

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

赵欣胜¹ 吕卷章² 孙涛¹

(¹ 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室
2 山东黄河三角洲国家级自然保护区管理局)

摘要:首先运用典范对应分析(CCA)方法,对黄河三角洲湿地植物分布与环境因子之间的关系进行了研究,得出影响黄河三角洲湿地植物分布规律的主要因素是水深和盐度的变化。然后运用点格局分析方法(SPPA),研究了黄河三角洲柽柳在不同水深梯度下的空间分布格局。水深小于0 cm时,柽柳在0~6 m尺度内都不同程度地呈现出集群分布,即在不同水深梯度下,柽柳空间分布格局在尺度变换时,呈现不同的规律。说明水深变化对柽柳空间分布格局有着重要影响,是柽柳生态适应性的体现,也是柽柳对水深适宜性响应的结果。

关键词:黄河三角洲; 柽柳; 环境梯度; 空间格局; 湿地

中图分类号:S793.5; Q941.2 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2009)03-0029-08

ZHAO Xin-sheng¹; LÜ Juan-zhang²; SUN Tao¹. Relations between the distribution of vegetation and environment in the Yellow River Delta and SPPA for Chinese tamarisk spatial distribution. *Journal of Beijing Forestry University* (2009) 31(3) 29~36 [Ch, 33 ref.]

1 State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, P.R. China;

2 Yellow River Delta National Nature Reserve of Shandong, Dongying City, 257091, P.R. China.

Using canonical correspondence analysis (CCA), the authors studied the relationship between wetland vegetation distribution and environment factors in the Yellow River Delta, and found out that the key factors affecting wetland vegetation distribution were water depth and salinity. And then, by using the spatial pattern analysis method—spatial point pattern analysis (SPPA), the authors studied the different changing rules of spatial distribution pattern of Chinese tamarisk—a major shrub community in the Yellow River Delta, in different water depth gradients. When the water table depth was lower than 0 cm, the spatial distribution of Chinese tamarisk showed a cluster distribution pattern at the 0~6 m spatial scale, and it was related with environment conditions. Spatial distribution patterns varied at different water table depth. When the spatial scale changed, the water depth changing affected the spatial distribution of Chinese tamarisk greatly. This demonstrates the ecological suitability of Chinese tamarisk in response to water table depth.

Key words Yellow River Delta; Chinese tamarisk; environment gradient; spatial pattern; wetland

数量生态学引入到植被生态学中已经很长时期,且其中的排序和分类理论在植被群落生态学中的应用发展很快,已成为现代植被研究必不可少的手段,能客观地反映植物群落的生态关系及植物与环境间的关系,但用于湿地植被响应环境因子、确定影响湿地植被空间分布关键环境因子等方面的研究为数不多^[1~10]。种群空间分布格局及其动态往往反

映出环境对种群内个体生存和生长的影响,也反映和指示植物的生态适应对策。因此,一旦格局被表述出来,就能进一步探求格局的决定因素,以及产生和维持这些格局的机理^[11~12]。随着生态水文学理论深入到湿地生态需水研究中,有关湿地生态需水的相关理论和计算方法逐渐发展起来,但与之相关的机理研究较少,特别是以水分为主要环境因子影响

湿地植物空间分布格局方面的研究略显不足^[13-19]。而作为空间格局分析方法中的重要分析方法——空间点格局分析方法(Spatial point pattern analysis, SPPA),能够解决不同环境梯度下湿地植物空间分布格局规律及响应机制^[20-25]。

研究区选择黄河三角洲人为干扰最少的区域,通过分析植物生长的土壤(包括底泥)环境,运用典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)方法,先确定黄河三角洲湿地植物分布与环境因子之间的关系,然后探讨湿地植被分布与水深梯度变化、环境因子与水深梯度变化之间的联系;再运用空间点格局分析方法揭示柽柳(*Tamarix chinensis*)空间分布格局原因,通过尺度变换,分析不同环境梯度下柽柳空间分布格局规律。进而揭示水深变化对柽柳空间分布格局规律的影响,为丰富湿地生态需水机理研究提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲国家级自然保护区(N $37^{\circ}40' \sim 38^{\circ}10'$, E $118^{\circ}41' \sim 119^{\circ}16'$)地处山东省东营市黄河入海口处,总面积 153 000 hm²,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。属暖温带季风大陆性气候,四季分明,光照充足,雨

热同期。年平均气温 12.1°C,无霜期 196 d,年平均降水量 551.6 mm,年均蒸发量为 1 962 mm。黄河三角洲主要植被有芦苇(*Phragmites communis*)、柽柳、白茅(*Imperata cylindrica*)、獐茅(*Aeluropus littoralis* var. *sinensis*)、翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*)等,其中芦苇、柽柳及翅碱蓬分布较广。

1.2 调查方法

调查地点在山东省黄河三角洲大汶流管理站所辖区域(图 1)。用于典范对应分析(CCA)的样地有 21 个,规格 50 m × 50 m。每个样地随机取土样 10 个,回室内分析,并取平均值作为计算参数;同时记录植物种类、每种植物单位面积数量、多度、盖度(见表 1)。柽柳是黄河三角洲唯一的自然灌木,因此探讨柽柳的空间分布规律具有重要的研究价值。由于长期实施人工引水工程,导致柽柳林发生淹水现象,水深过高是幼龄柽柳死亡的主要原因。为此本文选择 5 年生柽柳作为观测对象,记录柽柳个体的位置,以坐标值表示,坐标值用距离(m)直接表示。同时纪录群落特征。

1.3 数据监测及分析方法

水深(WD)用标尺法、pH 用便携式 pH 测定仪、盐度(S)用便携式盐度测定仪、有机质(SOM)用重铬酸钾-浓硫酸氧化法、全氮(TN)用碱解扩散法、全磷(TP)用高氯酸-硫酸法、K⁺用原子吸收法、Na⁺用原



图 1 研究区位置及试验选址

FIGURE 1 Location of study area and experiment site

子吸收法、氨态氮(NH_4^-N)用便携式多参数测定仪、 Cl^- 用莫尔法、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 用EDTA滴定法。

1.4 研究方法

典范对应分析(CCA)已被广泛应用于植被、种类分布与环境因子关系研究,是基于对应分析发展而来的一种排序方法,是由CA/RA修改而产生的新方法,是把CA/RA与多元回归分析相结合起来,每一步计算均与环境因子进行回归,用于研究植被与环境的关系,又称多元直接梯度分析^[21, 26-27]。

CCA的基本思路是,在对应分析的迭代过程中,每次得到的样方排序坐标值均与环境因子进行多元线性回归,即:

$$Z_j = b_0 + \sum_{k=1}^q b_k U_{kj}$$

式中: Z_j 是第 j 个样方的排序值, b_0 是截距, b_k ($k=1, 2, \dots, q$; q 为环境因子数)是样方与第 k 个环境因子之间的回归系数, U_{kj} 是第 k 个环境因子在第 j 个样方中的观测值。

点格局分析的统计学理论是由Ripley(1976)首先提出来的,后来经Diggle等人的发展逐步形成一种种群格局分析的新方法^[21-24]。它是以植物种的个体在空间的坐标为基本的数据,每个个体都可以看作是二维空间的一个点。这样所有个体组成了空间分布的点图。张金屯利用此方法在研究植物种群的分布格局和联结关系时,取得了很好的效果^[22, 24]。其计算公式为:

$$H_t = \sqrt{\frac{A}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{W_{ij}} I_t(u_{ij}) / \pi - t}$$

式中: n 为总点数; u_{ij} 为点 i, j 之间的距离。 $u_{ij} \leq t$

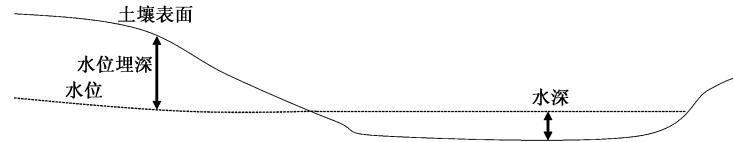


图2 环境梯度示意图

FIGURE 2 Sketch map of environmental gradients

从表2可知,研究区 Na^+ 、 K^+ 、盐度平均含量非常高,空间差异性也很大。盐度平均含量达到4.58%,最大含量为12.90%,最小含量为0.20%; Na^+ 平均含量在0.081 g/kg,最大为0.344 g/kg(指表层土盐结皮含量),最小为0.011 g/kg; K^+ 平均含量达到0.014 g/kg,最大为0.068 g/kg,最小为0.001 g/kg; Cl^- 平均含量为0.96 g/kg,最大为2.35 g/kg,最小为0.02 g/kg。其他环境因子平均含量和空间差异性不是很明显,说明研究区与盐碱化有关的环境因子,其空间变异性较大。而盐度过好的含量是由

时, $I_t(u_{ij})=1$; $u_{ij} > t$ 时, $I_t(u_{ij})=0$ 。 W_{ij} 为以点 I 为圆心, u_{ij} 为半径的圆周长在面积 A 中的比例,其为一个点(植株)可被观察到的概率,这里为权重,是为了消除边界效应。 $H_t > 0$,为集群分布; $H_t < 0$,为均匀分布; $H_t = 0$,为随机分布。Monte-Carlo拟合检验用于计算上下包迹线(Envelopes),即置信区间,并以 t 为横坐标,上下包迹线为纵坐标绘图。若用种群实际分布数据(点图)计算得到的函数值在包迹线内,则符合随机分布;若在包迹线以上,则为集群分布;若在包迹线以下,则为均匀分布。

2 结果与分析

2.1 不同环境梯度下湿地植物分布规律

环境梯度是指环境条件随空间变化而产生的变异性,其影响条件主要是坡度、坡向、坡高、水分、人类干扰、地形等。黄河三角洲环境梯度主要是环境质量(土壤环境)、水深(图2)及盐度引起的。

通过自由R语言的Vegan模块(R v2.21 Vegan)编程实现CCA分析,作出15个种与12个环境因子的排序图。在CCA排序图中,环境因子用带有箭头的线段表示,连线的长短表示植物种类分布与该环境因子关系的大小,箭头连线与排序轴的夹角表示该环境因子与排序轴相关性的大小,箭头所指的方向表示该环境因子的变化趋势。对植物种类和环境因子之间关系进行分析时,可以作出某一种类与环境因子连线的垂直线,垂直线与环境因子连线相交点离箭头越近,表示该种与该类环境因子的正相关性越大,处于另一端的则表示与该类环境因子具有负相关性越大^[21, 26-27]。

于淡水资源短缺,导致地下反盐情况严重,加之有潮沟子(海水进入研究区经过的沟渠,简称潮沟子)进入研究区,是湿地生态恢复工程面临的主要问题。

2.1.1 环境因子的相关性及主要因素

从表3可知, Cl^- 、 Na^+ 和盐度呈明显的相关性(相关系数分别为0.933 1和0.933 6),说明研究区氯化物对盐度贡献率最大,而水深与 Cl^- 、盐度呈明显的负相关性(相关系数分别为-0.842 1和-0.779 0),说明水量增加可促使湿地水深上升,进一步降低土壤盐度和氯化物含量。 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、

表1 植物多度值

TABLE 1 Abundance of vegetation in each sample plot

样地	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11	s12	s13	s14	s15
yf1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1
yf2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1
yf3	1	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
yf4	0	1	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
yf5	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
yf6	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
yf7	1	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
yf8	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
yf9	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
yf10	0	1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
yf11	0	1	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
yf12	1	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
yf13	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
yf14	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
yf15	3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
yf16	3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
yf17	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
yf18	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
yf19	3	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
yf20	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
yf21	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0

注:s1为芦苇; s2为翅碱蓬; s3为柽柳; s4为碱蓬(*Suaeda glauca*); s5为荻(*Miscanthus sacchari*); s6为白茅; s7为二色补血草(*Limonium bicolor*); s8为黄花蒿(*Artemisia annua*); s9为野大豆(*Glycine soja*); s10为罗布麻(*Apocynum venetum*); s11为草木樨(*Melilotus suaveolens*); s12为戟叶鹅绒藤(*Cynanchum sibiricum*); s13为蒲草(*Lepironia rticulata*); s14为金鱼草(*Ceratophyllum submersum*); s15为狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)。

表2 环境因子测定值

TABLE 2 Measurement values of the environmental factors in each sample site

样地	WD/ cm	TP/ ($g \cdot kg^{-1}$)	pH	TN/ ($g \cdot kg^{-1}$)	S/ %	SOM/ ($g \cdot kg^{-1}$)	Cl ⁻ / ($g \cdot kg^{-1}$)	K ⁺ / ($g \cdot kg^{-1}$)	Na ⁺ / ($g \cdot kg^{-1}$)	Ca ²⁺ / ($g \cdot kg^{-1}$)	Mg ²⁺ / ($g \cdot kg^{-1}$)	NH ₄ -N/ ($g \cdot kg^{-1}$)
yf1	80.00	0.08	8.90	2.70	0.20	5.76	0.04	0.002	0.017	0.13	0.34	0.07
yf2	150.00	0.17	9.20	2.10	0.30	6.29	0.23	0.001	0.019	0.34	0.09	0.06
yf3	45.00	0.06	8.30	2.60	1.30	6.43	0.23	0.001	0.014	0.28	0.89	0.10
yf4	-120.00	0.08	8.70	2.30	9.20	5.49	1.87	0.001	0.195	0.30	0.35	0.10
yf5	-70.00	0.07	8.40	2.30	9.90	8.18	1.35	0.042	0.195	0.41	0.28	0.10
yf6	-75.00	0.03	8.80	3.10	12.90	9.63	2.00	0.022	0.344	6.66	5.50	0.09
yf7	-70.00	0.12	8.30	7.10	9.70	8.16	2.21	0.021	0.126	5.88	4.28	0.07
yf8	-70.00	0.31	9.60	3.00	10.90	6.86	1.69	0.058	0.211	0.86	0.67	0.06
yf9	-85.00	0.25	8.90	0.50	9.30	6.02	1.99	0.068	0.086	1.55	1.33	0.03
yf10	-90.00	0.67	8.70	0.70	12.20	3.02	2.35	0.012	0.240	0.98	0.71	0.01
yf11	-80.00	0.03	8.50	1.00	4.60	16.18	1.75	0.006	0.030	1.58	1.27	0.10
yf12	-100.00	0.07	8.70	1.72	1.30	14.83	0.65	0.003	0.016	0.35	0.43	0.01
yf13	20.00	0.01	7.70	1.59	1.20	3.95	0.42	0.007	0.012	0.50	0.43	0.02
yf14	25.00	0.02	7.60	1.46	1.70	6.71	0.64	0.004	0.018	0.62	0.99	0.10
yf15	50.00	0.02	8.00	1.33	1.00	3.76	0.02	0.006	0.014	0.38	0.39	0.02
yf16	35.00	0.10	7.30	1.20	1.11	2.59	0.22	0.005	0.012	0.52	0.69	0.03
yf17	45.00	0.01	7.50	1.07	1.20	7.10	0.37	0.007	0.014	1.03	1.23	0.03
yf18	15.00	0.16	7.90	0.94	1.10	5.20	0.50	0.007	0.017	0.52	0.27	0.02
yf19	20.00	0.10	7.80	0.81	1.40	7.52	0.29	0.008	0.012	0.39	0.13	0.02
yf20	45.00	0.10	7.10	0.68	1.00	3.28	0.41	0.005	0.011	0.24	0.01	0.02
yf21	41.00	0.20	7.20	0.63	1.30	3.44	0.56	0.006	0.019	0.31	0.22	0.10

Ca^{2+} 和 Cl^- 的相关性分别为 0.549 5、0.792 3、0.538 8、0.583 2, 说明研究区氯化物主要以 NaCl 、

KCl 、 MgCl_2 以及 CaCl_2 的形式存在。

表 3 环境因子之间相关性

TABLE 3 Correlativity among the environmental factors

	TP	pH	TN	S	SOM	Cl^-	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NH_4^+	WD
TP	1											
pH	0.394 9	1										
TN	-0.119 8	0.309 5	1									
S	0.490 8	0.530 9	0.356 9	1								
SOM	-0.296 9	0.322 6	0.159 0	0.102 1	1							
Cl^-	0.485 1	0.488 0	0.331 3	0.933 1	0.256 1	1						
K^+	0.319 8	0.453 5	0.121 1	0.647 8	0.030 1	0.549 5	1					
Na^+	0.412 9	0.519 3	0.335 4	0.933 6	0.046 3	0.792 3	0.476 8	1				
Ca^{2+}	-0.045 5	0.176 6	0.641 5	0.573 4	0.271 1	0.583 2	0.240 7	0.567 8	1			
Mg^{2+}	-0.104 4	0.156 0	0.615 1	0.539 9	0.278 7	0.538 8	0.209 6	0.550 2	0.983 7	1		
NH_4^+	-0.323 8	0.304 2	0.432 8	0.299 9	0.337 2	0.284 3	0.054 3	0.326 3	0.258 3	0.320 1	1	
WD	-0.284 3	-0.352 0	-0.175 0	-0.779 0	-0.422 0	-0.842 1	-0.467 6	-0.650 5	-0.371 7	-0.350 7	-0.162 8	1

2.1.2 植被分布关键环境因子的确定

从表 4 可知, 环境因子中的盐度、 Cl^- 、 Na^+ 与植物种类第 1 排序轴呈显著的负相关性(相关系数分别为 -0.806 7、-0.848 6、-0.674 7), 而水深与植物种类第 1 排序轴呈显著的正相关性(相关系数为 0.928 4), 环境因子中 pH、 K^+ 和 Na^+ 与植物种类第 2 排序轴呈较强的正相关性(相关系数分别为 0.437 2、0.460 0、0.489 2); 盐度、 Cl^- 、 Na^+ 与环境因子第 1 排序轴呈明显的负相关关系(相关系数分别为 -0.818 6、-0.861 2、-0.684 7), 水深则与环境因子第 1 排序轴呈极显著的正相关(相关系数为 0.942 2), pH、 K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 与环境因子第 2 排序轴呈较明显的正相关, 说明盐度、氯化物及水深是影响黄河三角洲湿地植被分布的主要环境因子。环境因子第 1 排序轴负方向反映的盐度梯度变化, 正方向反映的是水深梯度变化, 第 2 轴反映的仍然与盐度梯度有关。从表 5 可以看出, 植物种类第 1 排序轴与环境因子第 1 排序轴具有明显的正相关(相关系数为 0.985 4), 环境因子第 2 排序轴与植物种类第 2 排序轴具有极显著的正相关(相关系数为 0.958 3)。

从图 3 可知, 柽柳、翅碱蓬与盐度具有显著的相关性; 翅碱蓬与氯离子含量呈明显的正相关, 同时与 TP 含量正相关性也很强; 柽柳与 TN 也具有显著的相关性; 金鱼草和狐尾藻与水深具有显著的正相关性; 芦苇、荻、白茅、野大豆、罗布麻、草木樨、戟叶鹅绒藤、蒲草与水深也具有较强的正相关性; 而二色补血草和黄花蒿与有机质呈正相关。盐生植被的类型、空间分布和演替与含盐量的关系极为密切^[27]。沿第 1 轴从左到右反映的是盐度和氯化物从高到低、水深从低到高的过程, 植物分布类型也由旱生、耐盐碱植物向水生和湿生植物演化。

表 4 环境因子与植物种类及环境因子排序轴相关系数

TABLE 4 Correlative coefficients of environmental factors with vegetation types and the compositor axis of environmental factors

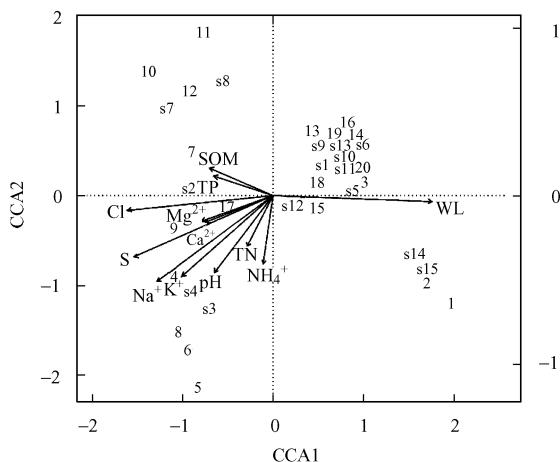
	植物种类		环境因子	
	第 1 排序轴	第 2 排序轴	第 1 排序轴	第 2 排序轴
TP	-0.343 6	-0.110 6	-0.348 7	-0.115 4
pH	-0.341 9	0.437 2	-0.347 0	0.456 2
TN	-0.151 9	0.288 2	-0.154 1	0.300 7
S	-0.806 7	0.350 7	-0.818 6	0.365 9
SOM	-0.369 3	-0.159 8	-0.374 8	-0.166 7
Cl^-	-0.848 6	0.080 9	-0.861 2	0.084 4
K^+	-0.530 2	0.460 0	-0.538 1	0.480 1
Na^+	-0.674 7	0.489 2	-0.684 7	0.510 4
Ca^{2+}	-0.415 5	0.143 0	-0.421 6	0.149 3
Mg^{2+}	-0.391 0	0.149 9	-0.396 8	0.156 5
NH_4^+	-0.055 3	0.389 6	-0.056 1	0.406 5
WD	0.928 4	0.031 2	0.942 2	0.032 6

表 5 植物排序轴与环境因子排序轴相关性

TABLE 5 Correlativity of vegetation compositor axis and that of environmental factors

	植物种类		环境因子	
	第 1 排序轴	第 2 排序轴	第 1 排序轴	第 2 排序轴
植物种类				
第 1 排序轴	1			
植物种类				
第 2 排序轴	-0.004 7	1		
环境因子				
第 1 排序轴	0.985 4	0	1	
环境因子				
第 2 排序轴	0	0.958 3	0	1

根据上述分析, 黄河三角洲湿地区域内的植被分布与水深、盐度、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 等环境因子有着非常密切关系, 而 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 是构成盐的主要化学成分, 即黄河三角洲湿地区域内的植被分布主要影



柽柳为了生存,采取聚集在一起更利于抵抗盐度的侵害。这可以用 Allee 效应规律解释,如果植株个体形成集群,就能有效地发挥群体效应,抵御风吹、盐害等外界不利条件,提高植株的成活率^[28]。

柽柳是耐盐碱、耐干旱,对水分要求不高的植物。根据上述分析,不同水深梯度下柽柳在不同尺度范围内空间格局变化规律存在着差异。由于研究区盐分空间分布异质性,导致局部环境含盐量较高,盐碱呈斑点分布特征。另外研究范围内局部分布有极小的洼地,造成环境条件呈空间异质性,加上柽柳对水深的响应不同,是柽柳不同尺度空间分布格局差异性的主要原因。柽柳在不同环境梯度下表现出空间格局分布的差异性,主要是与柽柳林木群落的自然稀疏过程、干扰格局以及环境变化有着密切关系,同一龄级的个体在不同尺度下有不同的分布格局,这主要与环境条件的空间异质性变化相联系,而柽柳空间分布格局的聚集性随水深的变化是研究区自然稀疏过程的结果^[21-24,30-33]。

3 结论与讨论

1)盐度、氯化物及水深是影响黄河三角洲湿地植被分布的主要环境因子。黄河三角洲湿地区域内的植被分布与水深、盐度、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 等环境因子有着非常密切关系,而 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 是构成盐的主要化学成分,水盐交互作用是影响黄河三角洲湿地植被分布主要原因,水深过低,盐度增加,水深过高,盐度降低。可以单独从水深变化来阐述湿地植被分布特征。

2)不同环境梯度下,柽柳空间分布格局不同,其集群分布、随机分布及均匀分布变换方式不同。年最低水深大于0 cm 时,柽柳空间分布格局规律在0~25 m 尺度内都呈随机分布。年水位埋深变幅在-50~0 cm 时,在0~1.5 m 尺度下为随机分布,1.5~4.5 m 尺度下为集群分布,大于4.5 m 尺度下,则呈随机分布。年水位埋深变幅在-100~-60 cm 时,在1~4 m 和9~11.5 m 尺度下为集群分布,4~9 m 尺度下为随机分布,大于11.5 m 尺度下为均匀分布。水位埋深<-100 cm 范围下,在0~6 m 尺度下为集群分布,大于6 m 尺度下为随机分布。

3)水深小于0 cm 时,柽柳在0~6 m 尺度内都不同程度的呈现出集群分布,这与环境条件密切相关,水深过低,土壤含盐量增加,柽柳为了生存,采取集群分布对策利于种群抵抗盐害,提高植株的成活率。

致谢 感谢黄河三角洲国家级自然保护区管理局刘月良总工、大汶流管理站路峰副站长及王立东同志在数据采集、文献资料整理和野外工作中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] 郝占庆,郭水良. 长白山北坡草本植物分布与环境关系的典范对应分析[J]. 生态学报,2003,23(10):2 000-2 008.
HAO Z Q, GUO S L. Canonical correspondence analysis on relationship of herbs with their environments on northern slope of Changbai Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2 000-2 008.
- [2] HILL M O. Patterns of species distribution in Britain elucidated by canonical correspondence analysis [J]. *Journal of Biogeography*, 1991, 18: 247-255.
- [3] BRUNET J. Environmental and historical factors limiting the distribution of rare forest grasses in south Sweden [J]. *Forest Ecology and Management*, 1993, 61: 263-275.
- [4] 江洪,黄建辉,陈灵芝,等. 东灵山植物群落的排序、数量分类与环境解释[J]. 植物学报,1994,36(7):539-551.
JIANG H, HUANG J H, CHEN L Z, et al. DCA ordination, quantitative classification and environmental interpretation of plant communities in Dongling Mountain[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1994, 36 (7): 539-551.
- [5] 米湘成,张金屯,张峰,等. 山西高原植被与气候的关系分析及植被数量区划的研究[J]. 植物生态学报,1996,20(6):549-560.
MI X C, ZHANG J T, ZHANG F, et al. Analysis of relationships between vegetation and climate in Shanxi Plateau [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(6): 549-560.
- [6] 王孝安. 甘南玛曲植物群落的多元分析与环境解释[J]. 生态学报,1997,17(1):61-65.
WANG X A. Multivariate analysis and environmental interpretation of plant communities in Maqu, south Gansu [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 17(1): 61-65.
- [7] 娄安如. 天山中段山地植被的生态梯度分析及环境解释[J]. 植物生态学报,1998,22(4):364-372.
LOU A R. Ecological gradient analysis and environmental interpretation of mountain vegetation in the middle stretch of Tianshan Mountain [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22 (4): 364-372.
- [8] 上官铁梁,贾志力,张金屯,等. 汾河太原段河漫滩草地植被的数量分类与排序[J]. 草业学报,2001,10(4):31-39.
SHANGGUAN T L, JIA Z L, ZHANG J T, et al. A study on the numerical classification and ordination of grassland vegetation in flood plain of the Fen River in Taiyuan [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2001, 10(4): 31-39.
- [10] ANKE H,STEPHAN R. Multivariate statistics as a tool for model-based prediction of floodplain vegetation and fauna [J]. *Ecological Modelling*, 2003, 169: 73-87.
- [11] GUISAN A, WEISS S B, WEISS A D. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution [J]. *Plant Ecol*, 1999, 143: 107-122.
- [12] DIECKMANN U, HERBEN T, LAW R. Spatio-temporal processes in plant communities [M]// LEOPENIES W. *Yearbook 1995/1996, Institute for Advanced Study Berlin*. Berlin, Germany: Nicolaische Verlagsbuchhandlung, 1997.
- [13] 刘振国,李镇清. 不同放牧强度下冷蒿种群小尺度空间格局[J]. 生态学报,2004,24(2):227-235.

- LIU Z G, LI Z Q. Fine-scale spatial pattern of *Artemisia frigida* population under different grazing intensities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 227-235.
- [14] 崔保山,赵祥,杨志峰. 基于生态水文学原理的湖泊最小生态需水量计算[J]. 生态学报,2005,25(7):1 788-1 795.
- CUI B S,ZHAO X,YANG Z F. Eco-hydrology-based calculation of the minimum ecological water requirement for lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1 788-1 795.
- [15] 崔保山,杨志峰. 湿地生态环境需水量研究[J]. 环境科学学报,2002,22 (2):219-224.
- CUI B S, YANG Z F. Water consumption for eco-environmental aspect on wetlands [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22 (2):219-224.
- [16] 杨志峰,崔保山,刘静玲,等. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 北京:科学出版社,2003.
- YANG Z F, CUI B S, LIU J L, et al. *Theory, method and application of ecological and environmental water demand* [M]. Beijing: Sciences Press, 2003.
- [17] 崔保山,杨志峰. 湿地生态环境需水量等级划分与实例分析[J]. 资源科学,2003,25(1):21-28.
- CUI B S, YANG Z F. The classification and case study on eco-environmental water requirement of wetlands[J]. *Resources Science*, 2003, 25(1): 21-28.
- [18] 赵欣欣,崔保山,杨志峰. 黄河流域典型湿地生态环境需水量研究[J]. 环境科学学报,2005,25(5):567-572.
- ZHAO X S, CUI B S, YANG Z F. Study on the eco-environmental water requirement for wetland in Yellow River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(5):567-572.
- [19] 赵翔,崔保山,杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究[J]. 生态学报,2005,25(5):1 033-1 040.
- ZHAO X, CUI B S, YANG Z F. A study of the lowest ecological water level of Baiyangdian Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (5):1 033-1 040.
- [20] 李英华,崔保山,杨志峰. 白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响[J]. 自然资源学报,2004,19(1):62-68.
- LI Y H, CUI B S, YANG Z F. Influence of hydrological characteristic change of Baiyangdian on the ecological environment in wetland [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(1):62-68.
- [21] CRESSIE N A G. Statistics for spatial data[M]//WILEY DALE M R T. *Spatial pattern analysis in plant ecology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [22] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1995.
- ZHANG J T. *Quantitative ecological method of the vegetation* [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1995.
- [23] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析[J]. 植物生态学报,1998,22(4):344-349.
- ZHANG J T. Analysis of spatial point pattern for plant species[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(4): 344-349.
- [24] DIGGLE P J. *Statistical analysis of spatial point patterns* [M]. New York: Academic Press, 1983.
- [25] 张金屯,孟东平. 芦芽山华北落叶松林不同龄级立木的点格局分析[J]. 生态学报,2004,24(1):35-40.
- ZHANG J T, MENG D P. Spatial pattern analysis of individuals in different age-classes of *Larix principis-rupprechtii* in Luya Mountain Reserve, Shanxi, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1):35-40.
- [26] BAROT S, GIGNOUX J, MENAUT J C. Demography of a savanna palm tree: Predictions from comprehensive spatial pattern analyses [J]. *Ecology*, 1999, 80, 1: 987-2 005.
- [27] TER B C J F. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis [J]. *Ecology*, 1986, 67: 116-117.
- [28] 吴志芬,赵善伦,张学雷. 黄河三角洲湿地植被与土壤盐分的相关性研究[J]. 植物生态学报,1994,18(2):184-193.
- WU Z F, ZHAO S L, ZHANG X L. Studies on interrelation between salt vegetation and soil salinity in the Yellow River Delta [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(2):184-193.
- [29] ALLEE W C. *Animal aggregations: A study in general sociology* [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1931.
- [30] TOUCHETTE B W. Salt tolerance in a *Juncus roemerianus* brackish marsh: Spatial variations in plant water relations [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, 337: 1-12.
- [31] ADOR I C, TIBE' RIO S, CABRAL H N. Species zonation in Corroios salt marsh in the Tagus estuary (Portugal) and its dynamics in the past fifty years[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 587: 205-211.
- [32] BRUELHEIDE H, UDELHOVEN P. Correspondence of the fine-scale spatial variation in soil chemistry and the herb layer vegetation in beech forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 210: 205-223.
- [33] DALE W F, LYNN E N, ADAM H F. Environmental gradients, plant distribution, and species richness in arctic salt marsh near Prudhoe Bay, Alaska[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2004, 12: 215-233.

(责任编辑 赵 勃)