

# 缺镁对杉木根系活力及抗氧化酶活性影响研究

汪凤林<sup>1,2</sup>, 马志慧<sup>2,3</sup>, 叶义全<sup>1,2</sup>, 黄田盛<sup>1,2</sup>, 王 飞<sup>2,3</sup>, 曹光球<sup>1,2\*</sup>

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 国家林业局 杉木工程技术研究中心, 福建 福州 350002;  
3. 福建农林大学 资源与环境学院, 福建 福州 350002)

**摘 要:**以 1 年生无性系 020 杉木幼苗为试验材料,采用营养液浇灌的方法研究缺镁处理对杉木根系的根系活力(TTC)、丙二醛(MDA)含量和保护酶活性的影响。结果表明,与正常供镁相比,缺镁处理下杉木根系的 TTC 降低了 34.73%;MDA 含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性则相对较低,分别降低了 1.32%和 13.63%,其中 SOD 活性表现出显著的差异性( $P<0.05$ );过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性和多酚氧化酶(PPO)活性在缺镁处理下则表现出较高的酶活性,分别高出了 53.02%、0.35%和 22.88%;缺镁破坏了根系中几种抗氧化酶和保护酶之间的协调和平衡,使得根系内自由基的平衡被打破,进而影响根系活力,破坏养分的吸收和转化。

**关键词:**缺镁;杉木根系;根系活力;MDA 含量;酶活性

**中图分类号:**S791.27      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2018)02-0016-04

## Physiological Responses of *Cunninghamia lanceolata* Roots to Magnesium Deficiency

WANG Feng-lin<sup>1,2</sup>, MA Zhi-hui<sup>2,3</sup>, YE Yi-quan<sup>1,2</sup>, HUANG Tian-sheng<sup>1,2</sup>, WANG Fei<sup>2,3</sup>, CAO Guang-qiu<sup>1,2\*</sup>

(1. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;  
2. Chinese Fir Engineering Technology Research Center, State Forestry Administration, Fuzhou, Fujian 350002, China;  
3. College of Resource and Environmental Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

**Abstract:** Effects of magnesium deficiency on root activity (TTC), malondialdehyde (MDA) content and protective enzyme activities in roots of one-year-old seedlings of *Cunninghamia lanceolata* were studied by nutrient solution irrigation. The results showed that compared with the normal magnesium, the TTC of the roots decreased by 34.73% while the content of MDA and superoxide dismutase (SOD) activities were relatively low, reduced by 1.32% and 13.63%, respectively, among them, SOD activity showed significant difference ( $P<0.05$ ), catalase (CAT) activity, peroxidase (POD) activity and polyphenol oxidase (PPO) activity showed a higher enzyme activity under magnesium deficiency, increased by 53.02%, 0.35% and 22.88%, respectively. The lack of magnesium destroys the coordination and balance between several antioxidant enzymes and protective enzymes in root system, which breaks the balance of free radical in root system, and then affects the activity of root system and destroys nutrient absorption and transformation.

**Key words:** *Cunninghamia lanceolata* root; root activity; MDA content; enzyme activity

镁是植物生长和发育过程中所必需的大量营养元素<sup>[1]</sup>,是构成植物体内叶绿素的主要成分之一,能直接参与植物的光合作用<sup>[2]</sup>。同时,镁对植物体内的酶活性、活性氧代谢以及脂肪代谢等方面均有重

要影响<sup>[3]</sup>。我国镁资源较为丰富,但土壤中缺镁严重<sup>[4]</sup>,特别在我国南方地区,伴随着酸沉降的加重土壤中镁不断风化、淋失,土壤供镁能力下降,从而影响植物的生长和发育,限制植物的产量和品质<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2017-08-26    修回日期:2017-10-18  
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0600301);福建农林大学科技创新专项基金(KFA17071A)。  
作者简介:汪凤林,女,在读硕士,研究方向:自然资源管理。E-mail:975753574@qq.com  
\* 通信作者:曹光球,男,副研究员,博士,研究方向:森林培育理论与技术。E-mail:cncgq@126.com

目前,国内外对植物镁元素的研究逐渐增多,主要侧重于镁对光合作用以及碳水化合物合成等方面<sup>[6]</sup>,且多为大豆(*Glycine max*)<sup>[7]</sup>、黄瓜(*Cucumis sativus*)<sup>[8]</sup>、厚皮甜瓜(*Cucumis melo* var. *cantaloupensis*)<sup>[9]</sup>、龙眼(*Dimocarpus longan*)<sup>[10]</sup>、柑橘(*Citrus reticulata*)<sup>[11]</sup>等农作物或果木的叶片和根系研究,对于林木类的研究较少。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方重要的造林树种<sup>[12]</sup>,其种植区域与缺镁严重的区域部分重合。酶活性对逆境变化较为敏感<sup>[13]</sup>,根系活力反映植物根系主动吸收能力<sup>[14]</sup>。本研究以 1 年生杉木无性系 020 为试验材料,研究了缺镁对杉木根系活力、丙二醛含量和保护酶活性的影响,并分析其相关性。初步探索分析杉木根系对缺镁的生理响应机理,以期探索缺镁对杉木生长、发育以及酶在杉木不同组织中转换的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试杉木为福建省顺昌县洋口国有林场提供的 1 年生无性系 020 杉木幼苗。平均株高 20.8 cm,地径 0.57 cm,冠幅 28.9 cm。

### 1.2 试验设计

选取长势一致,且健康的 1 年生无性系 020 杉木幼苗植株为试验对象。于 2017 年 3 月初在试验地内采用营养液基质(基质为蛭石与珍珠岩配比 3:1)培养方式进行缺镁试验。选用上端内径 12 cm、下端内径 8 cm、高 12 cm 的塑料盆作为盆栽容器,各塑料盆内填充 2/3 基质,每盆栽种 1 株幼苗,放置于温室内(温度 27 ℃,湿度 65%)。在幼苗生长的 1 个月适应期内,每隔 2 d 对各幼苗均匀浇灌 100 mL 营养液。营养液配方参照 Peng<sup>[15]</sup> 等的配方。驯化 1 个月后,开始进行缺镁和正常供镁(对照)的处理。镁以  $MgSO_4$  形态加入营养液,分别为缺镁(0 mM)和对照(1 mM),缺镁处理的  $SO_4^{2-}$  用  $Na_2SO_4$  补充以维持离子浓度的平衡和避免硫元素的缺乏。

每个处理 20 株苗,共 40 株,并编号标记(缺镁:QM,正常:ZM)。隔 2 d 定量每株浇灌 100 mL 改良的不同浓度镁营养液,每隔 15 d 用去离子水淋洗 1 次,以防止基质中盐分积累影响试验结果。处理 12 周后进行样品采集。

### 1.3 测定方法

每个处理取 12 株长势一致的苗,每 4 株混合为 1 个重复,共 3 个重复。取整株根系,经纯水淋洗后取白色根尖(长度 6~9 mm)4℃ 保存,进行相关参

数的测定。

根系活力采用(TTC,氯化三苯基四氮唑)法测定<sup>[16]</sup>,用  $\mu gTTF \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$  表示。丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法测定<sup>[17]</sup>,用  $\mu mol \cdot g^{-1}FW$  表示。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定<sup>[17]</sup>,用  $gFW \cdot h^{-1}$  表示。过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定<sup>[17]</sup>,用  $g \cdot min^{-1}$  表示。过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定<sup>[17]</sup>,用  $g \cdot min^{-1}$  表示。多酚氧化酶(PPO)活性采用邻苯二酚法测定<sup>[17-18]</sup>,用  $g \cdot min^{-1}$  表示。

### 1.4 数据处理与分析

利用 SPSS 18.0、Excel 2003 和 Origin Pro 8.5 软件对数据进行统计分析和作图;利用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验根系活力、丙二醛含量和保护酶活性的显著性;利用 SPSS 18.0 软件中的 Pearson 相关性分析对根系活力、MDA 含量和保护酶活性进行相关性分析,显著性水平为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 缺镁对杉木根系活力的影响

缺镁处理会降低杉木的根系活力。正常供镁的杉木根系活力为  $72.66 \mu gTTF \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ ,缺镁的根系活力为  $53.93 \mu gTTF \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ ,即根系活力表现为  $ZM > QM$ ,与 QM 相比,ZM 的根系活力高出 34.73%,但两者之间差异性不显著( $P > 0.05$ ) (图 1)。

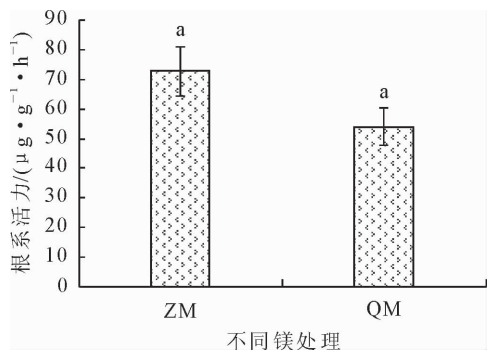


图 1 缺镁(QM)和对照(ZM)下杉木 1 年生苗根系活力(TTC)

Fig. 1 Effects of magnesium deficiency on root activities (TTC) of *C. lanceolata*

### 2.2 缺镁对杉木根系 MDA 含量和保护酶系统的影响

缺镁处理对杉木根系 MDA 含量和保护酶活性具有不同程度的影响(图 2)。由图 2a 和图 2b 可知,QM 的 MDA 含量和 SOD 活性均低于 ZM。

QM 的 MDA 含量比 ZM 低了 1.32%，差异性不显著 ( $P>0.05$ )；QM 的 SOD 活性比 ZM 低了 13.63%，且两者表现出显著性差异 ( $P<0.05$ )。而 QM 的 CAT 活性、POD 活性和 PPO 活性均高于 ZM，分别提高了 53.02%、0.35% 和 22.88%，且差

异性均不显著 ( $P>0.05$ ，图 2c、图 2d 和图 2e)。

在正常供镁处理下，杉木根系活力(TTC)与根系 MDA 含量、SOD 活性和 CAT 活性呈负相关关系，其中与 CAT 活性呈极显著负相关关系 ( $P<0.01$ )，而与 POD 活性和 PPO 活性呈显著正相关关系；根系 MDA 含量与 SOD 活性、POD 活性和 PPO 活性均呈负相关关系 ( $P<0.01$ )，除 SOD 活性外，其他相关性均达到极显著水平 ( $P<0.01$ )，而 MDA 含量与其 CAT 活性表现出极显著正相关关系 ( $P<0.01$ )；根系 SOD 活性与 POD 活性呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )，而与 CAT 活性呈极显著负相关 ( $P<0.01$ )；根系 CAT 活性与 POD 活性和 PPO 活性均呈极显著负相关 ( $P<0.01$ )；根系 POD 活性与 PPO 活性则表现为极显著正相关关系 ( $P<0.01$ ) (表 1)。

表 1 正常供镁处理下杉木根系活力与根系 MDA 含量和保护酶的关系

Table 1 Relationship between root activity and MDA content and protective enzyme of <i>C. lanceolata</i> under normal magnesium treatment						
指标	TTC	MDA	SOD	CAT	POD	PPO
TTC	1	-0.31	-0.94	-1**	1**	1**
MDA		1	-0.03	1**	-1**	-1**
SOD			1	-1**	1**	1**
CAT				1	-1**	-1**
POD					1	1**
PPO						1

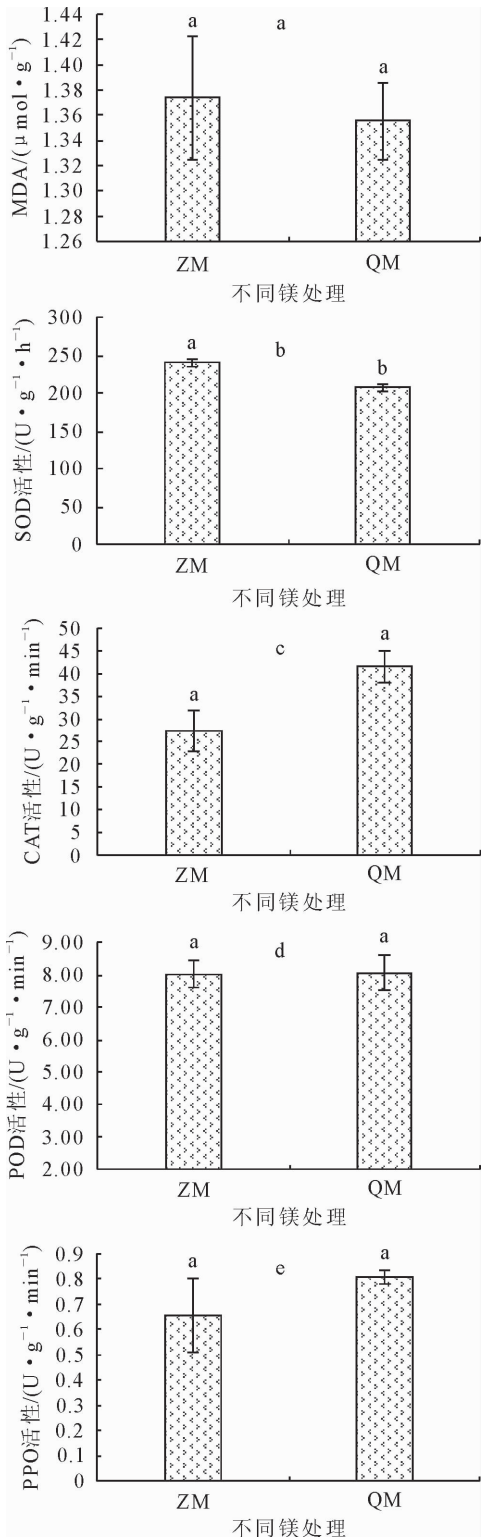
注：\* \* 在  $P<0.01$  水平(双侧)上显著相关。表 2 同。

在缺镁处理下，除与 SOD 活性呈负相关关系外，杉木根系活力(TTC)与 MDA 含量、CAT 活性、POD 活性和 PPO 活性均呈正相关关系，且均达到极显著水平 ( $P<0.01$ )；根系 MDA 含量与 CAT 活性、POD 活性和 PPO 活性呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )，而与 SOD 活性呈负相关且不显著；根系 SOD 活性与 CAT 活性、POD 活性和 PPO 活性均呈负相关关系且均达到极显著水平 ( $P<0.01$ )；根系 CAT 活性与 POD 活性和 PPO 活性呈极显著正相关水平 ( $P<0.01$ )；根系 POD 活性与 PPO 活性呈正相关关系，同时也达到了极显著水平 ( $P<0.01$ ) (表 2)。

### 3 结论与讨论

逆境胁迫下，植物的叶片和根系等都会产生具有不同破坏作用的物质。研究表明，缺镁对杉木根系活力、MDA 含量、保护酶活性和多酚氧化酶具有不同程度的影响。

根系活力是植物生长的重要指标之一<sup>[16]</sup>，能够反映根系新陈代谢的强弱程度，根系活力越高表明其吸收养分的能力越强。研究表明，缺镁处理会



注：不同小写字母表示差异显著 ( $P=0.05$ )。

图 2 缺镁对杉木丙二醛(MDA)和保护酶的影响

Fig. 2 Effects of magnesium deficiency on malondialdehyde (MDA) and protective enzymes of *C. lanceolata*

表 2 缺镁处理下杉木根系活力与根系 MDA 含量和保护酶的关系

Table 2 Relationship between root activity and MDA content and protective enzyme of *C. lanceolata* under magnesium deficiency treatment

指标	TTC	MDA	SOD	CAT	POD	PPO
TTC	1	1**	-1**	1**	1**	1**
MDA		1	-0.67	1**	1**	1**
SOD			1	-1**	-1**	-1**
CAT				1	1**	1**
POD					1	1**
PPO						1

抑制杉木的根系活力,从而进一步影响根系对养分的吸收,这一结果与王芳<sup>[7]</sup>等的研究结论一致。

MDA 含量是细胞膜脂过氧化作用的一种产物<sup>[16]</sup>,能够衡量植物对外部逆境的抵御能力<sup>[19]</sup>。本研究结果显示,与正常供镁相比,缺镁条件下的杉木根系所产生的 MDA 含量相对较低,即在缺镁环境下,杉木根系表现出更强的抗氧化能力,与 R. K. Tewari<sup>[20]</sup>等对桑树叶片在缺镁条件下的研究结果一致。植物在逆境胁迫环境下,细胞内的自由基代谢平衡被破坏,活性氧积累,由此对植物产生毒害<sup>[21]</sup>。SOD、CAT 和 POD 等酶活性是植物细胞膜中酶促防御系统的重要保护酶,其活性常作为植物衰老的生理生化指标。本研究表明,与正常供镁相比,缺镁处理下的 SOD 活性较高,且达到极显著水平( $P<0.01$ ),而 CAT 和 POD 活性均较低,但差异性不显著( $P>0.05$ ),这一研究结果与王芳<sup>[22]</sup>等对大豆叶片 CAT 活性和 POD 活性在缺镁处理下的结果一致,均低于正常供镁的 CAT 和 POD 活性,而与之结果不同的是本研究中正常供镁的 SOD 活性高于缺镁处理。植物体中多酚氧化酶(PPO)是重要的保护酶。逆境胁迫下,植物体内的 PPO 活性会有所上升<sup>[23]</sup>。与正常供镁的杉木根系相比,缺镁处理的杉木根系 PPO 活性提高了 22.88%,与上述研究结果一致<sup>[23]</sup>。

逆境胁迫下,为保持植物体内自由基的动态平衡,一般通过维持最高的 SOD 水平和保持几种抗氧化酶之间的协调和平衡两种途径来提高抗活性氧的能力<sup>[24]</sup>。本研究表明,缺镁下的杉木根系 SOD 活性未达到正常供镁 SOD 活性的同一水平,而 CAT、POD 和 PPO 活性均表现出较高的活性。由此可知,缺镁使得根系内自由基的平衡被破坏,杉木根系活力降低,进而影响根系对养分的吸收和转换,最终影响植物正常生长发育。

本文对杉木根系对缺镁的生理机理进行了初步探索,而缺镁对杉木植株内镁元素的迁移,叶片光合

作用以及酶活在不同组织中的活性等影响还需后期进一步探索研究。

参考文献:

[1] 李延,刘星辉,庄卫民. 植物 Mg 素营养生理的研究进展[J]. 福建农林大学学报:自然版,2000,29(1):74-80.  
LI Y,LIU X H,ZHUANG W M. Advances in magnesium nutritional physiology in plants[J]. Journal of Fujian Agricultural University:Nat. Sci. Edi.,2000,29(1):74-80. (in Chinese)

[2] WALKER C J,WEINSTEIN J D. Further characterization of the magnesium chelatase in isolated developing cucumber chloroplasts: substrate specificity, regulation, intactness, and ATP requirements [J]. Plant Physiology,1991,95(4):1189-96.

[3] GERENDAS J,FVHRS H. The significance of magnesium for crop quality[J]. Plant & Soil,2013,368(1-2):101-128.

[4] 朱帅. 镁对低温弱光下黄瓜光合作用的调控研究[D]. 泰安:山东农业大学,2014.

[5] 李延,刘星辉. 缺镁胁迫对龙眼叶片衰老的影响[J]. 应用生态学报,2002,13(3):311-314.  
LI Y,LIU X H. Effects of magnesium deficiency on senescence of dimocarpus longana leaves[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2002,13(3):311-314. (in Chinese)

[6] 靳晓琳. 缺镁胁迫下柑橘幼苗 cDNA-AFLP 分析[D]. 福州:福建农林大学,2013.

[7] 王芳,刘鹏,朱靖文. 镁对大豆根系活力叶绿素含量和膜透性的影响[J]. 农业环境科学学报,2004,23(2):235-239.  
WANG F,LIU P,ZHU J W. Effect of magnesium on root activity,chlorophyll content and membrane permeability of soybean[J]. Journal of Agro-Environment Science,2004,23(2):235-239. (in Chinese)

[8] 谢小玉,张喆. 低温和镁胁迫对黄瓜幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中国蔬菜,2012,1(22):54-58.

[9] 朱立保,刘海河,张彦萍,等. 镁对厚皮甜瓜坐果节位叶片叶绿素荧光特性和活性氧清除系统的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(5):1279-1285.

[10] 李延,刘星辉. 缺镁对龙眼叶组织活性氧代谢及膜系统的影响[J]. 热带作物学报,2000,21(4):39-44.  
LI Y,LIU X H. Effects of magnesium deficiency on active oxygen metabolism and membrane system of longan (*Dimocarpus longana*. Lour) leaves[J]. Chinese Journal of Tropical Crops,2000,21(4):39-44. (in Chinese)

[11] YANG G H,YANG L T,JIANG H X,*et al*. Physiological impacts of magnesium-deficiency in *Citrus*, seedlings: photosynthesis, antioxidant system and carbohydrates[J]. Trees,2012,26(4):1237-1250.

[12] 俞新妥. 杉木栽培学[M]. 福州:福建科学技术出版社,1996:1-8.

[13] 钟楠,王进鑫,马惠芳,等. 水分和镉交互胁迫对刺槐幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 西北林学院学报,2010,25(6):5-9.  
ZHONG N,WANG J X,MA H F,*et al*. Effects of interactive stress of drought and antioxidant enzyme activity of *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University,2010,25(6):5-9. (in Chinese)

ZHANG J J, HAI P, LIU H P. Study on the change of chlorophyll content in tomato leaves [J]. Horticulture, 2015(1): 99-100. (in Chinese)

[11] 孟军, 陈温福, 徐正进, 等. 水稻剑叶净光合速率与叶绿素含量的研究初报[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 32(4): 247-249.

MENG J, CHEN W F, XU Z, J, *et al.* The study of the net photosynthetic rate and chlorophyll content of rice sword leaf [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2008, 32(4): 247-249. (in Chinese)

[12] 刘贞琦, 刘振业, 马达鹏, 等. 水稻叶绿素含量及其与光合速率关系的研究[J]. 作物学, 1984, 10(1): 57-64.

[13] 梁镇林. 水稻不同品种叶绿素含量的变异及遗传表现[J]. 贵州农学院学报, 1982(1): 11-25.

LIANG Z L. Genetic study on chlorophyll content of rice[J]. Journal of Guizhou Agricultural College, 1982(1): 11-25. (in Chinese)

[14] 张琦, 何天明. 早熟梨“新梨七号”不同枝条叶片叶绿素含量的变化[J]. 北方果树, 2003(1): 7-9.

[15] 张宪政. 植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学, 1986(3): 26-28.

[16] ANDERSON J M, PARK Y I, CHOW S W. Photo inactivation and photo protection of photo system II in nature[J]. Physiol Plant, 1997, 100: 214-223.

[17] 潘瑞炽, 董思得. 植物生理学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 55-136.

[18] 张琦, 高疆生, 张雪花. 杏叶片叶绿素含量的变化规律研究[J]. 塔里木农垦大学学报, 2004, 16(4): 1-4.

ZHANG Q, GAO J S, ZHANG X H. Study on the change law of chlorophyll content in apricot leaves[J]. Journal of Tarim Land Reclamation University, 2004, 16(4): 1-4. (in Chinese)

[19] 范淑秀, 陈温福. 超高产水稻品种叶绿素变化规律研究初报[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(1): 14-17.

FAN S X, CHEN W F. Preliminary study on chlorophyll change law of super high yield rice[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005, 36(1): 14-17. (in Chinese)

[20] 潘波, 郑王尧. 大麦叶片叶绿素含量及消长规律的研究[J]. 莱阳农学院学报, 1990, 7(4): 266-269.

[21] 张巨松, 杜永猛. 棉花叶片叶绿素含量消长动态的分析[J]. 新疆农业大学学报, 2002, 25(3): 7-9.

ZHANG J S, DU Y M. Analysis of growth and decline of chlorophyll content in cotton leaves[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2002, 25(3): 7-9. (in Chinese)

[22] 邢艳秋, 黄超, 陈世宏. SPAD 叶绿素仪在评价树木叶片光环境 and 健康水平上的应用初探[J]. 森林工程, 2011, 27(1): 1-4.

XING Y Q, HUANG C, CHEN S H. Application of SPAD chlorophyll meter in assessing light environment and health status of tree leaves[J]. Forest Engineering, 2011, 27(1): 1-4. (in Chinese)

[23] 许大全. 光合速率、光合效率与作物产量[J]. 生物学通报, 1999, 34(8): 9-10

[24] ZELITCH I. The close relationship between net photosynthesis and crop yield [J]. BioScience, 1982, 32: 706-802.

(上接第 19 页)

[14] 冯志培, 赵佳宝, 孔玉华, 等. 种基盘对侧柏幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(3): 107-112.

FENG Z P, ZHAO J B, KONG Y H, *et al.* Effect of seed-base technique on the root morphological and physiological properties of platycladus orientalis[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(3): 107-112. (in Chinese)

[15] PENG H Y, QI Y P, LEE J, *et al.* Proteomic analysis of *Citrus sinensis*, roots and leaves in response to long-term magnesium-deficiency[J]. Bm. Genomics, 2015, 16(1): 253.

[16] 蔡永萍. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014.

[17] 张蜀秋. 植物生理学实验技术教程[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[18] 张立军. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.

[19] 陈志刚, 张红蕊, 周晓红, 等. 铝胁迫对黑麦草根系抗氧化酶活性和丙二醛含量的诱导特征研究[J]. 土壤通报, 2012(2): 391-395.

CHEN Z G, ZHANG H R, ZHOU X H, *et al.* Study on characteristics of antioxidant enzymes activities and MDA contents in lolium multiflorum roots induced by aluminum stress [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012(2): 391-395. (in Chinese)

[20] TEWARI R K, KUMAR P, SHARMA P N. Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 108(1): 7-14.

[21] 李妍. 铅镉胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(3): 514-517.

LI Y. Effect of lead and cadmium stress on antioxidant enzymes activities and malondialdehyde concentration of wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(3): 514-517. (in Chinese)

[22] 王芳, 刘鹏, 史锋, 等. 镁对大豆叶片细胞膜透性和保护酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 659-664.

[23] 田荣荣, 王岩, 王伟, 等. 大豆叶片黄酮类及多酚类物质对臭氧浓度升高的响应[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1277-1282.

TIAN R R, WANG Y, WANG W, *et al.* Response of soybean leaves flavonoids and polyphenols to elevated ozone [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(8): 1277-1282. (in Chinese)

[24] SCANDALIOS J G. Oxygen stress and superoxide dismutases [J]. Plant Physiology, 1993, 101(1): 7.