

应用 BP 神经网络对荒漠啮齿动物种群数量的预测研究

卢志宏 武晓东* 柴享贤 杨素文 李燕妮 叶丽娜

内蒙古农业大学生态环境学院, 草业与草地资源教育部重点实验室 呼和浩特 010019

摘要: 群落的格局与动态是群落生态学研究的核心内容, 种群数量预测是研究群落动态的主要途径之一。本研究尝试采用 2006 ~ 2014 年阿拉善荒漠区啮齿动物数量数据建立 BP 神经网络模型, 对啮齿动物群落全部组成物种的总个体数量进行模拟与预测。BP 神经网络通过模拟学习, 建立模型, 能够实现对于啮齿动物群落数量动态规律进行模拟与预测。本研究以阿拉善荒漠为试验区, 以啮齿动物个体数量为研究对象, 采用标志重捕法, 监测 2006 ~ 2014 年每年 4 ~ 10 月的数量, 建立 BP 神经网络预测模型, 利用 2006 ~ 2013 年的数据建立训练网络, 以 2014 年的数据进行验证与测试, 比较单层隐含层、双层隐含层和三层隐含层 BP 神经网络模型。结果表明: 单隐含层模型的隐含层节点数为 6 时, 最大误差百分比为 16.13%, 决定系数 0.998 0 ($P = 0.006 0$)。双隐含层模型的两层隐含层节点数均为 6 时, 最大误差百分比为 8.58%, 决定系数 0.999 5 ($P = 0.002 3$)。三层隐含层模型的三层隐含层节点数分别为 1、10 和 7 时, 最大误差百分比为 5.87%, 决定系数 0.999 2 ($P < 0.000 1$)。不同隐含层网络模型的预测效果均取得了满意效果, 通过比较最大误差百分比、平均误差百分比、决定系数及拟合优度, 三层隐含层优于单隐含层及双隐含层的 BP 神经网络模型。本文认为三层隐含层的 BP 神经网络模型更适合于阿拉善荒漠区啮齿动物群落全部组成物种的总个体数量的预测研究。

关键词: BP 人工神经网络; 啮齿动物; 标志重捕法

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2017) 02-227-08

Prediction of the Population of Rodent Community Based on BP Neural Network in Alasan Desert

LU Zhi-Hong WU Xiao-Dong* CHAI Xiang-Xian YANG Su-Wen LI Yan-Ni YE Li-Na

① *College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Key Laboratory of Prataculture and Grassland Resource, Ministry of Education, Hohhot 010019, China*

Abstract: Community structure and dynamics is the core content of community ecology, and the prediction of population is one way to study the community dynamics. This study attempted to establish a neural

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 30760044, 31160096), 公益性行业科研专项经费项目 (No. 201203041);

* 通讯作者, E-mail: wuxiaodong_hgb@163.com;

第一作者介绍 卢志宏, 男, 博士研究生; 研究方向: 啮齿动物生态学与草地保护研究; E-mail: luzhihong305@163.com。

收稿日期: 2016-07-18, 修回日期: 2016-10-26 DOI: 10.13859/j.cjz.201702006

network model based on BP neural network model in the rodent communities in Alasan desert area from 2006 to 2014. Through the simulation study and the establishment of the model, BP neural network could achieve the simulation and forecast the dynamic law of the number of rodent communities. Taking Alasan Desert as a test area and the number of rodents as the research object, this study used mark recapture method to monthly monitor the catches from April to October from 2006 to 2014, count the minimum alive number, and set up BP neural network prediction model. Then, built the training network by the data from 2006 to 2013 minimum survival, and used 2014 year's data for verification and testing. Through comparing hidden layer, double hidden layer and triple hidden layer BP artificial neural network model. The results showed that: 1) When the nodes' number of single hidden layer were 6, the maximum error percentage of single hidden layer model was 16.13%, and the determination coefficient was 0.998 0 ($P = 0.006 0$, Table 1). 2) When the nodes' number of the two hidden layer were both 6, the maximum error percentage of double hidden layer model was 8.58%, and the coefficient of determination was 0.999 5 ($P = 0.002 3$, Table 2). 3) When the nodes' number of the triple hidden layer is 1, 10, and 7, the maximum error percentage of triple hidden layer model was 5.87%, and the determination coefficient was 0.999 2 ($P < 0.000 1$, Table 3). 4) The forecasting effect of the different hidden layer network model has been achieved. By comparing the maximum error percentage, the average error percentage, the decision coefficient, and nonlinear fitting rate, the triple hidden layer was better than other two BP neural network models (Table 4). In this paper, the BP neural network model with triple hidden layer was most suitable for the prediction of rodent population in Alasan desert area.

Key words: BP neural network; Rodent; Mark recapture method

神经网络是能够模拟人类大脑思维活动, 进行分布式信息处理的数学模型, 可以将系统中不同种类、不同性质的变量联系在一起, 数字化信息, 建立模型, 从而实现对具体问题的分析研究(祖元刚等 2004, 汪少华等 2011, 黄旭光等 2015, 李辉东等 2015)。啮齿动物种群数量随着分布区域的变化而变化, 不同物种的生存策略也不同(武晓东等 2003, Leanne et al. 2014)。随着气候变化和人为活动的干扰, 如强降雨事件、极端干旱和火灾的发生强烈影响着啮齿动物性别比例, 不同年龄个体的比例, 表现出种群数量的波动(Meserve et al. 2011, Georgy 2014); 气候变化, 尤其是降雨变化, 通过影响植被的高度、密度以及种子、果实等的数量和质量而影响数量变化(武晓东等 2006, Adam k et al. 2008, Letnic et al. 2011)。啮齿动物数量变化受外部因素如气象因子、食物、天敌以及干扰等, 以及内部因素包括啮齿动物寿命、繁殖能力、种间竞争等因素的共同作用,

表现出数量波动(Krebs et al. 1973, 董维惠等 1993, 1998)。

在阿拉善地区, 由于多年连续过度放牧, 致使荒漠草原大面积沙化和退化, 更加适宜于啮齿动物生存, 使其种群数量上升(武晓东等 2003, 2006, 付和平等 2004), 形成了以子午沙鼠(*Meriones meridianus*)、三趾跳鼠(*Dipus sagitta*)和五趾跳鼠(*Allactaga sibirica*)为优势种的啮齿动物群落, 其数量变化影响啮齿动物的总个体数量, 本文根据当地研究结果, 尝试建立神经网络模型, 模拟和预测阿拉善荒漠啮齿动物总个体数量的动态规律, 为啮齿动物数量变化提供新的预测方法和思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本实验研究区域位于内蒙古阿拉善左旗南部的荒漠景观中(37°24' ~ 38°25'N, 104°10' ~ 105°30'E, 海拔 1 420 m), 属于亚洲中部荒漠

亚区最东部的一个植物地理区系。为典型的温性荒漠, 植被稀疏, 结构单调, 覆盖度低, 一般仅 1% ~ 20%。植物种类贫乏, 主要以旱生、超旱生和盐生的灌木、半灌木、小灌木和小半灌木为主, 如刺叶柄棘豆 (*Oxytropis aciphylla*) 和白沙蒿 (*Artemisia sphaerocephala*), 草本以虫实 (*Corispermum mongolicum*)、沙米 (*Agriophyllum pungens*) 和糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*) 为主, 伴生有雾冰藜 (*Bassia dasyphylla*) 等一年生植物。地形起伏不平, 丘陵、沙丘与平滩相间。气候为典型的高原大陆性气候, 冬季严寒、干燥, 夏季酷热, 昼夜温差大, 极端最低气温 -36℃, 最高气温 42℃, 年平均气温 9.0℃, 无霜期 156 d。年降水量 45 ~ 288 mm, 主要集中在 7 ~ 8 月份。年潜在蒸发量 3 000 ~ 4 700 mm。土壤为棕漠土, 淋溶作用微弱, 土质松散、瘠薄。

固定的标志重捕样地位于阿拉善左旗李井滩, 样地面积为 105 m × 90 m。每个标志重捕样地以方格式布笼, 笼距 15 m × 15 m, 每个网格点上布设 1 个活捕笼 (42 cm × 17 cm × 13 cm), 以新鲜花生米为饵。2006 ~ 2014 年 4 ~ 10 月每月月初连捕 4 d。记录捕获个体种名、性别、繁殖状况、体重及捕获位置, 并统计 2006 ~ 2014 年 4 ~ 10 月每月啮齿动物所有物种的最小存活数, 以表示啮齿动物实际存活的个体数量。啮齿动物群落组成物种包括子午沙鼠、三趾跳鼠、五趾跳鼠、阿拉善黄鼠 (*Spermophilus alaschanicus*)、长爪沙鼠 (*Meriones unguiculatus*)、小毛足鼠 (*Phodopus roborovskii*) 等。啮齿动物总个体数量为各物种最小存活数之和。

试验区单一鼠种个体数量的变化对草地的影响往往很小, 而是啮齿动物的总个体数量变化影响草地的植被恢复和放牧生产, 因而对总个体数量进行预测, 在生产实践上具有指导意义。因此本文着重分析总个体数量变化, 根据优势种的变化反应总个体数量的动态特征。

1.2 研究方法

1.2.1 BP 神经网络 1943 年, McCulloch 和 Pitts 总结了脑细胞、信息传递方式, 并提出了数学模型, 模拟人脑处理信息的功能; Rosenblatt 于 1957 年提出了感知器, 1958 年提出了模式识别的监督学习方法, 并付诸实践 (Rosenblatt 1962); 1986 年, Rumelhart 等提出了反向传播算法, BP 神经网络是目前应用最为广泛、最为成熟的人工神经网络模型之一 (高隽 2007, 施彦等 2009)。BP 神经网络是对某种算法或者函数的逼近, 通常包含输入层、隐含层和输出层, 隐含层可以有多层, 每层含有多个神经元, 神经元通过权值和阈值逐层联系; BP 神经网络通过正向传播和误差反向传播两个过程对输入信息进行处理, 输入信息通过正向传播, 由输入层到隐含层再到输出层进行逐层处理, 影响下一层神经元的状态, 再通过计算得到输出误差, 若输出误差大于目标误差, 则转入反向传播过程, 逐层修改各层神经元之间的权值, 信息正向传播和误差反向传播反复进行, 直到最小输出误差满足要求, 这样经过大量样本的学习, 最终确定最优的权值和阈值, 从而对实际问题进行模拟 (祖元刚等 2004, 陈明 2013, 李辉东等 2015)。

1.2.2 模型构建 本文在 Matlab2014a 环境下, 以啮齿动物群落优势种个体数量为自变量 (输入向量), 啮齿动物群落全部组成物种的总个体数量为因变量 (目标向量), 自变量 (输入向量) 沿输入层向隐含层传递, 再向输出层传递, 得到期望输出, 将期望输出和因变量 (目标向量) 进行比较, 计算得到输出误差。利用 2006 ~ 2013 年的数据建立训练网络, 以 2014 年的数据进行验证与测试, 尝试建立单层隐含层、双层隐含层和三层隐含层拓扑结构, 比较三种结构的预测效果; 输入层和输出层的节点数由研究对象决定; 隐含层节点数 (即隐含层神经元个数) 需要主观确定。根据经验公式, $m = \sqrt{n+1} + \alpha$, m 为隐含层节点数, n 为输入层节点数, l 为输出层节点数, α 为 1 ~ 10 的整数, 采用试凑法, 确定隐含层节点数。

在网络学习过程中,为了消除输入样本间的量纲差异,更好地进行学习,反应啮齿动物种群数量的变化规律,需要对样本进行归一化处理:

$$X_i' = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式(1)中, X_i 和 X_i' 为归一化前后的第 i 个向量元素, X_{\max} 和 X_{\min} 为对应向量的最大值和最小值。建模过程中,学习速率为 0.000 1,精度要求为 0.004,训练次数为 1 000,输入层和隐含层之间的传递函为正切 S 型函数 tagsig,隐含层与输出层之间的传递函数为对数 S 型函数 logsig,网络采用 Levenberg-Marquadt 优化算法进行优化,模型精度评价指标采用决定系数 (R^2) 和拟合优度 (R_{NL}),其值越大,模拟效果越好(张世强 2002,李辉东等 2015)。 R^2 和 R_{NL} 计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \right) \quad (2)$$

$$R_{NL} = 1 - \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum y_i^2}} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中 y_i 、 \hat{y}_i 、 \bar{y} 分别表示实测值、预测值、预测值平均值,实测值指用最小存活数表示的实际存活的个体数量,预测值指通过神经网络模型获得的预测值。

2 结果

2.1 4~10 月份啮齿动物群落优势种个体数量及群落组成物种总个体数量统计情况

经统计,2006~2014 年试验区的优势种为三趾跳鼠、五趾跳鼠和子午沙鼠。三趾跳鼠个体数量在 4 月份变异范围最大,为 0.0~34.0 只,5 月份集中程度最大,在 11.5~24.0 只之间;五趾跳鼠个体数量在 5 月份变异范围最大,为 1.0~11.0 只,6 月份集中程度最大,在 0.9~5.9 只之间;子午沙鼠个体数量在 9 月份变异范围最大,为 1.0~20.0 只,6 月份集中程度最大,在 1.0~10.0 只之间;群落所有组成物种总个体数量在 4、5 月份变异范围最大,分别为 0.0~

46.0 只、2.0~48.0 只,8 月份集中程度最大,在 9.0~33.0 只之间(图 1)。

2.2 单层隐含层模型

2.2.1 拓扑结构的确定 根据确定隐含层神经元节点数的经验公式,分别建立隐含层神经元节点数为 3~12 的网络模型,隐含层神经元节点数为 3~12 时的决定系数分别为 0.988 1、0.993 6、0.993 4、0.998 0、0.993 2、0.997 6、0.982 2、0.975 3、0.992 7、0.991 4。隐含层神经元节点数为 6 时,决定系数 $R^2 = 0.998 0$ ($P = 0.006 0$),拟合效果最好,因此确定单层隐含层模型的拓扑结构:输入层向量为 3,隐含层节点数 6,输出层向量为 1,表示为 3—6—1。

2.2.2 单层隐含层模型预测结果 2014 年啮齿动物群落所有组成物种总个体数量预测值与实测值十分接近,最小误差仅为 0.07,最大误差为 1.92,误差百分比低于 20%,整体预测效果较好(表 1)。经计算,平均误差百分比为 7.70%,预测值的变化趋势符合啮齿动物总个体数量的变化规律。

2.3 双层隐含层模型

双层隐含层 BP 神经网络模型包括 2 个隐含层,将每层神经元节点数分别设置为 1~12,共计 144 种拓扑结构,经过试凑法,第一和第二隐含层神经元节点数为 6 时,模型的决定系数最大, $R^2 = 0.999 5$ ($P = 0.002 3$),因此确定双隐含层网络模型的拓扑结构:输入层向量为 3,第一隐含层节点数 6,第二隐含层节点数 6,输出层向量为 1,表示为 3—6—6—1。

预测值和实测值十分接近,最小误差仅为 0.28,最大误差为 2.83,误差百分比低于 10%,整体预测效果较好(表 2)。经计算,平均误差百分比为 6.55%,预测值的变化趋势符合啮齿动物总个体数量的变化规律。

2.4 三层隐含层模型

三层隐含层 BP 神经网络模型包括 3 个隐含层,将每层神经元节点数分别设置为 1~12,共计 1 728 种拓扑结构,经过试凑法,第一、二和三隐含层节点数分别为 1、10 和 7 时,模

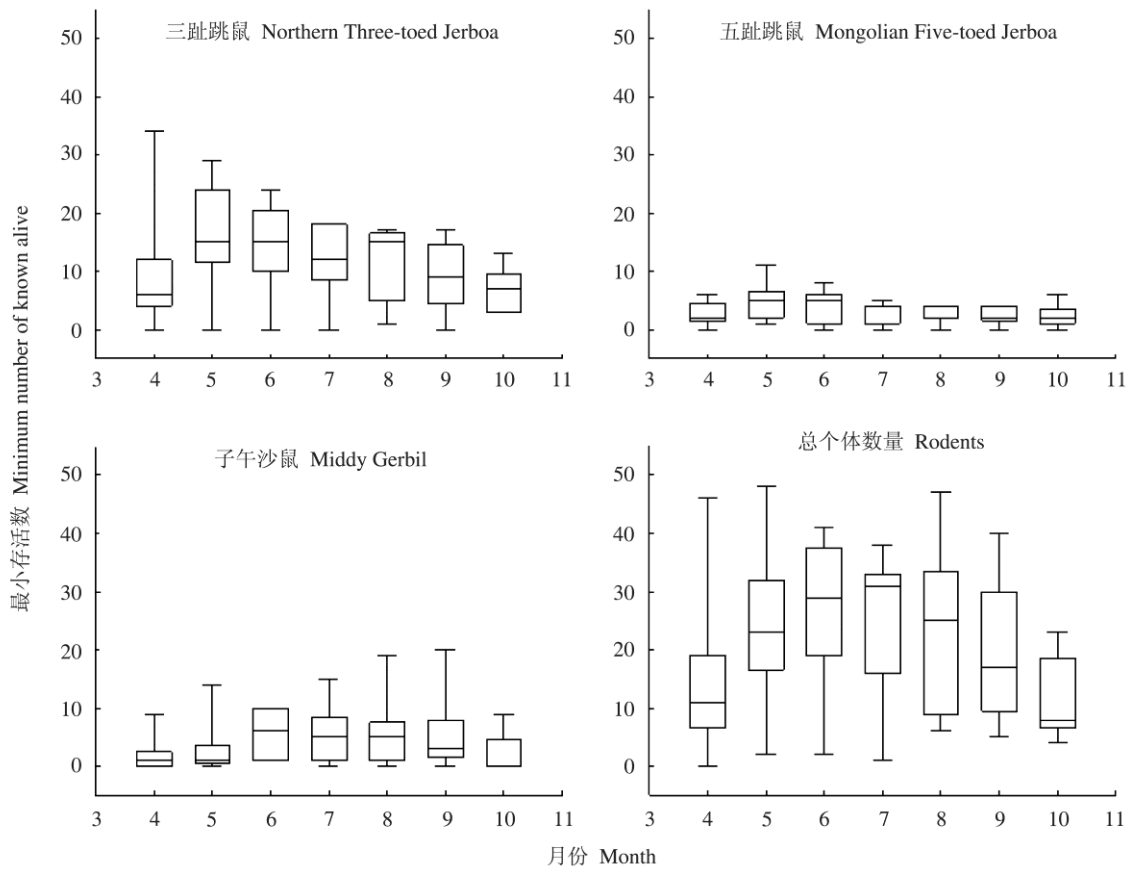


图 1 啮齿动物群落优势种个体数量及总个体数量

Fig. 1 The population of dominant species and the total population of rodents

总个体数量为三趾跳鼠、五趾跳鼠、子午沙鼠及其他鼠种的个体数量之和。

Total population continue population of Northern Three-toed Jerboa, Mongolian Five-toed Jerboa, Middy Gerbil and orther rodents.

表 1 单层隐含层 BP 网络预测结果及预测误差

Table 1 Predict result and error of single hidden layer BP neural network models

	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October
实测值 Original	14.00	33.00	23.00	24.00	8.00	10.00	6.00
预测值 Pridict	13.15	34.92	22.93	25.21	6.71	8.93	5.41
绝对误差 Absolute error	0.85	1.92	0.07	1.21	1.29	1.07	0.59
误差百分比 Percentage error (%)	6.07	5.82	0.30	5.04	16.13	10.7	9.83

绝对误差 = || 实测值 - 预测值 || ; 误差百分比 (%) = (绝对误差/实测值) · 100%。

Absolute error = || Original - Pridict || ; Percentage error = (Absolute error/Original) · 100%.

型的决定系数最大, $R^2 = 0.999 2 (P < 0.000 1)$, 因此确定三层隐含层网络模型的拓扑结构: 输入层向量为 3, 第一隐含层节点数 1, 第二隐含

层节点数 10, 第三隐含层节点数 7, 输出层向量为 1, 表示为 3—1—10—7—1。

预测值和实测值十分接近, 最小误差仅为

0.10, 最大误差为 0.65, 误差百分比低于 6%, 整体预测效果较好 (表 3)。经计算, 平均误差百分比为 2.52%, 预测值的变化趋势符合啮齿动物总个体数量的变化规律。

2.5 三种隐含层 BP 神经网络模型比较

三层隐含层模型的最大误差百分比、平均误差百分比小于单层隐含层和双层隐含层; 双

隐含层模型的决定系数最大, 三层隐含层模型次之, 但二者十分接近; 三层隐含层模型的拟合优度最大, 单隐含层模型次之 (表 4)。综合考虑决定系数、拟合优度、最大误差百分比和平均误差百分比, 本文认为三层隐含层模型的预测效果最好, 三层隐含层的 BP 神经网络模型可以应用于荒漠啮齿动物种群数量预测研究。

表 2 双层隐含层 BP 网络预测结果及预测误差

Table 2 Predict result and error of double hidden layer BP neural network models

	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October
实测值 Original	14.00	33.00	23.00	24.00	8.00	10.00	6.00
预测值 Pridict	14.73	35.83	24.70	25.92	7.32	10.28	5.68
绝对误差 Absolute error	0.73	2.83	1.70	1.92	0.68	0.28	0.32
误差百分比 Percentage error (%)	5.21	8.58	7.40	8.00	8.50	2.80	5.33

绝对误差 = || 实测值 - 预测值 ||; 误差百分比 (%) = (绝对误差/实测值) · 100%。

Absolute error = || Original - Pridict ||; Percentage error = (Absolute error/Original) · 100%.

表 3 三层隐含层预 BP 网络预测结果及预测误差

Table 3 Predict result and error of triple hidden layer BP neural network models

	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October
实测值 Original	14.00	33.00	23.00	24.00	8.00	10.00	6.00
预测值 Pridict	14.31	33.74	23.09	24.65	8.47	9.73	6.10
绝对误差 Absolute error	0.31	0.74	0.09	0.65	0.47	0.27	0.10
误差百分比 Percentage error (%)	2.21	2.24	0.39	2.71	5.87	2.70	1.67

绝对误差 = || 实测值 - 预测值 ||; 误差百分比 (%) = (绝对误差/实测值) · 100%。

Absolute error = || Original - Pridict ||; Percentage error = (Absolute error/Original) · 100%.

表 4 不同隐含层 BP 神经网络模型

Table 4 Different hidden layer BP neural network models

	最大误差百分比 (%) Max of percentage error	平均误差百分比 (%) Average of percentage error	决定系数 Coefficient of determination	拟合优度 Goodness of fit
单层隐含层 Single hidden layer	10.7	7.70	0.998 0	0.940 9
双层隐含层 Double hidden layer	8.58	6.55	0.999 5	0.922 0
三层隐含层 Triple hidden layer	5.87	2.52	0.999 2	0.976 9

3 讨论

在本研究中,小毛足鼠、长爪沙鼠等鼠种只有个别年份、月份出现,导致啮齿动物群落组成物种数量变化存在不确定性,而子午沙鼠、三趾跳鼠和五趾跳鼠等鼠种对啮齿动物个体数量的稳定具有决定作用,气候变化、人为干扰、种间竞争对啮齿动物个体数量的影响十分复杂,因此研究对象的复杂程度决定了模型的复杂程度。将优势种个体数量作为输入向量,组成物种总个体数量作为目标向量,利用 2006~2013 年的数据建立模型,满足了获得较好泛化能力的必要条件,预测效果取得了满意的结果。

神经网络往往出现过拟合或欠拟合现象。样本数量和权值数量的比值往往较大,一般认为大于 30 倍时容易出现过拟合,低于 5 倍时容易出现欠拟合;也有研究指出,不能单纯为了避免过拟合而任意减少权值数目,而出现欠拟合(施彦等 2009)。而本文通过增加网络的复杂程度,即隐含层层数和权值个数,寻找最优网络模型。一般认为有噪声的数据,样本数量应该是输入变量维数的 10 倍以上,无噪声的数据至少是 2 倍。本文输入向量维数为 3,样本数为 63,符合经验原则,因此从经验原则出发,可以通过提高网络权值的个数来避免过拟合和欠拟合。而实际上,模型的成功在于特定的问题相匹配,而不是依靠避免过拟合带来的好处(施彦等 2009)。本文通过增加隐含层层数和神经元节点数,取得了较好的预测效果。本文仅从预测效果上探讨了不同复杂程度 BP 神经网络模型在啮齿动物组成为物种数量预测中的应用效果,并未深入到 BP 神经网络算法和生态学原理相结合的层面阐述不同隐含层神经网络生态学意义,正是生态学应用神经网络进行预测、模式识别面临的难题之一。本文所进行的探索必定存在很多不足之处,但意义在于尝试不同复杂程度的 BP 神经网络模型模拟啮齿动物群落数量变化过程及进行预测。也有人认为 BP 网络类似于非线性方程,但对生态学的

解释能力较差,BP 网络是对机理模型的重要补充(米湘成等 2005)。

根据 2006~2014 年阿拉善荒漠啮齿动物捕获量数据进行了模拟与预测分析,从结果可知,三种模型决定系数均大于 0.99,实用性较强。三层隐含层模型最大误差百分比比较低,更接近于实测值,较好地模拟了啮齿动物数量变化规律。

荒漠啮齿动物群落是一个复杂的非线性系统,由不同的啮齿动物组成,同时受环境因子的影响,优势物种维持着群落的稳定,减少群落的波动,本文通过 BP 神经网络模拟这种竞争关系,很好地模拟和预测了啮齿动物群落全部组成物种的总个体数量变化规律,进一步通过比较三种隐含层网络的预测精度,确立了三层隐含层的 BP 网络更适合于模拟和预测荒漠啮齿动物数量动态变化规律。

致谢 本研究野外工作得到了内蒙古阿拉善盟草原工作站工作人员的大力支持,杨泽龙、王利清、查木哈、岳闯、包达尔罕等在野外数据采集过程中的辛苦工作,中国农业科学研究院草原研究所郭利彪助理研究员在神经网络模型分析过程中给予的指导,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- Adam k P, Krá M. 2008. Climate- and resource-driven long-term changes in dormice populations negatively affect hole-nesting songbirds. *Journal of Zoology*, 275(3): 209–215.
- Georgy S. 2014. Population and community dynamics and habitat selection of rodents in complex desert landscapes. *Mammalia*, 78(1): 1–10.
- Krebs C J, Gaines M S, Keller B L, et al. 1973. Population cycles in small rodents. *Science*, 179(68): 35–41.
- Leanne M H R, Christopher M S, Ray G P. 2014. Rodent populations on the northern Great Plains respond to weather variation at a landscape scale. *Journal of Mammalogy*, 95(1): 82–90.
- Letnic M, Story P, Story G, et al. 2011. Resource pulses, switching trophic control, and the dynamics of small mammal assemblages

- in arid Australia. *Journal of Mammalogy*, 92(6): 1210–1222.
- McCulloch W S, Pitts W H. 1943. A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, (5): 115–133
- Meserve P L, Kelt D A, Previtani M A, et al. 2011. Global climate change and small mammal populations in north-central. *Journal of Mammalogy*, 92(6): 1223–1235.
- Rosenblatt F. 1962. *Principles of Neurodynamics*. New York: Spartan Book.
- Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. 1986. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088): 533–536.
- 陈明. 2013. *MATLAB 神经网络原理与实例精解*. 北京: 清华大学出版社, 278–307.
- 董维惠, 侯希贤, 林小泉, 等. 1993. 黑线仓鼠种群数量动态预测研究. *生态学报*, 13(4): 300–304.
- 董维惠, 侯希贤, 周延林, 等. 1998. 黑线毛足鼠种群数量动态及预测研究. *草地学报*, 6(34): 207–211.
- 付和平, 武晓东, 杨泽龙, 等. 2004. 内蒙古阿拉善荒漠主要啮齿动物生态位测度比较. *动物学杂志*, 39(4): 27–34.
- 高隼. 2007. *神经网络原理及仿真实例*. 北京: 机械工业出版社, 1–54.
- 黄旭光, 周俊朝, 黄柏华, 等. 2015. 基于神经网络对栎树天然林地位指数模拟系统的研究. *河南农业大学学报*, 49(2): 190–194.
- 李辉东, 关德新, 袁凤辉, 等. 2015. 基于BP神经网络的杨树林冠蒸腾模拟研究. *生态学报*, 35(12): 1–13.
- 米湘成, 马克平, 邹应斌, 等. 2005. 神经网络模型及其在农业和生态学研究中的应用. *植物生态学报*, 29(5): 863–873.
- 施彦, 韩力群, 廉小亲, 等. 2009. *神经网络设计方法与实例分析*. 北京: 北京邮电大学出版社, 1–76.
- 汪少华, 张茂震, 赵平安, 等. 2001. 基于TM影像、森林资源清查数据和人工神经网络的森林碳空间分布模拟. *生态学报*, 31(4): 998–1008.
- 武晓东, 阿娟, 付和平. 2003. 内蒙古阿拉善荒漠啮齿动物群落结构及其多样性研究. *草地学报*, 11(4): 312–316.
- 武晓东, 付和平. 2006. 人为干扰下荒漠啮齿动物群落格局——变动趋势与敏感性反应. *生态学报*, 26(3): 849–861.
- 张世强. 2002. 曲线回归的拟合优度指标的探讨. *中国卫生统计*, 19(1): 9–11.
- 祖元刚, 赵则海, 于景华, 等. 2004. *非线性生态模型*. 北京: 科学出版社, 530–572.