

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202105041



不同香蕉品种苗期钾效率差异性分析

陈文亮^{1,2}, 王明元^{1,2}, 李雨晴^{1,2}, 林萍^{1,2}, 陈科霖^{1,2}, 刘建福^{1,2}

(1. 华侨大学 园艺科学与工程研究所, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 以国内主栽的 8 个香蕉品种为材料,设计低钾和正常钾水培试验,研究株高、干质量、叶绿素质量比等指标的变化.结果表明:低钾处理可以显著降低‘巴西蕉’的干质量,‘南天黄’的干质量最小,‘金粉 1 号’的干质量最大;两种钾水平处理中,‘金粉 1 号’的叶绿素质量比最高,几乎不受低钾胁迫影响,‘南天黄’的叶绿素质量比最低;两种钾水平处理中,‘金粉 1 号’的根系指标最高,‘南天黄’的根体积最小,‘巴西蕉’的根总吸收面积和根总活跃吸收面积最小;同一处理中,8 个香蕉品种的地上部钾质量比差异不明显,‘桂蕉 1 号’的地下部钾质量比最高,‘金粉 1 号’的地上部钾积累量最大,‘南天黄’的地上部钾积累量最小;8 个香蕉品种的地上部钾效率系数为 0.44~0.97,2 个品种的地上部钾效率系数较小,3 个品种的地上部钾效率系数居中,3 个品种的地上部钾效率系数较大;初步确定‘金粉 1 号’‘桂蕉 1 号’为钾高效基因型,‘威廉斯’‘广东粉蕉’‘桂蕉 6 号’‘红蕉’为钾中效基因型,‘南天黄’‘巴西蕉’为钾低效基因型.

关键词: 香蕉;基因型;钾效率;苗期

中图分类号: Q 945.12

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2022)04-0481-08

Difference Analysis of Potassium Efficiency of Different Banana Varieties at Seedling Stage

CHEN Wenliang^{1,2}, WANG Mingyuan^{1,2}, LI Yuqing^{1,2},
LIN Ping^{1,2}, CHEN Kelin^{1,2}, LIU Jianfu^{1,2}

(1. Institute of Horticultural Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Using eight mainly planted domestic banana varieties as materials, low potassium and normal potassium hydroponic experiments are designed to study the changes of plant height, dry weight, chlorophyll mass ratio and other indicators. The results show that low potassium treatment can significantly reduce the dry weight of ‘Baxijiao’, the dry weight of ‘Nantianhuang’ is lowest, and the dry weight of ‘Jinfen No. 1’ is highest. In the two potassium levels treatment, the chlorophyll mass ratio of ‘Jinfen No. 1’ is highest, which is almost not affected by low potassium stress, and the chlorophyll mass ratio of ‘Nantianhuang’ is lowest. In the two potassium levels treatment, the root indexes of ‘Jinfen No. 1’ are highest, the root volume of ‘Nantianhuang’ is lowest, and the total root absorption area and total active root absorption area of ‘Baxijiao’ are both lowest. In the same treatment, there is no significant difference in aboveground potassium mass ratio among the eight banana varieties, the underground potassium mass ratio of ‘Guijiao No. 1’ is highest, the aboveground potassium accumulation of ‘Jinfen No. 1’ is highest, and the aboveground potassium accumula-

收稿日期: 2021-05-17

通信作者: 王明元(1980-),男,副教授,博士,主要从事香蕉枯萎病的研究. E-mail: w_mingyuan@163.com.

基金项目: 福建省高校产学研合作项目(2017N5009);福建省星火项目(2021S0049);华侨大学高层次人才科研启动费项目(17BS415);华侨大学青年教师科技创新资助计划(ZQN-YX507)

tion of ‘Nantianhuang’ is lowest. The aboveground potassium efficiency coefficients of eight banana varieties are between 0.44 to 0.97, two varieties are lower, three varieties are in the middle, and three varieties are higher. It is preliminarily determined that ‘Jinfen No. 1’ and ‘Guijiao No. 1’ are potassium efficient genotypes, ‘Williams’ ‘Guangdong Fenjiao’ ‘Guijiao No. 6’ and ‘Hongjiao’ are potassium medium efficient genotypes, and ‘Nantianhuang’ and ‘Baxijiao’ are potassium inefficient genotypes.

Keywords: banana; genotype; potassium efficiency; seedling stage

钾(K)是植物生长发育过程中必需的 3 大营养元素(氮、磷、钾)之一,也是植物体内含量最多的金属元素^[1]. 钾离子参与植物的生长发育和生理代谢,在提高作物产量、品质和抗性过程中有重要的作用^[2-4]. 香蕉(芭蕉属 *Musa*)是喜钾植物,缺钾会显著影响香蕉的根系生长、植株干质量、钾质量比和光合作用. 我国香蕉主产区处于热带、亚热带地区,土壤普遍缺钾,如海南省 50% 的土壤中速效钾质量比较低,供钾能力差^[5]. 然而,果农并未依据香蕉品种的钾效率精准施用钾肥,造成钾肥的浪费及土地肥料过载. 因此,香蕉品种钾效率基因型的筛选、评价至关重要,是解决土壤缺钾问题的有效途径之一^[6-7].

目前,学者已对钾效率基因型在多种植物中的筛选展开一些研究. 吴宇佳等^[8]通过钾效率系数、钾质量比和干质量等指标,从 16 个香蕉品种中筛选出 4 种钾高效基因型品种,分别为‘广东粉蕉’‘泰蕉’‘牛角蕉’‘粉蕉’. John 等^[9]对 83 个木薯品种进行研究,通过块茎产量、块茎性状、植株干物质率、植株钾质量比、植株生物特征等差异,筛选出 6 个钾高效基因型品种. 姜存仓等^[10]发现与棉花钾低效基因型相比,棉花钾高效基因型在低钾条件下的生长状况优势更加明显. Khan 等^[11]采用浓度分别为 0.3, 3.0 mmol · L⁻¹ 的营养液,研究 6 个小麦基因型钾吸收效率的差异. 张宁等^[12]发现在相同的供钾水平下,钾高效基因型水稻的根系干质量、根体积、根总吸收面积均大于钾低效基因型水稻. 此外,关于甘蔗^[13]、玉米^[14]、大麦^[15]等作物的钾效率研究也有报道. 基于此,本文以国内主栽的 8 个香蕉品种为材料,设计低钾(LK)和正常钾(NK)水培试验,对不同香蕉品种苗期钾效率的差异性进行分析.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为国内主栽的 8 个香蕉品种. 供试香蕉品种的相关资料,如表 1 所示.

表 1 供试香蕉品种的相关资料

Tab. 1 Relevant data of tested banana varieties

编号	品种	来源	类型	编号	品种	来源	类型
1	巴西蕉	石生源生物科技公司	地方品种	5	南天黄	石生源生物科技公司	选育品种
2	红蕉	石生源生物科技公司	地方品种	6	桂蕉 1 号	广西农业科学院	选育品种
3	威廉斯	石生源生物科技公司	选育品种	7	桂蕉 6 号	广西农业科学院	选育品种
4	红蕉	石生源生物科技公司	地方品种	8	金粉 1 号	广西农业科学院	选育品种

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 在华侨大学园艺专业温室进行香蕉幼苗水培试验. 选择生长基本一致的四叶期组培苗,经炼苗后,洗净根部的营养液,移栽至塑料箱,用定植棉和定植杯固定,塑料箱连接通气泵. 试验装置,如图 1 所示.

为了使幼苗更好地生长,先用完全营养液预培养 2 周. 营养液均用 K₂SO₄ 配制,其他养分与 1/2 改良霍格兰营养液相同,营养液一周换. 1/2 改良霍格兰营养液母液配方,如表 2 所示. 表 2 中:ρ 为母液中化合物的质量浓度;V_n 为配置 30 L 营养液所需的母液体积.

一周后,开始进行钾元素处理,设低钾(c=0.25 mmol · L⁻¹)和正常钾(c=2.50 mmol · L⁻¹)2 种钾水平,每个浓度处理 20 棵组培苗. 种植位置采用随机区组实验设计,试验处理 30 d 后采样,每个处理随机采 6 棵苗用于测定数据.



图 1 试验装置

Fig. 1 Experiment equipment

表 2 1/2 改良霍格兰营养液母液配方
Tab. 2 1/2 improved Hogland nutrient mother liquor formula

母液类型	化合物	$\rho/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	V_n/mL
A 液	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	472.500	30
	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	57.500	30
	MgSO_4	246.500	30
B 液	$\text{K}_2\text{SO}_4 (0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}) /$ $\text{K}_2\text{SO}_4 (2.50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	21.780/108.900	30/60
	H_3BO_3	6.200	30
C 液	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	24.960	30
	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	15.290	30
	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.290	30
	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.029	30
	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.025	30
	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	5.560	30
铁盐	$\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	7.460	30

- 1.2.2 株高 用直尺测量植株从茎基部到最新展开叶的距离。
- 1.2.3 植株干质量 对地下部和地上部分别取样,在 105 ℃下杀青 15 min 后,在 80 ℃下烘干 24 h,称质量、磨粉,以备钾质量比的测定。
- 1.2.4 叶绿素质量比 参照文献[16]的方法,分别测定提取液在 665,649 nm 的吸光度,叶绿素质量比的单位为 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。
- 1.2.5 根系指标 根体积采用排水法测定,根总吸收面积和根总活跃吸收面积采用甲烯蓝法测定^[17]。
- 1.2.6 钾质量比 称取节 1.2.3 中的植株干样,用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 浸提 24 h,震荡 1 h,经定性滤纸过滤,采用 Optima 7000DV 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定滤液的钾质量比。ICP-OES 的工作条件:功率为 1 300 W;等离子体气流量为 $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$;载气流量为 $0.8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$;辅助气流量为 $0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$;试样流量为 $1.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;读数延时时间为 30 s;检测波长为 766.49 nm;轴向观测。钾标准溶液(GSB 04-1773—2004)质量浓度为 $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,分别吸取 0,0.5,1.0,1.5,2.0,2.5 mL 的钾标准溶液,定容至 50 mL,配成质量浓度分别为 0,10,20,30,40,50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的校准溶液。
- 1.2.7 地上部钾效率系数 地上部钾效率系数(KUE)可体现植株的耐低钾能力,地上部钾效率系数越大,植株耐低钾能力越强,地上部钾效率系数的计算公式为 $\text{KUE} = m_{\text{LK}}/m_{\text{NK}}$,上式中: m_{LK} 为低钾处理的植株地上部干质量; m_{NK} 为正常钾处理的植株地上部干质量。

1.3 数据分析

采用 SPSS 25.0 软件进行方差分析,通过 Excel 2010 作图,多重比较方法采用最小显著性差异(LSD)法($P < 0.05$)。

2 实验结果与分析

2.1 不同钾水平处理对株高、干质量、叶绿素质量比的影响

不同钾水平处理对株高、干质量(地上部干质量、地下部干质量、整株干质量)、叶绿素质量比的影响,如图 2~4 所示。图 2~4 中: h 为株高; m_s, m_r, m_p 分别为地上部干质量、地下部干质量和整株干质量;不同的字母表示显著性差异, $P < 0.05$ 。

由图 2~4 可得以下 4 个结论。

- 1) 低钾处理的香蕉苗干质量和叶绿素质量比均低于正常钾处理。
- 2) 低钾处理的香蕉苗均出现不同程度的缺钾症状。在同一品种中,相较于正常钾处理,低钾处理的香蕉苗株高降低,‘桂蕉 1 号’‘红蕉’和‘南天黄’的株高分别下降了 6.14%,7.06%,14.00%,无显著性差异,受低钾影响较少,其他品种株高下降了 10.62%~25.63%,均有显著性差异,受低钾影响显著。
- 3) 在不同钾水平处理情况下,‘金粉 1 号’的干质量均为最大,而‘南天黄’的干质量均为最小。相

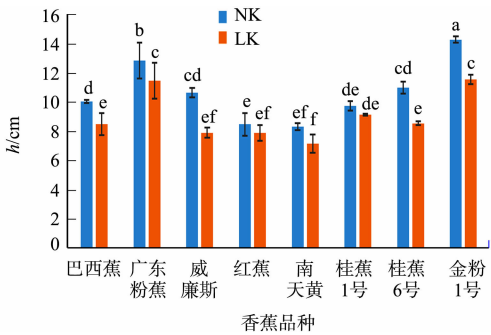
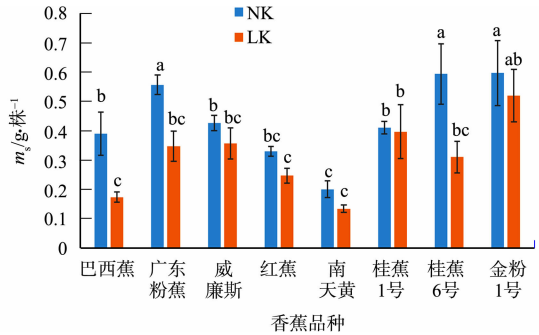
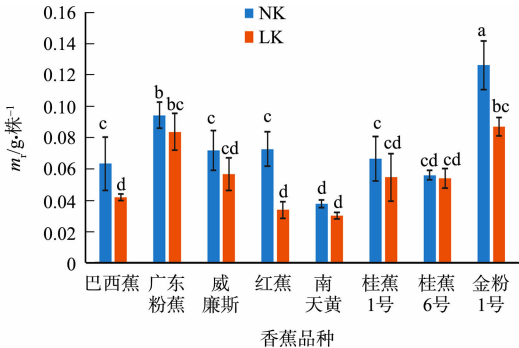


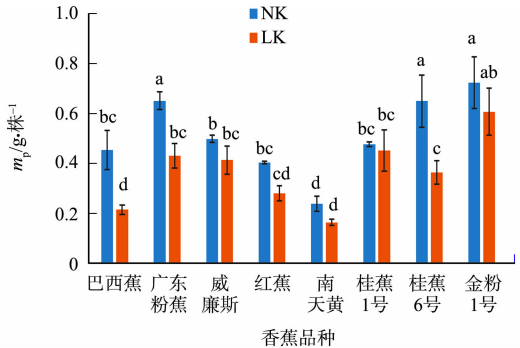
图 2 不同钾水平处理对株高的影响
Fig. 2 Influence of different potassium levels treatment on plant height



(a) 地上部干质量



(b) 地下部干质量



(c) 整株干质量

图 3 不同钾水平处理对干质量的影响

Fig. 3 Influence of different potassium levels treatment on dry weight

较于正常钾处理,经低钾处理的‘巴西蕉’和‘桂蕉 1 号’地上部干质量分别下降 55.56%和 3.25%,而‘红蕉’和‘桂蕉 6 号’地下部干质量分别下降 53.67%和 3.57%;而相较于正常钾处理,低钾处理的‘巴西蕉’和‘桂蕉 1 号’整株干质量分别下降 52.57%和 5.25%,‘南天黄’和‘巴西蕉’受低钾影响最为明显,缺钾症状最为严重.

4) ‘巴西蕉’和‘南天黄’的叶绿素质量比分别为经正常钾处理和低钾处理的最低值,‘金粉 1 号’叶绿素质量比均为最高值,但其不同钾水平处理无显著性差异,其他品种均有显著性差异. 其中,相较于正常钾处理,经低钾处理的‘广东粉蕉’‘南天黄’的叶绿素质量比分别下降了 46.50%和 41.22%.

2.2 不同钾水平处理对根系指标的影响

不同钾水平处理对根系指标(根体积、根总吸收面积、根总活跃吸收面积)的影响,如图 5 所示. 图 5 中: V 为根体积; S_t 为根总吸收面积; S_a 为根总活跃吸收面积. 由图 5 可得以下 4 个结论.

1) 低钾处理的香蕉苗根系指标均低于正常钾处理,在同一处理中,‘金粉 1 号’各项根系指标均最高,‘南天黄’的根体积最小,‘巴西蕉’的根总吸收面积和根总活跃吸收面积最小.

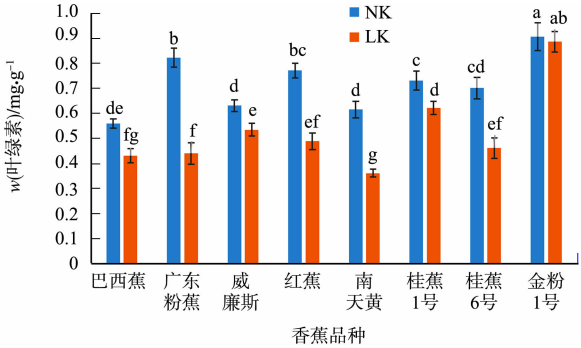
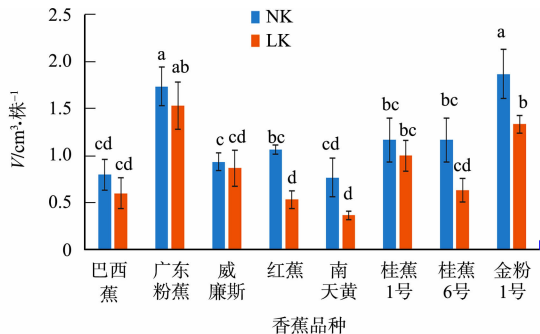


图 4 不同钾水平处理对叶绿素质量比的影响
Fig. 4 Influence of different potassium levels treatment on chlorophyll mass ratio



(a) 根体积

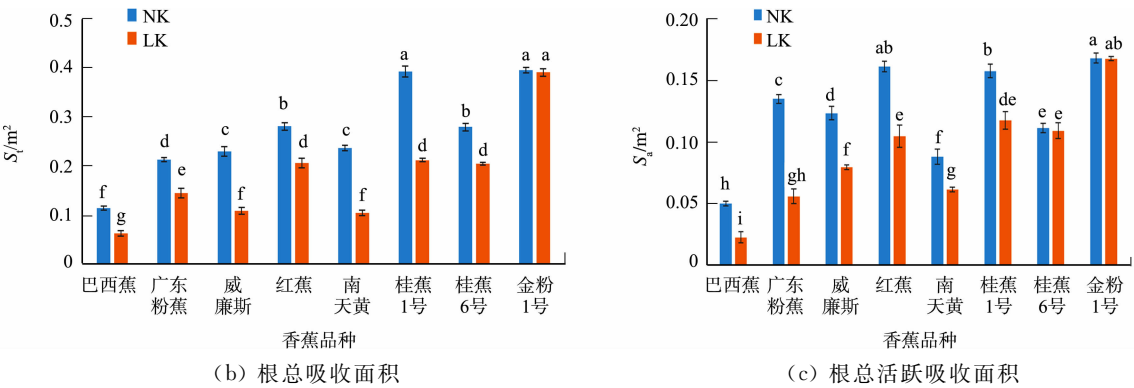


图 5 不同钾水平处理对根系指标的影响

Fig. 5 Influence of different potassium levels treatment on root indexes

2) 正常钾处理的根体积大于低钾处理,二者变化趋势一致,不同品种之间存在显著的基因型差异,正常钾处理和低钾处理的‘金粉 1 号’根体积分别比‘南天黄’高 137.5%,225.0%,差异显著。

3) 低钾处理的‘金粉 1 号’根总吸收面积比正常钾处理仅下降 0.66%,几乎未受低钾影响;‘桂蕉 1 号’的根总吸收面积受低钾影响明显,较正常钾处理下降了 44.7%;低钾处理的‘巴西蕉’‘南天黄’分别比正常钾处理下降了 45.11%,55.49%,受低钾影响明显;正常钾处理和低钾处理的‘金粉 1 号’的根总吸收面积分别比‘巴西蕉’高 224.33%,520.35%,差异极显著。

4) 正常钾处理的根,其总活跃吸收面积大于低钾处理,经正常钾处理和低钾处理的‘金粉 1 号’根的总活跃吸收面积分别比‘巴西蕉’高 237.75%,648.66%;而经低钾处理的‘金粉 1 号’‘桂蕉 6 号’根总活跃吸收面积分别比正常钾处理下降了 0.30%,2.15%,且其他品种均有较大降幅,低钾处理的‘巴西蕉’‘广东粉蕉’‘南天黄’分别比正常钾处理下降了 55.02%,58.59%,30.00%。

2.3 不同钾水平处理对钾质量比和地上部钾积累量的影响

不同的钾水平处理对钾质量比(地上部钾质量比、地下部钾质量比)、地上部钾积累量的影响,如图 6 所示。图 6 中: $w_s(K)$, $w_r(K)$ 分别为地上部钾质量比和地下部钾质量比; $m_s(K)$ 为地上部钾积累量。由图 6 可得以下 4 个结论。

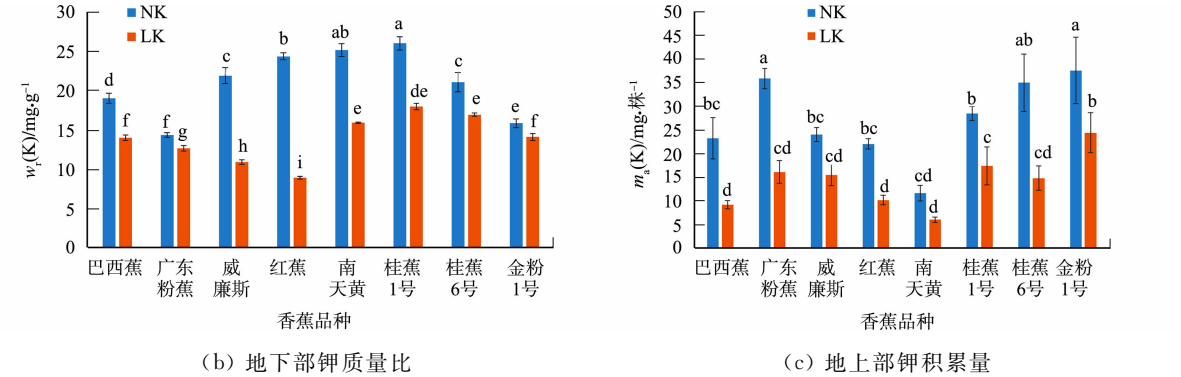


图 6 不同钾水平处理对钾质量比和地上部钾积累量的影响

Fig. 6 Influence of different potassium levels treatment on potassium mass ratio and aboveground potassium accumulation

1) 正常钾处理的地上部钾质量比大于低钾处理,不同香蕉品种的地上部钾质量比差异不明显,地下部钾质量比和地上部钾积累量均有显著性差异。

2) 正常钾处理中,‘桂蕉 1 号’的地上部钾质量比最高,‘威廉斯’的地上部钾质量比最低;低钾处理中,‘巴西蕉’的地上部钾质量比最高,‘红蕉’的地上部钾质量比最低。

3) 正常钾处理的香蕉苗,其地下部钾质量比大于低钾处理。两种钾水平处理的‘桂蕉 1 号’地下部

钾质量比均为最高,其正常钾处理和低钾处理的地下部钾质量比分别比‘广东粉蕉’‘红蕉’高 80.67%,99.24%.

4) 正常钾处理的地上部钾积累量大于低钾处理,正常钾处理和低钾处理的‘金粉 1 号’分别比‘南天黄’高 222.47%,305.32%.

2.4 香蕉苗期的钾吸收效率系数

不同香蕉品种的地上部钾效率系数,如图 7 所示.由图 7 可知:8 个香蕉品种的地上部钾效率系数区间为 0.44~0.97,最高值与最低值相差 54.6%;地上部钾效率系数较小(0.4~0.6)的品种为‘巴西蕉’和‘桂蕉 6 号’;地上部钾效率系数居中(0.6~0.8)的品种为‘广东粉蕉’‘红蕉’和‘南天黄’;地上部钾效率系数较大(0.8~1.0)的品种为‘金粉 1 号’‘桂蕉 1 号’和‘威廉斯’;‘桂蕉 1 号’‘金粉 1 号’的地上部钾效率系数分别比‘巴西蕉’高 120.45%,96.40%.

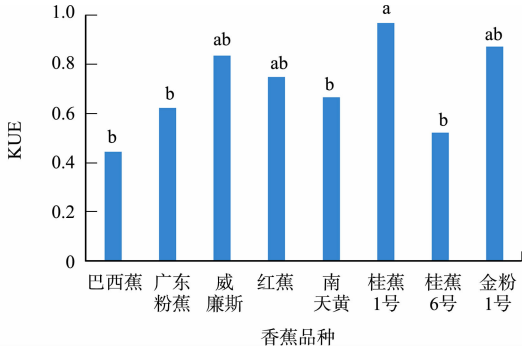


图 7 不同香蕉品种的地上部钾效率系数
Fig. 7 Aboveground potassium efficiency coefficients of different banana varieties

3 结果与讨论

以国内主栽的 8 个香蕉品种为材料,通过水培试验,对不同香蕉品种苗期钾效率的差异性进行分析.初步确定‘金粉 1 号’‘桂蕉 1 号’为钾高效基因型;‘威廉斯’‘广东粉蕉’‘桂蕉 6 号’‘红蕉’为钾中效基因型;‘南天黄’‘巴西蕉’为钾低效基因型.

干质量是筛选钾效率基因型的首要指标^[8,18-19].文中试验结果表明,低钾处理对不同香蕉品种的株高影响并不显著,在低钾条件下,‘金粉 1 号’和‘桂蕉 1 号’的干质量较高,‘南天黄’和‘巴西蕉’的干质量较低,其他品种属于中间类型.‘金粉 1 号’和‘桂蕉 1 号’属于钾高效基因型,‘南天黄’虽然受低钾影响较小,但干质量很小,可归为钾低效基因型,‘巴西蕉’受低钾影响较大,也可归为钾低效基因型.‘广东粉蕉’和‘桂蕉 6 号’虽然受低钾影响较大,但低钾条件下的干质量较高,故未归为钾低效基因型.

缺钾会在一定程度上影响植株的光合作用,叶绿素质量比是体现光合作用强弱的一个重要指标^[20-22].文中试验结果表明,‘广东粉蕉’受低钾影响最大,低钾处理的叶绿素质量比比正常钾处理下降了 46.50%,‘巴西蕉’和‘南天黄’的叶绿素质量比分别为正常钾处理和低钾处理的最低值,这说明低钾处理明显影响了‘广东粉蕉’的光合作用,而‘南天黄’和‘巴西蕉’的耐低钾能力也较弱.

根是植物吸收营养物质的重要器官,根系指标的差异一定程度上反映了植株营养吸收能力的差异^[23-27].文中试验结果表明,‘金粉 1 号’各项根系指标均为最高,几乎不受低钾处理的影响,进一步说明‘金粉 1 号’为钾高效基因型.‘桂蕉 1 号’的根总吸收面积受低钾影响较为明显,较正常钾处理下降了 44.7%,但其根体积、根总吸收面积、根总活跃吸收面积较大,故仍将其归为钾高效基因型.‘巴西蕉’和‘南天黄’的根系指标较低,且受低钾条件影响明显,进一步说明其为钾低效基因型.综上所述,钾高效基因型品种的根系指标较高,均受低钾影响较小,除‘桂蕉 1 号’的根总吸收面积下降明显外,钾低效基因型品种的根系指标较低,且受低钾影响明显.

钾质量比、地上部钾积累量和地上部钾效率系数是衡量植物钾吸收效率的重要指标^[28-31].文中试验结果表明,8 个香蕉品种的地上部钾质量比差别不大,地下部钾质量比差异明显.‘广东粉蕉’地下部钾质量比虽受低钾影响不明显,但其值较低.‘威廉斯’‘红蕉’‘南天黄’‘桂蕉 1 号’和‘巴西蕉’地下部钾质量比受低钾影响明显,但‘桂蕉 1 号’地下部钾质量比在两种处理中均为最高值,‘红蕉’地下部钾质量比下降最为明显,下降了 62.3%.8 个香蕉品种的地上部钾积累量受低钾影响明显,‘金粉 1 号’‘桂蕉 6 号’‘桂蕉 1 号’和‘广东粉蕉’的地上部钾积累量较大,‘南天黄’和‘巴西蕉’的地上部钾积累量较小.王为木等^[32]发现水稻在同等供钾条件下,地上部钾效率系数越高,耐低钾能力越强,在缺钾条件下对钾的吸收能力越强.吴宇佳等^[8]根据地上部钾效率系数,将 16 个香蕉品种分为 3 种基因型,钾效率较低基因型(3 个)、钾效率中等基因型(9 个)、钾效率较高基因型(4 个).文中试验结果表明,‘桂蕉 1 号’‘金粉 1 号’‘威廉斯’地上部钾效率系数较大,‘广东粉蕉’‘红蕉’‘南天黄’地上部钾效率系数居中,‘巴西蕉’‘桂

蕉6号’地上部钾效率系数较小。虽然‘威廉斯’的地上部钾效率系数较大,但其钾质量比和钾积累量较低,因此,不能归为钾高效基因型,只能归为钾中效基因型;虽然‘桂蕉6号’的地上部钾效率系数较小,但低钾条件下植株的干质量、钾积累量较大,因此,将其归为钾中效基因型;虽然‘南天黄’的地上部钾效率系数居中,但众多生理指标均为最低,故将其归为钾低效基因型。

综上所述,不同香蕉品种在干质量、叶绿素质量比、钾质量比、根系指标等方面存在一定的差异,钾高效率基因型品种在低钾处理时受到的影响较小。将8个国内主栽香蕉品种初步分为3种钾效率基因型,‘金粉1号’‘桂蕉1号’为钾高效基因型;‘威廉斯’‘广东粉蕉’‘桂蕉6号’‘红蕉’为钾中效基因型;‘南天黄’‘巴西蕉’为钾低效基因型。然而,文中试验仅为苗期生理层面的筛选,今后还将从分子层面筛选出钾高效基因型的香蕉品种,挖掘植物自身的营养吸收潜力,降低钾肥使用量,减少对环境的污染。

参考文献:

- [1] JU Huiyan, LIU Junfeng, GAO Jie, *et al.* Potassium uptake characteristics of two maize hybrids and their parents under the stress from a low amount of potassium[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 37(1): 123-135. DOI: 10.1080/01904167.2013.849733.
- [2] TAGLIANI A, TRAN A N, NOVI G, *et al.* The calcineurin beta-like interacting protein kinase CIPK25 regulates potassium homeostasis under low oxygen in *Arabidopsis*[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2020, 71(9): 2678-2689. DOI: 10.1093/jxb/eraa004.
- [3] ZHAO Xiaoming, LIU Yang, LIU Xin, *et al.* Comparative transcriptome profiling of two tomato genotypes in response to potassium-deficiency stress[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(8): 2402. DOI: 10.3390/ijms19082402.
- [4] HOU Wenfeng, TRÄNKNER M, LU Jianwei, *et al.* Diagnosis of nitrogen nutrition in rice leaves influenced by potassium levels[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 165. DOI: 10.3389/fpls.2020.00165.
- [5] WANG Yi, WU Weihua. Regulation of potassium transport and signaling in plants[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2017, 39: 123-128. DOI: 10.1016/j.pbi.2017.06.006.
- [6] CHEN Guang, LI Chaolei, GAO Zhenyu, *et al.* Driving the expression of RAA1 with a drought-responsive promoter enhances root growth in rice, its accumulation of potassium and its tolerance to moisture stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 147: 147-156. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2017.12.008.
- [7] CHAKRABORTY K, BHADURI D, MEENA H N, *et al.* External potassium (K(+)) application improves salinity tolerance by promoting Na(+)-exclusion, K(+)-accumulation and osmotic adjustment in contrasting peanut cultivars[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 103: 143-153. DOI: 10.1016/j.plaphy.2016.02.039.
- [8] 吴宇佳, 张文, 符传良, 等. 不同基因型香蕉苗期钾效率差异的初步研究[J]. *西南农业学报*, 2014, 27(4): 1587-1590. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2014.04.067.
- [9] JOHN K S, SREEKUMAR J, SHEELA M N, *et al.* Pre evaluation of cassava (*manihot esculenta* crantz) germplasm for genotypic variation in the identification of K efficient genotypes through different statistical tools[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2020, 26(9): 1911-1923. DOI: 10.1007/s12298-020-00867-2.
- [10] 姜存仓, 袁利升, 王运华, 等. 不同基因型棉花苗期钾效率差异的初步研究[J]. *华中农业大学学报*, 2003, 22(6): 564-568. DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2003.06.011.
- [11] KHAN A, KHUAWER M Y, SHIRAZI M U, *et al.* Differential responses of wheat genotypes for potassium uptake and utilization efficiency under adequate and deficient potassium levels in solution culture[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2017, 49(6): 2153-2159.
- [12] 张宁, 郭荣发. 不同钾效率水稻品种苗期的根系形态与生理指标[J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(4): 716-720. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4440.2014.04.004.
- [13] FLORES R A, ANDRADE A F, CASAROLI D, *et al.* Potassium fertilization in sugarcane ratoon yield grown in a tropical region[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, 51(7): 896-910. DOI: 10.1080/00103624.2020.1744622.
- [14] ERIKA O E, EMMA T S, DIRGA S S. The effect of Npk+Mg fertilizer application on potassium availability, potassium uptake, and yield of sweet corn (*zea mays saccharata* sturt) in inceptisols[J]. *International Journal of Energy and Environmental Science*, 2020, 5(3): 47-50. DOI: 10.11648/j.ije.20200503.11.

[15] SAIMA L, SHAHID U, PEER S, *et al.* Protective effect of 24-epibrassinolide on barley plants growing under combined stress of salinity and potassium deficiency[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2020, 39(4): 1543-1558. DOI:10. 1007/s00344-020-10163-8.

[16] 顾骏飞, 周振翔, 李志康, 等. 水稻低叶绿素含量突变对光合作用及产量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(4): 551-560. DOI:10. 3724/SP. J. 1006. 2016. 00551.

[17] 饶宝蓉. 香蕉不同基因型间钾素营养效率差异性研究[D]. 海口: 海南大学, 2010.

[18] 叶芝兰. 大麦响应低钾胁迫的基因型差异及其耐性机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.

[19] COSTA D R, SIMISTER R, ROBERTS L A, *et al.* Nutrient and drought stress: Implications for phenology and biomass quality in miscanthus[J]. Annals of Botany, 2019, 124(4): 553-566. DOI:10. 1093/aob/mcy155.

[20] ZAHOOR R, ZHAO Wenqing, DONG Haoran, *et al.* Potassium improves photosynthetic tolerance to and recovery from episodic drought stress in functional leaves of cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 119: 21-32. DOI:10. 1016/j. plaphy. 2017. 08. 011.

[21] 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其基因型差异[J]. 作物学报, 2001, 27(6): 1000-1006. DOI:10. 3321/j. issn:0496-3490. 2001. 06. 051.

[22] 夏乐, 于海秋, 郭焕茹, 等. 低钾胁迫对玉米光合特性及叶绿素荧光特性的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(6): 71-74. DOI:10. 13597/j. cnki. maize. science. 2008. 06. 026.

[23] WANG Jidong, ZHU Guopeng, DONG Yue, *et al.* Potassium starvation affects biomass partitioning and sink-source responses in three sweet potato genotypes with contrasting potassium-use efficiency[J]. Crop and Pasture Science, 2018, 69(5): 506-514. DOI:10. 1071/CP17328.

[24] DENG Kexuan, WANG Wanqing, FENG Li, *et al.* Target of rapamycin regulates potassium uptake in *Arabidopsis* and potato[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 155(10): 357-366. DOI:10. 1016/j. plaphy. 2020. 07. 044.

[25] 王晓茹, 董合林, 李永旗, 等. 棉花不同品种钾吸收效率差异的根系形态学和生理学机理[J]. 棉花学报, 2016, 28(2): 152-159. DOI:10. 11963/issn. 1002-7807. 201602008.

[26] DUNCAN E G, O'SULLIVAN C A, ROPER M M, *et al.* Yield and nitrogen use efficiency of wheat increased with root length and biomass due to nitrogen, phosphorus, and potassium interactions[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2018, 181(3): 364-373. DOI:10. 1002/jpln. 201700376.

[27] 刘芳, 林李华, 张立丹, 等. 缺钾对香蕉苗期地上部、根系生长及氮磷钾吸收的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(2): 47-53. DOI:10. 7671/j. issn. 1001-411X. 2018. 02. 008.

[28] CAI Kangfeng, GAO Huaizhou, WU Xiaojian, *et al.* The ability to regulate transmembrane potassium transport in root is critical for drought tolerance in barley[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(17): 4111-4133. DOI:10. 3390/ijms20174111.

[29] MA Nana, DONG Linda, LU Wei, *et al.* Transcriptome analysis of maize seedling roots in response to nitrogen-, phosphorus-, and potassium deficiency[J]. Plant and Soil, 2020, 447(1/2): 637-658. DOI: 10. 1007/s11104-019-04385-3.

[30] 黄莹, 周文灵, 陈迪文, 等. 钾镁水平对甘蔗主要矿质营养吸收和分配的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(8): 1695-1700. DOI:10. 3969/j. issn. 2095-1191. 2019. 08. 07.

[31] PACHECO J S, CECÍLIA L P R, MENDES R C, *et al.* Agronomic efficiency for nitrogen, phosphorus, and potassium in bean cultivars[J]. Bioscience Journal, 2020, 36(5): 1590-1599. DOI:10. 14393/BJ-v36n5a2020-42340.

[32] 王为木, 杨肖娥, 李华, 等. 低钾胁迫对两个耐钾能力不同水稻品种养分吸收和分配的影响[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(1): 52-56. DOI:10. 16819/j. 1001-7216. 2003. 01. 011.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 刘源岗)