

文章编号: 1007-7588(2010)07-1356-06

城市水价预测的长期边际成本 方法理论与案例研究

李翠梅^{1,2}, 陶 涛¹, 刘遂庆¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011)

摘 要: 科学制定城市供水价格是直接关系到城市水资源可持续发展的重要问题。本文基于长期边际成本理论下, 将城市供水价格预测模型中固定成本与可变成本进行了分离, 应用超越对数生产函数方法构建了供水可变成本数学模型。引入谢泼德辅助定理, 建立了城市水价预测边际成本方法的对数函数模型。以苏州市1997年至2008年制水可变成本、固定成本, 用水人数与用水量结构与分布变化等基础数据为依据, 结合所研究的水价预测模型, 分别预测了2010年苏州市居民生活水价为4.71元/m³, 第二产业水价为6.5元/m³。实例研究表明: 预测结果虽然略高于当前实际水价, 但与水资源稀缺性日益增强的发展趋势是一致的。同时也表明: 当前实际水价可能较低, 是预测水价与实际水价存在一定差距的原因。通过水价预测模型与实践研究, 为我国城市制定合理的水价提供了理论依据与参考。

关键词: 水价; 边际成本; GMM估计; 模型; 预测

边际成本定价是目前最推崇的自然资源定价方法之一, 边际成本是指增加单位水量所引起的总供水成本的增加量, 其一般分为两类: 短期边际成本与长期边际成本。由于短期边际成本假定现存资金的机会成本是零, 同时供水工程存在额外容量, 用户需求增加不需要去修建新的工程, 所以增加供水量的投入只是化学品、劳动力和能源等部分可变成本, 没有其他的资金投入^[1]。这种情况与我国快速城市化进程中用水量大幅度增加, 各城市现有供水工程无法满足用水需求不一致, 因此, 不宜作为城市供水价格制定的理论方法。

1 长期边际成本定价原理

设在一定时期(5-10年), 现有供水能力不能满足用水量的增加, 需要兴建新工程; 同时资金存在机会成本。因此长期边际成本是考虑资金将来的边际成本和其他扩容及维持扩容运行的投入, 适合作为城市供水价格制定的方法。计算长期边际成本需要了解每年增加供水量所需未来全部项目的

年投资增加量, 例如: 投资年折算费用、增加的每年运行费用等。

由于考虑了资金、劳动力和其他投入的机会成本, 长期边际成本定价同时将推进资源的高效分配, 促进水资源保护。因为在价格的调控下, 用户将会调整他们的用水量, 使其逐渐接近或等于水的边际成本等于边际效用点^[2]。

图1显示的是水资源开发利用中的各种边际成本的变化曲线。随着水资源开发利用程度的提高, 其带来的环境影响越来越严重, 水资源开发利用的边际环境成本将持续上升; 在初期, 相对来讲区域水资源量较丰富, 在一定规模范围以内, 边际开发成本呈下降趋势。但随着区域水资源供需矛盾的日益紧张, 水资源开发难度将日益提高, 有可能需要兴建大型的跨流域调水工程等才能解决水资源矛盾, 于是边际开发成本将上升。因此水资源的边际开发成本总体上呈抛物线型, 存在一个极小值和一个最优规模。对于水资源利用来讲, 其边际成本

收稿日期: 2009-12-03; 修订日期: 2010-05-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(编号: 50409016); 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(编号: 2004AA649410); 江苏省环境科学与工程重点实验室开放课题项目(编号: Zd081204); 江苏省高校自然科学基金资助项目(编号: 08KJD610008)。

作者简介: 李翠梅, 女, 安徽滁州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事水资源与给水排水工程设计运行的最优化研究。

E-mail: cuimeili@163.com

2010年7月

是一个持续下降的过程。因此,随着水资源开发利用程度的提高,区域水资源开发利用的边际总成本的变化有可能呈抛物线型,也可能为一不规则的曲线,但存在一个最优点或几个局部最优点。如图1所示,在 $0 \sim a$ 以之间,随着水资源开发利用量的增加,水资源开发利用的边际成本是下降的;但在 $a \sim b$ 之间,由于水资源开发利用难度的增加,水资源开发利用的边际总成本开始上升,而且曲线斜率也增加;在 b 点以后,区域水资源开发利用的难度将进一步增加,需要寻求其他方法解决。

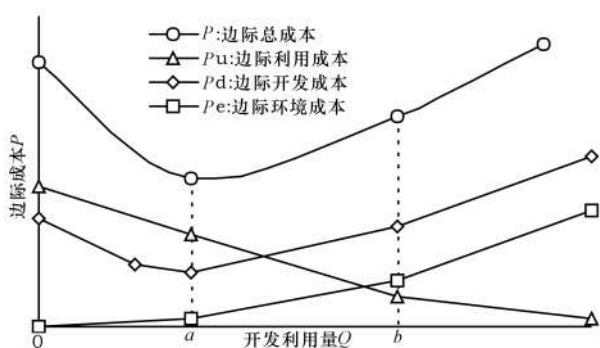


图1 区域水资源开发利用的边际成本变化

Fig.1 Marginal costs' variation in regional water resources development and utilization

2 基于GMM的区域水价预测边际成本实用模型研究

2.1 水价预测边际价格数学模型

长期边际成本方法由于需要大量的数据而在实际应用中很难实现,因此在各类自然资源定价模型研究中,必须结合实际情况构建具有可操作性的数学模型。在总结和参考了他人研究的基础上^[3-7],为了克服传统水价预测模型包含内容过于笼统的缺点,本研究将水价模型分为固定成本与可变成本两部分。其中 FC 表示固定成本,以固定资产年折旧费表示,用 P 表示边际价格,每年用水量为 q ,则相应的两部分水价每年总成本为: $FC+Pq$,其中固定成本可以写成:

$$FC = (FC_w^d + FC_s^d + FC_w^{lc} + FC_s^{lc})(1 + V_{AT}) \quad (1)$$

式中 d 、 lc 分别表示投资公司和地方政府; FC_i^d 和 FC_i^{lc} 是固定成本中分别偿还给投资公司(FC_i^d)和地方政府(FC_i^{lc})的部分; $i=w$ 表示由供水服务机构偿还部分, $i=s$ 表示由水资源管理部门偿还部分; V_{AT}

表示消费者交纳的税。

水价边际价格数学模型基本组成可以写成下式:

$$P = (P_w^d + P_s^d + P_w^{lc} + P_s^{lc})(1 + V_{AT}) + T_{AX} \quad (2)$$

式中 T_{AX} 表示流域水资源费,即:消费者交给流域管理机构取水和污染治理费用。

2.2 供水成本与需求函数

分析水价模型必须剖析供水需求特点和成本结构特点:向最终用户提供的水量为 Q , r 表示管网漏损率,漏损率普遍为15%左右,这个必须考虑到水的成本函数中。生产过程包括四种投入:劳动力费(L),电费(E),材料费(M),资金费用(K)。假设生产技术在一段时期内逐步适应技术革新,对一个既定的管网,生产单位的技术水平是相同的。供水服务面临不同的生产与管网环境,以水表连接的数量表示供水服务的服务面积,定义其服务人口数为 n ,服务范围以管网长度 $Leng$ 计,资金以 K 计,既定管网长度为固定不变的,其他参数是可变的,供水价格的短期可变成本函数可以定义为:

$$VC = VC(w, Q, r, n, Leng) \quad (3)$$

式中 VC 表示最小的可变成本; $w = (w_L, w_E, w_M)$ 表示可变成本价格的输入向量。采用最早由Christensen (1973)提出的著名translog近似理论来表示可变成本函数^[6,7]。这是一个二阶泰勒展开式,因此式(3)中右边所有变量必须格式化采用中间值White (1980)^[8]。通过划分可变成本和输入单位价格来增加Hessian矩阵的对称和输入价格的线性同次性^[8]。以输入和输出价格的向量积为零作为类似性的约束参数,因此,translog可变成本函数为:

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{VC}{\omega_L}\right) = & \alpha_{c1} + \sum_j \alpha_j \ln\left(\frac{\omega_j}{\omega_L}\right) + \alpha_Q \ln(Q) + \alpha_r \ln(r) \\ & + \sum_k \alpha_k \ln(A_k) + \frac{1}{2} \sum_j \sum_{j'} \alpha_{jj'} \ln\left(\frac{\omega_j}{\omega_L}\right) \ln\left(\frac{\omega_{j'}}{\omega_L}\right) \\ & + \frac{1}{2} \alpha_{QQ} (\ln(Q))^2 + \frac{1}{2} \sum_k \sum_{k'} \alpha_{kk'} \ln(A_k) \ln(A_{k'}) \\ & + \sum_j \sum_k \alpha_{jk} \ln\left(\frac{\omega_j}{\omega_L}\right) \ln(A_k) + \sum_l \alpha_{Qk} \ln(Q) \ln(A_k) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $j, j' = E, M, K, K' = 1, 2; A_1 = Leng, A_2 = n$,定义 S_j 为输入 j 的成本份额,应用谢泼德(Shephard's)辅助定理^[9]可以写出 S_j :

$$\begin{aligned} S_j = \frac{\omega_j x_j}{VC} &= \frac{\partial \ln(VC / \omega_L)}{\partial \ln(\omega_j / \omega_L)} \\ &= \alpha_j + \sum_{j'} \alpha_{jj'} \ln\left(\frac{\omega_{j'}}{\omega_L}\right) + \sum_k \alpha_{jk} \ln(A_k) \end{aligned} \quad (5)$$

表1 苏州市1997年-2007年人口与用水量变化

Table 1 Water users and water consumption variation in Suzhou city from 1997 to 2007

年份	人口总数 (万人)	生活用水 (亿m ³)	平均每户 人口数 (人)	居民生活 水价 (元/m ³)	第二产业 用水 (亿m ³)	第二产业 从业人数 (万人)	第二产业 水价 (元/m ³)
1997	574.99	4.62	2.97	0.60	19.80	167.69	0.75
1998	575.35	4.27	2.97	0.80	20.51	162.95	0.75
1999	576.23	4.39	2.96	0.95	20.08	151.72	0.75
2000	578.17	4.75	2.92	1.15	24.58	156.27	1.60
2001	580.53	4.79	2.91	1.40	25.52	158.98	2.30
2002	583.86	4.88	3.11	2.00	27.20	161.55	2.30
2003	590.96	5.04	3.12	2.00	31.38	195.25	2.30
2004	598.95	5.19	3.05	2.40	36.66	202.37	2.70
2007	624.43	5.93	2.99	2.70	51.73	306.96	3.00

注:表中数据由江苏省统计年鉴整理得出。

2.3 长期边际成本水价预测实用模型

作为一个效用最大化的结果,居民生活用水由一套变量决定,包括水的居民生活用水边际价格 P^0 ;参数 X^0 表示用户特征的综合特征系数,例如用户年龄、住宅大小和家庭收入。工业用水也是生产者根据需求输入的一个典型部分^[1],工业用户对水需求的典型性决定于水的边际价格 P^I 和其特征系数 X^I , X^I 表示工业企业的特点,例如:工业雇员人数及用水类型及其规律^[9,10]。考虑到最终用户可能是居民或者工业企业,对于特定区域每个用户用水量计算用下式表达:

$$\frac{Q}{n} = f(P^0, X^0, P^I, X^I, X^{LC}) \quad (6)$$

式中 X^{LC} 表示区域变量特征的向量值,这个向量可以表示工业用户在某一区域占的比例或者区域降雨特征。公式(6)需要详细的需求函数,为了简化,这里采用对数的形式^[11-12],并在需求函数中使用一个简单的边际价格 P ,得出边际价格与用水量、用户数量与用水特性关系如下:

$$\ln \frac{Q}{n} = \alpha_{c2} + \alpha_p \ln(P) + \sum_k \alpha_k \ln(X_k) \quad (7)$$

式中 $X=(X^0, X^I, X^{LC})$, $\alpha_{c2}, \alpha_p, \alpha_k$ 分别表示对数需求函数中的需求成本弹性系数、价格弹性系数、资金弹性系数。

3 案例研究

苏州市位于江苏省最南部,是13个省辖市之一。2000年下辖5个县级市,6个区,130个镇,22个街道和2833个行政村。据2000年统计,全市总人口为578.17万,其中农业人口331.83万,非农业人口246.34万,平均人口密度为681人/km²,城镇化

率为42.6%。2003年苏州市自来水实际供水能力271.745万m³/d,其中地下水厂实际供水能力2.11万m³/d,实际供水能力大于10万m³/d的较大型水厂10座。2000年全市总用水量为55.67亿m³,其中农业用水量26.34亿m³,占总用水量的47.3%;工业用水量为24.58亿m³,占总用水量的44.2%,其中电力工业用水量比重较大,占工业用水量的73.5%,占总用水量的32.4%;生活用水量为4.75亿m³,占总用水量的8.5%。1997年至2007年全市用水资料统计,总用水量的构成及比例,见表1。总用水量平均年增长率为2.33%;单位GDP用水量呈逐年下降的趋势明显,已从1997年的462m³/万元,下降到2004年的178 m³/万元,单方水资源GDP的产出从1997年21.65元上升至2004年51.25元。

3.1 研究区需水量预测

根据不同用水部门的需水特性和资料收集情况,主要运用指标分析法进行需水预测,预测结果见表2。

3.2 人口预测

按照在籍人口计算,从1985年至2007年,人口

表2 苏州市用水结构

Table 2 Water usage structure in Suzhou city (亿m³,%)

	2010年		2020年		2030年	
	用水量	百分数	用水量	百分数	用水量	百分数
生活用水	10.25	25.73	12.83	17.66	15.39	12.51
第二产业用水	29.58	74.27	59.81	82.34	107.68	87.49
合计	39.83	100	72.64	100	123.07	100

注:表中数据是根据2008年苏州市水资源公报相关数据计算得出。

2010年7月

平均增长率为0.76%,预测2010年、2020年、2030年苏州地区总人口数量如表3所示。

3.3 水价预测

根据表1、表4、表5已知苏州市1997年-2008年人数与用水量变化、水价变化、单位制水可变成本与固定成本等基础数据,运用GMM(广义矩)^[8]估

表3 苏州市总人口预测

Table 3 The total population forecasting in Suzhou city (万人)

2007年	2010年	2020年	2030年
624.43	638.67	686.12	733.58

注:表中数据是根据2007年苏州市统计年鉴相关数据计算得出。

表4 1997年-2008年苏州市单位制水可变成本费用

Table 4 Unit variable costs of water manufacture in Suzhou city from 1997 to 2008

(元/m³)

年份	水资源		动力		药剂		管理		财务		小计
	成本	比例	成本	比例	成本	比例	成本	比例	成本	比例	
1997	0.0100	1.9400	0.1100	21.34	0.0200	3.88	0.0450	8.73	0.0065	1.26	0.1915
1998	0.0100	1.9400	0.1100	21.34	0.0200	3.88	0.0450	8.73	0.0065	1.26	0.1915
1999	0.0100	1.9400	0.1100	21.34	0.0200	3.88	0.0450	8.73	0.0065	1.26	0.1915
2000	0.0100	1.5300	0.1200	18.40	0.0300	4.60	0.0750	11.45	0.0078	1.20	0.2428
2001	0.0100	1.5300	0.1200	18.40	0.0300	4.60	0.0750	11.50	0.0078	1.20	0.2428
2002	0.0100	1.5300	0.1200	18.40	0.0300	4.60	0.0750	11.50	0.0078	1.20	0.2428
2003	0.0100	1.4800	0.1300	19.34	0.0400	5.95	0.0750	11.16	0.0078	1.16	0.2628
2004	0.1300	12.1800	0.1300	12.17	0.0400	3.74	0.0850	7.96	0.0085	0.80	0.3935
2007	0.2000	17.4100	0.1400	12.19	0.0400	3.48	0.0850	7.40	0.0085	0.74	0.4735
2008	0.2000	17.4100	0.1400	12.19	0.0400	3.48	0.0850	7.40	0.0085	0.74	0.4735

注:表中数据由苏州市自来水公司年度统计报表整理得出。

表5 1997年-2008年苏州市单位制水固定成本费用

Table 5 Unit fixed costs of water manufacture in Suzhou city from 1997 to 2008

(元/m³)

年份	工人工资及福利		固定资产折旧		无形资产与递延资产摊销费		大修理费		日常检修维护费		小计	合计
	成本	比例	成本	比例	成本	比例	成本	比例	成本	比例		
1997	0.011	2.13	0.210	40.75	0.00085	0.16	0.081	15.72	0.021	4.07	0.32385	0.51535
1998	0.011	2.13	0.210	40.75	0.00085	0.16	0.081	15.72	0.021	4.07	0.32385	0.51535
1999	0.011	2.13	0.210	40.75	0.00085	0.16	0.081	15.72	0.021	4.07	0.32385	0.51535
2000	0.015	2.30	0.250	38.33	0.00150	0.23	0.100	15.33	0.043	6.59	0.40950	0.65230
2001	0.015	2.30	0.250	38.33	0.00150	0.23	0.100	15.33	0.043	6.59	0.40950	0.65230
2002	0.015	2.30	0.250	38.33	0.00150	0.23	0.100	15.33	0.043	6.59	0.40950	0.65230
2003	0.015	2.23	0.250	37.19	0.00150	0.22	0.100	14.87	0.043	6.40	0.40950	0.67230
2004	0.018	1.68	0.450	42.12	0.00200	0.19	0.150	14.04	0.055	5.15	0.67500	1.06850
2007	0.018	1.57	0.450	39.18	0.00200	0.17	0.150	13.06	0.055	4.79	0.67500	1.14850
2008	0.018	1.57	0.450	39.18	0.00200	0.17	0.150	13.06	0.055	4.79	0.67500	1.14850

注:表中数据由苏州市自来水公司年度统计报表整理得出。

计方法对公式(7)水价预测模型的需求成本弹性系数、价格弹性系数、资金弹性系数等参数进行估计,得出该模型不同规划水平年的参数值。将用水量、用水人数、各类用水占用水总量的百分数、资产弹性系数等参数带入水价预测模型:

$$\ln \frac{Q}{n} = \alpha_{c2} + \alpha_p \ln(P) + \sum_k \alpha_k \ln(X_k) \quad (8)$$

即可获得相应规划年不同用水类型的不同水价。水价预测模型中 α_{c2} 、 α_p 、 α_k 等参数对应不同预测年,不同的预测水平而有对应的值,即2010年某城市水价预测模型中的各参数与2020年、2030年是不同的,需要分别计算。本研究中由于基础数据的限制,及考虑到预测周期太长会造成较大误差,所以进行了2010年的参数估计及水价预测。

2010年苏州市生活用水量为10.25亿 m^3 ,人口总数为638.67万人,经过GMM估计参数分别为:

$$\alpha_{c2}=4.4993, \alpha_p=-0.2546, \alpha_{kl}=0.0599, \alpha_{k2}=0.1808, \\ X_1=25.73, X_2=74.27。$$

将这些数据带入水价预测模型得出2010年苏州市居民生活水价为:4.71元/ m^3 。

第二产业水价预测:2010年苏州市第二产业用水量为29.58亿 m^3 ,第二产业从业人数为415.14万人,各参数带入模型:

$$\alpha_{c2}=4.4993, \alpha_p=-0.2546, \alpha_{kl}=0.0599, \alpha_{k3}=0.3244, \\ X_1=25.73, X_2=74.27$$

计算可得:2010年第二产业水价为6.5元/ m^3 。

4 结论

通过对公共设施最优定价理论—长期边际成本的理论研究,分析了城市供水边际价格模型、剖析与构建了供水成本与需求函数的超越对数生产函数形式、建立了城市供水价格预测的长期边际成本数学模型。以苏州市为例进行了实际应用研究,给出了城市水价预测边际成本方法的具体步骤:①用水量预测;②人口预测;③用水结构预测;④单位制水成本分析与GMM参数估计;⑤水价预测,实例研究验证了所提出方法的正确性与科学性。研究

结果对科学制定城市水价、优化城市水资源配置、城市水资源可持续管理与发展具有重要的参考价值 and 指导意义。

参考文献 (References):

- [1] Reynaud A.. An econometric estimation of industrial water demand in France[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2003, 25(2): 213–232
- [2] Nauges C., Reynaud A.. Estimation de la demande domestique d'eau potable en France[J]. *Revue Economique*, 2001, 52 (1): 167–185.
- [3] Raymundo G.. Price setting for water use charges in Brazil [J]. *Water Resources Development*, 2005, 21(1): 99–117.
- [4] Roberto G. A., Jay R. L. Derived willingness-to-pay for household water use with price and probabilistic supply[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2006, 132(6): 424–433.
- [5] Sheila Olmstead, W. Michael Hanemann, Robert N. Stavins. Water demand under alternative price structures [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2007, 54 (2): 181–198.
- [6] Garcia, Serge, Reynaud, Arnaud. Estimating the benefits of efficient water pricing in France[J]. *Resource and Energy Economics*, 2004, 26(1): 1–25
- [7] Duke J M, Ehemann R. An application of water scarcity pricing with varying threshold, elasticity, and deficit[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004(2): 59–65.
- [8] Hansen L.. Large sample properties of generalized method of moment estimators[J]. *Econometrica*, 1982, 50(4): 1029–1073.
- [9] Anna Hurlimann, Jennifer McKay. Urban Australians using recycled water for domestic non-potable use—An evaluation of the attributes price, saltiness, colour and odour using conjoint analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 83(1): 93–104.
- [10] Jeffrey D. Mullen, Yingzhuo Yu, Gerrit Hoogenboom. Estimating the demand for irrigation water in a humid climate: A case study from the southeastern United States[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(10): 1421–1428.
- [11] J. Cui, S. Schreider. Modelling of pricing and market impacts for water options[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 371(1–4): 31–41.
- [12] Joachim Schleich, Thomas Hillenbrand. Determinants of residential water demand in Germany[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(6): 1756–1769.

A Study on Prediction of Urban Water Prices Based on the Marginal Cost Methodology

LI Cuimei^{1,2}, TAO Tao¹, LIU Suiqing¹

(1.School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2.department Of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: Reasonably formulating urban water prices is an important issue related to sustainable development of urban water resources. Water scarcity is one of the serious problems needed to be addressed urgently. Formulating water prices can be considered a promising way for coordinating water allocation and thus must be justified in a rational way. This paper aims to examine the long-run marginal cost of water price forecasting models by separating the fixed cost from the variable cost. A water variable cost mathematical model was constructed by applying the transcendental logarithmic production function (translog). The price elasticity of water demand was estimated with household-level data and the secondary industry-level data. The Shepard lemma was introduced to establish the marginal cost of urban water price forecasting methods involved in the translog function model. The proposed method was applied to Suzhou City, Jiangsu Province, offering the marginal cost of urban water price predictions. First, the water demand was forecasted to project water usage in different periods of time. Second, the population of water use was projected and analyzed. Third, the water structure was analyzed, indicating different types of water structures. Fourth, the water unit cost was analyzed. Fifth, the parameters of the model were derived. The final step was water price forecasting. By analyzing data regarding water usage structure, water users and water consumption variations, unit variable costs of water manufacture, unit fixed costs of water manufacture in Suzhou City from 1997 to 2008, it was projected that the domestic water price is 4.71 yuan/m³ and the second industrial water price is 6.5 yuan/m³ in Suzhou City in 2010. Results indicated that first, although the forecasted prices are slightly higher than current water prices, they are basically consistent with the growing trends in water scarcity. Second, current water prices may be lower than reasonable water prices. With increasing water resources scarcity, it is suggested that the water price must be increased accordingly. Research on and applications of mathematical models are critical ways to formulate reliable water prices. It was also found that due to the possibility of the choice of endogenous utility price structure, obvious differences in the elasticity across price structures may be resulted from a behavioral response to price structure, or to underlying heterogeneity among water utility service areas in Suzhou City. The water price forecasting model could be widely applied to different cities, and provides a theoretical basis for urban water price forecasting.

Key words: Water price; Marginal cost; GMM; Model; Forecasting