

生态系统响应气候变化脆弱性的人工神经网络模型评价

李双成¹, 吴绍洪², 戴尔阜²

(1. 北京大学环境学院资源与环境地理系, 北京 100871; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:生态系统的脆弱性评价对于生态系统的管理具有重要作用。在分析生态系统脆弱性特征和影响因素的基础上, 构建了针对森林和草地生态系统的脆弱性评价指标体系, 涵盖了生态系统的结构、功能和生境 3 个方面, 评价指标分别是物种多样性、群落覆盖度、NPP、建群种年生长量、地表干燥度以及土壤有机碳等。评价系统将生态系统的脆弱性划分为轻微脆弱、中度脆弱、重度脆弱以及系统崩溃 4 级。作为案例研究, 构建了结构和性能优化的多层感知器, 评价了温带落叶阔叶林生态系统的脆弱性。结果表明, 通过人工神经网络模型评价生态系统的脆弱性是一条可行的途径。

关键词:生态系统; 脆弱性; 人工神经网络; 评价

Assessing the fragility of ecosystem using artificial neural network model

LI Shuang-Cheng¹, WU Shao-Hong¹, DAI Er-Fu² (1. College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. The Institute of Geographic Science and Natural Resource Research, CAS, Beijing 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 621~626.

Abstract: Assessing the fragility of ecosystem has an important role in sustainable ecosystem management. Based on a critical review of current research, we developed an indicator system for assessing the fragility of natural ecosystems, which includes NPP, species biodiversity, community coverage, annual growth of dominant species, surface aridity, and density of soil carbon. These variables affect the structure, function, and habitats of ecosystems. The proposed indicator system classifies the fragility of natural ecosystem into four levels, i. e., slight, medium, severe and collapse.

Defining the ecological baseline of an ecosystem is a precondition for establishing assessment standard. Here, two approaches were employed to build ecological baselines. One is the fundamental niche of dominant species obtained from their ecological ranges and the other is the average value of the structural or functional indices of the ecosystem in its distribution region.

As a case study, we developed the specific assessing indicators for temperate deciduous broad-leaved forests according to the defined ecological baseline and general grading standard of assessment system. By using intelligent solver of artificial neural network (ANN), a Multi-layer Perceptron (MLP) which is a supervised learning ANN, was developed to assess the fragility of ecosystem in the case study area. The topological structure of MLP is $6 \times 6 \times 1$, namely six neurons in the input layer, six neurons in the hidden layer, and one neuron in the output layer. The input variables of MLP are above-mentioned six indicators, and the output variable is the fragility index of the ecosystem. In order to train and test the MLP model, the training data of the six indicators were linearly interpolated.

Based on the ANN assessing results, during 1961-2000, the fragile index of the temperate deciduous broad-leaved forest ranged from 0.64 to 1.80, which indicated slight to medium fragility. The fragility index showed slight increase with a 0.003/40a tendency rate. The tendency rates of fragility index, however, were all negative and exhibited decreasing but fluctuating trends during the first 30 years of the whole assessing period and then increased during last decade.

基金项目:国家科技攻关资助项目(2001-BA611B-02-05-03A); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX3-SW-339-05)

收稿日期:2004-06-18; **修订日期:**2004-11-26

作者简介:李双成(1961~), 男, 河北平山人, 副教授, 主要从事为区域生态评价与生态系统管理研究。

Foundation item: National Key Project (No. 2001-BA611B-02-05-03A); Knowledge Innovation Project, CAS (No. KZCX3-SW-339-05)

Received date: 2004-06-18; **Accepted date:** 2004-11-26

Biography: LI Shuang-Cheng, Associate professor, mainly engaged in regional ecological assessment and ecosystem management.

Artificial neural network, originally inspired by their biological namesakes, are composed of many simple intercommunicating elements, or neurons, working in parallel to solve a complex problem. In this study, we tested the feasibility of ANN in assessing the ecosystem fragility. The results indicated that ANN can be an alternative assessment approach, and it shows advantage of fault tolerance, robustness in modeling process.

Like other approaches, ANN-based methods also face some difficulties due to lack of data for choosing indicators. Further improvements should include developing appropriate ecological baseline and grading standard for each indicator, and considering other factors such as topography in assessing ecosystem.

Key words: ecosystem; fragility; artificial neural network; assessment

文章编号:1000-0933(2005)03-0621-06 中图分类号:Q141,Q148 文献标识码:A

生态系统是地球表层系统中重要的组成要素。作为可再生资源,它对人类具有直接的经济价值;作为环境与介质,为人类提供各种直接或间接的生态服务。因而,全球气候变化下生态系统生物多样性、空间分布范围、生产力等结构与功能方面的变化状况,成为相关领域的一个研究热点。

从生态系统管理的实践看,评价气候变化下生态系统的脆弱性变化更具应用价值。特别是在阈值附近生态系统的突变过程。然而,定量评价生态系统的脆弱性是一项复杂的工作。困难除了来自气候变化的不确定性外,生态系统结构和功能与气候因子之间的非线性关系也是主要障碍之一。目前在这一领域已有一些相关研究工作,绝大部分是将与生态系统相关的因子分类定级,然后给因子赋权,计算生态系统的脆弱度或可能的受损情况。此类评价工作范式归结为3段式,即:(i)建立评价指标体系;(ii)确定评价方法(专家打分法、层次分析法、模糊综合评判法、关联树法等);(iii)综合评价。其中,专家打分法在确定各层或各指标之间权重时起着至关重要的作用。这类评价模式简便易算,可操作性较强,但权重的赋值却存在着较大的主观性。探索更为科学的生态脆弱性评价方法仍是一项具有挑战性的研究课题。

1 气候变化与生态系统的状态

生态系统对气候变化的适应和调节能力只能在一定情形下起作用,如果气候变化幅度过大、胁迫时间过长,或短期的干扰过强,超出了生态系统本身的调节和修复能力,生态系统的结构功能和稳定性就会遭到破坏,造成难以恢复的演化,这个临界限度,称为“生态阈值”。从外力角度分析,生态阈值决定于外力的类型、强度、节奏、持续时间等诸多性质;从生态系统自身来讲,系统的结构(系统物种的多样性、等级层次、营养结构、联结方式)、功能(生产功能如第一性生产力、生态功能等)、成熟程度等都影响到生态系统的阈值高低。一般来说,生态系统的物种多样性越高、系统成分和营养结构越复杂、生产力越高,系统的稳定性就越大,对外界扰动的抵抗能力也越强,生态阈值也就越高。相反,某些自然生态系统和部分人工生态系统,组分单调,结构简单,适应能力较低,生态阈值也就较低。

当超过生态阈值时,生态系统会出现许多“病态”症状,这可以从生态系统的结构和功能两方面加以表征,如生产力显著减少、个体生长不良、结构缺损、生态功能变异、逆行演替等。例如,大面积的森林采伐不仅使原有生产者层次的主要种类从系统中消失,而且各级消费者也因栖息地的破坏而被迫迁移或消失。

当外部干扰不甚严重时,生态系统的结构和功能没有完全变异,物种组成结构和比例发生较小变化,系统的垂直和水平分层结构减少。在这种情形下,当外界干扰力消失后,系统将会逐渐恢复。然而在长期剧烈的生态扰动下,系统将会崩溃。对于已经崩溃的生态系统,停止胁迫也无法使其回复初始状态。如在长期喷施农药的林区,生态系统向灌木林逆行演替,当到达灌木林分时,即使停止施药,也难以恢复到乔木林。在热带的一些地区,森林被破坏后,也往往很难恢复,甚至是不可逆的,原因在于其生境条件随着森林的破坏而迅速恶化如水土流失造成土壤肥力衰竭等。

R. Forman 和 M. Godron 对自然扰动下生态系统的可能变化趋势做了图示。图 1 就是经过修改的示意图。在图 1 中,生态系统的阈值应该定在 R 点。在这一点之前,虽然依靠生命组份的阻抗和恢复功能,系统不至于崩溃,但这时的波动平衡已不是先前的平衡状态了。但这个 R 点不是所有生态系统的阈值点,因为超过这个点后,尽管这一类生态系统毁灭了,但还可能有新的生态系统类型出现,如草原生态系统毁灭后,荒漠就可能出现,绿

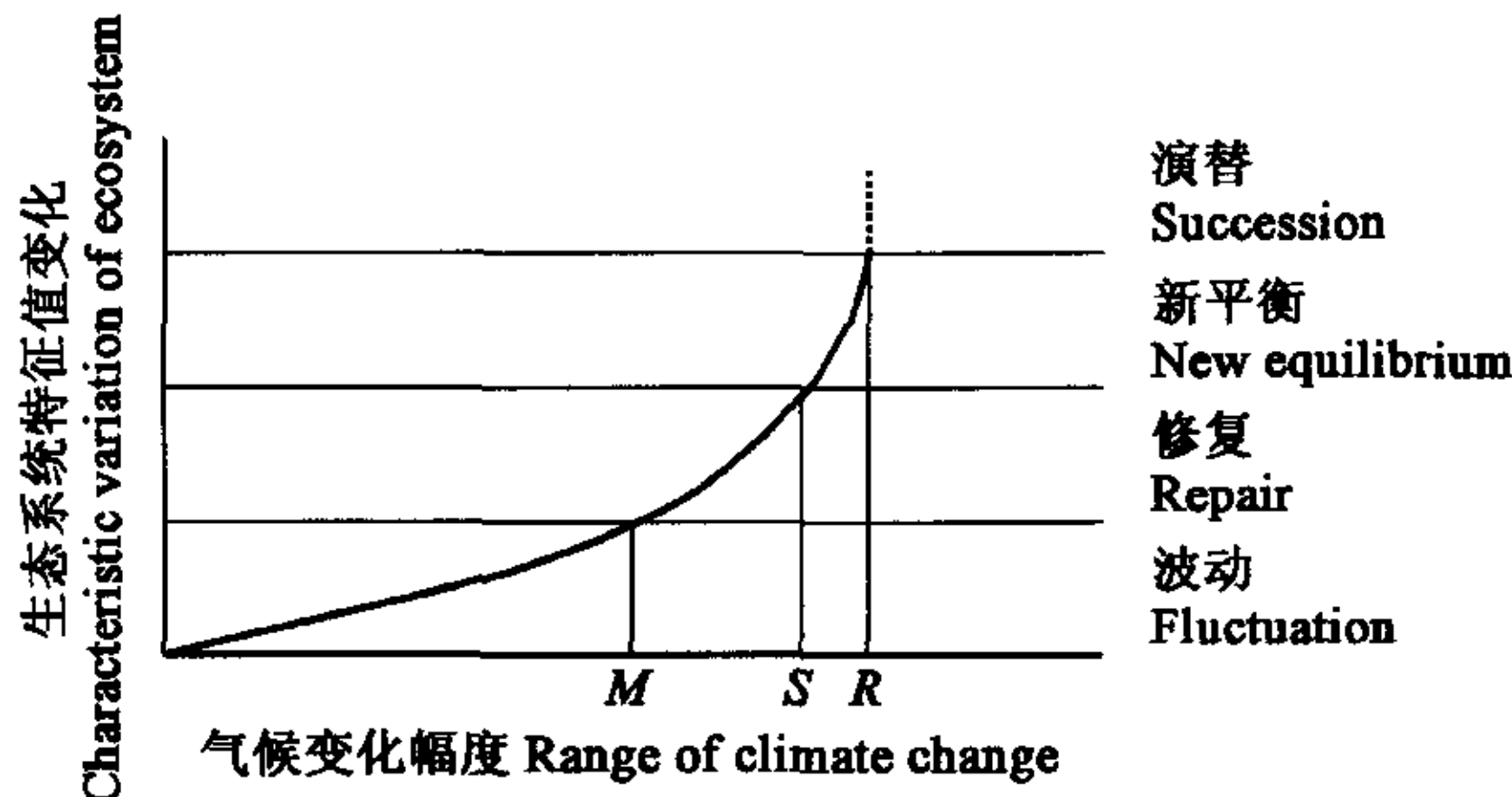


图 1 生态系统响应气候变化阶段示意图(根据 R. Forman & M. Godron 修改)
Fig. 1 Ecosystem response for climate change (after R. Forman & M. Godron)

洲消退后,沙漠生态系统同样会存在。

2 生态系统脆弱性评价的指标体系

2.1 已有工作的评述

从生态系统的现实状况和外在扰动下生态系统的行为反应考虑出发,以下途径常用于生态系统的脆弱性评价:①以生态系统受到压力而出现的非正常综合症状为指标,来诊断生态系统的状态;②以生态系统受到干扰后产生的回归原有状态的趋势,来衡量生态系统的抗力和恢复力;③以生态系统作为受体,评价外界胁迫因子对生态系统造成的生态风险。

在评价的指标类型方面,常用的有以下几类:①状况表征指标:是生态系统现状和趋势的指标,可用于评价生态系统数量、质量、受威胁的和灭绝的物种以及栖息地类型;②压力表征指标:是温室气体驱动的气候变化因子,如 CO₂ 浓度变化、温度升高、降水量变化等;③利用通用指标:是生态系统利用价值的指标(包括产品财货和生态服务功能两个方面);④响应表征指标:是生态系统受到气候变化因子后可能出现的“症状”指标,如物种多样性的增减、第一性生产力的变化等等。Haskell 等提出一个健康的生态系统应该远离“危困综合症 (distress syndrome)”,其具体的症状有:第一性生产力降低、营养流失、生物多样性损失、关键种群波动增加、生物结构衰退,并且疾病广泛发生和更加严重^[1]。Costanza 试图构建一个能对复杂系统在所有尺度上都容易应用的实践性的定义。该定义能综合测度系统回复力、平衡、组织(多样性)和活力(新陈代谢),并要求使用权重因素去比较和综合系统中的不同组分^[2]。Rapport 等考察了一些压力和它们的症状,并且给了生态系统压力的 5 个指标:营养库、初级生产力、尺度分布、物种多样性和系统恢复力^[3~5]。Cairns 把生态系统评价指标体系分为物理化学指标、生态学指标和社会经济指标三大类。物理化学指标包括水质、大气污染、土壤理化性质等,生态学指标包括物质和能量流动、食物链、初级生产力、恢复力、抵抗力、群落结构、稳定性、生态系统服务功能等,社会经济指标包括人类健康水平、区域经济的发展水平、技术发展水平、公众环境质量和生活质量的观念、政府决策等^[6]。Rice 综述了生态系统健康状态评价工作现状后,提出了选择评价因子的若干准则,并特别指出能否设置参照点应当是选择的重要依据之一^[7]。

2.2 气候变化下生态系统脆弱性评价指标体系

2.2.1 生态系统脆弱性评价指标体系 表 1 针对自然生态系统而构建的评价气候变化下生态系统脆弱性的指标体系。这一指标体系由总指数、指标集和指标 3 层构成。其中,在指标集中考虑了生态系统的结构、功能和生境 3 个方面,每个指标集由两个指标构成,分别是物种多样性、群落盖度、NPP、建群种年生长量、地表干燥度和土壤有机碳等。评价系统将生态系统的脆弱性划分为轻微脆弱、中度脆弱、重度脆弱以及系统崩溃 4 级。需要提出的是,指标体系中各个指标脆弱性等级划分均是以系统的生态基准(ecological baseline)作为比较基础的。所谓生态基准类似于环境科学中的“环境本底”,是指在自然生态系统在适宜环境条件的原始状态和特征值。本研究中,生态基准的确定有两种途径,一是根据生态系统关键成分的生理生态幅度,计算其基础生态位,并以生态系统的基础生态位作为生态基准;二是取某类生态系统目前在地球表层各个区域的平均特征值作为生态基准。

表 1 自然生态系统脆弱性评价指标体系

Table 1 indices for assessing the fragility of natural ecosystem

总指数 Total index	指标集 Indictor set	指标及其分级				
		指标 Indicator	轻微脆弱 Slight fragility	中度脆弱 Medium fragility	重度脆弱 Severe fragility	系统崩溃 Ecosystem collapse
生态系统脆弱性 Fragility of ecosystem	系统结构指标集 Structural Indictor set	物种多样性 Species biodiversity	-40%	-60%	-80%	-100%
		群落盖度 Community coverage	-40%	-60%	-80%	-100%
	系统功能指标集 Functional Indictor set	NPP	-40%	-60%	-80%	-100%
		建群种年生长量 Annual growth of dominant species	-40%	-60%	-80%	-100%
	生境状况指标集 Habitat Indictor set	地表干燥度 Surface aridity	+50%	+100%	+150%	+200%
		土壤碳密度 Soil carbon density	-25%	-50%	-75%	-90%

表中所有百分比数值均是与生态基准值比较,+表示增加,-表示减少 Percents in table are compare with ecological baseline,“+” denotes increase and“-” denotes decrease

2.2.2 脆弱性评价指标选择依据 生产力是生态系统结构与功能的重要指标,也是衡量生态系统脆弱性的主要依据之一。H. T. Odum 根据全球生态系统的第一性生产力的平均状况,划定了几个阈限段。当绿色生产者受到外力作用发生逆向演替时,第一性生产力将不断降低,其降低的幅度在 3650~7300g/(m²·a),而 R 点的阈值是 3650 g/(m²·a),当低于这个数值时,由最高等级的自然生态系统退化为较高生态系统。较高自然生态系统中的第一性生产力如果受到干扰也发生退化时,其第一性生产力的幅度由 3650 g/(m²·a)降低到 1095g/(m²·a),而 R 点的阈值是 1095 g/(m²·a),这时自然生态系统已基本由森林生态系统退化为灌草生态系统。紧接着,再进行逆向演替,自然生态系统由灌草向荒漠或半荒漠演替,第一性生产力也由 1095

$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 降到 $182.5\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, R 点的阈值是 $182.5\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。当生态系统演替为沙漠时, R 的值为 $36.5\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 比最高等级的生态系统的阈值低了 100 倍。上述森林、灌丛、草地、荒漠和沙漠的 R 值, 可以作为本次生态系统阈值研究的参考依据。国内有一些生态系统退化与生产力关系的研究成果, 如李绍良等^[8]建立了土地退化与草地生态系统之间的关系, 发现对应于草地退化极轻、轻、中度和重度 4 个等级的群落生物量分别为 $142.53\text{g}/\text{m}^2$ 、 $55.79\text{g}/\text{m}^2$ 、 $63.30\text{g}/\text{m}^2$ 和 $13.20\text{g}/\text{m}^2$ 。

物种多样性对于生态系统稳定性的影响效应目前虽有些争议, 但多数学者倾向于认为物种多样性越高, 生态系统的稳定性越大, 脆弱性就愈低; 群落盖度是衡量生态系统结构与功能的重要指标。群落覆盖度的高低不仅直接影响到群落内外的自然环境, 而且对于群落的垂直结构、种的资源竞争等有重要作用; 优势种的年生长量反映了生态系统的活力, 年生长量大说明环境条件适宜, 同时也反映优势种是由中低龄种构成, 抵御外界扰动的能力强; 在生境状况指标集中, 地表干燥度是反映生态系统生境中水热状况的一个综合指标, 而土壤碳密度则在一定程度上表征了土壤肥力状况。

3 生态系统脆弱性评价的人工神经网络模型

3.1 人工神经网络评价模型的构建

对于一个生态系统脆弱性进行评价, 同时要考虑许多因素, 许多分指标。这些分指标之间互相联系, 相互影响, 构成了综合评价指标体系。对多指标综合评估方法的研究, 近年来取得了一定进展, 除了上面提到的方法外, 诸如模糊综合评判等技术应用较多。但是如何在评价过程中, 对具有不同量纲, 代表不同类型和物理含义的分指标将其归一化到某一区间而又最大程度地反映被评估对象的真实状况; 如何确定综合评估指标中各指标的权数又尽可能排除人为的因素的影响, 这些问题尚有待进一步探讨。本文提出一种基于人工神经网络的综合评估方法, 试图在上述两方面做一些改进工作。

(1) 选择合适的网络类型 本研究采用 StatSoft 公司 (StatSoft Inc., 1998~2000) 的带有智能求解器的 ANN 软件 (STATISTICA Neural Network 4.0), 备选的网络类型有多层感知器、改进的 BP、径向基函数网络 (RBF) 以及自组织特征映射网络 (SOFM) 等。将原始数据输入软件后由智能求解器确定适当的网络类型和网络结构。

(2) 准备网络训练数据 本研究属于 ANN 的评价型工作, 根据评价型工作的特点, 网络训练数据通常由各种研究对象的评价标准构成, 如水质和大气质量国家或地方标准等。由于区域生态系统响应气候变化研究时间较短, 且响应的机理、表现形式以及区域差异明显, 故没有一个通用的评价标准。因此, 本研究以表 1 为基础, 结合评价区域的实际情况构建人工神经网络的训练数据集 (表 2)。

为了增大训练样本量, 对训练数据采取了线性内插。为了增大网络的适应性, 对部分训练样本人工添加噪声。

(3) 网络测试和检验 在网络训练完成后, 需要对其进行测试和检验, 以确定其性能和误差。

(4) 用训练好的网络离线进行评价。

表 2 人工神经网络生态系统脆弱性评价标准 (以温带落叶阔叶林为例)

Table 2 Criteria for assessing the fragility of ecosystems by ANN

脆弱等级 Fragility rank	NPP ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)	优势种年生长量 Annual growth of dominant species (cm/a)	物种多样性 Species richness	群落盖度 Coverage (%)	地表干燥度 Surface Aridity	土壤碳 Soil C (kg/m^2)
生态基准 Ecological baseline	1000	40	30	80	0.8	12.0
轻微脆弱 Slight fragility	600	24	18	50	1.2	9.0
中度脆弱 Medium fragility	400	16	12	30	1.6	6.0
重度脆弱 Severe fragility	200	8	6	20	2.0	3.0
系统崩溃 Ecosystem collapse	0	0	0	0	2.4	1.2

各等级值均按表 1 的标准制定, 部分作了取整处理 Rank values of all indices are developed by the standard in table 1, and some have a rounding procedure

下面对各主要指标的分级依据作一简要说明。

本研究中, 温带落叶阔叶林生态系统 NPP 的生态基准值定为 $1000\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 是基于以下两方面考虑: ①中国 49 个样点的温带落叶阔叶林的 NPP 平均值为 $1002\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ^①; ②世界温带落叶阔叶林的 NPP 的平均值也为近似为 $1000\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。土壤有机碳的生态基准是根据世界温带森林的平均值制定的, 而重度脆弱的标准大致相当于荒漠生态系统的土壤碳密度值^[9]。计算地表干燥度的公式较多, 按照彭曼公式给予的干燥度, 一般以 1.0 作为湿润与干旱的分界线^[10], 结合燕山地区温带落叶阔叶林的自然生境状况, 本文以 0.8 作为生态基准值。

3.2 生态脆弱性评价的 ANN 模型

① 罗天祥, 中国科学院博士论文, 1996 年

3.2.1 网络结构及其训练与检验 根据研究对象特点和智能求解器的搜索结果,本研究采用多层感知器(Multi-layer Perceptron,MLP)网络类型,其网络拓扑结构为 $6 \times 6 \times 1$ (图 2)。图中 MLP 网络的左端输入层为 6 个神经元,分别对应于 NPP 总量、建群种年生长量、物种多样性、群落盖度、地表干燥度以及土壤有机碳 6 个因子,网络有一个隐层包含有 6 个神经元,输出层为一个神经元,是生态脆弱性指数,取值范围在 0~4 之间。生态脆弱性指数以 0 代表生态基准,1 代表轻微脆弱,2 代表中度脆弱,3 代表重度脆弱,4 代表系统崩溃。输出指数为非负整数,表示生态脆弱居于两个等级之间,假如指数为 1.5,则说明生态脆弱性等级在轻微脆弱和中度脆弱之间,其它依此类推。

在构建人工神经网络后,将表 4 中的数据进行内插后,对其训练和检验。

3.2.2 生态系统脆弱性的 ANN 评价——以温带落叶阔叶林为例 作为案例研究,选择位于燕山山地的雾灵山国家级自然保护区的山地栎类桦杨林生态系统作为研究对象。需要说明的是,除了 NPP、优势种年生长量、土壤碳和干燥度外,输入层的群落覆盖度和物种多样性没有长时间序列,仅有 1988 和 1996 年的两期调查数据。本项研究力图对生态系统的动态进行刻画,因而对这两期数据进行了线性内插。NPP 数据用曹明奎模型计算获得。优势种年生长量按照蒙古栎、辽东栎、栓皮栎、白桦和山杨的气温-降水生长曲线,做每年推定。地表干燥度采用年潜在蒸散和年降水量的比值,其中潜在蒸散量用修正的彭曼公式计算。土壤碳密度值采用文献^[11]提供的方法计算获得。

利用上述经过训练、检验的网络进行生态系统脆弱性的判定,结果列在表 3。从表 3 可以看出,1961 年到 2000 年评价区域的温带落叶阔叶林生态系统脆弱性指数的变化范围在 0.64~1.80 之间,平均值为 1.117,基本属于轻微脆弱到中度脆弱,表 4 是对评价结果的统计分析。所选评价地点为河北省燕山山地的雾灵山国家级自然保护区,生态系统为山地栎类桦杨林,人类扰动较轻,评价结果基本上反映了生态系统的脆弱性特征。从影响脆弱性的因素分析,地表干燥度与脆弱性的相关性最好,其相关系数达到 0.985,其次是优势种的年生长量,相关系数为-0.979,土壤碳密度和 NPP 与脆弱性指数的相关系数分别为-0.629 和-0.577($p < 0.05$)。

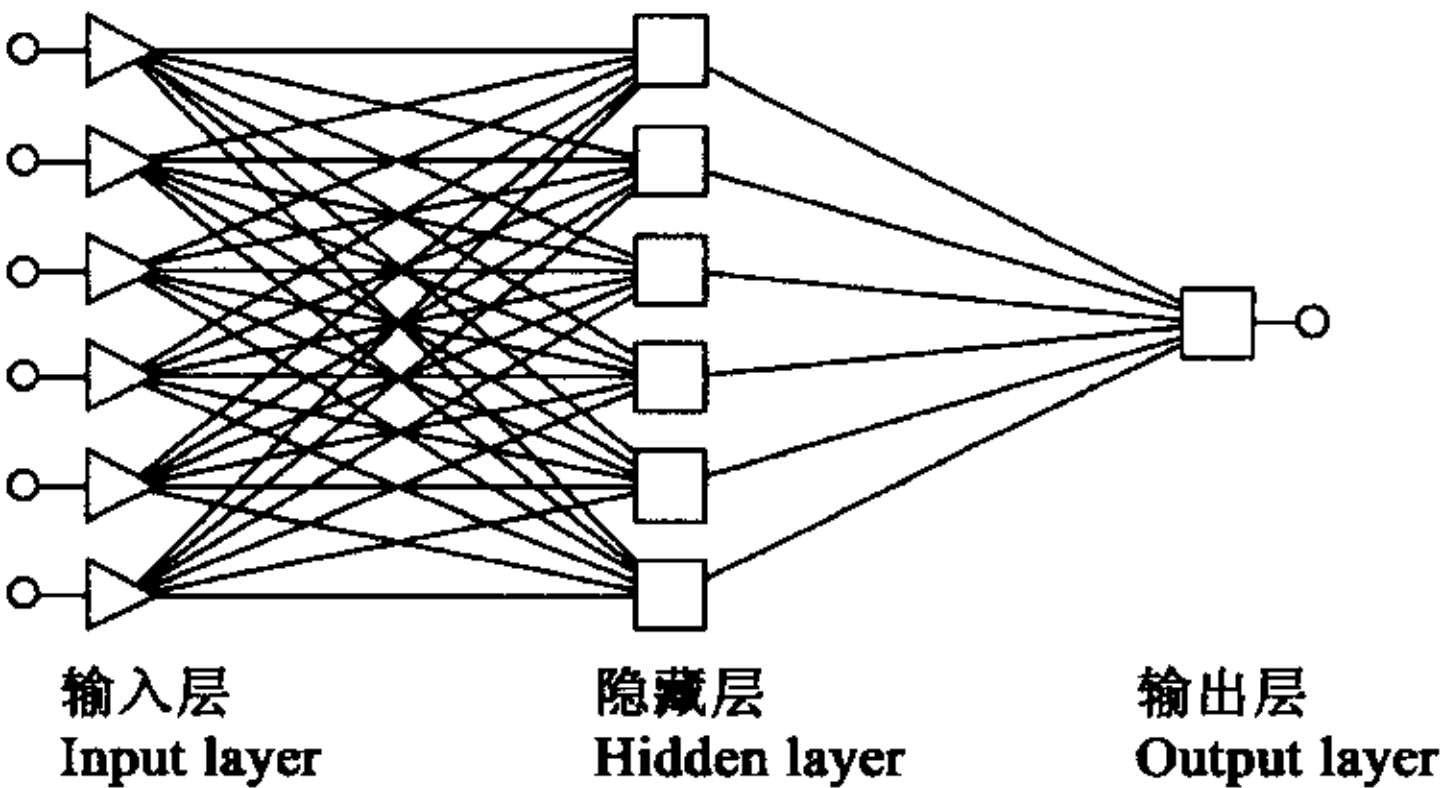


图 2 生态系统脆弱性评价的 ANN 结构示意图
Fig. 2 ANN structure for assessing the fragility of ecosystems

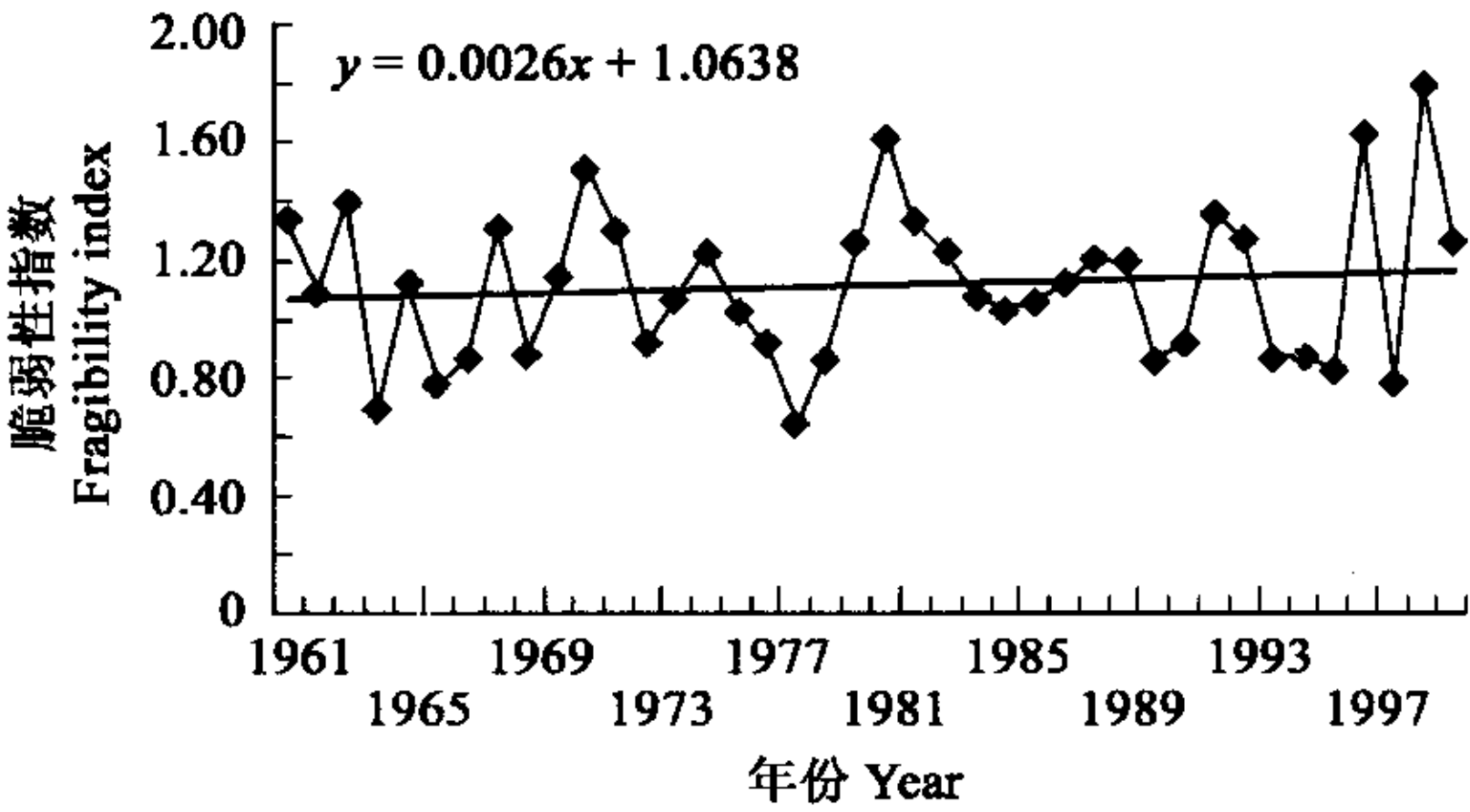


图 3 研究案例区生态系统脆弱性变化趋势
Fig. 3 The change process of ecosystem fragility in study area

表 3 1961~2000 年温带落叶阔叶林生态系统脆弱性评价结果

Table 3 The fragility of temperate deciduous broad-leaved forest ecosystems from 1961~2000							
年份 Year	脆弱性指数 Fragility index	年份 Year	脆弱性指数 Fragility index	年份 Year	脆弱性指数 Fragility index	年份 Year	脆弱性指数 Fragility index
1961	1.33	1971	1.51	1981	1.62	1991	0.92
1962	1.09	1972	1.31	1982	1.32	1992	1.36
1963	1.40	1973	0.91	1983	1.23	1993	1.27
1964	0.68	1974	1.08	1984	1.08	1994	0.87
1965	1.13	1975	1.23	1985	1.04	1995	0.88
1966	0.78	1976	1.03	1986	1.06	1996	0.84
1967	0.86	1977	0.91	1987	1.11	1997	1.63
1968	1.30	1978	0.64	1988	1.21	1998	0.78
1969	0.87	1979	0.86	1989	1.20	1999	1.80
1970	1.15	1980	1.27	1990	0.86	2000	1.27

图 3 展示了评价区域生态系统脆弱性变化的动态趋势。从 40a 变化曲线看,尽管脆弱性指数围绕 1.0(轻微脆弱)波动,但总的趋势是脆弱性稍微有些增加,其指数倾向率为 0.003/40a。为了揭示更加细微的时间变化格局,分别统计了 1961~1970、1971~1980、1981~1990 和 1991~2000 年 4 个时段的脆弱性指数变化趋势,其 10a 的变化趋向率分别为-0.021、-0.045、-0.047 以及 0.037。从分时段脆弱性指数变化趋势看,前 3 个时段(1961~1990 年)内,生态系统脆弱性指数是降低的,而只有 1991~

2000 年脆弱性指数是增加的。这反映了近期该区域生态系统脆弱性有增加的趋势。

表 4 脆弱性评价结果统计分析

Table 4 Statistic analysis on assessment results of the fragility

平均值 Mean	置信度 Confidence		最小值 Minimum	最大值 Maximum	方差 Variance	标准差 Std. Dev.	斜度 Skewness	峰度 Kurtosis
	(-95%)	(+95%)						
1.117	1.032	1.203	0.640	1.800	0.072	0.267	0.440	-0.079

4 小结与讨论

- (1)在分析生态系统脆弱性评价工作进展的基础上,本文提出了分别针对森林和草地生态系统而构建的评价气候变化下生态系统脆弱性的指标体系。具体指标包括物种多样性、群落盖度、NPP、优势种年生长量、地表干燥度和土壤碳密度等,涵盖了生态系统的结构、功能和生境三大方面。评价系统将生态系统的脆弱性划分为轻微脆弱、中度脆弱、重度脆弱以及系统崩溃四级。
- (2)根据生态基准和评价指标体系的分级标准,制定了温带落叶阔叶林的生态系统脆弱性评价标准。经过神经网络的智能求解器判定,本研究构建了 6×6×1 的多层感知器网络,用于案例区生态系统脆弱性的动态评价。
- (3)通过 ANN 模型评价结果可以看出,研究区域的温带落叶阔叶林生态系统在 1961~2000 年这个时段内,脆弱性指数在 0.64~1.80 之间,如果按照脆弱性等级划分,基本在轻度脆弱到中度脆弱之间。
- (4)从脆弱性变化的趋势看,在 1961~2000 时段内,脆弱性指数有轻微升高,而 40a 中的前 30a,脆弱性指数呈现波动下降态势,只有近 10a 才呈现振荡上升趋势。
- (5)本研究初步将人工神经网络应用到生态系统脆弱性评价。研究结果表明,这一途径是有效可行的,它具有定权客观、量纲无需统一等优点。
- (6)当然这一模型途径也存在许多问题。同其它方法一样,选取的指标面临着无数据支撑的困难。评价指标的选取以及各等级阈值的确定还应斟酌。研究所用的建群种生长量主要由气候因子决定,今后应当考虑土壤、地形等其它要素的影响等。
- (7)网络的类型、结构和性能等有待优化。对于同一求解问题,不同的网络类型和结构,计算结果稍有差异。因而,探索性能更加良好的网络模型是工作改进目标之一。

References:

[1] Haskell B D, et al. What is ecosystem health and why should we worry about it? In: Costanza R, Norton B G, Haskell B D, eds. *Ecosystem health: new goals for environment management*. Washington D C: Island Press, 1992. 1~18.

[2] Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem health. In: Costanza R, Norton B G, Haskell B D, eds. *Ecosystem health: new goals for environment management*. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management. Washington: Island Press, 1992. 239~256.

[3] Rapport D J, et al. Ecosystem Behaviour Under Stress. *American Naturalist*, 1985, **125**: 617~640.

[4] Rapport D J, Costanza R, Mcmichael. Assessing ecosystem health. *Tree*, 1998, **13**(10): 397~402.

[5] Rapport D J, Bohm G, Buckingham D, et al. Reply to Calow: Critics of ecosystem health misrepresented. *Ecosystem Health*, 2000, **6**(1): 5~6.

[6] Cairns J P, et al. A proposed framework for developing indicators of ecosystem health. *Hydrobiologia*, 1993, **263**: 1~44.

[7] Rice J. Environmental health indicators. *Ocean & Coastal Management*, 2003, **46**: 235~259.

[8] Li S L, Chen Y J, Guan S Y, et al. Relationships between soil degradation and rangeland degradation. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2002, **16**(1): 92~95.

[9] Yang X, Wang M X. A Simple Model in Calculating Average Soil Respiration Rate and Soil Carbon Density. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2001, **18**(1): 90~96.

[10] Zhang X S. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification (1) An introduction of main methods and PEP program. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 1989, **13**(1): 1~9.

[11] Yang X, Wang M X, Huang Y. Modeling Study of Terrestrial Carbon Flux Response to Climate Change I. Past Century. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(2): 270~277.

参考文献:

[8] 李绍良,陈有君,关世英,等. 土壤退化与草地退化关系的研究. 干旱区资源与环境, 2002, **16**(1): 92~95.

[9] 杨昕,王明星. 一个计算平均土壤呼吸速率和土壤碳密度的简单模型. 中国科学院研究生院学报, 2001, **18**(1): 90~96.

[10] 张新时. 植被的 PE(可能蒸散)指标与植被-气候分类 (1)几种主要方法与 PEP 程序介绍. 植物生态学与地植物学报, 1989, **13**(1): 1~9.

[11] 杨昕,王明星,黄耀. 地-气间碳通量气候响应的模拟 I. 近百年来的气候变化. 生态学报, 2002, **22**(2): 270~277.