

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0077

曹若馨,张可欣,曾维华,等.2021.基于 BP 神经网络的水环境承载力预警研究——以北运河为例[J].环境科学学报,41(5):2005-2017

Cao R X, Zhang K X, Zeng W H, et al. 2021. Research on the early-warning method of water environment carrying capacity based on BP neural network: A case study of Beiyunhe River Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 41(5): 2005-2017

基于 BP 神经网络的水环境承载力预警研究 ——以北运河为例

曹若馨¹,张可欣¹,曾维华^{1,2,*},马俊伟¹,解钰茜¹,李晴¹

1. 北京师范大学环境学院,北京 100875

2. 中国科学院西北高原生物研究所,西宁 810008

摘要:为了预测水环境承载力未来可能出现的超载状态并提出警告,达到水环境风险管控的目的,本文构建了基于 BP 神经网络的水环境承载力预警方法体系,并在北运河流域开展了实证研究. 所构建预警模型包括 COD、氨氮、总磷承载力预警子模型和水资源承载力预警子模型,且模型拟合效果较好(平均绝对百分比误差在 20%左右). 研究结果表明:朝阳区、海淀区等 8 个行政区落在了红灯重警区域,水环境承载力超载状况最为严重;位于北运河中下游的石景山区、广阳区、北辰区和香河县处于橙灯中警区域;昌平区、顺义区等 5 个行政区处于黄色轻警区域;怀柔区和延庆区处于绿色无警区域,状况较好. 最后,为了排除警情,基于双向调控的原则,本文从水环境全过程控制角度,分别对各区域提出了调控区域人口规模及经济发展方式、治理面源污染等具体排警措施.

关键词:水环境承载力;BP 神经网络;水环境承载力超载状态;预警

文章编号:0253-2468(2021)05-2005-13

中图分类号:X17

文献标识码:A

Research on the early-warning method of water environment carrying capacity based on BP neural network: A case study of Beiyunhe River Basin

CAO Ruoxin¹, ZHANG Kexin¹, ZENG Weihua^{1,2,*}, MA Junwei¹, XIE Yuxi¹, LI Qing¹

1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875

2. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008

Abstract: Aim to predict the possible overloading status of water environment carrying capacity (WECC) in the future and give warnings to control water environment risk, we constructed an early warning system of WECC by adopting Back Propagation Neural Network (BPNN), and Beiyunhe river basin was selected for a case study. The early-warning model involves four sub-models of carrying capacity (COD, NH₄, and TP and water resources), and it can provide reliable fitting result (the mean absolute percentage error is about 20%). The results show that 8 administrative districts including Chaoyang District and Haidian District are in the red-light warning area where the WECC is severely overloaded; Shijingshan District, Guangyang District, Beichen District and Xianghe County which located in the middle and downstream are in the orange-light warning area; 5 administrative districts including Changping District and Shunyi District are in the yellow-light warning area; Huairou District and Yanqing District are in the green-light warning area, and the carrying status is good. Finally, to eliminate the overloading situation, from the perspective of integrated control of water environment, we proposed specific management measures for each region on the basis of the principle of bidirectional regulation, such as regulation of population and economic development, non-point source pollution control, etc.

Keywords: water environment carrying capacity; BP neural network; overloading status of water environment carrying capacity; early warning

1 引言 (Introduction)

在我国很多地区,由于环境资源长期不合理的开发利用,社会经济活动强度已经达到甚至远超环境承载能力. 对水环境承载状态的研究是判断一定时期内水系统与流域内社会经济、人口发展的协调

程度的重要依据(王乃亮等,2015),而水环境承载力预警是对未来水环境承载力可能出现的超载状态进行预判进而发出警报. 近些年来,对环境承载力预警的研究随着中国环境管理制度日趋严格应运而生(周翟尤佳,2018). 党的十八届三中全会、《环境保护法(修订版)》都明确提出了要建立资源环境

收稿日期:2020-11-26

修回日期:2021-02-23

录用日期:2021-02-23

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(No.2018ZX07111003)

作者简介:曹若馨(1997—),女,E-mail:hntjcrx@163.com; * 责任作者,E-mail:zengwh@bnu.edu.cn

承载力监测预警机制,《水污染防治行动计划》中明确提出建立水资源、水环境承载能力监测评价体系,实行承载能力监测预警.开展水环境承载力预警研究,能够为流域、区域间实施污染物排放总量控制、排污许可证制度和排污权交易等现代环境管理制度提供决策依据和科学支撑,是促进环境质量管理“倒逼”社会经济向新常态转变的重要支撑手段.

众多学者在不同的领域从不同的角度对承载力预警进行了丰富的研究.现有很多研究利用现状评价来进行预警分析,实际上是现状警情评价,无法对未来可能发生的警情进行预判,没有实现真正意义上的预警(陈仲常等,2011;杨丽花等,2013; Xu *et al.*, 2017).也有部分学者利用如自回归滑动平均(刘丹等,2019)、系统动力学动态仿真(崔丹等,2018)、景气指数法(解钰茜等,2019)对未来水环境承载力进行超载预警.在水环境承载力警义界定方面,许多研究直接定义水环境容量超载或水资源量供不应求为警情(任永泰等,2011;刘雯雯等,2019),没有综合考虑水环境的承载状态.另外,在确定警度时,往往只考虑了承载力超载状态(承载率)这单一指标,没有考虑环境承载力超载状态的历史变化趋势.

本文在明确预警内涵的前提下,也就是基于对未来情况的预判发出警报,在水环境承载力理论的基础上,引入人工神经网络模型,提出了基于BP神经网络的水环境承载力预警方法.该方法综合考虑水环境容量承载状态与水资源量承载状态两个要素,构建了可直接反映水环境承载状态相对大小的水环境承载力预警警情指标,利用BP神经网络预测水环境承载力未来警情.最后在预测警情的基础上,同时考虑承载状态与承载状态历史变化趋势,对水环境承载力预警的警度进行界定,并提出相关排除警情的方法.以北运河流域为对象进行案例研究,验证该方法的有效性,预测水环境承载力未来可能发生的警情.本文提出的预警方法,可推广应用于类似的水体,以为现代水环境监管提供技术方法.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 基于BP神经网络的水环境承载力警情预测模型

2.1.1 水环境承载力警情预测建模方法 BP神经网络算法中主要包含两个过程:信号的正向传播和误差的反向传播.在BP神经网络模型的学习过程

中,首先是信号的正向传播,系统接受输入信号后,信号从输入层传到下一层,过中间隐含层的运算和处理后,将结果传到输出层.如果输出层的实际输出与期望输出的误差不符合设定要求,则进入误差的反向传播阶段.在此阶段,误差通过隐含层向输入层逐层反传,将误差分摊给各层的所有单元,同时修正各层之间的连接权值和阈值(刘春艳等,2013;焦李成等,2016;秦璐,2019).最终得到最优参数,保存网络.BP算法的实质是选取最速下降法,按照误差函数的负梯度方向修改权值和阈值,从而获得最合适的结果.

①建模步骤.在MATLAB中创建BP神经网络及应用的基本步骤可分为:设计模型输入输出样本、创建网络并进行训练、测试和修改网络、保存网络并进行实际应用.BP神经网络工作流程图如图1所示.

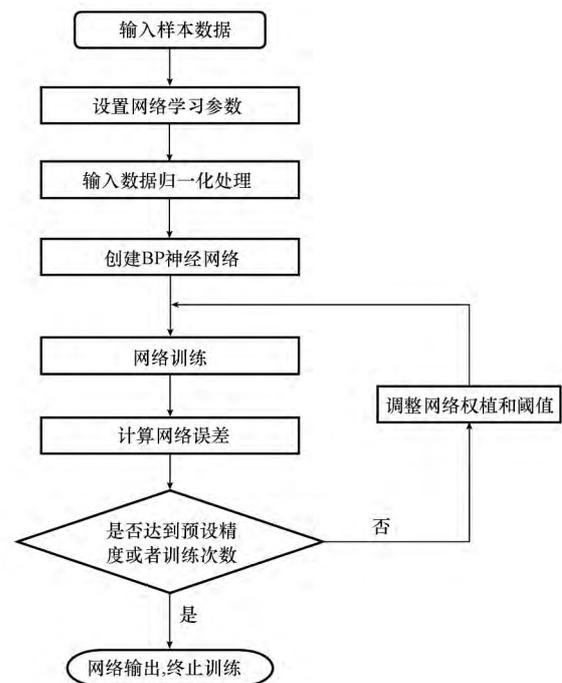


图1 BP神经网络工作流程图

Fig.1 BP neural network work flow chart

②模型结构设计.网络的层数.相关学者分析证明了具有单隐含层,即3层神经网络,便可以任意精度逼近任何复杂的连续映射(焦李成等,2016).为了降低误差可以增加隐含层数,使精度得到提高,但是会导致网络复杂化,容易陷入局部极小.因此在研究中通常优先考虑3层BP神经网络结构(江飞,2015).

隐含层的神经元数. 隐含层神经元数如果过多,可导致网络学习时间过长,甚至可能出现不能收敛的现象. 相反如果神经元个数过少可能导致网络的容错性较低. 在实际研究中一般用试错法,选择不同的神经元个数分别对网络进行训练,最终选取 BP 神经网络模型输出误差最小时对应的隐层节点数.

激活函数的选择. 在 BP 神经网络中,每个神经元通过激活函数完成输入到输出的非线性映射. 较为常用的是 S 型(Sigmoid)函数和双极性函数.

学习速率. 学习速率决定 BP 神经网络中误差反向传播时的每一次权值和阈值的变换量. 如果学习速率太小,则网络的训练时间变长,收敛速度慢,但是这样可保证网络最终趋向最小的误差值. 相反如果学习速率太大,则系统可能会比较不稳定. 在实际研究中,趋向于选择较小的学习速率,一般范围为 0.001~0.8.

训练函数. BP 系统的训练函数常见的有 trainbfg、traingx、trainlm 等算法. 在实际模型构建过程中,可利用训练数据,通过不同的训练函数对训练样本进行训练,得到各对应的回归分析图,选取拟合值最高的训练函数.

2.1.2 数据的过拟合问题 为了防止过拟合问题,先把拥有的数据分为训练数据和测试集两部分,进一步将训练数据分为训练集和验证集,训练集用于训练 BP 神经网络,验证集用于测试性能并调整超参数,测试集用于评价训练得到的模型的性能. 在划分训练集和验证集时使用交叉检验法,找到使得模型泛化性能最优的超参数,之后在全部训练集上重新训练模型. 本文采用 K 折交叉验证用于模型调优,原理是将原始训练集划分为 K 组大小相似的互斥子集,每次将其中的一组作为测试集,剩下的 K-1 组作为训练集,进行 K 次训练和检验,最终返回 K 个测试结果,使用 K 次测试返回结果的平均作为评估指标. 较为常用的是 K 取 10.

2.1.3 模型性能评价 本文采用均方根误差(RMSE)、平均绝对误差百分比(MAPE)、相关系数(R)和分类正确率(CATS)来评价模型的性能. 均方根误差反映了预测值与目标值之间的绝对偏离;平均绝对误差百分比反映了预测值与目标值之间的相对偏差程度;相关系数反映预测值与真实值的线性相关程度;分类正确率反映了模型的学习能力. 总的来说,均方根误差和平均绝对误差百分比越小,相关系数和分类正确率越大,模型性能也就越好.

2.2 水环境承载力预警警度界定方法

将超载指数转化为预警等级即警度之前需要划分警限,本文采用控制图法确定警限. 利用控制图法的前提是假定预警指标服从正态分布,比较其预警指标数据的预警期望值(平均值 X)与标准差 σ 的偏离程度,根据数据实际情况将 $X \pm \sigma$ 、 $X \pm 2\sigma$ 、 $X \pm 3\sigma$ 纳入考量,从而进行界定警度区间. 如果数据是非正态的,那么就不能直接用控制图法. 因此首先对预测的指数进行正态分布检验,利用 SPSS 进行正态性检验,如果不符合正态分布,则需要进行正态变换,本文中采用的是取对数变换处理,再进行正态检验. 通过检验后,对变换后的数据求其 σ 值,参考控制图法原理,确定警度区间.

警限的确定往往要考虑区域的实际情况,要根据具体的情况进行分析. 由水环境承载力指数构造的内涵可知,利用指数大小比较的是流域内各区域水环境承载力超载状态相对严重程度,因此在划分警界时必须考虑研究区域的实际情况,使得最终的结果更符合实际,也更有参考价值. 本文在划分预警区间时考虑了区域承载力超载状态的变化趋势,以此来反映承载力超载状态会持续加剧或趋缓,其中变化趋势用连续 3 年以上的水环境承载力超载指数回归直线的斜率 k 表征. 综上所述,具体按照下表中的等级划分方法对水环境承载力超载指数划分警限.

表 1 预警等级划分方法

Table 1 Early warning grades

警限标准		$I < X - \sigma$	$X - \sigma \leq I < X$	$X \leq I < X + \sigma$	$I \geq X + \sigma$
变化过程	变差 $k > 0$	黄色预警区	橙色预警区	红色预警区	红色预警区
	变好 $k \leq 0$	绿色无警区	黄色预警区	橙色预警区	

2.3 水环境承载力预警排除警情方法

当警情发生时,决策者需要采取一定的响应来

解除警情,这种响应就是排警决策. 但是排警决策的制定要有依据,它应该从警情发生的角度进行分

析,同时还应考虑决策的可行性和成本大小. 在实际中,可以考虑从双向调控的角度提出减轻水环境承载力超载状态警情的对策,一方面,可以考虑相关措施来提高水环境承载力,另一方面可以采取降低社会经济活动给水环境带来的压力. 综合考虑研究区域的实际情况,提出缓解水环境承载力超载状态的对策建议.

3 案例研究: 北运河流域 (Case study: Beiyunhe river basin)

北运河发源于北京市昌平区,流域涉及北京市东城、西城、朝阳等 13 个行政区,以及河北省安次、广阳和香河县 3 个行政区,天津北辰、红桥、河北和

武清 4 个行政区,流域内总人口超过 1800 万,其中北京超过 1700 万,占全市人口 75% 以上,占全市 GDP 的 80% 以上. 在北京市五大水系中,北运河流域是人口最为集中、产业最为密集、城市化水平最高的区域,因此北运河流域的环境状况直接影响沿边经济发展和人民的日常生活. 北运河已经成为了北京市的主要排水纳污水系,北运河的来水水源也主要是市区污水处理厂排水以及城市下游纳污河道的排水(单铎,2013),自然水源补充相对来说不足,河道自净能力不足. 与此同时,流域污染负荷也日益加重. 虽然北京市一直致力于改善流域水体,但是下游水体还是难以达到水功能标准,水环境状况不容乐观.

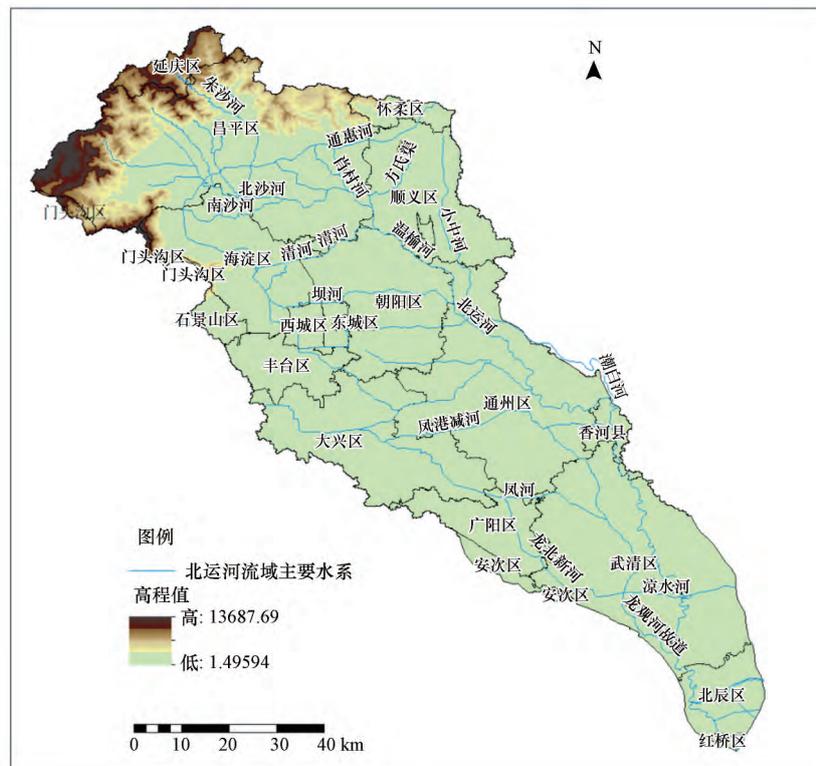


图 2 北运河流域河流水系图

Fig.2 River network of Beiyunhe river basin

3.1 数据来源

本研究中原始数据主要来自于《中国区域年鉴》、《北京区域年鉴》、《天津统计年鉴》、《廊坊统计年鉴》、《廊坊经济年鉴》、《河北农村统计年鉴》、《北辰统计年鉴》、《武清统计年鉴》、《天津水资源公报》、《北京市水资源公报》以及相关部门统计数据、学者的研究成果等,基于收集到京津冀统计资料对北运河流域各类污染源进行统计,计算各预警单元

的污染物排放量,污染物入河量则通过污染排放量与入河系数的乘积得到,因数据限制门头沟区不在本文水环境承载力预警研究范围内.

3.2 水环境承载力预警指标体系构建

水环境承载力本质上是指水系统对人类活动的综合承载能力,通常包含水环境容量、水资源承载力和水生态承载力 3 个分量(崔丹等,2018). 针对短期预警的研究目的,水生态承载状态在短期内

较为稳定,通常在中长期预警的情形下才有必要考虑,因此本文只考虑水环境容量承载状态和水资源承载状态两个分量。

根据行政管理的需求,按照行政单元边界将流域划分为东城区、西城区、朝阳区、石景山区、海淀区等 20 个预警单元。本研究中预警指标体系主要包括反映警情的指标和警情指标两部分。基于水环境承载力的概念,水环境容量和水资源承载力的主要表征方法除了包括污染物水环境容量和水资源量,还应考虑社会经济系统。根据北运河流域降雨时空分布不均等自然特性、经济发展水平差距较大、污染排放严重等社会特性,同时考虑到数据的可得性,最终选择了以下 13 个反映警情的指标。

表 2 研究中主要指标选择
Table 2 Main indicators

要素层	指标	单位
社会经济发展	人口数	万人
规模、结构	GDP	亿元
	第三产业占 GDP 的比重	
	环保支出占比	
污染排放与资源	人均水耗	m ³
利用强度	万元 GDP 水耗	t
	万元 GDP 化学需氧量排放量	t
	万元 GDP 氨氮排放量	t
	万元 GDP 总磷排放量	t
污染净化与	年降雨量	mm
水资源供给	污水处理量	m ³
	水资源总量	万 m ³
	地表水资源量	万 m ³

警情指标即水环境承载力超载状态表征指标,借鉴环境承载率理论构建。水环境容量通常是利用水质模型反演得到,但是费时费力。本文所建立水环境承载力预警方法是面向流域水环境监管年度考核,指标数据大多源于统计资料;因此没必要花费大量精力计算水环境容量的绝对值,而是基于可以收到的年报与统计数据构建了水环境容量指数,以表征水环境容量的相对大小。水环境容量指数顾名思义就是表征水环境容量大小的指数,旨在不计算具体水环境容量情况下,用影响水环境容量大小的相关指标来表征水环境承载容量的大小,从而可以对比各区域水环境容量的相对大小,在流域行政管理上具有一定的实际意义。

①水环境容量指数构建。水环境容量相对大小可以由地表水资源量、断面水功能目标及上游来水

水质浓度决定。水资源量越大,断面水功能目标对应的污染物浓度越高,水环境容量越大,上游来水污染物浓度越高,水环境容量越小。据此,构建水环境容量指数的公式,见式(1)。

$$I_w = \frac{Q \times c_1}{c_0} \quad (1)$$

式中, I_w 为水环境容量指数, Q 为地表水资源量相对值, c_1 为断面水功能目标对应的污染物浓度相对值, c_0 为上游来水污染物浓度相对值。由于 I_w 是一个体现相对大小的指数,因此在计算之前要对涉及到的计算指标原始值进行无量纲归一化处理,得到对应的相对值 Q 、 c_1 、 c_0 。

在本研究中,选择 COD、氨氮、总磷 3 种因子作为研究对象,分别构建 COD 环境容量指数、氨氮环境容量指数和总磷环境容量指数,如下所示:

$$I_{w_COD} = \frac{Q_{\text{地表水}} \times c_{1_COD}}{c_{0_COD}} \quad (2)$$

$$I_{w_氨氮} = \frac{Q_{\text{地表水}} \times c_{1_氨氮}}{c_{0_氨氮}} \quad (3)$$

$$I_{w_总磷} = \frac{Q_{\text{地表水}} \times c_{1_总磷}}{c_{0_总磷}} \quad (4)$$

式中, I_w 为行政区水环境容量指数; Q 选用流域内行政区的地表水资源量相对值; c_1 选择流域内各行政区的水功能目标所对应的浓度的相对值; c_0 选择流域内各个行政区内的所有断面污染物平均浓度。各计算指标原始值需提前进行无量纲归一化处理,因此在式(2)~(4)中均不带有单位。

②水环境承载力超载指数构建。基于以上理论,构造 COD 环境承载力超载指数、氨氮承载力超载指数、总磷承载力超载指数和水资源承载力超载指数作为警情指标来反映流域内各行政单元水环境承载力承载状态的相对好坏,指数构造如下所示:

$$I_{\text{超载_COD}} = \sqrt{\frac{\text{COD 入河量相对值}}{\text{COD 容量指数}}} = \sqrt{\frac{P_{\text{COD}} \times c_{0_COD}}{Q_{\text{地表水}} \times c_{1_COD}}} \quad (5)$$

$$I_{\text{超载_氨氮}} = \sqrt{\frac{\text{氨氮入河量相对值}}{\text{氨氮容量指数}}} = \sqrt{\frac{P_{\text{氨氮}} \times c_{0_氨氮}}{Q_{\text{地表水}} \times c_{1_氨氮}}} \quad (6)$$

$$I_{\text{超载_总磷}} = \sqrt{\frac{\text{总磷入河量相对值}}{\text{总磷容量指数}}} = \sqrt{\frac{P_{\text{总磷}} \times c_{0_总磷}}{Q_{\text{地表水}} \times c_{1_总磷}}} \quad (7)$$

$$I_{\text{超载_水资源}} = \sqrt{\frac{\text{用水总量}}{\text{水资源总量}}} \quad (8)$$

式中, $I_{\text{超载_COD}}$ 、 $I_{\text{超载_氨氮}}$ 、 $I_{\text{超载_总磷}}$ 分别为流域内各行政单元的 COD、氨氮、总磷水环境容量承载力超载指数; P_{COD} 、 $P_{\text{氨氮}}$ 、 $P_{\text{总磷}}$ 分别为流域内各行政单元的 COD 入河量相对值、氨氮入河量相对值和总磷入河量相对值, 分别由 COD 入河量、氨氮入河量和总磷入河量无量纲归一化处理得到; $I_{\text{超载_水资源}}$ 表示水资源承载力超载指数.

3.3 基于 BP 神经网络的预警模型构建与验证

BP 神经网络预警模型的输入是警情指标(水环境承载力超载指数)与反映警情的指标(系统中的其他影响警情的指标), 输出则是未来水环境承载力超载指数.

在时间序列神经网络模型的构建过程当中, 输入层神经元个数即输入步长 m 、输出层神经元个数即输出时间步长 n 的选择非常重要. 如果输入步长选择过大, 模型中的输入数据就会过多, 冗余无关的历史数据可能就会引入到模型当中, 如果输入步长太小可能无法反映变化趋势. 同样 n 的选择也会直接影响预测的精度. 通过综合考虑和多次尝试, 最终选择 $m=3, n=1$, 选取 2008—2017 年北运河流域主要涉及的 19 个行政区的水环境承载力预警指数构建训练样本. 依据输入步长为 3, 输出步长为 1 构造训练样本, 从而得到 2011—2017 年一共 133 组样本. 进而将 2011—2016 年的 114 组数据作为训练数据, 利用 10 折交叉验证划分训练集和验证集, 进行参数优选, 2017 年的 19 组数据作为测试集用来检验训练完神经网络的输出误差. 分别构建 COD、氨氮、总磷和水资源承载力预警模型.

用前 3 年的水环境承载力超载指数及影响警情的指标, 输出为后一年水环境承载力超载指数. 系统的输入值过多, 会使 BP 神经网络在验证的时候数据集不能很好地拟合数据, 因此针对各个模型选择相关性较高的指标, 各个模型中涉及的输入输出指标如表 3 所示. 每个模型中选取了 8 个反映警情的指标, 模型样本的构造如表 4 所示.

3.3.1 模型构建与训练 在 MATLAB 中构建三层 BP 神经网络, 即一个输入层(节点数为 27)、一个输出层和一个隐含层(节点数为 1). 隐含层节点数的选择非常重要, 考虑研究问题的复杂性和非线性因素, 在交叉交叉验证的基础上利用试错法来选择网络隐含层的节点个数, 即选取输出误差最小时对应的隐含层节点数. 具体操作方法是将在隐含层节点数由 5 个逐步增加到 30 个, 逐一进行训练, 最终得到

表 3 各模型的输入和输出指标

Table 3 Input and output indicators of each model

模型	指标类别	指标名称
COD/氨氮/总磷承载力预警模型	输入指标	COD/氨氮/总磷承载力超载指数
		总人口
		GDP
		三产占比
		万元 GDP 氨氮排放量
		地表水资源量
		降雨量
		节能环保支出占比
水资源承载力预警模型	输入指标	COD/氨氮/总磷承载力超载指数
		水资源承载力超载指数
		总人口
		GDP
		三产占比
		万元 GDP 水耗
		人均水耗
		水资源总量
	输出指标	节能环保支出占比
		降雨量
		COD/氨氮/总磷承载力超载指数
		水资源承载力超载指数
		节能环保支出占比
		降雨量
		水资源承载力超载指数
		水资源承载力超载指数

表 4 样本构建方式

Table 4 Sample construction method

输入层	输出层	类型
$y_{m2008}, y_{m2009}, y_{m2010}, x_{2008}, x_{2009}, x_{2010}$	x_{2011}	训练集与验证集
$y_{m2009}, y_{m2010}, y_{m2011}, x_{2009}, x_{2010}, x_{2011}$	x_{2012}	
$y_{m2010}, y_{m2011}, y_{m2012}, x_{2010}, x_{2011}, x_{2012}$	x_{2013}	
$y_{m2011}, y_{m2012}, y_{m2013}, x_{2011}, x_{2012}, x_{2013}$	x_{2014}	
$y_{m2012}, y_{m2013}, y_{m2014}, x_{2012}, x_{2013}, x_{2014}$	x_{2015}	
$y_{m2013}, y_{m2014}, y_{m2015}, x_{2013}, x_{2014}, x_{2015}$	x_{2016}	
$y_{m2014}, y_{m2015}, y_{m2016}, x_{2014}, x_{2015}, x_{2016}$	x_{2017}	测试集

注: 1) y 为各模型中影响警情的指标, $m=1, 2, \dots, 8, x$ 为 COD/氨氮/总磷/水资源承载力超载指数.

COD、氨氮、总磷和水资源承载力预警模型分别在隐含层节点数为 25、23、29 和 27 时对应的测试误差(平均绝对误差百分比)最小, 选择作为模型训练的隐含层节点数. 在训练中, 设置学习步长为 0.01, 动量项系数为 0.9, 收敛误差为 0.0001.

```

%设置学习步长
net.trainParam.lr=0.01;
%设置动量项系数
net.trainParam.mc=0.9;
%设置显著数据间隔
net.trainParam.show=50;
%设置训练次数
net.trainParam.epochs=50000;
%设置收敛误差
    
```

net.trainParam.goal=0.0001;

经验,神经网络模型对训练样本的拟合程度较高,平均绝对误差分别为 0.79%、0.78%、0.94% 和 1.26%,输出值和期望值基本完全一致. 接下来同样将训练好的网络模型保存后利用函数 $Y = \text{sim}(\text{net}, P\text{-test})$ 对 2017 年的样本进行检验.

表 5 各模型仿真主要参数及误差

承载力预警模型	隐含层节点数	隐含层传递函数	输出层传递函数	训练函数	模型误差
COD	25	tansig	tansig	trainlm	0.1347
氨氮	23	tansig	tansig	trainlm	0.2002
总磷	29	tansig	tansig	trainlm	0.2448
水资源	27	tansig	tansig	trainlm	0.1346

3.3.2 模型检验 通过训练好的承载力预警模型对测试样本进行仿真,系统最终计算结果如下所示:各承载力预警模型的性能评价参数如表 6 所示. 由历史性检验可知,各预警模型的网络拟合效果较好,总体误差在 20%左右. 总的来说,构建的模型仿真效果可信,能够很好地预测出各个承载力超载指

表 6 模型性能评价

模型	RMSE	MAPE	R	CATS
COD 承载力预警模型	0.33	18.30%	0.90	78.95%
氨氮承载力预警模型	0.25	21.29%	0.90	73.68%
总磷承载力预警模型	0.12	22.88%	0.87	78.95%
水资源承载力预警模型	0.3	17.32%	0.94	78.95%

数,达到建模目的,可以成立. 由于所构建的复杂系统本身存在许多的不确定因素,各区域发展过程中,个别年度会因为政策变化、突发环境灾害、甚至是统计口径的变化,使得模型内出现相对误差高的情况,这是正常的现象.

4 结果与分析(Results and discussion)

4.1 各分量承载力预警结果

利用最终保存好的神经网络,对研究区 2018 年的水环境承载力超载指数进行预测,输入指标为前 3 年即 2015、2016 和 2017 年的承载力超载指数、GDP、人口数等 27 项指标,预测得到 2018 年各行政单元的 COD 承载力超载指数、氨氮承载力超载指数、总磷承载力超载指数和水资源承载力超载指数. 如表 7 所示.

北运河流域主要覆盖 3 个省市,根据文献调研(解钰茜等,2019),显示京津冀 3 个省市的环境承载力长期处于严重超载的状态. 同时根据北京市生态状况公报,北运河的水质一直较差,V 类水占比近 40%. 说明北运河水环境超载状态较为严重,在此背景下,基于前文所述的预警等级划分方法,通过相对大小的比较对流域内各区超载的严重程度进行等级划分,最高的等级为重警区,其次依次为中警、轻警和无警,具体结果如表 8 所示. 根据各行政单元承载力超载指数预测结果与警度划分表得到 2018 年北运河流域各行政区的各分量承载力警度分布如图 3 所示.

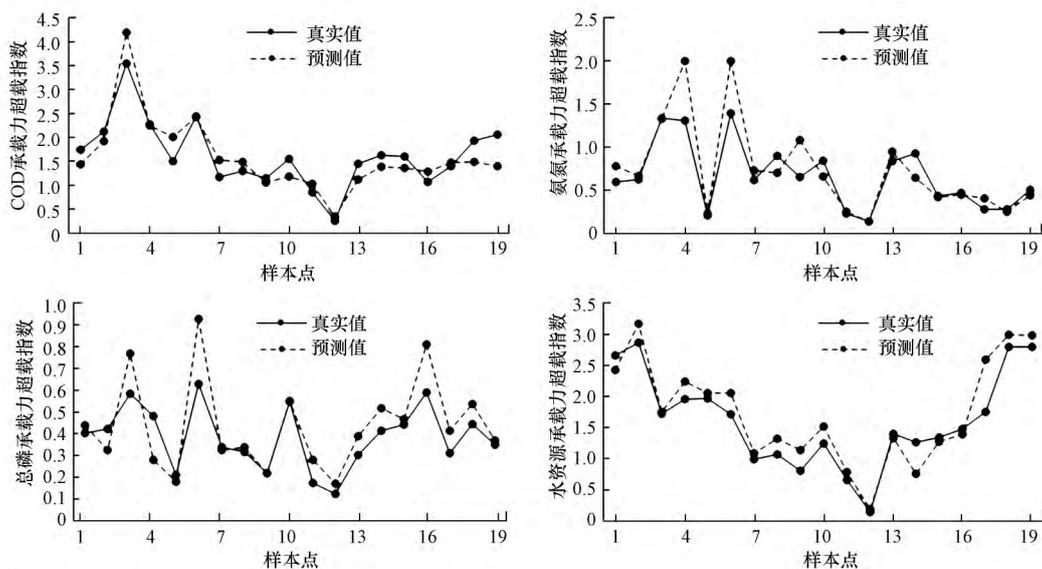


图 3 各承载力预警模型输出值与真实值

Fig.3 Output value and true value of each model

表 7 2018 年各行政单元承载力超载指数预测结果

Table 7 Predicted results of the carrying capacity overload index of each administrative district in 2018

地区	COD 承载力 超载指数	氨氮 承载力 超载指数	总磷 承载力 超载指数	水资 源承载力 超载指数	地区	COD 承载力 超载指数	氨氮 承载力 超载指数	总磷 承载力 超载指数	水资 源承载力 超载指数
东城区	1.2736	0.3015	0.3455	3.3269	怀柔区	0.6138	0.2234	0.1698	1.1288
西城区	1.9025	0.8828	0.4862	3.7321	延庆区	0.3800	0.1445	0.1858	0.2027
朝阳区	4.6001	1.7173	0.7676	2.4669	安次区	1.0471	0.2190	0.1870	2.1425
丰台区	4.2709	1.5135	0.3265	2.7020	广阳区	1.9930	1.2488	0.6110	1.5896
石景山区	1.0268	0.1757	0.1725	2.8746	香河县	0.9615	0.5085	0.3152	1.9966
海淀区	2.5997	1.8459	0.8021	2.2025	武清区	1.2780	0.4647	0.5293	1.7065
通州区	0.8776	1.3232	0.3151	2.0442	北辰区	1.6560	0.6158	0.2123	2.2440
顺义区	1.2829	1.1162	0.3197	0.9690	红桥区	1.3563	0.4192	0.8096	3.2003
昌平区	1.2667	0.5170	0.2128	0.6103	河北区	1.0346	0.7727	0.2511	3.1178
大兴区	1.1401	1.1732	0.8180	2.3258					

表 8 承载力警度划分表

Table 8 Carrying capacity alarm grades

承载力	警限标准		I < 0.76				0.76 ≤ I < 1.31		1.31 ≤ I < 2.25		I ≥ 2.25	
	变化过程	变差 变好	k > 0 k ≤ 0	黄色轻警区 绿色无警区	橙色中警区 黄色轻警区	红色重警区 橙色中警区	红色重警区 橙色中警区	红色重警区 橙色中警区	红色重警区 橙色中警区			
COD 承载力	警限标准		I < 0.27		0.27 ≤ I < 0.61		0.61 ≤ I < 1.37		I ≥ 1.37			
	变化过程	变差 变好	k > 0 k ≤ 0	黄色轻警区 绿色无警区	橙色中警区 黄色轻警区	红色重警区 橙色中警区	红色重警区 橙色中警区	红色重警区 橙色中警区				
氨氮承载力	警限标准		I < 0.20		0.20 ≤ I < 0.35		0.35 ≤ I < 0.58		I ≥ 0.58			
	变化过程	变差 变好	k > 0 k ≤ 0	黄色轻警区 绿色无警区	橙色中警区 黄色轻警区	红色重警区 橙色中警区	红色重警区 橙色中警区	红色重警区 橙色中警区				
总磷承载力	警限标准		I < 1.19		1.19 ≤ I < 2.14		2.14 ≤ I < 3.08		I ≥ 3.08			
	变化过程	变差 变好	k > 0 k ≤ 0	黄色轻警区 绿色无警区	橙色中警区 黄色轻警区	红色重警区 橙色中警区	红色重警区 橙色中警区	红色重警区 橙色中警区				

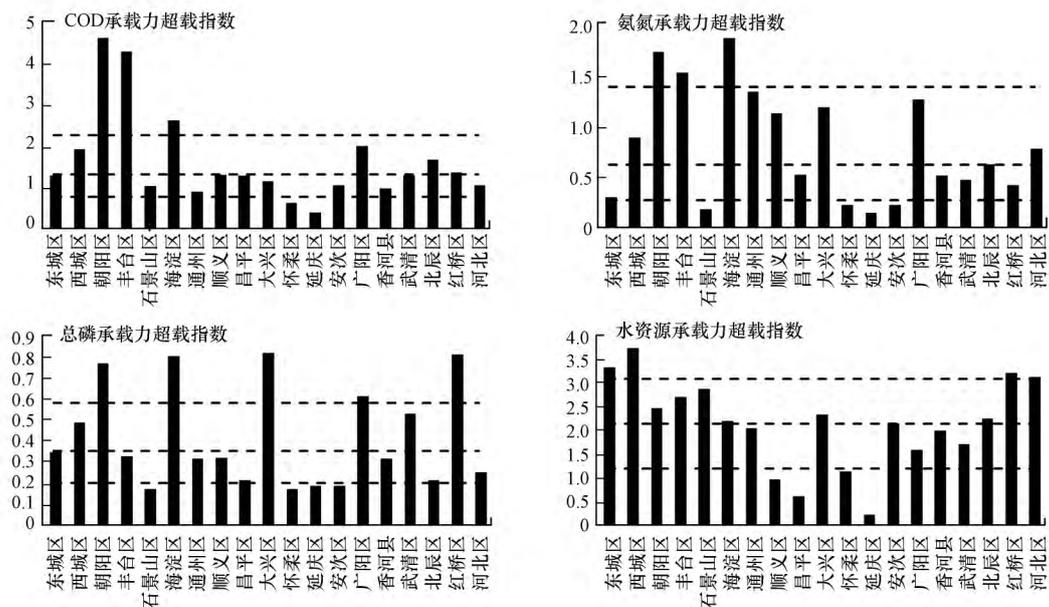


图 4 各分量承载力超载指数分布图(图中虚线为各个警度划分线)

Fig.4 Distribution diagram of overload index of each carrying capacity

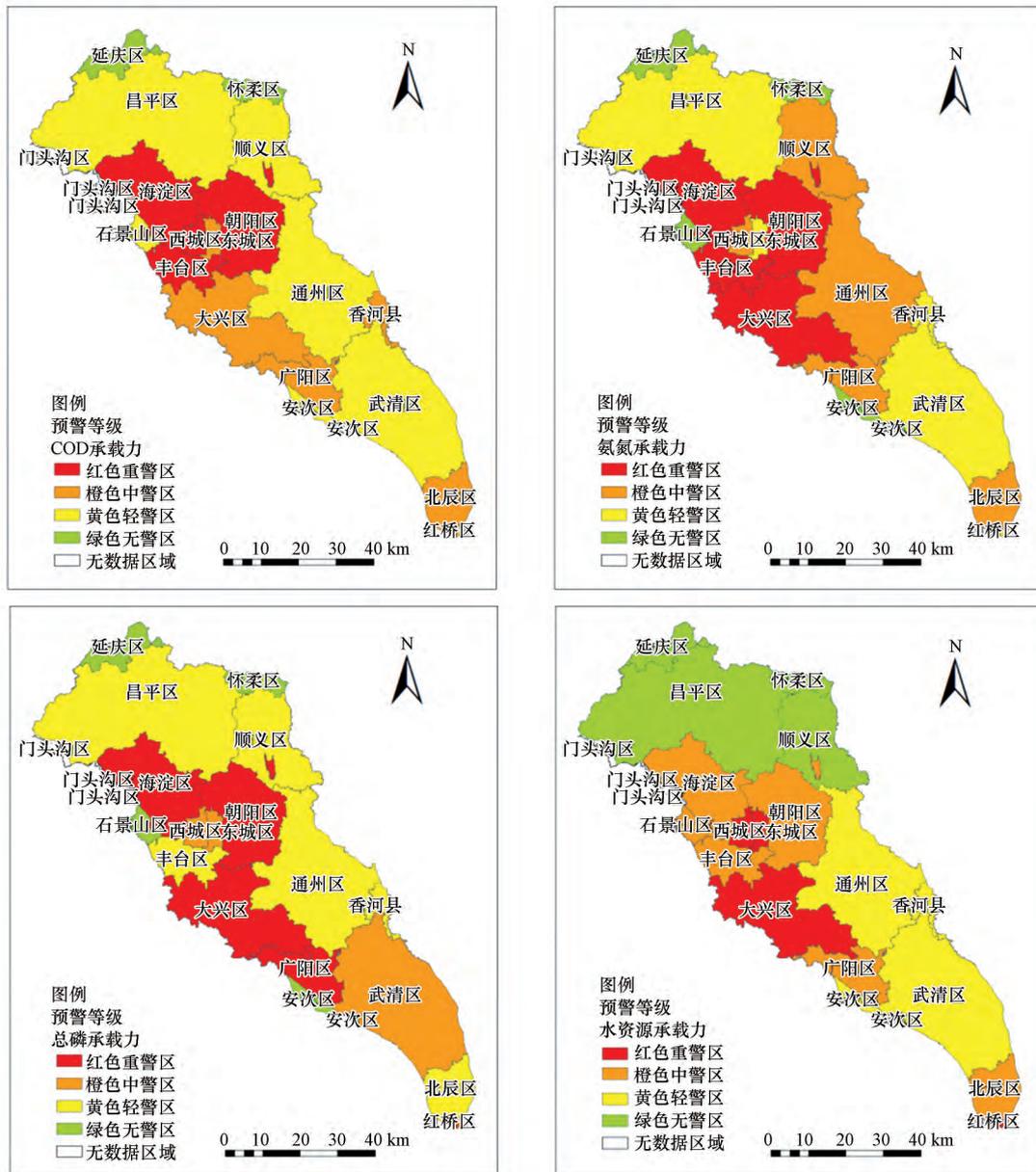


图5 2018年北运河流域各分量承载力预警结果

Fig.5 Early warning results of each carrying capacity in Beiyunhe river basin in 2018

结果显示,朝阳区、海淀区、丰台区、西城区和红桥区 COD 承载力超载状态亮起了红灯,发出了重度预警的信号,情况紧急. 其中朝阳区、海淀区、丰台区、西城区属于北京中心城区,人口稠密、产业集中,城市化水平较高,是北京市内发展程度最高、速度最快的区域,因而 COD 排放量水平很高,水环境质量受社会活动影响较大. 近年来的 COD 排放量主要来自点源,朝阳区和丰台区超过七成,海淀区超过六成. 红桥区的 COD 排放主要集中在城镇面源,且近几年超载指数有上升的趋势,超载加剧,所以

落在了红灯预警区域,同样需要重点关注. 东城区、大兴区、广阳区、香河县和北辰区落在了橙色预警区,发出了中警的信号,COD 承载力的超载状态比较严重. 其中东城区,人口密度较高,COD 排放量几乎全部来自于城镇生活,水质较差,此外区域水资源量较小,水环境容量有限,造成了 COD 承载力超载. 大兴区 COD 排放量较大,污染物来源主要是农业和城镇生活排放,而且大兴区位于凉水河下游,区域污染程度较高. 香河县、广阳区和北辰区 COD 排放则主要来自面源. 其中大兴区和香河县超载指

数有上升趋势值得注意. 昌平区、顺义区、石景山区、武清区、通州区、河北区和安次区 COD 承载力超载状态相比较北运河流域中的中警和重警区域轻微一些, COD 承载力状态有变好的趋势, 发出轻警的区域需要采取相关措施以防往更坏的方向发展. 延庆区、怀柔区相对于其他地区 COD 承载力状态要好, 落在了绿色无警区域, 位于北运河流域上游地区, 整体水质较好.

对于氨氮承载力而言, 朝阳区、海淀区、丰台区和大兴区发出了重警的信号, 落在了红色预警区. 朝阳区、海淀区和丰台区的城市发展水平高, 氨氮排放量较大, 大部分来自于城镇生活污水排放, 小部分来自区域内污水处理厂排放, 对区域氨氮承载力影响较大. 大兴区的氨氮排放量主要来自 3 个方面, 城镇生活、农业和污水处理厂, 区域内水质较差. 西城区、顺义区、通州区、北辰区、广阳区和河北区的氨氮承载力发出了中警的信号. 位于中心城区的东城区的氨氮排放主要来自生活面源排放, 顺义区和通州区离北京中心较远, 发展水平不及中心城区高, 氨氮排放量主要来自面源, 除了城镇生活污染排放外, 农业面源排放量较大, 面源污染较为严重. 北辰区、广阳区和河北区的氨氮排放同样来自面源, 其中生活污水和农业污染排放占据了较大比例, 面源污染严重, 因而氨氮承载力不容乐观. 东城区、昌平区、香河县、武清区和红桥区等 7 个区域落到了黄色预警区, 发出了轻警的信号. 这些区域的氨氮排放水平相对较低, 且连续 3 年以上的水环境承载力指数回归直线的斜率为负, 总磷超载状态趋缓, 因此划到了轻警区. 延庆区、广阳区、昌平区和安次区则落在了绿色无警区域, 氨氮承载力状态相较其他区域较好.

对于总磷承载力而言, 朝阳区、海淀区、大兴区、广阳区和红桥区属于红色预警区, 发出了重警信号. 朝阳区和海淀区发展水平高、发展速度快, 总磷排放水平高, 总磷承载力超载依然严重, 主要是区域内城镇生活污水和污水处理厂排放. 大兴区和广阳区面源污染比较严重, 总磷排放绝大部分来自农业面源, 主要是畜禽养殖和种植业. 西城区、东城区、武清区和河北区属于橙色预警区, 发出了中警的信号. 西城区和东城区北京中心城区发展水平较高, 总磷排放主要来自城镇生活污水. 武清区和河北区的总磷排放主要集中在农业, 其次是城镇生活排放, 农业面源污染较为严重, 水质较差. 丰台区、

通州区、顺义区、香河县、昌平、北辰区落在了黄色轻警区, 超载状态较为轻缓, 且处于黄色轻警区的几个区域超载指数是下降趋势. 延庆区、怀柔区、石景山区和安次区则属于绿色无警区, 总磷排放水平较低, 情况较好.

对于水资源承载力而言, 东城区、西城区、大兴区、红桥区和河北区发出了重警的信号; 朝阳区、海淀区、石景山区、丰台区、广阳区和北辰区等 7 个区发出了中警的信号. 从图 5 可以看出, 北京中心城区水资源情况比较危急, 主要原因是这些区域的水资源紧缺, 同时人口密度较高, 生活用水量大, 水体受到人类活动影响较大, 因此水资源承载力超载状况严重. 红桥区和河北区相对来说水资源量很少, 主要是生活用水, 造成水资源紧张, 且这 3 个区域的水资源承载力超载指数连续 3 年以上的水环境承载力指数回归直线的斜率为正, 有超载加剧的可能, 因此划到了红色预警区. 通州区、武清区水资源量相对丰富, 人均水资源量较大, 因此落在了黄色预警区; 位于上游地区的怀柔区、延庆区和广阳区则相对来说水资源超载情况最好.

4.2 水环境承载力综合预警等级

以上是各行政区不同分量的水环境承载力指数, 本研究将结合内梅罗指数法(曾维华等, 2017)和短板法则得到水环境承载力的综合预警等级. 内梅罗指数法克服了平均值法各要素分摊的缺陷, 考虑到每个元素的平均值和最大值, 它可以突出显示最严重的超载因素的影响和作用(贾紫牧等, 2018). 根据卡顿的提出的最小法则, 环境承载力是由最不足且不便获取的物资确定的, 这也就是短板效应. 因此在本文中, 先用内梅罗指数法计算水环境容量指数, 对水环境容量指数进行预警等级划分后, 根据短板效应取水环境容量预警等级和水资源承载力指数中的较严重的预警等级, 得到水环境承载力综合预警等级. 其次根据上述预警等级划分方法对水环境容量承载力超载指数进行等级划分, 并根据短板效应取水环境容量承载力预警等级和水资源环境承载力预警等级中的严重者, 得到最终的水环境承载力综合预警等级.

综合各个水环境承载力要素, 最终得到综合水环境承载力预警等级, 朝阳区、海淀区、西城区、东城区、丰台区、大兴区、河北区和红桥区落在了红色重警区域; 石景山区、广阳区、北辰区和香河县处于橙色中警区域; 昌平区、顺义区、通州区、武清区和

安次区处于黄色轻警区域;怀柔区和延庆区处于绿色无警区域. 结合上文对各个分量预警的结果来看,总的来说,北运河流域上游地区水环境承载力状态较好,中下游地区相对较差.

表 9 水环境容量预警结果

Table 9 Water environment capacity warning results

地区	水环境容量 超载指数	警度	警示灯颜色
东城区	1.008	轻警	黄色
西城区	1.551	中警	橙色
朝阳区	3.656	重警	红色
丰台区	3.346	重警	红色
石景山区	0.795	轻警	黄色
海淀区	2.216	重警	红色
通州区	1.108	轻警	黄色
顺义区	1.111	轻警	黄色
昌平区	1.012	轻警	黄色
大兴区	1.110	轻警	黄色
怀柔区	0.495	无警	绿色
延庆区	0.317	无警	绿色
安次区	0.816	轻警	黄色
广阳区	1.676	中警	橙色
香河县	0.800	中警	橙色
武清区	1.050	轻警	黄色
北辰区	1.309	中警	橙色
红桥区	1.136	中警	橙色
河北区	0.878	中警	橙色

表 10 水环境承载力综合预警等级

Table 10 Comprehensive warning level of water environment carrying capacity

地区	警度	警示灯颜色
东城区	重警	红色
西城区	重警	红色
朝阳区	重警	红色
丰台区	重警	红色
石景山区	中警	橙色
海淀区	重警	红色
通州区	轻警	黄色
顺义区	轻警	黄色
昌平区	轻警	黄色
大兴区	重警	红色
怀柔区	无警	绿色
延庆区	无警	绿色
安次区	轻警	黄色
广阳区	中警	橙色
香河县	中警	橙色
武清区	轻警	黄色
北辰区	中警	橙色
红桥区	重警	红色
河北区	重警	红色

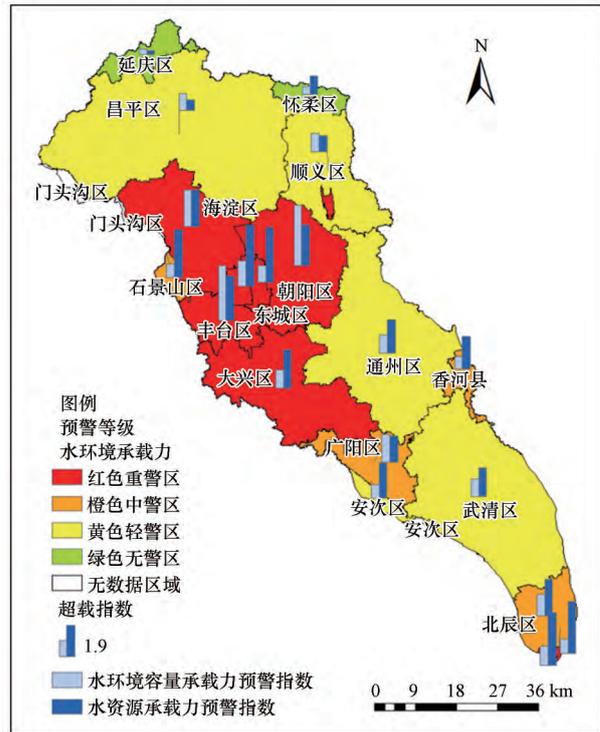


图 6 2018 年北运河流域水环境承载力综合预警结果

Fig.6 Comprehensive early-warning results of the water environment carrying capacity in Beiyunhe river basin in 2018

由预警结果可知,北运河流域有一半以上区域处于重警或中警的状态,水环境承载力超载状况严重,如果不加以调控,水环境承载力将持续超载,甚至会让流域的水环境往衰败的方向发展. 面对如此严峻的形势,必须要采取相应的排警措施.

4.3 相应排警措施的制定

在排警措施方面,由于影响水环境承载力状态的原因是多方面的,可以基于双向调控从提高水环境承载力和降低社会经济活动对水环境的压力两个方面入手,进一步,可以从流域的水环境全过程控制角度将措施细分为前端、过程和末端 3 个方面考虑调控措施,本研究提出了改善北运河流域承载力超载状态的双向调控措施,具体如表 11 所示.

处于红色与橙色预警区的区域水环境承载力超载比较严重,在行政管理中需要重点治理:

朝阳区、海淀区:属于北京中心城区,区域经济发展速度快,人口稠密,产业密集,区域三产占比已经达到很高水平,在流域内水环境承载力常年超载严重,主要问题在于区域污染物排放量大,集中在城镇生活污水、污水处理厂排放,其次是水资源较为紧张.工作重心可以放在减少生活污水直排,积极

开展水污染防治工作,成立水污染综合治理领导小组,实行“谁污染谁补偿”经济补偿机制,督促属地落实责任;同时开展追根溯源工作,摸排排水口,加强执法和监管力度;继续大力实行河长制,制定本区域水质评定目标,量化考核;加大专项投入,大力加强宣传节水理念,取得社会共识.逐步减缓区域水环境承载力超载状况,使区域水环境承载力与经济社会发展逐步适应.

表 11 北运河流域水环境承载力超载状态双向调控措施

Table 11 Two-way control measures for the overloading state of water environment carrying capacity in Beiyunhe river basin

原则	分类	按生命周期细分	具体措施
提高水环境承载力		前端	通过水利工程进行调水
		过程	加强设施蓄水
		末端	雨水收集回用
			提高污水处理量 完善截污官网,提高污水再生回用率
降低社会经济活动对水环境压力	前端		调整经济结构及增速
			调整人口规模
			产业经济结构转型升级
	过程		加大环保投入
			生活生产宣传节水、提高水回用率
			工业推进清洁生产
末端		提高污水收集处理率 减少生产生活污染物排放 节水回用	

西城区、东城区、丰台区:水环境承载力超载的主要原因在于水资源短缺,区域内人口多,生活用水量大,供需矛盾仍然突出.其次区域内生活污水排放是主要的污染来源.工作重心可以放在水资源的高效利用,严格落实区域用水总量控制和行业用水效率控制,进一步强化计划用水和定额管理,制定区域的用水计划,深入推行河长制,加强督查工作,西城区可以加大力度推行街巷长制,协助推进河长制工作体系建设;开展清河行动,对重点河段进行整治,减轻水体污染.

大兴区:水环境承载力超载的主要原因在于区域内水体污染严重,一方面大兴区位于凉水河下游,水体水质较差,另一方面,自 2013 年以来,随着整顿和重建工作强度不断加强,以及搬迁房屋和保障房的建设不断增加,人口迅速从市区聚集到郊区,并从建成区转移到非建成区,导致污水产生量大大超过规划预期;此外,零星的排污企业、畜禽养

殖业等污水不时直接进入河道,尚未得到充分控制,面源污染较为严重.工作重心可以放在调控经济发展方式,加快产业经济结构转型升级,调整人口规模;加快建设高效节水农业,促进雨养农业(农业生产完全依靠自然降水),水肥一体化和土壤试验配方,鼓励使用低污染肥料,加强农业排水沟的生态修复,加强农用排水沟渠的生态恢复,减少多余养分的输入,提高农业排涝水的自净能力;对于区域内工业要推行清洁生产,减少生产污染物排放,解决区域性工业环境污染问题.

河北区、红桥区:河北区和红桥区位于北运河水系的下游,区域来水水质较差,污染物排放主要来自城镇面源,还存在雨污合流及部分排污口治理效果反复的现象,经常会出现污水直接溢流到河道的现象,以及降雨天污水处理厂超负荷运转,河道水质在降雨天有明显恶化,给北运河的水环境承载力带来了很大的挑战;同时区域内的水资源量又比较紧张.工作重心可以放在加强日常巡查全面推进水污染治理,改善水环境质量;做好雨污混接点排查改造工作,严防生活污水通过雨水口门向河道排放的现象发生;做好雨水管道和雨污合流管道的精细化管理工作;同时加大执法力度,持续用力开展专项整治行动.

石景山区:整体来看区域水质较好,污染物排放主要来自城镇面源,水资源较为短缺,用水量较大,主要是工业用水和生活用水.区域第三产业占比约为 70%,还有提升的空间.工作重点可以放在加快产业经济结构转型升级,对工业结构和布局进行调整,加强工业节水技术改造;同时推进河长制及“清四乱”专项行动.

广阳区、北辰区和香河县:污染物排放主要来自生活面源与农业面源,区域内农业面源污染较为严重,用水大部分都是农业用水.工作重点可以放在农业面源污染治理上,推行农业高效节水建设,鼓励使用低污染化肥,提高农业排涝水的自净能力;对固定污染源进行清理整顿,整治“散乱污”企业.

5 结论(Conclusions)

本文在归纳总结国内外水环境承载力预警相关进展与不足的基础上,分析了水环境承载力的特征,认为水环境具有时间性、空间性、动态性、可调控性等特点,进而提出了水环境承载力预警的内涵;进一步,分析了时间序列预测和人工神经网络

的特点,将二者有机结合,构建了完整的水环境承载力预警方法体系。

本研究以北运河流域为对象,构建了以水环境承载力超载指数为预测指标的 BP 神经网络预警模型,各预警模型的网络拟合效果较好,总体平均绝对百分比误差在 20% 左右。进一步,利用模型对 2018 年北运河流域的水环境承载状态进行预警研究。本文构建了 COD 承载力预警模型、氨氮承载力预警模型、总磷承载力预警模型和水资源承载力预警模型,最后结合内梅罗指数法和短板法则得到综合水环境承载力预警等级。结果表明,朝阳区、海淀区、西城区、东城区、丰台区、大兴区、河北区和红桥区落在了红灯重警区域,水环境承载力超载状况最为严重,亟需做出调整;位于北运河中下游的石景山区、广阳区、北辰区和香河县处于橙灯中警区域,需要采取措施以防超载持续加剧;昌平区、顺义区、通州区、武清区和安次区处于黄色轻警区域;怀柔区和延庆区处于绿色无警区域,状况较好。为了排除警情,基于双向调控的原则,从水环境全过程控制角度,分别对各区域提出了调控区域人口规模及经济发展方式、治理面源污染等具体调控措施。

本文所建立的流域水环境承载力预警方法具有一定针对性与实用性,并具有一定的普适性,能够为促进流域水系统协调发展,提升流域可持续发展形势分析能力与流域水系统管理提供技术支撑。

参考文献 (References):

- Bouma J, Stoorvogel J, Alphen B J V, *et al.* 1999. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 63(6):1763-1768
- 陈国阶.1996.对环境预警的探讨[J].*重庆环境科学*, (5):1-4
- 陈仲常,马红旗,谢小丽.2011.人口承载力预警系统研究[J].*西北人口*,32(4):6-11
- 崔丹,陈馨,曾维华.2018.水环境承载力中长期预警研究——以昆明市为例[J].*中国环境科学*,38(3):1174-1184
- 黄睿智.2018.南宁市水环境承载力评价[J].*科技和产业*,18(3):45-49
- Jia Z, Cai Y, Chen Y, *et al.* 2018. Regionalization of water environmental carrying capacity for supporting the sustainable water resources management and development in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 134:282-293
- 江飞.2015.粗糙集神经网络故障诊断方法研究[D].西安:西安石油

- 大学
- 焦李成,杨淑媛,刘芳,等.2016.神经网络七十年:回顾与展望[J].*计算机学报*,39(8):1697-1716
- 贾紫牧,曾维华,王慧慧,等.2018.流域水环境承载力综合评价分区研究——以湟水流域小峡桥断面上游为例[J].*生态经济*,34(4):169-174+203
- 金菊良,陈梦璐,酆建强,等.2018.水资源承载力预警研究进展[J].*水科学进展*,29(4):583-596
- Katwijk M M V, Welle M E W V, Lucassen E C H E, *et al.* 2011. Early warning indicators for river nutrient and sediment loads in tropical seagrass beds: A benchmark from a near-pristine archipelago in Indonesia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 62(7):1512-1520
- 李如忠.2006.基于指标体系的区域水环境动态承载力评价研究[J].*中国农村水利水电*, (9):42-46
- 刘春艳,凌建春,寇林元,等.2013.GA-BP 神经网络与 BP 神经网络性能比较[J].*中国卫生统计*,30(2):173-176+181
- 刘丹,王烜,曾维华,等.2019.基于 ARMA 模型的水环境承载力超载预警研究[J].*水资源保护*,35(1):52-55+69
- 刘雯雯.2019.辽宁省水资源可持续利用预警研究[J].*水利技术监督*, (2):122-124+227
- Malthus T R. 1798. An essay on the principle of population [M]. London: J. Johson, in St. Paul's Church-Yard
- 秦璐.2019.股票信息的投资价值分析与预测建模研究[D].长春:吉林财经大学
- 任永泰,李丽.2011.哈尔滨市水资源预警模型研究(I)——基于时差相关分析法的区域水资源预警指标体系构建[J].*东北农业大学学报*,42(8):136-141
- 单铎.2013.北运河氨氮降解系数测算研究[D].北京:首都师范大学
- 谭立波,许东.2014.辽河流域水环境预警研究[J].*中国农学通报*,30(35):154-157
- 王根深.2018.基于 BP 神经网络的太湖叶绿素浓度反演[D].南京:南京邮电大学
- 王乃亮,王雪玲,王成元,等.2015.水资源承载力和水环境承载力概念辨析[J].*甘肃农业科技*,480(12):73-75
- 徐美.2013.湖南省土地生态安全预警及调控研究[D].长沙:湖南师范大学
- Xu W H, Yang Y Y, Zhang L, *et al.* 2017. Evaluation methods and case study of regional ecological carrying capacity for early-warning[J]. *Progress in Geography*, 36(3):306-312
- 解钰茜,吴昊,崔丹,等.2019.基于景气指数法的环境承载力预警[J].*中国环境科学*,39(1):440-448
- 杨丽花,佟连军.2013.基于 BP 神经网络模型的松花江流域(吉林省段)水环境承载力研究[J].*干旱区资源与环境*,27(9):135-140
- 周翟允佳.2018.面向业务化需求的区域环境承载力评价方法与实践[D].北京:中国环境科学研究院
- 曾维华,薛英岚,贾紫牧.2017.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*,45(24):17-24