

中文引用格式:刘星良,徐纪东,刘唐志,等. 基于轨迹数据的隧道进出口风险驾驶行为谱研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(6): 88-97.

英文引用格式:LIU Xingliang, XU Jidong, LIU Tangzhi, et al. Research on risky driving behavior spectrum of tunnel entrance and exit based on trajectory data [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 88-97.

基于轨迹数据的隧道进出口风险驾驶行为谱研究^{*}

刘星良¹副教授, 徐纪东¹, 刘唐志^{**1}教授, 汪星钧¹, 谭国举²

(1 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

中图分类号: X951

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.0642

基金项目: 国家自然科学基金资助(52302430); 重庆市自然科学基金资助(CSTB2022NSCQ-MSX0519); 重庆市自然科学基金资助(CSTB2022NSCQ-MSX1516)。

【摘要】 为明确隧道进出口路段主要风险驾驶行为种类及分布特征, 基于卡口轨迹数据构建风险驾驶行为谱。首先, 基于宁夏六盘山隧道连续视频监控采集轨迹数据, 选取4类风险驾驶行为, 即急变速、蛇形驾驶、危险跟驰和危险换道; 然后, 使用风险度量法计算风险驾驶行为特征参数, 以四分位差法和 CRITIC 权重法确定风险驾驶行为特征参数阈值和权重, 综合得到个体驾驶员风险驾驶行为谱特征值; 最后, 对比驾驶行为得分和特征阈值统计危险驾驶员的典型风险行为危险点空间分布。结果表明: 隧道进出口段高风险驾驶员主要表现出急变速或蛇形驾驶行为, 其中急变速行为对驾驶员风险行为谱总得分的影响最为显著; 车辆在隧道进口洞内和出口洞外0~50 m 均有较大速度变化, 且与进口相比出口0~50 m 速度变化幅度更大, 危险驾驶员的急变速行为风险点在该区段分布也更为集中; 隧道进出口的洞外横向偏移值均大于洞内, 危险驾驶员的蛇形驾驶行为风险点则主要分布在隧道进出口的洞外0~50 m 范围内; 基于轨迹数据的风险驾驶行为谱可评估量化隧道进出口段驾驶员的风险程度, 有助于精细化识别高风险驾驶人。

【关键词】 隧道进出口; 风险驾驶行为谱; 轨迹数据; 驾驶员; 风险度量; 风险点

Research on risky driving behavior spectrum of tunnel entrance and exit based on trajectory data

LIU Xingliang¹, XU Jidong¹, LIU Tangzhi¹, WANG Xingjun¹, TAN Guojun²

(1 College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2 College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To identify the primary types and distribution patterns of risky driving behaviors at the entrance and exit of the highway tunnel, a risk driving behavior spectrum was constructed based on trajectory data. Firstly, trajectory data were collected through continuous video surveillance of Liupan Mountain Tunnel in Ningxia. Vehicle traffic characteristics at tunnel entrance and exit were analyzed and four categories of risky driving behaviors were selected, including rapid speed change, serpentine driving, dangerous following, and dangerous lane changing. Then, the measurement of risk method was applied to

* 文章编号: 1003-3033(2025)06-0088-10; 收稿日期: 2025-02-20; 修稿日期: 2025-04-26

** 通信作者: 刘唐志(1976—), 男, 江西吉安人, 博士, 教授, 主要从事山区公路道路交通安全方面的研究。E-mail: liutangzhi@cqjtu.edu.cn。

quantify four types of risky driving behaviors, and quartile deviation and criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) were used to determine the threshold values of risky driving behavior characteristics and weights, and the characteristic values of drivers' risky driving behavior spectrum were calculated. Finally, driving behavior scores were compared with characteristic thresholds, and the spatial distribution of hazard points for typical risky behaviors of dangerous drivers was statistically analyzed. The results of the study show that high-risk drivers in the entrance/exit sections of the tunnel mainly show the behaviors of rapid speed change or serpentine driving, in which the rapid speed change behavior has the most significant effect on the total score of the risky behavioral spectrum of the drivers. Vehicles have large speed variations at both the inside the tunnel entrance and outside the exit from 0 to 50 meters. Moreover, larger speed changes are observed at the exit section (0–50 m) compared to the entrance section, and risk points for rapid speed change behavior of dangerous drivers are also more concentrated in that segment. The lateral offset values outside the tunnel entrance/exit are larger than those inside the tunnel, and the risk points for serpentine driving behavior of dangerous drivers are mainly distributed in the range of 0–50 meters outside the tunnel entrance and exit. Risky driving behavior spectrum based on trajectory data can assess and quantify the risk level of drivers in the tunnel entrance/exit sections, facilitating precise identification of high-risk drivers.

Keywords: tunnel entrance and exit; risky driving behavior spectrum; trajectory data; drivers; measurement of risk; distribution of risk points

0 引言

高速公路隧道进出口段交通环境变化显著,事故风险较高。据统计,隧道路段约58%的事故发生在进出口段,由事故致因分析可知:驾驶员风险驾驶行为是导致隧道交通事故的主要因素^[1]。因此,量化隧道进出口路段驾驶员驾驶行为的危险程度,对行车预警设施设计等具有重要意义。

驾驶员的心理和生理指标可反映其行为状态。万利等^[2]分析车辆运行指标和驾驶员状态指标之间的相对敏感程度,结合隧道内行车安全和通行效率,提出隧道内侧墙应装饰色彩的建议。梁波等^[3]分析隧道入口不同时间和位置下驾驶员的视觉负荷,提出行车舒适度评价标准。FENG Zhongxiang等^[4]分析驾驶员的心率和速度,量化了隧道入口坡度对驾驶员心理和速度的影响。徐进等^[5]分析公路隧道断面的行驶车速数据,明确了山区隧道出入口区段的车辆运行特性和驾驶行为,揭示了隧道洞口交通事故的发生机制。孟虎等^[6]基于车辆轨迹数据,提出以个体风险指标和交互风险指标评价隧道进出口段驾驶员行为风险的方法。王可等^[7]基于轨迹数据以风险度量法量化了驾驶员4类危险驾驶行为,并构建了适用一级公路直线段的不良驾驶行为谱。刘唐志等^[8]根据合流区场景的交通特性,针对性提取出4类特征参数,构建了合流区危险驾

驶行为谱。现有研究围绕不同场景,基于驾驶员的心理生理指标及车辆运行数据分析其行为特征。此外,当前对隧道进出口路段驾驶员行为的研究主要侧重于心理和生理方面,且数据来源多为实车试验,实时性和客观性不足,缺乏针对高速公路隧道路段交通特性的驾驶行为整体风险程度的量化研究。

鉴于此,笔者拟依托实际卡口的轨迹数据,分析隧道进出口路段交通特性并选取4类风险驾驶行为,以风险度量法计算其驾驶行为风险评分,构建隧道进出口段驾驶员风险驾驶行为谱,以期对隧道路段精细化主动预警提供理论基础支撑。

1 隧道进出口段风险驾驶行为分析

1.1 数据来源

利用车辆轨迹数据进行驾驶行为研究的主要数据来源有无人机航拍数据^[8]、模拟仿真数据^[9]和美国NGSIM(Next Generation Simulation)轨迹数据^[10]等。然而,鉴于隧道场景的特殊性,无人机的使用受到诸多限制,此外,国内外交通环境与驾驶特性存在差异,美国NGSIM轨迹数据难以在此场景中得到有效应用,虽然模拟仿真应用场景广阔,但无法还原真实轨迹数据。为提取更加精确、稳定的轨迹数据,文中选定宁夏回族自治区六盘山隧道青岛方向进口路段和出口路段作为研究对象,并构建一套以卡口相机、毫米级微波雷达和补光灯组成的轨迹数据采集系

统。数据采集范围为隧道进口段和出口段各 250 m,其中出口段包括洞外 100 m、洞内 150 m,进口段包括洞外 150 m、洞内 100 m。数据采集监控点在进口和出口各设置 2 处,且 2 处监控区域存在重叠,以确保

轨迹数据可以有效拼接,监控点设置如图 1 所示。隧道长 2 385 m,限速 80 km/h,流量为 201 veh/h,大型车比例约 29%。为避免天气等自然环境对试验结果的干扰,轨迹数据采集在天气晴朗的白天进行。

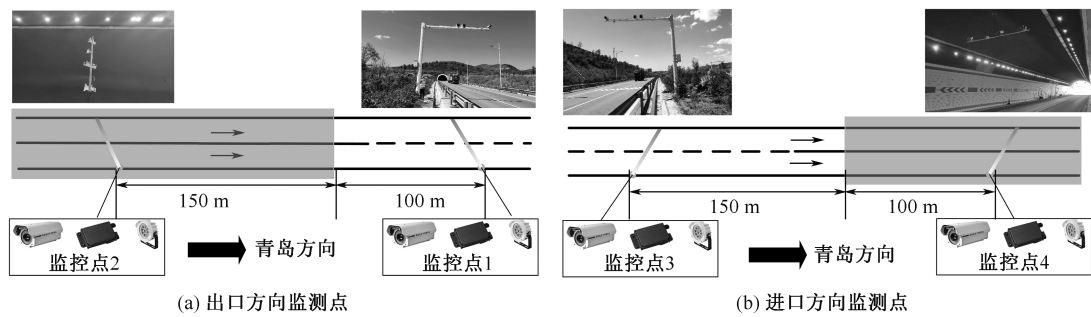


图 1 数据采集对象及监测点设置

Fig. 1 Data collection objects and monitoring point settings

鉴于大型车在车辆总数中的占比较低,并且其性能与小型车存在明显差异,文中在数据提取过程中剔除大型车和受大型车干扰的小型车轨迹数据。数据清洗和处理的具体步骤如下:①首先,进行微波雷达原始数据适配,构建雷达帧数适配表,识别并适配不同帧数格式数据进行,输出标准形式轨迹数据;②然后,按照标准形式进行数据清洗,读取微波雷达数据并判断目标形状和点云面积,删除异常目标,判断有效目标的连续性以划分 ID 和车型,并对缺失帧进行插值;③接着,剔除异常轨迹数据,依据已处理

轨迹数据,提取车速成整数倍的轨迹数据,删除车速 2 倍及以上的轨迹数据,同时剔除大型车和受大型车干扰的小型车轨迹数据;④最后,拼接车辆轨迹,统一 2 个监测点微波雷达数据的时间戳,对轨迹缺失值进行插值,当 2 个微波雷达监测点位都位于重叠区域时,需要匹配车辆的轨迹数据,统一 2 个监测点雷达坐标系进而确定车辆完整轨迹数据。经过数据清洗和轨迹拼接得到自由流下同一小型车驾驶员分别经过隧道进口和出口的高精度完整轨迹数据 612 条,轨迹数据示例见表 1。

表 1 隧道进出口路段车辆行驶轨迹数据示例

Table 1 Vehicle trajectory data in tunnel exit and entrance

车辆编号	时刻	车道编号	纵向位置/m	横向位置/m	速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	航向角/($^{\circ}$)	车长/m
6	09:12:03	2	16.7	3.16	53.2	137.69	5.27
6	09:12:03	2	17.3	3.20	54.1	137.69	5.27
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

1.2 隧道进出口段车辆行驶特性分析

1) 区间断面划分。为便于分析车辆行驶轨迹,将六盘山隧道各车道按照出口方向至入口方向分别记为出口车道 1、出口车道 2、进口车道 3、进口车道 4。根据《公路隧道设计细则》^[11],隧道洞口内外 3 s 设计速度行程范围内的平面线形应保持一致。试验监测路段的行驶车速分布在 50~80 km/h 区间,取中值速度计算得到 3 s 内车辆行程范围约为 50 m。监测隧道出入口路段范围共 250 m,按照每隔 50 m 的间距划分成 5 个区段,并沿着行车方向对各个区段依次进行编号,区段划分情况如图 2 所示。其中, S_1 — S_5 为区段。

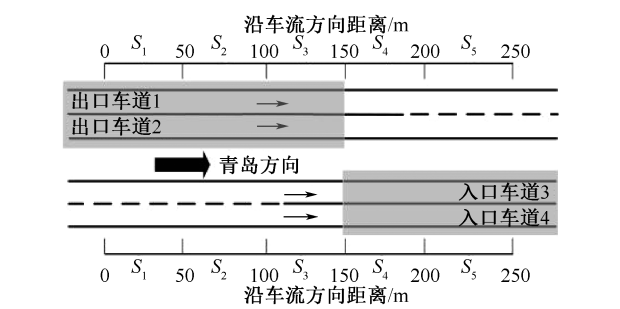


图 2 隧道出入口路段断面划分

Fig. 2 Schematic diagram of section division of tunnel entrance and exit

车辆通行状况正常,各车道不同区段的车速变化情况如图 3 所示。由图 3 可知:隧道出口路段,车辆在

2) 速度特性分析。在监测时段内隧道进出口

隧道内部 S_1 — S_3 区段始终保持稳定的小幅度增长趋势。在隧道外 S_4 区段,车道 2 的驾驶员由于在隧道内长时间保持低速行驶,驶出隧道后车速提升幅度最大。车道 1 的车辆一直位于快车道,出于对行驶环境的适应,驶出隧道后速度变化幅度较小。隧道进口段车道 3 的平均车速在所有车道中始终最大。在 S_1 区段,外部环境干扰较小,为了能够快速到达隧道入口,车道 3 车速存在小幅度增加。在 S_2

和 S_3 区段,车辆在车道 3 上以相对稳定的速度到达隧道入口,车道 4 上的车速有较缓慢增长。进入隧道内部即 S_4 — S_5 区段,车道 3 和车道 4 均出现明显的减速行为。

3) 加减速特性分析。车辆加减速速度能够表征出驾驶员行为的反应剧烈程度,并反映出驾驶员当前车速与期望车速的差距大小。各车道加减速速度变化如图 4 所示。

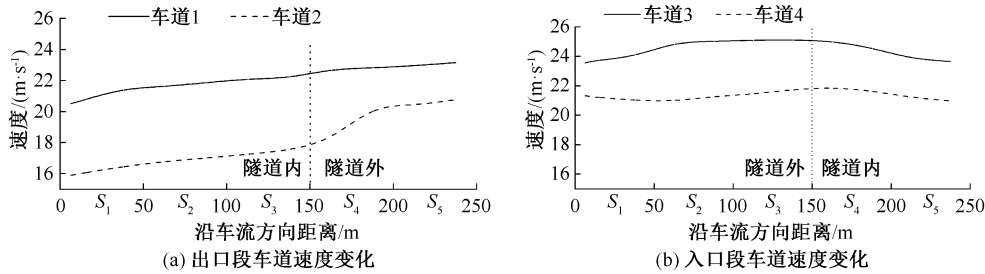


图 3 不同车道速度变化情况
Fig. 3 Lane speed variation in different sections

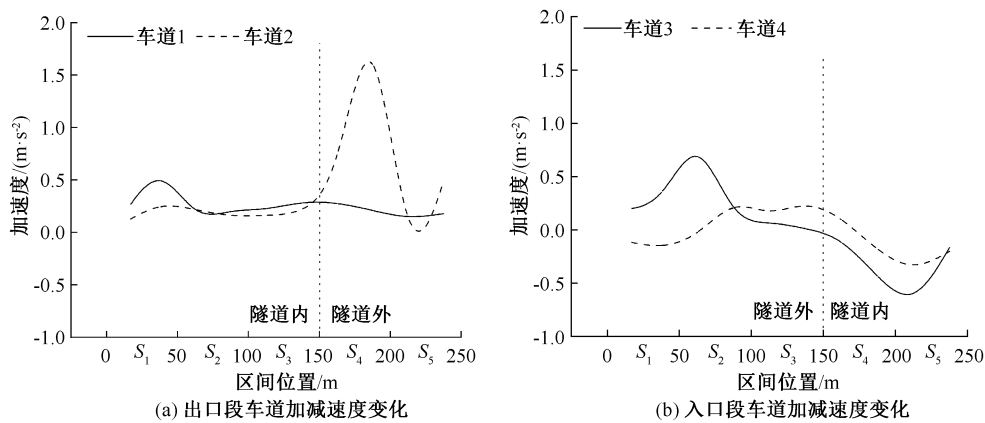


图 4 不同车道加减速速度变化情况
Fig. 4 Lane accelerated speed and drag acceleration variation in different sections

由图 4 可知:在出口路段车辆加速度始终大于 0,其中车道 2 在出口路段 S_1 — S_3 区段即隧道内部加速度维持在较低水平并保持相对稳定的状态,直到 S_4 区段即隧道出口外,由于长时间处于低速行驶状态,驾驶员产生了逃逸心理^[12],驶出隧道后加速度大幅度提升,在驶出洞口约 40 m 处达到峰值 1.72 m/s^2 后并逐渐回落。而车道 1 在 S_1 区段内加速度出现小幅度的上升,其余区段车辆加速度波动较小。

在进口路段车道 3 上的车辆在 S_1 区段加速度有一定程度的增长,随后在 S_2 — S_4 区段内车辆的加速度持续减小逐渐转为减速,并在车辆驶入隧道后 60 m 左右减速度值降到最低值(约为 0.74 m/s^2)。车道 4 上的车辆在 S_2 区段加速度开始缓慢增长并

保持较小波动,直到车辆进入隧道在 S_4 区段因为环境限制开始减速,与车道 3 上的车辆几乎在相同的位置达到减速度的极值。

4) 横向偏移值特性分析。为便于统计偏移值,以垂直于车道中心线的方向作为 X 轴,向右偏移为正,反之为负。分别统计隧道进出口段 4 条车道的横向偏移量特征,结果见表 2。

由表 2 可知:车道 2 和车道 4 上的车辆在隧道外段的偏移量普遍较大,由此表明驾驶人存在挤占内侧车道压线行驶的行为。对比各车道隧道内外的车辆偏移量可知,在隧道内部驾驶人具有更为谨慎的驾驶行为,横向偏移值的均值和中位数均较小,这与文献[9]的研究相契合。由于隧道外车辆行驶车速较高,保持中线行驶的稳定性的更差,隧道外各

表 2 隧道进出口路段车辆横向偏移量特征

Table 2 Characteristics of vehicle lateral offset at entrance and exit of tunnel

统计量	出口方向/cm				进口方向/cm			
	车道 1		车道 2		车道 3		车道 4	
	隧道内	隧道外	隧道内	隧道外	隧道内	隧道外	隧道内	隧道外
均值	-25.31	-8.34	29.16	40.03	3.18	21.14	-31.12	-46.98
中位数	-25.16	-12.55	26.42	39.47	1.56	17.35	-26.45	-42.76
标准差	23.64	31.95	28.94	35.95	27.13	34.96	33.26	40.96
最大值	21.15	49.58	84.56	118.48	87.62	148.47	11.17	10.51
最小值	-73.33	-76.54	-30.52	-51.63	-60.92	-56.46	-90.08	-130.64

车道上的车辆偏移量均值大于隧道内部。

5) 换道特性分析。提取采集的车辆行驶轨迹数据得到换道轨迹数据 168 条。区间分布如图 5 所示。由图 5 可知:出口路段车辆换道频率整体上高于入口路段,且换道位置更为集中。出口路段车辆换道主要在车道 2 上进行,且换道位置集中在洞口外 25~50 m,表明车道 2 的多数车辆驶出隧道后倾向于换道至车道 1 上行驶以快速达到期望速度。反观入口路段,车辆的换道情况多表现为从车道 3 换道至车道 4,且集中在隧道洞口前 50~75 m,仅有部分驾驶员从车道 4 换道至车道 3。

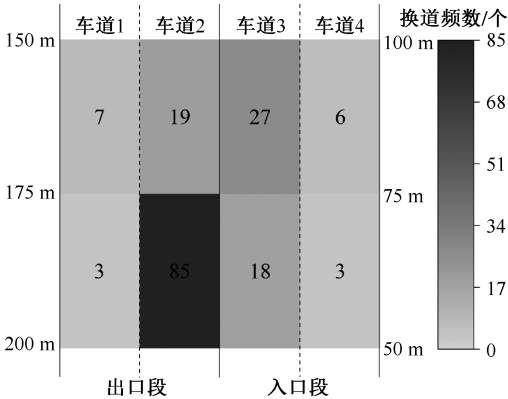


图 5 车辆换道位置分布

在换道行为时与目标车道中前车和后车的碰撞时间倒数的最大值。采用风险度量法分别计算上述 4 类风险驾驶行为的特征参数 $H_i(i=1,2,3,4)$,特征参数 H_i 值越大则表示该类驾驶行为风险程度越高。

1) 急变速。急变速特征参数 $H_1(t)$ 衡量驾驶员加减速过程中的纵向速度稳定程度。计算式为:

$$H_1(t) = \frac{a(t) - a(t - s)}{s} \tag{1}$$

式中: $a(t)$ 为车辆在 t 时刻的加速度, m/s^2 ; s 为采样时间间隔, s 。

2) 蛇形驾驶。蛇形驾驶特征参数 $H_2(t)$ 衡量驾驶员在隧道进出口段保持同一车道中线行驶的横向稳定程度,车辆蛇形驾驶横向速度标准差较大而均值近似为 0。计算式为:

$$H_2(t) = \frac{\text{std}(V_x(t - 2), \dots, V_x(t))}{\text{mean}(V_x(t - 2), \dots, V_x(t))} \tag{2}$$

式中: $\text{std}(V)$ 为速度标准差, m/s ; $\text{mean}(V)$ 为速度均值, m/s ; $V_x(t)$ 为目标车辆在 t 时刻的横向速度, m/s 。

3) 危险跟驰。危险跟驰特征参数 $H_3(t)$ 衡量驾驶员对自身车辆与前车间距把控不当而发生碰撞的风险程度,若 $H_3(t) \leq 0$,则表示无危险跟驰行为。计算式为:

$$H_3(t) = \frac{V_y(t) - V_{ly}(t)}{L_1(t)} \tag{3}$$

式中: $V_y(t)$ 为目标车辆在 t 时刻的纵向速度, m/s ; $V_{ly}(t)$ 为目标车辆前车在 t 时刻的纵向速度, m/s ; $S_1(t)$ 为目标车辆与前车在 t 时刻的车辆间距, m 。

4) 危险换道。危险换道特征参数 $H_4(t)$ 衡量驾驶人进行换道时与目标车道前车或后车发生碰撞的危险程度,不发生换道行为时 $H_4(t)$ 为 0。计算式为:

$$H_4(t) = \max \left\{ \frac{V_y(t) - V_{ly}(t)}{S_1(t)}, \frac{V_{2y}(t) - V_y(t)}{L_2(t)} \right\} \tag{4}$$

2 隧道进出口风险驾驶行为谱构建

2.1 风险驾驶行为谱量化指标

分析隧道进出口段交通特性发现,进出隧道时驾驶员的操纵行为更加复杂。结合文献[7-8],选取隧道进出口段驾驶员的风险驾驶行为,主要包括急变速、蛇形驾驶、危险跟驰和危险换道^[13-15]。参照文献[7]中对不良驾驶行为的度量方法,选取纵向加速度变化率、横向速度变异系数、碰撞时间倒数(Inversed Time to Collision, ITTC)、 $\max\{\text{ITTC}\}$ 作为风险驾驶行为谱特征指标,其中, $\max\{\text{ITTC}\}$ 为车辆存

式中: $V_{2y}(t)$ 为目标车道后车在 t 时刻的纵向速度, m/s ; $L_2(t)$ 为目标车辆与后车在 t 时刻的车辆间距, m 。

2.2 风险驾驶行为谱特征值计算方法

1) 风险驾驶行为特征参数阈值。文中 4 类风险驾驶行为特征参数存在特征参数阈值 H_i^* , 若 $H_i > H_i^*$ 则说明该驾驶员具有第 i 种风险驾驶行为, 反之则为安全状态。为了确定特征参数阈值以划分驾驶人驾驶行为状态, 参照文献[16]计算数据阈值的方法, 按照剔除中度异常值的计算方式确定危险指标阈值 H_i^* (系数取 1.5), 计算式为:

$$H_i^* = Q_i + 1.5I_i \tag{5}$$

式中: Q_i 为第 i 类风险驾驶行为特征参数值的上四分位数; I_i 为第 i 类风险驾驶行为特征参数值上、下四分位数差值。

2) 风险驾驶行为谱特征值。驾驶员的整体风险程度判别以 4 类风险驾驶行为总得分为依据, 在 t 时刻仅当 $H_i > H_i^*$ 时计算该类风险驾驶行为的得分 $G_i(t)$, 分值越大风险程度越高; 当特征参数小于特征参数阈值时, 处于安全状态得分为 0。计算式为:

$$G_i(t) = \frac{H_i(t) - H_i^*}{H_i^*}, H_i(t) > H_i^* \tag{6}$$

式中: H_i 为第 i 类风险驾驶行为的特征参数; H_i^* 为第 i 类风险驾驶行为的特征参数阈值。

采用时间累计平均法计算驾驶员风险行为得分, 驾驶员在试验监测时段内的平均分 E_i 为:

$$E_i = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T G_i(t) \tag{7}$$

式中: $G_i(t)$ 为第 i 类风险驾驶行为得分; T 为监测时长, s 。为消除 4 类风险行为特征参数造成的量纲差异, 归一化处理 E_i 可得:

$$E_{Ni} = \frac{E_i - \min(E_i)}{\max(E_i) - \min(E_i)} \tag{8}$$

对标准化后风险行为得分进行赋权求和得到驾驶人的风险行为谱特征值 K 。文中选取的 4 类不同风险驾驶行为特征参数之间数值差异较大, 且同一类风险驾驶行为特征参数间存在显著波动性, 因此文中选取 CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) 权重法进行赋权。该权重法是一种基于数据波动性的客观赋权法, 采用波动性和冲突性指标进行参数权重评价。其中, 波动性指标使用数据标准差进行表征, 波动越大则权重越高; 冲突性使用数据的相关性系数进行表征, 冲突性越小

则权重越低。将波动性指标和冲突性指标做乘积并进行归一化处理, 得到最终权重 W_i 。基于风险驾驶行为权重, 综合得到风险行为谱特征值, 计算过程为:

$$K = \sum_{i=1}^n W_i E_{Ni} \tag{9}$$

式中: W_i 为第 i 类风险驾驶行为的权重, 4 类权重之和为 1; n 为风险驾驶行为类别数, $n=4$ 。

3 风险驾驶行为谱结果分析

基于监测采集轨迹数据, 运用式(1)一式(9)计算驾驶员风险驾驶行为谱特征值, 分析驾驶员风险行为得分分布情况, 辨别隧道场景下的高风险驾驶员。

3.1 风险驾驶行为相关性

为了验证文中所提取的 4 类风险驾驶行为可有效描述隧道进出口段驾驶人风险行为, 研究运用 Spearman 相关系数法对风险行为特征参数进行相关性分析, 结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 文中 4 类驾驶员风险驾驶行为间整体相关系数偏小, 其中多数驾驶行为参数间相关系数小于 0.1, 仅蛇形驾驶同危险跟驰和换道之间相关系数达到了 0.2 以上, 说明本研究选取的 4 类驾驶行为能够涵盖隧道进出口场景下的驾驶员风险驾驶行为。

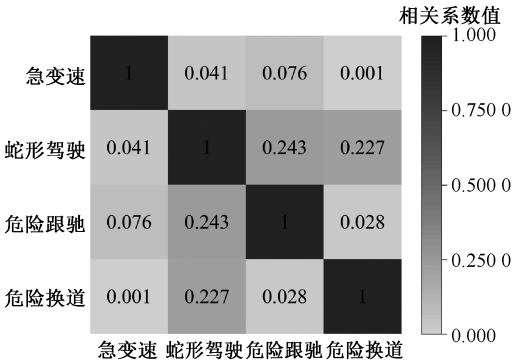


图 6 特征参数间的相关性系数

Fig. 6 Correlation coefficient between feature parameters

3.2 隧道进出口段风险驾驶行为量化评价

利用式(1)一式(5)分别计算各类风险行为的特征参数阈值, 结果见表 3。文中针对同一驾驶员通过隧道进出口的驾驶行为进行研究, 旨在辨识出高风险驾驶员, 因此在量化评价的过程中不对进口和出口进行区分。

基于所计算风险驾驶行为的阈值, 运用式(6)一式(8)得到归一化后的 4 类风险驾驶行为

表 3 风险驾驶行为特征参数阈值

Table 3 Risk driving behavior characteristic
parameter threshold

指标	急变速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-3}$)		蛇形 驾驶	危险跟 驰/ s^{-1}	危险换 道/ s^{-1}
	急加速	急减速			
阈值	2.161	-2.258	5.381	0.333	0.401

时间平均得分,绘制分布图如图 7 所示。由图 7 可知:4 类风险驾驶行为的得分分布主要集中于 $[0, 0.1)$ 区间,仅有部分驾驶员在隧道进出口路段行驶过程中出现高风险驾驶行为。驾驶员危险跟驰和换

道的得分呈现出相似的分布特征,多数集中在 $[0, 0.4)$,而在 $[0.5, 0.7)$ 内有极少数分布,表明在隧道进出口段驾驶人因车间距把控不当而引发事故的风险较低。急变速和蛇形驾驶得分较为分散,急变速行为得分大部分处于 $[0, 0.1)$ 中,在 $[0.1, 1.0)$ 中也有一定数量的均匀分布;蛇形驾驶行为得分多数分布在 $[0, 0.6)$ 中,且在 $[0.6, 1.0)$ 中有少量分布。上述分析结果表明:隧道进出口路段高危驾驶员主要表现为急变速和蛇形驾驶行为。

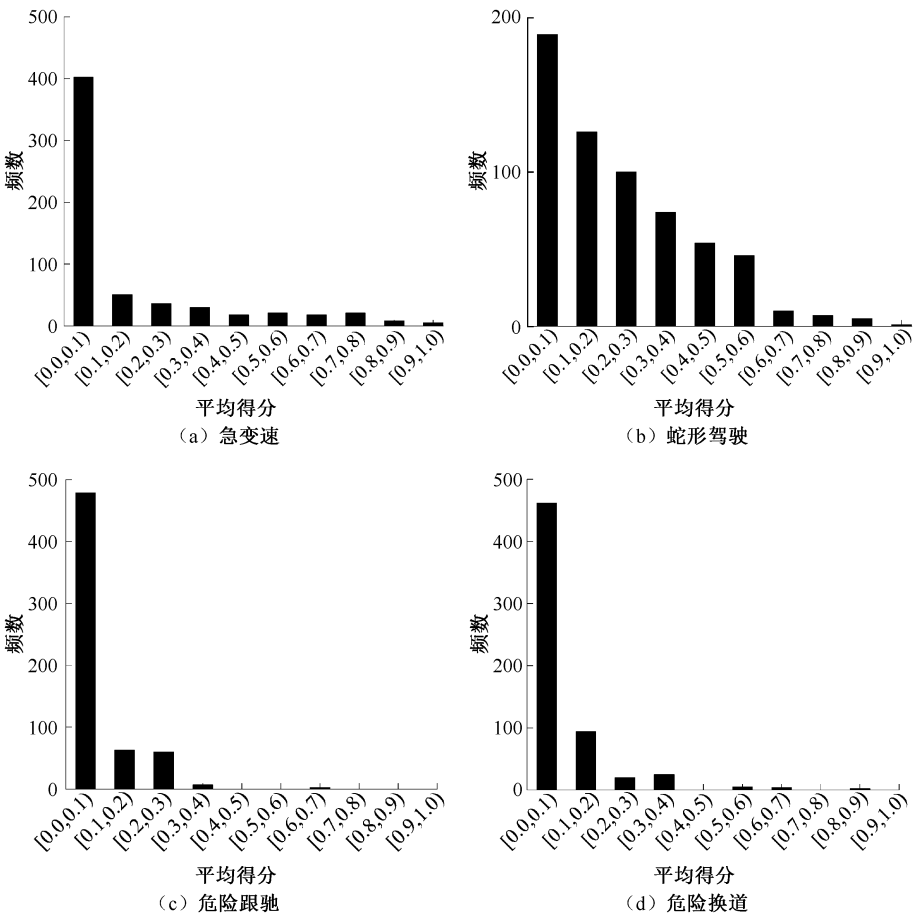


图 7 风险驾驶行为得分分布

Fig. 7 Distribution of risk driving behavior scores

3.3 隧道出入口段风险驾驶行为谱特征值

利用 CRITIC 权重法计算得到隧道进出口段 4 类风险驾驶行为权重占比见表 4。

表 4 风险驾驶行为权重

Table 4 Weight of risky driving behavior

风险行为	急变速	蛇形驾驶	危险跟驰	危险换道
权重	0.392	0.287	0.139	0.182

基于上述权重值,结合式(9)分别计算各类风

险驾驶行为赋权得分,求和得到各驾驶员总得分,并绘制分布图,如图 8 所示。由图 8 可知:驾驶员风险驾驶行为谱得分在 $[0, 0.05)$ 分布数量最多,有 93% 的驾驶员的得分分布在 $[0, 0.15)$ 区间内且得分越高频数越小,而其他区间内也有少量分布。上述结果表明:在隧道进出口段场景下行驶的绝大多数驾驶员安全风险较低,只有约 7% 的驾驶员对该路段下的交通安全产生较大影响,且通过上述研究能够得知,该交通安全风险大部分由驾驶员的急变速和

蛇形驾驶行为所产生。

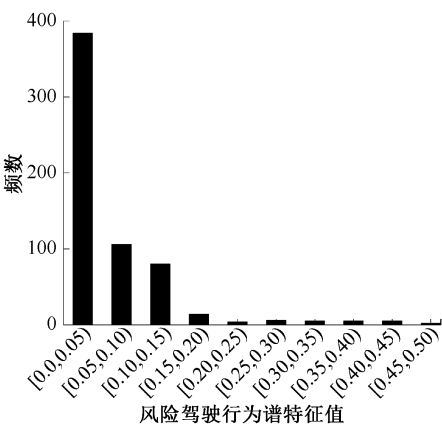


图 8 风险驾驶行为谱特征值分布
Fig. 8 Distribution of characteristic values of risky driving behavior spectrum

3.4 隧道进出口风险点分布

通过分析风险驾驶行为谱特征值的分布情况可知,在数据采集的 612 位驾驶员当中高风险驾驶员属于少数群体,但划分正常与危险驾驶员的具体阈值尚未统一。通过对风险驾驶行为谱特征值分布的统计发现,得分较低的驾驶员主要分布在区间[0, 0.15)中,其占比经统计结果为 93%,结合部分学者将驾驶员样本中的 5%~10% 划分为高风险驾驶员^[7,17],全文将风险驾驶行为谱特征值分布在 [0.15,0.50) 占总体样本 7% 的驾驶员标记为高风险驾驶员。风险驾驶行为特征值可对应到具体空间位置,比较风险驾驶行为特征参数与对应特征参数

阈值的大小,统计 43 位高风险驾驶员的行为得分空间位置分布特征,当 $H_i > H_i^*$ 则将该点统计为风险点。隧道进出口驾驶员的急变速和蛇形驾驶得分在高分段存在一定数量的分布,且权重占比较高,而危险跟驰和危险换道高得分分布极少。

鉴于此,统计高风险驾驶员急变速和蛇形驾驶行为的风险点空间位置分布特征,如图 9 所示。由图 9a 可看出,纵向分布上,隧道出口和进口中的快车道出口车道 1 和入口车道 3 其急变速危险点分布均高于另一车道;横向分布上,在出口段,由于驾驶员在隧道内长时间保持低速行驶,驶出隧道后会产生逃逸心理,因此,隧道外部急变速危险点数量高于内部,且在出口洞外 50 m 范围内最为集中;在进口段,由于环境变化和限速,大部分驾驶员驶入隧道后开始减速,因此,隧道内部急变速危险点高于外部,同样也是集中在进口洞内 50 m 范围内。由图 9b 可知:横向分布上,介于隧道内的封闭物理构造,驾驶员横向操作更加谨慎,隧道外部的蛇形驾驶危险点分布均高于内部,在出口段,隧道洞口外急加速现象明显,速度越大单位时间内横向偏移量越大,因此,蛇形驾驶危险点在出口洞外 50 m 范围内最为集中,在进口段,由于隧道内外环境差异,多数驾驶员在隧道进口洞外 50 m 范围内调整其横向位置,以安全驶入隧道。基于上述对危险驾驶员主要风险驾驶行为危险点空间分布特征的分析结果,可为隧道进出口合理位置设置交通安全设施以及标志提供依据。

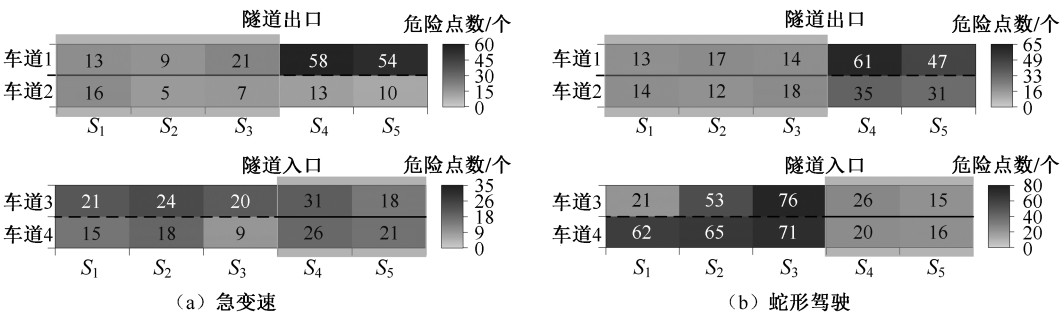


图 9 危险驾驶员风险点空间分布
Fig. 9 Distribution of risk points for dangerous drivers

4 结 论

1) 自由流状态下,急变速、蛇形驾驶、危险换道和危险跟驰行为不存在共线性,可有效表征隧道进出口路段驾驶员的风险驾驶行为;其中,急变速和蛇形驾驶行为对隧道进出口区域的安全影响最大。

2) 不同驾驶行为对隧道进出口的安全影响程度不同,高风险驾驶员的行为主要表现为急变速或蛇形驾驶行为,其中急变速对隧道出口的安全影响更大,而蛇形驾驶对隧道入口的安全影响更大。

3) 隧道进出口典型风险驾驶行为危险点空间分布具有重合性,急变速行为危险点主要分布在隧道出

口洞外和进口洞内各 50 m 范围内,且隧道进出口段快车道急变速危险点分布均高于普通车道;蛇形驾驶危险点在隧道进出口段的隧道外部分布均高于内部,且主要集中在进出口隧道外部 50 m 范围内。

4) 隧道进出口路段驾驶员的风险行为得分多

数分布在 $[0, 0.15)$,处于安全状态,高风险驾驶员占比较低;基于卡口轨迹数据的隧道进出口风险驾驶行为评价能精准定位高风险驾驶人,结合道路监测预警系统可为隧道路段精细化主动安全防控提供理论依据。

参 考 文 献

[1] 赖金星,张鹏,周慧,等. 高速公路隧道交通事故规律研究[J]. 隧道建设, 2017, 37 (1): 37-42.
LAI Jinxing, ZHANG Peng, ZHOU Hui, et al. Study of rules of traffic accidents in expressway tunnels[J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (1): 37-42.

[2] 万利,张长安,李璟,等. 隧道彩色路面和侧墙设计对驾驶行为的影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33 (增1): 25-34.
WAN Li, ZHANG Chang'an, LI Jing, et al. Analysis of effect of colored pavement and sidewall design on driving behavior in tunnels[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33 (S1): 25-34.

[3] 梁波,秦灿,牛佳安,等. 基于 Topsis 改进因子分析的公路隧道入口段视觉负荷研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34 (1): 77-84.
LIANG Bo, QIN Can, NIU Jia'an, et al. Visual load in threshold zone of highway tunnel based on Topsis improved factor analysis method[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34 (1): 77-84.

[4] FENG Zhongxiang, YANG Miaomiao, ZHANG Weihua, et al. Effect of longitudinal slope of urban underpass tunnels on drivers' heart rate and speed: a study based on a real vehicle experiment[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 525-533.

[5] 徐进,曾粤. 高速条件下隧道出入口行驶速度特性[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21 (4): 197-209.
XU Jin, ZENG Yue. Characteristics of driving speed at tunnel entrance and exit at high speed[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21 (4): 197-209.

[6] 孟虎,郭蕊,陈艳艳. 基于轨迹数据的高速公路隧道风险特性分析[J]. 公路, 2023, 68 (9): 289-295.
MENG Hu, GUO Rui, CHEN Yanyan. Risk characteristics analysis of highway tunnel based on trajectory data[J]. Highway, 2023, 68 (9): 289-295.

[7] 王可,陆健,蒋愚明. 基于车辆行驶轨迹的道路不良驾驶行为谱构建与特征值计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20 (6): 236-249.
WANG Ke, LU Jian, JIANG Yuming. Abnormal road driving behavior spectrum establishment and characteristic value calculation method based on vehicle driving trajectory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20 (6): 236-249.

[8] 刘唐志,毕辉云,杨卓思,等. 基于操纵量指标的合流区危险驾驶行为谱研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23 (2): 242-251.
LIU Tangzhi, BI Huiyun, YANG Zhuosi, et al. Dangerous driving behavior spectrum in merging area based on maneuver indicators[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23 (2): 242-251.

[9] CALVI A, DE-BLASIIS M R, GUATTARI C. An empirical study of the effects of road tunnel on driving performance[J]. Procedia-social and Behavioral Sciences, 2012, 53: 1 098-1 108.

[10] 陈景旭,程文昱,万剑,等. 基于 NGSIM 微观轨迹数据的车辆跟驰行为安全评价[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2022, 41(1): 1-6,21.
CHEN Jingxu, CHENG Wenyu, WAN Jian, et al. Safety evaluation of car-following behavior based on NGSIM micro trajectory data[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2022, 41(1): 1-6,21.

[11] JTG/T D70—2010, 公路隧道设计细则[S].
JTG/T D70—2010, Guidelines for design of highway tunnel[S].

[12] CHEN Danjue, LAVAL J, ZHENG Zuduo, et al. A behavioral car following model that captures traffic oscillations[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(6): 744-761.

[13] 唐正光, 付用国, 董文武, 等. 高速公路隧道路段车速特性分析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2020, 39(6): 25-32.

TANG Zhengguang, FU Yongguo, DONG Wenwu, et al. Speed characteristic analysis of expressway tunnel section[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2020, 39(6): 25-32.

[14] 陈莹, 杜志刚, 许富强, 等. 基于规避行为的城市水下特长隧道驾驶负荷评价[J]. 公路, 2023, 68(12): 206-214.

CHEN Ying, DU Zhigang, XU Fuqiang, et al. Driving load evaluation of urban underwater extra-long tunnel based on evasive behavior[J]. Highway, 2023, 68(12): 206-214.

[15] 胡立伟, 陈政, 张婷. 基于高原地区高速公路特长隧道路段的跟车特征与安全性研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(1): 112-120.

HU Liwei, CHEN Zheng, ZHANG Ting. Study on car-following characteristics and safety based on extra-long expressway tunnel section in plateau region[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(1): 112-120.

[16] 赵天辉, 张耀, 王建学. 基于空间密度聚类 and 异常数据域的负荷异常值识别方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 97-105.

ZHAO Tianhui, ZHANG Yao, WANG Jianxue. Identification method of load outlier based on density-based spatial clustering and outlier boundaries[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 97-105.

[17] 万豫, 黄妙华, 王思楚. 基于改进 DBSCAN 算法的驾驶风格识别方法研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2020, 43(10): 1 313-1 320.

WAN Yu, HUANG Miaohua, WANG Sichu. Research on a driving style recognition method based on improved DBSCAN algorithm[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2020, 43(10): 1 313-1 320.



作者简介： 刘星良 （1989—）,男,陕西西安人,博士,副教授,主要从事交通安全、交通流理论等方面的研究。E-mail:xingliang@cqjtu.edu.cn。