

考虑不同投资模式的城市群绿色物流中心选址模型

魏 紫

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2023年10月24日; 录用日期: 2024年1月5日; 发布日期: 2024年1月16日

摘 要

随着城市群经济的高速发展, 城市群之间的物流运输活动日益频繁。然而, 上述活动产生的大量碳排放给城市群物流系统的低碳运营带来了挑战。根据上述背景, 我们调查了三种不同投资政策(*i.e.*, 非预算共享机制、集中预算共享机制和条件预算共享机制)下的城市群物流中心选址问题。利用含有均衡条件的数学规划, 我们实现了对三种投资情景的数学建模。基于起作用集算法(ASA)框架, 一个能够求解模型局部最优解的算法被设计来实现模型求解。以中国长沙-株洲-湘潭地区为例, 数值实验被开展以评估三种投资方案的有效性。

关键词

城市群, 物流中心选址问题, 投资政策, 减排, 起作用集算法, 用户均衡

Green Logistics Center Location Model in City Clusters under Different Investment Mechanisms

Zi Wei

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: Oct. 24th, 2023; accepted: Jan. 5th, 2024; published: Jan. 16th, 2024

Abstract

With the rapid economic development of urban agglomerations, logistics transportation activities between urban agglomerations are becoming more and more frequent. However, the large

amount of carbon emissions generated by these activities poses a challenge to the low-carbon operation of urban agglomeration logistics systems. Based on the above background, we investigate the location of logistics centers in urban agglomerations under three different investment policies (i.e. non-budget sharing mechanism, centralized budget sharing mechanism and conditional budget sharing mechanism). Using mathematical programming with equilibrium conditions, we achieve mathematical modeling of three investment scenarios. Based on the active set algorithm (ASA) framework, an algorithm that can solve the local optimal solution of the model is designed to solve the model. Taking the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan region of China as an example, numerical experiments were conducted to evaluate the effectiveness of three investment scenarios.

Keywords

Urban Agglomeration, Logistics Center Location Problem, Investment Policy, Emissions Reduction, Active Set Algorithm, User Equilibrium

Copyright © 2024 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

随着经济全球化和市场竞争的加剧，一个大国的城市已经通过中央政府实施的各种协调方案形成了区域结构，以增强竞争力，实现规模经济和范围经济。城市群是城市高度发展的空间形态，一般由三个或更多地理相邻的城市组成。城市群的发展目标在于通过在城市网络的空间层次产生聚集效应从而提升整个地区的经济竞争力。通过域内不同城市的分工协作，各城市的产业结构得到协调、比较优势得以充分发挥，并可反作用于城市群的进一步发展。然而，在城市群高速发展的背后，也存在着碳排放量过高的隐忧。伴随着世界各国雄心勃勃提出了“碳达峰”“碳中和”时间表，减少城市群产生的大量碳排放已刻不容缓。

在城市群的发展过程中，物流活动是联系经济活动的纽带。城市群中各类产成品(半成品)均需通过物流活动，流向存在需求(或具备比较优势)的城市。据统计，物流活动二氧化碳(CO₂)排放量对环境存在不可忽视的影响。2018年，鉴此，城市的“管理者”(决策者)需要定期制定的一项关键政策，便是在有限的预算范围内确定城市内物流中心的位置和容量，以实现物流运输的可持续发展。上述问题也被称为城市群绿色物流中心选址问题。

与一个城市内部的选址决策不同，城市群层面的物流中心选址决策往往存在两个方面的全新挑战。一方面，政府的投资机制直接影响政策的实施效果。纵观目前各国城市群的发展模式，一般使用3种不同的投资机制[1]。第一种是独立决策机制[2]，城市群中每个城市的决策者独立进行决策，利用自身有限预算进行在城市内开展绿色物流中心选址。第二种是集中投资协调机制[3]。这意味着一个城市群层面的物流管理部门负责统一对城市群的物流中心建设进行规划，每个城市将预算拨付给这个管理部门。然后，它根据既定规划目标向各城市分配资金。第三种是预算分担投资协调机制[1]。这种机制下，城市群层面的物流管理部门统一向各城市征收财政资金，并统一进行物流中心选址。另一方面，在城市间的物流运输过程中，货主对运输路径的选择行为不容忽视。在城市群物流运输网络中，每个货主都会基于广义运输成本最低的原则自行选择运输方式和运输路径。随着选择同样的运输方式(路径)的货主逐渐增加，这条路径包含的路段会产生“拥挤效应”。上述效应具体表现在如下两个方面。首先，运输服务将出现供不

应求的状态而导致运价上涨。其次，由于大量载运工具需要经过同样的路段，路段的通行时间将增加。这种货主之间的非合作博弈行为持续下去，将使城市群物流运输网络货流分布达到一个均衡状态，学界称之为用户均衡(User equilibrium, UE)状态。

基于上述两方面挑战，我们将调查一个城市群绿色物流中心选址问题。为达此目的，我们建立了一个同步考虑政府三种不同投资机制和各利益相关者博弈行为的数学模型，并设计相应的算法实现模型求解。本文的研究目标在于探索如下 3 个研究问题的答案。

1) 如何描述物流运输系统中不同利益相关者(城市群层面的物流管理机构、货主及承运人)之间的博弈行为?

2) 基于上述博弈行为并结合三种不同的投资机制，如何构建政府绿色物流网络选址问题的数学模型?

3) 考虑到上述模型的特点，如何设计一种有效算法实现模型求解?

本文后续各节的安排如下。第 2 节回顾了国内外相关研究，以便明确当前的研究空白。第 3 节介绍了绿色物流中心选址问题使用的假设、符号和运输网络的数学定义。第 4 节建立了三种不同投资机制下数学模型。在第 5 节，求解上述数学模型的算法被设计。第 6 节开展数值实验，以中国长沙 - 株洲 - 湘潭地区为研究对象，对模型和算法的有效性进行检验。最后，第 7 节总结全文，并提出未来的若干研究方向。

2. 文献综述

网络设计 - 基础设施投资联合优化问题本质上是一个选址问题和一个物流网络设计的复合问题。因此，本节分别从选址问题和物流网络设计问题两个方面开展文献综述，以准确识别研究空白。

2.1. 选址问题的研究

针对选址问题的研究，最早可以追溯到 1928 年[4]。近年来，代表性的综述文献可以参阅 Campbell [5]、Alumur and Kara [6]以及 Farahani, Hekmatfar [7]。物流中心选址问题的代表性文献包括：Alumur, Kara [8]讨论了一个多式联运物流中心选址问题。作者们以物流中心的建设成本及运输成本之和最小为目标构建模型，并利用遗传算法实现模型求解。Martins de Sá, Contreras [9]讨论了一个类似的问题。作者们在预算的约束下，以加权运输时间最小为目标构建混合整数线性规划模型，并使用了多种启发式方法。随着经济的高速发展，物流活动产生的大量排放逐步成为学界关注的焦点。近年来，学界围绕绿色物流网络设计问题开展了大量研究，以实现经济、环境和社会目标之间的平衡[10] [11]。例如，You & Wang [12]认为将可持续性纳入物流网络设计可能会改变生产设施和库存的位置，因此会对环境和社会产生重大影响。Aljohani and Thompson [13]基于实证结果概述了各国的物流政策并建议重新整合物流设施以降低碳排放。

2.2. 区域低碳物流网络设计问题

区域物流网络设计是交通规划领域最经典的问题之一。继 Beckmann, McGuire [14]在 1956 年提出用户均衡理论和物流网络设计理论之后，相关研究愈发丰富。在不同时期，系统性的综述性文献可以参阅 Yang and H. Bell [15]、Farahani, Hekmatfar [7]和 Christiansen, Hellsten [16]。

由于城市交通的快速发展，其带来的环境因素不可小觑[17]。因此，绿色物流网络设计问题成为近年来学界的研究热点。代表性的文献包括：Zhang, Zhan [18]提出了物流基础设施建设和绿色交通方式补贴的协同优化模型，以在既定的碳减排目标下最小化区域通行总成本。随着环境问题日趋严峻、人们环保意识的普遍增强，电池电动车逐渐成为一种新兴的载运工具。Cheng, Zou [19]调查了一个电池电动车交通网络设计问题，并构建了一个同步考虑电动汽车充电时间、司机范围焦虑和不确定性出行需求的车道扩建方案优化模型。上述虽然考虑了物流网络设计问题中的可持续性，但却没有考虑货主对于运输路径

的选择行为。Gan, Liu [20]认为在区域物流活动中,不同利益相关者之间(例如,众多货主之间)可能存在冲突。因此,考虑利益相关者之间的关系以及他们在不同政策下的选择偏好至关重要。为达此目的,Jiang, Zhang [21]考虑了区域物流网络中不同的利益相关者之间的博弈关系,构建了一个双层规划模型。最近,Jiang, Zhang [1]进一步分析了城市群中不同城市的投资政策对网络设计的影响。作者们考虑了三种不同的投资策略,分别构建了与之匹配的双层模型。每个模型中,上层模型以区域碳排放量最小为目标,以不同类型的投资政策作为约束。下层模型以最大化区域物流网络的货流量为目标,优化物流网络的货运方案。然而,作者们将货主对于运输路径的选择行为忽略了。

2.3. 研究空缺

综合上述两类研究,可以识别出两方面的研究空白。首先,现有研究忽略了城市群物流网络中货主之间的非合作博弈行为对物流中心的选址和网络设计的影响。其次,现有的城市群物流中心选址问题未能充分考虑不同物流基础设施投资模式的投资效果。为填补上述空白,本文首先利用用户均衡理论刻画货主对运输路径的选择行为,以得到区域运输网络的货流均衡条件。基于上述均衡条件和三种不同的投资模式,本文构造了三类城市群物流中心选址模型,以实现对不同投资模式下物流中心选址问题的数学建模。

3. 问题描述

3.1. 模型假设

城市群物流网络选址问题的逻辑框架如图 1 所示。每个利益相关者的决策行为可被总结为:城市群层面的物流管理部门需要在有限的预算约束下,基于一个既定的投资机制,做出对各城市物流中心的选址(投资)决策,以最小化区域的运输总成本。运输网络中存在众多理性的货主。每个货主根据自身广义运输成本最小的原则,在运输网络中自由地选择运输方式、运输路径。承运人会货主的选择行为调整路径的运价。最终,众多货主的选择行为互相影响,使运输网络的货流分布达到用户均衡状态。

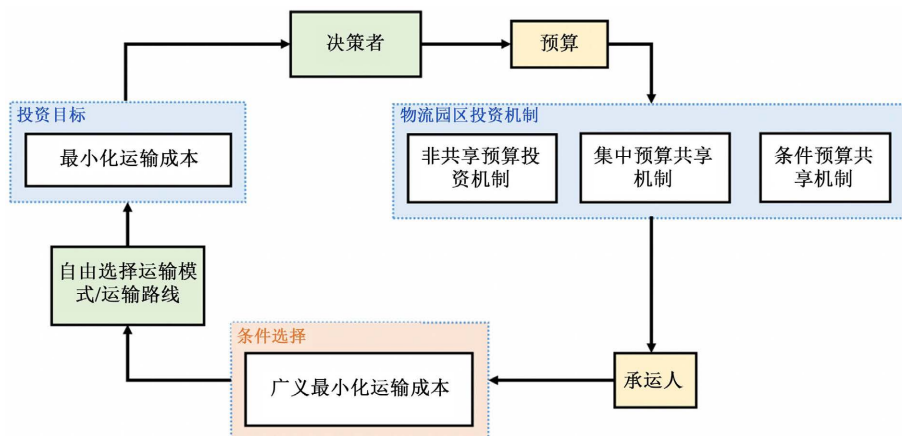


Figure 1. Logical framework
图 1. 逻辑框架

为了方便建模,我们进一步对问题做出以下假设:

- 1) 区域: 本文涉及的研究区域是一个城市群。它是一个由多个地理相邻的城市高度整合而形成的整体。
- 2) 节点: 研究区域内存在两类不同的节点,分别是物流中心和运输起点、终点(O-D 对)。我们假设

每个城市的物流中心只服务于所在城市，且物流运输活动只在区域内物流中心之间、不同城市需求节点之间和城市内物流中心与需求节点之间发生。

3) 物流中心：每个物流中心存在既定的处理能力。政府可以通过投资扩建物流中心的方式，提升上述处理能力以进一步影响区域货流的分布。假定每个物流中心存在若干个离散的扩建方案，政府可以为每个物流中心确定一个方案[1]。

4) 路段：研究区域内存在 3 种类型的路线，分别为公路、快速路和铁路，如图 2 所示。公路路段上，由轻型货车(LGV)承担运输任务。快速路路段、铁路路段则由重型货车(HGV)和火车负责运输。所有节点之间都可以以公路运输，但铁路运输、快速路运输只能在物流中心之间使用，且铁路运输容量有限。

5) 运输需求：假设城市 O-D 对之间的货运需求已知，且物流运输活动只考虑区域内部物流中心与需求节点之间的物流需求。

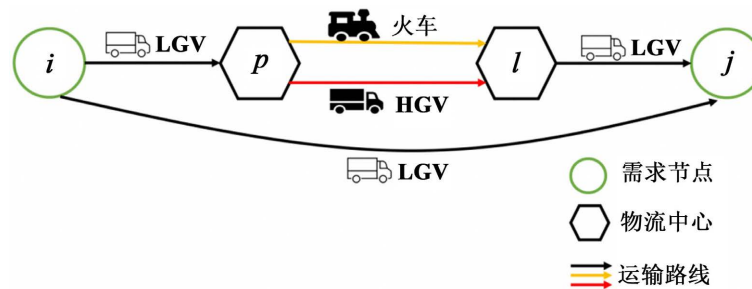


Figure 2. Regional freight route
图 2. 区域货运路线

6) 货主：每个货主都是理性的。货主在运输网络中既可以采用直达运输(例如，从图 2 中的 i 点直达至 j 点)和转运运输(例如，从图 2 中的 i 点经过物流中心 p 和 l 最后到达 j 点)两种方式。货主会根据时间成本、运输成本和补贴自由决定自身货物在运输网络中的运输路径、运输方式。

7) 承运人：承运人根据货主的选择行为自由调整路径中各路段的运价。随着越来越多的货主选择同一路段，该路段的运价将上涨。我们假定每条路段的运价和路段上货流量之间的关系服从 BPR (Bureau of Public Roads)函数的形式。

8) CO₂ 排放：参考 McKinnon and Piecyk [22]，若路段 a 单位距离、单位货物运输产生的 CO₂ 排放为 e_a ，则长度为 d_a 的路段产生的 CO₂ 排放量 E_a 的计算公式为：

$$E_a = e_a d_a$$

9) 物流管理部门：城市群层面存在一个统一的物流管理部门负责统筹规划城市群内各城市的物流中心建设资金的使用。物流管理部门按照区域综合运输成本最小的目标开展各类决策。综合运输成本包括货运成本和碳排放成本。

为便于读者阅读，本文常用的集合、参数和决策变量被列示如表 1 所示。

3.2. 城市群物流网络定义

城市群物流网络可被抽象为图 3。令 $G := (K, N, A)$ 表示这个网络。其中， K 表示构成城市群的城市集合。 N 表示区域内的节点集合， I 表示城市内的需求节点， P 表示物流中心节点。 A 表示区域内路段的集合，且 $A = A_L \cup A_H \cup A_T$ 。其中， A_L 表示轻型卡车通过的公路路段， A_H 表示重型卡车通过的快速路路段， A_T 表示铁路路段。快速路路段、铁路路段仅在物流中心之间存在。

Table 1. Symbolic comment
表 1. 本文符号注释

集合	
K	城市集合
N	节点集合
I	需求节点集合
P	物流园区集合
P_k	城市 $k \in K$ 内的物流园区 $k \in K, \bigcup_{k \in K} P_k = P$
I_k	城市 $k \in K$ 内的需求节点 $k \in K, \bigcup_{k \in K} I_k = I$
A	路线集合
A_H	不同物流园区和城市之间的重型卡车路线
A_T	不同物流园区和城市之间的火车路线
A_L	不同需求节点之间的轻型卡车路线
W	O-D 对集合
W_k	城市 $k \in K$ 内的 O-D 对集合
R_w	经过 O-D 对的所有路线集合 $w \in W$
G_p^k	城市 $k \in K$ 内的物流园区 P_k 的参数
参数	
$\sigma_{a,r}^w$	如果路线 $r \in R_w$ 包含 $a \in A$ 则为 1, 否则为 0
σ_a^p	如果路线 $a \in A$ 起始节点或目标节点穿过物流园区 $p \in P$ 则为 1, 否则为 0
d_a	路线 $a \in A$ 的长度(千米)
q_w	O-D 对 $w \in W$ 之间的货运需求(吨/年)
t_a	在路线 $a \in A$ 上的运输时间(小时)
φ	单位 CO ₂ 治理成本(人民币/吨)
e_a	路线 $a \in A$ 的平均 CO ₂ 排放量(千克/吨 - 千米)
ρ	时间成本(人民币/吨)
$p_a(x_a)$	路线 $a \in A$ 的广义运输成本(人民币)
M_k	城市 $k \in K$ 的预算(人民币)
v_a	路线 $a \in A_T$ 的最大可承载运力(吨/周)
Γ_k	城市 k 的 CO ₂ 排放量
ϖ_a^k	路线 $a \in A$ 的长度在城市 $k \in K$ 内所占比例
CA_c^0	物流园区 $p \in P_k$ 的初始承载能力(吨)
$CA_c^{k,g}$	通过扩建城市 $k \in K$ 内的物流园区 $p \in P_k$ 增加的承载量, 扩建规模为 $g \in G_k$ (吨)
$S_c^{k,g}$	建城市 $k \in K$ 内的物流园区 $p \in P_k$, 扩建规模为 $g \in G_k$ 所需投资(人民币)
χ_k	城市 $k \in K$ 的预期碳减排投资比例因子(千克-CO ₂ /人民币)
决策变量	
$z_p^{k,g}$	当城市 $k \in K$ 内的物流园区 $p \in P_k$ 以规模 $g \in G_k$ 扩建时为 1, 否则为 0

续表

f_r^w	O-D 对 $w \in W$ 之间路线 $r \in R_w$ 的货运量(吨)
x_a	路线 $a \in A$ 上的货运量(吨)
i_k^l	城市 $l \in K \setminus \{k\}$ 转移到城市 k 内的投资总量(人民币)
i_j^l	城市 k 转移到城市 $l \in K \setminus \{k\}$ 内的投资总量(人民币)

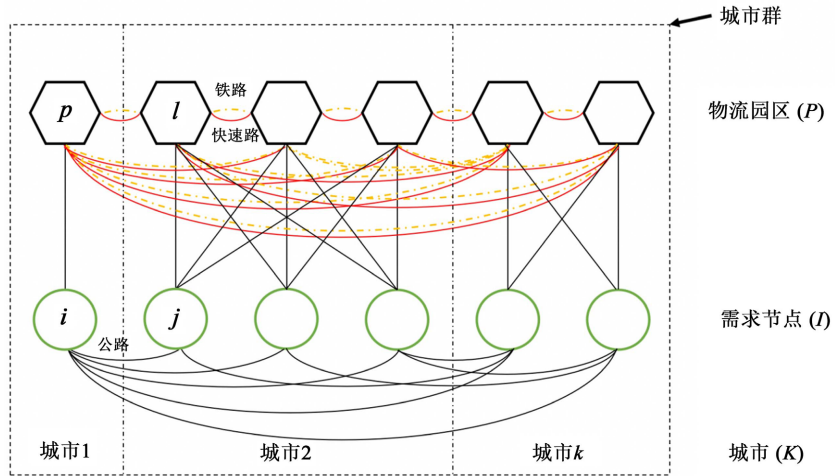


Figure 3. Regional logistics roadmap
图 3. 区域物流路线

3.3. 阻抗函数定义

路段 $a \in A_L$ 的阻抗函数如式(1)所示。它表示通过路段 $a \in A_L$ 的货流量与路段运输成本的关系。其中, α_1 、 α_2 和 α_3 是根据路段情况而确定的大于 0 的参数。 d_a 为路段 a 的长度。 π 表示时间价值系数。 t_a 表示路段 a 上的通行时间。 x_a 表示路段 a 上的货流量。 $p_a(x_a)$ 代表路段 a 在货流量为 x_a 时, 单位货物的广义运输成本。

$$p_a(x_a) = \alpha_1 d_a + \rho t_a \left(\frac{x_a}{\alpha_a} \right)^{\alpha_2} \quad \forall a \in A_L \quad (1)$$

路径 $a \in A_H$ 的阻抗函数如公式(2)所示。其中, β_1 、 β_2 和 β_3 是根据路段情况而定的大于 0 的参数。

$$p_a(x_a) = \beta_1 d_a + \rho t_a \left(\frac{x_a}{\beta_a} \right)^{\beta_2} \quad \forall a \in A_H \quad (2)$$

路径 $a \in A_T$ 的阻抗函数如公式(3)所示。其中, γ_1 、 γ_2 和 γ_3 是根据路段情况而定的大于 0 的参数。

$$p_a(x_a) = \gamma_1 d_a + \rho t_a \left(\frac{x_a}{\gamma_a} \right)^{\gamma_2} \quad \forall a \in A_T \quad (3)$$

4. 模型构建

为了评估物流管理部门采取 3 种投资机制的绩效, 本节构建 3 个混合整数规划模型。根据第 3 节中的假设(7), 城市群中的货流分布将在众多货主的选择行为的影响下服从用户均衡状态。因此, 我们提出定义 1, 用来描述货主的选择行为, 以便为后续模型构建打下基础。

定义 1. 在物流网络的 UE 状态下，一对 O-D 之间已使用路径的运价相同，但小于或等于同一 O-D 对之间任何未使用路径的运价。

4.1. 基于非预算共享机制的绿色物流中心选址问题

基于定义 1，我们构建基于非预算共享机制的双层规划模型。在双层规划模型中，上层模型描述了非预算共享机制的原理，下层模型则描述了众多货主在物流网络中的选择行为。

上层模型

$$\min = \varphi \sum_{k \in K} \Gamma_k + \sum_{a \in A} p_a(x_a) x_a \quad (4)$$

s.t.

$$\Gamma_k = \sum_{a \in A} \varpi_a^k d_a x_a e_a \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{c \in C_k} \sum_{g \in G_k} CA_c^{k,g} S_c^{k,g} z_c^{k,g} \leq M_k \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{g \in G_k} z_c^{k,g} \leq 1 \quad \forall c \in C_k, k \in K \quad (7)$$

$$z_c^{k,g} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C_k, g \in G_k, k \in K \quad (8)$$

上述各式中，式(4)为模型的目标函数，用以要求区域广义运输成本最低。约束(5)计算 CO₂ 在城市 $k \in K$ 的总排放量。约束(6)表示每个城市物流中心建设的预算限制。约束(7)表示每个城市的物流园区最终只能选择最多只能一种扩建方案。对一个物流中心进行扩建。约束(8)要求变量 $z_c^{k,g}$ 为双变量。

下层模型

$$\min_{(x,f)} = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} p_a(\varpi) d\varpi \quad (9)$$

s.t. (1), (2), (3),

$$\sum_{r \in R_w} f_r^w = q_w \quad \forall w \in W \quad (10)$$

$$x_a = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R_w} f_r^w \delta_{a,r}^w \quad \forall a \in A \quad (11)$$

$$x_a \leq v_a \quad \forall a \in A_T \quad (12)$$

$$\sum_{a \in A} x_a \delta_a^c \leq CA_c^0 + \sum_{g \in G_k} z_c^{k,g} CA_c^{k,g} \quad \forall c \in C_k, k \in K \quad (13)$$

$$f_r^w \geq 0 \quad \forall r \in R_w, w \in W \quad (14)$$

上述各式中，目标函数(9)是经典的 Beckmann 模型的目标函数；约束(10)表示路径总流量等于需求；约束(11)表示各种交通方式的流量描述；约束(12)表示铁路运输的容量限制；约束(13)表示通过物流园区路径流量不能超过物流园区内中心的容量限制；约束(14)是路径流量的非负限制。

为了便于模型的求解，一个可行的思路是将双层模型转化为一个含有均衡约束的数学规划。为达此目的，我们写出下层模型的卡罗需一库恩一塔克条件。

$$f_r^w \left[\sum_{a \in A} p_a(x_a) \delta_{a,r}^w + \sum_{a \in A_T} \xi_a \delta_{a,r}^w + \sum_{a \in A} \sum_{c \in C_k} \sum_{k \in K} \zeta_c \delta_{a,r}^w \delta_a^c - \pi_w \right] = 0 \quad \forall r \in R_w, w \in W \quad (15)$$

$$\sum_{a \in A} p_a(x_a) \delta_{a,r}^w + \sum_{a \in A_T} \xi_a \delta_{a,r}^w + \sum_{a \in A} \sum_{c \in C_k} \sum_{k \in K} \zeta_c \delta_{a,r}^w \delta_a^c - \pi_w \geq 0 \quad \forall r \in R_w, w \in W \quad (16)$$

$$\xi_a(x_a - v_a) = 0 \quad \forall a \in A_T \quad (17)$$

$$x_a - v_a \geq 0 \quad \forall a \in A_T \quad (18)$$

$$\zeta_c \left[CA_c^0 + \sum_{g \in G_k} z_c^{k,g} CA_c^{k,g} - \sum_{a \in A} x_a \delta_a^c \right] = 0 \quad \forall c \in C_k, k \in K \quad (19)$$

$$CA_c^0 + \sum_{g \in G_k} z_c^{k,g} CA_c^{k,g} - \sum_{a \in A} x_a \delta_a^c \geq 0 \quad \forall c \in C_k, k \in K \quad (20)$$

$$\xi_a \geq 0 \quad \forall a \in A_T \quad (21)$$

$$\zeta_c \geq 0 \quad \forall c \in C_k, k \in K \quad (22)$$

其中, π_w 、 ξ_a 和 ζ_c 和分别是约束(10)、约束(12)和约束(13)的拉格朗日乘子。

基于上述最优性条件, 上述双层规划模型即可被转化模型 A, 它是一个非线性规划模型。

模型 A

$$\min_{(x,f,z)} = \varphi \sum_{k \in K} \Gamma_k + \sum_{a \in A} p_a(x_a) x_a \quad (23)$$

s.t. (1)~(3), (5)~(8), (10)~(22)

4.2. 具有集中预算共享机制的绿色物流中心选址问题

在集中预算共享机制下, 城市群层面的物流管理部门对实施非预算共享机制后的各个城市内的剩余资金进行统筹, 并集中利用各城市剩余资金继续扩大为该城市建设物流中心的建设规模。 $M_{0,k}^*$ 和 $\Gamma_{0,k}^*$ 分别模型 A 中得出的城市 $k \in K$ 对物流中心的建设成本和 CO_2 排放量。

模型 B

$$\min_{(x,f,z)} = \varphi \sum_{k \in K} \Gamma_k + \sum_{a \in A} p_a(x_a) x_a \quad (24)$$

s.t. (1)~(3), (5), (7)~(8), (10)~(22),

$$\sum_{c \in C_k} \sum_{g \in G_k} CA_c^k z_c^{k,g} S_c^{k,g} \geq M_{0,k}^* \quad \forall k \in K \quad (25)$$

$$\sum_{c \in C_k} \sum_{k \in K} CA_c^k \sum_{g \in G_c^k} z_c^{k,g} S_c^{k,g} \leq \sum_{k \in K} M_k \quad (26)$$

$$\Gamma_k \leq \Gamma_{0,k}^* \quad \forall k \in K \quad (27)$$

约束条件(25)表示集中预算共享机制的模型; 约束条件(26)确保表示实施集中预算共享机制后, 城市 $k \in K$ 内对物流中心的投资不小于模型 A 中非预算共享机制模型对城市的预算; 约束条件(27)表示实施集中预算共享机制后, 城市 $k \in K$ 内的 CO_2 排放量不超过模型 A 非预算共享机制模型的城市 CO_2 排放量。

4.3. 具有条件预算共享机制的绿色物流中心选址问题

物流管理部门实施条件预算共享机制的前提是, 在该城市群内的其他城市进行投资决策, 会降低该城市群内的碳排放利用各城市剩余预算加大对城市群内部的城市物流中心的建设投资, 从而降低整个区域的碳排放量。所以城市群层面的物流管理部门向各城市政府签订了物流协议, 内容如下:

$$\Psi(i_k^l, i_l^k) = \Gamma_{0,k}^* - \chi_k \left(\sum_{l \in K \setminus \{k\}} i_k^l + \sum_{l \in K \setminus \{k\}} i_l^k \right) - \Gamma_k \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (28)$$

$$0 \leq \sum_{l \in K \setminus \{k\}} i_k^l \perp \sum_{l \in K \setminus \{k\}} i_l^k \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (29)$$

i_k^l 表示城市 k 分配内的预算分配给城市 $K \setminus \{k\}$ 的投资； i_l^k 表示城市 k 接受来自城市 $K \setminus \{k\}$ 的投资；约束条件(29)表示 i_k^l 和 i_l^k 是两个互相对立的条件。由于是非线性约束，将其转化为以下线性约束：

$$0 \leq \sum_{l \in K \setminus \{k\}} i_k^l \leq \eta_k \Lambda_k \quad \forall k \in K \quad (30)$$

$$0 \leq \sum_{l \in K \setminus \{k\}} i_l^k \leq (1 - \eta_k) \Theta_k \quad \forall k \in K \quad (31)$$

$$\eta_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K \quad (32)$$

其中 η_k 是 0~1 变量， Λ_k 和 Θ_k 是很大的数(类似于大 M 变量)，在本研究中可以设置成城市群的投资额总和；条件(30)和(31)表示：当 η_k 为 0 时， i_k^l 为 0；当 η_k 为 1 时， i_l^k 为 0。

综合以上条件，具有条件预算的共享机制的模型表示如下：

模型 C

$$\min_{(x, f, z, i)} = \varphi \sum_{k \in K} \Gamma_k + \sum_{a \in A} p_a(x_a) x_a \quad (33)$$

s.t. (1)~(3), (5), (7)~(8), (10)~(22), (28), (30)~(32),

$$\sum_{c \in C_k} \sum_{g \in G_c^k} CA_c^k S_c^{k,g} z_c^{k,g} \leq M_k - \sum_{l \in K \setminus \{k\}} i_k^l + \sum_{l \in K \setminus \{k\}} i_l^k \quad \forall k \in K \quad (34)$$

$$M_{0,k}^* - \sum_{l \in K \setminus \{k\}} i_l^k \leq M_k \quad \forall k \in K \quad (35)$$

$$i_k^l \geq 0 \quad \forall k \in K, l \in K \setminus \{k\} \quad (36)$$

5. 算法设计

本节设计了一种算法来解决上述非线性规划问题，由于存在平衡条件(即三个模型中包含的约束(15)至(20))，该问题的求解在理论上比较困难。平衡条件使得该模型的任何可行解都违反 Mangasarian-Fromovitz 约束条件(MFCQ)。现有的算法难以直接求解该非线性规划问题。这促使我们设计了一种基于 ASA 的启发式算法来探索非线性规划的局部最优解。ASA 的计算过程可以简单概括如下：

首先，求解了现阶段城市群物流网络的均衡状态，并基于均衡条件和最优解构建了多个活动集；然后，利用一对活动集将 MEPC 中的每个均衡条件分解为两个非均衡约束。最后，根据之前计算得到的乘数信息，对每个活动集中的元素进行迭代和调整。

本节设计了一种基于 ASA 的启发式算法来求解不同机制下的非线性规划模型。我们首先构造以下活动集。特别地，为了保证每个平衡条件积为 0 的两部分只能处于一种状态(零状态或非零状态)，我们要求活动集中的元素满足以下关系：

$$\Omega_{w,r} \cap \bar{\Omega}_{w,r} = \emptyset, \quad \Omega_{w,r} \cup \bar{\Omega}_{w,r} = \{(w, r) \mid r \in R_w, w \in W\}, \quad \Omega_a \cap \bar{\Omega}_a = \emptyset, \quad \Omega_a \cup \bar{\Omega}_a = A_r, \quad \Omega_c \cap \bar{\Omega}_c = \emptyset, \quad \Omega_c \cup \bar{\Omega}_c = \{c \mid c \in C_k, k \in K\}。活动集如下：$$

$$\begin{aligned} \Omega_{w,r} &:= \{(w, r) : f_r^w = 0\}, \quad \bar{\Omega}_{w,r} := \{(w, r) : h_r^w = 0\}, \\ \Omega_a &:= \{a : \xi_a = 0\}, \quad \bar{\Omega}_a := \{a : x_a = v_a\}, \\ \Omega_c &:= \{c : \zeta_c = 0\}, \quad \bar{\Omega}_c := \left\{ c : CA_c^0 + \sum_{g \in G_k} z_c^{k,g} CA_c^{k,g} = \sum_{a \in A} x_a \delta_a^c \right\} \end{aligned}$$

$$h_r^w = \sum_{a \in A} p_a(x_a) \delta_{a,r}^w + \sum_{a \in A_T} \xi_a \delta_{a,r}^w + \sum_{a \in A} \sum_{c \in C_t} \zeta_c \delta_{a,r}^w \delta_a^c - \pi_w.$$

接着，我们以模型 **A** 为例写出松弛版本的非线性规划模型(如以下模型)。模型 **B** 和模型 **C** 除部分投资约束不同外，与以下模型基本一致。

松弛模型 A

$$\min_{(x,f,z)} = \varphi \sum_{k \in K} \Gamma_k + \sum_{a \in A} p_a(x_a) x_a \quad (37)$$

s.t. (1)~(3), (5)~(8),

$$f_r^w = 0 \quad \forall (w,r) \in \Omega_{w,r} \quad (38)$$

$$h_r^w \geq 0 \quad \forall (w,r) \in \Omega_{w,r} \quad (39)$$

$$f_r^w \geq 0 \quad \forall (w,r) \in \bar{\Omega}_{w,r} \quad (40)$$

$$h_r^w = 0 \quad \forall (w,r) \in \bar{\Omega}_{w,r} \quad (41)$$

$$\xi_a = 0 \quad \forall a \in \Omega_a \quad (42)$$

$$x_a - v_a \geq 0 \quad \forall a \in \Omega_a \quad (43)$$

$$\xi_a \geq 0 \quad \forall a \in \bar{\Omega}_a \quad (44)$$

$$x_a - v_a = 0 \quad \forall a \in \bar{\Omega}_a \quad (45)$$

$$\zeta_c = 0 \quad \forall c \in \Omega_c \quad (46)$$

$$CA_c^0 + \sum_{g \in G_k} z_c^{k,g} CA_c^{k,g} \geq \sum_{a \in A} x_a \delta_a^c \quad \forall c \in \Omega_c \quad (47)$$

$$\zeta_c \geq 0 \quad \forall c \in \bar{\Omega}_c \quad (48)$$

$$CA_c^0 + \sum_{g \in G_k} z_c^{k,g} CA_c^{k,g} = \sum_{a \in A} x_a \delta_a^c \quad \forall c \in \bar{\Omega}_c \quad (49)$$

算法的求解过程如下，下面仍以 A 型的解决方案为例。

第一步：令 $g=1$, $\mathbf{z}=(z_c)=0$ 。求解 **NLP** 模型。集合 $\Omega_{w,r}^1 := \{(w,r): f_r^w = 0\}$,

$\bar{\Omega}_{w,r}^1 := \{(w,r): h_r^w = 0\}$, $\Omega_a^1 := \{a: \xi_a = 0\}$, $\bar{\Omega}_a^1 := \{a: x_a = v_a\}$, $\Omega_c^1 := \{c: \zeta_c = 0\}$, 且根据 **NLP** 模型,

$$\bar{\Omega}_c^1 := \left\{ c: CA_c^0 + \sum_{g \in G_k} z_c^{k,g} CA_c^{k,g} = \sum_{a \in A} x_a \delta_a^c \right\}$$

第二步：求解下列模型

$$\min_{(x,f,z)} = \varphi \sum_{k \in K} \Gamma_k + \sum_{a \in A} p_a(x_a) x_a \quad (50)$$

s.t. (1)~(3), (5)~(8),

$$f_r^w = 0 \quad \forall (w,r) \in \Omega_{w,r}^g \quad (51)$$

$$h_r^w \geq 0 \quad \forall (w,r) \in \Omega_{w,r}^g \quad (52)$$

$$f_r^w \geq 0 \quad \forall (w,r) \in \bar{\Omega}_{w,r}^g \quad (53)$$

$$h_r^w = 0 \quad \forall (w,r) \in \bar{\Omega}_{w,r}^g \quad (54)$$

$$\xi_a = 0 \quad \forall a \in \Omega_a^g \quad (55)$$

$$x_a - v_a \geq 0 \quad \forall a \in \Omega_a^g \quad (56)$$

$$\xi_a \geq 0 \quad \forall a \in \bar{\Omega}_a^g \quad (57)$$

$$x_a - v_a = 0 \quad \forall a \in \bar{\Omega}_a^g \quad (58)$$

$$\zeta_c = 0 \quad \forall c \in \Omega_c^g \quad (59)$$

$$CA_c^0 + \sum_{g \in G_k} z_c^{k,g} CA_c^{k,g} \geq \sum_{a \in A} x_a \delta_a^c \quad \forall c \in \Omega_c^g \quad (60)$$

$$\zeta_c \geq 0 \quad \forall c \in \bar{\Omega}_c^g \quad (61)$$

$$CA_c^0 + \sum_{g \in G_k} z_c^{k,g} CA_c^{k,g} = \sum_{a \in A} x_a \delta_a^c \quad \forall c \in \bar{\Omega}_c^g \quad (62)$$

第三步：令 $\Xi_{w,r}^g := \{(w,c) \in \Omega_{w,r}^g \cap \bar{\Omega}_{w,r}^g : \varepsilon_g^{w,p} < 0\}$ 且 $\Xi_a^g := \{a \in \Omega_a^g \cap \bar{\Omega}_a^g : \varepsilon_g^a < 0\}$,

$\Xi_c^g := \{a \in \Omega_c^g \cap \bar{\Omega}_c^g : \varepsilon_g^c < 0\}$, $\varepsilon_g^{w,c}$, ε_g^a 和 ε_g^c 分别是约束(62), (66)和(70)的乘子。若 $\Xi_{w,r}^g \cup \Xi_c^g \cup \Xi_a^g = \emptyset$, 停止计算, 当前解是局部最优解; 否则, 请执行步骤 4。

第四步：执行以下两个集合转换操作

$$1) \Omega_{w,r}^{g+1} = \Omega_{w,r}^g - \Xi_{w,r}^g, \quad \Omega_a^{g+1} = \Omega_a^g - \Xi_a^g, \quad \Omega_c^{g+1} = \Omega_c^g - \Xi_c^g;$$

$$2) \bar{\Omega}_{w,r} := \{(w,r) : h_r^w = 0\}, \quad \bar{\Omega}_a^{g+1} := \{a : x_a = v_a\}, \quad \bar{\Omega}_c^{g+1} := \left\{ c : CA_c^0 + \sum_{g \in G_k} z_c^{k,g} CA_c^{k,g} = \sum_{a \in A} x_a \delta_a^c \right\}.$$

第五步：集合 $g = g + 1$ 且跳转至第二步。

6. 数值试验

为了验证上述模型和算法的有效性, 我们以中国长株潭城市群的物流网络为研究区域, 进行了实际的数值实验。

6.1. 参数设置

长株潭城市群位于中华人民共和国湖南省。它由长沙、株洲、湘潭三市组成, 是促进湖南省经济发展的重要组成部分。如图 4 所示, 该区域共有 29 个节点(其中物流园区节点 10 个, 需求节点 19 个), 104 条链路, 13 对 O-D。城市群所涉及的物流中心、运输路径、运输方式、运输需求等数据见附录。目前, 物流园区分布为长沙 4 个, 株洲 3 个, 湘潭 3 个。

在物流中心扩建的资金和成本方面, 我们将长沙市、株洲市和湘潭市的物流中心建设预算分别定为 200 万元、60 万元和 4000 万元。每个城市的物流中心容量增量不超过 40 万吨/周, 有 10 万吨/周、20 万吨/周、30 万吨/周、40 万吨/周四个扩建选项。

6.2. 结果讨论

三种模型的主要数值结果如表 2 所示

如表 2 所示, A、B、C 模型设计的区域物流网络的碳排放量预测分别为 341,820 吨/年、326,960 吨/年和 333,050 吨/年。注意, 在模型 B 中设计的区域物流网络要求所有城市共享基线模型 A 优化后的剩余预算。与 A 型相比, B 型碳排放量减少了 4.35%, C 型碳排放量减少了 2.57%。因此, 区域内各地方物流部门独立使用自己的可用预算来规划辖区内的物流园区, 这不利于区域的发展。同样, 以 C 模式为例, 长沙市通过有条件预算分担机制, 分别向株洲和湘潭投资 2900 万元和 3250 万元。区域总预算的利用率从 66.50% 提高到 79.17%。以上结果表明, 有效的投资协调机制不仅提高了区域总预算的利用率, 而且显

著降低了区域物流网络的碳排放。虽然 B 和 C 两种模式的建设成本的增加大于碳排放的减少，但是在城市群内增加对当地物流部门的投资是值得的。

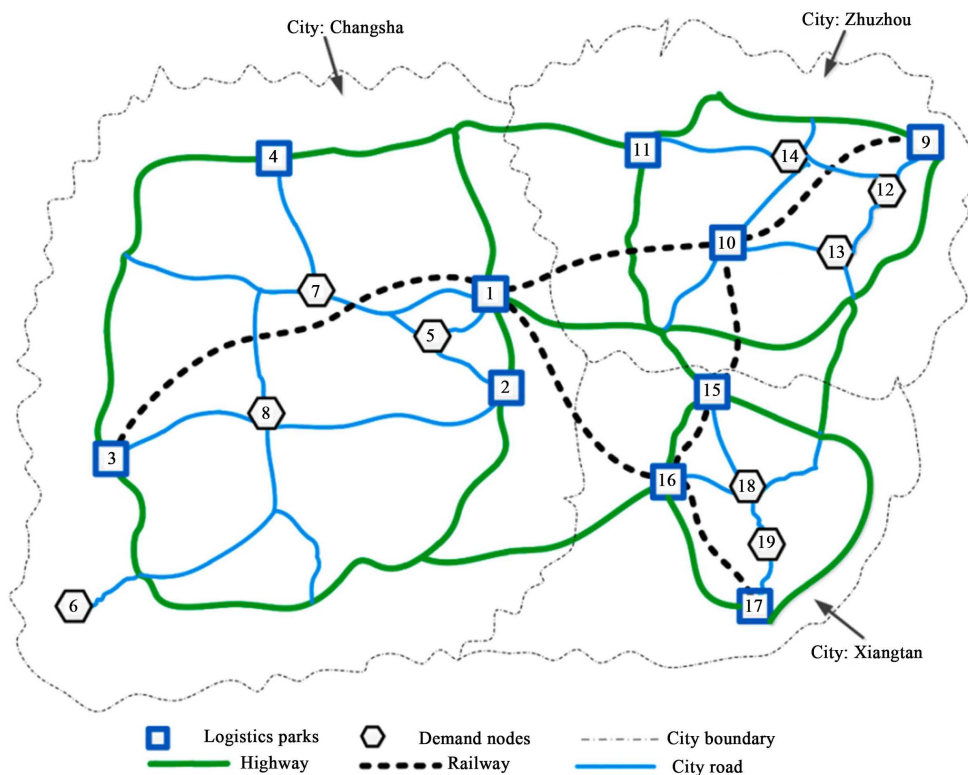


Figure 4. Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration
图 4. 长沙 - 株洲 - 湘潭城市群

Table 2. Numerical result
表 2. 数值结果

		模型 A	模型 B	模型 C
排放量(吨/年)	长沙	170,020	169,920	167,070
	株洲	97,100	84,380	92,600
	湘潭	74,640	72,660	73,380
	总计	341,760	326,960	333,050
交通货流(百万吨/年)	轻型卡车	11.36	6.56	7.88
	重型卡车	5.80	8.10	7.20
	火车	12.10	16.60	16.18
物流园区建造成本(百万)	长沙	100.0	114.0	108.0
	株洲	60.0	81.5	76.5
	湘潭	39.5	52.5	53.0
	总计	199.5	248.0	237.0

续表

	1	1010	1290	1210
	2	180	190	180
	3	810	800	770
	4	0	0	0
物流园区心中承载量(万吨/年)	9	400	400	410
	10	400	600	580
	11	400	630	540
	15	10	290	270
	16	580	590	600
	17	200	170	190
	预算共享(百万)	长沙	0	+34.0
株洲		0	-21.0	-16.5
湘潭		0	-12.5	-13.0
剩余预算(百万)	长沙	100.0	52.0	62.5
	株洲	0.0	0.0	0.0
	湘潭	0.5	0.0	0.0

7. 结论

在“碳达峰”“碳中和”的背景下，本文考虑了城市群内各利益相关者的选择行为，并在三种不同的投资机制下分别建立混合整数线性规划模型，研究在特定的城市群内物流园区的选址和物流网络的设计问题，目的是在碳减排标准下最小化区域的总成本。通过对案例的分析，我们可以得到三种不同的投资机制对城市群内物流园区建设和区域物流网络设计的影响。本文得到的结论有以下几点：

1) 根据案例的计算结果可知，在集中预算共享机制和有条件预算共享机制下的区域碳排放明显低于非预算共享机制下的区域碳排放。这表明了在城市群整体发展的过程中，物流管理机构不能只局限于单个城市的自我管理，而是需要考虑城市间的资金往来和政策互惠的背景下开展物流工作，才可以有效减少区域整体的碳排放量。

2) 在含有多个利益相关者的物流系统中，每个利益相关者为实现自身利益最大化呈现出不同的选择行为，这将会影响区域物流网络的设计。所以为促进区域低碳经济的可持续发展，实现互利共赢，物流管理机构应关注不同利益相关者的行为，从而制定相关的政策和协调措施。作为管理者的物流管理机构可以采取相应措施(如路线补贴、优化网络基础设施、调整物流园区政策等)积极引导不同的货主选择其适合的相应的低碳出行方式，物流管理部门也可以宣传环保政策来提高货主及承运人的低碳意识。

参考文献

- [1] Jiang, J., Zhang, D. and Meng, Q. (2021) Impact Analysis of Investment Coordination Mechanisms in Regional Low-Carbon Logistics Network Design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **92**, Article ID: 102735. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102735>
- [2] Cleophas, C., Cottrill, C., Ehmke, J.F. and Tierney, K. (2019) Collaborative Urban Transportation: Recent Advances in Theory and Practice. *European Journal of Operational Research*, **273**, 801-816. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.04.037>

- [3] Zhou, D., Xu, J.C., Wang, L. and Lin, Z.L. (2015) Assessing Urbanization Quality Using Structure and Function Analyses: A Case Study of the Urban Agglomeration around Hangzhou Bay (UAHB), China. *Habitat International*, **49**, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.05.020>
- [4] Predöhl, A. (1928) The Theory of Location in Its Relation to General Economics. *Journal of Political Economy*, **36**, 371-390. <https://doi.org/10.1086/253950>
- [5] Campbell, J.F. (1994) Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problems. *European Journal of Operational Research*, **72**, 387-405. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90318-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90318-2)
- [6] Alumur, S. and Kara, B.Y. (2008) Network Hub Location Problems: The State of the Art. *European Journal of Operational Research*, **190**, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.008>
- [7] Farahani, R.Z., Hekmatfar, M., Arabani, A.B. and Nikbakhsh, E. (2013) Hub Location Problems: A Review of Models, Classification, Solution Techniques, and Applications. *Computers & Industrial Engineering*, **64**, 1096-1109. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.01.012>
- [8] Alumur, S.A., Kara, B.Y. and Karasan, O.E. (2012) Multimodal Hub Location and Hub Network Design. *Omega*, **40**, 927-939. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.02.005>
- [9] Martins de Sá, E., Contreras, I. and Cordeau, J.F. (2015) Exact and Heuristic Algorithms for the Design of Hub Networks with Multiple Lines. *European Journal of Operational Research*, **246**, 186-198. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.017>
- [10] Dekker, R., Bloemhof, J. and Mallidis, I. (2012) Operations Research for Green Logistics—An Overview of Aspects, Issues, Contributions and Challenges. *European Journal of Operational Research*, **219**, 671-679. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.010>
- [11] McKinnon, A., *et al.* (2015) *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*. Kogan Page Publishers, London.
- [12] You, F. and Wang, B. (2011) Life Cycle Optimization of Biomass-to-Liquid Supply Chains with Distributed—Centralized Processing Networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **50**, 10102-10127. <https://doi.org/10.1021/ie200850t>
- [13] Aljohani, K. and Thompson, R.G. (2016) Impacts of Logistics Sprawl on the Urban Environment and Logistics: Taxonomy and Review of Literature. *Journal of Transport Geography*, **57**, 255-263. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.08.009>
- [14] Beckmann, M., McGuire, C.B. and Winsten, C.B. (1956) *Studies in the Economics of Transportation*. Yale University Press, New Haven.
- [15] Yang, H. and Bell, M.G.H. (1998) Models and Algorithms for Road Network Design: A Review and Some New Developments. *Transport Reviews*, **18**, 257-278. <https://doi.org/10.1080/01441649808717016>
- [16] Christiansen, M., *et al.* (2020) Liner Shipping Network Design. *European Journal of Operational Research*, **286**, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.057>
- [17] Adenso-Díaz, B., Lozano, S. and Moreno, P. (2016) How the Environmental Impact Affects the Design of Logistics Networks Based on Cost Minimization. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **48**, 214-224. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.022>
- [18] Zhang, D., Zhan, Q.W., Chen, Y.C. and Li, S.Y. (2018) Joint Optimization of Logistics Infrastructure Investments and Subsidies in a Regional Logistics Network with CO₂ Emission Reduction Targets. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **60**, 174-190. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.02.019>
- [19] Cheng, K., Zou, Y.J., Xin, X. and Gong, S.Y. (2020) Optimal Lane Expansion Model for a Battery Electric Vehicle Transportation Network Considering Range Anxiety and Demand Uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, **276**, Article ID: 124198. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124198>
- [20] Gan, M., *et al.* (2018) The Identification of Truck-Related Greenhouse Gas Emissions and Critical Impact Factors in an Urban Logistics Network. *Journal of Cleaner Production*, **178**, 561-571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.047>
- [21] Jiang, J., Zhang, D.Z., Meng, Q. and Liu, Y.J. (2020) Regional Multimodal Logistics Network Design Considering Demand Uncertainty and CO₂ Emission Reduction Target: A System-Optimization Approach. *Journal of Cleaner Production*, **248**, Article ID: 119304. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119304>
- [22] McKinnon, A.C. and Piecyk, M.I. (2009) Measurement of CO₂ Emissions from Road Freight Transport: A Review of UK Experience. *Energy Policy*, **37**, 3733-3742. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.007>

附录

表 C1. 节点之间公路路线长度(km)

节点	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	36	18	7	44	16	21	50	31	26	46	41	37	30	30	42	36	39
2	4	36	22	8	43	17	21	49	30	27	46	40	38	28	27	39	34	36
3	36	0	33	28	13	22	15	85	66	62	82	76	73	62	58	67	65	66
4	18	33	0	17	45	13	21	61	44	36	58	54	48	47	48	60	52	57
5	7	28	17	0	36	10	14	57	38	34	53	48	45	35	34	45	41	43
6	44	13	0	36	0	32	24	91	72	70	88	81	80	66	61	67	67	68
7	16	22	36	10	32	0	8	65	46	41	62	57	53	45	44	55	51	53
8	21	15	10	14	24	8	0	71	52	47	67	61	59	49	46	56	53	55
9	50	85	14	57	91	65	71	0	19	25	3	12	13	29	37	43	34	36
10	31	66	57	38	72	46	52	19	0	12	16	10	10	13	21	31	22	25
11	26	62	38	34	70	41	47	25	12	0	22	20	12	22	29	41	32	35
12	46	82	34	53	88	62	67	3	16	22	0	8	10	25	33	40	31	33
13	41	76	53	48	80	57	61	12	10	20	8	0	11	17	25	32	23	25
14	37	73	48	45	66	53	59	13	10	0	10	11	0	23	31	41	31	34
15	30	62	45	35	61	45	49	29	13	8	25	17	23	0	8	19	10	13
16	30	58	35	34	67	44	46	37	21	10	33	25	31	8	0	13	7	9
17	42	67	34	45	67	55	56	43	31	25	40	32	41	19	13	0	9	7
18	36	65	45	41	68	51	53	34	22	33	31	23	31	10	7	9	0	3
19	39	66	41	43	43	53	55	36	25	40	33	25	34	13	9	7	3	0

表 C2. 节点之间铁路路线长度(km)

节点	1	3	9	10	15	16	17
1	0	-	46	28	27	27	39
3	-	0	79	61	57	54	62
9	46	79	0	-	26	34	39
10	28	61	-	0	12	19	29
15	27	57	26	12	0	-	-
16	27	54	34	19	-	0	-
17	39	62	39	29	-	-	0

表 C3. O-D 需求(万吨/年)

开始节点	终止节点	需求量
5	14	24
6	12	560

续表

6	19	364
7	14	270
7	19	280
8	14	420
8	18	64
13	6	152
14	19	300
18	5	104
18	6	276
18	14	152
19	13	160

表 C4. 不同交通方式相关参数

交通方式	速度(km/h)	单位成本(元/千米 - 吨)	平均单位排放量(千克/吨 - 千米)
轻型卡车	60	0.4	0.283
重型卡车	60	0.32	0.132
火车	45	0.25	0.022