

基于碳交易的可持续供应链网络设计

□ 韩水华 姜 跃 董梦媛

(厦门大学 管理学院, 福建 厦门 361005)

[摘要] 将环境因素融入到传统供应链中, 构建了一个基于碳交易的可持续供应链网络的混合整数线性规划模型, 然后用一个具体实例对模型验证, 同时通过软件进行求解, 得到该企业在采购、制造、分销及回收等环节的最优化决策, 并进行分析。

[关键词] 可持续供应链网络; 碳交易; 最优化决策; 供应链

[中图分类号] F273 [文献标识码] A [文章编号] 1003-1154(2014)05-0105-03

2009年, 哥本哈根大会形成共同的认识, 碳排放是全球变暖的主要原因, 气候变化和碳管理是企业必须要面对的事实。目前, 在可持续供应链网络方面的研究相对比较丰富, 但在研究中考考虑碳排放相对比较少。Sundarakani^[1]讨论了如何在电力供应链网络范围内测量供应链的碳足迹。Venkat和Cholette^[2]计算了在食品和饮料供应链的运输环节和仓储活动的能源消耗和碳排放。数据表明, 不同供应链设计, 能源消耗和碳排放可以有很大的差别。Ramudhin等^[3]提出了碳市场敏感的可持续供应链网络设计模型。

基于碳交易的可持续供应链网络模型, 主要解决四大战略问题, 即供应链合作伙伴选择、工艺技术选择、运输工具选择、原材料和回收物料供应决策。

一、模 型

基于碳交易的可持续供应链网络设计, 即政府设定碳排放上限——碳排放额度, 企业的碳排放量不得超过碳排放额度。如果实际排放量小于分配到排放额度, 企业可以将剩余的排放额度拿到市场上出售获取利润。相反, 如果实际排放量大于分配到排放额度, 企业就要去购买排放额度。

(一) 供应链运作成本

$$TOC = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T FC_{sit} Y_{sit} + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T P_{sit} Q_{sit} + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I$$

$$\begin{aligned} & \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T VC_{vt} LG_s Q_{sit} + \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T VC_{vt} LG_r Q_{rjt} + \sum_{t=1}^T FC_t + \sum_{h=1}^H \\ & \sum_{t=1}^T FC_{ht} Y_{ht} + \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T VC_{ht} Q_{ht} + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T HC_{it} I_{it} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T HC_{jt} I_{jt} \\ & + \sum_{t=1}^T HC_{rt} I_{rt} + \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T FC_{dt} Y_{dt} + \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T VC_{dt} I_{dt} + \sum_{d=1}^D \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T VC_{vt} \\ & LG_d Q_{dvt} + \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T VC_{vt} LG_{dc} Q_{dcv} + \sum_{e=1}^E \sum_{t=1}^T FC_{et} Y_{et} + \sum_{c=1}^C \sum_{e=1}^E \\ & \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T P_{et} Q_{cevt} + \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T VC_{ct} Q_{cevt} + \sum_{c=1}^C \sum_{e=1}^E \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T VC_{vt} LG_{ce} Q_{cevt} \\ & + \sum_{e=1}^E \sum_{r=1}^R \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T VC_{vt} LG_{er} Q_{erv} + \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T FC_{rt} Y_{rt} + \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T VDC_{rt} \\ & D_{rt} + \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T VC_{rjt} Q_{rjt} + \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T HC_{rt} I_{rt} + \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T HC_{rjt} I_{rjt} \end{aligned}$$

上式第1到第4项表示采购成本, 第5到第10项表示制造成本, 第11到第14项表示分销成本, 第15到第24项表示回收成本。

(二) 碳收益/成本

$$\begin{aligned} TEC = & \left(\sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T CE_{sit} Q_{sit} + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^I \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T CE_{vt} \right. \\ & LG_s Q_{sit} + \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T CE_{vt} LG_r Q_{rjt} + \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T CE_{ht} Q_{ht} \\ & + \sum_{d=1}^D \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T CE_{vt} LG_d Q_{dvt} + \sum_{d=1}^D \sum_{c=1}^C \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T CE_{vt} LG_{dc} Q_{dcv} \\ & \left. + \sum_{c=1}^C \sum_{e=1}^E \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T CE_{vt} LG_{ce} Q_{cevt} + \sum_{e=1}^E \sum_{r=1}^R \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T CE_{vt} LG_{er} Q_{erv} \right) \end{aligned}$$

[基金项目] 国家自然科学基金项目(70971112)。

$$+ \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T CED_{rt} D_{rt} + \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T CE_{rjt} Q_{rjt} - \sum_{t=1}^T \Theta_t P_{CE}$$

上式前3项表示采购碳排放,第4项表示制造碳排放,第5项和第6项表示分销碳排放,第7到第10项表示回收碳排放,第11项表示企业所获得的碳排放额度。

(三)约束条件

$$\sum_{v=1}^V Q_{sivt} \leq \bar{S}_{sit} Y_{sit} \quad (1)$$

约束(1)是供应商约束。

$$Q_{ht} \leq \bar{Q}_{ht} Y_{ht} \quad (2)$$

$$Q_{it} + Q_{jt} = \sum_{h=1}^H \beta_{ht} Q_{ht} \quad (3)$$

$$I_{i(t-1)} + \sum_{s=1}^S \sum_{v=1}^V Q_{sivt} = I_{it} + Q_{it} \quad (4)$$

$$I_{j(t-1)} + \sum_{r=1}^R \sum_{v=1}^V Q_{rjvt} = I_{jt} + Q_{jt} \quad (5)$$

$$I_{(t-1)} + \sum_{h=1}^H Q_{ht} = I_t + \sum_{d=1}^D \sum_{v=1}^V Q_{dvt} \quad (6)$$

约束(2)-(6)是制造中心约束。

$$\sum_{v=1}^V Q_{dvt} + \sum_{c=1}^C \sum_{v=1}^V Q_{dcvt} \leq \bar{D}_{dt} Y_{dt} \quad (7)$$

$$I_{d(t-1)} + \sum_{v=1}^V Q_{dvt} = I_{dt} + \sum_{c=1}^C \sum_{v=1}^V Q_{dcvt} \quad (8)$$

约束(7)(8)是分销中心约束。

$$\sum_{d=1}^D \sum_{v=1}^V Q_{dcvt} = DE_{ct} \quad (9)$$

约束(9)是市场约束。

$$\sum_{e=1}^E \sum_{v=1}^V Q_{cevt} = \theta_t DE_{ct} \quad (10)$$

$$\sum_{v=1}^V Q_{cevt} \leq \bar{E}_{et} Y_{et} \quad (11)$$

$$I_{e(t-1)} + \sum_{v=1}^V \sum_{c=1}^C Q_{cevt} = I_{et} + \sum_{v=1}^V Q_{ervt} \quad (12)$$

约束(10)-(12)是收集中心约束。

$$Q_{nt} \leq \bar{R}_{nt} Y_{nt} \quad (13)$$

$$I_{r(t-1)} + \sum_{e=1}^E \sum_{v=1}^V Q_{ervt} = I_{rt} + Q_{rt} \quad (14)$$

$$I_{vj(t-1)} + Q_{vjt} = I_{jt} + \sum_{v=1}^V Q_{rvjt} \quad (15)$$

$$D_{rt} = \beta_{rt} Q_{rt} \quad (16)$$

$$Q_{jt} = \sum_{h=1}^H \gamma_{hj} Y_{ht} (1 - \beta_{rt}) Q_{rt} \quad (17)$$

约束(14)-(17)是处理中心约束。

(四)目标函数

制造商所做出的决策,就是在满足一定约束条

件下,实现供应链总运作成本和碳交易成本的最小,因此目标函数为:

$$\text{Min } Z = \text{TOC} + \text{TEC}$$

二、算例及分析

(一)供应链网络结构与供应链成本、碳成本/收益分析

由图1可以看出,配料由配料供应商提供,初级切片由初级切片供应商(江苏)提供;在生产环节,选择技术4进行生产;在分销环节选择了南平、漳州和宁德分销中心,南平分销中心负责南平和龙岩市场,漳州分销中心负责厦门、泉州、龙岩和漳州市市场,宁德分销中心负责泉州、福州和宁德市场。在回收环节,各市场的产品使用完后,首先送到各自收集中心,然后再送到处理中心进行物料恢复,物料恢复完成后转化成回收物料进入到生产环节。

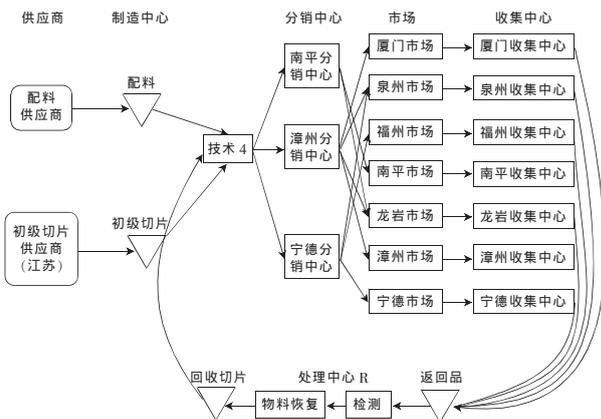


图1 供应链网络结构图

从表1可以看出,采购成本占总运作成本比例最大,其次为制造成本,分销配送成本和回收成本。出现这一结果的原因:采购成本主要是由原材料购买成本、固定订货成本和采购运输成本组成,其中原材料购买成本占的比重最大,而切片是采购的原材料最重要的组成部分,采购量相对较大。而产品的回收率较低,所以回收切片供给量较低,导致大部分切片都要靠初级切片供给,而目前初级切片价格又较高,因此导致原材料购买成本较大,进而总采购成本就较高。

表1 供应链运作成本构成 单位:万元

成本组成	采购成本	制造成本	分销成本	回收成本	总运作成本
数值	5390	1087	952	200	7630

从表2可以发现,制造碳排放占的比例最大,其次为采购碳排放和分销碳排放,回收碳排放占的比例最小。出现这一结果的主要原因是,在可持续供应

链模型最优时,制造环节选择的是工艺4,而在产量相同的情况下工艺4消耗的水电都比较多,这就导致使用工艺4产生的碳排放较多,因此制造碳排放就较多;由于选择减重工艺4进行生产,在产量相同的情况下,工艺4大大降低了切片使用量,进而也大大降低了切片的采购量,因此采购环节的碳排放比例不大;在分销环节选择了距离市场较近的3个分销中心,所以在产品分销环节碳排放的比重也不大;在回收环节,现在的回收率较低,导致返回品总量不多,所以回收中心进行物料恢复的总量比较小,所以碳排放也比较少。

表2 供应链碳足迹构成 单位:吨

碳足迹组成	采购碳排放	制造碳排放	分销碳排放	回收碳排放	总碳足迹
数值	2234	8030	1815	962	1304

(二) 供应链网络各环节决策

分析表3,由于配料供应商只有一家,因此不存在选择问题。在初级切片的供应商选择方面,选择的是江苏供应商,这主要是因为,虽然江苏供应商比厦门供应商距公司更远,会产生较多运输成本和运输碳排放,同时江苏供应商的初级切片比厦门供应商初始碳足迹高,但是江苏供应商提供的初级切片价格比厦门供应商价格低。更低的原材料购买成本可以弥补较高的初始碳足迹、运输成本和运输碳排放,所以综合各方面,选择江苏供应商。在运输工具选择方面,如果在飞机、货船、卡车和货车之间优先选择货船;卡车和货车之间,优先选择货车。这主要是由于货船的运输成本和运输碳排放都比飞机、卡车和货车要低,选择货船成本最低。卡车的运输成本要比货车低,但是卡车的运输碳排放比货车高,使用卡车节约的运输成本小于使用货车节约的碳排放成本,综合考虑运输成本和碳排放,选择货车更优。

表3 供应商选择和采购量安排

单位:万吨

所选择的供应商	时期	采购量	所使用的运输工具
配料供应商	1	0.081	货船
	2	0.058	货船
初级切片供应商 (江苏)	1	0.1437	货车
	2	0.0916	货车

在制造过程中,选择的是技术4。出现这一结果主要有以下几个原因。虽然从技术1到技术5固定投资成本越来越高,但是变动生产成本却越来越低。综合固定成本和变动成本,从技术1到技术5还越来越小。碳排放方面,从高到低依次是技术4、技术5、技术1、技术2和技术3。综合考虑制造成本和碳排放,选择技术4最佳。表4表示原材料、回收物料消耗与产品生产安排。

在分销环节,选择南平、漳州和宁德三个分销中

表4 原材料、回收物料消耗与产品生产安排

	配料(万吨)	初级切片(万吨)	回收切片(万吨)	产品(万个)
1	0.073	0.1237	0.0004	3650
2	0.056	0.0866	0.0086	2800

心。原因是:受分销中心分销能力的约束,只选择一个分销中心无法满足分销需求;考虑分销中心的固定运营成本和单位分销成本,南平、漳州、宁德相对较低;选择南平、漳州和宁德分销中心可以减少从制造中心到分销中心的运输距离和从分销中心到市场的运输距离,一方面可以降低运输成本,另外还可以减少运输过程中的碳排放,综合考虑选择了南平、漳州和宁德分销中心。表5表示回收环节收集中心和处理中心回收再处理安排。

表5 收集中心和处理中心回收再处理安排

	收集中心当期 返回品(万个)	处理中心当期 返回品(万个)	处理中心丢弃 返回品(万个)	处理中心再生 回收切片(万吨)
1	530	530	53	0.0072
2	960	960	96	0.0141

三、结论与指导意义

本文构建了一个基于碳交易的供应链网络模型,然后通过算例验证了模型的有效性。对可持续供应链最优设计下的成本与碳排放以及决策进行解析,得到如下结论。采购成本是影响供应链总运作成本的主要因素。制造碳排放是影响供应链总碳足迹的主要因素。因此,采购环节和制造环节应该是供应链重点关注的对象。制造环节的某些技术改进,可能会产生更高的制造碳排放,需要更高的初期投资,但是新技术一般能快速节约资金,最终大大降低制造成本。同时新技术使得物料耗用减少,导致采购成本与采购碳排放降低,最终会起到降低供应链的成本与碳足迹的作用。最后,企业在选择供应链上下游合作伙伴时,要综合考虑成本、碳排放和距离几个因素。□

[参考文献]

- [1] Seuring S, Müller M. From a Literature Review to a Conceptual Framework for Sustainable Supply Chain Management [J]. Journal of Cleaner Production, 2008, 16(15): 1699-1710.
- [2] Cholette S, Venkat K. The Energy and Carbon Intensity of Wine Distribution: A Study of Logistical Options for Delivering Wine to Consumers [J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(16): 1401-1413.
- [3] Ramudhin A, Chaabane A, Paquet M. Carbon Market Sensitive Sustainable Supply Chain Network Design [J]. International Journal of Management Science and Engineering Management, 2010, 5(1): 30-38.