

城市内河水环境承载力评价研究

胡雄光¹, 徐荣华², 徐海波³, 付意成⁴

(1. 丽水学院, 浙江 丽水 323000; 2. 丽水市水利局, 浙江 丽水 323000;
3. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 城市内河水环境承载力评价是实现水资源科学管理和水污染综合治理的基础。本文在阐述水环境承载力内涵及评价状况的基础上,对多种方法的适用性和可操作性进行分析,选取人工神经网络模型(BP)和径向基函数人工神经网络模型(RBF)进行内河水环境承载力评价;构建指标评价体系,对BP和RBF模型进行驯化和参数率定,确定水环境综合污染指数,进行城市内河水环境承载力评价。以丽水市城市内河为例,综合评价水环境综合承载状态为弱承载,验证了评价指标和方法选取的可行性,为进行丽水市内河水环境整治提供依据。

关键词: 水环境承载力; BP模型; RBF模型; 评价指标; 丽水市

中图分类号: TV211.11

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0105-05

River water environment bearing capacity evaluation study in the city

HU Xionguang¹, XU Ronghua², XU Haibo³, FU Yicheng⁴

(1. Lishui University, Lishui 323000, China; 2. Water Conservancy Bureau of Lishui, Lishui 323000, China;
3. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China; 4. China Institute of Water Resources
and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The river water environment bearing capacity evaluation in the city is the basis of realizing water resources scientific management and water pollution comprehensive treatment. By stating the content and evaluation state of water environment bearing capacity, the paper analyzed the applicability and operability of various methods, selected model of artificial neural network (BP) and radial basis function (RBF) artificial neural network model to evaluate water environmental bearing capacity. The paper established the index evaluation system, domesticated BP and RBF model and calibrated parameter, finally, given the comprehensive pollution index of water environment, to study the water environment bearing capacity evaluation method in the city. The paper made Lishui city as the study region, the water environment comprehensive load state was weak load. The result demonstrated the feasibility of evaluation index and method.

Key words: water environment bearing capacity; BP model; RBF model; evaluation index; Lishui city

1 研究背景

城市内河作为城市的灵魂,与城市生态环境和人居环境息息相关,与城市发展和品位提升关系密切。水环境承载力的研究始于1990年,侧重于量化方法研究。水环境承载力评价关系到区域人口、经济发展规模、环境、生态和代际持续发展等方面,系统性强、内容复杂,目前国内外尚无通用方法^[1]。

借鉴相关研究,评价水环境承载力的方法主要有向量法、系统分析法、系统动力学法、水量水质分析法、模糊综合评价法以及综合指数法等多指标评价法,而对模拟智能这种复杂系统方法应用较少^[2]。为此,在借助层次分析-熵值定权法确定指标权重的基础上^[3],利用灰色关联理论对评价指标进行分析和筛选^[4],引入人工神经网络,构建多元综合评价模型进行水环境承载能力评价。水环境承载力的研

收稿日期: 2015-03-14; 修回日期: 2015-04-07

基金项目: 浙江省水利厅科技计划项目(RB0918); 浙江省科学技术厅科技计划项目(2012F2004)

作者简介: 胡雄光(1963-),男,浙江缙云人,学士,讲师,主要从事水环境及水资源保护等方面的研究。

通讯作者: 付意成(1983-),男,山东临朐人,博士,工程师,主要从事流域水资源管理与生态价值研究。

究对象一般包括流域、区域和城市 3 类,而当前对城市内河水环境承载力评价的研究稍显不足。为此,本文在对相关研究方法适用性和可操作性进行对比的基础上,合理选择水资源子系统、社会经济子系统、水环境及生态子系统对应的衡量指标,采用人工神经网络模型(BP 模型)和径向基函数人工神经网络模型(RBF 模型)对城市内河水环境承载能力进行评价。借助人工神经网络强大的非线性数据处理能力构建城市水环境承载力评价模型,旨在探寻科学评价水环境承载能力的方法,并通过丽水市内河的实例验证,为深层挖掘区域水环境对人类社会经济发展的支撑作用提供方法借鉴。

2 水环境承载力概念及评价

2.1 水环境承载力概念

水环境承载力有狭义和广义之分,狭义的水环境承载力一般指一定水域水体所能够容纳污水及污染物的上限,等同“水环境容量”、“水环境允许污染负荷量”的概念^[1];广义的水环境承载力指在一定的社会经济和技术力量限定下,某一区域/流域水系统功能的正常发挥或保持良好状态时所支撑社会经济发展和人民生活需求的协调度^[7]。因此,水环境承载力由水环境系统本身结构决定,是水环境系统与外界物质输送/输入、能量交换、信息反馈的能力和自我调节能力的表现,体现了水环境与社会经济系统间协调发展的耦合关系。

水环境承载力是一个限值,当外界干预超越自身承受限度,水环境系统的结构和功能将发生不可逆变化,反作用于区域社会经济发展。此外,水环境承载力还具有客观固有性、动态调整性、时空差异性、学科融合性特点^[8-9]。本文借助水环境和人类经济、社会活动的相互关系对广义水环境承载力进行评价,反映研究区水环境系统对人类社会经济活动的承载状况,实现水环境系统对社会、经济作用对象的反馈作用。

2.2 水环境承载力评价

水环境承载力作为一种交叉学科的概念,国内外与之相关的专门研究尚处于初始阶段,缺少统一和成熟的方法^[10]。国际层面,Harris 等^[11]提出基于城市供水的水资源承载力的概念,随后,Rijberman^[12]将承载力作为衡量城市水资源安全保障的标准,2001 年,URS 公司对佛罗里达 Keys 流域的承载力、研究方法和量化方法等进行了系统研究^[13]。国内学者多借助数学模拟和优化算法、系统动力学方

法、指标评价体系法等系统算法和多目标寻优途径对水环境承载力进行研究,如蒋晓辉等^[14]采用多目标大系统分解协调模型对陕西关中地区的水环境承载力进行评价;汪彦博等^[15]借助系统动力学方法量化比较南水北调工程对石家庄市水环境承载力的影响;邢有凯等^[16]利用向量模法评价北京市 2000 - 2005 年水环境承载力水平,提出增加水资源供给量的途径;李如忠等^[17]借助模糊随机优选模型对指标信息不确定的区域水环境承载力进行评价;王俭等^[18]从阈值角度出发,采用基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型对辽宁省的水环境承载力进行评价;秦克丽^[19]借助投影寻踪技术与遗传算法,综合评价分析黄河中上游某流域地区的水环境承载力;杨钧婷等^[20]运用 AHP 和“模加和”法对海南水环境承载力进行分析评价。

当前,水环境承载能力的评价方法日益多样化,但不同评价方法的缺陷和局限性导致评价结果存在偏差;新的数学分析技术的引入推动了对水环境承载力系统研究的进展,但结果的可靠性及稳定性尚需进一步验证。多目标模型优化法在目标选取、模型求解和经济技术条件约束的表达方面存在一定难度;系统动力学法易于操作,但参变量不易取值,多应用于中短期发展规划预估;指标体系评价法简便、直观,但针对评价给出结论的精度和深度不够具体;人工神经网络模型结构简单、构建简捷、评价结果直观,但其学习的精度取决于网络结构和训练样本数量。前人从不同层面和角度对流域/区域及城市水环境承载力进行研究,并根据评价区的特点和评价方法的适用范围,成功的探索出应用于不同区域的研究方法,如多目标模型最优化方法、遗传算法在流域水环境承载力评价方面应用的较为普遍;多目标分析评价模型、人工神经网络及主成分分析法主要适用于区域水环境承载力的综合评价;向量模法、系统动力学模型等在城市水环境承载能力方面的评价较为奏效。

为此,本文在糅合城市、流域水环境承载力评价方法各自特点的基础上,采用人工神经网络模型和径向基函数人工神经网络模型两种方法进行城市内河水环境承载能力的评价研究。

2.3 评价指标

水环境承载力系统包括社会经济子系统、水资源子系统和生态环境子系统。在指标选取时,按指标满足功能的程度、信息整合能力、资料收集的难易程度等因素进行综合取舍,同时还在考虑与水量、水

质、水生态直接关系的指标,国家、地方、行业统计数据中已收编整理的相关数据的基础上,结合指标选取原则,针对城市内河特征和数据可获取性,构建城市内河水环境承载力评价指标体系。

本文构建的指标体系由水资源子系统、社会经济子系统、水环境及生态子系统构成:①水资源子系统包含 3 个指标,分别是反映区域水资源丰、缺状态及发展潜力的正效指标——水资源总量;反映区域总用水量的负效指标——总用水量;反映区域从外区域补给的水资源的正效指标——调水量;②社会经济子系统包含 4 个指标,分别是反映区域人口总数的负效指标——人口数;反映区域经济总量的负效指标——GDP;反映区域民众生活用水水平的负效指标——人均生活用水量;反映区域工业用水水平的负效指标——工业万元增加值取水量;③水环境及生态子系统包含 4 个指标,分别是反映社会发展对水环境压力的负效指标——废污水排放量;反映环保措施后社会发展对水环境影响程度的正效指

标——污水处理率;反映区域环境状况的正效指标——绿化覆盖率;反映社会经济发展程度的负效指标——公路密度。

在指标选取的基础上,本文采用可以表征多项水质参数、多个监测断面的综合污染程度的内河综合污染指数作为输出参数,据此评估水环境承载力的取值合理性^[21]。

单项水质参数 i 在第 j 点的污染指数为:

$$S_{ij} = C_{ij}/C_{si} \tag{1}$$

第 j 点的综合污染指数:

$$\bar{S}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{ij} \tag{2}$$

式中: $\bar{S}_j$ 为综合污染指数; S_{ij} 为单项水质污染指数; m 为评价指标个数; C_{ij} 为项目 i 在第 j 点的监测浓度,mg/L; C_{si} 为项目 i 的环境质量标准,mg/L。

根据综合污染指数,将水环境质量等级划分为 5 级,便于水环境等级的判定与区域水环境状况预测。水环境综合污染指数评价等级见表 1。

表 1 综合污染指数评价等级表

污染程度分级	好	较好	合格	污染	重污染
综合污染指数	≤ 0.2	$0.4 < S \leq 0.7$	$0.7 < S \leq 1.0$	$1.0 < S \leq 2.0$	> 2.0

3 典型区城市内河水环境承载力评价

3.1 典型区概况

丽水市地处浙江省西南浙闽两省结合部,东南与温州市接壤,西南与福建省宁德市、南平市毗邻,西北与衢州市相接,北部与金华市交界,东北与台州市相连。辖区面积 1.73 万 km²,下辖 1 区、1 市、7 县。城市中心莲都区位于丽水市东北部,总面积 1 502 km²。

丽水市位于瓯江、钱塘江、闽江、飞云江、椒江和赛江的源头,是浙闽两省重要的生态屏障区。丽水市城区位于瓯江中游大溪与好溪汇合处的丽水盆地,内河水系众多,现有河流 17 条,长度 69.4 km,河流水域面积 0.38 km²,水域容积 61.7 万 m³。

3.2 模型搭建与验证

BP 模型、RBF 模型是当前应用比较成熟的多目标交互寻优的数字化分析工具,应用范围广泛,技术成熟。为此,本文主要对模型驯化及参数寻优的关键过程进行阐述,依此验证研究方法的可行性和模型的适用性。

(1)BP 模型。BP 模型是目前应用最广泛的神

经网络模型,通常由输入层、输出层和若干隐含层构成,层与层间的神经元采用全互连的方式连接。在进行 BP 网络设计时,应包含网络层数、每层神经元个数、学习次数、学习速率、学习动量及期望误差等几个方面。本文从降低误差和网络复杂化、提高精度层面进行考虑,采用输入层、中间层、输出层 3 层网络结构;神经元个数为 23 个;最佳的学习次数一般借助试算确定,在能达到模型的精度要求的情况下,将学习次数确定为 100 次;学习速率选择经验推荐值 0.01;依据随机训练结果,学习动量选择经验推荐值 0.7;学习目标为 0.0001,验证的相对误差控制在 20% 以内。

结合训练结果误差数据,训练误差均在 1.3% 以内,59.3% 数值误差小于 0.001%,81.5% 的误差小于 0.1%,训练误差满足精度要求,BP 模型通过训练掌握了样本中的信息。

通过训练得到各层连接权值及各层神经元的阈值,利用验证数据对模型进行验证,结果见表 2。验证的相对误差均在 20% 以内,验证精度能够满足模型的应用要求,模型可用于内河水环境承载力综合评价。

表 2 BP 网络验证误差表

序号	实际值	模拟值	相对误差/%
1	4.44	4.13	-7
2	2.41	2.66	10
3	2.13	2.04	-4
4	2.91	2.42	-17
5	3.36	3.13	-7

(2)RBF 模型。RBF 是近年应用较多的一种前馈神经网络模型,一般由输入层、隐含层、输出层构成,各层有多个神经元,各相邻两层单元间单方向连接。在进行 RBF 模型设计时,一般应从网络层数、隐含层神经元个数、扩展速度以及期望误差等几方面着手。在综合考虑的基础上,本文采用 3 层网络结构,隐含层最大神经元个数为 50,选定学习目标为 0.0001,选取扩展速度为 1,采用训练均方误差小于 10^{-3} 。

通过将确定好的参数用于模型训练,训练误差均在 0.6% 以内,51.9% 数值误差小于 0.001%,83.2% 的误差小于 0.1%,训练误差满足精度要求。利用验证数据对 RBF 模型进行验证的结果见表 3。相对误差均在 20% 以内,而且从广义水环境承载能力度量区间来看,模拟值与实际值均在同一度量区间之内,不影响水环境承载程度的判断。

表 3 RBF 网络相对误差情况表

序号	实际值	模拟值	相对误差/%
1	4.44	4.05	9
2	2.41	2.37	2
3	2.13	2.33	-10
4	2.91	2.60	11
5	3.36	3.99	-18.8

3.3 评价结果分析

鉴于丽水市社会经济发展和环保水平,考虑到内河水生态应在保护的基础上加大治理恢复力度,因此,选择中环保水平对应下的经济组合进行水环境承载力评价。在此发展模式下,GDP 正常增长,单位用水量及环保治理为中等水平,调水量随工程完善有所增加,水资源总量为平均状态。由于经济和社会的发展,GDP 和人口逐渐增加,节水水平有所提高,人均生活用水量降低至 150 L/d、工业万元增加值取水降至 100 m³,总用水量相应减少;截污纳管和污水处理率提高,污水处理率 0.75。BP

及 RBF 模型预测结果及承载力评价见表 4。

表 4 中环保水平不同方案预测结果及承载力评价表

时间点	BP 模型		RBF 模型	
	综合污染指数	承载力评价	综合污染指数	承载力评价
2010	1.3	一般	1.7	较弱
2015	1.9	较弱	2.5	较弱
2020	2.3	较弱	3.0	弱

两个模型模拟值在 1.3~3.0 之间,总体趋势为 BP 模型预测结果要比 RBF 模型要小,但两者分级基本一致,水环境综合承载状态为弱承载。BP 和 RBF 模型的评价数值相关不大,分级评价相近,因此,两种模型均可用于城市内河水环境承载力评价。

4 结 语

本文选取 BP 神经网络模型和 RBF 网络模型对城市内河水环境承载力进行评价分析。通过参数优选以及模型训练和验证,BP 网络和 RBF 网络两者精度基本相同,预测结果也相接近,RBF 网络模型预测值相对较大,但两者水环境承载程度的评价基本一致。中环保水平下,丽水市内河水环境承载力处于较弱和弱承载状态,表明人类经济活动与水环境处于非协调状态。但本文做为城市内河水环境承载能力评价方法的探索,尚存在如下不足:①研究空间尺度相对较小,在资料整理以及资料系列的长度上受限;②亟需构建以水质为中心的水环境管理模式,利于流域(或区域)的分析管理;③资料系列偏短,时间跨度有限,在不同社会经济以及环保水平下的城市内河特征并没有完全包含,部分资料数据不完整。

参考文献:

[1] 贺瑞敏,张建云,陆桂华. 水环境承载能力 & 评价方法研究[J]. 内蒙古农业大学学报,2007,28(2):217-220.

[2] 郭婉娥. Elman 与 GRNN 神经网络模型在水环境承载力评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013,24(4):184-188.

[3] 王 芳. 层次-熵定权的灰色关联理论在工程评标中的应用[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2011,32(4):49-56.

[4] 徐建新,肖 恒. 城市水环境承载力灰色关联分析等级评价研究[J]. 水利科技与经济,2007,13(12):902-904.

[5] 杨秋林,张淑贞. 基于 BP 神经网络的水环境承载力评价[J]. 国土与自然资源研究,2009(4):70-72.

- [6] 汪恕诚. 水环境承载能力分析 with 调控[J]. 中国水利, 2001(11): 9-12.
- [7] 贺瑞敏. 区域水环境承载能力理论及评价方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [8] 李清龙, 王路光, 张焕祯, 等. 水环境承载力理论研究与展望[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(1): 87-89.
- [9] 李川. 水环境承载力量化方法的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(8): 66-69.
- [10] 周洋, 周孝德, 张新华. 区域水环境承载力评价系统平台构建与应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(6): 34-39.
- [11] Harris J M. Carrying capacity in Agriculture: Globe and regional issue[J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 443-461.
- [12] Rijberman. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water system[J]. Environment Impact Assessment Review, 2000, 129(3): 333-345.
- [13] 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, 14(2): 249-253.
- [14] 蒋晓辉, 黄强, 惠洪河, 等. 陕西关中地区水环境承载力研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3): 312-317.
- [15] 汪彦博, 王嵩峰, 周培疆. 石家庄水环境承载力的系统动力学研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(3): 26-27.
- [16] 邢有凯, 余红, 肖杨, 等. 基于向量模法的北京市水环境承载力评价[J]. 水资源保护, 2008, 24(4): 1-3.
- [17] 李如忠, 钱家忠, 孙世群. 模糊随机优选模型在区域水环境承载力评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2005(1): 31-34.
- [18] 王俭, 孙铁珩. 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.
- [19] 秦克丽. 区域水环境承载力评价模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 86-89.
- [20] 杨钧婷, 陈秋波, 彭黎旭. 基于联合层次分析法和“模加和”法的海南水环境承载力评价[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(3): 47-51.
- [21] HJ/T2.3-93. 环境影响评价技术导则-地面水环境[S]. 1994.

(上接第104页)

- [12] 钟倩倩, 岳钦艳, 李倩, 等. 改性麦草秸秆对活性艳红的吸附动力学研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2011, 41(1): 133-139+150.
- [13] Wang Yu, Gao Baoyu, Yue Wenwen, et al. Adsorption kinetics of nitrate from aqueous solutions onto modified wheat residue[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, 308(1): 1-5.
- [14] Özcan A Safa, Özcan Adnan. Adsorption of acid dyes from aqueous solutions onto acid-activated bentonite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 276(1): 39-46.
- [15] Xu Xing, Gao Baoyu, Wang Wenyi, et al. Adsorption of phosphate from aqueous solutions onto modified wheat residue: Characteristics, kinetic and column studies[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2009, 70(1): 46-52.
- [16] Khaled A, Nemr A E, El-Sikaily A, et al. Removal of direct N blue-106 from artificial textile dye effluent using activated carbon from orange peel: Adsorption isotherm and kinetic studies[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1-3): 100-110.
- [17] Hasany S M, Chaudhary M H. Sorption potential of hare river sand for the remove of antimony from acidic aqueous solution[J]. Applied Radiation and Isotopes, 1996, 47(4): 467-471.
- [18] 冯丽, 葛小鹏, 王东升, 等. pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 94-103.
- [19] 徐佳丽. 蒙脱石负载纳米零价铁对水溶液中铈的去除研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- [20] 袁土贵. 纳米零价铁处理含铈废水的研究[D]. 广州: 广州大学, 2013.