

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201312042

董诚明,曹利华,苏秀红,等. 稀土元素镧和铈对冬凌草再生植株生长及次生代谢产物的影响[J]. 广西植物,2015,35(3):437-441

Dong CM, Cao LH, Su XH, et al. Effects of rare earth elements  $\text{La}^{3+}$  and  $\text{Ce}^{3+}$  on the growth of *Rabdosia rubescens* regeneration plant and the accumulation of main secondary metabolites[J]. *Guihaia*, 2015, 35(3):437-441

## 稀土元素镧和铈对冬凌草再生植株生长及次生代谢产物的影响

董诚明<sup>1\*</sup>, 曹利华<sup>1</sup>, 苏秀红<sup>1</sup>, 张艳贞<sup>2</sup>, 乔毅琳<sup>1</sup>, 姚 锋<sup>1</sup>

(1. 河南中医学院, 郑州 450008; 2. 新乡医学院 三全学院, 河南 新乡 450003)

**摘 要:** 以冬凌草无菌苗为材料, 在冬凌草再生植株时期, 添加不同浓度的稀土元素镧和铈, 用重量法测定其单株平均鲜重及干重, 用高效液相法测定冬凌草甲素、乙素、迷迭香酸的含量, 参考农作物、园艺作物种质评比的方法, 根据冬凌草生产中各项指标的重要性, 设置权重, 计算加权后得到综合评分对其进行综合评价, 探讨稀土元素镧、铈对冬凌草再生植株产量及次生代谢产物冬凌草甲素、乙素、迷迭香酸含量的影响。结果表明: 空白对照组综合评分为 62.99 分, 添加稀土元素铈的条件下,  $1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  评分最高为 87.96 分, 添加稀土元素镧的条件下,  $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{LaCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  评分最高为 74.44 分, 这表明  $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  对冬凌草再生植株生长及次生代谢产物积累的促进作用优于  $\text{LaCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ; 适宜浓度的镧、铈能促进冬凌草再生植株的生长及次生代谢产物冬凌草甲素、冬凌草乙素、迷迭香酸的合成, 而高浓度  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{LaCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  具有抑制的情况。该研究结果将对进一步研究稀土元素对冬凌草再生植株生长的促进作用机制奠定基础, 为植物组织培养中如何科学合理地使用稀土元素提供理论依据。

**关键词:** 冬凌草; 稀土元素; 甲素; 乙素; 迷迭香酸

**中图分类号:** Q943.1; R282, 284.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2015)03-0437-05

## Effects of rare-earth elements $\text{La}^{3+}$ and $\text{Ce}^{3+}$ on the growth of *Rabdosia rubescens* regeneration plant and the accumulation of main secondary metabolites

DONG Cheng-Ming<sup>1\*</sup>, CAO Li-Hua<sup>1</sup>, SU Xiu-Hong<sup>1</sup>,  
ZHANG Yan-Zhen<sup>2</sup>, QIAO Yi-Lin<sup>1</sup>, YAO Feng<sup>1</sup>

(1. Henan University of Traditional Chinese Medicine, Zhengzhou 450008, China;

2. Sanquan Medical College of Xinxiang, Xinxiang 450003, China)

**Abstract:** Aseptic seedlings of *Rabdosia rubescens* were used as the experiment material. In *R. rubescens* regeneration period, the rare-earth elements  $\text{La}^{3+}$  or  $\text{Ce}^{3+}$  with different concentrations were added in the culture medium. Fresh and dry weight of the plant were determined by gravimetric method. HPLC method was used for the determination of oridonin, ponidicin and rosmarinic acid content. We determined weight according to evaluating methods of agricultural and horticultural crops and the importance of indexes in the production of *R. rubescens*. The quality synthetic evaluation was also carried out according to weighted mark. The effects of rare earth elements  $\text{La}^{3+}$  and  $\text{Ce}^{3+}$  on *R.*

收稿日期: 2014-05-02 修回日期: 2014-10-1

基金项目: 国家自然科学基金(81173486); 国家科技重大专项(2012ZX09304006)。

作者简介: 董诚明(1963-), 男, 内蒙古四子王旗人, 教授, 主要从事中药资源学的研究与开发, (E-mail) dcm663@sina.com。

\* 通讯作者

*rubescens* tissue culture and the contents of oridonin, ponicedin, rosmarinic acid in *R. rubescens* were studied. The synthetic score of blank control group was 61.51 points, under the condition of  $1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , the score reached up to the highest value of 87.20 points. But under the condition of  $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{LaCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , the score 74.44 points. The results of this experiment showed that  $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  had more positive promoting effects on the growth of regeneration plant of *R. rubescens* and the accumulation of main secondary metabolites than  $\text{LaCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . The optimal concentration of  $\text{Ce}^{3+}$  or  $\text{La}^{3+}$  could promote the growth of regeneration plant of *R. rubescens* and secondary metabolites oridonin, ponicedin and rosmarinic synthesis. However,  $\text{La}^{3+}$  concentration in high level inhibited the growth of *R. rubescens* plant regeneration. The experiment would lay a foundation for further study on the promotion effect on the growth of regeneration plant of *R. rubescens*. The study of *R. rubescens* could provide theoretical basis for the rational utilization of rare earth elements.

**Key words:** *Rabdosia rubescens*; rare earth elements; oridonin; ponicedin; rosmarinic acid

冬凌草,学名碎米桠(*Rabdosia rubescens*),为唇形科香茶菜属多年生草本或亚灌木植物,产于我国河南、山西、贵州、河北等地。具有活血止痛、清热解毒等功效,同时对治疗食管癌、结肠癌等均有一定疗效(刘晨江等,1998)。冬凌草中的主要抗癌、抗菌活性成分为二萜类化合物(冬凌草甲素、冬凌草乙素)(李继承等,1986)、迷迭香酸。

稀土元素是元素周期表中的镧系元素(15种)和与镧系元素化学性质相似的铈、钇共17种元素的总称。何跃君等(2005)对稀土元素对植物的生物效应及其作用机理进行了探讨,结果表明适量的稀土元素对植物吸收、转化和利用营养元素具有一定的促进作用。稀土有类似钙的功能,可置换出酶中的钙离子而参与酶的反应。薛建平等(2004)研究了稀土元素铈对‘红地球’葡萄组培苗生长的影响,表明适宜浓度的铈对其生长具有促进作用。刘晨等(2009)探讨了稀土元素对冬凌草细胞合成冬凌草甲素的影响,结果表明添加不同种类、不同浓度的稀土离子镧和铈均可促进冬凌草甲素的合成。添加镧离子的细胞合成的冬凌草甲素明显高于添加铈离子的细胞。目前未见有关稀土元素对冬凌草再生植株影响的报道,因此通过添加适量稀土元素能够提高冬凌草再生植株时期其生物量及其次生代谢产物含量,将为提高冬凌草的品质起到重要作用。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

实验材料为实验室内通过对冬凌草叶片愈伤及不定芽分化得到的冬凌草无菌苗。

### 1.2 实验方法

1.2.1 不同浓度稀土元素条件下冬凌草再生植株产

量比较 将冬凌草无菌苗剪成带有1个茎节的小段,接种于生根培养基  $1/2 \text{MS} + \text{IBA } 0.3 + \text{NAA } 0.2$  中,在培养基中分别添加浓度为 0、1、5、10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  或  $\text{LaCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (编号分别为 CK、C1、C2、C3、L1、L2、L3)。在光照  $12 \text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 、温度  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、无菌条件下培养。第30天称取冬凌草鲜重及干重,采用 SPSS17.0 软件分析冬凌草产量之间的差异性。

1.2.2 冬凌草有效成分含量的测定 第30天,取出不同稀土元素条件下得到的冬凌草植株,称重后放置于烘箱中,  $80^\circ\text{C}$ ,烘至恒重,用研钵研成粉末,备用。采用 HPLC 法,测定冬凌草甲素、乙素、迷迭香酸含量(干重含量),具体提取、测定方法如下。

1.2.2.1 供试品溶液的制备 冬凌草甲素、迷迭香酸的制备方法参照中华人民共和国药典中冬凌草甲素的制备方法(国家药典委员会,2010),  $0.22 \mu\text{m}$  微孔滤膜过滤即得其供试样品,每个样品重复3次,冬凌草乙素的制备参照董诚明等(2011)中的冬凌草乙素的提取方法,  $0.22 \mu\text{m}$  微孔滤膜过滤后测定冬凌草乙素的含量,每个样品重复3次。

1.2.2.2 色谱条件 紫外检测器是 waters e2695, waters 2489; Agilent XDB-C18(4.6 mm  $\times$  250 mm, 5  $\mu\text{m}$ ) 作为色谱柱;甲醇-水(55:45), 甲醇-0.5%磷酸水溶液(51:49) 分别作为冬凌草甲素、乙素流动相;检测波长、流速、柱温分别为 238 nm、0.8 mL  $\cdot$  min $^{-1}$ 、30  $^\circ\text{C}$ 。甲醇-0.5%磷酸水溶液(41:59) 为迷迭香酸的流动相;检测波长、流速、柱温分别为 335 nm、0.8 mL  $\cdot$  min $^{-1}$ 、30  $^\circ\text{C}$ 。

1.2.3 不同稀土元素条件下冬凌草再生植株综合评价 评价方法(田密等,2009):以产量(经济性状)、3种次生代谢产物(冬凌草甲素、乙素、迷迭香酸)含量共4个指标对冬凌草种质进行综合评价,并按照各

影响因素的重要程度设定各因素的权重系数(结合生产实际和药效考虑,将甲素含量和产量设置了较多权重,各占总体的 30%;其它的乙素占 20%,迷迭香酸占 20%,再计算加权后总分。

公式如下:综合总分=(产量/ $X_{Max}$ ×0.3+甲素含量/ $Y_{Max}$ ×0.3+乙素含量/ $Z_{Max}$ ×0.2+迷迭香酸含量/ $P_{Max}$ ×0.2)×100

式中, $X_{Max}$ 为单株平均干重最大重量; $Y_{Max}$ 为最高甲素含量; $Z_{Max}$ 为最高乙素含量; $P_{Max}$ 为最高迷迭香酸含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 稀土元素对冬凌草再生植株产量的影响

冬凌草的产量是衡量冬凌草品质优劣的一个重要因素,评价冬凌草的品质必须对其产量进行评价。不同稀土元素下冬凌草最终产量评价结果见表 1。

表 1 稀土元素对冬凌草再生植株产量的影响

Table 1 Effects of rare earth elements on the regeneration plant yield

组别 Group	平均鲜重 Mean fresh weight (g)	平均干重 Mean dry weight (g)
CK(0)	0.1076	0.0151
C1(1)	0.2370 *	0.030 *
C2(5)	0.1954 *	0.0270 *
C3(10)	0.1409	0.0210 *
L1(1)	0.1767 *	0.0126
L2(5)	0.1386	0.0188
L3(10)	0.0853	0.0121

注: \* 表示与空白对照比较差异显著( $P < 0.05$ ); C:  $CeCl_3 \cdot 7H_2O$ ; L:  $LaCl_3 \cdot 6H_2O$ 。下同。

Note: \* indicates significant difference in contrast with blank control group ( $P < 0.05$ ); C:  $CeCl_3 \cdot 7H_2O$ ; L:  $LaCl_3 \cdot 6H_2O$ . The same below.

从表 1 可知,除 L3 外,其余条件下冬凌草平均鲜重、平均干重均高于空白对照,且  $CeCl_3 \cdot 7H_2O$  对冬凌草产量的促进作用显著优于  $LaCl_3 \cdot 6H_2O$ ,  $1 \mu mol \cdot L^{-1} CeCl_3 \cdot 7H_2O$  条件下,冬凌草单株平均鲜重最高为 0.2370 g、平均干重为 0.030 g,随着其浓度升高促进作用减弱。低浓度  $LaCl_3 \cdot 6H_2O$  促进冬凌草产量的提高;高浓度  $LaCl_3 \cdot 6H_2O$  抑制,  $10 \mu mol \cdot L^{-1} LaCl_3 \cdot 6H_2O$  条件下冬凌草平均鲜重最低为 0.0853 g、平均干重为 0.0121 g。

### 2.2 稀土元素对冬凌草再生植株次生代谢产物含量的影响

适量浓度的稀土元素能够促进植物的生长或次生代谢产物的合成(周洁等,2009;徐忠传等,2006)。

本实验探讨了不同浓度的  $Ce^{3+}$ 、 $La^{3+}$  对冬凌草次生代谢产物含量的影响,并采用 SPSS17.0 软件对实验结果进行方差分析。具体结果见表 2。

从表 2 可知,不同稀土元素条件下冬凌草甲素含量均高于空白对照组,随着浓度的升高, $Ce^{3+}$  对冬凌草甲素促进作用逐渐降低, $La^{3+}$  的促进作用逐渐增强,L3 条件下冬凌草甲素含量最高为  $14.12 mg \cdot g^{-1}$ 。除 L3 外,不同稀土元素条件下均促进冬凌草乙素合成,C3 条件下冬凌草乙素含量最高为  $0.201 mg \cdot g^{-1}$ ,是空白对照组的 2 倍。L3 条件下  $La^{3+}$  抑制冬凌草乙素合成,含量最低为  $0.061 mg \cdot g^{-1}$ 。说明在  $1 \sim 10 \mu mol \cdot L^{-1}$  浓度范围内,随着浓度的升高, $Ce^{3+}$  对冬凌草乙素促进作用越来越强, $La^{3+}$  促进作用不显著,反而高浓度时抑制冬凌草乙素合成。 $1 \sim 10 \mu mol \cdot L^{-1}$  的  $Ce^{3+}$  及  $La^{3+}$  均不同程度促进迷迭香酸的合成,且均呈现显著性差异( $P < 0.05$ ),C1 条件下迷迭香酸的含量最高为  $30.41 mg \cdot g^{-1}$ ,比空白对照组高  $13.11 mg \cdot g^{-1}$ ,而随着其浓度升高,促进作用开始减弱。

表 2 稀土元素对冬凌草再生植株次生代谢产物含量的影响

Table 2 Effects of rare earth elements on secondary metabolite accumulation in regeneration plant

培养基 Medium ( $\mu mol \cdot L^{-1}$ )	甲素 Oridonin ( $mg \cdot g^{-1}$ )	乙素 Ponicidin ( $mg \cdot g^{-1}$ )	迷迭香酸 Rosmarinic acid ( $mg \cdot g^{-1}$ )
CK(0)	$12.55 \pm 0.5147$	$0.099 \pm 0.0044$	$17.30 \pm 0.0651$
C1(1)	$13.37 \pm 0.3581 *$	$0.096 \pm 0.0021$	$30.41 \pm 0.2250 *$
C2(5)	$12.85 \pm 0.1082$	$0.099 \pm 0.0036$	$21.90 \pm 0.1250 *$
C3(10)	$13.06 \pm 0.1323$	$0.201 \pm 0.0015 *$	$21.16 \pm 0.6959 *$
L1(1)	$13.08 \pm 0.1940$	$0.094 \pm 0.0010$	$22.55 \pm 0.2207 *$
L2(5)	$12.87 \pm 0.3580$	$0.110 \pm 0.0010$	$27.05 \pm 0.1484 *$
L3(10)	$14.12 \pm 0.0862 *$	$0.061 \pm 0.0045 *$	$20.17 \pm 0.5486 *$

### 2.3 稀土元素对冬凌草再生植株综合评分结果

从以上分析结果来看,不同稀土元素条件下各评价指标有高低,为了保证最终筛选出最佳条件,参考农作物及园艺作物种质评比的方法,根据冬凌草生产中其指标的重要性,设置权重,计算加权后得到其综合评分,对冬凌草种质资源进行综合评价研究。具体评价方法见 1.2.3 项下评价方法。综合评价结果见表 3。

从表 3 可见,除 L3 以外,不同稀土元素条件下的综合评分均高于空白对照组,说明稀土元素对冬凌草再生植株的生长及次生代谢的合成均有促进作用。从综合评分结果可以看出,  $Ce^{3+}$  对冬凌草的促

表 3 不同稀土元素条件下冬凌草再生植株综合评分结果

Table 3 Effects of rare earth elements on the comprehensive score in regeneration plant

培养基 Medium	平均干重 Mean weight (g)	单株干重评分 Score of single plant dry weight	甲素 Oridonin (mg · g <sup>-1</sup> )	甲素评分 Score of oridorlin	乙素 Ponicidin (mg · g <sup>-1</sup> )	乙素评分 Score of ponicidin	迷迭香酸 Rosmarinic acid (mg · g <sup>-1</sup> )	迷迭香酸评分 Score rosmarinic acid	综合评分 Comprehen- sive score
CK(0)	0.0151	15.10	12.55	26.66	0.099	9.85	17.30	11.38	62.99
C1(1)	0.030	30.00	13.37	28.41	0.096	9.55	30.41	20	87.96
C2(5)	0.0270	27.00	12.85	27.30	0.099	9.85	21.90	14.40	78.55
C3(10)	0.0210	21.00	13.06	27.75	0.201	20.00	21.16	13.92	82.67
L1(1)	0.0126	12.60	13.08	27.80	0.094	9.35	22.55	14.84	64.59
L2(5)	0.0188	18.80	12.87	27.34	0.110	10.50	27.05	17.80	74.44
L3(10)	0.0121	12.10	14.12	30.00	0.061	6.07	20.17	13.26	61.43

进作用优于 La<sup>3+</sup>, 空白对照组 62.99 分, C1 条件下, 评分最高为 87.96 分, 高于空白对照组 24.97 分, 说明 1 μmol · L<sup>-1</sup> Ce<sup>3+</sup> 为最佳条件。L3 条件下评分最低为 61.43 分, 说明 La<sup>3+</sup> 对冬凌草再生植株的影响出现高浓度抑制现象。

### 3 讨论与结论

本实验应用组织培养的方法研究了稀土元素 Ce<sup>3+</sup>、La<sup>3+</sup> 对冬凌草再生植株的生长和冬凌草甲素、乙素、迷迭香酸合成的影响, 实验结果表明, 适量浓度的稀土元素铈对冬凌草生长的促进作用优于镧, 1~10 μmol · L<sup>-1</sup> 铈能提高冬凌草产量, 促进冬凌草次生代谢产物的合成, 同等浓度的镧可以促进冬凌草甲素、迷迭香酸的合成, 但其对冬凌草再生植株的生长及对冬凌草乙素的合成出现高浓度抑制的情况, 综合考虑, 将 1 μmol · L<sup>-1</sup> CeCl<sub>3</sub> · 7H<sub>2</sub>O 作为稀土元素最佳条件选择。

鉴于稀土元素对植物生长具有广泛的促进作用, 国内已将稀土元素用于药用植物细胞和组织培养中。大量研究表明, 在细胞培养和组织培养过程中添加适量的稀土元素对植物的产量及次生代谢产物含量同样起到促进作用(袁晓凡等, 2005)。大量的稀土农用实践表明, 低浓度的稀土元素及其化合物能刺激植物生长, 提高作物产量, 而高浓度则表现出抑制效果(解惠光, 1991; 赵英琪等, 1999)。这些在本实验中也得到了证实, 在此基础上, 本实验利用加权平分法对再生植株产量与次生代谢产物的合成进行综合分析, 为进一步提高冬凌草的品质选出最佳配方, 为优良品质冬凌草的工业化生产奠定基础。稀土元素对植物生长作出调控可能是其通过与细胞膜外侧受体结合, 再通过信号转导的途径(李伟等,

2002)。陈为钧等(2000)研究了 La<sup>3+</sup> 对烟草 RuBPcase 活性的影响, 结果表明低浓度的稀土元素能够提高、活化植物体内 RuBPcase 的活性, 高浓度的稀土离子会占据 RuBPcase 中 Mg<sup>2+</sup> 的作用位点, 降低 Mg<sup>2+</sup> 对酶活性的催化及活化作用, 同时酶蛋白中其他氧原子与多余的 La<sup>3+</sup> 离子结合, 导致酶构象发生更大程度上的变化, 最终抑制酶活性(陈为钧等, 2001)。稀土元素对冬凌草再生植株生长的促进作用, 实质可能是其影响了体内生理机制, 提高了有关酶的含量及活性, 进而提升了体内能量代谢及物质代谢的水平, 其作用机理将有待于进一步研究。

为了更有效更广泛地将稀土应用于药用植物的组织培养, 还需要对稀土元素在不同作物组培中的效应做深入系统地研究, 以了解稀土元素对不同药用植株的促进生长分化及抑制生长分化作用机理, 特别是其抑制生长机制, 为药用植物组织培养中如何正确使用稀土元素提供理论依据。

### 参考文献:

- Chinese pharmacopoeia commission(国家药典委员会). 2010. Pharmacopoeia of the People's Republic of China(中华人民共和国药典)[M]. Beijing(北京): China Medical Science Press(中国医学科技出版社); 106
- Chen WJ(陈为钧), Gu YH(顾月华), Wang SB(王圣兵), et al. 2000. Effect of Lanthanum on RuBPcase activity of tobacco seedlings(镧对烟草 RuBPcase 活性影响的研究)[J]. *J Rare Earth*(中国稀土学报), 18(3): 258-261
- Chen WJ(陈为钧), Tao Y(陶冶), Hu TD(胡天斗), et al. 2001. Effects of Ln<sup>3+</sup> on inhibition of tobacco RuBPcase(稀土离子对烟草 RuBPcase 的抑制作用)[J]. *J Rare Earth*(中国稀土学报), 19(4): 362-365
- Dong CM(董诚明), Xu P(徐鹏), Su XH(苏秀红), et al. 2011. Effects of trace elements Zn on yield and effective components of *Rabdosia rubescens*(锌对冬凌草产量及其有效成分含量的影响)[J]. *Chin J Exp Trad Med Form*(中国实验方剂学杂志), 17(3): 58-60

- He YJ(何跃君), Xue L(薛立). 2005. Biological effects of rare earth elements and their action mechanisms(稀土元素对植物的生物效应及其作用机理)[J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **16**(10): 1 983—1 989
- Liu CJ(刘晨江), Zhao ZH(赵志鸿). 1998. Development of *Rabdosia Rubescens* [Hemsl.] Hara(冬凌草的研究进展)[J]. *Chin Pharm J* (中国药理学杂志), **33**(10): 577—581
- Liu C(刘晨), Li DJ(李冬杰), Li N(李楠), et al. 2009. Effects of rare earth elements on the synthesis of rubescensin A in *Robdosia rubescens* cell(稀土元素对冬凌草细胞合成冬凌草甲素的影响)[J]. *J Anhui Agric Sci* (安徽农业科学), **37**(13): 5 965—5 966, 5 969
- Li JC(李继成), Liu CJ(刘晨江), Sun HD(孙汉董). 1986. Research on the structure of lushan rubescensin B and C(鲁山冬凌草乙素和丙素的结构研究)[J]. *Acta Bot Yunnan* (云南植物研究), **8**(1): 93—97
- Li W(李伟), Liang JS(梁建生), Li YR(李幼荣), et al. 2002. Studies on biological dosage effect of rare earth element on protein(稀土元素对生物体蛋白的剂量效应研究进)[J]. *Biotechnology* (生物技术), **12**(1): 42—44
- Tian M(田蜜). 2009. The germplasm resource evaluation and preliminary screening of excellent strains about *Curcuma longa*, which is produced in Sichuan Province(川产姜黄的种质资源评价及优良株系初步筛选研究)[D]. Chengdu(成都): Chengdu University of Tradition Chinese Medicine(成都中医药大学)
- Xu ZC(徐忠传), Yu D(郁达), Zhou JY(周静亚), et al. 2006. The effects of Eu and Y on regeneration and growth of test-tube plantlet for *Oxalis violacea*(稀土元素铕和钇对紫叶酢浆草试管苗生长的影响)[J]. *Biol Bull* (生物科技通报), (s1): 330—333
- Xie HG(解惠光). 1991. A study on the application of rare earth elements on agriculture(中国稀土元素在农业上应用研究进展)[J]. *Chin Sci Bull* (科学通报), **36**(8): 561—564
- Xue JP(薛建平), Xu M(徐敏), Zhang AM(张爱民). 2004. Effects of rare-earth elements Cerium on "Red Globe" grape plantlets *in vitro*(稀土元素铈对"红地球"葡萄组培苗生长的影响)[J]. *Acta Horticult Sin* (园艺学报), **31**(3): 369—371
- Yuan XF(袁晓凡), Zhao B(赵兵), Wang YC(王玉春). 2005. Application of rare earth elements in medicinal plant cell and tissue culture(稀土元素在药用植物细胞和组织培养中的应用)[J]. *Chin Bull Bot* (植物学通报), **22**(1): 115—120
- Zhou J(周洁), Zhang J(张霁), Gou LP(郭兰萍), et al. 2010. Effects of lanthanum on leaf photosynthesis and artemisinin accumulation in *Artemisia annua*(稀土元素镧对黄花蒿光合作用及青蒿素积累的影响)[J]. *Chin Trad Herb Drug* (中草药), **41**(8): 1 371—1 374
- Zhao YQ(赵英琪), Wang NJ(王乃江), Zhao ZY(赵智渊). 1999. A research of effects of Ce rare earth on photosynthesis and drought resistance of *Prunus armeniaca* × *sibirica*(稀土铈对大扁杏光合作用和抗旱性影响的研究)[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin* (西北植物学报), **19**(5): 54—58

(上接第 446 页 Continue from page 446)

- Wang YX(王永祥), Liu B(刘斌). 2006. Development of fluorescent indicators of intracellular free  $\text{Ca}^{2+}$ (细胞内游离  $\text{Ca}^{2+}$  的荧光指示剂研究进展)[J]. *J Xi'an Univ Arts & Sci; Nat Sci Ed* (西安文理学院学报·自然科学版), **9**(1): 21—24
- Xu GH(徐国华), Zhang SL(张绍玲), Zhang CY(张超英), et al. 2003. Changes in free  $\text{Ca}^{2+}$  distribution in pollen cell after self-and cross pollination in *Pyrus serotina* Re hd(梨自花与异花授粉后花粉胞内游离  $\text{Ca}^{2+}$  分布的变化)[J]. *J Plant Physiol & Mol Biol* (植物生理与分子生物学学报), **29**(2): 97—103
- Yu XC(余晓丛), Zhang SY(张少英), Na R(娜仁). 2013. Optimization of fluorescence detection conditions of calcium ion in the cell in sugar beet(荧光指示剂检测甜菜胞内钙离子的条件优化)[J]. *J Northeast Agric Univ* (东北农业大学学报), **44**(1): 61—64
- Yuan JH(袁建辉), Yang H(杨慧), Tang H(唐焕), et al. 2011. A cell-based detection of ciguatoxin usingsodium fluorescence probe (钠离子荧光探针用于检测雪卡毒素的细胞毒性)[J]. *J Southern Med Univ* (南方医科大学学报), **31**(4): 653—655
- Zhang JT, Liu H, Sun J, et al. 2012. Arabidopsis fatty acid desaturase FAD2 is required for salt tolerance during seed germination and early seedling growth[J]. *PLoS One*, **7**(1): 1—12
- Zhang WH, Rengel Z, Kuo J. 1998. Determination of intracellular  $\text{Ca}^{2+}$  in cells of intact wheat roots; loading of acetoxymethyl ester of Fluo-3 under low temperature[J]. *Plant J*, **15**(1): 147—151
- Zhou P(周平), Sun TE(孙天恩), Ye MW(叶梦炜), et al. 1995. Study on the loading of  $\text{Ca}^{2+}$  fluorescent indicator into protoplasts(钙离子荧光指示剂导入植物细胞原生体的研究)[J]. *Wuhan Univ J; Nat Sci Ed* (武汉大学学报·自然科学版), **41**(2): 208—212