

碳排放折扣下经济订货批量研究

王中枚, 王 婧, 滕 润, 晓 斌*

北京石油化工学院经济管理学院, 北京

收稿日期: 2022年12月2日; 录用日期: 2023年1月4日; 发布日期: 2023年1月11日

摘 要

我国是能源消耗大国, 每年的二氧化碳排放量巨大, 而库存作为企业供应链管理的关键环节, 对其碳排放的研究至关重要。在生产运作过程中, 批量折扣是常见的事情。在规模经济效应下, 大批量的生产不仅会降低产品的单位成本, 而且使产品的单位排放递减; 同时在碳排放约束下, 传统的经济订货批量(EOQ)库存模型最优解也会发生改变, 本文在价格折扣EOQ模型的基础上考虑碳排放约束和“折扣”, 研究企业最优订货批量, 使企业达到减排的目标。

关键词

碳排放折扣, 经济订货批量, 碳限额

Study on Economic Order Quantity under Carbon Emission Discount

Jinmei Wang, Jing Wang, Run Teng, Bin Xiao*

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

Received: Dec. 2nd, 2022; accepted: Jan. 4th, 2023; published: Jan. 11th, 2023

Abstract

China is a major energy-consuming country with huge annual CO₂ emissions, and the study of carbon emissions from inventory, a key part of corporate supply chain management, is crucial. In production operations, volume discounts are common. Under the effect of economy of scale, the production of large lots will not only reduce the unit cost of the product, but also make the unit emission of the product decreasing; meanwhile, under the carbon emission constraint, the optimal solution of the traditional economic order quantity (EOQ) inventory model will be changed, and this paper considers the carbon emission constraint and “discount” on the basis of the price dis-

*通讯作者。

count EOQ model, and studies the optimal order quantity of enterprises to make them achieve the goal of emission reduction.

Keywords

Carbon Discount, Economic Order Quantity, Carbon Cap

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

近年来,为应对日益严重的气候问题和履行大国责任,中国作出了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的国际承诺,以减少碳排放量。为实现这一目标,节能减排、大力发展新能源产业将是今后政府工作的重点。企业在生产、运输和存储等各个环节都会产生碳排放,将碳排放纳入库存管理,对进一步优化企业供应链管理至关重要,然而目前对于碳排放下的库存协调研究正处于发展阶段,因此优化库存管理,做到节能减排和利益优化,对于企业提升自身竞争力和可持续发展具有重要意义。

经济订货批量(Economic Order Quantity, EOQ)早在20世纪初期就已经被学者提出,并不断应用在企业生产管理中。该模型主要是通过数学方法和管理手段确定和控制企业的订货批量,从而实现企业库存总成本最小,达到为企业节省开支的目的[1]。杨树馨等[2]研究了EOQ模型在仪表盘库存管理中的应用。研究表明相比较于定期采购的方式,经济订货批量模型可以更加科学有效地确定最佳订货批量,实现订货成本和库存费用的最小化。目前学者主要从行业和区域等大的方面对碳减排问题进行研究,而对微观企业碳减排具体实施问题的研究还比较少。但在碳排放约束下,经济订货批量(EOQ)库存模型最优解会发生改变,因此为了在企业中实现碳减排的目标,本文研究如何利用碳“折扣”和碳限额实现对企业生产和库存减排,在不显著提高成本投入的情况下,采取订货策略,实现碳减排和满足生产要求的最佳订货批量。

2. 国内外文献综述

碳排放一直都是很多国内外学者研究的重要方向。到目前为止,不同学者和机构对碳足迹内涵有着不同的定义(见表1),但就全生命周期和CO₂排放量等关键信息基本达成一致,即碳足迹是产品全生命周期或生产活动全流程中所排放的至少包含CO₂在内的温室气体的量,是分析与产品、生产、消费等活动相关的所有直接和间接的碳排放或温室气体排放过程。

Table 1. Partial carbon footprint definition

表 1. 部分碳足迹的定义

来源	定义
POST (2006) [3]	从生命周期理论出发,碳足迹是某产品或活动全流程范围内排放的包含CO ₂ 在内的温室气体总量。在计算时,所有温室气体的量均换算成CO ₂ 等价物
BP (2007)	碳足迹是人类在日常生产、生活过程中排放的CO ₂ 总量

Continued

ETAP (2007)	碳足迹用以衡量人类活动对地球环境生态的影响, 具体指人类在生活、生产过程中所排放的 CO ₂ 的量
Global Footprint Network (2007) [4]	作为生态足迹的一种, 碳足迹是生态系统通过光合作用消化化石燃料燃烧释放的 CO ₂ 的生物承载力需求
碳足迹组织(2008)	碳足迹是在日常生活(如家电使用、照明取暖、交通运输等)中, 人类燃烧化石燃料所释放的温室气体数量。
《PAS 2050 规范》 (英国标准协会, 2008) [5]	碳足迹用以描述活动或实体的温室气体排放量。产品碳足迹是从全生命周期理论出发, 用以评价产品从原材料到生产再到运输、销售、使用和处置等全过程中, 所排放温室气体
国际标准化组织 (ISO, 2012)	侧重产品碳足迹。即在产品生产消费全流程(原料采购、生产制造、物流运输、销售、使用和废弃处置等环节)中直接和间接排放的温室气体总量。

其次, 随着碳排放政策和碳减排意识的加强, 人们开始关注碳排在微观企业的具体影响, 对碳排放的研究主要是从供应链和库存的角度进行研究, 主要集中在以下两个方面:

1) 供应链碳排放

随着全球范围内碳减排意识和工作的逐渐推进, 传统的企业供应链生产运营活动受到冲击, 越来越多的生产运营企业开始在其原有供应链运作环节中加入碳排放这一环境因素, 通过研究碳排放量与企业生产成本、利润之间的勾稽关系, 以制定最优的生产运营决策来减少碳排放量, 从而优化企业的运营管理。Manupati 等[6]通过 3 项碳政策(碳税、严格的碳限额和碳限额与交易)和交货时间考虑因素, 来分析多层次的供应链中的不同的生产 - 销售和存货问题, 并在此基础上采用启发式算法, 以一种非线性混合整数规划的数学模型为基础, 对其进行测试。李虹等[7]选取各省市面板数据对工业企业异质性特征与地区碳排放强度关系进行实证研究, 提出企业规模的扩大可以充分发挥规模效应, 在消耗一定能源的基础上大大减少能源产生的碳排放量, 产生的减排效果可以降低碳排放强度, 证明了规模生产可以降低碳排放, 为本文提供了依据。徐健腾等[8]在给定碳减排措施下, 发现相应的公司产量也随之发生变化, 研究表明企业在生产过程中, 通过采取碳减排策略, 可以降低企业生产活动的频率, 从而实现对企业碳排放量的控制, 达到减排的目标。

2) 库存管理方面

在限制碳排放的前提下, 如何进行有效的库存优化是供应链管理中的一个热点研究领域。国内学者曾伟[9]等通过与传统的联合经济批量(JELS)模式进行对比, 探究了碳价格、碳配额等对供应链决策、碳排放总量及总成本的影响, 为使整个供应链的费用开支最少, 必须对订货批量和产品产量进行合理的规划。覃艳华等[10]通过构建不同的碳配额条件下的供应链管理模型, 探讨了碳配额对最优订货批量的影响, 同时进一步深入研究了供应链预期收益如何改变和供应链的协同问题。兰梓睿等[11]提出一种新的网络流问题, 并构建成本最小化模型, 运用动态规划法寻求预测临界值, 为提高碳排放企业的生产决策提供科学的依据。

Chen Xu 等[12]研究表明在 EOQ 模型中, 当企业的订货批量可以被调节时, 企业的生产成本并不会明显增加, 相反企业的二氧化碳排放量会减少, 这使得企业未来想要实现减排目标而进行的生产运用策略的调整有了可能的机会。He Pang [13]通过比较企业中两种不同的碳排放体系(碳交易和碳税), 对得出的订货批量与 CO₂ 排放之间的差异进行分析, 并研究碳税的定价对订货批量和 CO₂ 排放的影响。Shu Tian [14]对传统的 EOQ 模型进行了拓展, 考虑了供应商在碳约束背景下如何进行生产与储存的问题, 并在此

基础上构建了具有碳约束的库存成本模型。

通过大量的文献阅读、总结和归类，可以看出上述文献分别对碳排放和供应链以及库存问题都进行了比较成熟的研究，能够得出结论表明规模经济可以降低供应链的碳排放量。然而同时考虑碳折扣和碳排放政策的库存管理研究还不多见。鉴于此，本文构建了基于价格折扣 EOQ 模型下的碳排放模型，并提供求解方法，最后用数值算例验证模型的应用，为企业在碳排放政策下进行生产运营提供一些参考。

3. 考虑碳限额情形的 EOQ 模型

3.1. 问题描述

碳排放折扣，是指规模经济下，产品的单位排放递减。碳限额指外部监管机构依据相关的法律法规强制限制的最大碳排放的数量，我国的监管机制是免费为企业分配碳排放量的限额，分配的标准是根据企业的规模、企业产品的性质以及去年的总碳排放量等。碳限额政策一般结合成本处罚机制一起使用，从而更好的完成碳排放的控制额度[15]。

这一节主要分析企业在生产运作中碳排放配额有限时，企业的最优生产决策问题。企业生产产品产生的碳排放量不能超过政府分配的碳排放配额，这是一种强制性规定。因此结合碳排放折扣和政策，构建碳排放约束下的生产与库存优化模型，寻求最佳生产批量策略和碳排放策略。模型以单位时间的总成本最小为目标函数，规定总的碳排放量不得超过政府分配的碳排放配额。

3.2. 参数设定和相关假设

模型所涉及符号说明如表 2 所示。

Table 2. Description of model parameters and symbols
表 2. 模型参数及符号说明

参数符号	说明
D	单位时间产品的需求量
Q	企业每次生产的产量
C_1	单位时间单位库存产品的持有成本
C_3	每次的生产准备的固定成本
k	单位产品的生产成本
\hat{C}_1	单位时间单位产品的存储时产生的碳排放量
\hat{C}_3	每次生产准备产生的固定碳排放量
\hat{k}	生产单位产品产生的碳排放量
M	单位时间内政府分配给企业的碳排放配额
$K(Q)$	单价函数
$\hat{K}(Q)$	单位产品碳排放函数
$C(Q)$	成本函数，单位时间内企业每次生产 Q 量产品所产生的相关成本
$E(Q)$	碳排放函数，单位时间内企业每次生产 Q 量产品产生的碳排放量

为了建模方便并符合科学管理规则，我们首先做出如下假设：

- 1) 企业碳排放量不能超过政府分配碳排放配额；
- 2) 单价随购物数量而变化，单位产品碳排放量随生产批量而减少；
- 3) 企业只生产一种产品，产品需求是静态的、确定的，费用参数是静态的；
- 4) 企业必须满足所有的订货需求；
- 5) 交货时间为 0，企业每次完成生产任务，产品立即售出，库存立即变为 0。

3.3. 模型建立

企业进行生产时，产生的碳排放量主要来自三处，包括固定生产产生的碳排放 $\hat{C}_3 \frac{D}{Q}$ ，库存产生的碳排放量 $\hat{C}_1 \frac{Q}{2}$ ，以及生产产品的碳排放量 $\hat{k}D$ 。所以目标函数应为单位时间内总成本最低，约束条件为单位时间内生产产品产生的碳排放量不超过政府分配的碳排放配额。构建的碳排放总量约束下的库存模型形式如下：

$$\min C(Q) = C_1 \frac{Q}{2} + C_3 \frac{D}{Q} + kD \tag{1}$$

$$E(Q) = \hat{C}_1 \frac{Q}{2} + \hat{C}_3 \frac{D}{Q} + \hat{k}D \leq M \tag{2}$$

记货物单价为 $K(Q)$ ，设 $K(Q)$ 按三个数量级变化，如图 1 所示。为了方便计算，记每单位货物碳排放量为 $\hat{K}(Q)$ ，同样设 $\hat{K}(Q)$ 按三个数量级变化，如图 2 所示。

$$K(Q) = \begin{cases} K_1 & 0 \leq Q < Q_1 \\ K_2 & Q_1 \leq Q < Q_2 \\ K_3 & Q \geq Q_2 \end{cases} \tag{3}$$

$$\hat{K}(Q) = \begin{cases} \hat{K}_1 & 0 \leq Q < \hat{Q}_1 \\ \hat{K}_2 & \hat{Q}_1 \leq Q < \hat{Q}_2 \\ \hat{K}_3 & Q \geq \hat{Q}_2 \end{cases} \tag{4}$$

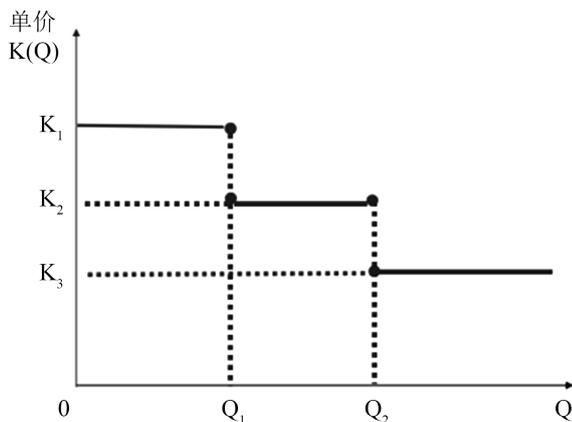


Figure 1. Unit product price discount chart
图 1. 单位产品价格折扣图

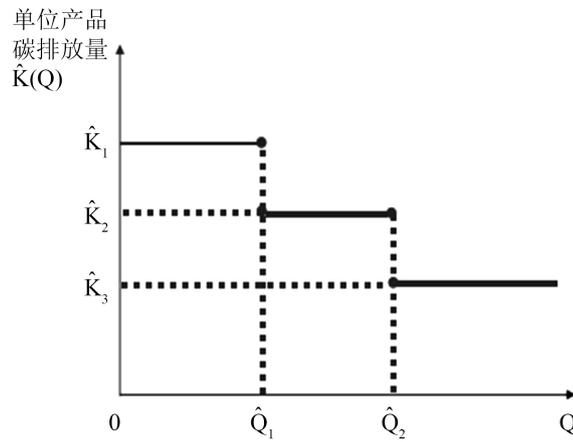


Figure 2. Carbon emission discount chart for unit product
图 2. 单位产品碳排放量折扣图

在价格折扣下，当订购量为 Q 时，单位时间内的总成本为(如图 3):

$$C^1(Q) = C_1 \frac{Q}{2} + C_3 \frac{D}{Q} + K_1 D \quad Q \in [0, Q_1) \quad (5)$$

$$C^2(Q) = C_1 \frac{Q}{2} + C_3 \frac{D}{Q} + K_2 D \quad Q \in [Q_1, Q_2) \quad (6)$$

$$C^3(Q) = C_1 \frac{Q}{2} + C_3 \frac{D}{Q} + K_3 D \quad Q \in [Q_2, +\infty) \quad (7)$$

在碳排放折扣下，当订购量为 Q 时，单位时间内的总碳排放量为(如图 4):

$$E^1(Q) = \hat{C}_1 \frac{Q}{2} + \hat{C}_3 \frac{D}{Q} + \hat{K}_1 D \quad Q \in [0, \hat{Q}_1) \quad (8)$$

$$E^2(Q) = \hat{C}_1 \frac{Q}{2} + \hat{C}_3 \frac{D}{Q} + \hat{K}_2 D \quad Q \in [\hat{Q}_1, \hat{Q}_2) \quad (9)$$

$$E^3(Q) = \hat{C}_1 \frac{Q}{2} + \hat{C}_3 \frac{D}{Q} + \hat{K}_3 D \quad Q \in [\hat{Q}_2, +\infty) \quad (10)$$

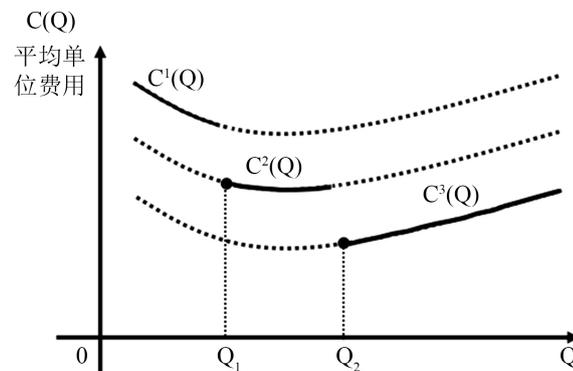


Figure 3. Total cost per unit of time
图 3. 单位时间成本图

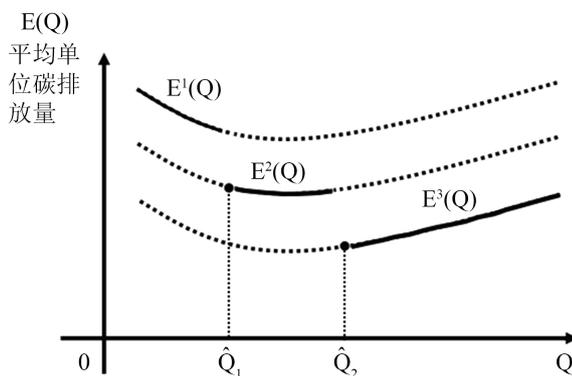


Figure 4. Total carbon emissions per unit of time
图 4. 单位时间总碳排放量图

3.4. 模型求解与算法设计

(一) 首先计算在价格有折扣的情况下，使得总费用最低的订货批量 Q^* 。

在价格有折扣的情况下，最佳批量的算法如下：

1) 对 $C(Q)$ (不考虑定义域)求得极值点为 Q_0 ：

令 $\frac{dC(Q)}{d(Q)}=0$ ，可得函数的驻点 $Q = \sqrt{\frac{2C_3D}{C_1}}$ ，又 $\frac{d^2E(Q)}{dQ^2} = \frac{2C_3D}{Q^3} > 0$ ，即函数存在极小值，

极小值点为： $Q_0 = \sqrt{\frac{2C_3D}{C_1}}$ 。

2) 对 $Q_0 < Q_1$ ，计算

$$C^1(Q_0) = C_1 \frac{Q_0}{2} + C_3 \frac{D}{Q_0} + K_1 D \tag{11}$$

$$C^2(Q_1) = C_1 \frac{Q_1}{2} + C_3 \frac{D}{Q_1} + K_2 D \tag{12}$$

$$C^3(Q_2) = C_1 \frac{Q_2}{2} + C_3 \frac{D}{Q_2} + K_3 D \tag{13}$$

由 $\min\{C^1(Q_0), C^2(Q_1), C^3(Q_2)\}$ 得到单位货物最小费用的订购批量 Q^* 。

3) 对 $Q_1 \leq Q_0 < Q_2$ ，计算

$$C^2(Q_0) = C_1 \frac{Q_0}{2} + C_3 \frac{D}{Q_0} + K_2 D \tag{14}$$

$$C^3(Q_2) = C_1 \frac{Q_2}{2} + C_3 \frac{D}{Q_2} + K_3 D \tag{15}$$

由 $\min\{C^2(Q_0), C^3(Q_2)\}$ 得到单位货物最小费用的订购批量 Q^* 。

4) 对 $Q_0 > Q_2$ ，则取 $Q^* = Q_0$

此时单位货物最小费用为 $C(Q^*) = C^3(Q_0) = C_1 \frac{Q_0}{2} + C_3 \frac{D}{Q_0} + K_3 D$ 。

(二) 根据第一步中得到的最小费用的订货批量 Q^* ，考虑其碳排放的折扣，计算单位货物碳排放量。

1) 对 $Q^* < \hat{Q}_1$ ，计算 $E^1(Q^*)$ 。

- 2) 对 $\hat{Q}_1 \leq Q^* < \hat{Q}_2$, 计算 $E^2(Q^*)$ 。
 3) 对 $Q^* > \hat{Q}_2$, 计算 $E^3(Q^*)$, 碳排放量为 $E(Q^*) = E^3(Q^*)$ 。

(三) 将第二步得到的碳排放量 $E(Q^*)$ 与碳限额 M 进行数值对比:

- 1) 若 $E(Q^*) \leq M$, 则求得最优订货批量 Q^* 。
 2) 若 $E(Q^*) > M$, 则需按照碳限额 M 的约束进行最优订货批量的计算。

计算过程如下: 分别求解方程 $E^1(Q) = M$, $E^2(Q) = M$, $E^3(Q) = M$, 可以得到 6 个批量, 分别计算 6 个批量的成本, 选择成本最小的即为最优解。

4. 算例分析

4.1. 问题提出

本文以某塑胶有限公司为例, 验证碳折扣对库存控制策略的效果。产品的市场需求量为 70,000 件/年, 产成品的持有成本 25 元/件, 生产准备的成本 2500 元/次, 产成品库存持有排放率 2 千克/件, 生产准备排放率 3 千克/次, 分配给公司的碳限额为 200 吨。产品单价随生产批量变化见表 3, 生产单位产品碳排放量随生产批量变化见表 4, 企业通过减排技术改进, 生产单位产品碳排放量随生产批量变化见表 5。

Table 3. Data related to product unit price

表 3. 产品单价相关数据

生产批量(件)	产品单价(元/件)
0~2000	30
2000~4000	25
4000 及以上	20

Table 4. Carbon emissions per unit of production

表 4. 生产单位产品碳排放量

生产批量(件)	生产单位产品碳排放量 (千克/件)
0~2500	3.5
2500~5000	3
5000 及以上	2.5

Table 5. Carbon emissions per unit of production after emission reduction technology improvement

表 5. 减排技术改进后生产单位产品碳排放量

生产批量(件)	生产单位产品碳排放量 (千克/件)
0~2500	3
2500~5000	2.5
5000 及以上	2

4.2. 模型求解及结果分析

利用第三节构建的模型，对以上问题进行实例求解分析。

由题意知 $D = 70000$ ， $C_1 = 25$ ， $C_3 = 2500$ ， $\hat{C}_1 = 2$ ， $\hat{C}_3 = 3$ ， $M = 200$ 吨

$$\text{产品单价: } K(Q) = \begin{cases} 30 & 0 \leq Q < 2000 \\ 25 & 2000 \leq Q < 4000 \\ 20 & Q \geq 4000 \end{cases}$$

$$Q_0 = \sqrt{\frac{2C_3D}{C_1}} = \sqrt{\frac{2 \times 2500 \times 70000}{25}} \approx 3742 \tag{16}$$

因为 $2000 \leq 3742 < 4000$ ，即 $Q_1 \leq Q_0 < Q_2$ ，计算总成本：

$$C^2(Q_0) = C_1 \frac{Q_0}{2} + C_3 \frac{D}{Q_0} + K_2 D = 25 \times \frac{3742}{2} + 2500 \times \frac{70000}{3742} + 25 \times 70000 = 1843541 \tag{17}$$

$$C^3(Q_2) = C_1 \frac{Q_2}{2} + C_3 \frac{D}{Q_2} + K_3 D = 25 \times \frac{4000}{2} + 2500 \times \frac{70000}{4000} + 20 \times 70000 = 1493750 \tag{18}$$

由 $\min\{C^2(Q_0), C^3(Q_2)\}$ 得到单位货物最小费用的订购批量 $Q^* = Q_2 = 4000$ 。

$$1) \text{ 技术改造前, 单位碳排放: } \hat{K}(Q) = \begin{cases} 3.5 & 0 \leq Q < 2500 \\ 3 & 2500 \leq Q < 5000 \\ 2.5 & Q \geq 5000 \end{cases}$$

因为 $2500 \leq 4000 < 5000$ ，即 $\hat{Q}_1 \leq Q^* < \hat{Q}_2$ ，计算碳排放量：

$$E^2(Q^*) = \hat{C}_1 \frac{Q^*}{2} + \hat{C}_3 \frac{D}{Q^*} + \hat{K}_2 D = 2 \times \frac{4000}{2} + 3 \times \frac{70000}{4000} + 3 \times 70000 \approx 214053 \tag{19}$$

根据式(19)，可以看出 $E(Q^*) > M$ ，此时超过了碳限额的约束。

$$2) \text{ 通过引进减排技术, 单位碳排放: } \hat{K}(Q) = \begin{cases} 3 & 0 \leq Q < 2500 \\ 2.5 & 2500 \leq Q < 5000 \\ 2 & Q \geq 5000 \end{cases}$$

因为 $2500 \leq 4000 < 5000$ ，此时 $\hat{K}_2 = 2.5$ 计算碳排放量：

$$E^2(Q^*) = \hat{C}_1 \frac{Q^*}{2} + \hat{C}_3 \frac{D}{Q^*} + \hat{K}_2 D = 2 \times \frac{4000}{2} + 3 \times \frac{70000}{4000} + 2.5 \times 70000 = 179052.5 \tag{20}$$

根据式(20)，可以看出引进减排技术后， $E^2(Q^*) < M$ ，满足了政府规定碳限额 200 吨的要求，此时订货批量为 4000，订购货物最小费用为 1,493,750。

由上述算例分析可知，企业引进碳排技术后，单位产品碳排放降低，满足了政府碳限额的要求，有效降低了企业成本，促进了企业的碳减排。同时企业可以通过碳交易市场售出多余的碳排放配额，使其进一步流通从而获得效益，增加企业的利润，缓解技术改进带来的成本压力，对企业具有一定的现实意义。

5. 结论

随着低碳经济的迅速发展，减排政策的实施变得尤为重要。在此背景下，本文对国内外学者的研究成果进行整合梳理，构建了碳折扣下改进的 EOQ 模型，给出求解算法并加以算例进行验证，得出碳排放折扣下的 EOQ 能更好地为企业实现减排，使企业满足碳限额的要求。

本文对于降低企业的碳排放量，增加企业利润同时对政府碳政策的实行具有一定的参考价值。在未来的研究中，可以进一步考虑碳税和碳交易对企业决策的影响。

基金项目

项目类型：2022年北京市大学生科研训练项目。项目编号：2022J00237。

参考文献

- [1] 王小玉. 基于改善型 EOQ 模型的零售商业变质生鲜产品库存策略研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2019.
- [2] 杨树馨, 高诗惠, 李春燕, 魏士. EOQ 理论下汽车装配厂库存管理优化研究[J]. 物流科技, 2022, 45(15): 148-151.
- [3] Baldwin, S. (2006) Carbon Footprint of Electricity Generation. Parliamentary Office of Science and Technology, London.
- [4] GFN (2007) Ecological Footprint Glossary. Global Footprint Network, Oakland.
- [5] BSI (2008) Guide to PAS 2050: How to Assess the Carbon Footprint of Goods and Services. British Standards, London.
- [6] Manupati, V.K., Jedidah, S.J., Gupta, S., Bhandari, A. and Ramkumar, M. (2019) Optimization of a Multi-Echelon Sustainable Production-Distribution Supply Chain System with Lead Time Consideration under Carbon Emission Policies. *Computers & Industrial Engineering*, **135**, 1312-1323. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.010>
- [7] 李虹, 刘凌云, 王瑞珂. 区域企业异质性特征、节能减排与碳排放强度——基于中国省市工业企业面板数据的研究[J]. 南京审计大学学报, 2016, 13(4): 43-51.
- [8] 徐健腾, 胡婷婷. 碳交易机制下具有学习行为的生产和减排策略[J]. 系统工程, 2017, 35(9): 112-120.
- [9] 曾伟, 王瑶池, 周洪涛. 碳限额与交易机制下供应链运作优化研究[J]. 管理工程学报, 2015, 29(3): 199-206.
- [10] 覃艳华, 曹细玉, 徐兆丰, 张杰芳. 基于碳排放配额约束下的供应链订货策略及协调研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2017, 51(4): 510-517.
- [11] 兰梓睿, 孙振清, 靖富营. 碳排放限额约束下的企业动态生产决策研究[J]. 统计与决策, 2018, 34(24): 64-67.
- [12] Chen, X., Benjaafar, S. and Elomri, A. (2013) The Carbon-Constrained EOQ. *Operations Research Letters*, **41**, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2012.12.003>
- [13] He, P., Zhang, W., Xu, X. and Bian, Y. (2015) Production Lot-Sizing and Carbon Emissions under Cap-and-Trade and Carbon Tax Regulations. *Journal of Cleaner Production*, **103**, 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.102>
- [14] Shu, T., Wu, Q., Chen, S., et al. (2017) Manufacturers'/Remanufacturers' Inventory Control Strategies with Cap-and-Trade Regulation. *Journal of Cleaner Production*, **159**, 133-137. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.021>
- [15] 余利娥. 不同碳减排政策下库存模式对供应链的碳排放影响研究[D]: [博士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2018.