

引用格式:朱永彬,史雅娟.中国主要城市水资源价值评价与定价研究[J].资源科学,2018,40(5):1040-1050. [Zhu Y B, Shi Y J. Value evaluation and pricing of water resources in major cities in China[J]. *Resources Science*, 2018, 40(5): 1040-1050.] DOI: 10.18402/resci.2018.05.16

中国主要城市水资源价值评价与定价研究

朱永彬^{1,2}, 史雅娟^{3,4}

(1. 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 北京城市学院城市发展研究所, 北京 100083)

摘要:水资源价值评价与定价是编制水资源资产负债表的基础条件,也是确定城市供水价格和水权交易的前提。本文利用模糊数学评价方法,从供水、需水和水质三个方面构建指标体系,指标的选取既满足反映水价的代表性需要,又考虑数据的可获得性,力求指标体系具有可操作性和推广应用价值。基于该评价模型,本文选取中国32个大中城市为研究对象,对其水资源价值进行评价,同时计算出反映支付能力的水资源价格。结果显示,中国水资源价值具有明显的空间分布特征,北方城市水资源价值普遍高于南方城市,反映出中国水资源空间分布和经济社会发展的区域特征。其中,郑州和银川的水资源价值最高,太原、沈阳、石家庄等12个城市的水资源短缺形势也依然较为严峻。水资源价格方面,北京最高,为28.7元/t;青岛、济南、上海和太原等城市的水资源价格也较高(>15元/t)。

关键词:模糊数学;城市水价;价值评价;水资源

DOI: 10.18402/resci.2018.05.16

1 引言

受全球气候变化和经济社会快速发展等因素的综合影响,中国水资源供需矛盾日益突出。水资源时空分布不均的水情特征以及经济社会发展程度的区域差距,进一步加剧了水资源的供需矛盾。水资源已经与能源、环境并列,成为影响中国经济社会可持续发展的三大制约性因子^[1]。

在推进生态文明建设和建设节约型社会的时代背景下,中国提出了“探索编制自然资源资产负债表,对领导干部实行自然资源资产离任审计,建立生态环境损害责任终身追究制”的重大决策^[2]。然而,自然资源核算是建立在资源有价的前提之下,水资源价格是编制水资源资产负债表的基础条件。由于水资源不同于矿产、森林、能源等自然资源,不存在完全市场价格,导致其价值核算十分困难^[3]。

尽管中国城市供水价格历经20多年演变,已经由社会福利型的“水费”转变为反映市场供需和资

源稀缺性的“水价”^[4],但由于城市供水价格具有保障民生的性质,因此其与水资源真实价值还有很大差距。从用水需求来看,其主要取决于经济社会发展水平,而水资源供给的空间分布又取决于气候和气象条件等自然因素。因此,不同地区的水资源供需匹配程度必然存在很大差别,导致反映水资源稀缺性的水资源价值也应该具有一定的地区差异。为此,本文选取中国主要城市为研究对象(指中国36个大中城市,其中4个城市缺少数据,因此最终选定32个城市,分别为北京、天津、石家庄、呼和浩特、太原、沈阳、大连、长春、上海、南京、杭州、宁波、合肥、福州、厦门、南昌、济南、青岛、郑州、武汉、长沙、广州、深圳、南宁、重庆、成都、贵阳、昆明、西安、兰州、西宁、银川),选取反映水资源价值的代表性指标,建立科学可操作的水资源价值评价和定价研究框架体系,对各主要城市的水资源进行评价比较与定价研究,为水资源价值核算以及水权市场定价和

收稿日期:2017-09-11 修订日期:2018-03-09

基金项目:中国科学院科技战略咨询研究院自主部署项目“百年强国资源环境关键瓶颈问题研究”。

作者简介:朱永彬,男,河北廊坊人,博士,副研究员,主要从事资源环境经济、可持续发展和政策模拟研究。E-mail: zhuyongbin@casipm.ac.cn

通讯作者:史雅娟, E-mail: shiyj@igsrr.ac.cn

2018年5月

城市供水价格的制订提供借鉴。

2 水价研究进展

理论上,水价由资源水价、工程水价和环境水价三部分组成^[5]。其中,资源水价反映的是水资源的相对稀缺性;工程水价反映了供水企业将自然界水加工为可利用水的成本(含适当利润),包括供水设施投资的固定成本以及运行过程中的可变成本;环境水价即污水处理费用,反映的是污水对环境容量的损害成本。水资源核算中使用的水资源价格与资源水价较为一致。2004年中国城市供水价格中引入了资源水价,但仅具有象征意义。因此,水资源价格的确定还可为城市供水价格的调整确立依据。关于水资源价格理论,徐晓鹏等^[3]以及李春雨等^[6]作了较为系统的梳理,大致可将水资源定价方法分为三类,分别是基于市场机制、基于资源优化配置和基于综合指标的水价确定模型。

第一类水价确定模型是基于市场机制将水资源视作普通商品,借助市场均衡条件来确定水价。例如,供求定价模型是借助用水需求的价格弹性系数,模拟水价变动对用水需求的影响,进而根据用水需求的控制目标来确定相应水价^[7]。

第二类水价确定模型是通过构建水资源配置优化模型:在水资源总量既定的约束下,从多种用途中选取经济净收益最大的配置方案。将最优配置方案对应的水资源影子价格作为水价。其实际上反映的是水资源的边际机会成本,即水资源可以创造的最大的经济价值^[8,9]。上述两类模型均侧重从用水需求角度来测算水价,前者忽略了不同用水功能间价格的差异,同时对市场发育程度的依赖较强,在非完全市场下得到的水价无法反映真实的水资源价值,实际应用受到限制;后者则对水资源不同用途的经济收益数据要求较高,由于水资源供给的不确定性、水资源用途的多样性以及水资源供求的区域性等影响,水资源优化配置模型的应用也受到限制。

第三类水价模型是基于反映水资源供给和需求的指标,来综合评价水资源价值。如姜文来^[10]用模糊数学的方法综合考虑影响水资源价值的社会、经济、自然三大类因素,并从经济承受能力、历史承受能力和生活承受能力确定价格的向量来综合评判水资源价值。该模型将影响水资源价值的各种因素全面

地纳入水资源价值模型之中,综合评价水资源价值,并考虑了水资源的使用功能、经济承受能力等各种因素,在此基础上计算水资源价格,符合实际可操作性^[3]。与资源配置模型仅反映帕累托最优状态时的静态价格相比,该模型可以实时反映影响水资源价值的各种因素随时间的变化,具有很强的动态性。

当前,中国水资源约束日益趋紧,很多城市出现了严重缺水问题。中国“十三五”规划强调,要实行最严格的水资源管理制度,以水定人、以水定产、以水定城。同时,水环境污染和水资源短缺问题相互交织。为此,对水资源价值的评价要从“量”和“质”两方面反映。其中,对水资源“量”的评价更侧重其相对于用水需求的相对稀缺性。钦丽娟等^[11]和简富绩等^[12]均利用模糊数学综合指标评价法,分别对郑州和黑河中游的水资源价值进行了评价。

3 研究方法 with 数据基础

通过比较已有水资源价格理论和方法,本文选取基于综合指标的水资源价格确定模型,以便客观地对不同城市水资源价值进行统一评价与横向对比。

3.1 评价指标选取

参考姜文来^[10]、钦丽娟等^[11]和简富绩等^[12]等研究所选用的评价指标,并综合考虑指标的全面性与非重复性等因素,作为本研究选取水资源价值评价指标的依据;同时兼顾指标数据的可得性,以提高水资源评价的可操作性,利于水资源评价工作的标准化和推广应用。由于各个城市的水资源在供给和使用等方面存在非常大的差异,为避免某一指标对水价的过度影响,本文从不同角度选取了较为全面的指标进行评价,其中供水指标6个,用水指标11个,水质指标3个(表1)。

(1)从水资源可利用量(供水)角度,选取表征水资源供给丰瘠情况的指标。水资源可利用量包括三个来源:逐年更新的水资源量、入境水量和蓄水情况。其中,水资源量指标包括人均水资源量、产水模数(单位面积水资源量)、产水系数(降水转化为水资源的比率)以及径流系数(降水转化为地表水资源的比率),前两个指标反映各城市的人均和单位面积水资源拥有量,后两个指标反映各城市气象和地质条件差异,与水资源产生的难易程度相关。此外,分别选取入流系数和单位面积蓄水量作

表1 水资源评价指标体系

Table 1 Index system for the evaluation of water resources

| 准则层 | 指标层 | 指标解释 |
|-----|--|---|
| 供水 | 人均水资源量/m ³ | 水资源总量/常住人口 |
| | 产水模数/(万 m ³ /km ²) | 水资源总量/区域面积 |
| | 产水系数 | 水资源总量/降水量 |
| | 径流系数 | 地表径流/降水量 |
| | 入流系数 | 入境水量/水资源总量 |
| | 单位面积蓄水量/(万 m ³ /km ²) | 蓄水量/区域面积 |
| 用水 | 人均GDP/万元 | GDP/常住人口 |
| | 人口密度/(人/km ²) | 常住人口/区域面积 |
| | 人均用水量/m ³ | 用水总量/常住人口 |
| | 万元GDP用水量/m ³ | 用水总量/GDP |
| | 水资源开发利用率/% | 用水总量(不含跨区域调水、再生水回用、雨水利用和海水淡化)/水资源总量 |
| | 地下水开采比例/% | 地下水供水量/供水总量 |
| | 耗水比例/% | 耗水量/用水总量 |
| | 人均有效灌溉面积/(亩/人) | 有效灌溉面积/常住人口 |
| | 农田灌溉亩均用水量/(m ³ /亩) | 农田灌溉用水/有效灌溉面积 |
| | 城镇居民日生活用水量/(L/人) | 城镇居民用水/市辖区人口 |
| 水质 | 城镇需水比例/% | 城镇居民用水/生活用水 |
| | 河流水质 | 参考GB 3838-2002 ^[13] ,对应不同水质分类的河流长度 |
| | 湖库水质 | 参考GB 3838-2002 ^[13] ,对应不同水质分类的湖库面积 |
| | 地下水水质 | 参考GB/T 14848-93 ^[14] |

为反映入境水量和蓄水情况的指标。

(2)从水资源使用量(用水)角度,选取反映用水总量和效率情况的指标。一般而言,经济发展水平越高需水量越大,人口数量越多用水需求也越多,因此选取人均GDP和人口密度两个经济社会指标反映影响用水需求的关键因素;综合用水方面,选取人均用水量和万元GDP用水量两个反映用水效率的指标,以及水资源开发利用率、地下水开采比例和耗水比例三个相对用水量指标,三个指标越高说明相对用水量越高,地区用水形势越严峻;单项用水方面,主要是农业用水和生活用水¹⁾,其中农业用水选取人均有效灌溉面积、农业灌溉亩均用水量两个反映农业用水效率的指标,生活用水选取城镇居民日生活用水量和城镇需水比例两个指标分别反映城镇居民用水量水平和城镇居民与农村居民生活用水的差异²⁾。

(3)从水资源质量角度,选取三类水体的水质进行反映,分别是河流水质、湖库水质和地下水水质。钦丽娟等^[11]和简富绩等^[12]以主要污染物(如COD、氨氮等)浓度作为评价指标,但其数据难以获取且不同监测点差异较大,难以有效反映整个区域的水质情况。因此,本研究分别根据地表水评价标准(GB 3838-2002)^[13]和地下水评价标准(GB/T 14848-93)^[14],采用其水质分类由高到低分为I类、II类、III类、IV类、V类和劣V类。

3.2 模糊评价方法

水资源价格的确定取决于对水资源质和量的评价。首先,将水资源价值的评价向量划设为5个级别,即 $M=\{\text{高,较高,中等,较低,低}\}$,进而根据评分标准(表2)对各评价指标进行评价,建立评价隶属度矩阵 U :

1)总用水可分为生产用水、生活用水和生态用水。其中生态用水指回补生态环境的用水,用水比例较小,因此一般主要考虑生产用水和生活用水。生产用水以农业用水和工业用水为主,其中工业用水一般用万元工业增加值用水量表示,其与万元GDP用水量较为一致,因此本文在单项用水方面主要考虑农业用水和生活用水。

2)农业用水与生活用水、城镇居民生活用水和农村居民生活用水均形成用水竞争关系,对城镇居民生活用水的水价带来一定影响。

2018年5月

$$U = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \mu_{14} & \mu_{15} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \mu_{24} & \mu_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \mu_{n3} & \mu_{n4} & \mu_{n5} \end{bmatrix}_{n \times 5} \quad (1)$$

式中 $\mu_{i,j}$ 为评价指标*i*对各等级的隶属度取值。一般来说,水资源可利用量越多,水资源价值越低;水资源需求越大,水资源价值越高。由于各城市的每项评价指标并不完全隶属于某个评价等级,因此需要利用模糊数学方法的隶属度函数进行计算。

3.2.1 隶属度确定

本文选用降半梯形分布,建立一元线性隶属函数计算各指标对不同评价等级的隶属度。以逆向属性(指标值越大,级别越低;反之级别越高)指标为例,其函数形式为:

$$\mu_{i1} = \begin{cases} 1, & x_i \leq x_{i1} \\ \frac{x_{i2} - x_i}{x_{i2} - x_{i1}}, & x_{i1} < x_i < x_{i2} \\ 0, & x_i \geq x_{i2} \end{cases} \quad (2)$$

当 $j=2,3,4$ 时,

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 0, & x_i \leq x_{i,j-1} \\ \frac{x_i - x_{i,j-1}}{x_{i,j} - x_{i,j-1}}, & x_{i,j-1} < x_i \leq x_{i,j} \\ \frac{x_{i,j+1} - x_i}{x_{i,j+1} - x_{i,j}}, & x_{i,j} < x_i < x_{i,j+1} \\ 0, & x_i \geq x_{i,j+1} \end{cases} \quad (3)$$

当 $j=5$ 时,

$$\mu_{i5} = \begin{cases} 0, & x_i \leq x_{i4} \\ \frac{x_i - x_{i4}}{x_{i5} - x_{i4}}, & x_{i4} < x_i < x_{i5} \\ 1, & x_i \geq x_{i5} \end{cases} \quad (4)$$

式中 x_i 为评价指标*i*的实际值; $x_{i,j-1}, x_{i,j}, x_{i,j+1}$ 为评价指标相邻两等级的标准值(表2); $\mu_{i,j}$ 为评价指标*i*对指标等级*j*的隶属度。

评价指标中,除水质以外均可由隶属度函数确定。但对于水质指标,采用水体水质评价标准的分类方法,水资源价值由高到低分别对应水质>II类、III类、IV类、V类和劣V类等5个等级。根据模糊统

表2 评价指标分级评分标准

Table 2 Grading scale for each evaluation index

| 准则层 | 指标层 | 属性 | 最小值 | 最大值 | 指标评分标准 | | | | |
|-----|--|----|--------|----------|--------|------|------|------|-------|
| | | | | | 高 | 较高 | 中等 | 较低 | 低 |
| 供水 | 人均水资源量/ m^3 | 逆 | 56.70 | 2 062.30 | 150 | 250 | 400 | 600 | 1 200 |
| | 产水模数/($\text{万 m}^3/\text{km}^2$) | 逆 | 1.50 | 110.00 | 15 | 20 | 35 | 60 | 80 |
| | 产水系数 | 逆 | 0.05 | 0.63 | 0.25 | 0.35 | 0.40 | 0.50 | 0.60 |
| | 径流系数 | 逆 | 0.04 | 0.62 | 0.10 | 0.20 | 0.35 | 0.45 | 0.55 |
| | 入流系数 | 逆 | 0.14 | 277.30 | 1 | 3 | 5 | 8 | 10 |
| | 单位面积蓄水量/($\text{万 m}^3/\text{km}^2$) | 逆 | 0.09 | 72.90 | 1 | 2.50 | 5 | 8 | 10 |
| 用水 | 人均GDP/万元、 | 正 | 4.90 | 15.80 | 10 | 8 | 6 | 4 | 2 |
| | 人口密度/($\text{人}/\text{km}^2$) | 正 | 139.10 | 2 275.70 | 1 000 | 800 | 600 | 500 | 350 |
| | 人均用水量/ m^3 | 正 | 111.40 | 1 277.40 | 450 | 350 | 300 | 250 | 180 |
| | 万元GDP用水量/ m^3 | 正 | 9.40 | 122.80 | 55 | 45 | 35 | 30 | 20 |
| | 水资源开发利用率/% | 正 | 16.70 | 611.40 | 100 | 80 | 60 | 40 | 25 |
| | 地下水开采比例/% | 正 | 0.05 | 77.90 | 50 | 20 | 10 | 5 | 1 |
| | 耗水比例/% | 正 | 24.00 | 74.00 | 60 | 55 | 50 | 45 | 40 |
| | 人均有效灌溉面积/亩 | 正 | 0.00 | 0.85 | 0.30 | 0.20 | 0.15 | 0.12 | 0.08 |
| | 农田灌溉亩均用水量/ m^3 | 正 | 125.80 | 2 647.00 | 1 100 | 900 | 650 | 550 | 500 |
| | 城镇居民日生活用水量/L | 正 | 68.40 | 656.10 | 300 | 200 | 150 | 120 | 100 |
| 水质 | 城镇需水比例/% | 正 | 29.80 | 100.00 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 |
| | 河流水质 | — | | | >II类 | III类 | IV类 | V类 | 劣V类 |
| | 湖库水质 | — | | | >II类 | III类 | IV类 | V类 | 劣V类 |
| | 地下水水质 | — | | | >II类 | III类 | IV类 | V类 | 劣V类 |

注:指标评分标准根据城市样本相关指标的数据分布特征,结合分位断点方法与指标意义综合确定。

计原理,将不同等级河流长度、湖库面积和地下水资源量的比重作为相应等级的隶属度¹⁾。

3.2.2 指标权重

根据各评价指标的重要程度,为其赋相应权重。权重值的确定结合主观判断和数据本身的客观特征,分别采取层次分析法和熵值法计算。最后,取两种方法所确定权重的平均值作为最终的权重,以避免主观赋权法导致的偏差和客观赋权法的绝对化。

3.2.3 模糊综合评价

最后,将评价指标权重与评价矩阵相乘得到水资源价值综合评价结果:

$$V=A \cdot U \quad (5)$$

式中 A 为指标权重向量; U 为评价隶属度矩阵; V 为模糊评价结果。对评价结果进行归一化处理:

$$V^*=V/\sum_i V_i$$

根据水资源价值评价等级,构造向量 $T=(5,4,3,2,1)^T$,则水资源价值模糊综合评价指数为:

$$W=V^* \cdot T \quad (6)$$

该综合评价指数 W 介于1~5之间,指数越大,水资源价值越高;反之,水资源价值越低。基于上述评价方法,可对水资源进行两级评价,即针对各准则层,首先利用各指标的权重合成准则层评价指数,然后利用各准则层权重与准则层评价指数,合成水资源综合评价指数。

3.2.4 水资源定价

水资源价格通常是根据水资源评价结果,结合经济主体的水价承受能力进行确定。水资源价值越高,水价越接近承受能力上限。以居民生活用水为例:世界银行对发展中国家居民可承受水价的研究表明,家庭收入的5%为支付供水和污水处理服务的上限²⁾。考虑到国情因素,多数学者认为,中国城市居民生活用水支出占收入比例不超过3%~5%较为合理,并将3%作为现实可行的指标^[10-12, 15, 16]。据统计,中国水费支出占城市人均可支配收入的比重不超过1%^[4],存在一定的提价空间。由于水价是

水资源经济管理的重要手段,是调节水资源供给和需求的杠杆,适当提高水价有利于抑制用水需求的快速增加,缓解中国的水资源短缺困境。为此,本文选取3%作为水资源价格的上限:

$$\hat{P}=0.03E/Q-C \quad (7)$$

式中 \hat{P} 为水资源价格上限; E 为城市居民可支配收入; Q 为年用水量; C 为供水成本及正常利润,可由《城市供水价格管理办法》^[17]的规定确定。构造价格向量 $S=(\hat{P}, 0.75\hat{P}, 0.5\hat{P}, 0.25\hat{P}, 0)^T$,得到水资源价格 P 为:

$$P=V \cdot S \quad (8)$$

3.3 数据来源

本研究所使用的水资源和供水、用水数据来自各城市《水资源公报》^[18],由于水资源年际波动很大,为此利用多年平均值作为相应指标值;人口、GDP、区域面积等数据来自《中国城市统计年鉴》^[19],用水情况若表现为明显的时间趋势特征,如万元GDP用水量逐年递减,则将2015年数值作为相应指标值,以反映最新情况;否则取多年平均值;水质指标一般采用多年平均的水质等级。

4 水资源评价结果分析

本文首先根据各评价指标的重要程度及其在各城市之间的差异,采用AHP层次分析法和熵权法计算得出各准则层和指标的权重(表3);进而利用模糊数学评价方法,计算出供水、需水以及水资源综合评价指数。

4.1 供水侧水资源价值

基于供水量准则层下各指标计算得到的水资源价值评价指数,反映了各城市水资源供给的丰裕程度。评价指数越高,表明水资源绝对量越稀缺,可供利用的水资源量越少。

从供水侧水资源价值评价指数来看,各城市评价指数的空间分布呈现“南低北高”的特征(图1)。水资源价值较低的城市主要分布在长江沿线以及东南沿海地区,这些地区水资源量比较丰富,如广州、长沙、福州和重庆的评价指数<2.0,属于水资源价值很低的城市;合肥、杭州、武汉、宁波、南京和贵阳6

1)各城市的数据完备度差异很大,部分城市数据缺失,可由监测站点的水质等级所占比重作为隶属度。

2)根据世界银行等资料研究,水费支出占家庭收入的比例不同时,对居民心理的影响或其承受能力不同:水费占比1%时,对心理影响不大;占比2%时,有一定影响,并开始关心用水量;当水费占比3%时,比较重视用水,并注意节约用水;水费占比5%以上时,对心理影响很大,并考虑水重复利用问题。

表3 各评价指标权重

| Table 3 Weights of each evaluation index | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|
| 准则层 | AHP 权重 | 熵权法 | 综合权重 A | 指标层 | AHP 权重 | 熵权法 | 综合权重 |
| 供水量 | 0.405 40 | 0.500 00 | 0.452 70 | 人均水资源量 | 0.466 3 | 0.126 5 | 0.296 4 |
| | | | | 产水模数 | 0.269 2 | 0.087 8 | 0.178 5 |
| | | | | 产水系数 | 0.039 6 | 0.036 3 | 0.037 9 |
| | | | | 径流系数 | 0.026 3 | 0.076 4 | 0.051 3 |
| | | | | 入流系数 | 0.124 0 | 0.446 6 | 0.285 3 |
| | | | | 单位面积蓄水量 | 0.074 6 | 0.226 4 | 0.150 5 |
| | | | | 人均GDP | 0.023 3 | 0.077 2 | 0.050 2 |
| | | | | 人口密度 | 0.013 6 | 0.074 9 | 0.044 2 |
| | | | | 人均用水量 | 0.042 4 | 0.085 3 | 0.063 8 |
| | | | | 万元GDP用水量 | 0.042 4 | 0.075 3 | 0.058 9 |
| | | | | 水资源开发利用率 | 0.101 1 | 0.179 5 | 0.140 3 |
| | | | | 地下水供水比例 | 0.101 1 | 0.191 4 | 0.146 3 |
| | | | | 耗水比例 | 0.042 4 | 0.037 4 | 0.039 9 |
| | | | | 人均有效灌溉面积 | 0.093 6 | 0.079 9 | 0.086 8 |
| | | | | 农田灌溉亩均用水量 | 0.223 2 | 0.056 5 | 0.139 9 |
| 需水量 | 0.480 60 | 0.481 90 | 0.481 25 | 城镇居民日生活用水量 | 0.223 2 | 0.088 4 | 0.155 8 |
| | | | | 城镇需水比例 | 0.093 6 | 0.054 1 | 0.073 9 |
| | | | | 水质 | 0.114 00 | 0.017 90 | 0.065 95 |

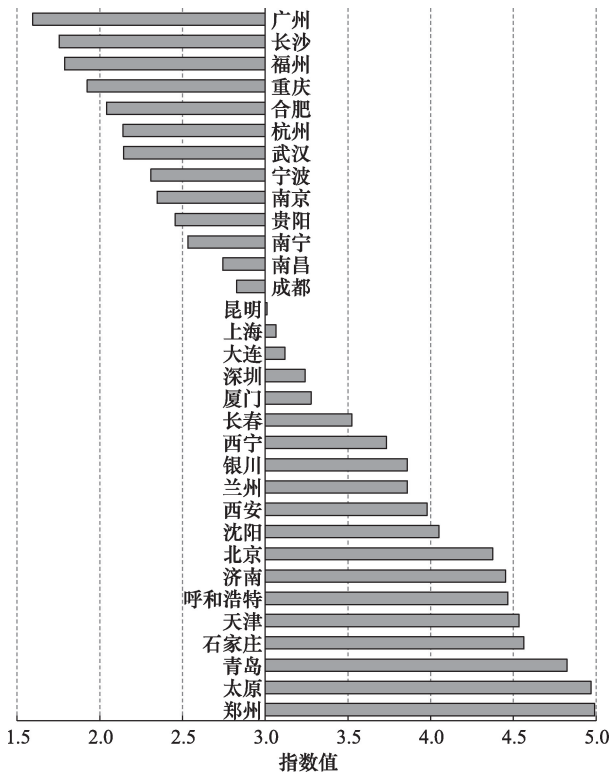


图1 中国主要城市供水侧水资源价值评价指数

Figure 1 Evaluation of water resources value from supply side for major cities in China

市的评价指数介于2.0~2.5之间,属于价值较低的城市;南宁、南昌和成都3市的评价指数介于2.5~3.0之间,属于价值中等偏低的城市。昆明市的评价指数在3.0左右,属于中等价值城市。

供水侧水资源价值较高的城市主要位于华北、西北和东北地区,其中华北地区水资源总量尤其匮乏。其中,郑州、太原、青岛、石家庄和天津5市的水资源短缺问题尤为严重,对应的评价指数介于4.5~5.0之间,导致其水资源价值极高;其次是呼和浩特、济南、北京和沈阳,评价指数位于4.0~4.5之间,其水资源价值也非常高;西北地区城市西安、兰州、银川、西宁以及东北的长春市,对应评价指数为3.5~4.0,价值较高;厦门、深圳、大连和上海的水资源评价指数也在3.0~3.5之间,属于中等偏高城市。

4.2 需水侧水资源价值

基于需水量准则层下各指标计算得到的水资源价值评价指数,反映了各城市经济社会发展过程中对水资源需求的依赖程度。该评价指数越高,表明对水资源需求越高(或用水效率有待提高),水资源对经济社会发展的制约越严重。实施“以水定人、以水定产、以水定城”的紧迫性越强。

与供水侧不同,需水侧的水资源价值评价指数的空间分布较为分散(图2),未呈现显著的趋势特征。一方面,经济发展水平高的地区对水资源的需求一般较高;但另一方面,这些地区的节水意识和技术水平也较高,水资源利用的效率往往也较高,从而在一定程度上弱化对水资源的依赖。因此,需水侧水资源价值与经济社会发展水平有一定关联,但相关性不大。

具体来说,银川和南京的需水侧水资源评价指数最高,属于高价值城市(>4.0)。东北城市长春、沈阳、大连,中部城市郑州、武汉、长沙,西部城市成都、兰州,以及上海等9个城市的评价指数介于3.5~4.0之间,属于价值较高城市;北京、石家庄、呼和浩特、太原、济南、合肥、西宁、南宁和广州等9个城市的评价指数介于3.0~3.5之间,属于中等偏高城市。另一方面,重庆和杭州的需水侧水资源评价指数最低,属于低价值城市(<2.0)。贵阳、昆明、深圳、福州4市评价指数介于2.0~2.5之间,厦门、宁波、青岛、西安、天津和南昌6市评价指数介于2.5~3.0之间,均

属于价值中等偏低的城市。

对需水侧价值偏高城市来说,导致其价值偏高的指标如表4所示。以银川和南京两个城市为例,尽管二者的需水评价等级相同,但经济发展水平却存在很大差距:银川市人均GDP处于中等水平,而南京市人均GDP位于最高级别;而且南京的人口密度也显著高于银川。但是,二者的水资源利用效率却同样低下:以银川市为例,其大部分指标均处于评价等级的最高级别,如人均用水量、万元GDP用水量、水资源开发利用率,以及人均有效灌溉面积、农田灌溉亩均用水量和城镇需水比例等;南京市在人均用水量、水资源开发利用率、农田灌溉亩均用水量、城镇居民日生活用水量和城镇需水比例等指标均处于最高级别。

对需水侧价值偏低城市来说,导致其价值偏低的指标如表5所示。同样以需水侧价值最低的两个城市为例:较低的水资源开发利用率和城镇居民日生活用水量是导致重庆市需水侧价值较低的原因;而杭州市的地下水供水比例、农田灌溉亩均用水量和城镇需水比例指标很低。

4.3 水资源价值综合评价

综合供水侧、需水侧和水质各项指标评价结果,计算得到的水资源价值综合评价结果。计算结果显示,中国水资源综合价值具有明显的空间分布特征,即南方城市的水资源价值普遍低于北方城市。从水资源综合评价指数来看,郑州和银川2市的评价指数最高(>4.0),是水资源价值最高的城市,水资源约束最为严重;紧随其后的城市依次为太原、沈阳、石家庄、青岛、兰州、济南、北京、呼和浩特、天津、西宁、西安和长春等12个城市,其综合评价指数介于3.5~4.0之间,属于水资源价值较高的城市,水资源短缺形势依然严峻。

此外,大连、上海、成都和南京4市的水资源价值综合评价指数介于3.0~3.5之间,属于中等偏高水平,主要受需水侧水资源价值影响,水资源供需之间还有一定的缺口。而其他大部分南方城市由于供给较为充分,且需水程度较弱,因此水资源价值普遍较低。尤其是重庆、杭州、福州和贵阳4市的水资源价值最低,评价指数介于2.0~2.5之间。

最后,综合考虑水资源内在价值和城市居民水

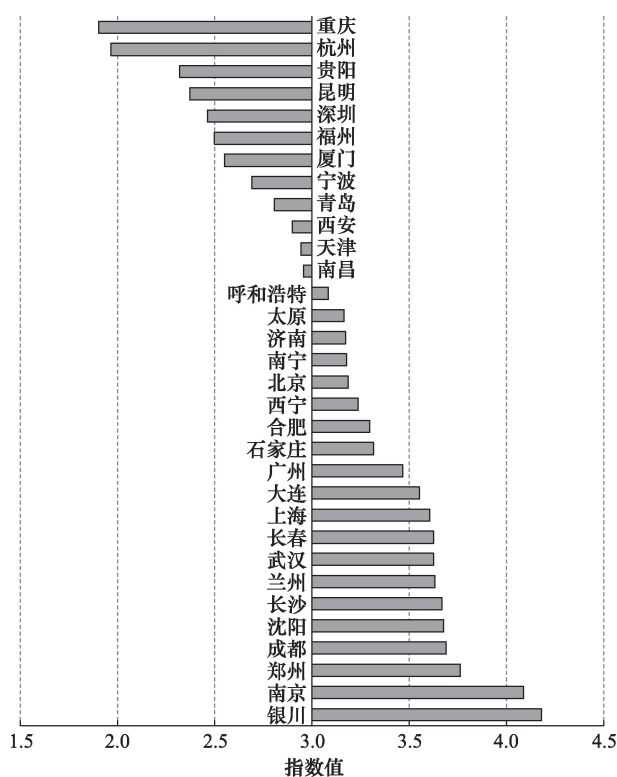


图2 中国主要城市需水侧水资源价值评价指数

Figure 2 Evaluation of water resources value from demand side for major cities in China

2018年5月

表4 需水侧价值较高城市的主要贡献指标因子

Table 4 Main contributors to the cities with higher water values from the demand side

| 城市 | 人均 用水量 | 万元GDP用 水量 | 水资源 开发利用率 | 地下水 供水比例 | 人均有效 灌溉面积 | 农田灌溉 亩均用水量 | 城镇居民 日生活用水量 | 城镇需水 比例 |
|------|-----------|--------------|--------------|-------------|--------------|---------------|----------------|------------|
| 银川 | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ |
| 南京 | ✓ | | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| 郑州 | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | |
| 成都 | | | | | | ✓ | | |
| 沈阳 | | | | ✓ | | | | |
| 长沙 | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ |
| 兰州 | | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ |
| 武汉 | | | ✓ | | | ✓ | | |
| 上海 | | | ✓ | | | ✓ | | |
| 大连 | | | | | | | ✓ | |
| 广州 | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ |
| 石家庄 | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | |
| 合肥 | | | | | ✓ | | | |
| 西宁 | | | | | | ✓ | | |
| 北京 | | | | ✓ | | | | |
| 南宁 | ✓ | ✓ | | | | ✓ | | |
| 太原 | | | | | | | | ✓ |
| 呼和浩特 | | | | ✓ | ✓ | | | |

表5 需水侧价值较低城市的主要贡献指标因子

Table 5 Main contributors to the cities with lower water values from the demand side

| 城市 | 人均 用水量 | 万元GDP 用水量 | 水资源 开发利用率 | 地下水 供水比例 | 人均有效 灌溉面积 | 农田灌溉 亩均用水量 | 城镇居民 日生活用水量 | 城镇需水 比例 |
|----|-----------|--------------|--------------|-------------|--------------|---------------|----------------|------------|
| 重庆 | | | ✓ | | | | ✓ | |
| 杭州 | | | | ✓ | | ✓ | | ✓ |
| 昆明 | | | | | | | | ✓ |
| 深圳 | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | |
| 福州 | | | | ✓ | | | | ✓ |
| 厦门 | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | |
| 宁波 | | | ✓ | ✓ | | | | |
| 青岛 | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | | |
| 西安 | | | | | | ✓ | | |
| 天津 | ✓ | ✓ | | | | | | |

费承受能力,计算得到各城市的水资源价格(图3)。结果表明,北京市的水资源价格最高,为28.7元/t,明显高于包括第二位在内的其他城市,这主要源于北京市的缺水现状和居民可支配收入水平(仅次于上海)。其次是青岛市,其水资源价格为20.4元/t,紧随其后的济南市、上海市和太原市水资源价格均高于15元/t。其他城市的水资源价格均低于15元/t,尤其是重庆市、贵阳市和南宁市等人均可支配收入

较低且水资源较为充沛的地区,其水资源价格不足5元/t。

5 结论与政策建议

本文基于模糊数学评价方法,从供水、需求和水质三个方面构建了水资源价值评价指标体系,并对中国32个大中城市的水资源价值进行了评价,计算得出各市的水资源价格。研究结果显示:

(1)供水方面具有明显的地域分布特征,水资

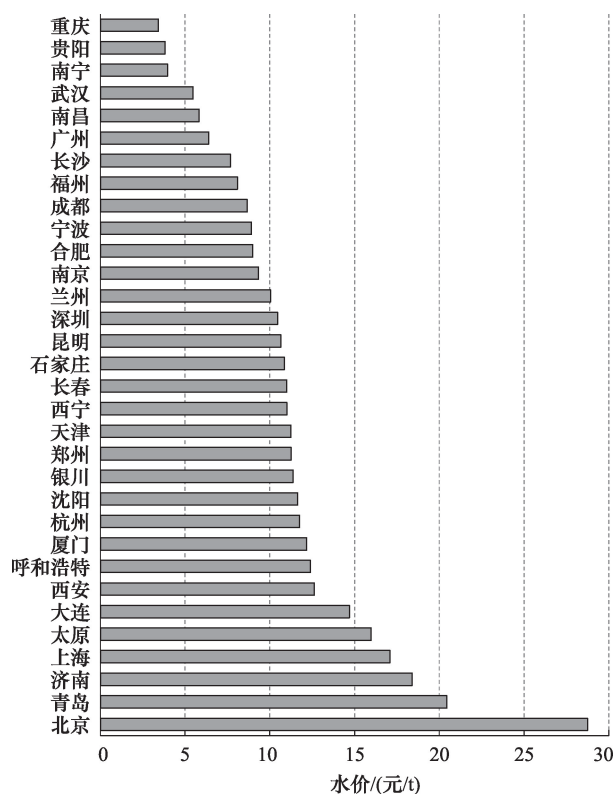


图3 中国主要城市水资源综合评价指数与水资源价格

Figure 3 Comprehensive Evaluation of water resources value and water price of major cities in China

源价值呈现“南低北高”的空间格局。与各城市水资源供给的丰瘠程度一致,郑州、太原和青岛的供水侧水资源价值最高(缺水),广州、长沙和福州的价值最低(丰水)。

(2)需水方面的空间分布较为分散,无显著趋势特征。银川、南京和郑州的需水侧水资源价值最高,水资源对经济社会发展的制约最为严重;重庆、杭州和贵阳等市的价值最低,水资源的瓶颈作用最弱。

(3)水资源综合价值的空间分布特征明显:南方低于北方。郑州和银川的水资源价值最高,太原、沈阳、石家庄等12个城市的水资源短缺形势也依然较为严峻。

(4)水资源价格北京最高(28.7元/t),青岛次之(20.4元/t),其次为济南、上海和太原(>15元/t),其他城市均低于15元/t,尤其是重庆、贵阳和南宁,价格不足5元/t。

研究不仅给出了主要城市的水资源定量评价结果,而且构建的评价模型结合水资源公报数据和国民经济与社会发展统计公报数据,综合考虑指标

代表性和数据可得性,具有较好的应用和推广前景。根据本文核算出的水资源价值与价格的地区差异,提出如下政策建议:

(1)因地制宜调整水价。根据各地水资源供给、需求和水质情况,以及当地收入水平,参照本文核算得出的水资源价值与定价结果,对各城市供水价格进行相应调整,以反映水资源的稀缺性和内在价值,引导对水资源的高效合理利用。但宜循序渐进改革水资源价格。

(2)开源节流并重,降低水资源对经济社会发展制约。对于供水侧水资源价值较高的城市,宜采取开源措施增加水资源供给,如结合“海绵城市”建设,加强雨水收集利用、再生水循环利用、湖库蓄水以及跨区域调水等措施;对于需水侧水资源价值较高城市,宜以“节流”为主,加强节水技术研发、节水意识宣传,提高水资源利用效率,如大力推广农业节水灌溉技术、工业循环水利用技术,提高居民家庭节水器具普及率等,减少生产用水和生活用水。对于水资源严重短缺的城市,建议“以水定人、以水定产、以水定城”,合理制订人口、产业与城市发展规划,实现水资源与经济社会协调可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] 王浩, 王建华. 中国水资源与可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 352-358. [Wang H, Wang J H. Sustainable utilization of China's water resources[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2012, 27(3): 352-358.]
- [2] 新华社. 中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定[EB/OL]. (2013-11-15)[2017-08-30]. http://www.gov.cn/jrzq/2013-11/15/content_2528179.htm. [Xinhua Net. Decision of the Central Committee of the Communist Party of China on Some Major Issues Concerning Comprehensively Deepening the Reform [EB/OL]. (2013-11-15)[2017-08-30]. http://www.gov.cn/jrzq/2013-11/15/content_2528179.htm.]
- [3] 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. [Xu X P, Wu C Y. Theory review of water resource pricing [J]. *Gansu Social Sciences*, 2005, (3): 218-221.]
- [4] 刘兴远, 宋小明, 周兴华. 关于城市供水成本与水价的思考[J]. 中国经贸导刊, 2014, (24): 76-79. [Liu X Y, Song X M, Zhou X H. Reflections on urban water supply cost and water price[J]. *China Economic & Trade Herald*, 2014, (24): 76-79.]
- [5] 汪恕诚. 水利部部长: 水市场不可能离开政府宏观调控[EB/OL].

2018年5月

- OL]. (2000-11-17) [2017-09-11]. <http://finance.sina.com.cn/2000-11-17/23201.html>. [Wang S C. Minister of Water Resources: Water Market Cannot Leave the Government Macro-Control [EB/OL]. (2000-11-17)[2017-09-11].<http://finance.sina.com.cn/2000-11-17/23201.html>.]
- [6] 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. [Li C Y, Shi H K. Introduction on theory of water resources price [J]. Shanxi Hydrotechnics, 2002, (1): 79-81.]
- [7] Schneider L, Whitlatch E. User-specific water demand elasticities [J]. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 1991, 117(1): 52-73.
- [8] Fotopoulos A, Taylor T R. Simulation versus optimization in the assessment of the resource opportunity cost in complex water resources systems [J]. *Journal of Neurophysiology*, 2009, 108(11): 3096-3104.
- [9] Tilmant A, Marques G, Mohamed Y. A dynamic water accounting framework based on marginal resource opportunity cost [J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2014, 11(10): 1457-1467.
- [10] 姜文来. 水资源价值模型研究[J]. 资源科学, 1998, 13(1): 35-43. [Jiang W L. A study on model of water resources value [J]. *Resources Science*, 1998, 13(1): 35-43.]
- [11] 钦丽娟, 曹剑峰, 平建华, 等. 模糊数学在郑州市水资源价值评价中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(4): 487-490. [Qin L J, Cao J F, Ping J H, *et al.* Application of fuzzy mathematics in evaluation of water resources value in Zhengzhou city [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2005, 35(4): 487-490.]
- [12] 简富绩, 宋晓谕, 虞文宝. 水资源资产价格模糊数学综合评价指标体系构建-以黑河中游张掖市为例[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 567-572. [Jian F H, Song X Y, Yu W B. Construction of the evaluation system of water asset price with fuzzy comprehensive assessment indexes: Taking Zhangye Prefecture in Heihe River basin as an example [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(2): 567-572.]
- [13] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. [National Environmental Protection Administration, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB 3838-2002 Environmental Quality Standards for Surface Water [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.]
- [14] 国家技术监督局. GB/T 14848-93 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993. [National Technical Supervision Bureau. GB/T 14848-93 Quality Standard for Ground Water [S]. Beijing: China Standard Press, 1993.]
- [15] 冷艳杰, 杨培岭, 刘玉龙. 水费支出系数分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(5-6): 522-524. [Leng Y J, Yang P L, Liu Y L. Analysis on the coefficient of water fee [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(5-6): 522-524.]
- [16] 施熙灿. 国外及我国部分地区水价概况 [J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(3): 60-64. [Shi X C. Overview of water prices in foreign countries and parts of China [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2003, 23(3): 60-64.]
- [17] 国家计委, 建设部. 城市供水价格管理办法 [EB/OL]. (1998-9-23) [2017-08-30]. <http://www.yzx.gov.cn/5/149/366/369/26682.html>. [National Planning Commission, Ministry of Construction. Urban Water Supply Price Management Measures [EB/OL]. (1998-9-23) [2017-08-30]. <http://www.yzx.gov.cn/5/149/366/369/26682.html>.]
- [18] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010-2015. [The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000-2015.]
- [19] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011-2016. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2001-2016.]

Value evaluation and pricing of water resources in major cities in China

ZHU Yongbin^{1,2}, SHI Yajuan^{3,4}

(1. *Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China,*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4. City Development Institute, Beijing City University, Beijing 100083, China)

Abstract: Water resource evaluation and pricing is the foundation for the preparation of a water resource balance sheet, urban water supply price determination and water rights transactions. This paper applied fuzzy mathematics evaluation methods and constructed the index system from the aspects of water supply, water demand and water quality. In selecting representative indexes, it both reflected the water intrinsic value and considered data availability to endow operationality and applicability. Based on the proposed evaluation model, we selected 32 large and medium cities in China as research subjects to evaluate the value of water resources according to water prices that reflect citizens' ability to pay. It is found that the water resource value in China shows obvious spatial distribution characteristics - water resource value in northern cities is generally higher than in southern cities, reflecting the spatial distribution of water resource supply and regional gaps in economic and social development. For instance, Zhengzhou, Taiyuan and Qingdao have higher value than Guangzhou, Changsha and Fuzhou from the perspective of water supply side; Yinchuan, Nanjing and Zhengzhou have high value than Chongqing, Hangzhou and Guiyang from the water demand side. A higher water resource means the according city either encounters limited water supply or requires plenty of water to satisfy development. Zhengzhou and Yinchuan have the highest comprehensive water resource values; the water shortage situation in 12 cities such as Taiyuan, Shenyang and Shijiazhuang is grim. By pricing water resources, Beijing is the city with the highest water price at 28.7 CNY/ton; followed by Qingdao, Jinan, Shanghai and Taiyuan, with price higher than 15 CNY/ton. Water prices in Chongqing, Guiyang and Nanning are relatively low at 5 CNY/ton.

Key words: fuzzy mathematics; urban water price; value evaluation; water resources