

Warning System of China's Pollution Emission Reduction Based on BP Neural Network Model[#]

Liying Bao^{1*}, Jing Guan¹, Qin Zhang¹, Xiaolu Zhao², Wensheng Deng¹, Yajuan Yu¹

¹Beijing Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, School of Chemical Engineering & Environment, Beijing Institute of Technology, Beijing

²Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, USA

Email: baoliying@bit.edu.cn

Received: May 3rd, 2011; revised: Jun. 21st, 2011; accepted: Jun. 27th, 2011.

Abstract: In the face of the absence of the early warning of pollution emission reduction, the article uses the forecasting technology of BP Neural Network, establishes the warning index system of pollution emission reduction, defines warning limits and warning status of the early warning model, and establishes the early warning system of pollution emission reduction. The early warning results and application analyses show that the system can reasonably predict the situation of pollution emission reduction and provide guidance and urgencies for the provinces.

Keywords: Pollution Emission Reduction; Early-Warning System; BP Neural Network

基于 BP 神经网络模型的中国污染减排预警系统[#]

包丽颖^{1*}, 关婧¹, 张琴¹, 赵小鹭², 邓文生¹, 郁亚娟¹

¹北京理工大学化工与环境学院, 北京

²密歇根大学土木与环境工程学院, 安娜堡, 美国

Email: baoliying@bit.edu.cn

收稿日期: 2011年5月3日; 修回日期: 2011年6月21日; 录用日期: 2011年6月27日

摘要: 为应对我国污染减排预警平台缺失的局面, 本文应用 BP 神经网络预测技术, 构建适合污染减排预警模型的预警指标体系, 界定预警模型的警限和警情, 建立了科学的污染减排预警系统。通过预警结果和应用研究分析, 表明预警系统能够合理预测我国污染减排情况, 为污染减排工作决策提供向导, 督促污染减排薄弱省份加快减排步伐。

关键词: 污染减排; 预警系统; BP 神经网络

1. 引言

预警^[1]一词最早是源于军事。随着系统科学的不断发展, 科学预警的思想和方法便迅速地向其它领域和学科延伸, 预警的系统方法被广泛地应用于社会、经济、环境、人口、资源等各个方面。日益突出的环境问题使预警思想在环境领域得到了充分重视, 并被应用于环境保护的众多方面。陈国阶^[2]曾提出, 环境预警就是对环境质量和生态系统逆化演替、退化、恶化的及时报警; 李华生^[3]认为, 狭义的环境预警指对自然资源或环境等研究对象可能出现的衰竭或危机而

建立的报警, 而广义的环境预警则涵盖了对研究对象的维护和减少危机的发展过程, 包括发现警情、分析警兆、寻找警源、判断警度以及采取正确的预警方法将警情排除的全过程。对于环境预警系统的建立, 具体包括预警指标的选择和构建、预警方法的选取、警限界定以及信号报警等几个方面的内容。

环境预警指标体系^[4], 就是由一系列相互联系的能敏感地反映环境系统与环境秩序状况的统计指标有机结合所构成的整体。目前研究表明, 环境预警指标体系普遍被分为警情指标和警兆指标两大类, 警情指标包括了环境污染和环境治理等相关指标, 警兆指标包括了环境保护和社会经济等相关指标。指标体系的建立要以预警的对象为基础, 来描述环境质量情况。

[#]基金项目: (1) 环境保护部: 污染减排预警制度的实施研究(编号: 20091016027); (2) 环境保护部环境规划院: 多指标污染减排集成预警系统研究(编号: 2011A048); (3) 国家水体污染控制与治理科技重大专项: 流域社会经济结构调整及水污染综合防治中长期规划研究(编号: 2008ZX07102-001)。

当前,环境预警仍未有针对各类环境事件系统明确的预警建模方法,建模思路主要来源于应用效果较好的经济模型,将其同环境预警对象实际情况相结合,建立适合环境预警的预警系统。应用比较广泛的模型有系统动力学模型(SD模型)、决策树模型、灰色模型和人工神经网络模型等。例如,曾勇等^[5]采用决策树方法和非线性回归方法,以北京六海为例,建立了湖泊水华预警模型。Gurbuz^[6]采用初期终止方法训练和校正人工神经网络模型,预测水库中藻类植物的浓度。Joseph H. W. Lee, Yan Huang^[7]等人则利用人工神经网络(ANN)驱动数据模型的方法,对香港沿海水域的水华进行了预测。

警限的界定即是对警度的确定,一般将警度划分为3~5个警限,以红、橙、黄、绿、蓝等不同颜色信号灯为标识代表警情的危机程度。警限确定和警度划分的方法通常有系统化法、控制图法、突变论法、对比判断法、专家确定法以及综合评判法等多种^[8]。

随着中国经济快速发展,污染排放量大幅度增加,环境污染问题日益突出,污染减排迫在眉睫。通过建立污染减排预警系统,预测各省主要污染物排放情况,从而做到从末端治理向污染预防转变,同时为污染减排管理工作提供决策依据。

为了开展污染减排监督管理的有关预警方面的工作,本文通过建立基于污染减排预警指标体系和主观-客观结合的权重计算方法,构建了污染减排预警系统。将该系统应用于全国31个省级区域,计算得到预警指数并输出警情,最后予以实证分析验证。

2. 全国污染减排预警系统的设计

对经济发展过程中存在的环境问题,党中央、国务院高度重视,在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》中明确提出了“十一五”期间主要污染物(COD和SO₂)排放总量减少10%的约束性指标。通过污染减排预警系统的建立,对污染减排情况做出合理的预测,为减排工作的进行提供有效的指导,从而使污染减排工作指标能够更快更好的完成。

“全国污染减排预警系统”针对中国的实际国情,深入分析影响我国主要污染物SO₂和COD减排的相关因素,构建污染减排预警指标体系和预警模型,并对我国各省市的污染减排体系预警进行应用性研究,

进而提出对策及建议,为环境管理者提供理论依据和决策借鉴。

2.1. 预警指标体系的建立

2.1.1. 预警指标的选择

污染减排预警指标体系的构建原则是综合而易于操作,选择最具代表性的重要指标,明确指标间的相互联系,可以将指标划分为一级指标、二级指标或三级指标等不同层次的指标。结合“十一五”前期工作,分析SO₂和COD减排密切相关的环境和社会经济因素,通过广泛查阅资料并咨询专家意见,对污染减排预警指标进行了合理的分类归并,建立了层次分明、逻辑清晰的减排预警指标框架体系。SO₂减排系统从经济子系统、社会子系统、能源子系统和环境子系统四个方面选取了11个预警指标;COD减排系统分别从经济子系统、社会子系统以及环境子系统三个方面选取了10个指标。具体指标见表1。

2.1.2. 权重的计算

权重确定方法通常分为两类:1)主观赋权法,如专家咨询法^[9]、层次分析法(AHP)^[10]等;2)客观赋权法,如熵值赋权法^[11]、主成分分析法^[12]、聚类分析法^[13]等。由于污染减排体系是一个非常复杂的开放型系统,多种因素相互制约,相互影响,有许多因子其重要性必须要借助有经验的专家、决策者通过在该领域十几年以至几十年的研究给出专业的判断,又要根据数据的客观信息来反映其在某段时期内的重要性。因此,本研究采用基于专家咨询法、熵权法以及两者结合的组合赋权法^[14]进行加权求和来确定评价指标的权重。各种指标的权重如表1所示。

2.1.3. 指标数据的标准化

污染减排预警指标具有不同的量纲,缺乏统一的衡量法,因而各指标间难以进行比较。为了避免计算结果受指标量纲和数量级的影响,保证其科学性和客观性,在进行综合评价之前,必须将原始数据进行标准化处理,将其统一转化到[0,1]范围内,以便预警过程是在标准化的状态下进行。通过对污染减排指标数据的分析,本文采用极差变换^[15]模型对预警指标数据矩阵作标准化无量纲处理。

Table 1. The mixed weight of the warning index of early warning system of pollution emission reduction
表 1. 污染减排预警指标复合权重

一级指标	二级指标	三级指标	专家权重	熵值权重	复合权重
SO ₂	经济子系统	GDP 增长率	0.07191	0.01555	0.04373
		第二产业比例	0.09512	0.17417	0.134645
		第三产业比例	0.02881	0.19784	0.113325
	社会子系统	环境污染治理投资占 GDP 比重	0.05916	0.09315	0.076155
		城镇人口比例	0.06761	0.08395	0.07578
		城镇人口增长率	0.05039	0.06781	0.0591
	能源子系统	单位 GDP 电耗量	0.1718	0.03778	0.10479
		单位 GDP 能耗量	0.2142	0.04571	0.129955
		单位 GDP 工业 SO ₂ 排放量	0.1162	0.03066	0.07343
	环境子系统	单位 GDP 生活 SO ₂ 排放量	0.0482	0.00833	0.028265
		脱硫设施占废气处理设施的比例	0.0766	0.24505	0.160825
		GDP 增长率	0.08154	0.01657	0.049055
COD	经济子系统	第二产业比例	0.1129	0.18572	0.14931
		第三产业比例	0.04743	0.21094	0.129185
		低 COD 排放行业工业增加值增量占 GDP 增量的比例	0.0686	0.16612	0.11736
	社会子系统	环境污染治理投资占 GDP 比重	0.08153	0.09932	0.090425
		城镇人口比例	0.1559	0.0895	0.1227
		城镇人口增长率	0.1191	0.072	0.09555
	环境子系统	单位 GDP 工业 COD 排放量	0.1012	0.0224	0.0618
		单位 GDP 生活 COD 排放量	0.1262	0.06015	0.093175
		城市污水处理率	0.1056	0.07728	0.09144

2.2. 预警方法的实现

2.2.1. BP 神经网络模型的构建

BP 人工神经网络模型具有并行处理能力、自学习、自组织、自适应能力和较好的容错性，从而适应了系统数据信息不完整、影响因素多、不确定性大和非线性等诸多问题，弥补了传统预测方法的不足。污染减排预警系统涉及经济、社会、能源和环境等多个层次，各因素之间关系复杂，具有很强的非线性，并存在预警指标数据缺失等问题。采用 BP 人工神经网络模型对我国污染减排系统进行预测，可以适应系统的复杂性和不确定性。

污染减排预警系统中的 BP 神经网络由三层构成，即一个输入层、一个隐含层和一个输出层。污染减排预警指标体系的指标共 21 个，对于每个预警指标，都需要由前 2 年的数据经过训练输出下一年的预测数据，因此确定神经网络的输入层有 2 个节点 Z_i 、 Z_{i-1} ，输出层为 1 个节点 Z_{i+1} ，其中 Z_i 和 Z_{i-1} 分别为第 i 和 $i-1$ 年的指标数据， Z_{i+1} 为经过训练得到的第 $i+1$ 年的指标预测数据；对于隐含层的考虑，根据 Hornik^[16]提出的公式： $N = \lceil \sqrt{2n+m}, 2n+m \rceil$ 求得。其中， n 为输入层节点数， m 为输出层节点数。隐含层节点数经过反复的训练，采用 2 层，每层 3 个节点，构建 2-3*3-1 结构的神经网络模型。由于污染减排监督管理在我国

开展年代较近，因此历史数据积累较少，特别是 2010 年的数据尚未完全统计完毕，鉴于此，即用 2004~2008 年历史数据作为输入数据，2009 年数据作为检验数据，待模型可靠性测试完成之后，即可用来预测 2010 年的情况。

2.2.2. 预警警限及警情界定

为了全面的分析、评价预警系统运行和减排工作开展情况，通过数学模型将描述评价对象的多项指标信息“合成”为一个整体的污染减排综合评价价值，即污染减排预警安全指数。对照环境系统综合指数预警级别标准^[17-18]，将污染减排预警安全指数在 0~1 之间划分为 5 个区间，作为预警系统的警限；将减排形势界定为很差、较差、一般、良好和很好，分别对应的预警系统警情为巨警、重警、中警、轻警和无警；将污染减排预警系统的警限与警情相互对应，最终以不同颜色的信号灯作为预警信号输出。详见表 2。

Table 2. The definition of warning limits and warning status of the early warning model
表 2. 污染减排警限及警情界定

警限(评价值)	[0, 0.2)	(0.2, 0.4)	(0.4, 0.6)	(0.6, 0.8)	(0.8, 1]
减排状况	很差	较差	一般	较好	很好
警情	巨警	重警	中警	轻警	无警
预警信号	红灯区	橙灯区	黄灯区	绿灯区	蓝灯区

3. 典型省份污染减排预警实证分析

应用污染减排预警系统对全国 31 个省 SO₂ 和 COD 减排情况进行预测,将预测数值绘成的曲线与实际数值曲线相比较,两条曲线的拟合程度较高,说明模型的预测精度较高,预测值参考性较高,能够较精准的进行我国污染减排情况预测。预警系统预测结果表明我国各省减排出现参差不齐的局面,部分省份减排达标困难。根据预警结果进行警情分析,由于全国省份较多,本文分别选取减排优秀省份和薄弱省份作为典型省份,用以表明污染减排工作开展着有成效和预警系统对于污染减排工作的积极作用。以下选取 SO₂ 减排典型情况较好的省份北京和 COD 典型减排存在困难的省份湖南,作为典型省份进行预测结果分析。

3.1. 北京市 SO₂ 减排预警结果分析

根据北京市各年度 SO₂ 污染减排预警安全指数评价价值,绘出预警趋势图,结合预警信号和警情,得到北京市 SO₂ 减排预警结果。

图 1 为北京市 SO₂ 污染减排预警趋势图,由图中可以看出北京市 SO₂ 减排体系整体处于绿灯区,呈现轻警状态,减排形势较好,而且 2005~2010 年其预警安全指数呈现上升趋势,可以判定北京市的 SO₂ 减排形势十分乐观。

通过北京市污染减排数据分析,可知道北京市在 GDP 多年持续增长的同时,已连续 4 年超额完成“十一五”年度节能减排的目标。首钢压产搬迁,四大燃煤电厂和燕化等企业自备电厂脱硫工程全部建成投运,从根本上减少了煤炭的消耗和 SO₂ 的污染排放。北京市自“十五”以来积极推进产业结构优化升级,

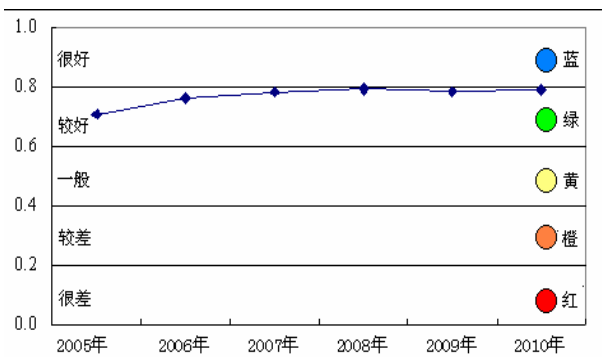


Figure 1. The trend of early warning of SO₂ in Beijing
图 1. 北京市 SO₂ 预警趋势图

促进产业方式的改变,突出科技创新、出台相关政策和法规,促进节能减排所做出的一系列努力,为其污染减排工作的进行提供了有力的帮助。

3.2. 湖南省 COD 减排预警结果分析

根据湖南省各年度 COD 污染减排预警安全指数评价价值,绘出预警趋势图,结合预警信号和警情,得到湖南省 COD 减排预警结果。

图 2 为湖南省 COD 预警趋势图,从图中可以看出湖南省 2005~2007 年处于橙灯区,2008~2010 年开始向黄灯区过渡,即是警度由重警区向中警区转变的过程,其预警安全指数不断呈现上升趋势,说明湖南省在“十一五”减排的头两年 COD 的排放量较大,污染严重,随着减排工作的不断开展,湖南省加大了 COD 的减排力度,并采取了一系列有效的减排措施,因此警情得以减轻。从预警输出结果上看,湖南在接下来的几年中警情有不断缓解的趋势,但仍然存在着一定的风险和不安因素,主要是因为: 1) 湖南省本身造纸行业发达, COD 减排水平较大。湖南省自然条件优越,造纸原料资源十分丰富,使其造纸业十分发达。行业废水为全省四大工业废水排放行业之一,同时 COD 的平均排放强度是其他行业的 10 倍左右,造成了湖南 COD 排放量大、污染严重的结果。2) 工业化、城镇化速度加快。湖南省正处于工业化、城镇化加速发展的重要阶段,经济发展较快,高耗能产品的需求较大,高耗能、高污染行业的产能扩张难以完全遏制,也就导致了工业 COD 和生活 COD 排放量的不断增加。3) 减排投入不足。减排技术改造和设备方面投入不足,部分老企业设备陈旧,对落后的生产能力无法及时更新换代,增加了 COD 排放量。

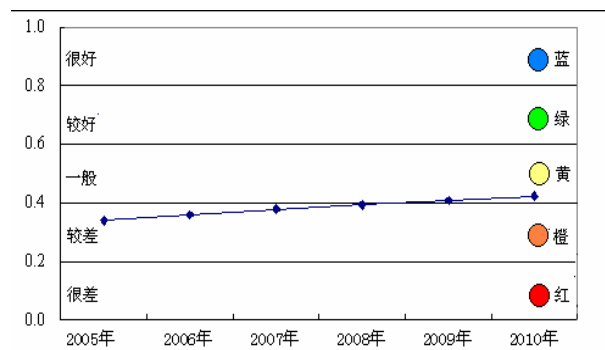


Figure 2. The trend of early warning of COD in Hunan
图 2. 湖南省 COD 预警趋势图

4. 结语

当前, 污染减排监督管理工作受到了高度重视, 本研究将 BP 神经网络预测技术应用于污染减排的管理工作并建立了污染减排预警系统。该系统能够对我国污染减排发展趋势和指标情况进行科学预测和分析, 预警结果显示各省减排力度加大, 减排形势也在不断好转, 但重工业化、高耗能、高污染工业产业结构比重大的省份减排进度仍缓慢, 需增加政府宏观调控。此外, 污染减排预警系统的建立过程存在着一定的局限性, 如预警指标数据的收集存在统计口径不对接、数据不齐全等问题。由于污染减排预警的综合性和复杂性, 在后续研究中应进一步提高其预测精确程度及预警的前瞻性, 使污染减排预警系统更加完善, 更好地为污染减排工作服务。

参考文献 (References)

- [1] 雷战波, 赵吉博, 朱正威. 企业危机预警理论及其对我国社会危机预警的启示[J]. 中国行政管理, 2005, 236(2): 34-35.
- [2] 陈国阶. 对环境预警的探讨[J]. 重庆环境科学, 1996, 18(5): 14.
- [3] 李华生, 徐瑞祥, 高中贵等. 南京城市人居环境质量预警研究[J]. 经济地理, 2005, 25(5): 658-661.
- [4] 颜卫忠. 环境预警指标体系研究[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版), 2002, 3(8): 87-90.
- [5] 曾勇, 杨志峰, 刘静玲. 城市湖泊水华预警模型研究——以北京“六海”为例[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 79-85.
- [6] H. Gurbuz. Predicting dominant phytoplankton quantities in a reservoir by using neural networks. *Hydrobiologia*, 2003, 504(1-3): 133-141.
- [7] J. H. W. Lee, Y. Huang, and M. Dickman. Neural network modelling of coastal algal blooms. *Ecological Modelling*, 2003, 159(2-3): 179-201.
- [8] 李键, 杨玉楠, 吴舜泽等. 水环境预警系统的研究进展[J]. 环境保护, 2009, 6: 4-7.
- [9] 冯志英, 王建荣. 应用专家咨询法设计患者对医院护理工作满意度量表[J]. 护理管理杂志, 2007, 7(2): 69.
- [10] 孟俊杰, 蔡世忠. 基于 AHP 的中原地区耕地预警实证研究——以新郑市为例[J]. 河南农业科学, 2011, 40(3): 1-5.
- [11] 韩伟, 李杰. 基于熵权法的财务危机预警指标选择研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2006, 6(4): 65-68.
- [12] 刘开瑞, 弥莹. 基于主成分分析法构建陕西省上市公司财务预警模型[J]. 科学·经济·社会, 2010, 28(121): 88-93.
- [13] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究[J]. 软件学报, 2008, 19(1): 48-61.
- [14] 李霞. 基于主客观决策信息一致化的组合赋权法[J]. 企业技术开发, 2007, 26(6): 78-92.
- [15] 雷铁栓, 郭瑞林, 王新海等. 灰色系统理论在农业上的应用[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1996: 24-27.
- [16] K. Hornik. Approximation capabilities of multiplayer feed-ward networks. *Neural Networks*, 1996, 4: 251-257
- [17] 雷鸣. 环境安全监测预警系统研究[J]. 天津农学院学报, 2007, 14(3): 49-54.
- [18] 尹晓波. 社会经济与生态协同发展预警系统分析[J]. 工业技术经济, 2004, 23(5): 55-57.