

外源水杨酸对低温胁迫下狭叶红景天 幼苗生理及膜伤害的影响

何淑玲, 马令法, 杨敬军, 常毓巍

(甘肃民族师范学院 高寒生态研究所, 甘肃 合作 747000)

摘要:以狭叶红景天幼苗为试材,在 0℃低温条件下,研究外源 SA 对狭叶红景天幼苗过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)3 种抗氧化酶活性、MDA 含量以及膜伤害的影响,探讨外源 SA 对低温胁迫下红景天幼苗生理及膜伤害的影响。结果表明:在 0℃低温胁迫条件下,不同浓度的外源 SA 总体上均使红景天幼苗叶片 CAT、POD、SOD 活性不同程度升高,使叶片 MDA 含量不同程度降低;使叶绿体膜 Ca^{2+} -ATP 活性、 Mg^{2+} -ATP 活性不同程度增强。在低温胁迫下,外源 SA 通过提高抗氧化酶活性、抗氧化物质含量及渗透调节物质含量,减少了膜脂过氧化产物 MDA 的产生,叶绿体膜 Ca^{2+} -ATP 活性、 Mg^{2+} -ATP 活性的增强,减轻细胞膜的损伤,提高了狭叶红景天幼苗耐低温胁迫的能力;提高狭叶红景天耐寒力的外源物质 SA 适宜浓度为 0.1~0.3 mg/L,SA 的最适浓度为 0.3 mg/L。

关键词:狭叶红景天;低温胁迫;外源物质;膜伤害;生理条件

中图分类号:R 282.71 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)17-0061-05

狭叶红景天(*Rhodiola kirilowii* (Regel) Maxim)为名贵藏药,生长在海拔 3 000~4 500 m 的雪域高原,生长

第一作者简介:何淑玲(1975-),女,博士,副教授,研究方向为药用植物资源与利用。E-mail:heshuling2@163.com。

基金项目:国家星火计划资助项目(2010GA860031);甘肃民族师范学院院长基金资助项目(14-16,14-17)。

收稿日期:2015-06-02

环境高寒、低氧、紫外线照射强烈。藏药名“嘎都儿”,根及根茎或全草入药,主要用于治瘟疫时疫、肺炎、肺吐血、腹泻、发烧、脉病、腰痛跌、打损伤、崩漏,月经不调等病。课题组在参加全国第四次中药资源普查-甘肃省夏河县、合作市的普查及后续对青藏高原东缘地区药用植物进行调查时发现该区红景天属(*Rhodiola*)植物已濒临灭绝,仅有狭叶红景天尚存野生种,目前药品市场主要

Study on Breaking Resistance Characteristics of Four Kinds of Plants' Lateral Root Branch During the Vigorous Growth Period

LIU Pengfei¹, LIU Jing¹, ZHANG Ge², ZHANG Xin³, ZHU Honghui¹, LI Youfang¹

(1. Institute of Ecological Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010010; 2. Experimental Center for Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou, Inner Mongolia 015200; 3. Institute of Water Resources for Pasturing Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010010)

Abstract: At the vigorous growth period, with the 3—4 year-old *Caragana korshinskii*, *Salix psammophila*, *Hippophae rhamnoides* and *Artemisia sphaerocephala* as the research objects, used the TianYuan-8000 test instrument to test the breaking resistance and the breaking strength of the four plants. The test roots both were that the upper straight root branched two lower straight roots through the lateral root branch. The results showed that the lateral root branch of four kinds of plants all were the weak part of test roots, and its breaking resistance was not as good as the upper straight root and the two lower straight roots. The breaking resistance and the diameter of lateral root branch were the positive correlation of power function, and the breaking strength and diameter were the negative correlation of power function. The breaking strength of the four kinds of plants compared: *Caragana korshinskii* (31.47 ± 7.68) MPa > *Salix psammophila* (17.27 ± 1.90) MPa > *Hippophae rhamnoides* (3.76 ± 1.07) MPa > *Artemisia sphaerocephala* (2.10 ± 0.28) MPa.

Keywords: roots; lateral root branch; breaking resistance characteristics

来源于采挖野生种,药源十分紧缺,因此,为了保护红景天野生种质资源、维护生态平衡,研究其驯化栽培迫在眉睫。经过多年来的研究发现,在青藏高原等高寒地区,不管是种子直播还是育苗移栽,狭叶红景天幼苗因受倒春寒和冻害很难成活,是影响红景天人工栽培成功的主要瓶颈。因此,探讨狭叶红景天提高耐寒力和抗冻力的技术措施在该领域具有深远意义。大量的研究表明,当药用植物植株受到低温胁迫时,会产生大量的活性氧,引起膜脂过氧化反应,产生大量的膜脂过氧化物而对植物产生伤害,甚至使植株死亡^[1-3]。水杨酸(salicylic acid, SA)是一种生热素,能诱导植物体生热,其诱导的生热效应是植物对低温环境的一种适应,SA的生热现象实质上是与抗氧途径的电子传递途径有关。因此,研究在低温胁迫下外源 SA 对红景天幼苗的抗氧化调节作用及与红景天幼苗低温下耐寒性的关系有非常重要的意义。国内外对外源物质在提高植物方面的抗逆性较多^[4-6],尤其 SA 是研究的热点,目前对 SA 与植物对逆境的抗性和耐性关系受到国内外学者的关注,但有关外源 SA 在红景天幼苗抗寒性方面的研究尚鲜见国内文献报道。现以狭叶红景天幼苗盆栽苗为试材,研究了低温胁迫下不同浓度的 SA 对其幼苗叶片抗氧化系统及渗透调节物质的影响,阐明低温胁迫时 SA 对狭叶红景天幼苗的调节作用,明确 SA 如何调控红景天幼苗提高抗寒性的机理,旨在提高狭叶红景天幼苗在育苗移栽或种子直播时幼苗期的耐寒性,以及抵御和防护其幼苗在返青期因倒春寒以及在生长发育中遇到的一些不可抗拒的逆境胁迫,对指导狭叶红景天的栽培生产有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用狭叶红景天幼苗于 2014 年 4 月 20 日在日光温室棚内播种育苗而获得,育苗营养钵口径 25 cm,高 18 cm,播种前将试验用土过筛,拌上杀菌剂,添加纯氮 0.5 g,五氧化二磷 0.15 g,氧化钾 0.2 g 即为原土,再按腐殖质:珍珠岩:原土=3:1:1(v:v:v)的比例配成营养土。水杨酸(salicylic acid, SA),分析纯。

1.2 试验方法

外源物质 SA 的浓度共设 0.1、0.3、0.5、0.7 mg/L 4 个处理,以清水为对照(CK)。每处理育苗 50 株,采用随机区组排列,每处理重复 3 次。待生长至四叶期时每钵留 30 株壮苗,待幼苗长至 10~15 cm 时,在 15:30—17:30 晴朗无风时按照试验设计全部处理进行第一次全株叶面喷施,喷施标准是以红景天幼苗全株滴水为止,

第 7 天进行第 2 次喷施,喷施 5 h 后移入人工气候箱中在 -1℃ 低温处理 24 h,光照度为 5 级,湿度为 50%,周期为 1 段数为 2 段。进行冻害分级后将红景天幼苗置于日光温室中,每个处理随机选取生长一致的幼苗 10 株,随机剪去功能叶进行各项指标的测定。

1.3 项目测定

Ca²⁺-ATP 活性测定参照郝再彬等^[7]的方法;Mg²⁺-ATP 活性测定参照王晶英等^[8]的方法;MDA 含量测定参照张志良等^[9]和赵世杰等^[10]的方法;红景天叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性测定参照张志良等^[11]的邻苯三酚自氧化法;红景天叶片过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法^[12];红景天叶片过氧化氢酶(CAT)活性测定采用碘化钾氧化法^[13]。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2003 进行数据整理和绘图,采用 DPS 7.05 统计学软件方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度的外源 SA 处理对狭叶红景天幼苗生理的影响

2.1.1 不同浓度的 SA 对低温胁迫下狭叶红景天幼苗 POD 活性的影响 由图 1 可知,喷施外源 SA 后狭叶红景天幼苗 POD 活性均极显著提高,且随着 SA 浓度的增大,狭叶红景天幼苗 POD 活性先增强后减弱。SA 浓度从 0.1 mg/L 增加到 0.3 mg/L 时,POD 活性增强至 0.5 mg/L 时随着浓度继续增大 POD 活性开始减弱。其中,用浓度为 0.3 mg/L 的 SA 喷施狭叶红景天幼苗后其 POD 活性最强为 215.29 U/mg,比 CK 极显著增加了 21.34%($P<0.01$),而 0.7 mg/L 处理后的 POD 活性降至最弱为 184.93 U/mg,仅比 CK 增加 7.50 U/mg。方差结果表明,除了处理 0.1 mg/L 与 0.5 mg/L 之间差异不显著外($P>0.05$),其它各处理之间都达到差异极显著水平($P<0.01$)。

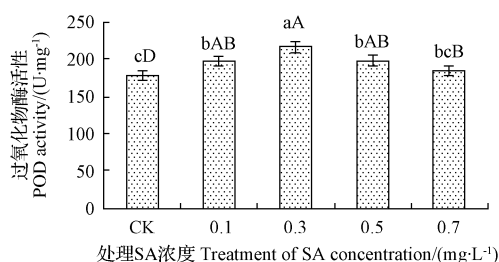


图 1 SA 对狭叶红景天幼苗 POD 活性的影响

Fig. 1 Effect of POD activity on exogenous substance SA to *Rhodiola kirilowii* seedlings

2.1.2 不同浓度的 SA 对低温胁迫下狭叶红景天幼苗 SOD 活性影响 从图 2 可以看出,SA 浓度从 0.1 mg/L 增加到 0.3 mg/L 时,SOD 活性增强,且增强的速度逐渐减慢,此后,随着浓度继续增加 SOD 活性减弱,到 0.7 mg/L 时,SOD 活性减弱至低于 CK;在低温胁迫下,用浓度为 0.3 mg/L 的 SA 喷施狭叶红景天幼苗后其 SOD 活性最高为 161.70 U/mg,比 CK 极显著增加了 27.06% ($P<0.01$),而当 SA 浓度增加至 0.7 mg/L 时狭叶红景天幼苗 SOD 活性为降低为 120.45 U/mg,比 CK 显著减弱了 5.35%,方差结果表明,各处理之间达到差异显著水平($P<0.01$)。

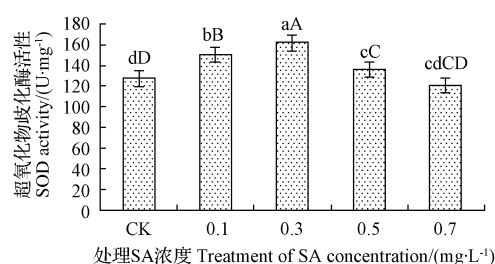


图 2 SA 对狭叶红景天幼苗 SOD 活性的影响

Fig. 2 Effect of SOD activity on exogenous substance

SA to *Rhodiola kirilowii* seedlings

2.1.3 不同浓度的 SA 对低温胁迫下狭叶红景天幼苗 CAT 活性的影响 图 3 表明,当浓度为 0.3 mg/L 时,CAT 活性最强 63.37 mmol/g FW,比 CK 时的活性 30.56 mmol/g FW 极显著增加 32.816 mmol/g FW,此后,随着 SA 浓度继续增大,CAT 活性减弱,当浓度为 0.5 mg/L 时,CAT 活性为 27.37 mmol/g FW,已经比 CK 降低 3.19 mmol/g FW,当浓度增至 0.7 mg/L 时,狭叶红景天幼苗的活性减至最弱,仅为 19.81 mmol/g FW,比 CK 极显著降低 35.18% ($P<0.01$)。方差结果表明,处理 0.5 mg/L 与处理 0.7 mg/L 之间达差异显著水平之外($P<0.05$),其它各处理之间都达到差异极显著水平($P<0.01$)。

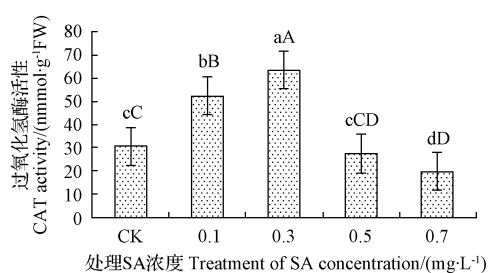


图 3 SA 对狭叶红景天幼苗 CAT 活性的影响

Fig. 3 Effect of CAT activity on exogenous substance

SA to *Rhodiola kirilowii* seedlings

2.1.4 不同浓度的 SA 对低温胁迫下狭叶红景天幼苗 MDA 含量的影响 由图 4 可知,喷施外源 SA 后对狭叶红景天幼苗 MDA 含量的影响是随着 SA 浓度的升高 MDA 含量先减小后增大。SA 浓度 0.1~0.3 mg/L 的升高过程中,MDA 含量减小的速度减慢,浓度增大至 0.5 mg/L 时,MDA 含量开始增大,但低于 CK,浓度继续增加至 0.7 mg/L,MDA 含量大于 CK,且比 CK 显著提高 9.56% ($P<0.01$)。方差结果表明,各处理之间达差异显著水平($P<0.05$)。

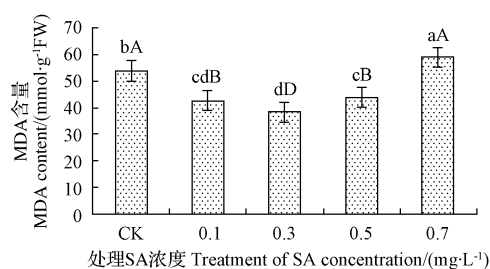


图 4 SA 对狭叶红景天幼苗 MDA 含量的影响

Fig. 4 Effect of MDA content on exogenous substance

SA to *Rhodiola kirilowii* seedlings

2.2 不同浓度的外源 SA 对狭叶红景天膜伤害的影响

2.2.1 不同浓度的 SA 对低温胁迫下狭叶红景天幼苗叶绿体膜 Ca^{2+} -ATP 活性的影响 图 5 表明,喷施不同浓度的外源 SA 后能极显著地提高狭叶红景天叶绿体膜 Ca^{2+} -ATP 活性。随着 SA 浓度的增加,狭叶红景天叶绿体膜 Ca^{2+} -ATP 活性呈现出先增强后减弱的变化态势,处理 0.3 mg/L 时狭叶红景天叶绿体膜 Ca^{2+} -ATP 活性增强最快,此时 Ca^{2+} -ATP 活性比 CK 增大了 47.36%,此后随着 SA 浓度的增加,活性逐渐递减。但处理 0.5 mg/L 的叶绿体膜 Ca^{2+} -ATP 活性比处理 CK 仍然增加了 26.31%。SA 浓度增加至处理 0.7 mg/L 时,叶绿体膜 Ca^{2+} -ATP 活性减弱至最低值且比 CK 极显著降低 13.16% ($P<0.01$)。

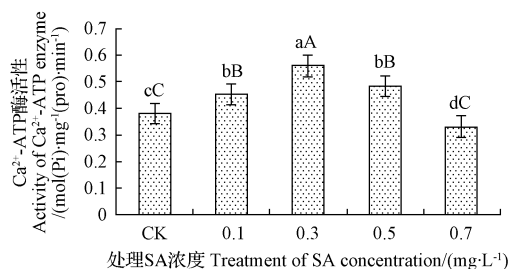


图 5 SA 对狭叶红景天幼苗叶绿体膜 Ca^{2+} -ATP 活性的影响

Fig. 5 Effect of Ca^{2+} -ATP enzyme activity on exogenous

substance SA to *Rhodiola kirilowii* seedlings

2.2.2 不同浓度的 SA 对低温胁迫下狭叶红景天幼苗叶绿体膜 Mg^{2+} -ATP 活性的影响 从图 6 可以看出,喷施不同浓度的外源 SA 后同样能极显著地提高狭叶红景天叶绿体膜 Mg^{2+} -ATP 活性。随着 SA 浓度的增加,狭叶红景天叶绿体膜 Mg^{2+} -ATP 活性也呈现出先增强后减弱的变化态势,处理 0.3 mg/L 时狭叶红景天叶绿体膜 Ca^{2+} -ATP 活性增强最快,此时 Mg^{2+} -ATP 活性比 CK 增大了 50.00%,此后随着 SA 浓度的增加,活性逐渐递减。但处理 0.5 mg/L 的叶绿体膜 Mg^{2+} -ATP 活性高于 CK。SA 浓度增加至处理 0.7 mg/L 时,叶绿体膜 Mg^{2+} -ATP 活性减弱至最低值为 $0.21 \mu\text{mol}(\text{Pi}) \cdot \text{mg}^{-1}(\text{Pro}) \cdot \text{min}^{-1}$,比处理 CK 极显著降低 25.00% ($P < 0.01$)。

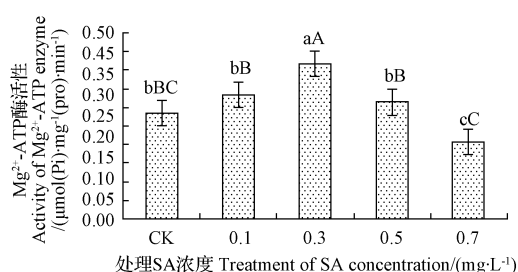


图 6 SA 对狭叶红景天幼苗叶绿体膜 Mg^{2+} -ATP 活性的影响

Fig. 6 Effect of Mg^{2+} -ATP enzyme activity on exogenous substance SA to *Rhodiola kirilowii* seedlings

3 讨论与结论

植物的抗寒性与植物细胞对活性氧的清除能力密切相关。在通常情况下,由于植物体内有可以清除产生自由基的一套抗氧化系统,使植物免受伤害,但植物在低温胁迫下,因为细胞内活性自由基增加,会对植物细胞膜及细胞器膜产生破坏作用,导致膜透性增大而诱发膜脂过氧化作用。SOD、POD 和 CAT 是植物体内的重要保护酶,在清除自由基中起重要作用。邹志荣等^[14]认为,辣椒幼苗经 5℃ 低温胁迫后,SOD 和 POD 活性升高,CAT 活性降低。马德华^[15]研究表明,黄瓜经低温胁迫后,CAT 和 POD 活性均显著下降,耐寒性强的品系 SOD 活性上升,耐寒性弱的品系 SOD 活性则降低。李建设等^[16]研究表明,茄子在遭受到不同的低温胁迫时随低温胁迫程度加大,SOD 和 POD 活性升高,CAT 活性下降,且以 POD 活性增加的幅度最大。说明在保护酶系调节系统中,SOD 和 POD 活性起着主要的调节作用。张燕等^[17]在研究钙对低温胁迫的烟草幼苗某些酶活性的影响时认为,烟草幼苗内的 CAT 和 SOD 活性随着胁迫时间的增加而降低,而 POD 活性增加。该研究结果表明,喷施适宜浓度的外源 SA 后狭叶红景天幼苗 POD、SOD

和 CAT 活性均表现出不同程度的增强,从而提高了狭叶红景天幼苗对低温胁迫的防御能力和耐寒能力。经浓度为 0.1~0.3 mg/L 外源 SA 喷施狭叶红景天幼苗后的酶活性最高,其幼苗的耐寒能力越强。

植物对低温胁迫的抗逆性与其细胞对活性氧的清除能力有关。在正常条件下,植物体内活性氧的清除和产生保持着动态平衡,如果受到低温逆境胁迫,动态平衡就会遭到破坏,活性氧自由基增加,就会导致细胞受到伤害。低温对植物的伤害可分为 2 个过程:一是膜相改变;二是因膜损坏而引起细胞代谢紊乱。膜脂相变使原生质流动停止,从而降低了膜结合酶活性,增大了膜透性,最后导致电解质和一些小分子有机物大量渗漏。有研究表明,茄子在受到低温胁迫时随低温胁迫程度的增大,茄子膜脂过氧化产物 MDA 含量增加,细胞膜透性增大,使茄子的冻害程度加剧^[16]。该研究结果表明,喷施外源 SA 后对狭叶红景天幼苗 MDA 含量的影响是随着 SA 浓度的升高 MDA 含量先减小后增大;狭叶红景天幼苗喷施最适浓度为 0.3 mg/L 的 SA 后可以通过降低 MDA 的产生降低了细胞膜透性,从而增强狭叶红景天幼苗耐低温的能力。

喷施不同浓度的外源 SA 后能极显著地提高狭叶红景天叶绿体膜 Ca^{2+} -ATP 和 Mg^{2+} -ATP 活性来增强狭叶红景天在低温胁迫时的耐寒性。随着 SA 浓度的增加,狭叶红景天叶绿体膜 2 种酶活性均呈现出先增强后减弱的变化态势,SA 浓度为 0.3 mg/L 时狭叶红景天叶绿体膜 2 种酶活性增强最快,此后随着 SA 浓度的增加,酶活性逐渐递减。因此,SA 浓度在 0.1~0.5 mg/L 时,外源 SA 还能通过提高低温胁迫后狭叶红景天幼苗的叶绿体膜酶活性,增强狭叶红景天在低温胁迫时的耐寒性。

但低温下狭叶红景天植株内源激素的变化规律,喷施 SA 后光合作用、生长调节剂受体及其信号传导的途径,生长调节剂对基因信息、基因表达的调控及功能分析以及其它外源物质能否提高狭叶红景天的耐寒力等有待继续研究。

该研究结果表明,对狭叶红景天幼苗喷施植物生长调节剂 SA,能缓解狭叶红景天冻害,是狭叶红景天抗冻减灾的有效栽培技术措施。在低温胁迫下,外源 SA 通过提高抗氧化酶活性、抗氧化物质含量及渗透调节物质含量,减少了膜脂过氧化产物 MDA 的产生,叶绿体膜 Ca^{2+} -ATP 活性、 Mg^{2+} -ATP 活性的增强,减轻细胞膜的损伤提高了狭叶红景天幼苗耐低温胁迫的能力,调节了狭叶红景天的生理功能;提高狭叶红景天耐寒力的外源物

质 SA 浓度为 0.1~0.3 mg/L,最适浓度为 0.3 mg/L。该结论对于指导红景天的栽培生产具有重要的意义。

参考文献

- [1] RAHIMIAND R, ABDOLLAHI M. Evidence-based review of medicinal plants used for the treatment of hemorrhoids[J]. International Journal of Pharmacology, 2013, 9(1): 1-11.
- [2] DHAMA K, TIWARI R, CHAKRABORTY S, et al. Evidence based antibacterial potentials of medicinal plants and herbs countering bacterial pathogens especially in the era of emerging drug resistance: An Integrated Update [J]. International Journal of Pharmacology, 2014, 10(1): 1-43.
- [3] HU W H, WU Y, ZENG J Z, et al. Chill-induced inhibition of photosynthesis was alleviated by 24-epibrassinolide pretreatment in cucumber during chilling and subsequent recovery[J]. Photosynthetica, 2010, 48(4): 537-544.
- [4] LIU Y J, JIANG H F, ZHA Z G, et al. Absciscic acid is involved in brassinosteroids-induced chilling tolerance in the suspension cultured cells from *Chorispora bungeana* [J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168: 853-862.
- [5] AHAMMED G J, YUAN H L, OGWENO J O, et al. Brassinosteroid alleviates phenanthrene and pyrene cytotoxicity by increasing detoxification activity and photosynthesis in tomato[J]. Chemosphere, 2012, 86: 546-555.
- [6] BAJGUZ A, HAYAT S. Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47: 1-8.
- [7] 郝再彬, 苍晶, 徐仲, 等. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 94-96.
- [8] 王晶英, 敖红, 张杰, 等. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨林业大学出版社, 2002: 58-59.
- [9] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 125-126.
- [10] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994, 4(3): 355-357.
- [11] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 125-126.
- [12] 李忠光, 龚明. 愈创木酚法测定植物过氧化物酶活性的改进[J]. 植物生理学通讯, 2008, 30(3): 207-210.
- [13] 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, 2000: 261-263.
- [14] 邹志荣, 陆帼一. 低温对辣椒幼苗膜脂过氧化和保护酶系统变化的影响[J]. 西北农业学报, 1995, 3(3): 51-55.
- [15] 马德华. 温度逆境对不同品种黄瓜幼苗膜保护酶系统的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 19(1): 342-347.
- [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, 2(1): 90-92.
- [17] 张燕, 方力, 李天飞, 等. 钙对低温胁迫的烟草幼苗某些酶活性的影响[J]. 植物学通报, 2002, 19(3): 342-347.

Effect of Exogenous SA on Physiological Conditions and Membrane Damage of *Rhodiola kirilowii* Seedling Under Stress of Low Temperature

HE Shuling, MA Lingfa, YANG Jingjun, CHANG Yuwei

(Institute of Alpine Ecosystems, Gansu Normal University for Nationalities, Hezuo, Gansu 747000)

Abstract: Taking *Rhodiola kirilowii* seedlings as test material, under the low temperature at 0°C, the effect of exogenous SA on activities of three antioxidant enzymes including CAT, SOD and POD, MDA content and membrane damage of *Rhodiola kirilowii* were studied. The results showed that under stress of low temperature at 0°C, exogenous SA at different concentrations could elevate activities of CAT, POD and SOD in leaves of *Rhodiola kirilowii* seedling to some extents, decreased MDA content of leaves to some levels and enhanced activities of Ca^{2+} -ATP enzyme and Mg^{2+} -ATP enzyme in the chloroplast membrane at variable degrees. Under the stress of low temperature, exogenous SA would decrease production of MDA which was a kind of membrane lipid peroxidation product, enhance activities of Ca^{2+} -ATP enzyme and Mg^{2+} -ATP enzyme in the chloroplast membrane and ease damage to the cell membrane by enhancing activity of antioxidant enzyme, content of antioxidants and osmolytes, which could improve capabilities of *Rhodiola kirilowii* seedling to resist low temperature, where the appropriate concentrations of exogenous SA ranged from 0.1 mg/L to 0.3 mg/L and the most appropriate concentration of SA was 0.3 mg/L.

Keywords: *Rhodiola kirilowii*; stress of low temperature; exogenous substance; membrane damage; physiological condition