

文章编号:0559-9350(2017)01-0061-09

## 基于供求关系和生产函数的灌区水量使用权交易模型

邵东国, 吴振, 顾文权, 陈述

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 随着市场在资源配置中的作用日益重要, 水权交易对优化水资源配置、提高用水效率、促进节水势在必行, 现已成为我国最严格水资源管理制度试点建设的重要内容之一。本文运用水资源系统分析与经济学理论, 建立了基于供求关系和生产函数的灌区水量使用权交易模型, 该模型以交易双方各自收益最大化为目标, 由C-D生产函数和供求关系确定水资源价值, 以纳什均衡价格和供需水量为约束确定交易水量和交易收益。经湖北省高关水库灌区与应城市水量使用交易应用研究, 结果表明: 高关水库灌区随着节水深入, 2013年现状、2020、2030规划水平年在50%平水年交易水量最大, 分别为3 744.78万 $\text{m}^3$ 、4 743.51万 $\text{m}^3$ 、5 829.13万 $\text{m}^3$ ; 75%、85%干旱年交易水量分别减少到1 225.28万 $\text{m}^3 \sim 4 180.79$ 万 $\text{m}^3$ , 213.65万 $\text{m}^3 \sim 1 570.17$ 万 $\text{m}^3$ ; 90%特旱年则不具备交易条件。通过双方交易, 可使应城市2013、2020、2030水平年50%平水年缺水情况明显缓解, 75%和85%干旱年缺水率降低; 还可提高高关水库灌区净收益201.73万元 $\sim 7 0541.97$ 万元, 应城市净收益88.37万元 $\sim 131 669.00$ 万元。但要根本解决应城市干旱缺水问题, 需要建立灌区节水交易收益补偿投入机制, 调动节水积极性, 充分挖掘当地节水潜力。这对建立健全我国水权交易机制和最严格的水资源管理制度, 提高水资源利用效益与效率, 指导节水型社会建设, 保障城乡供水安全, 具有重要意义。

**关键词:** 灌区; 水量使用权; 交易模型; 生产函数; 供求关系

**中图分类号:** F224

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20160527

## 1 研究背景

水资源时空分布极度不均、工程供水能力不足、河湖水体水质恶化、用水效率不高等造成的城乡缺水问题已严重制约了区域经济社会的发展, 单纯的行政计划配置难以调动供求双方高效节水的积极性, 需要遵循市场经济规律, 研究建立灌区节水的水量使用权交易及其补偿投入机制, 解决日益严重的城乡水供求矛盾, 提高水资源利用效率和效益, 实现水资源高效优化配置<sup>[1]</sup>。

近些年来, 水权交易模型和交易价格成为国内外学者研究热点, 并针对不同的用水户建立了不同的交易模型及求解策略。如: Sophie Thoyer等<sup>[2]</sup>建立了以农业用水户、环境用水户、水资源管理者及纳税人为水权交易方的多边协商议价模型; R. Maria等<sup>[3]</sup>通过分析灌区水市场规模、水权系统、参与人信息水平等, 定义了水权交易的议价环境, 建立了基于博弈理论的多农业用水户间的讨价还价模型。Wong等<sup>[4]</sup>通过模拟灌溉水市场, 证明水权交易使约95%的水资源真正经济价值得以实现; Narayanan等<sup>[5]</sup>应用规划模型研究计量季节水价。在我国, 自东阳、义乌水权交易之后, 水权交易研究得以重视<sup>[6-10]</sup>。如: 吴丽等<sup>[11]</sup>基于合作博弈建立了水权交易模型, 分析了准市场下水权交易双方的出价策略及收益; 陈洪转等<sup>[12]</sup>基于博弈原理建立了水权交易的定价模型; 李长杰等<sup>[13]</sup>建立了水权交易买卖双方叫价拍卖的不完全信息博弈模型, 并给出双方叫价拍卖的机制设计; 王庆等<sup>[14]</sup>基于双向拍

收稿日期: 2016-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51439006, 51379150); 2014年中央分成水资源费补助项目(201405)

作者简介: 邵东国(1964-), 男, 湖南常德人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源高效利用与生态环境效应研究。

E-mail: dgshao@whu.edu.cn

通讯作者: 吴振(1990-), 女, 山东菏泽人, 硕士生, 主要从事水资源高效利用及环境保护研究。E-mail: 767157817@qq.com

卖和序贯谈判博弈分析,给出了竞价策略模型;胡晓寒等<sup>[15]</sup>基于优化理论和博弈理论建立了合作性博弈模型。但由于目前国内外水权管理体制机制差异较大,国内水市场尚未形成,国外先进的水权交易机制难以适应我国灌区用水管理的发展需求,也缺少普适性的灌区水量使用权交易模型与方法。如何基于保障灌区粮食生产用水与城乡供水安全条件,考虑供求买卖双方自身水资源价值与效益最大化需求,建立灌区节水量使用权交易模型,尚待深入。

基于此,本文以湖北省高关水库灌区与应城市水量使用权交易这一最严格水资源管理制度建设试点为背景,将经济学中生产函数<sup>[16]</sup>、水资源供需系统分析<sup>[17]</sup>与价格博弈等理论相结合,探索建立以交易双方各自收益最大化为目标、纳什均衡价格与供需水量为约束的水量使用权交易模型。

## 2 水资源供需分析模型与方法

**2.1 水库灌区水资源供需分析模型与方法** 依据水库水量平衡方程及相关约束计算水库灌区可交易水量。

水库水量平衡方程<sup>[18]</sup>:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - D_t - L_t = S_t + Q_t - W_t - SU_t - EC_t - xt - L_t \quad (1)$$

依据上述方程,计算水库灌区的可交易水量 $xt$ :

$$xt = S_{t+1} - S_t + Q_t - W_t - SU_t - EC_t - L_t$$

由非负约束得:

$$x_t = \max \{0, S_{t+1} - S_t + Q_t - W_t - SU_t - EC_t - L_t\} \quad (2)$$

式中: $S_{t+1}$ 为 $t$ 时段末蓄水量, $S_t$ 为 $t$ 时段初蓄水量,其中, $S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max}$ , $S_{\max}$ 与 $S_{\min}$ 分别为水库蓄水能力的上下限; $Q_t$ 为 $t$ 时段入库径流量, $D_t$ 为 $t$ 时段水库泄水量(包括对灌区的供水量 $W_t$ ,水库发电水量与下游生态环境最小需水量 $EC_t$ ,水库弃水量 $SU_t$ ,可交易水量 $x_t$ ), $L_t$ 为 $t$ 时段水库蒸发和渗漏损失量;单位均为万 $m^3$ 。

**2.2 城市水资源供需分析模型与方法** 根据城市内各类工程的可供水能力和社会经济用水需求预测,分区计算城市不同发展水平的水资源供求状态,确定城市50%、75%、85%、90%等不同典型年的水资源余缺程度,计算方法如下:

$$\begin{aligned} x'_t &= \sum_{j=1}^m (S'_{jt} + P'_{jt} + G'_{jt} + Q'_{jt} - W'_{jt} - SU'_{jt} - L'_{jt}) \\ &= \sum_{j=1}^m (S'_{j1t} + S'_{j2t} + S'_{j3t} + S'_{j4t} + P'_{jt} + G'_{jt} + Q'_{jt} - W'_{jt} - SU'_{jt} - L'_{jt}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $S'_{jt}$ 为城市 $j$ 区 $t$ 时段地表水可供水量(包括城市内水库蓄水 $S'_{j1t}$ 、塘堰蓄水 $S'_{j2t}$ 、河流水 $S'_{j3t}$ 以及湖泊水 $S'_{j4t}$ ), $P'_{jt}$ 为城市 $j$ 区 $t$ 时段降雨量, $G'_{jt}$ 为城市 $j$ 区 $t$ 时段地下水开采量和地下水溢出量, $Q'_{jt}$ 为城市 $j$ 区 $t$ 时段外引水量, $W'_{jt}$ 为城市 $j$ 区 $t$ 时段总需水量(包括生活、生产、生态等全部用水), $SU'_{jt}$ 为城市 $j$ 区 $t$ 时段弃水量, $L'_{jt}$ 为城市 $j$ 区 $t$ 时段蒸发和渗漏损失量;对于城市买方来说, $x'_t$ 小于0时,为缺水量,即在交易中水量使用权最大买入量;单位均为 $10^4 m^3$ ;  $j$ 为城市的计算分区, $j=1, 2 \cdots m$ 。

## 3 水资源估价模型与方法

**3.1 模型假定** 水权出售方(水库灌区)将多余水量使用权有偿转让给水权购买方(城市),在交易过程中,双方出于自身利益会考虑对交易价格进行博弈,以获得自身效益最大化。因此,构造模型基于如下假设:

(1)多余水权是指以农业节水潜力为基础,当年节约出来的水量使用权,而长期持有的所有权不变。

(2)由于水资源边际效益能够体现水资源稀缺价值和对该国民经济的贡献程度,可用它反映城市水权购买方自身水资源利用的真实价值 $C$ 。水权购买方根据自身水资源利用的真实价值 $C$ 来报价,其报价策略为 $P_b = C(1 + k_b)$ 。考虑在价格博弈中,买方倾向于压低价格以实现利益最大化,为描述其基于水资源真实价值报价的浮动范围,使价格博弈更符合实际过程,可假设 $k_b \in [-1, 0]$ ,且服从均匀分布<sup>[12]</sup>。

(3)水库灌区水权出售方的水资源价值 $V$ 主要与其供水成本有关,而供水成本既包括向城市输供水的建设运行管理成本,又包括水库灌区自身节水投入和发电灌溉供水量减少产生的损失。考虑现行灌区节水投入主要来源于各级政府,灌溉水费收入很少,故供水成本简化为仅考虑发电效益损失,用发电效益代替交易水权的边际成本,并且单纯根据供求关系计算水权出售方的水资源价值 $V$ 。水权出售方根据自身估价 $V$ 进行报价,报价策略为 $P_s = V(1 + k_s)$ 。出售方在价格博弈中倾向于抬高价格使其收益最大,为描述其基于水资源真实价值报价的浮动范围,使价格博弈更符合实际过程,可假设 $k_s \in [0, 10]$ ,且服从均匀分布<sup>[12]</sup>。

(4)根据公平与效率原则,交易双方成交价格 $P$ 由双方的出价共同决定,交易双方围绕初步估价进行博弈,即 $P = \lambda P_b + (1 - \lambda)P_s$ ,其中 $\lambda \in [0, 1]$ 。 $\lambda$ 表示双方的议价能力,双方就彼此的出价最终达成一个成交价格。

**3.2 数学模型** 考虑到交易双方存在不同利益需求,交易双方都要先根据各自效益最大原则初步估算出自身水资源价值。

对水权出售方(水库灌区),利用供求理论<sup>[19-20]</sup>推导其效益最大时水资源价值与边际成本的关系,并利用发电效益作为其边际成本,从而求得卖方水资源价值,计算公式是:

水资源需求价格弹性系数

$$E = -\frac{V}{Q} \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (4)$$

水库灌区水费收入的边际效益

$$MR = \frac{\partial(VQ)}{\partial Q} = Q \frac{\partial V}{\partial Q} + V = V \left( 1 + \frac{Q}{V} \frac{\partial V}{\partial Q} \right) = V \left( 1 - \frac{1}{E} \right) \quad (5)$$

当利润最大时

$$MR = MC \quad (6)$$

由以上3式得

$$V = MC \left( 1 + \frac{1}{E - 1} \right) \quad (7)$$

式中: $V$ 为水权出售方水资源价值,是边际成本的函数; $Q$ 为水库灌区供水量; $MC$ 为边际成本。由于供水部门在正常生产及销售条件下, $E > 1$ 。本文根据水库发电量效益 $B_e = eTd(9.81\eta Q_e H)$ 来计算边际成本 $MC = B_e/Q_e$ ;其中, $e$ 为电价(元/度); $Td$ 为计算时段的小时数(h); $Q_e$ 为每时段可交易水量转化成的流量( $m^3/s$ ); $H$ 为上下游水头差(m); $\eta$ 为发电机组的总效率(一般取0.85)。

对水权购买方(城市),从合理利用有限的水资源而达到用水效益最优的角度确定水资源的边际效益<sup>[21-22]</sup>,以此作为买方水资源的真实价值<sup>[23-24]</sup>,体现水资源的稀缺与宝贵。而在多种生产函数中,Cobb-Daughlas生产函数<sup>[25-27]</sup>(简称C-D函数)因其计算简单而广泛应用于较为发达的地区,以此来衡量供水量对经济、社会整体发展的作用,由于GDP仅是社会经济发展的宏观反应,社会经济发展水平仅用本区GDP来表示具有一定的局限性。利用水资源生产函数求解其边际效益,原理如下:

水的生产函数

$$f(Q) = AK^\alpha L^\beta Q^\gamma \quad (8)$$

生产净效益

$$U = f(Q) - CQ \quad (9)$$

当其净效益最大时

$$\frac{\partial U}{\partial Q} = f'(Q') - C = 0 \quad (10)$$

水价等于水资源的边际效益

$$C = f'(Q') \quad (11)$$

式中： $C$  为水权购买方水资源价值， $f'(Q')$  为水权购买方的产出值，用本区 GDP 来表示； $f'(Q')$  为水资源的边际效益。 $A$  为技术进步对产值增长的贡献率； $K$ 、 $L$ 、 $Q'$  分别为水权购买方对资金、劳动力、水资源的投入量（即总供水量，包括生产、生态、生活用水等）； $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为资金、劳动力、水资源投入的产出弹性。将式(8)两边取对数，利用 spss19 对实际数据  $K$ 、 $L$ 、 $Q'$  进行多元线性回归分析求得参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $A$ ，从而求得城市水资源真实价值  $C$ 。

#### 4 水量使用权交易模型与方法

以交易双方效益最大为目标，以价格、水量为约束建立以下优化模型，以求取交易水量和交易效益：

目标函数为：

水权买方：

$$\begin{aligned} \max U_b &= (C - P)x \text{Prob}(P_b \geq P_s) \\ &= [C - \lambda C(1 + k_b) - (1 - \lambda)V(1 + k_s)] \cdot \left[ \frac{C(1 + k_b)}{V} - 1 \right] x / 10 \end{aligned} \quad (12)$$

水权卖方：

$$\begin{aligned} \max U_s &= (P - V)x \text{Prob}(P_b \geq P_s) \\ &= [\lambda C(1 + k_b) + (1 - \lambda)V(1 + k_s) - V] \cdot \left[ 1 - \frac{V(1 + k_s)}{C} \right] x \end{aligned} \quad (13)$$

约束条件为：

$$\frac{\partial U_b}{\partial k_b} = -\lambda C \left[ \frac{C(1 + k_b)}{V} - 1 \right] x / 10 + \frac{C}{V} [C - \lambda C(1 + k_b) - (1 - \lambda)V(1 + k_s)] x / 10 = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial U_s}{\partial k_s} = (1 - \lambda)V \left[ 1 - \frac{V(1 + k_s)}{C} \right] x - \frac{V}{C} [\lambda C(1 + k_b) + (1 - \lambda)V(1 + k_s) - V] x = 0 \quad (15)$$

$$0 \leq x \leq x_k; 0 \leq x \leq x_q; -1 \leq k_b \leq 0; 0 \leq k_s \leq 10; 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (16)$$

式中： $\text{Prob}(P_b \geq P_s)$  为水权购买方出价大于水权出售方出价的概率； $P$  为交易价格； $x$  为实际交易水量； $x_k$  为水权出售方可交易水量； $x_q$  为水权买方最大买入量。当双方交易效益最优时，必然对应一个最优均衡解  $(k_b^*, k_s^*, \lambda^*, x^*)$ ，以此可求得交易价格，交易水量和交易双方净效益。

#### 5 应用实例

**5.1 研究区概况** 湖北省是我国 7 个加快实施最严格水资源管理制度试点省份之一，高关水库灌区与应城市水量使用权交易作为试点建设的重要内容之一，2014 年启动。其中，高关水库灌区位于湖北省京山县以北大富水流域，区内灌溉水源有大型水库 1 座、中型水库 1 座、小型水库 58 座以及塘堰 13 893 处，设计灌溉面积 38.40 万亩；其中高关水库是以防洪、灌溉、发电、供水等为主的灌区骨干调节水库，控制面积 303 km<sup>2</sup>，总库容 20 108 万 m<sup>3</sup>，兴利库容 15 432 万 m<sup>3</sup>，多年平均降

雨量 1 001 mm。该灌区自 1999 年节水改造以来，多年平均需水量为 38 410 万 m<sup>3</sup>，多年平均可供水量为 46 092 万 m<sup>3</sup>，具有一定的交易条件。

应城市位于湖北省江汉平原中部，国土面积 1 168.3 km<sup>2</sup>，人口 71 万，是中国最早对外开放的县市，被誉为“全国中部县域经济百强县市”。应城市当地径流主要来源于降水，多年平均降雨量 1 109.4 mm，年径流深 336.8 mm，年径流系数 0.324，多年平均水资源量 5.5 亿 m<sup>3</sup>。但人均日占有量为 0.24 m<sup>3</sup>/(人·日)，亩均日占有量为 0.26 m<sup>3</sup>/(亩·日)，均低于湖北省平均水平。应城市多年平均需水量为 67 546.66 万 m<sup>3</sup>，多年平均可供水量仅 54 021.79 万 m<sup>3</sup>，水资源短缺已成为城市发展的瓶颈。

高关水库灌区与应城市之间建有输供水工程(如图 1 和图 2)，为双方水量使用权交易提供了便利条件。

**5.2 计算结果分析** 依据当地调研与水利普查数据、统计年鉴、水资源公报和发展规划等资料(限于篇幅，仅列出应城市水资源相关经济数据见表 1)，以旬为时段，分区计算出高关水库灌区 2013 年、2020 年和 2030 年不同典型年的可交易水量(见表 2)和应城市 2013 年、2020 年和 2030 年平水年 50%、干旱年 75%、85%和特旱年 90%条件下的需水量和缺水量。

表 1 应城市生产要素及产出值

年份	产出值( $Q'$ )/亿元	$K$ /亿元	$L$ /万人	$Q'$ /万 m <sup>3</sup>
2009	100.800	70.830	32.840	34859.860
2010	120.000	85.000	34.800	35836.970
2011	153.340	104.000	36.900	47961.710
2012	174.810	138.800	39.130	47969.450
2013	201.520	175.000	41.980	54021.789
2015	262.000	273.000	47.170	55010.310
2020	504.000	833.000	63.120	55788.260
2030	1870.000	5158.000	113.040	58824.657

注：表中字母符号含义同式(8)。

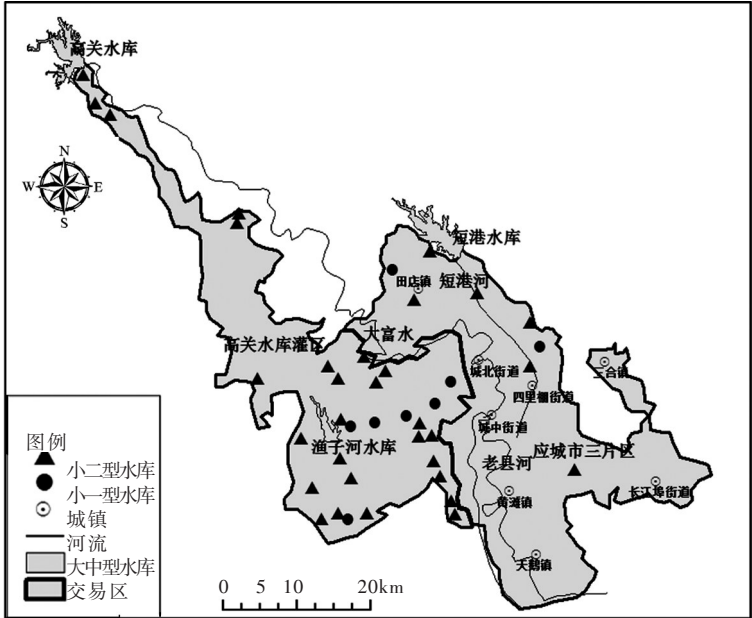


图 1 高关水库灌区和应城市三片区

经水资源供需分析发现，在应城市的 11 个分区中，短港片区、大富水片区和漳府河片区缺水严重，且与高关水库有水力联系。因此，可确定交易对象为高关水库灌区与应城市的短港片区、大富水片区及漳府河片区(简称应城市三片区)(见图 1)。

以 2013 年平水年为例，对于高关水库灌区，电价  $e=1.5$  元/度， $T_d$  为旬时段的小时数，取 240 h；



$H$ 为上下游水头差, 为125 m, 计算得边际成本为0.43元/ $\text{m}^3$ ; 利用式(7)求得自身水资源价值(取 $E=2.5$ )为0.72元/ $\text{m}^3$ ; 对于应城市三片区, 将式(8)两边取对数, 利用spss19对表1数据进行多元线性回归分析求得参数 $\alpha=-0.136$ 、 $\beta=2.655$ 、 $\gamma=0.377$ 、 $A=0.000335$ , 从而求得水资源的真实价值 $C$ 为4.44元/ $\text{m}^3$ ; 由式(14)–(16)求得 $(k_b^*, k_s^*, \lambda^*)$ 为(0, 0, 0.5), 交易水量 $x^*$ 为3 744.78万  $\text{m}^3$ , 交易价格 $p$ 为1.95元/ $\text{m}^3$ , 最后由式(12)–(13)求得高关水库灌区和应城市三片区的净效益, 结果见表2。

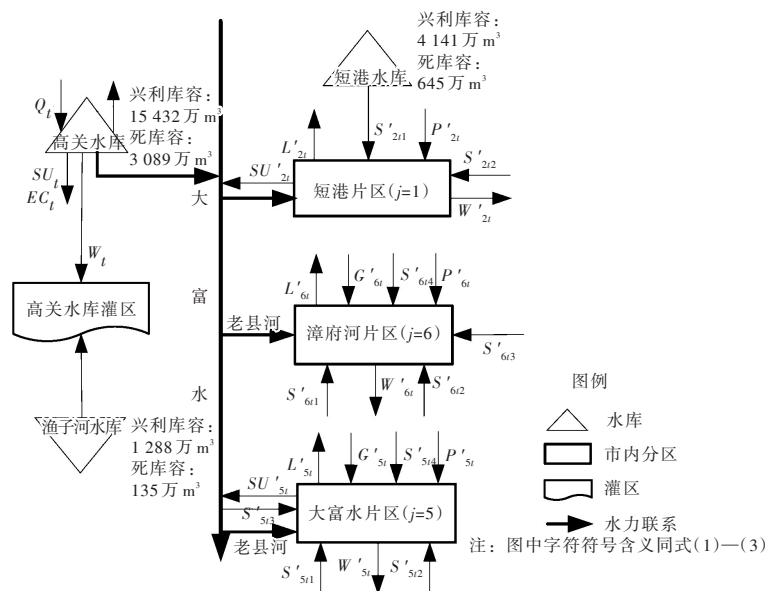


图2 高关水库灌区和应城市三片区概化图

表2 交易价格、交易水量以及交易双方净效益

年份	典型年	高关水库灌区 可交易水量 $x_k$ /万 $\text{m}^3$	应城市三片区 水资源价值 $C$ / (元/ $\text{m}^3$ )	高关水库灌 区水资源价 值 $V$ /(元/ $\text{m}^3$ )	实际交易水量 $x^*$ /万 $\text{m}^3$	成交价 格 $p$ /(元/ $\text{m}^3$ )	应城市三片 区交易净收 益/万元	高关水库灌 区交易净收 益/万元
2013(现状)	50%	10290.47	3.17	0.72	3744.78	1.95	1547.87	3535.78
	75%	6713.97	3.17	0.72	1225.28	1.95	506.79	1156.89
	85%	570.14	3.17	0.72	213.65	1.95	88.37	201.73
	90%	0.00	3.17	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00
2020(近期)	50%	11061.99	7.68	0.97	4743.51	4.32	11077.58	13922.41
	75%	7777.40	7.68	0.97	2805.02	4.32	6550.60	8232.85
	85%	1793.39	7.68	0.97	686.95	4.32	1604.23	2016.22
	90%	0.00	7.68	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00
2030(远景)	50%	12155.11	27.02	1.45	5829.13	14.23	131669.00	70541.97
	75%	9484.87	27.02	1.45	4180.79	14.23	94435.97	50594.29
	85%	3697.77	27.02	1.45	1570.17	14.23	35467.07	19001.56
	90%	0.00	27.02	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00

由表1和表2知, 2011年以来, 应城市GDP总产值一直以12.5 %的速度增长, 水资源利用率提高, 用水边际效益增长较快, 2013年、2020年和2030年应城市水资源真实价值为3.17元/ $\text{m}^3$ 、7.68元/ $\text{m}^3$ 和27.02元/ $\text{m}^3$ (表2), 高于该市现行水价1.50元/ $\text{m}^3$ 。而高关水库灌区经济结构相对单一, 农业比重大, 经济落后, 2013年、2020年和2030年的水资源真实价值仅为0.72元/ $\text{m}^3$ 、0.97元/ $\text{m}^3$ 和1.45元/ $\text{m}^3$ , 高关水库灌区的用水边际效益明显低于应城市。

2013年50 %平水年双方交易价格为1.95元/ $\text{m}^3$ , 交易水量为3 744.78万  $\text{m}^3$ , 应城市三片区产生最大净收益1 547.87万元, 高关水库灌区产生最大净收益3 535.78万元, 市场总增加值为5 083.65万元, 实现了交易系统收益最优。2020年50 %平水年双方交易价格为4.32元/ $\text{m}^3$ , 交易水量为4 743.51万  $\text{m}^3$ ,

应城市三片区净收益为 11 077.58 万元，高关水库灌区净收益为 13 922.41 万元，市场总增加值为 24 999.99 万元。2030 年 50%平水年双方交易价格为 14.23 元/m<sup>3</sup>，交易水量为 5 829.13 万 m<sup>3</sup>，应城市三片区净收益为 131 669.00 万元，高关水库灌区净收益为 70 541.97 万元，市场总增加值为 202 210.97 万元。

相同典型年下，2030 年的交易水量远高于现状年 2013 年的交易水量。说明应城市三片区经济发展，需水量增加，尤其工业需水量快速增加，区域供水不能满足自身需水，缺水严重；而高关水库灌区节水农业的推广和灌溉水利用系数的提高，灌溉需水量减少，高关水库可交易水量增加。

表 3 应城市三片区交易前后缺水量及缺水率对比

年份	典型年	交易前需水量/万 m <sup>3</sup>	交易前缺水量/万 m <sup>3</sup>	交易前缺水率/%	交易量/万 m <sup>3</sup>	交易后缺水量/万 m <sup>3</sup>	交易后缺水率/%
2013(现状)	50%	29136.24	3744.78	12.85	3744.78	0.00	0.00
	75%	30809.17	7140.47	23.18	1225.28	5915.20	19.20
	85%	32994.60	15001.18	45.47	213.65	14787.53	44.82
	90%	32880.79	16646.09	50.63	0.00	16646.09	50.63
2020(近期)	50%	32383.17	4827.42	14.91	4743.51	83.90	0.26
	75%	33983.18	8350.87	24.57	2805.02	5545.85	16.32
	85%	36128.05	16423.09	45.46	686.95	15736.14	43.56
	90%	35989.71	18739.37	52.07	0.00	18739.37	52.07
2030(远景)	50%	36216.44	5829.13	16.10	5829.13	0.00	0.00
	75%	37999.41	9587.64	25.23	4180.79	5406.85	14.23
	85%	39957.74	18194.55	45.53	1570.17	16624.38	41.60
	90%	40002.86	21529.95	53.82	0.00	21529.95	53.82

由表 3 缺水量和缺水率知，2013 年、2020 年和 2030 年 50%平水年进行的水量使用权交易可以有效缓解应城市三片区的缺水情况，交易后缺水量大幅度减少，交易后缺水率为 0，实现了供需平衡，说明每个旬时段高关水库可交易水量充足，能够解决应城市缺水问题；75 %和 85 %干旱年交易后缺水量分别为 5 406.85 万 m<sup>3</sup> ~ 5 915.20 万 m<sup>3</sup>，14 787.53 万 m<sup>3</sup> ~ 16 624.38 万 m<sup>3</sup>；缺水率分别从 23.18 % ~ 25.13 %、45.46 % ~ 45.53 %，降为 14.23 % ~ 19.20 %、41.60 % ~ 44.82 %。虽然高关水库灌区可交易水量富余，但是应城市三片区缺水率降低并不明显，这是因为在某些时段高关水库可交易水量远小于应城市三片区在该时段的缺水量而使应城市三片区缺水率没有得到充分满足；90 %特旱年高关水库灌区已不能满足自身用水要求，不具备交易条件。若要全面解决应城市干旱年供水问题，则需要解决应城市自身供水工程中的薄弱环节，加大后备水源建设与节水力度，充分挖掘当地节水潜力。

6 结论

(1)基于保障灌区粮食生产用水与城乡供水安全条件，考虑买卖双方效益最大化需求，根据供求关系和 C-D 生产函数来估算交易双方水资源真实价值，建立了以交易双方各自收益最大化为目标，以纳什均衡价格和供需水量为约束的水量使用权交易模型，提出了水资源分区供需分析与买卖双方最优均衡结合的求解方法。

(2)以湖北省高关水库灌区与应城市水量使用权交易为例，分析确定了交易范围，计算了 2013 年、2020 年、2030 年平水年 50 %、干旱年 75 %、85 %和特旱年 90 %条件下的交易价格、交易水量以及交易收益，为建立水权交易机制试点提供了科学依据。

(3)水量使用权交易涉及水市场发育状况，交易水量、时间、价格等受气候、经济、社会诸多因

素影响, 存在不确定性。需要深入探讨这些不确定性影响程度, 建立城乡水权交易中灌溉节水投入补偿机制。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] ROSEGRANT, MARK W, RENATO G S. Tradable water rights: experiences in reforming water allocation policy [M]. Mexico: Chile, 1994.
- [ 2 ] SOPHIE T, SYLVIE M, PATRICK R, et al. A bargaining model to simulate negotiations between water users [J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2001, 4(2): 189-210.
- [ 3 ] SALETH R M, BRADEN J B, EHEART J W. Bargaining rules for a thin spot water market[J]. Land Economics, 1991, 67(3): 326-339.
- [ 4 ] WONG B D C, EHERART J W. Market simulations for irrigation water rights: a hypothetical case study[J]. Water Resource, 1983, 19(5): 1127-1138.
- [ 5 ] NARAYANAN R, BELADI H, HANSEN R D, et al. Feasibility of seasonal water pricing considering metering costs[J]. Water Resources Research, 1987, 23(6): 1091-1099.
- [ 6 ] 李海红, 王光谦. 水权交易机理分析[J]. 水力发电学报, 2005, 24(4): 104-109.
- [ 7 ] 冯文琦, 纪昌明. 水资源优化配置中的市场交易博弈模型[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(11): 83-85.
- [ 8 ] 罗慧, 李良序, 王梅华, 等. 水权准市场交易模型及市场均衡分析[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 492-498.
- [ 9 ] 张晓军, 侯汉坡. 基于跨行业水权交易的北京市水资源优化配置研究[J]. 首都经济贸易大学学报, 2010, 7(3): 68-73.
- [ 10 ] 戴天晟, 顾宝炎, 赵文会. 基于纳什均衡理论的水权交易问题分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(1): 132-134.
- [ 11 ] 吴丽, 周慧成. 基于合作博弈的水权交易模型研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 53-58.
- [ 12 ] 陈洪转, 羊震, 杨向辉. 我国水权交易博弈定价决策机理[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1407-1410.
- [ 13 ] 李长杰, 王先甲, 范文涛, 等. 水市场双边叫价贝叶斯博弈模型及机制设计研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(4): 465-469.
- [ 14 ] 王庆, 王先甲. 基于博弈论的水权交易市场研究[J]. 水利经济, 2006, 24(1): 16-18, 81.
- [ 15 ] 胡晓寒, 纪昌明, 王丽萍. 基于优化和博弈理论的农业用户间水权交易分析[J]. 水利学报, 2011, 41(5): 608-612.
- [ 16 ] 吕素冰, 张亮, 王文川, 等. 河南省水资源利用演变及边际效益分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(9): 28-32.
- [ 17 ] 王学仁. 城市水资源经济需求量的预测和供水效益的探讨[J]. 自然资源研究, 1987, 3(2): 45-52.
- [ 18 ] 邵东国, 贺新春, 黄显峰, 等. 基于净效益最大的水资源优化配置模型与方法[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1050-1056.
- [ 19 ] 方必和, 何雪梅. 基于供求理论的区域水价模型[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2004, 27(2): 187-190.
- [ 20 ] 汪党献. 水资源需求分析理论与方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2002.
- [ 21 ] 于振亮. 辽宁省水资源利用边际效益的估算与时空差异分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2010.
- [ 22 ] 龙爱华, 徐中民, 张志强, 等. 基于边际效益的水资源空间动态优化配置研究——以黑河流域张掖地区为例[J]. 冰川冻土, 2002, 24(4): 407-413.
- [ 23 ] 蒋剑勇. 水资源价值模型综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(1): 61-63, 70.
- [ 24 ] 姜文来. 水资源价值模型研究[J]. 资源科学, 1998, 20(1): 37-45.
- [ 25 ] 唐增, 徐中民. 水价的经济学分析[J]. 中国农村水利水电, 2009, 3(11): 130-132, 134.
- [ 26 ] 邓红兵, 刘天星, 熊晓波, 等. 基于生产函数的中国水资源利用效率探讨[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(5): 16-18, 44.
- [ 27 ] 李可柏. 基于 Logistic 和 C-D 函数的城市生活用水动态优化及仿真[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(2): 178-183.



## Water use right trading model of irrigation area based on supply-demand relation and production function

SHAO Dongguo, WU Zhen, GU Wenquan, CHEN Shu

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** As market plays an increasingly important role in the allocation of resources, water right trading is imperative to optimize the allocation of water resources, improve the efficiency of water use and promote water saving, which has been an important part of the pilot construction of the most stringent water resources management system in China. In this paper, water resources system analysis and economic theory are used and water use right trading model of irrigation area is established on the base of supply-demand relation and the production function. In the model, the maximized transaction income of transactors is taken as the goal and the value of the respective water is determined by C-D production function and the supply-demand relation, and Nash equilibrium price and water quantity are bound to determine the transaction volume and transaction income. This model is applied to water use right trading between Gaoguan reservoir irrigation area and Yingcheng city in Hubei province. The results show that with the depth of water saving in Gaoguan reservoir irrigation area, transaction volume is maximal under 50% conditions of current year 2013, planning year 2020 and 2030, which are 37.447 million cubic metres, 47.44 million cubic metres, 58.29 million cubic metres, respectively; trading amount of dry year of 75% and 85% are reduced among 12.25 million cubic metres to 41.81 million cubic metres, and 2.14 million cubic metres to 15.70 million cubic metres, respectively; conditions of water use right trading are lacked in special drought year of 90%. Water use right trading can not only ease the level of water shortage significantly under 50% conditions of current year 2013, planning year 2020 and 2030 in Yingcheng city and make water shortage rate decreased, but also improve net benefit of Gaoguan reservoir irrigation area by 2.02 million yuan to 705.42 million yuan and improve net benefit of Yingcheng city by 0.88 million yuan to 1.32 billion yuan; but to fully solve the problem of water supply in Yingcheng city for drought year, it is necessary to establish water saving capacity trading income compensation investment mechanism of water saving in irrigation district, mobilize the enthusiasm of water conservation and fully tap the local water saving potential. It is of great significance to establish and improve the water right trading mechanism and the most stringent water management system, improve the utilization efficiency of water resources, guide water saving society construction in China, ensure the safety of urban and rural water supply.

**Keywords:** irrigation area; water use right; transaction model; production function; supply and demand relations

(责任编辑: 祁 伟)