

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.01.019

水环境质量资源定价模型研究

王俊能,许振成,彭晓春,胡习邦,张修玉

(环境保护部华南环境科学研究所,广东 广州 510655)

摘要 在水环境质量资源的价格分析中,引入“级差地租”理论,以水质差异而造成的水价不同作为水环境质量资源的定量依据,结合模糊综合评判法,建立一种新的适用于复杂且模糊的多指标评价体系的水环境质量资源定价方法。以广州流溪河为例,分析了各河段的水质价格,分析表明,本文提供的模型可为合理调整水价,修正水资源核算,制定水资源管理的相关政策提供依据。

关键词 环境质量资源;定价模型;水质价格;级差价格;模糊综合评判

中图分类号:F062.1;TV213.4 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2011)01-0080-05

Study on pricing model of aquatic environment quality resources

WANG Jun-neng, XU Zhen-cheng, PENG Xiao-chun, HU Xi-bang, ZHANG Xiu-yu

(South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Using price difference caused by water quality difference as the quantifying base of water environmental quality, introducing differential rent theory and combining with fuzzy comprehensive evaluation, a pricing method of aquatic environment quality resources was proposed. This new pricing method was applicable to complicated and fuzzy multi-index evaluation system. Taking Liuxi River in Guangzhou as an example, water quality price in each river section was calculated, which provided a base for rationally adjusting water price, correcting water resources checking and making relevant police of water resources management.

Key words: environment quality resources; pricing model; water quality price; grade difference price; fuzzy comprehensive evaluation

1 水环境质量资源定价研究现状

20 世纪 70 年代以来,面对日益紧缺的水资源和日益恶化的水环境,水资源价格研究问题引起国内外广大学者的关注。以往的研究中,具有代表性的理论有:影子价格模型、边际机会成本模型、一般均衡模型、供求定价模型、完全成本法、级差收益法、平衡价格法、市场利润提成法等^[1-5],这些理论中有些不但计算复杂,而且都仅涉及水量而未顾及水质。

1988 年,我国水资源核算及其纳入国民经济核算体系研究课题组提出了水资源实物量核算、价值

量核算、水质核算等 3 个方面的核算理论框架^[4]。此后,在出版的多部专著如文献^[6-7]都提及水质核算。尽管如此,水质核算仍然存在很多问题。如李金昌^[6]基于地租论、财富论、劳动价值论和效用论、市场供求理论,提出和推导了土地和自然资源价格的基本理论公式,在实际应用中,尚需根据统计数据、实际经验或通过实验,确定有关参数。姜文来^[7]用模糊数学的方法综合考虑水资源价值的社会、经济、自然 3 大类因素构建水资源价值模糊数学模型,但是由于模型相当复杂,并且不同地区流域通用性差,使得广泛应用受到限制。而许振成等^[8-11]将水

基金项目:广东省环境保护局科技项目(0202026)

作者简介:王俊能(1984—),广东揭阳人,助理工程师,主要从事水资源管理工作。E-mail: kooloon@126.com

通讯作者:许振成,研究员。E-mail: xzc@scies.com.cn

质核算问题提升到了一个更高层次,首次提出了“环境质量资本”这一全新概念和“以质定价,以量计质”“优质水优质价”原则,对环境质量资本有偿使用的理论基础、支付主客体、计价原则和实施管理思想等进行了探讨,并针对水质核算建立了环境质量资本的新理论,提出了经营水环境质量资源产业的新思路。

由于水资源的多元特性使得其价值难以真正把握,同时跨流域、跨行政区域管理也带来了操作上的难度,因此目前实现水资源价值核算仍十分困难。为寻求新的突破口,在已有的研究成果基础上,笔者以“水环境质量资源”为研究对象,试图提出一种新的水环境质量资源定价模型。

2 水环境质量资源定价模型

2.1 模型建立

a. 自然的禀赋和社会进程中人类活动的影响使得环境质量逐渐存在差异,其中相对优质的环境便具有了稀缺资源的性质即“环境质量资源”^[8-11]。为了解决这类资源的稀缺问题,将“级差地租”理论引入到水环境质量资源的价格分析中,以水质差异而造成的水价不同作为水环境质量资源的定量依据,即本着“以质定价,以量计质”原则,对水环境质量资源按照水质的优劣给以不同的“级差价格”。

b. 水资源价值系统是一个多层次、多目标、多因素控制的复杂模糊系统,水质往往涉及大量的复杂现象和多种因素的相互作用,并且不同的污染物对水环境质量的贡献不同。此外,水质监测结果在等级边界附近也表现出一定的模糊性,即使是颁布的水环境质量标准也存在模糊现象。因此需要将这些边界不清的水环境因素进行综合评判,以得到符合实际的水质状况。

基于以上2方面的考虑,笔者提出一种新的水环境质量资源定价模型如下:

$$P=\sum_{j=1}^nK_jR_j\tag{1}$$

式中: P 为水质价格; K_j 为等级隶属度; R_j 为各标准水质类型的级差价格; n 为水质等级数。

2.2 水质等级关联度计算

水质等级关联度可采用模糊综合评判法^[12]、灰色关联法^[13]等方法进行计算。这里仅简要介绍模糊综合评判模型,其基本步骤如下。

a. 记 $i=1,2,\cdots,m$ 为评价指标; $j=1,2,\cdots,n$ 为水质等级; c_i 为第 i 个指标的样本实测值。

b. 确定隶属函数 $\mu_i(x)$ 。样本对于各级水质的隶属程度是用隶属度来刻画的,隶属度用隶属函数 $\mu_i(x)$ 表示,且 $0\leq\mu_i(x)\leq 1$ 。用隶属度表达隶属程

度时,隶属度数值愈大,隶属程度愈高。求隶属函数的方法颇多,笔者采用降半梯形分布来表征隶属度。

按各指标隶属各水质等级,确定出不同的隶属函数如下。

2.2.1 第 i 个指标对第1类水(1级水)的隶属函数的确定

a. 对于数值愈大污染愈重的指标

$$\mu_{i1}(x)=\begin{cases}1&x\in[0,a_{i1}]\\(a_{i2}-x)(a_{i2}-a_{i1})&x\in(a_{i1},a_{i2})\\0&x\in[a_{i2},\infty)\end{cases}\tag{2}$$

b. 对于数值愈大污染愈轻的指标

$$\mu_{i1}(x)=\begin{cases}0&x\in[0,a_{i2}]\\(x-a_{i2})(a_{i1}-a_{i2})&x\in(a_{i2},a_{i1})\\1&x\in[a_{i1},\infty)\end{cases}\tag{3}$$

2.2.2 第 i 个指标对第 k 类水($k=2,3,\cdots,n-1$)的隶属函数的确定

a. 对于数值愈大污染愈重的指标

$$\mu_{ik}(x)=\begin{cases}(x-a_{i,k-1})(a_{i,k}-a_{i,k-1})&x\in[a_{i,k-1},a_{i,k}]\\(a_{i,k+1}-x)(a_{i,k+1}-a_{i,k})&x\in(a_{i,k},a_{i,k+1}]\\0&x\notin[a_{i,k-1},a_{i,k+1}]\end{cases}\tag{4}$$

b. 对于数值愈大污染愈轻的指标

$$\mu_{ik}(x)=\begin{cases}(x-a_{i,k+1})(a_{i,k}-a_{i,k+1})&x\in[a_{i,k+1},a_{i,k}]\\(a_{i,k-1}-x)(a_{i,k-1}-a_{i,k})&x\in(a_{i,k},a_{i,k-1}]\\0&x\notin[a_{i,k+1},a_{i,k-1}]\end{cases}\tag{5}$$

2.2.3 第 i 个指标对第 n 类水(n 级水)的隶属函数的确定

a. 对于数值愈大污染愈重的指标

$$\mu_{in}(x)=\begin{cases}0&x\in[0,a_{i,n-1}]\\(x-a_{i,n-1})(a_{i,n}-a_{i,n-1})&x\in(a_{i,n-1},a_{i,n})\\1&x\in[a_{i,n},\infty)\end{cases}\tag{6}$$

b. 对于数值愈大污染愈轻的指标

$$\mu_{in}(x)=\begin{cases}1&x\in[0,a_{i,n}]\\(a_{i,n-1}-x)(a_{i,n-1}-a_{i,n})&x\in(a_{i,n},a_{i,n-1})\\0&x\in[a_{i,n-1},\infty)\end{cases}\tag{7}$$

c. 建立模糊关系矩阵 R 。根据各因子的隶属度函数,得出模糊关系矩阵 R 。矩阵的行表示参评因子对各级水质的隶属程度,列表示参评的各单项指标对某一级水质的隶属程度。

$$R=[r_{ij}]=\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}&\cdots&r_{1,n-1}&r_{1n}\\r_{21}&r_{22}&\cdots&r_{2,n-1}&r_{2n}\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots&\vdots\\r_{m1}&r_{m2}&\cdots&r_{m,n-1}&r_{mn}\end{bmatrix}\tag{8}$$

d. 确定评价指标的权重 B 。由于各污染因子对环境污染的贡献,以及多因子间的相互作用对环

境污染的影响,需要考虑评价指标权重 b_i 。在此利用污染物浓度超标加权法计算各污染因子的权重^[14]。

①对于数值愈大污染愈重的指标

$$b_i = c_i / c_{i0} \quad (9)$$

②对于数值愈大污染愈轻的指标

$$b_i = c_{i0} / c_i \quad (10)$$

式中: c_i 为第 i 种污染物的实测值, c_{i0} 为第 i 种污染物平均允许浓度值, 即 $c_{i0} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}$ 。在实际操作中, 为了进行模糊变换, b_i 值应满足归一化要求。

e. 综合评判。综合评判结果是通过 B 与 R 复合运算 $B \cdot R$ 完成的, 复合运算通过模糊算子进行。常用相乘相加法来进行计算:

$$K_j = \sum_{i=1}^n (b_i r_{ij}) \quad (11)$$

式中: K_j 为样本对第 j 等级的隶属度; b_i 为第 i 个评价因子的权重; r_{ij} 为第 i 个评价因子对第 j 等级的隶属度。

2.3 各水质等级的“级差价格”的计算

李金昌^[6]提出的水价理论综合模型中的自然资源地租 R_j 是根据统计数据或实际经验确定的, 当缺少相关的统计数据时, 可采用倒推法求 R_j , 但由于难以估算出维持各种类型的水质的投入量和改善的水量, 该模型提出的确定自然资源地租 R_j 的方法并不适用于多指标评价体系的水环境质量的定价。若采用支付意愿法则常常由于流域的范围过于宽广、涉及的人群过于复杂, 增加了调查难度, 并浪费大量财力物力, 而且调查结果受抽样方法等因素的影响较大。而许振成等^[10]采用了影子工程法作为水质资本定价方法, 确定水质资本核算函数和曲线的步骤, 并以 BOD_5 浓度值作为水质优劣的参数, 建立了以水质定价、以水量计算水质资源价值的方法体系。利用这一方法虽然能容易地计量出治理不同浓度 BOD_5 所耗费的成本, 但是仅以 BOD_5 作为单因子评价的参数代表整体水质, 尚需改进。笔者试图通过污染当量将其他水质指标折算成容易计量的 BOD_5 污染当量, 进而运用已有的研究成果计算出各水质等级的级差价格 R_j , 也即是在只考虑技术因素的情况下, 将劣质水改善成优质水的投入量。

确定各水质等级的 R_j 步骤如下:

a. 确定基准水质等级 R_0 。基准水质等级的选取主要由水资源供给的目的地区的水质需求、水资源供给地的自然条件和技术条件等共同决定。

b. 计算第 j 等级污染物 i 的 BOD_5 污染当量数 c'_{ij} 。

$$c'_{ij} = c_{ij} / e_i \quad (12)$$

式中: c'_{ij} 为第 j 等级污染物 i 的 BOD_5 污染当量数; c_{ij} 为第 j 等级的污染物 i 的水质标准值; e_i 为污染物 i 的 BOD_5 污染当量值, 该值由“排污费征收标准及计算方法”^[15]规定的污染物 i 的污染当量值除以 BOD_5 污染当量值得到。

由于排污费是在治理水污染的水质补偿费基础上形成的, 排污费标准是根据污染物对水资源的污染程度和治理难度、按照不同的污染物种类及其排放数量或浓度制定。因此, 此处采用的污染当量值具有一定的科学性和合理性。

c. 确定不同 BOD_5 浓度的水质价格函数。水质恢复就是使受损害的水体通过采用各类技术或手段, 促使其原有的水质功能得以维持或发挥, 满足经济、社会及生态环境等用水质量需求的行为。在无法直接确定水质所具价格时, 可将恢复水质或保护水质不受污染所需的费用, 作为该资源环境本身所具的最低价值^[16]。因此可选取恢复成本法对水质资源价格进行核算。采用恢复成本法确定水质资源价格可通过对劣质水进行人工处理以恢复其功能或进一步达到优质水所付出成本回归分析, 进而确定水质价格^[17]。利用文献[11]中的数据, 经回归分析, 得到不同 BOD_5 浓度的水质价格函数为:

$$R(x) = -0.4355 \ln x + 0.9969 \quad (R^2 = 0.9998) \quad (13)$$

式中: x 为 BOD_5 质量浓度, mg/L ; $R(x)$ 为不同 BOD_5 质量浓度的水质价格, 元/ t_0 。

d. 计算第 j 等级的污染物 i 的治理费用 R_{ij} 。将 c'_{ij} 代入(13)式中的 x , 即为 R_{ij} 。在实际计算过程中, 考虑到一套治理方法可同时将多种污染物一并处理, 故在选取污染物指标进行计算时, 相似指标仅选取其中一个作为代表, 避免重复计量, 如 COD_{Mn} 、 COD_{Cr} 、 TOC 与 BOD_5 相似, TN 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标相似, 故可分别选 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为代表。

e. 计算级差价格 R_j , 即

$$R_j = \sum_{i=1}^s R_{ij}$$

式中: s 为评价因子数。

3 实例分析

流溪河流域位于广东省中部, 地处东亚大陆边缘, 地理位置为东经 $113^\circ 10' 12''$ — $114^\circ 2' 00''$, 北纬 $23^\circ 12' 30''$ — $23^\circ 57' 36''$ 。流溪河发源于从化市桂峰山, 流经从化市花都区、白云区, 在南岗口与白坭河汇合后流入珠江, 全长 171 km, 流域总面积 2 300 km^2 。流溪

河是珠江的一大支流 ,它不仅是广州市的“菜篮子”基地 ,同时还担负着向广州市供水的重要战略任务。目前每年约向广州市供水 4.5 亿 m³ ,流溪河是广州市最主要的水源地。广州市自来水江村水厂、石门水厂和西村水厂都是从流溪河取水 ,这 3 家水厂所供自来水占广州市自来水生产总量的 60% ,因此 ,流溪河水质对广州市饮用水质量有很大影响。流溪河水源的水质价格分析 ,将对合理制定水价 ,修正水资源核算^[18] ,进而保护和改善广州市人民生活饮用水质量具有重要意义。

从流溪河水源多年水质状况分析可知 ,超标指标主要是 DO、SS、BOD₅、COD_{Mn}、NH₃-N 等^[19] ,故选择这 5 个指标作为评价因子。

根据广州市环境监测中心站和广州市白云区环境监测站 2003 年在太平桥、人和桥、江村桥 3 个监测断面对广州市流溪河水源的水质监测 ,获得流溪河水质监测项目及结果^[19] ,见表 1。

表 1 2003 年流溪河水质现状监测结果 mg/L					
监测断面	$\rho(\text{DO})$	$\rho(\text{SS})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	$\rho(\text{BOD}_5)$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$
太平桥	7.25	47.00	3.86	2.06	1.46
人和桥	4.96	52.65	4.13	4.49	0.76
江村桥	6.32	39.33	3.23	4.10	0.22

按照上述方法进行计算 ,得到各水质等级的隶属度 ,结果见表 2。

表 2 流溪河水质模糊综合评价结果					
监测断面	各水质等级的隶属度				
	I	II	III	IV	V
太平桥	0.271 168	0.294 893	0.073 717	0.360 221	0
人和桥	0.336 059	0.602 112	0.061 830	0	0
江村桥	0.196 847	0.509 196	0.278 770	0.015 188	0

对于水质“级差价格”的计算 ,选取 BOD₅、NH₃-N、TP 作为计算级差价格的主要污染物 ,并分 2 种情景进行分析。

情景 1 :假设用水区认为 II 类水质不能满足当地的需求 ,此时选择 II 类水质作为基准水质等级 ,即 $R_0 = R_2 = 0$ 。

情景 2 :假设用水区认为 V 类水质不能满足当地的需求 ,此时选择 V 类水质作为基准水质等级 ,即 $R_0 = R_5 = 0$ 。

经上述步骤计算得到各水质类型的级差价格 R_j 以及各河段的水质价格 ,见表 3。

在情景 1 下太平桥、人和桥 2 个河段的水质价格都出现负值 ,分别为 -0.17 元/t 和 -0.52 元/t ,表明该水体水质已丧失了满足用水区需求的使用功能 ,同时也反映了上游河段对下游河段因污染超标所造成损失进行赔偿 ,也即是上游污染行为的外部

表 3 2 种情景分析下各河段的水质价格 元/t								
情景分析	各水质类型的级差价格					各河段的水质价格		
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	太平桥	人和桥	江村桥
情景 1 ($R_0 = R_2$)	1.23	0	-0.73	-1.26	-1.73	-0.17	-0.52	0.02
情景 2 ($R_0 = R_5$)	2.96	1.73	1.00	0.47	0	1.56	1.21	1.75

不经济性支付给下游的经济赔偿。而在情景 2 中 ,各河段的水质价格都为正值 ,反映了下游河段向上游河段提供的优质水进行补偿。因此 ,基准水质等级 R_0 的确定反映了上下游水质资源的供需关系。更进一步讲 ,如果将该思想拓展到流域水资源保护方面 ,只要在上下游之间建立“环境责任协议”制度 ,并引入激励机制——监督惩罚成本后 ,通过制度上的设计 ,可以突破上下游之间水资源保护的“囚徒困境” ,形成良性的流域生态补偿机制 ,使整个流域能够发挥出整体的最佳效益^[20]。

4 结论与讨论

为了合理进行水资源核算 ,需要考虑水质核算来对其进行修正。水环境质量资源定价模型 ,首先运用模糊数学方法对实际水质状况进行综合评判 ,然后通过污染当量将多种水质指标折算成易计量的 BOD₅ 污染当量 ,由 BOD₅ 的定价函数计算出各水质等级的级差价格 ,进而得到水质价格。该模型简便易行 ,且适用于其他复杂且模糊的多指标评价体系。环境质量资源的定价 ,如大气环境质量资源、生态环境质量资源等。

- 运用该模型时 ,需要注意以下几个问题 :
- a. 随着科学技术的进步 ,单一指标的定价函数将发生变化 ,此时需根据现有的污染治理水平重新修正 ,或者采用其他方法确定各水质级别的“级差价格”。
 - b. 运用单一指标的定价函数计算级差价格时 ,用于折算的评价因子种类应与定价水体的主要污染特征相符合 ,并注意因子间的相似性 ,如 COD_{Mn}、COD_{Cr}、TOC 与 BOD₅ 相似 ,可选 BOD₅ 为代表 ,避免重复计量。
 - c. 基准水质等级需根据水资源供给的目的地的水质需求、水资源供给地的自然条件和技术条件等实际情况进行合理选择。

参考文献 :

[1] 姜文来 ,武霞 ,林桐枫 .水资源价值模型评价研究[J].地球科学进展 ,1998 ,13(2) :178-183.
[2] 李春雨 ,石海宽 .水资源价格理论研究综述[J].山西水

利科技 2002(1):79-81.

[3]唐立杰,李良县,卢亚卓,等.水资源价值及其模型浅析[J].中国水利水电科学研究院学报 2009(1):67-70.

[4]徐晓鹏,武春友.水资源价格理论研究综述[J].甘肃社会科学 2005(3):218-221.

[5]许振成,叶玉香,彭晓春,等.水资源价值核算研究进展[J].生态环境 2006,15(5):1117-1121.

[6]李金昌.资源经济新论[M].重庆:重庆大学出版社,1995.

[7]姜文来.水资源价值论[M].北京:科学出版社,1998.

[8]许振成.环境质量资源有偿使用是实施可持续发展的重要举措[J].环境工作通讯 2003(10):36-38.

[9]许振成,叶玉香,周广飞.环境质量资本税的征收与可持续发展[J].上海环境科学 2006,25(4):158-161.

[10]许振成,叶玉香,彭晓春,等.流域水质资源有偿使用机制的思考:以东江为例[J].长江流域资源与环境 2007,16(5):598-602.

[11]许振成,彭晓春.广东流域水环境资源有偿使用机制研究报告[R].广州:国家环保总局华南环境科学研究所,2004.

[12]杨旭,于水利,由海波.模糊数学综合评判在水资源价值评估中的应用[J].海河水利 2008(2):49-51.

[13]邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1990.

[14]邹立芝,魏余广.用模糊综合评判法评价昌宁盆地地下水水质[J].长春地质学院学报,1997(3):337-341.

[15]国家计委,财政部,国家环保总局,国家经贸委令第31号.排污费征收标准管理办法[Z].2003.

[16]周广飞.水质定价及其有偿使用研究[D].北京:中国环境科学研究院,2006.

[17]COSTANZA R, ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the worlds ecosystem services and natural capita[J]. Nature, 1997, 387(6630):253-260.

[18]曲福田.资源经济学[M].北京:中国农业出版社,2001.

[19]刘芳文,吴军,颜文,等.流溪河水质评价与监控措施[J].安全与环境学报 2004,4(5):19-23.

[20]王俊能,许振成,彭晓春,等.流域生态补偿机制的进化博弈分析[J].环境保护科学 2010,36(1):37-40.

(收稿日期 2009-12-07 编辑:高渭文)

· 简讯 ·

上海 570 多万市民率先喝上来自青草沙水库优质长江水

据上海市水务部门 2011 年 1 月 13 日消息,作为上海“十一五”期间投资额最大的单体工程,总投资达 170 亿元的青草沙水源地工程通水切换工作目前进展顺利。全市有 570 多万市民率先喝上了来自青草沙水库的优质长江水,仅元旦 3 天假期,青草沙原水总供应量就达到 550 万 m³。

据介绍,青草沙水源地工程是关系上海民生和城市供水安全的“百年工程”,前期经过了 15 年的科学论证,于 2007 年 6 月正式动工。经过建设者 3 年半时间的努力,具备了通水条件并陆续投入使用,实现了“十一五”期间让上海市民喝上青草沙优质原水的目标。

据悉,2010 年 12 月 1 日,金海支线按计划率先通水,正式拉开青草沙水源地工程通水切换的序幕。12 月 30 日,工程最重要的陆域输水管线严桥支线通水投入运行,具有百年历史的杨树浦水厂、南市水厂和浦东陆家嘴水厂、居家桥水厂通水切换相继调试成功。按照相关部署,浦东临江水厂和目前上海最大的自来水厂长桥水厂计划在 2011 年 4 月和 6 月先后进行通水切换。同时,稳步推进青草沙南汇支线工程建设,力争于 2012 年 1 月建成通水。

据了解,上海市水务局加强通水切换工作的全面协调,主动加强与水利部太湖局的沟通,及时调整苏州河引清调水方式,加大太湖流域的清水来量,保证黄浦江和苏州河的水量 and 水质安全;海事部门主动加强对黄浦江通航船只的控制和污染物的监测;电力部门全力提供切换过程中各原水系统和各水厂的用电保障;环保部门加强了水环境的监测和保护。

上海市城投总公司及其原水公司抓紧时间对投运 23 年之久的黄浦江上游引水系统总长 7.52 km 的渠道进行检修,期间,清洗渠道内壁,加固底部地基,更新部分阀门、流量仪,修复 10 多个渗漏点和近千条止水带,及时完成了检修任务,为今后青草沙供水系统的安全运行打下坚实基础。

(本刊编辑部供稿)