

生态服务功能的动态货币化评价 ——以南水北调后的湖北省襄樊市为例

周敬宣, 陈云峰, 肖 杰, 李艳萍

(华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 生态环境是和社会经济紧密联系、相互影响的复杂大系统, 且其内部各因子之间存在大量的未知关系, 神经网络为未知复杂系统的建模提供了一条全新的思路。运用 BP 网络, 就南水北调对湖北省襄樊市生态服务功能价值的影响进行了动态研究。研究显示, 在调走约 1/3 汉江水量后, 襄樊的生态环境将受到严重的破坏, 其后果是当地社会经济的可持续发展能力将受到损害和抑制。在分析案例的基础上, 论证了神经网络在生态建模中的适用性, 探讨了生态服务功能价值动态评价的技术趋势, 并进一步提出了生态系统建模的新思路。

关键词: 生态服务功能价值; 神经网络; BP 网络; 生态建模; 南水北调

Dynamic assessment of ecosystem service value: a case study of Xiangfan, Hubei Province after the project of south to north water transfer project in China

ZHOU Jing-Xuan, CHEN Yun-Feng, XIAO Jie, LI Yan-Ping (Environmental Science & Engineering College, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 743~749.

Abstract: The services of ecological environment are critical to socio-economy by underpinning human welfare. Currently, how to dynamically predict ecosystem service value (ESV) is a multidisciplinary sharp-edge issue in the research field of sustainable development. Artificial neural networks (ANNs) has been proved to perform better than many classical modeling methods in an increasing number of applications in ecological modeling. However, too few applications have been reported in ecological economics. In this paper, by a case study of dynamic assessing ESV of Xiangfan, Hubei Province after south to north water transfer project in China, a BP network was built to simulate ESV loss of that district brought by the huge man-made project. Since the excellent nonlinear approximation ability of a BP network is based on properly determining the topology and structural parameters, learning efficient training sets with good typical characters and searching the global minimum solutions, the authors adopted some methods in this paper to avoid "multimodal", "overfitting" and "overlearn" which always occur in BP modeling process. As ecological environment is closely connected with and interacts with socio-economy, they should be looked at as a whole. In order to grasp the inherent essential relationship between them, the authors put both ecological environmental factors and socio-economic factors together to set up a 3-layer BP network in this paper. Historical data of ecological environmental factors and socio-economic factors were used as inputs and corresponding historical data of ESV and GDP (gross domestic product) as target outputs to train the network. The network was concluded to have been trained when the test errors were controlled within 1.4% after iteratively calculating outputs and adjusting weights and biases. So it could be used for generalization. Then predicted data of ecological environmental factors and socio-economic factors after 2001 were presented to the trained network as generalization sets, ESVs and GDPs of 2002, 2003, 2004. till 2050 were simulated as output in succession. According to simulation results, up to 2050, the district would have suffered an accumulative total ESV loss of RMB104.9 billion, which accounts for 37.36% of the present ESV. While coinstantaneous GDPs would change

基金项目: 湖北襄樊市政府资助

收稿日期: 2003-03-09; **修订日期:** 2003-09-18

作者简介: 周敬宣(1950~), 男, 教授, 从事环境工程、环境规划与管理。E-mail: zjxlypyj@public.wh.hb.cn

Foundation item: Financially Supported by the Xiangfan Municipal Government Hubei Province of China

Received date: 2003-03-09; **Accepted date:** 2003-09-18

Biography: ZHOU Jing-Xuan, Professor, mainly engaged in environmental engineering, enviromental planning and management.

asynchronously with ESVs, they would go through an up-to-down process and finally lose RMB89.3 billion, which accounts for 18.71% of 2001. The simulation indicated that ESV loss means damage to the capability of socio-economic sustainable development. To avoid loss of socio-economy, the authors put forward a series of countermeasures and retrieving plan to uphold the regional ecosystem service. On the base of case study, the authors also dealt with the applicability of ANNs in ecosystem modelling. Although a good few other published studies' results showed ANNs perform better than other modeling methods, many of them were just restricted within simple narrating. This paper further proved that in theory. Besides, the authors pointed out it seems more harmonious with the nature to use ANNs in ecosystem modeling. In the end, the authors reached conclusions: first, this huge man-made project would weaken the ecosystem service value (ESV) of that district and hold back the development of the local economy to a large extent, which manifests it is by providing the ability of sustainable development that ecosystem serves socio-economy. Second, the authors demonstrated in theory that ANNs have perfect applicability in ecosystem modelling. Meanwhile the authors indicated impersonally that any single approach couldn't meet all the needs of a complex incomprehension system modeling. So they brought forward suggestions for ecosystem modeling: first of all, to grasp the integration and dynamic by function simulating; then, to further research the inner topology and processes of the system under the guidance of the integration and dynamic by structure simulating, finally to harmonize the simulated topology and functions of the ecosystem.

Key words: ecosystem service value; artificial neural networks; BP network; ecosystem modeling; south to north water transfer project

文章编号:1000-0933(2004)04-0743-07 中图分类号:X21 文献标识码:A

1 生态服务功能货币化的研究进展

人类社会的生存和发展离不开生态环境的支持。“Study of Critical Environment Problems”中首次使用“Ecosystem Service (生态服务功能)”一词来描述生态环境对人类社会的这种支持作用。1997 年美国生态学会组织了 Daily 负责的研究小组对生态系统的服务功能进行了系统的研究。同年 5 月美国马里兰大学的 Costanza 等人在著名的《Nature》杂志上发表了题为“The Value of the World’s Ecosystem Services and Natural Capital (《全球生态系统服务功能及自然资本之价值》)”的论文,第一次对生态服务功能进行了货币化。根据他们的研究,1994 年整个生态圈服务功能的价值量为 US \$ 16-54×10¹²,平均每年为 US \$ 33×10¹²,为当年全球国民生产总值(GNP)的 1.8 倍。论文的发表引起了环境领域的极大震动和各国政府的高度关注,文章的原则和方法被各国学者广泛采用,生态服务功能的货币化研究也由此成为环境经济学的前沿热点。Costanza 在他的论文中,也客观地承认了他们的工作只是静态地描述了生态服务功能价值的瞬时状态(snapshot),并指出今后需要加紧研究能动态地反映生态服务功能价值变化的评价方法。

自从 1991 年 Colasanti 发现神经网络和生态系统之间存在大量相似特征,并推荐在生态建模时采用这一技术以来,神经网络在环境领域得到了突飞猛进的应用。如 Cammarata 等人在噪声预测方面、Kolehmainen 等人在大气预测方面、Comrie 在环境管理方面、Edwards 等人在生物多样性方面、Seginer 等人在温室效应研究方面……新研究层出不穷。同时,这些研究的结果表明,运用神经网络进行生态建模较传统的统计方法更客观、更准确。但遗憾的是,运用神经网络来研究生态服务功能价值目前国内外尚鲜有报道。本文拟运用神经网络中发展较为成熟、应用最为广泛的 BP 网络作些尝试。

2 BP 网络原理及建模要求

2.1 BP 网络原理

BP 网络属于多层网络,若干神经元(节点)分别组成输入层、隐含层和输出层。输入信号经隐含层“向前”传向输出层,如果输出信号误差超出网络的设定精度范围,则将误差由输出层“向后”传向隐含层,逐层调整各神经元的连接权重和阈值,直至输出信号误差满足网络精度要求,见图 1。

$$a_i^1 = f(\sum_j (w_{ij}p_j + b_i^1)) = f(net_i^1)$$

式中, a_i^1 为隐含层 i 节点输出, f 为传递函数, w_{ij} 为输入 p_j 与隐含层 i 节点间的权重, p_j 为输入, b_i^1 为隐含层 i 节点的阈值。

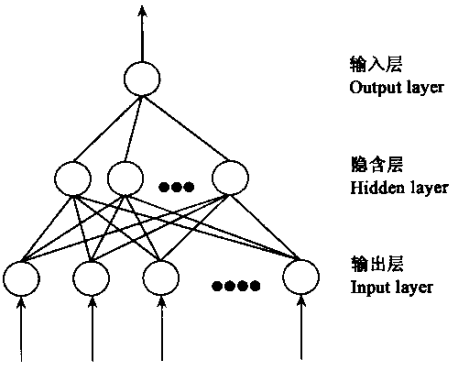


图 1 典型的 BP 网络结构
Fig. 1 Typical BP network

$$a_i^2 = f(\sum_l (w_{li}^2 a_l^1 + b_i^2)) = f(net_i^2)$$

式中, a_l^1 为输出层 l 节点输出, w_{li}^2 为隐含层 i 节点与输出层 l 节点间的权重, b_i^2 为输出层 i 节点的阈值。

如果在输出层得不到期望输出,即输出误差大于设定精度: $E = \sum_i \frac{(t_i - a_i^2)^2}{2} \geq e$, 则将误差沿原来通道反向传播,并逐级调整输出层和隐含层每个节点的连接权重和阈值:

① 输出节点

$$\delta_i = (t_i - a_i^2) f'(net_i^2)$$
$$w_{li}^2(k+1) = w_{li}^2(k) + \Delta w_{li}^2 = w_{li}^2 + \eta \delta_i a_l^1$$
$$b_i^2(k+1) = b_i^2(k) + \eta \delta_i$$

② 隐含层节点

$$\delta_i = f'(net_i^1) \sum_l \delta_l w_{li}^2$$
$$w_{lj}^1(k+1) = w_{lj}^1(k) + \Delta w_{lj}^1 = \Delta w_{lj}^1(k) + \eta' \delta_i' p_j$$
$$b_j^1(k+1) = b_j^1(k) + \eta' \delta_i'$$

通过反复调整各层每个神经元的连接权重和阈值,最终使网络输出与目标输出之间的误差小于设定精度,即

$$E = \sum_i e_i < e$$

2.2 BP 网络运用于生态建模的适用性

生态系统是由多因子、多单元广泛连接而成的复杂系统,作为一个有机统一的整体,其中任何因子或单元的变化都会引起其他因子或单元的联动,并在全局自适应地寻找到新的平衡点。正如 Jørgensen 在 1992 年所指出的,生态系统是不可拆分的,它最基本的特征是它的整体性和动态性。在进行生态服务功能的货币化评价时,应当体现和反映生态环境的这种系统特征。同时,在环境问题日益突显的今天,人们对生态系统的认识还刚刚起步,其内部大量的底层关系和动态机理目前尚鲜为人知。如何展开对这样一个未知复杂系统的研究,即生态建模,是进行生态服务功能价值动态评价的技术关键。

神经网络技术是 80 年代复苏的新兴系统建模技术,从理论上讲,BP 网络的非线性模拟技术可以以任意精度实现函数逼近。此外从上述的网络原理中可以发现,作为功能模拟技术,BP 网络有别于传统的结构模拟方法,强调输入与输出之间的拟合,避免了构模者纠缠于系统的结构和过程之中,这就为类似生态系统这样大量内部结构和机理尚出于人们认识之外的未知系统的建模提供了一种有效的解决方案。

2.3 BP 网络的建模要求

BP 网络高精度非线性函数逼近能力的实现有赖于正确地构建网络拓扑结构、合理地选择输入和输出参数、有效地选用有代表性的训练数据、以及采用适当的算法以保证网络能收敛到全局最小点等等,在网络设计过程中,尤其要杜绝经常出现的“多模式”、“过拟合”和“过学习”现象。

(1)多模式现象 神经网络的首要目的是保证网络泛化能力,即通过归纳已知样本的内在规律来推广到未知情况的预测。导致网络泛化能力下降的多模式现象的根本原因是训练样本太少或代表性差。BP 网络需要通过对大量样本的反复训练来逐步掌握输入、输出各因子间的内在规律,如果训练样本量太少或代表性差,网络就不能明确这种内在规律,出现对同一训练样本和同一网络结构而得到不同的连接权重和阈值的情况,即多模式现象。这实际上是系统误差出现了多个全局最小点,从而导致网络泛化能力的下降,甚至失去泛化能力。为避免出现多模式现象,要给网络提供尽可能多的训练样本量,至少要多于网络权重数,最好达到 3~5 倍以上(参照回归统计方法)。

(2)过拟合现象 “过拟合”的直接原因是网络结构过于庞大。过拟合的网络虽然在收敛速度和网络精度上有所提高,但会造成学习过程偏离样本内在规律,从而导致网络泛化能力的下降。为避免出现过拟合现象,应尽量精简网络结构。尤其是输入样本,对于相关性较大的向量组要尽可能地筛减。

(3)过学习现象 防止“过学习”的根本途径是设置监控样本,监督网络的训练过程,使学习在网络误差出现增大的趋势时结束,这也是避免出现过拟合现象的有效方法。

3 南水北调后襄樊市生态服务功能价值的动态模拟

3.1 工程概况

南水北调中线工程以长江支流汉江上的丹江口水库为起点,终点北京,建成后将有效地缓解北方地区的缺水状况。襄樊市位于湖北省西北部(东经 110°45'~113°05';北纬 31°14'~32°37'),地处汉江中游中线工程出水区。汉江在襄樊境内的流域面积达到 16893km²,占襄樊市总面积的 85.6%。中线工程计划每年从汉江调水 95~145 亿 m³(约占汉江水量的 1/3),势必给襄樊市的生态环境带来数据的振荡,进而对该地区的社会经济产生一定的影响。下面采用 BP 网络,对南水北调后襄樊生态服务功能的变化趋势进行预测。

3.2 预测模型

鉴于生态环境是和社会经济相互影响、密不可分的统一整体,两者内的各种因子交错影响、互为因果。因此在建模时,为了从整体上把握生态环境和社会经济(GDP)之间的本质联系,把二者放在一个 BP 网络中建模。

BP 网络对襄樊生态服务功能损失进行的是功能模拟,即把襄樊生态环境影响因子簇和社会经济影响因子簇的多年历史数据作为输入,同时把对应的生态服务功能价值和 GDP 的历史数据作为输出提供给网络,对它进行训练,反复比较网络输出与实际历史数据的误差,使网络逐渐把握住输入因子(生态环境影响因子和社会经济影响因子)之间、输入因子和输出因子(生态服务功能价值和 GDP)之间的内在本质联系。当此误差小于设定的精度时,便可认定网络已具备了泛化能力,即可用模拟数据来模拟调水后生态价值和 GDP 的变化情势,网络结构见图 2。

3.2.1 网络结构 具体的网络设计采用 MATLAB6.1 的神经网络工具箱中的 nntool 来完成。为保证网络的非线性,隐含层采用非线性传递函数 logsig 函数;输出层采用线性函数 purlin;目标误差 e 设定为 0.5;为保证网络快速收敛,采用 Levenberg-Marquardt 学习规则:

(1) 输出层 2 个神经元,包括生态服务功能价值、GDP。

(2) 隐含层 经过反复比较各种隐含节点数的网络收敛情况,最后确定隐含层的最优神经元数为 4 个。

(3) 输入层 包括生态环境影响因子簇和社会经济影响因子簇,其中生态环境影响因子簇包括流量(m^3/s)、流速(m/s)、水位(m)、水质(COD)、地下水(因与流量线性相关,故不单列)、水生生物(因与流速、COD 相关较大,故不单列)、生态投入(包括植树造林、退耕还林、还湖、还湿等)。社会经济影响因子簇包括:渔业(因与流量相关较大,故不单列)、河滩(因与水位相关较大,故不单列)、航运(因与流量相关较大,故不单列)、农灌(因与流量相关较大,故不单列)、工业新增固定资产和农业科技投入(万元)和生态价值年递减量。

为避免出现过拟合现象,应尽量精简网络结构。尤其是输入样本,对于相关性较大的向量组要尽可能地筛选,在 MATLAB6.1 的 nntool 工具箱中提供了这样的输入向量预处理工具 Principal Component Analysis(prePCA, trapca)。本文在设计输入参数时考虑了生态环境影响因子簇和社会经济影响因子簇的 15 组向量,通过对输入向量的相关性分析,经过筛选最终只选用了其中的 7 组:即流量、流速、水位、COD、生态投入、工业新增固定资产和农业科技投入和生态价值年递减量。

3.2.2 网络样本 网络样本包括训练样本、检验样本和模拟样本。

(1) 采用上述单列因子的 1960~2001 年(1975、1985、1995、1999 年除外)的 36a 数据作为训练数据。如前所述,为避免出现多模式现象,要给网络提供尽可能多的训练样本量,至少要多于网络权重数,最好达到 3~5 倍以上(参照回归统计方法)。本文中的 BP 网络含有 7 个输入、4 个隐含层神经元和 2 个输出神经元,共计 36 个网络权重,而 1960~2001 年(1975、1985、1995、1999 年除外)的训练样本量总计 37 个,基本满足以上要求。

输入部分 ① 流量,采用襄樊监测站流量的年均数据;② 流速,采用襄樊监测站流速的年均数据;③ 水位,采用襄樊监测站水位的年均数据;④ 水质,采用襄樊监测站 COD 的年均数据;⑤ 生态投入,逐年数据;⑥ 工业新增固定资产和农业科技投入,逐年数据;⑦ 生态价值年递减量。

输出部分 ① 生态服务功能价值,采用 Costanza 的方法计算,但对其经济参数进行调整,去除其中的直接市场价值部分(因直接市场价值部分已包含在 GDP 中),见下式:

万方数据

$$V = \sum S_i \times V_i \quad V_i = \sum V_{ij}$$

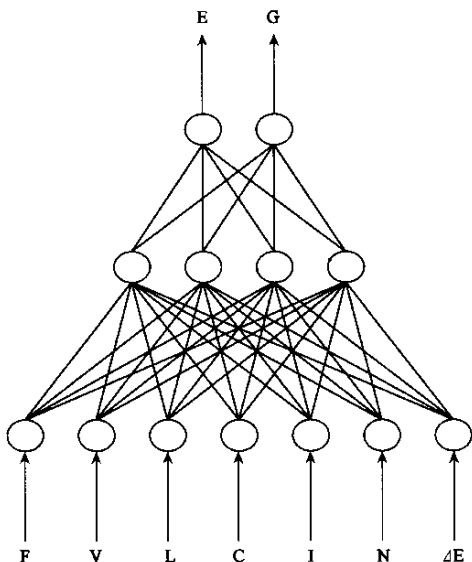


图 2 用于模拟调水后生态服务功能价值损失的 BP 网络拓扑结构

Fig. 2 Tpology of the BP network used to simulate the loss of ecosystem service value of Xiangfan after south to north water transfer project

E, 生态服务功能价值; G, GDP; F, 流量; V, 流速; L, 水位; C, COD; I, 生态投入; N, 工业新增固定资料 and 农业科技投入; ΔE , 生态服务功能价值减量

Inputs include Flow, flow Velocity, water Level, COD, ecological Investment, New investment in industry and agriculture, ΔE representing annual decrease of Ecosystem service value; Outputs include Ecosystem service value and GDP

式中, S_i 为各生态类型的面积; V_i 为各生态类型的单位面积价值量; V_{ij} 为各生态类型中包含的各种服务功能的单位面积价值量。② GDP,逐年数据。

(2) 检验样本包括训练中监控样本和训练后检验样本 ① 采用上述单列因子的 1975、1985、1995 年数据作为训练中监控样本;② 采用上述单列因子的 1999 年数据作为训练后检验样本。

(3) 模拟样本采用 ① 流量,调水后 2002 年开始预测的襄樊监测站逐年平均流量;② 流速,调水后 2002 年开始预测的襄樊监测站逐年平均流速;③ 水位,调水后 2002 年开始预测的襄樊监测站逐年平均水位;④ 水质,根据环境容量预测的调水后 2002 年开始襄樊监测站水质 COD 指标的上限值;⑤ 生态投入,为真实反映调水对生态造成的损害,2002 年之后生态投入均取 0;⑥ 工业新增固定资产和农业科技投入,保持 2001 年水平。

3.2.3 网络训练 采用训练数据对网络进行训练,设定网络训练参数: max_epoch=9000; err_goal=0.5; lr=0.05

训练结果: trainlm=8098/9000, sse=0.4999891

结果显示网络得到了快速、较好的收敛,见图 3。

3.2.4 网络检验 网络检验是验证模型有效性的重要建模步骤。采用 1999 年的数据对网络的模拟效果进行检验。将检验样本输入网络,得到的输出为:生态服务功能年度价值 282.5 亿元,而 1999 年实际的生态服务功能年度价值是 282.1 亿元,网络误差 0.4 亿元,网络精度 1.4%,说明网络已训练成功、是有效的。

3.3 预测结果

把一个时间序列的模拟样本提供给训练成功的网络即可实现对调水后襄樊生态价值变化的动态模拟:将 2002 年模拟样本输入网络,得到 2002 年的生态服务功能年度价值量。继续将 2003 年的模拟样本输入网络,得到 2003 年的生态服务功能年度价值量和 GDP。重复这个过程,即可得出 2004~2050 年时间序列的生态服务功能年度价值量和 GDP,结果见表 1。利用表 1 的计算结果,采用 3 次样条插值函数,得出调水后襄樊市生态服务功能价值和 GDP 的变化曲线(图 4,图 5)。

表 1 调水后生态服务功能价值和 GDP 的逐年计算结果

Table 1 Ecosystem service value and GDP of Xiangfan after south to north water transfer project						
年份 Year	生态服务功能价值 ($\times 10^8$ 元) Ecosystem service value ($\times 10^8$ Yuan)	生态服务功能价值 年递减量($\times 10^8$ 元) Annual decrease of ecosystem sevice value ($\times 10^8$ Yuan)	生态服务功能价值 损失总量($\times 10^8$ 元) Total loss of ecosystem service value ($\times 10^8$ Yuan)	GDP($\times 10^8$ 元) GDP($\times 10^8$ Yuan)	GDP 年递增量 ($\times 10^8$ 元) Annual increase of GDP ($\times 10^8$ Yuan)	GDP 增长总量 ($\times 10^8$ 元) Total increase of GDP ($\times 10^8$ Yuan)
2001	280.8			477.2		
2002	279.1	1.7	1.7	501.1	23.9	23.9
2003	277.4	1.7	3.4	521.1	20.0	43.9
2004	275.6	1.8	5.2	536.7	15.6	59.5
2005	273.6	2.0	7.2	550.9	14.2	73.7
2006	271.3	2.3	9.5	563.9	13.0	86.7
2007	268.4	2.9	12.4	569.5	5.6	92.3
2008	264.7	3.8	16.2	575.2	5.7	98.0
2009	260.2	4.5	20.7	578.1	2.9	100.9
2030	198.1		82.7	487.6		10.4
2050	175.9		104.9	387.9		-89.3

从图 4 中可以发现,南水北调后襄樊市生态服务功能受到明显的损害,在第 1 个 10a 中,由于生态服务功能破坏的缓释效应,生态服务功能价值的损失逐渐显现、逐步放大;在接下来的 20a 中,生态服务功能破坏的累积效应明显地表现出来,生态状况急剧恶化;最终,由于区域间生态系统的相互牵制,生态状况又趋于稳定。而图 5 则显示调水后社会经济的变化与生态服务功能并不同步。在第 1 个 10a 中,生态服务功能水平缓慢下降,相反,GDP 由于惯性继续保持增长。在接下来的 20a 中,累积的生态破坏效应释放出来,GDP 止升回落。到 2030 年以后,虽然生态服务功能逐渐趋于稳定,但因其已降至一个低水平,社会经济的可持续发展能力已受到了损害,所以 GDP 继续回落。

由此可看出,生态服务功能对社会经济起着至关重要的服务功能,这种服务功能表现为生态环境为社会经济提供可持续发展的保证。生态环境一旦遭到破坏,必定会给社会经济带来深远的负面影响。虽然有些时候社会经济会以牺牲生态环境为代价取得暂

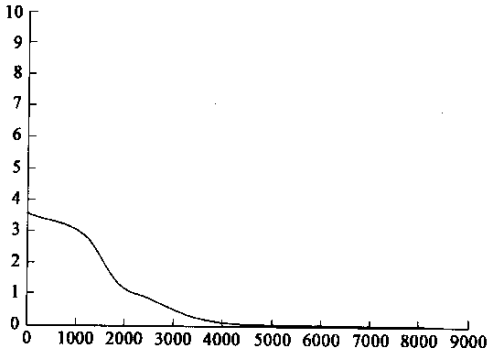


图 3 网络误差检验

Fig. 3 Error check for network training

时的繁荣,但它可持续发展的根基已被动摇,人们终究会为生态环境的恶化而付出代价。

4 建议与对策

南水北调是我国在新世纪对水资源进行优化配置的具有宏伟战略意义的大型水利工程,它将有效地缓解北方地区水资源短缺的现状,调水后国民经济将从整体上受益。应从大局出发,不能因为一些地区的环境经济受到了损害,就忽视了工程的整体效益和战略意义。要加紧研究社会经济在生态环境发生突变的情势下,如何积极地采用相应对策,缓解甚至扭转生态恶化给社会经济带来的负面影响。本研究结合襄樊市的实际情况,提出了响应的生态补偿及政策调控措施,希望通过调整当地的产业结构,增加在科技和环保方面的投入等措施来减少污染物的排放、防范调水带来的生态环境恶化,以求求得区域社会经济的可持续发展。具体包括:优先支持节水农业,鼓励生态农业,扶持农产品深加工,提供农产品附加值;企业全面推行清洁生产工艺并持续改进,坚决限期关停一批效益差、污染大的小造纸、小化工、小水泥、小酿酒等企业;充分利用该市的文化资源和旅游资源,大力发展第三产业;力争到 2005 年将三产比重调整至 22.60:39.13:38.27;倍增当前的科技和环保投入,转变经济增长方式走集约化产业发展的道路等。

5 讨论

生态系统是和社会、经济等系统紧密交织、相互作用、互为因果的复杂大系统,连接的高阶性和时空的动态性是其基本特征。此外,作为新兴的研究领域,生态系统内部的拓扑结构乃至动态机理尚鲜为人知,展现在人们面前的往往是系统的不确定性和反直观性。着手展开对此类未知复杂系统的研究,在方法论上应当遵循从整体到局部、由表及里的认识论原则。即首先应从系统的整体特征和发展趋势方面来入手,在准确地了解和把握系统的整体性和动态性之后,进而以其为指导深入系统内部,探究因子间的联系和作用,描绘系统的结构和过程,最终实现系统结构与功能的统一。

本文首次运用 BP 网络动态地进行了区域生态服务功能的货币化评价,研究展示了神经网络在生态系统建模方面的适用性,本节将从构模思想上进一步加以论证其在生态建模方面的优异潜质,同时探讨生态建模今后发展的技术趋势。

(1)神经网络模拟人脑的思维方式、采用大量神经元广泛联接而成的网络系统。它彻底摒弃了传统算法“串行”的运算和存储方式,采取“并行”分布处理,因而具备自组织、自适应、自学习、鲁棒性和容错性等独特的优良性质。作为一种“黑箱”模型,神经网络是一种功能模拟技术,它跳出了系统结构和过程的束缚,直接着眼于系统的输入和输出,为未知复杂系统建模提供了有效的解决方案。它所采用的迭代算法(如前所述)在模式识别、智能控制、生物工程、制药、信息处理等领域的优异表现,已充分证明其在实现高阶函数高精度拟合方面具有突出的优势。正是这种高精度的函数逼近能力,使网络在反复学习历史数据的基础上,逐步耦合出系统因子间的内在响应模式,最终准确地把握输入和输出间的本质必然联系。

近年来,在环境经济领域掀起了生态服务功能货币化动态建模的研究热潮,各国学者陆续提出了一些方法,尤以系统动力学、多目标规划、层次分析以及专家系统等方法为代表,然而这些方法的理论基础是否适用于解决生态系统的整体问题却受到质疑。上述方法是从不同角度,依据现在人们对生态环境在系统动力、物质能量循环以及拓扑结构等方面的认识,进而对整个生态系统展开研究,采用的是结构模拟的技术路线。生态环境是和社会经济紧密交织的复杂大系统,其间大量的因子相互作用、相互影响,通过能量流动、物质循环和信息传递构成了一个多输入、多输出系统。当剖析一个多输入、多输出系统时,从一个因子、层面或过程上“窥视”系统往往难以把握系统的整体特征,更何况生态系统中更多的因子、层面和过程目前尚在认识范围之外。其次,采用系统动力学或多目标规划模型时,系统因子间充斥着大量高阶的非线性关系,而高阶非线性方程的求解到目前为止缺乏强有力的数学理论支持,迫使系统动力学模型计算采用降阶和线性转换方法,这样就损失了许多信息,降低了求解精度。

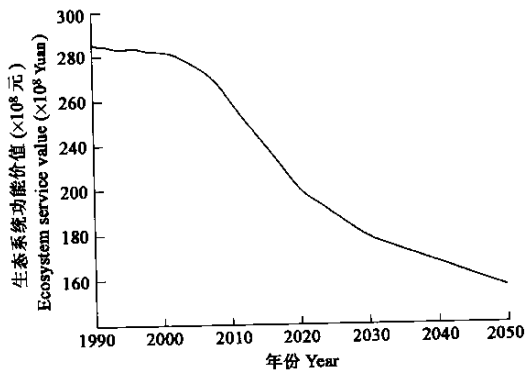


图 4 南水北调对襄樊生态服务功能的破坏趋势

Fig. 4 Trend of ecosystem service value of Xiangfan after south to north water transfer project

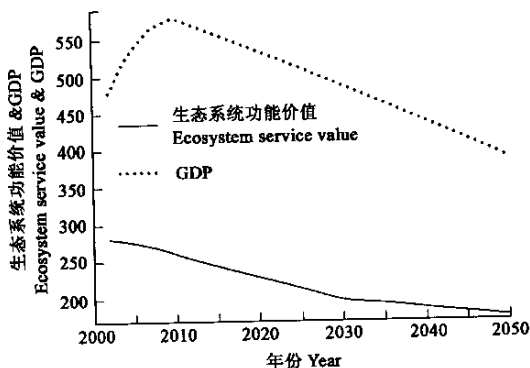


图 5 调水后生态服务功能价值和 GDP 的变化对比

Fig. 5 Contrast of ecosystem service value and GDP of Xiangfan after south to north water transfer project

层次分析模型和专家系统虽然引进了单元分层和层间单元依权重求和的方法,但权重的赋值依靠经验和专家意见,主观性过强,也不能准确的把握各环境因子之间的客观联系。

(2)更为重要的,误差指导、能量稳定、单元竞合等神经网络的基本算法思想,和生态系统的一般进化原则相协调一致。可以说,神经网络为生态服务功能价值的动态研究提供了一种生态和谐的建模方法。

(3)同时应客观指出的是,神经网络模型完成的仅仅是具有指导意义的对生态系统总体趋势的预测,不足以帮助人们全面认识一个复杂系统。对复杂系统的认识最终要实现结构和功能的统一。在掌握了系统整体性和动态性的基础上,需要以此为指导,继续深入系统内部,研究其具体的结构和过程以及相互间的耦合关系。对这样的后续工作,采用功能模拟的神经网络是不能胜任的,而系统动力学和层次分析等结构模拟方法,往往能取得较好的互补效果。

生态服务功能价值的动态建模是涉及环境、经济、社会、工程等多学科交叉的研究领域,任何一种方法都不可能胜任这样一个复杂大系统建模过程中的方方面面,这就要求把擅长功能模拟的神经网络和擅长结构模拟的系统动力学、层次分析、突变理论、非线性多目标规划等先进研究手段和分析方法加以整合,建立起分一套分步骤、互为补充、相互验证的理论方法,这也代表了生态系统建模今后的发展方向。

6 结语

本文采用神经网络的方法,对南水北调中线工程实施后湖北省襄樊市的生态服务功能价值进行了动态评价。研究结果表明,工程将对该地区的生态服务功能构成重大威胁,并将由此抑制和阻碍当地经济的持续增长,这表明生态系统服务功能的价值体现在为社会经济提供可持续发展的动力。

本文运用实际案例展示、并进一步从理论上论证了,神经网络在类似生态系统这样的复杂大系统建模工作中良好的适用性。客观地指出任何一种方法都不可能胜任一个未知复杂系统建模过程中的方方面面,并提出了生态系统建模的新思路,即首先运用功能模拟的方法来把握系统的整体性和动态性,之后进而以其为指导深入系统内部,采用结构模拟的方法来探究系统的结构和过程,最终实现系统结构与功能的统一。

References:

- [1] Cammarata G, Cavalieri S, Fichera A. A neural network architecture for noise prediction, *Neural Network Ecological Modeling*, 1995, **8**(6): 963~973.
- [2] Chen J L, Islam S, Biswas P. Nonlinear dynamics of hourly ozone concentrations: nonparametric short term prediction. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**: 1839~1848.
- [3] Colasanti R L. Discussions of the possible use of neural network algorithms in ecological modelling. *Binary*. 1991, **3**: 13~15.
- [4] Comrie A C. Comparing neural networks and regression models for ozone forecasting. *Journal of Air and Waste Management Association*, 1997, **47**: 653~663.
- [5] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **387**: 253~260.
- [6] Edwards M, Morse D R. The potential for computer-aided identification in biodiversity research. *Trends in Ecology & Evolution*, 1995, **10**: 153~158.
- [7] Franklin J. Predictive vegetation mapping: geographic modeling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Prog. Phys. Geogr.*, 1995, **19**(4): 474~499.
- [8] Gardner M W, Dorling S R. Artificial neural network modeling and prediction of hourly NO_x and NO₂ concentrations in urban air in London. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**: 709~719.
- [9] Heinrich Werner, Michael Obach. New neural network types estimating the accuracy of response for ecological modeling. *Ecological Modeling*, 2001, **146**: 289~298.
- [10] Jørgensen S E. Ecosystems emerging: towards an ecology of complex systems in a complex future. *Ecological Modelling*, 1992, **62**: 1~27.
- [11] Kolehmainen M, Martikainen H, Ruuskanen J. Neural networks and periodic components used in air quality forecasting. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**: 815~825.
- [12] Seginer I, Boulard T, Bailey B J. Neural network models of the greenhouse climate. *Journal of Agricultural Engineering & Research*, 1994, **59**: 203~216.
- [13] Schaap M G, Bouten W. Modeling water retention curves of sandy soils using neural networks. *Water Resource Research*, 1996, **32**(10): 3033~3040.
- [14] Schleiter I M, Borchardt D, Wagner R, *et al.* Bioindication of running water properties using general regression and sense neural networks combined with input relevance detection. *Ecological Modeling*, 2001, **146**.
- [15] Tan S S, Smeins F E. Predicting grassland community changes with an artificial neural network model. *Ecol. Model.*, 1996, **84**: 91~97.
- [16] van Wijk M T, Bouten W. Water and carbon fluxes above european coniferous forests modeled with artificial neural networks. *Ecological Modeling*, 1999, **120**: 181~197.
- [17] Yi J, 万万数据. A neural network model forecasting for prediction of daily maximum ozone concentration in an industrialized urban area. *Environmental Pollution*, 1996, **92**: 349~357.