

基于恩格尔系数与霍夫曼系数的城市需水量预测

张志果¹, 邵益生¹, 徐宗学²

(1. 中国城市规划设计研究院, 北京 100037;

2. 北京师范大学 水科学研究院 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要:北京市生活用水量与恩格尔系数和工业用水量与霍夫曼系数的相关系数分别达到-0.78和0.95。基于这一事实, 本文建立了基于恩格尔系数的生活用水量预测模型和基于霍夫曼系数的工业用水量预测模型, 并以1998-2007年北京市的用水资料进行参数率定。结果表明, 所建立的模型能较好地反映城市生活用水及工业用水的变化, 其确定性系数分别为0.68和0.92, 说明对工业用水的整体模拟要好于生活用水。对2020年北京市的城市用水预测表明, 2020年北京市生活需水量约为14.52亿m³, 工业需水量约为3.42亿m³, 城市用水量总体呈下降趋势, 所建立的模型对于预测长期用水变化具有一定的参考意义。

关键词:生活用水; 工业用水; 恩格尔系数; 霍夫曼系数

中图分类号: TV212.2

文献标识码: A

1 研究背景

城市需水量预测是城市供水总体规划和工程规划的基础。长期以来, 我国在用水需求的预测上一直过于“超前”, 过去许多部门的预测结果都已经或即将被证明是明显偏大的^[1]。常规的预测方法有用水回归分析法、用水定额法、时间序列分析法和弹性系数预测法等, 这些预测方法通常是先建立数据序列的统计模型, 然后根据统计模型进行计算和预测。但由于城市需水量受地域、城市市政基础设施、工业类别及产值和人口等众多因素的影响^[2], 各影响因素与城市需水量之间存在着复杂的非线性关系, 传统的预测模型无法很好地模拟这种非线性关系, 使得城市需水量预测带有较大的不确定性。为减少这种不确定性, 一些非线性理论, 如混沌理论^[3]、灰色系统理论^[4]、神经网络理论^[5]、系统动力学方法^[6]、粒子群算法^[7]、计量经济学方法^[8]等被引入到城市需水量预测中。非线性理论预测方法在一定程度上提高了预测精度, 但由于这些方法一般为数据驱动模型, 对驱动城市需水量变化的内在机制考虑不足, 且受历史资料的限制较大。实际上, 生活用水水平与居民的生活水平密切相关, 而工业用水水平与城市的工业化程度关系紧密。已有的研究表明, 世界城市生活用水量及工业用水量的增加与城市化的过程紧密相关^[9-10], 而居民生活水平的提高与城市工业化水平的提高则是城市化的两个重要表现。以北京市为例, 生活用水量与恩格尔系数、工业用水量与霍夫曼系数之间的相关系数分别达到-0.78和0.95, 基于这一事实, 本文选择表征居民生活水平的恩格尔系数与表征城市工业化水平的霍夫曼系数作为主要参数之一, 同时考虑人口总量与工业总量等其它重要的用水影响因素, 构建城市生活用水及工业用水的预测模型, 并以北京市为例, 分析模型的适用性。

收稿日期: 2009-04-27

基金项目: 北京市科委博士论文资助专项(ZZ0932)

作者简介: 张志果(1983-), 男, 山东泰安人, 博士, 主要从事水文预报及城市水系统研究。E-mail: zhangzhiguo910@gmail.com

2 模型建立

城市生活用水包括居民生活用水和公共生活用水。研究表明,影响城市居民生活用水量的因素可能包括水价和居民收入等因素^[11],而水价和居民收入等经济因素是居民生活水平的表征。因此,用表征城市居民生活水平的恩格尔系数作为城市生活需水预测的变量具有一定的可行性。恩格尔系数源于恩格尔定律,是表征居民生活水平的重要指标。恩格尔定律是指食物在总支出中所占比重与家庭收入(或衡量家庭总资源的某种其他尺度)成反比,即食物开支的收入弹性小于1。恩格尔系数是基于恩格尔定律的一个比值,即食物支出占全部生活消费支出的比重^[12]。恩格尔系数的降低对生活用水具有两方面的作用:一方面,随着生活质量的提高,居民的家庭用水量不断增加,同时居民消费能力的增强使得城市服务业持续发展,从而导致城市服务业等公共生活用水量增加。另一方面,居民生活水平的提高会使得居民有机会接受更多的节水教育,居民的节水意识逐步增强,节水器具的使用率增加,从而使得居民生活用水量减少。此外,人口的增长和降水^[13]的变化对城市的生活用水量也有重要影响。基于以上分析,建立城市生活用水量预测模型为

$$Q_i^R = Q_0^R \cdot \left(\frac{E_i}{E_0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{W_i}{W_0}\right)^\beta \cdot \left(\frac{P_i}{P_0}\right)^\gamma \quad (1)$$

式中: Q_i^R 、 Q_0^R 分别为第 i 年和基准年的生活用水量(亿 m^3); E_i 、 E_0 分别为第 i 年和基准年的城市居民恩格尔系数; W_i 、 W_0 分别为第 i 年和基准年的城市人口(万人); P_i 、 P_0 分别为第 i 年和基准年的降水量(mm); α 、 β 、 γ 分别为恩格尔系数、人口及降水对生活需水量的影响因子。

将式(1)两边分别取对数,得:

$$\ln Q_i^R - \ln Q_0^R = \alpha(\ln E_i - \ln E_0) + \beta(\ln W_i - \ln W_0) + \gamma(\ln P_i - \ln P_0) \quad (2)$$

即生活用水量的对数之差与恩格尔系数的对数之差、城市人口对数之差及降水量对数之差成线性关系。

相比于生活用水,城市工业用水相对集中。一个城市工业用水的多少与工业发展速度有关,也与工业结构、工业生产水平、用水管理和节约用水的程度等因素有关,因此,不同类型的工业用水量差异很大,即使相同类型的工业在不同的工业化水平下用水量也存在很大的差异。发达国家工业用水的历史变动过程显示,工业用水在上升到一定阶段后可能停止增长甚至转而下降^[14]。工业用水效率的提高是工业用水减少的主要因素,而工业用水效率的提高与传统的重工业向高科技及知识工业的经济结构调整密不可分^[15]。因此,城市的工业化水平对城市工业用水具有重要的影响。

城市的工业化水平可以用霍夫曼系数来表示。根据消费资料工业与生产资料工业的比例,霍夫曼于1931年提出了工业化四阶段理论。第1阶段,消费资料工业发展迅速,在制造业中占有统治地位;生产资料工业则不发达,在制造业中所占比重较小;第2阶段,生产资料工业发展较快,消费资料工业虽也有发展,但速度减缓;第3阶段,消费资料工业与生产资料工业在规模上大致相当;第4阶段,生产资料工业在制造业中的比重超过消费资料工业并继续上升。整个工业化过程,就是生产资料工业在制造业中所占比重不断上升的过程,后者的净产值将大于前者。消费资料工业与生产资料工业的比例,后人称为霍夫曼系数,可以表示为:

$$H_i = \frac{L_i}{H_i} \quad (3)$$

式中: H_i 为第 i 年霍夫曼系数; L_i 为第 i 年消费资料的工业产值; H_i 为第 i 年生产资料的工业产值。

霍夫曼系数适用于衡量一定时期的工业化水平和工业化阶段的划分。该系数越小,重工业化程度越高,工业化水平也越高^[16]。霍夫曼系数较好地反映了轻重工业的比例,但对于重工业内部结构却不能较好的刻画。而重工业的行业性质往往对工业用水有较大影响,如在工业规模相同的前提下,以矿电、冶金为主的重工业的用水量要远高于以加工业为主的重工业。

为更好地描述工业结构对工业用水的影响,引入加工工业在工业产值中的比例表征重工业产业升级。按生产性质和产品用途,重工业可以分为采掘(伐)工业、原材料工业和加工工业。在工业化

早期,工业结构以轻工业化为主,加工程度低。随着工业化的进一步发展,以能源、原材料为主的采掘(伐)工业及原材料工业得到高速发展;工业化中后期,随着工业技术的提高及能源短缺出现,工业结构向加工制造业方向发展。随着工业化的发展,加工程度高的重化工业和机械加工业必定优先发展,从而在总产出中的份额会增长^[16]。重工业阶段产业升级、第二产业比重的明显降低——其本质是高耗水的重化工行业的规模的绝对萎缩——几乎是工业用水停止增长的充分条件^[14]。基于以上分析,建立城市工业用水预测模型为

$$Q_i^I = Q_0^I \cdot \left(\frac{H_i}{H_0}\right)^\varepsilon \cdot \left(\frac{M_i}{M_0}\right)^\eta \cdot \left(\frac{G_i}{G_0}\right)^\mu \quad (4)$$

式中: Q_i^I 、 Q_0^I 分别为第*i*年和基准年的工业用水量(亿 m³); H_i 、 H_0 分别为第*i*年和基准年的霍夫曼系数; M_i 、 M_0 分别为第*i*年和基准年加工工业在工业产值中的比重; G_i 、 G_0 分别为第*i*年和基准年的工业增加值; ε 、 η 、 μ 分别为霍夫曼系数、加工工业比例及工业增加值对工业需水量的影响因子。

将式(3)两边分别取对数,得:

$$\ln Q_i^I - \ln Q_0^I = \alpha (\ln H_i - \ln H_0) + \beta (\ln M_i - \ln M_0) + \gamma (\ln G_i - \ln G_0) \quad (5)$$

即工业用水量的对数之差与霍夫曼系数对数之差与工业增加值产量的对数之差成线性关系。

3 模型应用

3.1 数据资料获取 本文选取1992—2007年北京市的用水指标,包括生活用水量和工业用水量,数据来自1992—2007年的《北京市水资源公报》;相应的社会、经济指标如人口,轻、重工业增加值则来自1999—2008年的《北京市统计年鉴》。

3.2 模型参数率定 北京市生活用水量从1992年的10.98亿 m³增加到2007年的13.89亿 m³,增加了26.5%;而工业用水量则从1992年的15.51亿 m³减少到2007年的5.75亿 m³,减少了63.0%。与此同时,北京市居民的恩格尔系数从1992年0.53下降到0.32,而霍夫曼系数则从0.55下降到0.18。北京市生活用水量与恩格尔系数、工业用水量及霍夫曼系数的相关关系如图1所示。由图1可以看出,工业用水变化与霍夫曼系数的变化具有较强的相关性,随着霍夫曼系数的减少,工业用水呈现明显的减少趋势,二者相关系数*r*达到0.95。相比与工业用水,生活用水的变动幅度相对较小,随着生活恩格尔系数的降低,生活用水量呈现增加趋势,二者的相关系数*r*为-0.78。

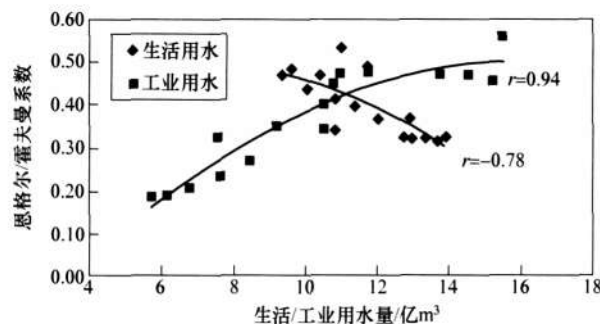


图1 北京市生活用水量与恩格尔系数、工业用水量与霍夫曼系数相关关系

北京市1998年的生活用水量为10.83亿 m³,工业用水量为10.84亿 m³。以1998—2007年的北京市生活及工业用水量进行参数率定,得生活用水量及工业用水量的预测模型如下式所示。

$$Q_i^R = 10.83 \left(\frac{E_i}{E_0}\right)^{0.11} \cdot \left(\frac{W_i}{W_0}\right)^{0.96} \cdot \left(\frac{P_i}{P_0}\right)^{-0.04} \quad (6)$$

$$Q_i^I = 10.84 \left(\frac{H_i}{H_0}\right)^{-0.47} \cdot \left(\frac{M_i}{M_0}\right)^{-0.28} \cdot \left(\frac{G_i}{G_0}\right)^{-0.89} \quad (7)$$

从生活需水量的影响因子可以看出,人口数量的影响因子为0.96,是决定城市生活需水量增长

的主要因素；恩格尔系数的影响因子为0.11，说明现阶段随着居民生活水平的提高，居民节水意识的提高和节水器具的使用对用水的增长产生了一定的抑制作用；降水的影响因子为-0.04，说明降水的增加能在一定程度上减少生活用水，但由于影响系数较小，因此对用水量的变化影响有限。北京市工业增加值与从1998年的670.4亿元增加到2007年的2082.8亿元，而工业用水量却由1998年的10.84亿 m³减少到2007年的5.75亿 m³，二者存在较为明显的负相关关系(工业增加值的影响因子为-0.89)；霍夫曼系数从1992年的0.55下降到2007年的0.18，重工业化进程明显，伴随着重工业化的是对水资源需求的增长，这一点可以从霍夫曼系数的影响因子(-0.47)看出。然而，北京的重工业化进程并不是以采掘(伐)工业及原材料工业的增长为主体，而是通过产业结构升级和技术革新实现加工工业的增长。加工工业的影响因子为-0.28，说明加工工业的增长减少了城市的工业需水量。以相对误差及确定性系数对模拟结果进行检验。

$$R^2 = \left[1 - \frac{\sum_i (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_i (Q_i - \bar{Q})^2} \right] \times 100\% \tag{8}$$

式中： Q_i 为实际用水量； $\hat{Q}_i$ 为用水量模拟值； $\bar{Q}$ 为实际用水量的平均值。

生活用水量及工业用水量的模拟结果分别如图2、图3所示。可以看出，基于恩格尔系数的生活用水量模型对生活用水量的变化趋势模拟较好，确定性系数 R^2 为0.68。其中，1998年、1999年、2001年，2002—2007年的生活用水量模拟值与实际值相当，相对误差均在1.5%以下。同时模型对生活用水量局部结构的变化趋势模拟能力较差，如2000年、2002年与2003年用水量的变化，相对误差在4%~15%之间。和工业用水量持续增长不同，工业用水量呈明显下降趋势。基于霍夫曼系数的工业用水模型对工业用水量的变化趋势模拟效果较好，确定性系数达到0.92，除2002年模拟值与实际值的误差较大(17.35%)外，其余年份的误差均在8%以下。

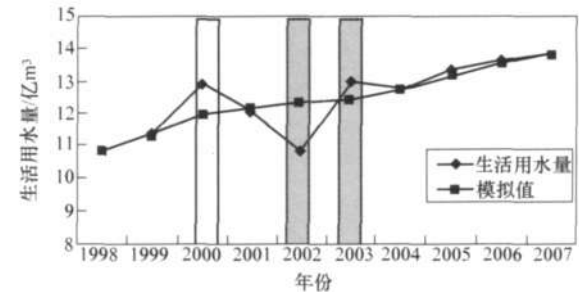


图2 1998—2007年北京市生活用水量与模拟值比较

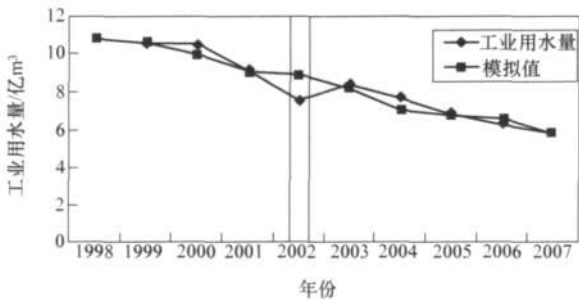


图3 1998—2007年北京市工业用水量与模拟值比较

需要指出，模型以恩格尔系数集中反映居民生活水平的提高对生活用水量的变化，但影响城市生活用水量变化的另一个重要因素——城市水价的调整并不总是与居民生活水平的变化相一致。此外，居民生活用水习惯的调整也往往落后于生活水平的提高。对于工业用水，霍夫曼系数与加工工业在工业中的比例虽然能较好地反映城市的工业化水平对工业用水的影响，但城市工业装备的升级具有一定的周期，因此，工业用水效率的提高要相对落后于工业化水平的提高。此外，模型未对工

业水价对工业用水的影响进行探讨,而贾绍凤等^[17]通过对北京27家工业企业的调查指出,工业用水定额对水价反应具有高弹性,工业用水定额对水价反应敏感。这些因素对模型的精度都会产生一定的影响,但对于预测长期的用水变化趋势,恩格尔系数和霍夫曼系数无疑具有重要意义。

3.3 用水量预测 模型的应用应该建立在未来经济、社会、气候情景预测的基础上。根据《北京市总体规划(2004—2020年)》,2020年北京市总人口规模规划控制在1800万人左右,人均地区生产总值(GDP)突破10000美元。根据国际粮农组织按恩格尔系数划分富裕程度的标准,当人均GDP在1001—10000美元时为富裕阶段(恩格尔系数为20%~40%)。因此,北京市2020年的恩格尔系数的预测值为20%。徐宗学等^[18]利用非参数Mann-Kendall检验方法分析了北京地区20个气象站1961—2004年的降水量,发现北京市年均降水量总趋势以每年1.72 mm的变化率减少,预测2020年北京市的年均降水量为456.98 mm左右。利用式(6),预测北京市2020年的生活需水量为14.52亿m³,高于2007年的生活用水量13.89亿m³。

“十五”期间,北京市工业产值年均增长20.1%,《北京市“十一五”时期工业发展规划》规划“十一五”期间北京市工业产值年均增长率为8%。综合北京市工业发展的情况,确定2008—2020年北京市工业增加值的年增长率为7%。根据2007年发布的首部工业化蓝皮书《中国工业化进程报告——1995—2005年中国省域工业化水平评价与研究》,北京在2004年已经成为第二个实现工业化的地区,北京市2007年的霍夫曼比例为0.18,预计2020年霍夫曼系数将降到0.10以下;根据《北京市总体规划(2004—2020年)》确定的产业发展方向,预测2020年加工工业在工业中的比例为60%。利用式(7),预测2020年北京市的工业需水量约为3.42亿m³,相比于2007年的工业用水量5.75亿m³有较大幅度的下降。考虑到首钢的搬迁及北京市未来工业结构的调整,北京市的工业用水还有一定的下降空间。基于以上分析,2020年北京市的生活用水量及工业用水量共需水17.94亿m³,低于2007年的19.64亿m³,用水量呈下降趋势。

对于北京市未来需水量,很多学者都进行了研究。阮本清等^[19]预测北京市2020年的城市生活需水量和工业需水量分别为15.58亿m³和11.60亿m³,总计需水27.18亿m³;魏保义等^[20]预测北京市2020年城镇生活需水量15.60亿m³,工业需水9.00亿m³,总计需水24.60亿m³。可以看出,本文对北京市2020年生活用水量的预测略低于之前研究的预测量,而工业用水量的预测结果则差别较大。考虑到首钢的搬迁及北京市未来工业结构的调整,北京市的工业用水还有一定的下降空间。

4 结论

研究以城市居民生活水平及城市工业化水平作为影响城市用水的主要参数之一,建立了基于恩格尔系数的生活用水量预测模型和基于霍夫曼系数的工业用水量预测模型,主要结论包括:(1)北京市生活用水量与恩格尔系数、工业用水量及霍夫曼系数的相关系数分别为-0.78和0.95,生活用水量与城镇居民生活水平和工业用水量与工业化水平密切相关;(2)基于恩格尔系数与霍夫曼系数建立的北京市生活用水与工业用水模型能较好地反映北京市生活及工业用水的变化情况,确定性系数分别为0.68和0.92,除个别年份的相对误差较大之外,其余年份的相对误差较小;(3)对2020年北京市的城市用水预测表明,2020年北京市生活需水量约为14.52亿m³,高于2007年的生活用水量13.89亿m³;工业需水量约为3.42亿m³,相比于2007年的工业用水量5.75亿m³有较大幅度的下降;生活用水量及工业用水量共需水17.94亿m³,城市用水量总体呈下降趋势。

参 考 文 献:

- [1] 钱易,刘昌明,邵益生.中国可持续发展水资源战略研究报告集第5卷:中国城市水资源可持续开发利用[M].北京,中国水利水电出版社,2002.
- [2] 孙勇,徐祖信.城市用水量预测影响因素分类以及对预测目标的权重分析[J].能源环境保护,2008,22

- (4): 59–61 .
- [3] 王建华. 城市需水量的混沌预测[J]. 中国农村水利水电, 2008(8): 32–34 .
 - [4] 蒋绍阶, 江崇国. 灰色神经网络最优权组合模型预测城市需水量[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(2): 113–115 .
 - [5] Cubero R G . Neural networks for water demand time series forecasting[C] . Artificial Neural Networks Int . Workshop, IWANN, 1991, 453–460 .
 - [6] 张雪花, 张宏伟, 张宝安. SD法在城市需水量预测和水资源规划中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(9): 42–46 .
 - [7] 岳琳, 张宏伟, 王亮. 粒子群优化算法在城市需水量预测中的应用[J]. 天津大学学报, 2007, 40(6): 742–746 .
 - [8] 沈大军, 陈雯, 罗健萍. 城镇居民生活用水的计量经济学分析与应用实例[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 593–597 .
 - [9] Falkenmark M . Preparing for the future: water for a growing population[J] . Journal of Water Services Research and Technology–Aqua, 1998, 47 (4), 161–166 .
 - [10] Gleick P H . Water use[J] . Annual Review of Environment and Resources, 2003(28), 275–314 .
 - [11] 陈菁, 陈丹, 褚琳琳, 陈祥. 基于ELES模型的城镇居民生活用水水价支付能力研究——以北京市为例[J]. 水利学报, 2007, 38(8): 1016–1020 .
 - [12] 约翰·伊特韦尔, 等. 新帕尔格雷夫经济学大辞典(第二卷: E–J)[M] . 北京: 经济科学出版社, 1996: 152—154 .
 - [13] Gato S, Jayasuriya, N, Roberts, P . Temperature and rainfall thresholds for base use urban water demand modeling[J] . Journal of Hydrology, 2007(337): 364–376 .
 - [14] 贾绍凤. 工业用水零增长的条件分析——发达国家的经验[J]. 地理科学进展, 2001, 20(1): 51–59 .
 - [15] Zhou Y, Tol R S J . Water Use in China's Domestic, Industrial and Agricultural Sectors: An Empirical Analysis [J] . Water Science and Technology: Water Supply, 2005, 5 (6): 85–93 .
 - [16] 黑龙江省工业化专题调研组. 加快推进老工业基地工业化进程——关于黑龙江省工业化发展情况的调研报告[J]. 学术交流, 2007, 160(7): 84–90 .
 - [17] 贾绍凤, 张士峰. 北京市水价上升的工业用水效益分析[J]. 水利学报, 2003(4): 108–113 .
 - [18] 徐宗学, 张玲, 阮本清. 北京地区降水量时空分布规律分析[J]. 干旱区地理, 2006, 29(2): 186–192 .
 - [19] 阮本清, 魏传江. 首都圈水资源安全保障体系建设[M] . 北京: 科学出版社, 2004 .
 - [20] 魏保义, 王军. 北京市水资源供需分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(2): 40–41 .

Prediction of urban water demand based on Engel Index and Hoffmann Coefficient

ZHANG Zhi-guo¹, SHAO Yi-sheng¹, XU Zong-xue²

(1. China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100037, China;

2. Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The correlation coefficient between domestic water use and Engel Index in Beijing is -0.78 , while that between industrial water use and Hoffmann coefficient is 0.95 . The domestic water demand model based on Engel Index and industrial water demand model based on Hoffmann coefficient are developed and the water use data series in Beijing from 1998 to 2007 are used for calibrating the parameters. On this basis the urban water demand in Beijing is predicted. The results show that both models can simulate the trends of urban water demands. The deterministic coefficient of domestic water demand model is 0.68 , while that of industrial water demand model is 0.92 . The domestic water demand and industrial water demand are predicted to be 1.452 and 0.342 billion cubic meters in Beijing in 2020, and the total of which tends to downward.

Key words: domestic water use; industrial water use; Engel Index; Hoffmann Coefficient

(责任编辑: 王成丽)