植物营养与肥料学报 2014,20(4):947-956
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0417

氮磷钾配比对木薯养分吸收动态及产量影响

黄巧义,唐拴虎*,陈建生,张发宝,解开治,黄 旭,蒋瑞萍,李 苹
(广东省农业科学院农业资源与环境研究所,农业部南方植物营养与肥料重点实验室,
广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室,广东广州 510640)

摘要:【目的】木薯是重要的粮食作物,也是优质的淀粉工业原材料,被认为是非粮生物质能源的最合适原料。氮、磷、钾含量水平显著影响木薯产量,但有关木薯养分阶段性累积特征及其对生物量和产量形成影响的相关研究仍较少。本文比较了不同肥料配比情况下,木薯生物量,氮、磷、钾累积量变化趋势,探讨了不同生育期氮、磷、钾含量及累积量的重要性及施肥对其影响。**【方法】**以我国主栽木薯品种"华南205"为材料,2009年在广东省郁南县丘陵坡地开展田间施肥试验,共设CK、NP、NK、PK、NPK 5个施肥处理。于苗期、块根形成期、块根生长早期、块根快速膨大期和成熟期调查生物量和氮、磷、钾含量,得出氮、磷、钾累积动态。以各时期氮、磷、钾含量及累积量作为原始变量进行主成分分析,判断各时期氮、磷、钾含量及累积量的重要性,并分析不同肥料配比对各时期氮、磷、钾含量及累积量的影响。**【结果】**华南205的生物量累积动态呈"S"型曲线,生物量在苗期较小,进入块根形成期后快速提高,当进入成熟期后增长逐渐减缓。氮肥对生物量影响最大,其次是钾肥,磷肥的影响最小。木薯氮含量的变幅为3.99%～0.93%,磷含量为0.82%～0.26%,钾含量为1.39%～0.89%。氮、磷、钾含量均在苗期最高,且随着生育期的推进不断降低,尤以氮含量降幅最大。不同氮、磷、钾肥料配比显著影响木薯的氮、磷、钾含量。PK处理的氮含量较NPK处理降低了32.96%,NK处理的磷含量较NPK处理降低了16.21%,NP处理的钾含量较NPK处理降低了50.37%。氮、磷、钾累积量与产量显著相关。主成分分析表明木薯整个生育期的营养状况与块根形成期的氮含量、苗期的钾含量及块根生长阶段的磷含量相关性最大。氮、磷、钾的吸收累积量随着木薯生长不断提高,其中块根形成期、块根生长早期、块根快速膨大期的氮累积量较大,块根形成期、块根快速膨大期的磷累积量较大,块根生长早期、块根快速膨大期、成熟期的钾累积量较大。主成分分析表明块根快速膨大期的氮、磷、钾累积量对整个生育期养分累积影响显著,同时,苗期及块根生长早期的氮、钾累积量对养分累积总量影响也较大。**【结论】**木薯氮、磷、钾含量随着植株生长不断下降,而累积量却不断提高。不同氮、磷、钾肥料配比显著影响木薯的氮磷钾含量及累积量、物质累积及产量形成,其中氮肥的影响最大,其次是钾肥,磷肥的影响最小。综合分析表明,苗期、块根形成期、块根生长早期为氮、磷肥的最佳施用时期,块根形成期、块根生长早期及块根快速膨大期为钾肥的补充阶段。

关键词:木薯;"华南205";氮;磷;钾;养分吸收累积;施肥
中图分类号:S147.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-505X(2014)04-0947-10

Effects of different N, P and K treatments on absorption and accumulation of nutrients and yield of cassava

HUANG Qiao-yi, TANG Shuan-hu*, CHEN Jian-sheng, ZHANG Fa-bao, JIE Kai-zhi, HUANG Xu, JIANG Rui-ping, LI Ping
(*Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture/Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China*)

Abstract:【Objectives】Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) is one of the most important calorie-producing crops in tropics and subtropics, and mainly used for processing industrial food, forage. N, P and K significantly affect

收稿日期:2013-08-03 **接受日期:**2013-12-03
基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BADA4B10)资助。
作者简介:黄巧义(1985—),男,广东潮阳人,硕士,助理研究员,主要从事植物营养、新型肥料与高效施肥技术研究。
E-mail:huangqiaoyi@hotmail.com。 * 通信作者 Tel:020-85161400,E-mail:tfstshu@yahoo.com.cn

Cassava yield, but the study on nutrient accumulation in cassava at different stages and on biomass as well as yield formation is still limited. In this paper, the biomass and accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium were investigated under different fertilizers treatments, and we also explored the accumulation characteristic of nitrogen, phosphorus and potassium in cassava at different growth stages. **【Methods】** "SC205" cultivated widely in south China was used as test material in this experiment. Field fertilization trials with CK (no fertilizer), PK, NK, NP and NPK treatments were carried out at a hilly slope land in Yunan city Guangdong province in 2009. The dry matter and the contents of N, P_2O_5 and K_2O in cassava "SC205" were examined respectively at the seedling stage (SS), tuber root formative stage (TRF), tuberous root early growing stage (TRG), tuberous root rapidly bulking stage (TRB) and maturity stage (MS), and analysis on cumulative dynamics and principal component of N, P_2O_5 and K_2O were carried out using N, P_2O_5 and K_2O content and accumulations as original variables at each stage to find out the importance of N, P_2O_5 and K_2O content and accumulations at each growth stage, and to analyze influence of different fertilizer combination on N, P_2O_5 and K_2O content and accumulations at each stage. **【Results】** The results showed that the biomass accumulation curve of "SC205" is exhibited in "S" shape, and the biomass at SS was relatively low, and increased rapidly after TRF, but the increase trend slowly declined at MS. Nitrogen fertilizer had the greatest influence on the biomass, the second factor was potash, the influence from phosphate is the least. Data also showed that N content in "SC205" was ranged from 3.99% to 0.93%, and the content of P_2O_5 was ranged from 0.82% to 0.26%, and the content of K_2O was ranged from 1.39% to 0.89%. The contents of N, P_2O_5 and K_2O at SS reached the highest values, and decreased with the extension of plants growth, especially in N content. Study proved that different fertilizer treatments significantly affect the contents of N, P_2O_5 and K_2O in cassava. Compared with NPK treatment, N content in the PK treatment reduced by 32.96%, and the content of P_2O_5 in the NK treatment reduced by 16.21%, and the content of K_2O in the NP treatment reduced by 50.37%. Analysis of principal components showed that the accumulation amounts of N, P_2O_5 and K_2O were significantly associated with cassava production, and that the nutritional status was significantly related to the N content at TRF, K_2O content at SS and P_2O_5 content at TRB. Detection on nutrients showed that accumulation of N, P_2O_5 and K_2O increased with cassava growth and development. N accumulation is greater at TRF, TRG and TRB, P_2O_5 accumulation is greater at TRF and TRB, while K_2O accumulation is higher at TRG, TRB and MS, and accumulation of N, P_2O_5 and K_2O at TRB significantly influenced the total cumulative nutrients. Meanwhile, N and K_2O accumulation at SS and at TRF impacted the total cumulative nutrients as well. **【Conclusions】** Plant growth changed the contents of N, P_2O_5 and K_2O contents at different stages, but the accumulation of N, P_2O_5 and K_2O increased. Different ratios of N, P, K fertilizers could remarkably affect the cassava biomass, the nutrient contents, the nutrient accumulation, the production and quality of cassava, and the most important factor is nitrogen fertilizer, the second factor is potash, the influence from phosphate is the lowest, showing that SS, TRF and TRG could be the optimum periods for N and P fertilizer application, and TRF, TRG and TRB could be the optimum periods for K fertilizer application.

Key words: cassava; SC205; N; P; K; nutrient absorption and accumulation; fertilization

木薯(*Manihot esculenta* Crantz)是热带、亚热带地区继水稻、甘蔗、玉米之后第四大碳水化合物食品作物,也是该地区关乎食品安全的关键作物[1],且以优质、价廉等优势成为生物燃料的原料新宠[1-3]。木薯栽培是我国南方山区低收入农民重要的经济来源,但平均单产仅为15 t/hm^2,远低于木薯产量上限(80 t/hm^2),增产空间巨大[4-5]。地力贫瘠、肥料投入低是限制我国木薯产量提升的重要因子[6-8],Howeler[9-10]早在80年代开始探讨木薯营养与产量的关系,并指出由于木薯适应性广、抗逆性强、养分最低阈值较小,易使农户产生错觉,忽视施肥和管理,从而引发土壤肥力及木薯产量严重下降等问题[11-13]。Molina[14]等通过研究不同施肥情况下种茎对产量的影响,指出苗期根系和叶片的形成所需养分主要来源于种茎。Howeler[15]通过总结亚洲各国及哥伦比亚不施氮、磷、钾情况下的产量情

况,分析土壤养分与木薯产量的相关关系,表明土壤养分显著影响木薯产量。Cruz 等[16-18]研究了不同供氮水平对木薯生长的影响,发现氮素营养影响木薯植株茎叶生长、光合能力,以及光合产物在植株体内的分配。氮素显著影响木薯生长,当氮素供应不足时木薯植株生长缓慢、黄化、产量低,增施氮肥可实现增产,但一定程度上降低了植株收获指数及木薯品质[10,17-19]。一般认为,木薯耐低磷能力较强[10,20],以致不同研究者得出的磷肥施用效应差异性较大,但当土壤磷含量低于一定阈值时将影响木薯产量[6-7,21]。钾能增强木薯植株光合作用、促进光合产物向地下部分运输[10]、影响木薯产量及品质[10,22],多数研究表明缺钾是长期种植木薯田块的重要限制因子,随着种植年限的增加而不断加重[10,21]。John[23]等通过对肥料利用进行系统管理,实现了木薯产量最大化。长期肥料试验结果表明,适当施用氮、磷、钾肥料,既可克服长期连作的营养障碍,亦可实现木薯的增产与稳产[12,24]。黄巧义等[25]认为,氮、磷、钾养分影响木薯的物质形成累积,且不同品种对养分的效应不同。唐拴虎等[26]通过"3414"施肥试验,认为木薯以氮素投入最重要,并推荐了氮、磷、钾肥用量。蒋瑞萍等[27]认为,在同等养分用量条件下,木薯配方肥二次施用为宜。综上所述,氮、磷、钾养分状况对木薯产量的影响显著,但有关木薯养分阶段性累积特征及其对生物量和产量形成影响的相关研究仍较少,本研究以我国主栽木薯品种"华南 205"为材料,通过比较不同施肥处理的植株生物量、氮、磷、钾养分累积量变化趋势,探讨氮、磷、钾养分对植株生物量的影响,以期为木薯的高效施肥提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验点概况

试验位于广东省云浮市郁南县都城镇(111°30′E, 23°10′N),为亚热带气候区,是木薯种植区域典型的坡岗地,赤红壤,土壤质地为壤土,pH 4.44,有机质含量 14.30 g/kg、碱解氮 68.50 mg/kg、有效磷 16.23 mg/kg、速效钾 51.66 mg/kg。

1.2　供试材料与试验设计

木薯品种为"华南 205"。试验设 CK、NP、NK、PK、NPK 5 个施肥处理,具体肥料用量见表 1。试验小区长 8.8 m、宽 3.6 m,面积为 31.7 m^2,每个处理重复 3 次,随机区组排列。氮肥用尿素(含 N 46%),磷肥用过磷酸钙(含 P_2O_5 12%),钾肥用氯化钾(含 K_2O 60%)。

木薯于 2009 年 3 月 20 日种植,采用起垄种植,垄面宽 1.8 m(包沟),每小区 2 垄。选取具有健康芽眼、长约 15 cm 的木薯种茎置种植穴中,芽眼朝上,盖土。行距 90 cm,株距 80 cm,种植密度为 13 000 plant/hm^2。2009 年 3 月 28 日出苗,11 月 17 日收获。

表 1　木薯田间试验各处理氮、磷、钾施用量(kg /hm^2)
Table 1　N, P and K application rates of different treatments

处理 Treatment	N	P_2O_5	K_2O
CK	0	0	0
PK	0	144	360
NK	360	0	360
NP	360	144	0
NPK	360	144	360

施肥措施为磷肥一次性基施,氮肥和钾肥分苗肥、块根形成肥及块根膨大肥 3 次施用,分配比例为 20%、50% 和 30%,肥料施用于距木薯种茎根系生长端 25 cm 的扇形扩大区域。其他按常规管理。

1.3　采样与分析

土壤基础样品于前茬作物收获后、新茬作物种植前采集。以整个试验田块为采样单元,棋盘采样法分 15 个点次采集 0—20 cm 土层土壤混合为一个样品,风干、过筛后测定养分含量。试验期间,于苗期、块根形成期、块根生长早期、块根快速膨大期和成熟期结束界点(6 月 18 日、7 月 8 日、8 月 20 日、9 月 22 日、11 月 17 日)分别采集各个小区有代表性的植株样品,装进样品网袋,清洗干净后放入烘箱烘干测定干物量,并用植物粉碎机打碎,过筛后测定养分含量。

土壤 pH(2.5∶1)用酸度计电位法;有机质用重铬酸钾容量法;速效氮用碱解扩散法;有效磷用 Olsen 法;速效钾用醋酸铵浸提—火焰光度法测定[28]。

植物样品的全氮用 H_2SO_4-混合加速剂—蒸馏法;全磷用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮—钼锑抗比色法;全钾用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮—火焰光度法测定[28]。

用 Excel 和 SPSS18.0 进行数据处理和统计分析。主成分分析(Principal Components Analysis)通过在 R 中导入 FactoMineR 程序包[29-30],将各处理

中相互关联的多个变量合成少数独立而又能反映总体信息的指标,并应用置换检验(Permutation test)比较不同处理间生物质量综合特征的差异;多元数据分析结果利用二维空间载荷图和得分图直观而形象地进行描述。

2 结果与分析

2.1 生物量变化

从图1可以看出,木薯华南205的生物累积动态呈"S"型曲线,苗期增长缓慢,块根形成后,物质累积量快速提高,且与块根生长节律统一,在块根快速膨大期达到累积高峰,当进入成熟期,块根膨大趋缓,生物量增长也逐渐减缓。各生育期生物量的累积速率平均为4.3、65.43、66.38、128.68、56.91 kg/(hm^2·d),可见,块根快速膨大期的累积速率远远高于其他时期。

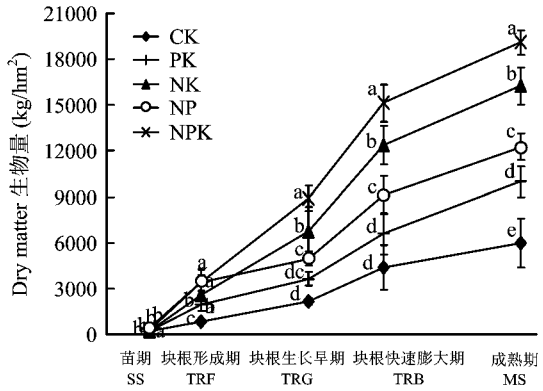

图1 木薯生物量累积动态

Fig.1 Dry matter accumulation amount of cassava

[注(Note): SS—Seedling stage; TRF— Tuber root formative stage; TRG— Tuberous root early growing stage; TRB—Tuberous root rapidly bulking stage; MS— Maturity stage. 图中同个时期不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters mean significant differences at the 5% level between different treatments.]

不同氮、磷、钾肥料配比显著影响生物累积量,其中NPK处理的生物量最大。与NPK处理相比,苗期、块根形成期、块根生长早期、块根快速膨大期和成熟期PK处理累积的生物量分别降低了50.20%、41.57%、68.98%、52.95%、13.80%,表明氮肥对苗期、块根生长早期、块根快速膨大期的生物量形成影响显著;NK处理分别降低了56.85%、18.98%、23.96%、10.19%、1.71%,表明磷肥对苗期的生物量形成影响较大;NP处理分别降低了34.70%、-5.2%、71.2%、33.70%、20.30%,表明钾肥对块根生长早期的生物量形成影响非常大。以NPK处理的总生物量为100%,CK、PK、NK、NP处理分别减少了68.70%、47.67%、14.85%、35.76%。总体上,氮肥对生物量的形成及累积影响最大,并对苗期、块根生长早期、块根快速膨大期的影响更大;其次是钾肥,其对块根生长早期的影响较大;磷肥的影响最小,但对苗期的影响较氮、钾肥大。

2.2 养分含量变化

表2结果表明,木薯苗期到成熟期各处理的营养元素浓度平均值分别为:氮,3.99%、1.83%、1.51%、1.18%、0.93%;磷,0.82%、0.51%、0.34%、0.29%、0.26%;钾,1.39%、1.16%、1.11%、0.89%、1.02%。苗期的养分含量非常高,以后由于生物量增长速率大于养分吸收速率,产生稀释效应,养分浓度不断降低,而氮、磷、钾养分的下降模式不同。氮含量降低幅度最大,苗期~块根形成期出现突降,降幅达54.13%,后期降幅逐渐变缓;磷肥则到块根生长早期降幅仍较大,之后趋于稳定;钾含量在整个生育期较稳定,降幅相对较小。苗期、块根形成期、块根生长早期、块根快速膨大期和成熟期各时期氮、磷、钾平均含量的比值分别为:1:0.20:0.34、1:0.27:0.63、1:0.23:0.73、1:0.24:0.75、1:0.27:1.10。随着生育期的推进,氮钾比逐渐降低,前期氮含量远高于钾养分,而收获时钾含量超过了氮含量;整个生育期氮磷比相对稳定,且磷含量远低于氮、钾含量。

不同氮、磷、钾肥料配比对木薯的氮、磷、钾养分含量影响显著。NPK处理的木薯氮、磷、钾养分含量总体上均较高。与NPK处理相比较,CK处理各生育期的氮、磷、钾含量均显著降低。不施氮处理(PK)各生育期的氮含量较NPK降低了23.07%、41.35%、33.73%、28.89%、37.74%,表明施氮肥可显著提高整个生育期氮含量水平。不施磷处理(NK)各生育期的磷含量较NPK分别降低了35.58%、7.69%、-6.25%、20.00%、11.54%,表明施磷肥对苗期、块根快速膨大期的磷含量影响较大。不施钾处理(NP)各生育期的钾含量较NPK分别降低了30.12%、51.39%、60.67%、59.68%、50.00%,表明施钾肥可显著提高整个生育期的钾含量,块根生长阶段的效果更明显,且其增幅大于氮、磷肥。

表 2　木薯养分含量变化情况(%)

Table 2　Changes of nutrient contents of Cassava

养分 Nutrient	处理 Treatment	苗期 SS	块根形成期 TRF	块根生长早期 TRG	块根快速膨大期 TRB	成熟期 MS
N	CK	3.66 ±0.28 b	1.48 ±0.17 c	1.15 ±0.02 b	1.01 ±0.11 b	0.68 ±0.07 c
	PK	3.30 ±0.17 c	1.39 ±0.18 bc	1.12 ±0.24 b	0.96 ±0.03 b	0.66 ±0.07 c
	NK	4.51 ±0.20 a	2.18 ±0.26 a	1.80 ±0.10 a	1.29 ±0.09 a	1.07 ±0.05 b
	NP	4.16 ±0.13 a	1.75 ±0.07 b	1.77 ±0.11 a	1.30 ±0.05 a	1.20 ±0.02 a
	NPK	4.29 ±0.17 a	2.37 ±0.02 a	1.69 ±0.11 a	1.35 ±0.08 a	1.06 ±0.06 b
P_2O_5	CK	0.73 ±0.14 bc	0.46 ±0.03 b	0.28 ±0.02 c	0.25 ±0.01 cd	0.25 ±0.02 b
	PK	0.72 ±0.12 bc	0.52 ±0.05 ab	0.34 ±0.02 bc	0.29 ±0.02 bc	0.26 ±0.01 b
	NK	0.67 ±0.20 c	0.48 ±0.09 ab	0.34 ±0.01 b	0.24 ±0.02 d	0.23 ±0.01 c
	NP	0.95 ±0.10 ab	0.59 ±0.03 a	0.41 ±0.04 a	0.34 ±0.03 a	0.30 ±0.01 a
	NPK	1.04 ±0.04 a	0.52 ±0.07 ab	0.32 ±0.06 bc	0.30 ±0.02 ab	0.26 ±0.00 b
K_2O	CK	1.02 ±0.12 c	0.69 ±0.16 b	0.49 ±0.12 b	0.43 ±0.09 c	0.81 ±0.08 c
	PK	1.45 ±0.11 ab	1.35 ±0.14 a	1.43 ±0.24 a	1.03 ±0.09 b	1.24 ±0.05 a
	NK	1.68 ±0.01 a	1.61 ±0.22 a	1.56 ±0.16 a	1.23 ±0.04 a	1.13 ±0.14 b
	NP	1.16 ±0.23 bc	0.70 ±0.09 b	0.59 ±0.04 b	0.50 ±0.00 c	0.64 ±0.03 d
	NPK	1.66 ±0.23 a	1.44 ±0.20 a	1.50 ±0.04 a	1.24 ±0.02 a	1.28 ±0.01 a

注(Note):SS—Seedling stage;TRF—Tuber root formative stage;TRG—Tuberous root early growing stage;TRB—Tuberous root rapidly bulking stage;MS—Maturity stage. 同列数据后不同字母表示同个时期处理间差异达5%显著水平 Different letters mean significant differences at the 5% level between different treatments at the same growth stage.

2.3　养分含量的主成分分析

各时期木薯养分含量的综合评价通过主成分分析进行,得到两大主成分(PC1、PC2)(图 2 左图),其中 PC1 贡献率为 43.36%,PC2 为 38.33%,合计达到 81.69%。第一主成分与块根形成期(TRF)的氮含量及苗期(SS)的钾含量显著相关($P<0.05$);第二主成分主要与成熟期(MS)、块根形成期(TRF)、块根生长早期(TRG)的磷含量密切相关。表明苗期、块根形成期的氮、钾养分含量及块根生长阶段的磷养分含量对木薯整个生长季节的营养状况的影响很大。

不同施肥处理的养分状况差别较大(图 2 右图)。与 NPK 处理相比,PK 处理向第一主成分方向上各时期氮、钾含量降低,第二主成分上部分时期磷含量(MS、TRG 除外)降低方向偏移,其中各时期氮含量降低偏移的幅度最大;NK 处理均向第二主成分方向上各时期磷含量降低的方向偏移,氮、钾含量偏移幅度不大;NP 处理向第一主成分方向上各时期钾含量降低,第二主成分方向上大部分时期(SS 除外)磷含量提高的方向偏移,而氮含量偏移较小;CK 处理沿着第一主成分、第二主成分方向上各时期养分含量降低方向偏移。表明,不施氮显著降低了木薯整体养分含量水平,尤以氮含量影响更大;不施磷主要影响木薯磷含量水平;不施钾显著降低了钾含量,但同时提高了磷含量。

2.4　养分累积动态

从图 3 可以看出,氮、磷、钾养分的吸收累积量随着木薯生长不断提高,但趋势各异。氮累积量苗期较少,进入块根形成期后,氮累积量近似直线攀升,成熟期却略显下降。磷累积量在块根形成期、块根膨大期两个阶段快速增长,块根生长早期也有显著提高,苗期、成熟期较少。钾累积量苗期较少,进入块根形成期后近似直线快速增长,一直维持到成熟收获。表明氮累积高峰期为块根形成期、块根生长早期,块根快速膨大期,磷累积高峰期为块根形成期、块根快速膨大期,钾累积高峰期为块根生长早期、块根快速膨大期、成熟期。收获时,钾累积总量最大,其次是氮,磷最少。

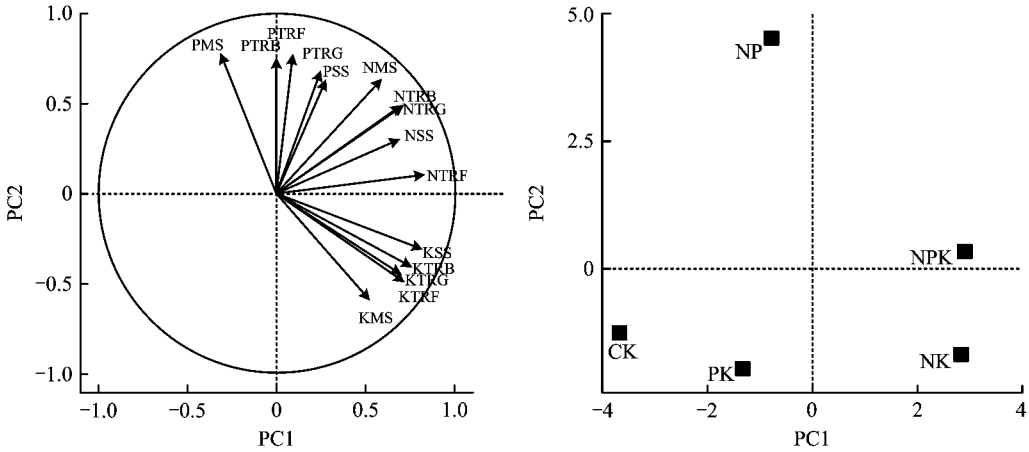

图2 木薯各时期养分含量的主成分分析

Fig. 2 Principal components analysis of the nutrient contents of cassava at different growth stages

[注(Note):(左图)各时期养分含量作为原始变量在主成分的映射图(Left) Projected graph of variables, nutrient contents of Cassava at different growth stages. NSS、NTRF、NTRG、NTRB、NMS 分别代表 SS、TRF、TRG、TRB、MS 时期的氮含量 Denote the N contents at SS, TRF, TRG, TRB and MS stages, respectively; PSS、PTRF、PTRG、PTRB、PMS 分别代表 SS、TRF、TRG、TRB、MS 时期的 P_2O_5 含量 Denote the P_2O_5 contents at SS, TRF, TRG, TRB and MS stages respectively; KSS、KTRF、KTRG、KTRB、KMS 分别代表 SS、TRF、TRG、TRB、MS 时期的 K_2O 含量 Denote the K_2O contents at SS, TRF, TRG, TRB and MS stages respectively. 矢量箭头表示各原始变量,变量在主成分轴上的投影长短代表其对主成分的贡献,两个矢量箭头的余弦角度代表其相关关系,角度越小,相关性越高 Each variable is symbolized by a vector; Projected length of variable on PC axis means its contribution to the PC; Smaller angles between variables mean better correlations. (右图)不同处理的养分含量的得分图,其位置与空间载荷图上的各时期氮、磷、钾养分含量矢量位置相对应(Right) Score plot of the nutrient contents of different treatments; Panes are bary centers of the projections of points for a given treatment.]

不同施肥处理可影响木薯的养分吸收累积。与NPK处理相比,不施氮处理(PK)在苗期、块根形成期、块根生长早期及块根快速膨大期的氮、磷、钾养分累积量显著降低;不施磷处理(NK)在苗期、块根形成期及块根快速膨大期的氮、磷累积量显著降低,同时,苗期及成熟期的钾累积量也显著降低;不施钾处理(NP)整个生育期的钾累积量显著降低,且对块根生长早期、块根快速膨大期的影响最大,同时块根生长期、块根快速膨大期的氮累积量,和块根生长早期及成熟期的磷累积量也显著降低。

2.5 养分累积量的主成分分析

木薯各时期养分累积量的总体状况通过主成分分析得到两大主成分(PC1、PC2)(图4左图),其中PC1贡献率为63.80%,PC 2贡献率为16.92%,合计贡献率达80.72%。第一主成分与块根快速膨大期(TRB)的氮累积量极显著相关($P<0.01$),同时与苗期(SS)、块根快速膨大期(TRB)、块根生长早期(TRG)的钾累积量,苗期(SS)、块根生长早期(TRG)、块根形成期(TRF)的氮累积量,以及块根快速膨大期(TRB)的磷累积量显著相关($P<0.05$)。表明,块根快速膨大期的氮、磷、钾累积量对整个生育期养分累积影响显著,同时,苗期及块根生长早期的氮、钾累积量对养分累积总量影响也较大。第二主成分与成熟期的氮累积量极显著相关($P<0.01$),表明该时期的氮累积量对养分累积总量影响也较大。

不同施肥处理养分累积状况具有显著差异($P<0.05$)(图4右图)。与NPK相比,PK、NK、NP处理均向第一主成分减少,第二主成分增加的方向偏移,PK处理第一主成分减少方向偏移幅度最大,而NP处理在第二主成分增加方向的偏移幅度更大;CK处理则向第一主成分、第二主成分减少的方向偏移。表明不施氮、不施磷、不施钾均显著影响养分整体累积量,不施氮影响最大,其次是不施钾,不施磷的影响最小。

2.6 产量及品质

表3显示,各处理间的产量大小顺序为NPK > NK > NP > PK > CK,且相互间差异均达到显著水平。PK和CK两个处理的木薯淀粉含量高于NK、NP、NPK处理。表明,施氮、磷、钾肥可显著提高木薯产量,氮肥增产效果最显著,但降低了淀粉含量,钾肥增产效果次之,且有利于块根淀粉的累积。

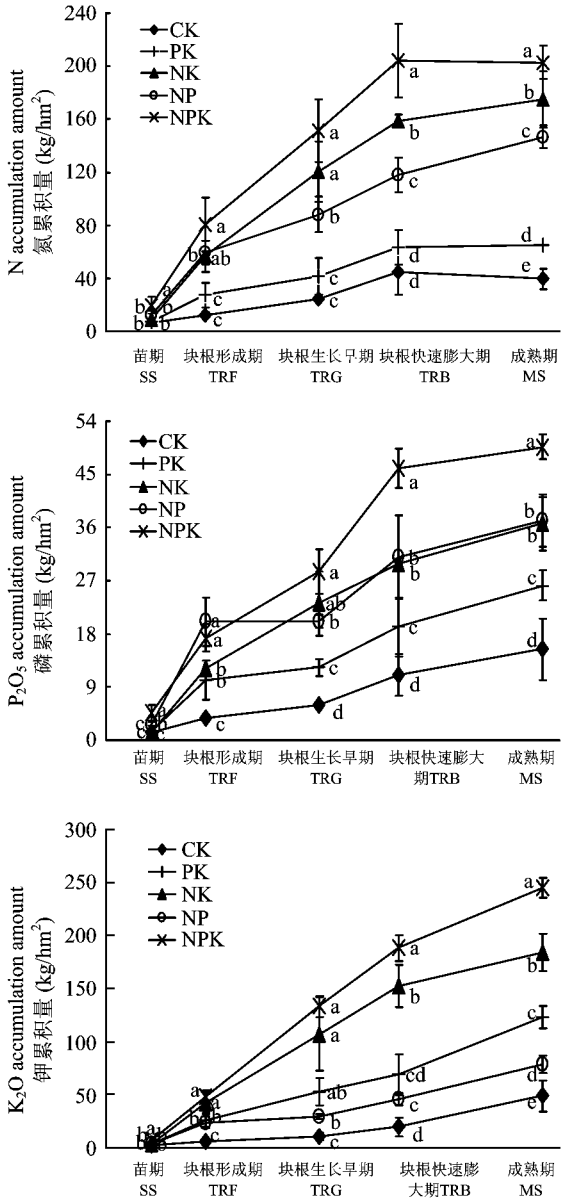

图 3　木薯各时期养分吸收累积动态图

Fig. 3　Dynamics of the nutrient accumulation amounts of cassava at different growth stages

[注(Note)：SS—Seedling stage；TRF—Tuber root formative stage；TRG—Tuberous root early growing stage；TRB—Tuberous root rapidly bulking stage；MS—Maturity stage. 图中同个时期不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letter at the same growth stages mean significant differences at the 5% level among treatments.]

3　讨论

3.1　木薯营养状况变化

“华南205”木薯品种早在上世纪六十年代已成为我国高产优质推荐品种[31]，因其稳产性能优良，至今仍在广东、广西、海南、云南等区有较大的种植面积[32]。本研究表明“华南205”的养分含量变化范围：氮为0.93%～3.99%；磷为0.26%～0.82%；钾为0.89%～1.39%。张永发等[33]在海南砖红壤上的试验表明，“SC8”木薯品种整个生育期的氮含量为0.89%～1.87%，磷含量为0.14%～0.27%，钾含量为1.06%～1.72%。但张永发等[33]调查养分含量时把种茎计算在内，拉低了苗期养分含量，同时其试验地土壤速效磷、钾含量较丰富，可能是其钾含量高于本试验的原因。本研究的结果显示，木薯前期氮含量远高于钾，而收获时钾含量超过了氮，该结论与张永发等[34]的报道较为一致。表明木薯前期需氮较多，而后期钾的吸收累积较多。本研究中氮、磷、钾养分含量在整个生育期的变化趋势与张永发等[33]、高志红等[8]的结果一致，均随着生育期的推进不断降低，且在苗期出现氮、磷含量突降现象，收获期的养分含量均降至最低值。

探讨木薯营养的变化规律，是为了更好地指导施肥，改善植株营养状况，以实现高产目标。曾有学者[12]报道，木薯块根产量与植株营养含量正相关，且钾含量的相关系数比氮含量大。Howeler[10]探索以4月龄木薯第一张完全展开叶的养分含量作为营养判断标准，认为氮、磷、钾含量的临界值分别为4.6%～5.7%、0.33%～0.41%和1.1%～1.9%。黄洁等[34]认为，当4月龄木薯第一张完全展开叶的氮、磷、钾养分含量超过界限时，将有减产风险。本研究表明，木薯营养水平主要与块根形成期的氮含量、块根形成期及块根快速膨大期的磷含量、苗期的钾含量密切相关。分析苗期、块根形成期、块根生长早期、块根快速膨大期及成熟期的养分含量与木薯产量的相关系数(表2、表3)，氮依次为0.730、0.902*、0.786、0.842、0.728；磷为0.561、0.322、0.327、0.262、-0.12，钾为0.825、0.664、0.680、0.752、0.500。表明块根形成期的氮含量与产量显著相关，苗期磷含量与产量相关性较大，苗期及块根快速膨大期的钾含量与产量的相关性均较大。结合以上分析，块根形成期的氮含量与产量及养分的总体状况均有紧密的相关性，可作为评价木薯养分状况的重要指标；苗期磷含量与产量相关性较大，而块根生长期的磷含量水平对植株养分状况的影响也较大，因此，对磷素的分析需结合苗期及块根形成期；苗期及块根形成期的钾含量对木薯产量的影响较大，且苗期的钾含量也可作为植株养分状况的重要指标，所以钾含量应在苗期及块根形成期进行监测。

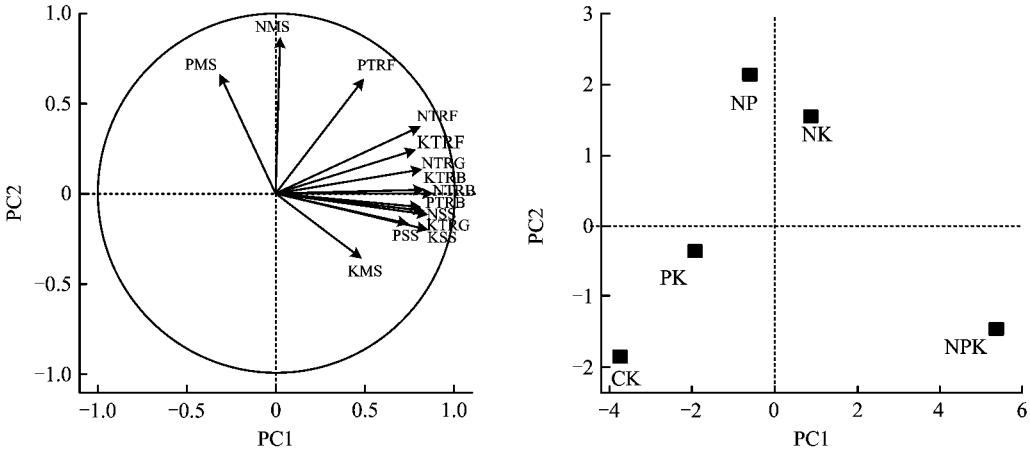

图4 木薯各时期养分累积量的主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of nutrients accumulation in cassava at different growth stages

[注(Note):(左图)各时期养分累积量作为原始变量在主成分的映射图(Left) Projected graph of variables, nutrients accumulation in Cassava at different growth stages. NSS、NTRF、NTRG、NTRB、NMS 分别代表 SS、TRF、TRG、TRB、MS 时期的氮累积量 Denote the N accumulation at SS, TRF, TRG, TRB and MS stages, respectively; PSS、PTRF、PTRG、PTRB、PMS 分别代表 SS、TRF、TRG、TRB、MS 时期的 P_2O_5 累积量 Denote the P_2O_5 accumulation at SS, TRF, TRG, TRB and MS stages, respectively; KSS、KTRF、KTRG、KTRB、KMS 分别代表 SS、TRF、TRG、TRB、MS 时期的 K_2O 累积量 Denote the K_2O accumulation at SS, TRF, TRG, TRB and MS stages, respectively. 矢量箭头表示各原始变量,变量在主成分轴上的投影长短代表其对主成分的贡献,两个矢量箭头的余弦角度代表其相关关系,角度越小,相关性越高 Each variable was symbolized by a vector, Projected length of variable on PC axis means its contribution to the PC, Smaller angles between variables meant better correlation. (右图)不同处理的养分累积量的得分图,其位置与空间载荷图上的各时期氮、磷、钾养分积累量矢量位置相对应(Right) Score plot of nutrients accumulation of different treatments, Panes are bary centers of the projections of points from a given treatments.]

表3 不同施肥处理对木薯产量及品质的影响

Table 3 Impact of different fertilization on the yield and quality of cassava

处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm^2)	淀粉含量 Starch concent. (%)
CK	12104 ± 3836 e	24.9 ± 2.9 ab
PK	21313 ± 2714 d	25.7 ± 0.1 a
NK	31187 ± 1999 b	21.2 ± 0.1 b
NP	26126 ± 784 c	21.9 ± 2.7 b
NPK	37882 ± 1714 a	23.1 ± 1.7 ab

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters mean significant differences at the 5% level between different treatments.

3.2 木薯养分吸收累积特性

据估算,当木薯产量水平约为 15 t /hm^2 时,将从土壤中携出约氮(N)80 kg/hm^2、磷(P)9 kg/hm^2、钾(K)50 kg/hm^2[10]。在本研究中,木薯平均产量为 25 t/hm^2 时,所消耗的养分为:N 126 kg/hm^2、P 14 kg/hm^2、K 113 kg/hm^2,其中钾的生理利用率较高。氮、磷、钾总累积量与产量的相关系数分别为 0.962**、0.979**、0.903*(图3,表3),因此,保证足够的养分吸收累积量是木薯增产的重要前提。

本研究结果表明,氮、磷、钾累积量均在块根形成后开始大幅度提高(图3),该结果与前人研究结果相一致[8-9,35],表明该时期为养分供应临界时期。Howeler[9]曾总结氮累积为"S"型模式,即前期缓慢—中期快速—后期减缓,磷和钾在出苗后前两个月吸收缓慢,之后保持较稳定的累积速率,而本研究则得出磷的累积速率在块根生长阶段波动性较大。张耀华等[36]认为早期氮、磷需求量较大,生长后期钾需求占主要部分。本研究发现,氮累积高峰期为块根形成期、块根生长早期、块根快速膨大期,磷为块根形成期、块根快速膨大期,钾为块根生长早期、块根快速膨大期、成熟期。块根快速膨大期的氮、磷、钾累积量对整个生育期养分累积影响显著,同时苗期及块根生长早期的氮、钾累积量对养分累积总量影响也较大。

3.3 施肥效应

研究表明,施肥可改善木薯的营养状况、促进木薯生长、增加块根产量[8,35]。其中,增施氮肥可

促进木薯茎叶生长、增强光合能力[16-19]。高志红等[8]认为,氮素是影响产量的第一限制因素。木薯根系吸磷能力强,具耐低磷特性[1],很多研究均表明磷肥效应较小[6-8,21]。木薯为喜钾作物,块根形成及膨大过程中需要大量的钾素营养[10,37],同时,块根大量累积淀粉也需钾素调节[22]。本研究表明,氮肥可提高苗期、块根形成期、块根生长早期、块根快速膨大期的养分含量,对产量的影响也是最大的。磷肥可提高苗期、块根形成期及块根快速膨大期的营养水平,且具有增产效应。钾肥显著提高木薯整个生育期的钾素吸收累积量,对产量及品质改善均有一定效果。

氮肥显著促进前期茎叶生长,为后期块根累积提供物质基础,但后期高氮含量对块根积累淀粉不利,因此应加强木薯生长前期的氮素调控,当块根快速生长时不宜大量施用氮肥。磷肥有利于木薯苗期、块根生长阶段的生长,此时期应注重适当补充磷肥,由于磷在土壤中的移动性较小,可作基肥施用。钾肥的增产效果仅次于氮肥,对后期植株生长影响较大,且有利于提高淀粉含量,因此应在保证前期植株正常生长的情况下,注重后期钾肥的供应。

4　结论

1)木薯氮、磷、钾养分含量随着生物量的累积呈不断下降趋势,而养分总累积量却不断提高,三种养分离子在植物体内的累积模式各不同,但均在块根快速膨大期达到累积高峰。木薯氮、磷的累积量主要源于中后期块根生长阶段的吸收,块根生长阶段对钾整体的累积量贡献最大,其次苗期的吸收量对养分吸收累积影响也较大。

2)块根形成期氮含量、苗期及块根形成期的磷含量、苗期及块根快速膨大期的钾含量可以综合评价木薯的营养水平。

3)不同氮、磷、钾肥料配比显著影响木薯的营养状况、物质累积及产量形成,其中氮的影响最大,其次是钾,磷的影响最小。

4)苗期、块根形成期、块根生长早期为氮、磷肥的最佳施用时期,块根形成期、块根生长早期及块根快速膨大期为钾肥的补充阶段。

参 考 文 献:

[1] El-Sharkawy M A. Cassava biology and physiology[J]. Plant Molecular Biology, 2004, 56(4): 481-501.

[2] Zhang C, Han W J, Pu G Q, Wang C T. Life cycle economic analysis of fuel ethanol derived from cassava in southwest China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2003, 7: 353-366.

[3] Wang F, Xiong X R, Liu C Z. Biofuels in China: opportunities and challenges[J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology, 2009, 45: 342-349.

[4] CIAT. Cassava program (Annual report)[C]. Cali, Colombia: CIAT, 1989.

[5] Tian Y N, Lin X, Jin S. Present situation and future potential of cassava in China [A]. Howeler R H, Tan S L. Cassava's potential in Asia in the 21st century: Present situation and future research and development needs [C]. Ho Chi Minh City: Proceeding 6th regional workshop, 2000. 71-83.

[6] 黄洁, 叶剑秋, 许瑞丽, 等. 长期施肥对木薯农艺性状、鲜薯产量和淀粉质量分数的影响[J]. 热带作物学报, 2004, 25(4): 42-49.
Huang J, Ye J Q, Xu R L *et al*. Fresh cassava yield, starch concentration and agronomics characters in the long-term fertilizer application trail[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2004, 25(4): 42-49.

[7] 黄巧义, 黄旭, 唐拴虎, 等. 木薯营养与施肥研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2010, 12(2): 62-68.
Huang Q Y, Huang X, Tang S H *et al*. Research progress on cassava nutrition and fertilizer application[J]. Journal of Agricultural Science and Techology, 2010, 12(2): 62-68.

[8] 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]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(8): 1637-1645.

[9] Howeler R H. Mineral nutrition and fertilization of cassava[M], Cali, Colombia: CIAT, 1981.

[10] Howeler R H. Cassava mineral nutrition and fertilization [A]. Hillocks R J, Thresh J M, Belloti A C. Cassava: biology, production and utilization [C]. Wallingford, UK: CAB International, 2002. 115-147.

[11] Tongglum, Suriyapan A P, Howeler R H. Cassava agronomy research and adoption of improved practices in Thailand-Major achievement during the past 35 years[A]. Howeler R H, Tan S L. Cassava's potential in Asia in the 21st century: Present situation and future research and development needs[C]. Ho Chi Minh City, Vietnam: Proceeding 6th Regional Workshop, 2000. 228-258.

[12] Nakviroj C, Paisancharoen K, Boonseng O *et al*. Cassava long-term fertility experiments in Thailand [A]. Howeler R H. Cassava research and development in Asia: Exploring new opportunities for an ancient crop [C]. Bangkok, Thailand: Proceeding 7th Regional Workshop, 2002. 212-223.

[13] Byju G, Anand M H. Differential response of short-and long-duration cassava cultivars to applied mineral nitrogen [J].

Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009, 172: 572-576.

[14] Molina J L, El-Sharkawy M A. Increasing crop productivity in cassava by fertilizing production of planting material[J]. Field Crops Research, 1995, 44: 151-157.

[15] Howeler R H. Cassava agronomy research in Asia—An overview, 1993-1996[A]. Howeler R H. Cassava breeding, agronomy and farmer participatory research in Asia[C]. Danzhou Hainan, China: Proceedings 5th Regional Workshop, 1996. 355-375.

[16] Cruz J L, Mosquim P R, Pelacani1 C R *et al*. Carbon partitioning and assimilation as affected by nitrogen deficiency in cassava[J]. Photosynthetic, 2003, 41(2): 201-207.

[17] Cruz J L, Mosquim P R, Pelacani C R. Photosynthesis impairment in cassava leaves in response to nitrogen deficiency [J]. Plant and Soil, 2003, 257: 417-423.

[18] Susan John K, Venugopal V K, Manikantan N M. Crop growth, yield and quality parameters associated with maximize yield research(MYR) in cassava[J]. Journal of Root Crop, 2005, 31 (1): 14-21.

[19] Cruz J L, Mosquim P R, Pelacani C R *et al*. Effects of nitrate nutrition on nitrogen metabolism in cassava [J]. Biologia Plantarum, 2004, 48 (1): 67-72.

[20] John S K, Venugopal V K, Saraswathi P. Critical level of phosphorus and potassium in the cassava growing soils (Typical Kandiustults) of Kerala[J]. Journal of Root Crop, 2004, 30 (1): 37-40.

[21] 张伟特，林雄，李开绵，等. 木薯长期定位肥料试验总结(1992～1995年)[J]. 热带作物研究，1997，(2)：27-32.
Zhang W T, Lin X, Li K M *et al*. Summary on the Cassava long-term fertilization experiment (1992-1995) [J]. Tropical Agriculture Science, 1997, (2): 27-32.

[22] Park C H, Kim K H, Hajrial *et al*. Effect of potassium application on yield-related characters and concentrations of starch and hydrocyanic acid of cassava[J]. Korean Journal of Crop Science, 2005, 50(5): 309-318.

[23] John K S, Venugopal V K, Sarawathi P. Yield maximization in cassava through a systematic approach in fertilizer use [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38: 779-794.

[24] Li J, Huang J, Tian Y N, Zhang W T. Cassava agronomy research and adoption of improved practices in China—Major achievement during the past 20 years[A]. Howeler R H, Tan S L. Cassava's potential in Asia in the 21st century: present situation and future research and development needs[C]. Ho Chi Minh City, Vietnam: Proceeding 6th Regional Workshop, 2000. 300-313.

[25] 黄巧义，唐拴虎，陈建生，等. 木薯物质累积特征及其施肥效应[J]. 作物学报，2013，39 (1)：126-132.
Huang Q Y, Tang S H, Cheng J S *et al*. Characteristics of dry matter accumulation and effect of fertilizer application in Cassava [J]. Acta Agronomic Sinica, 2013, 39(1): 126-132.

[26] 唐拴虎，陈建生，黄巧义，等. 坡岗地木薯氮磷钾养分用量优化研究[J]. 广东农业科学，2010，(3)：13-16.
Tang S H, Cheng J S, Huang Q Y *et al*. Optimize NPK nutrients application of Cassava planted on slope land[J], Guangdong Agricultural Sciences, 2010, (3): 13-16.

[27] 蒋瑞萍，黄巧义，唐拴虎，等. 坡岗地木薯养分运筹技术研究[J]. 广东农业科学，2010，(3)：19-21.
Jiang R P, Huang Q Y, Tang S H *et al*. Studies on techniques of fertilization mode for upland cassava[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, (3): 19-21.

[28] 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.
Lu R K. Soil analysis of agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[29] The R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing[M]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2007.

[30] Sébastien L, Julie J, François H. FactoMineR: An R package for multivariate analysis [J]. Journal of Statistical Software, 2010, 25(1): 19-21.

[31] 叶剑秋. 我国木薯选育种进展[J]. 热带农业科学，2009，(11)：115-119.
Ye J Q. Chinese cassava breeding progress [J]. Tropical Agricultural Science, 2009, (11): 115-119.

[32] 盘欢. 亚洲11国木薯生产概况[J]. 广西热带农业，2009，(5)：29-31.
Pan H. Cassava production profile in Asian 11 countries[J]. Guangxi Tropical Agriculture, 2009, (5): 29-31.

[33] 张永发，张冬明，唐树梅. '华南8号'木薯生育期营养元素含量变化研究[J]. 亚热带植物科学，2009，38(3)：7-11.
Zhang Y F, Zhang D M, Tang S M. Dynamic of mineral nutrients concentration during the growth cycle of Cassava 'SC8' [J]. Subtropical Plant Science, 2009, 38(3): 7-11.

[34] 黄洁，张伟特，李开绵，等. 木薯营养诊断及施肥研究初报[J]. 热带农业科学，1999，(5)：40-46.
Huang J, Zhang W T, Li K M *et al*. Preliminary report of cassava nutritional diagnosis and fertilization [J]. Tropical Agricultural Science, 1999, (5): 40-46.

[35] Fermont A M, Tittonell P A, Baguma Y *et al*. Towards understanding factors that govern fertilizer response in cassava: lessons from East Africa[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 86: 133-151.

[36] 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 Agricultural Sciences, 2009, 36(10): 29-31.

[37] Carsky R J, Toukourou M A, Identification of nutrients limiting cassava yield maintenance on a sedimentary soil in southern Benin, West Africa [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2005, 71: 151-162.