

植物钾素高效利用机理研究进展

王利 陈防 万开元

(中国科学院武汉植物园, 武汉 430074)

摘要: 植物对钾素的吸收和利用是一个复杂的过程。近年来, 科学工作者在钾素高效机理方面做了大量研究工作, 有关钾素效率的研究取得了长足的进展。本文简要综述了植物钾素效率的概念、钾素吸收效率的差异及其生理机制, 讨论了土壤钾库、根系特征、根系分泌物和根际微生物、钾素在植株和细胞水平的分配和再分配、其它离子对钾离子的替代作用、收获指数、研究中常用的钾素效率的判断指标及存在的一些问题。

关键词: 钾素; 土壤; 吸收效率; 利用效率; 生理机制

据统计, 全世界 13 亿公顷的土壤中, 无各种胁迫或胁迫很小的只占 10.1%, 受矿质养分胁迫的占 22.5%, 在养分胁迫中, 大约 40% 的土壤缺钾^[1,2]。近年来, 随着作物产量的提高和土壤钾素收支不平衡的加剧, 农田缺钾面积有扩大的趋势。Sheldrick 等^[3] 根据中国肥料投入和农产品产出的匡算, 认为我国农田钾素亏缺每年约有 7.7×10^6 吨。严小龙等对我国土壤根土层内钾的平均储量进行了估计, 认为根土层内钾的平均储量可达 25000~250000 公斤/公顷, 土壤中钾素资源潜力巨大, 只是生物有效性低, 作物不能很好的利用^[4]。目前中国农业生产中面临的一个突出问题是在钾肥资源短缺的形势下, 较低的农田土壤钾素及钾肥利用效率限制了作物产量潜力的发挥和产品品质的进一步改善。因此, 通过研究植物钾素高效的生理机制, 提高植物钾素利用效率具有重要的理论和实践意义。笔者根据国内外钾素高效机理研究的成果, 尤其是近年来相关科研工作取得的新进展, 对植物吸收和利用钾素的主要影响因素进行了归纳总结。

1 植物钾素效率的概念

在长期的进化过程中, 植物形成了各自吸收和利用钾素的机制。植物不同种间、不同品种间钾素效率存在着一定差异, 有些品种间的差异还很明显。钾素效率是指植物在土壤可利用性钾含量低的环境中良好生长和繁殖的能力^[5]。也有学者把钾素效率描述为低钾胁迫下, 植物获得的产量占最大产量潜力的比例。杨肖娥则把钾素效率定义为植物在中度供钾和缺钾的条件下, 通过内部和

外部的一些利用机制, 获得更高干物质产量和(或)谷物产量的能力^[6]。Zou 等认为钾素效率包括农学养分效率和相应度两个方面。农学养分效率只指某一特定养分供应量下, 植物产量或生物量的高低。养分相应度是指随养分浓度的提高或下降, 植物产量增加潜力或减少幅度的大小^[7]。一般认为, 植物钾素效率依赖于相互关联的两个方面: ①植物从土壤里吸收钾素的效率(吸收效率); ②植物利用钾素获得产量的效率(利用效率)。高效吸收只是高效利用的一个基本前提条件。高的钾素吸收效率并不一定意味着高的干物质产量^[8,9]。Shea 对菜豆钾素效率的研究发现, 在介质中的钾素耗竭之前, 菜豆存在明显的奢侈吸收的现象^[10]。农业生产的目的是获取经济产量, 钾素利用效率高的作物和品种在土壤钾素供应有限的情况下, 可以更有效地形成经济产量, 获得较高的收获指数, 减少植物体内钾素向其他部分的输送^[11]。综上所述, 钾素农学利用效率主要包括三种含义: ①介质中钾素浓度较低时, 植物正常生长的能力, 即植物耐低钾胁迫的能力; ②介质中钾素浓度增加或减少时, 植物生物量的反应状况, 即植物对钾素的敏感性; ③在介质中钾素浓度相同时, 可以形成更多的经济产量, 即收获指数高。

2 钾素吸收效率的差异

植物对钾素的吸收是植物和土壤相互作用的结果, 因此不同的土壤条件, 植物不同种间、不同栽培品种间存在钾素吸收效率的差异。Lu 等通过研究成土母质及土壤质地对油菜施钾效果的影响发现, 受母质的影响, 施钾效果高低顺序为: 花岗岩 > 小河冲击物 > 红砂岩 >

页岩 > Q3 母质 > 长江冲击物 > Q2 母质；质地愈粗钾素吸收效果愈好，粘粒含量愈高钾素吸收效果愈差^[15]。Pettersson 等通过向日葵、黄瓜、桦、越橘、松、小麦、大麦七种植物的水培试验发现，大麦的钾素吸收效率最高，其次是小麦，而松的钾素吸收效率最低^[9]。Tiwari 等人通过对小麦、鹰嘴豆、芥菜、埃及车轴草等不同植物对钾素需求的研究发现，在相同处理下钾素吸收总量的高低顺序为：埃及车轴草 > 鹰嘴豆 > 小麦 > 芥菜^[12]。有关同一植物不同栽培品种间钾素吸收效率差异的报道更多，前人对小麦^[7,8,11,13,14,21]、棉花^[16,17]、水稻^[6,18,20,22,23,24]、烟草^[25]、桑叶^[26]、油菜^[15,27]、番茄^[19,28]、大豆^[29]、甘薯^[30,31]、菜豆^[10]等植物的不同栽培品种间钾素吸收效率的差异做了大量的研究工作，在此就不一一列举。总的来说，甜菜、甘薯等块茎块根类作物钾素吸收效率较高，油菜及豆科作物的吸钾效率高于禾谷类作物。禾谷类作物中，玉米和大麦的吸钾效率明显高于小麦。同种植物，小麦不同品种在高钾条件下相差不大，在低钾条件下，高效品种的吸收效率是低钾品种的 2 倍；大麦不同品种在高钾条件下相差可达 4 倍，而在低钾条件下相差不大；水稻不同品种在高钾条件下相差不大，而在低钾条件下相差 2 倍多。

2.1 土壤钾库

有研究者把钾素在土壤中存在的形态归结为三种：固定态钾、交换性钾和土壤溶液中的钾，此后的几十年又有很多学者对钾素形态做了分类。谢建昌认为钾素以四种形态存在：结构钾、非交换性钾、交换性钾和水溶性钾。黄绍文等在此基础上把交换性钾按其存在位置及可交换性的不同将其分为特殊吸附钾和非特殊吸附钾两种有效性不同的形态^[32]。钾素的各形态之间存在动态的平衡，土壤溶液中的钾与交换性钾处于最直接的平衡状态，而非交换性钾和交换性钾之间的化学平衡则非常复杂，而且取决于各相总的钾素状况。矿物钾需要经过风化才能进入土壤溶液中，这是一个极其缓慢的过程，对植物当季钾素营养供应意义不大。土壤溶液中的钾可通过截获、质流和扩散三种方式被植物直接吸收，被认为是土壤供钾能力的强度因素。但其浓度很低，只占土壤总钾量的一小部分^[33]。当土壤溶液中钾浓度降低时，交换性钾就会从吸附位点上释放出来，补充到土壤溶液中。研究发现，除苜蓿、牧草或豆科与禾本科混播的高产饲料作物以及马铃薯类的块茎作物较大多数其他作物需要较高水平的钾外，大部分作物的高产所需的交换性钾的足量水平 (KSL) 与成熟作物所含

的全钾量大致相同。一般当土壤中交换性钾低于该土壤特有的某一水平时，植物就不可能再取走交换性钾，因为当交换性钾水平低时，剩下部分就被更强的吸持着，钾进入溶液减少，作物吸收也减少。这时低浓度的溶液钾、交换性钾或两者就启动了非交换性钾的释放机制^[34]。非交换性钾与土壤溶液中的钾或交换性钾的转化过程缓慢，用常规的离子交换方法难以测定。Munson 报道有人将生长 7 天的植物的根系藉一片尼龙网与土块分开，形成根垫的根系在表面吸收钾。将土块与根分离，冰冻并切片，获得离根不同距离的土样然后测定，证明了在根表 2 毫米的土壤之内，当溶液中 K^+ 减少至 2 微摩尔 / 升时就有非交换性钾释放^[34]。国内外也有一些学者用阳离子树脂交换法对非交换性钾释放的机制作过详细的研究。不同植物或同种植物的不同栽培品种促进非交换性钾释放的能力不同。Steingrobe 等做了水培和土培试验来研究小麦、甜菜和马铃薯的钾素效率。他们发现，同小麦和马铃薯相比，甜菜更容易使非交换性钾释放到根际的土壤溶液中^[36]。因此，在粘粒含量高的土壤中，能有效利用非交换性钾的植物具有更高的钾素吸收效率。

2.2 根系特征

植物根系从土壤中吸收钾素的过程是根系与土壤相互作用的过程，不同的土壤条件对根系的生长产生不同的影响；根系也会通过自身的变化，采用不同的方式适应不同的土壤环境。一般认为钾素高效吸收基因型所具有的根系特征是：高根 / 冠比，根系纵向、侧向分布广，大的根长和根半径，细根量大，多且长的根毛，大的根系吸收面积和活跃吸收面积；理想的根系吸收动力学参数，即吸钾速率高 (V_{max} 值大)， K^+ 亲和力强 (K_m , C_{min} 值小)；大的根系阳离子交换量 (CEC)。Silberbush 等^[37]利用数学模型对大豆在低钾条件下根系参数对钾素吸收的影响做了敏感性分析并发现根的生长率和根半径是影响钾素吸收的最敏感因素。Mengel 比较了草和豆类作物吸收钾素的状况并得出结论：根长和根鲜重是影响钾素吸收的重要因素^[38]。Jiang 在对番茄的钾素吸收效率的研究中也得出了类似的结论^[17]。崔国贤比较了苎麻不同基因型吸钾能力和根系参数的关系，他认为，根系总吸收面积和活跃吸收面积和细根量是影响钾素吸收的关键因素^[35]。Jia 在对不同基因型的水稻钾素效率的差别进行的研究中发现，在钾素胁迫条件下，钾高效品种比钾低效品种具有更大的根长、根表面积、体积和总根数^[18]。Zhang 利用盆栽试验

对小麦的不同品种钾素吸收效率的差异进行了研究,他认为根长不是钾素吸收效率差异的影响因素^[8]。除此之外还有一些学者也得出了根长不是钾素吸收效率影响因素的结论。在根系动力学参数(V_{max} 、 K_m 、 C_{min})和根系阳离子交换量(CEC)对钾素吸收效率的影响方面有不少学者做过研究,且意见比较一致:吸钾速率高(V_{max} 值大), K^+ 亲和力强(K_m 、 C_{min} 值小)^[8,35,36],大的根系阳离子交换量(CEC)^[19,35,40]利于钾素的高效吸收。在研究当中亦得出了不一致甚至是完全相反的结论,这可能是因为研究的植物和试验条件的不同造成的结果。而且植物钾素吸收效率的差异是根系诸多特征综合作用的结果,不能用单一的某项指标作为判断的依据。

2.3 根系分泌物和根际微生物

根际是植物与土壤进行物质交换的重要场所,根系分泌物是物质交换的重要媒介。微生物在根际分布密集,活性强,对根际营养有重要影响。有关根系分泌物和根际微生物对植物吸收钾素的影响已有不少研究报道。根际分泌物中的一种重要成分是低分子量的有机酸,常见的主要有柠檬酸、酒石酸、马来酸、苹果酸、甲酸、乙酸、草酸、富马酸、丙酸等。不同的植物分泌特定的有机酸^[39]。涂书新等发现,籽粒苋根系分泌物中的有机酸主要是草酸,占有有机酸总量的95%以上,且钾高效品种草酸分泌量明显高于一般品种。利用根系分泌物进行进一步的矿物释钾试验,发现籽粒苋对不同矿物均有显著的净释钾效应,且根系分泌物中草酸的含量与矿物释钾量有显著的相关关系^[42]。涂丛等用盆栽和根袋法观察了小麦和绿豆在不同的施钾处理下根际分泌物的特征,发现小麦根际的脯氨酸、谷氨酸、酪氨酸和亮氨酸含量明显升高,并推测这可能是小麦耐低钾能力强的原因之一^[43]。李廷轩等在不同基因型籽粒苋的缺钾土培和水培试验中发现,富钾基因型根际分泌物中可溶性糖和游离氨基酸的含量远高于一般基因型,差异达极显著水平,并且富钾基因型根际真菌和细菌数量是一般基因型的三倍以上^[40]。盛下放等发现硅酸盐细菌NBT菌株发酵液中含有大量的有机酸、氨基酸、荚膜多糖,三者都具有较强的分解钾长石的能力,且三者间有明显的协同作用^[44]。可开发成细菌肥料来施用。在后续土培试验中观察了NBT菌株对棉花和油菜吸收钾素的影响,发现NBT菌株可扩殖到根际土壤中,且对钾素的吸收有明显促进作用^[41]。因此,进一步研究根系分泌物、根际微生物对根际营养的影响,在生产上采用相应技术措

施,改善土壤微域环境,对于提高钾素和别的营养效率具有重要意义。

3 钾素利用效率的差异

研究表明,钾素利用效率和吸收效率是相互关联的,但是高吸收效率并不一定意味着高利用效率。钾素利用效率是指植物利用吸收到体内的钾素所产生的植物产量,侧重于体内钾素的利用、转化能力。植物钾素利用效率高低的生理机制主要依赖于:①钾素在植株和细胞水平的分配和再分配;②其它离子对钾离子的替代作用;③收获指数(harvest index)。

3.1 钾素在植株和细胞水平的分配和再分配

K^+ 在植物体中具有很好的移动性。植物在细胞和植株水平的钾素分配能力是影响钾素利用效率的重要因素。植物细胞通过膜外 K^+ 的流入和液泡中 K^+ 的补充把细胞质中的 K^+ 浓度严格控制在80–100毫摩尔/升。一些细胞器也可以在一定范围内维持其自身 K^+ 浓度的稳定,如叶绿体浓度一般在50–100毫摩尔/升浓度范围内^[45,46]。这些都是以牺牲液泡中 K^+ 浓度为代价实现的。研究表明:在不同钾素供应水平下,液泡中的 K^+ 浓度有较大波动。在钾饱和状态下,液泡中钾离子浓度通常在200–250毫摩尔/升,而在钾耗竭条件下会降低到10毫摩尔/升。Walker研究了植物细胞中 K^+ 的动态平衡,发现液泡 K^+ 浓度随植物组织中 K^+ 浓度的降低呈现线形降低的趋势^[47]。Memon研究了不同品种大麦之间钾效率的差别,发现钾高效品种液泡中的 K^+ 往细胞质的移动性显著高于钾低效品种^[48]。

钾素在植物器官之间的移动和分配也是钾素利用效率产生差异的重要机制。钾高效植物可以将钾素从茎和叶柄等非光合器官移动到叶片和繁殖器官,从而获得高的经济产量。Jiang研究了两个钾素效率不同的棉花基因型的生长状况和营养特性,发现钾低效品种吸收的钾素较多的分配到主茎和叶柄等器官。钾高效品种吸收的钾素则较多的分配到形成产量的器官(棉桃)中,棉桃钾素积累量是钾低效品种的1.98倍,由于成桃较多,其钾素利用效率显著高于钾低效品种^[17]。

3.2 其它离子对钾离子的替代作用

液泡中积累的 K^+ 可以产生细胞生长必需的渗透势,

而且细胞的快速生长要求渗透调节物质具有很好的移动性。加上 K^+ 还具有其它一些特殊的功能, 因此只有很少一些离子在某些植物中能部分地替代 K^+ 。目前报道较多的是 Na^+ 对 K^+ 的替代作用。Figdore 研究了不同品种番茄中 Na^+ 对 K^+ 的替代作用, 发现与不施 Na 处理相比, 每钵施入 10 毫克 Na 的处理中, 两个番茄品种的平均钾素效率增加了 35–37%; 每钵施入 160 毫克 Na 的处理中, 三个番茄品种钾素效率增加了 40–51%, 而另两个番茄品种钾素效率增加了 16–22%^[49]。这说明在番茄不同品种当中, Na^+ 对 K^+ 具有替代作用, 而且不同的番茄品种中, 这种替代作用对钾素效率的影响不同。Liu 研究了钾素效率不同的水稻基因型间 Na^+ 对 K^+ 替代作用的差异, 发现在低钾胁迫的条件下, NaCl 的施用虽然能提高水稻的钾素利用效率, 但不同基因型的水稻在不同生育期对 NaCl 的反应不同。在钾素充足的条件下, Na^+ 对 K^+ 的替代作用不明显, 甚至会产生毒害作用^[50]。

3.3 收获指数

收获指数也称为经济系数, 是指作物收获时的经济产量与收获量之比, 在一定程度上反映了作物把资源(包括钾)分配到收获器官中的能力。收获指数的高低作为影响钾素利用效率的重要机制被广泛报道。George 从 84 个甘薯品种筛选出 8 个优良品种, 并对其钾素吸收和利用效率进行了研究, 发现钾素利用效率和收获指数之间存在明显的相关关系^[30]。Yang 研究了 134 个水稻品种钾素利用效率的差异, Zhang 研究了 58 个小麦品种间钾素吸收和利用效率的差异, 都得出了同样的结论^[6,8]。由于收获指数对植物钾素利用效率的影响较大, 当植物不同品种收获指数不同, 且收获指数与总生物量之间没有明显的相关关系时, 用植物营养生长的钾素利用效率来反映其钾素的经济利用效率是不可靠的。

4 钾素效率的一些相关指标

目前对于植物钾素高效的含义还没有统一的认识, 其相关指标的使用比较混乱。一般意义上的钾高效是指作物从生长介质中获取钾素并将其转运到经济产量中的能力, 包括两方面的内容: 一是具有较高的钾素吸收效率, 也有人称之为体外钾素利用效率 (External K Use

Efficiency, EKUE), 即植物根系从生长介质中吸收钾素并向地上部分转运钾素的能力较强, 其大小主要与植物根土界面的物质转化、转运过程及钾向地上部运输的过程有关, 其计算方法是: $EKUE = \frac{\text{吸收的钾}}{\text{施用的钾} - \text{吸收的钾}}$; 二是具有较高的钾素利用效率, 也被称为体内钾素利用效率 (Internal K Use Efficiency, IKUE), 即单位养分吸收量(积累量)所获得的作物经济产量(或生物量)较高, 其大小主要与植物体内 K^+ 参与的物质合成和“源”向“库”的转运过程有关, 其计算方法是: $IKUE = \frac{\text{籽粒产量(生物量)}}{\text{吸钾量}}$ 。在钾素效率的相关指标使用中存在的一个常见问题是, 计算钾素利用效率时往往只考虑了植物营养生长的情况, 而忽略了其经济产量。虽然这样得出的结果有时也是有意义的, 特别是针对收获枝叶的植物(如饲料作物、烟草和一些蔬菜等), 但对于一些收获籽粒的作物(如禾谷作物等)来说, 这种方法就不可靠。在品种间收获指数差异较大, 且收获指数与生物量间无明显相关关系的情况下, 这显然是不合适的。有些学者在评价小麦不同品种的钾素利用效率差异时, 就使用了营养生长的钾素利用效率。另外, 有些学者提出用苗期的钾素营养状况作为筛选钾高效基因型的指标, 这虽然缩短了筛选的时间, 但从作物的整个生长发育过程中植株对钾的反应来看, 前期的表现与后期并不完全一致。如果在苗期筛选, 只能作为初选的结果, 还应该研究其在整个生育期内钾素利用效率的情况, 尤其是其经济产量的钾素利用效率。笔者认为, 钾素效率的相关指标要根据不同植物的实际情况, 灵活使用。

5 展望

中国在钾肥资源有限的条件下要实现农业持续发展, 必须节约资源, 提高钾素利用效率。因此, 在今后的研究中, 应注意从植物根系高效吸钾机制、植物吸钾效率与土壤环境因素(如土壤水分、有机质、其他营养元素、微生物、酶等)关系、植物体内钾素高效运输与合理分配机制等方面入手, 进一步深入探讨植物钾素高效利用的机理。在此基础上有针对性地采取相应的农艺措施, 改良和培育钾高效品种, 并结合全国正在开展的测土配方施肥和农田地力培肥工程, 提高土壤钾素供应能力, 用适合的钾肥品种在适时、适量、适当部位对农作物进行高效施肥。

参考文献

- [1] 杨肖娥. 植物无机营养遗传特性研究的理论与实践 [J]. 土壤通报, 1988, 19(6):284-287.
- [2] 姜存仓, 王运华, 鲁剑巍, 等. 植物钾效率基因型差异机理的研究进展 [J]. 华中农业大学学报, 2004, 23(4):483-487.
- [3] Sheldrick W F, Syers J K and Lingard J. Soil nutrient audits for China to estimate nutrient balances and output/input relationships [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 94(3):341-354.
- [4] 严小龙, 张福锁. 植物营养遗传学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997:1-17.
- [5] Rengel Z and Damon P M. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use [J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133:624-636.
- [6] Yang X E, Liu J X, Wang W M, et al. Genotypic differences and some associated plant traits in potassium internal use efficiency of lowland rice (*Oryza sativa* L) [J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 2003, 67:273-282.
- [7] Zou C Q, Li Z S, Li J Y. Characteristics of potassium nutrition of six wheat cultivars at different growth stages [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(3):340-344.
- [8] Zhang G P, Chen J X and Eshetu A Tirore. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in wheat [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54:273-282.
- [9] Pettersson S and Jensen P. Variation among species and varieties in uptake and utilization of potassium [J]. *Plant and Soil*, 1983, 72:231-237.
- [10] Shea P F, Gerloff G C, and Gabelman W H. Differing efficiencies of potassium utilization in strains of snapbeans, *Phaseolus Vulgaris* L [J]. *Plant and Soil*, 1968, 28:337-346.
- [11] 鲁剑巍, 陈防, 刘冬碧, 等. 成土母质及土壤质地对油菜施钾效果的影响 [J]. 湖北农业科学, 2001, 6:42-43.
- [12] Tiwari K, Nigam V and Pathak A. Studies on the potassium requirements of different crops [J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 1985, 8(1):91-96.
- [13] 韩燕来, 刘新红, 王宜伦, 等. 不同小麦品种钾素营养特性的差异 [J]. 麦类作物学报, 2006, 26(1):99-103.
- [14] 李见云, 谭金芳, 介晓磊. 黄淮麦区钾高效小麦品种的筛选麦 [J]. 麦类作物学报, 2003, 23(3):49-52.
- [15] Woodend J J and 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 [J]. *Plant and Soil*, 1993, 151:39-44.
- [16] 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.
- [17] Jiang C C, Chen F, Gao X Z, et al. Study on the nutrition characteristics of different K use efficiency cotton genotypes to K deficiency stress [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(6):740-745.
- [18] Jia Y B, Yang X E, Feng Y, et al. Jilani. Differential response of root morphology to potassium deficient stress among rice genotypes varying in potassium efficiency [J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2008, 9(5):427-434.
- [19] Chen J J, Warren H G. Morphological and physiological characteristics of tomato roots associated with potassium-acquisition efficiency [J]. *Scientia Horticulturae*, 2000, 83:213-225.
- [20] 宋桂云, 徐正进, 陈温福, 等. 田间低钾对不同穗型水稻钾的吸收和利用效率的影响 [J]. 华北农学报, 2006, 21(6):89-94.
- [21] 赵学强, 介晓磊, 谭金芳, 等. 钾高效小麦基因型的筛选指标和筛选环境研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2):277-281.
- [22] 贾彦博, 杨肖娥, 王为木. 不同供钾水平下水稻钾素吸收利用与产量的基因型差异 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(2):64-67.
- [23] Wang W M, Yang X E, Wei Y Z, et al. Studies on the differences in uptake and utilization of soil potassium between different rice genotypes [J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2005, 31(1):52-58.
- [24] 刘国栋, 刘更另. 籼稻不同基因型钾素吸收利用效率的调控 [J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2):47-53.
- [25] 颜丽, 关连珠, 栾双, 等. 土壤供钾状况及土壤湿度对我国北方烤烟烟叶含钾量的影响研究 [J]. 土壤通报, 2001, 32(2):84-87.
- [26] 鲁剑巍, 陈防, 万运帆. 钾肥用量和品种对桑叶生产及蚕茧质量的影响 [J]. 土壤学报, 2004, 41(5):780-788.
- [27] Damon P M, Osborne L D, Rengel Z. Canola genotypes differ in potassium efficiency during vegetative growth [J]. *Euphytica*, 2007, 156:387-397.
- [28] Scott S Figdore, Gerloff G C and Gabelman W H. The

- effect of increasing NaCl levels on the potassium utilization efficiency of tomatoes grown under low-K stress [J]. *Plant and Soil*, 1989, 119:295-303.
- [29] 王伟, 曹敏建, 蔡左莹, 等. 不同大豆品种对钾素吸收和利用效率差异的比较研究 [J]. *大豆科学*, 2007, 26(4):561-564.
- [30] George Melvin Sidikie, Lu G Q, Zhou W J. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) [J]. *Field Crops Research*, 2002, 77(1):7-15.
- [31] 陆国权, 丁守仁. 甘薯钾素利用效率的基因型差异研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 7(3):357-360.
- [32] 黄绍文, 金继运. 土壤钾形态及其植物有效性研究进展 [J]. *土壤肥料*, 1995, 5:23-29.
- [33] 金继运. 土壤钾素研究进展 [J]. *土壤学报*, 1993, 30(1):94-101.
- [34] Munson R D. Potassium in agriculture [C]. *American Society of Agronomy*, 1985:235-260.
- [35] 崔国贤, 李宗道. 苕麻不同基因型的吸钾能力及其与根系参数的关系 [J]. *农业现代化研究*, 2000, 21(6):371-375.
- [36] Steingrobe B and Claassen N. Potassium dynamics in the rhizosphere and K efficiency of crops [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1999, 163(1) :101-106.
- [37] Silberbush M and Barber S A. Prediction of phosphorus and potassium uptake by Soybeans with a mechanistic mathematical model [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47:262-265.
- [38] Mengel K and Steffens D. Potassium uptake of rye-grass (*Lolium perenne*) and red clover (*Trifolium pratense*) as related to root parameters [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1985(1):53-58.
- [39] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants [M]. London:Academic Press, 1986.
- [40] 李廷轩, 马国瑞. 籽粒苋不同富钾基因型根际钾营养与根系特性研究 [J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3):90-93.
- [41] Sheng X F. Growth promotion and increased potassium uptake of cotton and rape by a potassium releasing strain of *Bacillus edaphicus* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005(37):1918-1922.
- [42] 涂书新, 郭智芬, 孙锦荷. 富钾植物籽粒苋根系分泌物及其矿物释钾作用的研究 [J]. *核农学报*, 1999, 13(5):305-311.
- [43] 涂丛, 袁吕江, 魏世强, 等. 土壤钾营养状况对作物分泌物的效应研究 [J]. *西南农业大学学报*, 1996, 18(3):276-280.
- [44] 盛下放, 黄为一. 硅酸盐细菌 NBT 菌株解钾机理初探 [J]. *土壤学报*, 2002, 39(6):863-871.
- [45] Pier P A, Berkowitz G A. Modulation of water-stress effects on photosynthesis by altered leaf K⁺ [J]. *Plant Physiol*, 1985, 85:655-661.
- [46] Cuin T A, Shabala S. Potassium homeostasis in salinized plant tissues [J]. *Springer Berlin Heidelberg*, 2006, 287-317.
- [47] Walker D J, Leigh R A and Miller A J. Potassium homeostasis in vacuolate plant cells [J]. *Plant Biology*, 1996, 93, 10510-10514.
- [48] Memon A R, Siddiqi M Y and Class A D M. Efficiency of K⁺ utilization by barley varieties:activation of pyruvate kinase [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1985, 36(1):79-90.
- [49] Figdore S S, Gabelman W H and Gerloff G C. The accumulation and distribution of sodium in tomato strains differing in potassium efficiency when grown under low-K stress [J]. *Plant and Soil*, 1987, 99:85-92.
- [50] Liu J X, Yang X E, Ni W Z, et al. Sodium and potassium absorption and distribution in relation to growth and internal potassium use efficiency of K-efficient and-inefficient rice genotypes [J]. *Pedosphere*, 2001, 11(3):235-242.