

上海市景观格局的人工神经网络(ANN)模型

张利权, 甄 彧

(华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘要:定量分析城市景观的空间格局, 深入研究景观格局的形成机制, 将有助于理解城市景观的格局与过程, 分析城市化的社会、经济和生态学后果以及制定更有效的景观管理策略。研究以城市景观生态学途径, 应用基于 GIS 的景观格局分析与人工神经网络(ANN)相结合的方法定量分析上海市城市景观格局(1994 年)及其变化规律, 建立了能够较好地模拟上海市景观格局对居住区用地、道路密度、人口密度、城市发展历史与黄浦江等自然、社会、经济因素响应的人工神经网络。结果表明, 人工神经网络方法适于研究城市化驱动因素与城市景观格局的非线性对应关系, 为景观格局形成机制和景观空间结构与生态学过程相互关系的深入研究提供了一条有效、实用的研究途径。

关键词:上海市; 城市化; 景观格局; 人工神经网络; 驱动机制

文章编号:1000-0933(2005)05-0958-07 **中图分类号:**Q141, Q149 **文献标识码:**A

An artificial neural network model of the landscape pattern in Shanghai metropolitan region

ZHANG Li-Quan, ZHEN Yu (State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 958~964.

Abstract: To characterize the urbanization pattern quantitatively and study the mechanisms on the formation of landscape pattern could facilitate the understanding on urban landscape patterns and processes, the ecological and socioeconomic consequences of urbanization, as well as the establishment of more effective strategies for landscape management. In this study, we integrated a GIS-based analysis of landscape pattern with an Artificial Neural Network (ANN) to quantitatively characterize the urbanization pattern of the metropolitan area of Shanghai, and to establish an ANN model which could preferably simulate the responses of urban landscape pattern to the natural and socioeconomic factors such as residence area, road density, population density, urban development history and Huangpu River. Our results showed that the ANN model seems appropriate for studying the nonlinear relationship among the forcing factors of urbanization and the urban landscape patterns, which provides an effective and practical approach for further understanding the mechanisms on the formation of landscape pattern and the reciprocal relationship between landscape spatial pattern and ecological process.

Key words: Shanghai; urbanization; landscape pattern; ANN; forcing mechanism

进入 20 世纪 90 年代以来, 上海城市现代化进程不断加快, 成为我国经济体系中最具实力、活力和开放性的增长核, 其发展前景十分广阔。但与此同时, 上海在城市化的进程中已出现了短期的高密度投入、人口剧增、产业聚集、郊区迅速城市化、建筑密度和容积率增高的高强度开发特征, 给城市的可持续发展带来极大的挑战^[1]。城市是以人类为主体的自然-社会-经济复合生态系统。毫无疑问, 城市生态学研究对于认识并解决由于全球城市化加速和城市发展过程中出现的一系列问题, 如人口膨胀、资源紧缺、城市布局调整、环境污染等, 具有重要意义^[2~4]。

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB412406);上海市重点学科建设资助项目;国家“十五”与“211 工程”重点学科建设资助项目

收稿日期:2004-10-21; **修订日期:**2005-03-10

作者简介:张利权(1952~), 男, 上海市人, 博士, 教授, 主要从事景观生态学和植物生态研究. E-mail: lqzhang@sklec.ecnu.edu.cn

Foundation item: National Key Fundamental Research and Development Program (No. 2002CB412406), the Shanghai Priority Academic Discipline and the State's tenth five-year “211 Project”-supported key academic discipline program of ECNU

Received date:2004-10-21; **Accepted date:**2005-03-10

Biography: ZHANG Li-Quan, Ph. D., Professor, mainly engaged in landscape ecology and plant ecology. E-mail: lqzhang@sklec.ecnu.edu.cn

景观空间结构与生态学过程的相互关系是景观生态学研究的核心问题^[5]。城市景观生态学研究应包括城市形态与动态的描述,识别并测定城市形态与动态的主要驱动力。定量分析城市景观的空间格局,深入研究景观格局的形成机制,将有助于理解城市景观的格局与过程,分析城市化的社会、经济和生态学后果以及制定更有效的景观管理策略^[1,6,7]。

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN),是一具有高度非线性的超大规模连续时间动力系统,是由大量的处理单元(神经元)广泛互连而形成的网络。它是在现代神经科学研究成果的基础上提出的,反映了人脑功能的基本特征,但它并不是人脑的真实描写,而只是它的某种抽象、简化与模拟^[8]。人工神经网络的特点和优越性,主要表现在 3 个方面:自学习功能、联想存贮功能、高速寻找优化解的能力。在现代地理学中,人工神经网络方法特别适用于地理模式识别、地理过程模拟与预测、复杂地理系统的优化计算等问题的研究,因此,ANN 是现代地理计算学常用的重要方法之一。ANN 的这些特点,使得 ANN 在环境保护、生态建设、城市规划等领域的模拟、评价和预测中的应用日益广泛^[9,10]。然而,人工神经网络模型目前在城市景观格局、动态和驱动机制研究中的应用还很少^[11]。

本项研究以城市景观生态学途径,试图应用人工神经网络(ANN)模型,结合基于 GIS 的上海市景观格局分析^[1],初步探索研究有关景观格局形成机制的方法。研究结果对进一步研究城市格局与过程的相互关系以及监测与评价城市化过程具有重要意义。

1 研究区域和方法

1.1 研究区域

上海为我国直辖市之一,位于 30°23'~31°37'N,120°50'~121°45'E,面积 6 340 km²。按照 1994 年行政区划,上海市设黄浦、南市、卢湾、徐汇、长宁、静安、普陀、闸北、虹口、杨浦、闵行、宝山、嘉定和浦东新区 14 个市辖区,以及南汇、奉贤、松江、金山、青浦、崇明 6 个市辖郊县。1994 年年末全市总人口 1 298.81 万,人口密度为 2 048 人/km²,其中市区人口 953.04 万,人口密度为 4633 人/km²^[12]。

本项研究所采用的数据是华东师范大学地理信息教育部开放实验室制作的上海市地区 1994 年土地利用图,其主要信息源为 1994 年 154 张 1:6 000 的 IR/Color 航空遥感影像(资料来源:上海市航空遥感办公室),航空遥感影像的解译采用建设部 1991 年颁布的国家标准 GB137-90《城市用地与规划建设用地标准》中的“城市用地分类”体系,经地理底图制作、野外验证和要素转绘等步骤绘制而成上海市城市土地利用图(1994 年)。在上述步骤的基础上,通过数字化仪在 PC ARC/INFO 支持下进行数字化,得到数字化电子地图和相应的土地利用数据库并编纂在 PC ArcView GIS 上^[1](图 1)。

1.2 景观格局分析

为便于分析上海城市景观格局和建立人工神经网络模型,以市中心人民广场为中点,向东西和南北各延伸 15 km,构成一个 30 km×30 km 的正方形的研究区域。将研究区域进一步划分成 100 个大小为 3 km×3 km 的小样方,从东到西和从北向南依次命名为 C1-C100(见图 1)。为便于进行景观格局分析,先将原数据中 16 种土地利用类型重新归并成 8 类:居住区、工业区、城市其它建设用地、农业用地、待建用地、道路用地、水体和绿地。随后用 ESRI 的 ArcView Spatial Analyst 将矢量数据转换成栅格数据(栅格大小 10 m×10 m)。本项研究中每一小样方景观水平上的景观指数应用 FRAGSTATS 3.3 计算^[1,13]。

1.3 BP 模型介绍

目前 ANN 的实际应用中,绝大部分的模型都是采用 Rumelhart 等人于 1986 年提出的 BP(Back-propagation)模型或者它的变化形式。BP 网络是一种单向传播的多层前向网络,其结构如图 2 所示。网络除了输入和输出节点外还有一层或多层的隐层节点,同层节点中没有任何耦合。输入信号从输入层节点一次传过各隐层节点,然后传递到输出节点,每一层节点的输出只影响下一层节点的输出^[8]。BP 网络可以被看成是一个从输入到输出的高度非线性映射,即 $F:R^n \rightarrow R^m, f(X)=Y$ 。对于样本集合

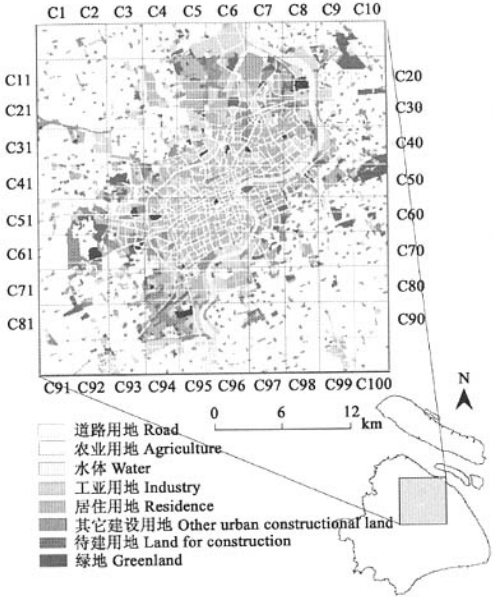


图 1 上海市 1994 年基于 GIS 的土地利用图, 30 km×30 km 的研究区域以及 100 个(C1-C100)大小为 3 km×3 km 的小样方

Fig.1 1994 GIS-based land use map of the Shanghai metropolitan area, the research area of 30 km×30 km and 100 sampling plots (C1-C100) of 3 km×3 km

$x_i \in R^n$ 和 $y_i \in R^m$, 可认为存在某一映射 g 使: $g(x_i) = y_i$ $i = 1, 2, \dots, n$. 现在要求一组映射 f , 使得在某种意义下, f 是 g 的最佳逼近. 给定任意 $\epsilon > 0$ 和任意 L_2 函数 $f: [0, 1]^n \rightarrow R^m$, 存在一个 3 层 BP 网络, 它可以在任意 ϵ 平方误差精度内逼近 $f^{[14]}$.

BP 网络的训练过程包括: ①用小的随机数对每一层的权值和偏差初始化, 以保证网络不被大的加权输入饱和; 同时还要初始化期望误差最小值、最大循环次数、修正权值的学习速率、从 1 开始的循环速率等参数; ②计算网络各层输出矢量及网络误差; ③计算各层反向传播误差, 并计算各层权值的修正值及新的权值; ④再次计算权值修正后的误差平方和; ⑤检查误差平方和是否小于期望误差最小值. 若是, 则训练结束, 否则继续.

1.4 模型的建立

有关景观格局形成机制的研究需要综合考虑地理、生态、社会、经济和政治等因素, 因此, 选取每一小样方的道路面积比例、居住区面积比例、距市中心距离、距黄浦江距离和人口密度 5 个驱动力因子作为模型的输入变量. 人口密度采用 1998 年上海市街道(乡、镇)人口调查数据(由于缺少 1994 年按街道的人口调查数据, 按照上海市统计局, 1994 年至 1998 年的人口数量变动不超过 0.6%)^[12], 其他数据通过在 ArcView 3.2a 中直接测量而得. 选取每一小样方景观水平上的斑块密度(patch density, PD)、周长面积比(perimeter-area ratio, PARA)、多样性指数(Shannon's Diversity Index, SHDI)和聚集度指数(aggregation Index, AI)4 个景观指数作为模型的输出变量(表 1).

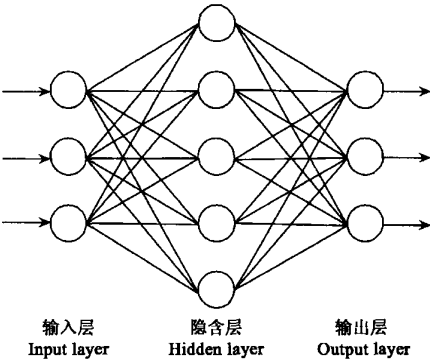


图 2 具 3 层结构的 BP 网络

Fig. 2 The back-propagation network with three layers

表 1 上海市景观格局神经网络模型的输入变量和输出变量

Table 1 The inputs and outputs for an ANN model of the Shanghai landscape pattern

	代号 Symbol	指标 Index	意义 Meaning
输入变量 Input variables	I1	道路面积比例 Percentage of roads (%)	交通与经济因素 Transportation and economical activities
	I2	居住用地所占比例 Percentage of residence area (%)	社会经济因素 Socio-economic factors
	I3	距市中心距离 Distance from the city center (km)	城市发展沿革 Urban development history
	I4	距黄浦江距离 Distance from Huangpu River (km)	自然与交通因素 Transportation and natural factor
	I5	人口密度 (人/km ²) Population density (persons/km ²)	社会因素 Social factor
输出变量 Output variables	O1	斑块密度 Patch density (m/hm ²)	景观的破碎程度 Fragmentation of the landscape
	O2	周长面积比 perimeter-area ratio	景观的复杂程度 Complexity of the landscape
	O3	多样性指数 Shannon's Diversity Index	景观的多样性 Landscape diversity
	O4	聚集度指数 Aggregation Index (%)	景观破碎度和镶嵌的复杂程度 Fragmentation of the landscape and complexity degree of the mosaic

考虑到原始数据的量纲不同和指标值数量级存在明显差异, 因此需要对用于训练的原始数据进行标准化变换^[15]. 标准化采用如下形式:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \overline{x_j}}{S_j} = \frac{x_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(x_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \right)^2}}$$

式中, x_{ij} , 原始数据; x'_{ij} , 经过变换的标准化数据; i, j, m 分别为样方号, 变量号和样方总数.

利用 MATLAB 6.5 的人工神经网络工具箱 NNTOOL 建立一个 3 层的 BP 网络^[16], 其中输入层包含 5 个节点(输入变量), 隐含层 10 个节点, 输出层 4 个节点(输出变量). 输入层到隐含层为线性变换, 权重向量为 iw(1,1), 阈值 b1; 隐含层到输出层为 S 型曲线变换, 权重向量 lw(2,1), 阈值 b2(见图 3). 当确定了训练步长/次数和训练目标后, 训练程序按照设定的参数不断的调整权值和阈值, 来不断减少训练误差和检验误差, 当训练结果满足要求时, 训练结束. 此时调整取得的权值和阈值就是最后的结果.

从 100 个小样方中随机抽取 20 个小样方作为验证数据, 剩余的 80 个小样方代入模型进行训练. 选取的 TRAINLM 算法采用 Leverberg-Marquardt 学习规则, 可以迅速收敛以缩小训练误差, 本模型选用平均方差 (Mean Squared Error, MSE) 来计算模型的误差. 设定最大训练次数为 1 000 步, 每隔 25 步显示一次; 误差初始值 0.001, 最大误差 10^{-10} , 误差的上升速率 10, 下降速率 0.1; 最大重复次数 5, 最小梯度为 10^{-10} .

2 结果与分析

2.1 上海市城市景观的基本特征

上海地区景观层次上(综合了所有 8 种土地利用类型)的斑块密度格局显示了从市郊-中心城区-市郊的脉动现象,是由于每隔 10 个样方的空间间断所产生。从市郊到中心城区,斑块密度呈指数式增加,如市中心(C46 处)达到最高值,此后随离中心城区距离的增加而迅速下降(图 4a 中的实测值)。反映斑块复杂程度的周长与面积比率也显示了随城市化程度增加而迅速上升(图 4b 中的实测值),该格局表明作为斑块镶嵌体的景观形状随城市化程度增加而变得更不规则。多样性指数(反映土地利用类型数)也呈现相似的增加形式(图 4c 中的实测值),表明随着农业用地的比例减少、城市用地的比例增加以及土地利用类型数的增加,景观变得更破碎化。而测定斑块聚集程度的聚集度指数则随城市化程度增加而下降(图 4d 中的实测值)^[1]。总体来说,景观层次上的这些指数显示上海地区景观形状复杂性(周长面积比)和景观破碎化程度(与聚集度指数成反比)沿城市化梯度而明显增加,表明随着城市化程度提高,景观破碎化程度也急剧增加,城市化的总体格局是随着城市化程度增加,景观在组分上更多样化,形状上更为复杂以及生态学上更破碎化。

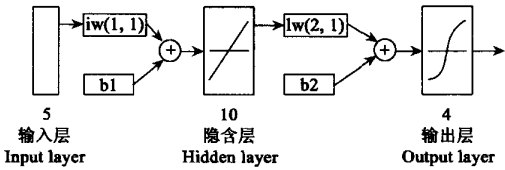


图 3 上海市景观格局的 BP 网络模型
Fig. 3 The BP network for the Shanghai landscape pattern

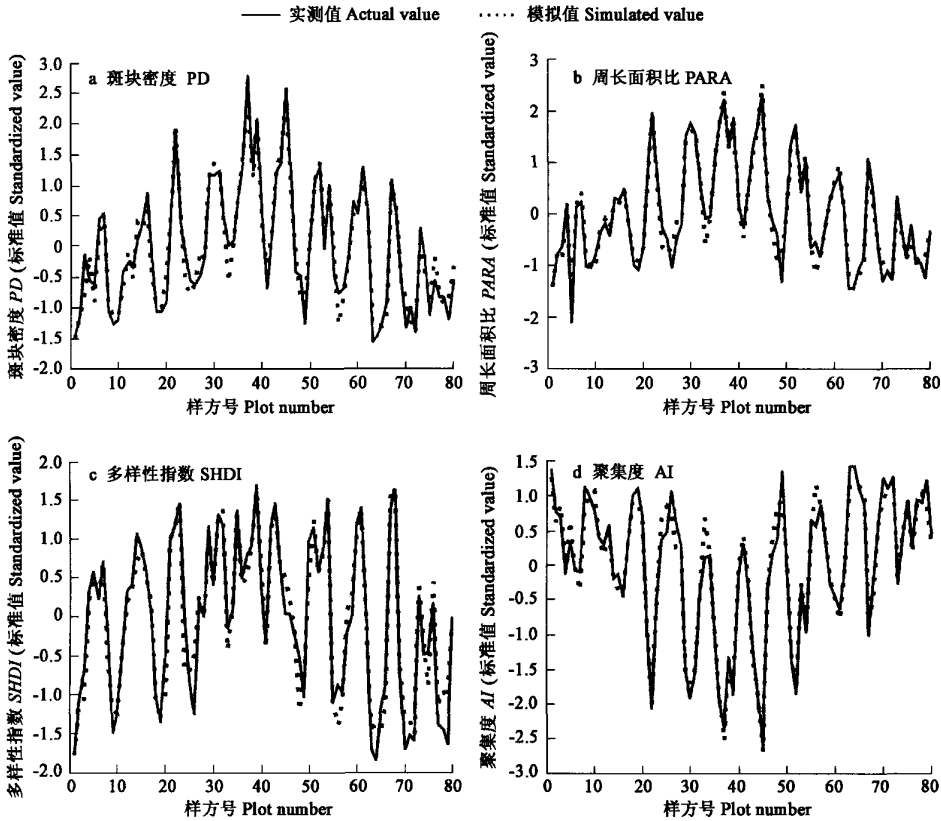


图 4 ANN 模型训练结果
Fig. 4 The results of ANN training

图中样方号 1~80 分别代表了图 1 中的样方 C1-C2、C4、C6-C17、C19-C23、C26-C33、C35-C36、C38-C40、C42-C43、C45-C49、C51-C54、C56、C58-C62、C64-C67、C69-C75、C77、C79-C82、C83-C86、C88-C90 和 C92-C99
The plot numbers here represent the sampling plot numbers in Fig. 1 C1-C2、C4、C6-C17、C19-C23、C26-C33、C35-C36、C38-C40、C42-C43、C45-C49、C51-C54、C56、C58-C62、C64-C67、C69-C75、C77、C79-C82、C83-C86、C88-C90、C92-C99, respectively

2.2 模型的训练

人工神经网络的训练误差和检验误差在前 200 步内剧烈震荡后逐渐都稳定下来,经过 1000 步后训练结束,训练数据的平均方差为 0.053,验证数据的平均方差为 0.25(图 5),3 层神经网络各节点之间的连接权值和阈值见表 2 和表 3。

人工神经网络模型对斑块密度、周长面积比、多样性指数和聚合度指数这 4 项景观指数的模拟值与实测值(目标值)之间的拟合程度可分别见图 4。结果表明,人工神经网络较好地模拟了景观指数随驱动力因子改变而变化的趋势,80 个样方的模拟值和目标值拟合程度较高,而且也较好地模拟了各景观指标沿郊区到中心城区的梯度变化。

2.3 模型的检验

训练完毕的人工神经网络模型,还需要数据检验来证明其模型的可靠程度。用代入模型训练的 20 个小样方来检验已训练好的人工神经网络,虽然局部偏差较大,但各项指标趋势变化体现得比较明显,基本上反映出了城市化过程中的居住区用地、道路密度、人口密度与河流等地理、社会、经济因素相互作用而对景观格局产生的驱动影响,总体结果是令人满意的。四个指数的准确程度平均在 80 % 左右,具有较高的可信度,其实测值(目标值)和预测值的拟合曲线见图 6。

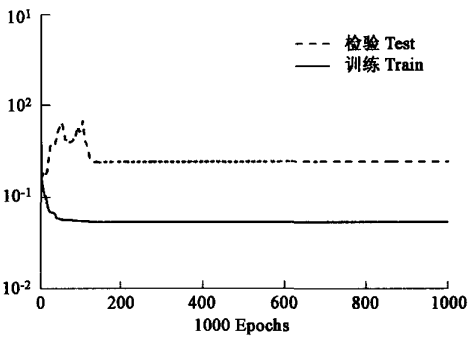


图 5 ANN 模型训练过程中误差的变化

Fig. 5 The performance change during the ANN training

表 2 输入层和隐含层之间的连接权值 iw(1,1)和阈值 b1

Table 2 The weights iw(1,1) and thresholds b1 between input layer and hidden layer

隐含层 hidden layer	输入层 input layer					阈值 b1 Threshold b1
	I1	I2	I3	I4	I5	
节点 1 Node 1	-0.36956	1.6982	-0.17373	-2.3749	-6.2017	3.6417
节点 2 Node 2	2.2418	0.013196	1.5017	-1.045	-2.2455	-2.508
节点 3 Node 3	23.193	3.2898	21.152	-14.942	26.016	0.22672
节点 4 Node 4	4.458	19.499	24.906	-63.978	-110.4	-27.714
节点 5 Node 5	25.048	-8.8204	-41.631	45.611	14.268	-32.888
节点 6 Node 6	1.0326	4.1185	5.6818	-1.4958	27.703	-23.964
节点 7 Node 7	4.7917	-1.0782	0.89889	4.14	12.259	6.0831
节点 8 Node 8	-1.3393	-0.86175	-0.10452	0.004156	-0.48226	-3.9442
节点 9 Node 9	-0.45725	-0.09442	-0.21507	0.7581	-0.02035	1.5848
节点 10 Node 10	0.43486	2.8424	4.7612	-15.909	-0.87166	-18.299

3 讨论

3.1 定量城市化空间格局的重要性

城市化过程的预测以及它们的生态学与社会经济的影响是城市规划、资源管理和生物多样性保护等方面必须考虑的问题^[3,6,7]。有关景观格局形成机制的深入研究需要综合考虑地理、生态、社会、经济和政治等因素,而定量分析城市景观的空间格局对于理解城市景观的格局与过程,分析城市化的生态学和社会经济的后果,是必不可少的第一步^[1]。城市系统中物理的、生态的和社会经济的过程会创造、维持或破坏空间格局,同时空间格局也会有利于、中和或阻碍这些过程。研究结果表明,利用基于 GIS 的景观指数方法可以定量测定城市景观的空间格局以及格局变化规律。上海市城市化的总体空间格局是随着城市化程度增加,景观在组分上更多样化,形状上更为复杂以及生态学上更破碎化。

3.2 景观格局形成机制的研究

便捷的交通是城市发展的必备条件,上海城市的兴起,首先得益于其水上交通。上海位于我国海岸线中段和长江的入海口,又通过黄浦江和吴淞江连接着水网稠密的太湖流域,发达的水上交通是上海城市初期发展的基础。随着陆上交通的发展以其快速灵活的方式促进着城乡和城市之间的交流,城市的边界得以沿着交通用地向外延伸。上海市城市景观空间格局的研究结果表明,上海市城市化的总体空间格局取决于离城市中心和黄浦江的距离,城市化区域高度的景观破碎化和空间复杂性可以作为距离的函数来定量。同时,20 世纪 90 年代以前,上海市的发展都是以浦西为主,浦东部分仅限于黄浦江沿岸,浦江两岸城市化过程呈明显的不对称状,这主要是黄浦江起了阻隔作用。20 世纪 90 年代以来,三桥(杨浦大桥、南浦大桥和卢浦大桥)和二遂

表 3 隐含层和输出层之间的连接权值 iw(2,1)和阈值 b2

Table 3 The weights iw(2,1) and thresholds b2 between hidden layer and output layer

隐含层 Hidden layer	输出层 Output layer			
	O1	O2	O3	O4
节点 1 Node 1	0.74285	0.75385	1.1497	-0.48654
节点 2 Node 2	-0.56133	-0.56869	-0.9897	0.40137
节点 3 Node 3	0.40654	0.42714	0.61245	-0.35713
节点 4 Node 4	-0.65193	-0.39793	-0.13885	0.43821
节点 5 Node 5	0.33212	0.45753	0.50973	-0.41928
节点 6 Node 6	-0.6575	-0.39822	-0.05096	0.49927
节点 7 Node 7	-0.74921	-0.44917	-0.3767	0.45835
节点 8 Node 8	-50.589	-45.822	-71.325	44.213
节点 9 Node 9	-2.7447	-2.173	-0.25745	2.2318
节点 10 Node 10	-1.0376	-1.3183	-0.05794	0.76643
阈值 b2 Threshold b2	-50.087	-45.822	-71.647	43.458

相符。

建立人工神经网络,目的就在于模拟城市景观格局与驱动因素的对应关系,并在此基础上预测人为活动对景观可能造成的影响,进而制定更有效的景观管理策略。同时,上海城市发展在不同时期的驱动因素不同,应该对不同时期的城区分划寻找其驱动因素,并建立量化的函数关系。本文主要是研究方法的初步探索,应用了已有的较完整的早期(1994年)资料,下一步的研究将建立基于不同时相景观格局的人工神经网络,用于预测不同时期城市化驱动因素对上海市景观格局的影响,在此基础上提出景观优化对策。

References:

- [1] Zhang L Q, Wu J P, Zhen Y, *et al.* A GIS-based gradient analysis of urban landscape pattern of Shanghai metropolitan area, China. *Landsc. Urban Planning*, 2004, **69**(1): 1~16.
- [2] Zhu W X, Wu J G, Zhang L Q. Urban ecology: an ecological field facing new challenges. In: Wu J G, Han X G, Huang J H eds. *Lectures in modern ecology I. from basic science to environmental issues*. Beijing: Chinese Scientific and Technological Press, 2002. 220~229.
- [3] Zipperer W C, Wu J, Pouyat R V, *et al.* The application of ecological principles to urban and urbanizing landscapes. *Ecol. Appl.*, 2000, **10**(3): 685~688.
- [4] BERLING-WOLFF S and Wu J. Modeling urban landscape dynamics: A review. *Ecol. Res.*, 2004, **19**(1): 119~129.
- [5] Wu J G. *Landscape ecology: pattern, process, scale and hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [6] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M, *et al.* Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 2001, **32**: 127~157.
- [7] Whitford V, Ennos V A R, Handley J F. "City form and natural process"-indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. *Landsc. Urban Planning*, 2001, **57**(2): 91~103.
- [8] Xu J H. *Mathematical methods in modern geography*. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [9] Jin Y and Li S T. BP networks of ANN and their applications. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1998, **18**(6): 789~791.
- [10] Lek S and Guégan J F. Artificial neural networks as a tool in ecological modeling. an introduction, *Ecol. Modell.*, 1999, **120**(2-3): 65~73.
- [11] Zhang Q J, Fu B J, Chen L D. Several problems about landscape pattern change research. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, **23**(3): 264~270.
- [12] Shanghai Statistics Bureau. *Shanghai Statistical Yearbook 1999*. Beijing: China Statistics Press, 1999. 5.
- [13] McGarigal K and Marks B J. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. General Technical Report PNW-GTR-351. Pacific Northwest Research Station, USDA-Forest Service, Portland, 1995.
- [14] Kitahara M, Achenbach J D, Guo Q C. Neural network for crack-depth determination from ultrasonic back-scattering data. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1992, 701~708.
- [15] An X Z, Lin X M. *Methods in applied multivariate statistics*. Jilin: Jilin Scientific and Technological Press, 1992. 25~29. 3
- [16] Wen X, Zhou L, Wang D L, *et al.* *MATLAB-Applied design for neural networks*. Beijing: Scientific Press, 2001.
- [17] Zhu S T. *The historical geography of Shanghai*. Shanghai: East China Normal University Press, 1996. 17.
- [18] Luo S W. *Building artificial neural networks*. Beijing: China Railway Publishing House, 1998.

参考文献:

- [2] 朱伟兴, 邬建国, 张利权. 城市生态学: 一个面临新挑战的生态学领域. 见: 邬建国, 韩兴国, 黄建辉主编. 现代生态学讲座(二): 基础研究与环境问题. 北京: 中国科学技术出版社, 2002. 220~229.
- [5] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [8] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [9] 金钰, 李书涛. 人工神经网络 BP 网的应用. 北京理工大学学报, 1998, **18**(6): 789~791.
- [11] 张秋菊, 傅伯杰, 陈利顶. 关于景观格局演变研究的几个问题. 地理科学, 2003, **23**(3): 264~270.
- [12] 上海市统计局. 上海统计年鉴 1999. 北京: 中国统计出版社, 1999. 5.
- [15] 安希忠, 林秀梅. 实用多元统计方法. 吉林: 吉林科学技术出版社, 1992. 25~29.
- [16] 闻新, 周露, 王丹力, 等. MATLAB-神经网络应用设计. 北京: 科学出版社, 2001.
- [17] 褚绍唐. 上海历史地理. 上海: 华东师范大学出版社, 1996. 17.
- [18] 罗四维. 人工神经网络建造. 北京: 中国铁道出版社, 1998.