植物营养与肥料学报 2002,8(4):409～413
Plant Nutrition and Fertilizer Science

“3414”肥料试验模型拟合的探讨

王圣瑞[1]，陈新平[1]*，高祥照[2]，毛达如[1]，张福锁[1]
（1 农业部植物营养学重点开放实验室，中国农业大学植物营养系，北京 100094；
2 农业部全国农业技术推广服务中心，北京，100026）

摘要：以 UNDP95－98 年在河北唐山进行的 27 个“3414”冬小麦试验为例，研究了三元二次施肥模型与一元施肥模型对“3414”肥料试验结果的拟合情况。结果表明，三元二次施肥模型进行拟合试验成功率仅为 56%，而采用一元施肥模型可以对全部试验进行数据处理。在同一试验中，与一元施肥模型相比，采用三元二次施肥模型计算的推荐施肥量偏高；根据一元施肥模型拟合计算分别有 15%、44%、67%的点不需要施用 N、P、K 肥，而采用三元二次施肥模型则无法获得这一信息。因此，在“3414”试验中，一元施肥模型是三元二次施肥模型拟合的一种很好补充和优化手段。

关键词：“3414”肥料试验；三元二次施肥模型；一元施肥模型；最佳施肥量
中图分类号：S11　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2002)04-0409-05

Study on simulation of “3414” fertilizer experiments

WANG Sheng-rui[1], CHEN Xin-ping[1], GAO Xiang-zhao[2], MAO Da-ru[1], ZHANG Fu-suo[1]
(*1 Dept. of Plant Nutrition, China Agric. Univ., Beijing 100094, China;*
2 National Agro-Tech. Exten. and Serv. Center, Beijing 100009, China)

Abstract: This paper studied the effects of different fertilizer models on simulation for the“3414” fertilizer experiments, which were conducted from 1995 to 1998 in Tangshan City in Hebei Province, sponsored by UNDP (United Nations Development Program). The results showed that, the success ratio of simulation by three-factor and one-factor model was 56% and 100%, respectively; the recommended fertilizer amount by three-factor model simulation was higher than that by one-factor model simulation in the same ‘3414’ experiment; and the ratio of the experiments without N, P_2O_5 and K_2O recommended by one-factor model simulation was 15%, 44% and 67% , respectively. But by the three-factor model simulation, such information was not available. So, in ‘3414’ fertilizer experiment, the one-factor model was a supplement and an optimization for the three-factor model.

Key words: “3414” fertilizer experiment; three-factor model; one-factor model; optimum fertilizer rate

1993～1998 年，中国政府与联合国开发计划署(UNDP)共同实施的平衡施肥 CPR/91/123 项目，在河北唐山、黑龙江双城、陕西宝鸡、江苏盐城、浙江金华、湖南邵阳和四川泸县等地进行了 600 多个田间试验，其中有 351 个以“3414”(或“3417”) 试验方案实施[1]。“3414”试验方案既吸收了回归最优设计处理少、效率高的优点，又符合肥料试验和施肥决策的专业要求。它不仅可以作为一个完整的三因素试验用于建立三元二次肥料效应回归方程，而且还可以作为三个二因素或三个单因素试验建立二元或一元肥料效应回归方程。同时，即使某一个或某几个处理出问题，仍可以获得一些用于施肥决策的有

收稿日期：2001-09-17
基金项目：联合国开发计划署(UNDP)平衡施肥项目(CPR/91/123)资助。
作者简介：王圣瑞(1972—)，男，内蒙古呼和浩特人，博士研究生，主要从事养分资源管理方面的研究。* 通讯作者

价值信息，提高了试验效率。此外，该方案的另一个优点是编码值取整数，有较直观的可比性，便于实施与示范推广[2]。

“3414”试验设计是用三元二次施肥模型对数据进行拟合。虽然“3414”试验设计具有很大的信息挖掘能力，然而，人们在实际工作中往往只采用三元二次肥料效应回归方程进行拟合，很少或几乎不考虑二元或一元肥料效应回归方程进行拟合，在三元二次肥料效应方程拟合不成功时，往往放弃对试验数据的处理，致使“3414”试验的效率降低。在实际应用中，相当多的试验结果因不能用三元二次模型进行拟合而被舍弃，这是当前这一工作中存在的一个实际问题。迄今为止国内学术界对这一问题及其产生的后果尚未予以足够的重视。相当多的试验结果因不能被三元二次模型拟合而被舍弃，造成信息的失真。采用“3414”试验设计，其试验结果不仅可以用三元二次肥料效应函数拟合，而且还可以用二元或一元肥料效应函数拟合。当三元二次模型不能对其进行拟合时，如采用一元或二元施肥模型可挖掘其更多的信息，从而使结果更完整和全面。关于单因素施肥模型的选择问题，近年来国内外有较大进展[3~5]。普遍认为，应根据具体情况选择适宜的施肥模型，而线形加平台模型与二次加平台模型更能反映当前生产条件下，由于高产耐肥品种的推广应用，在一定的施肥量范围内，即使过量施肥产量也不下降的效应趋势。

本文以 UNDP 平衡施肥项目从 1995～1998 年在河北唐山进行的 27 个“3414”冬小麦肥料试验为例，比较研究应用三元二次肥料效应模型进行拟合与应用一元肥料效应模型拟合的效果，以期更好地开发现有的大量试验数据资源，尽可能多地挖掘这些试验中可以获得的信息，为进行科学施肥工作提供研究方法。

1 材料与方法

以 1995～1998 年在河北唐山进行的 27 个“3414”冬小麦肥料试验数据进行研究。“3414”方案的试验处理见表 1。

采用三元二次肥料效应模型进行拟合时，所采用的方程为：

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + b_3x_2 + b_4x_2^2 + b_5x_3 + b_6x_3^2 + b_7x_1x_2 + b_8x_1x_3 + b_9x_2x_3$$

根据边际收益等于边际成本，即 $d_y \cdot p_y = d_x \cdot p_x$ 的原则计算经济最佳施肥量[5]。

在“3414”试验设计中，一般将第 2 水平作为可能的最佳用量。我们认为研究单因素的肥料效应时不应该受到其它

表 1 “3414”方案试验处理

Table 1 Designs of the program of “3414” fertilizer experiment

编号 Code	N(x_1)	P(x_2)	K(x_3)
1	0	0	0
2	0	2	2
3	1	2	2
4	2	2	2
5	3	2	2
6	2	0	2
7	2	1	2
8	2	3	2
9	2	2	0
10	2	2	1
11	2	2	3
12	1	1	2
13	1	2	1
14	2	1	1

注(Note)：“0”为不施肥 without fertilizer，“1”为低肥 low rate，“2”为中肥 Middle rate，“3”为高肥 High rate。

因素因不足或过量而造成的影响(对于 N、P、K 而言，轻微的过量一般不会造成大的影响)，因此，将其它 2 个因素定在 2 水平上应该是合理的。采用一元肥料效应模型进行拟合时，以处理 2、3、4、5(不同 N 水平，P、K 适量)进行 N 肥效应拟合；以处理 6、7、4、8(不同 P 水平，N、K 适量)进行 P 肥效应拟合；以处理 9、10、4、11(不同 K 水平，N、P 适量)进行 K 肥效应的拟合。采用的单因素肥料效应模型分别为：

直线加平台(Linear plus plateau)模型：

$$y = a + bx \quad (x \leqslant C)$$
$$y = P \quad (x > C) \qquad (1)$$

式中 y 为子粒产量(kg/hm²)，x 为肥料用量(kg/hm²)，a 为截距；b 为回归系数，C 为直线与平台的交点，P 为平台产量(kg/hm²)，当 $b > p_x/p_y$ 时，C 为优化施肥量，当 $b \leqslant p_x/p_y$ 时，此时的推荐施肥量为 0 kg/hm²(此模型实际是两条直线方程联立后所得)。

一元二次(Quadratic)模型：

$$y = a + bx + cx^2 \qquad (2)$$

式中 y 为子粒产量(kg/hm²)，x 为肥料用量(kg/hm²)，a 为截距；b 为一次回归系数，c 为二次回归系数，最佳肥料用量通过边际分析求得。

二次加平台(Quadratic plus plateau)模型：

$$y = a + bx + cx^2 (x \leqslant C) \quad y = P \ (x > C) \qquad (3)$$

式中 y 为子粒产量(kg/hm²)，x 为肥料用量(kg/hm²)，a 为截距；b 为一次回归系数，c 为二次回归系数，C 为二次型曲线与平台的交点，P 为平台的产量(kg/hm²)，最佳肥料用量通过边际分析求得。

平方根(Square root)模型：

$$y = a + bx^{0.5} + cx \quad (4)$$

式中 y 为子粒产量(kg/hm²), x 为肥料用量(kg/hm²),a 为截距;b 为平方根回归系数,c 为直线回归系数,最佳肥料用量通过边际分析求得。

计算采用的价格,N、P、K 肥以 N、P_2O_5、K_2O 计,均为 3 元/kg,小麦为 0.9 元/kg,所有模型的拟合均采用 SAS 软件计算。当试验结果表明施肥不增产时,则不采用上述模型进行拟合,直接给出推荐施肥量为 0 kg/hm²。

2 结果与分析

2.1 三元二次模型和一元肥料效应模型拟合结果的比较

以编号为 9510630033 的试验为例,对三元二次模型和一元肥料效应模型拟合结果进行比较。该试验处理及产量结果见表 2。采用三元二次肥料效应方程进行拟合时,计算所得的肥料效应方程为:

$$y = 196.6 + 5.3x_1 - 0.5x_1^2 + 1.6x_2 - 0.03x_2^2 + 12.7x_3 - 0.7x_3^2 + 0.7x_1x_2 + 0.5x_1x_3 - 0.5x_2x_3$$

($F = 29.68^{**}$)。

根据此方程计算的最佳施肥量(kg/hm²)为:N 220、P_2O_5 142、K_2O 143。

以一元肥料效应模型分别对 N、P、K 肥料效应进行拟合所得结果见表 3。根据模型的决定系数(R^2)、施肥的经济效益和推荐施肥量可能产生的环境风险,综合考虑一元肥料效应模型的选择问题,因此在上例试验中,采用一元肥料效应模型拟合的推荐施肥量(kg/hm²)应为:N 178 、P_2O_5 32、K_2O 98。综上采用三元二次肥料效应模型和一元肥料效应模型拟合得到的推荐施肥量见表 4。从表 4 可以看出,三元二次模型推荐的 N、P、K 肥施用量均高于一元肥料效应模型, N 高出 41、P_2O_5 高出 110、K_2O 高出 46 kg/hm²。

2.2 不同施肥模型拟合成功率比较

从不同施肥模型拟合成功率来讲,使用三元二次模型拟合时有效试验数占总试验数的 56%,即有 44%的试验是无法利用的;而采用一元肥料效应模型拟合有效试验数为 100%,基本上挖掘出了试验的大多数信息(表 5)。

2.3 "3414"试验不同施肥模型拟合推荐施肥量差异

图 1 可以看出,全部 27 个冬小麦试验中,一元肥料效应模型计算的 N 肥推荐用量有 81%的试验在 0～200 kg/hm²,其中有 15%的试验 N 肥推荐用量为 0 kg/hm²,19%的试验 N 肥推荐用量超过 200 kg/hm²,平均为 127 kg/hm²;在三元二次模型拟合成功的 15 个试验中,计算的 N 肥推荐用量在所有试验中均高于 100 kg/hm²,其中有 60%的试验为 100 ～200 kg/hm²,40%的试验超过 200 kg/hm²,平均为 229 kg/hm²。全部 27 个冬小麦试验中,一元肥料效应模型计算的 P 肥推荐用量有 81%的试验低于 100 kg/hm²,其中有 44%的试验 P 肥推荐施用量为 0 kg/hm²,平均为 54 kg/hm²;在三元二次模型

表 2　编号为 9510630033 的试验各处理肥料用量及产量(kg/hm²)

Table 2　Fertilizer input and grain yields of the No. 9510630033 experiment

编号 Code	N(x_1)	P_2O_5(x_2)	K_2O(x_3)	产量 Grain yield(DW)	
				Ⅰ	Ⅱ
1	0	0	0	2034	2175
2	0	240	120	2192	2600
3	105	240	120	4625	4758
4	210	240	120	5424	5417
5	315	240	120	5567	5058
6	210	0	120	4533	4817
7	210	120	120	5025	4934
8	210	360	120	5325	5159
9	210	240	0	4409	4301
10	210	240	60	5042	4634
11	210	240	180	5201	4941
12	105	120	120	4559	4083
13	105	240	60	4317	4334
14	210	120	60	4442	4625

表3 编号为9510630033的试验应用一元肥料效应模型拟合结果

Table 3 The results of experiment No. 9510630033 simulated by one-factor fertilization model

肥料 Fertilizer	模型 Model	效应方程 Equation	最佳施肥量 Optimum N supply (kg/hm²)	最佳施肥效益 Optimum profit (yuan/ hm²)
N	线形加平台 Linear plus plateau	$y=2394+21.9x$ $(x\leqslant 136)$; $y=5366$ $(x>136)$ $(R^2=0.981)$	136	2676
	二次加平台 Square plus plateau	$y=2393+29.7x-0.07x^2$ $(x\leqslant 181)$; $y=5366$ $(x>181)$ $(R^2=0.980)$	178	2763
	平方根 Square root	$y=2380+325.7x^{0.5}-8.8x$ $(R^2=0.975)$	195	2537
	一元二次 Square	$y=-0.06x^2+26.2x+2430$ $(R^2=0.978)$	191	2566
P_2O_5	线形加平台 Linear plus plateau	$y=4665+2.7x$ $(x\leqslant 240)$; $y=5319$ $(x>240)$ $(R^2=0.868)$	0	0
	二次加平台 Square plus plateau	$y=4675+30.0x-0.42x^2$ $(x\leqslant 33)$; $y=4103$ $(x>33)$ $(R^2=0.630)$	32	383
	平方根 Square root	$y=4661+45.0x^{0.5}-0.6x$ $(R^2=0.756)$	45	234
	一元二次 squre	$y=-0.008x^2+4.80x+4637$ $(R^2=0.833)$	94	308
K_2O	线形加平台 Linear plus plateau	$y=4355+8.1x$ $(x\leqslant 111)$; $y=5246$ $(x>111)$ $(R^2=0.815)$	111	802
	二次加平台 Square plus plateau	$y=4355+30.0x-0.30x^2$ $(x\leqslant 46)$; $y=5110$ $(x>46)$ $(R^2=0.646)$	46	680
	平方根 Square root	$y=4334+117.5x^{0.5}-4.0x$ $(R^2=0.725)$	74	299
	一元二次 squre	$y=-0.06x^2+15.0x+4303$ $(R^2=0.827)$	98	841

表4 编号为9510630033试验采用不同模型计算的推荐施肥量结果比较(kg/hm²)

Table 4 The comparison of the results simulated by different fertilizer models for the No. 9510630033 experiment

施肥模型 Fertilizing models	N	P_2O_5	K_2O
三元二次模型 Three-factor model	220	142	143
一元肥料效应模型 One-factor model	178	32	98

拟合成功的15个试验中,计算的施P量仅有27%的试验低于100 kg/hm²,60%的试验计算施P量超过200 kg/hm²,平均为219 kg/hm²。全部27个冬小麦试验中,一元肥料效应模型计算的K肥用量全部低于150 kg/hm²,其中67%的试验为0 kg/hm²,26%的试验在100~150 kg/hm²,平均20 kg/hm²;在三元二次模型拟合成功的15个试验中,计算的施K量有93%的试验在100~150 kg/hm²,有7%的试验计算施P肥量超过150 kg/hm²,平均为130 kg/hm²。

3 讨论

三元二次施肥模型的主要优点在于考虑了肥料的交互作用,但从本文的结果来看,该模型在对"3414"试验进行拟合并计算推荐施肥量时存在以下缺陷:1)试验成功率低,就本文的研究结果而言三元二次施肥模型拟合成功率仅为56%;2)对于那些拟合不成功的试验,三元二次施肥模型往往放弃了对它们的研究,随之也丢失了这些试验内涵的信息;3)三元二次施肥模型拟合不但试验成功率较低,而且在成功的试验中推荐施肥量偏高,不但造成施肥的经济效益下降,同时极有可能引起环境问题;4)三元二次模型拟合常常忽略了试验中得到的某些试验点

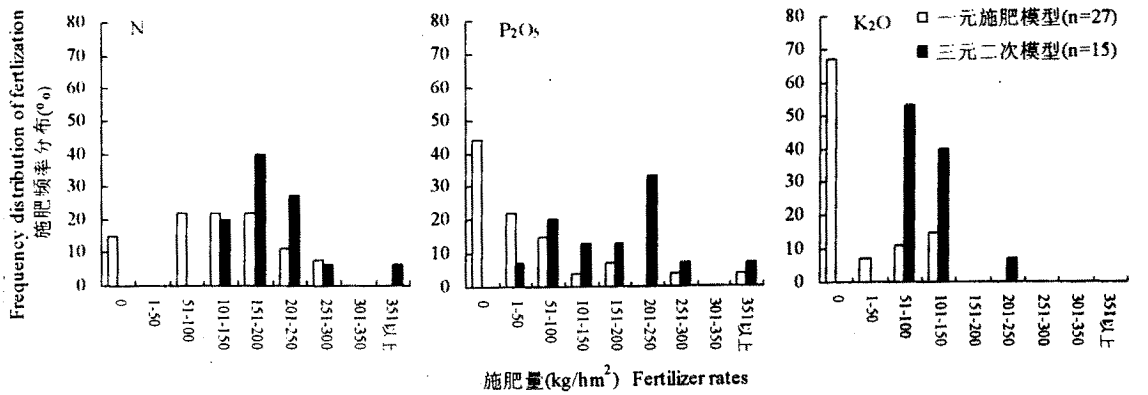

图 1　"3414"试验三元二次模型与一元施肥模型计算施肥量差异

Fig. 1　The difference of fertilizer amount between three－factor model and one－factor model

表 5　不同施肥模型拟合成功率比较

Table 5　The ratio of available experiments calculated by different fertilizer models

模型 Model	肥料 Fertilizer	总试验数 Tot. exp No.	有效试验数 No. of available experiments	
			No.	占总试验数百分数 % of total exp.
一元施肥模型 One-factor model	N	27	27	100
	P	27	27	100
	K	27	27	100
三元二次模型 Three-factor model	N	27	15	56
	P	27	15	56
	K	27	15	56

不需要施肥或某一养分不需要施肥的信息,所以,在对多点试验进行分析时应用三元二次肥料效应模型拟合代表性较差。本文 27 个试验中有 2/3 的点施 K 肥不增产,如果采用三元二次模型拟合,在拟合成功的 15 个试验中都需要施用超过 100 kg/hm² 的 K_2O,这一结果无论对指导肥料的宏观管理还是具体田块的推荐施肥都会产生误导。

采用一元肥料效应模型计算"3414"试验推荐施肥量时,拟合成功率高,可以开发三元二次模型不能利用的信息资源,结果更为全面合理。至于养分间的交互作用问题,一元肥料效应模型拟合"3414"试验时,把一个"3414"试验分成 3 个单因素试验,虽然作为单因素试验处理,但其中隐含了交互作用,因为在考虑其中 1 个因素时,另外 2 个因素是完全满足需要的,实际上是在交互作用存在的条件下研究单一因素,不足之处在于不能把交互作用量化。因此,可以说,在"3414"试验结果的计算过程中,一元肥料效应模型的拟合是对三元二次肥料模型拟合的补充和优化。

参 考 文 献:

[1] 全国农业技术推广服务中心. UNDP 平衡施肥项目在中国成效显著[A]. 中国农业科学院土壤肥料研究所. 国际平衡施肥学术讨论会论文集[C]. 北京:中国农业出版社,1998. 1-12.

[2] 王兴仁,张福锁,等. 现代肥料试验设计[M]. 北京:中国农业出版社,1996. 93-95.

[3] 王兴仁,等. 施肥模型在我国推荐施肥中的应用[J]. 植物营养与肥料学报,1998; 4(1): 67-74.

[4] 陈新平,等. 小麦—玉米轮作制中氮肥效应模型的选择—经济和环境效益分析[J]. 土壤学报, 2000,37(3): 346-353.

[5] Cerrato M E and Blackmer A M. Comparision of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer[J]. Agron. J., 1990,82(1): 138-143.

[6] 陈伦寿,李仁岗. 农田施肥原理与实践[M]. 北京:中国农业出版社, 1994. 49-107.