

沙化地日光温室黄瓜配方施肥数学模型的建立^{*}

穆大伟¹, 邹志荣¹, 王兰英²

(1 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100;

2 内蒙古农业大学 农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

[摘 要] 为探寻沙化地日光温室内黄瓜的最佳施肥方案, 采用三因素五水平二次回归正交旋转组合设计, 通过计算机模拟寻优, 建立了在含沙量为 237.6 g/kg 的沙化土中氮、磷、钾施肥量与黄瓜产量的数学模型。通过对数学模型的解析, 探讨了氮、磷、钾肥的单因子效应、互作效应、边际产量和最佳施肥量。结果表明, 在该土壤条件下的日光温室内, 氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥施用量分别为 264.28, 82.94 和 290.34 kg/hm² 时, 黄瓜可达到的最高产量为 114 045.30 kg/hm²。

[关键词] 沙化地; 日光温室; 黄瓜栽培; 配方施肥; 数学模型

[中图分类号] S642.206.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2006)07-0116-05

配方施肥技术在大田生产中已经推广多年^[1], 效果显著, 但是针对设施栽培的配方施肥技术研究很少, 仅对辣椒、番茄有初步研究^[2-3]。在设施栽培中, 人们为求得高产而一味超量施肥, 这既造成肥料浪费又不能得到理想产量, 且易降低土壤宜种度, 甚至导致土壤盐碱化。已有研究表明^[4-5], 盐分障碍、土壤养分比例失调是影响设施栽培果蔬产量和品质的主要因素。配方施肥在设施栽培中的应用研究是解决该类问题的有效途径, 有助于促进保护地的可持续发展^[6]。

我国荒漠化土地总面积达 26.2 × 10⁵ km², 占国土总面积的 27.3%^[7], 采用设施栽培技术可以利用这些不可耕作土地进行农业生产, 增加农业可利用土地资源, 因而具有广阔的发展前景^[8]。基于此, 本试验以黄瓜为材料, 研究沙化土地中日光温室内的黄瓜配方施肥数学模型, 以期在实际生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验于 2005-02~07 在陕西杨凌国家节水灌溉示范园日光温室内进行, 土壤为沙壤土, 含沙量为 237.6 g/kg (土壤颗粒分级标准采用国际制, 用沉降法测定^[9])。土壤含有机质 0.565 g/kg, 速效氮 25.58

mg/kg, 速效磷 23.40 mg/kg, 速效钾 103.05 mg/kg, pH 7.94。试验小区面积 6.84 m² (5.70 m × 1.20 m)。

1.2 供试材料

供试黄瓜品种选用津优 2 号, 由原天津黄瓜研究所生产, 为早熟种, 抗病性较强, 是适宜“三北”地区日光温室栽培的优良品种。

1.3 方法

1.3.1 试验设计 试验采用三因素五水平二次回归正交旋转组合设计^[10]。以 N、P₂O₅ 和 K₂O 施肥量为自变量, 以黄瓜产量为目标函数建立数学模型。共设 23 个小区, 各小区于田间随机排列, 小区之间以塑料薄膜竖直埋入地下 0.5 m 隔开, 以确保小区间无肥料渗透。肥料施用方法为将氮肥用量的 35% 作为基肥, 其余作为追肥分别在结果初期、盛期和末期分 3 次平均施入; 磷肥作基肥 1 次施入; 钾肥的 50% 作基肥, 50% 在结果盛期作追肥 1 次施入。试验数据采用 DPS 系统处理。

1.3.2 试验参数确定 试验采用目标产量法^[11]确定肥料用量, 计算过程中的一些参数参照文献^[11-12]。计算出需施入的 N 为 264.28 kg/hm², P₂O₅ 为 132.25 kg/hm², K₂O 为 462.95 kg/hm², 将此施肥量定为水平编码值 1, 可得试验中各因素水平编码 (表 1)。

^{*} [收稿日期] 2005-09-14

[基金项目] 国家“863”高新技术研究与发展计划项目 (2001AA 247012)

[作者简介] 穆大伟 (1979-), 男, 内蒙古赤峰人, 在读硕士, 主要从事设施蔬菜栽培研究。

[通讯作者] 邹志荣 (1956-), 男, 陕西延安人, 教授, 博士生导师, 主要从事设施农业科学与工程研究。E-mail: zuozhirong@163.com

表 1 沙化地日光温室黄瓜氮、磷、钾肥施用量及其水平编码

Table 1 Different amounts of N, P and K application to cucumber in solar greenhouse					kg/hm ²
肥料 Fertilizer	1 682	1	0	- 1	- 1 682
N	331.48	264.28	165.74	67.20	0
P ₂ O ₅	165.89	132.25	82.94	33.63	0
K ₂ O	580.68	462.96	290.34	117.72	0

2 结果与分析

本试验各小区处理及其产量见表 2。按二次回归正交旋转组合设计的统计分析方法, 经计算求得 N, P₂O₅ 和 K₂O 施用量与黄瓜产量的数学模型为:

$$Y = 112\,821.16 + 4\,692.11X_1 + 414.66X_2 + 2\,617.25X_3 - 3\,467.97X_1^2 - 2\,085.66X_2^2 - 3\,570.85X_3^2 + 586.50X_1X_2 + 1\,861.87X_1X_3 +$$

1 699.50X₂X₃ (1)

式中, Y 代表黄瓜产量; X₁, X₂ 和 X₃ 分别代表 N, P₂O₅ 和 K₂O 施用量。为了确定回归方程的实际意义, 对方程进行拟合性和显著性检验: F₁ = 2 218 < F_{0.05(5, 8)} = 3.69, 失拟不显著, 表明方程拟合性很好; F₂ = 6 017 > F_{0.01(9, 13)} = 4.19, 表明方程回归达到极显著水平。F 检验说明黄瓜产量与各肥料因子拟合很好, 方程(1)可用于进行相关分析。

表 2 沙化地日光温室黄瓜配方施肥试验处理方案及其产量

Table 2 The experiment treatments and cucumber yield in solar greenhouse							
处理号 No.	N/(kg·hm ⁻²) X ₁		P ₂ O ₅ /(kg·hm ⁻²) X ₂		K ₂ O/(kg·hm ⁻²) X ₃		产量/ (kg·hm ⁻²) Yield
	编号 Code	施肥量 Amount of fertilizer	编号 Code	施肥量 Amount of fertilizer	编号 Code	施肥量 Amount of fertilizer	
1	1	264.28	1	132.25	1	462.96	118 453.50
2	1	264.28	1	132.25	- 1	117.72	102 823.50
3	1	264.28	- 1	33.63	1	462.96	112 921.50
4	1	264.28	- 1	33.63	- 1	117.72	103 284.00
5	- 1	67.20	1	132.25	1	462.96	105 832.50
6	- 1	67.20	1	132.25	- 1	117.72	96 844.50
7	- 1	67.20	- 1	33.63	1	462.96	101 841.00
8	- 1	67.20	- 1	33.63	- 1	117.72	100 456.50
9	1 682	331.48	0	82.94	0	290.34	110 121.00
10	- 1 682	0	0	82.94	0	290.34	91 348.50
11	0	165.74	1 682	165.89	0	290.34	104 707.50
12	0	165.74	- 1 682	0	0	290.34	104 581.50
13	0	165.74	0	82.94	1 682	580.68	100 474.50
14	0	165.74	0	82.94	- 1 682	0	100 413.00
15	0	165.74	0	82.94	0	290.34	114 868.50
16	0	165.74	0	82.94	0	290.34	115 146.00
17	0	165.74	0	82.94	0	290.34	113 703.00
18	0	165.74	0	82.94	0	290.34	112 126.50
19	0	165.74	0	82.94	0	290.34	104 344.50
20	0	165.74	0	82.94	0	290.34	112 734.00
21	0	165.74	0	82.94	0	290.34	115 009.50
22	0	165.74	0	82.94	0	290.34	113 641.50
23	0	165.74	0	82.94	0	290.34	114 598.50

2.1 主效应分析

回归模型本身已经过无量纲性编码代换, 其偏回归系数已经标准化, 可直接从其绝对值大小来判断各因子对目标函数的相对重要性。由数学模型中的回归系数绝对值的大小顺序 X₁ > X₃ > X₂ 可以得出, 三因素中对产量影响最大的为氮, 其次为钾, 磷的影响最小, 且 3 个因子对产量均为正效应。土壤中

速效 N 含量为 25.58 mg/kg, 在菜田土中属严重缺乏^[11]。已有研究^[11]表明, 氮肥是作物产量的最大影响因素, 本试验结论与其一致。

2.2 单因子效应分析

利用降维法, 将数学模型中任意 2 个变量固定在 0 水平, 可得到 3 个变量中 1 个变量的偏回归模型(表 3), 该子模型相当于特定条件下的单因素试验。

表 3 各试验因子与黄瓜产量的偏回归子模型

Table 3 Partial regression submodel involving the experimental factors and cucumber yield

试验因子 Factor	回归模型 Partial regression model
N	$Y_1=112\ 821.16+4\ 692.11X_1-3\ 467.97X_1^2$
P ₂ O ₅	$Y_2=112\ 821.16+414.66X_2-2\ 085.66X_2^2$
K ₂ O	$Y_3=112\ 821.16+2\ 617.25X_3-3\ 570.85X_3^2$

将各因子水平值分别代入上述回归子模型,得到因子与产量的效应图(图 1)。

由图 1 可知,在试验范围内,各试验因子与黄瓜产量均呈抛物线关系。以氮肥为例,施肥水平由 -1.682 增大到 0.70 水平时,黄瓜产量由 98.32 t/hm² 增至 114.41 t/hm²; 超过 0.70 水平后产量开始下降; 到 1.682 水平时,产量下降至 110.90 t/hm²。磷在 0.10 水平时黄瓜产量达到最高,钾在 0.37 水平时黄瓜产量达到最高; 在达到此水平之前,施磷处理的黄瓜产量由 106.92 t/hm² 上升至 112.84 t/hm²,施钾处理的黄瓜产量由 98.32 t/hm² 上升至 113.30 t/hm²; 超过该水平,黄瓜产量分别下

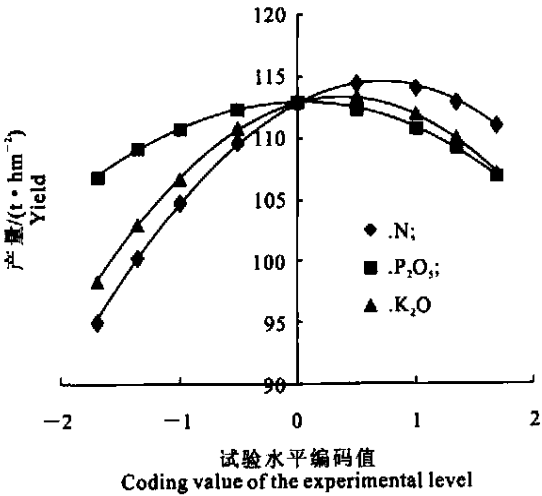


图 1 N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量与黄瓜产量的效应曲线
Fig 1 Effect curve between N, P, K amount and cucumber yield

根据多元函数极值理论,计算出响应曲面中黄瓜产量达最高值时氮肥和钾肥的水平分别为 0.833 和 0.584。根据此极值,响应曲面被分为 4 个区,将各区中氮肥和钾肥对黄瓜产量的影响列于表 4。

与此相似,计算出氮肥和磷肥、磷肥和钾肥响应曲面的极值分别为 (0.693, 0.197) 和 (0.275, 0.432)。根据极值将响应曲面分区,可直观地找到不同水平肥料下,黄瓜产量的变化趋势。

降至 106.92 和 107.12 t/hm²。

供试土壤肥力贫乏,N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量低时,增产效应显著;达到极点后继续增加肥料用量,作物生长反而受到抑制,产量下降,这与陈晓红等^[13]的研究结果一致。

2.3 交互效应分析

将 N、P₂O₅ 和 K₂O 中的某一个因素确定在 0 水平,分别得到其他 2 个因素与产量的子模型:

$Y_{(1,2)}=112\ 821.16+4\ 692.11X_1+414.66X_2-3\ 467.97X_1^2-2\ 085.66X_2^2+586.50X_1X_2$ (2)

$Y_{(1,3)}=112\ 821.16+4\ 692.11X_1+2\ 617.25X_3-3\ 467.97X_1^2-3\ 570.85X_3^2+1\ 861.87X_1X_3$ (3)

$Y_{(2,3)}=112\ 821.16+414.66X_2+2\ 617.25X_3-2\ 085.66X_2^2-3\ 570.85X_3^2+1\ 699.50X_2X_3$ (4)

在以上 3 个子模型中,以模型 (3) 的显著性最好,故以氮肥和钾肥为例进行交互效应解析。分别将 0, ±0.5, ±1, ±1.341 和 ±1.682 9 个水平代入模型 (3),得到氮肥和钾肥对黄瓜产量的交互效应,进一步将产量数值绘制成响应曲面,结果见图 2。

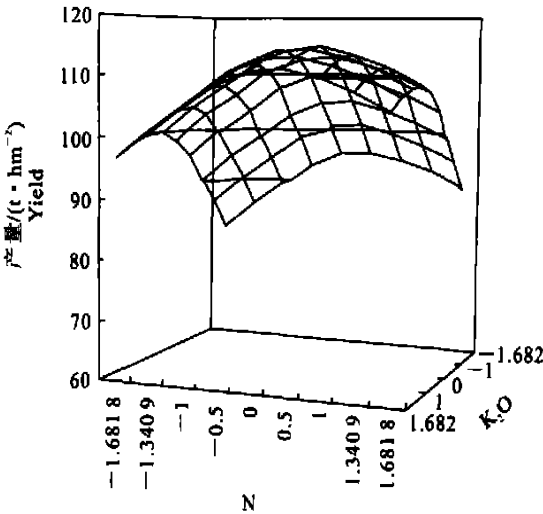


图 2 氮肥和钾肥交互效应响应曲面
Fig 2 Response surface of N and P interaction effect

表 4 氮肥和钾肥用量对黄瓜产量的影响

Table 4 Effect of N and K quantity variation on cucumber yield

区域 Range	因素变化 Factor variation	产量变化 Yield
$X_1 < 0.833, X_3 < 0.584$	N ↑ K ↑	↑
$X_1 > 0.833, X_3 < 0.584$	N ↑ K -	↓
	N - K ↑	↑
$X_1 < 0.833, X_3 > 0.584$	N ↑ K -	↑
	N - K ↑	↓
$X_1 > 0.833, X_3 > 0.584$	N ↑ K ↑	↓

注:“↑”表示增加,“↓”表示降低,“-”表示不变。

Note:“↑”: increase;“↓”: decrease;“-”: no change

2 4 边际效应分析

利用降维法得到各单因子作用子模型(表 3), 对子模型求一阶导数得到边际产量子模型:

$dy_1/dx_1 = 4\ 692\ 11 - 6\ 935\ 98x_1$ (5)

$dy_2/dx_2 = 414\ 66 - 4\ 171\ 32x_2$ (6)

$dy_3/dx_3 = 2\ 617\ 25 - 7\ 141\ 10x_3$ (7)

将编码值 ±1.682, ±1 和 0 分别代入上述子模型, 计算边际产量, 见图 3。

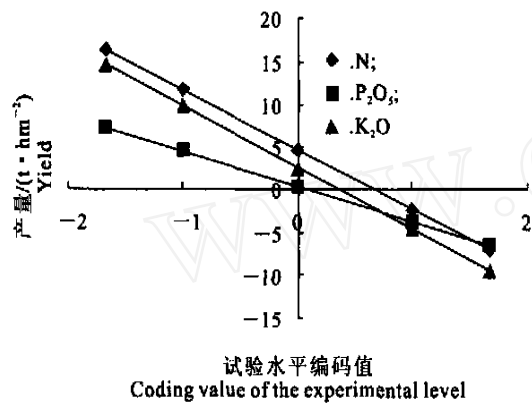


图 3 氮肥、磷肥和钾肥对黄瓜的边际产量效应

图 3 Border yield effect of N, P and K on cucumber
图 3 中, 斜率反映了单位肥料对产量的影响, 氮

肥和钾肥的变化对边际产量的影响相近, 氮肥略高于钾肥, 而磷肥的变化对边际产量的影响明显低于氮肥和钾肥。随着 3 种肥料编码值的增加, 边际产量均呈下降趋势, 边际产量为零时, 产量达最大值, 超过此水平, 呈负效应, 这符合米采利希(E. Mitscherlich)提出的肥料效应报酬递减定律^[14]。从图 3 中还可以直观地看出, 各因子在不同水平时, 对产量的影响程度也是不同的, 这为在不同条件下选择增产因素和决定施肥量的大小提供了参数。

2 5 模型寻优和频数分析

根据试验所得的数学模型, 每个因素取 5 个水平: ±1.682, ±1 和 0, 用计算机对 $5^3 = 125$ 个方案进行寻优, 得到黄瓜产量达最高时, N, P_2O_5 和 K_2O 的各因子水平分别为 1, 0, 0, 即 264 28, 82 94 和 290 34 kg/hm^2 , 此时黄瓜产量为 114 045 30 kg/hm^2 。

在所有的 125 个方案中, 黄瓜产量高于 107 403 26 kg/hm^2 的方案共有 22 个, 占全部方案的 5%, 频数分析结果见表 5。从表 5 可以看出, 当 x_1 水平为 0.652~1.175, x_2 水平为 -0.374~0.374, x_3 水平为 0.179~0.701 时, 每公顷黄瓜产量有 95% 的可能高于 107 403 26 kg/hm^2 。

表 5 黄瓜产量大于 107 403 26 kg/km^2 的 22 个方案中各变量取值的频率分布

Table 5 Frequency distribution of the variable value with cucumber yield higher than 107 403 26 kg/km^2 in the experiment scheme

水平 Level	x_1	x_2	x_3
- 1.682	0	1	0
- 1	0	6	1
0	6	8	11
1	10	6	9
1.682	6	1	1
加权均数 Weighted average	0.913	0	0.44
标准误 Standard error	0.133	0.191	0.133
95% 的分布区间	0.652~ 1.175	- 0.374~ 0.374	0.179~ 0.701
Distribution range at level of 95%			

3 模型验证

3 1 试验概况

供试品种为津优 2 号, 试验于 2005-07-11 在原温室内进行。供试土壤含速效氮 23.64 mg/kg , 速效磷 22.37 mg/kg , 速效钾 101.15 mg/kg 。根据第一次试验结果, 在计算机上进行模拟, 选出最优组合 A, 最差组合 B, 以所调查农民的一般施肥量作为对照(CK)共设 3 个处理, 每处理重复 3 次, 随机区组排列, 进行模型验证试验(表 6)。

表 6 不同处理的氮、磷、钾肥施用量

Table 6 Application amount of N, P and

处理 Treatment	K in different treatments kg/hm^2		
	N	P_2O_5	K_2O
A	271.43	85.72	298.26
B	0	164.63	0
CK	285.26	140.59	406.67

3 2 试验结果与分析

由表 7 可以看出, 不同氮、磷、钾配比对黄瓜产量影响很大, 3 个处理的黄瓜产量依次为处理 A > CK > 处理 B, 处理间差异达极显著水平($P < 0.01$)。

说明由模型所得氮、磷、钾最佳配比的栽培效果明显优于其他处理。生产中普遍采用的施肥模式,只是根据经验和估计,其产量居中,而由模型选出的较差配方 B 的产量最低,说明氮、磷、钾配比失衡,影响了黄瓜生长发育。由此可知,本研究构建的模型准确可靠。

表 7 不同施肥处理对黄瓜产量的影响

Table 7 Cucumber yield of different treatments					kg/hm ²	
处理 Treatment	产量 Yield				5% 显著水平 Significant level at 5%	1% 显著水平 Significant level at 1%
	重复 1 Repeat 1	重复 2 Repeat 2	重复 3 Repeat 3	平均 Average		
A	71 964 25	69 527 57	69 081 82	70 191 21	a	A
CK	64 503 60	63 827 45	63 293 46	63 874 84	b	B
B	56 927 27	57 218 89	57 091 35	57 079 17	c	C

4 结论与讨论

本研究在含沙量为 237.6 g/kg 的土壤条件下,建立了日光温室黄瓜配方施肥数学模型,其拟合性好,回归性极显著,可以用于指导生产。在本试验条件下,N、P₂O₅和 K₂O 影响黄瓜产量的顺序为 N>K₂O>P₂O₅。在本研究的肥力水平条件下,黄瓜达到最高产量 114 045.30 kg/hm²时,N、P₂O₅和 K₂O 的施用量分别为 264.28、82.94 和 290.34 kg/hm²。本试验建立了 N、P₂O₅和 K₂O 对黄瓜产量的互作效应响应曲面,在实际生产中应用更加直观、方便。

虽然本试验在含沙量为 237.6 g/kg 的沙化土

条件下得到了配方施肥数学模型,但实际生产中因各地含沙量不尽相同,肥料利用率、土壤有效养分校正系数随着含沙量不同而有较大差异,关于该模型在实际中的应用还有待于进一步研究。本试验所得数学模型的最优施肥配比与前人的研究结果^[13]基本一致。但在黄瓜生长过程中,由于发生了霜霉病,而影响了产量,致使实际产量低于目标产量。由于蔬菜作物生长在一个错综复杂的环境中,模型的参数是否会因为不同气候、不同品种、不同土壤肥力水平之间的差异而发生较大的变化,还有待于进一步研究。

[参考文献]

- [1] 农业部农业局. 配方施肥[M]. 北京: 农业出版社, 1989: 45-57.
- [2] 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.
- [3] 井立军, 邹志荣, 刘建辉. 中棚番茄产量的氮磷钾效应模式及最优施肥参数的确定[J]. 华北农学报, 1999, 14(3): 86-90.
- [4] 薛继澄, 毕德义, 李家金, 等. 保护地栽培蔬菜生理障碍的土壤因子与对策[J]. 土壤肥料, 1994(1): 4-9.
- [5] 董有为, 陈淡飞. 温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径研究[J]. 园艺学报, 1991, 18(2): 159-162.
- [6] Sarkar A. K, Mathur B. S, Shama A. Improving fertilizer use for sustaining high crop yields in red and lateritic soil of eastern India[J]. Fertiliser News, 1996, 41: 31-37.
- [7] 邹志荣, 杨振超. 西北荒漠化地带发展设施园艺的意义与作用[J]. 华中农业大学学报, 2004, 12(增刊): 26-28.
- [8] 李天来. 论设施园艺在我国农业发展中的战略地位及发展方向[J]. 华中农业大学学报, 2004, 12(增刊): 1-4.
- [9] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1988: 16-34.
- [10] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 360-366.
- [11] 全国土壤肥料总站. 蔬菜配方施肥[M]. 北京: 农业出版社, 1990.
- [12] 陈青云, 张福墁, 高丽红, 等. 黄瓜工厂化生产高产栽培技术开发研究[C]//中国农业工程学会. 发展中的中国工厂化农业. 北京: 北京出版社, 2000: 177-182.
- [13] 陈晓红, 邹志荣, 李军, 等. 温室黄瓜配方施肥 NPK 模型构建[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2003, 31(6): 85-89.
- [14] Kivisaari S. Importance of secondary and micronutrients in a balanced fertilizer schedule in S. E. Asia[R]. Manila, Philippines: Fertilizer Asia Conference and Exhibition, 1989.

(下转第 126 页)

- [42] Lee J, Reeves R D, Brooks R R, et al. The relation between nickel and citric acid in some nickel-accumulating plants[J]. *Phytochemistry*, 1978, 17: 1033-1035
- [43] Ma J F, Hiradate S. Form of aluminum for uptake and translocation in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) [J]. *Planta*, 2000, 211: 355-360
- [44] Tolra R P, Poschenrieder C, Barelo J. Zinc hyperaccumulation in *T. caerulescens*: II. Influence on organic acids[J]. *J Plant Nutr*, 1996, 19: 1541-1550
- [45] Pelosi P, Fiorentini R, Galoppini C. On the nature of nickel compounds in *Alyssum bertolonii* Desv. - II [J]. *Agric Biol Chem*, 1976, 40: 1641.
- [46] Krmer U, Pickering IJ, Prince R C, et al. Subcellular localization and speciation of nickel in hyperaccumulator and non-accumulator *Thlaspi* species[J]. *Plant Physiol*, 2000, 122: 1343-1353
- [47] Salt D E, Prince R C, Backer A J M, et al. Zinc ligands in the metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* as determined using X-ray absorption spectroscopy[J]. *Environ Sci Technol*, 1999, 33: 713-717.

Function of organic acids in heavy metal tolerance mechanism in hyperaccumulator

ZHU Yan-xia, WEI You-zhang, YE Zheng-qian, YANG Xiao-e

(College of Environmental and Resource, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310029, China)

Abstract: The contamination of heavy metals in soils is a serious problem. Organic acids such as citric, oxalic and/or malic acid, are important metal chelators in hyperaccumulator. A review is given on the participation of organic acids in the absorption, transport and accumulation of heavy metal tolerance mechanism in hyperaccumulator and existing problems in the recent studies and development projects in the future.

Key words: organic acid; hyperaccumulator; heavy metal; tolerance mechanism

(上接第 120 页)

Abstract ID: 1671-9387(2006)07-0116-EA

Construction of mathematic model for solar greenhouse cucumber balanced fertilization in the sandy land

MU Da-wei¹, ZOU Zhi-rong¹, WANG Lan-ying²

(1 College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Agricultural College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: By means of quadratic component rotational design, the experiment was conducted in order to get an optimized fertilization scheme for high yield cucumber production. A mathematic model involving the N, P, K and cucumber yield was established by computer optimization under the condition of sandy land with a sand content of 237.6 g/kg. Based on the model, the paper analyzed the effect of single factor and interaction of N, P, K, the marginal yield and the optimal fertilizer application. Under this soil condition, the result showed that the amount of N, P₂O₅ and K₂O for the highest yield were 264.28, 82.94, 290.34 kg/hm² and 114.045, 30 kg/hm² respectively.

Key words: sandy land; solar greenhouse; cucumber cultivation; balanced fertilization; mathematic model