植物营养与肥料学报 2012,18(6):1457-1465
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同氮磷钾处理对木薯产量、养分积累、利用及经济效益的影响

林洪鑫[1], 袁展汽[1*], 刘仁根[1], 肖运萍[1], 黄雪花[2], 汪瑞清[1]
(1 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所,农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室,国家红壤改良工程技术研究中心,江西南昌 330200; 2 江西省农业科学院农产品质量安全与标准研究所,江西南昌 330200)

摘要: 于 2010 和 2011 年,以木薯品种华南 205(SC205)为试验材料,采用"3414"方案设计,研究了氮磷钾不同施肥处理对木薯产量、养分积累利用和经济效益的影响,并通过多元回归建立红壤旱地木薯的施肥效益方程。结果表明,施肥处理的鲜薯产量显著高于不施肥处理; 缺氮处理的鲜薯产量显著低于缺磷和缺钾处理,对鲜薯产量的影响 $N > K_2O > P_2O_5$; 施肥处理中以 $N_2P_2K_2$ 处理的鲜薯产量、鲜薯淀粉含量、鲜生物量、养分收获指数和经济效益最高,而产投比以 $N_2P_2K_0$ 处理最高,$N_1P_2K_1$ 处理其次,$N_2P_2K_3$ 处理最小。木薯植株养分积累总量 $K_2O > N > P_2O_5$,平均 100 kg 鲜薯养分需求量分别为 1.00、0.91 和 0.11 kg,平均养分收获指数分别为 0.53、0.33 和 0.46。相关分析表明,木薯产量与施氮量呈极显著正相关,与施钾量呈显著正相关,与施磷量相关不显著。在本试验条件下,三元二次方程拟合结果表明,达到经济最佳产量时的氮、磷、钾施用量分别为 205.37、65.43 和 311.30 kg/hm^2,产投比为 6.23。

关键词: "3414"试验; 木薯; 养分积累利用; 产量; 经济效益
中图分类号: S533.062　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2012)06-1457-09

Effects of different N, P and K treatments on yield, nutrient accumulation and utilization and economic benefit of cassava

LIN Hong-xin[1], YUAN Zhan-qi[1*], LIU Ren-gen[1], XIAO Yun-ping[1], HUANG Xue-hua[2], WANG Rui-qing[1]
(*1 Soil and Fertilizer & Resources and Environment Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, China / National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200, China; 2 Institute of Quality & Safety and Standards of Agricultural Products, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China*)

Abstract: In 2010 and 2011, using cassava cultivar, SC205, as material and the "3414" experimental design, an experiment was carried out to study the effects of different application amounts of nitrogen, phosphorus and potassium on cassava yield, nutrient accumulation and utilization and economic benefit. And through multiple regressions, the equation of the fertilizer efficiency for upland red soils in Jiangxi province was established. The results show that the yields of the fertilization treatments are significantly higher than those of the treatments without fertilization, the yield of the nitrogen deficiency treatment is significantly lower than those of the phosphorus and potassium deficiency treatments, and the effects on the yield is $N > K_2O > P_2O_5$. Cassava yield, fresh root starch content, fresh biomass, nutrient harvest index and economic benefit of the $N_2P_2K_2$ treatment are the highest among

收稿日期: 2012-03-14　　**接受日期**: 2012-09-03
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-12-jxyzq)资助。
作者简介: 林洪鑫(1983—),男,江西兴国人,硕士,主要从事作物高产理论与技术研究。E-mail: lhxtfs@yahoo.com.cn
*通讯作者 Tel: 0791-87090032, E-mail: yuanzhanqi@126.com

the fertilization treatments. The output-input ratio of the $N_2P_2K_0$ treatment is the highest, the ratio of the $N_1P_2K_1$ treatment is secondly and the ratio of the $N_2P_2K_3$ treatment is the smallest. The order of plant total nutrient accumulation is $K_2O > N > P_2O_5$. The average nutrients (potassium, nitrogen and phosphorus) requirements for 100 kg fresh root are 1.00, 0.91 and 0.11 kg, and the average harvest indexes are 0.53, 0.33 and 0.46, respectively. The correlation analysis shows that the cassava yield has an extremely significantly positive correlation with nitrogen application amount and a significantly positive correlation with the potassium application amount, while the yield has an insignificantly correlation with phosphorus application amount. Under the condition of this experiment, the fitting results of the developed quadratic equations in three variables show that the application amounts of nitrogen, phosphorus and potassium and the ratio of output to input for the economic optimum yield are 205.37 kg/ha, 65.43 kg/ha, 311.30 kg/ha and 6.23, respectively.

Key words: "3414" experiment; cassava; nutrient accumulation and utilization; yield; economic benefit

中国是世界最大的化肥生产国和消费国。农业生产上化肥的不合理施用,严重地制约着中国农业的可持续发展。如何协调农业生产中增产增收与节能减污,是目前国内外农业科学家共同的研究热点。"3414"试验方案吸收了回归最优设计处理少、效率高的优点,是目前应用较为广泛的肥料效应田间试验方案,并且在水稻[1]、小麦[2]、油菜[3]、花生[4]和大豆[5]等作物[6-7]的测土配方施肥中取得了显著的应用效果。木薯(*Manihot esculenta* Crantz)为大戟科木薯属多年生亚灌木植物,是起源于热带美洲的热带薯类作物,在中国主要分布于海南、广西、广东、云南等省。近几年来,木薯种植区域正不断向福建、江西等省北移[8],主要种植于红壤旱地[9]。氮磷钾的合理运筹是木薯高产栽培的重要策略之一[10],也是保持土壤养分可持续供给的主要方法。前人就木薯合理施肥进行了研究,结果表明,适当比例的氮、磷、钾肥配合施用可以显著增加木薯植株的氮、磷、钾含量和产量[11],而过量施氮会造成植株徒长,降低鲜薯产量[12],对产量的作用效果为 $N > P_2O_5 > K_2O$[13-15],氮、磷、钾施用比例为 1.00∶0.33∶1.12[16];也有研究表明,氮、磷、钾肥增产的主次顺序为 $K_2O > N > P_2O_5$[17]。而江西省作为木薯产业化发展最北的区域,有关红壤旱地木薯种植的合理氮磷钾运筹的研究尚未见报道。为此,本研究采用"3414"最优设计方案,研究了不同氮磷钾处理对江西红壤旱地木薯产量、养分积累利用及经济效益的影响,以期为木薯北移江西种植和高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

按农业部《测土配方施肥技术规范》设计"3414"试验。"3414"即氮、磷、钾 3 个因素,每个因素 4 个水平,共计 14 个处理的肥料试验设计方案。4 个水平的含义:0 水平指不施肥,2 水平指当地推荐施肥量,1 水平(指施肥不足) = 2 水平 × 0.5,3 水平(指过量施肥) = 2 水平 × 1.5。14 个肥料处理分别为: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) $N_2P_1K_1$。氮肥用量(以 N 计)为 0、90、180、270 kg/hm^2,分别记为 N_0、N_1、N_2、N_3;磷肥(以 P_2O_5 计)为 0、45、90、135 kg/hm^2,分别记为 P_0、P_1、P_2、P_3;钾肥(以 K_2O 计)为 0、112.5、225、337.5 kg/hm^2,分别记为 K_0、K_1、K_2、K_3。

以木薯品种华南 205(SC205)为材料,试验于 2010 年和 2011 年在江西省东乡县圩上桥镇(国家木薯产业技术体系南昌综合试验站的试验基地)进行。试验地土壤为旱地红壤,其 0—20 cm 土壤的 pH 为 4.32、有机质含量 20.65 g/kg、全氮 1.07 g/kg、全磷 1.22 g/kg、全钾 9.50 g/kg、碱解氮 83.40 mg/kg、有效磷 95.60 mg/kg、速效钾 199.00 mg/kg。木薯于 3 月 20 日种植,11 月 20 日收获。试验小区面积 30 m^2,随机区组排列,3 次重复。种植规格为 1.00 m × 0.75 m(5 穴 × 8 穴),每蔸留苗 2 株,缺苗的及时补苗。氮肥按基肥∶壮苗肥∶结薯肥 = 5∶2.5∶2.5 施用;钾肥按基肥∶结薯肥∶壮薯肥 = 4∶3∶3 施用;磷肥全部用作基肥。基肥于种植前 1

d 深沟撒施,壮苗肥于种植后 40 d 穴施,结薯肥于种植后 70 d 穴施,壮薯肥于种植后 100 d 穴施。氮、磷、钾肥分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾。其他管理同一般常规栽培。

1.2　测定项目及方法

产量及淀粉含量：于收获期每小区考察 10 株木薯的结薯数,称量鲜薯和地上部植株的鲜重,取有代表性新鲜块根测定鲜薯淀粉含量[18]。实收各小区块根,称鲜重,即为鲜薯产量。

植株氮、磷、钾养分的测定：将称完鲜重后的 3 株分茎叶和块根包装,在 105℃杀青 15 min,然后 80℃烘干至恒重,样品粉碎后用于测定植株氮、磷、钾含量。植株全氮、全磷和全钾的测定采用常规方法[19],即用硫酸-过氧化氢消煮,消煮液碱化后用蒸馏定氮法测定全氮,全磷用磷钼蓝比色法测定,全钾用火焰光度法测定。

土壤养分状况：试验前采取土壤样品,测定碱解氮、有效磷、速效钾含量；碱解氮用碱解扩散法；速效钾用火焰光度计法；有效磷用磷钼蓝比色法。

1.3　数据统计方法

应用 14 个处理进行氮、磷、钾三元二次效应方程拟合：

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

式中：y 为木薯鲜薯产量；x_1、x_2 和 x_3 分别为 N、P_2O_5 和 K_2O 用量。价格分别按木薯鲜薯 0.58 Yuan/kg、N 4.57 Yuan/kg、P_2O_5 4.00 Yuan/kg、K_2O 5.17 Yuan/kg 计。

选用 14 个处理中的 2 ～ 7、11、12,求得在以 K_2 水平为基础的氮、磷二元二次效应方程 $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2$；选用处理 2、3、6、8 ～ 11、13,求得在以 P_2 水平为基础的氮、钾二元二次效应方程 $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_3 + b_3x_1^2 + b_4x_3^2 + b_5x_1x_3$；选用处理 4 ～ 10、14,求得在以 N_2 水平为基础的磷、钾二元二次效应方程 $y = b_0 + b_1x_2 + b_2x_3 + b_3x_2^2 + b_4x_3^2 + b_5x_2x_3$。

选用 14 个处理中的 2、3、6、11 可求得在 P_2K_2 水平为基础的氮肥效应方程 $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2$；选用处理 4 ～ 7 可求得在 N_2K_2 水平为基础的磷肥效应方程 $y = b_0 + b_1x_2 + b_2x_2^2$；选用处理 6、8、9、10 可求得在 N_2P_2 水平为基础的钾肥效应方程 $y = b_0 + b_1x_3 + b_2x_3^2$。

有关指标的计算方法：

收获指数 = 木薯鲜薯产量/植株的鲜生物量

氮、磷、钾收获指数 = 木薯块根氮、磷、钾积累量/植株氮、磷、钾素积累总量

生产 100 kg 鲜薯需氮、磷、钾量 = 植株氮、磷、钾素积累总量/鲜薯产量 ×100

本文参照文献[2]定义木薯缺素区相对产量低于 50% 的养分值为极低,介于 50% ～ 75% 范围内的为低,介于 75% ～ 90% 范围内的为中,介于 90% ～ 95% 范围内的为高,大于 95% 的为极高。

采用 Excel 和 Dps 进行数据处理。

2　结果与分析

2.1　不同氮磷钾处理对木薯鲜薯产量的影响

不同氮磷钾处理对养分收获指数、鲜薯淀粉含量、鲜生物量和鲜薯产量有一定的影响(表 1)。不同氮磷钾处理的鲜薯产量以 $N_2P_2K_2$、$N_2P_2K_3$、$N_2P_1K_2$、$N_2P_2K_1$ 和 $N_3P_2K_2$ 处理较高,显著高于其他 9 个处理,且 $N_2P_2K_2$ 处理显著高于 $N_2P_1K_2$、$N_2P_2K_1$ 和 $N_3P_2K_2$ 处理；不施肥处理的鲜薯产量显著低于施肥处理；缺氮处理的鲜薯产量显著低于缺磷和缺钾处理。在 P_2K_2 水平上,鲜薯产量以 $N_2 > N_3 > N_1 > N_0$,不同水平间差异达显著水平；在 N_2K_2 水平上,鲜薯产量以 P_2 显著高于 P_1,且 P_1 显著高于 P_3 和 P_0；在 N_2P_2 水平上,鲜薯产量以 K_2 显著高于 K_1 和 K_0,而与 K_3 差异不显著。不同氮磷钾处理的收获指数以 $N_3P_2K_2$ 处理最低,显著低于 $N_0P_2K_2$、$N_2P_1K_2$、$N_2P_2K_0$ 和 $N_2P_2K_1$ 处理。鲜薯淀粉含量以 $N_2P_2K_2$ 处理的最高,与 $N_1P_2K_2$、$N_3P_2K_2$ 和 $N_1P_1K_2$ 处理的差异不显著,而显著高于其余 10 个处理。木薯鲜生物量以 $N_2P_2K_2$ 处理最高,除与 $N_3P_2K_2$ 和 $N_2P_2K_3$ 差异不显著外,显著高于其他 11 个处理。相关分析表明,鲜薯产量与鲜生物量呈极显著正相关($r = 0.9488^{**}$),而与收获指数和鲜薯淀粉含量相关而不显著($r = -0.1555$)。鲜薯产量、鲜生物量与施氮量呈极显著正相关($r = 0.7196^{**}$、0.7193^{**}),与施钾量呈显著正相关($r = 0.5950^{*}$、0.6143^{*}),而与施磷量相关不显著($r = 0.4333$、0.4843)。

2.2　氮、磷、钾施肥效应方程拟合

对“3414”方案中不同氮(x_1)磷(x_2)钾(x_3)处

表1 不同氮、磷、钾处理对木薯鲜薯产量的影响

Table 1 Effects of different N, P and K treatments on cassava yields

处理 Treatment	N (kg/hm²)	P_2O_5 (kg/hm²)	K_2O (kg/hm²)	收获指数 Harvest index	鲜薯淀粉含量(%) Fresh root starch content	鲜生物量 Fresh biomass (kg/hm²)	鲜薯产量 Yield (kg/hm²)
$N_0P_0K_0$	0	0	0	0.54 ab	24.25 bcde	36992.5 h	19775.0 g
$N_0P_2K_2$	0	90	225	0.56 a	23.50 bcde	41966.0 g	23191.7 f
$N_1P_2K_2$	90	90	225	0.53 ab	24.70 abcd	49278.9 def	25855.4 cde
$N_2P_0K_2$	180	0	225	0.53 ab	22.05 cde	47344.1 def	25092.4 de
$N_2P_1K_2$	180	45	225	0.56 a	23.70 bcde	51205.3 cde	28675.0 b
$N_2P_2K_2$	180	90	225	0.53 ab	27.80 a	57787.4 a	30266.7 a
$N_2P_3K_2$	180	135	225	0.53 ab	24.45 bcde	50066.6 de	26116.7 cd
$N_2P_2K_0$	180	90	0	0.56 a	22.55 bcde	44466.5 fg	24671.6 e
$N_2P_2K_1$	180	90	112.5	0.56 a	21.15 e	52301.2 bcd	28873.4 b
$N_2P_2K_3$	180	90	337.5	0.53 ab	23.10 bcde	55771.7 abc	29216.7 ab
$N_3P_2K_2$	270	90	225	0.50 b	25.20 abc	57212.6 ab	28296.7 b
$N_1P_1K_2$	90	45	225	0.55 ab	25.70 ab	48896.1 def	26566.7 c
$N_1P_2K_1$	90	90	112.5	0.51 ab	22.45 bcde	50932.6 cde	25375.1 cde
$N_2P_1K_1$	180	45	112.5	0.55 ab	21.65 de	46156.3 efg	25316.6 de

注(Note)：同列数据后不同小写字母表示差异达到5%的显著水平 Values followed by different small letters in the same column mean significant at the 5% level.

理的鲜薯产量分别进行三元二次方程、二元二次方程和一元二次方程的拟合，并求出最高产量，经济最佳产量及其氮、磷、钾施用量。对试验中的氮、磷、钾三因素进行三元二次方程拟合，拟合的方程为 y_1(见表2)，达到最高产量(见表3)的氮、磷、钾施用量分别为335.79、67.36和565.54 kg/hm²，此时的产投比(产投比为木薯产值与肥料总投入的比值)为3.90；达到经济最佳产量的氮、磷、钾施用量分别为205.37、65.43和311.30 kg/hm²，此时的产投比为6.23。拟合氮、磷二因素的二元二次方程

表2 拟合方程

Table 2 The fitting equations

因素 Factor	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2 Determination coefficient
x_1、x_2、x_3	$y_1 = 19594.25 + 10.83x_1 + 92.12x_2 + 25.80x_3 - 0.12x_1^2 - 0.71x_2^2 - 0.04x_3^2 + 0.28x_1x_2 + 0.09x_1x_3 - 0.16x_2x_3$	0.9203**
x_1、x_2	$y_2 = 18217.37 + 63.81x_1 + 123.24x_2 - 0.14x_1^2 - 0.81x_2^2 - 0.04x_1x_2$	0.9059**
x_1、x_3	$y_3 = 15358.84 + 83.09x_1 + 48.91x_3 - 0.17x_1^2 - 0.07x_3^2 - 0.07x_1x_3$	0.9033**
x_2、x_3	$y_4 = 9068.71 + 265.00x_2 + 90.19x_3 - 1.00x_2^2 - 0.09x_3^2 - 0.53x_2x_3$	0.9715**
x_1	$y_5 = -0.14x_1^2 + 60.53x_1 + 22785$	0.8825**
x_2	$y_6 = -0.95x_2^2 + 139.24x_2 + 24905$	0.9580**
x_3	$y_7 = -0.10x_3^2 + 48.37x_3 + 24690$	0.9996**

注(Note)：x_1、x_2、x_3 分别表示氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O) Denote nitrogen, phosphorus and potassium, respectively. **表示在1%水平显著 Denotes significantly different at the 1% level.

表 3　最高产量和经济最佳产量时的施肥量

Table 3　Fertilizer application rate of the maximum yield and economic optimum yield

回归方程 Regression equation	最高产量及施肥量(kg/hm²) The maximum yield and its application rate				经济最佳产量及施肥量(kg/hm²) Economic optimum yield and its application rate			
	产量 Yield	氮 N (x_1)	磷 P_2O_5 (x_2)	钾 K_2O (x_3)	产量 Yield	氮 N (x_1)	磷 P_2O_5 (x_2)	钾 K_2O (x_3)
y_1	31811.0	335.79	67.36	565.54	30157.7	205.37	65.43	311.30
y_2	29385.2	217.78	70.82		29281.4	190.16	67.12	
y_3	29537.5	194.90		251.91	29243.8	183.67		193.88
y_4	31664.2		-1.27	504.80	31018.3		42.73	325.75
y_5	29327.6	216.18			29216.8	188.04		
y_6	30007.1		73.28		29994.5		69.65	
y_7	30539.1			241.85	30344.5			197.73
平均 Average	30324.5	241.16	52.55	391.03	29893.8	191.81	61.23	257.17

为 y_2,达到最高产量的氮、磷施用量分别为217.78、70.82 kg/hm²;达到经济最佳产量的氮、磷施用量分别为190.16、67.12 kg/hm²。拟合氮、钾二因素的方程为 y_3,达到最高产量的氮、钾施用量分别为194.90、251.91 kg/hm²;达到经济最佳产量的氮、钾施用量分别为183.67、193.88 kg/hm²。拟合磷、钾二因素的方程为 y_4,达到最高产量的磷、钾施用量分别为 -1.27、504.80 kg/hm²;达到经济最佳产量的磷、钾施用量分别为42.73、325.75 kg/hm²。分别拟合氮、磷、钾单因素的一元二次方程为 y_5、y_6 和 y_7,达到最高产量的氮、磷、钾施用量分别为216.18、73.28 和241.85 kg/hm²;达到经济最佳产量的氮、磷、钾施用量分别为188.04、69.65 和197.73 kg/hm²。综合三类回归拟合方程的结果表明,达到最高产量的平均氮、磷、钾施用量分别为241.16、52.55 和391.03 kg/hm²,产投比为5.28;达到经济最佳产量的平均氮、磷、钾施用量分别为191.81、61.23 和257.17 kg/hm²,产投比为7.07。

2.3　不同氮磷钾处理对木薯经济效益的影响

不同氮磷钾处理的肥料投入成本、木薯产值和经济效益有差异(表4)。施肥处理中 $N_2P_2K_3$、$N_3P_2K_2$ 和 $N_2P_3K_2$ 的肥料投入成本较高,投入超过2500 元/hm²,比最低肥料投入处理($N_2P_2K_0$)分别提高147.55%、133.15%和113.59%,比 $N_2P_2K_2$ 处理分别提高24.79%、17.53%和7.67%。可以看出,任何一种肥料施用过多,均增加了肥料投入成本。不同氮磷钾处理的木薯产值以 $N_2P_2K_2$、$N_2P_2K_3$、$N_2P_2K_1$、$N_2P_1K_2$ 和 $N_3P_2K_2$ 处理的较高,显著高于其他9个处理,且 $N_2P_2K_2$ 显著高于 $N_2P_1K_2$ 和 $N_3P_2K_2$;施肥处理的木薯产值显著高于不施肥处理,平均提高35.18%,以 $N_2P_2K_2$ 处理的增幅最高为53.06%。施肥处理 $N_2P_2K_2$、$N_2P_2K_1$ 和 $N_2P_1K_2$ 的经济效益较高,显著高于其他10个处理($N_2P_2K_3$ 处理除外),比不施肥处理分别提高32.60%、30.63%和26.12%。试验中各氮磷钾处理的产投比以大小依次为 $N_2P_2K_0$(12.01)、$N_1P_2K_1$(10.88)、$N_2P_2K_1$(9.49)、$N_2P_1K_1$(9.27)、$N_0P_2K_2$(8.83)、$N_1P_1K_2$(8.78)、$N_1P_2K_2$(7.75)、$N_2P_1K_2$(7.68)、$N_2P_2K_2$(7.48)、$N_2P_0K_2$(7.33)、$N_2P_3K_2$(6.00)、$N_3P_2K_2$(5.95)和 $N_2P_2K_3$(5.79)。相关分析表明,肥料总投入与N投入和 K_2O 投入呈极显著正相关($r=0.6990^{**}$、0.8446^{**}),而与 P_2O_5 投入相关不显著($r=0.5014$);木薯产值与N投入和 K_2O 投入呈显著正相关($r=0.7196^{**}$、0.5950^{*}),而与 P_2O_5 投入的相关性不显著($r=0.4334$)。木薯种植的经济效益与N投入呈显著正相关($r=0.5924^{*}$),与 P_2O_5 投入和 K_2O 投入相关不显著($r=0.3011$、0.3054)。回归分析表明,肥料总投入与木薯产值呈极显著的抛物线型相关($y=-0.0003x^2+2.6368x+11423$,$R^2=0.7046^{**}$),当肥料总投入达4394.67 Yuan/hm² 时,木薯产值最大为17216.93元,产投比为3.92。肥料总投入与经济效益呈显著抛物线相关($y=-0.0003x^2+1.6368x+11423$,$R^2=0.3398^{*}$),当肥料总投入达2728.00 Yuan/hm² 时,

表4 不同氮、磷、钾处理对木薯经济效益的影响(Yuan/hm²)

Table 4 Effects of different N, P and K treatments on the economic benefit of cassava

处理 Treatment	N投入 N input	P_2O_5投入 P_2O_5 input	K_2O投入 K_2O input	肥料总投入 Total fertilizer input	木薯产值 Cassava production	经济效益 Economic benefit
$N_0P_0K_0$	0	0	0	0	11469.5 g	11469.5 h
$N_0P_2K_2$	0	360	1163.3	1523.3	13451.2 f	11927.9 gh
$N_1P_2K_2$	411.3	360	1163.3	1934.6	14996.1 cde	13061.6 ef
$N_2P_0K_2$	822.6	0	1163.3	1985.9	14553.6 de	12567.7 fg
$N_2P_1K_2$	822.6	180	1163.3	2165.9	16631.5 b	14465.6 bc
$N_2P_2K_2$	822.6	360	1163.3	2345.9	17554.7 a	15208.8 a
$N_2P_3K_2$	822.6	540	1163.3	2525.9	15147.7 cd	12621.8 f
$N_2P_2K_0$	822.6	360	0	1182.6	14309.5 e	13126.9 ef
$N_2P_2K_1$	822.6	360	581.6	1764.2	16746.5 ab	14982.3 ab
$N_2P_2K_3$	822.6	360	1744.9	2927.5	16945.7 ab	14018.2 cd
$N_3P_2K_2$	1233.9	360	1163.3	2757.2	16412.1 b	13654.9 de
$N_1P_1K_2$	411.3	180	1163.3	1754.6	15408.7 c	13654.2 de
$N_1P_2K_1$	411.3	360	581.6	1352.9	14717.5 cde	13364.6 de
$N_2P_1K_1$	822.6	180	581.6	1584.2	14683.6 de	13099.4 ef

注(Note):同列数据后不同小写字母表示差异达到5%的显著水平 Values followed by different small letters in the same column mean significant at the 5% level.

经济效益最大值为13655.59元,产投比为6.01。

2.4 不同氮磷钾处理对木薯植株养分积累及利用的影响

不同氮磷钾处理对木薯氮、磷、钾积累总量、养分收获指数和100 kg块根需求量有一定影响。总体看来(表5),木薯植株养分的积累总量以$K_2O > N > P_2O_5$,平均积累比例为9.5∶8.6∶1.0;100 kg鲜薯需求量以$K_2O > N > P_2O_5$,平均需求量分别为1.00、0.91和0.11 kg;养分收获指数以$K_2O > P_2O_5 > N$,平均收获指数分别为0.53、0.46和0.33。不同施肥处理的氮素积累总量以$N_2P_2K_2$、$N_2P_1K_2$、$N_2P_2K_3$和$N_3P_2K_2$处理较高,其中$N_3P_2K_2$显著高于其他10个处理;100 kg鲜薯需氮量以$N_3P_2K_2$、$N_0P_2K_2$和$N_2P_1K_1$处理较高,与$N_0P_0K_0$差异不显著,而显著高于其他10个处理;氮素收获指数以$N_2P_2K_2$处理最高,显著高于$N_1P_2K_2$、$N_2P_2K_1$和$N_2P_2K_0$。不同施肥处理的磷素积累总量以$N_2P_1K_2$、$N_2P_2K_2$、$N_2P_3K_2$、$N_2P_2K_3$、$N_3P_2K_2$和$N_1P_1K_2$处理较高,其中$N_2P_1K_2$、$N_2P_2K_2$、$N_2P_2K_3$和$N_3P_2K_2$处理与$N_1P_1K_2$、$N_2P_3K_2$处理间差异不显著,但显著高于其他8个处理;100 kg鲜薯需磷量以$N_3P_2K_2$和$N_2P_2K_2$处理较高,介于0.08～0.14 kg之间;磷素收获指数以$N_2P_2K_2$、$N_3P_2K_2$、$N_0P_2K_2$和$N_2P_3K_2$处理较高,并显著高于$N_1P_2K_2$、$N_2P_2K_1$和$N_2P_2K_0$处理。不同施肥处理的钾素积累总量以$N_2P_2K_2$、$N_3P_2K_2$、$N_2P_2K_3$、$N_2P_1K_2$、$N_0P_2K_2$、$N_2P_1K_1$和$N_1P_1K_2$处理的较高,显著高于不施肥处理;100 kg鲜薯需钾量以$N_3P_2K_2$、$N_2P_1K_1$和$N_0P_2K_2$处理的较高,其中$N_3P_2K_2$和$N_0P_2K_2$处理显著高于其他11个处理,与$N_2P_1K_1$处理差异不显著,而$N_2P_1K_1$处理显著高于$N_2P_2K_0$和$N_2P_2K_1$处理。钾素收获指数以$N_2P_2K_2$处理的最高,显著高于$N_2P_2K_0$、$N_2P_2K_1$、$N_2P_2K_3$、$N_2P_1K_2$、$N_1P_2K_2$和$N_0P_0K_0$。相关分析表明,氮素积累总量与磷、钾素积累总量呈极显著正相关($r = 0.8777^{**}$、0.9516^{**});100 kg鲜薯需氮量与100 kg鲜薯需磷、钾量呈极显著正相关($r = 0.8279^{**}$、0.9567^{**}),氮素收获指数与磷、钾收获指数呈极显著相关($r = 0.9197^{**}$、0.9932^{**})。

2.5 施肥对木薯产量的增产效果

分别计算缺氮、缺磷、缺钾处理的相对产量(即为缺素处理的鲜薯产量与$N_2P_2K_2$处理鲜薯产量的比值),分别为76.62%、82.90%和81.51%,

表 5　不同氮、磷、钾处理对木薯植株养分积累及利用的影响

Table 5　Effects of N, P and K treatments on plant nutrient accumulation and utilization of cassava

处理 Treatment	氮积累总量 Total N accumulation (kg/hm^2)	100 kg 鲜薯需氮量 N requirement for 100 kg fresh root (kg)	氮收获指数 N harvest index	磷积累总量 Total P accumulation (kg/hm^2)	100 kg 鲜薯需磷量 P requirement for 100 kg fresh root (kg)	磷收获指数 P harvest index	钾积累总量 Total K accumulation (kg/hm^2)	100 kg 鲜薯需钾量 K requirement for 100 kg fresh root (kg)	钾收获指数 K harvest index
$N_0P_0K_0$	188.40 d	0.95 ab	0.31 ab	22.35 b	0.11 a	0.46 ab	200.25 c	1.01 b	0.51 b
$N_0P_2K_2$	233.10 c	1.01 a	0.37 a	26.55 b	0.11 a	0.50 a	272.70 ab	1.18 a	0.58 ab
$N_1P_2K_2$	220.50 cd	0.85 bc	0.29 b	23.40 b	0.09 b	0.39 b	233.40 b	0.90 b	0.48 b
$N_2P_0K_2$	218.70 cd	0.87 bc	0.34 a	26.25 b	0.10 ab	0.45 ab	248.10 b	0.99 b	0.55 ab
$N_2P_1K_2$	266.40 ab	0.93 b	0.30 ab	32.55 a	0.11 a	0.44 ab	288.60 ab	1.01 b	0.49 b
$N_2P_2K_2$	264.75 ab	0.87 b	0.41 a	35.25 a	0.12 a	0.57 a	312.15 a	1.03 b	0.62 a
$N_2P_3K_2$	219.60 cd	0.84 bc	0.34 a	28.35 ab	0.11 a	0.51 a	250.65 b	0.96 b	0.54 ab
$N_2P_2K_0$	214.50 cd	0.76 c	0.25 b	23.25 b	0.08 b	0.35 b	214.20 bc	0.76 c	0.43 b
$N_2P_2K_1$	215.25 cd	0.75 c	0.27 b	23.40 b	0.08 b	0.39 b	228.60 bc	0.79 c	0.45 b
$N_2P_2K_3$	265.50 ab	0.91 b	0.32 ab	30.15 a	0.10 ab	0.43 ab	289.65 ab	0.99 b	0.51 b
$N_3P_2K_2$	273.90 a	1.11 a	0.36 a	33.60 a	0.14 a	0.52 a	318.90 a	1.29 a	0.56 ab
$N_1P_1K_2$	240.45 c	0.91 b	0.37 a	28.05 ab	0.11 a	0.49 ab	268.20 ab	1.01 b	0.57 ab
$N_1P_2K_1$	230.40 c	0.91 b	0.35 a	24.60 b	0.10 ab	0.46 ab	250.05 b	0.99 b	0.55 ab
$N_2P_1K_1$	256.05 bc	1.01 a	0.37 a	27.45 b	0.11 a	0.47 ab	276.45 ab	1.09 ab	0.56 ab

注(Note):同列数据后不同小写字母表示差异达到5%的显著水平 Values followed by different small letters in the same column mean significant at the 5% level.

介于75%～90%，养分丰缺等级属于中等级别，施相应肥料有一定的增产效果，对产量的增产效果以 $N > K_2O > P_2O_5$（表6）。

表6 施肥对木薯产量的增产效果

Table 6 Effects of the fertilization on yield increase of cassava

缺素处理 Deficiency treatment		产量 Yield (kg/hm^2)	相对产量 Relative yield (%)	相应的速效养分含量 The content of avail. nutrients (mg/kg)	相对产量范畴及养分丰缺级别 Relative yield category And nutrient level	
$N_0P_2K_2$	缺氮 N deficiency	23191.7	76.62	83.4(N)	75%～90%	中 Middle
$N_2P_0K_2$	缺磷 P deficiency	25092.4	82.90	95.6(P_2O_5)	75%～90%	中 Middle
$N_2P_2K_0$	缺钾 K deficiency	24671.6	81.51	199.0(K_2O)	75%～90%	中 Middle

3 讨论与结论

木薯是重要的块根淀粉作物，根系吸收能力很强，生物产量大，采收后可带走大量营养元素，且养分吸收积累总量各异。谭宏伟等[20]研究认为，木薯植株含钾量很高，其次是氮，而磷含量相对较低。Ojeniyi 等[21]研究认为，收获的木薯块根带走大量钾素和氮素，磷素的带走量较少。张耀华等[22]认为，木薯生长前期需氮、磷量较多，需钾量较少，而生长中后期需钾量较多，需氮、磷量较少。高志红等[15]研究表明，木薯定植2个月后，植株体内的氮、磷、钾养分含量都几乎达到高峰，之后逐渐降低；在木薯全生育期，各养分在不同器官中的大小顺序为氮素和磷素以叶片 > 茎秆 > 块根，而钾素以叶片 > 块根 > 茎秆。本试验研究表明，木薯植株的养分积累总量以 $K_2O > N > P_2O_5$，平均积累总量分别为260.85、236.35 和 27.51 kg/hm^2，木薯采收后带走大量的钾和氮素，部分处理的带走量高于投入量；100 kg 鲜薯需求量以 $K_2O > N > P_2O_5$，平均需求量分别为1.00、0.91 和 0.11 kg，生产 100 kg 木薯鲜薯消耗的钾和氮素较多；养分收获指数以 $K_2O > P_2O_5 > N$，平均收获指数分别为0.53、0.46 和 0.33，一半以上的钾素存在于木薯块根中（均值为53%），而一半以上的氮素存在于地上部分（均值为67%）。因此，在利用木薯茎秆作为繁殖材料之外，还可采用茎秆粉碎还田或腐熟还田等措施，促进氮磷钾养分的循环利用。Nguyen 等[11]发现，在木薯生长过程中，随着氮、磷、钾肥的增加，木薯叶片中的氮、磷、钾浓度提高，之后逐渐稳定下来。随着氮、磷、钾单一养分用量增加，木薯产量随之增加，但氮肥过量和钾肥过量均不利于增产[23]。本试验研究还表明，施肥处理的产量显著高于不施肥处理；缺氮处理的产量显著低于缺磷和缺钾处理，对产量的影响 $N > K_2O > P_2O_5$；施肥处理以 $N_2P_2K_2$ 的鲜薯产量、鲜薯淀粉含量、鲜生物量和养分收获指数均最高。相关分析表明，木薯产量与鲜生物量、施氮量极显著正相关，与施钾量呈显著正相关，与施磷量相关不显著。

在中国，木薯主要作为加工淀粉之用，其肥料成本的投入多少，直接关系到种植木薯的经济效益以及木薯产业的发展前景。本研究表明，任何一种肥料施用过多，均增加了肥料投入成本；经济效益与 N 投入呈显著正相关，与 P_2O_5 投入和 K_2O 投入相关不显著；肥料总投入与经济效益呈显著抛物线相关，肥料总投入达 2728.00 $Yuan/hm^2$ 时，经济效益最大为 13655.59 元，产投比为 6.01。在广东省，高志红等[15]采用“3414”试验研究表明，红壤旱地种植木薯的氮磷钾养分用量以处理组合 358.80、89.10 和 187.50 kg/hm^2 为最佳。在本试验条件下，木薯产量以氮磷钾施用量分别为 180.00 kg/hm^2、90.00 kg/hm^2 和 225.00 kg/hm^2 处理组合最高，并应用14个处理组合进行三元二次方程拟合，结果表明，达到经济最佳产量时的氮、磷、钾施用量分别为205.37、65.43 和 311.43 kg/hm^2，产投比为 6.23。综合三类回归拟合方程的结果表明，达到经济最佳产量的平均氮、磷、钾施用量分别为191.81、61.23 和 257.17 kg/hm^2。鉴于木薯氮钾养分积累总量较大，习惯的养分投入低于养分输出，无法满足木薯种植的可持续生产。因此，在农业生产上木薯种植一般采用木薯间作花生和大豆等养地作物，或者采用木薯与养地作物周年轮作的模式。

参 考 文 献：

[1] 张德军. 利用“3414”试验设计进行水稻测土配方施肥研究[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 52-56.
Zhang D J. Study on testing soil and rational blend fertilization of rice by utilizing “3414” experiment design [J]. China Soils Fert., 2009, (6): 52-56.

[2] 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 phosphorus and potassium fertilization recommendation index based on the “3414” field experiments[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(1): 197-203.

[3] 丛野, 李艳君, 周灿金, 等. 氮磷钾对湿害胁迫下甘蓝型油菜产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1122-1129.
Cong Y, Li Y J, Zhou C J *et al*. Effect of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on yield in rapeseed (*Brassica napus* L.) under the waterlogging stress[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(5): 1122-1129.

[4] 祁大成, 冯旭东, 董红梅, 等. 花生“3414”肥料效应试验及推荐施肥分析[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(14): 2831-2834.
Qi D C, Feng X D, Dong H M *et al*. “3414” fertilizer trial of peanut and analysis on the optimal fertilization amounts[J]. Hubei Agric. Sci., 2011, 50(14): 2831-2834.

[5] 王志刚, 高强, 冯国忠. 吉林省大豆施肥指标体系初步建立[J]. 大豆科学, 2010, 29(4): 669-672.
Wang Z G, Gao Q, Feng G Z. Preliminary raising fertilization index system for soybean in Jilin province[J]. Soybean Sci., 2010, 29(4): 669-672.

[6] 宋朝玉, 高峻岭, 张继余, 等. 夏玉米氮肥减量化配套栽培技术研究[J]. 中国土壤与肥料, 2010, (5): 50-53.
Song C Y, Gao J L, Zhang J Y *et al*. Study on the supporting cultivation techniques for nitrogen reduce in corn [J]. China Soils Fert., 2010, (5): 50-53.

[7] 戴树荣. 应用“3414”试验设计建立二次肥料效应函数寻求马铃薯氮磷钾适宜施肥量的研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(12): 154-159.
Dai S R. NPK reasonable application rate on potato by establishing fertilizer effect model of second degree polynomial using “3414” experimental design [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2010, 26(12): 154-159.

[8] 袁展汽, 林洪鑫, 古碧, 等. 北移江西种植的木薯品种鲜薯产量及淀粉品质差异研究[J]. 热带作物学报, 2011, 32(11): 2007-2011.
Yuan Z Q, Lin H X, Gu B *et al*. Yield and starch quality of cassava cultivars planted in Jiangxi province [J]. Chin. J. Trop. Crops, 2011, 32(11): 2007-2011.

[9] 袁展汽, 刘仁根, 肖运萍, 等. 华南系列木薯品种在江西红壤旱坡边际土地上的适应性研究初报[J]. 江西农业学报, 2009, 21(5): 21-22, 26.
Yuan Z Q, Liu R G, Xiao Y P *et al*. Preliminary study on adaptability of southern serial cassavas varieties in red soil slope land in Jiangxi [J]. Acta Agric. Jiangxi, 2009, 21(5): 21-22, 26.

[10] 漆智平, 唐树梅, 洪彩香, 等. 木薯的营养特性及平衡施肥[J]. 广西农业生物科学, 1999, 18(3): 176-180, 183.
Qi Z P, Tang S M, Hong C X *et al*. The nutriention characteristic and balanced fertilization for cassava [J]. J. Guangxi Agric. Biol. Sci., 1999, 18(3): 176-180, 183.

[11] Nguyen H, Schoenau J J, Nguyen D *et al*. Effects of long-term nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization on cassava yield and plant nutrient composition in north Vietnam [J]. J. Plant Nutr., 2002, 25(3): 425-442.

[12] Byju G, Haripriya Anand M. Differential response of short-and long-duration cassava cultivars to applied mineral nitrogen [J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2009, 172(4): 572-576.

[13] 王英日. 木薯华南5号“3414”肥效试验研究[J]. 广西农业科学, 2009, 40(8): 1036-1039.
Wang Y R. Fertilizer efficiency test of “3414” on cassava variety SC5[J]. J. Guangxi Agric. Sci., 2009, 40(8): 1036-1039.

[14] 章赞德. 木薯的氮磷钾肥效和适宜用量研究[J]. 福建农业科技, 2009, (5): 63-65.
Zhang Z D. Cassava efficiency and suitable application amount of nitrogen phosphorus and potassium fertilizer [J]. Fujian Agric. Sci. Tech., 2009, (5): 63-65.

[15] 高志红, 陈晓远, 林昌华, 等. 不同施肥水平对木薯氮磷钾养分积累、分配及其产量的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1637-1645.
Gao Z H, Chen X Y, Lin C H *et al*. Effect of fertilizer application rates on cassava N, P, K accumulations and allocation and yield in sloping lands of north Guangdong[J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(8): 1637-1645.

[16] 何军月. 木薯“3414”肥效试验研究[J]. 广西农业科学, 2009, 40(12): 1586-1589.
He J Y. Effect of “3414” fertilizer design on cassava [J]. J. Guangxi Agric. Sci., 2009, 40(12): 1586-1589.

[17] 张永发, 杜前进, 张冬明, 唐树梅. 平衡施肥对木薯产量及品质的影响初报[J]. 热带作物学报, 2009, 30(4): 435-439.
Zhang Y F, Du Q J, Zhang D M, Tang S M. Effects of balanced fertilization on yield and quality of cassava[J]. Chin. J. Trop. Crops, 2009, 30(4): 435-439.

[18] GB/T5009.9-2008. 食品中淀粉的测定[S].
GB/T5009.9-2008. Determination of starch in foods[S].

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析(3版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 263-270.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd Ed.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 263-270.

[20] 谭宏伟, 杜承林, 何天春, 黄恒掌. 木薯的营养特性与施肥效应[J]. 土壤, 1994, 26(1): 38-42.
Tan H W, Du C L, He T C, Huang H Z. Nutrient characteristic and fertilizer application effects for cassava [J]. Soils, 1994, 26(1): 38-42.

[21] Ojeniyi S O, Ezekiel P O, Asawalam D O *et al*. Root growth and NPK status of cassava as influenced by oil palm bunch ash [J]. Afr. J. Biotechnol., 2009, 8(18): 4407-4412.

[22] 张耀华, 郑厚贵, 关意昭, 李定荣. 木薯的营养需求特点与平衡施肥研究进展[J]. 广东农业科学, 2009, 36(10): 29-31.
Zhang Y H, Zheng H G, Guan Y Z, Li D R. Summarization of research on nutritional characteristics and fertilizer of cassava [J]. Guangdong Agric. Sci., 2009, 36(10): 29-31.

[23] 高志红, 陈晓远, 林昌华, 等. 不同施肥水平对粤北坡岗地木薯干物质积累和产量的影响[J]. 广东农业科学, 2011, 38(4): 70-71, 93.
Gao Z H, Chen X Y, Lin C H *et al*. Effect of different N, P, K level on cassava dry matter accumulation and yields in sloping soil of northern Guangdong [J]. Guangdong Agric. Sci., 2011, 38(4): 70-71, 93.