

需求变动下南水北调东线水资源供应链多级协调决策模型

张玲玲¹,王慧敏¹,王宗志²

(1.河海大学商学院,江苏 南京 210098;2.南京水利科学研究院水文水资源所,江苏 南京 210024)

摘要 :从水资源、管理学和经济学的角度对南水北调东线水资源供应链主链节点湖泊到各供水企业这一决策链设计了 Pareto 最优决策模型——多级价格协调因子确定模型,采用通用的遗传算法优化决策结构中的各个参数.理论分析和实例验证结果表明,该模型适用于研究南水北调工程正常运行中的多级协调问题,具有一定的理论依据和实用价值.

关键词 水资源配置 ;供应链 ;不确定需求 ;遗传算法

中图分类号 :TV212.3 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2005)06-0616-04

1 南水北调东线水资源供应链契约的多级协调

南水北调东线水资源系统是一个多流域、多水源、多目标的复杂水资源大系统,供水、防洪、排涝、航运并举,涉及 5 个省市和众多用水部门利益^[1].

所谓供应链契约(协调机制)就是指通过提供合适的信息和激励措施,保证买卖双方协调,优化销售渠道绩效的有关条款,即使供应链达不到最好的协调,也可能存在帕累托(Pareto)最优解,以保证每一方的利益优于原来水平^[2].缺乏协调的供应链中容易导致双重边际化效应^[3]、牛鞭效应^[4]等低效率行为,因此如何协调供应链中买卖双方的行为是供应链契约管理的重要内容.

文献[5]研究了供应链终端供水企业和用水户的单级协调因子确定,本文将研究在需求具有季节性的前提条件下,南水北调水资源供应链上节点成员间的协调问题.例如,以东平湖为本节点湖泊,研究南四湖、东平湖及以东平湖为取水源的供水企业间的多级协调问题(图 1).该供应链的决策结构分为两部分:(a)东平湖为了保障枯水期的供水保证率,根据枯水期和丰水期,于丰水期末向上级节点湖泊南四湖进行大批量的订水,同时考虑到供水企业的需求信息、库存成本及安全库存,东平湖对从本节点取水的供水企业进行协调,并将部分库存成本转移至供水企业;(b)依据上述原理,上级节点湖泊南四湖提前把丰水期的水转移到东平湖,两者也要进行协调.可见,协调因子的确定在南水北调水资源供应链的运行中起着至关重要的作用.

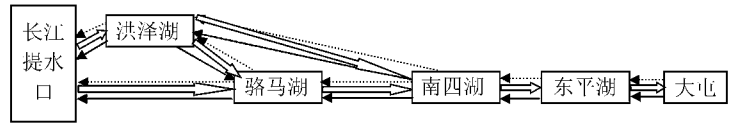


图 1 南水北调东线供应链主链结构

Fig.1 Structure of main supply chain of east route of South-to-North Water Transfer Project

2 模型建立背景分析

在水量需求不确定性的情况下(枯水期和丰水期),为确保供水的保证率,协调主链各个主体的成本和利润,本文在保障供水保证率的情况下,从价格角度以各个节点利润为评价目标函数,确定各个节点的协调因子.

本文研究具有不确定性的季节性需求下供应链的多级协调问题.枯水期需求预测以季度为时间单位,枯

水期前后因为按照正常的定价和订水策略该模型中就不予考虑.以枯水期为第一季度 $T_2 \sim T_3$ (1~4 月),上级节点湖泊在 T_2 时刻对本节点实行价格协调策略,本节点考虑枯水期到来时供水保证率及合理的利润和成本,在 T_2 时刻根据预测需求信息采取批量订水,并对下级供水企业设计了价格协调策略.

季度高峰期需求选用历史数据,采用 AR(1) 模型,预测需求 D . 供求定价模型中需求对价格是敏感的,需求为价格的指数分布,即, $D = KP^{-E}$. 供需双方考虑价格协调时的需求量为

$$D_d = K(Pd_0)^{-E} = (KP^{-E}) d_0^{-E} \quad (1)$$

即 $D_d = Dd_0^{-E}$
式中: K ——常量; E ——季节需求因子, $E > 1$. 通常,普通商品的需求因子 $E > 1$,有限资源 $E < 1$ ^[5],本文中 $E > 1$,因为本文研究主链上节点湖泊到供水企业间的协调,并不考虑终端用水户(主链协调这一过程相当于研究对象是水的调度过程,不是将水作为有限资源供给终端用水户过程,上下级节点间水的需求——价格关系同普通商品),考虑终端用水户的情况见文献[6].

3 本节点湖泊与上级湖泊、供水企业间的利润模型

3.1 上级湖泊与本节点湖泊间的利润模型

在上级湖泊和本节点间不考虑价格协调因子条件下,本节点湖泊的季度利润模型如下:

$$TP_r^0 = (P' - P)D - h_r P \frac{Q}{2} - K_r \frac{D}{Q} \quad (2)$$

式中: TP_r^0 ——无价格协调时,本节点湖泊的季度利润; D ——季度需水量; P ——上级湖泊的批量供水价格; P' ——本节点企业的供水价格; Q ——无价格协调时,本节点季节高峰需求预测值下的经济订水量 EOQ ; h_r ——本节点湖泊的平均库存持有成本占单位批量价格的百分比; K_r ——每次订水的过程成本. $P' = (a \times \text{批量价格})$,所以在无协调因子、批量价格为 P 时,供给供水企业的价格 $P' = aP$ ($a \geq 1$),当上级对本节点实行协调策略时,本节点湖泊供水成本 P_d ,给供水企业的批量价格为 $P' = aP_d$ ($a \geq 1$),若不存在协调时仍按式(2)计算.

根据本节点湖泊预测的季节需求信息 D 确定季度经济订水量为

$$Q = \sqrt{2DK_r/(h_r P)} \quad (3)$$

假设上级湖泊对本节点湖泊实行价格协调因子 d 下的订水量在变为原订水量的 m 倍 ($m \geq 0$) 时,订水量将由 Q 变至 mQ .

本节点湖泊不对供水企业实行价格协调时的利润模型为

$$TP_r = (P' - Pd)D - h_r Pd \frac{mQ}{2} - K_r \frac{D}{mQ} \quad (4)$$

本节点湖泊对供水企业实行价格协调时的利润模型为

$$TP_r^d = (P'd_0 - Pd)D_d \frac{T_d - T_2}{3} + (P' - Pd)D \frac{T_3 - T_d}{3} - h_r Pd \frac{mQ - Dd}{2} \cdot \frac{T_3 - T_d}{3} - h_r Pd \frac{Dd}{2} \cdot \frac{T_d - T_2}{3} - K_r \frac{D_d(T_d - T_2) + D(T_3 - T_d)}{3mQ} \quad (5)$$

式中: d_0 ——本节点与供水企业间的价格协调因子; d ——上级和本节点企业间的价格协调因子; D_d ——价格协调策略下供水企业的季度需水量; TP_r ——有价格协调时,本节点湖泊的季度利润; TP_r^d ——本节点湖泊对供水企业实行协调策略时季度利润. 需求对价格是敏感的,即, $D_d = Dd_0^{-E}$.

本节点湖泊是理性人,必然追求 Pareto 最优,要求利润不减少. 当对供水企业无价格协调时,即在 $TP_r \geq TP_r^0$ 成立的条件下,上级湖泊和本节点湖泊考虑接受价格协调方案. 式(5)中,需水量是以季度为单位, $T_2 \sim T_3$ 是 3 个月,因此各个时间段除以 3,分别代表该时间段内的需求. 理性的本节点湖泊要求 $TP_r^d \geq TP_r$,即对供水企业实行协调时的利润大于无协调时的利润.

3.2 上级湖泊利润模型

一般来说,上级湖泊的生产批量应是本节点湖泊订水量的 n 倍 ($n > 1$),即 nmQ . 假定上级湖泊的供给满足本节点湖泊的需求,上级湖泊的平均流动库存为 $(n-1)Q/2$.

假设 $h_s = h_r P/C$ ^[7],上级湖泊的利润等于销售收入减去输水成本、库存持有成本和订水成本,则在无协

调时的上级湖泊利润模型为

$$TP_s^0 = (P - C)D - K_s \frac{D}{Q} - h_s C \frac{(n - 1)Q}{2} = (P - C)D - K_s \frac{D}{Q} - h_r P \frac{(n - 1)Q}{2} \tag{7}$$

式中： K_s ——上级湖泊每次接受本节点订水的过程成本； C ——上级湖泊的单件成本； h_s ——上级湖泊的平均库存持有成本占单位成本的百分比； TP_s^0 ——无价格协调时，上级湖泊的年利润。

在价格协调存在条件下水的批量价格为 P_d ，此时上级湖泊的利润模型为

$$TP_s = (P_d - C) \left(D \frac{T_3 - T_d}{3} + D_d \frac{T_d - T_2}{3} \right) - K_s \frac{D_d}{mQ} - h_s C \frac{(n - 1)mQ}{2}$$

整理得上级湖泊的年利润为

$$TP_s = (P_d - C) D \left(\frac{T_3 - T_d}{3} + d_0^{-E} \frac{T_d - T_2}{3} \right) - K_s \frac{D d_0^{-E}}{mQ} - h_r P \frac{(n - 1)mQ}{2} \tag{8}$$

由于本节点湖泊的经济订水量即为上级湖泊的销售水量，因此，需将式(1)和式(3)代入式(8)。上级湖泊对本节点湖泊实行价格协调时，也要使自己利润最大化，满足约束 $TP_s \geq TP_s^0$ 。

3.3 上级湖泊与本节点湖泊目标联合决策函数

本节点湖泊对供水企业实行价格协调策略是基于上级湖泊对其实行价格协调的信息，因此将目标函数设计为本节点湖泊利润最大化。将 $TP_r \geq TP_r^0$ ， $TP_r^d \geq TP_r$ ， $TP_s \geq TP_s^0$ 分别作为约束条件，且令： $A = PD$ ， $B = CD$ ， $E = K_r \frac{D}{Q}$ ， $F = h_r P \frac{Q}{2}$ ， $G = K_s \frac{D}{Q}$ 。整理后得到如下的优化模型及约束条件：

$$\begin{cases} \max_{d, d_0, m, n} f = A(ad_0 - d) \left(d_0^{-E} \frac{T_d - T_2}{3} + \frac{T_3 - T_d}{3} \right) - F \left(m - \frac{D d_0^{-E}}{Q} \right) \frac{T_3 - T_d}{3} - E \frac{d_0^{-E} (T_d - T_2) + T_3 - T_d}{3m} \\ \text{s.t.} \quad (1 - a)A + (1 - md)F + \left(1 - \frac{1}{m} \right)E \geq 0 \\ f \geq (a - d)A - mdF - \frac{E}{m} \\ TP_s = (Ad - B) \left(\frac{T_3 - T_d}{3} + d_0^{-E} \frac{T_d - T_2}{3} \right) - G \frac{d_0^{-E}}{m} - (n - 1)mF \geq A - B - G - (n - 1)F \end{cases} \tag{9}$$

为使本节点湖泊利润式(5)达到最大，可以在 $[0, 1]$ 区间内分别对 d 和 d_0 进行搜索求值，在 $[1, 10]$ 内对 m 进行搜索求值，(1, 4) 对 T_d 搜索求值，求出使式(5)达到最大和满足约束条件的 d^* ， d_0^* 和 m^* 作为供需双方的最优价格协调因子和最佳订水量。

4 基于遗传算法的协调因子决策模型的求解

模型的目标函数是使本节点湖泊企业在价格协调条件下取得最大利润。第一、第二个约束条件为本节点湖泊企业的 Pareto 最优约束条件，分别为接受上级湖泊协调因子和对供水企业实行价格协调策略时的利润大于不实行价格策略时的利润。第三个约束条件为上级湖泊的 Pareto 最优约束条件，即对本节点湖泊实行价格策略时的利润大于不实行时的利润。 d, d_0, m 和 n 为优化变量，它们和目标函数之间的关系是复杂的非线性关系，通常通过列表的方法表示为离散的数值间的关系。而用穷举法或动态规划方法求解则随着 d, d_0, m 和 n 分布区间的不确定性而导致计算量急剧增加，出现‘维数灾’问题，以致给求解带来巨大困难。基于此，在模型求解中，本文采用被广泛应用于组合优化、机器学习、自适应控制、多目标决策等诸多领域，对一些复杂 NP 问题往往能得到较好效果的遗传算法，它只要求优化问题可解没有其他严格的适用条件，它从问题的整体出发并行搜索获得全局最优解，因此，通过对优化变量可能区间搜索求解得到可能的协调因子，从管理学的角度实现供水保证率，从经济学的角度供需方设计‘双赢’的协调机制，实现了双方的 Pareto 最优。

南水北调东线工程正在建设中，案例中需求数据来源于干渠一节点湖泊的需水预测，用遗传算法求解该问题方便、有效。案例中遗传算法^[8]参数设置见表 1，群体规模为 300，计算结果见表 2。

表 1 参数设置

Table 1 List of parameters									
$D/10^3\text{m}^3$	$P/(\text{元}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/(\text{元}\cdot\text{m}^{-3})$	$K_r/(\text{万元}\cdot\text{次}^{-1})$	$K_s/(\text{万元}\cdot\text{次}^{-1})$	$h_r/\%$	$T_2/\text{月}$	$T_3/\text{月}$	E	a
11000	0.35	0.008	1.3	1.2	0.045	1	4	1.2	1.3

从以上结果可知,在南水北调水资源供应链运作管理中,需求具有相对的不确定性.上级节点湖泊对本节点在丰水期末实行价格协调策略,此时本节点对其供水企业也实行价格协调策略,且通过计算可知,在该种情况下所得利润高于不实行价格协调策略情况下的利润,实现各自的 Pareto 最优.用遗传算法全局寻优,求出最优价格协调因子、订水量和本节点对其供水时间的实行价格协调的时间,从而实现南水北调水资源的有效配置与效率.

5 结 语

本文研究的对象是南水北调东线水资源供应链主链上各节点及其下一级供水企业间的多级协调因子确定问题,由于水资源本身具有枯水期和丰水期,所以各节点及供水企业间具有需求季节性,即不确定性.价格协调是供应链沟通与协调机制的一种重要途径,在建立主链上级节点湖泊对本节点湖泊利润的协调因子模型和本节点对其供水企业协调因子模型中,以本节点湖泊利润最大化为目标函数,各方间的价格策略为约束条件,通过遗传算法搜索确定最优价格协调因子和订水量.在价格协调模型中,由于供需方的 Pareto 最优,有利于整条供应链的优化,从管理学和经济学角度实现供应链的效率,为南水北调供应链的协调和正常运行提供了理论依据,具有一定的实用价值.

参考文献：

[1] 刘国伟.关于中国南水北调的思考[J].水科学进展,2000,11(4):346—350.
[2] TSAY A A. Quantity flexibility contract and supplier – customer incentives[J]. Management Science,1999,45(10):1339—1358.
[3] SPENGLER J. Vertical integration and antitrust policy[J]. Journal of Political Economy,1950,58:347—352.
[4] LEE H L, PADMANABHAN V, WHANG S. The bullwhip effect in supply chains[J]. Sloan Management Review,1997,38:93—102.
[5] 张玲玲,张乃伟,王宗志. CAS 范式在南水北调东线水资源供应链管理中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004,32(6):703—706.
[6] 张玲玲,王慧敏,王宗志. 南水北调东线水资源供应链协调因子确定[J]. 中国管理科学专辑,2004,10(12):500—504.
[7] LEE H L, ROSENBLATT M J. A generalized quantity discount pricing model to increase the supplier’s profits[J]. Management Science, 1986,32(9):1177—1185.
[8] 金菊良,杨晓华.基于遗传算法的地下水位动态预测双线性模型[J].水科学进展,2001,12(3):361—366.

表 2 遗传算法中待求参数的计算结果

Table 2 Results of parameters in GA			
参数	初始搜索范围	最优取值	目标函数值
d	[0,1]	0.804 1	359 660.825 1
d_0	[0,1]	0.952 7	
n	[1,10]	3.071 2	
m	[1,10]	2.550 2	
T_d	(1,4)	2.158 9	

Multi-level cooperative decision-making model for water resources supply chain of east route of South-to-North Water Transfer Project under seasonal demand

ZHANG Ling-ling¹, WANG Hui-min¹, WANG Zong-zhi²
(1. Business School, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract :A Pareto optimization model—a multi-level price cooperative factor decision-making model was designed for the decision-making chain from the nodal lakes to each water supply enterprise on the main water supply chain of the South-to-North Water Transfer East Route Project from the angles of water resources, management and economy, and the conventional genetic algorithm was adopted to optimize each parameter of the structure. Theoretical analysis and case study show that the model is suitable for multi-level cooperative decision-making in normal operation of the South-to-North Water Transfer Project, and is of certain theoretical basis and practical value.

Key words :water resources allocation ; supply chain ; uncertain demand ; genetic algorithm