

丁俊, 娄伟, 谭启玲, 等. 含微量元素镁肥对赣南脐橙施用效果研究[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(1): 35-42.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.01.004

含微量元素镁肥对赣南脐橙施用效果研究

丁俊¹, 娄伟², 谭启玲¹, 武松伟¹, 严翔², 杨云洪³, 张荣阳³, 胡承孝¹

1. 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;
2. 江西省赣州市柑桔科学研究所, 赣州 341000; 3. 辽宁营口菱镁化工集团有限公司, 营口 115000

摘要 针对我国柑橘园土壤交换性镁及微量元素普遍缺乏导致产量品质下降的问题, 利用创制的含微量元素镁肥, 以江西赣州脐橙为试验材料, 采取田间小区试验, 比较含微量元素镁肥(MG1)、含微量元素钙镁肥(MG2)、速溶镁肥土壤施用(MG3S)、速溶镁肥叶面喷施(MG3F)对赣南脐橙产量、品质、养分含量的影响。结果显示, 施用4种镁肥均可显著提高果实产量, 其中MG1和MG2分别增产28.82%和24.76%, MG3S和MG3F分别增产18.78%和16.01%; 施用镁肥可显著增加脐橙单果质量、可溶性固形物和维生素C含量、固酸比, 改善果实品质, 其中以MG2综合评分得分最高, 即果实品质最佳; 含微量元素镁肥明显提高果实养分积累, MG1和MG2的钙携出量分别显著提高32.12%和53.50%, 镁携出量分别显著提高25.28%和29.90%, 果实氮、硼、锌、钼养分积累量也显著增加。结果表明, 施用镁肥对赣南脐橙有显著的增产提质效果, 含微量元素镁肥、钙镁肥能明显改善树体钙、镁及硼、锌、钼营养状况, 增产提质效果最好; 速溶镁肥土壤施用和叶面喷施效果相近。

关键词 含微量元素镁肥; 赣南脐橙; 果实产量; 品质; 养分

中图分类号 S666 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)01-0035-08

柑橘是我国第一大类水果, 2022年中国柑橘产量达6 003.89万t^[1]。中国柑橘产区集中在长江以南地区, 其中四川、江西、广东、广西及湖北5个省域柑橘产业贡献的农业产值分别位列全国前五名, 且在全国柑橘总产值中的占比均超过10%, 但各个柑橘主产区土壤却存在不同程度的中微量元素含量缺乏问题^[2-3]。由于成土母质的区域性分布不同, 我国土壤交换性镁含量呈北高南低分布, 且受高温、多雨及土壤酸性较强等环境因素影响, 南方土壤镁容易因淋溶和迁移而损失^[4]; 土壤有效镁缺乏地区与柑橘主产区高度重叠, 土壤镁素缺乏成为阻碍柑橘产量和品质提高的主要限制因子之一^[5]。

镁是植物生长发育所必需的营养元素, 参与植物体内光合作用、调节源库分配以及酶的活化等多种生理活动^[6]。缺镁会对柑橘生长发育产生不良影响, 导致产量减少、品质降低等^[7]; 植物对镁的吸收利用与土壤交换性镁含量有很大关系, 施用镁肥可以提升脐橙、椪柑、蜜柚等产量, 有效改善果实糖酸、维生素C等风味品质^[8]。随着赣南脐橙果实品质的提

高, 叶片镁含量呈上升趋势, 其含量与可溶性固形物含量呈极显著正相关^[9], 但生产上, 柑橘种植园普遍重视氮肥、磷肥和钾肥而忽视钙、镁、硼、锌和钼等中微量元素肥料的施用, 导致肥料利用率低下、土壤养分失衡等问题的产生^[10]。在赣南地区, 高达59%的柑橘园土壤中有有效钙含量以及85%的柑橘园土壤中有有效镁含量均处于缺乏和低量状态; 67.3%的果园土壤有效硼含量和44.6%的果园土壤有效锌含量亦存在不足; 同时还存在着大面积的土壤缺钼现象^[11-12]。镁肥对作物的效果受肥料形态、种类和施用方式等影响, 且受多种因素制约^[13]; 根据土壤养分供应状况和作物需肥特性来施用专用肥更有针对性, 并能提高作物对养分的吸收能力和利用率^[14]。针对上述问题, 笔者所在课题组研发了含微量元素镁肥, 本研究聚焦于含微量元素镁肥对赣南脐橙果实品质、产量及养分含量的影响, 旨在明确含微量元素镁肥矫正养分缺乏、改善树体营养、提高产量品质的作用, 为施用含微量元素镁肥促进柑橘高产优质提供依据。

收稿日期: 2024-09-27

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-26)

丁俊, E-mail: cnzsdj@163.com

通信作者: 胡承孝, E-mail: hucx@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验设计

2022年3月至2023年11月在江西省赣州市柑橘研究所(N 24°10′34.7″, E 117°23′3.77″)柑橘园布置田间试验。试验品种为纽荷尔脐橙,砧木为枳壳,树龄4年,采果期在10月中旬至12月。试验土壤类型为红壤,基本理化性质为pH 4.54,有机质 12.58 g/kg、碱解氮 38.92 mg/kg、速效磷 23.97 mg/kg、速效钾 216.53 mg/kg、交换性镁 33.79 mg/kg、交换性钙 247.77 mg/kg、有效硼 0.27 mg/kg、有效锌 1.40 mg/kg、有效钼 0.04 mg/kg,参照柑橘园土壤养分分级标准^[15],该土壤样本中速效钙、镁、硼、钼的含量低于标准水平。

试验采用完全随机区组设计,选择树势基本一致的柑橘树,基于赣南脐橙需肥特性和土壤质量状况,试验设置5个处理,分别为习惯施肥(XG)、习惯施肥+土壤施用含微量元素镁肥 I (MG1)、习惯施肥+土壤施用含微量元素钙镁肥 II (MG2)、习惯施肥+土壤施用速溶镁肥(MG3S)、习惯施肥+叶面喷施速溶镁肥(MG3F),每个处理重复4次,每个重复柑橘树5株。供试肥料包括:(1)习惯施肥处理,与当地农户保持一致,按照习惯施入氮磷钾复合肥(15-6-14);(2)含微量元素镁肥 I (含MgO 30%和B、Zn、Mo适量);(3)含微量元素钙镁肥 II (含CaO 45%、MgO 30%及B、Zn、Mo适量);(4)速溶镁肥(MgO 26.7%),试验镁肥均由辽宁营口菱化化工集团有限公司提供。习惯施肥及土壤施用镁肥为沟施(于树冠滴水线范围附近挖深度和宽度约30 cm的长沟,施肥后覆土),全年分2次施用。3月下旬(萌芽期)和7月上旬(壮果期)施用氮磷钾复合肥0.5 kg/株;3月下旬和7月上旬土壤施用镁肥(MG1、MG2和MG3S处理),用量为0.2 kg/株和0.1 kg/株;3月下旬和7月上旬叶面喷施镁肥(MG3F处理),用量为1.87 L/株,各处理留足保护行,保证各小区地力、树势以及其他管理措施一致。试验于2022年实施,第2年(2023)壮果期(7月)、果实收获期(11月)分别采集柑橘园叶片样品和成熟果实样品用于后续试验分析。

1.2 测定项目及方法

在每株果树的东、西、南、北4个方向采集当年生营养春梢顶端起第2~3片叶,每棵树8~12片叶组成混合样。带回实验室后用0.1%的中性洗涤剂水溶液洗涤叶片30 s,用蒸馏水洗净表面洗涤剂后再用

0.2%的HCl溶液洗涤叶片约30 s,最后用去离子水将叶片洗净。经烘箱105℃杀青后,70℃烘干至恒质量。植物全氮采用H₂SO₄-H₂O₂消化-半微量凯氏定氮法测定,全磷采用H₂SO₄-H₂O₂消化-钼锑抗比色法测定,全钾采用H₂SO₄-H₂O₂消化-火焰光度计法测定,钙镁锌采用HNO₃-HClO₄消化-原子吸收分光光度法测定,硼钼采用HNO₃-HClO₄消化-ICP-MS测定,具体方法参照文献^[16]。

成熟期于果树4个方向分别采取果实样品,每个重复采集12~16个果实组成混合样,测定单果质量、果皮厚度、果形指数、出汁率、可食率、含水率、果皮养分携出量、果肉养分携出量、果实养分携出量、产量。维生素C含量采用2,6-二氯酚酚滴定法测定,可溶性固形物含量采用手持数显糖量计(PAL-1, Japan)测定,可滴定酸含量采用NaOH中和滴定法测定,计算固酸比^[17]。

1.3 数据分析

采用Excel 2022进行数据处理,SPSS 27.0进行LSD显著性检验和Duncan's多重比较,利用Origin 2022进行相关图形绘制。

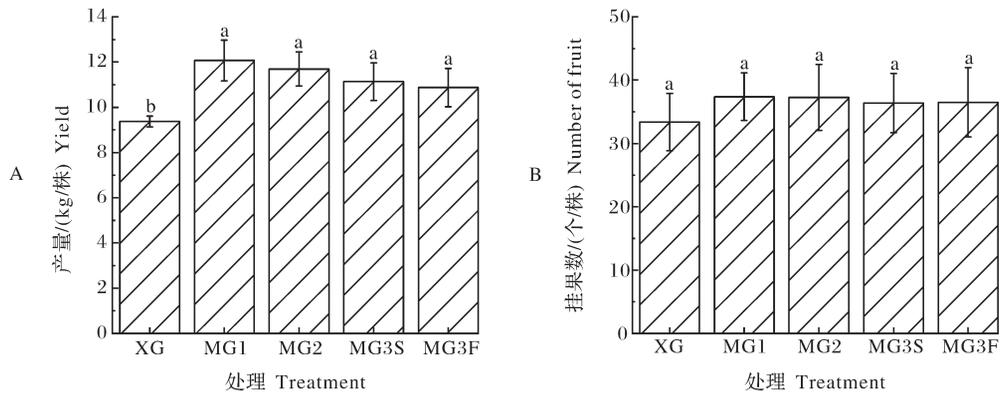
2 结果与分析

2.1 含微量元素镁肥对赣南脐橙产量的影响

由图1可知,施用不同镁肥均可显著提高赣南脐橙果实产量,其中,MG1、MG2处理分别较XG处理显著增产28.82%和24.76%,MG3S、MG3F处理分别显著增产18.78%和16.01%;各处理间单株挂果数没有显著差异,说明产量的增加主要依赖单果质量的增加。以上结果表明,含微量元素镁肥、钙镁肥和速溶镁肥均显著增加脐橙产量,但前两者增产幅度更大;土壤施用和叶面喷施速溶镁肥均显著增加脐橙产量,但2种施用方法间无显著差异。

2.2 含微量元素镁肥对赣南脐橙果实品质的影响

由表2可知,施用镁肥能有效改善赣南脐橙果实品质。在外在品质方面,施用镁肥在不同程度上促进了脐橙单果质量的提高,其中MG1处理效果最为显著,与XG处理相比,MG1、MG2、MG3S和MG3F处理分别提高了15.02%、11.80%、9.02%和6.11%。不同镁肥处理均显著增加了脐橙果皮厚度,其中以MG2处理效果最为显著,与XG处理相比,MG1、MG2、MG3S和MG3F处理分别提高了14.76%、24.66%、19.61%和12.82%。不同镁肥处理下脐橙可食率和果型指数虽略有提高,但与XG处理相比,



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters above the bars indicate significantly different among different treatments($P < 0.05$). The same as below.

图 1 不同处理下赣南脐橙产量(A)和挂果数(B)

Fig. 1 Effects of magnesium fertilizer on fruit yield(A) and number(B) of Gannan navel orange

差异不显著。

内在品质方面,不同镁肥处理下脐橙果实维生素C和可溶性固形物含量均显著高于XG处理,果实维生素C含量以MG2处理最高,其次为MG1处理,增幅为9.40%~13.47%;可溶性固形物含量以MG3S处理最高,其次为MG1处理,增幅为6.15%~7.73%;不同镁肥处理下脐橙果实可滴定酸含量与XG处理相比无显著差异;固酸比高低排序

为MG3F> MG1> MG2> MG3S> XG,但各处理间差异不显著;MG1、MG2处理下脐橙果实出汁率显著高于MG3S和MG3F处理,与XG处理相比差异不显著。

以上结果表明,施用镁肥对赣南脐橙果实品质有显著影响,能有效改善果实品质,其中含微量元素镁肥、钙镁肥在提高脐橙单果质量、维生素C含量、固酸比和出汁率方面效果明显。

表 2 不同处理对赣南脐橙果实品质的影响

Table 2 Effects of different treatments on Gannan navel orange fruit quality

处理 Treatment	单果质量/g Single fruit weight	果皮厚度/mm Peel thick	可食率/% Edible rate	果型指数 Shape index	维生素C含量/ (mg/100 g) Vitamin C content	可溶性固形物 含量/% Soluble solids content	可滴定酸 含量/% Titratable acid content	固酸比 Solids to acid ratio	出汁率/% Juice yield ratio
XG	280.64b	5.15b	79.41a	1.05a	18.93b	11.38b	0.58a	19.55a	49.01ab
MG1	322.79a	5.91a	79.80a	1.07a	21.15a	12.11a	0.56a	21.36a	52.04a
MG2	313.75ab	6.42a	80.02a	1.08a	21.48a	12.07a	0.57a	21.33a	51.61a
MG3S	305.94ab	6.16a	80.64a	1.07a	21.05a	12.26a	0.58a	21.16a	48.24b
MG3F	297.78ab	5.81ab	80.90a	1.07a	20.71ab	12.08a	0.56a	21.41a	47.73b

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$). The same as below.

将赣南脐橙果实单果质量、果皮厚度、可食率、果型指数、维生素C含量、可溶性固形物、可滴定酸、固酸比、出汁率9个品质指标进行Z-score标准化处理及主成分分析,结果显示,3个主成分的贡献率分别为48.54%、21.84%、15.11%,累计贡献率达到85.49%(表3)。

以各主成分特征值的贡献率为分配系数,构建赣南脐橙果实综合评价模型: $Y = 0.57Y_1 + 0.26Y_2 + 0.18Y_3$,式中 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别代表赣南脐橙品质主成分分析提取出的第1、2、3主成分(表4),通过综合评

价模型得出各处理对赣南脐橙品质综合得分,排序依次为:MG2(1.00)>MG1(0.60)>MG3S(0.41)>MG3F(-0.05)>XG(-1.96),表明土壤施用含微量元素镁肥、钙镁肥能有效提高果实品质综合得分;速溶镁肥土壤施用和叶面喷施2种处理对改善果实综合品质具有良好效果。

2.3 含微量元素镁肥对赣南脐橙果实养分积累的影响

由表5可知,施用镁肥能有效促进赣南脐橙果实养分积累。与XG处理相比,MG1、MG2、MG3S和

表3 主成分特征值、贡献率、累计贡献率及特征向量

Table 3 Principal component eigenvalue, contribution rate, cumulative contribution rate and eigenvector

项目 Item	主成分 Principal component		
	1	2	3
特征值/% Characteristic value	4.37	1.97	1.36
贡献率/% Contribution rate	48.54	21.84	15.11
累计贡献率/% Cumulative contribution	48.54	70.38	85.49
单果质量 Single fruit weight	0.89	-0.15	0.13
果皮厚度 Peel thick	0.86	0.32	0.15
可食率 Edible rate	0.49	0.42	-0.64
果型指数 Shape index	0.89	-0.04	-0.16
维生素C含量 Vitamin C content	0.70	0.51	0.19
可溶性固形物含量 Soluble solids content	0.09	0.89	0.19
可滴定酸含量 Titratable acid content	-0.67	0.71	0.14
固酸比 Solids to acid ratio	0.90	-0.27	-0.07
出汁率 Juice yield	0.24	-0.18	0.89

MG3F 处理果实氮携出量分别显著提高 14.46%、16.85%、21.49% 和 14.71%；果实磷携出量以 MG1 处理最高,但各处理间差异不显著;果实钾携出量以 MG2 处理最高,较 XG 处理显著提高 9.44%。不同镁肥处理均显著增加了果实钙、镁的养分携出量, MG1、MG2、MG3S 和 MG3F 处理果实钙携出量较 XG 处理分别显著提高 32.12%、53.50%、45.51% 和

表4 各处理主成分综合得分

Table 4 Comprehensive scores of the treatments obtained by principal component method

处理 Treatment	得分 Score	排名 Ranking
XG	-1.96	5
MG1	0.60	2
MG2	1.00	1
MG3S	0.41	3
MG3F	-0.05	4

33.76%,以 MG2 处理最高,并显著高于 MG1、MG3F 处理;果实镁携出量分别显著提高 25.28%、29.91%、22.87% 和 22.71%,不同镁肥处理间无显著差异。在果实硼、锌、钼养分携出量方面, MG1、MG2 处理均显著高于 XG 处理(MG1 处理硼携出量除外),其中,硼携出量分别提高 30.38%、52.80%;锌携出量分别显著提高 32.47%、46.10%;钼携出量分别显著提高 113.38%、94.40%,而 MG3S、MG3F 处理与 XG 处理相比则无显著差异。以上结果表明,施用镁肥不同程度地增加了脐橙果实养分,尤其是显著增加氮的携出量;施用含微量元素镁肥、钙镁肥显著增加了果实钙、镁、硼、锌、钼养分携出量;土壤施用和叶面喷施速溶镁肥 2 种处理下,果实养分携出量均无显著差异。

表5 不同处理下赣南脐橙果实养分携出量

Table 5 Removal of nutrition in fruit of Gannan navel orange under different treatments

处理 Treatment	果实养分携出量/(mg/kg) Fruit nutrients removal amount							
	N	P	K	Ca	Mg	B	Zn	Mo
XG	1 756.73b	168.85a	1 656.26b	221.13c	157.18b	3.39b	1.54c	0.024 8c
MG1	2 010.69a	192.45a	1 728.18ab	292.16b	196.91a	4.42ab	2.04ab	0.052 9a
MG2	2 052.77a	180.95a	1 812.65a	339.44a	204.19a	5.18a	2.25a	0.048 2ab
MG3S	2 134.25a	180.09a	1 807.19ab	321.76ab	193.12a	3.93b	1.61c	0.040 9abc
MG3F	2 015.21a	185.78a	1 806.64ab	295.79b	192.87a	3.65b	1.86bc	0.029 8bc

2.4 含微量元素镁肥对赣南脐橙叶片养分的影响

由表6可知,7月和11月脐橙春梢叶片中大量和中量养分含量呈现下降趋势。7月叶片氮含量以 MG2 处理最高,较 XG 处理增加 5.66%,且与 MG1 和 MG3S 处理存在显著差异;11月不同镁肥处理下叶片氮含量均显著或不显著地高于 XG 处理,增幅为 11.59%~18.47%。与 XG 处理相比,7月和11月不同镁肥处理下叶片磷含量差异不显著。7月施用镁肥处理下叶片钾含量均降低,平均降幅为 3.78%,但处理间无显著差异;11月 MG3S 处理下叶片钾含量较 XG 处理显著下降 14.64%,且与 XG、MG1、MG2 和 MG3F 处理间存在显著差异。

与 XG 处理相比,7月和11月 MG1 处理下叶片钙含量分别显著增加 17.75% 和 17.37%,MG2 处理分别增加 5.57% 和 5.81%;MG3S 和 MG3F 处理与 XG 处理间差异不显著。7月 MG1、MG2 处理下叶片镁含量分别较 XG 处理增加 18.52% 和 10.37%;11月 MG1 和 MG3F 处理较 XG 处理分别显著增加 29.65% 和 26.16%。

以上结果表明,施用镁肥均显著增加了果实成熟期(11月)脐橙叶片氮含量,但没有显著影响叶片磷、钾含量;土壤施用含微量元素镁肥、钙镁肥和叶面喷施速溶镁肥均不同程度增加了果实成熟期叶片钙、镁含量,但只有土壤施用含微量元素镁肥、钙镁肥增加了7月份叶片钙、镁含量,说明

表6 赣南脐橙春梢叶片中大量和中量养分含量
Table 6 Macro and secondary nutrient contents in spring shoot leaves of Gannan navel orange

时期 Period	处理 Treatment	叶片养分含量/(g/kg) Nutrient contents in leaves				
		N	P	K	Ca	Mg
7月 July	XG	36.38ab	1.67a	26.03a	22.98c	2.70b
	MG1	33.90b	1.62a	25.58a	27.06a	3.20a
	MG2	38.44a	1.68a	24.21a	24.26b	2.98ab
	MG3S	33.90b	1.69a	25.28a	23.03c	2.68b
	MG3F	37.41ab	1.73a	25.11a	23.83bc	2.57b
11月 November	XG	29.34b	1.32ab	21.17a	26.49bc	1.72c
	MG1	33.68a	1.25ab	21.07a	31.09a	2.23a
	MG2	34.76a	1.29ab	21.38a	28.03abc	1.91bc
	MG3S	32.74ab	1.11b	18.07b	25.56c	1.85c
	MG3F	34.69a	1.42a	21.17a	28.79ab	2.17ab

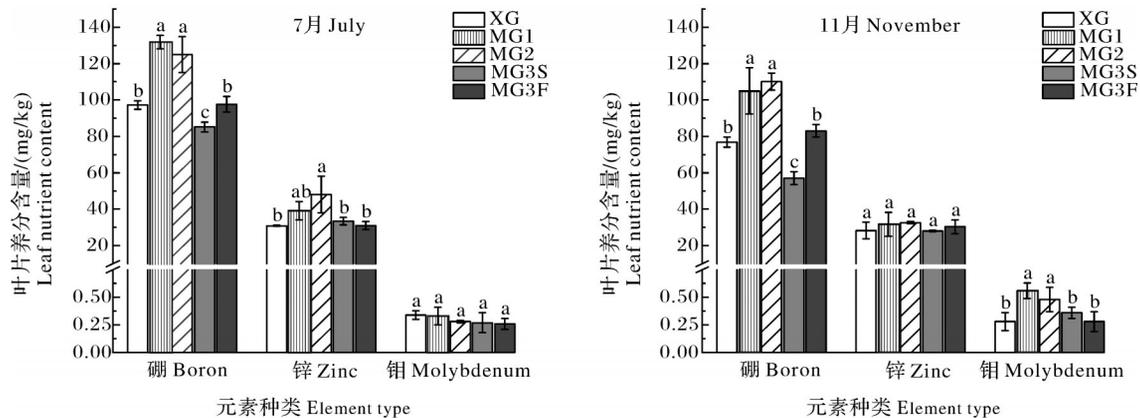


图2 不同月份镁肥处理下赣南脐橙叶片硼、锌、钼养分含量

Fig. 2 Boron, zinc and molybdenum contents in leaves of Gannan navel orange applied with magnesium fertilizer in different months

3 讨论

3.1 含微量元素镁肥、钙镁肥对赣南脐橙果实产量和品质的影响

南方地区土壤酸性和淋溶作用较强,多数果农习惯重视大量元素肥料而忽视中微量元素肥料的施用。近年来柑橘缺镁、少钙和少微量元素的情况日益严重,造成柑橘树势早衰、果实产量和品质下降等现象^[18-19]。通过增施对应的中微量元素肥料可以解决脐橙缺素症状,但要避免过量施肥而引起的问题。“以果定肥”的柑橘施肥定量方法提出,应综合柑橘果实的养分携出量和目标产量来确定肥料用量,对酸性土壤柑橘园推荐与氮、钾等量的CaO和与磷等量的MgO。

结合脐橙中微量元素推荐用量相关研究,考虑土壤基础养分含量、赣南脐橙需肥特性和果树树龄,

施用镁肥能够有效改善果实成熟期叶片氮和钙、镁营养。

由图2可知,与XG处理相比,7月和11月MG1、MG2处理下脐橙叶片硼含量平均显著提高36.14%和35.86%,而MG3S处理平均显著降低19.14%。7月份MG2处理下叶片锌含量显著提高55.56%,MG1处理提高26.63%;11月份各处理间叶片锌含量差异不显著。7月份MG1、MG2、MG3S和MG3F处理较XG处理叶片钼含量分别下降2.94%、17.65%、20.59%和23.53%;而11月份MG1和MG2处理分别显著提高37.14%和32.15%。以上结果表明,施用含微量元素镁肥、钙镁肥能有效补充脐橙树体硼、锌、钼养分的缺乏,而单独施用镁肥可能加剧树体微量元素的缺乏。

本研究中基施镁肥用量控制在80~120 g/株MgO,喷施镁肥质量分数控制在0.2%^[20-21]。结果显示,施用镁肥使赣南脐橙产量均得到显著提升,相比土壤施用和叶面喷施速溶镁肥,土壤施用含微量元素镁肥、钙镁肥的效果更好。前期研究表明,沙田柚施用含微量元素镁肥后可以增产37.71%^[22]。以上结果表明,柑橘对镁元素的需求量较大,施用镁肥具有显著的增产效果,而含微量元素镁肥增产效果更好。琯溪蜜柚的镁肥试验结果显示,柚树果实的可溶性固形物、维生素C含量有一定提升^[23],本研究同样发现施用镁肥可显著增加脐橙可溶性固形物和维生素C含量,改善果实固酸比;中微量元素在调控果实糖酸积累、同化物的合成与转运、光合作用等一系列过程中具有重要意义,养分含量不足对脐橙品质均有负面影响^[7, 24],果实品质综合评分MG1、MG2处理

比MG3S和MG3F处理得分高,综合提质效果最好。由此说明,创制的含微量元素镁肥、钙镁肥能够集中体现钙、镁及硼、锌、钼对于提升果实产量和品质的积极作用。

3.2 含微量元素镁肥、钙镁肥对赣南脐橙树体养分含量的影响

植物矿质养分丰缺状况是影响脐橙生长发育和果实品质的重要因素,果树的增产提质效果与有效养分含量呈现正相关关系。柑橘果实膨大期对养分的需求量较大,需充分补足养分。研究表明,施用镁肥不仅能促进缺镁作物对镁的吸收利用,还能显著提升植株对其他营养元素的吸收,如施用镁肥增加了白菜叶片的氮、磷、钾含量^[25-26]。本研究发现,镁肥处理显著提高了赣南脐橙果实的氮、钙、镁携出量,一定程度上提高了果实的磷、钾携出量,其中含微量元素镁肥、钙镁肥在提高果实微量养分携出量方面的效果尤为明显。土壤施用含微量元素镁肥、钙镁肥对于脐橙果实中微量养分积累的效果优于土壤施用和叶面喷施速溶镁肥;而速溶镁肥在土壤施用和叶面喷施上,2种施用方法间并无明显优劣。

在叶片养分含量方面,施用镁肥可以显著提高脐橙叶片氮元素含量,而对磷、钾含量无显著影响,此结果与脐橙果实养分携出量一致。11月份MG3S处理的叶片钾、钙含量均低于XG处理,这是由于植物在对钾、钙和镁元素的吸收中存在较强的拮抗作用,土壤施用速溶镁肥导致的交换性镁含量升高加剧了这一现象,引起树体对钾、钙吸收的抑制,而叶面喷施对其影响较小。MG1处理叶片钙、镁含量高于MG2处理,结合果实养分携出量,其原因可能为MG2处理叶片中钙、镁元素更多向果实转运所导致。土壤施用速溶镁肥显著降低了脐橙叶片中的硼含量,这可能与硼、镁在吸收机制中的竞争关系有关,前期研究表明,硼能降低番茄果实的镁含量^[27]。土壤施用含微量元素镁肥避免了因竞争作用而引起的硼含量下降问题,还不同程度提高了叶片对钼和锌的吸收。

综上所述,施用含微量元素镁肥、钙镁肥能促进树体对氮、钙、镁养分的吸收积累,有效补充硼、锌、钼养分,可使脐橙树体养分趋近平衡、协调生长,在柑橘园土壤中微量元素普遍缺乏的现状下,更能达到增产提质效果,而叶面喷施速溶镁肥作为一种更为经济的施用方法也值得考虑。

参考文献 References

- [1] 付凌晖,叶礼奇,国家统计局.中国统计摘要.2023[M].北京:中国统计出版社,2023.FU L H, YE L Q. China statistical abstract. 2023 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023 (in Chinese).
- [2] 武松伟,梁珊珊,胡承孝,等.我国柑橘园“因土补肥”与化肥减施增效生态分区[J].华中农业大学学报,2022,41(2):9-19.WU S W, LIANG S S, HU C X, et al. Ecological region division of soil based supplementary fertilization and decrement fertilization in China citrus orchards [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(2): 9-19 (in Chinese with English abstract).
- [3] 自由路,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].土壤肥料,2004(2):3-5. BAI Y L, JIN J Y, YANG L P. Study on the content and distribution of soil available magnesium and foreground of magnesium fertilizer in China [J]. Soils and fertilizers, 2004(2): 3-5 (in Chinese with English abstract).
- [4] 范玉兰,卢映琼,巫辅香,等.赣南地区脐橙园土壤交换性钙镁含量分布特征研究[J].中国果树,2014(3):29-32. FAN Y L, LU Y Q, WU F X, et al. Study on distribution characteristics of exchangeable calcium and magnesium content in soil of navel orange orchard in Southern Jiangxi Province [J]. China fruits, 2014(3): 29-32 (in Chinese).
- [5] 黄鸿翔,陈福兴,徐明岗,等.红壤地区土壤镁素状况及镁肥施用技术的研究[J].土壤肥料,2000(5):19-23. HUANG H X, CHEN F X, XU M G, et al. Status of magnesium and the techniques of application of magnesium fertilizer in the red earth region [J]. Soils and fertilizers, 2000(5): 19-23 (in Chinese with English abstract).
- [6] TIAN X Y, HE D D, BAI S, et al. Physiological and molecular advances in magnesium nutrition of plants [J]. Plant and soil, 2021, 468(1): 1-17.
- [7] DE BANG T C, HUSTED S, LAURSEN K H, et al. The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants [J]. New phytologist, 2021, 229(5): 2446-2469.
- [8] 刘小曼,刘晓东,刘闰,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).
- [9] 凌丽俐,彭良志,淳长品,等.赣南脐橙叶片营养状况对果实品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(4):947-954. LING L L, PENG L Z, CHUN C P, et al. The relationship between leaf nutrients and fruit quality of navel orange in South-

- ern Jiangxi Province of China[J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2012, 18(4): 947-954 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘怀伟, 谭启玲, 陈敏, 等. 磷减量配施锌肥对琯溪蜜柚果实产量和品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 40(1): 70-76. LIU H W, TAN Q L, CHEN M, et al. Effects of phosphorus reduction combined with zinc foliar fertilizer on yield and quality of Guanxi pomelo fruit [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 40(1): 70-76 (in Chinese with English abstract).
- [11] 谢凯柳, 商庆银, 王小慧, 等. 赣南脐橙园种植区和背景区不同土层养分丰缺状况[J]. 果树学报, 2021, 38(9): 1503-1514. XIE K L, SHANG Q Y, WANG X H, et al. Analysis and evaluation of nutrient contents of different layers of virgin and cultivated soils in navel orange orchards of Southern Jiangxi province [J]. Journal of fruit science, 2021, 38(9): 1503-1514 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王男麒, 彭良志, 淳长品, 等. 赣南柑桔园背景土壤营养状况分析[J]. 中国南方果树, 2012, 41(5): 1-4. WANG N Q, PENG L Z, CHUN C P, et al. Study on virgin soil nutrient status of citrus orchards in Southern Jiangxi Province [J]. South China fruits, 2012, 41(5): 1-4 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王昱桁, 康福蓉, 熊华焯, 等. 三种镁肥在酸性土壤柑橘园中的施用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2023(4): 155-162. WANG Y H, KANG F R, XIONG H Y, et al. Effects of three magnesium fertilizers application on citrus orchard in acid soil [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2023(4): 155-162 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王敏, 毛航, 姜兰芳, 等. 小麦专用肥配施改良剂对旱地小麦产量、品质及肥水效率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(5): 1044-1051. WANG M, MAO H, JIANG L F, et al. Effects of wheat special fertilizers combined with modifier on yield, quality, and fertilizer and water efficiency of wheat in dry land [J]. Journal of agricultural resources and environment, 2024, 41(5): 1044-1051 (in Chinese with English abstract).
- [15] 鲁剑巍, 陈防, 王富华, 等. 湖北省柑橘园土壤养分分级研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 390-394. LU J W, CHEN F, WANG F H, et al. Study of classification of the soil nutrient status of citrus orchard in Hubei Province [J]. Plant nutrition and fertilizing science, 2002, 8(4): 390-394 (in Chinese with English abstract).
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese).
- [18] 阮科, 朱礼乾, 沈鑫健, 等. 奉节脐橙园土壤养分状况普查及其与叶片养分和产量相关性研究[J]. 果树学报, 2019, 36(4): 458-467. RUAN K, ZHU L Q, SHEN X J, et al. Investigation of soil nutrient status and the correlation between leaf nutrient and yield of navel orange in Fengjie County [J]. Journal of fruit science, 2019, 36(4): 458-467 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王彤, 朱攀攀, 习建龙, 等. 重庆柑橘园土壤微量营养元素养分状况分析[J]. 果树学报, 2018, 35(12): 1478-1486. WANG T, ZHU P P, XI J L, et al. A study on nutrient status of microelements in soils of citrus orchards in Chongqing [J]. Journal of fruit science, 2018, 35(12): 1478-1486 (in Chinese with English abstract).
- [20] 武松伟, 梁珊珊, 谭启玲, 等. 柑橘营养特性与“以果定肥”[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(1): 12-21. WU S W, LIANG S S, TAN Q L, et al. Nutritional characteristics and determining amount of fertilizer by fruit nutrients removal in *Citrus* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(1): 12-21 (in Chinese with English abstract).
- [21] 朱盼盼, 马彦平, 师蓉, 等. 中微量元素钙、镁、硼、锌、铁对脐橙品质的影响及推荐用量[J]. 肥料与健康, 2021, 48(6): 43-48. ZHU P P, MA Y P, SHI R, et al. Effects of medium and trace elements calcium, magnesium, zinc, boron and iron on the quality of navel orange and recommended application rates [J]. Fertilizer & health, 2021, 48(6): 43-48 (in Chinese with English abstract).
- [22] 胡佳玉. 专用镁肥、增效剂(ZNC)对柚树和萝卜产量、品质及养分利用的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. HU J Y. Effects of special magnesium fertilizer and synergist (ZNC) on the yield, quality and nutrient utilization of pomelo and radish [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [23] 雷靖. 不同钙镁对比对柚果实产量、品质及钙镁吸收的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. LEI J. Effects of different proportions of calcium and magnesium on yield, quality and calcium and magnesium absorption of pomelo fruit [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [24] 陈欢欢, 王玉雯, 张利军, 等. 我国柑橘镁营养现状及其生理分子研究进展[J]. 果树学报, 2019, 36(11): 1578-1590. CHEN H H, WANG Y W, ZHANG L J, et al. Advances in magnesium nutritional status and its mechanisms of physiological and molecule in *Citrus* [J]. Journal of fruit science, 2019, 36(11): 1578-1590 (in Chinese with English abstract).
- [25] 罗春梅. 硫酸钾镁肥对小白菜产量、品质及养分吸收的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014. LUO C M. Effects of potassium magnesium sulfate fertilizer on yield, quality and nutrient absorption of Chinese cabbage [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).

- [26] 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.
- [27] LONG Y, PENG J S. Interaction between boron and other elements in plants [J/OL]. *Genes*, 2023, 14(1): 130 [2024-09-27]. <https://doi.org/10.3390/genes14010130>.

Effects of magnesium fertilizer containing trace-elements on yield, quality and nutrients of Gannan navel orange

DING Jun¹, LOU Wei², TAN Qiling¹, WU Songwei¹, YAN Xiang²,
YANG Yunhong³, ZHANG Rongyang³, HU Chengxiao¹

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

2. *Ganzhou Citrus Science Institute, Ganzhou 341000, China;*

3. *Yinkou Magnesite Chemical Ind Group Co., Ltd., Yinkou 115000, China*

Abstract Gannan navel orange was used to study the effects of self-developed magnesium fertilizer containing trace-elements (MG1), calcium-magnesium fertilizer containing trace-elements (MG2), instant magnesium fertilizer in soil spraying (MG3S) and foliar spraying (MG3F) on quality and nutrients of fruit to solve the declines in yield and quality of fruit in Gannan navel orange caused by exchangeable magnesium and trace-elements in the soil of citrus orchards in China. The results showed that the application of four types of magnesium fertilizers significantly increased the yield of fruit, with an increase of 28.82% and 24.76% in MG1 and MG2, and 18.78% and 16.01% in MG3S and MG3F, respectively. The application of magnesium fertilizer significantly increased the quality of single fruit, the content of soluble solids and vitamin C, the ratio of solids to acid, and improved the quality of fruit. Among them, the comprehensive score in MG2 was the highest, indicating the quality of fruit is the best. Magnesium fertilizer containing trace-elements significantly increased the accumulation of nutrients in fruits. The calcium carrying capacity and the magnesium carrying capacity of MG1 and MG2 increased by 32.12% and 53.50%, 25.28% and 29.90%, respectively. The accumulation of nutrients including nitrogen, boron, zinc, and molybdenum in fruits increased significantly as well. It is indicated that the application of magnesium fertilizer has a significant effect on increasing the yield and improving the quality of Gannan navel oranges. Magnesium fertilizer and calcium magnesium fertilizer containing trace-elements can significantly improve the content of nutrients including calcium, magnesium, boron, zinc, and molybdenum in the tree, with the best effect on increasing the yield and improving the quality. The application of instant magnesium fertilizer in soil spraying and foliar spraying have similar effects.

Keywords magnesium fertilizer containing trace-elements; Gannan navel orange; yield of fruit; quality; nutrients

(责任编辑:葛晓霞)