

文章编号:1000-8551(2019)11-2261-10

施钙与覆膜栽培对缺钙红壤花生 Mg、Fe、Zn 吸收, 积累及分配的影响

王 飞¹ 王建国^{1,2} 李 林^{1,*} 刘登望^{1,*} 万书波² 张 昊¹¹湖南农业大学农学院,湖南 长沙 410128;²山东省农业科学院生物技术研究中心,山东 济南 250100)

摘要:为探究施钙与覆膜栽培对花生植株 Mg、Fe、Zn 营养改善状况,以大籽品种湘花 2008 和南方典型第四纪红土发育的缺钙酸性红壤为试验材料,设置 3 个基施钙肥梯度[不施钙(Ca0)、施钙 375 kg·hm⁻²(Ca375)、施钙 750 kg·hm⁻²(Ca750)]和 2 种栽培方式[露地(OF)、覆膜栽培(PF)],采用土柱栽培,研究施钙与覆膜栽培对植株 Mg、Fe、Zn 含量,积累及籽仁分配系数的影响。结果表明,增施钙肥明显提高了花生茎秆、根系、果针、籽仁中 Mg 和 Fe 含量,其中,Ca750-OF 处理较 Ca0-OF 分别提高 19.2%、10.4%、38.6%、3.1%和 21.5%、30.9%、27.5%、20.0%,但显著降低了叶、茎秆、果壳及籽仁中 Zn 含量。覆膜栽培提高了茎秆、果针、籽仁 Mg 含量及果壳、籽仁 Zn 含量,较露地栽培分别提高 10.8%、12.2%,但降低了花生叶、茎秆、根系 Fe 和 Zn 含量。施钙与覆膜栽培增加了花生植株、生殖体(针壳、籽仁)Mg 积累量、籽仁 Mg 分配系数。施钙实现花生整个植株体 Fe 积累量的富集,其籽仁 Fe 分配系数显著提高 68.8%,而覆膜栽培籽仁 Fe 和 Zn 积累量显著高于露地栽培。增施钙肥降低了花生营养体 Zn 积累量,显著提高了籽仁 Zn 积累量及籽仁 Zn 分配系数,提高效果表现为 Ca750>Ca375。年份、施钙处理、栽培措施三者间对籽仁积累量及分配系数存在正交互作用。植株 Ca 积累量与 Mg、Fe 积累量呈极显著正相关,存在协同吸收关系。综上,施钙与覆膜栽培促进了土壤活化,有利于花生植株中 Mg、Fe 的吸收,加快 Mg、Fe、Zn 向籽仁的富集,进一步扩大“库容”。本研究结果为南方酸性缺钙红壤旱地改良及花生高产高效栽培提供了理论依据。

关键词:花生;钙;镁;铁;锌

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.11.2261

花生(*Arachis hypogaea* L.)属喜钙肥作物,钙需求量高于磷^[1]。钙离子(Ca²⁺)参与花生种子萌发、生长分化^[2]、形态建成^[3-4]、开花结果^[5-6]、产量构成及品质形成^[7]的全过程。镁(Mg)和钙(Ca)是花生生长所需的大量元素。其中,Mg 在植物的碳氮代谢、叶片抗氧化代谢等过程中发挥着重要作用^[8],是多种酶的活化剂。Mg 营养不足会导致土壤中养分失去平衡,进而限制作物单产的提高^[9]。据报道,南方红壤地区土壤中 Mg 元素缺乏较为严重^[10],已成为限制作物增产的重

要因素之一。铁(Fe)和锌(Zn)是花生所需的微量元素。Fe 是固氮酶、豆血红蛋白、铁氧还蛋白等的重要组成部分^[1,11]。研究发现,花生根表皮细胞中 Fe²⁺通过铁转运载体 AhIRT1 和 AhNRAMP1 进入根系从而被花生植株吸收^[12-13]。Zn 可以促进蛋白质代谢和生殖器官的发育,是植物体内多种重要酶的组分或活化剂。此外,Zn 可以增强花生叶片抗镉胁迫能力,缓解镉胁迫对花生的减产作用,提高花生产量^[14]。

从栽培角度上,关于 Ca 的吸收利用及其对农艺

收稿日期:2018-05-21 接受日期:2018-10-04

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAD11B04),国家自然科学基金面上项目(31671634),国家花生产业技术体系建设专项(CARS-14),湖南省研究生科研创新项目(CX2015B230)

作者简介:王飞,男,主要从事花生栽培研究。E-mail:wfchaoge0329@163.com

* 通讯作者:李林,男,教授,主要从事花生栽培研究。E-mail:lilindw@163.com;

刘登望,女,教授,主要从事花生栽培研究。E-mail:ldwtz@163.com。同为通讯作者。

性状、产量和品质影响等方面的研究已有大量报道^[15-20]。其中,湖南农业大学旱地作物研究所花生课题通过研究施钙肥对南方酸性缺钙红壤旱地花生生理生态的影响,发现增施钙肥提高了土壤 pH 值,有利于促进 Ca 与氮、磷、钾的协同吸收,增强了花生抗旱能力,提高了花生产量,解决了缺钙红壤旱地花生空壳问题^[21-25]。研究表明,地膜覆盖栽培能够改善土壤生态环境^[26]、促进农作物对土壤养分的吸收及产量的提高^[1, 27],在农业生产中应用广泛。然而,施钙与覆膜栽培对南方酸性缺钙红壤旱地花生植株 Mg、Fe 及 Zn 吸收、积累及分配的研究尚鲜见报道。本试验以南方典型缺钙红壤为研究对象,采用 PVC 管土柱法模拟大田环境条件,研究施钙与覆膜栽培对 Mg、Fe、Zn 的吸收富集及改善整个植株体内 Mg、Fe、Zn 营养状况的影响,以期为南方酸性缺钙红壤旱地改良和花生高产高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验地概况

供试花生品种:湘花 2008,由湖南农业大学旱地作物研究所提供。

供试土壤:湖南省浏阳市普迹镇书院村月光坪的第四纪红壤表层土,属于典型的缺钙红壤^[1, 28-29],土壤养分情况如表 1 所示。

供试肥料为尿素、磷酸二氢钾、氯化镁、氧化钙,均为分析纯。微膜采用厚度为 0.008 mm 的聚氯乙烯透明膜。试验地点位于湖南农业大学耘园试验基地,属于亚热带湿润季风气候区。2 个试验周期(2014 年 6-10 月、2015 年 5-10 月)的花生生育期内降雨量分别为 502.1、541.9 mm,平均温度分别为 24.7、25.4℃,年度间水热条件差异不大。

表 1 供试土壤的养分
Table 1 The tested soil nutrients

指标 Indicators	pH 值 pH value	碱解氮 Available nitrogen /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg·kg ⁻¹)	交换性钙 Exchangeable calcium /(mg·kg ⁻¹)	交换性镁 Exchangeable magnesium /(mg·kg ⁻¹)	有效锌 Available zinc /(mg·kg ⁻¹)
检测值 Indicators value	4.5	64.0	-	82.0	148.0	0.26	0.63

注:“-”表示未检出。

Note: ‘-’ indicates not detected.

1.2 试验设计

采取土柱栽培法^[22, 25],所用的 PVC 排水管内径为 37.5 cm、高 350 cm。装土前用电锯将 PVC 管(直径 37.5 cm、高 70 cm)横向切成两半(便于根系分层取样),用胶带封住缝隙,保证 PVC 管的侧身不漏水漏肥,管的底端和顶端分别用铁丝扎紧,管底部用双层塑料膜封底,高 10 cm,用铁丝扎紧。PVC 管底筑起宽度 100 cm、高度 10 cm 的坚实平整土垄,铺垫双层塑料膜,进一步隔断根系与 PVC 管外的接触。每个土垄排列两行 PVC 管。每 PVC 管装干土 100 kg。

试验设置 3 个基施钙肥梯度:Ca0(未施钙肥)、Ca375(熟石灰 375 kg·hm⁻²,换算后每 PVC 管施用氧化钙 4.73 g)、Ca750(熟石灰 750 kg·hm⁻²,换算后每 PVC 管施用氧化钙 9.46 g);2 种栽培方式:覆膜栽培(plastic film, PF)和露地栽培(open field, OF)。覆膜栽培采用先播种后覆膜,花生出苗时打孔引苗,地膜全程覆盖。钙肥梯度与栽培方式组合成 6 个试验处理,分别记作 Ca0-OF、Ca375-OF、Ca750-OF、Ca0-PF、

Ca375-PF、Ca750-PF。为保证除 Ca 外的其他基本养分供给的平衡性和一致性,于土柱表层 0~20 cm 处参照大田标准(45%氮磷钾等比例复合肥 750 kg·hm⁻²),每 PVC 管基施尿素 4.02 g、磷酸二氢钾 8.23 g、六水氯化镁 8.50 g(当土壤有效 Mg 含量低于 20 mg·kg⁻¹时,说明土壤缺镁^[10];本试验条件下,土壤镁含量为 0.26 mg·kg⁻¹,远低于临界值,故需要补充 Mg),并混匀。2014 年 6 月 4 日、2015 年 5 月 20 日播种精选花生种子 8 粒,出苗后定苗 4 株,每个处理播种 6 个 PVC 管,始花期每个处理喷施等量硼肥。成熟期选择长势均匀的 4 个 PVC 管取样、收获。花生生长发育阶段进行正常的水分和病虫草害管理。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生物量的测定 参照王建国等^[22]的方法。将植株分为叶片、茎秆、根系、果针、果壳、籽仁等各个器官取样。其中,根系按照 3 个土层(0~20、20~40、40 cm 以下)进行准确取样,将各样品 105℃ 杀青 1 h,80℃ 烘干至恒重,称取干物质重量。荚果收获后及时

晾晒、考种、测产。

1.3.2 Mg、Fe、Zn 含量的测定 采用 FW100 高速万能粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司)粉碎样品,浓 HNO₃ 消煮,超纯水定容后用 ICPE-9000 电感耦合等离子体发射光谱仪(岛津公司,日本)测定^[22]。标准样品购自国家有色金属及电子材料分析测试中心。

参照文献[22, 25]的方法计算 Mg、Fe、Zn 积累量,按照公式分别计算 Mg 积累量(mg·株⁻¹)、籽仁 Mg 分配系数:

Mg 积累量 = 植株各器官生物量 × 植株各器官 Mg 含量 (1)

籽仁 Mg 分配系数 = 籽仁 Mg 积累量 / 植株 Mg 积累量 (2)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据整理和作图; IBM SPSS Statistics 21 软件进行数据分析;采用 LSD 法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 花生植株不同器官 Mg、Fe、Zn 含量

2.1.1 Mg 含量 由表 2 可知,2014-2015 年,成熟期缺钙红壤旱地花生植株 Mg 含量以叶片(5.34 ~ 7.72 mg·g⁻¹)最高,其次是茎秆、果针、根系、籽仁,果壳的 Mg 含量最低;随着土层深度增加,根系中 Mg 含量逐渐降低。不论是覆膜栽培还是露地栽培,增施钙肥均显著降低了花生叶片和果壳的 Mg 含量($P < 0.05$),但提高了茎秆、根系、果针及籽仁 Mg 含量,其中,与不施钙处理(Ca0-OF)相比,Ca750-OF 的茎秆、根系、果针及籽仁 Mg 含量分别提高 19.2%、10.4%、36.8% 和 3.1%。同一施钙处理下,覆膜栽培较露地栽培提高了茎秆、果针及籽仁中的 Mg 含量。茎秆、叶、果针、果壳中 Mg 含量在年份、栽培方式、施钙处理三者交互作用间均达到显著水平。

2.1.2 Fe 含量 由表 3 可知,除 Ca0-PF 外,相同处理下花生各器官的 Fe 含量均依次为根系>茎秆>果针>叶>果壳>籽仁。施钙处理改善了整个植株 Fe 营养状况,提高了缺钙红壤旱地花生叶、茎秆、根系、果针、籽仁中的 Fe 含量,其中 Ca750-OF 较 Ca0-OF 分别提高 28.4%、21.5%、30.9%、27.5%、20.0%。但 2 种栽培方式下施钙均显著降低了果壳中的 Fe 含量。同一钙肥水平下,覆膜栽培降低了果针中的 Fe 含量,显著降低了叶、茎秆、根系中的 Fe 含量($P < 0.05$),其中,与 Ca750-OF 相比,Ca750-PF 的果针、叶、茎秆、根系中平

均 Fe 含量分别降低 12.4%、9.6%、7.0%、18.8%,而其果壳的 Fe 含量则增加 13.4%。花生籽仁的 Fe 含量低于其他器官,覆膜栽培对其 Fe 含量影响较小。茎秆 Fe 含量在栽培方式与施钙处理的交互作用达到显著水平。

2.1.3 Zn 含量 由表 4 可知,2 种栽培方式下,施钙降低了红壤花生叶、茎秆、果壳、籽仁中的 Zn 含量,其中 Ca750-OF 较 Ca0-OF 分别显著降低 13.4%、11.3%、18.9% 和 28.5%。2 种栽培方式下,施中钙(Ca375)均显著提高了根系平均 Zn 含量,而施高钙(Ca750)则均显著降低了根系 Zn 含量,但 2 个处理对果针 Zn 含量均无显著影响(除 Ca750-PF 外)。同一钙肥水平下,与露地栽培相比,覆膜栽培降低了茎秆和根系平均 Zn 含量,但提高了果壳、籽仁的 Zn 含量,其中 Ca750-PF 较 Ca750-OF 分别显著提高 8.2% 和 26.3%。茎秆、叶、生殖器官(果针、果壳、籽仁)Zn 含量在栽培方式与施钙处理间的交互作用达到显著水平。

2.2 花生植株 Mg、Fe、Zn 积累

2.2.1 Mg 积累量 由表 5 可知,2014-2015 年,相同栽培方式下,施钙提高了花生植株 Mg 积累量(除 2015 年 Ca750-OF 外),其中,2014 年 2 种栽培方式下,施钙处理的植株 Mg 积累量均高于不施钙处理。施钙对不同年份间花生营养体 Mg 积累的影响存在差异,与不施钙处理相比,施钙处理下 2014 年花生营养体 Mg 积累有所提高,但降低了 2015 年 Mg 积累。除 2015 年覆膜栽培施钙处理外,施钙增加了生殖体(针壳、籽仁)Mg 积累量,其中 2014、2015 年,Ca750-OF 较 Ca0-OF 针壳 Mg 积累量分别增加 28.2%、5.6%,籽仁 Mg 积累量分别显著增加 231.0%、98.8%,籽仁 Mg 分配系数分别显著提高 120%、90%,除 2015 年 Ca375-PF 外,覆膜栽培提高了花生植株、营养体、生殖体 Mg 积累量。不同年份覆膜栽培对籽仁 Mg 分配系数的影响存在差异。施钙处理与栽培方式对籽仁 Mg 分配系数存在显著的交互影响。年份、施钙处理、栽培方式三者间对花生籽仁 Mg 积累量及其分配系数的交互影响显著。

2.2.2 Fe 积累量 由表 6 可知,综合两年试验结果发现,施钙明显促进了花生营养体对 Fe 的吸收积累。其中 Ca750-OF 的花生植株、营养体、针壳、籽仁 Fe 积累量较 Ca0 分别增加 16.4%、15.3%、15.1% 和 198.8%。增施钙肥实现了籽仁 Fe 的富集,其分配系数均有所提高。2014 年,相同施钙水平下,覆膜栽培的花生植株、营养体、针壳和籽仁的 Fe 积累量均显著高于露地栽培。2015 年,相同施钙水平下,覆膜栽培

表 2 施钙与覆膜栽培对缺钙红壤花生植株各器官 Mg 含量的影响

Table 2 Effect of calcium application and plastic film mulching cultivation on Mg content of each part of peanut plant in red soil under calcium deficiency

年份 Year	处理 Treatment	叶 Leaf	茎秆 Stem	不同土层根系 Root in different soil layer				果针 Gynophore	果壳 Shell	籽仁 Kernel
				0~20 cm	20~40 cm	40 cm 以下	平均含量			
				/(mg·g ⁻¹)						
2014	Ca0-OF	6.83b	3.23c	2.86b	2.26	1.58	2.56c	3.01b	1.43b	2.29d
	Ca375-OF	5.61d	3.71bc	3.48a	2.33	1.59	2.94b	3.70a	1.12cd	2.38ab
	Ca750-OF	5.34d	3.99ab	3.44a	2.60	1.71	2.93b	3.61a	0.98d	2.32b
	Ca0-PF	7.69a	3.33c	2.75b	2.49	1.76	2.52c	3.68a	2.11a	2.35ab
	Ca375-PF	6.92b	4.12ab	3.31a	2.73	1.99	3.00ab	3.75a	1.54b	2.46a
	Ca750-PF	6.32c	4.16a	3.49a	3.03	2.13	3.18a	3.75a	1.22c	2.46a
均值 Mean		6.45	3.76	3.22	2.57	1.79	2.86	3.58	1.40	2.38
2015	Ca0-OF	7.43b	3.36e	2.32c	2.10	1.48	2.11c	2.29c	1.42a	1.96d
	Ca375-OF	6.88c	3.98c	2.35bc	2.21	1.57	2.16b	3.43a	0.90d	2.11c
	Ca750-OF	6.16d	3.87d	2.47a	2.14	1.55	2.22a	3.64a	0.80e	2.07cd
	Ca0-PF	7.72a	3.82d	2.16d	1.76	1.47	1.96d	3.13b	1.06b	2.16bc
	Ca375-PF	6.76c	4.13b	2.37b	1.96	1.63	2.16b	3.55a	0.98c	2.29ab
	Ca750-PF	6.02d	4.26a	2.48a	1.97	1.62	2.23a	3.65a	0.81e	2.31a
均值 Mean		6.83	3.90	2.36	2.02	1.55	2.14	3.28	1.00	2.15
方差分析(P 值) Analysis variance(P value)										
Y		*	*	*	-	-	*	*	*	*
CM		*	*	ns	-	-	ns	*	*	*
CaT		*	*	*	-	-	*	*	*	*
Y×CM		*	ns	ns	-	-	*	ns	*	*
Y×CaT		ns	ns	*	-	-	*	ns	*	ns
CM×CaT		ns	ns	ns	-	-	*	*	ns	ns
Y×CM×CaT		*	*	ns	-	-	ns	*	*	ns

注: Y: 年份; CM: 栽培方式; CaT: 施钙处理。由于 20~40 cm 和 40 cm 以下土层根系个别样品较少, 所以仅测定一个重复值, 未做方差分析。* 表示处理间在 0.05 水平差异显著; ns: 差异不显著 ($P > 0.05$); “-” 表示未进行差异显著分析。同列不同小写字母表示同一年不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Y: Year. CM: Cultivation methods. CaT: Calcium treatment. Since there are fewer individual samples of root in the layer of 20~40 cm and below 40 cm, only one repeat value was determined, and no variance analysis was performed. * indicates significant at 0.05 level. ns: No significant. “-” indicates no significant difference was analyzed. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments in the same year at 0.05 level. The same as following.

表 3 施钙与覆膜栽培对缺钙红壤花生植株各器官 Fe 含量的影响

Table 3 Effect of calcium application and plastic film mulching cultivation on Fe content of each part of peanut in red soil under calcium deficiency

处理 Treatment	叶 Leaf	茎秆 Stem	不同土层根系 Root in different soil layer				果针 Gynophore	果壳 Shell	籽仁 Kernel	
			0~20 cm	20~40 cm	40 cm 以下	平均含量				
			/(mg·g ⁻¹)							
Ca0-OF	0.765bc	1.237b	1.643c	1.218	2.470	1.719cd	1.008bc	0.595b	0.030b	
Ca375-OF	0.960a	1.497a	2.120b	1.500	2.490	2.090b	1.137ab	0.506c	0.034ab	
Ca750-OF	0.982a	1.503a	2.369a	1.509	2.507	2.251a	1.286a	0.509c	0.036a	
Ca0-PF	0.558d	0.966c	1.243d	1.078	1.888	1.346e	0.903c	0.677a	0.033ab	
Ca375-PF	0.669cd	1.061c	1.606c	1.080	1.980	1.605d	0.993bc	0.623b	0.034ab	
Ca750-PF	0.888b	1.398b	1.783c	1.499	2.239	1.828c	1.126ab	0.577b	0.033ab	
方差分析(P 值) Analysis variance(P value)										
CM		*	*	*	-	-	*	*	*	*
CaT		*	*	*	-	-	*	*	*	*
CM×CaT		ns	*	ns	-	-	ns	ns	ns	ns

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same as following.

表 4 施钙与覆膜栽培对缺钙红壤花生植株各器官 Zn 含量的影响

Table 4 Effect of calcium application and plastic film mulching cultivation on Zn content of each part of peanut in red soil under calcium deficiency $/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$

处理 Treatments	叶 Leaf	茎秆 Stem	不同土层根系 Root in different soil layer				果针 Gynophore	果壳 Shell	籽仁 Kernel
			0~20 cm	20~40 cm	40 cm 以下	平均含量			
Ca0-OF	65.73a	45.33a	83.13b	55.21	65.20	76.15b	40.09a	32.56b	41.18a
Ca375-OF	47.03c	39.40bc	93.03a	52.09	65.89	81.27a	41.94a	30.67b	34.54c
Ca750-OF	56.90b	40.20b	64.88c	64.47	83.70	68.80c	44.07a	26.41c	29.44d
Ca0-PF	56.47b	45.03a	45.93e	61.59	72.23	53.32e	41.27a	39.18a	40.89a
Ca375-PF	51.10bc	36.17bc	57.57d	52.80	66.70	58.59d	40.85a	31.61b	39.91a
Ca750-PF	44.73c	34.63c	44.33e	57.64	54.58	47.99f	36.03b	28.57ab	37.19b
方差分析(P 值) Analysis variance(P value)									
CM	*	*	*	-	-	-	*	*	*
CaT	*	*	*	-	-	-	ns	*	*
CM×CaT	*	ns	*	-	-	-	*	*	*

表 5 施钙与覆膜栽培对缺钙红壤花生植株 Mg 积累与分配的影响

Table 5 Effect of calcium application and plastic film mulching cultivation on Mg accumulation and distribution of peanut in red soil under calcium deficiency

年份 Year	处理 Treatment	营养体 Nutritive organ $/(\text{mg}\cdot\text{plant}^{-1})$	生殖体 Reproductive organ/ $(\text{mg}\cdot\text{plant}^{-1})$		植株 Plant $/(\text{mg}\cdot\text{plant}^{-1})$	籽仁 Mg 分配系数 Mg distribution index of kernel
			针壳	籽仁		
2014	Ca0-OF	32.53b	6.64b	6.89d	46.06d	0.15d
	Ca375-OF	34.83b	7.87b	17.92b	60.62c	0.30b
	Ca750-OF	37.65b	8.51b	22.81a	68.97c	0.33a
	Ca0-PF	67.24a	12.18a	13.54c	92.96b	0.15d
	Ca375-PF	70.55a	14.16a	22.06a	106.77a	0.21c
	Ca750-PF	69.39a	12.23a	23.11a	104.72ab	0.22c
2015	Ca0-OF	78.3ab	11.56b	9.61d	99.54c	0.10e
	Ca375-OF	72.92bc	14.01a	17.79b	104.72bc	0.17c
	Ca750-OF	67.87c	12.21ab	19.10b	99.19c	0.19b
	Ca0-PF	81.93a	13.37ab	13.98c	109.29ab	0.13d
	Ca375-PF	75.22b	12.97ab	24.03a	112.22a	0.21a
	Ca750-PF	73.68b	12.72ab	26.34a	112.74a	0.23a
方差分析(P 值) Analysis variance(P value)						
CM×CaT		ns	ns	ns	ns	*
Y×CM×CaT		ns	ns	*	ns	*

籽仁 Fe 积累量高于露地栽培, 其中 Ca750-PF 较 Ca750-OF 提高 7.6%。施钙处理与栽培方式交互作用对花生植株、营养体、籽仁 Fe 积累和籽仁 Fe 分配系数影响显著。

2.2.3 Zn 积累量 由表 7 可知, 增施钙肥降低了花生营养体 Zn 积累量。其中, Ca750-OF 较 Ca0-OF 降低 17.8%, 但其花生籽仁 Zn 积累量及籽仁 Zn 分配系数

分别提高 86.5% 和 79.6%。2014 年, 相同施钙水平下, 覆膜栽培增加了花生营养体、针壳和籽仁 Zn 积累量, 较露地栽培分别提高 39.4%、19.0%、20.5%。2015 年, 相同施钙水平下, 覆膜栽培的花生籽仁 Zn 分配系数显著高于露地栽培。花生植株、营养体、籽仁 Zn 积累量和籽仁 Zn 分配系数在年份、施钙处理、栽培方式三者间交互作用达到显著水平。

表 6 施钙与覆膜栽培对缺钙红壤花生植株 Fe 积累与分配的影响

Table 6 Effect of calcium application and plastic film mulching cultivation on Fe accumulation and distribution of peanut in red soil under calcium deficiency

年份 Year	处理 Treatment	营养体 Nutritive organ /(mg·plant ⁻¹)	生殖体 Reproductive organ/(mg·plant ⁻¹)		植株 Plant /(mg·plant ⁻¹)	籽仁 Fe 分配系数 Fe distribution index of kernel
			针壳	籽仁		
2014	Ca0-OF	8.71d	2.40d	0.09e	11.19d	0.008d
	Ca375-OF	11.19c	2.86cd	0.26c	14.31c	0.018b
	Ca750-OF	12.44bc	3.53b	0.36a	16.33bc	0.022a
	Ca0-PF	12.42bc	3.37bc	0.19d	15.99c	0.012c
	Ca375-PF	13.95b	4.47a	0.30b	18.72b	0.016b
	Ca750-PF	18.15a	4.43a	0.31b	22.90a	0.014c
2015	Ca0-OF	20.43a	5.01a	0.15d	25.59a	0.006e
	Ca375-OF	20.90a	5.32a	0.28b	26.50a	0.011d
	Ca750-OF	21.16a	5.00a	0.33ab	26.49a	0.013bc
	Ca0-PF	14.70b	4.98a	0.22c	19.90b	0.011cd
	Ca375-PF	15.28b	4.89a	0.36a	20.53b	0.017a
	Ca750-PF	21.19a	5.13a	0.38a	26.69a	0.014b
方差分析(P 值) Analysis variance(P value)						
CM×CaT		*	ns	*	*	*
Y×CM×CaT		ns	ns	*	ns	*

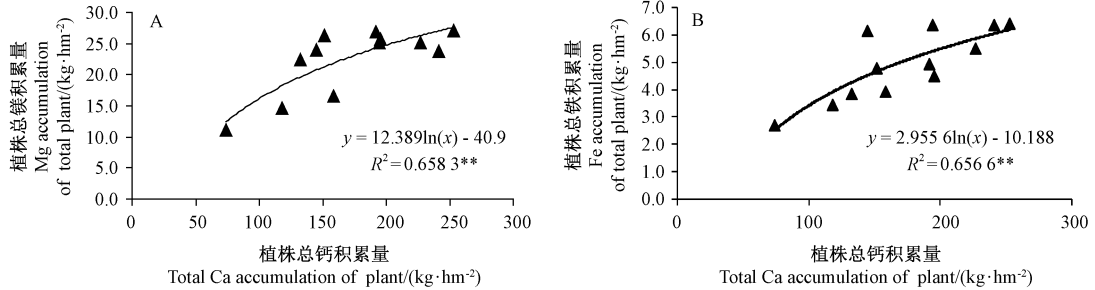
表 7 施钙与覆膜栽培对缺钙红壤花生植株 Zn 积累与分配的影响

Table 7 Effect of calcium application and plastic film mulching cultivation on Zn accumulation and distribution of peanut in red soil under calcium deficiency

年份 Year	处理 Treatments	营养体 Nutritive organ /(mg·plant ⁻¹)	生殖体 Reproductive organ/(mg·plant ⁻¹)		植株 Plant /(mg·plant ⁻¹)	籽仁 Zn 分配系数 Zn distribution index of kernel
			针壳	籽仁		
2 014	Ca0-OF	430.6c	109.4d	123.6d	663.6c	0.19d
	Ca375-OF	394.3c	138.2cd	260.5bc	793.0bc	0.33a
	Ca750-OF	408.8c	149.6bc	290.0b	848.3b	0.34a
	Ca0-PF	712.6a	174.0ab	236.5c	1 123.1a	0.21c
	Ca375-PF	633.3ab	204.2a	357.2a	1 194.8a	0.30b
	Ca750-PF	569.8b	178.0ab	349.3a	1 097.1a	0.32a
2 015	Ca0-OF	1 003.9a	221.8ab	202.7d	1 428.4a	0.14d
	Ca375-OF	743.8c	236.3a	248.0cd	1 228.1c	0.20c
	Ca750-OF	770.0c	197.9b	318.8bc	1 286.7bc	0.25b
	Ca0-PF	846.3b	252.4a	265.2b	1 363.9ab	0.19c
	Ca375-PF	707.1cd	222.4ab	418.8a	1 348.4ab	0.31a
	Ca750-PF	656.0d	203.2b	424.3a	1 283.4bc	0.33a
方差分析(P 值) Analysis variance(P value)						
CM×CaT		ns	*	ns	ns	ns
Y×CM×CaT		*	ns	*	*	*

2.3 花生植株 Ca 与 Mg、Fe、Zn 协同吸收关系

本研究条件下, 2014 年增施钙肥处理下花生植株 Zn 积累量呈波动式变化, 而 2015 年, 施钙肥降低了植株 Zn 积累量, 两年结果变化趋势不一致, 因此未进行 Zn 与 Ca 协同吸收关系分析。由图 1 可知, 植株 Ca 积



注: ** 表示在 0.01 水平上极显著相关。

Note: ** indicates extremely significant correlation at 0.01 level.

图 1 花生植株钙素与镁 (A)、铁 (B) 协同吸收关系

Fig.1 Synergistic correlation between Ca and Mg (A), Fe (B) accumulation in plant of peanut

3 讨论

3.1 施钙与覆膜栽培对花生植株 Mg、Fe、Zn 营养的吸收效应

本研究结果表明, 施钙与覆膜栽培提高了花生茎秆、果针、籽仁 Mg 含量, 缓解了土壤酸胁迫, 进而促进了花生植株对 Mg 的吸收。这是由于基肥中添加氯化镁, 提高了表层土壤中 Mg²⁺ 浓度, 进而有利于根系吸收, 这与何春梅等^[30] 在花生上施用镁肥及丁玉川等^[31] 在大豆上施用镁肥的研究结论一致。但也有研究表明, Mg 对苹果区 Ca 和 Zn 的吸收存在拮抗作用^[32], 这可能与前人研究采用水培法 (Mg²⁺、Ca²⁺ 及 Zn²⁺ 直接共存于溶液), 而本试验是土柱栽培, 采用酸性土壤, 施钙肥后土壤物理、生态环境对离子间的拮抗作用产生部分抵消作用, 有利于 Mg²⁺、Ca²⁺ 吸收有关。本研究还发现施钙与覆膜栽培降低了红壤旱地花生叶、茎秆 Zn 含量, 这主要与 Mg²⁺ 与 Zn²⁺ 间的拮抗作用有关。

南方酸性红壤中 Fe 含量较高。相比北方石灰性土壤而言, 南方红壤旱地花生极少出现缺 Fe 新叶黄化的现象。增施钙肥后整个植株 Fe 营养状况进一步改善, 各器官 (除果壳外) Fe 含量明显提高。这可能是由于施钙促进了土壤活化, 提高了根际土壤酶活性^[21]、根系 Fe(III) 还原酶活性及 Fe(III) 还原酶基因的表达^[33]。本研究中, 相同施钙水平下覆膜栽培显著降低了花生营养器官 (叶、茎秆、根系) Fe 含量, 这可能是由

累量与 Mg、Fe 积累量均呈极显著正相关。采用对数函数进行回归分析可知, 植株 Ca 积累量与 Mg、Fe 素积累量存在协同吸收关系, 即随着钙肥施用量的增加, 花生植株对 Ca 的吸收积累量提高, 同时植株对 Mg、Fe 的吸收积累也增加。

于覆膜提高了营养器官生物量, 导致花生营养器官 Fe 含量降低, 存在一定的“稀释效应”^[34]。

3.2 施钙与覆膜栽培对花生植株 Mg、Fe、Zn 营养的积累效应

Mg、Fe、Zn 是人类正常生长发育所必需的营养元素。2002 年的营养普查表明, 我国约 2.5 亿和 1 亿人口分别受到缺 Fe 和缺 Zn 的影响, 尤其是农村地区的妇女和儿童^[35]。如何提高 (遗传育种、栽培措施、生物技术等) 作物籽粒中微量元素含量和生物有效性, 成为解决人类微量元素缺乏的第四大战略 (生物防御工程)。研究表明, 花生和玉米间作增加了花生籽粒 Fe 的富集^[36], 土壤翻耕措施有效增加了花生籽仁中 Fe 的累积分配, 提高了花生 Fe 的利用效率^[37]。本研究结果表明, 施钙与覆膜栽培提高了花生籽仁 Mg、Fe、Zn 积累量及籽仁 Mg、Fe 和 Zn 分配系数, 说明此栽培措施下 Mg、Fe 和 Zn 更多地向花生籽仁中富集, 进一步扩大了“库容”, 主要原因是覆膜具有稳温作用^[26], 能够改善土壤微生物环境^[27], 且覆膜和钙肥互作可促进元素吸收^[1, 22, 25]。本研究还发现年份、施钙处理、栽培措施三者间对花生籽仁积累量及籽仁 Mg、Fe 和 Zn 分配系数存在显著交互作用。此外, 花生植株总 Ca 积累量与 Mg、Fe 积累量呈极显著正相关, 存在协同吸收关系。随着钙肥施用量的增加, 花生植株对 Mg、Fe 的吸收积累也增加, 这与前期研究发现的钙与氮、磷、钾间存在协同吸收的结论相似^[25]。不同年份花生植株总 Ca 积累量与 Zn 积累量间相关性存在差异, 这可能是由于土壤有效锌偏低, 而试验中未添加锌肥所致,

具体原因还有待进一步验证。

4 结论

本研究结果表明,施钙与覆膜栽培能缓解土壤酸胁迫,促进花生植株对 Mg 的吸收,改善整个植株 Fe 营养状况,提高花生籽仁 Mg、Fe 和 Zn 积累量及分配系数,进一步扩大了“库容”。植株 Ca 积累量与 Mg、Fe 积累量呈极显著正相关及协同吸收关系。本研究为南方缺钙酸性红壤旱地改良及花生高产高效栽培提供了理论依据。本试验采用土柱栽培方法研究 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Zn^{2+} ,是对水培法的有力补充。但存在两点不足,还有待进一步探究:一是,本试验所用的 Mg 肥为氯化镁(施用氯的量相对 Mg 比较大),研究表明,过量的氯对种子发芽和根瘤菌的固氮作用有影响^[1];二是,本研究未添加 Zn 肥,因此未能得出 Ca 和 Zn 之间协同吸收关系。今后应开展不同种类 Mg 肥试验研究,以进一步明确 Mg 的作用、排除氯的影响,同时施用 Zn 肥,探明 Ca 和 Zn 之间协同吸收关系。

参考文献:

[1] 万书波. 中国花生栽培学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003

[2] 张海平. 钙调控花生 (*Arachis hypogaea* L.) 生长发育的细胞生理机制研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2003

[3] Yang S, Wang F, Guo F, Meng J J, Li X G, Wan S B. Calcium contributes to photoprotection and repair of photosystem II in peanut leaves during heat and high irradiance [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2015, 57(5): 486-495

[4] Zharare G E, Blamey F C, Asher C J. Effects of pod-zone Calcium supply on dry matter distribution at maturity in two groundnut cultivars in solution culture [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2012, 35(10): 1542-1556

[5] Jain M, Pathak B P, Harmon A C, Tillman B L, Gallo M. Calcium dependent protein kinase (CDPK) expression during fruit development in cultivated peanut (*Arachis hypogaea*) under Ca^{2+} -sufficient and-deficient growth regimens [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(18): 2272-2277

[6] 林葆, 周卫. 花生荚果钙素吸收调控及其与钙素营养效率的关系国际合作课题 [J]. *核农学报*, 1997, 11(3): 42-46

[7] Howe J A, Florence R J, Harris G, Van Santen E, Beasley J P, Bostick J P, Balkcom K B. Effect of cultivar, irrigation, and soil calcium on runner peanut response to gypsum [J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(5): 1312-1320

[8] 彭云, 韩晓日, 杨劲峰, 刘轶飞, 王月, 林颖. 镁肥不同用量对花生叶片抗氧化代谢的影响 [J]. *花生学报*, 2014, 43(2): 7-11

[9] 杨利华, 郭丽敏, 傅万鑫. 玉米施镁对氮磷钾肥料利用率及产量的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(1): 84-86

[10] 黄鸿翔, 陈福兴, 徐明岗, 秦道株, 高菊生, 朱永兴. 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

[11] 左元梅, 刘永秀, 张福锁. 铁营养对花生根瘤生长发育和功能的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(4): 462-466

[12] Ding H, Duan L H, Li J, Yan H F, Zhao M, Zhang F S, Li W X. Cloning and functional analysis of the peanut iron transporter AhIRT1 during iron deficiency stress and intercropping with maize [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167(12): 996-1002

[13] Xiong H C, Kobayashi T, Kakei Y, Senoura T, Nakazono M, Takahashi H, Takahashi H, Shen H Y, Duan P G, Guo X T, Nishizawa N K, Zuo Y M. AhNRAMP1 iron transporter is involved in iron acquisition in peanut [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(12): 4437-4446

[14] 孙志强. 锌对花生生理特性、产量和品质的影响及其对镉胁迫的调控 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2014

[15] 高丽丽. 两个花生品种苗期钙素营养特性比较 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2013

[16] 张佳蕾, 郭峰, 孟静静, 于晓霞, 杨莎, 张思斌, 耿耘, 李新国, 万书波. 酸性土施用钙肥对花生产量和品质及相关代谢酶活性的影响 [J]. *植物生态学报*, 2015, 39(11): 1101-1109

[17] 周录英, 李向东, 王丽丽, 汤笑, 林英杰. 钙肥不同用量对花生生理特性及产量和品质的影响 [J]. *作物学报*, 2008, 34(5): 879-885

[18] 何鑫, 张存政, 刘贤金, 卢海燕, 梁颖. 外源硝酸钙对水培生菜生长及矿质元素吸收的影响 [J]. *核农学报*, 2016, 30(12): 2460-2466

[19] 杨莎, 侯林琳, 郭峰, 张佳蕾, 耿耘, 孟静静, 李新国, 万书波. 盐胁迫下外源 Ca^{2+} 对花生生长发育、生理及产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 894-900

[20] 于天一, 王春晓, 张思斌, 王丽丽, 于晓霞, 刘川江, 王才斌, 孙学武. 土壤酸胁迫下不同花生品种 (系) 钙吸收、分配及钙效率差异 [J]. *核农学报*, 2018, 32(4): 751-759

[21] 穆青. 施钙对种植不同粒型花生的瘠薄红壤旱地酶活性与肥力的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016

[22] 王建国, 张昊, 李林, 刘登望, 万书波, 王飞, 卢山, 郭峰. 施钙与覆膜栽培对缺钙红壤花生钙素积累、分配及利用率的影响 [J]. *华北农学报*, 2017, 32(6): 205-212

[23] 谭红姣. 瘠薄红壤旱地不同粒型花生品种生长发育及产量对施钙响应 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015

[24] Yang S, Li L, Zhang J L, Geng Y, Guo F, Wang J G, Meng J J, Sui N, Wan S B and Li X G. Transcriptome and differential expression profiling analysis of the mechanism of Ca^{2+} regulation in peanut (*Arachis hypogaea*) pod development [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1609

[25] 王建国, 张昊, 李林, 刘登望, 万书波, 王飞, 卢山, 郭峰. 施钙与覆膜对缺钙红壤花生氮、磷、钾吸收利用的影响 [J]. *中国油*

- 料作物学报, 2018, 40(1): 110-118
- [26] 高彦萍, 胡新元, 李掌, 吴雁斌, 张武, 齐恩芳. 高寒阴湿区不同覆膜马铃薯微型薯的土壤水热效应及产量表现[J]. 核农学报, 2017, 31(12): 2426-2433
- [27] 张帆, 王晨冰, 赵秀梅, 王发林. 果园垄膜覆盖对土壤微生物量碳氮及土壤呼吸的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(7): 1448-1455
- [28] Robert J F. Fertilization of Peanut (*Arachis hypogaea* L.) with Calcium; Influence of Source, Rate, and Leaching on Yield and Seed Quality[D]. Alabama: Auburn University, 2011
- [29] 杨锦. 四川盆地水稻土钙含量及钙肥效应研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2006
- [30] 何春梅, 王飞, 李清华, 林诚, 李昱, 林新坚. 钾、镁、硫元素不同对比对花生养分吸收、累积及分配的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1385-1389
- [31] 丁玉川, 焦晓燕, 聂督. 镁水平对不同类型土壤大豆生长、养分吸收以及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 201-205
- [32] Zharare G E, Asher C J, Blamey F P C. Magnesium antagonizes pod-zone calcium and zinc uptake by developing peanut pods[J]. Journal of Plant Nutrition, 2010, 34(1): 1-11
- [33] Ding H, Duan L H, Wu H L, Yang R X, Ling H Q, Li W X, Zhang F S. Regulation of AhFRO1, an Fe(III)-chelate reductase of peanut, during iron deficiency stress and intercropping with maize [J]. Physiologia Plantarum, 2009, 136(3): 274-283
- [34] Fan M S, Zhao F J, Fairweather-Tait S J, Poulton P R, Dunham S J, McGrath S P. Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2008, 22(4): 315-324
- [35] Ma G S, Jin Y, Li Y P, Zhai F Y, Kok F J, Jacobsen E, Yang X G. Iron and zinc deficiencies in China: What is a feasible and cost-effective strategy? [J] Public Health Nutrition, 2008, 11(6): 632-638
- [36] 左元梅, 李晓林, 王永歧, 曹一平, 张福锁. 玉米花生间作对花生铁营养的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(2): 153-159
- [37] 沈浦, 王才斌, 于天一, 吴正锋, 郑永美, 孙学武, 郑亚萍, 孙秀山, 罗盛. 免耕和翻耕下典型棕壤花生铁营养特性差异[J]. 核农学报, 2017, 31(9): 1818-1826

Effects of Calcium Application and Plastic Film Mulching Cultivation on Absorption, Accumulation and Distribution of Mg, Fe and Zn of Peanut in Red Soil Under Ca Deficiency

WANG Fei¹ WANG Jianguo^{1,2} LI Lin^{1,*} LIU Dengwang^{1,*} WAN Shubo² ZHANG Hao¹

(¹ College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128; ² Biotechnology Research Center, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan, Shandong 250100)

Abstract: In order to explore the nutrition improvement of Mg, Fe and Zn of peanut in red soil of southern China under calcium deficiency by applying calcium and plastic film mulching cultivation, a large seed variety Xianghua 2008 and the typical red soil of southern China under calcium deficiency were used as the test material for the soil column experiment. Three calcium fertilizer gradients and two kinds of cultivation methods (open field and plastic film cultivation) were used in this experiment including no calcium (Ca0), medium calcium fertilizer (Ca375) and high calcium fertilizer (Ca750) [open field cultivation(OF)、mulching cultivation] to study effect of application of calcium and plastic film mulching on the contents and accumulation of Mg, Fe, Zn in the plant of peanut and the distribution coefficient of seed. The results showed that the content of Mg and Fe in stems, roots, pegs and kernels of peanut. Among them, Ca750-OF treatment increased by 19.2%、10.4%、38.6%、3.1% and 21.5%、30.9%、27.5%、20.0%, respectively, compared with Ca0-OF; but the content of Zn in leaves, stems, husks and kernels was significantly decreased under calcium application. The content of Mg in stems, pegs and kernels and the content of Zn in the husks and seed kernels by the mulching cultivation were increased 10.8% and 12.2% more than that of open field cultivation respectively, but the content of Fe and Zn in the roots, stems and roots was decreased. Application of calcium and plastic film mulching cultivation increased the accumulation of Mg in the plant, genital (needle, shell and seed kernel) and the partition coefficient of magnesium in kernel. The application of calcium was to achieve whole plant peanut accumulation of Fe and the Fe distribution coefficient of the kernel was increased significantly 68.8%, while the accumulation of Fe and Zn accumulation in kernel under plastic film mulching cultivation was significantly higher than the open field cultivation. The addition of calcium fertilizer reduced the accumulation of Zn in vegetative body of peanut, significantly increased the accumulation of Zn in kernel and Zn distribution coefficient of seed kernel, and the effect followed the order of Ca750> Ca375. There was an orthogonal interaction among year, calcium application and the film mulching cultivation on the accumulation of seed kernels and the distribution coefficient. A significant and positive correlation between the accumulation of Ca and Mg and Fe, and synergistic absorption existed. In summary, the application of calcium and plastic film mulching cultivation promoted soil activation, which was beneficial to the absorption of Mg and Fe in peanut plants, accelerated the enrichment of Mg, Fe and Zn from plant to seed kernels and further expanded the “storage capacity”. This study provides a theoretical basis for the improvement of calcium deficiency and acid-red dry upland and high-yield cultivation of peanut in the south of China.

Keywords: peanut, calcium, magnesium, iron, zinc