

宏观交通安全建模研究与安全影响因素分析

王雪松¹, 吴杏薇¹, 金昱²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海城市规划设计研究院, 上海 200040)

摘要: 由于对规划层面的交通安全研究不足, 道路网络特征、区域交通特征及区域其他与交通安全的关系尚不明确, 导致在交通规划阶段缺少可用的方法和工具来评价不同规划方案的安全性。依托美国佛罗里达州 Orange 县的数据对宏观交通安全建模进行了系统研究, 基于拓扑学理论计算交通分析小区 (traffic analysis zone, TAZ) 路网形态结构, 提取 TAZ 层面交通特征和其他影响因素。TAZ 在空间上有远近之分, 相邻的 TAZ 在社会经济发展、道路交通特征方面有某种程度的趋同性, 距离较远的 TAZ 之间有某种程度的相异性。贝叶斯条件自回归模型可以分析空间相关数据, 利用先进的贝叶斯空间统计模型分析 TAZ 层面交通安全与影响因素之间的关系。基于事故发生机理考虑, 提出将主干路事故和支路事故分别建模的新思路。分析发现新的建模思路能够很好区分不同道路类型的安全影响因素; 路网形态结构和安全之间有显著的关系。

关键词: 宏观安全建模; 交通分析小区; 贝叶斯模型; 条件自回归模型; 道路网络形态; 宏观影响因素

中图分类号: U491.13

文献标识码: A

Macro Level Safety Modeling and Impact Factor Analysis

WANG Xuesong, WU Xingwei, JIN Yu

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; Shanghai Urban Planning and Design Research Institute, Shanghai 200040, China)

Abstract: Due to the lack of systematic research for traffic safety at the planning stage, the relationship between macro level impact factors such as road network patterns, traffic features and other variables with transportation safety remains unclear, which leads to the shortage of available methods and tools to evaluate the safety of various transportation plans. Based on the data from the Orange County, Florida, this paper describes the system research on macro transportation

safety modeling at traffic analysis zone (TAZ) level, abstracting effective indices of road network patterns, traffic features and other macro level impact factors. Bayes Space Static Model was adopted to investigate the association between transportation safety and impact factors. Adjacent TAZs are always similar in economic development, road network structures, and traffic features; while TAZs located separately tend to be more diversity. Bayesian Conditional Autoregressive Regression (CAR) Models were used to analyze these spatial correlated data. Considering the different crash mechanisms of major roads and minor roads, new modeling strategy was proposed by modeling crashes on arterials and on local roads separately. The paper finds out there is a significant relationship between the road network patterns and safety, and the new modeling strategy is able to differentiate the safety effect for different types of crashes.

Key words: macro transportation safety planning; traffic analysis zone; Bayesian estimation; conditional autoregressive; road network pattern; macro level impact factors

传统的交通安全研究致力于事故多发点判别、事故致因分析和安全改善措施的选取, 这种基于已有事故数据针对具体交通设施的解决途径可以在一定程度上缓解已有的交通安全隐患, 但无法从根本上解决交通系统的安全问题。交通安全受交通系统规划、设计、建设、运营、管理、维护各个阶段的影响, 考虑到交通规划对塑造交通系统的深刻影响, 交通安全应该在规划阶段就得到足够的重视和充分的考虑。近十几年, 美国、英国、加拿大已经开始重视在交通规划的整个过程中充分考虑交通安全, 并且通过定量研究来分析道路区域属性特征、交通特征及区域其他影响因素与交通安全的关系, 其中以交通分

收稿日期: 2011-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(51008230); 新世纪优秀人才支持计划

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

E-mail: wangxs@tongji.edu.cn

通讯作者: 吴杏薇(1987—), 女, 硕士生, 主要研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: wuxingwei062626@163.com

析小区(traffic analysis zone, TAZ)层面的研究成果最为丰富.

宏观交通安全研究主要针对区域人口经济特征、道路网络特征、交通运行特征几个方面进行分析. 在已有研究中,对于区域道路网络特征的分析仅仅是以区域为单位设施数量的简单累计(如交叉口总数、道路总里程),这些特征并不能充分反映道路网络空间结构特性,没有从路网结构深度挖掘事故发生的根本原因,需要结合复杂网络、拓扑结构等学科的理论与方法进一步研究区域路网空间结构对于宏观安全的影响. 此外,传统的统计分析模型无法考虑研究区域内小区之间的复杂空间数据结构,贝叶斯空间统计模型可以满足数据的空间相关性以及模型的复杂性,已经在宏观交通安全分析中发挥着越来越重要的作用.

提高交通安全已经成为国内外许多城市交通规划的主要目标之一. 由于美国基础数据完善,因此本研究依托美国佛罗里达州 Orange 县的数据,以 TAZ 作为分析单元,借鉴复杂网络、拓扑结构学科知识提取能够有效反映路网结构的特征指标,在传统宏观交通安全建模方法的基础上提出新的建模思路,并利用先进的贝叶斯空间分析方法建立统计模型,分析区域路网特征、交通运行特征和区域其他影响因素与交通安全之间的关系,为国内宏观交通安全建模研究在数据收集和处理、模型标定与分析方法等方面提供借鉴.

1 宏观安全研究进展

宏观交通安全分析始于 20 世纪 90 年代事故空间分布的研究. 1995 年,Levine 等人开始研究夏威夷火奴鲁鲁地区交通事故在主干道网络上的空间分布规律,并使用修正的多元线性回归模型建立了人口普查街区组(census block group)层面交通事故与人口、就业、道路交通特征(高速公路、主干道、匝道长度)三类影响因素之间的统计模型^[1]. 从那以后,学者们开始研究宏观层面影响事故数量的显著因素. 下面从宏观安全建模策略、宏观交通安全影响因素、统计分析方法、面向应用的理论研究等角度总结研究现状.

1.1 宏观安全建模策略

出于宏观安全和交通规划衔接的考虑,TAZ 层面的分析受到交通安全研究人员的重视. 在现有 TAZ 层面的交通安全分析中,通常以 TAZ 内的所

有事故作为因变量进行建模分析. 如 2003 年 Hadayeghi 等人对加拿大多伦多市 463 个 TAZ 所做的安全分析^[2];2006 年 Lovegrove & Sayed 利用加拿大大温哥华地区 577 个 TAZ 所做的安全分析^[3]. 这种思路的假设是 TAZ 内事故的发生受其所属 TAZ 变量的影响. 由于作为 TAZ 边界的干线道路主要承担长距离交通,发生在主要道路的事故与 TAZ 内部人口、土地利用、路网结构等因素关系较为疏远;另一方面,发生在主要道路上的事故同事故位置所在小区的关系并不像支路与其发生的事故那样密切. 因此,有必要对不同道路类型的事故分别进行建模.

1.2 宏观交通安全影响因素

国外宏观交通安全研究主要从区域人口经济、土地利用特征、交通运行特征、道路属性特征等几个方面进行分析. 反映区域人口特征的常用因素包括人口总量、总户数、人口密度、老年人口和非老年人口^[2,4];表示区域经济水平的常用因素包括就业人数、失业率、户均小汽车数等^[2,5];描述区域土地利用常用因素为各类性质的用地面积和区域内学校数量等^[6];反映交通运行特征的因素包括交通流量、路网平均车速、区域平均车公里数和体现拥挤程度的区域平均饱和度^[2-3,7];区域内交叉口规模和道路设施规模是最常用的反映道路属性特征的因素^[2,5];有些研究用到了区域内道路平均弯曲程度^[3].

已有研究用到的区域道路属性特征是以区域为单位的设施数量简单累计,这些对区域道路交通特征的简单提取并不能够充分考虑不同区域之间的道路网络结构差异,没有从路网功能、拓扑结构深度挖掘造成交通运行状况以及事故发生的根本原因. 近几年拓扑结构、复杂网络等科学的发展为提取道路几何拓扑、路网布局特征提供了理论支持和方法. 2004 年 Buhl 等人提出用 Meshedness 值来研究网络中圈形结构的数量^[8]. Meshedness 值具有容易计算、路网区分度强等优点. 这类指标能在一定程度上反映了路网形态,但能否有效地反映路网形态对安全的作用有待进一步分析.

1.3 统计分析方法

研究人员早期利用广义线性模型(generalized linear model, GLM)对 TAZ 事故数同解释变量的关系进行建模,误差项假定服从泊松或负二项分布^[4-5,9]. 在 GLM 建模框架下,假设各个小区是相互独立的. 交通分析小区在空间上有远近之分,相邻的小区在社会经济发展、道路交通特征上有某种程度

的趋同性. 为了克服传统统计分析方法的缺陷,空间统计模型逐步被用到了宏观安全分析中. 基于英国伦敦地区的交通事故数据,Quddus 分别使用负二项回归模型和贝叶斯空间统计模型来分析区域层面的交通事故与区域人口特征等影响因素之间的关系,并且比较了不同模型的差异,指出贝叶斯空间统计模型更适合于建立区域层面的交通事故与影响因素之间的关系^[3]. Hadayeghi 等人建立全贝叶斯模型分析影响 TAZ 事故数量的显著因素^[10],研究结果显示贝叶斯空间模型能有效地揭示事故数据分布存在空间关联性的特性.

随着城市化的快速发展和国内城市交通安全问题日益严峻,国内学者已开始重视城市交通安全的研究,但已有研究主要集中于对城市各类道路设施如城市交叉口安全性的分析^[11]. 认识到以事故黑点改造为代表的传统“被动交通安全改善”方法虽然能有效解决道路安全中的一些问题,但也存在着明显的缺陷;王岩和杨晓光在国内提出了“主动道路交通安全规划”这一概念^[12];认识到城市总体规划、土地利用规划中都很少考虑交通安全,现实中许多规划对规划区内的交通安全造成了直接或潜在影响,唐珏琳对城市总体规划和土地规划中影响交通安全的因素进行了探讨^[13]. 但是,反映路网特征、交通特征与交通安全之间关系的定量研究在我国尚未展开.

2 研究数据准备

建立宏观安全模型需要区域人口经济、土地利用、道路网络、交通运行信息及区域事故数据. 选取美国佛罗里达州 Orange 县 2006 年的事故以及 TAZ 边界、道路、交通、人口、土地利用等数据进行研究. 其中,TAZ 边界数据来源于中佛罗里达区域规划模型 (Central Florida Regional Planning Model, CFRPM),该模型的基准年是 2005 年,目标年是 2035 年,共分为 662 个 TAZ,且 TAZ 边界在 1~2 年之内不会有明显的变动. 事故数据、土地利用和道路交通属性资料来源于佛罗里达州交通部 (Florida Department of Transportation, FDOT) 和美国统计局拓扑地理信息编码系统 (Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing, TIGER).

2.1 人口与土地利用特征提取

人口特征包括人口数量、年龄分布以及家庭规模等,这些数据由美国 2000 年人口普查数据获得.

研究区域内有 14 582 个人口普查单元 (census block),远大于研究区域 TAZ 的数量,一个 TAZ 包含多个人口普查单元. 利用 ArcMap 空间关联工具可以把几个人口普查单元的数据汇总到相应的 TAZ 中. 根据 Orange 县人口增长率,可以推算到 2006 年每个 TAZ 人口的统计数据. FDOT 的土地使用数据包括城市化程度和学校数量,这些数据是按照地块提供的. 城市化程度分为完全城市化、部分城市化和郊区三种类型. 利用 ArcMap 中空间关联工具可以分析得到每个 TAZ 的城市化程度和学校数量.

2.2 区域道路、交通特征提取

交通数据主要来自 FDOT,主要包括道路路段年平均日交通量 (annual average daily traffic, AADT)、交叉口信控类型. 结合这些数据可以计算 TAZ 内道路车公里数 (vehicle kilometers of travel, VKT)、TAZ 内主干道信号灯数量和密度. 道路相关变量分为两大类:道路、交叉口规模指标和路网结构指标. 规模指标包括各类道路长度、密度,以及各类交叉口的数量、密度. 结构主要包括 TAZ 内道路的类型,本文通过提取路网形态特征指标 Meshedness 值来实现.


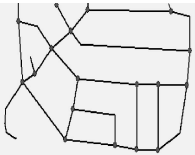
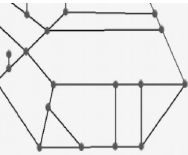
群聚性 (clustering) 是网络分析中一类非常重要的指标,用来衡量网络中顶点的积聚程度. 2004 年 Buhl 等人提出 Meshedness 值,它通过计算网络中三角形圈型结构数量同该网络中所有顶点对应的完备平面图中三角形圈型结构数量的比来反映网络的群聚性. 如果网络中圈型结构多,则 Meshedness 值高,顶点间联系紧密,积聚程度高;反之如果网络中圈型结构少,则 Meshedness 值低,顶点间联系松散,积聚程度低. 对于一个由 K 条边、 N 个顶点组成的网络 G ,Meshedness 值计算如下:

$$M = \frac{F}{F_{\max}} = \frac{K - N + 1}{2N - S} \tag{1}$$

式中: F 为由欧拉公式计算出的网络中面 (face) 的个数; F_{\max} 为 N 个顶点组成的网络所可能拥有最多的面的数量^[8]. 将现实的道路网络变换为抽象网络后 (如表 1 所示),基于路网图层 (shapefile) 和 TAZ 图层,利用程序可以计算出各个 TAZ 对应的 Meshedness 值.





基于 Southworth 和 Ben-Joseph^[14] 的研究,本文将道路网络形态分为:离散型、尽端路+环形路结构、混合型、方格网 & 平行曲线结构四种类型. 其中离散型是指 TAZ 内道路网离散,分块分布的;混合

表 1 原始法解析道路网图示

Tab.1 Conventional method analysis of road network		
区域道路网	对应 GIS 地图	对应抽象网络
		

型路网是指 TAZ 道路网形态含有方格路网、平行曲线路网、尽端路+环形路中两种及以上路网形态的. 分析结果表明 Meshedness 值对四类路网具有很好的区分度,不同道路类型对应的 Meshedness 取值区间见表 2.

表 2 路网分类与 Meshedness 值离散化处理结果
Tab.2 Road network classification and corresponding Meshedness value

离散型	尽端路+环形路	混合型	方格网 & 平行曲线
			
(-0.30, 0]	(0, 0.11]	(0.11, 0.17]	(0.17, 0.35]

2.3 事故数据

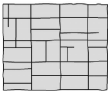
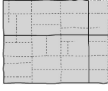
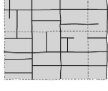
事故数据由 FDOT 提供,首先需要分析每个事故点相对于 TAZ 边界的空间位置. 如果事故点不在 TAZ 边界上,它归属是明确的. 对于 TAZ 边界上的事故,以 TAZ 边界的道路中心线为事故归属的分界

线,从 FDOT 事故报告中提取每起事故中各车辆行驶方向(东、西、南、北),然后对于每起事故编制分析事故点相对于 TAZ 边界的精确位置关系,从而确定事故归属.

3 宏观安全建模策略

传统的宏观交通安全模型大多以 TAZ 为分析单元,使用 TAZ 内所有事故作为因变量. 佛罗里达州 TAZ 的平均面积一般在 0.65~2.59 km² 之间,其中 Orange 县 TAZ 平均面积为 3.90 km². 假设 TAZ 为正方形,则其平均边长约 2.0 km;若 TAZ 为圆,则其平均直径约为 2.3 km. 数据分析显示 2006 年 Orange 县 75% 的事故的发生位置距离肇事司机居住地的距离大于 4.8 km(直线距离). 另一方面,在 Orange 县,80% 的主干道被用作 TAZ 的边界,这些主要道路发挥着重要的交通作用、承载大量交通流量. 因此,发生在 TAZ 边界主干道的事故和发生在 TAZ 内部支路事故有着不同的属性,发生在 TAZ 主干道上事故同主干道的属性关系大一些;发生在 TAZ 支路上的事故同小区内部属性(如人口、经济、土地利用、道路网络结构)的关系更紧密. 传统的宏观交通安全建模缺乏对 TAZ 不同道路类型事故发生机理的深入分析. 将交通分析小区的事故按事故所在道路类型划分为主干道事故和支路事故(见表 3),对两类事故分别建模分析,分析其显著影响因素.

表 3 TAZ 层面宏观交通安全建模策略

Tab.3 Comparison of methods on macroscopic traffic safety modeling strategies on TAZ-level			
建模策略		图示	因变量
传统方法	全体事故模型		全体事故
	主干道事故模型		发生在主干路(多为 TAZ 边界)上的事故
新策略	支路事故模型		发生在支路(多为 TAZ 内部道路)上的事故

4 贝叶斯空间统计方法

研究交通安全与各类影响因素关系时,传统的统计模型无法正确反映数据之间的复杂空间关联,

对该类空间关联性的忽视往往引起模型残差结构的不恰当构建,从而导致参数估计的不准确和偏差,而贝叶斯空间统计模型却可以很好地拟合复杂的数据结构.

贝叶斯方法是整合总体、样本和先验三类信息

的统计推断方法^[15]. 模型中所有未知量(包括观测样本和模型参数)都被看作一个随机变量,用概率分布去描述未知状况. 贝叶斯定理表述为

$$p(\boldsymbol{\theta} \mid x) = f(x \mid \boldsymbol{\theta})\pi(\boldsymbol{\theta})/p(x) \tag{2}$$

式中: $p(\boldsymbol{\theta} \mid x)$ 为给定样本 x 信息后参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 后验分布,即抽样后对未知参数分布的重新认识, $\boldsymbol{\theta}$ 为参数向量, $x=(x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n)$ 为样本; $f(x \mid \boldsymbol{\theta})$ 为似然函数; $\pi(\boldsymbol{\theta})$ 为参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 的先验分布; $p(x)$ 为 x 的边缘分布. 贝叶斯分析能灵活地调整模型以满足需要,方便地计算统计推断结果,对复杂数据结构有较好的拟合性.

为了解决空间相关问题,条件自回归模型(conditional autoregressive model, CAR)在 GLM 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 间的空间相关性^[16],这样 GLM 中设定的事故模型就变为

$$\eta_i = \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta} + \varphi_i \tag{3}$$

式中: η_i 为第 i 个 TAZ 内事故期望值; \mathbf{x}' 为参数向量; $\boldsymbol{\beta}$ 为系数向量; φ_i 为空间随机效应项.

通常利用空间邻接矩阵 \mathbf{W} 来说明空间内任意两个 TAZ 的关系. 本研究该矩阵定义为

$$w_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{如果 TAZ}_i \text{ 和 TAZ}_j \text{ 相邻} \\ 0, & \text{如果 TAZ}_i \text{ 和 TAZ}_j \text{ 不相邻} \end{cases} \tag{4}$$

在贝叶斯 CAR 模型中, φ_i 的先验条件分布可定义为

$$\varphi_i \mid \varphi_{-i} \sim N\left(\sum_j \frac{w_{i,j}}{w_{i+}} \varphi_j, \frac{1}{\tau_c w_{i+}}\right) \tag{5}$$

式中: φ_{-i} 是除 φ_i 外所有的 φ 的集合; w_{i+} 是同 TAZ_{*i*} 相邻的 TAZ 的 $w_{i,j}$ 的和, $w_{i+} = \sum_{j=1}^N w_{i,j}$, j 是与第 i 个 TAZ 相邻的 TAZ 集合; τ_c 是精度系数(precision parameter), φ_i 的联合先验分布为

$$\pi(\varphi) \propto \exp\left\{-\frac{\tau_c}{2} \sum_{i \neq j} w_{i,j} (\varphi_i - \varphi_{i-1})^2\right\} \tag{6}$$

其中 $\pi(\varphi)$ 是 $\varphi(\varphi = \{\varphi_i, i=1,2,3\cdots\})$ 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.

5 宏观安全模型标定

利用贝叶斯空间统计模型建立传统的全体事故模型、TAZ 主干路事故模型和 TAZ 支路事故模型. 以全体事故模型为参照,对比分析新的建模策略下模型的标定结果,深入分析小区社会经济、人口、路网形态、交通特征等因素对事故发生的影响.

5.1 基于传统建模方式的全体事故模型

基于 2006 年美国 Orange 县数据,用 TAZ 全体事故作为因变量,建立了贝叶斯泊松 CAR 模型. 基于马尔科夫链蒙特卡洛(Markov Chain Monte Carlo,MCMC)方法计算出参数后验估计结果,包括后验均值(posterior mean)、后验标准偏差(posterior standard deviation)和 95%置信区间,见表 4. 如果置信区间内不包含 0,则说明对应变量在 95%显著性水平下是显著的;如果包含 0,则对应变量不显著. 偏差信息准则(Deviance Information Criterion, DIC)用来比较模型的优劣,DIC 越小,说明模型的拟合效果越好.

表 4 针对全体事故的贝叶斯泊松 CAR 模型标定结果
Tab.4 Bayesian Poisson CAR Model for total crashes

变量	后验均值	后验标准差	95%置信区间
常数项	2.314	0.075	(2.182,2.458)
人口	0.063	0.017	(0.030,0.098)
老年人口比例	-0.451	0.209	(-0.871,-0.051)
多路交叉口	0.092	0.022	(0.049,0.134)
路网形态			
方格网 & 平行曲线型(基准)			
混合型	-0.082	0.068	(-0.215,0.049)
尽端路+环形路	-0.145	0.067	(-0.278,-0.014)
离散型	-0.772	0.117	(-1.002,-0.542)
主干道信号控制交叉口	0.363	0.033	(0.297,0.426)
主干道比例	1.385	0.270	(0.844,1.894)
道路总长度	0.010	0.002	(0.006,0.014)
CAR 效应	0.704	0.105	(0.547,0.953)
DIC	4 264.250		

模型标定结果显示,Meshedness 值不仅具备对路网进行分类的能力,同时也能较好地反映路网形态对安全的影响:随着 Meshedness 值的升高,事故数量降低. 除了路网形态,影响全体事故的显著因素还有主干路的比例、老年人口比例,信控交叉口数量、道路总长等,其中随着主干路比例的提升,事故发生的概率也随之增大. 这与之前有研究认为高等级的道路长度增加会增大事故发生的可能,而地方生活性道路里程的增加则可以减少事故发生的几率是一致的^[3-5,10].

5.2 基于主干路事故的空间贝叶斯模型

建立 TAZ 主干路事故贝叶斯泊松 CAR 模型,见表 5. 在主干路事故模型中,显著影响因素包括:主干路上交叉口数量、信控交叉口数量和车公里. 其中主干路上交叉口数量和信控交叉口数量对事故的影响在 95%显著性水平下都是显著为正的,原因可能是交叉口过于复杂的交通流及大流量交通增加了事故发生的可能. 车公里数 VKT、主干道长度在路网

中所占比例以及对事故的影响也都是显著为正的. 这些结论同常识是相符的, 并同之前相关研究结论类似^[2-3,5,17].

表 5 TAZ 主干路上事故模型标定结果

Tab.5 Bayesian Poisson CAR Model for crashes on TAZ arterials

变量	后验均值	后验标准差	95%置信区间
常数项	0.648	0.078	(0.504,0.793)
主干路长度	0.206	0.063	(0.087,0.330)
主干路上交叉口	0.050	0.015	(0.020,0.084)
主干路上信控交叉口	0.427	0.068	(0.295,0.559)
车公里(VKT)	0.007	0.001	(0.005,0.009)
CAR 效应	0.296	0.057	(0.213,0.432)
DIC	3 404.130		

5.3 基于支路事故的空间贝叶斯模型

支路事故贝叶斯泊松 CAR 模型见表 6. 影响 TAZ 支路上事故的显著因素包括: TAZ 人口、老年人口比例、学校、路网形态、主干路比例等. 从模型标定结果可看出, 各类路网对安全水平的影响都是显著为负的. 同使用全体事故作为因变量的模型标定结果相比较, 路网形态对支路上事故的影响更大更为显著, 原因在于 TAZ 支路上的事故同路网形态的关系更为密切.

表 6 TAZ 支路上事故模型标定结果

Tab.6 Bayesian Poisson CAR Model for crashes on local roads

变量	后验均值	后验标准差	95%置信区间
常数项	1.617	0.095	(1.432,1.807)
人口	0.142	0.023	(0.101,0.190)
老年人口比例	-1.602	0.304	(-1.652,-0.478)
学校	0.128	0.030	(0.069,0.188)
路网形态			
方格网 & 平行曲线型(基准)			
混合型	-0.220	0.090	(-0.398,-0.045)
尽端路+环形路	-0.216	0.091	(-0.394,-0.039)
离散型	-0.883	0.153	(-1.188,-0.590)
主干道比例	0.838	0.345	(0.183,1.530)
道路总长度	0.012	0.003	(0.007,0.018)
CAR 效应	1.546	0.353	(0.820,2.220)
DIC	3 404.130		

路网形态对于支路事故具有更强的解释力度. 从模型结果中可以看出, 以方格网 & 平行曲线型路网作为基准, 尽端路+环形路路网对事故的影响是显著为负的, 这可能同这类路网道路平曲线半径较小、支路接入主要道路控制等因素有关. 在其他条件相同的情况下, 尽端路+环形路路网事故数量仅为方格路网事故数量的 80.0%. 最为安全的是离散型

路网, 原因可能是道路连接点少、交通需求小、交通可能的冲突点和冲突量少. 在其他条件相同的情况下, 离散型路网事故数量仅为方格路网事故数量 37.3%. 但是, 由于这类路网所在 TAZ 路网发育还不成熟、地广车少, 所得结果对交通规划的指导性不强. 对于混合式路网, 由于其包含了方格网、平行路网以及尽端路+环形路路网多种路网形态, 各式路网形态的影响相互叠加或者抵消. 因此, 混合式路网虽没有离散型路网安全, 但是相较于方格网、平行路网等形式, 其安全性仍然较高.

在支路事故模型中, TAZ 内人口数量对支路上事故数量的影响在 95%显著性水平下是显著为正的, 这些同以往研究是相似的^[18]. 其中老年人口比例对 TAZ 内部事故数量显著为负的影响同 Quddus 研究伦敦事故发生原因的研究结论一致^[3]. 模型结果中 TAZ 内学校数量对 TAZ 内部事故数量的影响在 95%显著性水平下是显著为正的, 原因可能是学校数量的增加意味着学生这类弱势群体在交通流中的暴露量增大. 在以往研究中曾得出学校数量对事故数量不显著的结论^[17], 本研究通过建立贝叶斯空间模型得出了不同的观点.

6 结论

本文就交通安全规划的核心技术问题——宏观交通安全建模进行研究. 基于美国佛罗里达州数据, 在 TAZ 层面针对全体事故、主干路事故和支路事故分别建立贝叶斯泊松 CAR 模型用以分析包括路网结构特征、交通运行特征以及人口及土地利用情况在内的宏观交通安全影响因素.

就建模思路而言, 深入分析 TAZ 内事故发生机理, 发现发生在 TAZ 主干路上的事故位置同肇事司机家庭住址的直线位置距离远大于一般的 TAZ 半径, 且考虑到常作为 TAZ 边界的主干道承担长距离的过境交通, 由此, 在传统建模方法的基础上, 提出将事故按其发生位置划分为主干路上事故和支路上事故, 并对其分别建模分析, 模型标定结果的讨论有力地验证了假设: 主干路上的事故主要跟主干路交通属性相关, 同 TAZ 内部的一些社会、人口指标关系不大; 而 TAZ 支路上事故受 TAZ 内部路网形态结构、人口等指标影响大, 同主要道路的道路交通属性关系较远. 对比传统的针对全体事故的建模方法, 这种新的建模思路具有更强的针对性和精准度. 在宏观层面影响因素分析上, 不同于以往宏观交通安

全建模中仅仅从道路网络规模角度反映道路网单一方面特征,借鉴复杂网络、拓扑结构等学科的分析方法提取道路网络形态特征指标道路网络结构 Meshedness 值. 分析结果证明 Meshedness 值不仅能够将道路网络划分为方格网 & 平行曲线型、混合型、尽端路+环形路以及离散型四类,而且能够有效地反映路网结构对安全水平的影响. 统计分析方法层面,考虑到数据空间相关性,临近的 TAZ 往往具有相似的社会经济发展水平和道路交通特征,而距离较远的 TAZ 则差异较大. 文章采用贝叶斯泊松 CAR 模型分析宏观影响因素与交通安全之间的关系,模型比较结果显示,贝叶斯泊松 CAR 模型在模型拟合效果、模型复杂程度上均较贝叶斯泊松模型有较大改进.

参考文献:

[1] Ned Levine, Karl E Kim, Lawrence H Nitz. Spatial analysis of Honolulu motor vehicle crashes: I spatial patterns [J]. Accident Analysis and Prevention, 1995, 27(5): 663.

[2] Hadayeghi A, Shahi J, Persaud B N. Macrolevel collision prediction models for evaluating safety of urban transportation systems [C]//Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1840, Washington D C: Transportation Research Board of the National Academies, 2003:87-95.

[3] Lovegrove G R, Sayed T. Using macrolevel collision prediction models in road safety planning applications [C] // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1950, Washington D C: Transportation Research Board of the National Academies, 2006:73-82.

[4] Guevara F L D, Washington S P, Oh J. Forecasting crashes at the planning level: simultaneous negative binomial crash model applied in Tucson, Arizona [C] // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1897, Wanshington D C: Transportation Research Board of the National Academies, 2004:191-199.

[5] Bidoura Khondakar, Tarek Sayed, Gord Lovegrove. Transferability of community-based macro-level collision prediction models between different time-space regions for use in road safety planning applications [C] // the 88th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D C: Transportation Research Board, 2009:871-880.

[6] Ng Kwoksuen, Hung Wingtat, Wong Winggun. An algorithm for assessing the risk of traffic accident[J]. Journal of Safety

Research, 2007, 33: 387.

[7] Gordon Richard Lovegrove, Clark Lim, TarekSayed. Using macrolevel collision prediction models to conduct road safety evaluation of regional transportation plan [C] // the 87th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D C: Transportation Research Board, 2008:08-0693.

[8] Buhl J, Gautrais T, Sole R V, et al. , Efficiency and robustness in ant networks of galleries [J]. The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems, 2004, 42(1):123.

[9] Sun J, Lovegrove G R. Using community-based macrolevel collision prediction models to evaluate safety level of neighborhood road network patterns [C] // the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D C. Transportation Research Board, 2010:123-129.

[10] Hadayeghi A, Shalaby A, Persaud B. Development of planning-level transportation safety models using full Bayesian semiparametric additive techniques [C] // the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D C. Transportation Research Board, 2010:45-68.

[11] 张春平,景天然. 城市道路交叉口交通安全评价研究[J]. 同济大学学报,1994,22(1):47.

ZHANG Chunping, JIANG Tianran. Research on traffic safety evaluation at urban road intersections[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,1994,22(1):47.

[12] 王岩,杨晓光. 主动道路交通安全规划体系[J]. 系统工程, 2006,24(1):30.

WANG Yan, YANG Xiaoguang. System framework of safety conscious planning[J]. Systems Engineering,2006,24(1):97.

[13] 唐珏琳. 城市规划中的交通安全因素分析[J]. 公路与汽运, 2007,121(4):47.

TANG Yulin. Traffic safety impact factor analysis in urban planning [J]. Highways & Automotive Applications, 2007, 121(4):4.

[14] Southworth M, Ben-Joseph E. Streets and the shaping of towns and cities [M]. Washington D C: Island Press, 2003.

[15] Gelman A, Carlin T B, Stern H S. et al. Bayesian data analysis [M]. 2nd ed. New York: CRC Press. 2004.

[16] Guo F, Wang X, Abdel-Aty M A. et al. Modeling signalized intersection safety with corridor-level spatial correlations [J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42: 84.

[17] 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: 676.

[18] Noland R B, Quddus M A. A spatially disaggregate analysis of road casualties in England [J]. Accident Analysis & Prevention, 2004, 36(6): 973.