文章编号：1003-1421(2026)03-0152-12
引用格式：石学刚，邬林江. 基于组合赋权的各运输方式间货运分担率计算[J]. 铁道运输与经济，2026，48(3)：152-163.
SHI Xuegang，WU Linjiang. Calculation of Freight Modal Split Among Different Transportation Modes Based on Combined Weighting[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(3)：152-163.

基于组合赋权的各运输方式间货运分担率计算

石学刚[1]，邬林江[2]

(1.中国民航大学 临空经济研究中心，天津 300300；2.中国民航大学 交通科学与工程学院，天津 300300)

摘 要：合理优化运输结构对物流降本增效具有重要意义。首先，基于运输指标构建Logit分担率模型；然后，基于主客观组合赋权探究不同运距和时效下各运输方式分担率；最后，探究不同碳税下各运输方式分担率的演变规律。结果表明：IAHP-CRITIC相比于CRITIC更能凸显货运供需关系，表现为主观低碳意识不足和过度重视便捷性；公路分担率随运距和货物时效增加而上升，至临界值后随时效增加而下降，航空和铁路偏向于中远距离的高时效货物，铁路运距范围更广且分担率随运距缓慢下降，水路对运距不敏感，但中远距离的高时效货物不再适用；相比于不缴纳碳税，碳税为0.05元/kgCO_2时航空和铁路份额分别提高21.93%和20.94%，同时水路和公路份额将分别降低5.6%和60.49%；而碳税为0.1元/kgCO_2和0.5元/kgCO_2时，较高碳税分别将水路和铁路份额提高5.46%和41.75%，同时将公路和航空份额分别降低10.34%和84.8%。

关键词：综合运输；运输分担率；IAHP-CRITIC法；货物运输；碳排放
中图分类号：U116.1；U-9 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250419002

Calculation of Freight Modal Split Among Different Transportation Modes Based on Combined Weighting

SHI Xuegang[1], WU Linjiang[2]

(1. The Center for Airport Economic Research, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Reasonable optimization for transportation structure is of great significance for reducing costs and enhancing the efficiency of logistics. Initially, a Logit model for modal split was constructed based on transportation indicators. Subsequently, the modal split under different transportation distances and timeliness was explored based on objective and subjective combination weighting. Finally, the evolution patterns of the modal split of different transportation modes under varying carbon tax levels were investigated. The findings reveal that compared with CRITIC, IAHP-CRITIC better highlights the relationship between freight supply and demand, reflecting issues such as insufficient subjective awareness of low-carbon transportation and an overemphasis on convenience. Specifically, the highway modal split increases with transportation distance and cargo timeliness, peaking before declining with further timeliness increases. Aviation and railway tend to serve high-timeliness cargo over medium-to-

收稿日期：2025-04-19 **修订日期**：2025-12-15
通信作者：邬林江(2000—)，男，重庆人，中国民航大学交通科学与工程学院硕士研究生。
基金项目：天津市教委社会科学重大项目(2024JWZD41)

long distances, with railway having a broader transportation distance range and a gradually decreasing modal split as transportation distance increases. Waterway transportation is insensitive to distance but is unsuitable for high-timeliness cargo over medium-to-long distances. Compared to those without a carbon tax, aviation and railway shares increase by 21.93% and 20.94%, respectively, with a carbon tax of 0.05 yuan/kgCO_2, while waterway and highway shares reduce by 5.6% and 60.49%, respectively. Waterway and railway shares increase by 5.46% and 41.75%, respectively, and highway and aviation shares decrease by 10.34% and 84.8%, respectively, with higher carbon taxes of 0.1 yuan/kgCO_2 and 0.5 yuan/kgCO_2.
Keywords: Comprehensive Transportation; Freight Modal Split; IAHP–CRITIC Method; Cargo Transportation; Carbon Emission

0　引言

交通运输是强国建设的先行领域，是推进中国式现代化的先锋[1]。近年来，我国交通运输业营业性货运量呈逐年增长态势，2023年达547.47亿t，各运输方式已由相对独立运行向一体化融合发展转变[2]。从运输结构来看，2023年公路、水路、铁路、航空所占比例分别为73.7%，17.1%，9.2%和0.01%，其中公路和水路依然占据着较大比重；从运输平均距离来看，2023年这4种运输方式平均运距依次为183 km，1 387 km，724 km和3 857 km，空间区位差异性较为明显；从运输的快捷程度来看，公路、航空和铁路是最主要的快捷货物运输方式，水路则偏向于提供大宗商品货物的运输服务[3]；从单位运距碳排放来看，航空和公路是碳排放最高的2种运输方式，铁路次之，水路单位碳排放最低。由于货运方式选择涉及多维度的协同评价体系，生产运营过程中缺乏全局性指导，因此，制定合理的评估标准对于优化各运输方式在服务空间和对象上的布局，促进各运输方式协同合作和高效运行，降低全社会物流成本，实现物流行业高质量发展具有重要意义[4]。

在不同物流运输需求对各运输方式的选择决策方面，多数学者采用启发式算法来计算运距和分担率，如遗传算法[5-6]、遗传-模拟退火组合算法[7]等。但启发式算法相比于离散的Logit模型通常需要大量的参数设定，其严谨性、可拓展性和求解的效率都存在不足，而Logit计算的结果更适合宏观层面的交通结构调控，因此不少学者通过离散的Logit来解决货运分配的相关问题。与研究相关的文献主要集中在优势运距区间计算、分担率计算和预测模型优化3个方面。在优势运距方面，部分学者通过Logit模型来求取如高铁-公路在不同时速、定价下的竞争优势区间[8-9]、公铁空的相对优势运距[10]等；分担率计算方面，主要通过离散的Logit模型来计算货物时效对运输工具的偏好[11]、基于高铁快运供需关系的客户选择[12]等；货运分担率预测模型优化的相关研究中，如基于托运人偏好的地铁分担率预测[13]、轨道交通出行率预测[14]等也是基于离散的Logit模型来实现的。另外，部分学者从低碳物流角度来探讨运输结构优化问题，如多式联运路径优化对碳排放的影响[15]、碳排放与货运效用价值的双目标优化问题[16]、不同碳配额下区域化减排压力分析[17]等，但这部分文献在探讨过程中少有从碳税制定方面来切入，并且极少同时考虑运距和单位货物时效异质性的相关问题。

综上所述，本研究采用组合赋权的方式对各运输方式进行分担率计算，并在此基础上，探究碳税和单位货物时间价值对各运输方式市场分担率的综合影响。具体创新之处为：分别从运力供给侧和市场需求侧考虑，结合区间层次分析法(IAHP)和基于指标相关性的权重确定法(CRITIC)对相关指标进行赋权，在有效避免主观误差的基础上，最大程度地保留客观数据信息；加入了不同货物单位时效具有差异性这一变量，将货物类别由快捷货物拓展为不同种类货物，因此水运纳入考虑范围，并与平均运距相结合以综合考虑两者结合后的市场分担率分布情况，仿真结果更符合运输市场分担比重；讨论了不同碳税比例对分担率的影响，特别是将不同碳税下各运输方式的分担率随运距和货物单位时效变化趋势进行了重点探究，得出在不同碳税区间各运输方式市场分担率的演变规律，以助力相关部门进行合理调控。

1　基本模型

货主选择运输方式一般会从多个维度进行综合考虑，属于多元离散决策，并且Logit模型相比于

启发式算法在算例设定等方面具有可拓展性更强、得出的结果更利于指导实践等优点，目前交通分担率问题中常用这一方法进行建模分析。因此选用Logit模型作为构建各运输方式的分担率模型。由于目前大多数货运研究的对象集中在运输的经济性、货物的时效性、运输工具的稳定性、安全性、便捷性以及绿色性[2-3]，将以上指标作为模型构建的主要参考依据，模型指标、表达式及对应含义如表1所示。

为了便于突出研究重心，对模型做出如下假设：由于目前货运主要以表1中指标作为运输决策依据，因此不考虑除表1以外的其他指标，如货物可拆分性、区域经济条件、地形地貌、交通基础设施建设等对运输决策造成的影响；不考虑货物在运输过程中的中转决策，包括同一运输方式的中转与不同运输方式的中转；不考虑货运市场供需关系导致的各运输方式之间的恶性竞争，也不考虑运力不足导致货主更换运输方式等极端情况。

表1　模型指标、表达式及对应含义

Tab.1　Model indicators, expressions, and corresponding meanings

指标	表达式	含义
经济性s_{i1}	$s_{i1}=\lambda_i d$	λ_i为运输方式i的平均单位运价，元/km；d为运距，km
时效性s_{i2}	$s_{i2}=\left(\frac{d}{\overline{v_i}}+t_i\right)m$	$\overline{v_i}$为运输方式i的平均速度，km/h；t_i为运输方式i的附加时间，h；m为货物单位时间损失价值，元/(kg·h)
稳定性s_{i3}	$s_{i3}=\delta_i$	δ_i为运输方式i的准点率
安全性s_{i4}	$s_{i4}=1-\chi_i$	χ_i为运输方式i的货损率
便捷性s_{i5}	$s_{i5}=\varphi_f f_i+\varphi_u u_i$	f_i和u_i分别为运输方式i的开行频率和作业复杂度；φ_f和φ_u为指标对应的权重
绿色性s_{i6}	$s_{i6}=ne_i d$	n为碳排放税率；e_i为运输方式i的平均碳排放因子

运输方式i运距为d时的效益函数表达式为

$$v_i(d)=\exp\{s_{i3}s_{i4}[-\theta_1 s_{i1}-\theta_2 s_{i2}+\theta_5 s_{i5}-\theta_6 s_{i6}]\} \tag{1}$$

式中：θ_1，θ_2，θ_5，θ_6分别为经济性、时效性、便捷性和绿色性对应的组合权重。

在同一运距下，效益值越高所对应的分担率就越大，因此运输方式i运距为d时对应的市场分担率$p_i(d)$为

$$p_i(d)=\frac{\exp\{s_{i3}s_{i4}[-\theta_1 s_{i1}-\theta_2 s_{i2}+\theta_5 s_{i5}-\theta_6 s_{i6}]\}}{\sum_i \exp\{s_{i3}s_{i4}[-\theta_1 s_{i1}-\theta_2 s_{i2}+\theta_5 s_{i5}-\theta_6 s_{i6}]\}} \tag{2}$$

各运输方式的市场总分担率为

$$p_i=\int_0^{p_i(d)}\int_1^m p_i(d)\ \mathrm{d}\,d\,\mathrm{d}m \tag{3}$$

式中：m为运距范围与步长的比值，设定运距为0~2 500 km，步长为150 km。

2　组合赋权法

在实际的赋权过程中，仅依靠人为经验判断，可能会因主观因素造成可信度降低，若仅依靠客观因素，可能会导致信息损失，造成赋权的不准确[15]。因此，在确定各指标权重时，采用主客观结合的赋权方法，能够最大限度地降低主观误差和信息损失。IAHP是一种在信息不足情况下处理模糊问题的方法，常用于主观赋权[16]，而CRITIC法是一种可以根据因子变动而使得权重系数呈现异质性的客观赋权方法，常用于不同运输方式之间权重系数的确定。本研究组合2种赋权方法对4种运输方式进行综合赋权。

2.1　基于IAHP的主观赋权方法

2.1.1　构建区间判断矩阵

$$\boldsymbol{A}_i=\begin{bmatrix}[1,\ 1] & [a_{12}^l,\ a_{12}^u] & \cdots & [a_{1n}^l,\ a_{1n}^u]\\ [a_{21}^l,\ a_{21}^u] & [a_{22}^l,\ a_{22}^u] & \cdots & [a_{2n}^l,\ a_{2n}^u]\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ [a_{n1}^l,\ a_{n1}^u] & [a_{n2}^l,\ a_{n2}^u] & \cdots & [1,\ 1]\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：$[a_{12}^l,\ a_{12}^u]$表示运输方式i的第1个指标相对于第2个指标的重要程度，其余依次类推，则有$[a_{12}^l,\ a_{12}^u]=\left[\frac{1}{a_{12}^u},\ \frac{1}{a_{12}^l}\right]$。

2.1.2　一致性自动修正

$$k=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}a_{ij}^u}} \tag{5}$$

$$m=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}a_{ij}^l}} \tag{6}$$

式中：k为区间判断矩阵的上界；m为区间判断矩阵的下界。一般认为，当$k\leqslant 1$且$m\geqslant 1$时，区间判断矩阵的一致性较好，否则将重新评估，直到满足对应关系。

2.1.3　权重计算

$$\sigma_j=\frac{ka_j^l+ma_j^u}{2} \tag{7}$$

$$w_z^j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^{n}\sigma_j} \tag{8}$$

式中：σ_j为指标j的绝对权重；w_z^j为运输方式z中指标j的IAHP相对权重。

由此得出运输方式z对应的权重矩阵表达式为

$$\boldsymbol{w}_z = (w_z^1,\ w_z^2,\ \cdots,\ w_z^n) \tag{9}$$

2.2　基于CRITIC的客观赋权方法

x_{im}为第i种运输方式的第m个指标的取值，x'_{im}表示x_{im}标准化后的取值，首先将各指标标准化，表达式为

$$\begin{cases} x'_{im} = \dfrac{x_{im} - \min\limits_m\{x_{im}\}}{\max\limits_m\{x_{im}\} - \min\limits_m\{x_{im}\}} \\ x'_{im} = \dfrac{\max\limits_m\{x_{im}\} - x_{im}}{\max\limits_m\{x_{im}\} - \min\limits_m\{x_{im}\}} \end{cases} \tag{10}$$

计算各指标的标准差，表达式为

$$\begin{cases} \overline{b_m} = \dfrac{1}{m}\sum\limits_{i=1}^{m} x'_{im} \\ s_m = \sqrt{\dfrac{1}{m-1}\sum\limits_{i=1}^{m}(x'_{im} - \overline{b_m})^2} \end{cases} \tag{11}$$

式中：$\overline{b_m}$表示指标的平均值；s_m表示各运输方式指标m的标准差。

计算相关系数，表达式为

$$r_{mh} = \frac{\sum(x'_{im} - \overline{x'_m})(x'_{ih} - \overline{x'_h})}{\sqrt{\sum(x'_{im} - \overline{x'_m})^2(x'_{ih} - \overline{x'_h})^2}} \tag{12}$$

式中：r_{mh}表示指标之间的相关系数；m和h表示指标m和指标h。

计算各指标包含的信息量，表达式为

$$c_h = s_h\sum_{h=1}^{m}(1 - r_{mh}) \tag{13}$$

式中：c_h表示指标h包含的信息量；s_h表示各运输方式指标h的标准差。

各指标进行客观赋权，表达式为

$$w_k^h = \frac{c_h}{\sum_{h=1}^{n} c_h} \tag{14}$$

式中：c_h表示指标h对应的信息量；w_k^h表示指标h的CRITIC客观权重。

2.3　组合权重

为了避免因主观和客观评估过程中的局限性而引起的组合权重偏差，这里运用最小鉴别信息的原理缩小组合权重中主客观的权重因子，表达式为

$$\begin{cases} \min w = \sum\limits_{i=1}^{n}\left(w_j\ln\dfrac{w_j}{W_z^j} + w_i\ln\dfrac{w_j}{w_k^j}\right) \\ \text{s.t.}\sum\limits_{i=1}^{n} w_j = 1 \qquad w_j \geqslant 0 \end{cases} \tag{15}$$

对应求得这一最小组合因子下的组合权重，表达式为

$$w_j = \frac{\sqrt{w_z^j w_k^j}}{\sum\limits_{i=1}^{n}\sqrt{w_z^j w_k^j}} \tag{16}$$

式中：w_j为第j个指标的组合权重；w_z^j表示第j个指标的IAHP权重；w_k^j表示第j个指标的CRITIC权重。

3　分析与讨论

3.1　参数设定

为了进一步通过组合赋权方法对相关指标进行对比分析，并探究不同运输方式的优势运距和分担率问题，借鉴文献[21−23]的相关参数对指标进行参数设定，参数设定如表2所示。需要说明的是，本研究的铁路运输均指高铁快运。

表2　参数设定

Tab.2　Parameter settings

参数	$\overline{v_i}$/(km/h)	λ_i/(元/km)	t_i/h	δ_i	χ_i	f_i	u_i	e_i
公路	80	0.350	0.500	0.750	0.004	0.960	0.980	0.252
航空	800	2.850	4.500	0.802	0.001	0.850	0.950	1.460
铁路	250	2.140	1.000	0.964	0.002	0.920	0.950	0.108
水路	45	0.120	1.200	0.700	0.003	0.820	0.930	0.054

另外，由于探讨的是各运输方式之间不同指标的权重系数，为避免进一步研究同一指标下的二级指标赋权而引起的复杂性，参考文献[3]，将便捷性中的φ_f和u_i分别赋权为0.6和0.4。

3.2　数据收集

为获取相关从业人员对运输方式的不同属性的评价数据，邀请来自中国民航大学、西南交通大学、北京交通大学、大连海事大学的行业专家，以及天津航空有限责任公司、中国国家铁路集团有限公司、中国远洋海运集团有限公司的中高层管理人员共15人参与调研。调研的主要方式为线下访谈和线上问卷调查，调研的主要问题是从运力需求端

分别对4种运输方式的6种属性按重要程度进行排序。然后将统计的数据进行筛选整理，按照1—9进行等比例相对重要性标度，1表示同等重要，9表示显著重要，1—9重要性逐步增加。由此得出4种运输方式的区间判断矩阵分别为

$$\boldsymbol{A}_a=\begin{bmatrix}[1,1] & [\frac{1}{6},\frac{1}{4}] & [\frac{1}{2},1] & [\frac{1}{3},\frac{2}{3}] & [1,\frac{1}{2}] & [\frac{1}{5},\frac{1}{3}]\\ [4,6] & [1,1] & [2,4] & [2,3] & [3,5] & [5,7]\\ [1,2] & [\frac{1}{4},\frac{1}{2}] & [1,1] & [\frac{1}{2},1] & [1,\frac{3}{2}] & [3,5]\\ [\frac{3}{2},3] & [\frac{1}{3},\frac{1}{2}] & [1,2] & [1,1] & [2,3] & [3,5]\\ [\frac{1}{2},1] & [\frac{1}{5},\frac{1}{3}] & [\frac{2}{3},1] & [\frac{1}{3},\frac{1}{2}] & [1,1] & [2,4]\\ [3,5] & [\frac{1}{7},\frac{1}{5}] & [\frac{1}{5},\frac{1}{3}] & [\frac{1}{5},\frac{1}{3}] & [\frac{1}{4},\frac{1}{2}] & [1,1]\end{bmatrix} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{A}_r=\begin{bmatrix}[1,1] & [2,3] & [\frac{3}{2},4] & [4,6] & [\frac{2}{3},1] & [6,8]\\ [\frac{1}{3},\frac{1}{2}] & [1,1] & [\frac{5}{2},3] & [\frac{7}{2},\frac{9}{2}] & [\frac{1}{3},\frac{2}{3}] & [5,\frac{15}{2}]\\ [\frac{1}{4},\frac{2}{3}] & [\frac{1}{3},\frac{5}{2}] & [1,1] & [3,4] & [\frac{1}{6},\frac{1}{4}] & [4,\frac{9}{2}]\\ [\frac{1}{6},\frac{1}{4}] & [\frac{2}{9},\frac{2}{7}] & [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [1,1] & [\frac{1}{8},\frac{1}{7}] & [2,3]\\ [1,\frac{3}{2}] & [\frac{3}{2},3] & [4,6] & [7,8] & [1,1] & [8,9]\\ [\frac{1}{8},\frac{1}{6}] & [\frac{2}{15},\frac{1}{5}] & [\frac{2}{9},\frac{1}{4}] & [\frac{1}{3},\frac{1}{2}] & [\frac{1}{9},\frac{1}{8}] & [1,1]\end{bmatrix} \tag{18}$$

$$\boldsymbol{A}_h=\begin{bmatrix}[1,1] & [\frac{7}{2},4] & [3,4] & [4,5] & [5,6] & [6,8]\\ [\frac{1}{4},\frac{2}{7}] & [1,1] & [\frac{4}{5},1] & [2,3] & [\frac{7}{2},\frac{9}{2}] & [5,7]\\ [\frac{1}{4},\frac{1}{3}] & [1,\frac{5}{4}] & [1,1] & [\frac{5}{2},\frac{7}{2}] & [\frac{7}{2},\frac{9}{2}] & [5,\frac{15}{2}]\\ [\frac{1}{5},\frac{1}{4}] & [\frac{1}{3},\frac{1}{2}] & [\frac{2}{7},\frac{2}{5}] & [1,1] & [2,3] & [4,5]\\ [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [\frac{2}{9},\frac{2}{7}] & [\frac{2}{9},\frac{2}{7}] & [\frac{1}{3},\frac{1}{2}] & [1,1] & [2,3]\\ [\frac{1}{8},\frac{1}{6}] & [\frac{1}{7},\frac{1}{5}] & [\frac{2}{15},\frac{1}{5}] & [\frac{1}{5},\frac{1}{4}] & [\frac{1}{3},\frac{1}{2}] & [1,1]\end{bmatrix} \tag{19}$$

$$\boldsymbol{A}_w=\begin{bmatrix}[1,1] & [8,9] & [5,6] & [5,\frac{13}{2}] & [\frac{11}{2},\frac{13}{2}] & [\frac{7}{2},5]\\ [\frac{1}{9},\frac{1}{8}] & [1,1] & [\frac{1}{5},\frac{1}{3}] & [\frac{1}{4},\frac{2}{5}] & [\frac{2}{7},\frac{2}{5}] & [\frac{2}{9},\frac{2}{7}]\\ [\frac{1}{6},\frac{1}{5}] & [3,5] & [1,1] & [1,\frac{9}{5}] & [1,2] & [\frac{6}{11},1]\\ [\frac{2}{13},\frac{1}{5}] & [\frac{5}{2},4] & [\frac{5}{9},1] & [1,1] & [1,\frac{6}{5}] & [\frac{1}{2},\frac{3}{2}]\\ [\frac{2}{13},\frac{2}{11}] & [\frac{5}{2},\frac{7}{2}] & [\frac{1}{2},1] & [\frac{5}{6},1] & [1,1] & [\frac{1}{2},1]\\ [\frac{1}{5},\frac{2}{7}] & [\frac{7}{2},\frac{9}{2}] & [1,\frac{11}{6}] & [\frac{2}{3},2] & [1,2] & [1,1]\end{bmatrix} \tag{20}$$

式中：a表示航空运输；h表示铁路运输；r表示公路运输；w表示水路运输。

3.3　指标权重分析

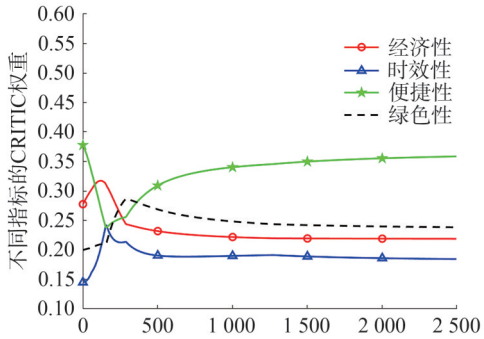
通过计算可得，航空、公路、铁路和水路的一致性检验系数k和m分别为0.854，1.035；0.928，1.043；0.933，1.046；0.968，1.077。符合区间判断矩阵的一致性良好条件，进一步可得6大指标的权重系数矩阵为

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}0.031\,4 & 0.384 & 0.158 & 0.207 & 0.111 & 0.108\\ 0.249 & 0.194 & 0.141 & 0.0571 & 0.331 & 0.027\\ 0.353 & 0.204 & 0.224 & 0.125 & 0.064\,2 & 0.029\,7\\ 0.469 & 0.034\,9 & 0.061\,5 & 0.116 & 0.099\,7 & 0.145\end{bmatrix} \tag{21}$$

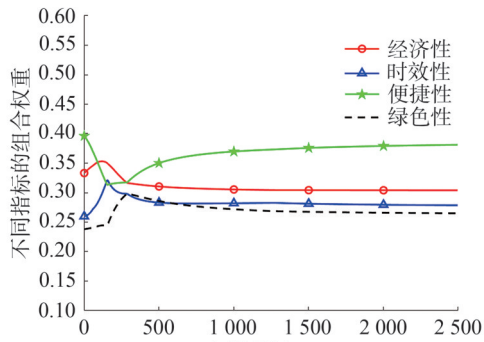
式中：行分别表示航空、公路、铁路和水路4种运输方式；列分别表示经济性、时效性、稳定性、安全性、便捷性和绿色性6种指标。可以看出，在基于IAHP的主观赋权下，航空运输的时效性特征最为显著，但同时经济性在4种运输方式中排名最后；公路运输的便捷性较为突出，但其绿色性在4种运输方式中处于最低水平；铁路运输的经济性较高，但同时也伴随着较高的碳排放；水路运输的经济性和低碳性在4种运输方式中处于最高，同时也存在时效性最低的问题。

借助经验和表2中设定的参数判断，主观赋权下各运输方式的权重符合客观规律，这也从侧面验证了IAHP法在处理此类权重时的科学性和有效性。但由于这种赋权并未结合运输方式的运距和货物的其他特性进行考虑，因此需要结合CRITIC法进行

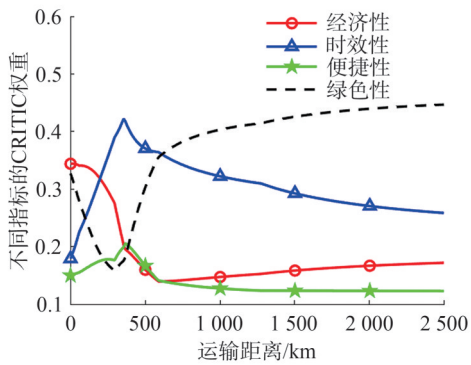
组合赋权。基于运距的各指标权重如图1所示。在CRITIC赋权下，4种运输方式的经济性、时效性、便捷性和绿色性指标关于运距、运输时效性的指标权重如图1a所示；为了进一步区分组合赋权和CRITIC法在指标权重上的区别，图1b列出IAHP-CRITIC组合赋权后的各指标权重变化趋势；同时为了对比加入水路运输后指标权重的变化趋势，根据文献[2]的模型，图1c列出空铁公基于CRITIC法赋权后各指标的变化趋势。



a　基于CRITIC的指标权重
a　Indicator weights based on CRITIC



b　基于IAHP-CRITIC组合赋权的指标权重
b　Indicator weights based on IAHP-CRITIC combined weighting



c　空铁公基于CRITIC法赋权的指标权重
c　Indicator weights of aviation, railway, and highway based on CRITIC method weighting

图1　基于运距的各指标权重

Fig.1　Weights of indicators based on transportation distances

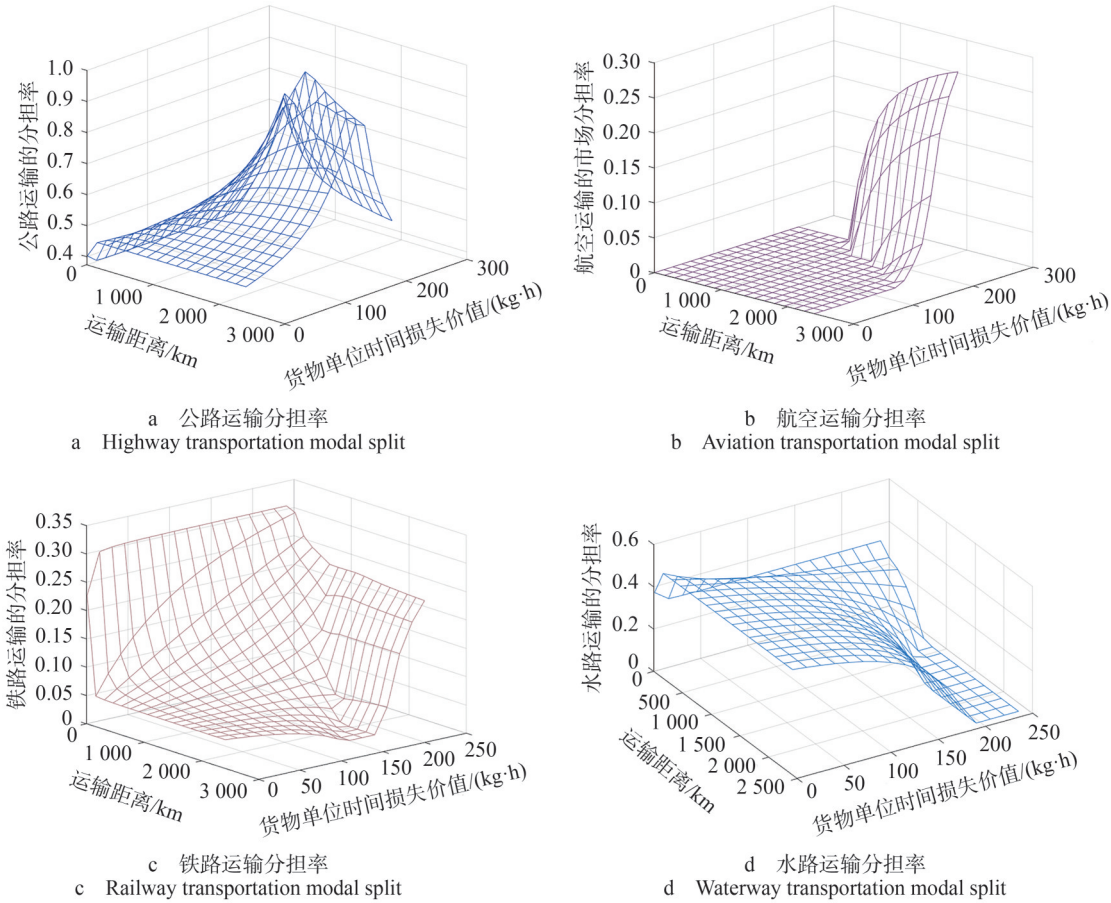
（1）对比图1a和图1b可知，当运距为100 km时，4种运输方式的便捷性、经济性、时效性、绿色性对应组合权重分别为0.345，0.35，0.288，0.244，而以上4种指标对应的CRITIC权重分别为0.29，0.316，0.187，0.208，即在组合赋权下，时效性的权重要高于绿色性，表明在0~100 km内货物更加偏向于选择时效性更强的运输方式，而对运输方式的碳排放关注力度不强，这也验证了组合赋权的优势大于单一的CRITIC赋权。对比图1b和图1c可知，当运距为100 km时，空铁公3种运输方式关于便捷性、经济性、时效性、绿色性的CRITIC权重分别为0.176，0.317，0.54，0.253，即便捷性不再成为主要的影响因素，取而代之的是时效性，之后依次是经济性、绿色性和便捷性，这表明快捷运输更加注重在较短的时间内用更低的成本完成货物运输服务，而由于水运相比于其他3种运输服务在时效性、经济性和绿色性上差异较大，因此所得到的权重变得更为均衡。

（2）随着运距的增加，到运距达到500 km及以上时，对比图1a和图1b可知，4种指标的权重逐渐趋于稳定，相比于CRITIC权重，在稳定状态下组合权重的时效性和经济性均高于绿色性，这表明货主在选择运输方式时，并未过多地关注运输方式的碳排放问题，而在CRITIC客观赋权下，碳排放应该排在时效性和经济性之前，故要加强货主对碳排放的重视程度。对比图1b和图1c可知，4种运输方式的各指标差异性不再明显，货主或运输企业不再仅从运输方式的属性判断货物的运输类型，而是要结合货物性质进行综合考虑。

3.4　不同运输方式分担率分析

我国交通运输领域虽然已建立起了一套完整的碳交易税收政策体系，但由于环境、市场等多方面因素的影响，目前碳交易税并没有明确的执行标准，仅能通过参考欧盟、瑞士等国家的碳税标准和文献[5]设定的碳税率来确定区间。首先设定不缴纳碳排放税为研究背景展开分析，不同运距和时效下各运输方式的分担率如图2所示。

（1）由图2a可知，公路运输中，在相同的货



a　公路运输分担率
a　Highway transportation modal split

b　航空运输分担率
b　Aviation transportation modal split

c　铁路运输分担率
c　Railway transportation modal split

d　水路运输分担率
d　Waterway transportation modal split

图2　不同运距和时效下各运输方式的分担率

Fig.2　Modal splits of different transportation modes under different transportation distances and timeliness

物单位时间损失价值下，分担率随着运距的增加而不断增加，且随着货物单位损失价值增加的方向不断增快，当运距达到1 501 km和货物单位损失价值达到196元/(kg·h)时，分担率达到峰值0.956，此时公路运输具有绝对优势；之后，随着运距的进一步增加，分担率开始快速下降，此时货物单位损失价值上升会加速降低公路的市场分担率，最终分担率下降到最低点0.5。

（2）由图2b可知，在航空运输中，运距小于751 km的范围内几乎没有市场份额，但随着货物单位时间损失价值的上涨和运距的增加，分担率得到了显著的提升，并且航空运输对货物的时间价值要比运距更为敏感，最终在运距为2 401 km和货物单位损失价值为241元/(kg·h)时分担率达到峰值0.28。

（3）由图2c可知，铁路运输覆盖的范围更广，在运距为0~100 km范围内，随着运距的增加，分担率迅速下滑，特别是货物单位时间损失价值越低，下滑的速度越快，但其在中高时效货运市场依旧有着较高的市场占有率；随后，当运距大于1 000 km且货物单位损失价值达181元/(kg·h)时，分担率随着货物单位时间损失价值迅速上涨达到峰值0.218。

（4）由图2d可知，水路运输中，在相同的运距下分担率随着货物单位损失价值的增加而缓慢下降，运距基本上不会引起较大的分担率波动；当货物单位损失价值到达136元/(kg·h)时，分担率随着货物单位损失价值的增加出现快速下滑，最后完全失去市场份额。

（5）对比各运输方式的市场分担率，在不缴纳碳排放税下，公路运输对运距敏感程度不高，甚至随着运距的增加分担率会出现缓慢的上升，且适用于时效性为中低的货物运输，整体而言所占的市场份额最大，达到0.559 3；水路运输较为适用于时效性较差的货物运输，且在这部分货物中所占的市场份额较大，其整体的市场份额排在第2位，达到0.316 5；在0~100km运距内，铁路运输只有在极高

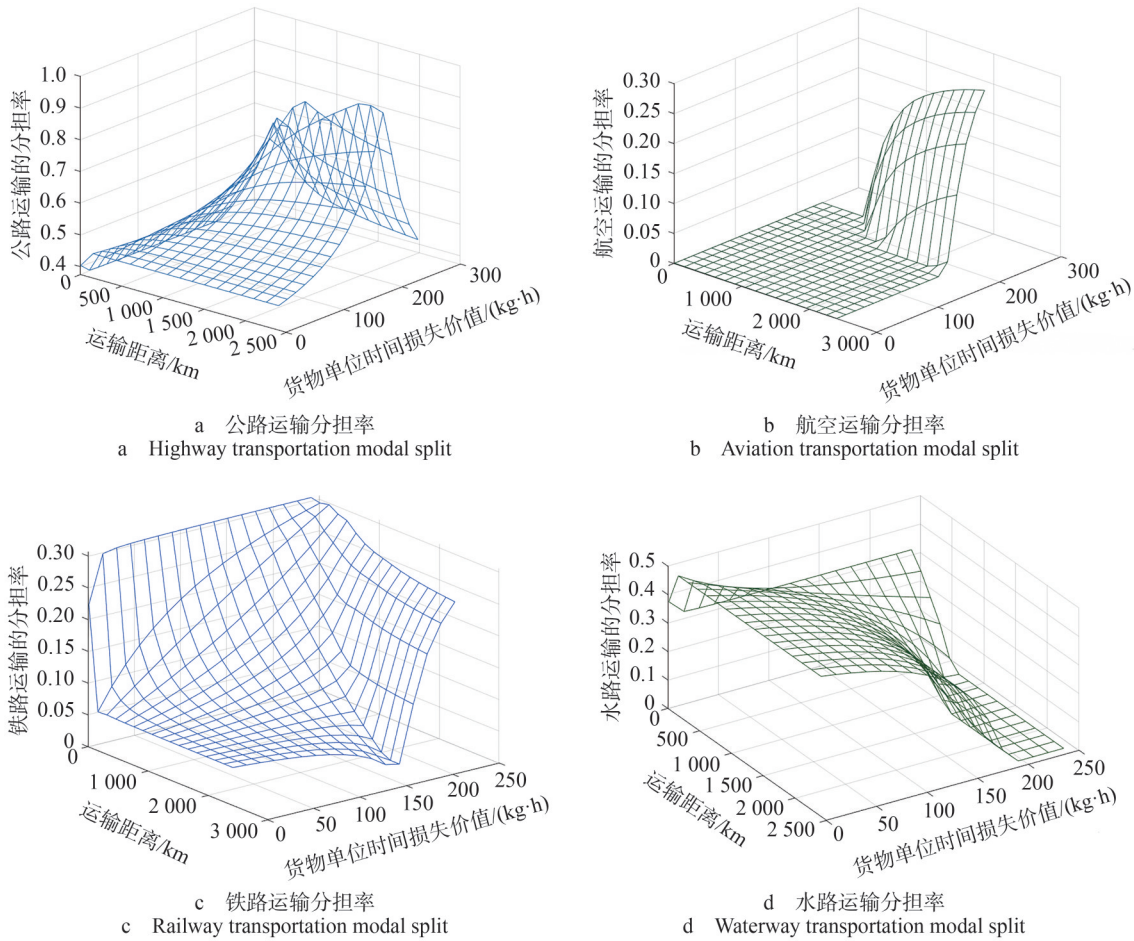
时效性货物市场中能够分担一定的市场份额，并且铁路在这一区间的低时效市场占有率较低，因此在这一运距范围内整体市场分担率与公路存在着不少的差距，随着运距的进一步增加，铁路在中低端货物运输中的优势逐渐降低，仅能依靠中高时效性货物抢占一定的市场份额，其整体的市场份额为0.104 6；航空运输仅适应于高时效性货物的长距离运输，且对运输的时效性极其敏感，市场份额最低，仅为0.019 6。虽然与目前市场分担率有一定差异，但基本符合2023年营业性货物运输量市场分担率的比重关系，这从侧面证明了模型的可靠性和科学性。

3.5　不同碳税下分担率的演变趋势

3.5.1　较低碳税下不同运输方式的分担率演变趋势

运输的经济性由运输成本决定，便捷性、时效性、安全性和稳定性由运输工具的性质决定，很难进行调整，并且降低交通运输行业碳排放是重要发展方向。通过调整碳排放的税收比例，以此来探究不同碳税政策下各运输方式的市场分担率变化趋势。碳税为0.05元/kgCO_2时的分担率演变如图3所示。

（1）在执行较低的碳税政策后，4种运输方式的市场分担率变化趋势并不会出现明显变化，但其对应的市场份额会发生一定的变化。公路运输的分担率出现较小的下滑，其峰值由原先的0.956下降到0.93，并且在峰值下的运距和单位损失价值分别为2 401 km和181元/(kg·h)，这表明执行低碳税政策后公路的平均运距将会拉长，并且会倾向于选择单位时间损失价值较低的货物；航空运输的最短运距由750 km下降到了601 km，但其所能接受的货物单位时间损失价值范围更低，即对高时效货物更为敏感，并且航空运输分担率的峰值由0.280降低到0.278，这表明在执行低碳税政策后，航空运输



a　公路运输分担率
a　Highway transportation modal split

b　航空运输分担率
b　Aviation transportation modal split

c　铁路运输分担率
c　Railway transportation modal split

d　水路运输分担率
d　Waterway transportation modal split

图3　碳税为0.05元/kgCO_2时的分担率演变

Fig.3　Evolution of modal split with carbon tax of 0.05 yuan/kgCO_2

的市场份额将会有一定程度的削减；铁路运输分担率几乎未发生明显地变化，这也说明在较低的碳税政策下，并不会对铁路运输的市场引起较大波动；水路运输对时效的敏感程度降低，这也意味着在较低的碳税政策下水路运输将会赢得更大的市场空间。

（2）相比于不缴纳碳排放税，在税率为0.05元/kgCO_2下，公路、航空、铁路和水路运输的市场分担率分别为0.551 0，0.0239 0，0.126 5和0.298 7，即在缴纳碳税背景下，航空和铁路份额会分别提高21.93%和20.94%，同时水路和公路份额将分别降低5.6%和60.49%。这是因为在缴纳碳排放税后，水路和公路运输的经济性优势将会降低，而低碳优势在较低的碳税下作用较差；相反，铁路运输和航空运输因为经济性较差，因此在执行较低的碳税后，会通过碳税提高一定的市场份额。

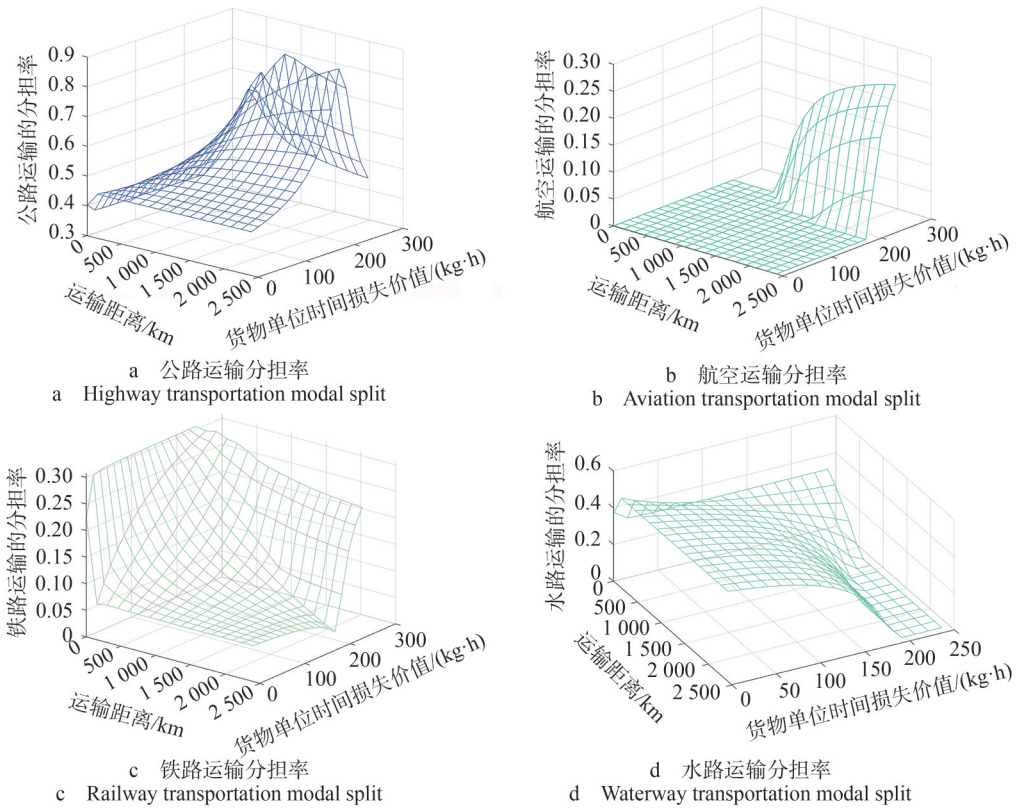
3.5.2　较高碳税下不同运输方式的分担率演变趋势

在对比较低的碳税政策后，以碳税为0.1元/kgCO_2和0.5元/kgCO_2进一步探究随着碳税的增加各种运输方式的市场分担率变化，碳税为0.1元/kgCO_2时的分担率演变如图4所示，碳税为0.5元/kgCO_2时的分担率演变如图5所示。

（1）碳税的增加并不会改变各运输方式分担率的变化趋势，但会改变不同运输方式对运距和货物单位时间损失价值的敏感程度，并且不同运输方式的敏感程度差异性很大。

（2）随着碳税比例的增加，公路运输的市场分担率会逐渐下降，由碳税为0.1元/kgCO_2时的峰值0.887降低到碳税为0.5元/kgCO_2时的0.726，其整体的市场份额也出现了下滑；而航空运输的最短运距由601 km增加到了1 051 km，其运输的货物种类时效性更高，此时航空运输在市场中占据的份额进一步削减；对于铁路运输而言，更高的碳税比例将会整体上增加铁路的市场份额，这意味着航空运输中时效性较低的部分货物将会转移到铁路，铁路运输逐渐开始分担高时效性货物；而更高的碳税意味着水路运输对货物单位时间损失价值更为迟钝，其在货物时效性方向的变化趋势将更为明显。

（3）当碳税为0.1元/kgCO_2时，公路、航空、



a　公路运输分担率
a　Highway transportation modal split

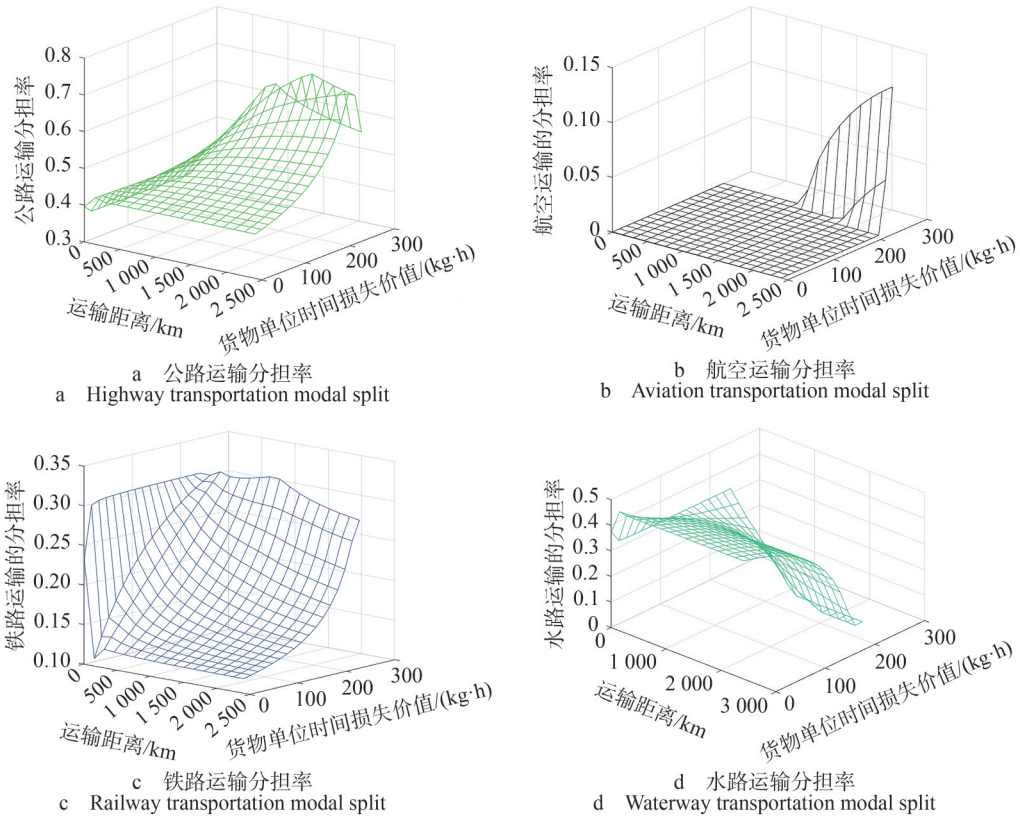
b　航空运输分担率
b　Aviation transportation modal split

c　铁路运输分担率
c　Railway transportation modal split

d　水路运输分担率
d　Waterway transportation modal split

图4　碳税为0.1元/kgCO_2时的分担率演变

Fig.4　Evolution of modal split with carbon tax of 0.1 yuan/kgCO_2



a　公路运输分担率
a　Highway transportation modal split

b　航空运输分担率
b　Aviation transportation modal split

c　铁路运输分担率
c　Railway transportation modal split

d　水路运输分担率
d　Waterway transportation modal split

图5　碳税为0.5元/kgCO_2时的分担率演变

Fig.5　Evolution of modal split with carbon tax of 0.5 yuan/kgCO_2

铁路和水路的市场分担率分别为0.542 8，0.020 4，0.136 3和0.300 5，当碳税为0.5元/kgCO_2时，4种运输方式的市场分担率分别为0.486 7，0.003 1，0.193 2和0.316 9，即较高碳税会分别将水路和铁路份额提高5.46%和41.75%，同时将公路和航空份额分别降低10.34%和84.8%。由此可以得出，在较高的碳税比例下，公路运输和航空运输的市场分担率将会下降，而铁路和水路的市场分担率将会得到上升。这是因为在执行较高的碳税政策下，公路和航空较高碳排放逐渐引起市场的关注，由此市场份额逐步减小，相反，铁路和水路的市场份额将会因为其较低的碳排放比例而增加。

4　结论

（1）研究方法方面。相比单一的CRITIC客观赋权，IAHP-CRITIC组合赋权更能反映市场的供需关系，验证了各指标客观权重的合理性，还能反映出运输市场中供需之间存在的问题，如货主对绿色碳排放的重视程度有待加强，对运输方式的便捷性重视程度过高，这种主客观对比分析的方法使得赋权更为科学有效。

（2）运输方式选择方面。不同时效货物在不同运距对运输方式的选择倾向具有较为显著的差异性。其中，公路运输在中低时效性货物中，随着运距的增加其分担率会逐渐增加，且随着单位损失价值的增加其分担率会出现显著增加，当货物单位损失价值增加到一定临界值后，分担率达到最大，随后随着时效性增加急速下降；航空运输的市场份额在4种运输方式中最小，但对600 km以上中远距离的高时效性货物极为敏感；铁路运输的市场分担率变化趋势更为复杂，更偏向于中远距离的高时效性货物，并且随着运距的增加其分担率出现缓慢下降的趋势；水路运输对运距极其不敏感，在500 km的范围内其市场份额均在三成以上，但随着运距的增加，时效性更高的货物将会不再选择水路运输。这给货主根据货物属性和运距选择运输方式提供了借鉴，运输企业也可以根据市场需求调整运力结构，从而优化货运效率。

（3）碳税政策方面。不同的碳税可以在一定程度上改变各运输方式的市场分担率。首先，不同的

碳税政策并不会改变4种运输方式的分担率变化趋势，仅会影响到不同运输方式对货物时效和运输距离的敏感程度。具体而言：相比于不执行碳税，在0.05元/kgCO_2的碳税比例下，由于各种运输方式经济性的变化，航空和铁路运输市场份额得到一定提升，而水路和公路的市场份额将会下降；相比于碳税为0.1元/kgCO_2，在0.5元/kgCO_2的碳税比例下，航空和公路的市场份额将会由于较高的碳排放因子而下降，而铁路和水路的市场份额将会得到提升。

本研究探讨了不同运输距离和货物时效性对各运输方式分担率的影响，但仍然存在局限性。进一步研究的重点，一是可以探究不同碳税对货主选择行为的影响，二是考虑货物重量、区域间交通条件等因素的影响。

参考文献：

[1] 向爱兵，何世伟，宋　瑞．中国交通运输百年发展成就、演进逻辑与基本经验[J]. 北京交通大学学报(社会科学版)，2023，22(2)：63-72.
XIANG Aibing，HE Shiwei，SONG Rui. Achievements，Evolution Logic and Basic Experiences of a Centenary-Old Traffic and Transportation Development in China[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition)，2023，22(2)：63-72.

[2] 孙宗胜，帅　斌，杨俊杰，等．客观赋权对快捷货运各方式间临界运距影响分析[J]. 交通运输系统工程与信息，2024，24(2)：45-52.
SUN Zongsheng，SHUAI Bin，YANG Junjie，et al. Impact Analysis of Objective Weighting on Critical Distance for Express Goods Transportation Modes[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2024，24(2)：45-52.

[3] 孙宗胜，帅　斌，许旻昊．低碳背景下快捷货物各运输方式间临界运距研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2023，23(6)：11-21.
SUN Zongsheng，SHUAI Bin，XU Minhao. Critical Transportation Distance Analysis for Express Goods Transportation Modes Considering Low Carbon Emissions[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2023，23(6)：11-21.

[4] 丁俊发．降低社会物流成本研究[J]. 中国流通经济，2024，38(7)：3-14.
DING Junfa. Research on Lowering Social Logistics Cost[J]. China Business and Market，2024，38(7)：3-14.

[5] 石学刚，邬林江．低碳下考虑客运需求的空铁货流分配方案优化[J]. 北京交通大学学报，2025，49(2)：25-35.
SHI Xuegang，WU Linjiang. Optimization of Air-Rail Freight Flow Allocation Scheme Considering Passenger Transport Demand under Low-Carbon Background[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2025，49(2)：25-35.

[6] KE H，XU G Y，LI C T，et al. Optimization of China's Freight Transportation Structure Based on Adaptive Genetic Algorithm under the Background of Carbon Peak[J]. Environmental Science and Pollution Research International，2023，30(36)：85087-85101.

[7] 刘倚玮，赵章荣．考虑碳排放的多式联运路径优化算法比较与分析[J]. 工业工程与管理，2022，27(5)：53-59.
LIU Yiwei，ZHAO Zhangrong. Comparison and Analysis of Optimization Algorithms for Multimodal Transportation Routes Considering Carbon Emissions[J]. Industrial Engineering and Management，2022，27(5)：53-59.

[8] 周国华，陈德捷，周芳汀，等．高速铁路与公路客运竞争的市场分担率模型研究[J]. 铁道学报，2020，42(1)：1-8.
ZHOU Guohua，CHEN Dejie，ZHOU Fangting，et al. Research on Market Share Rate Models of Passenger Transport Competition between High Speed Rail and Road[J]. Journal of the China Railway Society，2020，42(1)：1-8.

[9] 孟祥涛，张　戎，刘峻麟，等．基于广义费用模型的公铁分担率研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(5)：115-122.
MENG Xiangtao，ZHANG Rong，LIU Junlin，et al. Road and Rail Sharing Rates Based on Generalized Cost Model[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(5)：115-122.

[10] 项　昀，徐铖铖，于维杰，等．基于人口迁徙大数据的城市对外交通客运方式优势出行距离研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2020，20(1)：241-246.
XIANG Yun，XU Chengcheng，YU Weijie，et al. Dominant Trip Distance of Urban External Passenger Transport Mode Based on Big Data of Migration[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2020，20(1)：241-246.

[11] 简文良，刘肖肖，高良鹏．不同货物品类对运输时效的偏好差异性分析[J]. 铁道运输与经济，2022，44(8)：91-96，122.
JIAN Wenliang，LIU Xiaoxiao，GAO Liangpeng. Analysis of Preference Difference of Different Cargo Categories for

Transportation Timeliness[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(8)：91-96，122.

[12] YU X Q，ZHOU L Y，HUO M K，et al. Research on High Speed Railway Freight Train Organization Method Considering Different Transportation Product Demands[J]. Mathematical Problems in Engineering，2021，2021(1)：5520867.

[13] 张　涵，吕永波，任　远，等. 基于潜变量和有序Logit地铁货运分担率预测研究[J]. 地下空间与工程学报，2025，21(2)：384-392.
ZHANG Han，LYU Yongbo，REN Yuan，et al. Prediction Research of Subway Freight Sharing Rate Based on Latent Variables and Ordered Logit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2025，21(2)：384-392.

[14] 刘海洲，王利雷，周建尧，等. 融合手机信令数据的轨道交通出行分担率模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2021，21(3)：78-85.
LIU Haizhou，WANG Lilei，ZHOU Jianyao，et al. Rail Transit Trip Sharing Rate Model Combining Mobile Phone Signaling Data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2021，21(3)：78-85.

[15] LI X F，HE L，CUI Q，et al. Environmental and Economic Impact of Modal Shift Policy in China's Freight Transportation[J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2025，140：104617.

[16] 钟　鸣，赖泽强，潘晓锋，等. 长江经济带货运经济运距时空差异性及影响因素研究[J]. 交通信息与安全，2024，42(6)：133-142，162.
ZHONG Ming，LAI Zeqiang，PAN Xiaofeng，et al. A Study on Spatial-Temporal Variability and Impact Factors of Economic Distance for Freight Transport in the Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Transport Information and Safety，2024，42(6)：133-142，162.

[17] LI W Y，DONG F G，SHI M X，et al. Multi-Attribute Decision-Making Research on Investment Suitability Assessment of Hydropower-Wind-Photovoltaic-Storage Complementary System Based on Dynamic Social Network[J]. Energy Conversion and Management，2024，307：118358.

[18] 杨天建，王　星，程嗣怡，等. 基于IAHP-CRITIC-MARCOS的多种类目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术，2025，47(4)：1246-1254.
YANG Tianjian，WANG Xing，CHENG Siyi，et al. Multi-Type Target Threat Evaluation Based on IAHP-CRITIC-MARCOS[J]. Systems Engineering and Electronics，2025，47(4)：1246-1254.

[19] DING W Z，BAI X，WANG Q W，et al. Research on the Spacecraft Ground Equivalence Test Assessment Problem：A Comprehensive Assessment Method Combining Interval-Type Evaluation and Prospect-Two-Dimensional Cloud[J]. Applied Soft Computing，2024，166：111882.

[20] LI S J，MA Q F. Carbon Quota Allocation and Emission Reduction Responsibility Sharing at Provincial Level in China from Transport Industry[J]. Sustainable Futures，2025，9：100535.

[21] 赵　旭，尹熙琛，高　攀，等. 基于双层规划的水利枢纽通航拥堵收费机制研究[J]. 管理评论，2023，35(6)：288-300.
ZHAO Xu，YIN Xichen，GAO Pan，et al. Research on Navigation Congestion Charging Mechanism of Hydro-Junction Based on Bi-Level Programming[J]. Management Review，2023，35(6)：288-300.

[22] 尹浣青，蒋惠园. 不确定条件下长江绿色多式联运路径优化[J]. 北京交通大学学报，2025，49(1)：71-79.
YIN Huanqing，JIANG Huiyuan. Optimization of Green Multimodal Transport Routes in Yangtze River under Uncertain Conditions[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2025，49(1)：71-79.

(责任编辑　汪沁萱)