

外源褪黑素对低温弱光胁迫下茄子幼苗生理特性的影响

唐懿^a, 余雪娜^a, 何娟^b, 张恩泽^b, 兰静宇^b, 李焕秀^{a*}

(四川农业大学 a.果蔬研究所; b.园艺学院, 四川 成都 611130)

摘要:以‘春晨长红茄’为材料,采用不同浓度(50、100、150、200、250 $\mu\text{mol/L}$)褪黑素(MT)喷施茄子幼苗叶片,以喷施清水为对照(置于自然光温下为CK,低温弱光下为CK1),研究MT对低温弱光胁迫下茄子幼苗生理特性的影响。结果表明:浓度低于200 $\mu\text{mol/L}$ 的MT能保持低温弱光胁迫下茄子幼苗叶片中叶绿素和类胡萝卜素含量,当MT浓度为150 $\mu\text{mol/L}$,茄子幼苗叶片叶绿素总量和类胡萝卜素含量分别比CK1高40.23%和75.00%;喷施MT,有助于提高PSII活性,增大光能捕获和转化效率;喷施MT能提高茄子幼苗叶片POD、SOD、CAT活性,降低MDA含量,促进脯氨酸和可溶性糖的积累,当MT浓度为150 $\mu\text{mol/L}$ 时,与CK1相比,茄子幼苗叶片POD活性提高了108.66%,可溶性糖含量提高了50.61%。综合本研究结果,喷施MT能提高茄子幼苗叶片对低温弱光的抵抗力,且浓度为150 $\mu\text{mol/L}$ 时效果较好。

关键词:茄子幼苗;褪黑素;低温弱光;生理特性;叶绿素荧光

中图分类号: S641.101; Q945.78 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2017)03-0257-05

Effects of exogenous melatonin on physiological properties of eggplant(*Solanum melongena* L.) seedlings under the stress of low light and low temperature

TANG Yi^a, YU Xue^a, HE Juan^b, ZHANG Enze^b, LAN Jingyu^b, LI Huanxiu^{a*}

(a.Institute of Pomology & Olericulture; b.College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: In this study, five different concentrations (50, 100, 150, 200, 250 $\mu\text{mol/L}$) of melatonin (MT) were sprayed to the eggplant seedlings under the stress of low light and low temperature, CK and CK1 were sprayed with fresh water but the CK was under natural light and CK1 was under the stress of low light and low temperature, to study the effects of different concentrations of MT on the physiological characteristics of eggplant seedlings under the stress of low light and low temperature. The results showed that photosynthetic pigment content, PSII photochemistry, and efficiency of light energy conversion and rate of photosynthesis in eggplant seedling kept at high level when the concentration of melatonin was below 200 $\mu\text{mol/L}$; when the MT concentration was 150 $\mu\text{mol/L}$, the total chlorophyll and carotenoid content of eggplant were 40.23% and 75.00% higher respectively than those of CK1; the activities of antioxidase (POD, SOD, CAT) increased significantly and the POD activity was 108.66% higher than CK1; the accumulations of proline and soluble sugar were accelerated and the soluble sugar content was 50.61% higher than CK1, while the content of malonaldehyde was reduced in leaves of eggplant seedling. Thus, exogenous melatonin can enhance the resistance to the stress of low light and low temperature of eggplant seedling, and the best concentration is 150 $\mu\text{mol/L}$.

Keywords: eggplant seedlings; melatonin; low irradiance and low temperature; physiological properties; chlorophyll fluorescence parameters

中国设施栽培的迅速发展实现了蔬菜连续生产和周年供应。目前,中国设施栽培以非加温的日光温室和塑料大棚为主,冬、春两季易遭遇低温弱光等不良条件,影响喜温性蔬菜的产量和品质^[1]。茄子(*Solanum melongena* L.)属喜温性蔬菜,对低温极为敏感,是设施内主要栽培蔬菜之一^[2]。研究表明,低温弱光会降低茄子幼苗的光合速率,引起膜脂过氧化,导致细胞膜遭到破坏,严重影响幼苗的质量,进而影响到产量和品质^[3]。如何提高茄子抗低温弱光的能力成为茄子早春栽培亟待解决的问题之一。

褪黑素(melatonin, MT)于1958年由Lerner等从牛松果体中提取出来,因其能使深色的蛙皮褪色而被命名为褪黑素,是一种抗氧化作用极强的内源性自由基清除剂^[4-5]。有研究表明,MT可提高种子的发芽率^[6]、缓解盐胁迫^[7]、重金属胁迫^[8]、高温胁迫^[9]以及UV辐射^[10]等非生物胁迫给植物带来的伤害。还有研究^[11]表明,MT可以增强低温下烟草细胞的精胺脱羧酶的活力,促进多胺合成,显著提高烟草悬浮细胞的存活率;MT还可以有效缓解低温对拟南芥各种生理现象的不利影响^[12]。本研究中,以茄子幼苗为材料,采用叶面喷施MT的方法,研究低温弱光胁迫下茄子幼苗的光合色素含量、渗透调节物质含量等的变化规律,旨在为茄子设施内春季早栽提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试茄子为‘春晨长红茄’,种子由四川省农业科学院提供。褪黑素(MT)购自SIGMA-ALDRICH公司。

1.2 试 验 设 计

试验于2015年3—6月在四川农业大学果蔬研究所实验室进行。挑选饱满的茄子种子,消毒后浸种催芽,露白后取发芽一致的种子播在装有基质(草炭、蛭石、珍珠岩体积比为2:1:1)的10 cm×10 cm育苗钵中,每钵种植1株。待幼苗长出3片真叶时,选择长势一致的幼苗于19:00分别叶面喷施50、100、150、200、250 μmol/L的MT,以清水处理为对照(置于自然光温下为CK,低温弱光下为CK1),

每处理喷50 mL,隔2 d喷1次,共喷3次。每个浓度喷施10钵,3次重复。喷完后2 d,将除CK外的各处理放置于温度为15℃(昼)和10℃(夜)、光照强度为100 μmol/(m²·s)、相对湿度为70%的RXZ智能型人工气候箱中进行低温弱光处理,昼、夜各12 h,CK置于光照1000 μmol/(m²·s)、温度为28℃(昼)和20℃(夜)的智能温室中。

1.3 测 定 项 目 及 方 法

喷施MT 6 d后,测定茄子幼苗叶片叶绿素荧光参数。参照王春萍等^[13]的方法,将茄子幼苗暗适应30 min后,选取各处理植株的第2~3片真叶,采用便携式调制叶绿素荧光仪(IMAGING-PAM, WALZ,德国)在25℃下进行叶绿素荧光参数测定。测定时用光子量照度小于0.1 μmol/(m²·s)检测光照射,得到初始荧光,光化光强度100 μmol/(m²·s),饱和脉冲强度2700 μmol/(m²·s)脉冲光时间0.8 s,每隔20 s打开1次。参数设定后,测叶绿素荧光动力学曲线,获得初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、PSII最大光化学量子产量(F_v/F_m)、光化学淬灭系数(q_P)和非光化学淬灭系数(q_N)等。

采集各处理植株的第2~3片真叶,混合后进行以下各项指标的测定。采用丙酮乙醇混合液浸泡法^[14]测定叶绿素含量;愈创木酚法^[15]测定POD活性;紫外吸收法^[15]测定CAT活性;参照文献^[16]的方法测定SOD活性、MDA含量、可溶性糖含量和脯氨酸含量;电导率用DDS-307型电导仪测定;电解质渗透率为叶片煮沸前外渗液电导值与叶片煮沸后外渗液电导值的百分比^[17]。

1.4 数 据 分 析

数据采用Excel 2007进行整理;运用SPSS 20.0进行统计分析;采用Duncan新复极差法进行差异显著性比较。

2 结 果 与 分 析

2.1 外 源 MT 对 低 温 弱 光 胁 迫 下 茄 子 幼 苗 叶 片 光 合 色 素 含 量 的 影 响

由表1可知,CK1处理的叶绿素总量和类胡萝卜素含量都显著低于CK。喷施外源MT能有效减缓低温弱光胁迫下茄子幼苗叶片光合色素的降解速率,在MT浓度为150 μmol/L时,叶绿素a、叶

绿素 b、叶绿素总量、类胡萝卜素分别比 CK1 高 36.07%、40.74%、40.23%、75.00%，且与 CK 处理

表 1 低温弱光胁迫下喷施 MT 后茄子幼苗叶片光合色素的含量

MT 浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	叶绿素 a 含量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	叶绿素 b 含量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	叶绿素总量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	类胡萝卜素含量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
0(CK)	(0.89±0.09) a	(0.34±0.07) ab	(1.24±0.15) a	(0.16±0.01) a
0(CK1)	(0.61±0.21) c	(0.27±0.06)bc	(0.87±0.26) c	(0.08±0.03) b
50	(0.65±0.06)bc	(0.30±0.02)abc	(0.95±0.07)bc	(0.12±0.02) ab
100	(0.66±0.08)bc	(0.26±0.04)bc	(0.92±0.12) c	(0.11±0.04) ab
150	(0.83±0.05) ab	(0.38±0.07) a	(1.22±0.09) ab	(0.14±0.03) a
200	(0.65±0.11)bc	(0.31±0.04)abc	(0.95±0.12)bc	(0.13±0.02) a
250	(0.56±0.11) c	(0.22±0.02) c	(0.78±0.13) c	(0.11±0.02) ab

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2 外源 MT 对低温弱光胁迫下茄子幼苗叶片细胞渗透调节物质的影响

由表 2 可知，低温弱光条件下，MDA 含量和电解质渗透率急剧升高，显著高于 CK。喷施低浓度 MT 能有效缓解低温弱光对细胞膜的破坏，随着 MT 浓度的升高，茄子幼苗叶片细胞电解质渗透率

和 MDA 含量均呈先下降后升高的趋势，且在 MT 浓度为 150 $\mu\text{mol/L}$ 时最低。低温弱光胁迫下，茄子幼苗叶片脯氨酸和可溶性糖含量都高于 CK，喷施 MT 能有效促进脯氨酸和可溶性糖的积累，当 MT 浓度为 150 $\mu\text{mol/L}$ 时，茄子幼苗叶片脯氨酸和可溶性糖含量分别比 CK1 高 174.17%和 50.61%。

表 2 低温弱光胁迫下喷施外源 MT 茄子幼苗叶片细胞渗透物质的含量

MT 浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	电解质渗透率/%	脯氨酸含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	可溶性糖含量/%	MDA 含量/($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$)
0(CK)	(9.55±0.08) f	(2.95±0.97) d	(1.35±0.02) e	(9.92±0.06) d
0(CK1)	(19.61±0.81) a	(3.02±0.25) d	(1.64±0.03) d	(23.40±0.20) a
50	(17.09±0.49) b	(3.08±0.48) d	(1.97±0.01) c	(19.12±0.89) b
100	(14.92±0.24) cd	(4.94±0.42) c	(2.43±0.15) a	(16.03±0.58) c
150	(13.60±0.58) e	(8.28±1.18) a	(2.47±0.02) a	(15.37±0.27) c
200	(12.13±0.07) d	(6.89±0.14) b	(2.39±0.04) ab	(16.96±0.13) c
250	(16.09±1.16)bc	(4.64±0.98) cd	(2.25±0.02) b	(23.25±1.83) a

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.3 外源 MT 对低温弱光胁迫下茄子幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

由表 3 可以看出，低温弱光胁迫下，茄子幼苗叶片 POD、SOD、CAT 活性受到抑制，喷施 MT 能提高低温弱光胁迫下茄子幼苗叶片抗氧化酶活

性。与 CK1 相比，随 MT 浓度增高，茄子幼苗叶片中 POD 活性先升高后降低，当浓度为 150 $\mu\text{mol/L}$ 时，POD 活性高达 120.67 U/g，比 CK1 高 108.66%。SOD 活性与 POD 活性变化趋势一致，但 MT 浓度为 50、100、150、200 $\mu\text{mol/L}$ 时叶片的 SOD 活性

表 3 低温弱光胁迫下喷施 MT 后茄子幼苗叶片 POD 和 SOD 及 CAT 的活性

MT 浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	POD 活性/($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	SOD 活性/($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	CAT 活性/($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)
0(CK)	(145.11±10.57) a	(289.92±18.23) a	(29.58±0.82) a
0(CK1)	(57.83±5.42) d	(166.41±20.46) d	(21.01±0.71) d
50	(82.67±10.37) cd	(227.39±6.32)bc	(22.36±0.47) cd
100	(100.56±4.24)bc	(233.93±4.35)bc	(25.03±0.73) b
150	(120.67±1.41) ab	(251.18±8.79) b	(27.58±1.06) a
200	(98.39±8.08)bc	(248.06±1.50) b	(24.02±0.94)bc
250	(79.14±1.89) cd	(219.12±3.39) c	(22.33±1.65) cd

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

差异不明显。喷施 MT 也能提高低温弱光胁迫下茄子幼苗叶片 CAT 活性, 当 MT 浓度为 150 $\mu\text{mol/L}$ 时, 茄子幼苗叶片的 CAT 活性显著高于 CK1, 为 CK1 的 131.27%, 且与 CK 差异不明显。

2.4 外源 MT 对低温弱光胁迫下茄子幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

由表 4 可知, 与 CK 相比, CK1 茄子幼苗叶片的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 都显著降低。低温弱光胁迫下, F_v/F_m 、 F_v/F_o 随 MT 浓度的升高均先升高后降低, 当 MT 浓度为 150 $\mu\text{mol/L}$ 时达到最高。茄子幼苗叶

片的 F_v/F_m 在低温弱光胁迫下急剧下降, 喷施 MT 后显著升高, MT 浓度为 150、200、250 $\mu\text{mol/L}$ 时, 茄子幼苗叶片的 F_v/F_m 差异不明显。 Φ_{PSII} 变化趋势与 F_v/F_o 一致, 当 MT 浓度为 150、200 $\mu\text{mol/L}$ 时, Φ_{PSII} 分别达到了 0.597、0.579, 与 CK 差异不明显。低温弱光胁迫导致茄子幼苗叶片的 qP 降低, 喷施 MT 能显著提高 qP 。低温弱光胁迫后, 茄子幼苗叶片的 NPQ 显著高于 CK, 随着 MT 浓度的升高, NPQ 呈先降低后升高的趋势, 当 MT 浓度为 150 $\mu\text{mol/L}$ 时降到最低。

表 4 低温弱光胁迫下喷施外源 MT 后茄子幼苗叶片的叶绿素荧光参数

Table 4 The chlorophyll fluorescence parameters in leaves of eggplant seedlings sprayed with MT under low irradiance and low temperature

MT 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	F_v/F_m	F_v/F_o	F_v/F_m'	Φ_{PSII}	qP	NPQ
0(CK)	(0.851±0.006) a	(5.232±0.139)a	(0.753±0.033)a	(0.598±0.015)a	(0.796±0.041)a	(0.723±0.066)e
0(CK1)	(0.693±0.013) c	(2.710±0.251)e	(0.501±0.013)d	(0.300±0.004)e	(0.490±0.045)e	(1.80±0.071)a
50	(0.728±0.025)bc	(3.293±0.153)d	(0.659±0.025)c	(0.349±0.013)d	(0.599±0.008)d	(1.704±0.014)ab
100	(0.777±0.058)ab	(3.587±0.104)c	(0.712±0.023)b	(0.498±0.012)b	(0.680±0.039)b	(1.623±0.012)c
150	(0.846±0.018) a	(4.259±0.003)b	(0.750±0.019)a	(0.597±0.009)a	(0.793±0.052)a	(1.446±0.037)d
200	(0.834±0.015) a	(4.060±0.067)b	(0.733±0.012)ab	(0.579±0.021)a	(0.791±0.032)a	(1.676±0.054)bc
250	(0.778±0.041)ab	(3.677±0.031)c	(0.732±0.009)ab	(0.446±0.017)c	(0.629±0.008)c	(1.731±0.035)a

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

3 结论与讨论

本研究结果表明, 低温弱光胁迫导致茄子幼苗叶片叶绿素和类胡萝卜素含量降低, 喷施 MT 能有效缓解低温弱光对茄子幼苗的伤害。这可能与 MT 能抑制叶片叶绿素降解关键酶—脱镁叶绿酸 a 加氧酶基因及叶片衰老相关基因 12(*SAG12*) 的转录水平, 增强光合色素的稳定性有关^[19-20]。低温弱光破坏茄子幼苗叶片活性氧代谢平衡, 喷施适当浓度的 MT, 可使茄子幼苗叶片电解质渗透率和 MDA 含量降低, 同时使可溶性糖和脯氨酸含量升高, 表明 MT 能缓解低温弱光对细胞膜的破坏, 提高茄子的抗逆性^[21-22]。随着 MT 处理浓度的升高, SOD、POD 和 CAT 活性均呈先升高后降低的趋势, 说明适宜浓度 MT 不仅可以直接作用于自由基, 也可以通过提高抗氧化酶活性来保持细胞内自由基动态平衡, 降低逆境胁迫对细胞膜的破坏, 这与 LI 等^[23]的研究结果一致。

本研究结果表明, 低温弱光胁迫后 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 Φ_{PSII} 都显著降低, 表明低温弱光导致 PSII 潜在活性中心受损, 抑制了茄子幼苗的电子传递活

性, 影响 PSII 反应中心捕获激发能的效率^[24]。喷施 MT 后, 茄子幼苗叶片 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 Φ_{PSII} 都显著升高, 可能是喷施适宜浓度的 MT 使茄子能保持较高的光能捕获效率, 提高 PSII 活性, 调节 PSII 反应中心开放比例, 提高电子传递能力, 进而加快光合速率^[6]。低温胁迫下 PSII 反应中心受体更趋于还原态, PSII 电子传递活性下降, 同时 NPQ 增大, 以热消耗的形式猝灭过多的激发能, 从而保护 PSII^[25]。说明外源 MT 能提高低温弱光胁迫下茄子幼苗的光合活性, 提高光能利用率。

综上所述, 在低温弱光环境条件下, 茄子幼苗光合色素含量降低, 抗氧化酶活性受到抑制, 致使细胞内活性氧无法被及时清除而造成堆积, 引起细胞膜脂过氧化, 电解质大量外渗, 同时 PSII 活性中心遭到破坏, 光能利用率降低。喷施外源 MT 有效缓解了低温弱光胁迫对茄子幼苗的破坏, 提高保护性酶活性, 增大光能捕获和转化效率, 且在 MT 浓度为 150 $\mu\text{mol/L}$ 时效果较好。

参考文献:

- [1] 何勇, 符庆功, 朱祝军. 低温弱光对辣椒叶片光合作

- 用、叶绿素荧光猝灭及光能分配的影响[J].核农学报, 2013, 27(4): 479-486.
- [2] 陈磊, 郭军, 田时炳, 等. 低温弱光胁迫对不同茄子品种幼苗抗氧化特性的影响[J].西南农业学报, 2012, 25(6): 2054-2058.
- [3] 舒英杰, 周玉丽, 郁继华. 低温弱光对茄子幼苗某些生理指标的影响[J].中国农学通报, 2005, 21(10): 180-184.
- [4] LERNERA B, CASEJ D, TAKAHASHI Y, et al. Isolation of melatonin, a pineal factor that lightens melanocytes[J]. Journal of the American Chemical Society, 1958, 80(10): 2587.
- [5] REITER R J. Oxidative damage in the central nervous system protection by melatonin[J]. Progress in Neurobiology, 1998, 56(3): 359-384.
- [6] ZHANG N, ZHAO B, ZHANG H J, et al. Melatonin promotes water-stress tolerance, lateral root formation, and seed germination in cucumber (*Cucumis sativus* L.)[J]. Journal of Pineal Research, 2013, 54(1): 15-23.
- [7] 张娜, 蒋庆, 李殿波, 等. 外源施加褪黑素对 NaCl 胁迫下狼尾草种子萌发及相关生理指标的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(4): 54-60.
- [8] POSMYK M M, KURAN H, KAZIMIERZ M, et al. Presowing seed treatment with melatonin protects red cabbage seedlings against toxic copper ion concentrations [J]. Journal of Pineal Research, 2008, 45(1): 24-31.
- [9] TIRYAKI I, KELES H. Reversal of the inhibitory effect of light and high temperature on germination of *Phacelia tanacetifolia* seeds by melatonin [J]. Journal of Pineal Research, 2012, 52(3): 332-339.
- [10] 张来军, 贾敬芬, 梅康, 等. 褪黑素对秦艽原生质体抗 UV-B 环境胁迫的作用[J].核农学报, 2015, 29(5): 830-835.
- [11] 张贵友, 李萍, 戴尧仁. 低温胁迫下褪黑激素对烟草悬浮细胞精氨酸脱羧酶活性的影响[J].植物学报, 2005, 22(5): 555-559.
- [12] BAJWA V S, SHUKLA M R, SHERIF S M, et al. Role of melatonin in alleviating cold stress in *Arabidopsis thaliana*[J]. Journal of Pineal Research, 2014, 56(3): 238-245.
- [13] 王春萍, 黄启中, 雷开荣, 等. 低温弱光下辣椒幼苗叶绿素荧光特性及其与品种耐性的关系[J].园艺学报, 2015, 42(9): 1798-1806.
- [14] 舒展, 张晓素, 陈娟, 等. 叶绿素含量测定的简化[J].植物生理学报, 2010(4): 399-402.
- [15] 张以顺. 植物生理学实验教程[M].北京:高等教育出版社, 2009.
- [16] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社, 2006.
- [17] 徐向东, 孙艳, 孙波, 等. 高温胁迫下外源褪黑素对黄瓜幼苗活性氧代谢的影响[J].应用生态学报, 2010, 21(5): 1295-1300.
- [18] 颜建明, 郁继华, 黄高宝, 等. 弱光或低温弱光下辣椒叶片类胡萝卜素含量与品种耐性的关系[J].中国农业科学, 2010, 43(19): 4036-4044.
- [19] WANG P, YIN L H, LIANG D, et al. Delayed senescence of apple leaves by exogenous melatonin treatment: toward regulating the ascorbate-glutathione cycle [J]. Journal of Pineal Research, 2011, 53(1): 11-20.
- [20] ARNAO M, HERNANDEZ-RUIZ J. Protective effect of melatonin against chlorophyll degradation during the senescence of barley leaves [J]. Journal of Pineal Research, 2008, 46(1): 58-63.
- [21] 潘红艳, 张晓庆, 李婕, 等. 褪黑素对低温胁迫后菘蓝种子苗抗氧化性影响[J].西北大学学报(自然科学版), 2013(2): 238-242.
- [22] POSMYK M M, BALABUSTA M, WIECZOREK M, et al. Melatonin applied to cucumber (*Cucumis sativus* L.) seeds improves germination during chilling stress [J]. Journal of Pineal Research, 2009, 46(2): 214-223.
- [23] LI C, WANG P, WEI Z, et al. The mitigation effects of exogenous melatonin on salinity-induced stress in *Malus hupehensis* [J]. Journal of Pineal Research, 2012, 53(3): 298-306.
- [24] 颜建明, 郁继华, 黄高宝, 等. 低温弱光下辣椒叶片 PSII 光能吸收和转换变化及与品种耐性的关系[J].中国农业科学, 2011, 44(9): 1855-1862.
- [25] 吴雪霞, 陈建林, 查丁石. 低温胁迫对茄子幼苗叶片叶绿素荧光特性和能量耗散的影响[J].植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 164-169.

责任编辑: 尹小红

英文编辑: 梁和