

水市场的博弈分析

孔珂, 解建仓, 岳新利, 陈鸿起

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 本文应用博弈论研究了水资源管理部门如何利用初始水权分配和水资源费对水市场进行有效的宏观调控, 以实现水资源的优化配置。分析了市场经济条件下以水权和水市场为基础的水资源配置的过程。根据用水者在水市场上的行为特征, 建立了以水资源总效益最大化为目标的两阶段动态博弈模型。给出了求解子博弈精炼纳什均衡条件下市场参与者的行动策略方法, 从而得出管理机构相应的最优初始水权分配方案和水资源费率方案, 并用算例阐明了建模的思路与方法。

关键词: 水权; 水市场; 分配; 动态博弈; 纳什均衡

中图分类号: F407.9 **文献标识码:** A

我国是一个水资源短缺的国家, 人均水资源占有量约为世界人均占有量的1/4。水资源的供需矛盾, 已经成为制约我国社会经济发展的重要因素, 这就对水资源的优化配置提出更高的要求。在以往计划经济体制下, 我国一直采用行政命令配置水资源, 这种方式有一定的作用, 并且直到现在也是一种必不可少的手段。然而, 在市场经济体制下, 应当发挥经济手段的调节作用, 通过建立以水权制度为基础的水市场, 发挥市场功能, 优化资源配置, 实现水资源的可持续利用。

1 水市场与水权分配

1.1 水市场的作用与宏观调控的必要性 在计划经济体制下, 虽然从理论角度讲, 管理者可以制定“最优”的资源配置方案, 并依靠行政的权威推行, 但这种方式缺乏有效的激励, 用水者没有节约用水的内在动力, 大家争相引水, 水资源浪费严重, 供需矛盾加剧。市场经济条件下, 水权和水市场是水资源管理的重要手段。水权就是水资源的产权, 包括水的所有权和使用权^[1]。我国法律规定, 水资源的所有权属于国家, 单位和个人可以依法取得水的使用权。水资源作为一种稀缺经济资源, 同其它资源一样, 可以通过市场机制促进其优化配置。用水者依法获得的水权既可以自己使用, 也可以在水市场上有偿转让并获得收益, 目前水市场在我国还处于发展和完善之中。因为追求利益最大化是任何理性个体的必然行为, 所以水市场能为用水者提供内在的节水动力, 有效地克服单纯的行政手段在激励方面的不足, 提高资源的利用效率。一般情况下, 国家管理机构不直接干预水市场的交易行为, 只是规范和监督水市场的正常运转。但由于水资源具有不可替代性、再生性、随机性、多用途性、公益性以及流域性等, 所以水市场并不是完全的市场, 而是一个准市场, 离不开以流域统一管理为基础的宏观调控^[1]。

1.2 初始水权分配与水资源费 政府宏观调控的目的是在保证社会公平的基础上, 优化水资源的配置。分配初始水权和征收水资源费是两种重要的调控手段。水权是水市场的基础, 用水者只有合法地从国家获得明确的、有保证的初始水权, 水市场才能正常运行。这里的用水者是指从管理机关分配到水权的地

收稿日期: 2003-12-31

基金项目: 国家自然科学基金资助(50279041); 国家“863”计划研究资助项目(2002AA113150)

作者简介: 孔珂(1972-), 男, 山东德州人, 博士生, 研究方向为水资源系统工程。

区、单位或经济实体。需要指出的是,水资源有公益性,河道冲沙、生态保护、环境美化等社会公益事业都需要用水,在实际中,“社会公共”是缺位的,其利益诉求只能由国家委托管理机关来实现,所以管理机关要分配一定的公共水权以保证公益用水。

水资源是有偿使用的,除公益用水外,用水者要使用水资源就必须交纳水费。水费的构成不是单一的,按照文献[1]的提法,水费应包括三部分:水资源费(或叫水权费)、工程水费和环境水费。水资源费是用水者支付给国家的,属政府财政收入,具有税的性质,但目前没有以税的形式征收。工程水费和环境水费类似,都是由工程投入(供水工程和治污工程)引起的。目前水利工程投资主体是多元化的,只有政府作为投资主体的工程,管理机关才收取这部分费用。不同的工程,建设和运行费用不一样,政府的投资比例也不一样,所以,工程水费(环境水费)情况差异很大,不能一概而论。为简化起见,在后面的讨论中水费只以水资源费的形式出现。

初始水权分配和水资源费的核定与征收问题都是非常复杂的,无论在理论上还是在实践上都有待发展和完善。尤其是初始水权问题,我国在这方面的工作刚刚开展,2004年水利部开始在松辽流域大凌河进行初始水权分配的基础研究及试点工作。初始水权分配不仅涉及到流域水资源的合理评价、微观用水指标体系的确立、行政职能与程序、法律法规的配套完善等问题,还涉及到流域的民族、宗教、文化等方面。需要研究的问题非常多,本文这里研究的是管理机关如何利用初始水权分配和水资源费对水市场进行有效的宏观调控,促进水资源的优化配置。

管理机关分配初始水权和核定水资源费率的过程与用水者进行水权交易的过程是相互联系的前后两个阶段。由于管理机关不直接干预市场,用水者可在市场规则的约束下自主决策并自由地采取最大化自身利益的行动,所以,水资源的配置最终会达到怎样的状态,不仅取决于管理机关的最初决策,还要取决于市场的运行情况。管理机关的决策要想取得最优效果,就必须分析用水者可能采取的市场行为及其造成的市场后果,这类问题可采用博弈论的理论和方法来分析解决。

2 博弈理论与博弈分析

2.1 博弈论的基本理论 博弈论是研究决策主体的行为发生相互作用时如何决策以及这种决策的均衡问题的理论。一个博弈的最基本的要素是:局中人(player)、战略空间(strategy space)和支付结构(payoff structure)。如果博弈的局中人能够沟通谈判并且达成有约束力的协议,那么这种博弈被称为合作博弈,否则被称为非合作博弈。在市场经济中,后者比前者应用广泛,并且其理论在20世纪50年代纳什的几篇重要论文发表后获得了快速发展。纳什在文献[2]中提出并证明了非合作博弈中最基本、最重要的一种均衡:纳什均衡。若局中人的集合记作 A ,局中人的策略集记作 S ,支付记作 u ,一个 n 人博弈可记为: $G = \{A_1, A_2, \dots, A_n; S_1, S_2, \dots, S_1, \dots, S_n; u_1, u_2, \dots, u_1, \dots, u_n\}$ 。纳什均衡可定义为^[3]: 战略组合 $s^* = \{s_1^*, s_2^*, \dots, s_1^*, \dots, s_n^*\}$ 是一个纳什均衡,如果对于每个 i , s_i^* 是给定其他局中人选择 $s_{-i}^* = (s_1^*, s_2^*, \dots, s_{i-1}^*, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*)$ 的情况下第 i 个局中人的最优战略,即: $u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*), \forall s_i \in S_i, \forall i$ 。这时,任何一个局中人都无法通过单方面改变战略而获得更高的支付。

根据局中人行动的先后顺序,非合作博弈可分为战略博弈与动态博弈两种形式。局中人同时决策的博弈称为战略博弈,局中人按照一定顺序决策的博弈被称为动态博弈。动态博弈中,博弈被分为几个阶段进行,这种情况下,纳什均衡可以扩展为子博弈精炼纳什均衡^[4]。

博弈论在经济、政治、军事等领域得到了广泛应用,现已应用到水资源领域。近年来,我国一些学者在这方面进行了很多有益的研究,其中,傅春、胡振鹏^[5]用 n 人合作博弈的理论与方法来解决综合利用水利工程中公共部分的费用分摊问题,周玉玺^[6]等用长期合作博弈理论研究了农村小流域灌溉组织制度,肖江

文^[7]等建立了污水排放申报机制的不完全信息博弈模型,刘文强^[8]等利用博弈论对不同管理模式下水资源分配问题中用水冲突矛盾进行分析和解释等等。这些研究显示了博弈论在水资源领域的应用价值和前景。

2.2 水市场宏观调控的博弈分析 管理机构和用水者构成博弈的局中人集合。如前所述,管理机构的决策和用水者的水权交易是前后两个阶段。第1阶段管理机构先决策,第2阶段用水者后决策,所以这是一个动态博弈问题。

用水者的决策空间是直接引水量的多少和交易量的多少,其收益是直接引水收益、节水成本以及市场收益之和,他们是个体理性的,追求自身收益最大。管理机构的决策空间是水权分配方案和水资源费率的标准。虽然征收的水资源费是一种直接的财政收入,但是作为政府部门,管理机构不能单纯以水资源费为目标,其职责是在保证社会公平的基础上,优化水资源的配置。所谓公平就是确定合理的最低供水保证量,保证用水者和公益事业的基本用水。所谓优化水资源配置,从收益的角度看就是使水资源的社会总收益达到最优,而社会总收益应包括管理机构的直接收益、公共收益和所有用水者的收益三部分,所以管理机构的目标可以描述为在保证公平的基础上,争取这三者之和最大。

虽然管理者是在第1阶段决策,并且不能对第2阶段进行直接干预,但管理者可以预期到用水者在第2阶段必然会采取最大化自身利益的行为,从而在制定决策的时候采取相应的对策,进行有效的宏观调控。这个过程可以通过建立一个两阶段动态博弈模型进行分析研究,用水者在市场上的最终收益与水市场的价格有关,而水市场的价格又受供求关系的影响,建立博弈模型时必须将这点考虑在内。

3 水市场的博弈模型

3.1 模型的建立 设可供管理机构分配的总水量为 Q ,公共水权为 w ,水资源费率为 t , U_i 表示用水者,第 i

个用水者的初始水权为 r_i , ($\sum_{i=1}^n r_i + w = Q$)。若 U_i 实际需水量为 d_i ,直接取水量为 q_i , ($d_i \geq r_i, d_i \leq q_i$),其需

水差值 $d_i - q_i$ 可通过节约用水、提高用水效率等方式解决。当 $q_i > r_i$,即引水量大于水权时,多引的水量 $q_i - r_i$ 需在水权交易市场上购买;反之,当 $q_i < r_i$ 时,可在水市场上出售多余的水权。

虽然水市场不是完全竞争市场,但市场价格受供求关系影响的规律是不变的,水资源供不应求时,水价升高;供大于求时,价格下降。参照文献[3]中的库诺特模型,水市场的价格函数可以表示为:

$p(x) = a - bx$, ($a, b > 0$), 式中 x 为市场供需的差值,在这里 x 就是 $\sum_{j=1}^n (r_j - q_j)$, 所以, U_i 的收益 V_i 为

$$V_i = f_i(q_i) - q_i t - s_i(d_i - q_i) + (r_i - q_i) \cdot p\left(\sum_{j=1}^n (r_j - q_j)\right) \quad (1)$$

式中: $f_i(q_i)$ 为取水效益函数,并且 $f_i(0) = 0, f_i'(q_i) > 0$; $s_i(d_i - q_i)$ 为节水成本函数,并且 $s_i(0) = 0, s_i'(d_i - q_i) > 0$ 。

将 $p(x) = a - bx$ 代入式(1),可得

$$V_i = f_i(q_i) - s_i(d_i - q_i) - q_i t + a \cdot (r_i - q_i) - b \cdot (r_i - q_i) \cdot \left(\sum_{j=1}^n (r_j - q_j) \right) \quad (2)$$

管理机构征收的水资源费和公共收益可一起表示为 V_0

$$V_0 = g(w) + t \sum_{i=1}^n q_i \quad (3)$$

式中： $g(w)$ 为公共用水效益函数，并且 $g(0)=0, g(w)>0$ 。

社会总收益 V_T 为： $V_T = V_0 + \sum_{i=1}^n V_i$ ，将式(2)、式(3)代入得

$$V_T = g(w) + \sum_{i=1}^n \left[f_i(q_i) - s_i(d_i - q_i) + a \cdot (r_i - q_i) - b \cdot \left(\sum_{j=1}^n (r_j - q_j) \right) \cdot (r_i - q_i) \right] \quad (4)$$

管理机构的目标是使 V_T 最大，考虑水权分配的下限，可建立下面的优化模型目标函数： $Z = \max V_T$

$$\text{约束条件：} r_i \geq m_i, m_i > 0; w \leq n, n > 0; t > 0; \sum_{i=1}^n r_i + w = Q \quad (5)$$

式中： m_i 为用水者 i 的最低供水保证； n 是流域最小生态需水量。

3.2 模型的求解 上文已经分析了水资源配置过程是一个两阶段的动态博弈。在动态博弈中，子博弈精炼纳什均衡是对纳什均衡的改进，它不仅是原博弈的纳什均衡，而且在每个子博弈上都达到纳什均衡。因此子博弈精炼纳什均衡的求解可通过逆向归纳法从最后一个子博弈的纳什均衡开始。

先考虑第2阶段，对于 U_i ，在其他人的取水量为 $q_j, (j \neq i)$ 时，其必然采取使自身收益最大的取水决策 q_i^*, q_i^* 满足： $\partial V_i / \partial q_i^* = 0$ 。将式(2)代入，整理得

$$f_i'(q_i^*) + s_i(d_i - q_i^*) - a - t + b \cdot [2 \cdot (r_i - q_i^*) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (r_j - q_j)] = 0 \quad (6)$$

根据纳什均衡的原理，在均衡状态下，所有用水者的取水决策 $q_i^* (i=1, \dots, n)$ 都要满足式(6)，所以可以得到方程组：

$$f_i'(q_i^*) + s_i(d_i - q_i^*) - a - t + b \cdot [r_i - q_i^* + \sum_{j=1}^n (r_j - q_j^*)] = 0 \quad (7)$$

由式(7)求出决策向量 $Q^* = (q_1^*(R, t), q_2^*(R, t), \dots, q_n^*(R, t))$ ，其中 $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ 。

回到阶段一，因为当 R, t 确定后，用水者的决策向量为 Q^* ，将其代入式(4)，得：

$$V_i = g(w) + \sum_{i=1}^n \left(f_i(q_i^*(R)) - s_i(d_i - q_i^*(R)) + a \cdot (r_i - q_i^*(R)) - b \cdot \left(\sum_{j=1}^n (r_j - q_j^*(R)) \right) \cdot (r_i - q_i^*(R)) \right) \quad (8)$$

将式(8)代入优化模型式(5)的目标函数,解此约束极值问题,可以求出: w^* , $R^* = (r_1^*, r_2^*, \dots, r_n^*)$, t^* , $Q^* = (q_1^*, q_2^*, \dots, q_n^*)$,从而计算出收益 V_i 和 V_T 。

3.3 模型分析 博弈模型的应用前提是水市场正常运转,水价取决于市场供求关系,并且用水者能自由交易。除非遇到自然灾害或者其他社会政治原因,在一般情况下这个前提是能够满足的。模型还假定公共用水效益函数、用水者的取水效益函数和节水成本函数都存在且可导,而且是所有局中人都了解的共同知识。另外,分析式(1)~式(8),还可以看出:(1)如果优化模型式(5)有解,就表示管理机构调控下的市场机制能较好地解决水资源配置问题。如果没有解,其主要原因是供需差距太大或用水者的节水成本太高。在这种情况下,管理机构应当致力于帮助用水者提高用水效率,增强节水能力,同时适当考虑跨流域的调水。(2)水资源费 t 既存在于用水者收益表达式(2)中,又存在于个体决策的表达式(6)中,这说明水资源费对用水者的取水行为有影响,能调节用水者的取水量。(3)从表面上看,水资源费 t 在表达式(4)中被消去了,从而对总收益没有影响,仅仅是用水者同政府之间的一种转移支付而已。但是通过观察会发现,水资源费 t 存在于个体决策向量 Q 中,从而隐含于总收益的计算式(8)中,这说明水资源费是通过影响个体的决策来影响社会总收益的,具体的影响程度取决于收益函数 $f(q)$ 、成本函数 $s(d-q)$ 以及价格函数 $p(x)$ 的具体形式和分析性质。所以,水资源费是一种既能调控用水者的取水行为,又能影响社会总收益的宏观调控措施。进一步讲,通过政府的转移支付,水资源费可用于帮助落后地区提高用水效率、增强节水能力或者改善产业结构等等,也就是通过改善 $f_i(q_i)$ 和 $s_i(d_i - q_i)$,起到提高 V_i 的作用。

3.4 算例 假设某一小流域可供管理机构分配的总水量为88亿 m^3 ,流域内有两个用水者,用水者一和用水者二,需水量分别为40亿 m^3 和50亿 m^3 。用水者一的取水效益函数和节水成本函数为: $f_1(q_1) = 0.6q_1$; $s_1(d_1 - q_1) = 0.4(d_1 - q_1)^2$ 。用水者二的取水效益函数和节水成本函数为: $f_2(q_2) = 0.7q_2$; $s_2(d_2 - q_2) = 0.5(d_2 - q_2)^2$ 。公共效益函数为: $g(w) = 0.5w$ 。水资源费率为 t (单位:元/ m^3),水市场价格函数为: $p = 0.8 - 0.01x$ 。用水者水权下限和公共水权下限为: $r_1 = 35, r_2 = 45, w = 5$,将以上数值和表达式代入式(2)~式(5),整理得: $V_1 = 0.6q_1 - 0.4 \cdot (40 - q_1)^2 - tq_1 + 0.8(r_1 - q_1) - 0.01 \cdot (r_1 - q_1)(r_1 + r_2 - q_1 - q_2)$, $V_2 = 0.7q_2 - 0.5 \cdot (50 - q_2)^2 - tq_2 + 0.8(r_2 - q_2) - 0.01 \cdot (r_2 - q_2)(r_1 + r_2 - q_1 - q_2)$, $V_T = 0.5w + t(q_1 + q_2) + V_1 + V_2$ 。优化模型的目标函数: $Z = \max V_T$;优化模型的约束条件: $r_1 = 35; r_2 = 45; t > 0; w = 5; r_1 + r_2 + w = 88$ 。按照3.2中的方法求解,计算结果为: $r_1 = 37.1$ 亿 $m^3, r_2 = 45.1$ 亿 $m^3, w = 5.8$ 亿 $m^3, t = 0.02$ 元/ $m^3, q_1 = 39.7$ 亿 $m^3, q_2 = 42.3$ 亿 $m^3, V_T = 25.85$ 亿元。

4 结论与展望

市场经济条件下,管理机构可以利用初始水权分配和水资源费等手段对水市场进行有效地宏观调控,促进水资源的优化配置。本研究仍有许多问题有待进一步探讨:(1)模型中使用的收益函数、成本函数、价格函数,都是根据水资源的特性和经济学原理得出的,仅具备理论上可行性,在算例中更是使用了非常简单的形式。事实上,由于水资源问题的特殊性和实际情况的复杂性,要得到这些函数的具体形式不仅需要深入的理论分析,还需要大量的实际数据支持,目前还没有能被普遍接受的成果。(2)在算例中通过模型计算得出了水资源配置方案,但是在实际中,方案能够实施的前提是节约下来的水能够在水市场上销售。为了保证水权交易的顺利实施,尤其是大范围、甚至跨流域的水权交易的顺利实施,还要有相应的配套措施作保障。(3)本模型是非合作一次博弈模型,其实,流域水资源分配有长期合作博弈特性。因为同一流域的用水者集体是相对稳定的,水权交易年年都进行,如果政策保持稳定的话,可以看成是一个无限重复

博弈。因为这种博弈有合作的性质，所以用无限重复博弈模型求出的解一般会优于本模型的解，这也是一个有待探讨的问题。

参考文献：

- [1] 汪恕诚 水权和水市场——谈实现水资源优化配置的经济手段[J]. 中国水利, 2000, (11): 6-9.
- [2] Nash J F. Non-cooperative Games [J]. Annals of Mathematics, 1951, 54(2): 286-295.
- [3] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海: 上海三联书店, 1996.
- [4] Selten R. Spiel theoretische Behandlung eines Oligopolmodells mit Nachfrageträgheit[J]. Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft, 1965, (12): 301-324.
- [5] 傅春, 胡振鹏. 一种综合利用水利工程费用分摊的对策方法[J]. 水利学报, 2000, (4): 57-63.
- [6] 周玉玺, 等. 基于长期合作博弈的农村小流域灌溉组织制度研究[J]. 水利发展研究, 2002, (5): 9-12.
- [7] 肖江文, 罗云峰, 等. 排污申报机制的博弈分析[J]. 系统工程理论与实践, 2002, (11): 23-27.
- [8] 刘文强, 等. 水资源分配冲突的博弈分析[J]. 系统工程理论与实践, 2002, (1): 16-25.

Game analysis of water resources market

KONG Ke, XIE Jian-cang, YUE Xin-li, CHEN Hong-qi
(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The games theory is applied to analyze the effectiveness of government organization in macroscopically controlling the water market in order to optimize the water resources allocation by utilizing the initial water rights allocation and water resources rate. The procedure of water resources deploment based on water rights and water market under the condition of market-oriental economy is analyzed. A two-stage dynamic game model regarding the most optimal income as the target is established according to the behavior characteristics of water users. The method for solving the market behavior strategies of water users in case of sub-game perfect Nash equilibrium is studied. On this basis, the optimal scheme of initial water rights allocation and water resources rate can be deduced consequently. An example is given to illustrate the idea of constructing and solving the model.

Key words: water rights; water resources market; allocation; dynamic game; Nash equilibrium