

基于贝叶斯网络的城市居民绿色出行安全研究

陈晓君, 杨家其

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 针对城市居民绿色出行安全问题,在贝叶斯网络的基础上,考虑城市居民、城市车辆、城市道路、城市环境四大因素,构建城市居民绿色出行风险模型;以武汉市为例,通过问卷调查和专家知识经验确定四大影响因素和 13 个影响因子为贝叶斯网络节点,根据调查数据计算各节点参数,利用 Netica 软件进行武汉市居民绿色出行风险贝叶斯网络因果推理和敏感性分析。结果表明城市居民最为敏感,其次是城市车辆,关键因子为安全意识缺乏、违章行为、违章心理、行为失误、设备故障、特殊时间(段)和路况差,并据此提出安全保障措施,提高绿色出行安全性。

关键词: 城市交通;绿色出行;出行安全;贝叶斯网络;敏感性

中图分类号:U491

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2020)04-0021-06

近年来,中国大力提倡城市绿色出行,交通运输部先后提出发展绿色交通、建设低碳交通等理念。目前,国内外对于绿色出行的研究主要集中于绿色出行概念理念、城市绿色出行方式选择影响因素、城市绿色出行评价体系 and 绿色出行政策等。Chris Bradshaw、杨晓光、肖建斌等研究了绿色出行的概念理念,由于各学者研究领域不同,对于绿色出行的概念尚未统一,故绿色出行又被称为绿色交通、低碳出行等。在出行方式影响因素与评价体系研究方面,Yujiro Hirano 等根据居民个人基本情况或家庭特征研究出行过程中碳排放量问题,得出影响绿色出行过程的重要因素;Farla J.等从车辆、能源、政策三方面进行绿色出行影响研究;温惠英等以出行者、交通设施、出行方式、管理、环境、经济为影响因素,采用集成云模型与物元分析理论对中等城市的绿色出行水平进行了评价;刘维跃等选取交通设施、环境、交通出行、交通安全作为影响因素,采用熵权法和 TOPSIS 法对京、津、沪 3 座大型城市的绿色交通水平进行了分析。在绿色出行政策方面,Alex A.等采取补贴公交、收取燃油和拥挤费等政策来提高城市绿色出行水平;郑婧等归纳了德国弗赖堡市绿色交通政策的演变。相对来说,对于城市绿色出行安全的研究极少。为此,该文基于贝叶斯网络,以城市居民、城市车辆(自行车及公共运输工具等绿色出行工具)、城市道路、交通环境为影响因素,构建城市居民绿色出行风险模型,对绿色出行过程中影响安全的风险因素进行评判,为制定安全绿色出行政策提供措施提供参考。

1 问题描述与模型构建

1.1 问题描述

近年来,中国城市居民绿色出行安全问题频发,对社会经济造成了一定威胁。2018 年城市规划设计研究院发布绿色出行与安全相关手册,并展开了“绿色出行 多一份安全”的公益服务。由于对城市绿色出行安全的研究极少,目前对于城市绿色出行安全还没有定义。

城市道路安全是指城市道路交通系统的风险降低到可接受水平时的状态。绿色出行是一种坚持以人为本的多元化交通运输体系,采用环保的出行方式达到交通可持续发展。根据城市道路安全与绿色出行的定义引申出城市绿色出行安全的定义如下:城市居民在采用环保出行方式过程中将交通系统的风险降低到可接受水平时的状态。

考虑到交通运输系统中的人一车一路一环境四要素,绿色出行安全研究从城市居民、城市车辆、城市道路、城市环境四方面展开,得到违章心理、违章行为、行为失误等 13 个影响评价指标。根据因果关系分析,由风险评价指标体系建立城市居民绿色出行风险贝叶斯网络结构,再通过大量数据确定节点参数构建贝叶斯网络模型。

1.2 调查问卷设计

借鉴相关道路安全专家意见及学术研究成果,将影响城市居民安全绿色出行的风险因素分为城市居民问题、城市车辆问题(自行车、公共运输工具等绿色出行工具)、城市道路问题、城市环境问题四类,

违章心理、违章行为、绿色出行安全意识缺乏等 13 项(见表 1)。将 13 项影响因子发生风险的可能性分为极高、高、较高、一般、较低、低、极低 7 级。

表 1 城市居民绿色出行安全风险因素

一级风险	二级风险
城市居民问题	违章心理;违章行为;绿色出行安全意识缺乏;行为失误
城市车辆问题	设备故障;应急救援配置不足;设备噪音对居民的伤害
城市道路问题	路况差;设施设备故障;线路设计问题
城市环境问题	恶劣天气;特殊时间(段);景观环境差

1.3 贝叶斯网络模型构建

1.3.1 贝叶斯网络的定义

贝叶斯网络以贝叶斯公式为基础,利用概率推理进行计算形成联合概率分布 $U = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$,并借助有向无环图描述各变量之间的依赖关系。贝叶斯网络又称为因果图,可呈现各变量之间的因果关系。它主要由模型结构(s)和参数(θ)组成,即 $B = (s, \theta)$,提取网络中的所有节点并对其发生概率展开专门解析。

1.3.2 数学基础

(1) 条件概率。是指在随机事件 A 已发生的情况下,随机事件 B 发生的概率,可表示为:

$$P(B|A) = \frac{P(AB)}{P(A)}$$

(2) 边缘概率。是指某一事件与其他事件无关时发生的概率。

(3) 先验概率。是指通过之前的经验和分析得到的概率。

(4) 后验概率。是指将随机事件发生的结果结合相关数据或证据后重新得到的概率。

(5) 联合概率。是指多个随机变量分别满足其条件时的概率。假设贝叶斯网络中的变量为 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$,其中 n 为网络中变量的总个数, $\pi(X_i)$ 为第 i 个变量 X_i 的父节点集,则其联合分布可表示为:

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n (X_i | \pi(X_i))$$

1.3.3 贝叶斯网络节点及节点值域的确定

构建城市居民绿色出行风险模型的第一步是确定网络节点,可由相关领域专家或参考以往研究成果来确定。确定网络节点后需明确各节点的值域,

说明其代表的状态。

1.3.4 贝叶斯网络结构的确定

采用科学的方法,根据城市居民绿色出行风险与各影响因子之间的关系确定各节点之间的连接,组成网络拓扑结构。一般确定网络结构的方法有 3 种:1) 根据相关领域专家的知识经验来确定;2) 根据以往相关学术研究及历史数据来确定;3) 结合上述 2 种方法,先由专家初步确定,再通过学术研究及历史数据优化。

1.3.5 节点参数的确定

节点参数是指各随机变量的概率,其中根节点是边缘概率,非根节点是条件概率。根据确定的贝叶斯网络结构,通过各非根节点的条件概率算出事件的先验概率,最后得到各节点的后验概率。

2 实证分析

2.1 问卷数据处理

对武汉市居民展开绿色出行安全问题问卷调查,调查时间为 2019 年 5 月,调查地点为步行街、居民区等。共回收 247 份问卷,其中有效问卷 231 份,占 93.5%。

采用 SPSS22.0 软件对 231 份有效问卷数据进行信度、效度分析,结果见表 2。城市居民、城市车辆、城市道路、城市环境 4 个影响因素的克隆巴赫系数 α 均大于 0.70,说明这 4 个影响因素的内在一致性结果甚佳、信度较高。城市居民、城市车辆、城市道路、城市环境的 KMO 值都在 0.65 以上,且各影响因素的 Bartlett 球形检验结果显著,说明各因素之间相关性良好,效度分析结果良好。

表 2 调查问卷的信度、效度分析

影响因素	克隆巴赫系数 α	KMO 值	Sig. 值
城市居民	0.841	0.765	0.000
城市车辆	0.774	0.682	0.000
城市道路	0.742	0.737	0.000
城市环境	0.796	0.708	0.000

2.2 武汉市居民绿色出行风险分析

2.2.1 贝叶斯网络结构的建立

根据城市居民、城市车辆、城市道路、城市环境 4 个影响因素与 13 个影响因子之间的因果关系建立绿色出行风险评价指标体系(见图 1)。

贝叶斯网络结构中的各节点变量与风险评价指标体系中风险因子之间一样存在因果关系,参考图 1,将其转化为贝叶斯网络结构(见图 2)。

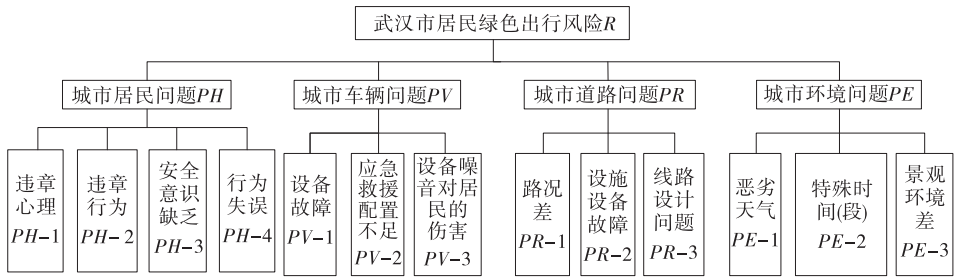


图1 武汉市居民绿色出行风险评价指标体系

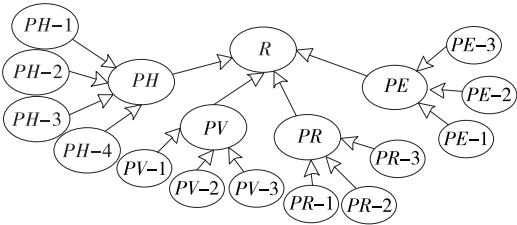


图2 武汉市居民绿色出行风险贝叶斯网络结构

2.2.2 节点值域说明

在武汉市居民绿色出行风险贝叶斯网络中,18个节点的值域均为{Y,N},其中Y是指该节点所代表的事件发生风险,处于不安全状态;N是指该节点所代表的事件不发生风险,处于安全状态。

2.2.3 网络节点条件概率

根据调查数据确定网络节点的条件概率。调查问卷中风险发生的可能性分为极高、高、较高、一般、较低、低、极低,为与节点值域相对应,将极高、高、较高归为Y,即发生风险,处于不安全状态;将一般、较低、低、极低归为N,即不发生风险,处于安全状态。根节点、城市居民及节点R的条件概率见表3~5。

表3 根节点的条件概率

节点	Y	N
违章心理 PH-1	0.172	0.828
违章行为 PH-2	0.137	0.863
安全意识缺乏 PH-3	0.184	0.816
行为失误 PH-4	0.151	0.849
设备故障 PV-1	0.117	0.883
应急救援配置不足 PV-2	0.076	0.924
设备噪音对居民的伤害 PV-3	0.142	0.858
路况差 PR-1	0.074	0.926
设施设备故障 PR-2	0.099	0.901
路线设计问题 PR-3	0.026	0.974
恶劣天气 PE-1	0.118	0.882
特殊时间(段) PE-2	0.094	0.906
景观环境差 PE-3	0.061	0.939

表4 城市居民问题的条件概率

违章心理 PH-1	违章行为 PH-2	安全意识缺乏 PH-3	行为失误 PH-4	Y	N
		Y	Y	0.912	0.088
	Y	N	Y	0.762	0.238
		N	Y	0.716	0.284
Y		N	N	0.647	0.353
		Y	Y	0.418	0.582
	N	N	N	0.573	0.427
		N	Y	0.315	0.685
			N	0.247	0.753
		Y	Y	0.738	0.262
	Y	N	N	0.611	0.389
		N	Y	0.452	0.548
N		N	N	0.356	0.644
		Y	Y	0.598	0.402
	N	N	N	0.503	0.497
		N	Y	0.215	0.785
			N	0.012	0.988

表5 节点R的条件概率

城市居民问题 PH	城市车辆问题 PV	城市道路问题 PR	城市环境问题 PE	Y	N
		Y	Y	0.663	0.337
	Y	N	N	0.339	0.661
		N	Y	0.294	0.706
Y		Y	N	0.201	0.799
	N	Y	Y	0.269	0.731
		N	N	0.173	0.827
		N	Y	0.232	0.768
			N	0.208	0.792
		Y	Y	0.300	0.700
	Y	N	N	0.135	0.865
		N	Y	0.221	0.779
N		N	N	0.137	0.863
		Y	Y	0.213	0.787
	N	N	N	0.111	0.889
		N	Y	0.095	0.905
			N	0.002	0.998

2.2.4 因果推理

利用 Netica 软件创建贝叶斯网络结构,输入各节点参数,实现因果推理。以城市居民问题 PH 、违章心理 $PH-1$ 、违章行为 $PH-2$ 、安全意识缺乏 $PH-3$ 、行为失误 $PH-4$ 为例,在 Netica 软件创建贝叶斯网络,并输入参数(见图 3~5),运行软件,根据因果推理自动得到 PH 的参数(见图 6)。结果显示, PH 对武汉市居民绿色出行过程中发生风险的概率为 20.3%,不发生风险的概率为 79.7%。

根据数学基础联合概率计算得到 PH 在两种状态下的概率为:

$$P(PH=Y) = \sum_{PH-1, \dots, PH-4} P(PH-1, PH-2, PH-3, PH-4, PH=Y) = 0.203$$

$$P(PH=N) = 1 - P(PH=Y) = 0.797$$

计算结果与软件所得结果一样,说明 Netica 软件的因果推理具有合理性。

在 Netica 软件中创建图 2 所示贝叶斯网络结构,输入参数,得到因果推理后的基于贝叶斯网络的武汉市居民绿色出行风险评价模型(见图 7)。由图 7 可得到 PH 、 PV 、 PR 、 PE 及 R 在 Y 、 N 两种状态

下的边缘概率(见表 6)。

图 4 $PH-1$ 节点参数设置

PH-1	PH-2	PH-3	PH-4	Y	N
Y	Y	Y	Y	91.2	8.8
Y	Y	Y	N	76.2	23.8
Y	Y	N	Y	71.6	28.4
Y	Y	N	N	64.7	35.3
Y	N	Y	Y	41.8	58.2
Y	N	Y	N	57.3	42.7
Y	N	N	Y	31.5	68.5
Y	N	N	N	24.7	75.3
N	Y	Y	Y	73.8	26.2
N	Y	Y	N	61.1	38.9
N	Y	N	Y	45.2	54.8
N	Y	N	N	35.6	64.4
N	N	Y	Y	59.8	40.2
N	N	Y	N	50.3	49.7
N	N	N	Y	21.5	78.5
N	N	N	N	1.2	98.8

图 5 PH 节点参数设置

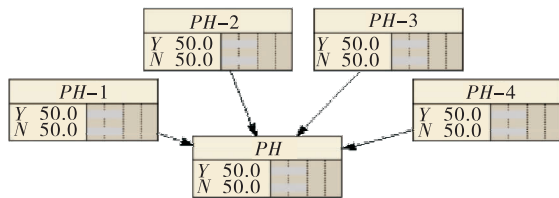


图 3 城市居民问题贝叶斯网络结构

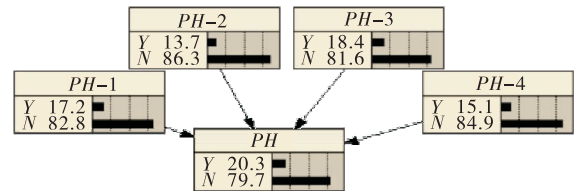


图 6 PH 节点的运行结果

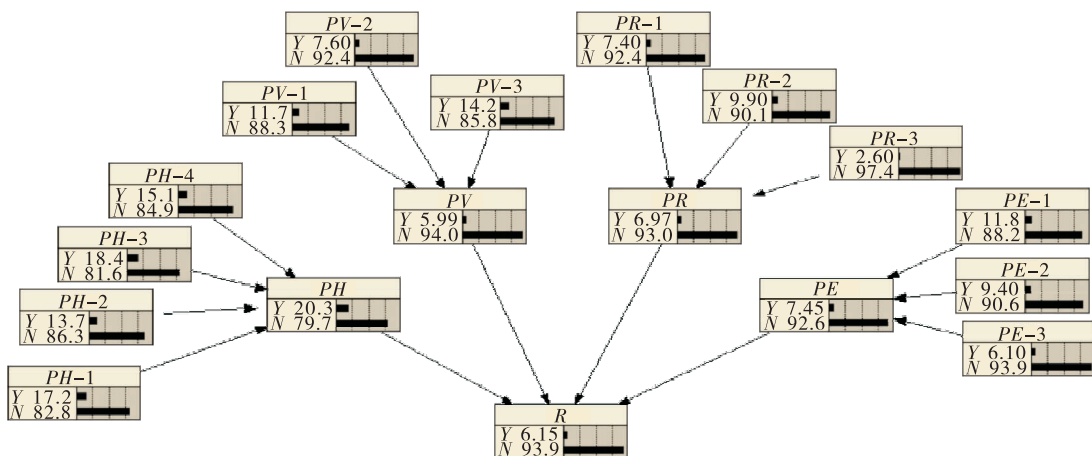


图 7 武汉市居民绿色出行风险贝叶斯网络因果推理图

2.2.5 敏感性分析

Netica 软件中贝叶斯网络的敏感性分析通过互

信息(两随机变量之间的相互依赖性)来表现。设 A 、 B 两个离散随机变量,其联合概率为 $P(A, B)$,边缘

概率分别为 $P(A)$ 和 $P(B)$, 则其互信息为:

$$I(A;B) = \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} p(a,b) \log \frac{p(a,b)}{p(a)p(b)}$$

表 6 经因果推理后 PH 、 PV 、 PR 、 PE 及 R 的计算结果

节点	Y	N
PH	0.203 0	0.797 0
PV	0.059 9	0.940 0
PR	0.069 7	0.930 0
PE	0.074 5	0.926 0
R	0.061 5	0.939 0

在图 7 的基础上,利用 Netica 软件对武汉市居民绿色出行风险贝叶斯网络进行敏感性分析,结果见表 7。4 个影响因素对武汉市居民绿色出行过程中发生风险的敏感性为城市居民问题>城市车辆问题>城市环境问题>城市道路问题;13 项影响因子对武汉市居民绿色出行过程中发生风险的敏感性为 $PH-3 > PH-2 > PH-1 > PH-4 > PV-1 > PE-2 > PR-1 > PV-2 > PE-3 > PE-1 > PV-3 > PR-2 > PR-3$ 。从整体上看,城市居民问题对绿色出行过程中发生风险最为敏感,即影响最大,其中影响因子 $PH-3$ 的敏感性最高,其他 3 个因子也较敏感; $PV-1$ 、 $PE-2$ 、 $PR-1$ 的敏感性也较高;城市道路问题对绿色出行过程中发生风险的敏感性最低,其原因是 $PR-2$ 和 $PR-3$ 的敏感性很低,被这两个影响因子弱化了。

表 7 R 节点的敏感性分析结果

节点	互信息	百分比	信念变化
R	0.333 28	100.000 00	0.057 698 6
PH	0.052 76	15.800 00	0.005 481 5
$PH-3$	0.009 22	2.770 00	0.000 877 7
PV	0.005 52	1.660 00	0.000 602 6
PE	0.004 43	1.330 00	0.000 455 8
PR	0.003 91	1.170 00	0.000 400 9
$PH-2$	0.003 91	1.170 00	0.000 366 7
$PH-1$	0.002 02	0.607 00	0.000 178 6
$PH-4$	0.001 10	0.330 00	0.000 095 8
$PV-1$	0.000 96	0.289 00	0.000 084 8
$PE-2$	0.000 25	0.074 90	0.000 021 2
$PR-1$	0.000 14	0.040 60	0.000 011 4
$PV-2$	0.000 11	0.033 30	0.000 009 3
$PE-3$	0.000 07	0.019 90	0.000 005 5
$PE-1$	0.000 05	0.013 80	0.000 003 8
$PV-3$	0.000 04	0.012 30	0.000 003 3
$PR-2$	0.000 01	0.002 58	0.000 000 7
$PR-3$	0.000 01	0.001 61	0.000 000 4

2.3 绿色出行安全保障措施

根据贝叶斯模型分析结果,四大影响因素中城市居民问题对绿色出行过程中产生风险的敏感性最高,其次是城市车辆问题。其中影响城市居民问题的因子安全意识缺乏、违章行为、违章心理和行为失误的敏感性较高,影响城市车辆问题的因子设备故障最为敏感。此外,特殊时间(段)和路况差的影响也较大。因此,针对这几个关键因子提出绿色出行安全保障措施。

2.3.1 居民安全意识缺乏、违章行为、违章心理、行为失误

城市居民绿色出行安全意识缺乏是指居民在绿色出行过程中没有产生安全的观念,违章心理可能是居民的从众、侥幸等心理引起的。意识、心理决定行为,意识的缺乏和违章心理的存在造成违章举动和行为失误。针对这 4 个影响因子,可从以下方面提高绿色出行安全:1) 在提倡绿色出行的同时,通过新闻媒体、海报标语等加强绿色出行安全的宣传,增强安全意识,规范出行行为;2) 开展绿色出行安全知识教育活动,如出行安全讲座、课程、知识竞答等,提高居民出行安全素养;3) 政府相关部门加大对居民绿色出行安全的管理,严格执法,尽量减少居民违章的可能性。

2.3.2 设备故障

城市车辆设备故障是指自行车、公共运输工具等绿色出行工具发生问题,无法正常工作。减少或避免因设备故障影响绿色出行安全的保障措施有:1) 车辆生产商加强对设备(发动机、变速器、轮胎等,包括零部件)质量的检查,减少劣质产品投入生产中;2) 车辆所有者经常保养,经常将其送到汽车保修厂、车管所等地方检查;3) 车辆使用者注意使用,正常载重,合理使用润滑等。

2.3.3 特殊时间(段)

特殊时间(段)是指凌晨、深夜、上班高峰期等时间点及节假日等时间段。可采取以下措施保障这些时间(段)绿色出行安全:1) 加强驾驶员的心理素质教育,在黑暗、道路拥挤等情况下保持冷静,平稳驾驶;2) 在凌晨、深夜等黑暗环境时,市政管理局及电力公司等确保路灯正常工作;3) 交通局等政府部门合理安排交警,在这些时间(段)设置工作值班人员进行交通管理。

2.3.4 路况差

城市道路路况差可能是市政单位施工质量未

达标准,也可能是经过长期使用后道路质量下降。针对这一点的保障措施有:1) 增强驾驶员驾驶能力,在遇到路况差的道路时仍能安全、平稳、低速驾驶;2) 道路养护部门、地方道路管理局等及时了解路段状况,进行维护;3) 道路设计单位合理设计道路,市政单位施工时确保路基路面质量,保证路面平整等。

3 结语

在大力提倡绿色出行的背景下,该文根据问卷调查数据及专家知识经验确定指标体系及贝叶斯网络节点,利用贝叶斯网络构建武汉市居民绿色出行风险模型。利用 Netica 软件进行贝叶斯网络因果推理和敏感性分析,得出城市居民问题、城市车辆问题敏感性极高,其中安全意识缺乏、违章行为、违章心理、行为失误、设备故障、特殊时间(段)、路况差 7 个影响因子对绿色出行安全的影响最大,可从这 7 个方面采取保障绿色出行安全的措施。

文中也存在一些不足,如调查只从居民角度着手,调查结果偏主观,未从车辆、道路、环境等相关企业获得绿色出行事故及环境污染数据,还有待进行更深一步研究。

参考文献:

- [1] CHRIS Bradshaw. Green transportation hierarchy: A guide for personal and public decision-making[R/OL]. <http://www.sierraclub.org/sprawl/articles/trips.asp>, 2009-02-10.
- [2] Government Office of Science. Foresight: tackling obesity; future choices[R]. London: Government Office of Sciences, 2007.
- [3] 杨晓光,白玉,严海,等.城市绿色交通发展研究[J].绿色交通向导,2009(17):34-37.
- [4] 肖建斌.深圳市居民低碳出行行为影响因素研究[D].深圳:深圳大学,2017.
- [5] YUJIRO Hirano, TOMOHIKO Ihara, YUKIKO Yoshida. Estimating residential CO₂ emissions based on activities and consideration of methods to reduce emissions[J]. Building and Environment, 2016, 103: 1-8.
- [6] FARLA J, ALKEMADE F, SUURS R A. Analysis of barriers in the transition toward sustainable mobility in the Netherlands[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2010, 77(8): 1260-1269.
- [7] 温惠英,杨锐烁,张子佳,等.中等城市绿色交通发展水平评价[J].城市交通,2017,15(3):1-7.
- [8] 刘维跃,曹溥晶,孔震.基于熵权的 TOPSIS 法的京津沪城市绿色交通发展对比研究[J].经济研究导刊,2018(34):42-48+60.
- [9] ALEX A, TIMILSINA G R. Impacts of policy instruments to reduce congestion and emissions from urban transportation: the case of Sao Paulo, Brazil[J]. Policy Research Working Paper, 2009, 42(5): 1627-1639.
- [10] 郑婧,陈可石.德国弗赖堡绿色交通规划与策略研究[J].现代城市研究,2014(5):109-115.
- [11] 彭建华,吴宗之,金龙哲.基于层次分析法的城市道路安全性评价[J].安全,2005(6):15-17.
- [12] 高士麟,王志攀,何冠楠.出行态度及社区环境对出行行为的影响分析[J].公路与汽运,2014(3):43-47.
- [13] 李根读.基于熵权物元模型的城市道路交通安全评价研究[J].公路与汽运,2018(1):45-48.
- [14] 杨冉冉,龙如银.基于扎根理论的城市居民绿色出行行为影响因素理论模型探讨[J].武汉大学学报(哲学社会科学版),2014,67(5):13-19.
- [15] 李赤林,黄勇.基于结构方程的城市居民绿色出行意愿影响因素研究[J].物流科技,2016(12):85-89.
- [16] 潘静玉.大中型城市居民绿色出行行为影响研究[D].大连:大连理工大学,2014.
- [17] LAURITZEN S L, SPIEGELHALTER D J. Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 1988, 50(2): 157-194.
- [18] 窦慧丽,王国华.城市轨道交通与常规公交衔接评价指标体系及方法研究[J].公路与汽运,2016(1):42-46.
- [19] 芒烈.面向轨道交通站点的需求响应型接驳公交系统调度方法[D].长春:吉林大学,2017.
- [20] 黎晖.基于数据包络法的地铁-公交接驳换乘状态评估[J].公路交通科技(应用技术版),2017(9):310-312.
- [21] 朱雪松,彭国雄,周文辉.基于层次分析(AHP)的公共交通枢纽换乘衔接模糊评价[J].内蒙古工业大学学报(自然科学版),2003,22(4):311-315.

收稿日期:2019-12-03

收稿日期:2020-03-10

(上接第 20 页)