

田晓燕, 高楠, 陆冠茹, 等. 黄河三角洲两种水盐生境下芦苇植被根系特征差异研究[J]. 生态科学, 2021, 40(2): 1-8.

TIAN Xiaoyan, GAO Nan, LU Guanru, et al. Study on the differences of root spatial distribution characteristics of *Phragmites australis* in two different water-salt habitats in the Yellow River Delta[J]. Ecological Science, 2021, 40(2): 1-8.

黄河三角洲两种水盐生境下芦苇植被根系特征差异研究

田晓燕¹, 高楠^{1,2}, 陆冠茹^{1,2}, 杨锦媚^{2,3}, 路峰⁴, 于君宝⁵, 王雪宏⁵, 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), 山东省海岸带环境过程重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003

3. 河南理工大学, 资源环境学院, 焦作 454000

4. 山东黄河三角洲国家级自然保护区管理委员会, 东营 257091

5. 鲁东大学, 滨海生态高等研究院, 烟台 264025

【摘要】为了研究芦苇在黄河三角洲潮水和淡水两种生境条件下的生长差异,特别是根系生态特征差异,分别在潮水区和淡水区选取长势均匀的芦苇群落,测量不同土层电导率、pH值,芦苇株高、密度、茎叶及不同土层主根、须根生物量、离子含量等指标。结果表明,两个区域的表层土壤(0—10 cm)电导率均大于下层土壤,并在20—30 cm土层处电导率测得最小值,而在更深的土壤呈现出随土层深度增加,电导率上升、pH值下降的趋势。潮水区芦苇的平均株密度和株高分别为(20.80±5.93)株·m⁻², (35.70±16.01) cm,淡水区芦苇的平均株密度和株高分别为(309.60±39.15)株·m⁻², (91.48±13.09) cm。在生物量分配上,潮水区芦苇的主根、须根、茎、叶生物量分配比例分别是79.70%、11.88%、6.79%和1.64%,而淡水区芦苇在这四个部位生物量分配比例分别是66.77%、8.76%、18.54%和5.92%。淡水区芦苇主根生物量主要集中在0—30 cm土层,须根生物量主要集中在0—10 cm土层(68.18±38.99) g·m⁻²;潮水区芦苇主根生物量主要集中在20—30 cm土层(146.57±109.94) g·m⁻²。离子含量结果表明,潮水区芦苇主根平均Na⁺和K⁺含量分别为(6.38±1.56) mg·g⁻¹和(1.08±0.17) mg·g⁻¹,并且Na⁺与Cl⁻分布呈极显著正相关(P<0.01)。淡水区芦苇主根这两种离子平均含量分别为(2.82±0.56) mg·g⁻¹和(3.93±1.10) mg·g⁻¹。以上结果表明芦苇能够改变株高、密度、各部位生物量分配比例以及离子分布来适应不同水盐环境,这也是芦苇能够在高盐环境下长期生存的适应机制。

关键词: 芦苇; 潮水生境; 淡水生境; 电导率; 生物量

doi:10.14108/j.cnki.1008-8873.2021.02.001 中图分类号: S157.2 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2021)02-001-08

Study on the differences of root spatial distribution characteristics of *Phragmites australis* in two different water-salt habitats in the Yellow River Delta

TIAN Xiaoyan¹, GAO Nan^{1,2}, LU Guanru^{1,2}, YANG Jinmei^{2,3}, LU Feng⁴, YU Junbao⁵, WANG Xuehong⁵, GUAN Bo^{2,*}

1. School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China

2. CAS Key Laboratory of Coastal Environmental Process and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research (YIC), Chinese Academy of Science(CAS), Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental

收稿日期: 2019-10-20; 修订日期: 2019-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871091); 国家自然科学基金山东联合基金重点支持项目(U1806218); 国家重点研发计划项目(2017YFC0505901)

作者简介: 田晓燕(1965—), 女, 教授, 硕士, 主要从事污水处理与湿地生态研究, E-mail: txy1317@163.com

*通信作者: 管博, 男, 副研究员, 博士, 主要从事滨海湿地植被生态学与生态修复研究, E-mail: bguan@yic.ac.cn

Processes, YICCAS, Yantai 264003, China

3. School of Resource and Environmental Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

4. Management Committee of Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying 257091, China

5. The Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract: In order to study the growth differences of *Phragmites australis*, especially the differences of root ecological characteristics, between the tidal and fresh water habitats of the Yellow River Delta, two typical habitats of *P. australis* in tidal and fresh water habitats were chosen, and the electrical conductivity (EC) and pH of different soil layers were measured; the height, density, biomass of stem, leaf, main and fibrous root and ion content in different soil layers of *P. australis* were also analyzed. The results showed that the EC of surface soil (0-10 cm) was higher than that of the lower soil in both habitats and the minimum EC was tested in 20-30 cm soil layer. However, with the increase of soil depth deeper than 20-30 cm, the EC value increased and the pH decreased. The mean density and height of *P. australis* were (20.80±5.93) stem·m⁻² and (35.70±16.01) cm in tidal area, (309.60 ± 39.15) stem·m⁻² and (91.48 ± 13.09) cm in fresh water habitat, separately. In terms of biomass allocation, the proportion of the main root, fibrous root, stem and leaf of *P. australis* in tidal and fresh water habitats were 79.70%, 11.88%, 6.79%, 1.64% and 66.77%, 8.76%, 18.54%, 5.92%, respectively. The main and fibrous root biomass of *P. australis* in fresh water habitat was mainly concentrated in 0-30 cm and 0-10 cm (68.18±38.99) g·m⁻² soil layer, respectively. And the main root biomass of *P. australis* in tidal water area was mainly concentrated in 20-30 cm (146.57±109.94) g·m⁻² soil layer. After analyzing the ion content of roots in two habitats, we found the average content of Na⁺ and K⁺ in the main root of *P. australis* from tidal water habitat were (6.38±1.56) mg·g⁻¹ and (1.08±0.17) mg·g⁻¹ respectively, and the distribution of Na⁺ and Cl⁻ had a significantly positive correlation ($P < 0.01$). The average contents of these two ions in the main root of *P. australis* in fresh water habitat were (2.82±0.56) mg·g⁻¹ and (3.93±1.10) mg·g⁻¹ respectively. The results show that *P. australis* can adjust the height, density and biomass allocation of different organs and the distribution of ions to adapt to the different salt-water environment, which is the typical adaptation mechanism of *P. australis* in high-salt areas.

Key words: *Phragmites australis*; tidal water habitat; fresh water habitat; electrical conductivity; biomass

0 前言

在我国三大三角洲中,黄河三角洲是开发最晚,最年轻的三角洲,其滨海湿地享有“中国最年轻的湿地”之称。由于其特殊的地理位置和较短的成陆时间,黄河三角洲新生土地成土历程短,土壤熟化程度低,并且含盐量高,地表水蒸发过快,极易出现盐碱化等多种原因造成黄河三角洲滨海湿地生态系统具有明显的脆弱性的特征^[1]。然而,近年来黄河三角洲滨海湿地土壤盐渍化程度仍在加剧,其原因主要有海平面上升、海水入侵、降雨量分布不均等自然因素以及人类对湿地不合理、超高强度开发利用等人为因素^[2]。目前黄河三角洲的盐碱地面积高达 16.7 万 hm²^[3]。只有少数具有较高耐盐碱性的植物能在 pH 为 8—9.5 的盐碱土里生存^[4]。

芦苇(*Phragmites australis*)是典型的具有超强繁殖力的多年生禾本科植物,是沿海湿地生态系统里植物群落优势种之一^[5]。芦苇群落广泛分布于地下水埋深较浅的滨海沼泽地和河间洼地中,具有较广的生态位。由于芦苇能够随水盐生境的差异显现出不同的生态特征,并且能够耐受不同程度的水盐胁迫,有研究表明芦苇的耐盐范围一般在 5‰—25‰之间,甚至可达 40‰以上^[6-8],因此被广泛应用于湿地生态系统的恢复与重建^[9-10]。由于黄河三角洲地区的芦苇

能够通过自身的生理生化特征、分子机制来降低盐胁迫损害^[11],因此芦苇具有较高的水盐适应阈值,既能适应盐分较低的淡咸水交互区,也能够适应在潮水侵淹的潮滩分布。根系是植物能否在不同生境中生存的直接响应器官,为了探讨不同水盐生境下芦苇的根系生长适应策略,本文选择潮水分布区和淡水分布区生长的 2 种芦苇群落为研究对象,分析不同水盐生境下土壤不同土层电导率、pH 特征,并比较了芦苇的株高、密度以及根系生物量分布、离子含量特征等生态响应差异。探究芦苇根系在不同水盐环境中的生态适应性,能够为滨海湿地恢复与重建提供科学依据。

1 试验区概况及试验方法

1.1 试验区概况

试验区位于黄河三角洲(东营)国家级湿地自然保护区内(图 1)。研究区属温带季风型大陆性气候,四季分明,冷热干湿界限极明显,春季干旱多风回暖快,夏季炎热多雨,秋季凉爽多晴天,冬寒少雪多干燥,年平均气温 12.2 °C,无霜期 196 d,年平均降水量为 609.5 mm,降水集中于 7、8 月,年均蒸发量 1962 mm^[12]。土壤为隐域性潮土和盐土土类,芦苇(*Phragmites australis*)是黄河三角洲分布面积最广的优势种之一。

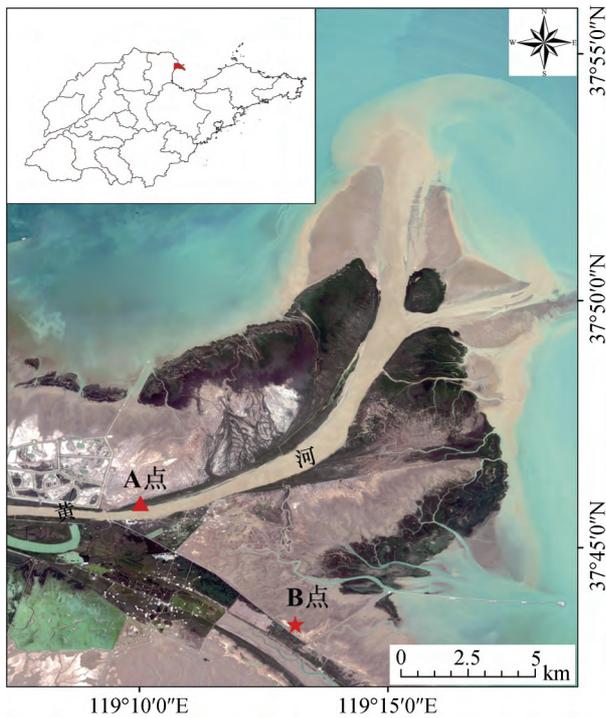


图1 取样点示意图 (A 为淡水区芦苇群落, B 为潮水区芦苇群落)

Figure 1 Sampling point distribution (A stands for *P. australis* community in fresh water habitat, B stands for *P. australis* community in tidal water habitat)

1.2 试验方法

2018年6月,在保护区内选择典型的潮水区芦苇群落和淡水区芦苇群落为实验小区,每个群落区面积不小于 2 hm^2 ,标记为潮水区和淡水区。每个实验小区随机选取5个 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 的样方,测量样方内芦苇高度、密度,测量后剪取地上部分收集带回,并在样方内采集不同土层芦苇根系样品,用直径 20 cm 的不锈钢管进行取样,每 10 cm 分为一层,共取5层。土壤样品采用直径 3 cm 土钻采集,同样分为5层,带回实验室测量土壤电导率、pH值(土水比 $1:5$ 浸提,用电导率仪和pH计测量)。

芦苇根系离子测定方法:称取干样 0.05 g (视情况而定)放入离心管中,加入 10 mL 超纯水,封口袋封口加盖后,沸水浴 1 h ,冷却后离心($3000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 10 min),上清液待测。阳离子(Na^+ 、 K^+)用原子吸收分光光度计(AA=6800,日本岛津)测定。 Cl^- 离子用离子色谱仪(Dionex ICS3000,美国戴安)测定。

1.3 数据处理

采用 Office-Excel 分析所有数据的平均值及标准误差,使用 SPSS21.0 对不同土层的电导率、pH

值和芦苇各部位的生物量分配进行单因素方差分析,所有数据均为5次重复的平均值,并在 $P<0.05$ 水平上进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 两种芦苇生境不同土层电导率与 pH

电导率和 pH 值是描述土壤盐碱度常用的指标^[13]。由表 1 可知,潮水区土壤电导率均值为 $(2.38\pm 0.78)\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,大于淡水区土壤平均电导率 $(1.67\pm 0.73)\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。相似的,潮水区土壤的平均 pH 值 (8.65 ± 0.17) 也大于淡水区土壤 (8.39 ± 0.13) 。潮水区土壤电导率和 pH 值偏大的原因可能是受海水侵淹的影响。两种生境土壤各土层电导率均呈现由表层向下先降低后增加的趋势。潮水区表层土壤($0\text{—}10\text{ cm}$)和下层土壤($10\text{—}20\text{ cm}$ 、 $20\text{—}30\text{ cm}$)差异不显著($P>0.05$)。淡水区表层土壤($0\text{—}10\text{ cm}$)的电导率显著高于下层土壤($10\text{—}20\text{ cm}$ 、 $20\text{—}30\text{ cm}$)($P<0.05$),两种生境土壤的电导率均在 $20\text{—}30\text{ cm}$ 土层取得最小值,而在 $30\text{—}50\text{ cm}$ 土层中,出现了随土壤深度增加电导率上升的趋势。淡水区 $10\text{—}20\text{ cm}$ 土壤的 pH 值显著高于表层土壤($0\text{—}10\text{ cm}$)pH 值($P<0.05$)。在深层($20\text{—}50\text{ cm}$)土壤中,土壤 pH 值随着土壤深度增加出现持续减小的趋势。

2.2 两种生境芦苇株高、密度差异

由表 2 可知,两种生境下的芦苇株高与密度均

表1 两种芦苇生境不同土层电导率和 pH

Table 1 EC and pH of different soil layers in two habitats

实验区	土层深度/cm	电导率/($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH
潮水生境	0—10	$2.29\pm 0.10\text{ ab}$	$8.72\pm 0.04\text{ B}$
	10—20	$2.19\pm 0.84\text{ ab}$	$8.84\pm 0.16\text{ B}$
	20—30	$1.73\pm 0.47\text{ a}$	$8.70\pm 0.01\text{ B}$
	30—40	$2.84\pm 1.03\text{ bc}$	$8.52\pm 0.10\text{ A}$
	40—50	$2.89\pm 0.76\text{ bc}$	$8.48\pm 0.15\text{ A}$
	平均值±标准偏差	2.38 ± 0.78	8.65 ± 0.17
淡水生境	0—10	$2.31\pm 0.32\text{ bc}$	$8.24\pm 0.12\text{ A}$
	10—20	$1.00\pm 0.11\text{ a}$	$8.56\pm 0.09\text{ C}$
	20—30	$0.89\pm 0.25\text{ a}$	$8.44\pm 0.04\text{ B}$
	30—40	$1.77\pm 0.63\text{ b}$	$8.40\pm 0.09\text{ B}$
	40—50	$2.40\pm 0.32\text{ c}$	$8.32\pm 0.03\text{ AB}$
	平均值±标准偏差	1.67 ± 0.73	8.39 ± 0.13

注:不同小写字母代表两种生境不同土层之间电导率差异显著,不同大写字母代表不同土层之间 pH 差异显著。

表 2 两种生境芦苇密度、株高特征

Table 2 Characteristics of density and height of *P. australis* in two habitats

实验区	样点名	密度/(株·m ⁻²)	株高/cm	实验区	样点名	密度/(株·m ⁻²)	株高/cm
潮水生境	CS-1	12.00	23.70	淡水生境	DS-1	248.00	71.78
	CS-2	28.00	14.29		DS-2	300.00	89.03
	CS-3	20.00	48.34		DS-3	328.00	105.71
	CS-4	24.00	41.22		DS-4	352.00	100.79
	CS-5	20.00	50.94		DS-5	320.00	90.10
平均值±标准偏差		20.80±5.93	35.70±16.01	平均值±标准偏差		309.60±39.15	91.48±13.09

存在显著差异, 潮水区芦苇平均株高为(35.70±16.01) cm, 显著低于淡水区芦苇平均株高(91.48±13.09) cm。潮水区芦苇平均密度为(20.80±5.93) 株·m⁻², 仅为淡水区芦苇平均密度(309.60±39.15) 株·m⁻²的 6.7%。

2.3 两种生境芦苇各器官生物量分配特征

由图 2 可知, 在不同生境芦苇各器官生物量分配上, 主根生物量占比均最高, 均显著高于其他器官生物量($P<0.05$), 叶生物量占比最低。两种生境芦苇生物量分配的差异体现在茎和须根生物量分配上, 在潮水区中, 芦苇须根生物量比例为 11.88%, 大于茎生物量比例(6.79%), 而淡水区芦苇在须根和茎生物量分配的比例分别为 8.76%和 18.54%。由表 3 可知潮水区芦苇单位面积总生物量为(506.35±242.48) g·m⁻², 显著小于淡水区芦苇单位面积总生物量(1401.55±137.51) g·m⁻²。

图 3 展示了两种生境芦苇的主根、须根生物量空间分配特征。结果表明, 潮水生境芦苇主根生物量在 20—30 cm 土层最高, 为(146.57±109.94) g·m⁻², 显著高于上层土壤主根生物量(40.97±16.68) g·m⁻² ($P<0.05$), 须根生物量在表层土壤(0—10 cm)分布最低, 为(2.55±1.07) g·m⁻²。下层土壤(10—50 cm)各层须

根生物量分布无显著差异($P>0.05$)。淡水生境芦苇主

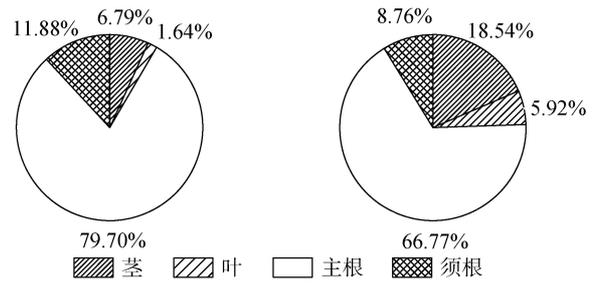
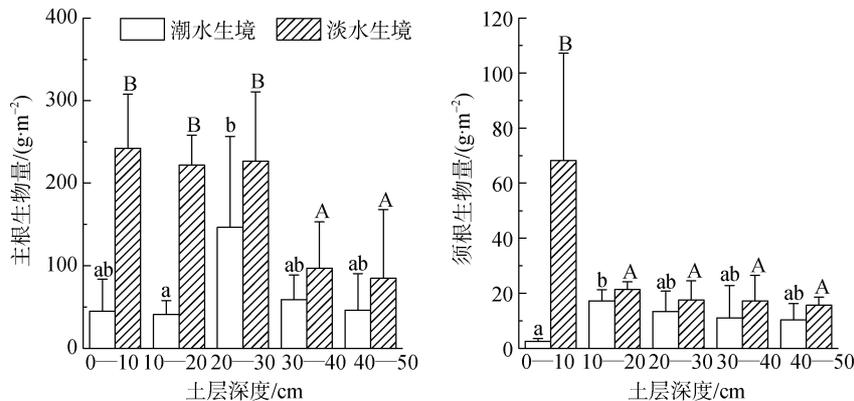


图 2 芦苇各器官生物量分配比例, 潮水(左)、淡水(右)生境
Figure 2 Distribution proportion of biomass in organs of *P. australis* Tidal (left) or fresh (right) water habitat

表 3 两种生境芦苇各部位生物量

Table 3 Biomass of different organs of *P. australis* in two habitats

潮水生境芦苇		淡水生境芦苇	
植物部位	生物量/(g·m ⁻²)	植物部位	生物量/(g·m ⁻²)
主根	403.54±220.65	主根	935.87±160.55
须根	60.14±9.93	须根	122.81±46.15
茎	34.36±15.6	茎	259.89±40.89
叶	8.31±5.31	叶	82.99±7.80
总和	506.35±242.48	总和	1401.55±137.51



注: 不同小写字母代表潮水区不同土层之间根系生物量分布差异显著, 不同大写字母代表淡水区不同土层之间根系生物量差异显著。

图 3 两种生境芦苇不同土层主根和须根生物量分布

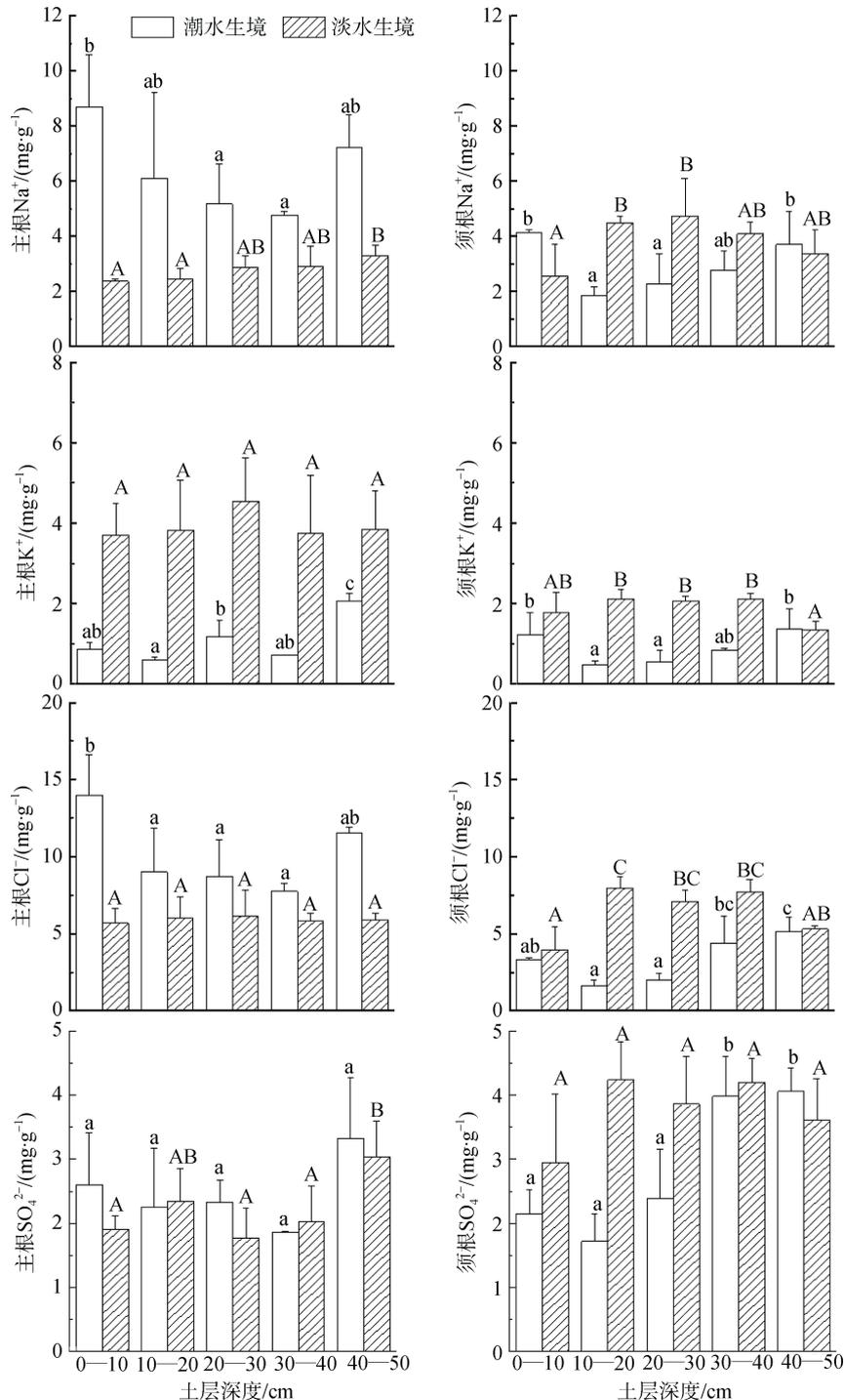
Figure 3 Biomass of main root and fibrous root in different soil layers of *P. australis* in two habitats

根生物量在 0—30 cm 土层分布差异不显著($P < 0.05$), 均显著高于 30—50 cm 土层主根生物量($P < 0.05$)。土壤表层(0—10 cm)的须根生物量分布最高, 为 $(68.18 \pm 38.99) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。分布在下层土壤(10—50 cm)的须根生物量各层之间差异不显著($P > 0.05$), 并显著小

于土壤表层(0—10 cm)的须根生物量($P < 0.05$)。

2.4 两种生境芦苇根系离子分配特征

研究盐胁迫下植物离子含量可以帮助探究植物耐盐性分子机理^[4]。图 4 展示了两种生境芦苇不同土层根系四种离子的含量。 Na^+ 在潮水区芦苇在



注: 不同小写字母代表潮水区不同土层之间离子分布差异显著, 不同大写字母代表淡水区不同土层之间离子差异显著。

图 4 两种生境芦苇不同土层主根和须根离子分布

Figure 4 Ion distribution of main root and fibrous root in different soil layers of *P. australis* in two habitats

0—10 cm 主根处分布最高, 为 $(8.70 \pm 1.88) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著高于 20—30 cm 与 30—40 cm 主根的 Na^+ ($P < 0.05$)。在前 40 cm 土层中, 芦苇主根的 Na^+ 含量随土层深度增加而逐渐减少, 而须根 Na^+ 含量在 10—50 cm 的土层分布呈现随土层深度增加而上升的趋势。两种生境芦苇根系的氯离子分布特征与钠离子相似, 由表 4、5 可知潮水区芦苇主根与须根和淡水区芦苇须根的钠离子与氯离子分布均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。 K^+ 在淡水区芦苇 0—50 cm 主根和 0—40 cm 须根各土层分布无显著差异 ($P > 0.05$)。潮水区芦

苇分配在 40—50 cm 土层主根和须根的 K^+ 最高, 分别为 $(2.07 \pm 0.18) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $(1.37 \pm 0.51) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 均显著高于 10—30 cm 土层主根和须根的 K^+ 含量。潮水区芦苇主根与淡水区芦苇须根在 0—50 cm 各土层分布的 SO_4^{2-} 无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.5 根系空间分配与土壤电导率、pH 相关分析

表 4 和表 5 对土壤电导率、pH 值与根系离子和生物量分配进行 Pearson 相关性分析发现潮水区土壤 pH 值与电导率和主根 K^+ 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 淡水区土壤电导率与芦苇须根 Na^+ 、 Cl^- 还有主根 Cl^-

表 4 潮水区芦苇根系生物量、离子与土壤环境因子 Pearson 相关性分析

Table 4 Pearson correlations of biomass and ions of *P. australis* roots in tidewater habitat and soil environmental factors

	电导率	pH 值	主根生物量	须根生物量	总生物量	主根 Na^+	须根 Na^+	主根 K^+	须根 K^+	主根 Cl^-	须根 Cl^-	主根 SO_4^{2-}	须根 SO_4^{2-}
电导率	1.000												
pH 值	-0.549*	1.000											
主根生物量	-0.121	0.249	1.000										
须根生物量	0.118	0.158	-0.096	1.000									
总生物量	-0.107	0.269	0.993**	-0.021	1.000								
主根 Na^+	0.493	-0.355	-0.075	-0.412	-0.113	1.000							
须根 Na^+	0.324	-0.423	-0.109	-0.446	-0.165	0.538	1.000						
主根 K^+	0.463	-0.667*	-0.372	-0.042	-0.378	0.100	0.588	1.000					
须根 K^+	0.356	-0.386	-0.147	-0.310	-0.185	0.605*	0.919**	0.536	1.000				
主根 Cl^-	0.352	-0.243	-0.070	-0.493	-0.116	0.925**	0.566	0.102	0.572	1.000			
须根 Cl^-	0.386	-0.442	-0.373	-0.319	-0.412	0.159	0.766**	0.520	0.723**	0.119	1.000		
主根 SO_4^{2-}	0.166	-0.434	-0.316	-0.377	-0.353	0.572	0.513	0.580	0.466	0.561	0.145	1.000	
须根 SO_4^{2-}	0.258	-0.277	-0.112	-0.286	-0.160	-0.153	0.460	0.367	0.393	-0.137	0.846**	0.009	1.000

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, 下同。

表 5 淡水区芦苇根系生物量、离子与土壤环境因子 Pearson 相关性分析

Table 5 Pearson correlations of biomass and ions of *P. australis* roots in fresh water habitat and soil environmental factors

	电导率	pH 值	主根生物量	须根生物量	总生物量	主根 Na^+	须根 Na^+	主根 K^+	须根 K^+	主根 Cl^-	须根 Cl^-	主根 SO_4^{2-}	须根 SO_4^{2-}
电导率	1.000												
pH 值	-0.706**	1.000											
主根生物量	-0.159	0.205	1.000										
须根生物量	0.286	-0.256	0.240	1.000									
总生物量	-0.087	0.136	0.979**	0.434*	1.000								
主根 Na^+	0.072	0.195	-0.243	-0.273	-0.283	1.000							
须根 Na^+	-0.530*	0.495	-0.305	-0.618	-0.416	0.128	1.000						
主根 K^+	-0.355	0.124	0.101	-0.016	0.091	0.281	0.064	1.000					
须根 K^+	-0.168	0.081	-0.437	0.335	-0.343	-0.290	0.138	-0.272	1.000				
主根 Cl^-	-0.518*	0.608*	-0.232	-0.156	-0.255	0.326	0.350	0.151	-0.035	1.000			
须根 Cl^-	-0.647*	0.488	-0.110	-0.678*	-0.276	-0.043	0.740**	0.259	0.234	0.345	1.000		
主根 SO_4^{2-}	0.149	-0.051	-0.103	-0.218	-0.148	0.040	-0.159	-0.346	-0.279	0.021	-0.019	1.000	
须根 SO_4^{2-}	-0.204	-0.149	0.107	-0.742**	-0.083	-0.013	0.367	0.306	-0.023	-0.265	0.709*	-0.115	1.000

均呈现显著负相关($P < 0.05$), 该结果体现了淡水区土壤中的盐离子对芦苇根系吸收离子有一定抑制作用。两种生境芦苇的主根生物量与总生物量均呈极显著正相关($P < 0.01$)。潮水区芦苇根系生物量分配与四种离子均未发现显著相关性, 而淡水区芦苇须根生物量与须根 Cl^- 和 SO_4^{2-} 分别呈显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)负相关。

3 讨论

有研究表明, 芦苇在盐胁迫的影响下会改变形态和理化特征^[15], 并且随盐胁迫程度的增加, 芦苇会以低密度来适应盐胁迫生境^[16]。根据谭小丽等^[17]对土壤酸碱度的划分标准可知, 本研究中两种生境土壤均属于碱性土壤(pH 值在 7.5—8.5 范围内), 部分土层土壤达到了强碱性(pH 值在 8.5—9.5 范围内), 其中潮水区由于频繁受到海水侵袭, 土壤盐碱化更加严重。本研究中, 两种生境土壤表层(0—10 cm)电导率均高于下层土壤(10—30 cm)电导率, 其原因可能是土壤表层蒸发速率较高, 使土壤返盐现象严重。淡水区芦苇密度高于潮水区芦苇密度, 且潮水区芦苇的株高也显著低于淡水区芦苇, 可能是由于潮水区较强烈的水盐交互作用对芦苇生长发育产生了抑制作用^[18-19]。虽然潮水生境芦苇生长受到抑制, 但仍有一定数量的芦苇能够在潮水区生长, 说明芦苇具有较广的水盐适应阈值和较强的适应能力^[2-20]。

生物量是评价植物生长状态的重要指标之一, 指单位面积内植物积攒的全部有机物^[21]。研究根系生物量的空间分布情况可以了解植物对环境的适应性和竞争力^[22]。本研究通过对潮水生境和淡水生境芦苇各部位生物量的分析发现, 与潮水生境芦苇生物量(506.35 ± 242.48) $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 相比, 淡水生境下芦苇会累积更高的生物量(1401.55 ± 137.51) $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。自我调节生物量配置模式是植物适应盐胁迫的可塑性机制之一, 植物能通过改变不同器官的生物量分配比例来适应不同盐分环境^[23-24]。本研究中, 两种生境的芦苇各器官生物量的分配比例具有显著差异, 潮水生境和淡水生境芦苇的主根生物量分配比例分别是 79.70% 和 66.77%, 可以看出, 主根在总生物量中起着明显的决定性作用。而淡水区芦苇地上部分(茎+叶)分配比例为 24.46%, 潮水区芦苇地上部分仅为 8.43%。与本研究结果相似, 已有研究表明当植物地下资源不受限制时, 植物将会投入更大比例的碳给

地上^[25]。这些生物量分配比例的差异体现了植物适应自然变化的结果^[21]。植物的根系是植物与土壤环境接触的重要器官, 对水盐变化的响应最为敏感^[26]。本研究两种生境芦苇在不同土层的根系生物量分配上也具有差异性, 潮水区芦苇的主根生物量主要集中在 20—30 cm 土层, 其表层土壤(0—10 cm)的须根由于受到高浓度盐的胁迫, 显著低于 10—20 cm 土层中的须根生物量($P < 0.05$)。淡水区芦苇的主根生物量在 0—30 cm 土层均有较高分布, 须根生物量主要集中在 0—10 cm 土层。这些根系生物量较集中的土层含盐量较低, 说明芦苇根系生长过程中会主动逃避高盐区而集中生长在含盐量较低的土层。

植物受到盐胁迫时, 细胞内离子稳态的破坏会造成离子毒害和矿质营养缺乏从而影响植物正常生长^[27], 因此植物抗盐的主要机制之一是离子稳态^[28]。由于 Na^+ 和 K^+ 离子半径与水合能相似^[29], Na^+ 竞争 K^+ 转位运点, 使 K^+ 的吸收受到抑制, 从而影响植物生长^[30]。王微微等^[27]研究表明, 随着盐浓度增加, Na^+ 进入植物体内越多, K^+ 进入植物体内越少。本实验结果与其有相似趋势, 淡水区芦苇各土层主根 K^+ 含量均高于 Na^+ 而潮水区芦苇各土层两种离子分布相反。 Cl^- 也是盐害的另一种离子^[31], 在王瑞^[32]的盐胁迫对芦苇的研究中发现: 随着盐碱胁迫浓度增加, 芦苇芽内 Na^+ 和 Cl^- 含量显著增加($P < 0.05$) 而 K^+ 含量显著下降($P < 0.05$)。杨帆等^[33]研究中发现随外界 NaCl 浓度增加, 构树体内 Na^+ 和 Cl^- 含量明显增加并且各器官中两种离子分布规律相同。在本研究中, 潮水区芦苇主根与须根和淡水区芦苇须根中 Na^+ 与 Cl^- 分布均呈极显著正相关, 说明在芦苇根系中, 这两种离子分布也具有相似之处。

本研究选择了生境差异性较大的盐分作为影响因素, 芦苇根系在垂直空间分布上并未体现出与盐分具有显著的相关性, 但在土层含盐量较低的区域, 芦苇根系生物量有集中分布的现象, 能够说明芦苇根系生长具有避盐的特点。由于野外环境的异质性特点, 后续研究应将多生境因子(包括养分特征、水位特征等)相结合, 探讨芦苇生长对多环境因子的综合响应模式。

参考文献

- [1] 张晓龙, 李培英, 刘乐军, 等. 中国滨海湿地退化[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.

- [2] 田晓燕, 杨杉杉, 赵亚杰, 等. 黄河三角洲自然湿地芦苇在不同演替阶段的生态适应性[J]. 湿地科学与管理, 2017, 13(4): 37–42.
- [3] 李甲亮, 陆兆华, 田家怡, 等. 造纸废水灌溉对滨海盐碱化湿地的生态修复[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(2): 281–286.
- [4] 管博, 栗云召, 于君宝, 等. 不同温度及盐碱环境下盐地碱蓬的萌发策略[J]. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1411–1416.
- [5] 陈敏, 林德城, 黄勇, 等. 沿海湿地植物芦苇生态功能研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35(20): 55–58.
- [6] HELTINGS S E, GALLAGHER J L. The effects of salinity and flooding on *Phragmites australis*[J]. Journal of Applied Ecology, 1992, 29(1): 41–49.
- [7] CUI Baoshan, TANG Na, ZHAO Xincheng, et al. A management-oriented valuation method to determine ecological water requirement for wetlands in the Yellow River Delta of China[J]. Journal for Nature Conservation, 2009, 17(3): 129–141.
- [8] WANG Xuehong, ZHANG Dongjie, GUAN Bo, et al. Optimum water supplement strategy to restore reed wetland in the Yellow River Delta[J]. Plos One, 2017, 12 (5): 1–11.
- [9] 田晓燕, 陈敏, 路峰, 等. 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[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 404–411.
- [10] EIHER F, SKALOVA H, CAPLAN J S, et al. Cosmopolitan species as models for ecophysiological responses to global change: The common reed *Phragmites australis*[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1833.
- [11] 李倩, 李晓霞, 齐冬梅, 等. 黄河三角洲地区耐盐植物研究进展与展望[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2019, 45(3): 266–271.
- [12] 宋德彬, 于君宝, 王光美, 等. 1961~2010年黄河三角洲湿地地区年平均气温和年降水量变化特征[J]. 湿地科学, 2016, 14(2): 248–253.
- [13] 商放泽, 任树梅, 邹添, 等. 再生水及盐溶液入渗与蒸发对土壤水盐和碱性的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 120–129.
- [14] 李晓院, 解莉楠. 盐胁迫下植物 Na^+ 调节机制的研究进展[J]. 生物技术通报, 2019, 35(7): 148–155.
- [15] 于婷. 水盐多变条件对芦苇植物功能性状的影响[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [16] 陈敏. 黄河三角洲滨海湿地典型植被芦苇对氮磷营养盐的吸收机制研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2019.
- [17] 谭小丽, 王岩宏, 韩卫东. 黄河三角洲湿地土壤剖面理化特征分析[J]. 资源节约与环保, 2018, (12): 9.
- [18] 赵可夫, 冯立田, 张圣强, 等. 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[J]. 生态学报, 1998, 18(5): 463–469.
- [19] 单鱼洋. 不同盐度灌溉水对芦苇生长动态和生理特性影响的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [20] 薛宇婷. 芦苇不同生长阶段的耐盐特性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
- [21] 袁云香. 陕西黄河湿地芦苇的生长特性及生物量动态[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(3): 75–78.
- [22] CASPER B B, JACKSON R B. Plant competition underground[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1997, 28: 545–570.
- [23] 王树凤, 胡韵雪, 孙海菁, 等. 盐胁迫对2种柃树苗期生长和根系生长发育的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 1021–1029.
- [24] 王继伟, 赵成章, 赵连春, 等. 内陆盐沼芦苇根系形态及生物量分配对土壤盐分因子的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4843–4851.
- [25] WANG Jing, GAO Yingzhi, ZHANG Yunhai, et al. Asymmetry in above-and below ground productivity responses to N addition in a semi-arid temperate steppe[J]. Global Change Biology, 2019, 25(9): 2958–2969.
- [26] 管博, 陆冠茹, 高楠, 等. 湿地植物根系对水盐生境异质性的适应机制研究进展——以黄河三角洲滨海湿地为例[J]. 海岸科学, 2019, 6(1): 30–36.
- [27] 王薇薇, 祖艳侠, 吴永成, 等. 盐胁迫对豇豆幼苗离子分布的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 161–164.
- [28] 刘志华, 赵可夫. 盐胁迫对獐茅生长及 Na^+ 和 K^+ 含量的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(3): 311–316.
- [29] PARIDA A K, DAS A B, MITTRA B. Effects of salt on growth, ion accumulation, photosynthesis and leaf anatomy of the mangrove, *Bruguiera parviflora*[J]. Tree-structure and Function, 2004, 18(2): 167–174.
- [30] SHI D C, WANG D L. Effects of various salt-alkaline mixed stresses on *Aneurolepidium chinense* (Trin.) Kitag.[J]. Plant and Soil, 2005, 271(1/2): 15–26.
- [31] 高淳. 盐胁迫下杨树细胞 H^+ 、 K^+ 、 Na^+ 的离子流动与抗盐性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [32] 王瑞. 盐碱胁迫对芦苇生长、叶性状和克隆繁殖性状的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2017.
- [33] 杨帆, 丁菲, 杜天真. 盐胁迫下构树幼苗各器官中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Cl^- 含量分布及吸收特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 767–772.