

# 水分和钾素胁迫对不同基因型棉花钾素利用效率的影响

汪霄<sup>1,2</sup> 陈防<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 作物钾效率和作物基因型、土壤特性、水肥施用量等因素紧密相关。作物基因型间钾效率的差异, 国内外学者做了大量的研究, 但有关土壤湿度和施钾量对棉花钾效率影响方面的研究甚少。为此, 实验选取钾高效和钾低效基因型棉花(简称为 HEG 和 LEG)为材料, 设置水分和钾素胁迫处理(OPT-W, OPT-K, OPT-W-K)和对照处理(OPT), 研究结果表明: 两种棉花钾效率均受到水分和钾素胁迫的抑制作用。水分胁迫显著影响棉花的产量、干物质重、钾素利用率及脱落率, 土壤含水量下降降低钾素的吸收利用率。土壤缺钾抑制光合产物及钾素在产量器官的累积和转运。相比 LEG 棉花品种, HEG 在低钾处理下表现出良好的生长特性。

**关键词:** 胁迫; 不同基因型棉花; 钾素利用率; 钾吸收; 钾分配



中国是世界主要的棉花生产国之一, 中国棉花产业在全球经济市场中占据主要地位。棉花是典型的喜钾作物, 具有缺钾敏感、需钾量高等特性<sup>[1]</sup>, 每生产 1 公斤皮棉约需要吸收 12–15 公斤 N, 5–6 公斤 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 12–15 公斤 K<sub>2</sub>O<sup>[2]</sup>。但是, 随着农业的迅速发展, 新型耕作制度、钾高效作物品种的应用, 以及农民传统习惯上偏施氮肥和磷肥等原因, 打破了原有的土壤钾素平衡, 农田土壤缺钾成为限制作物高产的全国性问题。且我国钾肥资源匮乏, 2012 年钾肥年生产量为 455 万吨, 钾肥进口依赖度高达 50%<sup>[3]</sup>。因而, 随着钾肥价格和农业需求量的日益飙升, 如何充分挖掘土壤供钾能力, 提高缺钾环境下作物的钾素利用效率, 追求产量最大化, 成为当前研究的重要课题。

钾是作物生长必需的大量营养元素, 在改善棉花品质, 提高棉花产量中起着重要作用。钾肥的合理使用具有改善土壤性状, 调节光合产物的分配, 提高水分利用效率, 增强棉花抗逆性的效果<sup>[4,5]</sup>。在过去的几十年里, 农业生产中往往通过使用大量的钾肥, 以追求高产。但是由于其他限制因素(如土壤湿度、pH、土壤理化特性、其他养分离子)的影响, 高投入并不一定等同于高产量。钾素的生物有效性受作物品种、土壤环境、耕种模式等多种因素的影响。

土壤水分和肥料是作物生长发育的物质基础, 其利用效率的高低是制约农业生产的主要因素。研究发现, 土

壤水分和养分有效性有着紧密的联系。土壤水分直接影响养分有效性, 适宜的水分可加速肥料的溶解和有机肥料的矿化, 促进养分的释放。水分缺乏时, 养分的截获和扩散受到抑制, 导致作物生长过程中的营养不良; 作物生长缓慢, 又使有限的水分得不到充分利用。同时, 棉花也是一种耐旱性作物, 但是土壤水分是否适宜, 直接影响到棉花的长势、植株光合产物的合成及其分配, 决定着棉花根系的活力, 进而影响到棉花根系吸收养分的能力以及养分在植株体内的运输。

前期研究发现, 缺钾条件下两种基因型棉花存在显著的生理学和形态学差异<sup>[6,7]</sup>。但是未曾深入探究不同钾效率基因型的棉花品种在水分和钾素胁迫环境条件下做出的生理学响应, 以及土壤水分对棉花钾效率的影响。因此, 我们拟通过盆栽实验来探明水分和钾素胁迫对两种基因型棉花的产量、干物质重、钾素吸收和分配等方面产生的影响, 为提高棉花水分和钾素的利用效率, 实现高产稳产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

供试棉花品种为钾高效基因型棉花和钾低效基因型棉花(简称为 HEG 和 LEG)。种子由中国农业科学院棉

花研究所种质资源室和华中农业大学作物遗传育种研究所提供。

## 1.2 实验设计

采用盆栽试验，完全随机区组排列，分为2个区组：HEG和LEG组，每组设置4个处理：对照处理（OPT），水胁迫处理（OPT-W），钾胁迫处理（OPT-K），水与钾共同胁迫处理（OPT-W-K），每个处理重复5次。

风干土壤过3mm筛后装钵，每钵装土4公斤。化学试剂为肥源，具体施肥量见表1。每钵尿素基施1.04克，现蕾期、盛花期、桃期分别追肥0.7克，其余肥全部基施。OPT-W和OPT-W-K处理土壤湿度控制为25%的土壤含水量，其余处理土壤湿度控制为35%的土壤含水量。采用手持式土壤湿度计（Delta-T Devices Ltd.），每隔3-4天进行土壤含水量的测定和控制，夏季温度较高时，每隔一天测定一次。

处理	OPT	OPT-W	OPT-K	OPT-W-K
尿素	3.13	3.13	3.13	3.13
过磷酸钙	9.33	9.33	9.33	9.33
氯化钾	3.86	3.86	0.00	0.00
硼酸	0.47	0.47	0.47	0.47
硫酸锌	0.88	0.88	0.88	0.88
硫酸镁	1.23	1.23	1.23	1.23

## 1.3 测定指标及方法

棉花成熟期，将棉花各器官分开收集，放在85℃烘箱中烘干（72h），称重后磨碎。样品采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法消煮，植物各器官含钾量用火焰光度计（FP6400，上海分析仪器厂）测定<sup>[8]</sup>。

## 1.4 统计分析

所有的数据用SPSS进行统计分析，用Sigmaplot软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 产量和生物量

从图1中可以看出，四种处理条件下，籽棉、铃壳、根系及总干重均表现为HEG大于LEG，而茎、叶、凋

落物干重均为LEG大于HEG。对比HEG和LEG各器官干重发现，LEG营养生长较好，营养物质更多地分配到了营养器官，但是较好的营养生长耗费了大量的养分，造成后期生殖生长养分供给不足，加速了棉花早衰，形成了更多的凋落物，经济效益反而不高。

图1还表明，水分和钾素互作显著地影响了棉花的生长和产量的形成。缺水条件下HEG和LEG棉花植株各器官干重均显著小于缺钾条件下HEG和LEG棉花植株各器官干重。说明水分控制在棉花产量和干物质积累上起主要作用。这是因为钾素在土壤中主要以质流、扩散的方式被植物根系吸收利用，且以离子形态存在于植株体内，较低的土壤湿度降低了土壤钾素的有效性，阻碍植物对K<sup>+</sup>的吸收、运转，以及光合产物的形成，严重抑制了棉花的产量和生物量。

许多学者认为，高效品种应该是在逆境条件下既能完成正常的生长发育，又能形成较高的产量。所以，产量的高低常被作为评价品种优劣性的一项重要指标。图1数据表明：不同处理条件下，HEG籽棉产量显著高于LEG，这可能是因为HEG良好的根系吸收能力，保证了胁迫条件下充足的水分和养分供给。因而，HEG棉花品种被认为是高效品种，更具经济价值。

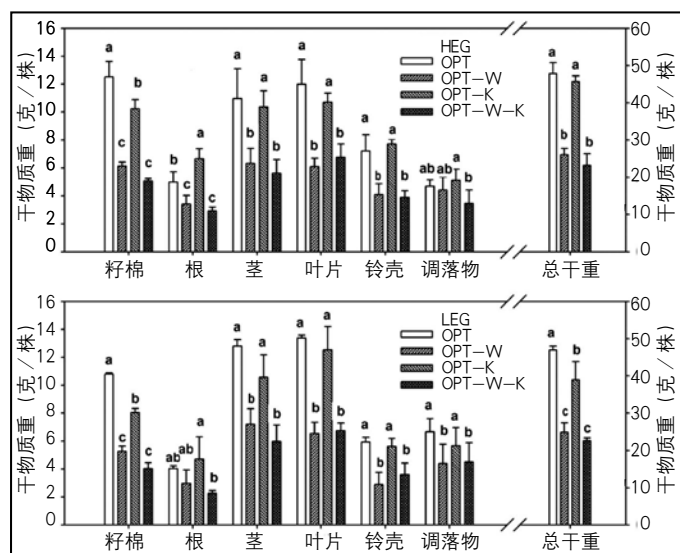


图1 水钾胁迫下两种棉花基因型的干物质重

### 2.2 钾浓度和钾积累量

表2数据显示，棉花各器官钾浓度随着施钾量的增大而增大。供钾充足条件下，棉花叶片及繁殖器官（籽棉、铃壳）钾浓度较高；缺钾条件（OPT-K，OPT-W-K），

表 2 不同处理下两基因型棉花各器官 K 含量							毫克 / 克
处理	基因型	根	茎	叶	籽棉	铃壳	总干重
OPT	HEG	5.91	5.21	9.79	14.78	14.90b	10.28
	LEG	5.99	6.30	9.07	11.17	22.73a	10.24
OPT-W	HEG	6.70	4.44	6.74	16.74	12.81b	9.48
	LEG	6.55	5.68	8.90	15.56	20.68a	10.52
OPT-K	HEG	2.74	1.80	1.11b	15.78	9.63b	6.21
	LEG	2.89	2.64	1.26a	14.86	14.42a	6.69
OPT-W-K	HEG	3.51a	2.73	0.95b	14.75	11.03b	6.20
	LEG	3.45b	3.20	1.28a	12.81	15.60a	6.29
主效应							
处理	OPT	5.95a	5.76a	9.43a	12.98b	18.82a	10.26a
	OPT-W	6.63a	5.06a	7.82b	16.15a	16.75a	10.00a
	OPT-K	2.82b	2.22b	1.19c	15.32a	12.03b	6.45b
	OPT-W-K	3.48b	2.97b	1.12c	13.78b	13.32b	6.25b
基因型	HEG	4.72	3.55b	4.65	15.51a	12.09b	8.04
	LEG	4.72	4.46a	5.13	13.60b	18.36a	8.44
方差分析							
基因型		NS	**	NS	**	**	NS
处理		**	**	**	**	**	**
基因型 * 处理		NS	NS	NS	NS	NS	NS
数据采用二因素方差分析进行统计分析 (** 差异极显著, P<0.01; * 差异显著 P<0.05; NS 差异不显著), 采用 Turkey 法进行多重比较, 同一列中数字后不同字母表示差异达 5% 显著水平, 下同。							

棉花叶片及繁殖器官钾浓度显著下降。这可能是因为钾素供给充足时, 棉花根系吸收大量的钾素运输到叶片中, 用于叶绿素的形成, 提高光合速率, 维持叶片的基本功能; 并将养分大量输送到繁殖器官中去, 形成较高的产量。当钾素匮乏时, 根系不能够吸收足够的钾素, 并运输到繁殖器官中去, 造成了大量的落花落果现象, 最终导致棉花减产。

表 3 数据显示, HEG 棉花产量、繁殖器官钾积累量 (RKA) 及总钾积累量 (TKA) 均高于 LEG。两种棉花基因型的产量、RKA 及 TKA 均遵循 OPT>OPT-K>OPT-W>OPT-W-K 的规律。由此可见, 土壤干旱 (25% 的土壤含水量) 显著抑制棉花的生长、产量的形成, 以及钾素的积累。在无外源钾肥施入的条件下 (OPT-K 和 OPT-W-K), OPT-W-K 处理下 TKA 和 RKA 的含量小于 OPT-K 处理下 TKA 和 RKA 的含量。这些结果表明, 土壤干旱不仅抑制钾素在植株体内的运输, 而且抑制植株根系对土壤固有钾素的吸收利用, 降低了土壤钾素的有效性。

### 2.3 钾素及生物量的分配

土壤含水量和钾肥用量不仅影响棉花的光合效率, 而且影响钾素和光合产物在各器官的分配格局。表 3 和图 2 显示, 不同处理下棉花繁殖器官 (籽棉和铃壳) 钾积累量约占植株总钾积累量的 53.0% - 82.9%。OPT,

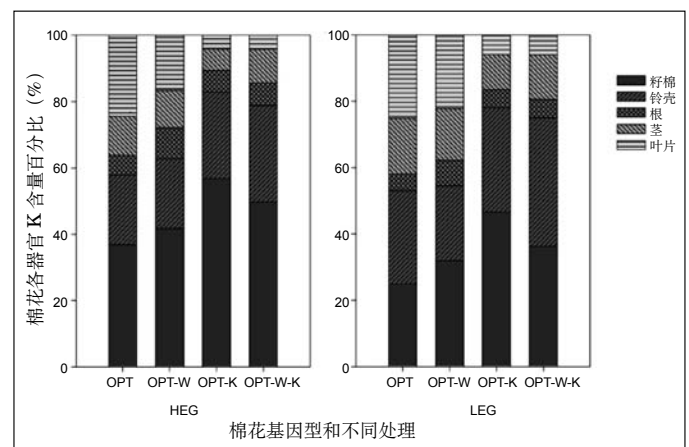


图 2 水钾胁迫下两棉花基因型各器官钾素配置百分比

OPT-W, OPT-K 和 OPT-W-K 处理下, HEG 繁殖器官钾积累量与植株总钾积累量的比值 (RKA / TKA) 分别为 57.8%, 62.7%, 82.9%, 78.8%; LEG 棉花的 RKA / TKA 值分别为 53.0%, 55.5%, 78.0%, 75.0%; OPT-K 条件下, RKA / TKA 最大。说明逆境胁迫条件下, 两个棉花品种为了保证生长, 表现出某些适应机制。低水分和钾素胁迫条件下, 尤其是钾素胁迫条件下,  $K^+$  以较大的比例向生殖器官转运和积累, 提前进入成熟期, 为延续下一代 (棉籽) 提供了物质基础, 保证整个生育期的完成。

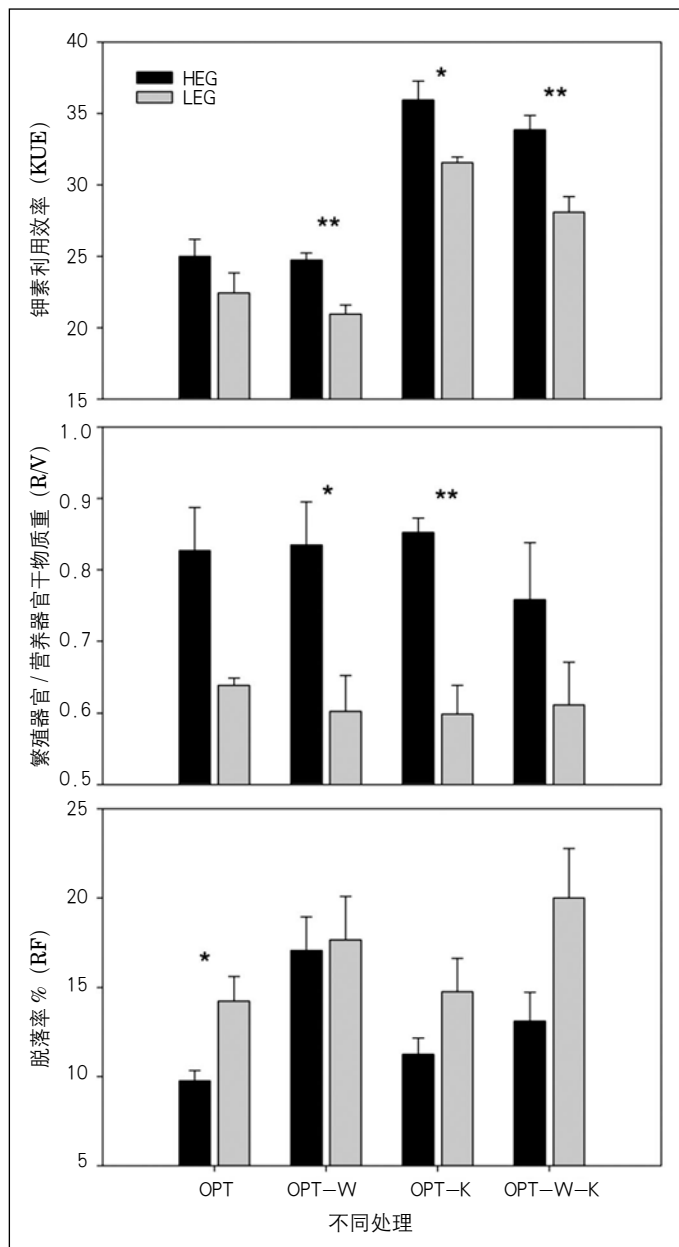


图 3 水钾胁迫下两棉花基因型的 KUE、RF 和 R/V 值

从 RKA / TKA 值还可以看出, 相比 LEG 来说, HEG 转移能力更强, 不同处理条件下 HEG 的 RKA / TKA 值依次比 LEG 大 4.8%, 7.2%, 4.9%, 3.8%, OPT-W 条件下两棉花品种差异最大。这说明高钾素利用效率的棉花品种在胁迫条件下, 不仅体现出抗低钾胁迫能力, 还表现出较强的抗旱性。这或许与钾素对植株水分利用效率的调控有关。

此外, R / V (繁殖器官与营养器官干物质重的比值) 和 RF (脱落的叶、蕾、桃与植株总干物质重的比值) 等参数也清晰地体现了植株养分的输送和分配趋势。不同处理条件下, HEG 棉花的 R / V 和 KUE 值较 LEG 高, 而 RF 值较 LEG 低 (图 3)。OPT-W, OPT-K 处理下, HEG 棉花的 R / V 值不断增大, 而 LEG 棉花的 R / V 值不断减小。由此可见, HEG 在 OPT-W, OPT-K 处理下能够将养分较多地输送到繁殖器官, 胁迫条件下表现出较好的生物学特性。

## 2.4 钾素利用效率

钾素利用效率 (KUE, potassium utilization efficiency) 一般指植株体内单位钾所生产的生物量或经济产量,  $KUE = \text{干物质重 (或产量)} / \text{钾吸收量}$ , 反映了植物对钾素的运输, 分配及积累能力。表 3 数据显示, HEG 棉花各处理条件下 KUE 值为 25.0, 24.9, 36.1, 33.8; LEG 棉花的 KUE 值为 22.6, 20.9, 31.3, 28.3; 四种处理条件下, HEG 棉花各处理钾素利用效率比 LEG 棉花高 2.4, 4.0, 4.8, 5.5。OPT-K 条件下, 两棉花品种 KUE 均最高。KUE 在评价钾素利用效率时正好验证了养分定律中的报酬递减定律, 即随着施钾水平的提高, 钾素利用效率反而下降。方差分析结果表明, 基因型间和处理间差异极显著 ( $P < 0.01$ )。



表 3 不同处理下两基因型棉花产量及钾素积累量

处理	基因型	产量 (克/株)	干物质重 (DMW) (克/株)	总钾积累量 (TKA) (毫克/株)	繁殖器官钾积 累量 (RKA) (毫克/株)	繁殖器官钾积累量 / 总钾积累量 (RKA/TKA) (%)	钾素利用 效率 (KUE)
OPT	HEG	12.5a	48.8	500.1	288.9	57.8	25.0
	LEG	10.8b	46.9	481.4	255.2	53.0	22.6
OPT-W	HEG	6.1a	26.1	246.7	154.6	62.7	24.9a
	LEG	5.3b	24.9	253.0	140.3	55.5	20.9b
OPT-K	HEG	10.2a	45.7	283.8a	235.1a	82.9	36.1a
	LEG	8.1b	39.0	256.8b	200.3b	78.0	31.3b
OPT-W-K	HEG	5.1a	24.4	150.6	118.6	78.8	33.8a
	LEG	4.0b	22.6	142.4	106.7	75.0	28.3b
主效应							
处理	OPT	11.8a	48.0a	492.1a	274.5a		24.0c
	OPT-W	5.7c	25.5c	249.8b	147.5c		22.9c
	OPT-K	9.0b	42.0b	268.8b	215.8b		33.5a
	OPT-W-K	4.5d	23.4c	146.0c	112.0d		30.7b
基因型	HEG	8.5	36.3	295.3	199.3		30.0
	LEG	7.1	33.4	283.4	175.6		25.8
方差分析							
基因型		**	**	NS	**		**
处理		**	**	**	**		**
基因型 * 处理		*	NS	NS	NS		NS

### 3 讨论

#### 3.1 水分和钾素胁迫下两棉花品种的响应差异

作物 K 素效率是指植物在一定的 K 素供给条件下, 良好生长繁殖和获得产量的能力<sup>[9]</sup>。一般认为, 作物 K 素效率依赖于吸收效率和利用效率两个方面。研究发现, 不同作物在低土壤水分和缺钾条件下响应程度不同<sup>[10,11]</sup>。此次实验首次比较了两个不同钾效率基因型棉花在低土壤水分和缺钾条件下的响应差异, 以及两棉花品种在干旱条件下的钾吸收能力及调控干旱胁迫的能力。实验结果显示: 不同处理条件下, HEG 具有较高的产量、DMW、TKA, 以及较强的抗胁迫能力, 特别是在缺钾条件下表现出良好的生长特性。但是实验还未能确定两个棉花品种 K 素效率差异的主要来源, 能否将钾素吸收效率和钾素利用效率二者进行量化分析, 还有待于进一步的探究。

实验发现, 土壤水分和施钾量的多少显著影响棉花各器官的钾素含量及其分配(表 2, 图 2)。从图 2 中可以

清晰地看到棉花叶片及繁殖器官钾素含量最高; 表 2 中钾素浓度数据显示, 缺钾处理下叶片中钾素浓度迅速下降, 繁殖器官中钾素浓度变化不大。由此可见, 当供钾充足时, 钾素大量积累于棉花叶片, 进行光合作用, 并将养分和光合产物运输到繁殖器官中去; 当钾素匮乏时, 钾素由叶片向繁殖器官转运, 用于产量的形成和子代的发育, 也是作物应对胁迫环境产生的某种适应机制。

#### 3.2 钾素有效性与土壤水分的关系

钾素在提高作物的抗旱性起着重要的作用。K<sup>+</sup> 通过调节细胞的渗透势, 气孔的关闭等方式调控植株体内水分的运输。土壤水分也影响钾素的吸收利用。土壤干旱抑制植株根系的生长, 降低土壤微生物的活性, 同时增大了土壤分离子的浓度, 产生了离子毒害作用, 也增大了其他养分离子与 K<sup>+</sup> 的竞争作用。总而言之, 土壤水分与钾素有效性间存在着紧密的联系, 其相互作用机理也很复杂, 土壤干旱抑制植株根系对土壤钾素的吸收, 以及植株体内钾素的运移。

我们的实验结果表明：两个棉花品种的产量，DMW, TKA, RKA 以及 KUE 等指标均随着土壤含水量的降低而降低。土壤干旱显著抑制棉花生物量的形成以及土壤钾素的吸收利用效率，棉花基因型间存在响应差异，土壤水分与钾素有效性间紧密相关。研究结果告诉我们在提高作物钾素利用效率，寻求最大产量的可持续农业发展道路上，不仅要了解作物基因型间的钾效率差异，掌握土壤水分与钾素有效性间的相互关系，以及作物基因型间对土壤水肥的响应差异也很重要。

## 4 结论

产量，钾素利用效率，棉花各器官钾素积累量和钾素分配是评估钾素利用率的主要指标。实验结果表明：两种棉花基因型均受到土壤水分和低钾的抑制作用，但基因型间响应程度不同，HEG 比 LEG 更耐干旱和低钾胁迫。良好的根系生长及较高钾素利用效率，保证 HEG 具有较好的根系吸收和养分供应能力，因而干旱和低钾条件下 HEG 能够正常的生长，保证稳定的产量。

## 参考文献

- [1] Adeli, A., and J. J. Varco. Potassium management effects on cotton yield, nutrition, and soil potassium level [J]. *Journal of plant nutrition*, 2002, 2:2229-2242.
- [2] 鲁剑巍, 李荣, 等. 棉花常见缺素症状图谱及矫正技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [3] 陈丽. 2012 年化肥供需形势分析与 2013 年展望 [J]. *中国化肥信息*, 2013, 1:6-8.
- [4] Reddy KR, Zhao DL. 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.
- [5] 姜存仓, 高祥照, 王运华, 等. 不同钾效率棉花基因型对低钾胁迫的反应 [J]. *棉花学报*, 2006, 18:109-114.
- [6] Xia Y, Jiang C, Chen F, Lu J, Wang Y. Differences in Growth and Potassium-Use Efficiency of Two Cotton Genotypes [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42:132-143.
- [7] Wang L, Chen F. Genotypic variation of potassium uptake and use efficiency in cotton (*Gossypium hirsutum*) [J]. *Journal of plant Nutrition and soil science*. 2012, 175:303-308.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [9] Rengel Z, Damon PM. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use [J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133:624-636.
- [10] George MS, Lu GQ, Zhou WJ. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) [J]. *Field Crops Research*, 2002, 77:7-15.
- [11] Damon PM, Ma QF, Rengel Z. Wheat genotypes differ in potassium accumulation and osmotic adjustment under drought stress [J]. *Crop and pasture science*, 2011, 62:550-555.