

城际间出行分布量预测方法

朱鸿国^{1,2}, 张祎祎³, 马壮林¹, 胡大伟¹

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 广东省道路运输管理局, 广东 广州 510075;
3. 深圳市都市交通规划设计研究院, 广东 深圳 518058)

摘 要:为了准确预测无精确现状出行 OD 矩阵的城际间出行分布量, 首先借鉴区位理论方法, 根据城市的土地利用属性和社会经济属性, 引入城市区位优势因子, 根据各城市的自身繁华程度确定城市的质因子, 根据城市的土地利用程度确定城市的吸引量因子, 根据城市之间的出行时间确定各城市的相对可达性; 其次, 根据得到的 3 类数据从城市的聚集规模因子和可达性 2 个角度量化城市区位信息, 求得各城市的产生区位影响因子和吸引区位影响因子, 并提出基于城市区位影响因子的改进重力模型, 从而得到城市间的出行分布概率矩阵; 再次, 根据 Furness 模型预测城市之间的出行分布量; 最后, 基于上述模型以珠三角地区 9 个城市间城际出行的出行分布量预测进行实证研究。结果表明: 城市的聚集规模质因子可通过社会经济指标量化, 城市间的相对可达性可采用城市间各交通方式出行所需时间的倒数量化; 改进后的重力模型无需基准年出行分布量矩阵, 利用城市的产生区位影响因子、吸引区位影响因子和相对可达性可以得到城际间出行的分布概率矩阵; 根据 Furness 模型, 经过迭代计算求得最终的出行分布量矩阵。提出的出行分布预测方法可以简化基础数据的收集, 从而极大地减少城市间居民出行调查工作量, 具有较好的普适性。

关键词:交通工程; 城际间出行; 出行分布量预测; 城市区位优势因子; Furness 模型

中图分类号: U491

文献标志码: A

Trip distribution forecasting method of intercity-travel

ZHU Hong-guo^{1,2}, ZHANG Yi-yi³, MA Zhuang-lin¹, HU Da-wei¹

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Guangdong Highway Transport Administration, Guangzhou 510075, Guangdong, China; 3. Shenzhen Urban Transport Planning & Design Institute, Shenzhen 518058, Guangdong, China)

Abstract: In order to predict the trip distribution of intercity-travel without the current accurate OD matrix. Firstly, the urban location advantage factor was introduced based on location theory method and urban land use attributes and socioeconomic attributes. The city's quality factor was determined by the city's own prosperous degree, the city's attractiveness factor was determined by the degree of urban land use, and the relative accessibility of the city was determined by the travel time between cities. Secondly, the urban location information was quantified from two aspects of the city's aggregation scale factor and accessibility on the basis of the above mentioned three types of data. The city's production location impact factors and attract location factor were respectively obtained, and the trip distribution probability matrix of different cities was obtained

by the improved gravity model. Thirdly, the trip distribution of different cities was forecast by Furness model. Finally, the trip distribution forecasting of the Pearl River Delta Region, including nine cities, was taken as an example based on the above model. The results show that city's aggregation scale quality factor can be quantified by socioeconomic indicators, accessibility between cities can be quantified by the reciprocal of the time needed for transportation between cities. The improved gravity model doesn't need the trip distribution matrix of the base year, and the trip distribution probability matrix of intercity-travel can be obtained by production factor, attract location factor and relative accessibility (reciprocal of travel time). According to Furness model, after times of iterative calculation, the final trip distribution matrix can be obtained. The trip distribution forecasting method mentioned in this paper can simplify the collection of basic data and greatly reduce the workload of traffic survey of intercity residents. So it has extensive applicability.

15 tabs, 1 fig, 20 refs.

Key words: traffic engineering; intercity-travel; trip distribution forecasting; urban location advantage factor; Furness model

0 引言

随着城市群社会经济一体化的发展,城际居民出行需求迅速增长。出行分布预测是根据各交通小区的出行产生量和出行吸引量,求得任意2个交通小区之间出行分布量的过程,其预测方法一般包括增长系数法、重力模型法等。传统的交通需求预测方法主要用于研究城市内部的居民出行行为,需要大量的交通基础数据,即通过大量的居民出行调查获得基准年的出行分布量矩阵。相对于城市内部居民出行,城际间居民出行在出行目的、出行方式选择、出行时间分布等方面均有较大差异。因此,有必要对城际间居民出行特征进行详细分析,采用合理的方法完成城际间居民出行需求预测。

目前,国内外学者对居民出行分布预测进行了大量研究,取得了一定的研究成果。Mozolina等比较了多层感知器神经网络模型和最大似然双重约束模型预测通勤出行分布的性能,结果表明多层感知器神经网络模型的预测效果好于最大似然双重约束模型,但是多层感知器神经网络模型具有不可移植性^[1];Yim等根据城市用地类型的不同将城市分为不同区域,假设各区域的出行产生率服从一定的分布,并在此基础上建立了交通分布-分配的组合模型^[2];Horner等认为城市的土地利用结构和城市人口统计特征随时间变化的同时会影响城市居民的出行行为和出行需求^[3];王元庆等认为交通小区的区位优势并不是严格随着与中心区距离的增大而向外逐渐递减,某些外围小区因为其自身功能特点也具有较高的区位优势^[4];刘术红等认为不同土地利用类型的聚集规模对交通

的影响也不相同,交通小区吸引区位势与就业岗位数、商业设施数量等相关性较大,交通小区生成区位势与居住地的聚集规模密切相关^[5];杨敏等从城市人口-土地利用-交通需求的相关关系机理出发,按用地类型分别建立交通产生和交通吸引模型,模型中引入小区区位优势因子反映小区利用强度和交通可达性对交通需求的影响^[6];石飞等选择土地利用规模、性质和强度为主要影响因素,并引入容积率概念,建立基于土地利用形态的交通生成预测模型^[7];罗志忠采用土地吸引强度对传统重力模型进行修正,从而建立了基于土地利用和出行目的的出行分布预测模型^[8];姚丽亚等引入小区魅力度修正传统的出行量分布预测模型,认为交通小区的魅力度与繁华中心的贴程度以及自身的繁华程度相关,其中,与繁华中心的贴程度可以通过与繁华中心的交通距离来量化,自身繁华程度可以用交通小区内商业资金流动、人口密集程度等社会经济指标来描述^[9];李霞等根据土地面积或容积率计算不同土地利用类型权重,结合规划年的土地利用,预测规划年的小区出行吸引量,进而推算出行生成量^[10];杨励雅等认为影响城市交通的土地利用指标主要包括平均人口密度、交通用地面积、就业岗位和居住人口比^[11];兰鹏等在充分考虑居民出行链、出行目的等影响因素的基础上,建立了基于出行目的链的出行生成-分布组合模型^[12];龙雪琴等从出行链的结构出发,结合交通小区的人口和土地利用特性,建立了出行分布预测模型^[13]。由此可见,交通小区的土地利用属性在出行分布预测方面的应用非常广泛。以上研究基本集中在城市内交通小区分析,较少涉及城市间的居民出行。

重力模型最初由 Casey 提出^[14],用于分析不同城镇间的购物行为,后来重力模型逐渐成为出行分布预测最常用的方法之一^[15-16]。由于重力模型存在一定的缺陷,许多学者对其进行了改进。杨天宝等运用综合阻抗的概念改进重力模型,可以在未获取完整 OD 调查数据的情况下,预测铁路行包运输量^[17];朱顺应等以重力模型和模糊数学理论为依据,构建了模糊重力模型,指出模糊重力模型可以解决交通分布预测中的模糊不确定性^[18];米红等将人口重心与经济中心的距离作为影响人员迁移的影响因素,提出了改进的人口迁移重力模型^[19];郭晓峰借助信息熵理论,建立了基于用地结构熵函数的广义重力模型^[20]。上述文献中尚未有采用重力模型针对城际间的出行分布量预测研究,这主要是由于城市群之间的城际出行涉及多个城市,且城际间出行方式具有多样性(公路、铁路、航空等),而现有的票务系统难以获得准确的基准年城际间居民出行分布量。

为此,本文根据珠三角地区 9 个城市的土地利用属性、社会经济属性等,引入城市区位优势因子,改进传统的重力模型,并根据改进后的重力模型,计算城际间居民出行分布概率矩阵,最后采用 Furness 模型预测城际间居民出行分布量矩阵,从而了解城际间居民出行需求,为城市群制定交通发展规划和近期交通管理策略提供理论支撑。

1 区位信息量化方法

区位理论认为城市内部各区域或与相邻城市之间均表现出不同的位置关系,并影响总体研究区域的结构。研究区域一般由中心区和外围区组成,中心区通常具有更高的建筑物密度、人流密度和更完善的公共设施等。因此,中心区相对于外围区具有更大的区位优势 and 明显的聚集效应。本文引入区位优势对各城市的土地利用及其聚集效应进行量化,以提高交通需求预测的准确性。

城市的区位信息量化主要包含 2 个方面的内容:该城市在整个研究区域中的相对位置,即城市的相对可达性;各城市的自身特点,即城市的土地利用结构和社会经济发展程度。

城市相对可达性的量化主要考虑 3 个方面的内容:交通成本(包括城市间的出行时间、出行费用等方面);端点吸引力(包括始、终点城市的经济发展水平、就业岗位数等);端点数的选择(包括一个城市与另外多个城市之间或一个城市与另一个城市之间)。

城市的土地利用结构和社会经济发展程度主要

通过综合聚集规模量化。其中综合聚集规模因子包含 2 个方面的内容:聚集规模质因子 q ,可以用来衡量经济活动聚集规模质的水平值;聚集规模量因子 s ,可以用来衡量经济活动聚集规模量的水平值,包括聚集规模产生量因子 s^s 和聚集规模吸引量因子 s^a 。

区位优势是城市间出行产生和出行吸引的量化描述,与城市的相对可达性成正比,也与城市的用地聚类成正比,其计算公式为

$$L_i = kb_i^\theta a_i^\chi (q_i s_i)^\delta \quad (1)$$

式中: L_i 为第 i 个城市的区位优势; b_i 为第 i 个城市的其他因素; a_i 为第 i 个城市的可达性; q_i 为第 i 个城市的聚集规模质因子; s_i 为第 i 个城市的聚集规模量因子; k 为比例系数; θ, χ, δ 为弹性系数。

第 i 个城市的相对区位优势 Y_i 是指城市 i 的区位优势 L_i 与基准城市的区位优势 L_0 的比值,即

$$Y_i = L_i / L_0 \quad (2)$$

相对区位优势反映了其他各城市和基准城市在土地聚集规模、繁华程度等自身特点方面的相对大小,因此第 i 个城市的相对区位优势可以用城市的可达性、聚集规模质因子、聚集规模量因子及其他因素表示,即

$$Y_i = \frac{kb_i^\theta a_i^\chi (q_i s_i)^\delta}{kb_0^\theta a_0^\chi (q_0 s_0)^\delta} \quad (3)$$

式中: b_0 为基准城市的其他因素; a_0 为基准城市的可达性; q_0 为基准城市的聚集规模质因子; s_0 为基准城市的聚集规模量因子。

为了计算简便,假设第 i 个城市的区位优势与基准城市区位优势的其他影响因素相等,即 $b_i = b_0$,令第 i 个城市与基准城市的交通可达性、聚集规模质因子和聚集规模量因子满足

$$A_i = \frac{a_i}{a_0}, Q_i = \frac{q_i}{q_0}, S_i = \frac{s_i}{s_0} \quad (4)$$

式中: A_i 为第 i 个城市的相对可达性; Q_i 为第 i 个城市的相对聚集规模质因子; S_i 为第 i 个城市的相对聚集规模量因子。

第 i 个城市的相对区位优势可简化为

$$Y_i = A_i^\chi (Q_i S_i)^\delta \quad (5)$$

由于不同城市的土地利用类型和规模均存在差异,如居住用地相对较多的城市,其出行产生量相对较多;而商业用地规模大的城市,其出行吸引量相对较多。因此,本文引入聚集规模产生量因子和聚集规模吸引量因子,分别计算不同城市的产生区位影响系数和吸引区位影响系数,其计算式为

$$Y_i^s = A_i^\chi (Q_i S_i^s)^\delta \quad (6)$$

$$Y_i^a = A_i^\chi (Q_i S_i^a)^\delta \quad (7)$$

式中: Y_i^a 为第*i*个城市的产生区位影响因子; S_i^a 为第*i*个城市的相对产生量因子; Y_i^a 为第*i*个城市的吸引区位影响因子; S_i^a 为第*i*个城市的相对吸引量因子。

2 出行分布预测模型

2.1 出行分布概率预测

重力模型法是进行出行分布预测最常用的方法之一,传统的重力模型的基本原理为:假设2个交通小区的出行分布量与2个小区的出行产生量和出行吸引量成正比,而与交通小区之间的出行阻抗成反比。其计算式为

$$q_{IJ} = \alpha \frac{P_I P_J}{d_{IJ}^2} \quad (8)$$

式中: q_{IJ} 为第*I*个交通小区到第*J*个交通小区的出行分布量; P_I 、 P_J 分别为第*I*、*J*个交通小区的人口总数; d_{IJ} 为第*I*个交通小区到第*J*个交通小区的距离; α 为待定系数。

由于传统的重力模型只是简单地模仿牛顿的万有引力定律,存在很多不足,因此许多学者对其进行了大量改进,主要体现在2个方面:用出行量代替人口总数;采用不同形式的出行阻抗函数。计算公式为

$$q_{IJ} = k O_I D_J^\beta f(c_{IJ}) \quad (9)$$

式中: O_I 为第*I*个交通小区的出行产生量; D_J 为第*J*个交通小区的出行吸引量; $f(c_{IJ})$ 为第*I*个交通小区到第*J*个交通小区的出行阻抗函数; β 为待定系数。

传统的重力模型需要根据未来年各交通小区的出行产生量和出行吸引量计算模型中的待定系数,然后再根据标定的重力模型和现状年的出行分布量矩阵计算未来年的出行分布量矩阵。可见,在缺乏基准年出行分布量矩阵的情况下,利用传统的重力模型无法计算出未来年的出行分布量。因此,本文借鉴区位理论,引入城市区位优势因子,修正重力模型,使修正后的重力模型适用于基准年出行分布量矩阵未知的情况。

根据修正后的重力模型可以计算出各城市间的出行分布概率矩阵。修正后重力模型的主要特点为利用区位优势系数分析各城市自身特性对居民出行分布的影响,假设出行分布量 t_{ij} 与城市区位优势系数成正比,与城市间的阻抗函数也成正比,则有

$$P_{ij} = \alpha Y_i^a Y_j^a f(c_{ij}) \quad (10)$$

式中: P_{ij} 为城市*i*、*j*之间的分布概率;为了便于计算,此处取 $\alpha=1$; $f(c_{ij})$ 为城市*i*到城市*j*的出行阻抗函数。

2.2 出行分布量预测

出行分布量矩阵的预测方法主要包括2类:增长

系数法、综合法。本文采用增长系数法中的Furness模型计算出行分布量矩阵。增长系数法一般需要基准年的出行分布量矩阵。前文已根据修正后的重力模型计算出各交通小区之间的出行分布概率矩阵,因此,可以根据出行分布概率矩阵和各城市总的出行吸引量,计算各城市间的初始出行分布量矩阵,即

$$t_{ij}^0 = \frac{P_{ij} O_i}{\sum_{j=1}^m P_{ij}} \quad (11)$$

式中: t_{ij}^0 为第*i*个城市到第*j*个城市的初始出行分布量; O_i 为第*i*个城市的出行产生量; m 为城市数量。

Furness模型假设第*I*个小区到第*J*个小区的出行分布量不仅与第*I*个小区的出行产生量有关,而且也与第*J*个小区的出行吸引量相关。Furness模型的基本思想是首先利用各城市的出行产生量和城市间的出行分布概率求得城市间的出行分布量矩阵,并使起点城市的出行产生量平衡,然后再根据各城市的出行吸引量和上一步计算所得城市间出行分布量矩阵迭代求出新的出行分布量矩阵,并使终点城市的出行吸引量平衡,其迭代计算公式为

$$t_{ij}^n = \frac{t_{ij}^{n-1} D_j}{\sum_{i=1}^m t_{ij}^{n-1}} \quad (12)$$

$$t_{ij}^{n+1} = \frac{t_{ij}^n O_i}{\sum_{j=1}^m t_{ij}^n} \quad (13)$$

式中: t_{ij}^n 为城市*i*到城市*j*的*n*次出行分布量迭代结果; D_j 为城市*j*的出行吸引量。

根据各城市的出行产生量和出行吸引量迭代求出的各城市间的出行分布量矩阵,需满足出行产生量和出行吸引量平衡的约束条件,即

$$\sum_{j=1}^m t_{ij} = O_i \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^m t_{ij} = D_j \quad (15)$$

当计算得到的相邻2次出行分布量矩阵之间的误差满足精度控制条件时,则停止迭代。精度控制条件为

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (t_{ij}^n - t_{ij}^{n-1})^2 \leq 0.1 \quad (16)$$

3 实证分析

3.1 数据来源

本文以珠三角地区广州、深圳、佛山、东莞、中山、珠海、惠州、江门和肇庆9个城市间的城际出行行为研

究对象,通过收集相关资料,获得珠三角地区 9 个城市 1 年内的城际出行产生量和出行吸引量、社会经济指标和土地利用信息。

聚集规模质因子主要通过社会经济指标来量化,具体涉及的指标有城市人均 GDP、城市非农业人口、社会消费品零售额、城市竣工建筑面积和外商直接投资金额,这 5 个指标可以通过查询珠三角地区 9 个城市的 2014 年统计年鉴获得;聚集规模产生量因子主要通过珠三角地区 9 个城市规划年的人口数量来量化;聚集规模吸引量因子主要通过珠三角地区 9 个城市规划年各市建成区总面积来量化,可以通过查询各城市的“十二五”发展规划获得。通过整理分析,珠三角地区 9 个城市的主要指标数据如表 1 所示。

表 1 珠三角地区 9 个城市的主要指标数据
Tab. 1 Main indicators data of nine cities in Pearl River Delta Region

城市	人均 GDP/ 元	城市城 镇人口/ 万人	社会消 费品零 售总额/ 亿元	竣工建 筑面积/ 10 ⁴ m ²	外商 直接 投资/ 万美元	常住 人口/ 万人	规划年 建成区 总面积/ km ²
广州	119 695	1 102.27	6 882.85	3 683.50	711 432	1 292.68	1 710.0
深圳	136 948	1 062.89	4 433.59	931.11	669 998	1 062.89	890.0
佛山	96 310	692.22	2 264.10	1 873.19	353 477	729.57	1 070.0
东莞	66 109	738.10	1 486.66	440.73	404 110	831.66	1 032.0
中山	83 393	279.30	890.55	1 003.68	132 102	317.39	468.0
珠海	104 786	139.71	720.52	598.93	237 064	159.03	210.0
惠州	57 144	310.20	857.91	1 353.42	289 227	470.00	427.0
江门	44 546	288.30	903.70	862.08	121 754	449.76	221.5
肇庆	41 479	176.25	493.12	554.19	22 384	402.21	98.2

可达性主要通过各城市之间的出行时间来量化,本文研究对象为珠三角地区 9 个城市之间的城际居民出行分布量的预测,主要考虑公路和铁路 2 种运输方式。珠三角地区 9 个城市间城际居民出行采用公路运输方式时,其出行时间见表 2。

表 2 珠三角地区 9 个城市间公路运输方式的出行时间
Tab. 2 Travel time of highway transportation mode among
nine cities in Pearl River Delta Region min

城市	广州	东莞	惠州	佛山	肇庆	江门	中山	珠海	深圳
广州		52.3	94.0	35.5	79.5	66.0	56.5	95.5	89.0
深圳	89.0	63.5	62.0	239.5	228.0	122.0	109.0	135.0	
佛山	35.5	106.5	174.0		97.5	74.0	83.0	117.0	239.5
东莞	52.2		64.5	106.5	194.0	107.0	91.0	163.0	63.5
中山	56.5	91.0	135.0	83.0	142.0	31.0		76.5	109.0
珠海	95.5	163.0	210.0	117.0	172.0	83.0	76.5		135.0
惠州	94.0	64.5		174.0	266.5	158.0	135.0	210.0	62.0
江门	66.0	107.0	158.0	74.0	104.0		31.0	83.0	122.0
肇庆	79.5	194.0	266.5	97.5		104.0	142.0	172.0	228.0

城市间的铁路运输包括高速铁路、城际铁路和普通铁路 3 种运输方式,因此,本文根据不同类型铁路运输方式的发车班次,加权求均值,可以得到铁路运输方式下珠三角地区 9 个城市间的出行时间,如表 3 所示。

表 3 珠三角地区 9 个城市间铁路运输方式的出行时间
Tab. 3 Travel time of railway transportation mode among
nine cities in Pearl River Delta Region min

城市	广州	东莞	惠州	佛山	肇庆	江门	中山	珠海	深圳
广州		42.5	67.0	30.0	42.0	47.0	28.0	79.0	54.0
深圳	54.0	57.0	40.0	354.0	268.0				
佛山	30.0	126.0	205.0		90.0				354.0
东莞	42.5		40.0	126.0	226.0				57.0
中山	28.0					7.0		42.0	
珠海	79.0						42.0		
惠州	67.0	40.0		205.0	329.0				40.0
江门	47.0						7.0		
肇庆	42.0	226.0	329.0	90.0					268.0

珠三角地区 9 个城市间的城际居民出行量指居民 1 年内往返于多个城市的出行总量,因此,假设基准年各城市的出行产生量等于出行吸引量。基准年的出行量数据可以通过查询珠三角地区 9 个城市 2014 年统计年鉴得到,用其客运总量(公路和铁路 2 种运输方式)近似代替。此处的出行产生量和出行吸引量包括珠三角地区 9 个城市内部和外部总的出行量,根据抽样的城际居民出行调查数据,可以得到珠三角地区 9 个城市内部居民出行量的比例,如表 4 所示。

表 4 珠三角地区 9 个城市交通小区划分和基准年出行量
Tab. 4 Division of nine city traffic zones in Pearl River Delta
Region and their travel volume data in base year

交通小区 编号	城市	客运总量/ 万人	基准年出 行产生量/ 万人	基准年出 行吸引量/ 万人	城市内部 出行量 比例/%
1	广州	82 518	10 974	10 974	13.3
2	深圳	198 192	8 399	8 399	4.2
3	佛山	49 060	2 514	2 514	5.1
4	东莞	78 081	6 346	6 346	8.1
5	中山	33 727	2 686	2 686	8.0
6	珠海	29 034	1 698	1 698	5.8
7	惠州	17 273	3 756	3 756	21.7
8	江门	19 906	1 074	1 074	5.4
9	肇庆	7 672	3 004	3 004	39.2

3.2 交通小区的划分

交通小区是交通需求预测最基本的统计单元,

交通小区划分的合理性将直接影响预测结果的准确性。根据交通小区划分原则(数据采集方便,均匀性由中心向外逐渐扩大充分,利用自然障碍物以及充分考虑土地利用等),按照地级市行政区域类别将珠三角地区 9 个城市划分为 9 个交通小区,结果如表 4 和图 1 所示。

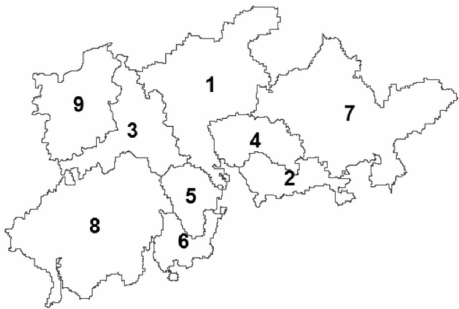


图 1 交通小区划分示意
Fig.1 Diagram of traffic zones division

3.3 出行生成量的预测

根据基准年各城市的出行产生总量和出行吸引总量,以回归分析法计算规划年各城市的出行产生总量和出行吸引总量。利用常住人口和人均 GDP 预测出行产生量和出行吸引量,其基准年数据如表 1 所示。要完成出行生成量的预测,需先预测规划年 2020 年常住人口和人均 GDP 的数值,预测结果如表 5 所示。

表 5 2020 年珠三角地区 9 个城市常住人口、人均 GDP 的预测值
Tab.5 Predicted values of permanent population and per capital GDP of nine cities in Pearl River Delta Region in 2020

交通小区编号	常住人口/万人	人均 GDP/元
1	1 770	143 068
2	1 271	190 829
3	945	119 338
4	1 071	75 305
5	427	105 216
6	174	151 574
7	594	78 947
8	485	64 919
9	432	68 680

根据上述指标的预测值和基准年的出行产生量和出行吸引量,利用软件 TransCAD 中的回归分析模型预测规划年的出行产生量和出行吸引量,预测结果如表 6 所示。由于前面假定基准年的出行产生量与出行吸引量相等,因此,采用回归分析法预测得到的规划年的出行产生量与出行吸引量也保持一致。

表 6 2020 年珠三角地区 9 个城市的出行量预测值
Tab.6 Predicted values of travel volume data of nine cities in Pearl River Delta Region in 2020

交通小区编号	规划年出行产生量/万人	规划年出行吸引量/万人
1	13 880	13 880
2	10 730	10 730
3	7 317	7 317
4	7 691	7 691
5	4 207	4 207
6	1 902	1 902
7	4 126	4 126
8	3 115	3 115
9	3 463	3 463

3.4 区位信息量化

聚集规模质因子是用于测度该城市经济活动聚集规模质的水平值。本文中 9 个城市的聚集规模质因子采用等级制确定,具体的划分等级借鉴文献[6]中的研究结果,其含义如表 7 所示。

表 7 交通小区聚集规模质因子等级划分
Tab.7 Grade division of clustering scale quality factor of traffic zone

分数	1	3	5	7	9	11
描述	很差	差	较差	较好	好	很好

选取 9 个城市人均 GDP、非农业人口、社会消费品零售额、城市竣工建筑面积和外商直接投资金额 5 个指标作为计算依据,取上述 5 个指标的几何平均值来量化各城市的综合实力,反映各城市的自身繁华程度。自身繁华程度最高即上述指标几何平均值最大的城市,其相对繁华程度定为 1,其余 8 个城市根据自身繁华程度取值与最大值比值,最终得出各城市的聚集规模质因子等级。以表 1 原始数据进行分析,结果如表 8 所示。

表 8 珠三角地区 9 个城市繁华程度和聚集规模质因子等级
Tab.8 Grade of flourishing degree and clustering scale quality factor of nine cities in Pearl River Delta Region

交通小区编号	自身繁华程度	相对繁华程度	聚集规模质因子
1	18 849.72	1.00	11
2	13 212.17	0.70	9
3	9 998.86	0.53	7
4	6 641.26	0.35	5
5	4 873.86	0.26	3
6	4 316.00	0.23	3
7	5 687.81	0.30	5
8	4 141.33	0.22	3
9	2 138.46	0.11	1

从表 8 可以看出,自身繁华程度最高的是广州,因此将广州的相对繁华程度定为 1。根据表 7 的等

级分类,完成珠三角地区 9 个城市聚集规模质因子的等级划分。

本文中 9 个城市的吸引量因子采用对各城市规划年城镇建设用地总面积进行量化,如表 9 所示。

表 9 2020 年珠三角地区 9 个城市城镇建设用地面积 S 预测值
Tab.9 Predicted values of urban construction area S of nine cities in Pearl River Delta Region in 2020

交通小区编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S/km ²	1 710.0	890.0	1 070.0	1 032.0	468.0	210.0	427.0	221.5	98.2

9 个城市之间的可达性可以用城市间的出行时间进行量化。根据表 2、表 3 中珠三角地区 9 个城市间公路、铁路 2 种运输方式的出行时间原始数据,通过求其均值得到 9 个城市间的城际居民出行时间,计算结果如表 10 所示。

表 10 珠三角地区 9 个城市间的出行时间
Tab.10 Travel times of nine cities in Pearl River Delta Region min

城市	广州	深圳	佛山	东莞	中山	珠海	惠州	江门	肇庆
广州	0.0	89.0	35.5	52.3	56.5	95.5	94.0	66.0	79.5
深圳	89.0	0.0	239.5	63.5	109.0	135.0	62.0	122.0	228.0
佛山	35.5	239.5	0.0	106.5	83.0	117.0	174.0	74.0	97.5
东莞	52.3	63.5	106.5	0.0	91.0	163.0	64.5	107.0	194.0
中山	56.5	109.0	83.0	91.0	0.0	76.5	135.0	31.0	142.0
珠海	95.5	135.0	117.0	163.0	76.5	0.0	210.0	83.0	172.0
惠州	94.0	62.0	174.0	64.5	135.0	210.0	0.0	158.0	266.5
江门	66.0	122.0	74.0	107.0	31.0	83.0	158.0	0.0	104.0
肇庆	79.5	228.0	97.5	194.0	142.0	172.0	266.5	104.0	0.0

以广州为基准城市,分别计算 9 个城市间的相对可达性。计算方法为:以广州为基准,将广州到其他城市的相对可达性定为 1,其余各城市相对可达性是各城市间出行时间的倒数与广州到其余各城市出行时间倒数的比值。计算结果见表 11。

表 11 珠三角地区 9 个城市间相对可达性
Tab.11 Relative accessibility of nine cities in Pearl River Delta Region

城市	出行时间总和/min	出行时间倒数	相对可达性
广州	568.25	0.001 8	1.000 0
深圳	1 048.00	0.001 0	0.542 2
佛山	927.00	0.001 1	0.613 0
东莞	841.75	0.001 2	0.675 1
中山	724.00	0.001 4	0.784 9
珠海	1 052.00	0.001 0	0.540 2
惠州	1 164.00	0.000 9	0.488 2
江门	745.00	0.001 3	0.762 8
肇庆	1 283.50	0.000 8	0.442 7

根据式(6)、式(7),计算各交通小区的产生区位

影响因子和吸引区位影响因子;同时,将式(3)中的参数 χ 、 δ 分别取值为 0.25 和 0.2。珠三角地区 9 个城市的区位信息量化结果如表 12 所示。

表 12 珠三角地区 9 个城市区位信息量化结果
Tab.12 Quantization results of location information of nine cities in Pearl River Delta Region

交通小区编号	相对质因子 Q_i	相对产生量因子 S_i^g	相对可达性 A_i	产生区位影响因子 Y_i^g	吸引区位影响因子 Y_i^a
1	11	1 770.0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2	9	1 271.0	0.542 2	0.771 5	0.723 4
3	7	1 071.0	0.613 0	0.713 0	0.736 0
4	5	1 032.0	0.675 1	0.700 2	0.699 8
5	3	468.0	0.784 9	0.546 2	0.560 1
6	3	210.0	0.540 2	0.415 7	0.434 6
7	5	427.0	0.488 2	0.573 9	0.540 9
8	3	221.5	0.762 8	0.556 3	0.478 9
9	1	98.2	0.442 7	0.380 8	0.285 2

3.5 出行分布量矩阵预测

采用修正后的重力模型预测城市间的出行分布概率矩阵,然后根据 Furness 模型计算城市间的出行分布量矩阵。由式(10)可知,计算出行分布概率矩阵需要的数据为:产生区位影响因子 Y_i^g 、吸引区位影响因子 Y_i^a 和出行阻抗 $f(c_{ij})$ 。其中,城市间的出行阻抗矩阵采用出行时间的倒数表示。根据表 10 可以得到珠三角地区 9 个城市间的出行阻抗矩阵,如表 13 所示。

表 13 珠三角地区 9 个城市出行阻抗矩阵
Tab.13 Travel impedance matrix of nine cities in Pearl River Delta Region

城市	广州	深圳	佛山	东莞	中山	珠海	惠州	江门	肇庆
广州	0.000 0	0.011 2	0.028 2	0.019 1	0.017 7	0.010 5	0.010 6	0.015 2	0.012 6
深圳	0.011 2	0.000 0	0.004 2	0.015 7	0.009 2	0.007 4	0.016 1	0.008 2	0.004 4
佛山	0.028 2	0.004 2	0.000 0	0.009 4	0.012 0	0.008 5	0.005 7	0.013 5	0.010 3
东莞	0.019 1	0.015 7	0.009 4	0.000 0	0.011 0	0.006 1	0.015 5	0.009 3	0.005 2
中山	0.017 7	0.009 2	0.012 0	0.011 0	0.000 0	0.013 1	0.007 4	0.032 3	0.007 0
珠海	0.010 5	0.007 4	0.008 5	0.006 1	0.013 1	0.000 0	0.004 8	0.012 0	0.005 8
惠州	0.010 6	0.016 1	0.005 7	0.015 5	0.007 4	0.004 8	0.000 0	0.006 3	0.003 8
江门	0.015 2	0.008 2	0.013 5	0.009 3	0.032 3	0.012 0	0.006 3	0.000 0	0.009 6
肇庆	0.012 6	0.004 4	0.010 3	0.005 2	0.007 0	0.005 8	0.003 8	0.009 6	0.000 0

利用表12中的产生区位影响因子和吸引区位影响因子,根据式(10)可以计算出珠三角地区 9 个城市间的出行分布概率矩阵,如下页表 14 所示。

根据式(11)~式(13),经过 17 次迭代发现,最终 2 次出行分布量矩阵的迭代结果误差小于 0.1,满足精度控制要求,从而得到珠三角地区 9 个城市间的出行分布量矩阵预测值,如下页表 15 所示。

表 14 珠三角地区 9 个城市出行分布概率矩阵
Tab. 14 Travel distribution probability matrix of nine cities in
Pearl River Delta Region

城市	广州	深圳	佛山	东莞	中山	珠海	惠州	江门	肇庆
广州	0.000 0	0.008 1	0.020 8	0.013 4	0.009 9	0.004 6	0.005 7	0.007 3	0.003 6
深圳	0.008 6	0.000 0	0.002 4	0.008 5	0.004 0	0.002 5	0.006 7	0.003 0	0.001 0
佛山	0.020 1	0.002 2	0.000 0	0.004 7	0.004 8	0.002 6	0.002 2	0.004 6	0.002 1
东莞	0.013 4	0.008 0	0.004 8	0.000 0	0.004 3	0.001 9	0.005 9	0.003 1	0.001 0
中山	0.009 7	0.003 6	0.004 8	0.004 2	0.000 0	0.003 1	0.002 2	0.008 5	0.001 1
珠海	0.004 4	0.002 2	0.002 6	0.001 8	0.003 1	0.000 0	0.001 1	0.002 4	0.000 7
惠州	0.006 1	0.006 7	0.002 4	0.006 2	0.002 4	0.001 2	0.000 0	0.001 7	0.000 6
江门	0.008 5	0.003 3	0.005 5	0.003 6	0.010 1	0.002 9	0.001 9	0.000 0	0.001 5
肇庆	0.004 8	0.001 2	0.002 9	0.001 4	0.001 5	0.001 0	0.000 8	0.001 8	0.000 0

表 15 2020 年珠三角地区 9 个城市出行分布量矩阵预测值
Tab. 15 Predicted values of travel distribution matrix of nine
cities in Pearl River Delta Region in 2020 万人

城市	广州	深圳	佛山	东莞	中山	珠海	惠州	江门	肇庆	产生量
广州	0	3 177	3 727	2 392	1 225	487	847	788	1 236	13 880
深圳	3 177	0	743	2 631	852	459	1 722	569	577	10 730
佛山	3 727	743	0	734	518	246	284	436	630	7 317
东莞	2 392	2 631	734	0	450	167	732	285	301	7 691
中山	1 225	852	518	450	0	198	193	547	224	4 207
珠海	487	459	246	167	198	0	84	136	124	1 902
惠州	847	1 722	284	732	193	84	0	123	140	4 126
江门	788	569	436	285	547	136	123	0	230	3 115
肇庆	1 236	577	630	301	224	124	140	230	0	3 463
吸引力	13 880	10 730	7 317	7 691	4 207	1 902	4 126	3 115	3 463	56 431

4 结 语

(1)根据城市的土地利用属性和社会经济属性,引入城市区位优势因子,从城市聚集规模因子和可达性 2 个角度量化城市区位信息,从而得到城市的产生区位影响因子和吸引区位影响因子。

(2)提出基于城市区位影响因子的改进重力模型,该模型的主要特点是考虑了城市的区位优势因子对居民出行分布的影响。城市间的出行分布量不仅与城市的区位影响因素有关,而且还与城市间的出行阻抗函数有关,其中出行阻抗函数用城市间不同出行方式所需出行时间加权平均值的倒数表示。该模型不需要以基准年出行分布量矩阵为基础,而是利用城市的产生区位影响因子、吸引区位影响因子和相对可达性得到城际出行分布的概率,从而得到城市间的出行分布概率矩阵。

(3)相比于城市内部出行,城际间出行的基础数据获取难度较大,采用传统的调查方法难以获得完整的城际间基准年的出行分布量矩阵,因此采用各

城市统计年鉴中的数据进行近似计算可较便利地获得城际间出行分布量矩阵。运用 Furness 模型预测城际出行分布量,经过迭代计算求得最终的出行分布量矩阵,以误差 0.1 作为精度控制的要求。

(4)本文方法极大地减少了城际间居民出行调查的工作量,具有较好的普适性,但是各城市的出行产生量和出行吸引力的估算相对简单,后续将进一步深入研究,从而准确确定各城市的出行产生量和出行吸引力。

参考文献:
References:

[1] MOZOLINA M, THILLB J C, USERYC E L. Trip distribution forecasting with multiplayer perceptron neural networks: A critical evaluation[J]. Transportation Research Part B, 2000, 34(1): 53-73.

[2] YIM K K W, WONG S C, CHEN A, et al. A reliability-based land use and transportation optimization model[J]. Transportation Research Part C, 2011, 19(2): 351-362.

[3] HORNER M W, SCHLEITH D. Analyzing temporal changes in land-use-transportation relationships: A LEHD-based approach[J]. Applied Geography, 2012, 35(1/2): 491-498.

[4] 王元庆,张福勇,王圆圆. 产生率法区位影响修正方法研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 87-91.
WANG Yuan-qing, ZHANG Fu-yong, WANG Yuan-yuan. Study of location impact in applying trip generation rate method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 87-91.

[5] 刘术红,吴家友,王艳军,等. 城市土地利用量化评价方法及其应用研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(12): 1736-1738.
LIU Shu-hong, WU Jia-you, WANG Yan-jun, et al. Study on urban land using quantitative analysis method and application[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(12): 1736-1738.

[6] 杨 敏,陈学武,王 炜,等. 基于人口和土地利用的城市新区交通生成预测模型[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2005, 35(5): 815-819.
YANG Min, CHEN Xue-wu, WANG Wei, et al. Trip generation forecasting model of new district based on urban population and land use[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(5): 815-819.

[7] 石 飞,江 薇,王 炜,等. 基于土地利用形态的交通生成预测理论方法研究[J]. 土木工程学报, 2005,

- 38(3):115-118,124.
- SHI Fei,JIANG Wei,WANG Wei,et al. Research on forecast method for traffic creating based on characteristic of land utilizing[J]. China Civil Engineering Journal,2005,38(3):115-118,124.
- [8] 罗志忠. 基于土地利用的城市交通需求分析研究[D]. 西安:长安大学,2006.
- LUO Zhi-zhong. Analysis and study on urban traffic demands in terms of the land use[D]. Xi'an:Chang'an University,2006.
- [9] 姚丽亚,关宏志. 基于目的地魅力度的出行生成/分布联合模型[J]. 北京工业大学学报,2007,33(11):1777-1781.
- YAO Li-ya, GUAN Hong-zhi. Combined model of trip generation and trip distribution based on destination fascination[J]. Journal of Beijing University of Technology,2007,33(11):1777-1781.
- [10] 李霞,邵春福,贾洪飞. 土地利用与居民出行生成模型及其参数标定[J]. 吉林大学学报:工学版,2007,37(6):1300-1303.
- LI Xia,SHAO Chun-fu,JIA Hong-fei. Land use and resident trip generation model and its parameter calibration[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition,2007,37(6):1300-1303.
- [11] 杨励雅,邵春福. 城市交通与土地利用协调关系的数据包络分析模型[J]. 交通运输工程学报,2007,7(6):107-112.
- YANG Li-ya, SHAO Chun-fu. Data envelopment analysis model of harmonious relationship between urban traffic and land use[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2007,7(6):107-112.
- [12] 兰鹏,高跃文,韩宝明. 基于出行目的链的出行生成-分布组合模型分析[J]. 数学的实践与认识,2011,41(13):94-98.
- LAN Peng,GAO Yue-wen,HAN Bao-ming. Study on trip origination-distribution combined model based on the chain of travel's purpose[J]. Mathematics in Practice and Theory,2011,41(13):94-98.
- [13] 龙雪琴,关宏志,赵昕,等. 基于土地利用和出行链的出行分布量预测方法[J]. 中国公路学报,2014,27(1):107-112.
- LONG Xue-qin, GUAN Hong-zhi, ZHAO Xin, et al. Forecast method for trip distribution based on land use and trip chain[J]. China Journal of Highway and Transportation,2014,27(1):107-112.
- [14] CASEY H J. Application to traffic engineering of the law of retail gravitation[J]. Traffic Quarterly,1955,9:23-25.
- [15] FLORIAN M,NGUYEN S,FERLAND J. On the combined distribution assignment of traffic[J]. Transportation Science,1975(9):43-53.
- [16] 彭辉,魏金丽,陈宽民. 运输通道公路旅客中长距离 OD 模型构造及分段客运量预测[J]. 中国公路学报,2006,19(2):101-105.
- PENG Hui, WEI Jin-li, CHEN Kuan-min. Construction of OD model of middle and long distance highway trips and prediction of segment passenger volume of transport corridor[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(2):101-105.
- [17] 杨天宝,刘军. 应用改进重力模型法预测铁路行包 OD 运量的研究[J]. 铁道运输与经济,2006(3):84-87.
- YANG Tian-bao, LIU Jun. Study on applying improved gravity model to forecast the OD freight volume of railway luggage and parcel[J]. Railway Transport and Economy,2006(3):84-87.
- [18] 朱顺应,管菊香,王红,等. 交通分布预测模糊重力模型[J]. 东南大学学报:自然科学版,2008,38(4):727-751.
- ZHU Shun-ying, GUAN Ju-xiang, WANG Hong, et al. Fuzzy gravity model of traffic distribution forecast[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition,2008,38(4):727-751.
- [19] 米红,周伟,史文钊. 人口迁移重力模型的修正及其应用[J]. 人口研究,2009,33(4):99-104.
- MI Hong, ZHOU Wei, SHI Wen-zhao. Modified gravity model of population migration and its application[J]. Population Research,2009,33(4):99-104.
- [20] 郭晓峰. 引入土地结构熵参数的出行分布预测广义重力模型研究[J]. 交通信息与安全,2014,32(4):1-7,13.
- GUO Xiao-feng. Generalized gravity model of land structure entropy parameter for trip distribution prediction[J]. Journal of Transportation Information and Safety,2014,32(4):1-7,13.