

番茄幼苗冠层内微环境因子与净光合速率间 回归方程的研究

贾利元, 田 伟

(商丘职业技术学院, 河南 商丘 476005)

摘要: 为了确定番茄幼苗冠层内通风时微环境因子与幼苗净光合速率间的回归方程, 对影响幼苗净光合速率(Y)的 6 个因子[苗龄(X_1)、辐射(X_2)、温度(X_3)、相对湿度(X_4)、风速(X_5)、通风时间(X_6)]进行二次通用旋转组合设计, 按照试验方案最终得出了番茄幼苗叶片净光合速率与幼苗冠层内微环境因子间的优化方程 $Y = 19.825\ 00 - 0.272\ 50X_1 + 0.758\ 33X_2 + 0.515\ 00X_3 - 0.663\ 33X_4 - 0.670\ 00X_1^2 - 0.375\ 00X_2^2 - 0.235\ 00X_3^2 - 0.590\ 00X_4^2 - 0.461\ 25X_5^2 - 0.303\ 75X_6^2 + 0.273\ 75X_1X_2 - 0.361\ 25X_4X_5 - 0.442\ 50X_5X_6$; 找到并验证了通风调控的最佳组合, 即幼苗生理苗龄为三叶一心、辐射强度为 $1\ 200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、温度为 $25\ ^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 70% 、通风风速为 $1.1\ \text{m/s}$ 、通风时间为 $20\ \text{min}$, 此时模型预测的幼苗净光合速率响应值最大, 为 $20.6\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 取上述最优条件在番茄幼苗冠层内进行通风调控, 实测幼苗的净光合速率为 $20.5\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。对回归方程更进一步分析得出, 在幼苗冠层内以 $0.8\ \text{m/s}$ 风速通风 $30\ \text{min}$, 也可达到较好的调控效果, 实用性较强。

关键词: 番茄; 冠层内通风; 微环境因子; 净光合速率; 二次通用旋转组合设计; 回归方程

中图分类号: S641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2012)07-0111-05

Study of the Regression Equation between Microenvironment Factors in Tomato Seedlings' Canopy and Net Photosynthetic Rate of Seedlings

JIA Li-yuan, TIAN Wei

(Shangqiu Polytechnic, Shangqiu 476005, China)

Abstract: A quadratic orthogonal revolving experiment was designed to study the regression equation between the microenvironment factors in tomato seedlings' canopy and the net photosynthetic rate of seedlings. The quadratic orthogonal revolving experiment of the tomato seedlings' net photosynthetic rate(Y) involved 6 impact factors, seedling age(X_1), radiation(X_2), temperature(X_3), relative humidity(X_4), wind speed(X_5), and ventilation time(X_6). An optimization equation between the net photosynthetic rate and the microenvironment factors in tomato seedlings' canopy was obtained, which was $Y = 19.825\ 00 - 0.272\ 50X_1 + 0.758\ 33X_2 + 0.515\ 00X_3 - 0.663\ 33X_4 - 0.670\ 00X_1^2 - 0.375\ 00X_2^2 - 0.235\ 00X_3^2 - 0.590\ 00X_4^2 - 0.461\ 25X_5^2 - 0.303\ 75X_6^2 + 0.273\ 75X_1X_2 - 0.361\ 25X_4X_5 - 0.442\ 50X_5X_6$. The optimal combination of ventilation control was obtained, i. e. seedlings with 3 leaves and 1 shoot, radiation $1\ 200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $25\ ^\circ\text{C}$, 70% relative humidity, air velocity $1.1\ \text{m/s}$ and ventilation for $20\ \text{min}$. Under this optimal combination the net photosynthetic of seed-

收稿日期: 2012-02-06

基金项目: 商丘市科技攻关项目(2009-14B-015)

作者简介: 贾利元(1967-), 男, 河南商丘人, 副教授, 主要从事蔬菜栽培生理的教学和研究。E-mail: sqzyjly@126.com

lings was maximum of $20.6 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Taking the optimum conditions to control ventilation in the canopy of tomato seedlings, the net photosynthetic rate of seedling was $20.5 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Further analysis of the regression equation showed that ventilation for 30 min with 0.8 m/s wind speed in seedling canopy and intermittent cycle ventilating gave good control effect.

Key words: tomato; ventilation in canopy; micro environmental factors; net photosynthetic rate; quadratic orthogonal revolving experiment; regression equation

对番茄幼苗冠层内进行通风是调节番茄幼苗冠层内微环境的关键措施。在番茄穴盘育苗过程中,对幼苗冠层内适时通风可以有效促进幼苗生长发育,显著减少幼苗处于低温高湿胁迫下的时间,降低幼苗染病几率,对于提高番茄穴盘育苗的质量、实现定植后高产稳产均有重要意义^[1-9]。但是,随着环境条件的变化和幼苗苗龄的增加,幼苗冠层内适宜的通风风速和通风时间是不同的,如何确定合适的的风速和通风时间就成为一大难题。鉴于此,研究番茄幼苗冠层内通风时微环境因子与幼苗净光合速率间的回归方程,对影响幼苗净光合速率的 6 个因子进行二次通用旋转组合设计^[9-18],以期找到适用的回归方程,确定合适的的风速和通风时间,为番茄幼苗冠层内通风措施的制定和推广提供指导。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试番茄品种为辽源多丽,选择生理苗龄从两叶一心到六叶一心 5 个不同时期的番茄幼苗,共 5 批备用,试验在易盛泰和牌 B6-20 培养架光源人工气候室内进行。

1.2 试验方法

对影响幼苗冠层内微环境的因子进行二次通用旋转组合设计,试验因子、水平及编码见表 1。

1.3 试验中通风设备的组装

在本试验中,为了减小通风管道中风速随传送距离延长而产生的衰减,鼓风机放在苗床的中部下

表 1 番茄幼苗冠层内微环境因子二次通用旋转组合设计因素及水平

水平	因素					
	苗龄(X_1)	辐射(X_2)/ $[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	温度(X_3)/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度(X_4)/%	风速(X_5)/(m/s)	通风时间(X_6)/min
-2	二叶一心	600	15	60	0.2	10
-1	三叶一心	800	20	70	0.5	20
0	四叶一心	1 000	25	80	0.8	30
1	五叶一心	1 200	30	90	1.1	40
2	六叶一心	1 400	35	100	1.4	50

现(图 1)。通风管道分为两级,一级管道(直径 4.95 cm)一端直接与鼓风机(功率 1 500 kW,电压 220 V)相连,另一端用三通连接主管道,主管道固定在苗床的一侧,在主管道上每隔 18 cm 打与二级管道直径相同的孔;二级管道(直径 0.6 cm)一端用胶水固定在主管道的孔洞内,另一端用胶带固定在苗床另一侧,使二级管道紧紧贴在穴盘表面,在二级管道上打通风孔(直径 0.06 cm)。

1.4 试验参数的测量

温室及番茄幼苗上部冠层内温湿度数据采用美国 HOBO 公司生产的 U23-001 温湿度红外线传感器自动采集,设置每 10 min 采集 1 次,全天 24 h 采集;风速使用热球式风速仪测定;叶片净光合速率使用 LI6400 光合仪测定;辐射由人工气候室电脑控制,由 LI6400 光合仪测定。

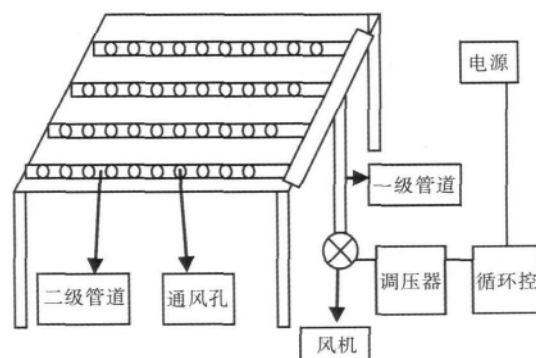


图 1 通风设备的组装示意

2 结果与分析

2.1 番茄幼苗叶片净光合速率与幼苗冠层内微环境因子间模型的建立与检验

在每个处理结束后测定幼苗的净光合速率,结

果列于表 2。将表 2 中的数据导入 DPS 数据处理系统,进行二次通用旋转组合设计的数据分析,求出番茄幼苗净光合速率与幼苗苗龄(X_1)、辐射(X_2)、冠层内温度(X_3)、冠层内相对湿度(X_4)、通风风速(X_5)、通风时间(X_6)间的回归模型:

$$Y = 19.805\ 00 - 0.272\ 50X_1 + 0.758\ 33X_2 + 0.515\ 00X_3 - 0.663\ 33X_4 + 0.112\ 50X_5 + 0.082\ 50X_6 - 0.666\ 25X_1^2 - 0.371\ 25X_2^2 - 0.231\ 25X_3^2 - 0.586\ 25X_4^2 - 0.457\ 50X_5^2 - 0.300\ 00X_6^2 + 0.273\ 75X_1X_2 - 0.006\ 25X_1X_3 + 0.096\ 25X_1X_4 + 0.177\ 50X_1X_5 + 0.052\ 50X_1X_6 + 0.187\ 50X_2X_3 - 0.143\ 75X_2X_5 + 0.120\ 00X_3X_4 + 0.051\ 25X_3X_5 - 0.208\ 75X_3X_6 - 0.361\ 25X_4X_5 - 0.442\ 50X_5X_6。$$

表 2 不同处理番茄幼苗叶片的净光合速率

处理	因素						净光合速率/ [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	
1	1	1	1	1	1	1	17.52
2	1	1	1	-1	-1	-1	18.04
3	1	1	-1	1	-1	1	17.62
4	1	1	-1	-1	1	-1	18.37
5	1	-1	1	1	-1	-1	15.34
6	1	-1	1	-1	1	1	16.93
7	1	-1	-1	1	1	-1	15.07
8	1	-1	-1	-1	-1	1	16.24
9	-1	1	1	1	-1	-1	18.45
10	-1	1	1	-1	1	1	18.93
11	-1	1	-1	1	1	-1	16.12
12	-1	1	-1	-1	-1	1	18.75
13	-1	-1	1	1	1	1	16.07
14	-1	-1	1	-1	-1	-1	17.32
15	-1	-1	-1	1	-1	1	17.03
16	-1	-1	-1	-1	1	-1	18.24
17	-2	0	0	0	0	0	17.21
18	2	0	0	0	0	0	16.83
19	0	-2	0	0	0	0	16.54
20	0	2	0	0	0	0	19.86
21	0	0	-2	0	0	0	17.73
22	0	0	2	0	0	0	19.79
23	0	0	0	-2	0	0	18.92
24	0	0	0	2	0	0	15.76
25	0	0	0	0	-2	0	17.63
26	0	0	0	0	2	0	18.08
27	0	0	0	0	0	-2	18.32
28	0	0	0	0	0	2	18.65
29	0	0	0	0	0	0	19.69
30	0	0	0	0	0	0	20.12
31	0	0	0	0	0	0	20.16
32	0	0	0	0	0	0	19.73

注:29-32 为对照 4 个重复。

由表 3 可以看出,对回归方程的失拟性检验, $F_1 = 3.70 < F_{0.05}(4, 3) = 4.26$,说明方程失拟不显著,可以认为所选用的二次回归模型是适当的,可进一步用统计量 F_2 对二次回归模型进行检验;对回

归方程的显著性检验, $F_{0.05}(24, 7) = 6.59 < F_2 = 16.15 < F_{0.01}(24, 7) = 16.69$,说明方程在 0.05 水平上显著,模型的预测值与实际值比较吻合,采用此模型进行预报具有较高的可行性。

表 3 不同处理番茄幼苗叶片净光合速率的方差分析

变异来源	DF	SS	MS	F	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
X_1	1	1.018 4	1.018 4	6.441 1*	4.26	7.82
X_2	1	7.886 7	7.886 7	49.882 2**		
X_3	1	1.212 5	1.212 5	7.668 6*		
X_4	1	6.034 4	6.034 4	38.167 1**		
X_5	1	0.057 9	0.057 9	0.365 9		
X_6	1	0.031 1	0.031 1	0.196 8		
X_1^2	1	7.378 9	7.378 9	46.670 8**		
X_2^2	1	2.291 1	2.291 1	14.491 2**		
X_3^2	1	0.889 0	0.889 0	5.622 6*		
X_4^2	1	5.713 3	5.713 3	36.135 7**		
X_5^2	1	3.479 4	3.479 4	22.006 6**		
X_6^2	1	1.496 1	1.496 1	9.462 7**		
X_1X_2	1	0.685 2	0.685 2	4.333 5*		
X_1X_3	1	0.000 4	0.000 4	0.002 3		
X_1X_4	1	0.084 7	0.084 7	0.535 7		
X_1X_5	1	0.288 1	0.288 1	1.821 9		
X_1X_6	1	0.025 2	0.025 2	0.159 4		
X_2X_3	1	0.321 4	0.321 4	2.033 0		
X_2X_4 与 X_1X_6 线性相关						
X_2X_5	1	0.188 9	0.188 9	1.194 9		
X_2X_6 与 X_1X_4 线性相关						
X_3X_4	1	0.131 7	0.1317	0.832 7		
X_3X_5	1	0.008 0	0.008 0	0.050 6		
X_3X_6	1	0.132 8	0.132 8	0.840 0		
X_4X_5	1	1.193 2	1.193 2	7.546 6*		
X_4X_6 与 X_1X_2 线性相关						
X_5X_6	1	0.596 7	0.596 7	3.774 3 Δ		
回归	24	61.299 4	2.554 1	$F_2 = 16.15$	6.59	16.69
剩余	7	1.106 7	0.158 1			
失拟	4	0.920 2	0.230 1	$F_1 = 3.70$	4.26	7.82
误差	3	0.186 5	0.062 2			
总和	31	62.406 2				

注:*, **, Δ 分别表示在 0.05、0.01、0.10 水平上显著。

2.2 回归方程的优化

对回归系数进行显著性检验(表 3)表明,方程中因素 X_2 、 X_4 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_4^2 、 X_5^2 、 X_6^2 在 0.01 水平上显著,因素 X_1 、 X_3 、 X_3^2 、 X_1X_2 、 X_4X_5 在 0.05 水平上显著,因素 X_5X_6 在 0.10 水平上显著,因此在 $\sigma = 0.10$ 显著水平剔除不显著项,得到优化后的方程为:

$$Y = 19.825\ 00 - 0.272\ 50X_1 + 0.758\ 33X_2 + 0.515\ 00X_3 - 0.663\ 33X_4 - 0.670\ 00X_1^2 - 0.375\ 00X_2^2 - 0.235\ 00X_3^2 - 0.590\ 00X_4^2 - 0.461\ 25X_5^2 - 0.303\ 75X_6^2 + 0.273\ 75X_1X_2 - 0.361\ 25X_4X_5 - 0.442\ 50X_5X_6。$$

2.3 通风调控的最佳组合及回归方程的验证

结合回归模型的数学分析,可以得到模型的极值点在幼苗生理苗龄为三叶一心、辐射强度为 1 200

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 70% 、通风风速为 1.1 m/s 、通风时间为 20 min ，此时模型预测的幼苗净光合速率最大响应值为 $20.6\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。为了证实预测结果，采取上述最优条件在番茄幼苗冠层内进行通风调控，并测量幼苗的净光合速率为 $20.5\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，与理论值十分接近，进一步验证了数学回归模型的合理性。

将苗龄、辐射强度、温度、相对湿度都固定在 0 水平，方程在风速、通风时间这 2 个因子同时在 0 水平时，模拟值达到最大，为 $19.8\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。也就是说，在实际生产操作中，无论外界环境如何，都是在冠层内以 0.8 m/s 风速通风 30 min 效果最好。这表明，如果温室内没有较为精确的环境监测和控制系统，无法使用方程确定最适宜的风速和通风时间时，可以在幼苗冠层内以 0.8 m/s 风速通风 30 min ，也可以达到较好的调控效果。此组合可以在任意苗龄和环境条件下使用，实用性较强。

2.4 试验因子间互作效应分析

从回归系数的显著性检验结果可以看出，苗龄 (X_1) 与辐射 (X_2)、湿度 (X_4) 与通风风速 (X_5)、通风风速 (X_5) 与通风时间 (X_6) 的互作效应对幼苗净光合速率影响明显，对其分别作图，可直观地分析各因子间的互作效应。

从图 2 可以看出，在大部分范围内，增大苗龄和提高辐射强度都可提高幼苗的净光合速率，超过这个范围之后，苗龄越大，幼苗的净光合速率越小。

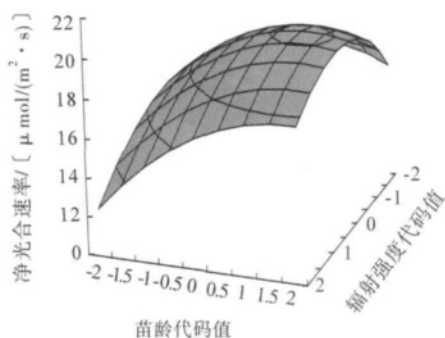


图 2 番茄幼苗生理苗龄与辐射强度对幼苗叶片净光合速率的互作效应分析

从图 3 可以看出，相对湿度对幼苗叶片净光合速率影响显著，将相对湿度固定在最高水平下，风速对净光合速率的影响微弱，但当湿度处于低水平时，风速越大幼苗叶片的净光合速率越大。分别将相对湿度和风速固定在 0 水平下，可以发现，相对湿度与幼苗净光合速率呈负相关，风速与净光合速率基本上呈正相关，两者共同作用与幼苗净光合速率呈负相关。

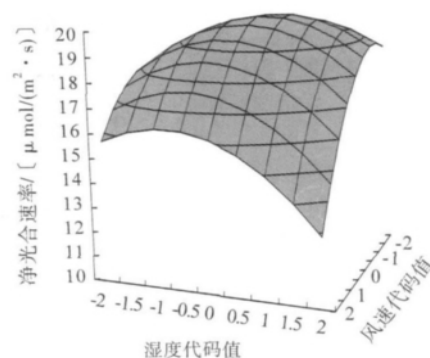


图 3 番茄幼苗冠层内湿度与通风风速对幼苗叶片净光合速率的互作效应分析

从图 4 可以看到，将风速固定在最高水平下，通风时间越长，幼苗叶片净光合速率越小；同样，将通风时间固定在最高水平，风速越大，幼苗叶片的净光合速率越小。将风速固定在 0 水平下，发现不同通风时间下幼苗叶片的净光合速率呈对称分布；将通风时间固定在 0 水平下也发现了同样的规律。

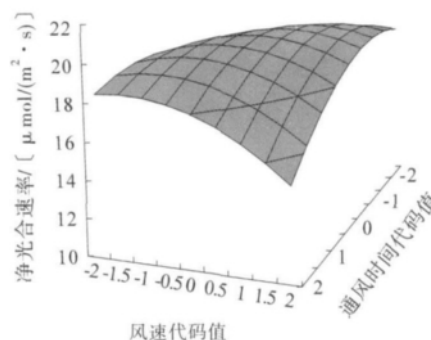


图 4 通风风速与通风时间对幼苗叶片净光合速率的互作效应分析

3 结论

番茄幼苗叶片净光合速率与幼苗冠层内微环境因子间优化回归方程为： $Y = 19.825\ 00 - 0.272\ 50X_1 + 0.758\ 33X_2 + 0.515\ 00X_3 - 0.663\ 33X_4 - 0.670\ 00X_1^2 - 0.375\ 00X_2^2 - 0.235\ 00X_3^2 - 0.590\ 00X_4^2 - 0.461\ 25X_5^2 - 0.303\ 75X_6^2 + 0.273\ 75X_1X_2 - 0.361\ 25X_4X_5 - 0.442\ 50X_5X_6$ 。对回归方程的失拟性检验表明，方程失拟不显著，可以认为所选用的二次回归模型是适当的；对其进行显著性检验，发现方程在 0.05 水平上显著，说明方程在试验范围内能够较好模拟番茄幼苗冠层内微环境因子与幼苗净光合速率间的关系。

通过对回归方程的分析得到，通风调控的最佳环境组合为幼苗生理苗龄三叶一心、辐射强度 $1\ 200\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度 70% 、通风风速 1.1 m/s 、通风时间 20 min 。通过对回归方程进

行更深一步的分析得出,在生产条件较差的温室,如果没有较为精确的环境监测和控制系统,无法实时使用方程确定最适宜的风速和通风时间时,可以在幼苗冠层内以 0.8 m/s 风速通风 30 min 也可达到较好的调控效果。此组合可以在任意苗龄和环境条件下使用,为穴盘育苗期间的微环境控制提供了理论指导,实用性强。

参考文献:

- [1] Xu H, Pi J, Wang R, *et al.* Effects of ventilation in canopy on the microenvironment and metabolism of tomato seedlings[C]. The 2nd conference on horticulture science and technology, 2010: 66-69.
- [2] Shibuya T, Kozai T. Effects of air current speed on net photosynthetic and evapotranspiration rates of a tomato plug sheet under artificial light[J]. *Environ Control Biol*, 1998, 36(3): 131-136.
- [3] Toshio S, Johshin T, Yoshiaki K, *et al.* Enhancement of photosynthesis and growth of tomato seedlings by forced ventilation within the canopy[J]. *Scientia Horticulture*, 2006, 109: 218-222.
- [4] Kitaya Y, Shibuya T, Yoshida M, *et al.* Effects of air current speed on photosynthesis of plant canopies under elevated CO₂ levels in a plant culture system[J]. *Environ Control Biol*, 2009, 34(2): 121-126.
- [5] Kitaya Y, Tsuruyama J, Shibuya T, *et al.* Effects of air current speed on gas exchange in plant leaves and plant canopies[J]. *Adv Space Res*, 2003, 31(1): 177-82.
- [6] Kim Y H, Kozai T, Kubota C, *et al.* Effects of air current speeds on the microclimate of plug stand under artificial lighting[J]. *Acta Hort*, 1996, 440: 354-359.
- [7] Chintakovid W, Kozai T. Growth of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plug transplants in a closed system at relatively high air current speeds—A preliminary study[M]//Kubota C, Chun C. Transplant production in the 21st century. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000: 98-101.
- [8] Kitaya Y, Shibuya T, Yoshida M. Effects of air velocity on photosynthesis of plant canopies under elevated CO₂ levels in a plant culture system[J]. *Adv Space Res*, 2006, 34: 146-149.
- [9] 徐中儒. 回归分析与实验设计[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 102-158.
- [10] 薛志平, 林美娟, 陈平华, 等. 正交试验设计在优化甘蔗再生体系中的应用[J]. *江西农业大学学报*, 2005, 27(3): 389-393.
- [11] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 361-366.
- [12] 邢东旭, 廖森泰, 刘吉平, 等. 应用二次回归正交旋转组合设计提取桑叶多糖的研究[J]. *食品工业科技*, 2007, 28(26): 145-147.
- [13] 沈维志, 廖森泰, 刘吉平, 等. 用二次回归正交旋转组合设计优化桑叶多酚的提取工艺[J]. *蚕业科学*, 2009, 35(3): 594-597.
- [14] 曹国璠, 杨志华. 麦烟套作中综合措施对烤烟氮碱比的影响[J]. *天津农业科学*, 2009, 15(4): 4-7.
- [15] 李卫国, 任永玲. 氮、磷、钾、硅肥配施对水稻产量及其构成因素的影响[J]. *山西农业科学*, 2001, 29(1): 53-58.
- [16] 陈碧华, 罗庆熙, 王广印, 等. 热激处理对甘蓝幼苗叶片细胞膜系统热稳定性的影响[J]. *华北农学报*, 2007, 22(5): 60-62.
- [17] 刘辉. 豫东平原麦套棉高产栽培措施优化决策模型的研究[J]. *华北农学报*, 2000, 15(1): 102-107.
- [18] 李小川. 茄子工厂化育苗技术中基质穴盘肥料优化研究[J]. *山西农业科学*, 2008, 36(7): 52-54.