

烟草栽培中土壤适宜含水率及施肥模型

陈义强¹, 刘国顺^{1*}, 习红昂², 张彩霞¹

(1. 河南农业大学烟草学院, 国家烟草栽培生理生化研究基地, 郑州 450002; 2. 南阳市烟草公司, 南阳 473000)

摘要: 该研究以提供优质烟叶生产的量化施肥模型, 防止化肥的过量使用从而造成的环境污染及烟叶品质下降为目的, 通过盆栽试验建立了氮磷钾肥及水分这 4 因子与产值的关系模型, 对各因子之间的交互作用进行了分析, 对模型进行了优化, 并对供试土壤基础肥力的贡献率进行了计算, 以此为基础建立了氮磷钾的施肥模型, 并对所建模型进行了大田试验的验证。结果表明, 盆栽试验适宜的施氮量为每株 4.85~5.45 g 纯氮, 施磷量为 P_2O_5 每株 7.68~8.64 g, 施钾量为 K_2O 每株 16.17~17.95 g, 土壤相对含水率为 75.8%~80.5%。施肥模型推荐的氮磷钾肥施用量分别为 39.30~44.16 kg/hm^2 , 64.30~72.34 kg/hm^2 , 232.77~258.41 kg/hm^2 , 与大田试验的最佳施氮量纯氮 (42.86 ± 7.49) kg/hm^2 , P_2O_5 为 (65.09 ± 12.58) kg/hm^2 , K_2O 为 (242.68 ± 8.69) kg/hm^2 的结果大致相同。

关键词: 烟草, 施肥模型, 肥料, 土壤水分

中图分类号: S152.7⁺1, S147.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-2-0042-08

陈义强, 刘国顺, 习红昂, 等. 烟草栽培中土壤适宜含水率及施肥模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 42-49.

Chen Yiqiang, Liu Guoshun, Xi Hong'ang, et al. Favorable soil moisture and fertilization model in tobacco cultivation[J].

Transactions of the CSAE, 2009,25(2): 42-49.(in Chinese with English abstract)

0 引言

掌握烟草的需肥需水规律, 并把它量化, 在此基础上进行精准施肥、精准浇水是生产优质烟叶的主要途径, 更是防止化肥的长期过量使用而造成污染环境、烟叶品质下降的经济措施, 最终有助于实现烟叶生产的可持续发展。氮磷钾肥及水分是烟草栽培中最为关键的四大影响因素。生产中由于施肥不当引起的烟叶长势差、品质下降也时有发生。施肥不足, 烟叶无法正常生长, 烟叶品质更是无从谈起。施肥过多, 在当季可能并不会引起烟叶产量和品质的急剧下降, 但是, 如果年年都多施肥料, 久而久之就会引起许多生态环境问题。如土壤的板结, 活性有机碳^[1]、土壤微生物、土壤动物种类及数量的急剧减少, 水资源的污染, N_2O 、 NO_2 、 NH_3 、 O_3 等有害气体释放量的增加^[2, 3]。随之而来的便是烟草品质和产量的降低。近几年来屡屡出现的许多优质烟叶生产区所产烟叶品质下滑的现象在很大程度上是由于肥料的过量使用造成的环境污染而引起的。肥料的过量使用不仅产生了环境污染, 而且也增加了生产成本。因此, 研究烟草的需肥需水规律并把它量化, 在此基础上建立施肥模型是实现优质烟叶生产可持续发展的根本途径。

氮、磷、钾是作物生长的三大营养元素, 水是生命之源, 这 4 个因子是形成优质烟叶最基础也是最重要的

条件。烟草是喜钾作物, 较高的烟叶钾含量可以提高烟叶的燃烧性, 提高烟叶的品质^[4]。刘国顺等研究表明施用钾肥提高了烟叶的酸性和中性香气成分含量^[5]。McKee 和 Aycock 研究表明随着施磷量增加, 产值增加^[6]。Rideout 等研究表明在 84~134 kg/hm^2 的施氮(溶解在水中滴灌)范围内, 随着施氮量的增加烟叶的产量、等级也相应增加^[7]。Maw 等研究表明在移栽后第 8 周至第 9 周严重干旱时烟叶面积和干质量会明显减少^[8]。汪耀富等研究表明有机肥与无机肥质量比 1:1 并结合灌水, 烟叶的产量和质量性状较为理想^[9]。汪耀富等的研究表明氮、磷、钾配施处理烟叶的化学成分协调, 致香物质总量和不同种类致香物质含量高^[10]。有关氮、磷、钾肥及土壤水分对烟草生长和烟叶品质的影响已有较多报道, 但大部分都是研究这 4 个因子中某一单因子对烟草的影响, 而有关这 4 个因子与烟草产值或品质的关系模型及以此为基础的施肥模型鲜见报道。为此, 本研究通过分析施肥量与产值间的关系, 对烟草需肥需水的量化规律、肥水间的交互作用及土壤基础肥力的养分贡献率进行探讨, 拟建立施肥量及土壤含水率与产值间的统计关系模型, 氮磷钾的施肥模型, 为烟草精准栽培提供量化依据。

1 材料与方法

1.1 建模试验

采用二次回归旋转组合设计进行盆栽试验, 分氮、磷、钾、水分 4 个因素, 每个因素各设 5 个水平。各肥料的零水平按 $N : P_2O_5 : K_2O$ 为 1 : 1.5 : 3 的比例施肥, 水分以每天土壤相对含水率的平均值表示, 控制在 $\pm 2\%$ 的波动范围, 各因素的中间水平、区间和具体施肥方案见表 1 及表 2。

试验于 2006 年在河南省方城县金叶园的遮雨篷内进

收稿日期: 2007-09-10 修订日期: 2008-11-21

基金项目: 烟草行业烟草栽培重点实验室资助项目(TCKL06001); 国家烟草专卖局南阳优质烟生产科技示范基地建设资助项目(110200401004)

作者简介: 陈义强(1978-), 男, 福建漳平人, 博士, 研究方向为烟草栽培与精准农业。郑州市文化路 95 号 河南农业大学烟草基地, 450002。

Email: tanhai575@163.com

*通讯作者: 刘国顺, 博士生导师, 教授, 主要从事烟草栽培生理研究。郑州市文化路 95 号 河南农业大学烟草基地, 450002

行，5月22日移栽烟苗。供试品种为云烟87，供试土壤为黄褐土，pH值为7.09±0.082，有机质为(12.07±1.42)g/kg，全氮为(791.2±54.8)mg/kg，全磷为(494.3±66.6)mg/kg，全钾为(26.81±3.36)g/kg，碱解氮为(76.16±4.16)mg/kg，速效磷为(33.12±2.06)mg/kg，速效钾为(76.03±4.50)mg/kg。试验所用盆钵高40cm，盆口直径50cm，盆底直径45cm。每个盆钵装土35kg。共种植110盆，每盆移栽1棵烟苗。前24个处理中每个处理种4盆，由于方案中处理号从25至36的处理是一样的，因此25号设3个重复，编号为26至36的处理不再设重复。试验所施肥料为KNO₃(分析纯)、K₂SO₄(分析纯)、KH₂PO₄(分析纯)、NaH₂PO₄·2H₂O(分析纯)、硝酸铵(含氮30%)，其中70%作为基肥施用，30%作为追肥。

表 1 盆栽试验各因素的零水平及区间

Table 1 Zero level and range of different factors in potted experiment

因素	N/g	P ₂ O ₅ /g	K ₂ O/g	H ₂ O/%
中间水平	4	6	12	70
变化步长	2	3	6	15
上限	8	12	24	100
下限	0	0	0	40

表 2 二次回归旋转组合设计方案

Table 2 Design of quadric circum-regression

处理号	N	P	K	H ₂ O	施 N /g	施 P ₂ O ₅ /g	施 K ₂ O /g	相对含水率 /%
1	1	1	1	1	6	9	18	85
2	1	1	1	-1	6	9	18	55
3	1	1	-1	1	6	9	6	85
4	1	1	-1	-1	6	9	6	55
5	1	-1	1	1	6	3	18	85
6	1	-1	1	-1	6	3	18	55
7	1	-1	-1	1	6	3	6	85
8	1	-1	-1	-1	6	3	6	55
9	-1	1	1	1	2	9	18	85
10	-1	1	1	-1	2	9	18	55
11	-1	1	-1	1	2	9	6	85
12	-1	1	-1	-1	2	9	6	55
13	-1	-1	1	1	2	3	18	85
14	-1	-1	1	-1	2	3	18	55
15	-1	-1	-1	1	2	3	6	85
16	-1	-1	-1	-1	2	3	6	55
17	-2	0	0	0	0	6	12	70
18	2	0	0	0	8	6	12	70
19	0	-2	0	0	4	0	12	70
20	0	2	0	0	4	12	12	70
21	0	0	-2	0	4	6	0	70
22	0	0	2	0	4	6	24	70
23	0	0	0	-2	4	6	12	40
24	0	0	0	2	4	6	12	100
25	0	0	0	0	4	6	12	70
26	0	0	0	0	4	6	12	70
27	0	0	0	0	4	6	12	70
28	0	0	0	0	4	6	12	70

29	0	0	0	0	4	6	12	70
30	0	0	0	0	4	6	12	70
31	0	0	0	0	4	6	12	70
32	0	0	0	0	4	6	12	70
33	0	0	0	0	4	6	12	70
34	0	0	0	0	4	6	12	70
35	0	0	0	0	4	6	12	70
36	0	0	0	0	4	6	12	70

1.2 验证试验

在试验地养分空间变异性分析的基础上选取氮、磷、钾养分分布均匀的长方形典型地块作为研究区，采用正交回归设计，分氮、磷、钾3个因素，每个因素各设5个水平。各肥料的中间水平按N:P₂O₅:K₂O为1:1.5:3的比例施肥，各因素的中间水平、区间和具体施肥方案见表3及表4。

试验于2006年在河南省方城县金叶园内进行，供试品种也为云烟87，供试土壤为黄褐土，所有土壤样品均为取自0~20cm土层的土壤，测得pH值为7.05±0.23，有机质为(12.89±3.40)g/kg，全氮为(885.4±46.8)mg/kg，全磷为(456.5±80.0)mg/kg，全钾为(23.81±2.67)g/kg，碱解氮(84.67±4.09)mg/kg，速效磷(19.54±3.06)mg/kg，速效钾(47.94±7.35)mg/kg。试验地面积为0.22hm²，共36个小区，小区面积为55m²，设保护行。实验所施肥料为烟草专用复合肥(氮磷钾比例为10%:10%:20%)、硝酸铵(含氮30%)、Ca(H₂PO₄)₂·H₂O(含P₂O₅12%)、K₂SO₄(含K₂O50%)、KNO₃(含氮13%，含K₂O45%)，其中70%作为基肥施用，30%作为追肥。

表 3 大田试验各因素的中间水平及区间

Table 3 Zero level and range of different factors in field experiment

因素	N/kg·hm ⁻²	P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	K ₂ O/kg·hm ⁻²
中间水平	45.0	67.50	135.0
变化步长	22.5	33.75	67.5
上限	90	135	270
下限	0	0	0

表 4 二次回归旋转组合设计方案

Table 4 Design of quadric circum-regression

处理号	N	P	K	施 N /kg·hm ⁻²	施 P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	施 K ₂ O /kg·hm ⁻²
1	1	1	1	67.5	101.25	202.5
2	1	1	1	67.5	101.25	202.5
3	1	1	-1	67.5	101.25	67.5
4	1	1	-1	67.5	101.25	67.5
5	1	-1	1	67.5	33.75	202.5
6	1	-1	1	67.5	33.75	202.5
7	1	-1	-1	67.5	33.75	67.5
8	1	-1	-1	67.5	33.75	67.5
9	-1	1	1	22.5	101.25	202.5
10	-1	1	1	22.5	101.25	202.5
11	-1	1	-1	22.5	101.25	67.5
12	-1	1	-1	22.5	101.25	67.5

接上页

处理号	N	P	K	施 N /kg·hm ⁻²	施 P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	施 K ₂ O /kg·hm ⁻²
13	-1	-1	1	22.5	33.75	202.5
14	-1	-1	1	22.5	33.75	202.5
15	-1	-1	-1	22.5	33.75	67.5
16	-1	-1	-1	22.5	33.75	67.5
17	-2	0	0	0	67.50	135
18	2	0	0	90	67.50	135
19	0	-2	0	45	0	135
20	0	2	0	45	135	135
21	0	0	-2	45	67.50	0
22	0	0	2	45	67.50	270
23	0	0	0	45	67.50	135
24	0	0	0	45	67.50	135
25	0	0	0	45	67.50	135
26	0	0	0	45	67.50	135
27	0	0	0	45	67.50	135
28	0	0	0	45	67.50	135
29	0	0	0	45	67.50	135
30	0	0	0	45	67.50	135
31	0	0	0	45	67.50	135
32	0	0	0	45	67.50	135
33	0	0	0	45	67.50	135
34	0	0	0	45	67.50	135
35	0	0	0	45	67.50	135
36	0	0	0	45	67.50	135

1.3 测定方法

土壤全氮及烟叶总氮用 FOSS Kjeltac 2300 全自动定氮仪测定,回收率为 99.27%;土壤及烟叶的全磷、全钾用美国瓦里安的 VISTA-MPX CCD Simultaneous ICP-OES(全谱直读等离子体发射光谱)测定;水解性氮用碱解扩散法测定,速效磷用 0.5 mol/L NaHCO₃法测定,速效钾用乙酸铵提取法测定,有机质用重铬酸钾容量法-稀释热法测定,pH 值用电位法测定,土壤含水率用环刀法测定^[11]。

1.4 数据处理与分析

用 DPS 及 EXCEL 软件进行数据的统计与分析。

2 结果与分析

2.1 肥水经验模型的建立

以二次多项式回归进行分析,建立盆栽条件下氮、磷、钾、水分 4 因子与产值的关系模型如下:

$$Y_p = 0.25380 + 0.11404N + 0.00442P + 0.01346K + 1.87019W - 0.01599N^2 + 0.00234P^2 + 0.00027K^2 - 1.29815W^2 + 0.00202NP - 0.00146NK + 0.12958NW + 0.00094PK + 0.00139PW + 0.01694KW \quad (1)$$

式中 Y_p ——单株产值,元; N 、 P 、 K ——单株纯氮、P₂O₅、K₂O 的施用量, g; W ——土壤相对含水率, %。

F 检验表明,所建方程 Y_p 的显著水平 $p=0.0015$, 达极显著水平,复相关系数 $R=0.8591$, Durbin-Watson 统计量 $d=2.3449$, 接近 2, 说明该模型拟合性较好。从方程中可以看出,氮肥因子和水分因子的二次项系数都为负数,说明氮肥用量和土壤相对含水率都有一个适宜的范

围,低于或高于这个范围产值都会下降。磷肥因子和钾肥因子的二次项系数都为正数,说明试验条件范围内施用磷肥和钾肥可以提高烟叶产值。

2.2 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)^[12],根据单因子效应分析结果,以氮、磷、钾肥的施用量及土壤含水率为横坐标,并对其数据进行归一化处理,以产值为纵坐标,作 X-Y 折线图,得图 1。从图中可以看出,氮肥和水分因素都呈先升后降的趋势,盆栽的氮肥施用量为每株 3.6 g 纯氮时所取得的产值是最大的,盆栽的土壤相对含水率为平均整个生育期(76±2)% 时所取得的产值是最大的,而磷肥与钾肥则都呈上升趋势,这可能是由于施肥量的上限不够大,未出现磷肥、钾肥对烟草生长的胁迫作用。

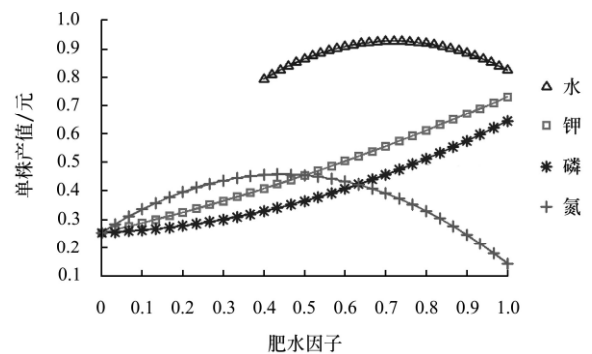


图 1 单因子效应折线图

Fig.1 Broken line graph of single-factor

2.3 两因素交互效应分析

与单一的肥料处理和水分处理相比,肥水多因素处理并非仅仅表现出简单的加和作用,同时还存在协同促进作用和拮抗作用。图 2 为盆栽试验中氮磷钾肥及水分间的两因素交互效应的曲面图。当盆栽试验中磷肥和钾肥处于零水平时(见图 2a),产值随着氮肥施用量的增加表现为先增加而后有所下降的趋势,说明氮肥与土壤水分在施氮量小于每株 4 g 时存在协同促进作用,在施氮量大于每株 4 g 时存在拮抗作用。当氮肥和钾肥处于零水平,且土壤相对含水率盆栽试验中 <80% (见图 2b),随着施磷量和土壤相对含水率的增加,产值增加,说明磷水间存在着协同促进作用;土壤相对含水率盆栽试验中 >80%,产值随着施磷量的增加而增加,但随着土壤相对含水率的增加而减少,磷水间则表现为拮抗作用。当氮肥和磷肥处于零水平,且土壤相对含水率盆栽试验中 <80% 时(见图 2c),随着施钾量和土壤相对含水率的增加,产值增加,说明钾水间存在着协同促进作用;土壤相对含水率盆栽试验中 >80%,产值随着施钾量的增加而增加,但随着土壤相对含水率的增加而减少,钾水间表现为拮抗作用。

当钾肥和土壤相对含水率处于零水平,且施氮量盆栽试验中每株小于 4 g, (见图 2d),随着施氮量和施磷量的增加,产值增加,说明氮肥和磷肥间存在着协同促进作用;氮肥施用量盆栽试验中每株大于 4 g,产值随着施

磷量的增加而增加，但随着施氮量的增加而减少，氮肥和磷肥间表现为拮抗作用。当磷肥和土壤相对含水率处于零水平，且氮肥施用量盆栽试验中每株小于 4 g 时（见图 2e），随着施氮量和施钾量的增加，产值增加，说明氮肥和钾肥间存在着协同促进作用；氮肥施用量盆栽试验

中每株大于 4 g 时，产值随着施钾量的增加而增加，但随着施氮量的增加而减少，氮肥和钾肥间表现为拮抗作用。当氮肥和土壤相对含水率处于零水平时（见图 2f），随着施钾量和施磷量的增加，产值增加，说明钾肥和磷肥间存在着协同促进作用。

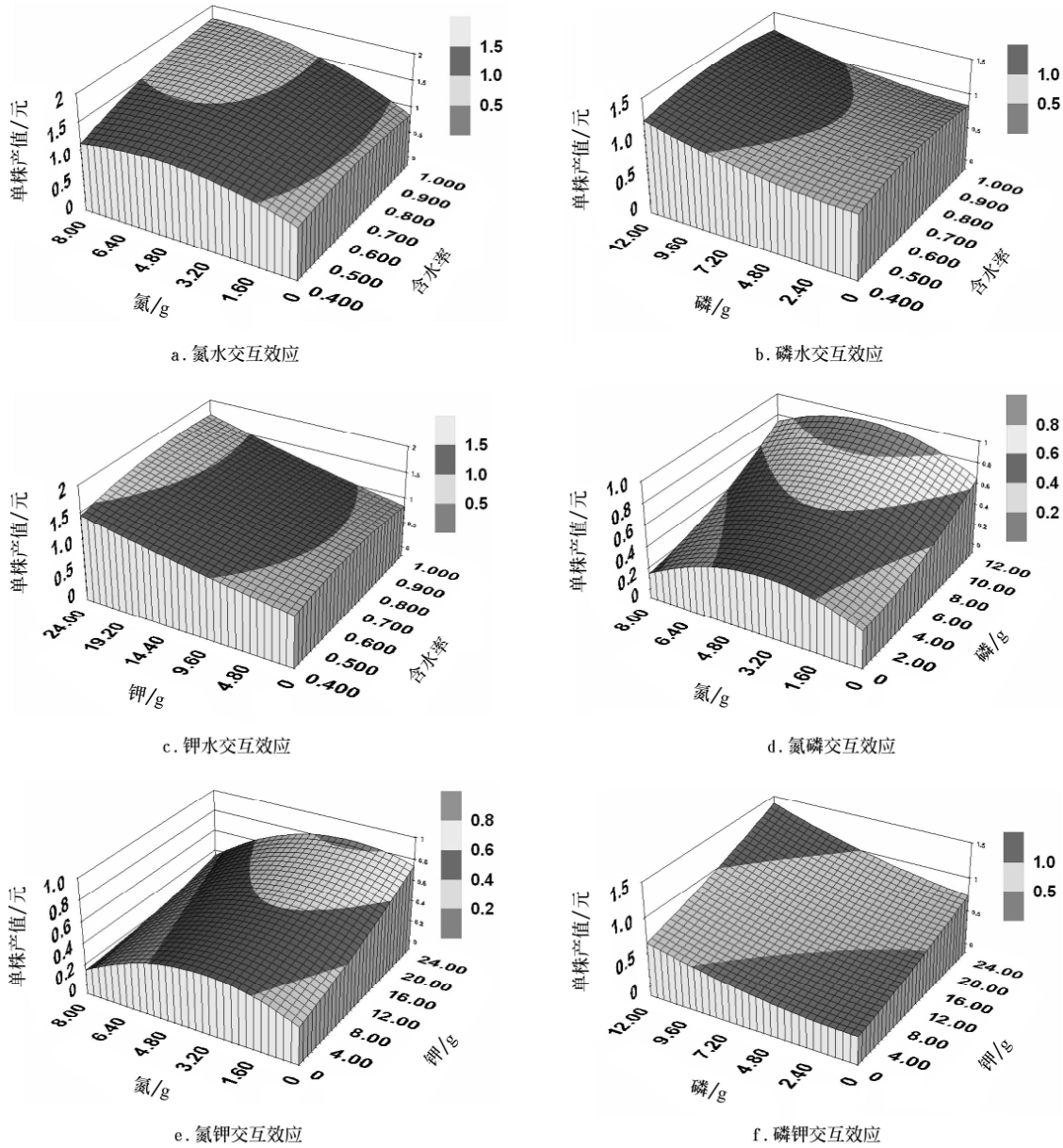


图 2 两因素交互效应曲面

Fig.2 Response surface of interaction effects between two factors

2.4 模型的优化方案

对所建立的氮、磷、钾、水分与产值的经验模型进行优化。在试验条件约束之下，产值越高越好，数学上常用求最大值的方法来优化模型，然而由于模型的最大值仅仅是个理论值，在生产实际中出现的概率非常低，因此不采用求最大值的方法来优化模型，而用频次分析的方法进行模型的优化^[12]。对盆栽试验的产值进行频次分析，盆栽试验中每株产值大于 2.00 元的有 242 个方案，其频次分布见表 5。从表 5 可以看出，盆栽试验中每株产值大于 2.00 元的氮肥处理水平和水分处理水平都主要分

布在 0 水平至 2 水平，即施氮量为每株 4~8 g 纯氮，土壤相对含水率为 70%~100%；磷肥处理水平和钾肥处理水平都主要分布在 1 水平和 2 水平，即施磷量 (P_2O_5) 为每株 9~12 g，施钾量 (K_2O) 为每株 18~24 g。

计算盆栽试验中每株产值大于 2.00 元的 242 个方案中各个因子的加权均数及标准误，并进行参数的区间估计，结果列于表 6。从表 6 可知，盆栽试验适宜的氮肥施用量为每株 (4.85~5.45) g 纯氮，施磷量 (P_2O_5) 为每株 7.68~8.64g，施钾量 (K_2O) 为每株 16.17~17.95 g，土壤相对含水率为 75.8%~80.5%。

表5 产值大于2.00元的242个方案中各变量取值的频率分布
Table 5 Frequency distribution of variable values in 242 schemes and output values larger than 2.00 Yuan

水平	氮肥 X1	频率 /%	磷肥 X2	频率 /%	钾肥 X3	频率 /%	水分 X4	频率 /%
-2	12	4.96	19	7.85	12	4.96	18	7.44
-1	36	14.88	27	11.16	24	9.92	36	14.88
0	60	24.79	43	17.77	45	18.60	53	21.90
1	69	28.51	67	27.69	70	28.93	67	27.69
2	65	26.86	86	35.54	91	37.60	68	28.10

注: X1, X2, X3, X4 分别表示 242 个方案中氮、磷、钾及水分因子在各水平上的方案个数。

表6 施肥优化方案

Table 6 Optimum fertilizer application scheme

因素	加权均数	标准误	95%的分布区间	
			下限	上限
氮肥/g	5.15	0.15	4.85	5.45
磷肥/g	8.16	0.25	7.68	8.64
钾肥/g	17.06	0.45	16.17	17.95
土壤相对含水率/%	78.10	1.20	75.80	80.50

2.5 土壤基础肥力的贡献率

各种作物对土壤基础肥力贡献率的计算基本上都是以无肥区所取得的产量或产值除以施肥区所取得的产量或产值表示。中国种烟的区域跨度较大,北至黑龙江南到广东均有种植,由于各烟区的收购价格不同,在加上各地区的施肥量不同,都将使以施肥区所取得的产量或产值为分母计算而得的土壤基础肥力贡献率不具有可比较性。因此,本研究土壤基础肥力贡献率是以不施某种肥料的试验区所产烟叶中所含该种肥料的养分含量为分子,以烟叶生产中该养分的适宜含量为分母计算而得。因为,烟叶生产中某种养分的适宜含量的标准是一致的,所以用该方法计算的土壤基础肥力贡献率具有可比较性。以不施氮肥区烤后烟叶的总氮含量、不施磷肥区烤后烟叶的磷含量、不施钾肥区烤后烟叶的钾含量分别除以烤烟叶片适宜的总氮含量、磷含量、钾含量得到土壤基础肥力中氮磷钾的贡献率(见表7)。烤烟叶片适宜的总氮含量为2.5%,适宜的磷含量和钾含量以全国319个样品的平均值表示^[13]。从表5中可以看出,土壤基础肥力中氮和磷的贡献率较高,分别为69.54%、56.86%,钾的贡献率较低,仅为25.97%。

表7 土壤基础肥力中氮磷钾对烤后烟叶氮磷钾含量的贡献率
Table 7 Contribution ratios of soil N, P, K contents to N, P, K contents of cured tobacco leaves

因素	施肥/g	烟叶养分含量/%	适宜值/%	贡献率/%
氮	N0-P6-K12	1.739±0.054	2.500	69.54
磷	P0-N4-K12	0.151±0.003	0.265	56.86
钾	K0-N4-P6	0.470±0.074	1.810	25.97

注: N0-P6-K12 表示不施氮肥,施6g磷肥,施12g钾肥,下同;贡献率=不施某种肥烟叶养分含量/适宜值×100%。

2.6 供试品种适宜的总氮磷钾供应量的计算

由于土壤基础肥力和施肥量的量纲不同,难以直接换算,这给生产中的推荐施肥带来了很大的困难。本文通过土壤基础肥力的贡献率把土壤基础肥力的单位转换成与施肥量相同的单位,进而根据所建模型的优化施肥量计算烟草生长适宜的总氮磷钾供应量(包括土壤基础肥力的供肥量和施肥量)。具体计算过程为:某种养分适宜的总供应量=优化施肥量/(1-土壤基础肥力中该养分的贡献率)。计算结果见表8。从表中可以看出每株烟适宜的总氮磷钾供应量分别为15.92~17.89g,17.80~20.03g,21.84~24.25g。由于烟草生产中株距和行距基本上是不变的,分别约为0.5m和1.2m,推算得每公顷约种烟16500株,因此计算得供试品种适宜的总氮磷钾供应量分别为262.7~295.2kg/hm²,293.8~330.5kg/hm²,360.4~400.1kg/hm²。

表8 供试品种适宜的总氮磷钾供应量(包括土壤基础肥力的供肥量和施肥量)

Table 8 Optimized total supply of N, P, K for tested variety (including supplying amounts and application rate of basic fertility)

因素	每株适宜的总供应量/g		单位面积适宜的总供应量/kg·hm ⁻²	
	下限	上限	下限	上限
氮	15.92	17.89	262.7	295.2
磷	17.80	20.03	293.8	330.5
钾	21.84	24.25	360.4	400.1

注:每公顷以16500株计。

2.7 施肥模型的建立及验证

品种的需肥量是稳定的,其所需的养分来源有两种途径,一是土壤自然供给的,另一种是人们施肥供给的。因此,施肥量等于某一品种的总需肥量减去土壤自然供给的部分。据此建立烟草的施肥模型:

$$F_x = S_v \times (1 - \frac{C_x}{O_x}) \quad (2)$$

式中 F_x ——某种养分的最佳施肥量; S_v ——某一品种所需的供肥量(包括土壤基础肥力的供肥量和施肥量); C_x/O_x ——土壤基础肥力中该养分的贡献率; C_x ——不施某种养分时烤后中部烟叶中该养分的含量; O_x ——烤后烟叶中某种养分的适宜含量。其中 S_v 、 O_x 为常数, C_x 为变量。

对所建模型进行验证,求得大田条件下分别仅不施氮磷钾肥时烤后烟叶中总氮含量为2.126%±0.007%,磷含量为0.207%±0.004%,钾含量为0.641%±0.045%。代入上式求得氮磷钾肥的最佳施用量分别为39.30~44.16kg/hm²,64.30~72.34kg/hm²,232.77~258.41kg/hm²。

用二次多项式回归分析,求得大田试验氮、磷、钾与产值的关系模型如下,

$$Y = 10997.46 + 93.32N + 15.34P + 57.75K - 1.09N^2 + 0.07P^2 + 0.02K^2 + 0.48NP - 0.20NK - 0.25PK \quad (3)$$

F检验 $p=0.0005$,复相关系数 $R=0.9204$,Durbin-Watson统计量 $d=2.1358$,Y为产值,单位为元/hm²,N、P、K分别表示纯氮、P₂O₅、K₂O的施用量,单位为kg/hm²。

用频次分析的方法进行模型的优化, 试验中每公顷产值大于 22000 元的有 42 个方案, 计算 42 个方案中各个因子的加权均数及标准误, 并进行参数的区间估计, 得大田试验的最佳施肥量为纯氮 (42.86 ± 7.49) kg/hm^2 , P_2O_5 为 (65.09 ± 12.58) kg/hm^2 , K_2O 为 (242.68 ± 8.69) kg/hm^2 。大田试验的最佳施肥量与施肥模型的推荐施肥量大致相同, 验证效果较好。

3 讨 论

施肥模型是精准施肥的核心内容之一。目前施肥模型的建立主要有 3 种方法。第一种是回归函数法。如已建立的小麦施肥模型^[14,15], 早稻推荐施肥模型^[16], 小白菜施肥模型^[17]。第二种是养分平衡法。如已建立的菠菜施肥模型^[18], 基于土壤肥力的红壤旱地和水田的平衡施肥模型^[19], 土壤-作物系统水分养分模拟模型^[20], 小麦播前施氮总量和播后精确追氮的数量模型^[21], 猕猴桃目标产量(即现有养分条件下的最大产量值)与养分关系模型^[22]。第三种是人工神经网络模型。如已建立的玉米变量施肥模型^[23,24]。以上这 3 种方法各有优点和技术特点, 故所起作用有别, 同时也显示出各自的不足。回归函数法是施肥与产量或品质指标间的函数关系, 通常没有考虑土壤基础肥力的影响, 因此其应用范围受到了限制。养分平衡法中的土壤养分校正系数变异大, 常常影响了土壤供肥量的准确估算。人工神经网络模型的建立需要大量的样本对模型进行训练, 建模成本较大。本研究综合应用了回归函数法和养分平衡法两种施肥模型的建模方法, 通过测定供试土壤的养分及烟草的营养诊断, 计算供试土壤基础肥力的贡献率, 把土壤基础肥力的单位转换成与施肥量相同的单位, 进而根据所建回归函数模型的优化施肥量计算烟草生长适宜的总氮磷钾供应量(包括土壤基础肥力的供肥量和施肥量), 并以此为基础建立了氮磷钾施肥模型。

对于同一品种而言, 其需肥量是比较稳定的。当某一品种在不同的生态区种植时施肥量的不同主要是由各生态区土壤基础肥力的供肥能力不同而引起的。所以, 只要求得各主栽品种所需的养分总供应量和土壤基础肥力的贡献率, 就可以进行精准施肥。当然, 由于肥料的高效利用还受到水分等栽培措施的影响, 且所建的施肥模型中某一品种的总需肥量是在优化的栽培措施下求得的, 因此在精准施肥后还需要有相应的栽培管理措施。

所建施肥模型是建立在肥料用量与烟叶产值的回归函数之上, 虽然烟叶是按国家规定价格的等级进行收购, 但是烟叶等级的价格在年份之间还是会变动的, 因此在优化肥料用量与烟叶产值的回归函数时, 一般以试验全实施方案数目的约三分之一为较优方案, 并以此来确定相应的产值标准, 如盆栽试验的全实施方案为 625 个, 其中有 242 个方案的产值大于 2.00 元, 大田试验的全实施方案为 125 个, 其中有 42 个方案的产值大于 22000 元, 因此确定了以盆栽试验每盆大于 2.00 元, 大田试验每公顷大于 22000 元的实施方案为较优方案。另外, 所建施肥模型是否具有普适性取决于品种的需肥量和土壤贡献

率的计算。由于所建模型只在一个地点进行大田验证, 因此在更多的烟区验证并完善该模型是下一步的研究工作。

4 结 论

建立了氮、磷、钾肥及水分这四因子与烟草产值的回归函数模型, 并对模型进行了优化, 结果表明, 盆栽试验适宜的氮肥施用量为每株 4.85~5.45 g 纯氮, 施磷量 (P_2O_5) 为每株 7.68~8.64 g, 施钾量 (K_2O) 为每株 16.17~17.95 g, 土壤相对含水率为 75.8%~80.5%。

根据土壤基础肥力的贡献率及回归模型的优化施肥量, 建立了烟草氮磷钾的施肥模型, 并对施肥模型进行了大田试验的验证。由施肥模型计算的氮磷钾肥推荐施用量分别为 39.30~44.16 kg/hm^2 , 64.30~72.34 kg/hm^2 , 232.77~258.41 kg/hm^2 , 与大田试验的最佳施肥量纯氮 (42.86 ± 7.49) kg/hm^2 , P_2O_5 为 (65.09 ± 12.58) kg/hm^2 , K_2O 为 (242.68 ± 8.69) kg/hm^2 的结果大致相同。

[参 考 文 献]

- [1] 姜培坤, 徐秋芳. 施肥对雷竹林土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 263-256.
Jiang Peikun, Xu Qiufang. Effects of fertilization oil soil active organic carbon under *Phyllostachys praecox* stand[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 253-256. (in Chinese with English abstract)
- [2] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 应用 DNDC 模型分析施肥和翻耕方式变化对旱田土壤 N_2O 释放的潜在影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 917-922.
Xu Wenbin, Liu Weiping, Liu Guangshen. Potential effect of fertilizing and tilling on N_2O emission from upland soils analyzed by DNDC model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(6): 917-922. (in Chinese with English abstract)
- [3] 肖 玉, 谢高地, 鲁春霞, 等. 施肥对稻田生态系统气体调节功能及其价值的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(4): 577-583.
Xiao Yu, Xie Gadi, Lu Chunxia, et al. The impact of urea amendments on atmospheric gas regulation services in rice paddy ecosystems and their valuation[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2005, 29(4): 577-583. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003, 142-145.
Liu Guoshun. Tobacco cultivation[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003, 142-145. (in Chinese)
- [5] 刘国顺, 叶协锋, 王彦亭, 等. 不同钾肥施用量对烟叶香气成分含量的影响[J]. 中国烟草科学, 2004, (4): 1-4.
Liu Guoshun, Ye Xiefeng, Wang Yanting, et al. Effect of different potassium application rates on the contents of aroma constituents in flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2004, (4): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [6] McKee C G, Aycocock M K Jr. Effects of phosphorus rate on performance tobacco of Maryland tobacco cultivars[J]. Tobacco Science, 1997, 41(1): 5-9.
- [7] Rideout J W, Gooden D T, Fortnum B A. Influence of nitrogen application rate and tobacco method on yields and

- leaf chemistry of tobacco grown with drip irrigation and plastic mulch[J]. *Tobacco Science*, 1998, 42(2/3): 46—51.
- [8] Maw B W, Stansell J R, Mullinix B G. Curves describing the growth of flue-cured tobacco under soil-water stress[J]. *Tobacco Science*, 1998, 42(4): 73—81.
- [9] 汪耀富, 孙德梅, 李群平, 等. 有机肥与无机肥配施及灌水对烤烟养分含量及产量、品质的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2003, 37(7): 237—252.
Wang Yaofu, Sun Demei, Li Qunping, et al. Effect of irrigation and combining application of organic-mineral fertilizers on content of nutrients and yield and quality of flue-cured tobacco[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2003, 37(7): 237—252. (in Chinese with English abstract)
- [10] 汪耀富, 高华军, 刘国顺, 等. 氮、磷、钾肥配施对烤烟化学成分和致香物质含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 76—81.
Wang Yaofu, Gao Huajun, Liu Guoshun, et al. Effects of combining application of N, P, K fertilizers on chemical components and content of aroma constituents in flue-cured tobacco leaves [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1): 76—81. (in Chinese with English abstract)
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39—60, 79—57, 99—107.
Bao Shidan. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 39—60, 79—57, 99—107. (in Chinese)
- [12] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 100—105.
Tang Qiyi, Feng Mingguang. *Utility of Statistics Analysis and Its DPS Data Processing System*[M]. Beijing: Science Press, 2002: 100—105. (in Chinese)
- [13] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003, 146—147.
Wang Ruixin. *Tobacco chemistry*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003, 146—147. (in Chinese)
- [14] David Makowski, Daniel Wallach, Jean-Marc Meynard. Models of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat[J]. *Agron J*, 1999, 91: 377—385.
- [15] Terry L Kastens, John P Schmidt, Kevin C Dhuyvetter. Yield models implied by traditional fertilizer recommendations and a framework for including nontraditional information[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, 67: 351—364.
- [16] 施建平, 鲁如坤, 时正元, 等. Logistic 回归模型在红壤地区早稻推荐施肥中的应用[J]. *土壤学报*, 2002, 39(6): 853—862.
Shi Jianping, Lu Rukun, Shi Zhengyuan, et al. Application of logistic regression for early rice recommended fertilization in red soil area[J]. *Acta Pedoidgica Sinica*, 2002, 39(6): 853—862. (in Chinese with English abstract)
- [17] 柯庆明, 林文雄, 黄珍发, 等. 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
Ke Qingming, Lin Wenxiong, Huang Zhenfa, et al. Simulation on the mathematical model of balanced fertilization in Pak-chie vegetable crop[J]. *Chinese Journal of Eeo-Agriculture*, 2005, 13(1): 119—121. (in Chinese with English abstract)
- [18] 阮云泽, 孙桂芳, 唐树梅. 土壤养分状况系统研究法在菠菜平衡施肥上的应用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(4): 530—535.
Ruan Yunze, Sun Guifang, Tang Shumei. Application of ASI systematic approach on balanced fertilization of spinach[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(4): 530—535. (in Chinese with English abstract)
- [19] 孙波, 严浩, 施建平, 等. 基于组件式 GIS 的施肥专家决策支持系统开发和应用[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(4): 75—79.
Sun Bo, Yan Hao, Shi Jianping, et al. Development and application of fertilization decision-making supporting systems based on ComGIS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(4): 75—79. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈研, 胡克林, 冯凌, 等. 基于土壤—作物系统模拟模型的冬小麦田间水氮优化管理[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6): 55—60.
Chen Yan, Hu Kelin, Feng Ling, et al. Optimal management of water and nitrogen for winter wheat based on simulation model in soil-plant system in agricultural field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(6): 55—60. (in Chinese with English abstract)
- [21] 马新明, 张娟娟, 席磊, 等. 基于叶面积指数 (LAI) 的小麦变量施氮模型研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 22—26.
Ma Xinming, Zhang Juanjuan, Xi Lei, et al. Variable nitrogen fertilization model of wheat based on LAI[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(2): 22—26. (in Chinese with English abstract)
- [22] 朱红春, 张蕾, 刘海英, 等. 基于 GIS 的猕猴桃土壤养分评价与施肥建议模型研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6): 194—198.
Zhu Hongchun, Zhang Lei, Liu Haiying, et al. Soil nutrient evaluation and recommended model for Chinese gooseberry fertilization based on GIS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(6): 194—198. (in Chinese with English abstract)
- [23] 马成林, 吴才聪, 张书慧, 等. 基于数据包络分析和人工神经网络的变量施肥决策方法研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 152—155.
Ma Chenglin, Wu Caicong, Zhang Shuhui, et al. Decision making method for variable rate fertilization based on data envelopment analysis and artificial neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(2): 152—155. (in Chinese with English abstract)
- [24] 谭宗琨. BP 人工神经网络在玉米智能农业专家系统中的应用[J]. *农业网络信息*, 2004, (10): 9—11.
Tan Zongkun. Application of the BP artificial neural network to the corn intelligent agriculture expert system[J]. *Agriculture network information*, 2004, (10): 9—11. (in Chinese with English abstract)

Favorable soil moisture and fertilization model for tobacco cultivation

Chen Yiqiang¹, Liu Guoshun^{1*}, Xi Hong'ang², Zhang Caixia¹

(1. Tobacco College, Henan Agricultural University, National Tobacco Cultivation and Physiology and Biochemistry Research Center, Zhengzhou 450002, China;

2. Tobacco Company of Nanyang City, Nanyang 473000, China)

Abstract: This study was conducted to provide a quantitative fertilization model for producing high quality tobacco leaves and reducing environmental pollution and the quality decline of tobacco leaves resulted from over-fertilization. A mathematic model for the relations of tobacco output value with nitrogen, phosphorus, potassium and water factors was established by the potted experiment. The interaction among factors was analyzed, the model was optimized, and the contribution ratios of soil nitrogen, phosphorus, and potassium were calculated. Furthermore, a fertilization model was developed and tested in a field experiment. Results show that the optimum fertilization amounts of pure nitrogen, P₂O₅, K₂O are 4.85-5.45 g, 7.68-8.64 g, 16.17-17.95 g, respectively. The favorable soil moisture is 75.8%-80.5% in potted experiment. The recommendation amounts of pure nitrogen, P₂O₅, K₂O based on fertilization model are 39.30-44.16 kg/hm², 64.30-72.34 kg/hm², 232.77-258.41 kg/hm², which coincide with the results of field experiment. The optimum fertilization amounts of pure nitrogen, P₂O₅, K₂O are (42.86 ± 7.49) kg/hm², (65.09 ± 12.58) kg/hm², (242.68 ± 8.69) kg/hm².

Key words: tobacco, fertilization model, fertilizer, soil moisture