

考虑碳排放的物流网络优化模型研究^{*}

吕品

(广西科技大学管理学院, 广西柳州 545006)

摘要: 考虑碳排放的物流网络优化问题,分两阶段建立考虑碳排放的配送中心选择与需求匹配模型和碳排放成本最小的配送路径优化模型,通过两阶段模型的配合使用,解决了物流网络中配送中心选址、不同物流节点间的需求匹配以及配送车辆路径优化等多种决策问题。对“考虑碳排放”与“不考虑碳排放”情况进行 Lingo 软件的数值分析,结果表明:考虑碳排放的物流网络综合物流成本明显降低,比不考虑碳排放的传统方法更具现实意义。

关键词: 物流网络优化; 低碳物流; CO₂ 排放量; Lingo

中图分类号: TP319 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)10-2977-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.10.024

Study of logistics network optimization model considering carbon emissions

LV Pin

(Dept. of Management, Guangxi University of Technology, Liuzhou Guangxi 545006, China)

Abstract: Considering carbon emissions, this paper proposed a problem of logistics network optimization. It established the distribution center selection and demand matching model considering carbon emissions and the distribution routing optimization model on minimum carbon emissions respectively in two stages, and used the software Lingo 9.0 to solve the models. Through using the model of the second stage in conjunction with the model of the first stage, some decision problems about the distribution center location, it solved the demand matching between different logistics nodes as well as the vehicle routing optimization. Finally, an actual example verified the proposed models, and compared the optimization results when considering and not considering carbon emissions. The results show the proposed method of minimizing comprehensive costs of entire logistics process considering carbon emissions is more practical value than the conventional method of not considering carbon emissions.

Key words: logistics network optimization; low carbon logistics; CO₂ emissions; Lingo

近年来,随着全球气候变暖,温室气体(主要是二氧化碳)的减排问题受到各国的密切关注,低碳经济、绿色物流逐渐成为国内外研究的热点^[1]。由于供应链全球化发展,供应链中各物流节点距离不断增加,车辆在运输配送过程中所带来的碳污染等环境问题逐渐显现,因此把减少碳排放的理念融入到物流网络设计当中,构建一个碳排放量最低的绿色物流网络具有广泛的现实意义。已有学者提出了一些模型来研究这些问题,其中通过运输距离的优化间接达到减排目的的研究较多,而直接计算碳排放量并将其整合进目标函数的研究较少^[2]。此外,在考虑碳排放的模型中,针对单层级的配送网络优化的研究较多,决策问题较单一,主要是配送路径优化问题^[3-7]。而针对多层级的绿色物流网络优化,需要综合考虑多个决策问题(如设施选址、客户需求分配以及配送路径优化等问题)的模型研究较少。由于物流网络涵盖的范围广,涉及到多个阶段和多个层次,因此绿色物流网络优化应该从系统的角度出发考虑碳排放问题,分阶段解决不同的决策问题。

本文针对一个涉及厂商、配送中心与客户的三层级物流网络,在考虑碳排放的情况下,对商品从厂商经过配送中心再到最终客户的整个流程中有关设施选址、需求分配以及路线选择等问题进行优化设计。

1 问题描述

将物流节点划分为三种类型:工厂、配送中心和客户,形成一个由多厂商、多配送中心与多客户组成的三级物流网络。在考虑碳排放的情况下对该物流网络进行优化设计,对网络中的配送中心选址问题、运输与配送量的分配问题以及配送路径的选择问题进行综合决策;优化目标是使包含配送中心开办成本、运输与配送成本和碳排放成本的总物流成本最小。

1.1 问题的基本假设

- a) 厂商有生产能力(或供应能力)的限制。
- b) 由厂商到配送中心运输成本以及由配送中心到客户的配送成本均为线性函数。
- c) 建设配送中心有固定费用;配送中心有容量限制。
- d) 配送车辆有最大载重量限制;一条配送路径上至少有一个以上的客户。
- e) 不考虑时间要求以及配送车辆数量限制的问题。

1.2 需考虑的主要因素

- a) 各厂商到各配送中心的总运输成本;各配送中心到各客户的总配送成本。
- b) 运输与配送过程中所产生的碳排放成本,其计算方法见 1.3 节。

c) 开办配送中心的固定成本。

d) 各配送中心的容量限制、各厂商的供货量限制以及配送车辆的载重量限制。

e) 配送中心流量守恒,即某配送中心的流入货物总量应与流出货物总量相等。

f) 每个客户的需求都能得到满足。

1.3 碳排放成本计算

物流过程所引发的碳排放主要是由于在物流过程中消耗各种能源和物质所带来的直接和间接二氧化碳排放^[1]。本文主要针对运输与配送过程所消耗的石油燃料量来核算二氧化碳排放量,其核算公式为:碳排放量 = 燃料消耗量 × CO₂ 排放系数^[1]。文献[4]认为运输过程中的燃料消耗量,不仅与运输距离有关,还与载货量等因素有关,并收集相关统计数据进行了回归分析。结果显示单位距离燃料消耗量 ρ 可以表示为一个依赖于货车载货量 X 的线性函数,即若将车辆总重量分为 Q_0 (车辆自重) 和 X (载货量) 两部分,则有

$$\rho(X) = \alpha(Q_0 + X) + b \quad (1)$$

设车辆最大载货量为 Q ,满载时单位距离燃料消耗量为 ρ^* ,空载时单位距离燃料消耗量为 ρ_0 ,则由式(1)可知:

$$\rho_0 = \alpha Q_0 + b \quad (2)$$

$$\rho^* = \alpha(Q_0 + Q) + b \quad (3)$$

$$\text{于是有} \quad \alpha = \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} \quad (4)$$

这样,式(1)就可以改写为

$$\rho(X) = \rho_0 + \frac{(\rho^* - \rho_0)}{Q} X \quad (5)$$

在地形、车速等保持不变的情况下,式(5)表示的就是单位距离燃料消耗量与载货量之间的线性关系,其中截距为 ρ_0 ,斜率为 $\frac{\rho^* - \rho_0}{Q}$ 。在物流网络中,若从物流节点 i 运送 x_{ij} 单位的货物至物流节点 j ,则在 (i, j) 间行驶所产生的碳排放成本表示为

$$e(x_{ij}) = c_0 e_0 \rho(x_{ij}) d_{ij} \quad (6)$$

其中: c_0 为单位碳排放费用; e_0 为 CO₂ 排放系数; $\rho(x_{ij})$ 为单位距离燃料消耗量; d_{ij} 为节点 i 至 j 的距离。当 $c_0 = 0$ 时,碳排放成本为零,表示不考虑碳排放带来的成本。

2 考虑碳排放的物流网络优化模型及其求解

由于多层级物流网络的复杂性,整体建模有一定的困难,因此可以将问题分解后建模。根据三层级物流网络的两阶段特性,将原问题分解为两个相互衔接的子问题进行两阶段建模,第一阶段建立了配送中心选择与需求匹配模型,第二阶段建立了配送路径优化模型,并结合 Lingo 软件进行求解,在第一阶段模型求解的基础上进行第二阶段的模型求解,通过两类模型的配合使用达到物流网络整体优化的目的。

2.1 考虑碳排放的配送中心选择与需求匹配模型

设物流网络是由 m 个厂商($i = 1 \sim m$)、 n 个配送中心($j = 1 \sim n$)和 p 个顾客($k = 1 \sim p$)组成。并假设厂商 i 的供应能力为 S_i ,配送中心 j 的最大容量为 V_j ,开办配送中心的固定成本为 g_j ,顾客 k 的需求为 d_k ,从 i 厂运送单位产品至配送中心 j 的单位运输费用为 c_{ij} ,从配送中心 j 配送单位货物至顾客 k 的单位配送费用为 h_{jk} 。

引入三个决策变量,即连续变量 x_{ij} 、0-1 变量 y_{jk} 和 z_j 。其

中: x_{ij} 表示从工厂 i 运送至配送中心 j 的货物量; y_{jk} 为 1 表示顾客 k 由配送中心 j 负责配送,否则为 0; z_j 为 1 表示开办配送中心 j ,否则为 0。于是得到一个混合整数规划模型如下:

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n e(x_{ij}) + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p e(d_k y_{jk}) + \sum_{j=1}^n g_j z_j \quad (7)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^n y_{jk} = 1 \quad k = 1 \sim p \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = \sum_{k=1}^p d_k y_{jk} \quad j = 1 \sim n \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq S_i \quad i = 1 \sim m \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq V_j z_j \quad j = 1 \sim n \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^p d_k y_{jk} \leq V_j z_j \quad j = 1 \sim n \quad (12)$$

$$y_{jk}, z_j \in \{0, 1\}; x_{ij} \geq 0 \quad i = 1 \sim m, j = 1 \sim n, k = 1 \sim p \quad (13)$$

式(7)为目标函数表示物流网络系统总成本最低,其中前两项表示在运输及配送过程中所产生的碳排放成本;第三、四项表示运输及配送成本;最后一项表示开办配送中心的固定成本。约束条件式(8)使每个顾客都能得到一个配送中心的服务;约束式(9)确保配送中心的货物流入量与流出量达到平衡,同时也能使网络中各层级间的决策是相互关联的;约束式(10)是针对厂商供应能力限制而设立的;约束式(11)(12)是针对配送中心的容量限制的,要求只使用已开设的配送中心,并且无论是货物流入量还是流出量,都不能超出配送中心的最大容量。

2.2 碳排放成本最小的配送路径优化模型

该模型的目的是找到一条卸载货物的最优配送路线,使整个配送过程所产生的碳排放成本最低。设配送车辆从配送中心出发,向 n 个分散的客户送货,依次经过每个客户点一次且仅一次,最后返回原配送中心。若每辆车的最大载重量为 Q , d_{ij} 表示物流节点 i 与 j 之间的距离, D_i 表示第 i 个客户需求。

引入两个决策变量,即连续变量 q_{ij} 和 0-1 变量 z_{ij} 。其中: q_{ij} 表示从物流节点 i 驶向节点 j 途中车辆的装载量, $z_{ij} = 1$ 表示选择了从物流节点 i 到 j 的路线,否则为 0。数学模型如下:

$$\min \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n e(q_{ij}) z_{ij} \quad (14)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=0}^n z_{ij} = 1 \quad i = 1 \sim n \quad (15)$$

$$\sum_{j=0}^n z_{ij} - \sum_{j=0}^n z_{ji} = 0 \quad i = 0 \sim n \quad (16)$$

$$\sum_{j=0, j \neq i}^n q_{ji} - \sum_{j=0, j \neq i}^n q_{ij} = D_i \quad i = 1 \sim n \quad (17)$$

$$q_{ij} \leq Q z_{ij} \quad i, j = 0 \sim n \quad (18)$$

$$q_{ij} \geq 0, z_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j = 0 \sim n \quad (19)$$

式(14)为目标函数,表示配送过程中总的碳排放成本最小;约束式(15)确保每一顾客都能得到一辆车且仅一辆车的配送服务;约束式(16)要求车辆到达某客户节点,也必须从该节点离开;约束式(17)表示完成某一客户的配送任务后,车辆载重量的减少量应等于该客户的需求量,这一约束可以确保不产生巡回配送等非正常情况;约束式(18)要求行驶在 (i, j) 间的车辆装载量不得超过最大负载量 Q ,且当车辆不经过 (i, j) 段(即 $z_{ij} = 0$)时, (i, j) 间的车辆装载量 $q_{ij} = 0$ 。此外,需要注意式(19)中规定 i, j 的取值范围是在 $0 \sim n$,当 i (或 j) = 0 时,表示的物流节点为配送中心,当 i (或 j) = $1 \sim n$ 时,表示的物流节点为顾客。

2.3 模型求解

上述两类模型都属于混合整数规划模型,可以用分支定界法、拉格朗日算子法等方法进行求解,对于变量较多、约束条件较多的问题可以借助相应的软件来完成求解。Lingo 软件是一种用于求解数学规划模型的软件包,它具有执行速度快,易于输入、求解和分析的优点,是求解优化问题的一种理想的软件^[8]。本文以 Lingo 9.0 为基础,设计了上述模型的求解程序对其进行求解。

3 数值分析

若需要优化设计的三级物流网络包含三个供货厂商,三个备选配送中心以及六个客户,并假设 CO_2 排放系数 $e_0 = 2.61$ (kg/l),车辆最大载重量为 20 t,车辆满载及空载时的单位距离燃料消耗量分别为 $\rho^* = 2$ (l/km) 和 $\rho_0 = 1$ (l/km)。客户的需求量、配送中心的容量及开办配送中心的固定成本、厂商的供应能力以及各地之间的单位运费与距离分别如表 1~7 所示。

表 1 客户需求量

客户	1	2	3	4	5	6
需求量/t	2	10	2	3	8	15

表 2 配送中心容量及固定费用

配送中心	1	2	3
容量/t	25	20	20
固定费用/元	131	100	124

表 3 厂商供应能力

厂家	1	2	3
供应量/t	19	16	30

表 4 配送中心到客户的单位配送费用/元/t

配送中心	客户					
	1	2	3	4	5	6
1	3	2	7	4	7	5
2	6	1	4	2	5	3
3	2	4	5	3	6	8

表 5 厂商到配送中心的单位运输费用/元/t

厂商	配送中心		
	1	2	3
1	6	6	7
2	4	9	3
3	8	5	8

表 6 配送中心到客户的距离/km

配送中心	客户					
	1	2	3	4	5	6
1	46	25	92	89	11	92
2	52	35	101	100	16	102
3	56	32	100	93	22	98

表 7 厂商到配送中心的距离/km

厂商	配送中心		
	1	2	3
1	20	17	30
2	23	34	26
3	17	27	16

3.1 模型求解第一阶段

在第一阶段的模型求解中,设单位碳排放费用分别为 $c_0 = 0, 0.1$ 和 0.3 (元/kg),对比“考虑碳排放”与“不考虑碳排放”时物流网络优化结果的不同。

1) 考虑碳排放的配送中心选择与需求匹配模型求解

考虑碳排放成本时,选取了单位碳排放费用较低 $c_0 = 0.1$

(元/kg)和单位碳排放费用较高 $c_0 = 0.3$ (元/kg)两种情况进行求解。

当 $c_0 = 0.1$ 时,利用 2.1 节中的模型,结合 Lingo 9.0 软件编写程序,将表 1~7 中的数据输入即可求得物流网络最优设计方案为:开设 2 和 3 两个配送中心,其中配送中心 2 负责送货给客户 3(2 t)、4(3 t)、6(15 t),配送中心 3 负责送货给客户 1(2 t)、2(10 t)、5(8 t);厂商 1 和 2 分别给配送中心 2 送货 4 t 和 16 t,厂商 3 负责给配送中心 3 送货 20 t。此时,总成本最小为 957.6 元,包括开设配送中心的固定成本 224 元,厂商至配送中心的运输成本 176 元,配送中心至顾客的配送成本 151 元,以及运输过程中的碳排放成本 68.8 元与配送过程中的碳排放成本 337.7 元。

当 $c_0 = 0.3$ 时,物流网络最优设计方案为:开设 1 和 2 两个配送中心,其中配送中心 1 负责送货给客户 1(2 t)、2(10 t)、5(8 t),配送中心 2 负责送货给客户 3(2 t)、4(3 t)、6(15 t);厂商 1 和 2 分别给配送中心 1 送货 4 t 和 16 t,厂商 3 负责给配送中心 2 送货 20 t。此时,总成本最小为 1 769.3 元,包括开设配送中心的固定成本 231 元,厂商至配送中心的运输成本 188 元,配送中心至顾客的配送成本 141 元,以及运输过程中的碳排放成本 203.1 元和配送过程中的碳排放成本 1 006.2 元。

2) 不考虑碳排放的配送中心选择与需求匹配模型求解

不考虑碳排放的影响(即令 $c_0 = 0$),同样可以利用 2.1 节中的模型求得结果。物流网络最优设计方案为:开设 2 和 3 两个配送中心,其中配送中心 2 负责送货给客户 3(2 t)、4(3 t)、6(15 t),配送中心 3 负责送货给客户 1(2 t)、2(10 t)、5(8 t);厂商 1、2 分别给配送中心 2 送货 4 t 和 16 t,厂商 3 负责给配送中心 3 送货 20 t。此时,总成本最小为 551 元,包括开设配送中心的固定成本 224 元,厂商至配送中心的运输成本 176 元和配送中心至顾客的配送成本 151 元。

3) 求解结果比较

以上三种情况相比较可以看出,由于必须满足所有客户的需求,因此无论哪种情况至少需要开设两个配送中心。对比 $c_0 = 0.1$ 与 $c_0 = 0$ 两种情况,两者的优化方案是一致的。这是因为当 $c_0 = 0.1$ 时,虽然在总成本中计入了运输与配送过程中的碳排放成本,但是由于单位碳排放费用较小,碳排放成本对总成本的影响不大,其对总成本的影响小于传统物流成本(固定成本与运输配送成本)所带来的影响,因此优化方案仍然维持传统方法即不考虑碳排放情况下的状态。

而当 $c_0 = 0.3$ 时,碳排放成本对总成本的影响增大,其对总成本的影响大于传统物流成本所带来的影响,优化方案开始发生变化。选择了固定成本最大的配送中心 1 代替了原来的配送中心 3,这种选择虽然增加了总固定成本,但是由此带来的厂家至配送中心以及配送中心至客户的路线变化,可以达到降低碳排放成本的目的。

3.2 模型求解第二阶段

在第二阶段的模型求解中,仍然需要将“考虑碳排放”与“不考虑碳排放”的优化结果进行对比分析。为了更具可比性,选择了第一阶段优化方案相同的两种情况(即当 $c_0 = 0.1$ 与 $c_0 = 0$ 时),进行第二阶段的对比分析。

1) 碳排放成本最小的配送路径优化模型求解

当 $c_0 = 0.1$ 时,选择的配送中心是 2 和 3,其中配送中心 2 负责送货给客户 3(2 t)、4(3 t)、6(15 t),配送中心 3 负责送货给客户 1(2 t)、2(10 t)、5(8 t)。在此基础上进行配送路径优化,需要相关客户之间的距离数据(表 8、9)。

表 8 客户 3、4、6 之间的
距离/km

客户	客户		
	3	4	6
3	0	20	21
4	20	0	19
6	21	19	0

表 9 客户 1、2、5 之间的
距离/km

客户	客户		
	1	2	5
1	0	32	36
2	32	0	22
5	36	22	0

利用 2.2 节的模型以及表 6 中的相关数据,结合 Lingo 9.0 软件编写程序,即可求得最优配送路线为:配送中心 2→客户 6→客户 4→客户 3→配送中心 2,配送中心 3→客户 5→客户 2→客户 1→配送中心 3。也就是由配送中心 2 发出一辆载重量 20 t 的货车,先发货 15 t 给客户 6,然后是 3 t 货给客户 4,最后 2 t 给客户 3,并返回配送中心 2;该路线的总距离为 242 km,配送过程中的碳排放成本最小为 91.5 元(表 10)。另外,由配送中心 3 发出一辆载重量 20 t 的货车,先发货 8 t 给客户 5,然后是 10 t 货给客户 2,最后 2 t 给客户 1,并返回配送中心 3。该路线的总距离为 132 km,配送过程中的碳排放成本最小为 44.5 元(表 11)。

2) 不考虑碳排放的配送路径优化模型求解

当 $c_0 = 0$ 时,选择的配送中心仍然是 2 和 3,并且配送中心 2 负责送货给客户 3(2 t)、4(3 t)、6(15 t),配送中心 3 负责送货给客户 1(2 t)、2(10 t)、5(8 t)。由于不考虑碳排放成本,因此配送路径是按传统方法即距离最短来进行优化的。显然,由配送中心 2 发货的最短路线为客户 4→客户 6→客户 3 或客户 3→客户 6→客户 4,这两条配送路线的总距离都是 241 km;而两条路线上的碳排放成本却不一样,路线 4→6→3 的碳排放成本为 93.8 元,路线 3→6→4 的碳排放成本为 94.9 元(表 10)。由配送中心 3 发货的最短路线为客户 5→客户 1→客户 2 或客户 2→客户 1→客户 5,这两条配送路线的总距离都是 122 km;同样,两条路线上的碳排放成本不同,路线 5→1→2 的碳排放成本为 47.4 元,路线 2→1→5 的碳排放成本为 48.1 元(表 11)。

表 10 由配送中心 2 出发的车辆配送路线距离及碳排放成本计算

配送中心 2: 客户 6→4→3			
节点 $i \rightarrow$ 节点 j	d_{ij}	q_{ij}	$e(q_{ij})$
配送中心 2→客户 6	102	20	53.2
客户 6→客户 4	19	5	6.2
客户 4→客户 3	20	2	5.7
客户 3→配送中心 2	101	0	26.4
距离为 242 km, 碳排放成本为 91.5 元			

配送中心 2: 客户 4→6→3			
节点 $i \rightarrow$ 节点 j	d_{ij}	q_{ij}	$e(q_{ij})$
配送中心 2→客户 4	100	20	52.2
客户 4→客户 6	19	17	9.2
客户 6→客户 3	21	2	6.0
客户 3→配送中心 2	101	0	26.4
距离为 241 km, 碳排放成本为 93.8 元			

配送中心 2: 客户 3→6→4			
节点 $i \rightarrow$ 节点 j	d_{ij}	q_{ij}	$e(q_{ij})$
配送中心 2→客户 3	101	20	52.7
客户 3→客户 6	21	18	10.4
客户 6→客户 4	19	3	5.7
客户 4→配送中心 2	100	0	26.1
距离为 241 km, 碳排放成本 94.9 元			

3) 求解结果比较

由上述两种情况的求解结果可以看出:“不考虑碳排放”情况下分别从配送中心 2 和 3 发出的两条配送路线总距离为 363 km,总的碳排放成本根据卸货的先后顺序不同略有差别,最小为 141.2 元(配送中心 2:客户 4→6→3 和配送中心 3:客户 5→1→2);而“考虑碳排放”情况下的总碳排放成本较低为 136 元,但两条配送路线的总距离较长为 374 km。这是因为在

考虑碳排放成本时,配送路线的选择不是优先选取最短路线,而是优先考虑有较大需求的客户,以便在卸载较重货物之后的后续路程中使碳排放成本降低更多。

表 11 由配送中心 3 出发的车辆配送路线距离及碳排放成本计算

配送中心 3: 客户 5→2→1			
节点 $i \rightarrow$ 节点 j	d_{ij}	q_{ij}	$e(q_{ij})$
配送中心 3→客户 5	22	20	11.5
客户 5→客户 2	22	12	9.2
客户 2→客户 1	32	2	8.2
客户 1→配送中心 3	56	0	14.6
距离为 132 km, 碳排放成本为 44.5 元			

配送中心 3: 客户 5→1→2			
节点 $i \rightarrow$ 节点 j	d_{ij}	q_{ij}	$e(q_{ij})$
配送中心 3→客户 5	22	20	11.5
客户 5→客户 1	36	12	15.0
客户 1→客户 2	32	10	12.5
客户 2→配送中心 3	32	0	8.4
距离为 122 km, 碳排放成本为 47.4 元			

配送中心 3: 客户 2→1→5			
节点 $i \rightarrow$ 节点 j	d_{ij}	q_{ij}	$e(q_{ij})$
配送中心 3→客户 2	32	20	16.7
客户 2→客户 1	32	10	12.5
客户 1→客户 5	36	8	13.2
客户 5→配送中心 3	22	0	5.7
距离为 122 km, 碳排放成本为 48.1 元			

4 结 束 语

本文针对商品从厂商经过配送中心到客户这一典型的物流过程,提出了考虑碳排放成本的三层次物流网络优化问题,通过分阶段建模以及模型的配合使用,解决了物流网络中配送中心选址、需求匹配以及配送路径优化等多种决策问题,具有较高的实用价值。在碳排放成本的计算中,不仅考虑了车辆行驶距离,还考虑了行驶途中车辆的载货量。但是在实际生活中货物运输过程中的碳排放还受很多其他因素的影响,如交通道路情况、天气情况等,因此该计算方法有一定的局限性。另外,模型的求解利用了 Lingo 软件,该软件的编程求解只适合中小规模的优化问题,对于较大规模的物流网络优化问题还有待于今后进一步研究。

参考文献:

- [1] 周叶,王道平,赵耀. 中国省域物流作业的 CO₂ 排放量测评及低碳化对策研究[J]. 中国人口、资源与环境,2011,21(9):81-87.
- [2] ELHEDHLI S, MERRICK R. Green supply chain network design to reduce carbon emissions[J]. Trans on Research Part D,2012,17(5):370-379.
- [3] 陈岱莲,李鹏. 基于 VRP 模型的两阶段物流网络路径优化模型[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2009,28(6):1131-1134.
- [4] XIAO Yi-yong, ZHAO Qiu-hong, KAKU I, et al. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem[J]. Computers & Operations Research,2012,39(7):1419-1431.
- [5] MIGUEL F. Vehicle routing problem for emissions minimization[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2010,2197:1-7.
- [6] SUZUKI Y. A new truck-routing approach for reducing fuel consumption and pollutants emission[J]. Trans on Research Part D,2011,16(1):73-77.
- [7] 王钰青,许茂增. 基于最小碳排放的广义 TSP 模型研究[J]. 数学的实践与认识,2012,42(8):69-75.
- [8] 王林,叶小侠. 基于 Lingo 语言求解物流配送中心选址模型[J]. 物流技术,2008,27(10):113-115.