

网络出版时间:2017-07-21 14:49

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2017.09.007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170721.1449.014.html>

施钾对木薯产量和品质及大中微量元素吸收的影响

魏云霞¹, 苏必孟^{1,2}, 黄洁¹, 徐海强^{1,2}, 宋恩亮¹, 闫庆祥¹

(1 中国热带农业科学院 热带作物品种资源研究所/农业部木薯种质资源保护与利用重点实验室,
海南 儋州 571737; 2 海南大学 农学院, 海南 海口 570228)

【摘要】【目的】研究不同施钾量对木薯产量、大中微量元素吸收及品质的影响, 为木薯合理施钾提供理论依据。**【方法】**采用田间试验, 以我国主栽木薯品种“SC205”为材料, K_2O 施用量设 0, 60, 120, 180, 240 kg/hm^2 共 5 个水平, 于收获期测定木薯薯块、茎秆、叶片的生物量及 N、P、K、Ca、Mg、Mn、Cu、Zn 含量, 并测定薯块可溶性糖和淀粉含量。**【结果】**1) 与不施钾相比, 施钾可显著提高薯块、茎秆和叶片鲜产量, 其中鲜薯增产 9.87%~25.57%; 随施钾量增加, 鲜薯产量先增加后降低, K_2O 施用量为 60~120 kg/hm^2 时, 鲜薯产量较高。2) 施钾可以明显提高薯块、茎秆和叶片的 K 含量, 提高薯块的 Mn、Zn、可溶性糖及淀粉含量, 但 Mg 含量有所降低, 同时还可以提高薯块、茎秆和叶片的 K/N、K/P、K/Ca、K/Mg、K/Mn、K/Cu、K/Zn 值。3) 施钾能显著提高薯块 K、Mn、Zn、可溶性糖、淀粉的积累量, 其中可溶性糖和淀粉积累量的增幅分别为 7.65%~32.91% 和 12.65%~53.41%, K_2O 施用量为 60~120 kg/hm^2 时, 薯块各矿质元素、可溶性糖及淀粉积累量均处于较高水平; 施钾可显著降低钾素在薯块中的分配比例。4) 薯块的 P、K、Mn 及可溶性糖含量与施钾量呈极显著或显著正相关。**【结论】**为获得较高的木薯产量、大中微量元素积累量、品质及经济效益, 建议最佳的 K_2O 施用量为 95~130 kg/hm^2 。

【关键词】 木薯; 钾肥; 营养元素; 木薯产量; 可溶性糖; 淀粉

【中图分类号】 S143.3; S533

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2017)09-0046-09

Effects of potassium application on yield, quality and absorption of macro-, meso-, and micro-nutrients of cassava

WEI Yunxia¹, SU Bimeng^{1,2}, HUANG Jie¹, XU Haiqiang^{1,2},
SONG Enliang¹, YAN Qingxiang¹

(1 Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Conservation and Utilization of Cassava Genetic Resources, Ministry of Agriculture, Danzhou, Hainan 571737, China;

2 College of Agronomy, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: 【Objective】Effects of potassium application on yield, absorption of macro-, meso- and micro-nutrients as well as quality of cassava were studied to improve potassium fertilization management on cassava. 【Method】Variety SC205, widely cultivated across south China, was planted in field with five K_2O rates of 0, 60, 120, 180 and 240 kg/hm^2 . After harvest, the plants were divided into root, stem and leaf to measure biomass, contents of N, P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, and Zn, and contents of soluble sugars and starch in root. 【Result】1) K application significantly improved fresh yields of three organs (root, stem and leaf). Especially, the fresh root yield (FRY) increased by 9.87%—25.57%. With the increase of K_2O amount, FRY increased before decreasing and reached the highest level at 60—120 kg/hm^2 . 2) K supply obviously

【收稿日期】 2016-08-12

【基金项目】 农业部现代农业产业技术体系建设专项(CARS-12-hnhj)

【作者简介】 魏云霞(1989—), 女, 河南南阳人, 研究实习员, 硕士, 主要从事木薯栽培研究。E-mail: mydearxiaowei@126.com

【通信作者】 黄洁(1966—), 男, 广东遂溪人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事木薯高产栽培技术研究。E-mail: hnhjcn@163.com

improved K contents in all organs, contents of Mn, Zn, soluble sugars, and starch in root, while decreased Mg contents. The K/N, K/P, K/Ca, K/Mg, K/Mn, K/Cu and K/Zn ratios in all organs were also increased. 3) K supply significantly increased accumulation amounts of K, Mn, Zn, soluble sugars and starch in root. Soluble sugars and starch accumulation were increased by 7.65%—32.91% and 12.65%—53.41%, respectively. Accumulation of nutrients, soluble sugars and starch in root achieved highest level at 60—120 kg/hm². K application also significantly decreased K distribution ratios in root. 4) Correlation analysis showed that P, K, Mn and soluble sugars contents in root had extremely significantly or significantly positive correlation with K₂O rate. 【Conclusion】Based on FRY, nutrients absorption, quality and economic benefit, the optimum application was 95—130 kg/hm² for cassava.

Key words: cassava; K fertilizers; nutrient element; cassava yield; soluble sugars; starch

木薯是世界热区的重要粮食、饲料、工业原料作物,是我国“走出去”战略的重要热带作物之一^[1-2]。钾是仅次于氮的限制木薯产量形成的第二养分因子^[3],对木薯增产增收^[4]、块根淀粉含量增加^[5]、块根氢氰酸含量降低^[6-7]、土壤肥力提高^[8]具有重要的作用。本课题组的前期研究及近2年的调研发现,施钾量不足是限制木薯产量的重要原因之一,因此开展木薯施钾量研究对木薯产业发展具有重要意义。

营养元素间的相互作用及平衡是作物养分管理中不可忽视的重要因素,而钾与植物生长所需的多数营养元素之间存在互作或竞争^[9-10],因此合理施钾对调控作物营养元素间的平衡、保证产量和品质尤为重要。研究表明,施钾会降低油菜^[11]、稻米^[12]、马铃薯^[13]、绿芦笋^[14]、草坪草^[15]的Ca、Mg含量,甚至降低其Ca、Mg积累量,而对大豆叶片N、K、Ca、Mg、Mn、Cu、Zn含量无明显影响^[16];程素贞^[17]指出,施钾过多会降低小麦Mn含量;Reis等^[13]研究表明,施钾可使马铃薯茎秆Cu、Zn含量及叶柄N、P、Cu含量降低,而使叶片Mn、Zn含量提高;陈凤真^[18]指出,增施钾肥可促进黄瓜叶片对K的吸收,而抑制N、P的吸收。目前,有关施钾对木薯产量、品质、土壤肥力等的影响已有部分研究^[4-8],而有关施钾对木薯大中微量营养元素吸收、平衡的影响研究还鲜见报道。为此,本研究设置不同的施钾水平,研究钾肥用量对木薯产量、品质、大中微量元素吸收及经济效益的综合影响,以期为木薯合理施钾提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试木薯为我国主栽品种“SC205”,来源于中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所(以下

简称“品资所”)。供试肥料为尿素 $[\omega(\text{N})=46.4\%]$ 、过磷酸钙 $[\omega(\text{P}_2\text{O}_5)=16\%]$ 、氯化钾 $[\omega(\text{K}_2\text{O})=60\%]$ 。

1.2 试验设计

田间试验于2015年在海南省儋州市宝岛新村品资所木薯试验基地进行。试验田土壤为花岗岩发育的砖红壤,土壤基本理化性质为:pH 5.88,有机质含量 9.76 g/kg,全氮含量 0.59 g/kg,碱解氮含量 31.5 mg/kg,速效磷含量 37.5 mg/kg,速效钾含量 36.0 mg/kg。

试验设5个施钾水平,K₂O施用量分别为0, 60, 120, 180和240 kg/hm²,分别以K₀、K₆₀、K₁₂₀、K₁₈₀、K₂₄₀表示。各处理氮、磷用量一致,均为N 120 kg/hm²、P₂O₅ 60 kg/hm²。所有肥料均在木薯种植前一次性基施。每个处理重复3次。小区面积9.6 m×5.6 m=53.76 m²,随机区组排列。2015-03-27选取具有健康芽眼、长约20 cm的种茎平放种植,行向为南北走向,统一芽眼朝南,株行距均为80 cm。于2015-12-20收获。

1.3 测定项目及方法

木薯收获期,各小区考察5株木薯的结薯数、单薯鲜质量;同时,采集10株木薯,分别称量薯块、茎秆、叶片的鲜质量,以实收的10株木薯薯块鲜质量换算成每公顷鲜薯产量。将各部位样品分别切碎或切丝,混匀,用四分法保留约400 g鲜样,称鲜质量,烘干称干质量,粉碎、过筛,用于大中微量元素、可溶性糖及淀粉含量的测定。粉碎样品经浓H₂SO₄-H₂O₂消煮后,用凯氏定氮法测定N含量,用钼锑抗比色法测定P含量,用火焰光度法测定K含量;样品经HNO₃-HClO₄消煮后,用原子吸收分光光度法测定Ca、Mg、Mn、Cu、Zn含量,用蒽酮比色法测定薯块可溶性糖和淀粉含量^[19-20]。按下面公式计算经济系数及各中微量元素积累量:

经济系数=鲜薯产量/(鲜薯产量+地上部鲜产量);

各元素积累量=干物质量×元素含量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2013 软件对试验数据进行分析、处理并绘图,用 SPSS 20.0 软件进行统计与分析,LSD 法检验 $P<0.05$ 水平上的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 施钾量对木薯产量及产量构成的影响

由表 1 可以看出,各处理木薯不同部位鲜产量均表现为茎秆>薯块>叶片,分别占生物学总鲜产量的 47.15%~51.52%,42.13%~45.53%和 6.35%~8.28%;不同部位干物质量均表现为薯块>茎秆>叶片。与不施钾处理(K_0)相比,施钾对各部位鲜产量及干物质量均有不同程度的提高作用,

薯块、茎秆、叶片鲜产量的增幅分别为 9.87%~25.57%,13.94%~48.27%和 17.56%~27.88%;相同施钾量下,茎秆鲜产量、干物质量的增幅高于薯块。随施钾量的增加,薯块鲜产量和干物质量均呈先增加后降低趋势,其中 K_{120} 处理薯块的鲜产量和干物质量均最高,分别达 27.07 和 10.20 t/hm²; K_{60} 处理次之,分别达 25.51 和 9.78 t/hm²。进一步分析可知,不施钾时薯块、茎秆、叶片的鲜产量分别占木薯生物学总鲜产量的 45.53%,47.15%和 7.32%,薯块、茎秆、叶片的干物质量分别占总干物质量的 55.19%,38.29%和 6.52%;施钾降低了薯块鲜产量占生物学总鲜产量的比例及薯块干物质量占总干物质量的比例,提高了茎秆鲜产量比例及干物质量比例。从产量构成可以看出,与不施钾相比, K_{60} 和 K_{120} 有利于提高单株结薯数。同时,施钾降低了木薯的经济系数。

表 1 施钾量对木薯产量及产量构成的影响

Table 1 Effects of K application on fresh cassava yield and yield components

处理 Treat- ment	鲜产量/(t·hm ⁻²) Fresh yield				干物质量/(t·hm ⁻²) Dry matter				产量构成 Yield components		经济系数 Economic coefficient
	薯块 Root	茎秆 Stem	叶片 Leaf	地上部 Above- ground	薯块 Root	茎秆 Stem	叶片 Leaf	地上部 Above- ground	单株结 薯数	单薯鲜 质量/g	
									Roots per plant	Fresh weight per root	
K_0	21.56 b	22.33 c	3.47 a	25.80 c	8.03 ab	5.57 d	0.95 a	6.52 c	7.7	181.07	0.46
K_{60}	25.51 a	28.90 ab	4.32 a	33.22 ab	9.78 ab	7.21 b	1.16 a	8.37 b	9.5	172.50	0.43
K_{120}	27.07 a	33.10 a	4.08 a	37.18 a	10.20 a	8.48 a	0.98 a	9.46 a	8.3	212.33	0.42
K_{180}	23.72 ab	25.44 bc	4.44 a	29.88 bc	7.87 b	6.26 cd	1.11 a	7.37 bc	7.3	207.46	0.44
K_{240}	23.69 ab	27.22 b	4.26 a	31.47 b	8.19 ab	6.62 bc	1.06 a	7.67 b	7.6	200.58	0.43

注:同列数据后标不同小写字母表示差异达到显著水平($P<0.05$)。表 2~5 同。

Note: Different lowercase letters mean significant difference at the $P<0.05$ level. The same for Tables 2-5.

2.2 施钾量对木薯各部位大中微量元素的影响

2.2.1 大中微量元素含量 由表 2 可以看出,各大中微量元素在木薯不同部位的含量均表现为叶片>茎秆>薯块。与不施钾相比,施钾可有效提高薯块、茎秆、叶片的 K 含量,且随施钾量的增加而增加,增幅分别为 34.15%~96.61%,53.90%~140.11%和 51.88%~149.67%;施钾虽使茎秆、叶片中的 Ca 含量有一定降低,但差异未达显著水平;施钾可明显降低薯块、茎秆、叶片的 Mg 含量,降幅分别为 19.50%~22.38%,21.62%~33.65%和 7.70%~29.52%;同时,施钾显著提高了薯块中的 Mn、Zn 含量及叶片中的 N、P 含量,且薯块中的 Mn、Cu、Zn 含量均随施钾量的增加呈现先增加后降低趋势,其中 Cu 含量受施钾量影响相对较小,各处理间差异未达显著水平;除此之外,其余元素含量无明显变化。

2.2.2 大中微量元素积累量 由表 3 可以看出,各营养元素在木薯不同部位的积累量表现不一致,其

中 N、K 表现为茎秆≈薯块>叶片,P、Ca、Mg、Cu 表现为茎秆>薯块>叶片,Mn、Zn 表现为茎秆>叶片>薯块。与不施钾相比,施钾可以较大幅度地提高薯块、茎秆、叶片的 P、K、Cu 积累量及茎秆、叶片的 N 积累量,同时施钾可以提高薯块和茎秆的 Mn、Zn 积累量,薯块 K、Mn、Zn 积累量的增幅分别为 62.05%~98.22%,23.55%~42.40%和 29.06%~38.80%;合理施钾能提高薯块 N、Ca 积累量,而过量施钾反而会使其积累量降低;整体上, K_{60} 、 K_{120} 处理薯块各元素积累量均处于较高水平。进一步分析,不施钾时 K 在薯块、茎秆和叶片中的分配比例分别为 52.84%,39.46%和 7.70%,施钾时 K 在薯块、茎秆、叶片中的分配比例分别为 43.51%~48.72%,43.31%~47.36%和 7.32%~9.78%。从不同部位 K 分配比例来看,施钾可以降低 K 在薯块中的分配比例,而提高其在茎秆中的分配比例;施钾对 K 以外其余元素在薯块中的分配比例无明显

影响。

表 2 施钾量对木薯各部位大中微量元素含量的影响

Table 2 Effects of K application on macro-, meso-, micro-nutrients contents of cassava organs									
部位 Organ	处理 Treatment	大量元素/(g·kg ⁻¹) Macro-nutrients			中量元素/(g·kg ⁻¹) Meso-nutrients		微量元素/(mg·kg ⁻¹) Micro-nutrients		
		N	P	K	Ca	Mg	Mn	Cu	Zn
薯块 Root	K ₀	5.69 ab	0.83 a	3.89 b	1.69 a	0.83 a	10.13 b	2.27 a	6.12 c
	K ₆₀	5.44 b	0.83 a	5.32 ab	1.59 a	0.67 b	10.88 ab	2.30 a	6.54 bc
	K ₁₂₀	4.98 b	0.85 a	5.21 ab	1.75 a	0.64 b	11.47 ab	2.38 a	6.48 bc
	K ₁₈₀	7.06 a	0.86 a	6.64 a	1.16 a	0.66 b	13.09 a	2.76 a	8.70 a
	K ₂₄₀	5.05 b	0.93 a	7.64 a	1.49 a	0.67 b	12.37 ab	2.49 a	8.26 ab
茎秆 Stem	K ₀	8.78 a	1.50 a	4.19 c	4.22 a	2.36 a	123.03 a	3.72 a	38.16 ab
	K ₆₀	7.65 a	1.50 a	6.45 bc	3.84 a	1.85 b	112.96 a	3.64 a	37.09 ab
	K ₁₂₀	7.32 a	1.36 a	6.50 bc	3.57 a	1.76 b	120.53 a	3.48 a	32.98 b
	K ₁₈₀	8.37 a	1.39 a	8.35 ab	3.52 a	1.78 b	123.90 a	4.14 a	40.00 a
	K ₂₄₀	7.80 a	1.58 a	10.06 a	3.12 a	1.56 b	100.33 a	3.98 a	32.98 b
叶片 Leaf	K ₀	28.59 b	2.12 b	4.87 c	16.26 a	4.76 a	475.41 a	7.30 ab	85.54 a
	K ₆₀	31.92 ab	2.47 a	7.40 bc	16.04 a	4.39 ab	471.67 a	8.84 a	75.77 a
	K ₁₂₀	30.94 ab	2.43 a	8.63 b	14.82 a	3.36 b	450.65 a	6.82 b	70.59 a
	K ₁₈₀	33.81 a	2.50 a	9.95 ab	14.15 a	3.54 b	435.81 a	6.45 b	66.54 a
	K ₂₄₀	32.97 a	2.55 a	12.17 a	15.93 a	3.83 ab	442.33 a	7.54 ab	82.76 a

表 3 施钾量对木薯各部位大中微量元素积累量的影响

Table 3 Effects of K application rate on macro-, meso-, micro-nutrients accumulation of cassava organs									
部位 Organ	处理 Treatment	大量元素/(kg·hm ⁻²) Macro-nutrients			中量元素/(kg·hm ⁻²) Meso-nutrients		微量元素/(g·hm ⁻²) Micro-nutrients		
		N	P	K	Ca	Mg	Mn	Cu	Zn
薯块 Root	K ₀	45.72 a	6.67 a	31.18 b	13.53 ab	6.65 a	81.48 b	18.31 a	49.20 b
	K ₆₀	53.20 a	8.08 a	51.81 a	15.38 ab	6.56 a	106.46 ab	22.31 a	63.50 ab
	K ₁₂₀	51.20 a	8.70 a	53.58 a	18.30 a	6.50 a	116.02 a	24.34 a	65.51 ab
	K ₁₈₀	54.73 a	6.63 a	50.54 a	9.14 b	5.23 a	102.57 ab	21.46 a	68.29 a
	K ₂₄₀	41.22 a	7.66 a	61.81 a	11.97 ab	5.45 a	100.67 ab	20.76 a	66.61 a
茎秆 Stem	K ₀	48.77 b	8.37 c	23.32 c	23.29 a	13.12 ab	687.77 b	20.81 a	212.73 b
	K ₆₀	55.13 ab	10.86 ab	46.54 b	27.64 a	13.27 ab	816.00 ab	26.04 a	267.67 a
	K ₁₂₀	62.02 a	11.56 a	55.40 ab	30.43 a	14.95 a	1 016.85 a	29.61 a	279.57 a
	K ₁₈₀	52.01 b	8.75 bc	51.72 ab	22.18 a	11.22 b	776.38 b	25.58 a	249.29 ab
	K ₂₄₀	51.64 b	10.40 abc	66.52 a	20.70 a	10.41 b	656.18 b	26.55 a	217.55 b
叶片 Leaf	K ₀	26.83 b	2.01 b	4.56 c	15.71 a	4.56 a	456.51 a	6.93 b	82.29 a
	K ₆₀	36.91 a	2.87 a	8.43 b	18.80 a	5.11 a	549.94 a	10.29 a	86.90 a
	K ₁₂₀	30.51 ab	2.38 ab	8.54 b	14.60 a	3.32 a	443.72 a	6.75 b	69.36 a
	K ₁₈₀	37.40 a	2.77 a	11.05 ab	15.55 a	3.89 a	481.48 a	7.12 b	74.00 a
	K ₂₄₀	34.85 a	2.69 a	12.99 a	16.80 a	4.06 a	465.29 a	7.99 ab	86.24 a

2.2.3 大中微量元素平衡性 由表 4 可以看出,K 与各元素的比值在木薯不同部位均表现为薯块>茎秆>叶片。与不施钾相比,施钾整体上可显著提高木薯各部位 K/N、K/P、K/Ca、K/Mg、K/Mn、K/Cu、K/Zn 值,且其值随施钾量的增加而增大。

表 4 施钾量对木薯各部位大中微量元素平衡性的影响

Table 4 Effects of K application on ratio balance between different nutrients of cassava								
部位 Organ	处理 Treatment	营养元素平衡性 Ratio balance						
		K/N	K/P	K/Ca	K/Mg	K/Mn	K/Cu	K/Zn
薯块 Root	K ₀	0.70 b	4.68 b	2.41 c	4.70 b	389.58 a	1762.21 b	642.84 a
	K ₆₀	0.98 b	6.41 ab	3.47 bc	8.13 ab	492.68 a	2347.55 ab	817.11 a
	K ₁₂₀	1.04 b	6.13 ab	3.11 c	8.16 ab	455.74 a	2190.05 ab	813.23 a
	K ₁₈₀	0.93 b	7.62 a	5.69 a	10.19 a	511.99 a	2386.15 ab	763.09 a
	K ₂₄₀	1.51 a	8.29 a	5.14 ab	11.60 a	644.26 a	3152.48 a	938.08 a

表 4(续)Continued table 4

部位 Organ	处理 Treatment	营养元素平衡性 Ratio balance						
		K/N	K/P	K/Ca	K/Mg	K/Mn	K/Cu	K/Zn
茎秆 Stem	K ₀	0.48 c	2.82 b	1.02 c	1.78 c	34.24 c	1 136.07 c	110.23 c
	K ₆₀	0.84 b	4.33 ab	1.72 bc	3.51 b	58.65 bc	1 799.54 b	173.96 bc
	K ₁₂₀	0.89 b	4.75 ab	1.84 bc	3.66 b	56.71 bc	1 864.43 b	197.65 b
	K ₁₈₀	1.00 b	6.12 a	2.48 ab	4.77 b	67.42 b	2 030.78 b	206.70 b
	K ₂₄₀	1.29 a	6.38 a	3.26 a	6.45 a	102.54 a	2 552.43 a	310.37 a
叶片 Leaf	K ₀	0.17 c	2.30 c	0.30 c	1.03 c	10.34 c	667.16 b	57.61 b
	K ₆₀	0.23 bc	3.00 bc	0.47 bc	1.69 bc	15.94 bc	844.21 b	97.28 ab
	K ₁₂₀	0.28 b	3.57 b	0.58 ab	2.59 ab	19.09 b	1 288.67 a	127.82 a
	K ₁₈₀	0.29 b	3.97 ab	0.71 a	3.00 a	22.86 ab	1 554.99 a	151.11 a
	K ₂₄₀	0.37 a	4.78 a	0.77 a	3.18 a	27.65 a	1 612.99 a	154.47 a

2.3 施钾量对木薯薯块品质的影响

施钾量对木薯薯块品质的影响见表 5。

表 5 施钾量对木薯薯块品质的影响

Table 5 Effects of K application on quality of cassava root

处理 Treatment	含量/(g·kg ⁻¹) Content		积累量/(kg·hm ⁻²) Accumulation	
	可溶性糖 Soluble sugars	淀粉 Starch	可溶性糖 Soluble sugars	淀粉 Starch
K ₀	19.89 a	569.78 d	159.17 c	4 578.17 c
K ₆₀	20.02 a	624.26 c	195.16 ab	6 079.55 ab
K ₁₂₀	20.87 a	688.28 b	211.54 a	7 023.27 a
K ₁₈₀	22.07 a	742.70 a	171.34 bc	5 849.12 abc
K ₂₄₀	21.92 a	631.70 c	177.88 abc	5 157.47 bc

由表 5 可以看出,与不施钾相比,施钾处理薯块可溶性糖含量提高 0.67%~10.97%,但各处理间的差异未达显著水平;施钾可显著提高薯块的淀粉含量和可溶性糖、淀粉积累量,但这 3 个指标均随施

钾量的增加而先增加后降低,总体上施钾后薯块淀粉含量及可溶性糖和淀粉积累量的增幅分别为 9.56%~30.35%,7.65%~32.91%和 12.65%~53.41%。K₁₂₀处理的可溶性糖和淀粉积累量最高,分别达 211.54 和 7 023.27 kg/hm²。

2.4 木薯薯块各指标及其与施钾量的相关性

对薯块产量、各元素含量、可溶性糖含量、淀粉含量、单株结薯数、单薯鲜质量、施钾量进行相关分析,结果(表 6)表明:薯块的 P、K、Mn、可溶性糖含量与施钾量呈极显著或显著正相关,相关系数 r^2 分别为 0.882,0.968,0.901,0.944;薯块 K、Cu 含量均与薯块 Zn 和可溶性糖含量呈显著正相关;薯块 Ca 含量与 Cu、Zn 含量呈显著负相关;薯块 Mn 含量与 Cu、Zn、可溶性糖含量呈显著或极显著正相关;薯块 Zn 含量与可溶性糖含量呈显著正相关。

表 6 木薯薯块各项指标及其与施钾量间的相关系数

Table 6 Correlation analysis among different measure datas of cassava root and among these datas with K application rate

指标 Index	施钾量 K rate	薯块鲜 产量 Fresh root yield	N 含量 N content	P 含量 P content	K 含量 K content	Ca 含量 Ca content	Mg 含量 Mg content	Mn 含量 Mn content	Cu 含量 Cu content	Zn 含量 Zn content	可溶性 糖含量 Soluble sugars content	淀粉 含量 Starch content	单株 结薯数 Roots per plant	单薯鲜 质量 Fresh weight per root
施钾量 K rate	1.000													
薯块鲜产量 Fresh root yield	0.187	1.000												
N 含量 N content	0.064	-0.380	1.000											
P 含量 P content	0.882 *	-0.072	-0.217	1.000										
K 含量 K content	0.968 *	0.117	0.103	0.869	1.000									
Ca 含量 Ca content	-0.565	0.249	-0.831	-0.303	-0.633	1.000								
Mg 含量 Mg content	-0.678	-0.806	0.051	-0.354	-0.652	0.307	1.000							
Mn 含量 Mn content	0.901 *	0.150	0.459	0.625	0.872	-0.815	-0.677	1.000						
Cu 含量 Cu content	0.718	-0.052	0.725	0.410	0.690	-0.919 *	-0.469	0.940 *	1.000					
Zn 含量 Zn content	0.869	-0.139	0.521	0.691	0.892 *	-0.890 *	-0.467	0.947 *	0.918 *	1.000				
可溶性 糖含量 Soluble sugars content	0.944 *	0.037	0.349	0.761	0.889 *	-0.732	-0.567	0.969 *	0.890 *	0.943 *	1.000			

sugars content

表 6(续) Continued table 6

指标 Index	施钾量 K rate	薯块鲜 产量 Fresh root yield	N 含量 N content	P 含量 P content	K 含量 K content	Ca 含量 Ca content	Mg 含量 Mg content	Mn 含量 Mn content	Cu 含量 Cu content	Zn 含量 Zn content	可溶性 糖含量 Soluble sugars content	淀粉 含量 Starch content	单株 结薯数 Roots per plant	单薯鲜 质量 Fresh weight per root
淀粉含量 Starch content	0.579	0.458	0.531	0.139	0.492	-0.644	-0.740	0.824	0.834	0.631	0.709	1.000		
单株 结薯数 Roots per plant	-0.431	0.560	-0.393	-0.476	-0.314	0.432	-0.230	-0.474	-0.581	-0.556	-0.625	-0.242	1.000	
单薯 鲜质量 Fresh weight per root	0.679	0.336	0.117	0.461	0.482	-0.287	-0.537	0.708	0.641	0.521	0.761	0.750	-0.591	1.000

注: * 在 $P<0.05$ 水平上显著相关, ** 在 $P<0.01$ 水平上显著相关。
Note: * means significant correlation at $P<0.05$ probability level; ** means significant correlation at the $P<0.01$ probability level.

2.5 施钾量对木薯经济收益的影响

按市场价格尿素 3.0 元/kg、过磷酸钙 1.4 元/kg、氯化钾 5.0 元/kg、鲜薯 500.0 元/t,通过二次多项式,将鲜薯产量、净收入分别与施钾量进行拟合,得到拟合方程如图 1 所示。根据拟合方程,可求出获得最高鲜薯产量时的施钾量为 128.04

kg/hm²,对应的鲜薯产量和净收入分别为 26.17 t/hm²和10 715.74 元/hm²;同样可求得获得最大收益时的施钾量为 95.59 kg/hm²,对应的鲜薯产量和净收入分别为 25.90 t/hm²和 10 851.61 元/hm²。可见,当 K₂O 用量为 95~130 kg/hm² 时,能同时获得较高的鲜薯产量和收益水平。

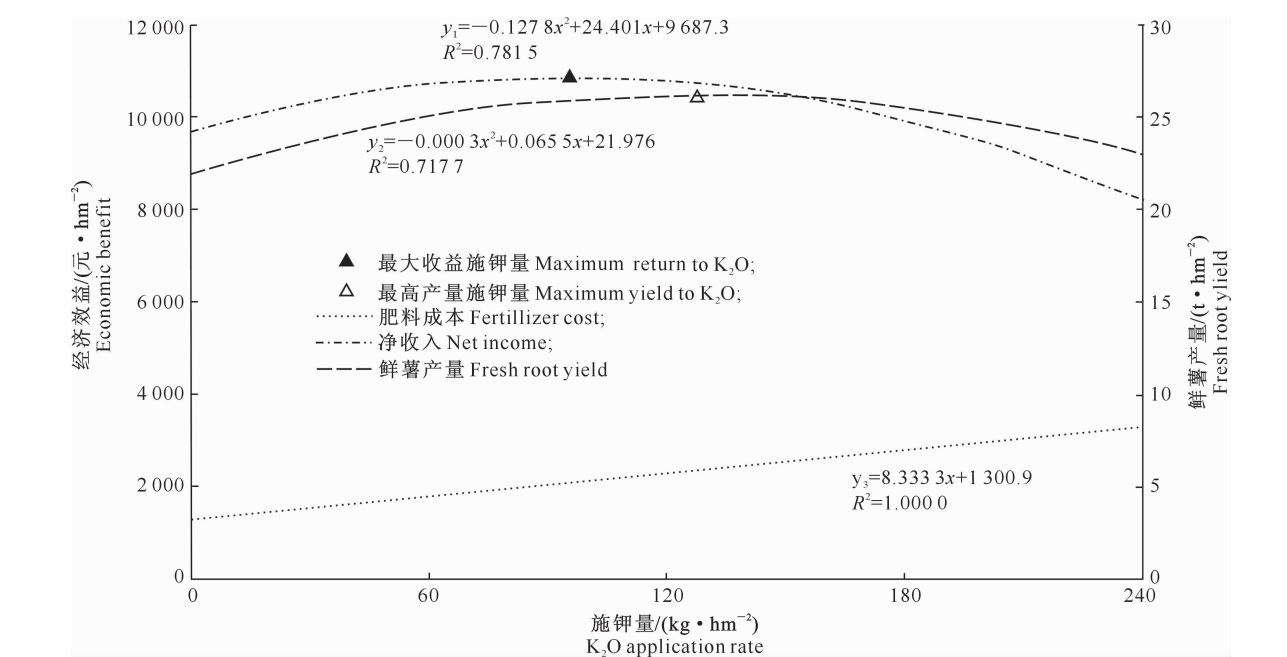


图 1 鲜薯产量、肥料成本和净收入与施钾量的关系
Fig.1 Relationships of fresh root yield,fertilizer cost and net income with K application rate

3 讨论

前人研究表明,与不施钾相比,施钾对木薯具有显著的增产增效作用^[4],同时可以提高木薯淀粉含量^[21]。杨德桦^[22]的研究表明,施钾能显著提高马铃薯的可溶性糖和淀粉积累量。黄洁等^[23]指出,对木薯而言,当土壤速效钾含量<40 mg/kg 时为钾素过低,40 mg/kg≤速效钾含量<60 mg/kg 时为钾素

低。本试验条件下,土壤速效钾含量仅为 36.0 mg/kg,处于较低水平,因此施钾可以提高木薯鲜薯产量、总生物学产量、薯块淀粉含量及其可溶性糖、淀粉积累量,这与前人关于施钾提高作物产量及品质的研究结果^[4,21-22]一致。黄洁等^[5]研究表明,100 kg/hm² 的施钾水平对木薯较为适宜;何浩清等^[24]认为,135 kg/hm² 是木薯获得最高综合效益的适宜钾肥用量;张永发等^[25]指出,150 kg/hm² 是木薯获

得最高产量和最佳利润的适宜施钾量;高志红等^[26]推荐木薯最佳施钾量为 187.5 kg/hm^2 。本研究从鲜薯产量、大中微量元素积累量、品质及经济效益等方面进行综合分析,建议最佳施钾量为 $95 \sim 130 \text{ kg/hm}^2$ 。前人不同研究结果之间的差异可能与木薯品种、土壤钾素状况、气候条件、氮磷肥用量等有关。

适量施钾可显著提高木薯薯块、茎秆和叶片的 K 含量,降低 Mg 含量及茎秆、叶片 Ca 含量,这与施钾提高油菜^[11]、草坪草^[15]、红花^[27] K 含量,降低其 Ca、Mg 含量的研究结果一致;也与 Spear 等^[28-29]报道的随 K^+ 浓度提高,木薯 Ca、Mg 含量呈降低趋势,甚至出现缺 Mg 症状的现象相吻合。木薯 Ca、Mg 含量的降低可能一方面与养分稀释效应有关,另一方面与 K、Ca、Mg 等离子间的相互影响有关^[15,30]。俄胜哲等^[12]指出,施钾可以降低稻米中的 Ca、Mg 含量及积累量,且适量施钾能提高稻米中的 Fe、Mn、Cu、Zn 含量和积累量;郭熙盛等^[31]指出,施钾对甘蓝各元素吸收的影响因氮肥用量不同而表现不同;Rampim 等^[16]研究表明,当土壤钾含量处于较高水平时,施钾对大豆叶片的大中微量元素含量无明显影响。可见,钾肥对作物元素吸收的影响与施钾量、土壤肥力、养分配施等均有密切关系。本研究中,施钾在影响木薯各部位 K、Ca、Mg 含量的同时,也使薯块 P、K、Mn、Cu、Zn 积累量有一定的增加,但却降低了钾素在薯块中的分配比例,究其原因,是因为在同一钾水平下,茎秆鲜质量的增幅高于薯块,导致薯块鲜质量比例降低,进而降低了木薯的经济系数及薯块 K 分配比例。已有研究还表明,随施钾量的增加,荞麦^[32]、水稻^[33] K 积累量增加,但籽粒的 K 分配比例却有所下降。因此,如何在提高产量、品质的同时,最大化提高钾肥的有效性,合理考虑“以钾调控其他元素吸收”的作用,改进其对经济产量的贡献,是合理施钾应考虑的内容。

本研究中,适量施钾可以显著提高木薯 K/N、K/P、K/Ca、K/Mg、K/Mn、K/Cu、K/Zn 值,且随施钾量的增加其值均呈增大趋势,这与施钾对木薯 K 含量的影响大于其对其他元素含量的影响有关^[34]。已有研究表明,施钾可以显著提高红花^[27]、蓝莓^[35]叶片的 K/N、K/P、K/Ca、K/Mg 值;随施钾量增加,棉花幼苗根系和叶片中的 K/Ca、K/Mg 值也显著升高^[36]。营养元素间的平衡是作物良好生长的重要前提,与土壤养分含量、肥料平衡配施均有重要关系,因此施肥时应考虑平衡施肥。结合目前我国木薯主产区土壤微量元素含量处于临界或缺乏水平的

现状^[37-38],更应重视木薯施肥中的平衡配施及微肥的施用。本研究中,施钾虽可以提高木薯产量及品质,但不同施钾量的增产提质效果存在较大差异,整体上, K_{60} 、 K_{120} 处理更有利于木薯增产提质,而 K_{180} 、 K_{240} 处理增产提质效果弱于 K_{60} 、 K_{120} 处理。Sahu 等^[39]指出,过量施钾会降低水稻的干物质量;王强盛等^[40]研究表明,过量施钾可抑制水稻有效穗数;Celik 等^[41]研究发现,过量施钾对玉米叶片的生长有抵制作用;武际等^[42]的研究也表明,过量施钾会降低小麦对 N、K 的转运及籽粒产量。不同施钾量对木薯增产提质效果存在较大差异,可能与过多施钾造成的营养元素不平衡^[35-36]、渗透胁迫^[43]、产量构成调节^[40]等有关。本研究仅从施用量的角度研究钾对木薯产量、大中微量元素吸收、木薯品质及经济效益的影响,对施钾时期、养分配施、不同品种木薯钾肥运筹等方面尚有待于进一步研究,而木薯适宜的各营养元素平衡值也有待于深入探究。

4 结 论

在本试验条件下,施钾可以提高鲜薯产量、薯块中 K 和淀粉含量及薯块中 K、可溶性糖、淀粉的积累量,而降低木薯各部位 Mg 含量;同时,施钾可以提高薯块 P、K、Mn、Cu、Zn 积累量;其中在 K_2O 施用量为 $60 \sim 120 \text{ kg/hm}^2$ 时,鲜薯产量较高(达 $25.51 \sim 27.07 \text{ t/hm}^2$),薯块各元素积累量均处于较高水平; K_2O 施用量为 120 kg/hm^2 时薯块可溶性糖和淀粉积累量最高,分别为 211.54 和 $7\,023.27 \text{ kg/hm}^2$ 。相关分析表明,薯块的 P、K、Mn、可溶性糖含量与施钾量呈极显著或显著正相关。施钾可以提高木薯各部位 K/N、K/P、K/Ca、K/Mg、K/Mn、K/Cu、K/Zn 值,且随施钾量的增加其值呈增大趋势。整体分析认为,为了获得较高的木薯产量、大中微量元素积累量、品质及经济效益,建议最佳的 K_2O 用量为 $95 \sim 130 \text{ kg/hm}^2$,同时应重视中微肥的配施。

[参考文献]

- [1] 陈伟. 中国农业“走出去”的背景及行业选择 [J]. 农业经济, 2012(4): 7-9.
Chen W. The background of China's agricultural "go out" and industry selection [J]. Agricultural Economy, 2012(4): 7-9.
- [2] 王燕婕. 中国的海外农作物种植: 规模与争论 [J]. 国际政治研究, 2010, 31(2): 10-38.
Wang Y J. China's overseas cultivation of agricultural produce: scope and issues [J]. The Journal of International Stud-

- ies,2010,31(2):10-38.
- [3] 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,Chen J S,et al.Characteristics of dry matter accumulation and effect of fertilizer application in cassava [J].Acta Agronomica Sinica,2013,39(1):126-132.
- [4] Adekayode F O,Adeola O F.The response of cassava to potassium fertilizer treatments [J].Journal of Food,Agriculture & Environment,2009,7(2):279-282.
- [5] 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 or starch content and agronomic characters in the long-term fertilizer application trial [J].Chinese Journal of Tropical Crops,2004,25(4):42-49.
- [6] Elsharkawy M A,Cadavid L F.Genetic variation within cassava germplasm in response to potassium [J].Experimental Agriculture,2000,36(3):323-334.
- [7] John K S,Venugopal V K,Nair M M.Crop growth,yield and quality parameters associated with maximum yield research (MYR) in cassava [J].Journal of Root Crops,2005,31(1):14-21.
- [8] Nguyen H,Schoenau J J,Van Rees K C J,et al.Long-term nitrogen,phosphorus and potassium fertilization of cassava influences soil chemical properties in North Vietnam [J].Canadian Journal of Soil Science,2001,81(4):481-488.
- [9] Pervez H,Makhdom M I,Ashraf M.The interactive effects of potassium nutrition on the uptake of other nutrients in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under an arid environment [J].Journal of Chemical Society of Pakistan,2006,28(3):256-265.
- [10] International Plant Nutrition Institute (IPNI).Potassium interactions with other nutrients [J].Better Crops,1998,82(3):12-13.
- [11] 刘冬碧,陈防,鲁剑巍,等.施钾对油菜干物质积累和钾、钙、镁吸收的影响[J].土壤肥料,2001(4):24-28.
Liu D B,Chen F,Lu J W,et al.Effect of K application on dry matter accumulation and absorption of K,Ca and Mg of oil rape [J].Soil and Fertilizer Sciences in China,2001(4):24-28.
- [12] 俄胜哲,袁继超,丁志勇,等.氮磷钾肥对稻米铁、锌、铜、锰、镁、钙含量和产量的影响[J].中国水稻科学,2005,19(5):434-440.
E S Z,Yuan J C,Ding Z Y,et al.Effect of N,P,K fertilizers on Fe,Zn,Cu,Mn,Ca and Mg contents and yields in rice [J].Chinese Journal of Rice Science,2005,19(5):434-440.
- [13] Reis R D A,Monnerat P H.Nutrient concentrations in potato stem,petiole and leaflet in response to potassium fertilizer [J].Scientia Agricola,2000,57(2):251-255.
- [14] 张瑞富,杨恒山,刘晶,等.不同钾肥用量对绿芦笋产量及营养品质的影响[J].中国农学通报,2013,29(28):165-168.
Zhang R F,Yang H S,Liu J,et al.Effect of different amount of potassium fertilizer on yield and nutrient quality of green asparagus [J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2013,29(28):165-168.
- [15] Waddington D V,Moberg E L,Duich J M,et al.Effect of N source,K source,and K rate on soil nutrient levels and the growth and elemental composition of penncross creeping bentgrass,*Agrostis palustris* Huds [J].Agronomy Journal,1972,64(5):562-566.
- [16] Rampim L,Fey R,Lana M D C,et al.Phosphorus and potassium fertilization in culture of soybean plants in the Oxisol [J].African Journal of Agricultural Research,2014,9(19):1461-1466.
- [17] 程素贞.钾肥对小麦 Zn、Mn、Fe、Cu 的吸收分配的影响[J].安徽农业大学学报,1995,22(3):196-202.
Cheng S Z.The effects of K supplement on the absorption and distribution of Zn,Mn,Fe,and Cu in wheat [J].Journal of Anhui Agricultural University,1995,22(3):196-202.
- [18] 陈凤真.氮磷钾用量及配比对黄瓜矿质元素吸收和产量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(6):174-180.
Chen F Z.Effects of application and ratio of nitrogen,phosphorus,and potassium on mineral nutrient absorption and yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J].Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2015,43(6):174-180.
- [19] 鲍士旦.土壤化学分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2015:25-109,257-282.
Bao S D.Methods of soil agricultural chemical analysis [M].3rd ed.Beijing:Chinese Agriculture Press,2015:25-109,257-282.
- [20] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006:144-148.
Gao J F.Plant physiology experiment instruction [M].Beijing:Higher Education Press,2006:144-148.
- [21] 黄巧义,唐拴虎,陈建生,等.氮磷钾配比对木薯养分吸收动态及产量影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):947-956.
Huang Q Y,Tang S H,Chen J S,et al.Effect of different N,P and K treatment on absorption and accumulation of nutrients and yield of cassava [J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2014,20(4):947-956.
- [22] 杨德桦.不同施肥量和不同施肥方式对襄阳地区马铃薯产量、养分积累规律和品质的影响[D].武汉:华中农业大学,2012:31-38.
Yang D H.Effect of different fertilizer rates and fertilization methods on yield,nutrients accumulation and tuber quality of potato in Xiangyang [D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2012:31-38.
- [23] 黄洁,周建国.木薯间套作与高效利用技术[M].海口:海南出版社,2015:40-46.
Huang J,Zhou J G.Intercropping and high benefit utilization of cassava [M].Haikou:Hainan Publishing House,2016:40-46.

- [24] 何浩清, 吴健华, 黎展文. 不同钾肥施用水平对木薯产量影响试验初报 [J]. 广西农学报, 2008, 23(6): 26-27, 34.
He H Q, Wu J H, Li Z W. Preliminary study of K application rate on cassava yield [J]. Journal of Guangxi Agriculture, 2008, 23(6): 26-27, 34.
- [25] 张永发, 杜前进, 张冬明, 等. 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, et al. Effect of balanced fertilization on yield and quality of cassava [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2009, 30(4): 435-439.
- [26] 高志红, 陈晓远, 林昌华, 等. 不同施肥水平对木薯氮磷钾养分配积、分配及产量的影响 [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.
- [27] Kádár I. Effect of mineral fertilization on the element uptake of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) [J]. Agrochemistry and Soil Science, 2007, 56(1): 61-72.
- [28] Spear S N, Asher C J, Edwards D G. Response of cassava, sunflower, and maize to potassium concentration in solution: I. Growth and plant potassium concentration [J]. Field Crops Research, 1978, 1: 347-361.
- [29] Spear S N, Edwards D G, Asher C J. Response of cassava, sunflower, and maize to potassium concentration in solution: III. Interactions between potassium, calcium, and magnesium [J]. Field Crops Research, 1978, 1: 375-389.
- [30] Pervez H, Makhdom M I, Ashraf M. The interactive effects of potassium nutrition on the uptake of other nutrients in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under an arid environment [J]. Journal of the Chemical Society of Pakistan, 2006, 28(3): 256-265.
- [31] 郭熙盛, 叶舒娅, 王文军, 等. 不同氮钾水平对结球甘蓝养分配吸收和分配的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2004, 31(1): 62-66.
Guo X S, Ye S Y, Wang W J, et al. Effects of different rates of N and K on the nutrient uptake and partition of cabbage [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2004, 31(1): 62-66.
- [32] 侯迷红, 范 富, 宋桂云, 等. 钾肥用量对甜荞麦产量和钾素利用效率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 340-346.
Hou M H, Fan F, Song G Y, et al. Effect of K application rate on yield and K use efficiency of buckwheat [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(2): 340-346.
- [33] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施钾增产效应及钾肥利用率研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1058-1065.
Wang W N, Lu J W, Lu M X, et al. Effects of potassium fertilizer and potassium use efficiency on early-, mid- and late-season rice in Hubei province, China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17(5): 1058-1065.
- [34] 邹铁祥, 戴廷波, 姜 东, 等. 氮、钾水平对小麦花后旗叶光合特性的影响 [J]. 作物学报, 2007, 33(10): 1667-1673.
Zou T X, Dai T B, Jiang D, et al. Effects of nitrogen and potassium application levels on flag leaf photosynthetic characteristics after anthesis in winter wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(10): 1667-1673.
- [35] Pereira I D S, Picoletto L, Gonçalves M A, et al. Potassium fertilization affects florican mineral nutrient content, growth, and yield of blackberry grown in Brazil [J]. Hort Science, 2015, 50(8): 1234-1240.
- [36] 卜晶晶, 王素芳, 张志勇, 等. 钾素对棉花幼苗器官生长和矿物质元素吸收、分配及平衡性的影响 [J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2015, 36(2): 40-45.
Bu J J, Wang S F, Zhang Z Y, et al. Effects of potassium on organs growth and uptake, distribution and balance of mineral nutrient in cotton young seedling [J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2015, 36(2): 40-45.
- [37] 宋付平, 黄 洁, 陆小静, 等. 中国木薯施肥研究进展 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(4): 140-144.
Song F P, Huang J, Lu X J, et al. Cassava fertilization research in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(4): 140-144.
- [38] 李晓辉, 唐拴虎, 朱碧岩, 等. 木薯中微量营养元素临界值研究 [J]. 广东农业科学, 2010, 37(3): 22-24.
Li X H, Tang S H, Zhu B Y, et al. Studies on soil critical values of secondary-micro nutrients for upland cassava [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37(3): 22-24.
- [39] Sahu S K, Mitra G N. Iron-potassium interaction of nutrient balance in rice [J]. Journal of Potassium Researches, 1992, 8(4): 311-319.
- [40] 王强盛, 甄若宏, 丁艳锋, 等. 钾肥用量对优质粳稻钾素积累利用及稻米品质的影响 [J]. 中国农业科学, 2004, 37(10): 1444-1450.
Wang Q S, Zhen R H, Ding Y F, et al. Effects of potassium fertilizer application rates on plant potassium accumulation and grain quality of japonica rice [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(10): 1444-1450.
- [41] Celik H, Asik B B, Gurel S, et al. Effect of potassium and iron on macro element uptake of maize [J]. Zemdirbyste Agriculture, 2010, 97(1): 11-22.
- [42] 武 际, 郭熙盛, 王允青, 等. 钾肥运筹对小麦氮素和钾素吸收利用及产量和品质的影响 [J]. 土壤, 2008, 40(5): 777-783.
Wu J, Guo X S, Wang Y Q, et al. Effects of potassium fertilizer operation on the uptake and utilization of nitrogen and potassium, yield and quality of wheat [J]. Soil, 2008, 40(5): 777-783.
- [43] 孙 哲, 史春余, 刘桂玲, 等. 干旱胁迫与正常供水钾影响甘薯光合特性及块根产量的差异 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 1071-1078.
Sun Z, Shi C Y, Liu G L, et al. Effects of potassium fertilizer operation on the uptake and utilization of nitrogen and potassium, yield and quality of wheat [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(4): 1071-1078.