

低硼胁迫对根系调控及生理代谢的影响研究进展

董肖昌¹ 姜存仓^{1,2} 刘桂东¹ 刘磊超¹ 吴礼树¹ 彭抒昂²

1. 华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070; 2. 园艺植物生物学教育部重点实验室, 武汉 430070

摘要 硼作为植物的必需营养元素,对植物的许多生理过程起着重要的作用。根系是植物地下的营养器官,决定着地上部及整个植株的生长发育。本文对近年来国内外学者在植物根系方面硼素营养的一些研究成果进行综述,着重阐述了低硼胁迫下植物调控根系生长和养分吸收的机制,以及硼对根系细胞壁结构的形成及稳定、豆科植物根瘤的生长发育及根瘤菌的固氮能力等方面的重要作用,最后提出了应加强硼元素在植物根系方面研究的问题与展望。

关键词 硼; 根系生长; 养分吸收; 细胞壁; 根瘤

中图分类号 S 143.7⁺1; Q 945.78 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2014)03-0133-05

硼是植物必需的微量营养元素之一,在目前已知的植物必需微量元素中,缺硼最为普遍。自1923年 Warington 在豌豆试验中证实了硼对植物的作用以来^[1],已报道的发生缺硼症状的植物超过100种^[2]。硼对植物的生长发育有一系列重要作用,涉及到细胞壁和生物膜结构的稳定与功能^[3-4]、碳水化合物的运输和分配^[5-6]、蛋白质和核酸的合成^[5,7]、花粉萌发和花粉管的生长^[8]等多种生理功能。高等植物对低硼胁迫反应响应最迅速的部位是根系,缺硼会引起根尖生长组织细胞分裂和延伸受阻^[9]、主根或侧根的生长受抑制或停滞、根系呈短粗丛枝状^[10];严重缺硼还会使根系开裂或空心霉烂,甚至坏死脱落^[11]。根系是植物吸收矿质养分和水分的重要器官,还是养分同化以及某些有机物质合成的重要场所,对植物的生长起着非常重要的作用。了解缺硼对植物根系的调控,对理解缺硼时植物出现缺素症状的原因及硼在植物体内的作用机制十分关键。笔者对近些年国内外学者在植物根系硼素营养方面的一些最新研究成果进行综述。

1 低硼胁迫对根系生长的影响

1.1 低硼胁迫下根系的生长

根系是植物对缺硼最敏感的部位,缺硼症状的早期表现之一就是根伸长受阻。研究发现,缺硼3 h

后南瓜根的伸长就会显著受阻,6 h后尤为严重,24 h后根停止生长^[12]。Martin等^[13]在研究低硼条件下拟南芥幼苗根系结构的反应时,发现主根的伸长首先受到抑制。根伸长迅速停止也是棉花硼缺乏时最早出现的症状,缺硼明显降低了棉花的根长、根数、根表面积、根体积^[14]。缺硼还对不同棉花品种的根系影响不同,即对敏感品种的抑制程度高于不敏感品种。在油菜和柑橘的缺硼研究上也有类似结果,缺硼时不同品种甘蓝型油菜低效品种根系的生长首先受到抑制,但硼高效的根长降幅小于硼低效品种^[15];低硼条件下柑橘砧木苗根的生长会受到抑制,根长、根表面积和根数等显著下降,且不同砧木对缺硼敏感性也存在差异^[3,16]。习金根等^[17]研究表明,缺硼时菠萝根系的根长、根数、根粗、根表面积、根体积都显著下降。徐强等^[18]研究发现,缺硼时绿豆根尖膨大呈淡褐色,根系的伸长受到严重的抑制,呈丛枝状。冯红柳等^[19]发现缺硼显著降低了烤烟的根系深度、根系幅度、1级和2级分枝根数等。

1.2 低硼胁迫影响根系生长的可能机制

尽管不同植物根系缺硼症状各不相同,但具有显著的共同特征即根尖的伸长首先受到抑制。根伸长的速度主要依赖于细胞的伸长,而细胞的伸长又受细胞壁延伸的调节,IAA(indole-3-acetic acid, 3-

收稿日期: 2013-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271320)和中央高校基本科研业务费专项(2013PY093)

董肖昌,博士研究生,研究方向:植物营养与施肥。E-mail: dxc.ujan@163.com

通信作者: 姜存仓,博士,副教授。研究方向:植物营养机理与施肥。E-mail: jcc2000@mail.hzau.edu.cn

吲哚乙酸)和酶是影响细胞壁延伸的主要因素。IAA 在诱导细胞壁的松弛、控制细胞的延伸生长上有重要作用。研究表明,硼影响植物体内 IAA 氧化酶活性^[20],缺硼后油菜根系细胞壁 IAA 氧化酶活性显著升高,其具有氧化分解 IAA 的功能,其活性的增加必然导致根细胞壁内 IAA 含量的下降^[21]。研究表明,缺硼后不同硼效率油菜品种根系 IAA 含量均显著下降^[22]。杨玉华等^[21]发现缺硼后油菜根系细胞壁中 POD(过氧化物酶, peroxidase)活性显著升高,而 POD 具有氧化分解 IAA 和催化细胞壁中的结构蛋白、半纤维素和果胶的交联的功能。因此,缺硼植物 POD 活性的升高必然导致细胞壁塑性伸展能力下降、细胞壁硬化,降低细胞生长速度^[23]。因而,缺硼根系细胞壁中 IAA 氧化酶活性和 POD 活性的升高,使细胞壁内的 IAA 含量降低、细胞壁多糖组分正常的解离和聚合遭到破坏,造成细胞的机械强度和塑性伸展能力降低,最终导致根系生长受到抑制。但是,有研究发现根系伸长和 IAA 氧化酶对缺硼反应在时间上有明显不同,在 IAA 氧化酶活性提高的 3 h 前,根尖伸长已受抑制^[24]。因此,IAA 氧化酶活性的提高可能是缺硼的次生反应^[11]。而 Martin 等^[13]研究发现,缺失 AUX1 蛋白的拟南芥突变体 *aux1-22* 受硼胁迫的抑制程度低于野生植株,因此他认为 AUX1 蛋白参与了低硼胁迫对根系伸长的抑制,同时他还指出根生长受到低硼胁迫的抑制可能是硼对细胞壁的结构作用的结果。缺硼根系生长迅速受抑到还可能与核酸代谢有关。缺硼使核酸含量下降,导致细胞分裂停止,从而影响根系生长^[25]。研究表明,植物缺硼第一个变化是 RNA 含量减少,随后植物停止生长,这可能是缺硼时根系生长停止和坏死的直接原因^[11]。

2 低硼胁迫对根系吸收养分的影响

2.1 低硼胁迫下根系对养分的吸收

硼作为植物必需营养元素之一,与其他元素之间存在着显著的相互作用。适量硼能促进植物根系对许多营养元素的吸收,而缺硼则会显著影响根系对养分的吸收。徐畅等^[26]研究表明,适宜硼水平促进了烤烟对 N、P、K 的吸收,而缺硼则抑制烤烟对 N、P、K 的吸收。低硼条件下油菜下部叶片的 N、P 含量都显著降低,且不同品种油菜其含量下降幅度不同^[27]。缺硼植物吸收硝态氮的能力也低于正常植株,耿明建等^[14]研究发现缺硼导致棉花伤流液中

NO_3^- 组分数量减少,表明缺硼抑制了根系对硝态氮的吸收。植物对磷的吸收和磷在植物体内的分布也都受到硼的影响,Goldbach 等^[28]用向日葵作³²P 标记试验,发现缺硼条件下植株根系对³²P 的吸收显著降低。黄玉芬等^[29]在大豆上也发现低硼条件下体内磷的吸收受到了抑制。刘桂东等^[30]在脐橙上观察到缺硼使植株各部位钾含量呈现降低的趋势,表明缺硼可能影响了根系对钾的吸收。研究发现,施硼后脐橙植株的镁含量显著提高,并且植株各器官的硼分配比例得到改善^[31],而刘桂东等^[30]观察到缺硼后使脐橙各部位镁含量有下降的趋势。硼对其他微量元素的影响也有报道,如耿明建等^[32]研究发现缺硼条件下棉花花器官中的 Cu、Zn 等元素含量降低;刘鹏等^[33]报道适量硼能促进大豆对 Mo 的吸收,增加大豆 Mo 含量。

2.2 低硼胁迫影响根系吸收养分的可能机制

缺硼会影响植物根系对 N、P、K 及多种微量元素的吸收,从根系表型来看是因为缺硼抑制了根系的生长,降低了根系的吸收能力。研究表明,缺硼显著降低了棉花根系活跃吸收面积和总吸收面积以及伤流量^[14],而伤流液的数量及成分是反映根系吸收活力强弱的良好指标^[34],因此,缺硼显著抑制了根系的吸收活力。再者,植物根系对养分的吸收与膜的透性及 ATP 酶的活性是紧密相关的,所以缺硼影响根系吸收养分可能与膜的透性及膜结合 ATP 酶的活性有关。Wang 等^[35]研究发现,缺硼胁迫后黄瓜根尖中 K^+ 外渗量明显增多,是正常硼浓度下的 10 倍, K^+ 向细胞外泄漏说明细胞质膜的透性发生了改变。质膜参与物质的吸收、运输、排出及信号传递等,而质膜透性的改变必然会影响到这些生理过程。研究还发现,在低硼胁迫条件下拟南芥根上膜表面蛋白 AGP 的一些基因表达迅速受到了抑制^[36],很可能是硼通过与质膜上的糖蛋白结合而生成有关络合物参与到稳定细胞膜的功能中来。硼对质膜上 ATP 酶活性的影响也已得到了证明,缺硼会显著降低细胞中质子的净分泌量,而质子分泌量的减少与膜结合的 ATP 酶活性的降低相联系^[37]。Alves 等^[38]对低硼胁迫下白羽扇豆的根进行了蛋白组学分析,检测到 V 型 H^+ -ATP 酶亚基 B2、ATP 酶合成酶亚基 α 的表达受到抑制,影响了 ATP 酶的活性。黄玉芬等^[29]认为由于缺硼抑制了根尖细胞膜的 H^+ -ATP 泵,所以磷的吸收受到抑制。ATP 酶的活性取决于膜两侧的跨膜电势梯度,而硼具有

稳定膜以建立这种梯度的能力,所以适量的硼能增强 ATP 酶的活性^[39]。综上所述,缺硼降低根系的吸收活力,使根系生物膜功能受到破坏,导致膜透性增加和膜结合的 ATP 酶活性降低,进而影响根系对养分的吸收。

3 低硼胁迫对根系细胞壁的影响

近几年有关植物硼营养研究显示,硼对植物的主要功能是参与细胞壁结构和保持细胞壁的稳定。缺硼会影响植物细胞壁结构的完整性,Loomis 等^[40]观察到根尖的缺硼特征是细胞壁不正常。一般认为,硼通过与鼠李半乳糖醛酸聚糖-II (RG-II) 形成 B-RG-II 复合物在细胞壁果胶网络的形成上起重要作用^[41]。缺硼时,新形成的果胶不能结合到细胞壁中,因此导致细胞壁结构的紊乱。Yu 等^[42]观察到缺硼导致玉米和小麦根尖细胞壁内果胶增多,但果胶网状结构的形成受阻,从而直接或间接影响细胞壁-质膜-细胞骨架结构的连续性。低硼胁迫除了影响细胞壁的结构外,还会影响与细胞壁有关的许多基因的表达。Camacho 等^[43]研究发现,细胞壁修饰酶如木葡聚糖内糖基转移酶(XTHs)的一些基因表达在低硼胁迫条件下受到了抑制,这些酶类控制着构成细胞壁的高分子聚合物之间的连接。Alves 等^[38]研究发现,尿苷二磷酸-葡萄糖 6-脱氢酶和 GDP-甘露糖-3,5-差异构酶的基因表达受到了抑制,这两个酶参与的碳水化合物代谢主要用来指导细胞壁的生物合成。另外,缺硼条件下,根系的鲜质量显著降低,但细胞壁物质总量却显著增加。李金柱等^[44]研究表明,缺硼时油菜根系中的细胞壁提取率升高,原因是细胞壁物质如纤维素、半纤维素和果胶等在低硼条件下难以相互交联而形成完整的细胞壁,从而导致细胞壁物质的大量累积,细胞壁增厚。

4 低硼胁迫对根瘤的影响

硼素在豆科植物根瘤的生长发育及根瘤菌的固氮能力方面起着非常重要的作用。黄庆海等^[45]研究表明,施硼有利于紫云英根瘤的形成,增加根瘤数,而低硼胁迫明显抑制根瘤的形成。Bonilla 等^[46]研究表明,低硼条件下根瘤薄壁组织细胞壁中编码该蛋白的基因缺失,从而影响了根瘤结构的形成。Reguera 等^[47]研究发现,根瘤中富集的硼和阿拉伯半乳糖糖-伸展蛋白形成配体,参与调节根瘤中活性氧的浓度,并通过影响结瘤大分子的稳定性来调节

侵染过程。适量的硼还可以提高根瘤菌的固氮能力和增加其固氮量^[48],硼缺乏 3 周后,蚕豆固氮酶活性降低了一半,而硼缺乏 4 周,其活性降低达 60%^[49]。原因与碳水化合物运输有关^[11],缺硼时植物根部维管束发育不良,影响碳水化合物向根部运输,根瘤因得不到充足的碳源,最终导致固氮能力下降。

5 展望

硼是当前世界农业生产应用最广泛的必需微量元素之一,国内外学者关于硼的营养功能已经进行了大量的研究。目前人们对植物硼素营养的地上部分研究已经比较成熟,但是由于根系生长环境的复杂性及根系研究方法和手段的局限性给人们的研究带来诸多不便,使得专门针对硼素营养地下部分的研究相对不足。因此,今后应利用最新的植物根系生理生态、分子生物学知识和先进的根系研究方法,加强根系硼素营养的功能及其作用机制的研究,主要应从以下几个方面进行:首先,应加强低硼胁迫下根系构型变化的研究,揭示硼胁迫调控根系构型变化的信号网络,探讨根系构型变化形成的生理和分子机制;其次,根尖是植物根系生理活性最活跃的部分,具有感知重力方向、响应和传递环境信号、吸收水分和养分及合成物质等重要功能,应加强低硼胁迫对根尖细胞超微结构的影响研究,揭示低硼胁迫下根尖细胞超微结构与养分吸收的关系;第三,应加强在低硼条件下,植物的地上部分与地下部分的相互调节的机制及其之间的信号传导研究。

参 考 文 献

- [1] WARINGTON K. The effect of boric acid and borax on the broad bean and certain other plants[J]. Annals of Botany, 1923, 37: 629-672.
- [2] GUPTA U C, SOLANKI H A. Impact of boron deficiency on plant growth[J]. International Journal of Bioassays, 2013, 2 (7): 1048-1050.
- [3] LIU G D, WANG R D, JIANG C C. Cellular boron allocation and pectin composition in two citrus rootstock seedlings differing in boron-deficiency response[J]. Plant and Soil, 2013, 370 (1/2): 555-565.
- [4] LIU G D, JIANG C C, WANG Y H, et al. Distribution of boron and its forms in young "Newhall" navel orange (*Citrus sinensis* Osb.) plants grafted on two rootstocks in response to deficient and excessive boron [J]. Soil Science and Plant Nutrition,

- 2011, 57(1):93-104.
- [5] CHEN M, MISHRA S, HECKATHORN S A. Proteomic analysis of *Arabidopsis thaliana* leaves in response to acute boron deficiency and toxicity reveals effects on photosynthesis, carbohydrate metabolism, and protein synthesis[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(3/4):235-242.
- [6] 焦晓燕, 王劲松, 武爱莲, 等. 缺硼对绿豆叶片光合特性和碳水化合物含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3):615-622.
- [7] PANDE N, YARCHAN A. Effect of boron stress on growth, carbohydrate, protein and phenol metabolism in the leaves and roots of sunflower seedlings[J]. *The Journal of the Indian Botanical Society*, 2011, 3:56-61.
- [8] DAS B, DASH S K, SAHA B C, et al. Effect of boron on pollen sterility in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 2012, 72(3):367-371.
- [9] DELL B, HUANG L. Physiological response of plants to low boron[J]. *Plant and Soil*, 1997, 193:103-120.
- [10] 盛鸥, 彭抒昂, 邓秀新, 等. 不同硼浓度对脐橙生长和硼吸收、分布的影响[J]. *湖南农业大学学报:自然科学版*, 2007, 33:76-84.
- [11] 陆景陵. *植物营养学(上册)* [M]. 北京:中国农业大学出版社, 2003:82-87.
- [12] LOVATT C J, ALBERT L S, TREMBLAY G C. Synthesis and catabolism of uridine nucleotides in boron-deficient squash roots [J]. *Plant Physiology*, 1981, 68:1389-1394.
- [13] MARTIN E M, CAMACHO J J, HERRERA M B, et al. Auxin and ethylene are involved in the responses of root system architecture to low boron supply in *Arabidopsis* seedlings[J]. *Physiologia Plantarum*, 2011, 142:170-178.
- [14] 耿明建, 朱建华, 吴礼树, 等. 不同硼效率棉花品种根系参数和伤流液根系活力组分的差异[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4):744-747.
- [15] 石磊, 赵华, 徐芳森. 硼、磷缺乏对甘蓝型油菜不同硼效率基因型苗期生长的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2004, 26:50-53.
- [16] MEI L, SHENG O, PENG S A, et al. Growth, root morphology and boron uptake by citrus rootstock seedlings differing in boron-deficiency responses[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 129:426-432.
- [17] 习金根, 曾洪立, 祁寒, 等. 硼素营养对菠萝根系和地上部生长的影响[J]. *热带作物学报*, 2009, 30(10):1417-1421.
- [18] 徐强, 焦晓燕, 王云中, 等. 硼对绿豆植株生长发育及矿质营养状况的影响[J]. *华北农学报*, 2004, 19(1):89-92.
- [19] 冯红柳, 刘永贤, 郑希, 等. 镁硼对烤烟生长发育与产质量的影响[J]. *广西农业科学*, 2010, 41(3):244-247.
- [20] 焦晓燕, 杨治平, 赵瑞芬, 等. 硼对吡啶乙酸在植物体内运输的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(2):366-370.
- [21] 杨玉华, 吴礼树, 王运华, 等. 硼对不同甘蓝型油菜品种细胞壁酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(4):341-346.
- [22] 王火焰, 王运华, 吴礼树. 硼钙营养对甘蓝型油菜 IAA 含量的影响[J]. *华中农业大学学报*, 1998, 17(4):341-344.
- [23] HU H, BROWN P H. Localization of boron in cell walls of squash and tomato and its association with pectin: evidence for a structural role of boron in the cell wall [J]. *Plant Physiology*, 1994, 105:681-689.
- [24] 熊双莲, 吴礼树, 王运华. 黄瓜缺硼症状与激素变化关系的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(2):194-198.
- [25] LIU G D, WANG R D, JIANG C C, et al. Boron distribution and mobility in navel orange grafted on citrange and trifoliate orange[J]. *Plant and Soil*, 2012, 360:123-133.
- [26] 徐畅, 高明, 谢德体, 等. 不同硼水平对烤烟干物质累积和氮磷钾吸收的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3):94-99.
- [27] 郭丽丽, 赵竹青, 石磊, 等. 硼对不同硼效率甘蓝型油菜嫁接植株下部叶片矿质养分含量的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2010, 32(1):89-93.
- [28] GOLDBACH H. Influence of boron nutrition on net uptake and efflux of ^{32}P and ^{14}C -glucose in *Helianthus annuus* roots and cell cultures of *Daucus carota* [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1985, 118(5):431-438.
- [29] 黄玉芬, 黄隆斌, 廖红, 等. 磷硼耦合胁迫对大豆生长和磷、硼吸收的影响及基因型差异[J]. *华南农业大学学报*, 2012, 33(2):129-134.
- [30] 刘桂东, 姜存仓, 王运华, 等. 缺硼条件下两种不同砧木“纽荷尔”脐橙矿质元素含量变化的比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1):180-185.
- [31] 姜存仓, 王运华, 刘桂东, 等. 赣南脐橙叶片黄化及施硼效应研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(3):656-661.
- [32] 耿明建, 朱建华, 吴礼树, 等. 硼对不同硼效率棉花品种苗期叶片膜脂过氧化和多胺含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9:337-341.
- [33] 刘鹏, 吴建之, 杨玉爱. 钼、硼供给水平对大豆钼、硼吸收与分配的影响[J]. *浙江大学学报:农业与生命科学版*, 2005, 31(4):399-407.
- [34] 柏彦超, 钱晓晴, 沈淮东, 等. 不同水、氮条件对水稻苗生长及伤流液的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1):76-81.
- [35] WANG Z Y, TANG Y L, ZHANG F S. Effect of boron and low temperature on membrane integrity of cucumber leaves [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, 22(3):543-550.
- [36] CAMACHO J J, REXACH J, GONZALEZ A. Boron in plants: deficiency and toxicity [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50:1247-1255.
- [37] FERROL N, BELVER A, ROLDDAN M, et al. Effect of boron on proton transport and membrane properties of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cell microsomes[J]. *Plant Physiology*, 1993, 103:763-769.
- [38] ALVES M, MOES S, PINHIRO C, et al. The analysis of *Lupinus albus* root proteome revealed cytoskeleton altered features due to long-term boron deficiency[J]. *Journal of Proteomics*, 2011, 74:1351-1363.
- [39] 彭陈, 何冰, 郭士伟. 植物中的 P-ATP 酶[J]. *植物生理学通讯*, 2010, 46(7):637-642.
- [40] LOOMIS W D, DURST R W. Chemistry and biology of boron

- [J]. *Biofactors*, 1992, 3(4): 229-239.
- [41] SHAABAN M M. Role of boron in plant nutrition and human health [J]. *American Journal of Plant Physiology*, 2010, 5(5): 224-240.
- [42] YU Q, HLAVACKA A, MATOH T, et al. Shortterm boron deprivation inhibits endocytosis of cell wall pectins in meristematic cells of maize and wheat apices [J]. *Plant Physiology*, 2002, 130(1): 415-421.
- [43] CAMACHO J J, HERRERA M B, BEATO V M, et al. The expression of several cell wall-related genes in *Arabidopsis* roots is down-regulated under boron deficiency [J]. *Env Exp Bot*, 2008, 63: 351-358.
- [44] 李金柱, 吴礼树, 杨玉华. 硼对不同硼效率甘蓝型油菜细胞壁硼钙含量的影响 [J]. *中国油料作物学报*, 2007, 29(2): 174-178.
- [45] 黄庆海, 徐小林, 徐昌旭, 等. 丘陵旱地红壤上施用硼、锌和钼肥对紫云英种子产量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2013(2): 75-79.
- [46] BONILLA I, MERGOLD C, CAMPOS M E, et al. The aberrant cell walls of boron-deficient bean root nodules have no covalently bound hydroxyproline-/proline-rich protein [J]. *Plant Physiology*, 1997, 115: 1329-1340.
- [47] REGUERA M, WILNMER M, BUSTOS P, et al. Ligands of boron in *Pisum sativum* nodules are involved in regulation of oxygen concentration and rhizobial infection [J]. *Plant Cell Environment*, 2010, 33: 1039-1048.
- [48] ABREU I, CERDA M E, NANCLARES DE M P, et al. Boron deficiency affects rhizobia cell surface polysaccharides important for suppression of plant defense mechanisms during legume recognition and for development of nitrogen-fixing symbiosis [J]. *Plant and Soil*, 2012, 361: 385-395.
- [49] BOLANOS L, ESTENBAN E, LORENZO D C, et al. Essentiality of boron for symbiotic dinitrogen fixation in pea (*Pisum sativum*) rhizobium nodules [J]. *Plant Physiology*, 1994, 104: 85-90.

Advances on regulation and physiological metabolism of roots under the boron deficiency

DONG Xiao-chang¹ JIANG Cun-cang^{1,2} LIU Gui-dong¹
LIU Lei-chao¹ WU Li-shu¹ PENG Shu-ang²

1. *Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

2. *Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Ministry of Education, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

Abstract Boron is an essential nutrient element for plant and plays an important role in many physiological processes of higher plants. Root is an important organ for absorbing the water and nutrients, and affects the growth and development of plants. This review is focused on recent researches about the regulation and physiological metabolism of roots under boron deficiency, the regulatory mechanism of root growth and nutrition absorption under low boron condition. In addition, this paper summarized effects of boron on stability of root cell walls, growth and development and nitrogen fixing capacity of root nodule of leguminous plants. Finally, problems and prospects of researches about the effects of boron on plant roots were proposed.

Key words boron; root growth; nutrition absorption; cell wall; root nodule

(责任编辑:陆文昌)