

白昕晨,董建梅,李晶,等. 缺镁胁迫对不同砧木柠檬幼树养分吸收利用的影响[J]. 华中农业大学学报, 2026, 45(2): 165-172.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.017

缺镁胁迫对不同砧木柠檬幼树养分吸收利用的影响

白昕晨^{1,2}, 董建梅¹, 李晶¹, 付小猛¹, 刘红明¹, 胡承孝^{2,3}, 杜玉霞^{1,3}

1. 云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所, 保山 678000;

2. 华中农业大学资源与环境学院/新型肥料湖北省工程实验室/华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070;

3. 果蔬园艺作物种质创新与利用全国重点实验室, 武汉 430070

摘要 为探究缺镁胁迫下不同砧木柠檬幼树的养分吸收差异, 筛选出耐缺镁的柠檬砧木, 以枳砧柠檬和 C35 枳橙砧柠檬为材料, 采用沙培试验, 试验设置枳砧柠檬-镁正常(Z1)、枳砧柠檬-镁缺乏(Z0)、C35 枳橙砧柠檬-镁正常(C1)、C35 枳橙砧柠檬-镁缺乏(C0)4 个处理, 2 个镁水平分别为镁正常(1 mmol/L MgSO₄·7H₂O)和镁缺乏(0 mmol/L MgSO₄·7H₂O), 培养 180 d 后测定不同组织器官养分含量及转移系数。结果显示: 镁正常条件下, 枳砧柠檬对 Mg 的吸收利用效率高, 枳砧柠檬老叶和新叶的 Mg 含量显著高于 C35 枳橙砧柠檬 26.08% 和 15.91%, 对 Mn、Cu 表现出更强的富集能力; 镁缺乏导致 2 种砧木柠檬的 N 转移系数均低于 0.5, C35 枳橙砧柠檬表现出更高的 Mg 利用效率, C35 枳橙砧柠檬对 Ca、Fe、Mn、Zn 的转移能力较差; 缺镁胁迫显著增加了枳砧柠檬对 Mn 的吸收, 有 Mn 中毒风险。综合分析表明, 在镁元素缺乏但其他养分供应充足的栽培条件下, 选用 C35 枳橙作为‘云柠一号’的嫁接砧木具有显著优势; 而在多种营养元素普遍匮乏的环境中以传统枳砧木更为适宜。

关键词 柠檬; 砧木; 低镁胁迫; 养分吸收利用; 养分转移系数

中图分类号 S666.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)02-0165-08

柠檬(*Citrus limon* L. Burm. F)是芸香科(Rutaceae)柑橘属(*Citrus*)的多年生常绿果树, 其栽培历史已有 2 500 多年, 在我国长江流域以南的柑橘产区均有栽培^[1-2]。生产中常用嫁接的方式来提高树体的抗病性和适应性^[3], 优质的砧穗组合能显著提高柠檬产量, 保障果实品质^[4-5]。矿质养分是果树正常生长发育的基础, 不同砧穗组合对养分的吸收利用能力存在差异^[6-7], 枳(*Poncirus trifoliata* (L.) Raf.)作为柑橘类果树最常用的砧木之一, 具有嫁接亲和力强、抗病性好、矮化效果佳的特点^[8], 枳壳属于根系较浅的弱势砧木, 生长过程中容易缺镁^[9]、硼^[10-11]等营养元素。C35 枳橙(*C. sinensis* × *P. trifoliata*)由红玉血橙(*Citrus sinensis* [L.] Osbeck, CRC No. 589)和枳(*P. [L.] Raf.* CRC No. 2552)杂交而来^[12], 具有良好的抗病性^[13], 广泛应用于柑橘的砧木嫁接。

柠檬对镁的需求量大, 我国四川^[14]、云南^[15]等柠檬主产区缺镁的现象较为普遍。镁营养供应不足

时, 树体下部叶片会出现叶脉间失绿黄化现象, 严重时叶片光合速率下降, 碳水化合物分配速率降低, 影响果实产量与品质^[16-17]。不同砧木对缺镁环境的适应能力存在差异, 但其养分吸收利用特点尚不清楚。本研究以柠檬生产中常见的 2 种砧木(枳和 C35 枳橙)为研究对象, 通过沙基培养的方式, 研究嫁接在不同砧木上柠檬幼树的养分吸收利用差异, 探明缺镁胁迫下砧木对养分吸收利用的影响, 旨在明确 2 种砧木的养分利用规律, 筛选出耐/缺镁的砧木品种, 并为不同砧木柠檬园施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验在云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所瑞丽站(24°1'11"N, 97°52'10"E)开展, 供试砧木选用枳(*P. trifoliata* (L.) Raf.)和 C35 枳橙(*C. sinensis* × *P. trifoliata*), 嫁接‘云柠一号’尤力克柠檬

收稿日期: 2025-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060653); 云南省科技人才和平台计划项目(202205AD160055); 云南省创新引导与科技型企业培育计划项目(202304BI090025); 现代农业(柑橘)产业技术体系建设专项(CARS-26); 德宏州英才兴边计划项目(2022RC006)

白昕晨, E-mail: 861976880@qq.com

通信作者: 杜玉霞, E-mail: duyuxia117@163.com

接穗,分别为‘枳砧柠檬’和‘C35枳橙砧柠檬’,嫁接6个月后,选择萌发叶5~6片、长势一致、无病虫害的幼树进行沙培。

试验设置枳砧柠檬-镁正常(Z1)、枳砧柠檬-镁缺乏(Z0)、C35枳橙砧柠檬-镁正常(C1)、C35枳橙砧柠檬-镁缺乏(C0)等4个处理,2个镁水平分别为镁正常(1 mmol/L $MgSO_4 \cdot 7H_2O$)和镁缺乏(0 mmol/L $MgSO_4 \cdot 7H_2O$),每个处理9株,设置3个重复,共计108株,用1/2浓度 Hoagland 和全浓度 Aron 营养液^[18]培养180 d。每2~3 d 浇灌1次营养液,前3次浇灌用量分别为常量的1/4、1/4和1/2。用NaOH或 H_2SO_4 调节营养液pH至5.8。

1.2 测定项目与方法

试验期间实时记录树体生长发育状况,按生育周期将叶片划分为老叶(>120 d)、中间叶(30~60 d)和新叶(<30 d)。胁迫培养结束后,每个处理取老叶、中间叶和新叶,以及主根和须根,样品带回实验室进行预处理:中性洗涤剂配成0.1%的水溶液,将叶片和根系置于其中洗涤30 s,取出立即用清水冲洗,再用0.2% HCl(去离子水)溶液洗涤约30 s,后用去离子水洗净,为避免某些养分的损失,清洗必须在2 min内完成,105 °C杀青30 min,70 °C烘干至恒质量,研磨后用于养分测定。N含量采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消解,用半微量蒸馏法测定,Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn含量采用 HNO_3-HClO_4 (V/V=4:1)消解,利用PE

900T原子吸收分光光度计(珀金埃尔默,美国)测定各养分的含量。

参照前人研究方法计算养分转移系数(translocation factor)^[19]。

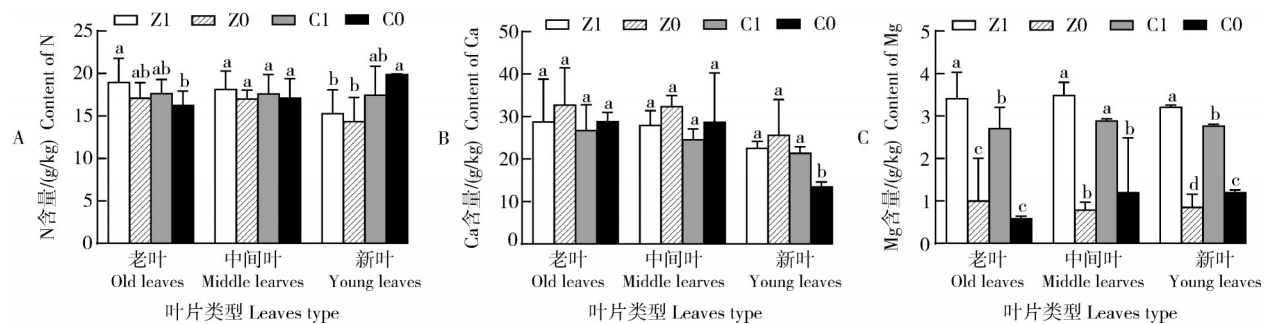
1.3 数据分析

采用Excel 2019 进行数据处理,SPSS 26.0 进行统计分析和Duncan's多重比较,用Graphpad Prism 9 和Origin 2024 制图。

2 结果与分析

2.1 缺镁胁迫对不同砧木柠檬幼树叶氮、钙、镁含量的影响

在Mg缺乏条件下,C35枳橙砧柠檬的新叶N含量为19.89 g/kg显著高于枳砧处理的14.36 g/kg(图1A),而Mg正常处理下,2个砧木柠檬叶片的N含量差异不显著。不同处理的老叶和中间叶的Ca含量均无显著差异(图1B),缺MgC35枳橙砧柠檬新叶Ca含量小于15 mg/kg,显著低于其他处理。Mg缺乏条件下,2个砧木柠檬叶片Mg含量显著低于Mg正常处理(图1C),正常处理下枳砧柠檬老叶和新叶的Mg含量显著高于C35枳橙砧柠檬26.08%和15.91%,但缺Mg条件下,C35枳橙砧柠檬新叶Mg含量显著高于枳砧40.73%,2个砧木柠檬老叶和中间叶Mg含量无显著差异,说明缺Mg条件下C35枳橙砧柠檬的Mg吸收利用能力高于枳壳。



不同小写字母表示不同处理间差异显著(Duncan's多重比较),下同。Different lowercase letters indicate significant differences(Duncan's test, $P < 0.05$).The same as below.

图1 不同处理下不同砧木柠檬幼树叶N(A)、Ca(B)、Mg(C)含量

Fig.1 N(A), Ca(B) and Mg(C) nutrient content in leaves of different rootstock lemon under different treatments

2.2 缺Mg胁迫对不同砧木柠檬幼树叶微量元素含量的影响

老叶和中间叶的Fe含量在不同处理间无显著差异(图2A),C35枳橙砧柠檬新叶Fe含量均值达到0.11 mg/kg,显著高于其他处理;在Mg缺乏条件下,2个砧木柠檬幼树新叶Fe含量无显著差异。Mg缺乏使枳砧柠檬叶片Mn含量显著高于其他处理,达到

0.08 mg/kg(图2B),而C35砧柠檬中间叶的Mn含量在Mg缺乏条件下显著高于正常处理27.65%,但新叶则相反,说明缺Mg后枳砧柠檬较C35枳橙砧柠檬对Mn的吸收更为敏感;在Mn含量充足的环境下,Mg缺乏可能会使枳砧柠檬幼树面临Mn中毒的风险。不同处理的老叶Cu含量均高于中间叶和新叶(图2C),缺Mg后C35枳橙砧柠檬老叶Cu含量均值

大于 0.08 mg/kg, 显著高于其他处理, 枳砧柠檬结果相反, 在 Mg 缺乏条件下老叶 Cu 含量显著低于正常处理。缺 Mg 后 C35 枳橙砧柠檬新叶 Zn 含量为 0.12 mg/kg, 显著高于其他处理(图 2D), 老叶和中间叶 Zn 含量在不同处理之间无显著差异。

2.3 缺镁胁迫对不同砧木柠檬幼树根系养分元素含量的影响

如表 1 所示, Mg 缺乏条件下 C35 枳橙砧柠檬主根的 N 含量显著高于未胁迫处理。正常处理下, 枳砧柠檬主根 Mg 含量显著高于 C35 枳橙砧柠檬

38.02%, 而胁迫处理后, 2 个砧木 Mg 含量无显著差异。Mg 正常处理 C35 枳橙砧柠檬主根的 Fe 含量和枳砧柠檬主根 Mn 均显著高于其他处理 50% 以上, 说明 Mg 正常培养下 C35 枳橙砧柠檬主根对 Fe 吸收效率高, 枳砧柠檬对 Mn 吸收效率高。Mg 正常处理的 C35 枳橙砧柠檬主根 Cu 含量为 18.86 mg/kg, 显著低于其他处理, 而 Mg 缺乏的主根 Cu 含量与枳砧柠檬无显著差异。主根的 Ca 含量和 Zn 含量在不同处理间均无显著差异。

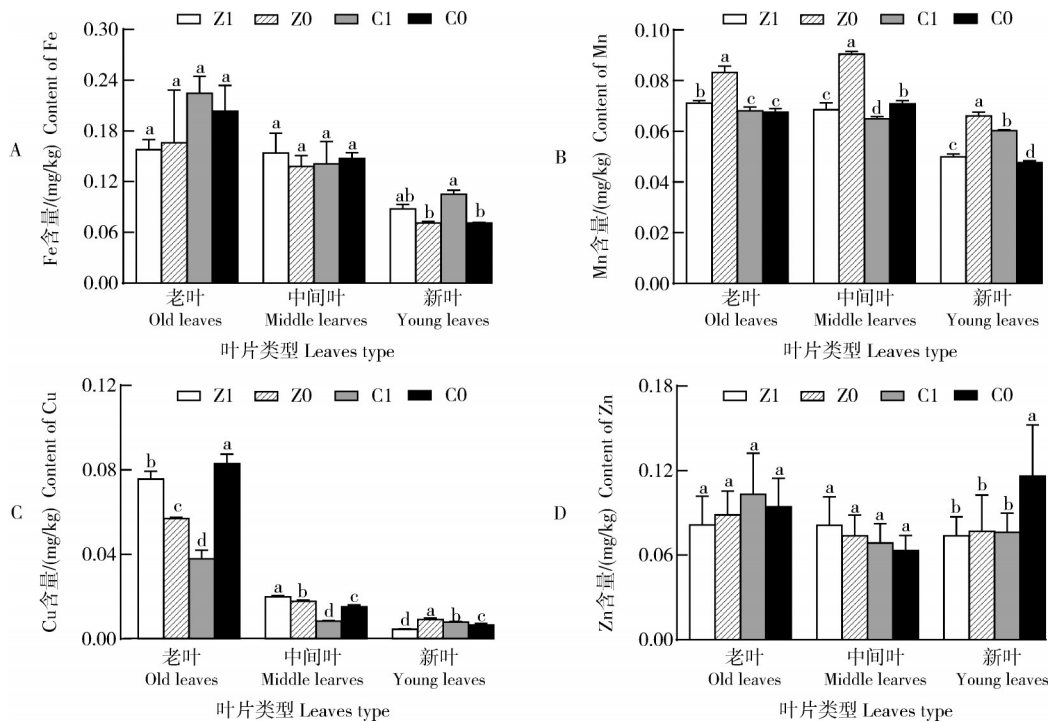


图 2 不同处理下不同砧木柠檬幼树叶 Fe(A)、Mn(B)、Cu(C)和 Zn(D)含量

Fig.2 Content of Fe(A), Mn(B), Cu(C) and Zn(D) in leaves of different rootstocks lemon under different treatments

表 1 不同处理下不同砧木柠檬幼树主根养分元素含量

Table 1 Taproot nutrient elements content of lemon saplings

养分元素 Nutrient elements	Z1	Z0	C1	C0
N/(g/kg)	2.28±0.36ab	2.38±0.30a	1.75±0.23b	2.55±0.27a
Ca/(mg/kg)	5.87±0.54b	12.35±2.18ab	10.10±0.42ab	18.13±1.21a
Mg/(mg/kg)	2.46±0.10a	0.79±0.08c	1.78±0.23b	0.78±0.02c
Fe/(mg/kg)	0.12±0.003b	0.14±0.0 b	0.21±0.03a	0.11±0.01b
Mn/(mg/kg)	44.45±2.69a	17.33±1.28b	17.49±1.48b	16.49±0.24b
Cu/(mg/kg)	44.83±3.98a	43.92±3.00 a	18.86±0.51b	44.56±3.04a
Zn/(mg/kg)	30.43±8.64a	34.23±5.52a	26.29±3.55a	27.04±1.44a

不同处理下须根的 N、Ca、Fe、Cu、Zn 含量均无显著差异(表 2)。Mg 缺乏枳砧柠檬须根 Mg 含量显著低于未胁迫处理, 缺 Mg 的 C35 枳橙须根 Mg 含量仍低于枳壳。缺 Mg 会显著影响柠檬幼树须根的 Mn 含量, 须根的 Mn 含量显著高于正常处理, 且 C35 枳

橙砧柠檬的 Mn 含量显著高于枳砧柠檬。

2.4 缺镁胁迫对不同砧木柠檬幼树养分转移系数的影响

将不同处理下养分转移系数进行归一化处理后将不同处理下养分转移系数进行归一化处理后将不同处理下养分转移系数进行归一化处理后做分层聚类分析(图 3), 在枳砧柠檬(图 3A)中 Fe、Zn

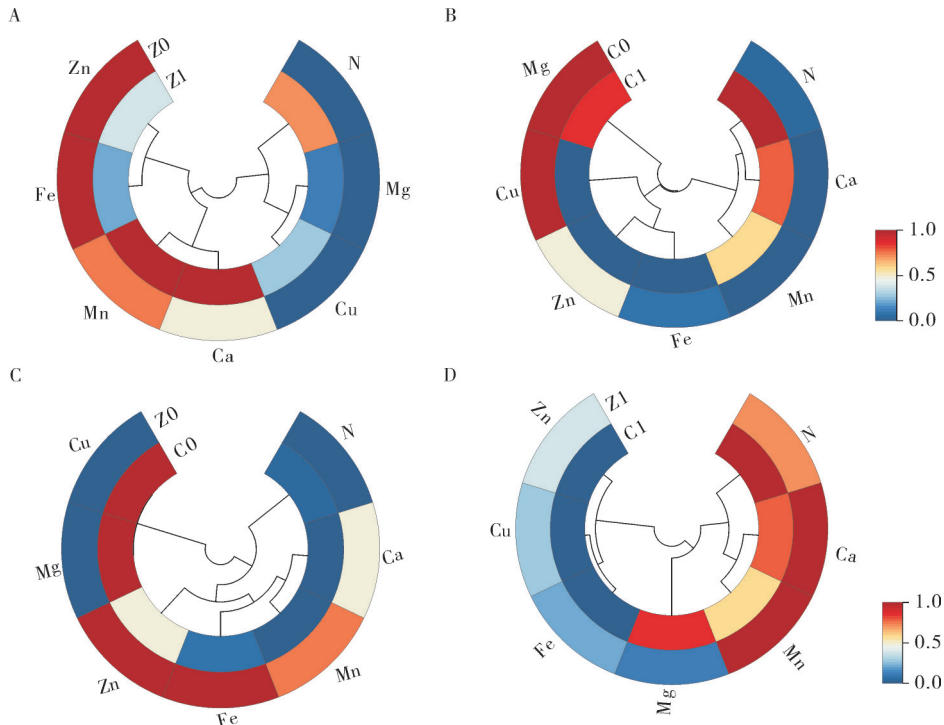
表2 不同处理下不同砧木柠檬幼树须根养分元素含量
Table 2 Fibrous root nutrient content in lemon saplings

养分元素 Nutrient elements	Z1	Z0	C1	C0
N/(g/kg)	5.43±1.46a	5.52±0.54a	5.73±0.16a	6.07±0.32a
Ca/(mg/kg)	26.57±1.46a	31.63±7.13a	19.22±13.64a	23.69±16.79a
Mg/(mg/kg)	5.40±0.50a	1.34±0.19c	3.01±0.10b	1.00±0.0 c
Fe/(mg/kg)	0.63±0.17ab	0.46±0.07b	0.83±0.10a	0.63±0.10ab
Mn/(mg/kg)	380.29±90.30c	596.29±81.49b	522.85±54.67b	777.40±67.95a
Cu/(mg/kg)	18.87±1.65a	12.94±5.92a	17.91±10.39a	13.86±8.00a
Zn/(mg/kg)	69.62±12.70a	61.15±11.08a	83.10±17.10a	87.62±30.77a

为一类,其Mg缺乏处理的转移系数高于正常处理,数值均在0.5以上;Ca、Mn归为一类,Mg正常处理下转移系数都高于缺Mg处理;最后N、Mg、Cu归为一类,其Mg缺乏处理的转移系数低于正常处理,数值均在0.5以下。在Mg缺乏条件下,枳砧柠檬表现出Fe、Zn养分转移系数增加,而其余养分转移系数下降的特点,其中N、Mg、Cu受胁迫影响较大。C35枳橙砧柠檬处理养分转移系数聚类结果与枳砧不同(图3B),聚类结果将Mg转移系数归为单独一类,2个处理转移系数均高于0.5,缺Mg处理高于正常处理;Fe、Cu、Zn和N、Ca、Mn被归为另2类,前者Mg

缺乏处理的转移系数高于0.5并大于正常处理,N、Ca、Mn结果相反,缺Mg处理后转移系数低于0.5并小于正常处理;Mg缺乏的C35枳橙砧柠檬较正常处理对Mg转移系数影响较小,N、Ca、Mn转移系数下降影响较大。

Mg缺乏条件下,枳砧柠檬和C35枳橙砧柠檬养分转移系数有明显差异(图3C),聚类结果将Mg、Cu归为一类,2个处理转移系数差异大,C35枳橙砧柠檬(>0.5)高于枳砧柠檬(<0.5);2个砧木柠檬的N的转移系数均低于0.5,C35枳橙砧柠檬略高于枳砧柠檬;Ca、Fe、Mn、Zn归为一类,枳砧柠檬的转移系数



A:Z0和Z1处理的养分转移系数聚类热图;B:C0和C1处理的养分转移系数聚类热图;C:Z0和C0处理的养分转移系数聚类热图;D:Z1和C1处理的养分转移系数聚类热图。A:Cluster heat map of nutrient translocation coefficient of Z0,Z1;B:Cluster heat map of nutrient translocation coefficient of C0,C1;C:Cluster heat map of nutrient translocation coefficient of Z0,C0;D:Cluster heat map of nutrient translocation coefficient of Z1,C1.

图3 缺镁胁迫处理下不同砧木柠檬幼树养分转移系数聚类热图

Fig.3 Cluster heat map of nutrient translocation coefficient of young lemon rootstocks

都高于C35枳橙砧柠檬;缺Mg的C35枳橙砧柠檬的Mg、Cu的转移系数优于枳砧柠檬,枳砧柠檬Ca、Fe、Mn、Zn的转移系数优于C35枳橙砧柠檬,2个砧木柠檬N的转移系数都较低。Mg正常处理枳砧柠檬和C35枳橙砧柠檬养分转移系数的聚类结果分为3类(图3D),其中Fe、Zn、Cu归为一类,转移系数均低于0.5;N、Ca、Mn为一类,转移系数均高于0.5,Mg单独为最后一类,C35枳橙砧柠檬转移系数高于枳砧柠檬,说明正常生长状态下,C35枳橙砧柠檬对Mg的转移优于枳砧柠檬。

3 讨论

多数柠檬以嫁接苗的方式种植栽培,砧木作为连接土壤与地上部的载体,其对养分的吸收利用直接影响着果实的产量与品质。不同砧木品种对养分吸收转运的能力不同^[20],本研究中枳砧柠檬叶片和主根的Mg含量显著高于C35枳橙砧柠檬,说明在正常生长环境中枳砧柠檬对Mg的吸收和需求能力优于C35枳橙砧柠檬;董建梅等^[21]对不同砧穗组合柠檬进行研究,发现进入生殖生长期(果实膨大期)后枳叶片Mg含量高于C35枳橙;何满^[22]以枳和枳橙为砧木,“爱媛28号”为接穗的研究中也得到了相似结果。缺Mg会显著影响柑橘树体对Mg的吸收利用^[23-25],本研究中C35枳橙砧柠檬中间叶和新叶的Mg含量均显著高于枳砧柠檬,C35枳橙砧的Mg转移系数也优于枳砧柠檬,这与正常供Mg处理的试验结果相反,说明枳砧柠檬对Mg高效吸收利用是依赖于充足的Mg供应环境;Xu等^[26]发现缺Mg胁迫会促进不同形态的Mg在柑橘幼苗不同组织器官中迁移,加速其在不同器官中Mg的分配;本试验中缺Mg胁迫处理的C35枳橙砧Mg转移系数与正常处理差异小,且Mg正常处理下C35枳橙砧柠檬对Mg的转移优于枳砧柠檬,因此推测C35枳橙砧柠檬较枳砧柠檬有更高效率的Mg利用能力,这与牛玉杰^[27]以株高、分枝增量和叶片光合色素相对含量为评价标准的结果一致

Mg作为植物必需的营养元素,是叶绿素分子中心唯一的金属原子,参与叶片光合作用,对柑橘果实的糖酸含量^[28]与着色机制^[29]都有显著影响,缺Mg胁迫不仅影响柑橘树体对Mg的吸收利用,还会扰乱其他养分的吸收利用平衡,不同砧木品种在低Mg胁迫后的表现也不同^[30]。本研究中,缺Mg胁迫对各组织器官N含量没有显著影响,但Mg缺乏使N转移系

数明显下降,推测因为柑橘是铵态氮(NH₄⁺-N)敏感性植物^[31],Mg的供应可以缓解NH₄⁺对植株生长的负面影响,缺Mg会显著影响柑橘植株的氮同化过程^[32],导致ATP合成减少^[33],影响N的吸收与转运。Mg²⁺和Ca²⁺同为二价阳离子,在根细胞膜表面的吸收位点存在竞争关系,与缺Mg老叶先出现黄化的情况不同,植物缺钙的表现会优先表现在新生组织与器官(新叶)^[34];本研究中缺Mg的C35枳橙砧柠檬的新叶Ca含量显著小于枳砧柠檬,Ca转移系数也低于枳砧柠檬;说明枳砧较C35枳橙砧柠檬在缺Mg环境下更易获取Ca营养。Mg缺乏会影响柑橘树体对微量养分的吸收与利用^[35]。植物在缺Mg环境中,可能会通过增加Mn的吸收来补偿Mg的功能缺失,例如增强植物的抗氧化能力,缓解缺Mg引起的氧化应激^[36],但Mn的过量吸收会引起氧化损伤^[37],本研究中缺Mg胁迫使枳砧柠檬叶片Mn含量均高于其他处理,缺Mg且Mn含量高的环境可能不利于枳砧柠檬的生长发育。缺Mg胁迫的C35枳橙砧老叶Cu含量均显著高于其他处理;Cu在植物体内不易转移,柑橘Cu过量主要表现为老叶失绿^[38],推测缺Mg且铜含量高的环境易导致C35枳橙砧面临铜毒风险。缺Mg胁迫的C35枳橙砧新叶Zn含量均显著高于其他处理,说明Mg缺乏条件下C35枳橙砧有较强的获取Zn营养的能力,但Zn过多会诱发缺Fe症状,C35枳橙砧对缺铁环境敏感^[39-40],本研究中Mg缺乏C35枳橙砧对Fe的转移系数低于枳,说明缺Mg胁迫可能会诱导C35枳橙砧出现缺铁症状。

本试验探究了缺Mg胁迫下不同砧木对柠檬幼树的养分吸收差异,明确了以枳和C35枳橙为砧木的柠檬在Mg及其他养分吸收利用上的特点。在生产实践中,缺Mg高发区建议优先选用C35枳橙砧木,可以更有效地吸收和利用土壤中的Mg,具有较强的抗缺Mg特性,但需加强Cu等微量元素的动态监测,避免毒害累积;在Mg充足但Ca、Fe缺乏的土壤,宜采用传统枳作为砧木,以发挥其对多种养分的协同吸收优势。未来可结合分子生物学手段解析砧木调控Mg转运的机制,挖掘Mg代谢的关键基因,为砧木改良与抗逆品种选育提供科学支撑,推动柠檬产业可持续高质量发展。

参考文献 References

- [1] 周开隆,叶荫民.中国果树志-柑橘卷[M].北京:中国林业出版社,2010.ZHOU K L, YE Y M. Chinese fruit tree annals: cit-

- rus volume [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010(in Chinese).
- [2] 邓秀新,彭抒昂.柑橘学[M].北京:中国农业出版社,2013. DENG X X, PENG S A. Citology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013(in Chinese).
- [3] 朱世平,陈娇,马岩岩,等.柑橘砧木评价及应用研究进展[J].园艺学报,2013,40(9):1669-1678. ZHU S P, CHEN J, MA Y Y, et al. Advances in the studies on *Citrus* rootstock evaluation and application[J]. Acta horticulturae sinica, 2013, 40(9): 1669-1678 (in Chinese with English abstract).
- [4] DUBEY A, SHARMA R M. Effect of rootstocks on tree growth, yield, quality and leaf mineral composition of lemon (*Citrus limon* (L.) Burm.) [J]. Scientia horticulturae, 2016, 200:131-136.
- [5] 蒋运宁,邓崇岭,刘升球,等.砧木对“台湾香水柠檬”生长结果与品质的影响[J].中国南方果树,2022,51(4):20-24. JIANG Y N, DENG C L, LIU S Q, et al. Effect of rootstocks on growth, fruiting and fruit quality of Taiwan Xiangshui lemon [J]. South China fruits, 2022, 51(4): 20-24 (in Chinese with English abstract).
- [6] 洪林,文泽富,程昌凤,等.砧木对柠檬幼树生长及叶片矿质元素积累的影响[J].西南农业学报,2012,25(5):1827-1833. HONG L, WEN Z F, CHENG C F, et al. Effects of different rootstocks on growth and mineral nutrition changes of lemon leaves [J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2012, 25(5):1827-1833 (in Chinese with English abstract).
- [7] 胡敏,兰翔,何玉广,等.不同砧木对云柠1号柠檬叶片养分含量的影响[J].湖北农业科学,2014,53(13):3066-3069. HU M, LAN X, HE Y G, et al. Effects of different rootstocks on the contents of nutrient in leaves of Yunnan No.1 *Citrus* × *Limon* [J]. Hubei agricultural sciences, 2014, 53(13): 3066-3069(in Chinese with English abstract).
- [8] 欧智涛.几种柑橘实生苗的矮化性、抗旱性和嫁接亲和性评价研究[D].南宁:广西大学,2014. OU Z T. Evaluation of dwarf, drought resistance and grafting affinity of several varieties of *Citrus* seedlings [D]. Nanning: Guangxi University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [9] 韩佳,周高峰,李岍虹,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. HAN J, ZHOU G F, LI Q H, et al. Effects of magnesium, iron, boron deficiency on the growth and nutrition absorption of four major *Citrus* rootstocks [J]. Acta horticulturae sinica, 2012, 39(11): 2105-2112 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘桂东,姜存仓,王运华,等.缺硼条件下两种不同砧木“纽荷尔”脐橙矿质元素含量变化的比较[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):180-185. LIU G D, JIANG C C, WANG Y H, et al. Changes in mineral element contents of ‘Newhall’ navel orange (*Citrus sinensis* Osb.) grafted on two different rootstocks under boron deficiency [J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2011, 17(1): 180-185 (in Chinese with English abstract).
- [11] 卢晓佩,姜存仓,董肖昌,等.硼利用效率不同的柑橘砧木光合性能差异研究[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):476-483. LU X P, JIANG C C, DONG X C, et al. Leaf photosynthetic characteristics of *Citrus* rootstocks with different boron efficiency [J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2017, 23(2):476-483 (in Chinese with English abstract).
- [12] CAMERON J W, SOOST R K. C35 and C32: citrange rootstocks for *Citrus* [J]. HortScience, 1986, 21(1):157-158.
- [13] LEGUA P, HERNÁNDEZ F, ÁNGELES FORNER-GINER M. Influence of *Citrus* rootstocks in bioactive compounds of clementines [J]. Journal of food and nutrition research, 2017, 5(8):545-552.
- [14] 周上铃.柠檬园土壤养分、叶片营养与果实品质的相关性研究[D].重庆:西南大学,2021. ZHOU S L. Study on the correlation analysis of soil and leaf mineral nutrients with fruit quality of lemon [D]. Chongqing: Southwest University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [15] 闫素云,周先艳,杜玉霞,等.云南省柠檬主产区土壤肥力特征与评价[J].中国南方果树,2022,51(1):28-33. YAN S Y, ZHOU X Y, DU Y X, et al. Characteristics and evaluation of the soil fertility in main lemon production areas of Yunnan Province [J]. South China fruits, 2022, 51(1): 28-33 (in Chinese with English abstract).
- [16] YE X, HUANG H Y, WU F L, et al. Molecular mechanisms for magnesium-deficiency-induced leaf vein lignification, enlargement and cracking in *Citrus sinensis* revealed by RNA-Seq [J]. Tree physiology, 2021, 41(2):280-301.
- [17] 杜玉霞,李晶,刘红明,等.低镁胁迫对不同品种柠檬生长、光合特性和镁元素吸收的影响[J].中国土壤与肥料,2020(5):196-201. DU Y X, LI J, LIU H M, et al. Effects of low magnesium stress on plant growth, photosynthetic characteristics and magnesium content of different lemon varieties [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2020(5): 196-201 (in Chinese with English abstract).
- [18] DU Y X, DONG J M, LIU H X, et al. Transcription-related metabolic regulation in grafted lemon seedlings under magnesium deficiency stress [J/OL]. Plant physiology and biochemistry, 2024, 210: 108615 [2025-04-09]. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108615>.
- [19] WAN H X, YANG F Y, ZHUANG X L, et al. *Malus* rootstocks affect copper accumulation and tolerance in trees by regulating copper mobility, physiological responses, and gene expression patterns [J/OL]. Environmental pollution, 2021, 287: 117610 [2025-04-09]. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117610>.
- [20] ALBRECHT U, TRIPATHI I, KIM H, et al. Rootstock effects on metabolite composition in leaves and roots of young navel orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) and pummelo (*C. grandis* L. Osbeck) trees [J]. Trees, 2019, 33(1):243-265.

- [21] 董建梅, 胡江, 李晶, 等. 砧木对柠檬‘云柠1号’矿质养分吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2025, 41(7): 47-54. DONG J M, HU J, LI J, et al. Effect of rootstocks on mineral nutrient uptake in lemon ‘Yunning No.1’ [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2025, 41(7): 47-54 (in Chinese with English abstract).
- [22] 何满. 不同砧木对“爱媛28号”橘橙幼树生长发育的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2023. HE M. Effects of different rootstocks on the growth and development of ehime No.28 orange young trees [D]. Chongqing: Southwest University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [23] PENG H Y, QI Y P, LEE J, et al. Proteomic analysis of *Citrus sinensis* roots and leaves in response to long-term magnesium-deficiency [J/OL]. BMC genomics, 2015, 16(1): 253 [2025-04-09]. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1462-z>.
- [24] LIANG W W, HUANG J H, LI C P, et al. MicroRNA-mediated responses to long-term magnesium-deficiency in *Citrus sinensis* roots revealed by Illumina sequencing [J/OL]. BMC genomics, 2017, 18(1): 657 [2025-04-09]. <https://doi.org/10.1186/s12864-017-3999-5>.
- [25] JIN X L, MA C L, YANG L T, et al. Alterations of physiology and gene expression due to long-term magnesium-deficiency differ between leaves and roots of *Citrus reticulata* [J]. Journal of plant physiology, 2016, 198: 103-115.
- [26] XU H, LUO Z W, HU W L, et al. Magnesium absorption, translocation, subcellular distribution and chemical forms in *Citrus* seedlings [J]. Tree physiology, 2022, 42(4): 862-876.
- [27] 牛玉杰. 不同柠檬砧穗组合对镁水平的响应及其机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. NIU Y J. Responses of different scion/rootstock lemon seedlings subjected to different Mg levels and its physiological mechanism [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [28] 周媛. 柑橘果实糖酸代谢与镁的关系及其机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. ZHOU Y. The relationship between *Citrus* fruit sugar and organic acid metabolism and magnesium and its mechanism [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [29] 刘小曼, 刘晓东, 刘闫, 等. 镁肥对温州蜜柑果实产量及品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(5): 84-90. LIU X M, LIU X D, LIU Y, et al. Effects of magnesium fertilizer on yield and quality of satsuma mandarin fruit [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(5): 84-90 (in Chinese with English abstract).
- [30] 刘璟, 赵环宇, 王昱衍, 等. 不同钾镁比对缺镁土壤上两种柑橘砧木生长和养分吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(3): 7-16. LIU J, ZHAO H Y, WANG Y H, et al. Effects of different potassium-magnesium ratios on growth and nutrient uptake of two *Citrus* rootstocks on magnesium-deficient soils [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2023(3): 7-16 (in Chinese with English abstract).
- [31] 范子晗, 罗雅尹, 熊华焯, 等. 酸性土壤硝化作用对柑橘铵毒害的效应[J]. 中国农业科学, 2022, 55(18): 3600-3612. FAN Z H, LUO Y Y, XIONG H Y, et al. Effect of nitrification on ammonium toxicity to *Citrus* in acidic soil [J]. Scientia agricultura sinica, 2022, 55(18): 3600-3612 (in Chinese with English abstract).
- [32] 徐浩. 氮素形态调控柑橘生长和镁素利用的生理机制[D]. 福州: 福建农林大学, 2022. XU H. Physiological mechanism of nitrogen form regulating plant growth and magnesium uptake in *Citrus* seedlings [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [33] BRISKIN D P, POOLE R J. Role of magnesium in the plasma membrane ATPase of red beet [J]. Plant physiology, 1983, 71(4): 969-971.
- [34] GUO J X, JIAO Y L, WANG Y W, et al. Regulation of magnesium and calcium homeostasis in *Citrus* seedlings under varying magnesium supply [J/OL]. Plant physiology and biochemistry, 2023, 204: 108146 [2025-04-09]. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108146>.
- [35] HUANG J H, XU J, YE X, et al. Magnesium deficiency affects secondary lignification of the vascular system in *Citrus sinensis* seedlings [J]. Trees, 2019, 33(1): 171-182.
- [36] YANG G H, YANG L T, JIANG H X, et al. Physiological impacts of magnesium-deficiency in *Citrus* seedlings: photosynthesis, antioxidant system and carbohydrates [J]. Trees, 2012, 26(4): 1237-1250.
- [37] NAZARI M, ZARINKAMAR F, NIKNAM V. Changes in primary and secondary metabolites of *Mentha aquatica* L. exposed to different concentrations of manganese [J]. Environmental science and pollution research, 2018, 25(8): 7575-7588.
- [38] 李欣钰. 过量铜在柑橘幼苗的分布特征及超微结构响应机制研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2022. LI X Y. A study on the distribution pattern of copper and the responses of ultrastructure to excessive copper in *Citrus* seedlings [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [39] ÇIMEN B, YEŞİLOĞLU T, İNCESU M, et al. Physiological investigation of tolerance to iron chlorosis of navelina orange budded on different *Citrus* rootstocks [J]. Acta horticulturae, 2015(1065): 1423-1430.
- [40] CIMEN B, YESILOGLU T, INCESU M, et al. Growth and photosynthetic response of young ‘Navelina’ trees budded on to eight *Citrus* rootstocks in response to iron deficiency [J]. New Zealand journal of crop and horticultural science, 2014, 42(3): 170-182.

Effects of magnesium deficiency on uptake and utilization of nutrients in young lemon trees with different rootstocks

BAI Xincheng^{1,2}, DONG Jianmei¹, LI Jing¹, FU Xiaomeng¹,
LIU Hongming¹, HU Chengxiao^{2,3}, DU Yuxia^{1,3}

1. Institute of Tropical and Subtropical Economic Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Baoshan 678000, China;

2. College of Resources and Environment/Hubei Provincial Engineering Laboratory for New-Type Fertilizer/Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. National Key Laboratory for Germplasm Innovation & Utilization of Horticultural Crops, Wuhan 430070, China

Abstract Low content of available magnesium (Mg) in soils is prevalent across the main lemon-producing regions in China, leading to the frequent symptoms of Mg deficiency in lemon trees and compromising the yield and quality of fruits. A hydroponic sand culture experiment was conducted on lemon saplings grafted onto rootstocks of *P. trifoliata* and C35 citrange to study the differences in the uptake of nutrients in young lemon trees with different rootstocks under Mg-deficient stress and screen out rootstocks of lemons resistant to magnesium deficiency. Four treatments including *P. trifoliata*-grafted lemon-normal magnesium (Z1), *P. trifoliata*-grafted lemon-magnesium deficiency (Z0), C35 citrange-grafted lemon-normal magnesium (C1), and C35 citrange-grafted lemon-magnesium deficiency (C0), were set up, with two levels of magnesium including normal magnesium (1 mmol/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) and magnesium deficiency (0 mmol/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). The content and transportation coefficient of nutrients in different tissues and organs were measured after 180 days of cultivation. Results showed that the uptake and utilization efficiency of Mg in *P. trifoliata*-grafted saplings was high under the normal Mg treatment. The content of Mg in the old and new leaves of *P. trifoliata*-grafted saplings was 26.08% and 15.91% higher than that of C35 citrange-grafted saplings respectively, with stronger capacity for enriching Mn and Cu. Mg deficiency resulted in transportation coefficient of N in both rootstock rootstocks being below 0.5. C35 citrange-grafted saplings had higher utilization efficiency of Mg and poorer ability to transport Ca, Fe, Mn, and Zn under Mg deficiency. Mg deficiency significantly increased the absorption of Mn in *P. trifoliata*-grafted saplings, with a risk of Mn toxicity. The results of comprehensive analyses showed that C35 citrange rootstock offers distinct advantages for Yunnan No.1 under the cultivation condition of Mg deficiency but sufficient supply of other nutrients, whereas traditional *P. trifoliata* rootstock is more suitable in environments where multiple nutrients are generally scarce.

Keywords lemon (*Citrus limon* L. Burm. F); rootstock; magnesium deficiency; uptake and utilization of nutrients; nutrient translocation coefficient

(责任编辑:张志钰)