

利用正交趋势分析进行大面积 经济施肥建模^①

申建波

李仁岗

(中国农业大学植物营养系,北京 100094)

(河北农业大学,保定 071001)

摘要 以田间肥料效应试验为基础,利用正交趋势分析建立了大面积经济施肥的数学模型,分析了建模的理论与方法,讨论了模型的特点。该模型反映了作物产量、需肥量和土壤供肥量三者之间的关系。通过测试土壤供肥量来确定肥料效应方程,从而计算经济合理施肥量。水稻大面积施肥试验证明了该施肥模型有较高的准确性和敏感性。

关键词 施肥模型;正交趋势分析;推荐施肥

国内外大量的试验表明施肥量同产量间有明显的相关性。用数学方法研究施肥量与产量间的定量关系,是由本世纪初德国农业化学家米采利希(E. A. Mitscherlich)首次提出的。著名的米氏方程 $Y = A(1 - 10^{-cx})$ 标志着定量施肥技术的开端。以后,各国学者以此为基础相继研究了适合于本国的施肥函数式,大大推进了建立在田间生物试验统计基础上的肥料效应函数的发展。与此同时,化学分析和仪器分析技术的发展也促进了土壤和植株分析方法的日趋完善,土壤肥力原理与测定技术的结合使得测土定量施肥得到迅猛发展。由此可见,肥料的田间生物试验和合理的土壤测试有机地结合连同作物整个生育期间的营养诊断共同构成了推荐施肥技术体系的基本框架。

目前,定量施肥技术应用的最大障碍是不能同时进行微观和宏观施肥管理。一方面,田间肥料效应试验得到的结果尽管可以覆盖一定的区域,但它只能反映进行试验的特定土壤和区域条件下施肥与产量间的关系,而且田间肥料效应试验耗时费力,人们不可能在每一田块上进行一次田间试验来定量施肥,为此,肥料效应函数定量施肥技术的应用受到了限制。另一方面,不考虑生物效应试验的单纯土壤化学测定很难准确反映土壤养分的生物有效性(时间和空间有效性),因为土壤测定受多因素影响,而不能完全模拟根对养分的吸收机理,也没有考虑不同作物根际效应间的差异。此外,单凭土壤肥力测定只能进行微观分类指导农户施肥,很难做到宏观施肥管理。而肥料的产量效应是作物与肥料以及环境因子间相互作用的结果,在一定的气候和栽培技术条件下,肥料效应的差异反映了土壤供肥能力的差异。尽管土壤肥力的测定存在缺点,但在田间肥料效应试验的基础上,土壤的测定可以为肥料的产量效应提供重要的信息,利用这些信息来估计作物的需肥量是十分必要的。在进行大面积施肥管理时,通过合理布局田间肥料效应试验作为主控点,找出肥料效应与土壤供肥量间的关系,再通过土壤肥力测定将肥料效应试验结果应用到未做田间试验的地块上,从而实现大面积的施肥管理。

推荐施肥技术的发展,积累了大量的、多年的田间生物试验和土壤测试资料。汇总多年

① 作者感谢毛达如教授的指导。

多点田间肥料试验结果,进行区域施肥决策,建立肥料效应同影响肥料效应的土壤环境因子之间的关系,一直是国内外科学施肥的重要研究课题^[1]。本文的目的是利用正交趋势分析建立一种以田间生物试验为基础,土壤测试与多点分散试验相结合的综合推荐施肥方法,从而为科学施肥开辟一条新的途径。

1 试验设计

正交趋势分析方法要求试验设计具有完全正交性^[2],以便求出正交多项式的值。对于N、P二因子试验采用了 3×3 设计,三因子以上的正交试验,试验处理较多,可以减少一些不必要的正交性以便使试验工作量有所减少,但必须保证主要趋势成分的正交性。

古典的回归分析长期以来只是被动地处理已有的试验数据,而对试验的安排几乎不提任何要求,对所求得的回归方程的精度也很少研究,这不仅盲目地增加了试验次数,而且试验数据还往往不能提供充分的信息,以致在许多多因子问题中达不到试验的目的。正交趋势分析把试验的安排、数据的处理和回归方程的精度统一起来加以考虑,根据试验目的和数据分析来选择试验方案,不仅使得在每个试验点上获得的数据含有最多的信息、减少了试验次数,而且使数据的统计分析具有了一些良好的性质^[3,4]。

2 模型的建立与讨论

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。二次肥料效应函数是普遍采用的方程形态^[5],n个田间试验可以得到n个肥料效应方程,用回归方程表示为:

$$Y_{ijk} = b_{i0} + b_{i1}N_j + b_{i2}P_k + b_{i3}N_jP_k - b_{i4}N_j^2 - b_{i5}P_k^2 \quad (1)$$

式中*i*代表不同的试验点,*j*、*k*分别代表N、P的施用量,*Y*为产量,上式的矩阵表示式为:

$$Y = Z^t \times B \quad (2)$$

由最小二乘法解得:

$$B = (Z \times Z^t)^{-1} Z \times Y \quad (3)$$

式(3)中*B*为回归系数矩阵,*Y*为产量数据构成的矩阵,*Z*为施肥量多项式构成的矩阵。

从式(1)可以看出,不同试验点间肥料效应的差异主要反映在回归系数的差异上,不同的试验点间由于环境因子(包括土壤养分、性质、类型、农田气候和栽培技术等,用数量表示为降雨量、灌溉量、土壤有效性N、P、K的测定值以及播期等等)的不同,造成了肥料效应的差异。在某一试验点上,肥料因子对产量的贡献多少取决于环境因子的量。方程(1)是一般的二元二次回归模型,各项系数间往往彼此相关,因而难以弄清各个因子对产量的贡献。必须通过正交变换将一般多项式回归模型(1)转化为正交多项式模型(4),使各自变量间彼此独立,则可直接利用正交多项式模型的回归系数(趋势系数)来定量地计算试验因子对依变量的贡献。

$$Y = P_0M + P_1L_N + P_2L_P + P_3L_NL_P + P_4Q_N + P_5Q_P \quad (4)$$

正交变换如下:

设:

$$E = L^t \times Z \quad (5)$$

式中 E 为正交多项式矩阵, L 为线性变换阵, 通过式(5)可将等间隔或不等间隔的施肥量矩阵 Z 转化为正交多项式矩阵, 则由式(2)可得:

$$Y = E^t \times C \quad (6)$$

C 为系数矩阵, 由最小二乘法得:

$$C = (E \times E^t)^{-1} \times E \times Y \quad (7)$$

系数矩阵 C 反映了施肥对产量各次趋势独立的贡献, 不同试验点间趋势系数的差异是由于地点变量的差异造成的, 因此趋势系数矩阵 C 可看作是环境因子的函数, 则:

$$C^t = T^t \times D \quad (8)$$

式(8)中 T 为地点变量因子(或环境因子)矩阵, D 为系数矩阵, 则:

$$D = (T \times T^t)^{-1} \times T \times C^t \quad (9)$$

将(8)式代入(6)式, 得:

$$Y = E^t \times D^t \times T \quad (10)$$

将(5)式代入(10)式, 得:

$$Y = Z^t \times L \times D^t \times T \quad (11)$$

将(11)式展开即可得到正交多项式模型(4), 进一步化简得到综合肥料效应函数:

$$Y = f_0(T_0) + f_1(T_1)N + f_2(T_2)P + f_3(T_3)NP + f_4(T_4)N^2 + f_5(T_5)P^2 \quad (12)$$

式中 f_0, f_1, \dots, f_5 为不同的函数形态, T_0, T_1, \dots, T_5 为地点变量的通称, 方程(12)中含有产量因子 Y 、施肥量 Z 和地点变量 T , 当地点变量 T 的数值确定后, 便可得到肥料效应函数式(13):

$$Y = b_0 + b_1N + b_2P + b_3NP - b_4N^2 - b_5P^2 \quad (13)$$

从上式可计算出不同土壤供肥水平下的经济合理施肥量, N 、 P 肥经济合理施肥量按下式计算:

$$\begin{aligned} \partial Y / \partial N &= (R + 1)P_N / P_Y \\ \partial Y / \partial P &= (R + 1)P_P / P_Y \end{aligned} \quad (14)$$

式中 R 为边际利润, P_N 、 P_P 和 P_Y 分别为 N 、 P_2O_5 和谷物的价格, 解上式得:

$$\begin{aligned} N &= (S_2b_3 - 2S_1b_5)D^{-1} \\ P_2O_5 &= (S_1b_3 - 2S_2b_4)D^{-1} \end{aligned}$$

式中 $S_1 = (R + 1)P_N / P_Y - b_1$

$S_2 = (R + 1)P_P / P_Y - b_2$

$D = b_3^2 - 4b_4b_5$

作者曾应用趋势分析方法在大面积水稻上进行推荐施肥, 得出氮、磷肥的综合肥料效应函数:

$$\begin{aligned} Y &= -27.6 + 0.82Y_0 + 0.0028N_S^2 + 2.37CEC + 49.59 \log P_S + (33.71 - 0.00037N_S^2 \\ &\quad - 0.32CEC)N + (19.68 - 13.22 \log P_S)P + 0.14NP - 1.05N^2 - 0.58P^2 \end{aligned}$$

上式包括氮、磷(N 、 P_2O_5)施用量、地力产量(Y_0)、土壤碱解氮(N_S)、土壤阳离子交换(CEC)和土壤速效磷(P_S), 根据此函数可以计算不同土壤供肥水平的经济合理施肥量。

当 $R = 0.2$, $P_N / P_Y = 2$, $P_P / P_Y = 2.5$ 时, 经济合理施肥量的计算公式为:

$$N(\text{kg}/\text{hm}^2) = 238.65 - 0.0027N_5^2 - 2.25\text{CEC} - 11.25\log P_s$$

$$P_2O_5(\text{kg}/\text{hm}^2) = 245.7 - 0.000315N_5^2 - 0.27\text{CEC} - 173.55\log P_s$$

由上式可以看出, N、P 肥的经济合理施肥量和施肥利润随土壤阳离子交换量、土壤碱解氮和土壤速效磷含量的增加而减少。

为了验证该模型的准确性, 将根据综合模型预报的产量同实际产量进行了相关分析, 结果达极显著相关($r=0.84^{**}$), 这表明利用正交趋势分析方法进行大面积推荐施肥是可行的。

以上论述的推荐施肥方法将肥料效应函数法和测土施肥技术有机结合起来, 取长补短, 形成了一项以田间生物试验为基础, 土壤测试和多点分散试验相结合的综合技术, 不仅可以起到宏观控制化肥合理分配的作用, 而且也能担负起微观分类指导农户科学施肥的任务, 这种方法具有很强的扩充功能, 根据宏观控制施肥面积的大小, 模型中的地点变量也可以包括降水、温度等气候变量和地点虚变量^[3,6], 因而有着广泛的应用前景。

3 结语

正交趋势分析方法简便、快速, 并且具有很强的扩充功能。是肥料效应函数与测土施肥技术的有机结合, 适于推荐施肥方面的研究, 可用于自变量为非等间隔的情况, 对指导大面积经济施肥是可行的。随着土壤测试技术和数理统计学的进一步发展, 这种方法将更趋于完善。

参 考 文 献

- 1 毛达如、张承东. 推荐施肥技术中施肥模型与试验设计的研究. 土壤通报, 1991, 22(5):216~218.
- 2 申建波. 正交趋势分析及其试验设计. 见王兴仁, 张福锁主编, 现代肥料试验设计, 农业出版社, 128~139.
- 3 Colwell JD. Development and evaluation of general or transfer models of relationships between wheat yields and fertilizer rates in Southern Australia. Australian Journal of Soil Research, 1984, 22:191~205.
- 4 Gomez KA and Gomex AA. Statistical procedures for agricultural research. Second edition. International Rice Research Institute, John Wiley & Sons, New York, 1984.
- 5 李仁岗, 王克武. 冬小麦施肥模式的初步研究. 土壤, 1990, 4:210~211.
- 6 杨卓亚, 毛达如, 黄金龙, 卢志光. 基于年景变化的施肥决策. 北京农业大学学报, 1995, 21(增):17~22.

USING ORTHOGONAL TREND ANALYSIS TO DEVELOP THE LARGE-AREA ECONOMIC FERTILIZATION MODELS

Shen Jianbo

(*Depart. of Plant Nutrition, China Agri. Univ., Beijing 100094*)

Li Rengang

(*Hebei Agri. Univ., Baoding 071001*)

Abstract The mathematical models of large-area economic fertilization based on fertilizer-yield response experiments were developed, by using orthogonal trend analysis. The theory and the method to develop the models were analysed and the properties of the fertilization models were discussed. The relationships among fertilizer requirements, crop yields and soil nutrient supplying amounts were established in the fertilization models. The economic rational fertilizer requirements can be estimated by the prediction of yield response functions determined through testing soil nutrient supplying amounts. The models were proved by large-area fertilizer field experiments for rice to have a good accuracy and sensitivity.

Key words Fertilization models; Orthogonal trend analysis; Fertilizer recommendation