文章编号：1003-1421(2026)04-0042-09
引用格式：陶思宇，左露，赵悦，等.基于综合收益和碳排放的铁路综合客运枢纽城市功能开发研究[J].铁道运输与经济，2026，48(4)：42-50，71.
TAO Siyu，ZUO Lu，ZHAO Yue，et al. Research on Urban Function Development of Comprehensive Railway Passenger Transport Hub Based on Integrated Benefit and Carbon Emissions[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(4)：42-50，71.

基于综合收益和碳排放的铁路综合客运枢纽城市功能开发研究

陶思宇[1,2,3]，左　露[1,2,3]，赵　悦[4]，冯　涛[1,2,3]，甘元伟[5]

(1.西南交通大学 交通运输与物流学院，四川 成都　611756；2.西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程研究中心，四川 成都　611756；3.西南交通大学 综合交通大数据应用技术国家工程实验室，四川 成都　611756；4.大庆市交通运输局 道路运输事业发展中心，黑龙江 大庆　163000；5.中国铁路成都局集团有限公司 成都客运段，四川 成都　610082)

摘　要：基于可持续发展理念和经济发展水平，建立双目标铁路综合客运枢纽的城市功能开发体量测算模型，构建经济收益和社会效益的测算方法，分析枢纽运营期间碳排放过程，提出碳排放量测算方法。利用标量化法将目标函数无量纲化处理，将双目标规划转化为单目标规划，利用线性规划求解方法对模型进行求解，得到不同偏好下的城市功能开发体量。以重庆沙坪坝枢纽为例，分析求解结果和实际开发体量符合度验证模型有效性及实际意义。结果表明，实际开发规模高度接近模型测算的最大开发体量，两者差异仅约3.67%。这表明决策偏好更贴近于收益最大化而非碳排放量的绝对控制。所建模型可同时考虑综合收益和碳排放量，为枢纽的开发规划提供有效参考。

关键词：铁路运输；铁路综合客运枢纽；建筑碳排放；交通碳排放；综合收益；体量测算模型

中图分类号：U-9；F512　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250611001

Research on Urban Function Development of Comprehensive Railway Passenger Transport Hub Based on Integrated Benefit and Carbon Emissions

TAO Siyu[1,2,3]，ZUO Lu[1,2,3]，ZHAO Yue[4]，FENG Tao[1,2,3]，GAN Yuanwei[5]

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center of Integrated Transportation Intelligence, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3.National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 4. Daqing Municipal Transportation Bureau Road Transport Development Center, Daqing Municipal Transportation Bureau, Daqing 163000, Heilongjiang, China; 5. Chengdu Passenger Section, China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Chengdu 610082, Sichuan, China)

收稿日期：2025-06-11
通信作者：左露(2003—)，女，湖北孝感人，西南交通大学交通运输与物流学院硕士研究生。
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB4300502-3)；广西创新驱动发展专项资金项目(AA21077011-2)；国家自然科学基金项目(72501229)

Abstract: Based on the sustainable development concept and the economic development level, a measurement model for the urban function development volume of a dual-objective comprehensive railway passenger transport hub was established. A calculation method for economic and social benefit was formulated. The carbon emission process during the hub operation was analyzed, and a measurement method for the carbon emission amount was proposed. The scalarization method was used for dimensionless processing of the objective function, and the dual-objective programming was converted into single-objective programming. The model was solved via linear programming methods to obtain the urban function development volume under different preferences. By taking Chongqing Shapingba Hub as an example, the consistency between solution results and actual development volume was analyzed to verify the model's validity and practical significance. The results show that the actual development scale is highly close to the maximum development volume calculated by the model, with a deviation of only approximately 3.67%. This indicates that the decision-making preference is more inclined to benefit maximization rather than absolute carbon emission amount control. The established model can simultaneously consider integrated benefits and carbon emission amount, providing effective references for hub development and programming.

Keywords: Railway Transport; Comprehensive Railway Passenger Transport Hub; Building Carbon Emission; Traffic Carbon Emission; Integrated Benefit; Volume Calculation Model

0　引言

随着我国城市化进程的持续推进，居民生活水平不断提高，铁路综合客运枢纽的功能定位也有了相应的转变。现代化的铁路综合客运枢纽的建设目的并非只是实现交通功能，还需要实现部分城市功能，满足城市发展的土地集约化、高效化、综合化需求，利于解决人口迅速增长和高密度客流等问题。作为大型交通基础设施项目，铁路综合客运枢纽具有投资回收期长和投资力度大等特点，为缓解政府的经济压力，通过引入社会资本提高资金利用效率。与此同时，人类正面临日益严重的全球变暖趋势和环境保护问题，“碳达峰碳中和”目标已成为我国长期发展方向，当前，城市交通低碳化转型需着重从空间规划视角出发[1]，铁路综合客运枢纽集多种运输方式于一体，整体运输效率高，枢纽的建设对减少碳排放量以及推动节能减排具有积极意义[2]。

近年来，诸多学者开始研究铁路综合客运枢纽的城市功能开发。冯岑等[3]认为轨道交通枢纽的上盖物业及综合立体化开发的业态组合开发比例需根据具体限制条件和既有的开发经验确定；雷敏[4]以九龙仓在渝项目为例，分析项目定位、目标客户群和业态组合配比，探寻该项目业态组合的合理性，得出与之匹配的运营管理办法；杨涛[5]从经济效益与收益划分维度对物业开发进行分析，并对交通枢纽的建设提出建议；彭其渊等[6]利用商圈理论和相关建筑规范对综合客运枢纽上盖物业的体量开发规模进行预测；冯涛[7]进一步将城市道路交通剩余能力和城市建筑容积率纳入模型考虑范围内；陶思宇等[8]、赵悦等[9]考虑了综合收益以及建筑碳排放对枢纽城市功能的影响。

上述研究从交通能力、经济效益和建筑规范方面对枢纽的城市功能开发体量和业态分布进行研究，但在枢纽实际运营过程中，各类城市功能建筑对环境产生的影响也亟需关注。周思月[10]利用建筑软件模拟铁路车站碳排放情况并得出运营阶段碳排放量占比最大的结论；Li 等[11]在构建区域土地碳排放最小化目标函数时采取排放系数法对碳排放量进行测算。

综上所述，针对枢纽城市功能的研究，缺乏对交通诱增碳排放量的考量，在枢纽城市功能开发中考虑交通诱增碳排放量，是实现枢纽长期可持续运营、平衡经济收益与环境效益的关键前提。为此，构建考虑综合收益与碳排放量的铁路综合客运枢纽体量测算模型，系统开展模型构建、适用性验证及应用场景分析等研究，不仅为枢纽体量的科学测算提供了兼顾经济与环境效益的新路径，也为枢纽城市功能开发中协调发展质量与生态保护、提升全社会综合价值提供了理论支撑与实践参考。

1　体量测算模型

铁路综合客运枢纽各城市功能开发面积的体量测算模型，是结合交通承载力、城市规划等多因素

构建的量化分析体系，核心是确定商业、办公、住宅等功能的合理开发面积。本模型测算边界包括3部分：①枢纽产权内部(仅交通功能)，即铁路客运枢纽与城市轨道交通枢纽的建筑本体；②上盖及周边物业商业开发，包括枢纽地上的商业综合体、写字楼、酒店、住宅等上盖物业，以及周边1 km范围内的文化场馆、休闲服务设施；③间接影响范围，即枢纽一定辐射范围内因交通改善带来的间接碳排放变化区域。立体分布上，地上部分主要为商业、办公、住宅、绿化功能，地下部分主要为交通换乘、地下商业、停车场。

1.1　收益测算方法

针对商业、办公、住宅等7种不同类型的城市功能特点及对应业态，梳理其经济收益来源和社会效益来源，城市功能经济收益来源如表1所示，基于可量化角度及相应数据的可得性，建立相应的经济收益和社会效益测算方法。

表1　城市功能经济收益来源

Tab.1　Economic benefit source of urban function

城市功能类型	经济收益来源
商业功能	租赁商业面积、运营商业面积
办公功能	出售写字楼
住宅功能	出售住宅、提供物业服务
酒店功能	出租客房、提供酒店内餐饮服务
文化功能	出售日常展览表演门票、举办营业性演出
休闲服务功能	租赁小型文体场所面积
绿化功能	

其中，绿化功能的核心产出为碳汇，该产出属于生态环境效益范畴，而非直接性经济价值产出，因此暂不将其衍生的经济收益纳入评估维度。社会效益是指最大限度地利用有限的资源，满足人们日益增长的物质文化需求，也可理解为间接经济收益，包括但不限于推动社会经济发展、吸引更多客流与常住人口、提供更多就业机会、提升枢纽内住宅居民社会福利水平、提高枢纽周边不动产价值、提高枢纽内公共服务质量、改善枢纽绿化环境，以及提高政府公信度和号召力等。考虑到当且仅当部分社会效益指标处于一个合理范围时，得出的方案才能保障社会效益，因此将职住均衡度和人均公建面积作为约束条件纳入模型中，其余指标进行加和求得最终的综合收益系数。

1.2　碳排放量测算方法

1.2.1　适用条件与假设

构建的铁路综合客运枢纽城市功能开发体量测算模型，适用条件需明确界定，具体如下：模型仅适用于已投入稳定运营1 a以上、同时具备“交通集散+城市功能开发”双重属性的复合型铁路综合客运枢纽，排除仅承担单一旅客转运功能的传统铁路客站，以及处于建设阶段或开通初期的枢纽；在空间范围上，“周边间接交通能耗”的核算以枢纽稳定运营期的客流调查数据为基础，假设仅覆盖枢纽3~5 km核心辐射圈(具体半径可根据枢纽所在城市规模、人口密度进一步校准)，超出该范围的交通能耗(如跨市长途交通、枢纽辐射圈外居民日常出行能耗)不纳入核算；在功能类型上，仅针对界定的商业、办公、住宅、酒店、文化、休闲服务、绿化7类城市功能的能耗进行测算，假设枢纽无大型工业配套、危险品仓储、大型会展中心等特殊定制化功能，未涉及功能的能耗不纳入模型计算。

(1) 核算周期与参数稳定性假设。为清晰划分模型核算边界，确保测算逻辑的严谨性，需补充以下核心假设：能耗核算周期设定为“枢纽运营期典型日”，选取近1 a内无法定节假日、无暴雨暴雪等极端天气、无枢纽周边大型活动的普通工作日，且假设核算周期内枢纽能源供应结构、交通方式分担率保持稳定，若遇特殊时段或能源、交通结构突变，需重新校准参数。

(2) 建筑能耗核算范围与系数假设。建筑能耗仅核算运营期能耗，与下文中“聚焦枢纽城市功能运营阶段”的研究定位一致，不涉及建筑建设期的材料生产、运输及施工能耗，且假设建筑能耗系数(如单位面积电耗、碳排放系数)采用枢纽所在区域的平均基准值，不考虑单栋建筑的光伏屋顶、地源热泵等个性化节能改造，此类改造需单独修正参数。

(3) 周边间接交通能耗核算边界与系数假设。“周边间接交通能耗”仅源于枢纽城市功能开发带来的“诱增客流”，不包含枢纽本身的旅客集散交通，同时假设交通方式的碳排放强度基于区域交通统计数据，不考虑临时限行等短期政策调控或新能源汽车普及率骤升等技术突变的影响，长期变化需

更新系数库。

（4）基础数据来源与误差控制假设。模型输入的基础数据(如建筑容积率、道路剩余通行能力、人均公建面积)均假设来自官方统计年鉴，数据误差控制在±5%以内，若数据来源为非官方渠道，需额外进行有效性验证。

基于上述适用条件与核心假设，本模型明确不涵盖以下内容，以避免边界混淆。在阶段上，不涵盖建筑建设期、枢纽开通初期(客流/配套未稳定)及枢纽拆除期的能耗与碳排放；在空间上，不涵盖枢纽3~5 km核心辐射圈以外的交通能耗，以及枢纽产权范围外的周边独立工厂、居民区等非关联建筑的能耗；在因素上，不涵盖极端天气、大型活动导致的能耗异常，太阳能、风能等清洁能源的大规模接入，单栋建筑的个性化节能改造，以及跨市长途交通的能耗。

1.2.2　碳排放量测算

铁路综合客运枢纽的碳排放来源分为交通碳排放、建筑碳排放和其他碳排放[9]，其中交通碳排放主要指交通二氧化碳排放量，其主要来源有轨道交通、公共交通、小汽车和非机动车。基于居民出行特征数据，通过整合日均各交通方式分担率、平均出行距离及对应碳排放因子，构建交通碳排放量核算模型。具体采用多维度数据加权计算方法，将轨道交通、公交、小汽车、非机动车4种出行方式的占比、平均出行距离与其碳排放强度建立关联矩阵，最终实现交通碳排放量的定量测算。

建筑碳排放是指建筑物在全生命周期过程中直接或间接产生的碳排放量[12]。若将建筑看作一个产品，那么在建筑的建造、维修和拆除过程中产生的碳排放可看作是在产品生产过程中导致的碳排放；在建筑运行过程中，由于终端用能而产生的碳排放则可以看作产品消费过程中造成的碳排放。在城市功能的实际运行过程中，仅绿化功能不会产生碳排放且可以通过碳汇的方式吸收大气中的部分二氧化碳，其他类型的城市功能均可直接或间接产生碳排放，其中间接碳排放主要源于电力和热力的使用，直接碳排放主要源于天然气和煤等化石能源的使用。目前我国电力和热力的获取，主要依赖燃烧化石能源，仅有少量通过太阳能、风能、水能等清洁能源生产。主要采取排放系数法对碳排放量进行测算：利用铁路综合客运枢纽所在城市(区域)能源排放因子，计算建筑运行过程中消耗电能和水能产生的碳排放量，同时对其他碳排放用途以及绿化景观碳汇量进行粗略估算。铁路综合客运枢纽城市功能碳排放来源示意图如图1所示。模型中的参数及含义如表2所示。

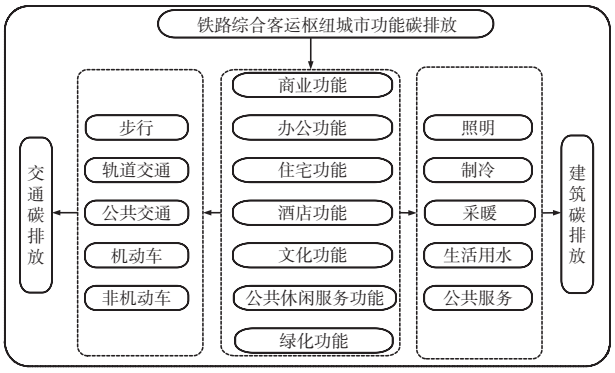

图1　铁路综合客运枢纽城市功能碳排放来源示意图

Fig.1　Carbon emission sources for urban functions in comprehensive railway passenger transport hubs

1.3　目标函数

枢纽城市功能开发体量测算模型的目标是实现枢纽经济收益和社会效益的综合收益最大化、枢纽城市功能运营过程中产生的碳排放总量最小化，因此以综合收益最大化和碳排放量最小化建立双目标函数。

$$\max F_1 = \sum_{j \in J}\left[s_j \cdot \left(\varphi_e^j + \varphi_s^j\right)\right] \tag{1}$$

$$\min F_2 = \sum_{j \in J} s_j \cdot \left[\left(c_e^j + c_w^j + c_{he}^j - c_{cs}^j\right) + ks_j \cdot \left(k_{xq}^j \cdot C_{xq} + k_{zx}^j \cdot C_{zx} + k_{gj}^j \cdot C_{gj} + k_{gd}^j \cdot C_{gd} + k_{wk}^j \cdot C_{wk}\right)\right] \tag{2}$$

式中：F_1，F_2分别为综合收益和碳排放量目标函数。

考虑到两目标函数量纲差异，采用线性归一化法对F_1和F_2进行无量纲化，使无量纲化后的F_1'和F_2'取值均位于[0，1]区间。

$$F_1' = \frac{F_1 - F_{1\min}}{F_{1\max} - F_{1\min}} \tag{3}$$

$$F_2' = \frac{F_{2\max} - F_2}{F_{2\max} - F_{2\min}} \tag{4}$$

式中：$F_{1\max}$，$F_{1\min}$为F_1在约束条件下的最大值、最小值，万元；$F_{2\max}$，$F_{2\min}$为F_2在约束条件下的最大值、最小值，10^4 kg；

表2　参数及含义

Tab.2　Parameters and corresponding meanings

类型	参数	含义
变量	s_j	第j类城市功能开发面积，分别为商业功能、办公功能、酒店功能、住宅功能、文化功能、公共休闲服务功能和绿化功能，m^2
	φ_e^j，φ_s^j	第j类城市功能的经济收益、社会效益计算系数，元/m^2
	ks_j	客流系数，第j类城市功能单位面积吸引的日均客流量
	c_e^j，c_w^j，c_{he}^j，c_{cs}^j	第j类城市功能的日均建筑净碳排放系数，分别是电能、生活用水、集中供暖所产生的碳排放，以及碳汇量，kg/m^2
	c_{xq}，c_{zx}，c_{gj}，c_{gd}，c_{wk}	机动车、非机动车、公交车、轨道交通、步行单位人公里碳排放，g/人公里
	C_{xq}，C_{zx}，C_{gj}，C_{gd}，C_{wk}	机动车、非机动车、公交车、轨道交通、步行平均碳排放，g/人
	k_{xq}^j，k_{zx}^j，k_{gj}^j，k_{gd}^j，k_{wk}^j	第j类城市功能的机动车、非机动车、公交车、轨道交通、步行的出行占比率
	s_{xq}，s_{zx}，s_{gj}，s_{gd}，s_{wk}	机动车、非机动车、公交车、轨道交通、步行的平均出行距离，km
	f_{max}	枢纽周边道路的最大剩余交通通行能力，pcu/h
	gr_j	第j类城市功能对应的交通生成率
	RW_{min}，RW_{max}	职住均衡度最小值、最大值
	p_w^j，p_r^j	第j类城市功能开发带来的单位面积就业人口数、单位面积常住人口数，人/m^2
	P_w，P_r	枢纽辐射范围内就业、常住人口总数，人
	d	枢纽辐射范围内常住人口密度，人/m^2
	pr_{rj}，pr_{bj}，pr_{cj}，pr_{tj}	第j类城市功能开发的居住用地、商务设施用地、商业设施用地以及整体用地建筑容积率
常量	β	枢纽城市功能开发占地面积，m^2
	Ar	人均公建面积，人/m^2
	p_b	枢纽商业功能开发吸引日均消费者数量，人
	T_b	枢纽开发商业功能单位面积平均营业额，元/m^2
	Acp	枢纽商业功能开发的目标客群消费能力，元/人
	IGR	枢纽所在城市规划年人均收入增长率
	p_{ti}	枢纽所在区域第三产业就业人数，人
	d_w	第三产业岗位中对写字楼的需求占比
	s_{pw}	写字楼内人均使用面积，m^2/人
	σ_n，σ_m	枢纽所在区域人口自然、机械增长量，人
	c	枢纽所在区域城镇化率
	As	枢纽所在城市居民人均居住面积，m^2/人
	δ	住宅允许空置率
	M_v	枢纽所在城市的酒店市场需求内旅游需求占比
	M_h	枢纽所在区域三星级及以上等级酒店市场占有率
	p_v	枢纽所在区域年旅客数量，人
	S_h	枢纽所在区域三星级及以上等级酒店的人均住宿面积，人/m^2
	c_h	枢纽所在区域三星级及以上等级酒店的平均入住率
	g	枢纽所在区域绿地面积增加率
集合	J	城市功能类型集合，$j \in J$

引入权重系数w_1，w_2，将双目标函数整合成单目标最大化函数。

$$F = w_1 F_1' - w_2 F_2' \tag{5}$$

式中：w_1，w_2分别为综合收益权重和碳排放权重，%。

双目标函数的构建与转化方法，主要参考以下研究与理论以确保方法学的严谨性与适配性：一是双目标函数定义借鉴赵悦等[9]“综合收益–碳排放”双目标框架，该框架已在铁路枢纽城市功能开发研究中通过实证验证，能够有效耦合经济正效益与环境负效益目标，与“站城融合”背景下枢纽开发需平衡经济与生态的核心需求高度适配；二是考虑到双目标函数量纲差异，采用线性归一化法进行无量纲化处理，使无量纲化后的取值均位于[0，1]区间，该方法参考“异质目标无量纲化”经典算法[13]，通过计算逻辑消除量纲差异，计算过程简洁且结果可解释性强，已广泛应用于交通规划、土地利用优化等双目标决策场景，能够满足多目标转化的精度需求；三是引入权重系数，将双目标函数整合成单目标最大化函数；其中权重赋值采用Li等[11]“21组梯度权重”设计思路，通过2个权重从100∶0至0∶100的梯度设置，覆盖“纯经济导向”“纯环保导向”及不同平衡态的决策场景，该设计已在基础设施规划、土地利用优化等领域验证有效性，可适配不同城市或不同开发阶段中对枢纽经济收益与碳排放控制的差异化目标偏好。

1.4　约束条件

铁路综合客运枢纽的城市功能体量测算模型还需满足一系列的约束条件，根据各约束条件的约束目的可分为整体约束和局部约束，整体约束规定铁路综合客运枢纽城市功能开发总体量上下限，局部约束则基于不同城市功能的开发需求和功能特点规定其开发体量上限。参数设定中已给定铁路综合客运枢纽城市功能类型j的取值范围，铁路综合客运枢纽的城市功能分为7种类型即J=7，为便于表示相关约束条件，此处定义7种城市功能分别对应商业、办公、酒店、住宅、文化、公共休闲服务和绿化功能的开发面积。

1.4.1　整体约束

（1）城市建筑容积率约束：建筑容积率可以有效衡量建筑用地的使用强度。在实际建设环节中，铁路综合客运枢纽内每种城市功能类型对应的建筑

都需符合当地对该类建筑的容积率要求。该约束的数学表述为

$$\min\left\{pr_{rj},\ pr_{bj},\ pr_{cj},\ pr_{tj}\right\}\cdot\beta\leqslant\sum_{j\in J}s_j\leqslant \max\left\{pr_{rj},\ pr_{bj},\ pr_{cj},\ pr_{tj}\right\}\cdot\beta \tag{6}$$

（2）道路剩余交通容量约束：铁路综合客运枢纽的城市功能开发需以道路实际最大承载能力为限，即在道路剩余交通容量的限制下进行。该约束的数学表述为

$$\sum_{j\in J}s_j\leqslant\frac{f_{\max}}{gr_j} \tag{7}$$

（3）职住均衡度约束：为确保铁路综合客运枢纽的就业和居住需求相匹配，为枢纽的可持续发展和居民社会福利提供保障，铁路综合客运枢纽的职住均衡度需处于有效范围内，该约束的数学表述为

$$\sum_{j\in J}\left(s_j\cdot p_w^j\right)\geqslant\sum_{j\in J}\left(s_j\cdot p_r^j\right)\cdot\frac{P_w\cdot RW_{\min}}{P_r} \tag{8}$$

$$\sum_{j\in J}\left(s_j\cdot p_w^j\right)\leqslant\sum_{j\in J}\left(s_j\cdot p_r^j\right)\cdot\frac{P_w\cdot RW_{\max}}{P_r} \tag{9}$$

1.4.2　局部约束

（1）人均公建面积约束：铁路综合客运枢纽内居民对区域建筑环境和使用舒适度存在需求，因此通过明确枢纽内人均公建面积标准，确保为枢纽覆盖人群提供充足公共服务，进而保障居民生活舒适度。该约束的数学表述为

$$s_5+s_6\geqslant d\cdot Ar\sum_{j\in J}s_j \tag{10}$$

（2）商业功能开发体量上限约束：铁路综合客运枢纽商业功能开发体量需与枢纽客群消费能力、其单位面积营业额相适应，同时结合枢纽所在城市的整体经济环境，依据客流消费需求设定商业功能开发体量上限，避免因过度开发导致造成成本投入冗余和资源浪费。该约束的数学表述为

$$s_1\leqslant\frac{Acp\cdot p_b}{T_b}(1+IGR) \tag{11}$$

（3）办公功能开发体量上限约束：办公功能多通过建造写字楼实现，因此铁路综合客运枢纽办公功能开发体量需与枢纽所在区域内第三产业发展程度相适配，适当开发办公功能，既能满足发展第三产业对写字楼的需求，又可引进不同规模的企业，进而推动铁路综合客运枢纽所在区域的经济发展。该约束的数学表述为

$$s_2\leqslant p_{ti}\cdot s_{pw}\cdot d_w \tag{12}$$

（4）酒店功能开发体量上限约束：由于旅游市场在酒店行业市场中占比显著[14]，因此基于旅游业对酒店行业的需求，对铁路综合客运枢纽内酒店功能开发体量上限进行预测。该约束的数学表述为

$$s_3\leqslant\frac{p_v\cdot M_h\cdot S_h\cdot c_h}{365M_v} \tag{13}$$

（5）住宅功能开发体量上限约束：选取人口增长量、住宅成交增量、人均收入增长率和住宅允许空置率4方面指标，预测铁路综合客运枢纽住宅功能的开发需求。该约束的数学表述为

$$s_4\leqslant\frac{\left[\left(\sigma_n+\sigma_m\right)\cdot As\cdot c\right]}{1-\delta}(1+IGR) \tag{14}$$

（6）绿化功能开发体量上限约束：铁路综合客运枢纽绿化功能的开发体量需要与其所在区域园林绿地面积增长率相适应。该约束的数学表述为

$$s_7\leqslant g\cdot\sum_{j\in J}s_j \tag{15}$$

综上，模型中当枢纽开发导致交通方式分担率变化时，通过分担率的动态调整，直接反映碳排放总量的变化，例如机动车分担率降低会减少高排放贡献，轨道交通分担率上升会增加低排放贡献，从而量化交通方式改变的间接碳排放影响。第j类功能单位面积吸引的日均客流量，与各交通方式平均出行距离的乘积，可反映不同功能开发带来的交通流量变化；而单位人公里碳排放则体现了单位里程的碳排放强度。当流量因开发体量调整而变化，或单位里程碳排放因交通方式转移而改变，模型会通过两者的乘积动态更新碳排放总量，实现流量与单位里程碳排放变化的关联测算。

2　案例分析

沙坪坝铁路综合客运枢纽地处沙坪坝商业核心区三峡广场旁，为沙坪坝火车站改造而成，是重庆市综合交通运输体系的重要组成部分，也是我国最大的地下综合交通枢纽。枢纽内共设7层，每层通过相互有机衔接形成便捷、立体的交通转换系统。沙坪坝枢纽城市功能辐射范围半径为3.53 km[8]，《重庆市沙坪坝区总体规划(2011—2020年)》中明确，沙坪坝火车站周边3~4 km为“站城融合核心区”，3.53 km的测算结果与规划边界一致，具备政

策合理性。同时枢纽开通后会通过客流培育、周边配套成熟度影响辐射范围。模型中采用的辐射范围半径3.53 km，其基础数据来源于枢纽开通稳定期的客流调查与土地利用数据，已排除开通初期的短期波动影响。因此，3.53 km的辐射范围半径经多维度校核，符合沙坪坝枢纽的实际客流特征与规划要求；同时，通过数据时效性控制与动态修正机制，可应对不同开通阶段的差异。

2.1　确定模型参数

模型目标函数的输入参数需结合枢纽城市功能特性、区域交通特征及能源消耗规律确定，各种城市功能类型综合收益和建筑碳排放计算系数如表3所示，各种城市功能类型不同交通方式出行比率如表4所示，各种交通方式碳排放量计算系数如表5所示。表3中日均综合收益计算系数为日均经济收益和日均社会效益计算系数之和，其中数据来源于《2017年重庆市星级酒店经营数据汇总》《沙坪坝区三峡广场商业物业市场调查分析报告》等资料，建筑碳排放量计算系数参考《建筑给水排水设计标准2019版》、国家发展和改革委员会应对气候变化司最新统计数据、《2017年重庆市统计年鉴》及相关文献[15]的数据；表4中枢纽辐射范围内各类交通方式的出行比率与平均出行距离，参考《2023年沙坪坝区居民出行调查》《2023年重庆市中心城区交通发展年度报告》及沙坪坝区实地调研数据，并结合山地城市特性确定；单位人公里碳排放系数参考城市交通系统碳排放系数测算及计算方法[16]。轨道交通的单位人公里碳排放系数(32.6 g/人公里)，该系数已考虑区域电力结构。由表5可见，相较于机动车，轨道交通的单位碳排放系数较低，已体现其大运量带来的低碳优势。模型中，当轨道交通分担率上升时，整体交通碳排放显著降低，这与实际中“优先发展轨道交通以减少交通碳足迹”的逻辑一致。

常量参数取值如表6所示。在对枢纽周围道路交通剩余能力进行预测时需以枢纽改造前的数据为参考，鉴于沙坪坝枢纽已投入使用，因此沙坪坝枢纽周围各路段流量的预测数据取最大值2.26×10^6 pcu/h为剩余交通通行能力[17]。

2.2　枢纽开发体量测算

本模型中有2个目标函数，利用标量化法将双目标规划模型转化成单目标规划模型，考虑到其量纲存在差异，需要对其分别进行无量纲化。首先分别计算出在上述约束条件下单一目标函数的最值，求得枢纽可实现的最大日均综合收益为2 997万元，最小日均综合收益为536万元；枢纽最大日均碳排

表3　各种城市功能类型综合收益和建筑碳排放计算系数

Tab.3　Calculation coefficients of integrated benefit and building carbon emissions for various urban function types

类型	φ_e^j/(元/m^2)	φ_c^j/(元/m^2)	c_e^j/(kg/m^2)	c_u^j/(kg/m^2)	c_{he}^j/(kg/m^2)	c_{cs}^j/(kg/m^2)	ks_j/(人/m^2)
j=1	247.56	8.90	0.88	8.49×10^{-4}	0	0	5.3
j=2	13.51	0.93	0.32	5.75×10^{-4}	0	0	0.7
j=3	9.42	0.55	0.24	6.85×10^{-4}	0	0	0.9
j=4	19.32	2.19	0.40	4.66×10^{-4}	0	0	0.4
j=5	10.25	0.36	0.17	6.85×10^{-4}	0	0	1.2
j=6	21.23	0.71	0.27	7.67×10^{-4}	0	0	1.8
j=7	0	0.36	0	4.11×10^{-4}	0	0.072	0.3

表4　各种城市功能类型不同交通方式出行比率　%

Tab.4　Trip ratios of different transportation modes for various urban function types

功能类型	轨道交通	公共交通	机动车	非机动车	步行
j=1	45	20	10	2	23
j=2	38	35	15	5	7
j=3	52	15	25	0	8
j=4	28	18	8	1	45
j=5	60	12	1	1	22
j=6	30	25	3	3	27
j=7	18	10	2	2	65

表5　各种交通方式碳排放量计算系数

Tab.5　Calculation factors of carbon emission amount from various transportation modes

交通方式	平均出行距离/km	单位人公里碳排放/(g/人公里)	单位碳排放/(g/人)
步行	1.00	0	0
非机动车	1.90	4.77	9.06
公共交通	2.80	55.00	154.00
机动车	3.90	146.00	569.40
轨道交通	4.30	32.60	140.18

表6　常量参数取值

Tab.6　Values of constant parameters

参数	取值	参数	取值	参数	取值
pr_{rj}	1.0~2.35	T_b/(元/m^2)	12 719	β/m^2	1.155×10^5
pr_{bj}	2.5~4.5	Acp/(元/人)	25 740	c	88%
pr_{cj}	2.0~4.5	IGR	8.5%	Ar/(m^2/人)	1.138 4
pr_{tj}	1.0~4.326	p_{ti}/人	178 497	δ	21.4%
f_{max}/(pcu/h)	2.26×10^6	s_{pw}/(m^2/人)	9	p_b/人	3.011×10^5
RW_{min}	0.908	d_w	17%	M_v	60%
RW_{max}	24	σ_n/人	−1 551	M_h	45.2%
p_r^j/(人/m^2)	2.017×10^{-3}	σ_m/人	15 765	c_h	54.38%
P_w/人	1.045×10^7	P_r/人	1.971×10^7	g	2.58×10^{-3}
d/(人/m^2)	2.803×10^{-3}	As/(m^2/人)	43.5	—	—

放量为26.30×10^4 kg，最小日均排放量为17.14×10^4 kg。

运用Python对单目标F进行求解，在各约束条件下得到F的最大值，即为同时满足枢纽运营期间综合收益最大化和碳排放量最小化时，对应的城市功能开发体量。在求解过程中，基于不同决策偏好对权重系数w_1，w_2赋值，权重系数赋值分为21组，w_1和w_2的比值分别从100取到0。在这种约束条件下，不同决策偏好下枢纽的城市功能开发体量范围为[40.53×10^4，49.76×10^4]；同理，将枢纽的整体开发容积率修改为一般情况下的数值即3.783，可得出在不同决策偏好下枢纽的城市功能开发体量范围为[40.53×10^4，43.70×10^4]，将不同决策方案下的开发体量的综合收益和碳排放量进行整合，得到枢纽开发总体量如表7所示。

由表7可以得到以下结论。

（1）碳排放约束的权重一旦达到压倒性的95%，最优开发体量的规划逻辑将发生根本性转变，方案向更严格的环境承载力区间收敛。城市功能总开发体量最大为从49.76×10^4 m^{2}转变成40.5×10^4 m^2，沙坪坝枢纽城市功能实际开发体量为48×10^4 m^2，与综合收益最大化导向的测算方案高度契合。

（2）模型测算结果与实际开发体量适配性强，两者相差仅约3.67%，精准匹配“以综合收益为核心、兼顾碳排放控制”的决策逻辑，既验证了模型的现实有效性，又为实际开发预留了合理弹性空间。

（3）双目标模型具备平衡多元诉求的核心优势。相较于单一收益导向的传统方法，该模型在保障枢纽综合收益的同时实现碳排放可控，为枢纽开发的量化决策提供了科学边界。

表7　枢纽开发总体量

Tab.7　Overall volume of hub development

w_1:w_2权重系数	总开发体量/10^4 m^2	综合收益/万元	碳排放量/10^4 kg
100:0			
95:5			
90:10			
85:15			
80:20			
75:25			
70:30			
65:35			
60:40			
55:45	49.76	2 997	26.30
50:50			
45:55			
40:60			
35:65			
30:70			
25:75			
20:80			
15:85			
10:90			
5:95			
0:100	40.53	536	17.14

3　结论

科学合理地测算铁路综合客运枢纽的城市功能开发体量，是确保其未来健康、可持续发展的前提保障。这不仅关系到枢纽自身运营效率与活力，更深刻影响着周边区域的城市形态、经济发展和社会服务效能。围绕枢纽开发中综合收益与碳排放的平衡核心问题，研究形成以下结论。

（1）构建了以“综合收益最大化”和“碳排放最小化”为核心的双目标优化模型，优化综合收益测算的精细化程度，增强碳排放核算针对性，既切实贯彻城市可持续发展理念，又在经济效益和碳排放间找到了优化平衡点。核心成果之一是构建了与城市功能开发深度耦合的碳排放测算模型。该模型通过细分交通与建筑碳排放来源，量化不同功能类型的碳排放强度，为枢纽开发提供了“体量-功能-排放”的清晰关联路径。

（2）通过对比分析发现，模型揭示了在特定决策偏好下，枢纽开发体量存在“临界点”和“稳定值”现象，且该双目标优化框架具有极强的通用性和可复制性。当决策偏好达到特定范围时，开发体量不再随容积率变化而稳定，同时通过参数本地化适配、功能类型普适性设计及决策偏好弹性调整，可灵活适配不同城市、不同发展阶段的枢纽开发需求，为决策者提供科学参考。

在未来的研究中，可以进一步拓展碳核算的覆盖维度，构建包含建筑全生命周期及精细化核算体系，提升核算精准度；结合多元投融资模式特点完善综合收益评估框架，增强方案财务可行性与实践适配性；注重枢纽客流特征与开发体量、功能配比的动态关联分析，通过精细化建模让优化结果更贴合实际运营需求。

参考文献：

[1] 邓　欣，柴铁锋，何青松等. 低碳视角下成都轨道交通中心型站点集约紧凑型空间指标阈值研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(5)：37-50.
DENG Xin，CHAI Tiefeng，HE Qingsong，et al. Threshold of Intensive and Compact Spatial Indicators for Central Rail Transit Stations in Chengdu from a Low-Carbon Perspective[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(5)：37-50.

[2] 康　禄，刘　涛，李　平. 低碳背景下的综合运输组织优化研究[J]. 铁道运输与经济，2021，43(5)：97-102.
KANG Lu，LIU Tao，LI Ping. Research on Integrated Transportation Organization Optimization under Low Carbon Background[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(5)：97-102.

[3] 冯　岑，余晓丽，王　晶，等. 轨道交通枢纽物业开发模式、业态构成及开发比例研究[J]. 综合运输，2021，43(8)：117-128.
FENG Cen，YU Xiaoli，WANG Jing，et al. Property Development and Format Composition of Rail Transit Hub：Taking Japan as an Example[J]. China Transportation Review，2021，43(8)：117-128.

[4] 雷　敏. 购物中心业态组合的研究：以九龙仓在渝项目为例[D]. 重庆：重庆大学，2016.

[5] 杨　涛. 铁路客运枢纽物业开发探究[J]. 铁道标准设计，2015，59(4)：106-111.
YANG Tao. Research on Property Development of Passenger Transport Hub[J]. Railway Standard Design，2015，59(4)：106-111.

[6] 彭其渊，陈昕梅，殷　勇，等. 考虑交通影响的综合交通枢纽上盖商业体量预测：以重庆沙坪坝综合交通枢纽为例[J]. 交通运输系统工程与信息，2016，16(4)：67-72，100.
PENG Qiyuan，CHEN Xinmei，YIN Yong，et al. Forecasting Research of Commercial Volume of Integrated Transportation Hub Property：A Case Study of Shapingba Integrated Transportation Hub in Chongqing[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2016，16(4)：67-72，100.

[7] 冯　涛. 铁路综合客运枢纽城市功能开发研究[D]. 成都：西南交通大学，2019.

[8] 陶思宇，赵　悦，冯　涛，等. 考虑综合收益的铁路综合客运枢纽物业开发研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(5)：176-185.
TAO Siyu，ZHAO Yue，FENG Tao，et al. Study on Property Development of Integrated Passenger Transport Hub in Railway Based on Comprehensive Income[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(5)：176-185.

[9] 赵　悦，陶思宇，冯　涛，等. 基于碳排放量的铁路综合客运枢纽城市功能开发研究[J]. 综合运输，2024，46(12)：26-31.
ZHAO Yue，TAO Siyu，FENG Tao，et al. Urban Function Development Based on Carbon Emission of Integrated Passenger Transport Hub in Railway[J]. China Transportation Review，2024，46(12)：26-31.

[10] 周思月. 大型铁路客站站区建筑与道路交通碳排放量化分析：以武昌火车站为例[D]. 武汉：武汉理工大学，2016.

[11] LI W，CHEN Z J，LI M C，et al. Carbon Emission and Economic Development Trade-Offs for Optimizing Land-Use Allocation in the Yangtze River Delta，China[J]. Ecological Indicators，2023，147：109950.

（下转第71页）