福建农业学报 2020,35（5）:480−488 http://www.fjnyxb.cn
Fujian Journal of Agricultural Sciences doi: 10.19303/j.issn.1008-0384.2020.05.003

李娟，张立成，张华，等. 福建花生氮磷钾推荐施肥与有机肥替代化肥潜力研究［J］. 福建农业学报，2020，35（5）：480−488.
LI J, ZHANG L C, ZHANG H, et al. Recommended NPK and Organic Fertilizer Applications for Peanut Farming in Fujian［J］. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*，2020，35（5）：480−488.

福建花生氮磷钾推荐施肥与有机肥替代化肥潜力研究

李　娟[1]，张立成[1]，张　华[2]，章明清[1*]，姚宝全[2]

（1. 福建省农业科学院土壤肥料研究所，福建　福州　350013；2. 福建省农田建设与土壤肥料技术推广站，福建　福州　350003）

摘　要：【目的】为提高花生施肥效益，实现减量增效的目标，在花生氮磷钾施肥限量标准研究基础上，探讨有机肥替代化肥的最佳施肥模式。**【方法】**根据近年来在福建花生主产区开展的105个田间肥效试验结果，应用系统聚类分析结合类别间差异显著性检验技术，确定花生最佳施肥类别数；构建各施肥类别的三元非结构肥效模型，确定推荐施肥量，并开展田间试验验证和有机肥替代化肥潜力的研究。**【结果】**在各施肥类别间的氮磷钾施肥效应具有显著水平差异条件下，福建花生可划分为高产田、中产田、中低产田和低产田等4个施肥类别；高产田的花生施肥效应远高于其他类型田块，中产田及以下的耕地类型应进行土壤改良培肥，才能充分发挥施肥增产潜力。针对各耕地施肥类别对应的氮磷钾田间肥效试验结果构建的4个三元非结构肥效模型均属于典型式，由此建立了基于农学效应的花生氮磷钾推荐施肥量。34个大田对比试验表明，化肥推荐施肥的花生产量平均比习惯施肥增产10.2%，肥料成本下降63元·hm^{-2}，净增收2 877元·hm^{-2}；平均氮、磷减肥幅度分别为24.9%、38.1%，但增加钾肥用量79.3%。有机肥替代25%化肥处理的产量最高，平均比化肥推荐施肥增产10.6%，净增收1 595元·hm^{-2}。**【结论】**在推荐施肥基础上，有机肥替代25%化肥是花生减肥增效最佳施肥模式。

关键词：花生；施肥类别；化肥；有机肥；推荐施肥；施肥模式

中图分类号： S 147.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1008-0384（2020）05−0480−09

Recommended NPK and Organic Fertilizer Applications for Peanut Farming in Fujian

LI Juan[1], ZHANG Licheng[1], ZHANG Hua[2], ZHANG Mingqing[1*], YAO Baoquan[2]

（1. *Soil and Fertilizer Institute*, *Fujian Academy of Agricultural Sciences*, *Fuzhou*, *Fujian*　350013, *China*; 2. *Fujian Cropland Construction and Soil and Fertilizer Station*, *Fuzhou*, *Fujian*　350003, *China*）

Abstract:【Objective】Derived from fertilization models, utilization of organic fertilizers to partially replace NPK for peanut farming in Fujian was investigated.【Method】In the major peanut producing areas in Fujian, 105 field experiments were conducted in recent years to examine the response of peanut plants to NPK fertilization. Applying the systematic cluster analysis combined with significant test of difference, various fertilization categories for the planting fields were established. A ternary non-structural fertilizer response model was constructed to arrive at recommend fertilizations for each category. Based on the models, field experiments were carried out to test replacement of NPK with an organic fertilizer.【Result】According to the significant differences on effectiveness of NPK fertilizations, 4 categories of peanut fields were generated as (1) high yield paddy, (2) medium yield paddy, (3) medium-to-low yield field, and (4) low yield field. To maximize the fertilization effect and peanut yield for the fields, 4 optimized models were formulated to obtain the recommended NPK applications. In 34 controlled field experiments, on average, a 10.2% yield increase over the conventional practice was realized by following the recommendation of the models. Meanwhile, although the usage of N decreased 24.9% and of P 38.1%, that of K increased 79.3%. Financially, the cost on fertilizer was reduced to 63 yuan·hm^{-2} and the net revenue increased to 2 877 yuan·hm^{-2}. Furthermore, by replacing 25% of NPK with a commercial organic fertilizer resulted in the highest peanut yield among all

收稿日期：2020−02−28 初稿；2020−04−26 修改稿

作者简介：李娟（1977−），女，硕士，副研究员，研究方向：作物营养与施肥研究（E-mail：lj-95@163.com）
* 通信作者：章明清（1963−），男，博士，研究员，研究方向：作物施肥原理和技术（E-mail：zhangmq2001@163.com）

基金项目：福建省科技计划公益类专项（2018R1022-3）；福建省财政专项——福建省农业科学院科技创新团队建设项目（STIT2017-1-9）；福建省农业厅测土配方施肥项目（2010-2015）

treatments. The substitution increased peanut yield by 10.6% and revenue by 1 595 yuan·hm^{-2}over the recommended NPK application.【Conclusion】 It appeared that a 25% replacement of NPK with the organic fertilizer based on the recommended fertilization could be most profitable for the peanut farming in Fujian.

Key words: Peanut；fertilization category；fertilizer；organic fertilizer；recommended fertilization；fertilization model

0　引言

【研究意义】花生是我国的主要油料作物之一，在福建省常年种植面积达到 6.7 万 hm^2。山东、湖北和广东等省份花生主产区的众多农户施肥状况的调查研究[1–3]均表明，农户在花生栽培中普遍存在氮磷肥用量偏高，钾肥用量偏低，三要素比例失调；大多采用一次性施肥，普遍不施有机肥等不合理施肥现象，造成花生固氮功能减弱、土壤养分失衡，从而导致花生施肥效益下降和一系列环境问题[4–5]。因此，探讨花生减肥增效技术，对进一步提高花生产量和施肥效益、改善花生品质等具有重要意义。【前人研究进展】研究表明，有机无机肥配施对红壤旱地的花生生理特性、产量和品质具有显著的促进作用[6]，合理施用氮肥有利于提高花生品质[7]，合理施用化肥或化肥配施有机肥还能改善和提高土壤肥力水平[8–9]。近十余年来，我国各地花生主产区针对氮磷钾施肥指标进行了许多深入研究[10–15]，为当地花生测土配方施肥技术的推广应用提供了科学依据。福建省自 20 世纪 90 年代中期以来，应用“土壤养分状况系统研究法”对花生平衡施肥技术进行了探讨[16–17]；根据众多“3414”氮磷钾田间肥效试验结果，构建了花生氮磷钾施肥指标体系[18]。【本研究切入点】但相关研究是针对化肥推荐施肥技术，有关有机肥替代潜力的研究尚未涉及，同时，推荐施肥所用模型为三元二次多项式函数，可能存在推荐用量偏高的问题[19]。【拟解决的关键问题】本文根据课题组前期提出的三元非结构肥效模型[20]，对近 10 年来完成的花生氮磷钾田间肥效试验结果进行总结与建模，并在此基础上，探讨有机肥替代化肥的潜力，旨在为福建花生减肥增效技术的推广应用提供施肥技术依据。

1　材料与方法

1.1　花生氮磷钾田间肥效试验

近 10 年来，在福建花生主产区完成了 105 个氮磷钾田间肥效试验。试验采用“3414”方案，氮磷钾各 4 个水平，设 14 个处理，即：（1）$N_0P_0K_0$；（2）$N_0P_2K_2$；（3）$N_1P_2K_2$；（4）$N_2P_0K_2$；（5）$N_2P_1K_2$；（6）$N_2P_2K_2$；（7）$N_2P_3K_2$；（8）$N_2P_2K_0$；（9）$N_2P_2K_1$；（10）$N_2P_2K_3$；（11）$N_3P_2K_2$；（12）$N_1P_1K_2$；（13）$N_1P_2K_1$；（14）$N_2P_1K_1$。其中，“2”水平表示花生在试验前的 N、P_2O_5、K_2O 推荐用量，“0”水平为不施肥；“1”水平施肥量为“2”水平的 50%，“3”水平施肥量为“2”水平的 150%。试验采用多点分散不设重复和随机区组排列的方法。选择当地具有代表性的土壤类型和肥力水平的地块作为试验田，小区面积 20～25 m^2，同一个试验点小区面积相同。全省布点情况和处理（6）施肥量见表 1。

在各点试验实施前，按照规范方法采集 1 个耕层混合基础土样，用常规方法[21]测定供试土壤主要理化性状（表 1）。105 个土样的测定结果为：pH（5.2±1.8），有机质（19.82±8.03）g·kg^{-1}，碱解氮（116.2±41.2）mg·kg^{-1}，有效磷（31.7±20.0）mg·kg^{-1}，速效钾（63.2±36.5）mg·kg^{-1}。供试土壤包括旱地土壤的赤沙土和稻田土壤的灰泥田、黄泥田等耕作土壤类型（土属）。相关田间试验设计、土样采集和测定方法等，与文献 [18] 相同或相似，不再赘述。

在氮磷钾施肥限量标准研究基础上，在花生主

表 1　福建省花生氮磷钾田间肥效试验的供试土壤主要理化性状及其处理（6）施肥量

Table 1　Major physiochemical properties of soils at test fields and NPK applications for Treatment 6

地点 Site	试验点 No. of trials	pH值 pH value	有机质 Organic Matter/（g·kg^{-1}）	碱解氮 Alkaline hydrolytic nitrogen/（mg·kg^{-1}）	有效磷 Olsen-P/（mg·kg^{-1}）	速效钾 Available potassium/（mg·kg^{-1}）	处理（6）施肥量 Application rate of Treatment 6/（kg·hm^{-2}）		
							N	P_2O_5	K_2O
福州 Fuzhou	9	7.2±0.6	13.90±4.61	97.5±29.9	25.4±10.3	52.9±24.8	95±38	59±2	104±25
莆田 Putian	46	4.4±2.3	22.55±6.83	133.6±41.9	25.4±16.2	48.8±28.4	110±10	72±9	132±12
泉州 Quanzhou	33	5.7±0.7	13.80±0.53	90.8±32.6	42.5±25.1	75.6±38.2	76±4	60±0	93±11
龙岩 Longyan	17	5.6±0.5	27.2±6.80	128.3±31.5	31.4±13.1	83.8±41.8	102±8	86±10	131±13

产区选择代表性田块设置了 34 个大田对比示范试验，供试土壤主要理化性状为：pH（5.4±1.0），有机质（20.31±5.93）g·kg^{-1}，碱解氮（113.6±25.9）mg·kg^{-1}，有效磷（37.7±30.0）mg·kg^{-1}，速效钾（64.8±46.2）mg·kg^{-1}。每个大田示范设空白、习惯施肥和推荐施肥 3 个处理，不设重复，每个小区 60 m^2。相关地市的供试土壤主要理化性状和习惯施肥与推荐施肥的施肥量见表 2，氮磷肥减肥幅度分别平均为 24.9%、38.1%，钾肥增加幅度平均值为 79.3%。相关田间示范土样采集和测定、施肥方法与氮磷钾“3414”田间肥效试验相同。

表 2 花生推荐施肥示范田的土壤主要理化性状及其施肥量

Table 2 Major physiochemical properties of soils at peanut fields under recommend NPK fertilizations

地点 Sites	试验点 No. of trials	pH值 pH value	有机质 Organic matter/（g·kg^{-1}）	碱解氮 Alkaline hydrolytic nitrogen/（mg·kg^{-1}）	有效磷 Olsen-P/（mg·kg^{-1}）	速效钾 Available potassium/（mg·kg^{-1}）	习惯施肥 Farmer practice/（kg·hm^{-2}）			推荐施肥 Recommend fertilization/（kg·hm^{-2}）		
							N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
莆田 Putian	19	5.3±0.4	21.87±3.72	115.2±18.4	23.5±11.6	47.0±29.6	161±20	79±6	45±4	118±25	72±5	120±11
泉州 Quanzhou	6	5.1±1.9	17.32±6.33	105.7±31.8	36.2±12.6	80.8±35.2	153±31	103±43	60±0	88±6	36±13	125±18
厦门 Xiamen	4	6.2±0.8	13.00±2.23	82.3±17.5	74.4±38.4	47.8±10.9	122±0	195±0	105±0	128±0	38±0	102±0
漳州 Zhangzhou	5	5.5±1.1	23.84±8.93	142.0±21.0	63.9±48.3	126.6±71.2	160±27	83±11	126±20	135±0	90±0	126±0

1.2 有机肥替代化肥潜力的田间试验

2018–2019 年课题组在南安市和晋江市花生主产区设置 4 个不同施肥模式田间试验。其中，习惯施肥的施肥量以表 2 的 34 个大田示范区习惯施肥量平均值为依据；推荐施肥的施肥量则以花生氮磷钾施肥限量标准研究结果为依据，结合当地生产实际适当调整。试验设 5 个处理（表 3），3 次重复，随机区组排列，每个小区面积 15 m^2。试验地选择灰泥田、赤沙土等土壤类型和代表性肥力水平的地块作为试验田，供试土壤主要理化性状见表 4。试验区周围设 1 m 宽以上的保护行。供试花生品种选用当地大面积种植的良种，试验时间为每年 3 月中旬至 7 月底。

氮磷钾肥料分别选用尿素（N46%）、过磷酸钙（$P_2O_5$12%）和氯化钾（K_2O60%），有机肥选用商品有机肥（N+P_2O_5+K_2O≥5%）。处理（1）空白区不施任何肥料。处理（2）和处理（3）的基肥为 50% 的尿素，100% 的过磷酸钙，30% 氯化钾；处理（4）和处理（5）的基肥则为 100% 的有机肥，化肥施用比例与处理（2）和处理（3）相同。追肥则分 2 次施用，即：在苗期追肥 50% 的尿素和 30% 钾肥；在始花期追施 40% 钾肥。施肥方式均为基肥全层深施，结合整地时进行；追肥采用穴施，结合中耕除草。其他栽培管理措施与当地大田生产一致。

试验实施前，按照规范方法采集 1 个耕层混合

表 3 花生有机肥替代化肥潜力田间试验设计方案

Table 3 Peanut field experimentation designed for organic fertilizer replacement

序号 No.	处理 Treatments	氮磷钾化肥和有机肥施用量 Application rate of N, P and K fertilizer and manure/（kg·hm^{-2}）			
		N	P_2O_5	K_2O	商品有机肥 Commercial organic fertilizer
1	空白 CK	0	0	0	0
2	习惯施肥 Farmer practice	155	97	66	0
3	推荐施肥 Recommend fertilization	105	60	105	0
4	75%化肥+25%有机肥 75%chemical fertilizer+25% manure	78.8	45	78.8	1 800
5	50%化肥+50%有机肥 50%chemical fertilizer+50% manure	52.5	30	52.5	3 600

注：商品有机肥（N+P_2O_5+K_2O）≥5%，按照5%计算；处理3、处理4和处理5为等氮磷钾养分数量。

Note: Commercial organic fertilizer (N+P_2O_5+K_2O) application rate ≥5%, calculated at 5%; same NPK application rate for Treatment 3, Treatment 4, and Treatment 5.

表 4　有机肥替代化肥潜力田间试验供试土壤主要理化性状

Table 4　Major physiochemical properties of soils in organic fertilizer replacement trials

试验点 Sites	土壤类型 Soil types	pH值 pH value	有机质 Organic matter/（g·kg^{-1}）	全氮 Total nitrogen/（g·kg^{-1}）	碱解氮 Alkaline hydrolytic nitrogen/（mg·kg^{-1}）	有效磷 Olsen-P/（mg·kg^{-1}）	速效钾 Available K/（mg·kg^{-1}）	缓效钾 Slowly available K/（mg·kg^{-1}）
南安市 Nan'an City	灰沙田	6.0	24.2	1.37	124.2	38.8	152	494
南安市 Nan'an City	灰泥田	5.7	28.1	1.46	124.2	28.4	147	303
晋江市 Jinjiang City	赤沙土	8.5	7.90	0.54	41.4	92.5	47	366
晋江市 Jinjiang City	灰赤沙土	5.5	9.18	0.53	67.8	93.6	47	143

基础土样。花生收获时，各小区单收单称，分别记录荚果、茎叶鲜重产量和晒干重产量；每个处理各小区分别采集代表性荚果和茎叶样品各约 2 kg，分别准确称取鲜重和晒干重。样品用于测定氮磷钾含量等指标。

1.3　试验数据的整理与计算

对 105 个花生氮磷钾田间肥效试验结果进行归纳总结时，为确保各个花生施肥类别间的施肥效应具有统计显著水平差异，采用欧氏距离-离差平方和法进行系统聚类分析，并结合类别间施肥效应差异显著性的 F 值检验方法[22−23]，确定花生氮磷钾施肥类别的数量；然后针对各施肥类别对应的试验点，分别构建三元肥效模型。

由于三元非结构肥效模型较好克服了三元二次多项式肥效模型的设定偏误和多重共线性的缺陷，推荐施肥量普遍略低于多项式模型[20]，本文采用该模型拟合花生相关试验结果：

$$\mathrm{Y} = A(N_0+\mathrm{N})(P_0+\mathrm{P})(K_0+\mathrm{K})e^{-c1\mathrm{N}-c2\mathrm{P}-c3\mathrm{K}} \quad (1)$$

其中，N_0、P_0、K_0 分别表示供试土壤的氮、磷、钾供肥当量，以 N、P_2O_5、K_2O 养分形态计量，计量单位为 kg·hm^{-2}；c_1、c_2、c_3 分别表示施用氮、磷、钾养分的增产效应系数；A 表示施肥量等于零时土壤肥力与作物产量之间的转换系数，综合反映了试验地的土壤生产力。该模型在一定施肥量范围内存在一个产量峰值，由此分别计算最高产量施肥量和经济产量施肥量[20]。

本研究的系统聚类分析和施肥类别间差异显著性检验采用 MATLAB R2015b 软件的统计分析工具箱完成，三元非结构肥效模型构建则使用 MATLAB R2015b 软件的 nlinfit 功能函数进行参数估计、显著性检验和模型典型性判别。

2　结果与分析

2.1　花生氮磷钾施肥类别和施肥效应

根据花生主产区完成的 105 个氮磷钾田间肥效试验结果，应用欧氏距离-离差平方和法系统聚类分析结合类别间差异显著性检验的方法[22]，定量确定花生氮磷钾施肥类别数量。结果表明，若将花生施肥类别划分为 5 个或以上，则最少有一对施肥类别间产量效应差异不显著，导致分类结果无效；若划分 3 个或 2 个施肥类别，虽然各施肥类别间的产量效应差异可以达到显著水平，但对全省区域而言，则因类别数过少而使推荐施肥精确度不够；若将花生施肥类别数划分为 4 个，这时类别 1 和类别 2、类别 3、类别 4 之间的 F 值分别为 43.9**、136.7**、52.5**；类别 2 与类别 3、类别 4 之间的 F 值分别为 54.2**、195.5**；类别 3 与类别 4 之间的 F 值则为 202.9**，各施肥类别间的施肥产量效应均有显著水平差异，分类结果有效。因此，福建花生主产区的最佳施肥类别数量为 4 个。

依据 4 个施肥类别各自空白区和处理（6）的产量水平，从“高产”到“低产”分别命名为“高产田”“中产田”“中低产田”和“低产田”（表 5），其中处理（6）平衡施肥的花生荚果平均产量为 3 880 kg·hm^{-2}，土壤对花生荚果的平均贡献率为 63.3%；低产田土壤的贡献率最低，平均只有 59.5%，其他 3 类则大致在 63.0%～64.4%。氮、磷、钾化肥的平均增产率分别为 24.2%、17.1% 和 19.2%，增产效果是 N＞K＞P。从施肥的单位面积增产量看，与对照相比，处理（6）平衡施肥的增产量与土壤肥力水平成正比，高产田的增产量平均为 2 190 kg·hm^{-2}，低产田则只有 866 kg·hm^{-2}；高产田的氮磷钾化肥增产量分别为 1 776、1 101、1 593 kg·hm^{-2}，高于其他施肥类别的 1 倍以上。结果显示，高产田的花生施肥效应远高于其他类型田块；中产田及以下的耕地类型应进行土壤改良培肥，才能充分发挥花生施肥增产潜力。

2.2　基于农学效应的花生氮磷钾推荐施肥

在花生氮磷钾施肥类别定量分类基础上，根据各施肥类别对应的试验点及其氮磷钾田间肥效试验结果，应用三元非结构肥效模型建立氮磷钾施肥效应模型（表 6）。结果表明，4 个三元非结构肥效模

表 5 花生氮磷钾施肥类别及其施肥的产量效应

Table 5 NPK fertilization categories and peanut yields

施肥类别 Fertilization category	试验点 No. of trials	处理（6）施肥量 Application rate of treatment 6 /（kg·hm^{-2}）			各处理荚果产量 Peanut yield of treatments /（kg·hm^{-2}）				
		N	P_2O_5	K_2O	CK	$N_2P_2K_2$	$N_0P_2K_2$	$N_2P_0K_2$	$N_2P_2K_0$
高产田 High yield field	19	89±19	65±8	107±22	3 725±504	5 915±678	4 139±802	4 814±930	4 322±993
中产田 Middle yield field	21	103±14	73±11	126±17	2 761±411	4 349±363	3 567±341	3 862±561	3 686±449
中低产田 Medium-low-yield field	51	103±19	73±12	125±19	2 196±436	3 408±397	2 636±450	2 893±482	2 644±505
低产田 Low yield field	14	74±5	58±5	89±9	1 272±395	2 138±451	1 470±341	1 679±311	1 620±329

型均达到统计显著水平以上，且模型均属于典型式，可用于花生推荐施肥。因此，根据表 6 的建模结果，应用三元非结构肥效模型推荐施肥计算式[20]，计算花生荚果最高产量施肥量，并以每 kg N 4.3 元、P_2O_5 5 元、K_2O 5 元和荚果 6 元的市场均价计算经济施肥量。表 7 的结果显示，在 95% 置信区间下，各施肥类别的目标产量或空白区产量几乎不出现重叠。因此，在实际应用中，可根据表 7 的施肥目标产量或者空白区产量确定具体田块所属的施肥类别及其推荐施肥量。

表 6 花生不同施肥类别的氮磷钾三元非结构肥效模型

Table 6 Ternary non-structural fertilizer response models for peanut cultivation under various NPK fertilization categories

施肥类别 Fertilization category	模型参数 Model parameter							统计检验 Statistical test		模型典型性 Model typicality
	$A\times10^3$	N_0	P_0	K_0	$c_1\times10^3$	$c_2\times10^3$	$c_3\times10^3$	F	R^2	
高产田 High yield field	6.555 6	80.12	69.81	90.21	5.851 1	8.437 9	5.449 0	9.4**	0.890 1	典型式
中产田 Middle yield field	1.735 7	111.40	103.74	137.46	4.578 4	5.879 9	3.948 1	269.3**	0.996	典型式
中低产田 Medium-low-yield field	1.332 9	109.02	113.27	125.69	4.635 1	5.500 1	4.095 1	23.6**	0.952 9	典型式
低产田 Low yield field	4.322 7	57.68	51.86	89.13	7.724 3	10.570	5.962 7	13.0**	0.917 5	典型式

平均而言，花生最高产量施肥量加权平均为 N 99 kg·hm^{-2}、P_2O_5 61 kg·hm^{-2}、K_2O 108 kg·hm^{-2}，预计产量为 3 759 kg·hm^{-2}；经济施肥量加权平均则为 N 90 kg·hm^{-2}、P_2O_5 54 kg·hm^{-2}、K_2O 95 kg·hm^{-2}，预计产量为 3 745 kg·hm^{-2}，氮磷钾适宜比例为 1∶0.6∶1.1。

2.3 化肥推荐施肥对花生产量和施肥效益的影响

闽东南地区的 34 个田间示范结果（表 8）表明，与空白区产量相比，无论是推荐施肥还是习惯施肥，花生产量都获得显著提高；推荐施肥调整了习惯施肥的氮磷钾施用量和比例，花生荚果产量平均增产 10.2%。以每 kg N 4.3 元、P_2O_5 5 元、K_2O 5 元和荚果 6 元的市场均价计算，推荐施肥的肥料成本较习惯施肥下降 63 元·hm^{-2}，净增收达到 2 877 元·hm^{-2}。因此，表 7 提出的花生氮磷钾施肥限量标准具有较好的增产增收效果。

2.4 花生有机肥替代化肥潜力

为进一步降低表 7 的花生化肥施用量，在花生种植地代表性土壤上设置了有机肥替代化肥潜力田间试验。产量结果（表 9）表明，习惯施肥、推荐施肥、有机肥替代部分化肥处理的花生荚果产量都比空白区处理获得显著的增产效果，但增产幅度差异较大。其中，在推荐施肥基础上，有机肥替代 25% 化肥处理的产量最高，且均显著高于习惯施肥，平均增产 18.9%；除灰泥田试验点与推荐施肥产量持平外，其他 3 个试验点的产量显著高于化肥推荐施肥，4 个试验平均增产 10.6%。

以每 kg N 4.3 元、P_2O_5 5 元、K_2O 5 元、荚果 6 元和商品有机肥 800 元·t^{-1} 的市场均价计算不同施肥模式的肥料成本和产量效益（表 9）。结果表明，扣除化肥成本，与习惯施肥相比，化肥推荐施肥、有机肥替代 25% 化肥的处理均使花生获得增产增收，

表 7　基于农学效应的花生氮磷钾施肥限量标准

Table 7　NPK limits based on agronomic effects for peanut fertilization

施肥类别 Fertilization categories	试验点 No. of trials	空白区产量 Blank yield/（kg·hm^{-2}）	目标产量 Target yield/（kg·hm^{-2}）	最高施肥量及产量 Maximum fertilizer rate and yield/（kg·hm^{-2}）				经济施肥量及产量 Economic fertilizer rate and yield /（kg·hm^{-2}）			
				N	P_2O_5	K_2O	产量 Yield	N	P_2O_5	K_2O	产量 Yield
高产田 High yield field	19	3 725±504	5 915±678	91	49	93	5 712	87	46	88	5 707
中产田 Middle yield field	21	2 761±411	4 349±363	107	66	116	4 288	98	60	102	4 274
中低产田 Medium- low-yield field	51	2 196±436	3 408±397	107	69	119	3 287	95	59	102	3 269
低产田 Low yield field	14	1 272±395	2 138±451	72	43	79	2 032	65	39	66	2 021

表 8　氮磷钾推荐施肥对花生产量和施肥效益的影响

Table 8　Peanut yield and fertilization efficiency as affected by recommended NPK applications

地区 Regions	试验点 No. of trials	空白区产量 Blank yield/（kg·hm^{-2}）	习惯施肥 Farmer practice		推荐施肥 Recommended fertilization		推荐施肥效益 Benefits of recommended fertilization		
			肥料成本 Fertilizer cost/（元·hm^{-2}）	产量 Yield/（kg·hm^{-2}）	肥料成本 Fertilizer cost /（元·hm^{-2}）	产量 Yield/（kg·hm^{-2}）	增产 Yield increase/ %	肥料成本 Fertilizer cost/（元·hm^{-2}）	净增收 Net income/（元·hm^{-2}）
莆田 Putian	19	3 692±1 397	1 312	4 682±1 631	1 467	5 157±1 621	10.1	+155	2 695
泉州 Quanzhou	6	2 403±796	1 473	2 973±633	1 183	3 278±506	10.3	−290	2 120
厦门 Xiamen	4	4 709±3 501	2 024	5 444±3 094	1 250	5 779±2 957	6.2	−770	2 780
漳州 Zhangzhou	5	1 727±161	1 733	5 541±329	1 661	6 261±275	13.0	−72	4 392

表 9　不同施肥模式对花生产量和经济效益的影响

Table 9　Peanut yield and economic benefit under various fertilization models

序号 No.	处理 Treatment	南安灰泥田 Plaster field in Nan'an		南安灰沙田 Gray Sand field in Nan'an		晋江赤沙土 Red sand field in Jinjiang		晋江灰赤沙土 Gray red sand field in Jinjiang	
		产量 Yield/（kg·hm^{-2}）	净增收 Net income/（元·hm^{-2}）	产量 Yield/（kg·hm^{-2}）	净增收 Net income/（元·hm^{-2}）	产量 Yield/（kg·hm^{-2}）	净增收 Net income/（元·hm^{-2}）	产量 Yield/（kg·hm^{-2}）	净增收 Net income/（元·hm^{-2}）
1	空白 CK	3 300 d	-	2 885 d	-	2 261 d	-	-	-
2	习惯施肥 Farmer practice	3 890 c	-	3 455 c	-	2 835 c	-	3 602 b	-
3	推荐施肥 Recommended fertilization	4 467 ab	3 667	3 986 b	3 391	3 135 b	2 005	3 800 b	1 393
4	有机肥替代25%化肥 OR25%	4 934 a	6 469	4 386 a	4 664	3 495 a	3 038	4 200 a	2 666
5	有机肥替代50%化肥 OR50%	4 310 bc	1 598	3 248 c	−3 278	2 960 bc	−1 286	-	-

注：（1）产量方差分析：灰泥田的$F_{处理}$=37.5**，灰沙田的$F_{处理}$=87.4**，赤沙土的$F_{处理}$=32.3**，灰赤沙土$F_{处理}$=43.6**；（2）处理2至处理5的肥料成本分别为1 482元·hm^{-2}、1 277元·hm^{-2}、2 404元·hm^{-2}和3 518元·hm^{-2}；（3）OR25%表示有机肥替代25%化肥，OR50%有机肥替代50%化肥。

Note:（1）yield variance analysis: plaster field: F=37.5**, gray sand field: F=87.4**, red sand field: F=32.3**，gray red sand field : F=43.6**.（2）Fertilizer cost from treatment 2 to treatment 5 is 1 482 Yuan·hm^{-2}, 1 277 Yuan·hm^{-2}, 2 404 Yuan·hm^{-2} and 3 518 Yuan·hm^{-2}, respectively.（3）OR25% stands for organic replacement of 25% chemical fertilizer, and OR50% stands for organic replacement of 50% chemical fertilizer.

平均净增收分别提高 2 614、4 029 元·hm^{-2}；与化肥推荐施肥相比，有机肥替代 25% 化肥处理平均净增收 1 595 元·hm^{-2}。但有机肥替代 50% 化肥的处理，由于增产幅度较小，且大幅度增加肥料成本，净增收明显下降，甚至低于习惯施肥。

3　讨论

3.1　氮磷钾施肥类别的定量分类

在推荐施肥领域，如何对多年多点田间肥效试验结果进行合理分类总结，提出不同土壤肥力等级

或者施肥目标产量下的推荐施肥技术，历来是重要的研究课题。福建花生种植地分布在闽东南和闽西地区，常年种植面积 11 万 hm^2 左右，种植区域较小，区内生产条件和一般产量水平差异不大。为此，将花生种植区域作为一个整体进行系统聚类分析，并对分类结果的方差协方差矩阵进行差异显著性检验[23]。这种方法的优点是花生氮磷钾施肥效应在不同施肥类别间具有显著水平差异，确保了分类结果的有效性。

在推荐施肥服务区域内，土壤肥力水平或者目标产量应该划分为多少个等级，即划分成多少个施肥类别，至今仍然悬而未决。由于施肥量和作物产量的关系不是确定性关系，施肥类别间在统计学上应该具有显著水平的差异，才能保证分类结果的有效性。迄今不少学者研究提出了许多肥料试验资料的分类或聚类方法[24−26]，具有简洁、实用和易于理解的优点，但类别间是否具有显著性差异均未进行统计检验。本文结合方差协方差矩阵差异显著性检验技术，从定量角度较好地解决了施肥类别到底应该划分多少个等级的问题。

3.2 三元肥效模型选择及其计量结果

本研究根据花生各施肥类别的对应田间肥效试验结果，应用三元非结构肥效模型建立氮磷钾肥效模型，得到各施肥类别的推荐施肥量。在测土配方施肥中，常用三元二次多项式肥效模型建立氮磷钾肥效方程和计算推荐施肥量[27]。但是，已有研究表明，二次多项式模型的推荐施肥量普遍偏高[19, 28]。

课题组曾在 10 年前，根据当时花生氮磷钾田间肥效试验结果，应用三元二次多项式肥效模型探讨花生推荐施肥[18]。由于最高施肥量不受价格因素的影响，本研究采用非结构肥效模型推荐的全省平均最高施肥量，与当时采用三元二次多项式肥效模型得到的全省花生平均最高施肥量相比，氮、磷、钾推荐用量分别降低了 13.9%、14.1% 和 17.6%；即使是经济施肥量，氮、磷、钾的推荐用量也分别下降了 8.2%、1.8% 和 7.8%。因此，三元非结构肥效模型的推荐施肥量较好地克服了三元二次多项式肥效模型推荐施肥量偏高[19, 28]的问题，有利于减肥增效技术的推广应用。

3.3 化肥与有机肥配施进一步提高花生产量

105 个花生氮磷钾肥效试验表明，福建省高产田的花生施肥效应高于其他类型田块的 1 倍以上，显示中产田及以下的耕地类型需进行土壤改良培肥，才能充分发挥花生施肥增产潜力。34 个田间示范结果表明，推荐施肥的花生荚果产量比习惯施肥平均增产 10.2%，肥料成本下降 63 元·hm^{-2}，净增收 2 877 元·hm^{-2}。但在化肥推荐施肥基础上，有机肥替代 25% 化肥的施肥模式使花生荚果产量进一步增产 10.6%，平均净增收进一步提高 1 595 元·hm^{-2}。

坡耕地是福建省花生主要种植区域，坡耕地农耕历史悠久，利用强度大，加上不合理的坡地利用方式，水土流失严重。土壤和施肥管理粗放，导致土壤酸化严重，土壤有机质含量普遍偏低。本研究显示，花生种植区配施有机肥显著改善了土壤生产力，有利于发挥花生施肥的增产潜力。

参考文献：

[1] 房增国, 赵秀芬, 李俊良. 山东省不同区域花生施肥现状分析 [J]. 中国农学通报, 2009, 25（13）：129−133.
FANG Z G, ZHAO X F, LI J L. The status analysis of fertilizer application on peanut in different region of Shandong Province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25（13）: 129−133.（in Chinese）

[2] 余常兵, 李银水, 谢立华, 等. 湖北省花生平衡施肥技术研究Ⅳ.农户花生施肥状况 [J]. 湖北农业科学, 2011, 50（21）：4354−4356.
YU C B, LI Y S, XIE L H, et al. Study on peanut balanced fertilization technique in Hubei Province Ⅳ. status of farmer peanut fertilization [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50（21）: 4354−4356.（in Chinese）

[3] 张桥, 张育灿, 林日强, 等. 广东省花生测土配方施肥氮素指标体系研究 [J]. 中国农学通报, 2014, 30（33）：101−104.
ZHANG Q, ZHANG Y C, LIN R Q, et al. Research of nitrogen in For *Mula* fertilization by soil testing index system for peanut in Guangdong [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30（33）: 101−104.（in Chinese）

[4] 孙彦浩, 陈殿绪, 张礼凤. 花生施氮肥效果与根瘤菌固N的关系 [J]. 中国油料作物学报, 1998, 20（3）：70−73.
SUN Y H, CHEN D X, ZHANG L F. The relationship between the effect of N application and nitrogen fixation in peanut [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 1998, 20（3）: 70−73.（in Chinese）

[5] 万书波, 封海胜, 左学青, 等. 不同供氮水平花生的氮素利用效率 [J]. 山东农业科学, 2000, 32（1）：31−33.
WAN S B, FENG H S, ZUO X Q, et al. Nitrogen use efficiency by peanut with different nitrogen levels [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2000, 32（1）: 31−33.（in Chinese）

[6] 许小伟, 樊剑波, 陈晏, 等. 有机无机肥配施对红壤旱地花生生理特性、产量及品质的影响 [J]. 土壤学报, 2015, 52（1）：174−182.
XU X W, FAN J B, CHEN Y, et al. Effect of manure combined with chemical fertilizer application on yield, kernel quality and physiological characteristics of peanut to red soil in subtropical China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52（1）: 174−182.（in Chinese）

[7] 张翔, 张新友, 毛家伟, 等. 施氮水平对不同花生品种产量与品质的

影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17（6）：1417−1423.
ZHANG X, ZHANG X Y, MAO J W, et al. Effects of nitrogen fertilization on yield and quality of different peanut cultivars [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17（6）: 1417−1423.（in Chinese）

[8] 王才斌, 郑亚萍, 梁晓艳, 等. 施肥对旱地花生主要土壤肥力指标及产量的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33（4）：1300−1307.
WANG C B, ZHENG Y P, LIANG X Y, et al. Effects of fertilization on soil fertility indices and yield of dry-land peanut [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33（4）: 1300−1307.（in Chinese）

[9] 姜灿烂, 何园球, 李辉信, 等. 长期施用无机肥对红壤旱地养分和结构及花生产量的影响 [J]. 土壤学报, 2009, 46（6）：1102−1109.
JIANG C L, HE Y Q, LI H X, et al. Effect of long-term inorganic fertilization on soil nutrient and structure and peanut yield in upland red soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46（6）: 1102−1109.（in Chinese）

[10] 余常兵, 李银水, 谢立华, 等. 湖北省花生平衡施肥技术研究Ⅵ.花生氮肥用量 [J]. 湖北农业科学, 2012, 51（4）：677−678, 684.
YU C B, LI Y S, XIE L H, et al. Study on peanut balanced fertilization technique in Hubei Province Ⅵ.N fertilizer application level [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51（4）: 677−678, 684.（in Chinese）

[11] 于俊红, 张桥, 张育灿, 等. 广东省花生测土配方施肥钾素指标体系研究 [J]. 中国农学通报, 2014, 30（30）：106−110.
YU J H, ZHANG Q, ZHANG Y C, et al. Research of potassium in For *Mula* fertilization by soil testing index system for peanut in Guangdong [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30（30）: 106−110.（in Chinese）

[12] 张育灿, 于俊红, 林日强, 等. 广东省花生测土配方施肥磷素指标体系研究 [J]. 中国农学通报, 2014, 30（36）：211−215.
ZHANG Y C, YU J H, LIN R Q, et al. Research of phosphorus in For *Mula* fertilization by soil testing index system for peanut in Guangdong [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30（36）: 211−215.（in Chinese）

[13] 娄春荣, 王秀娟, 董环, 等. 辽宁花生测土配方施肥技术参数研究 [J]. 土壤通报, 2011, 42（1）：151−153.
LOU C R, WANG X J, DONG H, et al. Parameters of fertilization recipe on peanut in Liaoning [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42（1）: 151−153.（in Chinese）

[14] 王秀娟, 娄春荣, 董环, 等. 辽宁花生施肥模型试验研究 [J]. 土壤通报, 2011, 42（1）：148−150.
WANG X J, LOU C R, DONG H, et al. Fertilization model on peanut in Liaoning [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42（1）: 148−150.（in Chinese）

[15] 钟秋瓒, 陈荣华, 方先兰, 等. 红壤旱地花生“3414”肥料试验施肥效应研究 [J]. 花生学报, 2013, 42（3）：16−22.
ZHONG Q Z, CHEN R H, FANG X L, et al. Effects of “3414” For *Mula* fertilization on upland peanut in red soil [J]. *Journal of Peanut Science*, 2013, 42（3）: 16−22.（in Chinese）

[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.
ZHANG M Q, PENG J G, YANG J, et al. The application of “A systematic approach for determining soil nutrient contents” to peanut balanced fertilization [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2000, 15（1）: 55−58.（in Chinese）

[17] 章明清, 林新坚. 闽东南旱地土壤养分状况与花生平衡施肥研究 [J]. 热带亚热带土壤科学, 1996, 5（4）：206−211.
ZHANG M Q, LIN X J. Studies on nutritional status of upland soil and balanced fertilization for peanut in southeast area of Fujian [J]. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1996, 5（4）: 206−211.（in Chinese）

[18] 颜明娟, 章明清, 李娟, 等. 福建花生测土配方施肥指标体系研究 [J]. 中国油料作物学报, 2010, 32（3）：424−430.
YAN M J, ZHANG M Q, LI J, et al. Soil testing and For Mula fertilization index for peanut in Fujian Province [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2010, 32（3）: 424−430.（in Chinese）

[19] 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 Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4（1）: 67−74.（in Chinese）

[20] 李娟, 章明清, 章赞德, 等. 三元非结构肥效模型提高水稻施肥推荐的可靠性 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25（2）：311−320.
LI J, ZHANG M Q, ZHANG Z D, et al. Increasing precision of fertilizer recommendation using ternary non-structural fertilizer response model [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25（2）: 311−320.（in Chinese）

[21] 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: 146-196.

[22] 李娟, 章明清, 孔庆波, 等. 构建县域早稻氮磷钾施肥的系统聚类方法研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23（2）：531−538.
LI J, ZHANG M Q, KONG Q B, et al. Building fertilization categories of N, P and K fertilization for early rice using systematic clustering method in County territory [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23（2）: 531−538.（in Chinese）

[23] 袁志发, 宋世德. 多元统计分析(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 278-293.

[24] 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技术[M]//黄淮海平原主要作物优化施肥和土壤培肥研究总论.北京: 中国农业科技出版社, 1991: 1-26.

[25] 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, 20（1）：17−21.
WANG X R, CHEN L S, MAO D R, et al. Classification regression synthetic method and its application in regional fertilization decision [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1989, 20（1）: 17−21.（in Chinese）

[26] 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（2）：49−54.

MAO D R, ZHANG C D. Cluster analysis of quadratic response fanction on the fertilizer dispersed experiments [J]. *Journal of Beijing Agricultural University*, 1991（2）: 49−54.（in Chinese）

[27] 金耀青, 张中原. 配方施肥方法及其应用[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1993: 1-64.

[28] 陈新平, 周金池, 王兴仁, 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）: 346−354.

CHEN X P, ZGOU J C, WANG X R, et al. Economic and environmental evaluation on models for describing crops yield response to nitrogen fertilizer at wheat-corn rotation system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37（3）: 346−354.（in Chinese）

（责任编辑：张梅）