黄河三角洲滨海湿地水盐胁迫对盐地碱蓬幼苗生长和抗氧化酶活性的影响

管博[1,2], 于君宝[1,3*], 陆兆华[1,3*], 张莹[4], 王雪宏[1,2]

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所滨海湿地生态实验室, 海岸带环境过程重点实验室, 烟台 264000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603; 4. 山东省海洋水产研究所海洋渔业资源与生态修复研究中心, 烟台 264006)

摘要: 研究黄河三角洲滨海湿地先锋植物盐地碱蓬在水盐胁迫下的生存机制能够为退化滨海湿地的修复提供重要的理论基础. 通过温室控制模拟试验, 研究了不同地下水位深度(0、-10、-20、-30 cm)以及不同盐浓度(0%、1%、2%、3%)的交互作用对盐地碱蓬幼苗高度、分枝数、生物量以及叶绿素含量和抗氧化物酶的活性的影响. 结果表明, 从地下水位深度 -30 ~ 0 cm, 盐地碱蓬幼苗高度显著降低, 分枝数以及根、茎、叶生物量均显著减少; 不同盐浓度对幼苗高度, 分枝数以及生物量影响也差异显著. 在 -30 cm 水位和 0% 盐的交互作用下幼苗总生物量达到最高, 为(1.09 ± 0.15) g/株, 而 0 cm 水位深度和 3% 盐胁迫的交互作用下其总生物量为(0.23 ± 0.01) g/株, 仅为最高生物量的 21%. 同样地, 在 -30 cm 水位和 0% 盐的交互作用下幼苗叶片叶绿素 a、b 以及类胡萝卜素含量最高, 而 0 cm 水位深度和 3% 盐胁迫的交互作用下各含量达到最低. 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性随盐浓度增加而显著增加, 以 0 cm 水位为例, SOD 活性从 55.00 U/mg (0% NaCl) 增加到 151.58 U/mg (3% NaCl); 当地下水位下降时, SOD 活性下降, 但 CAT 活性在 -30 cm 水位深度时最高; 在 0 和 -10 cm 水位下, 丙二醛(MDA)含量随盐浓度增加而增加, -30 cm 水位下, MDA 含量在 3% 盐浓度时为 0.26 mmol/g, 仅为其他盐浓度下的 28% ~40%. 以上结果表明盐地碱蓬能够通过改变形态特征、生物量分配比例以及调节体内抗氧化胁迫物质含量来适应不同的生存环境, 这正是盐地碱蓬在滨海湿地潮间带不同水盐环境中能够长期生存的适应性机制.

关键词: 盐地碱蓬; 水位; 盐胁迫; 叶绿素; 抗氧化酶

中图分类号: X171.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2011)08-2422-08

Effects of Water-Salt Stresses on Seedling Growth and Activities of Antioxidative Enzyme of *Suaeda salsa* in Coastal Wetlands of the Yellow River Delta

GUAN Bo[1,2], YU Jun-bao[1,3], LU Zhao-hua[1,3], ZHANG Ying[4], WANG Xue-hong[1,2]

(1. Laboratory of Coastal Wetland Ecology, Key Laboratory of Coastal Zone Environment Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264000, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory for Eco-Environmental Sciences Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, China; 4. Research Center of Marine Fishery Resources and Ecology, Shandong Marine Fisheries Research Institute, Yantai 264006, China)

Abstract: The halophyte *Suaeda salsa* is the pioneer plant and is used for the degraded coastal wetland in Yellow River Delta. The water-salt stress is the most important factor for ecological restoration to degraded coastal wetland. To understand the adaptive mechanism of *Suaeda salsa* to water-salt stresses, the induced effects of different groundwater table depths (0, -10, -20, -30 cm) and salt stress (0%, 1%, 2%, 3%) on seedlings of *Suaeda salsa* plant were characterized by the growth parameters of plant height, branch number and biomass of different organs and biological indices of leaf chlorophyll content, the activities of SOD, CAT, the leaf content of MDA and protein. The results showed the significantly ($p < 0.001$) decreased height of the seedlings from -30 cm to 0 cm of groundwater table depth, together with the decreased the number of branches, the biomass of leaf, shoot and root. The highest total biomass of single plant was (1.09 ± 0.15) g under the condition of -30 cm water table depth and 0% salt stress. However, the combination of 0 cm water table depth and 3% NaCl resulted in the biomass of (0.23 ± 0.01) g, which was ca. 21% compared with the highest biomass. Similarly, the contents of leaf chlorophyll *a*, *b* and carotenoid were the highest under the condition of -30 cm water table depth and 0% salt stress and lowest under the condition of 0 cm water table depth combined with 3% NaCl. The activities of SOD, CAT were increased significantly ($p < 0.05$) depending on the increase of salt stress. At 0 cm water table depth, the activities

收稿日期: 2010-09-29; **修订日期:** 2010-12-01

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-223); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903001); 中国科学院百人计划项目; 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划项目; "十一五"国家科技支撑计划项目(2006BAC01A13); 国家自然科学基金项目(30770412); 山东省科技攻关计划项目(2008GG20005006, 2008GG3NS07005)

作者简介: 管博(1981 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为退化湿地植被修复与生态重建, E-mail: guanb627@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: junbao.yu@gmail.com; jbyu@yic.ac.cn; lu-zhh@263.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

of SOD were 55.00 U/mg with 0% NaCl and 151.58 U/mg with 3% NaCl, respectively. The activities of SOD were decreased when the water table depth increased. However, the activities of CAT achieved the highest level at −30 cm water table depth. At 0 and −10 cm water table depth, the MDA content increased with the increase of salt stress. The MDA content was 0.26 mmol/g at −30 cm water table depth with 3% NaCl, which was approx. 28%-40% of the MDA contents compared with that caused by other salt stresses. These results demonstrated that *Suaeda salsa* plant could change its morphological characteristics, biomass allocation, and the activities of antioxidative enzymes to adapt severe environment.

Key words: *Suaeda salsa* plant; water table; salt stress; chlorophyll; antioxidative enzyme

黄河三角洲位于渤海西岸,渤海湾和莱州湾湾口,是我国三大河口三角洲之一,是东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙的重要中转站、越冬栖息地和繁殖地. 黄河三角洲滨海湿地是依靠黄河水和海水的共同作用而形成的,但是近年来由于黄河水源的非持续供应,海水不断侵蚀,加之蒸发量远远高于水分补给量,使黄河三角洲土壤盐碱化现象日益严重[1,2]. 黄河水位的不断变化以及海潮的侵蚀直接影响着滨海湿地的水分和盐分状况,在地下水位较浅的滨岸地区,植物生长会受到水分和盐分双重胁迫影响[3,4],而植物对水分和盐分的响应则可以通过形态特征变化[5]、叶绿素含量变化[6,7]以及抗氧化酶活性[7,8]等表现出来. 近年来,关于黄河三角洲滨海湿地的研究不断增加,主要集中在湿地资源的开发利用[9]、湿地生态风险评价[10]、湿地变化[11]以及滨海湿地营养元素空间分布特征[12,13]等方面,而关于植物受滨海潮间带不同地下水位深度和盐分影响方面的研究报道还很少.

盐地碱蓬[*Suaeda salsa* (L.)]群落是黄河三角洲滨海湿地的主要植被类型之一,它主要分布在由陆地向滩涂延伸的过渡地带,由于其具有较高的耐盐性,是重度盐碱湿地的主要修复物种和先锋植物. 因盐地碱蓬分布的特殊地理位置,使其受海水侵蚀和黄河水冲积影响最明显. Cui 等[14]通过野外调查认为盐地碱蓬的适合水位生态阈值为 −0.92 ~ 0.08 m,但由于黄河三角洲水位变化频繁,此结果也只能代表当时调查的状态,并不能说明盐地碱蓬长期生存的生态阈值. 另外,关于不同水、盐胁迫的交互作用影响下盐地碱蓬的生理生态响应鲜见报道,而探讨植物在水盐胁迫下的生理生态响应机制对于研究滨海湿地植物的适应性以及退化湿地的修复均具有重要意义. 本研究通过温室控制试验模拟分析了不同地下水位深度和不同浓度盐胁迫的交互作用对盐地碱蓬生长以及生理方面的影响,目的是揭示盐地碱蓬在黄河三角洲滨海盐碱湿地潮间带不同水盐环境长期生存过程中所产生的适应性机制,以期为黄河三角洲退化盐碱湿地生态环境的恢复提供重要的理论依据.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

黄河三角洲国家级自然保护区(37°40′N ~ 38°10′N, 118°41′E ~ 119°16′E)于 1992 年经国家林业局批准建立,是全国最大的河口三角洲自然保护区,该保护区属暖温带季风气候区,具有明显的大陆性季风气候特点,区年均气温 12.1℃,年均蒸发量 1 962 mm,年均降水量为 551.6 mm. 该地区土壤类型主要为滨岸潮土,由黄河泥沙沉积而成. 近年来由于地下水过度开采,导致海水倒灌,加之年蒸发量远大于年降水量,某些区域形成寸草不生的重度盐碱地,土壤表面有盐析出,形成独特的白斑光板地. 该区域植被群落类型以芦苇群落、柽柳群落及盐地碱蓬群落为主,其中盐地碱蓬为重度盐碱地的先锋物种.

1.2　试验材料

试验供试种子于 2009 年 11 月中旬采自黄河三角洲滨海盐碱湿地内盐地碱蓬群落. 将采集的种子处理干净,置于4℃冰箱内保存,备用. 试验于 2010 年在滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室的温室内进行. 试验用土为黄河口滨岸潮土,土壤含盐量约为 0.22%. 挑选籽粒饱满的盐地碱蓬种子按试验设计播种于不同高度的花盆中,每盆 15 ~ 25 粒按相同密度种植,每天补充蒸发所需的水分.

1.3　试验设计

试验为 4 个不同地下水位和 4 个不同盐浓度交互作用处理. 4 个地下水位处理分别为 0、−10、−20 和 −30 cm(分别用 10、20、30、40 cm 高度的花盆放于 10 cm 水深的水槽中). 盐浓度处理为 0%、1%、2% 和 3% NaCl 溶液. 苗龄 2 周时,植株平均高度为 6.3 cm,选取长势均匀的盐地碱蓬 48 盆按不同水位分成 4 组,每组 12 盆; 在每组内分成 4 个小组,每小组 3 盆,进行不同盐梯度处理,盆下面均有排水孔,并铺有塑料网以防止土壤流失并保持水分流通. 每天以 0.5% NaCl 的增速对碱蓬幼苗进行透

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

灌 2 次,7 d 后达到不同盐浓度要求后停止透灌,并保持水槽内水位. 试验期间每天向水槽内补充蒸发的水分,并每 5 d 更换水槽内盐溶液,以保持盐浓度稳定.

试验周期为一个月,期间每周测量株高变化,试验结束时,用小铲将幼苗小心从盆中取出,尽可能不破坏其原有根系结构,并用蒸馏水冲洗干净后,部分鲜样用于测量植物叶片中抗氧化酶活性以及叶绿素含量; 部分样品测量分枝数,并分离为根、茎、叶,测量鲜重,再将植物样品先于105℃下杀青,后于80℃下烘干至恒重,称量干重.

1.4 生理指标测定

叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量: 取新鲜叶片 0.1 g,剪碎,用 95% 乙醇与 80% 丙酮(1∶1) 混合液浸提 24 h,提取液在波长 663、645 和 440nm 下测定吸光度. 并应用公式计算叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量(mg/L).

$$c_a = 12.7A_{663} - 2.69A_{645}$$

$$c_b = 22.9A_{645} - 4.68A_{663}$$

$$c_k = 4.7A_{440} - c_T$$

$$c_T = c_a + c_b = 8.02A_{663} + 20.21A_{645}$$

式中,c_a为叶绿素 a 的浓度,c_b为叶绿素 b 的浓度,c_k为类胡萝卜素的浓度,c_T为叶绿素的总浓度,A 为吸光值.

超氧化物歧化酶(SOD),过氧化氢酶(CAT),丙二醛(MDA)和蛋白含量测定均采用南京建成生物工程公司试剂盒测定.

1.5 数据分析

采用 SPSS 统计软件利用双因素方差分析(TWO-WAY ANOVA)对试验数据差异性进行显著性分析,并对不同生长参数与水位、盐及其相互作用进行相关分析,所有数据均为 3 次重复的平均值,并在 0.05 水平进行显著性分析.

2 结果与分析

2.1 不同地下水位与盐处理对植物生长的影响

2.1.1 不同地下水位与盐处理对株高与分枝数的影响

由图 1、表 1 可知,不同地下水位,盐浓度以及其交互作用对盐地碱蓬幼苗高度具有显著影响

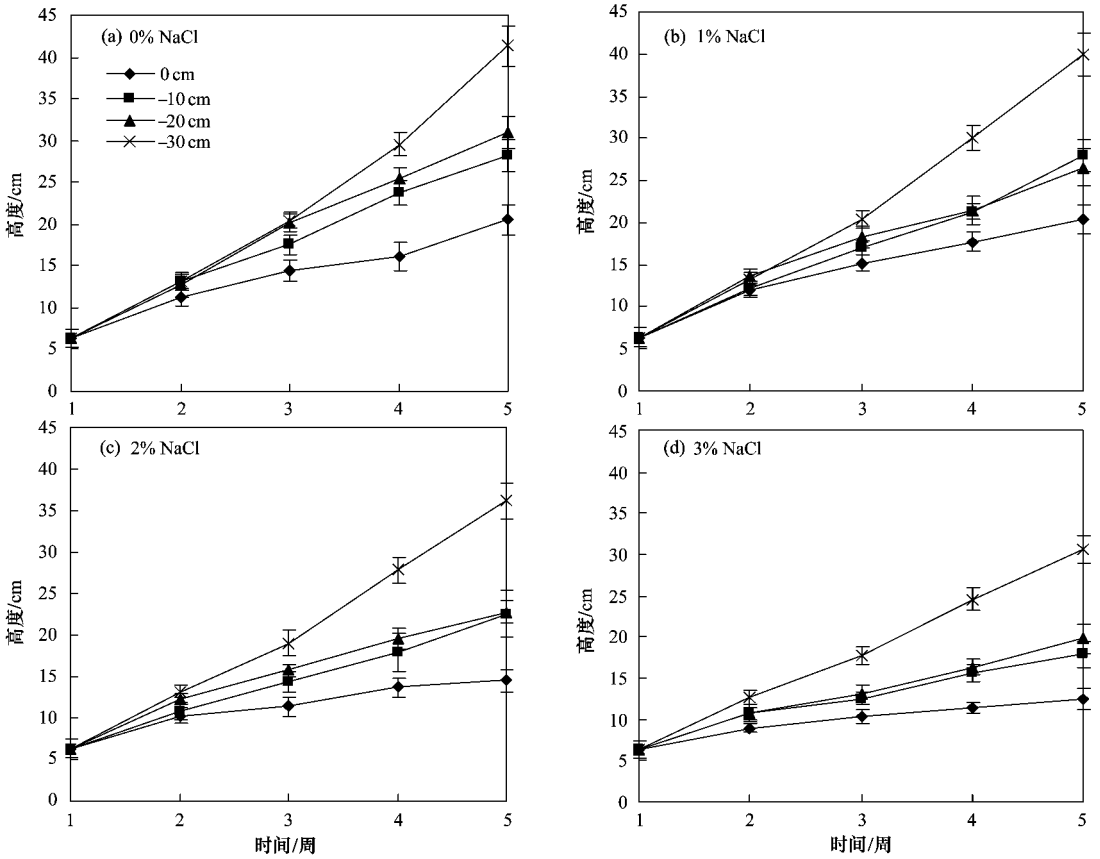


图 1 不同水位及盐梯度处理下盐地碱蓬幼苗株高变化

Fig. 1 Changes of *S. salsa* seedling height in different water table and salt treatments

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

($p<0.01$). 相同水位情况下盐地碱蓬高度随着盐浓度升高而显著降低($p<0.001$),0% 盐条件下株高最高. 随着地下水位的降低,盐地碱蓬植株高度变化速度显著增加($p<0.001$),相同盐浓度下,0 cm 水位盐地碱蓬高度最小; -10 cm 和 -20 cm 水位下的植物高度差异不显著; 水位深度为 -30 cm 时,植株高度达到最大. 盐地碱蓬幼苗的分枝数与水位深度呈正相关, 0 cm 水位下分枝数最少(图 2). 但在 0 cm 水位条件下,不同盐浓度对分枝数影响差异显著,与 0% 盐处理相比,1% 和 2% 盐浓度能够显著增加盐地碱蓬的分枝数($p<0.05$),3% 的盐浓度与 0% 差异不显著; -30 cm 水位下,分枝数则随着盐浓度的增加而逐渐减少,其中 3% 盐浓度下的分枝数显著低于 0% 和 1%($p<0.05$). 说明相同盐的环境中,较低的水位能够对盐地碱蓬高度及分枝起促进作用,而在不同水位条件下,盐分对幼苗分枝数起不同的作用,水位深度较浅时,适当的盐分能够促进盐地碱蓬产生分枝.

2.1.2　不同水位与盐处理对生物量的影响

由图 3、表 1 可知,不同水位和不同盐浓度盐地碱蓬生物量影响差异显著. 0 cm 水位条件下,盐地碱蓬生物量最低,不同盐浓度对盐地碱蓬生物量积累差异不显著,说明 0 cm 水位条件下水分对于盐地碱蓬生物量积累的影响程度显著高于盐胁迫(图 3). 随着地下水位的降低,盐分对生物量积累影响显著,在 -10 cm 和 -20 cm 水位下不同浓度盐分对总生物量影响差异不显著,但均显著低于对照($p<0.05$),而 -30 cm 水位下,与对照相比,1% 和 2% 的盐浓度对生物量影响差异不显著,3% 盐浓度则显著降低盐地碱蓬生物量积累. 各处理条件下盐地碱蓬幼苗生物量均主要积累于叶片中,占总生物量的 39.6% ~64.1%,而且均随着盐浓度增加,叶片生物量比例增大(图 3),与之相反,根的生物量分配比均随着盐浓度增加而呈降低趋势. 这说明随着盐胁迫的增加,盐地碱蓬的根系所占比例降低,而积累更多的叶片生物量.

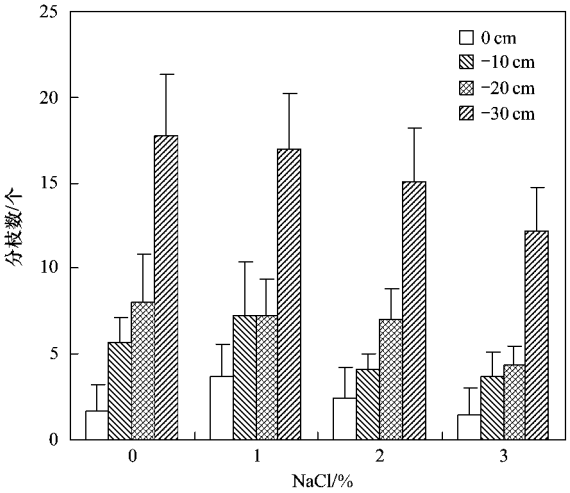
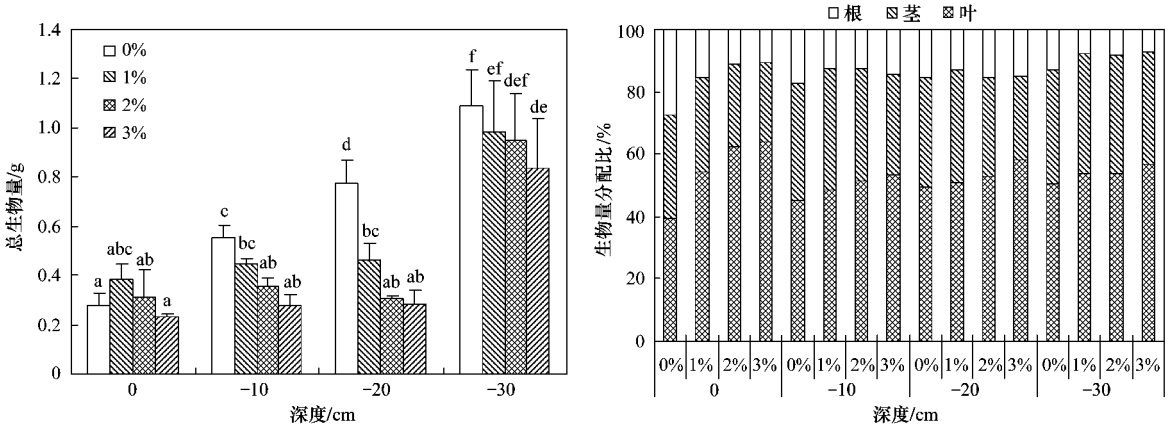


图 2　不同水位及盐梯度处理下盐地碱蓬幼苗分枝数的变化

Fig. 2　Changes of branch numbers of *S. salsa* seedlings in different water table and salt treatments

2.2　不同水位与盐处理对植物叶绿素含量的影响

盐地碱蓬叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量在不同水位和不同盐浓度处理下均出现显著性变化(表 1). 随着地下水位的降低,盐地碱蓬叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量均显著升高(图 4、表 1); 而在同一水位下,叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量随着盐浓度



不同字母代表不同处理间差异显著

图 3　不同水位及盐梯度处理下盐地碱蓬幼苗生物量及根茎叶生物量分配比

Fig. 3　Total biomass and dry weight of different parts of *S. salsa* seedling in different water table and salt treatments

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

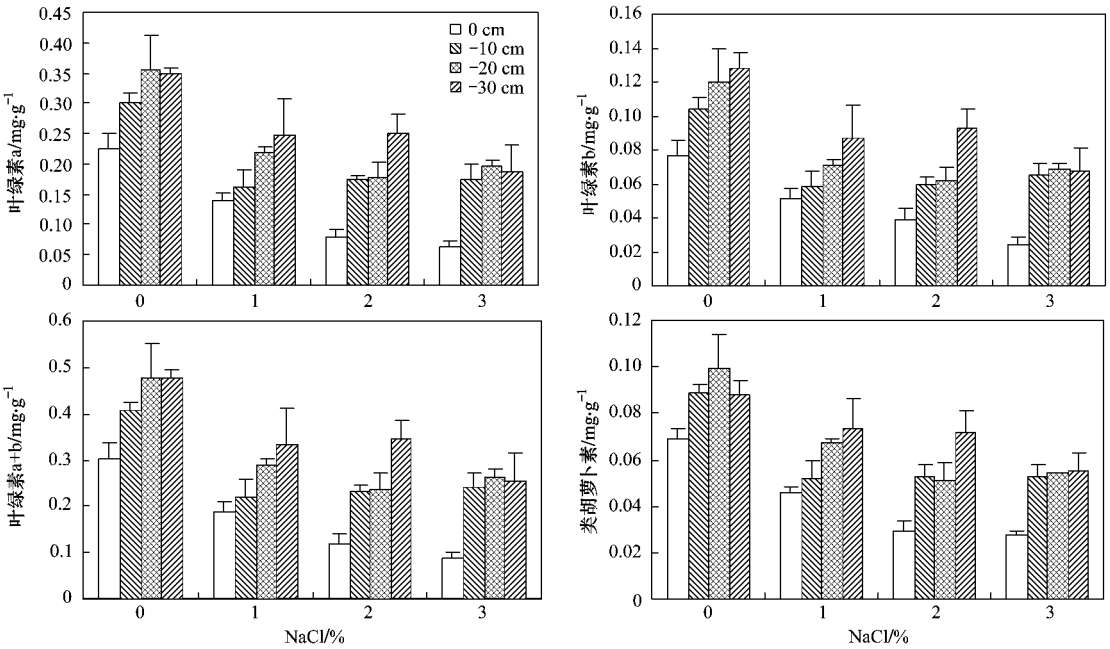


图 4 不同水位及盐梯度处理对盐地碱蓬幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 4 Effects of different water table and salt treatments on leaf chlorophyll content of *S. salsa* seedlings

升高而呈降低趋势(图 4). 其中,0 cm 水位与 3% 盐浓度交互处理下的叶绿素含量最低,0% 盐浓度下的 -20 cm 和 -30 cm 水位处理的叶绿素含量最高.

2.3 不同水位与盐处理对植物抗氧化酶活性的影响

在盐胁迫条件下盐地碱蓬叶片中 SOD 活性升高,SOD 活性受盐胁迫影响差异极显著($p < 0.001$)(表 1). 在相同水位条件下,随着盐浓度的升高 SOD 活性显著升高;而在高盐胁迫条件下,SOD 活性随着地下水位的降低而降低(表 1、2). CAT 活性随盐浓度升高呈现出与 SOD 相同的升高趋势,同一盐浓度处理下,-30 cm 水位 CAT 活性显著高于其他 3 个水位处理. MDA 含量在 0 cm 水位处理中随着盐浓度升高而呈现显著升高趋势,而在其他水位处理下,则呈现先升高后降低趋势. 植物体内蛋白含量随着盐浓度升高呈现整体下降趋势,0% 和 1% 盐处理下,植物体内蛋白随着地下水位的降低而降低;相反,在 2% 和 3% 盐处理下,蛋白则呈现升高趋势(表 2).

表 1 盐地碱蓬生长参数与水位,盐以及其交互作用的相关关系[1)]

Table 1 Relationships between different growth parameters of *S. salsa* seedlings and water table and salt treatments

生长参数	水位	盐	水位×盐
高度/cm	648.889***	197.127***	2.585**
分支数	223.000***	15.197***	1.879(0.06)
生物量(叶)/g	53.379***	3.417(0.029)	1.764(0.115)
生物量(茎)/g	76.193***	12.506***	1.479(0.198)
生物量(根)/g	13.856***	45.608***	1.243(0.305)
叶绿素 a/mg·g^{-1}	38.266***	60.200***	1.534(0.168)
叶绿素 b/mg·g^{-1}	35.475***	55.362***	1.670(0.128)
叶绿素(a+b)/mg·g^{-1}	37.888***	59.650***	1.525(0.172)
类胡萝卜素/mg·g^{-1}	31.850***	64.470***	2.330*
SOD/U·mg^{-1}	24.246***	231.110***	28.916***
CAT/U·mg^{-1}	57.522***	15.879***	5.129***
MDA/mmol·g^{-1}	14.600***	1.914(0.146)	2.546*
蛋白/mg·g^{-1}	8.812***	257.537***	35.237***

1) * 代表 $p < 0.05$ 水平下差异显著;** 代表 $p < 0.01$ 水平下差异显著;*** 代表 $p < 0.001$ 水平下差异显著

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　不同水位及盐梯度处理对盐地碱蓬幼苗抗氧化酶活性以及蛋白含量的影响[1)]

Table 2　Effects of different water table and salt treatments on leaf antioxidative enzymes and protein content of *S. salsa* seedlings

指标	NaCl/%	水位/cm			
		0	−10	−20	−30
SOD/U·mg^{-1}	0	55.00 ± 2.75 a	65.24 ± 2.48 a	73.43 ± 2.52 a	70.54 ± 4.18 a
	1	70.71 ± 5.18 b	82.92 ± 1.67 b	95.57 ± 2.57 b	75.33 ± 4.81 a
	2	137.21 ± 5.55 c	99.93 ± 6.60 c	106.09 ± 2.40 c	99.12 ± 3.81 b
	3	151.58 ± 9.18 d	109.29 ± 3.69 d	102.27 ± 4.78 bc	101.62 ± 5.31 b
CAT/U·mg^{-1}	0	17.09 ± 2.81 a	22.51 ± 0.10 ab	18.54 ± 3.86 a	32.53 ± 3.59 a
	1	16.27 ± 0.61 a	21.26 ± 2.12 a	18.74 ± 1.61 a	27.60 ± 0.53 a
	2	19.41 ± 1.90 ab	27.05 ± 3.34 b	22.47 ± 3.08 ab	29.17 ± 1.87 a
	3	22.77 ± 1.59 b	26.59 ± 0.60 b	27.89 ± 2.30 b	38.06 ± 2.62 b
MDA/mmol·g^{-1}	0	1.01 ± 0.18 a	0.93 ± 0.02 a	1.11 ± 0.09 ab	0.68 ± 0.14 b
	1	2.17 ± 0.82 ab	1.59 ± 0.18 b	1.61 ± 0.19 b	0.65 ± 0.14 b
	2	3.32 ± 0.42 b	1.06 ± 0.31 ab	0.92 ± 0.29 a	0.92 ± 0.13 b
	3	3.82 ± 0.65 b	1.41 ± 0.15 b	1.11 ± 0.28 ab	0.26 ± 0.11 a
蛋白质/mg·g^{-1}	0	5.12 ± 0.11 a	4.29 ± 0.29 a	3.80 ± 0.17 a	4.03 ± 0.19 a
	1	3.75 ± 0.27 b	3.33 ± 0.06 b	2.82 ± 0.24 b	3.39 ± 0.11 b
	2	1.47 ± 0.04 d	2.40 ± 0.05 d	2.61 ± 0.06 b	3.01 ± 0.16 c
	3	1.93 ± 0.16 c	2.96 ± 0.12 c	2.81 ± 0.18 b	2.83 ± 0.14 c

1) 不同字母代表不同盐浓度处理下差异显著

3　讨论

盐地碱蓬是黄河三角洲滨海盐碱湿地系统的先锋物种,而黄河水位变化以及海水侵蚀海岸是导致黄河三角洲海岸环境不断变化的重要因素[15],也是海岸植被经常面临的重要选择压力之一[16]. 植物在盐碱环境中的生长状态主要取决于其根际环境、根深以及植物对水盐的敏感性[17]. 在野外条件下探讨水、盐与植物生长之间的关系是非常困难的,因为盐胁迫对于植物的影响非常复杂并且这种影响很容易受到其他因素的干扰,比如温度、湿度等[18],而在温室控制条件下能够较详细地探讨水盐交互作用与植物生长的关系[19].

相同水位条件下,植株株高、分枝数以及各个器官生物量随盐浓度增加而呈显著性下降趋势. 已有很多研究表明,盐胁迫能够显著降低植物的株高、叶面积指数和干物质含量的积累等生长指标[5,14];而地下水位的降低对盐地碱蓬生长具有显著促进作用,这与 Dickin 等[20] 在 2008 年对小麦的研究结果相似: 水淹能够通过抑制冬小麦根系正常生长而降低其地上生物量和产量的积累. Cui 等[14] 2008 年通过野外调查研究得出在特定野外环境条件下盐地碱蓬的生长最适的水位深度范围. 本试验结果表明,在不同盐浓度下,地下水位的适当降低能够显著促进盐地碱蓬生长. 原因可能是高水位条件下根系周围空气流通率降低,因而导致水淹胁迫,抑制盐地碱蓬生长.

叶绿素含量是表征光和利用效率的最重要指标之一. 段迪等[21] 研究表明处于潮间带的盐地碱蓬叶绿素降低,但同时甜菜红素的含量显著升高; 阮圆等[22] 研究结果表明潮间带生境盐地碱蓬叶绿素 a 和 b 的含量显著低于盐碱地生境的,并认为其可能是因为生长在滨海潮间带逆境下的盐地碱蓬可以减少光能的吸收、传递,避免产生过多自由基(ROS)造成氧化胁迫. 本研究结果与其有相同的趋势,随着盐浓度升高,叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量均显著降低,而地下水位的降低则对叶绿素的积累有明显的促进作用. 表明高盐胁迫抑制或破坏了光系统Ⅱ(PSⅡ)的部分功能,光合作用的能量及电子传递受到抑制,从而导致植物生长受到抑制[23]. 而在类似于潮间带等较高地下水位条件下,植物同样受到水淹胁迫,破坏光合作用部分功能而导致生长受到抑制.

植物在生长过程中为了避免活性氧自由基(ROS)的伤害,在长期进化过程中形成了较完善的防御机制,使活性氧的产生与清除维持在一个平衡状态. 当植物遇到胁迫时,为了避免氧自由基产生的伤害,植物体内就会增加抗氧化酶活性(SOD、POD、CAT 等)以降低活性氧自由基产生的伤害. 本研究结果也证实了此观点,随着盐胁迫的增强,SOD 作为防御 ROS 的第一道防线[8],其活性显著增加,并且随着水淹胁迫的降低,其活性有显著下降的趋

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

势. CAT 活性受盐胁迫产生的变化趋势与 SOD 相似,均显著增加. MDA 含量的高低和细胞质膜的透性变化是反映膜脂过氧化作用强弱和质膜破坏程度的重要指标[24]. 在本研究中,当地下水位深度较深时(-30 cm),与 0% 盐浓度相比,MDA 含量在 3% 浓度盐条件下显著降低,这可能是因为 3% 盐浓度胁迫时盐地碱蓬对质膜过氧化产生的一种防御反应;而在较高地下水位(0 cm)情况下,MDA 含量随着盐浓度升高而升高,说明当盐地碱蓬受到水淹和高盐的双重胁迫时,植物细胞的膜系统会受到严重损伤[25].

4 结论

(1) 盐地碱蓬作为黄河三角洲滨海盐碱湿地的先锋物种,能够适应不同的水盐环境,并且在不同环境中,其生长状态不同. 在 -30 cm 水位和 0% 盐的交互作用下幼苗总生物量达到最高,为 1.09 g/株,而 0 cm 水位深度和 3% 盐胁迫的交互作用下其总生物量为 0.23 g/株,仅为最高生物量的 21%. 地下水位较深时,盐地碱蓬可以积累更多的生物量,产生更多的分枝,并通过增加地上器官生物量分配比来抵御根系所经受的盐分胁迫.

(2) 不同水盐处理下,盐地碱蓬叶绿素 a、b 以及类胡萝卜素含量产生显著性差异. 在 -30 cm 水位和 0% 盐的交互作用下,叶绿素 a、b 以及类胡萝卜素含量达到最高,而 0 cm 水位深度和 3% 盐胁迫的交互作用下各叶绿素含量最低. 说明在水淹和高盐双重胁迫条件下,盐地碱蓬光系统Ⅱ(PSⅡ)的部分功能受到抑制或破坏,光合作用的能量及电子传递受到抑制,叶绿素含量降低,从而导致植物生长受到抑制.

(3) 在胁迫条件下,盐地碱蓬能够通过增加抗氧化酶活性(SOD、POD、CAT 等)来降低活性氧自由基产生的伤害. 0 cm 水位条件下,SOD 活性从 55.00 U/mg(0% NaCl)增加到 151.58 U/mg(3% NaCl);而当地下水位下降时,SOD 活性下降,但 CAT 活性在 -30 cm 水位深度时最高;在 0 和 -10 cm 水位下,丙二醛(MDA)含量随盐浓度增加而增加,-30 cm 水位下,MDA 含量在 3% 盐浓度时为 0.26 mmol/g,仅为其他盐浓度下的 28% ~40%;蛋白含量受地下水位,盐浓度以及两者相互作用影响呈显著相关性.

(4) 结果均表明盐地碱蓬能够通过调节形态特征,生物量分配比例以及改变体内抗氧化胁迫物质含量来适应不同的生存环境,这正是盐地碱蓬在滨海湿地潮间带不同水盐环境中能够长期生存的适应性机制.

致谢:感谢山东省黄河三角洲生态环境研究中心各位老师在试验过程中所提供的帮助. 感谢吴惠丰研究员(博士)帮助修改论文英文摘要.

参考文献:

[1] 张晓龙. 现代黄河三角洲滨海湿地环境演变及退化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.

[2] Cui B S, Yang Q C, Yang Z F, *et al*. Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**: 1090-1103.

[3] Yang J F, Wan S Q, Deng W, *et al*. Water fluxes at a fluctuating water table and groundwater contributions to wheat water use in the lower Yellow River flood plain, China [J]. Hydrological Processes, 2007, **21**: 717-724.

[4] Xie T, Liu X H, Sun T. The effects of groundwater table and flood irrigation strategies on soil water and salt dynamics and reed water use in the Yellow River Delta, China [J]. Ecological Modelling, 2011, **222**: 241-252.

[5] Liu X J, Yang Y M, Li W Q, *et al*. Interactive effects of sodium chloride and nitrogen on growth and ion accumulation of a halophyte [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, **35**: 2111-2123.

[6] Wei Y, Xu X, Tao H, *et al*. Growth performance and physiological response in the halophyte *Lycium barbarum* grown at salt-affected soil [J]. Annals of Applied Biology, 2006, **149**: 263-269.

[7] 王宝增, 刘玉杰. 低浓度 NaCl 对非盐生植物小麦的生理效应 [J]. 南京农业大学学报, 2009, **32**(2): 15-19.

[8] Gomez J M, Jimenez A, Olmos E, *et al*. Location and effects of long-term NaCl stress on superoxide dismutase and ascorbate peroxidase isoenzymes of pea (*Pisum sativum* cv. Puget) chloroplasts [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, **55**: 119-130.

[9] 刘红玉, 吕宪国, 刘振乾. 环渤海三角洲湿地资源研究 [J]. 自然资源学报, 2001, **16**(2): 101-106.

[10] 徐学工, 林辉平, 付在毅. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, **37**(1): 111-118.

[11] 时连强, 李九发, 应铭, 等. 近、现代黄河三角洲发育演变研究进展 [J]. 海洋科学进展, 2005, **23**(1): 97-102.

[12] 于君宝, 陈小兵, 孙志高, 等. 黄河三角洲新生滨海湿地土壤营养元素空间分布特征 [J]. 环境科学学报, 2010, **30**(4): 855-861.

[13] 董洪芳, 于君宝, 孙志高, 等. 黄河口滨岸潮滩湿地植物-土壤系统有机碳空间分布特征 [J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1594-1599.

[14] Cui B S, He Q, Zhao X S. Ecological thresholds of *Suaeda salsa* to the environmental gradients of water table depth and soil salinity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(4): 1408-1418.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[15] 张晓龙，李培英. 现代黄河三角洲的海岸侵蚀及其环境影响[J]. 海洋环境科学，2008，**27**(5)：475–479.

[16] Short F T，Neckles H A. The effects of global climate change on sea grasses [J]. Aquatic Botany，1999，**63**: 169–196.

[17] Shannon M C. Adaptation of plants to salinity [J]. Advances in Agronomy，1997，**60**: 75–120.

[18] Zeng L，Lesch S M，Grieve C M. Rice growth and yield respond to changes in water depth and salinity stress [J]. Agriculture Water Management，2003，**59**: 67–75.

[19] Zheng Y，Wang Z，Sun X，*et al*. Higher salinity tolerance cultivars of winter wheat relieved senescence at reproductive stage [J]. Environmental and Experimental Botany，2008，**62**: 129–138.

[20] Dickin E，Wright D. The effects of winter waterlogging and summer drought on the growth and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. European Journal of Agronomy，2008，**28**: 234–244.

[21] 段迪，杨青，李涛，等. 紫红色表型盐地碱蓬叶片营养成分分析[J]. 山东师范大学学报(自然科学版) 2008，**23**(3)：118–120.

[22] 阮圆，刘彧，王宝山. 不同自然盐渍生境下盐地碱蓬叶片色素积累及光合特性的研究[J]. 山东师范大学学报(自然科学版)，2008，**23**(1)：114–117.

[23] Jarunee J，Kenjiusui，Hiroshi M. Differences in physiological responses to NaCl between salt-tolerant *Sesbania rostrata* Brem. and Oberm. and non-tolerant *Phaseolus vulgaris* L. [J]. Weed Biology and Management，2003，**3**: 21–27.

[24] 陈少裕. 脂膜过氧化与植物逆境胁迫[J]. 植物学通报，1989，**6**(4)：211–217.

[25] 毛桂莲，张春梅，许兴. NaCl 胁迫对枸杞幼苗活性氧的产生和保护酶活性的影响[J]. 农业科学研究，2005，**26**(4)：21–24.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net