

中文引用格式: 闫杰, 邢小亮, 孙鹏, 等. 山区低等级公路事故严重度致因与异质性对比分析[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(7): 201–208.

英文引用格式: YAN Jie, XING Xiaoliang, SUN Peng, et al. Comparative analysis of accident severity causation and heterogeneity on low-grade highways in mountainous areas[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7): 201–208.

山区低等级公路事故严重度致因与异质性对比分析^{*}

闫杰¹工程师, 邢小亮^{**1}高级工程师, 孙鹏²研究员, 张昱¹高级工程师,
彭汉杰³研究员, 孙同波³研究员

(1 山东省交通科学研究院 智慧交通中心, 山东 济南 250100;

2 山东省交通运输厅 工程建设事务中心, 山东 济南 250002;

3 山东省交通科学研究院 检测校准中心, 山东 济南 250100)

中图分类号: X928.02

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.1744

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600103); 山东省交通科技计划项目(2023B43)。

【摘要】 为明确山区低等级公路交通事故严重度影响因素的异质性效应来源, 剖析事故严重度致因机制, 以重庆市某山区低等级公路近7年事故数据为基础, 采用固定参数Logit、混合Logit及考虑异质性来源的随机参数Logit模型, 构建基于碰撞车型的事故严重度致因分析模型, 对比分析不同模型的拟合优度与异质性差异, 并借助平均弹性系数量化变量对事故严重度的影响强度。结果表明: 在同类型事故中, 考虑异质性来源的随机参数Logit模型拟合优度最高; 在综合事故模型中, 涉事非机动车对事故严重度的作用强度最大, 正面碰撞为服从 $(-0.668, 0.749^2)$ 正态分布的异质性变量, 其参数均值和方差受夏季、大型肇事车的正向影响; 在机-机事故模型中, 季节、肇事车型的作用强度最大, 夏季、中型肇事车、侧面碰撞对应参数服从均值(方差)分别为0.586、0.948、0.631的单侧三角分布, 且与夜间、平曲线半径 $\geq 1\ 600\text{ m}$ 存在均值异质性; 在机-非事故模型中, 事故严重度受涉事非机动车、夜间、正面碰撞变量显著影响, 夜间、涉事非机动车对应参数服从均值(方差)分别为2.040、1.330的单侧三角分布, 其参数均值与周末、年龄 ≥ 59 岁显著相关; 合理切分山区低等级公路事故数据集, 可有效降低事故严重度影响因素中的异质性效应, 进而提升事故严重度致因分析结果的精确性和可靠性。

【关键词】 山区低等级公路; 事故严重度; 致因分析; 异质性; Logit模型

Comparative analysis of accident severity causation and heterogeneity on low-grade highways in mountainous areas

YAN Jie¹, XING Xiaoliang¹, SUN Peng², ZHANG Yu¹, PENG Hanjie³, SUN Tongbo³

(1 Institute Intelligent Transportation Center, Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong 250100, China; 2 Engineering Construction Affairs Center, Shandong Provincial Department of Transportation, Jinan Shandong 250002, China; 3 Testing and Calibration Center, Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong 250100, China)

Abstract: In order to explore the heterogeneity sources of the influencing factors of traffic accident

^{*} 文章编号: 1003-3033(2025)07-0201-08; 收稿日期: 2025-03-13; 修稿日期: 2025-05-19

^{**} 通信作者: 邢小亮(1988—), 男, 山东安丘人, 博士, 高级工程师, 主要从事道路交通环境与安全方面的研究。E-mail: xingxiaoliang@sdjtky.cn。

severity on low-grade highway and analyze the causal mechanisms of accident severity, based on traffic accident records of a low-grade highway in Chongqing city in the past 7 years, combined with the classification of collision vehicle types, the accident severity inducement analysis model was constructed using the fixed parameter Logit, mixed Logit, and random parameter Logit models considering heterogeneity sources. The differences in goodness-of-fit and heterogeneity of different models were analyzed, and the influence of significant variables on accident severity was quantified using average elasticity coefficient. The results show that the Logit model with random parameters considering heterogeneous sources has the highest goodness-of-fit under the same type of accident conditions. In the comprehensive accident model, the non-motor vehicle of the involved party has the greatest influence on the accident severity. The frontal collision is a heterogeneous variable that obeys a normal distribution of $(-0.668, 0.749^2)$. The mean and variance of the parameters are positively influenced by summer and large accident-causing vehicles. The season and involved vehicle types exhibit the largest effect intensity in the vehicle-to-vehicle accident model. The parameters associated with summer, mid-sized accident-causing vehicles, and side collisions follow a one-sided triangular distribution with mean (variance) of 0.586, 0.948, and 0.631, and have mean heterogeneity with the factors of night and horizontal curve radius greater than 1 600 m. The severity of vehicle-to-non-motor vehicle accidents is significantly affected by the variables of non-motor vehicle, night, and frontal collision. The parameters corresponding to the night and involved non-motor vehicle variables obey the unilateral triangular distribution of the mean (variance) 2.040 and 1.330, the mean value of parameters is significantly correlated with the weekend and age over 59 years old. Reasonably segmenting the accident dataset of low-grade highways in mountainous areas helps to reduce the heterogeneity effect in the factors affecting accident severity and improve the accuracy and reliability of accident severity cause analysis results.

Keywords: mountainous low-grade highways; accident severity; causality analysis; heterogeneity; Logit model

0 引言

山区占我国(含港澳台地区)国土面积的69.1%,拥有着6.74亿常住人口,独特的地理环境与人口布局孕育了规模庞大的山区低等级公路^[1]。相较于其他低等级公路,山区低等级公路因地形限制,平曲线半径、纵坡等技术指标常采用低限值,导致弯道密集、纵坡陡峭、桥隧比高,通行环境更为复杂,事故率及严重度更高。事故统计数据显示,约70%的重、特大道路交通事故发生在山区,且事故占比逐年上升^[2]。因此,以山区低等级公路事故数量多、事故严重度高为切入点,对比分析不同交通涉事主体下的事故机制差异,精准识别潜在的安全隐患,有助于提升山区低等级公路的运营安全水平。

目前,国内外学者的研究聚焦于高速公路或城市道路典型场景,如桥隧、交叉口、互通立交等。王芳菲等^[3]基于山区高速公路隧道事故的时空特征,运用二元logistic模型分析了事故严重程度的影响因素,发现紧急停车带对事故严重度有显著影响。张洁等^[4]利用多源数据建模分析城市道路事故严

重度,指出路侧防护设施可显著降低事故发生概率。MUSSONE等^[5]通过多层前馈神经网络和广义线性混合模型验证了交通量在城市交叉口交通事故严重度预测中的显著作用。在研究方法上,针对事故严重度致因分析和拟合预测的双重需求,学者们倾向于使用离散选择模型,因其在小样本数据集上具有良好的解释性能和稳健拟合能力^[6-8]。但传统Probit、Logit模型等离散选择模型存在一致性假设,无法刻画未观测变量引起的异质性效应。因此,部分学者引入随机参数Logit模型来解释数据异质性,并构建了考虑均值异质性、均值和方差异质性的随机参数模型,以挖掘影响随机参数的潜在因素^[9-11]。潘义勇等^[12]采用均值和方差异质性随机参数Logit量化了老年人交通事故的关键致因。上述研究仍存在以下不足:①较少关注山区低等级公路异于其他公路的事故因果机制;②忽略了不同类型事故间的致因机理差异,弱化或隐藏了潜在因素对事故严重度的关键作用^[13-14]。因此,有必要结合不同交通涉事主体,对比分析山区低等级公路事故严重程度的关键致因和异质性差异。

鉴于此,笔者拟根据不同交通涉事主体,将山区低等级公路事故数据划分为综合事故、机动车-机动车事故(机-机事故)和机动车-非机动车事故(机-非事故)3类,采用考虑异质性来源的随机参数 Logit 模型,探究各数据集的内在异质机制,甄别事故严重度的关键致因,并量化其边际效应,以期为降低山区低等级公路交通事故严重程度提供理论支撑。

1 山区低等级公路事故数据基础

1.1 山区低等级公路事故数据来源

以重庆市某山区双向 2 车道三级公路为研究对象,该公路全长为 16.2 km,设计速度为 40 km/h,平曲线最小半径为 200 m,最大纵坡为 7%,临水临崖

路段占比高达 38.4%,途径 3 处村落,机非混行问题突出。收集 2014—2020 年该路段交通事故案情记录(含人员特征、涉事车型、环境信息等)及道路设计资料,经数据清洗整合,获 1 782 起事故样本,其中,机-机事故 1 168 起(占比 65.54%)、机-非事故 614 起(占比 34.46%)。

1.2 事故严重度影响变量选取

为表征山区低等级公路的道路、交通和事故信息,选取驾驶人特征(性别、年龄)、环境特征(时段、季节、天气等)、车辆特征(肇事车型、涉事车型、事故类型)和道路特征(平曲线半径、坡长、坡度等)作为候选自变量,以事故严重度为因变量,将事故严重程度划分为仅财产损失事故和伤亡事故。各变量详细信息见表 1。

表 1 变量说明

Table 1 Description of explanatory variables		
变量属性	变量名称	变量类型(占比)
因变量	事故严重度	仅财产损失事故(61.5%)、伤亡事故(38.5%)
驾驶人	性别	女(12.3%)、男(87.7%)
	年龄/岁	<25(17.3%)、≥25 且<39(32.5%)、≥39 且<59(32.1%)、≥59(18.1%)
车辆	肇事车型/涉事车型	小型车(55.3%/48.8%)、中型车(24.4%/17.6%)、大型车(9.8%/9.6%)、非机动车(10.5%/24.0%)
	事故类型	追尾事故(34.0%)、撞固定物(12.6%)、侧面碰撞(13.3%)、正面碰撞(40.1%)
道路	平曲线半径/m	<800(39.4%)、≥800 且<1 600(36.3%)、≥1 600(24.3%)
	坡长/m	<1 000(67.5%)、≥1 000(32.5%)
	坡度/%	<2(46.2%)、≥2 且<5(37.4%)、≥5(16.4%)
	路面状况	干燥(86.3%)、潮湿(13.7%)
环境	时段	日间(79.3%)、夜间(20.7%)
	季节	春季(29.7%)、夏季(19.5%)、秋季(17.2%)、冬季(33.6%)
	是否周末	工作日(68.3%)、周末(31.7%)
	天气	晴天(82.1%)、非晴天(17.9%)

注:肇事车型为事故中引发事故、负有主要责任或对事故发生起到关键推动作用的车辆;涉事车型为事故中次要或无责任车辆。

2 事故严重度致因与异质性对比分析

2.1 考虑异质性来源的随机参数 Logit 模型

混合 Logit 模型将待估参数设置为随机变量,从而捕获事故数据的内在异质性^[10],解决了传统 Logit 模型在应用中存在的 IIA (Independence of Irrelevant Alternatives) 假设问题。混合 Logit 模型的效用函数可表示为:

$$U_{kn} = \beta_k X_{kn} + \varepsilon_{kn} \tag{1}$$

式中: U_{kn} 为第 n 起事故严重度为 k 的效用函数; β_k 为模型待估参数向量; X_{kn} 为第 n 起事故影响因素向量; ε_{kn} 为误差项。

为解释事故数据间存在的异质性,混合 Logit 模型将某些待估参数设置为随机变量:

$$\beta_k = \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\sigma}_k \cdot \boldsymbol{\nu}_{kn} \tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{\beta}$ 为 β_k 的均值向量; $\boldsymbol{\sigma}_k$ 为系数矩阵,其对角元素为 β_k 的标准差; $\boldsymbol{\nu}_{kn}$ 为随机项,表征异质性。

为解释模型中随机参数的来源,宋栋栋等^[11]引入了均值异质性,其待估参数向量形式可表示为:

$$\beta_k = \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{o} \boldsymbol{w}_k + \boldsymbol{\sigma}_k \cdot \boldsymbol{\nu}_{kn} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{o}$ 为构成均值异质性的特征向量 $\boldsymbol{w}_k$ 的待估参数。

为进一步挖掘异质性产生的原因,潘义勇等^[12]在均值异质性随机参数 Logit 模型的基础上纳入方差异质性向量,进而构成考虑均值和方差异质性的

随机参数 Logit 模型,其待估参数向量表示为:

$$\boldsymbol{\beta}_k = \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{ow}_k + \boldsymbol{\sigma}_k \exp(\boldsymbol{\varphi}_k \boldsymbol{t}_k) \boldsymbol{v}_{kn} \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}_k$ 为方差异质性向量; $\boldsymbol{t}_k$ 为其参数向量。

若式(1)中的误差项 $\boldsymbol{\varepsilon}_{kn}$ 服从广义极值分布,则模型选择概率表示为:

$$P_{nk} = \int \frac{\exp(\boldsymbol{\beta}_k \boldsymbol{X}_{kn})}{\sum_k \exp(\boldsymbol{\beta}_k \boldsymbol{X}_{kn})} f(\boldsymbol{\beta}_k | \boldsymbol{\theta}) d\boldsymbol{\beta}_k \quad (5)$$

式中: P_{nk} 为第 n 起事故严重度为 k 的概率; $f(\boldsymbol{\beta}_k | \boldsymbol{\theta})$ 为 $\boldsymbol{\beta}_k$ 的概率密度函数; $\boldsymbol{\theta}$ 为概率密度函数的数字特征。

2.2 平均弹性系数

由于无法从考虑异质性来源的随机参数 Logit 模型的回归系数中直观解析自变量对事故严重度的作用机制^[9],因此,采用平均弹性系数量化各解释变量的影响程度,计算如下:

$$\bar{E}P_{nkx_{nj}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{P_{nk}(x_{nj} = 1) - P_{nk}(x_{nj} = 0)}{P_{nk}(x_{nj} = 0)} \quad (6)$$

式中 $\bar{E}P_{nkx_{nj}}$ 为第 j 个特征变量 x_{nj} 对 k 水平事故严重度的影响程度。

3 事故严重度模型结果解析

3.1 事故严重度模型参数标定

为避免变量间多重共线性导致模型估计偏差,采用斯皮尔曼相关系数检验各数据集特征间的相关性。结果显示:在机-机事故数据集中,坡度与坡长变量的相关系数最大,为-0.62($p < 0.05$),天气与季节变量呈线性关联,相关性系数为0.58($p < 0.05$);在机-非事故数据集中,天气与路面状况变量的相关性系数最大,达0.65($p < 0.05$)。各数据集的相关性系数绝对值均小于0.7,表明初步筛选的变量可用于建模。

基于 Nlogit6.0 软件,采用逐步回归法在0.05显著水平上筛选显著特征,并将筛选出的特征设为随机参数。选取事故建模中常用的正态分布、均匀分布、单侧三角分布等作为随机参数的先验分布^[9-12],通过500次Halton采样,分别求解各类事故模型的最优参数组合。综合事故、机-机事故和机-非事故下固定参数Logit、混合Logit以及考虑异质性来源的随机参数Logit模型的最终估计结果见表2—表4。

表2 综合事故模型估计结果

Table 2 Estimation results of integrated accidents

变量	固定参数 Logit		混合 Logit		考虑均值异质性的随机参数 Logit		考虑均值和方差异质性的随机参数 Logit	
	参数估计	<i>P</i> 值	参数估计	<i>P</i> 值	参数估计	<i>P</i> 值	参数估计	<i>P</i> 值
截距	-1.885	0.000	-1.960	0.000	-1.969	0.000	-1.930	0.000
侧面碰撞	0.593	0.002	0.612	0.001	0.613	0.001	0.618	0.001
肇事车型:中型车	0.861	0.000	0.906	0.000	0.919	0.000	0.900	0.000
肇事车型:大型车	0.748	0.000	0.787	0.000	0.772	0.000	0.586	0.020
肇事车型:非机动车	2.447	0.000	2.556	0.000	2.596	0.000	2.569	0.000
涉事车型:非机动车	2.912	0.000	3.041	0.000	3.065	0.000	3.038	0.000
夜间	0.512	0.001	0.639 (0.639)	0.000 (0.000)	0.639 (0.639)	0.000 (0.000)	0.636 (0.636)	0.001 (0.001)
正面碰撞	-0.399	0.006	-0.617 (0.861)	0.003 (0.039)	-0.617 (0.861)	0.003 (0.039)	-0.668 (0.749)	0.001 (0.049)
均值异质性	—							
夜间,年龄≥59岁	—	—	—	—	-0.678	0.046	-0.663	0.048
正面碰撞,夏季	—	—	—	—	0.495	0.053	0.540	0.061
方差异质性	—							
正面碰撞,肇事车型:大型车	—	—	—	—	—	—	1.454	0.058
模型评估	—							
对数似然值	-787.022		-786.363		-783.234		-781.427	
AIC	1 590.000		1 590.700		1 588.500		1 586.900	
伪 <i>R</i> ²	0.338		0.338		0.341		0.342	

注:“—”表示该变量不纳入对应模型;随机参数 Logit 模型中参数估计列括号内外分别为该随机参数的标准差和均值;*P* 值列括号内外分别为随机参数标准差和均值的显著性;赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC);伪 *R*² 为伪决定系数。

表 3 机-机事故模型估计结果

Table 3 Estimation results of motor-motor vehicle accidents

变量	固定参数 Logit		混合 Logit		考虑均值异质性的 随机参数 Logit	
	参数估计	<i>P</i> 值	参数估计	<i>P</i> 值	参数估计	<i>P</i> 值
截距	-2. 545	0. 000	-2. 548	0. 000	-2. 469	0. 000
夜间	0. 379	0. 048	0. 377	0. 052	—	—
秋季	0. 630	0. 012	0. 637	0. 012	0. 594	0. 021
冬季	0. 515	0. 020	0. 517	0. 020	0. 491	0. 030
肇事车型:大型车	0. 771	0. 000	0. 778	0. 000	0. 852	0. 000
夏季	0. 803	0. 001	0. 776 (0. 776)	0. 001 (0. 001)	0. 586 (0. 586)	0. 024 (0. 024)
肇事车型:中型车	0. 899	0. 000	0. 876 (0. 876)	0. 000 (0. 000)	0. 948 (0. 948)	0. 000 (0. 000)
侧面碰撞	0. 825	0. 000	0. 806 (0. 806)	0. 000 (0. 000)	0. 631 (0. 631)	0. 019 (0. 019)
均值异质性	—					
夏季,平曲线半径≥1 600 m	—	—	—	—	0. 702	0. 069
肇事车型:中型车,夜间	—	—	—	—	0. 981	0. 042
肇事车型:中型车,平曲线半径≥1 600 m	—	—	—	—	-1. 139	0. 033
侧面碰撞,夜间	—	—	—	—	1. 347	0. 004
侧面碰撞,平曲线半径≥1 600 m	—	—	—	—	-1. 137	0. 084
模型评估	—					
对数似然值	-495. 684		-495. 804		-485. 770	
AIC	1 007. 368		1 007. 608		995. 541	
伪 <i>R</i> ²	0. 196		0. 196		0. 212	

表 4 机-非事故模型估计结果

Table 4 Estimation results of motor to non-motor accidents

变量	固定参数 Logit		混合 Logit		考虑均值异质性的 随机参数 Logit	
	参数估计	<i>P</i> 值	参数估计	<i>P</i> 值	参数估计	<i>P</i> 值
截距	-2. 545	0. 000	-2. 548	0. 000	-2. 469	0. 000
平曲线半径:≥800 且<1 600 m	-0. 437	0. 040	-0. 463	0. 045	-0. 459	0. 049
正面碰撞	-0. 814	0. 001	-0. 867	0. 001	-0. 897	0. 001
肇事车型:中型车	1. 065	0. 018	1. 112	0. 017	1. 042	0. 026
夜间	0. 811	0. 006	0. 899 (0. 899)	0. 009 (0. 009)	2. 040 (2. 040)	0. 004 (0. 004)
肇事车型:非机动车	1. 410	0. 000	1. 562 (1. 562)	0. 000 (0. 000)	1. 569 (1. 569)	0. 000 (0. 000)
涉事车型:非机动车	1. 370	0. 000	1. 474 (1. 474)	0. 000 (0. 000)	1. 330 (1. 330)	0. 000 (0. 000)
均值异质性	—					
夜间,周末	—	—	—	—	-1. 483	0. 044
夜间,年龄≥59 岁	—	—	—	—	-1. 447	0. 035
涉事车型:非机动车,周末	—	—	—	—	0. 583	0. 048
模型评估	—					
对数似然值	-284. 173		-284. 453		-279. 350	
AIC	580. 347		580. 907		576. 700	
伪 <i>R</i> ²	0. 230		0. 229		0. 243	

根据伪 R^2 越大和 AIC 值越低,模型拟合优度越高的原则,在综合事故、机-机事故和机-非事故场景下,考虑异质性来源的随机参数 Logit 模型具有更好的拟合优度,表明山区低等级公路交通事故数据中普遍存在异质性效应。因此,依据此类模型的估计结果对山区低等级公路事故严重度开展致因分析。

3.2 各类型事故严重度模型结果对比分析

1) 综合事故模型。综合事故模型结果见表 2。侧面碰撞、中/大型肇事车、肇事/涉事非机动车、夜间和正面碰撞对山区低等级公路综合事故严重度有显著影响,其中正面碰撞参数服从均值为-0.668、标准差为 0.749 的正态分布,表明相比其他事故类型,约 81.37% 的事故在发生正面碰撞时更易仅造成财产损失,而 18.63% 的事故更易导致伤亡。正面碰撞参数的均值受夏季因素的正向影响,即夏季的正面碰撞事故会增加伤亡事故的概率。此外,该参数的方差与大型肇事车存在方差异质性,估计参数为 1.454,表明大型肇事车的出现会增大正面碰撞参数的方差,即扩大参数的离散性和随机性。

夜间参数服从单侧三角分布,该分布假设均值和标准差相等,从而限制随机参数符号一致(此处为正)^[15]。该参数的均值受驾驶人年龄的影响,对应系数为-0.663。这表明:当驾驶人年龄 ≥ 59 岁时,会降低夜间的参数均值,即降低山区低等级公路事故的严重度。这主要是因为中老年驾驶人对当地路况更为熟悉,驾驶经验丰富,能够在夜间行车时更早地预判未知风险,并在短时间内采取有效的风险补偿行为,从而降低事故发生时的严重程度。

2) 机-机事故模型。机-机事故模型估计结果见表 3。夏季、秋季、冬季、侧面碰撞及中/大型肇事车显著影响山区低等级公路机-机碰撞事故的严重度。模型将夏季、中型肇事车、侧面碰撞识别为服从单侧三角分布的随机参数变量,其均值(方差)分别为 0.586、0.948 和 0.631,即 3 项随机参数均为非负值。结果表明:夏季与平曲线半径 $\geq 1\,600\text{ m}$ 间存在均值异质性,估计参数为 0.702,平曲线半径 $\geq 1\,600\text{ m}$ 会增加夏季的参数均值,即增大伤亡事故发生的概率。中型肇事车与平曲线半径 $\geq 1\,600\text{ m}$ 间存在均值异质性,估计参数为-1.139。侧面碰撞的参数均值与夜间呈正相关,即夜间会增加侧面碰撞情况下事故的严重度。侧面碰撞与平曲线半径 $\geq 1\,600\text{ m}$ 间存在均值异质性,即平曲线半径 $\geq 1\,600\text{ m}$ 会降低侧面碰撞情况下伤亡事故发生的概率。

3) 机-非事故模型。机-非事故模型估计结果见表 4。平曲线半径、正面碰撞、夜间、肇事/涉事非机动车、中型肇事车显著影响山区低等级公路机-非事故严重度。模型将夜间、肇事/涉事非机动车识别为服从单侧三角分布的随机参数变量,其均值(方差)分别为 2.04、1.569 和 1.33,即 3 项随机参数均为非负值。探寻模型异质性来源发现,夜间的参数均值受周末和驾驶人年龄 ≥ 59 岁的影响,估计参数分别为-1.483 和-1.447。这表明事故发生在夜间且在周末或驾驶人年龄 ≥ 59 岁时,会降低夜间对应的随机参数的均值,即降低山区低等级公路伤亡事故发生的概率。涉事非机动车的参数均值与周末呈正相关,对应系数为 0.583。这表明事故发生在周末会增加涉事非机动车变量的参数均值,即增加山区低等级公路事故的严重度。这主要是因为非工作日时段非机动车流量增加,间接导致更严重的碰撞后果。

3.3 边际效应分析

各模型的平均弹性系数计算结果见表 5。由表 5 可知:

1) 综合事故。相比日间,夜间发生伤亡事故的概率增加 5.38%。相比其他车型,当涉事车型为非机动车时,伤亡事故发生的概率增加 18.72%。潜在原因是非机动车对驾乘人员的防护能力较弱,发生事故时,驾乘人员完全暴露于危险环境,导致更为惨重的事故损失。

表 5 各自变量的平均弹性系数

Table 5 Average elasticity coefficient of respective variables

事故类型	自变量	弹性分析	
		仅财产损失事故	伤亡事故
综合事故	夜间	-0.043 8	0.053 8
	侧面碰撞	-0.046 3	0.035 6
	正面碰撞	0.038 5	-0.058 4
	肇事车型:中型车	-0.051 0	0.062 4
	肇事车型:大型车	-0.014 7	0.029 7
	肇事车型:非机动车	-0.153 6	0.019 6
	涉事车型:非机动车	-0.780 4	0.187 2
机-机事故	夏季	-0.032 9	0.113 9
	秋季	-0.020 2	0.082 5
	冬季	-0.028 3	0.136 1
	侧面碰撞	-0.036 8	0.047 5
	肇事车型:中型车	-0.042 6	0.081 6
	肇事车型:大型车	-0.028 3	0.074 8

续表 5

事故类型	自变量	弹性分析	
		仅财产损失事故	伤亡事故
机-非事故	夜间	-0.151 0	0.008 1
	平曲线半径:≥800 且<1 600 m	0.1034	-0.034 8
	正面碰撞	0.119 4	-0.051 1
	肇事车型:中型车	-0.093 4	0.009 9
	肇事车型:非机动车	-0.209 9	0.028 7
	涉事车型:非机动车	-0.951 9	0.232 3

2) 机-机事故。事故发生季节为夏天、秋天、冬天时,发生机-机伤亡事故的概率分别增加 11.39%、8.25%和 13.61%。当事故肇事车型为中、大型车时,相比其他车型,发生机-机伤亡事故的概率分别增加 8.16%、7.48%。相较于其他碰撞类型,当事故类型为侧面碰撞时,机-机伤亡事故发生的概率将增加 4.75%,仅财产损失事故的概率降低 3.68%。

3) 机-非事故。相比日间,夜间发生伤亡机-非事故的概率增加 0.81%。涉事非机动车相比其他车型,发生机-非伤亡事故的概率增加 23.23%,发生仅财产损失事故的概率降低 95.19%,表明非机动车等弱势交通参与者一旦发生事故,后果往往更为严重。

4 对策建议

1) 建议在条件允许的情况下,尽可能提高改善山区低等级公路的夜间照明状况,路侧护栏加装附着式太阳能轮廓标,特别是道路环境和线形状况复杂路段。

2) 针对小半径弯道路段,建议增设黄色实线分隔对向车道,并配套设置轮廓标、线形诱导标、凸面镜等安全设施,必要时可引入急弯会车预警装置,通过智能化手段补偿视距。

3) 建议对受季节性或不良天气影响严重的山区路段,加强日常养护巡查力度,并增设或完善注意雨雾冰雪等不利气象条件的警告标志。

4) 建议加强对山区低等级公路弱势使用者的交通安全警示教育,并推动安全头盔、反光背心等个人防护用品的普及使用。

5 结 论

1) 与固定参数 Logit、混合 Logit 模型相比,考虑异质性来源的随机参数 Logit 模型拟合优度最高,能更有效地刻画山区低等级公路事故数据中的异质性效应。

2) 在综合事故模型中,涉事非机动车对事故严重度的作用强度最大,正面碰撞为服从正态分布的异质性变量;在机-机事故模型中,季节的作用强度最大,夏季、中型肇事车、侧面碰撞对应参数服从单侧三角分布;在机-非事故模型中,事故严重度受涉事非机动车显著影响,夜间、涉事非机动车对应参数服从单侧三角分布。

3) 事故数据中存在未观察到的异质性,不同事故参与主体下的碰撞事故严重度的影响机制存在差异,通过合理划分事故数据,能够有效增强事故数据间的同质性,进而提升事故严重度致因分析结果的精确性和可靠性。

4) 道路交通管理部门应注意改善山区低等级公路的夜间照明条件,加强对行车视距受限路段的安全警示和速度控制。同时,针对山区低等级公路的交通弱势群体开展交通安全教育工作,并推动非机动车安全保障设备的普及应用。

5) 受实际条件的限制,模型未能考虑行人、交通流特征、违规驾驶行为等影响因素。后续研究将进一步丰富事故数据集,并深入探讨山区低等级公路事故严重度建模中的时间不稳定性。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 数据查询[EB/OL]. (2023-06-20). <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.

[2] 胡立伟, 贺雨, 侯智, 等. 山区高速公路交通事故风险多维度耦合研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 17-27.
HU Liwei, HE Yu, HOU Zhi, et al. Multi-dimensional coupling study on traffic accident risk of highway in mountainous areas[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 17-27.

[3] 王芳菲, 彭立飞, 张诗, 等. 山区高速公路隧道交通事故特征分析:以 G65 包茂高速 6 条隧道为例[J]. 隧道建设:中英文, 2023, 43(5): 816-825.
WANG Fangfei, PENG Lifei, ZHANG Shi, et al. Characteristics analysis of traffic accidents in six tunnels of G65

- Baotou-Maoming highway in mountainous regions[J]. *Tunnel Construction*, 2023, 43(5): 816–825.
- [4] 张洁,张萌萌,李虹燕. 基于二元 Logistic 模型的城市道路交通事故严重程度分析[J]. *交通信息与安全*, 2022, 40(5): 70–79.
ZHANG Jie, ZHANG Mengmeng, LI Hongyan. An analysis of severity of traffic accidents on urban roadways based on binary Logistic models[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2022, 40(5): 70–79.
- [5] MUSSONE L, BASSANI M, MASCI P. Analysis of factors affecting the severity of crashes in urban road intersections[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, 103: DOI: 10.1016/j.aap.2017.04.007.
- [6] 梁乃兴,闫杰,杨文臣,等. 基于 ARIMA-LSTM 的高速公路交通安全组合预测模型研究[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2023, 42(4): 131–138.
LIANG Naixing, YAN Jie, YANG Wenchen, et al. A combined prediction model for highway traffic safety based on ARIMA-LSTM[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2023, 42(4): 131–138.
- [7] IRANITALAB A, KHATTAK A. Comparison of four statistical and machine learning methods for crash severity prediction[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2017, 108: DOI: 10.1016/j.aap.2017.08.008.
- [8] KARLAFTIS M G, VLAHOIANNI E I. Statistical methods versus neural networks in transportation research: differences, similarities and some insights[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, 19: DOI: 10.1016/j.trc.2010.10.004.
- [9] SHANGGUAN Qiangqiang, WANG Junhua, FU Ting, et al. An empirical investigation of driver car-following risk evolution using naturalistic driving data and random parameters multinomial logit model with heterogeneity in means and variances[J]. *Analytic Methods in Accident Research*, 2023, 38: DOI: 10.1016/j.amar.2022.100265.
- [10] ALNAWMASI N, MANNERING F. The impact of higher speed limits on the frequency and severity of freeway crashes: accounting for temporal shifts and unobserved heterogeneity[J]. *Analytic Methods in Accident Research*, 2022, 34: DOI: 10.1016/j.amar.2021.100205.
- [11] 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 Dongdong, YANG Xiaobao, ZU Xingshui, et al. Examination of driver injury severity in urban crashes: a random parameters Logit model with heterogeneity in means approach[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(3): 214–220.
- [12] 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 Yiyong, WU Jingting, SHI Ying, et al. 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.
- [13] 杨文臣,谢碧珊,房锐,等. 山区双车道公路机动车碰撞事故严重度致因比较分析与预测[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(1): 190–195.
YANG Wenchen, XIE Bishan, FANG Rui, et al. Comparative analysis and prediction of motor vehicle crash severity on mountainous two-lane highways[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(1): 190–195.
- [14] SUN Ming, SUN Xiaoduan, SHAN Donghui. Pedestrian crash analysis with latent class clustering method[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 124: DOI: 10.1016/j.aap.2018.12.016.
- [15] COOK J, KIMUYU P, BLUM A G, et al. A simple stated preference tool for estimating the value of travel time in rural Africa[J]. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 2016, 7: DOI: 10.1017/bca.2016.13.



作者简介: 闫杰 (1996—),男,山东乐陵人,硕士,工程师,主要从事道路交通安全与环境方面的工作。E-mail: yanjie@sdjtky.cn。