

# 植物-土壤系统中钾镁营养及其交互作用研究进展<sup>①</sup>

薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 罗雪华, 王大鹏, 张永发, 邹碧霞

(中国热带农业科学院橡胶研究所, 海南儋州 571737)

**摘要:** 钾和镁是植物生长发育必需的重要营养元素。近些年来, 钾、镁营养, 离子间相互作用及其平衡关系已经逐渐受到人们的关注。本文对近些年来关于植物-土壤系统中钾、镁营养及二者间交互作用的研究现状及未来发展趋势进行了综述。主要从植物生长发育、养分吸收及转运、作物品质、生理生化、碳氮代谢、活性氧代谢以及土壤中  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  等方面分别进行了论述; 此外, 本文还展望了钾、镁营养及其二者交互作用未来的研究方向。

**关键词:** 钾; 镁; 交互作用

中图分类号: S-1; S143 文献标识码: A

钾作为植物生长发育过程中所必需的大量矿质营养元素, 在植物体内具有广泛作用, 如维持细胞膜电位梯度、产生膨压、激活酶活性等, 此外钾还参与光合作用、蛋白质合成、调节气孔运动以及维持离子平衡等生理过程<sup>[1]</sup>。研究已证实, 钾在植物产量形成、品质以及抵抗胁迫等方面具有重要作用<sup>[2]</sup>。镁早在 1925 年就被确定为必需的矿质营养元素<sup>[3]</sup>。人体骨骼中的镁占人体镁总量的 60% 以上, 在促进骨骼结构发育方面起到至关重要的作用<sup>[4]</sup>。镁在植物体内的主要功能是稳定大分子结构, 如核酸、蛋白质、细胞膜、细胞壁、维持酶活性( $H^+$ -ATP 酶、聚合酶、激酶)、平衡活性氧(ROS)等<sup>[5]</sup>。此外, 镁还参与调节细胞阴阳离子平衡及与钾共同调节细胞渗透压<sup>[1]</sup>。植物叶片中 75% 的镁用于参与蛋白质合成、15%~20% 参与叶绿素合成, 其主要作用是作为酶辅因子参与光合碳固定及代谢过程<sup>[6]</sup>。

据统计, 我国缺钾土壤主要分布在长江以南地区, 其中有 3/4 处于缺钾水平<sup>[7-8]</sup>。近些年来, 农户施钾量有所增加, 与 2000 年相比, 农田钾肥施用面积由 38% 上升到 71%, 然而, 我国土壤速效钾含量与 20 世纪 80 年代相比却下降了 9 mg/kg, 我国钾肥施用量目前仍然不能完全满足作物需求<sup>[9]</sup>。长期定位试验和全国土壤普查结果表明, 自新中国成立以来, 全国土壤钾变化的总体趋势是: 随产量水平不断提高以及有机肥施用量的相对减少, 土壤钾的收入平衡入不敷出, 呈逐年耗竭趋势, 缺钾面积持

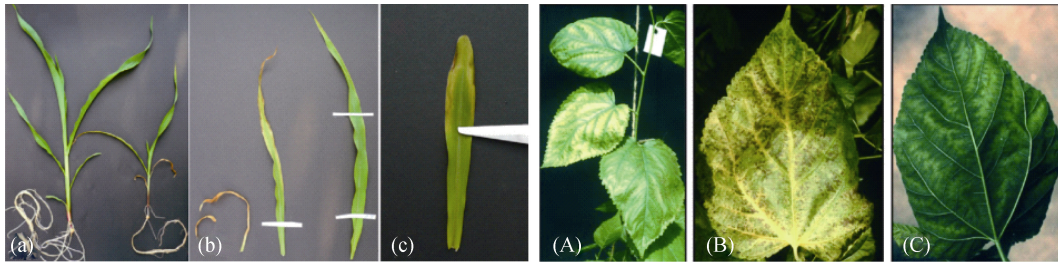
续扩大。根据目前的现状, 掌握作物钾素吸收特征、土壤钾库供应特征的情况下, 应该做到因地、因时、因作物合理施用钾肥, 以保持土壤钾地力<sup>[10]</sup>。土壤中的镁主要以无机离子形式存在, 我国南方地区土壤中含镁矿物易风化淋失, 造成土壤镁的供应能力降低; 加之复种指数的提高和产量水平的不断提高, 也加速了土壤的缺镁症状, 从而影响作物产量和品质。我国有效镁含量较低的土壤类型主要包括砖红壤、赤红壤和部分红壤; 全国有 54% 的土壤需要不同程度地补充镁素肥料<sup>[11]</sup>。大量研究表明, 在缺镁的土壤上施用矿质镁肥可以明显改善水稻、烤烟、甘蔗、香蕉、玉米、小麦等作物的生长状况、产量形成以及品质<sup>[12]</sup>。近年来, 逐渐重视镁肥的施用, 农业镁大多数以硫酸钾镁肥、钙镁磷肥等作为基肥的形式进入土壤, 进而被农作物吸收<sup>[13]</sup>。与  $K^+$  相比,  $Mg^{2+}$  具有较大的水合半径, 对土壤胶体的吸附强度较低, 在土壤中更容易被淋洗从而损失<sup>[14]</sup>。农业生产中钾、镁营养的缺乏及离子间的不平衡逐渐成为限制我国农作物高产的重要限制因子。钾和镁作为植物必需元素, 在植物-土壤系统中钾和镁之间既存在协同作用又存在拮抗作用, 当土壤  $Mg^{2+}$  含量较低时, 合理施钾会增加植物对  $Mg^{2+}$  的吸收; 而当钾肥施用量较大时, 由于钾-镁之间的拮抗作用, 缺镁症状可能会加剧<sup>[15]</sup>。因此, 重视钾、镁在植株-土壤系统中的平衡及其二者间的相互作用, 对促进农业的可持续发展具有重要作用。

基金项目: 中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金项目 (1630022017029) 和国家重点研发计划项目(2018YFD0201100)资助。  
作者简介: 薛欣欣(1986—), 男, 陕西咸阳人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为作物养分管理。E-mail: xuexinxin\_2010@163.com

研究元素的交互作用一直以来是植物营养的重要研究领域之一。土壤-植株系统中的营养元素相互作用关系到植物根系对元素的吸收、体内迁移、分布积累和生理活动等<sup>[15]</sup>。钾-镁元素相互作用则是指钾、镁配施条件下,钾(镁)对镁(钾)在植株生长发育、养分吸收与转运以及生理功能的影响,在土壤中有效性及各种形态的影响<sup>[16]</sup>。为此,本文主要从植物生长发育、养分吸收与转运、品质、生理生化、碳氮代谢、活性氧代谢以及土壤等方面阐述土壤-植株系统中钾-镁营养及其相互作用的研究进展,进而为农业生态系统中的钾、镁营养高效管理提供参考。

## 1 钾、镁营养在植物生长发育中的作用

钾和镁在植物生长发育过程中起着重要作用。植物叶片缺钾和缺镁症状如图 1 所示<sup>[2,17]</sup>。缺钾造成植株缺水及细胞壁木质化,导致作物叶片失绿并枯萎<sup>[2]</sup>;



(a. 左侧图为对照,右边图为缺钾;b. 左侧图和右侧图分别为老叶缺钾和新叶缺钾;c. 叶尖和叶缘失绿症状;  
A. 缺镁叶脉间退绿;B. 整个叶片退绿及坏死;C. 叶片背面叶脉附近暗绿)

图 1 玉米缺钾(a~c)<sup>[2]</sup>及桑树缺镁(A~C) 症状<sup>[17]</sup>

Fig. 1 Deficiency symptoms of K in maize (a - c) and Mg in mulberry (A - C)

K/Mg 是评价植物体生长发育过程的一个重要的参数。研究表明,棉花在初花期和盛花期,植株体 K/Mg 与棉铃产量呈显著负相关关系,而镁含量则与棉铃产量呈显著正相关关系( $P < 0.05$ )<sup>[22]</sup>。当水稻植株体内  $K/Mg < 22$  时,地上部干重随着 K/Mg 增大而相应增加;但当  $K/Mg > 22$  时,地上部干物质积累明显下降<sup>[23]</sup>。另外,根据已有研究总结,我国热区经济作物橡胶树对缺钾及缺镁均比较敏感<sup>[24]</sup>。研究证实,叶片的 K/Mg 与缺镁黄叶病呈极显著正相关,当叶片  $K/Mg > 4.5$  时,橡胶树极易发生缺镁黄叶病症状,健康胶树叶片的 K/Mg 为 2.5~3.5。另外,当镁素营养过于丰富时,会抑制胶树对钾的吸收,从而对胶树的产胶排胶造成不良影响。Suchartgul 等<sup>[25]</sup>研究表明,土壤中和叶片中的 K/Mg 分别为 2.0 和 3.0 时,橡胶生长较好;当重视钾肥而忽略镁肥施用,便不利于橡胶树的正常生长发育。综上所述,调整钾、镁肥的施用方式,

缺镁造成叶脉间退绿,严重时,老叶或中叶坏死<sup>[18]</sup>。有效的碳水化合物合成需要通过捕光色素蛋白复合物的高光截获,然后才到达 PSI 和 PSII 系统,而镁作为叶绿素 a 和 b 的中心原子,也是捕光色素蛋白复合物的主要组成部分,由于镁在叶绿素和蛋白生物合成方面的重要角色,加之镁的移动性较强,严重缺镁易造成老叶和成年树叶片叶脉间退绿等症<sup>[1]</sup>。缺钾和缺镁同时胁迫下,水稻叶片变厚,结构组织较单独养分胁迫处理受到的破坏较轻<sup>[19]</sup>。缺钾还会显著增加叶片镁含量;在供氮充足、缺钾条件下,水稻单位叶面积叶绿素含量显著提高,比叶重增加及叶色加深,根冠比显著降低<sup>[20]</sup>。缺镁还会造成橡胶树叶片出现黄化病,严重时会造成叶片大面积脱落;当施钾量过高时,橡胶幼苗叶片镁含量显著下降,并可能诱发缺镁症状;另外,镁肥施用过多也会造成橡胶苗钾营养水平下降,从而诱发缺钾症状<sup>[21]</sup>。

合理调控植株体  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  间的平衡是目前亟需关注的科学问题。

## 2 钾、镁营养在植物体养分吸收及转运过程中的作用

植物根系吸收的营养元素在特定机制的调控下向茎、叶中运转和分配,其中茎主要行使储存功能,叶片则利用各种营养元素合成大分子物质,因此,转运到叶片中的  $K^+$  和  $Mg^{2+}$  较多有利于植物的生长发育<sup>[26]</sup>。研究表明,供钾充足时,转运到叶片中的  $K^+$  在 35%~40% 之间,滞留在根部的仅不到 25%,而低钾胁迫下转运到叶片中的  $K^+$  显著增加,说明钾胁迫条件下植物会将有限的钾转运到叶片中满足植物生长发育所需<sup>[27]</sup>。植物对  $Mg^{2+}$  的吸收一般分为两部分,开始吸收速率较高,属于根系空间吸收,以后吸收速率减慢且稳定,表现为主动吸收过程<sup>[28]</sup>。植物种子中含  $Mg^{2+}$  较多,茎、叶次之,根系中含量较少。

植物生长初期,  $Mg^{2+}$  大多集中在叶片中, 而到结实期,  $Mg^{2+}$  多转运到籽实部分;  $Mg^{2+}$  与  $K^+$  相似, 在韧皮中可以自由移动, 当植株缺镁时,  $Mg^{2+}$  会从老叶转移到幼叶和生长点部位<sup>[29]</sup>。

研究已证实, 钾和镁在植株体吸收方面存在明显的拮抗作用, 但二者的拮抗仅存在单方面的作用<sup>[5]</sup>; 高钾会抑制作物根系对镁的吸收<sup>[30]</sup>, 增加外源营养液中  $K^+$  浓度会降低小麦地上部  $Mg^{2+}$  含量, 对根部  $Mg^{2+}$  含量无明显影响; 然而外源  $Mg^{2+}$  浓度则对地上部和根部  $K^+$  含量无影响<sup>[31]</sup>。丁玉川等<sup>[23]</sup>研究表明, 营养液中高  $K^+$  浓度会显著增加水稻叶片钾含量, 但当营养液中存在  $Mg^{2+}$  时, 能够显著降低叶片镁含量; 相反, 高  $Mg^{2+}$  浓度营养液条件下, 水稻叶片镁含量显著增加, 仅在高钾浓度营养液条件下叶片钾含量显著降低(表 1)。 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  的拮抗作用机理主要发生在根系至地上部的转运过程中<sup>[31]</sup>。这种拮抗作用可能是由于  $K^+$  和  $Mg^{2+}$  竞争拥有转运蛋白的质膜上的活性位点<sup>[1]</sup>。 $K^+$  除了与  $Mg^{2+}$  竞争质外体结合位点, 还可能竞争其他转运蛋白。研究表明, 非洲爪蟾卵母细胞(*Xenopus laevis*)表达的 II 类钾转运体 2 个家族成员(*OsHKT2;4* 和 *TaHKT2;1*)也可以转运  $Mg^{2+}$ <sup>[32]</sup>。Hariadi 等<sup>[33]</sup>研究表明, 蚕豆叶肉细胞对  $Mg^{2+}$  的吸收有两种系统, 一种是非选择性离子通道, 另外一种则是  $H^+/Mg^{2+}$  的交换器, 后者在低镁浓度下作用, 非选择性离子通道也转运钾, 这些可能会解释高  $K^+$  浓度抑制植物根系吸收利用  $Mg^{2+}$  的现象。 $K^+$  和  $Mg^{2+}$  的相互关系可能还受到土壤环境的影响。Malvi<sup>[34]</sup>研究发现,  $K^+$  的吸收受到土壤溶液 pH 的影响, 尤其是在高 pH 的土壤中, 钾、镁元素的拮抗作用会更加明显。综上所述, 重视钾、镁二者相互关系有助于改进植株体对养分的吸收、利用效率, 进而对培育养分高效吸收利用的新品种具有重要的参考意义。

表 1 钾和镁交互作用对水稻完全展开叶钾和镁含量的影响<sup>[23]</sup>  
Table 1 Effects of interaction between K and Mg on concentrations of Mg and K in second youngest fully expanded leaves of rice

营养液含量 (mmol/L)		叶片含量 (mg/g)	
K	Mg	K	Mg
0.5	0	14.64 + 1.67 d	1.19 + 0.04 e
6.0	0	44.03 + 0.91 a	0.89 + 0.04 e
0.5	1.0	10.82 + 0.27 e	4.09 + 0.05 b
6.0	1.0	35.09 + 1.75 b	2.43 + 0.16 d
0.5	5.0	12.78 + 0.74 e	6.51 + 0.17 a
6.0	5.0	31.24 + 0.84 c	3.26 + 0.05 c

注: 同列数据小写字母不同表示处理间差异达到  $P < 0.05$  显著水平。

### 3 钾、镁营养在植物品质形成方面的作用

农产品品质是影响消费的一个重要因素, 其往往决定着市场价格。钾和镁作为重要的品质元素, 在谷类、油料、水果及蔬菜类作物品质参数形成方面起着重要作用<sup>[2, 8]</sup>。在水稻结实期, 根系分泌的  $K^+$  与稻米垩白米率、垩白度、直链淀粉含量呈显著或极显著负相关, 钾营养水平对根系分泌物有调控作用, 进而影响稻米品质<sup>[35]</sup>。适量施钾显著提高棉铃纤维长度, 增幅达 2.7%, 初花期叶片钾含量与棉花纤维长度呈密切相关性, 缺钾会加速棉花早衰<sup>[22]</sup>。Smith<sup>[36]</sup>研究表明, 山核桃的叶片坏死率与籽实和叶片中的  $K^+$  浓度呈显著正相关, 叶片  $K^+$  浓度与恢复开花和体重/坚果比值呈负相关。叶面喷施钾肥可以增大柑橘果实、改善色泽和酸度<sup>[37]</sup>, 明显提高甜橙的可溶性糖和抗坏血酸含量<sup>[38]</sup>、Vc 含量、可滴定酸和非还原糖含量等<sup>[39]</sup>。

镁在光合作用和同化物转运方面具有重要的作用, 其含量高低直接影响作物品质; 施镁可以持续提高马铃薯干重、淀粉含量和马铃薯块茎硬度, 施镁量与马铃薯茎干的抗机械阻力呈正相关关系<sup>[8]</sup>。缺镁造成的初级代谢系统的受损, 不仅严重影响产量, 同时也会影响作物的品质。研究表明, 柑橘主产区由于土壤酸化造成镁严重缺乏, 叶片镁含量与柑橘果实中的总固形物及酸度呈明显正相关关系<sup>[40]</sup>。在缺镁的地区施入镁可以显著改善农作物品质, 尤其是在当品质参数形成时期主要取决于镁驱动的光合作用及同化物在体内的转运<sup>[8]</sup>。镁还可以促进碳水化合物向谷种中转运, 进而提高谷类作物的千粒重<sup>[41]</sup>。另外, 镁对甘蓝型油菜籽的出油率有显著提升的作用, 施用镁肥条件下甘蓝型油菜的菜籽出油率可以从 39.2% 提高至 40.8%。

在所有元素中, 钾作为番茄吸收最多的营养元素, 其被认为是决定番茄果实品质的关键因素; 但在含钾营养液中加入 50 ~ 80 mg/L 的  $Mg^{2+}$  既可以提高番茄产量也可以改善果实品质<sup>[42]</sup>。研究发现, 与单施氯化钾相比较, 氯化镁代替 25% 的氯化钾施用后可明显改善番茄果实品质和外观; 氯化镁与氯化钾配施主要增加了葡萄糖含量、镁含量以及果实干物质质量, 有效地降低了果实中的  $NO_3^-$  含量并提高了铁含量<sup>[43]</sup>。另外, 钾肥施用可以明显提高茶叶的茶多酚含量, 而当土壤钾和镁均缺乏的条件下, 施镁有提高茶多酚的作用, 而钾和镁的共同施用可以提高乌龙茶的风味<sup>[44]</sup>。除此之外, 在水果和蔬菜等作物上, 镁

与钙和钾等营养元素的比例更适合作为评价品质的指标,  $K^+/Mg^{2+}$  和  $K^+/Ca^{2+}$  浓度比值决定了水果、蔬菜等作物的品质参数, 如总固形物、酸度等, 其较单一的镁作为评价指标更为准确<sup>[8]</sup>。在热区橡胶树上的研究表明,  $Mg^{2+}/K^+$  还会影响胶乳的稳定性、排胶状况以及胶乳品质。综上所述, 探索合适的植株  $K/Mg$  对于合理施肥具有重要的意义。

## 4 钾、镁营养在植物生理生化特性方面的作用

渗透调节是钾的生理功能之一, 缺钾胁迫造成棉花幼苗叶片脯氨酸(Pro)含量增加, 而 Pro 在植物体内起到平衡细胞内外渗透压而又不影响细胞正常代谢功能的作用<sup>[27]</sup>。缺钾会造成棉花幼苗叶片的渗透势降低, 其主要原因可能与缺钾抑制碳水化合物和蛋白质合成, 致使小分子量物质(单糖、游离氨基酸等)积累有关<sup>[27]</sup>。水稻缺钾显著降低根系活力、根系柠檬酸含量以及根系  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  和  $NH_4^+$  的分泌量, 并加速根系衰老<sup>[44]</sup>。在小麦灌浆早期和中期, 施钾可以增加小麦弱势粒中玉米素、核苷、脱落酸以及乙烯的释放速率, 进而增加库强度<sup>[46]</sup>。另外, 钾在韧皮部装载方面也起着重要的作用。蒋德安等<sup>[47]</sup>研究表明, 低钾胁迫阻碍叶片中同化物的输出, 这可能与低钾胁迫影响韧皮部装载有关, 而并非叶片中蔗糖和能量的不足。镁作为调节阳离子, 参与调节离子平衡和细胞的渗透活性, 其与钾一起调节细胞膨压<sup>[1]</sup>。植物响应镁缺乏首先为根系, 其次为茎叶<sup>[18]</sup>。缺镁显著增加单萜类化合物比例, 降低倍半萜类成分比例<sup>[48]</sup>。缺镁还会显著增加强心甙含量<sup>[49]</sup>、酚类物质以及腐胺物质, 而细胞中腐胺的积累是植物响应胁迫的一种普遍反应, 进而调节生物大分子的结构和功能以及它们在体内的合成<sup>[50]</sup>。过量镁毒害会诱导 ABA 的生物合成, 通过 ABI1 增加 DELLA 蛋白积累, 进而抑制植物生长和发育<sup>[51]</sup>。在缺水农业生态系统中, 镁通过影响植物的夜间蒸腾、呼吸或根系分泌物来影响植物生物量水分利用率, 进而影响植物的生长发育<sup>[52]</sup>。综上所述, 关于钾和镁营养对植物生理生化参数的研究较多, 但是关于钾-镁营养交互效应在植物生理生化方面的研究仍需进一步进行探讨。

## 5 钾、镁营养对植物碳氮代谢的影响

### 5.1 碳代谢

缺钾可显著降低甘蓝型油菜的净光合速率、气孔导度和叶肉导度; 当叶片钾含量低于 0.78% 时, 光合

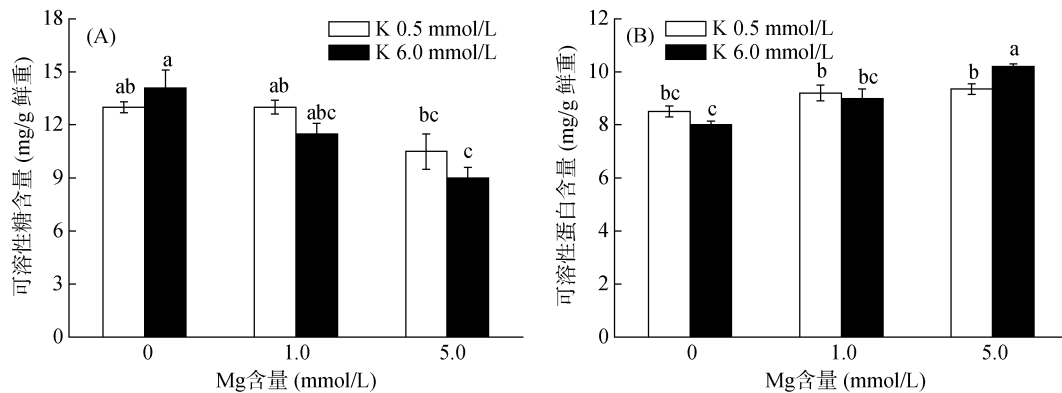
速率的主要限制因子为生化限制, 而当缺钾条件下, 光合速率开始下降阶段, 主要的限制因子则为叶肉导度<sup>[53]</sup>。甘蓝型油菜叶片净光合速率在缺钾条件下与碳水化合物含量呈负相关关系, 也说明了缺钾处理造成净光合速率下降是由低需求下的库的反馈调节所致<sup>[54]</sup>。另外, 缺钾还造成源-库失衡, 进而导致韧皮部装载受限, 造成碳水化合物在源叶片中大量积累<sup>[55]</sup>。Gautam 等<sup>[56]</sup>研究表明, 缺钾胁迫条件下, 水稻光合作用受限的同时, 伴随气孔导度和叶绿素含量下降, 但与 Pan 等<sup>[54]</sup>研究结果不同的是, 源器官中的碳水化合物的降低。钾对植株体碳代谢过程中的关键酶也有重要作用。增施钾肥可以提高棉花叶片的核酮糖 1,5-二磷酸羧化酶(Rubisco)、1,6-二磷酸果糖酶(CY FBpase)、蔗糖磷酸合成酶(SPS)、蔗糖合酶(SuSy)和淀粉酶的活性, 而降低可溶性酸转化酶(SAI)活性<sup>[57]</sup>。增施钾肥还可以提高水稻的耐涝能力、淹水之后的恢复生长能力、存活率以及光合作用等, 其主要是由于施钾提高了水稻体内碳水化合物、叶绿素含量、抗倒伏能力并有效延缓叶片早衰<sup>[56]</sup>。合理施钾还可以通过改善棉花叶片光合能力进而使干旱胁迫造成的影响降到最低<sup>[58]</sup>。

碳水化合物的形成需要通过补光系统捕获较高的光辐射, 从而进入光系统 I 和 II。镁作为重要的叶绿素中心原子在叶绿素 a/b(重要的光捕获物质)以及蛋白质合成等方面发挥重要作用<sup>[1]</sup>。光合作用作为植物生产的核心过程, 其主要取决于植物体镁的含量<sup>[8]</sup>。叶片中的 Mg 有 75% 参与蛋白质合成, 15% ~ 20% 与叶绿素合成密切相关<sup>[59]</sup>。植物缺镁主要表现在碳代谢受损、叶绿素含量和碳固定下降等异常生理过程<sup>[5]</sup>。Yang 等<sup>[60]</sup>研究表明, 缺镁导致柑橘幼苗叶片  $CO_2$  固定下降的主要原因则为光合电子传递能力下降所致。 $Mg^{2+}$  是碳水化合物代谢酶的活化剂或辅助因子, 因此镁缺乏会明显抑制碳代谢相关酶活性, 导致韧皮部装载蔗糖受阻, 从而造成碳水化合物在叶片中大量积累<sup>[1]</sup>。然而, 重新供应镁能迅速提高韧皮部蔗糖的转运<sup>[14]</sup>。Cakmak 和 Kirkby<sup>[6]</sup>研究表明, 在韧皮部装载位点 Mg-ATP 浓度下降可能是缺镁胁迫下蔗糖转运受阻的主要原因。叶片中淀粉的过量积累会反馈抑制光合速率, 还会抑制 Cab2 基因(叶绿素 a/b 结合蛋白基因 2, 负责编码叶绿素 a 和 b 的蛋白)的表达, 进而减少叶绿素的生物合成<sup>[12]</sup>。Cakmak 等<sup>[61]</sup>在大豆上的研究表明, 严重缺钾或缺镁均会造成大豆叶片的叶脉间严重失绿、叶绿素含量显著降低; 缺钾和缺镁的大豆叶片由于输导组织受损, 造成固定  $CO_2$  的光化学还原剂利用受限, 光合产物在叶片中大量积累, 进而

造成活性氧分子的光还原提高,导致活性氧毒害引起叶绿体受到破坏。

$K^+$ - $Mg^{2+}$ 的相互作用同样对植物碳代谢有较重要的影响。营养液中  $K^+$  浓度较低时,提高  $Mg^{2+}$  浓度对叶绿素含量无显著影响,而当营养液中  $K^+$  浓度较高时,提高  $Mg^{2+}$  浓度显著增加叶绿素含量<sup>[61]</sup>。由此表明,水稻植株叶片要保持相对较高的叶绿素含量时就需要保证充足的钾、镁供应。钾、镁相互作用对水稻净光合速率也有显著影响。高钾缺镁条件下,水

稻净光合速率与缺钾缺镁处理相比无显著变化,而无论高钾还是低钾,增加  $Mg^{2+}$  浓度,均显著提高水稻净光合速率<sup>[23]</sup>。当  $K^+$  供应充足时,缺镁显著提高水稻叶片可溶性糖含量,而提高  $Mg^{2+}$  浓度则显著降低叶片可溶性糖含量;适量施钾条件下,施镁可以显著增加可溶性蛋白含量,而缺镁降低可溶性蛋白含量(图 2)<sup>[15]</sup>。综上所述, $K^+$ - $Mg^{2+}$  的相互作用对植株体碳代谢的影响仍需从分子水平进行深入研究,以探明二者相互作用的机理。



(图中小写字母不同表示处理间差异达到  $P < 0.05$  显著水平)

图 2 钾和镁交互作用对水稻完全展开叶可溶性糖(A)和可溶性蛋白含量(B)的影响<sup>[15]</sup>

Fig. 2 Effects of interaction between K and Mg on soluble sugar content (A) and soluble protein content (B) in second youngest fully expanded leaves of rice

## 5.2 氮代谢

氮代谢作为植物体最基本的物质代谢之一,是植物正常生长的物质基础<sup>[62]</sup>。钾缺乏显著影响氮代谢,尤其是氨基酸和蛋白质代谢<sup>[57]</sup>。Hu 等<sup>[57]</sup>研究表明,缺钾增加游离氨基酸含量,这与缺钾导致蛋白酶和肽酶活性增加而促进蛋白质降解有关。缺钾还导致根部的硝酸盐转运减少而硝酸盐还原比例增加,这与缺钾条件下根部硝酸还原酶活性增加有关,这也说明钾在调节植株根部和地上部硝酸盐还原方面起着重要作用<sup>[63]</sup>。低钾胁迫显著降低橡胶幼苗叶片和茎皮的硝酸还原酶活性和可溶性蛋白质含量<sup>[64]</sup>。钾供应诱导提高燕麦硝酸还原酶和氨基转氨酶活性,对植株叶片氮代谢具有显著影响,钾供应还增加  $NO_3^-$  吸收及促进  $NO_3^-$  从根部向地上部的转运<sup>[65]</sup>。

植物缺镁也会影响氮代谢。有研究发现,缺镁条件下,龙眼叶片氮含量明显降低,叶片硝酸还原酶活性下降,游离氨基酸总量增加,水解氨基酸总量减少,蛋白质合成受阻而分解加剧,谷氨酸脱氢酶、脲酶、谷丙转氨酶、谷草转氨酶等活性受抑制<sup>[14]</sup>。Grzebisz 等<sup>[40]</sup>研究表明,通过提高作物体内  $Mg^{2+}$  含量来提高氮代谢,进而增加了氮的同化。另外,最新研究表明,拟南芥镁缺乏还会诱导至少 10 个氮转运子<sup>[5]</sup>。尽管如

此,镁对氮代谢的影响到目前研究仍较少。

镁对水稻硝酸还原酶活性的影响主要受供钾水平的影响。在缺钾条件下,镁缺乏或过量均会造成硝酸还原酶活性降低,而当钾(2.0 mmol/L)和镁(1 mmol/L)供应充足时,硝酸还原酶活性(NR)和谷酰胺合成酶(GS)的活性均可达到最高值;与硝酸还原酶有所不同的是,尽管有镁的供应,但是当钾缺乏或过量都会使水稻叶片的谷氨酰胺合成酶活性下降;K-Mg 交互作用对 NR 没显著影响,但对 GS 活性具有显著交互效应(图 3)<sup>[66]</sup>。阮建云等<sup>[67]</sup>研究表明,钾、镁的适量供应可以促进茶树对氮的吸收、提高茶树叶片 NR 活性。以上研究说明,维持植株体内  $K^+/Mg^{2+}$  适宜的比例在氮代谢方面具有重要作用,然而 K-Mg 交互作用对植株氮代谢的影响仍需进一步深入研究。

## 6 钾、镁营养对植物活性氧代谢的影响

活性氧在应答生物和非生物胁迫时具有双重作用,低水平的活性氧可能参与应激信号通路触发应激防御/驯化反应;而当活性氧过量积累时,就对细胞膜和细胞其他组成部分产生严重的伤害,造成氧胁迫甚至细胞死亡<sup>[68]</sup>。维持充足的钾营养是缓解或防止植株体遭受干旱胁迫和控制水分平衡的关键<sup>[69]</sup>。

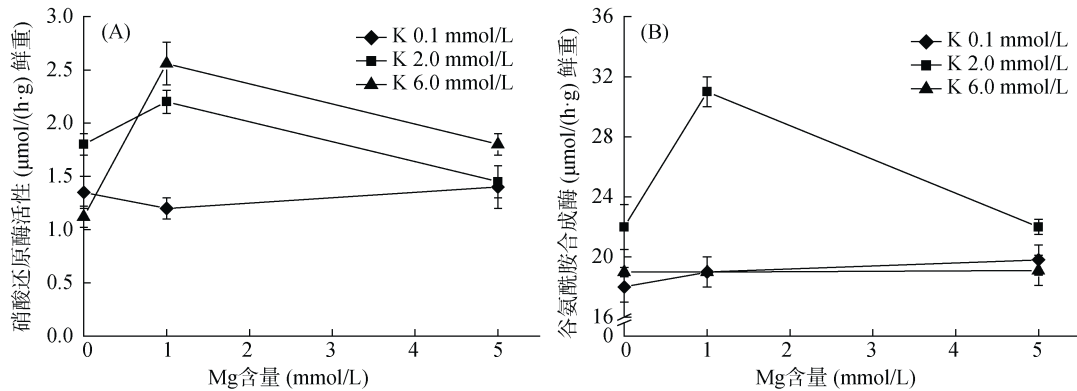


图 3 钾和镁交互作用对水稻叶片硝酸还原酶(A)和谷氨酰胺合成酶(B)活性的影响<sup>[66]</sup>

Fig. 3 Effects of interaction between K and Mg on NR (A) and GS (B) activities in rice leaves

Egilla 等<sup>[70]</sup>研究表明,增加植株体细胞叶绿体  $K^+$  含量可以有效阻止干旱胁迫下叶片光合作用受限,减轻活性氧伤害。另外,钾通过调节活性氧代谢在抗渍、抗寒和抗盐胁迫等方面发挥重要作用<sup>[71]</sup>。 $KNO_3$  和 NaCl 配施能有效缓解二者单独施用而造成的盐胁迫伤害,其主要通过减少电解质渗透率,降低丙二醛和可溶性糖含量,提高抗氧化酶活性,从而缓解活性氧产生所造成的伤害<sup>[72]</sup>。钾还在抗病虫害方面起着必不可少的作用。Amtmann 等<sup>[73]</sup>研究表明,草莓在高钾环境下极易感染炭疽病,而在钾胁迫条件下,抗病性得到大幅提高,研究发现低钾条件诱导活性氧和植物激素(生长素、乙烯和茉莉酸等)合成,从而提高了植株体的抗病能力。

缺镁降低桑树叶片的叶绿素含量,增加过氧化氢含量( $H_2O_2$ )、抗坏血酸(Ac)和过氧化酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)以及超氧化物歧化酶活性(SOD),降低脂质过氧化作用<sup>[74]</sup>。活性氧和细胞溶质  $Ca^{2+}$  是响应镁缺乏的主要信号因子,该结果也印证了抗氧化作用是植物对镁缺乏所诱导活性氧的早期响应<sup>[6]</sup>。另外,活性氧也会抑制光合作用酶活性,光合作用受损导致叶绿体无效电子和吸收能量的积累,促进活性氧物质产生,造成叶绿素的光氧化和叶绿体膜脂质损伤,高光强加重缺 Mg 的症状也印证了这一点<sup>[18]</sup>。由此可见,植物应答缺镁胁迫是一个复杂的系统,其分子调控机制尚不清楚,需进一步研究。随着基因组学、转录组学、非编码 RNA 和蛋白质组学技术的快速发展可以帮助我们阐明在植物镁缺乏的信号通路。

钾、镁互作效应在水稻活性氧代谢方面的研究有相关报道。外源  $K^+$  浓度过高而  $Mg^{2+}$  浓度缺乏时会加重水稻缺镁症状,显著增加过氧化物酶和过氧化氢酶活性,进而造成水稻植株体氧化损害<sup>[7]</sup>。丁玉川等<sup>[23]</sup>

研究表明,在高镁浓度条件下,不同钾浓度对水稻叶片 SPD 活性具有明显的影响;另外,当高钾浓度条件下,镁浓度的增加会显著降低水稻叶片 POD 活性;镁与钾的交互作用对水稻叶片 SOD、POD 活性均具有显著影响。Hilman<sup>[19]</sup>在水稻上的研究表明,供钾充足时低镁胁迫造成地上部超氧化物歧化酶和过氧化物歧化酶活性增加,而无论供镁充足与否,低钾胁迫均会降低超氧化物歧化酶活性。综上所述,尽管前人对 K-Mg 交互作用在活性氧代谢方面有相关研究,但是大多数集中在水稻等禾本科作物,而且钾、镁互作机制缺乏深入研究。

## 7 土壤中的钾、镁离子

土壤中的钾、镁存在形态可以划分为矿物态、非交换性态、交换性态和水溶性态。阳离子交换能力低的酸性土壤和雨量大的热带地区容易导致  $K^+$  和  $Mg^{2+}$  的淋失<sup>[75]</sup>。大气沉降也是引起  $K^+$  和  $Mg^{2+}$  淋失的主要因子;对森林土壤连续 30 a 的监测表明,由于淋洗作用造成的土壤  $Mg^{2+}$  随年代呈直线下降的趋势<sup>[75]</sup>。另外,  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  间的拮抗作用也是造成养分离子淋失的一个重要因素。Jalali 等<sup>[76]</sup>研究表明,如果盐碱地长期接受高  $Mg^{2+}$  浓度灌溉水进行灌溉,可能会导致土壤中  $K^+$  被大量淋洗出,该情况下,钾肥的管理制度应该适当进行调整。土壤的化学和物理性状也是影响  $K^+$  和  $Mg^{2+}$  有效性的重要参数<sup>[5]</sup>。有研究表明,土壤  $H^+$  含量明显影响黏土矿物中  $K^+$  的释放<sup>[77-78]</sup>。成土母质为伊利石和蛭石的土壤的表面、边缘和内部位点可以吸附  $K^+$ ,其中表面和边缘位点释放交换性  $K^+$ ,当  $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  到达这些吸附位点时,  $K^+$  会进一步被解吸,主要原因是  $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  具有较大的水合半径,扩展了黏土内部空间<sup>[76]</sup>。

近些年来,农业生产中钾肥施用逐渐得到重视,

施钾量逐步提高,但由于  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  的拮抗作用,土壤中镁的有效性进一步降低。土壤中  $K^+$ - $Mg^{2+}$  不平衡还会造成植物对病虫害抵抗能力下降。研究表明,土壤中  $K^+$ - $Mg^{2+}$  浓度比例失衡会导致香蕉对巴拿马病害(尖孢镰刀菌致病)的抗性下降。另外,土壤  $K^+$ - $Mg^{2+}$  浓度比例失衡还会造成香蕉树对香蕉象甲虫的抵抗力下降,这种虫害在宿主植物中改变果胶或产生甲基纤维素,影响植物生长<sup>[79]</sup>。也有研究指出,土壤中代换性  $Mg^{2+}$  含量虽然不低,但是活性钾/镁比值大,橡胶树同样容易出现缺镁黄叶病。综上所述,维持土壤  $K^+$ - $Mg^{2+}$  平衡可以起到有效的预防病虫害的作用。

## 8 展望

钾和镁是植物生长发育必需的营养元素,缺乏和过量均会影响植物的正常生长发育。随着农业科技水平的发展,种植模式的改变,农业系统中的钾、镁等元素投入和支出不平衡的现象也在逐年加剧,进而影响作物的生长状况及产量水平,限制农业发展。本文通过对前人的研究成果进行凝练,主要概述了钾、镁营养以及二者交互效应在植物-土壤系统中的研究进展,重点论述了钾、镁营养及其交互作用在植物生长发育、养分吸收及转运、品质、生理生化、碳氮代谢、活性氧代谢等方面的作用,并探讨了钾、镁营养在土壤中的有效性及其影响因素,为深入研究相关机理提供一定的文献基础。植物钾和镁营养元素的研究已获得了大量的成果及一定的进展,但仍有一些方面需要进一步研究。重视镁在植物体内的生理作用,深入研究镁营养水平与蔗糖在韧皮部装载的关系;加强研究镁胁迫条件下植物对  $Mg^{2+}$  的吸收规律;加强 K-Mg 元素交互作用的酶学机理研究;深入研究土壤矿质钾和镁释放的影响因素,如土壤 pH 等。另外,通过本文综述,也希望各学科的科学家的提高对钾、镁营养研究的重视,加强该领域的研究工作,为我国农业生产系统养分高效管理做出应有的贡献。

## 参考文献：

- [1] Marschner P. Marschner's mineral nutrition of higher plants[M]. 3rd. London: Academic Press, 2011
- [2] Zörb C, Senbayram M, Peiter E, et al. Potassium in agriculture-status and perspectives[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(9): 656-669
- [3] Schonewille J Th. Magnesium in dairy cow nutrition: An overview[J]. Plant and Soil, 2013, 368(1/2): 167-178
- [4] Joy E J M, Young S D, Black C R, et al. Risk of dietary magnesium deficiency is low in most African countries based on food supply data[J]. Plant and Soil, 2013, 368(1/2): 129-137
- [5] Guo W L, Nazim H, Liang Z S, et al. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem[J]. The Crop Journal, 2016, 4(2): 83-91
- [6] Cakmak I, Kirkby E A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage[J]. Physiologia Plantarum, 2010, 133(4): 692-704
- [7] Römheld V, Kirkby E A. Research on potassium in agriculture: Needs and prospects[J]. Plant and Soil, 2010, 335(1/2): 155-180
- [8] Gerendás J, Fühns H. The significance of magnesium for crop quality[J]. Plant and Soil, 2013, 368(1/2): 101-128
- [9] 张福锁. 中国钾肥施用现状与发展趋势[C]. 中国无机盐工业协会钾盐, 2011
- [10] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田土壤钾平衡研究进展与展望[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 920-930
- [11] 白由路, 金继运, 杨俐苹. 我国土壤有效镁含量及分布状况与含镁肥料的应用前景研究[J]. 中国土壤与肥料, 2004(2): 3-5
- [12] 蒋式洪, 何云峰. 作物镁素营养与镁肥应用前景[J]. 化肥工业, 1994(1): 17-18
- [13] 黄东风, 王利民, 李卫华, 等. 镁肥对小白菜产量、矿质元素吸收及土壤肥力的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 427-432
- [14] Hermans C, Verbruggen N. Physiological characterization of Mg deficiency in Arabidopsis thaliana[J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(418): 2153
- [15] Ding Y C, Chang C R, Wen L, et al. High potassium aggravates the oxidative stress induced by magnesium deficiency in rice leaves[J]. Pedosphere, 2008, 18(3): 316-327
- [16] 何忠俊, 华珞, 白玲玉, 等. 土壤-植物系统中氮锌交互作用研究进展[J]. 生态环境学报, 2001, 10(2): 133-137
- [17] Tewari R K, Kumar P, Sharma P N. Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 108(1): 7-14
- [18] Hermans C, Vuylsteke M, Coppens F, et al. Early transcriptomic changes induced by magnesium deficiency in Arabidopsis thaliana reveal the alteration of circadian clock gene expression in roots and the triggering of abscisic acid-responsive genes[J]. New Phytologist, 2010, 187(1): 119-131
- [19] Hilman. 钾镁施用对水稻植株生长、组织形态及抗氧化酶活性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013
- [20] 薛欣欣, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同施氮量下缺钾对水稻叶片营养及生理性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1494-1502
- [21] 许能琨. 氮镁磷钾肥对橡胶幼树生长量、叶片矿质养分含量和镁缺乏症的影响[J]. 热带作物学报, 1981, 2(2): 24-34
- [22] Tsialtas I T, Shabala S, Baxevanos D, et al. Effect of potassium fertilization on leaf physiology, fiber yield and quality in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under irrigated

- Mediterranean conditions[J]. *Field Crops Research*, 2016, 193: 94–103
- [23] 丁玉川. 水稻镁营养特性及镁钾营养互作效应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007
- [24] 林葆. 我国平衡施肥中的中量和微量元素营养问题[C]. 中国平衡施肥报告会, 2001
- [25] Suchartgul S, Maneepong S, Issarakraisila M, et al. Fertilization of rubber growing farmers in *chumphon, surat thani, and nakhon Si thammarat* provinces[J]. *Rubber Thai Journal*, 2012, 1: 19–31
- [26] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2006
- [27] 华含白, 李召虎, 田晓莉. 辽棉 18 与新棉 99B 苗期耐低钾能力的差异及其机制[J]. *作物学报*, 2009, 35(3): 475–482
- [28] Högberg P, Jensen P, Näsholm T, et al. Uptake of  $^{24}\text{Mg}$  by excised pine roots: A preliminary study[J]. *Plant and Soil*, 1995, 172(2): 323–326
- [29] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2005
- [30] Sun X. Correlated biogeographic variation of magnesium across trophic levels in a terrestrial food chain[J]. *Plos One*, 2013, 8(11): e78444
- [31] Ohno T, Grunes D L. Potassium-magnesium interactions affecting nutrient uptake by wheat forage[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(6): 685–690
- [32] Horie T, Brodsky D E, Costa A, et al.  $\text{K}^+$  transport by the OsHKT2;4 transporter from rice with atypical  $\text{Na}^+$  transport properties and competition in permeation of  $\text{K}^+$  over  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Ca}^{2+}$  ions. *Plant Physiology*, 2011, 156(3): 1493–1507.
- [33] Hariadi Y C, Shabala S N. Screening broad beans (*Vicia faba* L.) for magnesium deficiency. 1. Growth characteristics, visual deficiency symptoms and plant nutritional status[J]. *Functional Plant Biology*, 2004, 31(5): 529–537
- [34] Malvi U R. Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium[J]. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24(1): 106–109
- [35] 刘立军, 常二华, 范苗苗, 等. 结实期钾、钙对水稻根系分泌物与稻米品质的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(4): 661–669
- [36] Smith M W. Relationship of leaf necrosis and defoliation to phosphorus and potassium concentrations in selected tissue and to certain fruit quality parameters of pecan[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 125(2): 117–122
- [37] Tiwari K N. Diagnosing potassium deficiency and maximizing fruit crop productivity[J]. *Better Crops*, 2005, 89(1): 29–31
- [38] Lester G E, Jifon J L, Makus D J. Impact of potassium nutrition on food quality of fruits and vegetables: A condensed and concise review of the literature[J]. *Better Crops*, 2010, 94(1): 18–21
- [39] Nasir M, Khan A S, Basra S M A, et al. Foliar application of moringa leaf extract, potassium and zinc influence yield and fruit quality of ‘Kinnow’ mandarin[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 210: 227–235
- [40] Koo R C J, Young T W. Correcting correcting magnesium deficiency of limes grown on calcareous soils with magnesium nitrate[J]. *Proc. Fla. St. Hort. Soc.*, 1969, 82: 274–278
- [41] Grzebisz W. Crop response to magnesium fertilization as affected by nitrogen supply[J]. *Plant and Soil*, 2013, 368(1/2): 23–39
- [42] Hao X, Papadopoulos A P, Paine R. Effects of calcium and magnesium in nutrient solutions on growth, yield and quality of rockwool grown tomato[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 35(1): 15–20
- [43] Chapagain B P, Wiesman Z. Effect of potassium magnesium chloride in the fertigation solution as partial source of potassium on growth, yield and quality of greenhouse tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, 99(3): 279–288
- [44] Ruan J Y, Gerendás J. Absorption of foliar-applied urea- $^{15}\text{N}$  and the impact of low nitrogen, potassium, magnesium and sulfur nutritional status in tea (*Camellia sinensis* L.) plants[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 61(4): 653–663
- [45] Liu L J, Chang E H, Fan M M, et al. Effects of potassium and calcium on root exudates and grain quality during grain filling[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(4): 661–669
- [46] Lv X K, Li T, Wen X C, et al. Effect of potassium foliar application post-anthesis on grain filling of wheat under drought stress[J]. *Field Crops Research*, 2017, 206: 95–105
- [47] 蒋德安, 翁晓燕, 洪健, 等. 低钾营养条件下水稻源叶碳同化物输出的障碍[J]. *植物生理学报*, 1994, 20(2): 137–144
- [48] Farzadfar S, Zarinkamar F, Hojati M. Magnesium and manganese affect photosynthesis, essential oil composition and phenolic compounds of *Tanacetum parthenium*[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 112: 207
- [49] Sahin G, Verma S K, Gurel E. Calcium and magnesium elimination enhances accumulation of cardenolides in callus cultures of endemic *Digitalis* species of Turkey[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, 73(73C): 139–143
- [50] Sinilal B, Ovidia R, Nissim-Levi A, et al. Increased accumulation and decreased catabolism of anthocyanins in red grape cell suspension culture following magnesium treatment[J]. *Planta*, 2011, 234(1): 61–71
- [51] 盛翊佳, 丁亚文, 傅媛焯, 等. 植物应答镁营养胁迫机理的研究进展[J]. *植物学研究*, 2015, 4(5): 97–105
- [52] Tränkner M, Jáklí B, Tavakol E, et al. Magnesium deficiency decreases biomass water-use efficiency and increases leaf water-use efficiency and oxidative stress in barley plants[J]. *Plant and Soil*, 2016, 406(1): 1–15
- [53] Lu ZF, Ren T, Pan YH, et al. Differences on photosynthetic limitations between leaf margins and leaf centers under potassium deficiency for *Brassica napus* L.[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21725
- [54] Pan Y H, Lu Z F, Lu J W, et al. Effects of low sink demand on leaf photosynthesis under potassium deficiency[J]. *Plant Physiology Biochemistry*, 2017, 113: 110–121



- [55] Wright P R. Premature senescence of cotton (*Gossypium hirsutum* L.)-Predominantly a potassium disorder caused by an imbalance of source and sink[J]. Plant and Soil, 1999, 211(2): 231-239
- [56] Gautam P, Lal B, Tripathi R, et al. Beneficial effects of potassium application in improving submergence tolerance of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 128: 18-30
- [57] Hu W, Lv X B, Yang J S, et al. Effects of potassium deficiency on antioxidant metabolism related to leaf senescence in cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. Field Crops Research, 2016, 191: 139-149
- [58] Zahoor R, Dong H R, Abid M, et al. Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in cotton by enhancing photosynthesis and carbohydrate metabolism[J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 137: 73-83
- [59] White P J, Broadley M R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets- iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine[J]. New Phytologist, 2009, 182(1): 49-84
- [60] Yang L T, Yang G H, You X, et al. Magnesium deficiency-induced changes in organic acid metabolism of Citrus sinensis, roots and leaves[J]. Biologia Plantarum, 2013, 57(3): 481-486
- [61] Cakmak I, Hengeler C, Marschner H. Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium deficiency[J]. Journal of Experimental Botany, 1994, 45(278): 1245-1250
- [62] 许振柱, 朱广生. 植物氮代谢及其环境调节研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 511-516
- [63] Förster F, Jeschke W D. Effects of potassium withdrawal on nitrate transport and on the contribution of the root to nitrate reduction in the whole plant[J]. Journal of Plant Physiology, 1993, 141(3): 322-328
- [64] 吴敏, 何鹏, 韦家少, 等. 钾水平对巴西橡胶树幼苗叶片叶绿素及可溶性蛋白含量的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(28): 58-62
- [65] Dong H Z, Tang W, Li Z H, et al. On potassium deficiency in cotton-disorder, cause and tissue diagnosis[J]. Agriculturae Conspectus Scientificus, 2004, 69(2/3): 2-3
- [66] Ding YC, Luo W, Xu G. Characterisation of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice[J]. Annals of Applied Biology, 2006, 149(2): 111-123
- [67] 阮建云. 茶树钾镁营养特性与养分管理技术研究的回顾与展望[J]. 中国农业科学, 2007, 40(增刊): 256-266
- [68] Dat J, Vandenberghe S, Vranov á E, et al. Dual action of the active oxygen species during plant stress responses[J]. Cellular & Molecular Life Sciences Cmls, 2000, 57(5): 779-795
- [69] Abdel W A M, Abdalla M H. The role of potassium fertilizer in nodulation and nitrogen fixation of faba bean (*Vicia faba* L.) plants under drought stress[J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 20(2): 147-150
- [70] Egilla J N, Davies F T, Drew M C. Effect of potassium on drought resistance of Hibiscus rosa-sinensis cv. Leprechaun: Plant growth, leaf macro- and micro- nutrient content and root longevity[J]. Plant and Soil, 2001, 229(2): 213-224
- [71] Wang N, Hua H, Eneji A E, et al. Genotypic variations in photosynthetic and physiological adjustment to potassium deficiency in cotton (*Gossypium hirsutum*) [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology Biology, 2012, 110(9): 1-8
- [72] Zheng Y, Jia A, Ning T, et al. Potassium nitrate application alleviates sodium chloride stress in winter wheat cultivars differing in salt tolerance[J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165(14): 1455-1465
- [73] Amtmann A, Troufflard S, Armengaud P. The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants[J]. Physiologia Plantarum, 2008, 133(4): 682-691
- [74] Tewari R K, Kumar P, Sharma P N. Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 108(1): 7-14
- [75] Johnson D W, Todd D E, Trettin C F, et al. Decadal changes in potassium, calcium, and magnesium in a deciduous forest soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(6): 1795-1805
- [76] Jalali M. Effect of sodium and magnesium on kinetics of potassium release in some calcareous soils of western Iran[J]. Geoderma, 2008, 145(3): 207-215
- [77] Schneider A, Tesileanu R, Charles R, et al. Kinetics of soil potassium sorption-desorption and fixation[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44(1/2/3/4): 837-849
- [78] 谢建昌, 陈际型, 朱月珍, 等. 红壤区几种主要土壤的镁素供应状况及镁肥肥效的初步研究[J]. 土壤学报, 1963, 8(12): 49-51
- [79] Smithson P C, McIntyre B D, Gold C S, et al. Potassium and magnesium fertilizers on banana in Uganda: Yields, weevil damage, foliar nutrient status and DRIS analysis[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 69(1): 43-49

## Progress of Potassium, Magnesium and Their Interaction in Plant-soil System

XUE Xinxin, WU Xiaoping, WANG Wenbin, LUO Xuehua, WANG Dapeng, ZHANG Yongfa, ZOU Bixia  
(*Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Science, Danzhou, Hainan 571737, China*)

**Abstract:** Potassium (K) and magnesium (Mg) are important nutrients elements for plant growth and development. K, Mg and their interaction, and ion balance are focused gradually by scientists in recently years. This paper reviewed the study work on K, Mg and their interaction over the past several decades and looked forward to the research direction in the future. It discussed mainly the plants growth and development, nutrients uptakes and translocations, plants quality, physiology and biochemistry, carbon and nitrogen metabolism, active oxygen metabolism, and the potassium and magnesium cations in soil. In addition, it also discussed some prospects in the research on K, Mg and their interaction.

**Key words:** Potassium; Magnesium; Interaction