基于综合营养状态指数和 BP 神经网络的黑河富营养化评价

鲍广强[1]，尹 亮[1]，余金龙[1]，刘 畅[2]，邱小琮[3]

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院，宁夏 银川 750021；2. 中国水利水电科学研究院水环境研究所，北京 100038；3. 宁夏大学 生命科学学院，宁夏 银川 750021)

摘 要：[目的] 探究黑河流域富营养状态，为黑河流域水体污染综合防治提供基础数据和理论依据。[方法] 选取叶绿素 a(Chl. a)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、透明度(SD)作为评价因子，使用综合营养状态指数法和 BP 神经网络对黑河流域的富营养化进行综合评价。[结果] 黑河富营养化状况主要以中营养级为主，其中野牛沟和张掖湿地的营养指数接近轻度富营养程度，东居延海处于重度富营养化，尤其是总氮指数很高，应该及时进行治理和保护。[结论] 相对于综合营养状态指数法，BP 神经网络对黑河流域的评价结果更加贴近实际结果，较为客观可靠。

关键词：黑河流域；综合营养状态指数法；BP 神经网络；富营养化评价

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)01-0264-06 **中图分类号**：X824，TP183

文献参数：鲍广强，尹亮，余金龙，等. 基于综合营养状态指数和 BP 神经网络的黑河富营养化评价[J]. 水土保持通报，2018，38(1)：264-269. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2018. 01. 046. Bao Guangqiang，Yin Liang，Yu Jinlong，et al. Eutrophication evaluation of Heihe River based on comprehensive trophic state index method and BP neural network[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(1)：264-269.

Eutrophication Evaluation of Heihe River Based on Comprehensive Trophic State Index Method and BP Neural Network

BAO Guangqiang[1]，YIN Liang[1]，YU Jinlong[1]，LIU Chang[2]，QIU Xiaocong[3]

(1. *School of Civil and Hydraulic Engineering，Ningxia University，Yinchuan，Ningxia* 750021，*China*；2. *Water Environment Research Institute of China Academy of Water Resources and Hydropower Research，Beijing* 100038，*China*；3. *School of Life Science，Ningxia University，Yinchuan，Ningxia* 750021，*China*)

Abstract：[Objective] To evaluate the current eutrophication state and provide basic data and theoretical support for the pollution control in Heihe River basin. [Methods] The total nitrogen (TN)，total phosphorus (TP)，permanganate index (COD_{Mn})，chlorophyll a (Chl. a)，transparency (SD) were selected as indexes for water quality evaluation，and the comprehensive trophic state index and BP neural network were used to evaluate the eutrophication of Heihe River basin. [Results] The eutrophication status of Heihe River basin was mainly in medium level of nutrition. The nutrition status index of Yeniugou and Zhangye wetland were close to mild eutrophication. The eutrophication status of East Juyanhai Lake was severe and the total nitrogen index was high. The water environment of East Juyanhai Lake should be protected in time. [Conclusion] Compared to the comprehensive trophic state index method，the evaluation results of BP neural network are closer to the actual situation，and more objective and reliable.

Keywords：**Heihe River basin；comprehensive nutrition state index method；BP neural network；eutrophication evaluation**

收稿日期：2017-06-09 **修回日期**：2017-07-28

资助项目：国家水体污染控制与治理科技重大专项“重点流域水生态功能三级四级分区”(2012ZX07501-002-05)

第一作者：鲍广强(1990—)，男(汉族)，安徽省淮南市人，硕士研究生，研究方向为水资源与水环境调控。E-mail：724656809@qq. com。

通讯作者：邱小琮(1971—)，男(汉族)，浙江省湖州市人，博士，教授，主要从事水域生态学及水环境调控方面的教学与研究工作。E-mail：qxc7175@126. com。

水体营养化状态的评价,是水环境评价中一个重要内容。水体富营养化评价的目的是为了准确反映水环境的质量和污染状况,并预测将来的发展趋势,为开展环境污染和综合治理、环境规划及管理提供科学依据[1]。水体富营养化的评价和水体的水质评价一样,其实就是一个模式识别的问题,一开始都是使用综合营养状态指数法进行评价,其中的权重也是针对湖泊(水库)的,并没有针对河流的计算方法。对于湖泊富营养化的评价方法主要有综合营养状态指数法、参数法、特征法、生物指标评价法等,但这些方法均有适用的条件和局限性[2]。近年来,随着计算机技术和现代数学的发展,越来越多的学者将水质评价的许多方法(模糊综合评价法[3]、灰色聚类法[4]、层次分析法[5]、物元分析法[6]、集对分析法[7]等)系统评价方法。应用于水体富营养化评价中,并取得了良好的效果。目前,BP 人工神经网络被广泛应用于模式识别问题[8],并在水质评价方面得到了广泛应用[9],也有学者将 BP 神经网络法应用于湖泊富营养化评价[10-12],但其在河流富营养化评价中的应用研究很少。

黑河流域是中国西北地区第二大内陆河流域,位于河西走廊中部,主要发源于祁连山区的降水和冰雪融水。黑河从发源地到居延海全长 821 km,横跨 3 种不同的自然环境单元,流域面积约 1.429×10^5 km^2。随着流域内工农业迅速发展,人口增加,大量污染物的排放及不适当的水资源开发利用,以致黑河面临营养化的威胁,并严重影响到人民生活、生产用水。本研究于 2013—2015 年连续 3 a 对黑河流域的水环境因子进行采样测定,采用综合营养状态指数法和 BP 神经网络法对黑河富营养化状态进行综合评价,旨在为黑河流域水体污染综合防治提供基础数据和理论依据,并为黑河流域富营养化评价确定更为客观可靠的方法。

1　材料与方法

1.1　样点设置与采样时间

依据黑河流域的形状,在黑河流域里设置了 55 个采样点。采样时间为 2013 至 2015 年 4—5 月(平水期)、7—8 月(丰水期)和 12—1 月(枯水期)。

1.2　水样采集与测定

水样采集按照《水质采样方案设计技术规定(HJ495-2009)》《水质采样技术指导(HJ494-2009)》《水质样品的保存和管理技术规定(HJ493-2009)》中的要求进行。现场测定水体的透明度(SD)指标,用 5.0 L 采水器采集水样保存,带回实验室测定总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素(chl. a)指标。水质指标的测定依照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中规定使用的方法进行,有最新环境保护标准测定方法的都使用新的标准测定方法进行。

1.3　评价因子选取和预处理

根据黑河流域的水系特征,把黑河流域分为八宝河、野牛沟、北大河、梨园河、红水河、山丹河、张掖湿地、中游干流、额济纳河、东居延海 10 个小流域,然后取各个小流域不同点位水质指标监测数据的平均值,作为本流域的评价数据。根据李慧[13]黑河流域水质指标的选取原则,结合黑河流域周围工农业生产状况,本研究选取叶绿素 a(Chl. a)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、透明度(SD)作为评价因子。

由于水质各个指标的类型和量纲不同,各个指标之间不具有可比性,因此在评价的时候要对水质评价的分级标准和待评价河流的水质监测数据进行无量纲化处理[14]。由于 BP 神经网络必须把数据归一化到 0～1 之内,因此采用杨洁等[15]使用的方法把数据归一化到 0～1 范围内。

1.4　富营养评价的综合营养状态指数法

(1) 综合营养状态指数[16]为:

$$TLI(\sum)=\sum_{i=1}^{m}W_j\times TLI(j) \quad (1)$$

式中:TLI (∑)——综合营养状态指数;W_j——第 j 种参数的营养状态指数的相关权重;TLI(j)——代表第 j 种参数的营养状态指数。

(2) 各项目营养状态指数计算公示[17]如下:

$$TLI(chl.a)=10(2.5+1.086\ln chl.a) \quad (2)$$

$$TLI(TP)=10(9.436+1.624\ln TP) \quad (3)$$

$$TLI(TN)=10(5.453+1.694\ln TN) \quad (4)$$

$$TLI(SD)=10(5.118-1.94\ln SD) \quad (5)$$

$$TLI(COD_{Mn})=10(0.109+2.661\ln COD_{Mn}) \quad (6)$$

式中:chl. a 单位为 mg/m^3,SD 单位为 m;其他指标单位均为 mg/L。

(3) 营养状态分级。对照营养状态分级标准[18],采用 0～100 的一系列连续数字对湖泊(水库)营养状态进行分级(见表 1),综合营养状态指数越高,富营养状态越高。

表 1　营养状态分级

综合营养状态指数	营养水平	综合营养状态指数	营养水平
＜30	贫营养	50＜,≤60	轻度富营养
30≤,≤50	中营养	60＜,≤70	中度富营养
＞50	富营养	＞70	重度富营养

1.5 富营养评价的 BP 神经网络法

富营养化评价的 BP 神经网络法基本思想是：以和富营养化程度有关的相关指标限值作为学习样本，把富营养化指数设为相应的期望输出数值进行训练，然后以水体实测值作为输入层单元，运用训练的网络进行仿真，得到相应的输出指数，然后根据输出指数来确定营养状态。

基于 BP 人工神经网络的营养状态指数量化模型如下。

$$\begin{cases} \text{输入层(input)} & \sum_{i=1}^{m}\text{input}(C_i) \\ \text{隐含层(hide)} & n_1=\sqrt{m+n}+a \\ \text{输出层(output)} & \sum_{j=1}^{n}\text{output}(D_j) \end{cases} \tag{7}$$

式中：$C_i \in C$，$C=\{C_1, C_2, \cdots C_m\}$；$n_1$——隐含层神经元个数；$m$——输入层神经元个数；$C$——输出层神经元个数；$n$——1～10 的常数；$a$，$D_i \in D$；$D=\{D\}$。

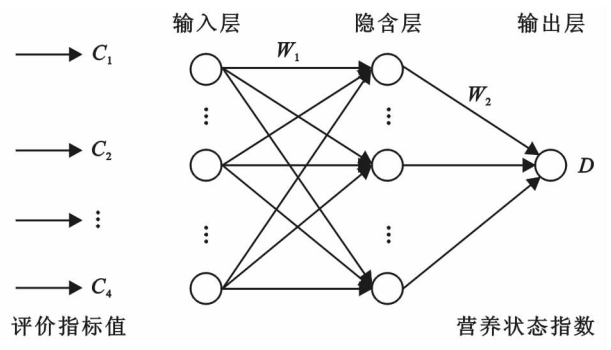


图 1 富营养化评价人工神经网络模型结构

模型中的输入层对应营养状态评价指标值，输出层为营养状态指数，隐含层神经元个数一般通过试错法获得。应用该模型进行计算时，输出层数值即为营养状态指数(图 1)。

运用 MATLAB 2014 年软件建立一个 4-6-1 的神经网络模型，由于 BP 神经网络的函数特点，把营养状态指数缩小 100 倍，然后进行学习、训练和仿真，得到网络输出结果和对应富营养化级别。

湖泊的富营养化污染程度主要由湖泊中氮、磷等营养盐含量的多少决定。能够直接、间接反映或影响水域或者湖泊营养状态的指标有：Chl. a，TN，TP，COD，SD，SS 等。其中，TN，TP 是水体富营养化的主要限制因子，Chl. a 是藻类量主要成分的指标，因此 Chla，TN，TP 在富营养化评价时。根据《地表水环境质量评价办法》(试行)中国对湖泊富营养化评价选择 Chl. a，TN，TP，COD_{Mn}，SD 作为评价参数。河流富营养化的发生条件和湖泊有很大的区别，而且河流的水深比较浅，尤其是像黑河这样的西北内陆河流，透明度不能完全体现富营养化的状态，如果使用综合营养状态指数法就会使得评价结果偏于保守，因此本次评价使用 Chl. a，TN，TP，COD_{Mn} 作为评价参数，不考虑 SD。

本研究以《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)为富营养化评价基础，结合其他学者在评价时的分级标准，建立本次评价的富营养化分级评价标准(如表 2 所示)。

表 2 富营养化评价标准分级

营养状态	指数	TP	TN	Chl. a	COD_{Mn}
贫营养	10	0.001	0.002	0.0005	0.15
	20	0.004	0.005	0.001	0.40
	30	0.010	0.100	0.002	1
中营养	40	0.025	0.300	0.004	2
轻度富营养	50	0.050	0.500	0.010	4
	60	0.100	1	0.026	8
中度富营养	70	0.200	2	0.064	10
重度富营养	80	0.600	6	0.160	25
极重度富营养	90	0.900	9	0.40	40
	100	1.300	16	1	60

2 结果与分析

2.1 综合营养状态指数法评价

根据《地表水环境质量评价办法》(试行)中富营养化的评价方法—综合营养状态指数法进行，通过使用综合营养状态指数法计算得到相应的综合营养状态指数，根据富营养化评价标准分级得出 2013—2015 年 4，7 和 12 月的营养化程度(如表 3—5 所示)。

如表 3 所示，2013 年八宝河流域 4 和 7 月富营养水平相差不大，12 月富营养水平降低；野牛沟流域从 4—12 月富营养水平不断变高；北大河流域、梨园河流域和红水河流域 4 月富营养水平比 7 月稍低，12 月最低；山丹河流域和东居延海流域 4 和 12 月富营养水平相差很小，7 月最高；张掖湿地 4 和 7 月富营养水平差别不大，12 月最高；中游干流和额济纳河流域 4 和 12 月富营养水平相差不大，7 月最高。

如表 4 所示，2014 年 4 月八宝河、野牛沟、北大河、梨园河、红水河、山丹河、张掖湿地、中游干流、额济纳河流域的营养状况为轻度富营养，东居延海流域的营养状况为中度富营养；7 月红水河流域的营养状况为中营养，八宝河、野牛沟、北大河、梨园河、山丹

河、张掖湿地、中游干流、额济纳河流域的营养状况为轻度富营养,东居延海流域的营养状况为重度富营养;12 月八宝河、野牛沟、北大河、梨园河、红水河、山丹河、张掖湿地、中游干流、额济纳河流域的营养状况为轻度富营养,东居延海流域的营养状况为重度富营养。

表 3　2013 年综合营养状态指数 TLI 及营养化水平

点 位	4 月		7 月		12 月	
	TLI	营养水平	TLI	营养水平	TLI	营养水平
八宝河	54.13	轻度富营养	54.62	轻度富营养	51.81	轻度富营养
野牛沟	55.26	轻度富营养	56.77	轻度富营养	57.13	轻度富营养
北大河	55.46	轻度富营养	56.50	轻度富营养	53.93	轻度富营养
梨园河	53.62	轻度富营养	55.56	轻度富营养	50.76	轻度富营养
红水河	52.97	轻度富营养	53.24	轻度富营养	51.77	轻度富营养
山丹河	54.54	轻度富营养	55.41	轻度富营养	54.51	轻度富营养
张掖湿地	57.62	轻度富营养	57.77	轻度富营养	59.05	轻度富营养
中游干流	52.22	轻度富营养	54.49	轻度富营养	52.84	轻度富营养
额济纳河	53.91	轻度富营养	56.35	轻度富营养	54.00	轻度富营养
东居延海	77.02	重度富营养	79.20	重度富营养	76.46	重度富营养

注:TLI 为综合营养状态指数。下同。

表 4　2014 年综合营养状态指数 TLI 及营养化水平

点 位	4 月		7 月		12 月	
	TLI	营养水平	TLI	营养水平	TLI	营养水平
八宝河	53.47	轻度富营养	55.07	轻度富营养	53.31	轻度富营养
野牛沟	55.18	轻度富营养	57.91	轻度富营养	57.52	轻度富营养
北大河	53.67	轻度富营养	56.93	轻度富营养	54.53	轻度富营养
梨园河	52.91	轻度富营养	55.32	轻度富营养	51.40	轻度富营养
红水河	51.93	轻度富营养	49.45	中营养	52.03	轻度富营养
山丹河	53.00	轻度富营养	55.48	轻度富营养	55.05	轻度富营养
张掖湿地	57.60	轻度富营养	59.40	轻度富营养	59.20	轻度富营养
中游干流	52.20	轻度富营养	55.95	轻度富营养	54.89	轻度富营养
额济纳河	54.70	轻度富营养	56.91	轻度富营养	55.09	轻度富营养
东居延海	73.97	重度富营养	80.18	重度富营养	74.66	重度富营养

由表 4 还可以看出,2014 年八宝河流域 4 和 12 月富营养水平相差不大,7 月富营养水平最高;野牛沟流域 4 月富营养水平较低,7 和 12 月较高;北大河流域富营养水平 4 比 12 月稍低,7 月最高;梨园河流域富营养水平 4 月比 12 月稍高,7 月份最高;红水河流域 4 和 12 月富营养水平相差很小,7 月最高;山丹河流域和张掖湿地 7 和 12 月富营养水平差别不大,4 月最低;中游干流、额济纳河和东居延海流域富营养水平 4 比 12 月富营养水平稍低,7 月最高。

由表 5 可知,2015 年 4,7 和 12 月八宝河、野牛沟、北大河、梨园河、红水河、山丹河、张掖湿地、中游干流、额济纳河流域的营养状况为轻度富营养,东居延海流域的营养状况为重度富营养。2015 年八宝河、北大河和东居延海流域 4 和 12 月富营养水平相差不大,7 月富营养水平最高;野牛沟流域全年富营养水平变化很小;梨园河流域富营养水平 4 和 7 月富营养水平相差较小,12 月最低;红水河流域从 4—12 月富营养水平不断变低;山丹河流域 7 月富营养水平比 12 月稍高,4 月最低;张掖湿地 7 和 12 月富营养水平差别不大,4 月最低;中游干流、额济纳河和东居延海流域富营养水平 4 比 12 月富营养水平稍低,7 月最大。

2.2　BP 神经网络法评价

本文以 Chl. a,TN,TP,COD_{Mn} 等影响水质分级的主要因子作为建立评价模型的主要参数指标。以水体实测值作为输入层单元,每组的数据有 4 个指标,所以输入层的神经元的个数为 4。而隐含层和隐节点数目却决定了网络的复杂程度,直接影响网络运行性能和收敛速度。如果没有隐含层,输入到输出的变换过于简单,许多问题解决不了;如果隐含层过多,则可能使表达分散不易形成完整的概念,且计算庞大,影响运行效果。

表 5 2015 年综合营养状态指数 TLI 及营养化结果

点 位	4 月		7 月		12 月	
	TLI	营养水平	TLI	营养水平	TLI	营养水平
八宝河	53.83	轻度富营养	54.57	轻度富营养	53.35	轻度富营养
野牛沟	56.80	轻度富营养	56.47	轻度富营养	56.92	轻度富营养
北大河	54.20	轻度富营养	55.81	轻度富营养	54.00	轻度富营养
梨园河	55.16	轻度富营养	55.56	轻度富营养	50.51	轻度富营养
红水河	55.54	轻度富营养	53.71	轻度富营养	52.57	轻度富营养
山丹河	52.98	轻度富营养	55.66	轻度富营养	54.65	轻度富营养
张掖湿地	57.47	轻度富营养	58.36	轻度富营养	58.58	轻度富营养
中游干流	52.04	轻度富营养	54.87	轻度富营养	53.77	轻度富营养
额济纳河	53.29	轻度富营养	56.20	轻度富营养	54.36	轻度富营养
东居延海	75.07	重度富营养	76.96	重度富营养	75.24	重度富营养

理论上已经证明设置 1～2 个隐含层可能就够了。隐节点数的确定与隐含层相类似，隐含节点数也不是越多越好，达到一定数量时，增加隐节点数非但不能提高运行效率，反而会使收敛速度减慢。一般来说，隐节点要比输入节点少一个数量级[19]。

BP 神经网络输出结果和对应富营养化级别见表 6—7。从计算出的指数和营养化程度评价结果可以看出 2013—2015 年八宝河、野牛沟、北大河、梨园河、山丹河、张掖湿地、中游干流、额济纳河流域的营养水平都是中营养，基本没有变化。东居延海在 2013—2015 年的营养水平都是重度富营养，可见污染状况非常严重。

由表 6 和 7 可知，2013 年八宝河、梨园河、山丹河、中游干流和额济纳河流域全年富营养水平相差不大；野牛沟流域 4 和 7 月富营养水平相差很小，12 月最高；北大河流域从 4—12 月富营养水平不断变低；红水河流域 7 和 12 月富营养水平相差很小，4 月最高；张掖湿地 4 和 12 月富营养水平相差不大，7 月最低；东居延海 4 月比 12 月富营养水平稍低，7 月最高，但是它全年都为重度富营养。

表 6 BP 神经网络法计算出的指数

点 位	2013 年			2014 年			2015 年		
	4 月	7 月	12 月	4 月	7 月	12 月	4 月	7 月	12 月
八宝河	42.98	43.10	43.08	42.80	42.99	42.84	42.87	42.94	43.05
野牛沟	47.24	47.57	48.19	47.54	47.05	48.37	48.22	47.78	48.37
北大河	44.47	43.41	42.90	44.07	43.46	42.89	44.45	43.45	42.88
梨园河	43.10	43.38	42.87	43.18	43.72	42.73	43.35	43.61	42.73
红水河	43.18	42.62	42.66	43.34	42.71	42.77	43.91	42.83	42.86
山丹河	43.36	43.39	43.30	43.34	43.43	43.36	43.74	43.39	43.38
张掖湿地	47.72	45.56	47.55	47.34	58.12	48.01	48.26	46.27	48.01
中游干流	43.39	43.38	43.15	43.33	44.04	43.51	43.85	43.88	43.48
额济纳河	43.43	43.54	43.40	43.59	43.71	43.64	43.67	43.78	43.66
东居延海	80.00	82.08	81.12	83.57	83.54	82.49	82.12	83.24	81.43

表 7 BP 神经网络法富营养评价结果

点 位	2013 年			2014 年			2015 年		
	4 月	7 月	12 月	4 月	7 月	12 月	4 月	7 月	12 月
八宝河	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养
野牛沟	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养
北大河	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养
梨园河	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养
红水河	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养
山丹河	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养
张掖湿地	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养
中游干流	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养
额济纳河	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养	中营养
东居延海	重度富营养	重度富营养	重度富营养	重度富营养	重度富营养	重度富营养	重度富营养	重度富营养	重度富营养

2014 年八宝河、山丹河、中游干流和额济纳河流域全年富营养水平相差不大;野牛沟流域 4 和 7 月富营养水平相差很小,12 月最高;北大河流域从 4—12 月富营养水平不断变低;梨园河流域 4 和 7 月富营养水平相差不大,12 月最低;红水河流域 7 和 12 月富营养水平相差很小,4 月最高;张掖湿地 4 和 12 月富营养水平相差不大,7 月最高;东居延海 4 月份比 7 月富营养水平相差较小,12 月最低,但是它全年都为重度富营养。

2015 年八宝河、山丹河、中游干流和额济纳河流域全年富营养水平相差不大;野牛沟流域 4 和 12 月富营养水平相差很小,7 月最低;北大河流域从 4—12 月富营养水平不断变低;梨园河流域 4 和 7 月富营养水平相差不大,12 月最低;红水河流域 7 和 12 月富营养水平相差很小,4 月最高;张掖湿地 4 和 12 月富营养水平相差不大,7 月最高;东居延海 4 月比 7 月富营养水平相差较小,12 月最低,但是它全年都为重度富营养。

3　讨论与结论

使用综合营养状态指数法和 BP 神经网络法分别对黑河流域的富营养化进行了评价,通过评价结果发现,运用综合营养状态指数法和 BP 神经网络法的评价结果有差别,主要是由于河流富营养化的发生条件和湖泊有很大的区别,河流的透明度并不能真实体现河流的富营养水平,像黑河这样的西北内陆河流,水深很浅,有的河段清澈见底,有的河段则混浊不辨,因此透明度不能明确富营养化的状态,使得综合营养状态指数法的评价结果偏离实际情况。利用 Matlab 软件建立的 BP 神经网络模型可以避免透明度对河流富营养化评价的干扰,采用足够多的学习样本对网络进行训练,最大限度地避免了人为主观因素的影响。而且这种方法操作简便易行,可以自组织、自适应并具有容错和抗干扰能力等特点,评价的结果和实际情况基本吻合,与综合营养指数法相比更加贴近实际结果,是一种比较实用的评价方法,其评价结果更客观、可靠。

由 BP 神经网络对黑河流域水质富营养化状况的评价结果可知,八宝河流域 3 a 平均营养指数为 42.96,野牛沟流域 3 a 平均营养指数为 47.81,北大河流域 3 a 平均营养指数为 43.55,梨园河流域 3 a 平均营养指数为 43.19,红水河流域 3 a 平均营养指数为42.99,山丹河流域 3 a 平均营养指数为 43.41,张掖湿地 3 a 平均营养指数为 48.54,中游干流 3 a 平均营养指数为 43.56,额济纳河流域 3 a 平均营养指数为43.60,这些流域均为中营养状态。东居延海流域 3 a平均营养指数为 82.18,为重度富营养状态。

总体来说,黑河流域富营养化状况主要以中营养级为主,营养状况整体良好。其中野牛沟和张掖湿地的营养指数接近轻度富营养程度,应该及时地加以保护。东居延海的平均营养指数超过了 80,处于重度富营养化,富营养状况不容乐观,尤其是总氮指数很高,应该及时进行治理和保护。

[参 考 文 献]

[1] 张忠祥,钱易. 城市可持续发展与水污染防治对策[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998:290-324.

[2] 张宝,刘静玲. 湖泊富营养化影响与公众满意度评价方法[J]. 水科学进展,2009,20(5):695-700.

[3] 方统中,杜耘,蔡述明,等. 模糊数学在洪湖富营养化评价中的应用[J]. 浙江林学院学报,2008,25(4):517-521.

[4] 胡丽慧,潘安,李铁松,等. 灰色聚类法在升钟水库水体富营养化评价中的应用[J]. 农业环境科学学报,2008,27(6):2407-2412.

[5] 李祥,袁政涛. 层次分析法在上海淀山湖水质评价中的应用[J]. 人民长江,2014,45(18):25-27.

[6] 王京城,孙世群. 物元分析法在湖泊富营养化程度评价中的应用[J]. 安徽水利水电职业技术学报,2008,8(1):21-23.

[7] 邱林,冯晓波,冯丽云,等. 集对分析法在湖泊水质富营养化评价中的应用[J]. 人民长江,2008,39(5):52-54.

[8] 闻新,周露,李翔,等. MATLAB 神经网络仿真与应用[M]. 北京:科学出版社,2003:1-3.

[9] 杨永宇,尹亮,刘畅,等. 基于灰关联和 BP 神经网络法评价黑河流域水质[J]. 人民黄河,2017,39(6):58-62.

[10] 崔东文. MATLAB 神经网络在湖库富营养化程度评价中的应用[J]. 环境研究与监测. 2012,25(1):42-48.

[11] 马正华,王腾,周炯如. 基于 BP 神经网络的太湖富营养化时空变化预测[J]. 常州大学学报:自然科学版,2013. 25(3):62-65.

[12] 梅长青,王心源,李文达. BP 网络模型在巢湖富营养化评价中的应用[J]. 能源与环境,2008(1):9-11.

[13] 李慧. 黑河水质评价及变化趋势分析[D]. 兰州:兰州理工大学,2014.

[14] 祚泳,丁晶,彭荔红,等. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京:化学工业出版,2004.

[15] 杨洁,吴贻名,万飚. 汉江水质综合评价的 BP 网络方法[J]. 武汉大学学报:工学版,2004,37(1):51-54.

[16] 杨一鹏,王娇,肖青. 太湖富营养化遥感评价方法及分级标准[J]. 地理与地理信息科学,2007,23(3):34-37.

[17] 王明翠,刘雪芹,张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测,2002,18(5):47-49.

[18] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.

[19] 孙境蔚. 基于 BP 神经网络的水体富营养化评价的研究[J]. 泉州师范学院学报:自然科学,2008,26(4):92-95.