

DOI: 10.3969/j.issn.2095-3704.2012.04.026

土壤与植物中钙营养研究进展

井大炜^{1,2}, 邢尚军^{1*}, 马丙尧¹, 马海林¹, 杜振宇¹, 刘方春¹, 陈波³

(1. 山东省林业科学研究院, 山东 济南 250014; 2. 德州学院, 山东 德州 253023;
3. 山东农业大学 生命科学学院 山东省农业微生物重点实验室, 山东 泰安 271018)

摘要: 钙的应用非常广泛, 它对作物的生长及品质具有重要的影响。通过论述植物与钙的营养机理的整体研究现状及植物对钙的吸收、运转和分布, 讨论了钙与激素之间的相互作用, 同时阐述了肥料中的钙在土壤中的迁移与转化, 并分析了钙与其他营养元素之间的互相作用机理, 最后对钙营养研究的进一步发展提出了自己的建议, 旨在为钙肥的合理利用提供理论依据。

关键词: 土壤; 植物; 钙

中图分类号: S158.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-3704 (2012) 04-0447-05

Research Advances on Calcium Nutrition in Soil and Plant

JING Da-wei^{1,2}, XING Shang-jun^{1*}, MA Bing-yao¹, MA Hai-lin¹, DU Zhen-yu¹,
LIU Fang-chun¹, CHEN Bo³

(1. Shandong Forestry Institute Academy, Ji'nan 250014, China; 2. Dezhou University, Dezhou 253023, China;
3. Shandong Key Laboratory of Agricultural Microbiology, College of Life Sciences, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: Application of calcium as nutrients for plant was common in recent years, since it is concerned that calcium affects the growth and quality of plant. Firstly, it was dealt with the present situation of calcium study and the uptake, transportation and distribution of calcium, and the relations between calcium and hormone were also reviewed in this paper. At the same time, the transportation and transformation of calcium in soil, and the relationship between calcium and other were analyzed. Finally, the perspective which related calcium utilization in China was put forward.

Key words: soil; plant; calcium

钙是植物生长的必需营养元素之一, 用盆栽试验证明钙是植物必需的营养元素已经有 100 年的历史。同时, 钙在植物生理代谢过程起着越来越重要的作用^[1-2], 它不仅是一种必需元素, 而且是许多重要的生理生化过程的调控者。从整体上看, 大多数土壤含钙量较高, 表土平均含钙量可达 1.37%,

大多数土壤溶液中钙的含量约为 10~20 mg/L, 正常条件下能够满足大部分作物的需要^[1]。但是, 长期以来, 人们普遍认为, 土壤中含钙丰富, 因而, 不需要施用钙肥。经过农业科学工作者长期的调查和试验, 以及与国外交流, 最近几年, 已经有越来越多的人认为给土壤施用钙肥是必要的。从目前的研

收稿日期: 2012-10-20

作者简介: 井大炜, 男, 陕西榆林人, 博士生, 主要从事植物营养机理研究, E-mail: jingdawei009@163.com; * 通信作者: 邢尚军, 研究员, 主要从事植物营养与土壤肥料研究, E-mail: xingsj-126@126.com。

究来看,北方富含钙的石灰性土壤上,一些作物也出现了生理性缺钙,特别是需钙量较多的果树、蔬菜缺钙现象较为普遍,如苹果的苦痘病或水心病^[2],鸭梨的黑心病和桃树缺钙果实的顶腐病及缺钙造成的大量落叶^[3]。蔬菜中的番茄^[4-5],甜椒肌腐病^[6]和大白菜干烧心^[7]等也很常见。不仅影响产量,而且会使果实品质变差,且不耐贮藏^[2]。因此,本文就土壤和植物中钙营养的若干机理进行综述,以期对钙肥的合理利用提供依据。

1 植物中钙的营养机理研究

植物体内钙的含量为 0.1%~5%,植物体内的含钙量受遗传特性影响很大,而受介质中钙供应量的影响却很小^[1]。钙是一种难移动的中量营养元素,基本只能在木质部随蒸腾运输,韧皮部运输的钙量极少,这种特性决定了当土壤钙素供给或钙素在植物体内运输受到抑制时,植株幼嫩器官如幼叶,生长点,果实等是首先遭到缺钙影响的部位。蔬菜作物需钙量较大,而且在整个生育期的需求量都很大^[8],很容易遭到缺钙的危害^[4]。钙在植物生长发育过程中,不仅是营养物质,而且对植物的生理生化过程有很重要的调节作用^[9]。Barr 等^[10]人指出了钙在光合电子传递中的作用。Hertig 与 Wolosiuk 证明菠菜叶体 F-1,6-Dpase 的激活与钙有密切的关系^[11]。因此研究果实吸收、运转、利用和代谢规律对钙素合理调控、提高果实鲜食品质和贮藏品质有重要的意义。

研究表明,钙在植物中起着不可估量的作用。钙能稳定细胞膜、细胞壁,还参与第二信使传递,调节渗透作用,具有酶促作用等;钙对生物膜的完整性具有重要作用^[12-13]。钙可以把膜表面的磷酸盐和磷脂蛋白质的羟基桥接起来,具有稳定生物膜透性和细胞完整性的基本作用^[14]。质膜上存在大量钙,可调节离子的吸收选择性,并防止溶质从细胞质中泄漏出去^[7]。植物在生长过程中获得高量钙的液泡和细胞壁中大部分果胶物质是以果胶酸钙的形式存在^[15]。

2 植物对钙的吸收、转运与分布

2.1 植物对钙的吸收

土壤中钙主要以钙离子的形态吸附在交换位点上,约占盐基的 80%以上^[16]。以螯合形态和不溶性

磷酸盐、硫酸盐以及硅酸盐形态存在的量较少。通常土壤中存在足够的钙供根系吸收。钙离子主要通过质流转移到根表面,再经过质外体途径短距离运输到达木质部,由于根内皮层细胞壁上木栓化的凯氏带可阻止 Ca^{2+} 的质外体运输,钙的吸收主要发生在凯氏带尚未形成的根尖和侧根形成部位^[9]。植物种类与实验条件不同,根系钙素吸收特点不同。有研究指出,大麦根吸收第一阶段为非代谢过程,第二阶段吸收速率恒定,属于代谢吸收,玉米是通过质外体吸收钙,凯氏带形成后即停止吸收,花生根系的成熟区与伸长区均可吸收钙^[3]。

2.2 植物对钙的运输

植物钙的长距离运输主要发生在木质部,一般认为钙难以在韧皮部运输,其运输的动力主要是蒸腾作用。钙由蒸腾液流从木质部到达旺盛生长的树梢、幼叶、花、果及顶端分生组织。钙到达这些组织和器官后,多数变得相对稳定,几乎不发生再分配与运输。蒸腾强度越大和生长时间越长的器官,经木质部运入的 Ca^{2+} 就越多^[17]。

2.3 植物中钙的分布

钙在植物中的分布,一般根部占总钙量 18%,木质部占 40%,树枝内占 11%,叶占 13%,果实占 15%^[3]。一般在新陈代谢旺盛的顶端分生组织中具有多量的钙,果实生长初期,钙在果实中均匀分布,随季节推移则出现浓度差异,果皮最高,果肉最低,种子与果心居中^[2]。芒果果实果肉钙含量也存在明显差异,由外果肉到内果肉,由果柄到果尖逐渐降低,但在储藏期间受外界条件的影响,果实中钙会进行再分配,不溶性钙含量增加,可溶性钙含量减少^[18]。

3 钙与植物激素的相互作用

钙对 5 种已知植物激素的功能都有强烈的修饰效应^[19]。钙或者加强某些激素的生理效应,或者抑制另一些激素的效应。王亚琴等^[20]在研究细胞分裂素诱导芽形成的过程中证实了钙调节细胞分裂素的作用。有文献报道^[21],钙与生长素的作用模型有某种直接联系。用 EDTA 洗涤向日葵茎段时,生长素的运输受到抑制,此时加入钙离子后,生长素运输又得以恢复;另一方面,EDTA 可加强钙离子从玉米胚芽鞘片段外流,说明生长素与钙离子逆向运输有关。生长素类对钙离子运转的影响已广泛用于生

产实践。安志信用 0.7% 氯化钙加上 50 mg/kg 萘乙酸进行心叶补钙, 对大白菜干烧心病的防治效果达 80% 以上。结合钙示踪, 证实了萘乙酸对钙素吸收运转有明显促进作用, 生长素还可促进钙向果实内转移, 原因是生长素具有向基部运转的功能, 钙与其发生逆向运输, 运输部位尚不清楚。钙与赤霉素是离体大麦糊粉层保持 α -淀粉酶高生产率所必需的两个条件, α -淀粉酶有 4 个同工酶, 其中两种的合成与分泌必须依赖钙离子的存在^[22]。此外, 钙调蛋白抑制剂也显著抑制 α -淀粉酶的分泌, 表明钙信使系统参与调节 α -淀粉酶的合成与分泌^[19], 脱落酸能诱导气孔关闭。近来的研究表明, 脱落酸与钙在阻止气孔开放过程中有协同效应, 钙可使低浓度脱落酸的效应显著增强, 用钙通道阻塞剂或钙调蛋白抑制剂都可使脱落酸的效应显著下降, 这被认为是由于脱落酸能增强保卫细胞对钙离子的透性, 而钙离子作为第二信使调节离子流动, 以决定保卫细胞的膨压^[23]。乙烯与钙的关系研究较少。

4 肥料钙在土壤中的迁移与转化

钙在土壤中的移动速度比想象的快得多^[24]。孙蕾对 4 个实验点养分淋溶进行监测发现, 土壤钙的淋溶损失远大于施钙量, 达每年每公顷数百公斤, 而钾淋失仅为痕量至每年每公顷 100 kg, 减少施钾量可增加钙的淋失。钙进入土壤后还可发生交换吸附和专性吸附, 形成离子对或生成难溶性沉淀, 土壤中钙的移动与转化将直接影响到肥料钙的有效性^[25]。

4.1 钙在土壤中的迁移

4.1.1 土壤钙的形态 地壳中平均含钙 3.25%, 按含量列于第 5 位^[26]。土壤含钙可以从痕量到 4% 以上, 其决定于母质、气候及其他成土因素。淋溶土壤含钙少于 1%, 干旱半干旱地区土壤含钙 1% 以上。有些土壤含游离碳酸钙, 这种土壤称之为石灰性土壤^[27]。土壤中钙有 4 种存在形态, 即有机物中的钙、矿物态钙、代换态钙和水溶性钙^[28]。有机物中的钙主要存在于动植物残体中, 占全钙的 0.1%~1.0%。矿物态钙占全钙量 40%~90%, 是主要钙形态。土壤含钙矿物主要是硅酸盐矿物, 如方解石碳酸钙及石膏硫酸钙等, 这些矿物易于风化或具一定的溶解度, 并以钙离子形态进入溶液, 其中大部分被淋失, 一部分为土壤胶体吸附成为代换钙, 因而矿物态钙是

土壤钙的主要来源。代换钙占全钙量的 20%~30%, 占盐基总量的大部分, 对作物有效性好^[29]。水溶性钙指存在于土壤溶液中的钙, 含量为每公斤几毫克到几百毫克, 是植物可直接利用的有效态钙^[26]。

4.1.2 钙在土壤中的迁移 周卫等^[24]研究表明, 在施钙与不施钙的条件下, 3 种土壤钙淋失均随降水量的增加而增加, 其中淋失量大小依次为: 砂壤质棕壤>壤质棕壤>粘质棕壤; 施硝酸钙的土层>施硫酸钙的土层>不施钙的土层。另外, 表层施钙, 在降水 60 mm 下, 棕壤中肥料钙迁移深度依次为: 砂质棕壤>壤质棕壤>粘质棕壤, 硝酸钙中钙的迁移大于硫酸钙^[30]。

4.2 钙在土壤中的转化

钙在土壤中有多种形态, 主要以吸附态存在, 还有相当一部分为非交换态和非酸溶态, 而水溶态钙量很少随着外界条件的变化, 土壤中钙形态发生改变。

4.2.1 钙在土壤中的转化与土壤条件有关 水溶性钙和吸附钙转化量为砂壤质>壤质>粘质。而非交换态和非酸溶态钙则与之相反。这可能由于质地粘重的土壤比表面较大, 其发生的土壤反应较为复杂, 钙结合形态亦日趋复杂化^[9]。

4.2.2 钙的转化与钙肥的品种有关 硝酸钙所转换的非溶态钙组分多于非交换态钙, 而硫酸钙则反之, 这可能是由于土壤中的硫酸钙易形成离子, 而硝酸钙所分解的钙离子有较大活性, 可形成较多的难溶含钙物质及发生专性吸附^[24]。

5 钙与其他营养元素的相互作用

酸性土壤中发生的 Al^{3+} 和 Mn^{2+} 毒害可由施石灰得到矫治。部分原因是由于钙可以与 Al^{3+} 和 Mn^{2+} 竞争吸收部位^[31], 并促进根系生长。石灰性土壤中嫌钙植物的缺绿病是由于缺铁所致, 可由在土壤中施入螯合剂来防治, 说明铁在土壤中的溶解度是缺铁病发生的原因之一, 另外由于铁在叶片中以磷酸铁形态沉淀了。盐渍土中施钙有明显的效果, 研究表明^[31], 小麦根在含 NaCl 的培养液中吸收大量的 Na^+ 和 Cl^- , 而 K^+ 和 Ca^{2+} 的吸收减少。补充 $CaCl_2$ 后细胞内的 Cl^- 和 Na^+ 含量明显减少, 质膜相对透性下降, Ca^{2+} 和 K^+ 吸收增加。研究表明^[32], 钙受到限制后对植物氮代谢影响明显, 表现为植物对外源氮的吸收下降, 抑制地下部硝态氮向地上部运转, 从而

改变硝态氮在不同器官中的分配,降低地上部氮素同化酶的活性以及蛋白质合成速度,最后导致植物生长量下降。据报道^[23],施钙促进了番茄对氮磷钾的吸收,减少了对镁的吸收。有研究得出,施用水溶性磷肥增加了植物对钙的吸收,并指出当营养液中钙硫比为20~25 mg/kg时,大豆产量最高。花生中钙镁表现出协助作用,这是否由于钙离子促进了土壤中镁的释放,并有利于导管壁上的 Mg^{2+} 的释放及 Ca^{2+} 不与 Mg^{2+} 竞争吸收部位所致,机制尚不清楚^[33]。钙与硼之间的关系一直不明确。一些研究发现,随着土壤施钙量的增加植物吸硼量降低^[18]。植物钙含量随土壤硼水平上升而下降,高钙抑制硼的运转,使叶片硼的含量降低。硼钙负相关在土壤硼、钙供应水平较高时尤为明显。认为钙硼间呈正相关的报道也不少,施硼可以增加对钙的吸收,促进对钙的运输,提高植株和果实中钙的含量。钙硼互作效应也显著影响果实的生理代谢^[18]。也有研究认为,喷硼减轻苹果的苦痘病是硼、钙互作的结果,因为喷硼后果实的含钙量明显提高,适当的硼钙比可降低苹果的栓化病和苦馅病^[1]。叶国平等^[34]试验指出,柑桔叶、果皮的有效硼钙比值与裂果率分别呈显著和极显著正相关。

6 钙营养研究的问题与展望

随着我国经济的快速发展和人民生活水平的不断提高,人们对食品的要求越来越高,如何通过各种有效措施提高产品品质成为植物营养研究者的重要研究方向。现阶段的研究证明钙的施用提高了作物中钙的含量和产品的品质^[31],但目前由于土壤缺钙导致作物减产并不为人们所重视,对于需钙量大的作物如花生、番茄等的吸钙模式也没有深入研究。钙缓解土壤重金属污染作用机制可能涉及到钙离子竞争吸附与专性吸附,对土壤钙吸附与解吸动力学及其在土壤中与重金属的工作机制研究也不多。钙与激素的作用机制目前仍停留在各种假设阶段,其真正的原初反应需进一步探讨。此外,在钙肥形态方面,大多数的研究均是硝酸钙对作物的影响,而关于螯合钙、纳米钙等其他不同高活性形态的钙的施用效果并没有涉及,而这也必将引起科研工作者的重视。

参考文献:

- [1] 梁和,马国瑞,石伟勇,等. 钙硼营养与果实生理及耐储性研究进展[J]. 土壤通报,2000(4): 187-190.
- [2] 白昌华,田世平. 果树钙营养研究[J]. 果树科学,1989,6(2): 121-124.
- [3] 刘剑锋. 梨果实钙的吸收、运转机制及影响因素研究[D]. 武汉:华中农业大学博士学位论文,2004.
- [4] 董彩霞,周健民,王火焰. 不同番茄品种对缺钙敏感性的差异[J]. 西北植物学报,2003,23(5): 778.
- [5] 杨利玲,刘慧. 北方石灰性土壤番茄缺钙症的发生及防治[J]. 长江蔬菜,2011(11): 39-40.
- [6] 顾汉龙. 春季大棚甜椒缺钙的防治措施[J]. 长江蔬菜,2011(5): 26.
- [7] 缪颖,蒋有条,曾广文,等. 大白菜干烧心病发生过程中中心叶组织 Ca^{2+} -ATPase活性的变化[J]. 园艺学报,1998,25(1): 50-55.
- [8] LU B W. Ca deficiency of vegetable and Ca was used[J]. Soil and Fertilizer, 1984(5): 27-28.
- [9] 许仙菊,陈明昌,张强,等. 土壤与植物中钙营养的研究进展[J]. 山西农业科学,2004,32(1): 33-38.
- [10] Barr R, Troxel K, Crane F L. Calcium chelator, inhibits electron transport in photosystem II of spinach chloroplasts at two different sites. Biochem[J]. Biophga Res Commum, 1980, 2: 206-212.
- [11] Hertig, Wolosiuk R A. A dual effect of Ca on chloroplast fructose-1, 6-biphosphatase Biochem[J]. Biphys commen, 1980, 97: 325-333.
- [12] Hanson J B. The functions of Calcium in plant development[J]. Annu. Rev. Plant Physiol, 1984, 36: 397-439.
- [13] Whittington J, Smith F S. Calcium-salinity interactions affect ion transport in Chara coralline[J]. Plant Cell Environ, 1992, 15: 727-733.
- [14] 郑青松. 外源钙和缩节胺对棉花幼苗耐盐性的调控及其机理[D]. 南京:南京农业大学硕士学位论文,2000: 49.
- [15] 王淑芬,张仪,沈征言. 大白菜干烧心病的形态结构及生理生化变化[J]. 园艺学报,1996,23(1): 37-44.
- [16] 张英鹏,于仁起,孙明,等. 氮钙配施对菠菜产量、钙含量以及土壤钙含量的影响[J]. 山东农业科学,2008,9: 51-54.
- [17] 周卫,林葆. 苹果幼果组织钙运输途径与激素调控[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(2): 214-219.

- [18] 梁和, 马国瑞, 石伟勇, 等. 钙硼营养与果实生理及耐储性研究进展[J]. 土壤通报, 2000(4): 187-190.
- [19] 龚明, 李英, 曹宗. 植物内的钙信使系统[J]. 植物学通报, 1990(3): 19-29.
- [20] 王亚琴, 张康健, 黄江康. 植物衰老的分子基础与调控[J]. 西北植物学报, 2003, 23(1): 182-189.
- [21] 吴秋琴, 赵素娥, 尚克进, 等. 2,4-D 和 6-BA 对向日葵下胚轴愈伤组织生长及钙调蛋白的影响[J]. 植物生理学报, 1987(2): 103-106.
- [22] 安志信, 孙德岭, 闻凤英, 等. 大白菜干烧心病发生和防治的研究[J]. 华北农学报, 1990, 5(1): 78-84.
- [23] 许涛. 钙素对番茄花柄外植体脱落调控机理的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学博士学位论文, 2008.
- [24] 周卫, 林葆. 棕壤中肥料钙迁移与转化模拟[J]. 土壤肥料, 1996, (1): 17-22.
- [25] 孙蕾. 渭北地区果园土壤质量演变趋势[D]. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2010.
- [26] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994.
- [27] 林培. 区域土壤地理学[M]. 北京: 北京农业出版社, 1993.
- [28] 周卫, 林葆. 土壤中钙的化学行为与生物有效性研究进展[J]. 土壤肥料, 1996(5): 19-22.
- [29] 孙德岭, 安志信, 闻凤英, 等. 萘乙酸对番茄钙素吸收运转的影响[J]. 华北农学报, 1999, 14(1): 89-92.
- [30] 郑维民, 李广敏, 商振清, 等. 用 ^{45}Ca 示踪法研究小麦对钙的吸收及其在土壤中的移动[J]. 核农学报, 1989, 3(4): 206-212.
- [31] 周卫, 林葆. 植物钙素营养机理研究进展[J]. 土壤学进展, 1995, 23(2): 12-17.
- [32] 王学奎, 李合生, 刘武定, 等. 钙螯合剂对小麦幼苗氮代谢和干物质和影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 42-47.
- [33] 沈竹夏. 钙信号对气孔调控作用机制的探讨[D]. 浙江: 浙江大学博士学位论文, 2009.
- [34] 叶国平, 李浩宇, 翁雪芳. 叶面肥在柑桔上的肥效试验研究[J]. 现代农业科技, 2010(14): 263-266.