农业资源与环境学报 CSCD核心期刊 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

基于人工神经网络模型的沧州市水生态承载力评估

郑浩巍, 王焕华, 卢少勇, 贾建丽, 万正芬, 毕斌, 张森霖

引用本文:
郑浩巍, 王焕华, 卢少勇, 等. 基于人工神经网络模型的沧州市水生态承载力评估[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(6): 1679–1686.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0837

郑浩巍, 王焕华, 卢少勇, 等. 基于人工神经网络模型的沧州市水生态承载力评估[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(10): 1679-1686.
ZHENG H W, WANG H H, LU S Y, et al. Assessment of water ecological carrying capacity in Cangzhou City based on artificial neural network model[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2025, 42(10): 1679-1686.


开放科学 OSID

基于人工神经网络模型的沧州市水生态承载力评估

郑浩巍[1,2], 王焕华[1], 卢少勇[1*], 贾建丽[3], 万正芬[1], 毕斌[1], 张森霖[1]

(1.中国环境科学研究院,环境基准与风险评估国家重点实验室,湖泊污染控制国家环境保护重点实验室, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012; 2.中国黄金集团有限公司, 北京 100010; 3.中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要:水生态承载力研究可作为从水生态角度预判可持续发展中产生问题的有效手段,但水生态承载力因其指标概念不统一,且需多领域交叉,传统量化过程繁琐复杂。本研究通过构建水资源、水环境、水生态和水安全的指标体系,结合人工神经网络的结构和特点,构建水生态承载力的量化评价模型,可为水生态承载力计算提供一种科学方法,并以典型生态缺水型城市河北沧州市为例进行了验证。本研究通过对沧州市2015—2019年数据进行计算,得到逐年水生态承载力指数分别为0.26、0.23、0.23、0.24、0.22,反映出其生态承载力整体处于及格水平,可能威胁到生态环境绿色健康可持续发展。可见,指标体系和神经网络模型结合,具有结构简单、抗干扰能力强、结果更直观等优点,使区域承载状态更直观有效地呈现出来,为该区域的水生态问题解决和未来发展方向的指定提供帮助。

关键词:水生态承载力;指标体系;人工神经网络;沧州市
中图分类号:TB183;X826;X52 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-6819(2025)06-1679-08 **doi**: 10.13254/j.jare.2024.0837

Assessment of water ecological carrying capacity in Cangzhou City based on artificial neural network model

ZHENG Haowei[1,2], WANG Huanhua[1], LU Shaoyong[1*], JIA Jianli[3], WAN Zhengfen[1], BI Bin[1], ZHANG Senlin[1]

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. China National Gold Group Co., Ltd, Beijing 100010, China; 3. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology – Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The study of water ecological carrying capacity can be used as an effective approach to predict the problems arising in sustainable development from the perspective of water ecology. The traditional quantitative process of water ecological carrying capacity is complicated due to the index concept inconformity and multi-field intersection. In this study, the quantitative evaluation model of water ecological carrying capacity was established by constructing the index system of water resources, water environment, water ecology and water security, and combining the structure and characteristics of artificial neural network, which provides a scientific method for the calculation of water ecological carrying capacity. Moreover, taking Cangzhou City, a typical eco-water-deficient city, as an example, the calculations showed that from 2015 to 2019 the indexes of water ecological carrying capacity were 0.26, 0.23, 0.23, 0.24 and 0.22, respectively. It reflected that the overall ecological carrying capacity was at a loaded state, barely meeting the standard level, which may threaten the green, healthy, and sustainable development of the ecological environment. It can be seen that the combination of the index system and neural network model has the advantages of simple structure, strong anti-interference ability and more intuitive results, so that the regional carrying capacity state can be presented more intuitively and effectively, providing help for the solution of water ecological problems in this region and the designation for future development direction.

Keywords: water ecological carrying capacity; index system; artificial neural network; Cangzhou City

收稿日期:2024-10-24 **录用日期**:2024-12-23
作者简介:郑浩巍(1995—),男,硕士,工程师。E-mail:13552046384@163.com
王焕华与郑浩巍同等贡献
***通信作者**:卢少勇 E-mail:lushy2000@163.com
基金项目:沧州市水环境质量改善技术服务项目
Project supported: Project of Cangzhou with Technical Services for Improving Water Environment Quality

随着经济社会的发展，我国不少水域受到不同程度的污染[1]，沧州市地处海河流域，水资源紧缺且水体受污染较重，为贯彻党的十九大精神，推进绿色发展，生态文明成为环境承载力所涉及到的重点之一[2]。“十四五”期间，我国水生态环境管理也由水环境质量管理向水生态健康管理转变。为科学地量化流域或区域水生态系统对人类活动的承载状态，为水生态环境综合管控提供决策支持[3]，尤其对于评价对象为人类主导下的社会经济-河湖生态复合系统，计算水生态承载力是有效评价方式。

水生态承载力的发展经历了由纳污能力向水环境承载力的转变过程，起初承载力普遍定义为环境所承载的最大程度：如Rijiberman等[4]、Harris等[5]将承载力定义为安全程度的标准或发展潜力；还有学者从阈值的角度，如王西琴等[6]、郭怀成等[7]从水环境角度出发，将水承载力定义为人类对水环境压力而产生的纳污能力；张文国等[8]在纳污能力基础上丰富了缓冲弹性力的概念；随着承载力的发展，彭文启等[9]、李林子等[10]将其定义为人类社会活动提供的承载情况，重点关注于人类社会对环境的影响过程。国外的研究者将生态指标作用于承载力的计算中，van den Bergh等[11]、Wackernagel等[12]运用承载力进行区域大尺度计算，丰富了生态承载情况；Rajaram等[13]将生态承载力与生态风险评价相结合。中国环境科学学会《水生态承载力评估技术指南》[14]将水生态承载力定义为：在一定发展阶段、一定技术水平条件下，某空间范围内的水生态系统在维持自身结构功能长期稳定、水生态过程可持续运转的基础上，具有为人类社会活动提供生态服务产品的能力。水生态承载力相比于水资源承载力和水环境承载力更加强调研究水生态人类社会复杂系统间动态互馈影响关系，具有巨系统、多要素、动态互馈等特性[15]。水生态系统为涉及多领域、多方向、多指标耦合的巨系统，包含复杂的非线性关系，人工神经网络模型法[16-17]可在信息知识不完备情况下，使用处理非线性过程的处理方法与评价过程有机结合，模拟真实的区域对应的生态承载情况。BP神经网络模型，即前馈网络模型（Back-propagation network），具有良好的非线性拟合能力，抗干扰能力强，输出值较直观，适合对水生态承载力量化研究。基于目前尚无针对沧州市水生态承载力的BP神经网络模型，本研究通过构建水资源、水环境、水生态和水安全的指标体系，结合人工神经网络的结构和特点，构建水生态承载力的量化评价模型，旨在探寻科学评价水生态承载能力的新方法。

据生态环境部2019年度国家地表水考核断面水环境质量状况排名，沧州市地表水排名倒数第三位，2020年沧州市总排名虽比前几年有明显进步，但仍位于倒数第十位[18]，生态环境受人类生产生活的影响较大。已有研究普遍关注水环境承载力表征水环境与人类活动协调程度[19-21]，但对于水生态的重视明显不足[22-24]。本研究通过指标选取、模型建立以及结果评价三个步骤，总结缺水性地区沧州市的水生态承载力现状及对未来生态环境发展方向提出建议。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

沧州市地处河北省东南部、河北平原东部的黑龙港流域。汇流面积50 km^{2}以上的排沥河道共有143条；主要湖库有大浪淀水库、明泊洼水库、杨埕水库、贝壳湖、珠海、七星湖、南大港湿地等；市域内共有坑塘7 388个，总面积近17.5万亩（1亩=667 m^2）。

沧州市降水及径流年内分配极不均匀，降雨主要集中在6—9月，占全年降雨量的80%以上。径流年际变化非常大，偏丰年与枯水年的年径流量比值可达30倍。区域内旱涝灾害易发，地表水资源的调控利用难度大。且沧州市的水资源量较低，沧州市的产水模数仅为全国平均产水模数的1/3，人均水资源量低于全国人均水量的1/10，且农田亩均水资源量更仅为全国平均值的1/16。

1.2 数据来源

本研究数据来源于《中国统计年鉴》《河北省水资源公报》《沧州市统计年鉴》、沧州市水文局、沧州市统计局等。

1.3 评价指标体系构建

构建科学合理的指标体系是生态承载力量化的首要条件，其指标筛选应遵循科学性、系统性、敏感性和可量化原则。王富强等[25]、张远等[15]分别系统地推出了生态承载力推荐的指标体系。综合考虑各种指标框架的合理性和实用性，并且能够适用于沧州的主要产业和生态情况，本研究通过目标-准则-指标层级关系框架建立水生态承载力指标体系。其中，目标层为水生态承载力，基于水生态承载力内涵，准则层由4方面构成，分别用8个子项表征，内含16项指标层。水生态承载力指标体系见表1。

1.4 评价方法

本研究采用BP神经网络模型进行评价，BP神经

表1 水生态承载力指标体系

Table 1 Evaluation system of waterecological carrying capacity index

目标层 Target	准则层 Criteria		指标层 Indicator
水生态承载力	水资源A	水资源禀赋指数A1	人均水资源量A1-1
		水资源利用指数A2	水资源开发利用率A2-1
			用水总量控制红线达标率A2-2
	水环境B	水环境纳污指数B1	工业污染强度指数B1-1
			单位耕地面积化肥施用量B1-2
			单位土地面积畜禽养殖量B1-3
			城镇污染强度指数B1-4
		水环境净化指数B2	水环境质量指数B2-1
			断面优于Ⅲ类水质比例B2-2
	水生态C	水生生境指数C1	林草覆盖率C1-1
			水域面积指数C1-2
			湿地面积占总面积比例C1-3
			年生态基流满足率C1-4
		水生生物指数C2	生物完整性指数C2-1
	水安全D	调蓄安全指数D1	水文调节功能指数D1-1
		用水安全指数D2	饮用水水源地达标比率D2-1

网络由一个输入层、一个输出层和若干个隐含层构成。隐含层数不应过多，而过多的隐含层会导致网络训练时间增长，精度下降。

网络学习由四个过程组成：模式顺传播→误差逆传播→记忆训练→学习收敛，通过对网络权值与阈值的修正，使误差函数(E)沿负梯度方向下降。BP网络三层节点表示为：输入节点(x_j)，隐节点(y_j)，输出节点(O_l)；输入节点与隐节点间的网络权值为W_{ij}；隐节点与输出节点间的网络权值为T_{ij}。当输出节点的期望输出为t_l时，模型的公式计算如下：

$$\text{隐节点的输出：}y_i=f\left(\sum_j w_{ij}x_i-\theta_i\right)=f\left(net_j\right)\quad(1)$$

输出节点的计算输出：

$$O_l=f\left(\sum_i T_{li}y_i-\theta_l\right)=f\left(net_i\right)\quad(2)$$

输出节点的误差公式：

$$E=\frac{1}{2}\sum_l\left(t_l-O_l\right)^2=\frac{1}{2}\sum_l\left(t_l-f\left(\sum T_{li}y_i-\theta_l\right)\right)^2$$

$$=\frac{1}{2}\sum_l\left(t_l-f\left(\sum_i T_{li}f\left(\sum_j w_{ij}x_j-\theta_i\right)-\theta_i\right)\right)^2\quad(3)$$

BP算法由正向传播和反向传播组成[26]，在正向传播阶段，学习样本送入输入层，经隐含层逐层运算后传至输出层。如果网络得不到期望的输出结果，实际输出与期望输出存在误差，则进入误差反向传播阶段。这时误差信息沿原连接通道从输出层返回输入层，并逐层调整连接权，使误差最小。由于隐含层存在，输出层对产生误差的调整，须通过改变隐含层与输出层间的连接权实现，而隐含层要能对输出层反传过来的误差调整，调整下一层与其间的连接权。

1.5 量化标准

神经网络模型得到的计算结果是一个数字，结果数值越高，代表当前水生态环境承载力越强，数值越低表示当前的生态环境状态越危险。本研究将水生态承载力指数分为四级[16,22]，通过等级划分使当前水生态承载情况更系统地呈现，具体分级见表2。

2 结果与分析

2.1 模型的训练

通过收集合适的样本数据，并参考逐年经济发展情况，征求专家意见，确定了训练指标标准，将每个指标值分为最差值、及格值和最优值。将水资源A、水环境B、水生态C和水安全D四项指标，按最优值、及格值和最差值分类汇总，共计16项指标，沧州市水生态承载力模型训练相关数据见表3。最优值是按经济发展要求某项指标所要达到的当前最佳值；及格值是某项指标在国内或国际上公认的不发生危机的安全值；最差值是维持现有经济条件的最低值[27]。由于水生态承载能力具有动态性，各指标值随不同发展时期和区域科技水平和经济发展规律改变相应变化。

表2 水生态承载能力指数分级

Table 2 Classification of water ecological carrying capacity index

等级 Class	承载能力指数 Carrying capacity index	承载能力 Carrying capacity	承载情况 Carrying condition
Ⅰ	$d\geqslant1$	强	自然生态环境处于优良状态，生态环境不仅可满足人类经济社会发展需求，还能满足生态发展要求，同时注意水生态环境保护
Ⅱ	$0.6\leqslant d<1$	良	人类经济和自然情况处于和谐状态，应注意生态环境保护问题，如果保持相同发展趋势，或忽视工业发展对环境的影响，很可能导致生态环境受威胁
Ⅲ	$0.2\leqslant d<0.6$	及格	水承载能力已处于危险状态，人类活动对水环境造成了不同程度的破坏，威胁到生态环境绿色健康可持续发展
Ⅳ	$d<0.2$	差	水系统承载力很低，生态系统失衡严重，很可能引发水环境危机。必须加大环保投资及水环境净化处理力度，恢复水生态环境承载状态

表3 沧州市水生态承载力模型训练相关数据

Table 3 Data for model practice of water ecological carrying capacity index in Cangzhou City

指标名称 Name of index	最优值 Optimal value	及格值 Pass value	最差值 Worst value	单位 Unit	计算公式 Calculating formula	数据来源 Data source
A1-1	2 000	1 700	500	$m^3\cdot人^{-1}$	水资源总量/人口总量	“国际人口行动”[28]人口和环境计划中的规定值
A2-1	15	40	100	%	流域用水量(t)/流域多年平均水资源量	国际公认的水资源利用率不能超过40%，开发利用率为15%被认为是丰水区
A2-2	100	60	30	%	辖区用水总量控制达标县(市)/辖区县(市)总数×100%	河北省的水资源控制达标率年均值
B1-1	12	60	430	kg·万元$^{-1}$	工业污染物年排放量/工业生产总值	《中国统计年鉴》
B1-2	0.01	1.8	10	t·hm^{-2}	评估区内化肥施用总量(折纯)/评估区耕地面积	《中国统计年鉴》
B1-3	0.5	2	3	头·667 m^{-2}	评估区内畜禽养殖总量/评估区面积	《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》和相关文献[29-30]
B1-4	0.4	1	2.2	t·万元$^{-1}$	城镇生活污水排放量/第三产业生产总值	《中国统计年鉴》各地市统计年鉴
B2-1	100	80	60	%	达标次数/总次数	生态环境部网站中环境形势会商内容
B2-2	100	80	0	%	优于Ⅲ类水质断面数/断面总数	生态环境部发布《关于2020年上半年水环境目标任务完成情况的函》
C1-1	60	23	5	%	植被面积/区域总面积	《中国统计年鉴》
C1-2	18.5	2.29	0	%	流域面积/区域总面积	《中国统计年鉴》
C1-3	75	6	1	%	湿地面积/区域总面积	《中国统计年鉴》
C1-4	100	90	80	%	基准年月实际流量/最小生态基流量×100%(最小生态基流量=近10年年平均流量×10%)	《沧州市水资源公报》
C2-1	3	2	1	—	生物完整性指数H	《湖泊生态安全调查与评估技术指南》
D1-1	70	50	10	%	各地平均径流系数=地表径流量/降雨量×100%	《沧州市水资源公报》
D2-1	100	90	80	%	水源地达标数/水源地总数	全国文明城市要求集中式引用水源地的水质达标率不低于90%

为计算水生态承载能力指数，模型输入应当统一采用正向指标。将上述各个指标变更为A_1，$1/A_2$，A_3，$1/B_1$，$1/B_2$，$1/B_3$，$1/B_4$，B_5，B_6，C_1，C_2，C_3，C_4，C_5，D_1，D_2，分别记为N_1，N_2，N_3，N_4，N_5，N_6，N_7，N_8，N_9，N_{10}，N_{11}，N_{12}，N_{13}，N_{14}，N_{15}，N_{16}，水生态承载能力指数d为输出的人工神经网络模型。

本研究采用Matlab神经网络工具箱[31]建立BP神经网络模型进行水生态承载力评价。在水生态承载力评价前，需利用样本数据学习，为使数据具良好泛化能力，在数据学习中，选设定最优值$N_{最优}$、较优值($N_{最优}+N_{及格}$)/2、及格值$N_{及格}$、较差值($N_{最差}+N_{及格}$)/2和最差值$N_{最差}$共五组数据进行模型学习。

将五组数据输入样本{A_{1-1}~D_{2-1}}和期望输出值N以数值矩阵形式保存记为S_1、S_2，隐含层依据数值试错法(式4)取平均误差最小值为5。

$$n_1=\sqrt{m+n}+a \tag{4}$$

式中：n_1为水生态承载力评价指标值；m、n为输入输出层个数；a值为1~10之间的常数。

根据以上建立模型，分别输入水生态承载力评价指标值，应用模型计算，对应的输出值为区域水生态承载力指数。

激活函数选择正弦型函数，学习次数设计为

5 000次，在epochs=3时，验证集和测试集达到最小均方误差0.002 04。模型在验证集和测试集上表现都较好，说明模型具有良好的泛化能力。

2.2 模型的检验

利用验证集将训练好的模型进行检验，带入运算得到的误差分别为0.060 65、0.000 95、0.010 82、0.147 29、0.036 04。总体上，构建的模型仿真效果可信，预测效果良好，达到建模目的。由于所构建复杂系统本身存在许多不确定因素，个别年度会因为政策变化、突发环境灾害，甚至是统计口径变化，使得模型内出现相对误差高的情况。

2.3 计算结果

应用所建模型，采用沧州市2015—2019年的实际数据作为输入数据（正向化处理，未将计算过程列出）见图1，输入数据以数字矩阵格式导入并记为数值矩阵S_3，选择S_3，计算沧州市水生态承载能力指数，评价沧州市水生态承载能力。将输出结果S_3转化为折线图（图2），各个指标的权重值见图3。

由图2可知，2015—2019年，沧州市水生态承载能力指数分别为0.26、0.23、0.23、0.24、0.22，处于及格状态，但接近临界值0.2。由图2趋势线可以看出，水生态承载能力整体呈波动下降趋势，人类经济活动严重影响生态环境，与缪萍萍等[32]2017年计算的沧州市承载力相近。

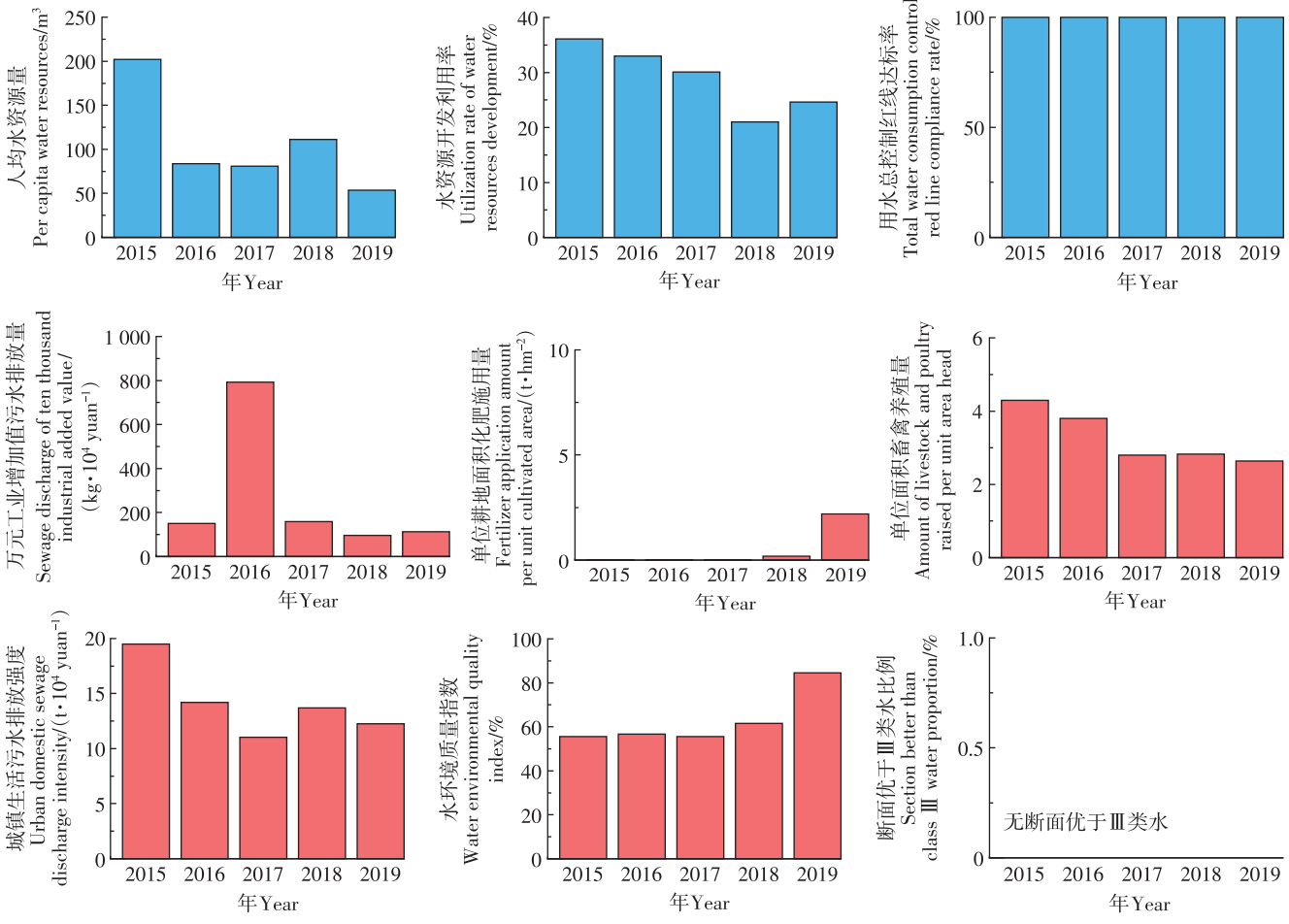
3 讨论

3.1 水资源因素

《沧州市水资源公报》显示，沧州市人均水资源量小于500 m^3，是极度缺水型城市。解决缺水问题主要通过补水，2015—2019年，沧州市入境客水量分别为11.21亿、8.02亿、5.35亿、8.31亿、10.70亿m^3，其中每年南水北调水量均值约2.5亿m^3，说明沧州市客水量较大，除黄骅市水资源量较多外，其他区市的用水资源均短缺，目前通过外调水来解决矛盾，并不能保证水量满足生态发展要求。

3.2 水环境因素

沧州市水质较差，13条主要河流国省控断面水质主要为Ⅳ、Ⅴ类水，还有部分劣Ⅴ类，主要定类因子为化学需氧量、高锰酸盐指数、生化需氧量，据笔者统计数据计算，2016—2019年近海海域化学需氧量排



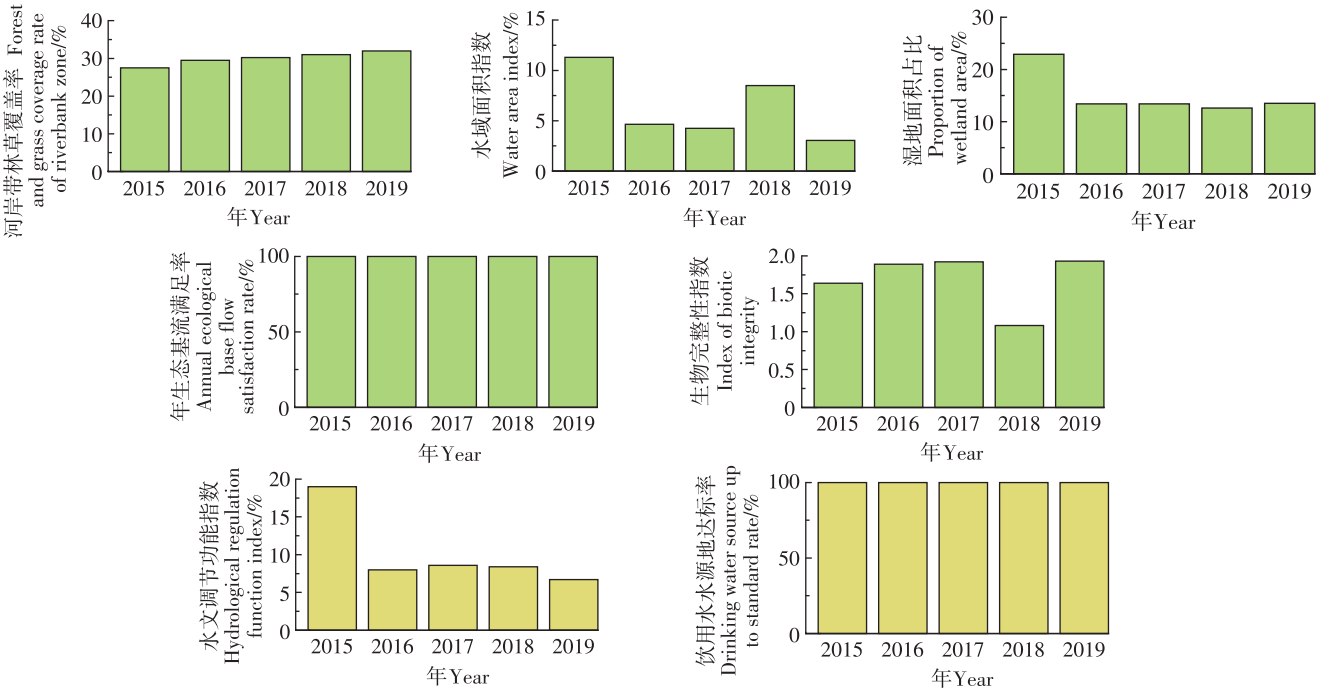


图1 沧州市2015—2019年水生态承载力指标统计

Figure 1 Results of water ecological carrying capacity index in Cangzhou City from 2015 to 2019

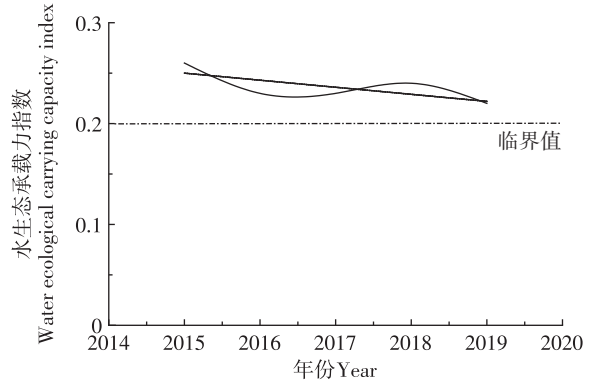


图2 沧州市2015—2019年水生态承载力指数

Figure 2 Water ecological carrying capacity index in Cangzhou City from 2015 to 2019

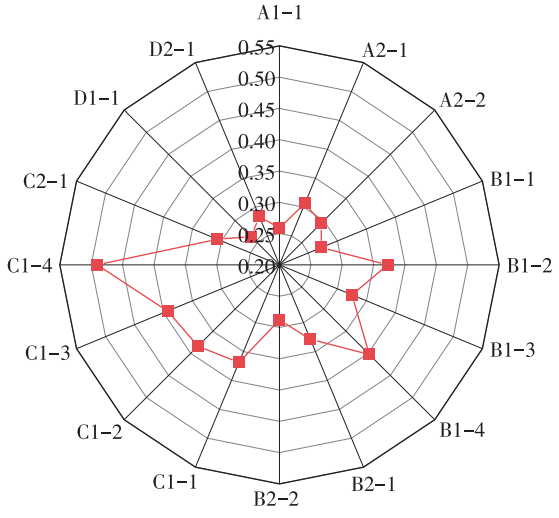


图3 各指标的影响权重

Figure 3 Weights of the evaluated indexes

放量较2015年排放量累计削减率分别为5.0%、17.0%、23.1%、20.4%，氨氮累计削减率分别为3.0%、14.1%、21.4%、24.7%，可见目前政府投入改善力度较大。解决工业废水排放问题，总量不容忽视，沧州市工业污染强度大是影响水环境指标不可忽略的因素，化肥用量逐年增加，农业污染也日益加重，此结果与牟真[33]计算沧州市纳污能力的结论一致；沧州市城镇污水排放量较大，单位和个人合理用水意识并不强，沧州市正增加对公众环境保护意识的宣传力度。

3.3 水生态因素

沧州市有河北海兴湿地和鸟类省级自然保护区、河北小山火山地质遗迹省级自然保护区、河北南大港湿地和鸟类省级自然保护区、河北黄骅古贝壳堤省级自然保护区4个自然保护区，截至2019年，生态保护红线面积200.48 km^2，占沧州市国土面积的1.40%。其中自然保护区121.72 km^2，饮用水水源地19.80 km^2，河滨岸带58.96 km^2。沧州市自2015年后，湿地面积发生不同程度缩减，全市海域浮游植物、浮游动物生物多样性基本稳定，大型底栖生物生物多样性较差。湿地面积方面，虽然与李珊等[34]于2011年检测的相关数据比较，湿地面积有所增加，但2015—2019年间湿地缩减现象还是沧州市生物生境所面临的主

要问题[35]。

3.4 水安全因素

沧州市1965—2015年平均降水量为543.8 mm，近年全市汛期平均降水量为388.1 mm，占年降水量的71.1%，季节性降雨强烈，因这种不均匀降雨特性，许多河段多为季节性断流，水文调节功能较差。大浪淀水库是沧州市市区的主要饮用水源，以引蓄黄河水及长江水为主，沧州市投资实施了大浪淀水库在线生物毒性预警系统站建设，实时监控水源地生物毒性和水质状况，监测结果符合水源地的水质要求，但据沧州市水质周报所公布的数据，饮用水中氟化物含量较高，应将氟化物检测和治理作为饮用水治理的重中之重。

3.5 未来工作

2020年，沧州市完成了强化地表河流达标消劣的任务，“十四五”规划中将沧州市主要河流水质保护目标定位在Ⅳ类及以上，同时压实治污责任，在水质监测考核方面，每周监测23条河流跨界断面水质，制定发放水质周报；提请市委修订地表水奖惩问责办法，加严惩罚标准，以奖惩并举促勤政有为；按照生态补偿要求，扣缴生态补偿金。通过以硬措施保障硬指标，沧州市对年度水环境目标和水污染防治工作进行安排部署。加强饮用水环境保护，完成水源保护区划分及规范化建设，强化大浪淀水库水源地保护，开展考核地下水水源地环境本底判定。强化白洋淀流域、南大港湿地的环境综合治理，加强入河排污口监管，强化水功能区治理，加强水环境的保护治理工作，限制对水环境有较大影响的人类社会活动，进而增强乃至恢复水生态系统的承载能力。通过对沧州市水生态承载力的评估，对保持水生态承载力等级具有重要贡献的指标应继续保持，对制约水生态承载力等级提升的指标应采取措施加以改进，以更好地实现可持续发展。

4　结论

（1）基于人工神经网络法构建的沧州市水生态承载力评价模型是一种方法的创新，具有一定概括性与实用性，并具一定普适性，能为促进人类社会和自然环境协调发展，提升区域可持续发展形势分析能力与未来生态发展方向提供技术支撑。

（2）通过对沧州市水生态承载情况量化模拟过程，得到承载力指数均介于0.2~0.3之间，且接近临界值0.2。这说明沧州市的水生态承载力较弱，生态环境受人类经济社会发展影响破坏较为严重，须大力加强水生态保护力度，恢复水生态承载力。

参考文献：

[1] ZHAO L J, QIAN Y, HUANG R B, et al. Model of transfer tax on transboundary water pollution in China's river basin[J]. *Operations Research Letters*, 2012, 40(3): 218-222.

[2] 胡运海. 马克思《资本论》中的生态文明思想探析[J]. 哲学进展, 2020, 9(1): 1-7. HU Y H. On the thought of ecological civilization in Marx's *Das Capital*[J]. *Advances in Philosophy*, 2020, 9(1): 1-7.

[3] 刘子刚, 郑瑜. 基于生态足迹法的区域水生态承载力研究：以浙江省湖州市为例[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1083-1088. LIU Z G, ZHENG Y. Evaluation of water ecological carrying capacity based on ecological footprint theory: a case study of Huzhou[J]. *Resources Science*, 2011, 33(6): 1083-1088.

[4] RIJSBERMAN M A, VAN DE VEN F H M. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2000, 20(3): 333-345.

[5] HARRIS J M, KENNEDY S. Carrying capacity in agriculture: global and regional issues[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 443-461.

[6] 王西琴, 高伟, 何芬, 等. 水生态承载力概念与内涵探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 41-46. WANG X Q, GAO W, HE F, et al. Discussion on the conception and connotation of water ecological carrying capacity[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2011, 9(1): 41-46.

[7] 郭怀成, 赵智杰. 我国新经济开发区水环境规划研究[J]. 环境工程学报, 1994, 2(6): 14-22. GUO H C, ZHAO Z J. Water environmental planning for new zone of economic and technological development in China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 1994, 2(6): 14-22.

[8] 张文国, 杨志峰. 基于指标体系的地下水环境承载力评价[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 541-544. ZHANG W G, YANG Z F. Assessment on bearing capacity of ground water environment based on indicator system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(4): 541-544.

[9] 彭文启, 杜强. 流域水生态承载力与调控技术[M]. 北京：化学工业出版社, 2011. PENG W Q, DU Q. Watershed water ecological carrying capacity and regulation technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.

[10] 李林子, 傅泽强, 沈鹏, 等. 基于复合生态系统原理的流域水生态承载力内涵解析[J]. 生态经济, 2016, 32(2): 147-151. LI L Z, FU Z Q, SHEN P, et al. An analysis on the meaning of water ecological carrying capacity for a basin based on the complex ecosystem theory [J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(2): 147-151.

[11] VAN DEN BERGH J C J M, VERBRUGGEN H. Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the 'ecological footprint'[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(1): 61-72.

[12] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375-390.

[13] RAJARAM T, DAS A. Screening for EIA in India: enhancing

effectiveness through ecological carrying capacity approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(1):140-148.

[14]《水生态承载力调控方案编制技术指南》征求意见稿[R/OL]. [2021-11-30] http://www.chinacses.org/xw/gsgg/202111/t20211130_962300.shtml

[15] 张远, 周凯文, 杨中文, 等. 水生态承载力概念辨析与指标体系构建研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(1):42-53. ZHANG Y, ZHOU K W, YANG Z W, et al. The definition and index system of hydro-ecological carrying capacity (HECC)[J]. *Journal of Northwest University*(*Natural Science Edition*), 2019, 49(1):42-53.

[16] 郑建根, 胡荣祥. RBF人工神经网络在区域水环境承载力研究中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2015(9):52-54. ZHENG J G, HU R X. The application of RBF artificial neural networks in regional water environment carrying capacity[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(9):52-54.

[17] 余金龙, 尹亮, 鲍广强, 等. 基于BP神经网络的腾格里湖水环境承载力研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(11):83-86. YU J L, YIN L, BAO G Q, et al. Research on water environmental carrying capacity of Tenggeli Lake based on BP neural networks[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(11):83-86.

[18] 陈运雄, 李飒. 我国城市地表水水质榜单公布[J]. 生态经济, 2019, 35(7):4. CHEN Y XI LI S. List of urban surface water quality in China released[J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(7):4.

[19] DONG X Y, LU Y, ZHOU Z X et al. Comprehensive assessment of water environment carrying capacity of Yunnan Province[J]. *Journal of Landscape Research*, 2017, 9(3):77-82.

[20] WAN Y L, ZHANG B, WU C D. Research on water environment carrying capacity of Neijiang River basin in Zhenjiang City[C]// Changzhou: 2010 International Conference on Future Information Technology and Management Engineering, 2010:234-237.

[21] ZHANG Q B, SHEN X, YAO Z. The concept, connotation and method of representation of watershed water environment carrying capacity (WWECC)[J]. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2009, 3:37-42.

[22] 王俭, 李雪亮, 李法云, 等. 基于系统动力学的辽宁省水环境承载力模拟与预测[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9):2233-2240. WANG J, LI X L, LI F Y, et al. Simulation and prediction of water environmental carrying capacity in Liaoning Province based on system dynamics model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9):2233-2240.

[23] ZHOU X Y, LEI K, MENG W, et al. Industrial structural upgrading and spatial optimization based on water environment carrying capacity [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165:1462-1472.

[24] WANG H, ZHOU Y Y, TANG Y, et al. Fluctuation of the water environmental carrying capacity in a huge river-connected lake[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(4):3564-3578.

[25] 王富强, 李鑫, 赵衡, 等. 基于水环境容量和综合指标体系的区域水环境承载力评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(2):24-31. WANG F Q, LI X, ZHAO H, et al. Evaluation of regional water environment carrying capacity based on water environment capacity and comprehensive index system[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power*(*Natural Science Edition*), 2021, 42(2):24-31.

[26] 丛爽. 神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2001. CONG S. Neural network, fuzzy system and their applications in motion control[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001.

[27] 王俭, 孙铁珩, 李培军, 等. 基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型及其应用[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1):139-144. WANG J, SUN T H, LI P J, et al. Evaluation model of regional water environment carrying capacity based on artificial neural network and its application in Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(1):139-144.

[28] WHO. Population action international[R]. Switzerland, 2014.

[29] 盛巧玲. 基于氮平衡的北京地区畜禽环境承载力研究[D]. 重庆:西南大学, 2010. SHENG Q L. Study on environmental carrying capacity of livestock and poultry in Beijing based on nitrogen balance [D]. Chongqing: Southwest University, 2010.

[30] 刘金鑫, 白林, 周立新, 等. 基于氮平衡原理分析成都市畜禽养殖土地承载压力[J]. 农业开发与装备, 2020(6):125-126. LIU J X, BAI L, ZHOU L X, et al. Analysis of bearing pressure of livestock and poultry farming land in Chengdu based on nitrogen balance principle [J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2020(6):125-126.

[31] 丛爽. 面向MATLAB工具箱的神经网络理论与应用[M]. 3版. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009. CONG S. Neural network theory and applications with MATLAB toolboxes[M]. 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.

[32] 缪萍萍, 石维, 张浩, 等. 河北省城市水环境承载力预警机制研究[C]. 贵阳:第五届中国水生态大会, 2017:1-6. MIAO P P, SHI W, ZHANG H, et al. Study on early-warning mechanism of urban water environmental carrying capacity in Hebei Province[C]. Guiyang: Proceedings of the 5th Water Ecology Conference in China, 2017:1-6.

[33] 牟真. 沧州市纳污能力计算与分析[J]. 中国水能及电气化, 2019(6):47-53. MU Z. Calculation and analysis on pollutant loading capacity in Cangzhou[J]. *China Water Power & Electrification*, 2019(6):47-53.

[34] 李珊, 宋小刚. 浅析沧州湿地的现状与生物多样性保护[C].《河北环境科学》-华北五省市环境科学学会第十七届年会论文集, 2011: 67-68. LI S, SONG X G. Current status of wetlands and biodiversity conservation in Cangzhou City[C]. *Hebei Environmental Sciences* - Proceedings of the 17th Annual Academic Conference of Chinese Society for Environmental Sciences of Five Provinces and Cities in North China[C]. 2011:67-68.

[35] 易丹, 赵小敏, 郭熙, 等. 环鄱阳湖城市群城乡建设用地的承载能力评价及空间格局匹配[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2):627-636. YI D, ZHAO X M, GUO X, et al. Evaluation of carrying capacity and spatial pattern matching on urban-rural construction land in the Poyang Lake urban agglomeration, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2):627-636.