植物营养与肥料学报 2000,6(4):464～470
Plant Nutrition and Fertilizer Science

稀土在农业中应用的生理学基础

魏幼璋
(浙江大学资源科学系,浙江杭州 310029)

摘要:本文从稀土元素在植物中的含量分布、存在形式、细胞定位以及它对植物种子萌发、根系发育、植物生长、养分吸收、内源激素变化、光合作用、质膜结构与功能和钙离子生理功能的影响等方面阐述了稀土在农业中应用的生理学基础。

关键词:稀土元素;植物生理
中图分类号:TQ133.3; Q945　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2000)04-0464-07

我国稀土资源丰富,储量居世界之冠。稀土由于其特殊的理化性质被广泛应用。近年来,稀土微肥也得到大面积的推广。稀土应用于农业,理论上应解决二个问题,一个是稀土元素进入农田环境后的生态及毒理效应;另一个就是稀土元素提高农作物产量、品质、抗逆性的作用机理,即生理学基础。通俗地讲,通过研究应告诉人们稀土对农作物有没有用、能不能用和如何用的问题。本文综合国内外有关的报道及近年来我们的研究结果,仅对稀土在农业上应用的生理学基础作一评述。

1　稀土元素在植物体内的分布及存在形式

研究稀土元素在植物体内存在的位置,是探索稀土元素植物生理功能的一条重要途径。稀土元素在植物器官中的分布一般是根>叶>茎>花和果实[1]。但生长在稀土矿区的植物,稀土元素的分布却是叶>根>茎。叶片中的含量大大高于根和茎[2]。我们对土培及液培的油菜成分分析的结果表明,稀土元素钕在植物体内的含量为根>茎、叶[3]。

稀土元素在离体条件下可与生物大分子如蛋白质、核酸、氨基酸、核苷酸和糖类等形成配合物[4],稀土与生物大分子形成的化合物含量甚微,现有的技术较难分离得到,但有一种稀土—脂多糖已从未喷施过稀土的新鲜茶叶中分离出来,并测定了其分子量[5]。稀土元素在植物体内主要与蛋白质结合,有一部分可与色素、纤维素等结合[6]。研究表明,植物含有稀土元素,其含量在一般情况下下部组织高于上部。稀土元素在植物体内是以结合态存在的。

2　稀土元素的植物细胞定位

由于稀土离子在碱性条件下可与溶质中的某些盐类生成电子束不能穿透的致密沉淀,用透射电镜很容易识别,可达到定位的目的[7]。Hanzely 等在研究镧对细胞伸长影响的试验时,通过电镜观察证实,镧沉积在细胞质膜的外表面,因此认为镧不能通过质膜[8]。

但李齐等以硝酸铈处理杨树苗(Ⅰ—69),用透射电镜能量分散型 X 射线微区分析法对在亚细胞微区间铈的分布和含量进行了测定,得出了相反的结果。即铈不但进入植物细胞,而且在细胞核内有明显富集[9]。

周世恭等采用扫描电镜与能谱分析相结研究的结果显示,进入植物体的镧离子沉积在细胞壁上,而细胞质中未检出。认为在正常生理状态下,镧离子主要沿细胞壁和壁外途径传递和分布,很难通过质膜进入

收稿日期:1999-11-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(39670422)
作者简介:魏幼璋(1945—),男,浙江余姚人,副教授,主要从事植物微量元素营养的研究。

胞质[10]。高小彦等对镧在水稻幼苗组织和亚细胞结构上的分布进行观察，得到了类似的结果[11]。我们的试验结果也支持这种观点，即油菜苗经 3mmol·L^{-1} $Nd(NO_3)_3$ 处理，通过透射电镜观察发现，根、茎、叶的细胞壁都有钕存在，而未发现钕穿过细胞膜进入细胞质。可见大多数研究者认为稀土元素的细胞定位是在细胞膜外，不能进入细胞质。

3　稀土元素对植物种子萌发和根系发育的影响

稀土元素对种子的萌发和根的发育有特殊的效应[12]。刘恩侠等研究稀土对向日葵种子萌发的影响，发现在低浓度下（<100mg·L^{-1}）有促进作用，而在高浓度下（>500mg·L^{-1}）有抑制作用[13]。稀土处理能诱导种子产生新的脂酶同工酶，提高其活性。这就有利于储存在脂库中的油脂动员，更好满足新生组织对脂肪酸和磷酸甘油的需求，促进种子萌发[14]。用 35μmol·L^{-1} 氯化钕处理时，小麦种子的萌发率明显提高[15]。

稀土元素可以提高根系活力[16]。根系伤流量及其内含物的变化常作为根系活力的指标。董倍等发现，经 5μmol·L^{-1} $LaCl_3$ 处理黄瓜能使其伤流液中酰胺和氨基酸的总量增加[17]。但 Diatloff 在探讨镧和铈对玉米和绿豆根伸长的影响时发现，随着溶液中镧和铈浓度的增加，两种试验材料根的伸长都有所减少。认为稀土对植物根系生长的促进作用如果存在，也只可能在极低的浓度下（<1μmol·L^{-1}）才会表现出来[18]。我们的研究结果表明，经 3μmol·L^{-1} $Nd(NO_3)_3$ 处理油菜苗的根长、根体积、表面积及鲜重均比对照高，而用 60μmol·L^{-1} $Nd(NO_3)_3$ 处理则反而下降。

4　稀土元素对植物生长和激素的影响

沈博礼用 7.5mg·L^{-1} $La(NO_3)_3$ 处理小麦苗，植株体内的生长素、赤毒素、细胞分裂素等激素的含量均有不同程度的增加[19]。异戊烯基类（iPA）是最重要的一类细胞分裂素。陈靠山等用酶联免疫吸附法（ELISA）测定了光照下氯化钕对油菜离体子叶 iPA 合成的影响，发现氯化钕可促进 iPA 合成，并维持在一个较高水平[20]。同时，6μmol·L^{-1} $NdCl_3$ 能够明显促进赤毒素（GA_3）对 α-淀粉酶的诱导，缩短 GA_3 作用的滞后期。而渗透胁迫下经氯化钕处理的小麦幼苗，ABA 峰出现时间推迟，且峰值显著低于对照[21]。色氨酸是形成吲哚乙酸的前体。稀土处理后的玉米胚芽鞘中的色氨酸含量明显增高，同时，也降低了 IAA 氧化酶的活性，减少了生长素的氧化分解，有利于生长素的合成[16]。有研究表明，氯化镧能促进外源生长素的吸收和极性运输[22,23]，并对生长素诱导的导管分化和形成有促进效应[24]。

侯彩霞等研究了镧和铈对小麦幼苗过氧化物酶和淀粉酶活性及其同工酶的影响。结果发现过氧化物酶同工酶的活性，尤其是参与生长素代谢的酶的活性有所降低，从而促进植物的生长[25]。稀土元素铕在低浓度下（0.001～1.0mg·L^{-1}）有类似植物激素的作用，其作用机制可能与钙调蛋白有关[26]。杨燕生等从钙调蛋白（CaM）水平的变化探讨了镧对小麦幼苗生长影响的原因。发现镧可显著地影响小麦幼苗 CaM 水平。由于镧的定位在细胞外，故推断镧通过某种机制将信号传递到细胞内从而影响 CaM 基因表达。CaM 含量上升，加速细胞分裂，使小麦幼苗生长加快[27]。由于稀土元素能促进植物生长发育，故有人称之为“超级激素”。

5　稀土元素对植物光合作用的影响

稀土元素对植物的光合作用有明显的影响[28]。稀土元素处理的小麦其叶绿体的数量增加，微管束的排列密度提高，导管及维管束鞘柔软组织细胞发育良好，有利于光合作用进行[29]。氯化铈可使叶绿素的含量提高 40%，并影响原叶绿体中光系统Ⅰ和Ⅱ的发育，延缓 657nm 状态原叶绿素的衰变过程，加速黄化幼苗转绿的进程[30]。氯化铈还促进螺旋藻的放氧活性以及叶绿素和藻蓝蛋白的形成，提高光系统Ⅰ和光

系统Ⅱ的荧光放射比值[31]。镧处理能提高小麦叶绿体膜上 Mg^{2+}-ATPase 和希尔反应的活性，加速 PQ 穿梭[32]。我们的研究发现，经 20 及 100mg·L^{-1} $Nd(NO_3)_3$ 处理，油菜叶绿素含量分别提高 5.8% 及 9.1%；叶绿体膜上 Mg^{2+}-ATPase 的活性分别提高 4.4% 及 6.4%[33]。

稀土元素还具有促进光合产物向收获器官运转的作用。稀土元素对甜菜块根膨大期和糖分积累期光合产物分配的影响可利用$^{14}CO_2$示踪法来检测。结果显示，喷施 0.01%～0.10% 的稀土微肥“常乐”使甜菜同化 CO_2 能力提高 35.79%～79.77%；提高根冠比 5.56%～8.21%，改善光合产物的分配，有利于光合产物向根冠运输[34]。

有报道说，铈对黄瓜叶绿体蛋白质复合物的形成有影响[31]。沈博礼等则认为稀土对植物光合能量代谢的影响，主要是促使植物中 PSⅡ蛋白质复合体的活性加强和光合电子传递速率的加快，从而带动整个光能转换和光化学反应[32]。有关稀土元素对光合作用产生影响的机理，目前还没有一致公认的结论。

6 稀土元素与植物矿质养分代谢的关系

施用稀土能够促进植物对养分的吸收、转化和利用。廖铁军研究了在氮、磷营养均衡供应的条件下，稀土元素对几种作物的增产作用。他认为增产机理在于稀土元素可促进、协调作物对矿质养分的吸收[35]。用富镧稀土(含 La_2O_3 97%)对春小麦喷施或拌种，可提高春小麦对氮素的吸收，并减少土壤氮素损失[36]。李元沅发现喷施稀土，也可显著影响水稻对养分的吸收[37]。据报道，铈对植物吸收 Mg、P、S、K、Fe 均有不同程度的促进作用。特别是对 P、S 和 K 的吸收影响显著[9]。

Diatloff 等发现用 0～5μmol·L^{-1}镧处理，玉米幼苗中除 S 和 Mg 外，其它元素的含量都随镧浓度的增加而降低[38]。我们的研究表明，油菜喷施钕后植物中的氮和钾重新分配。喷施过钕的部位含量提高，而未喷施钕的部位(如新叶和根)含量下降。养分有向喷施过钕的部位集中的趋势[3]。可见稀土元素对植物矿质养分代谢的影响是多方面的。施用稀土使作物增产，不一定是由于增加了矿质养分吸收的结果。

7 稀土元素对细胞质膜结构和功能的影响

稀土离子对细胞的作用主要在膜外，因此稀土对生物膜的作用是稀土元素生物效应的基础。李新民等的研究指出 0.5μmol·L^{-1}镧可使脂膜的有序性提高，降低了红细胞的膜脂流动性[39]。镧提高小麦幼苗弱发光值，是因为镧增加了膜的不饱和脂肪酸含量[40]。镧和铈使叶片细胞膜的极性脂和非极性脂含量提高，从而延缓叶片衰老[41]。焦根林等的研究表明镧离子能显著降低植物细胞膜的透性。并认为氯化镧对膜透性的影响可能与增强质子的分泌活动有关[42]。镧可能与细胞质膜上的大分子物质，如酸性磷酸脂的阴离子等形成较稳定的复合体而降低膜透性[43]。

大田作物常会遇到诸如干旱、高温、低温、盐渍、病虫害等逆境条件。稀土离子能与细胞膜的磷脂结合，维持细胞膜的透性和稳定性，提高膜的保护功能，增强作物对不良环境的抵抗能力，加强代谢过程中的氧化酶活性，抑制病原体侵染，提高作物的抗病性[44]。稀土离子增加了细胞膜在低温逆境条件下的稳定性，其电解质外渗量减少，从而提高了植株对外界低温逆境的抵御能力[45]。薏苡经 200mg·L^{-1}稀土微肥“常乐”溶液浸种后，幼苗在盐胁迫下，能够维持较高 SOD 活性，降低膜脂过氧化作用和膜的透性，从而提高幼苗的耐盐性[46]。

生物自由基可使脂质过氧化，破坏膜结构，从而造成对细胞的毒害。超氧化物自由基是细胞极易产生的活性氧，并可转化为其它形式的活性氧。超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(POD)等构成了植物体内的“保护酶系统”，在维持自由基代谢的平衡中发挥重要作用[47]。氯化钕能提高 SOD 和 POD 活性，降低 MDA 含量，缓解膜损伤，增强植物对 O_2^- 的消除能力[21]。铈是催化 O_2^- 歧化的无机催化剂，可以清除大量的 O_2^-，产生较大的生物效应，其作用与 SOD 十分相似[48]。而 β-二异烟酰腙 Sm(Ⅲ)配合物能较强地清除

O_2^- 和羟自由基(OH·)[49]。我们的研究也得到了类似的结果，即经 3μmol·L^{-1} $Nd(NO_3)_3$ 处理的油菜细胞膜透性降低，MDA 含量减少，提高了 SOD、POD 和 CAT 的活性，从而提高了细胞清除自由基的能力，抑制了膜脂的过氧化过程[50]。

稀土元素能提高细胞膜的不饱和脂肪酸的含量，维持膜的透性和稳定性，并抑制了膜脂的过氧化过程。细胞膜在调节植物生理活动的过程中起着关键的作用。稀土元素对细胞质膜结构与功能的影响必然会影响到植物的各种生理过程。

8　稀土元素对植物钙生理功能的影响

稀土离子的半径(9.6～11.5nm)与 Ca^{2+} 离子的半径(9.9nm)很相近。因此稀土元素的化学性质在许多方面与钙相似。在生物体系中稀土离子通常与 Ca^{2+} 结合在相同的位置上，表现出相似的效应[51]。通常认为稀土离子是钙的类似物，特别是镧，已有人称之为"超级钙"[52]。稀土离子可置换出许多酶中的钙离子，参与各种酶的反应，干扰钙的正常生理功能[53]。镧和钙对植物体内离子吸收和运输的影响很相似。在短时间内，它们都抑制 Rb^+ 标记的 K^+ 的吸收，这是一种竞争性抑制。随着时间增加，这两种离子都促进 K^+ 的吸收，这表明两种离子的作用是在同一位点[54]。镧与细胞膜外侧的 Ca^{2+} 位点结合而影响 Ca^{2+} 的转运，被认为是 Ca^{2+} 通道的阻塞剂[55]。研究发现，5μmol·L^{-1} 镧将导致玉米根细胞中 Ca^{2+} 的浓度下降 41%[38]。Hodick 等认为 Ca^{2+} 引起细胞膜的去极化，镧通过使膜超极化而影响 Ca^{2+} 的转运[56]。也有人认为这种抑制可能是镧在 Ca^{2+}-ATPase的 Ca^{2+} 结合区域中引进正电荷，改变了膜表面净电荷的结果[57]。Rangle 发现镧与质膜上同一通道受体位置结合而抑制 $^{45}Ca^{2+}$ 吸收[58]。镧处理对外周根冠细胞早期的影响显著表现在分泌活性的变化，而用 EDTA 去除细胞外的钙也会引起根冠分泌发生类似的变化[59]。

当植物缺钙症状出现后加镧，有减轻缺钙病症的作用[60]。在缺钙条件下，加氯化镧能促进黄瓜生长和根系活力，并使质膜上 K^+ 和 Mg^{2+}-ATPase 活性升高[43]。镨和钕对蚕豆叶片原生质膜上的 Ca^{2+} 泵分子活性的影响表明，低浓度的镨或钕(30～50μmol·L^{-1})能基本保留 Ca^{2+} 对依赖 CaM 的(Ca^{2+}·Mg^{2+})-ATPase的作用；而高浓度的镨或钕(100～300μmol·L^{-1})对此酶的抑制是由于稀土离子取代了 Ca^{2+}，并占据了酶上 Ca^{2+} 的结合位点，使 CaM 无法激活该酶的缘故[61]。

刑金铭等用细胞学的研究方法，探讨镧、铈和钙对马铃薯超微结构的影响。植物缺钙后细胞明显损坏，有质壁分离、细胞质变浓并有不同的聚集物、质膜不完整、叶绿体变形等现象发生。当供给镧或铈后，这两种稀土元素在维持膜的完整性方面，有类似钙的作用[62]。我们在缺钙培养液中加入 3μmol·L^{-1} $Nd(NO_3)_3$后，油菜苗的缺钙症状明显减轻。对油菜顶叶叶尖及主根根尖细胞的超微结构观察发现，缺钙植物细胞的细胞壁损坏、质壁分离严重、叶绿体类囊体片层结构不清楚；而加入适当浓度钕后细胞无质壁分离、叶绿体类囊体片层结构变得清晰。这说明稀土元素可部分替代钙。

众所周知，钙是高等植物的必需营养元素。钙生理作用机制的研究是当前分子生物学一个相当活跃的研究领域。稀土元素与钙的理化性质相似，因此稀土元素与钙关系的研究也许可能成为稀土元素对植物生理作用研究的突破口。

9　小结

对植物生理作用的大量研究表明，稀土元素，特别是轻稀土元素镧、铈、钕等对植物的生长有促进作用，使有明确生理效应酶的活性有所提高。对植物必需营养元素的吸收、转化和利用有有益的作用，能增强植物的抗逆性。因此根据 Pais 有关有益元素的定义[63]，镧、铈、钕等轻稀土元素已可列入植物有益元素的范畴。重稀土元素对植物生理作用的研究相对较少，今后应开展这方面的工作。矿质元素对植物生理作用的研究往往是从组织水平发展到细胞、亚细胞水平乃至分子水平。如果稀土元素对植物生理作用机制的研究能在分子水平上找到证据，这无疑将更深入地揭示其本质。

参考文献:

[1] 马玉增,劳秀荣,刘春生,李絮花,杨守祥.浸种花生稀土元素分配规律的研究[J].稀土,1996,17(5):62-65.

[2] 王玉琦,孙景信,陈红民,郭繁清.中子活化法研究稀土矿区植物体中稀土元素的分布特征[J].中国稀土学报,1997,15(2):160-164.

[3] Wei Youzhang, Zhou Xiaobo, Mohamed Omar Maalim Tang Caixiang. Effect of application of neodymium on the growth and nutrition of *Brassica napus* L[J]. Materials Sci. Forum., 1999,315:348-353.

[4] Fairclough R H, Miake-Lye R C, Stroud R M *et al*. Location of terbium binding sites on acetylcholine receptor – enriched membrane[J]. J. Mol. Biol., 1986, 189:673-685.

[5] 钟淑琳,闵蔚宗.茶叶中分离出一种稀土-脂多糖[J].科学通报,1994,39(9):863.

[6] 郑银铼,徐步进,沈毓渭,陈传群.稀土元素铈在橡胶幼苗体内的分布及其存在状态的初步研究[A].浙江省同位素示踪技术在农业上应用论文集,1987.57-60.

[7] Peterson T A, Swanson E S, Hull R J. Use of lanthanum to trace apoplastic solute transport in intact plants[J]. J. of Exper. Botany, 1986,37(179):807-822.

[8] Hanzely L, Harmet K H. Effect of lanthanum on cell wall elogation in *Avena* coleopitile segments: Physiological and ultrastractural studies[J]. Zeitschrift fur flanzenphysiologie, 1982, 107:223-230.

[9] 李齐,沈应柏,柳维波.Ce在Ⅰ—69杨根中的吸收、分布及其对其它元素吸收的影响[J].中国稀土学报,1995,13(4):355-360.

[10] 周世恭.镧在植物体中能谱分析和超微结构定位[J].电子显微学报,1993,5:400-403.

[11] 高小彦,郭一松,吴敦肃.研究镧在水稻幼苗组织中分布的冰冻置换法[J].植物生理学通讯,1998,34(4):270-273.

[12] 郝玉兰,郭莹慧.稀土元素对胡麻种子发芽率,根系生长及活力的影响[J].稀土,1993,14(2):39-42.

[13] 刘恩侠.稀土对向日葵种子萌发与根系生长的影响[J].稀土,1996,17(3):64-66.

[14] 潘登魁,郭春绒.$LaCl_3$对油松种子萌发过程酯酶同工酶谱的影响[J].稀土,1996,17(2):70-72.

[15] 陈靠山,彭正华,张志成,周燮.$NdCl_3$对水分亏缺下小麦种子萌发与幼苗抗旱性的影响[J].西北农业学报,1994,3(3):41-44.

[16] 江玲,王章荣,周燮.镧对马尾松的根系生长和IAA含量的影响[J].植物学报,1998,40(3):251-255.

[17] 董倍,吴兆明,许亮,高小霞.镧对植物伤流液中氨基酸的成分及含量的影响[J].植物学通报,1992,9(3):44-46.

[18] Diatloff E, Smith F W. Rare earth elements and plant growth: Ⅰ. Effect of lanthanum and cerium on root elongation of corn and mungbean[J]. J. Plant Nutr., 1995, 18(10):1963-1976.

[19] 沈博礼,张丽静.稀土元素镧对小麦幼苗体内内源激素含量的影响[J].植物生理学通讯,1994,30(5):351-352.

[20] 陈靠山,张举仁,彭正华,周燮.$NdCl_3$对油菜离体子叶生长和iPA水平的影响[J].中国稀土学报,1996,14(4):379-381.

[21] 安建平,陈靠山,周燮.氯化钕对渗透胁迫引起的膜损伤和ABA含量的影响[J].中国稀土学报,1994,12(4):348-351.

[22] Migliaccio F, Galston A W. On the role of calcium in indole-3-acetic acid movement and graviresponse in etiolated pea epicotyls[J]. Plant Growth Regul., 1989, 8:335-347.

[23] Allan A C, Rubery P H. Calcium deficiency and auxin transport in *Cucurbita Pepo* L. Seedlings[J]. Planta, 1991, 183:604-612.

[24] 李焕秀,Battey N. TIBA, $LaCl_3$, Verapamil和TFP对菜豆下胚轴生长素诱导的导管分化和形成的效应[J].植物生理学报,1996,22(1):33-39.

[25] 侯彩霞,沈博礼,刘戈,申世坤.镧和铈对小麦幼苗过氧化物酶和淀粉酶活性及其同工酶的影响[J].稀土,1997,18(2):64-66.

[26] 鲁宽科,常振战,陈宝卫,果德安,郑俊华,王燮.稀土元素对植物的激素样作用[J].北京医科大学学报,1997,29(4):289-291.

[27] 杨燕生,刘德龙,白娟,孙大业.镧对小麦幼苗素质、蛋白质及钙调素水平的影响[J].稀土,1997,18(2):61-63.

[28] 刘洪章,李亚东,郝瑞:稀土对黑穗醋栗若干生理效应的影响[J].中国稀土学报,1995,13(3):283-285.

[29] 高粱，夏荣基. 施用稀土的小麦显微结构研究[J]. 稀土，1988，(4)：26-28.
[30] 储钟稀. 氯化铈对高等植物叶绿素形成的影响[J]. 稀有金属，1988，11(7)：17-20.
[31] 储钟稀，牟梦华，张和民，高德禄，吴兆明. 氯化铈对螺旋藻光合放氧、色素和蛋白质形成的影响[J]. 中国稀土学报，1994，12(4)：344-347.
[32] 沈博礼，戴新宾. 稀土对小麦叶绿体光化学反应的效应[J]. 稀土，1994，15(2)：71-73.
[33] 魏幼璋，周小波，Mohamed Omar Maalim. 稀土元素钕提高油菜产量机理初析[J]. 植物营养与肥料学报，1999，5(2)：186-188.
[34] 白宝璋，杨玉昌，孟宪局，王岳峰，白嵩. 稀土元素对甜菜光合产物分配的影响[J]. 核农学报，1995，9(3)：189-192.
[35] 廖铁军，黄云，苏彬彦，邹宗杰. 稀土对作物的生物效应研究[J]. 稀土，1994，15(5)：26-29.
[36] 朱永懿，陈景坚，刘学莲，富镧稀土对春小麦吸收氮素的影响[J]. 核农学通报，1992，13(4)：176-178.
[37] 李元沅，胡瑞芝，荣湘民，易泽，赵振祥. 离子稀土对水稻根际生物磁性及生长发育的影响[J]. 湖南农业大学学报，1996，2(4)：341-345.
[38] Diatloff E, Asher C J, Smith F W. Effect of rare earth elements on the growth and mineral nutrition of plants[C]. Rare Earth in Agriclture Seminar, 1995. 11-23.
[39] 李新民，倪嘉缵，陈建文，黄芬. 镧和钙对人红细胞膜的作用[J]. 中国稀土学报，1995，13(3)：259-262.
[40] 李世清，冯春奎，周映. 稀土对苗期小麦一些生理影响[J]. 陕西农业科学，1992，(2)：7-8.
[41] 刑金铭，翁莉萍. 钙和稀土元素镧、铈对萝卜叶片衰老过程的延缓[J]. 稀有金属，1991，15(4)：262-266.
[42] 焦根林，汤锡珂，吴兆明. 氯化钕对玉米根切段钾离子外渗影响的动力学研究[J]. 植物学报，1993，35(4)：286-290.
[43] 董倍，吴兆明，汤锡珂. 氯化镧对缺钙黄瓜根系生理的影响[J]. 中国稀土学报，1993，11(1)：65-68.
[44] 宁加贲. 稀土对作物增效因子的研究[J]. 稀土，1994，15(1)：63-65.
[45] 田文勋，赵景阳，白宝璋. 稀土元素对甜菜种子萌发、幼苗生长及块根产量的影响[J]. 植物学通讯，1990，7(2)：37-40.
[46] 高岩，张汝民，郭旭宏. 盐胁迫下稀土浸种对薏苡幼苗膜脂过氧化作用影响的研究[J]. 稀土，1995，16(6)：35-36.
[47] 陆定志，傅家瑞，宋松泉. 植物衰老及其调控[M]. 北京：中国农业出版社，1997.
[48] 王金胜，郭春绒，程玉香. 铈离子清除超氧物自由基的机理[J]. 中国稀土学报，1997，15(2)：151-154.
[49] 许言和，方键，曾正志，陈慧. β-二酮异烟酰腙 Sm(Ⅲ)配合物对生物自由基消除作用的研究[J]. 稀土，1996，17(4)，65-67.
[50] Wei Youzhang, Zhou Xiaobo. Effect of neodymium on physiological activities in oilseed rape during calcium starvation [J]. Journal of Rare Earths, 2000, 18(1): 57-61.
[51] 王伟列，涂楚桥，王光辉. 稀土金属离子与酶分子的相互作用研究进展[J]. 稀土，1998，19(3)：57-65.
[52] Poovaiah B W, Leonard A C. Deferral of leaf senescence with calcium[J]. Plant Physiol., 1973, 52: 236-239.
[53] Squier T C, Bigelow D J, Fernandez-Belde F J, Demeist L, Inesi G. Calcium and lanthanide binding in the sarcoplasmic reticulum ATPase[J]. J. Biol. Chem., 1990, 265(23): 13713-13720.
[54] Leonard R T, Nagahashi G, Thomson W W. Effect of lanthanum on ion absorption in corn roots[J]. Plant Physiol., 1975, 55: 542-546.
[55] Pantoja O, Gelli A, Blumwald E. Oltage-dependent calcium channels in plant vacuoles[J]. Science, 1992, 225: 1567-1570.
[56] Hodick D, Sievers A. The action potential of *Dionaea muscipula* Ellis[J]. Planta, 1988, 174: 8-18.
[57] Ogurusu T, Wakabayashi S, Shigekawa M. Functional characterzation of lanthanide binding sites in the sarcoplasmic reticulum Ca^{2+}-ATPase: Do lanthanide ions bin to the calcium transport site? [J]. Biochem., 1991, 30: 9966-9973.
[58] Rangel Z. Disturbance of cell Ca^{2+} homeostasis as a primary in aluminum rhizotoxicity. I. Inhibition of root growth is not caused by reduction of calcium uptake[J]. Plant Physiology, 1994, 143: 47-51.
[59] Bennet R J, Breen C M. The use of lanthanum to delineate the aluminum signaling mechanisms functioning in the roots of *Zea Mays* L[J]. Envir. and Exper. Bot., 1992, 32: 365-376.
[60] 翁莉萍，寥辉，刑金铭. 缺钙时镧、铈对黄瓜白菜的生长及根系碱性磷酸酶活性的影响[J]. 华北农学报，1990，5(2)：55-59.

[61] 张金红,吴隽平,魏继中,翟治清,张遂坡,徐友涵.稀土元素 Pr^{3+}、Nd^{3+} 对蚕豆叶片原生质膜上 Ca^{2+}、Mg^{2+}-ATPase活性的影响[J].生物化学杂志,1992,8(2):195-199.

[62] 刑金铭,樊廷玉,王秀玲,郭世宜.La、Ce 和 Ca 对马铃薯苗株超微结构的影响[J].稀有金属,1989,12(7):49-54.

[63] Pais I. The problematic of essentality and beneficiality of trace elements[C]. Proceedings of the 4 International Symposium of New Results in the Research of Hardly Know Trace Elements. Budapest Hungary. July, 1990.191-204.

Physiological basis for the application of rare earth in agriculture

WEI You-zhang

(*Dept. of Resource Sci., Zhejiang Univ. Hangzhou* 310029)

Abstract: This paper depicts the physiological basis for the application of rare earth elements in agriculture. The contents, distribution, the forms and cytolocalization of rare earth elements in plants are discussed. The effects of rare earth elements on seed germination, root development, seedling growth, nutrient uptake, change of hormones, and photosynthesis are also discussed. Further more the rare earth elements affecting the plasma membrane and calcium physiological function are reviewed as well.

Key words: rare earth elements; plant physiology