

# 研究论文



印度尼西亚东爪哇木薯试验地测产场景。照片提供: IPI。

## 印度尼西亚东爪哇和中爪哇不同土壤类型上钾肥施用对木薯 (*Manihot esculenta* Crantz.) 的影响

Taufiq, A.<sup>(1)\*</sup>, Subandi<sup>(1)</sup>, and H. Suyamto<sup>(1)</sup>

### 摘要

东爪哇和中爪哇是印度尼西亚主要的木薯生产地。假设钾(K)的有效性是一定条件下木薯种植的限制因素,在4个地点,即玛琅、多隆亚公、沃诺吉利、加冷亚惹地区进行了6个年度钾肥施用量(0、30、60、90、120、180 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>)分两次施用(种植后1个月和3个月)处理,以及一个农民的习惯施肥处理的试验,以验证钾肥施用对木薯的影响。不同地区的土壤由中性(pH6.2~6.8)粉砂壤土向酸性(pH 4.6~5.1)黏土变化,相应的交换性钾(exch-K)的含量由高向低变化。除了1个处理氮磷肥的施用量分别为

200 kg N ha<sup>-1</sup>和60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>外,其他所有钾肥处理的氮磷肥的施用量分别为135 kg N ha<sup>-1</sup>和36 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>。尿素(46% N), SP36 (36 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和氯化钾(60% K<sub>2</sub>O)分别作为氮磷钾的肥源。钾肥的施用量对收获期的土壤性质几乎

<sup>(1)</sup> 印度尼西亚豆科和块茎作物研究所 (ILETRI), Jl. Raya Kendalpayak km 8, PO Box 66, Malang 65101 East Java, Indonesia

\* 通讯作者: [ofic\\_rilet@yahoo.com](mailto:ofic_rilet@yahoo.com)

注:国际钾肥研究所 (IPI) 感谢IPI前东南亚项目协调员Mr. Alexey Shcherbakov对这个项目的大力支持。

没有影响。3处试验地作物对施钾量的反应小到可以忽略不计,而只有多隆亚公地区反应较大,在这里木薯的块茎产量从 $19 \text{ Mg ha}^{-1}$ 增加到 $35 \text{ Mg ha}^{-1}$ 。木薯的最高产量出现在玛琅地区相对肥沃的土壤上,为 $40 \sim 50 \text{ Mg ha}^{-1}$ ,但这仍低于公认の木薯产量潜力。然而,一些证据表明,钾肥施用及其他手段来改善这些地区的木薯生产有相当大的潜力。钾素营养的主要问题,四个地区各有不同的意义,但共同点似乎是可溶解钾的储备在到达根系吸收区之前会从根际快速损耗掉,这也包括施用的肥料。必须考虑热带季节降水特征促进了土壤风化和养分浸出。讨论了季节性钾肥施用量分次较为频繁的施用、补充堆肥的有机质以提高土壤肥力和促进木薯作物生长发育。

## 引言

木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 用途广泛,如可作食品、动物饲料以及众多行业的原材料。因此,对木薯生产的需求很可能增加。在印尼,木薯在粮食安全中处于较高的战略地位,因为木薯消费总量的64%用作食物。最近,已实施开发木薯作为生物燃料原料的研究。

印度尼西亚是世界上第四大木薯生产国,位于巴西、尼日利亚和泰国之后。Sutyorini和Waryanto (2013) 研究表明,2009~2013年,木薯的收获面积下降了3% (从2009年的118万ha下降到2013年的114万ha),但单产增长了12%,由 $19.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ 增加到 $21.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ 。2013年,东爪哇和中爪哇的木薯种植面积分别占全国木薯种植总面积的16%和15%,平均产量为 $23 \text{ Mg ha}^{-1}$ 。2009~2013年,东爪哇和中爪哇的木薯种植面积下降了15%,而木薯产量却分别增加了25%和3%。

通过采用适当的栽培技术,木薯产量可以达到 $25 \sim 40 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Wargiono *et al.* 2006)。Taufiq *et al.* (2009) 报道,当氮(N)、磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )、钾( $\text{K}_2\text{O}$ )肥的施用量分别为 $70$ 、 $30$ 、 $115 \text{ kg ha}^{-1}$ 时,木薯的产量可以达到 $63 \text{ t ha}^{-1}$ 。木薯吸收的营养数量较高。Howeler (1981) 发现每生产 $21 \text{ t ha}^{-1}$ 的新鲜块茎,木薯需要吸收氮(N)、磷(P)、钾(K)的量分别为 $87$ 、 $37.6$ 、 $117 \text{ kg ha}^{-1}$ 。Wargiono *et al.* (2006) 报道,当木薯产量为 $30 \text{ t ha}^{-1}$ 时,需要分别吸收 $147.6$ 、 $20.7$ 、 $148.8 \text{ kg ha}^{-1}$ 的氮(N)、磷(P)、钾(K)。Amanullah *et al.* (2007) 研究表明当新鲜块茎产量为 $20 \sim 35 \text{ t ha}^{-1}$ 时,需求氮(N)、磷(P)、钾(K)的营养元素比例比较稳定,分别约为 $6$ 、 $0.75$ 、 $6 \text{ kg ha}^{-1}$ 。这些数据表明木薯对钾吸收需求与氮的需求一样高。Putthacharoen *et al.* (1998) 的研究表明,在收获物中,木薯吸收的钾素同玉米和花生吸收的钾素一样高。

木薯可以种植在不同的农业生态系统中。这种作物能适应干旱的环境以及低的土壤肥力。楠榜、东爪哇、中爪哇是印尼主要的木薯生产省份。这些地区的土壤类型主要是淋溶土、老成土、始成土,肥力较差 (Suryana, 2007)。15年前,东爪哇和中爪哇大多数的木薯种植园仅为单作。然而,由于木薯价格较低或不稳定,农民经常倾向于木薯与玉米、旱稻、花生间作。

很多研究 (Maduakor, 1997; Suyamto, 1998; Nguyen *et al.*, 2002; Ispandi and Munip, 2005) 已经表明施用钾肥会对木薯产量带来有利的影响,特别是在贫瘠的土壤上施用钾肥,土壤中可交换的钾离子含量处于临界阈值以下,即低于 $0.15 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1} \text{ 土}$  (Howeler, 1981)。此外,已有研究表明如果连续5年不施用钾肥,种植の木薯产量明显下降 (El-Sharkawy和Cadavid, 2000)。不仅如此,木薯产量的减少受到钾肥施用的严重影响。总之,木薯对施肥的反应很大程度上取决于当地的土壤属性和农民的施肥措施。过去,大多数的印度尼西亚木薯种植户不施用任何肥料 (FAO, 2005)。即使那些施用肥料的种植户,也是经常习惯于施用高水平的氮肥,较少的磷肥,不施用钾肥。收获时,几乎所有的木薯生产物都被带出土地,因此土壤肥力,特别是土壤钾素量迅速下降。因此,根据当地土壤属性和木薯种植需求优化钾肥施用量非常重要。

当前这个3年 (2011/12~2013/14) 试验的研究目标为:

- 1) 检验印尼东爪哇和中爪哇4种典型的土壤上的木薯对提高钾肥施用量的反应;
- 2) 与习惯施肥上的缺钾处理相比,验证钾肥施用对木薯产量的贡献;
- 3) 向木薯种植户和农业推广人员灌输平衡营养管理的经验,并进行成本及收益比率分析。本文的试验数据为连续多年的试验中最近两年或三年的试验结果。

## 材料与方法

### 种植日期及试验地点

田间试验安排在四个点 (地图1):

1. 东爪哇省玛琅区Kalipare的Sukowilangun村 (东经 $112^{\circ} 26' 51''$ , 南纬 $8^{\circ} 11' 03''$ , 海拔 $296 \text{ m}$ )。种植日期: 2013年11月12日。收获日期: 2014年9月10日。此试验持续了3年,各处理及对应小区的排列保持不变。
2. 东爪哇省多隆亚公区Tanggunggunung的Ngrejo村 (东经 $111^{\circ} 53' 04''$ , 南纬 $8^{\circ} 14' 08''$ , 海拔 $198 \text{ m}$ )。种植日期: 2013年11月19日。收获日期: 2014年9月1日。此试验持续了3年,各处理及对应小区的排列保持不变。
3. 中爪哇省沃诺吉利区Ngadirojo的Molokokulon村 (东经 $111^{\circ} 0' 42.97''$ , 南纬 $7^{\circ} 47' 26.23''$ , 海拔 $325 \text{ m}$ )。种

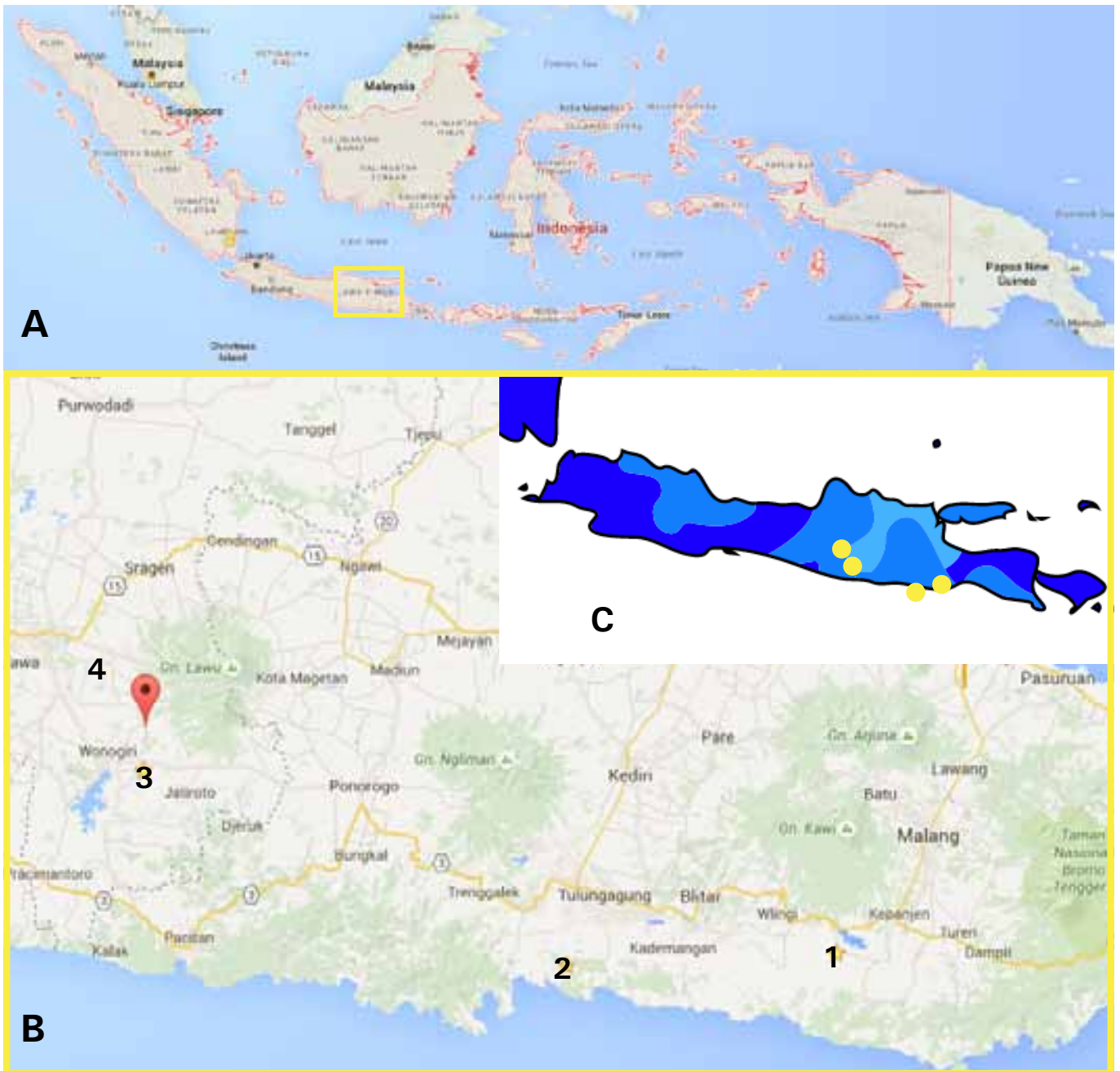
植日期: 2013年11月19日。收获日期: 2014年11月3日。此试验持续了2年, 但试验地块发生变化。

4. 中爪哇省加冷亚惹区Jatipuro的Jatipuro村 (东经 111° 55' 95", 南纬7° 44' 31.22", 海拔430 m)。种植日期: 2013年11月20日。收获日期: 2014年11月5日。此试验持续了3年, 各处理及对应小区的排列保持不变。

气候

印度尼西亚爪哇岛的气候属于热带气候, 然而地区间的气候显著差异 (图1c), 尤其是降水 (图 1)。

4个试验点, 雨季 (11 - 4月) 和旱季 (5 - 10月) 均有明显区别。最干旱的地区是玛琅地区, 年降水量约1300 mm。中爪哇地区的雨水显著较多, 年降水量超过2100 mm, 而



地图1. 印度尼西亚地图 (A), 四方形黄色区域为试验地; Malang (1)、Tulungagung (2)、Wonogiri (3) 和Karanganyar (4) 等为分布在印尼东爪哇和中爪哇的4个试验点 (B); 爪哇地区Köppen-Geiger气候分类为Equatorial (Af, dark blue), Monsoon (Am, blue), and Tropical savanna (Aw, light blue)。黄圈为试验地点 (C)。Google Maps (A and B); derived from: World Köppen Classification.Svg, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/#> (C)

多隆亚公地区的年降水量居中, 约1640mm (图1)。

土壤特性

表1给出了4个试验地点的土壤特性, 供试土样均采于最后一个生长季节开始时。各试验点的土壤质地显著不同, 玛琅Kalipare地区为粉砂壤, 多隆亚公地区为黏土, 沃诺吉利地区为粉砂质黏壤土, 加冷亚惹地区为重黏土。位于东爪哇省的试验点的土壤pH呈微酸性且接近中性, 位于中爪哇省试验点的土壤pH完全呈酸性, 根据Howeler (2002) 进行的土壤pH分类, 所有试验点的土壤pH (4.5 - 7.0) 适合木薯生长。所有试验点的土壤, 甚至是表层土壤有机碳 (C) 和总氮量很低, 这表明向土壤中施加有机质和氮肥可能会对木薯生长带来有利的影响。这正是农民经常施用高氮肥的原因。木薯对P和K的临界水平分别为8 ppm P (18 ppm P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 和0.15 meq K 100 g<sup>-1</sup> (Howeler, 1981)。除了多隆亚公地区底土层的有效磷较低外, 东爪哇省所有试验点表土层和底土层的有效磷含量较高。相反, 中爪哇省的试验点土壤中有效磷含量低于临界水平。

玛琅地区表土层和底土层的有效钾较高, 而多隆亚公地区表土层的有效钾高于临界水平, 底土层的

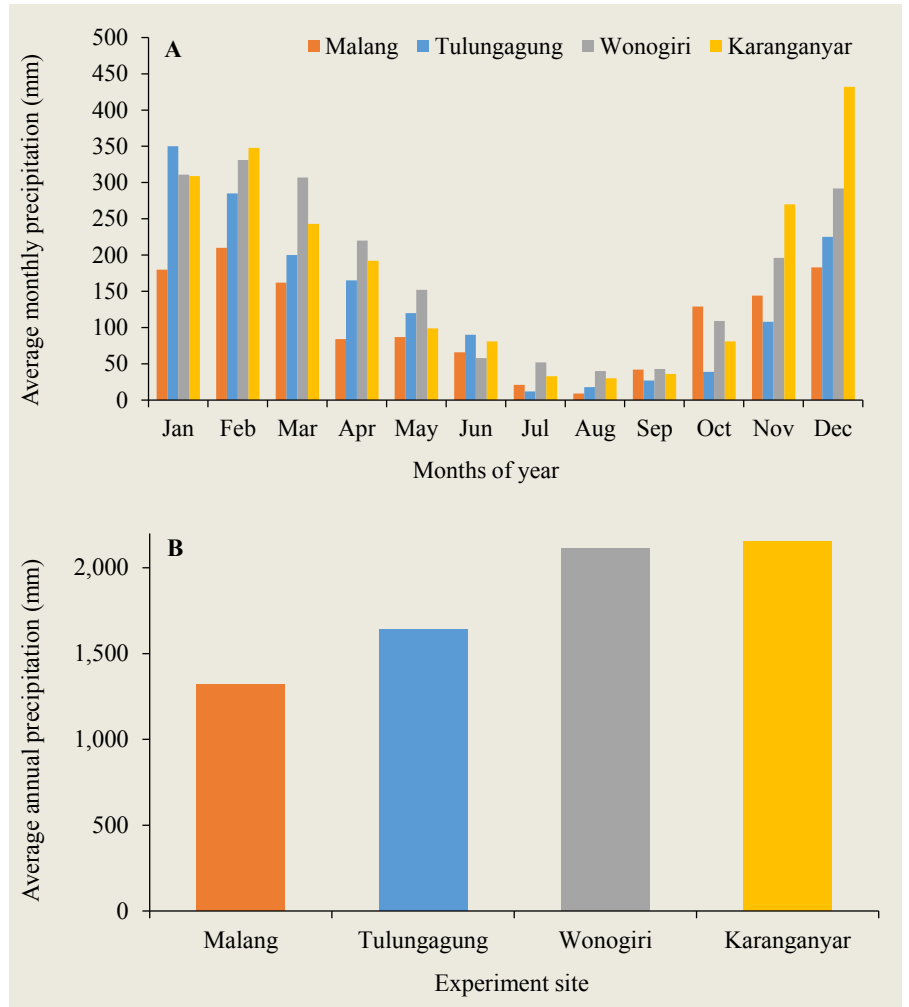


图1. 印尼东爪哇和中爪哇2000-2012年4个试验点的月平均 (A) 和年平均 (B) 降雨量  
Source: <https://www.worldweatheronline.com/>

表1. 印尼东爪哇和中爪哇4个试验地点的土壤特性。

Soil variables	East Java				Central Java			
	Kalipare-Malang		Tanggunggunung-Tulungagung		Ngadirojo-Wonogiri		Jatipuro-Karanganyar	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
Sand (%)	28	35	19	17	14	5	8	6
Silt (%)	55	54	39	27	54	33	39	35
Clay (%)	17	19	42	44	32	62	53	59
Texture	Silt loam	Silt loam	Clay	Clay	Silty clay loam	Clay	Clay	Clay
pH-H <sub>2</sub> O (1:2.5)	6.6	6.8	6.2	6.2	4.6	5.0	5.1	5.2
C-organic (%)	1.09	1.39	1.67	1.66	1.46	1.40	1.06	1.08
N-total (%)	0.08	0.07	0.12	0.12	0.11	0.09	0.07	0.07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm)	26.9	30.3	28.5	4.78	13.5	3.20	5.05	4.78
Exch-K (cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> )	0.98	0.93	0.21	0.15	0.27	0.28	0.34	0.38
Exch-Ca (cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> )	2.03	13.1	28.6	29.4	2.31	2.34	3.94	2.02
Exch-Mg (cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> )	3.65	3.30	7.30	7.11	0.72	0.75	0.60	0.63

表2. 印尼东爪哇和中爪哇2013/2014年4个试验详细设计。

Treatment	Fertilizer dose			K <sub>2</sub> O
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		
		East	Central	
-----kg ha <sup>-1</sup> -----				
T <sub>1</sub> Farmer's practices <sup>(1)</sup>				
T <sub>2</sub>	135	36	60	0
T <sub>3</sub>	135	36	60	30
T <sub>4</sub>	135	36	60	60
T <sub>5</sub>	135	36	60	90
T <sub>6</sub>	135	36	60	120
T <sub>7</sub>	200	60	60	180

<sup>(1)</sup>Farmer's practices are described in Table 3.

有效钾处于临界水平。中爪哇省的2个试验点可交换性钾(exch-K)较高(表1)。

#### 试验设计

试验设7个处理,完全随机区组设计,重复3次。其中包括6个不同的钾肥施用量处理(0、30、60、90、120、180 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>)及一个当地农民的习惯施肥处理。表2详细描述了各试验地不同处理的施肥方案。尿素(46% N)、SP36(36 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和氯化钾(60% K<sub>2</sub>O)分别作为氮磷钾肥源。氮肥共施用3次,即在作物种植(MAP)后的1、3、5个月分别施用氮肥年度用量的25%、50%、25%。磷肥和钾肥在作物种植(MAP)后的1、3个月平均分成两份施用。磷钾肥均为穴施,其中磷肥距离植株7~10 cm,钾肥更靠近植株,施肥后覆土。农民的习惯施肥量因个人操作及试验点的不同而变化(表3)。

#### 试验田间实施

土壤耕作后起垄,沿着垄进行木薯茎插(品种为Malang-4),行距100 cm,株距100 cm(种植密度为10000株ha<sup>-1</sup>),只有Kalipare试验点的行距为125 cm,株距100 cm(种植密度为8000株ha<sup>-1</sup>)。除了Kalipare试验点的小区面积为6.25 m×8 m(8 m的长度包含5行)外,其他所有试验点的小区面积均为5 m×8 m。木薯作为单一作物种植,没有进行套种。

表3. 印尼东爪哇和中爪哇2013/2014年4个试验农民习惯施肥处理。

Site	Fertilizer rate			Equivalent to		
	Urea	SP36	Phonska	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
	(46% N)	(36% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	15-15-15			
-----kg ha <sup>-1</sup> -----						
Malang	400	0	200	214	30	30
Tulungagung	500	0	200	260	30	30
Wonogiri	600	300	0	276	108	0
Karanganyar	0	0	550	83	83	83

在种植后的一个月进行间苗,每垄留2苗。在播种后1、2、3个月根据田间情况人工除草。按要求施用化学农药进行病虫害防治。大约种植后10个月进行作物收获。

#### 数据收集

- 取0~20、20~40 cm的初始土壤进行分析,包括pH(土壤:水为1:2.5)、P(Bray-1提取方法)、K、Ca、Mg(使用1 N NH<sub>4</sub>-acetate pH为7的提取液提取)及有机碳(Kurmis方法)。用土钻从各小区有规律的采取9个土壤样品。相同深度的土样混合在一起带回ILETRI土壤和植物实验室进行分析。
- 收获时测定叶、茎和块茎的干物质含量(每小区取3棵植株)。叶和茎在105°C烘干,块茎在60°C烘干,直到恒重。
- 在收获时,测定叶片(包括叶柄)、茎和块茎中钾的含量。
- 在收获时从各小区随机取土样(根区0~20 cm)进行土壤钾素的分析。
- 在收获时测定各试验小区的新鲜块茎产量。
- 收获时在ILETRI食品科学实验室采用水解法测定块茎淀粉含量。

使用Statistix 3.0统计软件和MSTAT-C对收集的数据进行方差分析和均值比较。

2013/14收获时的土壤分析显示了有趣的变化,即由于试验期间不同的钾肥施用量造成表层土壤的肥力已经发生了变化(图2)。位于东爪哇省的试验点,当钾肥的施用量小于60 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>时,土壤中的交换性钾保持不变甚至略有下降,当钾肥的施用量较高时,这个参数往往易于增加或保持较高水平。不管施肥管理如何,多隆亚公的土壤交换性钾远远低于玛琅的。中爪哇省的加冷亚惹,试验的第一年(2012/13)交换性钾大大增加,从0.17 cmol<sup>+</sup> kg<sup>-1</sup>增加到0.46 cmol<sup>+</sup> kg<sup>-1</sup>,但第二年下降到0.15~0.29 cmol<sup>+</sup> kg<sup>-1</sup>,对钾肥的施用反应较小(图2)。中爪哇省的第二个试验点为沃诺吉利,因为每个生长季进行试验的地块不同,所以连续年份之间没有可比性。然而,在2013/14年的试验

中,收获时交换性钾呈线性增加,即从钾肥施用量为0的处理的0.22 cmol<sup>+</sup> kg<sup>-1</sup>,增加到钾肥施用量为180 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>处理的0.66 cmol<sup>+</sup> kg<sup>-1</sup>。在2012/13的试验中,土壤较肥沃,交换性钾的含量为0.83~1.08 cmol<sup>+</sup> kg<sup>-1</sup>,对钾肥的施用量的反应非常轻微。

木薯的生长发育

在2013/14生产季木薯的干物质生产以玛琅和沃诺吉利的最高,为17~22.5Mg ha<sup>-1</sup>,加冷亚惹的居中(14~16 Mg ha<sup>-1</sup>),多隆亚公的最低(7~15 Mg ha<sup>-1</sup>) (图3A)。除了多

隆亚公,木薯干物质生产对钾肥施用量没有显示出任何一致的响应。然而在多隆亚公,干物质生产随钾肥施用量的增加而稳步增长(图3A)。

收获时,中爪哇省试验点的茎生物量显著较大,为6~7 Mg ha<sup>-1</sup>,而东爪哇省的玛琅和多隆亚公的茎生物量分别为3~3.7 Mg ha<sup>-1</sup>和1.3~3.5 Mg ha<sup>-1</sup> (图3 B)。只在多隆亚公观察到茎生物量对钾肥施用量的明确响应。

块茎产量及干物质分配

不同试验点的木薯块茎产量差别较大(图4)。新鲜块茎产量最高的出现在玛琅,为40 Mg ha<sup>-1</sup>。在这里,尽管各处理之间的鲜木薯产量存在一些显著差异,但是并没有发现鲜块茎产量对不同钾肥施用量产生一致的响应。沃诺吉利的鲜块茎产量仅次于玛琅的,为31~47 Mg ha<sup>-1</sup>,在这里同样没有显示出鲜块茎产量对钾肥施用量显著的响应。多隆亚公试验点观察到了一个重要且积极的响应,当钾肥

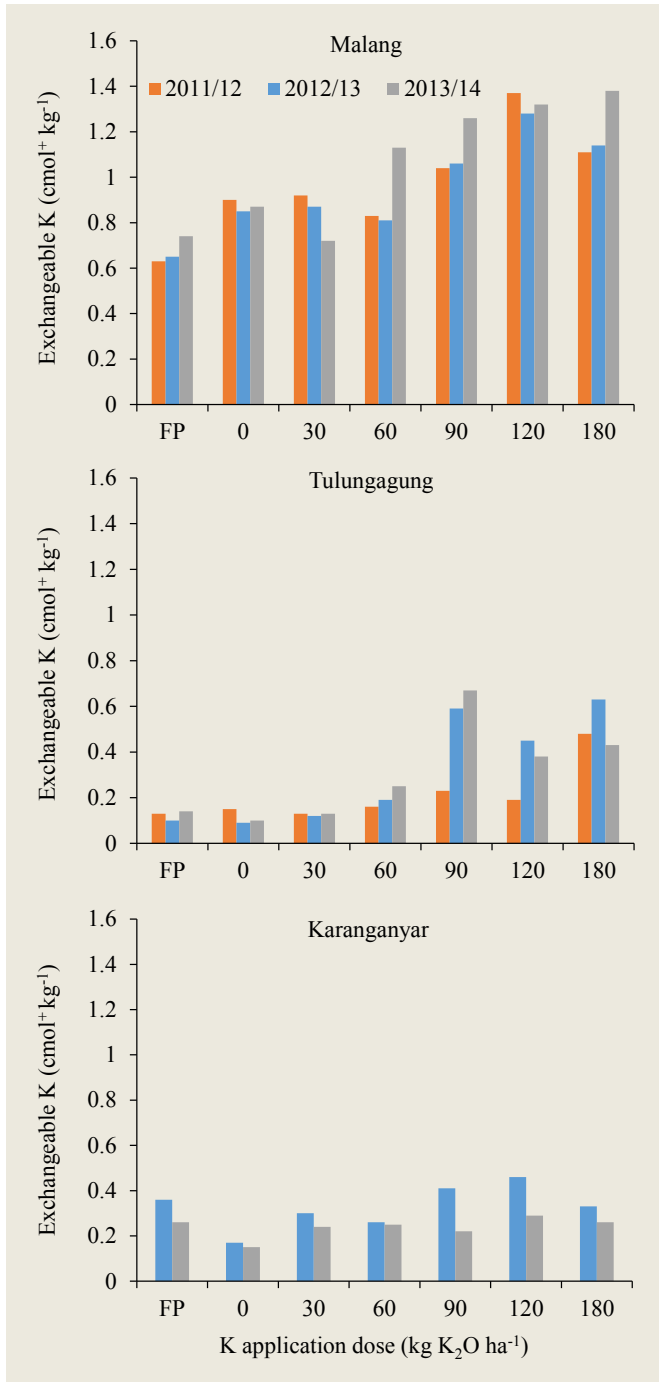


图2. 印尼东爪哇和中爪哇3个试验点施钾量对根区表土(0-20cm) 交换性钾含量的影响

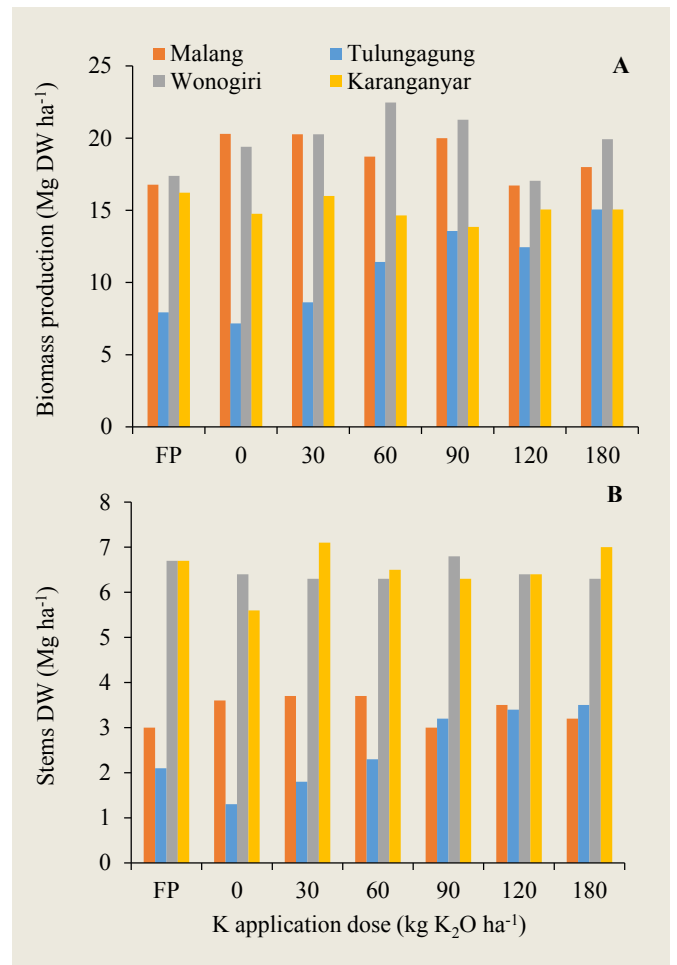


图3. 2013/2014收获季4个试验点施钾量对干物质重(A) 和茎干重(B)

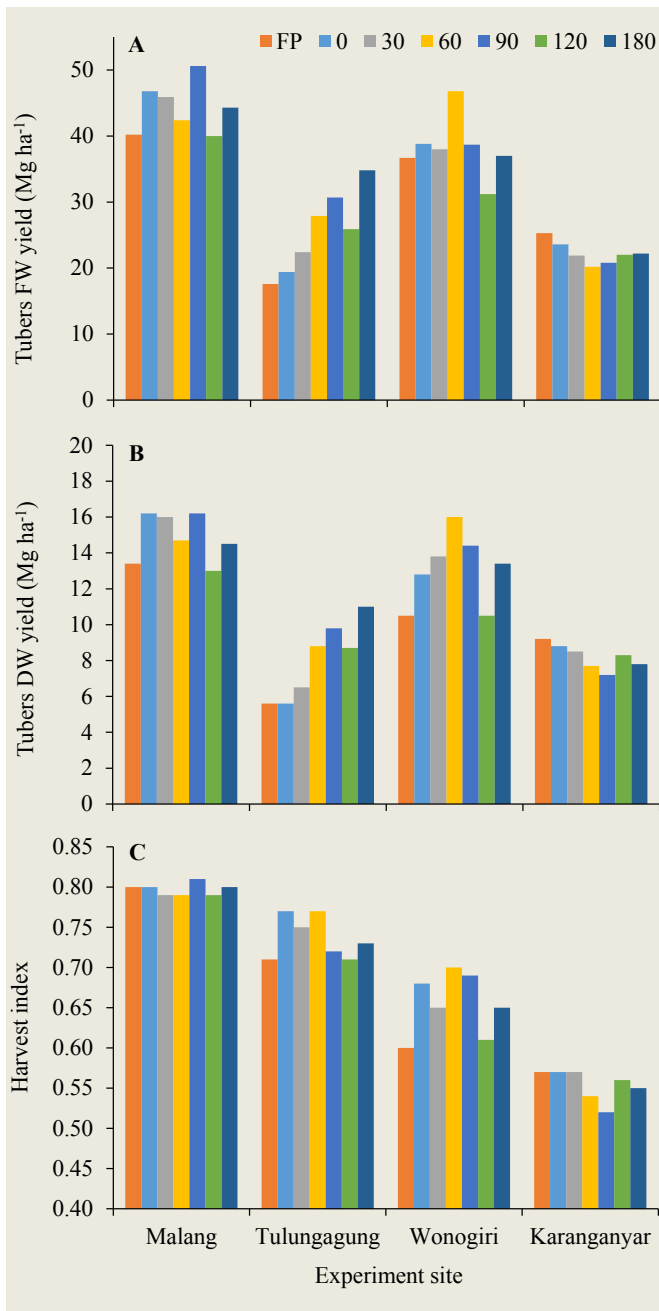


图4.钾肥施用量对4个试验点2013/14收获季鲜重(A)和干重(B)木薯产量,以及收获指数(C)的影响。

的施用量从0增加到180 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>时,鲜块茎产量从19 Mg ha<sup>-1</sup>增加到35 Mg ha<sup>-1</sup>。相反,在加冷亚惹,鲜块茎产量最低,且当钾肥施用量较高时产量有下滑倾向(图4A)。

检测木薯干块茎产量,得到的结果与鲜块茎产量差异不大。然而,在沃诺吉利试验点可以观察到较清晰响应,

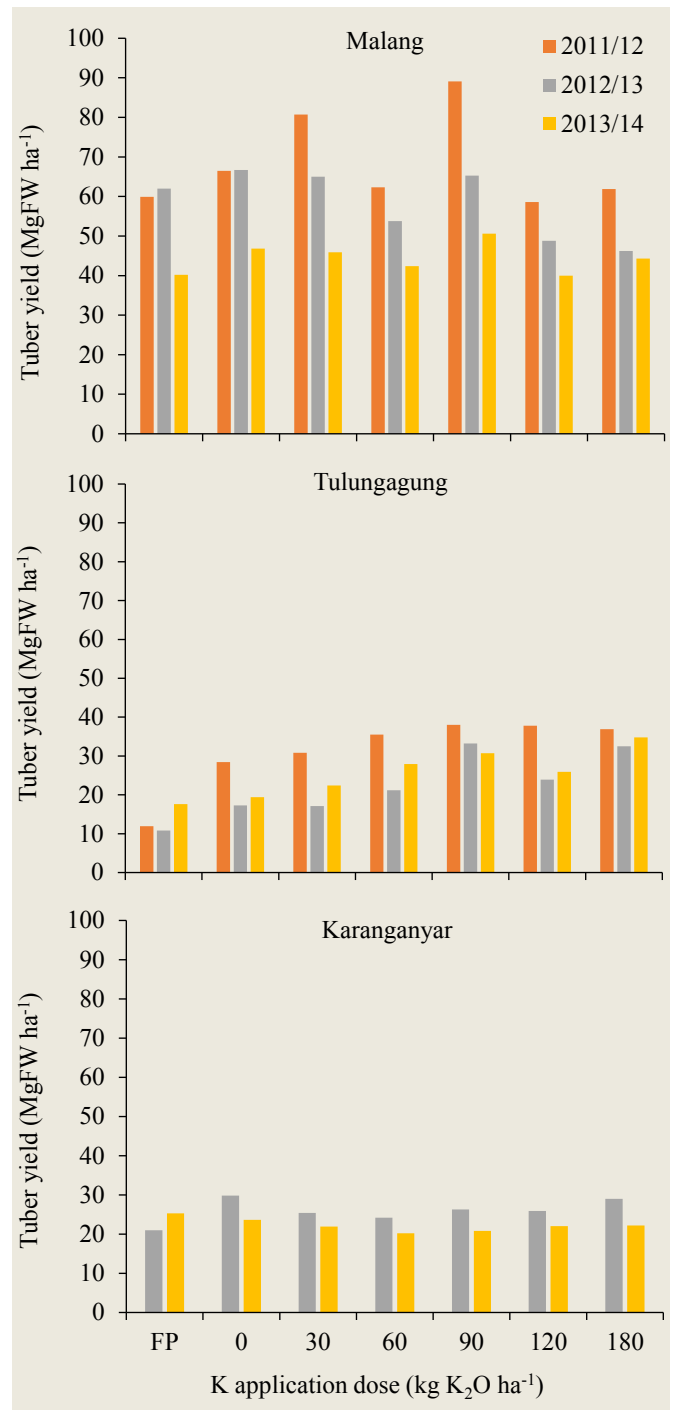


图5.钾肥施用量对东爪哇 (Malang and Tulungagung)和中爪哇 (Karanganyar) 分别连续三年或两年的新鲜木薯产量的影响。

即当钾肥的施用量从0增加到60 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>时,干块茎产量逐渐增加,但进一步增加钾肥的施用量干块茎产量下降(图4B)。

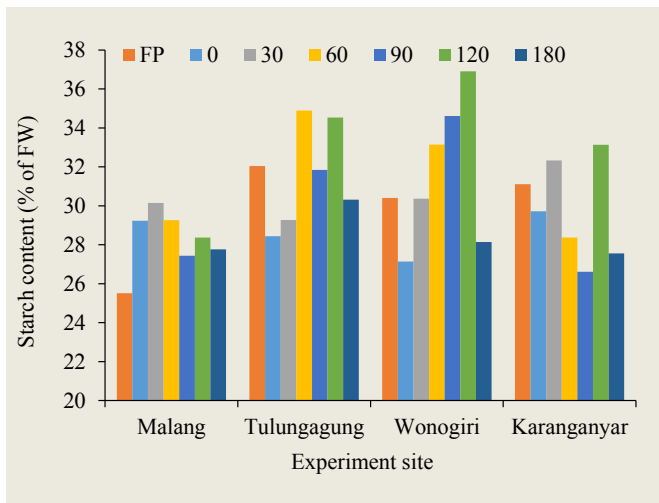


图6.钾肥施用量对2013/14季4个试验点木薯块茎淀粉含量的影响。

收获指数 (HI) 表达干物质在果实 (块茎) 和其他植物器官 (茎和叶) 之间的分配, 计算公式为:  $HI = \text{块茎}_{DM} / (\text{茎} + \text{叶} + \text{块茎})_{DM}$ 。不同试验点的HI之间有显著差异, 然而, 由目前的试验结果还不能得出钾肥施用量对HI的确定效应 (图4C)。

通过连续多年的试验得到的块茎产量, 既能从短期又能从长期的角度更好的观察钾肥施用带来的影响 (图5)。第一年的产量较高, 当钾肥的施用量为  $90 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$  时, 玛琅和多隆亚公试验点的块茎产量甚至分别达到  $89 \text{ Mg ha}^{-1}$  和  $38 \text{ Mg ha}^{-1}$ 。然而, 第二年玛琅试验点的木薯产量下降了16%, 第三年下降的更厉害, 与第一年相比约下降了66%。多隆亚公试验点的块茎产量第二年下降的相当尖锐 (28%), 但第三年略有反弹。加冷亚惹试验点的木薯产量也是在第一年较高, 第二年下降了13% (图5)。在整个试验过程中, 只有多隆亚公试验点的块茎产量对钾肥施用量产生显而易见的响应。

淀粉和钾的浓度

木薯块茎中积累的淀粉量平均占鲜重的28%~30% (图6)。虽然在玛琅试验点没有观察到钾肥施用量对淀粉积累产生显著影响, 但是多隆亚公和沃诺吉利试验点收获时块茎中淀粉浓度往往随着钾肥施用量增加而增加, 钾肥施用量增加到  $120 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$  时, 淀粉浓度增加了32%~37%, 但当钾肥的施用量达到最高时, 淀粉浓度增加幅度通常又回落到28%~30%。尽管加冷亚惹试验点不同处理之间的淀粉浓度存在显著差异, 但是钾肥施用量对其带来的影响不一致 (图6)。

不同试验点的植株地上器官中钾的浓度变化显著 (图7)。树叶中钾浓度为0.35%~2.31%, 而茎叶中钾浓度

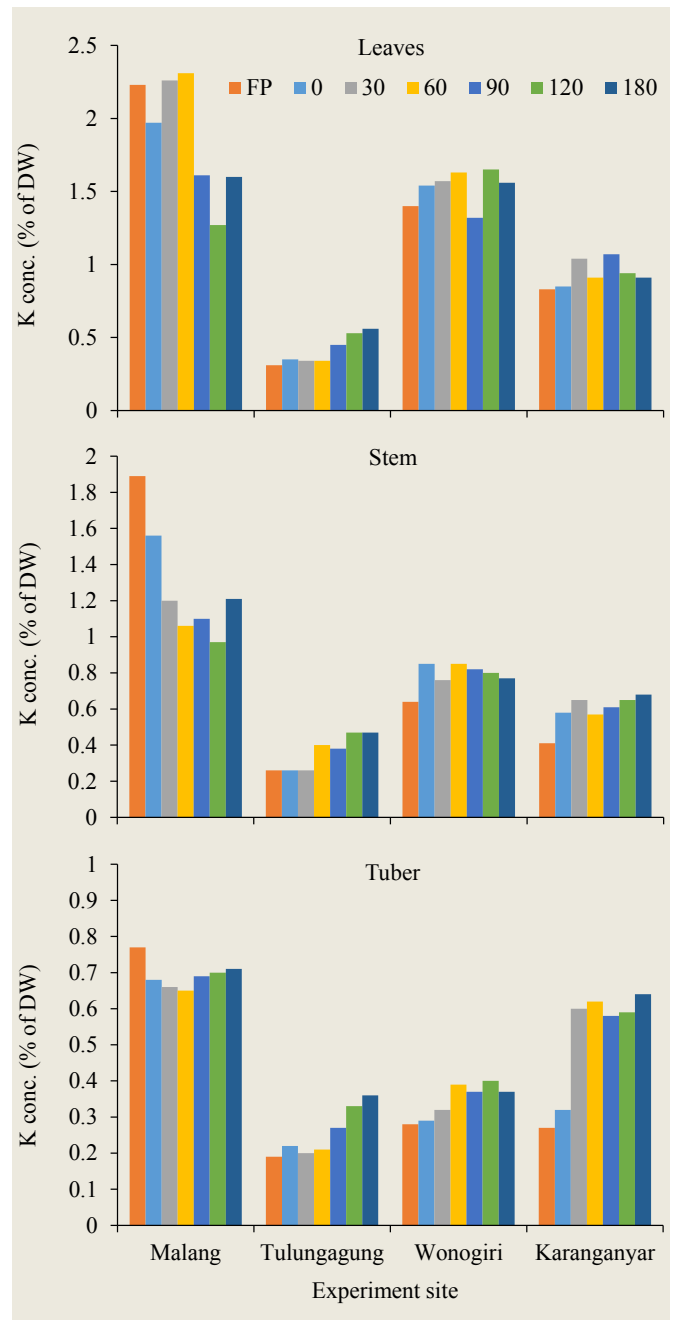


图7.钾肥施用量对木薯收获时薯块、茎、叶片中钾素含量的影响。

为0.26%~1.89%。叶片中钾的最高浓度出现在玛琅试验点, 当钾肥的施用量为0~60  $\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$  时, 叶片中钾的浓度超过2%, 但是继续提高钾肥的施用量, 叶片中钾的浓度会降至约1.5%。叶片中钾的最低浓度出现在多隆亚公试验点 (0.31%~0.56%), 显示当钾肥施用量超过  $60 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$  时, 叶片中钾的浓度随钾肥施用量增加而增加。沃诺吉利试验点, 叶片中钾的浓度差异非常小 (1.4%~1.56%),



表4.2013/14季不同试验点钾肥施用量对木薯带走的钾素量的影响

Treatment	K <sub>2</sub> O input	Equivalent K input	Experiment site			
			Malang	Tulungagung	Wonogiri	Karanganyar
			kg ha <sup>-1</sup>			
T <sub>1</sub>	FP <sup>(1)</sup>	FP <sup>(1)</sup>	168.4	16.8	74.8	55.0
T <sub>2</sub>	0	0	176.0	16.6	94.6	63.7
T <sub>3</sub>	30	24.9	162.9	18.8	94.7	101.2
T <sub>4</sub>	60	49.8	142.2	28.8	118.7	88.8
T <sub>5</sub>	90	74.7	157.7	41.2	110.0	83.9
T <sub>6</sub>	120	99.6	127.6	46.5	95.5	94.0
T <sub>7</sub>	180	149.4	146.3	59.2	101.7	99.8

<sup>(1)</sup>FP = 试验点农民习惯施肥。K<sub>2</sub>O 投入分别为: 30, 30, 0, and 83 kg ha<sup>-1</sup> (equivalent to: 24.9, 24.9, 0, and 69 kg K ha<sup>-1</sup>) 在四个试验点, Tulungagung, 在四个试验点.

随钾肥施用量的增加叶片中钾的浓度有轻微但显著的上升趋势。加冷亚惹试验点, 叶片中钾的浓度随钾肥施用量的变化趋势类似于沃诺吉利试验点的, 但变化范围更低 (0.83%~1.1.07%) (图7)。不同试验点木薯茎中钾浓度的差异非常类似于叶片中钾的浓度 (图7)。值得注意的是当钾肥的施用量较低时, 随钾肥施用量增加可以观察到玛琅试验点木薯茎中钾的浓度大幅下降。

块茎钾的浓度范围为0.2%~0.77% (图7)。记录显示块茎钾的最大浓度出现在玛琅试验点, 钾肥施用量对块茎钾的浓度影响非常轻微。其他3个试验点, 块茎钾的浓度较低, 但随钾肥施用量的增加而显著增加。多隆亚公试验点, 当钾肥的施用量超过90 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>时, 块茎钾的浓度对钾肥施用量的反应非常明显, 沃诺吉利试验点, 当钾肥的施用量低于30~60 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>时反应稍弱一点、加冷亚惹试验点, 钾肥的施用量为30 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>时呈非常急剧反应。

#### 作物带走的钾

通过测量作物不同器官的生物量及钾的浓度可粗略计算木薯带走的钾 (表4)。显然, 玛琅试验点大多数钾肥施用量处理下钾的带走量明显高于钾的投入。此外, 随钾肥施用量的增加移除的钾甚至倾向于下降。相反, 在多隆亚公试验点, 当钾的施用量为0时, 为17 kg K ha<sup>-1</sup>, 只占玛琅试验点相同情况下钾移除的10%, 随钾肥施用量的增加, 钾的移除稳步上升到59 kg K ha<sup>-1</sup>, 约占钾投入的40%。中爪哇省试验点, 大多数钾肥施用量处理下木薯作物移除的钾超过投入的钾; 只有钾的施用量为或超过120 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>时, 投入的钾超过移除的钾。两个试验点, 钾的移除率似乎只对低钾施用范围即30或60 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>有响应 (表4)。

#### 讨论

印尼是一个重要的木薯生产国, 可是, 木薯的平均产量却远低于该作物的潜在生产量。可以说, 印度尼西亚

许多地区可怜的木薯产量是由农民习惯施肥造成的, 经常忽略木薯对钾的需求。因此, 优化钾肥供应会带来较高的产量。在当前的研究中, 设计了各种不同的钾肥施用量, 最高达到180 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>, 试验在不同的土壤类型及气候条件下连续进行2~3年。最大的木薯产量出现在作物连续种植第3季 (2013/14) 的东爪哇省玛琅试验点, 为40~50 Mg ha<sup>-1</sup> (图4)。这些数据居于通常报道的各种土壤条件和施肥制度下的木薯的产量范围的上部 (Wargiono *et al.*, 2006)。然而, 更高产量的报道 (Taufiq *et al.*, 2009) 及试验的第1年或第2年获得的产量 (图5) 指出合理的更高的生产潜力。此外, 其他3个试验点木薯块茎的产量相当低 (中爪哇省沃诺吉利) 或明显较低 (多隆亚公和加冷亚惹, 图4)。显然, 在4个试验点, 发现钾的施用是有效的, 但是只有多隆亚公试验点钾的施用在经济上是有利的, 即使它的块茎产量仍相对可怜。钾肥施用仍然是一个重要的解决方案吗? 应采取什么样的措施来实现其潜在生产量?



照片2.2013/14季Wonogiri试验点木薯鲜产最高。照片拍摄 A.Taufiq。

钾是植物生长和发育所必需的 (Marschner, 1995)。如果没有肥沃的土壤提供钾素, 必须通过施肥提供钾以确保满意的作物性能和产量。钾在作物生长发育中的糖分运输和淀粉积累过程中起着重要作用 (Zorb *et al.*, 2014)。因此, 淀粉积累农作物如马铃薯、小麦和玉米 (Pettigrew, 2008) 以及木薯是非常重要的钾消费者。事实上, 木薯对钾的需求很高, 就像这个研究中得出的作物带走钾量显示的一样 (表4), 将来如果产量预期进一步提高, 对钾素的需求也预计将进一步增加。然而, 作物带走的钾往往远高于钾的投入; 虽然各试验点的施肥制度类似, 但作物性能和产量存在巨大的差异; 作物对钾肥施用量的响应很差或不是满意。这些不符之处需要进一步的深入解释。

植物对的钾吸收速度取决于土壤性质、气候 (温度和季节降水特征) 和施肥管理。不同土壤类型的钾的有效性大大不同, 并受土壤理化性质的影响。为了简化土壤中复杂的钾动力学, 根据其植物的有效性, 土壤中的钾通常被分为4种: 水溶性钾、可交换性钾、非交换性钾、结构性钾 (Zorb *et al.*, 2014)。水溶性钾能被植物直接利用, 但易受到被淋溶的潜在威胁。可交换性钾通过静电约束被吸附在复杂的黏土矿物和腐殖质的表面 (Barre *et al.*, 2008)。这两种钾通常被认为是容易被作物吸收利用的。然而, 这两种钾的储备往往非常小, 仅分别占土壤中总钾量的1.1%~0.2%和1%~2% (Sparks, 1987)。非交换性钾和结构性钾被认为是对植物缓效的或者无效的钾源。然而, 从长远来看, 这些类型的储备钾也可大大有助于植物钾的供应 (Pal *et al.*, 2001)。

土壤中的有效钾和无效钾的数量因土壤类型而变化很大, 且土壤中不同形态的钾储之间存在动态平衡。因此, 众多的土壤理化性质、植物和土壤之间的相互作用以及土壤微生物活动影响了土壤中钾的固定和释放。

钾固定或释放的程度取决于土壤黏土矿物的类型及它的电荷密度, 含水量, 竞争离子、pH。土壤湿润, 此外频繁的干湿交替可促进土壤风化和钾的释放。土壤溶液中H<sup>+</sup>浓度 (通过土壤pH显示) 似乎扮演着一个关键角色, 通过增强H<sup>+</sup>对K<sup>+</sup>的交换, 钾从黏土矿物中释放。较强的季节降水、高温及土壤呈酸性联系在一起促进了土壤风化、钾的释放及植物钾的有效性, 但也促进了速效钾通过淋溶的损失。这些条件也提高了土壤有机物的降解和矿化。众所周知, 有机酸、植物根系渗出的体液及某些微生物菌丛, 通过形成金属有机复合物和增强H<sup>+</sup>对K<sup>+</sup>的交换, 从而促进土壤矿物的风化 (Hinsinger and Jaillard, 1993; Wang *et al.*, 2011)。据报道, 根际土壤溶液中钾的损耗低于阈值

水平 (10~20 μM) 是一个激活根系分泌机制的关键信号 (Hosseinpur *et al.*, 2012; Schneider *et al.*, 2013)。

施肥是必需的, 不仅能确保而且还能维持作物生长的适当的可溶性钾的供应。因此, 对于优化钾肥管理实践, 识别和理解能调节土壤有效钾的动态因素, 以及改变发生在当地特定条件下的作物需求是至关重要的。因此, 由于产量和作物对施肥的反应之间存在较大的差异, 每个试验地的结果需要分别讨论, 进行个案研究。

玛琅Kalipare试验点的土壤是粉砂壤土, pH呈中性, 交换性钾相对较高 (表1), 年降水量最低, 仅为1317 mm (图1)。在这里获得了高的且对钾肥施用无响应的块茎产量 (图4), HI高, 作物带走的钾很高 (表4), 这表明, 土壤肥力可以提供作物对钾需求的大多数, 仅需要施用少量 (30 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>) 的钾肥就能维持这种状态。据推测, 这个钾肥施用量分2次施用, 即在12月和2月, 作物生长周期的开始和雨季 (图1) 中间, 大部分多余的钾肥还没有被作物吸收利用就会从根际处淋失掉。此外, 随钾肥施用量的增加, 作物带走的钾下降, 这可能表明了, 所运用的过度集中施用钾肥方式打断了土壤钾释放和作物吸钾之间的脆弱平衡。然而, 为了进一步提高这些条件下的木薯块茎产量, 应考虑更高的钾肥施用量, 并沿着作物的生长季分次施用5~6次。值得注意的是, 玛琅试验点高有效钾 (图2) 的情况下, 茎在作物生物量中所占得比值是有限的 (图3), 表明了钾素在干物质生产和分配中的管理角色。

相反, 多隆亚公Tanggunggunung试验点的土壤是粘土质的, 酸性更强 (pH 6.2), 交换性钾非常低 (表1), 年降水量为1640 mm。这个试验点的木薯块茎产量最低。然而, 所有参数对钾肥施用量的反应是显著的和积极的, 包括生物量生产 (图2)、块茎产量、HI (图4)、淀粉 (图6)、钾的浓度 (图7)。作物带走的钾与钾肥的施用量密切相关, 说明农作物严重依赖施肥。然而, 增加钾肥的施用量, 钾的利用率从75%急剧下降到39% (表4)。这些结果表明, 作物利用施用的钾肥的机会非常有限, 大部分的肥料都被浪费掉了。同于前面的个案研究, 沿作物的种植季节分次施用钾肥可能会拓宽作物吸钾的机会, 从而增加钾的利用率, 此外, 还可增强作物的性能和产量。

中爪哇省的土壤pH较低 (4.6~5.2), 加之年降水量 (2150 mm) 高, 促进了黏土的快速风化, 固定态的钾大量释放成可溶性的钾。因此, 依靠土壤中的有效钾, 就可获得相当大的块茎产量 (虽然差强人意) (图4)。雨季大部分的可溶性钾容易被淋失掉。此外, 在此期间 (11-4月, 图1) 任何额外施加的钾肥在达到植物根系前可能会被冲走 (Lambin Meyfroidt, 2010), 这解释了应对钾肥施用量

的可怜响应。N/K营养比例严重失调可能以牺牲块茎生产为代价促进了茎增长(图3),导致HI下降(图4)。毫无疑问,高效的钾肥供应应该能提高木薯作物的性能。处于中爪哇省的环境下,应该在木薯种植后的30天左右进行第1次钾肥施用,因为此时新的须根已扎入土壤中并开始运作(Alves, 2002)。剩余的年度钾肥施用量应该分成小份,沿作物的生长季节频繁的施用,最好在4~6月期间施用,因为此时降水量居中。

小心注意两个问题,虽然不一定与钾营养有关,但可能有助于提高热带地区的木薯种植,即土壤改良剂和作物轮作。有机质缺乏通常与土壤颗粒的松散联系在一起,并由此引起的水土流失和可怜的阳离子交换量(Don *et al.*, 2010; Prabowo and Nelson, 2015)。农民的习惯做法是木薯收获后,所有地上部的残留物质被清除掉,虽然这样做是出于植物检疫的原因,但是会加速土壤退化过程。木薯种植上施用有机肥料的做法,已被证明能提高作物的营养吸收和块茎产量,降低土壤养分的消耗(Amanullah *et al.*, 2007)。沿着种植行沟施有机堆肥,追施肥料,直接条施土壤改良剂(如施石膏降低土壤酸度),将会促进根系扩张到新的肥沃的土壤空间,从而提高养分吸收和作物性能。从长远来看,重复这样的操作方法预计将会使土壤特性得到恢复。

木薯经常连续多年单作。交换性钾积累的证据,即无论何时它都会发生在高钾施用量的处理(图2)下,需要作进一步研究;在种植季节进行土壤采样也是必要的。第1年的块茎产量(图5)全都减少应该引起重大关注。作物物种,包括木薯,可能有各自的特定的需求,连续的单一作物制可能会耗尽必需营养素,从而抑制作物的性能。因此,只要有可能,建议作物轮作。

总之,在东爪哇和中爪哇4个试验点中,有3处试验点的木薯对高钾施用量的响应相当令人失望。在大多数情况下,块茎产量远低于其产量潜力,相比农民的习惯施肥的产量,增加产量太小,甚至可以忽略不计。然而,有相当多的迹象表明,如果适当地施用钾肥,可能会大幅提高木薯性能和产量。钾肥施用的成本和收益比率分析是不成熟的,仍然需要进一步的研究。植物钾营养必须遵守的一个基本原则:保持土壤中的交换性钾处于一个恒定的可用的水平,以与当前需求相匹配。因此,年度钾肥施用量应分次施用,结合降水情况、作物物候学(如块茎增长长期)和土壤属性沿整个作物生长季节来分配。应该特别注意酸性土壤(Taufiq *et al.*, 2015)上钾的损耗速率非常快。

## 参考文献

- Alves, A.A.C. 2002. Cassava Botany and Physiology. *In*: Hillocks, R.J., J.M. Thresh, and A.C. Bellotti (eds.). Cassava: Biology, Production and Utilization. CABI Publishing, New York. p. 67-89.
- Amanullah, M.M., K. Vaiyapuri, K. Sathyamoorthi, S. Pazhanivelan, and A. Alagesan. 2007. Nutrient Uptake, Tuber Yield of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) and Soil Fertility as Influenced by Organic Manures. *J. Agron.* 6:183-187.
- Barre, P., C. Montagnier, C. Chenu, L. Abbadie, and B. Velde. 2008. Clay Minerals as a Soil Potassium Reservoir: Observation and Quantification through X-ray Diffraction. *Plant Soil* 302:213-20.
- Don, A., J. Schumacher, and A. Freibauer. 2010. Impact of Tropical Land Use Change on Soil Organic Carbon Stocks - A Meta-Analysis. *Global Change Biology* 17:1658-1670.
- El-Sharkawy, M.A., and L.F. Cadavid. 2000. Genetic Variation within Cassava Germplasm in Response to Potassium. *Expl. Agric.* 36:323-334.
- FAO. 2005. Fertilizer Use by Crop in Indonesia. First version. FAO, Rome. 62 p.
- Hinsinger, P., and B. Jaillard. 1993. Root-Induced Release of Interlayer Potassium and Vermiculitization of Phlogopite as Related to Potassium Depletion in the Rhizosphere of Ryegrass. *J. Soil Sci.* 44:525-34.
- Hosseinpur A.R., H.R. Motaghian, and M.H. Salehi. 2012. Potassium Release Kinetics and its Correlation with Pinto Bean (*Phaseolus vulgaris*) plant indices. *Plant Soil Environ.* 58:328-33.
- Howeler, R.H. 1981. Mineral Nutrition and Fertilization of Cassava. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Colombia. 52 p.
- Howeler, R. 2002. Cassava Mineral Nutrition and Fertilization. *In*: Hillocks, R.J., J.M. Thresh, and A. Bellotti (eds.). Cassava: Biology, Production and Utilization. Natural Resources Institute, University of Greenwich, U.K. Centro Internacional de Agricultura Tropical, (CIAT), Cali, Colombia. p. 115-147.
- Ispandi, A., and A. Munip. 2005. Efektifitas pengapuran terhadap serapan hara dan produksi beberapa klon ubikayu di lahan kering masam (The Effectiveness of Liming to Nutrient Uptake and Yield of Cassava Clones on Acidic Dryland). *Ilmu Pertanian* 12(2):125-139.
- Lambin, E.F., and P. Meyfroidt. 2010. Land Use Transitions: Socio-Ecological Feedback versus Socio-Economic Change. *Land Use Policy* 27:108-118.
- Maduakor, H.O. 1997. Effect of Land Preparation Method and Potassium Application on the Growth and Storage Root Yield of Cassava in an Acid Ultisol. *Soil and Tillage Research* 41:149-156.

- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, New York.
- Nguyen, H., J.J. Schoenau, Dang Nguyen, K. Van Rees, and M. Boehm. 2002. Effects of Long-Term Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilization on Cassava Yield and Plant Nutrient Composition in North Vietnam. *J. Plant Nutr.* 25(3):425-442.
- Pal, D.K., P. Srivastava, S.L. Durge, and T. Bhattacharyya. 2001. Role of Weathering of Fine-Grained Micaceous Minerals in Potassium Management of Indian Soils. *Appl. Clay Sci.* 20:39-52.
- Prabowo, N.E., and P.N. Nelson. 2015. Potassium and Magnesium Retention and Losses, as Affected by Soil and other Site Factors. *In: Webb, M.J., P.N. Nelson, C. Bessou, J.-P. Caliman, and E.S. Sutarta (eds.). Sustainable Management of Soil in Oil Palm Plantings. Proceedings of a workshop held in Medan, Indonesia, 7-8 November 2013. ACIAR Proceedings No. 144. Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra. p. 27.*
- Putthacharoen, S., R.H. Howler, S. Jantawat, and V. Vichukit. 1998. Nutrient Uptake and Soil Erosion Losses in Cassava and Six other Crops in a Psamment in Eastern Thailand. *Field Crops Res.* 57:113-126.
- Schneider, A., R. Tesileanu, R. Charles, and S. Sinaj. 2013. Kinetics of Soil Potassium Sorption-Desorption and Fixation. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 44:837-49.
- Sparks, D.L. 1987. Potassium Dynamics in Soils. *Adv. Soil Sci.* 6:1-63.
- Suryana, A. 2007. Kebijakan penelitian dan pengembangan ubi kayu untuk agroindustri dan ketahanan pangan (Research Policy of Cassava Development for Agroindustry and Food Security). Hlm. 1-19. Dalam Harnowo, D., Subandi, dan N. Saleh (Peny.). *Prospek, Strategi, dan Teknologi Pengembangan Ubi kayu untuk Agroindustri dan Ketahanan Pangan.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor. 98 hlm.
- Sutyorini, S., and B. Waryanto. 2013. Agriculture Statistics 2013. Center for Agric. Data and Information System, Ministry of Agriculture, Rep. of Indonesia. 316 p. (Indonesia and English).
- Suyamto, H. 1998. Potassium Increased Cassava Yield on Alfisol Soils. *Better Crops International* 12(2):12-13.
- Taufiq, A., A.A. Rahmianna, and W. Unjoyo. 2009. Uji efektivitas pupuk NPK Kujang formula 14-6-23 untuk tanaman ubikayu (Evaluation of Effectiveness of NPK Kujang 14-6-23 for Cassava). Balai Penelitian Tanaman Kacang-kacangan dan Umbi-umbian, Malang (Project report).
- Taufiq, A., Subandi, and H. Suyamto. 2015. Response of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) to Potassium Application on Acidic Dryland in Indonesia. *International Potash Institute e-ifc* 42:18-26.
- Wang H.Y., Q.H. Shen, J.M. Zhou, J. Wang, C.W. Du, and X.Q. Chen. 2011. Plants Use Alternative Strategies to Utilize Non-exchangeable Potassium in Minerals. *Plant Soil* 343:209-20.
- Wargiono, J., A. Hasanuddin, and dan Suyamto. 2006. Teknologi Produksi Ubi kayu Mendukung Industri Bioetanol (Production Technology of Cassava for Bioethanol Industry Support). Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor. 42 hlm.
- Zörb, C., M. Senbayram, and E. Peiter. 2014. Potassium in Agriculture - Status and Perspectives. *J. Plant Physiol.* 171:656-669.

“印度尼西亚东爪哇和中爪哇不同土壤类型上钾肥施用对木薯 (*Manihot esculenta* Crantz.) 的影响”一文可以在IPI官方网站浏览下载: [区域活动/东南亚](#)