

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^{*}

管博^{1,2} 栗云召¹ 夏江宝² 董洪芳³ 吕振波⁴ 于君宝^{1**}

(¹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; ²山东省黄河三角洲生态环境重点实验室(滨州学院), 山东滨州 256603; ³山东省黄河三角洲可持续发展研究院管理中心, 山东东营 257091; ⁴山东省海洋生态修复重点实验室(山东省海洋资源与环境研究院), 山东烟台 264006)

摘要 对黄河三角洲滨海湿地不同水位条件下芦苇植被生态特征进行动态调查, 并分析其与土壤理化性质的相关关系。结果表明: 芦苇湿地土壤电导率随水位梯度变化差异显著, 长期水淹的芦苇区土壤电导率最低; 在不同水位梯度下, 芦苇生态特征表现出较强的差异性, 相比之下, 在水位较高的条件下, 芦苇株高、茎粗、盖度和生物量均为最高值, 产量达到了 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 研究区土壤营养元素含量总体均处于较低水平, 且不同水位条件下营养元素在各土层中的分布具有一定的差异; 相关性分析表明, 土壤粘粒、粗粘粒、细粉粒、粗粉粒与土壤营养元素均呈现不同程度的相关性, 土壤有效磷含量与高度、茎粗、盖度、生物量均呈极显著正相关, 因此土壤有效磷可能是黄河三角洲滨海湿地芦苇植被生长的限制性营养因子。

关键词 芦苇; 电导率; 生态特征; 粒径; 有效磷

中图分类号 X171.4 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2014)10-2633-07

Ecological characteristics of *Phragmites australis* vegetation at different water table levels and their relation to environmental factors in the Yellow River Delta. GUAN Bo^{1,2}, LI Yun-zhao¹, XIA Jiang-bao², DONG Hong-fang³, LÜ Zhen-bo⁴, YU Jun-bao^{1**} (¹Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China; ²Key Laboratory for Eco-Environmental Sciences in Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, Shandong, China; ³The Administration Center of the Yellow River Delta Sustainable Development Institute of Shandong Province, Dongying 257091, Shandong, China; ⁴Shandong Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Shandong Marine Fisheries Research Institute, Yantai 264006, Shandong, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(10): 2633–2639.

Abstract: The ecological characteristics of *Phragmites australis* wetlands at different water table levels in the Yellow River Delta and the related soil environmental factors were studied. The results showed that soil electrical conductivities (EC) of *P. australis* wetlands were significantly different at different water table levels. The lowest EC value occurred in the highest water table area. The ecological characteristics of *P. australis* wetlands showed great differences at different water table levels. The maximum values of plant height, shoot diameter, vegetation coverage and plant biomass occurred at the highest water table level. The plant biomass at the highest water table level was $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. The contents of soil nutrient elements in the study area were at relatively low levels, and also showed significant differences among the different soil layers. The correlation analysis showed that the soil nutrient elements had various correlations with the contents of soil clay, coarse clay, fine silt, and coarse silt. The content of soil available phosphorus showed highly significant positive correlation with plant height, shoot diameter, vegetation cover-

* 国家自然科学基金项目(31300325)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC19B08)、山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金项目(2012KFJJ05)和山东省海洋生态修复重点实验室开放基金项目(201204)资助。

** 通讯作者 E-mail: junbao.yu@gmail.com; jbyu@yic.ac.cn

收稿日期: 2014-02-20 接受日期: 2014-06-10

age, and plant biomass. Therefore, it can be concluded that the soil available phosphorus is a limiting nutritional factor of plant growth in the coastal wetland of the Yellow River Delta.

Key words: *Phragmites australis*; electrical conductivity; ecological characteristics; particle size; available phosphorus.

黄河三角洲滨海湿地地处黄河入海口,多年来黄河携带大量泥沙入海,使得该区域成为世界上造陆速度最快的河口三角洲之一,然而黄河三角洲新生区土壤成土年龄短,土壤熟化程度低,使得该滨海湿地生态系统具有明显的生态脆弱性。黄河三角洲湿地生态系统受黄河、渤海淡咸水的双重影响,加之地下水位较浅,月降雨量分配不均,水文条件成为了制约该区域植被演替的最主要限制性因子(Yang *et al.* 2007; 栗云召等 2011; Xie *et al.* 2011)。

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的重要优势物种之一,从黄河三角洲近海河口湿地区到内陆草甸区均有广泛分布,是能够耐受不同程度的水分、盐分胁迫的典型耐盐型植物。芦苇植被具有很强的环境适应性(Ruzi & Velasco 2010),因此,芦苇被选为多种类型湿地恢复和重建的首选物种。目前关于芦苇在不同水位、不同盐分条件下的适应机制研究较多(Engloner 2004; 崔保山等 2006; 单鱼洋 2008; 庄瑶等 2010; 肖燕等 2011),但对于野外不同水位梯度下水盐动态、植被生态特征动态变化以及植被生态特征与土壤环境因子相关性的研究还很有限,特别是黄河三角洲滨海湿地地区土壤成土晚、土壤养分相对贫瘠,探讨芦苇植被与土壤环境因子的关系有助于对滨海湿地芦苇植被进行更加合理的保护,同时从地力提升角度进行退化湿地修复研究,为营养元素循环和生态修复有机结合提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于黄河三角洲(东营)国家级湿地自然保护区内。黄河三角洲自然保护区(37°40'N—38°10'N, 118°41'E—119°16'E)总面积 15.3×10^4 hm^2 ,是以保护黄河口新生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类为主体的自然保护区。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 12.1 °C,无霜期 196 d,年平均降水量为 551.6 mm,降水集中于 7、8 月,

年均蒸发量 1962 mm。土壤为隐域性潮土和盐土土类,芦苇是黄河三角洲分布面积最广的优势种之一。

1.2 研究方法

2012 年 5 月末,在保护区内选择 3 块不同水位梯度的芦苇小区,小区面积不小于 2 hm^2 ,分为常年干旱区(A)、常年积水区(B)和季节性积水区(C)。每个小区随机设置 4 个 1 m × 1 m 的样方,在生长季每个月(6—10 月)观测样方内植被高度、茎粗、密度、盖度等生态指标,并在样方周围采集土壤样品,土壤剖面采集从上到下分 3 层,每层 10 cm,4 次重复,同时测定实验小区内水位深度变化(用土壤采样器取出土柱,观测尺测量水位)。土壤样品带回实验室烘干,过 2 mm 筛,用电导率仪测定土壤不同土层 pH、电导率(土水比 1:5)、原子吸收分光光度计(AA-6800,日本岛津)测定土壤可溶性钠、有效钾离子含量。

生长季末(10 月)测定土壤不同土层有效磷含量(碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法)、土壤有机质含量(低温外加热重铬酸钾氧化比色法),并用激光粒度仪(Marvern Mastersizer 2000F,英国)对土壤粒径结构进行分析,另取部分混合样品过 0.15 mm 筛,用元素分析仪(Elementar Vario Macro,德国)测定土壤总碳、总氮含量;同时将每个小区样方内植物样品采回,烘干测定总生物量。

1.3 数据处理

采用 SPSS 20.0 对每个月份测量数据进行单因素方差分析,主成分分析和 Pearson 相关性分析数据均采用 10 月取样测量值,所有数据均为 4 次重复的平均值,并在 0.05 水平上进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 芦苇湿地研究区水盐动态变化特征

由图 1 可知,黄河三角洲滨海湿地降雨时间尺度分配非常不均,早春干旱严重,而 7、8 月降雨占全年降雨量的 70% 以上。在植被生长季内,3 个实验小区水位均呈现波动变化,7、8 月受雨季影响水位均显著增高。小区之间水位差异显著,整个生长季 A、B、C 平均水位分别为 -20、9、-4 cm(图 2)。

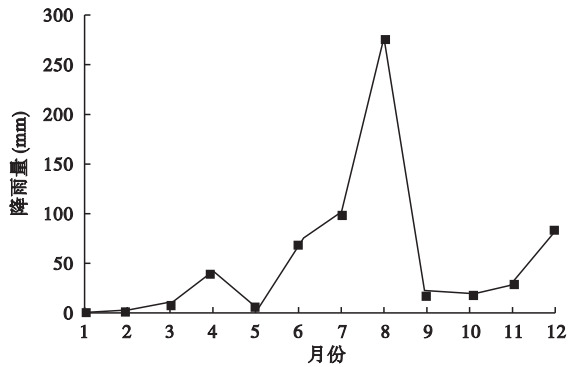


图1 2012年月降雨量动态
Fig.1 Monthly precipitation in 2012

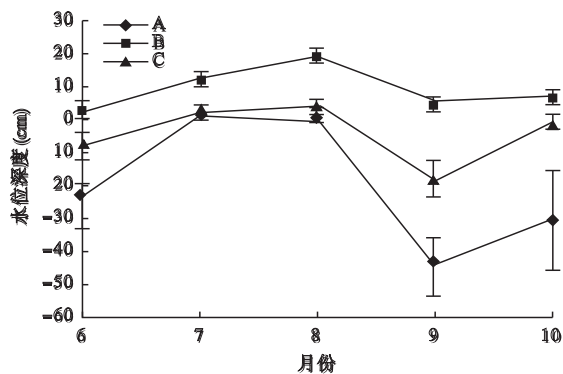


图2 三个小区在植被生长季内水位深度动态变化
Fig.2 Dynamic changes of water table depth of the three study areas

不同土层电导率结果如表1所示,3个研究区的土壤电导率在时间尺度上均随降雨量多少呈现波动式降低趋势。6月份,A、C研究区由于水位较低,加之春季降雨少,土壤水分蒸发快,土壤返盐现象严重,表层土壤(0~10 cm)电导率显著高于下层土壤(10~20、20~30 cm) ($P < 0.05$);B区由于常年处于积水状态,盐分均匀分布于土壤各层,因此各层之间

表1 实验区不同土层电导率动态变化
Table 1 Dynamic changes of EC value in different soil layers

实验区	土层 (cm)	电导率($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)				
		6月	7月	8月	9月	10月
A	0~10	4.51 ± 0.35 a	2.80 ± 0.24 a	2.14 ± 0.29 ab	1.35 ± 0.08 c	2.17 ± 0.34 a
	10~20	2.44 ± 0.17 c	2.59 ± 0.25 a	2.26 ± 0.22 ab	1.77 ± 0.09 ab	1.67 ± 0.12 b
	20~30	2.56 ± 0.17 c	2.53 ± 0.09 a	2.28 ± 0.21 ab	2.04 ± 0.24 a	1.62 ± 0.12 bc
B	0~10	2.13 ± 0.28 c	1.89 ± 0.13 bc	1.19 ± 0.13 c	1.57 ± 0.28 c	1.22 ± 0.28 d
	10~20	2.07 ± 0.45 c	1.56 ± 0.11 c	1.22 ± 0.22 c	1.47 ± 0.14 c	1.24 ± 0.09 d
	20~30	2.15 ± 0.30 c	2.07 ± 0.07 b	1.64 ± 0.12 bc	1.64 ± 0.26 bc	1.53 ± 0.14 bcd
C	0~10	3.54 ± 0.14 b	1.88 ± 0.47 bc	1.44 ± 0.62 c	1.37 ± 0.30 c	1.47 ± 0.14 bcd
	10~20	2.49 ± 0.23 c	1.75 ± 0.30 bc	2.51 ± 0.83 a	1.34 ± 0.15 c	1.23 ± 0.26 d
	20~30	2.32 ± 0.53 c	1.85 ± 0.47 bc	1.33 ± 0.44 c	1.59 ± 0.14 bc	1.31 ± 0.28 cd

不同字母代表同一月份不同实验区土层之间差异显著。

电导率差异不显著。3个研究区相比,表层土壤电导率 $A > C > B$,这与3个研究区水位高低具有相关性。而7、8月份,随着雨季的到来,降雨量显著增加,表层盐分被淋溶到下层,使得各层盐分均匀分配,因此各层之间电导率差异不显著,但3个研究区相比,A区仍然显著高于B、C区。10月,雨季结束,降雨量显著降低,土壤盐分随着土壤水分蒸发通过毛细作用重新积累到表层,A区水位降到-30 cm以下,土壤表层电导率显著高于下层 ($P < 0.05$),但B、C实验区仍保持着较高水位,电导率各层之间差异不显著。

2.2 芦苇植被生态特征

8月之前,3个研究区芦苇高度和盖度随时间显著升高,8月份出现一个明显的高峰期,以后各指标增长速度明显降低或呈现负增长趋势(图3)。不同水位条件下芦苇高度、基茎直径、盖度和密度均表现出显著差异(图3);在水位较高(B)的区域,芦苇高度、基茎直径和盖度均为三者最高值,而水位较低(A)的区域,芦苇高度、基茎直径和盖度相对较低。3个研究区域密度均较低,且相互之间差异不显著,均在 $60 \text{株} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。生长季末,对3个实验区芦苇植被产量进行了调查,B实验区芦苇产量最高,达到 $10 \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,而A、C实验区芦苇产量仅为B实验区的1/2。B区芦苇较高的高度、基茎直径和产量表明,芦苇对于水淹具有较高的生态适应性。

2.3 土壤环境因子

2.3.1 土壤粒径 土壤粒径分析结果表明,3个实验区粒径成分比例具有差异性(图4)。A实验区土壤0~30 cm土层粗粉粒占比重较高,达到50%以上,粗粘粒、细粉粒和细砂粒比重介于10%~20%,而粘粒只占总比重的5%左右;B实验区粗粉粒比

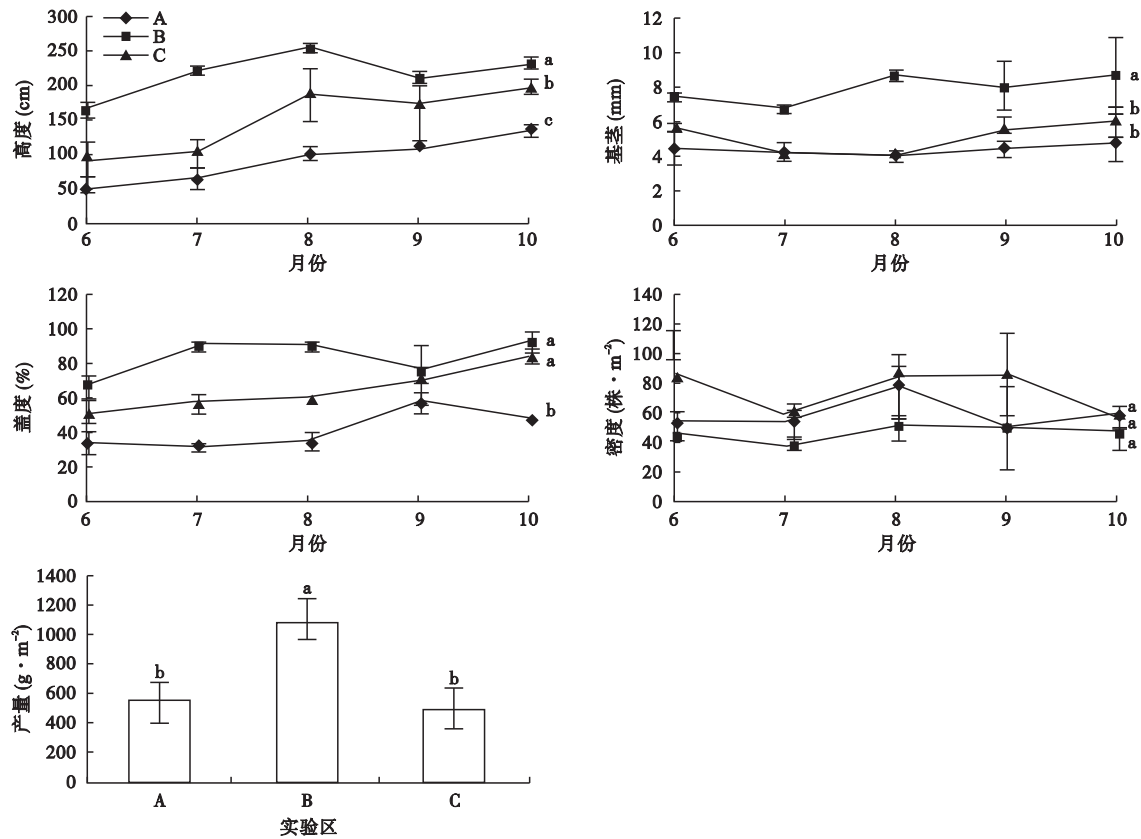


图3 三个实验区芦苇生态特征动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of ecological characteristics of *Phragmites australis* plants

不同字母代表不同实验区之间差异显著。

重则低于40% 粗粘粒、细粘粒比重高于A实验区,平均高于20%,只有10~20cm层细粉粒为15%;C实验区粗粉粒比重介于A和B之间,占总含量的36%~46%,粗粘粒达到20%以上,而细粉粒和细砂粒比重均在20%以下。A实验区粗粉粒含量显著高于B、C实验区,也表明A实验区的土壤保水能力相对较弱,可能与其较低的水位有一定相关关系。

2.3.2 土壤元素含量特征 土壤中的营养元素是植物养料的主要来源,其含量多少指示着土壤肥力状况。3个实验区土壤总氮、总碳、有效磷、有机质和有效钾含量如表2所示。各实验区不同土层养分含量略有差别,A实验区总氮和有机质含量各层差异不显著,介于0.21~0.30和4.71~6.64 g·kg⁻¹,其余各元素含量均显现出表层高于底层的趋势;B实验区各指标含量均为表层高、底层低;C实验区3层土壤营养元素含量差异均不显著。3个实验区相比,B实验区土壤表层总碳、有机质和有效磷含量显著高于其他2个实验区,由于B实验区常年处于水淹状态,土壤表层枯落物积累较多,分解速度快,有机质等含量相对较高。

土壤可溶钠含量是指示土壤盐度的常用指标。本研究表明,A实验区土壤表层盐分含量最高,原因可能为该区土壤表层常年处于相对干旱的状态,土壤蒸发量高,土壤返盐严重,导致可溶钠离子积累于表层。B、C实验区可溶钠离子各层之间无显著差异,水位波动对于可溶钠在各层的均匀分布起到了一定的作用。与元素含量各层分配趋势相反,3个实验区土壤表层pH均显著低于下层土壤,但3个实验区土壤pH含量均高于8.4,表明该地区土壤盐碱化程度较高。

2.3.3 土壤环境因子与芦苇生态特征相关性 表3指示了本实验3个研究区土壤粒径各成分与土壤理化性质的相关性程度。结果表明,土壤粗粘粒、细粉粒比重与水位、总碳呈显著正相关($P < 0.05$),与有效磷含量呈现极显著正相关性($P < 0.01$),而与电导率($P < 0.01$)和可溶钠($P < 0.05$)呈现显著的负相关性;与之相反,粗粉粒比重与水位、有效磷呈现极显著负相关性($P < 0.01$),而与电导率($P < 0.01$)、可溶钠($P < 0.01$)和有效钾($P < 0.05$)呈现极显著或显著正相关性。说明小颗粒(如粗粘粒、细粉粒)比重

表 2 三个实验区不同土层土壤理化特征

Table 2 Physicochemical characteristics in different soil layers

实验区	土层 (cm)	总碳 ($g \cdot kg^{-1}$)	总氮 ($g \cdot kg^{-1}$)	有效磷 ($mg \cdot kg^{-1}$)	有机质 ($g \cdot kg^{-1}$)	有效钾 ($mg \cdot kg^{-1}$)	可溶钠 ($mg \cdot kg^{-1}$)	pH
A	0~10	16.55 ± 0.39 b	0.30 ± 0.02 bc	8.14 ± 0.89 d	6.64 ± 1.05 b	37.12 ± 2.95 a	3185.14 ± 199.88 a	8.47 ± 0.10 bc
	10~20	16.38 ± 0.54 bc	0.34 ± 0.06 bc	9.12 ± 1.58 bcd	5.70 ± 1.28 b	26.84 ± 0.86 bc	2426.99 ± 342.45 b	8.64 ± 0.08 a
	20~30	13.88 ± 1.77 c	0.21 ± 0.05 c	5.84 ± 0.86 e	4.71 ± 0.68 b	20.71 ± 4.56 cd	2210.83 ± 405.33 bc	8.62 ± 0.06 a
B	0~10	20.76 ± 2.65 a	0.53 ± 0.13 a	13.43 ± 1.80 a	10.99 ± 2.96 a	31.03 ± 10.78 ab	1733.69 ± 235.52 c	8.44 ± 0.05 c
	10~20	15.62 ± 1.51 bc	0.27 ± 0.03 bc	8.83 ± 1.73 bcd	5.65 ± 1.52 b	22.49 ± 5.87 bcd	1692.28 ± 296.75 c	8.60 ± 0.02 a
	20~30	17.40 ± 0.79 b	0.30 ± 0.01 bc	10.78 ± 0.87 b	5.91 ± 1.03 b	13.37 ± 7.71 d	1851.10 ± 248.34 bc	8.64 ± 0.08 a
C	0~10	18.10 ± 1.79 b	0.41 ± 0.07 ab	10.38 ± 1.57 bc	6.76 ± 1.37 b	28.60 ± 4.36 abc	2400.60 ± 429.41 b	8.39 ± 0.10 c
	10~20	15.52 ± 2.07 bc	0.31 ± 0.13 bc	8.37 ± 0.85 cd	4.67 ± 1.34 b	20.56 ± 2.96 cd	1981.48 ± 520.51 bc	8.58 ± 0.04 ab
	20~30	16.25 ± 0.58 bc	0.30 ± 0.11 bc	9.12 ± 0.30 bcd	5.58 ± 1.25 b	21.95 ± 2.61 bcd	2407.20 ± 519.12 b	8.67 ± 0.10 a

不同字母代表不同实验区不同土层之间差异显著。

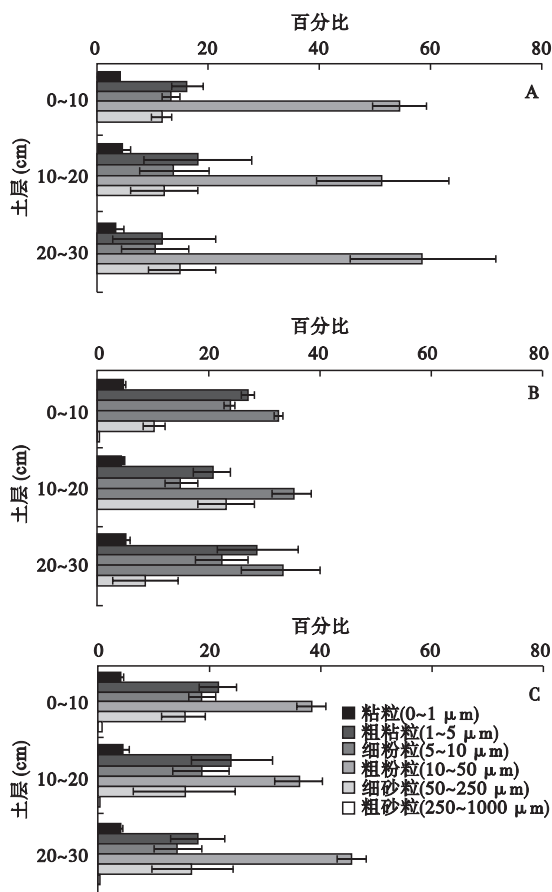


图 4 三个实验区不同土层粒径大小

Fig. 4 Particle size in different soil layers

较高时,土壤保水能力强,土壤盐分压至底层,表层土壤电导率较低;但当大颗粒(粗粉粒)比重增加时,土壤保水能力降低,土壤表层蒸腾速率高,返盐严重,导致表层土壤电导率升高。

对研究区土壤环境因子进行了主成分分析,结果表明,水位、有效钾、有效磷、电导率、可溶钠、有机质和总碳共同构成了第 1 主成分,综合贡献率达到了

45.36% (表 4)。对研究区芦苇生态特征与第 1 主成分中的土壤理化参数进行了 Pearson 相关性分析,结果表明(表 5),芦苇植被高度、盖度与水位、有效磷含量均呈极显著正相关关系($P < 0.05$),而与电导率($P < 0.01$)、可溶钠($P < 0.01$)和有效钾($P < 0.05$)呈现显著负相关关系,说明第 1 主成分中,水位、有效磷对植被高度和盖度起到了正效应,而电导率、可溶钠和有效钾均抑制了芦苇植被高度和盖度的增加;土壤总碳对芦苇高度和生物量起到了正效应($P < 0.05$);而密度与各指标相关性均不显著。值得注意的是,土壤有效磷与芦苇植被高度、茎粗、盖度和生物量均呈现极显著正相关性。

3 讨论

水文状况是影响滨海湿地植被分布的重要因素之一(Nicholls, 2004)。受降雨和潮汐的影响,黄河三角洲湿地水位呈现季节性波动变化,时间尺度上月降雨量分配极不均,春季干旱少雨,6—8 月降雨量占全年降雨量的 75% 以上,一年之中旱季、涝季共存,严重制约着黄河三角洲滨海湿地植被生物多样性。土壤电导率(含盐量)作为决定湿地植被生长、群落演替的重要制约因素(Saqib *et al.*, 2005; Cui *et al.*, 2008; Guan *et al.*, 2011),在黄河三角洲地区不同土层的分布状况与降雨格局呈显著相关关系。本研究表明,芦苇湿地实验区土壤电导率随水位梯度变化差异显著,春季由于雨量小,土壤返盐严重,各区域土壤电导率最高,且主要集中于土壤表层,随着雨季来临,电导率显著下降;3 个研究区相比较,较干旱的区域土壤表层电导率最高,而长期水淹的芦苇区土壤电导率最低。

芦苇植被具有较强的环境适应能力和表型可塑

表3 土壤粒径与土壤理化参数 Pearson 相关性分析

Table 3 Pearson correlations of soil particle size and physicochemical parameters

粒径	水位	电导率	可溶钠	有效钾	总碳	总氮	有效磷	有机质	pH
粘粒	0.622	-0.690*	-0.569	-0.511	0.591	0.417	0.771*	0.372	0.075
粗粘粒	0.768*	-0.870**	-0.717*	-0.501	0.697*	0.606	0.847**	0.428	-0.100
细粉粒	0.709*	-0.874**	-0.746*	-0.336	0.757*	0.724*	0.811**	0.466	-0.256
粗粉粒	-0.893**	0.915**	0.841**	0.721*	-0.664	-0.601	-0.825**	-0.446	0.152
细砂粒	0.191	0.081	-0.103	-0.555	-0.271	-0.261	-0.183	-0.076	0.069

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

表4 研究区土壤环境因子主成分分析

Table 4 Factor analysis of soil environmental variables

10月因素	成分1	成分2
水位	0.931	
有效钾	-0.830	
有效磷	0.828	
电导率	-0.768	
可溶钠	-0.726	-0.516
有机质	0.516	
总氮		0.859
pH		-0.830
总碳	0.571	0.697
贡献率(%)	45.36	30.48

性(崔保山等 2006; Vretare *et al.* 2011), 是广泛分布于世界许多国家和地区不同生境的一种经济植物(Waisel 1972)。芦苇作为黄河三角洲地区典型优势物种之一, 也是该地区生态修复的关键种(唐娜等 2006), 目前全区芦苇面积已经达到了 2600 hm^2 。本研究表明, 不同水盐梯度下芦苇植被生态特征表现出异质性, 较干旱区域芦苇高度、基茎、盖度最低, 与之相反, 长期水淹状态下的芦苇各指标均表现出最高值, 产量也能够达到 10 $\text{t} \cdot \text{hm}^2$, 说明芦苇的经济价值在较高水位条件下具有更高的表现力。前人研究也表明, 深水中的芦苇比生长在浅水中的芦苇高大, 茎粗也显著增加, 以利于在水体中生长防止折断, 同时, 芦苇在水淹条件下能够表现出较高的生长速率(段晓男等 2004; Vretare *et al.* 2011)。

表5 10月芦苇生态特征与土壤环境因子 Pearson 相关性分析

Table 5 Pearson correlations of ecological characteristics of *Phragmites australis* plants and soil environmental variables

生态特征	水位	电导率	可溶钠	有效钾	总碳	有机质	有效磷
高度	0.917**	-0.843**	-0.846**	-0.794*	0.713*	0.504	0.897**
茎粗	0.650	-0.657	-0.643	-0.534	0.627	0.414	0.955**
盖度	0.886**	-0.812**	-0.794**	-0.844**	0.630	0.352	0.817**
生物量	0.575	-0.646	-0.742*	-0.275	0.699*	0.713*	0.804**
密度	-0.458	0.184	0.377	0.638	-0.278	-0.498	-0.473

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

研究表明, 土壤粒径成分与土壤渗水能力、养分保持状况、土壤侵蚀程度等均具有显著的相关性(Cosby *et al.* 1984; 王洪杰等 2003; 王德等 2007)。本研究土壤粒径分析结果表明, 3个实验区粒径成分比例具有差异性, 由于黄河三角洲土壤沉积速度快, 实验所选的不同研究区分别代表着不同的成土历程, 因此认为该结果可能与不同实验区成土年代差异有关。另外, 土壤粘粒、粗粘粒、细粉粒、粗粉粒与土壤营养元素均呈现不同程度的相关性, 也与前人研究结论相似(王洪杰等 2003)。

该区域土壤营养元素含量总体均处于较低水平, 且不同水位条件下营养元素在各土层中的分布具有一定的差异, 但总体而言, 表层土壤营养元素含量略高于下层土壤。与内陆湿地含量相比, 该区土壤营养元素含量显著低于内陆湿地, 如三江平原湿地土壤总氮含量高于 17 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机碳含量也在 60 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Yu *et al.* 2007), 向海湿地也达到了 1.4 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的总氮和 11 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的有机碳含量(王国平等 2003), 远高于本研究区芦苇湿地。主要因为黄河三角洲滨海湿地属于河口湿地, 过水频繁, 营养元素积累量较低; 另外, 该区域也属于新生湿地, 成土年龄短, 土壤潜育化程度低, 因此土壤养分含量相对较低。

植被生长状况与土壤理化性质密不可分(于君宝等 2004; 赵景学等 2011)。本研究中, 水位、有效钾、有效磷、电导率、可溶钠、有机质和总碳共同构成了第1主成分, 其中土壤有效磷含量与高度、盖度、

茎粗、生物量均呈极显著正相关,同时该区域土壤有效磷含量均在 $13.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,远低于三江平原土壤表层有效磷含量 ($26 \sim 56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (杨永兴等 2001)。可以认为,黄河三角洲芦苇湿地区域土壤有效磷含量偏低,并未达到芦苇生长所需的饱和浓度,因此土壤有效磷可能是该区域芦苇植被生长的限制性营养元素因子,适当增加土壤有效磷含量,理论上能够促进该区域芦苇植被产量的提高。然而,由于该区域土壤总氮浓度也较低,氮素是否同样也是限制性因子,需要后续进行氮、磷施加的野外微区控制实验进行验证。

致 谢 本研究得到中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站的支持。

参考文献

- 崔保山,赵欣胜,杨志峰,等. 2006. 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, **26**(5): 1533 - 1541.
- 段晓男,王效科,欧阳志云,等. 2004. 乌梁素海野生芦苇群落生物量及影响因子分析. 植物生态学报, **28**(2): 246 - 251.
- 管 博,于君宝,陆兆华,等. 2011. 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, **32**(8): 2422 - 2429.
- 栗云召,于君宝,韩广轩,等. 2011. 黄河三角洲自然湿地动态演变及其驱动因子分析. 生态学杂志, **30**(7): 1535 - 1541.
- 单鱼洋. 2008. 不同盐度灌溉水对芦苇生长动态和生理特性影响研究(硕士学位论文). 兰州: 甘肃农业大学.
- 唐 娜,崔宝山,赵新胜. 2006. 黄河三角洲芦苇湿地的恢复. 生态学报, **26**(8): 2616 - 2624.
- 王 德,傅伯杰,陈利顶,等. 2007. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例. 生态学报, **27**(7): 3081 - 3089.
- 王国平,刘景双,张玉霞. 2003. 向海湿地全硫与有效硫垂直分布. 水土保持通报, **23**(2): 5 - 8.
- 王洪杰,李宪文,史学正,等. 2003. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成的关系. 水土保持学报, **17**(2): 44 - 50.
- 肖 燕,汤俊兵,安树青. 2011. 芦苇、互花米草的生长和繁殖对盐分胁迫的响应. 生态学杂志, **30**(2): 267 - 272.
- 杨永兴,王世岩,何太荣. 2001. 三江平原湿地生态系统 P、K 分布特征及季节动态研究. 应用生态学报, **12**(4): 522 - 526.
- 于君宝,刘景双,王金达. 2004. 三江平原泥炭沼泽沉积物中营养物质的分布规律. 湿地科学, **2**(1): 31 - 35.
- 赵景学,曲广鹏,多吉顿珠,等. 2011. 藏北高寒植被群落物种多样性与土壤环境因子的关系. 干旱区资源与环境, **25**(6): 105 - 108.

- 庄 瑶,孙一香,王中生,等. 2010. 芦苇生态型研究进展. 生态学报, **30**(8): 2173 - 2181.
- Cosby BJ, Hornberger GM, Clapp RB, et al. 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, **20**: 682 - 690.
- Cui BS, He Q, Zhao Z. 2008. Ecological thresholds of *Suaeda salsa* to the environmental gradients of water table depth and soil salinity. *Acta Ecologica Sinica*, **28**: 1408 - 1418.
- Engloner AI. 2004. Annual growth dynamics and morphological differences of reed (*Phragmites australis* [Cav.] Trin. ex Steudel) in relation of water supply. *Flora*, **199**: 515 - 523.
- Guan B, Yu JB, Wang XH, et al. 2011. Physiological responses of halophyte *Suaeda Salsa* to water table and salt stresses in coastal wetland of Yellow River Delta. *Clean: Soil, Air, Water*, **39**: 1029 - 1035.
- Nicholls RJ. 2004. Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: Changes under the SRES climate and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, **14**: 69 - 86.
- Ruzi M, Velasco J. 2010. Nutrient bioaccumulation in *Phragmites australis*: Management tool for reduction of pollution in the Mar Menor. *Water, Air, and Soil Pollution*, **205**: 173 - 185.
- Saqib M, Akhtar J, Qureshi RH. 2005. Na^+ exclusion and salt resistance of wheat (*Triticum aestivum*) in saline-waterlogged conditions are improved by the development of adventitious nodal roots and cortical root aerenchyma. *Plant Science*, **169**: 125 - 130.
- Vretare V, Weisner SEB, Sitrand JA, et al. 2011. Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* as a functional response to water depth. *Aquatic Botany*, **69**: 127 - 145.
- Waisel Y. 1972. Biology of halophytes. London: Academic Press.
- Xie T, Liu XH, Sun T. 2011. 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. *Ecological Modelling*, **222**: 241 - 252.
- Yang JF, Wan SQ, Deng W, et al. 2007. Water fluxes at a fluctuating water table and groundwater contributions to wheat water use in the lower Yellow River flood plain, China. *Hydrological Processes*, **21**: 717 - 724.
- Yu JB, Sun WD, Liu JS, et al. 2007. Enhanced net formations of nitrous oxide and methane underneath the frozen soil in Sanjiang wetland, northeastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **112**: doi: 10. 1029/2006JD008025.

作者简介 管 博,男,1981年生,助理研究员,主要从事盐碱地改良,滨海退化湿地修复研究。E-mail: guanb627@gmail.com; bguan@yic.ac.cn
责任编辑 魏中青