

基于 BP 神经网络模型的平潭岛植被景观模拟^{*}

刘晓芬¹ 黄义雄^{1**} 叶功富² 陈利¹

(¹ 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; ² 福建省林业科学研究院, 福州 350012)

摘要 以 GIS 为技术平台, 利用 Matlab 7.0, 选用 2 km×2 km 网格图对平潭岛植被景观进行切割, 得到 50 个样方数据, 其中, 44 个用于模型训练, 6 个用于模型检验, 在此基础上, 选取分维数、Shannon 多样性指数、蔓延度指数作为模型输出数据, 选取居民点个数、风速和距海边距离作为影响因素, 建立平潭岛植被景观的 BP 神经网络模型, 并进行误差检验. 结果表明: 影响平潭岛植被景观空间格局和植被多样性状况的主要因素为风速、距海岸距离, 人为因素对研究区植被景观的空间连接程度造成较大影响. BP 神经网络模型对研究区植被景观与环境及人为影响因子之间关系的拟合与实际情况基本吻合, 平均误差为 7.4%, 最小误差仅 0.2%, 模型模拟误差较小, 拟合度较高, 可用于对研究区植被景观的定量预测模拟.

关键词 神经网络 植被景观 GIS Matlab 平潭岛

文章编号 1001-9332(2011)08-2098-07 **中图分类号** S718.3 **文献标识码** A

Simulation of vegetation landscape in Pingtan Island based on BP neural network model. LIU Xiao-fen¹, HUANG Yi-xiong¹, YE Gong-fu², CHEN Li¹ (¹ College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; ² Fujian Academy of Forestry Sciences, Fuzhou 350012, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(8): 2098–2104.

Abstract: Taking GIS as technical platform and by using Matlab 7.0, the vegetation landscape in Pingtan Island was cut with 2 km×2 km grid graph. The data of 50 quadrats were obtained. Forty-four of the 50 quadrates were used for model training, and the rest 6 were used for model checking. Fractal dimension, Shannon diversity index, and contagion index were selected as output data of the model, and the number of residential quarter, wind speed, and the distance from the coast were chosen as affecting factors. A BP neural network model of vegetation landscape in Pingtan Island was established, and was checked by error test. The results demonstrated that the major factors affecting the vegetation landscape spatial pattern and diversity in Pingtan Island were wind speed and the distance from the coast, and anthropogenic factors had greater effects on the spatial connection of vegetation landscape. The fitted results of the relationships between vegetation landscape and environmental and anthropogenic factors were basically accorded with the truth. The average error was 7.4%, and the minimum error was 0.2%, indicating that the model could be applied to quantitatively predict and simulate the vegetation landscape in Pingtan Island.

Key words: neural network; vegetation landscape; GIS; Matlab; Pingtan Island.

人工神经网络是 20 世纪末迅速兴起的一门高新技术, 其不仅在环境保护、遥感生态参数的提取、生态系统模拟、城市规划方面应用广泛^[1-4], 而且在石油开采、病虫害防治、河流水质模拟等方面也有很多体现^[5-7], 并在近些年逐渐应用于景观生态学. 目前, 人工神经网络在景观格局、动态和驱动机制方面

的研究和应用还较少, 更多关注的是沙漠、绿洲等景观^[8-10], 对植被景观的研究和模型很少. 马学款等^[11]将人工神经网络模型用于重庆市能见度的预报, 模型结果对重庆市区的雾预报具有良好的参考价值; 孙会国和徐建华^[12]将人工神经网络与地理信息系统技术相结合, 对城市边缘区景观生态规划建立了 BP 神经网络模型; 张利权和甄彧^[13]运用景观生态学原理, 基于 GIS 对上海城市景观格局及其变化规律进行了定量分析, 建立了人工神经网络模型;

^{*} “十一五”国家科技支撑计划(2009BADB2B0302)资助.

^{**} 通讯作者. E-mail: yxhuang@fjnu.edu.cn

2010-12-26 收稿, 2011-05-05 接受.

郭沛等^[14]对人工神经网络模拟森林景观生态进行了研究分析,结果表明人工神经网络模型的泛化能力较强,对森林景观格局的预测、模拟分析及景观规划提供了一种新方法;孙华等^[15]对天鹅山林场景观格局和森林景观类型所占面积百分比的关系进行了人工神经网络的模拟研究,结果表明,人工神经网络模型对于明确森林景观的驱动因素和景观格局的非线性对应关系具有很强的适用性。

景观格局分析过程的实质是一个非线性映射过程,即由各种自然、社会经济因素与一组景观指数组成的非线性对应关系.神经网络模型具有高度的非线性映射能力,可以揭示系统隐含规律,且精度高、可靠性好、科学性强,又能完成任何从 n 维空间到 m 维空间的函数映射,不需要假设前提条件和人为确定所选因素权重,已应用于很多领域^[16-18],但在植被景观模拟方面的应用很少.为此,本文应用神经网络模型对福建省平潭岛(平潭岛是福建省第一大岛,其生态环境状况及特征具有代表性)植被景观格局进行模拟,旨在揭示影响植被景观空间分布的人为和自然影响因素,并探讨影响因素的作用机制,在平潭岛景观规划及环境保护方面具有重要的指导意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

平潭岛 (25° 15'—25° 45' N, 119° 32'—120°10' E)位于福建省东部,由 126 个岛屿组成.陆地面积 371. 91 km²,其主岛——海坛岛的陆地面积为 267. 13 km²,是福建省第一大岛、我国第五大岛.研究区属亚热带海洋性季风气候,夏长冬短,温热湿润,年均气温 19. 6 ℃,雨热同季,旱雨季节分明,年均降水量 1172 mm,为本省少雨区之一,且该岛处于强风区.平潭县经济发展迅速,工业建设成效突出,风力发电和旅游业发展迅速。

1.2 研究方法

1.2.1 植被景观现状 基于平潭岛 2007 年 TM 遥感影像,利用 ArcGIS 解译得到平潭岛植被景观图,将研究区植被景观分为黑松 (*Pinus thunbergii*) 林、木麻黄 (*Casuarina equisetifolia*) 林、次生相思树 (*Acacia confusa*) 林、湿地松 (*Pinus elliottii*) 林、月见草 (*Oenothera littoralis*) 灌丛、算盘子 (*Glochidion obovatum*) 灌丛、龙舌兰 (*Agave americana*) 灌丛、车桑子 (*Dodonaea viscosa*) 灌丛和白茅 (*Imperata cylindrica*) 灌丛等 9 种类型 (表 1)。

表 1 平潭岛主要植被类型的结构现状
Table 1 Current situation of main vegetation types in Pingtan Island

植被类型 Vegetation type	面积 Area (hm ²)	总面积 的百分比 Percentage of the total area	斑块数 Number of patch	总斑块数 的百分比 Percentage of the total patch
黑松林 <i>Pinus thunbergii</i> forest	1992. 32	21. 0	49	7. 5
木麻黄林 <i>Casuarina equisetifolia</i> forest	3302. 52	34. 4	364	54. 9
次生相思树林 <i>Acacia confusa</i> forest	3618. 99	37. 7	151	22. 3
湿地松林 <i>Pinus elliottii</i> forest	53. 05	0. 6	6	0. 9
月见草灌丛 <i>Oenothera littoralis</i> shrub	310. 42	3. 3	42	6. 4
算盘子灌丛 <i>Glochidion obovatum</i> shrub	121. 67	1. 3	13	2. 0
龙舌兰灌丛 <i>Agave americana</i> shrub	67. 95	0. 7	13	2. 0
车桑子灌丛 <i>Dodonaea viscosa</i> shrub	64. 74	0. 7	8	1. 2
白茅灌丛 <i>Imperata cylindrica</i> shrub	69. 54	0. 7	17	2. 6
合计 Total	9601. 21	100	663	100

1.2.2 模型变量的选取 综合考虑景观形成机制的自然和社会经济因素,结合研究区特性,选取居民点数、风速和距海边距离作为输入变量.其中,居民点数(指居民点斑块数目)代表人为干扰影响因素,选取依据是斑块面积不小于 150 m×150 m 的有人类活动干预的居民点建设用地;风速和距海边距离均代表自然影响因素,影响研究区植被景观的形成.选取分维数、蔓延度指数和 Shannon 多样性指数作为模型的输出数据,能较好反映景观镶嵌结构的复杂程度和景观要素构成等特征.其中,分维数可用来测定斑块形状的复杂程度,Shannon 多样性指数反映景观要素构成,蔓延度指数指景观中不同斑块类型成分的聚集程度。

1.2.3 模型变量的获得 平潭县植被景观斑块的平均面积为 0. 24 km²,由于景观样地的面积为斑块平均面积的 2~5 倍时,才能反映采样地点周围景观的格局信息^[12],因此,研究区样本面积大小为 0. 48~1. 2 km²,本文选用 2 km×2 km 的网格进行采样.剔除沿边的和不可靠的数据,选取均匀分布的 50 个样方作为样本数据.从 50 个样方中随机选取 6 个样本用于模型检验,其余 44 个样本用于网络训练.根据平潭岛实际情况,结合平潭岛风力分布图,对样方所属风力区进行计算取值,得到各样方的平均风速值。

在 ArcGIS 9. 2 软件支持下,运用 Data Management Tools 模块将样本网格图层转化为点图层,得到

表 2 模型的输入数据和输出数据
Table 2 Input data and output data of the model

样本编号 Sample No.	居民点个数 Number of residential quarter	风速 Wind speed ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	距海边距离 Distance from coast (m)	分维数 FRACT	Shannon 多样性指数 SHDI	蔓延度指数 CONTAG
1	14	6.5	1028.33	1.51	0.24	59.08
2	5	7.0	1726.63	1.33	0.47	65.78
3	0	8.0	1664.49	1.33	0.39	78.58
4	6	7.6	724.28	1.22	0.70	65.57
5	3	8.6	780.12	1.22	0.11	92.12
6	1	8.0	656.64	1.23	0.53	77.91
7	2	9.0	825.44	1.12	1.40	58.69
8	1	9.8	1112.39	1.21	1.01	71.55
9	1	9.2	1229.27	1.35	1.41	51.17
10	2	5.4	2822.47	1.08	0.84	59.78
11	3	6.3	2762.19	1.24	0	100
12	2	7.0	825.51	1.18	0.54	61.43
13	0	7.0	1010.90	1.46	0	100
14	6	6.0	2918.20	1.25	0	100
15	3	7.0	3089.80	1.24	0.70	72.59
16	7	7.5	1280.86	1.21	0.87	56.43
17	6	8.3	621.66	1.31	0	100
18	1	7.0	1045.31	1.23	0	100
19	0	7.0	1432.19	1.08	0	100
20	7	6.0	3160.22	1.24	0	100
21	14	7.0	2562.03	1.16	0.54	75.45
22	4	7.7	959.84	1.24	0.68	69.02
23	1	6.0	1944.87	1.32	0.58	58.16
24	0	7.0	3233.45	1.03	0.66	52.58
25	0	7.0	2073.12	1.25	0.58	57.98
26	0	7.0	830.33	1.21	0	100
27	1	7.0	491.44	1.19	0.68	51.01
28	1	7.0	2483.59	1.20	0.68	50.59
29	1	7.0	1955.80	1.11	0.89	57.44
30	2	7.6	1170.54	1.19	0.37	70.19
31	3	8.6	1333.39	1.15	0.66	68.35
32	2	6.6	1243.05	1.21	0.45	79.54
33	5	7.5	2804.08	1.19	0.57	59.09
34	1	7.0	2009.20	1.20	0	100
35	13	6.7	1451.19	1.19	1.09	58.32
36	1	6.5	2249.25	1.22	0.63	52.76
37	0	6.3	3199.00	1.26	0.51	76.81
38	3	8.0	3119.60	1.23	0.51	76.68
39	3	7.0	2780.92	1.24	0.69	50.03
40	0	8.0	558.46	1.13	0.09	95.55
41	2	6.6	2025.34	1.31	0.76	65.65
42	1	8.0	2732.21	1.36	0.68	40.39
43	2	6.5	1841.54	1.37	0.28	79.99
44	1	5.7	398.12	1.37	0.66	50.48
45	0	6.0	1418.33	1.25	0.44	68.10
46	4	5.4	1758.54	1.22	0.69	50.00
47	2	7.0	603.27	1.23	0	100
48	2	8.0	679.36	1.39	0.53	75.84
49	17	5.4	946.26	1.14	0.74	66.26
50	6	6.0	488.64	1.15	0	100

到各样本的中心点,再运用 Analysis tools 下 proximity 中的 near 功能模块计算每个样本中心到海边的最短距离.

运用 ArcGIS 9.2 软件将研究区景观类型图中的居民点提取出来,再将样本网格与居民点图层进行叠加,即可获得每个样本的居民点个数.

用网格样本切割平潭岛景观类型图,运用 Arc-GIS 9.2 软件将切割后的样本转化为像元大小为 30 m×30 m 的栅格数据,并结合景观空间格局分析软件 Fragstas 3.3 对每个样本的 3 个景观指数计算,即可获得 BP 神经网络的输出矩阵(表 2).

1.3 植被景观 BP 神经网络的构建

BP 神经网络结构包括 3 个层次:输入层、隐含层和输出层.本文中的输入层由居民点数、距海边距离和风力级别组成,输出层包括植被景观分维数、蔓延度指数和多样性指数.输入和输出层的神经元个数均为 3 个,隐含层的节点数根据经验和试探得来,本文中隐含层节点数为 20.

由于输入和输出数据的数值差异较大,本文在模拟前对原始数据进行标准化处理,公式如下:

$$x'_{ij} = \frac{(x_{ij} - \bar{x}_i)}{\delta_i}$$

(1)

式中: x'_{ij} 为标准化后的指标(变量)值; x_{ij} 为实际指标(变量)值; \bar{x}_i 为指标(变量)的算术平均值; δ_i 为标准差($i = 1, 2, \cdots, n$).

由表 2 中数据完成 BP 网络训练后,网络的拓扑结构为(3,20,3),在软件 Matlab 7.0 中进行网络的仿真训练.隐含层的传递函数采用系统中的 S 型函数(tansig),输出层的传递函数采用 purelin 线性函数,训练函数采用系统默认的 trainlm.训练步长经反复试选为 500 次,在训练样本时,输出向量的误差在开始时收敛十分明显,训练 140 次后,训练样本的输出误差很快趋于平缓,到 300 次后趋于稳定,误差的减少量几乎为 0,训练 500 次后误差平稳,训练

数据的方差为 0.0026(图略).当网络模型的收敛效果趋于理想状态时,BP 网络模型对植被景观各指数的模拟数值与目标数值之间的拟合基本完成.

1.4 模型检验

训练完毕的 BP 神经网络模型存在一定误差,误差大小影响其运用方面的泛化能力,因此,需要进行数据检验来说明模型的可靠程度.本研究采用训练样本之外的 6 个样本进行仿真模拟,从而检验仿真结果的误差,以检验其泛化能力.检验样本的输入数据为表 3,仿真结果见表 4,误差计算公式如下:

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_{i,k} - O_{i,k})^2$$

(2)

式中: $y_{i,k}$ 和 $O_{i,k}$ 分别为神经元 i 的期望输出和实际输出; K 为当前的输入样本; n 为输出层神经元结点数^[19].

2 结果与分析

2.1 平潭岛植被景观要素现状

研究区植被景观以次生相思树林和木麻黄林为主,面积分别为 3618.99 和 3302.52 hm²,两者面积之和占研究区植被总面积的 72.1%,斑块数分别为 151 和 364,二者之和占植被斑块总数的 77.2%(表 1).木麻黄林作为平潭岛的主要防护林,主要分布于沿海地带,以长江澳一带最多;次生相思树林多

表 3 模型检验样本的输入数据
Table 3 Input data of experiment samples of the model

样本编号 Sample No.	居民点数 Number of residential quarter	风速 Wind speed (m · s ⁻¹)	距海边距离 Distance from the coast (m)
1	14	6.5	1028.33
7	2	9.0	825.44
21	7	7.0	2562.03
23	4	6.0	1944.87
42	1	8.0	2732.21
47	2	7.0	603.27

表 4 模型的仿真结果和期望输出数值
Table 4 Emulational results and expectional output data of the model

样本编号 Sample No.	蔓延度指数 CONTAG		分维数 FRACT		多样性指数 SHDI	
	仿真结果 Emulational result	期望输出数值 Expectional output data	仿真结果 Emulational result	期望输出数值 Expectional output data	仿真结果 Emulational result	期望输出数值 Expectional output data
1	59.30	59.08	1.51	1.51	0.25	0.24
7	58.48	58.69	1.12	1.12	1.40	1.40
21	75.89	75.45	1.16	1.16	0.55	0.54
23	57.81	58.16	1.32	1.32	0.56	0.58
42	41.08	40.39	1.36	1.36	0.70	0.68
47	99.94	100	1.23	1.23	-0.004	0

分布在丘陵台地、君山基部和中部背风坡,且长势较好,已成为研究区植被的主导优势林地.黑松林面积为 1992.32 hm²,占研究区植被总面积的 21%,主要分布于君山迎风坡,苏澳和大练岛也有部分分布.在木麻黄林保护下,长江澳防护林中部有湿地松林分布,多为纯林,但面积不大.

研究区自然植被主要为防护林前沿地带的月见草灌丛,其次为算盘子灌丛;车桑子灌丛、龙舌兰灌丛和白茅灌丛也是岛上较常见的自然植被,但面积都不大,斑块分布较破碎,斑块数也很少.在君山中部,次生相思树林和黑松林的林下物种较多,在君山顶部的灌草丛带,算盘子和车桑子灌丛分布较多,同时伴生有黄栀子 (*Gardenia jasminoides*)、野牡丹 (*Tibouchina seecandra*)、硕苞蔷薇 (*Rosa bracteata*) 等.

2.2 平潭岛植被景观 BP 神经网络模型模拟

本文选取 3 个输入因子之一作为变量,其他 2 个因素设为定值,运用已训练好的网络对景观指数与 3 个输入因子分别做仿真效果分析图.考虑到 BP 神经网络^[20-22]传递函数的特点和数据序列的收敛速度,需对原始数据序列进行祛除量纲处理,即将神经元的输入输出值转化到 0~1,以此来提高 BP 神经网络数据的收敛速度.本文所选数据均为归一化后的数据,因为 0 与 1 都是传递函数的上下极限值,不宜作为输入输出的实际值使用,所以模型变量取值为 8 个上升的变化值,且均为归一化后的 0.1~0.8,适合作为模型的输入输出值.

由图 1 可以看出,在风速和距海边距离一定时,研究区植被景观多样性随居民点个数的增加而降低,蔓延度指数随居民点个数的增加而增大,分维数总体随居民点个数的增加而增大,但最后有下降趋势.人口的增长和经济的发展势必占用大量土地,人为活动使景观(生境)破碎化程度加剧,土地利用活动产生了孤立的生境斑块,不同程度地中断了种群间的基因流,导致植被景观多样性降低.无计划地利用土地是导致斑块形状趋于复杂的重要原因,随着人口的不断增加,人们意识到无节制地利用土地资源一定会引起资源短缺、环境污染等问题,日益紧迫的资源环境问题唤醒了人们的保护意识,政府、个人开始有目的地开发利用资源,政府规划可以使一些分散的、破碎的植被斑块通过大面积种植而连接在一起,斑块边缘形状比较规则,植被分维数变小.人为干扰下,植被景观中同一类型斑块高度连接,使许多离散的小斑块聚集在一起,蔓延度指数增大.

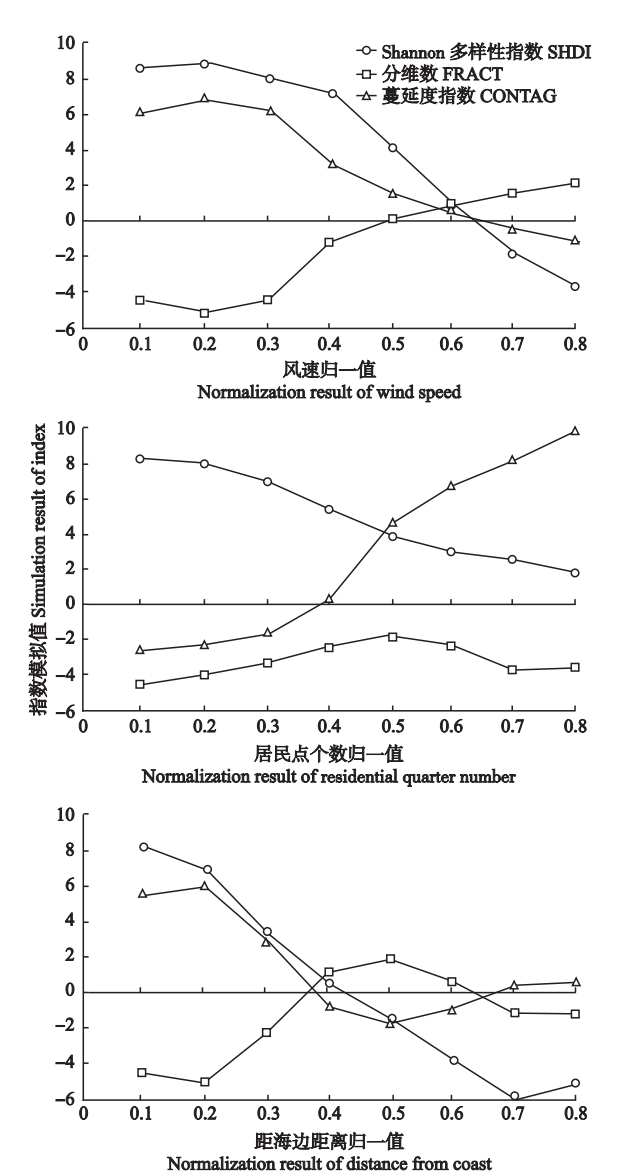


图 1 景观指数随居民点个数、风速和距海边距离变化的模拟
Fig. 1 Simulation of change of landscape index with the number of residential quarter, wind speed, and the distance from the coast.

在居民点个数和距海边距离一定时,随着风速的增加,研究区植被景观多样性指数和蔓延度指数呈下降趋势,分维数呈上升趋势(图 1).通常,风力大的地方主要分布于山地和海边,越靠近山顶,风力越大,植被种类越稀少;离海边越远,风力越小,越有利于多类型植被种植.海边许多植被是用来防风固沙的,防护林品种比较单一,因此,植被景观多样性指数随风速的增大而下降.蔓延度指数随着风速的增大而变小,说明风力大的地方,植被景观斑块的连接性不好,离散的小斑块数量较多.风属于自然影响因素,假设没有其他因素影响的前提下,风速对斑块

几何形状的影响是主要的,风速越大,植被的生境越恶劣,长势优良的植被越少,景观连接度越差,导致植被景观斑块复杂程度越高,分维数越大。

在居民点个数和风速一定的情况下,研究区植被景观多样性指数随距海边距离的增加而下降,且降幅较大。蔓延度指数和分位数的变化呈相反趋势,且变化幅度与景观多样性指数相比较为平缓(图 1)。距海岸越近,海浪、风沙等因素的影响越显著,生态环境的脆弱性越高。脆弱的生态环境直接威胁人们的生态安全,迫于社会经济发展和人们生活的需要,必须对生态环境敏感的近海区域进行保护,人为增加植被种类、优化林分结构来提高生态系统稳定性,导致越接近海边,植被多样性程度越高。距海边距离对植被景观斑块的形状及其间链接程度的影响不大,且波动幅度也较小。

2.3 模型检验

用模型训练的 6 个样方来检验已训练好的人工神经网络,6 个检验样本的平均误差为 7.4%,最小误差为 0.2%,虽然局部偏差较大,但各项指标的变化趋势体现得比较明显,基本上反映了输入因子对景观格局产生的影响。说明 BP 神经网络对于植被景观的模拟度较好,即理论值与模拟值吻合较好,误差小,可用于对研究区植被景观进行定量地预测模拟。

3 结 论

平潭岛的优势植被类型为木麻黄林和次生相思树林,这 2 种防护林在沿海地区的造林更新中为首选树种。影响平潭植被空间格局和植被多样性状况的主要自然因素为风速和距海岸距离等。滨海防护林解决了防风问题,只有控制风的危害,生态环境才有可能获得改善。越接近海岸,风越大、生态环境越脆弱,导致植被景观及其多样性在分布格局上受到的影响越明显。人为因素对研究区植被景观的空间连接程度造成较大影响,主要表现为由于居民点用地增加、防护林植被景观退化更新不良造成的防护林网络结点被破坏、廊道中断、局部地方斑块面积缩小。在植被生态恢复方面,需重点考虑近岸地区植被的更新改造和提高植被多样性,以提高植被景观的整体生态功能。

运用 Matlab 7.0,采用居民点个数、风速和距海边距离 3 个因素建立了研究区植被景观 BP 神经网络模型。从模拟结果来看,模型的误差较小,模拟精度较高,具有很好的实用性,对于植被景观格局分析

是一个有意义的尝试,对今后植被景观格局的定量分析及预测具有一定的指导意义。

本文选取的样本面积为 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$,具有一定的合理性,数据的数量和质量对模型的模拟结果起决定性作用,样本大小的合理性在一定程度上可以提高拟合精度。

本文所建立的 BP 神经网络模型较好地模拟了居民点个数、风速和距海边距离这 3 个影响因子对植被景观格局的影响,符合实际变化规律,适于自然、人为因素与沿海植被景观格局非线性关系的研究,为今后沿海植被景观或海岛植被景观的研究提供了新的研究方法。

参考文献

- [1] Zu Y-G (祖元刚), Zhao Z-H (赵则海), Yu J-H (于景华), *et al.* Nonlinear Ecological Model. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese)
- [2] Lek S, Gusgan JF. Artificial neural networks as a tool in ecological modelling: An introduction. *Ecological Modelling*, 1999, **120**: 65–73
- [3] Keiner L, Yan XH. A neural network for estimating sea surface chlorophyll and from thematic mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **66**: 153–165
- [4] Berberoglu S, Yilmaz KT, Özkan C. Mapping and monitoring of coastal wetlands of Cukurova Delta in the Eastern Mediterranean region. *Biodiversity and Conservation*, 2004, **13**: 615–633
- [5] Chen D-J (陈丁江), Lü J (吕 军), Shen Y-N (沈晔娜), *et al.* ANN approach for modeling and prediction of water quality in non-point sources polluted river. *Journal of Hydraulic Engineering (水利学报)*, 2007, **38**(12): 1519–1525 (in Chinese)
- [6] Ling C-P (凌成鹏), Sun Y-J (孙亚军), Yang L-H (杨兰和), *et al.* Prediction of inrush water of mine with pore water yield based on BP artificial neural network. *Hydrogeology and Engineering Geology (水文地质工程地质)*, 2007, **34**(5): 55–58 (in Chinese)
- [7] Feng S-Y (冯绍元), Huo Z-L (霍再林), Kang S-Z (康绍忠), *et al.* ANN model for simulating dynamic variation of groundwater under the condition of natural-human activity in arid-inland area. *Journal of Hydraulic Engineering (水利学报)*, 2007, **38**(7): 873–878 (in Chinese)
- [8] Li S (李 莎), Yuan X-B (原熙博), Fan H (樊华). Treatment of the suburb desertification with landscape methods. *China Population, Resources and Environment (中国人口·资源与环境)*, 2010, **20**(7): 160–163 (in Chinese)
- [9] Guo M (郭 明), Xiao D-N (肖笃宁), Li X (李新). Changes of landscape pattern between 1986 and 2000 in Jiuquan Oasis, Heihe River Basin. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2006, **26**(2): 457–466 (in Chinese)

[10] Liu N (刘 娜), Li H (李 红), Sun D-F (孙丹峰), *et al.* Extracting oasis landscape multi-seasonal characteristics with linear spectral mixture analysis. *Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(8): 174–182 (in Chinese)

[11] Ma X-K (马学款), Cai X-N (蔡芎宁), Yang G-M (杨贵名), *et al.* Study on fog synoptic characteristics and fog forecast method in Chongqing. *Climatic and Environmental Research* (气候与环境研究), 2007, **12**(6): 795–803 (in Chinese)

[12] Sun H-G (孙会国), Xun J-H (徐建华). Artificial neural network (ANN) model of landscape ecological planning in urban fringes. *Ecological Science* (生态科学), 2002, **21**(2): 97–103 (in Chinese)

[13] Zhang L-Q (张利权), Zhen Y (甄 戔). An artificial neural network model of the landscape pattern in Shanghai metropolitan region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(5): 958–964 (in Chinese)

[14] Guo L (郭 砾), Xia B-C (夏北成), Jiang X-D (江学顶). GIS and ANN-based ecological planning of forest landscape in Guangzhou. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* (中山大学学报), 2005, **44**(5): 121–123 (in Chinese)

[15] Sun H (孙 华), Chen Z-X (陈振雄), Lin H (林辉), *et al.* Forest landscape research based on ANN model. *Forest Resources Management* (林业资源管理), 2007(4): 97–104 (in Chinese)

[16] He S-H (贺尚红), Yang Y-Z (杨昀梓). Modeling of universal characteristics and optimization of operating conditions of concrete pump truck based on neural network. *Journal of Central South University* (中南大学学报), 2010, **41**(4): 1398–1404 (in Chinese)

[17] Sun J-B (孙军波), Qian Y-Z (钱燕珍), Chen P-Y (陈佩燕), *et al.* The artificial neural network method on the station wind in landfall typhoon. *Meteorological Monthly* (气象), 2010, **36**(9): 81–86 (in Chinese)

[18] Du X-M (杜秀敏), Huang Y-X (黄义雄), Jin R (金蓉), *et al.* Artificial neural network model of landscape pattern in Xiamen City. *Resources Science* (资源科学), 2008, **30**(9): 1362–1366 (in Chinese)

[19] O’Neill RV, Hunsaker CT, Timmins SP, *et al.* Scale problems in reporting landscape pattern at the regional scale. *Landscape Ecology*, 1996, **11**: 169–180

[20] Huang W-J (黄万杰). Demand Forecast of Inventory Based on Improved Algorithm of BP Neural Network. Master Thesis. Chongqing: Chongqing University, 2004 (in Chinese)

[21] Li J-P (李际平). Prediction study of forest resources based on the artificial neural network. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 2001, **21**(4): 19–22 (in Chinese)

[22] Bao Y-D (鲍一丹). Optimal mix forecasting method based on BP neural network and its application. *Journal of Agricultural Mechanization Research* (农机化研究), 2004, **5**(3): 162–164 (in Chinese)

作者简介 刘晓芬,女,1984 年生,硕士研究生.主要从事景观生态研究. E-mail: fen198558@126.com

责任编辑 杨 弘
