

盐城自然保护区海滨湿地植被演替的生态机制

姚 成, 万树文, 孙东林, 钦 佩*

(南京大学盐生植物实验室, 南京 210093)

摘要: 研究选取盐城自然保护区核心区典型湿地作为参照, 对其海滨湿地植物群落的自然演替以及利用生态工程方法控制外来种互花米草 (*Spartina alterniflora*) 的生态学机理进行了研究。利用空间替代时间的方法, 采取主分量分析和多元线性回归相结合的分析手段, 对采集的相关环境参量数据进行分析, 建立了海滨湿地植被自然演替的模型。模型表明, 在海滨湿地植被的自然演替过程中, 水分、盐度、土壤养分都起到了重要的作用, 同时种间竞争也发挥了巨大的作用。不同演替阶段各因素的影响大小各不相同。在模型的基础上分析了演替过程中环境因子与 3 种主要优势物种之间以及物种与物种之间的相互作用关系。

关键词: 海滨湿地; 演替; 模型; 主分量分析; 环境因子

文章编号: 1000-0933 (2009) 05-2203-08 中图分类号: Q145, Q178, Q948 文献标识码: A

Ecological mechanisms of vegetation succession of coastal wetland in Yancheng Nature Reserve

YAO Cheng, WAN Shu-Wen, SUN Dong-Lin, QIN Pei *

Halophyte Research Laboratory of Nanjing University, Nanjing 210093, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2203 ~ 2210.

Abstract: To understand the mechanism of the ecological engineering way for controlling *Spartina alterniflora*, a typical wetland in the core area of Yancheng Nature Reserve was chosen as a reference to study its natural succession. By employing a space-for-time substitution approach, a succession sequence of time series was built. After analyzing the data of related environmental factors with the method of Principal Component Analysis (PCA), three principal components were obtained. Through multiple linear regression analysis, a succession model of coastal wetland ecosystem was built up using the three principal components we got as parameters to study how environmental factors function in succession process. The model showed that in the nature succession process of coastal wetland vegetation, moisture, salinity, and soil nutrients all had played important roles, so as competition between species and different factors had different impacts on different succession stages. As a reference wetland, this study could help us to evaluate the degradation of wetland and the effect of wetland restoration, as well as to help us to achieve the balance of utilization and reservation.

Key Words: coastal wetland; succession; model; PCA; environmental factors

外来种的引入可能引起当地生态系统的巨大波动, 极大地改变引入区域的生态环境。外来种入侵对区域生态系统的负面影响已引起了政府部门和学术界的广泛关注^[1]。互花米草 (*Spartina alterniflora*) 作为外来种由于具有强大的保滩护岸, 加快淤积功能, 曾被世界上许多国家引种而快速蔓延。自从 1979 年南京大学仲崇信教授引种入我国以来, 经过近 40a 的发展, 目前天津、山东、江苏、浙江、福建、广东和广西均有分布, 其规模远大于世界上其它地区。虽然互花米草在保滩护岸, 促淤造陆, 吸收温室气体, 分解污染物等多方面起到了很

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (2006BAD03A19); 国家 908 计划资助项目 (JS-908-02-07)

收稿日期: 2008-04-23; 修订日期: 2008-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qinpei@nju.edu.cn

明显的作用,但是它的过度繁殖和扩张也带来了许多负面效应,例如快速的扩张侵占了本地物种的生境,导致本地物种生存受到威胁;泥沙淤积加快,致使航道堵塞,影响航运;互花米草巨大的残体生物量是对海洋的一种二次污染^[2]。为了控制互花米草的过度繁殖,2001 年南京大学盐生植物实验室与苏北大丰滩涂开发公司在大丰川东港滩涂选取了一块 50hm² 的互花米草-芦苇交错带作为实验地,合作开展地貌水文饰变促进芦苇替代互花米草生态工程。通过微地貌和水文饰变等具体的生态工程措施,营造了有利于芦苇生长发育的水盐环境,促进了交错带中植物群落向芦苇群落的演替,经过 5a 的演替过程,最终实现了本地物种芦苇对互花米草的生物替代。同时,在生态工程的涵沟系统辅以养鱼等水产,使该生态工程产生了可观的生态经济效益。很显然,“地貌水文饰变促进芦苇替代互花米草生态工程”找寻到了一条利用本地植物控制外来种互花米草的新途径,拓宽了生物控制的内涵^[3]。为了廓清运用生态工程方法控制互花米草的植物群落演替机理,选取一块合适的海滨盐沼湿地作为参照,研究其植物群落演替格局是全部工作的重要基础。同时海滨盐沼参照湿地的自然演替的研究可以为开展海滨湿地评价提供参考,从而量化湿地退化程度,评价湿地恢复的效果,为湿地保护和恢复提供可靠的途径,为制定湿地管理政策提供依据。盐城国家级珍禽自然保护区核心区湿地具有完好的自然植被演替系列(外围也有互花米草的入侵),是本文选择的盐沼参照湿地。

湿地演替动态是目前国内外研究热点之一^[4],其中较典型的是结合景观生态学方法研究植被演替,研究周期长短不一^[5-7]。以往针对海滨湿地植物群落演替的研究多为单纯的群落特征描述^[8],或运用遥感方法研究某种植物群落的分布动态^[9,10],而较少针对演替过程的各环境因子的作用进行全面的的研究。本文利用时空替代的方法,采用模型的方式研究了海滨参照湿地的演替过程及其与环境因子的作用关系,为深入了解海滨湿地生态系统的演替过程打下基础。

植被演替是一个时间跨度很长的过程,在缺乏长期观测数据的条件下或者研究较小尺度生态系统的演替过程中,空间替代时间的方法是一种常用工具。利用该方法可以克服演替研究周期的限制,有利于对生态系统演替的驱动力和机理进行深入的探讨^[11-14]。本文在研究海滨湿地自然演替的过程中,由于尺度和数据的限制也采用了时空替代的方法。

2 研究地区和研究方法

2.1 研究区域概况

江苏省海岸带以季风气候为主,处于暖温带向北亚热带过渡地区,受海洋性、大陆性气候双重影响。日总辐射量达 $(110 \sim 126) \times 4.18 \text{ kJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$,年日照总时数 2000 ~ 2650h,日照百分率达 50% ~ 55%。全年平均气温因受海洋的调节,具有冬半年(9 月 ~ 翌年 2 月份)偏暖,夏半年(3 ~ 8 月份)偏凉,春季回暖迟,气温低,秋季降温迟,明显偏暖,无霜期较长,气温年、日变化小等特点。年平均降雨量 850 ~ 1000mm,1 月份平均气温 0 ~ 3℃,最热月平均气温近海边 29 ~ 31℃,滩地无霜冻期 230d 左右。

盐城国家级珍禽保护区由隶属江苏省盐城市的响水、滨海、射阳、大丰、东台 5 个沿海县(市)的滩涂组成,呈西北东南向的狭长地带,北起响水的灌河,南至东台的新港闸,西起黄海公路(陈家港-李堡),东到海水 -3m 等深线。它位于中国海岸线中段、苏北平原东部,东临黄海,在北纬 32°20' ~ 34°37' 和东经 119°29' ~ 121°16' 之间。海岸线长度约 582km,总面积约

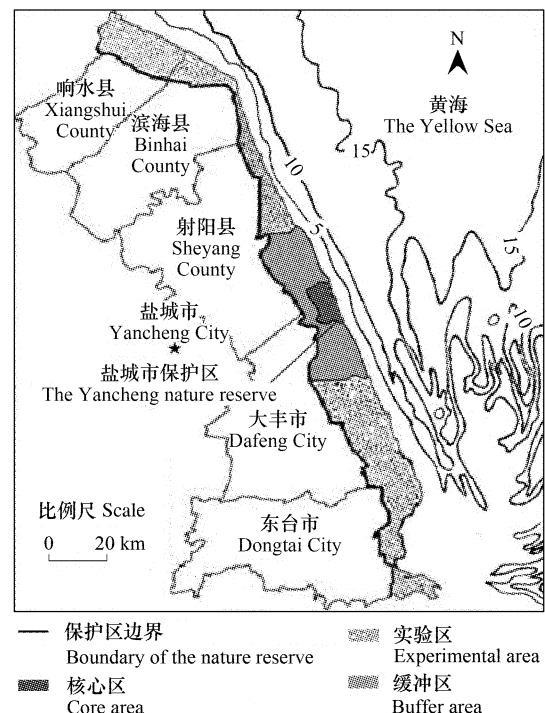


图 1 盐城国家级珍禽自然保护区地理位置

Fig. 1 Location of the rare birds national nature reserve of Yancheng

4530km²,核心区、缓冲区和实验区的面积分别为 174、467km²和 3889km²。核心区西以“建国堤”向东 100m 为界,其内紧靠此堤东侧有 36km²的生态工程示范区。

保护区核心区为典型的淤泥质平原原生湿地,处于绝对保护之下,无居民居住,未受人为干扰,经过长时间的演替形成了由海到陆的互花米草、互花米草碱蓬(*Suaeda glauca*)交错、碱蓬、碱蓬芦苇交错、芦苇(*Phragmites communis*)5 个条带状分布的植物群落,是研究海滨淤长盐沼湿地群落自然演替绝好的参照湿地。

2.2 研究方法

2.2.1 关于“空间替代时间”

淤积型海岸的海滨湿地生态系统的演替过程是在先锋植物定居后,随着时间的推移,高程逐渐改变,导致植物土壤、水文环境发生改变,从而发生植被演替的过程。因此,可以利用高程这个空间要素来代替时间要素确定生态系统演替的不同阶段顺序,通过空间的高程序列建立演替的时间序列。但是需要注意的是,碱蓬是当地海滨湿地生态系统的先锋物种,而处于高程最低处的互花米草在时间上来说是后来进入这个系统的,因此演替序列的初始群落应该是碱蓬群落,而不是高程最低的互花米草群落,因而,演替序列应为碱蓬群落→碱蓬芦苇交错群落→芦苇群落,在互花米草进入该生态系统以后又出现了新的与高程递增方向相反的演替序列,碱蓬群落→碱蓬互花米草交错群落→互花米草群落。

2.2.2 采样基本参数设定

要研究演替过程及其环境影响因子,就必须先确定这一过程中的必要环境参数。有关盐沼湿地植被的生长特性的研究表明,土壤盐度,水淹会影响互花米草的生长情况^[15,16],而土壤含水率,电导率的不同会导致芦苇的生长情况不同^[17],碱蓬的生长则主要受到盐度影响^[18],因此选择了土壤含水率,土壤盐度,以及土壤无机养分情况,和土壤有机质等环境因子作为参数。这里植物群落的生长情况主要考查了植物的株高和密度情况。其中土壤含水率,用 M 来表示,土壤盐度,用 S 表示,铵态氮含量,用 N 表示,速效磷含量,用 P 表示,速效钾含量,用 K 表示,有机质含量,用 O 表示。

2.2.3 采样及测定方法

2006 年 5 月在保护区核心区的盐沼湿地的 5 个植被带中,每个样带设置 5 个采样点(重复),每个样点之间间隔约 50m。采用 25cm×25cm 的取样框置于样点上,原位测定样框中相关植物的株高密度,并用土样铲挖取样框内 0~30cm 土层的土样,装于样袋中带回实验室测定(图 2)。在实验室中,将土样风干,利用烘干土壤法测定土壤含水率,接着研碎,去除杂质,过 100 目筛后,利用睿龙土壤养分测定仪(RL-3C-1 型,北京)测定土壤 N、P、K 和有机质等指标。土壤盐度的测定是用 DDS-11A 型电导率仪通过测定土壤溶液电导率间接测得的。

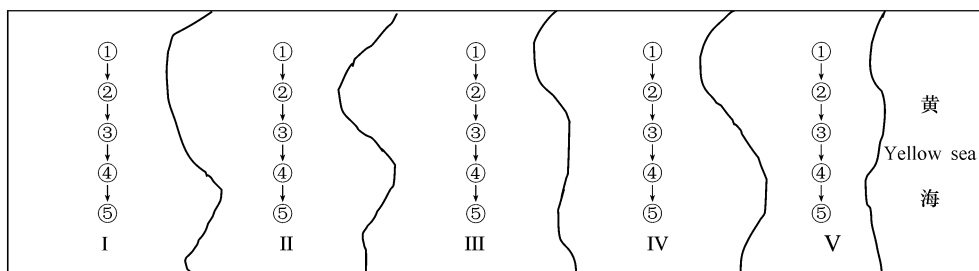


图 2 盐城国家级珍禽自然保护区核心区采样样点分布示意图

Fig. 2 Distribution of samples in core area of Yancheng Nature Reserve

I: 芦苇植物群落带 community of *P. communis*; II: 芦苇碱蓬交错带 ecotone of *S. glauca* and *P. communis*; III: 碱蓬带 community of *S. glauca*; IV: 碱蓬互花米草交错带 ecotone of *S. alterniflora* and *S. glauca*; V: 互花米草带 community of *S. alterniflora*

2.2.4 主成分分析及多元线性回归分析

为了减少多元线性回归中的变量数目,对所测得的环境参数数据进行主成分分析,得到几个相关关系不

明显的环境主分量,通过多元线性回归分析求得各植物群落带优势植物的多度与环境主分量之间的相关系数,建立相应演替模型,分析各个主分量在植物群落演替过程的作用。本文中的统计学计算和作图都是通过 MINITAB 和 Excel 完成的。

3 结果与分析

3.1 演替不同阶段植被生长情况及其相关环境因子

盐城国家级珍禽自然保护区核心区不同植物群落带的植物生长和环境因子情况见表 1 和表 2。表 1 中各项参数,除盐度外,都呈现出由陆向海先降低后升高的趋势,这种趋势的存在可能是因为海潮将养分,水分,有机质滞留在高程最低的互花米草带,互花米草带的各项指标都相对较高,而芦苇带高程最高,海水涨潮很少到达,因而土壤盐度低,植物生长状况好,物种丰富,相应地,除盐度外的各项指标也相对较高,于是出现了这种先降低后升高的趋势。表 2 显示的是各植被带植物群落的平均株高和平均密度,很容易发现,交错带中植被的株高呈现出相对较高变异性,从侧面反应出交错带环境条件的高度变异性。

表 1 盐城国家级珍禽自然保护区核心区不同植被带的土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties in core area of Yancheng Nature Reserve

样带 Sample	平均含水率 Moisture(%)	平均土壤盐度 Salinity(%)	平均铵态氮 N (mg/kg)	平均速效钾 K (mg/kg)	平均速效磷 P (mg/kg)	平均有机质含量 Organic matter(%)
I	0.279 ± 0.013	0.680 ± 0.149	9.5 ± 3.500	196 ± 13.693	7.0 ± 0.000	0.65 ± 0.071
II	0.239 ± 0.015	0.665 ± 0.236	8.1 ± 3.130	196 ± 13.693	1.4 ± 3.130	0.33 ± 0.045
III	0.220 ± 0.008	0.958 ± 0.160	8.8 ± 3.834	191 ± 11.180	4.9 ± 3.130	0.26 ± 0.055
IV	0.252 ± 0.015	0.786 ± 0.231	10.2 ± 2.928	211 ± 0.000	7.0 ± 0.000	0.44 ± 0.156
V	0.380 ± 0.056	0.854 ± 0.201	15.1 ± 3.130	241 ± 19.230	11.2 ± 3.834	1.64 ± 0.279

表 2 盐城国家级珍禽自然保护区核心区不同植物群落中植物的生长情况

Table 2 The performances of plants in core area of Yancheng Nature Reserve

样带 Sample	芦苇 <i>P. communis</i>		碱蓬 <i>S. glauca</i>		互花米草 <i>S. alterniflora</i>	
	平均高度 Hight(cm)	平均密度 Density(ind./m ²)	平均高度 Hight(cm)	平均密度 Density(ind./m ²)	平均高度 Hight(cm)	平均密度 Density(ind./m ²)
I	99.1 ± 9.4	227 ± 77	—	—	—	—
II	55.4 ± 11.7	90 ± 47	3.5 ± 1.4	390 ± 109	—	—
III	—	—	5.3 ± 1.4	1965 ± 571	—	—
IV	—	—	6.2 ± 3.9	77 ± 63	35.6 ± 16.9	186 ± 193
V	—	—	—	—	51.7 ± 10.3	326 ± 46

3.2 环境因子的主成分分析

将所测环境因子进行主成分分析(PCA),所得结果见表 3、表 4。主分量分析得到的 3 个主分量所包含的信息占了所有主分量的 90.4%,它们的贡献率分别为 64.8%,16.1%,9.5%,其主分量组成如下:

$$\text{Prin 1} = 0.478 \text{ M} + 0.147 \text{ S} + 0.416 \text{ N} + 0.448 \text{ K} + 0.380 \text{ P} + 0.481 \text{ O}$$

$$\text{Prin 2} = 0.117 \text{ M} - 0.966 \text{ S} - 0.076 \text{ N} + 0.200 \text{ K} - 0.029 \text{ P} + 0.079 \text{ O}$$

$$\text{Prin 3} = -0.020 \text{ M} - 0.025 \text{ S} - 0.538 \text{ N} - 0.209 \text{ K} + 0.815 \text{ P} + 0.044 \text{ O}$$

表 3 环境因子主分量信息表

Table 3 Information of principle component of environment factor

分量 Variable	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4	Prin5	Prin6
特征值 Eigenvalue	3.8872	0.9677	0.5705	0.3139	0.2167	0.0441
方差贡献率 Proportion	0.648	0.161	0.095	0.052	0.036	0.007
累计贡献率 Cumulative	0.648	0.809	0.904	0.957	0.993	1.000

表 4 环境因子主分量荷载表

Table 4 Load of principle component of environment factor

分量 Variable	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4	Prin5	Prin6
含水率 M	0.478	0.117	-0.020	0.439	-0.263	0.704
土壤盐度 S(%)	0.147	-0.966	-0.025	0.155	0.140	0.015
铵态氮 N(mg/kg)	0.416	-0.073	-0.538	-0.658	-0.314	0.008
速效钾 K(mg/kg)	0.448	0.200	-0.209	0.029	0.844	-0.047
速效磷 P(mg/kg)	0.380	-0.029	0.815	-0.434	0.025	0.049
有机质 O(%)	0.481	0.079	0.044	0.401	-0.317	-0.707

通过上面的分量组成和各分量得贡献率可以看到, Prin 1 的组成上含水率和土壤营养元素的系数相近,而盐分的系数相对较小,因此可以认为第一个分量主要是水分和土壤养分决定的环境主分量,这个分量所包含的信息量为 64.8%,是贡献率最大的分量。而 Prin 2 的组成上,盐度的系数明显大于其他所有因子,这个分量主要是由盐度决定的负相关分量,前两个分量累计贡献率达到了 80.9%,已经包含大部分信息,但是二维聚类图(图 3)上可以看到,互花米草带占有独立的巨大空间,第一主分量把互花米草明显地与其他群丛区分开,而其内部各点分布分散,说明互花米草有较宽的生态位,也就是说它在滩涂海水浸渍程度高的环境中有良好的适应性和较强的竞争力,这与前人研究结论一致^[15]。而碱蓬和芦苇的近一分群则完全依赖于第二主分量,对于碱蓬向芦苇的演替中在水盐梯度上有明显的聚类。前两个主分量能很好地区分 3 个单一优势物种的样带,但是交错带没有很好的区分开;第三个分量(Prin 3),主要是氮、磷、钾 3 个因子决定的分量,也就是土壤无机养分分量,虽然贡献率不是很大,但是通过比较两张排序图(图 3 与图 4)可以看出,交错带的情况较为复杂,仅仅使用两个主分量无法将其很好地与其他样带区分开来,第三主分量在交错带的区分上起到了重要的作用。

3.3 海滨湿地生态系统自然演替模型

经过主分量分析,将 6 个环境因子变量减少为 3 个互相相关性不明显的主分量,通过主分量荷载计算出其对应的值,然后根据各样带植物的多度情况和主分量的相关矩阵做多元回归分析,得出物种之间的相互关系及其受到各主分量因子的影响(图 5)。对各样带优势物种多元回归的 R^2 分别为:芦苇的 R^2 值为 0.701 ($n=10$),碱蓬的 R^2 值为 0.817 ($n=15$),互花米草的 R^2 值为 0.628 ($n=10$)。

根据图 5,可以得知各主成分分量与 3 个主要物种群落多度之间存在明显的相关关系,通过空间替代时间的方法,将 5 个群落的空间格局看成是植被格局随时间演变的过程,由此可以知道各主分量均对植被演替

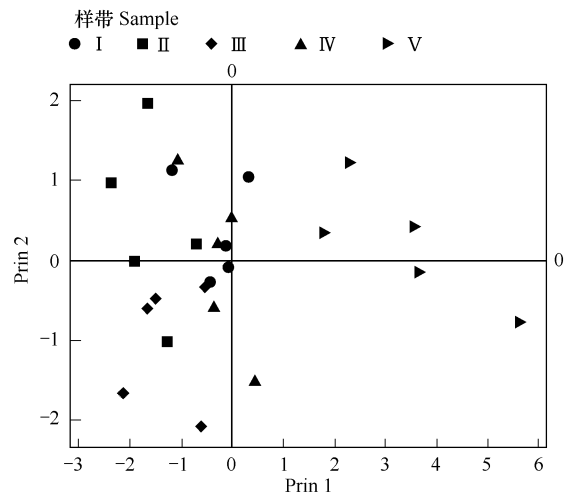


图 3 环境因子 PCA 二维排序图

Fig. 3 2D ordination of environmental factors

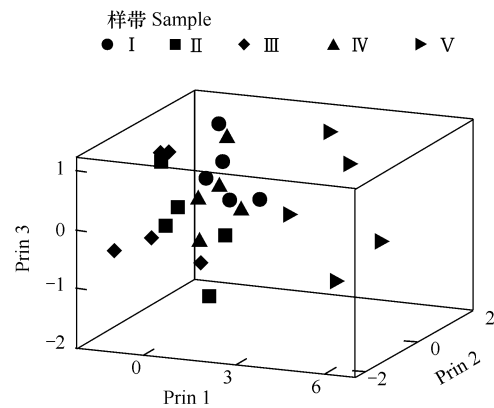


图 4 环境因子 PCA 三维排序图

Fig. 4 3D ordination of environmental factors

产生了影响,但是影响的大小和方向在演替的不同阶段各不相同,同时3个物种多度之间也存在着明显的相关关系,这表明种间竞争也影响了这一格局变化的过程。碱蓬作为先锋植物,所有环境因子以及种间竞争对于它都具有负效应,芦苇种群则相反,所有的因子都与其呈正相关关系,而互花米草种群既存在正相关因子,也存在负相关因子。

取各样带主分量的平均值,作出各主分量沿着由陆到海的方向的变化趋势图(图6),由陆到海方向上伴随着高程由高到低的逐渐变化。3个主分量都是先减小后增加的,和各参数(除土壤盐度)的变化趋势相同,但是3个主分量最小值出现的样带不同,Prin 1和Prin 3的最小值出现在芦苇碱蓬交错样带中,而Prin 2的最小值出现在碱蓬样带中,这主要是因为碱蓬样带中作为Prin2主要负因子的土壤盐度最高。

4 讨论

研究地区的海滨湿地的自然演替是从淤泥质光滩开始,随着泥沙沉积淤涨滩面不断下延。湿地先锋植物碱蓬入侵滩面后形成以碱蓬为优势种的单一优势种群落,碱蓬群落的建立加速了滩面淤积,滩面继续抬高,在碱蓬上部高程较高的滩面湿地植物芦苇定居,随着时间推移,碱蓬带和芦苇都不断扩大,逐渐形成碱蓬-芦苇交错带。由于互花米草的种子随海水进入该生态系统以后,凭借其高抗逆性和顽强生命力在原有的光滩上入侵定居,形成互花米草带,并向上扩展,出现了碱蓬与互花米草的交错带,于是形成了现在所看到的五条地带性明显的植物群落带。

通过模型分析可以更加清楚了解到其中各个环境因子在演替中发挥作用机制,碱蓬单一优势群落形成以后,随着高程的增加可以看到Prin 1,Prin 2,Prin 3三个主分量均呈现增加的趋势,而从模型中可以看到3个主分量的增加都抑制了碱蓬的继续发展;同时,碱蓬是一种能够很好改善盐碱土壤环境的植物^[19],因而碱蓬群落的生长对芦苇的生长起到促进作用,从模型中也可以看出碱蓬对于芦苇的生长存在正效应,芦苇进入系统以后逐渐生存发展,而芦苇的生长通过种间竞争更加抑制了碱蓬的发展,模型中也显示3个主分量因子的增加正面促进了芦苇群落的生长,于是逐渐形成了芦苇单一优势群落,和芦苇-碱蓬交错群落。相反的,随着高程的降低Prin 1,Prin 2,Prin 3三个主分量也呈现出增加的趋势,这样同样也就抑制了碱蓬的发展,有利于互花米草群落的建立和发展,碱蓬的抑制导致互花米草的种间竞争压力减少,而互花米草的生长也进一步抑制了碱蓬的生长,形成一个正反馈,同时Prin 1,Prin 2的增加也促进了互花米草的生长,Prin 3的增加虽然对于互花米草的生长起了抑制的作用,但是不能改变演替的方向,主要的决定因素是种间竞争压力的减小所起到的促进作用,在这些因素的综合作用下,逐渐形成了互花米草单一优势群落,和过渡的互花米草-碱蓬交错群落。通过以上过程,形成如下的演替格局:由海到陆的互花

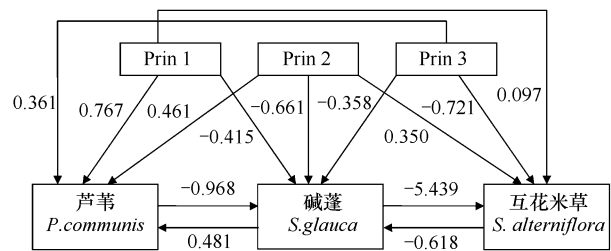


图5 盐城海滨湿地生态系统自然演替模型

Fig. 5 Succession model of coastal wetland ecosystem in Yancheng

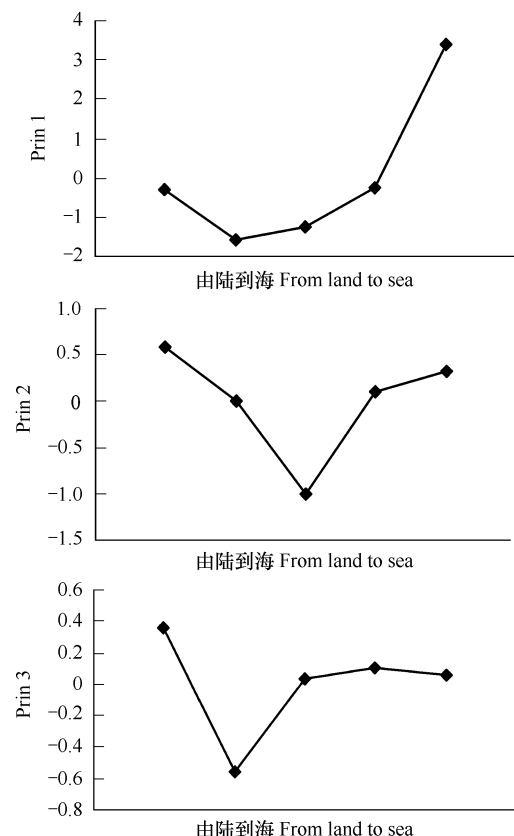


图6 各主分量由陆到海方向上的变化趋势

Fig. 6 Trends of principle components from land to sea

米草,互花米草碱蓬交错,碱蓬,碱蓬芦苇交错,芦苇 5 大群落带。

从上面的分析可以看出,水分和盐度无疑是演替过程中重要的因素,这一点与前人的研究结果一致^[20],同时土壤养分在其中也起到了很重要的作用,这也很容易得到理解,植物的生长都离不开养分的支持。演替过程中高程的变化引起水分、盐度、土壤养分等关键因素的梯度变化,是演替的动力之一,这一点前人也有过表述^[21],但是不能忽略物种之间的竞争的作用,以及生物对环境的改造作用,从模型及模型的分析讨论中可以看出,这两种作用力在演替过程中也起到了很大的作用。因此,微地貌水文饰变通过改变土壤盐度,水分等影响植被演替的主要因子,可以促进盐沼植被演替朝芦苇群落的方向发展,说明生态工程方法促进芦苇替代互花米草,从而控制互花米草过度繁殖扩张带来的负面效应具有科学性和可行性。

5 结语

利用空间替代时间的方法,通过主成分分析和多元线性回归结合分析相关数据,建立的自然演替模型表明盐城海滨湿地生态系统的自然演替与水分、盐度、土壤养分条件都有明显相关关系,物种之间的竞争也在其中起了非常重要的作用。模型很好地说明了整个演替过程中各相关因素的作用情况,有利于洞悉海滨湿地生态系统及其演替的作用过程,有利于认识生态工程方法控制外来物种互花米草的内在机理,同时为研究湿地演替提供了一个很好的参照系统,对于湿地退化和恢复的评价提供了参考,为将来湿地的保护和利用提供了很好的资料。

References:

- [1] Peng S L, Xiang Y C. The invasion of exotic plants and effects of ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(4): 560—568.
- [2] Zhu X J, Qin P. The alien species *Spartina alterniflora* and *Spartina* ecoengineering. *Marine Sciences*, 2003, 27(12): 14—19.
- [3] Guang Wang, Pei Qin, Shuwen Wan, *et al.* Ecological control and integral utilization of *Spartina alterniflora*. *Ecological Engineering*, 2008, 32: 249—255.
- [4] DeBerry D A, Perry J E. Primary succession in a created freshwater wetland. *Castanea*, 2008, 69(3): 185—193.
- [5] Bender O, Boehmer H J, Jens D, *et al.* Analysis of landuse change in a sector of Upper Franconia (Bavaria, Germany) since 1850 using land register records. *Landscape Ecology*, 2004, 20: 149—163.
- [6] Clarkson B D. Vegetation succession (1967—1989) on five recent montane lava flows, Mauna Loa, Hawaii. *New Zealand Journal of Ecology*, 1998, 22(1): 1—9.
- [7] Odland A, Del Moral R. Thirteen years of wetland vegetation succession following a permanent drawdown, Myrkdalen Lake, Norway. *Plant Ecology*, 2002, 162: 185—198.
- [8] Bernhardt K G, Koch M. Restoration of a saltmarsh system; temporal change of plant species diversity and composition. *Basic and Applied Ecology*, 2003, 4: 441—451.
- [9] Liu Y X, Chen J, Zhang R S. Analysis of remote sensing images for vegetation succession on tidal salt marsh in Jiangsu. *Rural Eco-Environment*, 2001, 17(3): 39—41.
- [10] Lü G H, Zhou L, Zhao X L. Vertical distribution of soil organic carbon and total nitrogen in reed wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3): 384—389.
- [11] Hu C X, Liu Y D. Primary succession of algal community structure in desert soil. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(8): 917—924.
- [12] Liu H Y, Huang J G. Dynamical of soil properties under secondary succession forest communities in Mt. Jinyun. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2041—2046.
- [13] Yang Y F, Zhang B T. Growth patterns of *Leymus chinese* clones under different habitat conditions in Songnen Plain of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 17(8): 1419—1423.
- [14] Wu W, Kuang M S, *et al.* The research of the relationship between vegetation succession and soil CO₂ concentration dynamics in subtropic Karst Area in summer. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, 29(2): 289—293.
- [15] Chen Z Y, Li B, Chen J K. Effects of salt stress and elevation of tideland on the growth of introduced *Spartina alterniflora* at dongtan of Chongming, the Yangtze River Estuary. *Journal of Yangtze University (Nat Sci Edit)*, 2005, 2(2): 6—9.
- [16] Xiao Q, Zheng H L, *et al.* Effects of salinity on the growth and proline, soluble sugar and protein contents of *Spartina alterniflora*. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4): 373—376.
- [17] Yang F, Deng W, *et al.* Effects of Soil Moisture and Electrical Conductivity on Growth and Population Distribution of *Phragmites australis*. *Journal*

of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4): 199—201.

- [18] Li C Z, Liu X J, *et al.* The effects of saline condition on the germination and seeding growth of *Suaeda salsa*. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(5): 209—212.
- [19] Zhao K F, Fan H, *et al.* Improvement and utilization of saline soil by planting halophyte-s. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2002, 8(1): 31—35.
- [20] Xi J B, Song Y M, *et al.* The Characteristics and succession L&W of ecosystem in the Yellow River Delta Area. Journal of Northeast Forestry University, 2002, 30(6): 111—114.
- [21] Zhao P, Ge Z M, *et al.* Study on the ecological characters of *Phragmites communis* and its succession in the eastern end of Chongming Island, Shanghai. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2005, 8(3): 98—112.

参考文献:

- [1] 彭少麟, 向言词. 植物外来种入侵及其对生态系统的影响. 生态学报, 1999, 19(4): 560~569.
- [2] 朱晓佳, 钦佩. 外来种互花米草及米草生态工程. 海洋科学, 2003, 27(12): 14~19.
- [9] 刘永学, 陈君, 张忍顺. 江苏海岸盐沼植被演替的遥感图像分析. 农村生态环境, 2001, 17(3): 39~41.
- [10] 吕国红, 周丽, 赵先丽. 芦苇湿地土壤有机碳和全氮含量的垂直分布特征. 应用生态学报, 2006, 17(3): 384~389.
- [12] 刘鸿雁, 黄建国. 缙云山森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2041~2046.
- [13] 杨允菲, 张宝田. 松嫩平原不同生境条件下羊草无性系的生长规律. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1419~1423.
- [14] 吴威, 况明生. 亚热带岩溶山区植被演替和夏季土壤 CO₂ 浓度动态关系. 西南师范大学学报(自然科学版), 2004, 29(2): 289~293.
- [15] 陈中义, 李博, 陈家宽. 长江口崇明东滩土壤盐度和潮间带高程对外来种互花米草生长的影响. 长江大学学报(自然科学版), 2005, 2(2): 6~9.
- [16] 肖强, 郑海雷. 盐度对互花米草生长及脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量的影响. 生态学杂志, 2005, 24(4): 373~376.
- [17] 杨帆, 邓伟. 土壤含水量和电导率对芦苇生长和种群分布的影响. 水土保持学报, 2006, 20(4): 199~201.
- [18] 李存桢, 刘小京. 盐胁迫对盐地碱蓬种子萌发及幼苗生长的影响. 中国农学通报, 2005, 21(5): 209~212.
- [19] 赵可夫, 范海. 盐生植物在盐渍土壤改良中的作用. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1): 31~35.
- [20] 郝金标, 宋玉民, 邢尚军, 等. 黄河三角洲生态系统特征与演替规律. 东北林业大学学报, 2002, 30(6): 111~114.
- [21] 赵平, 葛振鸣. 崇明东滩芦苇的生态特征及其演替过程的分析. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005, 8(3): 98~112.