

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.01.011

基于BP人工神经网络的河流生态健康预警

徐伟¹,董增川¹,付晓花¹,谈娟娟¹,刘倩¹,杜芙蓉²

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098; 2. 江苏省水利厅水资源处,江苏南京 210029)

摘要:为加强河流管理,在已有的河流生态系统健康研究和BP人工神经网络模型基础上建立了河流生态健康预警模型,并对滦河河流未来健康状况进行了预警。结果表明:滦河在未来20年内河流生态健康状况将有所好转,其中近期水平年2015年为轻度疾病状态,为中警级别;中期水平年2020年与远期水平年2030年均亚健康状态,为轻警级别。此外针对河流未来的警情状态,从警源分析角度提出了节水、优化水源工程、减污等关于滦河河流生态治理措施。

关键词:滦河;河流生态健康预警;BP人工神经网络;水污染治理措施

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2015)01-0054-06

Early warning of river ecosystem health based on BP artificial neural networks

XU Wei¹, DONG Zengchuan¹, FU Xiaohua¹, TAN Juanjuan¹, LIU Qian¹, DU Furong²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Water Resources Division, Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to manage rivers more effectively, a river ecosystem health early warning model based on the existing study of river ecosystem health and BP artificial neural networks was established and applied in the early warning of the Luanhe River's health status. The results show that the ecosystem health of the Luanhe River will be improved in the next 20 years: in 2015, its health will be in a mild disease state, corresponding to the middle warning level, and in 2020 and 2030, its health will be in a sub-health state, corresponding to the lower warning level. Measures to improve the ecosystem health of the Luanhe River, including water conservation, optimization of water supply projects, and water pollution mitigation, are proposed on the bases of future warning levels and warning sources.

Key words: Luanhe River; early warning of river ecosystem health; BP artificial neural networks; water pollution control measures

近几十年来,随着国家的大力投入与建设,滦河流域已经形成较完整的水利工程体系,并在流域防洪、供水等方面发挥了重要作用。但随着社会经济的迅猛发展,人类活动的日益加剧和自然气候的变化,滦河生态健康状况日趋恶化,其中1998年滦河干流大黑汀至河口(岩山渠首以下)段曾出现连续322 d的断流情况,入海水量大幅度减少,水资源供需矛盾尖锐,加之河道污染严重,优良鱼种消失,湿地严重退化等,已经严重威胁着滦河的河流健康和流域的供水安全、粮食安全和生态安全。

随着国内外许多河流生态状况的恶化,河流生态健康逐渐成为研究的热点^[1]。王光谦等^[2]曾依据评价河流健康的指标体系,将影响河流生态健康的因素分为:水体形态因素、水动力因素、水环境因素、水生态因素、社会经济因素;胡春宏等^[3]也从河道健康、河流生态系统健康和河流的社会经济价值来研究河流健康。目前普遍认为河流健康的内涵基本上是从河流的自然生态环境功能和社会服务功能两方面出发,即认为河流生态健康具备如下:(a)河流自身结构完整,功能完备;(b)具有满足自身维持与更新的能力,能发挥其正

收稿日期:2014-01-19

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(20141334714);水利部公益性行业科研专项(201101017);“十二五”国家科技支撑计划(2012BAB03B00)

作者简介:徐伟(1991—),男,江苏大丰人,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: hhuxuwei@163.com

常的生态环境效益;(c)满足人类社会发展的合理要求^[3]。

笔者从河流健康的这一基本内涵出发,在已有河流健康评价研究的基础上选取滦河为案例,进行河流生态健康预警研究。

1 河流生态健康预警基本理论

预警的思想最早实践于 20 世纪 50 年代的军事领域,后又广泛应用于经济领域^[4]和气象领域。生态健康预警是在工业化发展过程中由于环境污染促使社会对环境问题重视而发展起来的,其主要理论可以分为区域学派、系统动力学派、资源学派、未来学派、协同学派等^[5]。

河流生态健康预警是以警报为导向、以矫正为手段、以免疫为目的的一种科学管理模式。警报是通过河流生态健康状况的不同阈值水平,对相关指标进行监测,从而识别河流所面临的健康危机,并发出警报;矫正是指针对曾经出现或者将来可能出现的河流生态健康问题,提出调整措施并及时纠正过去不完善或者是错误的制度和行为,以促成河流在非均衡状态下实现自我均衡,从而使河流朝着正常健康的轨道发展^[6]。按照对河流生态健康内涵的理解,河流生态健康预警是包括河流自然生态环境子系统和社会经济服务子系统等诸多组成部分的警情分析、警兆识别、警源寻找和警患排除的决策全过程。其预警过程包括以下几个方面:

a. 确定警情。明确警情是河流生态健康预警的起点。警情可以从两方面来考察,其一是警素,其二是警度。警素是指构成警情的指标,在河流生态健康预警过程中,警情可以表现在某个考核指标上,也可以表现在某个子系统出现的状况;警度是警情所处的状态,也即其严重程度,一般可以划分为无警警度、轻警警度、中警警度、重警警度和剧警警度,用不同颜色的指示灯表示。

b. 寻找警源。警源就是发生警情的根源,在河流生态健康预警过程中就是河流生态健康发生病变的“病因”。寻找警源既是分析警兆的基础,也是排除警患的前提。由于系统之间存在替代、共生、此消彼长等复杂关系,警源往往比较复杂。不同警素的警源指标各不相同,即使同一警素,在不同的时空范围其警源指标也可能不相同。因此,针对具体的警素,必须具体分析,直至找到问题的症结所在。

c. 识别警兆。警兆即警素发生变化后引发警情变化的前兆。一般情况下,警素不同则警兆也不同;警素相同,但时空条件不同也可能表现出不同的警兆。警兆与警素之间可以直接关联,也可以间接关联。河流生态系统面临的不确定性因素很多,其警兆是在一特定区域内由不确定性因素引发的可能发生的安全问题及后果。气候变化因素引发的警兆主要表现在,由于气候状况发生变化的不确定性导致的各种健康突变,如厄尔尼诺现象导致全球变暖;人类活动变化因素包括水利工程、水土保持、城镇化、地下水开采、工矿开采等,如引滦工程的运行使用水量增加必然会使河道水量减少,河道的适宜生态流量可能就无法保证,从而使河流生态健康状况变差。

d. 预报警度。警源和警兆确定后就要分析警兆和警素之间的数量关系,找出与 5 种警情相对应的警兆范围,然后依次进行精度判断。预报警度是以一个或多个警素相关的警兆来预报警情的严重程度,这是预警的直接目的。河流生态健康预警可以根据事先设定好的预警标准确定警度,其健康评价等级、警度以及预警信号之间的映射对照关系如图 1 所示。



图 1 河流生态健康预警评价等级、警度与信号对照

Fig. 1 Contrast of assessed health status, warning levels, and signals of river ecosystem health early warning

2 河流生态健康预警模型构建

2.1 BP 人工神经网络预警模型构建

BP 人工神经网络^[7-9]是在对人脑神经网络基本认识的基础上,用数理统计方法从信息处理的角度对人脑神经网络进行抽象,并建立某种简化模型。基于 BP 人工神经网络的河流生态健康预警模型构建是将已有的河流生态健康指标体系近似作为警源指标体系,利用 BP 人工神经网络寻找已有规划值的指标与没有规划值的指标的潜在联系,预测没有规划值的各指标值,即确定各警源指标值的变化,再根据模糊物元可拓

评价模型,预测河流的未来健康状态,确定相应的警度,并发出预警信号。发出预警信号后,还可从警源、警兆角度提出河流生态的修复治理措施,从而排除警患,解除警情。

2.2 警源指标体系构建

警源指标体系即河流生态健康指标体系,构建时主要借鉴了国内外已有的河流健康评价指标体系^[10-13]。所构建的指标体系分为自然生态功能和社会服务功能两部分,包括河流形态特征、水量特征、水质特征、水生生物特征、景观特征、生境特征以及防洪安全、供水水平等8个准则层,并细化为13个指标,如表1所示(表中括号内数字表示权重,其值的确定方法为专家评分法)。

表1 河流生态健康指标体系(滦河)
Table 1 Index system of river ecosystem health (Luanhe River)

河流生态健康 指标体系	自然生态功能(0.7)	河流形态特征(0.100)	横向稳定性指数(0.350)
			纵向连续性指数(0.650)
		水量特征(0.200)	适宜生态流量保证率(0.600)
			河口径流量指标(0.400)
	社会服务功能(0.3)	水质特征(0.230)	水质达标率(1)
		水生生物特征(0.250)	浮游植物生物多样性(1)
		景观特征(0.100)	河岸带多样性指数(0.333)
			河岸带蔓延度指数(0.333)
		生境特征(0.120)	河岸带均匀度指数(0.333)
			水土流失率(0.500)
			湿地保存率(0.500)
		防洪安全(0.400)	防洪工程达标率(1)
		供水水平(0.600)	河流供水保证率(1)

河流生态健康具有相对性,不同区域、不同类型的河流在不同时期面对不同的社会期望,其评价标准也不尽相同。一般来说其评价标准确定的依据有:(a)国家、行业和地方规定的标准和规范,如《水生态城市试行标准》;(b)国家和地方发展规划目标和要求;(c)参考国内外已有的研究成果;(d)公众参与等。按此依据将滦河的健康评价指标标准分为健康、亚健康、轻度疾病、疾病、重病5个等级,如表2所示。

表2 河流健康评价指标体系的评价标准(滦河)
Table 2 Evaluation criteria of index system of river ecosystem health (Luanhe River)

评价等级	各评价指标标准												
	横向稳定性指数	纵向连续性指数	适宜生态流量保证率/%	河口径流量指标/%	水质达标率/%	浮游植物生物多样性指数	河岸带多样性指数	河岸带蔓延度指数	河岸带均匀度指数	水土流失率/%	湿地保存率/%	防洪工程达标率/%	河流供水保证率/%
健康	≤0.2	≤0.2	≥80	≥70	≥80	≥3.0	≥1	≤10	≥0.8	≤15	≥80	≥80	≥90
亚健康	(0.2,0.4]	(0.2,0.4]	[60,80)	[50,70)	[70,80)	[2.0,3.0)	[0.7,1)	(10,20]	[0.6,0.8)	(15,25]	[60,80)	[70,80)	[70,90)
轻度疾病	(0.4,0.6]	(0.4,0.6]	[40,60)	[30,50)	[50,70)	[1.5,2.0)	[0.4,0.7)	(20,40]	[0.4,0.6)	(25,40]	[40,60)	[60,70)	[50,70)
疾病	(0.6,0.8]	(0.6,0.8]	[20,40)	[15,30)	[25,50)	[0.5,1.5)	[0.2,0.4)	(40,70]	[0.2,0.4)	(40,60]	[20,40)	[40,60)	[30,50)
重病	>0.8	>0.8	<20	<15	<25	<0.5	<0.2	>70	<0.2	>60	<20	<40	>30

2.3 警度确定方法

由于建立的河流生态健康指标体系具有层次性,各层次性具有向下一级的拓展性。下一层与上一层的递阶属性,在数学上表现出其可拓性,不同层次的递阶评价过程可采用可拓学的物元评价方法,而同一层次的评价适合选择模糊优选评价^[14]。因此在用BP神经网络获得各指标的预测值后,可采用模糊物元可拓评价模型^[6,14-15]计算河流生态健康综合指数,即可确定河流健康状态,并可根据图1确定其相应的预警警度。

模糊物元可拓评价模型步骤主要如下:

a. 确定经典域:

$$R_{0j} = [N_{0j}, c_i, x_{0ji}] = \begin{bmatrix} c_1 & x_{0j1} \\ c_2 & x_{0j2} \\ \vdots & \vdots \\ c_n & x_{0jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & \langle a_{0j1}, b_{0j1} \rangle \\ c_2 & \langle a_{0j2}, b_{0j2} \rangle \\ \vdots & \vdots \\ c_n & \langle a_{0jn}, b_{0jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N_{0j} ——评价对象N的第j个健康等级; c_i ——第i个评价指标; x_{0ji} ——健康等级 N_{0j} 关于指标 c_i 所规定

的量值范围。

b. 确定节域:

$$R_p = [P, c_i, x_{pi}] = \begin{bmatrix} c_1 & x_{p1} \\ c_2 & x_{p2} \\ \vdots & \vdots \\ c_n & x_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ \vdots & \vdots \\ c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix}$$

(2)

式中: P ——河流健康等级的全体; $x_{pi} = \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ —— P 关于指标 c_i 所规定的量值范围。

c. 确定待评价物元 R :

$$R = \begin{bmatrix} c_1 & x_1 \\ c_2 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ c_n & x_n \end{bmatrix}$$

(3)

式中: N ——待评价对象; x_i —— N 关于健康指标 c_i 的量值。

d. 采用改进的模糊优选方法^[14]计算各健康指标关于各等级的隶属度。设 $x_i^{(a)}$ 、 $x_i^{(b)}$ 为指标集 p_i 的左右 2 个基点值,其中 $x_i^{(a)} < x_i^{(b)}$,隶属度 r_{ij} 计算公式如下:

当指标为效益型指标时

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \geq x_i^{(b)} \\ \frac{x_{ij} - x_i^{(a)}}{x_i^{(b)} - x_i^{(a)}} & x_i^{(a)} < x_{ij} < x_i^{(b)} \\ 0 & x_{ij} \leq x_i^{(a)} \end{cases}$$

(4)

当指标为成本型指标时

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \geq x_i^{(b)} \\ \frac{x_i^{(b)} - x_{ij}}{x_i^{(b)} - x_i^{(a)}} & x_i^{(a)} < x_{ij} < x_i^{(b)} \\ 1 & x_{ij} \leq x_i^{(a)} \end{cases}$$

(5)

e. 计算河流健康综合指数。用各指标的隶属度乘以各自权重,求和即可得各准则层的优属度;各准则层的优属度乘以各自权重,求和即可得河流健康综合指数。

将表 2 中的各指标健康等级阈值范围代入该模糊物元可拓评价模型,即可得到河流生态健康综合指数各等级的阈值范围,结果如下:评价为健康、亚健康、轻度疾病、疾病、重病等级的,综合指数阈值范围分别为 $[0.85, 1.0]$ 、 $[0.7, 0.85]$ 、 $[0.55, 0.7]$ 、 $[0.4, 0.55]$ 、 $[0, 0.4]$ 。

3 滦河河流健康预警及其结果分析

滦河已有规划值指标如表 3 所示。以表 3 中 4 个指标 1980—2011 年间共 32 a 的指标值(已经过归一化处理)作为 BP 神经网络模型的输入层,以其他 9 个指标 1980—2011 年 32 a 的数据作为输出层,采用 24 a 的数据进行训练,5 a 的数据进行校核,3 a 的数据进行检验。训练完成后即可根据规划指标值预测 2015 年、2020 年和 2030 年各健康指标的指标值,如表 4 所示。将各指标代入模糊物元可拓评价模型即可得滦河河流生态健康预警结果,如表 5 所示。

表 3 滦河已有规划值或预测值的指标及其指标值
Table 3 Indices of Luanhe River and their predicted values

年份	水质达标率/%	水土流失率/%	湿地保存率/%	防洪工程措施达标率/%
2015	70	42	55	80
2020	80	40	56	90
2030	90	30	57	100

注:水质达标率和防洪工程措施达标率来自于《海河流域综合规划》,并根据滦河的具体特点进行了微调。水土流失率和湿地保存率是根据近 15 a 的水土保持措施和湿地修复情况展延。

表4 滦河各指标预测值
Table 4 Predicted values of indices of Luanhe River

年份	横向 稳定性 指数	纵向 连续性 指数	适宜生态 流量保证 率/%	河口径 流量指标/ %	水质 达标 率/%	浮游植物 生物多样 性指数	河岸带 多样性 指数	河岸带 蔓延度 指数	河岸带 均匀度 指数	水土 流失 率/%	湿地 保存 率/%	防洪 工程 达标率/%	河流供水 保证率/ %
2015	0.37	0.87	54	34	70	0.83	0.74	0.62	0.83	42	55	80	57
2020	0.27	0.85	59	60	80	0.84	0.73	0.54	0.80	40	56	100	60
2030	0.20	0.84	66	74	90	0.81	0.71	0.49	0.85	30	57	100	67

表5 滦河河流健康预警结果
Table 5 Early warning results of ecosystem health of Luanhe River

年份	$I_{\text{自然}}$	$I_{\text{服务}}$	$I_{\text{综合}}$	健康等级	警情
2015	0.687	0.670	0.682	轻度疾病	中警
2020	0.783	0.699	0.758	亚健康	轻警
2030	0.804	0.770	0.794	亚健康	轻警

注: $I_{\text{自然}}$ 、 $I_{\text{服务}}$ 、 $I_{\text{综合}}$ 分别表示河流自然生态子系统指数、河流社会服务子系统指数及河流健康综合指数。

由预警结果可知,未来 20 a 滦河河流生态系统健康状况预期较为乐观,其中在近期水平年 2015 年为轻度疾病状态,警情为中警状态;中期水平年 2020 年与远期水平年 2030 年均为亚健康状态,警情为轻警状态。根据警情结果寻找警源,不难发现滦河的纵向连续性指数、适宜生态流量保证率、河口径流指标等指标仍然存在一定的问题。因此要解除警情,滦河近期应着重加强以下几个方面的河道生态治理措施:

a. 全面节水,建设节水型社会,量水而行。流域要在经济规模、城镇布局和人口发展等各项社会发展规划中充分考虑当地的水资源条件,适时调整经济布局 and 产业结构。实行总量控制、定额管理,促进水资源的节约和保护。

b. 在水利工程方面要优化水源调度工程,增加生态流量。未来通过南水北调对天津市、北京市供水,做好潘家口、大黑汀、桃林口等水库的调度,对中下游河道进行合理补水,满足河道生态流量要求和河口流量要求。

c. 控制污染,达标排放,总量控制。滦河流域有承德市、唐山市等大中型城市,采矿、造纸等工业排污以及城市发展和人口增长带来的污水排放量逐年增加,直接影响滦河河流生态系统。在近期,流域仍应新建一些污水处理厂,做好相关管网配套工作,加强河流排污的治理能力。要加强对工业污水排放的监督管理,从源头控制污染,实行总量控制。

另外,流域近期仍应加强潘家口水库以上地区的水土保持工作和滦河源、滦河口的湿地修复工作。

4 结 语

a. 河流生态健康预警是包括河流自然生态环境子系统和社会经济服务子系统等诸多组成部分的警情分析、警兆识别、警源寻找和警患排除的决策全过程。

b. 构建了基于 BP 人工神经网络的河流生态健康预警模型,并对滦河未来的河流生态健康状况进行预警,结果表明未来滦河仍有一定程度的警情存在;此外还从警源、警兆角度提出滦河河流生态的修复治理措施。

参考文献:

[1] 王伟, 杨晓华, 陈强. 基于 ELMAN 网络的河流健康复杂系统综合评价[J]. 水电能源科学, 2007, 5(2): 1-4. (WANG Wei, YANG Xiaohua, CHEN Qiang. Comprehensive assessment of river health complex system based on Elman Network model [J]. Water Resources and Power, 2007, 5(2): 1-4. (in Chinese))

[2] 王光谦, 翟媛. 河流健康的内涵及其影响因素[J]. 河南水利与南水北调, 2007(3): 1-2. (WANG Guangqian, ZHAI Yuan. The connotation of river health and its influencing factors [J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2007(3): 1-2. (in Chinese))

[3] 胡春宏, 陈建国, 孙雪岚, 等. 黄河下游河道健康状况评价与治理对策[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1189-1196. (HU Chunhong, CHEN Jianguo, SUN Xuelan, et al. Health assessment of river course in Lower Yellow River and measures for regulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1189-1196. (in Chinese))

- [4] 顾海兵. 未雨绸缪——宏观经济问题预警[M]. 北京: 经济日报出版社, 1993.
- [5] 仇蕾. 基于免疫机理的流域生态系统健康诊断预警研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [6] 杜芙蓉. 河流生态系统健康评价与预警研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.
- [7] 王旭, 王宏, 王文辉. 人工神经网络原理及应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000.
- [8] 温家鸣, 郭纯清, 李新建, 等. 基于 BP 神经网络的桂林生态城市建设需水量预测[J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 47-50. (WEN Jiaming, GUO Chunqing, LI Xinjian, et al. Water demand forecast of eco-city construction in Guilin City based on BP neural network [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3): 47-50. (in Chinese))
- [9] 崔东文, 金波. 改进 BP 神经网络模型在小康水利综合评价中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2014, 42(4): 306-313. (CUI Dongwen, JIN Bo. Application of improved BP neural network model to comprehensive evaluation of water conservancy in a state of relative prosperity [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(4): 306-313. (in Chinese))
- [10] 王淑英, 王浩, 高永胜, 等. 河流健康状况诊断指标和标准[J]. 自然资源学报, 2011(4): 591-598. (WANG Shuying, WANG Hao, GAO Yongsheng, et al. Index system and criteria for diagnosing the status of river health [J]. Journal of Natural Resources, 2011(4): 591-598. (in Chinese))
- [11] 高永胜, 王浩, 王芳, 等. 河流健康生命评价指标体系的构建[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 252-257. (GAO Yongsheng, WANG Hao, WANG Fang, et al. Construction of evaluation index system for river's healthy life [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 252-257. (in Chinese))
- [12] 孙雪岚, 胡春宏. 河流健康评价指标体系初探[J]. 泥沙研究, 2007(4): 21-27. (SUN Xuelan, HU Chunhong. River health evaluation index system [J]. Journal of Sediment Research, 2007(4): 21-27. (in Chinese))
- [13] 张又, 刘凌, 闫峰. 基于模糊物元模型的河流健康评价研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 382-384. (ZHANG You, LIU Ling, YAN Feng. River health assessment based on fuzzy matter-element model [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(1): 382-384. (in Chinese))
- [14] 刘倩, 董增川, 徐伟, 等. 基于模糊物元模型的滦河河流健康评价[J]. 水电能源科学, 2014, 32(9): 47-50. (LIU Qian, DONG Zengchuan, XU Wei, et al. Health assessment of Luanhe River based on fuzzy matter-element model [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(9): 47-50. (in Chinese))
- [15] 何金平, 廖文来, 施玉群. 基于可拓学的大坝安全综合评价方法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2008, 41(2): 42-45. (HE Jinping, LIAO Wenlai, SHI Yuqun. Comprehensive assessment method of dam safety based on extenics theory [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(2): 42-45. (in Chinese))