

# 土壤水分和施肥水平对甘薯叶片气体交换的影响\*

许育彬 宋亚珍 李世清\*\*

(西北农林科技大学 杨凌 712100)

**摘要** 以“秦薯4号”和“619”为材料,通过盆栽试验,测定和分析了不同土壤水肥条件下甘薯的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $Tr$ )、叶片水分利用效率( $WUE$ )、气孔导度( $G_s$ )、气孔限制值( $L_s$ )以及胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )。结果表明,土壤水分对两个甘薯品种的  $P_n$ 、 $Tr$ 、 $WUE$ 、 $L_s$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  均有极显著影响;除“秦薯4号”的  $G_s$  外,施肥对两个甘薯品种的6个生理指标的影响也均达到极显著水平。甘薯叶片的  $P_n$ 、 $Tr$  随土壤水分的减少均呈下降趋势,而  $G_s$  和  $L_s$  在土壤轻旱条件下下降或略有不明显上升,但在重旱条件下这两个指标均明显下降。 $C_i$  在轻旱条件下变化不明显,但在土壤严重干旱时极显著升高,说明轻旱条件下叶片气体交换主要受气孔因素限制,而重旱条件下主要受非气孔因素限制。“秦薯4号”叶片  $WUE$  随土壤水分的下降而极显著下降,而“619”则呈明显的先增后减趋势。甘薯叶片  $P_n$  随施肥量的增加而增加,说明增加施肥可促进叶片  $CO_2$  的气体内外交换。相对于不施肥处理,中肥处理的  $Tr$  略有不明显下降(“秦薯4号”)或明显上升(“619”),高肥处理极显著增加了  $Tr$ ; 叶片  $WUE$  在中肥处理下极显著增加,但继续增加施肥量时增加不明显或极显著下降;“619”的  $G_s$  随施肥量的增加而增加,而“秦薯4号”变化不明显。随施肥量的增加,  $L_s$  呈先增后减的趋势,  $C_i$  呈先降后增的趋势,说明中肥处理下甘薯叶片气体交换主要受气孔因素的限制,而高肥处理下则主要受非气孔因素的限制。水肥间互作效应明显,合理施肥可提高干旱条件下  $P_n$ 、 $Tr$ 、 $WUE$ , 但品种间气体交换对施肥的反应机制存在差异。

**关键词** 甘薯 土壤水分 施肥 气体交换

中图分类号: S343.1 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2009)01-0079-06

## Characteristics of gas exchange in sweet potato leaf under different soil water content and fertilization

XU Yu-Bin, SONG Ya-Zhen, LI Shi-Qing

(Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract** To understand the effect of soil water and fertilization on gas exchange in two cultivars of sweet potato leaf (“Qinshu 4” and “619”), photosynthesis rate ( $P_n$ ), water use efficiency ( $WUE$ ), transpiration rate ( $Tr$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), stomatal limitation ( $L_s$ ) and intercellular  $CO_2$  ( $C_i$ ) were measured in a pot experiment. Results show that soil water has a significant influence on  $P_n$ ,  $Tr$ ,  $WUE$ ,  $L_s$ ,  $G_s$  and  $C_i$  of sweet potato. Fertilization has marked effect on these indexes as well, except for  $G_s$  in “Qinshu4” cultivar. With the decrease of soil water, a reducing tendency is found for  $P_n$ ,  $Tr$  of sweet potato. Under light soil drought,  $G_s$  and  $L_s$  slightly decrease or increase but the change in  $C_i$  is unapparent. Under severe soil drought, however, both  $G_s$  and  $L_s$  significantly drop, while  $C_i$  increases significantly.  $WUE$  of “Qinshu 4” decreases with decreasing soil water content while light soil drought significantly enhances  $WUE$  in “619”, relative to CK or severe soil drought. Change in  $L_s$  and  $C_i$  with decreasing soil water content indicates that gas change in sweet potato leaf is mainly limited by stomatal factors under slight soil drought, and non-stomatal factors under severe soil drought. Sweet potato  $P_n$  is enhanced with increasing fertilization. Relative to CK,  $Tr$  slightly drops in “Qinshu 4” or significantly increases in “619” at moderate fertilization. However,  $P_n$  in the two varieties significantly increases at high fertilization.  $WUE$  apparently increases at moderate fertilization though high fertilization does not lead to any positive effect. The effect of fertilization on  $G_s$  is positive for “619” and insignificant for “Qinshu 4”. With improvement in soil nutrient,  $L_s$  initially shows an increasing ten-

\* 国家自然科学基金(30670326,30571116)和中国科学院西部之光联合学者项目(2006LH01)资助

\*\* 通讯作者: 李世清(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事植物营养生理生态学研究。E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn

许育彬(1970-), 男, 编辑, 在读博士, 主要从事植物营养生理生态研究。E-mail: xuyubin928@163.com

收稿日期: 2007-12-07 接受日期: 2008-04-15

gency but eventually decreases. For  $C_i$ , leaf gas exchange is mainly limited by stomatal factors under moderate fertilization and non-stomatal factors under high fertilization. A significant interaction exists between soil water content and fertilization for all six indices. This suggests that  $P_n$ ,  $Tr$  and  $WUE$  of sweet potato can be improved by selecting appropriate fertilization and soil water content. However, the degree of response to fertilization is different for the two varieties.

**Key words** Sweet potato, Soil water content, Fertilization, Gas exchange

(Received Dec. 7, 2007; accepted April 15, 2008)

干旱缺水是我国农业可持续发展的主要限制因素。耕作改制和改善栽培条件可有效提高作物生产能力和水分利用效率,这也是目前农业抗旱增产增收的主要途径之一。甘薯是我国第四大作物,具有耐旱、耐瘠薄和粮、经、饲兼用的特性,因而在农业种植结构调整中占有十分重要的地位。虽然甘薯耐旱,但水分胁迫仍会对甘薯的渗透调节、活性氧清除、光合特性、植株形态、茎叶和块根生长发育以及最终产量产生明显的影响<sup>[1-6]</sup>。施肥是增加甘薯产量的重要措施,尤其是在旱薄地。盛锦寿<sup>[7]</sup>的十几年田间试验结果表明,氮、磷、钾配方施肥比当地常规施肥可显著增加甘薯产量,增产效果  $N > K > P$ ,旱地明显高出水旱轮作地。戴树荣<sup>[8]</sup>在沿海丘陵旱地 3 种不同类型土壤上进行 NPK 肥料田间试验,甘薯均获得一定幅度的增产增值效果,并指出低产田土壤应适当增施 N 肥,降低 P、K 比例,中高产田土壤应适当提高 P、K 比例。气孔是植株进行内外气体交换的主要通道,气孔调节与植株光合、呼吸、水分蒸散关系密切。目前关于甘薯叶片气体交换特性的研究报道还比较少,而且基本上以研究水分或渗透胁迫效应为主,尚缺乏对多因子综合效应的研究。本试验在以前研究的基础<sup>[2]</sup>上,对不同水肥条件下甘薯生长前期叶片的气体交换特性进行了研究,旨在为甘薯抗旱高产栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选用甘薯品种“秦薯 4 号”和“619”作为供试材料。所用肥料为复合肥(含纯 N 11%,  $P_2O_5$  15%, 有机质 20%, 腐殖酸 8%)。土壤取自大田耕层,质地为垆土,土壤有机质  $12.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $75.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $19.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $351 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验采用塑料花盆,盆高 35 cm,上口直径 42 cm (包括 2 cm 外沿),下口径 25 cm,底部有通气口。

### 1.2 试验设计

试验于 2005 年 5~9 月在西北农林科技大学南校区玻璃温室内进行,采用盆栽试验。将土风干后,与沙子以 12:1 混和,再与肥料混匀装入盆中,每盆含 6 kg 风干土和 0.5 kg 干沙。混合土壤的饱和持水量为 31.5%。

设正常供水、轻旱和重旱 3 个土壤水分水平,分别为田间持水量 70%~75%、40%~45% 和 30%~35%,采用称重法调控土壤水分;施肥设低肥(CK)、中肥(MF)和高肥(HF)3 个水平,分别为 0、13 g(复合肥)·盆<sup>-1</sup>、26 g(复合肥)·盆<sup>-1</sup>。9 次重复。选用大小一致的薯苗于 5 月 15 日栽于盆中,每盆 1 株,浇水后置阴凉处 1 周,缓苗结束后移入温室中进行水分处理。温室通风正常,以保持整个试验过程中温室内外温度一致。

### 1.3 调查项目

分别于 6 月 25 日 9:00~11:00 进行净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $Tr$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )和大气  $CO_2$  浓度( $C_a$ )等指标的测定,叶片选取植株顶部第一片成熟的完全展开叶,每株重复测定 3 次,取平均值作为最终结果。仪器选用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400 光合作用测定仪。根据以上测定结果计算叶片水分利用效率( $WUE$ )和气孔限制值( $L_s$ )。

$$WUE = P_n / Tr \quad (1)$$

$$L_s = 1 - C_i / C_a \quad (2)$$

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2000 和 DPS 3.1 软件对试验数据进行整理和统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水肥处理对甘薯叶片 $P_n$ 的影响

试验结果(表 1)表明,土壤水分和施肥水平均对甘薯叶片  $P_n$  有极显著影响,水肥之间也存在极显著交互。从水肥两个因素的主效应来看,随着土壤水分的减少,“秦薯 4 号”和“619”两个甘薯品种的叶片  $P_n$  均明显下降;随施肥水平的提高,两个甘薯品种叶片  $P_n$  均呈增加趋势。从两个因素交互效应看,在土壤轻旱和重旱条件下,“秦薯 4 号”叶片  $P_n$  均随施肥量的增加而增加,而甘薯品种“619”在土壤轻旱条件下与“秦薯 4 号”表现一致,在土壤重旱条件下以中肥处理最高,高肥处理明显低于中肥和不施肥处理。说明适当提高施肥水平有助于增加土壤干旱时的叶片  $P_n$ ,提高叶片对大气  $CO_2$  的吸收和同化能力。

表 1 不同水肥处理对甘薯叶片  $P_n$  的影响Tab.1 Effect of water and fertilizer treatments on net photosynthetic rate of sweet potato leaf  $\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 

品种 Variety	施肥 Fertilizer	正常供水 Common water	轻旱 Light drought	重旱 Severe drought	平均 Mean
秦薯 4 号 Qinshu4	HF	9.328 9aA	8.154 4aA	3.624 3cCD	7.035 9aA
	MF	5.381 1bcBC	6.903 3abAB	0.829 6dDE	4.371 3bB
	CK	8.530 0aAB	3.667 3cCD	-0.048 0dE	4.049 8bB
	平均 Mean	7.746 7aA	6.241 7bB	1.468 6bB	
619	HF	16.733 3cC	18.233 3aA	-0.600 0iI	11.455 6aA
	MF	17.500 0bB	14.566 7dD	0.716 7gG	10.927 8bB
	CK	10.066 7fF	11.466 7eE	-0.500 0hH	7.011 1cC
	平均 Mean	14.766 7aA	14.755 6aA	-0.127 8bB	

表中数值后不同大小写字母代表 0.01 和 0.05 水平上的差异显著性。下同。The capital and small letters after the values mean significant difference at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same below.

## 2.2 不同水肥处理对甘薯叶片 $T_r$ 的影响

从水肥两个因素的主效应(表 2)来看,土壤水分和施肥对甘薯叶片  $T_r$  的影响均达到极显著水平。随土壤水分的减少,两个品种的  $T_r$  均呈下降趋势下降;甘薯品种“秦薯 4 号”高肥处理的平均  $T_r$  极显著高于中肥处理和不施肥处理,中肥处理略微低于不施肥处理,二者差异不显著,而甘薯品种“619”的平均  $T_r$  随施肥水平的提高而明显增加,说明增加施肥水平可提高甘薯的  $T_r$ 。水肥间在  $T_r$  上的互作也达到了极显著水平。从不同土壤水分条件下施肥效应看,“秦薯 4 号”在土壤轻旱和重旱下均表现出  $T_r$  随施肥量的增加而增加的趋势;甘薯品种“619”的  $T_r$  在土壤轻旱下与“秦薯 4 号”表现一致,但在土壤重旱时表现为先增后减趋势,即中肥处理最高。由此表明,通过适当增加施肥量可明显提高干旱条件下的甘薯叶片  $T_r$ ,促进叶片水气的交换,有利于植株体内水分和物质的运输。

## 2.3 不同水肥处理对甘薯叶片 $WUE$ 的影响

经方差分析,土壤水分和施肥对甘薯叶片  $WUE$  影响极显著,水肥间也存在极显著互作。从水肥两个因素的主效应来看,随土壤水分的减少,甘薯品种“秦薯 4 号”的叶片  $WUE$  呈明显下降趋势,而甘薯品种“619”表现为先增后减;甘薯品种“秦薯 4 号”的叶片  $WUE$  随施肥量的增加而增加,而甘薯品种“619”表现为先增后减。从两个因素互作效应来看,在轻旱条件下,与不施肥相比较,施肥明显提高了“秦薯 4 号”的叶片  $WUE$ ,但高肥处理与中肥处理差异不显著;而施肥明显降低了甘薯品种“619”的叶片  $WUE$ ,但高肥处理明显高于中肥处理。在重旱条件下,随施肥水平的提高,甘薯品种“秦薯 4 号”的叶片  $WUE$  呈现增加趋势,而甘薯品种“619”则表现为先增加后下降的趋势(表 3)。表明适当增加

施肥量可提高干旱条件下甘薯叶片  $WUE$ 。

## 2.4 不同水肥处理对甘薯叶片气孔特性的影响

### 2.4.1 不同水肥处理对甘薯叶片 $G_s$ 的影响

方差分析表明,土壤水分对两个甘薯品种的叶片  $G_s$  均有极显著影响;施肥对甘薯品种“秦薯 4 号”影响不显著,但极显著影响甘薯品种“619”(表 4);水肥间的互作也达到极显著水平。从土壤水分的主效应来看,3 个土壤水分处理相比,甘薯品种“秦薯 4 号”的叶片  $G_s$  在轻旱下最高,但与正常供水处理差异不显著,二者均明显高于重旱处理,而甘薯品种“619”的  $G_s$  随土壤水分减少而下降的趋势明显。从施肥的主效应来看,“秦薯 4 号”各施肥处理间差异不明显,而“619”随施肥量的增加而增加,说明提高施肥水平可增加甘薯叶片的  $G_s$ 。从不同土壤水分条件下施肥效应来看,在轻旱条件下,甘薯品种“秦薯 4 号”的  $G_s$  随施肥量的增加呈先增后降趋势,而甘薯品种“619”呈增加趋势;在重旱条件下,甘薯品种“秦薯 4 号”的  $G_s$  随施肥量的增加而减少,但各施肥水平间差异不显著,而甘薯品种“619”呈明显的先增加后降低的趋势。由此可见,适当增加施肥,可提高干旱条件下甘薯叶片  $G_s$ ,促进气体交换。

### 2.4.2 不同水肥处理对甘薯叶片 $L_s$ 的影响

从水肥两个因素的主效应(表 5)看,两个甘薯品种的  $L_s$  受土壤水分影响达到极显著水平,处理间相比,在正常供水处理和轻旱处理间差异均不显著,且均极显著高于重旱处理;随施肥量的增加,两个甘薯品种的  $L_s$  呈现先增后减趋势,但甘薯品种“秦薯 4 号”的中肥和高肥处理差异不显著。水肥间存在极显著的互作关系。从不同土壤水分条件下施肥效应看,甘薯品种“秦薯 4 号”在轻旱条件下随施肥量增加呈现先增后减的趋势,在重旱时则随

表 2 不同水肥处理对甘薯叶片  $Tr$  的影响Tab.2 Effect of water and fertilizer treatments on transpiration rate ( $Tr$ ) of sweet potato leaf  $\text{mol}(\text{H}_2\text{O}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 

品种 Variety	施肥 Fertilizer	正常供水 Common water	轻旱 Light drought	重旱 Severe drought	平均 Mean
秦薯 4 号 Qinshu4	HF	5.198 9aA	4.537 8abAB	2.423 4cdCDE	4.053 4aA
	MF	2.655 6cBCD	3.535 6bcABC	1.104 4deDE	2.431 9bB
	CK	4.980 0abA	2.910 0cBCD	0.521 7eE	2.803 9bB
	平均 Mean	4.278 2aA	3.661 1aA	1.349 9bB	
619	HF	15.033 3aA	15.000 0aA	0.225 0gF	10.086 1aA
	MF	14.366 7bA	13.000 0cB	1.710 0fE	9.692 2bA
	CK	6.690 0dC	5.319 8eD	0.182 3gF	4.064 0cB
	平均 Mean	12.030 0aA	11.106 6bB	0.705 9cC	

表 3 不同水肥处理对甘薯叶片  $WUE$  的影响Tab.3 Effect of water and fertilizer treatments on water use efficiency ( $WUE$ ) of sweet potato leaf

品种 Variety	施肥 Fertilizer	正常供水 Common water	轻旱 Light drought	重旱 Severe drought	平均 Mean
秦薯 4 号 Qinshu4	HF	2.035 4aAB	1.845 3abAB	1.385 3bBC	1.755 3aA
	MF	2.193 8aA	1.955 0aAB	0.712 4cC	1.620 4aA
	CK	1.697 0abAB	0.833 8cC	-0.103 2dD	0.809 2bB
	平均 Mean	1.975 4aA	1.544 7bB	0.664 9cC	
619	HF	1.113 1eD	1.215 6cC	-2.532 9gF	-0.068 1cC
	MF	1.218 1cC	1.120 5dD	0.419 1fE	0.919 2aA
	CK	1.504 7bB	1.927 6aA	-2.742 3hG	0.230 0bB
	平均 Mean	1.278 7bB	1.421 2aA	-1.618 7cC	

表 4 不同水肥处理对甘薯叶片  $G_s$  的影响Tab.4 Effect of water and fertilizer treatments on stomatal conductance ( $G_s$ ) of sweet potato leaf  $\text{mol}(\text{H}_2\text{O}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 

品种 Variety	施肥 Fertilizer	正常供水 Common water	轻旱 Light drought	重旱 Severe drought	平均 Mean
秦薯 4 号 Qinshu4	HF	0.232 0abAB	0.144 7bcABC	0.045 3cC	0.140 7
	MF	0.071 3cBC	0.273 8aA	0.078 0cBC	0.141 0
	CK	0.146 6bcABC	0.088 1cBC	0.079 0cBC	0.104 6
	平均 Mean	0.145 0aA	0.168 9aAB	0.067 4bB	
619	HF	0.685 7aA	0.684 3aA	0.003 0gG	0.457 7aA
	MF	0.575 7bB	0.443 7cC	0.024 0fF	0.347 8bB
	CK	0.115 0eE	0.121 0dD	0.002 0gG	0.079 3cC
	平均 Mean	0.458 8aA	0.416 3bB	0.009 7cC	

表 5 不同水肥处理对甘薯叶片  $L_s$  的影响Tab.5 Effect of water and fertilizer treatments on stomatal limitation value ( $L_s$ ) of sweet potato leaf

品种 Variety	施肥 Fertilizer	正常供水 Common water	轻旱 Light drought	重旱 Severe drought	平均 Mean
秦薯 4 号 Qinshu4	HF	0.348 3abAB	0.336 8abAB	0.382 2aAB	0.355 8aA
	MF	0.436 8aA	0.398 7aAB	0.259 2bB	0.364 9aA
	CK	0.3665abAB	0.2637bB	0.0763cC	0.2355bB
	平均 Mean	0.3839aA	0.3331aA	0.2393bB	
619	HF	0.244 2bcB	0.253 4bcB	-0.662 0dC	-0.054 8bC
	MF	0.266 0bB	0.268 6bB	0.240 0cB	0.258 2aA
	CK	0.503 3aA	0.525 0aA	-0.777 8eD	0.083 5bB
	平均 Mean	0.337 8aA	0.349 0aA	-0.399 9bB	

表 6 不同水肥处理对甘薯叶片  $C_i$  的影响  
 Tab.6 Effect of water and fertilizer treatments on intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) of sweet potato leaf  $\mu mol \cdot mol^{-1}$

品种 Variety	施肥 Fertilizer	正常供水 Common water	轻旱 Light drought	重旱 Serious drought	平均 Mean
秦薯 4 号 Qinshu4	HF	258.888 9bcdBC	263.666 7bcdBC	238.000 0cdBC	253.518 5bB
	MF	224.111 1dC	238.777 8cdBC	273.222 2bcBC	245.370 4bB
	CK	253.555 6bcdBC	287.333 3bB	352.666 7aA	297.851 9aA
	平均 Mean	245.518 5bB	263.259 3bAB	287.963 0aA	
619	HF	277.333 3cC	272.666 7cC	614.333 3bB	388.111 1aA
	MF	270.666 7cC	269.000 0cC	276.000 0cC	271.888 9cC
	CK	183.333 3dD	176.333 3dD	649.666 7aA	336.444 4bB
	平均 Mean	243.777 8bB	239.333 3bB	513.333 3aA	

之增加而增加;甘薯品种“619”在轻旱时施肥处理反而低于不施肥处理,但在重旱时随施肥量的增加呈明显的先增加后减少趋势。由此表明,干旱条件下施肥可提高甘薯的  $L_s$ ,但不同品种的反应有差异。

### 2.4.3 不同水肥处理对甘薯叶片 $C_i$ 的影响

测定结果(表 6)表明,土壤水分和施肥及其互作对甘薯  $C_i$  的影响均达到极显著水平。随土壤水分的下降,两个品种的  $C_i$  均在正常供水和轻旱处理间差异不显著,但在重旱处理下  $C_i$  极显著增加;随施肥量的增加,  $C_i$  呈先下降而后上升的趋势。结合  $L_s$  的变化,在轻旱条件下,气体交换主要受气孔因素的限制,重旱条件下则以非气孔因素限制为主。相对于不施肥处理,中肥处理下气孔限制对气体交换的效应较大,而高肥处理的非气孔限制效应增加。从水肥的互作来看,甘薯品种“秦薯 4 号”  $C_i$  在轻旱条件下随施肥量的增加呈先减后增,中肥和高肥处理均低于不施肥处理,在重旱条件下呈降低趋势,说明土壤干旱时施肥后叶片气体交换主要受气孔因素限制,轻旱时高施肥量相对于中施肥量的非气孔因素限制效应稍有上升,重旱时则相反;而甘薯品种“619”的  $C_i$  在轻旱条件下呈增加趋势,在重旱条件下先减后增,说明轻旱时施肥后叶片气体交换主要受非气孔因素限制,且随施肥量的增加非气孔因素限制效应呈上升趋势,而重旱时中等施肥量下气体交换主要受气孔因素限制,到了高肥量时非气孔因素限制变成主要影响因素。

## 3 讨论

气孔是植物进行内外气体交换的主要通道,气孔运动与植物叶片光合和蒸腾作用密切相关。在 PEP 渗透胁迫后,甘薯叶片  $P_n$ 、 $Tr$  和  $G_s$  下降,并随胁迫时间的延长而加剧<sup>[6]</sup>。本研究结果也表明,土壤水分对甘薯叶片  $P_n$ 、 $Tr$  和  $G_s$  有极显著的影响。

相对于正常水分处理,轻旱处理的这 3 个生理指标下降或略微增加,但变化幅度较小,而重旱处理则明显下降,变化幅度较大。这既反映出甘薯耐旱的特性,又说明在水分严重不足时甘薯叶片气体会明显受到抑制。结合  $L_s$  和  $C_i$  的变化来看,在轻旱条件下,两个甘薯品种的  $L_s$  和  $C_i$  下降或上升的幅度不明显( $P>0.05$ );在重旱条件下,两个甘薯品种的  $L_s$  明显下降,  $C_i$  明显上升,说明在轻旱条件下,两个品种的叶片气体交换主要受气孔因素的限制,而在重旱时气孔限制作用下降,非气孔因素限制效应增加,并占主导地位。在苜蓿等其他植物上也发现,在轻度和中度水分胁迫下,光合和蒸腾主要受气孔限制,重度胁迫时二者的下降则主要由非气孔限制引起<sup>[9-11]</sup>。这说明本研究结果与前人结论相一致。

另外,轻旱条件下甘薯叶片  $WUE$  “秦薯 4 号”明显下降,而甘薯品种“619”提高。说明不同甘薯品种之间叶片  $WUE$  对轻度干旱胁迫的反应存在差异;“秦薯 4 号”的下降主要归因于光合能力的减弱,而“619”的升高主要是  $Tr$  下降的结果;重旱条件下两个品种均大幅下降,其原因主要归因于光合作用严重受抑。

光合作用受光合色素含量、叶绿素荧光特性以及光合相关的酶类等非气孔因素的调节<sup>[12,13]</sup>。张云华等<sup>[5]</sup>研究表明,在水分胁迫条件下,甘薯叶绿素含量、 $P_n$ 、 $PS$  原初光化学效率( $F_v/F_m$ )和光化学猝灭系数( $qP$ )下降,非光化学猝灭系数( $qN$ )增加。施肥可改善  $CO_2$  等气体交换的非气孔调节能力<sup>[14-16]</sup>。从试验结果看,适当增加施肥量可提高甘薯  $P_n$ 、 $Tr$  以及叶片  $WUE$ ,同时使  $G_s$  有所增加,而随施肥水平的上升,两个品种的  $L_s$  均呈先增后减的趋势,而  $C_i$  则呈先降后升的趋势,即中肥处理的  $L_s$  最高,  $C_i$  最低。由此表明,中肥处理下气体交换主要受气

孔因素限制,在高肥处理条件下主要受非气孔因素限制。其原因可能是施肥改善了土壤营养状况,增加了植株体内矿物质的积累,提高了各器官的渗透调节能力,保证了各种新陈代谢的正常进行<sup>[17]</sup>,进而提升甘薯光合能力。目前在甘薯上这方面的研究报道很少,因而有待于进一步深入探讨。另外,土壤营养的改善也促进了甘薯叶面蒸腾,提高了水分利用效率。但叶片 *WUE* 对施肥水平的反应存在差异,两个甘薯品种的中肥处理均极显著高于不施肥的对照,进一步增加施肥量时水分利用效率提高不明显,甚至下降,因此施肥对叶片 *WUE* 的影响存在一个适宜范围。这与在大豆<sup>[18]</sup>、小麦<sup>[19]</sup>、玉米<sup>[20]</sup>等作物上的研究结果相一致。

水肥之间存在明显的互作效应。在轻旱和重旱条件下适当增加施肥量均可提高甘薯 *Pn*、*Tr*、*Gs* 和叶片 *WUE*, 促进气体交换。轻旱条件下,随施肥量的增加,“秦薯 4 号”的 *Ls* 呈先增后减趋势,*Ci* 呈先降后增趋势;“619”的 *Ls* 呈下降趋势,*Ci* 呈上升趋势。重旱条件下,“秦薯 4 号”的 *Ls* 呈上升趋势,*Ci* 呈下降趋势;“619”的 *Ls* 呈先增后减趋势,*Ci* 呈先降后增趋势。这说明随施肥的增加,两个甘薯品种间叶片气体交换的反应机制存在差异,这可能与品种特性有关,具体原因有待进一步研究和探讨。

## 参考文献

- [1] 张明生, 谢波, 戚金亮, 等. 甘薯植株形态、生长势和产量与品种抗旱性的关系[J]. 热带作物学报, 2006, 27(1): 39-43
- [2] 许育彬, 程雯蔚, 陈越, 等. 不同施肥条件下干旱对甘薯生长发育和光合作用的影响[J]. 西北农业学报, 2007, 16(2): 59-64
- [3] 许育彬, 陈越, 付增光. 甘薯的抗旱生理及栽培技术研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(1): 128-131
- [4] 王兰兰, 张立军, 陈贵. 甘薯愈伤组织对干旱胁迫的生理反应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 143-148
- [5] 张云华, 王荣富, 阮龙. 水分胁迫对甘薯叶绿素荧光和光合特性的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(8): 208-210
- [6] 李扬, 孙存华, 贺鸿雁, 等. PEG 渗透胁迫对甘薯光合作用的影响[J]. 河南农业科学, 2005 (6): 37-39
- [7] 盛锦寿. 氮磷钾肥配合施用对甘薯的增产效果[J]. 土壤肥料, 2005 (5): 29-31
- [8] 戴树荣. 南安市沿海丘陵旱地甘薯施肥模式初探[J]. 福建热作科技, 2004, 29(1): 1-4
- [9] 赵金梅, 周禾, 郭继承, 等. 不同水分胁迫对紫花苜蓿分枝期光合性能的影响[J]. 中国草地学报, 2007, 29(2): 41-44
- [10] 柯世省. 水分胁迫下夏蜡梅光合作用的气孔和非气孔限制[J]. 浙江林业科技, 2006, 26(6): 1-5
- [11] 徐利霞, 杨水平, 姚小华, 等. 石漠化地区 3 个树种幼苗在水分胁迫下的光合特性与抗旱性关系[J]. 林业科学研究, 2006, 19(6): 785-790
- [12] 姚庆群, 谢贵水. 干旱胁迫下光合作用的气孔与非气孔限制[J]. 热带农业科学, 2005, 25(4): 80-85
- [13] 关义新, 戴俊英, 林艳. 水分胁迫下植物叶片光合的气孔和非气孔限制[J]. 植物生理学通讯, 1995, 31(4): 293-297
- [14] 张岁岐, 山仑, 薛青武. 氮磷营养对小麦水分关系的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 147-151
- [15] 肖凯, 张树华, 邹定辉. 不同形态氮素营养对小麦光合特性的影响[J]. 作物学报, 2000, 26(1): 53-58
- [16] 上官周平. 氮素营养对旱作小麦光合特性的调控[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(2): 105-110
- [17] 关军锋, 李广敏. 干旱条件下施肥效应及其作用机理[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 59-61
- [18] 孙继颖, 高聚林, 吕小红. 施氮量对大豆抗旱生理特性及水分利用效率的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26(4): 517-522
- [19] 谭雪莲, 张绪成, 郭天文, 等. 氮素对小麦幼苗叶片气体交换和能量转化特性的调控[J]. 核农学报, 2007, 21(3): 305-310
- [20] 宋尚有, 王勇, 樊廷录, 等. 氮素营养对黄土高原旱地玉米产量、品质及水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 387-392