

DOI: 10.5846/stxb201501090067

夏江宝, 赵西梅, 刘俊华, 赵自国, 刘庆, 陈印平. 黄河三角洲莱州湾湿地柽柳种群分布特征及其影响因素. 生态学报, 2016, 36(15): - .

Xia J B, Zhao X M, Liu J H, Zhao Z G, Liu Q, Chen Y P. Environmental factors influencing the distribution of *Tamarix chinensis* Lour in the Laizhou Bay wetland of the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): - .

黄河三角洲莱州湾湿地柽柳种群分布特征及其影响因素

夏江宝^{1,*}, 赵西梅¹, 刘俊华¹, 赵自国¹, 刘庆², 陈印平¹

1 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603

2 青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109

摘要:为探明黄河三角洲莱州湾柽柳(*Tamarix chinensis* Lour)灌丛环境因子的基本特征及其对柽柳灌丛空间分布类型的影响, 采用样地与样方相结合的测定方法, 对柽柳灌丛样地距海远近、地下水水位、土壤盐碱含量、土壤容重和孔隙度等基本物理参数以及土壤有机质、速效氮、磷养分等 13 个环境因子参数进行相关性和主成分分析。结果表明:莱州湾柽柳种群空间分布表现为聚集型分布, 林分密度与距海距离和地下水水位呈极显著正相关, 与土壤含水量呈极显著负相关;土壤含盐量与土壤含水量呈极显著正相关, 与地下水水位和土壤孔隙度呈极显著负相关;土壤含水量与地下水水位呈极显著负相关。莱州湾柽柳灌丛 13 个环境因子的变异系数在 0.060—1.296 之间, 土壤 K⁺ 含量、土壤含盐量和林分密度变化幅度较大;其次为土壤有机质和有效磷, 地下水水位的空间变异性高于至海距离, 而土壤 pH 值、土壤容重和总孔隙度等基本物理性状变化幅度较小。土壤盐碱含量分别为 0.47% 和 pH 为 8.48, 呈重盐土和偏碱性特征。主成分分析表明, 土壤盐碱含量是影响黄河三角洲莱州湾湿地柽柳灌丛分布的主导因素, 其次是距海距离, 土壤速效磷和地下水位次之。

关键词: 柽柳; 分布格局; 环境因子; 湿地; 盐碱地; 黄河三角洲

Environmental factors influencing the distribution of *Tamarix chinensis* Lour in the Laizhou Bay wetland of the Yellow River Delta

XIA Jiangbao^{1,*}, ZHAO Ximei², LIU Junhua¹, ZHAO Zigu¹, LIU Qing², CHEN Yinping¹

1 Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, China

2 College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

Abstract: Analysis of the spatial distribution and influencing factors of plant populations can elucidate plant ecological adaptability and environmental survival strategies. In this study, we investigated the relationship between the characteristics of environment factors and a *Tamarix chinensis* population in the Yellow River Delta, to determine the spatial distribution pattern of *T. chinensis* population and the dominant factor influencing the distribution and also to reveal the mechanisms by which environment factors maintain the distribution of *T. chinensis* population. As a study population, we selected a *T. chinensis* population in the Shandong Changyi National Ecological Special Reserve, and conducted correlation and principal component analysis of 13 environmental factor parameters, including distance from the sea, groundwater level, soil salinity, soil bulk density and soil porosity, based on sample area and quadrat surveys. The results revealed that the spatial distribution of *T. chinensis* population in Laizhou Bay shows an aggregative pattern. There were significant positive

基金项目:国家自然科学基金(31370702);国家林业科技支撑计划项目(2009BADB2B0502);山东省自然科学基金省属高校优秀青年人才联合基金(ZR2015JL014);山东省重点研发计划项目(2015GNC111022)

收稿日期:2015-01-09; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiajb@163.com

correlations between stand density and distance from the sea and between stand density and groundwater level, whereas there was a significant negative correlation between stand density and soil moisture content. Furthermore, there was a significant positive correlation between soil salinity and soil water content, and significant negative correlations between soil salinity and groundwater level and between soil salinity and soil pore space. There was a significant negative correlation between soil water content and groundwater level. The coefficient of variation among the 13 environmental factors analyzed in relation to *T. chinensis* in Laizhou Bay was between 0.060 and 1.296. The content of K^+ , soil salinity, and stand density showed the largest ranges of variation, followed by soil organic matter, available phosphorus, and soil organic carbon. The spatial variability of groundwater level was higher than that of distance from the sea. Some basic physical properties, including soil pH, soil bulk density, and total porosity, varied slightly. The soil salt content was 0.47%, and pH was 8.48, indicating that the soil of *T. chinensis* has characteristics of heavy solonchak and meta-alkaliescence. The principal component analysis showed that soil salinity was the main factor influencing the distribution of *T. chinensis* in Laizhou Bay, followed by distance from the sea, soil available phosphorus, and groundwater level.

Key Words: *Tamarix chinensis*; distribution pattern; environmental factors; wetland; saline-alkali soil; Yellow River Delta

植被与生境之间存在一定的循环响应和反馈影响过程^[1-2],植物分布状况是植物与环境相互作用的产物^[3-4]。植物通过个体、种群和群落数量变化特征来对周围的生境产生响应变化^[5-6],同时,植物在生长过程中也对周围的环境产生一定的影响^[5-8]。因此,不同生境下的植被数量特征及其对环境因素的响应过程是生态研究的热点问题之一。种群的分布格局是植物种群生物学特性对生存环境长期适应和选择的结果,可较好反映种群中个体生存与生长的影响以及群体的适应能力^[9-11]。植物种群空间格局分布受自身生物学特性、生境条件及其相互作用共同影响^[3-4,9]。植物种群空间分布格局及其主导因子的探讨,可反映和指示植物的生存策略及生态适应对策^[1,4,12],对退化生态系统中植被恢复模式及优良植物材料的选择具有重要的参考价值。

怪柳(*Tamarix chinensis* Lour)是黄河三角洲盐碱类湿地的建群种,作为优良的盐碱地水土保持林灌木树种在黄河三角洲分布面积最广,对改善区域生态环境状况和维护海岸带生态系统稳定发挥着重要作用。位于莱州湾南岸的“山东昌邑国家级海洋生态特别保护区”存在我国海岸带区域连片最大、结构典型的怪柳群落,在黄河三角洲地区具有较强的代表性和典型性。近几十年来,受围垦改造盐田等人类活动干扰,以及海水入侵、海岸带盐渍化和风暴潮等自然因素的影响^[11,13-14],致使该区域怪柳灌丛生长发育衰退,林分结构失调,系统功能退化,呈现典型的低质低效状态。而怪柳种群空间分布格局及其影响因素的探讨,有利于阐明莱州湾湿地怪柳灌丛退化过程及其原因,对掌握泥质海岸带怪柳灌丛的生长适应特性和生存策略意义重大。目前对黄河三角洲盐碱类湿地怪柳灌丛的研究主要集中在水深环境梯度下怪柳种群空间分布格局的分形分析^[7,12]、怪柳物种的生态位、生态幅及其多度等数量特征^[11],以及怪柳湿地土壤养分空间异质性分析^[8]等方面。缺少针对泥质海岸带大面积怪柳种群的分布类型及其影响因素的探讨,致使泥质海岸带盐碱生境下怪柳灌丛分布格局特征及其生长环境尚不清晰,在一定程度上,限制了黄河三角洲怪柳低质低效林分的经营改造和植被恢复。因此,针对影响黄河三角洲怪柳灌木林生长分布的主导因素尚不清晰以及低效林改造提升中遇到的适宜地选择这一科学问题,以“山东昌邑国家级海洋生态特别保护区”的怪柳灌丛为研究对象,探讨了怪柳灌丛的聚集强度和分布型,结合距海远近、地下水水位、土壤盐碱状况、土壤基本物理性质以及土壤养分等13个环境因子的测定分析,明确了莱州湾怪柳灌丛生长的主要生境特征,利用相关性分析和主成分分析方法,阐明了影响怪柳灌丛空间分布格局的主导因素,以其为黄河三角洲怪柳灌丛的资源保护和经营管理提供理论依据和技术参考。

1 研究区概况

研究区位于黄河三角洲莱州湾南岸的“山东昌邑国家级海洋生态特别保护区”(37°03'07"—37°07'12" N, 119°20'19"—119°23'49" E),保护区是首个设立在山东省的国家级海洋特别保护区,也是我国唯一以保护怪柳为主的滨海湿地生态系统和各种海洋生物的国家海洋生态特别保护区,总面积达 29.3km²。保护区属暖温带半湿润季风区大陆性气候,年平均气温 12.3℃,极端最高气温 39.3℃,极端最低气温-17℃。年平均降水量为 679.1mm,雨季通常在 6—8 月份,年平均蒸发量为 2023.5mm,年平均相对湿度 65%,年平均日照总时数为 2426.9 h,最大冻土深度为 420mm。莱州湾南岸的地形呈东西状分布,地势北面较低南面偏高,属海滨平原的中部岸段,位于潮间带,是我国典型的咸水侵入区。成土母质为河流沉积物,土层深厚,耕层多为轻壤,土壤以含氯化物的盐土类为主,为砂质粘土。近海海底坡度小,以强堆积为特征,构成平坦的水平浅滩和海底平原,泥质滩涂广泛发育,滩涂宽度 5—10km,地面坡度为 0.27‰—0.31‰,滩涂区域海拔在 1.3—6.0m 之间,地下水埋深 1—4 m,地下水矿化度 1—10 g/L。保护区主要有天然怪柳灌丛、潮间盐水沼泽湿地、河流及河口湿地等生境类型,植被类型以怪柳灌木林为主,草本植物以盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、二色补血草(*Limonium bicolor*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、中亚滨藜(*Atriplex centralasiatica*)、芦苇(*Phragmites australis*)、鹅绒藤(*Cynanchum chinense*)和地肤(*Kochia scoparia*)等为主。

2 研究方法

2.1 标准地的选设与调查

于 2014 年 6 月在保护区野外实地取样,沿垂直于海岸带的方向设置 3 条调查样带,再依据距离海岸带远近,每隔 300—500m,设立 1 个 50m×50m 的标准样地,总共选取 28 个样地(图 1),在每个标准样地内随机设置 10m×10m 的标准样方 3 个,3 个标准样方的混合样品作为该标准地的采集样品。怪柳呈灌丛分布,因此以丛为单位在标准样方内测定怪柳密度,并采用标尺法测定地下水水位。在每个标准样方内随机采集 3 份 0—100cm 的土壤样品,采用四分法取部分土壤样品装入袋中,带回实验室自然风干,研磨过筛等预处理后,进行土壤理化指标的测定分析。

2.2 分布型的测定

为保证检验结果的可靠性,需采用不同参数对怪柳种群空间格局强度进行判定。本文选取负二项参数(Negative binomial parameter, K)、扩散系数(Dispersion index, C)、Cassie 指数(Cassie's index, Ca)、丛生指数(Clumping index, I)和聚块性指数(Congregation index, M^{*}/M)进行怪柳种群聚集强度的判断^[16-18]。

2.3 土壤理化指标的测定方法

土壤 pH 值用 pH 计水土比 5:1 测定;土壤可溶性盐分用重量法水土比 5:1 测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定。土壤硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)采用 2 mol/L KCl 溶液为浸提液,水土比 5:1 浸提,振荡后过滤,过滤的浸提液直接用连续流动化学分析仪(德国, SEAL AutoAnalyzer 3)测定。土壤速效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 溶液浸提钼锑抗比色法测定;土壤 K⁺ 和 Na⁺ 含量采用原子吸收分光光度计法测定(日本岛津, AA-6800)。环刀法测定土壤孔隙度和容重等物理性质,烘干法测定土壤含水量^[19]。

2.4 数据处理

试验数据利用 EXCEL 2007 和 SPSS16.0 软件进行相关分析(α=0.05 或 0.01)和主成分分析。

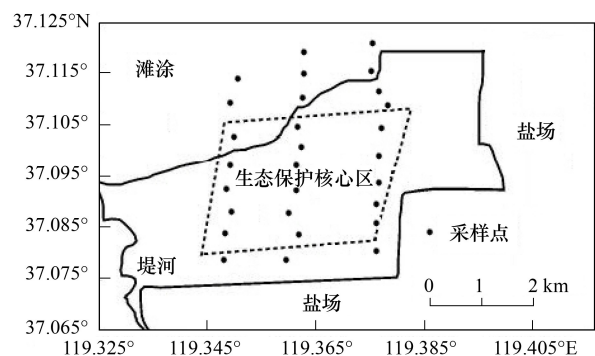


图 1 怪柳种群的标准样地采样分布图

Fig. 1 Schematic map of sampling sites of *Tamarix chinensis* population

3 结果与分析

3.1 柽柳种群的分布格局类型

聚集强度可定量描述种群个体在生境中的丛生能力,在一定程度上可反映种群的空间分布属性^[10]。黄河三角洲莱州湾湿地柽柳种群聚集强度的判定系数见表 1。

表 1 柽柳种群的聚集强度

Table 1 The aggregation intensity of *T. chinensis* population

聚集强度指标 Index of aggregate intensity	指标值 Index value	种群空间分布的判别标准 Discrimination standard of population space distribution
负二项参数 Negative binomial parameter	0.86	K 值越小,聚集强度越大,如果 K 值大于 8,则逼近 Poisson 分布。
扩散系数 Dispersion index	19.24	$C < 1$, 为均匀型分布; $C = 1$, 为随机型分布; $C > 1$, 为聚集型分布。
Cassie 指标 Cassie's index	1.16	$Ca > 0$, 为聚集分布; $Ca = 0$, 为随机分布; $Ca < 0$, 为均匀分布。
丛生指标 Clumping index	18.24	$I < 0$, 为均匀分布; $I = 0$ 时, 为随机分布; $I > 0$, 为聚集分布。
聚块性指标 Congregation index	2.26	$M^*/M < 1$, 为均匀分布; $M^*/M = 1$, 为随机分布; $M^*/M > 1$, 为聚集分布

由表 1 可以看出:负二项参数 K 小于 1,聚集强度较大,柽柳种群空间分布表现为聚集分布。扩散系数 C 远大于 1, Cassie 指标大于 0,丛生指标 I 远大于 0,聚块性指标 M^*/M 大于 1,上述分析表明,莱州湾柽柳个体分布呈现聚集趋势,柽柳种群空间分布格局表现为聚集型分布。

3.2 柽柳灌丛湿地环境因子的统计性分析

由表 2 可知,所测定指标变异系数在 0.060—1.296 之间,土壤 pH 值的变异系数最小,为 0.060,指标值在 7.34—9.30 之间变化,平均 pH 值为 8.48,总体呈偏碱性。土壤 Na^+ 含量的变异系数最大,达 1.296,在 23.19—6991.61 m/kg 之间变化,平均 Na^+ 含量为 815.78 m/kg;其次为土壤含盐量和林分密度,变异系数分别为 1.106 和 1.064,土壤含盐量在 0.01%—4.36%之间,盐分变化幅度较大,平均含盐量为 0.47%,属于重盐土^[20];林分密度在 0—540000 株/ km^2 之间,平均为 163200 株/ km^2 。分析表明,黄河三角洲莱州湾柽柳灌丛土壤 Na^+ 含量、土壤含盐量和林分密度变化幅度较大;其次为土壤有机质、有效磷和 K^+ 含量等,其变异系数在 0.611—0.675 之间,含量差异明显。地下水水位的空间变异性高于至海距离远近,而土壤 pH 值、土壤容重和总孔隙度等基本物理性状变化幅度较小,变异系数在 0.060—0.119 之间,微生境差异较小。

表 2 柽柳灌丛密度及其环境因子的测定值

Table 2 The measured value of population density of *T. chinensis* and it's environment factor

因子 Factor	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值±标准误 Mean±Std. Error	变异系数 Coefficient of Variation
林分密度 Forest density/(plant/ km^2)	0.00	540000.00	163200.00±16800	1.064
距海距离 Distance from the sea/Km	4.44	8.60	6.36±0.12	0.197
地下水水位 Groundwater level/m	0.06	3.90	1.69±0.08	0.485
土壤含盐量 Soil salt content/%	0.01	4.36	0.47±0.05	1.106
pH 值	7.34	9.30	8.48±0.05	0.060
土壤含水量 Soil water content (%)	3.37	27.86	11.34±0.41	0.372
土壤容重 Soil density/(g/cm^3)	0.95	1.45	1.20±0.01	0.083
总孔隙度 Total porosity/%	33.70	56.50	43.07±0.49	0.119
有机质 Organic matter/kg	0.41	8.77	2.09±0.14	0.675
有效磷 Available P/(m/kg)	0.01	40.16	13.06±0.80	0.631
NH_4^+ /(m/kg)	4.37	47.48	21.86±1.00	0.474
NO_3^- /(m/kg)	3.81	22.93	7.50±0.26	0.355
K^+ /(m/kg)	38.20	421.75	79.59±4.70	0.611
Na^+ /(m/kg)	23.19	6991.61	815.78±102.23	1.296

3.3 柽柳灌丛密度及其环境因子的相关性分析

由表 3 可知,黄河三角洲莱州湾柽柳灌丛的林分密度与距海距离和地下水水位呈极显著正相关,与土壤含水量呈极显著负相关,与有效磷含量和 NO_3^- -N 含量呈显著正相关。土壤含盐量与 K^+ 、 Na^+ 和土壤含水量呈极显著正相关,表明 K^+ 和 Na^+ 是该区域土壤盐分阳离子的主要成分;与地下水水位、土壤总孔隙度以及 NH_4^+ -N 含量呈极显著负相关,与有机质和有效磷呈显著负相关。表明地下水水位越低,土壤含盐量越高;土壤含盐量与土壤水分、土壤孔隙状况以及养分含量均密切相关。土壤含水量与 Na^+ 、 K^+ 、土壤含盐量和土壤容重呈显著正相关,与地下水水位、总孔隙度、林分密度和 NH_4^+ -N 呈极显著负相关,与距海距离呈显著负相关。表明随着距海距离的增加,土壤含水量下降显著;土壤水分与盐分含量、土壤通透性和林分密度密切相关。

表 3 柽柳灌丛密度及其环境因子的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between stand density of *T. chinensis* and it's environment factor

因子 Factor	FD	DS	GL	SC	pH	SWC	SD	TP	OM	AP	NH_4^+	NO_3^-	K^+	Na^+
FD	1													
DS	0.405 **	1												
GL	0.276 **	0.350 **	1											
SC	-0.166	0.142	-0.413 **	1										
pH	0.122	0.093	0.058	-0.072	1									
SWC	-0.300 **	-0.227 *	-0.620 **	0.472 **	-0.068	1								
SD	0.108	0.160	-0.128	0.195 *	0.404 **	0.343 **	1							
TP	0.019	-0.101	0.158	-0.441 **	-0.359 **	-0.390 **	-0.691 **	1						
OM	-0.012	0.009	-0.056	-0.224 *	-0.422 **	-0.095	-0.431 **	0.554 **	1					
AP	0.209 *	0.182	0.249 **	-0.225 *	-0.076	-0.186	-0.027	0.267 **	0.353 **	1				
NH_4^+	-0.124	-0.136	0.202 *	-0.256 **	-0.641 **	-0.262 **	-0.649 **	0.636 **	0.548 **	0.073	1			
NO_3^-	0.239 *	0.353 **	-0.014	0.070	-0.123	-0.129	0.006	0.098	0.173	0.208 *	0.125	1		
K^+	-0.139	0.102	-0.367 **	0.929 **	-0.263 **	0.450 **	0.099	-0.429 **	-0.163	-0.224 *	-0.115	0.097	1	
Na^+	-0.181	0.068	-0.411 **	0.919 **	-0.189	0.573 **	0.239 *	-0.553 **	-0.279 **	-0.243 *	-0.250 **	0.011	0.960 **	1

FD: 林分密度 Forest density; DS: 距海距离 Distance from the sea; GL: 地下水水位 Groundwater level; SC: 土壤含盐量 Soil salt content; SWC: 土壤含水量 Soil water content; SD: 土壤容重 Soil density; TP: 总孔隙度 Total porosity; OM: 有机质 Organic matter; AP: 有效磷 Available P. * 和 ** 分别代表在 5% 和 1% 水平下显著

土壤容重与 pH 值和土壤含水量呈极显著正相关,与总孔隙度、 NH_4^+ -N 和有机质含量呈极显著负相关,与含盐量和 Na^+ 含量呈显著正相关。土壤总孔隙度与 NH_4^+ -N、有机质和有效磷呈极显著正相关,与土壤容重、含盐量、pH 值、土壤含水量、 K^+ 和 Na^+ 含量等呈极显著负相关。分析表明,土壤容重和孔隙度等基本物理特性,与地下水水位和距海远近等空间因子相关性不大,而与土壤盐分和养分状况表现出一定的相关性。

土壤有机质与总孔隙度、 NH_4^+ -N 和有效磷呈极显著正相关,与土壤容重、pH 值和 Na^+ 含量呈极显著负相关,与土壤含盐量呈显著负相关。土壤速效养分与盐碱含量以及 K^+ 和 Na^+ 等 2 种阳离子多呈显著负相关,与总孔隙度多呈极显著正相关。分析表明,随着距海距离的变远,莱州湾柽柳灌丛地下水水位逐渐升高,土壤含水量和含盐量逐渐下降,柽柳灌丛密度呈现增大趋势。而土壤养分、土壤容重和孔隙度等基本物理性状与距海远近相关性不密切。

3.4 影响莱州湾柽柳分布主要环境因子的确定

距海距离、地下水水位、土壤盐碱含量、土壤基本物理性质及土壤养分含量均可影响柽柳灌丛分布格局,同时林分生长也对土壤理化性质产生一定的反馈效应,并且各环境因子之间也互相影响。因此,有必要将众多具有一定相关性的环境因子提取出主要影响因子,即需要对莱州湾柽柳灌丛分布格局的环境因子进行主成分分析。柽柳灌丛分布格局的主成分荷载见表 4。依据主成分特征值大于 1 的原则,共可选取 4 个主成分,累计贡献率可达 76.789%,能够较好反映 13 个指标的大部分信息。第一主成分的贡献率为 34.421%,因子负

荷量较大的为 Na^+ 和土壤含盐量, Na^+ 与土壤含盐量呈极显著正相关, 相关系数为 0.919 之间(表 3), 因此这一主成分可描述为土壤盐分条件。第二主成分的累计贡献率可达 54.575%, 因子负荷量较大的为土壤 pH 值, 该主成分因子可描述为土壤碱度。第三主成分累计贡献率达 67.877%, 距海距离的因子负荷量最大, 可描述为至海岸距离。第四主成分累计贡献率达 76.789%, 有效磷和地下水水位因子负荷量较大, 这一类因子可描述土壤速效磷和潜水埋深。综合分析表明, 影响莱州湾湿地柽柳灌丛分布格局的最主要因子为土壤盐分, 其次是土壤碱度和至海岸距离, 土壤速效磷和潜水埋深次之, 而其他因素影响较小。

表 4 柽柳灌丛分布的主成分分析

Table 4 Principal component analysis on distribution of *T. chinensis* population

因子 Factor	主成分 Principal component			
	1	2	3	4
距海距离 Distance from the sea	0.028	-0.161	0.841	-0.089
地下水水位 Groundwater level	-0.502	-0.354	0.410	-0.476
土壤含盐量 Soil salt content	0.814	0.399	0.229	-0.122
pH 值	0.194	-0.803	-0.048	0.072
土壤含水量 Soil water content	0.665	0.254	-0.313	0.403
土壤容重 Soil density	0.574	-0.543	0.122	0.324
总孔隙度 Total porosity	-0.794	0.369	-0.074	0.041
有机质 Organic matter	-0.527	0.526	0.074	0.413
有效磷 Available P	-0.373	-0.019	0.424	0.527
NH_4^+	-0.610	0.634	-0.026	-0.199
NO_3^-	-0.079	0.183	0.643	0.307
K^+	0.762	0.532	0.237	-0.188
Na^+	0.863	0.417	0.158	-0.132
特征值 Eigenvalue	4.475	2.620	1.729	1.159
贡献率 Contribution rate/%	34.421	20.154	13.302	8.913
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%	34.421	54.575	67.877	76.789

4 讨论与结论

4.1 影响湿地柽柳灌丛分布的主要因子

植物种群空间分布型是认识植物种群的生态过程以及它们与生境相互关系的主要指标^[7], 对掌握种群在植物群落中的地位和作用, 以及植物空间分布与环境因子的相互关系意义重大^[4, 12, 21-22]。相关研究表明, 柽柳种群在黄河三角洲的空间分布格局多呈现聚集分布, 但随着距海距离的增加, 聚集强度在下降; 柽柳种群定居和更新主要发生在 32m² 取样面积范围内, 呈现聚集性强的特点^[10]。本研究依据负二项参数、扩散系数、Cassie 指标、丛生指标以及聚块性指标判断出, 黄河三角洲莱州湾柽柳种群也呈现典型的聚集分布。植物聚集分布对策可有效发挥群体效应, 有利于柽柳种群抵抗盐害, 提高植株的成活率, 表现为 Allee 效应规律^[12]。但也有研究表明, 不同水深梯度下柽柳空间分布格局不同, 可呈现集群分布、随机分布和均匀分布等不同分布型^[12]。上述结果的不同, 可能与柽柳生境空间异质性较大和取样尺度不同有较大关系; 同时, 除了环境因素影响柽柳种群的结构动态之外, 随着种群竞争、繁殖等一系列种间种内的生态学过程变化, 诱导了群落生态过程的空间非同步性, 也会影响到种群的动态与空间分布^[10]。一般情况下, 在自然群落中, 植物种群多为集群分布, 这与物种繁殖体散布的有限性、环境的异质性有关^[17]。柽柳种子繁殖困难, 种群的扩展以最初侵入并定居的母体为中心而展开, 多形成以母体为中心的聚集分布。

滨海湿地、三角洲湿地以及盐沼类湿地的植被分布主要受土壤水分和盐分的影响, 其他环境因子直接或间接通过影响土壤盐分和水分的变化而影响植被空间分布和生长过程^[23-25]。相关研究表明, 水分条件和由

距离海洋远近、海拔高低以及微地貌等所决定的土壤盐分因子是制约黄河三角洲湿地生态系统形成和发育的关键制约因素^[7-8,22]。但也有研究表明,湿地植被生长和分布受土壤盐分和地下水埋深两者共同的影响^[4,12],黄河三角洲怪柳种群分布主要取决于土壤含盐量、 Na^+ 含量及距离海洋距离^[21],随着土壤含盐量及水分的增加,黄河三角洲湿地植物群落的组成种类减少^[11]。在黄河三角洲区域怪柳主要分布于低水深、高盐分地区,水深-1.55 m 可能是黄河三角洲湿地怪柳种群分布格局的一个阈值^[7],随着距离海岸越远,怪柳分布的可能性越小^[21]。本研究主成分分析表明,土壤盐碱状况是影响黄河三角洲莱州湾怪柳灌丛分布的主要影响因素,其次是距海距离,而土壤速效磷和潜水埋深对其影响相对较小。因此,在莱州湾怪柳林栽植管理中,除了通过改善微地形地貌来控制地下水水位之外,更应注意采用植被恢复措施来达到降盐抑碱作用和改善土壤速效养分的效果,为怪柳幼苗的生长提供良好的生境。

4.2 湿地怪柳灌丛土壤环境因子的交互效应

水盐生境的不同可影响盐碱类湿地植物的初级生产力^[25],从而影响有机质向土壤的输入^[8]。研究区土壤有机质平均含量为 2.09 /kg,速效养分含量均较低,可能与盐分较高影响土壤中有有机物的分解矿化和植物群落生产力的大小有关^[8,11]。动植物残体和生物固氮是天然湿地中氮的主要来源^[26],而湿地植被初级生产力的的高低以及植被向土壤的归还水平、固氮能力的强弱受水盐含量高低影响较大^[8,11,22],因此,怪柳灌丛土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量的变异系数较大,并且含量均较低,平均含量分别为 21.86、7.50 mg/kg。莱州湾怪柳灌丛土壤有机质与土壤通气透水性能、盐碱含量和速效养分含量密切相关。相关研究表明,黄河三角洲湿地土壤有机质含量与全氮含量^[11,21-22]、有效磷^[22]呈极显著正相关,与含水量、含盐量^[11]呈极显著负相关,而与距海远近相关性不大。可见距海远近、地下水水位高低等微地形因子对土壤有机质含量影响不大。

本研究表明,黄河三角洲莱州湾怪柳灌丛土壤含盐量与 K^+ 、 Na^+ 和土壤含水量呈极显著正相关,这与黄河三角洲湿地土壤含盐量与 Cl^- 、 Na^+ 含量呈极显著正相关^[12,21-22],与土壤含水量、pH 值呈显著正相关^[21]的结论类似。莱州湾怪柳灌丛地下水水位越低、土壤孔隙越小或养分含量越低,毛管作用强烈,致使土壤含盐量呈明显上升趋势,但与距海距离相关性不大,可能与研究样地与至海岸距离变异较小有关。而相关研究表明,地下水位和海拔高程等自然因素是造成黄河三角洲土壤盐渍化的主要因素^[27],黄河三角洲湿地土壤含盐量与距海远近^[21-22]、至海岸最短距离、地表高程、地下水埋深^[9]或有机质含量^[11]呈极显著负相关。综合分析表明,地下水水位和土壤含水量共同影响黄河三角洲莱州湾怪柳灌丛土壤含盐量的高低。

黄河三角洲怪柳湿地土壤含水量与可溶性盐含量、pH 值、 Cl^- 和 Na^+ 含量呈显著正相关^[11,21],与有机质含量^[11]、距离海岸远近^[21]呈极显著负相关。莱州湾怪柳灌丛土壤含水量也表现为与土壤盐分含量和土壤容重呈显著正相关,随着地下水水位的降低、孔隙度的减小或林分密度的降低,包气带输水能力增强,水分传导率增加,致使土壤含水量表现为增大趋势。分析表明,土壤含水量与土壤含盐量密切相关,至海岸距离远近、地下水水位高低、土壤通透性以及林分密度大小均可影响土壤水分含量。随着微生境条件的不同,黄河三角洲怪柳灌丛土壤水盐含量波动性较大,既受距海远近和植被状况的影响,也受区域微地形地貌、潮汐状况以及采集时间和采样方法的影响^[8,11]。

综上所述,黄河三角洲莱州湾怪柳灌丛土壤盐碱含量高且变异系数大,随距海远近的不同,林分密度波动性较大,土壤养分含量偏低且差异较大,而土壤基本物理性质差异较小。距海远近可显著影响该区域地下水埋深,而地下水水位的高低会引起土壤水分和盐分的变化,从而直接影响怪柳种群的密度和分布格局。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Tuchman N C, Larkin D J, Geddes P, Wildova R, Jankowski K, Goldberg D E. Patterns of environmental change associated with *Typha xglauca* invasion in a Great Lakes coastal wetland. *Wetlands*, 2009, 29(3): 964-975.
- [3] 张殷波, 郭柳琳, 王伟, 田瑜, 李俊生. 秦岭重点保护植物丰富度空间格局与热点地区. *生态学报*, 2014, 34(8): 2109-2117.

- [4] Antonellini M, Mollema P N. Impact of groundwater salinity on vegetation species richness in the coastal pine forests and wetlands of Ravenna, Italy. *Ecological Engineering*, 2010, 36(9): 1201-1211.
- [5] 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.
- [6] 张立杰, 赵文智, 何志斌. 青海云杉(*Picea crassifolia*)种群格局的分形特征及其影响因素. *生态学报*, 2008, 28(4): 1383-1389.
- [7] 贺强, 崔保山, 胡乔木, 杨舒茜, 赵欣胜. 水深环境梯度下柽柳种群分布格局的分形分析. *水土保持通报*, 2008, 28(5): 70-73.
- [8] 凌敏, 刘汝海, 王艳, 罗先香, 周凤琴. 黄河三角洲柽柳林场湿地土壤养分的空间异质性及其与植物群落分布的耦合关系. *湿地科学*, 2010, 8(1): 92-97.
- [9] 宋创业, 刘高焕, 刘庆生, 曹铭昌, 黄翀. 黄河三角洲植物群落分布格局及其影响因素. *生态学杂志*, 2008, 27(12): 2042-2048.
- [10] 刘富强, 王延平, 杨阳, 许景伟, 王华田. 黄河三角洲柽柳种群空间分布格局研究. *西北林学院学报*, 2009, 24(3): 7-11.
- [11] 汤爱坤, 刘汝海, 许廖奇, 王金玉, 刘一霆. 昌邑海洋生态特别保护区土壤养分的空间异质性与植物群落的分布. *水土保持通报*, 2011, 31(3): 88-93.
- [12] 赵欣胜, 吕卷章, 孙涛. 黄河三角洲植被分布环境解释及柽柳空间分布点格局分析. *北京林业大学学报*, 2009, 31(3): 29-36.
- [13] 刘衍君, 曹建荣, 高岩, 刘文全, 徐秀丽. 莱州湾南岸海水入侵区土壤盐渍化驱动力分析与生态对策. *中国农学通报*, 2012, 28(2): 209-213.
- [14] Guan B, Yu J B, Wang X H, Fu Y Q, Kan X Y, Lin Q X, Han G X, Lu Z H. Physiological responses of halophyte *Suaeda salsa* to water table and salt stresses in coastal wetland of Yellow River Delta. *Clean-Soil, Air, Water*, 2011, 39(12): 1029-1035.
- [15] 袁秀, 马克明, 王德. 黄河三角洲植物生态位和生态幅对物种分布-多度关系的解释. *生态学报*, 2011, 31(7): 1955-1961.
- [16] 王峥嵘, 安树青, 朱学雷, Campell D G, 杨小波. 热带森林乔木种群分布格局及其研究方法的比较. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 575-580.
- [17] 谢宗强, 陈伟烈, 刘正宇, 江明喜, 黄汉东. 银杉种群的空间分布格局. *植物学报*, 1999, 41(1): 95-101.
- [18] 郭忠玲, 马元丹, 郑金萍, 刘万德, 金哲峰. 长白山落叶阔叶混交林的物种多样性、种群空间分布格局及种间关联性研究. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2013-2018.
- [19] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究法. 北京: 中国林业出版社, 1986: 30-36.
- [20] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明. 土壤盐分和含水量的空间变异性及其 CoKriging 估值-以黄河三角洲地区典型地块为例. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 133-138.
- [21] 赵欣胜, 崔保山, 孙涛, 贺强. 黄河三角洲潮沟湿地植被空间分布对土壤环境的响应. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1855-1861.
- [22] 王岩, 陈永金, 刘加珍. 黄河三角洲湿地植被空间分布对土壤环境的响应. *东北林业大学学报*, 2013, 41(9): 59-62.
- [23] Jafari M, Chahouki M A Z, Tavili A, Azarnivand H, Amiri G Z. Effective environmental factors in the distribution of vegetation types in Poshtkouh rangelands of Yazd Province (Iran). *Journal of Arid Environments*, 2004, 56(4): 627-641.
- [24] Caçador I, Tibério S, Cabral H N. Species zonation in Corroios salt marsh in the Tagus estuary (Portugal) and its dynamics in the past fifty years. *Hydrobiologia*, 2007, 587(1): 205-211.
- [25] 管博, 栗云召, 夏江宝, 董洪芳, 吕振波, 于君宝. 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*, 2014, 33(10): 2633-2639.
- [26] 赵如金, 李潜, 吴春笃, 储金宇, 缪红云. 北固山湿地土壤氮磷的空间分布特征. *生态环境*, 2008, 17(1): 273-277.
- [27] 曹建荣, 徐兴永, 于洪军, 刘衍君. 黄河三角洲土壤盐渍化原因分析与生态风险评价. *海洋科学进展*, 2014, 32(4): 508-516.