

# 基于安全可提高空间的事故多发信控交叉口判别

王雪松, 李 佳, 谢 琨

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 贝叶斯安全可提高空间判别方法通过计算贝叶斯方法估计的事故数与具有相同道路交通特征地点的事故期望的差值, 对事故多发信控交叉口进行判别; 差值越大, 表明安全改善潜能越大. 贝叶斯方法结合事故观测值和具有相同道路交通特征地点的事故期望估计事故数, 消除了事故观测值的随机波动特性. 基于全贝叶斯安全可提高空间方法判别上海市事故多发信控交叉口, 并与事故绝对数方法、经验贝叶斯方法、全贝叶斯方法、经验贝叶斯安全可提高方法的判别结果进行对比, 发现该判别方法最优.

**关键词:** 信控交叉口; 事故多发点判别; 安全可提高空间; 经验贝叶斯估计; 全贝叶斯估计

中图分类号: U491

文献标志码: A

## Signalized Intersection Hotspot Identification Based on Potential for Safety Improvement

WANG Xuesong, LI Jia, XIE Kun

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

**Abstract:** The Bayesian-based potential for safety improvement method identifies signalized intersection hotspots using the difference between the Bayesian posteriors of crash number and the expected crash number for similar sites which are obtained from the regression model. As the difference increases, the potential for safety improvement increases. In addition, the Bayesian method combines clues from both the observed crash frequency of a specific site and the expected crash number for similar sites to estimate the crash number which can overcome the problem associated with the fluctuation of observed crashes. Based on signalized crash data at intersections in Shanghai, the full Bayesian-based potential for safety improvement method is compared with the crash frequency method, the empirical Bayesian method, the full Bayes method and the empirical Bayesian-based potential for safety improvement method. The results show that the

proposed full Bayesian potential for safety improvement is superior to other methods.

**Key words:** signalized intersection; hotspot identification; potential for safety improvement; full Bayesian estimation; empirical Bayesian estimation

信控交叉口是道路网络中的事故多发设施. 判别事故多发信控交叉口, 是进行路网安全改善的基础. 传统的事故绝对数法根据交叉口的历史事故数排序选出事故多发点, 筛选出的往往是几何尺寸和交通流量较大的交叉口, 而这些交叉口的安全改善空间有限. McGuigan<sup>[1]</sup> 提出某个交叉口超出类似交叉口事故均值的事例数是由该地点的特性引起的, 可以改善并使其降低到平均水平. 安全可提高空间最初被定义为某地点事故绝对数与类似地点事故期望(回归模型得出)的差值<sup>[2]</sup>, 差值越大, 表明事故减少的潜能越大, 以此作为判别指标更有利于实现交通安全改善.

交通事故是小概率事件, 影响因素众多, 在计算安全可提高空间时采用的历史事故绝对数具有随机波动特征. 经验贝叶斯安全可提高空间方法用经验贝叶斯估计事故数代替事故绝对数<sup>[3]</sup>, 经验贝叶斯方法由 Hauer 等<sup>[4]</sup> 提出, 通过建模找出事故数与设施几何特性、交通特征、环境因素等的关系, 并将回归模型得到的事故数与观测事故数结合得出事故期望, 解决了观测事故数随机波动的问题. Persaud 等<sup>[3]</sup> 研究发现, 以事故减少潜能为评价指标, 经验贝叶斯安全可提高空间优于经验贝叶斯方法. 然而经验贝叶斯方法在建模过程中采用点估计, 得到回归模型中参数的均值和方差, 在建模和估计经验贝叶斯事故后验分布时两次用到事故数据<sup>[5]</sup>.

Schluter 等<sup>[6]</sup> 首次将全贝叶斯方法引入安全分

收稿日期: 2013-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(51138003); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0387); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 王雪松(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通安全、交通统计分析 & 智能交通系统.

E-mail: wangxs@tongji.edu.cn

析中,建模过程中对所有未知参数设置先验分布,对每一个参数的估计都建立在给定数据条件下所有未知参数的联合分布上,将各参数似然值的分布与事故观测数结合得到事故数的最终估计.较之经验贝叶斯方法,全贝叶斯方法方差值计算更精确,计算也更加便捷. Miranda-Moreno 等<sup>[7]</sup>利用仿真建立负二项和泊松模型,发现当样本量较少时,全贝叶斯方法明显优于经验贝叶斯方法,当样本量充足时估计结果相似. Aguero-Valverde 等<sup>[8]</sup>针对城市及农村两车道与多车道路段与天气相关的事故,建立全贝叶斯泊松分层模型,发现分别以安全可提高空间和相对风险为指标,路段排名情况一致. Lan 等<sup>[9]</sup>针对信控交叉口事故建立泊松自回归模型,发现无论是以泊松均值还是以安全可提高空间为标准,全贝叶斯方法都优于经验贝叶斯方法,但研究样本是主路为两车道的停车让行交叉口,建模时仅考虑流量,并没有考虑交叉口的其他特性,如间距、相位数等.

国内对于事故多发信控交叉口的判别从基于观测事故数、事故率的分析,逐渐转向采用建模方法进行事故预测<sup>[10-11]</sup>. Xie 等<sup>[12]</sup>利用分层全贝叶斯负二项模型进行交叉口事故致因分析,针对事故多发信控交叉口判别<sup>[13]</sup>提出经验贝叶斯安全可提高空间方法,并与事故绝对数法、事故率法对比,发现判别结果差异较大,但是在事故多发点判别方法上没有考虑全贝叶斯方法,也没有采用量化指标对多种判别方法进行对比评价.

本文建立负二项模型,基于全贝叶斯安全可提高空间方法判别事故多发信控交叉口,并采用量化指标与事故绝对数方法、经验贝叶斯方法、全贝叶斯方法以及经验贝叶斯安全可提高空间方法的判别结果进行对比.

## 1 数据准备

利用地理信息系统 (geographic information system, GIS) 作为空间数据库,最终选出上海市 195 个几何设计、交通、控制、区位特征属性完整的十字、T 型信控交叉口用于研究.

共收集交叉口的 17 个变量用于安全分析. 几何设计属性包括交叉口类型、最小夹角、最大夹角、进口道总数、直行车道总数、右转车道总数、左转车道总数、直右车道数、直左车道数、转向车道比例. 控制属性包括周期时长、相位数,由于 2-3 相位交叉口事故数明显小于 4-6 相位交叉口事故数,因而将相位数设定为分类变量. 几何设计和控制属性通过上海的自适应交通控制系统 (sydney coordinated adaptive traffic system, SCATS) 得到. 交通特征包括饱和度、日均流量、平均车道流量,通过线圈检测数据和 SCATS 系统得到. 区位特征包括是否位于高架下、交叉口间距,通过 GIS 得到. 同时收集了所涉及交叉口 2009 和 2010 两年的事故数据,2009 年的事故数据用于交叉口事故预测模型的建立,2010 年的事故数据用于事故多发信控交叉口判别方法比较指标的计算. 表 1 和表 2 为自变量的统计值.

## 2 全贝叶斯安全可提高空间

本文提出利用全贝叶斯安全可提高空间方法进行事故多发信控交叉口判别,并与事故绝对数方法、经验贝叶斯方法、全贝叶斯方法、经验贝叶斯安全可提高空间方法的判别结果进行对比.

表 1 交叉口连续变量的统计性描述

Tab.1 Descriptive statistics for continuous variables of signalized intersections

类型	交叉口变量	变量描述	均值	标准差
几何设计	最小夹角	交叉口进口道间的最小夹角/(°)	84.25	13.12
	最大夹角	交叉口进口道间的最大夹角/(°)	95.66	12.25
	进口道总数	交叉口进口车道数之和	10.74	4.34
	直行车道数	进口道直行车道数之和	4.87	3.35
	右转车道数	进口道右转车道数之和	1.12	1.34
	左转车道数	进口道左转车道数之和	2.23	2.42
	直右车道数	进口道直右车道数之和	1.24	1.21
	直左车道数	进口道直左车道数之和	0.51	0.94
	转向车道比例	右转左转车道数之和与进口车道总数之比	0.21	0.24
控制属性	周期时长	交叉口信号周期长度/s	171.11	42.23
	饱和度	交叉口通过交通量与通行能力之比	85.71	26.22
交通特征	日均流量	交叉口月平均日流量/万辆	4.62	2.35
	平均车道流量	交叉口平均车道流量/万辆	0.51	0.22
区位特征	交叉口间距	沿主干道与相邻最近交叉口的距离/km	0.28	0.23

表 2 交叉口分类变量的统计性描述

Tab.2 Descriptive statistics for categorical variables of signalized intersections

类型	交叉口变量	变量描述	百分比/%
几何设计	交叉口类型	0: 十字交叉口	83
		1: T 型交叉口	17
控制特征	相位数	0: 2-3 相位	31
		1: 4-6 相位	69
区位特征	是否位于高架下	0: 不在高架之下	77
		1: 在高架下	23

### 2.1 经验贝叶斯方法

通过设定权重值,综合考虑交叉口已发生事故数和回归模型得出的类似交叉口发生事故数的期望,估计该交叉口将要发生的事事故数<sup>[4]</sup>. 计算方法如下:

$$\lambda_{EB,i} = \lambda_{NB,i} \left(1 + \frac{\lambda_{NB,i}}{\varphi}\right)^{-1} + y_i \left(1 - \left(1 + \frac{\lambda_{NB,i}}{\varphi}\right)^{-1}\right) \quad (1)$$

式中: $\lambda_{EB,i}$ 为经验贝叶斯方法预测的交叉口事故数期望值; $\lambda_{NB,i}$ 为负二项模型得出的交叉口事故数期望值; $y_i$ 为交叉口观测事故数; $\varphi$ 为过度离散系数,即 $1/r$ ; $r$ 为负二项模型的离散系数.

### 2.2 全贝叶斯方法

在全贝叶斯方法中,参数的先验可以设置为一个特定分布,再与已发生事故数结合得出后验分布.该方法通过马尔科夫链蒙特卡洛法(Markov chain Monte Carlo, MCMC)来完成.比起经验贝叶斯方法,全贝叶斯方法直接估计参数的后验分布,方差值计算更精确,也更加便捷<sup>[5]</sup>.其理论框架可以表示为

$$\pi(\theta | y) = \frac{L(y|\theta)\pi(\theta)}{\int L(y|\theta)\pi(\theta)d\theta} \quad (2)$$

式中: $y$ 为已发生的事故数; $\theta$ 为事故发生的期望; $L(y|\theta)$ 为似然函数; $\pi(\theta)$ 为 $\theta$ 的先验分布; $\pi(\theta|y)$ 为在给定 $y$ 条件下 $\theta$ 的后验分布,即将要发生事故的期望; $\int L(y|\theta)\pi(\theta)d\theta$ 为观测数据的边缘概率分布.

本文在贝叶斯理论框架下建立了负二项模型,表示如下:

$$y_i \sim \text{Negbin}(\lambda_i, r) \quad (3)$$

$$\ln \lambda_{FB,i} = \beta_0 + \sum_{p=1}^n \beta_p X_{pi} \quad (4)$$

式中: $y_i$ 为交叉口 $i$ 的观测事故数; $\lambda_{FB,i}$ 为负二项模型利用全贝叶斯估计方法得到的交叉口 $i$ 的事故数期望; $\beta$ 为变量的系数向量; $\beta_p$ 为第 $p$ 个变量的系数; $X_{pi}$ 为自变量向量; $n$ 为交叉口变量的个数.

### 2.3 安全可提高空间

安全可提高空间指某地点的贝叶斯估计事故数

超出类似地点平均事故期望值的部分.如果某地点的事故数超出了类似地点,那么肯定由与该地点相关的特征所引起,可以采取一定的改善措施将这部分超出事故降低到平均值.贝叶斯安全可提高空间计算方法如下:

$$P_{EB,i} = \lambda_{EB,i} - \lambda_{NB,i} \quad (5)$$

$$P_{FB,i} = \lambda_{FB,i} - \lambda_{NB,i} \quad (6)$$

式中: $P_{EB,i}$ 为交叉口的经验贝叶斯安全可提高空间; $P_{FB,i}$ 为交叉口的全贝叶斯安全可提高空间.

## 3 事故预测模型结果

全贝叶斯估计通过 MCMC 来完成.软件 WinBUGS 利用吉布斯取样法完成贝叶斯模型的标定.吉布斯取样法被广泛应用于马尔科夫链模拟中.因为没有可靠的先验信息,假定所有的回归系数服从正态分布 $N(0, 10^5)$ ,负二项分布的离散系数 $r$ 服从 Gamma 分布 $(10^{-3}, 10^{-3})$ .考虑到系数收敛和迭代时间,设定马尔科夫链进行 2 万次迭代,舍弃前 2 000 个不稳定样本.建模采用 2009 年数据,负二项模型和基于全贝叶斯方法的负二项模型参数估计结果如表 3 所示.对于负二项模型,95% 瓦尔德置信区间(wald confidence interval, WCI)被用于判断变量的显著性,如果 95% WCI 包括 0 则变量不显著,反之亦然;赤池信息标准(akaike information criterion, AIC)可以用来衡量模型拟合度,值越小,模型越优.对于全贝叶斯负二项模型,95% 贝叶斯置信区间(bayesian credible interval, BCI)被用于判断变量的显著性,如果 95% BCI 包括 0 则变量不显著,反之亦然;方差信息标准(deviance information criterion, DIC)综合量化贝叶斯模型的拟合度和复杂度,值越小,模型越优.负二项模型的参数估计结果用来计算 $\lambda_{NB,i}$ .

位于高架下的交叉口视距会受到影响,同时易受到上下匝道车流的干扰,Wang 等<sup>[11]</sup>也得出了一致结论.交叉口间距回归系数为负,表明邻近交叉口间距越近,车辆运行相互影响,增加事故发生几率,Wang 等<sup>[14]</sup>对佛罗里达州交叉口事故数据分析也得出了相同结论.十字交叉口较 T 型交叉口交通组织更为复杂,冲突点更多,发生事故可能性更大.转向车道比例回归系数为正,左转车辆越多,发生左转与对向碰撞的几率越大;右转车辆越多,与行人、非机动车冲突的几率越大.虽然多相位可以将交通流在时间上进行分离,但信号相位频繁切换也会增加事

表 3 负二项模型、全贝叶斯负二项模型参数估计结果

Tab. 3 Estimation results of negative binomial model and full Bayes negative binomial model

变量	负二项模型			全贝叶斯负二项模型		
	均值	标准差	95%WCI	均值	标准差	95%BCI
常数项	3.16	0.18	(2.82, 3.51)	3.3	0.22	(2.87, 3.72)
位于高架下	0.44	0.14	(0.17, 0.72)	0.43	0.18	(0.08, 0.77)
不位于高架下	0	0		0	0	
交叉口间距	-0.84	0.36	(-1.54, -0.13)	-0.77	0.45	(-1.61, 0.15)
T型交叉口	-0.26	0.15	(-0.56, 0.03)	-0.18	0.19	(-0.54, 0.20)
十字交叉口	0	0		0	0	
转向车道比例	1	0.35	(0.31, 1.69)	1.15	0.44	(0.28, 2.01)
4-6 相位	0.39	0.14	(0.124, 0.670)	0.3	0.16	(0.04, 0.64)
2-3 相位	0	0		0	0	
交叉口日均流量	0.04	0.02	(0.02, 0.07)	0.04	0.02	(0.02, 0.07)
离散系数	0.84	0.09	(0.67, 1.01)	0.89	0.09	(0.72, 1.08)
模型拟合度	AIC	1 845.15		DIC		1 845.16
	DIC					
样本数量	195			195		

故发生的几率,与其他研究结论一致<sup>[11,14-15]</sup>.作为影响交通事故数量最重要的因素<sup>[14-15]</sup>,流量的回归系数为正.

### 4 事故多发点判别对比分析

#### 4.1 判别方法评价标准

本文采用地点一致性检验(site consistency test, SCT)、方法一致性检验(method consistency test, MCT)、排序一致性检验(total rank differences test, TRDT)3种评价标准<sup>[16]</sup>,对5种事故多发点判别方法进行评价比较.3种检验方法均适用于没有对第一年判别出的事故多发信控交叉口进行安全改善,相邻两年内交叉口流量、几何设计、天气情况变化不大的情形.

SCT:判别方法的优劣通过判别出的事故多发点的安全性能来表现.第一年鉴别出的事故多发交叉口在第二年也会表现出较高风险性,这种风险性可以用下一阶段的平均事故发生率来表征.

$$T_{SC,j} = \frac{\sum_{k=n-\alpha+1}^n C_{k,j,i+1}}{\sum_{k=n-\alpha+1}^n V_{k,j,i+1}} \quad (7)$$

式中: $j$ 为待比较的事故多发点判别方法; $n$ 为交叉口总数目,即195; $k$ 为排名; $C_{k,j,i+1}$ 表示排名为 $k$ 的交叉口在 $i+1$ 年事故数,本研究中为2010年的事故数; $V_{k,j,i+1}$ 表示排名为 $k$ 的交叉口在 $i+1$ 年的总流量; $\alpha$ 为鉴别事故多发点的比例.SCT值越高表示判别出的事故多发点在下一年平均事故发生率越高,判别方法越有效.

MCT:通过计算相邻两年均被认定为事故多发交叉口的数目来反映事故多发点判别方法的优劣.好的事故多发点判别方法在相邻两年的判定结果会由于设施的内在风险性而相似,该值越大,判别方法越好.

$$T_{MC,j} = \{k_{n-\alpha+1}, k_{n-\alpha}, \dots, k_n\}_{j,i} \cap \{k_{n-\alpha+1}, k_{n-\alpha}, \dots, k_n\}_{j,i+1} \quad (8)$$

式中: $i$ 代表第一年, $i+1$ 代表下一年; $k_n$ 代表排名首位的事故多发点.

TRDT:通过计算两阶段事故多发点排名的差异度来反映事故多发点判别方法的优劣,差异越小,判别方法越优.该方法解决了事故多发点排名差异较大的情况.

$$T_{TRD,j} = \sum_{k=n-\alpha+1}^n |R(k_{j,i}) - R(k_{j,i+1})| \quad (9)$$

式中: $R(k_{j,i})$ 代表某交叉口在第一年的事故多发点排名; $R(k_{j,i+1})$ 代表某交叉口在下一年的事故多发点排名.

#### 4.2 判别结果对比分析

采用2010年事故数据作为下一年数据,对判别方法进行评价.分别假定排名前10、前15、前20的交叉口为事故多发点,计算各事故多发点判别方法的评价指标.计算结果如表4所示.

SCT:在设定不同事故多发点范围条件下,经验贝叶斯方法略优于事故绝对数方法,经验贝叶斯安全可提高空间方法优于经验贝叶斯方法.全贝叶斯方法更优,而全贝叶斯安全可提高空间方法又略优于全贝叶斯方法.全贝叶斯安全可提高空间方法判别出的事故多发点在下一年有着最大的事故率.

表 4 事故多发点判别方法比较  
Tab.4 Comparison of three evaluation criterion of five methods

判别方法	判别标准								
	SCT			MCT			TRDT		
	前 10	前 15	前 20	前 10	前 15	前 20	前 10	前 15	前 20
事故绝对数	0.65	0.57	0.65	3	6	11	195	353	454
经验贝叶斯	0.65	0.58	0.66	4	7	12	196	312	457
全贝叶斯	0.73	0.69	0.71	8	12	16	20	40	60
经验贝叶斯安全可提高空间	0.68	0.71	0.69	5	8	13	160	284	412
全贝叶斯安全可提高空间	0.77	0.71	0.70	10	14	18	16	20	52

MCT:全贝叶斯方法优于事故绝对数方法、经验贝叶斯方法及经验贝叶斯安全可提高空间方法,全贝叶斯安全可提高空间方法更优,3个不同条件下检验值分别为 10(占事故多发点总数的 100%)、14(占事故多发点总数的 93%)、18(占事故多发点总数的 90%),表明该方法可以稳定地判别事故多发信控交叉口。

TRDT:全贝叶斯方法和全贝叶斯安全可提高空间方法表现远优于其他 3 种判别方法,判别出来的事故多发信控交叉口随时间变化排名变化均在 60 以下,其中全贝叶斯安全可提高空间方法最优。

通过以上 3 个指标对几种判别方法对比发现:经验贝叶斯方法将观测事故数与负二项模型预测的事故数结合,克服了事故绝对数的随机波动性问题,因而优于事故绝对数法。全贝叶斯方法在参数估计之前引入了参数的先验分布并采用 MCMC,优于经验贝叶斯方法,与 Schluter 等<sup>[6]</sup>和 Huang 等<sup>[5]</sup>的研究结论一致。经验贝叶斯安全可提高空间方法优于经验贝叶斯方法,与 Persaud 等<sup>[3]</sup>的研究结论一致。全贝叶斯安全可提高空间优于全贝叶斯方法,该方法以交叉口安全改善潜能为出发点,在工程上比全贝叶斯方法更易筛选出事故减少潜能较大的交叉口。结合本研究的结论总结事故多发点判别方法的对比如表 5。

表 5 事故多发点判别方法比较

Tab.5 Comparison of five hotspot identification methods

判别方法	是否解决随机波动性	对样本量要求	是否结合先验信息	是否考虑事故改善潜能
事故绝对数	否	高	否	否
经验贝叶斯	是	高	否	否
全贝叶斯	是	低	是	否
经验贝叶斯安全可提高空间	是	是	否	是
全贝叶斯安全可提高空间	是	低	是	是

## 5 结语

本文提出了全贝叶斯安全可提高空间方法判别事故多发信控交叉口,以事故减少潜能为出发点,可以筛选出安全改善空间较大的交叉口,同时克服了传统事故绝对数法的随机波动性问题,也克服了经验贝叶斯方法在参数估计上的缺陷。在国内资源约束的情况下,该指标的提出对于交通安全管理部门准确筛选安全改善潜能较大的信控交叉口进行重点治理具有重要的参考意义。

## 参考文献:

- [1] McGuigan D R D. The use of relationships between road accidents and traffic flow in 'black-spot' identification[J]. Traffic Engineering and Control, 1981, 22(8): 448.
- [2] Persaud B N, Cook W, Kazakov A. Demonstration of new approaches for identifying hazardous locations and prioritizing safety treatment[R]. Lisbon: Swedish National Road and Transport Research Institute, 1998.
- [3] Persaud B, Lyon C, Nguyen T. Empirical bayes procedure for ranking site for safety investigation by potential for improvement[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1665(2): 7.
- [4] Hauer E, Harwood D W, Council F M, et al. Estimating safety by the empirical bayes method: A tutorial[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 1784(16): 126.
- [5] Huang H, Chin H C, Haque M M. Empirical evaluations of alternative approaches in identifying crash hotspots: Naive ranking, empirical bayes and full bayes [J]. Transport Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2013(5): 32.
- [6] Schluter P J, Deely J J, Nicholson A J. Ranking and selecting motor vehicle accident sites using a hierarchical bayesian model [J]. The Statistician, 1997, 46(3): 293.
- [7] Miranda-Moreno F L, Fu L. Traffic safety study: Empirical bayes or full bayes [C/CD] // TRB 86th Annual Meeting Compendium of Papers DVD. Washington D C: Transportation

- Research Board of the National Academies, 2007;07-1680.
- [ 8 ] Aguero-Valverde J, Jovanis P P. Identifying road segments with high risk of weather-related crashes using full bayesian hierarchical models [C/CD] // TRB 86th Annual Meeting Compendium of Papers DVD. Washington D C: Transportation Research Board of the National Academies, 2007;07-590.
- [ 9 ] Lan B, Persaud B. Fully bayesian approach to investigate and evaluate ranking criteria for black spot identification [J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2011,2247(13): 117.
- [10] Ma M, Yan X P, Abdel-Aty M, *et al.* Safety analysis of urban arterials under mixed-traffic patterns in Beijing [J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2010,2193(13): 105.
- [11] 王雪松,谢琨,陈小鸿,等.考虑空间相关性的信控交叉口安全分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2012,40(12):1814.  
WANG Xuesong, XIE Kun, CHEN Xiaohong, *et al.* Risk factor analysis for signalized intersections along corridors with a consideration of spatial correlation[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(12): 1814.
- [12] Xie K, Wang X S, Chen X H, *et al.* Corridor-level signalized intersection safety analysis in Shanghai? China using bayesian hierarchical models [J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 50(1): 25.
- [13] 谢琨,王雪松,陈小鸿.基于经验贝叶斯的信控交叉口黑点判别研究[J]. 交通与运输:学术版, 2011(2): 173.  
XIE Kun, WANG Xuesong, CHEN Xiaohong. Hotspot identification of signalized intersection using empirical Bayes method[J]. Traffic and Transportation Academic, 2011(2): 173.
- [14] Wang X S, Abdel-Aty M. Temporal and spatial analyses of rear-end crashes at signalized intersections [J]. Accident Analysis & Prevention, 2006, 38(6): 1137.
- [15] Poch M, Mannering F. Negative binomial analysis of intersection-accident frequencies[J]. Journal of Transportation Engineering, 1996, 122(2): 105.
- [16] Cheng W, Washington S. New criteria for evaluating methods of identifying hotspots[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2008,2083(9): 76.

(上接第 409 页)

#### 参考文献:

- [ 1 ] 何晶晶,宋立群,章骅,等.垃圾焚烧炉渣的性质及其利用前景 [J]. 中国环境科学,2003,23(4):395.  
HE Pinjing, SONG Liqun, ZHANG Hua, *et al.* Characterization of waste incineration bottom ash and its beneficial use prospect [J]. China Environmental Science, 2003, 23(4):395.
- [ 2 ] Bruder- Hubscher V, Lagarde F, Leroy M J F, *et al.* Utilisation of bottom ash in road construction; Evaluation of the environmental impact [J]. Waste Management & Research, 2001,19(6):545.
- [ 3 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 25032—2010 生活垃圾焚烧炉渣集料[S]. 北京:中国标准出版社,2010.  
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. GB/T 25032—2010 Municipal solid waste incineration bottom ash aggregate [S]. Beijing: China Standard Press, 2010.
- [ 4 ] 李相国,宋留庆,马保国,等.垃圾焚烧炉渣活性激发及对水泥性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(6):1.  
LI Xiangguo, SONG Liuqing, MA Baoguo, *et al.* Stimulation of MSWI bottom ash activity and effects on cement performance[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012,34(6):1.
- [ 5 ] 谢燕,吴笑梅,樊粤明,等.生活垃圾焚烧炉渣用作水泥混合材的研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2009, 37(12): 37.  
XIE Yan, WU Xiaomei, FAN Yueming, *et al.* Investigation into incineration bottom ash of municipal solid waste used as cement admixture[J]. Journal of South China University of Technology; Natural Science Edition, 2009,37(12):37.
- [ 6 ] Pecqueur G, Crignon C, Quénee B. Behaviour of cement-treated MSWI bottom ash[J]. Waste Management, 2001,21(3): 229.
- [ 7 ] Müller U, Rübner K. The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component[J]. Cement and Concrete Research, 2006,36(8): 1434.
- [ 8 ] 曹兴国.生活垃圾焚烧灰渣应用于高速公路路面基层的试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.  
CAO Xingguo. Research on application of municipal solid waste combustion residues for freeway pavement base[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2009.
- [ 9 ] 中华人民共和国交通运输部.JTG E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2009.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG E51—2009 Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press,2009.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2006.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D50—2006 Specification for design of highway asphalt pavement[S]. Beijing: China Communications Press,2006.
- [11] 上海市市政公路行业协会. SMHTA/T—08—2013 道路工程生活垃圾焚烧炉渣集料应用技术规程[S]. 上海:上海市市政公路行业协会,2013.  
Shanghai Municipal & Highway Trade Association. SMHTA/T—08—2013 Technical specifications for application of municipal solid waste incineration bottom ash aggregate for road engineering[S]. Shanghai: Shanghai Municipal & Highway Trade Association,2013.