

低温条件下油菜素内酯对黄金香柳生理指标的影响

张霓雯¹, 王莉², 吴云², 刘光立²

(1. 四川航天职业技术学院 计算机科学系, 四川 广汉 618300; 2. 四川农业大学 风景园林学院, 四川 成都 611130)

摘要:以二年生黄金香柳扦插苗为试材,研究了不同浓度油菜素内酯(BR)试剂(CK、0.000 1、0.001、0.01、0.1、1 mg·L⁻¹)在各低温(5、0、-5、-10℃)条件下对黄金香柳叶片生理指标的影响。结果表明:随着BR试剂浓度的升高,黄金香柳叶片叶绿素含量、游离脯氨酸含量、可溶性糖含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性均呈现先上升后下降的变化趋势,并显著高于对照(CK);当BR试剂浓度为0.1 mg·L⁻¹时达到最大值。丙二醛(MDA)含量呈现先下降后上升的变化趋势,显著低于对照;BR浓度为0.1 mg·L⁻¹时达到最低值。POD活性、SOD活性和CAT活性在0~5℃增幅最大。说明油菜素内酯有利于提高黄金香柳在低温条件下的生长能力;0.01~0.10 mg·L⁻¹的BR试剂最适合黄金香柳在低温下的生长;当温度在0~5℃时,BR试剂对黄金香柳生长的影响最大。

关键词:黄金香柳;油菜素内酯;生理指标;低温

中图分类号:S 793.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)17-0067-06

黄金香柳(*Melaleuca bracteata* cv. 'Revolution Gold') 属桃金娘科白千层属常绿灌木或小乔木,别名千层金,

原产新西兰和澳大利亚,是20世纪初选育出的变异新种^[1]。黄金香柳株型直立,枝条细长柔软,叶片全年呈金黄色或鹅黄色,是园林绿化、庭院栽植的优良色叶树^[2]。1999年黄金香柳首次从台湾引进到深圳,在园林中生长良好,并有很好的适应性。此前有报道称黄金香柳在0℃低温条件下已明显受害,抗寒极限温度在-15℃左右。黄金香柳在成都地区露地越冬仍存在较大风险。因此,如何有效提高黄金香柳的抗寒性仍然是当前亟需研究和探讨的热点。

第一作者简介:张霓雯(1989-),女,四川广元人,本科,助教,现主要从事园林植物栽培应用等研究工作。E-mail:631991145@qq.com.

责任作者:刘光立(1977-),男,山东德州人,博士,副教授,现主要从事园林植物栽培与野生植物应用等研究工作。E-mail:liugl_1@163.com.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31370436)。

收稿日期:2016-04-18

Study on Selenium Stress on Physiological Responses of *Medicago sativa* Leaves

DAI Huiping^{1,2,3}, CUI Kefei², JIA Genliang⁴, ZHAO Hua^{2,3}, LI Xinsheng^{1,3}, XU Hao²

(1. Shaanxi Province Key Laboratory of Bio-resources, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001; 2. College of Biological Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001; 3. Qinling-Bashan Mountains Bioresources Comprehensive Development, Collaborative Innovation Center, Hanzhong, Shaanxi 723001; 4. College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Taking *Medicago sativa* ssp., 'Vitoria' alfalfa and *Medicago sativa* cv. as materials, effects of Se stress on the activities of antioxidant enzymes and the contents of soluble protein and MDA in three *Medicago sativa* L. were studied with soil culture. The results indicated that the activities of SOD, APX, POD and CAT and the content of soluble protein in the leaves of three *Medicago sativa* L. was increased under 100 μmol·L⁻¹ Se. After exposure to 900 μmol·L⁻¹ Se, Se stress markedly increased the activities of SOD and APX, and the contents of soluble protein and MDA in the leaves of three *Medicago sativa* L. However, Se stress markedly decreased the activities of CAT and POD in the leaves of three *Medicago sativa* L. Under different levels of Se stress, *Medicago sativa* ssp. had the highest activities of SOD, CAT, APX and POD, compared with other species. Above results suggested that the order of antioxidant capacity of the three *Medicago sativa* L. species was *Medicago sativa* ssp., 'Vitoria' alfalfa and *Medicago sativa* cv.

Keywords: *Medicago sativa* L.; Se stress; antioxidant characteristics

油菜素内酯(brassinolide)是具有植物生长调节作用的甾醇类化合物,是一类新的植物内源激素,具有增强植物营养生长、促进细胞分裂和生殖生长、促进受精的作用。油菜素内酯的抗逆性在国内外研究较多,是生命科学的一个研究热点,能提高植物对高温、低温、干旱、高盐、病原菌等多种逆境的抗性。它是一种新型植物激素,其在植物体内含量极低,但生理活性却极高,植物经过低浓度处理便能表现出明显的生理效应^[3]。

陈善娜等^[4]研究发现,用油菜素内酯处理植物,可以提高在低温胁迫时植物的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性,减少丙二醛(MDA)积累。王三根等^[5]将油菜素内酯和抗坏血酸配合施用,对水稻抗寒力起到加和作用。低温冷害前后喷洒可有效地降低电解质渗漏率,促进可溶性糖和脯氨酸的积累,对冷害后幼苗恢复生长,提高叶绿素和蛋白质含量,增强根系活力与发根力有明显效果。现以二年生黄金香柳扦插苗为试材,探讨不同浓度油菜素内酯(BR)试剂对各低温条件下黄金香柳叶片生理指标的影响,以期从生理学角度了解 BR 试剂对黄金香柳生长的影响,为黄金香柳抗寒性的深入研究提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

黄金香柳购于成都市温江区日晨园艺。选取规格相同,生长健壮,株型均匀,分枝较多的二年生扦插苗 18 盆,在四川农业大学成都校区第四教学楼 c 区楼顶进行。

1.2 试验方法

BR 处理:分别用 5 个浓度梯度的 BR 试剂(1、0.1、0.01、0.001、0.000 1 mg · L⁻¹)和清水(CK)对黄金香柳进行叶面和叶背的喷施,以叶片药剂欲滴为度,喷药 3 次,每次间隔 1 d,各处理组设 3 盆植株,共 18 盆。

低温处理:施药完成后的第 2 天,剪取黄金香柳发育正常,粗细均匀,相同部位的枝条若干,用自来水冲洗,用吸水纸吸干表面水分,自封袋分装,置于预设温度分别为 5、0、-5、-10 °C 的低温光照培养箱中进行低温处理,持续处理 10 h 后,分别测定其各项生理指标。

1.3 项目测定

叶绿素含量采用吸光光度法,可溶性糖含量采用蒽酮比色法^[6],丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[7],游离脯氨酸含量采用酸性茚三酮比色法,过氧化物酶活性(POD)采用愈创木酚法,超氧化物歧化酶活性(SOD)参照李合生^[8]的方法,过氧化氢酶活性(CAT)采用高锰酸钾滴定法测定。

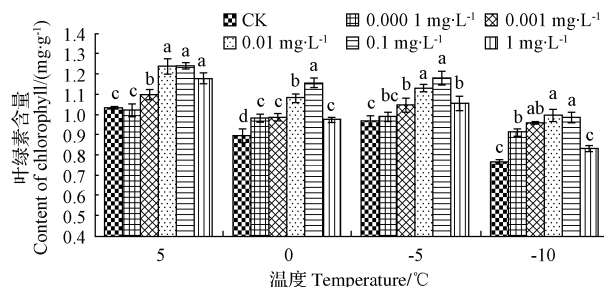
1.4 数据分析

采用 DPS 软件分析不同浓度 BR 处理下的显著性差异,利用 Excel 软件制作图表。

2 结果与分析

2.1 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片叶绿素含量的变化

光合作用是对温度极其敏感的生理生化过程,而低温直接影响光合作用中叶绿素的合成^[9]。由图 1 可知,黄金香柳叶片叶绿素含量随着 BR 处理浓度的升高呈现先上升后下降的变化趋势,并且处理过的黄金香柳叶片叶绿素含量都高于空白对照,说明在低温条件下经过 BR 处理的黄金香柳比未经处理的具有更强的合成叶绿素的能力。当 BR 浓度在 0.01~0.1 mg · L⁻¹ 时,叶绿素含量达到最高,并显著高于对照(CK)($P < 0.05$);当 BR 浓度为 0.000 1 mg · L⁻¹ 时,在 5 °C 和 -5 °C 处理下,叶绿素含量与对照(CK)差异不显著($P > 0.05$),0 °C 和 -10 °C 处理下,叶绿素含量与对照(CK)差异显著($P < 0.05$)。说明 BR 浓度在 0.01~0.1 mg · L⁻¹ 时,最有利于黄金香柳在低温条件下合成叶绿素,而 0.000 1 mg · L⁻¹ 的 BR 对促进黄金香柳合成叶绿素的作用不明显。随着温度降低,黄金香柳叶绿素含量呈现降-升-降的变化趋势,在 -5 °C 时略有升高,这可能是因为在 -5 °C 时,植物组织内代谢突然紊乱导致的;处理温度越低,叶绿素含量下降得越多,说明温度越低,黄金香柳受到的伤害越大。



注:图中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters represent significant difference ($P < 0.05$). The same below.

图 1 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片叶绿素含量的变化

Fig. 1 Changes of chlorophyll of *M. bracteata* cv.

'Revolution Gold' with different BR concentration under different low temperature levels

2.2 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片游离脯氨酸含量的变化

游离脯氨酸的抗性作用是调节和维护结构中融冻后原生质与环境的渗透平衡,防止水分散失,促进蛋白质与水的结合,增加蛋白质的可溶性。脯氨酸是植物体内普遍存在的保护物质。作为一种有机溶剂,许多植物在低温胁迫下,体内的游离脯氨酸含量都增加^[10]。从图 2 可以看出,随着 BR 处理浓度的升高,黄金香柳叶片游

离脯氨酸含量呈现先升高后降低的变化趋势,这说明不同浓度的 BR 试剂对黄金香柳在低温条件下的生长影响不同。当 BR 浓度低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,脯氨酸含量与对照(CK)接近,差异不显著($P>0.05$),说明浓度低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 BR 对提高黄金香柳在低温条件下的脯氨酸含量作用小。当处理温度在 5°C 和 0°C 时,BR 浓度在 $0.01\sim 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,脯氨酸含量达到最高,与 CK 差异显著($P<0.05$);当处理温度在 -5°C 和 -10°C 时,BR 浓度在 $0.1\sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,脯氨酸含量达到最高,与 CK 差异显著($P<0.05$)。这说明随着温度的降低,有利于黄金香柳积累脯氨酸的 BR 浓度提高。随着温度降低,黄金香柳叶片脯氨酸含量不断增加,说明黄金香柳受到了低温伤害,并通过体内脯氨酸含量的增加调节应对。

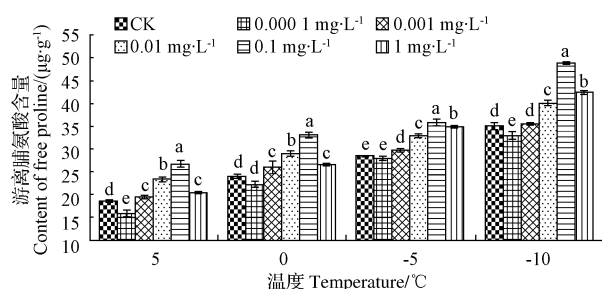


图2 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片游离脯氨酸含量的变化

Fig. 2 Changes of free proline content of *M. bracteata* cv. 'Revolution Gold' with different BR concentration under different low temperature levels

2.3 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片丙二醛(MDA)含量的变化

MDA 是膜脂过氧化作用的最终产物,对脂膜有毒害作用,其含量多少代表膜损伤的程度大小。园林植物为抵御低温伤害,其体内会发生一系列的生理生化变化,其中,渗透物质含量的变化可以反映园林植物抗寒性的强弱,而丙二醛含量直接反映树体受低温伤害的程度^[11]。图 3 明显反映出黄金香柳叶片在低温条件下 MDA 含量随 BR 处理浓度的升高呈现先下降后上升的变化趋势,经过 BR 处理的黄金香柳叶片 MDA 含量低于 CK,这说明经过 BR 处理的黄金香柳膜损伤的程度要轻于未经处理的,经过 BR 处理的黄金香柳抵抗低温的能力更强。随着 BR 处理浓度的降低,MDA 含量越来越接近对照(CK),这说明低浓度的 BR 对黄金香柳在低温条件下的生长作用减小。随着温度降低,MDA 含量呈现不断上升的变化趋势,并且在 -10°C 时,增加得较少,说明黄金香柳在低温条件下受到了不同程度的伤害,在 -10°C 时,黄金香柳膜损伤的程度已经基本达到最高值,MDA 含量基本不再增加。

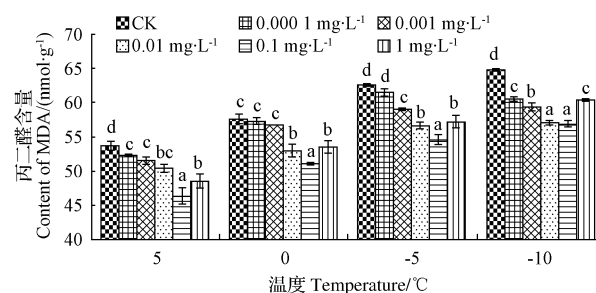


图3 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片丙二醛含量的变化

Fig. 3 Changes of MDA content of *M. bracteata* cv. 'Revolution Gold' with different BR concentration under different low temperature levels

2.4 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片可溶性糖含量的变化

可溶性糖是植物抵御低温的重要保护性物质,能降低冰点,提高原生质保护能力,保护蛋白质胶体不致遇冷变性凝聚^[12]。由图 4 可知,随着 BR 处理浓度的升高,可溶性糖含量大体呈现出先上升后下降的变化趋势,相比对照,在 $0.01\sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的 BR 处理下,可溶性糖含量增加显著($P<0.05$),这说明经 BR 处理的黄金香柳在低温条件下积累可溶性糖的能力比未经处理的更强。当温度为 5°C 时,BR 处理浓度在 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可溶性糖含量达到最高值,与 CK 差异显著($P<0.05$);当温度逐渐降低时,BR 浓度越接近 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可溶性糖含量越高,与 CK 差异显著($P<0.05$)。这说明不同浓度的 BR 对黄金香柳在低温条件下积累可溶性糖的作用不同,温度越低,适合黄金香柳在低温条件下积累可溶性糖的 BR 浓度在升高。从图 4 还可以看出,随着温度降低,可溶性糖含量总体呈现不断上升的趋势,说明黄金香柳已经适应低温环境,并不断积累可溶性糖来抵抗低温。温度越低,经处理的黄金香柳可溶性糖含量增加值越来越少,说明低温度条件下,BR 对黄金香柳积累可溶性糖的作用小。

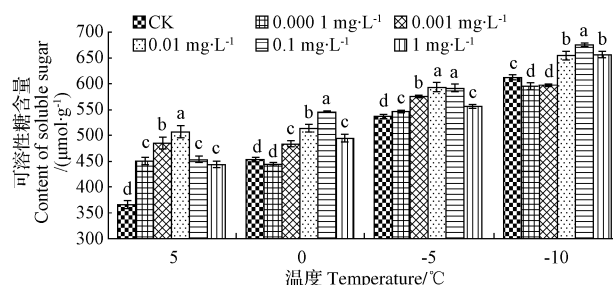


图4 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片可溶性糖含量的变化

Fig. 4 Changes of soluble sugar content of *M. bracteata* cv. 'Revolution Gold' with different BR concentration under different low temperature levels

2.5 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片 SOD 活性的变化

植物在面临低温胁迫时,体内会产生一些清除自由基和活性氧的酶类物质(如 POD、SOD 和 CAT)和非酶类物质。有研究表明,抗寒性强的品种 SOD、CAT 活性和可溶性蛋白质含量高,抗寒性弱的品种其 SOD、CAT 活性和可溶性蛋白质含量低^[13]。由图 5 可知,随着 BR 处理浓度的升高,SOD 活性呈现先升高后下降的变化趋势,说明 BR 提高了黄金香柳在低温条件下的 SOD 活性。BR 浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,SOD 活性最高,与 CK 差异显著($P < 0.05$),这说明浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 BR 有利于提高黄金香柳在低温条件下的 SOD 活性。当 BR 浓度为 $0.0001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,SOD 活性与 CK 接近,说明 $0.0001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 BR 提高黄金香柳 SOD 活性的作用较小。温度在 0°C 时,SOD 活性增幅最大,说明 BR 在 0°C 时,对黄金香柳 SOD 活性的影响最大。

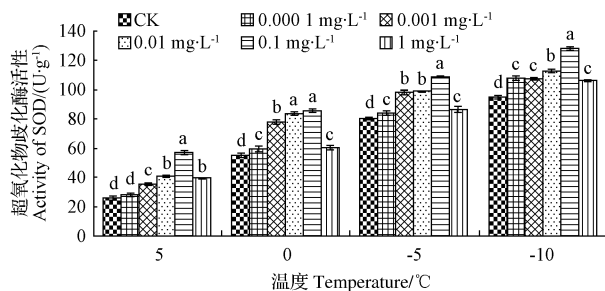


图 5 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片超氧化物歧化酶活性的变化

Fig. 5 Changes of SOD activity of *M. bracteata* cv. 'Revolution Gold' with different BR concentration under different low temperature levels

2.6 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片 POD 活性的变化

由图 6 可知,黄金香柳叶片中 POD 活性随着 BR 处理浓度的升高呈现先升后降的变化趋势,这说明 BR 对提高黄金香柳在低温环境下的 POD 活性有一定的作用。当 BR 浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,POD 活性最强,与对照相比,差异显著($P < 0.05$);当 BR 浓度小于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,POD 活性趋于稳定,与对照接近,这说明低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 BR 对提高黄金香柳在低温条件下的 POD 活性作用不明显。随着温度降低,POD 活性不断升高,并且在 0°C 时增幅最大,这说明 0°C 时,有利于 BR 提高低温条件下黄金香柳 POD 活性。

2.7 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片 CAT 活性的变化

由图 7 可知,随着 BR 处理浓度的升高,黄金香柳叶片 CAT 含量基本呈现出先上升后下降的变化趋势,与 SOD 和 POD 呈现相似的变化趋势,经过 BR 处理的黄金

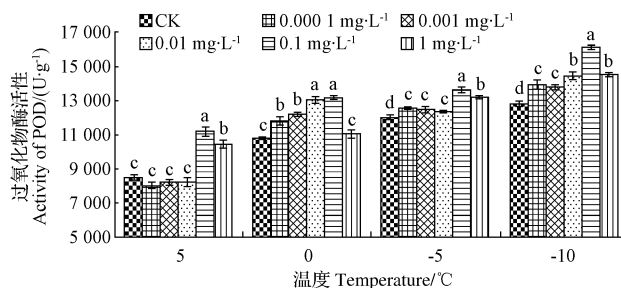


图 6 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片过氧化物酶活性的变化

Fig. 6 Changes of POD activity of *M. bracteata* cv. 'Revolution Gold' with different BR concentration under different low temperature levels

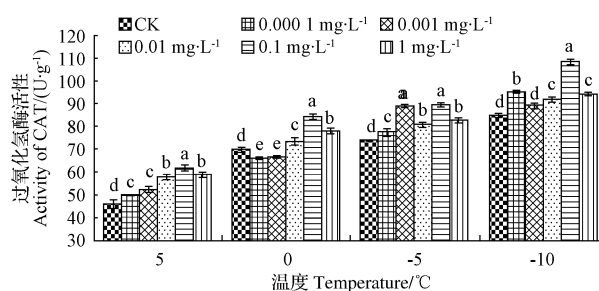


图 7 低温条件下不同浓度 BR 处理黄金香柳叶片过氧化氢酶活性的变化

Fig. 7 Changes of CAT activity of *M. bracteata* cv. 'Revolution Gold' with different BR concentration under different low temperature levels

香柳叶片 CAT 活性高于对照($P < 0.05$),这说明 BR 可以提高黄金香柳在低温条件下的 CAT 活性。当 BR 浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,4 个温度下 CAT 活性都达到最大值,与 CK 差异显著($P < 0.05$),说明浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 BR 有利于黄金香柳 CAT 活性的提高。当浓度低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,CAT 活性变化相对缓慢,与 CK 差异较小,说明低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 BR 对提高黄金香柳在低温条件下的 CAT 活性作用不大。在 -5°C 时,出现了 2 个最值,这可能与该株植物自身生理代谢紊乱有关。黄金香柳叶片 CAT 活性随着处理温度的降低呈现不断上升的趋势,在 0°C 时升高幅度最大,同以上 2 种保护酶具有同样的变化趋势,说明 BR 在 0°C 时对黄金香柳 CAT 活性的提高作用也最大。

3 结论与讨论

叶绿素是光合作用中最重要光合色素,而叶绿素的分子结构稳定性比类胡萝卜素的差,其含量容易受到光照、温度、矿质元素、氧气和水分的影响^[14]。秋季到来时,多数植物的叶子会变黄,这主要是因为低温使叶片中叶绿素含量下降,暴露出了类胡萝卜素的颜色。因此,叶绿素含量的下降是低温伤害的重要标志。王萍等^[15]研究低温弱光对辣椒叶片光合色素含量的影响表

明,在亚室温弱光($100\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, $23\ ^\circ\text{C}/10\ ^\circ\text{C}$)条件下,辣椒叶片的叶绿素 a、b 含量增加,叶绿素 a/b 降低,随着温度的降低,光照的减弱,叶绿素 a、b 含量逐渐降低,叶绿素 a/b 有上升趋势,低温弱光处理后,辣椒叶片类胡萝卜素含量降低。该研究结果表明,在低温条件下,黄金香柳叶片叶绿素的合成受到了阻碍,叶绿素加剧分解,温度越低,叶绿素含量越低。证明黄金香柳在各低温条件下确实受到了不同程度的伤害,温度越低,伤害越严重。经过处理的黄金香柳叶绿素含量明显高于未经处理的,说明油菜素内酯能促进黄金香柳在低温条件下合成叶绿素。并且当油菜素内酯浓度为 $0.01\sim 0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,黄金香柳叶片叶绿素含量最高,相比 CK 差异显著,说明 $0.01\sim 0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的油菜素内酯,最有利于黄金香柳叶绿素的合成。

植物在正常条件下,游离脯氨酸含量很低,但遇到低温、干旱、盐碱等逆境时,游离脯氨酸含量会大量积累,并且积累指数与植物的抗逆性有关。抗逆性强的品种上升幅度大,抗逆性弱的品种上升幅度小。因此,游离脯氨酸含量可以作为植物抗逆性的一项生化指标。李建设等^[16]的研究发现,茄子体内脯氨酸的含量在低温胁迫后增加,增加幅度与品种的抗寒性强弱呈正相关,刘兴宇等^[17]对厚朴的研究表明,随着寒害的深入,脯氨酸含量一直呈上升趋势。该研究结果表明,黄金香柳在受到低温胁迫时,通过提高自身游离脯氨酸含量来增强抵抗低温的能力。黄金香柳在低温条件下明显受害,受害程度与温度有关,温度越低,伤害越严重。经油菜素内酯处理过的黄金香柳叶片游离脯氨酸含量高于对照,表明油菜素内酯可以提高黄金香柳在低温条件下游离脯氨酸的含量,增强自身抵抗低温的能力。

丙二醛含量是植物细胞膜脂过氧化程度的体现,丙二醛含量高,说明植物细胞膜脂过氧化程度高,细胞膜受到的伤害严重。一般植物在逆境条件下,如高温、干旱、低温、盐碱以及强光等逆境条件下就会产生膜脂过氧化。艾琳等^[18]在研究鲜食葡萄抗寒性时指出,随着温度的降低,5 个抗寒性不同的葡萄品种根系 MDA 含量变化趋势增加幅度不同,抗寒性强的其含量增加少,抗寒性弱的增加多。王华等^[19]对杏花器官耐寒性研究表明,MDA 含量随着温度降低而增加,并发现抗寒性强的品种低温胁迫下含量低于抗寒性弱的品种。杨春祥等^[20]的研究表明,早熟油桃各花蕾和花朵 MDA 含量随温度下降而升高,温度越低含量越高。因此,MDA 含量在低温处理下的变化也可作为衡量植物抗寒性的一个生理指标。该研究结果表明,黄金香柳在受到低温胁迫时,MDA 含量呈现不断上升的变化趋势,在 $-10\ ^\circ\text{C}$ 时增幅最小,说明温度越低,黄金香柳受到低温的伤害越严重。经油菜素内酯处理过的黄金香柳 MDA 含量低于对

照,说明油菜素内酯可以增强黄金香柳抵抗低温的能力。当油菜素内酯浓度为 $0.01\sim 0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,MDA 含量最低,说明 $0.01\sim 0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的油菜素内酯最有利于提高黄金香柳抵抗低温的能力。

转基因拟南芥中蔗糖磷酸合酶的超表达可促进蔗糖水平的提高,同时也提高了植株的耐寒程度。小分子物质及可溶性物质的增加是植物抗寒反应之一。一般认为,抗寒性植物将积累较多的可溶性糖及可溶性蛋白质,这些可溶性糖对防止脱水后的蛋白质变性有一定的保护作用,而且胞间糖类将通过影响冰晶生长来减轻低温伤害^[21]。因此可溶性糖含量的高低可以成为衡量植物抗寒性强弱的指标。该研究结果表明,黄金香柳在低温条件下通过不断增加可溶性糖含量来抵抗低温环境,增强自身抵抗能力。经油菜素内酯处理的黄金香柳可以提高自身抵抗低温的能力,不同浓度的作用不同,低浓度的油菜素内酯不利于黄金香柳在低温条件下积累可溶性糖。温度越低,油菜素内酯最适浓度越高,最适合黄金香柳积累可溶性糖的油菜素内酯浓度是 $0.01\sim 0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,并且温度越低,油菜素内酯的作用越小。

植物在逆境条件下产生的活性氧自由基(ROS)会对植物的细胞膜以及蛋白质等大分子物质产生破坏作用,从而影响到植物的正常生长发育。同时在逆境条件下植物体内存在保护酶系统,即抗氧化酶系统,能够消除体内多余的自由基。植物体内的抗氧化酶主要有超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)。黄高峰等^[22]的研究表明,菊芋在受到轻度和中度干旱胁迫时,保护酶活性上升,膜脂过氧化程度低;重度胁迫下,保护酶活性先升后降,酶保护系统遭到破坏,膜脂过氧化程度高。因此,SOD、CAT、POD 活性的上升是植物受到逆境胁迫时的重要生理反应。该研究表明,不同的低温对黄金香柳造成了不同程度的伤害,黄金香柳通过提高自身 SOD 活性来增强抵抗低温的能力,保护自身不受低温伤害。 $0\ ^\circ\text{C}$ 作为黄金香柳受到低温伤害的临界温度,此时 SOD 活性增幅最大,说明黄金香柳在 $0\ ^\circ\text{C}$ 时抵抗力最强。油菜素内酯作为提高黄金香柳 SOD 活性的生理激素,其浓度在 $0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最有利于其在低温条件下 SOD 活性的提高。POD 活性与 SOD 活性呈现同样的变化趋势,说明黄金香柳在低温条件下确实受到了伤害,并且经过油菜素内酯处理确实可以提高低温条件下 POD 活性, $0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的油菜素内酯最适合黄金香柳 POD 活性的提高。在 $0\ ^\circ\text{C}$ 时,经 BR 处理的黄金香柳 POD 活性增幅最大,说明 $0\ ^\circ\text{C}$ 是油菜素内酯发挥作用的最适温度。CAT 活性随着温度的降低也呈上升趋势,与 SOD、POD 活性呈现一样的变化趋势,验证了黄金香柳确实受到了低温胁迫。浓度在 $0.01\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下的油菜素内酯对黄金香柳在低温条件下的促进作

用不明显,对增加黄金香柳的抗寒性作用不强。 $0\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 过程中,CAT 活性增加得最多,说明在此温度期间,最有利于黄金香柳生长。

该研究表明,油菜素内酯有利于提高黄金香柳在低温条件下的生长能力;在 $0\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,油菜素内酯对黄金香柳的生长影响最大; $0.01\sim 0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的油菜素内酯是提高黄金香柳在低温条件下生长的最适浓度。因此,在冬季寒冷的成都地区,适当喷施适宜浓度的油菜素内酯有利于黄金香柳安全过冬。

参考文献

- [1] 范仲先.珍稀彩叶芳香乔木新品种千层金[J].农村新技术,2005(7):31.
- [2] 戴英祥.最新色叶树种:千层金[J].广东园林,2003(1):43.
- [3] ADAMS W W,ZATER C R,EBBERT V,et al. Photoprotective strategies of ovej intering evergreens[J]. Bio Science,2004,54(1):41-49.
- [4] 陈善娜,刘继梅,游惠玲.抗寒剂和油菜素内酯对高原水稻抗冷性的影响[J].武汉植物研究,1997,19(2):123-128.
- [5] 王三根,汤学军,梁颖.油菜素甾醇和抗坏血酸对水稻幼苗抗寒性的研究[J].西南农业大学学报,1994,16(4):376-379.
- [6] 郝建军,康宗利,于洋.植物生理学实验技术[M].北京:化学工业出版社,2007:141-142.
- [7] 张宪政.作物生理研究法[M].北京:农业出版社,1992:144-155.
- [8] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2003:164-263.
- [9] 张向荣.植物抗寒性机理研究综述[J].现代园艺,2009(12):2-4.
- [10] 王小华,庄南生.脯氨酸与植物抗寒性的研究进展[J].中国农学通报,2008(11):398-402.
- [11] 石峰.低温对园林植物体内渗透物质与丙二醛含量的影响[J].山东林业科技,2011(5):85-93.
- [12] 喻方圆,徐锡增.植物逆境生理研究进展[J].世界林业研究,2003,16(5):6-11.
- [13] 罗军武,唐和平,黄意欢,等.茶树不同抗寒性品种间保护酶类活性的差异[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2001(2):94-96.
- [14] 刘东奇.浅谈低温对绿色植物叶片中叶绿素含量的影响[J].中学生物学,2011,27(9):6-7.
- [15] 王萍,郭晓冬,赵鹏.低温弱光对辣椒叶片光和色素含量的影响[J].北方园艺,2007(7):15-17.
- [16] 李建设,耿广东,程智慧.低温胁迫对茄子幼苗抗寒性生理生化指标的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(1):90-92,96.
- [17] 刘兴宇,周广柱,王新颖.日本厚朴抗寒生理研究[J].沈阳农业大学学报,2006,37(6):845-848.
- [18] 艾琳,张萍,胡成志.低温胁迫对葡萄根系膜系统和可溶性糖及脯氨酸含量的影响[J].新疆农业大学学报,2004,27(4):47-50.
- [19] 王华,王飞,陈登文,等.低温胁迫对杏花 SOD 活性和膜脂过氧化的影响[J].果树科学,2000,17(3):197-201.
- [20] 杨春祥,李宪利,高东升,等.低温胁迫对油桃花器官膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J].果树学报,2005,22(1):69-71.
- [21] 马振东,石艳霞.植物抗寒性的研究进展[J].林业科技情报,2012,42(1):1-2.
- [22] 黄高峰,王丽慧,方云花,等.干旱胁迫对菊芋苗期叶片保护酶活性及膜脂过氧化作用的影响[J].西南农业学报,2011,24(2):552-555.

Effect of Brassinolide on Physiology Indexes of *Melaleuca bracteata* cv. 'Revolution Gold' Under Different Low Temperature

ZHANG Niwen¹, WANG Li², WU Yun², LIU Guangli²

(1. Department of Computer Science, Sichuan Aerospace Vocational College, Guanghan, Sichuan 618300; 2. College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130)

Abstract: Using the two-year-old cutting seedlings of *Melaleuca bracteata* cv. 'Revolution Gold' as material, effects of different concentration of BR ($0(\text{CK}), 1, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) on leaf physiological indexes of *Melaleuca bracteata* cv. 'Revolution Gold' at different temperature levels ($5, 0, -5, -10\text{ }^{\circ}\text{C}$) were studied. The results showed that chlorophyll content, free proline content, soluble sugar content, SOD activity, POD activity, CAT activity firstly increased and then decreased with the rising of BR concentration. Also, these indexes were significant higher than CK treatment. These indexes were the highest scores when the concentration of BR was $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Interestingly, MDA content was the contrary change trend, meaning, firstly decreased and then increased. It was the lowest scores when the concentration of BR was $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. There were the largest increase of SOD activity, POD activity and CAT activity in the $0-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ interval. It could be summed that BR was conducive to the growth ability of this species. The most suitable concentration of BR for the growth of this species under low temperature was $0.01-0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. When the temperature was $0-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, BR had the highest impact on the growth of this species.

Keywords: *Melaleuca bracteata* cv. 'Revolution Gold'; brassinolide; physiological indexes; low temperature