

水资源约束下城市需水量预测研究

李琳¹, 左其亭², 郑二伟¹, 孙熙¹

(1. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450016; 2. 郑州大学水科学研究中心, 河南 郑州 450001)

摘要: 在分析需水量预测和水资源约束的基础上, 本文探讨了水资源约束的量化指标。提出城市需水量预测应和水资源约束结合, 并将水资源约束系数引入需水量预测中。应用 BP 网络, 建立了水资源约束下的城市需水量预测模型。本文以郑州市为例, 应用预测模型进行需水量预测, 并对预测结果进行了分析。结果表明: 本文建立的模型具有一定的实用价值, 为区域的发展规划、供水工程规划以及节水规划提供更科学的依据。

关键词: 水资源约束; 约束系数; 需水量; 需水量预测

中图分类号: TV211.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0042-04

Research on predication of urban water demand under water resources constraint

LI Lin¹, ZUO Qiting², ZHENG Erwei¹, SUN Xi¹

(1. Henan Water and Power Engineering Consulting Co. Ltd, Zhengzhou 450016, China;

2. Center for Water Science Research, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the analysis of water demand predication and water resources constraint, this paper investigated the quantification indicator of water resources constraint. It put forward that the forecast of urban water demand should be combined with the water resources constraint. The coefficient of water resources constraint was introduced to the predication of water demand. The paper set up the prediction model of urber water demand under water resources constraint by using BP network. Taking Zhengzhou for examble, it applied the model to predict the water demand and analyzed the result of prediction. The results indicated that the model has certain practical value and can provide scientific basis for the plan of zone development, the scheme of water supply project and water saving.

Key words: water resources constraint; constraint coefficient; water demand; predication model

随着人口持续增长、经济高速发展、生活水平的不断提高, 城市的工业和生活用水需求量大幅度增长, 使城市水资源供需矛盾加剧。全国 600 多个城市中有 400 座城市缺水, 130 座城市严重缺水, 水资源短缺成为制约城市社会经济发展的主要因素, 解决城市缺水问题是目前城市建设面临的重大挑战。目前, 一些城市为了解决缺水问题, 超采地下水, 造成地下漏斗, 以供定需是解决缺水的主要途径。在水资源约束下进行城市需水量预测就显得至关重要和紧迫。

目前对于城市需水量的预测, 采用回归分析法、指数平滑法、灰色预测法、用水定额法以及人工神经网络法。人工神经网络方法是近年来随着人工智能

的发展, 用来预测需水量的方法。如张志宇等将 PSO-RBF 神经网络用于城市需水量预测中^[1]; 霍金仙基于 BP 网络对全国需水量预测进行研究^[2]; 温家鸣等利用 BP 神经网络对桂林生态城市建设需水量进行预测^[3]; 陈卫等利用 BP 网络建立城市时用水量时间序列与解释性预测组合模型^[4]; 景亚平等提出了基于马尔科夫链修正的组合灰色神经网络预测模型, 用于城市用水量预测中^[5]; 左其亭等将需水量预测与社会经济安全结合起来, 建立了社会经济安全条件下区域需水量预测模型^[6]。

可以看出城市需水量的预测和社会经济密切相关, 需水量又受到水资源条件的制约。本文针对这些问题, 在分析了水资源约束的基础上, 将水资源约

收稿日期: 2014-04-02; 修回日期: 2014-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279183); 河南省科技攻关计划项目(132102310528); 河南省高校科技创新团队支持计划(13IRTSTHN030)

作者简介: 李琳(1982-), 女, 河南睢县人, 工程师, 硕士, 主要从事水利工程、水文规划、区域水资源规划工作。

束系数应用于需水量预测中,建立水资源约束下城市需水量预测模型。最后以郑州市为例,利用建立的预测模型对城市需水量预测进行了探讨。

1 水资源约束

水资源约束是指经济社会发展所需要的水资源供不应求,对发展形成制约^[7]。水资源对经济社会的制约作用主要表现为功能性约束、生态性约束、经济性约束和制度性约束^[8]。功能性约束主要为水资源供需矛盾突出会制约城市的发展;生态性约束主要为地表水资源的污染、地下水超采形成的水环境恶化问题;经济性约束是指水资源对城市经济的间接的约束力;制度性约束是指水资源管理制度不完善对社会可持续发展造成影响。

需水量预测考虑水资源对经济社会的制约作用,依据当地经济社会发展的实际状况,分析当地水资源利用条件的基础上,确定水资源约束下需水量预测指标体系。利用水资源约束系数以达到以供定需,实现水资源供需平衡目标;在取用水指标选取上要充分考虑当地水资源的条件,实行节水指标;同时加强水资源管理要求确保水资源安全,严格控制各部门的用水指标,严格控制取用水水质,及废污水排放的水质标准。

结合需水量预测实际情况,确定预测指标体系详见表 1。利用建立的模型进行预测时,可在指标体系中选取主要影响指标进行计算。

表 1 水资源约束下需水量预测指标体系

一级指标	二级指标
经济社会发展	人口、工业产值、国内生产总值、农业灌溉面积
	生活用水指标、万元工业产值用水指标、农业灌溉用水指标、人均综合用水量
取用水指标	可利用水资源量
取水水源条件	水资源约束系数、严格控制用水指标、严格控制水质标准、控制用水增长率
水资源安全	

2 BP 神经网络

BP 神经网络是应用 B - P 算法的多层前馈神经网络,也是误差反向传递神经网络。BP 网络一般由输入层,隐含层和输出层组成,各层包含着若干神经元节点,层之间的节点通过权值连接。BP 学习过程即是工作信号正向传播,误差信号反向传递。在

误差信号向前传递的过程中,通过不断修正权值使网络的期望输出与实际输出更接近。

改进的 BP 算法步骤如下:

(1) 输入、输出样本归一化:利用公式将 X_p, Y_p

转化为 0 ~ 1 之间的数据。 $\frac{x_p - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}; \frac{y_p - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}$

(2) 确定网络的结构:在 0 ~ 1 之间随机给出网络的连接权 $W = (w_{ji}, v_{kj}, \theta_j)$ 的值。 w_{ji} 为隐含层神经元与输入层神经元之间的连接权值; v_{kj} 为输出层神经元与隐含层神经元之间的连接权值; θ_j 为隐含层神经元的阈值。

(3) 确定隐含层的输入 I_j 和输出 O_j

$$I_j = \sum_{i=1}^n w_{ji}x_i + \theta_j; O_j = \frac{1}{1 + e^{-I_j}} \tag{1}$$

(4) 确定输出层的输出

输出层神经元的激励函数选取线性函数,输出层神经元的阈值取为 0,输出层神经元的输出即是

整个网络的输出: $y = \sum_{j=1}^m v_{kj}O_j \tag{2}$

(5) 计算网络单样本点的误差:网络的实际输出为 t_p ,计算输出为 y_p

网络的输出误差函数为 $e_p = \frac{1}{2}(t_p - y_p)^2 \tag{3}$

(6) 修正连接权值: $\Delta W = (\Delta w_{ji}, \Delta v_{kj}, \Delta \theta_j)$, 引入学习率 η 和动量因子 α

$$\Delta W = -\eta \frac{\partial e_p}{\partial W}; \Delta W = \eta \frac{\partial y_p}{\partial W}$$

$$\Delta v_j = \eta d_p O_{jp}; \Delta \theta_j = \eta d_p O_{jp} (1 - O_{jp});$$

$$\Delta w_{ji} = \eta d_p O_{jp} (1 - O_{jp}) x_{ip}$$

引入动量因子: $\Delta W^{(n)} = \Delta W^{(n-1)} + \alpha \Delta W^{(n-1)}$

网络的连接权: $W^{(n)} = W^{(n-1)} + \Delta W^{(n)}$

(7) 循环进行迭代计算直到能量函数值 (E_p) 达到要求的精度

$$E_p = \sum_{p=1}^s e_p \tag{4}$$

(8) 将预测数据代入训练好的网络中,进行预测。

3 需水量预测模型

随着城市用水量的逐渐增长,用水需求受到供水的严重约束。要将供水系统的信息反馈到需水系统,需要将水资源约束定量化,以充分体现“以供定需”的预测思路。本文依据前述方法,建立的需水量预测模型如下:

$$\begin{cases} Y_i = P_i \cdot Z_i \\ Z_i = F(v \cdot f(wR_i + \theta_h I) + \theta_0 I) \\ Y'_i = \lambda_i \cdot Y_i \\ \lambda_i = \sqrt{|(1 - \alpha_{i-1}^2)/(1 - \alpha_0^2)|} \end{cases} \quad (5)$$

式中： Y_i 为第 i 年无水资源约束的需水量预测值； Y'_i 为第 i 年有水资源约束的需水量预测值； P_i 为第 i 年用水人口； Z_i 为第 i 年人均用水定额； R_i 为输入向量，本例中为灌溉用水定额，人均生活用水定额及万元工业产值用水定额； I 为单位向量； $f(x)$ 为隐含层的激励函数，在此采用 S 型对数函数，隐含层的阈值为 θ_h ； $F(x)$ 为输出层的激励函数，在此采用线性函数，输出层的阈值 θ_0 为零； λ_i 为第 i 年的水资源约束系数； α_0 为建模所用数据最后一年的水资源开发利用系数， $\alpha_0 = Y_s/W_s$ ，其中 Y_s 为建模所用数据最后一年的实际用水量， W_s 为建模所用的多年平均水资源

可利用量； α_i 为第 i 年的水资源利用系数， $\alpha_i = Y'_i/W$ ，其中 W 为预测期多年平均水资源可利用量。

4 水资源约束下城市需水量预测

4.1 应用实例——郑州市概况

本文以郑州市为例，利用改进的 BP 网络，按照“以供定需”的思想对郑州市需水量进行预测。郑州市是河南省的省会，位于河南省中部，北临黄河，是河南省的中心城市。郑州市包括巩义市、登封市、新密市、荥阳市、新郑市、中牟县和郑州市区这 7 个市区。下面所指的郑州市是全市 7 个市区。郑州市水资源十分短缺，多年平均人均水资源量约 213 m³，约为全省人均水资源量的二分之一，占全国人均水资源量的十分之一，属于严重缺水地区，郑州市 2000 - 2010 年主要指标及实际用水量见表 2。

表 2 郑州市主要指标及实际用水量

m³/亩，万人，L/(人·d)，万元，m³/万元，万 m³，m³

年份	灌溉定额	常住人口	综合生活定额	工业产值	工业定额	GDP	总用水量	人均综合用水
2000	322	671.5	111	9399524	40	7380243	145743	232
2001	310	679.2	124	10538746	37	8221153	151617	230
2002	281	687.7	122	11597890	34	9268430	157789	229
2003	233	697.6	98	12996596	28	11021125	151459	217
2004	221	706.6	123	14452215	27	13751200	137653	219
2005	204	716.0	110	16041958	30	16501370	158940	222
2006	183	724.3	129	18108162	29	20134800	161165	223
2007	174	735.5	133	20469467	26	24867500	158649	216
2008	120	743.6	137	22874629	22	30039925	162908	219.1
2009	177	752.0	135	25642459	21	33085113	174221	231.7
2010	125	866.0	154	28463130	22	49798510	202312	233.6

说明：1. 资料来源于《河南省统计年鉴》、《河南省水资源公报》、《郑州市水资源公报》等。

2. 综合生活定额包含城镇居民生活、农村人畜生活和城镇公共用水定额。

4.2 郑州市 2000 - 2010 年用水量计算

利用人均综合用水来预测城市的需水量，在此选取人均生活用水量，万元工业产值用水量及农业灌溉定额作为影响人均综合用水的主要因素。这 3 个因素大体反映了社会经济发展状况，并且可以拟定预测年在水资源约束下的生活、工业、灌溉定额以及用水人口，从而计算出城市需水量。

选取 2000 - 2008 年的数据为样本，用 2009、2010 年的数据进行检验。利用公式 $\frac{x_p - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$ ，

$\frac{y_p - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}$ 对样本进行归一化处理(结果见表 3)；输入层神经元为 3 个，隐含层神经元为 3 个，输出层神经元为一个；隐含层神经元的激励函数采用修改的 S 型对数函数： $y = \frac{1}{1 + e^{-2x/3}}$ ；学习率 η 取 0.01， α 取

0.95；按照前文介绍的 BP 算法的步骤进行计算人均综合用水量(结果见表 4)。从预测结果看出，2000 - 2008 年人均综合用水量历年的预测值与实际值相差最大为 0.684%，满足精度要求。2009 年、2010 年预测结果与实际值相差分别为 0.647%、0.899%。

4.3 主要指标的选取及预测

考虑到人们生活水平的提高，综合生活用水定额增加，但同时加强节水，依据一些城市的综合生活用水定额，拟定郑州市人均综合生活用水量 2010 - 2015 年以 4.5% 的速度增长，2015 - 2020 年以 2.5% 的速度增长；考虑技术进步及节水措施实施，2010 - 2020 年郑州市万元工业产值用水量每年减少 2%；2010 年为新普查人口(常住人口为 866 万人)，根据郑州市发展规划，2010 - 2015 人口增长较

表 3 归一化结果 m³

年份	灌溉 定额	人均生活 用水量	万元产值 用水量	人均综合 用水量
2000	1.000	0.333	1.000	1.000
2001	0.941	0.667	0.833	0.875
2002	0.797	0.615	0.667	0.813
2003	0.559	0.000	0.333	0.063
2004	0.500	0.641	0.278	0.188
2005	0.416	0.308	0.444	0.375
2006	0.312	0.795	0.389	0.438
2007	0.267	0.897	0.222	0.000
2008	0.000	1.000	0.000	0.194

表 4 原始数据与预测数据表 m³/人, %

年份	实际 数值 A	预测 数值 B	误差百分比 = (A - B)/A × 100%
2000	232	230.5	0.647
2001	230	230.4	-0.174
2002	229	227.6	0.611
2003	217	217.2	-0.092
2004	219	218.3	0.320
2005	222	221.9	0.045
2006	223	222.6	0.179
2007	216	216.2	-0.093
2008	219.1	218.5	0.274
2009	231.7	233.2	-0.647
2010	233.6	231.5	0.899

快,增长率达 1.6%,2015 - 2020 控制在 8.5‰ 以内,GDP 增长率应大于人口的增长率。农业灌溉净定额按强化节水条件拟定,2010 - 2020 年每年减少 1%;减少万元工业产值用水量是经济安全的基本标准,根据郑州市发展规划,2010 - 2020 年万元工业产值用水量每年减少 3%;为了保证社会经济可持续发展,需水量不应超过水资源可利用量。

4.4 郑州市需水量预测计算及结果分析

根据郑州市的有关资料以及发展规划,预测郑州 2010 年 2020 年多年平均水资源可利用总量为 24 亿 m³,郑州市规划水平年需水量预测结果见表 5。

表 5 郑州市相关指标以及需水量预测结果 万人, m³, 万 m³

年份	总人口	无约束下 人均综合 用水量	无约束 下需 水量	水资源 约束下 需水量	水资源约 束下人均 综合用水量
2015	938.35	222	208012	197992	211
2020	978.90	241	245632	230042	235

应用 BP 网络预测城市需水量具有较好的可信度和很强的预测能力,在社会经济安全的条件下拟定各项指标,并在城市可供水资源约束的条件下预测,这种方法在实际中也是可行的。

(1)对表 4 所列的实际数据与预测数值分析,得出人均综合用水量的最大误差为 0.899%,小于 5%,经检验预测精度较高,可以用于城市需水量的预测。

(2)不考虑约束系数下,2020 年需水量超过了多年平均水资源可利用总量;考虑约束系数后,2020 年需水量减少了 15 590 万 m³。

(3)在引入水资源约束条件下,需水量的预测值减小,这充分体现了未来“以供定需”的水资源管理战略,从而保证城市社会经济的可持续发展。需水量从 2000 - 2010 的增长率为 3.3%,2010 - 2020 的增长率为 1.3%,增长速度有所下降。随人口增长达到饱和状态以及节水措施的实施,需水量的零增长是可以实现的。

5 结 语

本文利用预测模型对郑州市的需水量进行了预测,此方法充分体现了“以供定需”的用水管理方针。从预测结果可以看出,2000 - 2020 年郑州市的用水量呈非线性增长,并且 2000 - 2010 年的用水增长率大于 2010 - 2020 年的增长率。

21 世纪,水资源将成为制约城市社会经济发展的重要因素,城市需水量预测也就成为保障水资源安全的前提。今后的需水量预测会和水资源条件约束结合得更加紧密,随着新方法、新技术的引入,预测精度也会越来越高,为城市规划和水资源需求管理提供更可靠的依据。

参考文献:

[1] 张志宇,赵丹国,侯晓宇. PSO - RBF 神经网络在城市需水量预测中的应用[J]. 水电能源科学,2013,31(6):55 - 57.

[2] 霍金仙,郭永,刘文先. 基于 BP 网络的全国需水量预测研究[J]. 人民黄河,2009,31(9):54 - 56.

[3] 温家鸣,郭纯青,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.

[4] 陈卫,陆健,吴志成. BP 网络的城市时用水量预测组合模型[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(6):197 - 200.

[5] 景亚平,张鑫,罗艳. 基于修正组合模型的青海省城市需水量预测[J]. 自然资源学报,2012,27(6):1013 - 1021.

[6] 左其亭,李琳. 社会经济安全条件下区域需水量预测方法[J]. 水资源保护,2008,24(1):6 - 11.

[7] 董林,陈璇璇. 城市可持续发展的水资源约束分析[J]. 水利科技与经济,2006,12(8):525 - 527.

[8] 陶洁,左其亭,齐登红,等. 中原城市群发展战略与水资源约束研究[J]. 中国水利,2011(21):20 - 23 + 35.