

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.04.007

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

引文格式: 占家权, 李志勤. 碳限额下考虑公平关切的绿色建筑供应链决策研究[J]. 西安理工大学学报, 2024, 40(4): 512-521.

ZHAN Jiaquan, LI Zhiqin. Research on green building supply chain decision-making considering equity concerns in carbon caps[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(4): 512-521.

# 碳限额下考虑公平关切的绿色建筑供应链决策研究

占家权, 李志勤

(青岛理工大学 管理工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** 在碳限额交易政策下, 绿色建筑供应链成员不仅要加大碳减排投入, 还要关注利润分配以及自身利益是否被公平对待等问题。为了探究以上问题, 本文研究了绿色建筑供应链中总承包商和分包商二级供应链的碳减排和利润分配决策, 即在碳限额交易政策下, 分别研究双方保持公平中性、存在单向公平关切、存在双向公平关切这三种情形下供应链成员的碳减排决策以及各自的获利情况。通过数值分析发现: 相较于双方保持中立, 某一成员的单向公平关切会损害对方的利益, 且分包商的公平关切对供应链整体的利润损害较大; 而双向公平关切不仅不利于供应链成员的碳减排, 还会降低供应链整体的利润。

**关键词:** 绿色建筑供应链; 碳限额交易; 公平关切; 利润分配

**中图分类号:** F282

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2024)04-0512-10

## Research on green building supply chain decision-making considering equity concerns in carbon caps

ZHAN Jiaquan, LI Zhiqin

(School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** Under the carbon cap-and-trade policy, members of the green building supply chain must not only increase investment in carbon emission reduction, but also pay attention to profit distribution and to the fact whether their own interests are treated fairly. In order to explore the above problems, this paper studies the carbon emission reduction and profit distribution decisions of the general contractor and subcontractor in the secondary supply chain of the green building supply chain, that is, under the carbon cap-and-trade policy, the carbon emission reduction decisions of supply chain members and their respective profits are studied in the three situations of fairness neutrality, one-way fairness concerns and two-way fairness concerns. Through a numerical analysis, it is found that the one-way fairness concern of one member will harm the interests of the other party compared with the neutrality of the two parties, with the fairness concern of the subcontractor causing a greater damage to the profit of the overall supply chain. The two-way fairness concern is not only detrimental to the carbon reduction of supply chain members, but also to reduce the profits of the supply chain as a whole.

**Key words:** green building supply chain; carbon cap-and-trade; fairness concerns; profit distribution

建筑业在带动经济社会快速发展的同时, 其高消耗、高排放等特点也给环境带来了一定压力, 根据

中国建筑节能协会统计研究报告(2022), 2020年全国建筑全过程碳排放总量为50.8亿吨, 占全国碳排

收稿日期: 2023-05-24; 网络首发日期: 2023-10-18

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20231017.1141.004>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(72001121)

第一作者: 占家权, 男, 博士, 讲师, 硕导, 研究方向为对策与决策。E-mail: jiaquanzhan@hotmail.com

通信作者: 李志勤, 女, 硕士生, 研究方向为绿色建筑供应链管理。E-mail: 446162903@qq.com

放的比重为 50.9%<sup>[1]</sup>。碳排放是判定绿色建筑是否符合环境要求的一个重要指标,碳减排已然成为未来世界发展的主要趋势。世界各国也积极颁布并实施了一系列政策用以限制企业的碳排放,其中碳限额交易政策被大多数国家认可并采纳<sup>[2]</sup>。越来越多的国内外学者开始从供应链管理的角度去研究碳减排和利润分配问题。另外,许多研究发现,大多数供应链成员在合作致力于碳减排的同时,会更多地考虑公平关切问题,他们关心自己是否能够被公平对待,利润是否被公平分配<sup>[3]</sup>。

绿色供应链管理的研究中,大多假设决策者是完全理性的,然而在实际调查中发现,决策者并不是完全理性的,他们也会有不理性的行为,供应链成员会关心利润分配的公平性<sup>[4]</sup>。研究发现,公平关切会影响企业的决策,而且建筑企业涉及的资金比较多,总承包商和分包商的地位和能力差距又比较大,所以更易产生公平问题<sup>[5]</sup>。在建筑领域,大多数专家都在研究总承包商的优势,使得在供应链决策中,往往把总承包商当作领导者<sup>[6]</sup>。然而随着总承包商角色的转变以及社会各种分工的出现,专业分包商的重要程度也在逐渐增强,这使得总承包商对分包商的依赖性越来越大。分包商在服从总承包商管理的同时,其保护自己利益的意识也在不断增强,在供应链利润分配过程中也更加关注公平问题<sup>[7]</sup>。Wen 等<sup>[8]</sup>在研究绿色建筑碳排放问题时,考虑了分包商的公平关切。而碳限额交易政策下的绿色建筑供应链研究主要集中在碳交易制度以及碳排放的具体测算上。Shao 等<sup>[9]</sup>对建筑能耗和碳排放进行了定量研究,并具体测算了北京地标性建筑的碳排放。建筑业碳排放的测量研究为本研究的开展提供了相关依据。

关于碳限额交易政策下碳减排行为的研究, Yang 等<sup>[10]</sup>研究了碳限额交易下两级供应链中制造商的渠道选择以及减排策略,但该研究只考虑了制造商的减排行为,实际上在碳限额交易政策下,大多数零售商也有低碳偏好以及替代渠道选择。党伟超等<sup>[11]</sup>利用均衡理论和不等式方法,在碳限额交易机制下,构建了碳交易市场参与下的供应链网络均衡模型。秦立公等<sup>[12]</sup>为研究整个供应链的联合动态减排问题,利用效用函数构建供应商、制造商、零售商三方微分博弈模型,得出了不同决策下的碳减排轨迹以及供应链整体价值。考虑公平关切的供应链利润分配的研究中,苏屹等<sup>[13]</sup>以双渠道绿色供应链为研究对象,建立了三阶段博弈模型,分析了零售商和制造商的公平关切对绿色供应链决策的影响。

Jian 等<sup>[14]</sup>研究了在集中决策和分散决策下,考虑制造商的公平关切对绿色供应链利润分配的影响。韩同银等<sup>[15]</sup>研究了在政府补贴和不补贴情况下,零售商的公平关切对供应链最优定价、绿色度决策以及供应链成员利润的影响。

目前,从绿色供应链角度探究碳排放和利润分配问题的研究主要集中在传统制造业,而且这些研究大多聚焦于单一模式,缺乏多模型比较。另外,考虑公平关切这个非理性行为与碳减排结合的研究在绿色建筑供应链领域也比较少,因此,本文将在碳限额交易政策下,建立绿色建筑供应链总承包商和分包商公平中性、单向公平关切、双向公平关切三种模型,并利用 MATLAB 对模型进行数值分析,最后给出结论,以为建筑企业的碳减排和利润分配等提供理论支撑。

## 1 模型描述与假设

### 1.1 模型参数及假设

本文主要研究由总承包商和分包商组成的二级绿色建筑供应链的碳减排和利润分配模型,该模型讨论了供应链成员不同形式的公平关切对其碳减排以及供应链利润的影响。相关模型参数及符号含义如表 1 所示。

表 1 模型参数及符号含义

Tab. 1 Model parameters and symbolic meanings

参数	释义
$P_1$	业主向总承包商支付的价格
$P_2$	总承包商向分包商支付的价格
$\lambda$	碳排放报酬系数
$s$	绿色建筑面积
$C_1$	绿色建筑供应链低碳投入前的总成本, $C_1 = C_{11} + C_{12}$
$C_{1i}$	总承包商、分包商低碳投入前的总成本, $i=1,2$
$C_2$	绿色建筑供应链低碳投入后的总成本, $C_2 = C_{21} + C_{22}$
$C_{2i}$	总承包商、分包商低碳投入后的总成本, $i=1,2$
$e_{0i}$	总承包商、分包商单位面积的初始碳排放量, $i=1,2$
$e_i$	总承包商、分包商低碳后单位面积碳减排量, $i=1,2$
$Q_i$	总承包商、分包商允许碳排放量的上限, $i=1,2$
$E_i$	外部市场的碳交易量, $i=1,2$
$k_i$	总承包商、分包商碳减排的成本系数, $i=1,2$
$p$	外部碳交易市场上单位面积碳排放的价格
$\delta$	总承包商和分包商之间碳减排收入分配比例
$\beta$	总承包商的公平关切系数
$\gamma$	分包商的公平关切系数

本文的模型假设。

1) 在碳限额交易政策下,绿色建筑供应链的总承包商和分包商将加大减排投资,如增加减排技术

的研发投入、增加低碳材料和设备的使用等,其减排成本会随着低碳措施的增加而增加。在不失一般性的情况下,总承包商、分包商低碳投入后的成本  $C_{2i} = sk_i e_i^2$ , 这表明减排成本是单位面积碳减排量  $e_i$  的二次函数<sup>[16]</sup>。

2) 总量管制交易下,政府根据建筑业单位绿色建筑面积的碳排放水平制定排放上限<sup>[3]</sup>。当供应链成员超过上限时,需要从外部碳交易市场购买额外的碳排放权,相反,如果企业在建设完成后碳排放水平低于规定的上限,企业可以出售剩余的碳排放权以获得额外收入。本研究假设绿色建筑的碳减排由总承包商和分包商共同承担,两者可以分别采取低碳措施来减少单位面积的碳排放量,以此响应碳限额交易的规定。供应链成员外部市场的碳交易量为  $E_i = se_{0i} - se_i - Q_i$ , 当  $E_i > 0$  时,说明供应链成员需要从外部市场购买碳排放权,当  $E_i < 0$  时,说明供应链成员存在剩余的碳排放权,可出售剩余碳排放权以获得相关收入  $pE_i$ 。

3) 设  $P_1 > P_2$ , 与实际情况保持一致。这里假设业主向总承包商支付的价格高于总承包商向分包商支付的价格。总承包商与业主签订成本加成报酬合同,总承包商与分包商也签订同样类型的合同<sup>[3]</sup>。另外,业主支付给总承包商的合同价格  $G = P_1 + \lambda s(e_1 + e_2)$ , 为了获得更多的减排效益,总承包商将会大力鼓励分包商进行碳减排,在考虑碳限额交易政策下,总承包商支付给分包商的合同价格为  $R = P_2 + \lambda s(1 - \delta)(e_1 + e_2)$ 。

4) 设  $k_2 > k_1$ 。在实际工程中,总承包商的碳减排综合能力和减排效率往往高于分包商,所以总承包商的减排成本系数也应低于分包商,这说明  $k_i$  也能反映碳减排效率的高低。

## 1.2 基本模型

基于上述参数及假设,总承包商、分包商、绿色建筑供应链的利润函数分别为:

$$\Pi_1(\delta, e_1) = P_1 - P_2 + \delta \lambda s(e_1 + e_2) - pE_1 - sk_1 e_1^2 - C_{11} \quad (1)$$

$$\Pi_2(\delta, e_2) = P_2 + (1 - \delta)\lambda s(e_1 + e_2) - pE_2 - sk_2 e_2^2 - C_{12} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{sc}(e_1, e_2) &= \Pi_1(\delta, e_1) + \Pi_2(\delta, e_2) = \\ &P_1 + \lambda s(e_1 + e_2) - p(E_1 + E_2) - \\ &sk_1 e_1^2 - sk_2 e_2^2 - C_1 \end{aligned} \quad (3)$$

行为研究表明,绿色供应链利润分配过程中,供应链成员会关注自身利益是否得到公平分配,因此引入公平关切。当供应链成员关注公平时,决策目标变为自身效用最大化<sup>[4]</sup>。参考相关文献<sup>[17-19]</sup>,本

文以对方的利润函数为公平参考点构建总承包商和分包商的效用函数。为了清晰表达公平关切系数对碳减排量和利润的影响,本文将范围设置为  $\beta \in [0, 1], \gamma \in [0, 1]$ , 当  $\beta, \gamma$  越接近 0, 表示公平关切程度越小,特别地,当  $\beta, \gamma$  为 0 时,表示公平中性<sup>[13, 20]</sup>。总承包商和分包商的效用函数分别为:

$$U_1(\delta, e_1) = \Pi_1(\delta, e_1) + \beta[\Pi_1(\delta, e_1) - \Pi_2(\delta, e_2)] \quad (4)$$

$$U_2(\delta, e_2) = \Pi_2(\delta, e_2) + \gamma[\Pi_2(\delta, e_2) - \Pi_1(\delta, e_1)] \quad (5)$$

## 2 模型分析

本文将碳限额交易政策引入到绿色建筑行业,政府的碳排放总量管制将会影响链上企业的减排策略。首先,构建不考虑公平关切的绿色建筑供应链碳减排和利润分配模型;其次,研究考虑分包商的公平关切、总承包商的公平关切、双方公平关切的利润分配模型。

### 2.1 碳限额交易政策下双方保持公平中性(N)

这部分的模型分析没有考虑公平关切,即总承包商和分包商都是公平中性的,总承包商和分包商分别进行碳减排,再以供应链利益最大化为目标,分析总承包商和分包商的最优决策。在不考虑公平关切的利润模型中,面临的决策问题是在满足碳限额交易政策下,如何确定最优分配比例  $\delta$  以及最佳碳排放量,以获得最大利润。因此,总承包商面临的决策如下:

$$\begin{aligned} \max \Pi_1^N(\delta, e_1) \\ \text{s. t. } se_{01} - se_1 - Q_1 = E_1 \end{aligned}$$

约束条件中,当总承包商碳减排超过上限时,需要从外部碳交易市场购买额外的碳排放权,总承包商初始碳排放量与碳减排量、最大允许碳排放量的差应等于对外购买的碳排放量。

同理,分包商的决策如下:

$$\begin{aligned} \max \Pi_2^N(\delta, e_2) \\ \text{s. t. } se_{02} - se_2 - Q_2 = E_2 \end{aligned}$$

**引理 1:**碳限额交易政策下,双方保持公平中性时,总承包商和分包商的单位面积建筑最佳碳减排量分别为:

$$e_1^N(\delta) = \frac{\delta \lambda + p}{2k_1} \quad (6)$$

$$e_2^N(\delta) = \frac{(1 - \delta)\lambda + p}{2k_2} \quad (7)$$

证明:采用逆向归纳法求解,先对式(1)和(2)分别关于  $e_1$  和  $e_2$  求一阶偏导可得:  $\frac{\partial \Pi_1^N(\delta, e_1)}{\partial e_1} = \delta \lambda s +$

$ps - 2sk_1e_1$ ,  $\frac{\partial \Pi_2^N(\delta, e_2)}{\partial e_2} = (1 - \delta)\lambda s + ps - 2sk_2e_2$ , 然  
 后再分别对  $e_1$  和  $e_2$  求二阶偏导可得:  $\frac{\partial^2 \Pi_1^N(\delta, e_1)}{\partial e_1^2} =$   
 $-2s k_1 < 0$ ,  $\frac{\partial^2 \Pi_2^N(\delta, e_2)}{\partial e_2^2} = -2s k_2 < 0$ 。显然,  
 $\Pi_1^N(\delta, e_1)$  关于  $e_1$ 、 $\Pi_2^N(\delta, e_2)$  关于  $e_2$  均是凹函数。  
 最后, 令  $\frac{\partial \Pi_1^N(\delta, e_1)}{\partial e_1} = 0$ ,  $\frac{\partial \Pi_2^N(\delta, e_2)}{\partial e_2} = 0$ , 可得  
 $e_1^N(\delta) = \frac{\delta\lambda + p}{2k_1}$ ,  $e_2^N(\delta) = \frac{(1 - \delta)\lambda + p}{2k_2}$ , 因此, 引理  
 1 得证。

由引理 1 可以看出, 总承包商和分包商的单位  
 面积碳减排量与收入分配比例  $\delta$  密切相关, 总承包  
 商的单位面积碳减排量与  $\delta$  成正比, 分包商的单位  
 面积碳减排量与  $\delta$  成反比。

**命题 1:** 碳限额交易政策下, 双方保持公平中性  
 时, 总承包商和分包商的利润最优分配比为:  $\delta^{N^*} =$   
 $\frac{k_2}{k_1 + k_2}$ 。

证明: 把式(6)和(7)代入式(3), 然后关于  $\delta$  求  
 偏导得到:  $\frac{\partial \Pi_{sc}^N(\delta)}{\partial \delta} = \frac{\lambda^2 s}{2k_1} - \frac{\lambda^2 s}{2k_2} + \frac{\lambda ps}{2k_1} - \frac{\lambda ps}{2k_2} -$   
 $\frac{\lambda s(\delta\lambda + p)}{2k_1} + \frac{\lambda s[\lambda(1 - \delta) + p]}{2k_2}$ , 另外,  $\frac{\partial^2 \Pi_{sc}^N(\delta)}{\partial \delta^2} =$   
 $-\frac{\lambda^2 s}{2k_1} - \frac{\lambda^2 s}{2k_2} < 0$ , 所以  $\Pi_{sc}^N(\delta)$  是  $\delta$  的凹函数, 最后  
 令  $\frac{\partial \Pi_{sc}^N(\delta)}{\partial \delta} = 0$ , 可得  $\delta^{N^*} = \frac{k_2}{k_1 + k_2}$ , 命题 1 得证。

由命题 1 可得, 供应链成员间的利润分配比例  
 $\delta$  只与碳减排成本系数  $k_i$  有关, 而且分包商的碳减  
 排成本系数  $k_2$  越高, 其获得的利润分配比例越低,  
 因此, 分包商可以通过提高自身的技术研发水平来  
 提高碳减排效率, 降低碳排放成本, 从而获得更高的  
 利润分配。

### 2.2 碳限额交易政策下仅考虑分包商的公平关切(S)

绿色建筑供应链仅考虑分包商的公平关切时,  
 分包商的决策目标为自身效用最大化, 目标函数(分  
 包商的效用)如式(8)所示, 总包商和供应链的的目  
 标为利润最大化, 其目标函数与式(1)和(3)相同, 约  
 束条件和双方保持中立时一致。

$$U_2^S(\delta, e_2) = \Pi_2(\delta, e_2) + \gamma[\Pi_2(\delta, e_2) - \Pi_1(\delta, e_1)] \quad (8)$$

$$U_1^S(\delta, e_1) = \Pi_1(\delta, e_1)$$

$$U_{sc}^S(e_1, e_2) = \Pi_{sc}(e_1, e_2)$$

**引理 2:** 碳限额交易政策下, 考虑分包商公平关  
 切时, 总承包商和分包商的单位面积最佳碳减排量

分别为:

$$e_1^S(\delta) = \frac{\delta\lambda + p}{2k_1} \quad (9)$$

$$e_2^S(\delta) = \frac{(1 + \gamma)(\lambda + p) - (1 + 2\gamma)\lambda\delta}{2k_2(1 + \gamma)} \quad (10)$$

证明: 同引理 1 的证明类似, 首先对式(1)和(8)分  
 别关于  $e_1$  和  $e_2$  求一阶偏导可得:  $\frac{\partial U_1^S(\delta, e_1)}{\partial e_1} = \delta\lambda s +$   
 $ps - 2sk_1 e_1$ ,  $\frac{\partial U_2^S(\delta, e_2)}{\partial e_2} = (1 + \gamma)[(1 - \delta)\lambda s + ps -$   
 $2sk_2 e_2] - \gamma\delta\lambda s$ , 另外,  $\frac{\partial^2 U_1^S(\delta, e_1)}{\partial e_1^2} = -2sk_1 < 0$ ,  
 $\frac{\partial^2 U_2^S(\delta, e_2)}{\partial e_2^2} = -2sk_2(1 + \gamma) < 0$ 。显然,  $U_1^S(\delta, e_1)$   
 关于  $e_1$ 、 $U_2^S(\delta, e_2)$  关于  $e_2$  均是凹函数。最后, 令  
 $\frac{\partial U_1^S(\delta, e_1)}{\partial e_1} = 0$ ,  $\frac{\partial U_2^S(\delta, e_2)}{\partial e_2} = 0$ , 可得式(9)和  
 (10), 引理 2 得证。

**命题 2:** 碳限额交易政策下, 考虑分包商的公平  
 关切时, 总承包商和分包商的利润最优分配比为:

$$\delta^{S^*} = \frac{k_2(1 + \gamma)^2}{k_1(1 + 2\gamma)^2 + k_2(1 + \gamma)^2}$$

证明: 同命题 1 的证明方法类似, 首先把式(9)  
 和(10)代入式(3), 然后关于  $\delta$  求偏导得到:  
 $\frac{\partial U_{sc}^S(\delta)}{\partial \delta} = \frac{s\lambda^2}{2k_1} - \frac{s\lambda^2\delta}{2k_1} - \frac{s\lambda^2\delta(1 + 2\gamma)^2}{2k_2(1 + \gamma)^2}$ , 另外,  
 $\frac{\partial^2 U_{sc}^S(\delta)}{\partial \delta^2} = -\frac{s\lambda^2}{2k_1} - \frac{s\lambda^2(1 + 2\gamma)^2}{2k_2(1 + \gamma)^2} < 0$ , 所以,  
 $U_{sc}^S(\delta)$  是  $\delta$  的凹函数, 最后令  $\frac{\partial U_{sc}^S(\delta)}{\partial \delta} = 0$ , 可得

$$\delta^{S^*} = \frac{k_2(1 + \gamma)^2}{k_1(1 + 2\gamma)^2 + k_2(1 + \gamma)^2}, \text{命题 2 得证。}$$

由命题 2 可得, 碳限额交易政策下, 仅考虑分包  
 商公平关切的利润分配模型中, 利润分配比例不仅  
 和碳减排成本系数  $k_i$  有关, 而且和分包商的公平关  
 切系数  $\gamma$  有关, 当  $\gamma$  增加时, 分包商获得的利润分  
 配比例也会增加。当  $\gamma = 0$  时,  $\delta^{N^*} = \delta^{S^*}$ , 可以看  
 出, 考虑双方公平中性的绿色建筑供应链利润分配模  
 型是仅考虑分包商公平关切的利润分配模型的一种  
 特例。

### 2.3 碳限额交易政策下仅考虑总承包商的公平关 切(G)

绿色建筑供应链仅考虑总承包商的公平关切  
 时, 总承包商的决策目标为自身效用最大化, 目标函  
 数(总承包商的效用)如式(11)所示, 分包商和供应  
 链的目标为各自利润最大化, 其目标函数与式(2)和  
 (3)相同, 约束条件和双方保持中立时一致。

$$U_1^G(\delta, e_1) = \Pi_1(\delta, e_1) + \beta[\Pi_1(\delta, e_1) - \Pi_2(\delta, e_2)] \quad (11)$$

$$U_2^G(\delta, e_2) = \Pi_2(\delta, e_2)$$

$$U_{sc}^G(e_1, e_2) = \Pi_{sc}(e_1, e_2)$$

**引理 3:**碳限额交易政策下,仅考虑总承包商的公平关切时,总承包商和分包商的单位面积最佳碳减排量分别为:

$$e_1^G(\delta) = \frac{(1+\beta)(\delta\lambda+p) - (1-\delta)\beta\lambda}{2k_1(1+\beta)} \quad (12)$$

$$e_2^G(\delta) = \frac{(1-\delta)\lambda+p}{2k_2} \quad (13)$$

证明:同引理 1 的证明类似,首先对式(11)和(2)分别关于  $e_1$  和  $e_2$  求一阶偏导可得:  $\frac{\partial U_1^G(\delta, e_1)}{\partial e_1} = (1+\beta)(\delta\lambda + ps - 2sk_1e_1) - (1-\delta)\beta\lambda$ ,  $\frac{\partial U_2^G(\delta, e_2)}{\partial e_2} = (1-\delta)\lambda + ps - 2sk_2e_2$ , 另外,  $\frac{\partial^2 U_1^G(\delta, e_1)}{\partial e_1^2} = -2sk_1(1+\beta) < 0$ ,  $\frac{\partial^2 U_2^G(\delta, e_2)}{\partial e_2^2} = -2sk_2 < 0$ 。显然,  $U_1^G(\delta, e_1)$  关于  $e_1$ 、 $U_2^G(\delta, e_2)$  关于  $e_2$  均是凹函数。最后,令  $\frac{\partial U_1^G(\delta, e_1)}{\partial e_1} = 0$ ,  $\frac{\partial U_2^G(\delta, e_2)}{\partial e_2} = 0$ , 可得式(12)和(13),引理 3 得证。

**命题 3:**碳限额交易政策下,仅考虑总承包商的公平关切时,总承包商和分包商的利润最优分配比为:  $\delta^{G*} = \frac{k_2(1+2\beta)^2}{k_1(1+\beta)^2 + k_2(1+2\beta)^2}$ 。

证明:同命题 1 的证明方法类似,首先把式(12)和(13)代入式(3),然后关于  $\delta$  求偏导得到:  $\frac{\partial U_{sc}^G(\delta)}{\partial \delta} = \frac{(1+2\beta)^2\lambda^2}{2k_1(1+\beta)^2} - \frac{(1+2\beta)^2\lambda^2\delta}{2k_1(1+\beta)^2} - \frac{\lambda^2\delta}{2k_2}$ , 另外,  $\frac{\partial^2 U_{sc}^G(\delta)}{\partial \delta^2} = -\frac{(1+2\beta)^2\lambda^2}{2k_1(1+\beta)^2} - \frac{\lambda^2}{2k_2} < 0$ , 所以,  $U_{sc}^G(\delta)$  是  $\delta$  的凹函数,最后令  $\frac{\partial U_{sc}^G(\delta)}{\partial \delta} = 0$ , 可得

$$\delta^{G*} = \frac{k_2(1+2\beta)^2}{k_1(1+\beta)^2 + k_2(1+2\beta)^2}, \text{命题 3 得证。}$$

由命题 3 可得,碳限额交易政策下,仅考虑总承包商公平关切的利润分配模型中,利润分配比例不仅和碳减排成本系数  $k_i$  有关,而且和总承包商的公平关切系数  $\beta$  有关,当  $\beta$  增加时,总承包商获得的利润分配比例会增加,相应地,分包商获得的利润分配比例会降低。当  $\gamma = 0$  时,  $\delta^{N*} = \delta^{G*}$ 。

## 2.4 碳限额交易政策下双方都考虑公平关切(SG)

绿色建筑供应链考虑双方公平关切时,总承包商和分包商的决策目标均为自身效用最大化,目标

函数(效用)如式(14)和(15)所示,供应链的目标函数与式(3)相同,约束条件与双方保持中立时一致。

$$U_1^{SG}(\delta, e_1) = \Pi_1(\delta, e_1) + \beta[\Pi_1(\delta, e_1) - \Pi_2(\delta, e_2)] \quad (14)$$

$$U_2^{SG}(\delta, e_2) = \Pi_2(\delta, e_2) + \gamma[\Pi_2(\delta, e_2) - \Pi_1(\delta, e_1)] \quad (15)$$

$$U_{sc}^{SG}(e_1, e_2) = \Pi_{sc}(e_1, e_2)$$

**引理 4:**碳限额交易政策下,考虑双方的公平关切时,总承包商和分包商的单位面积最佳碳减排量分别为:

$$e_1^{SG}(\delta) = \frac{(1+\beta)(\delta\lambda+p) - (1-\delta)\beta\lambda}{2k_1(1+\beta)} \quad (16)$$

$$e_2^{SG}(\delta) = \frac{(1+\gamma)(\lambda+p) - (1+2\gamma)\lambda\delta}{2k_2(1+\gamma)} \quad (17)$$

证明:同引理 1 的证明类似,首先对式(14)和(15)分别关于  $e_1$  和  $e_2$  求一阶偏导可得:

$\frac{\partial U_1^{SG}(\delta, e_1)}{\partial e_1} = (1+\beta)(\delta\lambda + ps - 2sk_1e_1) - (1-\delta)\beta\lambda$ ,  $\frac{\partial U_2^{SG}(\delta, e_2)}{\partial e_2} = (1+\gamma)[(1-\delta)\lambda + ps - 2sk_2e_2] - \gamma\delta\lambda$ , 另外,  $\frac{\partial^2 U_1^{SG}(\delta, e_1)}{\partial e_1^2} = -2sk_1(1+\beta) < 0$ ,  $\frac{\partial^2 U_2^{SG}(\delta, e_2)}{\partial e_2^2} = -2sk_2(1+\gamma) < 0$ 。显然,  $U_1^{SG}(\delta, e_1)$  关于  $e_1$ 、 $U_2^{SG}(\delta, e_2)$  关于  $e_2$  均是凹函数。最后,令  $\frac{\partial U_1^{SG}(\delta, e_1)}{\partial e_1} = 0$ ,  $\frac{\partial U_2^{SG}(\delta, e_2)}{\partial e_2} = 0$ , 可得式(16)和(17),引理 4 得证。

**命题 4:**碳限额交易政策下,考虑双方的公平关切时,总承包商和分包商的利润最优分配比为:

$$\delta^{SG*} = \frac{k_2(1+\gamma)^2(1+2\beta)^2}{k_1(1+2\gamma)^2(1+\beta)^2 + k_2(1+\gamma)^2(1+2\beta)^2}$$

证明:同命题 1 的证明方法类似,首先把式(16)和(17)代入式(3),然后关于  $\delta$  求偏导得到:  $\frac{\partial U_{sc}^{SG}(\delta)}{\partial \delta} =$

$$\frac{(1+2\beta)^2\lambda^2}{2k_1(1+\beta)^2} - \frac{(1+2\beta)^2\lambda^2\delta}{2k_1(1+\beta)^2} - \frac{(1+2\gamma)^2\lambda^2\delta}{2k_2(1+\gamma)^2}, \text{另外,}$$

$$\frac{\partial^2 U_{sc}^{SG}(\delta)}{\partial \delta^2} = -\frac{(1+2\beta)^2\lambda^2}{2k_1(1+\beta)^2} - \frac{(1+2\gamma)^2\lambda^2}{2k_2(1+\gamma)^2} < 0, \text{所以,}$$

$U_{sc}^{SG}(\delta)$  是  $\delta$  的凹函数,最后令  $\frac{\partial U_{sc}^{SG}(\delta)}{\partial \delta} = 0$ , 可得

$$\delta^{G*} = \frac{k_2(1+\gamma)^2(1+2\beta)^2}{k_1(1+2\gamma)^2(1+\beta)^2 + k_2(1+\gamma)^2(1+2\beta)^2},$$

命题 4 得证。

由命题 4 可得,碳限额交易政策下,考虑双方的公平关切的利润分配模型中,利润分配比例不仅和碳减排成本系数  $k_i$  有关,而且和双方的公平关切系

数均相关,随着分包商的公平关切系数  $\gamma$  增加,利润分配比例会降低,随着总承包商的公平关切系数  $\beta$  增加,利润分配比例会升高。

### 3 数值分析

本章将通过数值分析,讨论不同公平关切程度对单位面积碳减排量和绿色建筑供应链利润的影响。假设  $P_1 = 6\,000\,000$ ,  $P_2 = 2\,600\,000$ ,  $s = 1\,000$ ,  $C_{11} = 1\,500\,000$ ,  $C_{12} = 1\,000\,000$ ,  $k_1 = 6$ ,  $k_2 = 8$ ,  $e_{01} = e_{02} = 10$ ,  $Q_1 = Q_2 = 7\,000$ ,  $p = 20$ ,  $\lambda = 5$ , 为了观察公平关切程度对单位面积碳减排量以及供应

链利润的影响,设置公平关切系数  $\beta \in [0, 1]$ 、 $\gamma \in [0, 1]$ 。

#### 3.1 分包商的公平关切对供应链决策的影响(S)

图 1 为分包商的公平关切系数  $\gamma$  对总承包商和分包商单位面积碳减排量的影响。由图 1(a)可知,随着分包商公平关切系数  $\gamma$  的增加,总承包商的单位面积碳减排量  $e_1^N$  逐渐减小,并且低于双方保持公平中性时的碳减排量。图 1(b)则显示,分包商的单位面积碳减排量随其公平关切系数  $\gamma$  的增加,有先降低然后逐渐增大的趋势,并在某一时刻超过双方保持公平中性时的碳减排量。

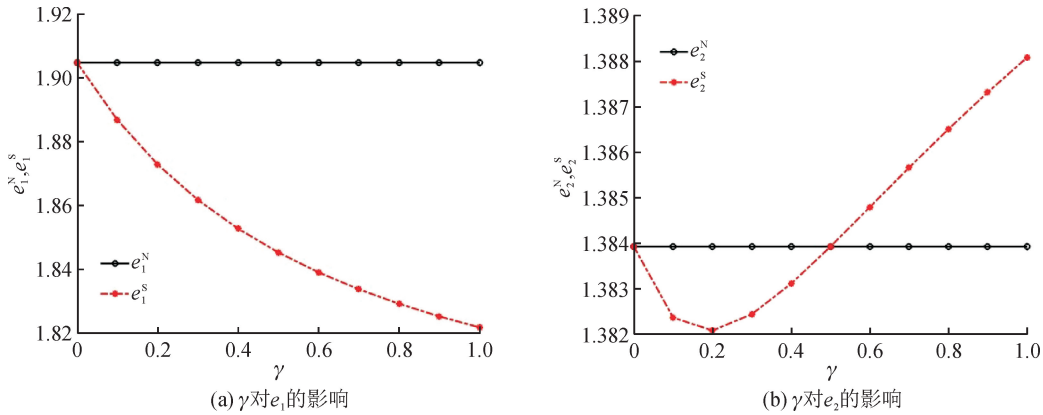


图 1 分包商公平关切系数  $\gamma$  对单位面积碳减排量的影响

Fig. 1 Impact of subcontractor's fairness concern coefficient  $\gamma$  on carbon emission reduction per unit area

图 2 为分包商的公平关切系数  $\gamma$  对总承包商和分包商之间最优利润分配比例  $\delta$  的影响。总承包商的收益率为  $\delta$ , 分包商的收益率为  $1 - \delta$ , 从图中可以看出,随着分包商的公平关切系数  $\gamma$  的增大,分包商将会获得更大的利润份额,结合图 1 中单位面积碳减排量的趋势,随着总承包商分配给分包商的利润份额增加,总承包商碳减排的意愿也会降低,单位碳减排量也会不断减少。

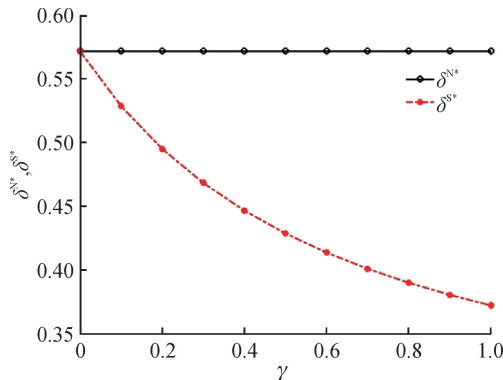


图 2 分包商公平关切系数  $\gamma$  对最优利润分配比例  $\delta$  的影响

Fig. 2 Impact of subcontractor's fairness concern coefficient  $\gamma$  on the  $\delta$  of optimal profit distribution ratio

图 3 为分包商的公平关切系数  $\gamma$  对绿色建筑供应链以及供应链成员利润的影响。由图 3(b)可以

看出,当考虑分包商的公平关切时,分包商可以获得更多的利润,但是由图 3(a)和(c)可知,分包商的公平关切会损害总承包商和供应链的利润。

#### 3.2 总承包商的公平关切对供应链决策的影响(G)

图 4 为总承包商的公平关切系数  $\beta$  对总承包商和分包商单位面积碳减排量的影响。由图 4(a)可以看出,随着总承包商的公平关切系数  $\beta$  增大,总承包商的单位面积碳减排量  $e_1$  逐渐增大,并且一直高于双方保持公平中性时的碳减排量。图 4(b)则显示,分包商的单位面积碳减排量随着总承包商公平关切系数  $\beta$  的增加在逐渐减少。

图 5 为总承包商的公平关切系数  $\beta$  对总承包商和分包商之间最优利润分配比例  $\delta$  的影响。总承包商的收益率为  $\delta$ , 分包商的收益率为  $1 - \delta$ , 从图中可以看出,随着总承包商公平关切系数  $\beta$  的增大,利润分配比例  $\delta$  在逐渐增大,说明总承包商分配给分包商的利润份额在逐渐减少,结合图 3 中单位面积碳减排量的趋势,随着总承包商分配给分包商的利润份额减少,分包商碳减排的积极性会降低,因此分包商单位面积碳减排量也会不断减少。

图 6 为总承包商的公平关切系数  $\beta$  对绿色建筑

供应链以及供应链成员利润的影响。由图 6(b)可以看出,当考虑总承包商的公平关切时,分包商的利润份额会降低,但是由图 6(a)和(c)可知,总承包商的公平关切有利于总承包商以及供应链整体利润的提高。因此,在绿色建筑供应链中,当总承包商关注公平关切时,虽然会一定程度损害分包商的利益,但是对整体供应链来说,利大于弊。

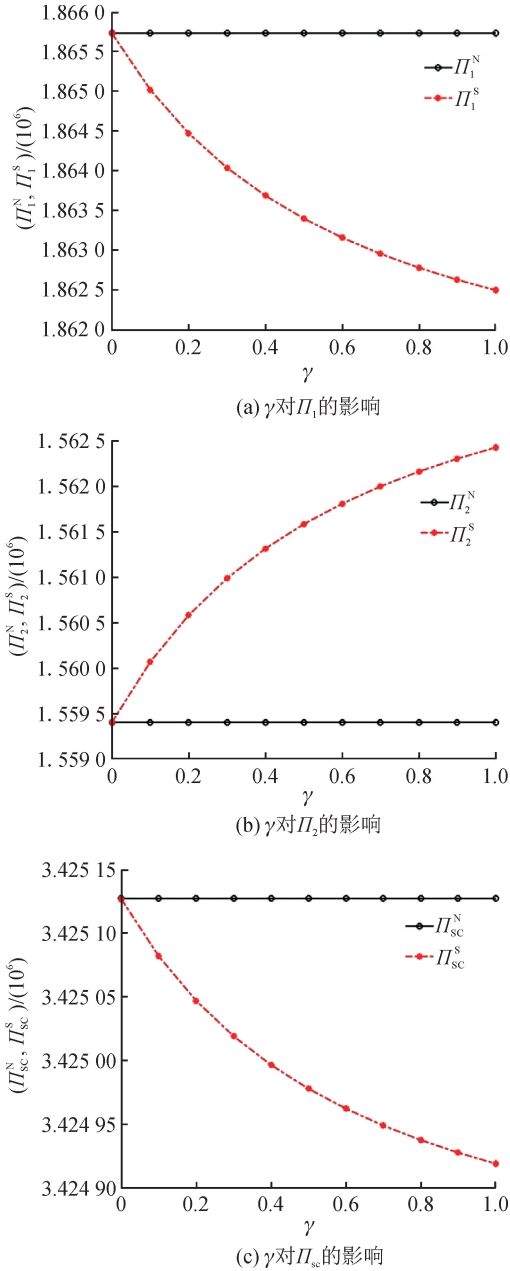


图 3 分包商公平关切系数  $\gamma$  对供应链利润分配的影响  
Fig. 3 Impact of subcontractor's fairness concern coefficient  $\gamma$  on the distribution of supply chain profits

### 3.3 双方的公平关切对供应链决策的影响(SG)

图 7 为双方公平中性以及双方均存在公平关切时,总承包商和分包商单位面积碳减排量的变化趋势对比。

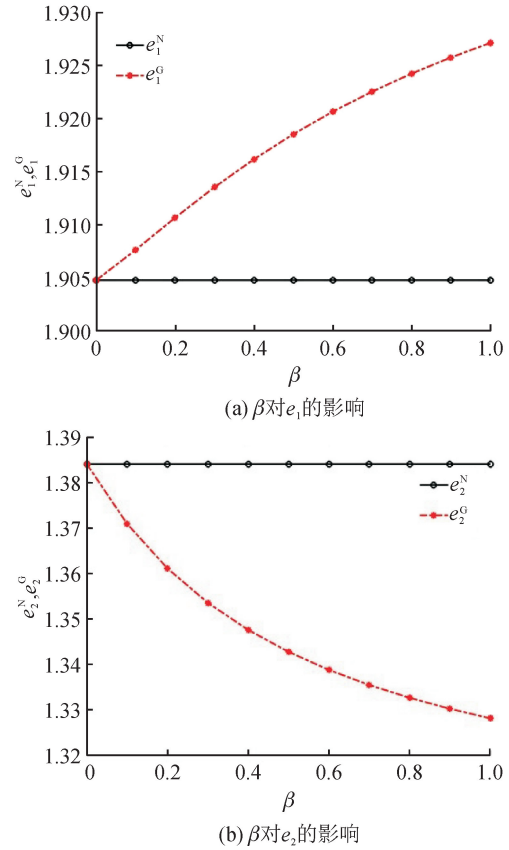


图 4 总承包商公平关切系数  $\beta$  对单位面积碳减排量的影响  
Fig. 4 Impact of the general contractor's fairness concern coefficient  $\beta$  on carbon emission reduction per unit area

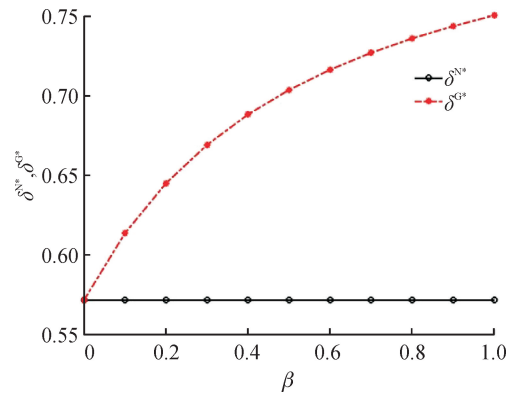
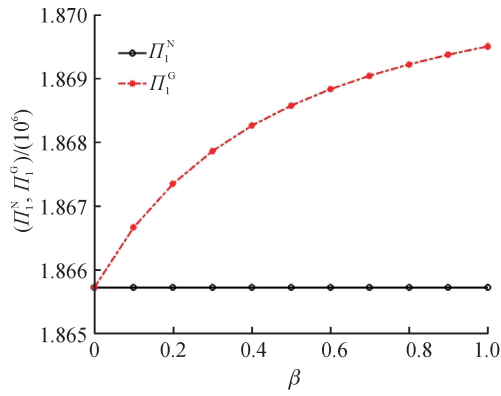


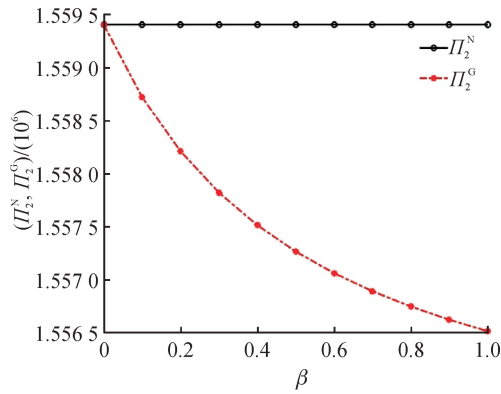
图 5 总承包商公平关切系数  $\beta$  对最优利润分配比例  $\delta$  的影响  
Fig. 5 Impact of the general contractor's fairness concern coefficient  $\beta$  on the  $\delta$  of optimal profit distribution ratio

由图 7(a)可以看出,总承包商单位面积碳减排量随着分包商公平关切系数  $\gamma$  的增大是在减少的,随着总承包商公平关切系数  $\beta$  的增大是在逐渐增大的。由图 7(b)可以看出,分包商单位面积碳减排量随着分包商公平关切系数  $\gamma$  的增加先略微减少后逐渐增大,随着总承包商公平关切系数  $\beta$  的增

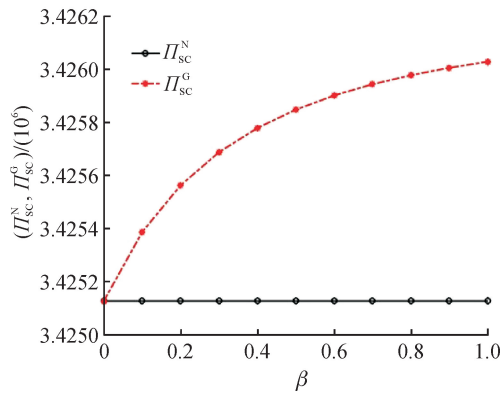
大是在逐渐减少的。与双方保持中立时相比,当总承包商和分包商均存在公平关切时,双方单位面积碳减排量均有所降低。



(a)  $\beta$ 对 $\Pi_1$ 的影响



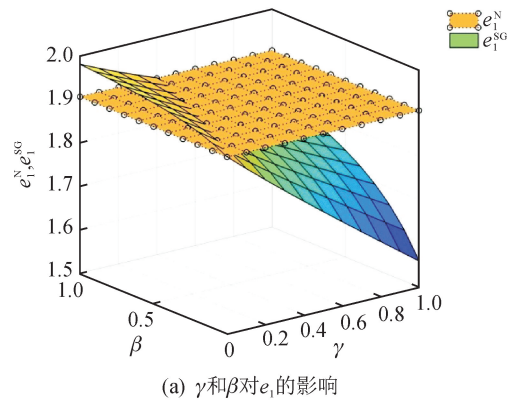
(b)  $\beta$ 对 $\Pi_2$ 的影响



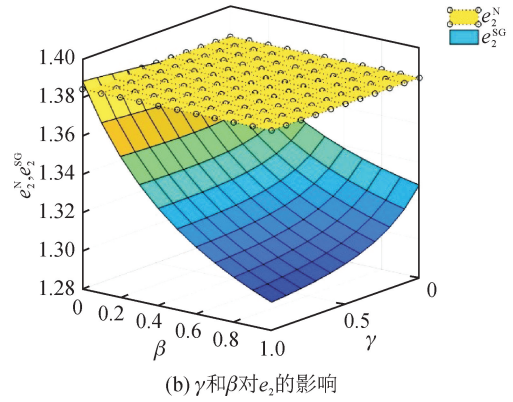
(c)  $\beta$ 对 $\Pi_{sc}$ 的影响

图6 总承包商公平关切系数 $\beta$ 对供应链利润分配的影响  
Fig. 6 Impact of the general contractor's fairness concern coefficient  $\beta$  on the distribution of supply chain profits

图8为双方的公平关切系数对供应链最优分配比例 $\delta$ 的影响。从图中可以看出,当总承包商和分包商有同样程度的公平关切时,利润分配比例就是基本模型(公平中性)的比例,当某一方的公平关切程度更高时,它将会获得更高的利润份额;从中也可以看出,虽然在竞争模型中存在公平关切,但是利润分配比例还是比较合理的,不存在一方完全压倒另外一方的情况。



(a)  $\gamma$ 和 $\beta$ 对 $e_1$ 的影响



(b)  $\gamma$ 和 $\beta$ 对 $e_2$ 的影响

图7 双方公平关切系数 $\gamma$ 和 $\beta$ 对单位面积碳减排量的影响

Fig. 7 Impact of the fairness concern coefficient  $\gamma$  and  $\beta$  of both sides on carbon emission reduction per unit area

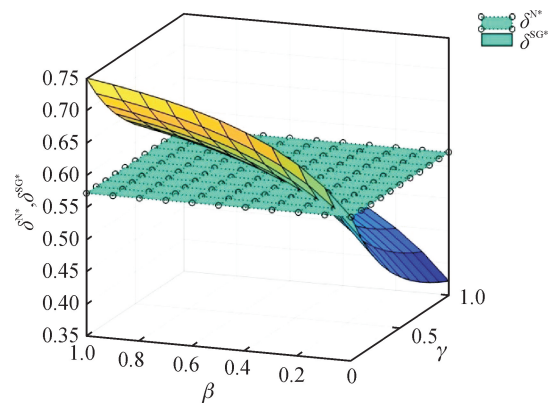


图8 双方公平关切系数 $\gamma$ 和 $\beta$ 对最优利润分配比例 $\delta$ 的影响

Fig. 8 Impact of the fairness concern coefficient  $\gamma$  and  $\beta$  of both sides on the  $\delta$  of optimal profit distribution ratio

图9为双方公平中性以及双方均考虑公平关切时供应链利润的对比。由图9(a)可以看出,当双方考虑公平关切时,总承包商的利润刚开始高于双方中立时的利润,随着双方公平关切系数的不断增加,总承包商的利润会受到损害,最终低于双方中立时的利润。根据图9(b),分包商的利润变化与总承包商刚好相反,随着双方公平关切系数的增加,其最终



利润会高于双方中立时的利润。但是从图 9(c)可以看出,双方同时存在公平关切时,不利于供应链整体的利润增长,供应链整体的利润会随着双方公平关切系数的增加而降低,并且一直低于双方公平中性时的利润。

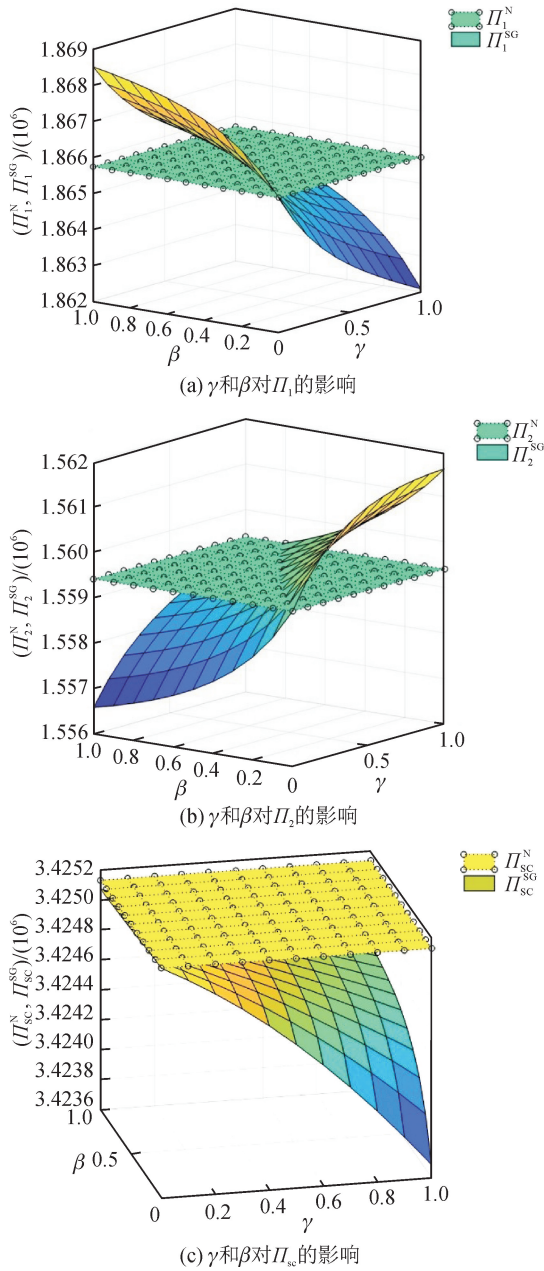


图9 双方公平关切系数  $\gamma$  和  $\beta$  对供应链利润分配的影响  
Fig.9 Impact of the fairness concern coefficient  $\gamma$  and  $\beta$  of both sides on the profit distribution of the supply chain

### 4 结论

本文在碳限额交易政策下,研究了绿色建筑供应链中总承包商和分包商考虑公平关切对单位面积碳减排量、供应链利润分配比例、供应链各成员的利

润、供应链整体利润的影响。通过对双方公平中性、单向公平关切、双向公平关切模型的构建及数值分析,得出以下结论。

1) 单向公平关切有利于自身的利益,但会损害对方的利润。另外,仅考虑分包商的公平关切,会降低总承包商碳减排的意愿,不仅会损害总承包商的利润,还会降低供应链整体的利润;仅考虑总承包商的公平关切,会降低分包商的碳减排意愿,只会损害分包商的利润。因此,当总承包商在选择分包商时,应尽量选择不太注重公平关切的分包商。

2) 双方同时考虑公平关切时,供应链成员的单位面积碳减排量会随着双方公平关切程度的增加而降低。另外,供应链成员无论自身公平关切程度如何,自身的利润都会随着对方公平关切系数的增加而降低,而且,与双方保持公平中性时相比,双方均存在公平关切时,供应链的整体利润会下降。

本文仅考虑了绿色建筑二级供应链中分包商和总包商的公平中性、单向公平关切、双向公平关切对碳减排和供应链利润分配的影响,但在实际中,在碳限额交易政策下,消费者的偏好、政府的激励形式、佣金率等因素都会影响供应链成员的决策,因此在后续研究中应综合考虑这些因素的影响,并做进一步分析。

### 参考文献:

[1] 中国建筑节能协会, 重庆大学城乡建设与发展研究院. 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022年)[J]. 建筑, 2023(2): 57-69.

[2] 杨光勇, 计国君. 碳排放规制与顾客环境意识对绿色创新的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(3): 702-712.  
YANG Guangyong, JI Guojun. Impacts of carbon emission regulation and consumer environmental consciousness on green innovation[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2021, 41(3): 702-712.

[3] WEN Jiang, LI Yuan, WU Lanjun, et al. Carbon emission reduction and profit distribution mechanism of construction supply chain with fairness concern and cap-and-trade[J]. PloS One, 2019, 14(10): e0224153.

[4] 闵杰, 代丹丹. 不同公平关切偏好下的低碳供应链定价和政府补贴研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2022, 35(4): 95-104, 111.  
MIN Jie, DAI Dandan. Research on low carbon supply chain pricing and government subsidies under different preferences of fairness concerns[J]. Journal of Qingdao University(Natural Science Edition), 2022, 35(4): 95-104, 111.

[5] LIU Junying, YANG Pengfei, XIA Bo, et al. Effect

- of perceived justice on subcontractor willingness to cooperate: the mediating role of relationship value[J]. *Journal of Construction Engineering & Management*, 2017, 143(9): 04017062.
- [6] WANG Qiankun, SHI Qiaosheng. The incentive mechanism of knowledge sharing in the industrial construction supply chain based on a supervisory mechanism[J]. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2019, 26(6): 989-1003.
- [7] WANG Xiuli, GENG Sujie, CHENG T C E, et al. Negotiation mechanisms for an order subcontracting and scheduling problem[J]. *Omega: The International Journal of Management Science*, 2018, 77:154-167.
- [8] WEN Jiang, LI Yuan. Profit distribution model of green building supply chain with fairness preferences and cap-and-trade policy[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 237(5): 052043.
- [9] SHAO Ling, CHEN Guoqiang, CHEN Zhanming, et al. Systems accounting for energy consumption and carbon emission by building[J]. *Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation*, 2014, 19(6): 1859-1873.
- [10] YANG Lei, JI Jingna, WANG Mingzheng, et al. The manufacturer's joint decisions of channel selections and carbon emission reductions under the cap-and-trade regulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 193: 506-523.
- [11] 党伟超,温雨亭,陈兆波. 碳交易市场参与下的供应链网络均衡模型研究[J]. *生态经济*, 2022, 38(9):29-36. DANG Weichao, WEN Yuting, CHEN Zhaobo. Research on the supply chain network equilibrium model with the participation of carbon trading market[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(9): 29-36.
- [12] 秦立公,张勇. 碳限额与碳交易下考虑时间偏好差异的供应链联合减排动态博弈[J]. *工业工程*, 2022, 25(5):55-64. QIN Ligong, ZHANG Yong. Dynamic game of supply chain joint emission reduction considering time preference difference under carbon quota and carbon trading[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2022, 25(5): 55-64.
- [13] 苏屹,王宁. 基于公平关切的双渠道绿色供应链决策研究[J]. *系统科学与数学*, 2021, 41(8): 2252-2275. SU Yi, WANG Ning. Dual-channel green supply chain decision-making based on fairness concern[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2021, 41(8): 2252-2275.
- [14] JIAN Jie, LI Bin, ZHANG Nian, et al. Decision-making and coordination of green closed-loop supply chain with fairness concern[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021(1): 126779.
- [15] 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.
- [16] SABZEVAR N, ENNS S T, BERGERSON J, et al. Modeling competitive firms' performance under price-sensitive demand and cap-and-trade emissions constraints[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 184(2): 193-209.
- [17] 杜少甫,杜婵,梁樑,等. 考虑公平关切的供应链契约与协调[J]. *管理科学学报*, 2010, 13(11): 41-48. DU Shaofu, DU Chan, LIANG Liang, et al. Supply chain coordination considering fairness concerns[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2010, 13(11): 41-48.
- [18] 杜少甫,朱贾昂,高冬,等. Nash 讨价还价公平参考下的供应链优化决策[J]. *管理科学学报*, 2013, 16(3): 68-72, 81. DU Shaofu, ZHU Jia'ang, GAO Dong, et al. Optimal decision-making for Nash bargaining fairness concerned newsvendor in two-level supply chain[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2013, 16(3): 68-72,81.
- [19] 石松,颜波,石平. 考虑公平关切的自主减排低碳供应链决策研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(12): 3079-3091. SHI Song, YAN Bo, SHI Ping. Pricing and coordination decisions in autonomous reduction low-carbon supply chain with fairness concerns[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2016, 36(12): 3079-3091.
- [20] 李重莲,范定祥,王晓蕾. 双向公平关切下双渠道供应链的线上线下融合契约设计[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(11):122-133. LI Chonglian, FAN Dingxiang, WANG Xiaolei. Contract design of 'online to offline' for dual-channel supply chain under bidirectional fairness concerns[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(11): 122-133.

(责任编辑 周 蓓)