

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2008.01435

## 棉花耐低钾基因型筛选条件和指标的研究

田晓莉 王刚卫 朱睿 杨培珠 段留生 李召虎

(中国农业大学作物化学控制研究中心 / 农业部作物栽培与耕作学重点开放实验室 / 植物生理学与生物化学国家重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 以 2004 年我国棉区的主栽品种/组合/品系为主, 收集 50 个基因型, 在苗期室内液培条件下(低钾浓度和高钾浓度分别为  $0.02 \text{ mmol L}^{-1}$  和  $2.50 \text{ mmol L}^{-1}$ )对棉花耐低钾基因型的适宜筛选苗龄和评价指标进行研究, 并与田间缺钾土壤(速效钾含量为  $59.88 \text{ mg kg}^{-1}$ )的筛选结果进行比较。结果表明, 棉花 5 叶期幼苗基因型间生物量的变异系数明显高于 3 叶期, 适宜进行耐低钾基因型筛选。低钾条件下的绝对生物量与相对生物量( $0.02/2.50$ )、吸钾量和钾利用指数(KUI, 单位浓度钾所形成的生物量)极显著( $P < 0.01$ )相关, 相关系数分别为 0.7690、0.9522 和 0.9791。根长、根表面积与整株吸钾量的相关系数分别为 0.5201( $P < 0.01$ )和 0.3325( $P < 0.05$ )。子叶缺钾斑占子叶总面积的比例(S)在基因型间变化幅度大(变异系数为 44.46%)、符合正态分布、与生物量极显著相关( $r = -0.4455$ ,  $P < 0.01$ ), 可作为棉花苗期耐低钾基因型筛选的辅助指标。种子含钾量与棉花幼苗子叶的S值、生物量、钾吸收量和KUI均无相关关系。液培条件下 5 叶期幼苗的整株生物量与田间条件下产量器官干重极显著相关( $r = 0.5091$ ,  $P < 0.01$ ), 证明苗期室内液培筛选具有可行性, 可作为对大量基因型的初筛方法, 典型基因型需要在田间进行复筛。

**关键词:** 棉花; 基因型; 耐低钾; 筛选

## Conditions and Indicators for Screening Cotton (*Gossypium hirsutum*) Genotypes Tolerant to Low-Potassium

TIAN Xiao-Li, WANG Gang-Wei, ZHU Rui, YANG Pei-Zhu, DUAN Liu-Sheng, and LI Zhao-Hu

(Center of Crop Chemical Control / Key Laboratory of Crop Cultivation and Farming System / State Key Laboratory of National Plant Physiology and Biochemistry, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Commercial cotton production is currently limited by varying levels of potassium (K) deficiency. Screening for low-potassium tolerant cotton genotypes is necessary to alleviate the shortage of available potassium in soil. However, there is no standard procedure for such screening. Fifty cotton genotypes, mainly predominant cultivars/lines developed in 2004 in China, were tested under a hydroponic culture at low ( $0.02 \text{ mmol L}^{-1}$ ) and adequate ( $2.50 \text{ mmol L}^{-1}$ ) K levels. We determined genotypic differences in dry matter and associated traits at the seedling stage and compared with dry weight of reproductive organs (squares, flowers and uncracked and cracked bolls) in a field with potassium-deficient soil ( $59.88 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Coefficient of variation (CV) among genotypes for whole plant dry weight increased from 15.13% at 1-leaf stage to 21.13% and 28.58% at 3- and 5-leaf stages, suggesting that differences among genotypes would manifest more clearly as seedlings aged. Together with the rather short growing period (about 20 d), we considered the 5-leaf stage most suitable for the screening at the seedling stage. The relative dry weight (RDW) of the whole plant ( $0.02/2.50$ ) correlated well ( $r = 0.7690$ ,  $P < 0.01$ ) with absolute dry weight (ADW) in the low K medium, but it had a higher CV than the latter (up to 37.39% at the 5-leaf stage). This suggests that the RDW would be a better screening index than ADW. Under the K-deficient media, highly significant positive correlations were observed between K accumulation and dry matter ( $r = 0.9522$ ), K utilization index (KUI, dry matter produced per 1% K) and dry matter ( $r = 0.9791$ ), respectively. This shows that cotton tolerance to low K is a function of uptake and utilization. Correlation coefficients between root length and K accumulation, root surface area and K accumulation were 0.5201 ( $P < 0.01$ ) and 0.3325 ( $P < 0.05$ ), respectively. The ratio of spotted area caused by potassium deficiency to total cotyledon area (defined as S) was highly variable (CV = 44.46%) and normally distributed among genotypes, and inversely correlated with dry matter ( $r = -0.4455$ ,  $P < 0.01$ ). Thus the S value

基金项目: 国家自然科学基金项目(30100111, 30571118)

作者简介: 田晓莉(1968-), 女, 教授, 研究方向为棉花生理。E-mail: tianxl@cau.edu.cn

Received(收稿日期): 2007-12-15; Accepted(接受日期): 2008-03-26.

could be a secondary screening index for low K tolerance. The K content of seed did not affect the low-K tolerance of seedlings. We obtained a significantly positive correlation between dry matter at the seedling stage and dry weight of reproductive organs in the field ( $r = 0.5091$ ,  $P < 0.01$ ). Our conclusion is that preliminary screening of cotton genotypes tolerant to low-potassium at the seedling stage is feasible using a hydroponic culture. However, some important genotypes would need further screening in the field.

**Keywords:** Cotton (*Gossypium hirsutum*); Genotypes; Tolerance to low-potassium; Screening

根据我国耕地地力监测点 10 余年的监测结果, 土壤钾素的亏缺已成为一个近乎全国性的严重问题<sup>[1]</sup>。最近有报道指出, 我国土壤钾肥力还在不断下降, 钾肥有效区还在不断扩大<sup>[2]</sup>。然而我国钾矿资源相当缺乏, 钾肥年产量不足消费量的 10%<sup>[3]</sup>。与缺少钾矿资源相比, 我国土壤中全钾含量相对丰富, 土壤的钾素总量可高达土壤速效钾的 500 倍<sup>[4]</sup>。因此, 利用作物的遗传多样性, 选育耐低钾的植物基因型、挖掘作物自身的潜力来提高钾素营养效率, 是缓解我国钾素资源短缺、促进农业可持续发展的一条有效途径。

国外开展作物钾营养基因型差异的工作较早, 涉及的作物种类有大麦<sup>[5-6]</sup>、小麦<sup>[7]</sup>和野燕麦<sup>[8]</sup>等。国内这方面的工作起步相对较晚, 但在水稻上自 20 世纪 80 年代以来已积累了较多的资料<sup>[9-13]</sup>, 近十余年来在小麦<sup>[14-15]</sup>、玉米<sup>[16]</sup>等作物上也开展了研究。棉花是一种喜钾的经济作物, 近年来随着黄河流域和长江流域棉区转基因抗虫棉种植面积的不断扩大和产量水平的逐步提高, 我国棉花生产中的缺钾现象越来越普遍、缺钾程度越来越严重, 成为导致当前棉花早衰的重要原因之一<sup>[17-18]</sup>。

由于棉花生产中的缺钾现象在 20 世纪 90 年代中期以前一般只是点片发生, 因此关于棉花钾营养效率基因型差异的研究很少。Mengel<sup>[19]</sup>指出, 容易缺钾的棉花品种根系生长停止的时间较早, Brouder 等<sup>[20]</sup>在缺钾土壤上发现, 钾高效品种 Acala GC510 盛花期后的根表面积和吸钾量高于钾敏感品种 Acala SJ-2, 而且前者达到最高产量 95% 时所要求的土壤水溶性钾和叶片的钾浓度低于后者<sup>[21]</sup>。另外, 熟期不同的棉花品种对钾的反应也存在差异<sup>[22]</sup>。针对转基因抗虫棉的易早衰问题, 笔者曾对其与非抗虫棉之间钾营养的差异作了初步的探讨<sup>[18,23-24]</sup>。而关于棉花耐低钾基因型的较大批量筛选直到 2003 年才见到报道<sup>[25]</sup>, 但未见其着重讨论筛选的方法和评价指标。本试验收集 50 个棉花基因型, 探讨适宜棉花苗期钾营养效率筛选的苗龄, 确定主要的筛选指标, 并对苗期筛选结果和田间筛选结果进行了初

步的比较。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

以《中国棉花景气报告 2004》<sup>[26]</sup>报道的 2004 年我国棉区主栽品种/组合/品系为主, 共收集 50 个棉花基因型(表 1), 其种植面积覆盖当年全国播种面积的 80% 以上。供试种子主要来自于有关育种单位和种子分公司(表 1)。

### 1.2 试验设计和方法

于光照(钨灯)培养室内进行营养液培养(液培)试验, 光强  $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  左右, 湿度 70%~80%, 光照时间 12 h, 昼夜温度  $30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}/22^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 。种子用 9% 双氧水消毒 30 min, 清水漂洗数次后, 浸泡过夜至露白, 然后均匀播于用去离子水冲洗过的沙床, 上面盖一层涤纶布后再覆薄沙一层, 3 d 后将萌发的幼苗移至不同钾浓度的改良 Hoagland 营养液中, 配方为:  $2.5 \text{ mmol L}^{-1} \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $1 \text{ mmol L}^{-1} \text{MgSO}_4$ ,  $0.5 \text{ mmol L}^{-1} \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $2 \times 10^{-4} \text{ mmol L}^{-1} \text{CuSO}_4$ ,  $1 \times 10^{-3} \text{ mmol L}^{-1} \text{ZnSO}_4$ ,  $0.1 \text{ mmol L}^{-1} \text{EDTA Fe Na}$ ,  $2 \times 10^{-2} \text{ mmol L}^{-1} \text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $5 \times 10^{-6} \text{ mmol L}^{-1} (\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$  和  $1 \times 10^{-3} \text{ mmol L}^{-1} \text{MnSO}_4$ 。培养容器为  $16 \text{ cm} \times 13 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$  的塑料盆, 幼苗根茎交界处经海绵包裹后用聚乙烯泡沫板固定于塑料盆上, 每盆加 2.2 L 营养液、移入 4 株幼苗, 每周更换 2 次营养液, 每天加入一定量的去离子水补充因蒸腾而消耗的水分, 以气泵 24 h 通气。

设  $0.02 \text{ mmol L}^{-1}$  低钾胁迫处理(预备试验证明此时基因型间的变异较大)和  $2.50 \text{ mmol L}^{-1}$  高钾处理(此时大部分品种叶片的含钾量在 2.5%~3.0% 之间, 可保证棉花达到最大生长速率<sup>[27]</sup>), 钾元素由 KCl 提供(补充试验证明 KCl 与  $\text{K}_2\text{SO}_4$  培养效果相似), 营养液中  $\text{Cl}^-$  的最高含量为  $88.8 \text{ mg L}^{-1}$ , 而介质中  $\text{Cl}^-$  含量低于  $306.7 \text{ mg kg}^{-1}$  时对棉花生长影响不显著<sup>[28]</sup>, 因此本试验可以忽略  $\text{Cl}^-$  对棉花幼苗生长的毒害作用。每处理各基因型重复 4 盆。液培试验重复 3 次以上, 各次试验基因型按生物量的排序基本一致,

表 1 供试棉花基因型及其来源  
Table 1 Genotypes and their sources

编号 No.	品种 Genotype	来源 Source	编号 No.	品种 Genotype	来源 Source	编号 No	品种 Genotype	来源 Source
1	新棉 33B NuCOTN33B	JDCSC	18	中棉所 45 CCRI45	CCRI	35	新陆早 9 Xinluzao 9	HXCSC
2	新棉 99B NuCOTN99B	JDCSC	19	中棉所 49 CCRI49	CCRI	36	新陆早 10 Xinluzao 10	HXCSC
3	DP20B	JDCSC	20	冀杂 566 Jiza 566	HBCRI	37	新陆早 12 Xinluzao 12	HXCSC
4	鲁棉研 15 SCRC15	SCRC	21	冀棉 668 Jimian 668	HBCRI	38	新陆早 13 Xinluzao 13	HXCSC
5	鲁棉研 16 SCRC16	SCRC	22	豫棉 20 Yumian 20	HPPI	39	系九 Xi 9	HXCSC
6	鲁棉研 18 SCRC18	SCRC	23	豫杂 35 Yuza 35	HCCRI	40	抗虫 1 号 Kangchong 1	SDCS
7	鲁棉研 21 SCRC21	SCRC	24	标杂 A1 Biaoza A1	SAAS	41	抗虫 5 号 Kangchong 5	SDCS
8	鲁棉研 22 SCRC22	SCRC	25	皖棉 16 Wanmian 16	ACRI	42	丰抗 6 号 Fengkang 6	SDCS
9	欣杂 1 号 Xinza 1	GXSGURT	26	皖棉 13 Wanmian 13	ACRI	43	1904	CCRI
10	欣杂 2 号 Xinza 2	GXSGURT	27	南农 8 号 Nannong 8	NAU	44	114	CCRI
11	国抗 12 Guokang 12	GXSGURT	28	南抗 3 号 Nankang 3	RSSC	45	205075	CCRI
12	SGK3	GXSGURT	29	鄂杂 4 号 Eza 4	JAAS	46	110077	CCRI
13	中棉所 12 CCRI12	CCRI	30	鄂杂 9 号 Eza 9	JAAS	47	153018	CCRI
14	中棉所 29 CCRI29	CCRI	31	湘杂 2 号 Xiangza 2	HNCRI	48	110025	CCRI
15	中棉所 35 CCRI35	CCRI	32	湘杂 3 号 Xiangza 3	HNCRI	49	960008	CCRI
16	中棉所 41 CCRI41	CCRI	33	辽棉 17 Liaomian 17	LCCRI	50	中 51504 Zhong 51504	CCRI
17	中棉所 43 CCRI43	CCRI	34	辽棉 18 Liaomian 18	LCCRI			

JDCSC: 河北冀岱棉种技术有限公司; SCRC: 山东棉花研究中心; GXSGURT: 河北省河间市国欣农村技术服务总会; CCRI: 中国农业科学院棉花研究所; HBCRI: 河北省农业科学院棉花研究所; HPPI: 河南省农业科学院植物保护研究所; HCCRI: 河南省农业科学院经济作物研究所; SAAS: 河北省石家庄市农业科学研究院; ACRI: 安徽省农业科学院棉花研究所; NAU: 南京农业大学; RSSC: 南京红太阳种业有限公司; JAAS: 湖北省荆州农业科学院; HBCRI: 湖南省农业科学院棉花研究所; LCCRI: 辽宁省农业科学院经济作物研究所; HXCSC: 新疆玛纳斯华西棉种有限责任公司; SDCS: 山东省棉花种子销售市场。

JDCSC: Hebei Jidai Cotton Seed Company Ltd; SCRC: Shandong Cotton Research Center; GXSGURT: Guoxin Service General Union of Rural Technology, Hejian County, Hebei Province; CCRI: Cotton Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences; HBCRI: Hebei Cotton Research Institute; HPPI: Henan Plant Protection Institute; HCCRI: Henan Cash Crop Research Institute; SAAS: Shijiazhuang Academy of Agricultural Sciences; ACRI: Anhui Cotton Research Institute; NAU: Nanjing Agricultural University; RSSC: Nanjing Red Sun Seed Company Ltd; JAAS: Jingzhou Academy of Agricultural Sciences, Hubei Province; HNCRI: Hunan Cotton Research Institute; LCCRI: Liaoning Cash Crops Research Institute; HXCSC: Huaxi Cotton Seed Company Ltd, Manasi County, Xinjiang Autonomous Region; SDCS: Commercial Seed in Shandong Province.

文中所用数据为其中具有代表性的一次。

于 2006 年在中国农业大学上庄实验站进行田间试验。试验田土壤为沙壤土, pH 8.03(水土=2.5 1), 含有机质 0.92%(浓硫酸和重铬酸钾 170 消煮), 速效氮 22.42 mg kg<sup>-1</sup>(1 mol L<sup>-1</sup> KCl 浸提, 水土=10 1), 速效磷 6.94 mg kg<sup>-1</sup>(0.5 mol L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 浸提), 速效钾 59.88 mg kg<sup>-1</sup>(1 mol L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>Ac 浸提)。底肥施尿素 150 kg hm<sup>-2</sup>、磷酸二铵 300 kg hm<sup>-2</sup>, 折合 N 123 kg hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 138 kg hm<sup>-2</sup>, 初花期追尿素 225 kg hm<sup>-2</sup>(N 123 kg hm<sup>-2</sup>), 试验过程中不施用钾肥。每小区一行, 行距 1.2 m, 行长 6 m, 株距 0.4 m, 种植密度为 20.8 万株 hm<sup>-2</sup>, 重复 3 次。5 月 18 日育苗, 5 月 28 日移栽, 常规田间管理, 特别注意防治棉铃虫, 保证非抗虫棉不受危害。

1.3 取样及测定

播种前取各基因型饱满种子 10 粒, 剥壳后分为

种壳和种仁两部分, 于 80 ℃ 下烘干 3 d, 称重, 粉碎过筛, 用 1 mol L<sup>-1</sup> HCl 浸提 5 h, 振荡 30 min, 过滤, 用原子吸收分光光度计 (SpectAA-50/55, Varian, Australia) 测定滤液钾浓度, 每品种重复 3 次。

移苗后 5 d, 各品种子叶展平, 0.02 mol L<sup>-1</sup> 低钾处理的缺钾斑(子叶叶缘以及叶面出现的失绿、水渍状斑点) 普遍出现, 此时用 EPSON 扫描仪 (G780B, Seiko Epson Corp., Tokyo, Japan) 扫描子叶, 用图像分析软件 Motic Images Advanced (3.1, Motic, 厦门) 对子叶面积和缺钾斑面积进行测量。

各处理分别于幼苗 1 叶期、3 叶期和 5 叶期(移入营养液后 10、15 和 20 d) 取样, 将植株分为根系和地上部(茎叶) 两部分。地上部于 105 ℃ 下杀青 30 min, 80 ℃ 下烘干 48 h, 称重、研磨或粉碎过筛; 根系经上述 EPSON 扫描仪扫描及软件 WinRHIZO (version 4.0b, Regent Instruments Inc., Quebec, Canada) 分析总根长

和根表面积后进行同样处理。钾含量测定方法同上。由于高钾处理的出叶快于低钾处理，叶龄的确定以低钾处理为准。

于田间花铃期(8月下旬)在每小区标记 3 株代表性植株，10 月 13~14 日一次性收获标记植株的产量器官(蕾、花、未吐絮棉铃、吐絮铃及其铃壳)，风干后称重。

1.4 筛选指标

低钾处理的植株生物量(DW); 低钾处理(0.02 mmol L<sup>-1</sup>)与高钾处理(2.50 mmol L<sup>-1</sup>)的生物量比值(相对生物量, RDW); 根长(RL); 根表面积(RSA); 植株积累的总钾量(KAA); 钾体内利用效率(KUE)即植株体内单位重量钾所形成的生物量; 钾体内利用指数(KUI)即植株体内单位钾含量(钾浓度)所形成的生物产量; 缺钾斑比例(S)即缺钾斑面积占子叶总面积的比值; 田间产量器官干重(FRDW)。

1.5 数据统计

用国际通用软件 SAS 8.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 棉花苗期耐低钾基因型筛选的适宜苗龄

基因型变异程度是衡量筛选条件是否适宜的重要依据，变异程度大，说明该条件有利于基因型差异的显示。如表 2 所示，在液培条件下，棉花苗期生物量的基因型差异随着苗龄的增大而增大，钾胁迫浓度为 0.02 mmol L<sup>-1</sup>时，1、3 和 5 叶期整株干重最大值与最小值的倍数关系分别为 2.22、2.63 和 3.40，变异系数分别为 15.13%、21.13%和 28.58%，地上部

干重也表现出同样的趋势。此外，整株干重和地上部干重在 2.50 mmol L<sup>-1</sup>的高钾条件下也存在较大的基因型差异，但其在 5 叶期的变异系数小于低钾处理。

为了消除基因型间自身生物学特性(如长势等)的差异，进一步研究了相对生物量的变化幅度和变异系数(表 2)。结果表明，最不耐低钾基因型的相对生物量只有 20%左右，耐低钾基因型则接近 70%或在 70%以上，不同苗龄相对生物量的平均值均在 40%左右。1 叶期和 3 叶期相对生物量的变异系数均为 25%左右，5 叶期则上升到 38%左右，与低钾处理的绝对生物量相比有较大幅度提高。可见，棉花苗期耐低钾基因型筛选的适宜苗龄为 5 叶期，相对生长量的筛选效果好于绝对生长量。

2.2 低钾条件下棉花 5 叶期幼苗的根长、根表面积、吸钾能力和体内利用能力的基因型差异及与生物量的相关性

植物的营养效率是由吸收效率、利用效率和运转效率共同决定的。如表 3 所示，低钾条件下基因型间根长最大值与最小值相差 4.33 倍，根表面积为 7.26 倍，二者的变异系数分别为 34.21%和 37.45%，表明根系形态的基因型差异很大。根长和根表面积与整株钾积累量的相关系数分别为 0.5201( $P < 0.01$ )和 0.3325( $P < 0.05$ )，说明根系形态具有优势的基因型吸收能力也较强。整株吸钾量和地上部吸钾量的变异系数均为 25%左右，而且与干物质积累极显著相关(表 3)，相关系数高达 0.9 左右。基因型间钾利用效率(KUE)的变幅不大，最大值与最小值相差不

表 2 棉花不同苗龄幼苗整株干重和地上部干重的基因型差异  
Table 2 Genotypic variations in absolute and relative total dry weight and shoot dry weight of cotton seedlings

项目 Item	苗龄 Seedling age	整株干重Total plant dry weight (g plant <sup>-1</sup> )			地上部干重Shoot dry weight (g plant <sup>-1</sup> )		
		K <sub>0.02</sub>	K <sub>2.50</sub>	K <sub>0.02/2.50</sub> × 100	K <sub>0.02</sub>	K <sub>2.50</sub>	K <sub>0.02/2.50</sub> × 100
平均值 Mean	1 叶期 1-leaf stage	0.145	0.370	40.99	0.123	0.313	40.51
	3 叶期 3-leaf stage	0.187	0.697	42.56	0.163	0.580	42.06
	5 叶期 5-leaf stage	0.486	1.107	45.88	0.423	0.968	45.54
变幅 Variation range	1 叶期 1-leaf stage	0.104–0.231	0.219–0.591	23.27–83.56	0.089–0.193	0.212–0.512	22.46–71.75
	3 叶期 3-leaf stage	0.123–0.324	0.409–1.027	24.22–81.59	0.109–0.283	0.340–0.882	23.40–77.14
	5 叶期 5-leaf stage	0.236–0.803	0.587–2.072	20.37–80.63	0.206–0.693	0.502–1.838	19.37–91.29
变异系数 CV (%)	1 叶期 1-leaf stage	15.13	19.94	25.29	14.92	18.78	23.24
	3 叶期 3-leaf stage	21.13	18.78	24.30	21.28	19.66	25.72
	5 叶期 5-leaf stage	28.58	24.15	37.39	28.57	24.88	38.87

K<sub>0.02</sub>: 0.02 mmol K L<sup>-1</sup>; K<sub>2.50</sub>: 2.50 mmol K L<sup>-1</sup>; K<sub>0.02/2.50</sub>: 钾浓度分别为 0.02 和 2.50 mmol L<sup>-1</sup>时的干重之比。  
K<sub>0.02/2.50</sub>: relative value of dry weight (0.02 mmol K L<sup>-1</sup> / 2.50 mmol K L<sup>-1</sup>).

表 3 低钾条件下棉花 5 叶期幼苗的钾吸收能力和体内利用能力的基因型差异及与生物量的相关性  
Table 3 Genotypic variations in potassium uptake and internal utilization of cotton seedlings grown in solution with 0.02 mmol L<sup>-1</sup> K and their correlation with dry matter at 5-leaf stage

性状 Character	平均值 Mean	变幅 Variation range	变异系数 CV (%)	与整株干重的相关性 CC with TDW ( <i>r</i> )	与地上部干重的相关性 CC with SDW ( <i>r</i> )
根长 RL (cm)	1185	437–1896	34.21	0.6047**	0.5727**
根系表面积RSA (cm <sup>2</sup> )	224	47–341	37.45	0.3664*	0.2899
整株吸钾量 TKAA (mg)	3.0	1.5–4.5	24.84	0.9522**	—
地上部吸钾量 SKAA (mg)	2.7	1.3–4.0	24.77	—	0.9503**
整株钾利用效率TKUE (g mg <sup>-1</sup> K <sup>+</sup> )	159.5	124.1–216.3	11.55	0.6980**	—
整株钾利用指数TKUI (g <sup>2</sup> mg <sup>-1</sup> K <sup>+</sup> )	0.078	0.036–0.147	34.98	0.9791**	—
地上部钾利用效率SKUE (g mg <sup>-1</sup> K <sup>+</sup> )	157.6	127.3–190.3	9.16	—	0.6174**
地上部钾利用指数SKUI (g <sup>2</sup> mg <sup>-1</sup> K <sup>+</sup> )	0.069	0.032–0.129	36.17	—	0.9772**

RL: root length; RSA: root surface area; TKAA: K absorption amount of total plant; SKAA: shoot K absorption amount; TKUE: K use efficiency of total plant; TKUI: K utilization index of total plant; SKUE: shoot K use efficiency; SKUI: shoot K utilization index; CC: correlation coefficient; TDW: total plant dry weight; SDW: shoot dry weight. \*: significant at 5% probability level; \*\*: significant at 1% probability level.

到 1 倍，变异系数也只有 10%左右，与干物质积累的相关虽也达到极显著水平，但相关系数在 0.6~0.7 之间；钾利用指数(KUI)则不同，不仅变幅大(最大值与最小值相差 4 倍左右)、变异系数高(35%左右)，而且与干物质积累的相关系数高达 0.97 以上( $P < 0.01$ )。因此，棉花苗期的钾营养效率是由吸收效率和体内利用效率共同决定的。

2.3 子叶缺钾斑面积占子叶总面积比例(S)作为棉花苗期钾营养效率筛选指标的可行性

营养液中的钾浓度为 0.02 mmol L<sup>-1</sup>时，棉花子叶展开后 3 d即出现水渍状失绿小圆斑(缺钾斑)，随时间推移，失绿斑面积逐渐扩大并干枯为褐色，严重影响子叶的功能。不同基因型缺钾斑出现的时间以及严重程度存在明显差异，如果能利用这一现象对棉花幼苗的钾营养效率及早进行非破坏性鉴定将会提高筛选的效率。统计结果表明，缺钾斑面积占子叶总面积比例(S)的平均值为 41.5%，变幅为 4.9%~75.1%，标准差为 18.5%，变异系数达到了 44.46%，可见这一指标能较好地地区分基因型之间的差异。以 11%为间距分析了不同S值段基因型的分布频数，发现其符合正态分布(图 1)，即绝大部分基因型的S值集中在中间部位，而极大值和极小值的基因型很少，说明S值具有筛选效果。进一步的相关分析表明，S值与 5 叶期的整株干重极显著负相关( $r = -0.4455$ ,  $P < 0.01$ )，与吸钾量和钾利用指数的负相关也达到了极显著( $r = -0.5155$ ,  $P < 0.01$ )和显著( $r = -0.3636$ ,  $P < 0.05$ )水平。因此，子叶缺钾斑比例可作

为棉花苗期钾营养效率的辅助筛选指标之一。

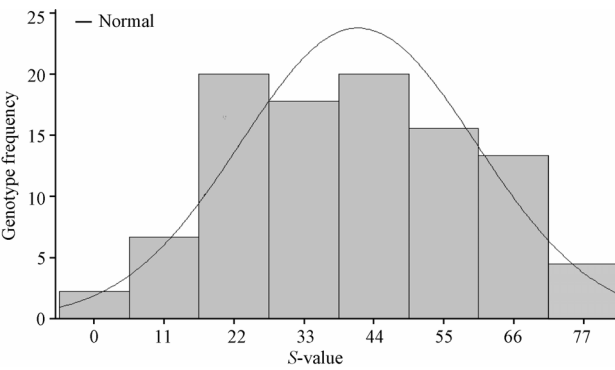


图 1 低钾条件下(0.02 mmol L<sup>-1</sup>)棉花不同基因型子叶缺钾斑面积占子叶总面积比例的正态分布  
Fig. 1 Normal distribution of S value among cotton genotypes  
S-value: 缺钾斑面积占子叶总面积的比例(%).  
S-value: Ratio of spotted area caused by potassium deficiency (0.02 mmol L<sup>-1</sup>) to total cotyledon area.

2.4 棉花种子钾积累量与幼苗钾营养效率的相关性

从表 4 可以看出，棉花基因型间种子各部分的含钾量和钾积累量均有差异，但幅度不如子叶缺钾斑比例(S)及 5 叶期幼苗的生物量、吸钾量和钾利用指数大，最大值与最小值相差不到 1 倍，变异系数一般在 15%以下(种壳钾积累量除外)。此外，种壳、种仁和种子的含钾量及钾积累量与表征棉花苗期钾营养效率的各指标无显著相关关系。

2.5 苗期筛选结果与田间筛选结果的比较

最直观和最客观的耐低钾基因型筛选应在田间进行，即在低钾土壤上进行棉花全生育期培养，最

表 4 棉花种子含钾量和钾积累量的基因型差异及与低钾条件下棉花幼苗钾营养效率的相关性  
Table 4 Genotypic variations in K concentration and K content of seed and their correlation with different indices of K efficiency under low K (0.02 mmol L<sup>-1</sup>) condition at 5-leaf stage

项目 Item	种子含钾量 K concentration of seed (%)			种子钾积累量 K accumulation of seed (mg seed <sup>-1</sup> )		
	种壳 Hull	种仁 Kernel	种子 Seed	种壳 Hull	种仁 Kernel	种子 Seed
平均值 Mean	0.60	0.94	0.82	0.21	0.54	0.74
变幅 Variation range	0.46-0.81	0.78-1.14	0.59-1.15	0.14-0.28	0.39-0.66	0.53-0.91
变异系数 CV (%)	12.57	7.76	11.39	16.32	13.10	11.93
与缺钾斑比例的相关性 CC with S value	-0.2685	-0.2374	-0.0088	-0.1866	-0.0473	-0.1107
与整株干重的相关性 CC with TDW (r)	-0.1342	-0.1459	-0.1562	0.0804	0.2432	0.2246
与整株吸钾量的相关性 CC with TKAA	0.2922	0.1106	0.1905	0.1968	0.0092	0.0809
与整株钾利用效率的相关性 CC with TKUE	-0.2742	-0.0706	-0.1665	-0.1974	0.0104	-0.0654
与整株钾利用指数的相关性 CC with TKUI	-0.1975	-0.1537	-0.1148	-0.0240	0.2290	0.1735

CC: correlation coefficient; S value: ratio of spotted area caused by potassium deficiency (0.02 mmol L<sup>-1</sup>) to total cotyledon area; TDW: total plant dry weight; TKAA: K absorption amount of total plant; TKUE: K use efficiency of total plant; TKUI: K utilization index of total plant.

后以产量等性状比较不同基因型耐低钾能力。田间缺钾条件下，产量器官干重的变化范围为 63.6~265.5 g plant<sup>-1</sup>，变异系数也达到了 33.55%，表明基因型差异很大。对液培条件下苗期钾营养效率各指标与田间产量器官干重的相关性进行分析，发现整株生物量和整株钾利用指数与产量器官干重的正相关达到了极显著水平，相关系数分别为 0.5091( $P < 0.01$ )和 0.3946( $P < 0.01$ )，整株钾吸收量和整株钾浓度与产量器官干重分别呈显著正相关( $r = 0.3312$ ,  $P < 0.05$ )和显著负相关( $r = -0.3080$ ,  $P < 0.05$ )，缺钾斑比例(S)和整株钾利用效率则与其无显著相关关系。这些结果说明采用液培条件在苗期对棉花的耐低钾能力进行筛选具有可行性，而且由于整株生物量与田间产量器官干重的相关系数最高、最便于获得，因此可作为苗期筛选的首要指标。

将 50 个供试基因型按苗期整株生物量和田间产量器官干重 2 个指标分别从小到大排序，前 10 位的基因型归为耐低钾型、后 10 位归为低钾敏感型、中间 30 位归为中间型，则苗期液培筛选出的 5 个耐低钾基因型在田间也表现出耐低钾特性，它们分别是鄂杂 9 号、中棉所 35、鲁棉研 15、湘杂 2 号和南农 8 号，其他 5 个耐低钾基因型在田间均属于中间型，并未进入低钾敏感型之列；苗期对低钾敏感的中棉所 45 和新棉 33B 在田间也不耐低钾，其他 8 个苗期低钾敏感基因型在田间也属于中间型，并未进入耐低钾基因型之列。可见，以生物量为指标在苗期进行耐低钾筛选的结果与田间的产量结果虽然不完全一致，但不会出现质的差异。

3 讨论

以植物自身对营养元素吸收利用的遗传差异为基础，逐步进行种质资源筛选、基因定位、分子克隆与转基因的生物工程，是克服资源限制、提高植物抵抗营养逆境能力的重要策略。但是典型材料的获得必须在大量基因型中进行筛选，因此简单的培养方法、适宜的筛选条件和直观、简便又可靠的评价指标是准确、快速获得耐低营养基因型的基础。

3.1 棉花苗期耐低钾能力的筛选条件

植物耐低营养的筛选环境一般有大田、土培、沙培、液培等，为了缩短筛选周期、加快筛选速度，常采用液培法在苗期进行大量的初筛，而苗龄是否适宜是影响筛选效率和准确性的重要因素。如果筛选苗龄太小，各基因型的遗传差异尚未充分体现，但苗龄太大则延长筛选周期，不利于提高筛选效率。本试验主要根据低钾条件下棉花幼苗绝对生物量和相对生物量(与高钾条件下的生物量之比)的变异系数，确定适合棉花苗期钾营养效率筛选的苗龄为 5 叶期。虽然 5 叶期以后的变异系数可能会更高，但这样筛选周期会延长到 20 d 以上，对提高筛选效率不利。

筛选浓度也很重要，如果浓度太低，极不耐低钾的基因型会逐渐死亡，而且各基因型的差异也不大，浓度太高则选择压力减弱或消失，优良基因型的遗传优势又得不到充分发挥。本试验应用 0.02 mmol L<sup>-1</sup>的低钾浓度是在预备试验中与 0.05 mmol L<sup>-1</sup>比较后确定的(后者的基因型差异较小，数据未列出)，这一浓度与姜存仓等<sup>[25]</sup>采用的 0.025 mmol L<sup>-1</sup>

也比较接近。

### 3.2 棉花苗期耐低钾能力的筛选指标

耐低钾能力的筛选指标包括生物量、钾利用率、钾利用指数、钾吸收动力学参数、吸钾量和钾吸收效率等,不同的研究者采用的筛选指标很不一致。生物量是植物各种生长发育过程最终结果的体现,综合反映植物受低营养胁迫的程度,历来是耐低营养的衡量指标。然而,由于作物耐低营养的生理生化 and 遗传机制非常复杂,因此与之有关的次级指标也非常多,如吸收效率、应用效率等。缺素症状则是营养胁迫在外部的直接表现,可作为辅助筛选指标<sup>[16,29]</sup>。一般情况下,将生物量和其他次级指标、辅助指标相结合可提高筛选的全面性、准确性和筛选效率。

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。本试验结果表明,0.02 mmol L<sup>-1</sup>的低钾条件下,棉花5叶期幼苗绝对生物量的基因型差异较大,变异系数为28.58%,而相对生物量(0.02/2.50)的变异系数更高,达到了37.39%。相关分析发现,绝对生长量和相对生长量之间存在极显著相关关系,其中整株干重的相关系数为0.7690( $P < 0.01$ ,  $n = 50$ ),地上部干重的为0.7555( $P < 0.01$ ,  $n = 50$ )。由于绝对生长量的获得比较简便(不需要同期在高钾条件下培养植株),因此大量初筛时可将其作为棉花苗期耐低钾能力的评价指标。

棉花幼苗子叶缺钾斑的面积比例(S)虽然变异系数高(44.46%)、与苗期生物量的相关性也达到了极显著水平( $r = -0.4455$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 50$ ),但其与田间产量器官干重无相关关系,因此只适合在苗期进行辅助筛选。根系是植物吸收矿质营养的主要器官,而吸收能力是决定植物耐低营养的三大因素(吸收、利用、运转)之一,因此根系形态及其生理吸收能力往往是耐低营养研究中考察的重点之一<sup>[5,10,30-31]</sup>。本试验发现,棉花不同基因型5叶期幼苗的根长和根表面积在0.02 mmol L<sup>-1</sup>低钾条件下的变异系数高达34.21%和37.45%,与整株钾积累量的相关也分别达到了极显著( $r = 0.5201$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 50$ )和显著( $r = 0.3325$ ,  $P < 0.05$ ,  $n = 50$ )水平,说明这两个指标(尤其是根长)可作为苗期的次级筛选指标。利用效率(KUE,植株体内单位重量钾所形成的生物量)和利用指数(KUI,植株体内单位钾含量所形成的生物量)是反映植物体内钾利用效率的两个指标,但KUE在评价作

物体内钾利用能力时存在一个缺点,即随钾水平的提高,利用效率却降低,反之亦然;KUI则综合考虑了生物量和利用效率的差异,能更好地反映养分效率<sup>[32]</sup>。本试验结果也表明,KUI较KUE的变异系数更大、与生物量的相关系数更高,因而筛选效果更好。

### 3.3 种子含钾量与棉花苗期耐低钾能力的关系

为了保证后代的正常生长,植物的种子中贮存了丰富的营养物质,其中包括矿质营养。有报道指出,菜豆基因型间磷营养效率的差异主要与种子的大小和其中的磷含量有关<sup>[33]</sup>,刘国栋和刘更令<sup>[34]</sup>也发现耐低钾能力最强的两种籼稻基因型的种子含钾量最高。本试验结果表明供试基因型种子含钾量和钾积累量的变异系数均为10%左右,由于供试种子来自于不同的单位,因而含钾量不仅受基因型的影响,同时也与生产地的环境条件和栽培措施有关。然而,无论是种子含钾量还是钾积累量,与幼苗的子叶缺钾斑比例(S)、生物量、钾吸收量和体内利用指数均无显著相关关系,这与水稻和菜豆上的结果<sup>[33-34]</sup>不同。这一现象为筛选工作提供了便利(不需要考虑种子含钾情况对筛选结果的影响),但其原因有待进一步研究。

### 3.4 苗期液培筛选结果与田间结果的比较

筛选植物耐低营养基因型最直接和客观的方法是在缺素土壤上进行种植、用经济产量进行评价。但田间全生育期试验不仅耗时、费工、筛选效率低,而且由于土壤在空间和时间上的变异性,增大了控制试验条件的难度。液培法的优点是可以对培养介质进行准确控制、能就某些形态或生理指标对大批量基因型进行快速筛选,但其条件与田间差别很大,如介质中的钾均为水溶性钾,无法反映植物利用土壤非交换性钾(层间钾)的能力。另外,同一个基因型在不同生育时期的钾营养特点及其影响因素也不相同,因此需要对苗期液培条件下的筛选结果与田间产量结果进行对比,并据此评价前者的可行性。相关分析表明,本试验液培条件下幼苗的整株生物量与田间产量器官干重的正相关达到了极显著水平( $r = 0.5091$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 50$ ),分别以二者为指标筛选出的耐低钾基因型和低钾敏感基因型有一定的吻合度,不吻合的部分也没有质的差异(如苗期的耐低钾型在田间表现钾敏感,或苗期的低钾敏感型在田间表现耐低钾),说明采用液培在苗期对棉花的耐低钾能力进行筛选具有可行性,而且以整株生物量作为评价指标既方便又比较可靠。

棉花的耐低钾基因型筛选研究相对于水稻、小麦等作物比较滞后, 据目前掌握的资料仅有国内的华中农业大学曾对 86 个棉花基因型的苗期钾营养效率进行过比较<sup>[25]</sup>, 但他们未着重研究筛选条件和评价指标, 也未在田间条件下对苗期的筛选结果进行检验。本试验所确定的筛选条件和指标为该领域的进一步研究提供了重要的参考, 而且由于供试基因型大部分为主栽品种, 因此筛选结果对生产实践具有指导作用。

## 4 结论

肯定了苗期液培筛选具有可行性, 可作为对大量基因型的初筛方法, 典型基因型需要在田间进行复筛。筛选的适宜苗龄为 5 叶期, 一级指标首选相对生物量, 低钾条件下的绝对生物量也有比较好的筛选效果, 吸钾量和钾利用指数(KUI)是很好的次级筛选指标, 根长是重要的次级参考指标, 子叶缺钾斑比例(S)只能作为苗期的辅助筛选指标。

致谢: 感谢为本试验提供种子的各育种单位、种子公司和个人, 以及参加本研究部分工作的张志勇、范希峰、李博、王春霞、华含白和王汉霞等同学。

## References

- [1] Gao X-Z(高祥照), Ma W-Q(马文奇), Cui Y(崔勇), Wang R-F(王蓉芳), Zhang F-S(张福锁). Changes of soil nutrient contents and input of nutrients in arable of China. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2000, 6(4): 363–369 (in Chinese with English abstract)
- [2] Jiang Z-S(姜子绍), Yu W-T(宇万太). Research advance in potassium cycling in agroecosystems. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), 2006, 17(3): 545–550 (in Chinese with English abstract)
- [3] Tang Z-F(唐中凡). Current status and development of potash fertilizer industry in China. *Xinjiang Chem Ind*(新疆化工), 2007, (1): 23–33 (in Chinese)
- [4] Xi C-F(席承藩). *China Soil* (中国土壤). Beijing: China Agriculture Press, 1998. pp 922–940 (in Chinese)
- [5] Glass A D M, Perley J E. Varietal differences in potassium uptake by barley. *Plant Physiol*, 1980, 65: 160–164
- [6] Pettersson S, Jensen P. Variation among species and varieties in uptake and utilization of potassium. *Plant Soil*, 1983, 72: 231–237
- [7] Woodend J, Glass A D M. Genotype-environment interaction and correlation between vegetative and grain production measures of potassium use-efficiency in wheat (*T. aestivum* L.) grown under potassium stress. *Plant Soil*, 1993, 151: 39–441
- [8] Siddiqi M Y, Glass A D M, Hsiao A I, Minjas A N. Genetic differences among wild oat lines in potassium uptake and growth in relation to potassium supply. *Plant Soil*, 1987, 99: 93–105
- [9] Xie S-P(谢少平), Ni J-S(倪晋山), Li G-F(李共福). The study of  $K^+$  ( $^{86}Rb^+$ ) transport and compartmentation in roots of potassium deficiency tolerant rice cultivar. *Acta Phytophysiol Sin* (植物生理学报), 1989, 15(4): 377–381 (in Chinese with English abstract)
- [10] Lin X-Y(林咸永), Sun X(孙羲). Differences of rice varieties in potassium uptake and response to potassium application. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1995, 32(1): 77–83 (in Chinese with English abstract)
- [11] Liu G-D(刘国栋), Liu G-L(刘更另). Study on method screening rice genotypes tolerant to low potassium. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1996, 33(2): 113–120 (in Chinese with English abstract)
- [12] Wang B(王波), Yang Z-M(杨振明), Bao S-D(鲍士旦). Study on screening rice genotypes tolerant to low-K and their absorbing potassium. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 1999, 5(1): 85–88 (in Chinese with English abstract)
- [13] Yang X E, Liu J X, Wang W M, Li H, Luo A C, Ye Z Q, Yang Y. Genotypic differences and some associated plant traits in potassium internal use efficiency of lowland rice (*Oryza sativa* L.). *Nutr Cycling Agroecosyst*, 2003, 67: 273–282
- [14] Yang Z-M(杨振明), Li Q-M(李秋梅), Wang B(王波), Bao S-D(鲍士旦), Shi R-H(史瑞和). Study on method for screening winter wheat genotypes tolerant to low potassium level. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1998, 35(3): 376–383 (in Chinese with English abstract)
- [15] Zhao X-Q(赵学强), Jie X-L(介晓磊), Tan J-F(谭金芳), Xu J-X(许菊仙), Li Y-T(李有田). Studies in screening indices and screening environments for efficient potassium wheat genotypes. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2006, 12(2): 277–281 (in Chinese with English abstract)
- [16] Yan H-K(阎洪奎), Cao M-J(曹敏建), Hu X-B(胡兴波), Li N(李娜). Selection of the appraisal guideline of bearing low-K in maize. *J Maize Sci* (玉米科学), 2003, 11(3): 70–73 (in Chinese with English abstract)
- [17] Zhou T-H(周桃华), Zhang H-P(张海鹏), Liu L(刘玲). Studies on effect of potassium fertilizer applied on yield of Bt cotton. *Chin Agric Sci Bull* (中国农学通报), 2006, 22(8): 292–296 (in Chinese with English abstract)
- [18] Zhang Z Y, Tian X L, Duan L S, Wang B M, He Z P, Li Z H. Differential responses of conventional and Bt-transgenic cotton to potassium deficiency. *J Plant Nutr*, 2007, 30: 659–670
- [19] Mengel K. Response of various crop species and cultivars to fertilizer application. *Plant Soil*, 1983, 72: 305–319
- [20] Brouder S M, Cassman K G. Root development of two cotton cultivars in relation to potassium uptake and plant growth in a vermiculitic soil. *Field Crops Res*, 1990, 23: 187–203
- [21] Cassman K G, Kerby T A, Roberts B A, Bryant D C, Brouder S M. Differential response of two cotton cultivars to fertilizer and soil potassium. *Agron J*, 1989, 81: 870–876
- [22] Clement-Bailey J, Gwathmey C O. Potassium effects on partitioning, yield, and earliness of contrasting cotton cultivars. *Agron*



- J*, 2007, 99: 1130–1136
- [23] Zhang Z-Y(张志勇), Wang G-W(王刚卫), Tian X-L(田晓莉), Duan L-S(段留生), Wang B-M(王保民), Dong X-H(董学会), Zhang M-C(张明才), He Z-P(何钟佩), Li Z-H(李召虎). Studies on differences in K uptake efficiency of seedling among cotton varieties. *Cotton Sci* (棉花学报), 2007, 19(1): 47–51 (in Chinese with English abstract)
- [24] Wang G-W(王刚卫), Tian X-L(田晓莉), Xie X-Y(谢湘毅), Li B(李博), Duan L-S(段留生), Wang B-M(王保民), He Z-P(何钟佩), Li Z-H(李召虎). Effects of potassium deficiency on the transport and partitioning of potassium in cotton plant. *Cotton Sci* (棉花学报), 2007, 19(3): 173–178 (in Chinese with English abstract)
- [25] Jiang C-C(姜存仓), Yuan L-S(袁利升), Wang Y-H(王运华), Lu J-W(鲁剑巍), Xu F-S(徐芳森). K-efficiency in different cotton genotypes at seedling stage. *J Huazhong Agric Univ* (华中农业大学学报), 2003, 22(6): 564–568 (in Chinese with English abstract)
- [26] Mao S-C(毛树春). Report on China's Cotton Production Prosperity 2004 (中国棉花生产景气报告 2004). Beijing: China Agriculture Press, 2005. pp 220–232 (in Chinese)
- [27] Reddy K R, Zhao D. Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub> and potassium deficiency on photosynthesis, growth, and biomass partitioning of cotton. *Field Crops Res*, 2005, 94: 201–213
- [28] Liang S-P(梁首鹏), Yang H-P(杨和平). Effects of the companion halogen solution on cotton growth. *Environ Protect Gas Field* (汽油田环境保护), 2000, 10(1): 41–42 (in Chinese)
- [29] Zhang L-M(张丽梅), He L-Y(贺立源), Li J-S(李建生), Xu S-Z(徐尚中). Investigation of maize inbred lines on tolerance to low-phosphorus stress at seedling stage. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2004, 37(12): 1955–1959 (in Chinese with English abstract)
- [30] Mengel K, Steffens D. Potassium uptake of rye-grass (*Lolium perenne*) and red clover (*Trifolium pratense*) as related to root parameters. *Biol Fert Soil*, 1985, 1: 53–58
- [31] Xie S-P(谢少平), Ni J-S(倪晋山). Correlation between K<sup>+</sup> influx and H<sup>+</sup> efflux by roots of intact seedlings of *indica* rice varieties. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 1990, 4(1): 22–26 (in Chinese with English abstract)
- [32] Siddiqi M Y, Glass A D M. Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plant. *J Plant Nutr*, 1981, 4: 289–302
- [33] Yan X, Lynch J, Beebe S E. Genetic variation for phosphorous efficiency of common bean in contrasting soil types: I. Vegetative response. *Crop Sci*, 1995, 35: 1086–1093
- [34] Liu G-D(刘国栋), Liu G-L(刘更令). Genotypic differences in potassium contents of rice seeds. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 1997, 11(3): 179–182 (in Chinese with English abstract)