

唐忠厚, 陈晓光, 魏 猛, 等. 低钾下光照度与 CO<sub>2</sub> 浓度对不同钾效率基因型甘薯光合作用的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 267-273.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.02.005

## 低钾下光照度与 CO<sub>2</sub> 浓度对不同钾效率基因型甘薯光合作用的影响

唐忠厚<sup>1,2</sup>, 陈晓光<sup>1</sup>, 魏 猛<sup>1</sup>, 张爱君<sup>1</sup>, 李洪民<sup>1</sup>, 丁艳锋<sup>2</sup>

(1. 中国农业科学院甘薯研究所/农业部甘薯生物学与遗传育种重点实验室, 江苏 徐州 221121; 2. 南京农业大学农学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 为揭示不同钾效率基因型甘薯在低钾条件下叶片光合性能及其响应效应, 以黄潮土区长期定位试验处理[正常钾处理(NPK 处理)和低钾处理(NP 处理)]下甘薯为对象, 研究低钾条件下不同钾利用效率基因型甘薯光照度与 CO<sub>2</sub> 响应曲线及其特征参数变化。结果显示, 2 个钾处理下甘薯叶片净光合速率都随光照度的增加迅速上升, 当光照度达到 1 000 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 后渐趋平缓, 增大至光饱和点, 出现最大净光合速率, 光照度达到光饱和点后净光合速率略有下降; NP 处理下, 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度小于 200 μmol/mol 时甘薯叶片净光合速率随胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的增加而缓慢升高, 200~400 μmol/mol 时净光合速率随胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的增加迅速升高, 随后又缓慢升高, 直至 CO<sub>2</sub> 饱和点出现最大净光合速率。直角双曲线修正模型拟合分析结果显示, 低钾条件下 3 个不同钾利用效率基因型品种(徐薯 18、徐薯 32、宁紫薯 1 号)间最大净光合速率、CO<sub>2</sub> 补偿点与光补偿点差异显著 ( $P < 0.05$ ), 饱和光照度与光响应曲线初始斜率差异不显著。与 NPK 处理相比, NP 处理下叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度与叶绿素含量显著下降, 且不同钾利用效率品种间的光合特性存在一定差异。不同钾利用效率品种对光照度与 CO<sub>2</sub> 响应强度次序相同, 均表现为: NPK-徐薯 18 > NPK-徐薯 32 > NPK-宁紫薯 1 号 > NP-徐薯 32 > NP-徐薯 18 > NP-宁紫薯 1 号。低钾条件下徐薯 32 叶片有最大净光合速率、饱和光照度与饱和 CO<sub>2</sub> 浓度以及最低 CO<sub>2</sub> 补偿点和光呼吸速率, 叶绿素含量受影响小, 因此徐薯 32 较适宜于低钾条件下种植。

**关键词:** 甘薯; 低钾; 光合作用; 光照度; CO<sub>2</sub> 浓度; 响应曲线

**中图分类号:** S531.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)02-0267-07

## Photosynthesis in response to light intensity and CO<sub>2</sub> concentration under low potassium condition in sweet potato with different genotypes of potassium utilization efficiency

TANG Zhong-hou<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-guang<sup>1</sup>, WEI Meng<sup>1</sup>, ZHANG Ai-jun<sup>1</sup>, LI Hong-min<sup>1</sup>, DING Yan-feng<sup>2</sup>

(1. Sweetpotato Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Sweetpotato Biology and Genetic Breeding, Ministry of Agriculture, Xuzhou 221121, China; 2. College of Agronomy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

收稿日期: 2015-08-19

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20151162); 公益性行业(农业)科研专项(201403039, 2013030311); 江苏科技支撑计划项目(BE2014315)

作者简介: 唐忠厚(1975-), 男, 安徽枞阳人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事甘薯栽培生理生态研究。(E-mail) zhonghoutang@sina.com

**Abstract:** To understand the photosynthetic performance and light intensity and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) responses in sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam] genotypes with different potassium utilization efficiencies (KUE), the photosynthetic parameters under low potassium (K) condition and normal fertilization condition were measured in a long-term located fertilizer experiment

station in Xuzhou. The results showed that the net photosynthetic rate ( $P_n$ ) mounted as light intensity increased, and leveled off at light saturation point under both low K level and normal K level. Under low K level,  $P_n$  increased slowly as inter-cellular  $CO_2$  concentrations ( $C_i$ ) climbed 200  $\mu\text{mol/mol}$ , rose rapidly with  $C_i$  of 200–400  $\mu\text{mol/mol}$ , then rose slowly to the peak at  $C_i$  saturation point. Three genotypes of sweet potato showed significant differences in maximum net photosynthetic rate,  $CO_2$  compensation point and light compensation point, and  $P_n$ , transpiration rate ( $T_r$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ) and chlorophyll content index (CCI) in sweetpotato leaves dropped significantly under low K level. The responses to light intensity and carbon dioxide followed the order of Xushu18 > Xushu32 > Ningzishu1 under normal K level > Xushu32 > Xushu18 > Ningzishu1 under low K level. Xushu32 presented maximum photosynthetic rate, the highest saturated  $CO_2$  and saturated light intensity, and the lowest  $CO_2$  compensation point and photorespiratory rate among varieties under low K level, indicating that Xushu32 is a potential variety for low K planting.

**Key words:** sweet potato; low potassium; photosynthesis; light intensity;  $CO_2$  concentration; responses curve

因土壤类型差异、管理措施不当以及作物吸收,土壤缺钾广泛存在<sup>[1]</sup>。据相关文献报道,中国约 1/3 左右的耕地土壤供钾能力不足,南方地区尤为严重<sup>[2]</sup>。钾缺乏可引起作物生长过程中代谢利用与化合物转化的变化,从而影响作物生长、产量及其品质<sup>[3-6]</sup>。钾缺乏亦不利于作物叶片保持正常净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,导致叶片光合能力的下降<sup>[7-9]</sup>。光合作用是生物界所有物质代谢的基础,植物叶片的光合能力与其生物产量密切相关<sup>[10]</sup>。与光合作用有关的光照度和  $CO_2$  响应曲线是植物生理和植物生态学研究的重要工具,能反映各种环境及植物自身的生理状况对光合作用效率的影响<sup>[11]</sup>。光照度和  $CO_2$  响应曲线的确定,对了解植物光化学过程中的光化学效率非常重要<sup>[12]</sup>。

甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam] 为地下块根类作物,是重要粮食、饲料和工业加工原料。中国为主要甘薯生产国,2010 年甘薯种植面积约  $4.60 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 约占世界甘薯种植面积 50%, 年产量约  $1.0 \times 10^8 \text{ t}$ , 占世界甘薯总产量的 75.3%<sup>[13]</sup>。相对于一般大田作物,甘薯具有耐贫瘠、抗逆性强等特点,但外界环境因子显著影响其生长特性。种植密度<sup>[14]</sup>、土壤水分<sup>[15-16]</sup>、盐分<sup>[17]</sup>、施肥期<sup>[18]</sup>、肥力<sup>[19-21]</sup> 等因素影响甘薯生长、产量及其品质的变化。钾 (K) 为作物重要“品质元素”,对甘薯生长发育与品质形成至关重要<sup>[22-24]</sup>;同时,甘薯钾吸收与利用效率存在显著基因型差异<sup>[23,25]</sup>。土壤缺钾或低钾影响作物光合产物的合成及相关的生理代谢<sup>[3]</sup>。作者前期研究表明,低钾伤害甘薯叶片超微结构,提高甘薯叶片抗氧化保护酶活性以及钾利用效率,且不同钾利用效率甘薯材料间有一定差异。低钾下甘薯光合特性,尤其是其潜在的光合能力是否受影响尚未见

报道。为此,本研究利用黄潮土区 33 年长期肥料定位试验田 (正常钾水平和低钾水平),采用直角双曲线修正模型拟合分析光合和  $CO_2$  响应特征参数,对 3 个不同钾利用效率甘薯叶光合作用对光照度和  $CO_2$  的响应进行模拟,以揭示不同钾利用效率基因型甘薯低钾条件下叶片光合性能及其响应效应,为研究甘薯光合特性、钾高效利用及优质栽培提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

选择不同钾利用效率甘薯品种徐薯 18、徐薯 32、宁紫薯 1 号。徐薯 18 为白肉型优良品种,钾利用效率中等;徐薯 32 为超短蔓黄肉型品种,钾利用效率较高;宁紫薯 1 号为紫肉型优良品种<sup>[22]</sup>,钾利用效率较低。

### 1.2 试验设计

2013 年在 1980 年秋播开始设置的长期肥料定位试验田 (北纬  $34.27^\circ$ , 东经  $117.29^\circ$ ) 中进行,土壤为黄潮土,质地沙壤。试验设 2 个处理:施钾处理 (NPK 处理),施氮、磷、钾肥;不施钾处理 (低钾, NP 处理),施氮肥、磷肥,不施钾肥。每处理重复 4 次。肥料种类与用量:氮肥为尿素,用量 (N) 150  $\text{kg/hm}^2$ ;磷肥为过磷酸钙,用量 ( $P_2O_5$ ) 75  $\text{kg/hm}^2$ ;钾肥为硫酸钾,用量 ( $K_2O$ ) 为 112.5  $\text{kg/hm}^2$ 。肥料 1 次施入。2012 年施钾处理 (NPK 处理) 土壤主要养分含量:速效钾 101.10  $\text{mg/kg}$ ,有机质含量 10.45  $\text{g/kg}$ ,全氮 1.08  $\text{g/kg}$ ,全磷 0.87  $\text{g/kg}$ ,速效磷 15.10  $\text{mg/kg}$ ;不施钾处理 (NP 处理) 土壤主要养分含量:速效钾 44.10  $\text{mg/kg}$ ,有机质含量 11.23  $\text{g/kg}$ ,全氮 1.11  $\text{g/kg}$ ,全磷 0.79  $\text{g/kg}$ ,速效磷 15.40  $\text{mg/kg}$ 。

小麦-甘薯轮作,平茬收割,人工翻地(20 cm 深),小区面积 33.3 m<sup>2</sup>,每小区 6 行,垄宽 85 cm,高 25 cm。6 月中旬扦插,苗长 25~30 cm,每小区 155 株。田间管理同一般甘薯高产栽培。

### 1.3 测定方法

采用 Li-6400XT 型便携式光合测定仪(LI-COR, Lincoln, USA),在移栽后 60 d 测定甘薯植株主茎顶第 2 或 3 完全展开叶片净光合速率( $P_n$ )。叶室配备 LED 红蓝光源,光合响应曲线测定,温度设置为 26 ℃,CO<sub>2</sub> 浓度为 400 μmol/mol,光照度梯度为 0 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、20 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、50 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、100 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、200 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、400 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、600 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、800 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、1 000 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、1 200 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、1 400 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、1 600 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、1 800 μmol/(m<sup>2</sup>·s)、2 000 μmol/(m<sup>2</sup>·s);CO<sub>2</sub> 响应曲线测定,温度设置为 26 ℃,光照度为 1 000 μmol/(m<sup>2</sup>·s),CO<sub>2</sub> 浓度梯度为 50 μmol/mol、100 μmol/mol、200 μmol/mol、300 μmol/mol、400 μmol/mol、600 μmol/mol、800 μmol/mol、1 000 μmol/mol、1 200 μmol/mol、1 500 μmol/mol。测定前使用 400 μmol/(m<sup>2</sup>·s)冷光源诱导 15 min,在每个光照度下平衡 30 s 后开始测定,重复 3 次。以光照度为横坐标, $P_n$ 为纵坐标,制作  $P_n$ -光照度响应曲线;以 CO<sub>2</sub> 浓度为横坐标, $P_n$ 为纵坐标,制作  $P_n$ -CO<sub>2</sub> 响应曲线。

选择晴天 9:30 至 12:00 间测定气孔导度( $G_s$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、净光合速率( $P_n$ )等光合参数。利用叶绿素测定仪(CCM-200, Opti-Sciences, Tyngsboro, MA, USA)同步测定叶绿素含量。

### 1.4 光照度与 CO<sub>2</sub> 响应曲线特征参数提取

分别参照光合作用对光照度响应的直角双曲线修正模型<sup>[26]</sup>和对 CO<sub>2</sub> 响应的直角双曲线修正模型<sup>[27]</sup>提取甘薯叶片的光合参数(即最大净光合速率、光饱和点、光补偿点和暗呼吸速率,以及光合能力、CO<sub>2</sub> 饱和点、光呼吸速率和 CO<sub>2</sub> 补偿点等)。

### 1.5 数据统计分析

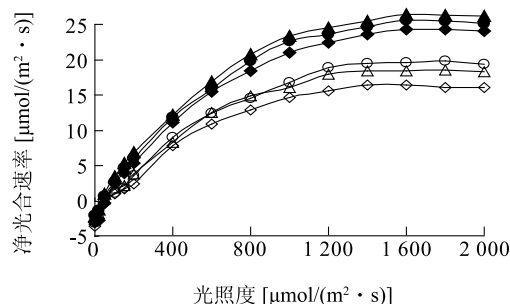
用 SPSS13.0 软件进行数据统计分析,采用单因素统计分析[One-way, ANOVA 和最小显著差异法

(LSD)]比较差异显著性。用 Microsoft Excel 2003 计算试验数据与作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 低钾胁迫对不同品种甘薯叶片光照度响应曲线的影响

光照度显著影响甘薯叶片光合作用,不同品种在 2 个钾水平处理下对光照度的响应也不相同(图 1)。正常施钾条件下 3 个品种叶片  $P_n$  随着光照度的增加先迅速上升,光照度 1 000 μmol/(m<sup>2</sup>·s) 后渐趋平缓,增大至光饱和点,对应出现最大净光合速率,光照度达光饱和点后  $P_n$  略有下降,可能出现光抑制现象;低钾胁迫下甘薯叶片  $P_n$  对光照度的响应曲线变化趋势与正常供钾条件下(NPK 处理)近似一致。说明虽然低钾胁迫能在一定程度上降低光照度对甘薯叶片光合作用的效应,但对光照度响应曲线变化趋势影响甚小。低钾胁迫下徐薯 32 光合能力表现最强,宁紫薯 1 号最低。



◆ NPK-宁紫薯1号; ● NPK-徐薯32; ▲ NPK-徐薯18;  
◇ NP-宁紫薯1号; ○ NP-徐薯32; △ NP-徐薯18

图 1 在低钾胁迫(NP)和正常施钾(NPK)处理下不同品种甘薯叶片光合作用对光照度的响应曲线

Fig.1 Photosynthetic rate of leaves of different sweet potato cultivars under normal K level and low K level in response to light intensity

### 2.2 低钾胁迫下不同品种甘薯叶片光照度响应特征参数

用直角双曲线修正模型拟合分析 2 个钾处理下光照度对不同品种甘薯叶片的响应特征参数。结果(表 1)显示,不同品种甘薯叶片光照度响应特征参数存在差异。低钾胁迫下,宁紫薯 1 号光照度响应曲线初始斜率、光补偿点与暗呼吸速率最高,最大净光合速率与饱和光照度最低;徐薯 32 最大净光合速

率与饱和光照度最高,3 个品种间最大净光合速率、光补偿点存在显著性差异( $P<0.05$ ),而饱和光照度与光响应曲线初始斜率差异不显著。低钾胁迫下 3 个甘薯品种光照度响应曲线初始斜率、最大净光合速率和饱和光照度均显著低于正常施钾处理,而光补偿点与暗呼吸速率显著高于正常施钾处理。2 个钾处理下甘薯叶片最大净光合速率都随饱和光照度增大而增加,光补偿点与暗呼吸速率降低。

### 2.3 低钾胁迫对不同品种甘薯叶片 $\text{CO}_2$ 响应曲线的影响

由图 2 可知,钾显著影响甘薯叶片  $P_n$  对  $\text{CO}_2$  的响应。低钾胁迫下,  $C_i$  小于  $200 \mu\text{mol}/\text{mol}$  时,甘薯叶片  $P_n$  随着  $C_i$  的增加而缓慢升高,  $200\sim 400 \mu\text{mol}/\text{mol}$

时,  $P_n$  随  $C_i$  的增加迅速升高,随后又缓慢升高,直至  $\text{CO}_2$  饱和点出现最大净光合速率,表明一定范围内  $\text{CO}_2$  浓度的升高有利于甘薯叶片净光合速率的提高;  $C_i$  达到  $\text{CO}_2$  饱和点后,  $P_n$  略有下降,可能是发生了  $\text{CO}_2$  饱和和抑制现象。正常施钾条件下,在  $C_i$  达到  $400 \mu\text{mol}/\text{mol}$  前,  $P_n$  随着  $C_i$  的增加迅速升高,随后缓慢升高,直至在  $\text{CO}_2$  饱和点出现最大净光合速率,说明低  $\text{CO}_2$  浓度下,钾供应对增强甘薯对  $\text{CO}_2$  的利用有积极的调控作用。同一钾水平下,3 个甘薯品种叶片  $P_n$  对  $\text{CO}_2$  变化的响应趋势相似,但 2 个钾处理的不同品种  $P_n$  随  $\text{CO}_2$  浓度增加的增幅有差异,徐薯 18 增幅最大,徐薯 32 最小。

表 1 在低钾胁迫 (NP) 和正常施钾 (NPK) 处理下不同品种甘薯叶片光照度响应特征参数

Table 1 Characteristic parameters of photosynthesis in response to light intensity in the leaves of different sweet potato cultivars under normal K level and low K level

处 理	光响应曲线 初始斜率	最大净光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	饱和光照度 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	光补偿点 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	暗呼吸速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
NPK-宁紫薯 1 号	0.050a	24.36b	1 929.42a	61.84c	2.93b
NPK-徐薯 18	0.049a	26.34a	1 822.83b	35.96d	1.74d
NPK-徐薯 32	0.045b	25.48ab	1 756.60bc	41.95d	1.84d
NP-宁紫薯 1 号	0.037c	16.39e	1 647.63d	89.13a	3.07a
NP-徐薯 18	0.036c	18.60d	1 660.62cd	64.32c	2.22b
NP-徐薯 32	0.035c	19.81c	1 723.37bcd	72.65b	2.44b

NPK:施氮、磷、钾肥;NP:施氮、磷肥,不施钾肥。同一列中不同字母表示差异达 0.05 显著水平。

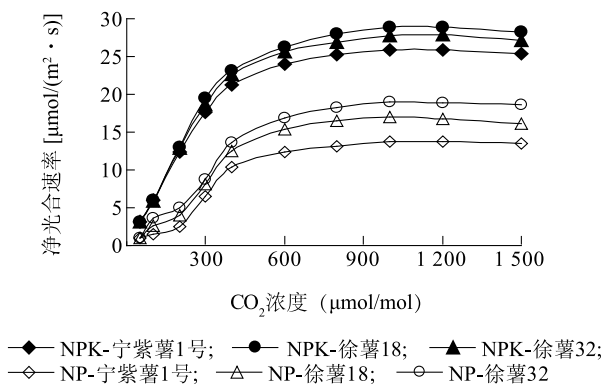


图 2 在低钾胁迫 (NP) 和正常施钾 (NPK) 处理下不同品种甘薯叶片光合作用对  $\text{CO}_2$  的响应曲线

Fig. 2 Photosynthesis of leaves of different sweet potato cultivars under normal K level and low K level in response to intercellular  $\text{CO}_2$  concentration

### 2.4 低钾胁迫下不同品种甘薯叶片 $\text{CO}_2$ 响应特征参数

用直角双曲线修正模型拟合分析 2 个钾处理下不同品种甘薯叶片  $\text{CO}_2$  响应特征参数。结果(表 2)显示,不同甘薯品种叶片  $\text{CO}_2$  响应特征参数也存在差异。低钾胁迫下宁紫薯 1 号  $\text{CO}_2$  补偿点最高,最大净光合速率最低;徐薯 32 最大净光合速率和饱和  $\text{CO}_2$  浓度最高,  $\text{CO}_2$  补偿点与光呼吸速率最低。3 个品种间最大净光合速率、 $\text{CO}_2$  补偿点存在显著差异( $P<0.05$ );对于饱和  $\text{CO}_2$  浓度与光呼吸速率,徐薯 18 与宁紫薯 1 号、徐薯 32 间差异显著( $P<0.05$ ),宁紫薯 1 号与徐薯 32 间差异不显著。低钾胁迫下响应曲线的初始羧化效率、最大净光合速率与光呼吸速率显著低于正常施钾处理,而  $\text{CO}_2$  补偿点与饱和  $\text{CO}_2$  浓度显著高于正常施钾处理;随饱和  $\text{CO}_2$  浓



度增加,甘薯叶片最大净光合速率增加,而光呼吸速率与 CO<sub>2</sub> 补偿点降低。

表 2 在低钾胁迫 (NP) 和正常施钾 (NPK) 处理下不同品种甘薯叶片 CO<sub>2</sub> 响应特征参数

Table 2 Parameters of photosynthesis in response to intercellular CO<sub>2</sub> concentration in the leaves of different sweet potato cultivars under normal K level and low K level

处 理	响应曲线的 初始羧化效率	最大净光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	饱和 CO <sub>2</sub> 浓度 ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	CO <sub>2</sub> 补偿点 ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	光呼吸速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
NP-宁紫薯 1 号	0.037bc	14.22e	1 115.13a	49.342a	1.760cd
NP-徐薯 32	0.049b	19.46c	1 124.38a	33.726c	1.613d
NP-徐薯 18	0.046b	17.44d	1 071.62b	41.996b	1.850c
NPK-宁紫薯 1 号	0.121a	26.22b	1 057.57c	25.278e	2.884b
NPK-徐薯 32	0.126a	28.12ab	1 059.46c	27.749de	3.273a
NPK-徐薯 18	0.129a	29.15a	1 075.66b	28.593d	3.468a

NPK:施氮、磷、钾肥;NP:施氮、磷肥,不施钾肥。同一列中不同字母表示差异达 0.05 显著水平。

## 2.5 低钾胁迫对不同品种甘薯叶片光合特性与叶绿素含量的影响

表 3 显示,低钾胁迫对甘薯叶片光合特性有显著影响。与正常施钾处理(NPK 处理)相比,低钾胁迫下(NP 处理)叶片  $P_n$ 、 $T_r$  与  $G_s$  显著下降( $P < 0.05$ ),而叶片  $C_i$  变化不明显;不同钾利用效率品种间光合特性有一定差异,在生长期 60 d,低钾胁迫下徐薯 18、宁紫薯 1 号和徐薯 32 顶 2 或 3 展开叶片净光合速率分别较正常施钾处理下降 38%、59% 和 24%,蒸腾速率分别下降 30%、36% 和 38%,气孔导度分别下降 14%、25% 和 25%。表明低钾胁迫抑制各品种幼叶光合产物的形成,显著降低块根产量。

低钾胁迫下不同品种叶片光合功能的差异可能受钾利用效率影响,与甘薯块根产量密切相关。

叶绿素含量对叶片光合特性至关重要。表 3 显示,低钾胁迫降低甘薯叶片叶绿素含量,但品种间变化幅度不同,与正常施钾处理相比,徐薯 18 和宁紫薯 1 号显著下降( $P < 0.05$ ),其中宁紫薯 1 号下降幅度最大,达 28.7%,而徐薯 32 变化不明显。说明低钾胁迫不同程度地干扰了叶片叶绿素生物合成,导致叶片光合能力下降;徐薯 32 叶片叶绿素含量较高,一定程度减少低钾胁迫引起的缺钾症状和对作物生长的不良效应。

表 3 在低钾胁迫 (NP) 和正常施钾 (NPK) 处理下 3 个甘薯品种光合特性与叶绿素含量变化

Table 3 Changes of photosynthetic performance and chlorophyll content of three sweet potato varieties under normal K level and low K level

处 理	净光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	气孔导度 [ $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	胞间二氧化碳浓度 ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	蒸腾速率 ( $\text{mmol}/\text{mol}$ )	叶绿素含量 (SPAD 值)
NP-徐薯 18	13.3c	0.49c	291.3a	5.4b	20.8d
NP-宁紫薯 1 号	7.5d	0.47c	257.9b	4.7bc	17.9e
NP-徐薯 32	14.5c	0.48c	301.9a	5.0b	26.4ab
NPK-徐薯 18	21.3a	0.57ab	292.0a	7.8a	23.1c
NPK-宁紫薯 1 号	18.3b	0.63a	292.1a	7.3a	25.1b
NPK-徐薯 32	19.0b	0.64a	297.2a	8.1a	28.1a

NPK:施氮、磷、钾肥;NP:施氮、磷肥,不施钾肥。同一列中不同字母表示差异达 0.05 显著水平。

## 3 讨 论

钾是作物必需的大量营养元素之一,与植物的光合特性密切相关。Ozbun 等较早报道钾对植物光合作用的影响,认为钾通过影响气孔的开闭,调节

CO<sub>2</sub> 透入叶片和水分蒸腾的速率,进而影响光合作用<sup>[28]</sup>。低钾或缺钾为较普遍的非生物逆境,是影响植物生长的主要环境因子之一,不利于作物光合产物合成与代谢<sup>[29-30]</sup>。因此,诸多学者关注低钾对作物生长及生理的影响<sup>[7,31-34]</sup>,寻求对低钾的缓冲与

适应策略<sup>[3,22]</sup>。甘薯是典型喜钾作物,钾对甘薯叶片光合特性有一定影响<sup>[18,34]</sup>,尤其干旱胁迫下缺钾会导致甘薯幼苗光合作用严重受阻,对植株生长极其不利<sup>[13]</sup>。本研究中,在长期定位肥料试验条件下,低钾胁迫一定程度抑制了甘薯叶片叶绿素合成,降低光合能力,使叶片净光合速率、蒸腾速率与气孔导度显著下降,而这种下降必然导致光合产物合成与转化受阻,可能是甘薯生长负效应的重要机制之一;而甘薯表现出的光合能力基因型差异,对于研究低钾胁迫下甘薯适应性及钾利用效率具有科学指导意义。

植物光合作用对光响应曲线反映了植物净光合速率和光照度之间的关系。本研究拟合了低钾胁迫与正常钾水平下甘薯光响应曲线,结果显示低钾作为限制因素,一定程度影响叶片光响应曲线。同时,低光照度时,净光合速率对光照度响应曲线斜率较大,CO<sub>2</sub>浓度趋于相对稳定饱和时,光能转化效率高,光照度的主导优势明显;光照度较高时,净光合速率受气孔导度、空气CO<sub>2</sub>浓度和非气孔限制等多因素影响,CO<sub>2</sub>浓度无法满足光合机构高速运转的需要,CO<sub>2</sub>同化不能与光能吸收协调,使加氧酶(Rubisco)羧化活性降低,二磷酸核酮糖(RuBP)的再生受到限制<sup>[35-36]</sup>。在低钾胁迫下,强光照射叶片导致光合电子传递过度还原,植物体内活性氧自由基(ROS)与光氧化增加<sup>[29]</sup>,光饱和点降低,补偿点提高,甘薯叶片净光合速率对光照度响应曲线趋于平缓;光照度饱和后,净光合速率随光照度的增加而略有下降,是否为光抑制需进一步验证。

CO<sub>2</sub>是光合作用的底物。饱和光条件下,叶片在光合作用过程中对CO<sub>2</sub>的利用受Rubisco 消化RuBP能力、光合电子传递生成ATP及NADPH能力等因素的制约<sup>[37]</sup>。低CO<sub>2</sub>浓度时,正常钾水平下叶片光合作用对CO<sub>2</sub>的响应表现最显著,但在低钾与低CO<sub>2</sub>浓度下,净光合速率上升相对平缓,CO<sub>2</sub>浓度达到200 μmol/mol时,净光合速率对CO<sub>2</sub>浓度响应曲线斜率明显增大;CO<sub>2</sub>浓度较高条件下,叶片净光合速率最大,反映植物叶片的最大光合能力,正常钾水平的显著高于低钾水平的,但两者净光合速率对CO<sub>2</sub>浓度响应曲线斜率都较小,说明此阶段叶片光合作用很大程度上受养分、水分、光照等环境因子影响。

低钾一定程度减弱光照度对甘薯叶片光合作用

的影响,降低甘薯叶片光合性能。在CO<sub>2</sub>浓度小于400 μmol/mol时CO<sub>2</sub>浓度的升高有利于低钾条件下甘薯叶片净光合速率的增强。不同钾利用效率品种对光照度与CO<sub>2</sub>响应强度次序相同,在正常施钾条件下均表现为徐薯18>徐薯32>宁紫薯1号,低钾条件下均表现为徐薯32>徐薯18>宁紫薯1号。低钾下3个甘薯品种中徐薯32的净光合速率、饱和光照度与饱和CO<sub>2</sub>浓度最大,CO<sub>2</sub>补偿点与光呼吸速率最低,低钾对徐薯32叶绿素含量的影响较小,因此徐薯32较适宜于低钾下种植。

致谢: 感谢井冈山大学叶子飘博士提供用于响应曲线特征参数计算的光合计算软件(光合计算4.1.EXE)!

#### 参考文献:

- [1] ZÖRB C, SENBAYRAM M, PEITER E. Potassium in agriculture-Status and perspectives[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(9):656-669.
- [2] XIE J C, ZHOU J M. Advance in soil K research and K fertilizer application in China[J]. Soils, 1999, 31(5):244-254.
- [3] HAFSI C, DEBEZ A, ABDELLY C. Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36:1055-1070.
- [4] ASHRAF M, ZAFAR Z U. Effect of potassium deficiency on growth and some biochemical characteristics in two lines of lentil (*Lens culinaris* Medic.) [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 1997, 19(1):9-15.
- [5] PETTIGREW W, Meredith R. Dry matter production, nutrient uptake, and growth of cotton as affected by potassium fertilization[J]. Journal Plant Nutrition, 1997, 20(4-5):531-548.
- [6] 李兴涛, 佟晓楠, 依兵, 等. 东北野生大豆种群对低钾胁迫的生理响应[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(12):120-122.
- [7] ZHAO D L, OOSTERHUIS M, BEDNARZ W. Influences of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants[J]. Photosynthetica, 2001, 39(1):103-109.
- [8] REDDY K, ZHAO D L. Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub> and potassium deficiency on photosynthesis, growth, and biomass partitioning of cotton[J]. Field Crops Research, 2005, 94:201-213.
- [9] KANAI S, MOGHAIEB R E, EL-SHEWY H A, et al. Potassium deficiency affects water status and photosynthetic rate of the vegetative sink in green house tomato prior to its effects on source activity[J]. Plant Science, 2011, 180(2):368-374.
- [10] MAKINO A. Photosynthesis, grain yield, and nitrogen utilization in rice and wheat[J]. Plant Physiology, 2011, 155(1):125-129.
- [11] 叶子飘. 光合作用对光合和CO<sub>2</sub>响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6):727-740.

- [12] SHARP R E, MATTHEWS M A, BOYER J S. Kok effect and the quantum yield of photosynthesis[J]. Plant Physiology, 1984, 75 (1): 95-101.
- [13] 马代夫,李 强,曹清河,等. 中国甘薯产业及产业技术的发展与展望[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(5): 969-973.
- [14] 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.
- [15] 靳 容,张爱君,史新敏,等. 干旱胁迫下钾对甘薯幼苗光合特性及根系活力的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(5): 992-996.
- [16] 陆燕元,马焕成,李吴民,等. 土壤干旱对转基因甘薯光合曲线的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2155-2160.
- [17] 谢逸萍,马代夫,王 欣,等. 盐胁迫对不同基因型甘薯光合、酶活和生物学特性的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(12): 97-100.
- [18] 陈晓光,史春余,李洪民,等. 施钾时期对食用甘薯光合特性和块根淀粉积累的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 759-763.
- [19] 唐忠厚,李洪民,张爱君,等. 甘薯叶光合特性与块根主要性状对氮素供应形态的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1494-1501.
- [20] 高璐阳,房增国. 不同施氮水平对甘薯生长前期根系生物学特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 122-125.
- [21] 后 猛,唐忠厚,陈晓光,等. 不同氮素水平对叶菜型甘薯光合作用及生长特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(1): 87-91.
- [22] 唐忠厚,张允刚,魏 猛,等. 耐低钾和钾高效型甘薯品种(系)的筛选及评价指标[J]. 作物学报, 2014, 40(3): 542-549.
- [23] GEORGE M S, LU G Q, ZHOU W J. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in sweetpotato[J]. Field Crop Research, 2002, 77(1): 7-15.
- [24] 李元元,李洪民,唐忠厚,等. 甘薯钾素营养及其生理机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(4): 13-15.
- [25] WANG J D, WANG H Y, ZHANG Y C, et al. Intraspecific variation in potassium uptake and utilization among sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) genotypes[J]. Field Crops Research, 2015, 170: 76-82.
- [26] YE Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa*[J]. Photosynthetica, 2007, 45(4): 637-640.
- [27] 叶子飘,于 强. 冬小麦旗叶净光合速率对光强度和 CO<sub>2</sub> 浓度的响应[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2008, 29(3): 33-37.
- [28] OZBUN J L, VOLK R J, JACKSON W A. Effect of potassium deficiency on photosynthesis, respiration and the utilization of photosynthetic reductant by immature bean leaves[J]. Crop Science, 1965, 5(1): 69-75.
- [29] HAFSI C, DEBEZ A, ABDELLY C. Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades[J]. Acta Physiol Plant, 2014, 36: 1055-1070.
- [30] 李兴涛,王 伟,李 晨,等. 低钾胁迫下不同低钾耐性大豆光合特性及保护性酶的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 384-390.
- [31] 彭海欢,翁晓燕,徐红霞,等. 缺钾胁迫对水稻光合特性及光合防御机制的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(6): 621-625.
- [32] 刘建祥,杨肖娥,吴良欢,等. 低钾胁迫对水稻叶片光合功能的影响及基因型差异[J]. 作物学报, 2001, 27(6): 1000-1006.
- [33] 乔建磊,于海业,肖英奎,等. 低钾胁迫下马铃薯植株光合机构响应特性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(2): 569-574.
- [34] ZHU L D, SHAO X H, ZHANG Y C, et al. Effects of potassium fertilizer application on photosynthesis and seedling growth of sweet potato under drought stress[J]. Food, Agriculture and Environment, 2012, 10(3-4): 487-491.
- [35] 贾士芳,董树亭,王空军,等. 弱光胁迫对玉米产量及光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2456-2461.
- [36] 叶子飘,高 峻. 光响应和 CO<sub>2</sub> 响应新模型在丹参中的应用[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 129-134.
- [37] 陈 雄,吴冬秀,王根轩,等. CO<sub>2</sub> 浓度升高对干旱胁迫下小麦光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(6): 881-884.

(责任编辑:张震林)