

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0119

张彦,李明然,李新德. GA-NN模型在保定市水环境承载力评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 131-138.  
ZHANG Y, LI M R, LI X D. Application of GA-NN model for evaluation of water environment carrying capacity in Baoding City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 131-138. (in Chinese)

# GA-NN模型在保定市水环境承载力评价中的应用

张彦<sup>1</sup>,李明然<sup>1</sup>,李新德<sup>2</sup>

(1. 河北省保定水文水资源勘测局,河北保定 071000; 2. 河北省水利科学研究院,石家庄 050051)

**摘要:**水环境承载力评价对于区域的水环境与人类社会经济的健康可持续发展具有重要的意义。为研究保定市水环境承载力状况,应用相关性分析和主成分分析相结合的方法筛选出10个评价指标,建立了遗传算法(GA)优化BP神经网络(BP-NN)的GA-NN评价模型,并与BP-NN评价模型对比,最后应用评价模型进行评价。结果显示:2001—2016年保定市水环境承载力呈现提高趋势,虽然水环境承载力水平有所提高,但仍处于较弱承载水平。与未经优化的BP-NN相比,GA-NN评价模型的拟合精度更高,拟合误差更加稳定,泛化能力更强,可作为一种简洁有效的水环境承载力评价方法。

**关键词:**水环境承载力;相关性分析;主成分分析;遗传算法;BP神经网络

中图分类号:X82 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Application of GA-NN model for evaluation of water environment carrying capacity in Baoding City

ZHANG Yan<sup>1</sup>, LI Mingran<sup>1</sup>, LI Xinde<sup>2</sup>

(1. Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Baoding 071000, China;

2. Hebei Institute of Water Resources, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** The assessment of water environmental carrying capacity (WECC) is of great significance to the healthy and sustainable development of regional water environment and human society and economy. In order to study the WECC of Baoding City, 10 evaluation indexes were selected based on correlation analysis and principal component analysis. A GA-NN evaluation model of back-propagation neural network (BP-NN) optimized by genetic algorithm (GA) was established and compared with BP-NN evaluation model. Finally, the evaluation model was applied for assessment of WECC. The results revealed that the WECC of Baoding City showed an increasing trend from 2001 to 2016. Although the carrying capacity of water environment increased, but it was still at a weak level. Compared with the unoptimized BPNN, the GA-NN evaluation model showed higher fitting accuracy, more stable fitting error and stronger generalization ability, and it can be used as a simple and effective method for evaluating the WECC.

**Key words:** water environmental carrying capacity; correlation analysis; principal component analysis; genetic algorithm; BP neural network

随着社会经济的快速发展,水环境日益恶化,严重阻碍了人类社会和经济的可持续发展。水环境承

收稿日期:2019-02-22 修回日期:2019-05-20 网络出版时间:2019-05-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190523.1605.006.html>

基金项目:保定市科技计划项目(18ZF080)

作者简介:张彦(1979—),男,河北迁安人,高级工程师,主要从事水环境监测与评价研究工作。E-mail:jackyhero2008@163.com

载力 (water environmental carrying capacity, WECC) 评价对于区域的“自然资源—社会经济—生态环境”协调可持续发展具有重要意义, 已成为国内外区域经济社会可持续发展的研究热点<sup>[1-2]</sup>。目前 WECC 尚未形成统一概念<sup>[3]</sup>。通过总结和研究学者们关于 WECC 的定义, 本文认为 WECC 是指在特定的自然、社会和经济条件下, 区域(流域)内水环境系统在保障自我调节良好条件下, 所能承载的社会经济发展和人民生活需求的支撑度。

目前, 国内学者对 WECC 提出了多种量化研究方法, 主要的研究方法有指标体系评价法<sup>[4]</sup>、多目标模型最优化法<sup>[5]</sup>、系统动力学法<sup>[6]</sup>以及神经网络法<sup>[7]</sup>等。由于 WECC 所涵盖的水环境系统与人类社会经济关系之间呈现复杂的非线性关系, 因此本文采用具有强大非线性数据处理能力的人工神经网络方法。目前神经网络在 WECC 评价研究中应用较少, 而且评价指标的选取没有明确的方法, 主观性强, 容易造成指标代表性不强, 指标间的信息重叠, 从而影响评价结果。而本文则先依据 WECC 的影响因素分类, 再根据分类进行指标选取, 同时采用相关性分析与主成分分析相结合的方法来筛选精简评价指标, 并应用遗传算法来优化 BP-NN 评价模型, 进一步完善了应用人工神经网络对 WECC 进行评价的方法, 同时为促进保定市的社会经济活动与水环境协调发展, 以及为保定市在京津冀一体化协同发展中发挥重要作用提供参考依据。

## 1 研究方法

选取对保定市 WECC 有影响的指标作为初选指标, 再通过指标间的相关性分析简化掉同一准则层内相关系数大的指标, 从而避免指标间的信息重复。然后对剩余指标进行主成分分析, 通过降维简化掉主成分因子载荷小的指标, 用以保证简化的指标对评价结果有显著的影响, 从而确定最终评价指标。对确定的评价指标制定 WECC 分级评价标准, 采用遗传算法优化已建立的 BP-NN 模型的权值和阈值, 确定 WECC 最终评价模型。

### 1.1 评价指标体系和评价分级标准的构建

#### 1.1.1 指标初选和数据收集

WECC 的影响因素纷繁复杂, 涉及到人口与水资源、社会经济系统以及生态环境等多个方面。建立的评价指标系统应全面体现各个系统对水环境的影响。本文通过查阅相关参考文献<sup>[8-13]</sup>, 在理解 WECC 的概念和在全面分析保定市水环境状况的基础上, 建立了人口和资源、社会经济发展和生态环境 3 个准则层, 同时本着评价指标的代表性、可量化性、数据的易获取性的原则, 选取了与之对应的 14 个评价指标。保定市 WECC 初选指标集见表 1。在评价指标初选后, 通过查阅《保定经济统计年鉴》《保定市水资源公报》《河北经济年鉴》《中国城市年鉴》等相关资料来收集相应的数据。对于缺少的数据部分采用插值法进行估值。

表 1 水环境承载力初选指标集

Tab. 1 Primary selection index for water environment carrying capacity

准则层(1)	指标层(2)	指标意义及影响类型(3)	筛选结果(4)
人口和资源	人均水资源量	反映水资源短缺状况, 正向	保留
	人均用水量	反映水资源利用状况, 正向	
	水资源开发利用率	反映水资源开采控制水平, 负向	
	人口增长率	反映人口变化程度, 负向	主成分分析删除
社会经济发展	人均 GDP	反映经济发展状况, 正向	保留
	第三产业占 GDP 比重	反映产业结构分布, 正向	
	万元工业增加值用水量	反映工业领域的水资源利用效率与效益, 负向	相关性分析删除
	城镇化率	反映区域经济发展程度, 负向	
生态环境	万元 GDP 用水量	反映水资源总体生产率及用水效率, 负向	主成分分析删除
	建成区绿化覆盖率	反映城市生态建设水平, 正向	
	森林覆盖率	反映生态平衡状况, 正向	保留
	城镇废污水处理率	反映城镇生产生活对水质的影响, 正向	
	工业废水排放达标率	反映工业生产对水质的影响, 正向	
地表水功能区达标率	反映不同功能水体水质安全状况, 正向		

#### 1.1.2 基于相关性分析的指标筛选

应用 IBM SPSS Statistics 24 对准则层所对应

的数据进行相关性分析, 计算相关系数, 将相关系数绝对值大于 0.9<sup>[14]</sup> 的指标删除。各准则层内指标间

的相关性分析结果见表 2。

表 2 经济社会发展准则层内人均 GDP 与城镇化率、万元 GDP 用水量两个指标相关系数均大于 0.9,而人均 GDP 能更好的反映社会经济发展情况,因此删除与之相关的两个指标。在表 1 第 4 列用“相关性分析删除”标出。其他准则层中各指标间的相关系数均小于 0.9,因此予以保留。

### 1.1.3 基于主成分分析的指标筛选

经相关性分析筛选指标之后,利用主成分分析

对剩余指标再次筛选,同时为了能更好的解释因子,本文采用最大方差法对因子进行了旋转分析。主成分提取条件为特征值大于 1 且方差累积贡献率超过 80%。这里指标保留的原则是:各准则层内的第一主成分的因子载荷系数绝对值大于 0.8 的指标,和其他主成分的因子载荷绝对值最大的指标。

分别将各准则层中的指标对应的数据带入 SPSS 软件中进行主成分分析,各准则层主成分方差贡献率结果见表 3,主成分因子载荷系数表见表 4。

表 2 准则层内指标间的相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis between indexes in the criterion layer

准则层	相关系数					
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>		
人口和资源	人均水资源量(X <sub>1</sub> )	1.000	-0.207	0.301	-0.510	
	人均用水量(X <sub>2</sub> )	-0.207	1.000	0.737	0.078	
	水资源开发利用率(X <sub>3</sub> )	0.301	0.737	1.000	-0.026	
	人口增长率(X <sub>4</sub> )	-0.510	0.078	-0.026	1.000	
社会经济发展		X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>
	人均 GDP(X <sub>5</sub> )	1.000	0.026	-0.846	0.987	-0.914
	第三产业占 GDP 比重(X <sub>6</sub> )	0.026	1.000	0.223	-0.020	0.155
	万元工业增加值用水量(X <sub>7</sub> )	-0.846	0.223	1.000	-0.895	0.985
	城镇化率(X <sub>8</sub> )	0.987	-0.020	-0.895	1.000	-0.943
万元 GDP 用水量(X <sub>9</sub> )	-0.914	0.155	0.985	-0.943	1.000	
生态环境		X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>
	建成区绿化覆盖率(X <sub>10</sub> )	1.000	0.131	0.298	-0.089	0.224
	森林覆盖率(X <sub>11</sub> )	0.131	1.000	0.473	0.062	0.404
	城镇废污水处理率(X <sub>12</sub> )	0.298	0.473	1.000	0.277	0.138
	工业废水排放达标率(X <sub>13</sub> )	-0.089	0.062	0.277	1.000	0.008
地表水功能区达标率(X <sub>14</sub> )	0.224	0.404	0.138	0.008	1.000	

表 3 主成分方差贡献率

Tab. 3 Principal component variance contribution rate

准则层	第一主成分方差贡献率/%	第二主成分方差贡献率/%	第三主成分方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
人口和资源	43.53	39.58	—	83.11
社会经济发展	61.42	34.64	—	96.06
生态环境	29.33	25.50	23.72	78.55

### 1.1.4 评价分级标准的建立

根据指标筛选最终结果,对筛选出的指标制定 WECC 分级评价标准,确定评价分级标准的依据是:(1)优先选用国家标准或地方标准的指标;(2)有多个参考文献的,在分析参考文献的标准基础上,同时根据本地区情况确定评价分级标准;(3)在没有国家标准和相关文献分级数据可参考的情况下,寻求专家经验值。

按照上述分级依据确定指标的评价标准,并将每个指标对 WECC 的影响程度划分为 4 个等级,分为 I、II、III 和 IV。每个指标对应的各个等级的标准范围见表 5,其中 I 级表示区域水环境有很强的承

载能力,水环境和人类社会经济活动之间处于良好的协调发展状态;II 级表示区域水环境有较强承载能力,人类社会经济活动与水环境处于较协调发展状态,应加强水环境的治理力度,减轻人类社会对水环境的进一步影响,保证水环境持续健康的发展;III 级表示区域水环境承载能力较弱,水环境和人类社会经济活动不能协调发展,应进一步加大对环境的治理程度;IV 级表示区域水环境承载能力很弱,人类社会经济活动与水环境处于严重失调状态,水环境完全丧失了承载能力,生态环境破坏严重,有发生水环境危机的可能。

表 4 主成分因子载荷系数

Tab. 4 Principal component factor load coefficient

准则层	指标层	第一主成分	第二主成分	第三主成分	筛选结果
人口和资源	人均水资源量	0.059	0.902	—	保留
	人均用水量	0.937	0.211	—	保留
	水资源开发利用率	0.926	-0.202	—	保留
	人口增长率	0.050	-0.827	—	删除
社会经济发展	人均 GDP	-0.968	0.088	—	保留
	第三产业占 GDP 比重	0.047	0.997	—	保留
	万元工业增加值用水量	0.950	0.196	—	保留
生态环境	建成区绿化覆盖率	0.084	-0.083	0.939	保留
	森林覆盖率	0.805	0.271	0.126	保留
	城镇废污水处理率	0.305	0.653	0.506	删除
	工业废水排放达标率	-0.046	0.866	-0.168	保留
	地表水功能区达标率	0.847	-0.135	0.065	保留

表 5 水环境承载力评价指标分级

Tab. 5 Grading table of evaluation index for WECC

评价指标	I (强)	II (较强)	III (较弱)	IV (弱)
人均水资源量/m <sup>3</sup>	>2 000	1 700~2 000	100~1 700	<100
人均用水量/m <sup>3</sup>	>400	240~400	30~240	<30
水资源开发利用率/%	<15	15~40	40~65	>65
人均 GDP/元	>33 000	17 750~33 000	2 500~17 750	<2 500
第三产业占 GDP 比重/%	>60	40~60	20~40	<20
万元工业增加值用水量/m <sup>3</sup>	<9	9~20	20~100	>100
建成区绿化覆盖率/%	>70	15~70	5~15	<5
森林覆盖率/%	>60	16~60	5~16	<5
工业废水排放达标率/%	>95	70~95	40~70	<30
地表水功能区达标率/%	>95	70~95	30~70	<30

## 1.2 GA-NN 模型的构建

### 1.2.1 遗传算法(GA)基本原理

遗传算法是模拟自然界“自然选择和优胜劣汰”的进化机制进而形成的一种自适应搜索全局最优解的方法<sup>[15]</sup>。它把需要求解的参数表示为字符串结构编码,然后带入到适应度函数中并通过选择、交叉、变异等操作对个体进行筛选,保留适应度值优良的个体,淘汰适应度值较差的个体,就这样循环迭代,直至完成搜寻到问题的最优解。由于其高效率的算法以及强大的全局寻优能力,被广泛应用在组合优化方面<sup>[16]</sup>。

### 1.2.2 BP-NN 基本原理

BP-NN 一般由输入层、隐层和输出层组成<sup>[17]</sup>。BP 算法的学习过程分为正向运算和反向运算两个部分。在正向运算过程中,输入信息由输入层正向传到隐层,然后通过传递函数处理计算将结果传向输出层;算法根据最陡梯度下降法原理,当测试输出和期望输出存在误差,则算法将误差转入反向传递,

误差信号沿原神经元通路返回,并逐一调整各层连接权值以不断减小误差。此过程经过不断迭代,直到达到精度要求<sup>[18]</sup>。

### 1.2.3 GA-NN 模型构建

虽然 BP-NN 具有强大的自学习、自适应和非线性映射能力,但其算法收敛缓慢,并对网络初始权重敏感,极易陷入局部最小值或过拟合现象<sup>[19]</sup>,而遗传算法正好克服了以上缺点,它是从群体出发,多个个体可以一起比较,提高运算效率,同时具有全局搜索能力而不易陷入局部最优,将二者结合起来用遗传算法全局寻优的能力来优化 BP-NN 的初始值和阈值,使优化的 BP-NN 避免陷入局部最优,提高收敛速度,从而使优化后的网络更好的进行预测。具体流程图参见图 1。

本文 GA-NN 建模都在 Matlab(R2016a)软件中进行。遗传算法部分应用美国北卡罗来纳大学开发的遗传算法工具箱(GAOT)完成。

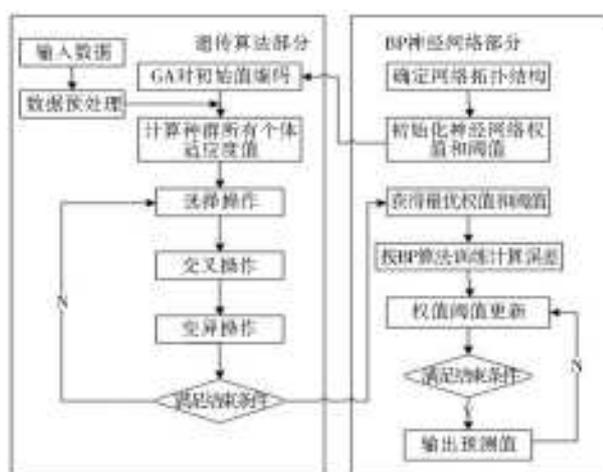


图1 GA-NN神经网络流程

Fig.1 Flow chart of GA-NN

输入、输出样本的确定。为了使模型具有良好的泛化能力,需要生成足够多实验样本,本文用  $\text{unifrnd}$  函数在评价指标相应级别之间进行随机插值,每个分级区间随机生成 200 个样本,共生成 800 个的典型的输入样本。将 WECC 的等级作为理论输出值,用 1,2,3,4 分别代表 WECC I、II、III、IV 4 个级别。另外,应用  $\text{mapminmax}$  函数将输入值和输出值归一化到  $[0,1]$ 。

BP-NN 模型构建及隐层神经元的确定。本文的 BP-NN 网络结构采用输入层、隐层、输出层的三层网络结构。根据选定的评价指标确定输入层为 10 个神经元,输出层为 1 个神经元。目前隐层神经元节点数尚无确定理论指导<sup>[20]</sup>,一般需要经验公式或试错法来确定。本文隐层神经元数通过经验公式:  $T = \sqrt{n+m} + a$  确定,式中:  $T$  为隐层神经元数;  $n$  为输入层节点数;  $m$  为输出层节点数;  $a$  为 1~10 的常数。根据公式得出隐层神经元个数为 5~14,然后应用试错法最终隐层神经元数确定为 7。输入层和隐层之间的激活函数选用 S 型正切函数  $\text{tansig}$ ,隐层和输出层之间选用  $\text{purelin}$  线性函数,训练函数选用  $\text{trainlm}$  函数。最大终止步数设置为 2000,学习速率设置为 0.01,期望误差目标值设置为  $1.0 \times 10^{-6}$ 。

遗传算法的优化设置。BP-NN 网络结构确定后需要用遗传算法对其权值和阈值进行编码,本文采用浮点编码形式。依据 BP-NN 的输入层、隐含层、输出层节点个数确定个体编码长度为 85。种群规模设定为 25,然后应用遗传算法 GAOT 工具箱中的初始化函数  $\text{initializega}$  对种群初始化。进化代数为 100,选择函数为几何规划排序选择函数  $\text{normGeomSelect}$ ,选择概率为 0.08,交叉函数为算

术交叉函数  $\text{arithXover}$ ,交叉概率为 0.95,变异函数为非统一变异函数  $\text{nonUnifMutation}$ ,其他设置均为默认值。适应度函数选用测试值与期望值间的误差平方和的倒数,个体适应度值越大,个体的适应度越高。

## 2 实例研究

### 2.1 研究区概况

保定市位于河北省中部,太行山东麓,素有“北控三关,南达九省,畿辅重地,都南屏翰”之称。保定市地处暖温带大陆性季风气候区,总面积 22 190  $\text{km}^2$ ,常住人口超千万。保定市水资源极度匮乏,人均水资源量仅为全国人均水资源量的 1/10,属极度缺水地区,随着生产生活和社会发展,地下水超采严重,已形成巨大的地下水漏斗区<sup>[21]</sup>。水资源供需矛盾日益突出,水环境污染日益严重,已成为制约保定市社会经济发展的关键因素之一。研究区域概况图见图 2。



图2 研究区域概况

Fig.2 Survey map of study area

### 2.2 结果评价分析

将训练集代入构建好的 GA-NN 模型进行训练,个体进化到 89 代得到最佳适应度值 0.010 42,遗传算法最佳个体适应度值进化过程见图 3。这时所对应的最佳染色体值作为 BP-NN 最优权值和阈值进行训练,得到误差曲线,见图 4。由图 4 可知,模型经过 14 步迭代,训练样本、验证样本和测试样本就达到设置精度以下。另外,3 种样本的误差曲线变化趋势是一致的,证明网络的泛化能力很强。图 5 为训练样本、验证样本、测试样本和全部样本的拟合值和原始值的线性回归曲线,相关系数均为 1,表明模型拟合效果非常好。

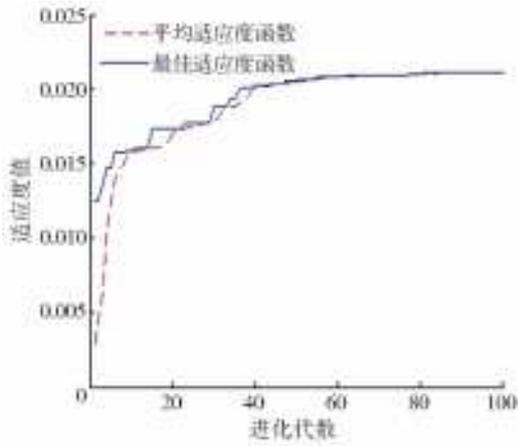


图 3 个体适应度值进化曲线

Fig. 3 Evolution curve of individual fitness value

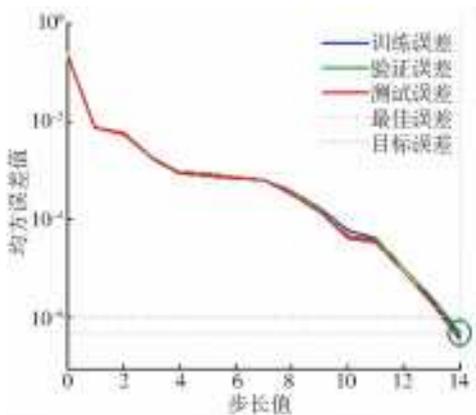


图 4 GA-NN 误差曲线

Fig. 4 Error curve of GA-NN

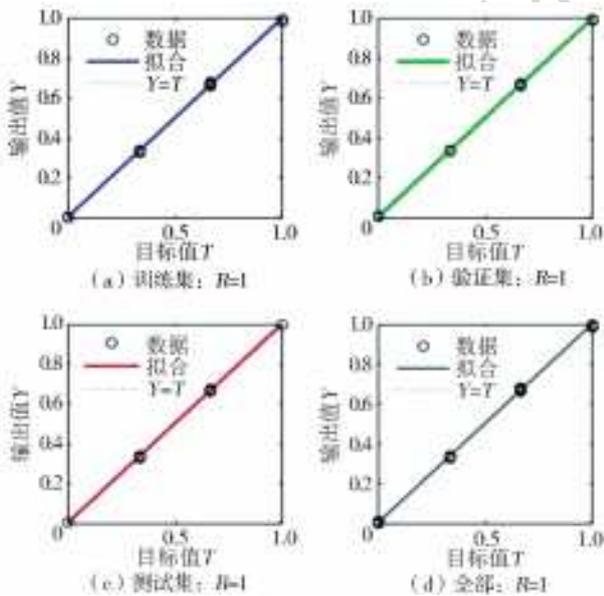


图 5 实验样本回归曲线

Fig. 5 Regression curve of experimental sample

本文分别将两种模型的训练集和测试集的平均相对误差和均方误差作为拟合精度的对比,平均相对误差衡量的是模型预测结果的可信度,均方误差衡量的是观测值与真值之间的偏离程度,结果见表

6。由表 6 可以看出,GA-NN 模型的训练集和测试集的平均相对误差和均方误差均明显小于 BP-NN,说明前者的拟合精度和预测精度均高于后者。另外,将两种模型的测试集误差曲线作到一张图上对比,对比图见图 6。由图 6 可以看出,经过遗传算法优化的 BP 神经网络评价模型的拟合精度更高,拟合误差更加稳定,可靠,泛化能力更强。

表 6 两种模型拟合精度对比分析

Tab. 6 Comparative analysis of fitting accuracy of two models

拟合精度	BP-NN		GA-NN	
	训练集	测试集	训练集	测试集
平均相对误差/%	0.050 3	0.054 7	0.013 7	0.012 1
均方误差	$1.215 1 \times 10^{-5}$	$1.169 2 \times 10^{-5}$	$1.032 1 \times 10^{-6}$	$4.228 8 \times 10^{-7}$

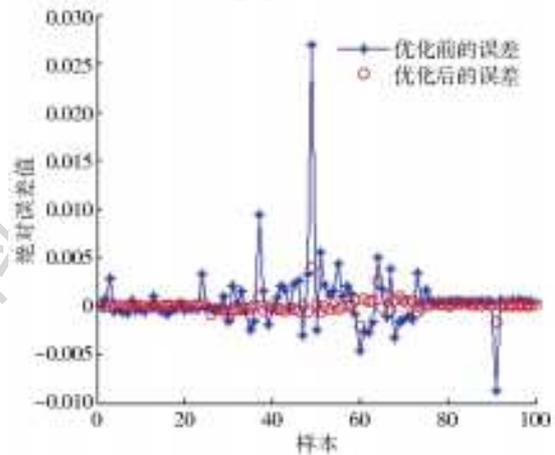


图 6 两种模型训练误差曲线比较

Fig. 6 Comparison of two model training error curves

模型训练完成后,将 2001—2016 年保定市 WECC 相应评价指标对应的数据作为输入项输入到训练好的网络模型中进行评价,评价结果见表 7。由评价结果可知,在 2007 年以前(2004 年除外),保定市 WECC 水平一直处于弱承载水平。2008 年以后保定市 WECC 有所好转,但仍一直处于较弱承载水平,水环境不能与社会经济和谐发展,仍需进一步加强水环境治理,提高用水效率,保证水环境和人类社会的可持续和谐发展。

### 3 结论

本文应用神经网络的评价方法建立了保定市 WECC 的评价模型,并对保定市 2001—2016 年 WECC 进行评价,主要结论如下。

(1)根据对 WECC 定义的理解将对 WECC 的影响因素分为 3 个准则层,即人口和资源、社会经济发展和生态环境,并初选了与之对应的 14 个评价指

标。然后应用相关性分析的放法剔除了各准则层中相关性大的指标,再对各准则层中剩余指标进行主成分分析,剔除载荷因子小的指标,最后确定选取了 10 个评价指标。并对筛选出的指标量化分级评价标准,从而建立了保定市 WECC 评价体系。

表 7 保定市水环境承载力评价结果

Tab. 7 Evaluation results of water environmental carrying capacity in Baoding

年份	输出值	评价等级	承载程度
2001	3.993 5	IV	弱承载
2002	3.993 9	IV	弱承载
2003	3.993 8	IV	弱承载
2004	2.998 2	III	较弱承载
2005	3.972 7	IV	弱承载
2006	3.994 0	IV	弱承载
2007	3.388 8	IV	弱承载
2008	2.934 7	III	较弱承载
2009	2.997 8	III	较弱承载
2010	3.005 5	III	较弱承载
2011	2.988 7	III	较弱承载
2012	2.959 9	III	较弱承载
2013	2.886 9	III	较弱承载
2014	3.000 6	III	较弱承载
2015	2.961 1	III	较弱承载
2016	2.614 2	III	较弱承载

(2)在对比分析 WECC 的各种研究方法以及其所涵盖的领域之间的复杂非线性的特性基础上,选用具有强大的非线性处理能力的 BP-NN 模型作为评价方法,并采用遗传算法来优化 BP-NN 模型,结果显示与传统 BP-NN 模型对比,GA-NN 评价模型的拟合精度更高,拟合误差更加稳定,可靠,泛化能力更强,是一种简洁高效的 WECC 的评价方法。

(3)应用建立好的 GA-NN 神经网络 WECC 评价模型对 2001—2016 年保定市 WECC 进行评价,结果表明:2001—2007 年(2004 年除外),保定市 WECC 水平一直处于弱承载水平,2008 年以后保定市 WECC 有所好转,但仍处于较弱承载水平,仍需进一步加强水环境问题的监管与治理,保证水环境和人类社会的可持续和谐发展。

#### 参考文献(References):

[1] 汪恕诚. 水环境承载能力分析 with 调控[J]. 水利发展研究, 2002, 2(1): 2-6. (WANG S C. Analysis and regulation of carrying capacity of water environment [J]. Water Resources Development Research, 2002, 2

(1): 2-6. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrdr. 2002. 01. 002.

- [2] 龙腾锐,姜文超. 水资源(环境)承载力的研究进展[J]. 水科学进展, 2003(2): 249-253. (LONG T R, JIANG W C. Advances in water resources and water environmental carrying capacity[J]. Advances in Water Science, 2003(2): 249-253. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2003. 02. 024.
- [3] 侯丽敏,岳强,王彤. 我国水环境承载力研究进展与展望[J]. 环境保护科学, 2015, 41(4): 104-108. (HOU L M, YUE Q, WANG T. Research and prospect of the theoretical framework of water environmental carrying capacity in China [J]. Environmental Protection Science, 2015, 41(4): 104-108. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-6216. 2015. 04. 021.
- [4] 董徐艳,陈豪,何开为,等. 云南省水环境承载力动态变化研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S1): 346-352. (DONG X Y, CHEN H, HE K W, et al. The dynamic changes of water environment carrying capacity of Yunnan Province [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(S1): 346-352. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-6504. 2016. S1. 069.
- [5] 高宏超,徐一剑,孔彦鸿,等. 基于多目标优化方法的钱塘江流域杭州江段水资源承载力分析[J]. 净水技术, 2015, 34(6): 18-24. (GAO H C, XU Y J, KONG Y H, et al. Analysis of carrying capacity of water resource in Hangzhou Section of Qiantang River basin based on multi-objective optimization method [J]. Water Purification Technology, 2015, 34(6): 18-24. (in Chinese)) DOI: 10. 15890/j. cnki. jsjs. 2015. 06. 004.
- [6] 曾程,梁成华,佟晓妹. 基于 SD 模型的沈阳市白塔堡河流域水环境承载力研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(2): 195-201. (ZENG C, LIANG C H, TONG X S. Control research of carrying capacity on water environment of Baita river basin in Shenyang based on SD model [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2013, 44(2): 195-201 (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1700. 2013. 02. 012.
- [7] 李娜,范海梅,许鹏,等. BP 神经网络模型在象山港水环境承载力研究中的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(1): 125-133. (LI N, FAN H M, XU P, et al. Application of BP neural network model in water environmental carrying capacity research of Xiangshan Bay [J]. Journal of Shanghai Ocean University Water Purification Technology, 2019, 28(1): 125-133 (in Chinese)) DOI: 10. 12024/jsou. 20170802116.
- [8] 曾维华,薛英岚,贾紫牧. 水环境承载力评价技术方法体系建设与实证研究[J]. 环境保护, 2017, 45(24): 17-24. (ZENG W H, XUE Y L, JIA Z M. Technical

- method system of water environment carrying capacity evaluation and empirical research[J]. Environmental Protection, 2017, 45(24): 17-24(in Chinese) DOI:10. 14026/j. cnki. 0253-9705. 2017. 24. 004.
- [9] 樊庆铎, 于森, 徐东川, 等. 大庆地区水环境承载力计算分析与评价[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(2): 66-70. (FAN Q X, YU M, XU D C, et al. Computing analysis and evaluation of water environment carrying capacity in Daqing area[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(2): 66-70(in Chinese) DOI: 10. 3321/j. issn:0367-6234. 2009. 02. 015.
- [10] 王建华, 翟正丽, 桑学锋, 等. 水资源承载力指标体系及评判准则研究[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1023-1029. (WANG J H, ZHAI Z L, SANG X F, et al. Study on index system and judgment criterion of water resources carrying capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1023-1029 (in Chinese) DOI:10. 13243/j. cnki. slxb. 20170377.
- [11] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 379-395. (FENG Z M, YANG Y Z, YAN H M, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th century: from theory to practice[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 379-395(in Chinese) DOI:10. 18402/resci. 2017. 03. 01.
- [12] 詹长根, 顾婷, 严盼. 基于灰色关联与主成分分析的环境承载力评价[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(11): 198-204. (ZHAN C G, GU T, YAN P. Evaluation of environmental carrying capacity based on grey relational analysis and matter-element evaluation model [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(11): 198-204(in Chinese) DOI:10. 3969/j. issn. 1003-6504. 2017. 11. 031.
- [13] 胡溪, 刘年磊, 蒋洪强, 等. 基于环境质量的长江经济带水环境承载力评价[J]. 环境保护, 2018, 46(21): 36-40. (HU X, LIU N L, JIANG H Q, et al. The water environmental carrying capacity assessment of Yangtze River economic zone based on environmental quality standards[J]. Environmental Protection, 2018, 46(21): 36-40(in Chinese) DOI: 10. 14026/j. cnki. 0253-9705. 2018. 21. 009.
- [14] 迟国泰, 曹婷婷, 张昆. 基于相关-主成分分析的人的全面发展评价指标体系的构建[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 32(1): 112-119. (CHI G T, CAO T T, ZHANG K. The establishment of human all-around development evaluation indicators system based on correlation-principle component analysis[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 32(1): 112-119 (in Chinese) DOI:10. 12011/1000-6788(2012)1-111.
- [15] 王小川, 史峰, 郁磊, 等. MATLAB 神经网络 43 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013. (WANG X C, SHI F, YU L, et al. Analysis of 43 cases of MATLAB neural network [M]. Beijing: BeiHang University Press, 2013(in Chinese)).
- [16] AHMADIZAR F, SOLTANIAN K, AKHLAGHIAN TAB F, et al. Artificial neural network development by means of a novel combination of grammatical evolution and genetic algorithm [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015, 39: 1-13. DOI: 10. 1016/j. engappai. 2014. 11. 003.
- [17] 陈明. MATLAB 神经网络原理与实例精解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014. (CHEN M. Principle and example of MATLAB neural network[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014(in Chinese)).
- [18] LIU X S, DENG Z, WANG T L. Real estate appraisal system based on GIS and BP neural network[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(S3): 626-630. DOI: 10. 1016/S1003-6326(12)61652-5.
- [19] WANG S X, ZHANG N, WU L, et al. Wind speed forecasting based on the hybrid ensemble empirical mode decomposition and GA-BP neural network method[J]. Renewable Energy, 2016, 94: 629-636. DOI:10. 1016/j. renene. 2016. 03. 103.
- [20] PIZZILEO B, LI K, IRWIN G W, et al. Improved structure optimization for Fuzzy-neural networks [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 20(6): 1076-1089. DOI:10. 1109/TFUZZ. 2012. 2193587.
- [21] 刘文具. 河北省保定市城市缺水成因与解决方法探讨[J]. 地下水, 2012, 34(1): 119-120. (LIU W J. Discussion on causes and solutions of water shortage in Baoding City, Hebei Province[J]. Ground Water, 2012, 34(1): 119-120 (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2012. 01. 045.