

赵富阳, 闫锋, 董扬, 等. 不同施肥处理对谷子光合指标及产量性状的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2024(11):7-12.

# 不同施肥处理对谷子光合指标及产量性状的影响

赵富阳, 闫锋, 董扬, 侯晓敏, 李清泉, 王占宇, 朱越影, 刘聪

(黑龙江省农业科学院 齐齐哈尔分院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

**摘要:** 为了提升谷子产量和品质, 采用大田试验并测定不同施肥量条件下谷子叶片的光合指标及产量构成因素, 通过隶属函数公式计算综合评价值对各施肥处理进行综合评价。结果表明, 施肥后谷子叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度均比对照处理有所增加, 胞间二氧化碳浓度基本上呈减少趋势, 各处理间在各指标上均具有显著性差异且以  $N_3P_1K_2$  处理最优; 产量随着无机肥施入量的增加出现先上升后下降的动态趋势,  $N_3P_1K_2$  处理下谷子穗粗、穗长、穗重、穗粒重、千粒重以及产量均高于其他处理, 其净光合速率较未施肥处理提升 42.06%, 蒸腾速率提升 105.91%, 气孔导度提升 87.04%, 胞间  $CO_2$  浓度降低 29.37%, 产量提升 31.03%。正交分析得出, N 对产量影响最大,  $K_2O$  次之,  $P_2O_5$  的影响作用最小。综上, 氮肥施用量为  $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 磷肥施用量为  $50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 钾肥施用量为  $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 谷子的光合能力较高, 产量较为理想。

**关键词:** 谷子; 氮、磷、钾配施比例; 光合指标; 净光合速率; 产量构成指标; 综合评价

谷子起源于中国, 作为重要的杂粮作物及栽培历史最悠久的作物之一, 至今已有 8 000 多年的种植历史, 具有抗旱节水、耐瘠薄、耐储藏等特点, 主要栽培于亚热带和热带地区。谷子籽粒富含纤维素、淀粉、维生素、蛋白质、钙、锌、镁、铜、硒、铁等矿物质及微量元素, 其蛋白质含量在 11%~13% 之间, 可作为人体 8 种必需氨基酸的良好来源<sup>[1-3]</sup>。外界矿质元素供给的丰缺程度将直接影响谷子产量的高低和籽粒品质的优劣, 尽管谷子的耐瘠薄性较强, 但施肥量不足、不合理的施肥方式仍是目前限制谷子生产推广的重要因素<sup>[4-7]</sup>。生产实践经验表明合理施肥既可以提高谷子对肥料的利用效率, 又可以提升谷子产量及品质, 进而有效增加肥料的经济效益, 达到降低生产成本且增产增收的目的。

玉米<sup>[8]</sup>、小麦<sup>[9-10]</sup>、水稻<sup>[11-12]</sup>等主要农作物关于施肥量对作物品质、产量及生理的影响已有较多的报道, 目前谷子施肥相关研究主要集中在肥料运筹<sup>[4, 13-15]</sup>, 氮、磷、钾配施比例<sup>[5-7, 16]</sup>, 有机肥、无机肥料配施比例<sup>[17-20]</sup>, 施肥量对谷子生长发育的影响等方面<sup>[21-24]</sup>。为应对目前谷子种植面积下滑的趋势, 谷子产量的提升和品质的优化尤为重要, 本研究通过测定不同施肥处理条件下谷子的叶片光合指标、产量构成指标的变化, 运用模糊隶属函数

对各施肥处理进行综合评价, 旨在为谷子高产优质栽培技术相关研究提供一定理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试品种为黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院育成的谷子品种嫩选 18, 千粒重 3.1 g, 秆高 127 cm, 生育日数 120 d 左右。

供试肥料有尿素(含 N: 46%), 重过磷酸钙(含  $P_2O_5$ : 40%), 硫酸钾(含  $K_2O$ : 50%)。

### 1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验地点位于齐齐哈尔市富拉尔基区科研基地( $47^{\circ}15'48.58''N$ ,  $123^{\circ}41'18.64''E$ ), 前茬作物为玉米。试验地于 2023 年 4 月 21 日灭茬、旋耕、起垄, 5 月 12 日机械开沟后进行人工条播, 播后机械镇压, 6 月 11 日定苗, 留苗密度为 40 万株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。随机区组设计, 3 次重复, 试验小区为 6 行区, 垄距 0.65 m, 行长 4.00 m, 等行种植, 小区面积为 15.6 m<sup>2</sup>, 设 2 行保护行。

试验设置氮、磷、钾肥为试验因素具体施用量为 4 水平, 用  $L_{16}(4^3)$  3 因素 4 水平 16 个处理的正交试验设计, 具体情况详见表 1 和表 2。其中磷、钾肥作为底肥一次性施入, 氮肥 40% 作为底肥施入, 拔节期追施 30% 尿素, 孕穗期追施 30% 尿素。

收稿日期: 2024-02-23

基金项目: 齐齐哈尔市科技计划创新激励项目(CNYGG-2023028, CNYGG-2023025)。

第一作者: 赵富阳(1984-), 男, 硕士, 助理研究员, 从事谷子育种与栽培研究。E-mail: zfyhzh@126.com。

表 1 正交试验各因素水平设计

水平	因素		
	N/(kg·hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /(kg·hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O/(kg·hm <sup>-2</sup> )
1	0	0	0
2	75	50	30
3	150	100	60
4	225	150	90

表 2 不同施肥处理正交试验组合

处理	N(N)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (P)	K <sub>2</sub> O(K)	因素水平组合
1	0	0	0	N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>
2	0	1	1	N <sub>0</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>
3	0	2	2	N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>
4	0	3	3	N <sub>0</sub> P <sub>3</sub> K <sub>3</sub>
5	1	0	1	N <sub>1</sub> P <sub>0</sub> K <sub>1</sub>
6	1	1	0	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>0</sub>
7	1	2	3	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>
8	1	3	2	N <sub>1</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>
9	2	0	2	N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>
10	2	1	3	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>3</sub>
11	2	2	0	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>
12	2	3	1	N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>1</sub>
13	3	0	3	N <sub>3</sub> P <sub>0</sub> K <sub>3</sub>
14	3	1	2	N <sub>3</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>
15	3	2	1	N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>
16	3	3	0	N <sub>3</sub> P <sub>3</sub> K <sub>0</sub>

1.2.2 测定项目及方法 光合指标的测定:每小区选定并标记 10 株代表性植株,于各关键生育期使用光合作用测定仪测定所标记植株的倒二叶中间部位的胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(C<sub>i</sub>)、气孔导度(G<sub>s</sub>)、蒸腾速率(Tr)、净光合速率(P<sub>n</sub>)。

产量及产量构成指标的测定:谷子成熟后从各处理取 3 个有代表性的 1 m<sup>2</sup> 调查谷子产量。每小区随机取 10 株考种测定其产量构成因素等指标,3 次重复,取平均值。

施肥处理的综合评价:将原始数据运用模糊隶属函数将数据标准化后采用均方差系数赋予权重的方法综合评价参试品种的光周期敏感度,具体公式如下:

$$U_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) \quad (1)$$

式中,U<sub>ij</sub> 代表第 j 个指标隶属函数值;X<sub>ij</sub> 代表第 j 个指标值;X<sub>jmin</sub>、X<sub>jmax</sub> 分别代表 j 指标的最小值和最大值。

$$P_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j) / \bar{X}_j} \quad (2)$$

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j \quad (3)$$

式中,W<sub>j</sub> 代表所测定的 j 指标相对于所有指标的权重;P<sub>j</sub> 代表 j 指标的均方差系数。

$$D_i = \sum_{j=1}^n [U_{ij} \cdot W_j] \quad (4)$$

式中,D<sub>i</sub> 为 i 处理的综合评价价值。

1.2.3 数据分析 试验数据使用 Excel 2019、SPSS 19.0 等软件进行录入、计算、分析和图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对谷子光合参数的影响

由表 3 可知,各施肥处理谷子的胞间二氧化碳浓度(C<sub>i</sub>)较对照处理有所降低,而净光合速率(P<sub>n</sub>)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G<sub>s</sub>)有所提高,即施肥后谷子叶片的 P<sub>n</sub>、Tr、G<sub>s</sub> 得到提升进而加快了无机养分的吸收从而利于光合产物的形成,进而有利于营养物质由源向库的转运。与不施肥对照处理比较各处理谷子叶片 P<sub>n</sub> 提高 12.50%~42.06%,G<sub>s</sub> 提高 4.40%~87.04%,Tr 提高 3.72%~105.91%,C<sub>i</sub> 降低 12.30%~46.32%。N<sub>3</sub>P<sub>1</sub>K<sub>2</sub> 在各项光合作用指标上测定的数据均优于其他处理。

表 3 不同施肥处理对嫩选 18 光合特性的影响

处理	净光合速率/ [μmol· (m <sup>2</sup> ·s) <sup>-1</sup> ]	蒸腾速率/ [(mmol· (m <sup>2</sup> ·s) <sup>-1</sup> ]	气孔导度/ [(mol· (m <sup>2</sup> ·s) <sup>-1</sup> ]	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度/ (μmol· mol <sup>-1</sup> )
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	20.16	4.57	152.80	256.44
N <sub>0</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	22.68	4.74	159.53	224.91
N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	24.17	6.14	180.80	137.66
N <sub>0</sub> P <sub>3</sub> K <sub>3</sub>	23.61	5.69	165.93	205.98
N <sub>1</sub> P <sub>0</sub> K <sub>1</sub>	25.39	7.57	211.35	142.91
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>0</sub>	24.49	6.26	188.65	205.93
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	26.83	8.27	248.21	184.28
N <sub>1</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	25.49	7.79	217.97	219.48
N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	27.51	8.43	255.21	194.78
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>3</sub>	27.60	8.77	262.99	192.39
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	26.02	7.88	225.81	154.53
N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>1</sub>	24.69	7.30	189.01	165.24
N <sub>3</sub> P <sub>0</sub> K <sub>3</sub>	26.05	7.98	241.51	176.19
N <sub>3</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	28.64	9.41	285.80	181.13
N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	27.98	9.25	272.45	204.72
N <sub>3</sub> P <sub>3</sub> K <sub>0</sub>	25.76	7.82	219.71	181.86

由表 4 可知,氮元素的  $K_3$  和  $\bar{K}_3$  值最大,说明氮肥在  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时光合作用能力最优;磷元素的  $K_2$  和  $\bar{K}_2$  值最大,说明磷肥在  $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时光合作用能力最优;钾元素的  $K_2$  和  $\bar{K}_2$  值最大,说明钾肥在  $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时光合作用能力最优;根据极差 R 可知氮肥对净光合速率影响最大,钾肥次之,磷肥影响最小,主次顺序为  $N > K > P$ 。

## 2.2 施肥量对谷子穗部性状及产量构成因素的影响

由表 5 可知,各施肥处理间谷子产量及穗部性状较对照处理有所提高。与不施肥对照处理比较各处理谷子穗长提高  $4.73\% \sim 28.11\%$ ,穗粗提高  $8.82\% \sim 36.40\%$ ,穗重提高  $5.66\% \sim 50.73\%$ ,穗粒重提高  $9.27\% \sim 54.96\%$ ,千粒重提高  $1.90\% \sim 16.77\%$ ,产量提高  $1.72\% \sim 31.03\%$ , $N_3P_1K_2$  在穗粒重、穗重、千粒重、穗长、穗粗、产量

上均优于其他处理。

表 4 不同施肥处理对嫩选 18 净光合速率影响的正交试验结果

处理	净光合速率/ $[\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$		
	同水平 N 元素	同水平 P 元素	同水平 K 元素
K0	90.6 dD	99.1 dD	96.5 dD
K1	102.3 cC	103.6 bB	100.7 cC
K2	105.8 bB	105.0 aA	105.8 aA
K3	108.4 aA	99.6 cC	104.1 bB
$\bar{K}_0$	22.7	24.8	24.1
$\bar{K}_1$	25.6	25.9	25.2
$\bar{K}_2$	26.5	26.3	26.5
$\bar{K}_3$	27.1	24.9	26.0
R	4.5	1.5	2.3

注:同列不同大小写字母分别表示在  $P < 0.01$  和  $P < 0.05$  水平差异显著。下同。

表 5 不同施肥处理对嫩选 18 主要农艺性状及产量的影响

处理	穗长/cm	穗粗/cm	穗重/g	穗粒重/g	千粒重/g	产量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$
$N_0P_0K_0$	26.86	2.72	30.73	23.09	3.16	0.58
$N_0P_1K_1$	28.13	2.96	32.47	25.23	3.22	0.59
$N_0P_2K_2$	29.87	3.12	37.01	26.47	3.32	0.60
$N_0P_3K_3$	28.95	3.06	35.82	26.34	3.31	0.59
$N_1P_0K_1$	30.66	3.20	38.48	28.40	3.37	0.64
$N_1P_1K_0$	30.39	3.18	37.33	27.59	3.36	0.62
$N_1P_2K_3$	32.20	3.31	42.07	30.77	3.49	0.69
$N_1P_3K_2$	31.25	3.22	39.11	28.59	3.39	0.64
$N_2P_0K_2$	32.41	3.35	42.27	32.04	3.57	0.72
$N_2P_1K_3$	32.90	3.35	43.00	32.03	3.54	0.72
$N_2P_2K_0$	32.04	3.24	40.90	29.87	3.48	0.67
$N_2P_3K_1$	31.63	3.22	40.44	29.52	3.47	0.66
$N_3P_0K_3$	33.82	3.39	43.97	33.50	3.56	0.75
$N_3P_1K_2$	34.41	3.71	46.32	35.78	3.69	0.76
$N_3P_2K_1$	33.86	3.42	45.22	33.56	3.54	0.76
$N_3P_3K_0$	32.41	3.31	42.20	31.07	3.52	0.70

由表 6 可知,氮元素的  $K_3$  和  $\bar{K}_3$  值最大,说明氮肥在  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时产量表现最优;磷元素的  $K_1$ 、 $K_2$  和  $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2$  值最大,说明磷肥在 50 和  $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时产量表现最优;钾元素的  $K_2$  和  $\bar{K}_2$  值最大,说明钾肥在  $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时产量表现最优;根据极差 R 的大小可知,氮肥对产量的影响最大,钾肥次之,磷肥的影响最小,主次顺序为  $N > K > P$ 。

## 2.3 运用隶属函数对各施肥处理综合评价

### 2.3.1 光合能力综合评价 通过均方差系数赋

予权重的方法对各处理谷子光合作用参数、相关产量性状进行综合评价。利用公式(4)计算出各处理的综合评价值(D 值),并依据 D 值的大小对各处理光合能力进行评价,D 值越大,表明其光合作用能力越强,反之越弱。依据 D 值大小,对 16 个处理的谷子光合作用强度进行排序(表 7)。数据结果显示,光合作用较强的前 3 个处理分别为  $N_3P_1K_2$ 、 $N_3P_2K_1$  和  $N_2P_1K_3$ ,D 值分别为 0.36,0.35 和 0.32。

表 6 不同施肥处理对嫩选 18 产量影响的正交试验结果

处理	产量/(kg·m <sup>-2</sup> )		
	N 元素	P 元素	K 元素
K0	2.54 dD	2.94 bB	2.81 cC
K1	2.90 cC	3.04 aA	2.94 bB
K2	3.11 bB	3.04 aA	3.09 aA
K3	3.37 aA	2.91 cC	3.09 aA
$\bar{K}0$	0.63	0.73	0.70
$\bar{K}1$	0.72	0.76	0.73
$\bar{K}2$	0.77	0.76	0.77
$\bar{K}3$	0.84	0.72	0.70
R	0.20	0.03	0.07

2.3.2 产量的综合评价 依据 D 值大小,对 16 个处理的相关产量性状进行综合评价(表 8)。数据显示,产量表现突出的前 3 个处理分别为 N<sub>3</sub>P<sub>1</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>1</sub> 和 N<sub>3</sub>P<sub>0</sub>K<sub>3</sub>,D 值分别为 0.59, 0.49 和 0.48。

根据产量及光合作用的 D 值排序可知, N<sub>3</sub>P<sub>1</sub>K<sub>2</sub> 和 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>1</sub> 的光合作用及产量表现均较为突出, N<sub>2</sub>P<sub>1</sub>K<sub>3</sub> 的光合作用能力较强而产量却稍低于 N<sub>3</sub>P<sub>0</sub>K<sub>3</sub>,表明磷元素可以提高光合作用能力,而氮肥用量的增加对提高产量的贡献度更高。

表 7 嫩选 18 光合能力各指标的隶属函数值及综合排名

处理	净光合速率	蒸腾速率	气孔导度	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度	D 值	排名
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	0.00	0.00	0.00	0.09	0.09	16
N <sub>0</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	0.03	0.00	0.01	0.07	0.10	15
N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	0.05	0.04	0.02	0.00	0.11	14
N <sub>0</sub> P <sub>3</sub> K <sub>3</sub>	0.04	0.03	0.01	0.05	0.13	13
N <sub>1</sub> P <sub>0</sub> K <sub>1</sub>	0.06	0.07	0.05	0.00	0.18	10
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>0</sub>	0.05	0.04	0.03	0.05	0.17	11
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	0.08	0.09	0.08	0.04	0.28	5
N <sub>1</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	0.06	0.08	0.05	0.06	0.25	6
N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	0.08	0.09	0.09	0.04	0.30	4
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>3</sub>	0.09	0.10	0.09	0.04	0.32	3
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	0.07	0.08	0.06	0.01	0.22	9
N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>1</sub>	0.05	0.06	0.03	0.02	0.17	12
N <sub>3</sub> P <sub>0</sub> K <sub>3</sub>	0.07	0.08	0.07	0.03	0.25	7
N <sub>3</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	0.10	0.11	0.11	0.03	0.36	1
N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	0.09	0.11	0.10	0.05	0.35	2
N <sub>3</sub> P <sub>3</sub> K <sub>0</sub>	0.06	0.08	0.06	0.03	0.23	8
权重	0.24	0.28	0.27	0.22		

表 8 嫩选 18 产量各指标的隶属函数值及综合排名

处理	穗长	穗粗	穗重	穗粒重	千粒重	产量	D 值	排名
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16
N <sub>0</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.10	15
N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.20	13
N <sub>0</sub> P <sub>3</sub> K <sub>3</sub>	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.17	14
N <sub>1</sub> P <sub>0</sub> K <sub>1</sub>	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.27	11
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>0</sub>	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.24	12
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.38	7
N <sub>1</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.29	10
N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	0.07	0.06	0.08	0.07	0.07	0.07	0.42	5
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>3</sub>	0.08	0.06	0.08	0.07	0.07	0.07	0.43	4
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	0.07	0.05	0.07	0.05	0.06	0.05	0.35	8
N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>1</sub>	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.33	9
N <sub>3</sub> P <sub>0</sub> K <sub>3</sub>	0.09	0.06	0.09	0.08	0.07	0.08	0.48	3
N <sub>3</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.10	0.59	1
N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	0.09	0.07	0.09	0.08	0.07	0.08	0.49	2
N <sub>3</sub> P <sub>3</sub> K <sub>0</sub>	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.39	6
权重	0.16	0.16	0.17	0.17	0.16	0.17		

### 3 讨论

#### 3.1 不同施肥量对谷子叶片光合作用指标的影响

光合作用作为自养生物合成有机物从而为生命体提供物质和能量基础的重要途径受到多种因素影响,本研究与多数前人研究一致,均发现通过合理的施肥处理能够显著提高谷子的光合速率,光合速率的提升是作物产量增加的重要基础。本研究表明各施肥处理谷子叶片的蒸腾速率、净光合速率、气孔导度均高于对照处理而胞间二氧化碳浓度有所降低, $N_3P_1K_2$  处理的光合作用各指标均表现最佳,表明适宜的氮、磷、钾肥配比能够提升谷子叶片光合能力。通过施肥量与净光合速率的正交分析结果可知,氮肥对谷子叶片净光合速率影响最显著,钾肥次之,磷肥的影响最小,表明氮肥对提高谷子叶片叶绿素含量、提高谷子叶片对光的利用效率方面有显著作用。可能因为氮元素是叶绿素的重要组成元素,随着氮元素浓度的提高可以促进叶绿素分子的合成,从而增强叶片固定无机碳的能力,钾元素能够通过提高谷子叶片的光合速率而促进碳元素的同化及转运。

#### 3.2 不同施肥量对谷子产量及其构成因素的影响

影响作物产量的因素是多方面的,施肥量作为影响产量最为重要的因素对谷子的穗长、穗重、穗粗和千粒重等产量构成因素指标均产生深远影响,各产量构成因素间合理的协同互作是促进谷子产量、提升小米品质的基础和先决条件。本研究与多数前人研究均指出,合理的施肥处理能够显著提升谷子的产量。本研究更具体地量化了施肥处理对产量提升的贡献度,通过实际产量数据对比和统计分析方法得出具体的增产百分比。本研究通过对比分析不同施肥处理下谷子的产量表现,确定最优施肥方案为  $N_3P_1K_2$  处理,谷子的穗长、穗粒重、穗重、穗粗、千粒重及产量均高于其他处理; $N_2P_1K_3$  处理的光合作用能力较强而产量却稍低于  $N_3P_0K_3$ ,表明磷元素可以提高谷子光合作用能力,而氮元素的提高对谷子产量提高的贡献度更高。正交分析结果表明,氮肥对谷子产量影响最高,其次为钾肥,而磷肥对谷子产量的影响最小,此结果与陈二影等<sup>[25]</sup> 的研究结论一致。氮、磷、钾肥料的均衡配比能够促进谷子植株的协调生长进而提高光合作用能力、加快光合产物的

积累与转运,最终达到增加产量、提升品质,进而提高谷子种植经济效益的目的。根据不同施肥量对谷子叶片光合作用能力和产量构成因素的影响,确定最佳施肥配比方案为  $N_3P_1K_2$ 。

目前本研究没有调查各施肥量对米质产生的影响,接下来应探明不同施肥量对品质产生的影响,并进一步在大面积示范区进行验证。同时本研究受限于试验条件和时间,未能全面考虑所有可能的影响因素,如土壤类型、灌溉制度、作物品种等。后续可进一步拓展至长期施肥对土壤理化性质、微生物群落结构及谷子植株根际微环境的影响研究;此外探索智能化施肥技术,根据谷子生长需求实时调整施肥方案,以提高施肥精准度和资源利用效率,进一步促进谷子产业的高质量发展。

### 4 结论

施肥后各处理谷子叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度比对照处理均有所增加,胞间二氧化碳浓度基本上减少,各处理间在各指标上均具有显著性差异且以  $N_3P_1K_2$  处理最优,其净光合速率达  $28.64 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ; 谷子产量随无机肥施入量的增加出现先上升后下降的动态趋势, $N_3P_1K_2$  处理条件下穗粗、穗长、穗重、穗粒重、千粒重以及产量均高于其他处理,产量达到  $0.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,正交分析得知 N 对谷子产量影响最大, $K_2O$  次之, $P_2O_5$  的影响因素最小。

#### 参考文献:

- [1] 杨延兵,管延安,秦岭,等.不同地区谷子小米黄色素含量与外观品质研究[J].中国粮油学报,2012,27(1):14-19.
- [2] 任晓利,崔纪菡,刘猛,等.夏播饲用谷子农艺性状与品质评价[J].草业学报,2019,28(1):15-26.
- [3] 刘思辰,曹晓宁,温琪汾,等.山西谷子地方品种农艺性状和品质性状的综合评价[J].中国农业科学,2020,53(11):2137-2148.
- [4] 王晓军,王勇,张晓娟,等.氮磷钾平衡施肥对谷子产量及土壤肥力的影响[J].农业科学研究,2015,36(2):5-8,26.
- [5] 郝洪波,李明哲.配方施肥对成熟期谷子氮磷钾吸收及产量的影响[J].河北农业科学,2010,14(11):62-64,72.
- [6] 韩芳,韩浩坤,王海龙,等.施肥对旱薄地谷子农艺性状及产量的影响[J].山西农业科学,2015,43(6):718-722.
- [7] 何继红,李洋,董孔军,等.施肥对旱地地膜覆盖栽培谷子产量的影响[J].河北农业科学,2010,14(11):59-61,130.
- [8] 李飒,彭云峰,于鹏,等.不同年代玉米品种干物质积累与钾素吸收及其分配[J].植物营养与肥料学报,2011,17(2):325-332.
- [9] 郝代成,高国华,朱云集,等.施氮量对超高产冬小麦花后光合

- 特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 346-352.
- [10] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 等. 施氮量对冬小麦灌浆期光合产物积累、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1027-1033.
- [11] 李勇. 氮素营养对水稻光合作用与光合氮素利用率的影响机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [12] 赵越. 施氮量对水稻产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(19): 8937-8938.
- [13] 樊永强, 苗兆丰, 王彦辉, 等. 谷子氮肥总量控制试验[J]. 农业科技通讯, 2016(9): 85-87.
- [14] 杨延兵, 秦岭, 陈二影, 等. 追施氮肥对济谷 16 叶片叶绿素含量、农艺性状及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2015, 47(12): 63-66.
- [15] 李志军, 贺丽瑜, 梁鸡保, 等. 不同氮磷钾配比对黄土丘陵沟壑区谷子产量及肥料利用率的影响[J]. 陕西农业科学, 2013, 59(5): 107-109.
- [16] 杨永青, 高芳芳, 马亚君, 等. 山西省旱作农业区不同施肥处理对谷子产量、品质及经济效益的影响[J]. 作物杂志, 2020(4): 195-201.
- [17] 张丽媛. 山西杂粮 2020 年上海推介会举办[J]. 品牌研究, 2020(3): 4.
- [18] 张姝, 柴晓娇, 沈铁男, 等. 不同氮素水平对谷子农艺性状和氮素利用效率的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(1): 66-71.
- [19] 赵禹凯, 王显瑞, 陈高勋, 等. 谷子主要农艺性状的相关和通径分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 35-38.
- [20] 杨馨逸, 刘小虎, 韩晓日. 施氮量对不同肥力土壤氮素转化及其利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(13): 2561-2571.
- [21] 郭瑞锋, 任月梅, 杨忠, 等. 春谷早熟区谷子种植密度对植株性状及产量的影响研究[J]. 农学学报, 2015, 5(9): 7-11.
- [22] 张林武, 李仁崑. 不同密度对不同品种谷子产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2013(9): 40-43.
- [23] 卢海博, 张付强, 孟丽丽, 等. 不同种植密度对张杂谷 5 号干物质积累的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(12): 30-32, 35.
- [24] 王艳玲, 奚广生. 氮肥对谷子产量的影响研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(34): 15070, 15091.
- [25] 陈二影, 杨延兵, 秦岭, 等. 谷子苗期氮高效品种筛选及相关特性分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(17): 3287-3297.

## Effects of Different Fertilization Application on Photosynthetic Ability and Yield Traits of Foxtail Millet

ZHAO Fuyang, YAN Feng, DONG Yang, HOU Xiaomin, LI Qingquan, WANG Zhanyu, ZHU Yueying, LIU Cong

(Qiqihar Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar 161006, China)

**Abstract:** In order to improve the yield and quality of millet, this study used field experiments to determine the photosynthetic indicators and yield components of foxtail millet leaves under different fertilization conditions. Fuzzy membership functions were used to comprehensively evaluate each fertilization treatment. The results showed that after fertilization applied, the ability photosynthetic, the rate of transpiration, and the conductance of stomatal of foxtail millet leaves increased compared to the CK treatment, but the concentration of carbon dioxide of intercellular basically decreased. And there were significant differences in various indicators among the treatments, all the results of indicators of  $N_3P_1K_2$  treatment owned the best values; As fertilizer increased, there was a dynamic trend of first increasing and then decreasing the yield indicators showed. Under the  $N_3P_1K_2$  treatment, the ear diameter, ear length, ear weight, ear grain weight, thousand grain weight, and yield were all higher than other treatments. The net photosynthetic rate increased by 42.06% compared to the unfertilized treatment, transpiration rate increased by 105.91%, stomatal conductance increased by 87.04%, and intercellular  $CO_2$  concentration decreased by 29.37%. The yield was 31.03% higher than the non fertilized treatment. Orthogonal analysis shows that N has the greatest impact on yield, followed by  $K_2O$ , and  $P_2O_5$  has the smallest influencing factor. In summary, when the nitrogen fertilizer application rate is  $225\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , the phosphorus fertilizer application rate is  $50\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , and the potassium fertilizer application rate is  $60\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , the photosynthetic capacity of foxtail millet is higher and the yield is more ideal.

**Keywords:** millet; the proportion of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer; photosynthetic index; net photosynthetic rate; yield composition indicators; comprehensive evaluation