

自组织特征人工神经网络在庞泉沟 自然保护区植物群落分类中的应用

张金屯 杨洪晓

(北京师范大学生命科学学院 北京 100875)

摘要 :人工神经网络是较新的数学分析工具 ,其中的自组织特征映射网络 (SOFM)具有较强的聚类功能。应用 SOFM 网络对庞泉沟自然保护区植物群落进行了分类研究。在讨论了 SOFM 网络的数学原理、聚类方法和步骤的前提下 ,分类过程在 MATLAB (6.5)神经网络工具箱 (NNTool)中编程实现。结果将 89 个样方分为 13 个植物群落类型。分类结果符合植被实际 ,生态意义明确 ,表明 SOFM 网络可以很好地反映植物群落的生态关系 ,是非常有效的植物群落数量分类方法。

关键词 :神经网络 ;自组织 ;植被 ;数量分类

文章编号 :1000-0933 (2007)03-1005-06 中图分类号 :Q948 文献标识码 :A

Application of self-organizing neural networks to classification of plant communities in Pangquangou Nature Reserve , North China

ZHANG Jin-Tun ,YANG Hong-Xiao

College of Life Sciences ,Beijing Normal University ,Beijing 100875 ,China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (3) 1005 ~ 1010.

Abstract :Vegetation classification is an important topic in plant ecology , and many quantitative techniques for classification have been developed in this field. The artificial neural network is a comparative new tool of data analysis ,and self-organizing feature map (SOFM) is powerful in clustering analysis. SOFM has been applied to many research fields , and it was applied to the classification of plant communities in the Pangquangou Nature Reserve in the present work. Pangquangou Nature Reserve ,located at 37°20'—38°20' N ,110°18'—111°18' E , is a part of Luliang mountain range. Eighty-nine samples (quadrats) of 10 m × 10 m for forest ,4 m × 4 m for shrubland and 1 m × 1 m for grassland along an elevation gradient were set up and species data was recorded in each sample. After discussion of the mathematical algorithm , clustering technique and procedure of SOFM , the classification was carried out by use of the NNTool box in MATLAB (6.5). As the result , the 89 samples were clustered into 13 groups , representing 13 types of plant communities. The characteristics of each community were described in the text. The result of SOFM classification was identical to the result of fuzzy c-mean clustering and consistent to the reality of vegetation in the study area , and show significant ecological meanings. This suggests that SOFM may clearly describe the ecological relationships between plant communities ,and it is a very effective quantitative technique in plant ecology.

Key Words :Neural network ; self-organizing feature map ; vegetation ; quantitative classification

基金项目 :国家自然科学基金资助项目 (No. 30070140)

收稿日期 :2006-03-06 ;修订日期 :2006-08-20

作者简介 :张金屯 (1957 ~) ,男 ,山西夏县人 ,博士 ,教授 ,主要从事植被生态、数量生态和生物多样性研究。E-mail :Zhangjt@bnu.edu.cn

Foundation item :The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30070140)

Received date 2006-03-06 ; **Accepted date** 2006-08-20

Biography ZHANG Jin-Tun , Ph. D. , Professor , mainly engaged in quantitative ecology and biodiversity. E-mail :Zhangjt@bnu.edu.cn

植物群落分类 (classification) 是植被生态学的基本研究内容 , 一直受到生态学家的关注 [1~3] , 不同时期所拟定的植被分类系统反映了该时期人们对植被的认识水平和生态学的发展阶段。在过去几十年的研究中 , 人们认识到数量分类是研究植物群落类型关系的必要手段 [4]。在植物生态学中已有不少有效的数量分类方法 [5]。神经网络理论 (neural network theory) 是相对比较新的数学分支学科 , 它是基于人体神经网络原理而发展起来的 [6,7]。与其他数量分类方法相比 , 神经网络已显示出在处理复杂系统问题上的优势 [7,8]。理论上讲 , 其能够较好地描述自然现象和规律 , 已在人工智能、计算机、工业、地学、医学等方面进行了应用 , 并表现出强大的生命力 [9]。生态系统是非常复杂的自然系统 , 应用神经网络加以描述 , 可能会有较好的效果。本文试用自组织神经网络 (self-organizing feature map , SOFM) 对庞泉沟自然保护区的植物群落进行分类 , 为研究群落间的生态关系提供一种新的思路和方法。庞泉沟自然保护区主要是为保护国家一级保护动物褐马鸡和寒温性针叶林而设立的 , 属于国家级保护区 , 植物群落类型多样性及其变化是濒危动植物保护的基础。近年来 , 随着生态旅游的发展 , 庞泉沟自然保护区成为重要的生态旅游地 [10]。因此 , 对其植物群落类型的研究具有重要的实际意义 [11]。

1 SOFM 网络的原理与方法

1.1 SOFM 基本原理

自组织特征映射网络 (Self-organizing feature map , SOFM) 是 Kohonen 1981 年提出的一种自组织竞争神经网络 [9]。在大脑皮层中 , 神经元的输入信号一部分来自感觉组织或其它区域的外部输入信号 , 另一部分来自同一区域的反馈信号。神经元之间的信息交互具有共同的特征 , 就是最邻近的 2 个神经元相互刺激而兴奋 , 较远的相互抑制。每个神经元都在加强自身及邻近神经元的同时抑制着周围的神经元。在一个神经细胞兴奋后 , 通过它的分支对周围的神经细胞产生抑制 , 这种抑制使神经细胞之间出现竞争 , 竞争的结果是兴奋作用最强的神经细胞所产生的抑制作用战胜了其他细胞的抑制作用而获胜 [9]。SOFM 就是基于该生物结构原理而建立 , 它能够对输入模式进行自组织训练和判断 , 实现功能相同的神经元在空间上的聚集而自动对输入模式进行分类 [12]。

SOFM 网络是由单层神经网络组成 , 其输入节点 (神经元) 与输出节点之间为双向权连接。因为网络学习中竞争特性表现在输出层 , 所以输出层也叫竞争层。如图 1 所示 , 网络上层为输出层 (竞争层) , 有输出节点 M 个 , 按二维形式排成一个节点距阵 ($M = m^2$) ; 下面的输入层有 N 个节点 , 代表 N 个输入矢量。所有输入节点到所有输出节点之间都有权值连接 , 竞争层节点之间也有权值连接 , 代表着相互作用。

SOFM 是以无教师示教的方式进行网络训练 , 网络结构和连接权值根据聚类规则自动对周围的模式样本进行学习 and 调整 , 直到网络结构能够合理反映训练样本的分布规律。具体的讲 , 对每个网络输入 , 只调整部分权值 , 使权向量更接近或更偏离输入矢量。这一重复调整过程就是竞争学习过程 , 在该过程中 SOFM 进行自动识别 , 并完成聚类功能 [9,12]。

1.2 SOFM 聚类计算方法和步骤

设 SOFM 网络的输入模式为 :

$$P_k = (P_1^k, P_2^k, \dots, P_N^k), \quad (k = 1, 2, \dots, q)$$

竞争层神经元的矢量为 :

$$A_j (a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jm}) \quad (j = 1, 2, \dots, M)$$

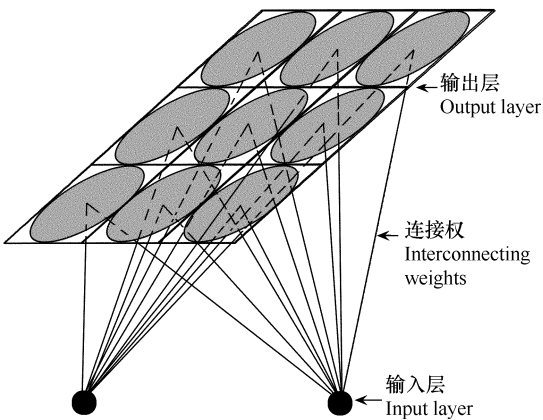


图 1 自组织特征神经网络结构示意图
Fig. 1 Structure of self-organizing feature map (SOFM)

竞争层神经元与输入层神经元之间的连接权为：

$$W_{ij} = (w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{ji}, \dots, w_{jN}) \quad i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M$$

SOFM 聚类分析的步骤如下：

(1)初始化 将网络的连接权 $\{w_{ij}\}$ 赋予 $[0, 1]$ 区间的随机值 ($i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M$)。确定学习率 $\eta(t)$ 的初始值 $\eta(0)$ ($0 < \eta < 1$)；确定邻域 $N_g(t)$ 的初始值 $N_g(0)$ 。邻域 $N_g(t)$ 是指以下面第 (4) 步确定的获胜神经元 g 为中心, 且包括若干神经元的区域范围, $N_g(t)$ 的值表示第 t 次学习过程中邻域所包含的神经元个数, 确定总的学习次数为 T 。

(2)任选一学习模式, 将输入矢量的原始值 P_k 提供给网络输入层, 并进行归一化处理：

$$\overline{P_k} = \frac{P_k}{\|P_k\|} = \frac{(P_1^k, P_2^k, \dots, P_N^k)}{[(P_1^k)^2 + (P_2^k)^2 + \dots + (P_N^k)^2]^{1/2}}$$

(3)对连接权矢量 W_{ij} 进行归一化处理：

$$\overline{w_j} = \frac{w_j}{\|w_j\|} = \frac{(w^{j1}, w^{j2}, \dots, w^{jN})}{[(w^{j1})^2 + (w^{j2})^2 + \dots + (w^{jN})^2]^{1/2}}$$

(4)计算 $\overline{w_j}$ 和 $\overline{P_k}$ 间的欧氏距离：

$$d_j = [\sum_{i=1}^N (\overline{P_i^k} - \overline{w_j})^2]^{1/2} \quad j = 1, 2, \dots, M$$

(5)找出最小的距离 d_g , 确定获胜神经元 g 。

$$d_g = \min [d_j], \quad j = 1, 2, \dots, M$$

(6)调整连接权值, 对竞争层神经元与输入层神经元之间的连接权值进行修正：

$$\overline{w_j}(T+1) = \overline{w_j}(t) + \eta(t) \cdot [\overline{P_i^k} - \overline{w_j}(t)], \quad [j = 1, 2, \dots, M; 0 < \eta(0) < 1]$$

(7)选取另一学习模式提供给网络的输入层, 返回到步骤 (3), 重复以上过程, 直到 q 个学习模式全部提供给网络。

(8)得出新的学习率 $\eta(t)$ 和邻域 $N_g(t)$ ：

$$\eta(t) = \eta(0)(1 - t/T)$$

$\eta(0)$ 为初始学习率, t 为学习次数, T 为总学习次数。

设竞争层某神经元 g 在二维阵列中的坐标值为 (x_g, y_g) , 则邻域的范围是以点 $(x_g + N_g(t), y_g + N_g(t))$ 和点 $(x_g - N_g(t), y_g - N_g(t))$ 为右上角和左下角的正方形。其修正公式为：

$$N_g(t) = \text{INT} [N_g(0)(1 - t/T)], \text{INT} [x] \text{ 代表取整符号, } N_g(0) \text{ 为 } N_g(t) \text{ 的初始值。}$$

(9)令 $t = t + 1$, 返回到步骤 (2), 直到 $t = T$ 为止。

通过训练使得输出层中获胜神经元 g 及其邻域内的权值向量逼近输入矢量, 而实现模式分类。在 MATLAB 的神经网络工具箱 (neural network toolbox) 中, 给定学习速率、邻域半径、学习次数、网络维数等, 网络可自动输出分类结果^[13, 14]。

2 庞泉沟自然保护区植物群落数据

庞泉沟自然保护区位于山西吕梁山脉中段, 约当北纬 $37^{\circ}20' \sim 38^{\circ}20'$, 东经 $110^{\circ}18' \sim 111^{\circ}18'$, 海拔 1700 ~ 2831m。该区属于暖温带半湿润大陆性季风气候。年均气温 $3 \sim 4^{\circ}\text{C}$, 最冷月 (1 月份) 均温 -10.6°C , 最热月 (7 月份) 均温 16.1°C , 无霜期 100d。年平均降水量 830.8mm, 其中 7、8、9 三个月降水量达 495mm, 占年降水量的 60%。该区的成土母质以花岗岩、片麻岩、石英岩为主, 土壤有明显的垂直地带性, 由低到高垂直带谱为: 山地褐土、山地淋溶褐土、山地棕壤和亚高山草甸土。庞泉沟自然保护区自然植被保存良好, 有暖温带地区完整的植被垂直带谱, 其基带植被为落叶阔叶林, 随海拔升高, 植被依次为: 落叶阔叶林 (800 ~ 1600m), 针阔叶混交林 (1600 ~ 1750m), 寒温性针叶林 (1750 ~ 2600m), 亚高山灌丛草甸 (2600 ~ 2831m)^[15-17]。

沿庞泉沟沟谷两侧从海拔 1700m 开始, 每隔 50m 设置一条样带, 每一条样带上取 4 ~ 6 个样方, 森林乔木样方大小为 $10 \times 10\text{m}^2$ (依群落最小样方面积而定), 林下灌木或灌丛样方大小为 $4 \times 4\text{m}^2$, 草本样方大小为

1 × 1m² ,一直至 2700m ,共有 22 条样带 ,89 个样方。调查记录内容主要包括 :乔木种的盖度、高度、株数、基围、胸围和冠幅 ;灌木的盖度、高度和株数 (或丛数) ;草本植物的盖度和高度。89 个样方共记录 198 个种。这里我们以重要值综合指标作为数据。重要值的计算 :

$$IV_{\text{乔木和灌木}} = (\text{相对密度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度})/300$$
$$IV_{\text{草本植物}} = (\text{相对盖度} + \text{相对高度})/200$$

因此 植被数据矩阵是 198 × 89 维的重要值矩阵。

3 庞泉沟自然保护区植物群落 SOFM 分类

本文的 SOFM 网络聚类是在 MATLAB (6.5)神经网络工具箱中使用初始化、训练、激活等函数完成学习过程的。训练过程分为排列和调整两个阶段进行 ,在这两个阶段中 ,学习速率和邻域半径的设定有所不同^[8,9]。将上面的 198 个种 89 个样方数据矩阵导入 SOFM 网络 ,为输入模式 $P_k = (P_1^k, P_2^k, \dots, P_N^k)$ $k = 1, 2, \dots, q$ ($q = 198, N = 89$) ,即共有 89 组样本矢量 (样方) ,每个样本矢量包含 198 个元素 (植物种) ,也就是输入层神经元有 89 个 ,而竞争层的神经元数取决于 89 个样方要被分为几类 ,由研究者给出 ,一般依据专业知识和研究经验决定。本文参考以前庞泉沟自然保护区植被研究资料 ,分别取 11 类、12 类和 13 类进行分析 ,以选择较优者。

在 MATLAB 软件中进入神经网络工具箱 (NNTool) ,选择 SOFM 网络类型 ,排列阶段学习速率取默认值 0.1 ,排列阶段学习次数设为 5000 次 ,调整阶段学习速率取默认值 0.02 ,调整阶段邻域半径取默认值 1.0。

经过比较分析 ,当 89 个样方被分为 13 类时 ,网络分类最接近实际情况。表 1 是被分为 13 类的结果。这 13 类代表 13 个植物群落类型 (表 1) 。这一分类结果与模糊 C-均值分类相一致 ,具有明确的生态意义^[17]。

表 1 89 个样方的 SOFM 网络分类结果

Table 1 Types and their sample composition result from SOFM clustering

SOFM 所分的类型 Result types		各类型所含样方 Sample composition of each type	植物群落类型名称 Name of plant communities
第 I 类	Type 1	9 , 13 , 39 ~ 42 , 54 ~ 57	沟谷草甸 (Valley bottom meadow)
第 II 类	Type 2	1 ~ 4 , 12 , 14 , 24 , 34 , 38	沙棘 虎榛子灌丛 (<i>Hippophae rhamnoides</i> , <i>Ostryopsis davidiana</i> scrubland)
第 III 类	Type 3	19 , 23 , 26 , 32 ~ 33 , 35 ~ 37	青杨林 (<i>Populus cathayana</i> forest)
第 IV 类	Type 4	18 , 27 ~ 30	油松林 (<i>Pinus tabulaeformis</i> forest)
第 V 类	Type 5	5 ~ 7 , 43 ~ 44 , 58 ~ 59 , 67 , 71	辽东栎林 (<i>Quercus liaotungensis</i> forest)
第 VI 类	Type 6	8 , 25 , 68 ~ 69	山杨、白桦林 (<i>Populus dividiana</i> , <i>Betula platyphylla</i> forest)
第 VII 类	Type 7	20 ~ 21	山杨林 (<i>Populus dividiana</i> forest)
第 VIII 类	Type 8	10 ~ 11 , 15 ~ 17 , 22 , 31 , 64	青杆林 (<i>Picea wilsonii</i> forest)
第 IX 类	Type 9	46 ~ 49 , 52 ~ 53 , 60 ~ 62 , 65	华北落叶松林 (<i>Larix principis-rupprechtii</i> forest)
第 X 类	Type 10	50 ~ 51 , 63 , 79 ~ 80	白杆林 (<i>Picea meyeri</i> forest)
第 XI 类	Type 11	45 , 88 ~ 89	银露梅、高山绣线菊灌丛 (<i>Potentilla glabra</i> , <i>Spiraea alpina</i> scrubland)
第 XII 类	Type 12	66 , 78 , 85 ~ 87	鬼见愁灌丛 (<i>Evonymus hamiltonianus</i> scrubland)
第 XIII 类	Type 13	70 , 72 ~ 77 , 81 ~ 84	亚高山草甸 (Subalpine meadow)

从生态学上看 ,这一分类结果是合理的 ,其反映了庞泉沟自然保护区的植被环境概貌和重点保护类型 ,也反映了群落类型间的生态关系 ,主要是植物群落分布与海拔、水热条件、土壤等的关系。各群落都有自己的特征。

沟谷草甸主要分布在海拔 1700 ~ 1750m 的谷地 ,环境湿度较大 ,种类以毛茛 (*Ranunculus japonicus*)、苔草 (*Carex* spp.)、蒲公英 (*Taraxacum asiaticum*) 等种类为主。沙棘 虎榛子灌丛见于海拔 1700 ~ 1800m ,灌丛盖度 60% ~ 100% ,很茂密。灌木层还有刺梨 (*Ribea burejense*)、美蔷薇 (*Rosa bella*) 等。草本层以蒿类 (*Artemisia* spp.)、苔草等为主。青杨林多见于海拔 1800m 的沟底 ,地势平坦 ,林内较潮湿 ,尚有白桦 (*Betula platyphylla*) 出现。灌木层以卫矛 (*Euonymus alatus*) 占优势 ,还有灰甸子 (*Cotoneaster acutifolius*) 等。草本层以披针苔草

(*Carex lanceolata*) 占优势。油松林分布于海拔 1500 ~ 1900m ,土壤为山地淋溶褐土和山地棕壤。辽东栎在林内也较常见。灌木层以虎榛子、土庄绣线菊 (*Spiraea pubescens*)、黄刺玫 (*Rosa xanthina*) 等为主。草本层有披针苔草、铁杆蒿 (*Artemisia gmelinii*) 等种类。辽东栎林广泛分布于海拔 1750 ~ 2000m 的阳坡、半阳坡土壤为山地棕壤,乔木层还有白桦。灌木层以毛榛 (*Corylus mandshurica*)、黄刺梅、美蔷薇等为主。草本层以糙苏 (*Phlomis umbrosa*)、披针苔草占优势。山杨、白桦林分布于海拔 1900 ~ 2500m。乔木层还有红桦 (*Betula albo-sinensis*)、华北落叶松等。林下灌木比较茂密,有土庄绣线菊、毛榛、美蔷薇等。草本层以披针苔草和舞鹤草 (*Maianthemum bifolium*) 占优势。山杨林分布在海拔 1950m ~ 2100m ,种类组成和群落环境与山杨、白桦林类似。华北落叶松林分布于海拔 1800 ~ 2500m ,面积较大,是该区的主要森林类型,是褐马鸡的主要栖息场所,还有白桦、红桦、茶条槭 (*Acer ginnala*) 等树种。灌木层以土庄绣线菊为优势种。草本层以披针苔草和小红菊 (*Spiraea pubescens*) 为优势种。青杆林见于海拔 1900 ~ 2050m ,也是褐马鸡的主要栖息地,乔木层还有华北落叶松、白桦等树种。灌木有美蔷薇、土庄绣线菊等。草本层有披针苔草、矮香豌豆 (*Lathy rushumilis*)、小红菊等。白杆林分布于海拔 2000 ~ 2500m ,郁闭度大,乔木层还有青杆和华北落叶松。灌木层以黄花忍冬 (*Lonicera chrysantha*) 为优势种,还有刺梨、刚毛忍冬 (*Lonicera hispida*) 等。草本层种类与青杆林相似。银露梅、高山绣线菊灌丛分布于海拔 1900 ~ 2500m ,上与亚高山草甸相接,还有土庄绣线菊等灌木。草本层以禾本科种类为多,还有许多杂类草。鬼见愁灌丛分布在海拔 2600 ~ 2800m 的林线以上地区,灌木还有金露梅等。草本层由金莲花 (*Trollius chinensis*)、华北风毛菊、地榆等 30 余种植物组成。亚高山草甸见于海拔 2000 ~ 2800m 的山顶,地势平缓,土壤为亚高山草甸土,主要种类有蒿草 (*Kobresia bellardii*)、雪白委陵菜 (*Potentilla nivea*)、毛茛、山大烟 (*Papaver nudicaula*)、金莲花等。

4 讨论

SOFM 网络能够处理大量的不精确、不完全的模糊信息,对非线性问题求解能力强。理论上讲能够更好的反映自然现象和规律。它同时能够并行分布工作,因此网络运算速度极快。它能够使信息分布于整个网络各权重的变化之中,某些单元的障碍不会影响网络的整体信息处理功能,因此非常适合对复杂系统的分析研究^[1]。植被生态系统是组成多样、结构复杂、生态关系相对模糊的庞大系统,所以 SOFM 网络在植物群落分类中的应用在理论上讲具有优越性。另外, SOFM 网络是非监督学习,比较客观,在网络中输入原始数据矩阵和事先设定的函数,经过网络自身的训练和学习,就能得到最终的聚类结果,不需要人为干涉^[9]。

本文应用 SOFM 网络将庞泉沟自然保护区植物群落分为 13 个类型,与模糊 c-均值分类相一致,分类结果合理,生态意义明确。群落以森林群落为主,其中寒温性针叶林是主体,华北落叶松林和云杉林面积大,林相好,是褐马鸡的主要栖息林地,也是华北地区重点保护林型。其他森林类型如辽东栎林、山杨白桦林、油松林等是维持该地区生物多样性的主要群落类型,也应加大保护力度。亚高山灌丛和草甸是高寒气候的产物,它们增大了该区生态系统多样性和物种多样性,具有独特的生态意义。生态学分析表明 SOFM 网络是非常有效的植物群落分类方法,适合于植被生态学的研究。

应用人工神经网络对植物群落进行分类,操作过程简单易行,尤其是基于 MATLAB 的 SOFM 工具箱之上,分类问题就更加简化。只要将植被数据矩阵和计算函数提供给网络,网络就给出分类结果。需要注意的是在 SOFM 网络中,分类组数是人为给定的,有一定的主观性,但这不是大缺点,因为在数量分类方法中,有相当一部分方法都是这样做的,比如模糊 C-均值聚类^[8]。最后的分类结果需要研究者根据专业知识和研究经验加以判断,这是数学方法所不能替代的^[3, 19]。

References :

[1] Yang H X , Lu Z Y. Methods of quantitative classification in plant ecology. Beijing : Science Press , 1981.
[2] Yu S X. Introduction to mathematical ecology. Beijing : Scientific Literature Press , 1995.
[3] Zhang J T. Quantitative ecology. Beijing : Science Press , 2004.
[4] Zhang J T. Canonical indicator species analysis , a new extrinsic classification technique. Acta Phytocologica Sinica , 1994 , 18 (4) : 331 — 337.

[5] Zhang F ,Zhang J T. Progress of quantitative classification and ordination research in China. Journal of Shanxi University (Nat Sci Ed) ,2000 ,23 (3) :278 — 282.

[6] Li S C ,Zheng D. Progress of the application of artificial neural network to earth science. Progress of Earth Science ,2003 ,18 (1) 69 — 70.

[7] Wu P Q ,Huang M S. The application of SOM on the classification of Fujian cities ' functions. Economic Geography ,2005 25 (1) 68 — 70.

[8] Yuan Z R. The artificial neural network and its application. Beijing :Qinghua University Press ,2000.

[9] Feisi Center for Scientific Products. MATLAB 6.5 Designe and analysis of artificial neural network. Beijing :Electronic Industry Press ,2004.

[10] Cheng Z H Zhang J T ,Wu B H ,*et al.* Relationships between tourism development and vegetation environment in Luya Mountain Nature Reserve : vegetation landscape types and ordination. Acta Ecologica Sinica ,2006 ,26 (6) :1940 — 1946.

[11] Li B ,Zhang J T. Analysis of relationships between vegetation and climate variables in Loess Plateau. Acta Botanica Sinica ,2003 ,23 (1) :82 — 89.

[12] Tran L T ,Knight C G ,O'Neill R V ,*et al.* Self-organizing maps for integrated environmental assessment of the Mid-Atlantic region. Environmental Management ,2003 ,31 (6) :822 — 835.

[13] The Math Works Inc. [http ://www. mathworks. com](http://www.mathworks.com) ,2002.

[14] Schreer J F ,Hines R J O ,Kovacs K M. Classification of dive profiles :A comparison of statistical clustering techniques and unsupervised artificial neural networks. Journal of Agricultural Biological and Environmental Statistics ,1998 ,3 (4) :383 — 404.

[15] Chen T G ,Zhang J T. A study of plant community diversity in Shenweigou of the Guandi Mountains ,Shanxi. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica ,2000 20 (4) 638 — 646.

[16] Zhang J T ,Chen T G. Variation of plant communities along an elevation gradient in the Guandi Mountains ,North China. Community Ecology ,2004 ,5 (2) :227 — 233 .

[17] Zhang J T. Fuzzy mathematic classification and ordination of plant communities in Pangquangou Natural Reserve. Journal of Beijing Normal University (Natural Science) ,2004 40 (2) 249 — 254.

[18] Zhang J T. A comparison of fuzzy c-mean clustering and TWINSpan. Journal of Wuhan Botanical Research ,1994 ,12 (1) :11 — 17.

[19] Zhang J T. Canonical principal component analysis of forest communities in Lishan Natural Reserve ,Shanxi Province ,North China. Journal of Biomathematics ,2005 20 (2) 213 — 218.

参考文献：

[1] 阳含熙 ,卢泽愚. 植物生态学数量分类方法. 北京 科学出版社 ,1981.

[2] 余世孝. 数学生态学导论. 北京 :科技文献出版社 ,1995.

[3] 张金屯. 数量生态学. 北京 科学出版社 ,2004.

[4] 张金屯. 典范指示种分析 一个新的外在分类方法. 植物生态学报 ,1994 ,18 (4) 331 ~ 337.

[5] 张峰 ,张金屯. 我国植被数量分类和排序研究进展. 山西大学学报 (自然科学版) ,2000 ,23 (3) :278 ~ 282.

[6] 李双成 ,郑度. 人工神经网络模型在地学研究中的应用进展. 地球科学进展 2003 ,18 (1) 69 ~ 70.

[7] 吴聘奇 ,黄民生. SOM 网络在福建省城市职能分类中的应用. 经济地理 2005 25 (1) 68 ~ 70.

[8] 袁曾任. 人工神经元网络及其应用. 北京 清华大学出版社 2000.

[9] 飞思科技产品研发中心. MATLAB 6.5. 辅助神经网络分析与设计. 北京 电子工业出版社 2004.

[10] 程占红 ,张金屯 ,吴必虎 ,等. 芦芽山自然保护区旅游开发与植被环境的关系——植被景观的类型及其排序. 生态学报 2006 26 (6) : 1940 ~ 1946.

[11] 李斌 ,张金屯. 黄土高原地区植被与气候的关系. 生态学报 2003 23 (1) 82 ~ 89.

[15] 陈廷贵 ,张金屯. 山西关帝山神尾沟植物群落多样性研究. 西北植物学报 2000 20 (4) 638 ~ 646.

[17] 张金屯. 庞泉沟自然保护区植物群落的模糊数学分类与排序. 北京师范大学学报 (自然科学版) 2004 40 (2) 249 ~ 254.

[18] 张金屯. 模糊 C-均值聚类法和 TWINSpan 分类的比较研究. 武汉植物研究 ,1994 ,12 (1) :11 ~ 17.

[19] 张金屯. 历山自然保护区森林群落的典范主分量分析. 生物数学学报 2005 20 (2) 213 ~ 218.