

旱地辣椒栽培中密度、氮、磷及钾肥因子的优化^①

赵贞祥¹, 杨永岗^{2*}, 张二喜¹, 卢子明¹, 逯建平³

(1 甘肃省天水市农业科学研究所甘谷试验站, 甘肃甘谷 741200; 2 甘肃省农业科学院蔬菜研究所, 兰州 730070;

3 甘肃省天水市农业科学研究所西十里试验站, 甘肃天水 741001)

摘要: 采用四因素二次正交旋转组合试验设计, 研究了旱地辣椒双垄沟全膜覆盖育苗移栽条件下密度、氮肥、磷肥、钾肥对辣椒产量的影响。试验结果单因子效应分析表明, 随着栽培密度、施氮量和施磷量的提高, 辣椒产量呈先升后降的趋势; 随着施钾量的提高, 辣椒产量呈上升趋势。双因素交互效应分析表明, 栽培密度与施钾量之间存在交互效应。获得旱地辣椒产量 45 000.00 kg/hm² 以上的栽培密度和氮磷钾优化方案为: 密度 49 071 ~ 52 179 穴/hm², 每穴移栽 2 株, 施 N 量 216.75 ~ 257.25 kg/hm², 施 P₂O₅ 量 234.45 ~ 257.55 kg/hm², 施 K₂O 量 141.45 ~ 158.10 kg/hm², 适宜的 N : P₂O₅ : K₂O 为 1.6 : 1.6 : 1.0。验证试验结果表明, 优化栽培较常规栽培增产 26.6% ~ 41.3%。

关键词: 辣椒; 栽培密度; 氮磷钾肥; 旱地; 模型

中图分类号: S641.3; S147.2

双垄沟全膜覆盖栽培技术是集农田微域集水技术和地膜覆盖两大旱作栽培技术优点于一体的作物栽培新技术。近年来, 随着双垄沟全膜覆盖栽培技术的示范推广, 有力地促进了山区旱地粮食、油料、蔬菜作物产量的提高, 因其集雨、保墒、增温作用明显, 从而进一步拓宽了经济作物的种植区域^[1-6]。旱地辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 双垄沟全膜覆盖育苗移栽集成栽培技术^[7-10], 是在推广玉米全膜双垄沟播种技术的基础上改进形成的辣椒栽培新技术, 目前在甘肃省天水市山区及周边旱地中得到大面积的应用, 种植面积约有 2 000 hm², 产量 40 000 ~ 60 000 kg/hm², 产值 50 000 ~ 80 000 元/hm²。栽培密度及氮磷钾肥施用量是旱地辣椒双垄沟全膜覆盖育苗移栽集成栽培技术中最为关键的四大影响因素。有关氮、磷、钾肥施用及栽培密度对辣椒的生长和品质的影响已有较多报道, 但大部分研究仅探讨了这四个因子中某一单因子或二因子对辣椒的影响^[11-16]。有关辣椒生长中氮、磷、钾肥及栽培密度四因子间的互作研究也较少, 这四个因子与辣椒产量或品质的经验模型未见报道。本试验对旱地辣椒栽培中的氮、磷、钾肥及栽培密度这四因子与产量的关系进行研究, 拟建立二者之间的数学模型, 探明辣椒栽培密度与氮、

磷、钾肥间的交互作用, 为旱地辣椒高产栽培提供量化依据。

1 材料与方法

1.1 密度、氮、磷及钾肥因子的优化试验

参试辣椒品种为天椒 9 号(甘认菜 2012005), 由甘肃省天水市农业科学研究所育成, 为鲜干兼用辣椒新品种, 该品种抗病、丰产、适宜于旱地栽培^[10]。

试验地点位于甘肃省甘谷县新兴镇十字道村北山旱地(105°17'34" E, 34°47'50" N), 海拔 1 460 m, 年降雨量 472 mm。土壤类型为黄绵土, 前茬为西瓜。试验地土壤含碱解氮 110.10 mg/kg, 有效磷 68.88 mg/kg, 速效钾 204.00 mg/kg, 有机质 12.54 g/kg, 全盐量 0.70 g/kg, pH 8.38。

试验采用四因素二次正交旋转组合设计, 设栽培密度(X_1)、施氮量(X_2)、施磷量(X_3)、施钾量(X_4)4 个因素, 各因素及编码值见表 1。试验小区面积 16.5 m², 小区长 5.0 m, 宽 3.3 m。小区设保护行, 共 36 个小区。试验采用全膜双垄沟覆盖育苗移栽技术进行辣椒栽培^[7-10]; 施用充分腐熟有机肥 45 000 kg/hm²、尿素(含 N 460 g/kg)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 160 g/kg)和硫酸钾(含 K₂O 500 g/kg), 其中, 有机肥、磷肥和钾

①基金项目: 国家科技富民强县专项行动计划项目(国科发农[2012]745号), 国家大宗蔬菜产业技术体系建设专项(Nycytx-35-gw32)和甘肃省天水市科技支撑计划项目资助。

* 通讯作者(yyg_868@163.com)

作者简介: 赵贞祥(1970—), 男, 甘肃甘谷人, 学士, 助理研究员, 研究方向为蔬菜育种及植物保护。E-mail: haohaotintinzhao@yahoo.com

肥全部作基肥，氮肥 60% 作基肥，40% 在辣椒初红期和盛果期分 2 次穴施。

3 月上中旬，土壤解冻后，用旋耕机将地表土层旋耕耙细。按小垄宽 40 cm，垄高 15~20 cm，大垄宽 70 cm，垄高 10~15 cm 划行起垄，形成两个大小拱形垄面，每幅垄分大小双行，幅宽 110 cm，用 0.008 mm × 1 200 mm 地膜(聚乙烯材料，甘肃天水天宝塑业有限责任公司生产)覆盖。覆膜前，垄面用 72% 异丙甲草胺乳油 1.5 kg/hm² 兑水均匀喷雾，防除部分苗期杂草。覆盖后沿地膜带垂直方向每间隔 2.5~3.0 m 压一土腰带，使地膜紧贴垄面和垄沟，防大风揭膜(图 1)。

表 1 试验因素水平编码
Table 1 Experimental factors and level-coding

编码值	X ₁ (穴/hm ²)	X ₂ (N, kg/hm ²)	X ₃ (P ₂ O ₅ , kg/hm ²)	X ₄ (K ₂ O, kg/hm ²)
-2	31 500	0	75	0
-1	42 750	150	150	60
0	54 000	300	225	120
1	65 250	450	300	180
2	76 500	600	375	240
变化区间	11 250	150	75	60

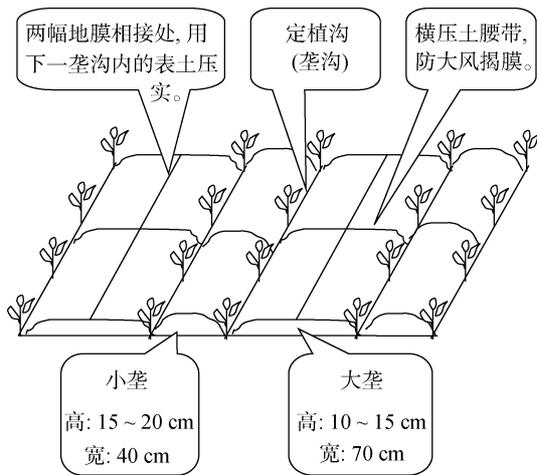


图 1 辣椒双垄沟全膜覆盖栽培示意图

Fig. 1 Sketch map of pepper field mulched with plastic film

试验育苗在日光温室内进行，采用 50 孔穴盘育苗，使用山东寿光盛禾农业科技有限公司生产的瓜果蔬菜营养基质。2010 年 1 月 23 日播种，至 5 月 2 日选择生长健壮、整齐一致的壮苗按小区设计密度将辣椒定植于两个垄沟内，每穴 2 株。定植时在垄沟内采用膜下开挖长宽各 7 cm、深 10 cm 的穴窝，穴窝内栽苗后分 2~3 次浇水，每穴 0.5~0.6 L，待水完全下渗后用穴窝旁和垄间细湿土封严移栽穴口。定植后在定植沟内穴间每隔 70 cm 左右打直径

1 cm 左右的渗水孔，以利于接纳雨水。缓苗后及时培土封严移栽穴口，及时除草，整枝打杈，摘除门椒和门椒以下全部侧枝。试验期间注意防治病虫害。最终，辣椒产量为分次采收的鲜椒合计产量。

1.2 验证示范试验

2011 年，将经过修正的最佳农艺措施，分别在甘肃省甘谷县新兴镇十字道村、康家滩村、甘谷县西坪乡陈家湾村、武山县鸳鸯镇丁门村、新村村设 5 点次 13.79 hm² 辣椒全膜双垄沟覆盖育苗移栽技术示范田，进行验证示范试验。示范方案内容为：1 月下旬在日光温室内播种育苗，4 月下旬至 5 月上旬选壮苗移栽定植，辣椒品种可选用天椒 9 号、甘谷七寸红、航椒 4 号、天线 3 号、航椒 10 号等。定植密度 48 000~54 000 穴/hm²，每穴移栽 2 株。在施用充分腐熟有机肥 45 000~60 000 kg/hm² 的基础上，施 N 量 195~270 kg/hm²，施 P₂O₅ 量 240~270 kg/hm²，施 K₂O 量 135~165 kg/hm²。

1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据处理作图，SPSS 13.0 统计软件进行数据统计与分析。

2 结果与分析

2.1 产量结果及其数学模型

以二次多项式回归进行分析，建立大田条件下密度、氮、磷、钾 4 因子与产量 \hat{Y} 的数学模型如下^[21-22]：

$$\hat{Y} = 49\ 898.875\ 0 - 1\ 118.562\ 5X_1 - 1\ 164.187\ 5X_2 + 760.187\ 5X_3 + 1\ 840.937\ 5X_4 + 238.593\ 8X_1X_2 + 738.656\ 3X_1X_3 - 1\ 428.093\ 8X_1X_4 - 806.906\ 3X_2X_3 - 307.031\ 3X_2X_4 - 822.092\ 8X_3X_4 - 941.296\ 9X_1^2 - 873.046\ 9X_2^2 - 380.671\ 9X_3^2 - 501.796\ 9X_4^2 \quad (1)$$

对该数学模型进行方差分析可知， $F_1 = 0.848\ 9$ ，失拟项不显著，表明未知试验因素对试验结果的影响较小； $F_2 = 5.021\ 9$ ，达极显著水平，说明模型与实测值拟合较好，复相关系数 $r = 0.877\ 5$ ，表明 4 项农艺措施与产量显著相关。

2.2 主因素效应分析

由于回归设计中各因素处理均经过无量纲性编码，偏回归系数已标准化，因而可直接从回归系数绝对值的大小看出各因素的重要程度。由方程(1)中的标准偏回归系数的大小可以看出，移栽密度、氮、磷、钾 4 因子对产量的影响大小不同，本试验中一次项 $X_4 > X_2 > X_1 > X_3$ ，而在二次项中， $X_1 > X_2 > X_4 > X_3$ ，可知栽培密度和氮肥，无论是线性项，还是二次项对旱地辣椒产量的影响均较大，是旱地辣椒栽培中应重点考虑的因子。

2.3 其他因子为零水平时的单因子效应分析

对各因素进行单因子效应分析(其他因子为零水平),在本试验范围内,各因素均呈不同程度的二次曲线关系。 X_1 、 X_2 随着水平的提高,当其达到 $-1 \sim -0.5$ 时产量最高,超过此值产量呈不同程度的下降趋势; X_3 随着水平的提高,产量逐步提高,当其达到 $0.5 \sim 1.5$ 时产量最高; X_4 当其水平提高时,产量逐步提高,当水平接近 2 时其产量最高。

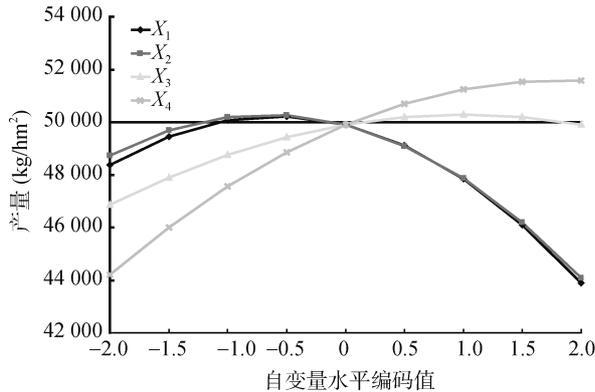


图 2 大田试验的单因子效应 X-Y 折线图
Fig. 2 X-Y maps of one-factor in field experiment

2.4 因素间交互效应分析

用“降维法”得偏回归模型,交互项间仅有 1 个达到显著水平:

$$\hat{Y}_{1,4} = 49\ 898.875\ 0 - 1\ 118.562\ 5X_1 + 1\ 840.937\ 5X_4 - 1\ 428.093\ 8X_1X_4 - 941.296\ 9X_1^2 - 501.796\ 9X_4^2 \quad (2)$$

图 3 为大田试验中移栽密度与钾肥交互效应的曲面图。当施 N 量和施 P_2O_5 量处于零水平时,在移栽密度 $-2 \sim 0$ 时,随着 K_2O 施用量的增加,辣椒产量表现为增长的趋势;当移栽密度在 $0 \sim 2$ 时,随着 K_2O 施用量的增加,辣椒产量表现为先增加后减少的趋势。说明移栽密度与钾肥在适量的范围内存在着明显的协同促进作用,但是当移栽密度与钾肥都过量时二者又表现为拮抗作用。

2.5 最高产量模拟寻优

本试验产量目标性状数学模型为线性函数,是在 $-2 \leq X_i \leq 2$ 约束区间的非线性规划问题,故在计算机上可求得最优解,即在本试验条件下可获得的最高产量值为: $58\ 957.80\ kg/hm^2$,其综合农艺措施组合方案为: $X_1 = -2$; $X_2 = 0$; $X_3 = -2$; $X_4 = 2$ 。

对大面积生产实践来说,上述最优解仅仅是理论值,在生产中出现的概率非常低,为了寻求各项农艺措施在生产上的可靠性,因此用频次分析的方法进行模型优化。在 $-2 \leq X_i \leq 2$ 约束区间,取步长为 1 时,经计算机运算得到 625 套组合方案,其中,产量大于 $45\ 000.0\ kg/hm^2$ 以上的组合方案 300 套,

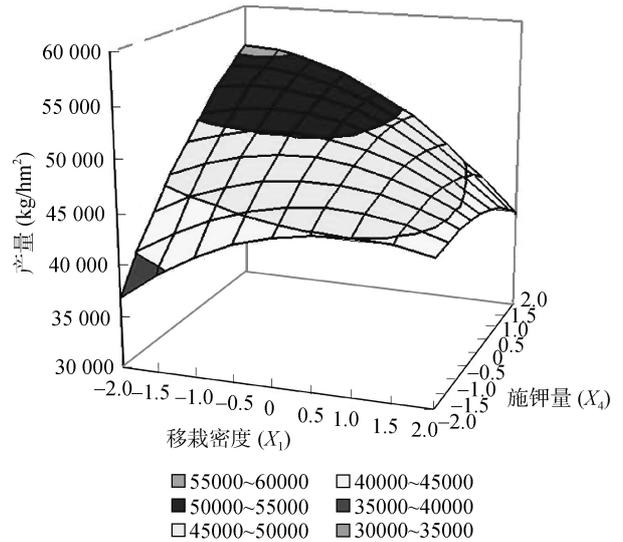


图 3 栽培密度 X_1 与施 K_2O 量 X_4 间的交互效应
Fig. 3 Interaction effects of planting density (X_1) and potassium rate (X_4) on pepper yield

其频次分布见表 2。从表 2 可以看出,大田试验中辣椒产量大于 $45\ 000.0\ kg/hm^2$ 自变量 X_i 编码值范围是: $X_1 = -0.438\ 1 \sim -0.161\ 9$; $X_2 = -0.555\ 3 \sim -0.284\ 7$; $X_3 = 0.126\ 7 \sim 0.433\ 3$; $X_4 = 0.358\ 0 \sim 0.635\ 4$ 。即在本试验条件下,最优农艺措施方案的取值范围是:密度 $49\ 071 \sim 52\ 179$ 穴/ hm^2 ,施 N 量 $216.75 \sim 257.25\ kg/hm^2$ (折合尿素约为 $471.15 \sim 559.20\ kg/hm^2$),施 P_2O_5 量 $234.45 \sim 257.55\ kg/hm^2$ (折合二级品过磷酸钙约为 $1\ 465.65 \sim 1\ 609.50\ kg/hm^2$),施 K_2O 量 $141.45 \sim 158.10\ kg/hm^2$ (折合硫酸钾约为 $282.90 \sim 316.20\ kg/hm^2$),试验的 N : P_2O_5 : K_2O 为 $1.6 : 1.6 : 1.0$ 。

表 2 大田试验的优化方案
Table 2 Optimum scheme of planting density and fertilization in field experiment

因素	加权均数	标准误	95% 的分布区间	
			下限	上限
密度	-0.300 0	1.220 7	-0.438 1	-0.161 9
N	-0.420 0	1.195 9	-0.555 3	-0.284 7
P_2O_5	0.280 0	1.354 6	0.126 7	0.433 3
K_2O	0.496 7	1.226 1	0.357 9	0.635 4

2.6 验证示范结果

在甘肃省甘谷县新兴镇十道村、康家滩村、甘谷县西坪乡陈家湾村、武山县鸳鸯镇丁门村、新庄村 5 点次 $13.79\ hm^2$ 旱地辣椒全膜覆盖双垄沟育苗移栽生产示范试验中,运用优化农艺措施方案均获得显著增产效果,增产达 $26.6\% \sim 41.3\%$ 。应用该农艺措施方案,2011 年在甘谷县新兴镇康家滩村栽培的

2.82 hm²天椒9号产量平均为54 340.5 kg/hm², 最高的产量可达62 470.5 kg/hm²。

表3 应用优化农艺措施栽培增产效果

Table 3 Yield-increasing effects of applying optimized agronomic measures

示范点	面积 (hm ²)	产量 (kg/hm ²)	增产率 (%)
甘肃省甘谷县新兴镇十字道村	3.68	53 647.5	41.3
甘肃省甘谷县新兴镇康家滩村	2.82	54 340.5	34.3
甘肃省武山县鸳鸯镇丁门村	3.25	52 177.5	32.5
甘肃省武山县鸳鸯镇新庄村	1.40	48 516.0	29.5
甘肃省甘谷县西坪乡陈家湾村	2.64	49 705.5	26.6

3 结论

(1) 定植密度与氮磷钾肥对旱地辣椒产量均有显著影响。单因子效应分析表明, 随着密度、氮、磷水平的提高, 辣椒产量呈先升后降的趋势; 双因素交互分析表明, 定植密度和施钾量之间存在互作效应, 定植密度与钾肥在适量的范围内存在着明显的协同促进作用, 但是当密度与钾肥都过量时二者又表现为拮抗作用。

(2) 在目前生产技术条件下, 旱地辣椒全膜覆盖双垄沟育苗移栽达到45 000.0 kg/hm²以上产量的优化农艺措施组合指标为: 密度49 071~52 179 穴/hm², 施N量216.75~257.25 kg/hm², 施P₂O₅量234.45~257.55 kg/hm², 施K₂O量141.45~158.10 kg/hm², 适宜的N:P₂O₅:K₂O为1.6:1.6:1.0。

(3) 应用优化农艺措施方案进行验证示范试验, 优化栽培比常规栽培增产26.6%~41.8%, 在现行的生产、生态、技术条件下推广应用可行。

致谢: 甘肃农业大学农学院教授颀建明和甘肃省天水师范学院教授裴建文审阅本文并提出修改意见, 甘肃省武山县蔬菜局高级农艺师张顺林协助完成试验工作, 甘肃省天水市农业科学研究所张二喜执笔本文, 在此一并致谢!

参考文献:

[1] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 马一凡, 于显枫, 柳燕兰. 旱地全膜双垄沟播玉米的土壤水热效应及其对产量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2 609-2 614

[2] 李尚中, 王勇, 樊廷录, 王立明, 赵刚, 唐小明, 党翼, 王磊, 张建军. 旱地玉米不同覆膜方式的水温及增产效应[J]. 中国农业科学, 2010, 43(5): 922-931

[3] 李尚中, 樊廷录, 王勇, 唐小明, 王立明. 旱地玉米抗旱覆膜方式研究[J]. 核农学报, 2009, 23(1): 165-169

[4] 郑有才. 全膜双垄沟播马铃薯的增温保墒及其产量效应

研究(硕士学位论文)[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008

[5] 水建兵. 干旱区马铃薯全膜双垄沟播栽培技术[J]. 中国马铃薯, 2008, 22(3): 181-182

[6] 王本辉, 韩秋萍. 旱地薄皮甜瓜全膜双垄沟集雨栽培技术[J]. 中国蔬菜, 2008 (7): 53-54

[7] 张巧娣, 李刚强, 杨芳云, 李彩霞. 干旱山区线辣椒全膜覆盖双垄沟栽培技术[J]. 农业科技与信息, 2011(3): 24-25

[8] 卢子明, 逯建平, 赵贞祥, 张二喜. 旱地辣椒栽培模式研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 38-44

[9] 卢子明, 赵贞祥, 张二喜, 李鹰, 李小红. 甘谷县线辣椒全膜双垄沟播栽培技术[J]. 甘肃农业科技, 2012(1): 51-53

[10] 赵贞祥, 张二喜, 杨永岗, 卢子明, 张小波, 宋舒祺. 旱地辣椒新品种筛选和适应性试验[J]. 中国园艺文摘, 2012(9): 1-4

[11] 宋舒祺. 甘谷县山区线辣椒种植密度研究[J]. 甘肃农业科技, 2006(8): 14-15

[12] 马文娟, 同延安, 高义民, 张树兰, 孔莹. 平衡施肥对线辣椒产量、品质及养分累积的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 161-166

[13] 夏兴勇, 彭诗云, 朱方宇, 罗焱, 谢挺, 黄荣建. 辣椒氮、磷、钾施肥效应模型初探[J]. 辣椒杂志, 2009(4): 30-34, 37

[14] 邢素芝, 汪建飞, 姚春芬. 辣椒 NPK 肥料配施数学模型的研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(3): 238-240

[15] 韩秋萍, 王本辉. 旱地辣椒全膜覆盖双垄沟栽培技术[J]. 中国瓜菜, 2008(2): 37-38

[16] 鲁耀, 段宗颜, 杨华, 龙洪进, 杜彩艳, 陈拾华. 干制辣椒土壤养分调查及配方施肥[J]. 辣椒杂志, 2011(1): 25-28

[17] 柯庆明, 林文雄, 黄珍发, 方加龙, 黄梅卿. 小白菜平衡施肥数学模型模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(1): 119-121

[18] Makowski D, Wallach D, Meynard J M. Models of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat[J]. Agronomy Journal, 1999, 91: 377-385

[19] 陈义强, 刘国顺, 习红昂. 烟草栽培中氮、磷、钾肥及水分因子与产值的经验模型[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 480-487

[20] 穆俊祥, 曹兴明, 弓建国, 梁建功, 郭美兰. 氮磷钾和有机肥配合施用对马铃薯淀粉含量和产量的影响[J]. 土壤, 2009, 42(4): 844-848

[21] 王福亭. 农业试验设计与统计分析[M]. 北京: 农村读物出版社, 1993: 490-547

[22] 南京农业大学主编. 田间试验和统计方法(第二版) [M]. 北京: 农业出版社, 1987

[23] 周可金, 章力干, 张俊霞, 马成泽. 种植密度和氮磷钾对药用菊花的产量及光合效率的影响[J]. 土壤, 2010, 42(4): 579-583

[24] 谢冰, 柯永培, 袁继超, 石海春, 杨世民, 陈增, 段必康. 攀西地区优质玉米品种正红 211 高产高效栽培模式研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 107-109, 132

Optimization of Transplanting Density, Nitrogen, Phosphorus and Potassium Fertilization on Yield of Pepper in Drought Area

ZHAO Zhen-xiang¹, YANG Yong-gang^{2*}, ZHANG Er-xi¹, LU Zi-ming¹, LU Jian-ping³

(1 *Gangu Experimental Station, Tianshui Institute of Agricultural Sciences, Gangu, Gansu 741200, China*; 2 *Institute of Vegetable, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China*; 3 *Xishili Experimental Station, Tianshui Institute of Agricultural Sciences, Tianshui, Gansu 741001, China*)

Abstract: A quadratic regression rotational combination design with four factors, including transplanting density, N, P₂O₅ and K₂O was conducted to study the cultivation models of high yield of pepper Tianjiao No. 9. A mathematical model of relations of pepper yield to transplanting density, nitrogen, phosphorus and potassium was established. Single-factor analysis showed that the yield of pepper increased and then decreased steadily with the increase of the transplanting density, the application of N and P₂O₅, but it always increased with the increase of the application of K₂O. The first order interaction analysis indicated that there existed an interaction range between transplanting density and K₂O. The synergistic and antagonistic effects between transplanting density and K₂O were shown in the lower and higher range, respectively. The optimizing cultivation models for yield more than 45 000.0 kg/hm² was calculated by the distributing frequency statistical method. The best transplanting density and amount of fertilizers that obtained yield above 45 000.00 kg/hm² was: 49 071 to 52 179 holes/hm² for transplanting density with 2 seedlings/hole, 216.75 to 257.25 kg/hm² for N, 234.45 to 257.55 kg/hm² for P₂O₅, 141.45 to 158.10 kg/hm² for K₂O, respectively. The reasonable proportion of N, P₂O₅, and K₂O in formulated fertilization should be 1.6 : 1.6 : 1.0. Using the optimizing cultivation, the yield of pepper was increased by 26.6% – 41.3%.

Key words: Chili pepper, Transplanting density, Fertilizer, Dry land, Mathematical model