

# 大城市客运铁路枢纽客流分配模型

寇俊, 顾保南\*

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 不同时段内, 不同区位的旅客会根据不同的接驳方式及城际列车班次进行城际出行。只根据城际间的出行成本无法准确地刻画旅客的出行。在已知不同时段内城市间各分区OD客流、城际列车时刻表和铁路枢纽布局的前提下, 构建城市内接驳交通网络; 利用多项Logit模型, 建立各个交通分区到铁路车站的接驳子模型; 进而利用列车时刻表得到城际出行成本, 并考虑列车拥挤造成的成本增加, 根据总成本最小原则及接驳子模型, 构建分时段的铁路枢纽客流分配模型。通过改进的MSA算法进行求解, 得到各时段内各交通分区到铁路车站、以及铁路车站之间的客流量。最后通过算例, 对方法的可行性及有效性进行了验证。

**关键词:** 铁路运输; 客流分配; 接驳子模型; 时段划分; 列车时刻表; 改进MSA算法

## Modeling the Passenger Flow Assignment of Railway Hub Stations in Metropolis

KOU Jun, GU Bao-nan

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In different periods, the passengers of different location will take an intercity travel through various access modes and different frequency of trains. It can't describe passengers' travel accurately only according to the inter-city travel costs. Therefore, with the premise that the OD passenger flow between traffic zones of two cities, intercity train timetable, and railway hub layout are known, it constructed the access traffic network in the city to get the access cost from traffic zones to railway stations and used multinomial Logit model to form the access submodel. Then it used the train timetable to get the intercity travel cost and considered the added cost caused by crowded passengers. According to the principle of minimum total cost and the access submodel, it formed the passenger flow assignment model in different periods, and got the passenger flow between traffic zones and railway stations and between railway stations through improved MSA algorithm. Finally, a numerical example shows the feasibility and validity of the method.

**Keywords:** railway transportation; passenger flow assignment; access submodel; time division; train timetable; MSA algorithm

### 0 引言

我国高速铁路快速发展, 城市内会有多个铁路车站来提供不同类型的铁路列车。随着城际铁路列车速度越来越快, 旅客在城市间的出行时间变短, 但城市内接驳铁路车站的时间随城市的扩大而增加, 因而城际出行时两端接驳的时间占总出行时间的比重在增加; 再者, 城际总出行时间的各

个组成部分的计算较为粗略, 这样会对城际客流预测的准确性产生影响。

城际出行时间主要包括两端接驳时间及城际时间3个部分。对于接驳交通方式效用的构成项, 国外的研究<sup>[1-3]</sup>重点在于不同模型的比较和参数的标定结果比较, 效用项所包含的范围很广, 涉及到宏观、微观等方面, 众多因素的干扰可能会使最本

收稿日期: 2017-08-08

修回日期: 2017-09-17

录用日期: 2017-10-09

作者简介: 寇俊(1989-), 男, 山西朔州人, 博士生。

\*通信作者: gbnyyh@163.com

质因素的影响程度降低,其中对于时间费用等变量,基本上由调查得到,而调查对象层次不齐,差异性较大,因此,忽略了效用项可获得性的方法无法适用于国内.而国内对于铁路出行接驳端的效用研究较少,开始的研究并未考虑接驳端的影响<sup>[4]</sup>,后来虽然有考虑,但是具体算法并不明确,因为不同交通分区规则下的接驳交通方式、计算方式可能有所不同,只是简单的罗列出接驳时间和费用,并不能有效地通过计算获得<sup>[5]</sup>.其中辛文慧<sup>[6]</sup>考虑的因素很多,但是很难获得,导致模型的实用性难以保证.

对于整个城际出行链的效用,由于国外城市面积较小,铁路车站较多,研究中考虑的多是城市内部的出行,时间费用等通过调查获得,与接驳端相似,难以适用于国内.而国内对于城际间出行的研究中,一类是通过量化城际出行效用来进行方式划分<sup>[7]</sup>;一类是抽象城际间路段<sup>[8-9]</sup>,但未考虑交通分区及不同时段下的接驳端,使得客流分配的有效性及其准确性降低.研究中考虑时刻表的文献较少,文献[10]通过时刻表即列车运行图来表征城市间的出行时间,但没有考虑接驳端的影响.

因此,基于以上问题,本文在研究城际客流分配时,一是考虑不同时段下,接驳交通方式的特征及时段内铁路时刻表的表征;二是考虑不同时段内,各个车站与各个交通分区之间的接驳关系;三是考虑不同时段内,城际出行总成本对客流分配的影响.提出适用于城市内多个铁路车站布局下的客流分配模型,为城际铁路客流预测提供依据.

## 1 建模基础工作

### 1.1 城市交通分区

不同时段内,城市中不同交通分区内的旅客到达铁路车站采用的接驳交通方式及其时间等成本不同,有必要对城市进行分区.

在城市道路交通规划和地铁线网规划的研究中,采用模糊聚类等分析方法对交通小区的划分及合并进行理论研究<sup>[11-12]</sup>,通常划分较细;而对于城际通道内的铁路出行,如果沿用道路交通或地铁规划时的分区,这种因数据来源及计算工作量巨大等原因,在多个城市的铁路线路规划设计中

难以实用,因此采用何种分区规则有待讨论.

### 1.2 城市客运铁路枢纽网络构建

城市客运铁路枢纽网络包含城市内接驳交通段及城市间铁路线路.考虑到大城市接驳距离较大,城市内的接驳出行所构建的接驳交通网络主要为机动方式,包含地铁、公交、快速路、主干道、次干道及支路网络.如图1为分区到火车站的示意图.

除了春运等特殊时期下可能因为购票困难而选择中途换乘之外,旅客一般都会首选直达列车,因此,本文假定城际之间的铁路网络只包括出发、到达车站及之间的铁路线路.如图1中两城市间的铁路示意图.

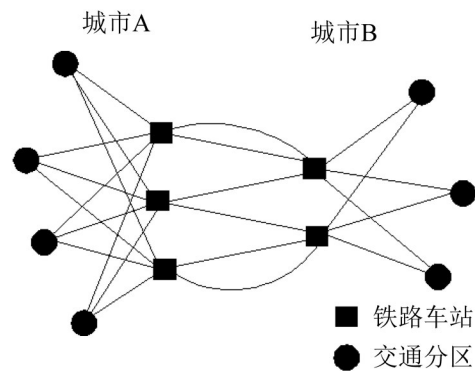


图1 城市间分区及铁路枢纽车站关系示意图

Fig. 1 The relationship between traffic zones and railway hub stations diagram

## 2 出行成本计算模型

本文在考虑城市之间的出行时间和费用的基础上,依据第1节中接驳网络的构建,在成本函数中加入城市内部接驳成本,并且通过列车时刻表来简化城际之间列车的成本.

### 2.1 时段划分

不同的时段内,两端城市内的接驳交通方式的种类及相应的网络特性会有所差异,即不同的交通分区内,接驳交通方式的有无及相应的时间费用等差异较大,如夜班公交车的分布及地铁的首末班车时间.而且,不同时段内,各铁路车站开行的列车班次不同,每班列车的等级、途中走行时间及票价等都会有所差异.因此,在铁路列车时刻表,接驳交通方式及交通分区确定的基础上,需要

考虑不同时间段对总出行成本的影响。1天内的时段划分越细,对于客流分配的结果越精确,同时工作量越大。

## 2.2 接驳子模型

根据建立的城市内接驳交通网络,建立接驳端的成本子模型,作为整个出行成本的一部分,包含的成本项有各接驳交通方式时间及费用。

根据Logit模型对各种接驳方式的系数进行标定,得到各个分区各种接驳方式的概率,将概率作为权重,加权得到出发、到达端各个分区到达各个车站的接驳成本。

以下以出发端为例,介绍接驳子模型的各个组成部分,首先各接驳方式的概率为

$$P_{Ox_i} = \frac{e^{V_{Ox_i}}}{\sum_j e^{V_{Ox_j}}} \quad (1)$$

$$V_{Ox_i} = \beta_{Ox_{i1}} T_{Ox_i} + \beta_{Ox_{i2}} F_{Ox_i} \quad (2)$$

式中: $P_{Ox_i}$ 为出发端各接驳方式的选择概率; $V_{Ox_i}$ 为出发端各接驳方式的效用; $\beta_{Ox_{i1}}, \beta_{Ox_{i2}}$ 为需标定的参数; $T_{Ox_i}, F_{Ox_i}$ 分别为各接驳方式的时间(h)及费用(元)。

则出发端各个分区到各个车站的接驳子模型为

$$C_{OxM, r} = \sum P_{Ox_i} (T_{Ox_i} \cdot \text{VOT} + F_{Ox_i}) \quad (3)$$

式中: $C_{OxM, r}$ 为出发端分区M到出发车站 $R_{or}$ 的接驳成本(元);VOT为时间价值(元/h)。

到达端接驳成本 $C_{DxN, j}$ 同理。对于各接驳方式的时间及费用计算方法参考文献[13],此处不做赘述。

## 2.3 铁路枢纽出行成本

除了接驳端的成本之外,城市内部的成本还包括铁路枢纽车站的成本,主要包含到达车站后的购取票时间、候车时间、上车时间,由于每个人的上述3项时间千差万别,同时考虑到列车时刻表对出行的约束,则上述3项时间可简化为抵达车站到发车时刻之间的时间,具体为

$$t_{rs} = t_{\text{ticket}} + t_{\text{hall}} + t_{\text{board}} = T_d - T_a \quad (4)$$

式中: $t_{rs}$ 为铁路枢纽车站的时间; $t_{\text{ticket}}$ 为购取票时间; $t_{\text{hall}}$ 为候车厅等待时间; $t_{\text{board}}$ 为上车时间; $T_d$ 为旅客到达车站的时刻; $T_a$ 为列车出发时刻。

时刻表的引入,可以直接获得城市间的时间及费用成本。则城市间的车上时间表达式为

$$t_l = T_{\text{RD}} - T_{\text{RO}} \quad (5)$$

式中: $T_{\text{RD}}$ 为列车到达时刻; $T_{\text{RO}}$ 为列车出发时刻。

虽然在铁路路段中,乘车时间和票价固定,但随着列车载客量及旅行时间的增加,特别是当列车载客量大于列车定员甚至接近坐席及站席总数时,旅客在车厢内的舒适度会显著降低。因此,将由于列车拥挤而导致的旅客舒适度降低折算为城市间的拥挤出行成本,借鉴“BPR”函数的思想,构建城际路段拥挤时间成本函数为

$$t_{lx}(x_l) = t_l \left[ 1 + \alpha \left( \frac{x_l}{S_c + S_s} \right)^\beta \right] \quad (6)$$

式中: $x_l$ 为列车在铁路路段 $l$ 上的客流量; $t_{lx}(x_l)$ 为考虑拥挤的车上时间; $\alpha, \beta$ 为参数; $S_c$ 为时段内列车的定员数; $S_s$ 为列车允许的最大站立人数。

则城际间铁路出行成本为

$$C_{rk} = \text{VOT} \cdot (t_{rs} + t_{lx}(x_l)) + F_k \quad (7)$$

式中: $F_k$ 为铁路出行费用,即各列车班次票价。

由上可得,1个人的总出行成本为

$$C_{ij, rk}(x) = C_{OxM, r} + C_{rk} + C_{DxN, j} \quad (8)$$

式中: $C_{ij, rk}(x)$ 为第 $i$ 个出发分区通过第 $r$ 个出发车站的第 $k$ 次列车到达第 $j$ 个到达分区的总出行成本(元)。

## 3 客流分配模型

### 3.1 基本符号定义

$T$ 为时段集合,  $T = \{T_\theta | \theta = 1, 2, 3, \dots\}$ , 每个时段内的列车班次数为 $\sigma_a$ 个; $\xi_o$ 为出发车站的接驳方式集,  $\xi_o = \{1, 2, \dots, a_o\}$ , 到达车站接驳方式同理; $O$ 为出发交通分区集合,  $O = \{O_i | i = 1, 2, 3, \dots, M\}$ ,  $M$ 个出发交通分区; $D$ 为目的交通分区集,  $D = \{D_j | j = 1, 2, 3, \dots, N\}$ ,  $N$ 个目的交通分区; $R_{or}$ 为出发车站集,  $R_{or} = \{R_{or} | r = 1, 2, 3, \dots, m\}$ ;  $R_{dr}$ 为到达车站集,  $R_{dr} = \{R_{dr} | r = 1, 2, 3, \dots, n\}$ ;  $A$ 为接驳端路段集,  $A = \{A_a | a = 1, 2, 3, \dots, M \cdot m + N \cdot n\}$ ;  $S$ 为时刻表集,  $S = \{S_{\sigma_k} | k = 1, 2, 3, \dots, \sigma\}$ ;  $L$ 为城际路段集,  $L = \{L_l | l = 1, 2, 3, \dots, e\}$ ;  $W$ 为两城市交通分区分时段OD量矩阵, 每个OD间的客流量为 $W_{ij}$ 。

### 3.2 模型建立

已知分时段下两城市交通分区之间OD, 城市

间全天的铁路列车时刻表及两城市内各铁路车站的接驳时间和费用表,以此为基础,以旅客出行总成本最小为目标函数构造客流分配模型为

$$\min Z(x) = \sum_l \int_0^{\xi_l} C_{ij,rl}(x) dx \quad (9)$$

### 3.3 模型求解

基于传统的客流分配问题及MSA算法,提出求解式(9)的改进MSA算法<sup>[14]</sup>.具体算法流程如图2所示.

约束条件:

(1) OD间各条路段上的交通总量应等于OD交通量.

$$X_{ij} = \sum_l w_{ij,l} \quad (10)$$

(2) 每列车有定员限制,尤其是对站票的数量也有要求,不可能无限制的增加车厢人数,因此,城际路段上的流量应大于等于0,且不超过列车的定员数和站席数之和.超过则此路段封闭,对其他可用路段进行分配.

$$0 \leq w_{ij,l} \leq S_c + S_s \quad (11)$$

## 4 算例

以上海—南京为背景,上海3个主要的铁路客站如图3所示,分别为1—上海火车站,2—虹桥火车站,3—上海南站.南京类似.假定采用辖区级的分区规则.假定城市间各交通分区之间不同时段

的OD量已知.  
模型变量取值:  $M=17, N=11$ , 则OD对为187个,假定每个OD对为10人;  $\xi_o = \xi_d = 4$ , 即地铁、公交、出租车、私家车;  $\theta = 12$ , 每2h时段内列车数经时刻表统计可知,  $\sigma_a = (0, 0, 4, 21, 30, 30, 29, 27, 31, 32, 21, 9)$ ; 包含K、Z、T、G、D字头列车, K/Z/T类型的城际费用取硬卧票价, G/D类型城际费用取二等座票价;  $t_n$ 取20 min; 列车坐席和站席总数取1 000个; VOT取20元/h;  $\alpha$ 取2.62,  $\beta$ 取5<sup>[14]</sup>; 迭代次数为1 000次.

根据第2节计算所得接驳成本及城际成本,构建成本矩阵,格式如表1所示,矩阵的行列数由出发、到达分区数及车站数组成,车站数则根据时段时列车时刻表班次统计,将相同出发车站进行分裂处理,得到相应的总车站点数.OD矩阵与成本

矩阵格式相同,依据OD量对应填入即可.

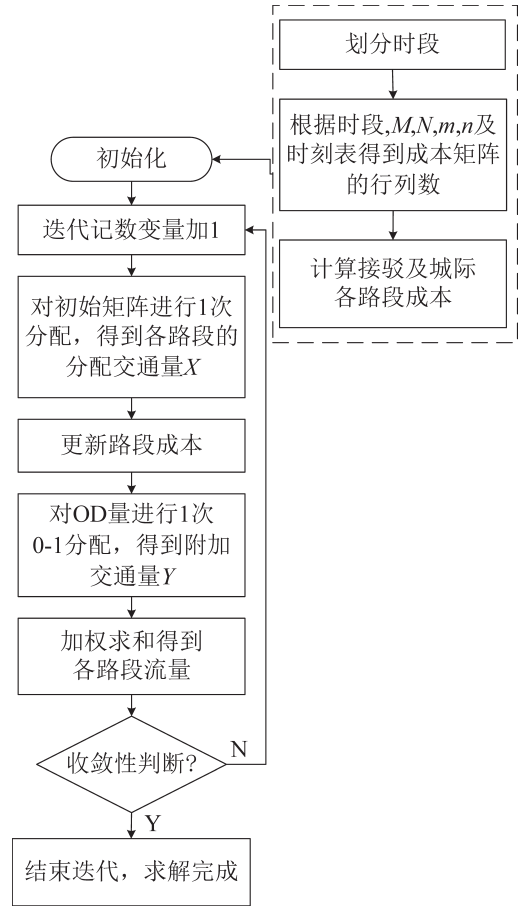


图2 改进的MSA算法流程图

Fig. 2 Flow chart of improved MSA algorithm



图3 上海市交通分区及铁路主要客站示意图

Fig. 3 Traffic zones and main railway stations in Shanghai diagram

表1 分时段成本矩阵数据格式

Table 1 Data format of cost matrix in different time division

时段1	出发分区1	出发分区2	...	车站1	车站2	...	到达分区1	到达分区2	...
出发分区1	—	—	...	55	—	...	—	—	
出发分区2	—	—	...	27	—	...	—	—	
...	—	—	...			...	—	—	
车站1	55	27	...	—	170	...	—	—	
车站2	—	—	...	170	—	...	32	27	
...	...	...	...	...	...	...	—	—	...
到达分区1	—	—	...	—	32	...	—	—	...
到达分区2	—	—	...	—	27	...	—	—	...
...	—	—	...	...	...	...	—	—	...

选取4:00-6:00时段为例,上海站及上海南站各有2列列车发往南京2个车站,根据改进的MSA算法,得到上海各个交通分区到达车站的客流结

果如图4所示,铁路车站之间客流如表2所示,南京各个交通分区到铁路车站客流量同理。

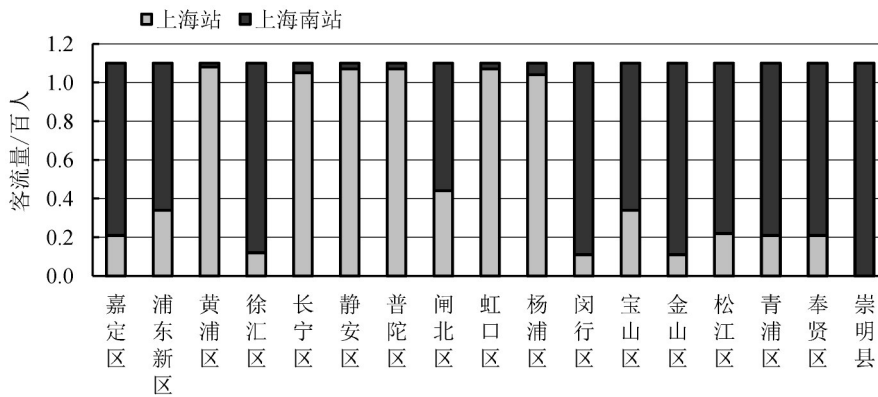


图4 上海各个交通分区与铁路车站客流量

Fig. 4 Passenger flow between traffic zones and railway stations diagram

表2 各车站之间客流分配结果

Table 2 Results of passenger flow assignment between railway stations

车站	南京站	南京南站
上海站	488	382
上海南站	1 000	0

同理,可得所有时段的客流分配量。从图4可知,黄浦、静安、普陀等区主要选择上海站,原因可能是距离上海站近,到达铁路车站的接驳方式较为便捷,接驳成本较低,对于金山、松江等区选择上海南站的较大也是同样道理。而从表2可知,上海南站到南京站的客流量比上海站到南京2个车站的客流量之和,一是因为上海南站车次的票价有较大优势,对此做票价的灵敏度分析,以闸北区为例,票价每增加100元,从闸北区(摇摆区)去往上海站的人数增加8%,如果只将上海南站列车的票价提高10%,则闸北区将有56人从上海

南站转移到上海站,可见,票价对于客流量的影响很大;二可能是因为假设的分时段OD量和时间价值的取值不太合理,使得上海南站出发车次的城际成本即使增加,但依然是最小成本,故分配的量较大,对时间价值进行灵敏度分析,时间价值增加10%,则闸北区有19人从上海南站转移到上海站,可见对于上海南站的低票价长时间,如果乘客时间价值较高,会更愿意选择时间短的车次。

## 5 结论

本文研究城市之间及城市内铁路枢纽客流分配,当城市内有多个车站时,考虑城市内的接驳成本,通过Logit模型构建交通分区到铁路车站的接驳成本子模型,根据列车时刻表,对不同时间段内城市间不同等级的铁路列车的成本进行简化,将接驳子模型代入城际出行总成本中,以旅客出行

成本最小化的原则来构建铁路枢纽客流分配模型,设置路段最大限值约束,采用改进的MSA算法进行求解,得到不同时段内城市中不同交通分区到铁路枢纽内各个车站及各路段的客流量,最后通过简单算例对整个方法的可行性和有效性进行了论证,为城市间的客流预测提供依据。

#### 参考文献:

- [1] DEBREZION G, PELS E, RIETVELD P. Modelling the joint access mode and railway station choice[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2009, 45(1): 270-283.
- [2] GIVONI M, RIETVELD P. Do cities deserve more railway stations? The choice of a departure railway station in a multiple-station region[J]. *Journal of Transport Geography*, 2014, 36(36): 89-97.
- [3] SHAO C, XIA J C, LIN T G, et al. Logistic regression models for the nearest train station choice: A comparison of captive and non-captive stations[J]. *Case Studies on Transport Policy*, 2015, 3(4): 382-391.
- [4] 李倩. 基于路网的高速铁路客流预测方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011. [LI Q. Research on passenger flow forecasting method of high-speed railway based on road network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.]
- [5] 柳健. 高速铁路多层次客流分配方法及系统设计[D]. 北京:北京交通大学, 2013. [LIU J. Multilevel passenger flow assignment method in high speed railways and the computer system design[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.]
- [6] 辛文慧. 铁路客运枢纽市内交通需求预测方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2010. [XIN W H. Study on urban internal traffic demand forecast method of railway passenger transport hub[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.]
- [7] 何宇强, 毛保华, 等. 高速客运专线客流分担率模型及其应用研究[J]. *铁道学报*, 2006, 3(28): 18-21. [HE Y Q, MAO B H, et al. The mode share model of the high-speed passenger railway line and its application[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2006, 3(28): 18-21.]
- [8] 聂磊, 胡小凤, 佟璐, 等. 基于旅客列车开行方案的客流分配方法研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 11(3): 87-92. [NIE L, HU X F, TONG L, et al. Research of passenger flow assignment based on passenger train plan[J]. *Journal of Transportation System Engineering and Information Technology*, 2011, 11(3): 87-92.]
- [9] 王培恒, 沈嘉曦. 基于城际铁路客流动态分配的列车开行方案优化生成[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2016, 14(1): 81-86. [WANG P H, SHEN J X. Optimal train operating scheme based in intercity railway passenger flow dynamic assignment[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2016, 14(1): 81-86.]
- [10] 曾玮. 基于时刻表的城际铁路客流分配研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2014. [ZENG W. Research on the schedule-based passenger assignment for an intercity high-speed rail line[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.]
- [11] 冯树民, 马栋才. 交通小区的两维图论聚类[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(9): 57-62. [FENG S M, MA D C. Two-dimensional graphic theory on clustering method of small traffic zones[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(9): 57-62.]
- [12] 宋亮. 交通小区的理论分析和划分方法研究[D]. 西安:长安大学, 2011. [SONG L. Theoretical analyses and research on division method for traffic zone[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.]
- [13] 寇俊, 顾保南. 大城市铁路主要客站接驳效用计算模型及分析方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(10): 1469-1475. [KOU J, GU B N. Methods of access utility calculation and analysis of the main railway station in metropolis[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science Edition)*, 2017, 45(10): 1469-1475.]
- [14] 陆化普. 交通规划理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2006. [LU H P. Theory and method in transportation planning (The second edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.]