

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.003

考虑利他偏好的南水北调水资源供应链生态补偿契约决策

陈军飞^{1,2,3}, 张学友¹, 李远航¹, 顾 岩¹

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

摘要: 基于南水北调水资源供应链, 构建政府补偿与市场化补偿相结合的多元生态补偿机制。假定水资源供应链中各成员具有利他偏好, 对比分析利他偏好下中央政府实行断面水质补偿机制与水资源保护成本补偿机制的效果。结果表明: 调水工程水资源供应链中水质、水价、消费者剩余与水资源分销商的利他偏好水平正相关; 中央政府纵向补偿与地方政府横向补偿对水质提升均有促进作用, 利他偏好下受水区的效用会随着水质的提升而提升; 转移制度契约可缓解市场化补偿机制下供应链各成员决策的双重边际效用, 改善水资源分销商“搭便车”行为, 促进供应链总效用和消费者福利提高。

关键词: 南水北调工程; 水资源供应链; 利他偏好; 生态补偿; 契约协调

中图分类号: F4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)06-0018-11

Ecological compensation contract decision of water resources supply chain in South-to-North Water Diversion Project considering altruistic preference

CHEN Junfei^{1,2,3}, ZHANG Xueyou¹, LI Yuanhang¹, GU Yan¹

(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, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the supply chain of water resources for the South to North Water Diversion Project, a diversified ecological compensation mechanism that combined the government compensation and the market-oriented compensation was established. By assuming that each member of the water supply chain has the altruistic preference, this paper compared and analyzed the effects of the compensation mechanism of cross-section water quality and the compensation mechanism of water resources protection cost by the central government under altruistic preference. The results show that the water quality, water price and consumer surplus in the water supply chain of water transfer project are positively related to the altruistic preference level of water distributors. The vertical compensation of the central government and the horizontal compensation of the local government can promote the improvement of water quality, and the utility of water receiving areas will increase with the improvement of water quality under altruistic preference. The transfer contract can alleviate the double marginal utility of supply chain members' decision-making under the market-oriented compensation mechanism, alleviate the "hitchhiking" behavior of water distributors, and promote the total utility of supply chain and the welfare of consumers.

Key words: South-to-North Water Diversion Project; water resources supply chain; altruism preference; ecological compensation; contract coordination

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071278); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B230207002); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX22_0702)

作者简介: 陈军飞(1973—), 男, 教授, 博士, 主要从事管理科学与水资源管理研究。E-mail: chenjunfei@hhu.edu.cn

通信作者: 张学友(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事管理科学研究。E-mail: zkxzy199@163.com

引用本文: 陈军飞, 张学友, 李远航, 等. 考虑利他偏好的南水北调水资源供应链生态补偿契约决策[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 18-28.

CHEN Junfei, ZHANG Xueyou, LI Yuanhang, et al. Ecological compensation contract decision of water resources supply chain in South-to-North Water Diversion Project considering altruistic preference[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6): 18-28.

跨流域调水是我国优化水资源配置,实现水资源空间均衡目标的一项重要举措。调水工程的实施优化了水资源配置格局,改善和调整了水供求关系,提高了受水区供水保障能力,发挥了显著的经济社会和生态环境效益^[1]。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跨流域调水工程,有效缓解了华北地区水资源短缺问题,自东线、中线工程建成通水以来,已累计输送优质“南水”超过 500 亿 m³,沟通了长、黄、淮、海四大流域,初步形成了“四横三纵”的国家水网主骨架^[2]。南水北调水源区在污染防治方面做出了突出贡献,维护了调水工程的供水安全,同样也承担了巨大的生态保护与污染治理成本。大规模的调水工程对水源区以及流域下游环境会产生一定影响^[3-4],加重水源区政府保水质、保发展、保民生的刚性支出负担,而南水北调工程主要采取以政府为主导的水权交易机制,由于调水工程的公益性,对水源区的补偿往往不足^[5]。2021 年 5 月中央全面深化改革委员会第十九次会议审议通过了《关于深化生态保护补偿制度改革的意见》,会议指出我国的生态补偿制度仍然存在重点不明确、奖惩力度弱等问题,今后要统筹运用好行政与市场手段,协同发力以完善生态补偿机制。

实施水生态补偿是协调利益关系的必要手段,也是践行生态文明建设国家战略的重要举措^[6]。目前对于南水北调工程生态补偿的研究可划分为补偿主客体的确立、补偿标准的明确和补偿方式的探索 3 个方向。在受益者付费的原则下,南水北调生态补偿问题已经基本明晰为受水区向水源区付费,但生态补偿标准却并未统一。李国平等^[7]通过结合机会成本法与水资源价值法,明确了南水北调中线工程的生态补偿标准。Yang 等^[8]结合机会成本法与支付意愿法,探索了南水北调工程横向生态补偿标准。Liu 等^[9]通过对比南水北调工程生态补偿标准的已有研究成果,得出成本法与生态系统服务价值法效果最佳的结论。而对于生态补偿方式的探索逐渐从以政府为主导向市场化、多元化的生态补偿机制转变。我国的生态补偿机制以中央政府为主导的纵向补偿和地方政府之间的横向补偿为主^[10],2018 年 12 月中华人民共和国国家发展和改革委员会等九部门发布的《建立市场化、多元化生态保护补偿机制行动计划》中明确指出,亟须建立政府主导、企业和社会参与、市场化运作、可持续的生态保护补偿机制。调水工程生态补偿机制的市场化需要以水资源价值的市场化为基础,只有明确水资源交易主体和水资源定价机制才能按照用水量确定生态补偿费用^[11]。

生态补偿市场化的核心是供需关系,即生态补偿的主客体与水资源价格能够通过水资源的供需关系来体现,南水北调工程将水资源由南到北输送的过程中,自然形成了涉及多流域、多水源、多目标、多主体的复杂供应链系统,目前学者多从水资源供应链视角研究南水北调工程的供需关系。王慧敏等^[12]探讨了南水北调工程中水资源的供需关系,并指出供应链管理理论在大型跨流域调水工程中广泛的应用前景。朱九龙等^[13-14]在王慧敏等^[12]研究的基础上进一步扩展,通过构建南水北调水资源供应链库存模型和基于 VMI 理论的水资源优化配置模型,进一步论证了供应链管理理论研究调水工程供需关系的有效性。陈志松等^[15-16]通过构建南水北调水资源供应链契约模型,研究南水北调工程经济效益和社会效益的协调问题。以往对南水北调工程水资源供应链的研究多数是关于水资源优化调度的,较少涉及生态补偿领域,并且研究过程中多假设供应链成员为理性人,不能很好体现南水北调工程肩负的社会责任和践行新发展理念的实际情况。

针对上述研究中的不足之处,本文通过利他偏好来刻画南水北调工程的社会性。利他偏好是指决策者先利他再利己的行为,决策者不以增加自身的福利为目标,而是希望采取行动来增加他人的福利^[17-18]。表面上看,决策者的利他偏好让自己遭受损失,但实际上,做出对他人有利的行为将产生利己回报。当前供应链管理中对于利他偏好的研究主要聚焦于探讨各成员之间的利他行为对供应链整体效用的影响,如 Huang 等^[19]通过研究论证了利他偏好将显著影响供应链上各成员的决策选择和利润;Wang 等^[20]构建了政府补贴机制下制造商具有利他偏好的供应链模型,指出利他偏好将提升供应链的运营效率和社会总福利。南水北调是一项利国利民的工程,工程的公益性决定了其利他属性,就水源区而言,其利他属性表现为保证优质水北送,投入了大量生态保护成本,关闭了沿线工厂,牺牲了发展机会成本;就受水区而言,其利他属性表现在通过产业转移、人才培养、共建产业园等多种渠道帮扶水源区发展。

鉴于此,本文综合考虑南水北调工程水源区与受水区的利他偏好,结合南水北调工程水资源供应链特点,构建包含中央政府纵向补偿、地方政府横向补偿与市场化补偿相结合的多元化生态补偿机制;在对比分析现有生态补偿方式效果的基础上,提出南水北调水资源供应链生态补偿契约以实现水资源供应链优化,以期推动南水北调工程后续运营管理工作高质量开展,助力国家水网建设。

1 问题描述与模型假设

基于王慧敏等^[12]的研究,将南水北调跨流域调水过程概化为水资源供应链系统^[21]。在南水北调工程多元生态补偿机制背景下,考虑如图1所示的在一个调水周期内由单个水源区水资源供应商与单个受水区水资源分销商组成的水资源供应链。水源区在将“南水”北送的过程中投入了生态保护成本,牺牲了发展机会。国家高度重视水源区发展,中央政府通过转移支付与生态保护项目投资等形式对水源区进行纵向生态补偿。在借鉴山东大汶河流域与新安江流域纵向、横向混合的生态补偿机制基础上^[22-23],本文将中央政府的纵向补偿标准分为以断面水质为依据的补偿(EC)和以水源区生态保护成本为依据的补偿(CC)两种;在以水权交易为基础的市场化生态补偿机制下,受水区水资源分销商通过支付单位水量的生态补偿价格对水源区进行横向生态补偿。在此基础上建立南水北调水资源供应链模型,探究利他偏好对生态补偿机制的影响,并进一步探究不同的补偿标准下供应链成员的决策情况。

研究基于以下假设:

假设1 通过实施水权交易促进南水北调工程沿线地区水资源优化配置,南水北调工程受水区省、直辖市人民政府水行政主管部门根据年度可调水量提出年度用水计划,水资源需求受到市场价格和水质水平的共同影响。借鉴陈志松等^[15,24]采用的线性需求假设形式,设水资源需求量满足关系式 $Q=a-bP_M+\varphi e$,其中 Q 为水资源需求量, a 为固定市场需求, P_M 为单位水量的市场价格, e 为水质, b, φ 分别为水资源需求量相对于水资源价格和水质的敏感度, $b>0, \varphi>0$ 。受水区水资源分销商需向水源区水资源供应商支付生态补偿费用,单位水量的生态补偿价格为 P_E 。

假设2 水资源供应商为保障优质“南水”北送,需要投入一定的水质保护成本。参考周艳菊等^[25]的研究,借鉴绿色供应链中绿色度提升投入成本思想^[26-27],水质保护成本表示为 $C(e)=ue^2/2$,其中 $u(u>0)$ 为水质保护成本的影响系数,该二次函数关系表明水质提升投入的边际成本递增。

假设3 为了激励供应商的水资源保护行为,借鉴绿色供应链政府补贴形式的研究成果^[28-31],水源区生态保护成本补偿模式下(CC),中央政府的纵向补偿资金设定为 $E_{CC}=nue^2/2$ (n 为中央政府根据水资源保护成本给予的补偿比例, $0\leq n\leq 1$),此种补贴形式借鉴江世英等^[30]关于产品绿色度提升的政府补贴形式的设定。断面水质补偿模式(EC)下,中央政府的纵向补偿资金设定为 $E_{EC}=me$ (m 为中央政府根据水质给予的补偿系数, $m>0$),此种补贴形式借鉴周艳菊等^[31]关于产品绿色度提升的政府补贴形式的设定。

假设4 借鉴李娜等^[32]对于利他偏好的普遍刻画,水资源供应商和水资源分销商的效用函数可以表示为 $U_i=\pi_i+\lambda_i\pi_j$,其中 U 为效用, π 为收益, λ_i 为成员 i 的利他偏好程度, $\lambda_i\in[0,1]$ 。当 $\lambda_i=0$ 时,表示成员 i 完全自利;当 $\lambda_i=1$ 时,表示成员 i 完全利他;当 $0<\lambda_i<1$ 时,成员 i 不仅关注自身利益,也会为成员 j 的利益付出努力,但利他程度不超过自身。

假设5 水资源供应商与水资源分销商间采取以供应商为主导的 Stackelberg 博弈,考虑北方地区的缺水现状,假设水资源市场是出清的,调水量等于市场用水量,不考虑缺水成本和储水成本。下文分别以下标 S 和 D 表示供应商和分销商。

2 考虑利他偏好水资源供应链模型

2.1 断面水质补偿机制

2.1.1 集中决策情形

集中决策情形为供应链模型中的理想状态,在此情形下,水资源供应商和水资源分销商被视为一个整体,双方的决策目标为实现供应链整体效用的最大化。在断面水质补偿机制下,供应链整体效用 U 为

$$U=(a-bP_M+\varphi e)P_M-ue^2/2+me$$

(1)

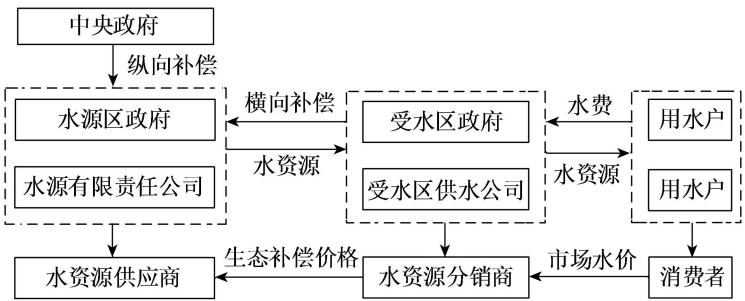


图1 水资源供应链系统概化
Fig.1 Generalization diagram of supply chain system of water resources

计算二阶 Hessian 矩阵 $\begin{vmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial P_M^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial P_M \partial e} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial e \partial P_M} & \frac{\partial^2 U}{\partial e^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -2b & \varphi \\ \varphi & -u \end{vmatrix} = 2bu - \varphi^2$, 效用函数存在最大值的充分必要条件为

Hessian 矩阵负定, 即一阶顺序主子式为负, 二阶顺序主子式为正, 已知 $-2b < 0$, 因此 $2bu - \varphi^2 > 0$ 时效用函数存在最大值, 此时令 $\begin{cases} \partial U / \partial P_M = 0 \\ \partial U / \partial e = 0 \end{cases}$, 求解得到供应链效用最大化时的市场水价与水质分别为

$$e^* = (2bm + a\varphi)(2bu - \varphi^2)^{-1} \quad (2)$$

$$P_M^* = (\varphi m + au)(2bu - \varphi^2)^{-1} \quad (3)$$

进一步求解得到集中决策下供应链的最优整体效用为

$$U^* = (a\varphi m + bm^2 + 0.5a^2u)(2bu - \varphi^2)^{-1} \quad (4)$$

2.1.2 分散决策情形

在中央政府实行断面水质补偿机制时, 水资源供应商和分销商的收益 $\pi_{EC,S}$ 、 $\pi_{EC,D}$ 分别表示为

$$\pi_{EC,S} = (a - bP_M + \varphi e)P_E - ue^2/2 + me \quad (5)$$

$$\pi_{EC,D} = (a - bP_M + \varphi e)(P_M - P_E) \quad (6)$$

考虑水资源供应商和分销商的利他偏好, 水资源供应商和分销商的效用 U_S 、 U_D 分别表示为

$$U_S = \pi_{EC,S} + \lambda_S \pi_{EC,D} \quad (7)$$

$$U_D = \pi_{EC,D} + \lambda_D \pi_{EC,S} \quad (8)$$

由于存在水资源供应商为主导的 Stackelberg 博弈关系, 此时的决策过程为水资源供应商根据市场水价与水资源分销商协商确定单位水量的生态补偿价格。采用逆序求解法求解这一过程, 首先 U_D 对 P_M 求一阶偏导数, 得到水资源供应商对于市场水价的反应函数:

$$\frac{\partial U_D}{\partial P_M} = 0 \Rightarrow P_M^* = \frac{a + e\varphi + bP_E - b\lambda_D P_E}{2b} \quad (9)$$

将式(9)代入式(7), 同样通过 Hessian 矩阵进行验证, 得到目标函数及其约束条件:

$$\begin{cases} \max U_S = \pi_{EC,S} + \lambda_S \pi_{EC,D} \\ \text{s. t. } 2bu(\lambda_D - 1)(\lambda_S + \lambda_D \lambda_S - 2) - \varphi^2(\lambda_D \lambda_S - 1)^2 > 0 \end{cases} \quad (10)$$

进一步求解得到分散决策下的单位水量的市场价格、生态补偿价格、水质分别为

$$P_{EC,E} = [2\varphi m(1 - \lambda_S) + 2ua(1 - \lambda_S)]\Delta_1^{-1} \quad (11)$$

$$e_{EC} = [a\varphi(\lambda_D \lambda_S - 1)^2 + 2bm(2 - 2\lambda_D + \lambda_D^2 \lambda_S - \lambda_S)]\Delta_1^{-1} \quad (12)$$

$$P_{EC,M} = [(-1 + \lambda_D)(-3 + 2\lambda_S + \lambda_D \lambda_S)(\varphi m + au)]\Delta_1^{-1} \quad (13)$$

其中

$$\Delta_1 = 2bu(\lambda_D - 1)(\lambda_S + \lambda_D \lambda_S - 2) - \varphi^2(\lambda_D \lambda_S - 1)^2$$

将式(11)(12)(13)代入式(7)(8)得到水资源供应商和水资源分销商在利他偏好下的效用为

$$U_{EC,S} = \{2m[a\varphi(\lambda_D \lambda_S - 1)^2 + bm(\lambda_D - 1)(\lambda_S + \lambda_D \lambda_S - 2)] + a^2u(\lambda_D \lambda_S - 1)^2\} / (2\Delta_1) \quad (14)$$

$$U_{EC,D} = \{4b^2\lambda_D m^2 u(\lambda_D - 1)^2(\lambda_S + \lambda_D \lambda_S - 2)^2 - (\lambda_D \lambda_S - 1)^4(2a\lambda_D \varphi^3 m + a^2\lambda_D \varphi^2 u) - (\lambda_D \lambda_S - 1)^2[2b\varphi^2 m^2(\lambda_D - 1)(1 - 5\lambda_D + 2\lambda_D \lambda_S + 2\lambda_D^2 \lambda_S) - (4ab\varphi mu + 2a^2bu^2)(\lambda_D - 1)^2]\} / (2\Delta_1^2) \quad (15)$$

命题 1 在中央政府实行断面水质补偿机制时, 水质、水资源市场价格、生态补偿价格和消费者剩余均随着水质补偿系数的增加而提高; 水质、生态补偿价格与水资源供应商效用随着水资源分销商利他偏好水平的提高而提高。

证明: 根据已知条件 $0 < \lambda_D < 1$ 、 $0 < \lambda_S < 1$, 于是存在 $2 - 2\lambda_D + \lambda_D^2 \lambda_S - \lambda_S > 0$ 、 $-3 + 2\lambda_S + \lambda_D \lambda_S < 0$, 进一步计算得到

$$\frac{\partial P_{EC,E}}{\partial m} > 0, \frac{\partial e_{EC}}{\partial m} > 0, \frac{\partial P_{EC,M}}{\partial m} > 0, \text{ 所以 } P_{EC,E}, e_{EC}, P_{EC,M} \text{ 均为关于 } m \text{ 的增函数。同样可计算得到 } \frac{\partial P_{EC,E}}{\partial \lambda_D} > 0, \frac{\partial e_{EC}}{\partial \lambda_D} > 0,$$

$$\frac{\partial U_{EC,S}}{\partial \lambda_D} > 0.$$

根据 Panda 等^[33]对消费者剩余的定義,消费者购买一定数量的商品愿意支付的最高价格与实际支付的价格之间的差值为消费者剩余 S :

$$S = \int_{P_{\min}}^{P_{\max}} Q(P) dP = \int_{\frac{a+\varphi e-Q}{b}}^{\frac{a+\varphi e}{b}} (a - bP + \varphi e) dP = \frac{Q^2}{2b} = b(\lambda_D - 1)^2(\lambda_D\lambda_S - 1)^2(\varphi m + au)^2/(2\Delta_1^2) \quad (16)$$

式中 $Q(P)$ 为水资源需求量关于价格的函数, $\partial S/\partial m > 0$, 消费者剩余同样为关于 m 的增函数。证毕。

命题 1 说明: 当中央政府实行断面水质补偿机制时, 水质越高, 水源区供应商所获得的补偿越多, 中央政府的纵向补偿对水资源供应商具有激励作用。而随着水质的提升, 水资源分销商需支付的单位水量的生态补偿价格将增高, 市场水价同样会提升。事实上, 对于华北平原水市场上的消费者来说, 随着水质提升, 其意愿支付的最高水价将会上升, 一定程度上缓解了供应链成员决策的双重边际效应, 因此消费者剩余得到提升。水资源分销商的利他行为将会使其支付给供应商更多的补偿款, 促进水质与供应商效用的提升; 而水资源供应商的利他行为则通过影响水质进一步影响市场水价与需求量, 表现出更加复杂的特征。

2.2 水资源保护成本补偿机制

2.2.1 集中决策情形

在水质保护成本补偿机制下, 供应链整体效用可以表示为

$$U = (a - bP_M + \varphi e)P_M + (n - 1)ue^2/2 \quad (17)$$

通过计算二阶 Hessian 矩阵, 得到在约束条件 $2b(1-n)u - \varphi^2 > 0$ 时, U 为关于 P_M 与 e 的联合凹函数, 计算得到效用最大化时的市场水价与水质分别为

$$P_M^{**} = au(1 - n) [2b(1 - n)u - \varphi^2]^{-1} \quad (18)$$

$$e^{**} = a\varphi [2b(1 - n)u - \varphi^2]^{-1} \quad (19)$$

代入式(19)进一步求解得到供应链的整体效用为

$$U^{**} = a^2u(1 - n) [4bu(1 - n) - 2\varphi^2]^{-1} \quad (20)$$

2.2.2 分散决策情形

在中央政府以水资源保护成本为依据进行补偿时, 相较于断面水质补偿机制, 只有水资源供应商的得益表达式发生改变, 可表示为

$$\pi_{CC,S} = (a - bP_M + \varphi e)P_E + (n - 1)ue^2/2 \quad (21)$$

在水资源供应商和分销商具有利他偏好且供应商主导的 Stackelberg 博弈下, 同样采用逆序求解法得到各决策变量与决策目标的表达式为

$$P_{CC,E} = 2au(\lambda_S - 1)(n - 1)\Delta_2^{-1} \quad (22)$$

$$e_{CC} = a\varphi(\lambda_D\lambda_S - 1)^2\Delta_2^{-1} \quad (23)$$

$$P_{CC,M} = au(1 - \lambda_D)(n - 1)(-3 + 2\lambda_S + \lambda_D\lambda_S)\Delta_2^{-1} \quad (24)$$

其中 $\Delta_2 = 2bu(\lambda_D - 1)(1 - n)(\lambda_S + \lambda_D\lambda_S - 2) - \varphi^2(\lambda_D\lambda_S - 1)^2$

求解得到利他偏好下水资源供应商和分销商的效用分别为

$$U_{CC,S} = a^2u(1 - n)(\lambda_D\lambda_S - 1)^2/(2\Delta_2) \quad (25)$$

$$U_{CC,D} = a^2u(n - 1)(\lambda_D\lambda_S - 1)^2[\lambda_D\varphi^2(\lambda_D\lambda_S - 1)^2 + 2bu(\lambda_D - 1)^2(n - 1)]/(2\Delta_2^2) \quad (26)$$

命题 2 在中央政府实行水资源保护成本补偿机制时, 水质、水资源市场价格、生态补偿价格和消费者剩余均随着水资源保护成本补偿系数的增加而提高; 水质、生态补偿价格与水资源供应商效用随着水资源分销商利他偏好水平的提高而提高。

证明: 与命题 1 的证明方法相同。通过求偏导数得到以下关系: $\frac{\partial P_{CC,E}}{\partial n} > 0$, $\frac{\partial e_{CC}}{\partial n} > 0$, $\frac{\partial P_{CC,M}}{\partial n} > 0$, $\frac{\partial S}{\partial n} > 0$,

$\frac{\partial P_{CC,E}}{\partial \lambda_D} > 0$, $\frac{\partial e_{CC}}{\partial \lambda_D} > 0$, $\frac{\partial U_{CC,S}}{\partial \lambda_D} > 0$ 。因此, e_{CC} 、 $P_{CC,M}$ 、 $P_{CC,E}$ 、 S 均为关于 n 的增函数; $P_{CC,E}$ 、 e_{CC} 、 $U_{CC,S}$ 均为关于 λ_D 的增函数。证毕。

命题 2 说明: 中央政府实行水资源保护成本补偿机制时, 水资源供应商在获得补偿后会增加水质保护成本投入, 促进水质提升。与实行断面水质补偿机制时相同, 水质的提升将导致分销商需支付的单位水量的生态补偿价格与市场水价上升, 但消费者福利并未因此削减。相反, 水质的提升提高了消费者的购买意愿, 抵

消了供应链成员决策时产生的双重边际效应,消费剩余得到改进。通过命题1与命题2的分析,两种补偿机制具有类似的作用机理,对于2种补偿机制的效果,仍需进一步研究。

2.3 补偿效果分析

由于不同补偿系数 m 、 n 的存在,首先需要统一2种补偿机制的表达形式使其具有可比性,例如,冯颖等^[34]在比较不同政府补贴形式的效果时,假定政府在不同补贴形式下的支出相等,但是此种方法计算过程较为繁琐。本文在此思路上进行改进,通过比较2种补偿机制下各决策变量(e, P_M, P_E)相等时的中央政府补偿金额,进而分析2种补偿机制的效果,得到命题3与命题4。

命题3 在供应商主导的 Stackelberg 博弈分散决策下,如果供应链上各成员效用最大化时,2种补偿机制下的水质达到相同水平,则中央政府在断面水质补偿机制下支出更多补偿款。

证明: 2种补偿机制下的生态补偿金额分别为 $E_{CC} = nu(e_{CC})^2/2$ 、 $E_{EC} = me_{EC}$ 。根据已知前提 $e_{CC} = e_{EC}$, 得到补偿系数 m 、 n 满足关系式:

$$\begin{aligned} [a\varphi(\lambda_D\lambda_S - 1)^2 + 2bm(2 - 2\lambda_D + \lambda_D^2\lambda_S - \lambda_S)]\Delta_1^{-1} &= a\varphi(\lambda_D\lambda_S - 1)^2\Delta_2^{-1} \Rightarrow \\ m &= a\varphi nu(\lambda_D\lambda_S - 1)^2\Delta_2^{-1} \end{aligned} \quad (27)$$

通过作差法: $E_{EC} - E_{CC} = m - 0.5nue_{CC} = 0.5a\varphi nu(\lambda_D\lambda_S - 1)^2\Delta_2^{-1} > 0 \Rightarrow me_{EC} - 0.5ne_{CC}^2 > 0, E_{EC} > E_{CC}$ 。证毕。

命题3说明:在供应商主导的 Stackelberg 博弈下,考虑利他偏好时,若要达到相同的水质,水资源保护成本补偿机制下中央政府支付的纵向补偿金额更少,即相同的补偿金额下,水资源保护成本补偿机制对于水源区水质保护的激励作用更强,从水质方面来看水资源保护成本补偿机制比断面水质补偿机制的效果更优。但对于消费者来说,水价也是其考虑的重要方面,如果水质相同时,水资源保护成本补偿机制下水价高于断面水质补偿机制,将不利于补偿模式的运行,因此下文对相同水质时不同模式的水价进行分析,得到命题4。

命题4 当2种补偿机制下的水质 e 相同时,生态补偿价格与市场水价也相等,即 $P_{EC,E} = P_{CC,E}, P_{EC,M} = P_{CC,M}$ 。

证明: 根据命题4的证明过程, $e_{CC} = e_{EC} \Rightarrow m = a\varphi nu(\lambda_D\lambda_S - 1)^2\Delta_2^{-1}$, 将 $m = a\varphi nu(\lambda_D\lambda_S - 1)^2\Delta_2^{-1}$ 代入式(11)(13), 由式(11)与式(22)、式(13)与式(24)相减,得到 $P_{EC,E} - P_{CC,E} = 0$ 和 $P_{EC,M} - P_{CC,M} = 0$ 。

因此 $P_{EC,E} = P_{CC,E}, P_{EC,M} = P_{CC,M}$ 。证毕。

命题4证明了水质相同时,2种补偿机制下的生态补偿价格与市场水价也相等,即2种补偿机制下供应链成员决策的双重边际效用相同。综合命题3和命题4,进一步证明了水资源保护成本补偿机制补偿效果更优。基于此,下文对水资源保护成本补偿机制做更进一步的探讨,分析补偿系数 n 的变动对于水资源供应商和分销商效用的影响,得到命题5。

命题5 水资源保护成本补偿机制下,水资源供应商的效用随着补偿系数 n 的增加而增加,水资源分销商的效用随补偿系数 n 的变化情况取决于供应商与分销商的利他偏好水平。

证明: 对水资源供应商效用和水资源分销商效用求关于补偿系数 n 的偏导数:

$$\frac{\partial U_{CC,S}}{\partial n} = \frac{a^2\varphi^2 u(-1 + \lambda_D\lambda_S)^4}{2\Delta_2^2} > 0 \quad (28)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial U_{CC,D}}{\partial n} < 0 & 0 < \lambda_S \leq \frac{3\lambda_D - 1}{\lambda_D + \lambda_D^2} \\ \frac{\partial U_{CC,D}}{\partial n} > 0 & \frac{3\lambda_D - 1}{\lambda_D + \lambda_D^2} < \lambda_S < 1 \end{cases} \quad (29)$$

证毕。

命题5说明:中央政府的纵向补偿直接作用于水资源供应商,水资源供应商的效用随着补偿的增加而提升。而纵向补偿通过影响水质间接影响水资源分销商,因此水资源分销商效用随纵向补偿的变动情况会受到双方利他偏好的影响。当水资源分销商的利他偏好处于较低水平($0, 1/3$)时,即使中央政府没有对水资源分销商进行补偿,水资源分销商的得益也一直在上升($\partial\pi_{CC,D}/\partial n > 0$),这种“搭便车”行为将进一步压缩水资源供应商的得益。当水资源分销商的利他偏好处于较高水平($2/3, 1$)时,“搭便车”行为产生的效应逐渐显现,水资源供应商的利他偏好水平处于较低水平时($0, (3\lambda_D - 1)/(\lambda_D + \lambda_D^2)$),其为水质提升付出的努力较

少,水资源分销商在利他偏好下的效用随着纵向补偿的增加而减少($\partial U_{CC,D}/\partial n < 0$)。只有当水资源供应商的利他偏好水平较高($(3\lambda_D - 1)/(\lambda_D + \lambda_D^2), 1$)时,水资源供应商对提升水质付出更多努力,分销商的效用随着纵向补偿的增加而提升($(\partial U_{CC,D}/\partial n) > 0$)。

命题6 在水资源供应商与水资源分销商具有利他偏好时,2种补偿机制均无法实现水资源供应链协调。

证明:水资源供应链实现协调的条件为分散决策下的水质与市场价格与集中决策时相等,在断面水质补偿机制下,存在关系 $e^* = e_{EC}, P_M^* = P_{EC,M}$,在水资源成本补偿机制下,存在关系 $e^{**} = e_{CC}, P_M^{**} = P_{CC,M}$,均需满足:

$$\begin{cases} (\lambda_D \lambda_S - 1)^2 = 1 \\ 2 - 2\lambda_D + \lambda_D^2 \lambda_S - \lambda_S = 1 \\ (-1 + \lambda_D)(-3 + 2\lambda_S + \lambda_D \lambda_S) = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lambda_D = 0 \\ \lambda_S = 1 \end{cases} \quad (30)$$

与已知条件 $0 < \lambda_D < 1, 0 < \lambda_S < 1$ 相矛盾,水资源供应链无法实现协调。证毕。

根据命题6的论证,存在利他偏好时,断面水质补偿机制与水资源保护成本补偿机制均无法实现协调,命题3、4的论证表明水资源保护成本补偿机制效果更优,因此下文通过构建契约优化水资源保护成本补偿机制,使得分散决策下的各变量接近集中决策的理想状态。

3 转移支付契约优化

通过第2节的分析,中央政府进行水资源保护成本补偿可以激励水源区水质保护、促进水质提升,但由于水资源分销商“搭便车”行为的存在,纵向补偿的效果无法达到最优,因此需要通过契约设计提升补偿效果。契约设计的思路:水资源分销商不仅要按照调水量支付生态补偿款,还需要根据水质对水资源供应商进行转移支付,转移支付金额为 ke ,其中 k 为转移支付系数, $k > 0$ 。在转移支付契约下,水资源供应商与分销商的效用函数分别为

$$U_{S,k} = (a - bP_M + \varphi e)P_E + (n - 1)ue^2/2 + ke + \lambda_S[(a - bP_M + \varphi e)(P_M - P_E) - ke] \quad (31)$$

$$U_{D,k} = (a - bP_M + \varphi e)(P_M - P_E) - ke + \lambda_D[(a - bP_M + \varphi e)P_E + (n - 1)ue^2/2 + ke] \quad (32)$$

同样采用逆序求解法,由于 $\partial^2 U_{D,k}/\partial^2 P_M = -2b < 0$,因此令 $\partial U_{D,k}/\partial P_M = 0$,得到水资源分销商自身效用最大化时的市场水价反应函数为

$$P_M = (a + e\varphi + bP_E - b\lambda_D P_E)/(2b) \quad (33)$$

代入到式(31)水资源供应商的效用函数中,并令 $\partial U_{S,k}/\partial P_M = 0, \partial U_{S,k}/\partial e = 0$ 得到供应商效用函数最大化时各决策变量值为

$$P_{E,k} = \{2au[(1 - \lambda_S)(1 - n)] + 2\varphi k(-1 + \lambda_S)^2\} \Delta_2^{-1} \quad (34)$$

$$e_k = \{a\varphi(\lambda_D \lambda_S - 1)^2 + 2bk(\lambda_D - 1)(\lambda_S - 1)(2 - \lambda_S - \lambda_D \lambda_S)\} \Delta_2^{-1} \quad (35)$$

$$P_{M,k} = (1 - \lambda_D)(-3 + 2\lambda_S + \lambda_D \lambda_S)[\varphi k(\lambda_S - 1) + au(n - 1)] \Delta_2^{-1} \quad (36)$$

命题7 在转移支付契约下,水质、水资源市场价格、生态补偿价格和消费者剩余均随着转移支付系数的增加而提高;且转移支付系数满足一定条件时,转移支付契约具有可行性。

证明:通过求偏导数得到关系 $\partial P_{E,k}/\partial k > 0, \partial P_{M,k}/\partial k > 0, \partial e_k/\partial k > 0, \partial S/\partial k > 0$,因此转移支付契约下水质、水资源市场价格、单位水量的生态补偿价格与消费者剩余均为关于转移支付系数 k 的单调增函数;转移支付契约具有可行性的充分必要条件为转移支付契约下的供应链总效用大于无契约情形,于是有 $U_{\text{总},k} - U_{CC,\text{总}} > 0$,求解不等式得到 k 的取值范围为

$$0 < k < \frac{a\varphi(-1 + \lambda_D \lambda_S)^2[(\lambda_D - \lambda_S)\xi_1 - (1 - 3\lambda_S + \lambda_S^2 + \lambda_D \lambda_S^2)\xi_2]}{b(\lambda_D - 1)(\lambda_S - 1)\{\xi_1[3 - 5\lambda_D + (2\lambda_D \lambda_S - \lambda_S^2)(1 + \lambda_D)] + \xi_1(1 + \lambda_S)(\lambda_S + \lambda_D \lambda_S - 2)^2\}} \quad (37)$$

其中 $\xi_1 = \varphi^2(\lambda_D \lambda_S - 1)^2, \xi_2 = 2bu(\lambda_D - 1)^2(1 - n)$ 。证毕。

命题7说明:水资源分销商通过转移支付会促进水资源供应商进行水质保护,虽然在转移支付契约下水资源市场价格上升,但消费者剩余相比无契约决策($k=0$)时提高,表明消费者愿意为质量较高的水资源支付更高的价格。在一定程度上转移支付契约可以使供应链总效用上升,说明了转移支付契约实施的可行性,对于水资源供应商与分销商单独效用的比较分析将在数值算例中给予讨论,以进一步分析转移支付契约的可行性。

通过第 2 节和第 3 节分析可以得到的启示有:①市场化生态补偿机制有利于促进跨流域调水工程上下游合作,充分发挥生态补偿机制的激励作用,需要强调的是,市场化补偿机制仍要以政府为主导,以此缓解市场决策下产生的双重边际效应,维护华北地区用水户权益;②落实政府纵向、横向混合的市场化、多元化生态补偿机制,一方面要明确水源区投入的生态保护成本与牺牲的发展机会成本核算标准,另一方面要对现行的断面水质衡量标准进一步细分,为准确衡量生态补偿金额提供基础;③要保持南水北调工程的公益性,注重培养工程利益相关者的利他属性,对受水方的利他行为要重点宣传引导,警惕市场化决策中自利行为的出现,始终以南水北调工程整体效用最大化为目标推动工程高质量发展。

4 数值模拟验证

本节通过数值模拟进一步验证第 2 节和第 3 节命题,并且转移支付契约中水资源供应商与分销商的效用问题也会在本节中探讨。在满足约束条件 $\Delta_1>0$ 、 $\Delta_2>0$ 的基础上,具体参数设置为 $a=100$ 、 $b=1$ 、 $\varphi=1$ 、 $u=10$,水资源供应商与水资源分销商社会偏好初始值均为 0.2,水资源保护成本补偿机制下的中央政府补偿系数初始值为 0.2,受水区转移支付系数 k 初始值为 5。需要注意的是,上述参数的取值仅仅为初始值,下文会改变各参数的数值来验证生态补偿契约在不同的参数取值下均有效,以使得结论更加具有普遍性,故其初始赋值不会影响数值分析结果。

4.1 关键参数的灵敏度分析

在上述参数取值基础上,满足约束条件 $\Delta_1>0$ 、 $\Delta_2>0$ 时,参数 n 的取值范围为 $(0,0.96)$,在此范围上,参数 n 的灵敏度分析结果如图 2(a) 所示。结果显示, n 取区间 $(0,0.96)$ 上任意值时均有 $U_{S,k}>U_{CC,S}$ 、 $U_{D,k}<U_{CC,D}$,因此 n 的取值不影响数值分析的判断。进一步分析可知,在 2 种情形下,水资源供应商与水资源分销商的效用均随着中央政府补偿系数 n 的增加而增加,验证了水资源保护成本补偿机制的有效性。对 k 的灵敏度分析结果如图 2(b) 所示,在 $k>0$ 范围上均有 $U_{S,k}>U_{CC,S}$ 、 $U_{D,k}<U_{CC,D}$,同时,随着 k 的增大,水资源分销商的效用逐渐降低,水资源供应商的效用上升,说明转移支付契约抑制了分销商的“搭便车”行为,另外,转移支付契约应使供应链总效用提升才具有可行性,这在后文进一步探讨。

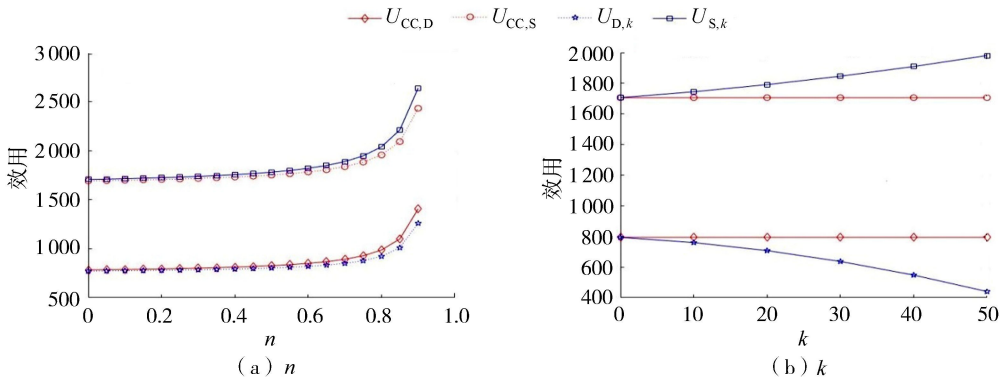


图 2 参数 n 和 k 的灵敏度分析

Fig.2 Sensitivity analysis of parameters n and k

对利他偏好水平 λ_s 、 λ_D 在区间 $(0,1)$ 上的灵敏度分析结果如图 3 所示,水资源供应商与分销商在任意偏好水平下均有 $U_{S,k}>U_{CC,S}$ 、 $U_{D,k}<U_{CC,D}$ 。分析趋势可知,当供应商的利他偏好相同时,随着分销商利他偏好程度的提升,供应商的效用提高,分销商的效用下降,原因在于水资源分销商对供应商表现出利他属性时,水资源分销商愿意支付的单位水量生态补偿价格会随着利他偏好程度的提升而提升,对水源区水资源保护的激励作用更加显著。

4.2 转移支付契约效果分析

灵敏度分析结果显示,随着参数 k 的增加,水资源分销

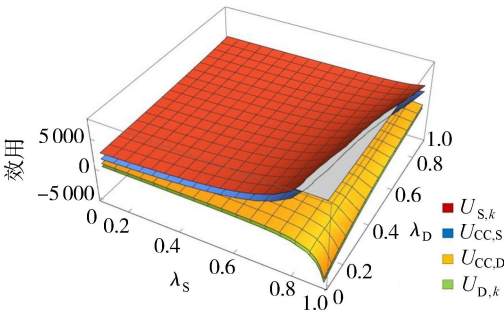


图 3 利他偏好程度 λ 灵敏度分析

Fig.3 Sensitivity analysis of altruism preference λ

商的效用降低,供应商的效用提升,但如果只是通过降低分销商的效用使得供应商效用增加,转移支付契约收效甚微。因此,需要进一步分析转移支付契约对供应链总效用的影响,验证转移支付契约有效性的仿真结果如图 4 所示。

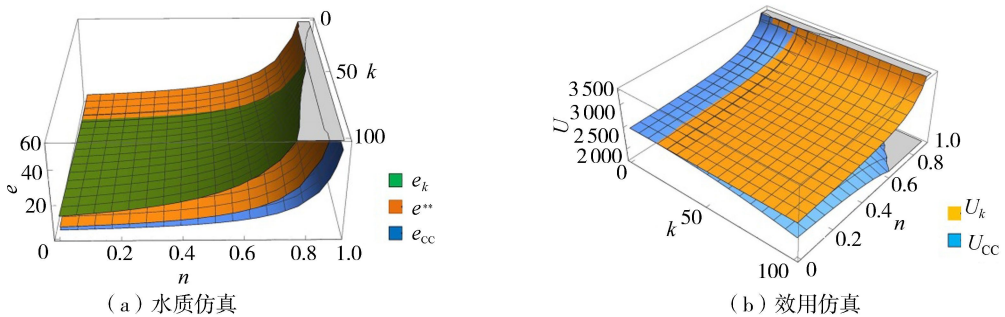


图 4 转移支付契约有效性仿真

Fig. 4 Effectiveness simulation of transfer contract

由图 4(a)可知,随着受水区政府转移支付的金额增加,水质逐渐提升,且转移支付契约下的水质始终高于无契约情形。由图 4(b)可知,在转移支付系数满足一定条件时,转移支付契约下的供应链总效用高于无契约情形。通过比较分析得到转移支付契约下供应链总效用高于无契约情形时,水质虽未达到集中决策水平,但相较无契约参与情形得到了提升,因此转移支付契约可以同时实现水质与供应链总效用的帕累托改进。验证契约有效性的另一个关键因素是供应链成员决策的双重边际效应,对市场水价以及消费者剩余的仿真结果如图 5 所示。

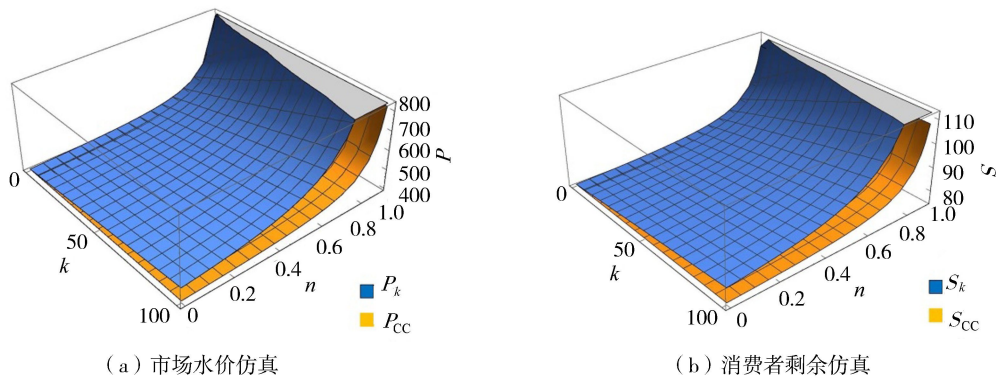


图 5 市场水价与消费者剩余仿真

Fig. 5 Simulations of market water price and consumer surplus

由图 5(a)可知,在转移支付契约下的市场水价要高于无契约情形,但这并不意味着转移支付契约下的双重边际效应更强,因为价格上升一方面是水质提升导致的。消费者愿意为质量更好的水资源支付更高的价格,因此需进一步分析转移支付契约下的消费者剩余。由图 5(b)可知,转移支付契约下的消费者剩余高于无契约情形,因此转移支付契约实际上缓解了供应链成员决策的双重边际效应,进一步验证了转移支付契约的有效性。

5 结 论

- a. 水资源供应链中水质、水价、生态补偿价格、消费者剩余均受供应链成员双方利他偏好的影响,且与水资源分销商的利他偏好水平正相关。
- b. 中央政府对水源区的纵向补偿对水质提升具有促进作用,并且受水区的效用也会随着水质的提升而增加,在水源区与受水区具有利他偏好时,中央政府支付一定比例的水资源保护成本比按断面水质进行补偿效果更优。
- c. 受水区政府对水源区政府进行适当的转移支付,有利于缓解供应链各成员决策的双重边际效应,改善“搭便车”行为,促进供应链总效用和消费者福利提升。

参考文献:

[1] 许凤冉,阮本清,张春玲,等. 跨流域调水生态补偿研究进展与关键技术[J]. 水利经济,2022,40(4):34-40. (XU Fengran, RUAN Benqing, ZHANG Chunling, et al. Research progress and key technologies of ecological compensation for inter-basin water diversion[J]. Journal of Economics of Water Resources,2022,40(4):34-40. (in Chinese))

[2] 张金良. 构建黄河流域水网的思考[J]. 水资源保护,2022,38(4):1-5. (ZHANG Jinliang. Thoughts on construction of water network in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):1-5. (in Chinese))

[3] FENG D,ZHAO G. Footprint assessments on organic farming to improve ecological safety in the water source areas of the South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Cleaner Production,2020,254:120-130.

[4] 张怡雅,袁飞,张利敏,等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):14-19. (ZHANG Yiya, YUAN Fei, ZHANG Limin, et al. Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):14-19. (in Chinese))

[5] GAO X,SHEN J,HE W,et al. An evolutionary game analysis of governments' decision-making behaviors and factors influencing watershed ecological compensation in China [J]. Journal of Environmental Management,2019,251:109592.

[6] 石常峰,王彦滢,吴敏. 水生态补偿研究进展与展望[J]. 水利经济,2021,39(3):22-29. (SHI Changfeng, WANG Yanying, WU Min. Research progress and prospect on ecological compensation of water[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2021,39(3):22-29. (in Chinese))

[7] 李国平,王奕淇,张文彬. 南水北调中线工程生态补偿标准研究[J]. 资源科学,2015,37(10):1902-1911. (LI Guoping, WANG Yiqi,ZHANG Wenbin. Study on South-to-North Water Transfer Middle Route Project ecological compensation standard [J]. Resources Science,2015,37(10):1902-1911. (in Chinese))

[8] YANG L,LIU M C,MIN Q W,et al. Transverse eco-compensation standards for water conservation;a case study of the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion in China[J]. Journal of Resources and Ecology,2018,9(4):395-406.

[9] LIU M K,GUO J. Comparisons and improvements of eco-compensation standards for water resource protection in the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Science & Technology Water Supply,2020,20(8):2988-2999.

[10] 杨玉霞,闫莉,韩艳利,等. 基于流域尺度的黄河水生态补偿机制[J]. 水资源保护,2020,36(6):18-23. (YANG Yuxia, YAN Li, HAN Yanli, et al. Compensation mechanism of the Yellow River water ecology based on watershed scale[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):18-23. (in Chinese))

[11] 李亚菲. 南水北调中线水源区生态补偿问题与对策研究:以陕西省为例[J]. 西安财经大学学报,2021,34(2):81-90. (LI Yafei. The ecological compensation problem and countermeasure research in the water source area of the South-to-North Water Transfer :from the perspective of Shaanxi Province[J]. Journal of University of Finance and Economics,2021,34(2):81-90. (in Chinese))

[12] 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 Huimin, HU Zhenyun. Several issues on South-to-North Water Transfer Project supply chain operations management[J]. Advances in Water Science,2005,16(6):864-869. (in Chinese))

[13] 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 Jiulong,TAO Xiaoyan,WANG Shijun. 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. (in Chinese))

[14] 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 Jiulong. 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. (in Chinese))

[15] 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 Zhisong. Coordination mechanisms for South-to-North Water Diversion:economic benefit and social responsibility[J]. Resources Science,2013,35(6):1245-1253. (in Chinese))

[16] 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 Zhisong, WANG Huimin. 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. (in Chinese))

[17] 武柏宇,仲伟俊,梅妹娥. 分包商利他偏好真的有利吗?——以公共产品技术创新委托研发为例[J]. 系统工程理论与实践,2022,42(1):172-183. (WU Baiyu, ZHONG Weijun, MEI Zhue. Is the subcontractor's altruism beneficial? -Take commissioned research and development of public good technological innovation as an example[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2022,42(1):172-183. (in Chinese))

- [18] 翟佳,于辉,王宇,等.互惠利他偏好下的供应链鲁棒协调策略[J].系统工程理论与实践,2019,39(8):2070-2079. (ZHAI Jia,YU Hui,WANG Yu,et al. Robust coordination of supply chain with preference of reciprocity and altruism[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2019,39(8):2070-2079. (in Chinese))
- [19] HUANG H,ZHANG J,REN X,et al. Greenness and pricing decisions of cooperative supply chains considering altruistic preferences[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2018,16(1):1-31.
- [20] WANG Y,FAN R,SHEN L,et al. Recycling decisions of low-carbon e-commerce closed-loop supply chain under government subsidy mechanism and altruistic preference[J]. Journal of Cleaner Production,2020,259:120883.
- [21] 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. (CHEN Junfei,ZHANG Xueyou,WANG Qian. Contract coordination of water resources supply chain of south-to-north water diversion project from the perspective of economic benefits and water quality improvement[J]. Control and Decision,2023,38(3):825-833. (in Chinese))
- [22] 严厚福.流域生态补偿机制的合理构建[J].南京工业大学学报(社会科学版),2015,14(2):40-47. (YAN Houfu. On appropriate establishment of watershed eco-compensation mechanism[J]. Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition),2015,14(2):40-47. (in Chinese))
- [23] 张晖,顾典,吴霜,等.流域生态补偿政策下受偿地区碳减排效应:以新安江流域为例[J].资源科学,2022,44(4):768-779. (ZHANG Hui,GU Dian,WU Shuang,et al. Effect of emission reduction in the compensated areas under the policy of watershed eco-compensation;a case study of the Xin'an River Basin[J]. Resources Science,2022,44(4):768-779. (in Chinese))
- [24] 熊中楷,张盼,郭年.供应链中碳税和消费者环保意识对碳排放影响[J].系统工程理论与实践,2014,34(9):2245-2252. (XIONG Zhongkai,ZHANG Pan,GUO Nian. Impact of carbon tax and consumers' environmental awareness on carbon emissions in the supply chain[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2014,34(9):2245-2252. (in Chinese))
- [25] 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 Yanju,HU Fengying,ZHOU Zhenglong. 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. (in Chinese))
- [26] BASIRI Z,HEYDARI J. A mathematical model for green supply chain coordination with substitutable products[J]. Journal of Cleaner Production,2017,145:232-249.
- [27] CHEN J Y,STAN D,HUBERT P. The impact of government subsidy on supply Chains' sustainability innovation[J]. Omega,2018,86:42-58.
- [28] 韩同银,刘丽,金浩.考虑政府补贴和公平关切的双渠道绿色供应链决策研究[J].中国管理科学,2022,30(4):194-204. (HAN Tongyin,LIU Li,JIN Hao. Research on dual-channel green supply chain decision making considering the government subsidy and fairness concerns[J]. Chinese Journal of Management Science,2022,30(4):194-204. (in Chinese))
- [29] 曹裕,李青松,胡韩莉.不同政府补贴策略对供应链绿色决策的影响研究[J].管理学报,2019,16(2):297-305. (CAO Yu,LI Qingsong,HU Hanli. Research on influence of different government subsidy strategies on the green decision-making of supply chain[J]. Chinese Journal of Management,2019,16(2):297-305. (in Chinese))
- [30] 江世英,方鹏骞.基于绿色供应链的政府补贴效果研究[J].系统管理学报,2019,28(3):594-600. (JIANG Shiyong,FANG Pengqian. Research on the effect of government subsidy based on green supply chain[J]. Journal of Systems & Management,2019,28(3):594-600. (in Chinese))
- [31] 周艳菊,黄雨晴,陈晓红,等.促进低碳产品需求的供应链减排成本分担模型[J].中国管理科学,2015,23(7):85-93. (ZHOU Yanju,HUANG Yuqing,CHEN Xiaohong,et al. Carbon emission reduction cost-sharing model in supply chain based on improving the demand for low-carbon products[J]. Chinese Journal of Management Science,2015,23(7):85-93. (in Chinese))
- [32] 李娜,马德青,胡劲松.基于利他偏好的绿色供应链动态均衡分析[J].系统工程学报,2021,36(6):798-816. (LI Na,MA Deqing,HU Jinsong. Dynamic equilibrium analysis of green supply chain based on altruistic preferences[J]. Journal of Systems Engineering,2021,36(6):798-816. (in Chinese))
- [33] PANDA S,MODAK N M,EDUARDO C B L. Coordinating a socially responsible closed-loop supply chain with product recycling[J]. International Journal of Production Economics,2017,188:11-21.
- [34] 冯颖,汪梦园,张炎治,等.制造商承担社会责任的绿色供应链政府补贴机制[J].管理工程学报,2022,36(6):156-167. (FENG Ying,WANG Mengyuan,ZHANG Yanzhi,et al. The government subsidy mechanism in a green supply chain with the manufacturer assuming social responsibility[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management,2022,36(6):156-167. (in Chinese))