

文章编号:1000-4653(2025)02-0159-07

低碳目标下内陆集装箱运输系统的 运输方式选择研究

管田超¹, 梁树琦², 韩京伟¹

(1. 交通运输部水运科学研究院 经济政策与发展战略研究中心(法律研究中心), 北京 100088;
2. 国能(天津)港务有限责任公司, 天津 300450)

摘要:我国内河水资源丰富,内河集装箱运输是内陆沿河地区运输系统的主要方式,但随着公路网规模的增加、路网结构的优化及陆运竞争加剧,导致了内河运输的费用下降,内陆集装箱运输面临巨大挑战。为更好地发挥内河水运经济、节能的作用,引导货主选择水路运输方式,文章从内陆集装箱运输系统的角度出发,将碳排放这一经济外部性通过运输总成本进行内部化,针对内河集装箱运输与公路运输的方式选择问题进行了定量分析。在低碳目标影响下,建立了基于内陆集装箱运输系统的运输方式选择均衡模型。同时,文章利用经济学方法重点分析了等运输总成本运距与其相关影响因素的经济学特征,最后用数值算例验证了模型的有效性。算例结果表明运输距离大于1 100 km时,低碳目标下货主选择水路运输更具有经济性。

关键词:水路运输;内陆集装箱运输系统;低碳;运输方式选择;均衡模型

中图分类号:U169.6 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.020

Study on transportation mode selection of inland container transport system under low carbon objective

GUAN Tianchao¹, LIANG Shuqi², HAN Jingwei¹

(1. The Center for Research on Economic Policy and Development Strategies (Legal Research Center), China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China;
2. GuoNeng (Tianjin) Coal Dock Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: China rivers are abundant in water resources, and inland container transport is the main form of river transport. However, with the rapid development of road construction, the continuous improvement of the comprehensive transport system and increased competition in road transportation resulting in lower freight costs, inland container transport will also face huge challenges. In order to utilise the economical and energy-saving role of inland river transport more effectively, it is necessary to encourage owners of goods to choose the waterway transportation mode. From the perspective of the inland container transport system, this paper conducts a quantitative analysis to address the issue of modal choice between inland container transport and road transport, internalising the economic externality of carbon emission through the total cost of transport. Taking into account the low-carbon objective, a transportation mode choice equilibrium model based on an inland container transport system was constructed. Meanwhile, the paper focuses on analysing the economic characteristics of total transportation costs and related influencing factors using an economic approach. Finally, the model's validity is verified using numerical examples. The results demonstrate that, under the low-carbon objective, it is more economical for owners to choose waterway transportation when the transportation distance is more than 1 100 km.

收稿日期:2023-12-28

基金项目:国家自然科学基金项目(72471026;62206116)

作者简介:管田超(1988—),女,博士,研究方向为综合交通运输系统建模及经济学分析。E-mail:guantianchao@wti.ac.cn

通信作者:韩京伟(1979—),男,研究员,博士,研究方向为港航经济及战略、综合交通与现代物流。E-mail:hanjw@wti.ac.cn

引用格式:管田超,梁树琦,韩京伟.低碳目标下内陆集装箱运输系统的运输方式选择研究[J].中国航海,2025,48(2):159-165.

GUAN T C, LIANG S Q, HAN J W. Study on transportation mode selection of inland container transport system under the low carbon objective[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 159-165. (in Chinese)

Key words: waterway transportation; inland container transport system; low carbon; transportation mode selection; equilibrium model

自1801年Dr. James Anderson提出集装箱运输的概念以来,集装箱运输便逐步发展成一种先进的现代化运输方式,实现了货主远程“门到门”的运输服务^[1]。同时,我国内河水源丰富,内河航道通航里程12.7万公里,内河集装箱运输是我国综合交通运输体系及水资源综合利用体系的重要组成部分^[2]。但是,内河水运的货运量占全国公路、铁路、内河三种内陆运输方式货运总量的比重不足7%,其货物周转量占内陆运输方式总货物周转量的比重不到9%^[3]。内河运输虽然具有运量大、单位能耗低等优点,但面对同等运距的内河运输和公路运输的方式选择时,货主更倾向于选择公路运输。货主运输方式选择行为与其内河运输的优势是相悖的,造成此认知差异的原因之一是对内陆集装箱运输系统的界定不清晰。传统意义上内河运输与公路运输相比具有的成本优势,是指内陆运输系统中船舶运输环节。但实际上,内陆运输系统由内陆集疏港运输、码头中转、船舶运输三个子系统组成,三个子系统相互联系、互相制约。其次,忽视了交通需求管理对用户选择行为的影响。交通运输业作为第二大CO₂排放来源,行业出台了多项政策引导运输结构调整,但其实施效果并不显著,其原因是运输需求的产生是用户选择行为的结果。用户方式选择以运输成本为依据,影响运输成本的因素不仅是运输时间成本和运输经济成本两个内部因素,还应考虑环境因素(CO₂排放)等外部成本影响。所以,将碳排放量通过经济手段转化为内部成本并加入总成本中,构建运输方式选择模型。

1 文献综述

20世纪70年代,国外部分地区的内河运输采用集装箱货运方式。欧洲西部地区、俄罗斯西部地区和北美东部地区是目前国外内河集装箱运输较发达地区。国内外学者基于内河集装箱运输的相关研究主要集中在以下几个方面:

基于运输服务,针对内河集装箱运输服务网络设计和内河多式联运理论展开研究,重点研究运输服务网络的构建及优化^[4-6],忽视货主选择是货物运输服务产生的根源。国内学者主要从两个方面开展研究:一是立足内河集装箱运输发展现状开展政策、战略等分析^[7];二是研究内河集装箱运输的网络规划及优化等微观层面的局部问题^[8],忽视内陆集装箱运输具有系统性的特征。

目前,低碳运输是发展低碳经济的重要组成部分,水运作为全球贸易和经济发展的纽带,是最为经济和节能的运输方式。国内外学者针对降低CO₂排放、减少温室效应达成了共识,从运营管理的角度出发,在CO₂减排的机制设置、碳强度计算、温室气体排放市场机制、碳交易等方面展开相关研究^[9-20]。其中,文献[9]~[11]关注CO₂排放驱动因素、计算标准以及碳排放网络结构特征;文献[12]~[13]关注不同碳交易政策的对比分析及碳交易政策对社会福利的影响;文献^[14-20]考虑不同影响因素下碳排放的测算方法和不同运输方式在不同情景下的碳排放计算机理。目前,碳排放测算模型的建立,一是宏观层面以统计方法建立“自上而下”或“自下而上”的不同运输方式碳排放测算模型,二是实际应用层面以碳排放系数方法基于类别建立碳排放测算模型。前者关注宏观因素影响,未考虑从货物运输组织产生的中观层面影响;后者关注实际运用,以实际情况反映其变化,故本文选择该方法进行碳排放计算。

为更好地发挥水运经济、节能的运输优势,引导货主选择水路运输方式,本文从内河集装箱运输系统的角度出发,将碳排放这一经济外部性通过运输总成本进行内部化,针对内河集装箱运输与公路运输的方式选择问题进行了定量分析。并在低碳目标影响下,建立了基于内河集装箱运输系统的运输方式选择均衡模型。同时,本文利用经济学方法重点分析了等运输总成本运距与其相关影响因素的经济学特征,最后用数值算例验证了模型的有效性。

2 低碳目标下内陆集装箱运输系统的运输方式选择均衡模型

2.1 模型假设

A1:运输方式是内河集装箱运输(a)和公路运输(b),用 i 表示运输方式, $i = a, b$ 。运输货物属性、货运量和运距是同质的。内陆运输系统包含三个子系统,分别是内陆集疏港运输、码头中转、船舶运输,实际情况如图1所示,公路运输仅考虑“门到门”的情景。

A2:运输网络包含一个起点 O 和终点 D ,运输总距离是 L 且满足 $L_1 + L_2 + L_3 = L$,假设起点为 O ,终点为 L ,集疏运的距离 L_1 和 L_3 取相同经验值测算,即 $L_1 = L_3$ 是确定且已知的, L_2 是船舶运输距离,运输网络如图2所示。



图1 内陆集装箱运输系统构成示意

Fig.1 Schematic diagram of inland container transport system

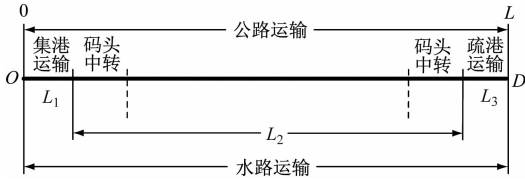


图2 运输网络示意

Fig.2 Schematic diagram of transport network

A3:运输成本包含固定成本和可变成本,内河集装箱运输的固定成本包含拆装箱、装车等费用和码头中转,其中内陆集疏港的码头中转成本相同;公路运输的固定成本包含燃油费、人员等费用。可变成本中运输费用是关于运距的正比例函数。

2.2 考虑低碳目标影响的运输总成本

2.2.1 不考虑低碳目标影响的运输总成本

本文用 l 表示目的地与起运地的运输距离, $c_i(l)$ 表示第 i 种运输方式从起运地 O 到目的地 l 的单向运输总成本,且满足 $\int_0^l c_i(l) dl \leq L$ 。根据 A3 可知,运输成本包含固定成本和可变成本,用 C_{i0} 表示第 i 种运输方式的固定成本且 $C_{i0} \geq C_{b0}$ 。可变成本包括货物在途运输时间成本 $t_i(l) = \tau_i \frac{l}{V_i} Q$ (式中, V_i 为第 i 种运输方式的平均速度且 $V_a < V_b$; τ_i 为单位运输成本且 $\tau_a > \tau_b$, Q 为运输量) 和运输距离为 l 的运输成本 $T_i(l)$,故运输总成本 $c_i(l)$ 可以表示为:

$$c_i(l) = C_{i0} + t_i(l) + T_i(l) \quad (1)$$

由假设 A2、A3 和图 2 可知,内河集装箱运输的内陆集疏港运输由集卡车载运,故货物在途运输时间成本可表示为式(2),公路运输的货物在途运输时间成本可表示为 $t_b(l) = \tau_b \frac{l}{V_b} Q$ 且 $l \leq L$ 。同时,内河集装箱的运输成本可表示为式(3),公路运输的运输成本为 $T_b(l) = \tau_b l Q$ 且 $l \leq L$ 。

$$t_a(l) = \left(\frac{2\tau_b L_1}{V_b} + \frac{\tau_a(l - 2L_1)}{V_a} \right) Q \quad (2)$$

$$T_a(l) = \left(2\tau_b L_1 + \tau_a \left((l - 2L_1) + \ln \frac{(l - 2L_1)^2}{2} \right) \right) Q \quad (3)$$

综上,不考虑低碳目标下两种运输方式的单向运输总成本可表示为:

$$c_a(l) = C_{a0} + \left(\frac{2\tau_b L_1 (1 + V_b)}{V_b} + \right.$$

$$\left. \frac{\tau_a (l - 2L_1) (1 + V_a)}{V_a} + \tau_a \ln \frac{(l - 2L_1)^2}{2} \right) Q \quad (4)$$

$$c_b(l) = C_{b0} + \tau_b \left(\frac{1 + V_b}{V_b} \right) l Q \quad (5)$$

2.2.2 考虑低碳目标影响的运输总成本

碳排放量通过收取碳排放成本的经济手段实现外部成本内部化,构建低碳目标下,基于内陆集装箱运输系统的运输总成本最小的优化问题。本文采用碳排放系数法估算不同运输方式的碳排放量,通过 CO_2 排放因子乘以运输强度获得^[3],第 i 种运输方式的碳排放成本计算如式(6)所示:

$$e_i(l) = p e_i l Q \quad (6)$$

式中: p 为碳排放价格, $e_i(l)$ 为第 i 种运输方式的碳排放成本; e_i 为第 i 种运输方式的碳排放因子且 $e_a < e_b$ 。

根据假设 A1,第 i 种运输方式的碳排放成本具体计算方法如下,式(7)表示内河集装箱运输的碳排放成本计算,式(8)表示公路运输的碳排放成本计算。

$$e_a(l) = (2e_b L_1 + e_a(l - L_1)) p Q \quad (7)$$

$$e_b(l) = e_b l p Q \quad (8)$$

综上,考虑低碳目标下两种运输方式的单向运输总成本 C_{T_i} 可表示为:

$$C_{T_i}(l) = c_i(l) + e_i(l) \quad (9)$$

根据式(4)、(5)、(7)和(8),低碳目标影响下内河运输的单向运输总成本可表示为式(10),公路运输的单向运输总成本可表示为式(11)。

$$C_{T_b}(l) = C_{a0} + \left(\frac{2\tau_b L_1 (1 + V_b)}{V_b} + \frac{\tau_a (l - 2L_1) (1 + V_a)}{V_a} + \tau_a \ln \frac{(l - 2L_1)^2}{2} + (2e_b L_1 + e_a(l - L_1)) p \right) Q \quad (10)$$

$$C_{T_b}(l) = C_{b0} + \left(\tau_b \left(\frac{1 + V_b}{V_b} \right) + e_b p \right) l Q \quad (11)$$

2.3 低碳目标影响的运输方式选择均衡模型

2.3.1 不考虑低碳目标影响的运输方式选择均衡模型

记 \bar{l}^* 为内河运输和公路运输等运输总成本运距, $c(\bar{l}^*)$ 为均衡运输总成本。通常,货主会选择成本较低的运输方式,当两种运输方式的运输总成本相等时,交通运输网络达到 UE 均衡。因此运输方式选择是在一定运输距离内的成本最小化问题,该成本最小化问题可以表示为:

$$\min_{c_i(l)} c_i(l), i = a, b \quad l \in [0, L] \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \int_0^l c_i(l) dl \leq L \quad (13)$$

求解整理后得到内河集装箱运输和公路运输等运输总成本的运距为:

$$\bar{l}^* = \frac{2\tau_b V_a (1 + V_b) L_1 - 2\tau_a V_b (1 + V_a) L_1 + 2\tau_a V_a V_b}{\tau_b V_a (1 + V_b) - \tau_a V_b (1 + V_a)} \quad (14)$$

由式(14)可知,内河集装箱运输和公路运输等运输总成本的运距与单位运输成本、集疏运距离和运输方式的平均速度相关。将式(14)代入式(5)可得均衡运输总成本的表达,即:

$$c(\bar{l}^*) = C_{b0} + \frac{\tau_b \bar{l}^* Q (1 + V_b)}{V_b} \quad (15)$$

当两种运输方式选择均衡时,均衡运输总成本不仅受到自身运输方式的属性影响,还会受到与之相竞争的另一种运输方式属性、运输量和集疏运距离的影响。如果运输量、单位运输成本和运输方式的平均速度保持不变,集疏运距离的改变对均衡运输总成本的影响取决于 $\tau_b V_a (1 + V_b)$ 与 $\tau_a V_b (1 + V_a)$ 之间的比值,如果 $\tau_b V_a (1 + V_b) / \tau_a V_b (1 + V_a) \geq 1$,则随着运输量的增加其均衡运输总成本会增加;如果 $\tau_b V_a (1 + V_b) / \tau_a V_b (1 + V_a) < 1$,则需要进一步讨论 $\tau_a V_a V_b$ 与集/疏运距离(L_1 或 L_3)的关系。如果 $\tau_a V_a V_b$ 小于集疏运距离,则随着运输量的增加,均衡运输总成本也增加,反之,则减少。

2.3.2 考虑低碳目标影响的运输方式选择均衡模型

通过碳排放价格将外部成本内部化转化成运输总成本,因此考虑低碳目标下基于内陆集装箱运输系统的运输方式选择问题将呈现式(16)和(17)的表达形式。

$$\min_{C_{T,i}(l)} C_{T,i}(l) = c_i(l) + e_i(l), i = a, b \quad l \in [0, L] \quad (16)$$

$$\text{s. t. } \int_0^l c_i(l) dl \leq L \quad (17)$$

记 \bar{l}_e^* 为考虑低碳目标下内河集装箱运输和公路运输的等运输总成本的运距,即为:

$$\bar{l}_e^* = \bar{l}^* + \frac{(2e_b - e_a)L_1}{e_b - e_a} \quad (18)$$

同理,考虑低碳目标下内河运输和公路运输的等运输总成本如式(19)所示:

$$C_T(\bar{l}_e^*) = c(\bar{l}^*) + \frac{\tau_b (2e_b - e_a) (1 + V_b) L_1}{(e_b - e_a) V_b} pQ \quad (19)$$

2.4 经济性质分析

由式(14)和(18)可知等运输总成本运距与单位运输成本、集疏运距离、运输方式的平均速度和不同运输方式的碳排放因子相关,等运输总成本除上述影响因素外还与运输量相关。为了进一步探究等运输总成本运距与上述影响因素之间的关系,本节采用比较静态分析方法重点分析等运输总成本运距与其相关影响因素的经济学特征。

2.4.1 等运输总成本运距 \bar{l}_e^* 与平均运输速度的关系

利用式(18)对两种运输方式的平均运输速度求一阶导数可得到如式(20)和(21)所示的等运输总成本运距与不同运输方式的平均速度、单位运输成本存在相关关系。由此可知,改变公路运输的平均速度对等运输总成本运距的改变是正相关的,但改变内河集装箱运输的平均速度对等运输总成本运距的变化是负相关的,则说明内河集装箱运输对等运输总成本运距的变化幅度是低于公路运输对其影响的变化幅度。

$$\frac{\partial \bar{l}_e^*}{\partial V_a} = - \frac{2\tau_a^2 V_b^2}{(\tau_b V_a (1 + V_b) - \tau_a V_b (1 + V_a))^2} \leq 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial \bar{l}_e^*}{\partial V_b} = \frac{2\tau_a \tau_b V_a^2}{(\tau_b V_a (1 + V_b) - \tau_a V_b (1 + V_a))^2} \geq 0 \quad (21)$$

2.4.2 等运输总成本运距 \bar{l}_e^* 与单位运输成本的关系

利用式(18)对两种运输方式的单位运输成本求一阶导数可得到如式(22)和(23)所示的等运输总成本运距与单位运输成本的关系:

$$\frac{\partial \bar{l}_e^*}{\partial \tau_a} = \frac{2\tau_b V_a^2 V_b (1 + V_b)}{(\tau_b V_a (1 + V_b) - \tau_a V_b (1 + V_a))^2} \geq 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial \bar{l}_e^*}{\partial \tau_b} = - \frac{2\tau_a V_a^2 V_b (1 + V_b)}{(\tau_b V_a (1 + V_b) - \tau_a V_b (1 + V_a))^2} \leq 0 \quad (23)$$

两种运输方式的平均速度、单位运输成本同时影响其等运输总成本运距的变化,其中,等运输总成本运距与公路单位运输成本的变化确定呈负向变化,然而,内河集装箱运输的单位运输成本与等运输总成本运距的关系则呈正向变化;如果提高内河集装箱运输的单位运输成本会使其均衡的运输总成本运距变大,进一步说明内河运输相比公路运输在单位运输成本中具有一定的优势。

2.4.3 等运输总成本运距 \bar{l}_e^* 与碳排放的关系

利用式(18)对两种运输方式的碳排放因子求一阶导数可得到如式(24)和(25)所示的等运输总成本运距与碳排放因子的关系:

$$\frac{\partial \bar{l}_e^*}{\partial e_a} = -\frac{e_b L_1 Q}{(e_b - e_a)^2} \leq 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial \bar{l}_e^*}{\partial e_b} = -\frac{L_1 Q}{(e_b - e_a)^2} \leq 0 \quad (25)$$

由上可知,集疏运距离、运输量和不同运输方式的碳排放因子影响等运输总成本运距与碳排放因子的关系,且其变化率恒为负。当改变内河集装箱运输的碳排放因子时,其等运输总成本运距会随着其增大而变小;相反地,当公路运输的碳排放因子增加时,其等运输总成本运距会增大,说明公路运输的碳排放因子对等成本运距的影响远大于内河集装箱运输的碳排放因子变化,进而影响了公路运输总成本的增量较大。

2.4.4 等运输总成本运距 \bar{l}_e^* 与运输总成本的关系

利用式(18)对等成本运距 \bar{l}_e^* 求一阶偏导数可以得到运输总成本与等运输总成本运距的关系,如式(26)所示,由此可知,运输总成本是与单位运输成本、运输量、集疏运距离、运输平均速度和碳排放相关。其中,随着单位运输成本、运输量、集疏运距离的增加,运输总成本也会增加,他们之间呈正相关关系;随着运输平均速度的增加,运输总成本是降低的,他们之间呈负相关关系。

$$\frac{\partial C_T(\bar{l}_e^*)}{\partial \bar{l}_e^*} = \frac{\tau_b Q(1 + V_b)}{V_b} \left(1 + \frac{(2e_b - e_a)pL_1}{(e_b - e_a)} \right) \quad (26)$$

3 数值算例

本节给出数值算例进一步说明模型的性质及相关应用,在运输量不变的前提下,主要分析运输距离的变化与运输总成本之间的关系,一是分析运输距离与运输总成本的变化关系,说明两种运输方式在不同运输距离的经济性;二是分析运输距离与运输总成本变化率的关系,说明两种运输方式与不同运输距离的单位边际成本变化情况。表1给出了模型中输入参数的基准值。

将表1中的输入参数值代入模型,可得到随着运输距离变化在不同情景下运输总成本的变化情况。此时,在相等的运输量下,随着运输距离的增加,货主选择公路运输的运输总成本高于选择水路运输的运输总成本;随着运输距离的不断增加,公路

运输的运输总成本变化也是高于水路运输的运输总成本变化。考虑碳排放影响时,选择公路运输的运输总成本随运输距离的变化高于不考虑碳排放影响的公路运输总成本,进一步说明同等运输量和运输距离下,公路运输的碳排放量是高于水路运输的碳排放量,变化如图3所示。

表1 数值算例中的输入参数

Tab.1 The input parameters in the numerical example

参数	描述	基准值
V_a, V_b	运输方式的平均运行速度/(km/h)	20,60
τ_a, τ_b	单位运输成本/(元/t·km)	0.15,0.55
e_a	内河集装箱运输的碳排放因子/(kg-CO ₂ /t·km)	0.012
e_b	公路运输的碳排放因子/(kg-CO ₂ /t·km)	0.133
Q	运输量/t	12
L	运输总距离/km	2 000
L_1, L_3	集疏运距离/km	25
p	碳排放价格/(元/t)	55

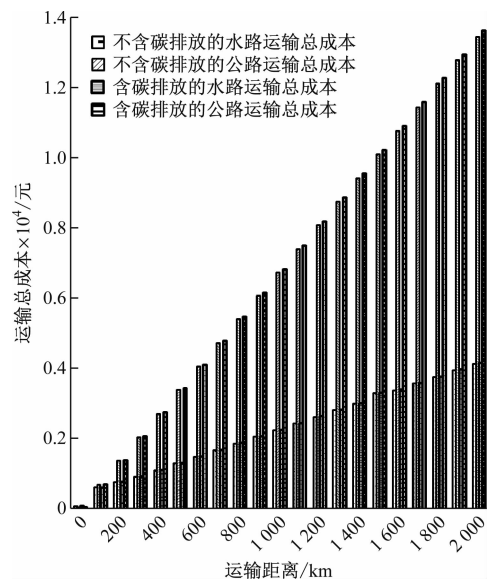


图3 不同运输方式的运输总成本随运输距离的变化

Fig.3 The total cost of different modes of transport with the variation of transport distance

同时,为了更好地说明运输总成本与运输距离的变化关系,图4显示了不同情景下,运输总成本随着运输距离的变化率。货主选择公路运输的运输总成本变化率远高于选择水路运输的运输总成本变化率,特别是运输距离小于1 100 km时,其运输总成

本的变化更加明显;货主选择水路运输的运输总成本变化率低于选择公路运输的运输总成本变化率。然而,货主考虑碳排放影响选择公路运输的运输总成本变化率高于不考虑公路运输的运输总成本变化率。图5进一步说明不同运输方式的碳排放情况,以及随着运输距离变化其碳排放量的变化率,通过图4和图5可以说明相同条件下水路运输具有低能耗、低运输成本的优势。

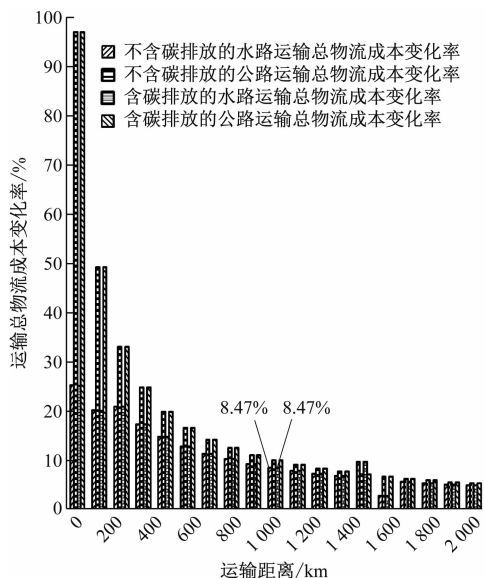


图4 不同情景下运输总成本随运输距离的变化率

Fig. 4 The variations of total cost of transports with transport distance under different scenarios

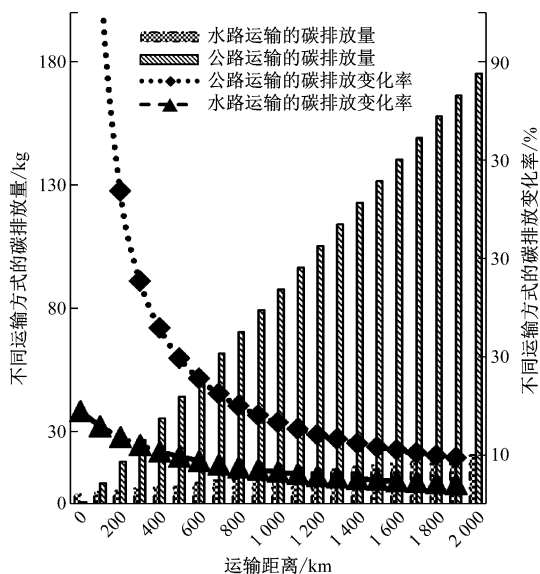


图5 不同运输方式随运输距离变化的碳排放量及变化率

Fig. 5 The carbon emissions of different transport modes with transport distance and the percentage of change

4 结束语

本文明确了内陆集装箱运输系统的理念,并从

内陆集装箱运输系统的角度出发,构建了低碳目标下运输方式选择均衡模型,定量描述货主运输方式选择问题。同时,本文探究了等运输总成本运距与平均运输速度、单位运输成本、碳排放等影响因素的经济学特性。通过数值算例发现,在低碳目标影响下,随着运输距离的增加,内河集装箱运输和公路运输的运输总成本增加,但前者的运输总成本增加率较低,使得货主进行运输方式选择时会偏向内河集装箱运输,特别是运输距离大于1 100 km时,货主选择内河集装箱运输是具有优势的。同时,本文发现内河集装箱运输的单位运输成本与等运输总成本运距正相关,内河集装箱运输碳排放与其负相关。但随着数字经济的发展、跨境电商业务的增加,拆箱业务会逐年增加,本文的研究中并未关注货物价值对运输方式选择的影响,后续将结合内陆集装箱业务发展并考虑单箱货值的影响,提供个性化的物流服务,实现“宜水则水、宜路则路”的目标。

参考文献

- [1] 国家综合立体交通网规划纲要学习读本[D]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.
National comprehensive stereo transportation network planning outline study book [D]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd., 2021. (in Chinese)
- [2] 韩京伟. 基于协调理论的内河集装箱运输系统发展研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
HAN J W. Inland container transport system development research based on coordination theory [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [3] 戴倩. 考虑碳排放的港口腹地集装箱多式联运网络优化研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2021.
DAI Q. The optimization of port hinterland container intermodal transportation network with consideration of carbon emissions [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [4] LANE D E, HEAVER T D, UYENO D. Planning and scheduling for efficiency in liner shipping[J]. Maritime Policy and Management, 1987, 14(2): 109-125.
- [5] NOTTEBOOM T E. Concentration and load centre development in the European port system[J]. Journal of Transport Geography, 1997, 5(2): 99-115.
- [6] CRAINIC T G. Service network design in freight transportation [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 122: 272-288.
- [7] 赵东华,陈虹,黄荃荃. 上海内河集装箱运输发展的问题探讨[J]. 水运工程,2012(12):10-12.

- ZHAO D H, CHEN H, HUANG D D. Discussion on development of Shanghai inland container transport [J]. *Port and Waterway Engineering*, 2012(12):10-12. (in Chinese)
- [8] 安芬. 内河集装箱班轮运输航线网络规划研究 [D]. 上海:上海交通大学,2014.
- AN F. Network planning and design of inland container liner shipping routes [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)
- [9] 马雪菲. 中国国际海上货物运输 CO₂ 排放驱动因素分析及减排对策研究 [D]. 大连:大连海事大学, 2020.
- MA X F. Study on driving factors and mitigation policies of CO₂ emissions from China's international seaborne freight transport [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020. (in Chinese)
- [10] PETER W. Recommendations for a future global CO₂-calculation standard for transport and logistics [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 100.
- [11] 邵帅, 徐俐俐, 杨莉莉. 千里“碳缘”一线牵:中国区域碳排放空间关联网络的结构特征与形成机制 [J]. *系统工程理论与实践*, 2023, 43(4): 958-983.
- SHAO S, XU L L, YANG L L. Structural characteristics and formation mechanism of carbon emission spatial association networks within China [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2023, 43(4): 958-983. (in Chinese)
- [12] 张跃军, 王霞. 中国碳交易政策对可持续经济福利的影响研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2023, 43(2): 309-320.
- ZHANG Y J, WANG X. The impact of carbon emissions trading scheme on sustainable economic welfare in China [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2023, 43(2): 309-320. (in Chinese)
- [13] 夏西强, 路梦圆, 郭磊. 碳交易下碳配额分配方式对制造/再制造影响研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(11): 3001-3015.
- XIA X Q, LU M Y, GUO L. Studying on the impact of carbon allowance allocation rules on manufacturing/remanufacturing under carbon trading [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2022, 42(11): 3001-3015. (in Chinese)
- [14] SANJUAN-DELMÁS D, PETIT-BOIX A, GASOL C M, et al. Environmental assessment of different pipelines for drinking water transport and distribution network in small to medium cities: a case from Betanzos, Spain [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 66: 588-598.
- [15] WANG C, CAI W, LU X, et. al. CO₂ mitigation scenarios in China's road transport sector [J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(7): 2110-2118.
- [16] CAI B, YANG W, CAO D, et. al. Estimate of China's national and regional sector CO₂ emissions in 2007 [J]. *Energy Policy*, 2012, 41: 474-483.
- [17] 田佩宁, 毛保华, 童瑞咏, 等. 我国交通运输行业及不同运输方式的碳排放水平和强度分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(3): 347-356.
- TIAN P N, MAO B H, TONG R Y, et al. Analysis of carbon emission level and intensity of China's transportation industry and different transportation modes [J]. *Climate Change Research*, 2023, 19(3): 347-356. (in Chinese)
- [18] YANG L. Urban transport carbon dioxide (CO₂) emissions by commuters in rapidly developing cities: the comparative study of Beijing and Xi'an in China [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 68: 65-83.
- [19] LIU J L, CHEN X R, ZHOU H W, et al. A practical methodology to evaluate internationally consistent energy data for China's transport sector [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 118030.
- [20] ZHANG L L, LONG R Y, CHEN H, et al. A review of China's road traffic carbon emissions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 207: 569-581.