

DOI: 10.5846/stxb202003250678

张超凡, 燕红, 潘丽铭, 姚明远, 刘庚, 李伟东, 齐巍, 马琼芳. 不同水盐条件对三江藭草生长和生物量分配的影响. 生态学报, 2021, 41(16): 6580-6587.
Zhang C F, Yan H, Pan L M, Yao M Y, Liu G, Li W D, Qi W, Ma Q F. Effects of water levels and salinity on growth and biomass allocation of *Scirpus nipponicus*. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6580-6587.

不同水盐条件对三江藭草生长和生物量分配的影响

张超凡^{1,2}, 燕红^{1,2}, 潘丽铭^{1,2}, 姚明远^{1,2}, 刘庚^{1,2}, 李伟东^{1,2}, 齐巍³, 马琼芳^{1,2,*}

1 吉林省林业科学研究院, 长春 130033

2 长白山湿地与生态吉林省联合重点实验室, 长春 130102

3 吉林龙湾国家级自然保护区管理局, 通化 135102

摘要:水、盐条件是盐沼生态系统最重要的环境因子, 直接影响着植物的生长和繁殖。以莫莫格湿地优势植物三江藭草 (*Scirpus nipponicus*) 为研究对象, 探究不同水盐条件及其交互作用对湿地植物三江藭草功能性状和生物量分配格局的影响, 以期加深对湿地盐渍化背景下内陆盐沼植物生态适应对策的了解, 为指导湿地水盐管理和植被生态恢复提供基础数据。实验采用室内模拟控制水盐条件的方法, 设置盐度 (300、1000、2000、3000、4000 mg/L 和 5000 mg/L) 和水位 (-10、0、20、40、60 cm 和 80 cm) 各 6 个梯度处理, 结果表明, 三江藭草株高变化仅受水位处理的影响 ($P < 0.05$), 随水位的升高株高呈现先增加后下降的趋势; 株数变化仅受盐度处理的影响, 并且受水位的限制, 适宜盐度能促进浅水域植株分株数增加; 水位、盐度和二者的交互作用对三江藭草生物量积累及其分配均产生显著影响, 随着水位和盐度的升高, 三江藭草球茎、地下、地上和单株总生物量均呈先增加后降低的趋势; 生物量分配受水盐交互作用较明显, 在 1000、2000 mg/L 和 3000 mg/L 盐度处理时, 随着水位升高球茎生物量分配和地下生物量分配增加, 地上生物量分配减少。综合三江藭草的生长特征和生物量累积, 认为其在 40—80 cm 水位和 1000—3000 mg/L 盐分处理环境中生长状态较好, 适宜的盐分处理可以增加三江藭草对水深的耐受程度。

关键词:湿地植物; 水位; 盐度; 功能性状; 生物量分配

Effects of water levels and salinity on growth and biomass allocation of *Scirpus nipponicus*

ZHANG Chaofan^{1,2}, YAN Hong^{1,2}, PAN Liming^{1,2}, YAO Mingyuan^{1,2}, LIU Geng^{1,2}, LI Weidong^{1,2}, QI Wei³, MA Qiongfang^{1,2,*}

1 Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China

2 Jilin Provincial Joint Key Laboratory of Changbai Mountain Wetland and Ecology, Changchun 130102, China

3 Jilin Longwan National Nature Reserve Administration, Tonghua 135102, China

Abstract: Hydrology and salinity are the most important environmental factors in the salt marsh ecology system, they directly affect the growth and reproduction of wetland plants. In order to better understand the ecological adaptation strategies of saltmarsh plants under the background of salinization of wetlands, and to provide theoretical and technical support for water—salt manipulation and wetland vegetation restoration, the *Scirpus nipponicus* was selected as the experimental material to study the effects of water levels and salinity on its growth traits and the biomass allocation in Momoge National Nature Reserve. The tested soil was collected in June 2019 from the study area, its salinity was 0.512 ± 0 .

基金项目:吉林省公益性科研院所科研项目 (GY-2020-06); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0500407); 吉林省林业重大科技攻关计划 (2015-004)

收稿日期: 2020-03-25; 网络出版日期: 2021-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: youzi841128@qq.com

0038 g/L. The *S. nipponicus* seedlings were cultivated outdoors for 3 weeks before the experiment. We carried out a controlled experiment with six levels of salinity (300, 1000, 2000, 3000, 4000 mg/L and 5000 mg/L) and six water levels (-10, 0, 20, 40, 60 cm and 80 cm). The salinity was controlled by mixing NaCl with NaHCO_3 (molar ratio was 2:1), and the water level was controlled by platforms of different heights. The experiment lasted for 60 days. The individual height and ramet number were determined directly. The biomass of tuber, and the underground, aboveground parts and total biomass were determined after drying to constant weight at 65°C. The biomass allocation indexes included tuber biomass allocation (tuber biomass/total biomass), underground biomass allocation (underground biomass/total biomass), and aboveground biomass allocation (aboveground biomass/total biomass). The results showed that the water level significantly affected individual height ($P < 0.05$), individual height increased first and then decreased with water level increasing. The ramet number was significantly affected by salinity, and it was limited by water level. The ramet number in shallow water increased at the appropriate salinity. The water level, salinity and their interaction significantly affected the biomass accumulation and allocation of *S. nipponicus*. The biomass of tuber, and the underground, aboveground parts and total biomass all increased first and then decreased with water level and salinity increasing. The total biomass was higher (3.24—3.71 g) at the salinity of 1000—3000 mg/L and the water level of 80 cm. The biomass allocation was significantly affected by water level-salinity interaction. At the salinity of 1000, 2000 mg/L and 3000 mg/L, the tuber biomass allocation and underground biomass allocation increased and the aboveground biomass allocation decreased with the water level increasing. This suggested that *S. nipponicus* focused on asexual reproduction to adapt to rising water levels. In summary, *S. nipponicus* grew well at the water level of 40—80 cm and the salinity of 1000—3000 mg/L. The tolerance of *S. nipponicus* to the water level increased at the appropriate salinity, while the threshold reduced at high salinity.

Key Words: wetland plant; water level; salinity; functional traits; biomass allocation

湿地是连接陆地生态系统与水生生态系统之间的过渡带,其独特的生态环境在物种基因保护、稳定全球气候及资源利用等方面发挥着重要的作用^[1]。在湿地生态系统中,水文情势和盐分是影响湿地植被分布与演替的关键因素^[2]。水位波动和洪水等水文过程是湿地最重要的生态过程之一,对湿地中物种分布格局和植被组成具有决定性作用^[3-4]。盐分是盐碱湿地的主控环境因子,湿地盐渍化直接导致生物多样性的丧失和生态服务功能的下降。目前,全球气候变化和人类活动导致的水文情势改变与盐分聚集已造成大面积的湿地退化和盐渍化,并严重威胁全球湿地生态系统的稳定和健康^[2,5-7]。在此背景下,开展湿地水盐条件变化和植物生理生态相互关系的研究,揭示生境变化对植物种群分布格局的影响,有利于维护湿地生态系统的稳定和健康。

湿地植被作为湿地生态系统的三大重要组成成分之一,能综合反映湿地生态环境的基本特点与功能特性^[8]。植物为了抵御环境胁迫,可以通过调整其功能性状和生物量分配格局来增强对逆境的适应,提高获取限制性资源的能力,维持自身的生长发育,该策略是植物对环境异质性胁迫生态适应对策的重要体现^[9-10]。由于特殊的生长环境,湿地植物经常遭受水文条件的大幅度变化,在长期的适应进化过程中形成了调整生活史、形态学特征和生理生化等方面的各种生存策略^[11]。因此,研究湿地植被对不同水盐环境下的生态响应特征和规律,对于了解湿地植物在环境胁迫下的生存策略、植被分布格局及演替规律等方面有着重要的理论意义和实践价值。

莫莫格国家级自然保护区位于松嫩平原西部边缘,是典型的盐碱湿地类型保护区,也是濒危物种白鹤(*Grus leucogeranus*)、丹顶鹤(*Grus japonensis*)、东方白鹤(*Ciconia boyciana*)等珍禽的重要栖息地、繁殖地和东亚候鸟南北迁徙主干线上的重要停歇中转站。该保护区广泛分布着三江藯草(*Scirpus nipponicus*)群落。三江藯草的地下球茎中含有丰富的淀粉和蛋白质,是白鹤和其他一些植食性水禽的重要食源,其生长情况直接影响水禽的生境质量。近年来,莫莫格保护区由于降水量减少等气候变化和人为活动干扰,湿地盐碱化加剧,部分

区域的三江蘆草原生境淹没,无法正常生长发育^[12-13]。因此,本研究以莫莫格湿地典型湿地植物三江蘆草为研究对象,探究水位和盐度变化对三江蘆草生长和生物量分配的影响,弥补水、盐相互作用对内陆盐沼植物影响研究方面的不足,有助于深入阐明三江蘆草对水盐条件变化的适应性及其响应机制,为保护珍稀物种白鹤栖息环境、指导湿地水盐管理和植被生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

莫莫格国家级自然保护区位于松嫩平原西部吉林省白城市镇赉县东南端,地理坐标为北纬 45°42′25″—46°18′00″,东经 123°27′00″—124°4′34″。保护区 2013 年加入国际重要湿地名录,总面积 14.4 万 hm^2 ,其中 80%以上为湿地,是东亚候鸟南北迁徙的主要途经地。样地海拔约为 142 m,区内地势较平坦,相对高差仅 2—10 m。气候春秋干旱、夏季多雨、冬季少雪,属温带大陆性季风气候,年均温度 4.2℃,多年平均降水量 391.8 mm,年平均蒸发量达 1553 mm。该地区土壤类型主要为沼泽土,沿江、河地区分布有草甸土、黑钙土和冲积土,有机质含量一般在 1.00—9.37%之间。区内植被属大兴安岭植物区系,以低湿草甸和草原草甸为基本类型。

1.2 实验材料

于 2019 年 6 月中旬采集莫莫格自然保护区鹅头泡内三江蘆草幼苗和湿地混合土壤,选取长势一致的同等数量(3 株)幼苗栽种到规格为 25 cm×25 cm 的小实验桶中,土壤厚度为 20 cm,共 36 桶。每日浇水保持土壤表面湿润,根据幼苗长势,室外培养 3 周后开始实验。结合野外调查数据及该地区以往研究结果,鹅头泡内土壤以苏打盐渍土(Na^+ 、 HCO_3^- 含量高)为主,土壤含盐量为 (0.512 ± 0.0038) g/L(利用 5:1 水土比测定),水体 pH 常年高于 8.0,属于 HCO_3^- -Na 型水体,全盐量约为 200—1500 mg/L。实验设置为 6 种水位梯度和 6 种盐度梯度交互处理,将实验桶放入大水池(1.5 m×1.5 m×1.3 m)中,利用不同高度的支撑平台来控制水位,其梯度设置为 -10、0、20、40、60、80 cm,其中负号代表水位低于土壤表面。盐度梯度设置为 300、1000、2000、3000、4000 mg/L 和 5000 mg/L,盐水采用混合盐 NaCl 和 NaHCO_3 ,按 2:1 的摩尔比配制而成。

1.3 实验方法

实验共持续 60 d,实验结束时,将塑料桶中三江蘆草整株取出,在室内用水冲洗干净后测定三江蘆草植株的株高、分株数。测量后,将三江蘆草分解为根、球茎、地上部分共 3 个部分,在 65℃ 条件下烘干至恒重,记录其生物量参数(球茎生物量、地下生物量、地上生物量、单株总生物量),并计算生物量分配指标。其中,生物量分配指标包括球茎生物量分配(球茎生物量/总生物量)、地下生物量分配(地下生物量/总生物量)、地上生物量分配(地上生物量/总生物量)。

1.4 数据处理

通过双因素方差分析(Two-way ANOVA)方法分析不同水位、盐度处理及二者交互作用对三江蘆草各功能性状指标的影响,采用 Tukey 多重比较方法进行后续检验,统计显著性水平设置为 0.05。数据在分析前对方差的齐次性和正态分布性作检验,不符合要求的进行数据转换使之符合统计要求。数据的处理分析及绘图采用统计软件包 IBM SPSS Statistics 22 和 SigmaPlot 12.5 统计软件完成。

2 结果

2.1 水位和盐浓度对三江蘆草生长的影响

双因素方差分析(表 1)表明,仅水位梯度对三江蘆草株高具有显著影响($P < 0.05$),盐度及两者交互作用则不存在显著影响($P > 0.05$)。在相同盐浓度梯度下,随着水位的增加,三江蘆草成株株高均呈现先增加后下降的趋势(图 1),在 300、1000 mg/L 和 2000 mg/L 盐度处理中,株高于 20 cm 水位处取得最大值,分别为 1.61、1.45 m 和 1.6 m;在 3000、4000 mg/L 和 5000 mg/L 盐度处理中,于 0 cm 处取得最大值,分别为 1.67、1.36 m 和

1.5 m。在相同水位梯度下,株高随盐度变化没有规律的趋势,且仅在-10 cm 和 20 cm 水位时,株高在不同盐度间有显著性差异($P < 0.05$),均表现为低盐度处理高于高盐度处理,其余水位条件下株高没有显著差别。

表 1 不同水位和盐度梯度下三江藦草功能性状响应的双因素方差分析

指标 Parameters	水位 Water level/cm		盐度 Salinity/(mg/L)		水位×盐度 Water level×Salinity	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
株高 Height/m	4.825	0.001 ***	1.501	0.200	0.969	0.516
株数 Number/株	0.679	0.641	5.774	<0.001 ***	0.992	0.489

如图 1 所示,在相同盐度条件下,三江藦草成株株数随水位升高呈波动变化趋势,且水位梯度及其与盐度处理的交互作用对株数的影响不显著($P > 0.05$,表 1)。在相同水位条件下,仅在 0 和-10 cm 处,即三江藦草植株处于水面以上的状态时,株数在不同盐度间有显著性差异($P < 0.05$),3000 mg/L 盐度处理的成株株数取得最大值,盐度处理显著影响三江藦草成株的株数(表 1),但随着水位的升高,不同盐度处理间成株株数差异不显著。

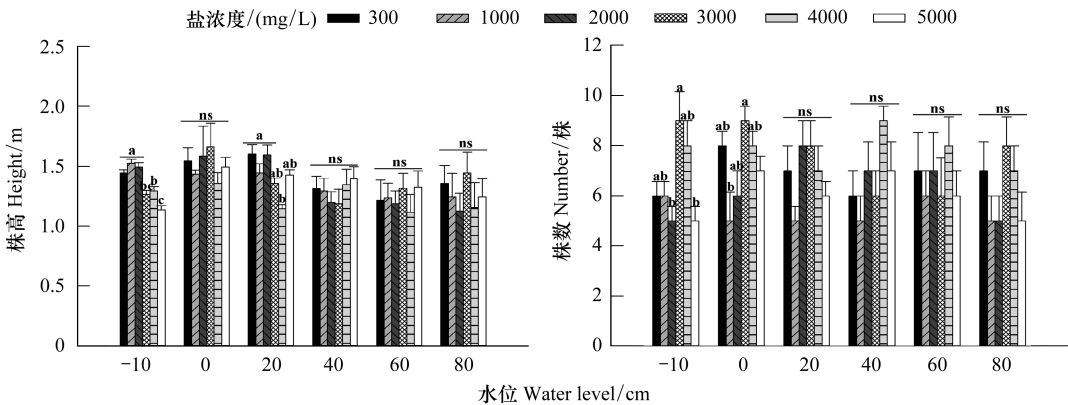


图 1 水位和盐浓度对三江藦草生长的影响(平均值±标准误差)

Fig.1 The effect of water level and salinity concentration treatments on growth of *S. nipponicus* (Mean ± SE)

不同小写字母代表在相同水位条件下,不同盐分之间差异显著 ($P < 0.05$),ns 表示差异不显著

2.2 水位和盐浓度对三江藦草生物量积累的影响

三江藦草的球茎、地下、地上生物量和单株总生物量在不同的水位梯度、盐度及其交互作用下均存在显著差异($P < 0.05$,表 2)。在 300、4000、5000 mg/L 盐度处理下,三江藦草的球茎、地下、地上生物量和单株总生物量均随水位的升高呈现先上升后下降的趋势,其中球茎生物量于 40 cm 水位处达到最大值,地下、地上生物量和单株总生物量于 60 cm 处达到最大值(图 2);在 1000、2000、3000 mg/L 盐度处理下,三江藦草的球茎、地下、地上生物量和单株总生物量变化趋势一致,均随水位的升高而升高,并于 80 cm 水位处达到最大值(图 2)。

表 2 不同水位和盐度梯度下三江藦草生物量响应的双因素方差分析

指标 Parameters	水位 Water level/cm		盐度 Salinity/(mg/L)		水位×盐度 Water level×Salinity	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
球茎生物量 Tuber biomass/g	795.207	<0.001 ***	72.521	<0.001 ***	41.853	<0.001 ***
地下生物量 Underground biomass/g	492.831	<0.001 ***	83.811	<0.001 ***	17.360	<0.001 ***
地上生物量 Aboveground biomass/g	215.535	<0.001 ***	201.560	<0.001 ***	9.655	<0.001 ***
单株总生物量 Total biomass per plant/g	760.526	<0.001 ***	262.594	<0.001 ***	14.371	<0.001 ***

在-10 cm 水位条件下,除 300 mg/L 盐度处理有球茎产生,其余盐度处理均无球茎的生成,故未在图中显示。总体上,在相同水位条件下,三江藨草的球茎、地下、地上和单株总生物量随盐度的升高呈先上升后下降的趋势(图 2),具体表现为:1000、2000、3000 mg/L 盐度处理显著高于 300、4000、5000 mg/L 盐度处理。

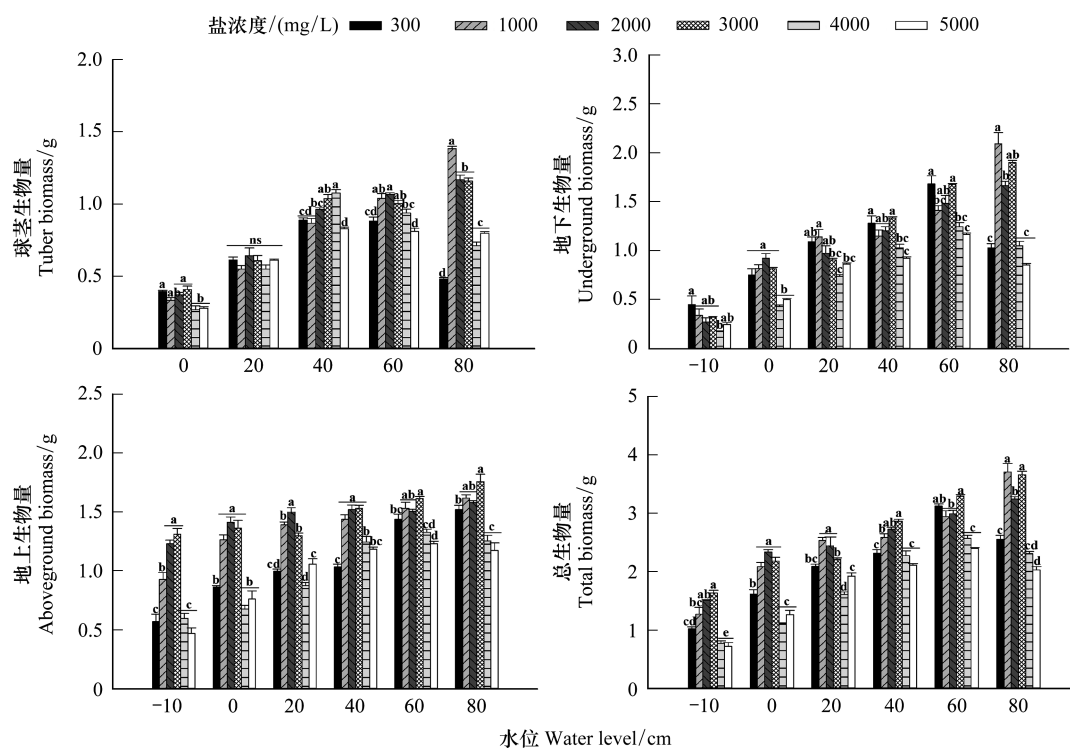


图 2 水位和盐浓度对三江藨草生物量的影响

Fig.2 The effect of water level and salinity concentration treatments on biomass of *S. nipponicus*

2.3 水位和盐浓度对三江藨草生物量分配的影响

三江藨草的球茎生物量分配、地下生物量分配和地上生物量分配在不同的水位梯度、盐度及其交互作用下均存在显著差异($P < 0.05$)。如图 3 所示,在 300、3000 mg/L 和 4000 mg/L 盐度处理下,三江藨草球茎生物量分配随水位的升高,表现为先升高后下降的单峰变化趋势,均在 40 cm 水位处达到最高值,分别占单株总生物量的 38.5%、36.21%和 47.41%,在 1000 mg/L 和 2000 mg/L 盐度处理下,球茎生物量分配呈上升趋势,在 5000 mg/L 盐度处理下则表现为 40 cm 和 80 cm 水位处的双峰变化趋势;三江藨草地下生物量分配在 300、4000 mg/L 和 5000 mg/L 盐度处理时,随水位的升高呈现先上升后下降的趋势,均于 60 cm 水位处取得最大值,分别为 53.9%、48.36%和 48.69%,在其余盐度处理条件下,随水位变化普遍呈现上升趋势;三江藨草地上生物量分配在 300、4000 mg/L 和 5000 mg/L 盐度处理时表现为“U 型”变化,于 60 cm 水位处取得最小值,分别为 46.1%、51.64%和 51.31%,其余则普遍呈下降趋势。

在 0—40 cm 水位条件下,三江藨草球茎生物量分配随水位的升高表现为先下降后升高的变化趋势,300、4000 mg/L 和 5000 mg/L 盐度处理显著高于其他处理,而在 60 cm 和 80 cm 水位处,300 mg/L 盐度处理显著低于其他处理(图 3);三江藨草地下生物量分配在-10—60 cm 水位条件时均表现为 300 mg/L 盐度处理显著高于其他处理,而在 80 cm 水位时表现为:300、4000 mg/L 和 5000 mg/L 盐度处理显著低于其他处理(图 3);三江藨草地上生物量分配随水位变化趋势与地下生物量分配相反(图 3)。

3 讨论

水位波动是自然环境中不可避免的环境变量,其对湿地植被的影响是不容忽视的,植物的地上部分变化

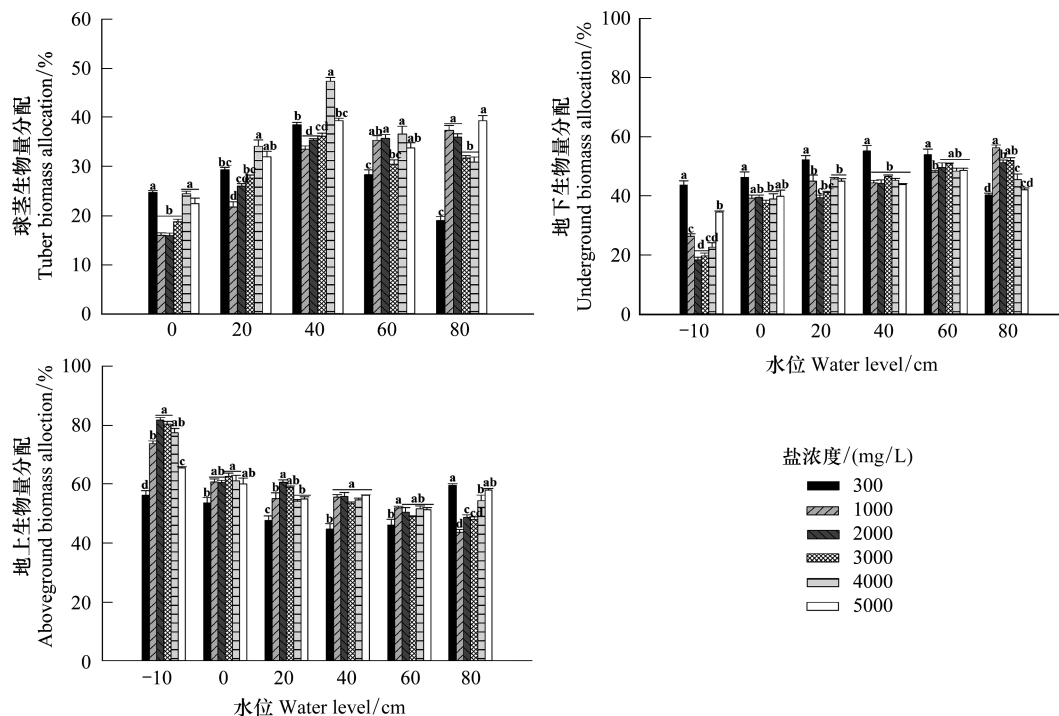


图3 水位和盐浓度对三江藴草生物量分配的影响

Fig.3 The effect of water level and salinity concentration treatments on biomass allocation of *S. nipponicus*

如株高、茎长、叶面积等是对水位变化最直观响应^[14]。本研究发现,水位变化显著影响三江藴草株高,但对其分株数无显著影响,随水位的升高三江藴草株高呈现先增加后下降的趋势,在0—20 cm水位处达到最大值。大量的野外及室内实验表明,在适宜的水位条件下,水位升高能够促进湿地植物株高生长^[15-16],而水位过高则会限制其生长^[13]。由于淹水环境中氧气和光照资源的限制,植物需要通过伸长茎部或节间距生长到水面之上,来获取更多的资源^[17-18],促进空气与植物体间的交换,满足植物自身生长的需求。还有部分植物会在体内积累植物激素乙烯,赤霉素等诱导基因表达,使其节间伸长^[19]。本研究中,三江藴草是莎草科藴草属(*Scirpus*)的大型挺水植物^[20],在淹水条件下,挺水植物为减轻水淹胁迫作用造成的危害,通过茎长伸长的方式形成发达的通气组织是一种非常重要的生存机制^[11,21],在20 cm水位处三江藴草的株高达到最大值。而当水深超过一定深度后,植物体内部O₂运输受限,浓度降低,植物的生长速率降低^[22-23]。三江藴草茎秆柔软,呈三棱形,这种生理形态使其在高水位条件下易折断。因此当水位过高时,三江藴草株高降低,植株向上伸长生长逐步转变为横向生长,增强茎部的组织生长以保证在高水位条件下生存。Gibberd M R等^[24]研究表明,多数湿地植物组织间孔隙度在水淹后迅速提高,且孔隙度随着直径的增加而增加。

三江藴草各部分生物量及生物量分配均受到水位的显著影响,就生物量而言,当水位超过40 cm时,三江藴草各部分生物量较高,表明高水位更利于三江藴草的生长。生物量的变化是湿地植物应对外界环境改变的综合响应^[25],湿生植物和挺水植物对水位变化的响应具有相似的规律^[14],荆三棱^[26]、菖蒲^[27]、梭鱼草^[28]等生物量积累随着水位升高有所增加。这可能是受植物固有的生态位影响,在植物自身耐受阈值内水位上升,有利于湿地植物的生长,如芦苇通常出现在湿地中较高区域的上部边缘,这些区域一般淹水较浅或仅有间歇性淹水^[29],古勇波等综合三江藴草幼苗的生长特征和生物量累积对不同水位处理的响应,认为其生长的最适宜水位为35 cm^[30]。在生物量分配方面,三江藴草的球茎生物量分配和地下生物量分配随水位升高而增加,地上生物量分配则表现为下降。这与以往研究不同,大多数研究表明^[26,30-31],随着水位的增加,植物通常会通过增加地上部分生物量分配比例以增加与空气的接触面积,提高氧气的获取速率。这可能是由于随着水深的增加,三江藴草地下生物量中球茎生物量的比重增加,即高水位环境中,三江藴草以无性繁殖方式达到生存和

发展的目的。尽管地下生物量呈上升趋势,但地上生物量总体高于地下,可以满足三江藯草在高水位环境中对氧气和光照的需求。

盐分主要是通过离子毒害、渗透胁迫或二者交互作用对植物产生影响^[32]。在本次试验中,盐浓度对三江藯草分株数有显著影响,但盐度对其株高无显著影响。已有实验证明植物对盐胁迫具有一定的耐受性,在植物的耐受阈值内,一定的盐分会促进植物生长^[33],如盐地碱蓬在地下水位较浅时,添加 1% 的 NaCl 溶液能显著增加其分株数^[34],三江藯草幼苗在 pH 为 7.57, Na⁺ 浓度为 25 mmol/L 时,其分株数增加,随着盐碱水平的增加,其株高、分株数和球茎显著降低,甚至在高盐碱水平(pH 为 10.42, Na⁺ 浓度为 200 mmol/L)处理下,三江藯草幼苗全部死亡^[35]。本研究也得到了相似的结论,这可能是因为具有克隆繁殖特性的植物在受到盐胁迫时,会增强其根状茎或其他克隆组织进行无性繁殖的能力^[36]。同时本研究发现盐度对分株数的影响受水位的限制,适宜盐度促进浅水域植株的分株数增加,Salter 等^[37]对 *Melaleuca ericifolia* Sm. 的研究也表明,盐度可能会限制水生植物对水的耐受范围。在盐胁迫条件下,环境中的渗透压发生改变,植物需要消耗大量的 ATP^[38]或通过其他生理生化方式进行调节,此时水位升高会加剧环境对植物的压迫,致使其生长、繁殖能力下降。

盐分也显著影响三江藯草各部分生物量及生物量分配,且盐分和水位的交互作用对三江藯草生长影响显著,在低浓度和高浓度盐分处理时,三江藯草生物量于 40 cm 水位达到最大,而中浓度盐分环境中,三江藯草生物量于 80 cm 水位达到最大,这进一步说明适宜的盐分处理可以增加三江藯草对水深的耐受程度,而高盐分会降低其对水位的耐受阈值。同时,本研究发现高盐分导致三江藯草地下生物量分配减少。这可能是由于湿地植物主要依靠根系吸收环境中盐分等营养物质,通过减少地下部分的比重可以减少对盐分的吸收,从而降低盐分胁迫对植物的危害^[39],如盐地碱蓬、芦苇和海滨锦葵等随盐处理浓度的增加,地下部分生物量减少,表明植物在高盐条件下,可以通过减少地下部分如根和根状茎的生物量分配比例来增强自身的适应性^[34,40]。

4 结论

三江藯草的生长和生物量分配对环境水盐条件变化的响应显著,随着水位和盐度的升高,三江藯草球茎、地下、地上和单株总生物量均呈先增加后降低的趋势,株高和株数呈波动变化,适宜的水位能够促进三江藯草的株高增加和生物量积累。高水位环境中,植株对地下部分(包括根和球茎)的投资增加,表明三江藯草侧重无性繁殖方式来适应水位升高的变化。盐分和水位的交互作用对三江藯草生长影响显著,在低浓度和高浓度盐分处理时,三江藯草生物量于 40 cm 水位达到最大,而中浓度盐分环境中,三江藯草生物量于 80 cm 水位达到最大,说明适宜的盐分处理可以提高三江藯草对水深的耐受程度,而高盐分会降低其对水位的耐受阈值。本研究结果表明,三江藯草适应生长的水盐环境范围较广,在 40—80 cm 水位和 1000—3000 mg/L 盐分处理环境中生长状态较好。研究结果对松嫩平原湿地退化和盐渍化背景下三江藯草种群分布格局和演替规律的预测具有重要的参考价值。

参考文献(References):

- [1] 孙广友. 中国湿地科学的进展与展望. 地球科学进展, 2000, 15(6): 666-672.
- [2] 章光新. 水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述. 生态学报, 2012, 32(13): 4254-4260.
- [3] Voesenek L A C J, Rijnders J H G M, Peeters A J M, Van De Steeg H M, De Kroon H. Plant hormones regulate fast shoot elongation under water: from genes to communities. Ecology, 2004, 85(1): 16-27.
- [4] 李亚芳, 陈心胜, 项文化, 谢永宏. 不同高程短尖苔草对水位变化的生长及繁殖响应. 生态学报, 2016, 36(7): 1959-1966.
- [5] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands. 3rd ed. New York: John Wiley, 2000.
- [6] Jin C H. Biodiversity dynamics of freshwater wetland ecosystems affected by secondary salinisation and seasonal hydrology variation: a model-based study. Hydrobiologia, 2008, 598(1): 257-270.
- [7] Huckelbridge K H, Stacey M T, Glenn E P, Dracup J A. An integrated model for evaluating hydrology, hydrodynamics, salinity and vegetation cover in a coastal desert wetland. Ecological Engineering, 2010, 36(7): 850-861.
- [8] 陈宜瑜. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995.
- [9] 刘晓娟, 马克平. 植物功能性状研究进展. 中国科学: 生命科学, 2015, 45(4): 325-339.

- [10] Freschet G T, Violle C, Bourget M Y, Scherer-Lorenzen M, Fort F. Allocation, morphology, physiology, architecture: the multiple facets of plant above- and below-ground responses to resource stress. *New Phytologist*, 2018, 219(4): 1338-1352.
- [11] 罗文泊, 谢永宏, 宋凤斌. 洪水条件下湿地植物的生存策略. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1478-1485.
- [12] 崔桢, 章光新, 张蕾, 武瑶. 基于白鹤生境需求的湿地生态水文调控研究——以莫莫格国家级自然保护区白鹤湖为例. *湿地科学*, 2018, 16(4): 509-516.
- [13] 李惠芳, 章光新. 水盐交互作用对莫莫格国家级自然保护区扁秆藯草幼苗生长的影响. *湿地科学*, 2013, 11(2): 173-177.
- [14] 杨娇, 厉恩华, 蔡晓斌, 王智, 王学雷. 湿地植物对水位变化的响应研究进展. *湿地科学*, 2014, 12(6): 807-813.
- [15] 崔保山, 赵欣胜, 杨志峰, 唐娜, 谭学界. 黄河三角洲芦苇种群特征对水深环境梯度的响应. *生态学报*, 2006, 26(5): 1533-1541.
- [16] Strand J A, Weisner S E B. Morphological plastic responses to water depth and wave exposure in an aquatic plant (*Myriophyllum spicatum*). *Journal of Ecology*, 2001, 89(2): 166-175.
- [17] 徐金英, 陈海梅, 王晓龙. 水深对湿地植物生长和繁殖影响研究进展. *湿地科学*, 2016, 14(5): 725-732.
- [18] Yang Y Q, Yu D, Li Y K, Xie Y H, Geng X H. Phenotypic plasticity of two submersed plants in response to flooding. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, 19(1): 69-76.
- [19] Hattori Y, Nagai K, Furukawa S, Song X J, Kawano R, Sakakibara H, Wu J Z, Matsumoto T, Yoshimura A, Kitano H, Matsuoka M, Mori H, Ashikari M. The ethylene response factors *SNORKEL1* and *SNORKEL2* allow rice to adapt to deep water. *Nature*, 2009, 460(7258): 1026-1030.
- [20] 古勇波, 潘艳文, 陈方圆, 姜彦景, 唐占辉. 水位和氮浓度对三江藯草幼苗生长和生物量分配的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(8): 2302-2309.
- [21] 袁桂香, 吴爱平, 葛大兵, 储昭升. 不同水深梯度对4种挺水植物生长繁殖的影响. *环境科学学报*, 2011, 31(12): 2690-2697.
- [22] Vretare V, Weisner S E B. Influence of pressurized ventilation on performance of an emergent macrophyte (*Phragmites australis*). *Journal of Ecology*, 2000, 88(6): 978-987.
- [23] Capon S J, James C S, Williams L, Quinn G P. Responses to flooding and drying in seedlings of a common Australian desert floodplain shrub: *Muehlenbeckia florulenta* Meisn. (tangled lignum). *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 66(2): 178-185.
- [24] Gibberd M R, Gray J D, Cocks P S, Colmer T D. Waterlogging tolerance among a diverse range of *Trifolium* accessions is related to root porosity, lateral root formation and 'aerotropic rooting'. *Annals of Botany*, 2001, 88(4): 579-589.
- [25] McConnaughay K D M, Coleman J S. Biomass allocation in plants: ontogeny or optimality? A test along three resource gradients. *Ecology*, 1999, 80(8): 2581-2593.
- [26] 柏祥, 陈开宁, 古小治, 黄蔚, 陈效民. 水深梯度对荆三棱(*Scirpus yagara*)生长的影响. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(1): 34-38.
- [27] 丁巧林, 徐菊芳, 余婷, 闫道良. 水位变动对2种水生植物生长及生物量分配的影响. *河北林业科技*, 2014, (1): 1-3.
- [28] 闫道良, 金水虎, 夏国华, 梅丽. 3种湿地植物克隆生长及其生物量对不同水淹的响应. *西南林业大学学报*, 2013, 33(2): 10-14.
- [29] 仲启铨, 王江涛, 周剑虹, 欧强, 王开运. 水位调控对崇明东滩围垦区滩涂湿地芦苇和白茅光合、形态及生长的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 408-418.
- [30] Visser E J W, Bögemann G M, Van De Steeg H M, Pierik R, Blom C W P M. Flooding tolerance of *Carex* species in relation to field distribution and aerenchyma formation. *New Phytologist*, 2000, 148(1): 93-103.
- [31] 符辉, 袁桂香, 曹特, 倪乐意, 张霄林. 水深梯度对苦草(*Vallisneria spiralis*)克隆生长与觅食行为的影响. *湖泊科学*, 2012, 24(5): 705-711.
- [32] Nielsen D L, Brock M A, Crosslé K, Harris K, Healey M, Jarosinski I. The effects of salinity on aquatic plant germination and zooplankton hatching from two wetland sediments. *Freshwater Biology*, 2003, 48(12): 2214-2223.
- [33] 丁珊珊, 于晓菲, 王国平, 郑思嘉, 华璐, 王启光, 孟彩红, 闫磊. 水盐条件变化对盐沼湿地植物生理生态特性及土壤环境的影响. *土壤与作物*, 2019, 8(2): 166-177.
- [34] 管博, 于君宝, 陆兆华, 张莹, 王雪宏. 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. *环境科学*, 2011, 32(8): 2422-2429.
- [35] 古勇波, 陈方圆, 白江珊, 姜彦景, 唐占辉. 盐碱胁迫对三江藯草幼苗功能性状的影响. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(1): 10-16.
- [36] Van Zandt P A, Tobler M A, Mouton E, Hasenstein K H, Mopper S. Positive and negative consequences of salinity stress for the growth and reproduction of the clonal plant, *Iris hexagona*. *Journal of Ecology*, 2003, 91(5): 837-846.
- [37] Salter J, Morris K, Bailey P C E, Boon P I. Interactive effects of salinity and water depth on the growth of *Melaleuca ericifolia* Sm. (Swamp paperbark) seedlings. *Aquatic Botany*, 2007, 86(3): 213-222.
- [38] Murphy L R, Kinsey S T, Durako M J. Physiological effects of short-term salinity changes on *Ruppia maritima*. *Aquatic Botany*, 2003, 75(4): 293-309.
- [39] 宋香静, 李胜男, 郭嘉, 韦玮, 于一雷. 环境变化对湿地植物根系的影响研究. *水生态学杂志*, 2017, 38(2): 1-9.
- [40] 闫道良, 王猛, 燕志, 潘海鸥. 水淹及盐胁迫对海滨锦葵生长及Na⁺、K⁺离子积累的影响. *生态科学*, 2014, 33(2): 226-231.