

回归模型在交通事故与行车风险分析中的应用综述

柳本民, 李诚信*, 胡佳欣, 王鹏飞

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为提升道路交通安全, 准确评估事故致因和行车风险因素至关重要。本综述旨在回顾和评估近年来应用于该领域的回归模型, 使用 VOSviewer 软件对中外文献进行计量分析, 以揭示该领域研究的趋势和热点。深入探讨一般线性模型、广义线性模型 (GLM)、广义加性模型 (GAM) 和非线性模型在风险因素分析中的应用, 尤其是详细讨论 Logit 回归模型、Probit 回归模型和计数数据模型 (如泊松模型和负二项模型) 在实际数据集中的表现和适用性。此外, 针对数据中多零值情况还探讨零膨胀模型 (ZIP 和 ZINB)、多层膨胀模型、Lindley 模型以及 Tobit 模型在处理样本选择偏误中的应用。特别强调不同模型对数据特性的处理能力, 并基于模型特性和适用场景提供了科学的模型选择指导, 旨在为研究人员在面对具体的交通安全问题时选择合适的回归分析模型提供参考。

关键词: 交通事故致因; 道路行车风险; 回归模型; 交通安全; VOSviewer 软件

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1671-3400(2024)06-0068-07

A Comprehensive Review of the Application of Regression Models in Traffic Accident and Driving Risk Analysis

LIU Benmin, LI Chengxin*, HU Jiaxin, WANG Pengfei

(Key Laboratory of Road&Traffic Engineering Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Accurate evaluation of accident causes and driving risk factors is crucial for improving road traffic safety. This review aims to assess regression models applied in this field over recent years. Using VOSviewer for bibliometric analysis of both Chinese and international literature, the study reveals research trends and hotspots. It explores the application of general linear models, generalized linear models (GLM), generalized additive models (GAM), and nonlinear models in analyzing risk factors. Special attention is given to Logit regression, Probit regression, and count data models (such as Poisson and negative binomial models), evaluating their performance and applicability on real-world datasets. Additionally, the review addresses the issue of excess zeros in data, examining the application of zero-inflated models (ZIP and ZINB), hurdle models, Lindley models, and Tobit models in managing sample selection bias. Emphasizing the capability of different models to handle various data characteristics, the review provides scientific guidance on model selection based on their properties and applicable scenarios, aiming to assist researchers in selecting suitable regression analysis models for specific traffic safety issues.

Keyword: Causative factors of traffic accidents; Road traffic risk; Regression models; Traffic safety; VOSviewer

收稿日期: 2024-07-09

项目资助: 国家重点研发计划重点专项 (2017YFC0803902); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (22120230078); 利用世行贷款云南公路资产管理项目 (HAMP ~ CS-05)

第一作者简介: 柳本民 (1968-), 女, 汉族, 副教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向: 道路安全与环境。

*通信作者简介: 李诚信 (2000-), 男, 汉族, 北京人, 硕士研究生, 主要研究方向: 智慧交通安全与多智能体。

0 引言

在道路交通过程中, 人、车、路、环境中的某些行为或属性都可能是造成交通事故或特定风险升高的风险因素^[1], 如: ①驾驶人年龄、性别、驾驶经验以及注意力机制^[2]、视觉特征、驾驶风格等驾驶行为特征; ②车辆速度控制与安全, 包括: 安全的车辆运行速度, 各种行驶工况下的限速, 车辆控制系统的安全性及稳定性, 车辆在各种工况下的控制算法, 车辆侧翻、碰撞、变道风险

的预防与控制, 自动化驾驶技术的安全性, 车载安全系统的人机交互界面等; ③坡度、线形^[3]、道路基础设施等; ④雾天、雨雪、狂风、冰雹等不良天气下的行车风险^[4]; ⑤地域性社会氛围^[5]、传染疾病^[6]等其他风险。

准确评估上述事故致因和风险因素对于提升驾驶安全和道路安全管理水平至关重要。回归分析作为一种统计方法, 在分析交通事故和风险影响因素方面具有独特优势。相比于机器学习方法, 回归分析能更精确地快速分析变量间的关联, 构建出具有可解释性的模型。相较于机器学习, 它不仅能够深入理解复杂问题并揭示潜在规律, 且无需长时间的训练。此外, 回归分析能帮助我们更好地理解影响驾驶行为的各种因素, 有效预测和避免可能的行车风险。

鉴于此, 使用 VOSviewer 软件对回归模型在交通

事故和行车风险因素中应用的中文文献(基于 CNKI 数据库)及外文文献(基于 Web of Science 数据库)情况进行文献计量分析, 并系统性地综述多种回归模型在交通事故和行车风险因素中的应用。不仅梳理这些模型的理论基础和方法特点, 还说明它们在不同条件下的适用性和有效性。

1 使用 VOSviewer 的文献计量分析

1.1 数据来源

针对“利用回归模型分析交通事故和行车风险”的研究主题, 分别选取中国知网(CNKI)数数据库及 Web of Science (WOS) 数据库作为数据来源, 并进行相应处理(见表 1)。

表 1 数据来源及处理过程

	中文文献	外文文献
数据库	中国知网 (CNKI)	WOS 核心库: SCI-Expanded & SSCI
检索方式	TS= “道路安全 OR 交通安全 OR 交通事故 OR 行车风险” AND “回归 OR 回归分析 OR 回归模型 OR 线性模型 OR Logit OR Probit OR Poisson OR 零膨胀模型 OR 多层膨胀模型 OR Lindley OR Tobit OR 广义加性模型 OR 非线性模型” NOT “水上交通 OR 海上交通 OR 船舶 OR 法律 OR 深度学习 OR 计算机视觉 OR 疲劳检测 OR 视频 OR 保险”	(TS=(Traffic Accidents) OR TS=(Traffic Safety) OR TS=(Driving Risk Analysis) OR TS=(Road Safety) OR TS=(Accident Prediction)) AND (TS=(Regression) OR TS=(Regression Analysis) OR TS=(Regression Models) OR TS=(Linear Models) OR TS=(Logit) OR TS=(Probit) OR TS=(Poisson) OR TS=(Zero-Inflated Models) OR TS=(Multilevel Models) OR TS=(Lindley) OR TS=(Tobit) OR TS=(Generalized Additive Models) OR TS=(Nonlinear Models)) NOT (TS=(Water Transportation) OR TS=(Maritime Transportation) OR TS=(Ships) OR TS=(Law) OR TS=(Deep Learning) OR TS=(Computer Vision) OR TS=(Fatigue Detection) OR TS=(Video) OR TS=(Insurance))
语种	中文	英语
时间跨度	2014 年 1—7 月	2014 年 1—7 月
检索文献	802 篇	5 501 篇
有效文献	607 篇 (去除新闻等及与研究不符的文章)	4 316 篇 (去除与研究不符的文章)

1.2 中外文献的关键词共现网络对比

通过 VOSviewer 软件, 对 2 个数据库筛选的有效文献进行处理, 将发表年份信息整合到关键词共现网络分析中, 得到关键词共现时间网络图谱(见图 1、2)。可视化结果中的关键词和节点的标签越大, 对应关键词出现频次越高; 节点间连线越宽, 关键词联系越紧密^[7]。

由图 1 可得, 中文文献在交通事故和行车风险研究中, 主要关注交通事故的预测、交通事故的影响因素、事故的严重程度及特征。研究也特别关注特定交通环境(如高速公路、城市道路和山区公路等)下的交通事故。在回归分析中, 研究者们使用 Logit 模型、广义有序 Logit 模型、随机参数 Logit 模型(混合 Logit 模型)及负二项模型等方法。随着时间推移, 研究者们开始关注“异质性”“空间异质性”等因素, 同时更加关注数

据多样性和空间因素对交通事故和行车风险的影响。此外, “机器学习”与“回归模型”关联, 表明机器学习方法在该领域中不断被应用。

由图 2 可得, 外文文献在交通事故和行车风险研究中, 主要关注交通事故预测、事故伤害严重程度分析、风险和事故致因分析以及回归模型和机器学习方法的应用。随着智能交通系统的发展, “autonomous vehicles”(自动驾驶车辆)和“connected vehicles”(联网车辆)成为研究热点, 研究者正在探索这些技术对交通安全的潜在影响。研究趋势表明, 尽管回归模型不断得到改进, 尝试采用更复杂的统计方法, 但离散选择模型仍是研究的主流。回归模型在过往研究中比深度学习模型应用更广泛, 也更成熟。同时, 研究者也越来越关注弱势道路使用者的安全和人为因素对交通安全的影响。

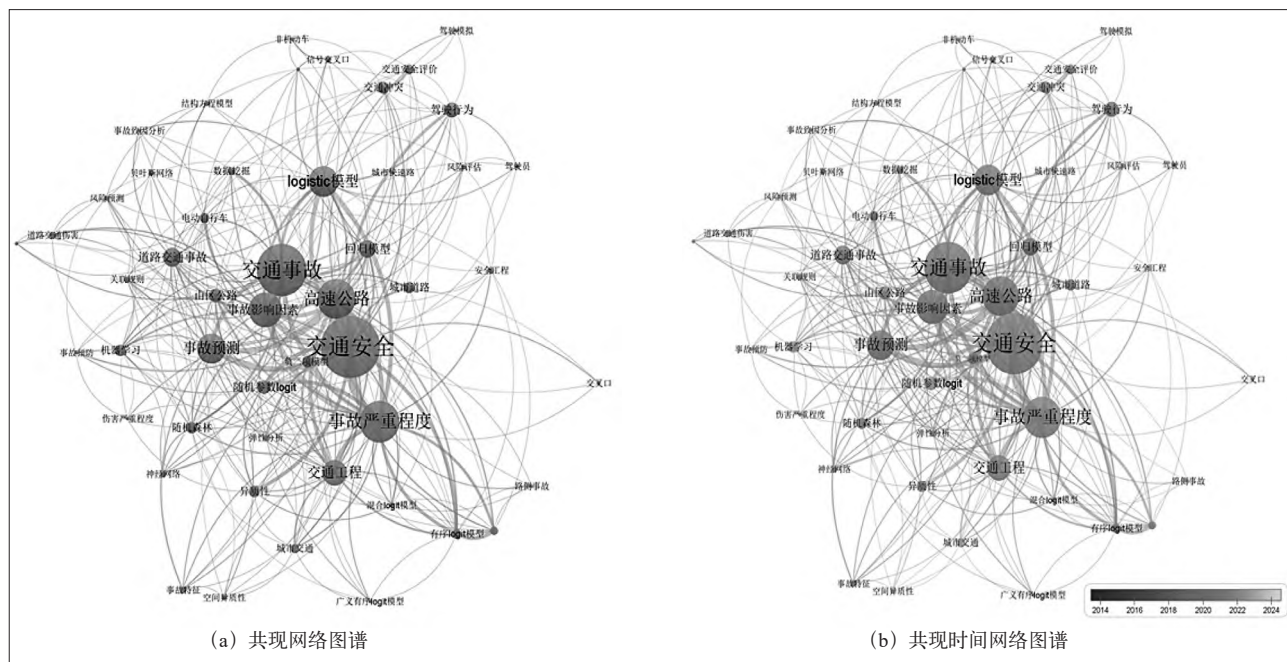


图1 基于CNKI数据库的关键词的网络图谱

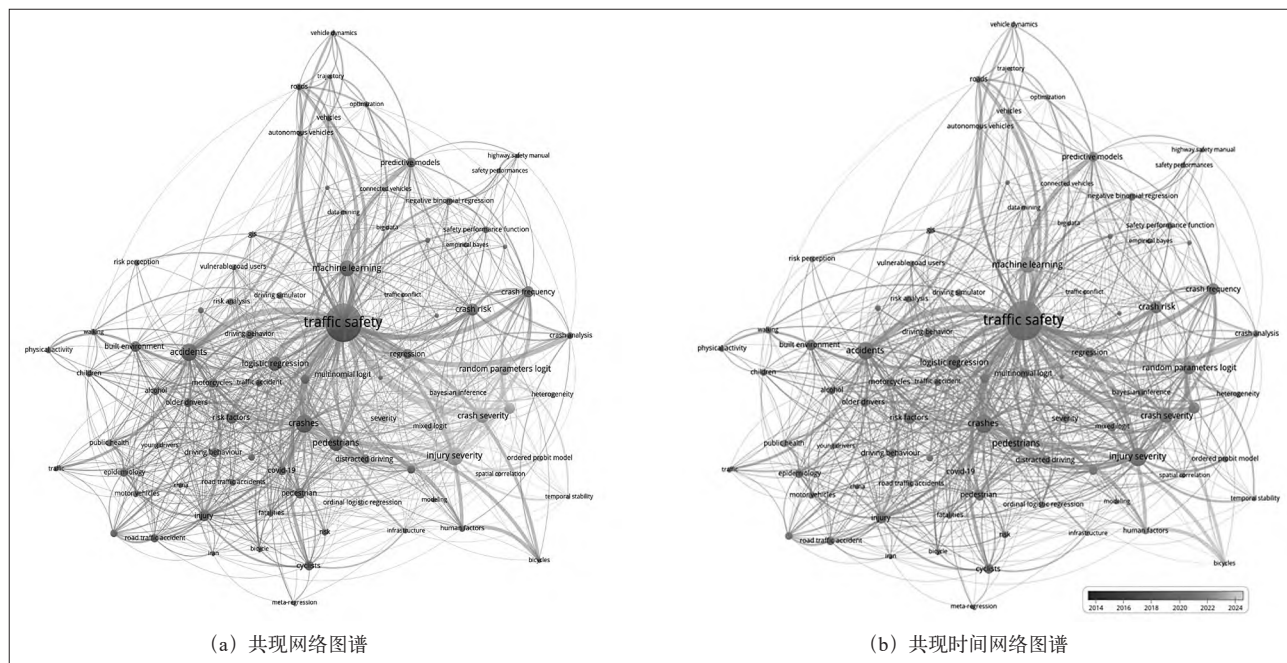


图2 基于WOS数据库的关键词的网络图谱

1.3 文献计量分析总结

通过比较中文和外文文献的计量分析发现, 交通事故预测和分析是研究的共同重点, 显示出对交通安全的广泛关注。同时, 对Logit回归模型使用较多, 并考虑异质性等因素, 一些研究应用了更为复杂的变体Logit回归模型。此外, 对事故严重程度的分析也受到重视, 根据严重程度的不同表现形式(有序、无序类别或量化计数数据), 研究者可能会选择离散选择模型或计数数据模型。因此, 梳理不同回归模型在交通事故和行车风险因素分析中的应用及其适用性, 有助于研究者根据数

据特点和研究目标选择最合适的模型。

2 交通事故和行车风险分析的回归模型

2.1 一般线性模型

一般线性模型(General Linear Model), 如多元线性回归, 通常采用最小二乘法(OLS)或偏最小二乘回归(PLS)等方法。如高波^[8]利用偏最小二乘回归方法建立交通事故经济损失预测模型, 分析GDP、人口、公路里程和机动车保有量等因素的影响。然而, 这类模型因假设条件严格、解释力有限且模型过于简化而存在

局限性。

2.2 广义线性模型

2.2.1 离散选择模型

2.2.1.1 Logit 回归模型

Logit 回归模型在交通事故研究中常用, 包括二项式和多项 Logit 模型, 后者更为常见。例如: 申昕等^[9]基于北卡罗莱纳州慢行交通事故数据, 利用多项 Logit 模型分析影响事故严重程度的因素, 包括驾驶员性别、饮酒状态、行人年龄、道路特征和地形等。

对于交通事故不同影响因素的重要程度排序常用序数逻辑回归 (Ordinal logit regression) 和顺序逻辑回归 (Sequential logit regression)。例如: 唐睿熙^[10]筛选驾驶员、车辆、道路和环境特征等 10 项因素, 利用广义有序 logit 模型建立事故严重程度预测模型, 结果显示天气、事故形态、路段类型、道路线形、照明条件、事故发生季节和时间对事故严重程度有显著影响。

交通事故受损程度的分析与预测常常使用累积 Logit 回归模型。如何雅琴等^[11]以 2016 年美国北卡罗来纳州夏洛特市的行人交通事故数据为样本, 使用累积 Logit 模型研究人、车、路、环境及事故特征与行人事故严重程度之间的关系。通过聚类压缩、共线性检验和预测力分析, 从 5 个方面选取 16 个因素作为自变量, 将事故严重程度作为因变量, 构建预测模型。模型分析了仅财产损失事故、受伤事故和死亡事故的影响因素, 并通过弹性分析量化各显著因素的影响程度, 结果显示模型拟合良好。

针对数据中未发现的异质性问题, 随机参数 Logit 模型 (混合 Logit 模型) 较好地解决了这一问题。随机参数 Logit 模型从多项 Logit 模型演化而来, 解决了多项式 Logit 模型未能考虑个体差异性与无关选择独立公理的限制^[12]。如 Alrejjal 等^[13]利用怀俄明州山区弯曲路段的单车碰撞数据, 采用随机参数 Logit 模型识别出增加翻车风险的因素。结果显示, 天气、路面状况和超速显著影响翻车事故风险。这些因素表现出未观察到的异质性效应, 可能源于驾驶员的反应和条件。

在交通事故分析中, 研究人员注意到参数取值的分组现象, 并由此引入了潜类别模型来进行分组建模^[14]。虽然随机参数模型的参数不相等, 但实际上参数会近似相等, 导致随机参数模型不再适用。与随机参数模型相比, 潜类别 Logit (LCL) 模型的优势在于它可以允许同一自变量在不同路段的参数相同, 从而识别出该自变量对不同事故严重程度的共同影响^[15]。例如: Fountas 等^[16]利用受伤最严重的损伤严重程度水平, 比较基于路段和事故的潜类别模型, 发现两者都能揭示事故异质性, 特别是路段模型能捕捉路段特有的异质性。

综上所述, 有序模型、随机参数 Logit 模型和潜类

别 Logit 模型在交通事故数据分析中受到广大学者的关注, 并具有较强的应用前景。也有将两者结合进行研究分析的, 如赵伟宁^[14]为综合解析异质性和参数组间差异性, 融合混合 Logit 和潜类别 Logit 模型, 构建潜类别混合 Logit 模型。

2.2.1.2 Probit 回归模型

离散选择模型适用于分析不同指标对交通事故的影响程度和事故严重性。如胡骥等^[17]引入有序选择模型中的 Ordinal Logit 模型和 Ordinal Probit 模型研究了驾驶员、车辆、环境、管理因素与翻车事故严重程度之间的耦合关系, 并进行了显著性检验, 结果表明两类模型均适用于交通事故严重性分析。

2.2.2 计数数据模型

2.2.2.1 常规模型: 假设交通事故发生次数服从伯努利分布

(1) 传统的线性回归模型无法充分描述事故数据的随机性、离散性、非负性和多零值等特征, 故泊松模型 (Poisson Model) 在拟合交通事故数据方面比多元线性模型更为有效。

(2) 泊松模型要求样本的均值与方差必须相等, 而交通事故数据通常方差会大于均值, 表现出过度离散特性。因此, 学者们提出采用负二项分布建立交通事故预测模型。负二项模型 (Negative Binomial Model) 广泛应用于事故多发点鉴别、公路安全性评价等场景^[18]。

2.2.2.2 优化模型: 考虑多零值

常规回归模型, 如泊松模型、泊松伽马模型和负二项模型, 通常假设交通事故次数符合伯努利分布。然而, 由于环境等因素, 某些路段可能从未发生事故, 这与假设不符。故使用这些常规模型来研究大量零值问题时, 往往无法有效拟合数据, 甚至可能产生错误结果^[19]。

(1) 零膨胀模型 (Zero-Inflated Model) 如零膨胀泊松 (ZIP 模型) 和零膨胀负二项 (ZINB 模型), 在拟合交通事故数据方面表现出显著优势, 已逐步应用于交通安全领域。然而, 有研究者指出, 零膨胀回归将交通事故过程分为 2 种状态, 可能与实际情况不符。因此, 应谨慎使用^[18]。

例如: 马艳磊等^[20]选择道路结构等 16 个解释变量, 构建空间滞后 - 零膨胀负二项回归模型, 考虑交通事故分布的过度分散性、零膨胀性和空间相关性, 并与 OLS 等回归模型进行比较, 结果显示该模型的拟合效果最佳; 王羽尘等^[21]探讨不同因素对高速公路事故形态的影响及其随时间的变化特征, 选择事故形态作为因变量, 从发生时段、年均日交通量、临近出入口环境和责任车辆信息方面选取自变量, 使用零膨胀泊松和零膨胀负二项模型对大量零值数据拟合, 通过似然比检验表明后者表现更佳。

(2) 多层零膨胀模型 (Multilevel Zero-Inflated Model) 如多层零膨胀泊松 (MZIP) 和多层零膨胀负二项 (MZINB) 模型类似于零膨胀模型, 分为 2 个过程^[19], 主要用于生物医学领域, 而在交通事故分析中的应用较少。

(3) Lindley 模型由 Lindley 于 1958 年提出, 2010 年由 Zamani 等^[22] 开始应用于交通事故分析。不同于双拟合过程的零膨胀模型和多层零膨胀模型, Lindley 模型只有一个过程, 将 Lindley 分布融入到泊松或负二项模型^[19]。如 Islam 等^[23] 不仅考虑了车祸数据的高分散性和多零值特性, 同时考虑车祸数据经常从具有不同空间或时间特征的地点收集, 提出有限混合负二项式 -Lindley (FMNB-L) 模型, 并使用多个拟合度指标来比较 FMNB-L 模型与 NB、NB-L 和有限混合 NB 模型, 发现 FMNB-L 能更准确地识别数据中的亚群, 且拟合效果更佳。

Lindley 模型比零膨胀模型 (或者和零膨胀模型同属于“双状态”模型的 Hurdle 模型) 更适合预测轻微事故。零膨胀模型 (或其他双状态模型) 为了解释大量零值数据, 假设无事故路段有正常计数状态和无事故状态, 其中无事故状态被视为几乎完全安全的状态^[24]。这种双状态假设适用于严重伤亡事故, 但不适合轻微事故。Lindley 模型, 如负二项 Lindley 模型, 由于不具备双状态假设, 更适合建模轻微事故数及包括轻微事故在内的总事故数^[25]。

2.2.3 Tobit 模型 (样本选择模型)

Tobit 模型作为样本选择模型, 在处理交通事故数据中的零值问题方面提供了新的视角。Tobit 等受限数据回归模型的研究在交通安全领域的应用尚处于起步阶

段^[26]。与未特别处理零值过多的 NB 模型和以事故次数为解释变量的 ZINB 模型不同, Tobit 模型使用交通事故率作为连续型解释变量, 如刘振博^[18] 通过比较 ZINB 和 Tobit 模型, 发现它们在拟合交通事故数据和预测能力上均优于 NB 模型, 且两者表现相当。

2.3 广义加性模型

广义加性模型是对广义线性模型的重要扩展, 它突破了广义线性模型中事故因素与事故间必须呈线性关系的假设, 以更准确地捕捉事故影响因素的复杂性。如赵伟宁等^[27] 利用广义加性模型对高速公路事故数据进行分析, 与传统广义线性模型相比, 广义加性模型不仅拟合优度和预测精度更高, 还有助于深入挖掘和解释事故影响因素的作用机制。这些研究表明, 广义加性模型在提高交通事故预测的准确性和深度方面具有显著潜力。

2.4 非线性模型

在非线性模型研究中, 马聪等^[28] 研究京港澳高速公路粤境北段的交通事故, 选取道路线形等 13 个关键自变量, 比较传统负二项回归模型与非线性负二项回归模型后, 认为后者在预测交通事故数量方面表现更佳。

3 模型总结

将上述对于交通事故和行车风险因素分析的不同回归分析模型的讨论进行总结、评价 (见表 2)。

4 结语

回归模型对于分析交通事故和行车风险因素至关重要。通过文献综述, 发现这些方法能高效揭示驾驶安全相关的多种因素及其相互影响, 从而识别出影响行车安全的关键因素。本研究利用 VOSviewer 软件对国内外

表 2 针对道路交通事故和行车风险因素分析的不同回归模型总结

模型	线性模型		广义线性模型				
子项模型	一元预测概率	多元预测概率	离散选择模型				
具体模型			一元 / 多元	事故影响 重要度排序	事故受损度 预测	考虑异质性	考虑异质性后 的分组
			Logit 模型	Ordinal Logit 模型	累积 Logit 模型	随机参数 Logit 模型	潜类别 Logit 模型
			Probit 模型	Ordered Probit 模型	累积 Probit 模型	随机参数 Probit 模型	潜类别 Probit 模型
模型评价	几乎没有使用	接近淘汰	接近淘汰	使用中	使用中	同一自变量在 不同类别的参 数通常不同 ^[29]	同一自变量在 不同类别的参 数可以相同, 能识别同一自 变量对不同事 故严重程度影响 ^[15]
							研究价值较高

续表 2							
模型	广义线性模型				广义加性模型	非线性模型	
子项模型	计数数据模型				Tobit 模型	将被解释变量的单个回归项分解为多个子项, 以更好拟合非线性关系	未将被解释变量的单个回归项分解为多个子项
具体模型	常规模型: 假设交通事故发生次数服从伯努利分布	优化模型: 考虑多零值			连续型模型	事故与各因素间呈非线性(对数线性)关系	多元非线性回归
		零膨胀模型	多层零膨胀模型	Lindley 模型			
	泊松模型	零膨胀泊松	多层零膨胀泊松	泊松 Lindley	模型的被解释变量为交通事故率		非线性泊松
	负二项模型	零膨胀负二项	多层零膨胀负二项	负二项 Lindley			非线性负二项
模型评价	泊松模型要求样本的均值与方差相等; 而交通事故数据通常方差大于均值, 故多用负二项模型进行事故多发点鉴别和公路安全性评价等 ^[18]	更合适预测严重程度较大的事故或风险的情况, 尤其是伤亡事故 ^[18,30-31]	使用相对较少 ^[19]	更合适预测严重程度较低的事故或风险的情况 ^[25]	尚处于起步阶段 ^[26]	广义加性模型比广义线性模型有更高的拟合优度与预测精度, 有挖掘更多影响因素潜力, 且可更合理解释作用机理 ^[27]	用于事故预测的效果更优 ^[28]

相关文献进行深入的计量分析, 以揭示研究趋势和热点问题。中文文献侧重于交通事故预测、影响因素、严重程度和特定交通环境, 而外文文献则更关注预测、伤害严重程度、风险因素分析以及回归模型和机器学习的应用。进一步系统介绍多种回归分析模型, 并详细探讨它们的子模型及其在实际中的应用。

(1) 一般线性模型包括多元线性回归, 通常用于连续数据的简单预测和分析。

(2) 广义线性模型, 特别是 Logit 和 Probit 模型, 因其在处理二元和多项结果方面的优势, 常被用于交通事故的离散选择分析。在考虑个体差异时, 随机参数(混合)模型更为合适。泊松和负二项模型能有效分析事故次数, 其中负二项模型特别适合处理数据的过度离散性。零膨胀模型在处理大量零值的交通事故数据时, 提供了更精确的模型拟合, 特别适合分析事故多发区域。Lindley 模型适合分析轻微事故。Tobit 模型作为样本选择模型, 能有效处理零值问题, 适用于交通事故率的分析。

(3) 广义加性模型因其灵活性, 能够捕捉数据中的复杂模式和非线性趋势, 从而提高交通事故预测的准确性, 并有助于解释事故影响因素的作用机制。

(4) 非线性模型在研究道路线形和环境条件等复杂

因素对交通事故的影响时, 能够提供更深入的分析。

总体而言, 回归分析模型是评估事故致因和行车风险因素的有力工具, 能够为交通安全研究和实践提供科学的决策支持。针对不同的研究场景和数据特性, 本文提供了模型选择的指导建议, 旨在帮助研究者选择最合适的分析工具。

参考文献:

[1] MA Y J, XU J L, GAO C, et al. Review of research on road traffic operation risk prevention and control[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(19): 12115.

[2] KASHEVNIK A, SHCHEDRIN R, KAISER C, et al. Driver distraction detection methods: A literature review and framework[J]. IEEE Access, 2021, 9: 60063-60076.

[3] OVIEDO-TRESPALAYOS O, HAQUE MD M, KING M, et al. Effects of road infrastructure and traffic complexity in speed adaptation behaviour of distracted drivers[J]. Accident Analysis & Prevention, 2017, 101: 67-77.

[4] 柳本民, 李诚信, 王子天, 等. 考虑不良天气的山区公路运营耦合风险识别 [J]. 交通与运输, 2023, 39 (5): 1-7.

[5] GHASEMZADEH A, AHMED M M. Quantifying regional

- heterogeneity effect on drivers' speeding behavior using SHRP2 naturalistic driving data: A multilevel modeling approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 106: 29-40.
- [6] YASIN Y J, GRIVNA M, ABU-ZIDAN F M. Global impact of COVID-19 pandemic on road traffic collisions[J]. *World Journal of Emergency Surgery*, 2021, 16(1): 51.
- [7] 李杰, 李平, 陈伟炯. 安全科学与工程硕博学位论文主题与方法研究[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28 (2): 8-14.
- [8] 高波. 基于 PLS 的道路交通事故经济损失预测模型的构建[J]. *辽宁警察学院学报*, 2017, 19 (2): 59-63.
- [9] 申昕, 沈金星, 郑长江, 等. 基于 Multinomial Logit 模型的美北卡罗莱纳州慢行交通事故严重程度分析[J]. *交通与运输*, 2021, 37 (5): 24-28.
- [10] 唐睿熙. 基于交通事故分析的山区高速公路交通安全预测研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [11] 何雅琴, 段雨阳, 王晨. 基于累积 Logistic 模型的行人交通事故严重程度分析及对策研究[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21 (3): 1165-1172.
- [12] 施颖, 潘义勇, 吴静婷. 基于随机参数 Logit 模型的校车事故伤害严重程度分析[J]. *交通信息与安全*, 2021, 39 (5): 43-49.
- [13] ALREJJAL A, FARID A, KSAIBATI K. Investigating factors influencing rollover crash risk on mountainous interstates[J]. *Journal of Safety Research*, 2022, 80: 391-398.
- [14] 赵伟宁. 基于改进 Logit 模型的高速公路交通事故严重程度分析方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [15] AFGHARI A P, HEZAVEH A M, HAQUE M M, et al. A home-based approach to understanding seatbelt use in single-occupant vehicles in tennessee: Application of a latent class binary logit model[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2020, 146: 105743.
- [16] FOUNTAS G, ANASTASOPOULOS P CH, MANNERING F L. Analysis of vehicle accident-injury severities: A comparison of segment- versus accident-based latent class ordered probit models with class-probability functions[J]. *Analytic Methods in Accident Research*, 2018, 18: 15-32.
- [17] 胡骥, 闫章存, 卢小钊, 等. 基于有序 Logit 与 Probit 模型的道路交通事故严重性影响因素分析[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18 (3): 836-843.
- [18] 刘振博. 基于 ZINB 及 Tobit 回归的高速公路交通事故预测模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [19] 徐建, 孙璐. 解决交通事故数据分析中零值问题的模型[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015, 45 (3): 769-775.
- [20] 马艳磊, 朱欣焰, 岳瀚, 等. 基于空间回归模型的道路交通事故影响因子分析[J]. *测绘地理信息*, 2023, 48 (3): 126-131.
- [21] 王羽尘, 陆涛, 马健霄, 等. 基于零膨胀模型的高速公路事故形态影响因素分析[J]. *物流科技*, 2020, 43 (9): 90-95.
- [22] ZAMANI H, ISMAIL N. Negative binomial-lindley distribution and its application[J]. *Journal of Mathematics and Statistics*, 2010, 6(1): 4-9.
- [23] ISLAM A S M M, SHIRAZI M, LORD D. Finite mixture Negative Binomial-Lindley for modeling heterogeneous crash data with many zero observations[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2022, 175: 106765.
- [24] MALYSHKINA N V, MANNERING F L. Empirical assessment of the impact of highway design exceptions on the frequency and severity of vehicle accidents[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2010, 42(1): 131-139.
- [25] 王文成. 考虑时空效应的道路交通事故建模及其影响因素分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [26] 孟祥海, 刘振博, 温程. 基于广义线性模型的高速公路事故预测能力对比研究[J]. *交通信息与安全*, 2020, 38 (2): 1-8; 36.
- [27] 赵伟宁, 霍晓艳, 谷方德, 等. 基于广义加性模型的高速公路交通事故影响因素分析[J]. *公路交通技术*, 2020, 36 (3): 125-131.
- [28] 马聪, 张生瑞, 马壮林, 等. 高速公路交通事故非线性负二项预测模型[J]. *中国公路学报*, 2018, 31 (11): 176-185.
- [29] 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.
- [30] 李蕊, 赵丽华. 交通事故人员伤亡的影响因素分析[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25 (4): 123-127.
- [31] 孟祥海, 覃薇, 霍晓艳. 基于统计与假设检验的高速公路交通事故数据分布特性[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18 (1): 139-149.