

Design of Supply Chain Network under Carbon Cap and Trade

Bin Xiao¹, Liya Su^{2*}, Youwen Cui¹, Xixue Chen¹

¹School of Economics and Management, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing

²Center for Medical Device Evaluation, China Food and Drug Administration, Beijing

Email: xiaobin@bipt.edu.cn, *sulia776201@163.com

Received: Nov. 25th, 2017; accepted: Dec. 7th, 2017; published: Dec. 14th, 2017

Abstract

This paper combines the theory of carbon footprint and basic supply chain model, add the carbon cap and trade mechanism into the basic supply chain model. And a comprehensive analysis of the impact of carbon cap and trade mechanism on operational costs and network flow has been made. Based upon basic transportation model, and taking into consideration of carbon cap and trade mechanism, we construct an optimized transportation network model applying 0-1 mixed integer programming method. Through the numerical simulation analysis of the model, we consider the influence on the enterprise's operational cost and strategy under the cap and trade policy from three aspects, such as consumers, suppliers, manufactures. The industry can use the model to develop a reasonable transportation route to reduce carbon emissions and operational costs.

Keywords

Carbon Cap and Trade Mechanism, Supply Chain Network, Carbon Emission, Operation Cost

碳限额与交易机制下供应链网络设计

晓 斌¹, 苏利亚^{2*}, 崔又文¹, 陈喜雪¹

¹北京石油化工学院经济管理学院, 北京

²国家食品药品监督管理总局医疗器械技术审评中心, 北京

Email: xiaobin@bipt.edu.cn, *sulia776201@163.com

收稿日期: 2017年11月25日; 录用日期: 2017年12月7日; 发布日期: 2017年12月14日

*通讯作者。

文章引用: 晓斌, 苏利亚, 崔又文, 陈喜雪. 碳限额与交易机制下供应链网络设计[J]. 管理科学与工程, 2017, 6(4): 172-186. DOI: 10.12677/mse.2017.64022

摘要

本文结合碳足迹及经典的供应链网络模型等相关理论,在传统的三级供应链网络模型中加入了碳限额与交易机制,全面分析了碳限额与交易机制对运营成本和供应链网络的影响。在经典供应链网络模型基础上运用0-1混合整数规划的方法构建了考虑碳限额与交易机制的供应链网络优化模型。从消费者、供应商和生产商三个角度对模型进行数值模拟对比分析,综合考虑了在碳限额与交易机制下各影响因子的变动对企业运营成本和供应链网络的影响。进一步验证了企业可以运用构建的模型来制定出合理的供应链网络,实现减排的同时降低企业的运输成本和运营成本。

关键词

碳限额与交易机制, 供应链网络, 碳排放, 运营成本

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前温室气体排放严重,地球气候系统不断发生变动。为了应对环境难题,各国召开联合气候大会,相继出台各种环境政策法规以遏制温室气体的排放。1968年美国的经济学家戴尔斯率先提出了碳限额与交易的概念即“排放权交易”,戴尔斯表示全球需建立污染物排放的制度,各国获取相应排放的权利,并发放排放权许可证,使其能够像商品一样交易[1]。当年经济学家戴尔斯针对水污染的治理提出的排放权方案对当下解决全球变暖,缓解温室气体排放压力也同样适用。

由欧洲委员会资助的估算运输过程中空气污染物排放方法项目(MEET)总结了所有在运输过程中产生的用于估计污染物的排放量和能源消耗的方法和相应的排放因子和函数式[2]。它涵盖了所有不同类型的道路车辆以及多种运输方式,提供了与能源生产相关的污染物排放量因子。其最大的贡献是提出了用速度来衡量碳排放量和燃料成本具有一定的合理性和应用性,其他学者也在此基础上相继进行了各种研究。Tolga Bektas and Gilbert Laporte认为污染物的排放量取决于车辆的负荷和速度,在经典车辆路径模型基础上扩展了污染路径模型,将距离、燃料、排放量和时间等各种参数考虑在内,权衡速度和成本后给出了一个“环境友好”的车辆路径[3]。Emrah Demir在他的博士论文中,就道路货运中的二氧化碳排放量进行了研究。在回顾和比较几种可用的燃料排放模型之后指出所有的排放都与负载,速度和加速度的变化有关。其次,研究了污染路径问题(PRP)、带时间窗的车辆路径问题的经典的延伸(VRPTW),考虑了燃料消耗和总行驶时间最小化问题[4]。不同学者从多个角度对生产和运输过程中产生的二氧化碳问题展开研究,探讨了二氧化碳排放下的供应链网络设计问题,得出碳排放成本会直接影响供应链网络配置改变运输路径和选址决策[5]。

虽然国内外学者对碳限额与交易机制下企业运营管理的研究已经取得了丰硕的成果,但供应链网络中产生的碳足迹问题研究刚刚兴起并有待进一步深入和拓展。以往大量研究尚未充分考虑碳足迹在供应链网络的重要性和影响力,忽视了碳排放许可及碳成本代价可能强化供应链环节企业的碳排放。面对单纯的运输环节却缺少系统的分析和决策,尤其是对于不成熟的碳限额与交易市场,政府的定价和限额对

整个企业乃至经济的影响都还没有一个系统的分析框架。因此，为了更好的缓解环境压力提高企业环保意识的同时降低运输成本和运营成本，研究碳限额与交易机制下的供应链网络显得至关重要。碳限额与交易机制是否有助于减少运营成本，是如何影响企业的供应链网络和运营决策的都有待进一步的深入和拓展研究。

2. 碳限额与交易机制下供应链网络优化模型构建

碳限额与交易机制遵循科斯定理，只要明确了企业各自的碳排放权，企业可以根据自身的生产需求通过碳交易平台合理有效的规划其供应链优化模型，在获得利益的同时实现企业之间的平衡。企业可以在碳交易市场上买卖碳排放权利而付出成本或获得收益。

对本文建立的碳限额与交易机制下的运输模型作出如下假设：

假设一：每一个客户的需求都是单期确定的，且被满足的(即不允许缺货)。

假设二：所有的运输都必须是按照供应商—生产者—消费者的路径来实现。

假设三：供应商总供应量和消费者总需求量都是确定的。

假设四：每段道路的平坦度都是已知变量。

假设五：与货物相关的运输成本、燃料成本、碳交易成本都是与运输成本相关的决策变量。

假设六：不同节点之间，运输过程中的原材料和产品的碳排放量与产品本身的碳排放因子有关，燃油消耗产生的碳排放量与速度和运距有关。

2.1. 碳限额与交易机制下的运营成本

2.1.1. 与货物相关的供应链成本

货物在运输过程产生的成本有车辆租赁费、保险费、车辆检修维护费，公路的过路费以及司机的工资等。不过考虑到本文主要研究的是碳排放对运输成本的影响，且上述因素对于货物总成本的影响都是很小的，故我们将这些影响因素做简化处理，根据企业实际的财务数据将这些影响因素与货物直接挂钩，采取每吨每公里的计价方式。

原材料在供应链网络节点供应商 S_i 与节点生产者 L_j 之间的运输成本为 TC_1

$$TC_1 = \sum_i \sum_j c_1 Q_{ij} d_{ij}$$

产品在供应链网络节点生产者 L_j 与节点消费者 D_k 之间的运输成本为 TC_2

$$TC_2 = \sum_j \sum_k c_2 V_{jk} d_{jk}$$

2.1.2. 燃料成本

燃料是指营运车量运行过程中所耗用的汽油、柴油等，本文将燃料消耗量直接与运输车辆的运行速度相关，即在速度 v 下的每一百千米的耗油量。货车在公路运输过程中会受到公路平坦度的影响，我们采用 Sinha 和 Labi 的研究思路，在不同的路况下考虑燃料成本的调整系数[6]。图 1 描述了道路平坦度与燃料成本系数之间的关系。

$$A = 0.001[(IRI/0.0158 - 80)/10]^2 + 0.018[(IRI/0.0158 - 80)/10] + 0.9991$$

货物在运输网络节点供应商 S_i 与节点生产者 L_j 之间的燃料成本为 F_1

$$F_1 = \sum_i \sum_j c_f A_{ij} F_{ij} d_{ij} / 100$$

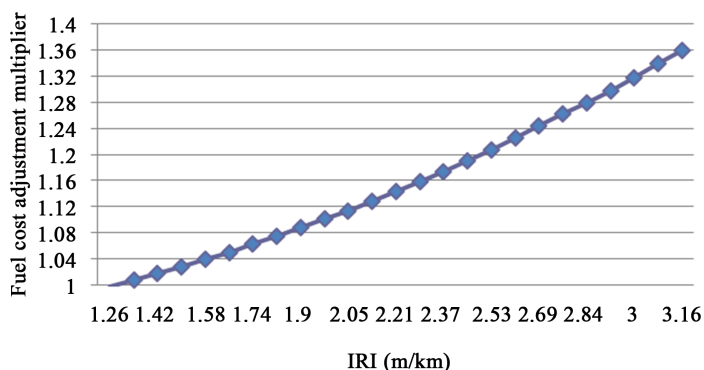


Figure 1. Fuel cost adjustments for pavement roughness levels
图 1. 道路平坦度与燃料成本系数之间的关系

货物在运输网络节点物流中心 L_j 与节点消费者 D_k 之间的燃料成本为 F_2

$$F_2 = \sum_j \sum_k c_f Z_{jk} S_{jk} d_{jk} / 100$$

2.1.3. 碳交易成本

由于我们将碳限额与交易机制纳入供应链网络考虑，也应当考虑碳交易成本对整个运营成本的影响。我们假定运输的材料和产品本身都产生一定的碳排放，同时货车在运输过程中消耗的燃料也产生一定的碳排放量。在碳限额与交易机制下，企业可以改变自己的供货商或者供应链网络优化自己的碳排放量来减少碳交易成本。

原材料在供应链网络节点供应商 S_i 与节点生产者 L_j 之间产生的碳排放量为 E_1

$$E_1 = \sum_i \sum_j e_{ij} Q_{ij}$$

产品在供应链网络节点生产者 L_j 与节点消费者 D_k 节点之间产生的碳排放量为 E_2

$$E_2 = \sum_j \sum_k e_{jk} Q_{jk}$$

燃料消耗在供应链网络节点供应商 S_i 与节点生产者 L_j 之间产生的碳排放量为 E_3

$$E_3 = \sum_i \sum_j u_{ij} d_{ij}$$

燃料消耗在供应链网络节点生产者 L_j 与节点消费者 D_k 之间产生的碳排放量为 E_4 ，则整个运输过程产生的碳排放为

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$$

$$E_4 = \sum_j \sum_k u_{jk} d_{jk}$$

在碳限额与交易机制下，我们假设碳价完全是由碳交易市场上多家企业共同参与决定的，完全遵循基本的市场机制， P^+ 、 P^- 是碳交易市场碳排放权的买入价和卖出价， e^+ 、 e^- 分别代表企业根据实际的碳排放量在碳交易市场买进和卖出的碳量。购买碳排放权会增加运营成本，但卖出碳排放权会增加企业收入。企业在整个运输过程中的碳排放满足碳排放成本 $C = P^+ * e^+ - P^- * e^-$ (其中 $e^+ * e^- = 0$)

$$E + e^- = Cap + e^+$$

综上所述，本模型的目标函数为

$$TC = \sum_i \sum_j c_1 Q_{ij} d_{ij} + \sum_j \sum_k c_2 V_{jk} d_{jk} + \sum_i \sum_j c_f A_{ij} F_{ij} d_{ij} / 100 + \sum_j \sum_k c_f A_{jk} F_{jk} d_{jk} / 100 + P^+ \times e^+ - P^- \times e^-$$

2.2. 碳限额与交易机制下运输模型的约束条件

$$\begin{aligned} \sum_j Q_{ij} &\leq S_i && \forall i \\ \sum_k V_{jk} &\leq L_j && \forall j \\ \sum_j V_{jk} &= D_k && \forall k \\ \sum_i Q_{ij} &= \sum_k V_{jk} && \forall j \\ Q_{ij} - M \cdot X_{ij} &\leq 0 && \forall i, j \\ Q_{ij} - M \cdot X_{ij} &\geq 1 - M && \forall i, j \\ V_{jk} - M \cdot Y_{jk} &\leq 0 && \forall j, k \\ V_{jk} - M \cdot Y_{jk} &\geq 1 - M && \forall j, k \\ \sum_i \sum_j e_{ij} Q_{ij} + \sum_j \sum_k e_{jk} Q_{jk} + \sum_i \sum_j u_{ij} d_{ij} + \sum_j \sum_k u_{jk} d_{jk} + e^- &= Cap + e^+ \\ e^+ * e^- &= 0 \\ Q_{ij}, E_{ij}, G_{jk}, T_{ij}, B_{jk}, F_{ij}, S_{jk}, U_{ijl}, H_{jkl} &\geq 0 \\ X_{ij}, Y_{jk}, P_{ijl}, D_{jkl} &= \{0, 1\} && \forall i, j, k, l \end{aligned}$$

3. 数值模拟分析

本研究主要是将供应链网络的问题转化为一个线性整数规划模型，在经典供应链网络模型基础上考虑了碳排放，通过碳排放成本来说明碳限额与交易机制对供应链网络的影响。首先，我们将研究企业设定在二氧化碳排放量大的供应企业。假设生产企业 A 通过上游的供应商取得原材料后加工成产品再运输给消费者，根据原材料的规格，质量，价格，交货期等因素确定了 4 个供应点，根据距离、交通状况等因素确定了生产企业 A 的 3 个生产点对 6 个客户需求点进行产品的配送与供应。

其次，我们假定与原材料和产品相关的运输成本分别为¥0.23/km·t 和¥0.27/km·t，燃油的价格选用柴油销售价格(¥6.0/L)，相对应的碳排放量是可求的。

最后，我们考虑车辆运输过程中产生的碳排放量与货车的行驶速度有关，根据由 MEET 中货车运行速度与碳排放量、燃油消耗量之间的关系，我们可以推出当货车以 70 km/h 的速度运行时产生的碳排放量和燃油消耗量都较低。故将所有货车的运行速度限定为 70 km/h，运输过程中的碳排放因子为 $e_3 = 0.75$ kg/km。

本文所涉及的所有数值求解均通过 Lingo 11.0 运行实现，在进行求解分析之前先给出生产企业自身、消费者、供应商的具体情况和基础数据(表 1~3)。

3.1. 碳排放限额和碳交易价格变动时的运营成本

在碳限额与交易机制下，政府会给每个企业一个既定的碳排放限额，且要求企业在实际生产运营过程中产生的碳排放量要小于政府规定的限额，而对于企业剩余的碳排放权可以在碳交易市场上进行买卖，

Table 1. Capacities of suppliers, manufacturers and demands of customers
表 1. 供应商的供应量、生产者的周转量及消费者的需求量(ton) (kg/kg)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|---------|----------|----------|---------|----|----|
| 供应商 | 190/0.5 | 200/0.6 | 210/0.35 | 120/0.2 | - | - |
| 生产者 | 210/0.8 | 170/0.24 | 180/0.5 | - | - | - |
| 消费者 | 90 | 95 | 90 | 85 | 95 | 90 |

Table 2. Distance and roughness levels between suppliers and manufactures (km)/(m/km)
表 2. 供应商和生产者之间的距离和路面平坦度(km) (m/km)

| | 生产者 1 | 生产者 2 | 生产者 3 |
|-------|----------|----------|----------|
| 供应商 1 | 164/2.53 | 353/1.58 | 106/2.69 |
| 供应商 2 | 200/1.74 | 385/1.42 | 182/2.21 |
| 供应商 3 | 74/3.08 | 197/2.05 | 209/1.90 |
| 供应商 4 | 92/2.84 | 97/2.92 | 227/1.82 |

Table 3. Distance and roughness levels between manufactures and customers (km)/(m/km)
表 3. 生产者和消费者之间的距离和路面平坦度(km) (m/km)

| | 消费者 1 | 消费者 2 | 消费者 3 | 消费者 4 | 消费者 5 | 消费者 6 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 生产者 1 | 551/2.13 | 487/2.61 | 503/2.05 | 258/3.00 | 500/1.98 | 699/1.58 |
| 生产者 2 | 490/2.45 | 691/1.50 | 462/2.37 | 320/2.77 | 196/3.08 | 490/2.21 |
| 生产者 3 | 916/2.69 | 699/2.92 | 328/1.90 | 274/3.08 | 502/1.66 | 257/1.34 |

卖给碳排放限额低的企业从而实现一定的收益。首先，碳排放限额的限定可能给企业带来收益，也可能提高企业的运营成本。其次，碳排放权在碳交易市场上的价格是变动的，企业需要根据不同的碳交易价格和自身的运营能力来决定是否卖出或者买入碳排放权。

表 4 给出了不同碳限额和碳交易价格对应的总成本，即企业的运营成本，可以看出在不考虑碳排放带来的成本影响时，即假设碳排放不带来任何的惩罚成本和效益，企业的运营成本运输成本为 67,136.83 元，当政府开始实行碳限额与交易机制时，企业的运营成本发生了变动。

从表 4 可以看出企业的碳排放量在 400~500 之间。政府推行碳限额与交易机制的本质是为了降低碳的排放，为了更好地研究碳交易市场对企业运营的影响，我们假定政府给定的企业碳排放额度为 300，此时企业必须优化自身生产和运输来降低碳排放成本。将碳交易价格设定为 25 元/吨，一方面企业的运营成本与无碳排放时成本差距最小，另一方面符合当前碳交易市场上的定价。

3.2. 运营成本构成

利用模型的约束条件用 Lingo 11.0 可分别求得使目标函数成本最小化的节点间运输量如表 5。

由表 5 可以得出：生产商 1, 2, 3 从供应商处获得的原材料分别为 210, 155, 180，消费者所有的需求都得到了满足，且从生产点 L_1 处运送的量最大。在不考虑碳排放成本因素时，企业可以通过对各运输节点的选取来达到供应链网络的最优化配置，实现所有运输产品成本最低的最优运输网络流。此时通过 lingo 11.0 我们可以求得最小的运营成本 $TC = 65,170.08$ 元，

总成本的主要构成可见表 4~6。

Table 4. The total cost corresponding to the carbon emission limit and the change in the carbon trading price
表 4. 碳排放限额和碳交易价格变动对应的总成本

| | CAP | | | | | | |
|-----|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| 0 | 67,136.83 | 67,136.83 | 67,136.83 | 67,136.83 | 67,136.83 | 67,136.83 | 67,136.83 |
| 25 | 77,783.35 | 75,283.35 | 72,783.35 | 70,283.35 | 67,783.35 | 65,283.35 | 62,783.35 |
| 50 | 87,853.42 | 85,204.70 | 80,204.70 | 75,204.70 | 70,204.70 | 65,204.70 | 60,204.70 |
| 75 | 90,204.70 | 95,126.04 | 87,626.04 | 80,126.04 | 72,626.04 | 65,126.04 | 57,626.04 |
| 100 | 102,626.00 | 105,047.40 | 95,047.39 | 85,047.39 | 75,047.39 | 65,047.39 | 55,047.39 |
| 125 | 127,468.70 | 114,968.70 | 102,468.70 | 89,968.73 | 77,468.73 | 64,968.73 | 52,468.73 |

Table 5. The solution of the initial transport problem
表 5. 初始运输问题的解

| 变量 | 考虑碳排放 | | | | 不考虑碳排放 | | | | | |
|-----|-------|-----|----|-----|--------|-----|----|-----|----|--|
| | 数值 | 变量 | 数值 | 变量 | 数值 | 变量 | 数值 | 变量 | 数值 | |
| Q13 | 180 | V12 | 95 | Q11 | 10 | V11 | 15 | V36 | 90 | |
| Q21 | 35 | V14 | 85 | Q13 | 180 | V12 | 95 | | | |
| Q31 | 175 | V21 | 60 | Q21 | 25 | V14 | 85 | | | |
| Q32 | 35 | V25 | 95 | Q31 | 160 | V21 | 75 | | | |
| Q42 | 120 | V33 | 90 | Q32 | 50 | V25 | 95 | | | |
| V11 | 30 | V36 | 90 | Q42 | 120 | V33 | 90 | | | |

Table 6. Total operating cost of the initial transport problem
表 6. 初始运输问题的总运营成本构成

| 含义 | 不考虑碳排放 | | 考虑碳排放 | | |
|-----|-----------------|-----------|--------|-----------|--------|
| | 数值(元) | 比例(%) | 数值(元) | 比例(%) | |
| PE1 | 总的运营成本 | 65,170.08 | 100.00 | 70,283.35 | 100.00 |
| PE2 | 货物的运输成本 | 63,296.60 | 97.13 | 63,391.10 | 90.19 |
| PE3 | 从 S 到 L 货物的运输成本 | 13,239.95 | 20.32 | 13,581.50 | 19.32 |
| PE4 | 从 L 到 D 货物的运输成本 | 50,056.65 | 76.81 | 49,809.60 | 70.87 |
| PE5 | 燃油成本 | 1873.48 | 2.87 | 1970.91 | 2.80 |
| PE6 | 从 S 到 L 货物的燃油成本 | 387.93 | 0.60 | 485.36 | 0.69 |
| PE7 | 从 L 到 D 货物的燃油成本 | 1485.55 | 2.28 | 1485.55 | 2.11 |
| PE8 | 碳交易成本 | | | 4921.34 | 7.00 |

在整个供应链网络中，货物的运输成本占 97.13% (其中从 S 到 L 路段发生的运输成本为 20.32%，从 L 到 D 路段发生的运输成本占 76.81%)，燃油消耗占总的运营成本 2.87%，其中主要由生产商到消费者产生的燃油成本决定(占 2.28%)。由于每百公里燃油消耗是直接和货车运行速度挂钩的，故燃油消耗产生的成本主要由运输距离来决定。

在考虑碳限额与交易机制时总的运营成本中, 通过从 S 到 L 以及 L 到 D 之间路线和运量的调整, 货物的运输成本所占比重下降; 在整个供应链网络中, 燃油消耗占总成本的比重下降了 0.07%, 产生的碳排放量为 496.85 吨, 企业根据政府规定的排放限额 300 吨, 需要在碳交易市场上以 25 元/吨的价格购买 196.85 吨, 产生碳交易成本 4921.34 元。可以看出在碳限额与交易机制下, 虽然企业总的运营成本上升了, 但企业单纯的运输成本减少了(由 67,136.83 元下降到 65,362.01 元)。

从上述分析可以看出, 碳限额与交易机制也是影响供应链网络的主要因素, 碳限额与交易机制的出台, 会增加企业整个供应链网络的运输成本, 但通过重新规划整个供应链网络可以降低企业的运营成本。

3.3. 对各因子变动进行敏感性分析

3.3.1. 碳限额与交易机制下消费者需求变动的影响

首先, 我们考虑消费者对产品需求的变动对供应链网络的影响, 表 7 和表 8 中给出了当消费者的需求依次减少 5% 时对应的情况。

表 9 和表 10 中给出了当消费者的需求依次减少 5% 时对应的成本构成和各路段的运量情况。

Table 7. Solution of the supply chain network corresponding to the change of consumer demand

表 7. 消费者需求变动对应的供应链网络的解

| | PE1 | PE2 | PE3 | PE4 | PE5 | PE6 | PE7 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|--------|---------|
| 目前 | 65,170.08 | 63,296.60 | 13,239.95 | 50,056.65 | 1873.48 | 387.93 | 1485.55 |
| -5% | 61,112.00 | 59,065.24 | 11,151.38 | 47,913.86 | 2046.76 | 380.82 | 1665.94 |
| -10% | 57,208.60 | 55,547.58 | 10,175.43 | 45,372.15 | 1661.02 | 175.47 | 1485.55 |
| -15% | 54,048.10 | 52,387.08 | 9645.40 | 42,741.68 | 1661.02 | 175.47 | 1485.55 |
| -20% | 50,887.58 | 49,226.56 | 9115.36 | 40,111.20 | 1661.02 | 175.47 | 1485.55 |
| -25% | 47,727.07 | 46,066.05 | 8585.33 | 37,480.72 | 1661.02 | 175.47 | 1485.55 |

Table 8. Supply chain path and volume corresponding to changes in consumer demand

表 8. 消费者需求变动对应的供应链路径和运量

| 变量 | 原值 | -5% | -10% | -15% | -20% | -25% |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Q11 | 0.00 | 7.75 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q13 | 180.00 | 180.00 | 162.00 | 153 | 144.00 | 135.00 |
| Q21 | 35.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q31 | 175.00 | 202.25 | 208.50 | 190.25 | 172.00 | 153.75 |
| Q32 | 35.00 | 7.75 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q42 | 120.00 | 120.00 | 120.00 | 120.00 | 120.00 | 120.00 |
| V11 | 30.00 | 48.00 | 46.500 | 37.25 | 28.00 | 18.75 |
| V12 | 95.00 | 90.25 | 85.50 | 80.75 | 76.00 | 71.25 |
| V14 | 85.00 | 71.75 | 76.50 | 72.25 | 68.00 | 63.75 |
| V21 | 60.00 | 37.50 | 34.50 | 39.25 | 44.00 | 48.75 |
| V25 | 95.00 | 90.25 | 85.50 | 80.75 | 76.00 | 71.25 |
| V33 | 90.00 | 85.50 | 81.00 | 76.50 | 72.00 | 67.50 |
| V34 | 0.00 | 9.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| V36 | 90.00 | 85.50 | 81.00 | 76.50 | 72.00 | 67.50 |

Table 9. The solution of the supply chain network corresponding to the change of consumer demand under carbon limit and transaction mechanism

表 9. 碳限额与交易机制下消费者需求变动对应的供应链网络的解

| | PE1 | PE2 | PE3 | PE4 | PE5 | PE6 | PE7 | PE8 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|--------|---------|---------|
| 目前 | 70,283.35 | 63,391.10 | 13,581.50 | 49,809.60 | 1970.91 | 485.36 | 1485.55 | 4921.34 |
| -5% | 65,549.15 | 59,645.81 | 12,466.69 | 47,179.12 | 1866.37 | 380.82 | 1485.55 | 4036.97 |
| -10% | 60,820.47 | 56,097.21 | 11,490.92 | 44,606.29 | 1463.20 | 283.38 | 1179.82 | 3260.06 |
| -15% | 56,930.44 | 52,827.37 | 10,699.20 | 42,128.17 | 1463.20 | 283.38 | 1179.82 | 2639.87 |
| -20% | 53,040.41 | 49,557.52 | 9907.48 | 39,650.04 | 1463.20 | 283.38 | 1179.82 | 2019.69 |
| -25% | 49,150.37 | 46,287.67 | 9115.76 | 37,171.91 | 1463.20 | 283.38 | 1179.82 | 1399.50 |

Table 10. Supply chain path and volume corresponding to changes in consumer demand under the carbon cap and trade

表 10. 碳限额与交易机制下消费者需求变动对应的供应链路径和运量

| 变量 | 原值 | -5% | -10% | -15% | -20% | -25% |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Q11 | 10.00 | 16.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q13 | 180.00 | 171.00 | 162.00 | 153.00 | 144.00 | 135.00 |
| Q21 | 25.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q31 | 160.00 | 160.00 | 162.00 | 153.00 | 144.00 | 135.00 |
| Q32 | 50.00 | 50.00 | 46.50 | 37.25 | 28.00 | 18.75 |
| Q42 | 120.00 | 120.00 | 120.00 | 120.00 | 120.00 | 120.00 |
| V11 | 15.00 | 5.75 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| V12 | 95.00 | 90.25 | 85.50 | 80.75 | 76.00 | 71.25 |
| V14 | 85.00 | 80.75 | 76.50 | 72.25 | 68.00 | 63.75 |
| V21 | 75.00 | 79.75 | 81.00 | 76.50 | 72.00 | 67.50 |
| V25 | 95.00 | 90.25 | 85.50 | 80.75 | 76.00 | 71.25 |
| V33 | 90.00 | 85.50 | 81.00 | 76.50 | 72.00 | 67.50 |
| V36 | 90.00 | 85.50 | 81.00 | 76.50 | 72.00 | 67.50 |

由此我们可以得出以下结论:

1) 随着需求量的减少, 碳交易成本和总的运营成本不断降低, 且碳交易成本所占比重逐渐下降;

2) 对比表 10 和表 8, 企业的运输网络流也发生了变动, 一直有供应商 3 向生产者 1 运送原材料, 且降低了从生产商 1 到消费者 1 运送商品的数量, 可见碳限额与交易机制会对企业的运输网络流产生影响, 企业可以通过重新规划运输路线来降低碳交易成本, 从而减少运营成本。

3.3.2. 碳限额与交易机制下供应商供给量变动的影响

考虑供应商供给量变动对整个运输网络流和运营成本的影响, 具体的成本构成如表 11, 各路线发生的运输量见表 12。

表 13 和表 14 中给出了当供应商的供应量增加时碳交易成本、运输成本和各路段运量情况。我们可以得出以下结论:

1) 碳限额与交易机制下, 运营成本随供应商供应量的变动, 供给量的不断增加带来运营成本不断降低, 且降低幅度不断缩小。碳交易成本也在随着供应量的减少而降低。

Table 11. Solution of supply chain network for supplier supply change
表 11. 供应商供应量变动对应的供应链网络的解

| | PE ₁ | PE ₂ | PE ₃ | PE ₄ | PE ₅ | PE ₆ | PE ₇ |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 目前 | 65,170.08 | 63,296.60 | 13,239.95 | 50,056.65 | 1873.48 | 387.93 | 1485.55 |
| +5% | 64,393.62 | 62,527.25 | 12,470.60 | 50,056.65 | 1866.37 | 380.82 | 1485.55 |
| +10% | 63,914.07 | 62,047.70 | 11,991.05 | 50,056.65 | 1866.37 | 380.82 | 1485.55 |
| +15% | 63,637.24 | 61,868.30 | 11,811.65 | 50,056.65 | 1768.94 | 283.38 | 1485.55 |
| +20% | 63,499.24 | 61,730.30 | 11,673.65 | 50,056.65 | 1768.94 | 283.38 | 1485.55 |
| +25% | 63,361.24 | 61,592.30 | 11,535.65 | 50,056.65 | 1768.94 | 283.38 | 1485.55 |

Table 12. Supply chain route and volume for supplier supply change
表 12. 供应商供应量变动对应的供应链路径和运量

| 变量 | 原值 | +5% | +10% | +15% | +20% | +25% |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Q11 | 0.00 | 18.50 | 2.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q13 | 180.00 | 180.00 | 180.00 | 180.00 | 180.00 | 180.00 |
| Q21 | 35.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q31 | 175.00 | 191.50 | 208.00 | 210.00 | 210.00 | 210.00 |
| Q32 | 35.00 | 29.00 | 23.00 | 17.00 | 11.00 | 5.00 |
| Q42 | 120.00 | 126.00 | 132.00 | 138.00 | 144.00 | 150.00 |
| V11 | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 |
| V12 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 |
| V14 | 85.00 | 85.00 | 85.00 | 85.00 | 85.00 | 85.00 |
| V21 | 60.00 | 60.00 | 60.00 | 60.00 | 60.00 | 60.00 |
| V25 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 |
| V33 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |
| V36 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |

Table 13. The solution of supply chain network corresponding to the change of supplier supply under carbon limit and transaction mechanism

表 13. 碳限额与交易机制下供应商供应量变动对应的供应链网络的解

| | PE1 | PE2 | PE3 | PE4 | PE5 | PE6 | PE7 | PE8 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|--------|---------|---------|
| 目前 | 70,283.35 | 63,391.10 | 13,581.5 | 49,809.6 | 1970.91 | 485.36 | 1485.55 | 4921.34 |
| +5% | 69,341.64 | 62,704.55 | 12,894.95 | 49,809.60 | 1866.37 | 380.82 | 1485.55 | 4770.72 |
| +10% | 68,777.71 | 62,225.00 | 12,415.40 | 49,809.60 | 1866.37 | 380.82 | 1485.55 | 4686.34 |
| +15% | 68,467.81 | 62,045.60 | 12,236.00 | 49,809.60 | 1768.94 | 283.38 | 1485.55 | 4653.27 |
| +20% | 68,307.31 | 61,907.60 | 12,098.00 | 49,809.60 | 1768.94 | 283.38 | 1485.55 | 4630.77 |
| +25% | 68,146.81 | 61,769.60 | 11,960.00 | 49,809.60 | 1768.94 | 283.38 | 1485.55 | 4608.27 |

Table 14. The supply chain network path and volume corresponding to the change of supplier supply under the carbon limit and the trading mechanism**表 14.** 碳限额与交易机制下供应商供应量变动对应的供应链网络路径和运量

| 变量 | 原值 | +5% | +10% | +15% | +20% | +25% |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Q11 | 0.00 | 18.50 | 2.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q13 | 180.00 | 180.00 | 180.00 | 180.00 | 180.00 | 180.00 |
| Q21 | 35.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q31 | 175.00 | 176.50 | 193.00 | 195.00 | 195.00 | 195.00 |
| Q32 | 35.00 | 44.00 | 38.00 | 32.00 | 26.00 | 20.00 |
| Q42 | 120.00 | 126.00 | 132.00 | 138.00 | 144.00 | 150.00 |
| V11 | 30.00 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 15.00 |
| V12 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 |
| V14 | 85.00 | 85.00 | 85.00 | 85.00 | 85.00 | 85.00 |
| V21 | 60.00 | 75.00 | 75.00 | 75.00 | 75.00 | 75.00 |
| V25 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 |
| V33 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |
| V36 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |

2) 对比表 11 和表 13 可以看出碳限额与交易机制只影响了从供应商到生产商之间发生的成本,对生产商到消费者之间发生的燃油消耗成本并没有影响,即改变供应商原材料的供应量不会影响生产者到消费者之间的运营决策。通过对比表 12 和表 14 在生产商和消费者之间的运输路线和运量可以得到验证。

3) 由于碳交易成本的影响,在供应商到生产商之间发生的运量,供应商 3 增加了到生产商 1 之间的运量,减少了到供应商 2 的运量。由以上分析可知,碳限额与交易机制会影响企业的运营决策,通过运输路线的重新规划可以降低运营成本。

3.3.3. 碳限额与交易机制下生产商生产量变动的影响

生产商供应给消费者的商品量一方面受原材料供应量和自身的生产条件限制,一方面又收到消费者自身的需求和市场价格的限制。在这里我们同样假设生产商的生产量依次变动 5% 得出相应的成本构成。

1) 结合表 16 可以看出随生产商生产量的不断提升,整个运输网络流的运营成本和碳交易成本不断下降,当生产商生产量从 5% 上升到 10% 时,总的运营成本下降的最快,但当生产商提供的产品提高到一定范围时,便不再对整个供应链网络有影响。

2) 结合表 15 和表 16 可以看出,在碳限额与交易机制下,从供应商到生产商的运营成本上升了,生产商到消费者的运营成本下降了。

3) 对照表 17 和表 18 各运输路线发生的运量,在碳限额与交易机制下,企业逐渐增加了供应商 2、生产商 2 和生产商 3 分别到生产商 3、消费者 1 和消费者 4 之间的运量,减少了生产商 1 对消费者 1 和 4 的供应量。可见货物的碳排放量会直接影响企业的运营决策,通过改变企业的供应链网络可以降低运营成本。

3.3.4. 碳限额与交易机制下供应商和生产商同时变动的的影响

表 19 和表 20 显示了当供应商和生产商的供应量同时发生变动时,各路段运营成本的构成和运量情况。

Table 15. Solution of the transport problem corresponding to the production change of the producer
表 15. 生产商生产量变动对应的运输问题的解

| | PE1 | PE2 | PE3 | PE4 | PE5 | PE6 | PE7 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|--------|---------|
| 目前 | 65,170.08 | 63,296.60 | 13,239.95 | 50,056.65 | 1873.48 | 387.93 | 1485.55 |
| +5% | 64,964.27 | 62,910.41 | 12,493.72 | 50,416.69 | 2053.86 | 387.92 | 1665.94 |
| +10% | 64,758.89 | 62,710.62 | 12,017.04 | 50,693.58 | 2048.27 | 382.33 | 1665.94 |
| +15% | 64,655.85 | 62,709.90 | 12,033.60 | 50,676.30 | 1945.95 | 280.01 | 1665.94 |
| +20% | 64,648.46 | 62,882.90 | 12,249.80 | 50,633.10 | 1765.56 | 280.01 | 1485.55 |
| +25% | 64,648.46 | 62,882.90 | 12,249.80 | 50,633.10 | 1765.56 | 280.01 | 1485.55 |

Table 16. Transport problems corresponding to production changes of producers under carbon quota and trading mechanism
表 16. 碳限额与交易机制下生产商生产量变动对应的运输问题的解

| | PE1 | PE2 | PE3 | PE4 | PE5 | PE6 | PE7 | PE8 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|--------|---------|---------|
| 目前 | 70,283.35 | 63,391.10 | 13581.5 | 49,809.6 | 1970.91 | 485.36 | 1485.55 | 4921.34 |
| +5% | 70,211.94 | 63,418.67 | 13,710.18 | 49,708.49 | 2053.86 | 387.92 | 1665.94 | 4739.41 |
| +10% | 69,854.40 | 63,478.20 | 13,872.45 | 49,605.75 | 1748.13 | 387.92 | 1360.20 | 4628.07 |
| +15% | 69,835.70 | 63,481.26 | 13,802.07 | 49,679.19 | 1850.45 | 490.25 | 1360.20 | 4503.99 |
| +20% | 69,668.85 | 63,482.70 | 13,768.95 | 49,713.75 | 1745.91 | 385.71 | 1360.20 | 4440.24 |
| +25% | 69,668.85 | 63,482.70 | 13,768.95 | 49,713.75 | 1745.91 | 385.71 | 1360.20 | 4440.24 |

Table 17. Transport path and volume corresponding to producer output changes
表 17. 生产商生产量变动对应的运输路径和运量

| 变量 | 原值 | +5% | +10% | +15% | +20% | +25% |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Q13 | 180.00 | 189.00 | 190.00 | 190.00 | 180.00 | 180.00 |
| Q21 | 35.00 | 26.00 | 21.00 | 25.00 | 35.00 | 35.00 |
| Q23 | 0.00 | 0.00 | 4.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q31 | 175.00 | 194.50 | 210.00 | 210.00 | 210.00 | 210.00 |
| Q32 | 35.00 | 15.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q42 | 120.00 | 120.00 | 120.00 | 120.00 | 120.00 | 120.00 |
| V11 | 30.00 | 49.50 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 |
| V12 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 |
| V14 | 85.00 | 76.00 | 71.00 | 75.00 | 85.00 | 85.00 |
| V21 | 60.00 | 40.50 | 25.00 | 25.00 | 25.00 | 25.00 |
| V25 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 |
| V33 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |
| V34 | 0.00 | 9.00 | 14.00 | 10.00 | 0.00 | 0.00 |
| V36 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |

Table 18. Transport path and volume corresponding to producer output changes under carbon quota and trading mechanism
表 18. 碳限额与交易机制下生产商生产量变动对应的运输路径和运量

| 变量 | 原值 | +5% | +10% | +15% | +20% | +25% |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Q13 | 180.00 | 189.00 | 190.00 | 190.00 | 190.00 | 190.00 |
| Q21 | 35.00 | 26.00 | 25.00 | 8.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q23 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 17.00 | 25.00 | 25.00 |
| Q31 | 175.00 | 151.50 | 145.00 | 145.00 | 145.00 | 145.00 |
| Q32 | 35.00 | 58.50 | 65.00 | 65.00 | 65.00 | 65.00 |
| Q42 | 120.00 | 120.00 | 120.00 | 120.00 | 120.00 | 120.00 |
| V11 | 30.00 | 6.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| V12 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 |
| V14 | 85.00 | 76.00 | 75.00 | 58.00 | 50.00 | 50.00 |
| V21 | 60.00 | 83.50 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |
| V25 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 |
| V33 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |
| V34 | 0.00 | 9.00 | 10.00 | 27.00 | 35.00 | 35.00 |
| V36 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |

Table 19. Solutions for the simultaneous changes in the supply chain network of suppliers and producers
表 19. 供应商和生产商同时变动对应的供应链网络的解

| | PE1 | PE2 | PE3 | PE4 | PE5 | PE6 | PE7 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|--------|---------|
| 目前 | 65,170.08 | 63,296.60 | 13,239.95 | 50,056.65 | 1873.48 | 387.93 | 1485.55 |
| +5% | 64,262.34 | 62,215.58 | 11,798.89 | 50,416.69 | 2046.76 | 380.82 | 1665.94 |
| +10% | 63,599.21 | 61,757.80 | 11,313.70 | 50,444.10 | 1841.41 | 175.47 | 1665.94 |
| +15% | 63,328.38 | 61,667.36 | 11,330.72 | 50,336.64 | 1661.02 | 175.47 | 1485.55 |
| +20% | 63,261.30 | 61,600.28 | 11,362.46 | 50,237.82 | 1661.02 | 175.47 | 1485.55 |
| +25% | 63,194.22 | 61,533.20 | 11,394.20 | 50,139.00 | 1661.02 | 175.47 | 1485.55 |

Table 20. Suppliers and producers are simultaneously changing the corresponding supply chain network path and traffic
表 20. 供应商和生产商同时变动对应的供应链网络路径和运量

| 变量 | 原值 | +5% | +10% | +15% | +20% | +25% |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Q11 | 0.00 | 9.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q13 | 180.00 | 189.00 | 182.00 | 180.00 | 180.00 | 180.00 |
| Q21 | 35.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q31 | 175.00 | 211.00 | 231.00 | 227.00 | 221.00 | 215.00 |
| Q32 | 35.00 | 9.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q42 | 120.00 | 126.00 | 132.00 | 138.00 | 144.00 | 150.00 |
| V11 | 30.00 | 49.50 | 53.00 | 47.00 | 41.00 | 35.00 |
| V12 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 |
| V14 | 85.00 | 76.00 | 83.00 | 85.00 | 85.00 | 85.00 |
| V21 | 60.00 | 40.50 | 37.00 | 42.00 | 49.00 | 55.00 |
| V25 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 |
| V33 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |
| V34 | 0.00 | 9.00 | 2.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| V36 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |

用 lingo 11.0 计算出各供应点原材料和生产点商品依次同比例增加 5%，10%，15%，20%，25% 时对应的成本得出表 21。

1) 随着供给量的增加总的运营成本不断降低，对比表 19 和表 21，分析各成分构成，我们发现在碳限额与交易机制下货物运输成本和油耗成本从供应商到生产商的下降了，从生产商到消费者上升了。

2) 对照表 20 和表 22，随着供应量的不断增大，供应商 3 减少了生产点 1 原材料的供应，增加了生产点 2 的供应，生产商到消费者之间也同样存着运量之间的调整。可见无论供给如何变动，企业都可以根据碳限额与交易机制对各路线的运量进行重新规划调整来优化成本。进一步验证了碳限额与交易机制下的运输模型具有一定的实用性。

4. 研究与结论

在碳限额与交易机制下供应链网络模型的基础上，通过以某一高碳排放量企业为例，分别从不涉及碳排放成本和考虑碳限额与交易机制两个方面着手，比较分析了消费者需求、生产商生产量和供应商原材料供应量几个因子的变动对运营成本和供应链网络的影响，并对比分析了碳交易成本如何影响企业的

Table 21. Solutions to transport problems of suppliers and producers at the same time under the carbon cap and trade

表 21. 碳限额与交易机制下供应商和生产商同时变动对应的运输问题的解

| | PE1 | PE2 | PE3 | PE4 | PE5 | PE6 | PE7 | PE8 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|--------|---------|---------|
| 目前 | 70,283.35 | 63,391.10 | 13,581.50 | 49,809.60 | 1970.91 | 485.36 | 1485.55 | 4921.34 |
| +5% | 69,323.11 | 62,805.03 | 13,135.42 | 49,669.61 | 1866.37 | 380.82 | 1485.55 | 4651.71 |
| +10% | 68,428.95 | 62,402.30 | 12,839.75 | 49,562.55 | 1560.63 | 380.82 | 1179.82 | 4466.02 |
| +15% | 68,119.04 | 62,222.90 | 12,660.35 | 49,562.55 | 1463.20 | 283.38 | 1179.82 | 4432.94 |
| +20% | 67,958.54 | 62,084.90 | 12,522.35 | 49,562.55 | 1463.20 | 283.38 | 1179.82 | 4410.44 |
| +25% | 67,798.04 | 61,946.90 | 12,384.35 | 49,562.55 | 1463.20 | 283.38 | 1179.82 | 4387.94 |

Table 22. Transport routes and volume of suppliers and producers at the same time under the carbon cap and trade

表 22. 碳限额与交易机制下供应商和生产商同时变动对应的运输路径和运量

| 变量 | 原值 | +5% | +10% | +15% | +20% | +25% |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Q11 | 0.00 | 18.50 | 2.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q13 | 180.00 | 180.00 | 180.00 | 180.00 | 180.00 | 180.00 |
| Q21 | 35.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Q31 | 175.00 | 168.00 | 178.00 | 180.00 | 180.00 | 180.00 |
| Q32 | 35.00 | 52.50 | 53.00 | 47.00 | 41.00 | 35.00 |
| Q42 | 120.00 | 126.00 | 132.00 | 138.00 | 144.00 | 150.00 |
| V11 | 30.00 | 6.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| V12 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 |
| V14 | 85.00 | 85.00 | 85.00 | 85.00 | 85.00 | 85.00 |
| V21 | 60.00 | 83.50 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |
| V25 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 | 95.00 |
| V33 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |
| V36 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 |

运营成本和供应链决策。观察各因子变动对供应链网络的影响，我们发现各因子的变动不仅会影响运输路线的增减还会调整供应链网络的运量。进一步验证了各运输路段产生的碳排放量会影响企业的碳交易成本进行影响企业的运营成本，企业通过合理的规划运输路径可以有效的减少碳排放带来的运营成本的增加。

基金项目

本文受国家级 URT 项目资助，项目编号 2017J00144。

参考文献 (References)

- [1] Dales, J.H. (1968) Pollution, Property & Prices: An Essay in Policy-Making and Economics. Edward Elgar Publishing, Cheltenham.
- [2] Hickman, J., Hassel, D., Joumard, R., *et al.* Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. Project funded by the European Commission under the Transport RTD programme of the 4th Framework programme. Contract No. ST-96-SC.204
- [3] Bektas, T. and Laporte, G. (2011) The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B*, **45**, 1232-1250.
- [4] Emrah, D. (2012) Models and Algorithms for the Pollution-Routing Problem and Its Variations. University of Southampton, Southampton.
- [5] Merrick, R. and Samir, E. (2012) Green Supply Chain Network Design to Reduce Carbon Emissions. *Transportation Research Part D*, **17**, 370-379.
- [6] Sinha, K.C. and Labi, S. (2008) Transportation Decision Making: Principles of Project Evaluation and Programming. *Wiley*, **75**, 94-95

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-664X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: mse@hanspub.org