

# 混合盐碱胁迫对青山杨渗透调节物质及活性氧代谢的影响<sup>\*</sup>

闫永庆<sup>1,2</sup> 王文杰<sup>1</sup> 朱 虹<sup>1</sup> 石溪婵<sup>2</sup> 刘兴亮<sup>2</sup> 祖元刚<sup>1\*\*</sup>

(<sup>1</sup> 东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室, 哈尔滨 150040; <sup>2</sup> 东北农业大学园艺学院, 哈尔滨 150030)

**摘 要** 为研究青山杨(*Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides*)对盐碱的适应能力,对青山杨2年生扦插苗进行不同盐度和碱度的28组胁迫处理.结果表明:随盐浓度增加,青山杨叶片的电解质外渗率、丙二醛和脯氨酸含量呈上升趋势,可溶性糖、SOD和POD活性先升后降. pH值升高使电解质外渗率、丙二醛和POD活性呈上升趋势,脯氨酸和可溶性糖含量先升后降, SOD活性上升趋势不明显.盐浓度低于100 mmol · L<sup>-1</sup>时,随pH值升高,各项生理指标的变化不明显. SOD具有较高的活性,盐浓度在200 mmol · L<sup>-1</sup>、pH 8.99以上时,其电解质外渗率在50%以上,POD活性和丙二醛含量大幅度增加,脯氨酸和可溶性糖含量下降, SOD活性较低.推断盐浓度>200 mmol · L<sup>-1</sup>、pH>8.99的盐碱条件不适宜青山杨的生长.

**关键词** 青山杨 混合盐碱胁迫 渗透调节物质 活性氧代谢

**文章编号** 1001-9332(2009)09-2085-07 **中图分类号** Q945.78 **文献标识码** A

**Effects of salt-alkali stress on osmoregulation substance and active oxygen metabolism of Qingshan poplar ( *Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides* ).** YAN Yong-qing<sup>1,2</sup>, WANG Wen-jie<sup>1</sup>, ZHU Hong<sup>1</sup>, SHI Xi-chan<sup>2</sup>, LIU Xing-liang<sup>2</sup>, ZU Yuan-gang<sup>1</sup>(<sup>1</sup>Ministry of Education Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; <sup>2</sup>College of Horticulture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2009 20(9): 2085-2091.

**Abstract :** Aimed to examine the adaptability of Qingshan poplar (*Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides*) to salt-alkali stress, two-year-old cutting seedlings of the poplar were treated with 28 combinations of salt-alkali stress. With increasing salt concentration, the leaf electrolyte leakage and MDA and proline contents of test seedlings all showed an increasing trend, while the leaf soluble sugar content and SOD and POD activities increased first but decreased afterwards. The increase of substrate pH made the electrolyte leakage, MDA content, and POD activity increased and the proline and soluble sugar contents decreased after an initial increase, but had lesser effects on the SOD activity. When the salinity was < 100 mmol · L<sup>-1</sup> and the pH was increasing, all test physiological indices had a slight change while SOD activity kept at a higher level; when the salinity was > 200 mmol · L<sup>-1</sup> and the pH was higher than 8.99, the electrolyte leakage was higher than 50%, POD activity and MDA content increased obviously, proline and soluble sugar contents declined, and SOD activity was lower. It was concluded that a salt-alkali condition with salinity > 200 mmol · L<sup>-1</sup> and pH > 8.99 was not appropriate to the growth of Qingshan poplar.

**Key words :** Qingshan poplar; salt-alkali stress; osmoregulation substance; active oxygen metabolism.

目前,土壤盐碱化正威胁着我国生态环境和农业的可持续发展.种植适应盐碱地生长的植物是治理盐碱、改善盐碱地区生态环境的有效措施<sup>[1]</sup>.近

几年来,有关植物抗盐碱机制方面的研究不断深入,但多以NaCl胁迫为主要研究对象<sup>[2-3]</sup>.在大面积的盐碱地中,除新疆和松花江部分地区土壤以硝酸盐为主外,其他地区主要含有Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,多为复合盐碱地<sup>[4]</sup>.颜宏等<sup>[5]</sup>

<sup>\*</sup> 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD03A0306)资助.  
<sup>\*\*</sup> 通讯作者. E-mail: zygorl@vip. hl. cn  
2009-03-25 收稿, 2009-07-21 接受.

研究表明,中性盐胁迫和碱性盐胁迫是两种不同性质的胁迫,既相关又有明显区别。碳酸盐的累积往往使土壤的 pH 升高,形成极端 pH( pH 8.15 ~ 10.15 )的逆境因子,所造成的土壤碱化问题比 NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 等中性盐更加严重<sup>[6]</sup>。贾娜尔·阿汗等<sup>[7]</sup>的研究表明,碱胁迫实际面临渗透胁迫、离子毒害和高 pH 等三重胁迫,其伤害程度甚于盐胁迫。

杨树是我国应用极为普遍的造林与绿化树种,也是黑龙江盐碱地造林绿化的骨干树种,但在大庆等盐碱地区,能生长良好的杨树种类却很少。近年来,人们对杨树抗盐碱机理的研究增多,如:陶晶等<sup>[8]</sup>研究了中绥 12、小黑 14 和白林 2 号等 8 个杨树品种在盐碱胁迫下丙二醛及保护酶活性;王瑞刚等<sup>[9]</sup>研究了盐碱胁迫下胡杨、群众杨和 I-214 杨的抗氧化能力与耐盐性;丁丽娜等<sup>[10]</sup>研究了盐胁迫对小胡 24 杨和吴屯杨幼苗叶片光合色素及气体交换特性的影响。青山杨( *Populus pseudo-cathayana* × *P. deltoides* )是近几年推出的杂交杨新品种,因其具有很好的速生性和观赏性而得以快速推广,但在盐碱地区尚少有种植,对其耐盐碱适应性的研究也未见报道。为此,本文通过研究混合盐碱胁迫下青山杨的生理变化规律及其对盐碱的适应性,旨在为青山杨在盐碱地区的推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料培养

2 年生青山杨扦插苗由黑龙江双馨园艺公司苗木基地提供。于 2008 年 3 月初起苗,定植于直径 30 cm、高 30 cm 的圆形塑料花盆内,每 3 株一盆,每 3 盆一组作为 3 个重复,栽培基质为纯净河砂,共计 29 组。每周用 Hoagland 完全营养液灌透一次,在日光温室中培养,至 3 月 25 日叶片充分展开时进行模

拟试验。

1.2 研究方法

1.2.1 模拟盐碱设计 根据黑龙江省西部盐碱地盐分组成,并参照文献<sup>[11]</sup>进行人工模拟。将中性盐 NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和碱性盐 NaHCO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 按不同比例混合,以碱性盐比例逐渐增大的顺序分成 7 组,所有处理组的单价盐( NaCl + NaHCO<sub>3</sub> )与二价盐( Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> )的比率为 1:1。每组内设总盐浓度为 50、100、200 和 300 mmol · L<sup>-1</sup> 4 个盐浓度梯度,共模拟出 28 个盐度及 pH 值各不相同的混合盐碱组合(表 1)。28 个处理液及 1 个营养液(CK)的 pH 值用 PHS-3BW 型 pH 计测定。由于组内 pH 值的变化明显小于组间,所以分析数据时以同组各浓度 pH 值的平均值作为 7 个盐组合的 pH 值。

1.2.2 胁迫处理 处理于 9:00—10:00 进行,选 1 组作为对照,其余 28 组作为胁迫处理组。对照组浇灌营养液,胁迫组用含有相应浓度混合盐溶液进行处理,每盆 1.5 L,分 3 次灌透,为防止盐分流失,花盆下垫塑料托盘,渗出的溶液再返倒回盆中。处理第 4 天的 9:00—10:00 取叶片进行试验,取叶部位为各小枝自基部以上 3 ~ 5 片叶片。

1.2.3 叶片生理指标的测定 将叶片用蒸馏水洗净,并用滤纸吸干水分,去叶缘和中脉剪碎混匀。细胞膜透性的测定采用相对电导率法,用电导率仪(DDS-307 型,上海雷磁仪器厂)测定;脯氨酸含量的测定采用酸性茚三酮法;可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法;丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸法;SOD 活性的测定采用 NBT 法;POD 活性的测定采用愈创木酚法<sup>[12]</sup>。

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 软件进行数据处理和绘图,采用 SPSS 13.0 软件进行数据分析,采用单因素方差

表 1 各处理灌溉液的盐分组成、摩尔比及 pH 值  
Tab.1 Salt composition, molar ratio and pH of solutions for irrigation in different treatments

处理 Treatment	盐分组成及摩尔比 Salt composition and molar ratio				不同盐浓度处理的 pH 值 pH values corresponding to various salinity treatments				
	NaCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>					
					0 mmol · L <sup>-1</sup>	50 mmol · L <sup>-1</sup>	100 mmol · L <sup>-1</sup>	200 mmol · L <sup>-1</sup>	300 mmol · L <sup>-1</sup>
CK	0	0	0	0	6.87	6.87	6.87	6.87	6.87
A	1	1	0	0	6.87	7.22	7.39	7.47	7.54
B	9	9	1	1	6.87	7.89	7.97	8.14	8.26
C	1	9	9	1	6.87	8.29	8.73	8.84	8.99
D	1	1	1	1	6.87	9.33	9.47	9.56	9.87
E	9	1	1	9	6.87	10.24	10.36	10.57	10.59
F	1	1	9	9	6.87	10.78	10.87	10.93	10.95
G	0	0	1	1	6.87	11.02	11.18	11.35	11.47

分析和 Duncan 新复极差法比较不同盐浓度和 pH 值下青山杨各生理指标的差异,采用非线性回归对 3 次重复数据的平均值进行相关性分析.

2 结果与分析

2.1 混合盐碱胁迫对青山杨叶片渗透调节物质的影响

2.1.1 脯氨酸含量 由图 1 可以看出,各盐组合处理下,随盐浓度增加,青山杨脯氨酸含量基本呈上升趋势.其中处理 B 的脯氨酸增幅最大,在 300 mmol · L<sup>-1</sup>时达到峰值,为对照的 4.41 倍;处理 C 在盐浓度 200 mmol · L<sup>-1</sup>时脯氨酸含量增至最大,随后下降,碱性盐比例大的处理组 E、F、G 的脯氨酸含量增加幅度较小,3 组间差异不显著(*P* > 0.05).盐浓度 50 和 100 mmol · L<sup>-1</sup>时,随 pH 值增加,脯氨酸含量增加不明显,盐浓度 200 和 300 mmol · L<sup>-1</sup>时,随 pH 值增大,脯氨酸含量呈先升高后下降的趋势,峰值分别出现在 pH 8.71 和 pH 8.06.

2.1.2 可溶性糖含量 由图 1 可以看出,随盐浓度的增加,处理 A 和 B 的可溶性糖含量呈上升趋势,其余处理组均呈先升后降的变化趋势.其中,盐浓度 300 mmol · L<sup>-1</sup>时,处理 B 的可溶性糖含量最高,为

对照的 6.3 倍,而处理 G 的可溶性糖含量较低.盐浓度为 50 mmol · L<sup>-1</sup>时,随 pH 值的增加,可溶性糖含量变化幅度不大,且处于较低水平;盐浓度 100 ~ 300 mmol · L<sup>-1</sup>时,随 pH 值增大,可溶性糖含量呈先上升再下降的趋势,峰值分别出现在 pH 10.44、8.71 和 8.06.

2.2 混合盐碱胁迫对青山杨叶片活性氧代谢的影响

2.2.1 细胞膜透性 由图 2 可以看出,随盐浓度和 pH 值增加,青山杨叶片的电解质外渗率均呈逐渐增大趋势,均高于对照处理.随盐浓度增加,处理 A、B、C 的电解质外渗率增幅较小,3 个组间差异不显著(*P* > 0.05).碱性盐比例越大,电解质外渗率增加越明显,处理 G 在盐浓度 300 mmol · L<sup>-1</sup>时电解质外渗率达到 85.5%.盐浓度在 50 和 100 mmol · L<sup>-1</sup>时,随 pH 值升高,电解质外渗率增加并不明显;随盐浓度增加,电解质外渗增幅明显.盐浓度 > 200 mmol · L<sup>-1</sup>和 pH 在 8.71 以上的盐碱胁迫使电解质外渗率达到 50% 以上,部分叶片脱落,叶脉周边颜色变暗,出现明显的水浸状.

2.2.2 丙二醛含量 由图 2 可以看出,随盐浓度的增加,青山杨叶片中的MDA含量均呈上升趋势,且

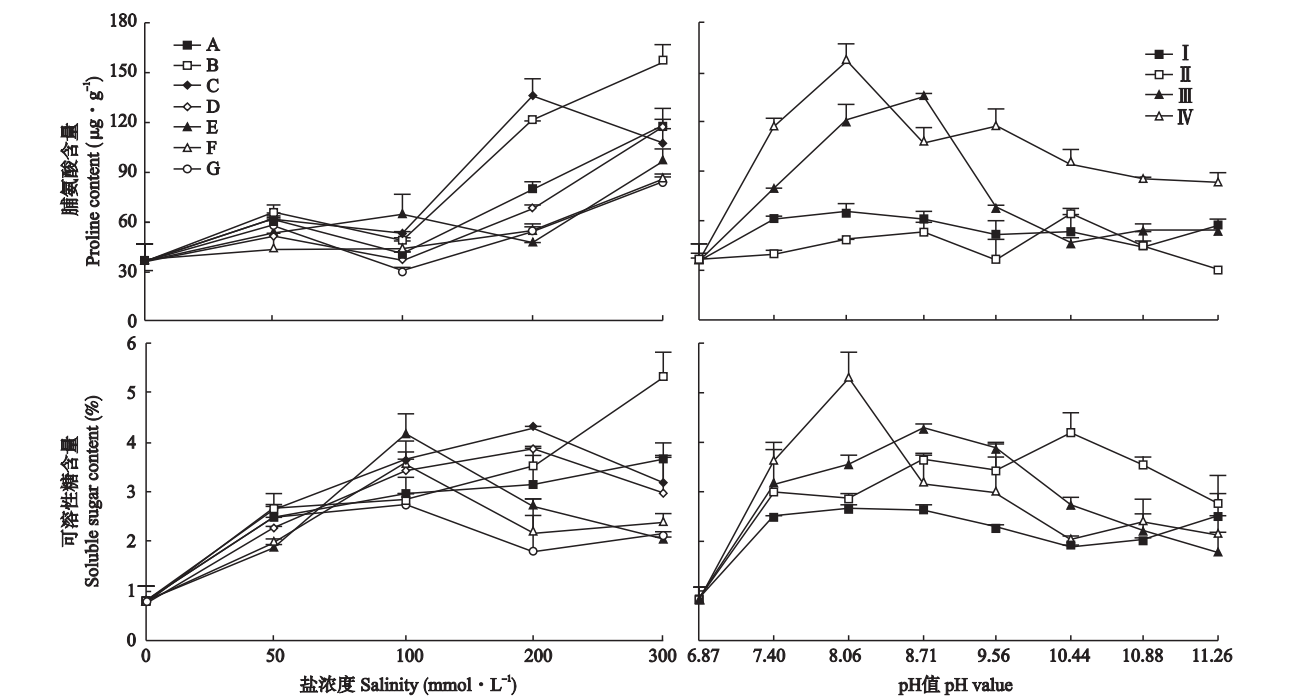


图 1 混合盐碱胁迫处理下青山杨叶片的脯氨酸及可溶性糖含量变化

Fig.1 Changes of proline and soluble sugar content in leaves of Qingshan poplar seedlings under salt-alkali stress.

NaCl: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: NaHCO<sub>3</sub>: Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> :A:1:1:0:0 , pH 6.87—7.54 ;B:9:9:1:1 , pH 6.87—8.26 ;C:1:9:9:1 , pH 6.87—8.99 ;D:1:1:1:1 , pH 6.87—9.87 ;E:9:1:1:9 , pH 6.87—10.59 ;F:1:1:9:9 , pH 6.87—10.95 ;G:0:0:1:1 , pH 6.87—11.47. I :50 mmol · L<sup>-1</sup> ; II :100 mmol · L<sup>-1</sup> ; III :200 mmol · L<sup>-1</sup> ; IV :300 mmol · L<sup>-1</sup>. 下同 The same below.

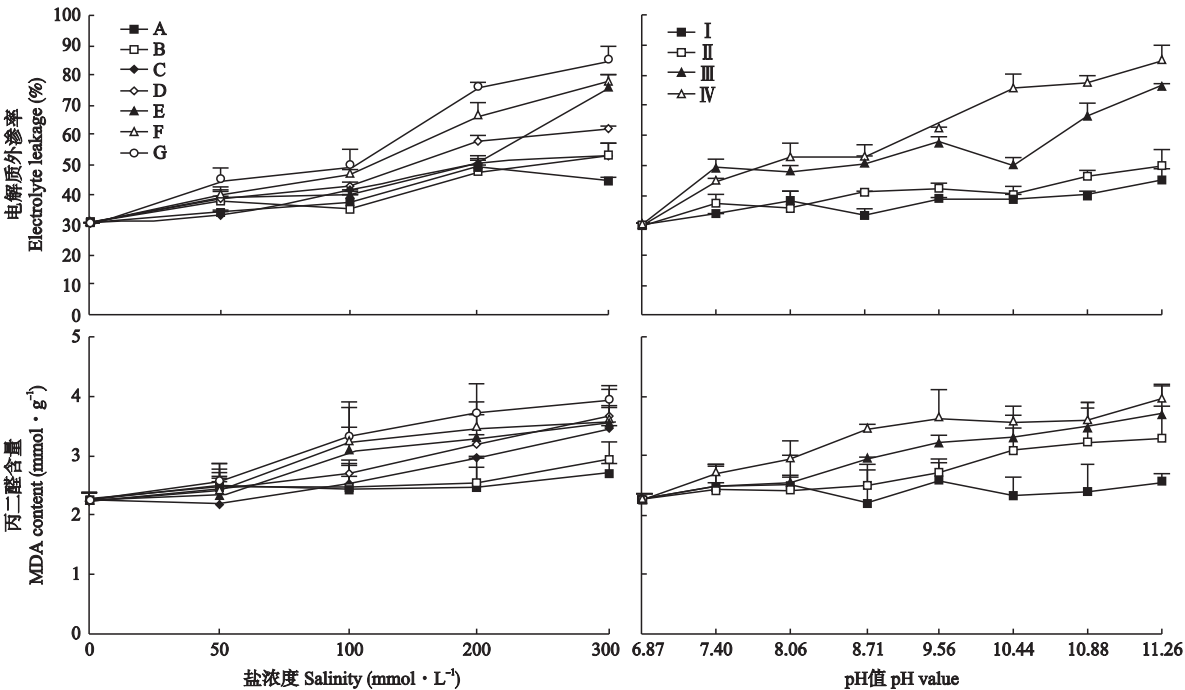


图2 混合盐碱胁迫处理下青山杨叶片的电解质外渗率及丙二醛含量的变化  
Fig.2 Changes of electrolyte leakage and MDA content in leaves of Qingshan poplar seedlings under salt-alkali stress.

碱性盐比例越大的处理,其增幅越大. 盐浓度 300 mmol · L<sup>-1</sup>时,处理 G 的 MDA 含量为对照的 1.74 倍. 低盐浓度 50 mmol · L<sup>-1</sup>时,随 pH 值的增加,MDA 含量增加不明显;随盐浓度增大,pH 值对 MDA 含量的影响增大. MDA 含量的变化与细胞膜透性变化基本一致,二者呈极显著正相关( $r = 0.879$ ).

2.2.3 保护酶活性 由图 3 可以看出,50 mmol · L<sup>-1</sup>的低盐胁迫使青山杨叶片中的 SOD 活性迅速增大,随盐浓度增加,各处理组的 SOD 活性均呈下降

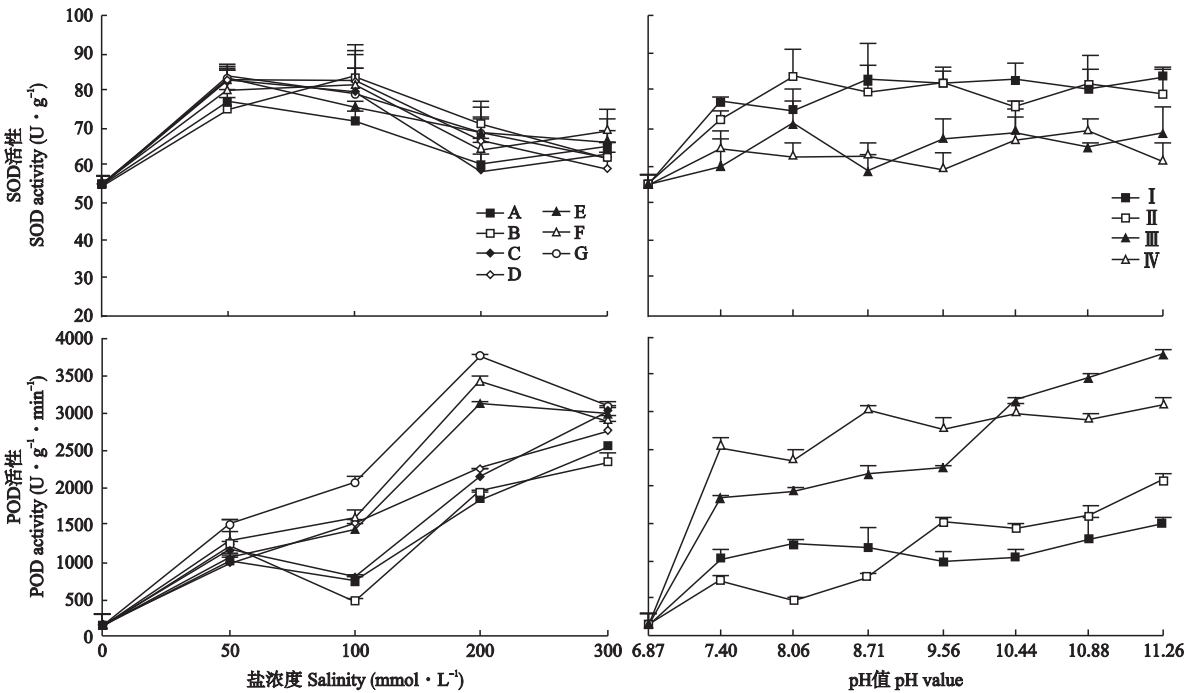


图3 混合盐碱胁迫处理下青山杨叶片的 SOD 及 POD 活性变化  
Fig.3 Changes of SOD and POD activities in leaves of Qingshan poplar seedlings under salt-alkali stress.

表 2 盐度和 pH 及其交互作用对青山杨不同胁变指标的影响  
Tab.2 Salinity ,pH and their interaction influences on different strain response indices of Qingshan poplar

胁变指标 Strain index	盐浓度 Salinity		pH		盐浓度 × pH Salinity × pH	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
脯氨酸含量 Proline content	104. 04	0. 000 * *	19. 79	0. 000 * *	7. 34	0. 000 * *
可溶性糖含量 Soluble sugar content	6. 87	0. 001 * *	6. 61	0. 000 * *	3. 81	0. 001 * *
电解质外渗率 Electrolyte leakage	311. 44	0. 000 * *	79. 19	0. 000 * *	11. 56	0. 000 * *
丙二醛含量 MDA content	3. 55	0. 027 *	2. 19	0. 074 <sup>NS</sup>	0. 47	0. 953 <sup>NS</sup>
SOD 活性 SOD activity	36. 09	0. 000 * *	0. 96	0. 469 <sup>NS</sup>	1. 07	0. 422 <sup>NS</sup>
POD 活性 POD activity	925. 80	0. 000 * *	174. 90	0. 000 * *	23. 27	0. 000 * *

\* *P* < 0. 05 ; \* \* *P* < 0. 01 ; NS : *P* > 0. 05. 下同 The same below.

表 3 各胁变指标与胁迫因素间的相关性分析  
Tab.3 Correlation analysis between stress factors and strain response indices

胁变指标 Strain index	盐浓度 Salinity		pH 值 pH value	
	相关方程 Correlation equation	相关系数 Correlation coefficient	相关方程 Correlation equation	相关系数 Correlation coefficient
脯氨酸含量 Proline content	$y = 0. 0007x^2 + 0. 0014x + 47. 394$	0. 748 * *	$y = - 6. 323x^2 + 112. 94x - 418. 427$	0. 361 <sup>NS</sup>
可溶性糖含量 Soluble sugar content	$y = - 5 \times 10^{-5}x^2 + 0. 0184x + 1. 5781$	0. 499 *	$y = - 0. 309x^2 + 5. 597x - 21. 828$	0. 581 * *
电解质外渗率 Electrolyte leakage	$y = 34. 1e^{0. 0022x}$	0. 803 * *	$y = 15. 75e^{0. 1188x}$	0. 631 * *
丙二醛含量 MDA content	$y = 2. 37e^{0. 0012x}$	0. 723 * *	$y = 1. 356e^{0. 0804x}$	0. 673 * *
SOD 活性 SOD activity	$y = - 0. 0002x^2 + 0. 0039x + 77. 387$	0. 670 * *	$y = - 1. 204x^2 + 23. 396x - 39. 342$	0. 274 <sup>NS</sup>
POD 活性 POD activity	$y = - 0. 0214x^2 + 15. 164x + 267. 71$	0. 839 * *	$y = 5. 781x^2 + 256. 62x - 1019. 6$	0. 548 * *

趋势 ,但组间差异不明显( *P* > 0. 05 ). 随 pH 升高 , SOD 活性呈不明显的上升趋势 ,低盐处理下的 SOD 活性较高. 盐碱胁迫使青山杨叶片中的 POD 活性迅速增大 ,且盐浓度越大或碱性盐比例越大的处理 ,其 POD 活性越大 ,处理 E、F、G 在盐浓度 200 mmol · L<sup>-1</sup>时达到峰值 ,而后下降.

2.3 胁变指标与盐浓度和 pH 值的方差分析及相关性分析

方差分析表明( 表 2 ) ,盐浓度和 pH 值以及二者间的交互作用对青山杨叶片细胞膜的电解质外渗率、脯氨酸含量、可溶性糖含量和 POD 活性的影响均达到极显著 ,盐浓度对 SOD 活性影响达极显著水平 ,对丙二醛的影响达显著水平 ,pH 值及其交互作用对丙二醛和 SOD 活性的影响不显著. 盐浓度对各胁变指标的影响明显大于 pH 值.

相关性分析表明( 表 3 ) ,电解质外渗率和丙二醛含量与盐浓度及 pH 值呈极显著的指数关系. 可溶性糖含量、脯氨酸含量、SOD 及 POD 活性与盐浓度及 pH 值的二项式回归分析表明 ,除可溶性糖含量与盐浓度显著相关外 ,其余 3 个指标均与盐浓度极显著相关 ,脯氨酸含量和 SOD 活性与 pH 值的相关关系不显著 ,可溶性糖及 POD 活性与 pH 值达极显著相关.

3 讨 论

渗透调节是植物提高耐盐性的一个重要途径 ,脯氨酸和可溶性糖是植物体内重要的渗透调节物质<sup>[ 13 ]</sup>. 植物体通过增加渗透调节物质来平衡渗透势 ,以减轻盐害<sup>[ 14 ]</sup>. 在低盐胁迫下 ,青山杨叶片的脯氨酸和可溶性糖含量随 pH 值的增加变化不明显 ,说明青山杨对盐碱胁迫有一定的耐受性 ,随盐浓度的增大 ,植物通过大量积累脯氨酸和可溶性糖 ,积极参与防御反应 ,平衡细胞的渗透势 ,在更高的盐碱胁迫下 ,细胞遭到破坏 ,之前积累的脯氨酸和可溶性糖用于合成蛋白和大分子糖类的同时 ,其生成不断减少 ,造成体内脯氨酸和可溶性糖含量的下降. 本研究中 ,盐浓度在 200 mmol · L<sup>-1</sup>以上时 ,脯氨酸才表现出大幅度的上升 ,说明 200 mmol · L<sup>-1</sup>以上的盐胁迫对青山杨的影响较严重 ,脯氨酸含量的升高体现了植物对环境的应变能力.

在正常的环境条件下 ,植物体内活性氧( ROS )的产生和清除处于动态平衡状态 ,ROS 维持在较低水平 ,不会造成细胞膜伤害<sup>[ 15 ]</sup>. 在盐胁迫条件下 ,活性氧大量产生 ,打破了活性氧代谢平衡 ,使诱导保护酶 SOD、POD、CAT 等的活性大幅升高 ,从而加强了活性氧的清除<sup>[ 16 - 18 ]</sup>. 当活性氧的生成超过保护酶系

统的清除能力时,保护酶活性降低,膜脂过氧化程度加重,膜透性增加<sup>[19-20]</sup>. 研究表明,在低盐胁迫下(50 mmol · L<sup>-1</sup>),青山杨的保护酶活性大幅升高,但电解质外渗率和 MDA 含量没有明显变化,说明保护酶及时清除了植物体内的活性氧,维持细胞内氧代谢的平衡. 随盐浓度增加,SOD 清除氧自由基的能力下降,膜透性及 MDA 含量逐渐增加,但 POD 保持较高的活性,能及时清除 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,以免使 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和氧自由基反应生成毒性更强的 ·OH 以损伤自身细胞<sup>[9]</sup>. pH 值对 SOD 活性的影响差异不显著说明青山杨的 SOD 对 pH 不敏感,这与陶晶等<sup>[8]</sup>的研究结果相同.

混合盐碱胁迫并不是盐、碱两种胁迫的简单叠加,而是有一定协同效应<sup>[21]</sup>. 研究表明,在盐碱混合胁迫下,无论高盐度时随碱度增大,还是高碱度时随盐度增大,都会使羊草(*Aneurolepidium chinense*)和向日葵(*Helianthus annuus*)的生长抑制幅度增大,说明盐度和碱度之间具有增强的协同效应,且协同效应的作用远比单纯盐胁迫或碱胁迫强烈<sup>[5,11,22]</sup>. 研究表明,在低盐度时随碱度增大(如盐浓度 50 mmol · L<sup>-1</sup>,pH 7.22~11.02)或低碱度时随盐度增大(如处理组 A,盐浓度 50~300 mmol · L<sup>-1</sup>),青山杨的各项生理指标的变化幅度不大,但随盐度和碱度的增加,各项指标的变化逐渐明显,尤其在 pH > 8.99 时,200 mmol · L<sup>-1</sup> 以上的盐浓度严重影响了青山杨脯氨酸和可溶性糖的积累,SOD 活性也明显下降,电解质外渗显著增大. 由此可知,盐与碱的协同效应对植物造成更大的伤害.

4 结 论

青山杨在高盐低碱或高碱低盐的条件下可以良好生长,盐浓度低于 100 mmol · L<sup>-1</sup> 的盐碱胁迫对青山杨的生理变化影响不大;在高盐浓度下(200 mmol · L<sup>-1</sup> 以上),pH > 8.99 会对青山杨造成较大影响,盐与碱的协同作用使胁迫产生叠加效应,加重了危害的程度. 青山杨可以在盐碱地区进行引种栽培,但在盐浓度高于 200 mmol · L<sup>-1</sup> 的盐碱条件下需慎重栽培,在大量应用前,要事先分析当地土壤成分并进行种植试验,以免造成大的损失.

参考文献

[ 1 ] Zhao K-F(赵可夫),Feng L-T(冯立田). China Hal-

ophyte Resources. Beijing : Science Press , 2001 ( in Chinese )

[ 2 ] Ma L-T( 马兰涛 ),Chen S-L( 陈双林 ). Physiological responses of *Guadua amplexifolia* to NaCl stress. *Chinese Journal of Ecology* ( 生态学杂志 ),2008 ,**27**( 9 ) : 1487-1491 ( in Chinese )

[ 3 ] Feng L( 冯 蕾 ),Bai Z-Y( 白志英 ),Lu B-S( 路丙社 ),*et al.* Effects of NaCl stress on *Hovenia dulcis* and *Gleditsia sinensis* seedlings growth , chlorophyll fluorescence , and active oxygen metabolism. *Chinese Journal of Applied Ecology* ( 应用生态学报 ), 2008 ,**19**( 11 ) : 2503-2508 ( in Chinese )

[ 4 ] Zhao K-F( 赵可夫 ). Plant Anti-Salt Physiology. Beijing : China Science and Technology Press , 1993 ( in Chinese )

[ 5 ] Yan H( 颜 宏 ),Zhao W( 赵 伟 ),Sheng Y-M( 盛艳敏 ),*et al.* Effects of alkali-stress on *Aneurolepidium chinense* and *Helianthus annuus*. *Chinese Journal of Applied Ecology* ( 应用生态学报 ), 2005 ,**16**( 8 ) : 1498-1501 ( in Chinese )

[ 6 ] Wu D( 武 德 ). Study on Saline-alkali Tolerance of Seeds and Seedlings of *Fraxinus velutina* Torr. Master Thesis. Shandong : Shandong Agricultural University , 2007 ( in Chinese )

[ 7 ] Jianaer Ahan( 贾娜尔 · 阿汗 ),Yang C-W( 杨春武 ),Shi D-C( 石德成 ),*et al.* Physiological response of an alkali resistant halophyte *Kochia sieversiana* to salt and alkali stresses. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* ( 西北植物学报 ), 2007 ,**27**( 1 ) : 79-84 ( in Chinese )

[ 8 ] Tao J( 陶 晶 ),Chen S-G( 陈士刚 ),Qin C-Y( 秦彩云 ),*et al.* Influences of salt-alkali stress on MDA and protective enzyme activity of poplar varieties. *Journal of Northeast Forestry University* ( 东北林业大学学报 ), 2005 ,**33**( 3 ) : 13-15 ( in Chinese )

[ 9 ] Wang R-G( 王瑞刚 ),Chen S-L( 陈少良 ),Liu L-Y( 刘力源 ),*et al.* Genotypic differences in antioxidative ability and salt tolerance of three poplars under salt stress. *Journal of Beijing Forestry University* ( 北京林业大学学报 ), 2005 ,**27**( 3 ) : 46-52 ( in Chinese )

[ 10 ] Ding L-N( 丁丽娜 ),Jin H( 金 华 ),Yin M-F( 殷鸣放 ),*et al.* Effects of salt stress on photosynthetic pigment and gas exchange characteristics of the leaves of *Populus* seedlings. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* ( 西北植物学报 ), 2006 ,**26**( 12 ) : 2523-2527 ( in Chinese )

[ 11 ] Shi DC ,Wang DL. Effects of various salt-alkaline mixed stresses on *Aneurolepidium chinense* ( Trin. ) Kitag. *Plant and Soil* , 2005 ,**271** : 15-26

[ 12 ] Zhang Z-L( 张志良 ). Experimental Guide for Plant

Physiology. Beijing : Higher Education Press , 2002 ( in Chinese )

[ 13 ] Xiao Q( 肖 强 ), Zheng H-L( 郑海雷 ), Chen Y( 陈瑶 ), *et al.* Effects of salinity on the growth and proline , soluble sugar and protein contents of *Spartina alterniflora*. *Chinese Journal of Ecology* ( 生态学杂志 ), 2005 , **24**( 4 ) : 373–376 ( in Chinese )

[ 14 ] Tester M , Davenport R.  $\text{Na}^+$  tolerance and  $\text{Na}^+$  transport in higher plants. *Annals of Botany* , 2003 , **91** : 503–527

[ 15 ] Yuan L( 袁 琳 ), Karim Ali( 克热木 · 伊力 ), Zhang L-Q( 张利权 ). Effect of NaCl stress on active oxygen metabolism and membrane stability in *Pistacia vera* seedlings. *Journal of Plant Ecology* ( 植物生态学报 ), 2005 , **29**( 6 ) : 985–991 ( in Chinese )

[ 16 ] Mittler R. Oxidative stress , antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science* , 2002 , **7** : 405–410

[ 17 ] Zhang R-H( 张润花 ), Guo S-R( 郭世荣 ), Fan H-F( 樊怀福 ), *et al.* Effects of exogenous spermidine on anti-oxidative enzyme activities in cucumber seedlings under salt stress. *Chinese Journal of Ecology* ( 生态学杂志 ), 2006 , **25**( 11 ) : 1333–1337 ( in Chinese )

[ 18 ] Koca H , Bor M , Özdemir F , *et al.* The effect of salt stress on lipid peroxidation , antioxidative enzymes and proline content of sesame cultivars. *Environmental and Experimental Botany* , 2007 , **60** : 344–351

[ 19 ] Bando glu E , Eyido gan F , Yücel M , *et al.* Antioxidant responses of shoots and roots of lentil to NaCl-salinity stress. *Plant Growth Regulation* , 2004 , **42** : 69–77

[ 20 ] Abed S , Peter MN. Exogenous ascorbic acid ( vitamin C ) increases resistance to salt stress and reduces lipid peroxidation. *Journal of Experimental Botany* , 2001 , **52** : 2207–2211

[ 21 ] Wu W( 吴 薇 ), Gao H-D( 高捍东 ), Cai W-J( 蔡伟建 ). Effect of alkali-saline stress and NO treatment on root activity of *Salix hybrid*. *Journal of Nanjing Forestry University* ( Natural Sciences ) ( 南京林业大学学报 · 自然科学版 ), 2008 , **32**( 4 ) : 59–62 ( in Chinese )

[ 22 ] Shi DC , Sheng YM. Effect of various salt-alkaline mixed stress conditions on sunflower seedlings and analysis of their stress factors. *Environmental and Experimental Botany* , 2005 , **54** : 8–21

---

作者简介 闫永庆 ,男 ,1966 年生 ,博士研究生 ,副教授. 主要从事植物逆境生理及园林植物应用研究 ,发表论文 20 余篇. E-mail : yanyongqing1966@163.com

责任编辑 李凤琴