

# 耐低钾切花菊品种筛选及其苗期耐性生理研究

徐顺莉, 房伟民, 管志勇, 蒋甲福, 陈素梅, 廖园, 陈发棣\*

(南京农业大学园艺学院, 南京 210095)

**摘要:** 对 23 个切花菊品种进行苗期耐低钾指标的筛选研究, 结果表明, 植物干质量、钾含量、钾积累量在不同钾浓度处理和不同品种之间均存在显著差异, 可以作为切花菊耐低钾能力的评价指标。依据耐低钾指标, 筛选出耐低钾品种‘南农银山’和‘南农菲紫’, 不耐低钾品种‘南农红枫’。通过水培试验研究了不同耐性切花菊品种幼苗对低钾胁迫的生物响应。结果表明: 低钾胁迫下耐性弱的‘南农红枫’叶绿素含量显著降低, SOD 及 POD 活性均明显降低, 耐性品种‘南农银山’和‘南农菲紫’没有显著性变化。此外, 低钾条件下耐性品种的可溶性糖含量显著降低, 淀粉含量没有显著性差异, 而耐性弱的品种可溶性糖含量没有显著差异, 淀粉含量显著下降。

**关键词:** 切花菊; 耐低钾指标; 保护酶; 可溶性糖; 淀粉

**中图分类号:** S 682.1<sup>1</sup>

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2013) 12-2463-09

## Screening Cut Chrysanthemum Varieties in Low Potassium Tolerant and Patience Physiology in Seedling

XU Shun-li, FANG Wei-min, GUAN Zhi-yong, JIANG Jia-fu, CHEN Su-mei, LIAO Yuan, and CHEN Fa-di\*

(College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Twenty-three cut chrysanthemum varieties were hydroponically cultured to screen hypokalemia indicators in seedling and the results showed that in different potassium, plant dry weight, the amount of potassium and potassium accumulation are significant different between different varieties. These may be the evaluation indicators of cut chrysanthemum resistance hypokalemia ability. Based on potassium indicators screened tolerance varieties ‘Nannong Yinshan’ and ‘Nannong Feizi’, intolerance variety ‘Nannong Hongfeng’. Different patience cut chrysanthemum varieties seedlings were hydroponically cultured to study the biological response under low potassium stress and the results showed that under low potassium stress the ‘Nannong Hongfeng’ chlorophyll content was significantly reduced, SOD and POD activity were significantly reduced, ‘Nannong Yinshan’ and ‘Nannong Feizi’ haven’t significantly change. Furthermore, soluble sugar content of tolerant varieties were significantly lower and amylose content have no significant difference. Soluble sugar content of patience weak varieties have no significant difference, but amylose content decreased significant.

**收稿日期:** 2013-08-16; **修回日期:** 2013-11-27

**基金项目:** 江苏省科技支撑计划项目 (BE2011325, BE2012350); 江苏省自然科学基金项目 (BK2012773, BK2011641); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-10-0492); 江苏省高校科研成果产业化推进项目 (JHB2011-8); 国家自然科学基金项目 (31071820, 31272202)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: chenfd@njau.edu.cn)

**Key words:** cut chrysanthemum; low potassium tolerant indicator; protective enzyme; soluble sugar; amylum

全世界 130 亿  $\text{hm}^2$  土壤中, 受到养分胁迫的占 22.5%, 其中约有 40% 的土壤缺钾 (杨肖娥, 1988; 谢建昌和周健民, 1999)。中国 1/3 左右耕地缺钾或严重缺钾, 在热带和亚热带地区土壤缺钾现象尤为严重 (王毅和武维华, 2009)。而钾作为植物生长发育的必要元素, 参与植物体内 60 多种酶的活化 (Broadley & White, 2005; 王伟 等, 2005), 对于提高作物产量、改善作物品质、增强作物的抗逆性起着非常重要的作用。

耐低钾作物品种筛选研究在国外开展较早 (Yang et al., 2007), 国内起步则较晚, 且主要集中在水稻、小麦等重要农作物上 (刘国栋和刘更另, 2000, 2002; Dessougi et al., 2002; George et al., 2002; 吕福堂 等, 2005; Su et al., 2005; 韩燕来 等, 2006)。相关研究表明, 不同作物或相同作物不同基因型对低钾的耐性存在着明显的差异 (Maser et al., 2002; 姜存仓 等, 2004; 姜存仓, 2006)。切花菊一般采用温室栽培, 复种指数高, 为了维持高产优质不得不大量施用化肥, 不仅造成了肥料浪费, 而且环境污染较大田更为严重。

本试验中对 23 个切花菊品种苗期耐低钾特性进行了研究, 旨在确立切花菊苗期耐低钾品种的评价指标, 建立低钾筛选体系, 并在此基础上探索切花菊耐低钾生理机制, 为其耐低钾分子机制研究提供材料与理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为南京农业大学中国菊花种质资源保存中心提供的 23 个切花菊品种 (表 1)。

于 2012 年 5 月, 从 23 个切花菊品种中选取生长一致的插穗, 剪成 5~7 cm, 基部 2.5~3.0 cm 去掉叶片, 保证顶部两叶一心。将插穗扦插于生根基质 (体积比 1:1 的蛭石和珍珠岩), 光照时间  $12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ , 白天最高温度  $32^\circ\text{C}$ , 夜间最低温度  $27^\circ\text{C}$ 。15 d 后插穗生根, 洗净基质, 用于试验处理。

### 1.2 筛选浓度的确定

设定 4 个低钾处理浓度, 分别为 0.1、0.2、0.3 和  $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 钾素供应的形态为  $\text{K}_2\text{SO}_4$ 。随机选取 8 个切花菊品种分别定植于 4 个水箱中, 气泵  $24 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$  通气, 每个处理 10 株, 用去离子水水培缓苗 5 d 后, 将去离子水换成不同钾浓度的营养液进行处理。所述的营养液除钾盐外的各成分分别为:  $\text{NH}_4\text{NO}_3$   $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MgSO}_4$   $1.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$   $1.33 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CaCl}_2$   $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Fe-EDTA}$   $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$   $45 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{MnCl}_2$   $7.8 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{ZnSO}_4$   $0.8 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_2\text{MoO}_4$   $4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CuSO}_4$   $0.32 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。3 d 更换 1 次营养液, 20 d 后进行各项指标的测定, 确定适宜的低钾处理浓度。

### 1.3 切花菊耐低钾植株筛选

每个品种挑选 40 株生根插穗分为两组, 每组 20 株, 用去离子水水培缓苗 5 d 后, 一组定植于  $\text{K}^+$   $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  低钾水平营养液中, 另一组定植于  $\text{K}^+$   $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  正常钾水平营养液中。气泵  $24 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$  通气, 3 d 更换 1 次营养液, 20 d 后进行各项指标的测定, 筛选耐低钾植株。

筛选指标包括: (1) 相对株高 (RPH, relative plant height); (2) 相对干质量 (RPW, relative plant

weight); (3) 相对钾含量(RPC, relative potassium content); (4) 相对钾积累量(RPA, relative potassium accumulation)。

相对耐性指标 (%) = (低钾处理的测定值/正常钾水平培养液的测定值) × 100。

株高: 植株基部到顶端的高度。

植株干质量: 先将鲜样在 105 °C 杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒重后测干质量。

全钾含量: 植株样品烘干, 磨细后, 经浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后用钼锑抗法测钾含量。

钾积累量: 由相对干质量和钾含量计算的钾积累量。

根据相对干质量、相对钾含量和相对钾积累量计算耐低钾指数。耐低钾指数 = (RPW + RPC + RPA) / 3。

## 1.4 耐性生理指标的测定

叶绿素含量的测定: 样品为 0.2 g, 用 95%乙醇浸提过夜。以 95%乙醇为空白, 在波长 665 nm、649 nm 下测定吸光度。

SOD 活性测定: 参照王爱国等(1983)的方法, 利用 SOD 抑制氮蓝四唑(NBT)在荧光下还原作用的原理测定。

POD 活性测定: 采用愈创木酚法, 以 PBS 为对照调零, 而后测定 OD<sub>470</sub> 值(3 min), 以 1 min 内 Δ470 减少 0.01 的酶量为 1 个酶活单位(U)。

可溶性糖和淀粉含量的测定: 将切花菊叶片去主脉, 在 105 °C 杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒重。将样品研磨后用蒸馏水于沸水中提取可溶性糖并过滤, 再将过滤后的残渣用 3 mol · L<sup>-1</sup> HCl 提取并过滤, 滤液用甲基红试剂显色, 以 3 mol · L<sup>-1</sup> NaOH 中和, 最后测定在 630 nm 的吸光度并通过徐迎春等(2001)的公式换算出淀粉和还原糖含量。

采用 Excel 和 Graph Pad Prism5 进行基本描述性数据的统计分析, 采用 SPSS 18.0 统计软件进行聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 筛选浓度的确定及 23 个切花菊品种的耐低钾能力分析

8 个品种 4 个处理下的干质量变异系数分别为 7.75%、10.24%、8.35%和 6.13%, 故选择变异系数大的低钾处理浓度 0.2 mmol · L<sup>-1</sup> 对 23 个品种进行筛选处理(表 1)。

在 4 个筛选指标中, 相对株高、相对干质量、相对钾含量和相对钾积累量两两之间均呈正相关, 其中相对钾积累量与相对干质量、相对钾含量之间呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 相关系数分别达到 0.808 和 0.712(表 2)。

部分切花菊品种在低钾条件下株高出现反常现象(表 1), 如‘南农金蝶’植株表现为又细又高, 即较高的株高、较低的干物质和钾含量, 因此相对株高(RPH)只能作为鉴定切花菊耐低钾特性的辅助指标。相对干质量、相对钾含量和相对钾积累量反映切花菊对钾素的吸收及同化能力, 这些指标在各品种间差异显著且变异系数较大(表 1), 且各指标间呈显著正相关(表 2), 可作为切花菊耐低钾特性的评价指标并根据这 3 个评价指标计算出耐低钾指数(表 1)。

以耐低钾指数为变量, 将数据在 0~1 标准化, 采用系统聚类法, 当类间距离为 5 时可将 23 份材料的耐低钾胁迫能力分为极强、强、中等、弱、极弱(表 1) 5 个级别。

表 1 低钾胁迫下 23 个切花菊品种生物学性状统计  
Table 1 Biological traits statistics of 23 cut chrysanthemum varieties under low potassium stress

编号 No.	品种 Cultivar	相对株高/% RPH	相对干质量/% RPW	相对钾含量/% RPC	相对钾积累量/% RPA	耐低钾指数 Low-potassium index	耐低钾胁迫能力 Potassium stress resistant capability
1	南农金柠檬 Nannong Jinningmeng	88.10 hij	94.53 h	66.72 f	59.02 i	0.73 hj	中等 Moderate
2	南农金绒 Nannong Jinrong	93.67 lm	76.90 ab	67.53 f	42.92 e	0.62 e	中等 Moderate
3	南农舞风车 Nannong Wufengche	88.14 hij	90.94 gh	86.45 m	66.72 l	0.81 l	强 Strong
4	南农菲紫 Nannong Feizi	90.01 ijk	93.77 h	92.46 o	70.39 m	0.85 m	极强 Extremely strong
5	南农皇冠 Nannong Huangguan	84.59 ef	91.73 gh	79.20 ij	63.97 k	0.78 k	强 Strong
6	南农玉珠 Nannong Yuzhu	98.83 n	90.87 gh	74.57 h	61.16 j	0.76 j	中等 Moderate
7	南农金荷 Nannong Jinhe	90.29 ijk	87.75 def	50.45 b	47.13 gh	0.62 e	中等 Moderate
8	南农红荷 Nannong Honghe	74.58 a	87.31 def	64.54 e	48.89 h	0.67 fg	中等 Moderate
9	南农雪峰 Nannong Xuefeng	94.43 m	92.62 gh	82.06 kl	73.71 n	0.83 l	强 Strong
10	南农红袖 Nannong Hongxiu	90.93 jkl	75.39 a	63.97 e	37.39 d	0.59 d	弱 Weak
11	南农玉盘 Nannong Yupan	91.45 kl	89.13 fgh	70.39 g	47.27 gh	0.69 g	中等 Moderate
12	南农月桂 Nannong Yuegui	93.46 lm	89.48 fgh	77.47 i	48.36 h	0.72 h	中等 Moderate
13	南农银山 Nannong Yinshan	93.49 lm	93.12 gh	90.06 n	77.47 o	0.87 m	极强 Extremely strong
14	南农金鼎 Nannong Jinding	85.56 fgh	80.56 abc	80.55 jk	36.54 cd	0.66 f	中等 Moderate
15	南农红枫 Nannong Hongfeng	75.66 ab	79.09 abc	47.13 a	27.56 a	0.51 a	极弱 Exceedingly weak
16	南农金轮 Nannong Jinlun	82.18 de	80.11 abc	53.50 c	35.51 c	0.56 bc	弱 Weak
17	南农紫唇 Nannong Zichun	87.64 ghi	75.99 a	83.40 l	42.92 e	0.67 fg	中等 Moderate
18	南农紫星 Nannong Zixing	77.49 bc	82.63 bcd	79.86 j	44.32 ef	0.69 g	中等 Moderate
19	南农香槟 Nannong Xiangbin	84.63 ef	91.58 gh	83.40 l	47.05 gh	0.74 ij	中等 Moderate
20	南农墨桂 Nannong Mogui	90.25 ijk	80.55 abc	59.02 d	31.49 b	0.57 cd	弱 Weak
21	南农金冠 Nannong Jinguan	79.82 cd	77.74 b	59.80 d	28.09 a	0.55 bc	弱 Weak
22	南农功勋 Nannong Gongxun	85.18 fg	88.95 efg	54.95 c	45.58 fg	0.63 e	中等 Moderate
23	南农金蝶 Nannong Jindie	101.07 n	83.85 cde	48.89 ab	30.51 b	0.54 b	弱 Weak
平均数 Mean		87.89	85.85	70.28	48.43	0.68	
标准差 SD		6.87	8.37	11.87	11.63	0.10	
变异系数/% CV		7.81	9.75	16.90	24.03	0.15	

注：不同小写字母表示各品种间差异显著性。  
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among the varieties.

表 2 低钾胁迫条件下不同切花菊品种各筛选指标间的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between cut chrysanthemum varieties screening indicators under the conditions of low potassium stress

指标 Index	相对株高 RPH	相对干质量 RPW	相对钾含量 RPC	相对钾积累量 RPA
相对株高 RPH	1			
相对干质量 RPW	0.246	1		
相对钾含量 RPC	0.152	0.437*	1	
相对钾积累量 RPA	0.310	0.808**	0.712**	1

其中耐低钾能力极强的 2 份：‘南农银山’和‘南农菲紫’；耐低钾能力强的 3 份：‘南农舞风车’、‘南农雪峰’、‘南农皇冠’；耐低钾能力中等的 12 份：‘南农金柠檬’、‘南农香槟’、‘南农玉珠’、‘南农月桂’、‘南农玉盘’、‘南农紫星’、‘南农红荷’、‘南农紫唇’、‘南农金鼎’、‘南农金绒’、‘南农金荷’、‘南农功勋’；耐低钾能力弱的 5 份：‘南农金轮’、‘南农墨桂’、‘南农金蝶’、‘南农金冠’、‘南农红袖’；耐低钾能力极弱的 1 份：‘南农红枫’。

## 2.2 低钾胁迫对不同品种切花菊各生理指标的影响

### 2.2.1 叶绿素含量

以筛选获得的耐低钾切花菊品种‘南农银山’和‘南农菲紫’及不耐低钾品种‘南农红枫’为试材，进一步对其耐性生理特性进行分析。表 3 显示，在正常供钾水平下，两个耐性品种叶片中叶绿素含量相近。低钾胁迫时，耐低钾品种‘南农银山’和‘南农菲紫’以及不耐低钾品种‘南农红枫’叶片中得叶绿素 a、b 以及 (a + b) 含量都低于正常钾处理的叶绿素含量，但耐低钾品种的下降幅度明显小于钾低效品种。其中叶绿素 a 及 (a + b) 含量都显著低于正常钾处理的值 ( $P < 0.05$ )。根据叶绿素 a/b 的值可以看出，低钾处理下叶绿素 a 所占的比例与正常钾处理时相比有所提高，耐低钾品种增长幅度显著高于不耐低钾品种，处理间差异显著。低钾处理时，‘南农银山’的叶绿素含量为对照的 99.7%；‘南农菲紫’为对照的 98.6%；而‘南农红枫’则为对照的 63.2%。

表 3 两种钾处理下各品种叶绿素含量

Table 3 Chlorophyll content of cut chrysanthemum varieties in two K-levels

处理 Treatment	品种 Cultivar	Chl. a/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ )	Chl. b/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ )	Chl. (a + b)/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ )	Chl. a/b
低钾水平 Low potassium level	南农银山 Nannong Yinshan	$2.96 \pm 0.14^*$	$1.74 \pm 0.10$	$4.70 \pm 0.20^*$	$1.70 \pm 0.02^{**}$
	南农菲紫 Nannong Feizi	$2.61 \pm 0.22$	$1.21 \pm 0.05$	$3.79 \pm 0.25$	$2.18 \pm 0.15$
	南农红枫 Nannong Hongfeng	$1.65 \pm 0.27$	$1.28 \pm 0.03$	$2.93 \pm 0.25$	$1.29 \pm 0.24$
正常钾水平 Normal potassium level	南农银山 Nannong Yinshan	$3.02 \pm 0.18$	$1.96 \pm 0.14$	$4.98 \pm 0.31$	$1.54 \pm 0.05^*$
	南农菲紫 Nannong Feizi	$3.02 \pm 0.14^*$	$1.61 \pm 0.10$	$4.63 \pm 0.24$	$1.88 \pm 0.05^*$
	南农红枫 Nannong Hongfeng	$2.52 \pm 0.29$	$2.13 \pm 0.52$	$4.65 \pm 0.24$	$1.18 \pm 0.52$

注：\*，\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。

Note: \*, \*\* indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively.

### 2.2.2 SOD 和 POD 活性

大量研究表明，植物抗逆性强弱与植物保护酶系统的活性变化有一定关系。SOD 和 POD 是植物细胞膜系统的重要保护酶，具有消除自由基、降低膜脂过氧化以及维持细胞膜稳定性的功能。低钾胁迫对不同品种切花菊的膜脂过氧化和保护酶系统的影响不同（图 1）。虽然低钾胁迫下各品种切花菊的 SOD、POD 活性均表现为明显下降的趋势，但耐低钾能力极弱的品种‘南农红枫’的下降幅度显著高于其它 2 个耐低钾能力强的品种 ( $P < 0.05$ )。

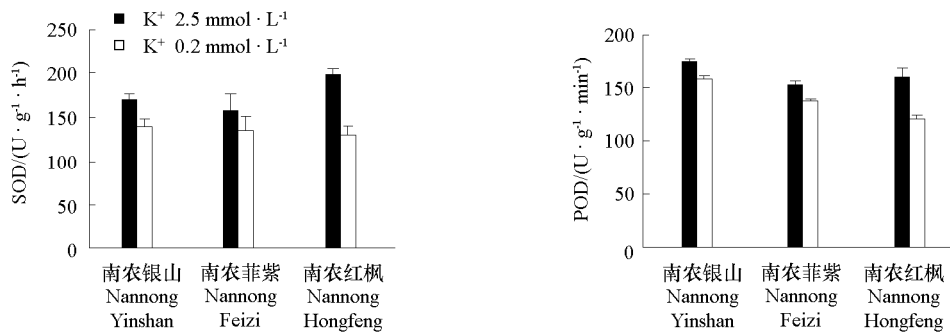


图 1 不同钾浓度下各切花菊品种 SOD 和 POD 活性

Fig. 1 SOD activity and POD activity of cut chrysanthemum varieties under different potassium concentrations

### 2.2.3 低钾胁迫对不同品种切花菊可溶性糖和淀粉含量的影响

如图 2 所示,在低钾胁迫条件下,各品种可溶性糖含量都降低,‘南农银山’可溶性糖含量为正常钾处理的 50.36%,‘南农菲紫’可溶性糖含量为正常钾处理的 52.23%,处理之间差异极显著,而‘南农红枫’可溶性糖含量为正常钾处理的 82.93%,处理之间没有达到显著差异。

从图 2 还可以看出,低钾胁迫对不同耐性品种淀粉含量的影响在品种之间存在差异。与可溶性糖含量变化相反,低钾胁迫下‘南农银山’和‘南农菲紫’的淀粉含量在两处理间并没有显著变化,而‘南农红枫’淀粉含量为正常钾处理的 56.01%,处理之间差异达到极显著水平。

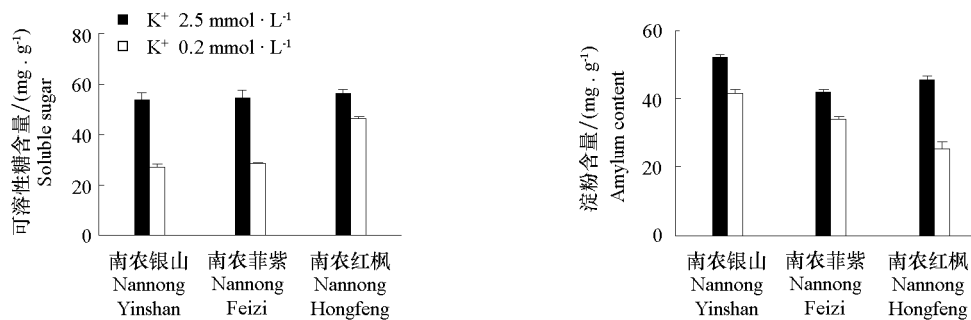


图 2 不同钾浓度下各切花菊品种可溶性糖和淀粉含量

Fig. 2 Soluble sugar content and starch content of cut chrysanthemum varieties under different potassium concentrations

## 3 讨论

大多数植物品种的耐低钾能力在其一生中相对稳定,即在苗期鉴定品种的耐低钾能力是可行的(刘国栋和刘更另,1995)。用水培法进行切花菊苗期耐低钾能力的筛选是最简单、快速又高效的筛选方法之一(刘国栋和刘更另,1996;王永锐等,1996)。因此,本试验中通过营养水培法在切花菊苗期筛选耐低钾品种是可行的。变异程度是衡量一个性状是否可作为筛选指标的标准,变异系数越大,说明该指标越灵敏(田晓莉等,2008)。本试验结果表明,4个钾浓度处理的干质量变异系数分别为7.75%、10.24%、8.35%和6.13%,故选择钾浓度0.2 mmol·L⁻¹为筛选浓度。

决定植物耐低营养的三大因素是吸收、利用和转运 (Glass & Perley, 1983; Mengel & Steffens, 1985; Xie & Ni, 1990; Lin & Sun, 1995)。通过株高、干质量、钾含量、钾积累量的研究, 发现干质量、钾含量、钾积累量在不同钾浓度处理和不同品种之间均存在显著差异, 其中相对钾积累量 (RPA) 与相对干质量 (RPW)、相对钾含量 (RPC) 之间呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数分别达到 0.808 和 0.712, 相对干质量 (RPW) 与相对钾含量 (RPC) 之间也达到 0.437 的显著性相关。相对干质量 (RPW)、相对钾含量 (RPC) 和相对钾积累量 (RPA) 的变异系数分别为 9.75%、16.90% 和 24.03%, 与株高的变异系数 7.81% 相比也较高。植物各指标的变异系数越大、与生物量的相关系数越高, 筛选效果会越好, 因此, 相对钾积累量 (RPA)、相对钾含量 (RPC) 与相对干质量 (RPW) 可以作为切花菊耐低钾能力的评价指标, 而部分切花菊品种在低钾下株高出现反常现象, 如‘南农金蝶’植株表现为又细又高, 即较高的株高、较低的干物质积累和钾含量, 因此株高只能作为鉴定切花菊耐低钾特性的辅助指标。通过研究发现, 切花菊适宜的钾浓度为  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 低钾胁迫浓度为  $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 在研究的材料中, 耐低钾切花菊品种有‘南农银山’和‘南农菲紫’, 不耐低钾切花菊品种有‘南农红枫’。

钾在一定程度上能促进硝酸还原酶活性的提高, 有利于植物进行氮的同化, 从而提高叶片的叶绿素含量 (田晓艳 等, 2007), 改善叶绿体结构, 缺钾时叶绿蛋白解体, 叶绿素遭破坏 (刘蓓 等, 2006)。叶绿素 a 被称为天线色素, 在光合作用中起到捕获光能地作用。低钾胁迫时, 钾高效品种‘南农银山’和‘南农菲紫’叶绿素 a 比例提高的幅度大于钾低效品种‘南农红枫’, 说明钾高效品种在低钾胁迫下比钾低效品种更易捕获光能, 这对于维持正常的光合速率起着非常重要的作用。低钾处理下, ‘南农红枫’叶绿素含量的下降幅度远远大于‘南农银山’和‘南农菲紫’叶绿素含量的下降幅度, 说明后者具有较强的向地上部转运钾的能力, 从而能维持切花菊叶片叶绿体的生理功能。

钾可以影响与活性氧代谢过程相关的酶的活性。逆境胁迫会产生大量的超氧阴离子, 为防止活性氧的伤害, 植物形成了对逆境胁迫的适应性生理生化反应机制, 包括酶促反应和非酶促反应。SOD 和 POD 是植物的酶促系统, SOD 是植物体内清除自由基最关键的酶类之一, 可催化超氧阴离子歧化为  $\text{H}_2\text{O}_2$ , POD 再将  $\text{H}_2\text{O}_2$  还原成  $\text{H}_2\text{O}$  (薛艳茹 等, 2008)。蒋德安等 (1996) 的研究表明, 耐低钾的水稻品种 SOD 活性较高, 马新明等 (2000) 在小麦中也得到证实。本试验结果显示, ‘南农银山’和‘南农菲紫’的 SOD 活性、POD 活性相比‘南农红枫’而言较高, 说明其对低钾胁迫的适应性较强。

可溶性糖是植物体内的一种渗透调节物质, 同时也是一种碳源。植物体内的可溶性糖含量受到可溶性糖生成和分解的共同影响。植物在逆境胁迫下, 其体内可溶性糖含量的增加提高了细胞汁液浓度, 并降低了细胞水势, 从而促进对水的吸收能力 (汤章诚, 1984; 张正斌和山仑, 1997)。植物光合作用所合成的可溶性糖大部分转化为淀粉, 当植物需要动用贮存的淀粉时, 就将淀粉分解为可溶糖, 再转化为其他物质或运送到其它需要糖类物质的部位 (李兴涛 等, 2010)。结合叶片可溶性糖含量和淀粉含量的变化可以推断, 低钾胁迫抑制了‘南农银山’和‘南农菲紫’叶片内淀粉转化为可溶性糖的过程, 从而保证了干物质的积累, 而‘南农红枫’低钾胁迫下叶片内淀粉含量显著降低, 可溶性糖含量变化不显著, 表明叶片内积累的淀粉部分转化为可溶性糖以维持正常的生理功能。

## References

- Broadley M R, White P J. 2005. Plant nutritional genomics. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd: 22 - 65.
- Dessougi H E, Claassen N, Steingrobe B. 2002. Potassium efficiency mechanisms of wheat, barley, and sugar beet grown on a K fixing soil under

- controlled conditions. *Plant Nutr Soil Sci*, 165: 732 – 737.
- George M S, Lu G Q, Zhou W J. 2002. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). *Field Crops Res*, 77: 7 – 15.
- Glass A D M, Perley J E. 1983. Variation among species and varieties in uptake and utilization of potassium. *Plant Soil*, 72: 231 – 237.
- Han Yan-lai, Liu Xin-hong, Wang Yi-lun. 2006. The difference of different wheat varieties potassium nutrition. *Journal of Triticeae Crops*, 26 (1): 99 – 103. (in Chinese)
- 韩燕来, 刘新红, 王宜伦. 2006. 不同小麦品种钾素营养特性的差异. *麦类作物学报*, 26 (1): 99 – 103.
- Jiang Cun-cang, Wang Yun-hua, Lu Jian-wei, Xu Fang-sen, Gao Xiang-zhao. 2004. Mechanism of plant potassium efficiency genotype differences. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 23 (4): 483 – 487. (in Chinese)
- 姜存仓, 王运华, 鲁剑巍, 徐芳森, 高祥照. 2004. 植物钾效率基因型差异机理的研究进展. *华中农业大学学报*, 23 (4): 483 – 487.
- Jiang Cun-cang. 2006. Different cotton genotypes difference in the reaction of potassium and its mechanism [Ph.D. Dissertation]. Wuhan: Journal of Huazhong Agricultural University: 101 – 108. (in Chinese)
- 姜存仓. 2006. 不同基因型棉花对钾的反应差异及其机理研究[博士论文]. 武汉: 华中农业大学: 101 – 108.
- Jiang De-an, Wen Xiao-yan, Lu Qing, Xie Xue-min, Rao Li-hua. 1996. Potassium nutrition on photosynthetic rate ( $P_n$ ), Hill reaction and SOD activity day change. *Plant Physiology Journal*, 22 (1): 87 – 93. (in Chinese)
- 蒋德安, 翁晓燕, 陆庆, 谢学民, 饶立华. 1996. 钾营养对水稻光和速率 ( $P_n$ )、Hill 反应及 SOD 活力日变化的影响. *植物生理学报*, 22 (1): 87 – 93.
- Li Xing-tao, Cao Ping, Wang Wei, Li Chun-hong, Wang Xiao-guang, Cao Min-jian. 2010. Blade physiological response of different tolerant soybean varieties under low potassium stress. *Soybean Science*, 29 (6): 964 – 970. (in Chinese)
- 李兴涛, 曹萍, 王伟, 李春红, 王晓光, 曹敏建. 2010. 不同耐性大豆品种叶片对低钾胁迫的生理响应. *大豆科学*, 29 (6): 964 – 970.
- Liu Bei, Cao Min-jian, Yan Hong-kui. 2006. Physiological differences of different tolerant maize inbred lines under low potassium. *Journal of Maize Sciences*, 14 (3): 90 – 92. (in Chinese)
- 刘蓓, 曹敏建, 闫洪奎. 2006. 低钾胁迫下不同耐性玉米自交系生理差异的研究. *玉米科学*, 14 (3): 90 – 92.
- Lin X Y, Sun X. 1995. Differences of rice varieties in potassium uptake and response to potassium application. *Acta Pedol Sin*, 32 (1): 77 – 83.
- Liu Guo-dong, Liu Geng-ling. 1995. On new countermeasures to alleviate the shortage of potassium source. *Sci Agric Sin*, 28 (1): 25 – 32. (in Chinese)
- 刘国栋, 刘更另. 1995. 论缓解我国钾源短缺问题的新对策. *中国农业科学*, 28 (1): 25 – 32.
- Liu Guo-dong, Liu Geng-ling. 1996. The method of screening resistant hypokalemia genotype rice. *Acta Pedologica Sinica*, 33 (2): 113 – 119. (in Chinese)
- 刘国栋, 刘更另. 1996. 水稻耐低钾基因型筛选方法的研究. *土壤学报*, 33 (2): 113 – 119.
- Liu Guo-dong, Liu Geng-ling. 2000. Screening combinations of indica rice for K-efficient genotypes. *Acta Agronomica Sinica*, 28 (2): 161 – 166. (in Chinese)
- 刘国栋, 刘更另. 2000. 籼稻耐低钾基因型的筛选. *作物学报*, 28 (2): 161 – 166.
- Liu Guo-dong, Liu Geng-ling. 2002. Screening hybrid combinations of indica rice for K-efficient genotypes. *Sci Agric Sin*, 35 (9): 1044 – 1048. (in Chinese)
- 刘国栋, 刘更另. 2002. 籼型杂交稻耐低钾基因型的筛选. *中国农业科学*, 35 (9): 1044 – 1048.
- Lü Fu-tang, Zhang Xiu-sheng, Zhang Bao-hua, Liu Chun-sheng. 2005. Study on the ability of potassium absorption and tolerant to low potassium for different genotype maize. *Plant Nutr Fert Sci*, 11 (4): 556 – 559. (in Chinese)
- 吕福堂, 张秀省, 张保华, 刘春生. 2005. 不同玉米基因型吸钾和耐低钾能力的研究. *植物营养与肥料学报*, 11 (4): 556 – 559.
- Ma Xin-ming, Wang Xiao-chun, Ding Jun. 2000. The effect of potash on lime concretion black soil of different grain winter wheat grain developmental and physiological characteristics. *Sci Agric Sin*, 33 (3): 67 – 72. (in Chinese)
- 马新明, 王小纯, 丁军. 2000. 钾肥对砂姜黑土不同粒型冬小麦穗粒发育及生理特性的影响. *中国农业科学*, 33 (3): 67 – 72.
- Maser P, Gierth M, Schroeder J I. 2002. Molecular mechanisms of potassium and sodium uptake in plants. *Plant Soil*, 247: 43 – 54.



- Mengel K, Steffens D. 1985. Potassium uptake of rye-grass (*Lolium perenne*) and red clover (*Trifolium pratense*) as related to root parameters. *Biol Fert Soil*, 1: 53 - 58.
- Su X K, Zhang X H, Wang Z Q. 2005. The genotypic difference of potassium nutrition of flue-cured tobacco. *Plant Nutr Fert Sci*, 11 (4): 536 - 540.
- Tang Zhang-cheng. 1984. Proline accumulation in plants under stress and its possible significance. *Plant Physiology Communications*, (1): 15 - 21. (in Chinese)
- 汤章诚. 1984. 逆境下植物脯氨酸的累积及其可能的意义. *植物生理学通讯*, (1): 15 - 21.
- Tian Xiao-li, Wang Gang-wei, Zhu Rui, Yang Pei-zhu, Duan Liu-sheng, Li Zhao-hu. 2008. Screening conditions and indicators of cotton resistant hypokalemia genotype. *Acta Agronomica Sinica*, 34 (8): 1435 - 1443. (in Chinese)
- 田晓莉, 王刚卫, 朱睿, 杨培珠, 段留生, 李召虎. 2008. 棉花耐低钾基因型筛选条件和指标的研究. *作物学报*, 34 (8): 1435 - 1443.
- Tian Xiao-yan, Liu Yan-ji, Cao Min-jian. 2007. Chloroplast structure and photosynthetic response of maize inbred lines at seedling stage under low potassium stress. *Journal of Maize Sciences*, 15 (4): 79 - 82. (in Chinese)
- 田晓艳, 刘延吉, 曹敏建. 2007. 低钾胁迫对玉米自交系苗期叶绿体结构及光合响应影响. *玉米科学*, 15 (4): 79 - 82.
- Wang Ai-guo, Luo Guang-hua, Shao Cong-ben. 1983. Research on superoxide dismutase of soybean seed. *Plant Physiology Journal*, 9 (1): 77 - 84. (in Chinese)
- 王爱国, 罗光华, 邵从本. 1983. 大豆种子超氧化物歧化酶的研究. *植物生理学报*, 9 (1): 77 - 84.
- Wang Wei, Cao Min-jian, Zhou Chun-xi, Li Zhi, Zhang Hui. 2005. Screening of soybean varieties (lines) under low potassium. *Soybean Bulletin*, (4): 7 - 8. (in Chinese)
- 王伟, 曹敏建, 周春喜, 李植, 张辉. 2005. 大豆耐低钾胁迫品种(系)的筛选. *大豆通报*, (4): 7 - 8.
- Wang Yi, Wu Wei-hua. 2009. Mechanism of efficient molecular genetic of plant potassium nutrition. *Bulletin of Botany*, 44 (1): 27 - 36. (in Chinese)
- 王毅, 武维华. 2009. 植物钾营养高效分子遗传机制. *植物学报*, 44 (1): 27 - 36.
- Wang Yong-rui, Li Wei-jun, Yu Kuan-jing. 1996. Apply nutrition hydroponic screening rice hypokalemia resistant genotypes. *Acta Agriculture Universitatis Jiangxiensis*, 18 (2): 193 - 198. (in Chinese)
- 王永锐, 李卫军, 余款经. 1996. 应用营养水培法筛选水稻耐低钾基因型品种. *江西农业大学学报*, 18 (2): 193 - 198.
- Xie Jian-chang, Zhou Jian-min. 1999. Progress of soil potassium and the use of potash in China. *Soils*, (5): 244 - 254. (in Chinese)
- 谢建昌, 周健民. 1999. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展. *土壤*, (5): 244 - 254.
- Xie S P, Ni J S. 1990. Correlation between  $K^+$  influx and  $H^+$  efflux by roots of intact seedlings of indica rice varieties. *Chin J Rice Sci*, 4 (1): 22 - 26.
- Xu Ying-chun, Li Shao-hua, Chai Cheng-lin, Liu Guo-jie, Chen Shang-wu. 2001. Carbohydrate metabolism regular of apple tree source leaves under during water stress and stress relief. *Journal of Fruit Science*, 18 (1): 16. (in Chinese)
- 徐迎春, 李绍华, 柴成林, 刘国杰, 陈尚武. 2001. 水分胁迫期间及胁迫解除后苹果树源叶同化物代谢规律的研究. *果树学报*, 18 (1): 16.
- Xue Yan-ru, Cao Min-jian, Wang Xiao-guang, Shao Ji-mei, Yan Hong-kui. 2008. Mechanism of corn stress response under low potassium stress. *Journal of Maize Sciences*, 16 (2): 101 - 103. (in Chinese)
- 薛艳茹, 曹敏建, 王晓光, 邵继梅, 闫洪奎. 2008. 低钾胁迫下玉米逆境反应机制初探. *玉米科学*, 16 (2): 101 - 103.
- Yang T Z, Lu L M, Xia W, Fan J H. 2007. Characteristics of potassium enriched, flue-cured tobacco genotype in potassium absorption, accumulation and in-ward potassium currents of root cortex. *Agricultural Sciences in China*, 6 (12): 1479 - 1486.
- Yang Xiao-e. 1988. The theory and practice of genetic characteristics of plant inorganic nutrients. *Chinese Journal of Soil Science*, 19 (6): 284 - 287. (in Chinese)
- 杨肖娥. 1988. 植物无机营养遗传特性研究的理论与实践. *土壤通报*, 19 (6): 284 - 287.
- Zhang Zheng-bin, Shan Lun. 1997. Crop physiology and stress resistance mechanism of certain common. *Crops Magazine*, (4): 10 - 12. (in Chinese)
- 张正斌, 山仑. 1997. 作物生理抗逆性的若干共同机理研究进展. *作物杂志*, (4): 10 - 12.