

不同钾基因型烟草钾吸收和生理生化特性研究

王 勇^{1,2}, 李廷轩^{1*}, 陈光登¹, 杨 欢¹, 孟 霖³

(1.四川农业大学资源学院,成都 611130;2.四川省烟草公司凉山州公司,四川 西昌 615000;3.中国农业科学院烟草研究所,青岛 266101)

摘 要: 采用水培试验在不同钾水平下研究了不同钾效率基因型烟草吸钾及其生理生化特性。结果表明,不同供钾水平下,烟草钾高效基因型生物量及钾含量均显著高于钾低效基因型,基因型间生物量最大差异为 2.56 倍;钾高效基因型叶绿素含量在不同供钾水平下,均无显著差异,且均高于钾低效基因型;不同供钾水平下,钾高效基因型的 SOD、NR、INV 活性均显著高于钾低效基因型,低钾条件下,钾高效基因型 SOD、INV 活性升高幅度均大于钾低效基因型,而钾低效基因型 NR 活性降低幅度大于钾高效型;不同供钾水平下,钾高效基因型烟草根系活力、H⁺分泌能力均显著高于钾低效型,各基因型根系活力随着供钾水平降低而升高,H⁺分泌能力随着供钾水平降低而降低。正常供钾条件下,不同钾基因型根系吸收面积无显著差异,低钾条件下,钾高效基因型烟草根系吸收面积显著高于钾低效基因型。综上所述,不同钾基因型间钾素吸收生理生化特性差异显著,钾高效基因型烟草材料具有更强应对低钾胁迫的响应机制。

关键词: 烟草;钾基因型;钾;生理生化特性

中图分类号: S572.01

文章编号: 1007-5119 (2017) 05-0056-06

DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2017.05.010

Study on K Absorption and Physiological and Biochemical Characteristics of Different K-efficiency Tobacco Genotypes

WANG Yong^{1,2}, LI Tingxuan^{1*}, CHEN Guangdeng¹, YANG Huan¹, MENG Lin³

(1. College of Resource Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Liangshan Branch of Sichuan Tobacco Company, Xichang, Sichuan 615000, China; 3. Tobacco Research Institute of CAAS, Qingdao 266101, China)

Abstract: By hydroponic experiments, the K absorption properties and physio-biochemical characteristics of K-efficient tobacco genotypes grown under normal or reduced K supply conditions were studied. The results showed that biomass and K content of the K-efficient tobacco genotypes were largely higher than that of K-inefficient genotypes under different K levels, with the biggest difference in biomass between two genotypes being 2.56 times. The chlorophyll contents of the K-efficient genotypes showed no difference but were significantly higher than that of K-inefficient genotypes under different K levels. SOD, Nr and INV activities of the K-efficient genotypes were also higher than that of the K-inefficient genotypes. The increase of SOD and INV activities of K-inefficient genotype was more than that of K-efficient genotypes with the reduction of K supply, while Nr activity of K-inefficient genotype decreased less. Under different K levels, the root activity and H⁺ secreting ability in K-efficient genotype were also remarkably higher than that of K-inefficient genotypes. Along with the reduction of K supply, root activity in both genotypes were increased, while H⁺ secretion capacity decreased. The root absorb areas of different genotypes under the normal K level showed no significant difference. However, root absorb areas of K-efficient tobacco genotype were significantly higher than that of K-inefficient genotypes under lower K application rate. In summary, great differences exist in K absorbing properties and physio-biochemical characteristics between K-efficient and K-inefficient genotypes. K-efficient tobacco genotypes have stronger mechanisms of response to low K stress.

Keywords: tobacco; potassium genotype; potassium; physiological and biochemistry characteristics

基金项目: 四川省烟草公司凉山州公司科技项目“植烟土壤钾素动态变化与烟草钾吸收分配规律研究”(2011-02)

作者简介: 王 勇(1982-),男,在读博士,研究方向为烟草栽培。E-mail: 690467791@qq.com。*通信作者, E-mail: litinx@263.net

收稿日期: 2017-07-02

修回日期: 2017-10-10

钾是作物生长所必需的三大元素之一,约占植物干重的 2%~10%^[1]。充足的钾素供给不仅能保证烟草正常生长发育,还对烟叶的燃烧性、吸食品质及卷烟制品的安全性均有重要影响。当前,烟叶钾含量偏低已成为制约我国烟叶品质提高的主要因素。生产中解决这一问题的传统方法为大量施用钾肥,不仅增加成本,还造成环境污染和钾肥资源的过度开发。加之,我国钾肥资源极其匮乏^[2],90%钾肥依赖于进口^[3],因此,筛选钾高效烟草种质资源,并进行烟草钾营养性状遗传改良,是解决这一问题的有效途径之一。利用钾高效烟草种质资源进行钾营养性状遗传改良仍需解析钾高效基因型适应低钾环境的生理生化机制^[4]。MENGEL^[5]研究发现,黑麦草耐低钾胁迫的主要原因是由于其根系发达、阳离子交换量高、根系活力强。低钾胁迫下,植物体内活性氧大量积累会对植物细胞产生毒害作用,耐低钾植物会增强抗氧化酶活性及清除活性氧的能力以保证在低钾条件下正常生长^[6-7]。在烟草中,相关报道较少,SONG 等^[8]对不同钾基因型烟草根系形态进行了研究,杨玉玲^[9]研究了烟草钾高、低效基因型的根系形态、光合生理指标及抗氧化酶活性,而对于包括根系生理特性在内的较为全面的研究尚未见报道。本研究采用水培试验,在 3 种钾水平下,以前期在 70 份烤烟品种中筛选得到的 1 个钾高效基因型和 1 个钾低效基因型烟草为试材,研究了不同钾效率基因型烟草的生理生化特性,以为烟草钾素营养性状的遗传改良奠定理论基础。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于 2016 年在四川农业大学都江堰灵岩山教学科研基地实施。

供试品种为“K326”(烟草钾高效基因型)和“毕纳 1 号”(烟草钾低效基因型)。

试验设 3 个钾水平:低钾 K1 (0.02 mmol/L)、K2 (0.2 mmol/L),正常供钾 K3 (2 mmol/L)。漂盘法育苗,待烟苗长至 5 片真叶,选择长势一致的烟苗,用自来水洗净根系,移至容量为 2L 不透光小

桶中,每桶 1 株,每处理 25 株。培养期间,每 1 小时通气 10 min,每日更换一次营养液,基础营养液为 1/4 霍格兰营养液,用 0.1 mmol/L NaOH 或 0.1 mmol/L HCl 调节营养液 pH 至 5.5。

1.2 样品采集与测定

样品采集:烟苗长至 13 片真叶时取 10 株生长整齐一致烟株,分离其中 5 株烟草根、茎、叶片(整株叶片混合),用于钾含量、叶片光合色素含量、酶活、根系特性测定,剩余 5 株用于生物量测定。

生物量测定:烟苗长至 13 片真叶时取 5 株生长整齐一致烟株,自来水冲洗干净,蒸馏水润洗,吸水纸擦干,于 105 °C 下杀青 30 min,75 °C 烘干至恒重,电子天平称量。钾含量测定:植株样品经 CH₃COOH 浸提(国标 GB/T5606.1,YC/T160—2002)后,采用全自动连续流动分析仪(德国 Bran+Luebbe 公司生产仪器 AAC3)测定。光合色素测定:参照张志良^[10]的方法。超氧化物歧化酶(SOD)活性:参照 GIANNOPOLITIS 等^[11]的方法。硝酸还原酶(NR)活性:参照陈薇等方法^[12]。蔗糖酶(INV)活性:参照邹琦^[13]的方法。根系活力:采用 TTC 法^[13]。根系 H⁺分泌能力测定:参照邹春琴等^[14]的方法。

1.3 数据分析

采用 Excel 2013 软件进行数据处理和图表绘制,DPS11.5 软件中 LSD 法进行方差分析。

2 结 果

2.1 不同基因型烟草钾吸收利用特性

2.1.1 生物量差异 在低钾(K1、K2)和正常供钾(K3)水平下,两基因型生物量均随供钾量增加而升高(表 1),且钾高效基因型(K326)生物量均显著高于钾低效基因型(毕纳 1 号)。随着供钾水平降低,两基因型烟草生物量差异逐渐增大,K1、K2、K3 处理钾高效基因型烟草生物量分别为钾低效型的 2.56、1.99 和 1.58 倍。钾低效基因型生物量在不同钾处理间均呈显著性差异,而钾高效基因型生物量仅在最低供钾水平(K1)下显著低于 K2、

K3 处理。上述结果表明, 钾高效烟草在低钾条件下仍能保持较高生物量, 表现出更强的耐低钾能力。

2.1.2 钾含量差异 由表 2 可知, 各基因型钾含量均随供钾水平降低而降低, 不同供钾水平下钾高效基因型钾含量均显著高于钾低效基因型。钾高效基因型烟株 K1 处理钾含量分别较 K2、K3 降低 22.8%、29.3%, 均达显著水平; K2、K3 处理间无显著差异。钾低效基因型烟株 K1、K2 处理钾含量分别较 K3 显著降低 56.6%、64.2%。表明在一定低钾范围内, 钾高效基因型仍能保持正常供钾条件下的钾含量; 随着供钾水平的进一步降低, 两基因型钾含量均显著降低, 但钾高效基因型的降低幅度低于钾低效基因型。

表 1 不同供钾水平下烟草生物量的基因型差异
Table 1 Difference in biomass of tobacco genotypes under different K treatments g/株

处理	基因型	均值±标准差
K1	K326	6.74±0.39aB
	毕纳 1 号	2.63±0.16bC
K2	K326	8.25±0.69aA
	毕纳 1 号	4.14±0.35bB
K3	K326	8.72±0.39aA
	毕纳 1 号	5.52±0.42bA

注: 数值后不同小写字母表示同一钾水平下基因型间差异在水平显著 ($p<0.05$); 不同大写字母表示同一基因型在不同钾水平间差异显著 ($p<0.05$)。下同。

表 2 不同供钾水平下烟草钾含量的基因型差异
Table 2 Difference in K contents of tobacco genotypes Under different K treatments %

处理	基因型	均值±标准差
K1	K326	6.24±0.21aB
	毕纳 1 号	2.34±0.03bC
K2	K326	8.08±0.44aA
	毕纳 1 号	3.16±0.29bB
K3	K326	8.82±0.39aA
	毕纳 1 号	6.54±0.02bA

2.2 不同基因型烟草生理生化特性

2.2.1 质体色素含量差异 由表 3 可知, 在正常供钾条件下, 基因型间 3 种质体色素含量均无显著差异。低钾处理下, 叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均表现为钾高效基因型烟草显著高于钾低效基因型。随着供钾水平降低, 两种钾基因型烟草叶绿素含量差异逐渐增大。钾高效基因型 3 种质体色素含量在不同供钾水平下, 均无显著差异, 而钾

低效烟草 3 种质体色素含量均随供钾水平降低而显著减少。K1、K2 处理下, 钾低效烟草叶绿素 a 含量分别较 K3 处理降低 45.4%、32.1%, 叶绿素 b 含量分别较 K3 处理降低 33.3%、24.2%, 类胡萝卜素含量分别较 K3 处理降低 39.0%、26.8%, 叶绿素 a 下降幅度最大。叶绿素 a 在光合作用中主要起捕获光能的作用, 钾低效烟草叶绿素 a 含量受供钾水平影响最大, 而钾高效基因型烟草在低钾条件下能够通过保持较高的叶绿素 a 含量以维持其捕获光能的能力, 从而维持正常的光合速率^[15]。

表 3 不同供钾水平下烟草质体色素含量的基因型差异
Table 3 Difference in chlorophyll content of tobacco genotypes under different K treatments mg/g

处理	基因型	叶绿素 a	叶绿素 b	类胡萝卜素
K1	K326	1.03±0.06aA	0.54±0.01aA	0.41±0.02aA
	毕纳 1 号	0.65±0.06bC	0.44±0.03bC	0.25±0.01bC
K2	K326	1.13±0.11aA	0.62±0.03aA	0.43±0.02aA
	毕纳 1 号	0.82±0.04bB	0.5±0.01bB	0.3±0.02bB
K3	K326	1.25±0.09aA	0.65±0.01aA	0.44±0.02aA
	毕纳 1 号	1.19±0.04aA	0.66±0.05aA	0.41±0.02aA

2.2.2 SOD、NR、INV 活性差异 不同供钾水平下, 基因型间 SOD、NR、INV 活性均表现为钾高效基因型显著高于钾低效型(表 4)。两种基因型 SOD、INV 活性均随供钾水平的降低而升高, 处理间均呈显著差异。K1、K2 处理下, 钾高效基因型 SOD 活性分别较 K3 处理升高 2.5 倍、1.0 倍, INV 活性分别升高 70.9%、25.6%; 钾低效基因型 SOD 活性分别较 K3 处理升高 1.5 倍、42.4%, INV 活性分别升高 48.8%、14.2%。即低钾条件下钾高效基因型 SOD、INV 活性升高幅度均大于钾低效基因型, 表明钾高效烟草在低钾条件下清除自由基以减轻或避免植株遭受伤害的能力更强; 同时能更大幅度地提高 INV 活性以促进多糖由叶绿体向外转移^[16]和增加可溶性糖供给以维持正常的生理代谢, 表现出更强的耐受低钾胁迫的能力。

两种基因型 NR 活性均随供钾水平的降低而减小(表 4)。K2 处理下, 钾高效基因型 NR 活性略低于 K3 处理, 但未表现出显著性差异; 钾低效基因型 NR 活性较 K3 处理显著降低 18.1%。K1 处理下, 钾高效基因型 NR 活性较正常供钾降低 17.1%,

表 4 不同供钾水平下烟草酶活性的基因型差异

Table 4 Difference in enzyme activities of tobacco genotypes under different K treatments U/mg

处理	基因型	SOD	NR	INV
K1	K326	2454.12±58.7aA	24.54±0.12aB	122.45±1.58aA
	毕纳 1 号	603.37±20.88bA	12.67±1.66bC	85.41±2.92bA
K2	K326	1427.53±72.8aB	28.36±1.53aA	89.96±6.11aB
	毕纳 1 号	348.67±12bB	14.75±0.5bB	65.5±2.12bB
K3	K326	712.81±25.1aC	29.61±1.42aA	71.63±1.58aC
	毕纳 1 号	246.12±10.2bC	18.01±1.09bA	57.38±3.92bC

呈显著差异, 钾低效基因型 NR 活性较正常处理显著降低 29.7%。钾低效基因型 NR 活性在 K1、K2 两低钾水平下降低幅度均大于钾高效型, 表明钾高效基因型烟草在低钾水平下具有更强的维持氮代谢的能力。

2.2.3 根系特性差异 不同钾处理下, 钾高效基因型烟草根系活力均显著高于钾低效基因型(表 5), 且各基因型均随供钾水的降低而升高。K1、K2 处理钾高效基因型根系活力分别较 K3 处理升高 1.6 倍、27.6%, 钾低效基因型则分别较 K3 处理升高 1 倍、57.9%, 表明不同供钾水平下钾高效基因型根系代谢强度均高于钾低效型^[17]。不同供钾水平下, 钾高效基因型烟草根系 H⁺分泌能力均显著高于钾低效基因型, 且各基因型均随供钾水平降低而减弱。K1、K2 处理下钾高效基因型 H⁺分泌能力分别较 K3 降低 30.3%、16.7%, 钾低效基因型则分别较 K3 降低 26.6%、9.7%, 钾高效基因型具有更强的从外界吸收阳离子养分的能力^[18]。

表 5 不同钾水平下烟草根系特性的基因型差异

Table 5 Difference in root characteristics of tobacco genotypes under different K treatments

处理	基因型	根系活力/ (mgTTF·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	H ⁺ 分泌能力/ (μmol·g ⁻¹ ·m _r ·h ⁻¹)
K1	K326	0.76±0.01aA	13.75±0.60aC
	毕纳 1 号	0.38±0.09bA	7.61±0.29bB
K2	K326	0.37±0.01aB	16.43±0.24aB
	毕纳 1 号	0.30±0.01bA	9.36±0.80bA
K3	K326	0.29±0.03aC	19.72±0.37aA
	毕纳 1 号	0.19±0.01bB	10.37±0.23bA

注: m_r, 鲜质量。

2.2.4 根系吸收面积差异 如表 6 所示, 正常供钾条件下, 基因型间根系总吸收及活跃吸收面积无显著差异。低钾水平(K1、K2)下, 钾高效基因型

根系总吸收及活跃吸收面积均显著高于钾低效基因型。钾高效基因型烟草根系总吸收及活跃吸收面积在 K2、K3 处理间无显著差异, 而钾低效基因型烟草 K2 处理根系总吸收及活跃吸收面积均显著低于 K3, 分别为 K3 的 32.9%、33.2%。钾低效基因型烟草根系总吸收面积及活跃吸收面积在 K1、K2 处理间无显著差异, 而 K1 处理下钾高效基因型烟草根系总吸收面积及活跃吸收面积则显著低于 K2, 分别为 K2 的 66.7%、66.8%。表明在低钾条件下钾高效型仍能保持较大的根系吸收面积。

表 6 不同供钾水平下烟草根系吸收面积的基因型差异

Table 6 Difference in root absorb area of tobacco genotypes under different K treatments m²

处理	基因型	总吸收面积	活跃吸收面积
K1	K326	30.03±0.08aB	15.20±0.08aB
	毕纳 1 号	15.24±0.16bB	7.60±0.10bB
K2	K326	45.46±0.23aA	22.75±0.24aA
	毕纳 1 号	15.07±0.04bB	7.52±0.00bB
K3	K326	45.23±0.27aA	21.28±1.69aA
	毕纳 1 号	45.76±0.18aA	22.68±0.04aA

3 讨 论

钾作为植物体内最重要的矿质元素之一, 参与植物体内诸多生理代谢, 对作物产质量起着决定性作用^[19]。不同钾效率基因作物间最直观的差异即表现在其生物量的差别^[20]。植物在缺钾条件下, 通常会表现生长缓慢, 株型矮小^[21]。钾素能通过多个途径影响光合作用, 因此对植物干物质积累和生物量形成有重要影响^[22]。相关研究表明^[23], 在低钾条件下, 不同烤烟品种根系对钾的吸收能力有明显差异, 富钾基因型烤烟根、茎、叶及总生物学干重普遍高于一般基因型烤烟, 表明富钾基因型烤烟对生长介质中钾的吸收与利用能力高于一般基因型烤烟。吴金涛等^[24]研究表明, 低钾水平下, 大麦钾高效基因型生物量大于钾低效型, 而钾含量却低于钾低效基因型。这可能是由于钾高效基因型大麦为低钾高效型, 能利用较低的钾量生产较多的干物质而造成的“稀释效应”^[25]。本研究发现, 不同供钾水平下, 钾高效基因型生物量和钾含量均显著高于钾低效基因型。

植物质体色素中主要以叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素为光合色素,光合色素含量的多寡直接影响着植物赖以生存的光合作用。减少钾素供给,棉花^[4, 20]、小麦^[21]叶片中叶绿素含量显著降低。增施钾肥明显促进棉花^[20]、黄瓜^[4]叶绿素的合成。本研究结果显示,在低钾胁迫下钾高效基因型叶绿素含量仍保持与正常供钾相当水平,而钾低效基因型叶绿素含量显著下降,与苏是浒^[26]的研究结果一致。

超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶等抗氧化酶系被认为是植物体内保护植物免受氧化损伤的重要组成部分^[27]。对籽粒苋的研究发现,富钾基因型植株抗氧化活性显著高于一般基因型^[18]。方明等^[28]研究表明,低钾水平处理的烟株硝酸还原酶活性在生育期内低于对照,说明钾供应不足会不同程度地制约氮代谢的强度。杨玉玲^[9]研究表明,相比钾低效基因型而言,钾高效基因型烤烟蔗糖合成酶活性、硝酸还原酶活性、SOD 和 POD 等活性较高,说明钾高效基因型抗逆境胁迫的能力强于钾低效基因型,与本研究结果一致。本研究发现,钾高效基因型 SOD、NR 活性显著高于钾低效基因型。

根系活力表征根系新陈代谢强弱,与根系对矿质元素的吸收能力有着密切的关系^[17]。植物根系代谢旺盛,其氧化力则强,吸收营养元素的能力也越强。马丽琼^[29]研究发现,钾高效基因型玉米根系氧化力强于钾低效玉米品种。根系分泌 H^+ 能力可以表征其吸收阳离子养分的活力,富钾基因型籽粒苋根系的 H^+ 分泌能力显著高于低钾基因型^[18]。多项研究证明^[30-31],植物品种间根系分泌 H^+ 能力与钾吸收量呈显著正相关。本研究对比两种钾基因型烟草根系的 H^+ 分泌能力发现,钾高效基因型根系分泌 H^+ 能力高于钾低效基因型,且随着供钾水平的升高而增加。

本试验发现,低钾条件下根系总吸收面积及活跃吸收面积均显著降低,且钾高效基因型根系吸收面积大于钾低效基因型,这一结果可能与不同基因型烟草根系发育对低钾条件的敏感性相关。SONG 等^[32]研究发现,低钾胁迫条件下,对低钾敏感型烟草根系生长素含量降低,从而抑制侧根发育,而对

低钾耐受型烟草根系能保持正常的生长素含量以维持侧根的发生和伸长,钾高效基因型烟草可能也正是低钾耐受型烟草。

4 结 论

低钾胁迫下,烟草根系吸收面积和活跃吸收面积、 H^+ 分泌量、NR 活性均降低,吸收利用氮、钾及阳离子养分的能力下降,烟草钾素含量和生物量下降;与钾低效基因型相比,钾高效基因型降低的幅度较小。低钾胁迫下,烟草叶绿素 a 含量、SOD、INV 活性和根系活力升高;钾高效基因型升高的幅度更大。钾高效基因型烟草抵抗低钾胁迫的能力显著高于钾低效基因型。

参考文献

- [1] LEIGH R A, WYNJONES R G. A hypothesis relating critical potassium concentrations for growth to the distribution and function of this ion in the plant cell [J]. *New phytologist*, 1984, 97(1): 1-13 .
- [2] 严小龙, 张福锁. 植物营养遗传学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [3] 鲁如坤. 中国土壤营养现状[J]. *土壤学报*, 1989, 26 (3): 280-286 .
- [4] 姜存仓, 高祥照, 王运华, 等. 不同基因型棉花苗期钾效率差异及其机制的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11 (6): 781-786.
- [5] MENGELK. Response of various crop species and euldvars to fertilizer application[J]. *Plant soil*, 1983, 72: 305-319.
- [6] 项虹艳, 丁洪, 郑金贵, 等. 低钾胁迫对水稻部分生理生化特性的影响[J]. *仲恺农业技术学院学报*, 2004, 17 (3): 12-18.
- [7] MEHLHORN H, WENAEL A. Manganese deficiency enhances ozone toxicity in bush beans (*Phaseolus vulgaris* L. cv. saxa)[J]. *Journal of Plant physiol.*, 1996, 148: 155-159.
- [8] SONG W J, XUE R, SONG Y, BI Y. Differential response of first-order lateral root elongation to low potassium involves nitric oxide in two tobacco cultivars[J]. *Journal of plant growth regulation*, 2017(10): 1-14.
- [9] 杨玉玲. 烟草钾高效吸收基因型筛选及其机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014
- [10] 张志良. 作物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.

- [11] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutase : occurrence in higher plant[J]. Plant physiology, 1977, 59: 309-314.
- [12] 陈薇,张德颐. 植物组织中硝酸还原酶的提取,测定和纯化[J]. 植物生理学通讯, 1980(4): 47-51.
- [13] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] 邹春琴,李振声,李继云,等. 钾营养效率不同的小麦品种间根际钾营养动态的比较[J]. 中国农业大学学报, 2000(3): 87-91.
- [15] 王伟,李兴涛,慕左莹,等. 低钾胁迫对不同效应型大豆光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 大豆科学, 2008, 27(3): 451-455.
- [16] 史宏志,韩锦峰,赵鹏,等. 不同氮量与氮源下烤烟淀粉酶和转化酶活性动态变化[J]. 中国烟草科学, 1999, (3): 5-8.
- [17] 李瑞,李絮花,杨守祥,等. 钾对冬小麦根系生理性状及地上部生长的影响[J]. 土壤学报, 2003(4): 16-19.
- [18] 李廷轩,马国瑞. 籽粒苋富钾基因型的根系形态和生理特性[J]. 作物学报, 2004, 30(11): 1145-1151.
- [19] WANG Y, WU W H. Potassium transport and signaling in higher plants[J]. Annual review of plant biology, 2013, 64: 451-476.
- [20] 田晓莉,王刚卫,朱睿,等. 棉花耐低钾基因型筛选条件和指标的研究[J]. 作物学报, 2008, 34(8): 1435-1443.
- [21] 李春俭. 高级植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- [22] 张银锁,宇振荣. 环境条件和栽培管理对夏玉米干物质积累、分配及转移的实验研究[J]. 作物学报, 2002, 28(1): 104-109.
- [23] 杨铁钊,彭玉. 富钾基因型烤烟钾积累特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 750-753.
- [24] 吴金涛,张锡洲,李廷轩,等. 大麦钾高效基因型钾吸收和生理生化特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 906-912.
- [25] 王晓光,曹敏建,于海秋,等. 不同基因型大豆吸收利用钾素的差异分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(5): 520-524.
- [26] 苏是浒. 钾高效水稻品种筛选及其机理研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.
- [27] 姜存仓,高祥照,王运华,等. 不同基因型棉花苗期钾效率差异及其机制的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 781-786.
- [28] 方明,符云鹏,刘国顺,等. 磷钾配施对晒红烟碳氮代谢和光合效率的影响[J]. 中国烟草科学, 2007, 28(2): 27-30.
- [29] 马丽琼. 钾营养效率型玉米的生长及生理特性的研究[D]. 沈阳, 沈阳农业大学, 2006.
- [30] ROMANI G, MARRÈ M T, BELLANDO M, et al. H⁺ extrusion and potassium uptake associated with potential hyperpolarization in maize and wheat root segments treated with permeant weak acids[J]. Plant physiology, 1985, 79(3): 734-739.
- [31] CLAASSEN N, BARBER S A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants[J]. Plant physiology, 1974, 54(4): 564-568.
- [32] SONG W J, LIU S, MENG L, et al. Potassium deficiency inhibits lateral root development in tobacco seedlings by changing auxin distribution[J]. Plant and soil, 2015, 396(1-2): 163-173.