

盐和温度胁迫对外来种互花米草 (*Spartina alterniflora*) 生理生态特性的影响

石福臣 鲍 芳

(南开大学生命科学学院 天津 300071)

摘要 盐浓度和环境温度是影响外来种互花米草自然分布的两大重要生态因子。在不同 NaCl 浓度和温度胁迫条件下,对互花米草幼苗根部和叶片中膜脂过氧化产物丙二醛 (MDA)、游离脯氨酸及可溶性糖、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 的动态变化进行了测定。结果表明:当 NaCl 浓度低于 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,可以促进互花米草的生长,而 NaCl 浓度超过 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,互花米草可以通过提高体内保护酶 (SOD、POD、CAT) 活性,增加可溶性糖和游离脯氨酸含量来适应外界盐浓度变化。温度胁迫后,互花米草地上和地下器官对胁迫的响应程度不同,叶片中可溶性糖含量、CAT 活性明显比根部高,而根部 SOD、POD 活性比叶片中高。

关键词 互花米草;NaCl 胁迫;温度胁迫;保护酶;丙二醛;游离脯氨酸;可溶性糖

文章编号:1000-0933 (2007) 07-2733-09 中图分类号:Q945.79 文献标识码:A

Effects of salt and temperature stress on ecophysiological characteristics of exotic cordgrass, *Spartina alterniflora*

SHI Fu-Chen, BAO Fang

College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (7) 2733 ~ 2741.

Abstract : *Spartina alterniflora* is a rhizomatous perennial, native to the Atlantic and Gulf coasts of North America. It was introduced to China to stabilize shorelines and increase vegetative cover in 1979; and now it flourishes in many inter-tidal zones of gulfs and the estuaries in East China. Dense growth of *Spartina alterniflora* reduces open mud feeding habitats of shore birds, and vigorously competes with native salt marsh vegetation in extended areas in South China. Salinity and temperature are two important ecological factors which affect the distribution of *S. alterniflora*. To find out how cordgrass adapts to the environmental conditions in the introduced range, we studied the dynamics of a series of important physiological components including superoxide dismutase (SOD), guaiacol peroxidase (POD), catalase (CAT), malondialdehyde (MDA), soluble sugar and free proline under different salinity and temperature stress. The results showed that low NaCl concentration (lower than $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) enhanced the growth of *S. alterniflora*. On the contrary, high NaCl concentration (higher than $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) inhibited the growth of *S. alterniflora*. To a certain extent, *S. alterniflora* was able to acclimate to the osmotic pressure created by external solution concentration by adjusting the activities of POD, SOD, CAT, as well as the content of free proline, soluble sugar. *S. alterniflora* varied in its responses to environment in different parts of the plant under 5°C and 38°C temperature stress. Compared to roots, leaves accumulated more soluble

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (30470179)

收稿日期 2006-12-30; 修订日期 2007-05-30

作者简介 石福臣 (1966 ~) 男,黑龙江人,教授,主要从事环境与资源植物学研究. E-mail fcs@nankai.edu.cn

Foundation item :The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30470179)

Received date 2006-12-30; **Accepted date** 2007-05-30

Biography :SHI Fu-Chen, Ph. D., mainly engaged in environmental and resources botany. E-mail fcs@nankai.edu.cn

sugar ; and CAT activities in leaves were higher , whereas SOD , POD activities in leaves were much lower than that in roots.

Key Words : *Spartina alterniflora* ; salinity stress ; temperature stress ; SOD ; POD ; CAT ; MDA ; soluble sugar ; free proline

互花米草 (*Spartina alterniflora*) 属于禾本科米草属多年生草本植物, 原产北美洲中纬度海岸潮间带^[1]。因其保岸护堤、促淤造陆等生态功能, 我国自 1979 年从美国引进, 目前在我国东部沿岸, 互花米草从广东省南部的电白至辽宁省的盘锦均有分布, 分布区跨越了近 22 个纬度, 已经形成了较大规模的互花米草人工群落^[2]。然而, 互花米草在保护我国海岸带生态环境中发挥了积极作用的同时, 在我国南方某些地区互花米草过度繁殖, 对海岸红树林的更新繁殖、潮间带物种多样性、河道畅通以及滩涂养殖业等带来许多负面影响^[2, 3, 4]。福建宁德市几个沿海县、市 12 余万亩滩涂近几年被互花米草侵占, 原先遍布闽东海滩的大片红树林被互花米草取代, 滩涂上的贝类、蟹类、鱼类逐年减少, 原有 200 多种生物仅存 20 多种, 每年直接经济损失亿元以上, 成为阻碍闽东海洋经济发展的祸害^[5]。长江口地区崇明东滩、九段沙等地, 互花米草群落与本土植物芦苇 (*Phragmites communis*)、海三棱藨草 (*Scirpus mariqueter*) 群落, 形成强烈的竞争态势, 甚至发生了竞争取代, 导致大型底栖无脊椎动物物种多样性的降低和群落结构的改变^[2, 4, 6, 7]。互花米草被引入海河三角洲湿地以后, 与浅滩乡土植物芦苇群落发生种间竞争, 使芦苇被迫丛生在突出水面的沙丘或岸边陆地。

作为全球性的入侵种, 互花米草的生理生态学研究已在国际上广泛开展, 如何有效管理成为近年来研究的热点之一^[8]。目前我国关于互花米草的研究主要集中在互花米草促淤造陆、保滩护岸等生态工程效益及综合开发利用方面, 而有关互花米草不同器官对环境胁迫生理适应性方面的研究并不多见。互花米草能够成功在南北气候完全不同的滨海湿地繁茂生长, 是因为它对环境中的高盐浓度及高温和低温胁迫有较强的适应性和耐性。本实验将以互花米草为研究对象, 分别对其进行 NaCl 和高、低温胁迫处理, 测定其根部和叶片中超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性以及丙二醛 (MDA)、游离脯氨酸、可溶性糖含量及其变化趋势, 研究互花米草地上、地下不同器官对环境盐浓度和温度变化的响应规律。为从生理生态学角度认识互花米草种群的生态适应性机制提供科学依据。

1 试验材料和方法

1.1 供试材料

供试互花米草幼苗为种子萌发的实生苗, 于 2006 年 6 月采自天津滨海滩涂。将大小基本一致 (高约 5 cm) 的实生苗移栽至装有砂基的培养钵中培养, 每盆 5 ~ 8 株, 浇自来水复壮 1 周, 复壮后开始浇 1/4 Hoagland 营养液, 以后每天递增 Hoagland 营养液浓度, 1 周后至全营养液浓度, 于室外自然光下培养。

1.2 盐浓度处理

试验共分 6 组, 分别浇灌含有 0、100、300、500、700、900 mmol·L⁻¹ NaCl 的 6 种 Hoagland 完全营养液, 每组 3 个重复。NaCl 浓度每 3 d 递增 100 mmol·L⁻¹, 直至各预定浓度。以后每隔 3 d 弃去旧液, 浇同样配比的新液 100 ml, 使每盆的盐浓度达到所设定的水平, 分别于 54 d 后采集所有植株用于试验分析。

1.3 温度处理

选取室外自然光下培养 54 d, 生长良好、大小基本一致的盆栽实生苗 (无分蘖) 分别放入 5、25℃ 和 38℃ 的人工气候箱中培养, 光强 5000 lx。其中 25℃ 处理为对照, 60 h 后取样进行测定, 每个处理设 3 个重复。

1.4 生理指标测定

SOD 活性测定采用氮蓝四唑 (NBT) 法, 以单位时间内抑制光化还原 50% 的氮蓝四唑为一个酶活性单位 U; POD 活性测定采用愈创木酚法, 以每分钟内 A470 变化 0.01 的酶量为 1 个酶活性单位 U; CAT 活性测定采用过氧化氢氧化法, 以每分钟内 A240 变化 0.01 的酶量为 1 个酶活性单位 U; MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸 (TBA) 氧化法, 游离脯氨酸含量测定采用磺基水杨酸法, 可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^[9, 10]。

1.5 数据分析

所得数据采用 SPSS 13.0、Origin 7.0 等软件进行统计处理。

2 结果与分析

2.1 保护酶 (SOD、POD、CAT)活性变化

2.1.1 盐浓度对互花米草保护酶活性的影响

从互花米草植物体总体来看 ,根部 SOD、POD 活性比叶片中高 ,CAT 活性比叶片中低 (图 1 ~ 图 3 ,CK)。互花米草的根部 ,当 NaCl 浓度低于 100 mmol·L⁻¹ 时 ,SOD 活性随 NaCl 浓度增加而下降 ,当 NaCl 浓度高于 100 mmol·L⁻¹ 时 ,SOD 活性随着 NaCl 浓度增加迅速上升 ,直到 300 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度时达到最大值为 208.80 U·g⁻¹ (FW) ,此后随 NaCl 浓度增加根部 SOD 活性大幅度下降 (图 1) ;与 SOD 不同 ,NaCl 浓度低于 100 mmol·L⁻¹ 时 ,根部 POD 活性随 NaCl 浓度增加迅速上升 ,100 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度时 POD 活性达到最大值 1834.17 U·g⁻¹ (FW) min⁻¹ ,此后随着 NaCl 浓度增加 ,POD 活性大幅度下降 (图 2) ;根部 CAT 活性变化趋势呈倒 N 字形 ,对照组酶活性最高 ,100 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度时降到最低点 ,此后随着 NaCl 浓度增加酶活性上升 ,在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度时达到第二个峰值 ,接着 CAT 酶活性随 NaCl 浓度增加而下降 (图 3)。

互花米草的叶部 ,NaCl 浓度低于 100 mmol·L⁻¹ 时 ,SOD 活性变化趋势与根部相同 ,NaCl 浓度超过 100 mmol·L⁻¹ 时 ,SOD 活性随 NaCl 浓度增加呈持续上升趋势 (图 1) ;NaCl 浓度低于 300 mmol·L⁻¹ 时 ,叶片 POD 活性随 NaCl 浓度增加而下降 ,300 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度时 POD 活性降到最低值 209.03 U·g⁻¹ (FW) min⁻¹ ,此后随着 NaCl 浓度增加 POD 活性逐步上升 ,当 NaCl 浓度超过 700 mmol·L⁻¹ 后 ,叶片 POD 活性再次下降 (图 2) ;叶片 CAT 活性变化趋势与根部相似 ,不同之处在于叶片 CAT 活性在 500 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度时才达到第二个峰值。由图 1 ~ 图 3 可见 ,盐胁迫条件下 ,互花米草体内不同保护酶对盐胁迫响应趋势不一致 ,不同器官保护酶含量及变化趋势也不相同。

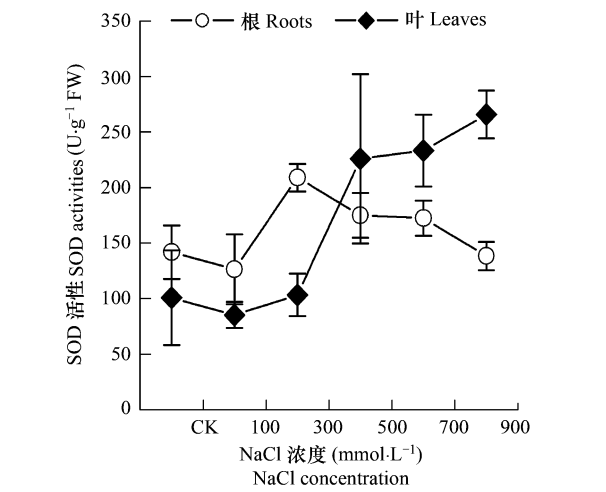


图 1 不同 NaCl 浓度下互花米草幼苗体内 SOD 活性的变化
Fig.1 Variations of SOD activities of *S. alterniflora* seedlings under different salinities

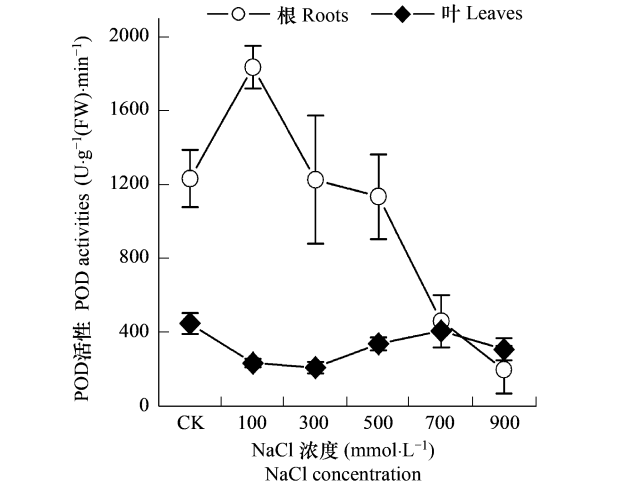


图 2 不同 NaCl 浓度下互花米草幼苗体内 POD 活性的变化
Fig.2 Variations of POD activities of *S. alterniflora* seedlings under different salinities

2.1.2 温度对互花米草保护酶活性的影响

由图 4、5、6 可见 ,低温胁迫条件下 ,互花米草根 SOD 活性相对于常温对照下降 46% ,POD 活性相对于常温对照下降 40% ,CAT 活性相对于常温对照上升 20%。叶片中 SOD 活性相对于常温对照下降 58% ,POD、CAT 活性相对于常温对照分别上升 23% 和 24%。

高温胁迫条件下 ,互花米草根 SOD 活性相对于常温对照下降 60% ,POD 活性相对于常温对照上下下降 55% ,CAT 活性相对于常温对照略有上升。叶片中 SOD 活性相对于常温对照下降 72% ,POD、CAT 活性相对于常温对照变化不大。根部 SOD、POD 活性显著的高于叶片 ,而其 CAT 活性却远远低于叶片。

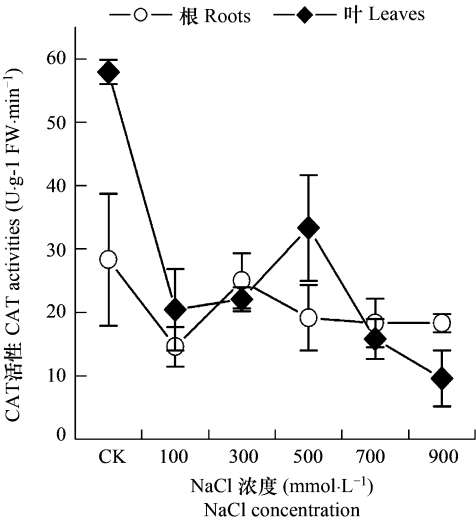


图3 不同 NaCl 浓度下互花米草幼苗体内 CAT 活性的变化
Fig.3 Variations of CAT activities of *S. alterniflora* seedlings under different salinities

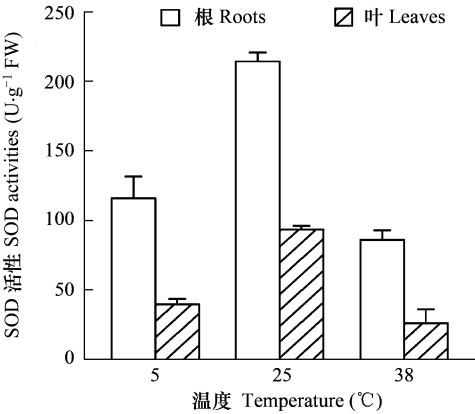


图4 不同温度下互花米草幼苗体内 SOD 活性变化
Fig.4 Variations of SOD activities of *S. alterniflora* seedlings under 5 25 38°C

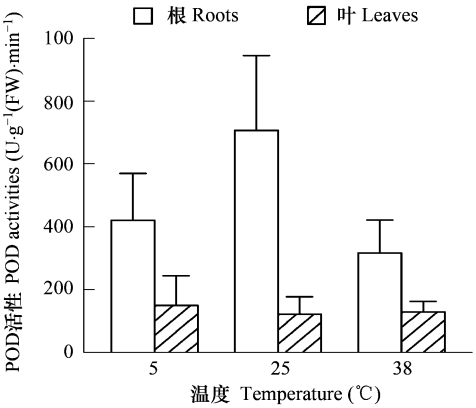


图5 不同温度下互花米草幼苗体内 POD 活性变化
Fig.5 Variations of POD activities of *S. alterniflora* seedlings under 5 25 38°C

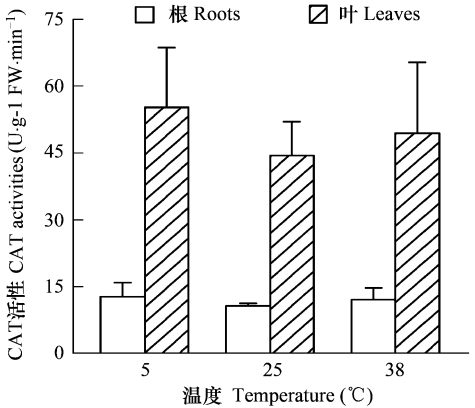


图6 不同温度下互花米草幼苗体内 CAT 活性变化
Fig.6 Variations of CAT activities of *S. alterniflora* seedlings under 5 25 38°C

2.2 丙二醛 (MDA) 含量变化

2.2.1 盐浓度对互花米草 MDA 含量的影响

由图 7 可见 互花米草根 MDA 含量随 NaCl 浓度增加呈单峰曲线 :NaCl 浓度低于 100 mmol·L⁻¹ 时 ,根部 MDA 含量随 NaCl 浓度增加缓慢下降 ,NaCl 浓度高于 100 mmol·L⁻¹ 时 ,根部 MDA 含量随着 NaCl 浓度增加迅速上升 ,在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度时达到最大值 12.8 μmol·g⁻¹FW 此后随 NaCl 浓度增加根部 MDA 含量下降。

NaCl 浓度低于 100 mmol·L⁻¹ 时 ,互花米草叶片 MDA 含量随 NaCl 浓度增加逐渐下降 ,NaCl 浓度介于 100 ~700 mmol·L⁻¹ 之间时 ,叶片 MDA 含量随 NaCl 浓度增加缓慢上升 ,NaCl 浓度超过 700 mmol·L⁻¹ 时 ,叶片 MDA 含量急剧增加。

2.2.2 温度对互花米草 MDA 含量的影响

由图 8 可见 经高温和低温胁迫后 互花米草根部和叶片中的 MDA 含量相对于常温对照都有不同程度的下降 根部 MDA 含量在低温胁迫后降幅为 33% ,高温胁迫后降幅为 31% ;叶片 MDA 含量在低温胁迫后降幅为 22% ,高温胁迫后降幅为 36%。低温胁迫后互花米草体内 MDA 含量下降幅度低于高温胁迫后的下降幅度。无

论是对照组还是高、低温胁迫处理组的互花米草幼苗 其叶片中 MDA 含量均远远高于根部 MDA 含量。

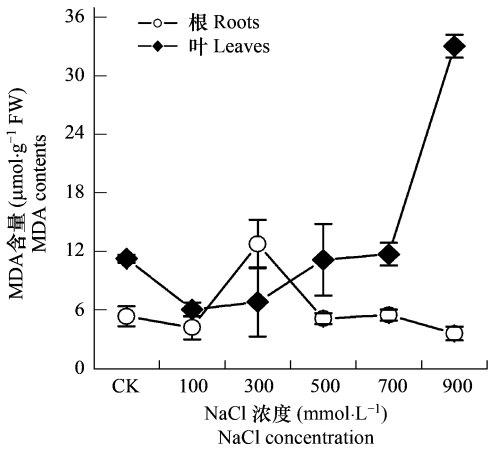


图7 不同 NaCl 浓度下互花米草幼苗体内 MDA 含量变化
Fig.7 Variations of MDA contents of *S. alterniflora* seedlings under different salinities

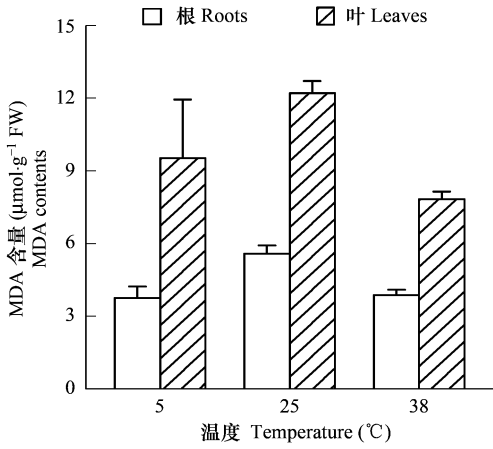


图8 不同温度下互花米草幼苗体内 MDA 含量变化
Fig.8 Variations of MDA contents of *S. alterniflora* seedlings under 5 25 38℃

2.3 游离脯氨酸含量变化

2.3.1 盐浓度对互花米草游离脯氨酸含量的影响

由图 9 可见 互花米草根部分离脯氨酸含量随 NaCl 浓度增加缓慢上升 700 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度时达到最大值 93.71 μg·g⁻¹FW 此后随 NaCl 浓度增加根部游离脯氨酸含量逐步下降。

互花米草叶片游离脯氨酸含量变化趋势与根部基本一致 但变化幅度加大。NaCl 浓度低于 100 mmol·L⁻¹时 叶片内游离脯氨酸含量缓慢上升 ;NaCl 浓度介于 100 ~300 mmol·L⁻¹时 叶片游离脯氨酸含量大幅度上升 ;NaCl 浓度介于 300 ~500 mmol·L⁻¹时 叶片游离脯氨酸含量保持稳定 ;NaCl 浓度介于 500 ~700 mmol·L⁻¹时 叶片游离脯氨酸含量再次急剧上升 700 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度时达到最大值 548.14 μg·g⁻¹FW 此后随着 NaCl 浓度增加叶片游离脯氨酸含量迅速下降。对照组互花米草根部和叶片中游离脯氨酸含量在差别不大 盐胁迫处理后互花米草叶片中游离脯氨酸含量上升很快 远远超过根部游离脯氨酸含量。

2.3.2 温度对互花米草游离脯氨酸含量的影响

由图 10 可见 低温胁迫后互花米草根部分离脯氨酸含量在上升 2% 叶片游离脯氨酸含量下降 2% 高温

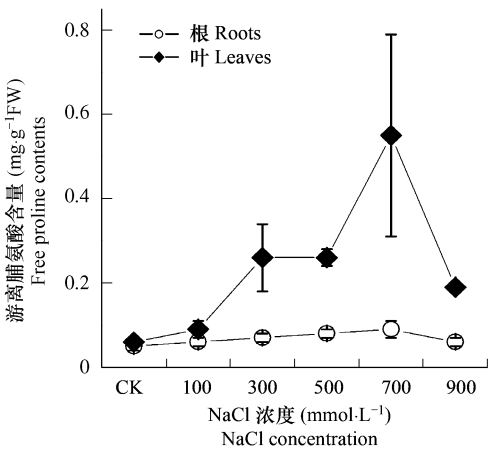


图9 不同 NaCl 浓度下互花米草幼苗体内游离脯氨酸糖含量变化
Variations of free proline contents of *S. alterniflora* seedlings under different salinities

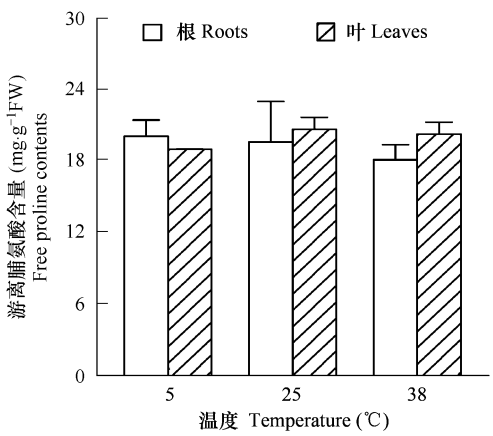


图10 不同温度下互花米草幼苗体内游离脯氨酸含量变化
Fig.10 Variations of free proline contents of *S. alterniflora* seedlings under 5 25 38℃

胁迫后,互花米草根部分离脯氨酸含量下降 8%,叶片分离脯氨酸含量下降 2%。相对于常温对照,互花米草体内分离脯氨酸变化幅度很小,各处理间差异不显著($p > 0.05$)。

2.4 可溶性糖含量变化

2.4.1 盐浓度对互花米草可溶性糖含量的影响

由图 11 可见,互花米草根部分溶性糖含量随盐浓度增加呈缓慢上升趋势,700 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度时,根部可溶性糖含量达到最大值 5.95 mmol·g⁻¹ FW,此后随 NaCl 浓度增加根部可溶性糖含量逐渐下降。

互花米草叶片可溶性糖含量变化趋势与 MDA 基本一致,NaCl 浓度低于 100 mmol·L⁻¹ 时,叶片可溶性糖含量逐渐下降,100 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度处降到最低值 34.45 mmol·g⁻¹ FW;NaCl 浓度介于 100 ~ 300 mmol·L⁻¹ 时,缓慢上升;NaCl 浓度介于 300 ~ 500 mmol·L⁻¹ 时叶片可溶性糖含量大幅度上升;NaCl 浓度介于 500 ~ 700 mmol·L⁻¹ 时,叶片可溶性糖含量基本保持稳定,此后随盐浓度增加叶片可溶性糖含量再次大幅度上升,并在 900 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度处上升到最大值 189.80 mmol·g⁻¹ FW。无论是对照组还是盐胁迫处理组,互花米草叶片中可溶性糖含量均远远高于根部可溶性糖含量。

2.4.2 温度对互花米草可溶性糖含量的影响

由图 12 可见,低温胁迫后,互花米草根部分溶性糖含量比常温对照上升 279%,叶片可溶性糖含量比常温对照上升 213%。高温胁迫后,根部可溶性糖含量比常温对照下降 71%,而叶片可溶性糖含量比常温对照上升 99%。3 个处理组中,叶片可溶性糖含量均高于根部。

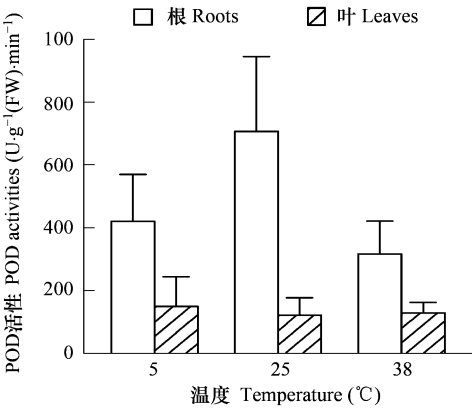


图 11 不同 NaCl 浓度下互花米草幼苗体内可溶性糖含量变化
Fig. 11 Variations of soluble sugar contents of *S. alterniflora* seedlings under different salinities

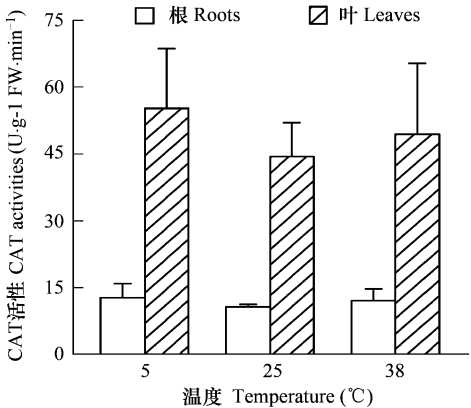


图 12 不同温度下互花米草幼苗体内可溶性糖含量变化
Fig. 12 Variations of soluble sugar contents of *S. alterniflora* seedlings under 5 25 38°C

3 讨论

在植物的正常生命过程中,植物细胞中存在着活性氧的产生和清除两个过程。逆境胁迫会促进活性氧产生增加,其结果一方面诱导有关的保护酶如 SOD、POD、CAT 等活性升高,另一方面可以直接破坏生物大分子,使酶活性丧失。表现为低强度胁迫条件下,植物体内酶活性随胁迫程度增加而上升,当胁迫程度超出植物体忍耐范围之后,胁迫程度越高,酶活性越低^[8]。MDA 是植物在环境胁迫下膜脂过氧化而产生的一种具有细胞毒性的物质,它的生成是由体内自由基引发而产生的,MDA 的积累能够反应植物体内自由基的活动状况^[11],在植物逆境生理研究中,MDA 普遍的作为一种伤害指标^[12]。典型盐地植物盐爪爪 (*Kalidium foliatum*) 和盐角草 (*Salicornia europaea*) 在盐渍环境下细胞内脂质过氧化产物 MDA 含量增加,相应的 SOD 活性也同样增加,且 SOD 与 MDA 二者之间保持一定比例^[13]。本研究中,互花米草体内保护酶 SOD、POD、CAT 对盐胁迫的响应趋势表现出不一致性,根部 SOD 活性与 MDA 的变化基本一致,而叶片 SOD 与 MDA 在 NaCl 浓度低于 300 mmol·L⁻¹ 时变化基本一致,NaCl 浓度超过 300 mmol·L⁻¹ 时二者表现出负相关关系,POD 与 MDA 之间表现出

明显的负相关性,NaCl 浓度低于 500 mmol·L⁻¹时 CAT 与 MDA 之间变化趋势保持一致。本研究表明,低盐浓度(低于 100 mmol·L⁻¹)可以促进互花米草的生长。而 NaCl 浓度超过 300 mmol·L⁻¹时互花米草根部保护酶(SOD、POD、CAT)活性以及 MDA 含量急剧下降,意味着根部活性氧清除与产生系统开始遭到破坏,而叶片 MDA 含量及保护酶活性在 700 mmol·L⁻¹NaCl 浓度前持续上升,表明互花米草叶片中抗氧化系统可以忍耐更高浓度的盐胁迫,与叶片相比,根部对盐胁迫更加敏感,其保护酶体系也更容易受到逆境伤害。从形态上看,在 0、100、300 mmol·L⁻¹NaCl 浓度处理后互花米草幼苗形态反映良好,100 mmol·L⁻¹NaCl 浓度为互花米草最适生长盐浓度,表现为株高、最大叶长、单株鲜重等生长参数显著高于其它处理组,而天津滨海滩涂土壤平均含盐量为 1.12%~1.19%^[4],低于 300 mmol·L⁻¹NaCl 浓度,适合互花米草正常生长,500 mmol·L⁻¹NaCl 浓度处理后,互花米草幼苗大范围枯黄,700 mmol·L⁻¹NaCl 浓度处理后互花米草幼苗大量枯死,900 mmol·L⁻¹NaCl 浓度处理后互花米草幼苗几乎全部枯死,作为一种典型的盐生植物,互花米草可能有其独特的生理代谢机制,在长期高盐环境胁迫、盐诱导条件下,甚至在无盐胁迫时也能够保持较高 MDA、保护酶含量水平。

高温胁迫后互花米草叶片大量分泌盐分(图 13),可能是由于高温下互花米草新陈代谢速率加快,呼吸作用增强,对盐离子运输作用加强造成的^[12]。高温胁迫处理的互花米草体内 SOD、POD 活性、MDA 含量下降幅度大于低温胁迫处理的下降幅度,CAT 活性、可溶性糖含量上升幅度小于低温胁迫后上升幅度,表明 38℃ 高温对互花米草生理代谢产生一定的不利影响,但并不影响其继续生长发育。在外来杂草加拿大一支黄花(*Solidago canadensis*)、小飞蓬(*Erigeron canadensis*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)、马缨丹(*Lantana camara*)等植物中也观察到类似的结果^[12,15]。互花米草叶片内 POD、CAT 活性受高、低温胁迫的影响较小,这种稳定性可能有利于互花米草更好的保持体内氧化还原平衡状态^[16]。

许多植物在逆境中积累游离脯氨酸,它所起的作用可以概括为:调节细胞的渗透势,保护蛋白质分子和酶活性,作为活性氧的清除剂和抗冷剂^[7,18]。本研究中互花米草体内游离脯氨酸含量随盐浓度增加大量积累,意味着游离脯氨酸的积累是互花米草适应盐胁迫的重要途径之一^[19],考虑到其与 MDA 积累上的高度相关性,它也可以作为互花米草的一种盐胁迫伤害指标^[2]。互花米草体内游离脯氨酸含量受高、低温胁迫的影响较小。有趣的是低温胁迫后,互花米草体内游离脯氨酸总量没有变化,根部游离脯氨酸含量上升,叶片游离脯氨酸含量下降,似乎低温胁迫后在互花米草的根部和叶片之间存在一个游离脯氨酸的转运过程,具体机理有待进一步研究。

可溶性糖在许多盐生植物体内作为渗透调节剂^[20],同时也是合成其它有机溶质的碳架和能量来源^[21],对细胞质膜和原生质胶体有稳定作用,还可在细胞内无机离子浓度高时起保护酶类的作用^[22]。盐胁迫处理后,互花米草体内可溶性糖含量大幅度增加,表明可溶性糖也是互花米草体内的渗透调节物质之一^[19]。低温胁迫后互花米草体内大量积累可溶性糖,表明可溶性糖的积累是互花米草对低温胁迫的一种适应方式,这也是互花米草适应北方寒冷气候环境,抵御低温的一种抗性生理特点。高温胁迫后,互花米草叶片内可溶性糖含量比常温对照上升而根部下降,这可能是由于高温胁迫下互花米草根系大量吸收无机离子,主动运输增强,呼吸作用旺盛导致大量消耗根部贮存的糖类造成的^[12],表明可溶性糖也是互花米草适应高温环境的一种渗透调节物质。

综上所述,互花米草对盐浓度和温度的适应生态幅较广,滨海滩涂的盐浓度比较适宜互花米草的正常生长,而由纬度引起的温度差异也不会成为互花米草生长的限制性因子。因此,互花米草在我国东部沿海滩涂及潮

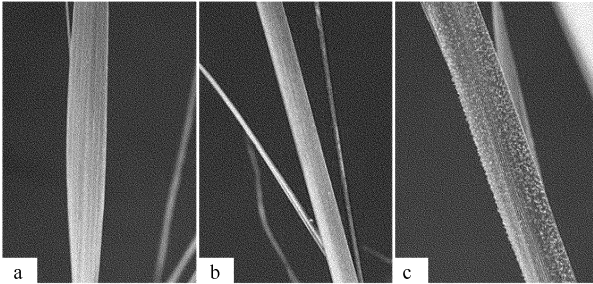


图 13 不同温度下互花米草叶片形态 (a 25℃对照;b 5℃低温处理;c 38℃高温处理)
Fig. 13 Variations of form of *S. alterniflora* seedling leaves under 5℃ (a) 25℃ (b) 38℃ (c)

间带仍有继续扩张的空间与可能。目前,互花米草在我国东海岸最北分布已经达到辽宁盘锦,最南分布已经达到广东电白以南,对于互花米草的未来发展趋势,要引起政府和科研等有关部门的密切关注,并尽快积极研究制定合理有效的控制措施。另外,还要尽力发掘互花米草的有利方面,如滩涂绿化、饲料添加及生物能源利用等,以便对互花米草进行科学管理,充分发挥其生态经济效益。

References :

[1] Tang T G , Zhang W J. A discussion of ecological engineering benefits of *Spartina* spp and its ecological invasion. *Engineering Science* ,2003 ,5 (3) :15—20.

[2] Zhao G Q , Zhang L Q , Liang X. A comparison of photosynthetic characteristics between an invasive plant *Spartina alterniflora* and an indigenous plant *Phragmites australis*. *Acta Ecologica Sinica* ,2005 ,25 (7) :1604—1611.

[3] Peng S L , Xiang Y C. The invasion of exotic plants and effects of ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* ,1999 ,19 (4) :560—568.

[4] Chen Z Y , Li B , Chen J K. Some growth characteristics and relative competitive ability of invasive *Spartina alterniflora* and native *Scirpus mariqueter*. *Biodiversity Science* ,2005 ,13 (2) :13—136.

[5] Du W Q , Ma L N , Liu J , *et al.* Controlling technique of *Spartina alterniflora* Loisel in mangrove-*spartina* ecotones. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* ,2006 ,14 (3) :154—156.

[6] Chen Z Y , Fu C C , Wang H Y , *et al.* Effects of *Spartina alterniflora* Invasions on the Benthic Macro-Onvertebrates Community at Dongtan of Chongming Salt Marsh , the Yangtze River Estuary. *Wetland Science* ,2005 ,3 (1) :1—7.

[7] Gao H , Peng X W , Li B , *et al.* Effects of the invasive plant *Spartina alterniflora* on insect diversity in Jiuduansha wetlands in the Yangtze River Estuary. *Biodiversity Science* ,2006 ,14 (5) :400—409.

[8] Lorne K , Kriwoken , Paul H. Exotic species and estuaries : managing *Spartina anglica* in Tasmania , Australia. *Ocean&Coastal Management* ,2000 ,43 (7) :573—584.

[9] Hao Z B , Cang J , Xu Z. *Plant physiology experiment*. Harbin Institute of Technology Press ,2004.

[10] Li H S. *The experiment principle and technique for plant physiology and biochemistry*. Beijing : Higher Education Press ,2000.

[11] Yang S S , Gao J F. Influence of active oxygen and free radicals on plant senescence. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica* ,2000 ,21 (2) :215—220.

[12] Jia H X , Zhao M R , Ma Y. The study on cell lipid over-oxidation injuries and changes of plasmalemma ultrastructure in typical saline plants. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica* ,1994 ,14 (6) :1—5.

[13] Guo S L , Fang F , Qiang S. Influences of temprature on physiological indices of seven exotic weeds and their adaptive significance. *Guihaia* ,2003 ,23 (1) :73—76.

[14] Cao D Z , Wang Y S , Zhang D R. Application of *Spartina alterniflora* on blow-fill-construct sea wall engineering. *Engineering Science* ,2005 ,7 (7) :14—23.

[15] Guo S L , Fang F. Physiological adaptation of the invasive plant *Solidago canadensis* to enviroments. *Acta Phytocologica Sinica* ,2003 ,27 (1) :47—52.

[16] Li J , Yan X F , Zu Y G. Generation of activated oxygen and changes of cell defense enzyme activity in leaves of Korean pine seedling under low temprature. *Acta Botanica Sinica* ,2000 ,42 (2) :148—152.

[17] Xu X M , Ye H C , Li G F. Progress in synthesis and metabolism of proline and its relationship with osmotolerance of plants. *Chinese Bulletin of Botany* ,2000 ,17 (6) :536—542.

[18] Peng Z H , Peng K Q , Hu J J. Research progress on accumulation of proline under osmotic stress in plants. *Chinese Agricultural Science Bulletin* ,2002 ,18 (4) :80—83.

[19] Xiao Q , Zheng H L , Chen Y , *et al.* Effects of salinity on the growth and proline , soluble sugar and protein contents of *Spartina alterniflora*. *Chinese Journal of Ecology* ,2005 ,24 (4) :373—376.

[20] Zhao K F. *Plant salt resistance physiology*. Beijing : China Science Technology Press ,1993.

[21] Zhang H Y , Zhao K F. Effects of salt and water stresses on osmotic adjutment of *Suaeda salsa* seedlings. *Acta Botanica Sinica* ,1998 ,40 (1) :56—61.

[22] Yang X M , Qin P , Xie M. A correlation research between physiological compositions of *Spartina alterniflora* and artificial seawater concentrations. *Chinese Journal of Ecology* ,1997 ,16 (3) :7—10.

参考文献 :

[1] 唐廷贵,张万钧. 论中国海岸带大米草生态工程效益与“生态入侵”. *中国工程科学* ,2003 ,5 (3) :15~20.

[2] 赵广崎, 张利权, 梁霞. 芦苇与入侵植物互花米草的光合特性比较. 生态学报, 2005, 25 (7): 1604 ~ 1611.

[3] 彭少麟, 向言词. 植物外来种入侵及其对生态系统的影响. 生态学报, 1999, 19 (4): 560 ~ 568.

[4] 陈中义, 李博, 陈家宽. 互花米草与海三棱藨草的生长特征和相对竞争能力. 生物多样性, 2005, 13 (2): 130 ~ 136.

[5] 杜文琴, 马丽娜, 刘建, 等. 红树林区内互花米草防除技术研究. 中国生态农业学报, 2006, 14 (3): 154 ~ 156.

[6] 陈中义, 付萃长, 王海毅, 等. 互花米草入侵东滩盐沼对大型底栖无脊椎动物群落的影响. 湿地科学, 2005, 3 (1): 1 ~ 7.

[7] 高慧, 彭筱葳, 李博, 等. 互花米草入侵九段沙河口湿地对当地昆虫多样性的影响. 生物多样性, 2006, 14 (5): 400 ~ 900.

[9] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.

[10] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[11] 杨淑慎, 高俊凤. 活性氧、自由基与植物的衰老. 西北植物学报, 2001, 21 (2): 215 ~ 220.

[12] 贾恢先, 赵曼容, 马莹. 典型盐地植物细胞脂质过氧化伤害与质膜超微结构变化的研究. 西北植物学报, 1994, 14 (6): 1 ~ 5.

[13] 郭水良, 方芳, 强胜. 不同温度对七种外来杂草生理指标的影响及其适应意义. 广西植物, 2003, 23 (1): 73 ~ 76.

[14] 曹大正, 王银生, 张东然, 等. 互花米草在吹填筑挡工程上的试验与应用. 中国工程科学, 2005, 7 (7): 14 ~ 23.

[15] 郭水良, 方芳. 入侵植物加拿大一支黄花对环境的生理适应性研究. 植物生态学报, 2003, 27 (1): 47 ~ 52.

[16] 李晶, 阎秀峰, 祖元刚. 低温胁迫下红松幼苗活性氧的产生及保护酶的变化. 植物学报, 2000, 42 (2): 148 ~ 152.

[17] 许详明, 叶和春, 李国风. 脯氨酸代谢与植物抗渗透胁迫的研究进展. 植物学通报, 2000, 17 (6): 536 ~ 542.

[18] 彭志红, 彭克勤, 胡家金, 等. 渗透胁迫下植物脯氨酸积累的研究进展. 中国农学通报, 2002, 18 (4): 80 ~ 83.

[19] 肖强, 郑海雷, 陈瑶, 等. 盐度对互花米草生长及脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量的影响. 生态学杂志, 2005, 24 (4): 373 ~ 376.

[20] 赵可夫. 植物抗盐生理. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.

[21] 张海燕, 赵可夫. 盐分和水分胁迫对盐地碱蓬幼苗渗透调节效应的研究. 植物学报, 1998, 40 (1): 56 ~ 61.

[22] 杨小梅, 钦佩, 谢民, 等. 人工海水环境中互花米草总黄酮等生理成分与盐浓度的相关性研究. 生态学杂志, 1997, 16 (3): 7 ~ 10.