

考虑时空不稳定性的行人事故严重程度分析

潘义勇, 李 烁

(南京林业大学 汽车与交通工程学院, 南京 210037)

摘 要:为探究行人事故伤害严重程度的时空不稳定性,构建了均值和方差异质性的随机参数 Logit 模型对行人事故严重程度进行异质性分析。采用行人交通事故数据,选取 21 个影响因素,通过对数似然比检验模型的时间不稳定性和空间可转移性,利用平均弹性系数分析了显著因素对重伤、轻伤和无伤害 3 类事故的影响程度。结果表明:行人事故严重程度影响因素具有显著的时空不稳定性,驾驶员逃逸、有物理隔离设施、土路肩和信号控制 4 个因素对事故严重程度的影响随年份正负变化,在 3 年中存在时间不稳定性;行人穿越马路和夜间黑暗有灯光对重伤事故的影响随区域正负变化,在城市和乡村间存在空间不稳定性;行人有不当行为和夜间黑暗有灯光对行人事故严重程度的影响随年份和区域正负变化,具有显著的时空不稳定性;随机参数及均值和方差异质性在不同年份的城市和乡村中也呈现显著的时空不稳定性。

关键词:事故严重程度;均值和方差异质性的随机参数 Logit 模型;行人;时空不稳定性;平均弹性系数

中图分类号:U491.31 文献标志码:A 文章编号:1671-5497(2025)07-2260-10

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231051

Analysis of pedestrian accident injury severities considering spatiotemporal instability

PAN Yi-yong, LI Shuo

(College of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In order to investigate the spatiotemporal instability on pedestrian accident injury severities, a random parameters approach with heterogeneity in means and variances was constructed to analyze the heterogeneity of pedestrian accident injury severities. Using the pedestrian traffic accident data, 21 influencing factors were selected, the temporal instability and spatial transferability of the model were assessed using the log-likelihood ratio test, while the average elasticity coefficient was used to analyze the influence of each factor on three types of accidents: severe injury, minor injury and no injury. The results revealed that the influencing factors of pedestrian accident severities have significant spatiotemporal instability. The influence of the four factors, namely driver escape, physical separation, dirt shoulder and signal control on the severity of the accident varies with the positive and negative of the year, and there was temporal instability in the three years. The influence of pedestrian crossing the road and dark lights at night

收稿日期:2022-12-08.

基金项目:国家自然科学基金项目(51508280).

作者简介:潘义勇(1980-),男,副教授,博士.研究方向:交通运输规划与管理.E-mail: uoupanyg@njfu.edu.cn

on severe injury accidents varies positively or negatively across different regions, and there was spatial instability in urban and rural areas. The effects of improper pedestrian behavior and nighttime darkness with lighting on pedestrian accident injury severities vary positively or negatively with both year and region, displaying significant spatiotemporal instability. Moreover, the random parameters, as well as the heterogeneity in means and variances, also exhibit significant spatiotemporal instability in urban and rural areas across different years.

Key words: accident injury severities; random parameter Logit with heterogeneity in means and variances; pedestrian; spatiotemporal instability; average elasticity coefficient

0 引言

行人-机动车碰撞是常见的交通事故类型,行人由于缺乏必要的保护措施,在事故中比机动车驾驶员更容易受伤并遭受严重伤害^[1]。国内外研究多采用离散选择模型分析事故严重程度影响因素的异质性。Islam等^[2]基于随机参数Logit模型对城乡地区过失碰撞导致的行人事故严重程度进行了异质性分析。宋栋栋等^[3]通过均值异质性的随机参数Logit模型研究了驾驶员事故严重程度的影响因素异质性。为了更准确地捕捉个体间的异质性,研究者们引入了考虑均值和方差异质性的随机参数Logit模型^[4],提升模型的拟合优度和准确性。Zamani等^[5]基于均值和方差异质性的随机参数Logit模型探究了行人事故严重程度的时间稳定性,验证了均值和方差异质性随机参数模型的拟合效果和准确性更好。潘义勇等^[6]采用均值和方差异质性的随机参数Logit模型探究老年人事故严重程度的异质性。因此,采用最优的均值和方差异质性的随机参数Logit模型对行人事故严重程度的影响因素进行异质性分析,通过分析行人事故严重程度影响因素的异质性,可以更好地采取针对性措施降低行人交通事故的风险,减轻事故严重程度。

事故严重程度的时空不稳定性逐渐成为一项重要研究课题。碰撞事故中的关键因素在不同年份间存在差异和不可预测性,从而导致时间上的不稳定性^[7]。国内外学者对事故影响因素的异质性和时间不稳定性进行了大量研究。Yu等^[8]探究了影响作业区追尾事故伤害严重程度因素的异质性和时间不稳定性。Islam等^[9]研究了不同性别在超速条件下事故严重程度的时间不稳定性。潘义勇等^[10]研究了影响老年驾驶员事故严重程度因素的时间不稳定性。Li等^[11]探讨了不同时

间段行人事故严重程度影响因素的潜在变化,结果表明救护车救援、弯道等因素具有时间稳定性。以往的行人事故严重程度研究主要关注影响因素的时间稳定性。然而,除了考虑时间稳定性,还应该充分重视空间稳定性对事故严重程度的影响,因为区域之间的差异也可能显著影响事故严重程度模型的估计结果^[7]。

综上所述,为探究行人-机动车碰撞事故严重程度的异质性和时空不稳定性,建立基于均值和方差异质性的随机参数Logit模型对事故严重程度影响因素进行分析。首先,构建模型并介绍模型和时空不稳定性检验的原理;其次,筛选2017~2019年城市和乡村的行人事故数据,并详细描述数据和事故严重程度的分布情况;然后,对事故数据进行基于似然比检验的时间和空间稳定性检验并进行模型的标定和参数估计;最后,对行人事故严重程度的影响因素进行异质性和时空不稳定性分析与总结。

1 研究方法

1.1 模型构建

采用考虑均值和方差异质性的随机参数Logit模型,行人事故伤害严重程度被定义为离散变量,引入其效应函数:

$$S_{kn} = \beta_k X_{kn} + \epsilon_{kn} \quad (1)$$

式中: S_{kn} 为事故 n 中行人伤害严重程度为 k 的效用函数; β_k 为待估参数向量; X_{kn} 为事故 n 中伤害严重程度为 k 的自变量集合; ϵ_{kn} 为误差项。

将 β_k 设置为随机参数向量,并引入均值和方差异质性向量:

$$\beta_k = \beta + \theta_{kn} Z_{kn} + \sigma_{kn} \exp(\omega_{kn} W_{kn}) v_{kn} \quad (2)$$

式中: β 为 β_k 的均值; Z_{kn} 为捕捉影响行人事故严重程度 k 的均值异质性解释变量的向量; θ_{kn} 为 Z_{kn}

的均值参数向量; σ_{kn} 为 β_k 的方差; W_{kn} 为捕捉标准差 σ_{kn} 异质性的特定碰撞解释变量的向量; ω_{kn} 为 W_{kn} 的待估参数向量; v_{kn} 为误差项。

为了估计事故中行人事故严重程度的概率,若 ϵ_{kn} 服从广义极值分布,选择概率扩展到具有异质性的混合 Logit 模型:

$$P_n(k) = \int \frac{\exp(\beta_k X_{kn})}{\sum_{\forall K} \exp(\beta_k X_{kn})} f(\beta_k | \varphi_k) d\beta_k \quad (3)$$

式中: $P_n(k)$ 为事故 n 中行人伤害严重程度为 k 的概率; K 为所有行人事故严重程度的集合; $f(\beta_k | \varphi_k)$ 为 β_k 用于观察异质性的密度函数; φ_k 为描述已知的密度函数的参数向量。

1.2 平均弹性系数

通过平均弹性系数评估各因素对事故伤害严重程度的影响。计算公式为:

$$\overline{E_{X_{in}}^{P_n(k)}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{P_n(k) [X_{in}=1] - P_n(k) [X_{in}=0]}{P_n(k) [X_{in}=0]} \quad (4)$$

式中: X_{in} 为行人 n 的事故严重程度为 k 时的第 i 个显著变量; $\overline{E_{X_{in}}^{P_n(k)}}$ 为第 i 个自变量对事故严重程度 k 的平均弹性系数,衡量当 X_{in} 从0变化到1时引起事故严重程度 k 的概率变化。

1.3 时空不稳定性检验

为了检验影响因素对行人-机动车碰撞事故严重程度的时空不稳定性,进行4组似然比检验,包括2组局部似然比检验和2组整体似然比检验。根据 Washington 等^[12]的可转移性理论进行第1组似然比检验,对2个独立模型进行比较,检验参数估计间是否存在局部不稳定性。定义为:

$$\chi_1^2 = -2 [L(\beta_{t_2|t_1,s}) - L(\beta_{t_1,s})] \quad (5)$$

式中: χ_1^2 为卡方值; t 为不同年份(2017、2018、2019年); s 为不同区域(城市、乡村); $L(\beta_{t_2|t_1,s})$ 为采用 t_2 的数据在 t_1 的模型中模型收敛时的对数似然值; $L(\beta_{t_1,s})$ 为采用 t_1 的数据在自身模型中模型收敛时的对数似然值;自由度为 $\beta_{t_2|t_1,s}$ 模型中的显著变量个数。为了获得每个模型比较的2个测试结果,还对 t_1 与 t_2 模型进行了反向测试。将 t 与 s 进行交换以获得空间模型的检验结果。

通过第2组似然比检验探究联合模型和各独立模型间的稳定性,检验是否存在全局不稳定性。

$$\chi_2^2 = -2 [L(\beta_{T,s}) - \sum_{\forall t,s} L(\beta_{t,s})] \quad (6)$$

式中: χ_2^2 为卡方值; $L(\beta_{T,s})$ 为使用所有年份 T (2017~2019年)或所有区域 S (城市和乡村)行人事故数据模型收敛时的对数似然比; $L(\beta_{t,s})$ 是使用不同区域 s (城市、乡村)一年 t (2017、2018、2019年)的数据模型收敛时的对数似然值;自由度等于单独模型收敛时的显著变量个数之和减去总体模型的显著变量个数之差。

2 数据描述

基于2017~2019年交通事故数据库的行人-机动车碰撞数据,经过数据清洗与筛选,共获得13 124条数据用于模型估计,其中2017~2019年城市分别包含2 826、2 895和2 204起事故数据;乡村分别包含1 918、1 898和1 353条数据。选用行人事故严重程度作为因变量,分为无伤害(仅财产损失)、轻伤(非失能性伤害和可能受伤)、重伤(失能性伤害和死亡)3个等级。具体事故数据分布如表1所示。

表1 事故数据分布

Table 1 Distribution of crash data

条

事故类型	2017年		2018年		2019年	
	城市	乡村	城市	乡村	城市	乡村
无伤害事故	553(19.6%)	297(15.5%)	657(22.7%)	312(16.4%)	671(30.4%)	220(16.3%)
轻伤事故	1 742(61.6%)	1 138(59.3%)	1 707(59.0%)	1 106(58.6%)	1 131(51.3%)	655(48.4%)
重伤事故	531(18.8%)	483(25.2%)	531(18.3%)	480(25.0%)	402(18.2%)	478(35.3%)

自变量即行人-机动车事故的影响因素,主要从行人特性、驾驶员特性、车辆特性、道路特性、环境特性和时间特性等方面共选出21个影响因素进行分析,包括行人特性(年龄、性别、是否存在不当行为、事故发生前行人行为、是否穿戴头盔和护

膝等安全装备)、驾驶员特性(年龄、性别、是否逃逸、分心状况)、车辆特性(车辆类型、车辆行驶状态)、道路特性(道路表面条件、事故发生地、控制方式、道路分隔形式、路肩类型、道路线形)、环境特性(天气状况、光照条件)、时间特性(季节、是否

为工作日)。

3 参数标定

采用NLOGIT 6软件,基于均值和方差异质性的随机参数Logit模型对城市和乡村3年的行人事故严重程度分别进行参数估计。利用逐步回归法对模型进行标定,95%置信水平下在不同年份城市与乡村的行人碰撞数据中挑选出与因变量显著相关的自变量参与建模。为提高抽样效率和分布均匀性,采用Halton序列抽样法,选取500个

抽样点。正态分布可提供最佳的统计拟合结果,因此随机参数的分布形式选择正态分布^[13]。

4 结果分析

4.1 时空不稳定性分析

在99.99%的置信水平下分别对行人事故进行全局对数似然比检验和局部对数似然比检验,以确定模型是否存在时空不稳定性,经过2个系列针对时间和空间的对数似然比检验,结果如表2~5所示。

表2 城乡不同年份似然比检验结果

Table 2 Results of likelihood ratio test for different years in urban and rural area

年份	城市			乡村		
	2017年	2018年	2019年	2017年	2018年	2019年
2017年	—	88.41 (15) [>99.99%]	59.30 (16) [>99.99%]	—	26.58 (13) [>99.99%]	71.05 (14) [>99.99%]
2018年	113.55 (21) [>99.99%]	—	305.589 (16) [>99.99%]	3.69 (14) [>99.99%]	—	48.38 (14) [>99.99%]
2019年	3.59 (21) [>99.99%]	110.31 (15) [>99.99%]	—	9.78 (14) [>99.99%]	0.68 (13) [>99.99%]	—

注:()内为自由度,[]内为置信水平。

表3 城乡联合时间似然比检验结果

Table 3 Results of joint time likelihood ratio test in urban and rural area

区域	$L(\beta_{2017-2019})$	$L(\beta_{2017})$	$L(\beta_{2018})$	$L(\beta_{2019})$	χ^2_T 值	自由度(置信水平)
城市	-7 272.88	2 450.01	2 657.19	2 058.52	214.32	(38)[>99.99%]
乡村	-4 867.03	1 693.52	1 719.96	1 276.75	353.60	(26)[>99.99%]

表4 不同年份城乡的似然比检验结果

Table 4 Likelihood ratio test results of urban and rural areas in different years

区域	2017年		2018年		2019年	
	城市	乡村	城市	乡村	城市	乡村
城市	—	56.76(14) [>99.99%]	—	65.30(13)[>99.99%]	—	37.48(14)[>99.99%]
乡村	73.26(21)[>99.99%]	—	16.86(15)[>99.99%]	—	91.03(16)[>99.99%]	—

表5 不同年份联合区域似然比检验结果

Table 5 Likelihood ratio test results of joint regional in different years

年份	$L(\beta_{\text{总体},t})$	$L(\beta_{\text{总体},t})$	$L(\beta_{\text{农村},t})$	χ^2_S	自由度(置信水平)
2017年	-4 185.27	2 450.01	1 693.52	83.48	(15)[>99.99%]
2018年	-4 398.00	2 657.19	1 719.19	43.24	(11)[>99.99%]
2019年	-3 360.40	2 058.52	1 276.75	50.26	(12)[>99.99%]

4.1.1 时间不稳定性

表2结果显示:模型收敛时的对数似然比值与自由度[>99.99%]完全不同,这说明城市与乡村间的12次似然比检验均以99.99%的置信水

平拒绝涉及各年份碰撞模型相同的原假设,即城市与乡村2017~2019年独立模型之间存在显著的时间不稳定性。

表3结果显示:城市与乡村的 χ^2_T 值分别为

214.32 和 353.60, 自由度分别为 38 和 26, 这表明行人事故严重程度的影响因素具有时间稳定性的零假设可以在 99.99% 的置信度水平下被拒绝, 即城市与乡村 3 年总体数据与独立年份数据之间存在显著的时间不稳定性。

4.1.2 空间不稳定性

表 4 结果显示: 2017~2019 年的 6 次似然比检验均以 99.99% 的置信水平拒绝涉及各区域碰撞模型相同的原假设, 即城市与乡村独立模型之间存在显著的空间不稳定性。

表 5 结果显示: 2017、2018 和 2019 年 3 年的卡方值 χ^2_s 的结果分别为 83.48、43.24 和 50.26, 自由度分别为 15、11 和 12, 对数似然比值与自由度完全不同。这表明城市和乡村模型相同的原假设以 $>99.99\%$ 的置信度被拒绝, 即城市与乡村总体模型与独立模型之间存在显著的空间不稳定性。

4.2 异质性分析

计算模型中显著变量的弹性系数并对其展开分析, 表 6、表 7 显示了 2017~2019 年城市和乡村行人事故严重程度的参数估计结果, 表 8 为各模

型中影响因素的弹性系数。如表 6 所示, 在城市模型中, 2017~2019 年小汽车、无物理隔离设施和行人 25~65 岁 3 个变量分别为随机参数。其中, 车辆左转和有物理隔离设施分别降低和增加了针对轻伤事故的小汽车指标的异质性均值和轻伤事故的概率。小汽车降低了无物理隔离设施的均值, 而交叉口增加了行人 25~65 岁的均值和发生轻伤事故的概率。此外, 在小汽车右转时, 行人 25~65 岁在夜间黑暗有灯光时, 随机参数存在方差异质性, 系数分别为 -0.552 和 -0.733 , 使其分布更窄, 离散程度降低, 随机性减小。控制方式为标志/标线控制时, 会增加随机参数无物理隔离设施的方差, 使得随机参数分布更广, 提高其离散程度, 增加了随机性。

如表 7 所示, 在乡村模型中, 2017~2019 年, 截距项、无物理隔离设施和驾驶员 25~65 岁分别为随机参数, 其中行人有不当行为增加了截距项均值, 降低了无物理隔离设施的均值, 并相应改变行人发生轻伤事故的概率。穿越马路增加了针对驾驶员 25~65 岁指标的均值, 同时也增加了行人

表 6 2017~2019 年城市模型参数估计

Table 6 2017~2019 urban model parameter estimates

类别	自变量	2017 年		2018 年		2019 年	
		参数估计	z 值	参数估计	z 值	参数估计	z 值
常数项	截距(NI)	-1.314	-9.84	0.593	3.13	-0.543	-5.48
	截距(MI)	—	—	0.585	4.65	—	—
	截距(SI)	-0.849	-5.66	—	—	-1.189	-8.53
行人特性	25~65 岁(MI)	—	—	—	—	-0.517	-2.44
	25~65 岁(MI)标准差	—	—	—	—	3.802	2.59
	行人有不当行为(NI)	1.225	10.01	—	—	—	—
	行人有不当行为(SI)	—	—	—	—	1.527	11.06
	穿越马路(MI)	0.599	4.65	0.499	5.52	—	—
	等待过马路(MI)	—	—	—	—	3.722	2.43
	在人行道上行走(NI)	-1.257	-4.03	-0.562	-2.09	—	—
驾驶员特性	驾驶员逃逸(NI)	0.552	2.61	—	—	—	—
	驾驶员逃逸(MI)	—	—	—	—	-0.411	-2.51
车辆特性	小汽车(MI)	2.652	1.88	0.141	1.65	—	—
	小汽车(MI)标准差	8.469	2.00	—	—	—	—
	SUV(NI)	-0.479	-3.36	—	—	—	—
	左转(NI)	-0.399	-2.06	—	—	—	—
	左转(MI)	—	—	0.649	5.18	—	—
	右转(SI)	-0.559	-2.60	-1.161	-3.74	—	—

续表 6

类别	自变量	2017 年		2018 年		2019 年	
		参数估计	z 值	参数估计	z 值	参数估计	z 值
道路特性	曲线(SI)	0.499	1.69			—	—
	有物理隔离设施(MI)	−0.447	−2.63	−0.421	−3.35	—	—
	无物理隔离设施(SI)	−0.389	−2.82	−2.214	−2.33	−0.801	−6.10
	无物理隔离设施(SI)标准差	—	—	2.821	2.64	—	—
	信号控制(MI)	0.512	2.36	—	—	—	—
	标志/标线控制(SI)	—	—	0.288	1.75	—	—
	标志/标线控制(NI)	−1.047	−5.41	—	—	—	—
	其他控制(SI)	—	—	—	—	−0.896	−2.98
环境特性	多云(NI)	—	—	—	—	−0.576	−2.54
	夜间黑暗有灯光(MI)	−0.495	−3.32	—	—	—	—
时间特性	夏天(SI)	—	—	—	—	−0.543	−3.15
	秋天(NI)	—	—	—	—	−0.404	−2.97
	冬天(SI)	0.376	2.89	0.744	5.26	—	—
随机参数均值的异质性	小汽车(MI):左转	−2.232	−1.69	—	—	—	—
	小汽车(MI):有物理隔离设施	3.652	1.70	—	—	—	—
	无物理隔离设施(SI):小汽车	—	—	−0.558	−1.88	—	—
	年龄 25~65 岁(MI):交叉口	—	—	—	—	1.06	2.57
随机参数方差的异质性	小汽车(MI):右转	−0.552	−2.22	—	—	—	—
	无物理隔离设施(SI):标志标线控制	—	—	0.333	2.18	—	—
	年龄 25~65 岁(MI):夜间黑暗有灯光	—	—	—	—	−0.733	−1.66
观察次数		2 826		2 895		2 204	
参数	AIC	4 942.0		5 344.4		4 149.0	
评价	McFadden R^2	0.210 9		0.164 5		0.149 8	
对数似然比		−2 450.007		−2 657.191		−2 058.520	

注:NI为无伤害事故,MI为轻伤事故,SI为重伤事故

表 7 2017~2019 年乡村模型参数估计
Table7 2017~2019 rural model parameter estimates

类别	自变量	2017 年		2018 年		2019 年	
		参数估计	z 值	参数估计	z 值	参数估计	z 值
常数项	截距(NI)	−0.537	−2.39	−0.678	−4.89	−1.502	−10.20
	截距(MI)	2.447	4.33	—	—	—	—
	截距(MI)标准差	3.003	2.61	—	—	—	—
	截距(SI)	—	—	−1.067	−8.50	−1.380	−8.22
行人特性	男性(MI)	−0.804	−2.44	—	—	—	—
	行人有不当行为(NI)	1.012	5.94	−1.106	−7.33	—	—
	穿越马路(SI)	1.116	6.04	0.720	5.23	1.134	7.12
驾驶员特性	25~65 岁(MI)	—	—	—	—	−0.740	−3.78
	25~65 岁(MI)标准差	—	—	—	—	1.511	1.79
	男性(SI)	0.541	3.21	—	—	0.301	2.16
	其他(注意力不集中等)(SI)	—	—	—	—	−0.422	−2.38
车辆特性	左转(MI)	—	—	0.771	3.25	—	—
	其他(掉头、转弯等)(NI)	0.378	2.14	—	—	—	—

续表 7

类别	自变量	2017 年		2018 年		2019 年	
		参数估计	z 值	参数估计	z 值	参数估计	z 值
道路特性	无物理隔离设施(MI)	—	—	1.208	2.84	—	—
	无物理隔离设施(MI)标准差	—	—	2.763	2.29	—	—
	无物理隔离设施(SI)	-0.675	-4.11	—	—	—	—
	土路肩(NI)	-0.554	-3.05	0.309	2.06	-0.537	-2.95
	信号控制(MI)	0.957	1.81	0.538	1.93	1.388	3.37
	标志/标线控制(NI)	—	—	—	—	-0.673	-1.98
环境特性	多云(SI)	—	—	0.323	1.88	—	—
	夜间黑暗有灯光(SI)	—	—	—	—	0.626	3.84
	夜间黑暗无灯光(MI)	-1.763	-3.07	—	—	-1.068	-5.57
时间特性	秋天(NI)	—	—	—	—	0.808	4.54
随机参数均值的异质性	截距(MI):行人有不当行为	0.494	1.75	—	—	—	—
	无物理隔离设施(MI):行人有不当行为	—	—	-0.940	-2.92	—	—
	25~65 岁(MI):穿越马路	—	—	—	—	1.041	4.31
随机参数方差的异质性	截距(MI):驾驶员男性	0.416	1.88	—	—	—	—
参数评价	观察次数	1 918		1 898		1 353	
	AIC	3 415.0		3 465.9		2 581.5	
	McFadden R^2	0.196 3		0.175 1		0.141 1	
	对数似然比	-1 693.523		-1 719.96		-1 276.746	

轻伤事故的概率。2017 年的截距项在驾驶员为男性中存在方差异质性,系数为 0.416,随机参数的分布变广,离散程度与随机性增大。随机参数的均值和方差异质性在时间与空间维度上都表现出不稳定性。

4.3 影响因素分析

4.3.1 行人特性

仅在 2017 年乡村中,男性行人对轻伤事故的概率有显著影响,而仅在 2019 年城市中,行人年龄在 25~65 岁具有显著性。行人有不当行为对行人无伤害事故的影响程度在不同年份呈现相反的效果,具有时间不稳定性:弹性系数分别为 0.090 3、0.059 6、-0.050 6 和 -0.030 4,即在

2017 年城市与乡村中均降低行人事故严重程度,而在 2018 年的乡村和 2019 年的城市中,行人有不当行为会增加重伤事故的概率,加重事故严重程度。行人有不当行为在 2017 年城市中与行人无伤害事故呈正相关,在 2018 年乡村中呈负相关;在 2017 年乡村模型中与行人无伤害事故呈正相关,在 2019 年城市中呈负相关,不同年份不同地区间影响程度呈相反效果,具有时空不稳定性。

行人穿越马路在 3 年中均显著,2017 和 2018 年城市与乡村中,该影响因素针对行人重伤事故的影响程度相反,即存在显著的空间不稳定性。行人穿越马路会增加 3 年乡村与 2017、2018 年城市的行人事故严重程度。2019 年城市中,等待过

表 8 2017~2019 年各影响因素的平均弹性系数

Table 8 Average elastic coefficients of each influencing factors from 2017 to 2019

年份	自变量	城市			乡村		
		无伤害	轻伤	重伤	无伤害	轻伤	重伤
2017 年	男性(MI)	—	—	—	0.015 5	-0.039 5	0.024 0
	行人有不当行为 NI)	0.090 3	-0.054 2	-0.036 1	0.059 6	-0.029 7	-0.029 9
	穿越马路(MI)	-0.015 0	0.034 4	-0.019 4	—	—	—
	穿越马路(SI)	—	—	—	-0.022 3	-0.035 2	0.057 4
	在人行道上行走 NI)	-0.004 7	0.002 5	0.002 2	—	—	—
	驾驶员逃逸(NI)	0.005 2	-0.003 1	-0.002 2	—	—	—
	男性(SI)	—	—	—	-0.020 9	-0.025 4	0.046 4

续表 8

年份	自变量	城市			乡村		
		无伤害	轻伤	重伤	无伤害	轻伤	重伤
2017 年	车辆特性	SUV(NI)	-0.011 3	0.008 3	0.002 9	—	—
		左转(NI)	-0.004 9	0.002 9	0.002 0	—	—
		右转(SI)	0.002 7	0.002 9	-0.005 6	—	—
		其他(掉头等)(NI)	—	—	—	0.011 0	-0.005 6
	道路特性	曲线(SI)	-0.001 2	-0.001 6	0.002 8	—	—
		有物理隔离设施(MI)	0.005 5	-0.015 1	0.009 5	—	—
		无物理隔离设施(SI)	0.011 1	0.013 7	-0.024 8	0.023 9	0.023 3
		土路肩(NI)	—	—	—	-0.014 1	0.005 8
		信号控制(MI)	-0.003 5	0.005 9	-0.002 4	-0.002 6	0.006 4
		标志/标线控制(NI)	-0.012 6	0.005 9	0.006 7	—	—
	环境特性	夜间黑暗有灯光(MI)	0.006 1	-0.015 4	0.009 3	—	—
		夜间黑暗无灯光(MI)	—	—	—	0.009 4	-0.030 5
	时间特性	冬天(SI)	-0.007 1	-0.008 8	0.015 9	—	—
2018 年	行人特性	行人有不当行为(NI)	—	—	—	-0.050 6	0.023 6
		穿越马路(MI)	-0.029 6	0.051 2	-0.021 6	—	—
		穿越马路(SI)	—	—	—	-0.014 1	-0.036 2
		在人行道上行走(NI)	-0.002 7	0.002 3	0.000 5	—	—
	驾驶员特性	驾驶员逃逸(NI)	-0.075 0	0.062 3	0.012 7	—	—
	车辆特性	小汽车(MI)	-0.010 5	0.016 5	-0.006 0	—	—
		左转(MI)	-0.011 3	0.019 5	-0.008 2	-0.005 6	0.013 8
		右转(SI)	0.001 5	0.004 3	-0.005 8	—	—
		其他(掉头等)(NI)	—	—	—	0.016 0	-0.009 2
	道路特性	有物理隔离设施(NI)	-0.012 5	0.008 5	0.003 9	—	—
		土路肩(NI)	—	—	—	0.012 3	-0.007 1
		信号控制(MI)	—	—	—	-0.002 7	0.006 0
		标志标线控制(SI)	-0.002 3	-0.008 7	0.010 9	—	—
	环境特性	多云(SI)	—	—	—	-0.002 6	-0.005 0
		夜间黑暗无灯光(SI)	—	—	—	-0.007 2	-0.017 5
	时间特性	冬天(SI)	-0.007 1	-0.021 6	0.028 7	—	—
2019 年	行人特性	年龄 25~65 岁(MI)	0.013 1	-0.015 6	0.002 4	—	—
		行人有不当行为(SI)	-0.030 4	-0.041 3	0.071 8	—	—
		穿越马路(SI)	—	—	—	-0.022 8	-0.072 7
		等待过马路(MI)	-0.001 6	0.002 4	-0.000 8	—	—
		男性(SI)	—	—	—	-0.011 8	-0.024 6
	驾驶员特性	驾驶员逃逸(MI)	0.012 0	-0.016 1	0.004 1	—	—
		其他(注意力不集中)(SI)	—	—	—	0.005 0	0.009 5
		无物理隔离设施(SI)	0.025 4	0.026 5	-0.051 9	—	—
	道路特性	土路肩(NI)	—	—	—	-0.017 8	0.008 7
		信号控制(MI)	—	—	—	-0.005 2	0.015 2
		标志标线控制(NI)	—	—	—	-0.005 0	0.002 2
		其他控制(SI)	0.003 1	0.002 4	-0.005 5	—	—
		交叉口(NI)	-0.029 6	0.019 0	0.010 6	—	—
	环境特性	多云(NI)	-0.007 8	0.005 2	0.002 6	—	—
		夜间黑暗有灯光(MI)	-0.001 6	0.002 4	-0.000 8	—	—
		夜间黑暗有灯光(SI)	—	—	—	-0.006 6	-0.021 4
		夜间黑暗无灯光(MI)	—	—	—	0.012 8	-0.044 0
		夏天(SI)	0.005 6	0.006 0	-0.011 6	—	—
	时间特性	秋天(NI)	—	—	—	0.035 6	-0.021 6
		冬天(NI)	-0.018 2	0.010 4	0.007 8	—	—

马路反而会增加轻伤事故的概率。此外,在人行道上行走仅会在 2017 和 2018 年的城市中增加事故严重程度。由此可见,行人特性的影响因素在时空维度上表现出不稳定性。

4.3.2 驾驶员特性

驾驶员逃逸行为在 2017~2019 年的城市模型中均显著,轻伤事故的平均弹性系数分别为 0.005 2、-0.075 0 和 0.012 0,即该影响因素对无伤害事故的影响程度呈现相反的效果,存在显著的时间不稳定性;而在 2017 和 2019 年的乡村模型中,男性驾驶员则表现出增大行人事故严重程度的时间稳定性,这与之前的研究结果一致^[8]。驾驶员分心状况为其他行为,仅在 2019 年的乡村模型中显著,行人发生轻伤与重伤事故的概率分别增加 0.50% 和 0.95%。

4.3.3 车辆特性

车辆类型影响因素分别在 2017 和 2018 年城市模型中显著。2017 年,运动型多用途汽车(Sport utility vehicle, SUV)增加了行人事故严重程度;2018 年,小汽车导致行人发生轻伤事故的概率增加了 1.65%,重伤概率降低了 0.60%。车辆行驶状态特性在 2017~2018 年表现出时间上的稳定性,车辆右转、车辆掉头和转弯等影响因素均降低了行人事故严重程度。

4.3.4 道路特性

曲线道路线型只在 2017 年城市中显著,该因素增加了行人发生重伤事故的概率。具有物理隔离设施的道路分隔形式在 2017 和 2018 年的城市中均显著,该因素对行人轻伤事故分别呈现负相关和正相关的影响效果,即存在时间不稳定性。道路无物理隔离设施时,2017 和 2019 年的城市行人发生重伤事故的概率降低。

土路肩与信号控制在 2017~2019 年乡村模型中均显著。2017 和 2019 年土路肩与行人无伤害事故呈负相关,信号控制与行人轻伤事故呈正相关;2018 年土路肩与行人无伤害事故呈正相关,信号控制与行人轻伤事故呈负相关,即影响因素对无伤害和轻伤事故的影响程度分别呈现相反的效果,表明土路肩与信号控制这 2 个影响因素具有时间不稳定性。

标志/标线控制在 2017、2018 年城市和 2019 年的乡村中表现出显著性,增加了行人事故严重程度,具有时间稳定性。其他控制、交叉口只在

2019 年的城市模型中显著,当采用其他控制方式时,行人发生重伤事故的概率降低了 0.55%,与路段相比,交叉口处行人发生轻伤的概率增加了 1.90%,重伤概率增加了 1.06%。

4.3.5 环境特性

天气特性中,多云分别在 2018 年乡村和 2019 年城市中显著,且均会增加行人事故严重程度。光照情况是重要的环境影响因素之一。夜间黑暗无灯光,在 3 年的乡村模型中均显著且增加行人重伤事故的概率,增大行人伤害严重程度。夜间黑暗有灯光在 2017 年和 2019 年城市模型中显著,针对轻伤事故的弹性系数分别为 -0.015 4 和 0.002 4,即该影响因素对轻伤事故的影响程度呈现相反的效果,具有时间不稳定性;相比其他条件,在 2017 年时会减少行人轻伤的概率,而在 2019 年会增加轻伤事故的概率。在 2019 年乡村中,夜间黑暗有灯光与轻伤事故负相关,同样呈现相反的效果,即同一年的城市乡村模型中,该影响因素具有显著的空间不稳定性。因此,夜间黑暗有灯光在不同年份和区域呈现出显著的时空不稳定性。

4.3.6 时间特性

在城市模型中,2019 年夏季,相比其他季节行人发生重伤事故的概率降低了 1.16%,行人事故严重程度降低。2017 年和 2018 年的冬季重伤事故弹性系数分别为 0.015 9 和 0.028 7,而 2019 年无伤害事故的概率降低了 1.82%,轻伤和重伤事故的概率分别增加了 1.04% 和 0.78%,表明冬季会增加行人伤害的严重程度且具有时间稳定性。乡村仅在 2019 年秋季表现出显著特征,无伤害事故的概率减小 3.56%,轻伤和重伤事故的概率分别增加了 2.16% 和 1.40%,行人事故严重程度增加。

5 结 论

(1) 2 个系列共 4 组对数似然比检验结果表明:城市和乡村各年份事故数据之间存在显著的时空不稳定性,对城市和乡村 3 年的事故数据分别进行建模。

(2) 行人事故严重程度影响因素的异质性存在时空不稳定性。城市模型中,2017 年小汽车为随机变量,左转和有物理隔离设施分别降低和增加了针对轻伤事故的均值,右转减少其方差;

2018年,无物理隔离设施为随机参数,小汽车降低了其均值,标志/标线控制增加其方差;2019年,行人25~65岁为随机参数,交叉口增加了均值和发生轻伤事故的概率,夜间黑暗有灯光减少其方差;乡村模型中,2017年截距项为随机变量,行人有不当行为和男性驾驶员分别增大其均值与方差;2018年,无物理隔离设施为随机参数,行人有不当行为降低了轻伤事故的均值;2019年,行人穿越马路增加了随机变量(驾驶员25~65岁)的均值。

(3)行人事故伤害严重程度各影响因素具有显著的时空不稳定性。行人男性、25~65岁、等待过马路、曲线、其他控制、交叉口、夏季等影响因素仅在特定的年份及区域显著;驾驶员逃逸和有物理隔离设施在3年的城市模型中存在时间不稳定性,土路肩和信号控制在3年的乡村模型中存在时间不稳定性;行人穿越马路和夜间黑暗有灯光分别在3年和2019年的城市和乡村模型中存在显著的空间不稳定性;行人有不当行为和夜间黑暗有灯光在不同年份的城市和乡村模型中对行人事故严重程度具有显著的时空不稳定性。

参考文献:

- [1] 董傲然,王长帅,秦丹,等. 机动车-行人事故中行人伤害严重程度分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(11): 141-147.
Dong Ao-ran, Wang Chang-shuai, Qin Dan, et al. Analysis on injury severity of pedestrian in motor vehicle-pedestrian accidents[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(11): 141-147.
- [2] Islam S, Jones S L. Pedestrian at-fault crashes on rural and urban roadways in Alabama[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 72: 267-276.
- [3] 宋栋栋,杨小宝,祖兴水,等. 基于均值异质性随机参数Logit模型的城市道路事故驾驶员受伤严重程度研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(3): 214-220.
Song Dong-dong, Yang Xiao-bao, Zu Xing-shui, et al. Research on the injury severity of drivers in urban road accidents based on mean heterogeneity random parameter Logit model[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(3): 214-220.
- [4] Mannering F L, Shankar V, Bhat C R. Unobserved heterogeneity and the statistical analysis of highway accident data[J]. Analytic Methods in Accident Research, 2016, 11: 1-16.
- [5] Zamani A, Behnood A, Davoodi S R. Temporal stability of pedestrian injury severity in pedestrian-vehicle crashes: new insights from random parameter logit model with heterogeneity in means and variances[J]. Analytic Methods in Accident Research, 2021, 32: No. 100184.
- [6] 潘义勇,吴静婷,施颖,等. 建成环境对老年人交通事故严重程度异质性影响[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(3): 224-230.
Pan Yi-yong, Wu Jing-ting, Shi Ying, et al. The heterogeneous effects of built environment on elderly traffic accident injury severities[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(3): 224-230.
- [7] Mannering F. Temporal instability and the analysis of highway accident data[J]. Analytic Methods in Accident Research, 2018, 17: 1-13.
- [8] Yu M, Zheng C, Ma C. Analysis of injury severity of rear-end crashes in work zones: A random parameters approach with heterogeneity in means and variances[J]. Analytic Methods in Accident Research, 2020, 27: No. 100126.
- [9] Islam M, Mannering F. The role of gender and temporal instability in driver-injury severities in crashes caused by speeds too fast for conditions[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 153: No. 106039.
- [10] 潘义勇,吴静婷,缪炫烨. 老年驾驶员事故严重程度影响因素时间不稳定性分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2024, 54(10): 2819-2826.
Pan Yi-yong, Wu Jing-ting, Miao Xuan-ye. Temporal instability analysis of factors affecting injury severities of elderly drivers[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(10): 2819-2826.
- [11] Li Y, Song L, Fan W D. Day-of-the-week variations and temporal instability of factors influencing pedestrian injury severity in pedestrian-vehicle crashes: A random parameters logit approach with heterogeneity in means and variances[J]. Analytic Methods in Accident Research, 2021, 29: No. 100152.
- [12] Washington S, Karlaftis M, Mannering F, et al. Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis[M]. Florida: Chapman and Hall/CRC, 2020.
- [13] Milton J C, Shankar V N, Mannering F L. Highway accident severities and the mixed Logit model: an exploratory empirical analysis[J]. Accident Analysis & Prevention, 2008, 40(1): 260-266.