

黄河三角洲芦苇生长与根系分布特征 对不同时期水盐胁迫的响应

田晓燕¹ 陈敏^{1,2} 路峰³ 王安东³ 韩广轩² 管博^{2*}

(¹吉林建筑大学市政与环境工程学院, 长春 130118; ²中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所), 山东烟台 264003; ³山东省黄河三角洲国家级自然保护区管理局, 山东东营 257091)

摘要 土壤水分和盐分是影响黄河三角洲地区植被生长发育的重要环境因子,了解湿地植物对水盐胁迫的响应规律是黄河三角洲湿地生态系统有效保护和修复的重要内容。本研究选择黄河三角洲地区典型植被芦苇,采用室内盆栽控制实验,研究芦苇生长与根系分布特征对不同水盐处理时期(萌芽期、苗期)和不同水位(CK、-30 cm、0 cm、30 cm)以及不同盐浓度(0%、1.5%)交互作用的响应。结果表明:水盐交互作用对芦苇根系生物量产生显著影响,在无盐分处理和30 cm水位交互作用下根生物量与CK无显著差异,但在1.5%盐分处理和30 cm水位联合胁迫下根生物量显著小于CK,说明土壤盐度会改变植物对水分的耐受阈值;除芦苇株高外,0 cm水位条件的芦苇各项生态指标均表现为高值,而30 cm水淹条件对芦苇生态特征存在一定抑制作用,说明芦苇生长适宜浅水环境;土壤表层芦苇根系总生物量对水盐梯度的响应不敏感,但随着土壤深度的增加,水盐因子显著影响芦苇根生物量的积累;芦苇须根生物量在0 cm水位、无盐分处理和苗期处理三因素交互作用下最高,为 $(6.76 \pm 2.19) \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$,在30 cm水位、1.5%盐分处理和萌芽期处理三因素交互作用下须根生物量最低,仅为 $(1.09 \pm 0.68) \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。

关键词 芦苇; 水位; 盐分; 生态特征; 根生物量

Response of growth and root biomass of *Phragmites australis* to water level and salt stress at different growth stages in the Yellow River Delta. TIAN Xiao-yan¹, CHEN Min^{1,2}, LU Feng³, WANG An-dong³, HAN Guang-xuan², GUAN Bo^{2*} (¹*School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China*; ²*Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China*; ³*Administration Bureau of the Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying 257091, Shandong, China*).

Abstract: Soil water level and salinity are the major factors affecting plant growth in the coastal wetlands. It is important to understand the adaptation mechanism of wetland plants to the interactive effect of water level and salinity for the protection and restoration of the coastal wetland in the Yellow River Delta. We examined the responses of plant growth and the characteristics of root biomass of *Phragmites australis* to the interaction of different water levels (CK, -30 cm, 0 cm, 30 cm), salt concentrations (0%, 1.5% NaCl) and growth stages (germination stage, seedling stage). The results showed that water level and salinity significantly interacted to affect root biomass. Compared with the CK, root biomass under the combination of 1.5% NaCl and 30 cm water level was significantly lower, but no significant differences were observed under the combination of 0% NaCl and 30 cm water level. This result indicated that soil salinity could change the tolerance threshold of *P. australis* enduring water stress. With the exception of plant height, ecological traits of *P. australis* at 0 cm water level showed high adaptation. However, 30 cm water table

depth had inhibitory effects on some ecological traits of *P. australis*. The total root biomass of soil surface layer was not sensitive to water level and salinity gradients. With the increasing soil depth, water level and salinity significantly affected the accumulation of root biomass. The highest fibrous root biomass was (6.76 ± 2.19) g per plant under the condition of 0 cm water level, 0% NaCl treated at seedling stage. The lowest fibrous root biomass was (1.09 ± 0.68) g per plant under the condition of 30 cm water table depth, 1.5% NaCl treated at germination stage.

Key words: *Phragmites australis*; water level; salinity; ecological trait; root biomass.

作为世界上造陆速度最快的河口三角洲之一,黄河三角洲滨海湿地生态系统具有较强的代表性,其突出特点表现为海洋与河口交互性、海陆过渡性、新生性及生态脆弱性。因其特殊的地理位置和地形地貌条件,以及海水入侵、人为灌溉等因素的影响,导致地下水埋深较浅,土壤盐渍化现象普遍,生态系统不稳定,湿地植被退化比较严重(荣丽杉等,2010;安乐生等,2011;王永丽等,2012)。水深和土壤盐分等因素是影响这一区域植被发育和分布的关键环境因子(贺强等,2008;Yu *et al.*, 2012;王卓然等,2016)。因此,研究土壤水盐因子对湿地植被生态特征影响机制并进一步探讨湿地植物对水盐胁迫的响应规律是黄河三角洲湿地生态系统有效保护和修复的重要内容。

芦苇(*Phragmites australis*)属于多年生根茎型禾本科植物,是黄河三角洲滨海湿地分布面积最广的重要优势物种和建群种之一。芦苇群落生态位较广,广泛分布于地下水埋深较浅的滨海沼泽地和河间洼地,能够耐受不同程度的水盐胁迫,并随水盐生境条件的差异呈现出不同的生态特征,被广泛应用于湿地生态系统的恢复与重建(荣丽杉等,2010;管博等,2014;Eller *et al.*, 2017)。芦苇根系是植物与土壤直接接触的界面,通过吸收土壤中的水分、矿物质和营养元素等来供植物体生长(褚光,2016),并且能够通过调节形态结构及生物量分配来增强植物在逆境条件下的生存能力(宋香静等,2017)。目前,关于水分、养分和盐分对芦苇地上部分生理生态特性的影响研究开展较多(马玉蕾等,2013;贡璐等,2014;许秀丽等,2014;管博等,2014;戚志伟等,2016),而根系作为植物吸收养分和耐受胁迫最直接的器官,其对水盐因子响应方面的研究尚缺乏。

本研究选择黄河三角洲滨海湿地芦苇为研究对象,通过温室盆栽控制试验分析了不同水盐梯度对芦苇生长以及根系分布特征的影响,以期探讨黄河三角洲湿地芦苇群落不同水盐生境中的适应策略,为湿地生态恢复工程提供科学参考依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲国家级自然保护区($118^{\circ}33'E$ — $119^{\circ}207'E$, $37^{\circ}35'N$ — $38^{\circ}12'N$)北临渤海,东靠莱州湾,介于东北亚内陆和江淮平原之间。自然保护区以黄河口新生湿地生态系统和珍惜濒危鸟类为保护对象。该区总面积 $15.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,属暖温带季风型大陆性气候,冬季干冷,夏季湿热,雨热同期。年平均气温 12.1°C ,无霜期 196 d。降水量 530~630 mm,蒸发量 1900~2400 mm,降雨较少且蒸发旺盛。自然保护区的土地是黄河携带大量泥沙填充渤海凹陷成陆的海相沉积平原,地势平坦,潜水位小于 2 m,矿化度 $10 \sim 20 \text{ ml} \cdot \text{L}^{-1}$,土壤为隐性盐潮土和滨海盐土,地下水矿化度和土壤全盐在 6—8 月当地旱季和雨季交替时变化最大。区域内植被的分布以水生植被和盐生植被为主,其中芦苇(*Phragmites australis*)在该区域分布面积最广,是黄河三角洲滨海湿地的典型优势物种。

1.2 试验设计

芦苇根系于 2015 年 3 月 25 日在黄河三角洲滨海湿地典型芦苇群落区采集,选择一处长势均一的芦苇丛,于方圆 9 m^2 内挖取芦苇根段,以确保实验用芦苇基因型一致。将取回的芦苇根段放入淡水条件下缓苗约 20 d,待根芽发出后,选择长势均一的芦苇幼苗进行移栽,移栽到直径 20 cm,高 60 cm 的 PVC 筒中,每筒移栽 5 株幼苗。将 PVC 筒放入用于保持水位的方盆中,方盆高 90 cm,每个实验处理 3 次重复。实验用土为野外芦苇群落区原状土,土壤理化性质本底值为:总氮(1.40 ± 0.21) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷(13.4 ± 2.5) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效钾(222.1 ± 13.8) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、总盐(2.22 ± 0.52) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。PVC 筒底部用纱网封盖,以防止土壤流失,同时可以保证水分正常交换,实验在温室中进行。

实验设置水分、盐分和处理时期 3 个因素处理。处理时期分别为萌芽期和苗期,第一个时间段(第

2—9 周)为萌芽期处理,第二个时间段(第 6—13 周)为苗期处理。盐处理设置 2 个梯度,分别为无盐处理和 1.5% NaCl 盐分处理。水位处理设置 4 个梯度,分别为 CK、-30 cm、0 cm、30 cm 水位,其中对照组(CK)为保持土壤田间持水量 60%~80%, -30 cm 是指保持土壤表层以下 30 cm 的水位,0 cm 是指水位与土壤表面持平,30 cm 水位是指土壤表层以上 30 cm 淹水深度。本实验共 16 个处理,每个处理设置 3 次重复。萌芽期处理时芦苇平均高度为 (8.80 ± 1.90) cm,水盐处理时间为 2 个月,后进行去水处理;苗期处理时芦苇平均高度为 (47.04 ± 2.27) cm,处理时间同样为 2 个月。实验结束后将 PVC 筒分成 3 个土层(0~20、20~40、40~60 cm)收集芦苇根系,芦苇根系区分主根和须根分别收集。

A 组和 B 组在萌芽期进行水盐梯度处理,A 组为无盐分处理,B 组为添加 1.5% NaCl 盐分处理,同时设置 CK、-30 cm、0 cm、30 cm(分别标记为 1、2、3、4)水位处理。C 组和 D 组在苗期进行水盐梯度处理,C 组为无盐分处理,D 组为添加 1.5% NaCl 盐分处理,水位处理方式同萌芽期处理。

1.3 生态指标测定

每周用卷尺测量植物株高,并记录分蘖数。实验结束后,收取植物,将植物主根、须根分开,并分 3 层(0~20、20~40、40~60 cm)分别测定主根、须根生

物量,于 60 ℃烘干至恒重。

1.4 数据分析

实验所得数据在 SPSS 21.0 软件中进行统计分析;采用多因素方差分析考察水盐因子和土层深度对芦苇生态特征的影响,并采用最小显著差异法(LSD)进行显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同时期水盐胁迫对芦苇形态特征的影响
2.1.1 不同水盐处理时期和水盐联合胁迫对植物株高的影响 由图 1 和表 1 可知,水盐处理时期和盐度以及二者的交互作用显著影响了芦苇高度($P<0.05$),这种影响表现为萌芽期进行水盐处理的芦苇株高显著大于苗期($P<0.001$),无盐分处理下的株高显著大于 1.5%盐分处理($P<0.001$),在萌芽期无盐分处理的芦苇株高达到最高,为 (114.61 ± 4.36) cm,而苗期处理和 1.5%盐分处理的交互作用下株高最小,仅为 (73.47 ± 3.79) cm。此外,盐度对芦苇株高的影响大于水盐处理时期,而水位及三因素的交互作用对芦苇株高未产生显著性影响($P>0.05$)。说明在水盐联合胁迫下,水位对芦苇高度的影响不显著,盐分是影响芦苇株高的主要驱动因子,盐分单一因子对芦苇株高的影响比较大,适宜盐度有利于芦苇生长发育。

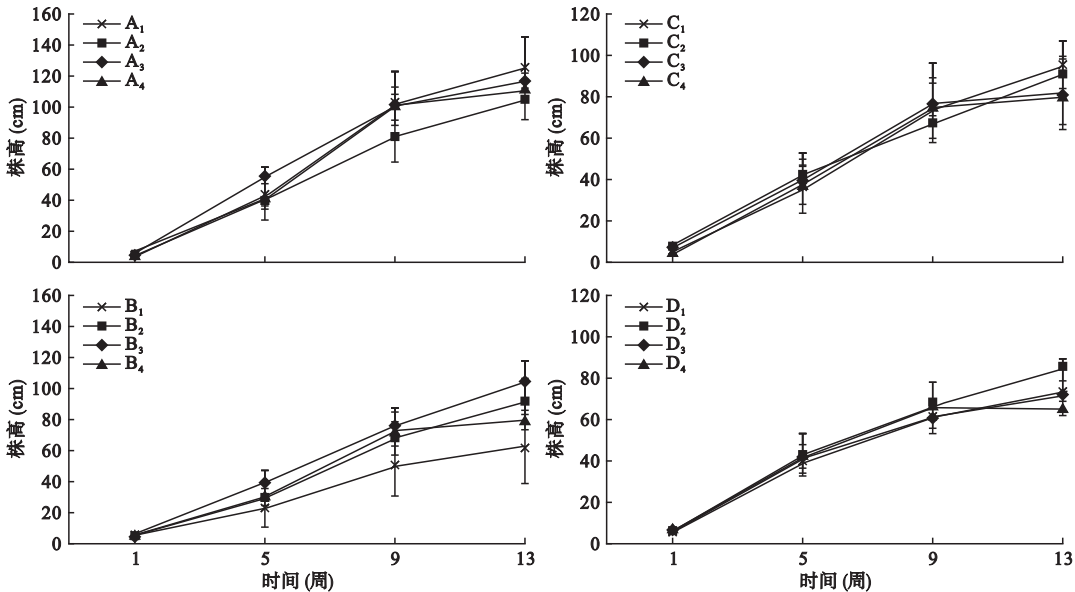


图 1 不同水盐处理时期和水盐联合胁迫下芦苇株高的变化

Fig.1 Changes in plant height of *Phragmites australis* under different water-salt treatment period and water-salt stress
A 组为萌芽期无盐分处理, B 组为萌芽期添加 1.5% NaCl 盐分处理, C 组为苗期无盐分处理, D 组为苗期添加 1.5% NaCl 盐分处理, 1、2、3、4 分别对应 CK、-30 cm、0 cm、30 cm 水位处理。下同。

表 1 在水盐处理时期、盐度、水位三因素交互作用下对芦苇生态特征进行三因素方差分析的结果 (F 值)

Table 1 Analysis results of three-way ANOVA for *Phragmites australis* ecological characteristics with water-salt treatment period, salt and water levels as fixed factors (F value)

| 生态特征 | 水盐处理时期 | 盐度 | 水位 | 时期×盐度 | 时期×水位 | 盐度×水位 | 时期×盐度×水位 |
|-------|------------|------------|------------|------------|---------|----------|----------|
| 株高 | 36.278 *** | 60.961 *** | 1.175 | 25.760 *** | 3.682 * | 4.169 ** | 1.847 |
| 分蘖数 | 1.944 | 21.388 *** | 22.481 *** | 13.746 *** | 1.431 | 0.512 | 1.336 |
| 总根生物量 | 1.206 | 3.430 | 3.622 * | 0.528 | 0.837 | 1.866 | 0.721 |
| 主根生物量 | 0.181 | 0.006 | 2.909 * | 0.806 | 0.807 | 0.928 | 1.406 |
| 须根生物量 | 6.602 * | 6.602 * | 5.593 ** | 1.549 | 1.470 | 1.470 | 0.162 |

* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$ 。

2.1.2 不同水盐处理时期和水盐联合胁迫对植物分蘖数的影响 由图 2 可知,在不同水盐处理条件下,芦苇单株分蘖数均呈现明显增长趋势,无盐分处理处理的芦苇分蘖数保持一定增速增长,而 1.5%盐处理下的增速在处理中后期放缓。由图 2 和表 1 可知,不同水盐处理时期的芦苇单株分蘖数没有显著差异($P>0.05$)。在萌芽期和苗期进行水盐处理的芦苇,30 cm 水位的分蘖数显著小于其他 3 种水位 ($P<0.001$),并且无盐分处理下的分蘖数显著高于 1.5%盐分处理下的分蘖数($P<0.001$)。在苗期进行水盐处理的芦苇,30 cm 和-30 cm 水位条件下的分蘖数显著小于 0 cm 和对照组 CK ($P<0.05$),并且 30 cm 水位的分蘖数显著小于-30 cm 水位条件 ($P<0.01$)。说明偏高或偏低的水位条件都会对芦苇分蘖数产生抑制,且淹水比缺水的抑制作用更明显。水位对芦苇分蘖数产生的影响比盐度大,而水盐处理时期、盐度、水位三因素的交互作用未对芦苇分蘖数产生显著性影响 ($P>0.05$)。

2.2 不同水盐处理时期和水盐联合胁迫对植物根生物量的影响

2.2.1 不同水盐处理时期和水盐联合胁迫对植物总根、主根、须根生物量的影响 由图 3 可知,主根生物量显著大于须根生物量 ($P<0.001$),主根生物量是须根生物量的 1.74 倍。水盐处理时期、盐度、水位对芦苇根生物量均产生了显著性影响 ($P<0.05$)。萌芽期进行水盐处理的根生物量显著小于苗期 ($P<0.05$)。1.5%盐分处理下的根生物量显著小于无盐分处理 ($P<0.05$),这是因为根系是植物吸收盐分的部位,为了保持植物继续生长,植物通过减少根系生物量来抵御体内对盐分的吸收,此时对盐离子的输送也就相对变缓,有效避免了植物的盐胁迫伤害(张力,2013)。30 cm 水位下的根生物量最小,0 cm 水位根生物量显著大于对照组 CK ($P<0.05$)。淹水过深限制植物的光合作用和体内氧气的运输,而氧气浓度会制约植物对营养元素的吸收,从而导致植物生长速率降低,湿地植物生物量分配

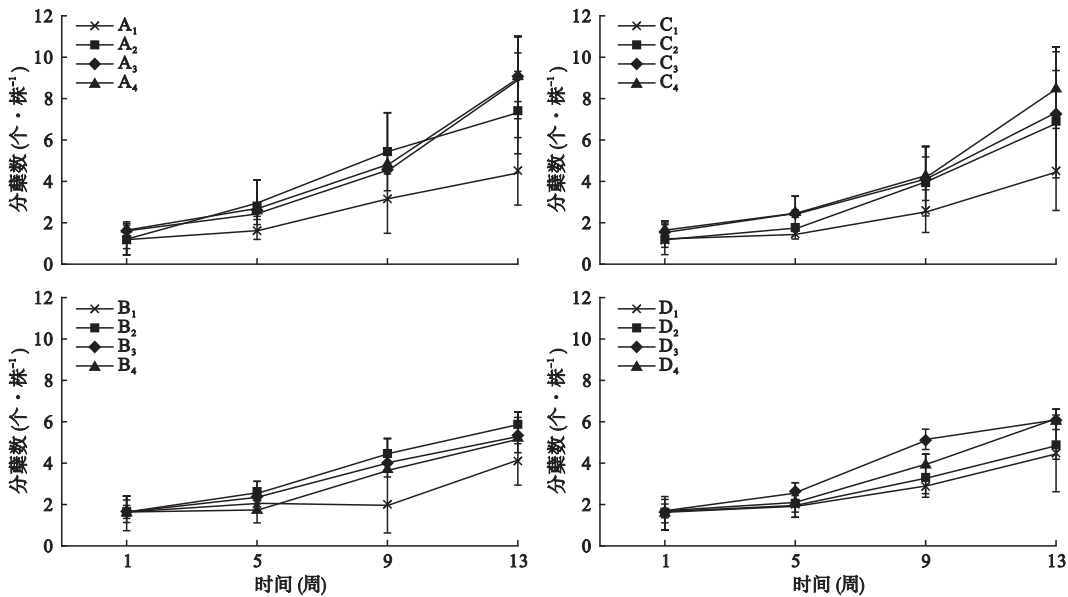


图 2 不同水盐处理时期和水盐联合胁迫下芦苇分蘖数的变化

Fig.2 Changes in tiller number of *Phragmites australis* under different water-salt treatment period and water-salt stress

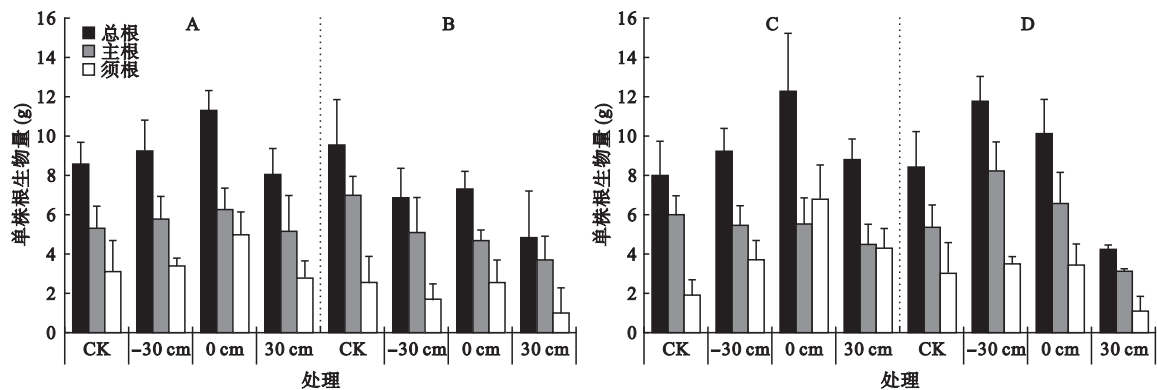


图 3 不同水盐处理时期和水盐联合胁迫对植物总根、主根、须根生物量的影响
Fig.3 Changes in biomass of total root, main root and fibrous root under different water-salt treatment period and water-salt stress

到地下的部分随水深增加而减少(邓春暖,2012)。水盐交互作用也对芦苇根生物量产生显著影响($P<0.05$),在无盐分处理和 30 cm 水位交互作用下根生物量与对照组 CK 无显著差异,但在 1.5% 盐分处理和 30 cm 水位交互作用下根生物量显著小于对照组 CK ($P<0.05$),可见,盐分加剧了水位对于根系生物量的影响。综合水盐要素,水位对芦苇根生物量的影响大于盐度,不同水盐处理时期对根生物量的影响最小。

2.2.2 不同水盐处理时期和水盐联合胁迫对植物不同土层总根生物量的影响 由图 4 可知,芦苇总根生物量随土层深度加深而显著减少 ($P<0.01$)。根系总生物量主要分布在近地面土层,0~20 cm 土层总根生物量达到最大,占总根系生物量的 53.2%,20~40 和 40~60 cm 土层总根生物量分别占总根系生物量的 27.7%和 19.0%。水位对总根生物量也产生显著性影响,30 cm 水位条件下的总根生物量最小,可见,淹水条件不利于芦苇根系的生长,这可能

是由于根系缺氧所造成的,使芦苇地下生物量显著降低($P<0.05$)。20~40 cm 土层中总根生物量随着水位增长出现先增高后降低的趋势,0 cm 水位处理组根系总生物量达到最高,后随着水位继续升高生物量下降,40~60 cm 土层中根系生物量随着水位升高呈现逐渐降低的趋势。土层与水位的交互作用对总根生物量产生了显著性影响($P<0.01$),且土层的影响比水位大。从图 5 也可以看出,水盐因子对表层 0~20 cm 根生物量没有显著影响,但对 20~40 和 40~60 cm 土层的根系生物量的影响较大。对照组 CK 的 40~60 cm 深层总根生物量在无盐分处理下占总根系生物量的 20.6%,在 1.5% 盐分处理下占总根系生物量的 27.1%,说明植物为逃避盐胁迫伤害,根系不断向下生长。

植物的主根占总根系生物量的比重最大,但它对植物根系的吸收功能影响不大,不会对植物的生长发育产生决定性影响(郭京衡,2016)。由图 5 可知,0~20 cm 土层的主根生物量显著高于 20~40 和

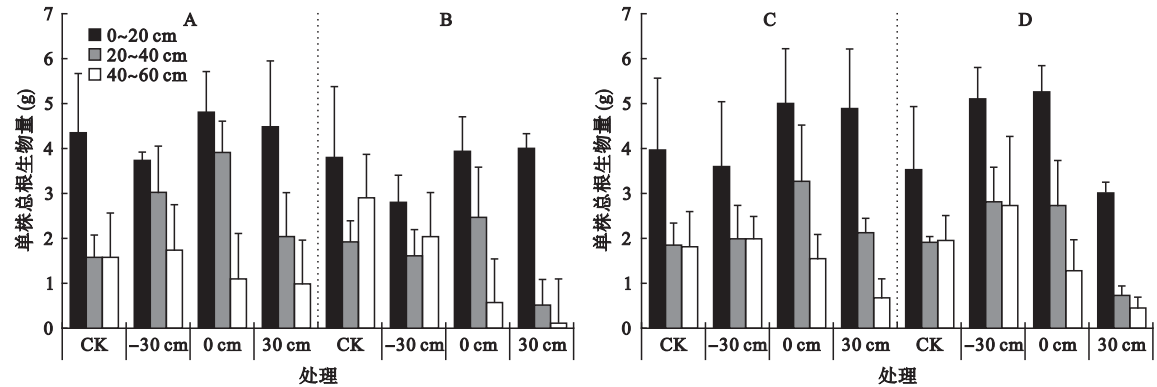


图 4 不同水盐处理时期和水盐联合胁迫对植物不同土层总根生物量的影响
Fig.4 Changes in total root biomass of different soil layers under different water-salt treatment period and water-salt stress

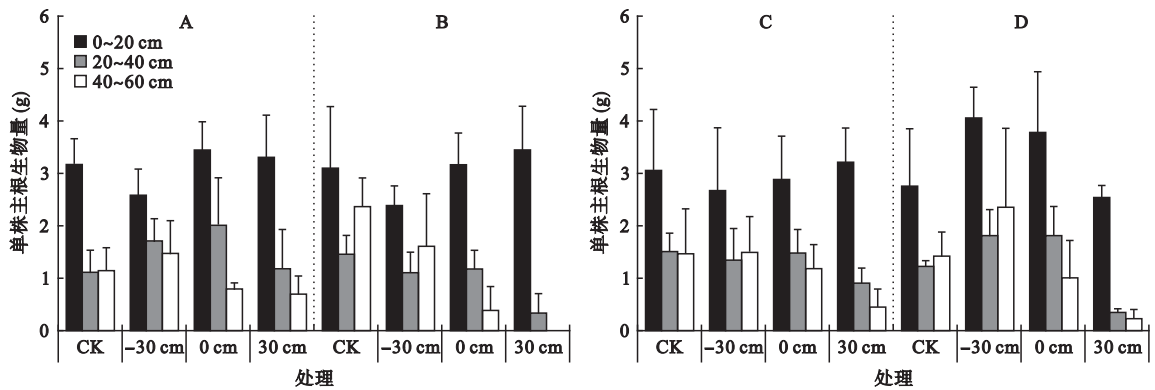


图 5 不同水盐处理时期和水盐联合胁迫对植物不同土层主根生物量的影响
Fig.5 Changes in main root biomass of different soil layers under different water-salt treatment period and water-salt stress

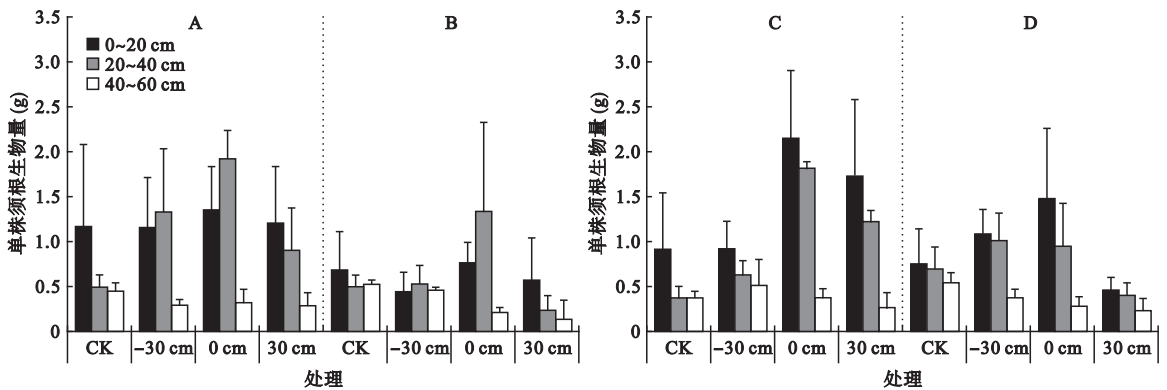


图 6 不同水盐处理时期和水盐联合胁迫对植物不同土层须根生物量的影响
Fig.6 Changes in fibrous root biomass of different soil layers under different water-salt treatment period and water-salt stress

40~60 cm 土层 ($P<0.001$), 占总主根生物量的 56.4%, 而 20~40 和 40~60 cm 土层的主根生物量没有显著差异 ($P>0.05$), 它们分别占总主根生物量的 23.1% 和 20.5%。地上 30 cm 水位对芦苇主根生物量的生长存在明显抑制作用, 使淹水条件下的主根生物量显著小于其他 3 种水位 ($P<0.01$), 20~40 cm 土层的主根生物量均有随着水位的升高呈现先升高后下降的趋势, 40~60 cm 土层和 20~40 cm 土层的主根生物量随着水位升高, 下降趋势更加明显。土层与水位的交互作用对主根生物量产生了显著性影响 ($P<0.01$), 且土层的影响大于水位。不同水盐处理时期与盐度下芦苇主根生物量没有显著差异 ($P>0.05$)。

由图 6 可知, 须根生物量的分布与土层、水分和盐分的状况关系密切。40~60 cm 土层的须根生物量显著小于 0~20 和 20~40 cm 土层 ($P<0.001$), 占总须根生物量的 15.4%, 0~20 和 20~40 cm 土层须根生物量分别占总须根生物量的 45.7% 和 38.9%。

芦苇须根生物量在近地面土壤表层分布集中, 使其能充分吸收土壤中的水分, 对芦苇生长发育起到了促进作用。水盐联合胁迫对芦苇须根生物量产生了显著性影响 ($P<0.05$)。0 cm 水位条件下芦苇须根生物量最大, 无盐分处理的须根生物量显著大于 1.5% 盐分处理 ($P<0.001$), 盐胁迫抑制了须根的生长发育。须根生物量在总根系生物量中所占比例较小, 但它是植物吸收水分和养分的主要器官, 须根生物量的差异对植物的生长发育起到了决定性作用 (郭京衡, 2016)。在 0 cm 水位、无盐分处理和苗期处理三因素交互作用下芦苇单株须根生物量最高, 为 $(6.76\pm2.19) \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 在 30 cm 水位、1.5% 盐分处理和萌芽期处理三因素交互作用下须根生物量最低, 仅为 $(1.09\pm0.68) \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。

3 结论与讨论

滨海湿地区域, 植物在其生长发育过程中受多种环境因子共同相互作用相互制约, 其中水盐过程

是最重要的环境影响因子之一 (Salter *et al.*, 2007; 贡璐等, 2014)。芦苇在 1.5% 盐分处理下的各项生态特征均低于无盐分处理, 植株生长发育受到明显抑制。盐胁迫主要是通过渗透胁迫和离子毒害效应等途径来限制植物生长发育, 随土壤盐度增加, 盐胁迫程度加大, 芦苇以低密度、低生物量的生态特征来适应盐胁迫生境 (赵可夫等, 1998; Parihar *et al.*, 2015; 戚志伟等, 2016)。冯忠江等 (2008) 研究也表明盐度是芦苇生长的限制因子, 由于生长受到盐度的抑制, 芦苇形态特征发生改变, 从而影响生物量的积累。此外, 盐分加剧了水位对于芦苇根系生物量的影响, 在无盐分处理和 30 cm 水位交互作用下根生物量与对照组 CK 无显著差异, 但在 1.5% 盐分处理和 30 cm 水位联合胁迫下根生物量显著小于对照组 CK, 说明土壤盐度会改变植物对水分的耐受阈值。

淹水深度和地下水埋深影响了土壤的生物、物理、化学过程, 促使植被生长环境中水分和盐碱化程度发生改变, 进而影响了植被空间分布和植被生态特征 (谭学界等, 2006)。在本研究中, 水位对芦苇株高的影响不显著, 这可能是因为 ± 30 cm 水位变化幅度不足以对芦苇高度产生促进或限制作用。除株高外, 30 cm 水位条件对芦苇各项生态特征均存在明显抑制作用。Pan 等 (2014) 指出, 淹水条件通过降低根区氧的利用率而抑制湿地植物生长, 表明在淹水条件下湿地植物的形态调整可能更加明显。相比之下, 0 cm 水位条件的芦苇各项生态指标均表现为高值, 说明芦苇生长适宜浅水环境, 水位变化对芦苇生态特征具有一定制约作用, 同时使植株形态发生改变, 适宜的水深条件有利于芦苇单株生长 (邓春暖等, 2012)。

植物通过根系实现与土壤之间的物质能量交换, 根系生物量的空间分布情况也可以反映出它对环境的适应性和竞争力 (Casper *et al.*, 2003)。根系生物量的空间分布主要体现在根系生物量垂直分布上的差异性 (宇万太等, 2001; 游海林等, 2013), 芦苇根系生物量的垂直分布格局与水盐等环境因子存在密切关系。本研究中根系生物量主要分布在近地面土壤表层, 随土壤深度增加根系生物量呈递减趋势。盐分对主根生物量的影响并不显著, 但须根生物量对不同盐度的响应存在明显差异, 1.5% 盐分处理条件须根生物量显著小于无盐分处理。植物主根虽然在总根系生物量中所占比例最大, 但它主要起

到支撑植物的作用, 对根系吸收功能影响很小 (郭京衡等, 2016)。须根生物量所占比例最小, 但它因为吸收面积最大, 是植物吸收水分和营养物质的主要器官, 所以在决定植物生长状况方面更有意义 (高瑞如等, 2010; 郭京衡等, 2016)。芦苇的须根生物量在表层土壤中分布集中, 占总须根生物量的 45.7%, 使植株能够吸收充足的水分。在 0 cm 水位、无盐分处理和苗期处理三因素交互作用下芦苇单株须根生物量达到最高, 而在 30 cm 水位、1.5% 盐分处理和萌芽期处理三因素交互作用下须根生物量最低, 仅为最高生物量的 16%。芦苇近地面表层土壤的总根系生物量对水盐梯度的响应不敏感, 随着土壤深度的增加, 水盐因子显著影响了芦苇根生物量的积累。水盐因子对芦苇根生物量影响程度排序依次为水位 > 盐度 > 处理时期。芦苇通过调整分配在各土层深度的根生物量, 来适应不同水盐梯度环境, 这正是芦苇能够长期生存在黄河三角洲地区的一种适应对策。

参考文献

- 安乐生, 赵全升, 叶思源, 等. 2011. 黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应. 水科学进展, **22**(5): 689–695.
- 褚光. 2016. 不同水分、养分利用效率水稻品种的根系特征及其调控技术 (博士学位论文). 扬州: 扬州大学.
- 邓春暖, 章光新, 李红艳, 等. 2012. 莫莫格湿地芦苇对水盐变化的生理生态响应. 生态学报, **32**(13): 4146–4153.
- 冯忠江, 赵欣胜. 2008. 黄河三角洲芦苇生物量空间变化环境解释. 水土保持研究, **15**(3): 170–174.
- 高瑞如, 赵瑞华, 杜新民, 等. 2010. 2 种盐生植物根系的适盐特性. 林业科学, **46**(7): 176–182.
- 贡璐, 朱美玲, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 2014. 塔里木盆地南缘旱生芦苇生态特征与水盐因子关系. 生态学报, **34**(10): 2509–2518.
- 管博, 栗云召, 夏江宝, 等. 2014. 黄河三角洲不同水位梯度下芦苇植被生态特征及其与环境因子相关关系. 生态学杂志, **33**(10): 2633–2639.
- 郭京衡, 李尝君, 曾凡江, 等. 2016. 2 种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系. 干旱区研究, **33**(1): 166–171.
- 贺强, 崔保山, 赵欣胜, 等. 2008. 水、盐梯度下黄河三角洲湿地植物种的生态位. 应用生态学报, **19**(5): 969–975.
- 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 等. 2013. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系. 应用生态学报, **24**(9): 2423–2430.
- 戚志伟, 高艳娜, 樊同, 等. 2016. 崇明东滩围垦湿地芦苇生态特征与水盐因子的关系. 应用与环境生物学报, **22**(5): 0736–0746.

- 荣丽杉, 刘高焕, 束龙仓, 等. 2010. 黄河三角洲地下水生态水位埋深研究. 水电能源科学, **28**(6): 92–95.
- 宋香静, 李胜男, 韦 玮, 等. 2017. 黄河三角洲怪柳根系分布特征及其影响因素. 湿地科学, **15**(5): 716–722.
- 谭学界, 赵欣胜. 2006. 水深梯度下湿地植被空间分布与生态适应. 生态学杂志, **25**(12): 1460–1464.
- 王永丽, 于君宝, 董洪芳, 等. 2012. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析. 地理科学, **32**(6): 717–723.
- 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 2016. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征. 生态学报, **36**(4): 1040–1048.
- 许秀丽, 张 奇, 李云良, 等. 2014. 鄱阳湖洲滩芦苇种群特征及其与淹水深度和地下水埋深的关系. 湿地科学, **12**(6): 714–721.
- 游海林, 徐力刚, 姜加虎, 等. 2013. 湿地植物根系生长动态及其环境响应性研究进展. 长江流域资源与环境, **22**(Z1): 52–57.
- 宇万太, 于永强, 等. 2001. 植物地下生物量研究进展. 应用生态学报, **12**(6): 927–932.
- 张 力. 2013. 耐盐植物对含盐污水净化效果及生理生化响应(硕士学位论文). 舟山: 浙江海洋学院.
- 赵可夫, 冯立田, 张圣强. 1998. 黄河三角洲不同生态型芦苇对盐度适应生理的研究 I. 渗透调节物质及其贡献. 生态学报, **18**(5): 463–469.
- Casper BB, Jackson RB. 2003. Plant competition underground. *Annual Review of Ecology & Systematics*, **28**: 545–570.
- Eller F, Skalova H, Caplan JS, *et al.* 2017. Cosmopolitan species as models for ecophysiological responses to global change: The common reed *Phragmites australis*. *Frontiers in Plant Science*, **8**: 1833.
- Pan Y, Xie YH, Deng ZM, *et al.* 2014. High water level impedes the adaptation of *Polygonum hydropiper* to deep burial: Responses of biomass allocation and root morphology. *Scientific Reports*, **4**: 5612.
- Parihar P, Singh S, Singh R, *et al.* 2015. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, **22**: 4056–4075.
- Salter J, Morris K, Bailey PCE, *et al.* 2007. Interactive effects of salinity and water depth on the growth of *Melaleuca ericifolia* Sm. (Swamp paperbark) seedlings. *Aquatic Botany*, **86**: 213–222.
- Yu JB, Wang XH, Ning K, *et al.* 2012. Effects of salinity and water depth on germination of *Phragmites australis* in coastal wetland of the Yellow River Delta. *Clean: Soil, Air, Water*, **40**: 1154–1158.
-
- 作者简介** 田晓燕,女,1965年生,教授,主要研究方向为环境工程和环境科学与技术。E-mail: txy1317@163.com。
责任编辑 张 敏
-