

城市快速路异常事件发生频率的时间差异性分析

陈小鸿¹, 张江漫¹, 涂颖菲^{1,2,3}

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092;

3. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 城市快速路系统长时间处于高流量高密度状态时, 异常事件等小的扰动就可能引发较大规模的拥堵. 根据连接路段的匝道类型对路段进行分类, 利用上海市内环和中环浦西段一年的异常事件监控数据, 分析了不同路段上异常事件发生频率的月变、周变与时变特征, 并分别探讨了抛锚和碰撞两类异常事件与交通流特征的关系. 运用负二项回归建立了异常事件发生频率基于时间差异性的估计模型. 分析发现, 公休日变量估计结果显著, 温度只对抛锚类事件产生明显影响, 天气状况对不同快速路、不同时间段和不同事件的影响显著性有较大差异.

关键词: 城市快速路; 异常事件; 发生频率; 数据集计; 时间差异

中图分类号: U 491

文献标志码: A

Temporal Heterogeneity Analysis for Incident Frequency on Urban Expressways

CHEN Xiaohong¹, ZHANG Jiangman¹, TU Yingfei^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Institute of Railway and Urban Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Incidents on congested expressways lead to roadway capacity reduction and commuter time loss. Incident data of Shanghai inner-ring and middle-ring expressways in Puxi Area by video monitoring were employed in this study. An analysis was made of the monthly change, weekly change and daily change of incident occurrence on segments with different ramp types, and the relationship was explored between the incident occurrence and traffic flow characteristics. Negative binomial regression was adopted to establish the frequency estimation model to explore temporal heterogeneity. Results show that holiday is significant for

both types of incidents while temperature only has a significant impact on disabled vehicles. The effect of weather varies much among different expressways, time periods and incident types.

Key words: urban expressway; incident; frequency; data aggregation; temporal heterogeneity

随着交通出行需求的不断增长, 城市快速路拥堵已经成为世界上很多城市面临的主要交通问题之一. 一般情况下, 交通事件可以划分为计划性事件与偶发性事件^[1]. 计划性事件的发生规律性强且易管理控制, 出行者通常可以根据准确的信息发布改变出行路径或出行方式, 从而避免拥堵. 而偶发性事件由于发生时刻、发生地点等都具有很强的随机性, 往往难以控制而易造成大规模交通拥堵. 本文所研究的异常事件即指交通事件中的偶发性事件.

快速路是城市交通系统的重要组成部分. 以上海为例, 2009 年中心城快速路日均承担交通量 2 883 万公里, 约占路网总周转量的 45%^[2]. 与高速公路相似, 城市快速路没有平面交叉且一般无信号控制, 但是其匝道密集, 长时间处于高流量、高密度的运行状态且两侧无紧急停车带, 由于这些特征, 异常事件等小的扰动就可能引发较大规模的拥堵. 国外有关数据表明, 异常事件所造成的拥堵占城市快速路总拥堵的 60% 以上^[3]. 目前, 绝大多数交通事件的研究都关注于高速公路或地面道路上严重程度较高的交通事故, 对城市快速路上异常事件的分析较少^[3-6].

1 发生频率分析的两种集计方法

在对交通事件(包括交通事故)频率的研究中,

收稿日期: 2012-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(70701027); 新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0406)

第一作者: 陈小鸿(1961—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通运输规划与管理. E-mail: chenxh@tongji.edu.cn

通讯作者: 涂颖菲(1982—), 女, 博士后, 工学博士, 主要研究方向为交通运输规划与管理. E-mail: tuyingfei@tongji.edu.cn

尽管所采用的模型以及研究区域不同,但由于事件具有偶发性,学者们都采用了数据集计的方法,以避免所研究的因变量(事件发生频率)大部分为零,主要可分为时间集计和空间集计两种。目前,绝大部分关于事件发生频率的研究都采用时间集计的方法,最常见的为黑点判别及其原因分析^[4]。时间集计的方法是把事件发生的次数在时间轴上进行合计,用如一年内异常事件的发生次数进行建模。这类方法通常把空间划分为较小的区段,研究不同区段之间发生频率的差异性和影响因素(如年平均日交通量、几何线形、车道数等)。由于是在时间轴上进行集计,不同时间段内事件发生频率的差异性却无法分析,这导致了一些与时间有关的影响因素被忽略,或认为与发生频率并没有明显的相关性。

对异常事件进行控制管理时,不仅需要了解哪些区段以及为什么这些区段事件发生频率较高,而且也要掌握什么时间段事件较易发生及其原因,但以往研究很少关注事件发生频率的时间差异性。空间集计的方法是把事件发生次数在某个较大空间范围内进行合计,这样使得研究可以按照时间段划分,分析发生频率的时间差异性。同时也能够分析随时间变化的因素(如温度、天气等)对于事件发生频率的影响。本文基于上海市城市快速路监控中心的事件监控系统数据,对上海市内环和中环快速路异常事件发生频率的时间差异性进行分析,通过空间集计的方法建立模型并对其影响因素进行探讨。

2 快速路异常事件数据总体描述

上海市快速路监控中心于2010年2月开始启用一套事件监控系统。工作人员通过城市快速路布设的无盲点交通监控摄像装置,分工负责监控不同的快速路路段,当发现异常事件时将视频信号切换给事件管理员并在系统软件中记录下相关信息。对于每起异常事件,除了记录发生与结束时间外,还对事件发生时的天气、运行状况、影响车道数等属性进行描述。研究采用上海市内环与中环快速路浦西段的异常事件数据,共收录从2010年4月1日到2011年3月31日共12 331起异常事件的信息,由于99%的事件其类型为单车抛锚和碰撞,这里只对这两类异常事件进行分析。从表1可以看出,两条快速路在匝道布置和运行特征上都有明显差异。

从表2的统计结果可以看出一些基本的时空规律:“碰撞类”事件发生频率要明显高于“抛锚类”;两

类异常事件的发生频率在工作日与非工作日都有显著差异;不论按照路段总体还是单位里程,工作日还是非工作日,内环异常事件发生频率都要大于中环快速路。

表1 研究区域基本特征

Tab.1 List of study area features

快速路	设计时速/(km·h ⁻¹)	浦西段双向里程/km	单位里程匝道数/(个·km ⁻¹)	平峰行程车速/(km·h ⁻¹)	晚高峰行程车速/(km·h ⁻¹)
内环	80	61.15	1.11	48.4	25.0
中环	75	78.63	0.84	71.8	45.3

表2 发生频率的分类汇总

Tab.2 Detailed list of incident frequencies by classification

区域	类型	全程发生频率/(次·d ⁻¹)		单位里程发生频率/(0.01次·d ⁻¹ ·km ⁻¹)	
		工作日	非工作日	工作日	非工作日
内环	抛锚类	8.72	7.31	14.26	11.95
	碰撞类	14.17	13.84	23.17	22.62
外环	抛锚类	5.25	3.19	6.67	4.06
	碰撞类	7.65	4.41	9.73	5.61

3 发生频率的时间特征分析

在交通参数的时间特征中,最常用(最能说明变化特征)的是月变、周变与时变规律。不同类型路段上异常事件发生频率的时间特性可能不同,本文根据“路段两端的匝道类型”将路段分类,对抛锚和碰撞两类异常事件进行讨论,并在时间特征分析结果的基础上,探讨这两类事件发生频率与交通流特征的关系。

3.1 事件发生频率的时变特征

快速路上车流的行驶特征会因路段两端的匝道类型的不同而有差异,而且由于城市快速路路段长度一般较短,这种差异更加明显。由进口匝道和出口匝道连接的路段会形成车流交织区,称为“交织路段”;由进口匝道和进口匝道连接的路段会形成车流汇合区,称为“合流路段”;由出口匝道和出口匝道连接的路段会形成车流分离区,称为“分流路段”;由出口匝道和进口匝道连接的路段无集中的车道变换且不设置辅道,称为“基本路段”,4种类型路段的示意图如图1所示。

将内环与中环线的路段分为上述4种类型,由于每种类型路段数量不同,本文分别统计平均每条路段相应时间段内的发生频次总和(如平均每条交织路段上全年所有发生在周一的碰撞事件数之和),其时间变化趋势汇总如图2所示。

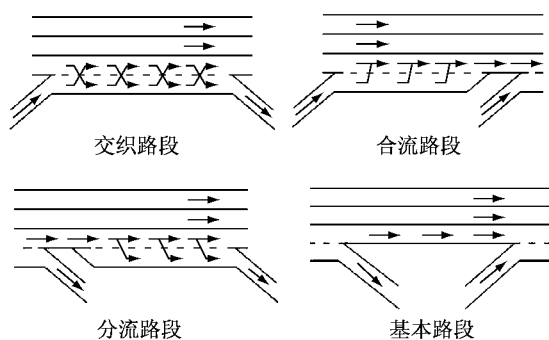
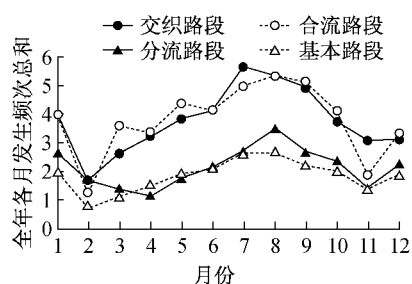
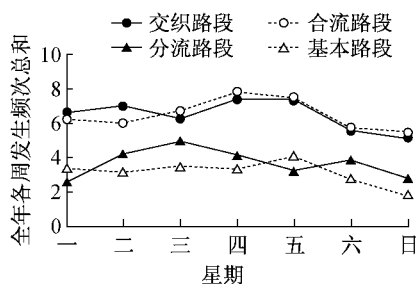


图1 城市快速路的4类路段

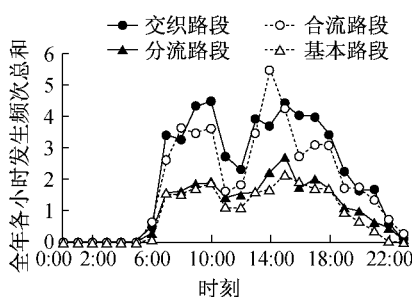
Fig.1 Four types of segments on urban expressways



a 抛锚类事件月变图



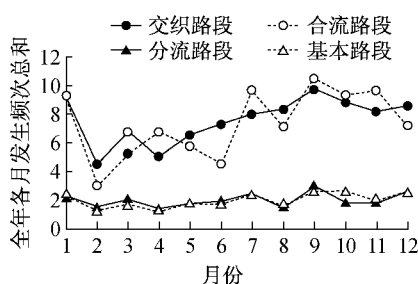
c 抛锚类事件周变图



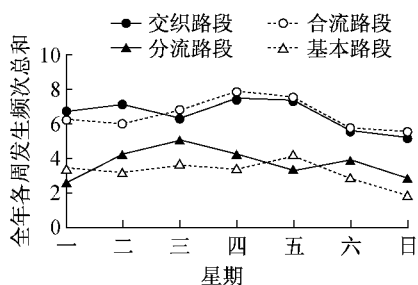
e 抛锚类事件时变图

各类型路段上事件发生频率的月变、周变和时变的共同特征如下:

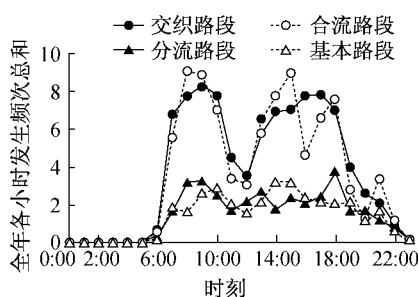
(1)月变. 随着月份的变化,事件发生频率出现了波动(图2a,2b). 抛锚类与碰撞类事件数在2月份都骤降,达到了全年低谷. 2011年2月份包含春节长假,交通量急剧减少. 抛锚类事件的发生频率随着季节的变化有明显的规律:夏季上升,冬季下降,且在7,8月达到一年的最高峰. 而碰撞类事件按月变情况与抛锚类有很大差异,除2月份急剧下降外,全年的事件发生频率都较平稳,但发现其在2010年9月和10月达到了最高峰,这是上海世博会最后两个开放



b 碰撞类事件月变图



d 碰撞类事件周变图



f 碰撞类事件时变图

图2 不同类型路段上事件发生频率的时间变化

Fig.2 Temporal changes of incident frequency on segments with different ramp types

月,世博会在临近尾声之际客流翘尾现象明显^[7],出行量的增加造成快速路拥堵加剧,碰撞类事件可能对运行状况的改变更加敏感,从而导致其发生频率明显增大.

(2)周变. 抛锚类事件发生频率的周变规律与碰撞类事件基本一致(图2c,2d). 工作日期间异常事件

发生频率呈现缓慢的上升趋势,在周五达到一周的高峰;周六略有下降,周日的发生频率达到一周的低谷. 相比于抛锚类事件,交织和合流路段上碰撞类事件发生频率在双休日下降更明显,这可能是由于碰撞类事件的发生与交通运行状况有关,而流量改变意味着行驶车量数和运行状态的双重变化.

(3)时变.两条快速路异常事件发生频率时变特征的共同点在于从早上6点钟开始急剧上升,从23点到次日的凌晨6点维持在时均发生频率接近零的水平(图2e,2f).但不同类型事件其白天高峰出现时间、高峰段持续时间、午间低峰都有差异,且下午频率开始急剧降落的时间点不同,与碰撞类事件相比,抛锚类事件发生高峰明显偏向中午.

此外,交织、合流、分流和基本路段上,其事件发生频率的时变特征也存在一定的差异:①交织路段和合流路段上两类事件的发生频率相近且变化趋势一致性强,分流路段和基本路段亦如此,且交织、合流路段平均每条路段的发生频率明显高于分流路段和基本路段.这主要由于交织路段和合流路段总体上比分流和基本路段的流量大.②对于碰撞类事件,随着时间的变化,分流与基本路段上事件频率变化缓和,而交织与合流路段上变化幅度大.这可能是因为交织与合流路段上车辆交织和变道行为更为激烈,碰撞事件更容易发生,运行状况对碰撞类事件影响显著.③比起抛锚类事件,不同类型路段上碰撞类事件的发生频率差异性更加明显,再次说明碰撞类事件的发生与交通流特征的关系更为密切.

3.2 发生频率与交通流特征的关联性

从发生频率的时间变化分析中可以看出,无论抛锚类还是碰撞类事件,都受到道路流量大小的显著影响.所以,月变、周变与时变走向与流量的变化趋势基本相似,如在春节长假的月份、周末、平峰时段和夜间时段发生频率都有所下降.

但是,发生频率变化与流量改变并非完全一致,不同类型事件的变化趋势也有所差异.抛锚类事件出现明显的季节变化和“正午集中”,这是由于车辆抛锚发生原因常常为水箱缺水、温度过高造成水箱开锅及机件老化引起油路、电路故障等,此类事件受气温的影响明显.

与抛锚类事件相比,碰撞类事件对世博会召开所引起的月交通流量变化和周交通流量变化更敏感,而其发生频率也出现了“高峰偏移”.此外,碰撞类事件在不同类型路段上(交织、合流、分流与基本路段),其发生频率的绝对值以及变化趋势的差异性大于抛锚类事件.这些都可能是因为交通流变化的同时运行状况有所改变,从而影响碰撞事件的发生.这里根据异常事件记录中的“运行状况”信息(分畅通($v \geq 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)、拥挤($20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} < v < 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)、堵塞($v \leq 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)3种情况)分析其对碰撞类事件发生频率的影响.采用碰撞事件占总

事件数的比例进行探讨.在“畅通”、“拥挤”、“堵塞”的状态下,碰撞类事件的发生比例分别为56%,67%和63%.可以看出,在“畅通”状态下的比例最低,此种状态下行驶车辆数少,车与车之间的碰撞行为很难发生.此外,在“拥挤”状态而非“堵塞”状态下,碰撞类事件发生比例最高,在堵塞状态下车辆往往只能被迫跟车移动,出现事故的可能性反而小.拥挤状态时,为了维持一定速度,驾驶员的变道行为往往更加频繁,使得车辆间、车辆与道路设施间易出现碰撞行为.

综上,两类事件与交通流特征的关联性总结如下:①抛锚类和碰撞类事件的发生频率都直接受行驶车辆数的影响,行驶车辆越多,事件发生频率则越大,所以事件频率随时间的变化特征与流量变化总的趋势大致相似.②碰撞类事件对交通运行状态敏感度较高,“拥挤”状态下碰撞类事件最易发生,而非“畅通”和“堵塞”状态,因为此时既有一定流量又有一定速度.③抛锚类事件发生频率变化虽然较流量变化有一定偏移,但这是由于气候环境引起的,与交通运行状况无关.

4 基于时间差异的模型建立

4.1 模型选用

泊松和负二项回归模型是计数资料常规分析的基础模型.泊松回归模型是考虑变量服从泊松分布而建立一种回归模型,其假定事件发生频率的均值等于方差.负二项模型通过引入离散参数 a ,不受方差等于均值的约束,负二项分布的概率函数如下:

$$P(y=k) = \frac{\Gamma(k+a^{-1})\left(\frac{\lambda}{a^{-1}}\right)^k}{\Gamma(k+1)\Gamma(a^{-1})\left(1+\frac{\lambda}{a^{-1}}\right)^{(k+a^{-1})}}$$

$$k=0,1,2,\dots \quad (1)$$

式中: $P(y=k)$ 表示事件发生 k 次的概率,其受 λ 和 a 两个参数影响, λ 为整体均值, a 为离散参数^[8]; y 则表示所考察的事件在一定范围内平均发生的次数; k 为整数,表示事件实际观测到的发生频率.所考察的事件在一定范围内平均发生的次数即参数 λ 受到各种条件或者影响因素 x 的影响,因此参数是变化的.经过对数变换,可以写出以下的负二项回归模型:

$$\ln \lambda = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \mu \quad (2)$$

式中: α 为回归模型的常数项; β 为各影响因素的估计参数; μ 为回归模型的残差,服从负二项分布.

研究采用负二项模型对异常事件建立基于时间差异性的模型。

4.2 模型分组

不论是抛锚类事件还是碰撞类事件,在不同时间段,其发生频率都有较大差异。在建立事件发生频率的模型时,如果只简单的对每日事件发生频率进行预测,那么一天之内不同时段流量变化所引起的差异就无法体现出来,如果精确到每小时发生频率则会出现大量的零值样本。此外,夜间事件发生概率低,同样也出现大量零值,这里不对其建模讨论。综上,研究根据流量变化的一般性规律选取3个时间段进行分类:工作日白天高峰、工作日白天平峰以及非工作日白天,其中高峰时间为7:00—10:00和16:00—19:00,平峰时间为10:00—16:00,非工作日不区分高、平峰时段,对其白天7:00—19:00统一建模。除发生时段外,不同类型快速路路段(如匝道类型,拥堵状况的差异)事件发生频率不同,但是路段在空间层面上过于细致的分类同样会产生大量零值

样本,而本文主要研究其时间差异性,所以下仅对不同快速路分开建模。同时,内环和中环在几何特征与交通特征上都有明显的区别,也能间接体现不同类型路段上异常事件发生频率的差异。抛锚类和碰撞类事件发生的影响因素不同,同一因素对其影响的显著程度也有所不同,所以对两类异常事件同样采取分类建模。

4.3 模型建立

根据时间特征分析,选取的与时间有关的自变量如下:天气状况(是否为下雨天、是否为下雪天),全天气温和是否为公休日。气温只能获取到全天的最高与最低温度,考虑到最低气温一般出现在凌晨,而白天基准温度与最高温度的关系较稳定,这里使用最高温度代表全天气温。

运用SAS分析软件的GENMOD过程进行负二项回归,可得模型显著性、自变量显著性检验结果。模型的参数估计结果以及负二项模型中的离散参数值见表3、表4。

表3 抛锚类事件发生频率模型标定结果

Tab.3 Calibration result for disabled vehicle frequency

自变量	内环						中环					
	工作日高峰		工作日平峰		非工作日白天		工作日高峰		工作日平峰		非工作日白天	
	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值
常数	0.794	0.001	0.819	0.001	1.347	0.001	0.678	0.001	0.147	0.250	0.747	0.001
雪天	0.583	0.019	0.174	0.174			0.745	0.004	0.779	0.011		
雨天	-0.109	0.185	-0.094	0.229	0.101	0.335	0.114	0.198	-0.064	0.547	0.331	0.026
气温	0.024	0.001	0.029	0.001	0.021	0.001	0.019	0.001	0.027	0.001	0.011	0.141
公休日	-0.973	0.001	-0.833	0.001	-0.489	0.017	-1.606	0.001	-0.763	0.002	-0.478	0.101
离散系数	0.063		0.073		0.090		0.095		0.090		0.186	

注: P值大于0.100时变量不显著;研究时间段内,没有非工作日下午雪天这一样本。

表4 碰撞类事件发生频率模型标定结果

Tab.4 Calibration result for crash frequencies

自变量	内环						中环					
	工作日高峰		工作日平峰		非工作日白天		工作日高峰		工作日平峰		非工作日白天	
	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值	系数	P值
常数	1.812	0.001	1.573	0	2.553	0	1.656	0.001	0.731	0.001	1.379	0.001
雪天	-0.016	0.940	0.364	0.364			-0.536	0.096	0.892	0.006		
雨天	0.171	0.006	-0.085	0.242	0.027	0.744	-0.098	0.261	-0.045	0.716	0.438	0.064
气温	0.008	0.010	0.009	0.015	-0.003	0.525	0.001	0.728	0.005	0.382	-0.004	0.700
公休日	-1.064	0.001	-0.251	0.063	-0.788	0.001	-1.654	0.001	-0.695	0.007	0.631	0.082
离散系数	0.048		0.100		0.068		0.189		0.345		0.631	

注: P值大于0.100时变量不显著;研究时间段内,没有非工作日下午雪天这一样本。

4.4 影响因素定量分析

4.4.1 天气状况

抛锚类事件:天气状况对内环与中环的影响结果较一致,雪天天气会引发更多的抛锚类事件,但在不同时间段,其显著性有所差异,这可能因为雪天温度低,车辆因为难以启动暂时停留,而在视频检测时

被误判为抛锚。是否下雨对抛锚类事件的影响没有一定规律,在某些时段,下雨天抛锚类事件的发生频率甚至小于晴天。总体来讲,天气状况对抛锚类事件是否发生影响不大。

碰撞类事件:不同快速路、不同时间段,天气状况与碰撞类事件频率的相关性(正相关或负相关)、影响

的显著性有所不同,且无一定规律可循,说明是否为雨、雪天气对碰撞类事件的发生频率影响不显著。

4.4.2 温度

抛锚类事件:对于抛锚类事件,不论在内环还是中环,温度的显著性较强且与发生频率呈正相关。高温常常是引发抛锚类事件的直接原因,高温行驶使得油箱过热,导致车辆无法移动。模型标定的结果解释了时间特征分析中抛锚类事件出现的“季节变化”和“正午集中”现象。

碰撞类事件:只有在内环的高峰、平峰时段,温度的上升会带来事件频率的增加,但其估计系数远小于抛锚类事件所对应时段的价值,说明影响程度较低。这里温度变量显著可能是因为世博会的召开期间也是全年气温较高的月份,温度的影响是世博会召开流量变化的间接体现。

4.4.3 公休日

这一变量对抛锚类和碰撞类事件的影响类似:公休日与发生频率呈负相关,且显著性强。同时,公休日在不同时段模型中显著性不同,这是因为不同时段(高峰、平峰、周末)公休日的出现引起的流量与运行状况变化程度有差异。

5 结论

以上海市内环与中环两条快速路共12 331起抛锚类和碰撞类异常事件为研究对象,对其发生频率的时间差异性进行研究。从不同匝道类型路段的时间变化特征中可以看出,抛锚类和碰撞类事件的发生频率都受到行驶车辆数即流量的直接作用。抛锚类事件一般是行驶车辆数与气温状况综合作用的结果,所以其有明显的季节变化特征,且时变图出现了事件发生高峰“正午集中”的现象。碰撞类事件的发生对世博召开、双休日的流量改变更为敏感,其在交织路段和合流路段上发生频率高且随时间的变化更为明显,这是因为流量改变引起运行状态变化,碰撞类事件的发生受运行状况的影响显著,且其在“拥挤”,而非“畅通”或“堵塞”状态下最易发生。通过建

立基于时间差异性的模型发现,在所有与时间有关的自变量中,公休日这一变量参数估计结果显著,温度只对抛锚类事件产生明显影响,不同快速路、不同事件类型与不同时间段模型中,天气状况(是否下雨与下雪)的回归系数显著性不同且规律性不强。文章对快速路异常事件时间差异性的研究方法以及分析结论可以为事件监测与救援设备的优化配置提供依据。

参考文献:

- [1] U S Department of Transportation. Traffic incident management handbook [M]. Washington D C: Federal Highway Administration, 2010.
- [2] 上海市第四次综合交通调查办公室. 上海市第四次综合交通调查总报告[R]. 上海:上海市城乡建设和交通委员会, 2010. Office of the Fourth Comprehensive Traffic Survey in Shanghai. Report on the fourth comprehensive traffic survey in Shanghai [R]. Shanghai: Shanghai Urban Construction and Communications Commission, 2010.
- [3] Giuliano G. Incident characteristics, frequency, and duration on a high volume urban freeway[J]. Transportation Research, 1989, 23(5): 387.
- [4] El-Basyouny K, Sayed T A. Urban arterial accident prediction models with spatial effects [C/CD]//Transportation Research Board 88th Meeting. Washington D C: Transportation Research Board of the National Academics, 2009.
- [5] Srinivas C, Dinu R R, Veeraragavan A. Application of Poisson and negative binomial regression for modeling road accidents under mixed traffic conditions [C/CD]//Transportation Research Board 85th Meeting. Washington D C: Transportation Research Board of the National Academics, 2007.
- [6] Cafiso S, Di Graziano A, Di Silvestro G, et al. Accident prediction models for the evaluation of safety performance on two lane rural highways [C/CD]//Transportation Research Board 88th Meeting. Washington D C: Transportation Research Board of the National Academics, 2009.
- [7] 肖金花. 上海世博会客流特征研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2011. XIAO Jinhua. Characteristics of passenger flow during Shanghai World Expo [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2011.
- [8] Greene W H. Econometric analysis[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000.