

## 福建主要粮油作物测土配方施肥指标体系研究

### III. 区域施肥模型及其推荐施肥

姚宝全<sup>1</sup>, 徐志平<sup>1</sup>, 章明清<sup>2</sup>, 林琼<sup>2</sup>, 陈子聪<sup>2</sup>, 李娟<sup>2</sup>, 颜明媚<sup>2</sup>, 张建丽<sup>3</sup>

(1 福建省农田建设与土肥技术总站, 福建 福州 350003; 2 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建 福州 350013; 3 福建省农产品质量检测检验中心, 福建, 福州, 350003)

**摘要:** 根据 227 个粮油作物氮磷钾肥效试验结果, 分别建立土壤肥力为“高”、“中”、“低”3 个等级的区域施肥模型。典型性判别表明, 35 个区域施肥模型中, 典型肥效模型占 65.7%。对典型肥效模型采用边际产量导数法推荐施肥, 对非典型肥效模型则采用 Monte Carlo 法随机解在目标产量下求推荐施肥量, 全省早晚稻平均最高施氮量为  $162 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 氮磷钾比为 1: 0.36: 0.72; 经济施氮量是  $122 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 比例为 1: 0.32: 0.65。中稻平均推荐施氮量为  $206 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 三要素比为 1: 0.38: 0.80。甘薯、马铃薯和花生的平均经济施氮量分别为  $134 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $217 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $107 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 氮磷钾比例分别为 1: 0.47: 1.40、1: 0.37: 1.00 和 1: 0.50: 0.98。

**关键词:** 粮油作物; 氮磷钾; 区域施肥模型; 推荐施肥

中图分类号: S 143 文献标识码: A

#### Soil testing and fertilization indices for major grain and oil crops in Fujian

#### III models and recommendations for regional fertilization

YAO Bao quan<sup>1</sup>, XU Zhi ping<sup>1</sup>, ZHANG Ming qing<sup>2</sup>, LIN Qiong<sup>2</sup>, LI Juan<sup>2</sup>,  
YAN Ming juan<sup>2</sup>, ZHANG Jian li<sup>3</sup>

(1. Fujian Cropland Construction and Soil and Fertilizer Station, Fuzhou, Fujian 350003, China;  
2. Soil and Fertilizer Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China;  
3. Fujian Farm Produce Quality Detection and Checkout Centre, Fuzhou, Fujian 350003, China)

**Abstract:** Three regional fertilization models for the “high”, “medium” and “low” soil fertility grades were established based on 227 field tests on the NPK fertilizer efficiency for the grain and oil crops. Representative model analysis showed that 65.7% of the 35 regional fertilization models were typical. The boundary yield derivative method was used to recommend optimum application rate for the typical models. The Monte Carlo method was applied for non typical models. The results showed that the average maximum N application rate for the early and the late rice in Fujian was  $162 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  with an NPK ratio of 1: 0.36: 0.72, while the average economic N application rate was  $122 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  with an NPK ratio of 1: 0.32: 0.65. The NPK application rate for the rice in the mountainous area was higher than in the coastal area. The recommended N application rate for the mid-reason rice was  $206 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  with an NPK ratio of 1: 0.38: 0.80. The economical N application rates for sweet potatoes, potatoes and peanuts were 134, 217 and  $107 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  with NPK ratios of 1: 0.47: 1.40, 1: 0.37: 1.00 and 1: 0.50: 0.98, respectively. It is apparent that considerable differences exist in the appropriate fertilization for soils of different fertility grades.

**Key words:** grain and oil crops; NPK; regional fertilization model; recommended fertilization

氮磷钾适宜施用量是测土配方施肥的关键参数之一, 多年多点的田间肥料试验结果, 反映了一定

区域内不同土壤肥力水平下的作物施肥效应。近 30 年来, 国内外学者先后提出了回归系数平均

收稿日期: 2008-11-03 初稿; 2009-03-15 修改稿

作者简介: 姚宝全 (1965-), 男, 推广研究员, 主要从事平衡施肥研究及其推广应用 (E-mail: fjtffz@163.com)

通讯作者: 章明清 (1963-), 男, 博士, 研究员 (E-mail: zhangmqing2001@163.com)

基金项目: 国家测土配方施肥补贴项目 (2005-2007); 国家科技支撑项目 (2008BAD4B10、2006BAD25B08-3); 国际植物营养研究所 (IPNI) 合作项目 (Fujian-13)

法<sup>[1]</sup>、分类回归综合法<sup>[2]</sup>和多因素聚类综合法<sup>[3]</sup>等许多方法, 对多年多点试验资料进行汇总。杨守春等人提出, 对同一肥力等级内的试验资料取相同处理的平均产量建立区域施肥模型, 是最简便的科学方法<sup>[4]</sup>。根据这些方法所获得的不同肥力水平下的区域施肥模型, 便可用于推荐施肥实践。

近年来, 应用二因素  $3 \times 3$  设计、二因素 D- 饱和最优设计、三因素回归最优设计和“3414”试验设计等试验方案, 在福建省水稻主产区完成了 195 个田间试验, 在甘薯、马铃薯和花生主产区分别完成了 27 个、17 个和 51 个的田间试验。在前人研究基础上<sup>[5-9]</sup>, 本文根据氮磷钾肥效试验结果, 建立福建省主要粮油作物在不同土壤肥力等级下的区域施肥模型, 并进行推荐施肥。

## 1 材料与方法

### 1.1 二因素肥效试验

主要采用  $3 \times 3$  设计和 D- 饱和最优设计 2 种, 用于旱作物肥效试验。 $3 \times 3$  设计共 9 个处理, 以氮钾为例, 即 (1)  $N_0 K_0$ ; (2)  $N_0 K_1$ ; (3)  $N_0 K_2$ ; (4)  $N_1 K_0$ ; (5)  $N_1 K_1$ ; (6)  $N_1 K_2$ ; (7)  $N_2 K_0$ ; (8)  $N_2 K_1$ ; (9)  $N_2 K_2$ 。氮磷、磷钾二因素的设计方案与此类似。“0”水平表示不施肥; “1”水平的  $N$ 、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  施肥量 ( $kg \cdot hm^{-2}$ ), 在水稻上推荐量为 150–45–105, 在甘薯、马铃薯和花生上推荐量分别为 180–45–225、225–120–270 和 75–60–90; “2”水平施肥量是在“1”水平施肥量基础上增加 50%。

D- 饱和设计共 6 个处理, 以氮钾为例, 即 (1)  $N_0 K_0$ ; (2)  $N_0 K_1$ ; (3)  $N_1 K_0$ ; (4)  $N_{0.7} K_1$ ; (5)  $N_1 K_{0.7}$ ; (6)  $N_{0.45} K_{0.45}$ 。氮磷、磷钾二因素的设计方案与此类似。“1”水平表示最大试验施肥量, 在甘薯、马铃薯和花生上推荐量分别为 300–90–300、300–180–375 和 120–90–135。各处理的施肥量按下标比例折算。

### 1.2 三因素肥效试验

主要采用五水平回归最优设计和“3414”田间试验设计 2 种。五水平回归最优设计主要用于旱作物肥效试验, 共 12 个处理, 氮磷钾各 5 个水平, 即 (1)  $N_{0.5} P_{0.5} K_1$ ; (2)  $N_{0.5} P_{0.5} K_0$ ; (3)  $N_{0.14} P_{0.14} K_{0.75}$ ; (4)  $N_{0.86} P_{0.14} K_{0.75}$ ; (5)  $N_{0.14} P_{0.86} K_{0.75}$ ; (6)  $N_{0.86} P_{0.86} K_{0.75}$ ; (7)  $N_1 P_{0.5} K_{0.25}$ ; (8)  $N_0 P_{0.5} K_{0.25}$ ; (9)  $N_0 P_1 K_{0.25}$ ; (10)  $N_{0.5} P_0 K_{0.25}$ ; (11)  $N_{0.5} P_{0.5} K_{0.5}$ ; (12)  $N_0 P_0 K_0$ 。“1”表示试验设计的最大施肥量, 与上述的二因素 D- 饱和设计

的推荐用量相同。

“3414”试验设计的氮磷钾各 4 个水平, 14 个处理, 即: (1)  $N_0 P_0 K_0$ ; (2)  $N_0 P_2 K_2$ ; (3)  $N_1 P_2 K_2$ ; (4)  $N_2 P_0 K_2$ ; (5)  $N_2 P_1 K_2$ ; (6)  $N_2 P_2 K_2$ ; (7)  $N_2 P_3 K_2$ ; (8)  $N_2 P_2 K_0$ ; (9)  $N_2 P_2 K_1$ ; (10)  $N_2 P_2 K_3$ ; (11)  $N_3 P_2 K_2$ ; (12)  $N_1 P_1 K_2$ ; (13)  $N_1 P_2 K_1$ ; (14)  $N_2 P_1 K_1$ 。其中, “2”水平表示  $N$ 、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  的推荐用量, 施肥量与上述二因素  $3 \times 3$  设计的试验相同; “0”水平为不施肥; “1”水平的用量为“2”水平的 50%, “3”水平的用量为“2”水平的 150%。

二因素肥效试验采用 3 次重复, 随机区组排列; 三因素肥效试验采用多点分散不设重复和区组排列的试验方法。小区面积 20~30  $m^2$ , 同一个试验点小区面积相同。在试验具体实施过程中, 各试验地可根据土壤肥力和目标产量水平对推荐施肥量进行调整, 其他处理按相应比例增减。试验选择全省各地具有代表性的土壤类型和肥力水平的地块作为试验田。

### 1.3 田间试验实施方法

供试品种选用当地大面积种植的良种, 试验时间都在当地正常农业生产季节内进行。氮肥选用尿素 ( $N 46\%$ ), 磷肥选用过磷酸钙 ( $P_2O_5 12\%$ ) 或磷酸二铵 ( $N 14\%$ ,  $P_2O_5 44\%$ ), 钾肥用氯化钾 ( $K_2O 60\%$ )。施肥方法: 水稻和花生基肥中氮钾肥占总用量的 50%, 磷肥全部作基肥, 余下的氮钾肥在苗期作追肥; 甘薯基肥中氮钾肥占总用量的 50%, 磷肥作基肥, 40% 氮肥在苗期作第 1 次追肥, 余下的氮钾肥在薯块膨大前期作第 2 次追肥。马铃薯的磷肥作基肥施用, 氮钾肥在基肥、追肥中各占 50%, 其中追肥分壮苗肥 (占追肥 60%) 和现蕾肥 (占追肥 40%) 2 次施用。试验区周围设 1 m 宽以上的保护行, 其他的栽培管理措施与大田生产一致。试验田作物收获时各小区单收单称, 分别记录产量鲜重和晒干重。

### 1.4 基础土样的采集和测定

每个田间试验在实施前, 按规范方法各取 1 个混合基础土样。采用常规方法<sup>[5]</sup>测定土壤 pH 以及有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量。供试土壤的主要理化性状请参照参考文献[11]。

试验结果采用 MATLAB 软件统计工具箱进行统计分析, 其中, 一元、二元和三元二次多项式肥效模型的参数估计采用最小二乘法或 Monte Carlo 法<sup>[12]</sup>, 用 MATLAB 语言编写计算程序。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥模型选择和试验数据处理

确定作物最佳施肥量的最可靠和直观的方法就是根据作物产量与施肥量的田间试验结果建立施肥数学模型<sup>[13]</sup>。二次多项式能较好地反映施肥量与产量的抛物线型关系及养分间的交互作用, 而且易于统计分析和计算最佳施肥量。选用一元、二元和三元二次多项式模型拟合肥料试验结果。

由于田间试验不可避免地受到许多不可控因子的影响, 使试验结果产生误差, 因此, 在建模前先将290个试验结果按二次多项式模型进行回归分析, 对每个回归方程的可用性进行检验, 剔除统计不显著和预测性能不良<sup>[14]</sup>的试验点。结果表明, 水稻试验结果有149个试验点的资料是可用的, 甘薯、马铃薯和花生试验分别有21个、14个和43个试验点的资料是可用的。

### 2.2 粮油作物区域施肥模型的建立

杨守春等人研究表明, 在同一土壤肥力等级内, 对相同处理的各试验点产量求平均值建立区域施肥模型是最简便有效的方法<sup>[4]</sup>, 可显著提高典型肥效模型的出现几率<sup>[6]</sup>。因此, 本文采用相同方法分别对水稻、甘薯、马铃薯和花生在“高”、“中”、“低”3个土壤肥力等级<sup>[11]</sup>的试验结果的相同处理求平均产量, 并对多元肥效模型采用Monte Carlo法参数估计<sup>[12]</sup>建立区域施肥模型。水稻的区域施肥模型如表1; 旱作物则根据不同试验设计的试验结果, 分别建立相同试验设计的区域施肥模型, 结果汇总于表2。

结果表明, 采用上述建模方法, 所建立的区域施肥模型的R<sup>2</sup>均达到统计显著水平, 说明这些施肥模型都是可用的。对各个区域施肥模型进行典型性判别分析<sup>[15]</sup>, 在表1和表2的35个区域施肥模型中, 典型肥效模型达到23个, 占65.7%。

### 2.3 不同土壤肥力等级的氮磷钾推荐用量和比例

#### 2.3.1 水稻

以每公斤N 4.3元、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5.0元、K<sub>2</sub>O 4.0元和稻谷2.0元市场价计, 对典型肥效模型采用边际产量导数法求推荐施肥量, 对非典型肥效模型则以试验所得最高产量为目标产量, 采用Monte Carlo法随机解在试验施肥量范围内, 寻找产量大于目标产量的各个氮磷钾组合, 然后计算这些组合的平均氮磷钾用量, 作为推荐用量。表3是水稻的推荐施肥量和预计产量结果。

最高产量施肥量排除了肥料和农产品价格等因素的干扰, 真实反映了施肥量与产量的响应关系。

早晚稻的推荐结果表明, 加权平均的最高施肥量为N 162 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 59 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 116 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮磷钾比例为1: 0.36: 0.72, 相比20世纪90年代的最高施肥量<sup>[6]</sup> N 156 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 66 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 101 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮磷钾比例为1: 0.42: 0.65, 氮肥用量基本持平, 磷肥用量下降了10.6%, 钾肥提高了14.9%; 氮磷比例由1: 0.42下降到1: 0.36, 氮钾比例也由1: 0.65提高到1: 0.72。

经济施肥量受肥料和农产品价格等因素的影响, 早晚试验资料加权平均的推荐施肥量为N 122 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮磷钾比例为1: 0.32: 0.65, 而20世纪90年代的平均结果是N 123 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮磷钾比例为1: 0.37: 0.72, 表明磷肥最佳比例下降了, 钾肥比例受到近年来价格大幅上涨的影响而下降, 但与20世纪80年代初的推荐结果<sup>[5]</sup>相比, 磷肥比例下降而钾肥比例显著提高了。表3的早晚稻统计还表明, 我省水稻不同生产区域, 由于光温等自然条件和社会经济发展状况不同, 山区稻田氮磷钾推荐用量明显高于沿海。

中稻生长期较长, 产量普遍较高。试验表明, 氮磷钾加权平均的最高施氮量为206 kg·hm<sup>-2</sup>, 三要素比例为1: 0.38: 0.80, 无论是施肥量还是磷钾比例都比早晚稻高。

不同肥力等级的稻田土壤, 由于理化性质和供肥能力不同, 稻谷产量水平明显不同, 导致推荐施肥量有明显差异。表3的结果表明, 高肥力土壤由于供肥强度大, 一般所需氮磷钾用量相对较低; 中等肥力土壤供肥能力较差, 要获得较高的产量, 大都需要较高的施肥量; 低肥力土壤障碍因子较多, 水稻产量较低, 需肥量一般也较低。

#### 2.3.2 甘薯、马铃薯和花生

与水稻推荐施肥方法一样, 以每公斤N 4.3元、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5.0元、K<sub>2</sub>O 4.0元和甘薯0.6元、马铃薯1.0元和花生4.0元的市场价计, 计算旱作物的推荐施肥量和预计产量如表4。结果表明, 甘薯的加权平均最高施氮量是168 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮磷钾比例为1: 0.43: 1.39; 马铃薯平均最高施氮量是233 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮磷钾比例为1: 0.38: 1.01; 花生平均最高施氮量是119 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮磷钾比例为1: 0.59: 1.10。经济施肥量推荐结果: 甘薯为N 134 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮磷钾比例为1: 0.47: 1.40; 马铃薯为N 203 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮磷钾比例为1: 0.36: 1.03; 花生为N 107 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮磷钾比例为1: 0.50: 0.98, 推荐施肥量高于20世纪90年代的研究结果<sup>[16]</sup>。

表1 水稻区域施肥模型及其模型典型性判别  
Table 1 Regional fertilization models and type differentiation for rice

稻作区域	肥力等级	区域施肥模型	R <sup>2</sup>	典型模型
早稻	高(n=1)	$Y = 7119 + 0.1694N + 1.9621P + 17.561K - 0.0201N^2 - 0.0547P^2 - 0.1438K^2 + 0.0518NP + 0.0096NK + 0.0505PK$	0.9116	非典型式
	中(n=19)	$Y = 5120 + 14.447N + 0.9740P + 7.1084K - 0.0599N^2 - 0.0495P^2 - 0.0391K^2 + 0.0366NP + 0.0176NK + 0.0134PK$	0.9762*	典型式
	低(n=22)	$Y = 3927 + 21.383N + 4.1662P + 3.1139K - 0.0752N^2 - 0.0870P^2 - 0.0164K^2 + 0.0060NP + 0.0206NK + 0.0206PK$	0.9902**	非典型式
	高(n=13)	$Y = 6692 + 9.5321N + 0.4732P + 5.9353K - 0.0348N^2 - 0.0355P^2 - 0.0463K^2 + 0.0047NP + 0.0023NK + 0.0111PK$	0.9580**	典型式
	沿海 中(n=8)	$Y = 5125 + 13.980N + 1.5406P + 8.4337K - 0.0523N^2 - 0.0329P^2 - 0.0559K^2 + 0.0195NP + 0.0073NK + 0.0169PK$	0.9615**	典型式
	低(n=2)	$Y = 4449 + 9.2449N + 15.366P + 3.5854K - 0.0397N^2 - 0.1853P^2 - 0.0362K^2 + 0.0047NP + 0.0219NK + 0.0036PK$	0.9043*	典型式
中稻	高(n=21)	$Y = 6969 + 13.260N + 2.4310P + 4.3463K - 0.0418N^2 - 0.0601P^2 - 0.0114K^2 + 0.0240NP + 0.0123NK + 0.0076PK$	0.9762**	非典型式
	全省 中(n=14)	$Y = 5306 + 12.199N + 1.2082P + 1.6864K - 0.0318N^2 - 0.0217P^2 - 0.0124K^2 + 0.0081NP + 0.0177NK + 0.0460PK$	0.9811**	非典型式
	低(n=2)	$Y = 4083 + 14.360N + 0.9250P + 3.8271K - 0.0522N^2 - 0.0186P^2 - 0.0328K^2 + 0.0075NP + 0.0239NK + 0.0207PK$	0.9587**	非典型式
晚稻	高(n=14)	$Y = 7003 + 15.620N + 3.5978P + 2.7555K - 0.0478N^2 - 0.0601P^2 - 0.0341K^2 + 0.0226NP + 0.0150NK + 0.0247PK$	0.9662**	非典型式
	山区 中(n=16)	$Y = 5065 + 14.526N + 6.8658P + 2.2300K - 0.0514N^2 - 0.1441P^2 - 0.0077K^2 + 0.0111NP + 0.0161NK + 0.0372PK$	0.9665**	非典型式
	低(n=2)	$Y = 3955 + 22.054N + 7.4663P + 6.5607K - 0.0081N^2 - 0.1237P^2 - 0.0074K^2 + 0.0180NP + 0.0057NK + 0.0128PK$	0.9731**	非典型式
	高(n=7)	$Y = 6589 + 13.651N + 1.5652P + 6.6368K - 0.0598N^2 - 0.0499P^2 - 0.0580K^2 + 0.0263NP + 0.0160NK + 0.0126PK$	0.9603*	典型式
	沿海 中(n=7)	$Y = 4786 + 13.911N + 13.087P + 7.4918K - 0.0464N^2 - 0.4517P^2 - 0.1454K^2 + 0.0034NP + 0.0196NK + 0.3710PK$	0.9669**	典型式
	低(n=1)	$Y = 4155 + 25.813N + 0.5832P + 18.395K - 0.0876N^2 - 0.1992P^2 - 0.1459K^2 + 0.0073NP + 0.0106NK + 0.1795PK$	0.9373*	典型式

表2 甘薯、马铃薯和花生区域施肥模型及其模型典型性

Table 2 Regional fertilization models and type differentiation for sweet potatoes, potatoes and peanuts

作物	肥力等级	区域施肥模型	R <sup>2</sup>	典型模型
甘薯	高(n=2)	$Y = 30248 + 61.342N + 25.425K - 0.1997N^2 - 0.0681K^2 + 0.0867NK$	1.0000**	非典型式
	(n=1)	$Y = 30416 + 111.67N + 70.584P + 123.24K - 0.5705N^2 - 0.7461P^2 - 0.4046K^2 + 0.3920NP + 5.9006NK + 0.0514PK$	0.9300*	典型式
	中(n=5)	$Y = 25500 + 321.934N + 811.520K - 0.11654N^2 - 0.2882K^2 + 0.1077NK$	11.0000**	典型式
	(n=2)	$Y = 13159 + 119.47P - 0.6811P^2$	0.9669**	典型式
	(n=7)	$Y = 23055 + 511.878N + 961.006P + 351.501K - 0.12659N^2 - 0.2048P^2 - 0.1455K^2 + 0.0970NP + 0.1511NK + 0.1816PK$	0.9702**	典型式
	低(n=5)	$Y = 12938 + 171.517N + 381.982P + 191.168K - 0.0838N^2 - 0.6838P^2 - 0.0374K^2 + 0.1089NP + 0.0161NK + 0.0192PK$	0.9955**	典型式
	(n=2)	$Y = 11146 + 186.09N + 115.06P + 611.846K - 0.6342N^2 - 0.8154P^2 - 0.2932K^2 + 0.2857NP - 0.0675NK + 0.7095PK$	0.9601**	典型式

作物	肥力等级	区域施肥模型	R <sup>2</sup>	典型模型
马铃薯	高( n= 2)	$Y = 22955 + 751.984N + 101.265K - 0.09824N^2 - 0.0019K^2 - 0.0310NK$	0.9941 <sup>**</sup>	非典型式
		$Y = 32597 + 541.078P - 0.3806P^2$	0.9989 <sup>**</sup>	典型式
	( n= 3)	$Y = 17368 + 511.466N + 91.1789P + 481.925K - 01.2297N^2 - 01.6037P^2 - 01.1145K^2 + 01.4885NP + 01.0125NK + 01.0226PK$	0.9004 <sup>*</sup>	典型式
	中( n= 2)	$Y = 16189 + 621.463N + 121.489P + 381.709K - 01.2556N^2 - 01.4227P^2 - 01.1533K^2 + 01.1794NP + 01.1096NK + 01.0681PK$	0.9909 <sup>**</sup>	典型式
	( n= 3)	$Y = 14445 + 691.554N + 164.83P + 661.354K - 01.3243N^2 - 01.1746P^2 - 01.1371K^2 + 01.3113NP - 01.1565NK - 01.0114PKI$	0.9685 <sup>**</sup>	典型式
	低( n= 1)	$Y = 9887 + 621.536N + 361.332P + 111.009K - 01.1949N^2 - 01.5584P^2 - 01.0450K^2 + 01.0125NP + 01.0138NK + 01.1208PK$	0.9544 <sup>*</sup>	典型式
花生	( n= 3)	$Y = 7160 + 761.690N + 371.274P + 221.151K - 01.1895N^2 - 01.2780P^2 - 01.0580K^2 + 01.0820NP - 01.0574NK + 01.0079PKI$	0.9673 <sup>**</sup>	典型式
	高( n= 5)	$Y = 3077 + 131.493N + 181.215P + 161.689K - 01.0767N^2 - 01.1358P^2 - 01.0680K^2 + 01.0277NP + 01.0436NK + 01.0409PK$	0.9916 <sup>**</sup>	典型式
	( n= 4)	$Y = 3418 + 161.007N + 91.3529P + 161.709K - 01.0895N^2 - 01.0328P^2 - 01.1007K^2 + 01.0244NP - 01.0031NK + 01.0076PKI$	0.9352 <sup>*</sup>	非典型式
	中( n= 4)	$Y = 2382 + 11.2799N + 51.6629P + 41.0748K - 01.0269N^2 - 01.0530P^2 - 01.0226K^2 + 01.0302NP + 01.0163NK + 01.0004PK$	0.9895 <sup>**</sup>	典型式
	( n= 19)	$Y = 2165 + 91.8245N + 71.2955P + 31.4360K - 01.0309N^2 - 01.0461P^2 - 01.0159K^2 + 01.0252NP - 01.0044NK + 01.0171PKI$	0.9940 <sup>**</sup>	典型式
	低( n= 3)	$Y = 1481 + 161.387N + 21.1698P + 01.1840K - 01.0738N^2 - 01.0233P^2 - 01.0008K^2 + 01.0008NP + 01.0040NK + 01.0538PK$	0.9376 <sup>*</sup>	非典型式
中稻	( n= 8)	$Y = 1195 + 91.4411N + 71.8873P + 41.8127K - 01.0435N^2 - 01.1207P^2 - 01.0375K^2 + 01.0058NP - 01.0043NK + 01.0476PKI$	0.9255 <sup>*</sup>	典型式

表3 不同土壤肥力等级的水稻推荐施肥量

Table 3 Recommended fertilization for rice on soils of different fertility grades

稻作	区域	肥力等级	试验数 ( n)	最高施肥量(kg # hm <sup>-2</sup> )				经济施肥量(kg # hm <sup>-2</sup> )			
				N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	产量	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	产量
早稻	山区	高	1	114	72	77	7942	-	-	-	-
		中	19	170	92	145	6908	132	47	103	6769
		低	22	163	46	136	6111	-	-	-	-
	沿海	高	13	141	27	71	7580	106	0	43	7463
		中	8	158	96	100	6728	126	41	92	6596
		低	2	145	44	96	5632	107	37	86	5541
晚稻	山区	高	14	183	59	96	8788	-	-	-	-
		中	16	163	46	138	6797	-	-	-	-
		低	2	147	45	127	6417	-	-	-	-
	沿海	高	7	137	61	74	7535	99	14	65	7422
		中	7	178	64	120	6891	139	48	88	6775
		低	1	155	49	99	6373	142	35	83	6258
中稻	全省	高	21	202	69	166	9007	-	-	-	-
		中	14	217	90	162	7741	-	-	-	-
		低	2	179	100	153	5788	-	-	-	-

表4的结果还表明, 与早晚稻相比, 无论是最高施肥量还是经济施肥量, 甘薯和马铃薯的氮磷钾推荐用量都较高, 尤其是磷钾肥, 这与甘薯和马铃薯的磷钾营养特性有关。我省马铃薯于冬季种植,

生长期温度较低, 土壤供肥能力较差, 无论是最高施磷量还是经济施磷量都明显高于甘薯和花生。与水稻一样, 不同肥力等级土壤的旱作物推荐施肥量有明显差异。

表4 不同土壤肥力等级的甘薯、马铃薯和花生推荐施肥量

Table 4 Recommended fertilization for sweet potatoes, potatoes and peanuts on soils of different fertility grades

作物	肥力等级	试验数 (n)	最高施肥量( $\text{kg} \# \text{hm}^{-2}$ )			经济施肥量( $\text{kg} \# \text{hm}^{-2}$ )			产量	
			N	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$	N	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$		
甘薯	高	2	181	105	237	47470	136	96	175	43628
	中	14	171	78	215	35396	144	71	187	35186
	低	7	161	56	269	23217	115	45	189	22742
马铃薯	高	5	227	91	216	32007	205	90	216	29433
	中	5	214	73	271	27910	196	65	219	26513
	低	4	232	100	283	23628	210	60	191	23460
花生	高	9	83	70	83	5109	70	58	75	4822
	中	23	137	74	160	3502	117	54	118	3460
	低	11	113	63	112	2415	104	47	87	2206

### 3 结 论

将土壤肥力水平划分为 /高0、 /中0、 /低0 3个等级, 利用相应等级内的试验结果建立区域肥效模型, 典型性判别表明, 在35个区域施肥模型中, 典型肥效模型占65.7%。

最高施肥量反映了施肥量与产量的响应关系。结果表明全省早晚稻平均最高施氮量与20世纪90年代的推荐结果基本持平, 但磷肥的推荐用量下降了10.6%, 钾肥则提高了14.9%。

全省早晚稻最高施氮量平均为 $162 \text{ kg} \# \text{hm}^{-2}$ , 氮磷钾比例为1 B 0.136 B 0.172, 经济施氮量平均为 $122 \text{ kg} \# \text{hm}^{-2}$ , 比例为1 B 0.132 B 0.165; 中稻平均最高施氮量为 $206 \text{ kg} \# \text{hm}^{-2}$ , 氮磷钾比例为1 B 0.138 B 0.180; 甘薯、马铃薯和花生的经济施氮量平均分别为 $134 \text{ kg} \# \text{hm}^{-2}$ 、 $217 \text{ kg} \# \text{hm}^{-2}$ 和 $107 \text{ kg} \# \text{hm}^{-2}$ , 氮磷钾比例分别为1 B 0.147 B 0.140、1 B 0.137 B 0.100和1 B 0.150 B 0.098。

山区稻田氮磷钾推荐用量明显高于沿海稻田。不同土壤肥力等级的推荐施肥量有明显差异, 高肥力等级土壤所需氮磷钾用量一般较低, 中等肥力等级土壤大都需要较高的施肥量, 低肥力等级土壤需肥量一般较低。由于受试验数量的限制, 个别土壤肥力等级的试验数较少, 可能有失代表性, 其推荐施肥应参考相邻等级的施肥量。

### 参考文献:

- [1] COWELL J D. The derivation of fertilizer recommendations for crop in non-uniform environment: Fertilizer [J]. Crop Quality and Economy, 1974: 936- 961.  
 [2] 王兴仁, 陈伦寿, 毛达如, 等. 分类回归综合法及其在区域施

肥决策中的应用 [J]. 土壤通报, 1989, 1: 17- 21.

- [3] 毛达如, 张承东. 多点肥料效应函数的动态聚类方法 [J]. 北京农业大学学报, 1991, 17 (2): 49- 54.  
 [4] 杨守春, 陈伦寿, 毛达如. 黄淮海平原主要作物优化施肥和土壤培肥研究总论 [M]. M黄淮海平原主要作物优化施肥和土壤培肥技术. 北京: 中国农业科技出版社, 1991: 1- 26.  
 [5] 林辉, 陈祖仁, 唐福钦, 等. 福建省稻田化肥的适宜用量和配比的研究 [J]. 福建农业学报, 1989, 4 (1): 23- 32.  
 [6] 章明清, 林代炎, 林仁埙. 福建水稻区域施肥模型及其推荐施肥研究 [J]. 福建农业学报, 1996, 12 (1): 51- 55.  
 [7] 姚宝全. 甘薯氮磷钾肥效与适宜用量研究 [J]. 福建农业学报, 2007, 22 (2): 136- 140.  
 [8] 姚宝全. 冬季马铃薯氮磷钾肥料效应及其适宜用量研究 [J]. 福建农业学报, 2008, 23 (2): 191- 195.  
 [9] 黄河. 秋花生优化施肥研究 [J]. 福建农业学报, 2003, 18 (3): 182- 184.  
 [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.  
 [11] 徐志平, 姚宝全, 章明清, 等. 福建主要粮油作物测土配方施肥指标体系研究, 土壤基础肥力对作物产量的贡献率及其施肥效应 [J]. 福建农业学报, 2008, 23 (4): 396- 402.  
 [12] 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.  
 [13] 金耀青. 配方施肥的方法及其功能))) 对我国配方施肥工作的述评 [J]. 土壤通报, 1989, 20 (1): 46- 48.  
 [14] 吴平, 陶勤南. 氮磷钾肥效模型的研究及其应用 [J]. 浙江农业大学学报, 1989, 15 (4): 383- 388.  
 [15] 章明清, 林仁勋, 林代炎, 等. 极值判别分析在三元肥效模型推荐施肥中的作用 [J]. 福建农业学报, 1995, 10 (2): 54- 59.  
 [16] 章明清, 彭嘉桂, 杨杰, 等. 土壤养分状况系统研究法在花生平衡施肥上的应用研究 [J]. 福建农业学报, 2000, 15 (1): 55- 58.

(责任编辑: 刘新永)