

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.04.002

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:周柏旭,吴金卓,王卉.考虑消费者低碳偏好和碳税政策的三级纸制品供应链协调机制研究[J].西安理工大学学报,2024,40(4):461-470.

ZHOU Baixu, WU Jinzhuo, WANG Hui. Coordination mechanism for three-level paper product supply chain in consideration of consumer low-carbon preferences and carbon tax policies[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(4): 461-470.

## 考虑消费者低碳偏好和碳税政策的三级 纸制品供应链协调机制研究

周柏旭<sup>1</sup>, 吴金卓<sup>1</sup>, 王卉<sup>2</sup>

(1. 东北林业大学 土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** 针对三级纸制品供应链碳排放量过高和利益分配不均等问题,引入消费者低碳偏好和碳税政策,利用 MATLAB 软件分别构建分散决策下三级主从博弈(TLG)模型以及集中决策下合作决策(CD)模型,并在合作决策模型中引入碳减排成本共担、收益共享契约,进而讨论供应链各成员的最优决策过程。结果表明:①消费者偏好系数和碳税会影响纸制品的零售价、碳减排量和市场需求量,进而导致实际利润的变化;②在 CD 模型下,纸制品供应链的市场需求量、包装材料的碳减排量以及整体利润都显著高于 TLG 模型;③引入碳减排成本共担、收益共享契约,可保证在一定共享系数范围内,每个供应链成员的利润都明显高于 TLG 分散决策模型。在考虑消费者低碳偏好以及市场碳税变化的情况下,使用收益共享契约可实现纸制品供应链的整体协调优化,促进供应链的可持续发展。

**关键词:** 纸制品; 供应链; 碳税; 消费者低碳偏好; 收益共享契约

中图分类号: TB 484

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2024)04-0461-10

### Coordination mechanism for three-level paper product supply chain in consideration of consumer low-carbon preferences and carbon tax policies

ZHOU Baixu<sup>1</sup>, WU Jinzhuo<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** Aiming at the problems from uneven profit distribution and excessive carbon emissions in the three-level paper product supply chain, this paper introduces the low-carbon preference for consumers and carbon tax policy, and uses the MATLAB software to establish the three-level leader-follower game model (TLG model) with the decentralized decision-making and the cooperative decision model (CD model) in centralized decision-making. In the cooperative decision-making model, the cost-sharing and benefit-sharing contracts are introduced, with the optimal decision-making process of each member of the supply chain discussed. The results show that: ① The consumer preference coefficient and carbon tax will affect the retail price, carbon reduction and market demand of paper products, which will lead to changes in actual profits. ② With the

收稿日期: 2023-11-03; 网络首发日期: 2024-03-30

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20240329.1705.006>

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2021G001);黑龙江省经济社会发展重点研究课题(22202)

第一作者: 周柏旭,男,硕士生,研究方向为物流与供应链管理。E-mail: 532427449@qq.com

通信作者: 吴金卓,女,博士,教授,博导,研究方向为物流与供应链管理。E-mail: wjz@nefu.edu.cn

CD model, the market demand of the supply chain, the carbon emission reduction of packaging materials and the overall profit are significantly higher than those by the TLG model. ③ The introduction to carbon emission reduction cost-sharing and benefit-sharing contracts can ensure that the profits of each supply chain member are significantly higher than that by the TLG decentralized decision-making model within a certain range of sharing coefficients. Considering the low-carbon preference of consumers and the change of market carbon tax, revenue sharing contract can realize the overall coordination and optimization of the paper product supply chain and promote the sustainable development of the supply chain.

**Key words:** paper products; supply chain; carbon tax; consumer low-carbon preferences; revenue sharing contract

随着全球工业化进程的加速以及气候变化问题的日益严峻,碳排放已经成为全球普遍关注的问题。2003年,英国首次提出“低碳经济”的概念,它是指在可持续发展理念指导下,通过技术创新、制度创新、产业转型、新能源开发等多种手段,尽可能地减少煤炭、石油等高碳能源消耗,减少温室气体排放,以达到经济社会发展与生态环境保护双赢的一种经济发展形态<sup>[1]</sup>。目前,发展低碳经济已经成为各国应对气候变化、转变经济增长方式的共识。我国是世界上最大的二氧化碳排放国,为了实现低碳转型,以低碳创新推动可持续发展,我国于2020年提出了“力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的“双碳”目标。在此背景下,产业绿色低碳发展成为必然的发展趋势。从造纸和纸制品行业来看,近年来国内纸制品消费需求日益增长。2012—2021年,我国纸制品生产量年均增长率为5.44%,消费量年均增长5.47%<sup>[2]</sup>。然而,造纸及纸制品行业对环境和资源造成的负面影响也更加显著<sup>[3]</sup>。为实现绿色可持续发展,政府出台了一系列低碳政策以倡导节能减排<sup>[4]</sup>,同时消费者的低碳消费意识也在逐渐增强,这些都促使相关行业从传统供应链向可持续发展的绿色供应链转变<sup>[5]</sup>。目前,我国纸产品供应链的碳排放总量以及单位碳排放量仍居高不下<sup>[6]</sup>,为应对低碳经济对企业发展的新要求,纸制品供应链需要整合上下游资源,在不确定的市场需求下充分调动供应链成员企业节能减排的积极性,同时保证供应链的协调运作<sup>[7]</sup>。

供应链由多个企业成员组成,不同决策主体间可能会产生分歧,导致整体供应链面临“双重边际效应”<sup>[8]</sup>。在独立决策过程中,供应链成员通常会追求自身利润最大化,而不是优化整个供应链体系,其产品价格往往会高于生产边际成本<sup>[9]</sup>。而在协调机制下,通过协调供应链成员间的决策和活动,能够优化整个供应链系统的性能<sup>[10]</sup>。近年来,很多学者融合碳排放因素对低碳供应链的协调机制展开分析。例

如,方健等<sup>[11]</sup>基于收益共享契约,建立了由单一制造商与供应商组成,具有碳排放需求弹性的产品利润模型,结果表明该模型引入碳排放成本和收益共享契约后,集中决策总是优于分散决策。张佩佩<sup>[12]</sup>通过构建三级低碳合作减排供应链模型,将消费者低碳偏好及供应链利润协调机制引入 Nash 非合作、Stackelberg 及协同合作三种博弈模型,结果表明随着成员间合作的加深,供应链上下游的碳减排量增加,且整体利润在协同合作时效益最高。Fahimnia 等<sup>[13]</sup>则指出,在考虑低碳经济和碳减排的前提下,可以引入碳税政策计划模型,并利用交叉熵方法进行求解,结果表明在碳税为23美元/吨时,整体碳排放成本每增加1.5%,碳排放将减少约3%。在低碳经济和可持续发展理念下,纸制品供应链的绿色管理以及利益分配也越发受到人们的关注。林铭香等<sup>[14]</sup>针对纸制品包装彩盒生产流程进行了全生命周期评价分析,结果显示该纸制品的温室气体排放主要集中在白卡纸生产加工阶段,初级能源消耗占比达到78.7%。孙志霞<sup>[15]</sup>从技术改造、环境和生态、经济效益等方面对造纸企业绿色供应链项目进行了可行性分析,结果显示实施绿色供应链项目管理符合市场需求,并会对全国范围内的造纸企业实施绿色供应链管理起到带头作用。廖吉林<sup>[16]</sup>针对纸产品“制浆-造纸-零售”三级供应链,基于 Shapley 值对该供应链进行利益再分配,并结合算例提出应降低零售商的利益分配,提高制浆企业收益分配比例,以实现供应链利润的公平合理分配以及供应链的持续稳定运作。

综上所述,对于纸制品的低碳供应链研究主要集中在供应链管理、环境影响以及特定产品的生命周期评价方面,而很少考虑为纸制品低碳供应链引入供应链协调机制来探究供应链的碳减排成本优化以及企业成员之间的最优决策。因此,本文以供应商-制造商-零售商构成的纸制品三级供应链的低碳发展为驱动目标,通过在传统决策模型中引入消费者低碳偏好、碳税政策以及收益共享契约模型,对比分析不

同博弈模型下供应链的最优利润以及企业成员之间的最优决策。研究结果可为企业决策提供参考,同时有利于促进纸制品供应链的低碳可持续发展。

## 1 问题描述与模型构建

### 1.1 问题描述与假设

纸制品供应链一般由供应商、制造商、零售商和

用户组成,涉及供应、生产、销售、回收、运输、消费等环节。本文主要分析由单一供应商、单一制造商和单一零售商构成的三级纸制品供应链,如图1所示。假定纸制品供应链各级成员间信息完全对称,供应商和制造商是供应链碳排放的主要来源,零售商碳排放则主要来自纸制品产品的运输。文中涉及的参数及含义如表1所示。

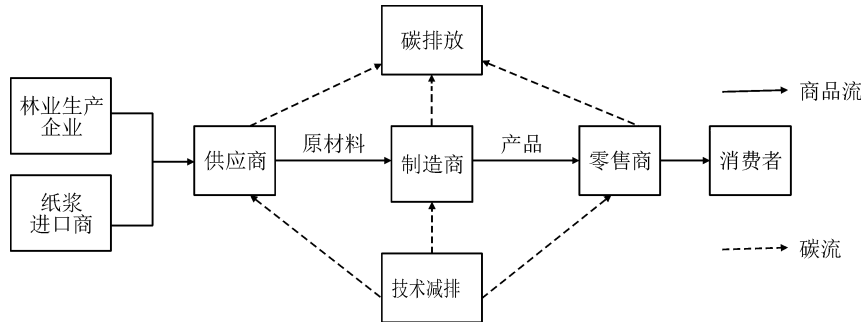


图1 三级纸制品供应链结构

Fig. 1 Structure of the three-level paper product supply chain

表1 纸制品供应链模型中的参数及定义

Tab. 1 Parameters and definitions in the paper product supply chain model

参数	定义	参数	定义
$c_s / (\text{元} \cdot \text{套}^{-1})$	单位产品的原材料成本	$q / \text{套}$	产品需求量
$c_m / (\text{元} \cdot \text{套}^{-1})$	单位产品的制造加工成本	$w_s / (\text{元} \cdot \text{套}^{-1})$	单位产品供应商的供应价格
$e_s / (\text{kg} \cdot \text{套}^{-1})$	单位产品供应环节的碳排放	$w_m / (\text{元} \cdot \text{套}^{-1})$	单位产品制造商的批发价格
$e_m / (\text{kg} \cdot \text{套}^{-1})$	单位产品制造环节的碳排放	$p / (\text{元} \cdot \text{套}^{-1})$	单位产品的零售价格
$e_r / (\text{kg} \cdot \text{套}^{-1})$	单位产品零售环节的碳排放	$c / (\text{元} \cdot \text{套}^{-1})$	供应链企业减排成本
$\alpha$	碳减排成本系数	$E / (\text{kgCO}_2\text{-eq})$	供应链的碳排放
$k$	消费者低碳偏好系数	$t / (\text{元} \cdot \text{吨}^{-1})$	政府规定单位碳排放量的碳税
$\Delta e_i / (\text{kgCO}_2\text{-eq})$	各成员企业产品的碳减排量	$\lambda_i$	政府向各成员企业减排成本的补贴率
$\varphi$	碳减排成本共担系数	$\phi$	收益共享系数
$\Pi_s / \text{元}$	供应商利润	$\Pi_m / \text{元}$	制造商利润
$\Pi_r / \text{元}$	零售商利润	$\Pi_{sc} / \text{元}$	供应链总利润

模型假设如下。

假设1:供应商以供应价格  $w_s$  将原材料销售给制造商,制造商以批发价格  $w_m$  销售给零售商,零售商以市场价格  $p$  作为纸制品的销售价格。假设供应链碳减排水平  $\Delta e_i$  为连续变量,企业减排成本函数  $c(\Delta e) = \alpha \Delta e^2$  ( $\alpha > 0$ ),  $\alpha$  为碳减排成本系数。

假设2:碳排放信息和市场信息在供应链上是透明的,纸制品零售价格  $p$  在一定程度上取决于碳排放量  $E$ ,即  $p = v - kE$  ( $0 < k < 1$ ),其中  $v$  为市场规模, $k$  为消费者低碳偏好系数,碳排放量会随低碳偏好系数  $k$  的变化而改变。分散决策中,零售商根据自身碳排放量来定价,即  $E = e_r q - \Delta e_r$ ;而在集中

决策以及协调分配情况下,零售价格则由供应链总碳排放量决定,即  $E = e_i q - \Delta e_i$ ,  $e_i = e_s + e_m + e_r$ 。

假设3:该供应链只考虑单一产品销售周期的情形,即制造商的生产量等于产品的需求量,三级供应链企业不存在其他存储成本。政府向企业提供比例为  $\lambda$  ( $0 < \lambda < 1$ ) 的碳减排成本补贴,企业购买等同于自身碳排放量的碳税,超出排放量或不执行低碳政策的惩罚成本远高于碳减排成本。

## 1.2 纸制品供应链模型的构建及求解

### 1.2.1 分散决策下主从博弈模型分析

基于以上假设,企业成员间会以自身利益最大化为目标,相互进行非合作三级 Stackelberg 博

弈<sup>[17]</sup>。由此构建纸制品供应商、制造商和零售商组成的三级主从博弈 (three-level leader-follower game, TLG) 模型:

$$\Pi_s^{\text{TLG}} = (\omega_s - c_s)q^{\text{TLG}} - (1 - \lambda_s)c(\Delta e_s) - t(e_s q^{\text{TLG}} - \Delta e_s) \quad (1)$$

$$\Pi_m^{\text{TLG}} = (\omega_m - c_m - \omega_s)q^{\text{TLG}} - (1 - \lambda_m)c(\Delta e_m) - t(e_m q^{\text{TLG}} - \Delta e_m) \quad (2)$$

$$\Pi_r^{\text{TLG}} = (v - kE^{\text{TLG}} - \omega_m)q^{\text{TLG}} - (1 - \lambda_r)c(\Delta e_r) - t(e_r q^{\text{TLG}} - \Delta e_r) \quad (3)$$

对 TLG 模型下纸制品零售商的利润  $\Pi_r^{\text{TLG}}$  关于零售商产品需求量  $q^{\text{TLG}}$  以及零售商最优碳减排水平  $\Delta e_r$  分别求偏导, 得出关于  $q^{\text{TLG}}$  的二阶偏导  $-2ke_r < 0$ , 即函数存在极大值, 则可令其导数等于 0, 联立方程进行求解, 通过计算得到当前零售商最优的产品需求量  $q^{\text{TLG}}$  以及零售商最优碳减排水平  $\Delta e_r$ 。

$$q^{\text{TLG}} = -\frac{kt + 2\alpha(1 - \lambda_r)(v - \omega_m - e_r t)}{k(k - 4\alpha e_r + 4\lambda_r \alpha e_r)} \quad (4)$$

$$\Delta e_r = -\frac{v - \omega_m + e_r t}{k_r + 4\lambda_r \alpha e_r - 4\alpha e_r} \quad (5)$$

制造商通过决策使其自身利润最大化。将式(4)、(5)代入式(2)中, 对 TLG 模型下制造商的利润  $\Pi_m^{\text{TLG}}$  关于批发价格  $\omega_m^{\text{TLG}}$  以及制造商碳减排水平  $\Delta e_m$  分别求一阶偏导, 并令其导数等于 0 进行求解, 得到当前制造商最优批发价格  $\omega_m^{\text{TLG}*}$  以及制造商最优碳减排水平  $\Delta e_m^*$ :

$$\omega_m^{\text{TLG}*} = -\frac{k - 2\alpha(1 - \lambda_r)(c_m + e_r t - v - \omega_s - e_m t)}{4\alpha(1 - \lambda_r)} \quad (6)$$

$$\Delta e_m^* = \frac{t}{2\alpha(1 - \lambda_m)} \quad (7)$$

供应商通过决策单位产品原材料的供应价格  $\omega_s^{\text{TLG}}$ , 使其自身利润最大化。将式(4)、(6)代入式(1)中, 对 TLG 模型下供应商的利润  $\Pi_s^{\text{TLG}}$  关于供应价格  $\omega_s^{\text{TLG}}$  以及碳减排水平  $\Delta e_s$  求偏导, 并令其结果等于 0, 得到供应商最优供应价格  $\omega_s^{\text{TLG}*}$  以及供应商最优碳减排水平  $\Delta e_s^*$ 。

$$\omega_s^{\text{TLG}*} = \frac{kt + 2\alpha(1 - \lambda_r)(v + c_s - c_m + e_s - e_m - e_r)}{4\alpha(1 - \lambda_r)} \quad (8)$$

$$\Delta e_s^* = \frac{t}{2\alpha(1 - \lambda_s)} \quad (9)$$

将式(8)代入式(6), 可得制造商最优的批发价格  $\omega_m^{\text{TLG}*}$ , 进而可以求出零售商最优的产品需求量  $q^{\text{TLG}*}$ :

$$\Delta e_r^* = \frac{t}{2\alpha(1 - \lambda_r)} \quad (10)$$

$$q^{\text{TLG}*} = \frac{kt + 2\alpha(1 - \lambda_r)(v - c_s - c_m - t(e_s + e_m + e_r))}{4k^2 - 16k\alpha e_r(1 - \lambda_r)} \quad (11)$$

将上述最优解代入式(1), 可得 TLG 分散决策模型下各级成员的利润  $\Pi_s^{\text{TLG}*}$ 、 $\Pi_m^{\text{TLG}*}$ 、 $\Pi_r^{\text{TLG}*}$  以及供应链总利润  $\Pi_{\text{sc}}^{\text{TLG}}$ :

$$\Pi_s^{\text{TLG}*} = (\omega_s^* - c_s)q^{\text{TLG}*} - (1 - \lambda_s)c(\Delta e_s^*) - t(e_s^* q^{\text{TLG}*} - \Delta e_s^*) \quad (12)$$

$$\Pi_m^{\text{TLG}*} = (\omega_m^* - c_m - \omega_s^*)q^{\text{TLG}*} - (1 - \lambda_m)c(\Delta e_m^*) - t(e_m^* q^{\text{TLG}*} - \Delta e_m^*) \quad (13)$$

$$\Pi_r^{\text{TLG}*} = (v - kE^{\text{TLG}*} - \omega_m^*)q^{\text{TLG}*} - (1 - \lambda_r)c(\Delta e_r^*) - t(e_r^* q^{\text{TLG}*} - \Delta e_r^*) \quad (14)$$

$$\Pi_{\text{sc}}^{\text{TLG}} = \Pi_s^{\text{TLG}*} + \Pi_m^{\text{TLG}*} + \Pi_r^{\text{TLG}*} \quad (15)$$

### 1.2.2 集中决策下模型分析

集中决策下共同合作 (cooperative decision-making, CD) 模型是供应链成员企业达成具有约束力的合作协议, 按照供应链利润最大化原则进行决策的一种合作模型<sup>[18]</sup>。在 CD 模型中, 供应商、制造商和零售商作为一个利益整体, 对供应链的碳减排水平  $\Delta e^{\text{CD}}$  以及产品需求量  $q^{\text{CD}}$  做出集中决策, 以实现供应链整体的利润最大化。模型如下:

$$\Pi_{\text{sc}}^{\text{CD}} = q^{\text{CD}}(v - kE^{\text{CD}} - c_m - c_s) - (1 - \lambda_{\text{CD}})c(\Delta e^{\text{CD}}) - t(e_{\text{cd}} q^{\text{CD}} - \Delta e^{\text{CD}}) \quad (16)$$

式中:  $e_{\text{cd}}$  为集中决策下供应链单位产品的碳排放量。

根据一阶最优条件, 供应链成员通过决策 ( $q^{\text{CD}}$ ,  $\Delta e^{\text{CD}}$ ) 使其自身利润最大化, 由此得到当前最优碳减排水平  $\Delta e^{\text{CD}*}$  和最优产品需求量  $q^{\text{CD}*}$ :

$$q^{\text{CD}*} = \frac{kt + 2\alpha(1 - \lambda_{\text{CD}})(c_m c_s + v - c_m - e_{\text{cd}} t)}{k(k - 4\alpha e_{\text{cd}}(1 - \lambda_{\text{CD}}))} \quad (17)$$

$$\Delta e^{\text{CD}*} = -\frac{v - c_m - c_s + e_{\text{cd}} t}{k - 4\alpha e_{\text{cd}}(1 - \lambda_{\text{CD}})} \quad (18)$$

由式(16)~(18)以及假设 2 可以得到供应链的碳排放量  $E^{\text{CD}*}$ 、产品的零售价格  $p^{\text{CD}*}$  和供应链的利润  $\Pi_{\text{sc}}^{\text{CD}*}$ :

$$E^{\text{CD}*} = (1 - \frac{e_{\text{cd}}}{k}) \cdot$$

$$\frac{kt - 2\alpha(1 - \lambda_{\text{CD}})(c_m - c_s - v + e_{\text{cd}} t)}{k - 4\alpha e_{\text{cd}}(1 - \lambda_{\text{CD}})} \quad (19)$$

$$p^{\text{CD}*} = v - kE^{\text{CD}*} \quad (20)$$

$$\Pi_{\text{sc}}^{\text{CD}*} = q^{\text{CD}*}(v - kE^{\text{CD}*} - c_m - c_s) - (1 - \lambda_{\text{CD}})c(\Delta e^{\text{CD}*}) - t(e_{\text{cd}} q^{\text{CD}*} - \Delta e^{\text{CD}*}) \quad (21)$$

### 1.2.3 碳减排成本共担收益共享协调机制

通常, 集中决策会优于分散决策, 但集中决策将损害某一参与者的利益<sup>[11]</sup>。碳减排成本共担收益共享协调机制 (carbon emission reduction cost-

sharing benefit-sharing coordination mechanism, RS)是解决供应链企业之间利益分配问题、提高供应链效率的一种方法<sup>[19]</sup>。本文在建立的CD模型中引入碳减排成本共担收益共享协调机制,以达到集中决策的最优效益水平。首先,三级纸制品供应链企业成员中供应商、制造商和零售商按照 $\varphi_s$  ( $0 < \varphi_s < 1$ )、 $\varphi_m$  ( $0 < \varphi_m < 1$ )、 $\varphi_r$  ( $0 < \varphi_r < 1$ )对供应链的减排成本 $(1-\lambda)c(\Delta e^{RS})$ 进行分担;其次,供应商以低价提供给制造商原材料,制造商以低价将产品销售给零售商;最后,在销售结束后供应商、制造商和零售商按照 $\phi_s$  ( $0 < \phi_s < 1$ )、 $\phi_m$  ( $0 < \phi_m < 1$ )、 $\phi_r$  ( $0 < \phi_r < 1$ )将三级纸制品供应链所获效益 $q^{RS}(v-kE^{RS})$ 进行合理统筹分配。其中 $\phi_s + \phi_m + \phi_r = 1$ ,  $\varphi_s + \varphi_m + \varphi_r = 1$ ,  $\lambda_{CD} = \lambda_{RS}$ 。分别构建供应商决策模型 $\Pi_s^{RS}$ 、制造商决策模型 $\Pi_m^{RS}$ 以及零售商决策模型 $\Pi_r^{RS}$ :

$$\begin{aligned} \Pi_s^{RS} = & \phi_s q^{RS}(v-kE^{RS}) + (\omega_s^{RS} - c_s)q^{RS} - \\ & \varphi_s((1-\lambda_{RS})c(\Delta e^{RS})) - \\ & t(e_s q^{RS} - \Delta e_s) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Pi_m^{RS} = & \phi_m q^{RS}(v-kE^{RS}) + \\ & (\omega_m^{RS} - c_m - \omega_s^{RS})q^{RS} - \\ & \varphi_m((1-\lambda_{RS})c(\Delta e^{RS})) - \\ & t(e_m q^{RS} - \Delta e_m) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \Pi_r^{RS} = & \phi_r q^{RS}(v-kE^{RS}) - \omega_m^{RS} q^{RS} - \\ & \varphi_r((1-\lambda_{RS})c(\Delta e^{RS})) - \\ & t(e_r q^{RS} - \Delta e_r) \end{aligned} \quad (24)$$

命题:三级纸制品供应链契约协调下 $\phi_s = \varphi_s$ 、 $\phi_m = \varphi_m$ 、 $\phi_r = \varphi_r$ ,即碳减排成本分担系数与收益共享系数相等。

证明:若要保证收益共享契约下的供应链系统利润函数与集中决策下CD模型的利润相同,只需参数 $(q^{RS*}, \Delta e^{RS*})$ 满足如下条件:

$$\begin{aligned} q^{RS*} &= q^{CD*} \\ \Delta e^{RS*} &= \Delta e^{CD*} \end{aligned}$$

对收益共享契约下供应商利润函数式(22)分别关于 $q^{RS}$ 和 $\Delta e^{RS}$ 求偏导,并令其等于0,联立方程并求解,可以得到当前最优减排水平 $\Delta e^{RS*}$ 和最优产品需求量 $q^{RS*}$ :

$$\Delta e^{RS*} = -\frac{(\omega_s^{RS} - c_s + \phi_s v)}{\phi_s(k - 4e_{cd}\phi_s(\lambda_{RS} - 1))} \quad (25)$$

$$q^{RS*} = \frac{2\alpha\varphi_s(\lambda_{RS} - 1)(\omega_s^{RS} - c_s + \phi_s v)}{\phi_s(k - 4e_{cd}(\lambda_{RS} - 1))} \quad (26)$$

将式(18)与式(25)联立求解,可得出每份产品所需原材料的最优供应价格 $\omega_s^{RS}$ ,将其代入式(26),可得此时 $q^{RS*}$ 为:

$$q^{RS*} = -\frac{2\alpha\varphi_s(\lambda_{RS} - 1)k(c_m + c_s + e_{cd}t)}{k(\phi_s k + 2(\lambda_{RS} - 1)\varphi_s)(k + 4e_{cd}(\lambda_{RS} - 1))} - \frac{2\alpha(\lambda_{RS} - 1)(c_m - c_s - v + e_{cd}t)}{k(\phi_s k + 2\varphi_s(\lambda_{RS} - 1))(k + 4e_{cd}(\lambda_{RS} - 1))} \quad (27)$$

联立式(17)与式(27),即可证 $\phi_s = \varphi_s$ ,同理可证 $\phi_m = \varphi_m$ 、 $\phi_r = \varphi_r$ ,证毕。

为促成供应链成员企业的三方合作决策,收益共享契约下参加者各成员企业的利润必须不少于分散模型下各自的收入,同时各成员不损失供应链集体利益也可获得自身最大利润。假设供应商、制造商和零售商的碳减排成本共担收益共享系数分别为 $\phi_s$  ( $0 < \phi_s < 1$ )、 $\phi_m$  ( $0 < \phi_m < 1$ )、 $\phi_r$  ( $0 < \phi_r < 1$ )。则碳减排成本共担收益共享系数需要满足如下方程组:

$$\begin{cases} \phi_s \Pi_{sc}^{CD*} \geq \Pi_s^{TLG*} \\ \phi_m \Pi_{sc}^{CD*} \geq \Pi_m^{TLG*} \\ \phi_r \Pi_{sc}^{CD*} \geq \Pi_r^{TLG*} \end{cases} \quad (28)$$

## 2 算例分析

以香烟折叠纸盒(GDX条盒,高88.48 mm×宽280.46 mm×厚48 mm,含内包装)三级供应链为例,结合文献[20]中不同供应链环节的碳排放以及成本数据,进一步分析供应链成员间的减排责任分配和整体利润优化,具体参数取值如下: $v=500$ 、 $\alpha=3$ 、 $c_s=0.04$ 元/套、 $c_m=0.015$ 元/套、 $e_s=0.15$  kg/套、 $e_m=0.03$  kg/套、 $e_r=0.02$  kg/套、 $\lambda_{CD}=0.3$ 、 $\lambda_s=0.2$ 、 $\lambda_m=0.07$ 、 $\lambda_r=0.03$ 。

### 2.1 消费者低碳偏好系数和碳税变化对变量的影响

采用MATLAB软件构建TLG与CD决策模型,并在不同模型下分别建立消费者低碳偏好系数 $k$ 、碳税 $t$ 与三级纸制品供应链的需求量、单位售价、供应链碳减排量以及利润之间的函数,其中消费者低碳偏好系数 $k$ 的取值范围为 $[0.2, 0.7]$ ,碳税 $t=50$ 元/吨。将函数可视化,以反映消费者低碳偏好系数对香烟折叠纸盒零售价、碳减排量、需求量、供应链总体收益的影响,结果如图2所示。同时,在碳税税率变化中设置 $t$ 的取值范围为 $[20, 70]$ , $k=0.5$ 。碳税税率对四种变量的影响如图3所示。

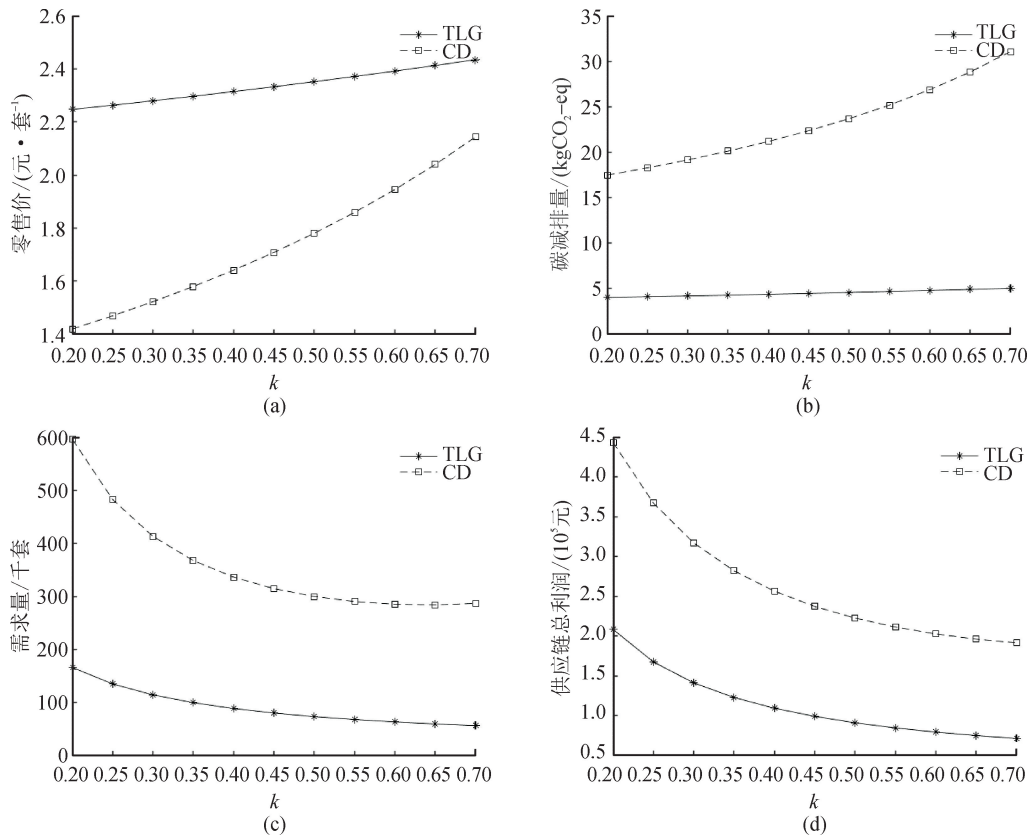


图 2 消费者低碳偏好系数对各变量的影响

Fig. 2 Influence of consumers' low-carbon preference coefficient on various variables

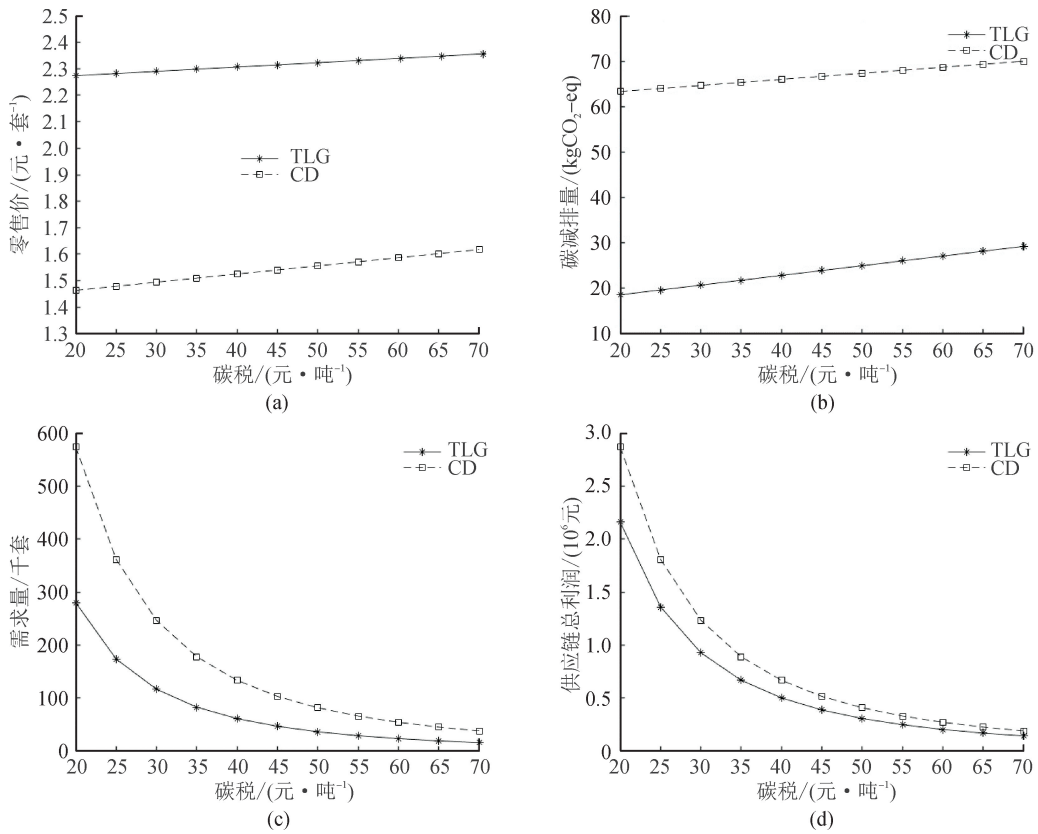


图 3 碳税对各变量的影响

Fig. 3 Influence of carbon tax on each variable

由图 2 可知,在 TLG、CD 模型下,消费者低碳偏好系数  $k$  与零售价、碳减排量呈正相关,与需求量、供应链总利润呈负相关。通过对比发现,在 CD 模型中,消费者低碳偏好系数对零售价、碳减排量、市场需求量、供应链总利润的影响更加显著。随着  $k$  的增大,TLG 模型中的零售价始终高于 CD 决策模型,并且由于碳减排量的增多,CD 模型下企业成员会提高产品单价来保证供应链的总体利润。另外,无论消费者低碳偏好系数在合理范围内如何变化,在集中决策下,CD 模型的供应链总利润、碳减排量、市场需求量始终高于 TLG 模型,这也证明了三级纸制品供应链企业进行集中决策,其整体供应链会达到最优利润值。

由图 3 可知,在 TLG、CD 模型下,碳税  $t$  与需求量和供应链总利润呈显著负相关,与零售价和碳减排量呈正相关。其中,TLG 模型下的纸制品零售价会始终高于 CD 模型下的零售价,而且碳税的变化不会改变 CD 模型下供应链总利润、碳减排量、市

场需求量始终高于 TLG 模型的情况。

在该三级纸制品供应链模型中,企业碳排放成本的增加会促使企业成员进行碳减排,并且会降低供应链企业的产品需求量以及总体利润,该结果在集中决策下的 CD 模型中更为显著,这表明企业可以在完成减排任务的前提下提高供应链的总体利润。因此,政府应该制定一个合理的碳税范围,在保证减排目标达成的同时,能够推动整个供应链协调发展。

## 2.2 不同合作参数下各成员的最优决策

随着人们环保意识的增强,人们对于低碳产品的需求也会逐步增加。本文假定消费者低碳偏好系数  $k$  取 0.3、0.5、0.7,碳税  $t=50$  元/吨,在其他参数不变的情况下,得出 TLG、CD 模型下供应商、制造商、零售商以及供应链的最优预期利润、折叠纸盒的最优零售价以及产品最优的需求量,结果如表 2 所示,并计算出供应链各环节的碳排放以及碳减排量,结果如表 3 所示。

表 2 不同博弈模型下的最优决策结果

Tab. 2 Optimal decision results by different game models

$k$	模型	利润/元				零售价/ (元·套 <sup>-1</sup> )	产品需求 量/千套
		供应商	制造商	零售商	供应链		
0.3	TLG	77 272	38 636	21 211	137 119	2.37	118.97
	CD				342 685	1.58	429.76
0.5	TLG	49 609	24 804	14 571	88 984	2.44	76.34
	CD				240 478	1.85	311.89
0.7	TLG	38 102	19 051	12 032	69 185	2.53	58.63
	CD				206 840	2.22	298.25

可以看出,随着  $k$  的增加,两种决策下不管是供应商、制造商还是零售商的利润都不同程度地下降,但折叠纸盒包装材料的零售单价会增加,且 CD 模型价格始终低于 TLG 模型。从碳减排的角度, $k$  的增加会导致两种决策下供应链碳减排量不同程度的提升,但是整体供应链的碳排放会减少,说明低碳偏好系数的提升在一定范围内会促使企业进行节能减排以及控制碳排放。

相较于 TLG 模型,CD 模型折叠纸盒包装材料的售价更低,平均碳减排量也更高。当  $k=0.5$  时,折叠纸盒包装材料的碳减排量比 TLG 模型同比增加 385.24%,需求量增加 308.55%,供应链的总期望利润增加 170.25%。可以看出,CD 模型下折叠纸盒的竞争力是最大的,该模型可以使三级纸制品

供应链的利润达到最优水平。而在 TLG 模型中,三级纸制品供应链中的成员企业之间存在边缘效应,使折叠纸盒的售价偏高,导致市场需求量较低,供应链利润处于最低值,不利于企业的可持续发展。

为保证供应链成员积极参加集中决策下的共同合作模型,优化三级纸制品供应链利润分配,同时降低供应链整体的碳排放,本文引入碳减排成本共担收益共享协调机制作为协调策略,根据式(28)得出三组碳减排成本分担系数范围,即满足  $0.24 < \phi_s < 1$ 、 $0.12 < \phi_m < 1$ 、 $0.06 < \phi_r < 1$  且  $\phi_s + \phi_m + \phi_r = 1$ 。当  $k=0.5$  时,在碳减排成本和效益分担合同下获得各成员的最优利润,如表 4 所示。

表 3 供应链各环节碳排放以及碳减排量

Tab. 3 Carbon footprint and carbon emission reduction of each link in the supply chain

$k$	模型	碳排放/(kgCO <sub>2</sub> -eq)			供应链总碳减排量/ (kgCO <sub>2</sub> -eq)	供应链总碳排放/ (kgCO <sub>2</sub> -eq)
		供应商	制造商	零售商		
0.3	TLG	619.30 (3.18)	123.86 (0.64)	82.57 (0.43)	4.25	825.73
	CD	646.04 (14.12)	129.20 (2.83)	86.14 (1.88)	18.83	861.38
0.5	TLG	386.33 (3.41)	77.26 (0.68)	51.51 (0.45)	4.54	515.10
	CD	387.22 (16.52)	77.44 (3.30)	51.62 (2.21)	22.03	516.28
0.7	TLG	265.25 (3.53)	53.05 (0.70)	35.36 (0.47)	4.70	353.66
	CD	265.56 (19.13)	53.11 (3.82)	35.41 (2.55)	25.50	354.08

注:括号内数值为各企业碳减排量。

表 4 不同合作参数下最优决策结果

Tab. 4 Optimal decision results for different cooperation parameters

碳减排成本共担 收益共享系数			供应商 利润/元	制造商 利润/元	零售商 利润/元
$\phi_s$	$\phi_m$	$\phi_r$			
0.3	0.3	0.4	72 139	72 153	96 185
0.35	0.4	0.25	84 162	96 199	60 116
0.4	0.35	0.25	96 185	84 176	60 116
0.45	0.4	0.15	108 208	96 199	36 069
0.5	0.3	0.2	120 232	72 153	48 092

由表 4 可知,在碳减排成本共担收益共享系数可行范围内, $\phi_s$ 、 $\phi_m$ 、 $\phi_r$  的不同取值组合都可以帮助供应商、制造商以及零售商增加利润,实现供应链的协调。在保证供应链达到 CD 模型中的总利润的前提下,遵循收益共享契约的纸制品供应链供应商、制造商和零售商的利润均高于分散决策下 TLG 模型中各成员的利润。供应链中成员企业利润的增量取决于具体的碳减排成本共担收益共享系数,该系数由成员企业在供应链中的位置和彼此之间的议价能力决定。

### 3 结 论

本文以纸制品供应链以及供应链成员企业的利润收益为目标,以单一供应商、制造商和零售商构成的某种纸制品包装材料供应链为研究对象,并遵循

减少供应链碳排放的原则,针对 TLG、CD 博弈模型进行供应链决策,使供应链成员企业的利润达到最优。同时,探究消费者低碳偏好、市场碳税变化对纸制品包装材料的需求量、销售单价、供应链利润以及碳减排量的影响,并引入碳减排成本共担收益共享协调机制,探讨如何进行利润分配和分担减排成本,使三级纸制品供应链成员企业积极参加集中决策下的共同合作模型,从而使供应链的利润达到最优水平。

1) 供应链上下游企业实行低碳减排决策与消费者低碳偏好系数息息相关,当消费者低碳偏好系数变大时,会促使供应链零售价格提高但利润降低。其中,在 CD 模型下消费者低碳偏好系数对市场需求量、供应链总利润的影响更加显著,而在 TLG 模型中影响较小;企业购买碳税会导致其成本增加,进而促使其进行更多的碳减排投入,并且碳税在一定范围内波动会导致市场需求量以及企业的效益降低。

2) 当消费者偏好系数为 0.5,碳税价格为 50 元/吨时,TLG、CD 模型纸制品供应链的利润在 88 984 元到 240 478 元之间,纸制品包装材料碳减排量的范围是 4.54 kgCO<sub>2</sub>-eq 到 22.03 kgCO<sub>2</sub>-eq。在 TLG 模型下,三级纸制品供应链的市场需求量较低,整个供应链的利润处于最低值,平均每套纸制品包装材料的碳减排量较少;在 CD 模型下,纸制品包装材料的售价较低,三级纸制品供应链的利润达



到最高水平,平均每套包装材料的碳减排量也达到最高值。

3) 通过碳减排成本共担收益共享协调机制,CD模型可以在纸制品供应链利润最大化的前提下(相比TLG分散决策模型),提升供应链成员企业自身的利益。供应链中成员企业利润的增量取决于碳减排成本共担收益共享系数的具体数值,该系数由参与成员在供应链中的位置和彼此之间的议价能力决定。

本文仅分析了在信息对称以及其他成本固定的情况下,由单一供应商、制造商以及零售商组成的三级纸制品供应链,实际上,纸制品包装材料供应链涉及多个独立参与者,每个参与者都可以自愿选择是否进行投资减排,且市场碳税也随时间发生变化。在今后的研究中,还应该考虑在信息不对称条件下,供应链上下游多个成员的碳减排情况与利润协调策略。

#### 参考文献:

- [1] 方建国,林凡力. 绿色金融与经济可持续发展的关系研究—基于中国30个省际面板数据的实证分析[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2019, 35(1): 14-20.  
FANG Jianguo, LIN Fanli. Study on the relationship of green finance and sustainable development of economy: empirical analysis based on 30 provincial panel data in China[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences), 2019, 35(1):14-20.
- [2] 任丽娟. 生命周期评价方法及典型纸产品生命周期评价研究[D]. 北京:北京工业大学,2011.  
REN Lijuan. Methodology research and typical paper products of life cycle assessment[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
- [3] 宋雯琪,李玉峰,王钦池. 2021年全球纸业发展报告[J]. 中华纸业, 2023, 44(3):7-11.
- [4] 郭施宏. “双碳”目标下的低碳试点效果再评估[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2023, 23(1): 137-148.  
GUO Shihong. Re-evaluation of low-carbon pilot project effects towards the goals of carbon peak and carbon neutrality[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2023, 23(1): 137-148.
- [5] DRAGOMIR V D. The disclosure of industrial greenhouse gas emissions: a critical assessment of corporate sustainability reports[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 29: 222-237.
- [6] 张清文,陈曦. 100%OCC生产的箱纸板碳足迹评价[J]. 中国造纸, 2015, 34(3): 20-24.  
ZHANG Qingwen, CHEN Xi. Carbon footprint assessment of linerboard produced with 100% OCC[J]. China Pulp & Paper, 2015, 34(3): 20-24.
- [7] NOH J, KIM J S. Cooperative green supply chain management with greenhouse gas emissions and fuzzy demand [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208: 1421-1435.
- [8] 宋兆宇,孙秉珍,赵可彤. 线性需求供应链中供应商参股制造商的定价与协调[J]. 运筹与管理, 2021, 30(6):166-171.  
SONG Zhaoyu, SUN Bingzhen, ZHAO Ketong. Pricing and coordination of supplier shareholding manufacturers under linear demand supply chain[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(6):166-171.
- [9] ZHANG T, CHOI T, ZHU X. Optimal green product's pricing and level of sustainability in supply chains: effects of information and coordination[J]. Annals of Operations Research, 2018, 30: 1-26.
- [10] 李潇. 考虑碳排放的生鲜农产品供应链协调研究[D]. 上海:东华大学,2019.  
LI Xiao. Research on coordination of fresh agricultural product supply chain considering carbon emission[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- [11] 方健,徐丽群. 基于收益共享契约的低碳供应链协调策略研究[J]. 科技管理研究, 2019, 39(23): 236-241.  
FANG Jian, XU Liqun. Research on coordination of low-carbon supply chain based on revenue sharing contract[J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(23): 236-241.
- [12] 张佩佩. 考虑消费者偏好的低碳供应链合作减排微分博弈研究[D]. 沈阳:东北大学,2015.  
ZHANG Peipei. Differential games of cooperative carbon-reduction in supply chain considering consumer preferences[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [13] FAHIMNIA B, SARKIS J, CHOUDHARY A, et al. Tactical supply chain planning under a carbon tax policy scheme: a case study[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 164: 206-215.
- [14] 林铭香,林勤保,马仕成,等. 定制猫眼彩盒的生命周期评价分析[J]. 包装工程,2020,41(21):125-130.  
LIN Mingxiang, LIN Qinbao, MA Shicheng, et al. Life cycle assessment on customized cat eye carton[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(21): 125-130.
- [15] 孙志霞. TY纸业绿色供应链项目可行性研究[D]. 济南:齐鲁工业大学,2017.  
SUN Zhixia. Feasibility study on TY paper green sup-

- ply chain project[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2017.
- [16] 廖吉林. 基于 Shapley 值的纸品供应链绿色收益分配研究—以中顺洁柔纸业为例[J]. 林业经济, 2018, 40(12): 47-50.  
LIAO Jilin. Research on green income distribution of paper supply chain based on Shapley value—a case study on Zhongshun Jierou paper industry[J]. Forestry Economics, 2018, 40(12): 47-50.
- [17] PAKSERESHT M, MAHDAVI I, SHIRAZI B, et al. Co-reconfiguration of product family and supply chain using leader-follower Stackelberg game theory: bi-level multi-objective optimization[J]. Applied Soft Computing, 2020, 91, 106203.
- [18] CHEN Y, LI Z, YANG B, et al. A Stackelberg game approach to multiple resources allocation and pricing in mobile edge computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 108: 273-287.
- [19] SONG H, GAO X. Green supply chain game model and analysis under revenue-sharing contract[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 170(1): 183-192.
- [20] 李梦婷. 折叠纸盒的生命周期评价研究[D]. 北京:北京印刷学院, 2019.  
LI Mengting. Study on the life cycle assessment of folding carton[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2019.

(责任编辑 周 蓓)

(上接第 460 页)

- [26] 周磊, 龚志民. 数字经济水平对城市绿色高质量发展的提升效应[J]. 经济地理, 2022, 42(11): 133-141.  
ZHOU Lei, GONG Zhimin. The impact of digital economy level on green high-quality development in Chinese cities [J]. Economic Geography, 2022, 42(11): 133-141.
- [27] 张元庆, 刘烁, 齐平. 数字产业协同创新发展对碳排放强度影响研究[J]. 西南大学学报(社会科学版), 2023, 49(3): 114-128.  
ZHANG Yuanqing, LIU Shuo, QI Ping. A research on the impact of collaborative innovation development of digital industry on carbon emission intensity[J]. Journal of Southwest University(Social Sciences Edition), 2023, 49(3): 114-128.
- [28] 尹迎港, 常向东. 科技创新、产业结构升级与区域碳排放强度—基于空间计量模型的实证分析[J]. 金融与经济, 2021(12): 40-51.
- [29] PREACHER K J, HAYES A F. Asymptotic and re-sampling strategies for assessing and comparing indirect effects in multiple mediator models[J]. Behavior Research Methods, 2008, 40(3): 879-891.
- [30] 钱海章, 陶云清, 曹松威, 等. 中国数字金融发展与经济增长的理论与实证[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(6): 26-46.  
QIAN Haizhang, TAO Yunqing, CAO Songwei, et al. Theoretical and empirical analysis on the development of digital finance and economic growth in China [J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2020, 37(6): 26-46.
- [31] 许钊, 高煜, 霍治方. 数字金融的污染减排效应[J]. 财经科学, 2021(4): 28-39.  
XU Zhao, GAO Yu, HUO Zhifang. Research on pollution reduction effect of digital finance[J]. Finance & Economics, 2021(4): 28-39.
- [32] 谢云飞. 数字经济对区域碳排放强度的影响效应及作用机制[J]. 当代经济管理, 2022, 44(2): 68-78.  
XIE Yunfei. The effect and mechanism of digital economy on regional carbon emission intensity[J]. Contemporary Economic Management, 2022, 44(2): 68-78.

(责任编辑 周 蓓)