

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.02.017

李冬花,陈银萍,鲍美娥,等. 外源水杨酸对低温胁迫下圆柏属植物幼苗生理特性的影响[J]. 广西植物, 2014, 34(2):220—226

Li DH, Chen YP, Bao ME, *et al.* Effect of exogenous salicylic acid on physiological characteristics of *Sabina* seedlings under low temperature stress[J].*Guihaia*, 2014, 34(2):220—226

外源水杨酸对低温胁迫下圆柏属植物 幼苗生理特性的影响

李冬花, 陈银萍*, 鲍美娥, 陈嘉斌, 张凤霞, 苏向楠

(兰州交通大学 环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘 要: 以3年生圆柏和祁连圆柏幼苗为材料, 采用不同浓度水杨酸(SA)预处理两种圆柏属植物幼苗, 测定-4℃低温胁迫处理第6天叶片相对含水量(RWC)、相对电导率(REC)、丙二醛(MDA)、可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)、脯氨酸(Pro)和类胡萝卜素(Car)含量及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸氧化酶(APX)和谷胱甘肽还原酶(GR)活性, 分析外源SA对低温胁迫下圆柏属植物叶片膜脂过氧化、渗透调节物质及抗氧化酶系统的影响, 为培育较多品种的抗冷冻常绿植物提供理论依据。结果表明: 低温胁迫下, 一定浓度的SA预处理能有效保护幼苗叶片膜系统的稳定性、增加渗透调节物质含量和提高抗氧化酶活性, 其中200 mg/L SA预处理对提高圆柏抗寒性效果最好, 30 mg/L SA预处理对提高祁连圆柏抗寒性效果最好, 且在外源SA预处理下, 祁连圆柏的抗寒性比圆柏的强。因此, 施用适合浓度的SA在提高圆柏属植物抗寒性方面具有较好的应用价值。

关键词: 水杨酸; 低温胁迫; 圆柏属; 膜脂过氧化; 渗透调节物质; 抗氧化酶

中图分类号: Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2014)02-0220-07

Effect of exogenous salicylic acid on physiological characteristics of *Sabina* seedlings under low temperature stress

LI Dong-Hua, CHEN Yin-Ping*, BAO Mei-E, CHEN Jia-Bin,
ZHANG Feng-Xia, SU Xiang-Nan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The effect of exogenous SA on membrane lipid peroxidation, osmotic regulation substances and antioxidant enzyme activities in the leaves of *Sabina* species under low temperature stress at -4℃ for 6 d was analyzed by determining the relative water content (RWC), relative electrical conductivity (REC), contents of malondialdehyde (MDA), soluble sugar (SS), soluble protein (SP), proline (Pro) and carotenoid (Car), activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), ascorbic acid peroxidase (APX) and glutathione reductase (GR) in the leaves of 3-year-old seedlings of *S. przewalskii* and *S. chinensis* pretreated with different concentrations of SA to provide a theoretical basis for fostering more anti-freeze evergreen varieties. The results indicated that certain concentrations of SA could maintain the stability of membrane system and increase the contents of osmotic regulators and antioxidant en-

收稿日期: 2013-09-09 修回日期: 2013-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(31260089, 31060060); 兰州交通大学“青蓝”人才工程基金(QL-08-14A)。

作者简介: 李冬花(1986-), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态学, (E-mail) 522691855@qq.com。

*通讯作者: 陈银萍, 博士, 教授, 主要研究方向为环境生态学, (E-mail) yinpch@mail.lzjtu.cn。

zyme activities, enhance freezing tolerance of plant, the optimum SA concentration was found to be 200 mg/L for *S. przewalskii* and 30 mg/L for *S. chinensis*. The chilling tolerance of *S. chinensis* was stronger than that of *S. przewalskii* in the pretreatments with SA. Those results suggested that appropriate concentration of SA could help to increase the chilling resistance of *Sabina* species.

Key words: salicylic acid; low temperature stress; *Sabina*; membrane lipid peroxidation; osmotic regulation; antioxidant enzyme activities

圆柏属常绿木本植物, 主要分布在中国西北地区。祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)是中国特有的树种, 分布在年均温 0.5℃、海拔 2 600~3 500 m 的高山地带, 具有耐严寒、干旱、瘠薄、抗盐碱的特性, 是研究植物抗冷冻性的理想材料。圆柏(*S. chinensis*)是常绿乔木或灌木, 分布在年均温 8.5℃、海拔 500~1 900 m 的低山地带(冯自成, 1994)。低温是限制植物地理分布的重要因素, 也是植物生长中常遇到的灾害之一。我国大部分地区经常由于受到低温胁迫而严重影响农林生产。植物对低温逆境的适应除受遗传特性控制外, 植物激素通过基因调控或代谢作用改变膜系统, 也能在一定程度上提高植物抗寒性(Kobayashi *et al.*, 2008)。作为植物生长调节剂, 水杨酸(Salicylic acid, SA)在提高植物的抗性方面得到了广泛应用。Ghader(2012)研究发现 SA 能通过清除活性氧, 降低植物叶片失水量, 增加植物抗氧化酶活性提高植物抗旱性。孙歆等(2005)研究认为 SA 能缓解水分胁迫下植物叶片含水量下降, 保持抗氧化酶活性, 降低水分胁迫对植物的伤害。何俊瑜等(2010)研究发现适当浓度 SA 可以提高叶片叶绿素含量, 增强植物光合作用, 降低 MDA 含量和 REC, 提高抗氧化酶活性从而缓解盐胁迫。黄志明等(2011)研究发现 SA 能够通过降低低温胁迫下 MDA 含量, 提高抗氧化酶活性从而提高植物的抗寒性。

目前, 圆柏属植物的已有研究主要集中在育苗繁殖(徐生旺等, 2008)、生长特性(简启亮等, 2010)、低温或者干旱等逆境中的生理变化(陈银萍等, 2008; 李玉强等, 2010; 马仁义等 2010)及建造涵养林等方面(权国仓等, 2007), 而关于激素对圆柏属植物抗寒性影响的研究尚未见报道, 本研究以祁连圆柏和圆柏幼苗为材料, 通过分析外源 SA 对低温下圆柏属植物叶片膜脂过氧化和抗氧化系统的影响, 探索其对圆柏属植物抗冻性的可能代谢调控机制, 为圆柏属植物的广泛种植以及培育更多抗冷冻常绿植物提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料和试剂

选择 3 年生祁连圆柏和圆柏幼苗盆栽于人工气候箱内, 每天光照 12 h, 每 5 d 浇水 1 次, 空气湿度为 60%~80%, 植株生长势一致, 健壮无病虫害。SA 购买自 sigma 公司。

1.2 实验设计

培养 20 d 后选取生长状况良好, 长势一致的植株进行 SA 喷施处理, 溶液浓度分别为 10、20、30、100、200 和 300 mg/L, 设两个对照喷施蒸馏水, 在不同浓度药剂和蒸馏水中分别加入两滴吐温-20 后喷施叶面和叶背(雾化喷洒, 使溶液在叶片上聚成水滴状但不滴落)。连续喷施 6 d 后一个对照在常温(25℃)下培养, 其他处理均转入-4℃低温光照培养箱(爱普低温冷光源培养箱 APD-320L-W-TLH)中, 光周期为昼夜各 12 h。实验采取完全随机设计, 重复 3 次, 持续处理至第 6 天混合取样, 进行相关生理指标测定。

1.3 测定方法

MDA 测定按照郝建军等(1994)的方法, RWC 测定按照罗芳芳等(2012)的方法, REC、SS、SP、Pro 和 Car 含量测定按照李合生(2001)的方法, SOD、POD、CAT、APX 和 GR 活性测定按照李忠光等(2002)的方法。

1.4 数据分析

实验数据采用 SPSS 19.0 进行相关性分析和显著性检验。采用数学分析隶属函数法对测定的各项指标进行综合分析评价(王改萍等, 2009)。隶属函数公式为 $U = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。式中, U 为隶属函数值, X_i 为无性系某项指标测定值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 为所有参试无性系中某一指标的最大值和最小值。如果某一指标与综合评判结果为负相关, 则用反隶属函数进行定量转换, 计算公式为 $U = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对圆柏属植物叶片生理指标的影响

低温胁迫下,圆柏植物叶片 RWC 极显著低于 25 ℃ 的对照($P<0.01$)。两种圆柏属植物叶片 REC 和 MDA 含量均极显著高于 25 ℃ 的对照($P<0.01$),圆柏的 REC 极显著高于祁连圆柏($P<0.01$)。两种圆

柏属植物叶片 SS、SP 以及 Car 含量均极显著低于 25 ℃ 的对照($P<0.01$),圆柏 Pro 含量极显著低于 25 ℃ 的对照($P<0.01$),祁连圆柏的 SS、SP、Pro 以及 Car 含量极显著高于圆柏($P<0.01$)。两种圆柏属植物叶片 SOD、CAT、GR 活性均极显著低于 25 ℃ 的对照($P<0.01$),POD 活性极显著高于 25 ℃ 的对照($P<0.01$),两种圆柏属植物叶片 APX 活性与 25 ℃ 的对照相比差异不显著($P>0.01$)(表 1)。

表 1 低温胁迫对圆柏属植物叶片抗寒性生理指标的影响

Table 1 Effect of low temperature stress on the chilling tolerance of the seedlings of two *Sabina* species

指标 Index	圆柏 <i>Sabina chinensis</i>		祁连圆柏 <i>Sabina przewalskii</i>	
	25 ℃	-4 ℃	25 ℃	-4 ℃
相对电导率(%)	20.66±0.92 c	47.97±2.97 a	14.66±0.82 d	40.66±1.80 b
Relative electrolyte leakage				
相对含水量(%)	74.41±1.71 a	65.07±1.81 b	81.77±2.45 a	72.77±5.67 ab
Relative water content				
MDA 含量(mmol/g FW)	11.61±1.15 c	54.21±2.07 a	7.15±0.36 c	38.64±2.86 b
MDA contents				
可溶性糖含量(mg/g FW)	102.13±7.83 b	41.54±2.84 c	128.11±6.46 a	56.32±2.57 c
Soluble sugar content				
可溶性蛋白含量(mg/g FW)	1.84±0.14 b	0.96±0.09 c	3.33±0.30 a	0.48±0.02 d
Soluble protein content				
脯氨酸含量(mg/g FW)	0.16±0.01 c	0.19±0.01 b	0.20±0.01 ab	0.23±0.02 a
Proline content				
类胡萝卜素含量(mg/g FW)	0.14±0.01 c	0.11±0.01 c	0.20±0.01 a	0.11±0.00 c
Carotenoid content				
SOD 活性(U/g/min)	16.83±0.46 b	7.83±0.46 d	23.45±0.20 a	13.78±0.44 c
SOD activities				
POD 活性(U/g/min)	61.51±4.98 c	122.47±8.88 a	44.92±3.00 d	77.91±3.57 b
POD activities				
CAT 活性(U/g/min)	25.65±1.07 b	21.10±1.58 c	33.84±2.55 a	28.53±1.20 b
CAT activities				
APX 活性(U/g/min)	62.74±4.25 b	66.69±5.01 b	83.53±6.98 a	75.15±2.46 ab
APX activities				
GR 活性(U/g/min)	2.63±0.23 b	0.66±0.03 c	3.96±0.36 a	1.13±0.06 c
GR activities				

注:表中数据为平均值±标准差,同一行中不同小写字母表示差异显著(LSD 检验法, $P<0.01$)。
Note: Values in the table is mean±standard deviation. Different small letters show differences at $P<0.01$ level in the same column.

2.2 SA 对低温胁迫下圆柏属植物叶片相对含水量的影响

低温胁迫下,除 20 mg/L SA 处理的圆柏叶片 RWC 较 0 mg/L 的对照有所下降,其他浓度 SA 处理较 0 mg/L 的对照均有所上升,其中 300 mg/L SA 处理的幼苗 RWC 最高($P<0.01$)。10、20 和 30 mg/L SA 处理祁连圆柏叶片 RWC 较 0 mg/L 的对照均有所下降,而 100、200 和 300 mg/L SA 处理均有所上升,其中 300 mg/L SA 处理效果最佳($P<0.01$)(图 1)。

2.3 SA 对低温胁迫下圆柏属植物叶片 REC 和 MDA 的影响

低温胁迫后,两种圆柏属植物叶片 REC 随 SA 浓度的增加呈先增后降的趋势,低浓度的 SA 处理

后两种圆柏属叶片 REC 有不同程度的增加,而高浓度的 SA 处理后 REC 均极显著下降($P<0.01$),其中 200 mg/L SA 处理后 REC 最低($P<0.01$)(图 2:A)。

低温胁迫后,与 0 mg/L 的对照相比,两种圆柏属叶片 MDA 在不同浓度 SA 处理后均极显著下降($P<0.01$)。其中,200 mg/L SA 处理的圆柏叶片 MDA 含量最低($P<0.01$),100 mg/L SA 处理的祁连圆柏叶片 MDA 含量最低($P<0.01$)(图 2:B)。

2.4 SA 对低温胁迫下圆柏属植物叶片渗透调节物质的影响

低温胁迫下,SA 处理后两种圆柏属植物叶片 SS 含量均极显著增加($P<0.01$),其中 300 mg/L SA 处理对圆柏叶片 SS 含量的增加作用最显著($P<$

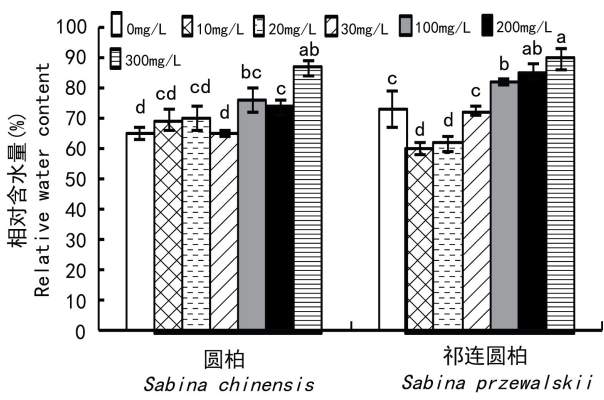


图 1 SA 处理对低温胁迫下圆柏属植物叶片相对含水量的影响 不同小写字母表示差异达 0.01 显著水平。下同。
Fig. 1 Effect of SA on relative water content in the leaves of two *Sabina* species under low temperature stress
Different small letters mean significant differences ($P<0.01$). The same below.

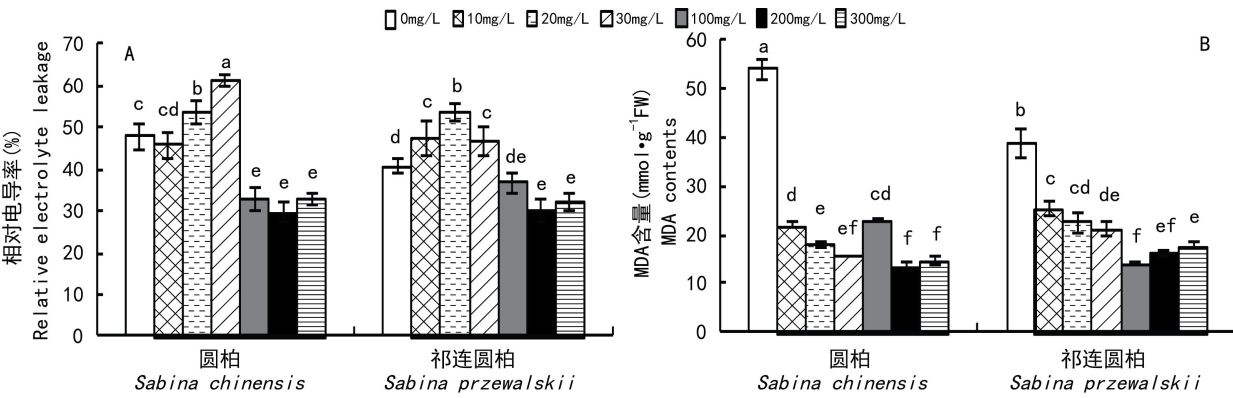


图 2 SA 处理对低温胁迫下圆柏属植物叶片 REC (A) 和 MDA 含量 (B) 的影响
Fig. 2 Effect of SA on relative electrolyte leakage (A) and MDA contents (B)
in the leaves of two *Sabina* species under low temperature stress

用最显著($P<0.01$)(图 3:D)。

2.5 SA 对低温胁迫下圆柏属植物叶片抗氧化酶活性的影响

低温胁迫下,SA 处理后两种圆柏属植物叶片 SOD 活性均呈先增加后降低的趋势。10、20、30 和 100 mg/L SA 处理后圆柏叶片 SOD 活性较 0 mg/L 的对照降低,200 和 300 mg/L SA 处理后都极显著高于 0 mg/L 的对照($P<0.01$),其中 200 mg/L SA 处理后圆柏叶片 SOD 活性最强。低浓度的 SA 处理对祁连圆柏叶片 SOD 活性的调节作用强于高浓度处理。10、20 和 30 mg/L SA 处理祁连圆柏 SOD 活性与 0 mg/L 的对照相比均增加,而 100、200 和 300 mg/L SA 处理 SOD 活性降低,其中 30 mg/L SA 处理祁连圆柏叶片 SOD 活性达到最强

($P<0.01$)(图 4:A)。低温胁迫下,与 0 mg/L 的对照相比,除 300 mg/L SA 处理圆柏叶片 POD 活性增加外,其他浓度处理 POD 活性均极显著降低($P<0.01$)。祁连圆柏叶片 POD 活性随 SA 浓度呈先增后降,其中 30 mg/L SA 处理后 POD 活性较 0 mg/L 的对照最强。SA 处理对提高祁连圆柏叶片 POD 活性作用较圆柏强(图 4:B)。低温胁迫下,两种圆柏属植物叶片 CAT 活性随 SA 浓度增加呈先升高后降低趋势,其中 100 mg/L SA 处理后圆柏叶片 CAT 活性最强($P<0.01$)。低浓度 SA 处理后祁连圆柏叶片 CAT 活性较 0 mg/L 的对照均下降,100 和 200 mg/L SA 处理后 CAT 活性较 0 mg/L 的对照极显著增加($P<0.01$)。与 0 mg/L 的对照相比,100 mg/L SA 处理对提高祁连圆柏叶片 CAT

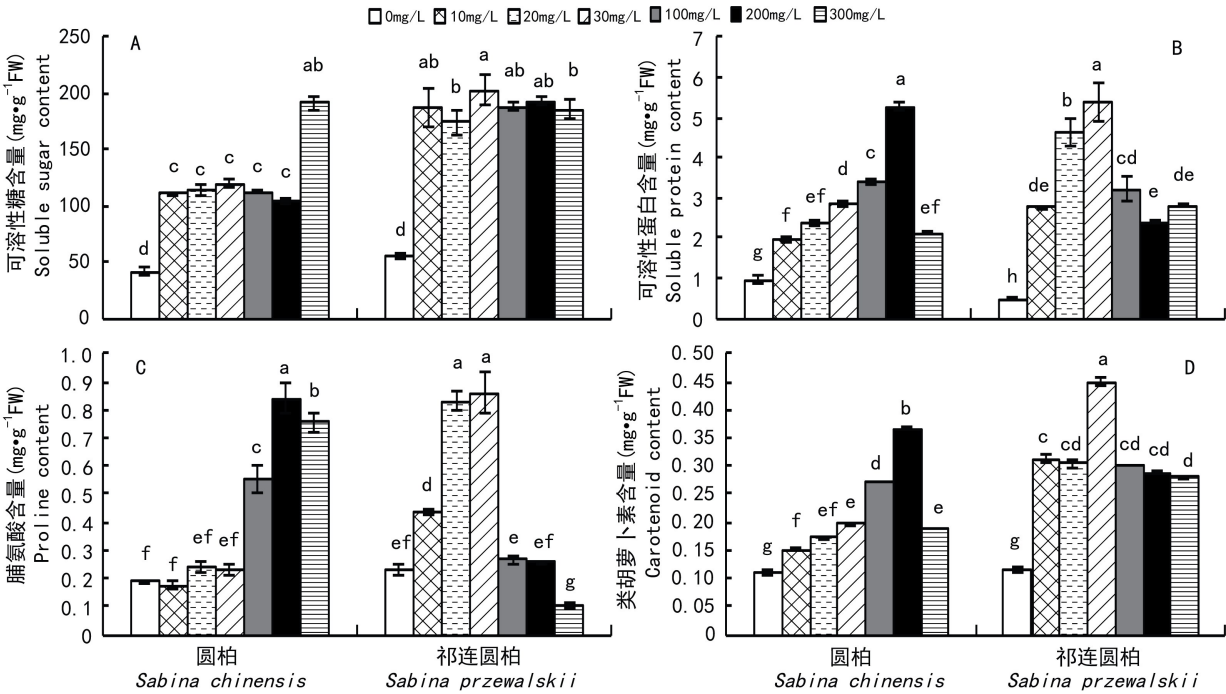


图 3 SA 处理对低温胁迫下圆柏属植物叶片可溶性糖(A)、可溶性蛋白(B)、脯氨酸(C)和类胡萝卜素(D)含量的影响
Fig. 3 Effect of SA on soluble sugar(A), soluble protein(B), proline(C) and carotenoid(D) contents in the leaves of two Sabina species under low temperature stress

表 2 SA 预处理对两种圆柏属植物幼苗抗冻性影响的综合评价

Table 2 Comprehensive evaluation of the effect of SA pre-treatment on the chilling tolerance of the seedlings of two Sabina species

树种 Variety	SA 浓度 SA concentration (mg/L)	指标隶属函数值 The function value of indexes												综合评价 Comprehensive evaluation	排名 Ranking
		RWC	REC	MDA	SS	SP	Pro	Car	SOD	POD	CAT	APX	GR		
圆柏 <i>Sabina chinensis</i>	0	65.07	47.97	54.21	41.54	0.96	0.19	0.11	7.83	122.47	21.10	66.69	0.66	0.29	13
	10	69.16	45.78	21.97	111.28	1.96	0.17	0.15	5.01	92.82	17.22	53.13	1.69	0.24	14
	20	69.61	53.50	18.23	113.94	2.38	0.24	0.17	5.74	80.23	26.92	79.01	2.53	0.34	11
	30	64.94	61.28	15.62	119.99	2.87	0.23	0.20	6.25	69.95	35.26	63.85	1.73	0.34	10
	100	76.04	32.89	23.10	112.45	3.38	0.55	0.27	6.68	78.12	43.55	89.41	2.57	0.45	5
	200	73.40	29.79	13.59	104.61	5.28	0.84	0.37	17.23	72.12	22.82	50.04	5.63	0.49	4
	300	86.26	32.73	14.53	191.64	2.12	0.76	0.19	10.29	141.06	10.93	41.58	3.65	0.43	7
祁连圆柏 <i>Sabina przewalskii</i>	0	72.77	40.66	38.64	56.32	1.48	0.23	0.11	13.78	77.91	28.53	75.15	1.13	0.31	12
	10	59.94	47.25	25.46	186.82	2.76	0.43	0.31	14.40	85.79	16.07	68.38	3.39	0.43	6
	20	61.46	53.94	22.65	174.52	4.64	0.86	0.31	15.46	56.55	16.49	68.66	3.28	0.50	3
	30	72.21	46.87	21.27	203.47	5.36	0.83	0.45	24.36	148.54	19.22	107.65	4.65	0.77	1
	100	81.73	36.90	14.06	188.32	3.22	0.27	0.30	12.71	80.95	34.25	92.45	4.22	0.51	2
	200	85.11	30.13	16.26	193.57	2.40	0.26	0.29	10.74	70.44	32.41	44.83	2.36	0.37	8
	300	89.15	32.15	17.75	185.85	2.81	0.10	0.28	10.99	51.53	9.53	89.31	2.90	0.37	9

活性的效果最好($P<0.01$)(图 4:C)。低温胁迫下, 20 和 100 mg/L SA 处理对圆柏 APX 活性的增加有显著作用($P<0.01$),其中 100 mg/L SA 处理对提高圆柏叶片 APX 活性的效果最好($P<0.01$)。30 和 100 mg/L SA 处理对祁连圆柏 APX 活性的

增加有显著作用($P<0.01$),其中 30 mg/L SA 处理对提高祁连圆柏叶片 APX 活性的效果最好($P<0.01$)(图 4:D)。低温胁迫下,不同浓度 SA 处理后两种圆柏属植物叶片 GR 活性均极显著增强($P<0.01$),其中 200mg/LSA 处理后圆柏叶片 GR 活

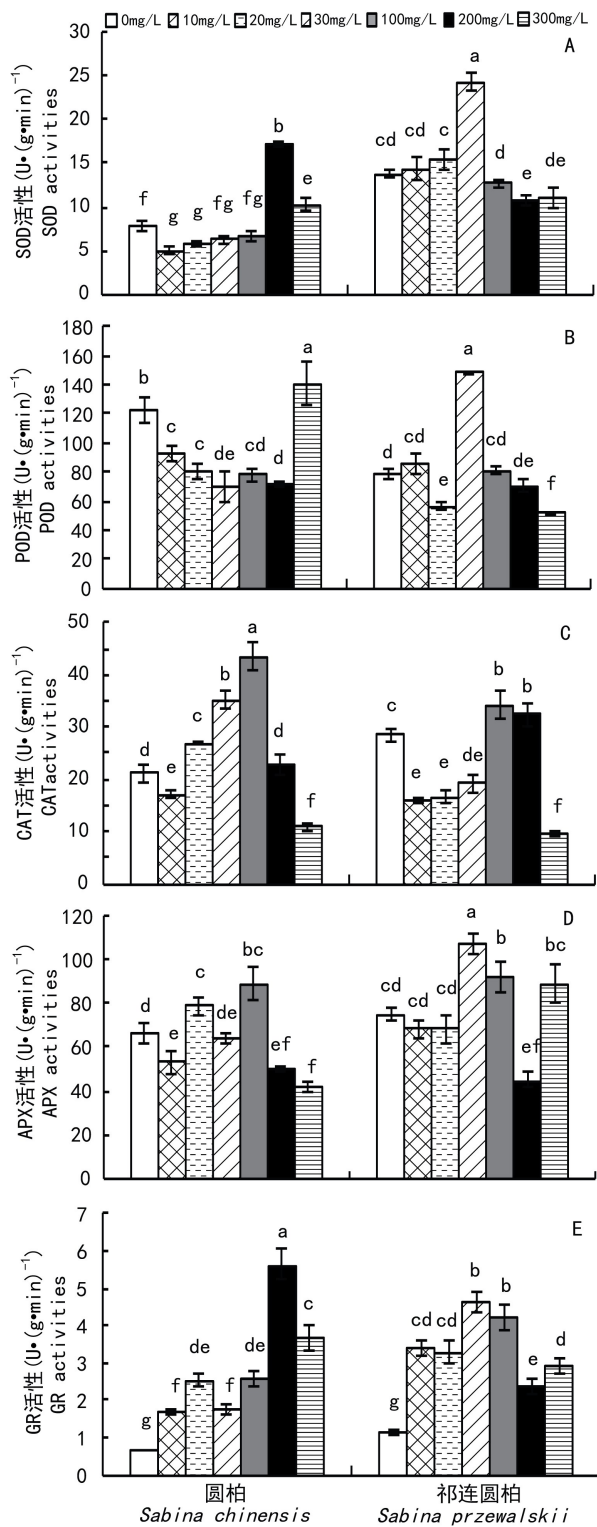


图4 SA处理对低温胁迫下圆柏属植物叶片SOD(A)、POD(B)、CAT(C)、APX(D)和GR(E)活性的影响
Fig. 4 Effect of SA on activities of SOD (A), POD (B), CAT (C), APX (D) and GR (E) in the leaves of two *Sabina* species under low temperature stress

性较0 mg/L的对照最强,30 mg/L SA处理后祁连圆柏叶片GR活性较0 mg/L的对照最强(图4:E)。
2.6 SA对低温胁迫下圆柏属植物抗冻性调控的综合评价

为了克服单一指标的片面性以及多个指标的复杂性等弊端,全面、准确地评价SA预处理对两种圆柏属植物抗寒性的影响,本研究采用隶属函数法对施用SA后两种圆柏属植物的抗寒性进行综合评价,比较施用不同浓度的SA处理对圆柏和祁连圆柏幼苗抗寒性的影响(何丽斯等,2011)。

从表2可以看出,高浓度的SA预处理对提高圆柏抗寒性效果较好,低浓度的SA预处理对提高祁连圆柏效果较好,其中200 mg/L SA溶液预处理对提高圆柏抗寒性效果最好,30 mg/L SA溶液预处理对提高祁连圆柏抗寒性效果最好。祁连圆柏综合排名较圆柏靠前,表现出更强的抗寒性,因此,SA预处理下,祁连圆柏的抗寒性比圆柏的强。

3 结论与讨论

逆境条件下,细胞中自由基代谢失衡,植物体内水分失衡,活性氧累积,产生膜脂氧化的主要产物MDA(陈银萍等,2010)。本研究发现,低温胁迫下两种圆柏属植物叶片RWC下降,细胞膜透性增大,电解质外渗,REC变大,MDA大量积累,导致细胞膜系统严重损伤。而植物受到损伤,激发植物体内渗透调节物质和抗氧化酶系统发生变化从而清除活性氧、保护细胞(潘晓云等,2002;Foyer *et al.*, 1994;吴嘉等,2010)。本研究发现,低温胁迫下两种圆柏属植物叶片Pro积累,POD活性增强,可能是因为不同渗透调节物质和酶类对低温胁迫反应机制不同,两种圆柏属植物叶片其余渗透调节物质含量和抗氧化酶活性均低于对照或变化不显著,但祁连圆柏的SS、SP、Pro、Car含量和SOD、CAT、GR活性均高于圆柏,表明祁连圆柏叶片渗透调节物质和抗氧化酶在低温胁迫下能更好的清除活性氧、保护细胞膜系统,对低温胁迫表现出更广泛的适应性策略,这一结果与陈银萍等(2008)、李玉强等(2010)和简启亮等(2010)的研究结果相似。

SA是重要的能够激活植物过敏反应(hypersensitive response, HR)和系统获得性抗性(systemic acquired resistance, SAR)的内源信号分子(Malamy *et al.*, 1990),其在植物体内的生理作用

广泛表现在植物生长、发育、成熟、衰老等生理过程的调控及抗盐、抗旱、抗低温、抗紫外线、抗重金属等抗逆反应的诱导过程中(Hayata *et al.*, 2010)。许多研究已证实外源 SA 的施用以及内源 SA 含量增加能提高植物的抗寒力(王英哲等, 2012; 王纪中等, 2010)。本研究结果表明, 喷施 200 mg/L 的 SA 能降低两种圆柏属植物幼苗的 REC, 不同浓度的 SA 预处理都能有效地减缓两种圆柏 MDA 的积累, 减轻低温胁迫对细胞膜系统的伤害, 300 mg/L 的 SA 处理后圆柏叶片 SS 含量上升, 200 mg/L 的 SA 处理后圆柏叶片 SP、Pro 和 Car 含量上升, 30 mg/L 的 SA 处理后祁连圆柏叶片 SS、SP、Pro 和 Car 含量均增加, 说明两种圆柏属幼苗中渗透调节物质对同一浓度 SA 响应机制一致, 高浓度的 SA 更有利于提高圆柏叶片渗透调节物质的含量, 而低浓度的 SA 则更有利于提高祁连圆柏叶片渗透调节物质含量。不同浓度 SA 对各种抗氧化酶活性的影响也不尽相同, 如 200 mg/L 的 SA 处理可以提高圆柏 SOD、POD 和 GR 活性, 100 mg/L 的 SA 处理可以提高圆柏 CAT 和 APX 活性, 30 mg/L 的 SA 处理可以提高祁连圆柏 SOD、POD、APX 和 GR 活性, 100 mg/L 的 SA 处理可以提高祁连圆柏 CAT 活性。可见, 一定浓度的 SA 预处理, 能在一定程度上降低低温胁迫下圆柏属植物叶片 REC、MDA 含量, 增加 RWC、渗透调节物质含量和抗氧化酶活性, 从而降低低温胁迫所带来的伤害。综合评价结果显示, 低温胁迫下, 一定浓度的 SA 预处理能有效保护幼苗叶片膜系统的稳定性、增加渗透调节物质含量和提高抗氧化酶活性, 其中 200 mg/L SA 预处理对提高圆柏抗寒性效果最好, 30 mg/L SA 预处理对提高祁连圆柏抗寒性效果最好。

参考文献:

Chen YP(陈银萍), Chen T(陈拓), Zhang MX(张满效), *et al.* 2008. The relation of seasonal changes in water and organic osmotica to freezing tolerance in the leaves of *Sabina* (圆柏属常绿木本植物叶片水分、渗透调节物质的季节变化与抗冷冻性的关系)[J]. *Bull Bot Res* (植物研究), **28**(3): 336—341

Chen YP(陈银萍), Tao L(陶玲), Yang L(杨莉), *et al.* 2010. Effects of nitric oxide on seed germination and physiological reaction of maize seedlings under water stress(一氧化氮对水分胁迫下玉米种子萌发及幼苗生理特性的影响)[J]. *Guihaia* (广西植物), **30**(5): 672—677

Feng ZC(冯自成). 1994. Illustrated sylvia of Gannan(甘南树木图志)[M]. Lanzhou(兰州); Gansu Science and Technology Press (甘肃科技出版社): 27—34

Foyer CH, Descourvires P, Kunert KJ. 1994. Protection against oxygen radicals: an important defence mechanism studied in transgenic plants[J]. *Plant Cell Environ*, **17**: 507—523

Ghader Habibi. 2012. Exogenous salicylic acid alleviates oxidative damage of barley plants under drought stress[J]. *Acta Biol Szeged*, **56**(1): 57—63

Hao JJ(郝建军), Liu YJ(刘延吉). 2001. Experimental technology on plant physiology(植物生理学实验技术)[M]. Shengyang(沈阳): Liaoning Science and Technology Publishing House(辽宁科学技术出版社): 178—190

Hayata Q, Hayata S, Irfan M, *et al.* 2010. Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: A review[J]. *Environ Experim Bot*, **68**: 14—25

He JY(何俊瑜), Ren YF(任艳芳). 2010. Alleviative effect of salicylic acid on growth inhibition of lettuce seedling under salt stress(水杨酸对盐胁迫下叶用莴苣幼苗生长抑制的缓解效应)[J]. *Chin Veg* (中国蔬菜), **8**: 30—35

He LS(何丽斯), Xia B(夏冰), Meng XJ(孟祥静), *et al.* 2011. Effect of salicylic acid and abscisic acid on physiological characteristics of jasmine seedlings under low temperature stress(水杨酸和脱落酸对低温胁迫下茉莉幼苗生理特性的影响)[J]. *Jiangsu J Agric Sci* (江苏农业学报), **27**(5): 1 083—1 808

Jian QL(简启亮), Wen LY(文隗英), Chen T(陈拓), *et al.* 2010. Seasonal changes in the contents of pigments and anthocyanins synthetase activity of *Sabina przewalskii* and *Sabina chinensis* (祁连圆柏和圆柏色素含量及其花青苷合成酶活性的季节性变化)[J]. *Chin Bull Bot* (植物学报), **45**(6): 698—704

Kobayashi F, Takumi S, Nakamura C. 2008. Increased freezing tolerance in an BAB-hypersensitive mutant of common wheat[J]. *J Plant Physiol*, **165**: 224—232

Li HS(李合生), Sun Q(孙群), Zhao SJ(赵世杰), *et al.* 2000. Experiments theory and technology of plant biochemistry[M]. Beijing(北京): Higher Education Press(高等教育出版社): 164—261

Li YQ(李玉强), Chen YP(陈银萍), Zhang MX(张满效), *et al.* 2010. The relation of seasonal changes in the $\delta^{13}\text{C}$ values to freezing tolerance in the needles of *Sabina* (圆柏属常绿木本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化与抗冷冻性的关系)[J]. *Ecol Environ Sci* (生态环境学报), **19**(2): 350—354

Li ZG(李忠光), Li JH(李江鸿), Du CK(杜朝坤), *et al.* 2002. Simultaneous measurement of five antioxidant enzyme activities using a single extraction system(在单一提取系统中同时测定五种植物抗氧化酶)[J]. *J Yunnan Norm Univ* (云南师范大学学报), **22**(6): 45—48

Luo FF(罗芳芳), Zhou R(周睿), Su WH(苏文华), *et al.* 2012. Influence of drought on leaf water content of typical plants on Yunnan Plateau(干旱对滇中高原典型植物含水量的影响)[J]. *J Anhui Agric Sci* (安徽农业科学), **40**(26): 12 745—12 747, 12 749

Ma RY(马仁义), Zhang Q(张茜), Zhang Q(张强), *et al.* 2010. Effect of continuous drought on water status and photosynthesis of leaves of *Platycladus orientalis* franco and *Juniperus przewalskii* (持续干旱对侧柏和祁连圆柏叶片水分状况及光合作用的影响)[J]. *Arid Zone Res* (干旱区研究), **27**(1): 88—96

Malamy J, Carr JP, Klessig DF, *et al.* 1990. Salicylic acid: a likely endogenous signal in the resistance response of tobacco to viral (下转第 286 页 Continue on page 286)