤² 王宏富¹ 王玉国¹ 原向阳¹ 邢国芳¹
邵东红¹ 祁祥¹ 解丽丽¹ 聂萌恩¹ 郭俊¹ 宁娜¹

¹ 山西农业大学农学院, 山西太谷 030801; ² 山西省晋中学院生物科学与技术学院, 山西晋中 030600

摘要: 优质高产的杂交谷子为我国乃至世界的粮食保障提供了有力保障, 但良种需良法配套, 为此研究杂交谷的最佳栽培条件。采用五因素二次通用旋转组合设计, 探讨氮、磷、钾、行距和株距对张杂谷 5 号产量及其构成因素穗数、穗粒数、千粒重的影响。结果表明, 产量与穗数、穗粒数显著正相关, 而与千粒重无显著相关。氮、行距、磷、钾对产量和穗粒数有显著影响, 氮肥和行距影响较大, 而磷和钾肥影响较小。行距、株距和氮对穗数有显著影响, 随着施氮量的增加以及株距和行距的缩小, 穗数呈增加趋势。施磷水平对千粒重有显著影响, 随着施磷量的增加, 千粒重表现先升后降的趋势。在研究的 5 个因素中, 施氮水平、施钾水平以及株距之间交互作用对穗粒数和产量有显著影响; 施氮水平与株距之间的交互作用对千粒重有显著影响。该 5 个因素与产量间回归关系极显著, 拟合程度较高, 可用于实际生产预测。使张杂谷 5 号产量最大的农艺方案为氮施用量 186 kg hm^{-2} , P_2O_5 施用量 95 kg hm^{-2} , K_2O 施用量 60 kg hm^{-2} , 行距 23 cm, 株距 13 cm, 预期产量为 $6\,683 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

关键词: 杂交谷; 二次通用旋转组合设计; 施肥; 密度; 产量; 产量构成

Effects of Fertilizer and Planting Density on Yield and Yield Components in Foxtail Millet Hybrid Zhangzagu 5

YANG Yan-Jun^{1,2}, GUO Ping-Yi^{1,*}, CAO Yu-Feng², WANG Hong-Fu¹, WANG Yu-Guo¹, YUAN Xiang-Yang¹, XING Guo-Fang¹, SHAO Dong-Hong¹, QI Xiang¹, XIE Li-Li¹, NIE Meng-En¹, GUO Jun¹, and NING Na¹

¹ College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; ² Bioengineering Institute of Jinzhong University, Jinzhong 030600, China

Abstract: Foxtail millet (*Setaria italica* L.) is of high nutritious value, which has been mostly used for foods in Africa and Asia or Central and South America. To investigate the effects of fertilizer and density on yield and yield components of Zhangzagu 5, we conducted an experiment based on quadratic general rotary unitized design with three replications. The results demonstrated that the yield was significantly positively correlated with ears per ha and grains per ear, but not with 1000-grain weight. The levels of nitrogen, phosphate and potassium and the row spacing all showed significant effects on grains per ear and yield, and the grains per ear and yield were mainly affected by nitrogen level and row spacing, and less affected by phosphate and potassium levels. Row spacing, plant spacing and nitrogen level had great effects on ears per ha, which was promoted with increasing N and decreasing row spacing and plant spacing. The effect of phosphate level on 1000-grain weight was evident, which had a trend from rising to declining with phosphate increasing. The interactions between nitrogen and potassium levels and plant spacing, and between potassium level and plant spacing showed significant effects on grains per ear and yield, while the interaction between nitrogen level and plant spacing showed great effect on 1000-grain weight. The interaction effects of other factors on the yield and yield components were not so obvious. Multivariate quadratic regression analysis indicated that the regression relationship between the levels of nitrogen, phosphate and potassium, row spacing, plant spacing and the yield of Zhangzagu 5, can be used for production forecasts. Here is the recommended cultivation conditions for Zhangzagu 5: 186 kg ha^{-1} for nitrogen level, 95 kg ha^{-1} for P_2O_5 , 60 kg ha^{-1} for K_2O , 23 cm for row spacing, 13 cm for plant spacing, and the expected yield is $6\,683 \text{ kg ha}^{-1}$. In conclusion, nitrogen, phosphate and potassium, row spacing, plant spacing and their interactions have certain effects on the ears per ha, grains per ear, 1000-grains weight and yield of Zhangzagu 5. Proper planting density and fertilization can successfully resolve the

本研究由山西省农业综合开发项目(201150-1/2), 山西省现代农业产业体系(谷子)项目和山西省科技攻关项目(20120311004-4)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 郭平毅, E-mail: pyguo@sxau.edu.cn, Tel: 0354-6286938

第一作者联系方式: E-mail: yyj1210@sina.com, Tel: 0354-3276092

Received(收稿日期): 2012-04-19; Accepted(接受日期): 2012-08-15; Published online(网络出版日期): 2012-10-08.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20121008.1258.007.html>

contradictions of ears per ha with grains per ear and 1000-grain weight, and increase yield.

Keywords: Millet hybrid; Quadratic general rotary unitized design; Fertilizer; Density; Yield; Yield components

谷子 [*Setaria italica* (L.) Beau] 属禾本科 (Grainier) 狗尾草属 (*Setaria* Beauv.), 在我国已有 7 000 多年的栽培历史。其不仅营养丰富, 而且具有一定药用价值^[1-4]。但由于受生产水平的限制及大宗作物小麦、玉米等影响, 近年来种植面积逐年下降。20 世纪 90 年代以来, 杂交谷子系列品种的育成显著提高了产量水平。但目前关于谷子栽培措施优化的研究仅限于单因素试验或正交试验, 如杨珍平等^[5]利用单因素试验表明, 磷元素对谷子产量及产量结构的贡献大于氮元素和钾元素。李书田等^[6]在对谷子的正交试验中指出, 对产量的影响为品种>施肥>播期>密度。而谷子产量往往是多种因素协同作用的结果, 单因素试验所确定的最优水平不完善, 正交试验的精确度不能保证。二次通用旋转组合设计确保与试验中心点距离相等的试验点上的预测值方差相等, 克服了其他统计方法的不足^[7]。栽培密度和施肥水平都是影响谷子产量的重要因素^[5-6,8-10]。本文以氮肥、磷肥、钾肥、行距和株距五因素为影响因子, 产量及其构成因素穗数、单穗粒数、千粒重为研究对象, 采用五因素五水平二次通用旋转组合设计, 明确张杂谷 5 号在山西晋中地区栽培密度和肥料供应最佳组合, 旨在探索该品种高产栽培条件, 充分发挥其产量潜力, 为大面积推广杂交谷子提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地与材料

试验于 2010—2011 年在山西省太谷县韩村进行, 试验地前茬为马铃薯, 土壤 pH 8.1, 含有机质 18.2 g kg⁻¹、全氮 0.92 g kg⁻¹、碱解氮 75 mg kg⁻¹、全磷 0.68 g kg⁻¹、速效磷 46 mg kg⁻¹、全钾 25.5 g

kg⁻¹、速效钾 102 mg kg⁻¹。供试品种为由张家口市农业科学院选育的、近几年在山西推广面积最大的张杂谷 5 号。

1.2 试验方法

试验包括氮肥、磷肥、钾肥、行距和株距 5 个因素, 每个因素 5 个水平(表 1), 采用二次通用旋转组合设计, 共 32 个试验处理组合(五因素的 1/2 实施)^[11], 小区面积 3 m×6 m=18 m², 重复 3 次, 随机安排小区, 试验区周围设保护行。磷、钾肥做为底肥, 氮肥 1/2 做底肥、1/2 做追肥在拔节孕穗期施入, 氮肥为尿素(含 N 46%); 磷肥为普钙(含 P₂O₅ 16%); 钾肥为氯化钾(含 K₂O 50%)。播前统一灌水, 统一旋耕, 统一于 2010 年 5 月 15 日上午用 2BX-3 型小籽粒播种机(山西农业大学工学院研制)按方案中行距播种。出苗后 3~5 叶时期统一间苗, 同时按株距要求定苗。期间 2 次统一人工中耕除草, 统一田间管理, 防倒伏、防鸟害。2011 年选用 2010 年最优组合及零水平组合进行验证试验, 5 月 18 日播种, 小区面积 6 m×6 m=36 m², 各 6 个小区。

1.3 测定项目与方法

成熟后各小区取 10 株用于考种, 考查单穗粒数和千粒重, 收获前每小区取 3 m 3 行测定穗数。9 月 30 日收获, 脱粒风干后称重、计产。

1.4 统计分析

采用 SAS9.0 统计软件, 通过相关分析计算产量构成要素和产量之间的相关系数。 x_1 表示 N, x_2 表示 P₂O₅, x_3 表示 K₂O, x_4 表示行距, x_5 表示株距, 通过回归分析建立五因素与产量以及产量构成要素之间的回归方程, 因通用旋转设计的常数项系数与二次项系数、二次项系数之间都具有相关性^[12], 为方便对模型分析讨论, 保留不显著的各项。将 5 个因素中

表 1 试验因素水平与编码表
Table 1 Levels and codes of experimental factors

编码 Code	N (kg hm ⁻²)	P ₂ O ₅ (kg hm ⁻²)	K ₂ O (kg hm ⁻²)	行距 Row spacing (cm)	株距 Plant spacing (cm)
-2	0	0	0	10	5
-1	69	36	37.5	20	10
0	138	72	75.0	30	15
1	207	108	112.5	40	20
2	276	144	150.0	50	25
Δj	69	36	37.5	10	5

的 4 个固定在零水平, 对数学模型进行降维分析, 得到以其中一个因素为确定变量的偏回归模型, 并根据该模型作出单因素变化趋势图。在固定其他三因子为零水平时, 求另两因子之间的交互作用, 并作两因子互作效应的等值线图。对所建模型进行非线性求解得出极大值。

2 结果与分析

2.1 谷子产量与产量构成要素的相关性

产量与单穗粒数极显著相关($r=0.98$, $P<0.0001$), 与穗数显著相关($r=0.44$, $P=0.0114$), 而与千粒重之间的相关性未达显著水平($P=0.2343$)。

2.2 谷子单位面积穗数对肥力和密度的响应

建立 5 个因素与张杂谷 5 号每公顷成穗数的回归方程: $y=656973+69008x_1-2753x_2-21506x_3-204113x_4-69660x_5-12078x_1^2-16314x_2^2-10758x_3^2+13692x_4^2+3194x_5^2+731x_1x_2+37189x_1x_3-54898x_1x_4+39896x_1x_5-1772x_2x_3-1354x_2x_4-4479x_2x_5+33023x_3x_4+38233x_3x_5+23231x_4x_5$, 决定系数为 0.573。方程的 F 检验 P 值为 0.0296 (<0.05), 失拟项检验不显著, 说明模型的预测值与实际值吻合较好。得张杂谷 5 号每公顷成穗数最大的农艺方案为 $x_1=1.0324$, $x_2=0.1788$, $x_3=-2$, $x_4=-2$, $x_5=-2$ 。即施氮 209 kg hm^{-2} , 施 P_2O_5 76 kg hm^{-2} , 施 K_2O 0 kg hm^{-2} , 行距为 10 cm, 株距为 5 cm, 此时穗数为每公顷 1 663 134 穗。

行距($P<0.0001$)、株距($P=0.0454$)、 N ($P=0.0471$)对穗数有显著影响, 由各一次项回归系数绝对值的大小可推断其影响为行距>株距> N 。其他因素以及相互作用的影响均未达到显著水平($P>0.05$)。由图 1-a 可以看出, 在设计范围内, 随着施氮量的增加以及株距和行距的缩小, 张杂谷 5 号的单位面积穗数均呈直线上升的变化趋势, 增加的幅度以行距最明显。磷肥和钾肥对单位面积穗数的影响很小, 变化趋势不明显。

2.3 谷子单穗粒数对肥力和密度的响应

建立 5 个因素与张杂谷 5 号单穗粒数的回归方程: $y=7419.6+244.4x_1+132.8x_2-146.8x_3-275.7x_4-83.5x_5-275.8x_1^2-140.9x_2^2-152.7x_3^2-225.3x_4^2-309.4x_5^2-4.9x_1x_2+165.7x_1x_3-118.1x_1x_4-166.1x_1x_5-18.1x_2x_3+41.7x_2x_4-57.6x_2x_5+22.6x_3x_4+164.6x_3x_5+94.6x_4x_5$, 决定系数为 0.7974。方程的 F 检验 P 值为 0.0009 (<0.05), 失拟项检验不显著, 说明模型的预测值与实际值吻合较好。得张杂谷 5 号单穗粒数最多的农艺方案为 $x_1=0.6607$, $x_2=0.5064$, $x_3=-0.5682$, $x_4=-0.9026$, $x_5=-0.6483$ 。即施 N 184 kg hm^{-2} , 施 P_2O_5 90 kg hm^{-2} , 施

K_2O 54 kg hm^{-2} , 行距为 21 cm, 株距为 12 cm, 此时单穗粒数为 7 727 粒。

行距($P=0.0008$)、 N ($P=0.0018$)、 K_2O ($P=0.0321$)、 P_2O_5 ($P=0.0484$)对单穗粒数有显著影响, 该影响为行距> N > K_2O > P_2O_5 。株距对单穗粒数影响不显著($P=0.1907$)。由图 1-b 可知, 在设计范围内, 张杂谷 5 号的单穗粒数随施氮水平的增加及行距的缩小呈先迅速增长后缓慢下降的趋势。 K_2O 、 P_2O_5 的影响相似, 均随肥料的增加略有增长, 而后逐渐降低。随着株距缩小, 单穗粒数呈现出低-高-低的变化趋势。

N 与 K_2O ($P=0.045$)、株距($P=0.0446$)之间存在显著的交互作用, K_2O 与株距之间也存在显著的交互作用($P=0.0463$)。从图 2-a 可以看出, 当 P_2O_5 、株距和行距固定在零水平时, 随 N 和 K 水平的增加, 单穗粒数呈先增后降的趋势。 N 的作用在高 K_2O 水平下对单穗粒数的增加效应更明显, 说明在 K_2O 充足时, 增施 N 会提高单穗粒数。 K_2O 在高 N 水平下对单穗粒数的影响较小, 在低 N 水平下, 单穗粒数随着 K_2O 的增加呈先缓慢增多后明显下降趋势, 说明在低 N 条件下应控制 K_2O 的过量施用。由图 2-b 可知, 当 P_2O_5 、 K_2O 和行距固定在零水平时, 株距较小的条件下, 增加 N 的施用量可引起单穗粒数较大幅度的增加; 而在株距较大的条件下, 增加 N 的施用量对单穗粒数的增多效果不明显。施 N 水平较高时, 缩小株距单穗粒数增多更为明显。从图 2-c 可以看出, 当 N 、 P_2O_5 、行距固定在零水平时, K_2O 低水平时, 单穗粒数随着株距的缩小先迅速增多后减少。但在 K_2O 高水平条件下, 单穗粒数随着株距的缩小先缓慢增多后迅速减少。

2.4 谷子千粒重对肥力和密度的响应

建立 5 个因素与张杂谷 5 号千粒重的回归方程: $y=3.102-0.006x_1-0.043x_2-0.011x_3+0.013x_4-0.003x_5-0.0006x_1^2-0.026x_2^2-0.021x_3^2-0.017x_4^2-0.036x_5^2+0.009x_1x_2+0.023x_1x_3+0.003x_1x_4-0.053x_1x_5+0.004x_2x_3+0.004x_2x_4+0.024x_2x_5-0.028x_3x_4-0.025x_3x_5+0.005x_4x_5$, 决定系数为 0.5167。回归方程(3)的 F 检验 P 值为 0.0493 (<0.05), 失拟项检验不显著, 说明模型的预测值与实际值吻合较好。得到张杂谷 5 号千粒重最大的农艺方案为 $x_1=-2$, $x_2=-0.2559$, $x_3=-2$, $x_4=2$, $x_5=2$ 。即施 N 0 kg hm^{-2} , 施 P_2O_5 63 kg hm^{-2} , 施 K_2O 0 kg hm^{-2} , 行距为 50 cm, 株距为 25 cm, 此时千粒重为 3.39 g。

P_2O_5 对千粒重有显著影响($P=0.0056$), 由图 1-c 可以看出, 在设计范围内, 随着磷肥用量的增加,

张杂谷 5 号的千粒重先缓慢上升, 而后迅速下降。其他 4 个因素引起千粒重的变化很小。N 与株距之间交互作用对千粒重有显著的影响($P=0.006$), 由图 2-d 可知, 在施 N 水平较低时, 随着株距的缩小, 千粒重先缓慢上升后迅速下降; 而在施 N 水平较高时, 随着株距的缩小, 千粒重开始迅速上升, 达高点后, 又缓慢下降。在较窄株距的条件下, 增施 N 肥提高千粒重更明显。

2.5 谷子产量对肥力和密度的响应

建立 5 个因素与张杂谷 5 号产量的回归方程:
 $y=6486.93+193.75x_1+104.17x_2-103.33x_3-184.17x_4-53.75x_5-192.56x_1^2-111.93x_2^2-143.81x_3^2-185.06x_4^2-233.18x_5^2+50x_1x_2+156.88x_1x_3-66.88x_1x_4-120.63x_1x_5-46.88x_2x_3+31.88x_2x_4-9.38x_2x_5+48.75x_3x_4+120x_3x_5+48.75x_4x_5$, 决定系数为 0.6545。回归方程(4)的 F 检验 P 值为 0.0001 (<0.01), 失拟项检验不显著, 说明模型的预测值与实际值吻合较好。得张杂谷 5 号每公顷产量最大的农艺方案为 $x_1=0.6905$, $x_2=0.6263$, $x_3=-0.4016$, $x_4=-0.6847$, $x_5=-0.4814$ 。即施 N 186 kg hm^{-2} , 施 P_2O_5 95 kg hm^{-2} , 施 K_2O 60 kg hm^{-2} , 行距为 23 cm, 株距为 13 cm, 此时产量为 $6\,683 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

N ($P<0.0001$)、行距 ($P<0.0001$)、 P_2O_5 ($P=0.0079$)、 K_2O ($P=0.0084$)对产量有显著影响, 其影响为 $\text{N}>\text{行距}>\text{P}_2\text{O}_5>\text{K}_2\text{O}$ 。株距对产量的影响不显著 ($P=0.1629$)。由图 1-d 可以看出, 在设计范围内, 5 个因素对产量的影响均呈抛物线状。张杂谷 5 号产量随施 N 水平的增加而迅速增长, 当施 N 水平超过一定值后开始缓慢下降; 随着行距的缩小, 产量先迅速增加, 而后缓慢下降, 二者呈现相反的不对称抛物线变化。 K_2O 、 P_2O_5 的影响相似, 均随着肥料的增加先略有增加, 而后逐渐降低。随着株距缩小, 产量略有增加, 接近零水平时达到最高, 而后逐渐降低, 表现出对称的抛物线变化。

N 与 K_2O ($P=0.045$)、株距 ($P=0.0446$)之间及 K_2O 与株距之间均存在显著的交互作用 ($P=0.0463$)。图 2-e 表明, 当 P_2O_5 、株距、行距固定在零水平时, 随着 N、K 施用量的增加, 产量呈先增加后下降的趋势。N 在高 K_2O 水平下比低 K_2O 水平下增产效应大, 说明在 K_2O 充足时, 增施 N 肥更利于达到高产。在高 N 水平下, 增施 K_2O 引起产量变化不大; 在低 N 水平下, 产量随着 K_2O 的增加呈先缓慢增多后迅速

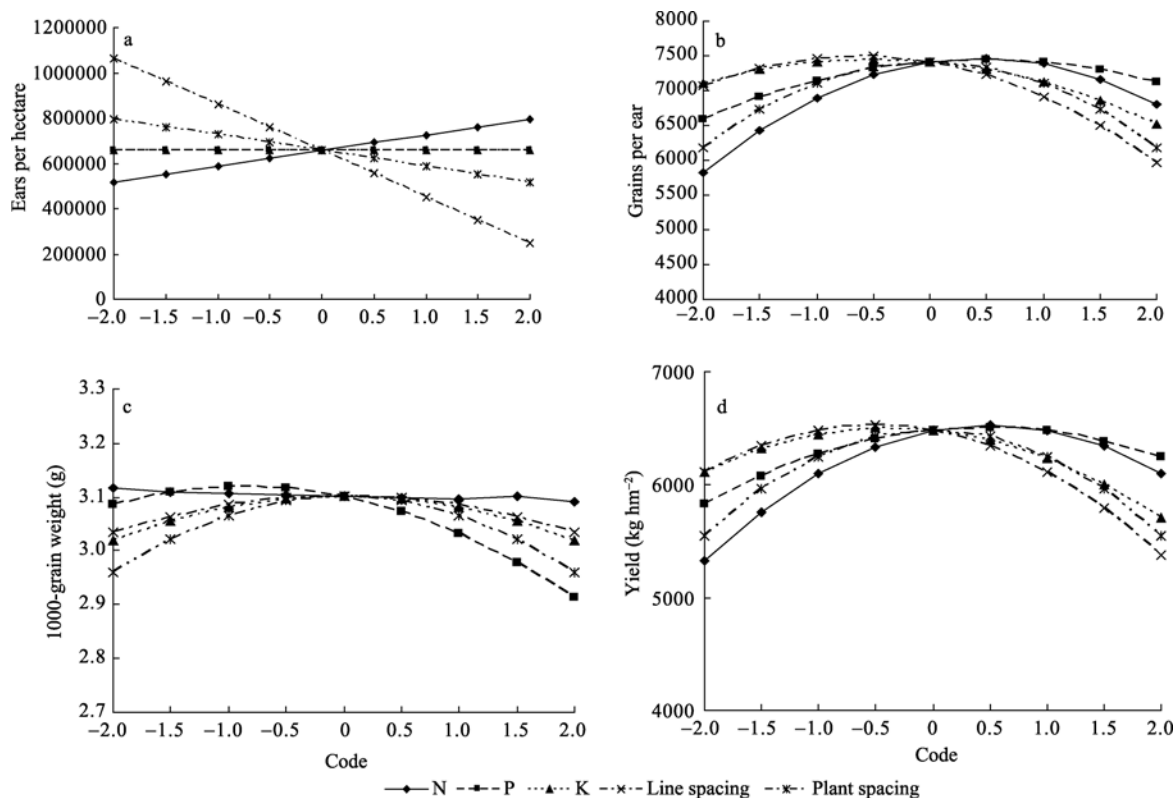


图 1 各单因素对张杂谷 5 号产量及产量构成要素的影响
 Fig. 1 Effects of single factor on yield and yield components of Zhangzagu 5

a: 单位面积穗数; b: 单穗粒数; c: 千粒重; d: 产量。
 a: ears per hectare; b: grains per ear; c: 1000-grain weight; d: yield.

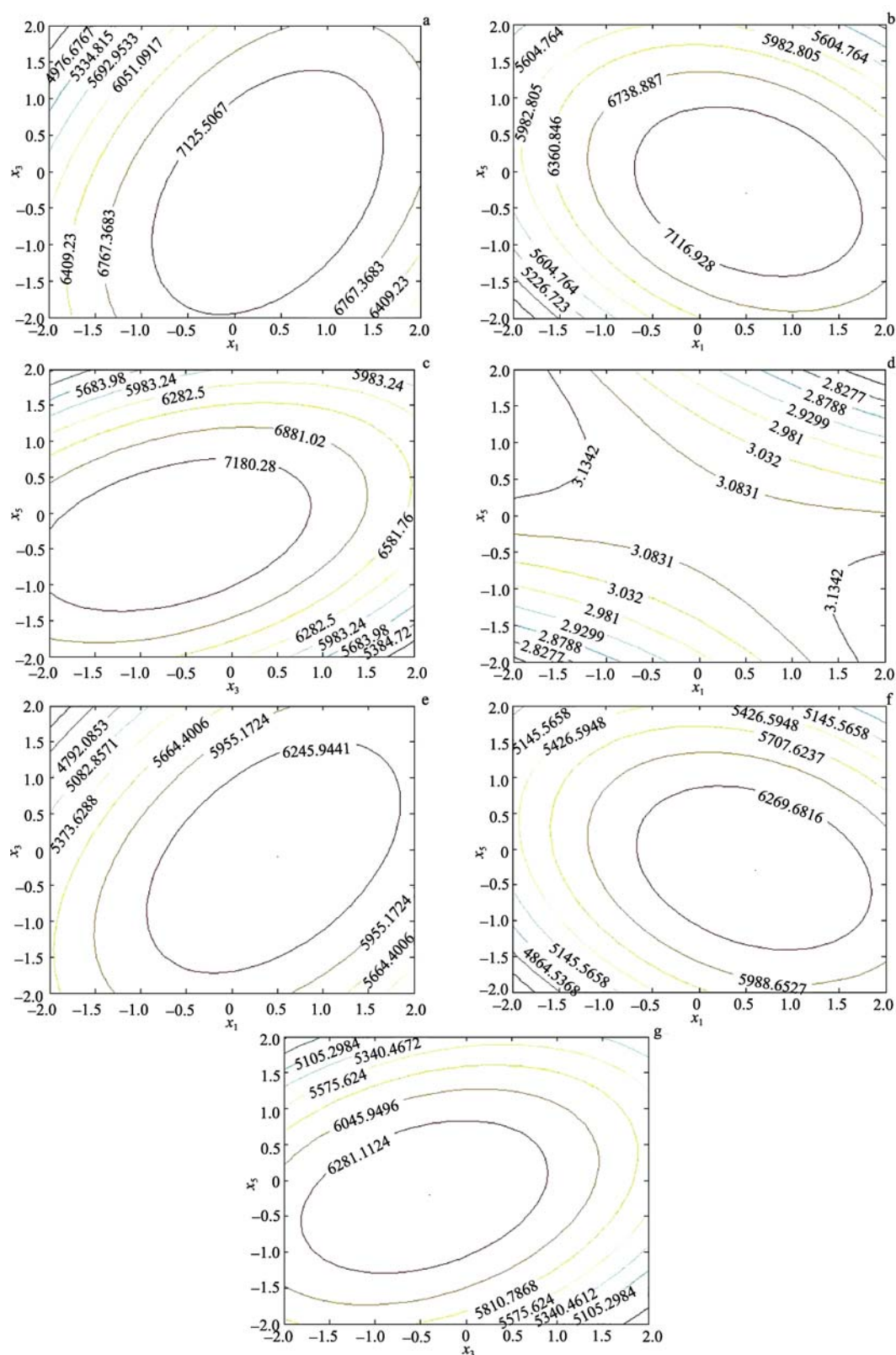


图 2 因素交互作用对张杂谷 5 号产量及产量构成要素的影响

Fig. 2 Effects of mutual interaction on yield and yield components of Zhangzagu 5

a: $N \times K_2O$ 对单穗粒数; b: $N \times$ 株距对单穗粒数; c: $K_2O \times$ 株距对单穗粒数; d: $N \times$ 株距对千粒重; e: $N \times K_2O$ 对产量; f: $N \times$ 株距对产量; g: $K_2O \times$ 株距对产量。

a: $N \times K_2O$ on grains per ear; b: $N \times$ plant spacing on grains per ear; c: $K_2O \times$ plant spacing on grains per ear; d: $N \times$ plant spacing on 1000-grain weight; e: $N \times K_2O$ on yield; f: $N \times$ plant spacing on yield; g: $K_2O \times$ plant spacing on yield.

下降趋势,说明在低 N 时应控制 K_2O 的过多施用。图 2-f 表明,当施 P_2O_5 、施 K_2O 、行距固定在零水平时,窄株距的条件下,增加 N 的用量可引起产量大幅提升;宽株距的条件下,增加 N 的用量对增产效果不明显。且随着施 N 量的继续增加,产量都有一个下降的趋势。说明在宽株距时,增施氮肥增产不明显,但是在窄株距时,一定要增施氮肥获得较高产量。在低 N 水平下,株距缩小,产量先缓慢上升,后迅速下降;在高 N 水平下,株距缩小,产量先迅速增加,后下降不明显。图 2-g 表明,当 N、 P_2O_5 、行距固定在零水平时,当少施 K_2O 或者适量施 K_2O 时,随着株距的缩小,产量开始增加比较快,后减产,但在高 K_2O 水平下,产量随着株距的缩小先缓慢增多后迅速减少。

2.6 张杂谷 5 号栽培条件的验证

2010 年筛选的最佳水平组合未包含在所设计的 32 个试验处理组合中,为了进一步对该栽培条件进行验证,在施 N 186 kg hm^{-2} ,施 P_2O_5 95 kg hm^{-2} ,施 K_2O 60 kg hm^{-2} ,行距为 23 cm,株距为 13 cm 条件下,2011 年 5 月选用面积为 $6\text{ m}\times 6\text{ m}$ 的 6 个小区,得到张杂谷 5 号平均产量为 $6\ 765\text{ kg hm}^{-2}$ 。同时种植了零水平 $6\text{ m}\times 6\text{ m}$ 的 6 个小区,得到 6 个零水平小区平均产量为 $6\ 437\text{ kg hm}^{-2}$,最佳水平组合比零水平组合增产 5.1%,进一步验证了产量模型的实用性。

3 讨论

谷子产量的高低,决定于单位面积穗数、单穗粒数和粒重三因素的乘积,栽培措施以达到该乘积最大值为目的。单位面积穗数主要反映群体的密植幅变,单穗粒数和粒重则反映群体内个体生长发育状况。本试验表明,张杂谷 5 号产量与单穗粒数高度相关($r=0.98$),与单位面积穗数中度相关($r=0.44$),与千粒重不相关。而田伯红等^[13]在对 20 个常规谷子品种农艺性状研究中表明,谷子千粒重与产量关系密切。说明大幅扩大产量库容(增加总粒数),是实现张杂谷 5 号高产的前提,而单位面积粒数的增加,可以通过保证一定穗数的基础上增加单穗粒数来实现,这与一些研究认为作物扩大库容主要是通过稳定穗数、增加粒数的观点相一致^[14]。薛亚光等^[15]关于水稻产量的研究认为,在高产高效栽培条件下增穗增粒是增加产量的重要措施。

有关 N、P、K 施肥水平对作物产量影响的相关

研究很多,但受土壤肥力、气候差异等因素影响,结果不尽相同。大多数结果表明,N 为作物所需的首要元素,而 P、K 元素则是在作物满足 N 的基础上追求进一步高产的必需^[16-22]。本研究表明,N、P、K 对张杂谷 5 号单穗粒数、产量均有显著影响,其影响以 N 为首,P、K 次之。而杨珍平等在对常规谷子的研究中认为磷元素对谷子产量及产量结构的贡献大于氮素和钾素^[5]。单穗粒数和产量随着施肥水平的提高均呈现先增长后下降的趋势。所以,施肥水平一定要与所追求的产量水平相协调^[23]。N 对穗数也有显著影响,随着施 N 量的增加,穗数呈直线上升趋势,可推断 N 对谷子的增产原因可能是首先增加穗数,而后增加单穗粒数;但随着 N 施用量继续增加,提高了单位面积穗数,而降低了单穗粒数,并茎秆软弱易于倒伏,导致产量下降。本研究表明,N 与 K 的互作对张杂谷 5 号的单穗粒数和产量有显著影响。在 K 充足时,增施 N 会提高单穗粒数和产量,说明 K 对 N 有促进作用。在低 N 水平下,开始时随着 K 的增加,单穗粒数、产量增加不明显,但随着 K 的继续施用,单穗粒数和产量均明显减少,说明在低 N 条件下应控制 K 的过量施用。P 与 N、K 之间的相互作用对产量及其构成要素的影响均未达显著水平。但单因素 P 对单穗粒数、千粒重和产量均有显著影响。由此可见,张杂谷 5 号合理施肥的主要措施以增 N 为主,通过增 N 补 K,以 K 促 N,配合施 P,才能增产增收。这与 Kunzova 等^[24]对小麦产量研究结果相一致。

合理密植利于缓冲个体与群体间的矛盾,并利于穗数、单穗粒数和粒重的协调发展。本研究表明,随着行距、株距的缩小,穗数呈直线增长,产量也相应提高;但行距、株距缩小到一定程度,虽然穗数增加,但密度与单穗粒数和粒重矛盾激化,单穗粒数减少,产量降低。薛盈文等^[25]的研究表明行距对小麦产量有显著影响,但株距对小麦产量影响不显著,这与本研究结果比较一致。行距对张杂谷 5 号穗数、单穗粒数、产量均有显著影响,随着行距的缩小,单穗粒数和产量均出现低-高-低的变化趋势,这是由于行距较大时,植株间虽互相影响较小,但光、热、气等资源未充分利用,产量不高;而当行距开始缩小时,植株分布合理,地力和光能均可充分利用,使生长好、产量高;而随着行距进一步缩小,植株对地力和光能等竞争过于激烈,不能满足生长需求,导致植株出现衰弱现象,从而影响到单穗粒数和千

粒重,使产量下降。株距只对穗数有显著的影响,但株距与N、K元素的相互作用对单穗粒数、千粒重、产量有一定影响。从生理学角度进一步说明,行距对产量与产量构成的影响与光能利用率和CO₂扩散能力相关性高;株距对产量与产量构成的影响则与植株间水肥竞争的相关度高。

在本研究中发现,营养元素与种植密度间也存在互作效应。施N与株距、施K与株距间交互作用对单穗粒数和产量均有显著影响。当少施N、K或者适量施N、K时,随着株距的缩小,单穗粒数、产量开始增加,而后减小。说明在一定肥力范围内,可以通过调整种植密度来替代施肥量,以密补肥。但在高N、K水平下,随着株距的缩小,产量开始增加比较慢,增加到一定程度后产量迅速减小。密度过大,叶片互相遮阴,群体郁闭,光合效率降低,使产量下降。施N、施K作用在窄株距水平下比宽株距水平下对产量的贡献大,说明高密高肥配合使用可获高产,但继续增施N、K肥料,产量会明显降低,高肥水平下营养生长过剩、倒伏严重可能是其产量下降原因。曹倩等研究也表明,只有在适宜密度下合理地施用氮肥才能有效利用氮密互作,提高产量^[26]。

4 结论

氮、磷、钾、行距和株距及其相互作用对张杂谷5号穗数、单穗粒数、千粒重和产量有一定影响。要获高产需合理密植和适当施肥,既要使每单位面积有最大限度的株数,又要使单株能充分利用水、肥、光、热等条件,使单位面积穗数与单穗粒数和粒重的矛盾得到统一从而达到增产的目的。在本试验条件下,推荐张杂谷5号的最佳农艺方案为N施用量186 kg hm⁻², P₂O₅施用量95 kg hm⁻², K₂O施用量60 kg hm⁻²,行距为23 cm,株距为13 cm,预期产量为6 683 kg hm⁻²。

References

- [1] Kasaoka S, Oh-hashii A, Morita T, Kiriya S. Nutritional characterization of millet protein concentrates produced by a heat-stable α -amylase digestion. *Nutr Res*, 1999, 19: 899–910
- [2] Antony U, Sripriya G, Chandra T S. The effect of fermentation on the primary nutrients in foxtail millet (*Setaria italica*). *Food Chem*, 1996, 56: 381–384
- [3] Geervani P, Eggum B O. Nutrient composition and protein quality of minor millets. *Plant Foods Human Nutr*, 1989, 39: 201–208
- [4] Zhang Z W, Qu J B, Xu G F, Song L H, Wang J J, Shimbo S, Watanabe T, Nakatsuka H, Higashikawa K, Ikeda M. Maize and foxtail millet as substantial sources of dietary lead intake. *Sci Total Environ*, 1997, 208: 81–88
- [5] Yang Z-P(杨珍平), Zhang X-Y(张翔宇), Miao G-Y(苗果园). Effects of fertilizing on millet root-shoot growth, rhizospheric soil enzyme and microbe in immature soil in north China. *Nucl Agric Sci* (核农学报), 2010, 24(4): 802–808 (in Chinese with English abstract)
- [6] Li S-T(李书田), Zhao M(赵敏), Liu B(刘斌), Chai X-J(柴晓娇), Zhang L-Y(张立媛), Li Y-H(李艳红). Multiple factorial experiments on the sowing data, density and fertilizer of new millet varieties. *Inner Mongolia Agric Sci Technol* (内蒙古农业科技), 2010(3): 33–34 (in Chinese with English abstract)
- [7] Kowalski J. Optimal estimation in rotation patterns. *J Statist Plan Infer*, 2009, 139: 1405–1420
- [8] Liu Z-L(刘正理), Cheng R-H(程汝宏), Zhang F-L(张凤莲), Xia X-Y(夏雪岩), Shi Z-G(师志刚), Zhang Y-H(张耀华). Yield and yield component characteristics of three foxtail millet varieties at different planting densities. *Chin J Eco-Agric* (中国生态农业学报), 2007, 15(5): 135–138 (in Chinese with English abstract)
- [9] Fan J-B(范静波), Yang L-F(杨潞芳), Yang P-H(杨鹏辉). Effect of potassium fertilizer on millet development and yield. *J Shanxi Agric Sci* (山西农业科学), 2003, 31(2): 41–43 (in Chinese with English abstract)
- [10] Xi G-S(奚广生), Wang Y-L(王艳玲). Study on fertilization technology of millet. *J Anhui Agric Sci* (安徽农业科学), 2008, 36(24): 10549–10550 (in Chinese with English abstract)
- [11] Rong T-Z(荣廷昭). Field Experimentation and Statistical Analysis (田间试验与统计分析). Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 1998. pp 299–301 (in Chinese)
- [12] Lu E-S(卢恩双), Song S-D(宋世德), Guo M-C(郭满才). Problem in second-order regression general rotation analysis. *J Northwest A&F Univ* (Nat Sci Edn)(西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2002, 30(5): 110–113 (in Chinese with English abstract)
- [13] Tian B-H(田伯红), Xu Y-P(徐玉鹏), Li G-R(李桂荣), Zhang L-X(张立新), Li Y-J(李雅静), Zhao Z-X(赵忠祥), Liu Q-F(刘全凤). Studies on grey correlative analysis for the evolution of agronomic characters of millet. *J Hebei Agric Sci* (河北农业科学), 2004, 8(3): 50–52 (in Chinese with English abstract)
- [14] Yang J-C(杨建昌), Wang P(王朋), Liu L-J(刘立军), Wang Z-Q(王志琴), Zhu Q-S(朱庆森). Evolution characteristics of grain yield and plant type for mid-season *indica* rice cultivars. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2006, 32(7): 949–955 (in Chinese)

- with English abstract)
- [15] Xue Y-G(薛亚光), Chen T-T(陈婷婷), Yang C(杨成), Wang Z-Q(王志琴), Liu L-J(刘立军), Yang J-C(杨建昌). Effects of different cultivation patterns on the yield and physiological characteristics in mid-season japonica rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2010, 36(3): 466–476 (in Chinese with English abstract)
- [16] Wang H-T(王宏庭), Jin J-Y(金继运), Wang B(王斌), Zhao P-P(赵萍萍). Effects of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2010, 16(4): 801–808 (in Chinese with English abstract)
- [17] Baethgen W E, Christianson C B, Lamothe A G. Nitrogen fertilizer effects on growth, grain yield, and yield components of malting barely. *Field Crops Res*, 1995, 43: 87–99
- [18] Guo S-L(郭胜利), Dang T-H(党庭辉), Hao M-D(郝明德). Effects of fertilization on wheat yield, $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation and soil water content in semi-arid area of China. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2005, 38(4): 754–760 (in Chinese with English abstract)
- [19] Lewandowski I, Kauter D. The influence of nitrogen fertilizer on the yield and combustion quality of whole grain crops for solid fuel use. *Ind Crops Prod*, 2003, 17(2): 103–117
- [20] Wan L-J(万靓军), Zhang H-C(张洪程), Huo Z-Y(霍中洋), Lin Z-C(林志成), Dai Q-G(戴其根), Xu K(许轲), Zhang J(张军). Effects of nitrogen application regimes on yield, quality and nitrogen use efficiency of super japonica hybrid rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(2): 175–182 (in Chinese with English abstract)
- [21] Sharma A R, Mitra B N. Effect of combination of organic materials and nitrogen fertilizer on growth, yield and nitrogen uptake of rice. *J Agric Sci*, 1988, 111: 495–501
- [22] Tan D S, Jin J Y, Huang S W, Li S T, He P. Effect of long-term Application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems. *Agric Sci China*, 2007, 6(2): 200–207
- [23] Sheehy J E, Mitchell P L, Kirk G J D, Ferrer A B. Can smarter nitrogen fertilizers be designed? Matching nitrogen supply to crop requirements at high yields using a simple model. *Field Crops Res*, 2005, 94: 54–66
- [24] Kunzova E, Hejcman M. Yield development of winter wheat over 50 years of FYM, N, P and K fertilizer application on black earth soil in the Czech Republic. *Field Crops Res*, 2009, 111: 226–234
- [25] Xue Y-W(薛盈文), Yu L-H(于立河), Guo W(郭伟). Effects of collocation of spacing form, fertilizer and density on yield and quality of spring wheat. *J Triticeae Crops* (麦类作物学报) 2008, 28(5): 873–876 (in Chinese with English abstract)
- [26] Cao Q(曹倩), He M-R(贺明荣), Dai X-L(代兴龙), Men H-W(门洪文), Wang C-Y(王成雨). Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2011, 17(4): 815–822 (in Chinese with English abstract)