

中文引用格式:吴付威,李育隆,马勇,等. 高速公路团雾区驾驶特性分析与碰撞风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(5): 124-134.

英文引用格式:WU Fuwei, LI Yulong, MA Yong, et al. Driving characteristics analysis and collision risk evaluation in expressway agglomerate fog areas[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 124-134.

高速公路团雾区驾驶特性分析与碰撞风险评价*

吴付威^{1,2}高级工程师, 李育隆¹, 马勇^{**2}编审, 王畅^{1,2}教授, 张智³讲师
(1 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710018; 2 长安大学 汽车运输安全保障技术交通运输行业
重点实验室, 陕西 西安 710018; 3 空军工程大学 航空工程学院, 陕西 西安 710086)

中图分类号: X951 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.1534
资助项目: 陕西省自然科学基金研究计划项目(2023-JC-QN-0516); 中央高校基本科研业务费资助(300102224501,
300102224302)。

【摘要】 为降低高速公路团雾环境下的交通事故风险, 将高速公路团雾区划分为过渡区和冲突区, 设计并开展驾驶模拟试验。首先, 采用方差分析(ANOVA)、非参数检验等方法分析驾驶人在2个区域中的驾驶行为; 然后, 利用 Pearson 相关性分析探索过渡区与冲突区之间的驾驶行为指标关联特性; 最后, 通过二元 Logistics 回归模型挖掘驾驶行为对碰撞风险的影响机制。结果表明: 在过渡区, 驾驶经验与能见度变化率对速度标准差和内边界速度有显著影响; 相比于新手驾驶人, 熟练驾驶人速度标准差降低 36.8%, 内边界速度高 13.5%; 能见度变化率对速度标准差和内边界速度有统计学差异, 不同能见度变化率对应的内边界速度和速度标准差不同。在冲突区, 碰撞时间(TTC)与能见度呈显著正相关, 避险反应时间与能见度呈显著负相关; TTC、避险反应时间及碰撞率均与冲突距离呈显著负相关; 过渡区速度调整行为会显著影响冲突区的碰撞风险。

【关键词】 高速公路; 团雾; 驾驶模拟; 驾驶行为; 碰撞风险

Driving characteristics analysis and collision risk evaluation in expressway agglomerate fog areas

WU Fuwei^{1,2}, LI Yulong¹, MA Yong², WANG Chang^{1,2}, ZHANG Zhi³

(1 School of Automobile, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710018, China; 2 Key Laboratory of Transportation Industry of Automotive Transportation Safety Enhancement Technology (Chang'an University), Xi'an Shaanxi 710018, China; 3 Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710018, China)

Abstract: In order to reduce the risk of traffic accidents in expressway agglomerate fog environment, the expressway agglomerate fog zone was divided into transition zone and conflict zone, and driving simulation tests were designed and carried out. Firstly, Analysis of Variance(ANOVA) and non-parametric tests were used to analyze the driving behavior in the two zones. Then, Pearson correlation analysis was used to explore the correlation characteristics of the driving behavior indicators between transition zone and conflict

* 文章编号: 1003-3033(2025)05-0124-11; 收稿日期: 2025-01-09; 修稿日期: 2025-03-10

** 通信作者: 马勇(1980—), 男, 新疆玛纳斯人, 博士, 编审, 主要从事驾驶行为特性和人-车-路系统安全研究。E-mail: mayong@chd.edu.cn。

zone. Finally, a binary logistic regression model was used to explore the mechanism of the influence of driving behavior on the collision risk. The study shows that: in transition zone, driving experience and visibility change rate have a significant effect on speed standard deviation and inner boundary speed. Compared with novice drivers, experienced drivers have 36.8% lower speed standard deviation and 13.5% higher inner boundary speed. Visibility change rate has a statistically significant difference on speed standard deviation and inner boundary speed. Different visibility change rates correspond to different inner boundary speed and speed standard deviation. In conflict zone, time to collision (TTC) was significantly positively correlated with visibility, and reaction time was significantly negatively correlated with visibility. TTC, reaction time and collision rate were all significantly negatively correlated with the conflict distance. The speed adjustment behavior in the transition zone significantly affects collision risk in conflict zone.

Keywords: expressway; agglomerate fog; driving simulation; driving behavior; collision risk

0 引言

高速公路团雾是一种局部浓雾现象,团雾外视线良好,团雾内能见度很低,一般只有不到 50 m,有时甚至低于 20 m^[1]。高速公路团雾路段的能见度具有快速突变的特征,持续时间较短^[2-3]。研究发现,雾天发生的严重交通事故和多车交通事故较多,雾天条件下追尾和撞车风险相较于晴天增加 12%^[4]。据统计,我国发生团雾天气最多的 5 条高速公路为银昆高速、德习高速、京港澳高速、京昆高速和水兴高速^[5]。其中,年均发生 10 次以上团雾的路段 916 处,年均发生 30 次以上团雾的路段 228 处,年均发生 50 次以上团雾的路段 79 处^[6]。

驾驶人对道路交通信息的感知大约有 90% 是通过视觉获取的,能见度直接影响驾驶人的视觉感知结果。能见度不足时,驾驶人往往难以及时获取足够的视觉信息,进而导致驾驶人对危险情境的感知相对滞后。这种情况下,驾驶人对周围环境的观察、确认行为会变得更加频繁,需要通过投入更多的注意力来弥补其对环境感知的不足。此外,低能见度环境导致驾驶人的速度感知能力下降,对周围车辆和自身车辆的速度变化敏感度降低,对自车速度的估计值通常偏小^[7]。团雾具有突发性特征,对驾驶人感知的影响主要表现为其对驾驶人动视觉的突发性刺激,容易诱发驾驶人心理紧张和操作失误等问题^[8-9]。

雾天环境同样会影响驾驶人的决策判断和操纵行为。研究表明^[10-11]:大部分驾驶人在雾天条件下会选择较小的跟车距离,驾驶人的最小车头时距较晴天减少 0.475 s。同时,雾天条件下,驾驶人面临的避撞情境更加复杂,尤其是在车头时距显著减少

的情况下,驾驶人的决策负荷将显著增加^[12],因此在进入团雾区域时,驾驶人一般通过紧急制动来应对突发状况。然而,驾驶人对车速控制的稳定性会随着能见度的降低而下降^[7,13],即使大多数驾驶人在进入团雾时会进行速度调整,但简单的速度调整不足以规避团雾中的道路紧急事件,因此,团雾区车辆追尾事故发生率普遍较高^[14]。

驾驶人特征方面,驾驶人性别和驾驶经验等也会对雾天条件下的驾驶行为产生显著影响。职业驾驶人通常能够更早识别大雾中的潜在风险,并及时采取控制措施,具有较强的风险规避能力^[15]。女性驾驶人在雾天条件下的驾驶风险高于男性驾驶人,这与其在风险感知和决策反应方面的差异密切相关^[16]。

综上所述,低能见度环境对驾驶人感知—决策—操纵过程会产生不良影响,进而影响行车安全。与大雾不同,高速公路团雾具有能见度突变特性,团雾过渡区的能见度快速变化是导致交通事故的主要因素。目前,大多数学者仅针对雾区驾驶人行为开展研究,对团雾能见度的变化与驾驶人行为间的关系研究相对较少。

鉴于此,笔者通过设计高速公路团雾驾驶模拟试验,旨在探究驾驶人性别、驾驶经验,以及团雾过渡区能见度变化率对驾驶行为的影响;研究冲突区能见度和冲突距离对碰撞风险的影响;并分析过渡区驾驶行为与冲突区碰撞风险间的作用关系,期为团雾路段安全驾驶提供一定的理论指导。

1 团雾驾驶模拟试验方案

1.1 试验设备

试验设备为长安大学驾驶人因采集及分析平

台,如图 1 所示。该设备由三自由度运动平台、实车驾驶模拟舱以及视景显示系统等构成。其中,三自由度运动平台内嵌力反馈方向盘、力反馈踏板、高清显示仪表等模块,可呈现较为真实的驾驶场景。配合驾驶模拟仿真系统中的人机交互、自动驾驶等功能,能够根据研究需求开展各类特殊场景下的仿真驾驶研究。利用 SILAB 软件可以实现个性化、高自由度的驾驶场景开发设计,包括对道路参与者、天气及路面状况等的个性化设置。



图 1 三自由度仿真驾驶模拟平台

Fig. 1 Three degree of freedom driving simulator

1.2 试验场景设计

为探究高速公路团雾路段的驾驶行为特征与碰撞风险,设计团雾环境下避险试验,场景如图 2 所示。试验道路为双向 4 车道,道路全长 15 km,限速 90 km/h,车道宽度为 3.75 m。试验车辆在第 1 车道行驶,第 1 车道交通流设置为自由流,车流位于试验车辆后方,第 2 车道交通流密度设置为 6 pcu/(km·车道)。试验采取 3×2 交叉设计,设计变量为能见度和冲突距离。参照文献[1, 17-18],正常条件下能见度设置为 1 km。根据文献[2, 12, 19-20]可知:团雾的整体形态无法准确定义,但从水平空间维度上说,进入团雾中心之前,通常存在一个能见度快速变化的区域。因此,将团雾区域分为过渡区和冲突区,冲突区的能见度为 20、50 和 100 m。为了研究团雾能见度变化率对驾驶行为的影响,将过渡区的长度设置为 100 m,对应冲突区能见度等级,过渡区的能见度变化率为高、中、低 3 个水平。冲突距离为车辆到达团雾内边界时,车头至前方事件的距离,表示冲突事件的危险程度,设置为 100 和 200 m 等 2 个水平。文中研究的为团雾(能见度)对驾驶行为的影响,由于雾灯会通过光照改变驾驶人的视觉感知,导致试验设定的能见度与驾驶人实际视野的能见度不一致,从而影响数据的准确性与可比性,因此,试验场景中的车辆均未开启雾灯。

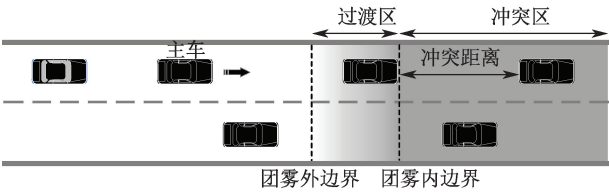


图 2 驾驶模拟场景

Fig. 2 Driving simulation scenario

1.3 试验被试

共招募 35 名驾驶人作为被试(平均年龄为 32.1 岁,标准差为 2.5 岁),其中,男性 23 人,女性 12 人,均持有中国 C1 或 C2 驾照。

参照文献[20],将累计驾驶里程 5 万 km 作为熟练驾驶人和新手驾驶人的分类阈值。被试基本信息见表 1。

表 1 被试基本信息

Table 1 Basic information of participants

类别	性别		平均驾驶里程/km
	男性	女性	
熟练驾驶人	9	4	60 769
新手驾驶人	14	8	16 136

1.4 试验流程

首先,向被试介绍试验要求、道路场景及试验注意事项,签订试验知情同意书,填写基本信息表,包括姓名、年龄、职业、驾龄和驾驶里程等。然后,对被试进行一定时间的模拟驾驶培训,使其熟悉驾驶模拟器的基本操作。

正式试验过程中,每名被试需完成 6 种高速公路团雾驾驶模拟场景试验。为避免学习效应,场景顺序随机出现。被试驾驶车辆在第 1 车道以 90 km/h 的速度匀速行驶,在距离出发点 1 km 处进入团雾过渡区,行驶一定距离后遇到交通冲突,要求被试根据道路环境和驾驶经验选择合理的避险措施。试验大约持续 1 h,每个试验场景间休息 2 min。

1.5 数据处理

采集驾驶人操作数据和车辆速度、加速度、碰撞时间(Time to Collision, TTC)和横向位置等车辆运动状态数据,运用 SPSS、Python 软件进行数据的预处理和分析工作。指标数据经过 Shapiro-Wilk 检验,符合正态性的指标采用方差分析(Analysis of Variance, ANOVA)方法处理,不符合正态性的指标采用 Keuskal-Wallis 非参数检验等方法处理。分别对驾驶人在团雾过渡区和团雾冲突区 2 个阶段的驾驶行为指标进行差异性分析,探讨团雾天气、驾驶人

自身特点及交通冲突条件对驾驶人车辆操纵行为和避险行为的交互作用。

2 团雾过渡区驾驶特性分析

2.1 速度标准差

速度标准差可以反映驾驶人的速度控制能力、驾驶一致性及风险偏好等驾驶风格,在文中指团雾过渡区的速度标准差。各因素影响下的团雾过渡区速度标准差分布如图 3 所示。

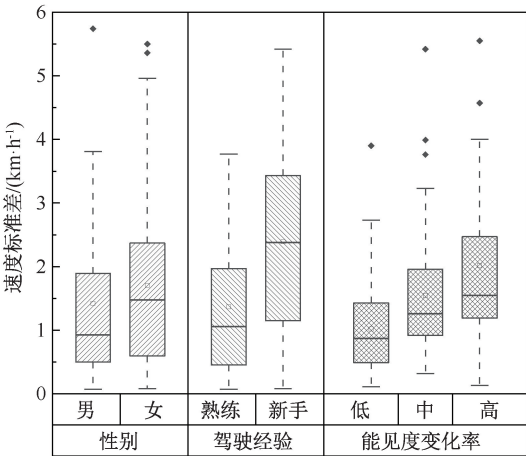


图 3 团雾过渡区速度标准差分布
Fig. 3 Standard deviation distribution of velocity in transition zone

由图 3 可知:男性驾驶人比女性驾驶人的速度标准差分布总体更低也更为集中,说明男性驾驶人的总体速度稳定性更高,速度控制能力更强。驾驶经验方面,由于熟练驾驶人能够快速适应各种驾驶环境,在过渡区不会频繁调整车速,因此速度标准差更小。能见度变化率与速度标准差呈正相关,当能见度快速变化时,驾驶人无法稳定地判断前方的路况和潜在危险。为了应对这种不确定性,驾驶人可能会频繁调整车速,导致速度波动加大。

团雾过渡区速度标准差非参数检验结果见表 2。由表 2 可知:不同能见度变化率下的速度标准差存在显著差异 ($H=3.943, p=0.036$),团雾能见度变化率越高,速度标准差越大。这是因为当能见度变化率越高,驾驶人视距的减小速率越高,这往往会导致驾驶人视觉和心理负荷增大,产生紧张情绪,容易采取更激进的制动行为。同时,快速变化的能见度环境要求驾驶人迅速做出调整,包括减速或加速以适应新的能见度水平。但由于每个人的反应时间和判断力不同,可能会导致一些驾驶人做出过度或不足的反应,进而引发速度的不稳定。由表 2 可

知:驾驶经验 ($H=1.095, p=0.041$) 对驾驶人速度标准差具有显著影响,而性别 ($H=0.909, p=0.340$) 与性别和驾驶经验的交互效应 ($H=0.981, p=0.612$) 对速度标准差均无显著影响。熟练驾驶人速度标准差较新手驾驶人降低 36.8%,表明熟练驾驶人能快速判断和适应前方路况,更加谨慎地调整车速。

表 2 速度标准差非参数检验结果
Table 2 Non-parametric test results of standard deviation of velocity

变量	自由度	<i>H</i>	<i>p</i>
性别	1	0.909	0.340
驾驶经验	1	1.095	0.047 *
性别×驾驶经验	3	0.981	0.612
能见度变化率	2	3.943	0.036 *

注: * 表示显著性水平小于 0.05,下同。

2.2 横向位置标准差

研究表明^[12]:驾驶人对车辆的横向控制能力会受到能见度水平的影响,能见度越低的环境下,驾驶人对车辆的横向控制能力往往越差。在团雾天气条件下,能见度往往会以较大的速率变化。文中选取横向位置标准差 (Standard Deviation of Lane Position, SDLP) 来表征驾驶人对车辆的横向控制能力水平。各因素影响下的团雾过渡区 SDLP 分布如图 4 所示。

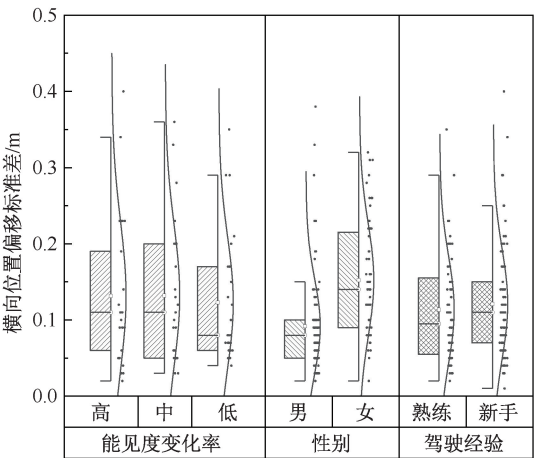


图 4 团雾过渡区 SDLP 分布
Fig. 4 SDLP distribution in transition zone

由图 4 可知:男性驾驶人的 SDLP 总体低于女性驾驶人,且分布更为集中,这表明男性驾驶人对车辆的横向控制能力个体差异性较小,比女性驾驶人拥有更强的车辆横向控制能力。经验丰富的驾驶人更能快速适应团雾过渡区这种视距和路况不断变化的环

境,因此他们在能见度突然降低时,不容易因紧张而偏离车道,进而表现出更加稳定的横向控制能力。能见度变化率低时,更有利于驾驶人保持车辆的横向位置。团雾过渡区 SDLP 的 ANOVA 结果见表 3。

表 3 团雾过渡区 SDLP 的 ANOVA 结果

Table 3 ANOVA results of SDLP in transition zone

变量	自由度	<i>F</i>	<i>p</i>
性别	1	4.227	0.042 *
驾驶经验	1	1.017	0.315
性别×驾驶经验	3	2.261	0.415
能见度变化率	2	0.032	0.038 *

结果表明:驾驶人性别 ($F = 4.227, p = 0.042$) 及能见度变化率 ($F = 0.032, p = 0.038$) 均对 SDLP 有显著影响。男性驾驶人在面对突发情况时,方向盘操作相对更稳健^[21]。相比之下,女性驾驶人可能因为其对环境变化更加敏感,容易做出较频繁的调整,这可能会导致横向位置偏移增大。

Bonferroni 事后检验结果表明:能见度变化率为中和高的 2 组条件下,驾驶人 SDLP 差异不显著,剩余 2 组 SDLP 均存在显著差异($p < 0.001$)。能见度变化率越低对应驾驶人感知到的风险越低,此时驾驶人不会对车辆进行大幅度横向位置调整,并且较好的能见度条件也有利于驾驶人保持车辆的横向位置。

2.3 内边界速度

内边界速度是车辆到达团雾内边界时刻的瞬时速度。驾驶人在面对能见度快速变化的环境时,会根据实际情况进行速度调整。文中内边界速度用于反映驾驶人在团雾过渡区的速度调整特性。

各因素影响下的内边界速度 ANOVA 结果见表 4。由表 4 可知:驾驶经验 ($F = 1.744, p = 0.009$) 和能见度变化率 ($F = 13.839, p < 0.001$) 对内边界速度具有显著影响。由此推断,驾驶人在进入团雾过渡区后,会根据能见度变化情况采取相应不同的制动措施,同时驾驶经验也会影响驾驶人制动策略的选择。

表 4 团雾内边界速度 ANOVA 结果

Table 4 ANOVA results of inner boundary velocity

变量	自由度	<i>F</i>	<i>p</i>
性别	1	0.959	0.329
驾驶经验	1	1.744	0.009 *
性别×驾驶经验	3	1.224	0.089
能见度变化率	2	13.839	<0.001 *

不同能见度变化率影响下的团雾过渡区速度曲线如图 5 所示。由图 5 可知:在团雾过渡区,驾驶人在不同能见度变化率下的速度调整行为存在显著差

异,导致内边界速度随着能见度变化率的增大而降低。相比于低变化率,中变化率和高变化率影响下的制动减速度更大。在进入团雾过渡区 50 m 后,中、高变化率影响下的制动减速度未表现出明显差异。这是因为,在能见度条件较好时,制动减速度受能见度变化率影响较大,而当能见度条件较差时,制动减速度受能见度影响更大。

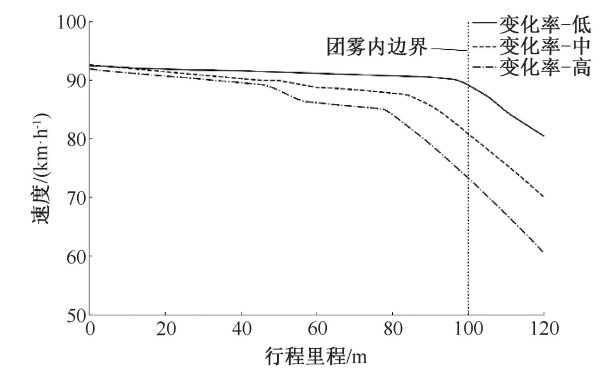


图 5 能见度变化率—过渡区速度曲线
Fig. 5 Visibility change rates – speed curves in transition zone

不同经验驾驶人的团雾过渡区速度曲线如图 6 所示。

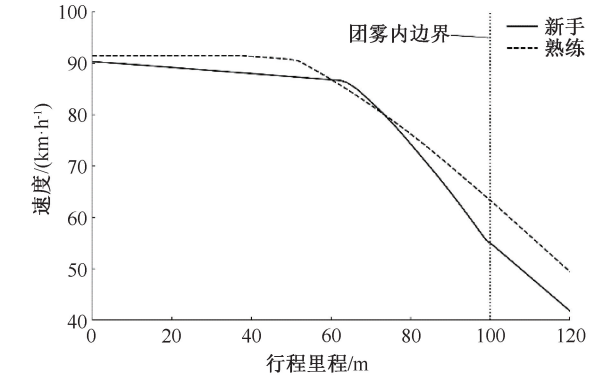


图 6 驾驶经验—过渡区速度曲线
Fig. 6 Driving experiences-speed curves in transition zone

由图 6 可知:熟练驾驶人能够更快地适应团雾的变化,在遇到能见度突然降低时,能够更准确地判断和评估当前情况,选择合理的速度。为了避免后车追尾,熟练驾驶人不会过度减速,因此,熟练驾驶人的内边界速度比新手驾驶人高 16.4%。

文中所得内边界速度值均大于文献[22]提出的高速公路团雾区安全行驶速度,这表明驾驶人在团雾过渡区的速度调整行为为不足以将车速调整到安全范围内,这与文献[23]的研究结论相符。

3 团雾冲突区安全性指标分析

3.1 TTC

TTC 是衡量碰撞风险的重要替代指标^[24-25],文中选取驾驶人采取避险行为时刻与前方车辆的 TTC 来表征碰撞风险。各变量交互影响下的团雾冲突区 TTC 描述性统计结果见表 5。

表 5 团雾冲突区 TTC 描述性统计

Table 5 TTC descriptive statistics in conflict zone			
变量	类别	TTC	
		平均值/s	标准差/s
性别	男	3.19	1.82
	女	2.84	1.72
驾驶经验	熟练	3.38	1.99
	新手	2.84	1.61
能见度	20	2.55	1.59
	50	2.51	1.24
	200	4.09	1.99
冲突距离	100	2.37	1.28
	200	3.74	1.96
能见度×冲突距离	20×100	1.71	1.09
	50×100	2.02	0.80
	200×100	3.37	1.26
	20×200	3.39	1.59
	50×200	3.00	1.42
	200×200	4.81	2.33

表 7 不同能见度及冲突距离下 TTC 事后检验 p 值

Table 7 P-value of TTC post-hoc test under different visibility and collision distances								
变量	检验方法	p						
能见度	LSD	—	20	50	200	—	—	—
		20	—	0.907	<0.001 *	—	—	—
		50	—	—	<0.001 *	—	—	—
能见度×冲突距离	LSD	—	20×100	50×100	200×100	20×200	50×200	200×200
		20×100	—	0.462	<0.001 *	<0.001 *	0.003 *	<0.001 *
		50×100	—	—	0.002 *	0.001 *	0.022 *	<0.001 *
		200×100	—	—	—	0.956	0.388	0.001 *
		20×200	—	—	—	—	0.359	0.001 *
		50×200	—	—	—	—	—	<0.001 *

文献[26]根据研究的驾驶场景不同,基于 TTC 对碰撞风险进行了分类定义,根据 TTC 的值将碰撞风险分为安全、危险、紧急、非常紧急等多个等级。文中结合上述研究和团雾环境特点,基于 TTC 将碰撞风险分为以下 4 类:安全($TTC \in (4\text{ s}, +\infty)$);危险($TTC \in (2\text{ s}, 4\text{ s})$);紧急($TTC \in (1\text{ s}, 2\text{ s})$);非常紧急($TTC \in (0\text{ s}, 1\text{ s})$)。不同冲突距离和能见度影响下的碰撞风险分布如图 7 所示。

各变量影响下的 TTC 的 ANOVA 结果见表 6,由表 6 可知:不同能见度($F=17.003, p<0.001$)、冲突距离($F=19.019, p<0.001$)以及能见度和冲突距离的交互作用下($F=13.794, p<0.001$)的 TTC 均存在显著差异。

表 6 各变量影响下 TTC 的 ANOVA 结果

Table 6 ANOVA results of TTC under influence of various variables			
变量	自由度	F	p
性别	1	1.389	0.240
驾驶经验	1	3.370	0.068
能见度	2	17.003	<0.001 *
冲突距离	1	19.019	<0.001 *
能见度×冲突距离	5	13.794	<0.001 *

不同能见度及冲突距离下 TTC 事后检验结果见表 7,团雾能见度及冲突距离与 TTC 均呈显著正相关,即团雾能见度越低或冲突距离越小,TTC 值越小,表明情况越紧急,碰撞风险越大。碰撞风险与冲突距离成反比,在能见度一定条件下,冲突距离的增大能有效增大 TTC,减小碰撞风险。因此在实际行车过程中,驾驶人应该在进入团雾边界时提高警惕并且尽量避免在团雾边界处停车或逗留,根据实际情况快速通过团雾边界区。

统计结果表明:更长的冲突距离伴随更低的碰撞风险。相比于长度为 100 m 的冲突距离,长度为 200 m 的冲突距离下的安全状态占比提高了 22%。同时,在冲突距离相同的条件下,能见度越低,紧急状态占比越高。

3.2 避险反应时间

驾驶避险过程可分为 3 个阶段,即感知阶段、决策阶段和执行阶段。文中,避险反应时间定义为从

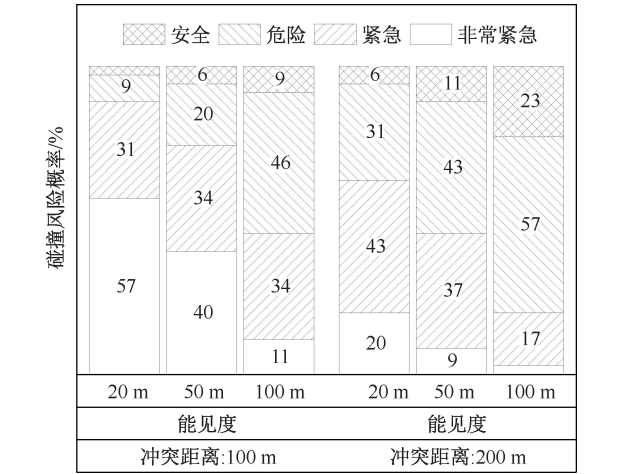


图7 基于TTC的碰撞风险分布

Fig. 7 Collision risk distribution based on TTC

驾驶人视距范围内出现事故车辆开始到驾驶人采取避险行为(制动或转向)所经历的时间。

各变量影响下的避险反应时间统计及ANOVA结果见表8,由表8可知:冲突距离($F=6.616$, $p=0.032$)和能见度($F=10.204$, $p<0.001$)对避险反应时间有显著影响。男性驾驶人反应时间相对于女性更短,熟练驾驶人反应时间短于新手驾驶人,但反应时间在性别和驾驶经验方面没有显著差异。

表8 避险反应时间ANOVA结果

Table 8 ANOVA results of response time

变量	分类	避险反应时间/s		F	p
		平均值	标准差		
性别	男	1.77	0.86	1.335	0.898
	女	1.80	0.62		
驾驶经验	熟练	1.89	1.13	1.427	0.092
	新手	1.93	0.91		
冲突距离/m	100	1.96	1.50	6.616	0.032*
	200	1.73	1.56		
能见度/m	20	2.15	0.98	10.204	<0.001*
	50	1.81	1.05		
	100	1.64	0.64		

冲突距离和能见度影响下的反应时间分布如图8所示,由图8可知:驾驶人避险反应时间随着能见度的减小而增加,这与文献[27]的研究结论相符。这是因为团雾环境可能引发驾驶人心理紧张,导致反应时间延长。同时,当视距变小时,驾驶人无法快速对交通环境作出准确判断,对紧急事件的感知能力显著下降,避险反应时间较长。

避险反应时间与冲突距离呈显著负相关,驾驶人进入团雾内的距离越长,避险反应时间越短。这是由于驾驶人进入团雾的时间越久,对环境的适应

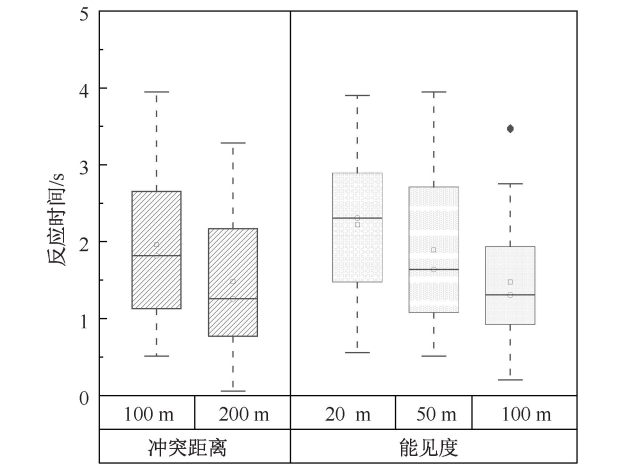


图8 冲突距离和能见度影响下的反应时间

Fig. 8 Reaction time distribution under influence of conflict distance and visibility

度越高,越有利于缓解紧张状态、缩短反应时间。

3.3 碰撞率

碰撞率用于评估驾驶人行为的安全性和风险水平。在驾驶人行为分析中,碰撞率通常用来衡量在一定时间内或一定距离内发生的事故数量。各因素影响下的碰撞率描述性统计结果见表9。

表9 碰撞率描述性统计结果

Table 9 Statistical results of collision rate

变量	分类	碰撞率/%
能见度/m	20	85.7
	50	71.4
	100	25.7
冲突距离/m	100	57.1
	200	18.1
性别	男	55.6
	女	48.6
驾驶经验	熟练	44.6
	新手	67.7

由表9可知:能见度越高,碰撞率越低,能见度为20 m时,碰撞率达到最高值(85.7%)。冲突距离对碰撞率存在影响,冲突距离为100 m时碰撞率为57.1%,而冲突距离为200 m时碰撞率降至18.1%。性别方面,男性的碰撞率为55.6%,女性稍低,为48.6%。碰撞率也受驾驶经验的影响,经验丰富的熟练驾驶人碰撞率为44.6%,而新手驾驶人高达67.7%。

各因素影响下的碰撞率卡方检验结果见表10,不同驾驶经验、能见度和冲突距离影响下的碰撞率均存在显著差异。

由表10可知:从驾驶经验因素上看,熟练驾驶

表 10 碰撞率卡方检验结果

Table 10 Chi-square test results of collision rate

变量	卡方检验			
	自由度	χ^2	p	Φ
性别	1	3.383	0.066	3.361
驾驶经验	1	3.971	0.046*	3.944
能见度	2	3.043	<0.001*	2.761
冲突距离	1	12.231	0.008*	0.825

人碰撞率显著低于新手驾驶人 ($\chi^2 = 3.971, p = 0.046$), 这与文献[11]中的研究结论相符。一方面, 新手驾驶人由于缺少驾驶经验, 关注的碰撞风险区域一般集中在前方, 团雾能见度突变对驾驶人视觉上产生压力, 导致新手驾驶人在面对冲突事件时产生紧张情绪^[9]; 另一方面, 虽然多数新手驾驶人在进入团雾过渡区时就开始采取紧急制动措施, 进入冲突区时速度普遍较低, 但新手驾驶人危险感知能力较差, 并没有对团雾内的潜在冲突进行预防, 因此仍有较高的碰撞率。

从能见度来看, 能见度较低时驾驶人视觉感知受限, 反应时间延长, 难以及时发现和应对前方情况, 导致操作不当或反应迟缓^[25, 28-29]。同时, 驾驶人进入团雾内边界的速度普遍较快, 低能见度下车速与反应能力不匹配, 车距不足时容易引发追尾事故, 加上心理压力增大, 进一步增加了碰撞的风险。由表 10 可知: 能见度为 20 m 时, 碰撞率最高 ($p < 0.001$), 能见度与碰撞率呈显著负相关。

另外, 冲突距离为 100 m 时的碰撞率显著高于冲突距离为 200 m 时的碰撞率。这是由于当冲突距离为 200 m 时, 驾驶人有更多时间识别和应对风险。

4 团雾区碰撞风险分析

Pearson 相关性分析多用于连续变量间线性关系的定量评估, 而二元 Logistic 回归模型则适合二分类因变量的风险预测及自变量影响的概率化解释。针对研究数据的特点和研究目标, 文中使用 Pearson 相关性分析方法评估过渡区和冲突区驾驶行为变量间的线性关系, 并采用二元 Logistic 回归模型对碰撞风险进行分析和建模。

表 12 Logistic 方程回归结果

Table 12 Results of logistic equations

变量	B	S. E	Wald	Sig.	exp B	exp B 95%置信区间	
						下限	上限
速度标准差	0.059	0.273	0.046	0.830	1.061	0.621	1.811
SDLP	4.377	2.542	2.966	0.085	79.629	0.546	11 606.117
TTC	-2.105	0.409	26.446	0.000	0.122	0.055	0.272

Pearson 相关性分析结果见表 11, 由表 11 可知: 速度标准差与 TTC 呈显著正相关 ($R = 0.391, p < 0.001$), 与碰撞率呈显著负相关 ($R = -0.264, p = 0.001$); 内边界速度与 TTC 呈显著负相关 ($R = -0.460, p < 0.001$), 与碰撞率 ($R = 0.324, p < 0.001$) 和反应时间 ($R = 0.761, p < 0.001$) 呈显著正相关。这说明速度标准差越小, TTC 越小, 碰撞风险越大; 反之, 更大的内边界速度会导致更大的反应时间和碰撞率。

表 11 Pearson 相关性分析结果

Table 11 Pearson correlation analysis results

变量	系数	TTC/s	碰撞率	反应时间/s
速度标准差	R	0.391	-0.264	0.225
	p	<0.001*	0.001*	0.821
内边界速度	R	-0.460	0.324	0.761
	p	<0.001*	<0.001*	<0.001*
SDLP	R	-0.059	0.082	0.190
	p	0.475	0.316	0.488

基于 Pearson 相关性分析的结果, 考虑各变量对碰撞风险的影响, 对所有连续自变量均进行 z-score 标准化处理, 建立团雾区碰撞风险 Logistic 回归模型。

$$P_i(y_i = 1 | x_i) = \frac{1}{1 + \exp(-(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k))} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_k)^T$ 为自变量, 文中指标准化后的速度标准差、内边界速度、SDLP、TTC 和反应时间; k 为自变量的个数, 取 $k = 3$; y_i 为因变量, 文中指碰撞风险, 其中, $y_i = 1$ 表示碰撞发生, $y_i = 0$ 表示碰撞未发生; P_i 为第 i 个事件发生的概率, 其计算过程如下:

$$P_i = \frac{\exp(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k)}{1 + \exp(-(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k))} \quad (2)$$

Logistic 方程回归结果见表 12, 内边界速度和 TTC 对是否发生碰撞事件有显著影响, 内边界速度与发生碰撞的风险呈显著正相关 ($p = 0.031, B = 0.042$), TTC 与发生碰撞的风险呈显著负相关 ($p < 0.001, B = -2.105$)。

续表 12

变量	<i>B</i>	S. E	Wald	Sig.	exp <i>B</i>	exp <i>B</i> 95%置信区间	
						下限	上限
内边界速度	0.042	0.056	0.569	0.031	1.043	0.935	1.165
反应时间	2.235	0.317	0.831	0.000	0.158	0.124	1.577
常量	-0.392	5.177	0.013	0.009	0.553	—	—

注:表中所示结果均为标准化变量的相关结果。

结合表 12,可以得到团雾条件下碰撞概率模型为:

$$P_y = \frac{\exp(-0.392 + 0.042Z_{\text{FBS}} - 2.105Z_{\text{TTC}} + 2.235Z_{\text{RT}})}{1 + \exp((0.392 - 0.042Z_{\text{FBS}} + 2.105Z_{\text{TTC}} - 2.235Z_{\text{RT}}))} \quad (3)$$

式中: Z_{FBS} 为标准化内边界速度,内边界速度(Fog Boundary Speed, FBS); Z_{RT} 为标准化反应时间,反应时间(Reaction Time, RT); Z_{TTC} 为标准化 TTC。

二元 Logistic 碰撞概率模型三维曲面图如图 9 所示。

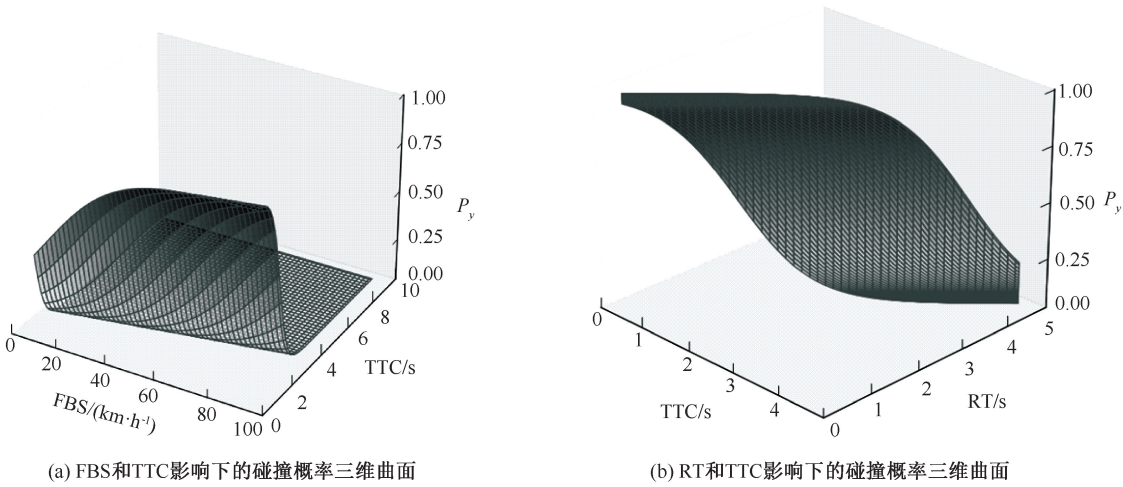


图 9 二元 Logistic 碰撞概率模型三维曲面

Fig. 9 3D surface diagram of a binary logistic collision probability model

避险反应时间为 2 s 时,内边界速度和 TTC 影响下的碰撞概率模型三维曲面图如图 9a 所示。当 TTC 在(1 s, 4 s)的范围内时,若 TTC 一定,碰撞概率 P_y 随着内边界速度的增加先快速升高后趋于平缓,这表明当内边界速度较高时,可能导致碰撞的 TTC 范围增大,碰撞风险显著增大;当内边界速度一定时,碰撞概率 P_y 随着 TTC 减小而增大,即使内边界速度较小,但如果 TTC 同样较小,仍会产生碰撞风险。

内边界速度为 65 km/h 时,TTC 和反应时间影响下的碰撞概率模型三维曲面图如图 9b 所示。由图 9b 可知:当内边界速度固定时,驾驶人避险反应时间与碰撞风险呈正比,即避险反应时间越长,驾驶人避险成功率越低。

模型系数的 Omnibus 检验结果表明($p = 0.000$):本次拟合的模型具有统计学意义。对团雾避险过程的关联性分析可以看出,过渡区中的内边界速度和速度标准差与冲突段中的避险反应时间、

TTC 和碰撞率有较强相关性,内边界速度和速度标准差通过影响 TTC 和避险反应时间间接影响碰撞风险,由此可见:在高速公路团雾区,速度是影响碰撞风险的关键因素^[12],在团雾过渡区进行合理的制动措施能有效减少碰撞风险。

5 结 论

1) 分析高速公路团雾过渡区的驾驶特性可知:在面对团雾能见度突变的情况下,相比于新手驾驶人,熟练驾驶人速度标准差降低了 36.8%,拥有更高的速度稳定性,制动行为更加缓和,这也导致熟练驾驶人内边界速度更高。男性驾驶人 SDLP 小于女性驾驶人,男性驾驶人对车辆横向位置的控制能力较强。能见度变化率与速度标准差呈正相关,与内边界速度呈负相关,即能见度变化率越大,驾驶人制动行为越激进。低能见度变化率更有利于驾驶人保持车辆横向位置。

2) 选取 TTC、避险反应时间和碰撞率作为团雾冲突区的安全性评价指标。分析结果表明:团雾能见度 and 冲突距离是影响 TTC 的关键因素,更小的能见度和冲突距离会导致更小的 TTC 和更大的碰撞率,团雾能见度为 20 m 时,碰撞率高达 85.7%。避险反应时间与冲突距离呈显著负相关,与能见度呈显著正相关。

3) 对团雾区碰撞风险的关联分析结果表明:过渡区的速度标准差和内边界速度与冲突段的 TTC、避险反应时间和碰撞率有较强相关性,即驾驶人在过渡区进行合理的速度调整行为有利于减小冲突区碰撞风险。基于二元 Logistic 回归模型的碰撞概率模型结果表明,内边界速度、避险反应时间和 TTC 对是否发生碰撞事件有显著影响。

参 考 文 献

- [1] GB/T 27964—2011, 雾的预报等级[S].
GB/T 27964—2011, Grade of fog forecast[S].
- [2] 卢振礼, 杨成芳, 郑宗杰, 等. 高速公路团雾分级预警研究[J]. 气象与环境科学, 2022, 45(1): 103–111.
LU Zhenli, YANG Chengfang, ZHENG Zongjie, et al. Study on warning level of expressway dense fog[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2022, 45(1): 103–111.
- [3] SONG Jianyang, TIAN Hua, YUAN Xiaoyu, et al. Study on risk prediction model of expressway agglomerate fog-related accidents[J]. Atmosphere, 2023, 14(6): DOI: 10.3390/atmos14060960.
- [4] 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.
- [5] GAO Jingjing, TIAN Hua, LI Aixun, et al. Analysis of agglomerate fog meteorological characteristics in Anhui province based on traffic accident data[J]. Pure and Applied Geophysics, 2023, 180(1): 313–333.
- [6] 中华人民共和国公安部. 公安部交管局公布 3188 处高速公路团雾多发路段[EB/OL]. (2018–11–15). <https://www.mps.gov.cn/n2255079/n2256030/n2256031/c6304801/content.html>.
- [7] CALSAVARA F, KABBACH JUNIOR F I, LAROCCA A P C. Effects of fog in a Brazilian road segment analyzed by a driving simulator for sustainable transport: drivers' visual profile[J]. Sustainability, 2021, 13(16): 9 448–9 461.
- [8] 李晓雷. 山区高速公路团雾段行车风险评估与视觉诱导研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
LI Xiaolei. Study on the traffic risk assessment and visual guidance to the driver in the dumpling fog sections of mountainous expressways[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [9] 李晓雷, 谭翔峻, 詹银霞. 团雾环境驾驶人最低注意力需求研究综述[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(13): 5 259–5 270.
LI Xiaolei, TAN Xiangjun, ZHAN Yinxia. Review of the minimum attention demand of drivers in environment of dumpling fog[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(13): 5 259–5 270.
- [10] 赵晓华, 任贵超, 陈晨, 等. 不良天气下驾驶行为研究综述[J]. 交通信息与安全, 2017, 35(5): 70–75, 98.
ZHAO Xiaohua, REN Guichao, CHEN Chen, et al. A review on driving behavior under adverse weather conditions[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2017, 35(5): 70–75, 98.
- [11] 薛晴婉, 徐嘉伟, 闫学东, 等. 雾天驾驶人车辆操纵行为特性及其与追尾风险相关性分析[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(1): 19–27.
XUE Qingwan, XU Jiawei, YAN Xuedong, et al. A study on the correlation between vehicle control behaviors and rear-end collision risk under foggy conditions[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(1): 19–27.
- [12] WANG Fan, MA Yongfeng, XING Guanyan, et al. Driving avoidance performance on Sand-Covered roads during sand and dust storms under different visibility conditions[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2024, 105: 306–320.
- [13] 王敏, 徐阳, 刘明文, 等. 山区高速公路雾区路段安全性分级研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(12): 119–125.
WANG Min, XU Yang, LIU Mingwen. Research on safety rating of foggy section of expressway in mountainous area[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(12): 119–125.
- [14] 龚龔, 魏晨. 雾霾能见度对车辆碰撞概率影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(7): 97–103.
GONG Yan, WEI Chen. Analysis of haze visibility's influence on vehicle collision probability[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(7): 97–103.

- [15] YAN Xuedong, LI Xiaomeng, LIU Yang, et al. Effects of foggy conditions on drivers' speed control behaviors at different risk levels[J]. *Safety Science*, 2014, 68: 275-287.
- [16] LI Xiaomeng, YAN Xuedong, WONG S C. Effects of fog, driver experience and gender on driving behavior on S-curved road segments[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2015, 77: 91-104.
- [17] 卢振礼, 安源, 宗晨临, 等. 高速公路团雾视频监控预警研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(34): 15 408-15 417.
LU Zhenli, AN Yuan, ZONG Chenlin, et al. Research on video monitoring and early warning for local dense fog on the expressway[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(34): 15 408-15 417.
- [18] 李晓雷, 唐伯明, 曾超. 基于突变论的高速公路团雾驾驶行为瞬态分析[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(4): 78-87.
LI Xiaolei, TANG Boming, ZENG Chao. Transient analysis of the driving behavior in the dumping fog sections of expressway based on catastrophe theory[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(4): 78-87.
- [19] 谭翔峻. 团雾环境路段考虑最低注意力的诱导需求模型[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
TAN Xiangjun. Inductive demand model for road sections in dumping fog environment considering minimum attention[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [20] 赵小平, 马有才, 万平, 等. 情绪对新手驾驶员视觉特性的影响研究[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(1): 34-40.
ZHAO Xiaoping, MA Youcai, WAN Ping, et al. Research on influence of emotion on novice drivers' visual characteristics[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(1): 34-40.
- [21] 赵晓华, 陈浩林, 李振龙, 等. 不同情景下自动驾驶接管行为的影响特征[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(9): 195-214.
ZHAO Xiaohua, CHEN Haolin, LI Zhenlong, et al. Influence characteristics of automated driving takeover behavior in different scenarios[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(9): 195-214.
- [22] 李赞勇, 冯焘. 基于多因素的高速公路团雾区限速设计[J]. *中外公路*, 2018, 38(4): 337-342.
LI Zanyong, FENG Tao. Design of speed limit in agglomerate fog area of highway based on multiple factors[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2018, 38(4): 337-342.
- [23] PENG Yichua, ABDEL-ATY M, SHI Qi, et al. Assessing the impact of reduced visibility on traffic crash risk using microscopic data and surrogate safety measures[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, 74: 295-305.
- [24] SHANGGUAN Qiangqiang, FU Ting, LIU Shuo. Investigating rear-end collision avoidance behavior under varied foggy weather conditions: a study using advanced driving simulator and survival analysis[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 139: DOI: 10.1016/j.aap.2020.105499.
- [25] LIN Zijian, CHEN Feng. How various urgencies and visibilities influence drivers' takeover performance in critical car-following conditions? a driving simulation study[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2024, 104: 303-317.
- [26] FU Rui, LIU Wenxiao, ZHANG Hailun, et al. Adopting an HMI for overtaking assistance - impact of distance display, advice, and guidance information on driver gaze and performance[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2023, 191: DOI: 10.1016/j.aap.2023.107204.
- [27] HOGEMA J, VAN DER HORST R. Driving behaviour under adverse visibility conditions[C]. *The First World Congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems*, 1994: 1 623-1 630.
- [28] CHANG Xin, LI Haijian, QIN Lingqiao, et al. Evaluation of cooperative systems on driver behavior in heavy fog condition based on a driving simulator[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 128: 197-205.
- [29] ZHANG Yuxiao, CARBALLO A, YANG Hanting, et al. Perception and sensing for autonomous vehicles under adverse weather conditions: a survey[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 196: 146-177.



作者简介: 吴付威 (1986—),男,山东临沂人,博士,高级工程师,主要从事人—车—路系统安全、道路交通运行风险防控理论、智能辅助驾驶等方面的研究。E-mail:wufuwei@chd.edu.cn。