

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022120124041962

文章编号: 1674-599X(2024)02-0138-08

引用格式: 荆毅, 林航飞. 考虑交通需求空间不平衡影响的交通指数[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(2): 138-145.

Citation: JING Yi, LIN Hangfei. Traffic index considering the impact of spatial imbalance in traffic demand[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 138-145.

考虑交通需求空间不平衡影响的交通指数

荆毅¹, 林航飞²

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 为精确反映整个区域或路网的实际交通运行状况, 本研究先通过实例分析验证交通需求空间不平衡对区域交通运行的不利影响, 再提出“延误等价”原则, 以此作为评价区域交通指数准确性的新标准; 其次, 利用“熵权法”构建区域交通指数模型, 该模型包含了反映路段几何特征、路段交通流特征、网络拓扑特征及网络交通需求不平衡特征的因素。以上海市杨浦区为例, 经验证, 交通指数模型不仅能够准确反映该区域的交通运行状况, 还具有较好的适用性, 为相关部门的规划建设和管理政策制定提供了借鉴与参考。

关键词: 交通指数; 交通需求空间不平衡; 熵权法; 路网每公里车均延误; 延误等价

中图分类号: U491

文献标志码: A

Traffic index considering the impact of spatial imbalance in traffic demand

JING Yi¹, LIN Hangfei²

(1. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China;

2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to accurately reflect the actual traffic operation of the whole region or road network, this study firstly verifies the negative impacts of the spatial imbalance of traffic demand on regional traffic operation through example analysis, and then proposes the principle of 'delay equivalence' as a new criterion for evaluating the accuracy of the regional traffic index. Secondly, the entropy weight method is used to construct the regional traffic index model, which contains factors reflecting the geometric characteristics of road sections, traffic flow characteristics of road sections, topological characteristics of the network, and the characteristics of the network traffic demand imbalance. Taking Yangpu District of Shanghai as an example, it is proved that the traffic index model can accurately reflect the traffic operation situation of the region and has good applicability. This offers significant reference value for relevant authorities in their infrastructure planning and policy-making efforts.

Key words: traffic index; spatial imbalance of traffic demand; entropy weighted method; delay per kilometer per vehicle of road network; delay equivalence

收稿日期: 2022-12-01

通信作者: 林航飞(1962—), 男, 教授, 主要从事交通运输规划与管理方面的研究工作。E-mail: draculajy@163.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

随着大数据采集、储存以及分析技术的飞速发展,利用自动交通检测器收集海量数据,实时反映和评价交通运行状况已成为可能^[1-4]。目前,构建的城市道路交通指数主要归纳为三类:1) 基于流量饱和度的指数模型,如日本的拥堵度指数(degree of congestion, DC)^[5];2) 基于行程时间或行程车速的指数模型,如美国的出行时间指数(travel time index, TTI)^[5]、高德指数^[6]和上海的交通运行指数^[7];3) 基于混合评价的指数模型,如北京基于拥堵里程比例的交通运行指数^[8]、深圳基于行程的时间比和专家打分的交通拥堵指数^[9]。

交通需求空间不平衡是指在路网中,部分路段的流量不变或持续增加,导致路网流量过度集中。已有研究表明,这种不平衡性是造成交通拥堵的重要原因。如,刘贤腾等^[10]发现南京主城区在早晚高峰时段的交通需求空间不平衡是导致交通拥堵的关键因素。徐亚辉^[11]对城市组团内的交通需求进行研究,发现路网交通流在规模和分布上因受道路等级、地理位置、用地环境和性质等影响,表现出空间不平衡性,并以平衡指数和偏差指数衡量不平衡程度。时振钦等^[12]采用交通分配方法发现,广州市不同行业人群对路网的交通需求也表现出空间不平衡性。梁颖等^[13]通过仿真试验进一步证实了交通需求空间不平衡会降低路网可靠度。而高爱霞等^[14]基于北京二环快速路的实测数据,提出了快速路可靠度概率型指标,并发现交通需求波动(标准差)越小,路网可靠性越高。

在已有交通指数中,缺乏能够准确反映整个区域或路网的实际交通运行状况的指数模型。主要有以下情况:1) 提供了路段交通指数模型,但缺乏对应的区域交通指数模型;2) 仅通过对路段交通指数进行加权平均,将其值作为对应的区域交通指数;3) 选取加权指标时,考虑不够全面,仅涉及了路段长度、车道数、车公里等常见指标。本文基于“熵权法”提出全新的区域交通指数模型,反映了区域交通运行状况。该模型不仅考虑了路段几何特征、路段交通特征和网络拓扑特征,还考虑了交通需求空间不平衡对交通运行的不利影响。

1 交通需求空间不平衡问题

为了准确反映交通需求空间不平衡所带来的

影响,定义路网每公里车均延误来衡量特定区域或整个路网的交通运行效率。具体定义如下:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^N d_i Q_i l_i}{V} \quad (1)$$

式中: d 为路网每公里车均延误; d_i 为路段*i*的每公里车均延误; Q_i 为路段*i*的交通量; l_i 为路段*i*的长度; N 为路网的路段总数; V 为路网车公里数。

对于城市道路而言,信号控制交叉口的延误是一个不可忽略的因素。因此,本文将路段延误定义为路段延误与路段下游交叉口延误的总和,则式(1)中路段*i*每公里车均延误可定义为:

$$d_i = d_{s,i} + d_{c,i} \quad (2)$$

式中: $d_{s,i}$ 为路段*i*的部分每公里车均延误; $d_{c,i}$ 为路段*i*的下游交叉口(进口道)车均延误。

$$\text{其中}, d_{s,i} = t_i - t_f = t_f \left[1 + \alpha (S_i)^\beta \right] - t_f = t_f \alpha (S_i)^\beta = \frac{l_i}{v_f} \alpha (S_i)^\beta \quad (3)$$

式中: t_i 为路段*i*实际行程时间; t_f 为路段*i*的自由流行程时间; S_i 为路段*i*的流量饱和度; α 和 β 为拟合参数,根据道路等级不同取不同的经验值^[15]; l_i 为路段*i*的长度; v_f 为路段*i*的自由流车速。

路段下游交叉口的车均延误通过式(4)计算得到^[16]。

$$d_{c,i} = d_{c,1} + d_{c,2} + d_{c,3} \quad (4)$$

式中: $d_{c,i}$ 为路段*i*的下游交叉口(进口道)车均延误; $d_{c,1}$ 为进口道均匀延误; $d_{c,2}$ 为进口道随机附加延误; $d_{c,3}$ 为进口道初始排队延误。

为了排除其他干扰因素,假设路网中仅包含两条主干路路段,路段的长度均为700 m,自由流车速为50 km/h。如图1所示,当两条路段的流量饱和度都保持在50时,路网的交通需求空间分布平衡,用路网中路段流量饱和度的算术平均值50来表示路网交通运行状况,通过式(1)~(4)可得到此时路网的每公里车均延误为16.8 s;当一条路段的饱和度降至30,而另一条路段的饱和度升至70时,路网的交通需求空间分布不平衡。在这种情况下,路网的每公里车均延误增加至35.7 s,表明:交通需求的空間不平衡会导致路网的每公里车均延误迅速上升。若用路段饱和度的算术平均值50来评估路网的交通运

行状况,则会“高估”路网的实际交通运行状况,表明:这种交通需求空间不平衡的路网所产生的每公里车均延误,相当于两条路段饱和度都为63的路网所产生的每公里车均延误。

综上所述,可以得出以下结论:1) 交通需求空间不平衡会对路网的交通运行产生负面影响,增加路网每公里车均延误;2) 依据“延误等价”原则来评价区域交通指数的准确性,即区域交通指数所反映的路网每公里车均延误应与区域路网每公里车均延误的真值相近。

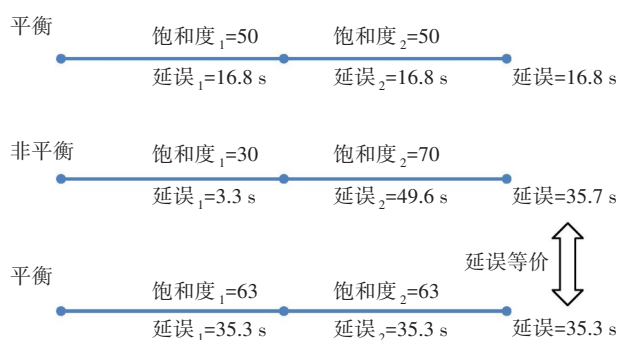


图1 简化路网示意图

Fig. 1 Simplified road network diagram

2 区域交通指数模型

2.1 “熵权法”区域交通指数

“熵权法”作为一种客观且全面的综合评价方法,能够有效避免人为因素带来的偏差,且计算过程相对简便,被广泛应用于交通研究领域^[17-20]。在利用“熵权法”赋权时,若指标值之间的差距越大(即离散程度越高),则该指标在综合评价中所起的作用就越大,其权重也会相应增大;若指标值之间的差距越小(即离散程度越低),则该指标在综合评价中的重要性就越小,权重也相应减小。

本研究选择路段的流量饱和度作为路段的交通指数,并采用“熵权法”来确定区域的交通指数。具体操作如下:首先,选择适合的路段重要度评价指标;其次,基于“熵权法”计算各指标的权重,并根据赋权结果计算出区域内各路段的重要度;最后,以各路段的重要度作为权重,对区域内路段的交通指数进行加权平均,得到区域的交通指数。

2.2 路段重要度评价指标

本文从路段的几何特征、交通特征、网络拓扑特征和交通需求平衡特征四个维度选取合适的评价指标对区域内的路段进行权重赋值。

1) 路段长度。

选取路段的几何特征为路段长度。在区域内,路段长度越长,该路段在整个交通网络中越重要。

2) 路段通行能力。

选取交通特征评价路段通行能力。对于区域内的路段,其通行能力越强,该路段就越重要。路段通行能力的计算考虑了路段的车道数、绿信比、左(右)转车辆比例等关键因素。与采用道路等级来评价路段通行能力相比,采用交通特征来评价路段通行能力提供了更明确的判断依据。

3) 路段边权重。

城市道路网络作为复杂网络问题,可以采用复杂网络的方法定量测度道路网络拓扑特征。文献[21]基于网络介数中心性提出了拥堵指数模型。本文选取的网络拓扑特征为路段边权重。根据式(5)计算边权重^[22],该公式可准确反映路段在网络结构中的重要性。

$$w_{ij} = k_i k_j \quad (5)$$

式中: w_{ij} 为节点*i*和*j*之间边的权重; k_i 为节点*i*的度; k_j 为节点*j*的度,节点度为与该节点直接相连的边的数量。

值得注意的是,假设有两条路段,它们端点的度虽然相同,但是其中一条与主干路相连,另一条与支路相连。在网络中,与主干路相连的路段更重要。为准确反映这种差异,本文对边权重的定义进行优化,其计算公式为

$$w_{ij} = w_i w_j \quad (6)$$

式中: w_{ij} 为端点*i*和*j*之间路段的边权重; w_i 为端点*i*的权度; w_j 为端点*j*的权度,端点权度为与该端点直接相连的路段等级权重之和。

根据上海市杨浦区的实例数据计算得到等级权重,具体见表1。

由式(6)可知,对于区域内的路段,其端点连接的路段数量越多,连接路段的等级权重越高,该路段就越重要。

表1 路段等级权重

Table 1 Grade weights of road sections

类别	道路等级	车道数	路段通行能力/ (pcu·h ⁻¹)	等级权重
1	支路	1	639	1.0
2		2	1 049	1.6
3	次干路	1	685	1.1
4		2	1 202	1.9
5		3	1 329	2.1
6	主干路	1	1 003	1.6
7		2	1 399	2.2
8		3	1 559	2.4
9		4	2 072	3.2
10	快速路	2	2 560	4.0
11		4	5 120	8.0

注:将通行能力最小的类别(“类别1”)的等级权重设为1,其他各类别的等级权重为其路段通行能力与“类别1”通行能力的比值。

4) 路段交通需求正向偏差。

路网中,交通需求空间不平衡会造成区域路网运行效率的下降。本文定义的路段交通需求正向偏差,反映了交通需求的空间平衡性程度,其计算公式为

$$b_i = \begin{cases} S_i - \bar{S}, & S_i > \bar{S} \\ 0, & S_i \leq \bar{S} \end{cases} \quad (7)$$

式中: b_i 为路段*i*的交通需求正向偏差; S_i 为路段*i*的流量饱和度; \bar{S} 为路网中所有路段流量饱和度的均值。

由式(7)可知,对于区域内的路段,路段饱和度超过路网饱和度均值越多,路段交通延误越大,该路段在该指标中就越重要;当路段饱和度低于路网饱和度均值时,路段交通延误较小,该路段在该指标中作用不大。

3 案例分析

3.1 上海市杨浦区案例分析

杨浦区土地面积60.73 km²,该区域内道路交通设施完善,拥有近200条道路,呈现出典型的网格状布局。地面道路全长308.0 km,其中,主干道占14%,次干道占23%,支路占63%。此外,还有20.5 km

的快速路^[23]。杨浦区的道路网络数据来自开源的开放街道图(open street map, OSM)数据,该数据采用WGS-84坐标系,共计1 306条路段。而路网流量数据来自2016年10月11日杨浦区的悉尼交通控制系统(Sydney coordinated adaptive traffic system, SCATS)。车速数据来自同一天的浮动车车速数据。

采用“熵权法”对4个评价指标计算不同时段

的权重,具体结果见表2。

表2 各时段评价指标权重

Table 2 Weights of evaluation indicators in each period

时段	路段 长度的 权重 w_1	路段通行 能力的 权重 w_2	路段 边权重 w_3	路段交通 需求正向 偏差的 权重 w_4	$\sum_{i=1}^n w_i$
6:00—6:15	0.12	0.14	0.16	0.58	1
6:15—6:30	0.12	0.13	0.16	0.59	1
6:30—6:45	0.12	0.14	0.16	0.58	1
6:45—7:00	0.12	0.15	0.17	0.56	1
7:00—7:15	0.12	0.13	0.17	0.58	1
7:15—7:30	0.12	0.12	0.16	0.60	1
7:30—7:45	0.11	0.12	0.16	0.61	1
7:45—8:00	0.11	0.12	0.16	0.61	1
8:00—8:15	0.11	0.15	0.15	0.58	1
8:15—8:30	0.11	0.15	0.15	0.59	1
8:30—8:45	0.12	0.16	0.16	0.56	1
8:45—9:00	0.11	0.15	0.15	0.59	1
9:00—9:15	0.11	0.12	0.16	0.61	1
9:15—9:30	0.11	0.12	0.16	0.61	1
9:30—9:45	0.12	0.12	0.16	0.59	1
9:45—10:00	0.12	0.12	0.16	0.60	1
10:00—10:15	0.11	0.12	0.16	0.61	1
10:15—10:30	0.12	0.12	0.16	0.60	1
10:30—10:45	0.12	0.12	0.16	0.60	1
10:45—11:00	0.12	0.12	0.16	0.60	1

由表2可知,这4个指标的权重在不同时段均存在微小波动。其中,路段交通需求正向偏差的权重 w_4 在各时段均保持最大,其次为路段边权重 w_3 ,再次为路段通行能力 w_2 ,而路段长度的权重 w_1 在所有时段为最小。这表明,交通需求空间不平衡的影响不可忽视,因此有必要将其纳入评价指标。

为了全面评估杨浦区的交通状况,采用了3种

不同的方法来计算杨浦区的区域交通指数。如表 3 所示,未考虑交通需求空间不平衡性影响的指数 2 与指数 1 差别不大,所有时段的平均变化率仅为 5.1%。相比于其他两种指数,指数 3 在各时段均最大,并且与指数 1 的差别较为明显,所有时段的平均变化率达到 36.2%,说明指数 3 对其他两种指数进行了“向上”修正,修正后指数所反映区域交通运行状况也更差。

表 3 各时段杨浦区交通指数

Table 3 Traffic indices of Yangpu District in each period

时段	指数 1	指数 2	指数 3	指数 2 与指数 1 的变化 率/ %	指数 3 与指数 1 的变化 率/ %
6:00—6:15	20.4	20.1	28.6	-1.5	40.2
6:15—6:30	25.3	25.5	35.8	0.8	41.5
6:30—6:45	36.8	36.9	50.0	0.3	35.9
6:45—7:00	50.9	51.6	68.1	1.4	33.8
7:00—7:15	58.9	60.5	75.3	2.7	27.8
7:15—7:30	60.0	63.1	79.6	5.2	32.7
7:30—7:45	60.1	64.1	80.3	6.7	33.6
7:45—8:00	60.0	63.8	80.3	6.3	33.8
8:00—8:15	58.2	62.8	77.4	7.9	33.0
8:15—8:30	56.5	60.8	75.7	7.6	34.0
8:30—8:45	55.1	58.7	71.4	6.5	29.6
8:45—9:00	49.2	53.8	64.4	9.3	30.9
9:00—9:15	47.7	51.1	67.7	7.1	41.9
9:15—9:30	45.6	48.4	64.0	6.1	40.4
9:30—9:45	46.0	49.0	63.5	6.5	38.0
9:45—10:00	42.5	46.3	60.3	8.9	41.9
10:00—10:15	40.9	43.5	57.4	6.4	40.3
10:15—10:30	41.9	43.5	57.6	3.8	37.5
10:30—10:45	40.5	43.0	57.3	6.2	41.5
10:45—11:00	38.6	40.3	52.7	4.4	36.5

注:“指数 1”表示采用算术平均计算的区域交通指数;“指数 2”表示采用以车道数和路段长度乘积加权平均计算的区域交通指数;“指数 3”表示采用“熵权法”计算的区域交通指数。

3.2 区域交通指数模型验证

基于杨浦区的实例数据对“熵权法”区域交通指数的准确性进行验证。验证过程如下:

1) 针对杨浦区的某个时段,分别计算了 3 种不

同指数对应的路网每公里车均延误。同理,分别计算该时段指数 2 对应的路网每公里车均延误和指数 3 对应的路网每公里车均延误;

2) 通过浮动车车速数据,计算该时段的路网每公里车均延误真值;

3) 将 3 种指数对应的路网每公里车均延误与路网每公里车均延误真值相比,两者相差越小,说明某种指数越准确。

验证结果见表 4。

表 4 各时段杨浦区交通指数验证结果

Table 4 Verification results of traffic indices of Yangpu District in each period

时段	路网每 公里车 均延误 真值	路网每公里 车均延误/s			指数1 的延误 相对误 差/ %	指数2 的延误 相对误 差/ %	指数3 的延误 相对误 差/ %
		指数1	指数2	指数3			
6:00—6:15	2.3	1.2	1.2	2.7	-50.0	-50.0	16.7
6:15—6:30	5.3	2.3	2.5	6.0	-56.1	-53.7	12.2
6:30—6:45	18.6	7.8	7.8	20.5	-58.0	-58.0	10.5
6:45—7:00	53.6	25.1	26.1	57.3	-53.2	-51.3	7.0
7:00—7:15	89.9	45.2	49.1	98.6	-49.7	-45.4	9.6
7:15—7:30	110.7	48.1	56.4	117.8	-56.5	-49.0	6.5
7:30—7:45	111.9	48.5	59.2	121.0	-56.7	-47.1	8.2
7:45—8:00	112.4	47.9	58.5	121.2	-57.3	-48.0	7.9
8:00—8:15	109.3	43.7	55.8	108.0	-60.0	-49.0	-1.2
8:15—8:30	108.3	39.8	50.3	100.8	-63.3	-53.5	-6.9
8:30—8:45	79.2	36.4	44.7	83.1	-54.1	-43.6	4.9
8:45—9:00	79.7	25.5	33.8	67.2	-68.0	-57.6	-15.8
9:00—9:15	53.1	19.3	24.1	58.7	-63.6	-54.6	10.6
9:15—9:30	38.2	15.5	18.9	45.5	-59.5	-50.7	19.0
9:30—9:45	44.1	16.0	19.5	44.3	-63.7	-55.8	0.6
9:45—10:00	37.3	12.4	16.3	37.6	-66.9	-56.4	0.7
10:00—10:15	30.0	10.9	13.4	32.0	-63.6	-55.4	6.5
10:15—10:30	30.6	11.8	13.3	32.4	-61.3	-56.6	6.0
10:30—10:45	31.9	10.5	12.7	31.9	-66.9	-60.0	0.0
10:45—11:00	23.0	9.1	10.4	24.3	-60.5	-54.8	5.6

由表 4 可知,在每个时段,相比于其他两种指数,指数 3 的路网每公里车均延误都是最大的,说明“熵权法”区域交通指数能够反映出不平衡的交通需求对路网交通的负面影响。在每个时段,相比于

其他两种指数,指数3的延误相对误差是最小的,说明“熵权法”区域交通指数反映的区域交通运行状况是最准确的。

为了验证“熵权法”区域交通指数的适用性。利用杨浦区的实际数据进行了深入分析。为了获得更多的区域交通指数样本,参考了杨浦区交通运行指数的片区划分方法,将杨浦区地面路网分为八个小区,分别为江湾、殷行、五角场、同济大学、新华医院、延吉新村、上海卷烟厂和杨树浦,如图2所示。

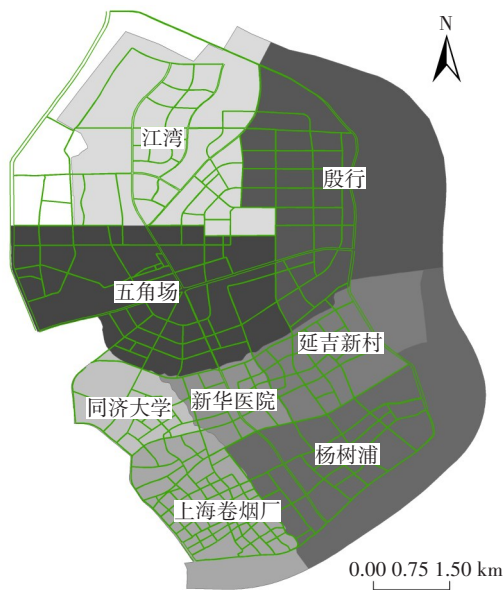


图2 杨浦区分区示意图

Fig. 2 Yangpu District zoning schematic diagram

采用平均绝对误差(mean absolute percentage error, MAE) E_{MAE} 来评价3种区域交通指数适用性的优劣,该指标定义如下:

$$E_{MAE} = \frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|}{m} \quad (8)$$

式中: y_i 为第*i*个时段的某小区每公里车均延误真值; \hat{y}_i 为第*i*个时段某种区域指数对应的某小区每公里车均延误; m 为时段总数。

验证思路如下:

- 1) 将杨浦区划分为8个小区;
- 2) 对于第1个小区的某时段,计算指数1~3对应的小区每公里车均延误;
- 3) 通过浮动车车速数据,精准计算该时段所有小区的每公里车均延误真值;
- 4) 对于下一个时段,重复步骤(2)~(3),直到所有时段全部计算完毕,并根据式(8)分别计算该小区3种指数的 E_{MAE} 指标;

5) 对于下一个小区,重复步骤(2)~(4),直到所有小区全部计算完毕;

6) 比较所有小区3种指数的 E_{MAE} 值。若某种指数的 E_{MAE} 值越小,且小区对应的数量越多,则说明该指数的适用性越好。

验证结果见表5。由表5可知,在每一行中,相比于其他两种指数,指数3的 E_{MAE} 始终是最小的,这表明对于每个小区而言,“熵权法”区域交通指数所对应的路网每公里车均延误与延误真值最为接近,反映的区域交通运行状况最为准确。该结论在每个小区都成立,充分证明了该区域指数模型具有很好的适用性。

表5 杨浦区各分区交通指数验证结果

Table 5 Verification results of traffic index of subregions in Yangpu District

小区	E_{MAE}		
	指数1	指数2	指数3
江湾	33.8	28.4	19.7
同济大学	25.0	16.6	5.0
上海卷烟厂	10.4	6.3	3.9
新华医院	15.9	13.0	1.8
延吉新村	6.9	5.7	5.4
杨树浦	35.7	31.6	18.2
殷行	28.3	26.0	5.9
五角场	20.4	15.4	10.2

4 结论

本研究通过实例详细阐述了区域中交通需求的空间不平衡问题,不仅发现空间不平衡对区域交通运行具有负面影响,还会导致路网每公里车均延误的增加。

为了更准确地评估区域交通状况,基于“熵权法”定义了一种全新的区域交通指数模型,并引入了能够反映交通需求空间不平衡负面影响的评价指标。以上海市杨浦区为例,对该指数模型进行验证,其结果表明:该区域交通指数,不仅能够准确反映区域整体的交通运行状况,还具有较好的适用性。

参考文献(References):

- [1] 顾金刚, 付强, 胡建伟. 基于排队时间指数的信号控制路口交通拥堵评价方法[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(6): 80-86. DOI: 10.3963/j.jssn.1674-4861.2020.06.011. GU Jingang, FU Qiang, HU Jianwei. Traffic congestion status evaluation for signal-controlled intersection based on queuing time index [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38(6): 80-86. DOI: 10.3963/j.jssn.1674-4861.2020.06.011.
- [2] 蒋寅, 薛文, 安睿, 等. 基于多源大数据的实时公共交通服务指数研究: 以天津市为例[J]. 城市交通, 2021, 19(3): 85-93, 129. DOI: 10.13813/j.cn11-5141/u.2021.0305. JIANG Yin, XUE Wen, AN Rui, et al. Real-time public transit service index based on multi-dimensional data: a case study of Tianjin [J]. Urban Transport of China, 2021, 19(3): 85-93, 129. DOI: 10.13813/j.cn11-5141/u.2021.0305.
- [3] 陈鼎, 周水庭, 陈云, 等. 拥堵指数自适应调节的交通运行状态识别方法及应用研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 137-144. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2022.02.013. CHEN Ding, ZHOU Shuiting, CHEN Yun, et al. Traffic performance identification method based on adaptive congestion index [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(2): 137-144. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2022.02.013.
- [4] 李弢, 刘勇凤, 成倩倩, 等. 基于大数据的交通运输公众评议指数设计及应用[J]. 公路交通科技, 2022, 39(9): 177-184. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.09.023. LI Tao, LIU Yongfeng, CHENG Qianqian, et al. Design and application of big-data-based transport public comment index [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(9): 177-184. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.09.023.
- [5] 王璐媛, 于雷, 孙建平, 等. 交通运行指数的研究与应用综述[J]. 交通信息与安全, 2016, 34(3): 1-9, 26. DOI: 10.3963/j.issn1674-4861.2016.03.001. WANG Luyuan, YU Lei, SUN Jianping, et al. An overview of studies and applications on traffic performance index [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2016, 34(3): 1-9, 26. DOI: 10.3963/j.issn1674-4861.2016.03.001.
- [6] 高德交通. 中国主要城市交通分析报告[R]. 北京: 高德软件有限公司, 2021. Gaode Transportation. Traffic analysis report on major cities in China [R]. Beijing: Gaode Software Co., Ltd., 2021.
- [7] 张扬, 何承, 张祎, 等. 上海市道路交通状态指数简介及应用案例[J]. 交通与运输, 2016, 32(3): 16-18. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3400.2016.03.007. ZHANG Yang, HE Cheng, ZHANG Yi, et al. Brief introduction and application case of Shanghai road traffic state index [J]. Traffic & Transportation, 2016, 32(3): 16-18. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3400.2016.03.007.
- [8] 郭继孚, 刘梦涵, 于雷, 等. 北京市交通拥堵宏观评价指标体系开发及其应用[C]//2007第三届中国智能交通年会论文集, 上海, 2007: 47-54. GUO Jifu, LIU Menghan, YU Lei, et al. Development and application of macroscopic evaluation index system for traffic congestion in Beijing [C]// Proceedings of the 3rd China Intelligent Transportation Annual Conference in 2007, Shanghai, 2007: 47-54.
- [9] 吕北岳. 基于浮动车的深圳市道路交通运行评价研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013. LYU Beiyue. Research on evaluation of road traffic operations based on floating car for Shenzhen [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [10] 刘贤腾, 沈青, 朱丽. 大城市交通供需矛盾及发展对策: 以南京为例[J]. 城市规划, 2009, 33(1): 80-87. DOI: 10.3321/j.issn: 1002-1329.2009.01.014. LIU Xianteng, SHEN Qing, ZHU Li. Imbalanced transport demand-supply and measures in metropolitan areas of China: a case study of Nanjing [J]. City Planning Review, 2009, 33(1): 80-87. DOI: 10.3321/j.issn: 1002-1329.2009.01.014.
- [11] 徐亚辉. 城市组团内路网交通流的不平衡性测度及组织研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016. XU Yahui. Disequilibrium measure and organization of network traffic flow within the city group [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [12] 时振钦, 周素红, 陈颖. 分行业居住-就业空间关系及路网交通需求分异: 以广州市为例[J]. 城市规划, 2020, 44(2): 87-94. DOI: 10.11819/cpr20200213a. SHI Zhenqin, ZHOU Suhong, CHEN Ying. Jobs-housing relationship in different industries and its impact on traffic demand on road networks: a case study in Guangzhou [J]. City Planning Review, 2020, 44(2): 87-94. DOI: 10.11819/cpr20200213a.

- 87-94. DOI: 10.11819/cpr20200213a.
- [13] 梁颖, 陈艳艳, 任福田. 不同交通供需分布下的路网畅通可靠度变化规律研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(8): 103-109. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2007.08.023.
- LIANG Ying, CHEN Yanyan, REN Futian. Research on unblocked reliability of road network under different traffic demand and supply distribution [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(8): 103-109. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2007.08.023.
- [14] 高爱霞, 陈艳艳. 基于实时数据的快速路可靠性及其影响因素研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(12): 107-111. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2009.12.021.
- GAO Aixia, CHEN Yanyan. Study on reliability of expressway performance and influence factors based on real-time data[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(12): 107-111. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2009.12.021.
- [15] 温旭丽, 吴恣, 曹蕊. 几种典型路阻函数的特性比较及参数选择研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(2): 205-208.
- WEN Xuli, WU Min, CAO Rui. Characteristics comparison and parameter selection of several typical road resistance functions [J]. Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition), 2014, 10(2): 205-208.
- [16] 同济大学, 上海市公安局交通警察总队, 上海市道路运输事业发展中心. 城市道路平面交叉口规划与设计规程: DG/TJ08-96—2022[S]. 上海: 上海市城乡建设和交通委员会, 2022.
- Tongji University, Shanghai Municipal Public Security Bureau Traffic Police Headquarters, Shanghai Road Transportation Business Development Center. Code for planning and design of urban road intersections: DG/TJ08-96—2022 [S]. Shanghai: Shanghai Urban Rural Development and Transportation Commission, 2022.
- [17] 谭振超, 成卫, 许世春. 基于熵权的道路交通状态模糊综合评判模型[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(3): 69-74, 81. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.03.012.
- TAN Zhenchao, CHENG Wei, XU Shichun. A fuzzy comprehensive evaluation model of road traffic state based on entropy weight[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(3): 69-74, 81. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.03.012.
- [18] 王艳辉, 黄雅坤, 李曼. 基于组合赋权方法的城轨线路运营安全评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 1243-1248. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2013.08.021.
- WANG Yanhui, HUANG Yakun, LI Man. Evaluation of urban rail transit line operational safety based on combination weighting method [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(8): 1243-1248. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2013.08.021.
- [19] 张琦, 易云帆, 夏鹏. 基于熵权云模型的高速公路交通安全风险评估研究[J]. 公路与汽运, 2022(6): 20-25, 36.
- ZHANG Qi, YI Yunfan, XIA Peng. Study on risk assessment of expressway traffic safety based on entropy weight cloud model [J]. Highways & Automotive Applications, 2022(6): 20-25, 36.
- [20] 李蓁, 段雅馨, 成宇飞, 等. 综合交通运输服务指数构建与应用研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(3): 198-206. DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2024.03.25.
- LI Zhen, DUAN Yaxin, CHENG Yufei, et al. Research on construction and application of comprehensive transportation service index [J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(3): 198-206. DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2024.03.25.
- [21] 叶焯星, 杨飞. 基于介数中心性的交通拥堵指数计算[J]. 测绘通报, 2021(5): 86-90.
- YE Yexing, YANG Fei. Calculation of traffic congestion index based on betweenness centrality [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(5): 86-90.
- [22] 章鹏. 复杂网络中边的重要性度量及应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- ZHANG Peng. The importance measurement of edge and its application in complex network [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [23] 上海市杨浦区统计局. 杨浦统计年鉴 2021[R]. 上海: 上海市杨浦区统计局, 2021.
- Shanghai Yangpu District Bureau of Statistics. Yangpu statistical yearbook 2021 [R]. Shanghai: Yangpu District Bureau of Statistics, 2021.

(责任编辑: 罗容; 英文编辑: 张洪)