

基于条件自回归模型的城市宏观安全分析

王雪松, 宋 洋

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 基于上海市外环以内 263 个交通分析小区的事故、道路、交通、土地利用数据, 在交通分析小区层面建立贝叶斯负二项条件自回归模型, 分析事故在交通分析小区层面的显著影响因素。结果表明, 主、次干道长度的增加会显著增加交通分析小区内事故数量; 道路网密度、交叉口数量与小区事故数具有显著正相关性; 随着客车产生量的增加, 事故数量增加; 土地利用强度高, 相应的事故数量增多。

关键词: 宏观安全分析; 交通分析小区; 贝叶斯估计; 条件自回归模型; 安全影响因素

中图分类号: U491.13

文献标志码:

Macro-level Safety Analysis in Urban Using Conditional Autoregressive Model

WANG Xuesong, SONG Yang

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

Abstract: This study collected crash data, roadway features, traffic characteristics and land use data in 263 traffic analysis zones (TAZ) within the Outer Ring in Shanghai. TAZ-level Bayesian Negative Binomial Conditional Autoregression model was established. Modeling results show that the frequency of total crashes in each TAZ can increase with longer arterials and minor arterials. The numbers of intersections and road density are positively correlated with crashes. More crashes occur with the increasing of car production and land development intensity.

Key words: macro-level safety analysis; traffic analysis zone (TAZ); Bayesian estimation; conditional autoregressive model; risk factor

镇化率已达 52.57%^[1]。上海城市快速发展, 2010 年常住人口已达 2 200 万^[2], 全市道路里程达 16 792 km^[2]。伴随着城市扩展和机动化快速发展, 交通安全问题日益严重, 2009 年上海的万车死亡率达 4.27, 远高于同期美国的 1.33^[3], 交通安全形势急需改善。美国佛罗里达州 20 个大都市以及芝加哥等大都市均已将安全作为交通规划首要目标^[4]。上海市在 2020 年城市交通发展白皮书中将安全确立为首要目标, 但上海市仍没有建立完善的安全定量评价方法和体系, 对路网特征、交通特征及其他因素与安全的关系无深入了解, 无法评估规划方案的安全性。

宏观交通安全分析将研究区域分成若干分析单元, 收集每个单元内道路、交通、土地利用等属性作为模型自变量, 事故数据作为因变量, 建立宏观安全统计模型。分析单元以交通分析小区 (traffic analysis zone, TAZ) 层面最多^[5-7]。TAZ 作为交通规划的空间分析单元, 获取数据方便, 而且宏观安全分析结果可以更好地融入到交通规划中。Guevara 等^[5]收集了 859 个 TAZ 的道路和交通数据, 以事故数作为因变量进行宏观安全分析。Hadayeghi 等^[6]收集了多伦多 463 个 TAZ 的道路和交通数据, 以事故数作为因变量进行宏观安全分析。

宏观层面影响交通安全的因素可以分为道路、土地利用、交通、社会-经济四大类。道路因素中, TAZ 内主干道长度及比例^[5]、交叉口密度^[6]、道路密度^[6]对事故数量具有显著正相关影响; Sun 等^[8]还发现三股交叉口比例对 TAZ 内事故数量有显著负相关影响。在土地利用因素中, 商业用地、仓储用地、综合开发用地、政府用地类型会导致事故显著增加^[9]。交通因素中, 车公里对事故数量有显著正相关影响^[6,8]; Lovegrove 等^[10]发现拥堵水平和事故有显

中国城市正在经历快速城市化, 2012 年我国城

收稿日期: 2013-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(51008230); 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(1600219176)

第一作者: 王雪松(1977—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为交通安全、交通规划与管理、交通信息化。

E-mail: wangxs@tongji.edu.cn

通讯作者: 宋 洋(1988—), 男, 硕士生, 主要研究方向为交通安全、交通统计分析。E-mail: song880308@gmail.com

著的正相关影响,平均速度对事故有显著负相关影响.关于社会-经济因素,TAZ内住户数量对事故数量有显著正相关影响^[6];Guevara等^[5]发现人口密度、17岁以下人口比例对TAZ内死亡事故具有显著正相关影响;随着家庭规模(每个家庭的平均人口)的增大,事故降低^[11].

事故具有非负、离散的特点,研究人员常使用广义线性模型进行分析^[5,8].相邻的TAZ在社会经济、道路、交通、土地利用等方面具有相似性,导致空间相关,违背了样本之间相互独立的假设.条件自回归(conditional autoregressive, CAR)模型可以解决空间相关问题. Wang等^[7]基于美国佛罗里达州的数据建立了TAZ层面的宏观安全模型,较好地解决事故数据过度离散、空间相关的问题.基于贝叶斯方法的空间统计模型可以更好地考虑数据的复杂性.

上海市区具有高密度路网、混合交通等中国城市的典型特点,本文采集了上海市外环内263个TAZ的事故、道路、交通、土地利用等数据,通过建立TAZ层面的宏观安全模型,分析道路、交通、土地利用等因素与安全之间的关系,寻找影响安全的显著因素.宏观交通安全研究对于建立安全的城市交通系统具有重要的指导意义.

1 数据准备

TAZ一般以行政边界、河流、高架快速路为边界,同时保证每个小区内土地利用类型一致.在数据处理过程中会遇到多源数据无法很好匹配的问题,由于TAZ边界与道路网数据来源不一致,导致2种数据融合之后TAZ边界与路网无法很好匹配,如有些TAZ边界本应沿着市区高架道路设置,但数据融合之后发现高架道路与TAZ边界不重合.因此人工检查了每个TAZ的边界,使TAZ边界能够与道路更好地匹配.

土地利用数据来自上海市市政管理局.土地利用性质分为八类:居住用地、居住商业用地、居住商业办公用地、居住科教文化商业用地、会展金融旅游用地、居住工业用地、居住物流用地和居住生态用地.地理区位分为浦西和浦东.土地利用强度分为1~5级以及未知.土地利用级别越高,开发强度越大.土地利用强度从市中心向外逐渐降低:内环内基本都是高强度开发,内环中环间开发强度相对减弱,而中外环间开发强度最弱.

收集了每个TAZ交通出行数据,包括客车产生

量、客车吸引量、货车产生量、货车吸引量.从上海市外环内客车产生量分布可以看出,客车产生的空间分布特征为:内环以内、外环内西南部的客车产生量较大,而外环内西部、北部以及东部客车产生量较小.利用ArcGIS软件中的空间关联技术统计各个TAZ内三岔交叉口数量、四岔交叉口数量、多岔交叉口数量、交叉口总数、主干道长度、次干道长度、道路总长度.

收集了2009年研究范围内的事故数据.通过对事故记录中的事故地点语义信息进行解析得到事故发生道路、相交道路等信息,并将事故定位于电子地图.利用地理信息系统(GIS)的空间关联技术便可计算出各个TAZ内的事故数量.

采用全局Moran指数来衡量研究范围内各个TAZ事故数之间的空间相关性,其计算公式为

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: I 为全局Moran指数; n 为TAZ的个数; i 和 j 均为TAZ的编号; x_i 和 x_j 代表第 i 个和第 j 个TAZ的事故数; \bar{x} 为所有TAZ事故数的均值, W_{ij} 为2个TAZ中心点之间的距离. I 的取值在 ± 1 之间,正值代表总事故数在空间上正相关,负值代表负相关,零值代表空间随机分布. I 值的显著性采用显著性检验公式Z-score来进行检验.

$$Z = \frac{1 - E(I)}{\sqrt{v_{ar}(I)}} \quad (2)$$

式中: $E(I)$, $v_{ar}(I)$ 分别为 I 值的期望和方差.本文选取显著性检验水平为5%,如果 $Z(I)$ 绝对值大于1.96,则说明总事故数在空间上存在显著的空间自相关性.在ArcGIS软件中计算得到 $I=0.231$, $Z=2.014$,说明事故数存在空间自相关性.

将所有自变量按照连续变量和分类变量分别进行统计描述,如表1和表2所示.

2 贝叶斯负二项条件自回归模型

贝叶斯方法通过结合先验分布及从观测数据得出的似然函数得到估计参数的后验分布^[12].先验分布可以根据经验给出,也可以是无信息的先验分布.贝叶斯方法的理论框架可以表示为

$$\pi(\theta | y) = \frac{L(y | \theta)\pi(\theta)}{\int L(y | \theta)\pi(\theta)d\theta} \quad (3)$$

表 1 连续型自变量统计描述

Tab.1 Continuous variable features statistics summary

变量	单位	均值	最小值	最大值	标准差
TAZ 面积	km ²	2.453	0.463	18.055	2.183
三股交叉口数量	个	20.240	0	1 840	23.560
四股交叉口数量	个	15.570	4	124	15.019
多股交叉口数量	个	0.692	0	9	1.116
交叉口总数	个	35.502	7	244	35.778
主干道长度	km	3.600	0	4.428	1.615
次干道长度	km	1.818	0	2.452	0.769
道路总长度	km	24.562	16.835	83.470	0.787
道路网密度	km · km ⁻²	10.136	6.628	32.756	3.024
客车产生量	pcu	10 349.267	4 400	15 233	1 051.730
客车吸引量	pcu	10 309.342	2 400	16 936	1 130.600
货车产生量	辆	388.764	0	745	77.140
货车吸引量	辆	394.385	0	645	63.770

表 2 分类变量统计描述

Tab.2 Categorical variable features statistics summary

变量	变量说明	比例/%
土地利用性质	0 居住用地	22.4
	1 居住商业用地	28.9
	2 居住商业办公用地	11.0
	3 居住科教文化商业用地	11.0
	4 会展金融旅游用地	7.6
	5 居住工业用地	9.1
	6 居住物流用地	7.2
土地利用强度	7 居住生态用地	2.7
	0 为 1~2 级	22.4
	1 为 3~5 级	27.4
地理区位	2 为其他、未知	50.2
	0 浦西	70.7
	1 浦东	29.3

式中: $\pi(\theta|y)$ 为在给定 y 的条件下 θ 的后验分布, θ 为似然函数系数的向量, y 为观测到数据的向量; $L(y|\theta)$ 为似然函数; $\pi(\theta)$ 为 θ 的先验分布; $\int L(y|\theta)\pi(\theta)d\theta$ 为观测数据的边缘概率分布。

设 y_i 为第 i 个 TAZ 内发生的事故数, 在负二项模型中 y_i 服从泊松 Gamma 分布, 如下所示:

$$y_i: N_{eg}(\theta_i, \gamma) \quad (4)$$

式中: N_{eg} 表示泊松 Gamma 分布; θ_i 为 y_i 的期望; γ 为离散系数。

对于不考虑空间相关性的负二项模型, 连接函数形式为对数函数, 如下所示:

$$\lg(\theta_i) = \mathbf{X}'\boldsymbol{\beta} \quad (5)$$

式中: \mathbf{X}' 为自变量协方差矩阵; $\boldsymbol{\beta}$ 为回归系数的向量。

如果在贝叶斯理论框架内建立负二项 CAR 模型, 那么就在前面负二项模型假设基础上引入随机效应项 ϕ_i , 以解释第 i 个 TAZ 同其他 TAZ 的空间相关性, 因此设定的事故模型就变为式(6):

$$\lg(\theta_i) = \mathbf{X}'\boldsymbol{\beta} + \phi_i \quad (6)$$

通常利用空间邻接矩阵 $w_{i,j}$ 来说明空间内第 i 个 TAZ 和第 j 个 TAZ 的关系, 定义如式(7):

$$w_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{若第 } i \text{ 个 TAZ 和第 } j \text{ 个 TAZ 相邻} \\ 0, & \text{若第 } i \text{ 个 TAZ 和第 } j \text{ 个 TAZ 不相邻} \end{cases} \quad (7)$$

在贝叶斯 CAR 模型中, ϕ_i 的先验条件分布可定义如式(8):

$$\phi_i | \phi_{(-i)} \sim N\left(\sum_j \frac{w_{i,j}}{w_{i+}} \phi_j, \frac{1}{\tau_c w_{i+}}\right) \quad (8)$$

式中: $\phi_{(-i)}$ 是除 ϕ_i 外所有 ϕ 的集合; τ_c 为精度系数; w_{i+} 为与第 i 个 TAZ 相邻的 TAZ 的 $w_{i,j}$ 的和, 即

$$w_{i+} = \sum_{j=1}^n w_{i,j}, j \text{ 是与第 } i \text{ 个 TAZ 相邻的 TAZ 集合.}$$

$$\pi(\phi) \propto \exp\left\{-\frac{\tau_c}{2} \sum_{i \neq j} w_{i,j} (\phi_i - \phi_j)^2\right\} \quad (9)$$

式中: $\pi(\phi)$ 为 $\phi = \{\phi_i, i=1, 2, 3, \dots\}$ 的联合分布, \propto 说明左式的似然方程同右式同比例变化, 进而可由先验分布计算后验分布, 并完成统计推断。

方差信息标准(deviance information criterion, D_{IC})综合量化了贝叶斯模型的拟合度和复杂度, 常用于比较复杂模型的优劣^[13]。 D_{IC} 的计算方法如下:

$$D_{IC} = \overline{D(\theta)} + p_D \quad (10)$$

式中: $D(\theta)$ 为估计系数 θ 的贝叶斯方差, $\overline{D(\theta)}$ 为 $D(\theta)$ 的后验均值, $\overline{D(\theta)}$ 可以看作是模型拟合优度的判别指标; p_D 为参数的有效数目, 反映了模型的复杂程度。 D_{IC} 值越小, 模型越优。

3 模型结果与分析

贝叶斯方法通常使用马尔科夫链进行计算^[14]。软件 WinBUGS 利用吉布斯取样法完成贝叶斯模型的标定。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 $N(0, 10^5)$, 随机效应的方差 σ_e^2 服从 Inverse-Gamma 分布 $(10^{-3}, 10^{-3})$, 负二项分布的离散系数 r 服从 Inverse-Gamma 分布 $(10^{-3}, 10^{-3})$ 。设定 2 条马尔科夫链各进行 20 000 次迭代, 舍弃前 2 000 个不稳定的样本, 建立了 TAZ 层面的贝叶斯负二项模型和贝叶斯负二项 CAR 模型。贝叶斯负二项模型和贝叶斯负二项 CAR 模型的后验分布和 D_{IC} 值如表 3 所示。

对比了贝叶斯负二项模型与贝叶斯负二项 CAR 模型的拟合结果, 前者的 D_{IC} 值(3 892.4)大于后者的 D_{IC} 值(3 288.3), 证明贝叶斯负二项 CAR 模型拟合结果更优。在贝叶斯模型中判断一个变量是

表 3 贝叶斯负二项 CAR 模型与贝叶斯负二项模型结果对比

Tab.3 Modeling results of Bayesian Negative Binomial (NB) CAR model and Bayesian NB model

变量	贝叶斯负二项模型			贝叶斯负二项 CAR 模型		
	后验均值	后验标准差	95%置信区间	后验均值	后验标准差	95%置信区间
主干道长度	0.712 0	0.083 1	(0.599,0.826)	1.546 0	0.742 7	(0.687,2.583)
次干道长度	0.039 3	0.031 6	(0.008,0.081)	0.062 1	0.046 2	(0.016,0.133)
道路网密度	3.770 0	1.130 0	(1.592,6.342)	3.974 0	1.830 0	(1.764,6.213)
三股交叉口比例	-0.159 3	0.175 1	(-0.391,-0.125)	-0.216 1	0.203 1	(-0.433,0.085)
交叉口总数	0.082 0	0.061 4	(0.019,0.152)	0.062 3	0.010 5	(0.043,0.095)
土地利用强度为 3~5 级	0.319 5	0.108 9	(0.202,0.437)	0.135 8	0.104 0	(0.097,0.274)
土地利用强度为其他和未知	0.413 5	0.028 3	(0.397,0.450)	0.242 3	0.115 6	(0.103,0.412)
客车产生量	0.009 1	0.002 6	(0.006,0.012)	0.013 5	0.006 4	(0.005,0.021)
地理区位浦东	-0.166 4	0.097 1	(-0.280,-0.062)	-0.821 0	0.379 0	(-0.128,-0.461)
CAR 效应	—	—	—	0.373 4	0.147 0	(0.231,0.544)

注:土地利用强度以 1~2 级为基准变量,地理区位以浦西为基准变量。

否显著有 2 个准则:①后验均值小于后验标准差的值;②95%置信区间不应覆盖零^[13]。按照以上准则判断,贝叶斯负二项 CAR 模型中的显著变量包括主干道长度、次干道长度、道路网密度、交叉口总数、土地利用强度、客车产生量和地理区位等 7 个变量。

3.1 路网特征

主干道长度对事故数量为正相关影响,主干道长度的增加会显著增加 TAZ 内的事故数。原因是主干道上车道多、流量大、车速高。上海市区主干道双向车道数平均为 6.43 条,有些路段双向甚至有 8~10 条车道,车道数多增加了行人过街距离,也增加了行人事故发生的可能性。主干道高峰小时每车道流量为 500 辆,大交通量增加了交通冲突和事故发生的可能性。此外,上海市区主干道上相邻交叉口平均距离较短,仅为 400 m,这对交通安全同样造成不利影响。Xie 等^[15]研究发现在上海市区主干道上,随着交叉口间距缩短,交叉口事故数增加。Levine 等^[16]发现每个人口普查街区组中的主干道里程对事故有显著的正相关影响。

模型结果表明次干道对事故数量同样有显著正相关影响。次干道同样具有较高的车流量和较高的车速,增加了事故发生的可能性;上海的部分次干道上没有机非分隔设施,会带来更多的机非冲突,从而导致事故多发^[17]。Hedayeghi 等^[6]在分析多伦多道路交通事故时也得到与本文相类似的研究结论,次干道长度增加,会增加 TAZ 内的事故数量。

道路网密度、交叉口数量与事故数呈现出显著正相关关系。路网密度越高,交叉口数量越多,意味着交叉口间距短,车辆交织、车辆变道转弯的准备距离也变短,发生交通冲突的概率增加,发生事故的概率也增加。而且交叉口密度越高,转向的流量就越大,机动车与行人、非机动车发生冲突的机会更大。根据模型结果计算,交叉口数量每增加 1 个单位,

TAZ 事故数量增加 6.4%($e^{0.0623} - 1$)。Siddiquia 等^[18]发现每个 TAZ 内的交叉口总数对事故数量会起到显著正相关作用。Hedayeghi 等^[19]在研究宏观安全过程中也发现了每个 TAZ 中道路密度对总事故数存在着显著的正相关影响。

3.2 交通、土地及区位变量

在贝叶斯负二项 CAR 模型中,客车产生量、土地利用强度及地理区位在 95%置信区间内是显著的。

客车产生量对事故数量的影响是显著正相关的:随着客车产生量的增加,事故数量增加。根据模型结果计算,客车产生量每增加 1 个单位,TAZ 事故数量增加 1.4%。TAZ 内客车产生量与事故数量之间存在正相关关系,这与常识是吻合的:交通量越大,事故越多。Hedayeghi 等^[6]统计了 TAZ 内车公里数,并分析得到其对事故数量的影响是显著正相关的。

贝叶斯负二项 CAR 模型结果显示,土地利用强度越高,事故数量越多。土地利用强度从 1~2 级上升到 3~5 级,TAZ 事故数量增加约 14.5%。土地利用强度高,会带来更多的交通量,从而导致更多事故的发生。表 3 结果同时显示,土地利用强度变量“其他和未知”的系数比变量“3~5 级”的系数大且为正,这说明相对于土地利用强度为 1~5 级的 TAZ,土地利用强度为“其他和未知”的 TAZ 事故更多。结合土地利用强度分布可以发现,土地利用强度为“其他和未知”的 TAZ 大多分布在外环附近,靠近城乡结合部。这类区域土地利用混合度高、客货混行严重、交通秩序混乱,容易发生事故。

从区位角度看,浦西事故数量高于浦东事故数量。原因是浦东从 20 世纪 90 年代开始开发,很多道路属于新建道路,道路安装有质量较好的隔离、防护设施,浦西由于历史原因,很多道路在设计与建设上

存在问题,某些浦西道路隔离、防护设施缺失,增加了事故发生可能性。而且浦西的道路密度、土地开发强度(浦西土地利用强度为 3~5 级的 TAZ 占 53%,浦东占 44%;浦西土地利用强度为“其他和未知”的 TAZ 占 33%,浦东占 18.2%)也比浦东大。以上因素增加了浦西发生事故的可能性。

4 结论

国外大都市区所采用的交通安全规划方法为上海市提供了借鉴。作为交通安全规划中必不可少的环节,宏观安全分析有助于找到宏观层面影响安全的因素。本文基于上海市事故数据将宏观安全分析应用于国内城市,针对上海市区进行 TAZ 层面宏观交通分析。基于宏观安全数据的特点建立贝叶斯负二项 CAR 模型进行分析,并根据 D_{IC} 证明贝叶斯负二项 CAR 模型相比于贝叶斯负二项模型更优。基于模型结果从道路属性、土地利用和交通特点层面上找到了显著影响宏观层面事故数量的因素。

模型分析结果为未来上海市交通规划的实施提供了一些借鉴:在交通规划过程中,注意道路里程、密度与土地之间的搭配;规划过程中注意控制交叉口距离,过短的交叉口间距会对安全产生不利影响;主、次干道做好防护隔离设施,减少交通冲突机会;在过街距离较长的路段设置安全性较高的行人过街设施,如行人安全岛、过街天桥等;对于靠近外环的城郊区域,应重点加强对非机动车、摩托车以及货车的安全管理;对于位于浦西主次干道里程较长、路网密集、土地开发强度较大的区域,要做好事故主动预防,因为由模型结果可知,此类区域发生事故的概率较大。

参考文献:

- [1] 中国社会科学院城市发展与环境研究所. 中国城市发展报告(2012)[R]. 北京: 中国社会科学院城市发展与环境研究所, 2013.
- Urban Development and Environmental Research Institute of China Social Science Academy. Report of Chinese city development (2012) [R]. Beijing: Urban Development and Environmental Research Institute of China Social Science Academy, 2013.
- [2] 上海市统计局. 上海市统计年鉴(2010)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- Bureau of Statistic of Shanghai. Shanghai statistical yearbook 2010 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011.
- [3] 同济大学交通运输工程学院. 交通运营安全管理配套政策研究课题——道路交通安全专题[R]. 上海: 同济大学, 2012.
- School of Transportation Engineering of Tongji University. Supporting policies research of traffic operation safety and management[R]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [4] 彭建, 王雪松. 国际大都市区最新综合交通规划远景、目标、对策比较研究[J]. 城市规划学刊, 2011(5): 19.
- PENG Jian, WANG Xuesong. A comparative study of visions, objectives, and strategies of the latest comprehensive transportation plans for metropolitan areas of international cities [J]. Urban Planning Forum, 2011(5): 19.
- [5] Guevara F L, Washington S P, Oh J. Forecasting crashes at the planning level: simultaneous negative binomial crash model applied in Tucson, Arizona [J]. Journal of Transportation Research Record, 2004, 1897: 191.
- [6] Hadayeghi A, Shahi J, Persaud B N. Macrolevel collision prediction models for evaluating safety of urban transportation systems [J]. Journal of Transportation Research Record, 2003, 1840: 87.
- [7] Wang X, Wu X, Abdel-Aty M, Tremout P. Investigation of road network features and safety performance [J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 56: 22.
- [8] Sun J, Lovegrove G R. Using community-based macrolevel collision prediction models to evaluate safety level of neighborhood road network patterns [C/CD]//Transportation Research Board 89th Annual Meeting. Washington D C: Transportation Research Board, 2010.
- [9] Ng K, Hung W, Wong W. An algorithm for assessing the risk of traffic accident [J]. Journal of Safety Research, 2002, 33 (3): 387.
- [10] Lovegrove G R, Sayed T. Macro-level collision prediction models for evaluating neighbourhood traffic safety [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006, 33(5): 609.
- [11] Lovegrove G R, Sayed T. Using macrolevel collision prediction models in road safety planning applications [J]. Journal of Transportation Research Record, 2006, 1950(1): 73.
- [12] Carlin B P, Louis T A. Bayesian methods for data analysis [M]. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2009.
- [13] Spiegelhalter D J, Best N G, Carlin B P, Linde A V D. Bayesian measures of model complexity and fit [J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 2003, 64(4): 583.
- [14] Gilks W R, Richardson S, Spiegelhalter D J. Markov Chain Monte-Carlo methods in practice [M]. New York: Chapman & Hall, 1995.
- [15] Xie K, Wang X, Huang H, et al. Corridor-level signalized intersection safety analysis in Shanghai, China using Bayesian hierarchical models [J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 50: 25.
- [16] Levine N, Kim K E, Nitz L H. Spatial analysis of Honolulu motor vehicle crashes: I. spatial patterns [J]. Accident Analysis and Prevention, 1995, 27(5): 663.
- [17] Wang X, Chen M. Safety analysis of urban arterials under varying operational conditions in Shanghai [C/CD]//Transportation Research Board 91st Annual Meeting. Washington D C: Transportation Research Board, 2012.
- [18] Siddiquia C, Abdel-Aty M, Huang H. Aggregate nonparametric safety analysis of traffic zones [J]. Accident Analysis and Prevention, 2012, 45: 317.
- [19] Hadayeghi A, Shalaby A S, Persaud B N. Development of planning level transportation safety tools using geographically weighted poisson regression [J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(2): 676.