植物营养与肥料学报 2013,19(3):632-643
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0313

基于烟叶品质指数的氮、磷、钾施肥模型

陈义强[1,2], 刘国顺[1*], 习红昂[3]
(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,河南郑州 450002;
2 福建中烟工业有限责任公司技术中心,福建厦门 361022; 3 南阳市烟草公司,河南南阳 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造成的环境污染及烟叶品质下降为目的。通过盆栽及大田回归组合试验,对烟草栽培中的氮、磷、钾肥因子与烟草品质的关系进行研究。采用层次分析法(AHP)确定了各品质指标的权重,通过隶属函数对各处理烤后烟叶的内在品质进行模糊综合评价,以模糊综合评价的总得分为品质指数,建立了氮、磷、钾施肥量与品质指数的回归方程,并对回归方程进行优化。结果表明,盆栽试验的适宜肥料施用量为 N 4.51～6.14 g/pot,P_2O_5 6.48～10.48 g/pot,K_2O 20.31～28.60 g/pot。在回归方程优化的基础上以盆栽试验结果建立了包含土壤基础肥力贡献率和烟草品种需肥量等参数的烟草氮、磷、钾施肥模型,并以大田试验的结果对模型进行了验证。结果表明,施肥模型计算的氮、磷、钾肥最佳推荐量为 N 54.22 kg/hm^2,P_2O_5 95.85 kg/hm^2,K_2O 347.26 kg/hm^2,与大田试验的优化施肥量大致相同。

关键词: 烟草; 品质指数; 施肥模型
中图分类号: S572.062; S11$^+$4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)03-0632-12

Fertilization model of nitrogen, phosphorus and potassium based on quality index of tobacco leaves

CHEN Yi-qiang[1,2], LIU Guo-shun[1*], XI Hong-ang[3]
(*1 College of Tobacco Science, Henan Agricultural University/ National Tobacco Cultivation and Physiology and Biochemistry Research Center, Zhengzhou 450002, China; 2 China Tobacco Fujian Industrial Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361022, China; 3 Tobacco Company of Nanyang City, Nanyang, Henan 473000, China*)

Abstract: This study was conducted to provide a quantitative fertilization model for high quality tobacco leaves production and low environmental pollution resulted from over-fertilization. A pot and a field experiment with the regression unitized design were carried out to study the effects of N, P and K fertilizers on internal quality indexes in flue-cured tobacco leaves. Tobacco leaf inherent quality in the experiment was scored by the fuzzy comprehensive evaluation, and weights of tobacco quality indexes were identified by the analytic hierarchy process (AHP). Regression equations of the relation of the tobacco quality index to nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer were established basing on the fuzzy comprehensive evaluation and then were optimized. The results showed that the optimal application amounts of N, P and K fertilizers in the pot experiment were N 4.51-6.14 g/pot, P_2O_5 6.48-10.48 g/pot, K_2O 20.31-28.60 g/pot. The fertilization model of the nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers containing the soil fertility contribution rate, tobacco cultivars and other parameters were developed based on the optimization of the regression equation and verified by the field experiment. The results showed that the recommended amounts based on the fertilization model were N 54.22 kg/ha, P_2O_5 95.85 kg/ha, K_2O 347.26 kg/ha, which were in concert with the recommended amounts from the field experiment.

Key words: tobacco; quality index; fertilization model

收稿日期: 2012-06-21 **接受日期:** 2013-01-24
基金项目: 烟草行业烟草栽培重点实验室项目(TCKL06001); 国家烟草专卖局南阳优质烟生产科技示范基地建设项目(110200401004)资助。
作者简介: 陈义强(1978—),男,福建漳平人,博士,农艺师,主要从事烟草栽培生理与精准农业研究。E-mail: tanhai575@163.com
* 通信作者 E-mail: liugsh@371.net

作物施肥模型的应用使农业研究与生产活动越来越具有动态化、精确化和数量化的特点[1-2]。近十几年以来，各种作物施肥模型在机理研究上不断深入，涉及领域不断拓展，在农业实践活动中得到了越来越普遍的应用，在解释现象、发现规律，预测预防、监测评估等方面已显现出其特有的优势[3-11]。特别是随着精准农业的兴起，作物施肥模型作为精准农业体系的重要内容，成为精准农业中决策支持系统的基础和精准农业完成量化的关键，更是备受关注。

氮、磷、钾肥是烟草栽培中最为关键的三大营养元素。自 80 年代以来，我国烟草工作者在施肥方面开展了大量有针对性的工作，取得了重要研究成果。但是，由于受多种因素的影响，当前我国烤烟施肥技术还存在许多问题和不足。如以烟叶的外观质量和产值为标准作为判断施肥效果好坏的依据；还未实现烟草需肥与土壤供肥的动态平衡；仍以经验施肥为主，缺乏科学可靠的量化施肥依据等。随着烟草农业现代化的发展和精准农业的兴起，传统农业生产中的粗放施肥方式已无法满足优质烟叶生产的需要，基于施肥模型的精准施肥技术正日益受到重视，有关烟草施肥模型的研究也就成为了当前的热点，一些研究也相继展开。如陈伟强等通过目标产量法建立了烟草施肥模型[12]；陈义强等通过回归函数法建立了氮、磷、钾肥与烟叶产值的回归模型[13]；陈义强等在氮、磷、钾肥与烟叶产值回归模型的基础上，建立了基于土壤基础肥力贡献率的施肥模型[14]。目前，有关烟草施肥模型的研究还不多，且这些模型基本上都是以烟叶的产量或产值为标准来判断施肥效果的好坏，基于烟叶品质指数的施肥模型鲜见报道。然而，烟叶品质是个十分复杂的概念，仅以产量或产值为标准作为判断施肥效果好坏的依据所建立的施肥模型在精确度方面还不够，根据该模型确定的施肥量还无法充分发挥烟叶的最佳品质。为此，以烟叶的综合品质为判断施肥效果的标准并依此建立烟草施肥模型已是当前烟草农业现代化和烟草精准栽培中急需解决的问题。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于河南省南阳市方城县清河乡金叶园（南阳市烟草研究所）。地理位置位于东经 112°54′，北纬 33°15′。属于平原地带，四季气候变化明显。本试验于 2007 年在金叶园内选取一个长方形典型地块作为研究对象。所选烟田地势平整，上一年度种植烟草，田间施肥量均匀一致，烟草田间长势较为整齐一致，烟叶采收后闲置。试验地南北长 65 m、东西宽 48 m。

1.2　试验设计

以盆栽为施肥模型的建模试验，以大田为施肥模型的验证试验，均采用回归组合试验设计，分氮、磷、钾三个因素，每个因素各设五个水平，按施肥量从低到高分别为 −2、−1、0、+1、+2 水平。各处理的具体施肥方案见表 1。各肥料的零水平参考 2006 年试验结果按 $N:P_2O_5:K_2O$ 为 1∶2∶5 的比例施肥[13-14]，盆栽和大田试验各因素各水平的具体施肥量见表 2。

表 1　回归组合试验设计方案

Table 1　The regression unitized design in the experiment

编号 Coder	氮水平 N level	磷水平 P level	钾水平 K level
1	1	1	1
2	1	1	−1
3	1	−1	1
4	1	−1	−1
5	−1	1	1
6	−1	1	−1
7	−1	−1	1
8	−1	−1	−1
9	−2	0	0
10	2	0	0
11	0	−2	0
12	0	2	0
13	0	0	−2
14	0	0	2
15	0	0	0
16	−2	−2	−2

表2 各因素各水平的施肥量

Table 2 The fertilization of factors at different levels

研究方法 Study way	因素 Factor	-2水平 -2 level	-1水平 -1 level	0水平 Zero level	+1水平 +1 level	+2水平 +2 level
盆栽试验 Pot experiment (g/pot)	N	0	2.5	5	7.5	10
	P_2O_5	0	5	10	15	20
	K_2O	0	12.5	25	37.5	50
大田试验 Field experiment (kg/hm^2)	N	0	26.25	52.5	78.75	105
	P_2O_5	0	52.5	105	157.5	210
	K_2O	0	131.25	262.5	393.75	525

1.2.1 盆栽试验 盆栽试验于2007年在金叶园遮雨蓬内进行,供试品种为云烟87。土壤为黄褐土,土壤有机质含量11.18 g/kg,全氮0.79 g/kg,全磷0.39 g/kg,全钾15.82 g/kg,碱解氮65.01 mg/kg,速效磷24.08 mg/kg,速效钾75.56 mg/kg,pH值7.18。试验所用盆钵高40 cm,盆口直径50 cm,盆底直径45 cm。每个盆钵装土35 kg,每盆移栽1棵烟苗。移栽时间为5月9日。试验中前14号处理和第16号处理每个处理种6盆,第15号处理种18盆,共16个处理,种植108盆。试验所施肥料为KNO_3(AR)、K_2SO_4(AR)、KH_2PO_4(AR)、$NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$(AR)、硝铵(含氮30%),其中施肥总量的70%作基肥,30%作追肥,追肥以钾肥为主。9月份采取烤后所有烟叶样品,计算各处理烟叶产量和产值,之后将所有烟叶样品粉碎过0.25 mm筛,用于各指标的测定。

1.2.2 大田试验 大田试验地土壤为黄褐土,供试土壤有机质含量11.67 g/kg,全氮0.88 g/kg,全磷0.42 g/kg,全钾21.68 g/kg,碱解氮68.41 mg/kg,速效磷18.22 mg/kg,速效钾77.10 mg/kg,pH值7.12。2007年3月7日(施肥前)以16 m×5 m的网格进行取样,共取39个土壤样品。取样时在网格中心点2 m范围内取多点土样混合而成,并以网格中心点位置表示取样位置,所有样品均取自0—20 cm土层。土样风干后过0.25 mm筛,用于土壤有机质、pH值、氮、磷、钾等指标测定。试验地面积为0.312 hm^2,小区面积70 m^2,设保护行,共16个处理,39个小区,其中第1至14号处理和第16号处理每个处理设2个小区,第15号处理设9个小区。供试品种为云烟87,移栽时间为4月29日。试验所施肥料为烟草专用复合肥(氮:磷:钾比例为10:10:20)、硝铵(含氮30%)、$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$(含P_2O_5 12%)、K_2SO_4(含K_2O 50%)、KNO_3(含N 13%,含K_2O 45%),其中70%作基肥,30%作追肥。烟田灌溉方式为喷灌。9月份取烤后所有烟叶样品,计算各处理烟叶产量和产值,之后从各处理烟叶中挑选2 kg能代表各处理总体水平的烟叶样品,粉碎,过0.25 mm筛,用于各项化学成分分析。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤养分 有机质用重铬酸钾容量法测定;全氮用FOSS Kjeltec 2300全自动定氮仪测定,回收率为99.31%;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;水解氮用碱解扩散法测定;速效磷用$NaHCO_3$浸提—分光光度计比色法测定;速效钾用乙酸铵提取—火焰光度法测定;pH值用电位法测定[15-16]。

1.3.2 烟叶常规化学成分 水溶性总糖、还原糖、烟碱、氯离子用荷兰SKALAR San++连续流动分析仪测定[17-18];总氮用FOSS Kjeltec 2300全自动定氮仪测定,回收率为99.31%;钾用干灰化-ICP-OES(美国瓦里安的VISTA-MPX CCD Simultaneous ICP-OES)法测定[15-16]。

1.4 数据处理与分析方法

用DPS、SPSS10.0软件进行数据统计与分析。

1.4.1 层次分析法 层次分析法(Analytic hierarchy process,AHP)是一种定性与定量相结合的分析方法,是处理某些难以完全用定量法分析复杂问题的一种有力手段。该方法的突出特点是可以将复杂的问题分解成若干个层次,然后对各层次进行分析,并可将人的主观判断和定性分析用数量形式表达和处理[19-21]。由于层次分析是定性分析与定量分析相

结合的多目标决策的分析方法，因而用该方法确定烟叶品质综合评价中指标的权重更为合理。

1）判断矩阵　判断矩阵就是由相关专家分析判断或根据专业知识判断各层因素相对于上一层因素的重要程度，用相应的标度值表示出来的矩阵形式。很明显，相对于某一层次因素而言，下一层次各因素之间重要性程度各不相同，为了表示出重要性程度的不同，层次分析法引入 1～9 标度法[19]。1～9 位整数及其倒数（标度 a_{ij}）表示的含义（C）为：1—C_i 与 C_j 的影响相同；3—C_i 比 C_j 的影响稍强；5—C_i 比 C_j 的影响强；7—C_i 比 C_j 的影响明显地强；9—C_i 比 C_j 的影响绝对地强；2,4,6,8—C_i 与 C_j 的影响之比在上述两个相邻等级之间；1/2，1/3，…，1/9—C_j 与 C_i 的影响之比为以上 a_{ij}的互反数。

2）相对权重向量　采用特征根法确定相对权重向量。依据层次结构、评价要素设置和构造各层次元素间的两两比较判断矩阵，计算判断矩阵的特征根和特征向量。计算对于上一层某元素有联系的各元素的重要性次序的权值，它是该层元素对于上层所有元素重要性总排序的基础，满足 $BW = \lambda_{max}W$ 的特征根与特征向量。式中 B 为判断矩阵，W 为对应于 λ_{max} 的正规特征向量，BW为判断矩阵与正规特征向量的乘积，λ_{max} 为 B 的最大特征根，W 的分量 Wi 即为元素 Bi 单排序的权值[19,22-25]。

3）判断矩阵的一致性检验　所谓一致性，即判断矩阵 A 具有 $a_{ij} = a_{ik}/a_{ki}(i,j,k=1,2,\cdots,n)$。若完全一致，则 $\lambda_{max} = n$，其余特征根为零。但实际上不可能达到完全一致，而只要满足 λ_{max} 稍大于 n，其特征根趋近于零，即认为达到满意的一致性。在层次分析法（AHP）法中，引用 CI 作为度量判断矩阵偏离一致性指标，$CI = (\lambda_{max} - n)/(n-1)$。

以 CI 与判断矩阵的平均随机一致性指标 RI 的比值 CR 作为其一致性指标，CR = CI/RI，对于 1，2 阶判断矩阵，RI 只是形式上的，因为 1、2 阶判断矩阵总具有完全一致性，当阶数大于 2 时，若 CR < 0.10，则认为判断矩阵具有满意的一致性，否则需调整[19,21]。RI 各阶数值见表 3[19,26]。

表 3　随机一致性指标

Table 3　The random coincidence indicator

阶数 Grade(n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI 值 RI value	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54	1.56	1.58	1.59

1.4.2 模糊综合评价　采用隶属函数法进行模糊综合评价。

1）建立各指标相应的隶属函数　在烟叶的常规化学成分评价中，一般认为每个指标都有一个最适宜的含量值。若某一指标的值越高对烟叶的品质越有利，则以该指标在本次试验中出现的最高值为最适宜的含量值，若某一指标的值越低对烟叶的品质越有利，则以该指标在本次试验中出现的最小值为最适宜的含量值[27]。本文中水溶性总糖的最适宜含量值为 20%，还原糖为 15%，总氮为 2.5%，烟碱为 2%，糖氮比为 8，氯为 0.3%[27-31]。钾、钾氯比和产值 3 个指标的最适宜的含量值用它们中的最高值来表示，最后按以下隶属函数计算各指标的得分[27]。

$$S_{ij} = 10 \times \left(1 - \frac{|p_j - x_{ij}|}{MAX(|p_j - x_{ij}|)}\right)$$

式中：S_{ij}指第 i 个试验处理第 j 指标的得分；P_j 指第 j 指标最适宜的含量值；X_{ij} 指第 i 个试验处理第 j 指标的含量；$MAX(|p_j - x_{ij}|)$ 指数组中的最大值。

2）综合评价总得分的计算　总得分 TS 按下式计算[27]。

$$TS = \sum_{j=1}^{m} S_{ij} \times N_j$$

式中：S_{ij} 指第 i 个试验处理第 j 指标的得分；N_j 指第 j 指标的权重；m 指有 m 个指标。

2　结果与分析

2.1　各处理烤后烟叶内在品质的模糊综合评价

由于产值带有较强的主观性，不能完全反应烟叶的品质，因此对试验各处理烤后烟叶的内在品质进行模糊综合评价，以模糊综合评价的得分作为品质指数，建立品质指数与施肥量的经验模型。

2.1.1 建立评判因素集　以产值、水溶性总糖、还原糖、总氮、烟碱、钾和氯 7 个指标作为评判因

素集。

2.1.2 采用层次分析法(AHP)确定权重

1) AHP综合评价模型结构的建立　根据烟叶品质指标之间的相互关联影响以及层次隶属关系,建立烟叶内在品质综合评价模型结构图(图1)。该综合评价模型的层次结构分为4层:第1层为目标层(O),为烟叶综合品质;第2层为准则层(C),为影响烟叶品质的m个因子,记为 $C=(C_1,C_2,\cdots,C_m)$=(产值,糖氮指标,钾氯指标),m=3;第3层为子准则层(D),为准则层 C_m 下细分的n个因子,记为 C_1、C_2 和 C_3,$C_2=(D_1,D_2,D_3,D_4,D_5)$=(水溶性总糖,还原糖,总氮,烟碱,糖氮比),$C_3=(D_6,D_7,D_8)$=(钾,氯,钾氯比),n=8;第4层为方案层(P),为k个试验处理,记为 $P=(p_1,p_2,\cdots,p_{16})$,k=16。

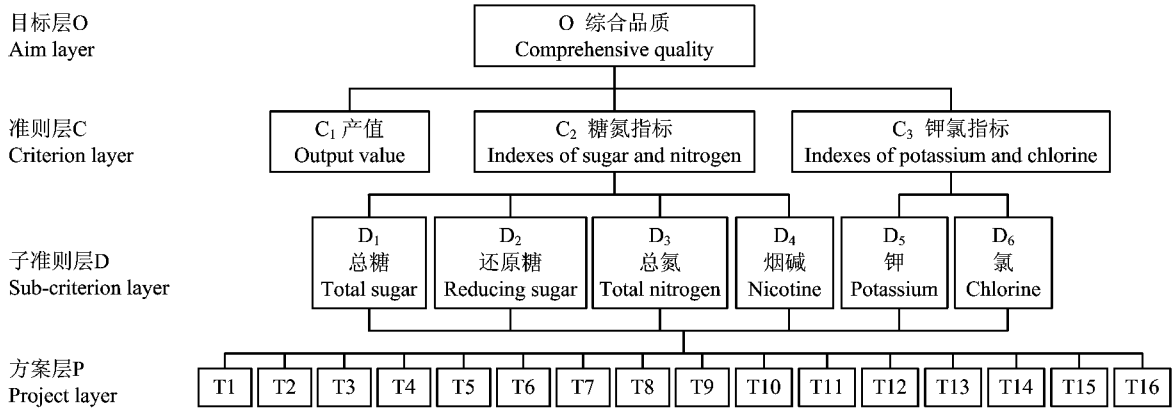

图1　烟叶内在品质综合评价层次递阶结构

Fig.1　Integrative evaluation hiberarchy chart of the tobacco internal quality

2) 构造判断矩阵　从图1可以看出,烟叶综合品质是一个具有4层指标的递阶层次结构。本文采用1～9比例标度法对以上层次模型构造判断矩阵。根据对各指标相对重要性程度的判断决策打分,得出目标层O相对于准则层 C_1、C_2、C_3(见表4),C_2、C_3 相对于 D_i 的判断矩阵(见表5和表6)。由此计算出各指标的权重值,形成评价的基础。

3) 相对权重向量确定　根据所构造的判断矩阵计算矩阵最大的特征根 λ_{max} 及相应的特征向量,然后对特征向量进行归一化处理,求出各个决定因素的权重 $W=(w_1,w_2,w_3,\cdots,w_i)$,见表4、表5和表6。

4) 判断矩阵的一致性检验　为保证结论的可靠性、合理性,有必要对判断矩阵进行一致性检验。由表4、表5和6可以看出,判断矩阵O－C中CR=0<0.10,判断矩阵 C_2－D中CR=0.0337<0.10,判断矩阵 C_3－D中CR=0<0.10,可见判断矩阵的一致性检验是满意的,说明建立的3个判断矩阵是合理的。

5) 各层次因素相对于目标层(O层)组合权重值的计算　根据 $w^k=w^k\cdot w^{k-1}\cdots w^2$ 可以得到D层指标相对于O层的组合权重值(表7)。

表4　判断矩阵O－C及一致性检验

Table 4　Judgment matrix of O－C and consistency check

O综合品质 Comprehensive quality	C_1 产值 Output value	C_2 糖氮指标 Index of sugar and nitrogen	C_3 钾氯指标 Index of potassium and chlorine	ω_i 权重 Weight
C_1 产值 Output value	1	3	3	0.6
C_2 糖氮指标 Index of sugar and nitrogen	1/3	1	1	0.2
C_3 钾氯指标 Index of potassium and chlorine	1/3	1	1	0.2
$\lambda_{max}=3.000$, CI=0, RI=0.58, CR=0<0.10				

表 5　判断矩阵 C_2-D 及一致性检验

Table 5　Judgment matrix of C_2-D and consistency check

C_2 糖氮指标 Index of sugar and nitrogen	D_1 总糖 Total sugar	D_2 还原糖 Reducing sugar	D_3 总氮 Total nitrogen	D_4 烟碱 Nicotine	ω_i 权重 Weight
D_1 总糖 Total sugar	1	1	1	1/3	0.1667
D_2 还原糖 Reducing sugar	1	1	1	1/3	0.1667
D_3 总氮 Total nitrogen	1	1	1	1/3	0.1667
D_4 烟碱 Nicotine	3	3	3	1	0.5000
$\lambda_{max}=4.00$, CI = 0, RI = 0.9, CR = 0 < 0.10					

表 6　判断矩阵 C_3-D 及一致性检验

Table 6　Judgment matrix of C_3-D and consistency check

C_3 钾氯指标 Index of potassium and chlorine	D_5 钾 Potassium	D_6 氯 Chlorine	ω_i 权重 Weight
D_5 钾 Potassium	1	3	0.75
D_6 氯 Chlorine	1/3	1	0.25
$\lambda_{max}=2.00$, CI = 0, RI = 0			

表 7　各评价指标最终权重表

Table 7　Final weights of the indexes

评价指标 Evaluation index	C_1 $W_1=0.6$	C_2 $W_2=0.2$	C_3 $W_3=0.2$	最终权重 Finally weight
产值 Output value	0.6			0.6000
总糖 Total sugar (TS)		0.1667		0.0333
还原糖 Reducing sugar (RS)		0.1667		0.0333
总氮 Total nitrogen(TN)		0.1667		0.0333
烟碱 Nicotine (Nc)		0.5000		0.1000
钾 Potassium (K)			0.75	0.1500
氯 Chlorine (Cl)			0.25	0.0500

2.1.3 确定模糊综合评价的标准　分别赋予每个评价指标 10 分,得分越高则品质越好[27]。

2.1.4 各施肥处理烟叶化学品质综合评价的结果　按以上的隶属函数及各指标的权重计算各施肥处理烟叶总得分 TS(见表 8),总得分越高的烟叶则品质越好。

2.2　基于施肥量与品质指数的回归方程建立及优化

以模糊综合评价的总得分为品质指数,建立施肥量与品质指数的回归方程,并对回归方程进行优化。在回归方程优化的基础上以盆栽试验的结果建立烟草氮、磷、钾的施肥模型,并以大田试验的结果对施肥模型进行了验证。

2.2.1 回归方程的建立　以二次多项式回归进行分析,建立盆栽试验氮、磷、钾肥与品质指数的回归方程,以多因子及平方项逐步回归进行分析,建立大田试验氮、磷、钾肥与品质指数的回归方程。所建 2 个回归方程如下:

表8 各施肥处理烟叶总得分

Table 8 Final scores of all fertilization treatments

处理 Treatment No.	盆栽试验 Pot experiment	大田试验 Field experiment
1	5.994	8.355
2	5.176	5.101
3	6.635	7.642
4	7.605	4.721
5	5.130	7.397
6	6.509	6.458
7	4.982	6.611
8	7.385	6.066
9	3.285	3.928
10	5.387	5.266
11	4.877	5.059
12	5.873	6.386
13	1.592	2.782
14	5.269	7.462
15	8.026	8.285
16	2.098	1.614

$$Y_{2007P} = 1.58977 + 1.17722N + 0.32904P + 0.19386K - 0.15978N^2 - 0.02956P^2 - 0.00784K^2 - 0.00309NP + 0.02265\ NK + 0.00969\ PK$$

$$Y_{2007F} = 1.37534 + 0.06676N + 0.03435P + 0.01498K - 0.00119N^2 - 0.00020P^2 - 0.00004K^2 + 0.00020NK$$

其中 Y_{2007P}、Y_{2007F}分别为盆栽条件和大田条件下试验各处理的品质指数，N、P、K 分别表示 N、P_2O_5、K_2O 的施用量，盆栽试验为 g/pot，大田试验为 kg/hm^2。

F 检验表明（见表9），所建2个方程都达显著水平，复相关系数都比较接近1，Durbin-Watson 统计量 *d* 也均接近2，说明所建2个方程的拟合性较好。

2.2.2 经验模型的优化方案　对所建立的氮、磷、钾肥与品质指数的经验模型进行优化。在试验条件约束之下，品质指数越高越好，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，而用参数估计的方法进行模型的优化[13-14]。盆栽试验中品质指数大于或等于6的方案有23个，大田试验中品质指数大于或等于5.5的方案有22个，计算这些优化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，得表10。从表10可以看出，2次试验的氮、磷、钾比例都不一样，可见，氮、磷、钾肥的施用比例并非固定不变，而应根据土壤的基础肥力进行适当调整。

表9 回归方程的检验

Table 9 Test of the regression formulas

方程 Formula	相伴概率（*P*） Associated probability	复相关系数（*R*） Multiple correlation coefficient	Durbin-Watson 统计量（*d*） Statistics of Durbin-Watson	备注 Note
$Y_{2007\ P}$	0.0151	0.9085	2.4698	2007年盆栽试验 Pot experiment
$Y_{2007\ F}$	0.0001	0.9543	2.1851	2007年大田试验 Field experiment

2.3 氮、磷、钾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[14]。据此采用以下的烟草施肥模型[14]：

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

式中：F_x 为某种养分的最佳施肥量；S_v 为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 为土壤基础肥力中该养分的贡献率；C_x 为不施某种养分时烤后中部烟叶中该养分的含量；O_x 为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。

2.3.1 土壤基础肥力贡献率（C_x/O_x）的计算　参考陈义强等的方法计算烟田土壤基础肥力的贡献

率[14]。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 11)。烤烟叶片适宜的磷含量和钾含量以全国 319 个样品的平均值表示[28]。从表 11 中可以看出,试验中土壤基础肥力氮和磷的贡献率较高,钾的贡献率较低。

表 10　施肥优化方案

Table 10　Optimum scheme of the fertilization

研究方法 Study way	肥料 Fertilizer	加权均数 Weight mean	比例 Ratio	标准误 Std. Error	下限 Lower limit	上限 Upper limit
盆栽试验 Pot experiment (g/pot)	氮 N	5.33	1.00	0.39	4.51	6.14
	磷 P_2O_5	8.48	1.59	0.97	6.48	10.48
	钾 K_2O	24.46	4.59	2.00	20.31	28.60
大田试验 Field experiment (kg/hm^2)	氮 N	54.89	1.00	4.20	46.15	63.62
	磷 P_2O_5	83.52	1.52	9.56	63.64	103.41
	钾 K_2O	310.23	5.65	25.24	257.72	362.74

注(Note): 置信水平为 0.95 The confidence level is at 0.95 level.

表 11　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 11　Contribution rates of soil N, P and K to flue-cured tobacco leaves's N, P and K contents

研究方法 Study way	不施肥种类 Absent fertilizer	烟叶养分含量(%) Nutrition in tobacco leaves	适宜值(%) Optimal value	贡献率(%) Contribution rate
盆栽试验 Pot experiment (g/pot)	氮 N	1.676 ±0.028	2.500	67.04 ±1.12
	磷 P_2O_5	0.142 ±0.006	0.265	53.58 ±2.26
	钾 K_2O	0.438 ±0.042	1.810	24.20 ±2.32
大田试验 Field experiment (kg/hm^2)	氮 N	1.992 ±0.036	2.500	79.68 ±1.44
	磷 P_2O_5	0.181 ±0.005	0.265	68.20 ±1.89
	钾 K_2O	0.630 ±0.053	1.810	34.78 ±2.93

2.3.2 供试品种适宜的总氮、磷、钾肥供应量(Sv)的计算　参考陈义强等的方法计算供试品种适宜的总氮、磷、钾肥供应量[14]。具体计算过程为: 某种养分的总供应量 = 优化施肥量/(1-土壤基础肥力中该养分的贡献率)。计算盆栽试验每盆(株)烟所需的总氮、磷、钾肥供应量,结果见表 12。由于烟草生产中株距和行距基本上是不变的,分别约为 0.5 m 和 1.2 m,推算得每公顷约种烟 16500 株,因此计算得出供试品种适宜的总氮、磷、钾供应量分别为 266.82 ± 40.80 kg/hm^2、301.42 ± 71.09 kg/hm^2、532.44 ±90.23 kg/hm^2。

2.3.3 施肥模型的验证　用大田试验对所建模型进行验证,根据上文求得的供试品种适宜的总氮、磷、钾供应量及大田试验中土壤基础肥力的贡献率(见表 11),代入上式, 某种养分的总供应量 = 优化施肥量/(1-土壤基础肥力中该养分的贡献率)]。求得氮、磷、钾肥的最佳施用量(见表 13)。由表 13 可知,由施肥模型计算的氮、磷、钾肥推荐量与大田试验的实际优化施肥量大致相同,说明验证效果较好。

表12 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 12 Optimized total supply amounts of N, P and K for the tested cutivar (Including the nutrition supplied by soil before fertilization and the mount of fertilization)

因子 Factor	每盆适宜的养分总供应量(g/pot) Optimized supply per tobacco			每公顷适宜养分总供应量(kg/hm²) Optimized supply per hectare		
	均值 Mean	下限 Lower limit	上限 Upper limit	均值 Mean	下限 Lower limit	上限 Upper limit
氮 N	16.17	13.68	18.63	266.82	225.77	307.37
磷 P_2O_5	18.27	13.96	22.58	301.42	230.33	372.51
钾 K_2O	32.27	26.79	37.73	532.44	442.10	622.56

表13 施肥模型的推荐施肥量与大田试验的最佳施肥量的比较

Table 13 Recommended amounts based on the fertilization model compare with the optimum fertilization from the field experiment

项目 Item	肥料 Fertilizer	均值 Mean	下限 Lower limit	上限 Upper limit
施肥模型的推荐施肥量(kg/hm²)	氮 N	54.22	45.88	62.46
Recommended amounts based on the fertilization model	磷 P_2O_5	95.85	73.25	118.46
	钾 K_2O	347.26	288.34	406.03
大田试验优化施肥量(kg/hm²)	氮 N	54.89	46.15	63.62
Recommended amounts from the field experiment	磷 P_2O_5	83.52	63.64	103.41
	钾 K_2O	310.23	257.72	362.74

3 讨论与结论

氮、磷、钾肥合理配施可以使烟叶化学成分协调,提高烟叶的致香物质含量,提高烟叶的产量和质量[32]。何秀成[33]研究表明,氮、磷、钾肥施用比例为1∶1.5∶3～4.5时烟叶化学成分含量较为适宜。李莎[34]等研究表明重庆市植烟区氮、磷、钾肥适宜的比例为1∶1.6∶2.5。本研究根据氮、磷、钾肥与烟叶品质指数的回归方程进行了优化施肥,结果表明,盆栽试验适宜的氮、磷、钾肥施用比例为1∶1.59∶4.59,大田试验适宜的氮、磷、钾肥施用比例为1∶1.52∶5.65,盆栽和大田试验优化施肥结果中氮、磷、钾比例不尽相同,可见,氮、磷、钾肥的施用比例并非固定不变,而应根据土壤的基础肥力进行适当调整。

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三种方法。第一种是回归函数法,如已建立的烟草施肥经验模型[13],小麦施肥模型[35-36],早稻推荐施肥模型[37],小白菜施肥模型[38]。第二种是养分平衡法,如已建立的菠菜施肥模型[39],基于土壤肥力的红壤旱地和水田的平衡施肥模型[40]。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[41-42]。以上这三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,常常会影响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,采用层次分析法(AHP)确定了各品质指标的权重,通过隶属函数对各处理烤后烟叶的内在品质进行模糊综合评价,以模糊综合评价的总得分为品质指数,建立了氮、磷、钾施肥量与品质指数的回归方程,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。由施肥模型计算的氮、磷、钾肥最佳推荐量为 N 54.22 kg/hm^2、P_2O_5 95.85 kg/hm^2、K_2O 347.26 kg/hm^2，与大田试验的优化施肥量大致相同。

烟叶质量综合评价包括外观质量、感官质量、内在质量、物理特性和安全性评价五个方面内容[29]。表征烟叶质量的品质指数也应该包含以上五个方面的内容。本文由于受研究条件的限制，所建立的品质指数仅指内在质量的品质指数，还未包括外观质量、感官质量、物理特性和安全性评价等方面内容。因此，建立表征烟叶质量的综合品质指数是进一步研究的内容。

参 考 文 献：

[1] 高亮之，金之庆，郑国清，等. 小麦栽培模拟优化决策系统（WCSODS）[J]. 江苏农业学报，2000，16（2）：25-72.
Gao L Z, Jin Z Q, Zheng G Q *et al*. Wheat cultivational simulation-optimization-decision making system (WCSODS) [J]. Jiangsu J. Agric. Sci., 2000, 16 (2): 25-72.

[2] 曹卫星. 农业信息学[M]. 北京：中国农业出版社，2005. 319-320.
Cao W X. Agricultural informatics [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. 319-320.

[3] 尚宗波，杨继武，殷红，等. 玉米生长生理生态学模拟模型[J]. 植物学报，2000，42（2）:184-194.
Shang Z B, Yang J W, Yin H *et al*. A physiological-ecological simulation model of maize of growth[J]. Acta Bot. Sin., 2000, 42 (2):184-194.

[4] 宋有洪，郭焱，李保国，等. 基于植株拓扑结构的生物量分配的玉米虚拟模型[J]. 生态学报，2003，23(11)：2333-2341.
Song Y H, Guo Y, Li B G *et al*. Virtual maize model I. biomass partitioning based on plant topological structure[J]. Acta Ecol. Sin., 2003, 23(11): 2333-2341.

[5] 宋有洪，郭焱，李保国，等. 基于器官生物量构建植株形态的玉米虚拟模型[J]. 生态学报，2003，23(12)：2579-2586.
Song Y H, Guo Y, Li B G *et al*. Virtual maize model Ⅱ. plant morphological constructing based on organ biomass accumulation [J]. Acta Ecol. Sin., 2003, 23(12): 2579-2586.

[6] 王锡平. 玉米冠层光合有效辐射三维空间分布模型的构建与验证[D]. 北京：中国农业大学博士学位论文，2004.
Wang X P. The modelling of three dimensional distribution of photosynthetically active radiation in maize canopy[D]. Beijing: PhD dissertation of China Agriculture University, 2004.

[7] Feliks M *et al*. Plant production model evaluation for the root zone water quality model (RZWQM 3.2) in Ohio[J]. Agron. J., 1999, 91: 220-227.

[8] Cavero J, Farre I, Debaeke P *et al*. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models [J]. Agron. J., 2000, 92: 679-690.

[9] Malagoli P, Laine' P, Erwan Le Deunff *et al*. Modeling nitrogen uptake in oilseed rape cv capitol during a growth cycle using influx kinetics of root nitrate transport systems and field experimental data [J]. Plant Physiol., 2004, 134: 388-400.

[10] Xie Y, Kiniry J R, Nedbalek V *et al*. Maize and sorghum simulations with CERES - maize, SORKAM, and ALMANAC under water-limiting conditions[J]. Agron. J., 2001, 93 (5): 1148-1155.

[11] Yin X, Kropff M J, Goudriaan J *et al*. A model analysis of yield differences among recombinant inbred lines in barley[J]. Agron. J., 2000, 92 (1): 114-120.

[12] 陈伟强，华一新，张世全. 基于 GIS 的烟草精准施肥配方系统研究[J]. 测绘科学技术学报，2008，25(6)：455-458.
Chen W Q, Hua Y X, Zhang S Q. Tobacco precision fertilization formula information system based on GIS[J]. J. Geom. Sci. Technol., 2008, 25(6): 455-458.

[13] 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.
Chen Y Q, Liu G S, Xi H A. Empirical model of the relation of output value to nitrogen, phosphorus, potassium and water during tobacco cultivation[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(2): 480-487.

[14] 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 Y Q, Liu G S, Xi H A *et al*. Favorable soil moisture and fertilization model in tobacco cultivation[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2009, 25(2): 42-49.

[15] 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 S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 39-60, 79-57, 99-107.

[16] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国科技出版社，1999. 45-46，146-196.
Soil Science Society of China. The analysis methods of soils and their agrochemistries[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1999. 45-46, 146-196.

[17] 刘泽春，谢卫，蔡国华，等. 连续流动法测定烟草水溶性糖的影响因素[J]. 福建分析测试，2004，13(1)：1901-1904.
Liu Z C, Xie W, Cai G H *et al*. Study on deviation source of determination of total sugars in tobacco products by continuous flow method[J]. Fujian Anal. Test., 2004, 13(1): 1901-1904.

[18] 蔡国华. 样品放置时间对连续流动法测定烟草还原糖结果的影响[J]. 闽西职业技术学院学报，2006，(2)：116-118.
Cai G H. The influence of laying-aside time of tabacco sample on determination of reduced sugar by continuous flow method[J]. J. Minxi Vocat. Tech. Coll., 2006, (2): 116-118.

[19] 韩中庚. 数学建模方法及其应用[M]. 北京：高等教育出版社，2006. 91-107，125-162.
Han Z G. Mathematical modeling method and its application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 91-107, 125-162.

[20] 蒋文伟，向其柏. 层次分析法在干旱区园林树木评选中的应用[J]. 南京林业大学学报，2000，(6)：63-67.
Jiang W W, Xiang Q B. Application of analytic hierarchy process to evaluation and selection of garden trees in arid regions[J]. J. Nanjing For. Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2000, (6): 63-67.

[21] 陈仲芳，张霖，尚富德. 利用层次分析法综合评价湖北省部分桂花品种[J]. 园艺学报，2004，31(6)：825-829.
Chen Z F, Zhang L, Shang F D. Use analytic hierchy process to appraise some osmanthus fragrans cultivars in Hubei Province [J]. Acta Hortic. Sin., 2004, 31(6): 825-829.

[22] 李双奎，谈存峰. 甘肃省农业科技进步贡献率的测算及分析[J]. 甘肃农业大学学报，2007，42(6)：143-147.
Li S K, Tan C F. Determination and analysis of contribution rate of agricultural scientific and technological progress in Gansu Province[J]. J. Gansu Agric. Univ., 2007, 42(6): 143-147.

[23] 刘遵春，包东娥，廖明安. 层次分析法在金花梨果实品质评价上的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2006，34(8)：125-128.
Liu Z C, Bao D E, Liao M A. Application of analytic hierarchy process in evaluating Jinhua pear quality[J]. J. Northwest A&F Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2006, 34(8): 125-128.

[24] 韩路，贾志宽，韩清芳，等. 应用AHP模型综合评价苜蓿生产性能的研究[J]. 草业科学，2004，21(2)：12-16.
Han L, Gia Z K, Han Q F *et al*. Application of the analytic hierarchy process to comprehensively evaluate the productive capability of thirty-one medicago sativa varieties [J]. Pratac. Sci., 2004, 21(2): 12-16.

[25] 张继权，张会，佟志军，等. 中国北方草原火灾灾情评价及等级划分[J]. 草业学报，2007，16(6)：121-128.
Zhang J Q, Zhang H, Tong Z J *et al*. Loss assessment and grade partition of grassland fire disaster in Northern China [J]. Acta Pratac. Sin., 2007, 16(6): 121-128.

[26] 万年峰，蒋杰贤，徐建祥，等. 层次分析法在上海市农田有害生物治理中的应用[J]. 生态学报，2005，25(11)：2997-3002.
Wan N F, Jiang J X, Xu J X *et al*. Application of the analytic hierarchy process to pest management in the rice fields of Shanghai City [J]. Acta Ecol. Sin., 2005, 25(11): 2997-3002.

[27] 陈义强，沈笑天，刘国顺，等. 聚类分析与模糊数学在烟叶品质综合评价中的应用[J]. 江西农业大学学报，2007，29(4)：550-556.
Chen Y Q, Shen X T, Liu G S *et al*. Comprehensive evaluation of flue-cured tobacco leaves base on cluster analysis and fuzzy mathematics [J]. Acta Agric. Univ. Jiangxiensis, 2007, 29(4): 550-556.

[28] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京：中国农业出版社，2003. 91-95，196-201，52-53，62-63，77-78，250-277，170-174，167-168，156-158.
Wang R X. Tobacco chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2003. 91-95, 196-201, 52-53, 62-63, 77-78, 250-277, 170-174, 167-168, 156-158.

[29] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京：中国农业出版社，2003. 1-3，142-179，143-145，150-151.
Liu G S. Tobacco cultivation[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2003. 1-3, 142-179, 143-145, 150-151.

[30] Broyer T C, Carlton A B, Johnson C M, Stout P R. Chlorine — a micronutrient element for higher plants[J]. Plant Physiol., 1954, 29: 526-532.

[31] 李明德，肖汉乾，汤海涛，等. 氯素营养对烤烟生长发育和产量、品质的影响[J]. 中国烟草学报，2004，10(6)：21-24.
Li M D, Xiao H Q, Tang H T *et al*. Effect of Cl nutrition on growth, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Acta Tabac. Sin., 2004, 10(6): 21-24.

[32] 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 Y F, Gao H J, Liu G S *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 Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(1): 76-81.

[33] 何秀成. 氮磷钾配施对正宁烤烟产量、品质及经济效益的影响[D]. 甘肃农业大学硕士学位论文，2009.
He X C. Effect of N, P, K fertilizer on flue-cured tobacco yield, quality and economic benefit in Zhengning[D]. Ms. thesis of Gansu Agricultural University, 2009.

[34] 李莎，高明，李常军，等. 氮磷钾配施对土壤氮素累积及烤烟产量品质的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，2007，32(6)：104-108.
Li S, Gao M, Li C J *et al*. Effects of combining application of N, P, K fertilizers on cumulation of nitrogen, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. J. Southwest China Normal Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2007, 32(6): 104-108.

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

[36] Terry L. Kastens, John P. Schmidt, Kevin C D. Yield models implied by traditional fertilizer recommendations and a framework for including nontraditional information[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2003, 67: 351-364.

[37] 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 J P, Lu R K, Shi Z Y *et al*. Application of logistic regression for early rice recommended fertilization in red soil area[J]. Acta Pedol. Sin., 2002, 39(6): 853-862.

[38] 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 Q M, Lin W X, Huang Z F *et al*. Simulation on the mathematical model of balanced fertilization in Pak-chio vegetable crop[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2005, 13(1): 119-121.

[39] 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 Y Z, Sun G F, Tang S M. Application of ASI systematic approach on balanced fertilization of spinach[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(4): 530-535.

[40] 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 B, Yan H, Shi J P *et al*. Development and application of fertilization decision-making supporting systems based on ComGIS [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2006, 22(4): 75-79.

[41] 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 C L, Wu C C, Zhang S H *et al*. Decision making method for variable rate fertilization based on data envelopment analysis and artificial neural network[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2004, 20(2): 152-155.

[42] 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 Z K. Application of the BP artificial neural network to the corn intelligent agriculture expert system[J]. Agric. Network Inform., 2004, (10): 9-11.