

控制与决策

Control and Decision

经济效益与水质提升双视角下南水北调水资源供应链契约协调

陈军飞, 张学友, 汪倩

引用本文:

陈军飞, 张学友, 汪倩. 经济效益与水质提升双视角下南水北调水资源供应链契约协调[J]. *控制与决策*, 2023, 38(3): 825–833.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1573>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[考虑消费者参考效应的双渠道乳制品供应链协调机制设计](#)

Coordination mechanism of dual channel supply chain in dairy products considering consumers' reference effect
控制与决策. 2022, 37(6): 1609–1620 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1706>

[考虑风险规避和谈判权力的农产品供应链绿色投资机制](#)

Green investment mechanism of agricultural supply chain considering risk aversion and bargaining power
控制与决策. 2022, 37(7): 1862–1872 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1671>

[BOPS模式下基于成本共担契约的供应链协调策略](#)

Coordination strategy for supply chain with a cost sharing contract under BOPS mode
控制与决策. 2022, 37(3): 690–700 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1263>

[信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调](#)

Coordination of closed supply chain under asymmetric information considering manufacturer's recycling behavior
控制与决策. 2021, 36(7): 1723–1731 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1657>

[损失厌恶下考虑参照利润效应的供应链决策模型](#)

Decision model of supply chain considering reference profit under loss aversion
控制与决策. 2020, 35(11): 2810–2816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0094>

经济效益与水质提升双视角下南水北调 水资源供应链契约协调

陈军飞^{1,2,3†}, 张学友^{1,2}, 汪倩^{1,2}

(1. 河海大学 商学院, 南京 211100; 2. 河海大学 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098;
3. 江苏长江保护与高质量发展研究基地, 南京 210098)

摘要: 南水北调工程是国家水网的重要组成部分, 为进一步发挥南水北调工程水资源优化配置能力, 确保优质南水供给, 推动后续运营管理工作有序开展, 助力国家水网建设, 结合博弈论与供应链理论, 从考虑经济效益和水质提升双目标视角, 探讨南水北调水资源供应链协调问题. 基于对南水北调水资源供应系统的概化及相关假设, 建立水资源供应链的市场需求函数、水质效用函数和水质提升成本函数, 分别构建包括集中决策、批发价格契约和收益共享-水质提升成本共担契约下的水资源供应链多目标模型并探讨相应的协调策略. 最后通过数值分析对结论进行验证. 研究表明, 水质效用与经济效益之间存在冲突, 批发价格契约无法实现供应链的协调, 而收益共享-水质提升成本共担契约可以实现水质效用目标的协调, 以及经济目标的帕累托改进.

关键词: 南水北调; 水资源供应链; 契约协调; 收益共享成本共担; 水质效用

中图分类号: TV9

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1573

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 陈军飞, 张学友, 汪倩. 经济效益与水质提升双视角下南水北调水资源供应链契约协调[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 825-833.

Contract coordination of water resources supply chain of south-to-north water diversion project from the perspective of economic benefits and water quality improvement

CHEN Jun-fei^{1,2,3†}, ZHANG Xue-you^{1,2}, WANG Qian^{1,2}

(1. Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Research Base of Yangtze Institute for Conservation and High-quality Development, Nanjing 210098, China)

Abstract: The south-to-north water diversion project is an important part of the national water network. In order to further give play to the optimal allocation capacity of water resources of the south-to-north water diversion project, ensure high-quality south water supply, promote the orderly development of follow-up operation and management, and help the construction of the national water network, based on game theory and supply chain theory, this paper discusses the coordination of the water resources supply chain of the south-to-north water transfer from the perspective of economic benefits and water quality improvement. Based on the generalization and relevant assumptions of the water resources supply system of the south-to-north water diversion project, the market demand function, water quality utility function and water quality improvement cost function of the water resources supply chain are established. The multi-objective models of the water resources supply chain under the centralized decision-making, wholesale price contract and revenue sharing water quality improvement cost sharing contract are constructed respectively, and the corresponding coordination strategies are discussed. Finally, the conclusion is verified by numerical analysis. The research shows that there is a conflict between water quality utility and economic benefits; wholesale price contract can not achieve the coordination of the supply chain; and revenue sharing-water quality improvement cost sharing contract can achieve the coordination of water quality benefit objectives and Pareto improvement of economic objectives.

Keywords: south-to-north water diversion project; water resources supply chain; contract coordination; benefit sharing and cost sharing; water quality utility

收稿日期: 2021-09-09; 录用日期: 2022-01-11.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0409000); 国家自然科学基金项目(42071278, 42001250).

责任编辑: 梁樑.

†通讯作者. E-mail: chenjunfei@hhu.edu.cn.

0 引言

南水北调工程作为我国一项规模宏大、影响十分深远的战略性调水工程,是国家水网的重要组成部分,主要解决我国北方地区,尤其是黄淮海流域的水资源短缺问题.南水北调工程正式通水以来,已累计调水超400亿 m^3 ,为保障上亿群众饮水安全,缓解华北地区地下水超采,推动我国生态、经济可持续发展做出了重要贡献^[1].能否调来干净的水是习近平总书记一直关心的问题:2020年11月,习总书记在视察南水北调东线时强调“一定要确保一江清水向北流”;2021年5月,习总书记在推进南水北调后续工程高质量发展座谈会上再次关注水质,强调“先治污后通水,先环保后用水,南水北调,成败在水质,水质好坏,关键在源头”.但南水北调工程具有公益性和经营性双重职能,在运营管理过程中涉及诸多利益主体,调水水质的提升更多的是响应国家政策要求,缺乏协调各利益主体关系以提升水质的运营管理机制.

目前,已有部分学者从供应链视角研究复杂的调水工程运营管理问题.Chen等^[2]将调水工程供应链协同管理模型界定为包含供应商和分销商等多方利益主体的协同机制.调水工程的运营需要在协调各方利益的基础上实现水资源的高效配置,这与供应链管理理论中的降本增效以及利益协商机制相契合,将南水北调工程看作一个注重环境效益和社会效益的多流域、多水源、多主体、多目标的复杂供应链系统具有重要的现实意义.学者们也针对南水北调工程水资源供应链进行了探讨.王慧敏等^[3]探讨了供应链管理理论应用于南水北调东线工程的可行性,指出供应链管理理论在水资源调度领域具有广泛的应用前景.朱九龙等^[4-6]将VMI理论与南水北调工程中水资源优化配置相结合,分析了调水工程水资源供应链的牛鞭效应,构建了信息不对称下的水资源供应链库存模型,并论证了供应链管理理论在调水工程中应用的有效性.

近年来,对于水资源供应链的研究逐渐从可行性分析层面转移到供应链优化层面,涉及利润分配、供应链定价和供应链整体效用的帕累托改进等各个方面.在利润分配方面,骆进仁等^[7]使用Shapely值法对调水工程水资源供应链上各主体利润进行分配,使合作博弈下的供应链总利润上升.在供应链定价方面,张莉等^[8]基于供应链思想构建了南水北调东线定价模型,并通过仿真验证了模型的有效性.在实现整体帕累托改进方面,学者多在构建Stackelberg博弈模型的基础上采用供应链契约实现优化协调,供应链契

约在物流^[9]、乳制品^[10]和绿色产品^[11]等领域应用广泛.有学者将契约思想应用于水资源供应链研究,陈志松等^[12-13]通过收益共享契约实现了调水工程供应链经济效益和社会效益的双目标优化;侯艳红等^[14]构建了最小订货承诺契约与灵活订货量契约,求解得出了最优调水策略;Du等^[15]通过对比批发价格契约、两部制定价契约和混合定价契约,得出了南水北调工程的最优定价和调水策略.

以往的研究大多从利润角度实现水资源供应链的改进,目前,尚未检索到同时考虑供应链经济效益与水质提升双目标优化情形的文献.实际调水工程中水质是不可忽视的重要因素,国务院发布的《南水北调工程供水管理条例》明确将水质保障作为重点内容;国家发展改革委等9部门发布的《建立市场化、多元化生态保护补偿机制行动计划》也提出,对优于水环境质量目标的水资源应予以横向补偿.在国内的实践中:山东省青岛市已设置水质基准,将水质指标纳入调水工程运营管理体系之中;江西省在对鄱阳湖水质改善的实践中鼓励各市县建立“成本共担,收益共享”的补偿机制;皖浙两省在推进新安江流域生态改善的过程中,基于“成本共担,利益共享”的共识,以断面水质为依据协商上下游承担的责任.因此,有必要进一步探讨经济效益与水质提升双目标的水资源供应链优化问题.

本文综合考虑南水北调工程水资源供应链各主体的博弈行为、水质提升和契约协调等问题,构建包含水质提升目标与经济效益目标的调水工程水资源供应链模型;分析水资源供应商水质关切水平对最优调水价格、水质效用和经济效益的影响;在结合国内实践的基础上,选择构建收益共享-水质提升成本共担契约模型以实现供应链协调.期望本文工作能为提升南水北调工程运营管理水平提供决策参考.

1 问题描述与模型说明

我国正在积极探索多元化市场化的生态补偿机制,生态补偿模式也逐渐从政府行政干预转为市场主体,政府宏观调控.供应链是一种有效的市场化手段,对促进我国生态补偿机制向市场化方向发展具有重要意义.本文结合南水北调工程运营情况将南水北调的水资源供应系统概化为一个水源区水资源供应商和一个受水区水资源分销商组成的两级水资源供应链系统,供应链结构如图1所示.在该系统中,将水源地调水公司概化为水资源供应商,将沿线省市水源公司和受水区供水公司概化为水资源分销商,受水区用户概化为消费者.水源区供应商以批发价格向

受水区调水,受水区分销商根据市场需求确定调水量,水源区供应商同时关注水质目标和利润目标,受水区分销商通过水资源优化配置实现经济效益最大化. 本文相关符号的含义描述如表1所示.

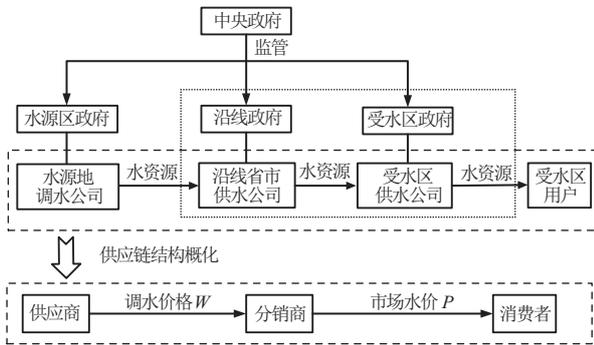


图1 调水工程供应链结构

表1 符号说明

符号	说明	符号	说明
α	基本市场需求	R	降水量
β	价格系数	P	市场水价
ϕ	降水量利用率	e	水质
u	水质系数	k	水质成本系数
π	利润	λ	水质关切水平

文中:下标SC、DC、CC分别表示集中决策、批发价格契约和收益共享-水质提升成本共担契约决策;上标S表示供应商,上标D表示分销商. 模型相关假设如下:

假设1 受水区水资源市场需求量受降水量、水质和水价因素影响,以水质类比绿色供应链中的绿色度^[16],并参考绿色产品市场需求函数的构建,水资源市场需求可用公式表示为 $D = \alpha - \beta P - \phi R + ue$,表示需求量随水价和降水量的上升而下降,随水质的提升而上升, $\alpha, \beta, \phi, u > 0$.

假设2 水源区水资源供应商根据国家规定需采取措施来保证调水工程水质,这会产生一定成本. 借鉴传统供应链管理中努力成本思想^[17-20]构建水质提升成本函数,则水源区提升水质需投入成本满足关系式 $C(e) = 0.5ke^2$, k 为水质成本系数且 $k > 0, C'(e) > 0, C''(e) > 0$. 表明水质越高,需投入成本越高且边际成本递增.

假设3 在碳排放领域^[21]和绿色供应链领域^[22]研究中,学者多采用单位产品绿色度与需求量的乘积来衡量环境效用,本文以单位水量水质与调水量的乘积来表示水质效用,函数表达式为 $h = (\alpha - \beta P - \phi R + ue)e$. 采用多目标优化理论中的线性加权法进行求解,用 λ 表示多目标函数中水质目标相对利润目标的权系数,并以此来衡量水源水资源供应商对水质

目标的关切水平. $0 \leq \lambda \leq 1$, λ 越大,表示供应商对水质目标越关切.

假设4 水源区水资源供应商和受水区水资源分销商构成Stackelberg博弈,供应商在博弈中处于领导地位且同时关注水质提升目标和经济效益目标.

假设5 水资源市场是出清的,调水量等于市场需求量,不考虑缺水成本和储水成本. 供应商单位水量调水成本为 C_1 ,分销商单位水量供水成本为 C_2 .

2 南水北调水资源供应链决策模型

2.1 集中决策模型

在集中决策时,水源区和受水区构成一个整体,以整体效用最大化进行决策. 水源区供应商的水质目标视为供应链整体的目标,供应链的总效用函数表达式为

$$U = (\alpha - \beta P - \phi R + ue)(P - C_1 - C_2 + \lambda e) - 0.5ke^2. \quad (1)$$

命题1 当满足条件 $2\beta k - u^2 - \beta^2 \lambda^2 - 2\beta u \lambda > 0$ 时, U 为关于 P 和 e 的凹函数,即效用函数存在最大值.

证明 U 对 P 和 e 求二阶偏导数以及二阶混合偏导数,代入二阶Hessian矩阵判定结果为

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial P^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial P \partial e} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial e \partial P} & \frac{\partial^2 U}{\partial e^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -2\beta & u - \beta \lambda \\ u - \beta \lambda & 2u\lambda - k \end{vmatrix} =$$

$$2\beta k - u^2 - \beta^2 \lambda^2 - 2\beta u \lambda > 0, \quad -2\beta < 0.$$

因此Hessian矩阵负定,总效用 U 是关于水价 P 和水质 e 的联合凹函数,存在最优解 P_{SC}^* 和 e_{SC}^* 使得效用函数达到最大值. □

为简化表达,设 $\Delta_1 = 2\beta k - u^2 - \beta^2 \lambda^2 - 2\beta u \lambda$,令 $\partial U / \partial P = 0, \partial U / \partial e = 0$,求得供应链总效用最大化时的水价、水质、供应链总利润与水质效用分别为

$$P_{SC}^* = [(-\beta \lambda + u)(\alpha \lambda - \phi \lambda R - C_1 u - C_2 u) - (\alpha + \beta C_1 + \beta C_2 - \phi R)(2\lambda u - k)] / \Delta_1, \quad (2)$$

$$e_{SC}^* = (\alpha \beta \lambda - \beta^2 C_1 \lambda - \beta^2 C_2 \lambda - \beta \phi \lambda R + \alpha u - \beta C_1 u - \beta C_2 u - \phi R u) / \Delta_1, \quad (3)$$

$$\pi_{SC} = k[\alpha - \beta(C_1 + C_2) - \phi R]^2 [-1.5\beta^2 \lambda^2 - 0.5u^2 + \beta(k - 2\lambda u)] / \Delta_1^2, \quad (4)$$

$$h_{SC} = \beta k[-\alpha + b(C_1 + C_2) + \phi R]^2 (\beta \lambda + u) / \Delta_1^2. \quad (5)$$

供应链总效用最大值为

$$U_{SC} = k[0.5\alpha^2 + 0.5\beta^2(C_1 + C_2)^2 + \beta \phi R(C_1 +$$

$$C_2) + 0.5\varphi^2 R^2 - \alpha(\beta C_1 + \beta C_2 + \varphi R)]/\Delta_1. \quad (6)$$

命题2 供应链总利润随着水资源供应商水质关切水平 λ 的提升而降低,水质随着水资源供应商水质关切水平的提升而提升.

证明 π_{SC} 与 e_{SC}^* 分别对 λ 求偏导数,有

$$\frac{\partial \pi_{SC}}{\partial \lambda} = 2k(\alpha - \beta C_1 - \beta C_2 - \varphi R)^2 [1.5\beta^4 \lambda^3 + 1.5\beta^2 \lambda u^2 + \beta^3 \lambda(k + 3\lambda u)](-2\beta k + \beta^2 \lambda + 2\beta \lambda u + u^2)^{-3} < 0,$$

$$\frac{\partial e_{SC}^*}{\partial \lambda} = \beta(\alpha - \beta C_1 - \beta C_2 - \varphi R)[\beta^2 \lambda^2 + u^2 + 2\beta(k + \lambda u)](-2\beta k + \beta^2 \lambda + 2\beta \lambda u + u^2)^{-2} > 0.$$

因此, π_{SC} 随着 λ 的增大而减小, e_{SC}^* 随着 λ 的增大而增大. \square

命题2说明,水质效用目标与利润目标之间存在一定冲突,若要提高水质效用,则需要牺牲一部分经济利润,因此,国家需要出台相关政策促进水源区水质达标.目前,我国正大力推行生态补偿政策,通过受水区政府对水源区政府进行转移支付来弥补水源区的经济与生态环境损失,以此激励水源区提升水质水平.

2.2 分散决策模型

2.2.1 批发价格契约

批发价格契约是一种最普遍的契约模式,在探讨供应链契约问题时通常作为参照基准.在批发价格契约下,水源区水资源供应商与受水区水资源分销商构成Stackelberg博弈,水源区水资源供应商为博弈的领导者.博弈过程为,水资源分销商首先根据市场需求确定其利润最大化时的市场价格,水资源供应商可根据市场价格来确定其效用最大化时的批发价格和水质.分销商利润 π_{DC}^D 、供应商利润 π_{DC}^S 、供应商总效用 U^S 分别为

$$\pi_{DC}^D = (\alpha - \beta P - \varphi R + ue)(P - C_2 - W), \quad (7)$$

$$\pi_{DC}^S = (\alpha - \beta P - \varphi R + ue)(W - C_1) - 0.5ke^2, \quad (8)$$

$$U^S =$$

$$(\alpha - \beta P - \varphi R + ue)(W - C_1 + \lambda e) - 0.5ke^2. \quad (9)$$

采用逆序求解法,求解过程为 π_{DC}^D 对 P 求偏导数,得到效用最大化时的市场价格反应函数

$$P = (\beta C_2 + \beta W + \alpha - \varphi R + ue)/(2\beta). \quad (10)$$

供应商可预测到分销商市场价格的反应函数,并以此制定自身效用最大化时的调水价格 W .将式(10)代入(9),得到新的效应函数表达式.与命题1证明方法相同,当满足条件 $4\beta k - u^2 - \beta^2 \lambda^2 - 2\beta u \lambda > 0$ 时,二阶Hessian矩阵

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial^2 U^S}{\partial W^2} & \frac{\partial^2 U^S}{\partial W \partial e} \\ \frac{\partial^2 U^S}{\partial e \partial W} & \frac{\partial^2 U^S}{\partial e^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\beta & \frac{u}{2} - \frac{\beta}{2} \lambda \\ \frac{u}{2} - \frac{\beta}{2} \lambda & u \lambda - k \end{vmatrix}$$

负定, U^S 为关于 W 和 e 的联合凹函数,即效用函数存在最大值,为简化表达,设定 $\Delta_2 = u^2 - 4\beta k + 2\beta \lambda u + \beta^2 \lambda^2$.令 $\partial U^S / \partial W = 0$, $\partial U^S / \partial e = 0$,求得批发价格契约下供应商效用最大化时的调水价格和水质分别为

$$W_{DC}^* = [2(\alpha + \beta C_1 - \beta C_2 - \varphi R)(u \lambda - k) - (u - \beta \lambda)(\alpha \lambda - C_1 u - \beta C_2 \lambda - \varphi R \lambda)]/\Delta_2, \quad (11)$$

$$e_{DC}^* = [\varphi R u + \beta^2(C_1 + C_2)\lambda - \alpha(u + \beta \lambda) + \beta(C_1 u + C_2 u + \varphi R \lambda)]/\Delta_2. \quad (12)$$

进一步求解,得到市场水价、水资源分销商利润、水资源供应商利润和水质效用如下:

$$P_{DC}^* = \{(C_1 + C_2)u^2 + \varphi R(3k - u \lambda) - b[(C_1 + C_2)(k - u \lambda) + \varphi R \lambda^2] - 3\alpha k + \alpha \lambda(u + \beta \lambda)\}/\Delta_2^2, \quad (13)$$

$$\pi_{DC}^D = k(-\alpha + \beta C_1 + \beta C_2 + \varphi R)[- \alpha \beta k + \beta^2(C_1 + C_2)k + \beta k \varphi R]/\Delta_2^2, \quad (14)$$

$$\pi_{DC}^S = \{-[\beta k(\beta C_1 + \beta C_2 + \varphi R)][2\alpha k + (\beta C_1 + \beta C_2 + \varphi R)(\beta \lambda^2 + u \lambda - 2k) - \alpha \lambda(u + \beta \lambda)] - 0.5k[\varphi R u + (\beta^2 \lambda + \beta u)(C_1 + C_2) - \alpha(u + \beta \lambda) + \varphi R \lambda]^2\}/\Delta_2^2, \quad (15)$$

$$h_{DC} = [\beta k(\beta C_1 + \beta C_2 + \varphi R)][(\varphi R - \alpha)(u + \beta \lambda) + (\beta^2 \lambda + \beta u)(C_1 + C_2)]/\Delta_2^2. \quad (16)$$

命题3 水资源供应商的利润随着水质关切水平 λ 的上升而下降,水资源分销商的利润随着水质关切水平的上升而上升.

证明 π_{DC}^D 和 π_{DC}^S 对 λ 求偏导数,有

$$\frac{\partial \pi_{DC}^D}{\partial \lambda} = 4\beta^2 k^2(-\alpha + \beta C_1 + \beta C_2 + \varphi R)^2(\beta \lambda +$$

$$k + u)(4\beta k - u^2 - \beta^2 \lambda^2 - 2\beta u \lambda)^{-3} > 0,$$

$$\frac{\partial \pi_{DC}^S}{\partial \lambda} = -\beta^2 \lambda k[-\alpha + \beta(C_1 + C_2) + \varphi R]^2(4\beta k +$$

$$3\beta^2l^2 + 6\beta\lambda u + 3u^2)(4\beta k - u^2 - \beta^2\lambda^2 - (1 - \theta)(\alpha - \beta P - \varphi R + ue)(P - C_2 - W), \tag{18}$$

$$k + 2\beta u\lambda)^{-3} < 0. \quad \square$$

命题4 在相同的水质关切水平下, 批发价格契约决策与集中决策情形相比, 批发价格契约下水质下降, 即 $e_{SC}^* > e_{DC}^*$.

证明 使用作商法求解 e_{SC}^*/e_{DC}^* . 因为

$$\frac{e_{SC}^*}{e_{DC}^*} = 1 + \frac{2\beta k}{2\beta k - \beta^2\lambda^2 - 2\beta\lambda u - u^2} > 1,$$

所以 $e_{SC}^* > e_{DC}^*$. \square

命题3说明, 水资源供应商同时考虑水质效用与经济效益时, 由于其需要承担水质提升成本, 水质效用提升会对经济效益产生影响. 现实情形中, 水源区为改善调水水质投入水质提升成本, 降低了自身经济利润, 而受水区仅需投入较少成本就能获得优质水源, 两者之间存在利益冲突. 命题4说明, 由于上述“搭便车”现象的存在, 导致批发价格契约下水质水平无法达到与集中决策相同的水平, 供应链无法实现协调. 因此, 需要设计协调机制对传统的批发价格契约进行改进, 使得分散决策下的经济效益与水质效用均得到提升.

2.2.2 收益共享-水质提升成本共担契约

基于上述分析, 为促进水源区与受水区进一步合作, 使得分散决策下的经济效益和水质效用趋于集中决策情形, 本文结合江西省在对鄱阳湖水质改善的过程中鼓励各市县建立“成本共担, 收益共享”的补偿机制以及皖浙两省基于“成本共担, 利益共享”的共识, 推进新安江流域生态改善的实践, 基于传统制造企业供应链中的收益共享成本共担契约^[23-24]思想, 构建收益共享-水质提升成本共担契约以实现南水北调工程水资源供应链的协调. 从供应链整体利润最大化的角度考虑受水区水资源分销商和水源区水资源供应商共享销售收入, θ 表示分销商从销售收入中的分享比例, $1 - \theta$ 表示供应商从销售收入中的分享比例, $0 < \theta < 1$. 受水区分销商与水源区供应商共同承担水质提升成本以激励水源区供应商提升水质, η 表示供应商承担的提升水质成本的比例, $1 - \eta$ 表示分销商承担的提升水质成本的比例, $0 < \eta < 1$. 因此, 在收益共享-水质提升成本共担契约下, 分销商利润和供应商的利润、效用函数表达式如下:

$$\pi_{CC}^D = \theta(\alpha - \beta P - \varphi R + ue)(P - C_2 - W) + \frac{1}{2}k(1 - \eta)e^2, \tag{17}$$

$$\pi_{CC}^S = (\alpha - \beta P - \varphi R + ue)(W - C_1) - \frac{1}{2}\eta ke^2 +$$

$$U_{CC}^S = (\alpha - \beta P - \varphi R + ue)(W - C_1 + \lambda e) + \frac{1}{2}\eta ke^2 + (1 - \theta)(\alpha - \beta P - \varphi R + ue)(P - C_2 - W). \tag{19}$$

当 $2\beta k\eta(1 + \theta) - \beta^2\lambda^2 - 2\beta\lambda u - u^2 > 0$ 时, Hessian 矩阵负定, U_{CC}^S 为关于 W 和 e 的凹函数, 新的效用函数存在最大值. 设定 $\Delta_3 = 2\beta k\eta(1 + \theta) - \beta^2\lambda^2 - 2\beta\lambda u - u^2$, 同样采用逆序求解法得到最优的调水价格、水质和市场价格分别为

$$W_{CC}^* = [(\alpha\beta - \beta^2C_2 - \beta\varphi R)\lambda^2 + (\alpha + \beta C_1 - \beta C_2 - \varphi R)\lambda u + C_1 u^2 + 2k\eta(\beta C_2\theta + \varphi R\theta - \beta C_1 - \alpha\theta)]/\Delta_3, \tag{20}$$

$$e_{CC}^* = [\beta^2\lambda^2 + \beta\lambda u(1 - \theta) - \theta u^2][\varphi R - \alpha + \beta(C_1 + C_2)]/[(\theta u - \beta\lambda)\Delta_3], \tag{21}$$

$$P_{CC}^* = \{(\alpha - \varphi R)\beta^2\lambda^3 + (C_1 + C_2)\beta^2\lambda^2 u + [\alpha\lambda - \varphi\lambda R + u(C_1 + C_2)](1 - \theta)\beta u\lambda + [\varphi\lambda R - \alpha\lambda - (C_1 + C_2)u]\theta u^2 + \eta[(C_1 + C_2)(\beta k\theta u - \beta^2 k\lambda) + k(\beta\varphi\lambda R - \varphi R - \alpha\beta\lambda + \alpha\theta u)(1 + 2\theta)]\}/[(\theta u - \beta\lambda)\Delta_3]. \tag{22}$$

命题5 当 $\lambda = (\sqrt{2\beta k} - u)/\beta$, $\eta = 1/(1 + \theta)$ 时, 收益共享-水质提升成本共担契约可以实现供应链协调.

证明 收益共享水质提升成本共担契约有效实行的前提, 应保证契约协调下供应商和分销商的决策变量达到集中决策水平, 即 $P_{CC}^* = P_{SC}^*$, $e_{SC}^* = e_{CC}^*$. 求解得到以下两组解:

$$1) \begin{cases} \theta = 0 \\ \eta = 1 \end{cases}, \text{ 结果表示供应商获得全部销售收入,}$$

并承担所有水质提升成本, 可视为集中决策情况, 但并非契约协调情形;

$$2) \begin{cases} \lambda = (\sqrt{2\beta k} - u)/\beta \\ \eta = 1/(1 + \theta) \end{cases}, \text{ 当供应商的水质关切}$$

水平为 $(\sqrt{2\beta k} - u)/\beta$, 收益共享-水质提升成本共担契约参数满足 $1/(1 + \theta)$ 时, 收益共享-水质提升成本共担契约下的决策变量与集中决策情形相同, 供应链实现了协调. \square

由命题5的计算过程可知, 契约决策达到集中决策水平要求较为苛刻, 需要水质关切水平为一定值. 通过进一步研究发现, 当水质关切水平 λ 能够使得不

等式组 $\begin{cases} \pi_{CC}^S > \pi_{DC}^S \\ \pi_{CC}^D > \pi_{DC}^D \end{cases}$ 成立,即收益共享-水质提升成本共担契约决策下水资源供应商与分销商的利润相较于批发价格契约情形均有所增加时,水资源供应链的经济目标已经实现了帕累托改进,且供应商和分销商具有接受契约的动力. 求解不等式组可知, λ 取 $0 \sim 1$ 之间的任何值时不等关系均成立,从而验证了收益共享-水质提升成本共担契约具有普遍适用性.

通过对收益共享契约两个参数的关系式 $\eta = 1/(1 + \theta)$ 的分析可知,当 θ 趋近于 0 时,存在关系式 $\eta = \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{1}{1 + \theta} = 1$,此种情形的含义为供应商获得全部的销售收入并承担全部的水质提升成本,可理解为集中决策情形,即将分销商和供应商当作一个整体看待.

当 θ 趋近于 1 时,存在关系式 $\eta = \lim_{\theta \rightarrow 1} \frac{1}{1 + \theta} = \frac{1}{2}$,此种情形的含义是若分销商想获得全部的销售收入,则其必须承担一半的水质提升成本. 其现实意义是若水资源分销商不与供应商进行利润分享,则必须与供应商承担相同的水质提升成本,在此种情形下才能发挥激励水资源供应商的作用,否则由于利润分配不均和公平偏好的影响,水质效用无法实现协调.

当 $\theta \in (0, 1)$ 之间时, $\eta \in (0.5, 1)$,此种情形为标准的收益共享-水质提升成本共担情形,分析可知,水资源分销商获得的销售利润的比例与其承担的水质提升成本比例同方向变动,即分销商获得的销售利润比例越大,需要承担的水质提升成本比例也越大. 通过合理的契约参数的设定,分散决策下的水质可以得到改善,但对于水质关切水平变动情况下的经济效益的帕累托改进仍需做进一步研究,研究结果将在数值仿真部分进一步探讨.

当 $\theta \in (0, 1)$ 之间时, $\eta \in (0.5, 1)$,此种情形为标准的收益共享-水质提升成本共担情形,分析可知,水资源分销商获得的销售利润的比例与其承担的水质提升成本比例同方向变动,即分销商获得的销售利润比例越大,需要承担的水质提升成本比例也越大. 通过合理的契约参数的设定,分散决策下的水质可以得到改善,但对于水质关切水平变动情况下的经济效益的帕累托改进仍需做进一步研究,研究结果将在数值仿真部分进一步探讨.

3 数值仿真

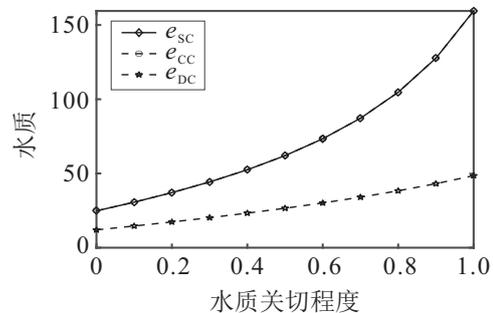
下面通过数值仿真对集中决策、批发价格契约和收益共享-成本共担契约决策下的供应链利润、水质效用、市场水价及水质进行比较,以进一步验证收益共享-水质提升成本共担契约对南水北调工程水资源供应链的优化效果. 在满足效用函数存在最大值的约束条件 $2\beta k - u^2 - \beta^2 \lambda^2 - 2\beta u \lambda > 0$, $2\beta k \eta (1 + \theta) - \beta^2 \lambda^2 - 2\beta \lambda u - u^2 > 0$ 的基础上,各参数取值为 $\alpha = 400$, $\beta = 2$, $\varphi = 0.01$, $\mu = 1$, $R = 800$, $k = 4$, $C_1 = 6$, $C_1 = 4$.

3.1 水质关切水平 λ 对供应链决策的影响

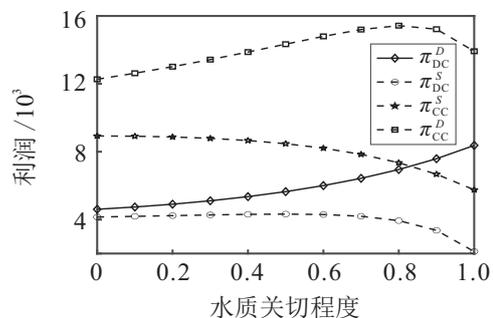
契约参数满足 $\eta = 1/(1 + \theta)$,随机取 $\theta = 0.6$,则 $\eta = 0.625$. 利用上文中的参数取值,将集中决策、批

发价格契约和收益共享-水质提升成本共担契约决策 3 种情形下的水质关切水平对决策变量和决策目标的影响进行对比分析,以验证收益共享-水质提升成本共担契约的可行性和有效性.

如图 2(a) 所示,3 种决策情形下水质水平均随着水质关切程度的提升而提升,说明水质效用目标占总目标的权重越大,水资源供应商将会更努力地提升水质水平. 批发价格契约下的水质水平明显低于集中决策水平,说明在供应商主导的 Stackelberg 批发价格契约决策下,分销商的“搭便车”行为将会对水质效用产生负面影响;在收益共享-水质提升成本共担契约下水质达到了集中决策水平(水质曲线重合),由此得出收益共享-水质成本共担契约实现了水质目标的优化.



(a) 水质仿真曲线



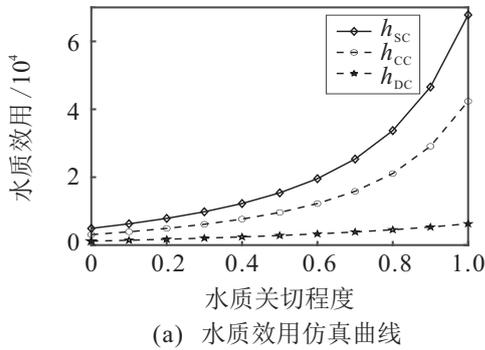
(b) 利润仿真曲线

图 2 不同情形水质关切程度对决策影响

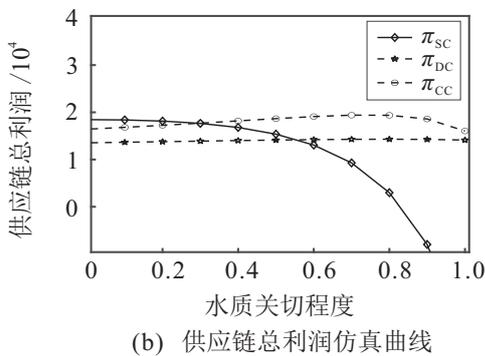
图 2(b) 对水资源供应商和分销商的利润进行了单独分析,结果显示,供应商和分销商在收益共享-水质提升成本共担契约决策时的利润始终大于批发价格契约,因此,收益共享-水质提升成本共担契约实现了对传统批发价格契约的改进,提高了水资源供应商和分销商的利润,这也是供应商和分销商接受契约的动机. 同时验证了命题 3 中水资源供应商的利润随着水质关切水平的上升而下降,水资源分销商的利润随着水质关切水平的上升而上升的正确性.

图 3(a) 显示了水质关切程度对水质效用目标的影响. 集中决策下的水质效用最高,批发价格契约下的水质效用最低. 水质效用的提升将会对经济效益

产生一定的负面影响,分散决策下分销商对于经济利润的追求将使得水质效用降低. 收益共享-水质提升成本共担契约虽没有使得水质效用达到集中决策水平,但相比于批发价格契约已取得了显著成效.



(a) 水质效用仿真曲线



(b) 供应链总利润仿真曲线

图3 水质关切程度对决策目标影响

图3(b)对供应链的总利润进行了分析,从中可以看出:在批发价格契约和收益共享-水质提升成本共担契约决策时,供应链总利润会随着水质关切水平的增加先增大后减小;而在集中决策时,供应链总利润会随着水质关切水平的增加而减小. 收益共享-水质提升成本共担契约下供应链的总利润始终高于批发价格契约,且在水质关切水平满足一定条件时,水资源供应商考虑水质效用,不仅能使水质效用提升,还能使得供应链总利润达到最优. 图3的结果验证了命题2中供应链总利润随着水资源供应商水质关切水平的提升而降低的正确性,随着水质关切程度的提升,供应商会对水质水平有着更高的要求,但是水质提升成本函数具有边际报酬递减性,当水质达到一定水平之后,再要提升将付出更多的成本,供应链总利润将会急剧减少.

3.2 降水量利用率与水质系数对水质影响

在3.1节中,模型参数取值为一特定值,为了使分析结果更具普遍性,令水质系数在(0,5)范围内随机取值,降水量利用率在(0,0.4)之间随机取值,对比批发价格契约与收益共享-水质提升成本共担契约决策下水质水平,以验证收益共享-水质提升成本共担契约的有效性,结果如图4、图5所示. 当水质关切水

平、降水量利用率、水质系数在设定范围内变动时,收益共享-水质提升成本共担契约下的水质水平显著高于批发价格契约下的水质水平,从而验证了收益共享-水质提升成本共担契约具有普遍适用性.

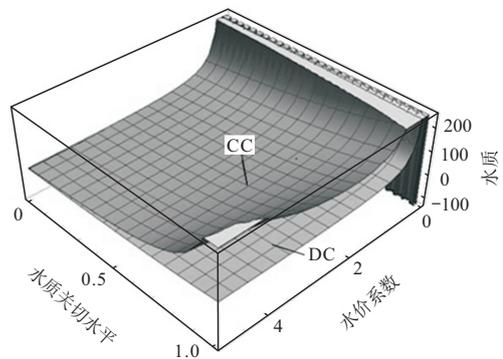


图4 水质系数与水质关切水平对水质影响

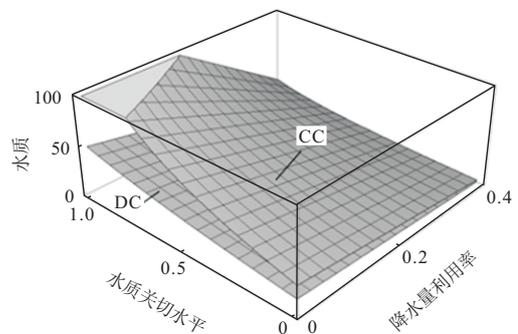


图5 降水量利用率与水质关切水平对水质影响

3.3 契约参数(η, θ)与水质关切水平λ对水质的影响

上述分析中契约参数值均取为 $\theta = 0.6, \eta = 0.625$,现研究 θ 与 λ 值在(0,1)之间变动,契约参数满足 $\eta = 1/(1 + \theta)$ 时水质变化情况. 当 θ 值趋近于0时, η 值趋近于1,表明供应商获得所有销售利润并承担所有水质提升成本,可视为集中决策情形. 如图6所示,当 $\theta = 0$ 时,得到集中决策下的最优水质,总存在 $\theta^* \in (0, 1)$,使得契约决策下的水质水平达到集中决策水平.

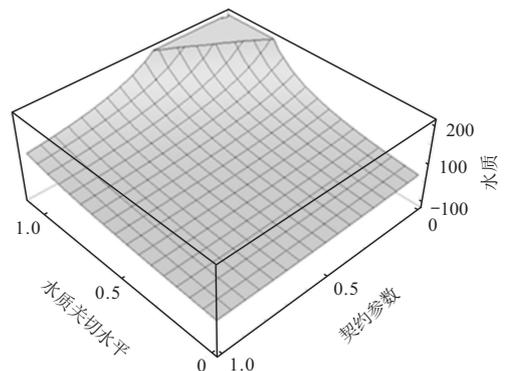


图6 参数θ与水质关切水平λ对水质影响

4 结论

本文研究了水源区水资源供应商同时关注经济效益与水质提升时,南水北调工程水资源供应链的协调情况. 以供应链水质效用和经济效益为决策目标,构建了水资源市场需求函数、水质效用目标函数以及水质提升成本函数,并在此基础上构建了多目标优化函数. 通过对比集中决策与分散决策批发价格模型可知,在供应商主导的Stackelberg分散决策批发价格契约决策下供应链无法实现协调,而引入收益共享-成本共担契约可以实现供应链多目标的帕累托改进. 通过模型求解与算例分析得出以下结论:

1) 在集中决策、批发价格契约和收益共享-水质提升成本共担契约3种情形下,水资源供应商关注水质效用目标均会使得水质提升,且水质关切水平越高,水质提升越显著.

2) 在水资源供应商主导的批发价格契约下,水质的提升将会使供应商牺牲一部分经济利润,分销商的利润则随着水质提升而增加;在收益共享-水质提升成本共担契约作用下,供应商和分销商利润都将得到提升,双方具有接受收益共享-水质提升成本共担契约的动机.

3) 收益共享-水质成本共担契约下的决策目标 (π, h) 都优于批发价格契约水平,且在收益共享-成本共担契约的协调作用下,水质达到集中决策水平,水质效用目标实现了协调.

4) 在收益共享-水质提升成本共担契约参数 (θ, η) 以及模型参数 $(\lambda, \beta, \varphi)$ 变动情况下,收益共享-水质提升成本共担契约决策结果均优于批发价格决策情形,收益共享-水质提升成本共担契约具有普遍适用性.

综上所述,本文从供应链视角为南水北调工程各利益主体协同机制的建立提供了思路,并为工程后续运营管理工作提供了一定的决策依据,通过恰当的利益分配,不仅会使得工程整体经济性有所提升,同时能够促进水质改善,推动南水北调水资源供应链绿色发展. 在后续研究中,可以考虑将更多的南水北调工程利益相关者纳入调水工程供应链中,实现多级供应链的多目标优化. 此外,收益共享-水质提升成本共担契约虽然可以实现水质目标的协调,但是对经济效益仅仅实现了帕累托改进,未来将探讨更多的契约模式以实现南水北调水资源供应链的多目标协调.

参考文献(References)

[1] 唐剑锋,肖新宗,王英才,等. 南水北调中线干渠生态系统结构与功能分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(12):

5391-5402.

(Tang J F, Xiao X Z, Wang Y C, et al. Ecosystem structure and function of the main channel of the middle route of south-north water diversion project[J]. China Environmental Science, 2020, 40(12): 5391-5402.)

[2] Chen Z S, Su S I I, Wang H M. Inter-basin water transfer supply chain equilibrium and coordination: A social welfare maximization perspective[J]. Water Resources Management, 2019, 33(7): 2577-2598.

[3] 王慧敏,胡震云. 南水北调供应链运营管理的若干问题探讨[J]. 水科学进展, 2005, 16(6): 864-869.
(Wang H M, Hu Z Y. Several issues on south-to-north water transfer project supply chain operations management[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(6): 864-869.)

[4] 朱九龙,王慧敏. 南水北调水资源供应链中牛鞭效应的随机控制[J]. 系统工程, 2005, 23(5): 1-6.
(Zhu J L, Wang H M. Stochastic control of bullwhip effect in SCM of water resource of south-to-north water transfer[J]. Systems Engineering, 2005, 23(5): 1-6.)

[5] 朱九龙,陶晓燕,王世军. 基于VMI理论的南水北调水资源供应链的库存协调[J]. 中国管理科学, 2006, 14(6): 98-103.

(Zhu J L, Tao X Y, Wang S J. Water inventory coordination of south-to-north water transfer project supply chain based on the theory of VMI[J]. Chinese Journal of Management Science, 2006, 14(6): 98-103.)

[6] 朱九龙. 非对称信息条件下的水资源供应链库存模型研究[J]. 管理工程学报, 2008, 22(1): 98-101.

(Zhu J L. The study on inventory model of SCM of water resource under asymmetric information[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2008, 22(1): 98-101.)

[7] 骆进仁,刘娜. 跨流域调水工程水资源供应链利益博弈分析[J]. 软科学, 2018, 32(5): 49-54.

(Luo J R, Liu S. Game analysis of supply chain profits of inter-Basin water diversion project[J]. Soft Science, 2018, 32(5): 49-54.)

[8] 张莉,王慧敏,杨玮. 南水北调东线供应链不同市场歧视性定价模型及仿真[J]. 系统工程, 2008, 26(3): 120-123.

(Zhang L, Wang H M, Yang W. A discriminatory pricing model and simulation to different markets of eastern route of the south-to-north water transfers supply chain[J]. Systems Engineering, 2008, 26(3): 120-123.)

[9] Giri B C, Sarker B R. Improving performance by coordinating a supply chain with third party logistics outsourcing under production disruption[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 103: 168-177.

[10] Lemma H R, Singh R, Kaur N. Determinants of supply chain coordination of milk and dairy industries in Ethiopia: A case of addis ababa and its surroundings[J]. SpringerPlus, 2015, 4: 498.

[11] 王丽杰,郑艳丽. 绿色供应链管理中 对供应商激励机

- 制的构建研究[J]. 管理世界, 2014(8): 184-185.
(Wang L J, Zheng Y L. Research on the construction of incentive mechanism for suppliers in green supply chain management[J]. Management World, 2014(8): 184-185.)
- [12] 陈志松. 经济效益与社会责任双视角下的南水北调供应链协调机制研究[J]. 资源科学, 2013, 35(6): 1245-1253.
(Chen Z S. Coordination mechanisms for south-to-north water diversion: Economic benefit and social responsibility[J]. Resources Science, 2013, 35(6): 1245-1253.)
- [13] 陈志松, 王慧敏. 南水北调东线Newsvendor优化模型[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(11): 42-47.
(Chen Z S, Wang H M. Newsvendor optimization model for eastern route of south-to-north water diversion in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(11): 42-47.)
- [14] 侯艳红, 王慧敏, 马树建, 等. 南水北调供应链最小订货承诺契约与灵活订货量契约研究[J]. 管理学报, 2009, 6(3): 299-302.
(Hou Y H, Wang H M, Ma S J, et al. Minimum commitment and flexibility contracts of the supply chain for transferring southern water to the north[J]. Chinese Journal of Management, 2009, 6(3): 299-302.)
- [15] Du W Y, Fan Y B, Liu X J, et al. A game-based production operation model for water resource management: An analysis of the south-to-north water transfer project in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 1482-1493.
- [16] Ghosh D, Shah J. Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 164: 319-329.
- [17] 刘艳秋, 蔡超. 考虑可靠性的物流服务供应链的契约设计[J]. 控制与决策, 2017, 32(11): 2039-2044.
(Liu Y Q, Cai C. Contract design of logistics service supply chain considering[J]. Control and Decision, 2017, 32(11): 2039-2044.)
- [18] 周艳菊, 胡凤英, 周正龙. 零售商主导下促进绿色产品需求的联合研发契约协调研究[J]. 管理工程学报, 2020, 34(2): 194-204.
(Zhou Y J, Hu F Y, Zhou Z L. Study on joint contract coordination to promote green product demand under the retailer-dominance[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2020, 34(2): 194-204.)
- [19] 王文隆, 王福乐, 张涑贤. 考虑低碳努力的双渠道供应链协调契约研究[J]. 管理评论, 2021, 33(4): 315-326.
(Wang W L, Wang F L, Zhang S X. Coordination contract in a dual channel supply chain with low carbon efforts[J]. Management Review, 2021, 33(4): 315-326.)
- [20] Basiri Z, Heydari J. A mathematical model for green supply chain coordination with substitutable products[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 145: 232-249.
- [21] 程发新, 邵世玲, 徐立峰, 等. 基于政府补贴的企业主动碳减排最优策略研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(7): 32-39.
(Cheng F X, Shao S L, Xu L F, et al. Optimal strategy of government subsidized initiative carbon reduction[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(7): 32-39.)
- [22] 蹇洁, 郭雨, 姜林, 等. 基于多目标优化的绿色供应链博弈模型及利润共享契约[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(3): 943-953.
(Jian J, Guo Y, Jiang L, et al. Game models and profit-sharing contract of green supply chain based on multi-objective optimization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(3): 943-953.)
- [23] 胡本勇, 雷东, 陈旭. 基于收益共享与努力成本共担的供应链期权销量担保契约[J]. 管理工程学报, 2010, 24(3): 33-38.
(Hu B Y, Lei D, Chen X. Supply chain option sale-surety contract based on revenue sharing and effort cost partaking[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2010, 24(3): 33-38.)
- [24] 王文宾, 丁军飞, 达庆利. 奖惩机制下闭环供应链的成本共担-利润共享契约[J]. 控制与决策, 2019, 34(4): 843-850.
(Wang W B, Ding J F, Da Q L. Cost-profit sharing contract for a closed-loop supply chain under reward-penalty mechanism[J]. Control and Decision, 2019, 34(4): 843-850.)

作者简介

陈军飞(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事管理科学、水资源管理等研究, E-mail: chenjunfei@hhu.edu.cn;

张学友(1998—), 男, 硕士生, 从事水资源管理、供应链管理的研究, E-mail: 2193389277@qq.com;

汪倩(1988—), 女, 博士生, 从事管理科学、水资源管理的研究, E-mail: wangqian5694@163.com.

(责任编辑: 李君玲)