

中文引用格式:朱彤,李微,赵云飞,等. 机动车驾驶人避险动作对骑行者损伤影响的因果推断[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(6): 27-36.

英文引用格式:ZHU Tong, LI Wei, ZHAO Yunfei, et al. Causal inference of effect of motor-vehicle driver's avoidance action on cyclists' injury[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 27-36.

机动车驾驶人避险动作对骑行者损伤影响的因果推断*

朱彤¹副教授, 李微¹, 赵云飞¹, 李晓虎², 王鹏³

(1 长安大学 运输工程学院, 陕西 西安, 710064; 2 郑州机动车质量检测认证技术研究中心有限公司, 河南 郑州, 451468; 3 中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300)

中图分类号: X910

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.0530

资助项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0108000)。

【摘要】 为验证驾驶人避险动作对两轮车骑行者损伤的影响, 识别出避险失效乃至加重损伤的条件。首先, 在中国交通事故深度调查(CIDAS)数据的基础上, 采用非支配排序遗传算法 II (NSGA-II) 仿真优化重建事故场景, 提取碰撞时刻机动车速度、两轮车速度数据, 构建由自变量、因变量和 11 项协变量构成的数据集, 将仿真获取的字段与调查所得的数据字段融合作为建模的基础数据; 其次, 采用 2 种因果推断方法, 即考虑正性假设与协变量调整的倾向性评分(PS)加权-回归分析结合方法(逆概率权重(IPW)和重叠概率权重(OW)), 推断避险动作与损伤程度之间的因果性, 并比较 IPW、OW 及无加权回归方法处理后的组间均衡性; 最后, 定量分析不同条件下驾驶人避险动作与两轮车骑行者损伤程度的因果效应。结果表明: 总体上看, 驾驶人目前采用的避险动作不能有效地减轻骑行者的损伤程度; 当车辆类型为商用车、机动车并以中高速行驶时, 采取避险驾驶动作会加剧骑行者损伤, 其中, 打方向盘更容易造成骑行者损伤加剧。

【关键词】 避险动作; 两轮车; 骑行者; 损伤程度; 因果推断

Causal inference of effect of motor-vehicle driver's avoidance action on cyclists' injury

ZHU Tong¹, LI Wei¹, ZHAO Yunfei¹, LI Xiaohu², WANG Peng³

(1 College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;
2 Zhengzhou Motor Vehicle Quality Inspection and Certification Technology Research Center
Co. Ltd, Zhengzhou Henan 451468, China; 3 China Automotive Technology and Research
Center Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: To verify the impact of drivers' evasive actions on injuries of two-wheeler riders and to identify the conditions under which evasive maneuvers fail or even exacerbate the injuries, based on data from China In-Depth Accident Study (CIDAS), NSGA-II was first used to simulate and optimize the reconstruction of accident scenes. Vehicle speed and two-wheeler speed data at the moment of collision were extracted. A research dataset consisting of independent variables, dependent variables, and 11

covariates was constructed. Simulation-derived variables and investigation-based data fields were integrated to serve as the foundational data for modeling. Secondly, two causal inference methods were adopted, namely the propensity score (PS) weighting - regression analysis combination method considering positive hypotheses and covariate adjustment (inverse probability weighting (IPW) and overlap probability weighting (OW)), to infer the causality between evasive actions and injury severity, and to compare the inter-group balance after processing by IPW, OW and unweighted regression methods. Finally, the causal effect of drivers' evasive actions on the injury severity of two-wheeler riders under different conditions was quantitatively analyzed. The results show that, in general, the evasive actions currently adopted by drivers cannot effectively reduce the injury severity of riders. When the vehicle types are commercial vehicles and the motor vehicle traveling at medium to high speeds, taking evasive driving actions tends to aggravates the injuries of riders. Among these actions, steering maneuvers is more likely to increase the severity of rider injuries.

Keywords: hedging action; two-wheeler; riders; injury degree; causal inference

0 引言

两轮车是自行车、摩托车和电动两轮车等两轮交通工具的统称,在我国具有较高的保有率和使用率。2020年,我国(不含港澳台)平均每100个中国家庭拥有33.1辆摩托车和66.7辆电动助力车^[1]。然而,两轮车骑行者在交通事故中属于弱势群体^[2],遭受机动车碰撞时容易导致严重伤害乃至致命伤害。2021年,我国共发生86 881起两轮车道路事故,造成104 050人受伤,16 075人死亡,其中,摩托车事故51 740起,电动自行车事故32 297起,自行车事故2 844起,并造成大量财产损失^[1]。因此,开展减轻两轮车骑行者事故伤害因果关系与防治技术措施研究具有重要意义。

以往对于两轮车骑行者损伤的研究,常围绕事故损伤致因展开建模与分析。目前,机动车车速^[3]、两轮车类型^[4]和行驶环境^[5]等因素已被识别出是造成骑行者严重乃至致命损伤的主要原因,但骑行者损伤形成的机制、机理等尚待进一步探明。

避险驾驶动作是机动车驾驶人在临近事故之前最后做出的应对行为。然而,避险动作是否能够以及在何种条件下能够减轻骑行者损伤,目前均无定量研究,相关研究缺失可能有以下2方面原因:①常见的事故数据中缺少避险动作的记录;②缺乏有效的对比分析工具。近年来,随着事故深度调查数据的开展与应用,以及基于深度调查事故的模拟再现,为研究提供了必要的数据支撑^[6-7]。常用的类别模型^[8]、有序模型^[9]和随机参数模型^[10]等仅能说明变量之间存在的相关关系,不能推断二者之间的因果关系。而因果分析方法,如倾向性评分(Propensity

Score,PS)加权方法可以获得更接近于随机试验的结论,逐渐成为检验变量之间因果关系的有力工具^[11]。

综上,文中基于中国交通事故深度调查(China In-Depth Accident Study, CIDAS)数据,采用基于非支配排序遗传算法II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)及事故再现仿真工具,实现事故场景再现;分别采用回归分析方法和2种因果分析方法,验证驾驶人避险动作对骑行者损伤的实际影响,进而分析避险失效乃至加重损伤的条件,以期为避险驾驶人培训、车辆自动紧急制动装置的安装与测试条件提供依据。

1 事故场景重建与数据提取

1.1 基于NSGA-II的仿真事故重建

文中数据来源于CIDAS中2015—2023年北京、长春等城市的机动车-两轮车碰撞事故。仅凭调查获取的数据字段不能满足建模的需要,所以将同一事故案例的调查数据字段与仿真字段一并作为建模的基础数据。

采用PC-Crash仿真软件实现事故重建^[12],构建两轮车骑行者的多刚体模型。选取以下8个对事故重建结果影响较大的参数作为关键参数的备选项,包括车辆碰撞纵向夹角、轿车速度、两轮车速度、轿车驾驶人反应时间、轿车减速度、轿车方向盘转角、轿车与路面摩擦因数和两轮车骑行者质心高度。选用标准正交表 $L_{27}(3^8)$,按试验序号及对应的参数,经过仿真后进一步分析,可得到两轮车和骑行者在仿真结束时所在位置与真实事故位置之间的距离差值,并以此作为仿真与真实事故之间的差异指标。

在案例中随机抽取52起重建后的机动车-两

轮车事故,进行参数敏感性分析。通过正交仿真试验与极差分析,结果表明对于仿真结果与真实事故差异性影响较大的关键参数为车辆碰撞纵向夹角、轿车速度、两轮车速度和轿车驾驶人反应时间 4 项。因此,在仿真重建过程中进一步将以上 4 个参数作为变量。后续进一步采用响应面法 (Response Surface Methods, RSM)^[13]构造响应目标与试验参数之间的函数关系曲面,以获得最优目标下的参数取值。采用该方法还原了 460 组两轮车碰撞样本,剔除部分数据字段有缺失的样本后,最终获得 410 组数据样本作为后续建模的基础数据。

1.2 数据描述分析与变量选取

以事故中机动车驾驶人是否采取避险驾驶动作(包括制动、转向)作为自变量,在数据样本中,共有 35.7%的机动车驾驶人采取了避险动作。以两轮车骑行者损伤严重程度作为因变量,该变量为二元变量,轻微损伤及无损伤占 72.5%,严重损伤或致命损伤占 27.5%。以包括机动车驾驶人特征、两轮车骑行者特征、车辆特征、道路和环境特征的其他 16 个变量作为潜在的协变量(表 1)。此外,事故案

例机动车均未安装自动紧急制动装置,使其基本条件保持一致性。避险动作对两轮车骑行者严重损伤比例的影响如图 1 所示。其中,横坐标为机动车速度,Ⅰ—Ⅶ级分别表示 0~10、11~20、21~30、31~40、41~50、51~60、>60 km/h,纵坐标为两轮车速度,1—5 级分别表示 0~10、11~20、21~30、31~40、>40 km/h。由机动车速度-两轮车速度构成的二维空间显示,是否采取避险驾驶动作,对骑行者损伤占比有明显影响。无避险动作时,严重损伤主要集中在机动车低速区域;有避险动作时,严重损伤主要集中在中高速区域。上述结果说明了避险动作效果的局限性,需进一步予以定量分析。

通过计算 CRAMER'S^[14]值来估计变量的相关性,作为因果推断的前序工作。最终,倾向评分模型中包含了 11 项协变量。其中,机动车驾驶人性别、骑行者性别、机动车车辆类型和事故发生地点为二元变量,用 0 和 1 表示;骑行者年龄、两轮车车辆类型、机动车车速、两轮车车速、道路类型、路面材料和交通密度为多分类变量。

表 1 关键指标变量的描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of key indicator variables

变量		占比/%
因变量	损伤严重程度:无伤或者轻伤、重伤或致命伤	72.5、27.5
自变量	避险驾驶动作:无避险动作、刹车和转向、仅刹车、仅转向	64.3、16.22、16.29、3.19
协变量	机动车驾驶人性别:男、女	86.8、13.2
	骑行者性别:男、女	72.1、27.8
	机动车驾驶人年龄:≤30 岁、31~40 岁、41~50 岁、51~60 岁、>60 岁	33.7、33.5、23.0、8.1、1.6
	骑行者年龄:≤30 岁、31~40 岁、41~50 岁、51~60 岁、>60 岁	20.2、15.5、27.6、21.6、15.1
	机动车驾驶人驾龄:0~1 年、2~5 年、6~10 年、>10 年	7.9、28.5、26.2、37.3
	骑行者佩戴头盔:是、否	18.9、81.1
	机动车车辆类型:商用车、乘用车	83.0、17.0
	两轮车车辆类型:电动自行车、自行车、摩托车	48.6、8.3、43.1
	机动车车速:≤10、11~20、21~30、31~40、41~50、51~60、>60 km/h	10.5、20.7、23.3、17.2、11.8、7.8、8.6
	两轮车车速:≤10、11~20、21~30、31~40、>40 km/h	10.8、25.9、35.3、17.1、10.9
	事故发生地点:市区、非市区	51.1、48.9
	路面干燥程度:干燥、潮湿	88.0、12.0
	道路类型:平直路段、弯曲路段、交叉口、其他(停车场等)	23.1、4.7、68.9、3.3
	天气条件:晴天、阴天、雨雪大雾天气	75.1、21.7、3.2
	路面材料:沥青、水泥、砂石	68.5、30.5、1.0
	交通密度:自由流、稳定流、不稳定流	73.6、24.3、2.1

2 因果推断方法

在因果推断领域,ROSENBAUM 等^[15]于 1983 年提出的 PS 方法已被广泛应用,它用 1 个评分指标

来体现多个混杂因素的综合影响,可以有效解决数据内生性问题,从而便于直接研究变量之间的因果关系^[16]。文中采用 PS 加权-回归因果推断方法,分为 4 个主要步骤:①计算 PS 值;②使用 PS 值平衡

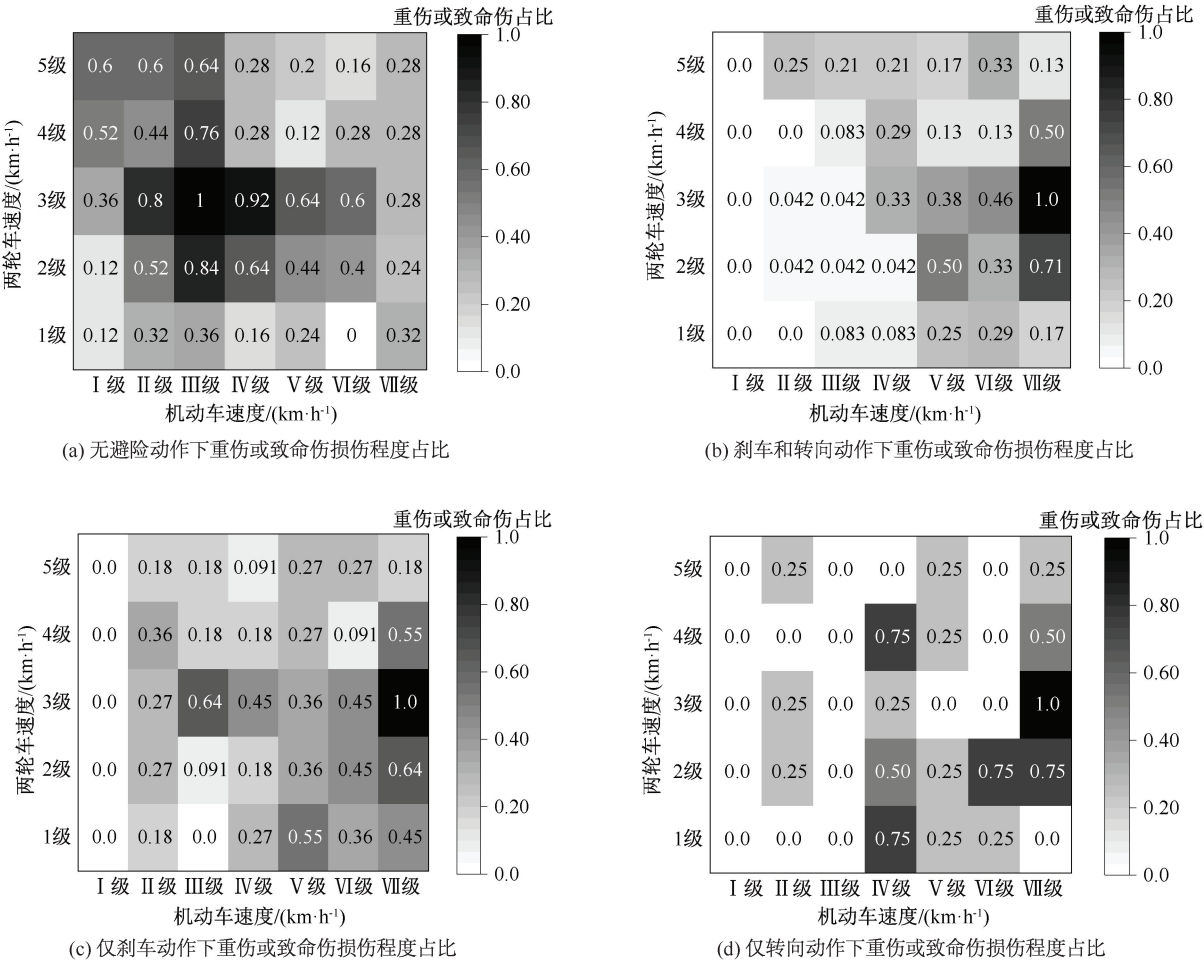


图 1 不同避险动作下骑行者重伤以上占比

Fig. 1 Proportion of riders with severe or more serious injuries under different evasive actions

协变量分布;③平衡性检验;④基于回归分析的作用效果估计。如果未能通过平衡性检验,那么重复前序步骤。计算流程如图 2 所示。

2.1 计算倾向得分值

倾向得分值是研究对象在一定协变量条件下采取避险驾驶动作的概率^[17]。

$$e_i = \text{Prob}(Z_i = 1 \mid X_i) \quad (1)$$

式中: i 为事故序数, $i = 1, 2, \dots, n$; X_i 为协变量向量,二元变量 Z_i 的值为 0 和 1,分别表示研究对象处于对照组和试验组; e_i 为 PS 值,表示研究对象 i 在协变量水平 X_i 下采取避险驾驶动作的概率,在 Neyman-Rubin 因果模型下,要求样本满足正性假定,即 e_i 的值介于 0 和 1 之间。

当某个体接受处理的概率接近 0 或 1 时,可能产生极端权重,导致出现有限样本偏差、不稳定的估计量等问题^[18]。为避免此现象,MOLINA 等^[19]提出调和严格的正性条件和估计 PS 最常用的 Logistic 回归,并通过增加 1 个明显的下限来略微改变原始

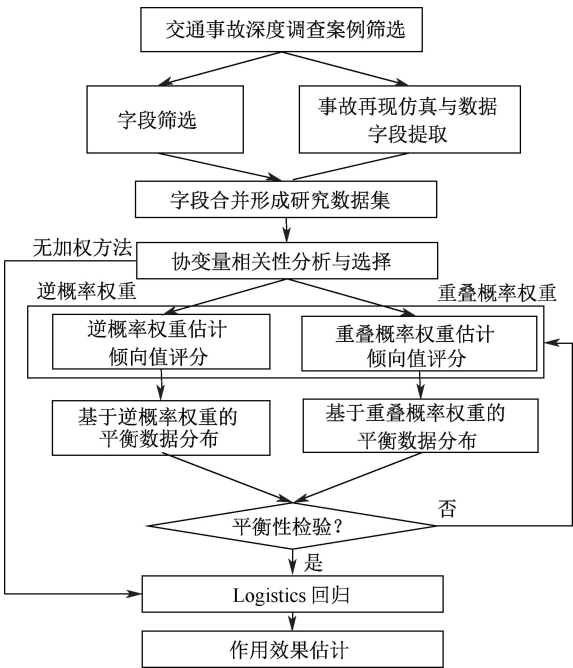


图 2 PS 方法流程

Fig. 2 Flow chart of PS methods

的参数模型^[20]。

$$e_i(\boldsymbol{\beta}) = \frac{\exp(\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}_i)}{1 + \exp(\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}_i)} \quad (2)$$

$$e(\mathbf{X}, \boldsymbol{\theta}) = (1 - \varepsilon - \sigma) \Phi(\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}) + \varepsilon \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\beta}$ 为给定 $\mathbf{X}_i$ 条件下, Z_i 在回归模型中的对应的参数向量, $\boldsymbol{\beta} \in R^p$; $\varepsilon, \sigma \in [0, 1]$, $\varepsilon + \sigma < 1$; $\boldsymbol{\theta} = (\varepsilon, \sigma, \boldsymbol{\beta}^T)^T$ 。

2.2 加权方法

不同目标群体采用不同加权方法, 对应不同的效果估计, 文中分别采用 2 种加权方法来提高处理估计结果的稳健性。

逆概率权重 (Inverse Probability Weight, IPW) 以所有研究对象 (无论是否采取避险驾驶动作) 为目标群体, 通过加权使每组研究对象与所有研究对象的协变量特征分布相似^[17]。估计效果为平均处理效果 (Average Treatment Effect, ATE)。处理组和对照组的权重计算过程如下:

$$\text{IPW}_{Z_i=1} = \frac{1}{e_i} \quad (4)$$

$$\text{IPW}_{Z_i=0} = \frac{1}{1 - e_i} \quad (5)$$

重叠权重 (Overlapped Weight, OW) 是由 Li Fan 等^[21]提出的。目标人群是 2 组具有相似协变量特征的群体, 即 PS 值分布重叠的群体。估计效果为重叠人群的 ATE (ATE in the Overlap, ATO)。加权公式如下:

$$\text{OW}_{Z_i=1} = 1 - e_i \quad (6)$$

$$\text{OW}_{Z_i=0} = e_i \quad (7)$$

上述 2 种方法相比, 前者计算每个观察值的倾向性评分并加权, 以减少混杂的影响。后者对协变量进行调整, 并考虑了正性假设的影响。后续将对上述 2 种加权方法及无加权情况予以对比。

2.3 平衡性检验方法

使用绝对标准均值差 (Absolute Standardized Mean Difference, ASMD) 进行平衡性检验^[22]。

$$\text{ASMD} = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_0|}{\sqrt{\frac{S_1^2 + S_0^2}{2}}} \quad (8)$$

式中: $\bar{X}_1$ 和 $\bar{X}_0$ 分别为 2 组对比数据中协变量的均值; S_1 和 S_0 分别为 2 组对比数据中协变量的方差。当 $\text{ASMD} < 0.1$ 时, 可以认为组间协变量平衡良好。 $\text{ASMD} > 0.1$ 时, 表明至少有 1 个协变量不平衡。此

外, 还可以根据 ASMD 的大小来判断不同加权方法的拟合效果, 其值越小越好。

2.4 作用效果估计

令 Y 为结局变量, N 为样本量, 试验组和对照组结局变量的均值分别为 $E(Y_1)$ 和 $E(Y_0)$, ω 为权重。估计效应为比值比 (Odds Ratio, OR)^[17, 23], 使用 Logistic 回归, 假设 Y_i 为指标变量, $Y_i = 1$ 表示重伤或致命伤, $Y_i = 0$ 表示无伤或轻伤。

$$P_i = \frac{\exp(\boldsymbol{\gamma}^T Z_i)}{1 + \exp(\boldsymbol{\gamma}^T Z_i)} \quad (9)$$

式中 P_i 为第 i 起事故中两轮车骑行者受重伤或致命伤的概率。在给定协变量水平 Z_i 的回归模型中, $\boldsymbol{\gamma}$ 为 Y_i 的参数向量。

$$E(Y_1) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i Z_i Y_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i Z_i} \quad (10)$$

$$E(Y_0) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i (1 - Z_i) Y_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i (1 - Z_i)} \quad (11)$$

$$\text{OR} = \frac{E(Y_1) / [1 - E(Y_1)]}{E(Y_0) / [1 - E(Y_0)]} \quad (12)$$

OR 值反映严重损伤或致命损伤与采取避险动作之间的关联强度。OR > 1, 表明避险动作与严重损伤或致命损伤呈正相关; OR < 1, 二者呈负相关; OR = 1, 二者无关。

3 避险动作对骑行者损伤影响的因果推断结果分析

3.1 组间均衡性

若将采取了任意 1 种避险驾驶动作 (刹车、转向、刹车及转向) 的事故样本称为避险驾驶动作组, 则未采取任何避险动作的事故样本则可称为无避险驾驶动作组。为更好实现避险驾驶动作效果的因果推断, 采用了 IPW 和 OW 等 2 种方法来控制选择偏差, 消除混杂因素的影响。不同加权方法下绝对标准均值差 ASMD 的量化计算结果如图 3 所示, 图 3 中还绘制了未加权条件下变量的 ASMD 值作为对比。

从图 3 中可以看出, 2 种加权方法后的 ASMD 值均小于 0.1, 表示通过平衡性检验, 加权后的混杂因子在 2 组间分布平衡。特别地, OW 加权后各协

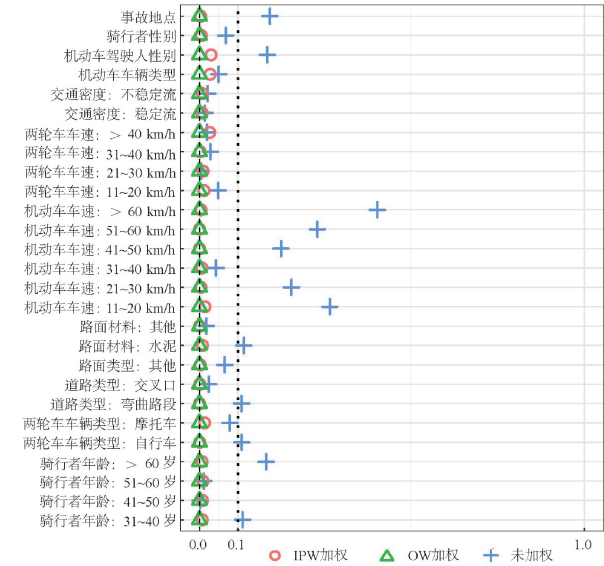


图3 避险驾驶动作下的ASMD值

Fig.3 ASMDs under evasive driving actions

变量的ASMD均为0,表现出更为优越的特征。

3.2 因果效应估计

当 $OR>1$ 时,严重或致命损伤概率更大。 p 值大小代表影响作用显著性, $p<0.05$ 视作显著。为探究更多细节,文中还计算分组变量下的OR,试图找出不同驾驶场景下,避险驾驶动作对严重或致命损伤的因果效应是否不同。根据以往经验,选择机动车车辆类型、道路类型和车速3组变量。其中,道路类型中“其他”分类因样本量过小(仅占3.3%)而被舍弃。将机动车车速重新划分为 <30 、 $31\sim60$ 和 $>60\text{ km/h}$ 等3类,分别代表低速、中速和高速行驶场景。

不同分组下OR值的差异反映出不同驾驶场景下避险驾驶动作的效果差异,如图4所示。在“总体样本”、“商用车”、“平直/弯曲路段”、“机动车车速($31\sim60\text{ km/h}$)”分组下,IPW和OW加权得到的OR值均大于1,即机动车驾驶人的避险驾驶动作会增加两轮车骑行者受重伤或致命伤的概率。

不同加权方法下OR值大小不同,如前所述,这是因为不同的加权方法基于不同的因果效应估计样本和不同的反事实论据。IPW加权关注的是整个群体,并假设所有受试者都切换了状态,而OW加权关注的是与协变量描述的场景相似的事件。例如:弯道路段场景IPW加权得到的OR为1.38,说明所有机动车驾驶人采取避险动作时的严重或致命损伤概率是不采取避险动作的1.38倍;而OW加权得到的OR为1.17,表明如果仅关注协变量条件相似的

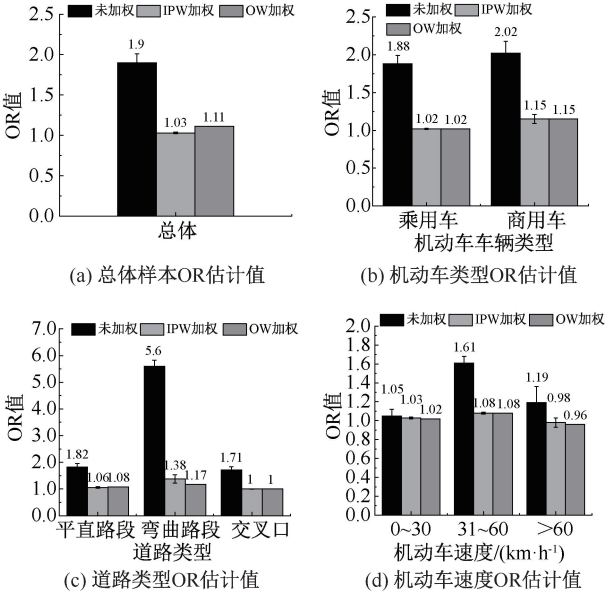


图4 不同分组条件重伤或致命伤的OR估计值

Fig.4 OR estimates of severe or fatal injuries under different grouping conditions.

事件,严重或致命损伤的几率是不采取避险动作的1.17倍。

3.3 考虑避险动作差异对骑行者损伤的影响分析

根据组间均衡性验证结果,OW加权方法获得了更好的效果,所以文中使用OW加权回归后得到的OR值衡量避险动作作用效果。将避险动作分为刹车和转向、仅刹车和仅转向3种避险方式作为自变量,并设置哑变量。首先,通过 P 值判断避险驾驶对两轮车骑行者损伤是否有显著影响。发现在总体样本中OW加权下的同时采用刹车和转向、仅采用刹车2种避险动作均不显著。

不同避险动作重伤或致命伤的OR估计值计算结果见表2,在未加权的整体样本中,可以观察到同时采用刹车和转向2种避险动作的OR值为2.355,表明采用该避险动作使骑行者遭受严重损伤程度的增加了135.5%。另一方面,未加权、IPW加权和OW加权得到的转向避险动作的OR值分别为1.999、1.134和1.128,均大于1,且具有显著效果,这表明转向使两轮骑行者受到严重损伤的概率增加,进一步证明转向避让动作是有效的,且会增加骑行者受严重损伤的概率。

同情景不同避险动作下OW的OR值见表3,由表3可知:同样的避险动作在不同场景下会产生不同的效果。例如:当速度为 $31\sim60\text{ km/h}$ 时,采用刹车和转向及仅转向这2种避险动作的OR值大于1,表明2种避险动作会增加两轮车骑车者严重损伤的概

率。而在车速为 0~30 km/h 和>60 km/h 的情况下, 甚至在其他情况下,例如:车辆在交叉口,车辆类型为乘用车时,2 种避险动作均无显著效果。不同的避险

动作在相同的场景下也呈现出不同的效果,大多数情况下仅采用刹车这种避险动作是没有显著效果的。

表 2 不同避险动作重伤或致命伤的 OR 估计值

Table 2 OR estimates of severe or fatal injuries under different avoidance behavior							
分组	加权方法	避险动作	OR	差异占比/%	<i>P</i> 值	ASMD 平均值	ASMD 最大值
总体	未加权	刹车和转向*	2.355	—	< 0.01*	0.11	0.46
		仅刹车	0.979	—	0.862		
		仅转向*	1.999	—	<0.01*		
总体	IPW	刹车和转向	1.053	-55.29	0.070	0.01	0.03
		仅刹车	0.993	1.43	0.758		
		仅转向*	1.134	-43.27	0.027*		
总体	OW	刹车和转向	1.046	-55.58	0.150	0	0
		仅刹车	0.998	1.94	0.940		
		仅转向*	1.128	-43.57	0.020*		

注:*表示避险驾驶动作具有显著效果。

表 3 不同情景不同避险动作下 OW 加权得到的 OR 值

Table 3 OW of OR estimates of severe or fatal injuries under different scenarios and different avoidance behavior					
分组		避险动作	OR	差异占比/%	<i>P</i> 值
机动车车辆类型	乘用车	刹车和转向	1.026	-55.795	0.479
		仅刹车	0.980	-1.110	0.586
		仅转向	1.061	-43.892	0.350
	商用车	刹车和转向*	2.124	-9.809	< 0.01*
		仅刹车	1.341	44.504	0.077
		仅转向*	2.054	-79.166	<0.01*
道路类型	交叉口	刹车和转向	1.135	-54.709	0.070
		仅刹车	1.118	-22.199	0.124
		仅转向	1.177	-27.301	0.068
	非交叉口	刹车和转向	1.019	-55.463	0.625
		仅刹车	0.948	18.057	0.171
		仅转向*	1.140	-48.323	0.028*
机动车车速/ (km·h ⁻¹)	0~30	刹车和转向	1.028	-18.927	0.626
		仅刹车	0.975	24.046	0.581
		仅转向	1.100	-34.988	0.250
	31~60	刹车和转向*	1.220	-38.693	< 0.01*
		仅刹车	1.090	34.071	0.110
		仅转向*	1.206	-28.129	< 0.01*
	>60	刹车和转向	1.054	4.460	0.661
		仅刹车	1.247	2.381	0.095
		仅转向	1.123	11.741	0.448

注:*表示避险驾驶动作具有显著效果。

3.4 因果效应讨论

3.4.1 加权方法对组间均衡性的提升效果

在未加权之前,避险驾驶动作组和无避险驾驶动作组之间的协变量不平衡,导致结果失真,得到的 OR 值偏大。加权有助于消除混杂因素的影响,而

消除混杂因素的影响后 OR 值得到降低,IPW 和 OW 加权后计算得到的 OR 均比未加权之前要小。此外,与传统的 IPW 方法相比,OW 加权得到了更好的结果,体现在更小的 ASMD 值,且在具体数据计算过程中,绝大部分基于 IPW 方法加权得到的

OR 值未通过显著性检验。IPW 方法通过加权使每 1 组研究对象的协变量分布与全部研究对象相似,会出现极端权重的现象,而 OW 加权关注的是与协变量描述的场景相似的事件。因此,因果效应的分析应该基于 OW 加权后得到的 OR 值。

3.4.2 不同条件下骑行者损伤程度因果效应分析

表 3 所示显著的 OR 估计值未出现小于 1 的情况,说明无论在一般情况下还是在分组驾驶场景下,机动车驾驶人的避险驾驶动作都不会降低骑行者的损伤程度。这是一个意料之外、但可以理解的结果。换言之,机动车驾驶人自发的避险驾驶动作未能起到减轻骑行者损伤程度的作用。在某些情况下,驾驶人的避险驾驶动作甚至会加重骑行者的伤害。

在商用车中,驾驶人的避险驾驶动作会对骑行者产生显著的负面影响,而在乘用车中,这种影响不显著。商用车对应的 OW 的 OR 估计值为 1.15,说明商用车驾驶人采取避险驾驶动作造成骑行者受重伤或致命伤的概率相较于不采取避险动作要高 15%。同时,经表 1 数据统计计算可知:商用车事故中重伤率为 48.7%,约为乘用车事故中重伤率的 2 倍,而商用车、乘用车驾驶人采取避险驾驶动作的占比分别为 35.1%和 38.4%,二者接近。造成该现象的主要原因为商用车的质量大,容易造成更加严重的伤害。

此外,当车辆行驶在路段而不是路口时,避险驾驶动作也会增加骑行者受伤的风险。图 4 中平直路段和弯曲路段条件下,OR 估计值比较接近,分别为 1.08 和 1.17,说明在平直或弯曲路段行驶时,机动车驾驶人的避险驾驶动作作用效果相似,会使骑行者受重伤或致命伤的概率分别增加 8%和 17%,而交叉口条件下 OR 估计值不显著。这是由于在平直路段行驶时的交通环境比较单调,驾驶人对道路环境的变化没有足够的重视且在直路和弯道采取刹车和转向避让方式很可能使得车辆发生侧滑、翻滚等失控现象,进而加重事故的严重程度。

另外,对于以机动车速度分组事故,避险驾驶动作在低速和高速下都没有产生显著影响。骑行者损伤的严重程度只会在 31~60 km/h 条件下增加,OW 加权后得到的 OR 值为 1.08,转向避险动作和刹车加转向的 OR 值分别为 1.206 和 1.22,表示这 2 种避险动作增加骑行者受重伤的概率分别为 20.6%和 22%。在数据统计中发现,随着机动车车

速的增加,重伤率从 18.9%递增到 62.4%,对比避险动作占比也从 23%增加到 73%,说明车速增加会带来更加严重的伤害,同时车速越高汽车驾驶人越警觉,采取避险动作的概率也越高。

文中结果表明:紧急情况下驾驶人采用的避险动作未能减轻骑行者的损伤。以往文献缺少基于事故深度调查数据的研究,但也有文献通过驾驶模拟试验进行过避险行为的研究。尽管这些研究中采用的场景较为单一,但也说明若制动时间较晚、制动深度不足和采用不适宜的避险行为,均会导致避险效果较差^[24]。结合文献推测,避险动作仍未能减轻骑行者损伤的原因可能来自 2 个方面,一是驾驶人对于危险场景的处置时机较晚,尽管采取了避险措施但仍会造成了严重的后果。二是对于复杂交通环境下的处置能力不足,尽管采取了下意识的避险动作,但对于如何正确控制车辆、减轻骑行者损伤缺乏基本的了解。此外,从以往的研究来看,驾驶人在紧急避险时有明显的保护自身安全的倾向^[25],这对于保护骑行者损伤是不利的,这也是有可能导致骑行者损伤加剧的原因之一。但进一步原因仍有待于更为细致的场景分析与研究。

4 结 论

1) 因果推断结果表明:机动车驾驶人自发的避险驾驶动作不能起到减轻骑行者损伤程度的作用。这也说明在紧急情况下采用自动驾驶或紧急制动的必要性。

2) 在商用车参与、弯道路段、中高速行驶这 3 种事故场景中,驾驶人采取避险驾驶动作反而会加剧骑行者损伤。

3) PS 方法能够减少混杂因素的影响,获得更接近于随机试验的分析结果。此外,在文中研究中,OW 加权可获得更低的 OR 值。

4) 为减轻骑行者损伤,宜加强商用车驾驶人避险能力培训,加强弯道与中高速运行条件下的避险能力培训,此外,商用车辆更应配置自动紧急制动装置。

5) 文中的研究仍存在一定的局限性。尽管获得了统计意义上的结论,但对于具体场景中的避险效果尚不清楚。在后续研究中应进一步细化场景。甚至采用案例研究方法,进一步理解避险动作未能减轻骑行者损伤的原因。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2022:771.

- [2] HUANG Yuan, ZHOU Qing, KOELPER C, et al. Are riders of electric two-wheelers safer than bicyclists in collisions with motor vehicles? [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 134: DOI: 10.1016/j.aap.2019.105336.
- [3] LUBBE N, JEPSSON H, STERNLUND S, et al. Injury risk curves to guide safe speed limits on Swedish roads using german crash data supplemented with estimated non-injury crashes [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2024, 202: DOI: 10.1016/j.aap.2024.107586.
- [4] 殷豪, 林淼, 王鹏, 等. 基于 XGBoost 的二轮车碾压事故致因研究[J]. *安全与环境工程*, 2023, 30(5): 19–27, 45.
YIN Hao, LIN Miao, WANG Peng, et al. Study on the cause of two-wheeler run-over accidents based on XGBoost[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2023, 30(5): 19–27, 45.
- [5] 王仲旭, 陈泽平, 鲁誉, 等. 两轮车事故影响因素分析及损伤机理研究[J]. *汽车技术*, 2022(10): 56–62.
WANG Zhongxu, CHEN Zeping, LU Yu, et al. Research on factors affecting two-wheeler accidents and injury mechanisms[J]. *Automobile Technology*, 2022(10): 56–62.
- [6] 周华, 张巧玉, 母尧尧, 等. 十字路口乘用车与二轮车典型危险场景聚类及推演[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(4): 100–107.
ZHOU Hua, ZHANG Qiaoyu, MU Yaoyao, et al. Clustering and deduction of typical dangerous scenarios between passenger vehicles and two-wheelers at crossroads[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(4): 100–107.
- [7] 周华, 刘峰, 李平飞, 等. 电动二轮车侧倾角对骑车人头部损伤影响研究[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(5): 79–84.
ZHOU Hua, LIU Feng, LI Pingfei, et al. Impact of electric bicycles' roll angle on cyclist's head injury[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(5): 79–84.
- [8] REN Qiaoqiao, XU Min. Heterogeneity in crash patterns of autonomous vehicles: the latent class analysis coupled with multinomial logit model[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2025, 209: DOI: 10.1016/j.aap.2024.107827.
- [9] 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.
- [10] WANG Chenzhu, ABDEL-ATY M, HAN Lei. Effects of speed difference on injury severity of freeway rear-end crashes: insights from correlated joint random parameters bivariate probit models and temporal instability[J]. *Analytic Methods in Accident Research*, 2024, 42: DOI: 10.1016/j.amar.2024.100320.
- [11] ZHANG Pengxiang, MAHMUD A, VIKASH V, et al. Comparison of safety effect estimates from propensity scores-potential outcomes framework and empirical Bayes before-after method: case study of adaptive traffic signal control[J]. *Journal of Safety Research*, 2024, 91: 258–270.
- [12] 董傲然. 面向骑行者保护的电动两轮车事故重建优化与损伤仿真研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
DONG Aoran. Research on accident reconstruction optimization and damage simulation of electric two-wheeled for cyclist protection[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [13] 李明, 唐姣, 宋欣筑, 等. 基于响应面法的抑尘剂组分配比优选模型[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(1): 88–94.
LI Ming, TANG Jiao, SONG Xinzh, et al. Optimization model of dust suppressant component ratio based on response surface methodology[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(1): 88–94.
- [14] CRAMER H. *Mathematical methods of statistics*[M]. Princeton: Princeton University Press, 1999: 286.
- [15] ROSENBAUM P R, RUBIN D B. The central role of the propensity score in observational studies for causal effects[J]. *Biometrika*, 1983, 70(1): 41–55.
- [16] LI Yan, LI Liang. Propensity score analysis methods with balancing constraints: a monte carlo study[J]. *Statistical Methods in Medical Research*, 2021, 30(4): 1119–1142.
- [17] 涂博祥, 秦婴逸, 吴骋, 等. 倾向性评分加权方法介绍及 R 软件实现[J]. *中国循证医学杂志*, 2022, 22(3): 365–372.
TU Boxiang, QIN Yingyi, WU Cheng, et al. Introduction of propensity score weighting methods and implementation by R software[J]. *Chinese Journal of Evidence-Based Medicine*, 2022, 22(3): 365–372.
- [18] 韩贺东. 基于稳定权重目标最大似然估计模型的研究及其在真实世界研究中的应用[D]. 上海: 中国人民解放军海军军医大学, 2020.

HAN Hedong. Modeling of stabilized weight based targeted maximum likelihood estimation and its application in real-world studies[D]. Shanghai: Naval Medical University, 2020.

[19] MOLINA J, SUED M, VALDORA M. Models for the propensity score that contemplate the positivity assumption and their application to missing data and causality[J]. *Stats in Medicine*, 2017, 37(24): 3 503–3 518.

[20] 高绒绒, 高倩, 王彤. 倾向性评分逆概率加权法中极端权重的处理方法[J]. *中国卫生统计*, 2023, 40(6): 956–960.

GAO Rongrong, GAO Qian, WANG Tong. Treatment of extreme weight in inverse probability weighted method of propensity score[J]. *China Health Statistics*, 2023, 40(6): 956–960.

[21] LI Fan, MORGAN K L, ZASLAVSKY A M. Balancing covariates via propensity score weighting[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2018, 113(521): 390–400.

[22] LI Fan, THOMAS L E. Addressing extreme propensity scores via the overlap weights[J]. *American Journal of Epidemiology*, 2019, 188(1): 250–257.

[23] 于淼, 张生奎, 王利华, 等. 肝酶对钢铁工人代谢健康型肥胖与高尿酸血症关联影响[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(2): 231–238.

YU Miao, ZHANG Shengkui, WANG Lihua, et al. Effect of liver enzymes on association between metabolically healthy obesity and hyperuricemia in steelworkers[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(2): 231–238.

[24] 朱彤, 王驰恒, 李青, 等. 基于集成学习的驾驶人避险安全效果影响因素研究[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(6): 3 243–3 251.

ZHU Tong, WANG Chiheng, LI Qing, et al. Study on factors influencing the avoidance effect of drivers based on integrated learning[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(6): 3 243–3 251.

[25] SUNBIN Y, KUMAGAI J, MORITA T, et al. Who to sacrifice? modeling the driver's dilemma[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2023, 178: DOI:10.1016/j.tra.2023.103872.

作者简介：朱彤（1977—），男，浙江诸暨人，博士，副教授，主要从事交通规划、交通安全与智能交通等方面的研究。E-mail: zhutong@chd.edu.cn。

