

区块链技术下绿色供应链减排策略与智能合约

王心¹⁺, 王雅生², 张书华¹, 王新宇¹, 徐帅³

1. 天津财经大学管理科学与工程学院, 天津 300222

2. 合肥工业大学管理学院, 合肥 230041

3. 锐翔工控(天津)自动化机械设备有限公司, 天津 300350

+ 通信作者 E-mail: wang_xin@tjufe.edu.cn

摘要:“双碳”背景下,绿色消费理念已深入人心。但消费者对于绿色产品的绿色度并非完全信任,区块链技术的信息透明与追踪溯源机制可以很好地解决这一问题。在传统绿色供应链中引入区块链技术,考虑消费者绿色偏好和绿色信任度,构建区块链技术应用前后以及不同权力结构下绿色供应链成员间的博弈模型,定量地研究其减排策略和定价策略,并探讨如何实现最优的消费者剩余和社会总福利。在采用区块链技术的基础上,设计智能批发价合约和成本分担智能合约,给出智能批发价的合理取值范围和最优的成本分担比例,以提高企业运营效率,实现供应链协调。结果表明,在消费者绿色偏好程度较高时,引入区块链技术能够给供应链上的各参与方带来更多收益,并且消费者购买绿色产品的意愿越高,收益就越大。通过数值分析发现,在零售商主导的情形下,智能合约能够更好地协调供应链。最后通过实证案例验证了相关结论的有效性。

关键词:绿色供应链;区块链;智能合约;供应链协调;博弈论

文献标志码:A **中图分类号:**F402.3;TP391

Green Supply Chain Emission Reduction Strategies and Smart Contracts Under Blockchain Technology

WANG Xin¹⁺, WANG Yasheng², ZHANG Shuhua¹, WANG Xinyu¹, XU Shuai³

1. School of Management Science and Engineering, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China

2. College of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230041, China

3. Real Fly Industrial Automation (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300350, China

Abstract: Under the background of “double carbon”, the concept of green consumption has been deeply rooted in the hearts of people. However, consumers do not fully trust the greenness of products. The information transparency and traceability mechanism of blockchain technology can well dispel consumers' doubts. Introducing blockchain technology into traditional green supply chains, considering consumer green preferences and green trust, a game model is constructed among members of the green supply chain before and after the application of blockchain technology, as well as under different power structures, to quantitatively study their emission reduction and pricing strategies, and to explore how to achieve optimal consumer surplus and total social welfare. On the basis of adopting

基金项目:国家自然科学基金面上项目(12271395);国家自然科学基金青年基金(12101447);教育部人文社会科学研究基金(22YJAZH156);天津市教委高校人文社科研究一般项目(2020SK100)。

This work was supported by the General Program of the National Natural Science Foundation of China (12271395), the National Natural Science Foundation for Youth of China (12101447), the Humanities and Social Science Research Program of the Ministry of Education of China (22YJAZH156), and the General Research Program of Humanities and Social Sciences in Colleges and Universities of Tianjin Education Commission (2020SK100).

收稿日期:2023-02-03 **修回日期:**2023-04-24

blockchain technology, smart wholesale price contracts and cost sharing smart contracts are designed, and the reasonable range of smart wholesale prices and the optimal cost sharing ratio are calculated, to improve enterprise operational efficiency and achieve supply chain coordination. The results show that when consumers' green preference is high, the use of blockchain can bring more benefits to all participants in the supply chain. At the same time, the higher the willingness of consumers to buy green products, the greater the benefits. Through numerical analysis, it is found that the smart contracts can better coordinate the supply chain in the case of retailers leading the supply chain. Finally, the validity of the relevant conclusions is verified through empirical cases.

Key words: green supply chain; blockchain; smart contract; supply chain coordination; game theory

“双碳”目标是我国基于推动构建人类命运共同体的责任担当和实现可持续发展的内在要求而作出的重大战略决策。若想早日实现“双碳”目标,就需要政府、企业和消费者共同努力,而制造企业应用新技术实现绿色创新和升级转型更是重中之重^[1]。

绿色创新离不开企业与供应链上下游的有效合作^[2]。如制造企业格力通过打造“格力零碳健康家”的场景将自己的绿色产品推向市场;零售企业阿里巴巴及京东在“双11”购物消费节中,纷纷开通“绿色会场”。消费者的绿色偏好度和对绿色产品的信任度也会影响企业的减排努力程度。但是对于一些小企业,即使研发出了绿色度很高的产品,消费者也不一定购买,这是因为消费者对于小企业产品的绿色度不信任;相反,一些知名大企业生产的产品即使不是绿色产品,在打上了绿色标签的情况下,消费者也可能会购买,从而不利于“双碳”目标的实现。

区块链技术可以应用于上述场景来解决信任问题,同时提高供应链的运作效率,协同供应链上下游共同实施企业环境责任。区块链技术是去中心化存储,将所有信息公开记录在“公共记账本上”且不可篡改,因此可以实现产品溯源及碳足迹的追踪,从而消除消费者对于绿色产品的信任危机。2020年4月,国家发改委将区块链纳入国家新基建范畴,同时商务部等八个部门联合印发《关于进一步做好供应链创新与应用试点工作的通知》,明确“要加快区块链等新兴技术在供应链领域的集成应用”;工信部《关于加快推动区块链技术应用和产业发展的指导意见》强调,区块链与供应链管理、产品溯源、数据共享等实体经济领域的融合应用,是行业数字化转型和产业高质量发展的重要举措。习近平总书记在党的二十大报告中强调,“高质量发展是全面建设社会主义现代化国家的首要任务。”应用区块链新技术培育绿色低碳新产业是企业实现高质量发展的路径之一。国家一系列政策的出台,为推动区块链在绿色

低碳制造业领域的应用指明了方向。

本文将区块链技术引入绿色供应链中并设计智能合约,不但能够提升供应链各主体低碳决策协同度,降低交易成本,促进企业碳减排,还为绿色供应链企业在区块链技术下的碳减排策略、产品定价策略、供应链协调等提供结论性建议。从而加快区块链等新兴技术在绿色供应链领域的集成应用,提升绿色低碳产业现代化水平,推动行业数字化转型和产业高质量发展,早日实现“双碳”目标。

1 国内外研究现状

与本文密切相关的研究有四个方面:绿色供应链、区块链技术、智能合约、供应链权力结构。回顾了相关研究,并强调了本文内容与现有文献之间的差异。

第一个方面是关于绿色供应链的研究。国外文献多集中于分析供应链成本、约束条件及协调管理上。Qin等^[3]研究了在制造商具有公平偏好而零售商是公平中立情形下绿色供应链各成员如何进行环境成本分配。Liu等^[4]研究了基于定价行为的绿色供应链的协调和管理决策。Toktaş-Palut^[5]研究了一个有公平条件约束的三阶段正向供应链以及逆向供应链的集成契约。国内文献则侧重于绿色偏好对供应链的影响。如熊峰等^[6]构建了供应商主导下的二级绿色供应链模型,研究了供应商和零售商的风险偏好对于商品绿色度、线上线下价格以及供应链整体的影响。本文在之前研究的绿色供应链基础上,引入了区块链技术,探讨不同权力结构下绿色供应链各个成员应用区块链技术前后的均衡策略及其变化。

第二个方面是关于区块链技术的研究。国内外学者均研究了供应链与区块链的创新性结合。徐杨杨等^[7]结合区块链的去中心化和不可篡改性的优点,创新性地探索区块链技术在云制造中的应用,提出了一种基于区块链的云制造资源分配方法。谭春桥

等^[8]将区块链与传统疫苗销售模式相结合,比较了传统疫苗销售模式和基于区块链技术的疫苗销售模式下采用集中决策和分散决策的最优定价策略。Yu等^[9]通过构造一个零售商和一个供应商的二级供应链,研究了区块链技术对劳动力的溢出效应。Niu等^[10]研究了农产品在有细菌污染的情况下,通过区块链来确定细菌污染的责任方从而合理分摊污染成本。本文借鉴上述文献中各行业对区块链技术的应用,将区块链技术引入碳减排绿色生产供应链中,设计合理的变量和参数来研究区块链技术对绿色供应链的价格策略、碳减排策略和企业利润的影响,同时探讨区块链对社会总福利和消费者总剩余的影响。

第三个方面是关于智能合约的研究。国内文献多侧重于研究智能合约的具体制定方法及漏洞检测。如李雷孝等^[11]对形式化验证、符号执行、机器学习等智能合约漏洞检测方法及其对应工具的国内外现状进行调研,并分析讨论各种工具的优缺点。国外文献多研究智能合约对企业业务流程的再造与企业协调。De Giovanni等^[12]构造了一个供应商和一个零售商组成的供应链,研究收入共享智能合约的适用性以及如何使用智能合约协调企业间的关系。Raj等^[13]建立了一个供应链交易智能合约和相关通用平台,智能合约通过降低信用期内不付款的风险而使供应商受益。Chang等^[14]通过区块链和智能合约技术帮助跨企业边界进行业务流程再造。目前关于智能合约的研究大多集中在创新合约或系统构建上,而本文分析智能合约与传统合同之间的区别,通过构建绿色供应链,采用智能合约的博弈模型,得出智能批发价的合理取值范围以及最优的成本分担比例,可以作为智能合约程序算法中的函数规则,进而利用AI技术实现绿色供应链的智能合约,最终达到供应链协调。

最后一个方面是关于供应链权力结构的研究。国内外学者大都研究了不同场景下不同权力结构对供应链的影响。孙自来等^[15]构建了Nash博弈三种权力结构下制造商和零售商的利润模型。刘名武等^[16]研究了关税和消费者绿色偏好以及权力结构对供应链的影响。Li等^[17]研究了双渠道竞争供应链中的广告效率,以及在不同权力结构下价格对制造商广告和零售商广告及合作广告效果的影响。Luo等^[18]研究了零售商在不同权力结构调价下受顾客价值影响进行产品选择和定价的问题。本文除了研究不同权力结构对供应链成员决策影响外,还探讨了不同的

智能合约由谁主导更为合适。

综上,本文以当前研究的不足为出发点,考虑消费者绿色偏好和绿色信任度,构建区块链技术应用前后绿色供应链成员间的Stackelberg博弈模型,定量地研究区块链技术下绿色供应链的减排策略和定价策略,并设计智能批发价合约和成本分担智能合约,以提高企业运营效率,实现供应链协调。同时还研究了不同权力结构下,各参与方的均衡策略、消费者剩余以及社会总福利,并进一步分析了哪种情形对绿色供应链企业和整个社会更有利。

2 模型假设与符号

本文考虑一个绿色制造商 M 和一个零售商 R 组成的绿色供应链。绿色制造商 M 以单位批发价 w 将绿色产品卖给零售商 R ,零售商 R 再以零售价 p 销售给消费者。模型的主要假设如下:

(1)假设市场供求平衡,即出清市场。绿色制造商和零售商关于市场信息完全对称,绿色制造商生产绿色产品的产量与市场需求量相等,且市场能够完全出清。

市场出清是经济学的一个重要概念,在一般的经济分析中,常常假设通过价格机制可以自动实现市场出清,即价格的波动决定了消费者的购买量和厂商的生产量,并使供给量与需求量相等。本文应用这一假设可以简化模型。

(2)根据参考文献[19],市场需求与产品价格呈负相关,与消费者绿色产品偏好程度以及绿色制造商对绿色产品生产投入的减排努力呈正相关。未采用区块链技术时,市场需求 $D = a - p + \theta BE$,其中绿色信任系数 $0 < \theta < 1$ 。采用区块链技术时,消费者能准确得知绿色产品的信息,绿色信任系数 $\theta = 1$,则市场需求 $D = a - p + \beta E$ 。

(3)根据参考文献[20],社会总福利由企业利润、消费者剩余构成。其中企业利润为绿色制造商和零售商的总利润;消费者剩余为 $(\hat{p} - p)D/2$, \hat{p} 表示消费者愿意支付的最高价格,即产品需求为0时的价格,因此消费者剩余为 $D^2/2$ 。社会总福利反映了生产者和消费者可以获得的额外利润,是政府制定相关政策的重要指标。

(4)本文主要考虑四种情形,这四种情形涵盖了不同权力结构下供应链与区块链结合的各种情形:由绿色制造商主导的传统绿色供应链(MT);由绿色制造商主导的采用区块链技术的绿色供应链(MB);

由零售商主导的传统绿色供应链(RT);由零售商主导的采用区块链技术的绿色供应链(RB)。供应链成员关系如图1所示。



图1 博弈各方关系图

Fig.1 Relationship diagram of game parties

模型中使用的符号解释如表1所示。

表1 模型各符号含义解释

Table 1 Explanation of each symbol meaning of model

类别	符号	含义解释	
参数	a	市场容量参数	
	θ	消费者的绿色信任度, $0 < \theta \leq 1$	
	β	消费者对绿色产品的偏好程度	
	c_M	制造商生产绿色产品的单位生产成本	
	c_g	制造商的减排努力成本系数	
	c_b	制造商和零售商采用区块链技术的单位成本	
	v	引入区块链后交易效率提升带来的单位收益	
变量	w	制造商单位绿色产品的批发价	
	p	零售商的零售价	
	E	制造商为生产绿色产品付出的减排努力程度	
	D	市场需求	
	π	各参与方的利润	
	CS	消费者剩余	
	SW	社会总福利	
	其他符号	下标 M	表示绿色制造商
		下标 R	表示零售商
		上标 T	表示不采用区块链的情形
	上标 B	表示采用区块链的情形	
	上标 M	表示绿色制造商主导的情形	
	上标 R	表示零售商主导的情形	
	上标 C	表示成本分担合同的情形	
	上标 I	表示智能批发价合同的情形	

3 绿色制造商主导的供应链模型与分析

3.1 不采用区块链的绿色供应链模型(MT情形)

假设决策过程如图2所示。

步骤1 绿色制造商决定销售给零售商的批发价格 w 和减排努力 E 。

步骤2 零售商决定产品的零售价格 p 。

建立模型如下：

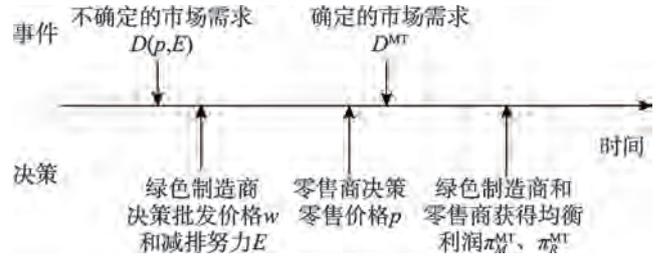


图2 MT情形下各方的决策顺序

Fig.2 Decision-making order of parties in MT situation

$$D = a - p + \theta\beta E \tag{1}$$

$$\pi_M = (w - c_M)D - \frac{c_g E^2}{2} \tag{2}$$

$$\pi_R = (p - w)D \tag{3}$$

引理1 在绿色制造商主导的传统绿色供应链模型下,当 $4c_g - \beta^2\theta^2 > 0$,绿色制造商 M 和零售商 R 的均衡决策结果如下：

$$p^{MT} = \frac{c_g(3a + c_M) - \beta^2\theta^2 c_M}{4c_g - \beta^2\theta^2}$$

$$w^{MT} = \frac{2ac_g(a + c_M) - \beta^2\theta^2 c_M}{4c_g - \beta^2\theta^2}$$

$$E^{MT} = \frac{(a - c_M)\beta\theta}{4c_g - \beta^2\theta^2}$$

$$D^{MT} = \frac{(a - c_M)c_g}{4c_g - \beta^2\theta^2}$$

$$\pi_M^{MT} = \frac{c_g(a - c_M)^2}{2(4c_g - \beta^2\theta^2)}$$

$$\pi_R^{MT} = \frac{c_g^2(a - c_M)^2}{(4c_g - \beta^2\theta^2)^2}$$

$$CS^{MT} = \frac{c_g^2(a - c_M)^2}{2(4c_g - \beta^2\theta^2)^2}$$

$$SW^{MT} = \frac{c_g(7c_g - \beta^2\theta^2)(a - c_M)^2}{2(4c_g - \beta^2\theta^2)^2}$$

命题1 $\frac{\partial \pi_M^{MT}}{\partial \beta}, \frac{\partial \pi_R^{MT}}{\partial \beta}, \frac{\partial CS^{MT}}{\partial \beta}, \frac{\partial SW^{MT}}{\partial \beta}, \frac{\partial w^{MT}}{\partial \beta}, \frac{\partial p^{MT}}{\partial \beta}, \frac{\partial D^{MT}}{\partial \beta}, \frac{\partial E^{MT}}{\partial \beta}$ 均大于0, $\frac{\partial \pi_M^{MT}}{\partial \theta}, \frac{\partial \pi_R^{MT}}{\partial \theta}, \frac{\partial CS^{MT}}{\partial \theta}, \frac{\partial SW^{MT}}{\partial \theta}, \frac{\partial w^{MT}}{\partial \theta}, \frac{\partial p^{MT}}{\partial \theta}, \frac{\partial D^{MT}}{\partial \theta}, \frac{\partial E^{MT}}{\partial \theta}$ 均大于0。即产品批发价、零售价、绿色制造商的减排努力、市场需求以及绿色制造商和零售商的利润、消费者剩余和社会总福利均会随着绿色信任度 θ 和消费者对绿色产品偏好程度 β 的提高而提高。

命题1说明两个现象:(1)如果可以完全消除消费者对于绿色产品的信任疑虑,则可以扩大市场需

求,提高生产者的利润,同时消费者剩余和社会总福利也随之得到提高。那么要想提高消费者的绿色产品信任度,绿色制造商需要付出更多努力去生产绿色产品,这会使得绿色制造商的批发价提高,零售商为了维持自己的利润也会提高零售价。(2)如果整个市场消费者的环保意识较强,或者消费者更加偏向购买绿色产品,那么首先绿色产品的需求量会增多,同时带动绿色制造商和零售商利润的提高,消费者剩余和社会总福利也随之提高。而绿色制造商为了让消费者更愿意购买绿色产品,就需要投入更多的精力去宣传环保的重要性或者努力研发质量好创意新的绿色产品,从而会导致绿色制造商为了维持自己的利润提高批发价,零售商为了维持自己的利润也会提高零售价。

3.2 采用区块链的绿色供应链模型(MB情形)

假设决策过程如图3所示。

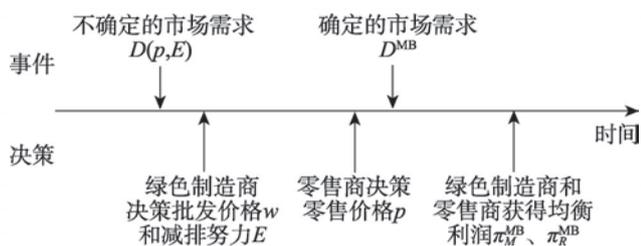


图3 MB情形下各方的决策顺序

Fig.3 Decision-making order of parties in MB situation

步骤1 绿色制造商决定销售给零售商的批发价格 w 和减排努力 E 。

步骤2 零售商决定产品的零售价格 p 。

建立模型如下：

$$D = a - p + \beta E \tag{4}$$

$$\pi_M = (w - c_M - c_b + v_M)D - \frac{c_g E^2}{2} \tag{5}$$

$$\pi_R = (p - w - c_b + v_R)D \tag{6}$$

引理2 在绿色制造商主导并且应用区块链技术的绿色供应链模型下,当 $4c_g - \beta^2 > 0$,绿色制造商 M 和零售商 R 的均衡决策结果如下：

$$p^{MB} = \frac{(3ac_g + 2c_b c_g + c_g c_M - 2c_b \beta^2 - c_M \beta^2 + (-c_g + \beta^2)v_M + (-c_g + \beta^2)v_R)(4c_g - \beta^2)}{4c_g - \beta^2}$$

$$w^{MB} = \frac{2ac_g + 2c_g c_M - c_b \beta^2 - c_M \beta^2 - 2c_g v_M + \beta^2 v_M + 2c_g v_R}{4c_g - \beta^2}$$

$$E^{MB} = \frac{a\beta - 2c_b \beta - c_M \beta + \beta v_M + \beta v_R}{4c_g - \beta^2}$$

$$D^{MB} = \frac{c_g(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)}{4c_g - \beta^2}$$

$$\pi_M^{MB} = \frac{c_g(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{2(4c_g - \beta^2)}$$

$$\pi_R^{MB} = \frac{c_g^2(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{(4c_g - \beta^2)^2}$$

$$CS^{MB} = \frac{c_g^2(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{2(4c_g - \beta^2)^2}$$

$$SW^{MB} = \frac{c_g(7c_g - \beta^2)(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{2(4c_g - \beta^2)^2}$$

命题2 (1) $\frac{\partial \pi_M^{MB}}{\partial \beta}, \frac{\partial \pi_R^{MB}}{\partial \beta}, \frac{\partial CS^{MB}}{\partial \beta}, \frac{\partial SW^{MB}}{\partial \beta}, \frac{\partial w^{MB}}{\partial \beta}, \frac{\partial D^{MB}}{\partial \beta}$ 均大于0, $\frac{\partial \pi_M^{MB}}{\partial c_b}, \frac{\partial \pi_R^{MB}}{\partial c_b}, \frac{\partial CS^{MB}}{\partial c_b}, \frac{\partial SW^{MB}}{\partial c_b}, \frac{\partial w^{MB}}{\partial c_b}, \frac{\partial D^{MB}}{\partial c_b}$ 均小于0。(2) 当 $\beta < \sqrt{c_g}, \frac{\partial p^{MB}}{\partial c_b} > 0$; 当 $\beta > \sqrt{c_g}, \frac{\partial p^{MB}}{\partial c_b} < 0$ 。即绿色制造商的产品批发价和减排努力、市场需求、制造商和零售商的利润、消费者剩余以及社会总福利均随着消费者对绿色产品偏好程度的提高而提高,随着采用区块链技术的单位成本的提高而降低。但零售商的零售价与采用区块链技术的单位成本的关系则与消费者对绿色产品偏好程度和绿色制造商减排努力的边际成本有关。

命题2说明不管是否采用区块链技术,消费者对绿色产品的偏好程度(或环保意识)都是一个积极因素。而引入区块链后增加的单位成本对于各方来说是一个消极因素。除此之外,本文还发现,如果消费者对绿色产品的偏好程度比较低,那么随着采用区块链技术的单位成本的增加,零售商会提高自己的零售价来维持利润;但如果消费者对绿色产品的偏好程度比较高,那么随着采用区块链技术的单位成本的增加,零售商反而会降低自己的零售价给消费者让渡一部分价值。

命题2说明不管是否采用区块链技术,消费者对绿色产品的偏好程度(或环保意识)都是一个积极因素。而引入区块链后增加的单位成本对于各方来说是一个消极因素。除此之外,本文还发现,如果消费者对绿色产品的偏好程度比较低,那么随着采用区块链技术的单位成本的增加,零售商会提高自己的零售价来维持利润;但如果消费者对绿色产品的偏好程度比较高,那么随着采用区块链技术的单位成本的增加,零售商反而会降低自己的零售价给消费者让渡一部分价值。

命题2说明不管是否采用区块链技术,消费者对绿色产品的偏好程度(或环保意识)都是一个积极因素。而引入区块链后增加的单位成本对于各方来说是一个消极因素。除此之外,本文还发现,如果消费者对绿色产品的偏好程度比较低,那么随着采用区块链技术的单位成本的增加,零售商会提高自己的零售价来维持利润;但如果消费者对绿色产品的偏好程度比较高,那么随着采用区块链技术的单位成本的增加,零售商反而会降低自己的零售价给消费者让渡一部分价值。

4 零售商主导的供应链模型与分析

4.1 不采用区块链的绿色供应链模型(RT情形)

假设决策过程如图4所示。

步骤1 零售商决定产品的零售价格 p 。

步骤2 绿色制造商决定销售给零售商的批发价格 w 和减排努力 E 。

建立模型如下：

$$D = a - p + \theta \beta E \tag{7}$$

$$\pi_R = (p - w)D - \frac{c_g E^2}{2} \tag{8}$$

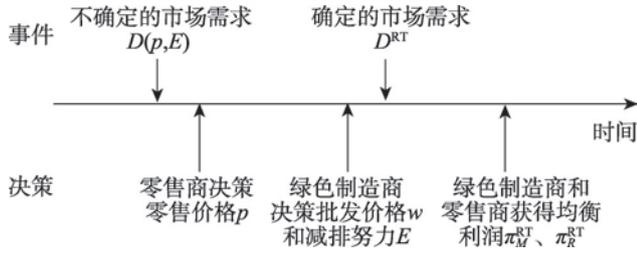


图4 RT情形下各方的决策顺序

Fig.4 Decision-making order of parties in RT situation

$$\pi_M = (w - c_M)D \quad (9)$$

引理3 在零售商主导的传统绿色供应链模型下,当 $2c_g - \beta^2\theta^2 > 0$,绿色制造商 M 和零售商 R 的均衡决策结果如下:

$$p^{RT} = \frac{3ac_g + c_g c_M - a\beta^2\theta^2 - c_M\beta^2\theta^2}{2(2c_g - \beta^2\theta^2)}$$

$$w^{RT} = \frac{ac_g + 3c_g c_M - 2c_M\beta^2\theta^2}{2(2c_g - \beta^2\theta^2)}$$

$$E^{RT} = \frac{(a - c_M)\beta\theta}{2(2c_g - \beta^2\theta^2)}$$

$$D^{RT} = \frac{c_g(a - c_M)}{2(2c_g - \beta^2\theta^2)}$$

$$\pi_M^{RT} = \frac{c_g(a - c_M)^2}{8(2c_g - \beta^2\theta^2)}$$

$$\pi_R^{RT} = \frac{c_g(a - c_M)^2}{4(2c_g - \beta^2\theta^2)}$$

$$CS^{RT} = \frac{c_g^2(a - c_M)^2}{8(2c_g - \beta^2\theta^2)^2}$$

$$SW^{RT} = \frac{c_g^2(a - c_M)^2(7c_g - 3\beta^2\theta^2)}{8(2c_g - \beta^2\theta^2)^2}$$

命题3 $\frac{\partial \pi_M^{RT}}{\partial \beta}$, $\frac{\partial \pi_R^{RT}}{\partial \beta}$, $\frac{\partial CS^{RT}}{\partial \beta}$, $\frac{\partial SW^{RT}}{\partial \beta}$, $\frac{\partial w^{RT}}{\partial \beta}$, $\frac{\partial p^{RT}}{\partial \beta}$, $\frac{\partial D^{RT}}{\partial \beta}$,

$\frac{\partial E^{RT}}{\partial \beta}$ 均大于0, $\frac{\partial \pi_M^{RT}}{\partial \theta}$, $\frac{\partial \pi_R^{RT}}{\partial \theta}$, $\frac{\partial CS^{RT}}{\partial \theta}$, $\frac{\partial SW^{RT}}{\partial \theta}$, $\frac{\partial w^{RT}}{\partial \theta}$, $\frac{\partial p^{RT}}{\partial \theta}$,

$\frac{\partial D^{RT}}{\partial \theta}$, $\frac{\partial E^{RT}}{\partial \theta}$ 均大于0。即产品批发价、零售价、绿色制造商的减排努力、市场需求以及绿色制造商和零售商的利润、消费者剩余和社会总福利均会随着绿色信任度 θ 和消费者对绿色产品偏好程度 β 的提高而提高。

命题3说明无论是绿色制造商主导供应链还是零售商主导供应链,提高消费者对绿色产品的偏好程度以及对绿色产品的信任度对参与各方都是有利的。

4.2 采用区块链的绿色供应链模型(RB情形)

假设决策过程如图5所示。

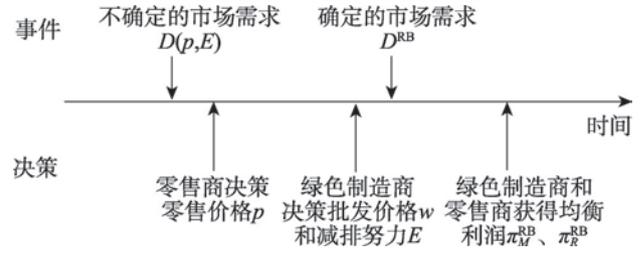


图5 RB情形下各方的决策顺序

Fig.5 Decision-making order of parties in RB situation

步骤1 零售商决定产品的零售价格 p 。

步骤2 绿色制造商决定销售给零售商的批发价格 w 和减排努力 E 。

建立模型如下:

$$D = a - p + \beta E \quad (10)$$

$$\pi_R = (p - w - c_b + v_R)D \quad (11)$$

$$\pi_M = (w - c_M - c_b + v_M)D - \frac{c_g E^2}{2} \quad (12)$$

引理4 在应用区块链技术的绿色供应链模型下,当 $2c_g - \beta^2 > 0$,绿色制造商 M 和零售商 R 的均衡决策结果如下:

$$p^{RB} = (3ac_g + 2c_b c_g + c_g c_M - a\beta^2 - 2c_b\beta^2 - c_M\beta^2 + (-c_g + \beta^2)v_M + (-c_g + \beta^2)v_R)/(2(2c_g - \beta^2))$$

$$w^{RB} = (ac_g + 2c_b c_g + 3c_g c_M - 2c_b\beta^2 - 2c_M\beta^2 + (-3c_g + 2\beta^2)v_M + c_g v_R)/(2(2c_g - \beta^2))$$

$$E^{RB} = \frac{\beta(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)}{2(2c_g - \beta^2)}$$

$$D^{RB} = \frac{c_g(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)}{2(2c_g - \beta^2)}$$

$$\pi_M^{RB} = \frac{c_g(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{8(2c_g - \beta^2)}$$

$$\pi_R^{RB} = \frac{c_g(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{4(2c_g - \beta^2)}$$

$$CS^{RB} = \frac{c_g^2(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{8(2c_g - \beta^2)^2}$$

$$SW^{RB} = \frac{c_g(7c_g - 3\beta^2)(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{8(2c_g - \beta^2)^2}$$

命题4 (1) $\frac{\partial \pi_M^{RB}}{\partial \beta}$, $\frac{\partial \pi_R^{RB}}{\partial \beta}$, $\frac{\partial CS^{RB}}{\partial \beta}$, $\frac{\partial SW^{RB}}{\partial \beta}$, $\frac{\partial D^{RB}}{\partial \beta}$, $\frac{\partial E^{RB}}{\partial \beta}$

均大于0, $\frac{\partial \pi_M^{RB}}{\partial c_b}$, $\frac{\partial \pi_R^{RB}}{\partial c_b}$, $\frac{\partial CS^{RB}}{\partial c_b}$, $\frac{\partial SW^{RB}}{\partial c_b}$, $\frac{\partial D^{RB}}{\partial c_b}$, $\frac{\partial E^{RB}}{\partial c_b}$ 均小

于0。(2)当 $\beta < \sqrt{c_g}$, $\frac{\partial p^{RB}}{\partial c_b} > 0$, $\frac{\partial w^{RB}}{\partial c_b} > 0$; 当 $\beta > \sqrt{c_g}$, $\frac{\partial p^{RB}}{\partial c_b} < 0$,

$\frac{\partial w^{RB}}{\partial c_b} < 0$ 。即绿色制造商的减排努力、市场需求、制造商和零售商的利润、消费者剩余以及社会总福利均随着消费者对绿色产品偏好程度的提高而提高，随着采用区块链技术的单位成本的提高而降低。但绿色制造商的批发价和零售商的零售价与采用区块链技术的单位成本的关系，则与消费者对绿色产品偏好程度和绿色制造商减排努力的边际成本有关。

命题4与命题2相比，除了零售商的零售价与消费者对绿色产品偏好程度和绿色制造商减排努力的边际成本有关外，绿色制造商的批发价也是如此。说明在零售商主导的情形下，如果消费者对绿色产品的偏好程度比较低，那么随着采用区块链技术的单位成本的增加，绿色制造商会提高批发价、零售商会提高自己的零售价来维持利润；但如果消费者对绿色产品的偏好程度比较高，那么随着采用区块链技术的单位成本的增加，绿色制造商会降低自己的批发价给零售商让渡一部分价值，而零售商会降低自己的零售价给消费者让渡一部分价值。

5 智能合约

5.1 智能批发价合约

智能批发价合约是在采用区块链的情况下，由区块链系统智能地算出一个最优的产品批发价，此时批发价为外生变量且不固定，制造商不参与批发价的制定。本节讨论不同权力结构下的智能批发价合约。

5.1.1 绿色制造商主导下的智能批发价合约(MI情形)

假设博弈过程如图6所示。

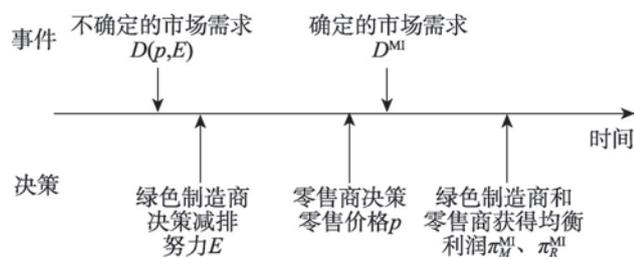


图6 MI情形下各方的决策顺序

Fig.6 Decision-making order of parties in MI situation

步骤1 绿色制造商决定减排努力 E 。
步骤2 零售商决定产品的零售价格 p 。
 建立模型如下：

$$D = a - p + \beta E \tag{13}$$

$$\pi_M = (w - c_M - c_b + v_M)D - \frac{c_g E^2}{2} \tag{14}$$

$$\pi_R = (p - w - c_b + v_R)D \tag{15}$$

引理5 在绿色制造商主导的智能批发价合约下，绿色制造商 M 和零售商 R 的均衡决策结果如下：

$$p^{MI} = \frac{1}{2} \left(a + c_b + w - \frac{\beta^2(c_b + c_M - w - v_M)}{2c_g} - v_R \right)$$

$$E^{MI} = \frac{\beta(w + v_M - c_b - c_M)}{2c_g}$$

$$D^{MI} = \frac{2c_g(a - c_b - w + v_R) - \beta^2(c_b + c_M - w - v_M)}{4c_g}$$

$$\pi_M^{MI} = (c_b + c_M - w - v_M)(4c_g(-a + c_b + w - v_R) + \beta^2(c_b + c_M - w - v_M)) / (8c_g)$$

$$\pi_R^{MI} = \frac{(2c_g(a - c_b - w + v_R) - \beta^2(c_b + c_M - w - v_M))^2}{16c_g^2}$$

$$CS^{MI} = \frac{(2c_g(a - c_b - w + v_R) - \beta^2(c_b + c_M - w - v_M))^2}{32c_g^2}$$

$$SW^{MI} = \frac{X + Y}{32c_g^2}$$

$$X = 4c_g(c_b + c_M - w - v_M)(4c_g(-a + c_b + w - v_R) + \beta^2(c_b + c_M - w - v_M))$$

$$Y = 3(2c_g(a - c_b - w + v_R) - \beta^2(c_b + c_M - w - v_M))^2$$

5.1.2 零售商主导下的智能批发价合约(RI情形)

假设博弈过程如图7所示。

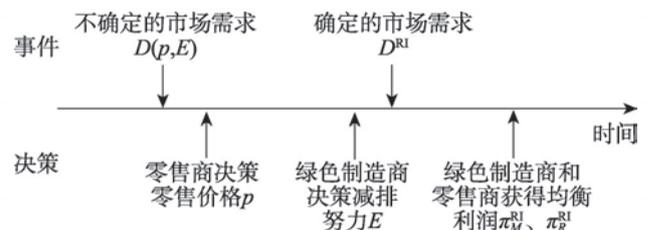


图7 RI情形下各方的决策顺序

Fig.7 Decision-making order of parties in RI situation

步骤1 零售商决定产品的零售价格 p 。

步骤2 绿色制造商决定减排努力 E 。

建立模型如下：

$$D = a - p + \beta E \tag{16}$$

$$\pi_R = (p - w - c_b + v_R)D \tag{17}$$

$$\pi_M = (w - c_M - c_b + v_M)D - \frac{c_g E^2}{2} \tag{18}$$

引理6 在零售商主导的智能批发价合约下，绿色制造商 M 和零售商 R 的均衡决策结果如下：

$$p^{RI} = \frac{c_g(a + c_b + w - v_R) - \beta^2(c_b + c_M - w - v_M)}{2c_g}$$

$$E^{RI} = \frac{\beta(w + v_M - c_b - c_M)}{c_g}$$

$$D^{\text{RI}} = \frac{c_g(a - c_b - w + v_R) - \beta^2(c_b + c_M - w - v_M)}{2c_g}$$

$$\pi_M^{\text{RI}} = \frac{1}{2}(c_b + c_M - w - v_M)(-a + c_b + w - v_R)$$

$$\pi_R^{\text{RI}} = \frac{(c_g(a - c_b - w + v_R) - \beta^2(c_b + c_M - w - v_M))^2}{4c_g^2}$$

$$CS^{\text{RI}} = \frac{(c_g(a - c_b - w + v_R) - \beta^2(c_b + c_M - w - v_M))^2}{8c_g^2}$$

$$SW^{\text{RI}} = \frac{1}{4}(2(c_b + c_M - w - v_M)(-a + c_b + w - v_R) + Z)$$

$$Z = \frac{3(c_g(a - c_b - w + v_R) - \beta^2(c_b + c_M - w - v_M))^2}{2c_g^2}$$

5.2 成本分担智能合约

成本分担合同是指零售商分担制造商的一部分减排成本,从而降低双重边际效应,实现供应链协调。但是传统合同的制定过程繁琐且效率低下,因此本文在采用区块链的情况下,通过计算最优的成本分担比例 k ,作为智能合约程序算法中的函数规则,设计成本分担智能合约,从而降低供应链企业的合同成本,提高效率,帮助企业实现数字化转型。本节讨论不同权力结构下的成本分担智能合约。

5.2.1 绿色制造商主导下的成本分担智能合约(MC情形)

假设博弈过程如图8所示。

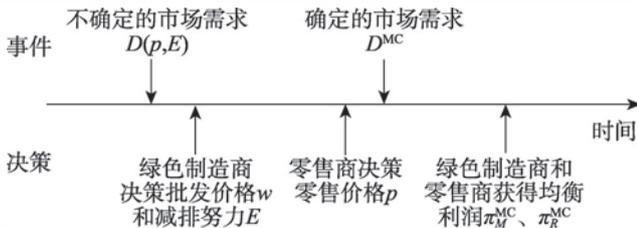


图8 MC情形下各方的决策顺序

Fig.8 Decision-making order of parties in MC situation

步骤1 绿色制造商决定销售给零售商的批发价格 w 和减排努力 E 。

步骤2 零售商决定产品的零售价格 p 。

建立模型如下：

$$D = a - p + \beta E \quad (19)$$

$$\pi_M = (w - c_M - c_b + v_M)D - \frac{kc_g E^2}{2} \quad (20)$$

$$\pi_R = (p - w - c_b + v_R)D - \frac{(1-k)c_g E^2}{2} \quad (21)$$

引理7 在成本分担智能合约下,当 $k > \frac{\beta^2}{4c_g}$,由绿色制造商 M 主导的均衡决策结果以及使社会总福利

达到最大值的 k 值如下：

$$p^{\text{MC}} = (3ac_g k + 2c_b c_g k + c_g k c_M - 2c_b \beta^2 - c_M \beta^2 + (-c_g k + \beta^2)v_M + (-c_g k + \beta^2)v_R) / (4c_g k - \beta^2)$$

$$w^{\text{MC}} = (2ac_g k + 2c_g k c_M - c_b \beta^2 - c_M \beta^2 - 2c_g k v_M + \beta^2 v_M + 2c_g k v_R) / (4c_g k - \beta^2)$$

$$E^{\text{MC}} = \frac{a\beta - 2c_b \beta - c_M \beta + \beta v_M + \beta v_R}{4c_g k - \beta^2}$$

$$D^{\text{MC}} = \frac{c_g k(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)}{4c_g k - \beta^2}$$

$$\pi_M^{\text{MC}} = \frac{c_g k(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{2(4c_g k - \beta^2)}$$

$$\pi_R^{\text{MC}} = \frac{c_g(2c_g k^2 + (-1+k)\beta^2)(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{2(4c_g k - \beta^2)^2}$$

$$CS^{\text{MC}} = \frac{c_g^2 k^2(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{2(4c_g k - \beta^2)^2}$$

$$SW^{\text{MC}} = \frac{c_g(7c_g k^2 - \beta^2)(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{(4c_g k - \beta^2)^2}$$

$$k^{\text{MC}} = \frac{4}{7}$$

5.2.2 零售商主导下的成本分担智能合约(RC情形)

假设博弈过程如图9所示。

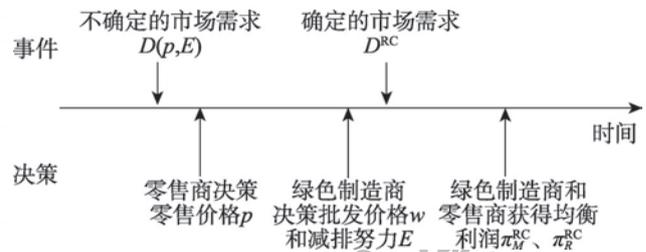


图9 RC情形下各方的决策顺序

Fig.9 Decision-making order of parties in RC situation

步骤1 零售商决定产品的零售价格 p 。

步骤2 绿色制造商决定销售给零售商的批发价格 w 和减排努力 E 。

建立模型如下：

$$D = a - p + \beta E \quad (22)$$

$$\pi_M = (w - c_M - c_b + v_M)D - \frac{kc_g E^2}{2} \quad (23)$$

$$\pi_R = (p - w - c_b + v_R)D - \frac{(1-k)c_g E^2}{2} \quad (24)$$

引理8 在成本分担智能合约下,当 $k > \frac{\beta^2}{2c_g}$ 且 $c_g > (1/4 + \sqrt{3})\beta^2$,由零售商 R 主导的均衡决策结果以及使社会总福利达到最大值的 k 值如下：

$$\begin{aligned}
 p^{RC} &= ((3a + 2c_b + c_M)c_g k^2 + (a - 2ak - 2c_b k - kc_M)\beta^2 + \\
 &\quad k(-c_g k + \beta^2)v_M + k(-c_g k + \beta^2)v_R)/(4c_g k^2 + (1 - 3k)\beta^2) \\
 w^{RC} &= ((a + 2c_b + 3c_M)c_g k^2 + (c_b - 3c_b k + c_M - 3kc_M)\beta^2 - \\
 &\quad (3c_g k^2 + (1 - 3k)\beta^2)v_M + c_g k^2 v_R)/(4c_g k^2 + (1 - 3k)\beta^2) \\
 E^{RC} &= \frac{k\beta(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)}{4c_g k^2 + (1 - 3k)\beta^2} \\
 D^{RC} &= \frac{c_g k^2(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)}{4c_g k^2 + (1 - 3k)\beta^2} \\
 \pi_M^{RC} &= \frac{c_g k^3(2c_g k - \beta^2)(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{2(4c_g k^2 + (1 - 3k)\beta^2)^2} \\
 \pi_R^{RC} &= \frac{c_g k^2(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{2(4c_g k^2 + (1 - 3k)\beta^2)} \\
 CS^{RC} &= \frac{c_g^2 k^4(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{2(4c_g k^2 + (1 - 3k)\beta^2)^2} \\
 SW^{RC} &= \frac{c_g k^2(7c_g k^2 + (1 - 4k)\beta^2)(a - 2c_b - c_M + v_M + v_R)^2}{2(4c_g k^2 + (1 - 3k)\beta^2)^2} \\
 k^{RC} &= \frac{2(5c_g + 3\beta^2)}{39c_g} - \tau_1 + \tau_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_1 &= 2^{1/3}(-100c_g^2 + 114c_g\beta^2 - 36\beta^4)/ \\
 &\quad (39c_g(2000c_g^3 + 1143c_g^2\beta^2 - 2052c_g\beta^4 + 432\beta^6 + \\
 &\quad 39\sqrt{3}\sqrt{4000c_g^5\beta^2 - 5877c_g^4\beta^4 + 2808c_g^3\beta^6 - 432c_g^2\beta^8})^{1/3}) \\
 \tau_2 &= \frac{1}{39 \times 2^{1/3}c_g} (2000c_g^3 + 1143c_g^2\beta^2 - 2052c_g\beta^4 + 432\beta^6 + \\
 &\quad 39\sqrt{3}\sqrt{4000c_g^5\beta^2 - 5877c_g^4\beta^4 + 2808c_g^3\beta^6 - 432c_g^2\beta^8})^{1/3}
 \end{aligned}$$

6 数值分析

利用 Wolfram Mathematica 软件对上述模型进行数值分析,模型中参数赋值如下: $a = 50, c_M = 3, c_b = 4, c_g = 5, v_M = 4, v_R = 3, \theta = 0.5$ 。

6.1 供应链企业利润分析

以消费者对绿色产品的偏好程度 β 为横轴,以绿色制造商和零售商在四种情形下的利润为纵轴,绘制利润曲线,如图 10 和图 11 所示。

通过观察图 10 和图 11,本文得到以下推论。

推论 1 图 10 和图 11 中的利润曲线均为递增的曲线,说明无论是绿色制造商还是零售商主导供应链,无论是否采用区块链技术,绿色制造商和零售商的利润均随着消费者对绿色产品偏好程度的增加而增加。

推论 2 图 10 中,当 $\beta > 1.050$ 时,绿色制造商采用区块链比不采用区块链获利多。图 11 中,当 $\beta > 0.744$ 时,零售商采用区块链比不采用区块链获利

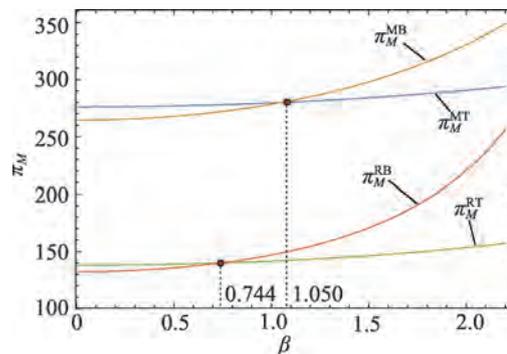


图 10 绿色制造商在四种情形下的利润

Fig.10 Profits of green manufacturers in four situations

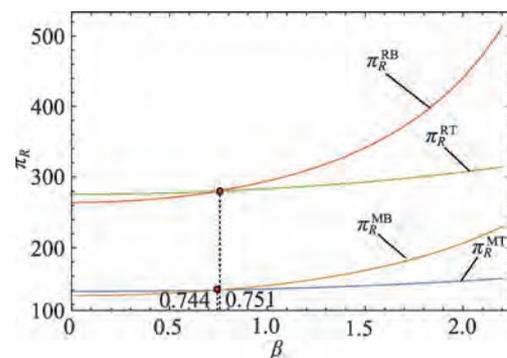


图 11 零售商在四种情形下的利润

Fig.11 Profits of retailers in four situations

多。这说明无论是绿色制造商主导还是零售商主导供应链,当消费者绿色偏好程度较高时,绿色制造商和零售商均是采用区块链比不采用区块链的利润多。即当消费者更倾向购买绿色产品时,绿色制造商和零售商才更愿意采用区块链技术。

推论 3 图 10 中,无论是否采用区块链技术,绿色制造商主导的利润曲线总在零售商主导的利润曲线的上方。同时图 11 中,无论是否采用区块链技术,零售商主导的利润曲线总在绿色制造商主导的利润曲线的上方。这说明无论是否采用区块链技术,绿色制造商和零售商均在自己主导供应链时获利更多。

6.2 消费者剩余和社会总福利分析

(1)以消费者对绿色产品的偏好程度 β 为横轴,以四种情形下的消费者剩余为纵轴,绘制消费者剩余曲线,如图 12 所示。

推论 4 消费者剩余随着消费者对绿色产品的偏好程度的提高而提高。这说明如果消费者更愿意购买绿色产品,则会提高自己的正向效用。

推论 5 无论由谁主导供应链,当 $\beta > 0.756$ 时,采用区块链技术比不采用区块链技术的消费者剩余更多,且随着 β 增加的幅度更大。这说明当消费者对

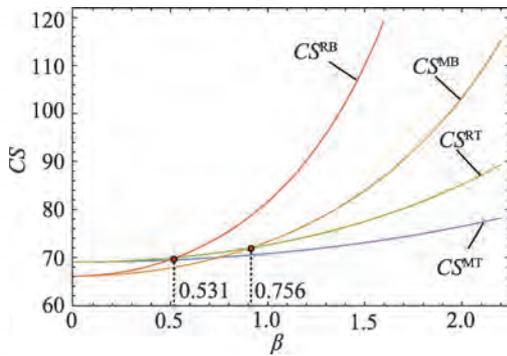


图12 四种情形下的消费者剩余

Fig.12 Consumer surplus in four situations

绿色产品偏好程度较高时,采用区块链技术对消费者是有益的。

推论6 无论是否采用区块链技术,零售商主导供应链时的消费者剩余总是多于绿色制造商主导供应链时的消费者剩余。这说明由零售商主导供应链能使消费者获益更多。

(2)以消费者对绿色产品的偏好程度 β 为横轴,以四种情形下的社会总福利为纵轴,绘制社会总福利曲线,如图13所示。

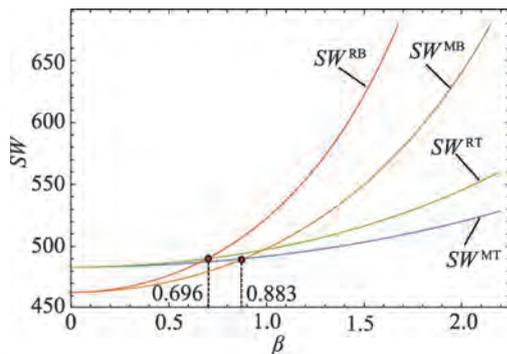


图13 四种情形下的社会总福利

Fig.13 Total social welfare in four situations

推论7 社会总福利随着消费者对绿色产品的偏好程度的提高而提高。这说明如果消费者更愿意购买绿色产品,则会提高社会总福利。

推论8 无论由谁主导供应链,当 $\beta > 0.883$ 时,采用区块链技术比不采用区块链技术的社会总福利更多,且随着 β 增加的幅度更大。这说明当消费者对绿色产品偏好程度较高时,采用区块链技术对社会整体是有益的。

推论9 无论是否采用区块链技术,零售商主导供应链时的社会总福利总是多于绿色制造商主导供应链时的社会总福利。这说明由零售商主导供应链能使社会整体获益更多,政府可以制定相关政策鼓

励有能力的零售商来主导供应链。

6.3 智能批发价合约下批发价的制定

取 $\beta = 2$,以批发价 w 为横轴,以零售商和绿色制造商使用和未使用(即未采用区块链技术)智能批发价合约的利润为纵轴,绘制利润曲线,如图14和图15所示。

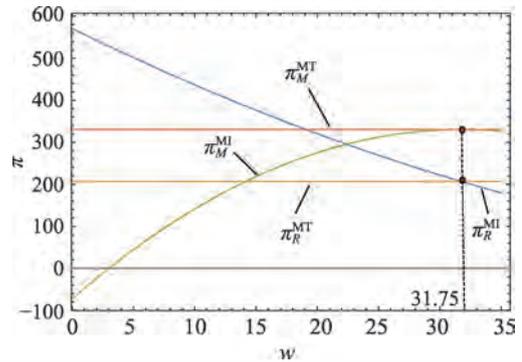


图14 绿色制造商主导下各方的利润

Fig.14 Profits of all parties under leadership of green manufacturers

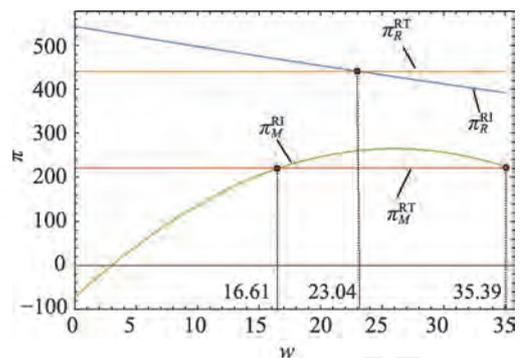


图15 零售商主导下各方的利润

Fig.15 Profits of all parties under leadership of retailers

(1)绿色制造商主导的智能批发价合约

推论10 不使用智能批发价合约时最优的批发价格为31.75,绿色制造商与零售商使用智能批发价合约的利润与未使用智能批发价合约的利润相等。而此时智能合约是由绿色制造商主导的,在保证零售商利润不减少的前提下,提高或降低批发价都会减少绿色制造商的利润,因此在绿色制造商主导的智能批发价合约的情形下,最合适的批发价为31.75,此时制造商与零售商的利润增长率均为0%。

(2)零售商主导的智能批发价合约

推论11 当不使用智能批发价合约时最优的批发价格为22.16,当使用智能批发价合约时,若仍使用22.16的批发价,零售商和绿色制造商的利润均有所上升。而此时智能批发价合约是由零售商主导的,

在保证绿色制造商利润不减少的前提下,零售商获利最大时的批发价为 16.61,此时零售商的利润增长率为 6%;零售商获利与不使用智能批发价合约相等时的批发价为 23.04,而最为合适的批发价将由区块链系统的人工智能从(16.61,23.04)区间中给定。

推论 12 通过对比两种不同权力结构的智能批发价合约,发现由零售商主导的智能批发价合约制定出的批发价可以使绿色制造商和零售商的利润都得到改善,反而由绿色制造商主导的智能批发价合约制定出的批发价不能提高绿色制造商和零售商的利润。这说明零售商主导的智能批发价合约能够更好地协调供应链。

6.4 成本分担智能合约分析

以成本分担比例 k 为横轴,分析社会总福利,以及绿色制造商和零售商利润的变化。

(1) 绿色制造商主导的成本分担智能合约

推论 13 如图 16 所示,当绿色制造商主导供应链时,采用成本分担智能合约后,社会总福利随着成本分担比例的增加呈现出先增加后减少的趋势,并在中间一点取到最大值。这说明采取合适的成本分担比例,可以使社会总福利达到最优。在此参数设置下的最优成本分担比例为 $k=4/7$ 。

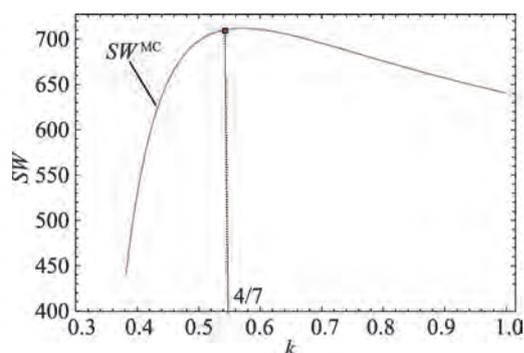


图 16 MC 情形下社会总福利随成本分担比例的变化

Fig.16 Change of total social welfare with cost-sharing ratio in MC situation

推论 14 如图 17 所示,当绿色制造商主导供应链时,绿色制造商的利润随着成本分担比例的增加而减少,零售商的利润随着成本分担比例的增加而增加。由于此时是绿色制造商主导供应链,绿色制造商在保证零售商愿意参与合同(即零售商利润大于 0)的前提下,更愿意将成本分担比例定在比 0.46 稍大的范围内。而根据推论 13,社会总福利在成本分担比例为 $4/7$ 时达到最大,因此政府可以制定相关政策,鼓励绿色制造商将成本分担比例提高至 $4/7$,此时零售商的利润也可以得到改善。

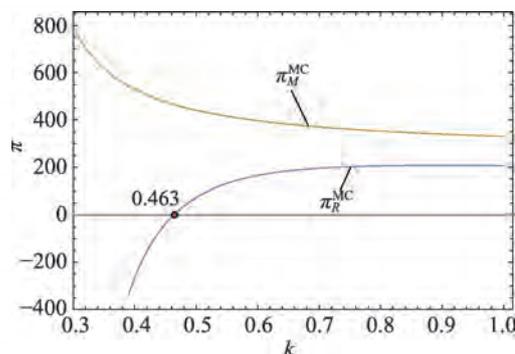


图 17 MC 情形下各方利润随成本分担比例的变化

Fig.17 Change of profits of all parties with cost-sharing ratio under MC situation

(2) 零售商主导的成本分担智能合约

推论 15 如图 18 所示,当零售商主导供应链时,采用成本分担智能合约后,社会总福利随着成本分担比例的增加呈现出先增加后减少的趋势,并在中间一点取到最大值。这说明采取合适的成本分担比例,可以使社会总福利达到最优。在此参数设置下的最优成本分担比例为 $k=0.76$ 。

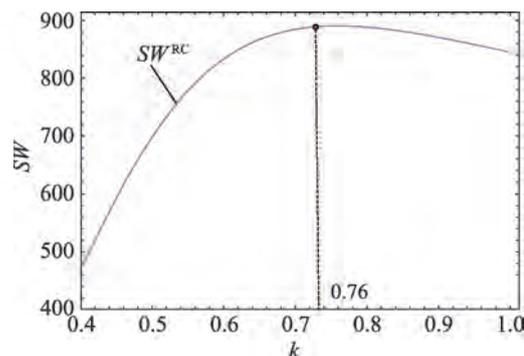


图 18 RC 情形下社会总福利随成本分担比例的变化

Fig.18 Change of total social welfare with cost-sharing ratio in RC situation

推论 16 比较两种不同权力结构下的成本分担智能合约,本文发现零售商主导情形下的社会总福利更高,同时最优成本分担比例也较高。这说明零售商主导的成本分担智能合约能够更好地协调供应链,并给社会带来更大的益处。

推论 17 如图 19 所示,当零售商主导供应链时,零售商的利润随着成本分担比例先增加后减少,绿色制造商的利润随着成本分担比例的增加而增加。由于此时是零售商主导供应链,零售商在保证绿色制造商愿意参与合同(即绿色制造商利润大于 0)的前提下,更愿意将成本分担比例定在自己利润最大值处,即 $k=2/3$ 。而根据推论 15,社会总福利在成本

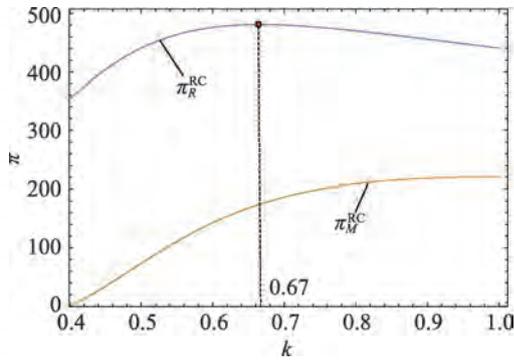


图19 RC情形下各方利润随成本分担比例的变化

Fig.19 Change of profits of all parties with cost-sharing ratio under RC situations

分担比例为0.76时达到最大,因此政府可以制定相关政策,鼓励零售商将成本分担比例提高至0.76,此时绿色制造商的利润也可以得到改善。

6.5 实证案例

针对本文得出的部分结论,本节给出了相符合的实证案例。

随着人们绿色环保意识的觉醒,越来越多的消费者开始倾向于绿色消费。例如,欧莱雅就抓住了消费者对绿色产品的偏好心理,将产品夜间修护的特点与夜晚节约用电相结合,主打绿色可持续的产品特点,同时联动线下地球日活动,使消费者对品牌的绿色信任度不断提高。在2022年第三季度,欧莱雅的产品销售额比去年同期增长了8%。又如世界500强企业美的,在产品最大化节能、开发低碳材料、降低噪音污染等方面都进行了技术创新,为绿色产品生产提供了强大支撑,从而吸引了更多绿色消费者,实现了利润增长。上述案例与本文中命题1、命题3以及推论1所提到的消费者对产品绿色信任度的提高对企业利润的增长有正向促进作用的结论相吻合。

在各大生产厂商发展的同时,零售商也在不断发展壮大。沃尔玛作为世界知名的零售企业,凭借购物形式和经营业态的多样化,仅在中国就开设了多达400余家门店。除此之外,亚马逊、好市多等零售商也在飞速发展。它们的壮大说明一个问题,那就是以往制造商主导供应链的情况出现了改变,零售商凭借自身的经营,可以更直接地了解消费者的诉求,从而进一步提高自己的口碑和竞争能力,使得零售商在供应链中的话语权不断提高。这与本文中推论6、推论9、推论12、推论16所提到的由零售商主导的绿色供应链对参与各方和整个社会更有利的结论相吻合。

在区块链技术应用方面,为维持高绿色度产品的消费者数量,京东、天猫国际与易贝等跨境电商平台建立了基于区块链技术的跨境产品溯源平台,以提高客户对跨境产品的信任度。部分制造商则应用区块链技术进行了碳交易,如新加坡 Air Carbon Pte 公司于2019年推出世界首个基于区块链的碳交易所。这与本文中推论2、推论5、推论8提到的消费者绿色信任度对供应链引入区块链的影响趋势一致。

此外,京东智臻链合同是一种基于区块链技术的智能合约系统,可以自动化执行合同条款,无需第三方介入,降低了合同操作成本和风险,提高了企业效率和利润,可以在商品交易、供应链管理、金融服务等多种场景下应用。这与本文中推论12、推论16提到的由零售商主导的智能合约能够更好地协调供应链这一结论相吻合。

区块链补贴是政府根据企业对区块链使用程度而做出的财政补贴。据统计,2020年全国共有上海、杭州、广州、长沙、青岛、贵阳、珠海、苏州、福州等10个城市的11个区域发布了专门面向区块链行业的专项优惠补贴政策。这些政策将在一定程度上解决区块链企业面临的早期商业模式不明显、缺乏落地场景等问题,进而真正推动区块链技术对社会发展的促进作用。政府对制造企业补贴是为了激励创新,对零售商补贴是为了拉动需求侧的产品创新,惠及消费者,从而扩大社会福利。这与本文中推论9、推论14、推论17提到的政府在特定情形下对绿色制造商或者零售商补贴对社会整体是有益的结论相一致。

7 结束语

7.1 结论和管理启示

本文研究了不同权力结构以及是否采用区块链技术四种情况下,绿色制造商和零售商的最优决策,以及如何实现最优的消费者剩余和社会总福利。在采用区块链技术的基础上,本文又设计了智能批发价合约以及成本分担智能合约,给出了智能批发价的合理取值范围和最优的成本分担比例,还讨论了不同权力结构下智能合约由谁主导对供应链整体和整个社会更有益。研究结果如下:

(1)在不采用区块链技术时,消费者对绿色产品的信任度越高,绿色制造商和零售商的利润就越高,绿色制造商也更愿意付出更多减排成本。此外,无论是否采用区块链技术,消费者环保意识的提高或者消费者对绿色产品偏好程度的提高可以扩大市场需求,激励绿色制造商付出更多减排努力,生产更绿色

的产品,同时还可以提高绿色制造商和零售商的利润。

(2)通过数值分析,发现采用区块链技术后绿色制造商和零售商的利润并非在任何情况下都高于不采用区块链技术时的利润,只有当消费者绿色偏好程度较高,对绿色产品的购买意向较强时,采用区块链技术对供应链上的参与者才更有益处。而当消费者绿色偏好程度较低时,这么做是有害无益的。究其原因,是售卖绿色产品的收益不足以抵消加入区块链所付出的成本。同时,发现在绿色制造商主导的情形下,如果消费者的绿色偏好程度较高,那么即使采用区块链技术的成本升高,零售商反而愿意降低零售价格让渡一部分价值给消费者,绿色制造商也愿意降低批发价让渡一部分价值给零售商;但是如果消费者的绿色偏好程度较低,绿色制造商会提高批发价,零售商会提高零售价来维持自己的利润。在零售商主导的情形下也有类似的结论。

(3)在智能批发价合约中,通过数值分析,发现如果供应链由绿色制造商主导,则绿色制造商和零售商的利润与不采用智能批发价合约的利润相同,二者的利润增长都为0%;但如果供应链由零售商主导,采用智能批发价合约后,零售商的利润可增长0%~6%,绿色制造商的利润可增长0%~8%,这说明智能批发价合约由零售商主导比较好。

(4)在成本分担智能合约中,通过数值分析,发现主导供应链一方的利润较多,而追随者利润较少;同时,在区块链系统给定的最优成本分担比例下,供应链由零售商主导时的社会总福利要高于由绿色制造商主导时的社会总福利。这说明成本分担智能合约更适合由零售商主导。值得注意的是,在绿色制造商主导的情形下,绿色制造商利润最高时的成本分担比例低于社会总福利最大时的成本分担比例,为了实现最大的社会总福利而调整成本分担比例,会使绿色制造商的利润下降,而零售商的利润上升,此种情形下,政府应该采取措施补贴绿色制造商以鼓励其提高成本分担比例。在零售商主导的情形下,零售商利润最高时的成本分担比例低于社会总福利最大时的成本分担比例,为了实现最大的社会总福利而调整成本分担比例,会使零售商的利润下降,绿色制造商的利润上升,此种情形下,政府应该采取措施补贴零售商以鼓励其提高成本分担比例。

7.2 局限性与展望

本文研究的局限性在于:首先,为了简化分析,本文只考虑由一个绿色制造商和一个零售商组成的简单二级供应链结构,而现实中往往是一对多或者多对多的复杂供应网结构,且同行业者之间存在竞

争关系。未来可以考虑两个或多个具有竞争关系的绿色制造商和零售商来进行研究。其次,对于采用区块链技术给供应链带来的增益,本文只用绿色信任度和交易效率的提升来描述,现实情况下区块链带来的增益也许更多更复杂。比如在没有采用区块链技术之前,绿色制造商和零售商之间的信息是不对称的或者共享程度较低,而在采用区块链技术后,信息共享程度提高,未来可以从信息不对称的角度进行研究。再次,本文假设绿色制造商和零售商都是中小型企业,没有能力建链,只能通过加入公有链的方式使用区块链技术,故只考虑了区块链的单位使用成本。而现实中不乏有资金实力雄厚的制造商和零售商,他们也许会考虑自建私有链,讨论他们对区块链的建设投资策略也是未来可以拓展的方向。此外,本文提到的智能合约是比较典型的批发价合约和成本分担合约,今后的研究可以加入其他契约或者比较不同契约对供应链协调的影响。最后,由于本文提到的企业节能减排相关策略许多都需要政府的引导激励,未来的研究模型中可以加入政府的激励机制来探讨其对供应链和区块链的影响。

参考文献:

- [1] 解学梅,朱琪玮. 创新支点还是保守枷锁:绿色供应链管理实践如何撬动企业绩效?[J]. 中国管理科学, 2022, 30(5): 131-143.
XIE X M, ZHU Q W. Innovative pivots or conservative shackles: how can green supply chain management practices spur corporate performance?[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(5): 131-143.
- [2] 解学梅,韩宇航. 本土制造业企业如何在绿色创新中实现“华丽转型”?——基于注意力基础观的多案例研究[J]. 管理世界, 2022, 38(3): 76-106.
XIE X M, HAN Y H. How can local manufacturing enterprises achieve luxuriant transformation in green innovation? A multi-case study based on attention-based view[J]. Journal of Management World, 2022, 38(3): 76-106.
- [3] QIN Q, JIANG M, XIE J, et al. Game analysis of environmental cost allocation in green supply chain under fairness preference[J]. Energy Reports, 2021, 7: 6014-6022.
- [4] LIU K, LI W, JIA F, et al. Optimal strategies of green product supply chains based on behaviour-based pricing[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 335: 130288.
- [5] TOKTA-PALUT P. An integrated contract for coordinating a three-stage green forward and reverse supply chain under fairness concerns[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123735.
- [6] 熊峰,魏瑶瑶,王琼林,等. 考虑成员风险规避的双渠道绿

- 色供应链定价与绿色投入决策研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(8): 267-276.
- XIONG F, WEI Y Y, WANG Q L, et al. Study on pricing and green input decision of dual-channel green supply chain based on risk aversion of members[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(8): 267-276.
- [7] 徐杨杨, 王艳. 区块链在云制造资源分配的研究[J]. 计算机科学与探索, 2022, 16(10): 2298-2309.
- XU Y Y, WANG Y. Research on blockchain in cloud manufacturing resource allocation[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2022, 16(10): 2298-2309.
- [8] 谭春桥, 刘瑞环, 赵程伟. 基于区块链技术的疫苗供应链定价策略研究[J]. 管理工程学报, 2022, 36(6): 205-220.
- TAN C Q, LIU R H, ZHAO C W. Pricing strategy of vaccine supply chain based on blockchain technology[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2022, 36(6): 205-220.
- [9] YU Y, LUO Y, SHI Y. Adoption of blockchain technology in a two-stage supply chain: spillover effect on workforce [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 161: 102685.
- [10] NIU B, SHEN Z, XIE F. The value of blockchain and agricultural supply chain parties participation confronting random bacteria pollution[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 319: 128579.
- [11] 李雷孝, 郑岳, 高昊昱, 等. 智能合约漏洞检测研究综述 [J]. 计算机科学与探索, 2022, 16(11): 2456-2470.
- LI L X, ZHENG Y, GAO H Y, et al. Survey of research on smart contract vulnerability detection[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2022, 16(11): 2456-2470.
- [12] DE GIOVANNI P. Blockchain and smart contracts in supply chain management: a game theoretic model[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 228: 107855.
- [13] RAJ P V R P, JAUHAR S K, RAMKUMAR M, et al. Procurement, traceability and advance cash credit payment transactions in supply chain using blockchain smart contracts[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 167: 108038.
- [14] CHANG S E, CHEN Y C, LU M F. Supply chain re-engineering using blockchain technology: a case of smart contract based tracking process[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2019, 144: 1-11.
- [15] 孙自来, 王旭坪, 阮俊虎, 等. 不同权力结构对制造商双渠道供应链的影响研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(9): 106-114.
- SUN Z L, WANG X P, RUAN J H, et al. Impact of different game power structures on the manufacturer dual-channel supply chain[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(9): 106-114.
- [16] 刘名武, 刘亚琼, 付巧灵. 关税、权力结构与消费者偏好下的绿色供应链决策研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(3): 131-141.
- LIU M W, LIU Y Q, FU Q L. Green supply chain decisions with consideration of tariffs, power structures and consumer preference[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(3): 131-141.
- [17] LI T, ZHANG R, LIU B. Advertising and power structures in competing supply chains[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 150: 106917.
- [18] LUO Z, CHEN X, KAI M. The effect of customer value and power structure on retail supply chain product choice and pricing decisions[J]. Omega, 2018, 77: 115-126.
- [19] 张令荣, 彭博, 程春琪. 基于区块链技术的低碳供应链政府补贴策略研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(10): 49-60.
- ZHANG L R, PENG B, CHENG C Q. Research on government subsidy strategy of low-carbon supply chain based on block-chain technology[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(10): 49-60.
- [20] HONG Z F, GUO X L. Green product supply chain contracts considering environmental responsibilities[J]. Omega, 2019, 83: 155-166.



王心(1983—),女,天津人,博士,讲师,主要研究方向为供应链管理。

WANG Xin, born in 1983, Ph.D., lecturer. Her research interest is supply chain management.



王雅生(2000—),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要研究方向为最优化理论与应用。

WANG Yasheng, born in 2000, M.S. candidate. His research interest is optimization theory and application.



张书华(1958—),男,天津人,博士,教授,主要研究方向为供应链金融。

ZHANG Shuhua, born in 1958, Ph.D., professor. His research interest is supply chain finance.



王新宇(1990—),男,天津人,博士,讲师,主要研究方向为可持续运营。

WANG Xinyu, born in 1990, Ph.D., lecturer. His research interest is sustainable operation.



徐帅(1983—),男,江苏人,总经理,主要研究方向为智能制造。

XU Shuai, born in 1983, general manager. His research interest is intelligent manufacturing.