

不同肥料和密度对马铃薯光合特性和产量的影响*

田 丰¹,张永成²,张凤军²,石小红¹,马福荣¹

(1. 青海大学 农牧学院农林系,青海西宁 810016;2. 青海省农林科学院,青海西宁 810016)

摘 要: 利用 4 因素 5 水平二次通用旋转组合设计分别对氮肥、磷肥、钾肥和密度进行 3 重复试验,结果表明,不同施肥密度组合与马铃薯叶片光合速率、小区产量之间有极显著的回归关系;施肥、密度对马铃薯光合速率的影响为钾肥>氮肥>磷肥>密度;对马铃薯小区产量的影响为钾肥>磷肥>氮肥>密度;马铃薯叶片光合速率与小区产量呈显著的正相关。过低、过高的氮肥、磷肥、钾肥均施用量均可以抑制马铃薯叶片光合速率。随着马铃薯密度的增加,马铃薯叶片光合速率逐渐降低,并且降低速率不断加快。氮和磷、氮和密度、钾和密度对马铃薯叶片光合速率的影响为正互作。氮和磷、氮和钾、磷和钾配合施用对块茎产量的影响为正互作。马铃薯叶片光合速率最高时的最优组合为纯 N 172.5 kg·hm⁻²,P₂O₅ 112.125 kg·hm⁻²,K₂O 90 kg·hm⁻²,密度 6 万·hm⁻²。马铃薯块茎最高理论产量时的最优组合为纯 N 172.5 kg·hm⁻²,P₂O₅ 112.125 kg·hm⁻²,K₂O 67.5 kg·hm⁻²,密度 6 万·hm⁻²。

关键词: 肥料;施用量;密度;光合速率;块茎产量;马铃薯

中图分类号:S532 文献标识码:A 文章编号:1004-1389(2010)06-0095-04

Effects of Fertilizer and Density on Photosynthetic Characteristics and Yield of Potato

TIAN Feng¹,ZHANG Yongcheng²,ZHANG Fengjun²,SHI Xiaohong¹ and Ma Furong¹

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry,Qinghai University,Xining 810016,China;

2. Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Science,Xining 810016,China)

Abstract: Densities and different fertilizers of nitrogen (N),phosphate (P),and potassium (K) were tested in field experiments of three replications using 4 factors 5 levels versatile regressive rotary compound design. The results indicated that photosynthetic rate of potato leaves and plot yield showed significant regression relations with different combinations of fertilizer and density; The effect of fertilizer and density on photosynthetic rate of potato was K> N> P> density; The effect on plot yield was K> P> N> density; There was significant positive correlation between photosynthetic rate of potato leaves and plot yield. Too low or too high N,P,K may inhibit photosynthetic rate of potato leaves. The photosynthetic rate of potato leaves decreased with the increase of potato density,and the rate accelerated. Interactions of N×P,N×density,and K×density had positive influence on photosynthetic rate of potato leaves. Interactions of N×P,N×K,and P×K had positive influence on tuber yield. The optimal combination for the maximum photosynthetic rate of potato leaves was N 172.5 kg·hm⁻²,P₂O₅ 112.125 kg·hm⁻²,K₂O 90 kg·hm⁻²,and density of 60 000 plants·hm⁻². The optimal combination for the maximum theoretical yield was N 172.5 kg·hm⁻²,P₂O₅ 112.125 kg·hm⁻²,K₂O 67.5 kg·hm⁻²,and density of 60 000 kg·hm⁻².

Key words: Fertilizer; Application rate; Density; Photosynthetic rate; Potato

* 收稿日期:2009-12-27 修回日期:2010-03-02
基金项目:国家科技支撑计划(2006BAD01A06-1-10)一高产优质专用马铃薯育种技术研究及新品种选育。
第一作者:田 丰,男,教授,从事作物育种及教学工作。E-mail:qhdx111tianfeng@sina.com

马铃薯是一种营养全面的粮菜兼用,高产喜肥作物,对肥料的反应极为敏感,产量形成与土壤营养条件关系密切^[1-2]。马铃薯的生长发育和块茎产量、品质形成,最终取决于植株个体与群体的光合作用,因此增强马铃薯光合作用是提高其块茎产量和品质的基础^[3],磷作为底物或调节物直接参与光合作用的各个环节,对一些关键性酶活性起调节作用等^[3]。施钾能明显增加马铃薯叶片气孔导度、蒸腾速率及光合速率^[4]。马铃薯叶片的光合特性直接关系到其他生理性状的变化^[5],研究马铃薯光合生产力是提高马铃薯种植水平及产量的基础。配方施肥是提高马铃薯产量的重要手段,目前,对马铃薯配方施肥的研究主要集中在配方施肥与产量的关系,单种肥料与马铃薯光合特性的研究上^[6-7],而氮、磷、钾、密度组合与马铃薯光合特性的关系还未见报道。笔者通过研究不同施肥和种植密度处理组合,与马铃薯植株叶片光合特性、块茎产量的关系,旨在了解马铃薯叶片光合特性随不同施肥和种植密度处理组合的变化规律、以及马铃薯叶片光合特性与马铃薯块茎产量的相关关系,为马铃薯品种生理育种及其高产

优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

品种为青薯 6 号;肥料为尿素[$w(N)=46\%$],三料磷肥[$w(P_2O_5)=46\%$],加拿大产氯化钾[$w(K_2O)=60\%$]。

1.2 试验方法

试验采用 4 因素 5 水平二次通用旋转组合设计,4 因素分别为氮肥、磷肥、钾肥和密度。肥料单位($kg \cdot hm^{-2}$),密度单位(万 $\cdot hm^{-2}$),5 水平分别为 2、1、0、-1、-2。水平编码值见表 1,共 31 个处理。各处理组合随机排列,3 次重复,尿素施用量 1/3 用作追肥,其余肥料均作为基肥一次性施入。试验于 2009 年 2—10 月在青海省农林科学院试验地进行,前茬为小麦,2008 年翻耕土壤,供试土壤为栗钙土,0~20 cm 耕层土壤的有机质含量 $17.3 mg \cdot kg^{-1}$,速效氮 $147.6 mg \cdot kg^{-1}$ 、速效磷 $21.4 mg \cdot kg^{-1}$ 、速效钾 $159.6 mg \cdot kg^{-1}$,pH 8.1,每小区长 5.5 m,行距 0.7 m,每小区种植 5 行,小区面积为 21 m²。

表 1 4 个因子的不同水平及其编码
Table 1 Level coding of four factors

试验因素 Test factor	水平编码($r=2$) Level coding					变化区间 Change Interval
	2	1	0	-1	-2	
$X_1(N)$	207	172.5	138	103.5	69	34.5
$X_2(P_2O_5)$	138	112.125	86.25	60.375	34.5	25.875
$X_3(K_2O)$	90	78.75	67.5	22.5	0	37.5
$X_4((Density))$	9 万	7.5 万	6 万	4.5 万	3 万	1.5 万

1.3 测定方法与数据分析

叶片光合速率测定采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合测定系统,分别于淀粉积累期测定,时间为 14:00—15:30。

块茎产量测定于 2009-10-05 马铃薯叶片变黄时,起挖块茎、去泥土晾干按每小区计产。采用 DPS、Excel 统计分析软件对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥组合光合速率、小区产量的方差分析和回归模型

由表 2 可以看出,施肥、密度组合与马铃薯叶片光合速率、小区产量没有回归关系的概率分别达 $0.0084<0.01$ 的极显著标准、 $0.0339<0.05$ 的显著标准。不同施肥密度组合与马铃薯叶片光合速率、小区产量与理论回归方程没有拟合关系

的概率分别为 0.0001、0.0001,说明施肥密度组合与马铃薯叶片光合速率、小区产量之间有极显著的回归关系,并与理论回归方程的拟合度高。可以用模型进行优化分析。并将各模型偏回归系数进行显著性检验。剔除没达到显著差异的项目。简化后的回归方程为施肥、密度组合与马铃薯叶片光合速率: $Y_{\text{光合速率}} = 90.8357 + 1.3379X_1 + 0.8296X_2 + 2.1988X_3 - 0.7696X_4 - 1.2624 X_1^2 - 1.4361 X_2^2 - 1.0949X_3^2 - 0.9449X_4^2 + 1.7144 X_1X_2 + 0.5644X_1X_4 + 1.5981X_3X_4$; 施肥、密度组合与马铃薯小区产量 $Y_{\text{产量}} = 86.1813 + 0.8546 X_1 + 1.2221X_2 + 1.2663X_3 + 0.5838X_4 - 1.4292X_1^2 - 1.4455 X_2^2 - 1.0879 X_3^2 - 0.8042 X_4^2 + 1.6669X_1X_2 + 0.8744X_1X_3 + 0.7431X_2X_3$

表 2 不同施肥、密度组合光合速率、小区产量的施肥方案及试验结果

Table 2 Results of photosynthetic rate and plot yield of potato in different combinations of fertilizers and densities													
处理代号 Code	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	密度 Density	光合速率 (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹) Photosynthetic rate	小区块茎产量 Tuber yield	处理代号 Code	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	密度 Density	光合速率 (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹) Photosynthetic rate	小区块茎产量 Tuber yield
1	1	1	1	1	96.35	90.28	17	-2	0	0	0	84.29	78.41
2	1	1	1	-1	93.75	86.94	18	2	0	0	0	86.93	82.94
3	1	1	-1	1	84.69	81.61	19	0	-2	0	0	85.86	81.08
4	1	1	-1	-1	89.44	83.74	20	0	2	0	0	83.97	80.14
5	1	-1	1	1	87.22	75.94	21	0	0	-2	0	86.05	79.54
6	1	-1	1	-1	88.22	76.54	22	0	0	2	0	86.51	84.54
7	1	-1	-1	1	80.58	84.21	23	0	0	0	-2	89.05	83.94
8	1	-1	-1	-1	82.65	76.94	24	0	0	0	2	84.71	82.41
9	-1	1	1	1	90.30	83.21	25	0	0	0	0	92.51	85.08
10	-1	1	1	-1	83.71	80.68	26	0	0	0	0	91.57	86.54
11	-1	1	-1	1	76.96	82.14	27	0	0	0	0	90.20	86.81
12	-1	1	-1	-1	86.13	77.48	28	0	0	0	0	90.62	87.21
13	-1	-1	1	1	87.78	83.74	29	0	0	0	0	89.60	84.68
14	-1	-1	1	-1	88.08	83.34	30	0	0	0	0	91.17	86.94
15	-1	-1	-1	1	80.71	77.88	31	0	0	0	0	90.18	86.01
16	-1	-1	-1	-1	82.40	76.28							

表 3 光合速率、产量结果多元统计分析结果的概率值

Table 3 The probability values of multivariate statistical analysis on photosynthetic rate and yield											
变异来源 Variation source	光合速率 Photosynthetic rate	块茎产量 Tuber yield	变异来源 Variation source	光合速率 Photosynthetic rate	块茎产量 Tuber yield	变异来源 Variation source	光合速率 Photosynthetic rate	块茎产量 Tuber yield	变异来源 Variation source	光合速率 Photosynthetic rate	块茎产量 Tuber yield
X ₁	0.0001**	0.0005**	X ₁ X ₂	0.0001**	0.0001**	X ₁	0.0001**	0.0001**	X ₁ X ₂	0.0001**	0.0001**
X ₂	0.008**	0.0001**	X ₁ X ₃	0.2708	0.0024**	X ₂	0.2708	0.0024**	X ₁ X ₃	0.2708	0.0024**
X ₃	0.0001**	0.0001**	X ₁ X ₄	0.8715	0.7402	X ₃	0.8715	0.7402	X ₁ X ₄	0.8715	0.7402
X ₄	0.0015*	0.0095**	X ₂ X ₃	0.6321	0.0075**	X ₂ X ₃	0.6321	0.0075**	X ₂ X ₃	0.6321	0.0075**
X ₁ ²	0.0001**	0.0001**	X ₂ X ₄	0.9345	0.9454	X ₂ X ₄	0.9345	0.9454	X ₂ X ₄	0.9345	0.9454
X ₂ ²	0.0001**	0.0001**	X ₃ X ₄	0.0001**	0.1594	X ₃ X ₄	0.0001**	0.1594	X ₃ X ₄	0.0001**	0.1594
X ₃ ²	0.0001**	0.0001**	回归	0.0084**	0.0339*	回归	0.0084**	0.0339*	回归	0.0084**	0.0339*
X ₄ ²	0.0001**	0.0004**	失拟	0.0001**	0.0001**	失拟	0.0001**	0.0001**	失拟	0.0001**	0.0001**

注:准显著标准=0.1,显著标准=0.05,极显著标准=0.01。
Note: * and ** following the figures in the same column represent the existence of significant differences at p=0.05 and 0.01 respectively.

二次通用旋转组合回归设计所得到的回归模型的偏回归系数已经标准化,偏回归系数的大小可直接反映不同施肥、密度对马铃薯光合速率、小区产量的影响程度。在施肥、密度组合与马铃薯叶片光合速率的模型中一次项的 $b_3 > b_1 > b_2 > b_4$,说明在该试验条件下不同施肥、密度对马铃薯光合速率的影响为钾肥>氮肥>磷肥>密度。

在施肥、密度组合与马铃薯小区产量的模型中一次项的 $b_3 > b_2 > b_1 > b_4$,说明在试验条件下不同施肥、密度对马铃薯小区产量的影响为钾肥>磷肥>氮肥>密度。二次项系数均为负值,表明不同施肥、密度因素都具有最佳值,用肥过量或不足、密度过大、过小都会降低马铃薯光合速率和小区产量。

2.2 不同施肥、密度组合与光合速率、小区产量回归模型的主因子效应分析

对不同施肥、密度组合与光合速率二次回归模型采用“降维法”得出各单因子对光合速率的一

元效应方程: $Y_{\text{光合速率,氮}} = 90.8357 + 1.3379X_1 - 1.2624X_1^2$; $Y_{\text{光合速率,磷}} = 90.8357 + 0.8296X_2 - 1.4361X_2^2$; $Y_{\text{光合速率,钾}} = 90.8357 + 2.1988X_3 - 1.0949X_3^2$; $Y_{\text{光合速率,密度}} = 90.8357 - 0.7696X_4 - 0.9449X_4^2$

从马铃薯叶片光合速率与氮、光合速率与磷、光合速率与钾的模型中可以看出:其一次项均为正值、二次项均为负值,说明随着氮肥、磷肥、钾肥的施用量的增加,马铃薯叶片光合速率逐渐增加,当增加到一定值后,又逐渐下降。这也进一步说明过低、过高的氮肥、磷肥、钾肥的施用量可以抑制马铃薯叶片光合速率。马铃薯叶片光合速率与密度模型的一次项、二次项均为负值,说明随着马铃薯密度的增加,马铃薯叶片光合速率逐渐减低,并且减低速率不断加快。这可能是由于密度增大,马铃薯内群体光照减弱所致。对不同施肥、密度组合与小区产量二次回归模型采用“降维法”得各单因子对光合速率的一元效应方程: $Y_{\text{产量,氮}} =$

$86.1813 + 0.8546X_1 - 1.4292 X_1^2$; $Y_{\text{产量、磷}} = 86.1813 + 1.2221X_2 - 1.4455X_2^2$; $Y_{\text{产量、钾}} = 86.1813 + 1.2663X_3 - 1.0879X_3^2$; $Y_{\text{产量、密度}} = 86.1813 + 0.5838X_4 - 0.8042X_4^2$ 。

从马铃薯小区产量与氮、磷、钾、密度的模型中可以看出,其一次项均为正值、二次项均为负值,说明随着氮肥、磷肥、钾肥施用量的增加、密度的增加,马铃薯小区产量逐渐增加,当增加到一定值后,又逐渐下降。这也说明可以找出马铃薯小区产量的最优肥料施用量的组合。

表 4 光合速率、产量最高值的各个因素组合

Table 4 Factor combinations for the highest value of photosynthetic rate and yield

比较项目 Dependent index	因素 Factors	N (kg·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ (kg·hm ⁻²)	K ₂ O (kg·hm ⁻²)	密度 Density (万/hm ²)	最大值 Maximum value
光合速率 Photosynthetic rate	水平代码	1	1	2	1	光合速率 93.52 μmol·m ⁻² ·s ⁻¹
	施肥量、密度	172.5	112.125	90.00	7.5	
块茎产量 Yield	水平代码	1	1	1	0	小区产量为 87.11 kg
	施肥量、密度	172.5	112.125	78.75	6	产量 41.48 t/hm ²

2.4 不同施肥、密度组合与光合速率、小区产量回归模型最优组合的选择

马铃薯叶片光合速率最高时的最优组合为纯 N 172.5 kg·hm⁻², P₂O₅ 112.125 kg·hm⁻², K₂O 90 kg·hm⁻², 密度 6 万·hm⁻² 时,马铃薯叶片光合速率的最高理论值应为 93.52 μmol·m⁻²·s⁻¹。马铃薯块茎最高理论产量时的最优组合为纯 N 172.5 kg·hm⁻², P₂O₅ 112.125 kg·hm⁻², K₂O 67.5 kg·hm⁻², 密度 6 万·hm⁻² 时。马铃薯最高理论产量为 41.48 t·hm⁻²。马铃薯叶片光合速率的最高理论值下的最优钾肥施用量、密度高于最高理论产量下的钾肥施用量、密度。

2.5 不同施肥、密度组合下马铃薯叶片光合速率与小区产量的相关分析

不同施肥、密度组合下马铃薯叶片光合速率与小区产量的相关系数 $r = 0.6571 > 0.449 = r_{0.01,30}$ 。达到了极显著差异。说明在本试验设计的水平范围内,马铃薯叶片光合速率高、相应的小区产量就高。

3 小 结

3.1 在本试验设计的水平范围内,不同施肥密度组合与马铃薯叶片光合速率、小区产量之间有极显著的回归关系;不同施肥、密度对马铃薯光合速

2.3 不同施肥、密度组合与光合速率、小区产量回归模型的互作效应分析

不同施肥、密度对马铃薯光合速率模型中的氮和磷、氮和密度、钾和密度为正互作。说明增加氮肥和磷肥配合施用、氮肥和密度合理配合、钾肥和密度合理配合后,可以进一步提高马铃薯叶片的光合速率。不同施肥、密度对马铃薯小区产量模型中的氮和磷、氮和钾、磷和钾为正互作,说明增加氮肥和磷肥、氮肥和钾肥、磷肥和钾肥合理配合施用、可以进一步提高马铃薯的小区产量。

率的影响为钾肥>氮肥>磷肥>密度;对马铃薯小区产量的影响为钾肥>磷肥>氮肥>密度;马铃薯叶片光合速率与小区产量呈显著的正相关关系。

3.2 过低、过高的氮肥、磷肥、钾肥的施用量可以抑制马铃薯叶片光合速率。随着马铃薯密度的增加,马铃薯叶片光合速率逐渐减低,并且减低速率不断加快。氮和磷、氮和密度、钾和密度对马铃薯叶片光合速率的影响为正互作。氮和磷、氮和钾、磷和钾配合施用对块茎产量的影响为正互作。

参考文献:

[1] 段志龙. 马铃薯高产高效施肥技术[J]. 作物杂志, 2009, 14 (1): 100-103.

[2] 段 玉, 妥德宝, 赵沛义. 马铃薯施肥肥效及养分利用率的研究[J]. 中国马铃薯, 2008, 22(4): 197-200.

[3] 王惠群, 萧浪涛, 李合松. 矮壮素对马铃薯中薯 3 号光合特征和磷素营养的影响[J]. 植物营养与肥料学报: 2007, 13 (6): 1143-1147.

[4] 陈光荣, 高世铭, 张晓艳. 施钾和补水对旱作马铃薯光合特性及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44, (1): 74-78.

[5] 王惠群, 萧浪涛, 杨艳丽. 不同加工型马铃薯品种光合特性的比较[J]. 中国马铃薯, 2005, 19 (6): 336-338.

[6] 白宝璋, 孙存华, 田文勋. 铜对马铃薯叶片光合特性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 1997, 19 (3): 12-17.

[7] 贾景丽, 周 芳, 赵 娜. 微量元素锰对马铃薯光合性能的影响[J]. 江苏农业科学, 2009, 4: 111-112.