

自然条件下海滨湿地土壤生态过程与景观演变的耦合关系

张华兵^{1,2}, 刘红玉^{1*}, 李玉凤¹, 侯明行¹

(1. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京 210023;

2. 盐城师范学院 城市与资源环境学院, 江苏 盐城 224002)

摘要: 景观过程与格局的相互关系与耦合机制, 已经成为景观生态学研究的重要问题。以盐城国家级自然保护区核心区为案例, 根据 2011 年 4—5 月对海滨湿地土壤采样分析, 运用典范对应分析、主成分分析、线性回归模拟以及空间代替时间的方法, 探索土壤生态过程与景观演变之间的耦合关系。结果显示: ①典范对应分析表明, 土壤过程能够很好地响应海滨湿地景观格局, 从陆到海, 5 种景观类型有序地、按逆时针方向分布在 CCA 排序轴上, 土壤过程与景观类型之间表现出不同的相关性。②通过主成分分析表明, 三个主成分能够有效地响应景观格局。主成分与景观类型相关性排序表现为: 第一主成分(土壤养分), 米草沼泽 > 碱蓬米草交错带 > 碱蓬沼泽 > 芦苇沼泽 > 碱蓬芦苇交错带; 第二主成分(盐度), 碱蓬沼泽 > 碱蓬米草交错带 > 米草沼泽 > 碱蓬芦苇交错带 > 芦苇沼泽; 第三主成分(有机质和水分), 芦苇沼泽 > 米草沼泽 > 碱蓬芦苇交错带 > 碱蓬米草交错带 > 碱蓬沼泽。③运用空间代替时间, 以样地到海堤的距离作为时间变量, 主成分与景观演变之间相关性较好。多元回归结果显示: 三个主成分与碱蓬沼泽→碱蓬米草交错带→米草沼泽时间序列的相关系数为 0.859 2; 与碱蓬沼泽→碱蓬芦苇交错带→芦苇沼泽时间序列的相关系数为 0.892 8。土壤生态过程的改变是景观演变的重要动力, 而景观的变化进一步引起土壤生态要素的改变, 盐城海滨湿地景观演变就是在这种格局与过程的交互作用下, 芦苇沼泽与米草沼泽不断扩张、碱蓬沼泽不断萎缩的过程。

关键词: 耦合关系; 景观演变; 土壤生态过程; 自然条件; 盐城自然保护区

中图分类号: S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2013)01-0063-10

海滨湿地位于海洋与陆地的过渡地带, 是受海陆两相交互作用的生态交错区^[1]。由于受潮汐和海水型地下水的多重影响, 海滨湿地土壤具有盐分重、养分贫乏的特性, 尤其是氮缺乏; 地下水矿化度高, 土壤盐碱化严重^[2-3]。海滨湿地主要包括潮滩盐土、草甸滨海盐土和沼泽滨海盐土三个土壤亚类, 分别处于滨海盐土发育的三个不同阶段^[4]。随着滩面高程的增加, 土壤受到海水影响逐渐减小, 开始逐步脱盐, 形成了海相沉积母质—潮滩盐土—草甸滨海盐土—沼泽滨海盐土的演替序列^[5]。海滨湿地土壤盐分、有机质、氮、磷、钾等土壤养分是与植被演替关系最密切的性状指标^[6]。土壤理化性质与景观格局空间梯度性显著, 景观格局与土壤的理化性质表现出很好的耦合性^[7]。因此, 掌握和研究湿地土壤性

收稿日期: 2012-05-15; 修订日期: 2012-08-17。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071119); 江苏省高校自然科学研究重大项目(10KJA170029); 江苏省省属高校自然科学研究项目(12KJB170006)。

第一作者简介: 张华兵(1979-), 男, 江苏响水人, 博士研究生, 主要从事湿地景观及遥感/GIS 应用研究。E-mail: jszhbing@163.com

* 通信作者简介: 刘红玉(1963-), 女, 辽宁辽阳人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事景观生态学研究。E-mail: liuhongyu@njnu.edu.cn

质与景观之间的关系,对于理解海滨湿地景观演变机制和合理利用海滨湿地资源具有重要意义。

盐城海滨湿地,因其独特的水文、水动力以及气候条件形成了宽广和缓的潮滩湿地,发育了多样的湿地生态类型。盐城自然保护区、大丰麋鹿自然保护区两个国家级保护区的建立,使得在人类活动日益加剧的今天,一些岸段还基本保持了天然的生态结构和功能,成为我国乃至世界为数不多的典型原始海岸湿地之一^[7]。对盐城海滨湿地土壤研究已广泛开展,如杨桂山指出海洋水文条件控制着土壤的性状和发育方向,进而影响植被的生长和发育^[8];姚成、沈永明等指出海滨湿地土壤有机质含量受植被影响比较大,盐蒿滩含量最少,磷含量基本从海向陆递减,氮含量碱蓬滩最低,向海陆两侧增加^[8-9];周秋华等认为土壤粒径从陆向海逐渐变细等^[10]。总体看,研究内容多集中在土壤形成过程、土壤肥力特征及质量评价、土壤改良、土壤养分和盐度、水分的分布、植被对土壤养分的影响等微观方面或是以某一个断面比较盐城海滨湿地土壤理化性质在海陆方向上的差异^[5-6,8-11],而从地学的角度,宏观与微观相结合、生态过程与景观演变相结合,从生态过程的角度揭示景观演变机理的研究较少。本文选择盐城自然保护区核心区为研究区,以空间代替时间,运用数学方法,建立土壤生态过程与景观演变的耦合关系,揭示海滨湿地景观演变的响应机制,可为海滨湿地景观格局预测、湿地的开发与合理利用提供科学依据。

1 研究区概况

盐城自然保护区,位于北纬 $32^{\circ}20' \sim 34^{\circ}37'$,东经 $119^{\circ}29' \sim 121^{\circ}16'$,面积为 $45.33 \times 10^4 \text{ km}^2$,拥有 582 km 海岸线,是太平洋西岸、亚洲大陆边缘面积最大的淤泥质海滨湿地。

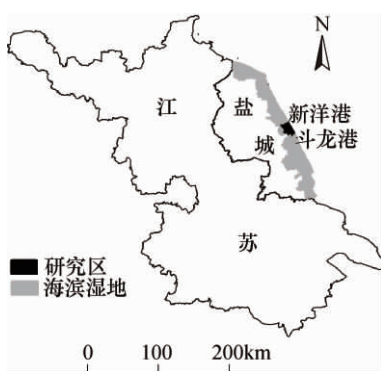


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

盐城海滨湿地位于亚热带向暖温带的过渡地带,季风气候显著,受南北气流和海洋、大陆双重气候的影响,年平均气温介于 $13.7 \sim 14.8^{\circ}\text{C}$ 之间,年降水量为 $900 \sim 1\,100 \text{ mm}$,雨量丰沛,南部多于北部。保护区核心区,北至新洋港,南至斗龙港,西至海堤公路,为典型的淤涨型潮滩湿地。区内大部分面积保持了原始的自然景观,从陆地到海洋、沿海岸线带状分布着芦苇沼泽、碱蓬沼泽、米草沼泽和光滩,总面积为 $1.74 \times 10^4 \text{ km}^2$,占保护区总面积的 3.84% 。保护区内,海滨湿地先锋物种是碱蓬,景观演替序列从海洋向陆地,表现为光滩—碱蓬沼泽—碱蓬芦苇交错带—芦苇沼泽。但是从1983年开始,

为了保滩护岸,增强促淤功能,引种了互花米草,并迅速扩张。导致了海滨湿地先锋群落由碱蓬变为米草,景观演替表现为,光滩—米草沼泽、碱蓬沼泽—碱蓬米草交错带—米草沼泽与碱蓬沼泽—碱蓬芦苇交错带—芦苇沼泽三个演变序列。

2 数据来源与研究方法

2011年4—5月,在盐城自然保护区核心区内沿中路港南侧,在每个景观带的上、下边缘和中间各设置一个样地,共15个样地,即米草沼泽(样地1,2,3)、碱蓬米草交错带(样地4,5,6)、碱蓬沼泽(样地7,8,9)、碱蓬芦苇交错带(样地10,11,12)、芦苇沼泽(样地13,14,15)。运用空间代替时间方法,用每个样地距海堤的距离表示海滨湿地土壤和景观不同

的演变时期。每个样地设置 3 个样点, 尽量避免一些偶然因素对土壤性质的影响。现场运用 PICO-BT(德国) 水分便携式测量仪测量土壤水分取其平均值, 并采集 0~20 cm 土样进行混合, 带回实验室。土样经风干、研磨后进行测定。采用电导法测量土壤盐度, 靛酚蓝比色法测定土壤氨氮, 水合热重铬酸钾氧化-比色法测定土壤有机质, 碳酸氢钠-钼锑抗比色法测定土壤有效磷, 乙酸铵提取法测定土壤速效钾。

在景观格局与土壤过程的关系研究中, 由于海滨湿地景观类型属于类型变量, 需要进行合理的赋值才能纳入定量分析中。因此, 在研究中将海滨湿地芦苇沼泽、芦苇碱蓬交错带、碱蓬沼泽、米草碱蓬交错带、米草沼泽 5 个类型变量, 通过设置虚拟变量, 分别进行 0、1 赋值, 转变为典范对应分析(CCA) 中的物种变量或样本变量^[8]。

对样本数据进行统计分析, 比较样本的平均值。在分析土壤环境变量与景观格局关系时, 采用主成分分析法(PCA) 建立新的变量。主成分作为解释变量, 以景观类型作为响应变量, 运用典范对应分析法(CCA) 分析景观格局与土壤生态过程关系及空间分异特征。所有分析是基于 DPS 7. 55、SPSS 17. 0 和 Canoco for Windows 4. 5 进行。

3 结果分析

3. 1 不同景观类型的土壤理化性质空间异质性

从表 1 中可以看出, 土壤水分和盐度基本呈现了从陆地向海洋递增的趋势, 在景观上表现为从芦苇沼泽—碱蓬沼泽—米草沼泽递增的趋势。土壤水分和盐度主要来源是海水, 受潮侵的影响, 从陆地向海洋, 随着高程的降低, 潜水水位变浅, 潮侵频率逐渐升高, 表层土壤受海水影响时间增加, 土壤水分和盐度呈现相应的增加。土壤养分和有机质含量都是米草沼泽最高, 碱蓬沼泽或碱蓬芦苇交错带最低。互花米草引种后, 滩面不断淤高, 大量有机质和营养盐累积; 同时互花米草繁殖速度快, 生长时间长的互花米草植株体内的氮、磷含量越高, 对土壤有机质及营养盐的贡献越大; 互花米草生物量大, 在非生长季, 凋落物分解后大量的营养元素归还土壤, 进一步增加了土壤中养分的累积; 另外, 米草沼泽最易受到海水的影响, 吸收了大量海水中的磷^[6, 19-21]。芦苇植株高大, 生物量大, 对土壤有机质和养分的贡献仅次于米草。碱蓬沼泽植被比米草和芦苇低, 生物量小, 对营养元素的吸收和积累作用较弱。通过变异系数计算, 在土壤理化性质中, 有效磷的空间变异最大, 达到了 64. 110%, 而速效钾的变异最小, 变异系数为 21. 590%。

表 1 盐城自然保护区不同景观类型的土壤理化性质
Table 1 Soil physiochemical properties of different landscapes in Yancheng Nature Reserve

样带	土壤理化性质平均状况					
	水分/%	盐度/%	氨氮/(mg/kg)	有效磷/(mg/kg)	速效钾/(mg/kg)	有机质/%
米草沼泽	45. 527	1. 739	16. 097	24. 116	181. 262	1. 402
碱蓬米草交错带	37. 388	1. 049	8. 588	13. 339	166. 809	1. 094
碱蓬沼泽	39. 480	1. 357	6. 462	7. 599	144. 284	0. 823
碱蓬芦苇交错带	37. 010	0. 597	8. 731	7. 380	108. 932	0. 861
芦苇沼泽	36. 820	0. 347	7. 978	7. 927	112. 937	1. 170

3. 2 土壤性质的主成分分析

先对所测的土壤各理化性质指标进行标准化处理, 然后进行主成分分析(PCA) , 所得结果见表 2。前 3 个主成分的贡献率分别为 63. 871 1%(P_1) 、16. 332 8%(P_2) 和 10. 599 5%(P_3) , 累计贡献率达到了 90. 803 5%。具体如下:

表 2 土壤过程的主成分载荷

Table 2 Principal components loadings of soil processes

过程变量	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
速效钾(K)	0.400 7	0.570 4	0.077 9	-0.028 8	-0.557 0	0.443 8
盐度(S)	0.392 1	0.578 6	-0.139 2	0.153 8	0.625 2	-0.278 5
有机质(O)	0.374 3	-0.276 5	0.754 8	-0.055 5	0.340 1	0.308 2
氨氮(N)	0.435 6	-0.177 4	-0.190 3	-0.810 4	-0.077 9	-0.282 4
有效磷(P)	0.455 4	-0.260 3	0.116 8	0.504 4	-0.389 0	-0.552 7
水分(W)	0.385 2	-0.405 3	-0.595 8	0.247 6	0.160 5	0.495 3

$$P_1 = 0.400\ 7K + 0.392\ 1S + 0.374\ 3O + 0.435\ 6N + 0.455\ 4P + 0.385\ 2W \quad (1)$$

$$P_2 = 0.570\ 4K + 0.578\ 6S - 0.276\ 5O - 0.177\ 4N - 0.260\ 3P - 0.405\ 3W \quad (2)$$

$$P_3 = 0.077\ 9K - 0.139\ 2S + 0.754\ 8O - 0.190\ 3N + 0.116\ 8P - 0.595\ 5W \quad (3)$$

通过上面各主成分的构成和各生态要素的贡献率可以看出, P_1 的构成上, 氮、磷、钾等营养元素的贡献率相近, 而水分、盐度和有机质的贡献率相对较小, 所以可以将 P_1 理解为土壤养分决定的变量, 看作是土壤养分的代表; P_2 的构成上, 盐度的贡献率明显大于其他土壤过程要素的贡献率, 因此可以将 P_2 理解为盐度决定的变量, 看作是土壤盐度的代表; P_3 的构成上, 有机质和水分的贡献率明显最大, 可以将 P_3 看作是土壤有机质和水分的代表, 但是有机质与水分的相关方向是相反的。

3.3 基于 CCA 的土壤性质与景观格局的关系

根据主成分与景观类型的 CCA 排序结果, 显示主成分与景观格局对应分析的特征值总和为 2.659, 第一主轴的特征值为 0.833, 占总特征值的 31.339%, 第二主轴特征值为 0.678, 占总特征值的 25.480%。第一、第二排序轴能够累积解释主成分与湿地景观格局关系的 56.819%。主成分与景观类型的 CCA 排序图(图 2)和采样点与土壤理化性质的排序图(图 3)有着高度的一致性, 主成分能够反映土壤性质与景观格局的关系。在图 2 上, 作景观类型与主成分的垂线, 与主成分的交点到箭头的长短, 反映了该主成分对景观类型的相关性大小。代表养分的 P_1 与米草沼泽的相关性最大, 其次依次为碱蓬米草交错带、碱蓬沼泽、芦苇沼泽、碱蓬芦苇交错带; 代表盐度的 P_2 与碱蓬沼泽的相关性最大, 其次依次为碱蓬米草交错带、米草沼泽、碱蓬芦苇交错带、芦苇沼泽; 代表水分和有机质的 P_3 与芦苇沼泽相关性最大, 其次依次为米草沼泽、碱蓬芦苇交错带、碱蓬米草交错带、碱蓬沼泽。通过 CCA 排序, 可以看出盐城海滨湿地景观在排序轴的分布与实际景观格局具有一致性, 从陆地到海洋, 呈逆时针排列, 5 类景观位于 3 个象限, 在排序轴上不同的位置具有不同的土壤理化性质组合特征。第 II 象限为芦苇沼泽以及碱蓬芦苇交错带, 芦苇带位于该区域上部, 与 P_3 呈正相关, 与 P_1 、 P_2 呈负相关, 说明芦苇沼泽土壤具有低盐度、低水分和有机质含量高的特征。碱蓬芦苇交错带位于区域下部, 与 P_1 、 P_2 、 P_3 呈负相关。第 III 象限为碱蓬沼泽, 与 P_2 呈正相关, 与 P_1 接近零相关, 与 P_3 呈负相关, 说明盐度是碱蓬沼泽发育的关键因子。第 IV 象限为米草沼泽和碱蓬米草交错带, 米草沼泽与 P_1 、 P_3 呈正相关, 与 P_2 呈零相关, 可以反映米草沼泽受盐度影响很弱, 对盐度具有较高的生态幅, 无论在咸水区还是在淡水区都能够发育, 同时也反映了米草沼泽发育的情况下, 土壤具有较高的水分、有机质和养分。碱蓬米草交错带, 由于碱蓬的存在, 所以与代表盐度的 P_2 呈正相关。通过土壤过程与景观格局的 CCA 排序比较, 可以得出, 土壤生态过程与景观格局在时空上存在着有序关系。

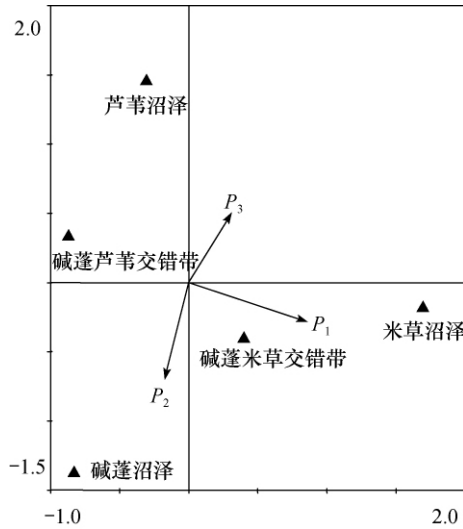


图2 主成分与景观类型的 CCA 排序

Fig. 2 Ordination diagram for the CCA of the relationship between principal components and landscape types

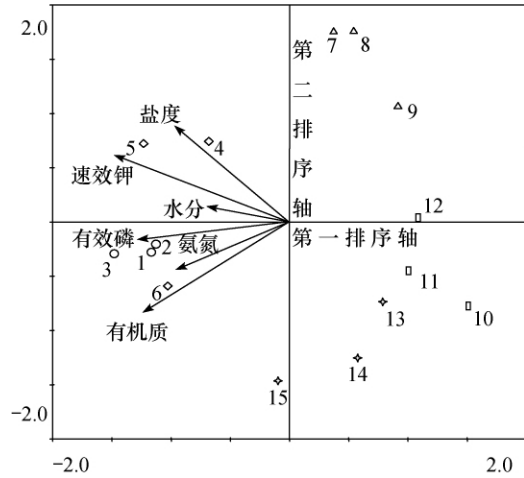


图3 土壤性质与样点的 CCA 排序图

Fig. 3 Ordination diagram for the CCA of the relationship between soil properties and samples

3.4 土壤生态过程与景观演变的耦合关系

景观演变是一个较长时间尺度的过程,在缺乏长期、连续的监测数据情况下,空间替代时间的方法是常用的方法,该方法可以克服时间尺度的限制,能够解释景观演变的驱动因素^[8]。以样点与海堤的空间垂直距离反映景观演变的时间顺序;任一个样点上的土壤理化性质的监测结果可理解为某个时间上的土壤状态;任一个样点所处的景观类型可看作是演变序列中某一时刻的景观状态。

通过主成分分析,计算每个样点在第一、二、三主成分上的得分 F_1 、 F_2 、 F_3 。根据各主成分的贡献率,计算综合主成分得分:

$$\sum F = 0.6387F_1 + 0.1633F_2 + 0.1060F_3 \quad (4)$$

通过主成分分析,将土壤性质 6 个指标值,转变为 3 个主成分,计算主成分综合得分(表 3)。每个样地上的主成分综合得分,可理解为土壤生态过程中某一时刻的状态变量。而每个样地距离海堤的距离表示景观演变的不同阶段,建立相应的时间序列。对时间序列(y)和过程变量(x)进行一元线性回归分析,结果显示(图 4):演替时间序列与土壤过程相关系数为 0.8112, $R^2 = 0.6580$ 。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,经过 F 检验,一元线性回归方程 $y = 1.582x + 5.332$ 是显著的。该方程能够解释或者证明土壤生态过程整体上与景观演变之间存在着这样的线性关系,但不能有效地解释具体的生态因子与对应景观演变序列之间的关系。

基于上述耦合结果,以 3 个主成分为过程变量,对过程变量和海滨湿地景观整个时间序列(y_1)进行多元回归分析,见式(5),结果显示:时间序列与过程变量相关系数为 0.8458, $R^2 = 0.7154$ 。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,经过 F 检验,多元回归方程[式(5)]是显著的。通过方程,可以得出土壤过程与 3 个主成分在海滨湿地景观整体演变中,所有环境因子与景

表 3 海滨湿地土壤过程主成分得分

Table 3 Principal component scores of soil process in coastal wetland

样地	F_1	F_2	F_3	ΣF
1	5.203 8	0.103 1	-0.274 1	3.311 449
2	0.714 3	1.106 3	0.926 0	0.735 038
3	3.742 0	-1.689 3	0.063 1	2.120 841
4	0.069 6	1.351 2	0.508 3	0.318 984
5	0.851 4	0.261 4	-0.908 1	0.490 217
6	-0.309 3	0.282 3	1.506 4	0.008 228
7	-0.750 5	1.731 1	-0.098 4	-0.207 090
8	-0.179 5	1.184 9	-0.694 2	0.005 262
9	-1.116 1	-0.142 2	-1.575 6	-0.903 090
10	-1.843 3	-0.952 9	-0.369 8	-1.372 120
11	-1.086 8	-0.190 0	-0.631 5	-0.792 110
12	-1.790 6	-0.039 8	-0.098 0	-1.160 540
13	-1.902 5	-1.250 5	0.928 4	-1.320 920
14	-1.319 2	-1.166 2	-0.194 4	-1.053 620
15	-0.283 2	-0.589 3	0.912 1	-0.180 430

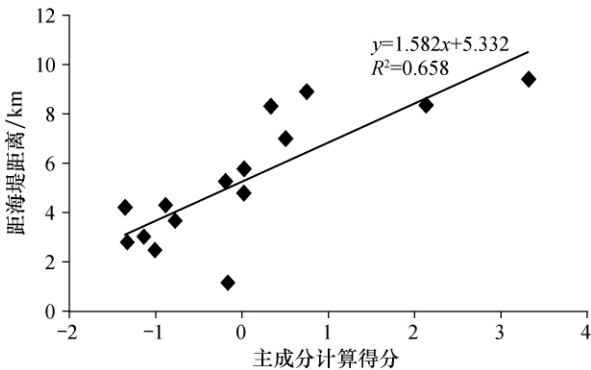


图 4 主成分综合得分与时间序列相关分析

Fig.4 Correlation analysis between principal component synthesis score and time series

观演变呈正相关,环境因子对景观演变具有正效应。这一结论与上述的 CCA 排序分析存在矛盾,问题在于两个方面: 第一,不能正确解释环境变量与景观演变的关系; 第二,没有将海滨湿地实际的演变序列考虑在内,无法区别其演变方向。所以下面从碱蓬沼泽—碱蓬米草交错带—米草沼泽与碱蓬沼泽—碱蓬芦苇交错带—芦苇沼泽两个演变序列建立其与土壤生态过程的耦合关系。

$$y_1 = 5.327\ 4 + 0.996\ 5P_1 + 0.881\ 4P_2 + 0.141\ 4P_3$$

(5)

选择碱蓬沼泽、碱蓬米草交错带和米草沼泽上边缘的 7 个样点(9→8→7→6→5→4→3) 来表征碱蓬沼泽→碱蓬米草交错带→米草沼泽演变序列(y_2), 与 3 个主成分进行多元回归分析, 见式(6), 结果显示: 时间序列与过程变量相关系数为 0.859 2, $R^2 = 0.738\ 2$ 。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下, 经过 F 检验, 多元回归方程 [式(6)] 是显著的。在这一演变序列中, 所有 3 个主成分与景观演变呈正相关, 环境因子对景观演变同样具有正效应, 即从碱蓬沼泽向米草沼泽演变过程中, 随着 y_2 的值逐渐增大, P_1 、 P_2 、 P_3 是逐渐增加的。

$$y_2 = 6.027\ 8 + 0.793\ 6P_1 + 0.492\ 9P_2 + 0.729\ 5P_3$$

(6)

选择碱蓬沼泽、碱蓬芦苇交错带和芦苇沼泽上边缘的 9 个样点(7→8→9→10→11→12→13→14→15) 来表征对碱蓬沼泽—碱蓬芦苇交错带—芦苇沼泽演变序列(y_3), 与 3 个主成分进行多元回归分析, 见式(7), 结果显示: 时间序列与过程变量相关系数为 0.892 8, $R^2 = 0.797 1$ 。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下, 经过 F 检验, 多元回归方程 [式(7)] 是显著的。在这一演变序列中, P_1 (养分因子)、 P_3 (有机质与水分因子) 与景观演变呈负相关, 对景观演变具有负效应; P_2 (盐度) 对景观演变具有正效应, 即从碱蓬向芦苇演变过程中, 随着 y_3 的值逐渐变小, P_1 、 P_3 是在增加的, 而 P_2 是降低的, 这与实际情况相符合。

$$y_3 = 2.553 0 - 0.874 5P_1 + 1.020 7P_2 - 0.709 9P_3 \quad (7)$$

4 结论与讨论

(1) 研究区内土壤过程能够响应景观格局。通过 PCA 和 CCA 分析, 可以得出土壤理化性质与景观格局的相关性存在明显的差异。代表养分的 P_1 与景观类型的相关性排序为: 米草沼泽 > 碱蓬米草交错带 > 碱蓬沼泽 > 芦苇沼泽 > 碱蓬芦苇交错带; 代表盐度的 P_2 与景观类型的相关性排序为: 碱蓬沼泽 > 碱蓬米草交错带 > 米草沼泽 > 碱蓬芦苇交错带 > 芦苇沼泽; 代表水分和有机质的 P_3 与景观类型的相关性排序为: 芦苇沼泽 > 米草沼泽 > 碱蓬芦苇交错带 > 碱蓬米草交错带 > 碱蓬沼泽。

(2) 不同景观演变序列与土壤过程之间存在的关系不同。碱蓬沼泽—碱蓬米草交错带—米草沼泽演变序列与土壤过程的相关系数为 0.859 2; P_1 、 P_2 和 P_3 与景观演变呈正相关, 但 P_3 所代表的水分和有机质相关性是相反的, 也就是说, 在这一演变序列中, 除了土壤水分外, 其余生态过程要素对景观演变都具有正效应。碱蓬沼泽—碱蓬芦苇交错带—芦苇沼泽演变序列与土壤过程相关系数为 0.892 8; P_1 和 P_3 与景观演变呈负相关, P_2 与景观演变呈正相关, 即土壤盐度和水分对景观演变具有正效应, 其余生态过程要素对景观演变具有负效应。

(3) 土壤生态过程与景观过程相互作用。从碱蓬沼泽—碱蓬米草交错带—米草沼泽演变序列中可以看出, 所有主成分与景观演变呈正相关。互花米草沼泽向碱蓬沼泽下边缘的扩张主要是沿着潮沟方向入侵。米草一旦入侵, 由于其超强的扩张能力和双重繁殖方式, 使之在与碱蓬的种群竞争中处于优势, 结果是米草沼泽不断扩大。一方面, 互花米草很强的淤积能力, 根据对互花米草沼泽下边缘的实地监测, 发现互花米草沼泽淤高已达到了 1.5 m, 在淤积过程中, 大量的有机质和营养物质逐渐积累; 另一方面, 互花米草生物量大, 对土壤有机质以及营养物质的积累作用比较强。所以随着互花米草的扩张, 引起新扩张地有机质、养分不断增加; 互花米草的淤高作用, 致使微地形发生变化, 在这一演变序列中, 土壤水分下降。而盐度不断增加的结果, 是否是由于碱蓬向互花米草演变而致使盐度升高, 还有待于进一步研究, 因为米草属于泌盐植物, 可以降低土壤的盐度。所以, 这个演替序列本质上就是米草沼泽不断扩张、碱蓬沼泽退缩的过程。

从碱蓬沼泽—碱蓬芦苇交错带—芦苇沼泽演变序列中, 通过方程得出 P_1 、 P_3 与景观演变呈负相关, P_2 对景观演变具有正效应。也就是说, 随着距海堤距离的增加, 土壤养分和有机质是在减小的, 而土壤盐度和水分是在增加的。海水是海滨湿地土壤水分主要来源, 从陆地向海洋, 随着地势的降低, 地下潜水位逐渐升高, 土壤水分随之升高。芦苇沼泽位于潮上带, 地势最高, 地下潜水位最深, 所以其土壤水分含量最低。但是, 芦苇生物量大, 对有机质及营养物质的积累作用比碱蓬强, 在这个演替序列中是逐渐增加的。从陆地到海洋, 盐度受海水影响程度的增加, 从芦苇沼泽向碱蓬沼泽逐渐增加。在这一演替序列中, 首先是碱蓬沼泽上部高程增加,

盐度条件改变,开始适合淡水植物芦苇生长,随着滩面的淤高,芦苇不断向海洋方向扩张,引起土壤有机质、养分增加,芦苇沼泽向海扩张,碱蓬沼泽开始萎缩。所以,碱蓬沼泽—碱蓬芦苇交错带—芦苇沼泽演变序列就是芦苇沼泽不断扩张、碱蓬沼泽退缩的过程。

综上所述,可以看出,水分、盐度、有机质以及氮、磷、钾等土壤生态要素的梯度变化,是景观格局变化的重要动力,而景观格局变化进一步引起土壤生态过程的变化,而过程的变化致使景观再次发生演变。盐城海滨湿地景观演变就是在这种格局与过程相互作用下,芦苇沼泽与米草沼泽不断扩张、碱蓬沼泽不断萎缩的过程。

参考文献(References):

- [1] 张晓龙,李培英,李萍,等. 中国滨海湿地研究现状与展望 [J]. 海洋科学进展, 2005, 23(1): 87-95. [ZHANG Xiao-long, LI Pei-ying, LI Ping, et al. Present conditions and prospects of study on coastal wetlands in China. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(1): 87-95.]
- [2] 张文渊. 滨海地区盐碱土类型与形成条件分析 [J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 19-23. [ZHANG Wen-yuan. Analysis on types of saline-alkali soil and development condition in seashore area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 23(1): 87-95.]
- [3] 姚荣江,杨劲松,陈小兵,等. 苏北海涂围垦区耕层土壤养分分级及其模糊综合评价 [J]. 中国土壤与肥料, 1999(4): 16-20. [YAO Rong-jiang, YANG Jin-song, CHEN Xiao-bing, et al. Classification and fuzzy synthetic evaluation of soil nutrient at plough horizon in coastal region of north Jiangsu Province. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1999(4): 16-20.]
- [4] 江苏省 GEF 湿地项目办公室. 盐城滨海湿地生态价值评估及政策法律、土地利用分析 [M]. 南京: 南京师范大学出版社, 2008: 9-12. [GEF Wetlands Project Office in Jiangsu Province. The Ecological Value Assessment and Policy and Law, Land Use Analysis in Yancheng Coastal Wetland. Nanjing: Nanjing Normal University Press, 2008: 9-12.]
- [5] 杨桂山. 中国海岸环境变化及其区域响应 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 166-178. [YANG Gui-shan. Coastal Environmental Change and Its Regional Responses in China. Beijing: Higher Education Press, 2005: 166-178.]
- [6] 仲崇庆,王进欣,邢伟,等. 不同植被和水文条件下苏北盐沼土壤 TN、TP 和 OM 剖面特征 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(3): 186-190. [ZHONG Chong-qing, WANG Jin-xin, XING Wei, et al. Effects of vegetation and hydrological conditions on the profile characteristics of TN, TP and OM in coastal salt marshes in northern Jiangsu Province. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(3): 186-190.]
- [7] 刘青松,李杨帆,朱晓东. 江苏盐城自然保护区滨海湿地生态系统的特征与健康设计 [J]. 海洋学报, 2003, 25(3): 143-148. [LIU Qing-song, LI Yang-fan, ZHU Xiao-dong. Characteristics of coastal wetland ecosystems and their healthy design. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(3): 143-148.]
- [8] 姚成,万树文,孙东林,等. 盐城自然保护区滨海湿地植被演替的生态机制 [J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2203-2210. [YAO Cheng, WAN Shu-wen, SUN Dong-lin, et al. Ecological mechanisms of vegetation succession of coastal wetland in Yancheng Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2203-2210.]
- [9] 沈永明,曾华,王辉,等. 江苏典型淤长岸段滩涂盐生植被及其土壤肥力特征 [J]. 生态学报, 2005, 25(1): 1-6. [SHEN Yong-ming, ZENG Hua, WANG Hui, et al. Characteristics of halophyte and associated soil along aggradational muddy coasts in Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 1-6.]
- [10] 周秋华,顾俊,刘德后,等. 盐城湿地沉积物环境特征及其影响因素研究 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32(4): 115-118. [ZHOU Qiu-hua, GU Jun, LIU De-hou, et al. Environment characteristics of sediments in the wetlands of Yancheng and their impact factors. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(4): 115-118.]
- [11] 刘春悦,张树清,江红星,等. 江苏盐城滨海湿地外来种互花米草的时空动态及景观格局 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 901-908. [LIU Chun-yue, ZHANG Shu-qing, JIANG Hong-xing, et al. Spatiotemporal dynamics and landscape pattern of alien species *spartina alterniflora* in Yancheng coastal wetlands of Jiangsu Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 901-908.]
- [12] 毛志刚,王国祥,刘金娥,等. 盐城滨海湿地盐沼植被对土壤碳氮分布特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 293-297. [MAO Zhi-gang, WANG Guo-xiang, LIU Jin-e, et al. Influence of salt marsh vegetation on spatial distribution of soil carbon and nitrogen in Yancheng coastal wetlands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 293-297.]

- bution of soil carbon and nitrogen in Yancheng coastal wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 293–297.]
- [3] 任丽娟, 王国祥, 仇乐, 等. 江苏潮滩湿地不同生境互花米草形态与生物量分配特征 [J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(3): 220–226. [REN Li-juan, WANG Guo-xiang, QIU Le, et al. Morphology and biomass distribution of *Spartina alterniflora* growing in different tidal flat habitats in Jiangsu. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(3): 220–226.]
- [4] 任丽娟, 王国祥, 何聃, 等. 盐城潮滩湿地不同植被带土壤有机质空间分布特征 [J]. 海洋科学进展, 2011, 29(1): 54–61. [REN Li-juan, WANG Guo-xiang, HE Dan, et al. Spatial distributions of soil organic matter in different vegetation zones of the Yancheng tidal flat. *Advances in Marine Science*, 2011, 29(1): 54–61.]
- [5] LIU J E, ZHOU H X, QIN P. Effects of *Spartina alterniflora* salt marshes on organic carbon acquisition in intertidal zones of Jiangsu province, China [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 30: 240–249.
- [6] GAO Jian-hua, YANG Gui-shan, OU Wei-xin, et al. Analyzing and quantitatively evaluating the organic matter source at different ecologic zones of tidal salt marsh, North Jiangsu Province, China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2008, 2(1): 81–88.
- [7] DENG Zi-fa, AN Shu-qing, WANG Zhong-sheng, et al. Habitat choice and seed-seedling conflict of *Spartina alterniflora* on the coast of China [J]. *Hydrobiologia*, 2009, 630(1): 287–297.
- [8] 杨艳丽, 史学正, 于东升, 等. 区域尺度土壤养分空间变异及其影响因素研究 [J]. 地理科学, 2008, 28(6): 788–792. [YANG Yan-li, SHI Xue-zheng, YU Dong-sheng, et al. Spatial Heterogeneity of soil nutrients and their affecting factors at regional scale. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(6): 788–792.]
- [9] 白军红, 邓伟, 王庆改, 等. 内陆盐沼湿地土壤碳氮磷剖面分布的季节动态特征 [J]. 湖泊科学, 2007, 27(5): 756–763. [BAI Jun-hong, DENG Wei, WANG Qing-gai, et al. Seasonal dynamics of carbon, nitrogen, phosphor in soil profiles from inland salt marsh. *Journal of Lake Science*, 2007, 27(5): 756–763.]
- [10] 王爱军, 高抒, 贾建军, 等. 江苏王港盐沼的现代沉积速率 [J]. 地理学报, 2005, 60(1): 62–69. [WANG Ai-jun, GAO Shu, JIA Jian-jun, et al. Contemporary sedimentation rates on salt marshes at Wanggang, Jiangsu, China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 62–69.]
- [11] 高建华, 杨桂山, 欧维新. 互花米草引种对苏北潮滩湿地 TOC、TN 和 TP 分布的影响 [J]. 地理研究, 2007, 26(4): 799–806. [GAO Jian-hua, YANG Gui-shan, OU Wei-xin. Overview on geochemistry process of nitrogen and phosphor in tidal flat wetland. *Wetland Science*, 2004, 2(3): 220–227.]

The Coupling Relationship between Soil Eco-Processes and Landscape Evolution under the Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland

ZHANG Hua-bing^{1,2}, LIU Hong-yu¹, LI Yu-feng¹, HOU Ming-hang¹

(1. Key Laboratory of Environment Change and Ecology Construction in Jiangsu Province, College of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. College of Urban and Resource Environment, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002, China)

Abstract: Yancheng coastal wetlands are the largest coastal wetlands along the Western Pacific. With its unique ecological location and special habitat types, Yancheng coastal wetlands not only play an important ecological role in biological diversity and resources, environmental protection but also has high land utilization suitability. However, humans are strongly interfering in the nature recently. And the landscapes changed promptly. Nowadays, the study of coastal wetlands

landscapes has become a hot field. And meanwhile, the coupling mechanism and relationship between landscape processes and patterns has become another significant field. Taking the core area of Yancheng National Nature Reserve as a case, we have used the methods of canonical correspondence analysis, principal component analysis, linear regression analysis and space instead of time to explore the coupling relationship of soil processes and landscape evolution, according to the sampling and analysis of coastal wetlands soil from April to May in 2011. And the results showed the following aspects: Firstly, CCA ordination indicates that soil processes can well response to the landscape pattern of coastal wetlands as soil process and landscape show different correlation and five kinds of landscape types are regularly located in the CCA ordination shaft in an anti-clockwise direction from land to sea. Secondly, PCA analysis suggests that three main components can effectively respond to landscape pattern. The relevance ranking of main composition and types of landscape are as follows: The first principal component is soil nutrients: *Spartina* marsh > *Spartina-Salsa* transitional zone > *Salsa* marsh > *Reed* swamp > *Reed-Salsa* transitional zone; the second principal component is salinity, *Salsa* marsh > *Spartina-Salsa* transitional zone > *Spartina* marsh > *Reed-Salsa* transitional zone > *Reed* swamp; the third principal components is organic matter and moisture, *Reed* swamp > *Spartina* marsh > *Reed-Salsa* transitional zone > *Spartina-Salsa* transitional zone > *Salsa* swamp. Thirdly, use space instead of time and take the distance from the seawall to the landscape as the time variable we find that there is a good correlation between the main components and landscape evolution. The results of multiple regression shows that the correlation coefficient of *Salsa* marsh-*Spartina-Salsa* marsh transitional zone-*Spartina* marsh time series is 0.8592. And the correlation coefficient of *Salsa* marsh-*Reed-Salsa* transitional zone-*Reed* marsh time series is 0.8928. Therefore, the gradient of soil eco-processes is a crucial driver of landscape changes while landscape changes further lead to changes of soil processes. Evolution of coastal wetland is *Reed* marsh and *Spartina* marsh expansion, *Salsa* marsh shrinking process under the interactive driving of pattern and process in Yancheng Natural Reserve. All in all, it is of greatly positive significance for us to correctly understand the coupling mechanism of coastal wetland landscape evolution and ecological processes under natural conditions which is also beneficial for rational development and utilization of coastal wetland resources, protect the ecological functions of wetlands, effective management of coastal environment.

Key words: coupling relationship; landscape evolution; soil eco-processes; the natural conditions; Yancheng Natural Reserve