

张 辉, 朱绿丹, 安 霞, 等. 水分和钾肥耦合对甘薯光合特性和水分利用效率的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(6): 1294-1301.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2016.06.016

水分和钾肥耦合对甘薯光合特性和水分利用效率的影响

张 辉¹, 朱绿丹², 安 霞¹, 董 月¹, 焦庆清³, 张永春¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部江苏耕地保育科学观测实验站, 江苏 南京 210014; 2. 南昌工学院, 江西 南昌 330108; 3. 泰州市农业科学院, 江苏 泰州 225300)

摘要: 为解析甘薯生长的水钾耦合效应, 科学调配水分和钾素以提高甘薯的产量和水分利用率, 进行了可控的水分、钾素二因子盆栽试验。水分因子设 3 个水平: 田间最大持水量的 50% (W50)、田间最大持水量的 75% (W75)、田间最大持水量的 100% (W100); 钾肥因子设 3 个水平 (以风干土中施 K_2O 含量计): 0 mg/kg (K0)、150 mg/kg (K150)、300 mg/kg (K300)。结果表明水分和钾素间表现出显著的耦合效应。在本研究条件下, 甘薯在 W75-K150 下块根产量最大, 其水分利用效率最高。对于水分利用效率, 在干旱条件下 (W50), 钾素与土壤水分表现为拮抗效应, 而当正常供水时 (W75), 施钾可以缓解由于土壤水分提高而造成的水资源浪费现象。在充分灌溉条件下 (W100), 产量的提高是以水和肥投入为代价的, 应该适当控制水肥的投入。结合块根产量和水分利用效率分析, 以 W75-K150 处理的水钾配比较为合适。

关键词: 水钾耦合; 甘薯; 光合特性; 水分利用率

中图分类号: S531.062

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2016)06-1294-08

Effects of water coupled with K on the photosynthetic characteristics of sweet potato and its water use efficiency

ZHANG Hui¹, ZHU Lü-dan², AN Xia¹, DONG Yue¹, JIAO Qing-qing³, ZHANG Yong-chun¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Scientific Observation and Experimental Station of Farmland Conservation and Cultivation in Jiangsu, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 2. Nanchang Institute of Science & Technology, Nanchang 330108, China; 3. Taizhou Institute of Agricultural Sciences, Taizhou 225300, China)

Abstract: To analyze the coupling effects of water and potassium on the growth of sweet potato, and to increase the

收稿日期: 2016-02-02

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS-11-B-15); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203013); 江苏省农业科学院成果导向型重大项目 [CX (14) 2005]; 国家自然科学基金项目 (31401337); 国际植物营养研究所合作项目 (IPNI) (JIANGSU-11)

作者简介: 张 辉 (1983-), 女, 江苏淮阴人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为甘薯的营养与施肥。(E-mail) 1983hui@sina.com.cn

通讯作者: 焦庆清 (1964-), 男, 江苏泰兴人, 推广硕士, 副研究员, 主要从事特经特粮作物栽培等方面研究。(E-mail) mtjq@163.com

yield and water use efficiency of sweet potato by scientifically regulating water and potassium, the pot experiments with controllable water and potassium factors were conducted. Three levels for the factor of water were designed: 50% of field moisture capacity (W50), 75% of field moisture capacity (W75), 100% of field moisture capacity (W100). Three levels for the factor of K were designed (by the content of K_2O in 1 kg dry soil): 0 mg/kg (K0), 150 mg/kg (K150), 300 mg/kg (K300). Results showed that there were significant coupling effects between water and potassium. In the study, sweet potato under W75-K150 treatment obtained the highest root yield, and its water use efficiency was higher than others. Potassium and soil moisture showed antagonistic effect on water use efficiency

under drought condition, while, the application of potassium would relieve the water loss caused by the increasing water condition with normal water condition. In the sufficient water condition, the high yield sacrificed with the controlled inputs of water and fertilizer. Combined the results of yield with water use efficiency, the treatment of W75-K150 was appropriate to produce sweet potato.

Key words: water and potassium coupling; sweet potato; photosynthetic characteristics; water use efficiency

甘薯具有较强的耐旱耐瘠性,被称为荒地开发的先锋作物,具有高产、稳产、适应性广的特点,在中国广泛种植。土壤水分和钾素与甘薯生长关系极为密切。姜增辉等^[1]认为土壤湿度以田间最大持水量 70% 为宜,持水量低于 60% 时须进行灌水。Chowdhory 等^[2]认为,随着土壤水分含量的下降,土壤机械阻力增大,限制了块根的膨大,同时降低了土壤中氮、钾养分的移动,影响根系对养分的吸收,不利于块根的生长发育和干物质积累。甘薯对土壤水分的需求还与生育期紧密相关。甘薯扎根缓苗期和生长前期对土壤水分状况要求较高,最佳土壤含水量为田间最大持水量的 60% ~ 80%,低于 50% 则严重抑制各器官的生长,高于 80% 则有徒长趋势。生长中期的土壤含水量应偏低些,以 50% ~ 60% 为宜,有利于控制徒长。生长后期土壤水分的变幅可大些,但也不宜大于田间最大持水量的 80% 或低于 45%,否则会降低鲜薯产量。总之,甘薯在其生长前期要求土壤水分充足,后期则要求土壤水分适中。再者,甘薯的不同部位,茎叶和块根对水分的响应也不同。Gomes 等^[3]发现,茎叶在雨季和旱季的水分利用率均增加,且旱季增加量显著高于雨季的增加量,而块根则相反,在雨季和旱季块根的水分利用率均减少。另外,从全生育期来看,甘薯对钾需求最多,氮次之,磷最少,总体上 N-P₂O₅-K₂O 比例大约为 1.0 : 0.5 : 1.5。钾肥的合理施用是甘薯高产优质的重要前提,钾肥的施用时间、方法和用量均对甘薯的产量和品质产生影响^[46]。尹子娟等^[7]选用 4 个甘薯品种进行试验,发现施 300 kg/hm² 纯钾时产量最高,但过高量钾肥施用会降低增产效果。张爱君等^[8]发现,长期不施钾肥,薯块膨大期滞后、日增质量减少,导致鲜薯产量下降;与施钾处理相比,不施钾可提高薯块干物质含量,而单位面积干物质产量明显下降;长期不施钾肥条件下,不同甘薯品种的产量反应存在显著差异,以此筛选出高耐低钾力品种徐薯 18、钾高效型品种徐薯 25-2 和钾敏感型品种苏薯 7。

对作物生长期间的水肥耦合调控目的在于寻求水肥的最佳配比,通过以水促肥和以肥调水的手段,实现作物高产和水分养分的高效利用。目前已有大量关于水肥耦合调控的研究报道^[9],但关于甘薯水肥耦合的研究较少^[10]。水肥对作物的耦合效应可产生 3 种不同的结果或现象,即协同效应、顺序加和效应和拮抗效应^[11]。要使土壤水分和钾肥表现出协同效果,必须合理调配水分和钾素。目前对水钾耦合效应的研究仍然较少,由于甘薯生育期内需钾量大,而 K⁺ 在植物体内有很强的移动性,在不同器官间、细胞及细胞器之间的分布变化受供水状况的影响明显。另一方面,K⁺ 的分布也直接影响这些部位的水分分布,进而影响各器官的生长与干物质积累,并最终影响收获产品的产量^[12]。因此本研究基于可控条件下水分和钾素的盆栽试验,研究甘薯不同生育期光合特性和光合酶活性、干物质积累和分配状况,以明确甘薯对不同水钾配比的响应特征,寻求水钾的最佳配比,为甘薯生产提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

甘薯品种为苏薯 14 号,江苏省农业科学院粮食作物研究所选育,系优质食用及食品加工型甘薯新品种,具有鲜薯产量高、熟食品质好的优点。供试土壤为潮土(采自江苏省姜堰地区),土壤理化性质为:田间持水量 18.37%,有机质含量 18.75 g/kg,碱解氮 44.14 mg/kg,有效磷 6.71 mg/kg,速效钾 52.00 mg/kg,pH 值 7.05。

采用盆栽试验,在江苏省农业科学院试验大棚内(119°13'21" E, 31°44'03" N)进行,大棚顶覆塑料薄膜,两边门框通风。盆钵为圆柱形塑料桶(高 28.5 cm、直径 28.0 cm),桶下钻孔便于排水,每盆装土 15 kg,与肥料混匀后灌水至饱和,静置 3 d,以便于保持土壤含水量均匀。于 7 月松土并插入 2 根 PVC 管(管直径 1 cm、长 30 cm,管底距盆底 6 cm,利用土壤毛细管作用进行由下而上的补水),每盆

移栽薯苗 1 株,缓苗 15 d 后开始进行水分处理,缓苗期间土壤水分维持在田间最大持水量的 75% ± 5%,按生育期(苗期、旺长期、膨大期、收获期)取样,共取 4 次,分别对应于栽后 41 d(41DAP)、栽后 72 d(72DAP)、栽后 95 d(95DAP)、栽后 128 d(128DAP)。生育期内土壤水分采用称质量法控制,每 2 d 称质量测定 1 次,并从 PVC 管中补充水分并记录浇水量。

试验设含水量、钾肥 2 个因子(表 1)。含水量设 3 个水平:田间最大持水量的 50% (W50)(实际土壤含水量为 9.2%)、田间最大持水量的 75% (W75)(实际土壤含水量为 13.8%)、田间最大持水量的 100% (W100)(实际土壤含水量为 18.4%);钾肥设 3 个水平:1 kg 风干土施 0 mg K₂O (K0)、1 kg 风干土施 150 mg K₂O (K150)、1 kg 风干土含 300 mg K₂O (K300)。采用二次回归正交设计,各变量水平以及无量纲编码值见表 1。试验共 9 个处理,每个处理设 3 个重复,由于需要进行 4 个生育期破坏性取样,共设置盆栽 108 个。各处理氮、磷施用量均相同,分别为 1 kg 风干土施 100 mg N、1 kg 风干土施 80 mg P₂O₅。肥料品种为尿素(含 N 46%)、硫酸钾(分析纯,含 K₂O 52%)、磷酸钙(分析纯,含 P₂O₅ 12%),均一次性基施。

表 1 水分和钾肥耦合试验因素和编码

Table 1 Coding numbers and the experimental factors of water coupled with potassium fertilizer

因素	变量设计水平($r=1$)		
	-1	0	1
土壤水分(田间最大持水量的百分数,%)	50	75	100
施钾量(mg/kg)	0	150	300

1.2 测定项目与方法

1.2.1 光合特性 采用便携式光合仪(Yaxin-1102,北京)对甘薯的光合特性进行测定。选取主蔓第 2、3、4 叶完全展开叶片,于晴朗无风日 9:00–16:00 测定其光合特性参数,测定指标主要为叶片光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO₂ 浓度(C_i),取 3 个重复处理的 3 个叶片测量值的平均值作为最终试验数据。

1.2.2 生物量 甘薯地上部分的茎、叶、叶柄,地下部分的块根和须根(苗期块根未膨大,故仅有须根)洗净晾干,分别称鲜质量,105 °C 杀青 30 min 后 75

°C 烘至恒质量,称干质量,以块根干质量与鲜质量之比计为干率。

1.2.3 产量水平上的水分利用效率(WUE_y)

WUE_y = 作物产量/作物用水量^[13]。

1.2.4 干物质分配(R/T 值) 甘薯根冠比,即甘薯地下部块根与地上部分蔓藤的干物质生物量比例。

1.3 数据统计

数据统计分析采用 Excel 2010 和 SPSS 16.0 软件处理,数据多重比较选用 Duncan's 法。

2 结果与分析

2.1 水钾耦合对甘薯光合特性的影响

选择甘薯旺长期(代表生育前期)和膨大期(代表生育后期)2 个典型生育期的光合特性参数进行方差分析(表 2、表 3)。在旺长期,随着土壤含水量的提高,甘薯叶片净光合速率(P_n)显著提高,而在各水分条件下施钾处理的 P_n 略有降低,但不显著。可见在生育前期影响甘薯光合速率的主要因素为土壤水分条件。通过水钾二因素方差分析也可以得到这个结果,且土壤水分和钾素在该时期对光合速率的交互作用不显著。生育前期甘薯叶片的气孔导度(G_s)同时受土壤水分和施钾量的影响,且二者对 G_s 的交互作用也达到极显著水平,在该时期,提高土壤水分有利于叶片打开气孔,钾素对 G_s 的影响与土壤水分有关,在干旱条件(W50)施钾显著提高了 G_s ,而在正常供水(W75)和充分供水(W100)时钾素的影响不显著。土壤水分和钾素对甘薯叶片蒸腾速率(T_r)的影响基本与对气孔导度的影响一致,随着土壤含水量增大而显著增大,施钾显著提高了干旱条件下的蒸腾速率,而对正常供水和充分供水条件下的蒸腾速率影响不明显。

在膨大期(生育后期),钾对甘薯净光合速率(P_n)具有显著主效应,土壤水分具有极显著主效应,水分和钾素具有极显著交互作用。在土壤水分含量为田间最大持水量的 50% 时, P_n 随施钾量增加而提高,且达到显著水平;土壤水分含量为田间最大持水量 75% 时,施钾对甘薯 P_n 无显著作用;土壤水分含量为田间最大持水量 100% 时,不施钾处理和施钾 150 mg/kg 处理 P_n 显著高于施钾 300 mg/kg 处理。在生育后期水分和钾素对甘薯气孔导度均具有极显著主效应,但无显著交互作用。相同施钾水平

下,甘薯 G_s 随土壤水分含量增大而升高,而在同样土壤水分条件下, G_s 随施钾量增大而显著增大。蒸腾速率(T_r)由于受气孔导度影响,其变化规律与气孔导度一致。胞间二氧化碳浓度(C_i)在土壤含水

量为田间最大持水量 50% 和 75% 时,各施钾处理间没有显著差异;在土壤含水量为田间最大持水量 100% 时,施钾 300 mg/kg 处理的 C_i 显著高于不施钾和施钾 150 mg/kg 处理。

表 2 水钾耦合对甘薯旺长期光合特性的主效应以及交互作用

Table 2 Main effect and interaction for photosynthetic characteristics of sweet potato in vigorous growth stage under treatments of water coupled with potassium fertilizer

土壤水分	施钾量	P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	G_s [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)
W50	K0	8.46±1.73c	86.62±10.74c	1.97±0.22e	253.07±21.63d
	K150	6.79±1.33c	160.44±23.79b	2.92±0.19d	366.81±32.94ab
	K300	6.45±0.65c	156.71±15.69b	2.90±0.24d	372.32±5.35a
W75	K0	13.14±0.97ab	227.81±21.23a	3.66±0.14c	353.2±7.57abc
	K150	12.46±2.13b	209.28±5.89a	3.72±0.07c	358.64±22.50abc
	K300	12.10±1.46b	203.19±22.99a	3.54±0.30c	348.42±6.17abc
W100	K0	15.13±1.07a	203.96±6.44a	4.27±0.11b	336.34±17.72bc
	K150	14.26±0.55ab	202.28±25.35a	4.53±0.22ab	332.12±14.34c
	K300	13.74±0.77ab	219.06±15.44a	4.65±0.24a	358.01±8.98abc

W50:土壤含水量为田间最大持水量的 50%;W75:土壤含水量为田间最大持水量的 75%;W100:土壤含水量为田间最大持水量的 100%;K0:施钾量(K_2O) 0 mg/kg;K150:施钾量(K_2O)150 mg/kg;K300:施钾量(K_2O)300 mg/kg。同列不同字母表示不同处理间差异达到 0.05 显著水平。

表 3 水钾耦合对甘薯膨大期光合特性的主效应以及交互作用

Table 3 Main effect and interaction for photosynthetic characteristics of sweet potato in expanding growth stage under treatments of water coupled with potassium fertilizer

土壤水分	施钾量	P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	G_s [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)
W50	K0	7.73±0.75 c	82.08±7.26b	2.18±0.14b	236.80±13.03a
	K150	10.05±0.79b	112.81±11.29a	2.85±0.23a	267.73±30.32a
	K300	13.68±0.45a	119.82±7.50a	3.14±0.10a	233.33±12.76 a
W75	K0	12.91±0.64 a	100.94±12.17a	2.95±0.08 c	248.51±25.45 a
	K150	12.91±0.17a	134.56±9.23a	3.30±0.19b	231.12±16.31a
	K300	12.53±0.63a	160.57±9.05a	3.71±0.19a	264.32±8.02 a
W100	K0	13.45±0.66a	150.07±8.18b	3.56±0.40 b	244.20±14.52 b
	K150	14.14±0.74a	165.04±3.89b	3.87±0.09b	254.00±7.43b
	K300	10.66±1.09b	194.18±3.54a	4.33±0.09 a	290.84±14.48a

各处理见表 2 注。同列不同字母表示不同处理间差异达到 0.05 显著水平。

干旱胁迫主要通过气孔和非气孔因素影响作物光合作用^[14]。吴琦等认为,气孔运动对水分的亏缺反应非常敏感,轻度水分条件的变化就会引起气孔导度的变化^[15]。Yu 等^[16]认为,在轻度干旱条件下,作物光合作用主要受气孔因素限制。本研究结果表明,干旱条件下甘薯 P_n 、 G_s 、 T_r 、 C_i 显著降低,由此推测,甘薯在干旱(土壤含水量为田间最大持水量 50%)时受到轻度干旱胁迫,气孔关闭,光合作用

受影响^[17]。本试验中在不施钾时,甘薯 G_s 水平低,光合作用受气孔因素限制,这与 Bednarz 等^[18]对棉花的研究结果一致。在施用钾肥后甘薯叶片的 G_s 、 T_r 、 C_i 显著高于不施钾处理,显著减弱了气孔限制作用,说明施用钾肥可减轻干旱条件下气孔因素对甘薯光合作用的限制。

2.2 水钾耦合对甘薯块根产量的耦合效应

2.2.1 耦合作用回归模型的建立和检验 根据表 1

的土壤水分条件和施钾量 2 个因素水平和正交性编码值构建水钾耦合试验的结构矩阵(表 4),结合各处理的甘薯块根产量,建立二元二次正交回归数学模型^[19]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 \quad (1)$$

根据表 3 结果,计算得到回归系数 b_i 分别为 $b_0 = 371.82$, $b_1 = 34.10$, $b_2 = 30.16$, $b_3 = 51.09$, $b_4 = -108.31$, $b_5 = -25.86$, 产量 Y 回归模型即为:

$$y = 371.82 + 34.10x_1 + 30.16x_2 + 51.09x_1x_2 - 108.31x_1^2 - 25.86x_2^2 \quad (2)$$

表 4 水分和钾肥耦合试验结构矩阵和产量结果

Table 4 Structure matrix and yield results under treatments of water coupled with potassium fertilizer

序号	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	x_1'	x_2'	Y
1	1	1	1	1	0.333	0.333	359.37
2	1	1	-1	-1	0.333	0.333	199.89
3	1	-1	1	-1	0.333	0.333	182.14
4	1	-1	-1	1	0.333	0.333	231.01
5	1	1	0	0	0.333	-0.667	278.27
6	1	-1	0	0	0.333	-0.667	221.77
7	1	0	1	0	-0.667	0.333	384.64
8	1	0	-1	0	-0.667	0.333	312.31
9	1	0	0	0	-0.667	-0.667	367.95

x_0 为常数项, x_1, x_1' 分别为土壤水分的一次项和二次项, x_2, x_2' 分别为施钾的一次项和二次项, x_1x_2 为水钾交互项, Y 为甘薯块根产量。

从表 5 中可以看出,总回归的 $F = 731.06 > F_{0.01(5,3)} = 28.34$,达到极显著水平,因此可以采用该模型对甘薯块根产量进行预报。表 5 显示,各项均达极显著水平 ($P < 0.01$),说明该模型模拟程度较好,可用于进一步分析。

表 5 产量回归方程的显著性检验

Table 5 Yield regression equation and its significance test

变异来源	平方和	自由度	均方	F	显著性
总回归	47 676.05	5	9 535.21	731.06	**
x_1	6 978.22	1	6 978.22	535.01	**
x_2	5 456.95	1	5 456.95	418.38	**
x_1x_2	10 439.39	1	10 439.39	800.38	**
x_{12}	23 463.64	1	23 463.64	1 798.94	**
x_{22}	1 337.85	1	1 337.85	102.57	**
剩余	39.13	3	13.04		
总和	47 715.19	8			

** 表示极显著 ($P < 0.01$)。

2.2.2 主效应分析和产量优化 由于设计中各因素均经过无量纲线性编码处理,所以可以从回归系数绝对值的大小直接比较各因素对甘薯块根产量的影响。在本试验设计范围内,将土壤水分条件 x_1 和施钾量 x_2 的一次项回归系数绝对值比较得到 $|b_1| > |b_2|$, $|b_4| > |b_5|$,说明土壤水分对块根增产作用较钾肥的作用明显。从回归方程一次项系数的正负可以看出, $b_1 > b_2 > 0$,说明提高土壤水分条件和施钾肥对产量的影响均是正效应,且水分的增产效应大于施钾肥。

对回归方程(2)进行降维,即求 Y 对 x_1 和 x_2 的一阶偏导,并令 $\frac{\partial y}{\partial x_1} = 0$, $\frac{\partial y}{\partial x_2} = 0$,得到的 x_1 和 x_2 为最高产量的土壤水分条件和施钾量。

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = 34.10 + 51.09x_2 - 2 \times 108.31x_1 = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} = 30.16 + 51.09x_1 - 2 \times 25.86x_2 = 0 \quad (4)$$

由(3)和(4)式联合求解得: $x_1 = 0.3844$, $x_2 = 0.9627$,分别对应的土壤水分条件为土壤含水量为田间最大持水量 84.61%,施钾量为 294.41 mg/kg,即在该条件下可以获得最高理论块根产量 (Y_{\max})。将 x_1 和 x_2 代入原方程可以得到最高单株产量 (Y_{\max}) 为 392.90 g。

2.2.3 水钾耦合效应分析 将土壤水分条件 x_1 和施钾量 x_2 各水平的编码值 -1、0、+1 分别代入方程(2)中,求出 x_1 和 x_2 对块根产量的交互效应(表 6)。

表 6 土壤水分条件和施钾肥对甘薯块根产量的交互作用

Table 6 The interaction effects of soil moisture and the application amount of potassium fertilization on sweet potato yield

施钾量	土壤水分条件		
	1	0	-1
1	353.00(355.37)	376.12(378.64)	182.62(178.14)
0	297.61(288.27)	371.82(375.95)	229.41(233.77)
-1	190.51(197.89)	315.80(308.31)	224.47(225.01)

括号内的数值为实际甘薯单株块根产量(g),括号外的数值为根据回归模型预估的单株块根产量(g)。

由表 6 可以看出,在不同施钾水平上,土壤水分条件对产量的影响基本都呈先升高后降低趋势。而在各土壤水分条件下,施钾量对甘薯块根产量的影响不同,在 -1(土壤含水量为田间最大持水量 50%)水平,产量随施钾量增大而先增加后降低趋势;而在 0(土壤含水量为田间持最大水量 75%)和 1(土壤

含水量为田间最大持水量 100%)水平,产量随施钾量增大而一直增加,但二者的增幅存在差异,在 0 (土壤含水量为田间最大持水量 75%)水平下施钾量 1 和 0 水平间增幅很小,而在 1(土壤含水量为田间最大持水量 100%)水平下施钾 1 和 0 水平间增幅较大。可见当土壤水分含量为田间最大持水量 100%时施钾的增产效果明显,而在土壤含水量为田间最大持水量 75%时适量施钾(150 mg/kg)的增产效果较明显,继续施钾(300 mg/kg)产量增加不明显。在不同土壤水分和施钾量条件下实际块根产量变化趋势与模型拟合的基本一致,当土壤干旱或者缺钾时,适量施用钾肥或者适当提高土壤含水量均可以产生耦合作用达到增产的效果。在本试验条件下,以土壤含水量为田间最大持水量的 75%,施钾量(K_2O) 150 mg/kg处理的产量最高。

2.3 水钾耦合对干物质分配(R/T 值)的影响

整个生育期内,甘薯苗期薯蔓比值最小,收获期最大(表 7)。土壤含水量为田间最大持水量 50%时,施钾对膨大期的 R/T 值均无显著效应,而成熟

期施钾 300 mg/kg处理的 R/T 值显著高于不施钾对照。说明在土壤干旱条件下,钾肥效应被推迟了,施钾对甘薯块根形成的促进作用受到时间限制。土壤含水量为田间最大持水量 75%时,施钾对苗期、膨大期和收获期的 R/T 值影响不显著,在旺长期施钾处理的 R/T 值显著高于不施钾处理。说明在土壤水分为田间最大持水量 75%时,地上部和地下部生长均较快,但旺长期地上部生长势明显比地下部高,施用钾肥调节了作物各器官的生物量积累分配^[20],较好地控制了地上部的过度生长,将生长中心转移至地下部分,促进块根迅速膨大。土壤含水量为田间最大持水量 100%时,整个生育期内施钾处理的 R/T 值显著($P<0.05$)高于不施钾处理,且在苗期和膨大期施钾 150 mg/kg时达到极显著水平($P<0.01$)。说明在土壤含水量为田间最大持水量 100%时,施用适量钾肥(150 mg/kg)可以提高植株 R/T 值^[21],促进碳水化合物由叶片向块根运输,为块根迅速膨大奠定物质基础^[22]。

表 7 水分和钾肥耦合对甘薯干物质分配(R/T 值)的影响

Table 7 The effects of water coupled with potassium fertilizer on dry matter distribution (R/T) of sweet potato

水分处理	钾处理	薯蔓比值(R/T 值)			
		苗期	旺长期	膨大期	成熟期
W50	K0	0.32±0.03g	0.75±0.02e	0.97±0.02de	1.38±0.03c
	K150	0.32±0.04g	0.62±0.04e	1.48±0.04c	1.58±0.04b
	K300	0.32±0.03g	0.46±0.05f	1.22±0.05cd	1.71±0.04ab
W75	K0	0.21±0.04h	0.46±0.03f	1.12±0.04d	1.75±0.07ab
	K150	0.21±0.03h	0.62±0.04e	1.25±0.07cd	1.92±0.03a
	K300	0.21±0.03h	0.61±0.03e	1.24±0.30cd	1.87±0.05a
W100	K0	0.19±0.04h	0.51±0.04f	0.65±0.04e	1.12±0.02bc
	K150	0.21±0.03h	0.61±0.05e	1.25±0.03cd	1.29±0.04cd
	K300	0.21±0.04h	0.72±0.04e	1.28±0.04cd	1.61±0.03b

各处理见表 2 注。同列不同字母表示不同处理间差异达到 0.05 显著水平。

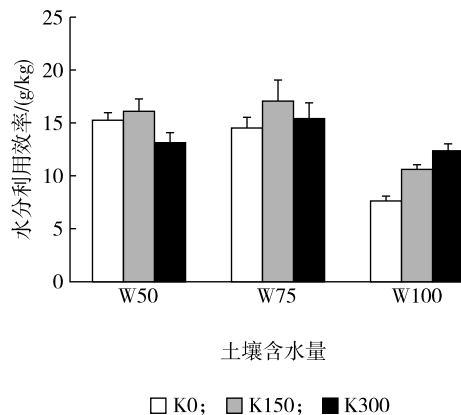
2.4 水钾耦合对甘薯水分利用效率的影响

由图 1 可以看出,W75-K150 处理的甘薯水分利用效率最大。随着土壤含水量提高,施钾水平对甘薯水分利用效率的影响也发生变化。在 K0 水平,3 个不同土壤水分条件下的水分利用效率由大到小的处理顺序为 W50、W75>W100($P<0.05$);K150 水平下,仍是 W50 和 W75 处理显著高于 W100 处理;而在 K300 水平下,W50、W100<W75。

钾素对水分利用效率的影响与土壤水分条件有关。在干旱条件下,施钾不利于提高甘薯的水分利用效率;在正常供水(W75)时,施钾显著提高了水分利用效率,不过两个施钾水平间没有明显差异;在充分供水(W100)时,整体水分利用水平较低,施钾显著提高了水分利用效率,缓解了由于水分提高造成的水浪费。

由此可见,在甘薯水钾管理中要获得较高的水

分利用效率,必须要考虑到当地的土壤水分和钾肥水平。当土壤水分较低时,应减少施钾量,因为二者在该条件下表现为拮抗效应;当能够正常供水时,可以适量提高施钾量,缓解由于土壤水分提高而造成的浪费现象;在充分灌溉条件下,产量的提高是以水和肥为代价的,应该适当控制水肥的投入。在本试验条件下,W75-K150 处理的水分利用效率最高。



各处理见表 2 注。不同字母表示处理间差异达到 0.05 显著水平。

图 1 水钾耦合对甘薯水分利用效率的影响

Fig. 1 Effects of water coupled with K on water use efficiency of sweet potato

3 结论

通过二元回归正交设计方法研究了水钾互作对甘薯光合特性、干物质累积和水分利用效率的耦合效应,建立的土壤水分和施钾量与产量的二元二次回归数学模型,能较可靠地预估甘薯块根产量。土壤水分、钾肥以及二者交互作用均达极显著水平,且土壤水分对甘薯块根的增产效果要高于钾肥。

水钾耦合对甘薯光合特性具有显著的主效应和交互作用。钾和水对 P_n 均具有显著的主效应,且水、钾之间存在着极显著交互作用。水钾对 G_s 具有极显著的主效应,但无显著交互作用。 T_r 变化规律与 G_s 一致。在土壤含水量为田间最大持水量 100% 时,施钾 300 mg/kg 处理的 C_i 显著高于不施钾和施钾 150 mg/kg 处理。

提高土壤含水量显著促进了甘薯地上部的生长,钾肥处理显著促进土壤含水量为田间最大持水量 100% 时苗期地上部的生长发育。水分和钾肥对甘薯产量具有显著的耦合效应,在土壤含水量为田

间最大持水量 50% 时增施钾肥会抑制块根干物质积累,反之在土壤含水量为田间最大持水量 75% 和 100% 时增施钾肥能促进块根干物质积累。在土壤含水量为田间最大持水量 75%、施钾 150 mg/kg 条件下,甘薯生物量从旺长期增加幅度最高,且最终产量最高。

在土壤水分含量较低时,钾素与土壤水分对水分利用效率表现为拮抗效应;在土壤含水量为田间最大持水量 75% 时,适量施钾可以提高水分利用效率;在土壤含水量为田间最大持水量 100% 条件下,产量的提高是以水和肥投入为代价的。

综上所述,在本试验条件下土壤含水量为田间最大持水量 75% 与施钾 (K_2O) 150 mg/kg 处理能获得较高的块根产量和水分利用效率。

参考文献:

- [1] 姜增辉,吕雅芳.甘薯高产栽培技术[J].杂粮作物,2010,30(3):225-226.
- [2] CHOWDHORY S R, SINGH R, KUNDU D K. Growth, dry matter and yield of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) as influence by soil mechanical impedance and mineral nutrition under different irrigation regimes [J]. Advances in Horticultural Science, 2000, 16(1): 25-29.
- [3] GOMES F, CARR M K V. Effects of water availability and vine harvesting frequency on the productivity of sweet potato in southern Mozambique. III. Crop yield/water-use response functions [J]. Experimental Agriculture, 2003, 39(4): 409-421.
- [4] 林子龙.种植密度与钾肥对甘薯新品种龙薯 14 号产量的影响[J].南方农业学报,2015,46(6):1002-1006.
- [5] 唐忠厚,李洪民,张爱君,等.施钾对甘薯常规品质性状及其淀粉 RVA 特性的影响[J].浙江农业学报,2011,23(1):46-51.
- [6] 沈学善,黄钢,屈会娟,等.施钾量对南紫薯 008 干物质生产和硝酸盐积累的影响[J].南方农业学报,2014,45(2):235-239.
- [7] 尹子娟,郭华春,李存芝.施钾对甘薯生长、产量及品质的影响[J].云南农业科技,2011(4):21-23.
- [8] 张爱君,李洪民,唐忠厚,等.长期不施钾肥对甘薯产量的影响[J].安徽农业大学学报,2010,37(1):22-25.
- [9] 汪德水.旱地农田肥水协同效应与耦合模式[M].北京:气象出版社,1999:44-85.
- [10] 张辉,张永春,宁运旺,等.土壤与肥料对甘薯生长调控的研究进展[J].土壤通报,2012,43(4):995-1000.
- [11] 汪德水.旱地农田肥水协同效应与耦合模式[M].北京:气象出版社,1999:44-85.
- [12] 魏永胜,梁宗锁,张福锁.干旱胁迫及不同钾水平下烟草叶肉细胞中钾的再分布[J].植物营养与肥料学报,2002,8(4):447.

- [13] LI W X, LU J W, CHEN F, et al. Effect of NPK application on yield, nutrients and water utilization under sudangrass and ryegrass rotation regime [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9 (7): 1026-1034.
- [14] NI B R, PALLARDY S G. Stomatal and nonstomatal limitations to net photosynthesis in seedlings of woody angiosperms [J]. *Plant Physiology*, 1992, 99(4): 1502-1508.
- [15] 吴 琦,张希明. 水分条件对梭梭气体交换特性的影响[J]. *干旱区研究*, 2005,22(1):79-84.
- [16] YU D J, KIM S J, LEE H J. Stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis in field-grown grapevine cultivars [J]. *Biologia Plantarum*, 2009, 53(1): 133-137.
- [17] OHASHI Y, NAKAYAMA N, SANEOKA H, et al. Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants [J]. *Biologia Plantarum*, 2006, 50(1): 138-141.
- [18] BEDNARZ C W, OOSTERHUIS D M, EVANS R D. Leaf photosynthesis and carbon isotope discrimination of cotton in response to potassium deficiency [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1998, 39(2): 131-139.
- [19] 李永孝. 农业应用生物统计[M]. 济南:山东科学技术出版社, 1988:357-377.
- [20] REDDY K R, ZHAO D. Interactive effects of elevated CO₂ and potassium deficiency on photosynthesis, growth, and biomass partitioning of cotton [J]. *Field Crops Research*, 2005, 94(2): 201-213.
- [21] 王汝娟,王振林,梁太波,等. 腐植酸钾对食用甘薯品种钾吸收利用和块根产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*,2008,14(3):520-526.
- [22] 史春余,王振林. 钾营养对甘薯某些生理特性和产量形成的影响[J]. *植物营养与肥料学报*,2002,8(1):81-85.

(责任编辑:张震林)