

测土配方施肥指标体系建立中 “3414”试验方案应用探讨 —以内蒙古海拉尔地区油菜“3414”试验为例

杨俐苹¹, 自由路¹, 王贺¹, 王磊¹, 卢艳丽¹, 吴国志²

(1 农业部作物营养与施肥重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

2 内蒙古自治区海拉尔农牧场管理局, 内蒙古海拉尔 021000)

摘要: 针对测土配方施肥指标体系建立中遇到的技术问题, 以内蒙古自治区海拉尔地区 2007 ~ 2009 三年油菜试验数据为例, 对应用“3414”试验数据进行土壤养分分级、基于三元二次肥料效应模型建立施肥指标体系进行了研究, 并就“3414”试验方案实施条件以及不同数学模型在肥料效应函数计算中的应用进行了探讨。提出了海拉尔地区油菜土壤有效磷的分级和施肥指标: 当土壤有效磷低于 7 mg/kg 时, 推荐施磷量为 120 kg/hm²; 当土壤有效磷在 7 ~ 26 mg/kg 时, 推荐施磷量为 90 kg/hm²; 当土壤有效磷在 26 ~ 50 mg/kg 时, 推荐施磷量为 60 kg/hm²; 而当土壤有效磷高于 50 mg/kg 时, 一般不再推荐施用磷肥。该地区多数土壤速效钾含量在 150 ~ 400 mg/kg 范围, 土壤速效钾含量已经在常规土壤速效钾分级指标的高限范围, 但作为干旱地区风险施肥管理措施, 仍然建议施用 20 ~ 60 kg/hm² 钾肥。测土配方施肥指标体系建立中, “3414”试验方案实施前, 应该在首先了解土壤养分限制因素的前提下进行肥料用量试验, 而不是简单地一个地区采用一个试验方案。无论是采用哪种数学模型模拟肥料效应函数, 都必须清楚肥料效应函数除了符合数学模型要求外, 还要求符合肥料报酬递减率等农业化学的基本理论和农业生产实际。

关键词: 肥料效应函数; 施肥模型; 推荐施肥; 肥力分级指标

中图分类号: S634.3.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)04-1018-06

Application of “3414” field trial design for establishing soil testing and fertilizer recommendation index

YANG Li-ping¹, BAI You-lu¹, WANG He¹, WANG Lei¹, LU Yan-li¹, WU Guo-zhi²

(1 Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Hailaer Agriculture and Animal Husbandry Management Bureau, Inner Mongolia Autonomous Region, Hailaer, Inner Mongolia 021000, China)

Abstract: The paper discussed the application of “3414” field trial design in soil testing and fertilizer recommendation using three years data collected in Hailaer, Inner Mongolia. The results showed phosphorus fertilizer recommended rate were 120, 90, 60 and 0 kg/ha when the soil available P (Olsen-P) was classified as low, medium, optimum and above optimum (Olsen-P < 7 mg/kg, 7-26 mg/kg, 26-50 mg/kg and > 50 mg/kg) based on the relative yield and the model of quadratic equation in three variables. Soil available K were at relative high levels in most of the soil but potassium fertilizer was still recommended because of the dry climate condition in this region. The recommended potassium fertilizer rate was 20-60 kg/ha as a risk fertilizer management strategy. Considering fertility field trials is an expensive and time consuming task and the results from field trial were incomplete or incorrect sometimes, it was emphasized the field trials for fertilizer rate should not carried out unless the soil testing

收稿日期: 2010-06-12 接受日期: 2010-09-13

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2008BADA4B01) 资助; 国际植物营养研究所 (IPNI) 项目资助。

作者简介: 杨俐苹 (1964—), 女, 重庆人, 博士, 研究员, 主要从事土壤植物测试及推荐施肥。Email: lpyang@caas.ac.cn

本文为 2010 中国植物营养与肥料学会学术年会会议论文。

results are available. A fixed rate and ratio of NPK in “3414” field trial for all soil nutrient condition should not be adopted for one region. The type of mathematical model selected on the identification of the nutrient rate required for optimum yield is not only meaningful and significant trends ($P > 0.05$) in mathematics but also practical and useful in agricultural production and agricultural chemistry philosophy, which fit the law of diminishing returns of crop response to fertilizer.

Key words: fertilizer response function; fertilization mode; fertilizer recommendation; categories of soil fertility

全国性的测土配方施肥工作已经开展了第6个年头,为建立测土配方施肥技术指标,农业部全国农业技术推广服务中心把“3414”试验作为推荐的主要田间试验方案。“3414”设计是陈伦寿、李仁岗^[1]在国外“3411”多点肥料试验方案的基础上,加了12~14个处理后得到的方案,该方案设计吸收了回归最优设计处理少、效率高的优点,同时又适合肥料试验和施肥决策的专业要求。它可以作为一个完整的3因素试验用于建立三元二次肥料效应回归方程,从而计算氮、磷、钾肥最高产量时施肥量和最佳经济效益施肥量。因此“3414”试验被认为是目前国内应用较为广泛的试验效率高的肥料效应田间试验方案^[2]。

6年来,各地在不同作物、不同土壤类型上开展了大量的“3414”田间试验,力图通过田间试验建立不同地区、不同作物的测土配方施肥指标体系。但是,多数地区“3414”试验的成功率不高,一些研究显示“3414”试验拟合三元二次肥料效应模型的成功率只有50%左右^[2],甚至只有9%^[3]。究其原因除了田间试验条件的难于控制以及不同地区农业技术人员对田间试验管理水平的差异导致试验结果的可靠性差异外,各地采用统一的“3414”试验设计的合理性值得探讨。本研究以内蒙海拉尔地区2007~2009年3年油菜“3414”田间试验结果为例,分析探讨“3414”试验方案实施条件以及肥料效应模型的应用,以提高农业技术人员对肥料效应函数及其肥料用量试验的认识,采用正确的试验设计和数学模型模拟和研究作物对施肥的反应。

1 材料与方法

1.1 试验设计

以内蒙古海拉尔地区10个农牧场2007~2009年81个油菜“3414”田间试验数据进行研究。内蒙古海拉尔地区位于我国东北地区、内蒙古东部、紧临黑龙江西部,东经119°03′~124°02′,北纬47°05′~50°45′。气候冷凉,年均气温-4~-2℃;光能资源丰富,年均日照2600~3000 h。年均降水量381

mm,降水集中,6~8月降雨占全年70%。作物一年一熟,春油菜为该区主要经济作物。油菜“3414”田间试验方案按照内蒙古自治区农业技术推广站统一要求,设计了氮、磷、钾3因素、4水平、14个处理的田间肥料试验方案。4水平的含义是:0水平为不施肥,2水平为根据以往经验的当地平均最佳施肥水平,1水平为2水平的0.5倍,4水平为2水平的1.5倍。油菜具体的施肥处理及肥料用量见表1。

表1 “3414”试验方案处理
Table 1 “3414” field trial design

编号 No.	处理 Treatment	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
		(kg/hm ²)		
1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0
2	N ₀ P ₂ K ₂	0	90	45
3	N ₁ P ₂ K ₂	37.5	90	45
4	N ₂ P ₀ K ₂	75	0	45
5	N ₂ P ₁ K ₂	75	45	45
6	N ₂ P ₂ K ₂	75	90	45
7	N ₂ P ₃ K ₂	75	135	45
8	N ₂ P ₂ K ₀	75	90	0
9	N ₂ P ₂ K ₁	75	90	22.5
10	N ₂ P ₂ K ₃	75	90	67.5
11	N ₃ P ₂ K ₂	112.5	90	45
12	N ₁ P ₁ K ₂	37.5	45	45
13	N ₁ P ₂ K ₁	37.5	90	22.5
14	N ₂ P ₁ K ₁	75	45	22.5

试验前在试验地块取土样,15~20个点混合为一个土样,代表该地块的肥力水平。用我国常规分析方法分析土壤全氮、有机质、碱解氮、有效磷(Olsen-P)、速效钾(醋酸铵浸提K)含量。

1.2 数据统计方法

1.2.1 土壤磷钾肥力分级指标的建立 用缺素区的相对产量即不施磷(钾)处理的产量除以施用磷

(钾)肥 4 个水平所对应的最大产量作为不施磷(钾)相对产量,以土壤有效磷(速效钾)为 X 坐标, 缺素处理的相对产量为 Y 轴作散点图,通过数学模型(如二次模型、对数模型、直线模型等)拟合相对产量与土壤测试值之间的数学关系,选择相关系数最高的数学模型。通过 75%、90%、95% 相对产量对应的土壤养分含量划分土壤养分丰缺指标的低、中、高范围。即,当因不施用某种元素肥料作物产量达到 35% 减产时,该种营养元素在土壤中的有效含量水平已经低到严重影响了作物产量,土壤有效养分水平为低,必须施用该营养元素肥料,否则引起严重的经济损失;而当不施用某种元素肥料作物产量达到 10%~35% 减产时,土壤中该种元素的有效含量偏低,仍然需要施用该元素,施用该养分元素肥料效果比较显著;当不施用某种元素肥料作物减产达到在 10% 以下时,土壤中该种元素的有效含量较高,施用该养分元素肥料仍有一定效果;当不施用某种元素肥料作物减产在 5% 以内时,土壤中该种元素的有效含量高,施肥效果不稳定。

1.2.2 肥料效应方程及施肥量的计算 对所有“3414”试验数据采用三元二次模型拟合,分析确定各试验的最高产量时磷、钾的施用量。所采用的三元二次方程为:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 + b_6x_3^2 + b_7x_1x_2 + b_8x_1x_3 + b_9x_2x_3$$

式中: \hat{y} 为油菜子粒最高产量; x_1 、 x_2 、 x_3 分别为氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥料用量; b_0 到 b_9 为三元二次方程的各项回归系数。通过以上方程,可知道作物产量与施肥量的回归关系,进一步对 x_1 、 x_2 、 x_3 求偏导数,根据自变量 x 的边际效益等于零,计算最高产量的施肥量。对不能拟合三元二次模型的试验采用降元处理(二元二次或一元二次模型)求取最高产量的施肥量^[2-3]。

2 结果与分析

2.1 土壤有效磷、钾分级指标

2.1.1 土壤有效磷分级指标 根据油菜试验地块不施磷处理的相对产量与土壤有效磷含量作散点图(图 1),分别用直线方程、二次方程、对数方程等拟合相对产量与土壤测试值之间的数学关系如下:

$$\text{直线模型 } y = 0.4596x + 75.714, r = 0.328^{**};$$

$$\text{二次模型 } y = -0.0225x^2 + 1.4968x + 65.051, \\ r = 0.358^{**};$$

对数模型 $y = 9.787\ln(x) + 56.168, r = 0.344^{**}$ 。

三种数学模型均达到显著相关($P < 0.01$),表明土壤有效磷含量与油菜相对产量的关系显著相关,并且可以用三种数学模型描述。选择相关系数最高的数学模型,即二次模型作为反映土壤有效磷测试值与相对产量关系的数学模型,分别计算相对产量达到 75% 和 90% 时土壤有效磷含量为 7 和 26 mg/kg,作为低、中水平的土壤有效磷分级指标。但是由于该二次抛物线的顶点在 90% 附近,所以根据二次模型不能计算出相对产量 95% 时的土壤有效磷含量。如果选择相关系数次高的数学模型,即对数模型作为反应土壤有效磷测试值与相对产量关系的数学模型,分别计算相对产量达到 75% 和 90% 及 95% 时土壤有效磷含量为 7、28 及 50 mg/kg,作为极低、低水平、适宜范围的土壤有效磷分级指标。

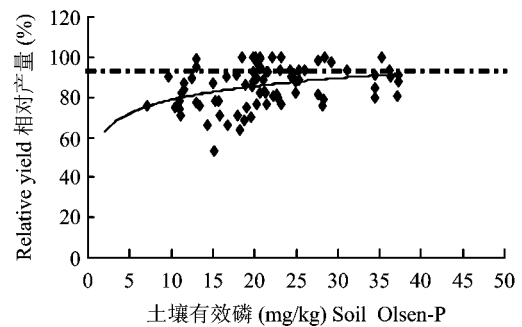


图 1 不施磷处理的土壤有效磷含量与相对产量关系

Fig. 1 The relationship between soil Olsen-P and relative yield of rape seeds

综合两种数学模型结合实际土壤有效磷状况和施磷水平,得到该地区油菜土壤有效磷分级标准(表 2)。当土壤有效磷低于 7 mg/kg 时,相对产量小于 75%;当土壤有效磷处在 7~26 mg/kg 时,相对产量在 75%~90%;当土壤有效磷处在 26~50 mg/kg 时,相对产量在 90%~95%;而当土壤有效磷高于 50 mg/kg 时,相对产量在 95% 以上。

表 2 油菜土壤有效磷丰缺指标

Table 2 Categories of soil Olsen-P for rape seeds

土壤有效磷分级 Categories of Olsen-P	土壤有效磷含量 Soil Olsen-P (mg/kg)	相对产量 Relative yield (%)
极低 Very Low	<7	<75
低 Low	7~26	75~90
中 Medium	26~50	90~95
高 High	>50	>95

2.1.2 土壤有效钾分级指标 用缺素区的相对产量即不施钾处理的产量除以施用钾肥4个水平所对应的最大产量作为不施钾相对产量,以土壤速效钾为X坐标,缺钾处理的相对产量为Y轴作散点图(图2),通过数学模型(如二次模型、对数模型、直线模型等)拟合相对产量与土壤测试值之间的数学关系如下:

直线模型 $y = 0.0036x + 92.374$, $r = 0.065$;

二次模型 $y = -5E-05x^2 + 0.0326x + 88.422$,
 $r = 0.138$;

对数模型 $y = 1.102\ln(x) + 87.251$, $r = 0.075$ 。

结果显示,该地区土壤有效钾含量与油菜相对产量无显著相关性,任何一种数学模型都难以描述该地区土壤速效钾和油菜产量的相关性。原因可能是由于该地区土壤速效钾水平较高,多数土壤速效钾含量在150~400 mg/kg范围,已经超出常规土壤速效钾分级指标的高量范围。

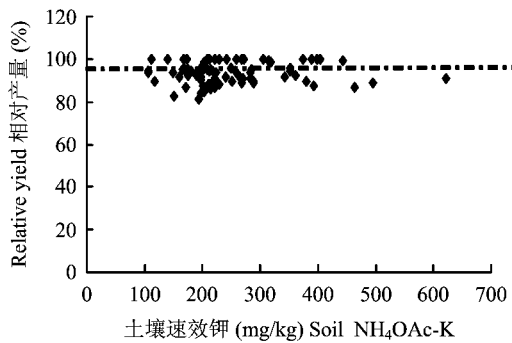


图2 不施钾处理的土壤有效钾含量与相对产量关系
Fig.2 The relationship between soil $\text{NH}_4\text{OAc-K}$ and relative yield of rape seeds

2.2 肥料效应模型与施肥量

分析海拉尔地区3年共81个“3414”田间试验结果,采用三元二次肥料效益模型进行拟合。首先通过F检验来判断回归模型的回归效果。结果显示只有19.6%的试验回归模型的显著性水平 $P < 0.05$,达到显著水平。说明81个试验中油菜产量与氮、磷、钾肥施用量之间具有显著的回归关系的占不到20%。同时,根据肥料报酬递减率和二次数学函数曲线的特点,除了回归方程F检验需要达到显著水平($P < 0.05$)以上外,该模型必须具有实际意义,这就要求此处的二次数学函数曲线必须是在一象限并且是开口向下的二次抛物线即符合报酬递减律,否则只能说在数学上回归模型的拟合成功无实际意义。因此要求除回归方程F检验需要达到显著水

平($P < 0.05$)以上外,三元二次模型的各二次项系数 b_4 、 b_5 和 b_6 还必须是负值,一次项系数 b_1 、 b_2 、 b_3 必须是正值,三元二次肥料效益模型才算真正拟合成功。本研究中,既达到方差分析回归方程F检验需要达到显著水平($P < 0.05$)以上,三元二次模型各二次项系数 b_4 、 b_5 和 b_6 又是负值,一次项系数 b_1 、 b_2 、 b_3 同时是正值的,仅占9.8%。

2.2.1 磷肥推荐施肥指标的建立 剔除试验异常点(在较低土壤有效磷含量时最大产量施磷量为零或极低以及土壤有效磷含量很高时仍然计算出一个较高的施磷量)后土壤有效磷含量与最大产量施磷量的关系(图3)显示,土壤有效磷含量与最大产量施磷量成显著负相关, $r = 0.330^*$, $n = 53$,直线方程为 $y = -1.1625x + 119.28$ 。根据该线性模型,计算土壤有效磷含量各分级标准时最大产量施磷量,并设置为推荐施磷量。表3看出,当土壤有效磷低于7 mg/kg时,推荐施磷量为120 kg/km²;当土壤有效磷在7~26 mg/kg时,推荐施磷量为90 kg/km²;当土壤有效磷在26~50 mg/kg时,推荐施磷量为60 kg/km²;而当土壤有效磷高于50 mg/kg时,一般不再推荐施用磷肥。本文仅以最高产量施肥量说明推

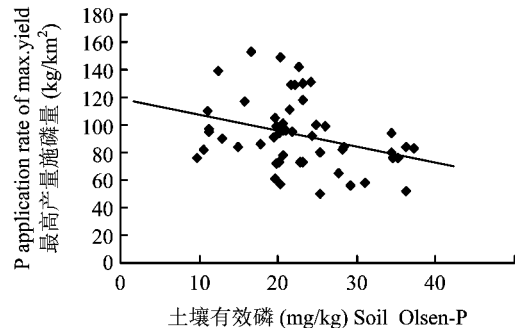


图3 油菜土壤有效磷含量与最大产量施磷量关系
Fig.3 The relationship between soil Olsen-P and P application rate of max. yield for rape seeds

表3 油菜土壤有效磷丰缺指标及推荐施磷量
Table 3 Soil Olsen-P and recommended P application rate for rape seeds

土壤有效磷分级 Categories of Olsen-P	土壤有效磷含量 Soil Olsen-P (mg/kg)	推荐施磷量 Recommended P rate (kg/km ²)
极低 Very low	<7	120
低 Low	7~26	90
中 Medium	26~50	60
高 High	>50	0

荐施肥量的研究方法,一般应考虑当年的农产品价格和肥料价格的影响,计算最佳经济效益施肥量,作为合理施肥的推荐依据。

2.2.2 钾肥推荐施肥指标的建立 由于该地区土壤速效钾含量较高,普遍在 150 ~ 400 mg/kg 之间,土壤有效钾含量与油菜相对产量无显著相关性,试验数据难以建立土壤速效钾的分级指标。图 4 显示了土壤速效钾含量与最高产量施钾量之间的关系,结果表明二者无显著相关性($n = 53$)。但是,即使在如此高的土壤速效钾水平下,施用钾肥仍然有一定效果,特别是干旱年份,施钾效果好于正常年份。如 2007 年海拉尔降雨量显著低于正常年,油菜主要生育季 5 ~ 8 月份的总降雨量为 162 mm,施用钾肥 83.3% 的土壤有增产效果;而 2008 年该地区降雨量正常,油菜生育季总降雨量为 208.9 mm,施用钾肥 47.4% 的土壤有增产效果。可见,虽然该地区的土壤速效钾含量较高,但作为施肥风险管理措施,钾肥在该地区油菜种植中仍被建议推荐施用。根据 3 年试验结果,油菜目标产量为 1500 ~ 3000 kg/km²,当土壤速效钾含量在 250 mg/kg 以下时,推荐施用钾肥(K₂O)40 ~ 60 kg/km²;当土壤速效钾含量在 250 ~ 400 mg/kg 之间时,推荐施用钾肥(K₂O)20 ~ 40 kg/km²;土壤速效钾含量 > 400 mg/kg,可以不施用钾肥。

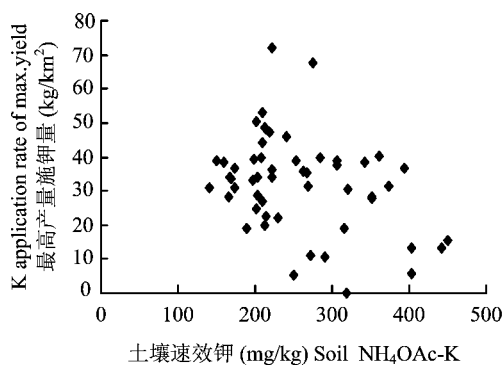


图 4 油菜土壤速效钾含量与最大产量施钾量关系
Fig. 4 The relationship between soil NH₄OAc-K and K application rate of max. yield for rape seeds

3 讨论

3.1 “3414”试验的实施条件

实践中发现,“3414”试验的成功率很低,除了前面提到的试验处理多(14 个处理),许多地方难以找到肥力水平一致的地块布置田间肥料试验,基层农技人员的农业科研管理水平差异大,造成试验出

错或失败外,对试验的实施条件认识不当是一个重要原因。因为假设客观条件如气候、水分、人为管理水平等完全一致时,“3414”试验成功的关键是第 2 水平的确定。由于“3414”试验各养分分为 4 个水平,第 2 水平的确定非常重要,2 水平过高、过低都会影响肥料效应函数的拟合。但是,2 水平的设置一般被建议为“按照本地区近年来开展的肥效试验和施肥调查数据进行统计分析,总结出本地区的最佳施肥量,把它确定为 2 水平”。但这种做法欠妥,如海拉尔地区 2007 ~ 2009 年 3 年油菜都采取了相同处理的肥料用量试验,试验的地块肥力水平并不一致,而不同的土壤养分含量所设置的 2 水平应有所差异,但试验中不管土壤养分高低,统统采取一个试验方案,土壤有效磷从 9.7 到 37.3 mg/kg,都用相同的 2 水平和磷肥处理浓度梯度。同样,土壤有效钾含量不管是 110 还是 457 mg/kg,都用相同的 2 水平和钾肥处理浓度梯度。若土壤养分测试值已经在高限范围,在这样高的土壤养分水平下,施肥已经无效,再做肥料用量试验只能造成浪费;而且处理数太多也难以达到优良的管理而出现错误。因此,建议各地在进行肥料用量试验之前,应该根据土壤养分测定值确定“3414”试验的 2 水平,如果该元素含量已经在高含量范围,则不必要再设置它的不同水平用量。总之,田间试验常常由于一些未知的非研究因子的干扰,使试验结果不完善、不正确或者混乱^[4]。只有在摸清土壤肥力状况和了解土壤养分限制因子的前提下有针对性地进行试验,试验才容易成功。

此外,“3414”试验的肥料用量水平数相对较少,只有 4 个,如果 2 水平设置不当或某一组合出了问题,就不易拟合成功肥料效应模型。因此如果对土壤养分水平不能很好估计,建议一般肥料用量试验以 5 ~ 6 水平为宜。王兴仁等^[5]曾建议减少试验因素,适当增加因素水平的措施,因为试验因素水平数太少,不能正确揭示肥料效应变化趋势。用 3 ~ 4 个水平的肥料用量试验必须是对养分水平的估计已经非常准确、并能合理控制肥料上、下限时才宜采取这种水平数少的肥料用量试验。

3.2 肥料用量研究的试验设计和肥料效应模型

毛达如等^[6]就推荐施肥技术中施肥模型和实验设计进行过研究和讨论,比较了二因素二次 D-饱和设计、二因素 5 水平回归设计以及二因素三水平完全均衡设计(3 × 3 设计)及不同数学模型如二次模型、平方根模型。结果表明,二次模型不同变换式都能较好反应肥料效应规律,但其中二次式模型

最佳;也有的研究表明,平方根式是肥料效应函数的最优模型^[7],认为基础肥力较低的宜用二次式,基础肥力较高的多适宜用平方根式。一些研究人员提出,如在三元二次肥料效应模型拟合不成功时改用二元二次或二元一次模型或者线性加平台模型、二次型加平台模型等拟合,可能增加肥料效应模型拟合成功的比例^[2-3, 8-10]。刘俊杰等^[8]提出了提高二次回归肥料试验成功率及函数典型率的技术优化措施,包括:(1)设置重复;(2)试验小区多向优化组合排列法,如D-最优设计排列;(3)选型回归统计,即通过二次、变换式的平方根式或者1.5次式进行回归统计,找到拟合度最高的施肥模型;(4)数据校正,对于可能发生较大误差的处理,利用缺区估计的方法校正数据,以增加获得典型函数的机会。章明清等^[11]针对“3414”田间试验三元二次模型大量存在非典型式的事实,提出采用Monte Carlo法为多元肥效模型提供参数估计。与二次模型采用最小二乘法回归建模相比,该方法是在参数寻优时牺牲数学上偏差平方和最小的最优性,使待估参数达到专业上最优而数学上较优,从而大大提高典型肥效模型的出现几率。

无论是采用哪种数学模型模拟肥料效应函数,都必须清楚肥料效应函数是数学中的一种特殊函数。因此既要符合数学要求,又要符合肥料报酬递减率等农业化学的基本理论要求,只有符合农业生产实际的肥料效应函数才有实际意义和价值。

参 考 文 献:

- [1] 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.
Chen L S, Li R G. Fertilization principals and practice [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1994. 49-107.
- [2] 王圣瑞,陈新平,高祥照,等. “3414”肥料试验模型拟合的探讨[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(4): 409-413.
Wang S R, Chen X P, Gao X Z *et al.* Study on simulation of “3414” fertilizer experiments [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2002, 8(4): 409-413.
- [3] 孙义祥,郭跃升,于舜章,等. 应用“3414”试验建立冬小麦测土配方施肥指标体系[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(1): 197-203.
Sun Y X, Guo Y S, Yu S Z *et al.* Establishing phosphorous and potassium fertilization recommendation index based on the “3414” field experiments [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(1): 197-203.
- [4] Portch S, Hunter A (杨俐苹译). 评价与改善土壤肥力的系统研究法[M]. 北京: 中国农业出版社,2005. 1-18.
Portch S, Hunter A (Yang L P trans.). A systematic approach to soil fertility evaluation and improvement [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005. 1-18.
- [5] 王兴仁,陈新平,张福锁,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.
Wang X R, Chen X P, Zhang F S *et al.* Application of fertilization model for fertilizer recommendation in China [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(1): 67-74.
- [6] 毛达如,张承东. 推荐施肥技术中施肥模型与实验设计的研究[J]. 土壤通报,1991,22(5): 216-218.
Mao D R, Zhang C D. Study on fertilization model and experiment design for fertilizer recommendation [J]. Chin. J. Soil Sci., 1991, 22(5): 216-218.
- [7] 岳素清,金喜强. 玉米肥料效应函数建立与应用的研究[J]. 内蒙古农业科技,2008,(6): 20-21.
Yue S Q, Jin X Q. Fertilizer effect function construction in maize and its application [J]. Inner Mongolia Agric. Sci. Tech., 2008, (6): 20-21.
- [8] 刘俊杰,韩晓日,张中原,等. 提高二次回归肥料试验成功率及函数典型率的研究[J]. 农业科技与装备,2009,183(3): 26-28.
Liu J J, Han X R, Zhang Z Y *et al.* Study on increasing the successful and typical probability of quadratic function regression in fertilizer experiments [J]. Agric. Sci. Tech. Equip., 2009, 183(3): 26-28.
- [9] 朱涛,张中原,李金凤,等. 应用二次回归肥料试验“3414”设计配置多种肥料效应函数功能的研究[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(3): 211-215.
Zhu T, Zhang Z Y, Li J F *et al.* Study on the multiple fertilizer effect function using dual regression “3414” fertilizer experiment design [J]. J. Shenyang Agric. Univ., 2004, 35(3): 211-215.
- [10] 宋朝玉,高峻岭,张清霞,等. “3414”肥料试验结果统计分析方法的探讨[J]. 山东农业科学,2009,(9): 93-96.
Song C Y, Gao J L, Zhang Q X *et al.* Discussion on the statistics method for “3414” fertilizer experiment [J]. Shandong Agric. Sci., 2009, (9): 93-96.
- [11] 章明清,徐志平,姚宝全,等. Monte Carlo法在多元肥效模型参数估计和推荐施肥中的应用[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(2): 366-373.
Zhang M Q, Xu Z P, Yao B Q *et al.* Using Monte Carlo method for parameter estimation and fertilization recommendation of multivariate fertilizer response model [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(2): 366-373.