植物营养与肥料学报 2013,19(3):566-576
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi:10.11674/zwyf.2013.0306

施肥和密度对张杂谷5号光合特性及产量的影响

杨艳君[1,2],王宏富[1*],郭平毅[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: 本研究采用5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号光合特性与产量的影响。结果表明,产量与叶面积指数、净光合速率、叶绿素含量显著正相关。单因素氮、行距、磷、钾对产量和净光合速率有显著影响,氮肥和行距影响较大,而磷和钾肥影响较小。单因素行距、株距和氮对叶面积指数有显著影响,随着施氮量的增加以及株距和行距的缩小,叶面积指数均表现先增后减趋势。单因素施氮和钾水平对叶绿素含量有显著影响,随着施氮、钾量的增加,叶绿素含量均表现为先升后降的趋势。在所研究的5个因素中,施氮水平、施钾水平以及株距之间交互作用对产量有显著影响;施钾水平与施氮水平、株距之间的交互作用对净光合速率有显著影响。该5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。使产量大于6200 kg/hm^{2}的优化因素取值的95%的置信区间为施氮(N) 178~197 kg/hm^2、磷(P_2O_5)88~101 kg/hm^2、钾(K_2O)54~67 kg/hm^2、行距为22~24 cm、株距为12~13 cm。

关键词: 杂交谷;二次通用旋转组合设计;施肥;密度;产量;光合特性
中图分类号: S515.062.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)03-0566-11

Effects of fertilization and density on photosynthetic characteristics and yield of hybrid foxtail millet

YANG Yan-jun[1,2], WANG Hong-fu[1*], GUO Ping-yi[1], WANG Yu-guo[1], YUAN Xiang-yang[1], XING Guo-fang[1],
SHAO Dong-hong[1], QI Xiang[1], XIE Li-li[1], NIE Meng-en[1], GUO Jun[1], NING Na[1]
(*1 College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;*
2 College of Bioengineering, Jinzhong University, Jinzhong, Shanxi 030600, China)

Abstract: Foxtail millet (*Setaria italica* L.) is of high nutritious value, which has been mostly used for foods in Africa, Asia and Central and South America. To investigate the effects of fertilization and density on photosynthetic characteristics and yield of millet, Zhangzagu 5, an experiment based on quadratic general rotary unitized design with 3 replications was conducted. The results show that the yield is significantly positively correlated with leaf area index, net photosynthetic rate and chlorophyll content (SPAD). The levels of nitrogen, phosphate and potassium and the row spacing all have significant effects on the net photosynthetic rate and yield of millet, and the net photosynthetic rate and yield are mainly affected by the nitrogen level and row spacing, while the influence of phosphate and potassium are relatively small. The row spacing, plant spacing and nitrogen level have great effects on leaf area index, and leaf area index is increased at first and then decreased with the increase of N level and decreases of row spacing or plant spacing. The effects of nitrogen and potassium levels on chlorophyll contents are obvious, and the chlorophyll contents have a trend from rising to declining with nitrogen or phosphate increasing. The interactions between the nitrogen level and potassium level and plant spacing, and the interaction between the potassium level and plant spacing show significant effects on yield, and the interactions between the nitrogen level

收稿日期: 2012-10-11 **接受日期:** 2013-01-16
基金项目: 山西省农业综合开发项目(201150-1/2);山西省谷子产业体系项目2011;山西省科技攻关项目(20120311004-4);博士后启动基金(112117)资助。
作者简介: 杨艳君(1977—),女,湖南邵阳人,博士研究生,副教授,主要从事作物栽培与耕作学研究。
Tel:0354-3276092, E-mail:yyj1210@sina.com。 *通信作者 Tel:0354-6288374, E-mail:ndwhf@126.com

and potassium level and plant spacing show great effects on net photosynthetic rate. The interaction effects of other factors on photosynthetic characteristics and yield are not obvious. Multivariate quadratic regression analysis indicates 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. The recommended cultivation conditions for Zhangzagu 5 are 178-197 kg/ha for nitrogen level, 88-101 kg/ha for P_2O_5, 54-67 kg/ha for K_2O, 22-24 cm for row spacing, and 12-13cm for plant spacing. These results suggest that nitrogen, phosphate and potassium, row spacing, plant spacing and their interactions have certain effects on the leaf area index, net photosynthetic rate and chlorophyll content (SPAD) and yield of Zhangzagu 5. The research lays a theoretical foundation for reaching high and stable millet yield and spreading hybrid millet to a large area.

Key words: hybrid millet; quadratic general rotary unitized design; fertilizer; density; yield; photosynthetic characteristic

谷子[*Setaria italica* (L.) Beau]属禾本科(grainier)狗尾草属(*Setaria Beauv.*),是我国北方地区重要的粮食作物之一,以抗旱、耐瘠、营养价值高而著称[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。光合作用是决定作物产量的重要因素,提高谷子群体光能利用,特别是维护中上部叶片较大的光合速率及持续时间对于产量形成十分重要[5]。不同施肥水平可以促进谷子相应生长中心器官对养分的吸收,不同种植密度可以调控谷子群体冠层结构性状,最终形成较高的群体产量[6-7]。因此,研究肥力和密度对张杂谷 5 号光合特性及产量的影响,对杂交谷子生产水平的提高具有重要意义。氮、磷和钾素是影响叶片光合作用的重要因子[8],马新明等[9]研究表明,运用科学的养分控制措施改善作物光合功能是实现高产的有效途径。大量研究表明,行株距设置差异,不仅影响作物冠层光截获和通风透光性,而且还可以有效调控冠层结构、光合产物积累分配及叶片衰老特性等因素[10-12]。栽培密度和施肥水平都是影响谷子光合特性及其产量的重要因素[13-16]。前人对常规谷子光合速率日变化、叶面积指数变化、叶绿素含量等与产量的关系进行了一些研究[17-19],但对杂交谷高产的光合特性研究还不够深入[20]。目前对谷子的栽培因子的研究多数只考虑单因素的影响,而忽略各因素间的相互作用。二次通用旋转组合设计可安排多因素多水平试验并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[21]。本试验在田间条件下以氮肥、磷肥、钾肥、行距和株距 5 因素为试验因子,采用 5 因素 5 水平二次通用旋转组合设计,对张杂谷 5 号灌浆期叶面积指数、旗叶叶绿素含量、旗叶净光合速率及其产量进行研究,以探明张杂谷 5 号在山西晋中地区的栽培密度和肥料供应的最佳组合以及其光合特性及产量对氮肥、磷肥、钾肥、行距和株距的响应,以期为杂交谷如何提高叶片光合、增加光合产物积累和大面积推广杂交谷子提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

试验于 2010 ~ 2011 年两个谷子生长季在山西省太谷县韩村进行,试验地前茬为马铃薯。该地土壤为石灰性褐土,土壤基本养分状况为: pH 值 8.1、有机质 18.2 g/kg、全氮 0.92 g/kg、碱解氮 75 mg/kg、全磷 0.68 g/kg、速效磷 46 mg/kg、全钾 25.5 g/kg、速效钾 102 mg/kg。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　试验设计

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)[22],小区面积 $3 \times 6 = 18\ m^2$,重复 3 次,随机区组排列,试验区周围设保护行。磷、钾肥全部作底肥,氮肥 1/2 作底肥、1/2 作追肥在拔节孕穗期追施。氮肥为尿素(含 N 46%)、磷肥为普钙(含 P_2O_5 16%)、钾肥为氯化钾(含 K_2O 50%)。播前统一灌水,统一旋耕。分别于 2010 年 5 月 15 日和 2011 年 5 月 18 日用 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 叶期统一间苗,同时按株距要求定苗。期间两次统一采用人工中耕除草,统一田间管理,防倒伏、防鸟害。

表1 试验因素水平与编码表

Table 1 Levels and codes of experimental factors

编码 Code	氮 N (kg/hm^2)	磷 P_2O_5 (kg/hm^2)	钾 K_2O (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	30	15
1	207	108	112.5	40	20
2	276	144	150	50	25
Δj	69	36	37.5	10	5

1.3 测定项目和方法

叶面积指数(LAI):在灌浆中期,每个重复随机取长势均匀的30个单茎,人工测量法测定叶面积指数,每个处理测3次重复。

叶绿素含量:在灌浆中期,每个处理测3次重复,每个重复选10片生长基本一致的旗叶,用SPAD-502型叶绿素仪测定旗叶中部SPAD值,每片叶片测定3次,取平均值。

净光合速率:在灌浆中期,每个处理测3次重复,用美国产LI-6400光合仪,自然光下测定旗叶的净光合速率(Pn),每重复选3片生长一致的旗叶,测定时间为晴天9:00~11:00。

产量:9月30日收获,每个小区全部单收单打,脱粒风干后进行称重、计产。

1.4 统计分析

两个试验年度的试验结果趋势基本一致,本文主要以2011年的结果进行分析。2011年试验数据见表2。用SAS 9.0软件统计分析,计算产量与各指标之间的相关系数。X_1表示氮(N)、X_2表示磷(P_2O_5)、X_3表示钾(K_2O)、X_4表示行距、X_5表示株距,通过回归分析建立5因素与叶面积指数、叶绿素含量、旗叶净光合速率和产量之间的五元二次回归方程,因通用旋转设计的常数项系数与二次项系数及二次项系数之间都具有相关性[23],为方便对模型进行分析讨论,保留不显著的各项,将5个因素中的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,并根据该模型做出单因素变化趋势图。在固定其他三因子为零水平时,求两因子之间的交互作用,并作两因子互作效应的等高线图。对所建模型,通过软件Lingo采用迭代逐次逼近的方法求解得到极大值。用频率分析及统计寻优求得在95%的置信区间产量大于一定值的优化方案。

2 结果与分析

2.1 谷子产量与光合特性指标的相关性

产量与光合特性指标的相关性结果表明,产量与叶面积指数极显著相关($r=0.868$, $P<0.0001$),产量与叶绿素含量极显著相关($r=0.85$, $P<0.0001$),产量与净光合速率之间极显著相关($r=0.917$, $P<0.0001$)。

2.2 谷子净光合速率对氮、磷、钾施用量和种植密度的响应

建立5个因素与张杂谷5号净光合速率的回归方程为:

$$Y_1 = 26.85 + 0.98X_1 + 0.53X_2 - 0.58X_3 - 0.79X_4 - 0.13X_5 - 0.87X_1^2 - 0.49X_2^2 - 0.66X_3^2 - 0.54X_4^2 - 1.04X_5^2 + 0.18X_1X_2 + 0.71X_1X_3 - 0.34X_1X_4 - 0.54X_1X_5 - 0.25X_2X_3 + 0.28X_2X_4 - 0.03X_2X_5 + 0.34X_3X_4 + 0.66X_3X_5 + 0.14X_4X_5 \quad (1)$$

决定系数为0.806。回归方程(1)的F检验P值为0.0008(<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。得到张杂谷5号净光合速率最大的农艺方案为$X_1=0.7127$、$X_2=0.5615$、$X_3=-0.7233$、$X_4=-1.1198$、$X_5=-0.558$。即施氮(N)187 kg/hm^2、磷(P_2O_5)92 kg/hm^2、钾(K_2O)48 kg/hm^2、行距为19 cm、株距为12 cm,此时净光合速率为28.03 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$。

表 2　二次通用旋转设计方案及试验结果

Table 2　Program and experimental results of the quadratic general rotary unitized design

编号 No.	因素 Factor					叶面积指数 Leaf area index	净光合速率 Net photosynthetic rate [μmol/(m² · s)]	叶绿素含量 Chlorophyll content SPAD value	产量 Yield (kg/hm²)
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5				
1	1	1	1	1	1	5.26	24.4	33.5	5880
2	1	1	1	−1	−1	5.82	26.3	37.4	6375
3	1	1	−1	1	−1	5.42	25.1	35.6	5955
4	1	1	−1	−1	1	5.29	24.7	34.4	5895
5	1	−1	1	1	−1	5.06	23.1	33.7	5625
6	1	−1	1	−1	1	5.47	25.2	35.9	6015
7	1	−1	−1	1	1	4.39	19.8	30.2	4995
8	1	−1	−1	−1	−1	5.67	26.7	36.5	6255
9	−1	1	1	1	−1	4.41	20.1	30.4	4935
10	−1	1	1	−1	1	4.76	21.8	31.7	5375
11	−1	1	−1	1	1	4.98	22.7	32.5	5565
12	−1	1	−1	−1	−1	5.33	25.1	36.3	5985
13	−1	−1	1	1	1	4.81	21.3	31.8	5325
14	−1	−1	1	−1	−1	4.57	20.7	30.5	5160
15	−1	−1	−1	1	−1	4.76	21.6	32.1	5320
16	−1	−1	−1	−1	1	5.08	23.2	33.9	5640
17	−2	0	0	0	0	4.89	22.2	32.5	5430
18	2	0	0	0	0	5.37	24.6	35.7	5910
19	0	−2	0	0	0	5.19	23.9	32.4	5775
20	0	2	0	0	0	5.69	26	36.8	6210
21	0	0	−2	0	0	5.66	26.2	38.1	6255
22	0	0	2	0	0	4.92	22.3	30.6	5475
23	0	0	0	−2	0	5.48	25.6	33.9	6030
24	0	0	0	2	0	4.79	23.9	35.3	5370
25	0	0	0	0	−2	6.26	22.1	34.2	5600
26	0	0	0	0	2	4.85	23.4	32.7	5415
27	0	0	0	0	0	5.85	27	39.8	6450
28	0	0	0	0	0	5.65	27.4	40.5	6240
29	0	0	0	0	0	6.21	25.7	36.1	6705
30	0	0	0	0	0	6.16	26.8	38.9	6675
31	0	0	0	0	0	6.12	27.8	41.2	6180
32	0	0	0	0	0	5.59	26.3	38.2	6765

注(Note): X_1—氮 N; X_2—磷 P_2O_5; X_3—钾 K_2O; X_4—行距 Row spacing; X_5—株距 Plant spacing

单因素氮($P=0.0005$)、行距($P=0.0023$)、钾($P=0.0153$)、磷($P=0.0222$)对净光合速率有显著影响,由各一次项回归系数绝对值的大小可推断,从一次项对净光合速率的作用来看,各单因素的作用大小为氮>行距>钾>磷;单因素株距对净光合速率影响不显著($P=0.5456$)。由图1a可知,在设计范围内,张杂谷5号的净光合速率随施氮水平的提高及行距的缩小均呈先迅速增长后缓慢下降的趋势;随施磷水平的提高净光合速率先增后缓慢下降;随施钾水平的提高净光合速率先略有增长,而后迅速降低。

氮与钾($P=0.0144$)之间存在显著的交互作用,钾与株距($P=0.0207$)之间也存在显著的交互作用。图2a可以看出,当磷、株距和行距固定在零水平时,随氮和钾水平的提高,净光合速率呈先增后降的趋势。氮的作用在高钾水平下对净光合速率的增加效应更明显,说明在钾充足时,增施氮会提高净光合速率。钾在高氮水平下对净光合速率的影响较小,在低氮水平下,净光合速率随着钾的增加呈先缓慢增多后明显下降趋势,说明在低氮条件下应控制钾的过量施用。氮与钾互作的等高线的脊线夹角为锐角,可判断该相互作用为正交互作用。从图2b可以看出,当氮、磷、行距固定在零水平,钾低水平时,净光合速率随着株距的缩小先迅速增多后减少。但在钾高水平条件下,净光合速率随着株距的缩小先缓慢增多后迅速减少。等高线的脊线夹角为锐角,所以钾与株距的交互作用对净光合速率的影响是正的。

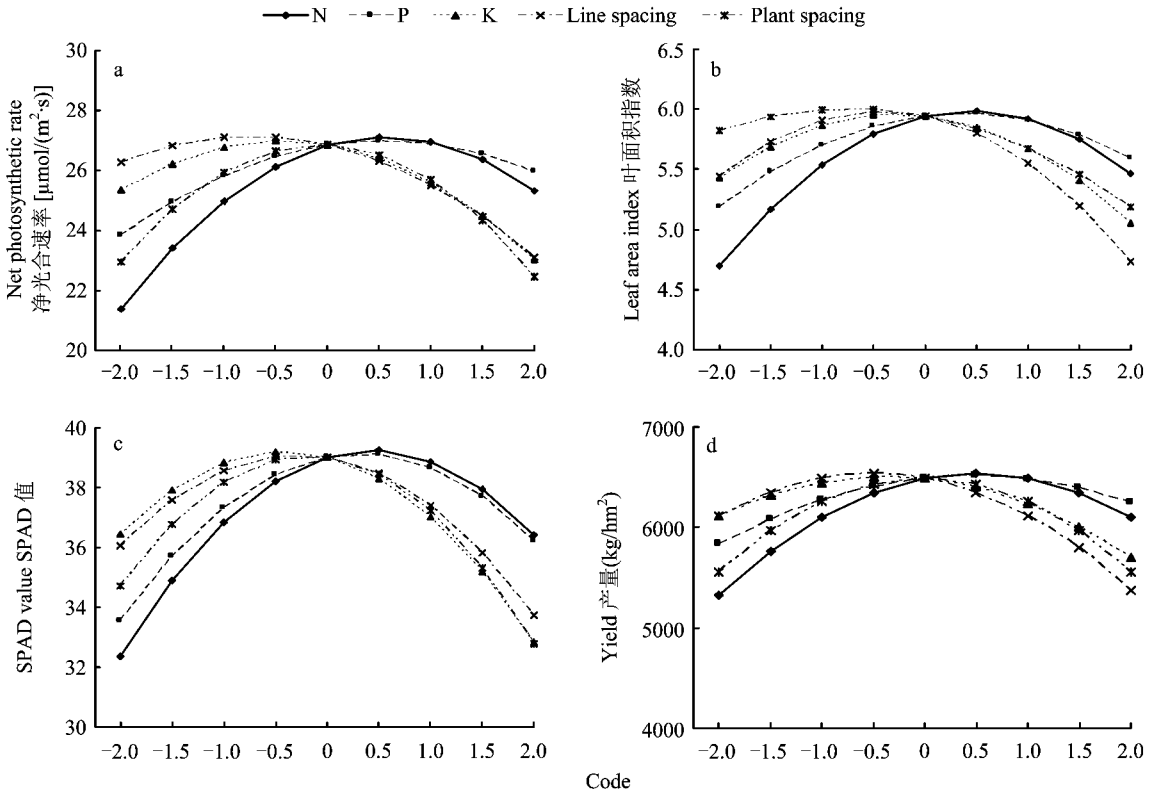

图1 各单因素对张杂谷5号产量及光合指标的影响

Fig.1 Effects of factors on yield and photosynthetic indices of Zhangzagu 5

2.3 谷子叶面积指数对氮、磷、钾施用量和种植密度的响应

建立5个因素与张杂谷5号叶面积指数的回归方程为:

$$Y_2 = 5.95 + 0.19X_1 + 0.1X_2 - 0.09X_3 - 0.18X_4 - 0.16X_5 - 0.22X_1^2 - 0.14X_2^2 - 0.18X_3^2 - 0.21X_4^2 - 0.11X_5^2 + 0.06X_1X_2 + 0.15X_1X3 - 0.08X_1X_4 - 0.13X_1X_5 - 0.05X_2X_3 + 0.04X_2X_4 - 0.02X_2X_5 + 0.05X_3X_4 + 0.12X_3X_5 + 0.04X_4X_5 \quad (2)$$

决定系数为0.6578。回归方程(2)的F检验P值为0.0112(<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号叶面积指数最大的农艺方案为$X_1=1.0653$、$X_2=0.7649$、$X_3=-0.6592$、$X_4=-0.7864$、$X_5=-1.9353$。即

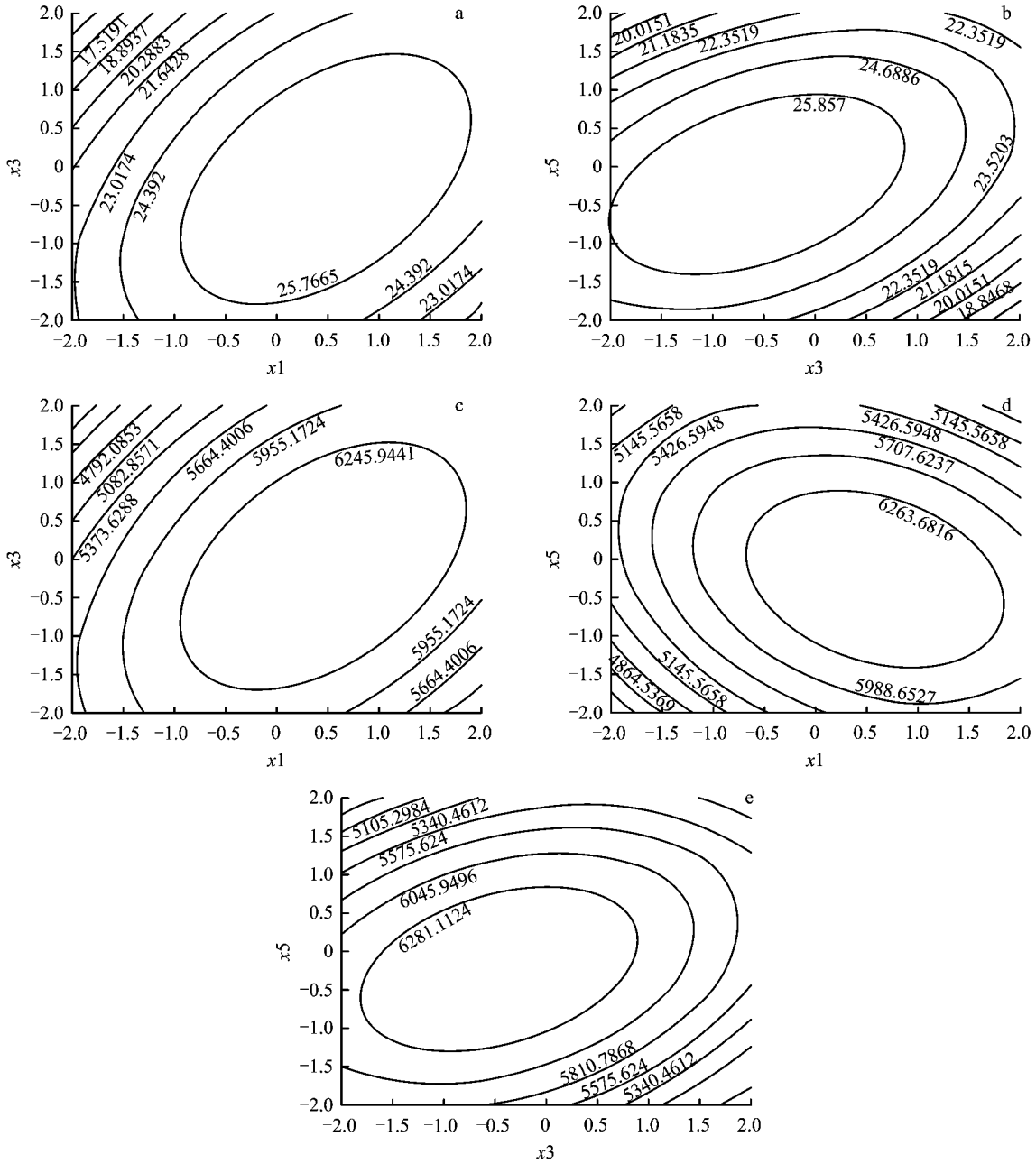

图 2　因素间交互作用对张杂谷 5 号产量及光合指标的影响

Fig. 2　Effects of mutual interactions on yield and photosynthetic indices of Zhangzagu 5

[注(Note): a—氮 × 钾对净光合速率的影响 N × K_2O on net photosynthetic rate; b—钾 × 株距对净光合速率的影响 K_2O × Plant spacing on net photosynthetic rate grains per ear; c—氮 × 钾对产量的影响 N × K_2O on yield; d—氮 × 株距对产量的影响 N × plant spacing on yield; e—钾 × 株距对产量的影响 K_2O × Plant spacing on yield.]

施氮(N)212 kg/hm^2、磷(P_2O_5)100 kg/hm^2、钾(K_2O) 50 kg/hm^2、行距为 22 cm、株距为 5 cm,此时叶面积指数为 6.34。

单因素氮($P = 0.01$)、行距($P = 0.0153$)、株距($P = 0.0266$)对叶面积指数有显著影响,从一次项对叶面积指数的作用来看,各单因素的作用大小为氮 > 行距 > 株距。由图 1b 可知,在设计范围内,张杂谷 5 号的叶面积指数随施氮水平的增加及行距和株距的缩小均呈先迅速增长后缓慢下降的趋势。因素之间的互作对叶面积指数的影响都没达到显著水平。

2.4　谷子叶绿素含量对氮、磷、钾施用量和种植密度的响应

建立 5 个因素与张杂谷 5 号叶绿素含量的回归

方程为：

$$Y_3 = 39.02 + 1.02X_1 + 0.67X_2 - 0.9X_3 - 0.58X_4 - 0.48X_5 - 1.16X_1^2 - 1.03X_2^2 - 1.10X_3^2 - 1.03X_4^2 - 1.32X_5^2 + 0.13X_1X_2 + 0.89X_1X_3 - 0.35X_1X_4 - 0.61X_1X_5 - 0.31X_2X_3 + 0.08X_2X_4 - 0.41X_2X_5 + 0.29X_3X_4 + 0.65X_3X_5 + 0.06X_4X_5 \quad (3)$$

决定系数为0.5796。回归方程(3)的F检验P值为0.0277(<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号叶绿素含量最大的农艺方案为$X_1=0.4743$，$X_2=0.5121$，$X_3=-0.498$，$X_4=-0.4287$，$X_5=-0.5057$。即施氮(N) 171 kg/hm²、磷(P_2O_5) 90 kg/hm²、钾(K_2O)56 kg/hm²、行距为26 cm、株距为12 cm，此时叶绿素含量为39.9。

单因素氮($P=0.0281$)、钾($P=0.047$)对叶绿素含量有显著影响，由图1c可以看出，在设计范围内，随着施氮量的增加，叶绿素含量先迅速增加，后缓慢下降。随着钾肥用量的增加，张杂谷5号的叶绿素含量先缓慢上升，而后迅速下降。两因素之间的相互作用对叶绿素含量的影响都没达到显著水平。

2.5 谷子产量对氮、磷、钾施用量和种植密度的响应

建立5个因素与张杂谷5号产量的回归方程为：

$$Y_4 = 6486.93 + 193.75X_1 + 104.17X_2 - 103.33X_3 - 184.17X_4 - 53.75X_5 - 192.56X_1^2 - 111.93X_2^2 - 143.81X_3^2 - 185.06X_4^2 - 233.18X_5^2 + 50X_1X_2 + 156.88X_1X_3 - 66.88X_1X_4 - 120.63X_1X_5 - 46.88X_2X_3 + 31.88X_2X_4 - 9.38X_2X_5 + 48.75X_3X_4 + 120X_3X_5 + 48.75X_4X_5 \quad (4)$$

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$X_1=0.6905$、$X_2=0.6263$、$X_3=-0.4016$、$X_4=-0.6847$、$X_5=-0.4814$。即施氮(N)186 kg/hm²、磷(P_2O_5) 95 kg/hm²、钾(K_2O) 60 kg/hm²、行距为23 cm、株距为13 cm，此时的产量为6683 kg/hm²。

对所建模型通过非线性求解可以得到达最大产量时最佳农艺方案组合，但没考虑到随机因素，在实际生产中是困难的，为此采用计算机对不同设计水平下的组合进行模拟试验，以6200 kg/hm²为临界值，获得大于临界值的方案95个，各变量值的频率分布见表3，由表3可以看出，使产量大于6200 kg/hm²的优化因素取值的95%的置信区间为施氮(N) 178～197 kg/hm²、磷(P_2O_5) 88～101 kg/hm²、钾(K_2O) 54～67 kg/hm²、行距为22～24cm、株距为12～13cm。

单因素氮($P<0.0001$)、行距($P<0.0001$)、磷($P=0.0079$)、钾($P=0.0084$)对产量有显著影响。从一次项对净光合速率的作用来看，各单因素的作用大小为氮>行距>磷>钾。单因素株距对产量的影响不显著($P=0.1629$)。由图1d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号产量随施氮水平的增加而迅速增加，当施氮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型变化趋势。钾和磷的影响相似，均随着施肥量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型变化趋势。

氮与钾($P=0.045$)、株距($P=0.0446$)之间存在显著的交互作用，钾与株距之间也存在显著的交互作用($P=0.0463$)。从图2c可以看出，当磷、株距、行距固定在零水平时，随着氮、钾施用量的增加，产量呈先增加后下降的趋势。氮在高钾水平下比低钾水平条件下增产效应大，说明在钾充足时，增施氮肥更利于达到高产。在高氮水平下，增施钾肥引起的产量变化不大；在低氮水平下，产量随着钾施用量的增加呈先缓慢增多后迅速下降的趋势，说明在低氮时应控制钾的过多施用。氮与钾互作的等高线的脊线夹角为锐角，可判断该相互作用对产量的影响为正。从图2d可以看出，等高线的脊线夹角为钝角，所以氮与株距的交互作用对产量的影响是负的。当磷、钾、行距固定在零水平时，在窄株距的条件下，增加氮的用量可引起产量大幅提升；宽株距条件下，增加氮的用量增产效果不明显，且随着施氮量的继续增加，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，但在窄株距时，一定要增施氮肥才能获得较高产量。在低氮水平下，株距缩小，产量先缓慢上升，后迅速下降；在高氮水平下，株距缩小，产量先迅速增加，后下降不明显。图2e显示，当氮、磷和行距固定在零水平时，在少施钾或者适量施钾条件下，随着株距的缩小，产量开始增加比较快，后减产，但在高钾水平条

表 3　优化栽培方案中各变量取值频率表

Table 3　The probability distribution of variables in the optimum cultivation program

编码 Code	X_1		X_2		X_3		X_4		X_5	
	次数 Times	频率 Freq.	次数 Times	频率 Freq.	次数 Times	频率 Freq.	次数 Times	频率 Freq.	次数 Times	频率 Freq.
-2	0	0	0	0	9	0.0947	7	0.0737	1	0.0105
-1	2	0.0211	9	0.0947	34	0.3579	51	0.5368	47	0.4947
0	35	0.3684	33	0.3474	37	0.3895	37	0.3895	46	0.4842
1	46	0.4842	37	0.3895	15	0.1579	0	0	1	0.0105
2	12	0.1263	16	0.1684	0	0	0	0	0	0
加权平均数 Weighted mean	0.7160		0.6320		-0.3890		-0.6840		-0.5050	
标准误 Standard error	0.0720		0.0890		0.0880		0.0620		0.0550	
95%置信区间 95% confidence	0.574～0.858		0.456～0.807		-0.563～-0.216		-0.805～-0.563		-0.614～-0.397	
栽培条件 Cultiv. condition	178～197 (kg/hm^2)		88～101 (kg/hm^2)		54～67 (kg/hm^2)		22～24 (cm)		12～13 (cm)	

注(Note): X_1—氮 N; X_2—磷 P_2O_5; X_3—钾 K_2O; X_4—行距 Row spacing; X_5—株距 Plant spacing

件,产量随着株距的缩小先缓慢增多后迅速减少。钾与株距交互作用的等高线的脊线夹角为锐角,可判断该相互作用对产量的影响为正。

3　讨论

谷子产量的高低,决定于净光合速率、接受光的叶面积和光合作用的有效时间三因素的乘积,采取的栽培措施以达到该乘积最大值为目的。前人关于光合指标与产量的相关研究较多,刘祚昌等[24]对小麦的研究指出,叶片光合速率对产量构成因素的影响因生育时期而异; 李娜娜[12]认为,不同行株距配置的旗叶光合速率与籽粒产量无显著相关性; 也有研究表明,高密度群体下维持较高的叶面积指数有利于形成较高的群体产量[25]。本试验对杂交谷灌浆期光合指标与产量的相关性研究结果表明,产量与叶面积指数极显著相关($r = 0.868$, $P < 0.0001$),产量与叶绿素含量极显著相关($r = 0.85$, $P < 0.0001$),产量与净光合速率之间极显著相关($r = 0.917$, $P < 0.0001$)。但是光合指标与产量之间相关关系是复杂的,前者仅受瞬时的内外界环境因子的制约,而后者不仅受生育后期绿色叶面积、光合与呼吸变化的影响,同时还与开花前干物质积累及输出有关,因此每个特定时期光合指标绝对值的高低并不能反映光合与产量间的真实关联性[26]。

有关氮、磷、钾施肥水平对作物产量影响的相关研究很多,但由于受土壤肥力、气候差异等因素影响,结果不尽相同。大多数结果表明,氮为作物需要的首要元素,而磷、钾元素则是在作物足氮的基础上追求进一步高产所必需[27-33]。本研究表明,氮、磷、钾对张杂谷 5 号净光合速率、产量均有显著影响,影响顺序均以氮为首,磷、钾次之。而杨珍平等[13]在对常规谷子的研究中认为,磷元素对谷子产量贡献大于氮素和钾素。净光合速率、叶绿素含量、叶面积指数和产量随着施肥水平的增加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[34]。氮、钾对净光合速率、叶绿素含量和产量有显著影响,施氮、钾肥能提高 CO_2 的同化速率,其原因可能是施氮、钾提高了叶绿素含量,可能有助于光能捕获。但也有研究认为,光合特性的提高主要来自叶面积的增加,而提高单叶光合速率的贡献甚微,这些差异可能与品种间的叶面积指数、叶片厚度、叶绿体和叶绿素含量等受施肥和其他生态因素的影响不同有关。本研究表明,氮与钾的互作对张杂谷 5 号的净光合速率和产量有显著影响。在钾充足时,增施氮肥会提高净光合速率和产量,说明钾对氮有促进作用。在低氮水

平下,开始时随着钾施用量的增加,净光合速率、产量增加不明显,但随着施钾量的继续增加,净光合速率和产量均明显减少,说明在低氮条件下应控制钾的过量施用。磷与氮、钾之间的相互作用对光合特性及其产量的影响均未达显著水平。但单因素磷对净光合速率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施氮肥为主,通过增氮补钾,以钾促氮,配合施磷,才能增产增收。这与 Kunzova 等对小麦产量的研究结果相一致[35]。

合理的行株距配置有助于提高作物群体光合性能并发挥品种增产潜力,获得高产。本研究表明,随着行距、株距的缩小,叶面积指数、净光合速率、叶绿素含量增加,产量也相应提高;但行距、株距缩小到一定程度,虽然叶面积指数依然增加,但密度与净光合速率、叶绿素含量矛盾激化,净光合速率减慢,产量降低。薛盈文[36]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,这与本研究结果较一致。行距对张杂谷5号叶面积指数、净光合速率、产量均有显著影响,随着行距的缩小,净光合速率和产量均出现低-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,地力和光能间能达到充分利用,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,导致植株出现衰弱现象,从而影响到净光合速率和叶绿素含量,使得产量下降。株距只对叶面积指数有显著的影响,但株距与氮、钾的相互作用对净光合速率、产量有一定影响。从生理学角度进一步说明,行距对光合特性与产量的影响与光能利用率和 CO_2 扩散能力相关性高;株距对光合特性与产量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。氮与株距、钾与株距间交互作用对产量均有显著影响,钾与株距间交互作用对净光合速率均有显著影响。当少施氮、钾或者适量施氮、钾时,随着株距的缩小,净光合速率、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。但在高氮、钾水平下,随着株距的缩小,产量开始增加较慢,增加到一定程度后产量迅速减小。密度过大,叶片互相遮荫,群体郁闭,光合效率降低,使产量下降。氮、钾作用在窄株距水平下比宽株距水平下对产量的贡献大,说明高密度高肥配合可获得高产,但继续增施氮、钾肥,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的原因。曹倩等[37]的研究也表明,只有在适宜密度下合理施用氮肥才能有效利用氮密互作,提高产量。

4 结论

氮、磷、钾、行距和株距以及相互作用对张杂谷5号叶面积指数、净光合速率、叶绿素含量和产量有一定影响。要获得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叶片数,又要使叶片能充分利用水、肥、光、热等条件,使叶面积指数与净光合速率和叶绿素含量的矛盾得到统一从而达到增产的目的。在本试验条件下,使产量大于6200 kg/hm^2 的优化因素取值的95%的置信区间为:施氮(N)178～197 kg/hm^2、磷(P_2O_5) 88～101 kg/hm^2、钾(K_2O) 54～67 kg/hm^2、行距为22～24 cm、株距为12～13 cm。

参考文献:

[1] Kasaoka S, Oh-hashi A, Morita T, Kiriyama S. Nutritional characterization of millet protein concentrates produced by a heat-stable α-amylase digestion[J]. Nutr. Res., 1999, 19(6): 899-910.

[2] Antony U, Sripriya G, Chandra T S. The effect of fermentation on the primary nutrients in foxtail millet (*Setaria italica*)[J]. Food Chem., 1996, 56(4): 381-384.

[3] Geervani P, Eggum B O. Nutrient composition and protein quality of minor millets[J]. Plant Foods Human Nutr., 1989, 39(2): 201-208.

[4] Zhang Z W, Qu J B, Xu G F *et al*. Maize and foxtail millet as substantial sources of dietary lead intake [J]. Sci. Total Environ., 1997, 208(1-2): 81-88.

[5] 吴光耀,邓岳芳,卢崇恩,等. 谷子生长过程中光合特征的变化[J]. 植物生理学报, 1982, 8(2): 111-116.
Wu G Y, Deng Y F, Lu C E *et al*. On the change of photosynthetic characteristics in *Setaria italica* [J]. Acta Phytophysiol. Sin., 1982, 8(2): 111-116.

[6] Farnharm D E. Row spacing, plant density, and hybrid effects on corn grain yield and moisture[J]. Agron. J., 2001, 93: 1049-1053.

[7] Zhu X K, Guo W S, Feng C N. The regulation effect of density and nitrogenous fertilizer quantity on grain yield and quality in hybridwheat[J]. J. Wheat Res., 1998, 19(2): 6-9.

[8] 邹铁祥,戴廷波,姜东,等. 氮、钾水平对小麦花后旗叶光合特性的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(10): 1667-1673.
Zou T X, Dai T B, Jiang D *et al*. Effects of nitrogen and potassium application levels on flag leaf photosynthetic characteristics after anthesis in winter wheat[J]. Acta Agron. Sin., 2007, 33(10): 1667-1673.

[9] 马新明, 王小纯, 王志强. 氮素形态对不同专用型小麦生育后期光合特性及穗部性状的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2587-2593.
Ma X M, Wang X C, Wang Z Q. Effects of N - form on photosynthetic characteristics in late growth stages and spikes of wheat cultivars with specialized end-uses[J]. Acta Ecol. Sin., 2003, 23(12): 2587-2593.

[10] Lambert D M, Lowenberg-DeBoer J. Economic analysis of row spacing for corn and soybean[J]. Agron. J., 2003, 95: 564 - 573.

[11] 吕丽华, 陶洪斌, 夏来坤, 等. 不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性[J]. 作物学报, 2008, 34(3): 447-455.
Lü L H, Tao H B, Xia L K *et al*. Canopy structure and photosyntheais traits of summer maize under different planting densities[J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(3): 447-455.

[12] 李娜娜, 李慧, 裴艳婷, 等. 行株距配置对不同穗型冬小麦品种光合特性及产量结构的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2869-2878.
Li N N, Li H, Pei Y T *et al*. Effects of row-spacing on photosynthetic characteristics and yield structure of winter wheat cultivars with different spike types[J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43(14): 2869-2878.

[13] 杨珍平,张翔宇,苗果园. 施肥对生土地谷子根苗生长及根际土壤酶和微生物种群的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(4): 802-808.
Yang Z P, Zhang X Y, Miao G Y. Effects of fertilizing on millet root-shoot growth, rhizospheric soil enzyme and microbe in immature soil in north China[J]. Nucl. Agric. Sci., 2010, 24(4): 802-808.

[14] 李书田, 赵敏, 刘斌, 等. 谷子新品种播期、密度与施肥的复因子试验[J]. 内蒙古农业科技, 2010, (3): 33-34.
Li S T, Zhao M, Liu B *et al*. Multiple factorial experiments on the sowing data, density and fertilizer of new millet varieties[J]. Inner Mongolia Agric. Sci. Technol., 2010, (3): 33-34.

[15] 刘正理, 程汝宏, 张凤莲, 等. 不同密度条件下 3 种类型谷子品种产量及其构成要素变化特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 135-138.
Liu Z L, Cheng R H, Zhang F L *et al*. Yield and yield component characteristics of three foxtail millet varieties of different planting densities[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2007, 15(5): 135-138.

[16] 范静波, 杨潞芳, 杨鹏辉. 施用钾肥对谷子生长发育及产量的影响[J]. 山西农业科学,2003, 31(2): 41-43.
Fan J B, Yang L F, Yang P H. Effect of pltassium fertilizer on miuet development and yield[J]. J. Shanxi Agric. Sci., 2003, 31(2): 41-43.

[17] 卢从明, 张其德, 冯丽洁, 等. CO_2 浓度倍增对谷子拔节期和灌浆期光合色素含量和 PSII 功能的影响[J]. 植物学报, 1997, 39(9): 874-878.
Lu C M, Zhang Q D, Feng L J *et al*. Effects of doubled CO_2 concentration on the content of photosynthetic pigments and PSII functions of jointing and grouting in setaria italica[J]. Acta Bot. Sin., 1997, 39(9): 874-878.

[18] 钟岩, 周吉锋, 祁宏英, 牟金明. 灌浆期谷子净光合速率日变化及相关影响因子的研究[J]. 吉林农业科学, 2008, 33(2): 5-7.
Zhong Y, Zhou J F, Qi H Y, Mou J M. Studies on daily changes and influence factors of the net photosynthetic rate of millet at filling stage[J]. J. Jilin Agric. Sci., 2008, 33(2): 5-7.

[19] 廖建雄,王根轩. 谷子叶片光合速率日变化及水分利用效率[J]. 植物生理学报, 1999, 25(4): 362-368.
Liao J X, Wang G X. The diurnal variations of photosynthetic rate and water use efficiency in setaria italica leaves[J]. Acta phytophysiol. Sin., 1999, 25(4): 362-368.

[20] 樊修武,池宝亮,张冬梅,等. 谷子杂交种灌浆期光合性能研究[J]. 山西农业科学,2011, 39(3): 227-229.
Fan X W, Chi B L, Zhang D M *et al*. Study on photosynthetic performance of millet hybrids at grain-filling stage[J]. J. Shanxi Agric. Sci., 2011, 39(3): 227-229.

[21] Kowalski J. Optimal estimation in rotation patterns[J]. J. Statist. Plan. Infer., 2009, 139(4): 1405-1420.

[22] 荣廷昭. 田间试验与统计分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998. 299-301.
Rong T Z. Field experimentation and statistical analysis[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 1998. 299-301.

[23] 卢恩双, 宋世德,郭满才. 回归通用旋转设计的几个问题[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2002, 30(5): 110-113.
Lu E S, Song S D, Guo M C. Problem in second-order regression general rotation analysis[J]. J. Northwest A & F Univ. (Nat. Sci. Edn.), 2002, 30(5): 110-113.

[24] 刘祚昌, 赖世登, 余彦波, 安庆坤. 小麦光合速率和光呼吸与产量性状的关系[J]. 中国农业科学, 1980, 13(3): 11-15.
Liu Z C, Lai S D, Yu Y B, An Q K. The correlation of photosynthetic characters with the yielding characters in wheat[J]. Sci. Agric. Sin., 1980, 13(3): 11-15.

[25] 金剑, 刘晓冰, 王光华,等. 大豆高产群体的生理生态特征[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]. Chin. J. Oil Crop Sci., 2003, 25(3): 109-114.

[26] 郭天财, 王之杰, 胡廷积, 等. 不同穗型小麦品种群体光合特征及产量性状的研究[J]. 作物学报, 2001, 27(5): 633 - 639.
Guo T C, Wang Z J, Hu T J *et al*. Study on canopy apparent photosynthesis characteristics and grain yield traits of two winter wheat cultivaters with different spike type[J]. Acta Agron. Sin., 2001, 27(5): 633-639.

[27] 王宏庭, 金继运, 王斌, 赵萍萍. 山西褐土长期施钾和秸秆还田对冬小麦产量和钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 801-808.
Wang H T, Jin J Y, Wang B, Zhao P P. Effects of long-term

potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(4): 801-808.

[28] Baethgen W E, Christianson C B, Lamothe A G. Nitrogen fertilizer effects on growth, grain yield, and yield components of malting barely[J]. Field Crops Res., 1995, 43: 87-99.

[29] 郭胜利，党廷辉，郝明德. 施肥对丰干旱地区小麦产量、NO_3^--N积累和水分平衡的影响[J]. 中国农业科学，2005，38(4)：754-760.
Guo S L, Dang T H, Hao M D. Effects of fertilization on wheat yield, NO_3-N accumulation and soil water content in semi-arid area of China[J]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(4): 754-760.

[30] Lewandowski I, Kauter D. The influence of nitrogen fertilizer on the yield and combustion quality of whole grain crops for solid fuel use[J]. Ind. Crops Prod., 2003, 17: 103-117.

[31] 万靓军，张洪程，霍中洋，等. 氮肥运筹对超级杂交稻产量、品质及氮素利用率的影响[J]. 作物学报，2007，33(2)：175-182.
Wan L J, Zhang H C, Huo Z Y *et al*. Effects of nitrogen application regimes on yield, quality and nitrogen use efficiency of super japonica hybrid rice[J]. Acta Agron. Sin., 2007, 33(2): 175-182.

[32] Sharma A R, Mittra B N. Effect of combination of organic material and nitrogen fertilizer on growth, yield and nitrogen uptake of rice[J]. J. Agric. Sci., 1988, 111: 495-501.

[33] Tan D S, Jin J Y, Huang S W *et al*. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems[J]. Agric. Sci. China, 2007, 6(2): 200-207.

[34] 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[J]. Field Crops Res., 2005, 94(1): 54-66.

[35] 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[J]. Field Crops Res., 2009, 111: 226-234.

[36] 薛盈文，于立河，郭伟. 行距与肥密配置对春小麦产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报，2008，28(5)：873-876.
Xue Y W, Yu L H, Guo W. Effects of collocation of spacing form, fertilizer and density on yield and quality of spring wheat[J]. J. Trit. Crops, 2008, 28(5): 873-876.

[37] 曹倩，贺明荣，代兴龙，等. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(4)：815-822.
Cao Q, He M R, Dai X L *et al*. Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use sufficiency of winter wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(4): 815-822.