

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.04.013

高海拔公路隧道进口段驾驶人生理特征识别模型研究

张丽改, 王 兵, 李鹏胜, 赵 越

(新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 为研究高海拔高速公路隧道进口段驾驶人生理特征变化规律及主要影响因素,提高高海拔隧道进口段行车安全性,首先,按照刺激因素对驾驶人生理特征的影响程度将高海拔高速公路隧道进口段划分为 L_1 、 L_2 、 L_3 ,以心率表征驾驶人生理特征,并分别选取车辆距隧道口距离、隧道内照度作为驶入隧道前、后的影响因子;其次,通过实车等效试验,获取车辆位置信息、驾驶人在不同速度下的心率及隧道内照度数据;最后,运用数理统计对比分析了驾驶人在不同路段以不同车速行驶时心率指标的变化规律及差异性,并分别建立了不同车速下驾驶人速率与车辆距隧道口距离($L_1 + L_2$)段、心率与照度(L_3 段)间的回归模型,以探索外部因素对驾驶人生理特征变化的影响程度。结果表明,不同行驶阶段,驾驶人速率存在显著差异,且驾驶人在驶入隧道前400 m至驶入隧道后350 m心率变化最明显;进入隧道前、后,在考虑了初始车速、车辆距隧道口距离与初始车速、照度等因素后,所建立的回归模型为三次曲线模型,且拟合度均较高;不同初始车速下,驾驶人的速率变化不同,当初始车速控制在80 km/h左右时,更有利于驾驶人适应高海拔隧道进口段行车环境。

关键词: 高海拔低氧环境; 隧道进口段; 驾驶人生理特征; 实车等效试验; 回归模型

中图分类号: U 458.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)04-0570-07

Study of driver's physiological feature recognition model at the entrance of high altitude highway tunnel

ZHANG Ligai, WANG Bing, LI Pengsheng, ZHAO Yue

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: In order to study the variation law and main influencing factors of drivers' physiological characteristics at the entrance section of high-altitude expressway tunnel and improve the driving safety at the entrance section of high-altitude tunnel. Firstly, the entrance section of high-altitude expressway tunnel is divided into L_1 , L_2 and L_3 according to the influence of stimulating factors on drivers' physiological characteristics. The physiological characteristics are characterized by the drivers' heart rate, with the distance from the vehicle to the tunnel mouth and the illumination in the tunnel selected as the influencing factor parameters before and after driving into the tunnel. Secondly, through the real vehicle equivalent test the vehicle position information, the driver's heart rate and illumination data in the tunnel at different speeds are obtained. Finally, the change law and difference of heart rate index when drivers drive at different speeds in different sections are compared and analyzed by using mathematical statistics, with the regression models between driver's heart rate and the distance between vehicle and tunnel entrance ($L_1 + L_2$) and heart rate and illumination (L_3) at different speeds established to explore the influence of external factors on the change of driver's physiological characteristics. The results show that there are significant differences in drivers' heart rate at different driving stages, and that the change of heart rate is

收稿日期: 2021-09-11; **网络出版日期:** 2022-05-23

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220523.1049.002.html>

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2020A03003)

第一作者: 张丽改,女,硕士生,研究方向为智能交通管控技术与装备。E-mail:3151140268@qq.com

通信作者: 王兵,男,学士,教授,研究方向为智能交通管控技术与装备、新型汽车应用关键技术等。E-mail:451619037@qq.com

the most obvious from 400 m before entering the tunnel to 350 m after entering the tunnel. Considering the initial vehicle speed, the distance between the vehicle and the tunnel entrance, the initial vehicle speed and illumination, the regression models are almost cubic curve models, and the fitting degrees are high. The driver's heart rate changes differently at different initial speeds; when the initial speed is controlled at about 80 km/h, it is more conducive for the driver to adapt to the driving environment at the entrance of high-altitude tunnel.

Key words: high altitude hypoxia environment; tunnel entrance section; driver's physiological characteristics; equivalent test of real vehicle; regression model

乌尉高速公路建成后将成为南北疆之间一条快速通道,而横贯天山南北的天山胜利隧道(ZK75+780~ZK97+815)则是乌尉高速的“咽喉”工程,该隧道全长约 22km^[1],入口段海拔 3 200 m,是典型的高海拔高速公路隧道,建成后将成为世界最长的高速公路隧道。在海拔 3 200 m,氧气含量为 17.75%的环境下,吸入人体内的氧相对减少,这会导致驾驶人出现心率、呼吸频率增加,血氧饱和度、肺通气量、耗氧量降低等现象^[2],造成驾驶人行车疲劳,反应延时等,使驾驶人的驾驶行为处于不良状态^[3-4],严重影响驾驶人的行车安全。

通过对中国 262 起典型隧道交通事故的统计分析发现,隧道进口段的洞内事故多于洞外事故;洞内 200 m 至洞外 100 m 路段,事故分布比较集中;由驾驶人直接引发的交通事故占事故总数的 56%;隧道长度与交通事故有一定关系,长隧道和特长隧道事故数量相对较多^[5]。乌尉天山胜利隧道是世界上最长的高海拔隧道,通过对乌尉高速公路的车型预测(2020—2035 年)发现,小客车占 57%以上^[6],驾驶人多为非职业驾驶员,故在隧道入口段,驾驶人更易出现紧张、激动等驾驶心理^[7],从而使驾驶人心理负荷增大,生理特征出现较大变化。

目前,有关隧道行车环境影响驾驶人心理生理特征的研究,国内外已有很多。Chen 等^[8]通过实车试验采集视觉和生理数据,研究了山区高速公路隧道进口环境对驾驶员视觉和生理的影响。Feng 等^[9]为量化研究隧道中坡度对驾驶人心率增长指数(HRG)和速度的影响,建立了 HRG、速度和坡度之间的关系模型。Ma 等^[10]将特长隧道划分为 5 个交通安全区,分析了不同交通安全区事故的时间分布、形态、事故原因等。Feng 等^[11]以最大心率变异性和平均心率变异率为生理指标来衡量驾驶员的生理负荷,并通过 UC-win/Road 软件模拟隧道场景,通过驾驶模拟器探索不同工况下驾驶员心率,以此来评估城市渡河隧道最低点的安全性。Faure 等^[12]以眨眼行为评估驾驶员心理负荷,研究了驾驶人在执行主任务和次任务时,心理负荷与驾驶任务难度的

关系,结果表明,次任务难度对驾驶人心理负荷存在显著影响。郭玉洁等^[13]为研究城市隧道驾驶人心理负荷变化规律,选用瞳孔面积变化率、注视时间、RR 间期标准差和 RR 间期差值平方根 4 项指标,利用因子分析法构建了驾驶人心理负荷计算模型。乔建刚等^[14]从定性、定量角度分析了高速公路隧道口距离与光照强度、速度、驾驶员心理生理反应的相互关系,建立了隧道入口段多元回归安全评价模型。朱彤等^[15]以心率和心率变异性指标分析为基础,通过数据挖掘构建了基于因子分析的心理负荷计算模型。吴苏南等^[16]对比分析了驾驶人在城市隧道入口和出口段行驶时,心率、瞳孔大小两类生理特征的变化规律及差异性,以探索外部因素对心率的影响程度。赵炜华等^[17]研究了驾驶人在隧道入口段心率和车速的变化,结果表明,在长隧道入口环境中行车时,驾驶人心率增加,心理紧张程度高于一般道路,随着与隧道入口的不断接近,驾驶人心率呈现先增加后减少的规律。

综上,现有研究主要集中在城市隧道^[9,11-13,16]及低海拔长大高速公路的隧道进口段^[8,10,14-15,17],对高海拔特长隧道进口段的研究较少,而在高海拔低氧环境下,驾驶人的反应、执行能力下降,再遇隧道驾驶环境,势必加大驾驶人对驾驶信息获取、判断及对车辆操控的难度。因此,本文通过研究驾驶人在高海拔隧道进口段的生理特征,分析其变化规律,探究外部因素对其心理、生理特征的影响程度,以期为乌尉天山胜利隧道异常驾驶行为特征研究及交通安全设施设计提供理论依据。

1 驾驶人生理特征分析及参数选取

1.1 驾驶人生理特征分析

驾驶人在低海拔地区行车时,其各项生理指标相对稳定;急进高海拔地区,由于氧气含量持续减少,驾驶人各项生理、心理指标波动较大,甚至出现异常;行进至海拔 3 200 m 左右时,驾驶人开始出现压抑、焦躁等心理,此时,驾驶人看到隧道洞口容易出现紧张的心理特征,尤其是当行车速度较高时,反应时间减少,而驾驶人大多为隧道驾驶经验匮乏的

非职业驾驶员,因此更易出现紧张的心理现象,进而引起生理指标变化。

为明晰驾驶人在高海拔隧道进口段的心理、生理变化,按照刺激因素对驾驶人生理特征的影响程度,将高海拔高速公路隧道进口段划分为模糊感知阶段(L_1 段)、清晰感知阶段(L_2 段)、适应隧道驾驶环境阶段(L_3 段)。 L_1 段,即从驾驶人看清楚隧道口且心率出现明显波动到认读隧道标志内容且心率出现明显上

升时车辆行驶的距离; L_2 段,即从驾驶人认读隧道标志内容且心率明显上升时到车辆最前端与隧道洞口截面重合时车辆的行驶距离;进入隧道后,环境引起驾驶人心理生理继续变化,生理指标继续叠加,一段时间后,驾驶人逐渐适应了隧道驾驶环境,生理指标叠加到一定程度后便不再增加,而是在一定范围内波动,故 L_3 段为车辆最前端与隧道洞口截面重合时到驾驶人心理变化开始稳定时车辆的行驶距离,如图1所示。

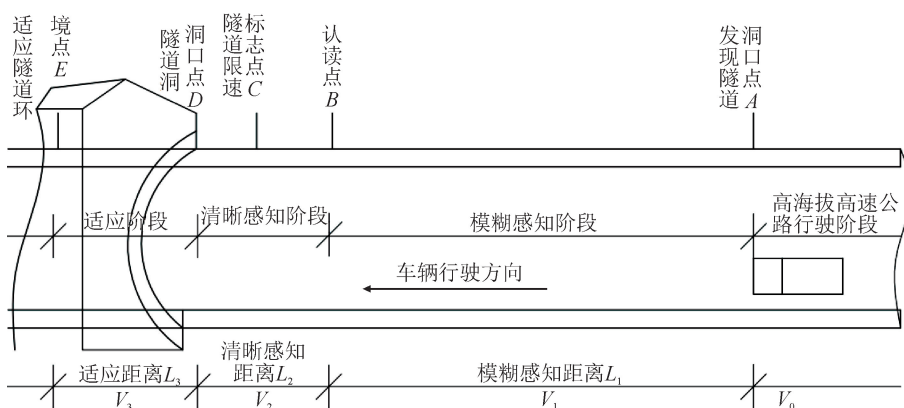


图1 隧道进口段划分示意图

Fig. 1 Diagram for division of tunnel entrance section

驾驶人主要通过视觉感知隧道洞口,经过反复实车试验,在距隧道口1400m左右时,驾驶人能清楚地看见隧道洞口,故取 L_1+L_2 为1400m;隧道限速标志的位置设在隧道洞外距离隧道进口75m处,开始认读距离202.66m^[18],由于高海拔低氧驾驶环境对驾驶人视认及减速过程的影响,初步判断限速标志及视认距离大于202.66m,且为给驾驶人预留充足的减速距离,故取 L_2 为300m。经过上述分析,驾驶人在隧道驾驶过程中,当其生理指标在一定范围内波动而不再持续增加时,便可认为驾驶人适应了隧道内驾驶环境,故 L_3 是驾驶人心理指标变化稳定时至隧道洞口的距离。

1.2 参数选取

1.2.1 驾驶人生理特征表征参数

在高海拔高速公路隧道进口段行车过程中,不同初始车速、低氧驾驶环境、隧道独特的驾驶环境等因素都会对驾驶人的心理、生理产生一定影响。心率是反映人体生理、心理特征变化的综合性指标,也是反映紧张程度的有效指标,如在模糊感知阶段,当看见隧道洞口,由于隧道驾驶经验匮乏,加之低氧环境对其生理、心理的影响,驾驶人易出现紧张感,从而导致心率增加;适应隧道驾驶环境后,隧道内行车速度相对较低,会使人昏昏欲睡,心率降低。因此,本文采用心率指标来衡量高海拔高速公路隧道进口

段对驾驶人心理、生理特征的影响。

1.2.2 影响因子参数选取

车辆进入隧道之前,驾驶人仍旧在高速公路段行车,但高海拔低氧环境及隧道的存在会使驾驶人产生紧张、激动的心理现象,即看见隧道后,驾驶人开始出现紧张情绪,随着车辆的前进,隧道洞口越来越清晰,驾驶人越来越紧张,到达隧道洞口时,紧张程度达到最大,故可用车辆与隧道洞口的距离(l)来近似刻画超长隧道对驾驶人心理特征的影响,且为方便记录,取 $\Delta l=100\text{m}$;进入隧道后,引起驾驶人心理、生理特征变化的因素较多,主要有“黑洞”效应、“闪频”效应、照度、心理上的“边墙效应”等,但心理上的“边墙效应”对驾驶人心理特征的影响难以刻画,而“黑洞”效应、“闪频”效应本质上是亮度不同所致,故用照度(L)近似代替进入隧道后隧道对驾驶人心理特征的影响。

2 试验数据采集

2.1 试验方案

由于乌尉天山胜利隧道尚未建成,因此通过等效试验来研究低氧状态下驾驶人在隧道进口段的生理特征。等效试验的隧道需具备以下条件:①海拔在3200m左右;②高速公路隧道;③特长隧道。

通过对新疆公路隧道的长期调研发现,很难找

到同时满足以上三个条件且已通车的隧道,故本次试验分为两部分:第一部分,营造高海拔低氧环境。高海拔地区的主要特征是低气压、低氧环境,它是通过影响驾驶人的呼吸率进而引起一系列生理反应,因此可尝试通过佩戴口罩的方式营造高海拔低氧环境。乌尉天山胜利隧道入口段海拔 3 200 m,氧气浓度 17.75%,动脉血氧饱和度 91.4%、反应延时 0.25 s。通过为驾驶人佩戴一层普通医用口罩与一个 N95 口罩,并用双面胶将口罩边缘与面部粘贴(粘贴范围占整个口罩的 2/3),使驾驶人的动脉血氧饱和度稳定于 91%~92%、反应延时达到 0.25 s,当驾驶人的

直观感受、心率以及对车辆的操控等均与置身于海拔 3 200 m 左右相同时,便可认定通过口罩营造了高海拔低氧环境,且该方法的可行性已经过大量试验验证。第二部分,采用葛家沟隧道等效代替乌尉天山胜利隧道。葛家沟隧道左幅长 1 475 m,右幅长 1 430 m,为三车道高速公路隧道,满足探索乌尉天山胜利隧道入口段驾驶人特征的条件。

为验证低氧环境的等效方法对驾驶操作有无影响,选择 30 名被试人员(4 名老师、26 名学生)通过驾驶模拟器进行预试验,初步分析驾驶人的生理特征并调整整车试验方案。试验过程如图 2 所示。



图 2 试验过程图

Fig. 2 Diagram of experiment process

2.2 数据采集与处理

试验车上路前,首先对试验仪器进行调试,对各试验设备的时间进行统一校准(保证各个特征数据为同一测试点),确保设备正确安装且不影响驾驶人正常操作,减少仪器对驾驶人的干扰。此外,提前告知驾驶人试验目的,要求驾驶人完全按照自身驾驶习惯、反应情况完成驾驶。其次在试验车辆上安装五轮仪、TES-1339 照度计以采集车辆的实时速度、隧道照度等数据,车辆位置信息通过 WT901C 数字姿态传感器测得的加速度信息间接获得;最后为驾驶人配戴 ProComp Infiniti 生理仪,实时采集驾驶人的心率数据。

通过预试验发现,不同被试者在高海拔隧道入口段表现出相同的生理变化规律,因此本次试验仅选取具有代表性(不同驾龄、性别、年龄、职业)的 5 名被试者作为试验对象。由于试验的特殊性,被试者均是身体健康、各项生理机能正常的非职业驾驶人,均持有 C 照及以上的驾驶执照,且要求驾驶人在试验前保证充足的睡眠,避免剧烈运动,禁止饮酒等。被试车辆为中型 SUV,为确保试验能采集到充足的样本,一名被试者进行一个来回试验后,换下一个人重复试验,直至 5 名被试驾驶人全部做完,整个过程循环 5 次,以确保试验的可靠性。在试验过程中,当车头经过图 1 中标记的 A、D、E 点时记录时刻,以确保车辆速度及位置信息与驾驶人处于同一时刻。被试驾驶人的基本情况如表 1 所示。

表 1 被试驾驶人基本情况

Tab. 1 Basic information of the tested driver

人员编号	年龄/岁	性别	驾龄/年	天气
1	55	男	23	晴
2	45	男	11	晴
3	27	男	7	晴
4	26	女	5	晴
5	27	女	4	晴

数据采集完成后,使用 MATLAB 对获得的数据进行处理,在确保试验数据符合要求的前提下,剔除部分异常值,并对所有样本在各测试点处的参数取均值,后期结合 Excel 和 SPSS 软件进行统计分析。处理后各测试点处的试验数据见表 2 和表 3。

表 2 四种不同初始车速下隧道入口段心率数据采集

Tab. 2 Heart rate data acquisition at tunnel entrance at four different initial vehicle speeds

距离/ m	心率/(次·min ⁻¹)			
	75 km·h ⁻¹	80 km·h ⁻¹	85 km·h ⁻¹	90 km·h ⁻¹
-1 400	83	85	86	89
-1 300	82	84	84	87
-1 200	81	83	84	86
...
300	89	89	92	93
350	87	88	90	92
400	87	89	90	93

表 3 四种不同初始车速下隧道内照度数据采集

Tab. 3 Illumination data acquisition in tunnel at four different initial vehicle speeds

距离/ m	照度/lx			
	75 km · h ⁻¹	80 km · h ⁻¹	85 km · h ⁻¹	90 km · h ⁻¹
0	37 290	28 791	32 741	32 290
50	32 680	19 864	19 902	26 931
100	26 560	10 357	11 479	14 372
...
300	5 817	5 957	5 971	4 726
350	5 613	6 264	6 025	5 103
400	5 814	6 762	6 137	5 826

3 数据分析

3.1 隧道进口段驾驶人心率特征分析

隧道进口段驾驶人心率变化趋势如图 3 所示。

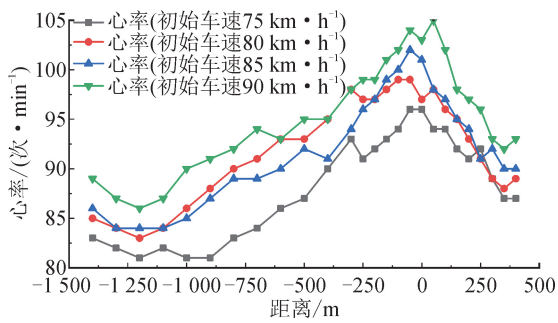


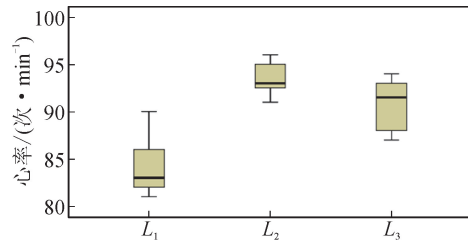
图 3 驾驶人心率变化趋势图

Fig. 3 Change trend of driver's heart rate

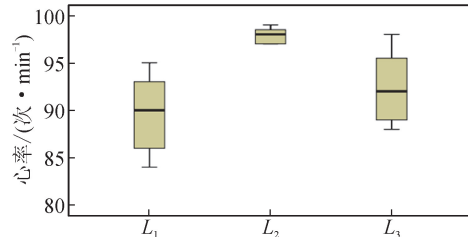
图 3 表明,初始车速越高,驾驶人心率越高,造成这一现象的原因是车速较高时,驾驶人看见隧道后作出判断、决策及操作车辆的时间相对减少,心理压力增大,因此出现心率上升的现象;在 L_1 阶段,驾驶人心率呈现先下降后小幅上升的趋势,直到 -400 m 附近,上升幅度开始加大;在 L_2 阶段,驾驶人心率出现大幅上升,并在隧道口前 50 m 附近达到最大值;在 L_3 阶段,驾驶人心率逐渐下降,并在距隧道口 350 m 附近基本保持平稳。

各阶段驾驶人心率分布如图 4 所示。

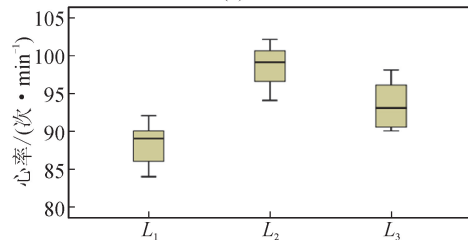
图 4 表明,不同初始车速下,驾驶人的心率变化程度不同,初始车速越高,驾驶人心率变化率越高;综合分析,初始车速在 80 km/h 左右时,驾驶人心率虽较高,但其心率变化波动较初始车速为 85 km/h、90 km/h 时小,且车辆行驶效率较 75 km/h 高。



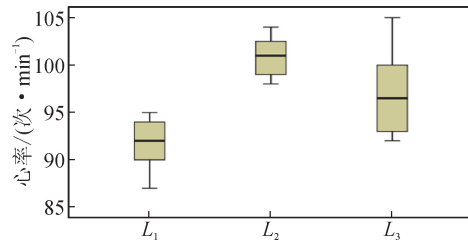
(a) 75 km/h



(b) 80 km/h



(c) 85 km/h



(d) 90 km/h

图 4 驾驶人心率分布图

Fig. 4 Heart rate distribution of drivers

3.2 进入隧道前驾驶人心率回归模型

在进入隧道之前,对不同初始车速下驾驶人速率与车辆距隧道口的距离建立回归模型。驾驶人速率随车辆距隧道口距离的变化趋势如图 5 所示。

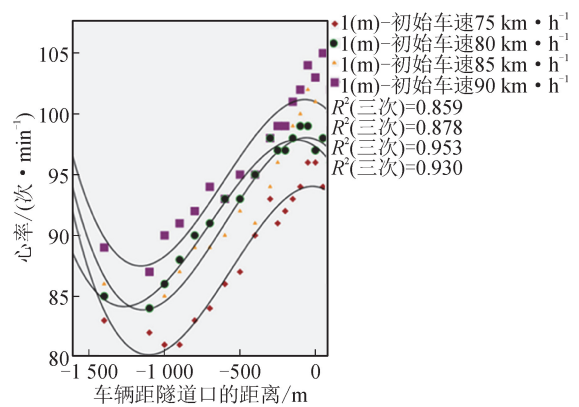


图 5 驾驶人速率随车辆距隧道口距离变化趋势拟合图

Fig. 5 Fitting diagram of change trend of driver's heart rate with the distance between the vehicle and the tunnel entrance

图 5 表明,驾驶人心率 HR 与车辆距隧道口距离 l 符合三次曲线模型,其数学模型及拟合度 R^2 如表 4 所示。

表 4 进入隧道前心率在四种不同初始车速下的曲线拟合

Tab. 4 Curve fitting of heart rate at four different initial velocities before entering the tunnel

初始车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	回归模型	拟合度 R^2
75	$HR_1 = 97.04 + 0.03l + 1.06e - 5l^2$	0.859
80	$HR_2 = 97.94 + 0.511l - 3.33e - 5l^2 - 1.64e - 8l^3$	0.878
85	$HR_3 = 102 + 0.03l + 9.96e - l^2 - 4.72e - 10l^3$	0.953
90	$HR_4 = 104 + 0.02l - 6.64e - 6l^2 - 4.85e - 10l^3$	0.930

由表 4 可以看出,进入隧道之前,在考虑车辆与隧道距离的影响下,不同车速下驾驶人的心率回归模型的拟合度均较高,说明所建立的心率模型能在一定程度上反映驾驶人的心理、生理变化过程。

3.3 进入隧道后驾驶人心率回归模型

车辆驶入隧道后,对驾驶人生理特征产生影响的因素有很多,为了简化模型,用隧道内照度表征隧

道内行车环境对驾驶人生理特征的影响。不同初始车速下,驾驶人心率 HR 随隧道内照度 L 的变化曲线如图 6 所示,数学模型及拟合度 R^2 如表 5 所示。

由表 5 可以看出,进入隧道之后,仅考虑隧道内照度变化的影响下,不同车速下驾驶人的心率回归模型的拟合度均较高,说明所建立的心率模型能在一定程度上反映驾驶人的心理、生理变化过程。

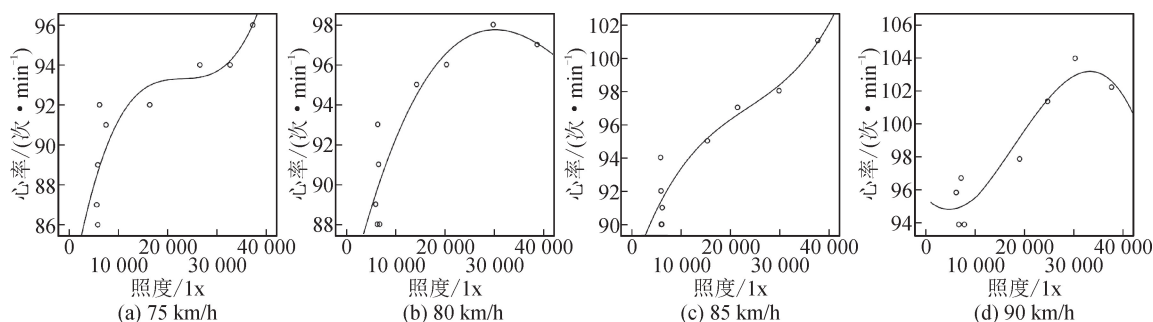


图 6 驾驶人速率随隧道内照度变化趋势拟合图

Fig. 6 Fitting diagram of change trend of driver's heart rate with illumination in tunnel

表 5 进入隧道后心率在四种不同初始车速下的曲线拟合

Tab. 5 Curve fitting of heart rate at four different initial velocities after entering the tunnel

初始车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	回归模型	拟合度 R^2
75	$HR_1 = 82.28 + 0.141L + 6.09e - 8L^2 + 8.81e - 13L^3$	0.761
80	$HR_2 = 69.18 + 0.454L - 2.25e - 7L^2 - 3.5e - 12L^3$	0.835
85	$HR_3 = 77.11 + 0.327L - 1.65e - 7L^2 + 2.65e - 12L^3$	0.898
90	$HR_4 = 85.43 + 0.176L - 4.4e - 8L^2 + 2e - 13L^3$	0.888

4 结 论

通过为驾驶人佩戴口罩营造高海拔低氧环境,采用葛家沟隧道等效代替乌尉天山胜利隧道以营造试验场景,进行实车试验,采集了车辆在隧道进口段行驶过程中驾驶人的生理指标数据、车速信息及隧道内照度等数据,在四种不同初始车速下,对车辆在 L_1 、 L_2 、 L_3 段行驶过程中驾驶人的心率进行对比分

析,检验其在进入隧道前、后的差异性。

1) 在高海拔隧道进口段行车过程中,驾驶人看见隧道口后心率先明显上升,随即下降,然后出现小幅上升;认读隧道标志内容后,心率出现大幅上升;进入隧道后,心率逐渐下降,最后趋于稳定。

2) 在驶入隧道前 400 m 至进入隧道后 350 m,驾驶人的生理特征变化最为明显,即在该路段,环境对驾驶人的心理、生理特征影响最大。

3) 不同初始车速下, 驾驶员的心率变化不同, 初始车速越高, 驾驶员心率越高, 且驶入隧道后波动越大; 综合分析, 当初始车速控制在 80 km/h 左右时, 更有利于驾驶人适应高海拔隧道进口段行车环境。

本文在分析高海拔低氧环境对驾驶员心率影响的基础上, 定量分析了不同初始车速下驾驶人在隧道进口段的心率变化规律, 可为高海拔隧道进口段异常驾驶行为分析提供一定的理论依据。但本研究仍存在许多不足之处, 例如等效试验中, 可用东天山特长隧道(尚未通车)等效代替天山胜利隧道, 以此来探索特长隧道对驾驶员生理特征的影响; 从回归模型来看, 进入隧道后, 驾驶员的生理特征是多种因素综合作用的结果, 而本文仅考虑了隧道内照度对驾驶员心率的影响, 在以后的研究中还有待进一步完善。

参考文献:

- [1] 毛锦波. 天山胜利隧道施工组织技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
MAO Jinbo. Study on construction organization technology of Tianshan Shengli Tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [2] 胡鸿勤, 孙哲, 黄慧群. 高原对驾驶员神经行为功能影响的研究[J]. 中国心理卫生杂志, 1993(6): 243-245, 286.
- [3] MARK A S. Changes in EEG alpha power during simulated driving: a demonstration[J]. International Journal of Psychophysiology, 2000, 37(2): 155-162.
- [4] 叶庆华, 陈林声, 胡鸿勤. 驾驶员进入高原不同海拔高度的反应时改变[J]. 交通医学, 1993(1): 14-15.
- [5] 王辉, 刘浩学, 赵炜华, 等. 公路隧道环境中交通事故特征分析[J]. 公路, 2009(11): 144-147.
- [6] 付焱鑫. 新疆乌尉高速长大纵坡事故易发位置辨识及交通安全保障措施研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.
FU Yanxin. Location identification and traffic safety guarantee measures of long slope accident prone in Wuyu highway of Xinjiang [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2017.
- [7] 卓艳冲, 邵飞. 城市隧道驾驶员心理特征分析[J]. 科技信息, 2014(11): 101, 113.
- [8] CHEN F, YANG Y. Influence of tunnel entrance environment on driver's vision and physiology in mountainous express way[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2019, 295: 042138.
- [9] FENG Z, YANG M, WESLEY K, 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.
- [10] MA Z, FGAN S, LIU S, et al. Analysis of the relationship between the number of traffic accidents and the traffic flow & section location in extra Long Tunnel[J]. Engineering, 2020, 12(2): 71-81.
- [11] FENG Deshan, CHEN Feng, PAN Xiaodong. Research on driver physiological load at the lowest point of city river-crossing tunnels[J]. Transportation Research Procedia, 2017, 25: 1494-1502.
- [12] FAURE V, LOBJOIS R, BENGUIGUI N. The effects of driving environment complexity and dual tasking on drivers' mental workload and eye blink behavior [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology & Behaviour, 2016, 40: 78-90.
- [13] 郭玉洁, 郭唐仪, 吴军. 基于因子分析的城市隧道驾驶员心理负荷变化规律[J]. 交通运输研究, 2021, 7(2): 91-99.
GUO Yujie, GUO Tangyi, WU Jun. Change regularity of drivers' psychological load in urban tunnels based on factor analysis[J]. Transportation Research, 2021, 7(2): 91-99.
- [14] 乔建刚, 谢一丹. 基于心生理反应的高速公路隧道入口安全[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 10074-10079.
QIAO Jian'gang, XIE Yidan. Safety of expressway tunnel entrance based on psychophysiological response [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 10074-10079.
- [15] 朱彤, 吴玲, 胡月琦, 等. 基于因子模型的高速公路特长隧道驾驶员心理负荷特性研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 165-175.
ZHU Tong, WU Ling, HU Yueqi, et al. Research on characteristics of drivers' mental workload in extra-long expressway tunnels based the factor model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 165-175.
- [16] 吴苏南, 陈新, 郭唐仪. 城市隧道驾驶员生理特征差异性研究[J]. 交通信息与安全, 2016, 34(5): 38-45.
WU Su'nan, CHEN Xin, GUO Tangyi. A study on differences of physiological characteristics of drivers driving through urban tunnel [J]. Traffic Information and Safety, 2016, 34(5): 38-45.
- [17] 赵炜华, 刘浩学, 丁光明, 等. 长隧道入口对驾驶人心理及车速的影响[J]. 公路与汽运, 2011(3): 48-51.
- [18] 刘国贵, 劳春江, 陆远迅. 基于视认特性的公路隧道限速标志位置研究[J]. 山西建筑, 2015, 41(7): 128-129.
LIU Guogui, LAO Chunjiang, LU Yuanxun. Research on positions of speed-limit signs of roads and tunnels based on visual recognition [J]. Shanxi Architecture, 2015, 41(7): 128-129.

(责任编辑 周 蓓)