

不同供镁浓度对芝麻生长及养分累积的影响

童佳峰, 韩配配[§], 廖祥生, 张秀荣, 李银水, 胡小加, 谢立华, 顾焯明, 张志华, 廖星, 秦璐*
(中国农业科学院油料作物研究所/农业部油料作物生物学与遗传育种重点开放实验室, 湖北武汉, 430062)

摘要:为促进芝麻高产营养与栽培, 探讨不同镁浓度对芝麻生长和养分累积的影响。以芝麻品种中芝13为材料, 设置5个供镁浓度(0、50、100、500和1 000 $\mu\text{mol/L}$), 30d后测定不同处理芝麻生物量、根系形态参数、氮磷钾含量等指标。结果显示: 不同供镁浓度对芝麻生长有着不同程度的影响, 镁浓度在100 $\mu\text{mol/L}$ 及以下时, 芝麻出现缺素症状, 表现为植株矮小、老叶失绿黄化, 根系生长受阻。芝麻植株生物量随着供镁浓度增加而增加, 根系生长对镁浓度的变化尤为敏感, 缺镁抑制根系生长, 与1 000 $\mu\text{mol/L}$ 相比, 3个缺镁浓度(0、50和100 $\mu\text{mol/L}$)处理下根系干重分别减少97.83%、93.88%和86.65%, 且侧根长、侧根数、根表面积、根体积以及根平均直径显著降低。同时, 随着镁浓度增加, 芝麻叶片和根系中氮、磷、钾累积量显著上升, 说明适宜供镁有利于芝麻生长和养分累积。此外, 与供镁浓度500 $\mu\text{mol/L}$ 相比, 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 处理下的芝麻植株, 叶片与根系中钙的积累量均显著降低, 暗示芝麻在钙和镁吸收方面可能存在拮抗关系。

关键词:芝麻; 镁; 缺镁; 根系; 养分累积

中图分类号: S565.3; S311 文献标识码: A 文章编号: 1007-9084(2019)02-0226-06

Effect of magnesium on sesame (*Sesamum indicum* L.) growth and nutrient accumulation

TONG Jia-feng, HAN Pei-pei[§], LIAO Xiang-sheng, ZHANG Xiu-rong, LI Yin-shui,
HU Xiao-jia, XIE Li-hua, GU Chi-ming, ZHANG Zhi-hua, LIAO Xing, QIN Lu*

(Oil Crops Research Institute of Chinese Academy of Agriculture Sciences, Key Laboratory of
Biology and Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China)

Abstract: For high yield nutrition of sesame (*Sesamum indicum* L.), effects of magnesium (Mg) on nutrient accumulation was investigated using cultivar Zhongzhi 13. Aquaculture was carried out with 5mg concentrations treatments, including 0, 50, 100, 500 and 1 000 $\mu\text{mol/L}$. Sesame plant biomass, root morphological parameters and the content of macronutrient (nitrogen, phosphorus and potassium) were measured after 30 days of different Mg treatments. Results showed that different Mg concentrations had different effects on sesame growth. The plants exhibited typical symptoms of Mg deficiency under 100 $\mu\text{mol/L}$. They had short stature with chlorotic and yellowish old leaves, and their roots were slowed down. Biomass of sesame plants increased with the Mg concentration, but root growth was particularly sensitive to the change of Mg concentration. Magnesium deficiency inhibited root growth and development. Compared with 1 000 $\mu\text{mol/L}$, root growth were dramatically suppressed by 97.83%, 93.88% and 86.65% in root dry weight under 0, 50 and 100 $\mu\text{mol/L}$ Mg respectively. Lateral root length, lateral root number, root surface area, root volume and the average diameter of roots were also significantly reduced under 3 Mg-deficiency treatments. For other nutrients, nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) accumulations in leaves and roots were dramatically enhanced with the increase of Mg. It indicated that the optimal Mg concentration is beneficial to other nutrients of sesame plants. Furthermore, compared with 500 $\mu\text{mol/L}$, the accumulations of calcium (Ca) in leaves and roots were significantly decreased under 1 000 $\mu\text{mol/L}$, illustrating an antagonistic e-

收稿日期: 2018-07-02

基金项目: 中国农业科学院创新工程(CAAS-ASTIP-2013-OCRI)

作者简介: 童佳峰(1995-), 男, 硕士研究生, 从事植物营养生理研究, E-mail: 1003512333@qq.com

[§] 韩配配为并列第一作者

* 通讯作者: 秦璐(1984-), 女, 博士, 从事植物营养生理与施肥研究, E-mail: qinlu-123@126.com

ffect between Ca and Mg absorption in sesame plants.

Key words: sesame; magnesium; Mg deficiency; root; nutrient accumulation

镁是植物必需的矿物营养元素^[1],也是叶绿素的中心离子,对维持叶绿体结构起着重要作用^[2]。同时,镁还是光合作用、呼吸作用、糖酵解和三羧酸循环中多种酶的活化剂^[3]。近些年,随着化肥的大量施用和作物产量不断提高,土壤离子间的相互作用影响植物对镁的吸收,作物缺镁现象逐渐凸显,直接影响作物地上部光合作用及光合产物的合成,导致作物生长发育受阻,作物产量和品质显著降低^[4]。例如北方番茄、蔬菜等作物在温室集约栽培下,肥料的过量施用导致土壤中钾离子含量过高,而造成阳离子比例失调,诱导番茄发生缺镁症^[5-8]。另一方面,镁过量同样会影响作物的生长和养分吸收,主要造成农作物吸收营养元素时离子之间增强拮抗作用,影响作物对钙、钾离子的吸收。在甘薯^[9]和油菜^[10]上缺镁主要表现为生长受阻,植株磷、钾、钙等含量有所增加。缺镁还破坏了大麦^[11]体内活性氧的代谢平衡,引起膜脂过氧化程度的加剧。同时,国内学者在缺镁对作物光合生理的影响方面也做了大量研究,包括龙眼、青枣、纽荷尔脐橙、菜薹、黄瓜等作物,研究结果表明缺镁会导致叶片光合色素含量、光合参数、叶绿素 a 荧光动力学参数降低^[12-16]。因此,研究不同供镁浓度对作物生长及养分累积的影响对提高作物产量和品质具有重要意义。

芝麻是世界上重要的优质油料作物之一,中国芝麻年种植面积 80 万公顷,总产量约 75 万吨,居世界首位^[17]。同时,芝麻是典型夏季种植的油料作物,喜温、喜光,在 3-4 个月内可完成整个生育期。但近年来为了追求高产而大量施用化肥,导致芝麻种植地区普遍存在不平衡施肥现象,不同区域土壤养分限制因子也存在差异。由此中量元素镁也正在成为芝麻高产优质的养分限制因子^[18]。目前镁营养及芝麻应对缺镁的机理研究尚未见报道。因此,本研究以芝麻品种中芝 13 为研究材料,通过设置不同的供镁浓度处理,采用营养液培养方式从植株表型、根系形态、养分累积等方面进行系统研究,了解镁对芝麻生长及养分累积的影响,探讨适宜的供镁浓度,以期为芝麻镁营养生理研究及其高产保优栽培施肥技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2016 年 7 月至 8 月在中国农业科学院油料作物研究所温室进行,试验材料选用芝麻品种中芝 13^[19],由中国农业科学院油料作物研究所芝麻遗传育种课题组提供。试验采用营养液水培方式,以改良后的 1/2 浓度 Hoagland 营养液作为对照^[16],在此配方基础上根据不同镁浓度处理进行调整。根据前人在缺镁方面的相关研究^[16,20,21]以及前期预试验结果,试验共设置 5 个供镁浓度,分别为 0、50、100、500 和 1 000 $\mu\text{mol/L}$,其中 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 为 1/2 浓度 Hoagland 营养液中的镁浓度,营养液中镁来源为 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,因此,缺镁处理通过补充硫酸钾使不同处理营养液中 SO_4^{2-} 浓度保持一致。

试验挑选饱满一致芝麻种子纯水浸泡 20min 后,5% 的 NaClO_4 溶液消毒 20min,用纯水反复冲洗 5~6 次后均匀播于 1/4 浓度 Hoagland 营养液浸润的纱布上育苗。育苗 5d 后选取长势一致的幼苗,移入盛有不同供镁浓度营养液的塑料周转箱中,植株固定于定植板上,每盆种植 24 株芝麻幼苗。移苗第一周采用 1/4 浓度的营养液培养,从第二周开始采用 1/2 浓度营养液进行培养。试验每个处理设置 4 次生物学重复。

1.2 植株表型观察及生物量测定

不同供镁浓度处理 30d 后统一进行拍照记录植株表型,拍照相机型号为 Nikon D800。植株生物量测定:分别收获不同供镁浓度处理下植株的地上部和地下部,105℃ 杀青 30min 后,75℃ 烘干至恒重后用万分之一天平准确称取干重。

1.3 植株根系形态的测定

不同供镁浓度处理的植株收获后,用直尺量取其主根长,并用植物根系扫描仪(EPSON P700)获取根部图片,用 Win RHIZO 根系分析软件(Pro 2012b)计算不同处理芝麻的总根长、根表面积、根尖数、根直径等根系形态指标。

1.4 植株养分含量测定

植株全氮测定采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮,凯氏定氮法测定氮含量^[22];植株磷和镁含量测定采用浓 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 消煮,用 ICP-OES(Optima7000DV)直接测定读数^[23];植株钾含量测定采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮,火焰光度计法测定。

植物养分积累量(mg/plant) = 养分含量(mg/g) × 干物质质量(g)。

1.5 数据分析与处理

用 Microsoft Excel 2010 软件进行平均数及标准误差计算,利用 SAS 软件(9.4 版)统计进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同供镁浓度下植株表型观察

镁供应不足,芝麻出现营养缺乏症状。如图 1 所示,不同供镁浓度处理 30d 后,与较高浓度相比,0 $\mu\text{mol/L}$ (完全缺镁)、50 和 100 $\mu\text{mol/L}$ 镁浓度处理均出现了不同程度的缺镁症状,表现为植株矮小,整株叶片小而薄,叶脉绿色,叶脉间出现不同程度失绿,老叶严重失绿变黄,出现褐色斑点,叶片边缘出现褶皱。同时,不同供镁浓度处理对根系生长表现出不同程度的影响,0、50 和 100 $\mu\text{mol/L}$ 镁浓度处理下芝麻根系生长受到抑制,其中完全缺镁处理的根系长度明显短于其它处理,几乎停滞生长。此外,从图 1 可以看出,供镁浓度为 500 和 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 时植株生长状况没有明显差异,植株株型饱满,叶片大而光滑,颜色翠绿有光泽。在本试验设置的 5 个镁浓度中,0、50 和 100 $\mu\text{mol/L}$ 表现出较为典型的缺镁症状,为缺镁胁迫处理。植株缺镁的严重程度随着营养液中供镁浓度的降低而增加,同时芝麻生长随着供镁浓度的增加呈递增趋势。

2.2 不同供镁浓度对芝麻生物量的影响

不同供镁浓度处理不同程度地影响了芝麻干物质的积累,植株地上部和根系干物质重的变化趋



图 1 不同供镁浓度对芝麻生长表型的影响
Fig.1 Effects of different magnesium concentration ($\mu\text{mol/L}$) on growth performance of sesame

势相似(图 2)。随着供镁浓度的增加芝麻生物量也逐渐增加,同时缺镁胁迫严重抑制了芝麻的生长。从图 2A 可以看出,供镁浓度 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 时芝麻地上部干重最高,但是与 500 $\mu\text{mol/L}$ 相比地上部干重无显著差异。0 ~ 100 $\mu\text{mol/L}$ 的 3 个缺镁浓度处理下,地上部干重显著降低,分别比 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 降低了 97.3%、92.4% 和 81.2%。从图 2B 根系干重结果可以看出,供镁浓度 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 时根系干重最高,500 $\mu\text{mol/L}$ 时根系干重下降 10.78%,缺镁胁迫对芝麻根系生长发育的抑制作用更为明显,表现在根系干重显著降低,3 个缺镁浓度处理下,根系干重分别减少 97.8%、93.9% 和 86.6% (图 2B)。综上所述,缺镁胁迫显著抑制了植株的生长,且随着供试镁浓度的增加芝麻地上部和根干重呈递增趋势。

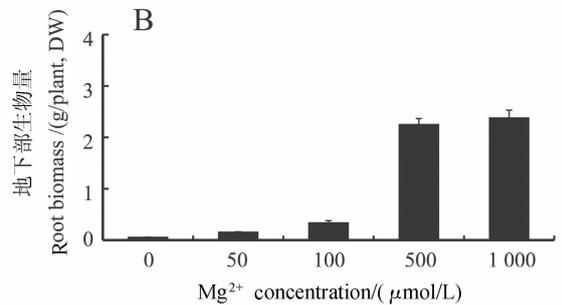
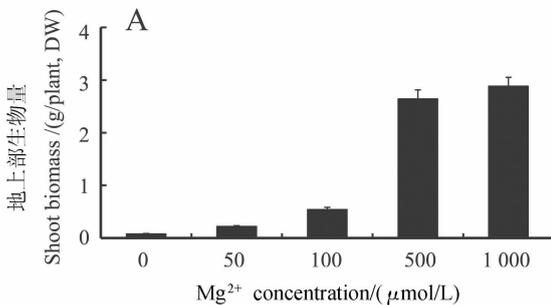


图 2 不同供镁浓度对芝麻干重的影响

Fig.2 Effects of different magnesium concentration on biomass of sesame

2.3 不同供镁浓度对芝麻根系生长的影响

不同供镁浓度对芝麻根系生长的影响较为明显。从图 3 可以看出,不同供镁浓度对芝麻主根长有着不同程度的影响。完全缺镁处理显著抑制了主根长,主根长比 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 镁浓度时减少了 53.8%,说明在完全缺镁条件下,芝麻根系生长对镁

的基本需求得不到满足,主根基本停止生长。在 0 ~ 100 $\mu\text{mol/L}$ 的 3 个缺镁浓度处理下,主根长随镁浓度的增加而增加,当镁浓度达到 100 $\mu\text{mol/L}$ 时,主根显著长于其它处理,与 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 镁浓度处理相比,增加了 18.6%,说明营养液中镁浓度较低时,芝麻通过主根长伸长从而增加根系接触养分的

表面积,使植株尽可能地吸收营养液中的镁,以适应低镁胁迫。

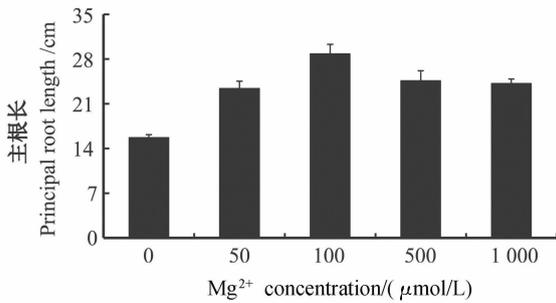


图3 不同供镁浓度对芝麻主根长的影响

Fig.3 Effects of different magnesium concentration on principal root length of sesame

从表1可以看出,镁对芝麻根系的生长发育影响较大,随着营养液中供镁浓度的增加,芝麻各根系

表1 不同供镁浓度对芝麻根系形态的影响

Table 1 Effects of different magnesium concentration treatments on root morphology of single plant

处理/(μmol/L) Treatment	侧根长/cm Lateral roots length	侧根数 Lateral roots number	根表面积/cm ² Roots surface area	根体积/cm ³ Roots volume	根平均直径/mm Average diameter
0	93.9 ± 4.6 e	110.4 ± 7.1 e	15.5 ± 0.8 d	0.21 ± 0.01 d	0.53 ± 0.008 b
50	221.8 ± 21.6 d	216.7 ± 26.7 d	42.9 ± 4.8 c	0.56 ± 0.06 c	0.53 ± 0.008 b
100	649.4 ± 59.2 c	517.1 ± 45.9 c	116.8 ± 9.3 b	1.74 ± 0.23 b	0.55 ± 0.019 b
500	2 046.9 ± 266.6 b	1 952.0 ± 110.1 b	392.8 ± 49.7 a	6.01 ± 0.76 a	0.62 ± 0.013 a
1 000	2 657.2 ± 147.4 a	2 787.0 ± 129.2 a	485.9 ± 29.5 a	7.60 ± 0.32 a	0.63 ± 0.014 a

2.4 不同供镁浓度对芝麻养分累积量的影响

不同供镁浓度对芝麻叶片和根部养分累积产生了不同程度的影响。如表2所示,植株体内镁累积量随着供镁浓度的增加呈递增趋势,尤其是叶片中的镁累积量。本试验0~100μmol/L的3个缺镁浓度处理下,芝麻叶片和根部的镁累积量都显著降低,说明植株缺镁明显,尤其是叶片。同时,从表3可以看出,3个缺镁处理都不同程度地影响了植株氮、磷、钾、钙的累积,主要表现在芝麻叶片和根系氮、磷、钾、钙累积量均大幅度降低,以0μmol/L为例,芝麻叶片和根部氮、磷、钾、钙累积量与1000μmol/L处理相比分别减少了97.4%和96.2%、97.5%和97.0%、97.5%和94.4%、97.2%和92.7%,说明缺镁抑制根系生长的同时也显著影响了植株对营养元素的吸收利用。另一方面可以看到,供镁浓度500μmol/L时叶片氮、磷累积量略高于供镁浓度

形态相关参数都呈逐渐增加的趋势,供镁1000μmol/L处理时芝麻根系侧根长、侧根数、根表面积、根体积显著大于其它处理;与供镁1000μmol/L相比,500μmol/L镁浓度处理下的侧根长、侧根数、根表面积、根体积比下降幅度分别为22.97%、29.96%、19.16%和20.92%,且侧根长和侧根数在两个处理间存在显著差异;与供镁1000μmol/L相比,0~100μmol/L的3个缺镁处理下芝麻侧根长、侧根数、根表面积和根体积的减幅分别达96.5%~75.6%、96.0%~81.4%、96.8%~75.9%和97.3%~79.7%,根平均直径分别减少16.1%、14.7%和13.1%。上述试验结果表明,镁对侧根的发生发育有着一定的影响,同时也进一步说明了镁对芝麻根系生长发育的重要性。

1000μmol/L处理,但是差异不显著,而根部氮累积量以1000μmol/L处理最高,与500μmol/L处理相比增加了22.69%(表3)。此外,从表3可以看到,与供镁浓度500μmol/L相比,1000μmol/L供镁浓度下芝麻叶片和根部的钙累积量都显著降低,降低幅度分别为21.31%和10.10%,说明钙和镁存在一定程度的拮抗作用,供镁浓度的提高影响了植株对钙的吸收利用。

表2 不同供镁浓度下芝麻镁累积量

Table 2 Effects of different magnesium concentration on Mg accumulations of sesame

处理/(μmol/L) Treatment	Mg/(mg/plant)	
	叶片 Leaf	根系 Root
0	0.053 ± 0.007 e	0.029 ± 0.001 d
50	0.219 ± 0.017 d	0.121 ± 0.002 c
100	0.726 ± 0.126 c	0.251 ± 0.037 b
500	7.637 ± 1.236 b	1.558 ± 0.128 a
1 000	10.268 ± 1.092 a	1.461 ± 0.106 a

表3 不同供镁浓度下芝麻单株氮、磷、钾、钙累积量

Table 3 Effects of different magnesium concentration on N,P,K and Ca accumulations of sesame

处理/(μmol/L) Treatment	N/(mg/plant)		P/(mg/plant)		K/(mg/plant)		Ca/(mg/plant)	
	叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root
0	3.07 ± 0.37 d	0.48 ± 0.05 d	0.68 ± 0.07 d	3.08 ± 0.41 d	0.45 ± 0.05 d	0.19 ± 0.01 d	1.57 ± 0.17 e	0.16 ± 0.007 e
50	10.65 ± 0.51 c	1.45 ± 0.15 c	2.38 ± 0.15 c	9.58 ± 0.70 c	1.35 ± 0.07 c	0.64 ± 0.05 c	5.34 ± 0.44 d	0.39 ± 0.013 d
100	25.19 ± 1.92 b	2.76 ± 0.34 b	6.49 ± 0.83 b	24.23 ± 2.23 b	2.97 ± 0.22 b	0.95 ± 0.13 b	14.03 ± 1.11 c	0.51 ± 0.061 c
500	124.93 ± 13.52 a	15.82 ± 2.61 a	21.32 ± 3.33 a	111.24 ± 14.7 a	17.11 ± 2.57 a	3.54 ± 0.45 a	70.62 ± 9.75 a	2.40 ± 0.208 a
1 000	118.66 ± 9.36 a	19.41 ± 1.48 a	17.89 ± 1.67 a	102.14 ± 5.82 a	17.94 ± 1.44 a	3.41 ± 0.14 a	55.57 ± 5.32 b	2.18 ± 0.173 b

3 讨论

镁是维持植物正常生长发育所必需的营养元素,在植物的光合作用、酶活化、离子平衡、细胞膨压作用、细胞膜稳定以及活性氧代谢等多方面均有重要影响,因此缺镁势必影响植物正常生长发育。本试验结果也验证了这一规律,当营养液中供镁浓度较低时($0 \sim 100 \mu\text{mol/L}$)时,芝麻缺镁症状明显,表现为植株矮小,整株叶片小而薄,叶脉绿色,叶脉间出现不同程度失绿,老叶严重失绿变黄,出现褐色斑点,叶片边缘出现褶皱。这与前人^[9,10,16]在甘薯、油菜及黄瓜的缺镁表型基本相似。

通过芝麻根系形态指标测定发现,镁浓度在 $1\ 000 \mu\text{mol/L}$ 时根系的生长状况最好,主要体现在根干重、侧根数和侧根长等指标(图2和表3)。缺镁胁迫下芝麻根系的生长受到明显抑制,已有研究也表明缺镁处理可使植物主脉韧皮部细胞间胞间连丝减少,导致碳水化合物从地上部向根系的运输受阻,从而抑制了根系的生长^[24]。同时,本试验还发现适度缺镁($100 \mu\text{mol/L}$)促进了主根的伸长生长(图3),这与植物氮胁迫下主根伸长相似,主根对外界养分(镁)浓度供应的变化较为敏感,可根据外界浓度产生适应性变化,因此,主根伸长可能是芝麻对适度缺镁胁迫的一种适应性机制。

在逆境胁迫下,植物体内的离子平衡会被打破,导致植物体内离子代谢紊乱,而影响植物正常代谢活动。前人研究表明重金属铅、盐碱等胁迫下植株体内离子分布受到显著影响,代谢紊乱,植株生长受到抑制^[25,26]。同样,营养元素缺乏或者过量,都会导致植株体内离子代谢失衡^[27],小麦缺氮不仅显著影响小麦籽粒含氮量,而且还降低了小麦籽粒中硫、钙、铁、锰、铜、锌的含量,这可能与缺氮胁迫下小麦根系生长受到影响,吸收养分能力下降有关^[28]。熊英杰等研究发现,缺镁胁迫降低玉米幼苗根系活力,氮在地上部和根部分配失调。新叶和老叶中镁、铜、铁、锰等离子含量下降,钙、钾、锌等离子含量上升,根中镁含量下降,钙、钾、锌、铜、铁、锰等离子含量上升,玉米幼苗体内离子平衡受到破坏,玉米幼苗生长受到抑制^[29]。砂糖橘缺镁处理90d后植株叶片氮、磷、钾、镁含量均降低,其中镁含量下降幅最大,但都未达到显著水平,可能因为材料为两年生苗,其体内贮存的氮、磷、钾、镁等养分在90d试验期内仍能维持叶片生长的需要^[30]。本试验中,缺镁处理30d芝麻体内大量元素氮、磷、钾累积量都显著减少(表3),这也与芝麻根系受抑制的表型相一致,说明缺

镁影响了根系生长,影响了其对大量元素的正常吸收利用。

在作物实际生产中,为追求更高产量,不断增施氮、磷、钾肥,容易造成土壤养分失衡。研究表明,不协调的养分吸收,会造成作物缺镁、缺锌等,降低其抗逆性,而追施镁肥、锌肥等微肥可改善作物生长的土壤环境,协调其对土壤养分的均衡吸收^[31]。研究表明,施用镁肥不仅可以提高作物产量,更能提升作物品质,例如徐茜等研究表明不论施用何种镁肥,均可促进烟株生长,改善烟叶品质,显著提高烟叶的产量以及产值^[32]。而硫酸钾镁肥对169种作物功效研究的田间试验结果也表明,硫酸钾镁肥在平衡施肥及促进作物产量、品质及效益提高方面具有显著作用,尤其是在缺硫、缺镁的土壤上^[33]。同样,芝麻产量和品质的提升也离不开肥料的合理施用,在追求作物高产的同时,优质也是日益凸显的重要目标,尤其包括除大量元素外的中微量元素,正在成为芝麻高产优质可能的限制因子。因此,加强芝麻中微量营养元素的研究势在必行。本研究仅从缺镁对芝麻形态、生理特征、养分吸收影响等方面做了研究,对芝麻镁营养生理有了初步的认识,如何通过调控镁促进芝麻生长以及提升芝麻品质将是今后工作的重点方向。

参考文献:

- [1] 陆景陵. 植物营养(上册)[M]. 北京:北京农业大学出版社,1994.
- [2] 郑重禄. 缺镁胁迫对柑橘的影响研究综述(2)——缺镁对柑橘光合作用及相关生理生化的影响[J]. 浙江柑橘,2015,32(3):2-8.
- [3] 李合生. 现代植物营养学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [4] 王正. 重视元素间互作 镁营养综合管理[N]. 农资导报,2018-01-23(C04).
- [5] 张西森. 温棚番茄缺镁危害与防治[J]. 现代农业科技,2007(12):75-76.
- [6] 赵春年. 设施蔬菜缺镁症状与施肥技术[J]. 河北农业科技,2008(2):49-50.
- [7] 陈竹君,赵文艳,张晓敏,等. 日光温室番茄缺镁与土壤盐分组成及离子活度的关系[J]. 土壤学报,2013,50(2):388-395.
- [8] 闫波,周婷,王辉民,等. 日光温室栽培番茄镁缺乏与土壤阳离子平衡的关系[J]. 中国农业科学,2016,49(18):3588-3596.
- [9] 马洪波,李传哲,宁运旺,等. 钙镁缺乏对不同甘薯品种的生长及矿质元素吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料,2015(4):101-107.

- [10] 韩配配,秦璐,李银水,等. 不同营养元素缺乏对甘蓝型油菜苗期生长和根系形态的影响[J]. 中国油料作物学报,2016,38(1):88-97.
- [11] 田斌,胡玉洁,路雪丽,等. 镁缺乏和过量胁迫对大麦幼苗生长以及生理生化指标的影响[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版),2018,17(2):146-152.
- [12] 李延,刘星辉,庄卫民. 缺镁对龙眼光合作用的影响[J]. 园艺学报,2001(2):101-106.
- [13] 吕玉兰,黄家雄,王跃全. 镁肥对台湾青枣叶片叶绿素含量和果实品质的影响[J]. 热带农业科学,2010,30(12):17-19.
- [14] 凌丽俐,彭良志,王男麒,等. 缺镁胁迫对纽荷尔脐橙叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学报,2013,33(1):71-78.
- [15] 刘厚诚,陈细明,陈日远,等. 缺镁对菜薹光合作用特性的影响[J]. 园艺学报,2006(2):311-316.
- [16] 谢小玉,邓小勇. 镁对黄瓜生长和光合特性的影响[J]. 西北农业学报,2009,18(2):193-196.
- [17] 张海洋,郑永战,卫双玲,等. 我国芝麻生产现状与发展对策[A]. 中国作物学会油料作物专业委员会第六次代表大会暨学术年会[C]. 2008.
- [18] 王宜伦,任丽,张许,等. 芝麻的营养与施肥研究现状与展望[J]. 江苏农业科学,2010(5):126-128.
- [19] 张秀荣. 中芝13简介[J]. 农业科技通讯,2005(6):50.
- [20] 韩佳,周高峰,李峤虹,等. 缺镁、铁、硼胁迫对4个柑橘砧木生长及养分吸收的影响[J]. 园艺学报,2012,39(11):2105-2112.
- [21] 杨勇,蒋德安,孙骏威,等. 不同供镁水平对水稻叶片叶绿素荧光特性和能量耗散的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(1):79-86.
- [22] 高凤梅,武际. 2种植株全氮测定方法比较[J]. 现代农业科技,2012(14):204-205.
- [23] 刘宏伟,秦宗会,谢华林,等. ICP-OES/ICP-MS测定葵花子中28种无机元素[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(1):224-227.
- [24] Cakmak I, Hengeler C, Marschner H. Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants[J]. J Exp Bot,1994,45:1251-1257.
- [25] 刘爱荣,张远兵,张雪平,等. 铅污染对高羊茅生长、无机离子分布和铅积累量的影响[J]. 核农学报,2009,23(1):128-133,144.
- [26] 杨春武,李长有,张美丽,等. 盐、碱胁迫下小冰麦体内的pH及离子平衡[J]. 应用生态学报,2008,19(5):1000-1005.
- [27] Maillard A, Etienne P, Diquélou S, et al. Nutrient deficiencies modify the ionic composition of plant tissues: A focus on cross-talk between molybdenum and other nutrients in *Brassica napus*[J]. J Exp Bot,2016,67,5631-5641.
- [28] 薛佳,毛晖,王朝辉,等. 黄土高原旱地大量营养元素缺乏对小麦产量和营养元素含量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(0):117-123.
- [29] 熊英杰,钟韬韬,严燕冬,等. 缺镁胁迫对玉米幼苗生长和离子平衡的影响[J]. 井冈山大学学报(自然科学版),2010,31(3):65-69.
- [30] 陈伟立,谢小林,李娟,等. 缺镁胁迫对‘砂糖橘’植株矿质养分及抗氧化酶的影响[J]. 热带农业科学,2015,35(6):5-10.
- [31] 李军,肖丹丹,邓先亮,等. 镁锌肥追施时期对优良食味粳稻产量及品质的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(8):1448-1463.
- [32] 徐茜,陈爱国,戴培刚,等. 镁肥合理施用对烤烟生长及产质量的影响[J]. 中国烟草科学,2011,32(2):33-37.
- [33] 白木. 我国推广硫酸钾镁肥的必要性、施用情况及前景[J]. 硫磷设计与粉体工程,2008(2):8-12,1.

(责任编辑:郭学兰)