

大面积经济施肥的建模与施肥推荐研究*

刘光崧 沈荣明 周伟金

(中国科学院南京土壤研究所)

摘 要

本文通过在河南省封丘县进行的多年、多点田间试验,介绍了大面积经济施肥模型的建立与推荐施肥的理论和应用。研究明确应以正交多项式回归试验设计、平方根模型建立产量—肥料效应函数,以边际报酬率计算推荐施肥量。做到了可根据市场经济变化和农民的具体经济情况灵活地推荐施肥。还介绍了包括环境因子的综合建模以及适合省(市)、县和基层应用的计算机推荐施肥咨询系统。

用数学方法研究施肥与产量间的定量关系,是本世纪初由德国著名农业化学家米切里西(E. A. Mitscherlich)首先提出的,他根据微分学原理建立了第一个产量—肥料效应模型。以后,随着数学向农业化学的渗透,学者们提出了许多有关产量—肥料效应模型的研究^[1,2]。近十余年来,由于数理统计和电子计算机的普及,促使建立施肥模型的研究走向了一个新阶段。1976年,联合国粮农组织率先应用建立产量—肥料效应方程方法,在巴西和印度、印尼、菲律宾等国的大面积农田上,开展计算机推荐施肥取得了良好效果,然而当时计算机尚不普及,试验数据需集中到粮农组织总部作统一处理,同时施肥研究基本上限于单元素试验^[3]。1975至1979年间,澳大利亚农业化学家科威尔(J. D. Colwell)通过在全澳农业地区大面积开展计算机推荐施肥,使数理统计与施肥研究紧密结合,系统的发展了推荐施肥研究,做到了可同时试验多种肥料元素,限于当时的条件,也采用了集中处理试验数据的方法。以后他在澳洲和巴西的工作,进一步提出了包括环境因子的综合建模,并进行了肥料后效和轮作条件下的推荐施肥研究^[4-6],所有这些,都有效的促使应用计算机建模方法开展大面积经济施肥更趋完善。

近年来国内应用产量—肥料效应函数从事施肥研究和应用的日渐增多,北京农业大学应用二次模型在内蒙、河北、河南进行了许多研究^[7,8];西北农学院也在肥料效应函数方面做过很多工作^[9];中国农业科学院在北京、山东采用2因素、5水平重复D-饱和最优设计及回归均匀布点设计,进行了玉米氮、磷最佳施用量研究^[10];河北农业大学进行过土壤养分与施肥效应的综合建模的探讨^[11]。

本文就1984至1990年期间,我们在豫北封丘黄泛平原区,以提高中、低产田小麦产量为目的,应用普及型微机,开展根据土壤肥力和市场经济因素进行施肥建模与推荐施肥,以及建立适合省(市)、县应用的土壤肥力数据库和推荐施肥软件包等方面取得的研究结果作一报道。

一、封丘地区的土壤肥力

地处豫北的封丘县,历史上长期遭受旱、涝、盐、碱、风沙的危害,全国解放以后,特

* 本项研究的协作单位为河南省封丘县农业局,主要参加人员有董学周、张启俊、王昆等。

别是近10年来的综合治理,已使农业形势有了根本好转。目前,影响农业增产的主要矛盾是土壤贫瘠。现在全县有低产田72万亩,占耕地面积75.8%,根据对近10年来(1980—1989)封丘县粮食总产和化肥总投入量进行的统计分析,证明两者间有极好的相关($r=0.946^{**}$)^①,这表明封丘的土壤肥力十分瘠薄,要取得粮食增产,关键的措施是增施肥料。但也应当看到,封丘县化肥施用量和粮食的增产量是不成比例的,从1980—1989年的10年间,全县化肥用量的增长率平均每年为17.7%,而粮食产量的增长率平均每年为9.3%,两者的差异表明,单位肥料与所增长的粮食比例从1980年的5.6明显的下降到1989年的3.2^②。这些数字充分说明土壤肥力在不断变化,搞好科学施肥以提高化肥的增产值和利用率,是当前急需解决的问题。

表1 封丘试验田块的土壤农化性状

(1986—1989年)

	肥力状况	田块数	有效磷 P, mg kg ⁻¹	有机质 g kg ⁻¹	全氮 g kg ⁻¹	水解氮 mg kg ⁻¹	粘粒 g kg ⁻¹
平均值	低肥田	27	6.6	8.2	0.6	49.0	273
	中肥田	42	7.7	9.0	0.7	51.5	296
	高肥田	8	9.2	9.5	0.7	54.7	279
	全部	77	7.5	8.7	0.7	50.8	
最小值	低肥田	27	2.1	4.0	0.3	19.3	12
	中肥田	42	2.1	5.9	0.3	16.0	121
	高肥田	8	4.4	7.8	0.5	43.0	162
	全部	77	2.1	4.0	0.3	16.0	
最大值	低肥田	27	16.3	11.6	0.9	69.0	528
	中肥田	42	22.7	12.5	0.9	89.5	570
	高肥田	8	24.3	12.6	0.9	61.0	470
	全部	77	24.3	12.6	0.9	89.5	

注:有效磷用Olsen法测定。

表1是从封丘77个田间试验地块采集土样进行分析取得的结果,表明封丘的土壤肥力是偏低的,全氮、有机质和有效磷含量均很少,这与土壤调查得出的全县土壤缺氮少磷,但含钾比较丰富的结果一致^②,从封丘的土壤肥力状况可以说明,在当前农业生产条件下,首先对氮、磷两种肥料因素开展推荐施肥研究是有现实意义的。

二、研究方法和建模数据的确认

(一)建模类型的选择和田间试验设计

1. 建模类型的选择

推荐施肥的依据主要来自通过田间试验取得的产量—肥料效应方程,因此,选择合用的能正确表达产量肥料效应关系的模型,无疑是开展推荐施肥研究的前提。现已提出可用于定量描述施肥反应的常见的效应方程已不下十余种(表2),但是至今并无充分的理论依据,足以说明某种土壤和地区特别适用的数学模型。看来,选择适用的模型应有以下的考虑,首先

① 刘光崧等,县级农业信息系统(待发表),1990。

② 封丘县土壤普查办公室,封丘土壤,封丘县农业局印,1984。

表2 几种产量—肥料效应模型

1. $Y = b_0 + b_1 X + b_2 X^2$
2. $Y = b_0 + b_1 X^{0.75} + b_2 X^{1.5}$
3. $\log Y = b_0 + b_1 X^{0.5} + b_2 X$
4. $Y = b_0 + b_1 X^{0.5} + b_2 X$
5. $Y = b_0 + b_1 e^{b_2 x}$
6. $\log Y = b_0 + b_1 e^{b_2 x}$
7. $Y = b_0 + b_1 \{ (X - b_2) - \sqrt{(X - b_2)^2 + g} \}$
8. $Y = b_0 + b_1 \{ X - b_2 - |X - b_2| \}$
9. $Y = b_0 + b_1 e^{b_2 x^2}$

应关系的数学模型，都是一元模型，并不反映多元和多元素间的交互作用，尽管如此，但稍加分析不难发现其中的1，2，3式和4式能够较好的满足上述建模的基本要求，常被作为产量—肥料效应模型。1977年，联合国粮农组织出版的肥料数据处理软件包“DESFLEX”，主要是应用以上的1，2式和4式建立3种一元模型^[3]。粮农组织在推广推荐施肥的培训报告中，着重介绍了二次式模型(表2的1式)和平方根模型(表2的4式)在图形分析上的差异，指出了用平方根模型计算的最佳施肥量要明显地比二次式模型计算的量少^[12]。J. D. Colwell对不同模型的特性做过较详细的比较研究，明确指出平方根模型要比采用二次式模型更适合于一般推荐施肥应用^[13]。

2. 几种通用模型的优缺点分析

用平方根模型计算产量肥料效应，由于 dY/dX (Y表示产量，X表示肥料用量)在施肥量接近于零时，因施肥而增长的产量值过大，显然不符合实际也是不可取的，然而在适当增加施肥量后，这一问题就不复存在。平方根模型的突出优点，在于它在最佳施肥量附近有一个斜率变化比较小，而产量变化趋于平缓的“平台”区，这意味着在包括最佳施肥量的这一平台范围内，适当减少施肥量对产量不会有明显影响，这一特点与施肥的实际情况相符，因而对经济施肥和提高效益特别有利，应当充分加以利用。平方根模型的另一特点是，它能方便的扩展和分析处理两个以上的养分因子以及它们之间的交互作用。与平方根模型相比，二次式模型的优点是，在低施肥量范围内，产量与施肥量间有与实际相符的线性关系。其不足之处是，它不象平方根模型那样，在最佳施肥量附近有一个产量比较稳定的“平台”区，相反，它在最佳施肥量附近的曲率变化大、施肥量对产量的影响过于敏感。这点与实际不符，也给合理地计算最佳施肥量带来了困难^[1,13]。

就图形而言，表2的8式(折线模型 Broken-Stick)与其他模型有明显的区别，它由两条简单直线交叉形成最高产量及其施肥量，在两条直线中，一条的走向与表示施肥量的横座标基本上平行，另一条保持一定斜率

这种模型在使用和计算上要简单易行，并适用于不同土壤条件下进行试验。应能用标准的数理统计方法进行数据处理，即可以做标准的方差分析，易于计算最佳施肥量，同时容易扩展和分析两个以上的肥料因子，并包括分析因子之间的交互作用。其次，模型的参数项不宜太多，所计算的参数值应当是稳定的，不易受计算数据波动的干扰。此外，由于一般模型的各项参数项往往是非独立的，应当在转换成正交模型时没有困难。

表2是几种能定量地表达产量—肥料效

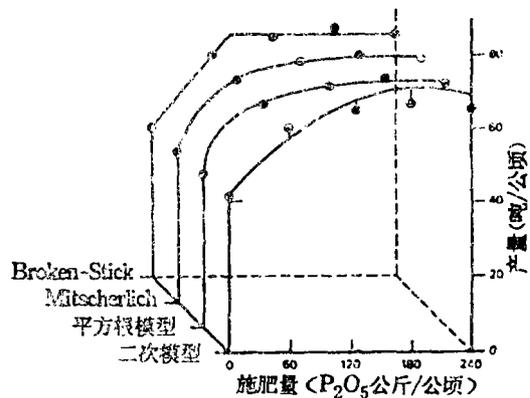


图1 几种产量—肥料效应模型图 (引自J. D. Colwell的报告)

与它相交,相交点构成了最佳施肥点,这种简单的图形分析给人以鲜明印象,而且计算方便,因而受到了大家的欢迎。它的不足之处是,用两根相交直线并不能正确地表达产量随施肥量逐渐增长应当呈现的肥效递减规律,特别是它难以应用于研究和计算具有交互作用的两个以上的肥料因子。

根据前人在选择模型方面从事的工作,以及上述对几种通用模型的优缺点分析,我们决定选用平方根模型作为本项研究的基本模型。

平方根模型的通式如下:

$$1 \text{ 式: } Y = b_0 + b_1 X^{0.5}$$

$$2 \text{ 式: } Y = b_0 + b_1 X_1^{0.5} + b_2 X_2^{0.5} + b_3 X_1^{0.5} X_2^{0.5} + b_4 X_1 + b_5 X_2$$

$$3 \text{ 式: } Y = b_0 + b_1 X_1^{0.5} + b_2 X_2^{0.5} + b_3 X_3^{0.5} + b_4 X_1^{0.5} X_2^{0.5} + b_5 X_1^{0.5} X_3^{0.5} \\ + b_6 X_2^{0.5} X_3^{0.5} + b_7 X_1 + b_8 X_2 + b_9 X_3$$

以上 1 至 3 式分别用于本文 1 种、2 种和 3 种肥料养分的试验。在安排有区组的情况下,模型尚可增加添加项,如 2 式在设置有区组时,可增加 $b_6 B$ 作为第 7 项,以便减少试验误差。

3. 田间试验设计

我们已经注意到,在设计施肥量处理水平时,要尽可能使最佳施肥量落在施肥量范围的中部;要使最高施肥量处理高于最佳施肥量处理;还要使处理水平之间保持合理的距离。确定处理的水平数也是个重要的问题,从数理统计的要求来讲,如果希望得到一条二次反应曲线,每个因子至少要安排 4 种数量水平,才能据以检验选用的二次模型是否适当^[14]。L. A. Nelson 指出,安排 3 个水平有点太少,因为拟合的程度难以估计,而且对最佳施肥量的估计很可能出现相当大的偏差,设 4—5 个水平较好^①。一般来说,选用部分因子试验设计,为了保证在方差分析时,多项式之间具有正交性,通常要求处理量之间是等间距的,但是在试验设计有空白处理,即最低施肥处理为零时,比较合适的间距比例应为 0:1:2:4,这一比例在具体应用时,还可以通过运算对其正交性进行检验(本文所附的推荐施肥软件包提供有这一功能)和调整。

为了选定适宜的施肥量处理和预测田间试验可能产生的误差,1985年首先在封丘有代表性的 5 种土壤上分别进行了田间试验。试验采用氮、磷 2 因子、4 水平、完全区组、正交多项式回归设计,2 次重复,每个试验 32 个小区。试验结果表明,除了一个点的试验发生意外的动物伤害外,4 个试验的田间试验误差(变异系数)接近百分之十,这说明在大面积上布置多点试验,采用正交不完全区组设计进一步减少小区数目是有可能的;其次,从 4 个点的结果可以估计,为保证试验要求,氮素处理的高限应大于 20 公斤, P_2O_5 的高限应大于 10 公斤。

自 1985 年以来,我们先后在封丘县近百万亩的 126 个基点上,有组织的统一进行了小麦田间肥料试验。试验一般采用氮、磷 2 因子,4 水平,不完全区组的 16 小区设计。其中 1986 年的试验略有不同,选用了氮、磷、有机肥(菜籽饼)3 因子,16 小区设计。由于试验设计均为程序安排,故各试验点的各小区位置均自动形成不同的随机排列。试验点的代码如表 3。

肥料处理水平设计列于表 4。

田间试验供试的小麦品种为陕农 7859,氮肥选用尿素,磷肥选用过磷酸钙,有机肥采用菜籽饼。为保证田间试验质量,尽可能减少其它因子的干扰,供试的小麦种子、肥料均统一购买同一批货源,各试点的播种期,播种量,播种方法及田间管理等均按统一规定进行,并

① Nelson, L. A., 1990 年访华期间在北京、南京等地的学术报告,肥料试验的试验设计和处理设计。

表3 试验点的代码

16小区, 2区组, 2因子4水平				16小区, 1区组, 2因子4水平 1因子2水平					
区组1		区组2		区组1					
N	P	N	P	N	P	O	N	P	O
0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
0	2	0	3	0	2	1	0	3	0
1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
1	3	1	2	1	3	1	1	2	0
2	0	2	1	2	0	1	2	1	0
2	3	2	2	2	3	1	2	2	0
3	1	3	0	3	1	1	3	0	0
3	2	3	3	3	2	1	3	3	0

表4 小麦试验肥料处理水平设计

(单位: 公斤/亩)

处理代码	1986—1987		1987—1988		1988—1989	
	N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅
0	0(0)*	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
1	5(1)	5(1)	7.5(1)	5(1)	7.5(1)	5(1)
2	10(2)	10(2)	15(2)	10(2)	15(2)	10(2)
3	20(4)	15(3)	30(4)	20(4)	30(4)	20(4)

* 括号内为处理间的比例。

通过督促检查保持一致。试验布置后, 组织统一检查, 以及时淘汰不合格的试验。小麦收获时, 各试点的收获物一律集中在农技站用机器脱粒、称重和测定籽粒含水量, 最后以14%的含水量标准计产。供分析的土样均在小麦播种前统一采集, 分析工作应用了常规分析方法: 全氮—半微量凯氏定氮法, 水解氮—康威皿法, 有机质—硫酸、重铬酸钾 硝化法, pH—1:2.5水提, 速效磷—Olsen法。

(二) 试验数据的确认

所有的田间试验数据均通过方差分析以确定试验误差, 再依据误差值的大小确定每个试验点的取舍。由于各试验点的平均产量不同, 宜采用变异系数, 而未采用误差均方作为决定取舍的参考量, 变异系数的计算式如下:

$$\text{变异系数}(C. V.)\% = \sqrt{\text{误差均方} / \text{试验平均产量}} \times 100\%$$

式中的误差均方项, 可通过对每个试验点的结果数据进行方差分析而求出。试验平均产量系指每个试验点各个小区的平均产量。

按照一般数理统计要求并结合具体情况, 规定凡变异系数<15%的为合格的试验, >20%的一般均淘汰, 但在15—20%之间的, 将根据情况决定取舍。试验数据根据误差大小初步确认后, 当计算推荐施肥量时, 还要结合三项检验(即根据模型计算出的推荐施肥量是否出现外推、负平方根或非降形式)进行综合考查, 以保证最后给出可信的推荐施肥量。

用于建模的数据是根据1986—1989年3年的田间试验, 总计在封丘全县范围共布置小麦试验113个, 小区1808个, 经淘汰质量不合格的试验后, 实际收获98个试验点。通过方差分析和误差检验发现其中变异系数<15%的达70个试点, >20%的有13个试验点, 变异系数在15—20%之间的为15个试验点。最后结合三项检验确定77个试验点进行建模, 其中变异系<15%的66个, 15—17%之间的9个, 17—20%的2个。

三、土壤肥力数据库和数据处理系统

(一) 土壤肥力数据库

用数据库手段管理试验数据和研究资料是一个值得重视的方法[15, 16]。为了管理好供试地区的土壤肥力信息和多年、多点的田间试验数据, 方便查询、检索和分析计算, 我们采用FOXBASE语言建立了一个完全汉化的土壤肥力数据库。现已建立的数据库有地点、试验单位、土壤理化分析、试验编码、试验设计、回归系数、趋势系数、试验产量等数据库文

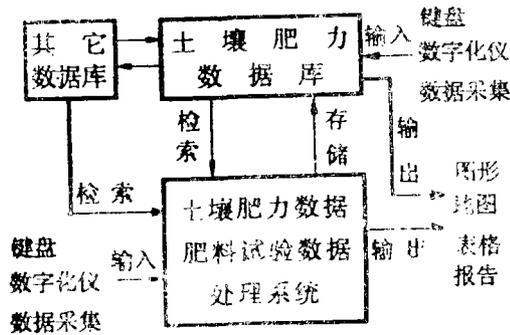


图 2 土壤肥力数据库与数据处理系统的关系图

可以以图形、地图、报表或报告形式直接输出，某些计算结果或中间运算值也可以再次重新存入土壤肥力数据库，以备在其它情况下分析应用。

(二)土壤肥力和施肥数据处理系统

土壤肥力和施肥数据处理系统是在我们开展推荐施肥研究的长时期中，结合工作需要逐步完善而形成的，实际上它已成为开展施肥建模研究不可缺少的重要手段，它的功能和应用与一般数理统计软件包有所不同，主要侧重在土壤肥力和施肥研究中的试验设计、试验数据处理以及尽可能结合实际分析问题和提供应用。在农业生产中，影响肥料效果和决定施肥的因子很多，除土壤、植物、肥料三者间的综合影响外，环境因子、市场经济条件等都需要通盘加以考虑。尤其是当施肥的元素在 2 种以上时，还涉及到元素之间的交互作用。因此，在设计数据处理系统功能时，除了安排如试验设计，数据处理，建立模型，施肥推荐以及大量试验点数据的归类综合(分综合归类、平均分类两种方法)等一些常规功能外，还增加了施肥建模的一些新方法，如包括环境因子的综合建模和轮作的施肥建模，土壤肥力数据库的查询以及为建模所需的其它计算和处理等。对施肥研究中一些重要的计算，做到了可以以二维和三维的彩色图形方式显示输出，例如等产量图、等利润图以及可旋转的施肥与产量关系三维图等。对于计算机硬件和某些必要的外部设备，主要是选用常见的通用型微机，如长城系列机，IBM PC/XT，/286，/386等。此外，在软件编写中，已做到了对上述型号微机的完全兼容。所有这些，无疑都对研究土壤肥力和施肥问题带来了很大方便。图 3 所展示的是土壤肥力数据处理软件系统的主菜单和部分一级子菜单。

为使这项推荐施肥方法容易为农业管理部门所掌握，我们根据农业生产的实际需要，在现有土壤肥力数据处理系统的基础上，进一步增加了有关施肥模型归类、施肥咨询以及多种实用性功能；改善了人机对话等操作条件，进而形成了适合省(市)和县级农业部门应用的两种软件包。适合省(市)级应用的软件包称作“施肥建模与施肥推荐”，适合县级应用的软件包称作“县级推荐施肥咨询系统”，为便于基层农技员走乡串户为农民开展咨询服务，还编写了可配套使用的廉价的便携机软件(可用黑白电视机作显示屏)，现有软件包的特点是，可不受农业地区的限制，各省、市、县农业部门都可应用。

图 4 是一个完整的推荐施肥咨询系统内部关系图，它说明了省(市)级农业管理部门、农业技术研究部门和县以下基层农业技术推广单位三者间，在开展推荐施肥工作中，有关施肥信息的获取、交换、管理以及提供咨询服务之间的互相关系。由于在整个系统中，软件和硬

件。为便于开展施肥研究和应用，还提供了可任意增减的农化专业常用数据文件。数据库本身提供有简单的统计功能，为了能对土壤肥力和肥料试验数据进行专业性深入研究，我们编写了土壤肥力和施肥数据处理系统软件^[13, 17]。方框图(图 2)显示了土壤肥力数据库与数据处理系统之间的关系。

数据处理系统能分别或综合地处理三种不同来源的数据，即各种信息可以来自土壤肥力数据库或其它数据库(例如气象、农田灌溉数据库等)，也可以直接由键盘或其它外部设备输入数据。经系统分析处理的结果

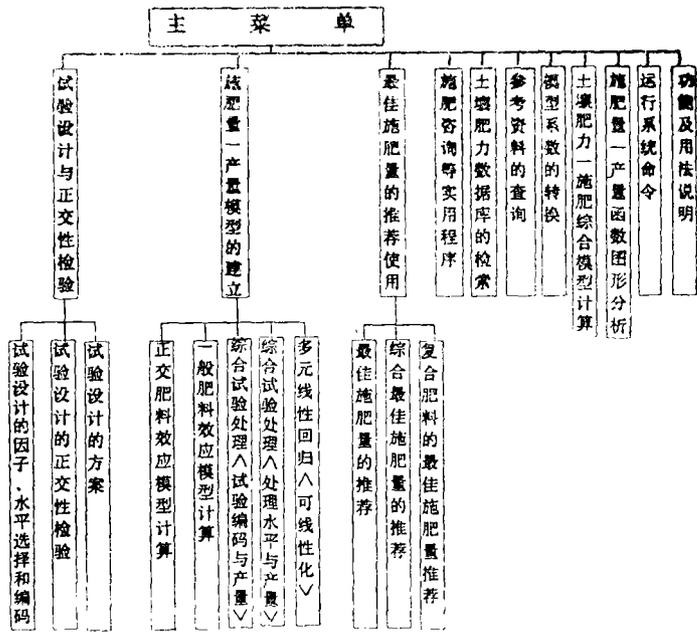


图3 土壤肥力数据处理软件系统的主菜单和部分一级子菜单

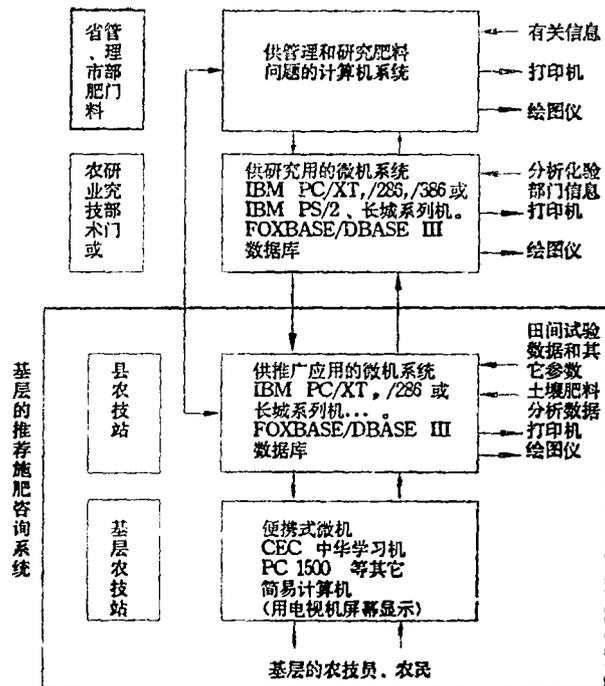


图4 推荐施肥咨询系统内部关系图

件的设计是统一的,因此,省(市)或县级农业管理部门很容易通过这一系统,对自己所管辖范围的土壤肥力和推荐施肥问题,实现计算机化的统一管理。

四、结果和讨论

(一)封丘地区的产量—肥料效应模型

一般认为,田间试验中不施肥区的产量是对试验地土壤肥力的一种估计,但是与所建立的每个试验点的产量—肥料效应模型相比,显然应用模型中的常数项 b_0 值更有代表性(二者间的相关系数 $r=0.946^{**}$),为此,我们确定以 b_0 值作为不同土壤肥力分类建模的主要依据。

表5是根据1986—1989年3年间小麦试验数据建立的综合模型,以及用聚类分析方法进一步区分通过归类综合而建立的土壤肥力高、中、低肥3个组及其类方程。计算是依据常规的最小二乘法,并应用了方差分析作误差检验。

从表5可以看出,低肥田的代表性产量水平约在每亩136公斤,中肥田约在220公斤,高肥田约在300多公斤。然而,高肥田的类方程由于试验点较少和各点的数据离散度大,未达到统计上显著($P>0.05$)。

严格地讲,对土壤肥力的高低变化实际很难人为的去划分一条截然的界限,更难说明在接近分界线两侧的样点,其间有那些确切的差别。因此,我们在按土壤肥力分类时,重点照顾了大面积的中、低产田,在封丘的具体条件下,只分成为高、中、低肥田3个组。

表5 封丘县不同肥力土壤的小麦肥料效应方程

(1986—1989年)

肥力分类	试验点数	效 应 方 程	F 检 验
低肥田	27	$Y = 136.6 + 67.70N^{0.5} + 32.52P^{0.5} + 1.353N^{0.4}P^{0.5} - 7.964N - 5.125P$	116.3 ^{***}
中肥田	42	$Y = 221.1 + 46.78N^{0.5} + 19.23P^{0.5} + 0.247N^{0.5}P^{0.5} - 5.878N - 2.35P$	63.0 ^{***}
高肥田	8	$Y = 339.5 + 11.45N^{0.5} + 10.35P^{0.5} - 0.98N^{0.5}P^{0.5} - 0.6524N - 0.1656P$	1.9
综 合	77	$Y = 204.5 + 50.54N^{0.5} + 23.70P^{0.5} + 0.6132N^{0.5}P^{0.5} - 6.147N - 3.231P$	123.4 ^{***}

***: $P \leq 0.001$

(二)不同肥力土壤的产量肥料效应分析

1. 低肥田的肥效反应

根据试验划分的封丘县低肥田一般离村庄远、施肥困难或质地粗、栽培或灌溉条件都较差,有些地块有其它障碍因子影响作物生长。图5-9是根据低肥田类方程由计算机输出的不同氮肥、磷肥用量的产量和利润关系图。

从图5,6可以看出,低肥田对施用氮、磷肥料显示了十分明显的增产效应,而且,肥料间的交互作用也极明显,当然,利润的计算与市场价格密切相关,随着价格的变动,利润将会有相应的改变。图9中所标注的黑色圆点,是在给定的作物、肥料价格以及指边际报酬率条件下的推荐施肥量。图20,21是根据低肥田类方程由计算机输出的等产线和等利润线图,等产图中两条交叉的曲线为脊线,其交叉点为产量最高点,相应的施肥量称为最大产量施肥量。与等产线图相对应,等利润线图也有两条脊线,交叉点为利润最大点,相应的施肥量为最佳施肥量,中间一条线为肥料最佳配比线,在该线上的点对应的施肥量相对来说都是最佳的,当肥料供应不足时,可以选用相应的施肥量,以求得最大的经济效益。

从试验结果来看,低肥田的增产效率是比较高的,但是在有些情况下,试验结果可能给

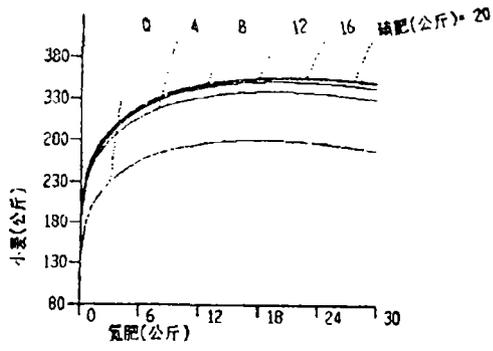


图5 低肥田氮肥施肥量与小麦产量关系图

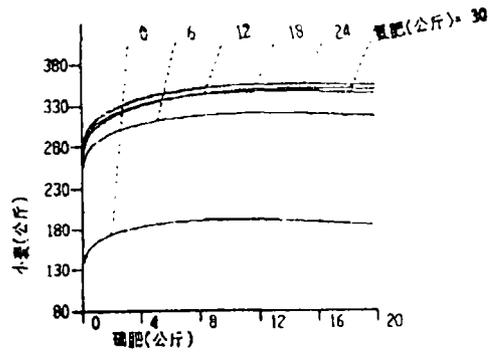


图6 低肥田磷肥施肥量与小麦产量关系图

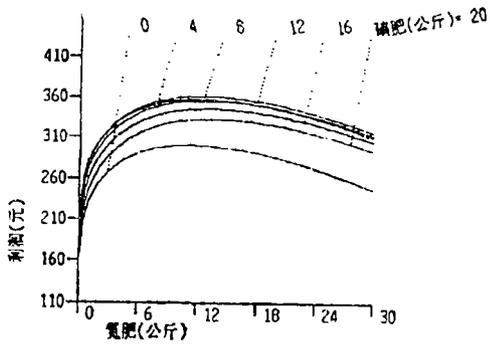


图7 低肥田氮肥施肥量与净利润关系图

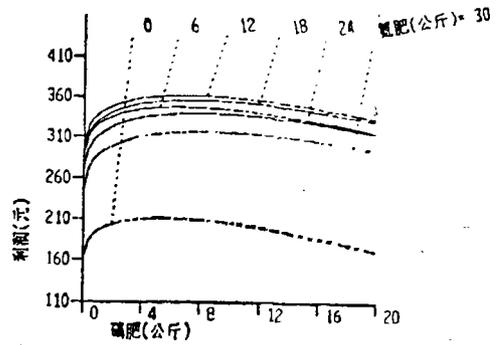


图8 低肥田磷肥施肥量与净利润关系图

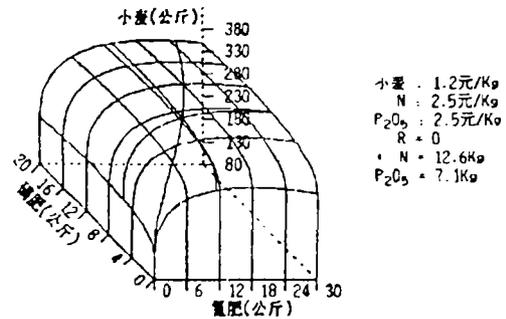
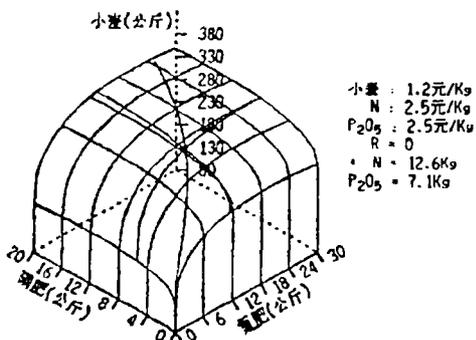


图9 低肥田氮、磷施肥量与产量关系的三维图

人以假象，似乎低肥田多投入并不能显示明显的施肥效果，经我们对这类试验进行的实地调查，发现这类低产田几乎都存在有肥料以外的限制因子，因而施肥的作用不大，再考虑增施肥料的同时，还必须去除影响作物生长的障碍因子。

2. 中、高肥田的肥效反应

图10—14和图15—19分别是根据中、高肥田类方程由计算机输出的肥料效应图。可以看出，中肥田除了产量基数高外，对施用氮、磷肥及其交互作用同样也有明显的效应。但高肥田由于肥力偏高，对肥料的效果不够明显，从封丘地区的施肥习惯看，农民普遍习惯给高肥田过量施肥，经验证明，不施肥区的产量如达到300公斤/亩，要继续保持大幅度增产，往往不是单靠肥料所能奏效的。如要求在高肥田上达到每亩400公斤以上的高产，必须改进栽培技术和引用高产品种等措施，同时再配合增施肥料。图22, 23和图24, 25分别是中、高肥田的等产线和等利润线图。

(三)不同肥力土壤的推荐施肥量

1. 边际报酬率与推荐施肥量

根据产量—肥料效应模型计算的推荐施肥量，不是一成不变的，而是要受到市场的肥料、作物价格和所选定向边际报酬率(R值)大小的直接影响。

通常是根据肥料效应模型求得的最佳施肥量作为推荐施肥量，但在当前的市场经济条件下，最佳施肥量未必能为农民所接受，如对小麦而言，购买肥料意味着资金投入(用CX表示，C为肥料单价，X为肥料元素的用量)，到收获物销售(用VY表示，V为收获小麦的销售单价，Y为销售小麦的总量)，其间约1年时间，显然应根据如下的利润函数计算肥料成本：

$$\Pi = VY - CX(1 + R)^n$$

式中 Π 为利润； $CX(1 + R)^n$ 表示肥料成本；R为边际报酬率($d\Pi/dI$)或者看作利率； $n = 1$ 表示利润的时期为1年。若 $R = -1$ ，表明利润对投入的一阶导数等于-1，即 $d\Pi/dI = -1$ 。这时计算的推荐施肥量称作最大产量施肥量，这一计算，除了说明运算对象的特征外，由于经济上不合算，并无实际应用的意义。但在 $R = 0$ 时，表明利润对投入的一阶导数等于零，此时计算的推荐施肥量即所谓的最佳施肥量。不考虑R值对计算利润的作用是不现实的，对于不同的农民可能面临不同的投资机会，富裕的农民可选用 $R = 0$ ，但在通常情况下选用 $R = 0.2$ 的推荐施肥量比较适宜，对资金不足的农民选用的R值也可大于0.2。总之，不难看出，C/V值，R值，n值(投入和归还所拖延的时间)都将直接影响到具体的推荐施肥量。

小麦推荐施肥量的计算式如下：

$$\text{设 } R^*_N = C_N/V \times (1 + R)^n, \quad R^*_P = C_P/V \times (1 + R)^n$$

$$\text{推荐的N用量} = [(2b_1 \times (R^*_P - b_5) + b_2 b_3)/D]^2$$

$$\text{推荐的 } P_2O_5 \text{ 用量} = [(2b_2 \times (R^*_N - b_4) + b_1 b_3)/D]^2$$

$$D = 4 \times (R^*_N - b_4) \times (R^*_P - b_5) - b_3^2$$

上式中的 $C/V \times (1 + R)^n$ 可看作是相对稳定的常数，由于市场上肥价和粮价的相应改变，它仍然可能是相对稳定的值，因为对C/V比例变化不大，所以表达式 $C/V \times (1 + R)^n$ 可以很方便地用 R^* 表示。而 R^* 可作为说明当地经济状况的计算基础。

图26是两种肥力土壤上不同R值所对应的氮、磷肥推荐用量关系图，可以看出，不同R值下的氮肥、磷肥推荐用量的变化几乎是平行的。随着R值由2渐减至0，N/P值相应的随之减少，而肥料的推荐施用量则随之愈高。

2. 低肥田的推荐施肥量

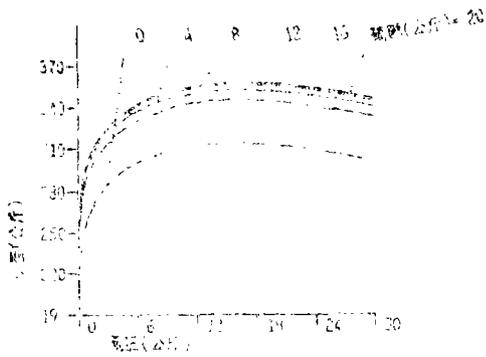


图10 中肥田磷肥施用量与小麦产量关系图

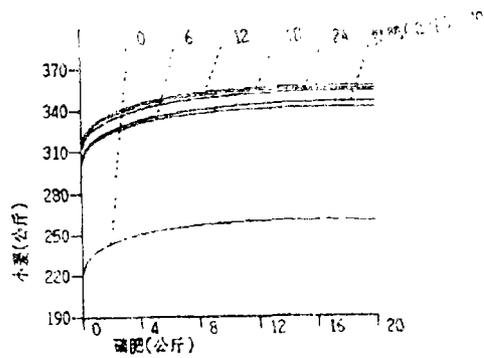


图11 中肥田磷肥施用量与小麦产量关系图

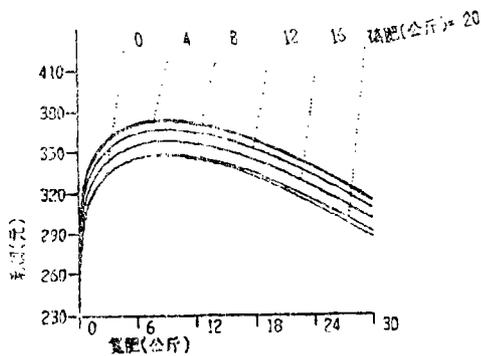


图12 中肥田氮肥施用量与净利润关系图

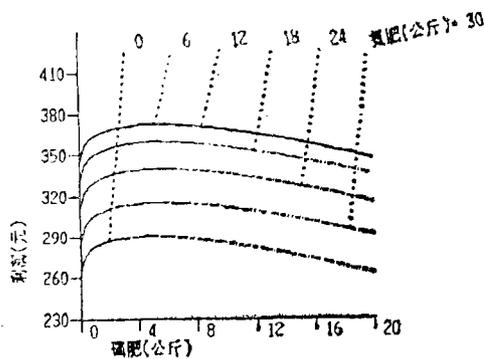


图13 中肥田磷肥施用量与净利润关系图

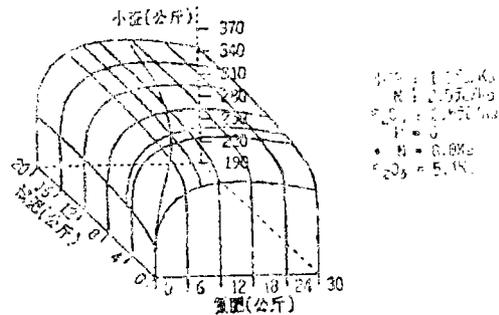
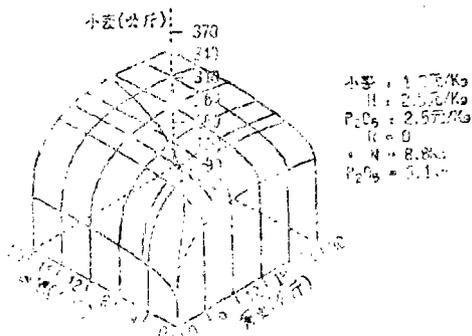


图14 中肥田氮、磷施用量与产量关系的三维图

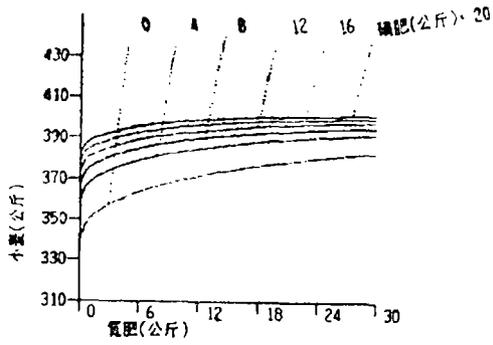


图15 高肥田氮肥施肥量与小麦产量关系图

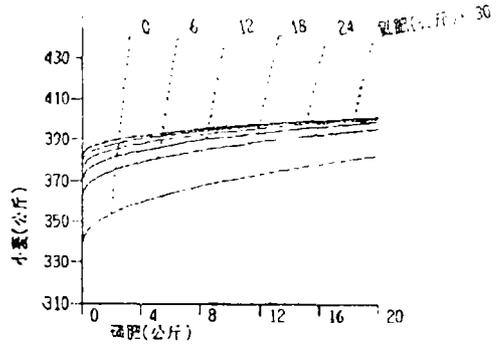


图16 高肥田磷肥施肥量与小麦产量关系图

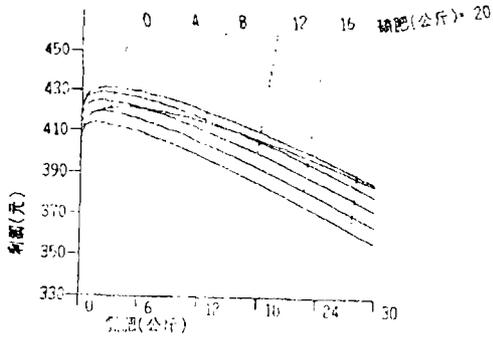


图17 高肥田氮肥施肥量与净利润关系图

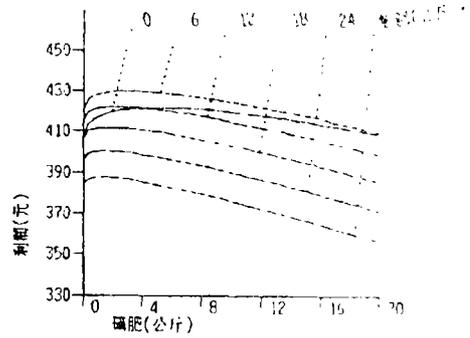


图18 高肥田磷肥施肥量与净利润关系图

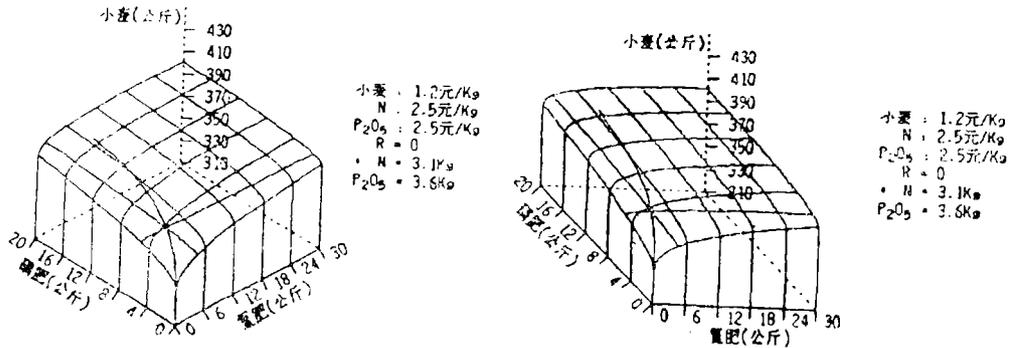


图19 高肥田氮、磷施肥量与产量关系的三维图

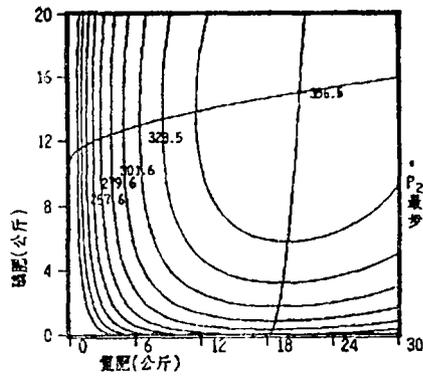


图20 低肥田等产线图

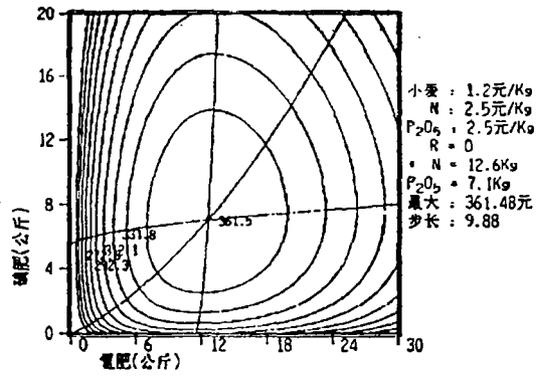


图21 低肥田等利润线图

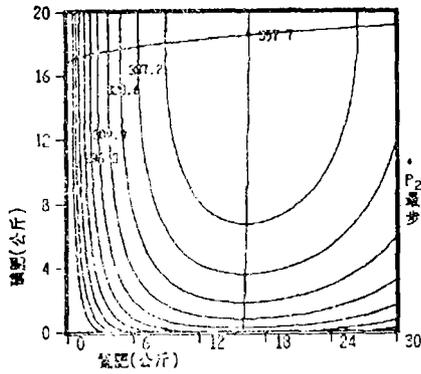


图22 中肥田等产线图

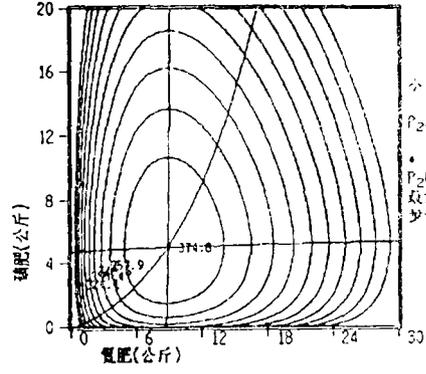


图23 中肥田等利润线图

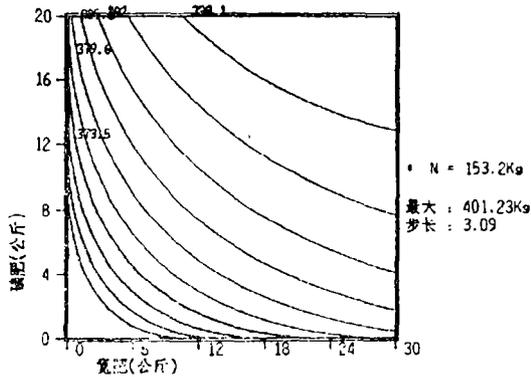


图24 高肥田等产线图

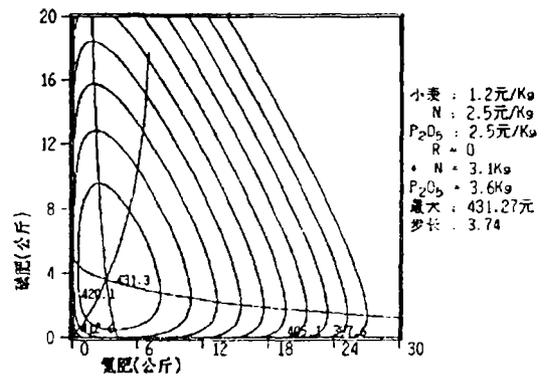


图25 高肥田等利润线图

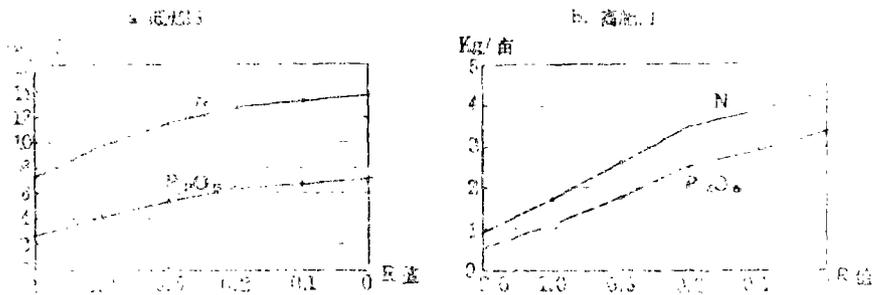


图25 不同R值所对应的N、P₂O₅推荐施用量

表6—15是分别根据封丘的低、中、高肥田类方程以及代表封丘全县的平均方程计算的不同推荐施肥量，其中包括氮、磷肥同时施用和两种肥料分别单独施用的各种推荐施肥量以及相应的肥效产量(指所施肥料的增产量)、投入、利润和产投比等所有信息。表中计算所用的价格，统一为：小麦每公斤1.2元，氮素每公斤2.0元，P₂O₅每公斤2.5元。

从表6可以看出，在上述小麦和肥料市场价格条件下，在封丘地区的低肥田上，同时施用氮、磷两种肥料，N肥的最佳用量(R = 0)应为每亩13.7公斤，P₂O₅的最佳用量(R = 0)应为7.1公斤。N/P₂O₅比为1.9。

若将表5的R = 0与R = 0.2两种条件下的肥效产量以及投入、利润等进行比较，可以发现选择R = 0要比R = 0.2的产量每亩多增长3.7公斤，投入每亩多增加4元，利润多增长0.39元。若就R = 0与R = 0.5条件相比，则肥效产量每亩多收9.3公斤，投入每亩多增加9.04元。利润增长2.13元，如再进一步就R = 0.2与R = 0.5二种条件进行同样比较就不难得出结论，选择R = 0.2是适宜的。但如资金比较充裕，而且根据当地条件认为选用R = 0确比R = 0.2所增加的效益可取，则应选用R = 0条件下的推荐氮、磷用量。

表6 低肥田同时施用2种肥料的推荐施肥量

R	N	P ₂ O ₅	肥效产量	投资	利润	产投比
2.0	7.27	2.67	171.69	21.21	184.81	9.71
1.0	9.72	4.12	189.16	29.75	197.24	7.63
0.5	11.45	5.33	198.55	36.23	202.02	6.58
0.2	12.73	6.32	204.19	41.27	203.76	5.94
0.1	13.21	6.71	206.01	43.20	201.05	5.72
0	13.71	7.14	207.85	45.27	204.15	5.51
-1.0	20.97	15.01	219.96	79.48	181.47	3.32

注：肥料和肥效产量单位为公斤，投资和利润为元，下同。

表7 低肥田单施氮肥的推荐施肥量

R	N	肥效产量	投资	利润	利润减少量	产投比
2.0	6.82	122.47	13.64	133.33	51.48	10.78
1.0	8.98	131.35	17.96	139.66	57.58	8.78
0.5	10.46	135.66	20.93	141.87	60.16	7.78
0.2	11.54	138.08	23.08	142.61	61.15	7.18
0.1	11.94	138.84	23.87	142.73	61.32	6.98
0.0	12.35	139.57	24.71	142.77	61.33	6.73
-1.0	18.07	143.88	36.13	136.52	17.95	4.78

表8 低肥田单施磷肥的推荐施肥量

R	P ₂ O ₅	肥效产量	投资	利润	利润减少量	产投比
2.0	2.17	32.26	5.43	40.49	144.32	8.46
1.0	3.25	43.79	8.13	44.41	152.83	6.46
0.5	4.13	46.95	10.32	46.02	156.00	5.46
0.2	4.83	48.92	12.08	46.62	157.13	4.86
0.1	5.11	49.58	12.77	46.73	157.32	4.66
0.0	5.41	50.23	13.52	46.76	157.39	4.46
-1.0	10.69	54.81	26.74	39.03	154.44	2.46

表7和表8显示了在单施氮肥或单施磷肥时不同R值下的推荐施肥量,由于低肥田对氮、磷二种肥料有明显的交互作用,因此,表中还计算出了在同样R值条件下单施任何一种肥料与两种肥料同时施用时所减少的利润值。

3. 中、高肥田的推荐施肥量

表9表明,中肥田的最佳施肥量(R=0)为氮素每亩施9.84公斤,五氧化二磷每亩施5.09公斤。高肥田的最佳施肥量(R=0)为氮素每亩施4.33公斤,五氧化二磷每亩施3.35公斤。比较低、中、高3种肥力土壤对肥料的反应,看来在低肥田上施氮、磷肥有比在中、高肥田上高得多的增产效果,随着土壤肥力的提高,肥料的增产效率显然有明显下降,例如,同样在R=0的条件下,低肥田的产投比为5.5,中肥为4.5,而高肥田则为2.5。另外,高、中、低肥田3个类方程的b₀值有明显区别,可以发现,同样在R=0的推荐施肥量条件下,不同肥力的土壤基本上保持了相近的产量水平,即低肥田每亩344.5公斤,中肥田343.8公斤,高肥田375.1公斤。

在表9中,出现了“检验1, P₂O₅具有负数平方根”的注解,说明计算机在运算到所注解的位置时,根据模型计算推荐施磷量出现了异常(负平方根,说明计算值为虚数),表明软件将不再进一步计算,因此在R=-1的一行中所有的数据都显示为零。注解均为计算机自动给出,有助于判断数据的可用性。

表10—12是根据代表封丘全县产量—肥料效应模型计算的推荐施肥表,从总体上看,封丘地区的小麦施肥,同时施用氮肥和磷肥是十分必要的,在最佳施肥量条件下,要求每亩施用氮素10.7公斤;五氧化二磷5.5公斤。比较经济的用量,也可以选用亩施氮素9.6公斤,五氧化二磷4.6公斤。

四、施肥模型的验证和推广应用

1. 施肥模型的验证

为了验证推荐施肥量在实践中的应用效果,1987年以来先后在封丘县不同土壤上开展了推荐施肥模型的田间验证试验(表13)和示范试验。整个工作是在封丘县政府统一组织下有计划进行的。验证试验采用了3区对比和4区对比两种方法,后者设置了2个对照(不施肥)区。所得试验结果应用A值法进行检验。A值愈近于1,说明理论值与实际值愈相近。

A值的计算式: $A = \text{实收产量} / \text{理论产量}$

由表13可见,高、中、低肥田的平均A值分别为1.08, 0.93和0.97,表明实收产量和理论产量基本一致。

2. 推广应用中的某些问题

根据试验结果可以证明,在当前封丘肥料供应尚不充分条件下,要使有限的肥料换得更

表9

中、高肥田的推荐施肥量

中肥田的推荐施肥量							
R	施用2种肥料		肥效产量	投资	利润	利润减少量	
	N	P ₂ O ₅				单施N	单施P ₂ O ₅
2.0	4.68	1.32	93.30	12.66	99.30	20.44	80.16
1.0	6.55	2.32	106.04	18.91	108.34	24.16	85.89
0.5	7.95	3.31	113.64	24.17	112.20	26.03	88.09
0.2	9.01	4.24	118.61	28.61	113.72	26.85	88.90
0.1	9.41	4.63	120.33	30.41	113.99	27.00	89.03
0.0	9.84	5.09	122.08	32.41	114.09	27.06	89.08
-1.0	16.57	18.53	136.59	79.46	84.44	4.41	79.09
高肥田的推荐施肥量							
2.0	0.90	0.54	17.08	3.14	17.35	6.29	9.12
1.0	1.71	1.09	23.11	6.14	21.59	7.60	10.68
0.5	2.59	1.76	28.04	9.57	24.08	8.30	11.31
0.2	3.48	2.52	32.14	13.25	25.32	8.63	11.50
0.1	3.87	2.89	33.79	14.97	25.57	8.69	11.51
0.0	4.33	3.35	35.60	17.05	25.67	8.71	11.51
试验1, P ₂ O ₅ 具有负数平方根。							
-1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

表10

封丘县平均同时施用2种肥料的推荐施肥量

R	N	P ₂ O ₅	肥效产量	投资	利润	产投比
2.0	4.61	1.49	90.27	12.94	95.37	8.37
1.0	6.71	2.57	104.36	19.86	105.37	6.30
0.5	8.35	3.63	112.89	25.77	109.70	5.26
0.2	9.64	4.60	118.49	30.78	111.42	4.62
0.1	10.14	5.01	120.43	32.80	111.72	4.41
0.0	10.68	5.48	122.40	35.05	111.83	4.19
-1.0	19.68	18.47	138.31	85.54	80.43	1.91

表11

封丘县平均单施氮肥的推荐施肥量

R	N	肥效产量	投资	利润	利润减少量	产投比
2.0	4.56	67.60	9.12	72.00	23.37	8.90
1.0	6.61	75.98	13.22	77.96	27.41	6.90
0.5	8.20	80.58	16.39	80.30	29.40	5.90
0.2	9.44	83.37	18.88	81.16	30.26	5.30
0.1	9.92	84.28	19.84	81.30	30.42	5.10
0.0	10.43	85.18	20.87	81.35	30.48	4.90
-1.0	18.87	91.18	37.75	71.67	8.76	2.90

多的产量,应当从大面积平衡增产着眼,提倡大面积均衡施肥,从全县范围的土壤肥力和期望的产量进行通盘考查,把有限的肥料按比例适当多分配给那些增产幅度高的土壤,反之,把肥料过多的集中施给面积较少的高肥田,对提高全县的粮食产量是不可取的。为了便于农业部门在全县范围推广大面积经济施肥取得的成果,我们结合封丘当前在施肥工作上存在的问题,把封丘的推荐施肥简单的归结为“低产田要抓症结,适当多施肥”,“高产田要抓措施,合理地施肥”,这一做法受到了领导和群众的欢迎。

表12

封丘县平均单施磷肥¹的推荐施肥量

R	P ₂ O ₅	肥效产量	投资	利润	利润减少量	产投比
2.0	1.43	21.48	3.57	22.21	73.17	7.23
1.0	2.45	26.66	6.12	25.87	79.50	5.23
0.5	3.43	30.19	8.57	27.66	82.04	4.23
0.2	4.33	32.71	10.83	28.42	82.99	3.63
0.1	4.71	33.62	11.78	28.57	83.15	3.43
0.0	5.14	34.56	12.86	28.62	83.21	3.23
-1.0	16.96	43.31	42.40	9.57	70.86	1.23

从宏观上讲,由于施肥模型是通过多年、多点、和严格的田间试验,根据建模计算归纳得出的,对较大范围地区有一定代表性,因此,作为大面积分区指导经济施肥,可信度是较大的。至于如何对小范围或个体的农户指导施肥,因田块小以及环境和人为因素的变异度大,要做到准确的预报显然有一定难度,尤其是农村的居住分散,也不可能做到让全县都集中在县农业机关进行咨询。为了尽可能解决好这一困难,我们采用了以下的办法:

首先,在县农技部门设置有可运行“县级推荐施肥系统”的计算机,它的主要任务之一,就是通过组织试验得出覆盖全县不同土壤肥力的施肥模型。另外,我们选用了廉价的“中华学习机”,充分利用了它的存储量编写和存入了某些为基层施肥咨询所必需的软件,只要事先输入已经求得的施肥模型,稍加训练,县农技员就可以携带它走乡串户直接为农户进行施肥咨询,这种便携机的最大优点是,有比较完整的 BASIC 语言,特别是它可以利用农村较常见的一般黑白电视机作显示屏幕,从而无需太大的花费,就可应用计算机直接与农户见面开展施肥咨询。

一般来说,由于对影响产量的各种因素难以作出准确的估计,因而,根据模型计算的推荐施肥量,在应用中并非一成不变的,但实践证明,只要能做到区分土壤的肥力类型,就可以在指导大面积施肥上发挥作用。开展施肥咨询,实际上是在计算机辅助下由农技员来完成的。计算机对土壤肥力信息的存储、检索和利用施肥模型的快速运算,加上农技员对当地农业和土壤肥力情况等问题的了解,要应付农户提出的施肥问题,一般不会有太大困难。当然,回答问题的正确与否,还需取得一些必要的信息,这方面国内外几乎都强调了利用土壤养分分析数据,但是结合当前农村的情况,无论从方法或时间考虑,几乎都是不易解决的问题,我们开展施肥咨询,所采取的办法是从农户那里取得信息,事实上,向农户要求可以用于计算的准确信息是不可能的,在各种可以选择的方案中,最后我们选择了要求农户给出被咨询田块的不施肥产量,一般情况下,农户可给出不施肥产量的高限和低限,从而计算机就能输出一个推荐施肥的幅度,如果农户每年安排一定面积土地作试验以取得不施肥田的确切产量,则下一年的推荐施肥量的可信度也就随之更高。

3. 不同品种肥料的推荐施肥问题

市售的化肥品种繁多,除了各种单一元素的肥料品种外,还有大量含 2 种或 2 种以上元素的复肥和混合肥,不同肥料品种在养分元素的种类、含量和比例上都有很大的差别,在销售价格方面,尚有国家牌价和市场价。另外,还有某些化肥品种,例如碳酸氢铵和钙镁磷肥,它们的有效利用率与土壤性质、施肥技术和施肥时的环境条件与施肥季节密切相关。面对这些复杂而又经常遇到的问题,如何在推荐施肥中作出比较满意的回答,无疑是个较难解决的问题。我们以产量—肥料效应模型作为基础,以计算得出的产量和利润为依据,把水溶性和有特殊性质的肥料品种加以区分,给农户提出了一种比较适用的办法。

表13

1987--1989 封丘县小麦推荐施肥的田间校验

(单位均为公斤/亩)

地 点	试验户	施 肥 量		预报产量	实际产量	A	A平均值	SE	SD	C.V.%	
		N	P ₂ O ₅								
低肥田: n = 12											
黄 陵 乡	曹敬学	12	8	343	326	0.95	0.97	0.028	0.098	10.1	
	曹 寨	曹品名	12	8	343	331	0.97				
		曹江友	12	8	343	315	0.92				
		曹小崇	12	8	343	325	0.95				
		曹中学	12	8	343	315	0.92				
		曹信学	12	8	343	352	1.03				
		曹全学	12	8	343	327	0.95				
应 举 乡	* 吕运嵩	12.8	6.6	342	321	0.94					
	* 梁西秋	12.8	6.6	342	306	0.89					
	* 梁尚社	12.8	6.6	342	289	0.85					
	* 范进修	12.8	6.6	342	395	1.15					
	* 董尚周	10.9	6.6	337	395	1.17					
中肥田: n = 16											
黄 陵 乡	曹敬学	9	5	341	412	1.21	0.93	0.035	0.14	14.8	
	曹 寨	曹发祥	9	5	341	360	1.05				
王 村 乡	李宗明	9	5	341	310	0.91					
三 里 庄	李宗友	9	5	341	331	0.97					
	留 光 乡	林建华	9.6	4.8	328	279	0.85				
		侯金雷	9.6	4.8	328	257	0.78				
侯金江		9.6	4.8	328	279	0.85					
辛 店	尹东林	9.6	4.8	328	298	0.91					
	尹传恒	9.6	4.8	328	266	0.81					
	侯金建	9.6	4.8	328	225	0.69					
留 光 乡	尹传经	8.8	4.8	341	325	0.95					
马 村	侯中臣	8.8	4.8	341	289	0.85					
	侯周臣	8.8	4.8	341	306	0.90					
	* 范西栋	12.8	6.6	349	378	1.08					
杨 徐 寨	* 杨 钦	9.5	6.6	345	402	1.16					
	* 杨景旺	10.9	5.6	346	339	0.98					
高肥田: n = 3											
王 村 乡	李宗贤	7	4	380	442	1.16	1.08	0.034	0.075	6.9	
	华 国	7	4	380	412	1.08					
	李金章	7	4	380	385	1.01					

共计低肥田12户, 中肥田16户, 高肥田3户, * 为1989年结果。

表14是目前市售的、某些化肥品种的养分含量和市场价格表。根据模型和投资与利润分析得到了表15所列的经济效益分析。为便于不同肥料品种间的相互比较, 表中的计算值统一按最佳推荐施肥量计算($R=0$)。可以看出, 在所有肥料品种中, 从获利和增产两方面考虑, 均以尿素加重钙和尿素加2号普钙的效益为最好。如以3种混合肥进行比较, 则显然可以看出以购买1号混合肥较为合适, 但是与其它肥料品种相比较, 它们的肥料含量相对偏低, 将给储存、运输和施用带来麻烦。所有这些, 通过咨询都可以向农户提供参考。至于碳铵和钙镁磷肥, 因影响它们发挥肥效的因子较多, 许多情况又无从掌握, 很难提出明确的推荐意见, 我们采取了将它们的肥效或相对于试验用肥的利用率作为变数, 在咨询时临时输入(例如根据掌握的当地情况临时输入碳铵的肥效相当于尿素的70%), 以便适应各地和各种情况下施

表14 常用化肥的市场价格表

(1990年10月)

化肥品种	有效成分%			价 格 元/吨	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	国家价	市场价
尿素	46			570	
过磷酸钙(1号)		12		265	
过磷酸钙(2号)		15		286	
重过磷酸钙		34			800
磷酸二铵	18	46		760	
复合肥(1号)	12	8			490
复合肥(2号)	8	8	4		460
复合肥(3号)	10	8	7		550

肥的需要。至于根据施肥模型作出的关于其它问题的咨询,如提出要求了解对期望产量的最佳施肥量,提出改变施肥量希望预报可能获得的产量等,根据施肥模型在咨询中也都都可以给出相应的应答。

(五)关于建立包括环境因素的综合施肥模型的探讨

应用一般回归分析方法建立施肥模型,通常的做法是将大量田间试验取得的产量数据,经统计分析得到一组包括每个试验点的产量—肥料效应模型,再采用适当的分组方法将模型进行分类,把属同类试验点的产量数据按小区平均,即可求得代表该类土壤肥力的肥料效应方程(即通称的类方程或类特征方程)。推荐施肥则应用这些类方程辅助农技员开展施肥咨询活动,在咨询过程中,待农技员弄清被咨询地块所属的土壤肥力类型后,即可利用该类的特征方程求得相应的最佳施肥量。这种分类推荐施肥的方法应用上比较简便,实践证明也是可行的,但不足之处是类方程所包含的个体差异无法体现,类间的界限不够明显,同属一类试验点的最佳施肥量有时会出现较大差异,分类标准也不够确切。显然,引起这些问题的根本原因是在所建立的产量—肥料模型中,只包含有供试的肥料因子,而缺少影响肥料效应的环境因子。为了解决这一问题,我们采用了J. D. Colwell提出的建立包括环境因子的综合模型法进行研究。

建立综合模型的关键是进行一般回归模型与正交回归模型之间的转换,由于一般回归模型的各项间往往彼此相关,因而难以弄清各个试验因子对产量的贡献。通过正交转换将一般多项式回归模型转换为正交模型,使各自变量间彼此独立,则可直接用模型的趋势系数定量的计算试验因子对依变量的贡献。

建立这种综合模型,通常将模型中的变量分作地点变量和产量变量。所谓地点变量,是指所有能够影响(就地进行的)试验肥料反应的各种因素,如土壤养分、性质、类型、农田气候因素和栽培技术等,具体地讲,例如降雨量、灌溉量、土壤有效性氮、磷、钾的测定值以及播种期等。产量变量实质上是计算肥料因子对产量的贡献,它实际是肥料效应模型的趋势系数。

为了计算地点变量与肥料效应方程之间的相互关系,先将产量肥料效应方程转换为正交多项式形式,再求出各地点变量与正交系数之间的回归关系,将其代入正交多项式形式的施肥模型,即可建立好包括地点变量的正交多项式施肥模型,最后再把正交形式的施肥模型转回为普通多项式形式,即可建成包括环境因子的产量—肥料效应模型。一般多项式模型及其转

表15 各种混合、复合肥料的增产量和经济效益

(同在R=0条件下)

肥料品种	施肥量	肥效产量	投资	利润
1号混合肥	100.6	206.3	49.3	198.2
2号混合肥	117.2	199.9	53.9	186.0
3号混合肥	100.1	200.4	55.1	185.4
磷酸二铵	40.7	189.8	30.9	196.9
尿素	34.5	213.3	35.3	220.7
重钙	19.5			
尿素	34.3	211.9	36.8	217.5
普钙 I	65.0			
尿素	34.4	213.0	35.6	219.9
普钙 II	56.0			

* 本表根据封丘低肥田产量—肥料效应模型和当前的市价计算。

换的正交多项式模型有如下通式:

(1) 普通产量—肥料效应模型的通式:

$$Y = b_0 + b_1 N^{0.5} + b_2 P^{0.5} + b_3 N^{0.5} P^{0.5} + b_4 N + b_5 P \quad (1)$$

(2) 转换为正交多项式后的通式:

$$Y = a_0 M + a_1 L_N + a_2 L_P + a_3 L_N L_P + a_4 Q_N + a_5 Q_P \quad (2) \quad (\text{在有区组或其它试验因子时, 可增加 } a_6 B \dots)$$

式中Y为产量, M、L、Q分别为多项式中n, p(下标标注)等的零次, 一次和二次趋势,

$a_0, a_1 \dots$ 代表各自变量的趋势系数。

为计算方便, 令正交多项式M、L、Q的最高次项系数为1。就有 $a_3 = b_3, a_4 = b_4, a_5 = b_5$ 。

由正交多项式的特殊性质, 肥料效应方程与地点变量之间的相关关系转化为正交系数与地点变量之间的关系。我们根据在封丘试验取得的77个试验点的产量—肥料效应方程, 结合在各试验点进行试验前采集土样分析取得的数据作为地点变量, 求出了它们与正交形式的产量肥料效应方程间如下的回归关系:

$$a_0 = 226.3544 - 76.82691 \times OM + 812.791 \times TN + 0.47022 \times b_0 \quad F = 20.55^{***} \quad r = .677$$

$$a_1 = 44.62 + 36.571 \times TN - 0.12808 \times b_0 \quad F = 22.47^{***} \quad r = .615$$

$$a_2 = 13.93526 + 47.79022/AP - 0.04244 \times b_0 \quad F = 10.47^{***} \quad r = .470$$

$$b_3 = 1.206059 \quad b_4 = -5.359698 \quad b_5 = -1.331258$$

式中的OM代表有机质含量; TN表示全氮量; b_0 代表模型的基础产量; AP代表有效磷; a_1 表示作为独立变量的试验的氮肥的反应值; a_2 表示作为独立变量的试验的磷肥的反应值。如前所述, b_3, b_4, b_5 分别与 a_3, a_4, a_5 数值相同, 将上列各式代入肥料效应方程(2), 再转化为式(1)的形式, 即得到综合施肥模型如下:

$$Y = 299.3546 - 76.82691 \times OM + 702.266 \times TN + 0.9620298 \times b_0 - 117.9281/AP + (67.71691 + 36.571 \times TN - 0.12808 \times b_0) N^{0.5} + (13.30653 + 47.79022/AP - 0.04244 \times b_0) \times P^{0.5} + 1.206059 N^{0.5} P^{0.5} - 5.359698 N - 1.331258 P$$

根据上述模型, 对田间试验所覆盖的区域内的任一田块, 只需将式中相应的土壤分析值代入模型, 即得该田块的肥料效应函数, 进一步的计算可求出该田块的最佳施肥量。

通过以上研究可以看出, 综合施肥模型为施肥模型引入各种环境因素数据找到了一个科学的可行途径。在建模过程中, 它的计算工作比较繁琐, 我们为此编写的软件系统, 基本上做到了使运算简便而快捷。然而综合建模要求有较多的、能准确反映实际的环境参数, 在当前农村条件下要做到普遍推广还有一定的困难。此外, 在大面积农田上开展有效养分分析, 由于方法和条件的限制, 所取得的结果与产量的相关系数也不可能很高〔18〕, 这些都将影响到推荐施肥量的正确运算, 因此这些问题尚待进一步研究。

五、结 语

本文通过在河南封丘多年、多点的田间试验, 明确了以平方根模型建立小麦产量—施肥效应函数, 以边际报酬率计算不同的推荐施肥量, 做到了可根据市场和农村的经济条件灵活的开展推荐施肥, 并作出产量和符合市场经济的利润估算。为配合推荐施肥建立的以土壤肥力数据库为基础的推荐施肥咨询系统, 除包括有农田施肥试验设计、数据处理、模型建立和

施肥咨询等常规内容外,还提供了包括环境因子的综合建模、土壤肥力数据查询、专业性的数据加工以及二、三维图形显示等多种功能,可应用于各种普及型微机,并不受农业地区限制,可为各省(市)、县和基层推广使用。

但是决定产量的因子毕竟不完全取决于肥料,而且影响肥效的因子也很复杂,为使这项研究成果能在封丘地区推广应用,试验是在封丘目前大面积上群众习惯采用的条件下进行的,如试验灌水2次,一般曾施用过微肥或少量土粪等。当然,封丘试验的结论用于其它地区是会有差异的,尽管我们编写的软件系统较好的解决了这一问题,但是从根本上解决好推荐施肥,无疑应重视研究包括环境因子的建模问题。

参 考 文 献

- [1] Colwell, J. D., Fertilizer Requirements. In Soils: An Australian Viewpoint, Division of Soils, CSIRO, 795-815. (CSIRO Melbourne: Australia/Academic Press, London), 1983.
- [2] Wild, A. (ed.), Russell's Soil Conditions and Plant Growth, 11: 101-102, Printed and Bound in Great Britain at the Bath Press. Avon, 1988.
- [3] Fertilizer Programme Land and Water Development Division, User's Manual, A Computer Program System for Fertilizer Data Processing (desflex), FAO, 1977.
- [4] Colwell, J. D., Soil Fertility Relationships of National Soil Fertility Project Vol. 2, CSIRO Australia, 1979.
- [5] Colwell, J. D., Soil Fertility Relationships. Vol. 2, CSIRO, Australia, 1979.
- [6] Colwell, J. D., Development of General Soil Fertility Models for Variable Regions, In Transaction of the 13 Congress of the International Society of Soil Science, Extended Informative Summaries, part 2, 708-709, ISSS, 1986.
- [7] 王兴仁, 二元二次肥料效应曲面等产线图在科学施肥中的位置, 土壤通报, 第1-2期, 1985。
- [8] 陈伦寿等, 关于推荐(配方)施肥中几个技术性问题, 土壤, 第4期, 第169-172页, 1990。
- [9] 陈伦寿、李仁岗主编, 农田施肥原理与实践, 第二章, 农业出版社, 1984。
- [10] 杨守春等, 黄淮海平原不同土壤玉米氮、磷最佳施用量和土壤-作物系统中氮素平衡的研究, 土壤肥料, 第三期, 第1-6页, 1986。
- [11] 李仁岗等, 冬小麦施肥模式的初步研究, 土壤, 第4期, 第210-211页, 1990。
- [12] FAO, Computerized Analysis of Soil Fertility Data, Guidelines for Training Courses, Working Document, FAO, 1977.
- [13] Colwell, J. D., Computations for Studies of Soil Fertility and Fertilizer Requirements, CAB, 1978.
- [14] 耿旭 F. J. 希尔斯著, 高明尉等译, 农业科学生物统计, 第166页, 农业出版社, 1984。
- [15] Colwell, J. D., The National Soil Fertility Data Bank and Methods for Data Manipulation, in Proceedings of the Australian Meeting of the ISSS Working Group on Soil Information Systems, Canberra, Australia, Centre for Agricultural Publishing and Documentation Wageningen, the Netherlands, 67-73, 1977.
- [16] Colwell, J. D., Objectives and Procedures, National Soil Fertility Project, Vol. 1, CSIRO, Australia, 1977.
- [17] Norusis, M. J., SPSS/PC+, SPPS, 1986.
- [18] Sumner, M. E., Field Experimentation: Changing to Meet Current and Future Needs, in "Soil Testing: Sampling, Correlation. Calibration, and Interpretation", Chapter 11, SSSA Special Publication Number 21, 119-131, SSSA Inc. USA, 1987.