

中文引用格式:何杰,陈维雨,陈昊泽,等. 非机动车道路交通安全研究现状与发展趋势[J]. 中国安全科学学报,2026,36(2):52-65.

英文引用格式:HE Jie, CHEN Weiyu, CHEN Haoze, et al. Research status and prospect of road traffic safety of non-motorized vehicles[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 52-65.

非机动车道路交通安全研究现状与发展趋势^{*}

何杰 教授, 陈维雨^{**}, 陈昊泽, 方之茗, 秦鹏程

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189)

中图分类号:X951 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.1404

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(52072069)。

【摘要】 为提升非机动车道路交通安全、降低非机动车道路行驶风险,系统梳理非机动车道路交通安全领域的研究脉络,探索该领域的研究动态与发展方向。基于中国知网(CNKI)和科学网(WOS)核心库,检索2000年1月—2025年3月的相关文献,筛选得到448篇中文文献和860篇英文文献。运用CiteSpace软件,对文献进行关键词共现、聚类分析,进而归纳出核心研究热点与发展趋势。结果表明:该领域的研究规模显著增长,研究热点主要集中于非机动车骑行行为特征、道路交通事故成因、混合交通冲突机制以及与道路交通管理政策等4大主题。在未来研究中,需进一步拓展多元场景研究并深化多模态数据的融合应用;与此同时,计算机视觉与机器学习等技术正逐步成为推动该领域方法创新的关键支撑。

【关键词】 非机动车; 道路交通安全; 交通事故; 交通冲突; 共现网络

Research status and prospect of road traffic safety of non-motorized vehicles

HE Jie, CHEN Weiyu, CHEN Haoze, FANG Zhiming, QIN Pengcheng

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 211189, China)

Abstract: The situation of road traffic safety of non-motorized vehicles remains severe, and extensive research has been conducted in China and abroad. To comprehensively analyze the research status and prospect, 448 Chinese papers and 860 English papers from 2000 to 2025 were selected from China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science (WOS). Subsequently, the papers were analyzed for keyword co-occurrence and cluster by CiteSpace, and on this basis, the research hotspots and prospect were summarized. The results indicate that current research shows a significant growth trend, and primarily focuses on four areas: risk of riding behaviors, road traffic accidents, mixed traffic flow conflicts, and traffic management strategies. Future studies should expand into diverse scenarios and deepen the application of multimodal data, with methodological support of computer vision technologies and machine learning algorithms to enhance research capabilities.

Keywords: non-motorized vehicles; road traffic safety; traffic accidents; traffic conflicts; co-occurrence network

^{*} 文章编号:1003-3033(2026)02-0052-14; 收稿日期:2025-09-20; 修稿日期:2025-12-09

^{**} 通信作者:陈维雨(2001—),女,山东日照人,硕士研究生,研究方向为道路交通安全。E-mail:220233474@seu.edu.cn。

0 引言

绿色、低碳出行已成为城市交通发展的重要趋势^[1],非机动车(如自行车、电动自行车等)以其灵活、环保、经济等优势得到广泛应用。特别是随着电动自行车技术的不断进步和《电动自行车安全技术规范》^[2]等行业标准的全面实施,我国电动自行车的社会保有量迅速增长,截至2024年底已超过4亿辆。然而,非机动车规模化普及在提升出行效率的同时,也带来了明显的交通安全问题。统计数据显示^[3],2023年,我国非机动车交通事故达到3.86万起,事故伤亡占道路交通事故总量的15.72%,道路交通安全形势日益严峻。

近年来,非机动车交通安全已成为国内外交通安全领域的研究热点。相关研究多借鉴机动车交通安全研究的思路^[4],聚焦于交通事故、交通冲突及道路安全评价等方面。相关综述类文献也多集中于非机动车事故特征及其影响因素,缺乏对该领域的综合梳理。例如:PRATI等^[5]归纳了影响自行车事故的关键因素;POUDEL等^[6]从研究方法、影响因素等方面总结了环形交叉口自行车交通安全的研究进展;LI Yuping等^[7]系统梳理了中国自行车和电动车出行的风险因素,并提出了强制佩戴头盔、规范驾驶执照管理及建立安全骑行信用系统等对策。此外,随着科学知识图谱技术的发展,越来越多的研究利用可视化工具来揭示文献的知识结构、发展脉络及关联关系。ZOU Xin等^[8]利用VOSviewer软件对科学网(Web of Science, WOS)中道路交通安全的文献进行了共引分析、关键词共现及突发检测;韦漠^[9]则基于中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)中与道路交通事故影响因素相关文献,运用CiteSpace软件对该领域的研究热点与发展趋势进行了可视化分析。

综上所述,在非机动车出行需求方兴未艾、交通安全问题依然严峻的背景下,相关研究广泛开展,然而,针对非机动车交通安全领域的系统性综述研究仍较为缺乏。为此,笔者拟系统回顾2000年1月—2025年3月非机动车交通安全相关文献,结合文献计量学与科学知识图谱方法,运用CiteSpace进行关键词共现、聚类等可视化分析,进而识别该领域的研究热点,重点围绕非机动车骑行行为特征、道路交通事故成因、混合交通冲突机制及交通安全管理管理4个主题梳理研究现状,并展望未来研究方向,以期提升道路交通安全水平提供理论参考。

1 文献计量分析

1.1 数据来源

以CNKI数据库和WOS核心库为检索源,搜集2000年1月—2025年3月间关于非机动车道路交通安全研究的文献。其中,CNKI数据库中选取的主题为(交通安全+交通事故)*(非机动车+电动自行车+自行车),WOS核心库中的检索格式设置为(traffic safety * or traffic accident) and (Non-motor vehicle * or electric bicycle * or bicycle)。文中将领域限定为交通运输,逐一剔除与主题相关度较低的文献,最终从CNKI和WOS数据库中分别筛选出448篇与860篇文献,作为分析样本。

1.2 结果分析

1.2.1 文献数量分析

按发表年份统计文献数量,其分布结果如图1所示。由图1可知:文献发表数量整体呈上升趋势,反映出该领域的研究热度在持续增加,与近年来我国非机动车事故的增长态势一致。以2010年为界,该领域的发展可划分为2个阶段:2010年以前,2个数据库中的相关文献数量较少,年均发文量均低于20篇;2011年起,随着非机动车交通安全问题日益受到重视,该领域研究进入快速发展期,发文量显著增长,至2024年已达近170篇。

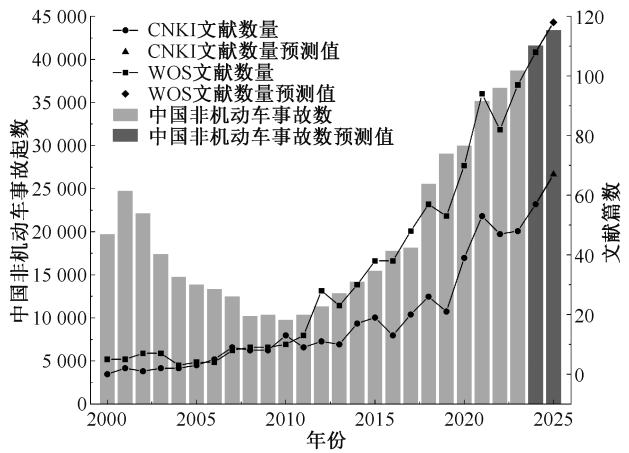
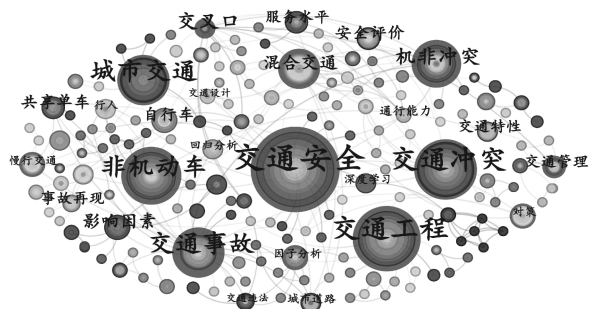


图1 2000—2025年非机动车道路交通安全研究趋势
Fig. 1 Trends of road traffic safety of Non-motorized vehicles from 2000 to 2025

1.2.2 研究热点分析

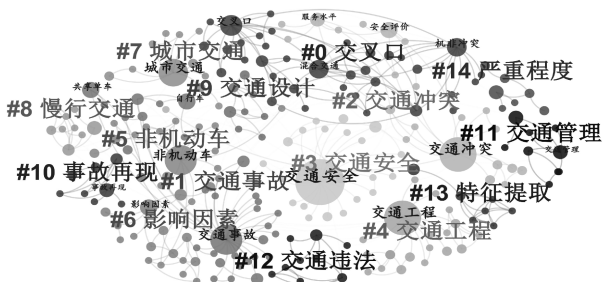
从文献计量学的角度,关键词是文章核心内容的高度凝练,能直观反映某一领域的研究重点与热点。文中运用CiteSpace软件,采用Top10%阈值提取算法,分别对CNKI和WOS这2个数据库中的文

在 CNKI 关键词共现网络中,共生成 196 个节点和 318 条连线,其中,非机动车、交通安全、交通冲突、交通事故、交通工程等关键词的频次与中心性较高,体现了该领域研究热点的集中性。除去非机动车、交通安全等基础性关键词外,交通事故、交通冲突与交通工程是主要的研究主题与重点研究内容。相比之下,WOS 关键词共现网络包含 246 个节点和 384 条连线,其中, Safety, Crashes, Bicycle 和 Injury 等关键词与 CNKI 的高频关键词具有一定对应性。此外 WOS 中还包括 Risk, Behavior, Cyclists 等更多关注骑行群体特征与行为机制的关键词,反映出不同数据库文献在研究视角与侧重点上存在差异。



关键词	频次	中心性	关键词	频次	中心性
交通安全	93	0.26	Safety	160	0.06
交通工程	57	0.23	Risk	113	0.12
交通冲突	54	0.15	Behavior	87	0.21

关键词	频次	中心性	关键词	频次	中心性
交通事故	37	0.58	Cyclists	84	0.08
非机动车	36	0.21	Crashes	74	0.30
城市交通	34	0.15	Injury	71	0.06
交叉口	17	0.27	Bicycle	69	0.10
机非冲突	15	0.22	Road safety	47	0.03
混合交通	12	0.25	Walking	44	0.11
影响因素	10	0.06	Accidents	43	0.17
共享单车	9	0.10	Models	43	0.27
安全评价	9	0.05	Drivers	42	0.12
交通管理	7	0.14	Severity	41	0.14



1) 非机动车骑行行为分析。非机动车的危险骑行行为与交通事故存在强相关性,该方向的研究关注非机动车骑行者的高风险行为特征及其形成机制,研究多结合风险感知、群体效应等理论,分析危险骑行行为的内在机制,从而为针对性的安全教育提供理论支持。

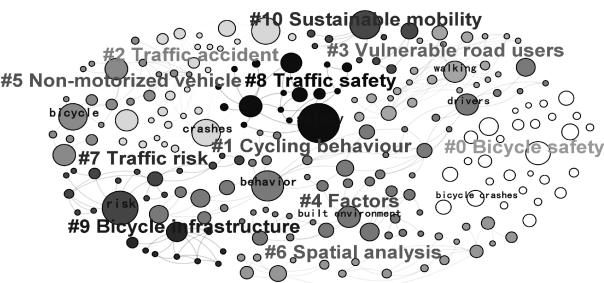


图 5 WOS 关键词聚类
Fig. 5 Keyword clustering of WOS

2) 非机动车交通事故研究。作为最直观的道路安全评价指标,该方向的研究侧重于事故特征分析、影响因素识别与事故预测建模等,旨在通过量化各类因素与事故频率、严重程度之间的关联,实现对交通事故的有效预防与精准管控。

3) 混合交通冲突评估。作为可代替性的道路安全评价指标,交通冲突被广泛应用于非机动车与机动车、行人交互场景的安全性评估。该方向的研究主要围绕冲突严重程度评估、预测以及道路安全评价,旨在为道路基础设施及交通组织优化提供依据。

4) 非机动车交通安全管理。非机动车交通安全管理需综合分析“人-车-路-环境”系统因素,旨在通过安全教育、交通工程、交通执法等措施来改善非机动车通行环境,提高道路交通安全水平。

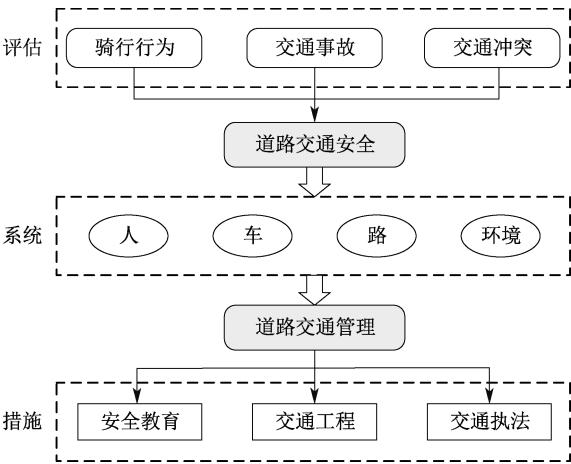


图 6 非机动车道路交通安全研究框架
Fig. 6 Research framework for road traffic safety of non-motorized vehicles

2 非机动车骑行行为研究

2.1 非机动车骑行特征分析

非机动车因其灵活性强且行为约束薄弱,骑行

者在现实中常出现攻击性驾驶、违规骑行等危险行为,是引发交通事故的重要诱因。基于问卷调查与实地观察的研究发现,非机动车骑行中普遍存在不佩戴头盔^[11]、超速^[12]、闯红灯^[13]、逆行^[14]、分心骑行^[15]及不按规定车道行驶^[16]等行为,相关代表性研究见表 2。DU Wei 等^[11]和 WU Changxu 等^[17]等分别对北京和江苏的非机动车行为进行观察,发现电动自行车闯红灯行为普遍,且头盔佩戴率偏低。LANGFORD 等^[18]基于全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 数据对比分析了美国共享电动自行车与自行车的骑行方向、骑行速度及信号遵守情况,结果表明:二者的骑行行为存在相似性且违规率均较高。SCHLEINITZ 等^[19]在德国的调查显示,自行车闯红灯的比率达到 16.3%。由此可见:非机动车违规行为普遍存在。由于电动车平均时速高于自行车,其超速、闯红灯等行为的发生频率更高,潜在风险更为突出^[20]。同时,智能手机的普及也加重了分心骑行的问题。研究表明:骑行过程中使用手机听音乐、接打电话、收发消息等行为,会影响骑行者的反应速度与车辆控制能力^[21]。此外,非机动车违规行为还表现出群体效应。BAI Lu 等^[22]发现骑行者闯红灯的倾向随群体规模的增加而有所下降;WANG Chen 等^[23]则指出电动自行车骑行者的群体性违规与其交通知识储备、风险态度及骑行经验密切相关,反映出加强安全教育的必要性。

作为新兴交通服务模式,共享单车(包括共享自行车和共享电动自行车)因其便捷、绿色的特点迅速普及,同时也带来了区别于传统个人自有车辆的风险特征。FISCHER^[24]和 GOODMAN^[25]等分别在美国和英国开展的观察研究表明:共享单车的头盔佩戴率显著低于个人骑行。WU Xiaolin 等^[26]对中国共享单车开展的危险骑行行为问卷调查显示,不佩戴头盔的现象极为普遍(97.6%),占用人行道(24.6%)和机动车道(6.1%)的行为也较为常见。此外,餐饮外卖、快递配送等行业需求也扩展了非机动车的应用场景,特别是受平台超时惩罚机制的影响,配送骑手为缩短时间常出现频繁超速、闯红灯等高风险行为。QIN Hua 等^[27]的调查显示,中国外卖骑手闯红灯(78.93%)和占用机动车道(61.76%)的现象尤为突出,进一步凸显了该群体在交通安全管理中的特殊性与紧迫性。

2.2 非机动车交互行为分析

非机动车在道路系统中具有交互对象多样、交互过程复杂的特点,加之骑行者个体差异显著,导致

表 2 非机动车风险骑行行为研究

Table 2 Research on risk riding behavior of non-motorized vehicles

文献	非机动车行为	研究方法	研究场景
[11]	载客、不佩戴头盔、闯红灯、逆行等	观察研究	苏州市交叉口电动车行为
[12][16]	不按规定车道骑行、超速行驶	基于轨迹数据	长沙市共享电动车行为
[13][17]	闯红灯	观察研究	南京、北京交叉口电动车和自行车行为
[15]	使用手机	试验研究	荷兰自行车行为
[18]	不按规定车道骑行、超速、违反交通信号灯等	基于 GPS 数据	美国共享自行车和电动车行为
[20]	超速行驶	试验研究	德国自行车和电动车行为
[26]	不佩戴头盔、占用人行道及机动车道等	观察研究	中国共享自行车行为
[28]	不佩戴头盔、闯红灯、使用手机等	观察研究	澳大利亚配送自行车与私人自行车行为

交互行为呈现较强的异质性。当前,针对非机动车的建模方法主要包括车辆横纵向运动模型、元胞自动机(Cellular Automata, CA)模型及社会力模型(Social Force Model, SFM)等^[29]。MOHAMMED 等^[30]基于横向与纵向距离、速度差等参数,对自行车的跟驰与超车行为进行了描述;刘启远等^[31]结合行驶时间预测、跟驰、变道与可接受间隙理论,构建了适用于机非混行路段的非机动车越线超车模型;LIU Zhenyuan 等^[32]基于 SFM 模型,建立了交叉口自行车的驾驶仿真模型,重点分析了自行车的让行与超车行为机制。此外,深度学习、强化学习等数据驱动方法也被逐步应用于非机动车轨迹预测与行为决策建模^[33-34]。

随着智能网联、车路协同与自动驾驶技术等的高速发展,智能交通环境下的机非交互安全研究成为热点,其中,非机动车与自动驾驶汽车(Autonomous Vehicle, AV)的交互行为受到重点关注。VLAKVELD 等^[35]通过视频试验发现,骑行者在交叉口与 AV 交互时更倾向于采取让行行为;HAMMAMI 等^[36]借助 Vissim 仿真工具并结合替代安全评估模型(Surrogate Safety Assessment Model, SSAM),对自行车与 AV 的交互行为进行了模拟,发现追尾冲突在所有冲突类型中出现的频率最高。目前,相关研究更加聚集于 AV 系统对非机动车的识别感知、行为预测与安全预警。BARNETT 等^[37]提出使用蓝牙接收器与视觉识别技术以提升对自行车的检测和定位能力;马社强等^[38]利用驾驶模拟器研究了非机动车闯红灯场景下驾驶人的接管行为特征,为智能驾驶安全设计提供了依据。此外,LI Xiaomeng 等^[39]和 BERGE 等^[40]还调查了非机动车骑行者与 AV 共享道路的意愿及接受度,为推动自动驾驶技术的实际应用提供了参考。

3 非机动车交通事故研究

3.1 交通事故数据采集及特征分析

交通事故数据是评估道路安全状况、识别安全问题的基础依据。早期研究多依赖交警部门事故记录或医疗机构数据,存在统计口径不一、信息完整性不足等局限。为提升交通事故数据质量,国际上已建立多个交通事故数据库,如欧盟的道路交通事故数据库(Community Data Base on Accidents on the Roads in Europe, CARE),美国的死亡事故报告系统(Fatality Analysis Reporting System, FARS)、德国的交通事故深度研究项目(German In-depth Accident Study, GIDAS)、澳大利亚的交通事故深度调查项目(Australian National Crash In-Depth Study, ANCIS)等,均通过深度调查方法系统采集事故信息。近年来,我国也逐步推进交通事故深度调查体系建设,国家车辆事故深度调查体系(National Automobile Accident In-Depth Investigation System, NAIS)及中国交通事故深入调查(China In-Depth Accident Study, CIDAS)等项目采用“全要素-全链条”采集模式,对交通事故信息进行全面的记录,为开展精准的道路交通安全分析与改善提供了重要的数据支撑。

在数据分析层面,现有研究多从时空分布、事故形态及伤害严重程度等维度分析非机动车的事故特征。如 HU Lin 等^[41]基于 CIDAS 中电动自行车侧面碰撞数据,建立 Logit 回归模型,证实非机动车碰撞速度与人员伤亡严重程度呈明显正相关;廖静倩等^[42]通过对 NAIS 中丁字路口交通事故进行层次聚类分析,发现右转机动车与直行非机动车的冲突是高危险事故场景之一。此外,部分研究聚焦于事故中骑车人伤害的影响机制^[43]。如王鑫等^[44]基于

NAIS 中的电动车碰撞案例,利用 PC-Crash 仿真平台进行事故重建,分析了车型、碰撞类型及碰撞速度对骑车人动力学响应及损伤程度的影响,结果指出,车速是导致骑车人头部损伤的关键因素。

3.2 事故影响因素与严重程度评估

非机动车事故是“人-车-路-环境”多因素耦合作用的结果,现有研究系统揭示了其影响因素及作用机制,具体总结见表 3。

表 3 非机动车事故影响因素及作用机制
Table 3 Factors and mechanisms influencing non-motorized vehicle accidents

要素	影响因素	作用机制
人 ^[45-46]	生理与心理特征,如年龄、性别、驾龄、风险感知、安全认知等	骑行者的生理与心理状态会影响骑行的决策及行为,如疲劳、分心或风险感知偏差可能导致危险行为发生,增加事故风险
车 ^[47]	车辆类型、行驶状态、安全状况等	车辆性能与状态直接影响行驶安全,如超速或关键部件(如制动、转向)故障等容易导致交通事故的发生
路 ^[48]	道路线形、路段类型、道路物理隔离设施等	道路应提供安全、可靠的行驶环境,路权混行、车流密度大的区域(如交叉口、缺乏隔离设施的路段等)容易引发交通冲突及事故
环境 ^[49]	天气、光照、环境、基础设施等	不良的气象条件(如雨、雪、雾等)及复杂的建成环境(如照明不足、路侧停车等)会影响骑行者的感知与判断能力,增加事故发生概率

交通事故严重程度的影响因素识别是当前研究的重点方向,相关研究普遍采用 Logit 回归、Probit 回归等模型,以量化各类影响因素与事故严重程度之间的关系,并在此基础上衍生出多种模型改进方法,相关研究文献总结见表 4。考虑到事故严重程度多具备有序多分类特征,WANG Tao 等^[50]运用广义有序 Logit 模型,识别出年龄、交互车辆类型及车辆故障等因素对电动自行车骑行者损伤严重程度具有显著影响。林庆丰等^[51]则通过多元有序 Logit 模型,系统揭示了人-车-路-环境等多维因素对事故责任认定及损害严重程度的作用机制。此外,为应对观测数据中存在的未观测异质性,混合 Logit 模型^[52]与随机参数 Logit 模型^[53]等方法也被广泛使用。ALNAWMASI 等^[54]基于佛罗里达自行车事故数据,采用随机参数 Logit 模型分析各因素在时间维度上对事故严重程度影响的稳定性;CHANG Fangrong 等^[55]构建了随机参数广义有序 Probit 模

型,发现水平曲线半径、路段限速、交通标志设置及光照条件等变量对电动自行车事故严重程度具有显著影响。

近年来,随着机器学习方法在交通安全领域的深入应用,决策树^[56]、贝叶斯网络^[57]、随机森林^[58]、轻量级梯度提升机(Light Gradient Boosting Machine, LightGBM)^[59]等模型被逐步用于事故严重程度的评估及预测中。YANG Zaili 等^[57]基于英国自行车事故数据,利用贝叶斯网络实现了关键风险因素的量化识别与事故严重度预测。SCARANO 等^[58]则利用随机森林和随机参数 Logit 模型,系统解析了人-车-路-环境等因素对自行车碰撞严重程度的影响。DING Hongliang 等^[60]提出结合随机森林的沙普利加解释法(Shapley Additive exPlanations, SHAP),并配合随机参数负二项回归模型在提高自行车碰撞频率预测准确度的同时,进一步解释了影响因素的作用机制。

表 4 非机动车事故严重程度影响因素研究
Table 4 Research on factors influencing severity of non-motorized vehicle accidents

文献	模型	因素					研究场景
		人	车	路	环境	事故	
[51]	有序 Logit 模型	√	√	√	√		机动车与非机动车交通事故
[52]	混合 Logit 模型	√		√	√		自行车与机动车事故
[54]	随机参数 Logit 模型	√	√	√	√		交叉口自行车事故
[55]	随机参数广义有序 Probit 模型	√	√	√	√	√	电动自行车事故
[57]	贝叶斯网络	√	√	√	√	√	自行车事故
[58]	随机森林及随机参数 Logit 模型	√	√	√	√		自行车事故
[59]	XGBoost、LightGBM 模型	√	√	√		√	电动自行车与机动车事故
[60]	随机森林及 SHAP 可解释模型	√		√	√		自行车事故

4 混合交通冲突研究

4.1 混合交通冲突判别与评估

在混合交通流中,不同交通方式在时空轨迹上的交叉与重叠易引发交通冲突,其中,交叉口作为交通流的交汇节点,是机非冲突的主要区域,其冲突形式主要包括:①左转非机动车与直行机动车的冲突,也是典型的通行权交叉场景;②直行非机动车与右转机动车的冲突,该场景下大型车辆的驾驶盲区可能加剧事故严重性^[61];③环形交叉口机非混行冲突,在缺乏物理隔离的条件下尤为显著。除交叉口外,路侧停车区域与公交站台也常因侵占非机动车通行空间而成为交通冲突高发区^[62]。CHEN Jingxu等^[63]发现,不同街道宽度的路侧停车区域发生的机非冲突类型存在差异,宽街以摩擦冲突为主,窄街则多为拥堵冲突。此外,BEITEL^[64]和 LIANG Xinyu^[65]等学者研究了慢行交通系统中行人与非机动车的冲突,指出交通流量与交通密度是造成行人与非机动车冲突的主要影响因素。

交通冲突的识别通常基于时空接近程度与避险行为强度,常用的判别指标见表5。

表5 交通冲突判别指标

Table 5 Traffic conflict discrimination index

类别	指标
避险行为指标	是否存在避险行为,如转向、刹车等
空间/时间指标	冲突时间(Time to collision, TTC) 后侵入时间(Post encroachment time, PET) 时间优势(Time Advance, TA) 修正碰撞时间(Modified Time To Collision, MTTC) 停车距离比例(Proportion of Stopping Distance, PSD)
与机动车运动状态相关指标	安全减速度(Deceleration To Safety Time, DST) 避免碰撞的减速率(Deceleration rate to avoid the crash, DRAC)

在非机动车冲突研究中,常采用TTC、PET等指标量化冲突的严重程度,如VAN等^[66]针对渠化右转车道场景,采用TTC和TA作为判别指标,发现赋予非机动车优先通行权可有效降低冲突等级。部分研究还致力于构建新的冲突指标来评估冲突严重程度,如王耀东等^[67]结合机动车的选择通过行为,提出将冲突时间差(Time Difference to Collision, TDTC)阈值小于0.66 s作为机非严重冲突的判定

标准;高志军等^[68]则综合冲突距离、速度与角度等参数,建立了非机动车冲突严重程度评估模型。此外,聚类方法也被应用于冲突等级划分,如LIU Jianrong等^[69]基于TTC、PET等指标,采用均值聚类实现了非机动车冲突严重程度的等级评估。

近年来,结合计算机视觉技术与轨迹预测技术的发展,基于动态识别的交通冲突分析方法为交通安全评估提供了新途径。龙科军等^[70]通过分析右转机动车与直行非机动车的轨迹数据,选用MTTC与TDTC指标改进了传统TTC判别方法,并指出原有方法可能低估实际冲突水平。CHAI等^[71]则基于YOLOv3模型提取无信号交叉口轨迹数据,开发了二轮车的交通冲突识别算法,统计结果显示,电动自行车涉及冲突的比例更高。XU Zheng等^[72]利用仿真生成了自行车-机动车交互数据,发现车辆加速度变化是引发冲突的主要原因,但高冲突概率场景并不必然导致实际碰撞事故。

4.2 基于交通冲突的道路安全评价

交通冲突技术作为非机动车交通安全评价的替代方法,已成为道路安全研究的重要手段。BAI Lu等^[73]基于广义线性回归模型,发现车速、速度差异及交通流量等因素会显著增加两轮车的追尾冲突风险。KONG Dexue等^[74]采用贝叶斯混合Logit模型,量化评估了无信号环形交叉口中电动自行车冲突严重程度的影响因素,研究结果显示,入口区域冲突风险最高,且车道数增加会显著提升严重冲突发生的概率。宋卓康^[75]根据道路环境、交通流特征、违规行为与交通冲突等多维指标,结合熵权法的逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)构建了信号交叉口机非冲突的评价模型。此外,部分研究聚焦于交通冲突频率与严重程度的建模与预测。马社强等^[76]基于广义线性混合模型(Generalized Linear Mixed Model, GLMM),对存在违规骑行行为的电动自行车交通冲突频次进行了预测。巫诚诚等^[77]则结合视域分析方法与随机森林算法,构建了交叉口中非机动车冲突易发点的空间预测模型,实现了对具体冲突点位及其严重程度的预测。任丽丽等^[78]提出了基于遗传算法优化的BP神经网络和支持向量回归的组合预测模型(Support Vector Regression-Genetic Algorithm-Back Propagation, SVR-GA-BP),该模型有效提升了无信号环形交叉口机非冲突的预测精度。

5 非机动车交通管理研究

5.1 驾驶人管理措施

从非机动车骑行者的安全视角出发,可以从个体防护与行为规范2个层面实施安全保障措施。在个体防护方面,重点在于强化头盔、照明灯及反光条等保护装备的配置与使用。研究表明:头盔可以有效降低事故中头部损伤的风险^[79],因此,推动头盔的强制佩戴政策,并配合完善非机动车基础设施、加强骑行者安全教育,能够多层次保护骑行者安全。此外,夜间骑行时穿戴反光衣或使用照明灯,可以显著提升骑行者可视性,减少夜间事故的发生^[80]。在行为规范方面,则应依托安全教育与严格交通执法等手段,有效约束骑行者的危险骑行行为,提高骑行者的交通安全意识。TRUONG等^[81]提出,应将安全教育与宣传引导相结合,以降低电动自行车骑行中因使用手机而引发的安全风险。同时,布设交通摄像头与加强交通执法,可以有效抑制交叉口非机动车闯红灯等违规行为^[82],从而降低骑行风险。

5.2 交通工程措施

从交通工程视角来看,提升非机动车安全主要通过完善基础设施和优化交通组织2方面的来实现。设置专用自行车道已被证实对骑行安全具有积极影响^[48],能够有效降低交通冲突和碰撞风险。因此,完善非机动车基础设施,如设立非机动车专用道、设置机非隔离设施等,是保障非机动车安全通行的重要基础。YAN Xinping等^[83]建议通过设置中央分隔带明确区分机动车道与自行车道,并在自行车交通流量较大路段进行限速管控。此外,非机动车道的设计与布局也需进一步优化,MADSEN等^[84]对比分析了信号交叉口5种自行车设施布局的冲突特征,发现凹入式自行车道的安全水平更高。张骏等^[85]提出了一种机非车道分隔与车道平面抬升设计的改进方案,以缓解机非混行带来的安全隐患。

针对交叉口混合交通引发的冲突,可通过优化交通组织设计予以改善。宋浪等^[86]通过优化交叉口几何布局,提出一种左转非机动车过街的设计方案,有效减少了左转非机动车对直行机动车的干扰。李英帅等^[87]聚焦公交站设施优化对机非冲突的缓解效果,研究结果显示,当非机动车道的宽度为3.5~4.0 m、直线式单泊位公交停靠站长度为16~18 m时,冲突发生率最低。ZHANG Chenxiao等^[88]调查了电动自行车与右转重型车辆的交通冲突,发现设

置右转弯警示设施与监控摄像头有助于降低冲突概率,提升非机动车通行安全。

6 未来发展趋势

结合上述分析,非机动车道路交通安全研究已在多个方面取得显著进展,未来该领域的研究可重点围绕以下4个方向开展:

1) 多元场景下的非机动车骑行行为分析。当前研究聚焦于骑行群体的风险行为特征及其微观仿真建模,未来的研究应逐步向多元主体交互与复杂场景2个维度拓展。在交互对象方面,研究范围需逐步从机非交互拓展至行人、自动驾驶车辆等多元场景,并加强交互行为数据的系统采集,深化车辆感知、决策与主动预警技术研究。同时,应重视高风险群体的行为画像构建,结合外卖订单数据、共享单车轨迹数据等,揭示危险行为与事故风险之间的内在关系。在复杂场景方面,现有研究多集中于交叉口与主干道等典型区域,未来应进一步拓展至农村地区、狭窄通道、城市支路等异质化场景,系统探究复杂场景下的非机动车骑行安全机制。

2) 数据驱动的非机动车交通事故研究。当前研究主要基于事故数据挖掘事故特征与关键影响因素,未来研究应以数据质量提升与事故致因深度分析为核心,进一步完善道路交通事故数据库,推动数据采集标准化与流程规范化,提升数据质量,以解决当前数据碎片化与质量不一的问题。在事故致因分析方面,未来应深化事故致因多维分析,结合数学模型与机器学习算,构建“人-车-路-环境”全要素系统框架,量化各因素对事故严重程度的影响机制,为交通安全治理提供决策依据。

3) 基于混合交通冲突的道路安全评价。现有研究主要通过交通冲突评估混合交通环境下非机动车的交通安全水平。未来应更重视骑行者个体行为特征对冲突形成的作用机制,将骑行行为特征纳入安全评价体系,量化其对交通冲突的影响程度。此外,随着轨迹数据获取技术的成熟,交通冲突自动化识别成为重要发展方向。未来可进一步结合目标检测、多目标跟踪、轨迹预测等计算机视觉技术与深度学习算法,构建高精度的冲突识别模型,提升安全评价的实时性与客观性。

4) 多维融合的非机动车交通管理措施。当前管理措施多集中于骑行者行为规范与交通工程优化2个层面。未来在行为规范方面,研究可利用计算机视觉技术实现闯红灯、逆行、不佩戴头盔等违规行

为的自动检测与识别,提升执法效率与管理覆盖。在工程优化方面,应强化交通设计精细化与设施智能化,优化基础设施与交通组织,实现机非通行权在时空上的高效协同。此外,应推动“教育-执法-工程-技术”多维度措施的协同配合,构建系统化、智能化的非机动车交通安全治理体系。

7 结 论

1) 目前,非机动车道路交通安全研究呈现显著的增长态势。基于关键词共现与聚类分析结果,该领域的研究热点主要集中于非机动车骑行行为、道路交通事故、混合交通冲突以及交通安全管理 4 个

方向。

2) 上述 4 个研究方向之间形成“行为风险→事故机制→冲突机制→治理体系”的递进逻辑链条,体现了非机动车交通安全研究兼具系统性与复杂性的学科特征。其中,非机动车交通事故分析与混合交通冲突识别是当前的研究重点。

3) 非机动车道路交通安全研究正朝着多元化与智能化的方向演进。随着智能交通技术的快速发展与非机动车群体的日益多元,研究场景不断丰富。同时,视频数据、轨迹信息等新型数据源以及计算机视觉技术、机器学习算法等先进方法,也为法领域的持续研究提供了有力的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 绿色交通“十四五”发展规划(交规划发[2021]104号)[Z]. [2025-06-23]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220121_3637584.html.
- [2] GB17761—2018, 电动自行车安全技术规范[S].
GB17761—2018, Safety technical specification for electric bicycle[S].
- [3] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2024:765.
- [4] 吕能超, 王玉刚, 周颖, 等. 道路交通安全分析与评价方法综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36(4):183-201.
LYU Nengchao, WANG Yugang, ZHOU Ying, et al. Review of road traffic safety analysis and evaluation methods[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(4):183-201.
- [5] PRATI G, PUCHADES V M, DE A M, et al. Factors contributing to bicycle-motorized vehicle collisions: a systematic literature review[J]. Transport Reviews, 2018, 38(2):184-208.
- [6] POUDEL N, SINGLETON P A. Bicycle safety at roundabouts: a systematic literature review[J]. Transport Reviews, 2021, 41(5):617-642.
- [7] LI Yuping, CHEN Qi, MA Qiang, et al. Injuries and risk factors associated with bicycle and electric bike use in China: a systematic review and meta-analysis[J]. Safety Science, 2022, 152:DOI:10.1016/j.ssci.2022.105769.
- [8] ZOU Xin, YUE Wenlong, HAI Lewu. Visualization and analysis of mapping knowledge domain of road safety studies[J]. Accident Analysis and Prevention, 2018, 118:131-145.
- [9] 韦漠. 基于 CiteSpace 的我国道路交通事故影响因素文献计量与可视化知识图谱分析[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(2):17-33.
WEI Mo. Bibliometric and visual knowledge graph analysis of road traffic accident influencing factors in China based on CiteSpace[J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(2):17-33.
- [10] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2):242-253.
CHEN Yue, CHEN Chaomei, LIU Zeyuan, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2):242-253.
- [11] DU Wei, YANG Jie, POWIS B, et al. Understanding on-road practices of electric bike riders: an observational study in a developed city of China[J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 59:319-326.
- [12] ZHANG Xiaolong, ZHAO Xiaohua, BIAN Yang, et al. Interactive effects analysis of road, traffic, and weather characteristics on shared e-bike speeding risk: a data-driven approach[J]. Accident Analysis and Prevention, 2024, 207:DOI:10.1016/j.aap.2024.107755.
- [13] GUO Yanyong, LI Zhibin, WU Yao, et al. Exploring unobserved heterogeneity in bicyclists' red-light running behaviors at different crossing facilities[J]. Accident Analysis and Prevention, 2018, 115:118-127.
- [14] TAIT C, BEECHAM R, LOVELACE R, et al. Contraflows and cycling safety: evidence from 22 years of data involving

- 508 one-way streets[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2023, 179:DOI:10.1016/j.aap.2022.106895.
- [15] DE W D, LEWIS-EVANS B, JELIJS B, et al. The effects of operating a touch screen smartphone and other common activities performed while bicycling on cycling behaviour[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, 22:196–206.
- [16] ZHANG Xiaolong, BIAN Yang, ZHAO Xiaohua, et al. The association of road, traffic, and environmental factors with wrong-way riding behavior on shared e-bikes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 470:DOI:10.1016/j.jclepro.2024.143294.
- [17] WU Changxu, YAO Lin, ZHANG Kan. The red-light running behavior of electric bike riders and cyclists at urban intersections in China: an observational study[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2012, 49:186–192.
- [18] LANGFORD B C, CHEN Jiaoli, CHERRY C R. Risky riding: naturalistic methods comparing safety behavior from conventional bicycle riders and electric bike riders[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2015, 82:220–226.
- [19] SCHLEINITZ K, PETZOLDT T, KROELING S, et al. (E-)Cyclists running the red light: the influence of bicycle type and infrastructure characteristics on red light violations[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2019, 122:99–107.
- [20] SCHLEINITZ K, PETZOLDT T, FRANKE-BARTHOLDT L, et al. The german naturalistic cycling study-comparing cycling speed of riders of different e-bikes and conventional bicycles[J]. *Safety Science*, 2017, 92:290–297.
- [21] JIANG Kang, YANG Zhiwei, FENG Zhongxiang, et al. Effects of using mobile phones while cycling: a study from the perspectives of manipulation and visual strategies[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 83:291–303.
- [22] BAI Lu, SZE N N. Red light running behavior of bicyclists in urban area: effects of bicycle type and bicycle group size[J]. *Travel Behaviour and Society*, 2020, 21:226–234.
- [23] WANG Chen, XU Chengcheng, XIA Jingxin, et al. The effects of safety knowledge and psychological factors on self-reported risky driving behaviors including group violations for e-bike riders in China[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2018, 56: 344–353.
- [24] FISCHER C M, SANCHEZ C E, PITTMAN M, et al. Prevalence of bicycle helmet use by users of public bikeshare programs[J]. *Annals of Emergency Medicine*, 2012, 60(2):228–231.
- [25] GOODMAN A, GREEN J, WOODCOCK J. The role of bicycle sharing systems in normalising the image of cycling: an observational study of London cyclists[J]. *Journal of Transport and Health*, 2014, 1(1):5–8.
- [26] WU Xiaolin, XIAO Wangxin, DENG Conghui, et al. Unsafe riding behaviors of shared-bicycle riders in urban China: a retrospective survey[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2019, 131:1–7.
- [27] QIN Hua, WEI Yuhao, ZHANG Qidi, et al. An observational study on the risk behaviors of electric bicycle riders performing meal delivery at urban intersections in China[J]. *Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 79:107–117.
- [28] OVIEDO-TRESPALACIOS O, RUBIE E, HAWORTH N. Risky business: comparing the riding behaviours of food delivery and private bicycle riders [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2022, 177: DOI: 10.1016/j.aap.2022.106820.
- [29] TWADDLE H, SCHENDZIELORZ T, FAKLER O. Bicycles in urban areas review of existing methods for modeling behavior[J]. *Transportation Research Record*, 2014, 2434:140–146.
- [30] MOHAMMED H, BIGAZZI A Y, SAYED T. Characterization of bicycle following and overtaking maneuvers on cycling paths[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 98:139–151.
- [31] 刘启远, 孙剑, 田野, 等. 机非交互路段非机动车越线超车行为建模与仿真[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2019, 47(11):1 585–1 592, 1 599.
- LIU Qiyan, SUN Jian, TIAN Ye, et al. Modeling and simulation of cross-line overtaking behavior of non-motorized vehicles at mixed flow road section[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2019, 47(11):1 585–1 592, 1 599.
- [32] LIU Zhenyuan, ZHONG Naiting, CHEN Junyi, et al. A modeling method for two-dimensional two-wheeler driving behavior during severe conflict interaction at intersections[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2024, 205:DOI:10.1016/j.aap.2024.107668.
- [33] GOLDHAMMER M, KOHLER S, ZERNETSCH S, et al. Intentions of vulnerable road users-detection and forecasting by

- means of machine Learning[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(7):3 035–3 045.
- [34] LI Jianqiang, NI Ying, SUN Jian. A two-layer integrated model for cyclist trajectory prediction considering multiple interactions with the environment [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 155: DOI: 10.1016/j.trc.2023.104304.
- [35] VLAKVELD W, VAN D K S, HAGENZIEKER M P. Cyclists' intentions to yield for automated cars at intersections when they have right of way: results of an experiment using high-quality video animations[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2020, 71:288–307.
- [36] HAMMAMI A, BORSOS A. Safety of cyclists interacting with autonomous vehicles: a combined microscopic simulation and SSAM analysis[J]. *Travel Behaviour and Society*, 2024, 36: DOI:10.1016/j.tbs.2024.100805.
- [37] BARNETT J, GIZINSKI N, MONDRAGON-PARRA E, et al. Automated vehicles sharing the road: surveying detection and localization of pedalcyclists[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2021, 6(4):649–664.
- [38] 马社强, 张键源, 陈发城, 等. 非机动车闯红灯场景下辅助驾驶汽车驾驶人接管行为研究[J]. *北京理工大学学报*, 2025, 45(5):493–502.
- MA Sheqiang, ZHANG Jianyuan, CHEN Facheng, et al. Driver takeover behavior of advanced driver assistance vehicles under scenarios of red light running by non-motorized vehicles[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2025, 45(5):493–502.
- [39] LI Xiaomeng, AFGHARI A P, OVIEDO-TRESPALACIOS O, et al. Cyclists perception and self-reported behaviour towards interacting with fully automated vehicles[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2023, 173: DOI:10.1016/j.tra.2023.103713.
- [40] BERGE S H, DE W J, DODOU D, et al. Understanding cyclists' perception of driverless vehicles through eye-tracking and interviews[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2025, 109:399–420.
- [41] HU Lin, HU Xinting, WANG Jie, et al. Casualty risk of e-bike rider struck by passenger vehicle using China in-depth accident data[J]. *Traffic Injury Prevention*, 2020, 21(4):283–287.
- [42] 廖静倩, 张道文, 高立, 等. 基于 NAIS 事故数据聚类的丁字路口危险场景研究[J]. *汽车安全与节能学报*, 2021, 12(3):336–345.
- LIAO Jingqian, ZHANG Daowen, GAO Li, et al. Research on dangerous scene of T-intersection based on NAIS database accident data clustering[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2021, 12(3):336–345.
- [43] 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.
- [44] 王鑫, 张道文, 冉启林, 等. 电动自行车骑车人与汽车碰撞的动力学响应研究[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(6):152–156.
- WANG Xin, ZHANG Daowen, RAN Qilin, et al. Cyclists' dynamics response to car-electric bicycle crash[J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(6):152–156.
- [45] FYHRI A, JOHANSSON O, BJORNSKAU T. Gender differences in accident risk with e-bikes-survey data from Norway[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2019, 132: DOI:10.1016/j.aap.2019.07.024.
- [46] TANG Tianpei, GUO Yuntao, ZHOU Xizhao, et al. Understanding electric bike riders' intention to violate traffic rules and accident proneness in China[J]. *Travel Behaviour and Society*, 2021, 23:25–38.
- [47] HUANG Feihui. Exploring the factors influencing e-bike road safety: a survey study based on the experiences of Taiwanese cyclists[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2022, 89: DOI:10.1016/j.ergon.2022.103292.
- [48] MORRISON C N, THOMPSON J, KONDO M C, et al. On-road bicycle lane types, roadway characteristics, and risks for bicycle crashes[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2019, 123:123–131.
- [49] 王菁, 董春娇, 李鹏辉, 等. 考虑建成环境的电动自行车事故严重程度致因分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2024, 24(1):179–187.
- WANG Jing, DONG Chunjiao, LI Penghui, et al. Causal analysis of e-bike traffic accident severity considering built environment[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2024, 24(1):179–187.
- [50] WANG Tao, CHEN Jun, WANG Chen, et al. Understand e-bicyclist safety in China: crash severity modeling using a

- generalized ordered logit model [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10 (6): DOI: 10.1177/1687814018781625.
- [51] 林庆丰, 邓院昌, 胡继华. 机非交通事故中驾驶员过错和事故严重程度影响因素的 Logistic 回归分析[J]. *安全与环境工程*, 2019, 26(5): 187-193.
- LIN Qingfeng, DENG Yuanchang, HU Jihua. Logistic regression analysis of driver's fault and accident severity in motor-bicycle accidents[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2019, 26(5): 187-193.
- [52] KLASSEN J, EL-BASYOUNY K, ISLAM M T. Analyzing the severity of bicycle-motor vehicle collision using spatial mixed logit models: a city of Edmonton case study[J]. *Safety Science*, 2014, 62: 295-304.
- [53] BEHNOOD A, MANNERING F. Determinants of bicyclist injury severities in bicycle-vehicle crashes: a random parameters approach with heterogeneity in means and variances[J]. *Analytic Methods in Accident Research*, 2017, 16: 35-47.
- [54] ALNAWMASI N, ALI Y, YASMIN S. Exploring temporal instability effects on bicyclist injury severities determinants for intersection and non-intersection-related crashes[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2024, 194: DOI: 10.1016/j.aap.2023.107339.
- [55] CHANG Fangrong, HAQUE M M, YASMIN S, et al. Crash injury severity analysis of e-bike riders: a random parameters generalized ordered probit model with heterogeneity in means[J]. *Safety Science*, 2022, 146: DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105545.
- [56] WANG Zhengwu, HUANG Shuai, WANG Jie, et al. Risk factors affecting crash injury severity for different groups of e-bike riders: a classification tree-based logistic regression model[J]. *Journal of Safety Research*, 2021, 76: 176-183.
- [57] YANG Zaili, YANG Zhisen, SMITH J, et al. Risk analysis of bicycle accidents: a Bayesian approach[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2021, 209: DOI: 10.1016/j.res.2021.107460.
- [58] SCARANO A, RICCARDI M R, MAURIELLO F, et al. Injury severity prediction of cyclist crashes using random forests and random parameters logit models [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2023, 192: DOI: 10.1016/j.aap.2023.107275.
- [59] 魏雯, 杜雨萌, 董傲然, 等. 基于 CIDAS 数据与集成学习的电动两轮车骑行者伤害致因分析[J]. *交通信息与安全*, 2022, 40(2): 45-52, 62.
- WEI Wen, DU Yumeng, DONG Aoran, et al. An analysis of factors affecting injury of electric two-wheeler riders based on CIDAS data and ensemble learning[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2022, 40(2): 45-52, 62.
- [60] DING Hongliang, WANG Ruiqi, CHEN Tiantian, et al. A hybrid approach for modeling bicycle crash frequencies: Integrating random forest based SHAP model with random parameter negative binomial regression model[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2024, 208: DOI: 10.1016/j.aap.2024.107778.
- [61] KIRCHER K, AHLSTROM C. Truck drivers' interaction with cyclists in right-turn situations[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2020, 142: DOI: 10.1016/j.aap.2020.105515.
- [62] 沈金星, 赵聪. 路侧直线式公交站台对非机动车行驶安全的影响[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(6): 1908-1915.
- SHEN Jinxing, ZHAO Cong. Influence of curbside bus stops on the driving safety of non-motorized vehicles[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(6): 1908-1915.
- [63] CHEN Jingxu, LI Zhibin, WANG Wei, et al. Evaluating bicycle-vehicle conflicts and delays on urban streets with bike lane and on-street parking[J]. *Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research*, 2018, 10(1): 1-11.
- [64] BEITEL D, STIPANCIC J, MANAUGH K, et al. Assessing safety of shared space using cyclist-pedestrian interactions and automated video conflict analysis[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 65: 710-724.
- [65] LIANG Xinyu, MENG Xianghai, ZHENG Lai. Investigating conflict behaviours and characteristics in shared space for pedestrians, conventional bicycles and e-bikes[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2021, 158: DOI: 10.1016/j.aap.2021.106167.
- [66] VAN HAPEREN W, DANIELS S, CEUNYNCK D T, et al. Yielding behavior and traffic conflicts at cyclist crossing facilities on channelized right-turn lanes [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*,

2018, 55:272–281.

- [67] 王耀东, 陈雨人. 考虑驾驶员选择通过行为的机非严重冲突判别[J]. 交通信息与安全, 2015, 33(4):61–68.
WANG Yaodong, CHEN Yuren. A method of identifying serious conflicts of motor and non-motor vehicles during passing maneuvers[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2015, 33(4):61–68.
- [68] 高志军, 马路, 闫学东. 城市交叉口非机动车交通冲突及其严重程度模型[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3):31–36.
GAO Zhijun, MA Lu, YAN Xuedong. Research on models for traffic conflicts involving non-motor vehicles at city intersection and their severity[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3):31–36.
- [69] LIU Jianrong, CHEN Xinyu. Analysis of pedestrian-two-wheeler conflicts at green light digital countdown signals: a random parameter ordered logit model approach[J]. Accident Analysis and Prevention, 2024, 206:DOI:10.1016/j.aap.2024.107716.
- [70] 龙科军, 张燕, 邹志云, 等. 基于车辆轨迹的信号交叉口机非冲突判别[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(1):69–74.
LONG Kejun, ZHANG Yan, ZOU Zhiyun, et al. Vehicle and non-motorized vehicle traffic conflict recognition at signalized intersection based on vehicle trajectory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(1):69–74.
- [71] CHAI Hao, ZHANG Zhipeng, HU Hao, et al. Trajectory-based conflict investigations involving two-wheelers and cars at non-signalized intersections with computer vision[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 230:DOI:10.1016/j.eswa.2023.120590.
- [72] XU Zheng, ZHENG Nan, LOGAN D B, et al. Assessing bicycle-vehicle conflicts at urban intersections utilizing a VR integrated simulation approach[J]. Accident Analysis and Prevention, 2023, 191:DOI:10.1016/j.aap.2023.107194.
- [73] BAI Lu, CHAN Chingyao, LIU Pan, et al. Identifying factors affecting the safety of mid-block bicycle lanes considering mixed 2-wheeled traffic flow[J]. Traffic Injury Prevention, 2017, 18(7):761–766.
- [74] KONG Dexue, ZHANG Cunbao, CHEN Feng, et al. Evaluating e-bike safety at unsignalized roundabouts using a Bayesian mixed logit model[J]. Accident Analysis and Prevention, 2025, 215:DOI:10.1016/j.aap.2025.108004.
- [75] 宋卓康. 基于机非冲突的信号交叉口交通安全评价[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
SONG Zhuokang. Traffic safety evaluation at signalized intersections based on conflict between motor vehicles and non-motor vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [76] 马社强, 陆育霄, 董春娇, 等. 电动自行车违规行为严重程度分析与预测[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11):172–178.
MA Sheqiang, LU Yuxiao, DONG Chunjiao, et al. Severity analyses and prediction of e-bikes violated behaviors[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11):172–178.
- [77] 巫诚诚, 陈大伟. 交叉口非机动车冲突易发点空间预测模型[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8):165–171.
WU Chengcheng, CHEN Dawei. Spatial prediction model for risk points of non-motor vehicle conflict in intersections[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(8):165–171.
- [78] 任丽丽, 吴江玲, 郭旭亮, 等. 无信号环形交叉口机非冲突机器学习预测方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31):13 592–13 600.
REN Lili, WU Jiangling, GUO Xuliang, et al. Traffic conflict prediction of motorized and non-motorized vehicles at unsignalized round about using machine learning [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23 (31):13 592–13 600.
- [79] ALNAWMASI N, ALOGAILI A, RANGASWAMY R, et al. A temporal statistical assessment of the effectiveness of bicyclist safety helmets in mitigating injury severities in vehicle/bicyclist crashes[J]. Analytic Methods in Accident Research, 2024, 43:DOI:10.1016/j.amar.2024.100338.
- [80] WOOD J M, BLACK A A, TYRRELL R A. Increasing the conspicuity of cyclists at night by using bicycle lights and clothing to highlight their biological motion to oncoming drivers[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2022, 90:326–332.
- [81] TRUONG L T, NGUYEN H T T, DE GRUYTER C. Mobile phone use among motorcyclists and electric bike riders: a case study of Hanoi, Vietnam[J]. Accident Analysis and Prevention, 2016, 91:208–215.

[82] LYU Huitao, LI Haojie, SZE N N, et al. The impacts of non-motorized traffic enforcement cameras on red light violations of cyclists at signalized intersections[J]. Journal of Safety Research, 2022, 83:310-322.

[83] YAN Xinping, MA Ming, HUANG Helai, et al. Motor vehicle-bicycle crashes in Beijing: irregular maneuvers, crash patterns, and injury severity[J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43(5):1 751-1 758.

[84] MADSEN T K O, LAHRMANN H. Comparison of five bicycle facility designs in signalized intersections using traffic conflict studies[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2017, 46:438-450.

[85] 张骏, 郑楠, 黄崇轩. 城市中心区非机动车系统设计优化与探索[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(6): 1 218-1 231.

ZHANG Jun, ZHENG Nan, HUANG Chongxuan. Optimal-design and exploration for non-motor vehicle system in urban center[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(6):1 218-1 231.

[86] 宋浪, 王健, 杨滨毓, 等. 连续流交叉口左转非机动车交通组织创新设计[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(1):225-233,242.

SONG Lang, WANG Jian, YANG Binyu, et al. Innovative design of transportation organization for left-turn non-motor vehicles at continuous flow intersection[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(1):225-233,242.

[87] 李英帅, 马泽超, 王雯婧, 等. 考虑非机动车影响的直线式单泊位公交停靠站设置优化[J]. 交通信息与安全, 2021, 39(5):137-143.

LI Yingshuai, MA Zechao, WANG Wenjing, et al. Optimization of single-berth curbside bus stops considering impacts of non-motorized vehicles[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021, 39(5):137-143.

[88] ZHANG Chenxiao, MA Yongfeng, SAYED T, et al. Exploring the impact of right-turn safety measures on e-bike-heavy vehicle conflicts at signalized intersections[J]. Accident Analysis and Prevention, 2024, 206: DOI: 10.1016/j.aap.2024.107722.



作者简介：何杰（1973—）,男,安徽潜山人,博士,教授,博士生导师,主要从事道路交通安全分析与评价等方面的研究。E-mail: hejie@seu.edu.cn。