

低碳型城市物流配送双层次网络设计

王道平, 李建立, 郭继东

(北京科技大学 东凌经济管理学院, 北京 100083)

摘要:考虑到国内即将实施的碳税政策,研究碳排放背景下的双层次城市物流配送网络,建立一个新型的考虑物流运营成本和碳排放成本平衡的凸整数规划模型。通过分析一个算例,应用流行的商业优化软件 GLPK 对模型进行求解,详细的结果输出分析表明了该模型的有效性。研究发现:城市物流配送运营商在递增型碳税情况下,仅需要通过物流配送网络配置的微调,即可以实现经济效益和环境效益双赢的目标。

关键词: 配送网络;网络设计;碳税;碳排放

中图分类号:F252.3

文献标识码:A

文章编号:1009-3370(2014)01-0007-05

一、问题的提出

温室效应所导致的全球性气候变暖受到世界范围内的广泛关注。中国政府承诺,到 2020 年,将其单位 GDP 的碳排放量在 2005 年基础上降低 40%~45%。目前,中国的城镇化进程已经过半,城市在国民经济中的比重越来越大,它也是我国碳排放和碳减排的重要主体^[1]。在国家《物流业调整和振兴规划》中,城市物流配送业被确定为物流发展的重点领域。然而,以城市物流车辆为主的城市交通业对城市环境的负面影响,被认为是城市的首要污染源^[2]。在发展低碳化城市经济发展模式转变的同时,要注意政策性工具的谨慎适当使用^[3]。Hepburn (2006)综述了降低碳排放的政策工具,并把它们分为基于价格和基于数量两种^[4]。碳税就是基于企业或个人的碳排放总量而征收的,也被认为是降低碳排放最具市场效率的政策之一^[5]。通过碳税可以赋予碳排放权利一个价格标签,每个碳排放者根据自己的成本函数及碳税率水平,自行选择适当的碳排放量,而国家则利用碳税率来对区域碳排放总量进行合理调节^[6]。汪曾涛(2009)认为,碳税的征收应遵循循序渐进的原则,一开始先设置在较低的水平,再逐步提高。这样可以让企业和居民在较低的税收下继续调整其能源消费行为^[7],本文的研究将为该定性研究提供定量化佐证。

在国内大中型城市里,市内交通一般被认为是导致污染的重要原因之一,物流业又是城市交通的

重要组成部分,它所带来的城市交通拥塞和环境污染也因此日益受到政府和居民的重视,这也是福利经济学所重点研究的经济活动外部不经济性问题,也是碳税政策的理论依据^[8]。对于城市物流配送业的发展,有学者认为应该遵循政府主导的方式,并构建了城市政府主导下,由物流园区、配送中心和最终用户构成的双层次物流配送网络模型^[9]。Ehmke(2012)介绍了一个城市物流服务规划系统,建立了一个旅行时间具有时段依赖属性的车辆调度问题。时段依赖的属性通过分析整个城市的交通数据得到,然后利用旅行商问题和车辆路径规划问题的一般启发式进行了求解^[10]。Sheu(2006)给出了一个基于顾客需求动态分组的物流资源分配法,该方法基于 5 个步骤,即顾客需求的属性明晰、顾客分组、顾客组别的排序、集装箱指派和车辆指派等,作者最后还在一个案例上对该方法进行了实证研究^[11]。基于在城市物流中,运输环节是造成交通拥堵、经济效率低下和碳排放高企的重要原因,文献[10]探讨了城市物流配送中运输环节的优化,即运输路径优化问题(VRP)。Benjaafar(2011)认为,进行低碳技术的改造虽然是最有效的,但往往成本高昂,会占用企业的流动资金,带来业务增长的困难;而运营优化可以在较小的代价下,抵消一部分碳成本。作者还利用一个库存优化模型,展示了运营优化对于企业降低碳排放成本的作用^[12]。另外,Chaabane(2012)则研究了在碳排放交易机制下供应链网络设计问题,建立了一个 MIP 模型,并用 Lindo 软件进行了优化求解。研究结果表

收稿日期:2013-06-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(971172169)

作者简介:王道平(1964—),男,教授,博士生导师,E-mail:dpwang@ustb.edu.cn;李建立(1973—),男,博士研究生,E-mail:shukerlee@sina.com;郭继东(1977—),男,博士研究生,E-mail:guojidong@sina.com.

明,如果企业实施积极的碳管理策略,就能够以成本有效的方式实现其可持续发展的目标^[13]。

本文研究了一个包含集散基地、配送中心和超市的双层次城市物流配送问题,且集散基地和配送中心能力均受限。在没有考虑碳排放税的情况下,此类问题的目标就是总运营成本最低,即在仓库成本和运输成本之间找到平衡;而在考虑碳税情况下,就需要在原有的运营成本与碳排放成本之间寻求新的平衡。本文研究了碳税率逐步增加的情况下,城市物流配送网络设计及策略变迁问题,国内外文献在这方面的研究成果并不多见,而这对于城市管理当局的碳税政策制定及物流业者采取积极应对措施来讲,又是十分必要的。

二、问题描述与数学模型

城市中的一家物流配送运营商从位于城市近郊区的集散基地完成采购后,将货物运往若干配送中心,在配送中心完成拣选组配等加工作业后,再将货物配送至网络末端的连锁超市。集散基地的位置和能力已知,可供该物流企业选择的配送中心的位置和能力也是已知的,每个超市的需求独立且已知。目的是要从市场上选择合适的集散基地和配送中心,并确定每个超市的需求由哪个配送中心满足,同时确定集散基地向每个配送中心的发货量,使得该物流企业的总体运营费用最低,同时还要兼顾可能出台的碳税政策给企业带来的新的成本压力。

为了尽可能地符合物流运营的实际,同时为了便于建模,笔者作出如下假设。

假设 1. 每个超市可由两个以上的配送中心提供服务。

假设 2. 运输成本与发运量及距离的乘积呈现线性正比例关系。

假设 3. 运输过程的碳排放与距离及发运量的乘积呈线性正比例关系。

假设 1 决定了问题的多源性。对于假设 2 和假设 3,即使参数之间存在某种复杂非线性关系,只不过原来的线性模型转化为了非线性模型,不会影响模型的结构和求解;另外,该假设也是集散基地和仓库有能力限制的网络规划模型内在的要求。

对模型中用到的参数及决策变量进行如下符号约定:

M 为集散基地的数量; N 为备选配送中心的数量; K 为超市的数量; I 表示 M 个集散基地的下标号集合, $|I|=M$; J 表示 N 个备选配送中心的下标号集

合, $|J|=N$; L 表示 K 个超市的下标号集合, $|L|=K$; i 表示第 i 个集散基地, $i \in I$; j 表示第 j 个备选仓库, $j \in J$; l 表示第 l 个超市, $l \in L$; P_i 是第 i 个集散基地可供应的货物总量,吨; C_j 是第 j 个备选配送中心的货物处理能力,吨; D_l 是第 l 个超市的需求量,吨; d_{ij} 表示第 i 个集散基地到第 j 个备选配送中心的距离,千米; d_{jl} 表示第 j 个备选配送中心到第 l 个超市的距离,千米; F_j 是第 j 个备选配送中心的租金,元; V_j 是第 j 个备选配送中心的变动处理成本,元/吨; T_i 是第 i 个集散基地到备选配送中心的单位运输费用,元/吨·千米; T_j 是第 j 个备选配送中心到超市的单位运输费用,元/吨·千米; v_j 表示第 j 个备选配送中心的单位货物加工处理变动碳排放,千克 CO_2 当量/吨; t_i 表示第 i 个集散基地向备选配送中心的运输环节单位碳排放,千克 CO_2 当量/吨·公里; t_j 表示第 j 个备选配送中心向超市的运输环节单位碳排放,千克 CO_2 当量/吨·公里。本文中碳排放不仅包含 CO_2 的排放,这里仅使用 CO_2 当量的概念。

决策变量包括 Z, Y 和 X , 意义如下:

Z_{ij} 表示第 i 个集散基地向第 j 个备选配送中心的发运量;

$$Y_j = \begin{cases} 0, & \text{第 } j \text{ 个配送中心没有被选中(进入方案)} \\ 1, & \text{第 } j \text{ 个配送中心被选中(进入方案)} \end{cases};$$

$$X_{jl} = \begin{cases} 0, & \text{第 } l \text{ 个超市未被分配到第 } j \text{ 个备选配送中心} \\ 1, & \text{第 } l \text{ 个超市被分配到第 } j \text{ 个备选配送中心} \end{cases}。$$

有了上述的假设和符号约定,可建立如下考虑碳排放的双层次物流配送网络规划问题模型,记为 CTLDNP 模型 (Carbon -constrained Two -level Logistics Distribution Network Planning Model, M_0)。

$$\begin{aligned} \min TC = & \sum_i \sum_j T_i d_{ij} Z_{ij} + \sum_j F_j Y_j + \sum_j \sum_l V_j X_{jl} D_l + \\ & \sum_j \sum_l T_j d_{jl} X_{jl} D_l \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \min CE = & \sum_i \sum_j t_i d_{ij} Z_{ij} + \sum_j \sum_l t_j d_{jl} X_{jl} D_l + \\ & \sum_j \sum_l v_j X_{jl} D_l \end{aligned} \tag{2}$$

$$\text{s. t. } Z_{ij} \leq P_i Y_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{3}$$

$$\sum_j Z_{ij} \leq P_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{4}$$

$$\sum_l X_{jl} D_l \leq C_j Y_j \quad \forall i \in J, \forall l \in L \tag{5}$$

$$\sum_i \sum_j Z_{ij} \geq \sum_l D_l \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall l \in L \tag{6}$$

$$\sum_j Z_{ij} \geq \sum_l X_{jl} D_l \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall l \in L \quad (7)$$

$$\sum_j C_j Y_j \geq \sum_l D_l \quad \forall j \in J, \forall l \in L \quad (8)$$

$$\sum_j X_{jl} = 1 \quad \forall j \in J, \forall l \in L \quad (9)$$

$$X_{jl} \leq Y_j \quad \forall j \in J, \forall l \in L \quad (10)$$

$$Z_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (11)$$

$$0 \leq X_{jl} \leq 1 \quad \forall j \in J, \forall l \in L \quad (12)$$

$$Y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (13)$$

上述模型中, 目标函数有两个: 第一个目标是企业对于最低总运营成本, 即对变量 TC 的要求, 由集散基地向备选配送中心的运费, 备选配送中心以租金形式体现的固定运营费用, 配送中心内部拣选、组配、再加工及装卸等变动费用, 以及备选配送中心向超市的运费组成。第二个目标即城市物流配送体系需要满足的环境约束, 即碳排放最低, 或 CE 最小, 包括运输环节碳排放和仓库内部加工处理等环节的变动碳排放。式(3)是集散基地向每个备选配送中心供货的能力约束; 式(4)实际上包含了式(3), 前者存在的目的是使约束更加紧凑, 表示每个集散基地整体的可供应能力约束; 式(5)是备选配送中心的能力约束; 式(6)是集散基地整体发运量要大于超市总体需求的约束; 式(7)是两个网络层次之间的物流平衡约束; 式(8)是备选配送中心总储存加工能力要大于超市需求的约束; 式(9)保证了所有超市的需求必须刚好得到满足; 式(10)说明了配送中心只有在被选中的情况下, 才能对超市形成有效供应; 式(11)给出了集散基地向备选配送中心的发运量只能为非负的; 而式(12)表明了问题的多源性; 式(13)定义了配送中心是否被选中的二元决策变量。

三、目标整合及模型优化方法

M_0 是一个混合整数凸型多目标规划问题。如果使用穷举法或其他非多项式算法求解, 时间会随着问题的规模变大而迅速增加, 从而使得问题的求解几乎成为不可能, 因此必须使用智能启发式算法或数学解析方法求解。分支定界法被证明是在有限步骤内解决混合整数规划问题的^[14]。鉴于求解多目标规划问题的困难性, 譬如, 对于存在离散型变量的情况, 一般只能找到少量的几个非劣解, 且比较过程存在人为价值判断因素的干扰, 一种较常用的方法是把多目标规划转化为单目标规划来求解。对于 M_0 模型, 两个目标的量纲可以通过对第二个

目标, 即变量 CE 乘上碳的价格因子实现。对于本研究, 该价格因子为单位碳排放的税率 α , 通过单位碳排放率可以把目标函数合二为一, 目标函数是包含碳税成本在内的总成本 TC' 最低, 可得到如下模型, 简记为 M_1

$$\begin{aligned} \min TC' &= TC + CE \\ (\text{约束条件同 } M_0) \end{aligned}$$

对于以上的单目标混合整数凸规划问题, 我们可以使用国际上流行的商业优化套件 GLPK 对模型进行精确求解。GLPK 是一个求解大型混合整数规划等问题的软件包, 是用标准 C 语言写成的一个函数库。它的求解过程是, 它首先把约束和目标转化为其要求的标准形式, 然后对整型变量进行松弛, 利用对偶单纯形法求解一个单纯的线性规划问题, 之后再加入整数约束, 利用分支定界法不断寻求目标函数的下限, 直到不能继续优化时给出最终结果^[15]。在输出结果里, 不仅要求输出目标函数值, 即考虑碳税的总体运行成本, 同时还要给出 X 、 Y 、 Z 的值, 还包括成本结构(运输、配送中心内部固定及变动成本)和碳排放组成(运输、配送中心固定及变动碳排放, 总体碳排放)等输出, 以用于最后的结果分析。

四、算例设计及优化结果分析

为了检验模型的有效性, 笔者设计了如下算例。一家位于某城市内物流配送的第三方物流运营商, 负责从位于该市近郊的 5 个物流集散基地采购货物, 之后中转运送到 28 个备选配送中心, 拣选组配加工后发往 126 个超市。该配送网络目前已经在没有碳税成本的情况下实现了最优化网络运营。对于碳税率的范围, 10 元/吨 CO_2 当量起步税率已基本达成共识, 以后将逐步增加到 0.04~0.05 元/千克 CO_2 当量, 甚至更高的 0.1~0.2 元/千克 CO_2 当量^[16-17]。本文采用 0.0001~0.001 元/千克 CO_2 当量区间进行试验。另外, 集散基地、备选配送中心和超市的位置在点(0,0)到点(50,50)的平面坐标系中随机生成, 其他各个参数的范围, 根据物流业的实际情况, 参考了行业专家意见, 给出了其范围, 如表 1 所示。数据在设定的范围内随机产生。

在 MATLAB 中编制程序, 输入相应参数, 并调用 GLPK 作为核心优化器进行求解, 按照原先设定的数据输出, 并对数据进行整理分析, 如图 1~图 3 所示。从图 1 中可以看到, 如果政府在实施稳步增长的碳税政策以后, 如果第三方物流运营商没有选择根据碳税率的不同不断调整物流配送的网络布局, 只是简单地吸收碳税所带来的新增成本, 那么, 它的

表 1 部分模型参数范围

参数	D_i	P_i	C_j	F_j	V_j
范围	60~180	5 000~10 000	1800~3 000	10 000~11 000	20~22
参数	T_i	T_j	v_j	t_i	t_j
范围	2~2.2	4~4.5	100~600	0.4~1.6	0.4~2.0

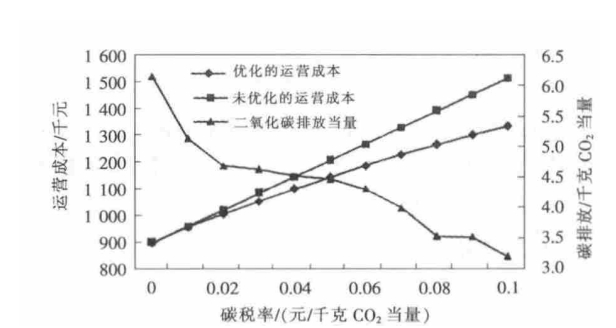


图 1 GLPK 优化结果

整体运营成本无疑会线性上升。即，碳税率每增加 0.01 元/千克 CO₂ 当量时，该物流配送企业的整体运营成本就会增加 61 512 元，而碳排放则始终保持不变。反之，如果该企业实施积极的碳管理策略，不断优化其配送网络，就会抵消部分因碳税而增加的成本压力，同时使得其碳排放量大幅度下降。例如，当碳税从 0 变化到 0.01 元/千克 CO₂ 当量时，通过优化网路配置，其整体运营成本增加了大约 6.50%，即 58 470 元，而不进行优化时的成本增加值为 61 512 元。也即通过网络运营优化可以节约 3 042 元的成本支出，并且同期的 CO₂ 当量排放量下降了 16.5%，即 1 010 吨左右。从图 1 中还可以看到，随着碳税率的不断增加，运营优化的效益也越来越明显。当碳税率增加到 0.10 元/千克 CO₂ 当量时，优化网络配置所带来的成本削减效应可以达到 179 780 元，碳排放量更是比施加碳税之前下降了约 48%。

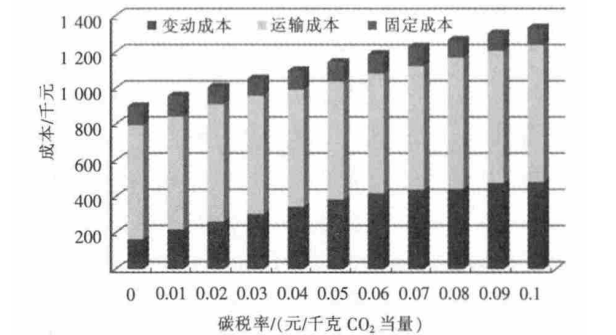


图 2 不同碳税率下的成本结构变化

由图 2、图 3 所示，能够观测到碳排放来源构成和运营成本结构，以及它们随着碳税率的变化而变化的情况，同时还可以看到 GLPK 优化过程中所采取的策略。在优化过程中，固定成本基本维持不变，

甚至略微有所下降；对于总成本中占比最大的运输成本，在优化过程中也基本维持不变，但占比呈现不断下降势头；对于占总成本较小的配送中心内部可变成本，呈现了一种缓慢增长的态势，从而使得整体的碳成本得到有效管理。从图 3 可知，碳排放量中占比较大的配送中心变动碳排放是 GLPK 主要的优化对象，在整个优化过程中快速下降。

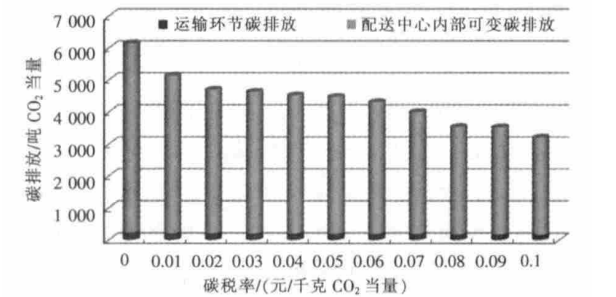


图 3 不同碳税率下的碳排放结构变化

另外，通过对网络配置输出结果进行处理分析可以看到，利用本模型，可以实现城市物流配送网络良好的经济和环境效益，并且这种运营服务优化是通过网络局部微调实现的，不会对运营网络的整体结构形成较大冲击。随着碳税率不断增加，需要选择的配送中心数量基本上在 9~11 个之间变化，且税率逐步稳定增加时，配送网络需要调整的配送中心在 0~2 个之间。

通过对于结果的比对，可以发现，当碳税从无到有，再逐步提升的过程中，该第三方物流企业需要不断地对网络进行恰当的调整，而这种调整均是局部的和轻微的，企业也在这种微调过程中实现了了成本的部分节约，同时大幅降低了物流配送服务过程中的碳排放。

五、结论

为了促进城市物流配送运营网络的低碳化发展，本文研究了考虑碳排放的城市连锁经营双层物流配送网络规划问题，建立了一个双层次多目标凸规划模型，并通过价格因子把模型的两个目标融合为单目标混合整数凸规划。利用商业优化软件 GLPK 混合整数规划软件包对模型进行求解。研究结果表明，碳排放税政策的实施应遵循低起点、稳增长的

原则,目的在于为物流企业留出持续运营优化调整的时间。同时可以看到,对于城市物流配送行业,尽管运营优化是最成本有效的方式,但是,在碳税成本攀升较大,超出企业运营优化所能承受范围时,

考虑应用更高碳效率的设施和技术,仍将是必然的选择。因此,考虑低碳资源部署的低碳城市配送网络规划,还有待进一步的研究。

参考文献:

[1] 潘家华. 怎样发展中国的低碳经济[J]. 绿叶, 2009(5):20-27.

[2] Taniguchi E, Thompson R G, Yamada T, van Duin J H R. City logistics: network modelling and intelligent transport systems[M]. Pergamon, Amsterdam, 2001.

[3] 钱洁, 张勤. 低碳经济转型与我国低碳政策规划的系统分析[J]. 中国软科学, 2011(4):22-28.

[4] Hepburn C. Regulation by prices, quantities or both: a review of instrument choice [J]. Oxford Review of Economic Policy, 2006, 22(2):226-247.

[5] Baranzini A, Goldemberg J, Speck S. A future for carbon taxes[J]. Ecological Economics, 2000, 32(3):395-412.

[6] 高鹏飞, 陈文颖. 碳税与碳排放[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2002, 42(10):1335-1338.

[7] 汪曾涛. 碳税征收的国际比较与经验借鉴[J]. 经济研究, 2009, 178(4):68-71.

[8] McKibbin W, Wilcoxon P. The role of economics in climate change policy[J]. Journal of Economic Perspectives, 2002, 16(2):107-129.

[9] 童明荣, 薛恒新. 基于遗传算法的城市物流网络设计研究[J]. 运筹与管理, 2008, 17(5):69-72.

[10] Ehmke J F, Steinert A, Mattfeld D C. Advanced routing for city logistics service providers based on time-dependent travel times[J]. Journal of Computational Science, 2012, 3(4):193-205.

[11] Sheu J B. A novel dynamic resource allocation model for demand-responsive city logistics distribution operations [J]. Transportation Research Part E, 2006, 42(6):445 - 472.

[12] Benjaafar S, Li Y Z, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: insights from simple models[R/EB]. (2011-05-20)[2013-05-16]. Working paper, <http://www.isye.umn.edu/faculty/pdf/>.

[13] Chaabane A, Ramudhin A, Paquet M. Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme[J]. Int. J. Production Economics, 2012, 135(1):37-49.

[14] Klose A, Drexel A. Facility location models for distribution system design [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 162(1):4-29.

[15] Makhorin A. GNU linear programming kit reference manual (draft edition)[EB/OL]. (2012-03-12)[2013-05-16]. <http://www.gnu.org/software/glpk>.

[16] 苏明, 傅志华, 许文, 等. 我国开征碳税问题研究参考[J]. 经济研究参考, 2009(72):2-16.

[17] 中国发展与改革委员会. 2050 中国能源和碳排放报告[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

Urban Logistics Two-level Distribution Network Design under Carbon Tax

WANG Daoping, LI Jianli, GUO Jidong

(Dongling School of Economics and Management, University of Beijing Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Considering the upcoming carbon tax policy in China, a two-level urban logistics distribution network is addressed under carbon tax. A new convex MIP model, balancing logistics operation cost and carbon emission cost, is then established. By analyzing a real case, the popular business optimization software GLPK is applied to solve the corresponding model. Detailed analysis to the output displays the effectiveness of the model. Results show that under gradually rising carbon tax rates, the urban logistics distribution operator could only finely adjust its network configurations to yield good economic and environmental performance.

Key words: distribution network; network planning; carbon tax; carbon emission

[责任编辑:孟青]