

李娟, 张立成, 张华, 等. 福建甘薯氮磷钾推荐施肥与有机肥替代化肥技术模式 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (8): 968–976.

LI J, ZHANG L C, ZHANG H, et al. Recommended NPK Fertilization and Partial Replacement with Organic Manure for Sweet Potato Cultivation in Fujian [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (8): 968–976.

福建甘薯氮磷钾推荐施肥与有机肥替代化肥技术模式

李娟¹, 张立成¹, 张华², 张世昌², 潘住财³, 张民生⁴, 林明贤⁵, 章明清^{1*}

(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; 3. 福建省南安市农业局, 福建 南安 362300; 4. 福建省云霄县土肥站, 福建 云霄 363300; 5. 福建省漳浦县土壤肥料技术推广站, 福建 漳浦 363200)

摘要:【目的】提高甘薯施肥效益, 实现化肥减施增效目标, 探讨推荐施肥和有机肥替代化肥的技术模式。

【方法】根据甘薯氮磷钾田间肥效试验结果, 定量确定福建甘薯最佳施肥类别; 然后分别建立各施肥类别的三元非结构肥效模型和推荐施肥量, 在此基础上开展有机肥替代化肥潜力的试验研究, 并进行田间示范。【结果】甘薯施肥可划分为高产田、中产田、中低产田和低产田等4个施肥类别, 高产田的氮肥增产效应明显高于其他施肥类别, 但磷钾肥的增产效应则反之。基于不同施肥类别的三元非结构肥效模型, 甘薯平均经济施肥量为 $N\ 160\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 62\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $K_2O\ 212\ kg\cdot hm^{-2}$, 三要素适宜比例为 1:0.4:1.3, 但不同施肥类别的推荐施肥量有明显差异。在推荐施肥基础上有机肥替代 25% 化肥具有最佳增产增收效果, 平均比推荐施肥增产 13.0%, 净增收 1802 元· hm^{-2} 。在 N、 P_2O_5 投入比习惯施肥下降 16.7% 和 47.4% 以及 K_2O 投入提高 94.0% 的条件下, 79 个化肥推荐施肥田间示范比习惯施肥平均增产 7.9%, 净增收 3 394 元· hm^{-2} ; 基于推荐施肥量的 16 个有机肥替代 25% 化肥的田间示范则平均增产 11.3%, 净增收 4 192 元· hm^{-2} 。【结论】化肥推荐施肥和在此基础上有机肥替代 25% 化肥是可供推广应用的甘薯化肥减施增效技术模式, 后者效果更佳。

关键词: 甘薯; 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 (2022) 08-0968-09

Recommended NPK Fertilization and Partial Replacement with Organic Manure for Sweet Potato Cultivation in Fujian

LI Juan¹, ZHANG Licheng¹, ZHANG Hua², ZHANG Shichang², PAN Zhucan³,
ZHANG Minsheng⁴, LIN Mingxian⁵, ZHANG Mingqing^{1*}

(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; 3. Nanan Agricultural Bureau, Nanan, Fujian 362300, China; 4. Yunxiao Soil and Fertilizer Station, Yunxiao, Fujian 363300, China; 5. Zhangpu Agricultural Technology Popularization Station, Zhangpu, Fujian 363200, China)

Abstract: 【Objective】NPK fertilization and utilization of manure for partial replacement in sweet potato farming were optimized for the agriculture in Fujian. 【Method】Based on field experiments, sweet potato growing fields in the province were classified. A ternary non-structural fertilization response model was constructed for each class to optimize the fertilization. Field tests and demonstrations were conducted to scrutinize and promote the recommended program.

【Result】The 4 classes of sweet potato fields in the province included (1) high yield paddy, (2) medium yield paddy, (3) medium-to-low yield field, and (4) low yield field. The sweet potato plants were highly responsive to N fertilizer application on the fields of higher yield, but P or K tended to benefit more the plants grown on lands of lower yields. According to the fertilization response models, the economic applications averaged $160\ kg\cdot hm^{-2}$ on N, $62\ kg\cdot hm^{-2}$ on P_2O_5 , and 212

收稿日期: 2022-04-24 初稿; 2022-05-24 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 (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 (2021R1025005); 福建省农业高质量发展超越“5511”协同创新工程项目 (XTCXGC2021009)

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ on K_2O in the ratio of 1:0.4:1.3. However, the recommendation for different classes of field differed significantly. By replacing 25% NPK in the recommended fertilizations (RF) with manure, on average a 13.0% increase on tuber yield and 1 802 yuan· hm^{-2} increase on net revenue over RF were realized. In the 79 field demonstrations with RF, the application of N was reduced by 16.7% and P_2O_5 by 47.41% while K_2O increased by 79.3% which resulted in 7.9% rise on yield and 3 394 yuan· hm^{-2} more on net revenue over what practiced by the farmers (FP). On the other hand, in the 16 field tests where 25% NPK fertilizers was replaced with manure, the average yield rose by 11.0% with 4 192 yuan· hm^{-2} higher in revenue.

【Conclusion】 Although either RF or 25% NPK replaced by organic manure could significantly improve the sweet potato productivity and profitability, the use of organic manure to partially substitute chemical fertilizer was deemed superior for the farming in the province.

Key words: Sweet potato; field classification; fertilizer; organic manure; recommended fertilization; fertilization model

0 引言

【研究意义】甘薯是我国重要的粮食、工业原料和饲料作物，是福建省种植面积位居第二的大田农作物，常年种植面积 17 万 hm^2 ^[1]。福建甘薯种植大部分集中在山区和沿海丘陵坡耕地，土壤贫瘠，有机质含量偏低。因此，探讨甘薯的化肥和化肥配施有机肥的施肥技术，对进一步提高甘薯产量和施肥效益等具有重要生产意义。【前人研究进展】近年来，我国甘薯养分管理技术研究取得长足进展，在施肥现状调研^[2-3]、养分吸收和营养特性^[4-6]、化肥推荐施肥或化肥配施有机肥对产量和品质影响^[7-12]等方面进行了许多深入研究，为甘薯合理施肥提供了重要依据。然而，相关研究的试验规模普遍偏小，甘薯不同生产条件的施肥指标体系和能直接用于指导区域施肥的科技成果尚少。自 2005 年以来，在全国测土配方施肥项目推动下，福建省对不同目标产量的甘薯推荐施肥量、施肥时期和施肥方法等方面进行了较为深入的研究，构建了甘薯氮磷钾施肥指标体系^[13-16]，为甘薯测土配方施肥技术推广应用提供了技术支撑。【本研究切入点】以往相关研究的推荐施肥计量模型依据是三元二次多项式函数，但这种模型存在推荐用量偏高的问题^[17]；已有的研究是针对化肥推荐施肥技术，有机肥替代化肥潜力的研究尚少涉及。【拟解决的关键问题】根据本课题组近年提出的三元非结构肥效模型^[18]，总结近 10 年来完成的甘薯氮磷钾田间肥效试验结果，构建不同目标产量下的甘薯氮磷钾推荐施肥量。在此基础上，探讨有机肥替代化肥的最佳技术模式，旨在为福建甘薯化肥减施增效技术推广应用提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 甘薯氮磷钾“3414”设计田间肥效试验

近 10 年来，本课题组在福建甘薯主产区完成了

110 个氮磷钾田间肥效试验。试验采用“3414”设计方案，氮磷钾各 4 个水平，共 14 个处理，即：（1） $\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$ ；（2） $\text{N}_0\text{P}_2\text{K}_2$ ；（3） $\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_2$ ；（4） $\text{N}_2\text{P}_0\text{K}_2$ ；（5） $\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_2$ ；（6） $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$ ；（7） $\text{N}_2\text{P}_3\text{K}_2$ ；（8） $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_0$ ；（9） $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_1$ ；（10） $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_3$ ；（11） $\text{N}_3\text{P}_2\text{K}_2$ ；（12） $\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_2$ ；（13） $\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_1$ ；（14） $\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_1$ 。其中，“2”水平表示试验前的推荐施肥量，分别为 N 180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 K_2O 225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，“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%。按照测土配方施肥田间试验规范，试验采用随机区组排列和多点分散不设重复的方法。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 ，同一个试验小区面积相同。试验分散设置在福建各地市的甘薯主产区。

试验肥料分别选用尿素（N 46%）、过磷酸钙（ P_2O_5 12%）和氯化钾（ K_2O 60%）。甘薯施肥分为基肥、苗期追肥和薯块膨大期追肥 3 次施用。其中，基肥时氮肥、钾肥施用量占总施用量的 50%，磷肥则占总用量的 100%。苗期追肥在薯苗插植后约 20 d 施用，氮肥用量占总施肥量的 35%；钾肥用量占总施肥量的 20%。薯块膨大初期追施剩余的 15% 氮肥和 30% 钾肥。基肥采用全层深施，结合整地时进行；追肥采用开浅沟施用，结合中耕培土。供试甘薯品种选用当地大面积种植的良种，试验时间均在当地甘薯正常生产季节进行。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当地大田生产一致。

试验实施前，在试验地以“S”型布点，采集一个耕层混合基础土样 1 kg。用常规方法^[19]测定供试土壤主要理化性状（表 1）。供试土壤包括旱地土壤的灰赤沙土、赤沙土和稻田土壤的灰沙田、黄泥田等主要耕作土壤类型（土属）。甘薯收获时，各小区单收单称，分别记录薯块鲜重产量。

表 1 供试土壤主要理化性状
Table 1 Major physiochemical properties of soils at test fields

试验或示范类型 Experiment or demonstration	试验数 No. of trials	pH	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 K/ (mg·kg ⁻¹)
“3414”肥效试验 Fertilizer effect experiment using “3414”design	110	5.2±1.4	24.94±10.56	121.9±43.6	32.0±26.3	77.5±45.7
有机肥替代试验 Replacement fertilizer with organic manure	14	5.7±0.5	19.04±6.48	103.0±19.3	66.4±29.8	120.7±33.3
化肥推荐施肥田间示范 Recommended fertilization demonstration	76	5.6±0.7	19.66±8.18	88.3±38.7	53.1±31.7	81.6±43.7
有机肥替代化肥田间示范 Organic manure replacement fertilizer demonstration	16	5.6±0.4	17.46±7.67	102.4±18.1	67.4±29.1	121.4±33.5

1.2 甘薯有机肥替代化肥田间试验

为完成化肥减施增效技术项目研究，近年来在甘薯主产区选择代表性田块设置了 14 个有机肥替代化肥田间试验。试验设 5 个处理（表 2），其中，习惯施肥以测土配方施肥项目在全省甘薯生产施肥现

状调查结果的平均施肥量为依据，推荐施肥则以上述甘薯“3414”设计氮磷钾田间肥效试验的平均推荐施肥量为依据；处理 3、处理 4 和处理 5 是在等量氮磷钾基础上设置的处理，全省统一实施方案。供试土壤的主要理化性状见表 1。

表 2 甘薯有机肥替代化肥田间试验设计
Table 2 Field experiment design on sweet potato grown under NPK fertilization with organic manure

序号 No.	处理 Treatments	施肥量 Application rate/ (kg·hm ⁻²)			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥 Organic manure
1	空白 CK	0	0	0	0
2	习惯施肥 FP	216	114	116	0
3	推荐施肥 RF	180	60	225	0
4	25%有机肥替代化肥 OR25%	135	45	170	3 000
5	50%有机肥替代化肥 OR50%	90	30	113	6 000

有机肥指商品有机肥，N+P₂O₅+K₂O≥5%，养分总量以 5% 计，含水量以 25% 计；处理 3、处理 4 和处理 5 为等氮磷钾养分数量。FP、RF、OR25%、OR50% 处理分别表示习惯施肥、化肥推荐施肥、有机肥替代 25% 化肥和有机肥替代 50% 化肥。下同。
Commercial organic manure contained N+P₂O₅+K₂O≥5%, total nutrients of 5%, and moisture content of 25%; same application rates of N, P₂O₅, and K₂O for Treatments 3, 4, and 5. FP: farmer practice; RF: recommend fertilization; OR25% and OR50%: 25% and 50% of chemical fertilizer replaced with organic manure, respectively. Same for below.

试验设 3 次重复，每个小区 20 m²，随机区组排列。有机肥作基肥一次性施用，其他相关田间试验实施方法、供试土壤、土样采集和测定、田间施肥管理措施和产量验收等，与上述“3414”设计的田间试验实施方法相同。

1.3 甘薯化肥减施增效主推技术的田间示范

在甘薯氮磷钾推荐施肥和有机肥替代化肥田间试验基础上，为加快化肥减施增效技术的推广应用，近年来在甘薯主产区设置了 76 个化肥推荐施肥技术模式示范田和 16 个有机肥替代化肥技术模式示范田。其中，化肥推荐施肥技术模式的示范田设置了 CK、习惯施肥和化肥推荐施肥对比，有机肥替代

化肥技术模式示范田则设 CK、习惯施肥和有机肥替代 25% 化肥对比。示范田的化肥推荐施肥量以甘薯不同施肥类别的经济施肥量为依据，有机肥替代 25% 化肥的施肥量以上述有机肥替代化肥试验结果为依据，肥料种类与表 2 的相关处理相同。

示范田分散设置在各地市甘薯主产区。每个处理 300 m²，不设重复。供试土壤的主要理化性状见表 1。田间示范供试土壤选择、土样采集和测定、田间施肥管理措施和产量验收与上述“3414”设计的田间试验实施方法相同，不再赘述。

1.4 试验数据处理

在甘薯“3414”设计的氮磷钾田间肥效试验结果汇

总时，为确保各施肥类别间的施肥效应具有显著差异，采用欧氏距离-离差平方和法系统聚类分析结合类别间施肥效应差异显著性检验技术^[20-21]，确定甘薯最佳施肥类别数量；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，并计算推荐施肥量。

由于三元非结构肥效模型较好地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，推荐施肥量普遍低于多项式模型^[17]，故本研究采用该模型拟合相关试验结果：

$$Y = A(N_0 + N)(P_0 + P)(K_0 + K)e^{-c_1 N - c_2 P - c_3 K}$$

其中， N_0 、 P_0 、 K_0 分别表示供试土壤的氮、磷、钾供肥当量，并以 N 、 P_2O_5 、 K_2O 养分形态计量，计量单位为 $kg \cdot hm^{-2}$ ； c_1 、 c_2 、 c_3 分别表示施用氮、磷、钾养分的增产效应系数； N 、 P 、 K 表示 N 、 P_2O_5 、 K_2O 养分用量； 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^[18]。

本研究的系统聚类分析、施肥类别间差异显著性检验和相关产量统计采用 MATLAB R2019b 全功能免费试用版软件的统计工具箱完成，三元非结构肥效模型典型性判别则使用 MATLAB 语言编程计算。双侧检验，检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 甘薯的氮磷钾施肥类别和施肥效应

对 110 个氮磷钾田间肥效试验结果进行统计分析，结果表明，若将甘薯施肥类别划分为 5 个或 5 个以上，则最少有一对施肥类别间施肥效应差异不显著，导致分类结果无效；若施肥类别划分为 3 个

或 2 个，虽然各施肥类别间的施肥效应可达到显著差异，但对区域甘薯生产而言，尚嫌施肥类别数过少而使推荐施肥针对性较差。若将施肥类别数划分为 4 个，这时类别 1 与类别 2、类别 3、类别 4 之间的 F 值分别为 13.1**、66.9**、97.6**，类别 2 与类别 3、类别 4 之间的 F 值分别为 135.8**、232.5**，类别 3 与类别 4 之间的 F 值则为 31.0**，显示各施肥类别间的施肥效应均有显著差异，分类结果有效。因此，福建甘薯主产区的最佳施肥类别数量为 4 个。

根据空白区和处理（6）的产量水平，4 个施肥类别从高产到低产分别命名为高产田、中产田、中低产田和低产田等 4 种类型。表 3 的统计结果表明，处理（6）平衡施肥的薯块加权平均产量为 $29\ 779\ kg \cdot hm^{-2}$ ，土壤对产量的贡献率为 56.4%；氮磷钾化肥的加权平均增产率分别为 23.1%、17.7% 和 25.0%，显示氮钾肥的增产效果相当，都明显高于磷肥，与供试土壤速效氮磷钾丰缺状况（表 1）一致。其中，高、中、中低以及低产田的氮肥平均增产率分别为 38.2%、33.8%、34.2% 和 27.6%；磷肥的平均增产率分别为 10.4%、17.2%、17.1% 和 19.4%，钾肥则分别为 13.2%、23.7%、21.9% 和 28.5%。结果表明，高产田的氮肥效应明显高于其他类型田块，但中、低产田类型的磷钾肥增产效应明显高于高产田。

2.2 不同施肥类别的甘薯氮磷钾推荐施肥量

根据各施肥类别对应的甘薯氮磷钾田间肥效试验结果，分别建立三元非结构肥效模型（表 4）。结果表明，4 个三元非结构肥效模型均达到统计显著水平以上， R^2 达到 0.927 2 以上，模型均为典型式，可用于甘薯推荐施肥。

因此，根据三元非结构肥效模型推荐施肥的计算式^[18]，计算甘薯最高产量施肥量（表 5），以每 kg

表 3 甘薯氮磷钾施肥类别及各类别的施肥效应
Table 3 Sweet potato field classes for NPK fertilization study and resulting tuber yields

施肥类别 Fertilization category	试验数 No. of trials	处理（6）施肥量 Application rate of treatment 6/ ($kg \cdot hm^{-2}$)			各处理甘薯产量 Peanut yield/ ($kg \cdot hm^{-2}$)				
		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	5	180±16	60±17	288±24	35 445±7 102	73 650±7 881	45 510±8 091	66 000±8 091	63 915±8 164
中产田 Middle yield field	26	176±3	70±19	237±31	26 024±5 776	44 571±5 681	29 492±5 846	36 922±6 944	33 994±5 637
中低产田 Middle-low yield field	28	182±5	60±10	248±18	14 321±3 603	27 106±4 550	17 842±4 246	22 478±4 147	21 159±3 951
低产田 Low yield field	51	181±3	66±20	248±22	11 587±3 306	19 339±3 504	14 000±4 019	15 579±4 302	13 833±3 285

表 4 甘薯不同施肥类别的氮磷钾三元非结构肥效模型
Table 4 Ternary non-structural fertilization response models for sweet potato cultivated on fields of different classes

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
	$A \times 10^3$	N_0	P_0	K_0	$c_1 \times 10^3$	$c_2 \times 10^3$	$c_3 \times 10^3$	F	R^2	
高产田 High yield field	8.302 5	91.573	120.420	387.340	3.483 7	4.889 2	1.444 2	18.93**	0.942 0	典型式
中产田 Middle yield field	10.455 0	115.41	86.937	226.160	3.567 1	6.952 2	2.274 7	18.81**	0.941 6	典型式
中低产田 Middle-low yield field	5.301 3	119.21	89.095	237.590	3.158 7	6.419 4	2.093 0	62.49**	0.981 7	典型式
低产田 Low yield field	3.178 6	150.140	100.520	219.120	3.169 8	5.951 4	2.149 0	14.87**	0.927 2	典型式

“**”表示 $P<0.01$ 。
“**” represents $P<0.01$.

N 6.0 元、 P_2O_5 5 元、 K_2O 5 元和薯块 1.5 元的市场均价计算经济施肥量。平均而言，最高产量施肥量加权平均为 $N\ 175\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 66\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $K_2O\ 239\ kg\cdot hm^{-2}$ ，预期薯块产量为 $28\ 595\ kg\cdot hm^{-2}$ ；经济施肥量加权平均则为 $N\ 160\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 62\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $K_2O\ 212\ kg\cdot hm^{-2}$ ，预期产量为 $28\ 513\ kg\cdot hm^{-2}$ ，氮磷钾适宜比例为 1:0.4:1.3。

表 5 基于农学效应的甘薯氮磷钾推荐施肥量
Table 5 Limit standards of NPK fertilization based on agronomic effects for sweet potato cultivation

施肥类别 Fertilization categories	空白区产量 Blank yield/ ($kg\cdot hm^{-2}$)	目标产量 Target yield/ ($kg\cdot hm^{-2}$)	最高施肥量及产量 Maxium fertilizer rate and yield/ ($kg\cdot hm^{-2}$)				经济施肥量及产量 Economic fertilizer rate and yield/ ($kg\cdot hm^{-2}$)			
			N	P_2O_5	K_2O	产量Yield	N	P_2O_5	K_2O	产量Yield
高产田 High yield field	35 000±7 100	73 000±7 900	195	84	305	72 880	191	82	284	72 833
中产田 Middle yield field	26 000±5 800	45 000±5 700	165	57	213	42 636	158	55	199	42 595
中低产田 Middle-low yield field	14 000±3 600	27 000±4 600	197	67	240	26 400	183	64	213	26 322
低产田 Low yield field	11 000±3 300	19 000±3 500	165	68	246	18 300	145	62	210	18 192

表中各施肥类别的空白区产量和目标产量是在肥效模型计算值的基础上取整数。
Control and target yields of each sweet potato field class were rounded values from fertilization response models.

因此，在实际应用中，可根据表 5 的施肥目标产量结合空白区产量水平，确定具体田块所属的施肥类别及其最佳氮磷钾养分投入量。

2.3 有机肥替代化肥对薯块产量和经济效益的影响

为降低甘薯施肥的化肥投入数量，近年来在甘薯主产区不同施肥类别田块上设置了 14 个有机肥替代化肥的田间试验（表 6）。结果表明，与空白区相比，不同施肥处理的薯块产量都有显著增产作用，但增产效果有明显差异。其中，在推荐施肥基础上采用有机肥替代 25% 化肥养分处理的薯块产量最高，均显著高于习惯施肥，高、中、中低以及低产田分别增产 7.7%、9.4%、16.3% 和 24.8%，加权平均

增产 18.2%。除了中低产田施肥类别的有机肥替代 25% 化肥养分处理与推荐施肥产量没有差异外，其他 3 个施肥类别的薯块产量均显著高于化肥推荐施肥；从高产到低产的不同施肥类别分别增产 3.9%、5.8%、9.4% 和 19.6%，加权平均增产 13.0%。但是，有机肥替代 50% 化肥养分的处理，除了低产田施肥类别外，其他 3 个施肥类别的薯块产量均低于化肥推荐施肥。

以上述相同的肥料和薯块价格以及商品有机肥 800 元·t⁻¹ 的市场均价，计算不同施肥模式的肥料成本和施肥效益（表 6）。结果表明，与空白区相比，不同施肥模式的甘薯均获得增产增收。与化肥推荐

表 6 不同有机肥替代化肥比例对甘薯产量和施肥效益的影响
Table 6 Sweet potato yield and economic benefits under varied percentages of organic manure replacement on NPK application

施肥类别 Fertilization categories	项目 Items	施肥处理 Treatments					方差分析 Variance analysis
		CK	FP	RF	OR25%	OR50%	
高产田 High yield field (n=5)	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	35 586 d	40 055 c	41 710 b	43 397 a	41 357 b	F=57.2**
	增产 Yield increase/%	-14.5	-4.0	—	4.0	-0.8	
	净增收 Net income/ (元·hm ⁻²)	-668 1	-236 3	—	751	-408 0	
中产田 Middle yield field (n=5)	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	23 072 c	33 477 b	34 816 b	36 969 a	34 510 b	F=146.4**
	增产 Yield increase/%	-33.7	-3.8	—	6.2	-0.9	
	净增收 Net income/ (元·hm ⁻²)	-15 111	-1 889	—	1 450	-4 009	
中低产田 Middle-low yield field (n=3)	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	19 051 c	28 165 b	30 492 ab	33 656 a	29 212 b	F=28.2**
	增产 Yield increase/%	-37.5	-7.6	—	10.4	-4.2	
	净增收 Net income/ (元·hm ⁻²)	-14 656	-3 371	—	2 966	-5 470	
低产田 Low yield field (n=1)	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	13 150 c	18 167 b	19 433 b	24 167 a	22 083 a	F=6.4*
	增产 Yield increase/%	-32.3	-6.5	—	24.4	13.6	
	净增收 Net income/ (元·hm ⁻²)	-6 920	-1 780	—	5 321	425	

① “*”表示 $P<0.05$, “**”表示 $P<0.01$, 同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。②CK、FP、RF、OR25%、OR50%处理的肥料成本分别为0、2 386、2 505、4 285和6 055元·hm⁻²。
① “*”: $P<0.05$, “**”: $P<0.01$. Different lowcase letters of the same row in the table showed significant difference($P<0.05$). ② Fertilizer costs of CK, FP, RF, OR25 % and OR50% were 0, 2 386, 2 505, 4 285, and 6 055 yuan·hm⁻², respectively.

施肥相比, 有机肥替代 25% 化肥处理的加权平均净增收 1 802 元·hm⁻², 但有机肥替代 50% 化肥处理, 除了低产田施肥类别外, 其他施肥类别由于增产幅度较小, 且大幅度增加肥料成本, 净增收均低于化肥推荐施肥。

2.4 甘薯化肥减施增效技术田间示范效果

田间示范结果显示, 与不施肥相比, 习惯施肥、化肥推荐施肥以及有机肥替代 25% 化肥的施肥模式的薯块产量都获得显著提高。在 N、P₂O₅ 投入量比习惯施肥下降 16.7% 和 47.4% 以及 K₂O 投入量提高 94.0% 的条件下, 79 个化肥推荐施肥田间示范 (表 7) 表明, 高、中、中低和低产田的 4 个施肥类别的薯块产量分别比习惯施肥增产 7.0%、5.5%、10.3% 和 17.3%, 加权平均增产 7.9%。在推荐施肥基础上, 16 个有机肥替代 25% 化肥田间示范 (表 7) 结果显示, 4 个施肥类别的薯块产量比习惯施肥分别增产 7.1%、11.3%、11.8% 和 25.0%, 加权平均增产 11.3%。化肥推荐施肥比习惯施肥加权平均净增收 3 394 元·hm⁻², 有机肥替代 25% 化肥的加权平均净增收则为 4 192 元·hm⁻²。

因此, 甘薯化肥推荐施肥具有较好的增产增收效果, 在推荐施肥基础上有机肥替代 25% 化肥可进一步提高甘薯产量和净增收。

3 讨论

作为世界上重要的粮食、工业原料和饲料作物的甘薯, 中国是最大生产国。联合国粮农组织 (FAO) 统计表明, 2018 年中国甘薯种植总面积为 237.93 万 hm², 占世界种植面积的 29.0%, 总产占到世界的 57.0%^[22]。但长期以来, 我国对甘薯的营养特性和施肥技术研究和推广应用重视不够。长江中下游薯区 472 个甘薯农户的施肥现状调查^[2]显示, 在肥料结构上, 目前仍然以 45% 通用型复合肥投入为主, 施用专用配方肥和有机肥的农户比例只有 4.0% 和 23.9%。安徽省 48 个农户的调查^[23]表明, 80% 以上的农户以硫酸钾型复合肥为主, 没有专用肥和有机肥投入。福建泉州市 200 个种植大户的调查^[24]表明, 甘薯施肥中存在氮磷钾养分过量与不足并存, N:P₂O₅:K₂O 为 1:0.46:0.33, 钾肥失调比例最大。目前的甘薯施肥现状普遍存在配方肥和有机肥施用不足、氮磷钾用量和比例失调、施肥时期和方法不合理等现象。因此, 对现有的众多甘薯施肥试验研究结果进行归纳总结, 制定方便实用的甘薯施肥技术规范, 对指导广大种植户科学施肥具有重要的生产意义。

在对多年多点田间肥效试验进行归纳总结时, 针对服务区域内要划分多少个有意义的施肥类别

表 7 化肥减施增效示范田的甘薯产量和施肥效益
Table 7 Sweet potato yield and economic benefit on demonstration field with fertilizer reduction and efficiency improvement

施肥类别 Fertilization categories	项目 Items	化肥推荐施肥 Recommended fertilization			有机肥替代化肥 organic manure replacement of chemical fertilizer		
		CK	FP	RF	CK	PF	OR25/%
高产田 High yield field	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	37 513±7 186	47 455±1 735	51 026±3 412	32 625±1 199	45 381±1 637	48 871±1 412
	增产 Yield increase/%	—	—	7.0	—	—	7.1
	净增收 Net income/ (元·hm ⁻²)	—	—	5 008	—	—	3 333
中产田 Middle yield field	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	26 704±5 406	34 119±3 209	36 091±5 442	26 862±6 261	34 786±3 496	39 210±1 412
	增产 Yield increase/%	—	—	5.5	—	—	11.3
	净增收 Net income/ (元·hm ⁻²)	—	—	2457	—	—	4737
中低产田 Middle-low yield field	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	17 819±5 432	26 175±3 249	29 190±3 227	22 061±2 610	28 410±3 057	32 217±2 839
	增产 Yield increase/%	—	—	10.3	—	—	11.8
	净增收 Net income/ (元·hm ⁻²)	—	—	4 094	—	—	3 812
低产田 Low yield field	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	13 537±2 256	17 611±1 663	21 291±1 400	13 158	18 141	24 192
	增产 Yield increase/%	—	—	17.3	—	—	25.0
	净增收 Net income/ (元·hm ⁻²)	—	—	5 271	—	—	7 177

化肥推荐施肥的高产田、中产田、中低产田、低产田的示范田数量分别为7、40、24、5个，有机肥替代化肥的示范田数量则分别为4、5、6、1个。
There were 7 demonstration fields for high yield, 40 for medium yield, 24 for middle-low yield, and 5 for low-yield class in RF treatment; and 4 demonstration fields for high yield, 5 for medium yield, 6 for middle-low yield, and one for low-yield class in 25% organic manure replacement treatment.

（土壤肥力等级）是首先要解决的问题。迄今不少学者已经研究提出了许多分类或聚类方法^[25-27]，但类别间的施肥效应是否具有显著差异均未进行统计检验。本研究根据 110 个甘薯氮磷钾田间肥效试验结果，应用系统聚类方法结合方差协方差矩阵差异显著性检验技术^[20-21]，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。结果表明，福建甘薯种植地可以划分为高产田、中产田、中低产田和低产田 4 种施肥类别。这种方法的优点是，不同施肥类别间的氮磷钾施肥效应具有显著水平差异，确保了分类结果的有效性。

在此基础上，本研究根据各施肥类别的甘薯田间肥效试验结果建立了三元非结构肥效模型，得到各施肥类别的推荐施肥量。在以往研究中，通常根据田间试验结果建立三元二次多项式肥效模型和计算推荐施肥量^[28]。但是，已有研究指出多项式模型的推荐施肥量普遍偏高^[17,29]。章明清等^[15]建立了三元二次多项式肥效模型，得到全省甘薯平均最高施肥量分别为 N199 kg·hm⁻²、P₂O₅ 80 kg·hm⁻²和 K₂O 259 kg·hm⁻²。由于最高施肥量不受价格因素的影响，与全省平均最高施肥量相比，三元非结构肥效模型

的氮、磷、钾养分平均推荐用量分别降低了 12.1%、17.5% 和 7.7%。因此，三元非结构肥效模型较好地克服了三元二次多项式肥效模型推荐施肥量偏高的问题，更好地满足了化肥减施增效的时代需求。

我国甘薯主要种植在丘陵坡地，土壤肥力较低。众多研究表明，增施有机肥对提高土壤肥力水平、促进甘薯高产稳产和改善薯块品质等具有重要作用^[7,11-12,30]。但有机肥的增产效应因生产条件和土壤肥力状况等不同而存在差异^[31-32]。坡耕地是福建甘薯主要种植区域，利用强度大，土壤贫瘠和酸化，有机质含量普遍偏低。14 个有机肥替代化肥田间试验表明，在当前土壤肥力水平下，在推荐施肥基础上以有机肥替代 25% 化肥的技术模式具有最佳的增产增收效果。这主要归因于配施有机肥料，提高了土壤有机碳和土壤全氮含量以及提升了土壤养分有效性等^[33-34]。

田间示范表明，76 个化肥推荐施肥示范田的甘薯平均产量比习惯施肥增产 7.9%，净增收 3 394 元·hm⁻²。在推荐施肥基础上配施适当比例的有机肥可进一步提高甘薯产量和净增收，16 个有机肥替代 25% 化肥处理比习惯施肥增产 11.3%，净增收则为 4 192 元·hm⁻²。

因此, 2种化肥减施增效技术模式均有较好的增产增收效果, 甘薯生产者可根据当地土壤肥力性状和肥源状况选用不同技术模式。

4 结论

福建甘薯施肥可划分为高产田、中产田、中低产田和低产田等4个施肥类别; 平均经济施肥量为 $N\ 160\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 62\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $K_2O\ 212\ kg\cdot hm^{-2}$, 但不同施肥类别间有明显差异。化肥推荐施肥或有机肥替代25%化肥可作为甘薯减肥增效技术模式推广应用。

参考文献:

- [1] 林子龙, 杨立明, 郭其茂, 等. 福建省甘薯产业现状与发展对策 [J]. *福建农业科技*, 2014 (8): 85–89.
LIN Z L, YANG L M, GUO Q M, et al. Present situation and development countermeasure of sweet potato industry in Fujian Province [J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2014 (8): 85–89. (in Chinese)
- [2] 张辉, 贺娟, 梁健, 等. 长江中下游薯区甘薯农户施肥现状调查分析 [J]. *江苏师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 39 (2): 31–34.
ZHANG H, HE J, LIANG J, et al. Investigation and analysis of farmers fertilizer application for sweetpotato in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 39 (2): 31–34. (in Chinese)
- [3] 王钊, 刘明慧, 高文川, 等. 陕西关中地区甘薯施肥存在的问题及建议 [J]. *农业科技通讯*, 2013 (8): 209–210.
WANG Z, LIU M H, GAO W C, et al. Problems and suggestions of sweet potato fertilization in Guanzhong area in Shaanxi Province [J]. *Bulletin of agricultural science and technology*, 2013 (8): 209–210. (in Chinese)
- [4] 张辉, 张永春. 肥料对甘薯营养品质影响的研究进展 [J]. *江苏农业科学*, 2017, 45 (17): 1–5.
ZHANG H, ZHANG Y C. Effects of fertilizer on nutrient quality of sweet potato [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45 (17): 1–5. (in Chinese)
- [5] 赵鹏, 刘明, 靳容, 等. 长期施用有机肥对潮土区甘薯碳氮积累与分配的影响 [J]. *中国农业科学*, 2021, 54 (10): 2142–2153.
ZHAO P, LIU M, JIN R, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on carbon and nitrogen accumulation and distribution of sweetpotato in FluvoAqueic soil area [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54 (10): 2142–2153. (in Chinese)
- [6] 郭梦成, 李鹏, 张欣, 等. 不同有机物料施用对油菜-红薯轮作模式下养分吸收利用的影响 [J]. *水土保持学报*, 2018, 32 (1): 320–326.
WU M C, LI P, ZHANG X, et al. Effects of different organic matters application on nutrient absorption and utilization in rape and sweet potato rotation mode [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (1): 320–326. (in Chinese)
- [7] 康国栋, 魏家星, 郭梦成, 等. 有机物料施用对旱地红壤作物产量和有机质活性组分的影响 [J]. *土壤*, 2017, 49 (6): 1084–1091.
KANG G D, WEI J X, WU M C, et al. Effects of organic material application on crop yield and active organic components in upland red soil [J]. *Soils*, 2017, 49 (6): 1084–1091. (in Chinese)
- [8] 魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期施肥下甘薯产量稳定性及品质特性研究 [J]. *西北农业学报*, 2017, 26 (4): 588–595.
WEI M, ZHANG A J, ZHUGE Y P, et al. Study of different fertilization practices on sweetpotato yield stability and quality characteristics [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2017, 26 (4): 588–595. (in Chinese)
- [9] 冉圆圆, 刘洪斌. 重庆市不同地貌甘薯土壤养分丰缺指标及施肥方案 [J]. *中国土壤与肥料*, 2017 (5): 44–50, 72.
RAN Y Y, LIU H B. The soil fertility and fertilization strategies of sweet potato in different landforms areas of Chongqing [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017 (5): 44–50, 72. (in Chinese)
- [10] 宁运旺, 张辉, 许仙菊, 等. 薯麦轮作体系钾肥全部施于薯季提高甘薯和周年产量 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (4): 935–946.
NING Y W, ZHANG H, XU X J, et al. Full application of potassium fertilizer in sweet potato to increase tuber and annual yields in sweet potato/wheat rotation [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24 (4): 935–946. (in Chinese)
- [11] 刘明, 张爱君, 陈晓光, 等. 秸秆还田施肥对土壤肥力及鲜食甘薯产量和品质的影响 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (10): 3445–3452.
LIU M, ZHANG A J, CHEN X G, et al. Effects of straw returning and fertilization on soil fertility and yield and quality of edible sweetpotato [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31 (10): 3445–3452. (in Chinese)
- [12] 段文学, 张海燕, 解备涛, 等. 化肥和生物有机肥配施对鲜食型甘薯块根产量、品质及土壤肥力的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27 (11): 1971–1980.
DUAN W X, ZHANG H Y, XIE B T, et al. Effects of chemical and bio-organic fertilizers on tuber yield, quality, and soil fertility of edible sweetpotato [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27 (11): 1971–1980. (in Chinese)
- [13] 姚宝全, 徐志平, 章明清, 等. 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 [J]. *福建农业学报*, 2009, 24 (2): 137–142.
YAO B Q, XU Z P, ZHANG M Q, et al. Soil testing and fertilization indices for major grain and oil crops in Fujian III. models and recommendations for regional fertilization [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 24 (2): 137–142. (in Chinese)
- [14] 张建丽. 福建主要粮油作物测土配方施肥指标体系研究IV. 土壤速效氮磷钾测定值与最佳施肥量的关系 [J]. *福建农业学报*, 2009, 24 (3): 246–250.
ZHANG J L. Soil testing and fertilization indices for major grain and oil crops in Fujian IV. Correlation between soil test data and fertilization model [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 24 (3): 246–250. (in Chinese)
- [15] 章明清, 李娟, 孔庆波, 等. 福建甘薯氮磷钾施肥指标研究 [J]. *土壤通报*, 2012, 43 (4): 861–866.

- ZHANG M Q, LI J, KONG Q B, et al. Study on fertilization index of nitrogen, phosphorus and potassium for sweet potato in Fujian [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43 (4): 861–866. (in Chinese)
- [16] 曹榕彬. 宁德市耕地土壤养分空间分布特征分析和甘薯施肥建议 [J]. *中国土壤与肥料*, 2018 (2): 153–160.
- CAO R B. Analysis of spatial distribution of soil nutrients and suggestions for fertilization of sweet potato in Ningde [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018 (2): 153–160. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] 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.
- [20] 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 Fertilizer*, 2017, 23 (2): 531–538. (in Chinese)
- [21] 袁志发, 宋世德. 多元统计分析[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2009.
- [22] Food and Agriculture Organization. FAOSTAT agriculture data[OL]. [2022-04-06]. <http://www.fao.org/faostat/en>.
- [23] 王道中, 张永春. 安徽省甘薯生产及施肥现状调查分析 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38 (19): 10024–10025.
- WANG D Z, ZHANG Y C. production and fertilization Investigation and analysis on sweet potato in Anhui Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38 (19): 10024–10025. (in Chinese)
- [24] 李秀勉. 泉州市甘薯施肥现状及建议 [J]. *福建农业*, 2009 (3): 15.
- LI X M. Fertilization status and suggestions for sweet potato in Quanzhou city [J]. *Fujian Agriculture*, 2009 (3): 15. (in Chinese)
- [25] 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]. 北京: 中国农业科技出版社, 1991.
- [26] 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)
- [27] 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.
- MAO D R, ZHANG C D. Cluster Analysis of quadratic response function on the fertilizer dispersed experiments [J]. *Journal of Beijing agricultural university*, 1991, 17 (2): 49–54. (in Chinese)
- [28] 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.
- [29] 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, ZHOU J C, WANG X R, et al. Economic and environmental evaluation on models for describing crop yield response to nitrogen fertilizers at winter-wheat and summer-corn rotation system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37 (3): 346–354. (in Chinese)
- [30] LARBI A, ETELA I, NWOKOCHA H N, et al. Fodder and tuber yields, and fodder quality of sweetpotato cultivars at different maturity stages in the West African humid forest and savanna zones [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2007, 135(1–2): 126–138.
- [31] 王汝娟, 史春余, 董庆裕, 等. 甘薯施用有机—无机缓释肥的生物学效应 [J]. *杂粮作物*, 2005, 25 (4): 248–250.
- WANG R J, SHI C Y, DONG Q Y, et al. Biological effects of organic-inorganic slow release fertilizer on sweetpotato [J]. *Rain Fed Crops*, 2005, 25 (4): 248–250. (in Chinese)
- [32] 魏猛, 张爱君, 李洪民, 等. 不同施肥方式对甘薯光合特性及产量的影响 [J]. *江西农业学报*, 2017, 29 (1): 47–50.
- WEI M, ZHANG A J, LI H M, et al. Effects of different fertilization modes on photosynthetic characteristics and yield of sweet potato [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2017, 29 (1): 47–50. (in Chinese)
- [33] YANG J, GAO W, REN S. Long-term effects of combined application of chemical nitrogen with organic materials on crop yields, soil organic carbon and total nitrogen in fluvo-aquic soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 151: 67–74.
- [34] ZHANG X B, SUN N, WU L H, et al. Effects of enhancing soil organic carbon sequestration in the topsoil by fertilization on crop productivity and stability: Evidence from long-term experiments with wheat-maize cropping systems in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 562: 247–259.

(责任编辑: 林海清)