植物营养与肥料学报 2003,9(2):233～237
Plant Nutrition and Fertilizer Science

缺钙对不同钙效率番茄幼苗钙吸收及幼茎解剖结构的影响

董彩霞[1,2], 周健民[1*], 王庆亚[2], 乔丽雅[2], 王火焰[1]
(1. 中国科学院南京土壤研究所,江苏南京,210008;2. 南京农业大学,江苏南京,210095)

摘要: 采用两个钙效率有较大差异的番茄品种(04,05)研究了缺钙胁迫对幼苗钙素吸收动力学特性、钙在体内的吸收和分配及幼茎解剖结构的影响。结果表明,正常供钙下不同钙效率番茄品种存在吸钙速率的基因型差异,钙低效品种 04>钙高效品种 05,经过缺钙胁迫后重新吸收钙的速率仍然以 04>05。正常供钙下,钙低效品种 04 生长量、钙吸收量均显著高于钙高效品种 05,而缺钙处理下植株生长量、钙吸收量、钙含量显著低于 05。缺钙下两品种的根冠比增加,05 增加程度高于 04。正常供钙下两品种表皮细胞、薄壁细胞和形成层细胞形状大小匀称,排列紧密,04 茎木质部导管数较多;缺钙使两品种幼茎形成层细胞发育受到影响,尤以 04 影响显著,表明缺钙胁迫对 04 品种结构的影响远远高于 05。

关键词: 番茄; 钙效率; 动力学特性; 钙素吸收; 幼茎; 解剖结构
中图分类号: S143.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2003)02-0233-05

Effects of Ca deficiency on the Ca absorption and distribution in plant and the anatomical structure of stem in tomato seedlings with different Ca efficiency

DONG Cai-xia[1], ZHOU Jian-min[1], WANG Qing-ya[2], QIAO Li-ya[2], WANG Huo-yan[1]
(*1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*
2 College of Agriculture, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Two tomato cultivars with different Ca efficiency were used to study the kinetic characteristics of Ca^{2+} absorption rate, Ca accumulation and distribution in plant under Ca stress in tomato seedlings. The anatomical structure of stem was also studied at the same time. Results showed that there was a genotype difference in absorption of Ca between the different Ca efficiency tomato cultivars. The Ca^{2+} absorption rate of Ca-inefficiency cultivar 04 was higher than that of the Ca-inefficiency cultivar 05 under both sufficient Ca treatment (CK) and Ca deficiency treatment (-Ca). In normal Ca supply condition (CK), Ca-inefficiency cultivar 04 had higher growth rate, Ca absorption rate and Ca content in seedlings than cultivar 05 while these indices were lower than those of 05 under Ca deficient condition. The ratio of R/S increased under Ca deficiency stress in both cultivars and the degree of the increase in 05 was larger than that in 04. In control the shape and size of epidermal cells and cambial cells of the young stem were uniform and the cells were regularly arranged and the xylem pipes of cultivar 04 were larger and more than that of 05. In the condition of Ca deficiency the development of these cells was affected significantly especially for Ca-inefficient cultivar which indicated that it was influenced greatly more than Ca-efficient cultivar when suffered by the Ca stress.

Key words: tomato; Ca efficiency; dynamics; Ca absorption; young shoots; anatomic structure

---

收稿日期: 2002-07-26
基金项目: 中国科学院南京土壤研究所所长基金项目(BR0007)资助。
作者简介: 董彩霞(1972—),女,山东文登人,博士,主要从事植物营养和植物生理研究。 * 通讯作者。

钙是植物必需的营养元素，缺钙导致番茄脐腐病、苹果苦痘病[1,2]等生理病害。通过选育钙高效基因型品种提高钙的利用效率，对于降低脐腐病等缺钙生理病害具有重要意义。我们通过对33个生产上广泛应用的番茄品种钙效率的比较，发现品种间存在较大差异，但导致这种钙效率有较大差异的原因尚不清楚。为此，选用两个钙效率有较大差异的番茄品种进行了有关吸钙特性差异和茎解剖结构分析，以期为不同钙效率番茄品种钙特性差异提供理论依据。

1 材料与方法

2.1 试验材料

供试材料为L-402(代号04)和江蔬一号(代号05)，分别为辽宁农学院和江苏农科院培育。

2.2 培养方法

采用Hoagland + Arnon微量元素营养液，EDTA-Fe为铁源。种子用次氯酸钠洗净后，浸泡5～6 h，置于培养皿中催芽，待种子露白后，取发芽一致的种子播于具纱网的聚酯乙烯盘(内有1/10浓度营养液)中。待两片子叶展开第一真叶外露时，选生长一致的幼苗移栽至600 mL的塑料烧杯(外裹黑纸)中，每杯植苗2株。在1/5、1/4、1/2营养液中各培养5d后，进行缺钙处理(－Ca)，钙浓度设为1 mg/L，不足的NO_3^-以$NaNO_3$补足，其余元素均按Hoagland完全营养液配置，对照(CK)为Hoagland完全营养液，钙浓度为200 mg/L。营养液用蒸馏水配置，pH保持在6.0～6.5。

钙吸收动力学特性：一周后进行幼苗动力学试验。在试验前一天，将所有幼苗移入蒸馏水中，饥饿培养24h。钙浓度设为0、20、40、80、100、200、400、800、1000 μmol/L 9个浓度。取长势一致的幼苗放入内装40 mL钙营养液的离心管中，置于恒温培养室中培养48h，每管中1株幼苗。恒温室内光强为400 μmol/(m·s)，温度为(25±1)℃。用原子吸收分光光度计测定溶液中的钙含量。通过测定离心管中试验前后的总钙量变化计算钙的吸收速率。每个浓度设2个重复。

缺钙对番茄幼苗干重、钙含量和吸收量的影响：缺钙处理2周后将幼苗分5个部位取样，分别是根、老叶(子叶和从下往上1～4真叶)、幼叶(第4叶往上)、老茎(包括胚根至第4叶以下的茎和叶柄)、幼茎(第4叶以上的茎及叶柄)，用蒸馏水冲洗3遍，擦干，放于纸袋中，实验室105℃杀青，50～60℃烘至恒重。

缺钙对不同钙效率番茄幼茎显微结构的影响：缺钙处理1周后，每处理用刀片取子叶以上2 cm茎段，切割成0.5 cm小段，FAA固定，石蜡包埋，常规石蜡切片法制片，制成厚8 μm的切片，番红固绿染色，显微观察。

2 结果与分析

2.1 不同钙效率番茄幼苗钙素吸收的动力学特征

动力学参数Km(表观米氏常数)和Vmax(最大吸收速率)可以表示根系吸收离子的效率[3]，还可以作为植物基因型适应土壤中营养条件的适应水平，是植物吸收养分数学模拟必不可少的两个参数。Km的倒数可以反映根系对离子亲和力的大小，Km越小，表明根系载体与离子亲和力越大。在正常供钙和经缺钙胁迫后不同钙效率番茄幼苗在不同浓度$Ca(NO_3)_2$溶液中吸Ca^{2+}的动力学曲线，均适合于Michaelis-Menten酶动力学模式(图1)。从该吸收曲线可以看到，不同钙效率番茄幼苗在正常供钙下就存在吸钙速率的差异，04吸收速率＞05，即效率低的品种吸钙速率快，这与低效品种往往是喜钙品种，对钙的需求量较大有关；缺钙培养后，04的吸收速率仍然远远高于05，尤其是当溶液钙浓度较高时04的吸收速率大大加快。正常供钙下，04品种Km＜05(表1)，缺钙培养使两品种Km值增大，Vmax降低，表明缺钙处理可能对根系造成了胁迫伤害，使根系对Ca^{2+}的亲和力降低。缺钙处理使05 Km增加的程度较小，04增加的程度较大，在本试验浓度范围内仍没有达到最大吸收速率。从CK来看，该品种需钙量较大，是个喜钙品种，经过缺钙胁迫后，重新供钙使其吸收速率大大增强，吸收量也显著增加。同一钙水平下，吸收速率04CK＞05CK，04缺钙处理＞05缺钙处理，这可能与该品种的生长速率快、生长量大有关。

Cmin是当养分吸收速率为0时溶液中离子的浓度。在本试验中，04CK的Cmin值＞05CK＞04缺钙＞05缺钙，表明品种的需钙量越大，越不适应低钙浓度的外界环境。也就是说，钙效率越低、需钙量越大的品种越容易遭受外界低浓度钙的胁迫伤害。

表1 钙水平对不同钙效率番茄幼苗Ca^{2+}吸收的动力学参数的影响

Table 1 Effects of Ca levels on the kinetic parameters of Ca^{2+} uptake in tomato seedlings with different Ca efficiency

处理 Treatment	Km (mmol/L Ca)	Vmax [μmol/(g·h)]	Cmin (μmol/L Ca)
04CK	0.285	68	38
05CK	0.308	56	22
04缺钙 Without Ca	＞0.408	62	8
05缺钙 Without Ca	0.316	45.7	0.2

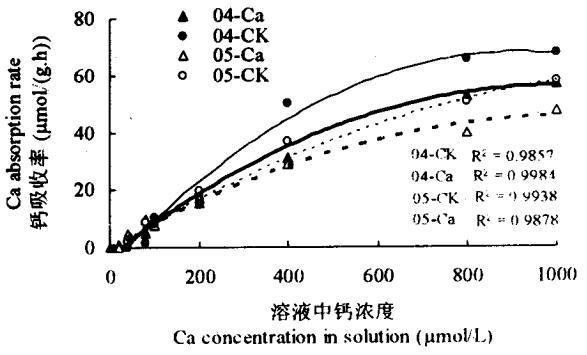


图 1　不同钙效率番茄吸钙特性比较

Fig. 1　Comparison of Ca^{2+} absorption rate between tomato cultivars with different Ca efficiency

2.2　缺钙对不同钙效率番茄幼苗干重和钙吸收的影响

表 2 看出，缺钙显著影响了植株的生长，两品种根和地上部干重分别比对照降低了 33.8%、38.7%(04)和 8.8%、19.2%(05)，缺钙对地上部的影响高于根部，导致了两品种根冠比(R/S)增加，增加程度 05>04。正常供钙下两品种钙含量无显著差异，缺钙显著降低了幼苗钙含量，04 下降程度高于 05；正常供钙下 04 的钙吸收量显著高于 05，缺钙使其显著降低，04 下降 80%，05 下降 60%左右。两品种在正常钙处理下果实钙含量无差异，缺钙使 04 显著下降，05 下降不明显。表明 04 品种对缺钙较为敏感，钙效率较低；05 不敏感，钙效率较高。在试验中也可发现，在同样缺钙胁迫下，04 心叶已经出现典型缺钙症状，而 05 品种没有。

表 2　缺钙对不同钙效率番茄幼苗干重和钙吸收量及含钙量的影响

Table 2　Effects of Ca deficiency in nutrient solution on the dry weight and Ca content and absorption in tomato seedlings with different Ca efficiency

品种 Cultivar	处理 Tr.	根干重 Root dry wt. (g)	-Ca/CK (%)	茎干重 Shoot dry wt. (g)	-Ca/CK (%)	幼苗钙浓度 Ca conc. in seedlings (%)	-Ca/CK (%)	幼苗钙吸收 Ca uptake in seedlings (mg/plant)	-Ca/CK (%)	R/S
04	-Ca	0.157a		1.001ab		0.819a		9.48a		0.157a
	CK	0.237c	66.2	1.635c	61.3	2.653c	30.8	49.66d	19.1	0.145a
05	-Ca	0.173ab		0.947a		1.103b		12.35b		0.183a
	CK	0.190bc	91.2	1.172b	80.8	2.454c	44.9	33.42c	37.0	0.162a

注：不同的字母表示同一指标在缺钙和对照中的 5%差异显著性。

Note: Different letters mean 5% significant difference among different treatments of the same index.

2.3　缺钙对不同钙效率番茄各部位钙含量、钙吸收量和钙分配的影响

植株各部位钙含量分析结果表明，番茄幼苗叶片是贮钙的主要场所(图 2)。正常供钙下，04 品种各部位钙含量与 05 无显著差异，各部位钙吸收量则显著高于 05。缺钙处理显著降低了植株各部位钙含量和吸收量，根、下茎、老叶、上茎和幼叶钙含量分别是 CK 的 18.7%、18.2%、45.2%、16.3%、9.4%(04)和 18.5%、23%、50%、23.5%、17%(05)；吸收量分别为 CK 的 10.8 %、12.9%、32.5%、7.0%、5.0%(04)和 16.8%、26.9%、62.3%、8.2%、9.1%(05)，即除了根部，05 各部位钙含量和钙吸收量的下降程度都明显低于 04。缺钙下两品种的幼茎钙吸收量很低，仅有幼叶的 19% 和 5%，是下茎的 10%和 4%；在正常钙处理下，这 4 个比值增加为 15%、13%和 20%、20%。在本试验中幼茎和下茎是输导组织的两个部位，根系吸收的钙随蒸腾流上运，两部分输导组织钙含量差异越大，形成的梯度越高，钙的上运就越容易。因此，05 幼茎钙比值很低可能也是钙高效的特点之一。植株吸收的钙在各部位的分配，缺钙以老叶>下茎>幼叶>根>上茎，而 CK 老叶钙比例下降，幼叶钙比例极大提高，顺序为老叶>幼叶>下茎>根>上茎，品种间无显著差异。

2.4　缺钙对不同钙效率番茄幼茎解剖结构的影响

如图 3 所示，正常供钙下，两品种幼茎表皮细胞结构完整、整齐，皮层细胞近圆形，壁完整，不收缩，形成层层次多(7～11 层)，髓细胞也近圆形，其中钙低效品种 04 木质部导管似乎比钙高效品种 05 多且大；缺钙后 05 品种表皮细胞解体，皮层细胞形状不规则，壁收缩，边缘不整齐，形成层层次少(5～9 层)，髓细胞收缩，多边形，导管差异不显著；04 品种缺钙后表皮更加收缩，皮层层次减少，细胞收缩严

重,形成层层次比对照显著减少,导管减少且变小,表明该品种在同样缺钙条件下受胁迫程度较重。

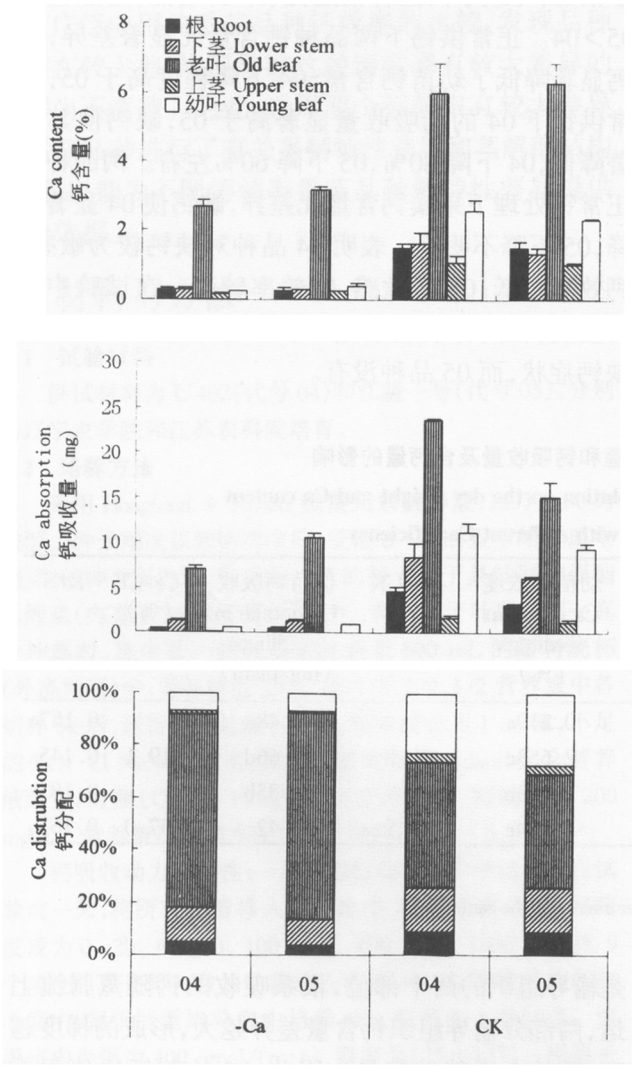


图2 不同钙效率番茄幼苗各部位钙含量、钙吸收量及钙分配

Fig.2 Concentration (A), absorption(B) and distribution(C) ofcalcium in different parts of tomato seedlings with different calcium efficiency

3 讨论

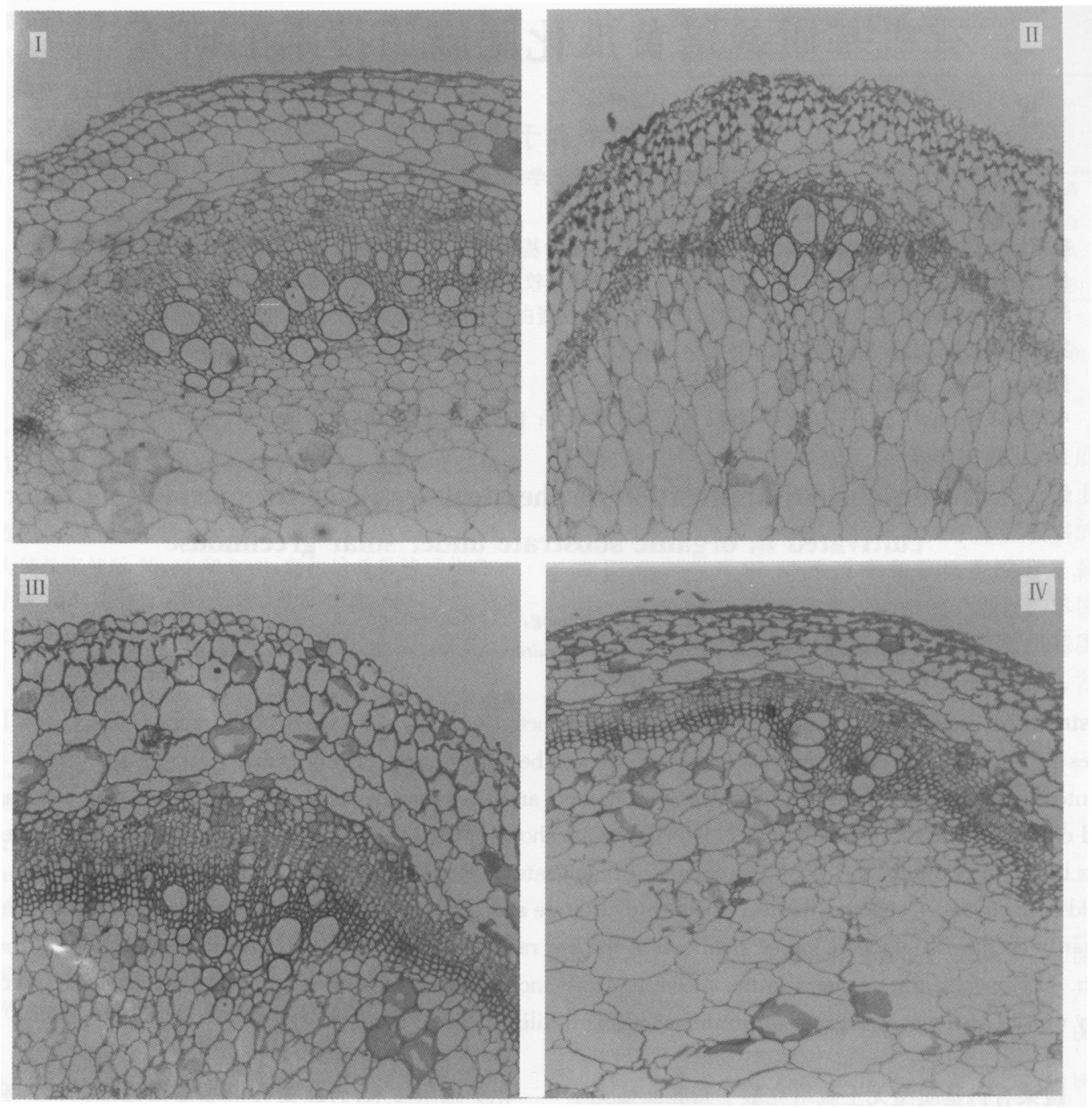
3.1 不同钙效率番茄的吸钙特性

吸收动力学特征能很好地反映钙效率不同的番茄幼苗对钙的吸收情况。两品种在正常生长条件下(CK)就存在钙吸收速率的差异,低效品种04大于高效品种05;其Km值在CK中低于05,而在缺钙胁迫后远远大于05。揭示了品种对钙的吸收能力与品种的钙效率有密切的联系:吸收能力越高,对钙的需求越多,越"喜"钙,因此吸收速率越快,越不耐缺钙胁迫;一旦遭到缺钙胁迫后,吸钙量大大减少,增加了其机体钙的缺乏,当重新供钙后,吸钙速率就越快,因此在同一钙水平下吸钙速率和最大吸收速率均高于钙高效品种05,这与Glass和Perley[4]研究K^+的吸收动力学特性研究结果一致。缺钙胁迫的幼苗对钙离子的吸收速率不仅低于同一品种的CK,而且其Km都增加,Vmax都下降,表明缺钙胁迫对植株造成了胁迫伤害,根系对钙离子的亲和力降低,与Lee[3]研究结果相反。他指出,缺Cl^-培养的大麦幼苗吸收Cl^-的Km值比有Cl^-培养的幼苗小而Vmax大,我们的研究与之相反,可能与试验材料的苗龄及缺钙胁迫的时间长短有关。另一重要的参数Cmin值在品种间的大小关系为04CK>05CK>04缺钙>05缺钙,也真实地反映了品种对钙需求的特点:对钙需求量较大的品种,该值比较高,表明较不耐缺钙胁迫,钙效率较低;相反对钙需求量较小的品种,较能有效利用介质中的有限钙,钙效率较高。同样,在经过缺钙胁迫后,对钙需求量较高的品种仍然要求溶液中有一定浓度的钙,而对钙需求量较少的品种则对溶液钙浓度没有要求。

3.2 缺钙对植株生长和器官结构的影响反映了品种特性

正常供钙下,04(钙低效品种)生长量、钙吸收量均显著高于05(钙高效品种),缺钙处理下植株的生长量、各部位钙吸收量显著下降,受缺钙影响程度较大,这可能与品种特性有关,反映了04品种在正常供钙下生长速率较快,生长量较大,幼苗吸收和积累的钙较多,而缺钙则使其吸收和积累钙的能力迅速降低,生长收到极大影响;而05品种在正常供钙下生长速率较慢,生长量较小,因此受缺钙的影响也较小。缺钙下两品种的根冠比增加,05增加程度高于04,表明钙高效品种在缺钙条件下能够对钙的吸收和利用作出调整,最大限度地吸收和活化有限的钙,这同Gableman和Gerloff[5,6]的报告一致。

幼茎的显微结构表明,受到缺钙胁迫后两品种幼茎的形成层细胞排列不紧密,细胞分裂紊乱,这主要是由于钙是纺锤丝和细胞板的组成成分,缺钙影响了纺锤丝和细胞板的形成,因此影响了细胞分裂,造成细胞形状的排列紊乱。从图3中可以看到,04在正常供钙下木质部导管数和大小明显高于05;而缺钙后05表皮细胞、形成层细胞结构和排列都好于04,表明05受缺钙影响程度低于04,反映出较耐受缺钙胁迫的特点。这从结构变化上证明了两品种养分吸收分布的差异性。



Ⅰ:04CK; Ⅱ:04 缺钙;Ⅲ:05CK; Ⅳ:05 缺钙

图 3　缺钙对不同钙效率番茄幼茎解剖结构的影响

Fig. 3　Effects of Ca deficiency on the anatomical structure of stem in tomato seedlings with different Ca efficiency

参 考 文 献:

[1] 牟咏花,陆定志,饶立华. 番茄花期缺钙与果实脐腐病关系研究[J]. 园艺学报,1992,19 (3): 251-255.

[2] 白昌华,田世平. 果树钙素营养研究[J]. 果树科学, 1989, 6 (2): 121-124.

[3] Lee R B. Selectivity and kinetics of ion uptake by barley plants following nutrient deficiency [J]. Ann. Bot., 1982, 50: 429-449.

[4] Glass A D M, Perley J E. Varietal differences in potassium uptake by barley [J]. Plant Physiol., 1980, 65: 160-164.

[5] Saric M R and Loughman B C. Genetic Aspects of Plant Nutrition [M]. The Hague: Martinus Nijhoff Publishers, 1983. 379-394.

[6] 张福锁. 植物营养的生态生理学和遗传学 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.