

高速公路交通事故影响因素分析及防控策略

魏泽平¹, 刘淼淼^{1*}, 张学驰²

¹北京航空航天大学大学车路协同与安全控制北京市重点实验室, 北京

²交通科技智库平台(交通运输部公路科学研究所), 北京

收稿日期: 2022年1月20日; 录用日期: 2022年2月21日; 发布日期: 2022年2月28日

摘要

严重的交通事故会使高速公路通行能力大大降低, 并在很短时间内造成交通拥堵和行车延误, 而正确合理的事故影响范围分析可以有效提高高速公路的事故管理水平。本文以北京市高速公路为例, 对交通事故形态、时空特征以及事故发生前后交通流变化特征进行分析, 提出了不同因素对于事故发生的多因素耦合作用。在此基础上研究了事故持续时间的主要影响因素, 采用K-means聚类方法分析流量与事故持续时间关系, 有针对性地提出在高速公路运营管理过程中减少和防止事故发生的方法和对策, 为管理部门提供参考。

关键词

高速公路, 事故特征, 影响因素, 防控策略

Analysis of Factors Affecting Expressway Traffic Accident and Preventive Measure

Zeping Wei¹, Miaomiao Liu^{1*}, Xuechi Zhang²

¹Beijing Key Laboratory for Cooperative Vehicle Infrastructure Systems and Safety Control, School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing

²Opening Funding Supported by the Platform of Transport Technology Thinktank (Research Institute of Highway, Ministry of Transport), Beijing

Received: Jan. 20th, 2022; accepted: Feb. 21st, 2022; published: Feb. 28th, 2022

Abstract

Serious traffic accidents will greatly reduce the capacity of the expressway, and cause traffic con-

*通讯作者。

gestion and travel delays in a very short time. So the reasonable analysis and correct prediction of the impact of the accident can effectively improve the freeway accident management. Taking the expressway in Beijing as an example, this paper analyzes the traffic accident patterns, temporal and spatial characteristics and the traffic flow change characteristics before and after the accident, and puts forward the multi-factor coupling effect of different factors on the accident. On this basis, the main influencing factors of the accident duration are studied, and the relationship between traffic flow and the accident duration is analyzed by using k-means clustering method. The methods and countermeasures to reduce and prevent accidents in the process of expressway operation and management are put forward to provide reference for the management department.

Keywords

Expressway, Accident Characteristics, Influencing Factors, Preventive Measure

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

道路拥堵问题已经成为世界上很多国家面临的主要交通问题之一。交通道路拥堵主要来源于每日高峰小时的常发性拥堵以及不可预知的交通事故而引起的偶发性拥堵,而交通拥堵和出行延误会增加二次事故发生的可能性。交通事故不仅会带来巨大的经济损失,还会大大降低道路的运行效率。因此,探寻高速公路交通事故分布特征,总结事故发生规律,有助于相关管理部门采取适当的交通管理控制措施,诱导出行者选择合理的行驶路径,从而避免交通拥堵,提高高速公路事故管理水平。

国内外学者对于高速公路以及隧道交通事故做了大量研究。在交通事故特征分布及影响因素方面,瑞士研究人员以 800 多起高速公路隧道交通事故作为数据源,分析总结了影响隧道安全运营的多项风险因素,针对性地提出了一些降低运营风险的措施[1] [2]。国内学者对山区、省域高速公路交通事故时空分布特性进行分析,提取主要影响因素,并针对性地提出安全改善对策[3] [4] [5] [6]。在交通事故持续时间研究方面,以往的研究大多采用时间、地点、事故类型、涉及车辆类型以及事故严重程度和天气状况等因素研究对交通事故持续时间的影响[7] [8] [9] [10] [11]。

已有研究成果对高速公路交通安全的提高有积极作用,但较少研究采用交通流数据集,研究交通状况因素对事故持续时间的影响。本文采用收集到的北京市高速公路交通事故数据作为分析数据源,数据主要包含两部分:事故数据(包括发生时间、地点、类型、严重程度等)和交通流特征数据(包括流量、速度、车型比例等,时间间隔 1 min),其中交通流数据来源于事故发生地点最近的道路检测器,统计出事故发生前后各一小时内流量均值、占有率、速度等参数,基于以上两类数据对事故的形态特征、时空分布、交通流特征以及事故持续时间影响因素进行了分析,为高速公路运营管理提供参考。

2. 交通事故与交通流参数特征分析

2.1. 事故特征分析

对收集到的北京市高速公路 2018~2019 两年内发生的 1379 起交通事故进行分析,得到在事故形态、空间及时间方面明显的特点:

1) 在事故形态方面, 高速公路交通事故主要为追尾碰撞、单车撞固定物、侧翻事故三种事故形态, 各事故形态占比如图 1 所示, 多车追尾碰撞所占比例达到半数以上。此外, 侧翻事故中多涉及大型车, 而追尾碰撞事故多为小型车辆。

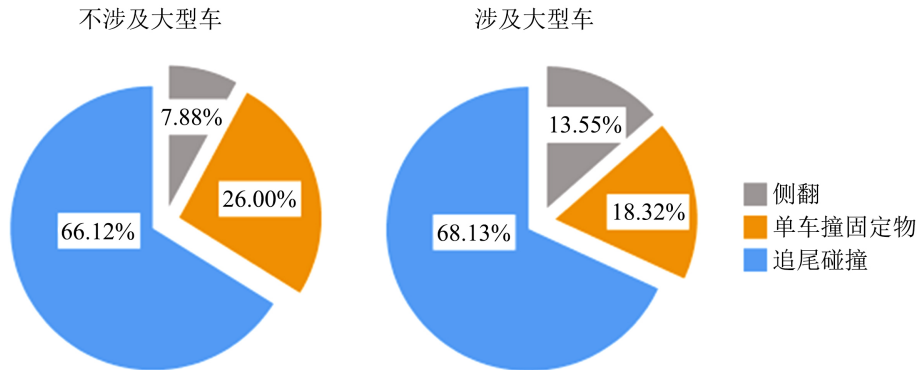


Figure 1. Shape distribution of freeway traffic accidents
图 1. 高速公路交通事故形态分布

2) 在空间上, 分别统计了发生在北京市各高速公路六环、京承、京哈、京平、通燕、机场二通道、机场南线和机场北线的事数, 如图 2 所示。其中, 六环路事故发生频率最高, 其次是京承和京哈高速公路。由于六环路为闭环绕城高速公路, 相比于其他放射性高速公路里程较长、封闭性较强, 事故发生频率较高。

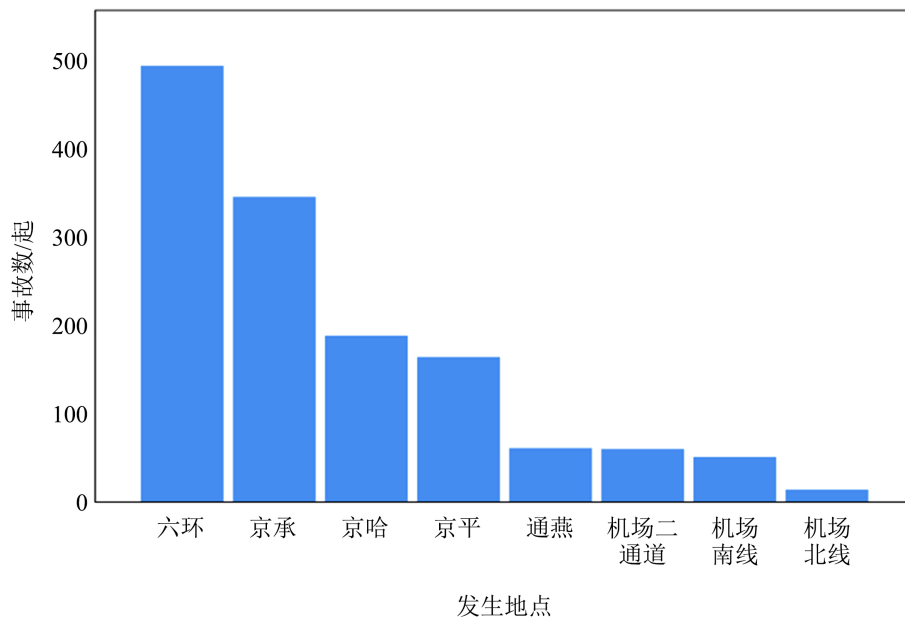


Figure 2. Spatial distribution of freeway traffic accidents
图 2. 高速公路交通事故空间分布图

3) 在时间上, 分别统计了一年內交通事故的月度分布和一天內各时段的事数频次分布, 如图 3 和图 4 所示。

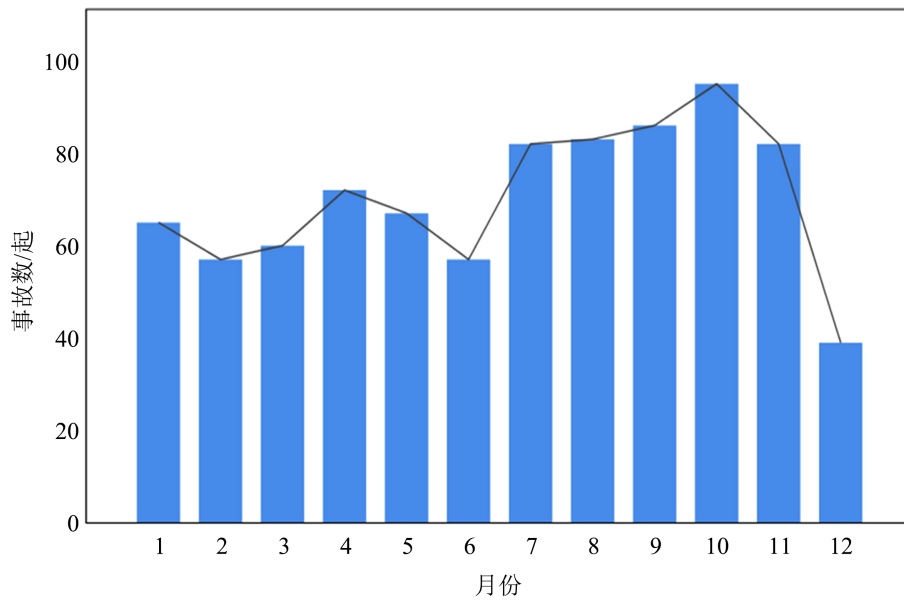


Figure 3. Monthly distribution of freeway traffic accidents
图 3. 高速公路交通事故月度分布图

由图 3 可知，各高速公路北京段交通事故集中发生于 7~11 月份，其中 10 月份发生起数最多。

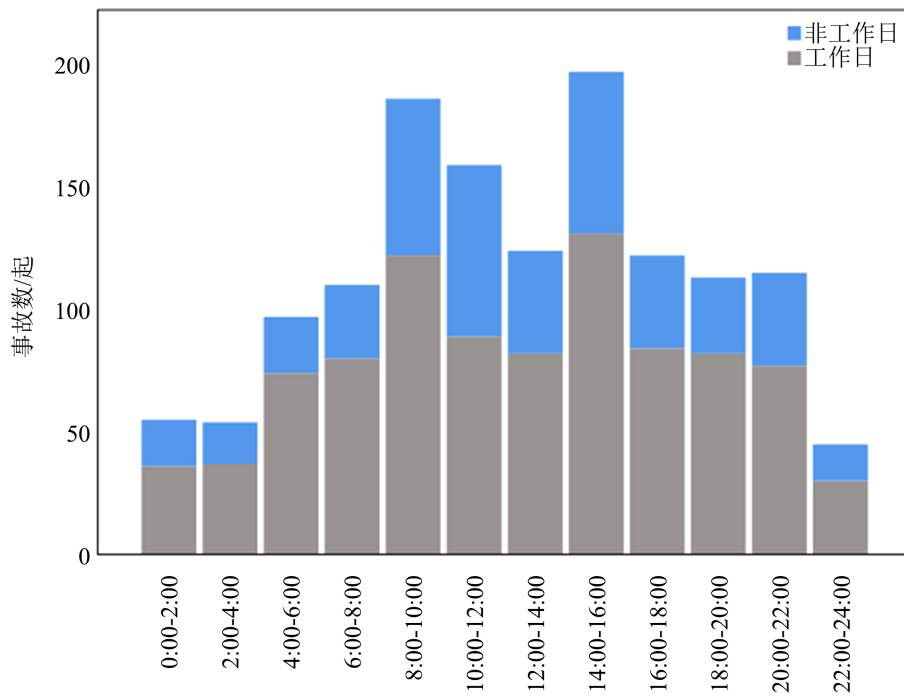


Figure 4. Distribution of freeway traffic accidents in different periods of a day
图 4. 高速公路交通事故一天内各时段分布图

由图 4 可知，各高速路段在一天内的事故多发时段为 8:00~10:00 和 14:00~16:00，且工作日事故发生频率更高。

2.2. 事故前后交通流参数变化特征分析

交通流运行中所表现的定性和定量特征就是交通流特性, 一般来说, 宏观交通流特性研究道路上整体车辆表现出的特性, 如流量、密度、速度、平均延误等参数; 微观交通流特性研究车辆间的特性, 如车头时距和车头间距等。相关研究表明交通流特性和交通安全有着极为密切的联系, 交通流的紊乱会引起事故的发生, 而交通事故反过来也会影响交通流的正常运行状态。

本文选取京哈高速北京段的事故以及交通流数据进行分析, 该高速公路为双向 6 车道, 设计车速是 120 km/h, 北京辖区的公路长度是 41 km。对所有事故发生前和发生后 5 min 的流量、速度、占有率变化进行统计, 如图 5~7 所示。

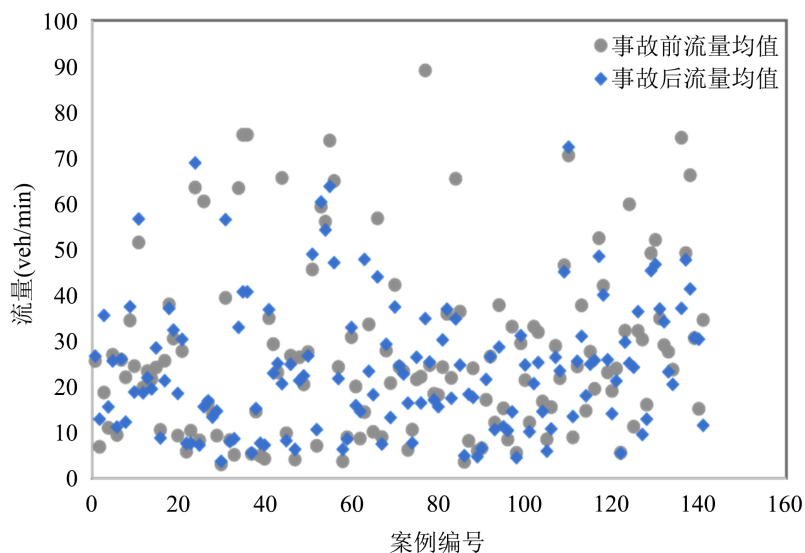


Figure 5. Traffic flow changes before and after accidents

图 5. 事故发生前后流量变化

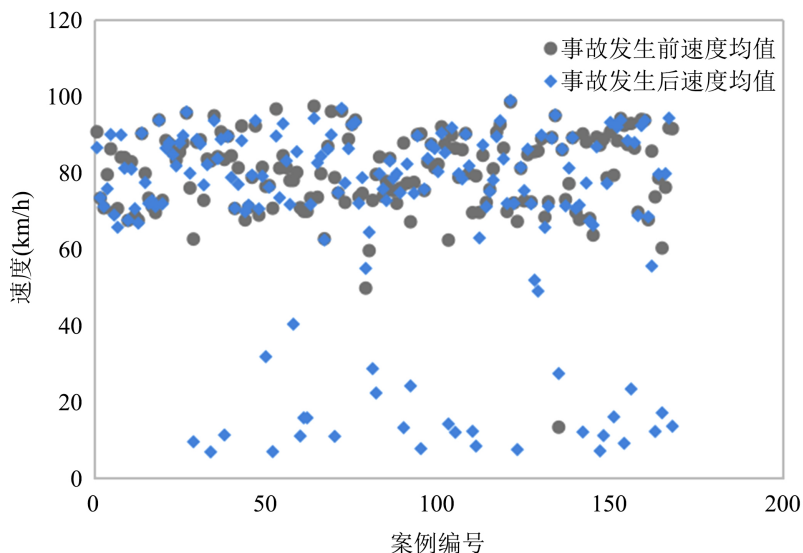


Figure 6. Speed changes before and after the accident

图 6. 事故发生前后速度变化

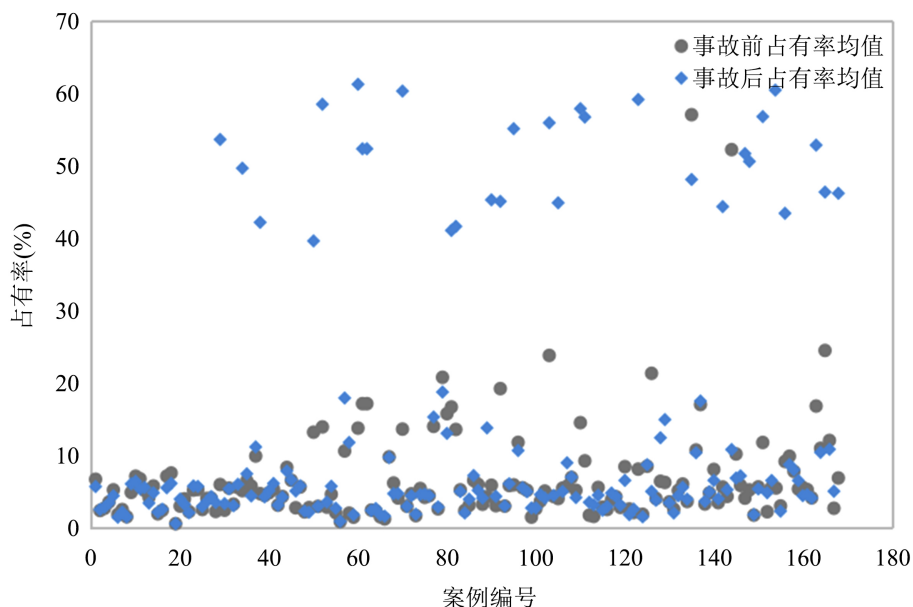


Figure 7. Occupancy changes before and after accidents

图 7. 事故发生前后占有率变化

由图 5 可以看出,事故发生前的流量明显大于事故发生后的流量,事故发生前流量均值为 27 veh/min,事故发生后流量均值为 24 veh/min。由于流量还受高峰时段的影响,所以单从流量的变化难以判断事故对交通流的影响。由图 6 所示,事故发生前速度均值是 80.54 km/h,事故发生后速度均值为 68.95 km/h,事故发生前的速度均值明显大于事故发生后的速度均值,但绝大部分事故发生前后速度变化较小,交通流状态不受影响,而有一部分案例事故前后速度发生明显改变,说明该部分事故发生后对交通流产生了显著影响。由图 7 分析得知,事故发生后的占有率均值明显大于事故发生前的占有率均值,事故发生前占有率均值为 6.39%,事故发生后占有率均值为 12.96%,这是由于事故发生后车速降低,对检测器占用时间变长。从以上分析可以看出,事故发生后速度和流量均值明显降低,而占有率明显升高。

本文对交通事故形态特征、时空分布、事故前后交通流变化特征进行了分析,可以看出交通事故特征受多方因素影响,显示了不同因素对事故发生的多因素耦合作用。

3. 交通事故持续时间相关影响因素分析

交通事故是指非常发性事故,包括交通事故、单车故障、恶劣天气、道路施工等,交通事故持续时间是指从事故发生到道路恢复通行能力的持续时间。交通事故的持续时间一般可以分为四个阶段:第一阶段为事故发生阶段,是指从事故发生到交通管理者或响应队伍接到报警的时间;第二阶段为事故响应时间,是指从接到报警到救援队伍到达现场的时间;第三阶段为事故清除时间,是指交警及救援车辆到达现场后,根据现场情况处理受伤人员、清理事故车辆直到现场清理完毕的过程,即救援队伍清除交通障碍的时间;第四阶段为交通恢复阶段,是指交通事故清除后,车辆排队开始消散直到交通流恢复到正常运行状态的过程。见图 8。

虽然大部分研究者将交通事故持续时间分为这四个阶段,但并非所有的交通事故都要经历这四个阶段,如果事故发生后马上就被相关交通管理部门获知,那么就没有事故发生阶段;再比如对于轻微事故,事故车辆被很快移动到应急车道,不存在车辆排队现象,交通流一直处于正常运行状态,则不存在交通恢复阶段。

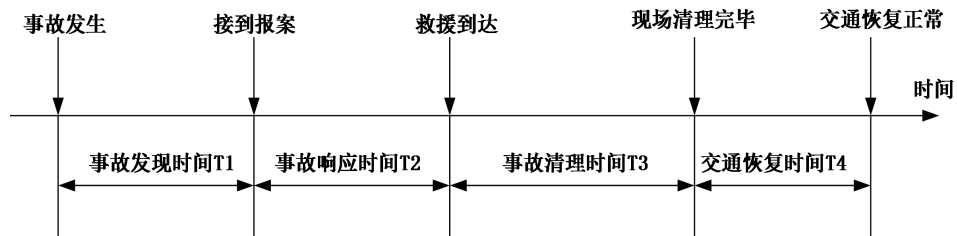


Figure 8. Distribution of traffic incident duration
图 8. 交通事故持续时间构成

3.1. 事故持续时间分布

针对京哈高速北京段的交通事故持续时间进行分析, 相关统计指标见表 1。

Table 1. Incident duration data information
表 1. 持续时间统计指标

统计指标	值/min
平均值 mean	136
标准差 std	122
最大值 max	621
最小值 min	5

由表 1 可知, 持续时间最大值为 621 min, 最小值为 5 min。大多数(75%)事件持续时间不到 200 min, 持续时间总平均值为 136 min, 均方根为 122 min。

图 9 和图 10 分别为持续时间频率分布直方图和持续时间对数值正态 P-P 图。

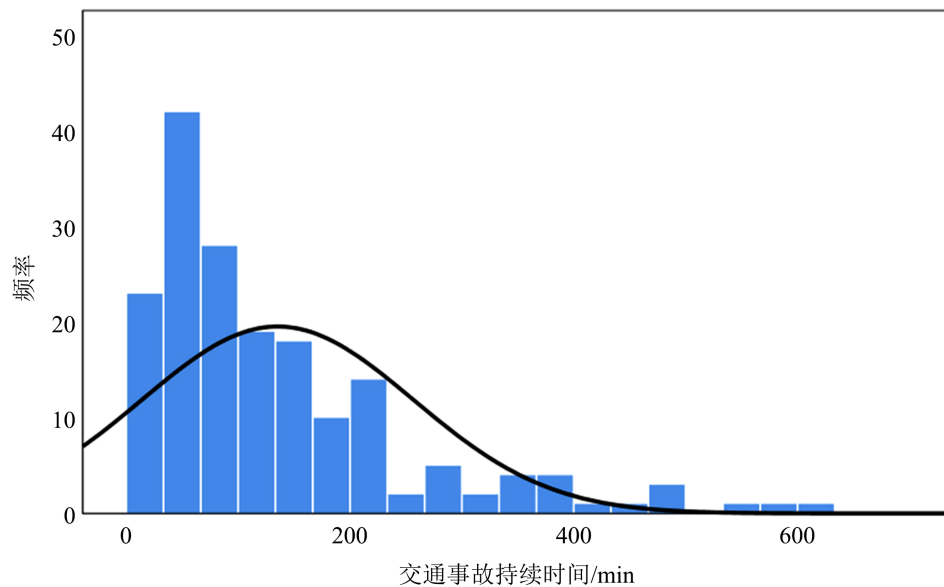


Figure 9. Duration distribution frequency histogram
图 9. 持续时间频率分布直方图

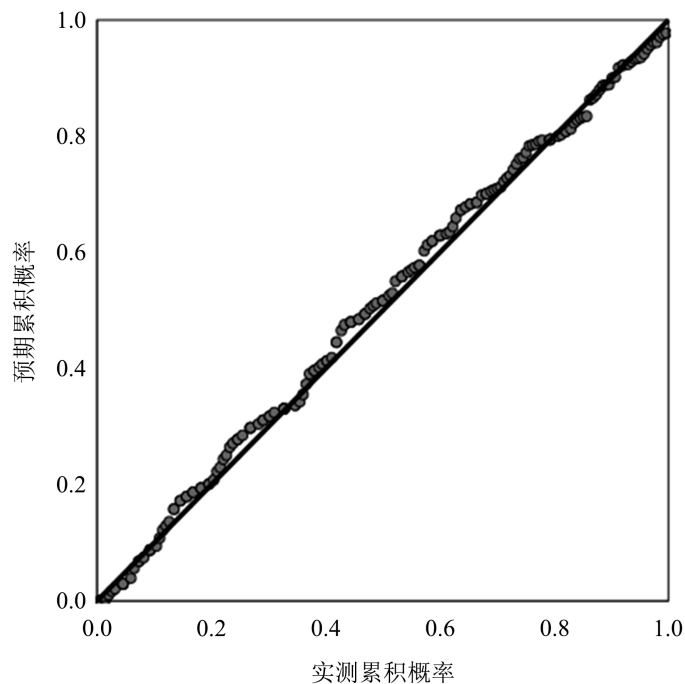


Figure 10. Normal P-P plot of log value of incident duration
图 10. 事故持续时间对数值的正态 P-P 图

由以上两图可以看出，图 9 中的曲线为正态分布曲线，且事故持续时间整体呈右偏态分布，由图 10 可知，持续时间对数值服从正态分布。

3.2. 事故持续时间主要影响因素分析

交通事故持续时间的长短与事故本身特征和交通流状态相关，因此本文将交通事故持续时间的影响因素分为事故特征因素和交通流特征因素两大类，其中事故特征因素主要用于描述事故状况，反映了事故严重程度，在一定程度上决定了事故处理的难易程度，因此主要与事故清除时间相关；交通流特征因素主要有事故发生后的流量、速度以及占有率均值变量，交通状况一方面影响着路政、救援以及养护队伍到达时间，而这决定了事故持续时间的响应阶段，另一方面影响着事故清理完毕后交通流恢复正常的时间。对所有影响因素进行分类，结果如表 2 所示。

对于离散型的分类变量，本文采用箱型图来描述其与因变量的关系，箱型图能够较好地展现出数据的集中趋势和离散程度，并能直观明了地识别批量数据中的异常值。

从图 11 可以看出，侧翻事故的平均持续时间最长，约为 160 min；单车事故以及涉及三辆车以上的事事故持续时间均值比涉及两车的大，说明事故持续时间并非随涉及车辆数增加而变长；占用三条行车道的事事故持续时间比较分散，且持续时间基本上随占用行车道数增加而变大，因为占用行车道数越多，通行能力下降得越多，拥堵越严重，清理时间越长；有大型车的交通事故持续时间均值明显大于不涉及大型的事事故，但持续时间比较分散；节假日比工作日的事事故持续时间长，这是因为节假日处于出行高峰期，流量比较大，这可能会增加事故响应时间；发生在白天的事故持续时间少于夜间，这是因为夜间视野不清晰，值班人员也较少，事故发生后难以及时发现；事故持续时间较长的地点集中分布于 K16-K20 和 K31-K35 路段，这可能是由于应急救援部门分布较远等管理因素，也可能是交通标志标线设置不合理等道路因素导致的。

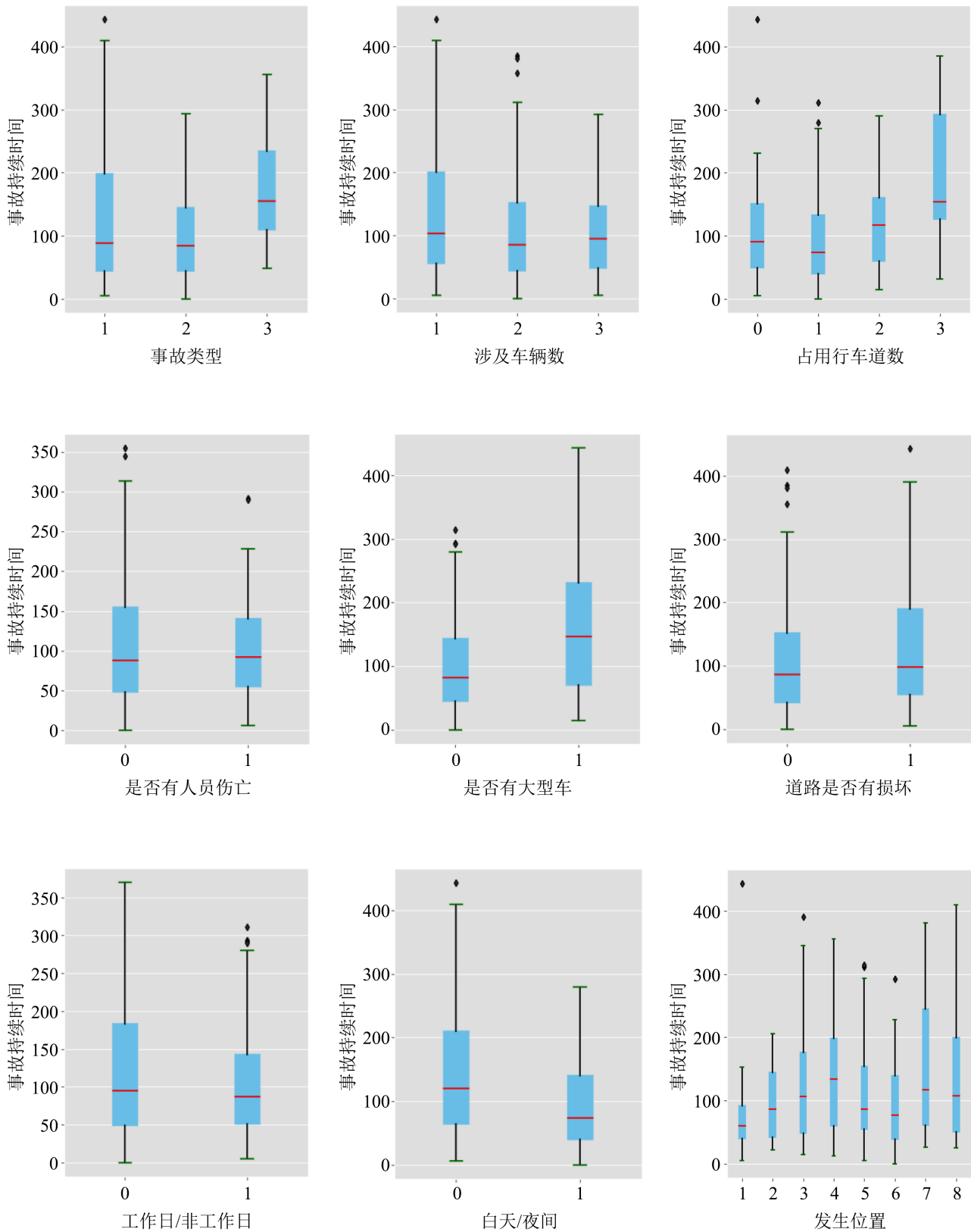


Figure 11. Box diagram of influencing factors of incident duration

图 11. 事故持续时间影响因素箱型图

Table 2. Classification results of influencing factors
表 2. 影响因素分类结果

变量分类	变量解释	变量类型	变量值	
事故特征因素	事故类型	D	1-撞固定物; 2-追尾碰撞; 3-侧翻事故;	
	事故严重程度	事故涉及车辆数	D	1, 2, 3+
		占用行车道数	D	0, 1, 2, 3
		是否有人人员伤亡	D	1-是; 0-否
		是否有大型车	D	1-是; 0-否
	时间因素	道路是否有损坏	D	1-是; 0-否
		工作日/非工作日	D	1-工作日; 2-0-非工作日
	地点因素	白天(08:00 AM~20:00 PM)/ 夜间(20:00 PM~08:00 AM)	D	0-白天; 1-夜间
		按桩号划分(K0-K5/K6-K10/K11-K15/ K16-K20/K21-K25/K26-K30/K31-K35/ K36-K40)	D	1 (K0-K5) 2 (K6-K10) 3 (K11-K15) 4 (K16-K20) 5 (K21-K25) 6 (K26-K30) 7 (K31-K35) 8 (K36-K40)
			交通状态因素	流量均值
交通状况				C
速度均值				C
占有率均值			C	

注: C 表示连续型变量, D 表示离散型变量。

对于交通状态因素的连续型变量, 本文采用散点图及回归曲线分析流量、速度、占有率随事故持续时间的变化。

本文选取事故发生前 10 min 的流量、速度和占有率均值分析其对交通事故持续时间的影响。从图 12、图 13 和图 14 可以看出, 流量、速度及占有率与事故持续时间并没有明显的线性关系, 但从图 13 和图 14 可以看出事故持续时间集中分布在速度大于 60 km/h 和占有率小于 20% 的状态下, 且速度和占有率的分布趋势正好相反。

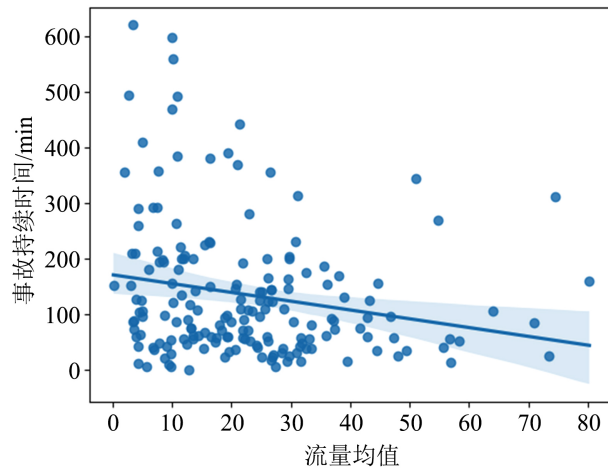


Figure 12. Flow-duration scatter plot
图 12. 流量 - 持续时间散点图

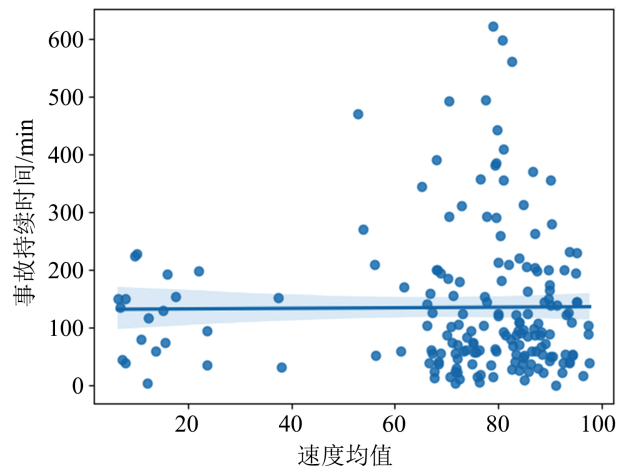


Figure 13. Speed-duration scatter plot
图 13. 速度 - 持续时间散点图

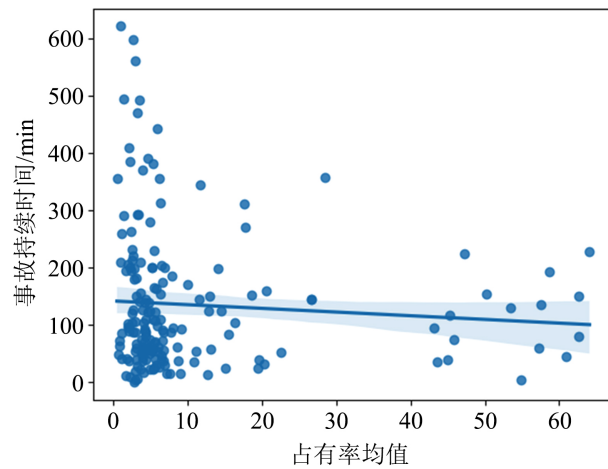


Figure 14. Occupancy-duration scatter plot
图 14. 占有率 - 持续时间散点图

由上文可知，事故持续时间不满足正态分布，因此本文采用可以处理不服从同方差正态分布样本数据的非参数单因素方差分析方法对事故持续时间影响因素中的离散变量进行显著性分析，取显著性水平 $\alpha = 0.05$ ，分析同一变量不同水平之间其事故持续时间是否有明显差异。

表 3 结果表明，白天/夜间、事故类型、占用行车道数、是否有大型车 4 个因素对事故持续时间影响显著，而工作日/非工作日、发生位置、涉及车辆数、是否有人员伤亡、道路是否有损坏 5 个因素对事故持续时间不具有显著影响。

Table 3. Results of non-parametric one-factor ANOVA
表 3. 非参数单因素方差分析结果

影响因素	概率 P
白天/夜间	0.000**
工作日/非工作日	0.993
发生位置	0.082
事故类型	0.004**
涉及车辆数	0.706
占用行车道数	0.014*
是否有人员伤亡	0.897
是否有大型车	0.000**
道路是否有损坏	0.136

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ 。

对于流量、速度、占有率三个连续变量和事故持续时间进行相关性分析，用雅克 - 贝拉检验变量的正态性，如表 4 所示。

Table 4. Normality test
表 4. 正态性检验

名称	Jarque-Bera 检验		
	χ^2	df	p 值
流量	60.795	2	0.000
占有率	374.696	2	0.000
速度	145.718	2	0.000
事故持续时间	150.044	2	0.000

由表 4 知流量，占有率，速度，事故持续时间全部均不具有正态性特质，故使用 Spearman 相关系数分析相关关系的强弱情况，相关性分析结果如表 5 所示。

Table 5. Correlation analysis
表 5. 相关性分析

		交通事故持续时间
发生后 10 min 流量均值	斯皮尔曼 Rho 相关系数	-0.190*
	Sig. (双尾)	0.011
发生后 10 min 速度均值	斯皮尔曼 Rho 相关系数	-0.028
	Sig. (双尾)	0.709
发生后 10 min 占有率均值	斯皮尔曼 Rho 相关系数	-0.090
	Sig. (双尾)	0.233
发生前 10 min 流量均值	斯皮尔曼 Rho 相关系数	-0.223**
	Sig. (双尾)	0.003
发生前 10 min 占有率均值	斯皮尔曼 Rho 相关系数	-0.114
	Sig. (双尾)	0.129
发生前 10 min 速度均值	斯皮尔曼 Rho 相关系数	-0.030
	Sig. (双尾)	0.695

*在 0.05 级别(双尾), 相关性显著; **在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

由表 5 可知, 事故持续时间和事故发生前后 10 min 流量之间的相关系数值分别为-0.223 和-0.190, 并且呈现出 0.01 水平的显著性, 说明事故持续时间和流量之间有着显著的负相关关系, 且事故发生前流量对事故持续时间影响更为显著。

3.3. 基于流量聚类事故持续时间分析

由于流量与事故持续时间存在着明显的负向关系, 故用 K-means 聚类方法对事故发生前 10 min 流量均值进行聚类, 分析不同流量范围内事故持续时间的分布趋势, 在一定程度上可以预测事故持续时间的范围。聚类结果如表 6 所示, 表中分析了每类的占比、流量均值以及相应类别的取值范围。

Table 6. Clustering results by flow
表 6. 按流量聚类结果

聚类	占比	流量均值	流量区间[min, max]
1	44.69%	9.39	[0, 18)
2	11.73%	54.67	[18, 40)
3	43.58%	26.96	[40, 81]

由表 6 可知, 按流量将所有事故聚类为三类, 且流量区间依次增大。根据不同的流量取值范围对事故持续时间进行统计分析, 如表 7 所示。

Table 7. Analysis of correlation between traffic flow and incident duration
表 7. 流量与事故持续时间相关关系分析

流量区间	事故持续时间均值	事故持续时间[Q ₁ , Q ₃]
[0, 18)	168	[60, 221]
[18, 40)	110	[44, 145]
[40, 81]	105	[38, 140]

表 7 统计了相应区间的事故持续时间均值, 并取上四分位数 Q₁ 和下四分位数 Q₃ 作为事故持续时间上下界, 反映出不同流量范围内事故持续时间的集中趋势。可以看出, 流量较小的区间对应的事故持续时间较长。

为了探究流量与事故持续时间负向关系的原因, 对不同流量区间对应个案的事故形态进行对比分析, 如图 15 所示。

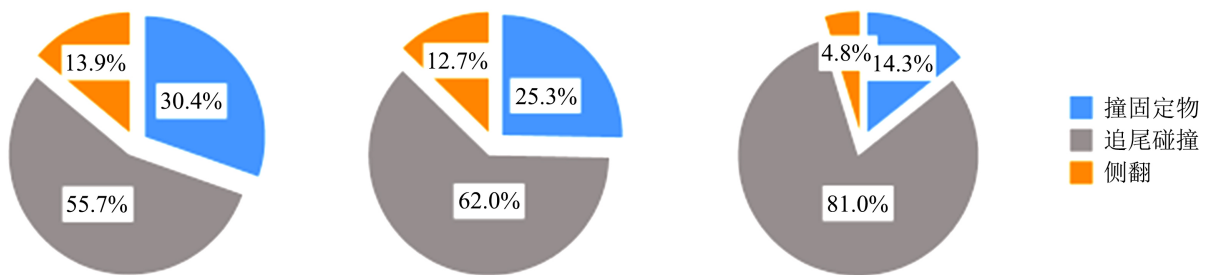


Figure 15. Traffic flow-incident type pie chart
图 15. 流量 - 事故类型饼状图

由图 15 可知, 流量较小且事故持续时间较长的事故中侧翻和撞固定物事故较多, 追尾碰撞事故较少。流量较大且事故持续时间较短的事故中侧翻和撞固定物事故较少, 追尾碰撞事故较多。

4. 结论

通过对北京市高速公路典型交通事故的事故形态、时空特征、事故发生前后交通流变化特征以及事故持续时间主要影响因素进行分析, 提出如下建议:

1) 基于交通事故形态特征分析, 可知事故形态以追尾碰撞事故为主, 侧翻事故多为大型车。因此一方面要加大对车辆超速、变道、停车等违规驾驶行为的监控处罚力度, 并定期对路面标志标线进行修缮, 提醒过往车辆与前车保持相对安全的距离。另一方面要加强对大型货车、挂车的管理, 加强对货物装载情况的检查, 如重心是否偏离、是否超重等, 并对大型车进行合理的速度管理, 尤其是在急转弯等特殊路段。

2) 基于交通事故时空特征分析, 可知 7~11 月为事故多发期, 而工作日 8:00~10:00 和 14:00~16:00 为事故多发时段。因此要加强事故高发期的交通管控, 针对高峰时段长期发生拥堵的路段, 可以实行一定的交通管控措施, 以保证高速公路通行的安全和效率。

3) 基于事故持续时间主要影响因素分析, 可知侧翻类型的交通事故持续时间最长, 所以相关部门应完善拖车救援设施、增设拖车救援点等。此外, 白天/夜间、事故类型、占用行车道数、是否有大型车、流量 5 个因素对事故持续时间影响显著, 因此要针对性地分时段、分类型采取应急救援措施, 缩短事故

持续时间,提高救援效率。

4) 基于流量聚类事故持续时间分析,可知流量与事故持续时间呈现负向关系。故对于流量较大的路段或时间段应重点防范追尾碰撞事故的发生,流量较小的则应加强对大型车侧翻事故的监控。其次,根据事故发生前流量可有效估计事故持续时间分布范围,为交管部门安排救援和出行者制定出行计划提供一定的参考。

5) 为了进一步提升道路交通安全性,建议继续完善高速公路交通事故识别和报警系统,升级视频监控和其他软硬件装置,实现公路事故、拥堵、停车等情况的自动判断并实时报警,缩短应急响应时间。

另外,本文通过对高速公路交通事故相关特征的综合分析,得出结论如下:

1) 交通事故往往受多方因素耦合作用的影响,不同路段、不同时间段事故的发生会呈现不同的特征。

2) 事故持续时间会受事故发生时间(白天/夜间)、事故类型、事故占用行车道数、是否涉及大型车、路段交通流量等因素的影响。

3) 根据事故特征和事故持续时间影响因素分析可以看出,为保证道路交通安全,可以借助智能化交通管控、实时交通信息处理、交通运行安全评估分析等手段提高高速公路运营管理水平,以减少和杜绝潜在交通事故的发生。

基金项目

交通科技智库平台(交通运输部公路科学研究所)开放基金课题“公路交通运输行业科技服务智库平台系统开发”。

参考文献

- [1] Rhodes, N. (2005) European Research on Tunnel Fire Safety. *Tunnels & Tunnelling International*, **37**, 25-27.
- [2] Haack, A. (2002) Current Safety Issues in Traffic Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **17**, 117-127. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00013-5](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00013-5)
- [3] 卢英志. 山区二级公路交通事故的发生及严重程度研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [4] 田毕江, 梁超, 鲍彦莅, 杨文臣, 贾现广. 山区高速公路交通事故时空分布特性与安全改善对策[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(6): 1014-1018.
- [5] 徐钟. 省域高速公路交通事故救援组织研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2015.
- [6] 张光南, 钟俏婷, 杨清玄. 交通违法事故时空分布特征及其影响因素——以广州市为例[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(3): 208-214.
- [7] Chang, G.L. and Rochon, S.M. (2008) Analysis of Freeway Incident Duration for ATIS Applications. *World Congress on Intelligent Transport Systems, ITS America's Annual Meeting*, New York, November 2008, 950-958.
- [8] Lee, Y. and Wei, C.H. (2010) A Computerized Feature Selection Method Using Genetic Algorithms to Forecast Freeway Accident Duration Times. *Computer-aided Civil & Infrastructure Engineering*, **25**, 132-148. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2009.00626.x>
- [9] Ghosh, I., Savolainen, P.T. and Gates, T.J. (2014) Examination of Factors Affecting Freeway Incident Clearance Times: A Comparison of the Generalized F Model and Several Alternative Nested Models. *Journal of Advanced Transportation*, **48**, 471-485. <https://doi.org/10.1002/atr.1189>
- [10] 康国祥, 方守恩. 基于风险分析的交通事故持续时间预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 241-245.
- [11] 丛浩哲, 方守恩, 王俊骅. 交通事故持续时间影响因素分析及其回归模型[J]. 交通信息与安全, 2010, 28(3): 80-83.