

文章编号:1671-1637(2016)04-0151-08

基于心电分析的青藏高原驾驶人疲劳特性

刘建蓓^{1,2}, 马小龙^{1,2}, 张志伟^{1,2}, 郭忠印³, 柳本民³

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 交通安全应急保障技术交通运输行业研发中心, 陕西 西安 710075;
2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室,
陕西 西安 710075; 3. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要:为了得出驾驶人在高原环境下的疲劳特性,选取3个不同海拔的试验点与20名驾驶人进行模拟试验,对试验过程中驾驶人的心率变化与驾驶行为进行记录,以心跳间隔变化率为评价指标进行疲劳研究并验证其合理性,采用受试者工作特征曲线确定疲劳时间点,建立了驾驶人疲劳的二元Logit模型。分析结果表明:海拔为3 500、4 200、4 600 m时,驾驶人平均心跳间隔分别为0.759、0.746、0.615 s;大型车与小型车驾驶人在海拔4 600 m比在海拔3 500 m的疲劳时间点分别提前20.8、8.4 min,海拔越高疲劳时间点出现越早;时间、心跳间隔变化率每增加一个单位,发生疲劳的比率分别是原来的1.215、1.139倍;大型车驾驶人发生疲劳的比率是小型车驾驶人的14.6%,表明大型车驾驶人表现出更强的抗疲劳能力。

关键词:交通安全;青藏高原;疲劳特性;心跳间隔;心率;驾驶模拟

中图分类号:U471.3

文献标志码:A

Fatigue characteristics of driver in Qinghai-Tibet Plateau based on electrocardiogram analysis

LIU Jian-bei^{1,2}, MA Xiao-long^{1,2}, ZHANG Zhi-wei^{1,2}, GUO Zhong-yin³, LIU Ben-min³

(1. Research and Development Center on Emergency Support Technologies for Transport Safety, CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions, CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China;
3. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to obtain the fatigue characteristics of driver in plateau environment, three test sites with different altitudes and 20 drivers were selected to do simulation tests, heart rate change of driver and driving behaviors were recorded in test process, the changing rate of heartbeat interval was regarded as the evaluation index to do fatigue research and verify its rationality, receiver operating characteristic (ROC) curve was used to determine the fatigue time point, and binary Logit model of driver fatigue was built. Analysis result shows that when the altitudes are 3 500, 4 200 and 4 600 m respectively, the average heartbeat intervals of driver are 0.759, 0.746 and 0.615 s respectively. The fatigue time points of large vehicle and small vehicle drivers at the altitude of 4 600 m respectively advance by 20.8 and 8.4 min compared with altitude of 3 500 m. The higher the altitude is, the earlier the fatigue time point comes. Every one unit increases of time length and change rate of heartbeat interval result in 1.215 and 1.139 times of fatigue happening ratio respectively. The fatigue happening ratio of large vehicle driver is 14.6% of fatigue happening ratio of small vehicle driver, so large vehicle driver shows stronger fatigue

收稿日期:2016-05-01

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG05B02);交通运输部科技成果推广项目(2014 316 T15 100)

作者简介:刘建蓓(1973-),女,河南驻马店人,中交第一公路勘察设计研究院有限公司教授级高级工程师,从事交通安全研究。

resistance ability. 4 tabs, 10 figs, 26 refs.

Key words: traffic safety; Qinghai-Tibet Plateau; fatigue characteristic; heartbeat interval; heart rate; driving simulation

Author resume: LIU Jian-bei(1973-), female, senior engineer, +86-29-88390348, 523279162@qq.com.

0 引 言

疲劳驾驶是影响中国交通事故最大的 4 个因素之一^[1],减少驾驶疲劳是降低中国道路交通事故的重要措施。目前,国内外关于驾驶疲劳主要从心电、脑电、眼动以及车辆行驶轨迹 4 方面进行研究。张祖怀使用主观调查问卷和生理参数测量法对驾驶过程中驾驶人心率、呼吸频率和腰部肌肉表面肌电值的变化规律进行了试验研究^[2];Sahayadhas 等使用心电与肌电数据对驾驶人警觉性进行了检测,将两者数据进行融合,检测精度达 96%^[3];Lin 等利用脑电数据对驾驶人疲劳状态进行了判定^[4];Oron-Gilad 等研究发现随着时间的增加,驾驶人的心率变异性逐渐增大^[5];Dorrian 等研究发现皮电设备并不能很好地反映驾驶疲劳^[6];董占勋等对心电指标中的心率变异性进行了分析,通过心率变异性检测与眼动跟踪同步试验研究发现,皮尔逊相关系数达到 0.728,可以作为实时监测驾驶疲劳的量化心电指标^[7]。

关于眼动与疲劳方面的研究,Coetzer 等分别采用人工神经网络算法、支持向量机以及自适应增强算法对眼动数据进行了分类^[8];Ji 等通过对眼睛、面部姿态的实时跟踪来监测驾驶人的警觉性^[9];Sun 等利用眼动数据对驾驶人疲劳状态进行了判定^[10];Filtness 等将眼睛状态分为以下 4 种:眼疲劳、聚焦困难、眼皮沉重以及难以睁开眼睛^[11];Di Stasi 等在驾驶模拟舱中研究了眼睛的扫视与驾驶疲劳的关系^[12];Bergasa 等采用眼睛闭合百分比、眼睛闭合时间等指标对驾驶人疲劳进行了分级^[13];Åkerstedt 等采用眼电对驾驶疲劳进行了研究^[14]。

关于车辆轨迹与驾驶疲劳方面的研究,Thiffault 等采用模拟仿真的方法,利用方向盘转角对驾驶人的疲劳与警惕性进行了评价^[15];Liu 等对应用车辆轨迹预测驾驶疲劳的相关文献进行了回顾,发现绝大多数文章均研究了车辆偏离轨道标准差与疲劳的关系,但得出的结果是一个平均值,并不能对个体的疲劳进行有效预测,车辆运行轨迹受外界环境影响较大^[16];Gharagozlou 等研究了驾驶人疲劳与车辆横向位置的关系^[17]。

上述研究都是在低海拔地区开展的,关于高原

区的驾驶疲劳研究较少。马强等研究发现,进驻高原地区初期不同驻地及兵种部队的体能均有所下降,尤其是原驻海拔较低的技术兵部队体能下降更明显,高原缺氧环境对人体机能具有明显的影响^[18];李天彪等在分析驾驶时间、海拔与驾驶人心率变异性指标之间关系的基础上建立了相关模型,发现心率变异性受到高原低氧环境和驾驶时间的双重影响^[19]。

综上所述,目前,关于驾驶疲劳的研究绝大多数集中在平原地区,主要是通过对眼动、心电、脑电以及车辆行驶轨迹等指标进行研究,得出不同疲劳状态的指标值。驾驶人眼动受光线以及外界刺激影响较大,车辆轨迹受交通环境的影响较大,而驾驶人无法控制自己的心跳次数,且不可伪造,故心跳数据具有更高的可信度。随着高原地区交通量的增大,研究高原区驾驶疲劳对保障交通安全具有重要意义,因此,本文在 3 个不同海拔处进行实地试验,基于心电数据对驾驶人在不同海拔条件下的疲劳状态进行分析研究。

1 试验介绍

为了获得驾驶人在高原条件下的驾驶疲劳特性,选取青藏公路沿线 3 个不同海拔地点进行驾驶试验,海拔分别为 3 500、4 200、4 600 m。2014 年,该区域 1 月至 9 月平均日交通量为:大型车 1 074 veh,小型车 571 veh。考虑到该交通特征,分别选取大型车与小型车驾驶人进行驾驶疲劳试验。3 个地点的试验人数分别为 6、7、7 个,共计 20 个,其中大型车驾驶人 12 个,小型车驾驶人 8 个。为了充分体现驾驶人的疲劳状态,试验时间保持在 2 h,若按照每分钟平均心跳 80 次进行计算,则 2 h 共采集心跳 9 600 次。如果驾驶人出现非常困乏、头昏等状况而无法继续进行试验,则提前终止试验。在试验的前一天驾驶人睡眠正常,未饮酒、喝咖啡以及服用相关药物等,身体状况良好。图 1 为在不同海拔处的驾驶模拟试验。

在试验过程中,工作人员对试验人员表现出的相关细节进行详细记录,尤其是疲劳过程中出现的典型现象,如打哈欠、流眼泪、打盹、车辆压线行驶以



图1 驾驶模拟试验

Fig. 1 Driving simulation tests

及开出路外等,这些资料是驾驶人疲劳判断标准之一。王琳虹等将疲劳等级划分为清醒状态、轻度疲劳、重度疲劳和睡意状态4个等级^[20],本文根据试验研究的需要将疲劳等级仅划分为清醒状态、轻度疲劳与重度疲劳。在清醒状态下驾驶人反应能力、操纵能力均非常强;轻度疲劳状态为驾驶人驾驶一段时间后,因体力减弱导致轻微疲劳,出现打哈欠、流眼泪等现象;重度疲劳为驾驶人驾驶较长时间后,反应能力、操纵能力迅速下降,出现车辆压线行驶、开出路外、打盹、短时间内连续多次打哈欠等现象。驾驶人在重度疲劳的状态下驾驶处于非常危险的状态,应当在其进入重度疲劳状态之前进行预警,避免疲劳驾驶。

2 数据分析

2.1 分析指标

心电图中包含P、Q、R、S、T这5种波形,其中R波的峰值远高于其他波形,在数据分析的过程中更容易识别,所以本文重点对相邻2个R波之间的时间进行统计分析,即RR间期。RR间期长度细节的变化可以反映心率的细微变化情况。

数据分析时间间隔的选取与结果的精度、处理工作量大小都有很大的关系,以某驾驶人的心跳间隔为研究对象,时间分别选取30、60、120、300、600 s计算平均值,平均心跳间隔见图2。可以看出:时间间隔越大,平均心跳间隔曲线越平滑,以30 s为间隔所绘制的曲线波动最大。时间间隔的选取需要遵循以下原则:能够反映数据变化的细节,不凸显某些随机波动,能够反映数据的整体变化趋势。分别计算了不同时间下的标准差,发现从120 s开始,心跳间隔逐渐平稳,综合考虑之后决定采用120 s为间隔进行相关指标的计算。此外,由于心电信号可能会受到肌电的影响,在进行分析之前需进行除杂处理。

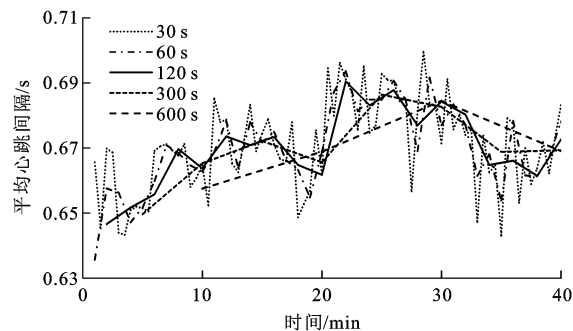


图2 不同时间长度下的平均心跳间隔

Fig. 2 Average heartbeat intervals under different time lengths

2.2 驾驶人心跳间隔

试验点a、b、c的海拔分别为3500、4200、4600 m,驾驶人编号为1~20号,以每2 min为分析单元,驾驶人在试验点a的心跳间隔见图3。

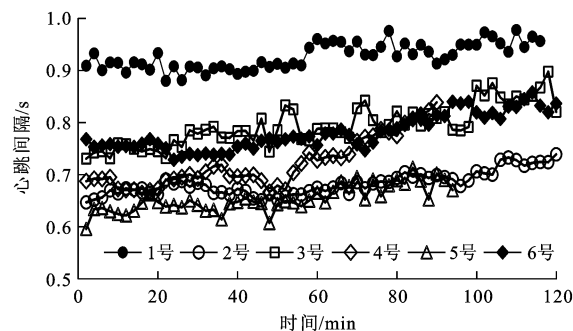


图3 驾驶人在试验点a的心跳间隔

Fig. 3 Heartbeat intervals of drivers at test site a

由图3可知,随着时间的增加,虽然心跳间隔有所波动,但整体呈逐渐上升的趋势,驾驶人的疲劳程度逐渐增加。1、6号为本地驾驶人,可以看出其心跳间隔明显高于外地驾驶人,尤其是1号,外地驾驶人的心跳间隔分布在0.60~0.85 s之间。

驾驶人在试验点b的心跳间隔见图4,总体规律与试验点a一致,其中7号为本地驾驶人,其心跳间隔高于外地驾驶人。

驾驶人在试验点c的心跳间隔见图5,20号为本地驾驶人,其心跳间隔高于外地驾驶人。外地驾

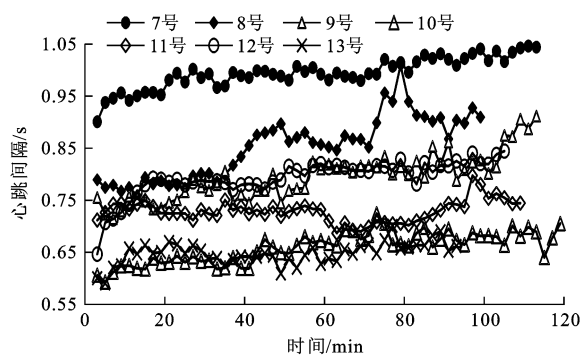


图4 驾驶人在试验点b的心跳间隔

Fig. 4 Heartbeat intervals of drivers at test site b

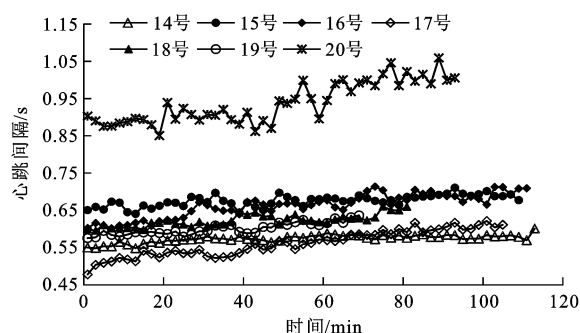


图5 驾驶人在试验点c的心跳间隔

Fig. 5 Heartbeat intervals of drivers at test site c

驶人的心跳间隔分布在 0.45~0.70 s 之间。

不同海拔条件下心率和心跳间隔的变化规律见图6, 试验点c处驾驶人的心率明显高于其他2个

试验点, 试验点c的海拔为4 600 m, 氧含量明显降低, 所以驾驶人心率加快, 部分驾驶人开始试验前的心率约为 $100 \text{次} \cdot \text{min}^{-1}$, 远高于平原区。

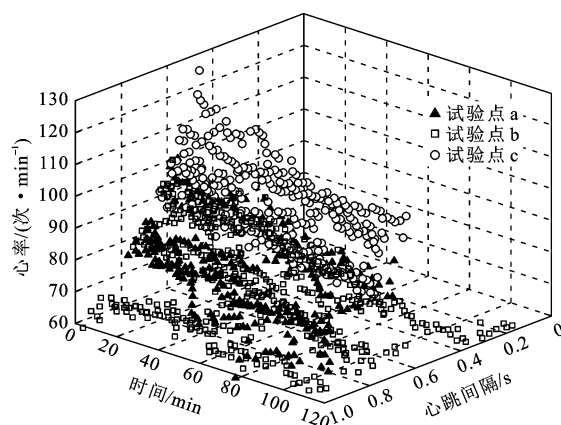


图6 不同海拔条件下时间与心率、心跳间隔之间的关系

Fig. 6 Relationship among time, heart rate and heartbeat interval at different altitudes

2.3 心跳间隔统计结果

随着海拔的增加, 心跳间隔的均值逐渐减小, 心率逐渐增大。试验点a至试验点b心跳间隔的减小值为 0.013 s, 试验点b至试验点c心跳间隔的减小值为 0.131 s, 从海拔 3 500 m 变化到海拔 4 200 m 时, 心跳间隔变化的幅度明显小于海拔 4 200 m 到海拔 4 600 m, 海拔越高对心跳间隔的变化影响越大, 心跳间隔统计结果见表1。

表1 心跳间隔统计结果

Tab. 1 Statistical result of heartbeat intervals

s

试验点	均值	均值的标准误差	中值	众数	标准差	方差	极小值	极大值
a	0.759	0.004	0.737	0.64	0.095	0.009	0.595	0.979
b	0.746	0.005	0.743	0.59	0.082	0.007	0.591	1.010
c	0.615	0.003	0.609	0.48	0.049	0.002	0.478	0.714

3 驾驶疲劳时间点确定

3.1 受试者工作特征曲线说明

采用受试者工作特征 (Receiver Operating Characteristic, ROC) 曲线确定驾驶疲劳时间点。ROC 曲线在医学领域已经有了广泛的应用, 主要用于确定诊断指标的有效性以及最佳阈值^[21], 近年来在交通领域也有所应用, 用于判断驾驶人脑电信号的疲劳阈值^[22], 判断不同道路线形下疲劳驾驶行为的指标阈值^[23]。

ROC 曲线是以灵敏度为纵坐标、1-特异度为横坐标所做出的曲线^[24-25]。ROC 曲线下的面积为 s , 取值范围为 0.5~1.0。当 s 取 0.5~0.7 时, 表示准确性较低; s 取 0.7~0.9 时, 表示准确性为中等;

s 大于 0.9 时, 表示准确性较高。

3.2 心跳间隔变化率

随着时间的增加驾驶人心跳间隔变长, 心率降低。由于不同驾驶人身体素质不同, 心率存在一定差别, 为了克服不同驾驶人本身心率的差异性, 采用心跳间隔变化率来表征不同驾驶人的心率变化情况。以试验前 10 min 的平均心跳间隔作为清醒状态的心跳间隔, 得到

$$r_i = \frac{t_i - t}{t} \quad (1)$$

式中: r_i 为第 i 个时间段的平均心跳间隔变化率; t 为试验前 10 min 的心跳平均间隔; t_i 为第 i 个时间段的平均心跳间隔。

以 120 s 为分析单元计算心跳间隔变化率, 驾

驶人心跳间隔变化率见图 7。3 个不同试验点处心跳间隔变化率的散点表现出同样的规律性,并且融合在一起,而图 6 中的散点则表现出明显的地域性,通过对比发现心跳间隔变化率既能克服不同驾驶人心率的不同,又能反映心率随时间的变化规律。采用 SPSS 数据分析软件计算 ROC 曲线的相关参数值,在 20 个驾驶人中,有 13 个驾驶人 ROC 曲线下的面积超过 0.9,其试验的准确性高。

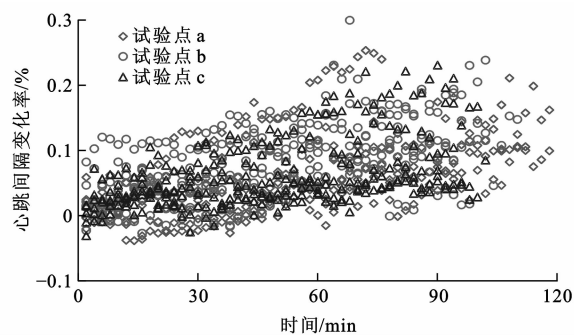


图 7 心跳间隔变化率
Fig. 7 Change rates of heartbeat intervals

最佳临界点处的心跳间隔变化率为 4%~6% 的驾驶人占到了 36.8%,小于 10% 的占到了 94.7%,大多数驾驶人出现轻度疲劳状态时,其心跳间隔变化率小于 10%。由于随着时间的增加,每个驾驶人的心跳间隔变化率逐渐变大,但又伴随着波动,所以每个最佳临界点可能对应多个时间值,将这多个时间值求平均得到疲劳时间点,驾驶人疲劳时间点与相关信息见表 2。1、6、7、20 号驾驶人为本地居民,每天在高原上平均驾驶时间为 3~4 h,祖祖辈辈在高原上生活,最终适应了这种高寒、缺氧的环境,在试验前每分钟平均心跳次数分别为 66、78、63、66,明显低于外地驾驶人,其出现疲劳的时间点分别为第 71.0、69.0、64.0、54.0 min,表现出更强的抗疲劳性。2 号驾驶人为大型车驾驶人,经常进行长途驾驶,长期出差在外且有高原驾驶经验。通过 ROC 曲线分析,其在第 79.0 min 才开始出现驾驶疲劳,表现为脑袋发昏、困倦、想抽烟、口渴。

按照驾驶车型的不同将驾驶人分为大型车驾驶人与小型车驾驶人,考虑到本地驾驶人具有明显抗疲劳性,在计算不同车型对应的疲劳时间点时仅考虑外地驾驶人数据,计算结果见表 3。大型车驾驶人的疲劳时间点明显晚于小型车驾驶人,由于大型车驾驶人经常进行长时间连续驾驶,能够更好地适应驾驶环境,所以其出现疲劳的时间点晚于小型车驾驶人。海拔越高,驾驶人出现疲劳的时间点越早,大型车驾驶人在海拔 4 600 m 比海拔 3 500 m 的疲

表 2 驾驶人疲劳时间点与相关信息
Tab. 2 Fatigue time points and relative informations of drivers

试验点	编号	驾照类型	疲劳时间点/ min	有无高原 驾驶经历	驾驶人 类型	是否为大型 车驾驶人
a	1	B2	71.0	有	本地	是
	2	B1	79.0	有	外地	是
	3	C1	45.5	无	外地	否
	4	A2	46.0	有	外地	是
	5	C1	41.0	无	外地	否
	6	B2	69.0	有	本地	是
b	7	A2	64.0	有	本地	是
	8	A2	50.0	有	外地	是
	9	A2	62.0	有	外地	是
	10	C1	36.0	有	外地	否
	11	C1	54.0	有	外地	是
	12	A2	56.0	有	外地	是
c	13	C1	35.2	有	外地	否
	14	A2	39.6	有	外地	是
	15	C1	32.0	有	外地	否
	16	A2	43.7	有	外地	是
	17	B2	37.0	有	外地	否
	18	C1	40.0	无	外地	否
	19	C1	30.0	有	外地	否
	20	A2	54.0	有	本地	是

表 3 不同海拔条件下大型车与小型车驾驶人的疲劳时间点
Tab. 3 Fatigue time points of large vehicle and small
vehicle drivers under different altitudes min

车型	试验点 a	试验点 b	试验点 c
大型车	62.5	55.5	41.7
小型车	43.2	40.0	34.8

劳时间点提前 20.8 min,小型车驾驶人在海拔 4 600 m 比海拔 3 500 m 的疲劳时间点提前 8.4 min。

4 驾驶人疲劳模型

通过上述分析可知,驾驶人疲劳时间点的出现与驾驶时间、海拔、是否为大型车驾驶人以及是否为本地驾驶人等具有一定的相关性。将驾驶人的疲劳状态划分为清醒与疲劳这 2 种状态,并采用二分类的 Logit 回归模型^[26]建立驾驶人的疲劳判别模型。初步选取驾驶时间、海拔、是否为大型车驾驶人、是否为本地驾驶人以及心跳间隔变化率这 5 个变量建立的二元 Logit 模型为

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right)=\beta_0+\beta_1\gamma_1+\beta_2\gamma_2+\beta_3\gamma_3+\beta_4\gamma_4+\beta_5\gamma_5\quad(2)$$

式中: p 为驾驶人的疲劳程度; γ_1 为驾驶时间; γ_2 为海拔; γ_3 为 0-1 变量,若驾驶人为大型车驾驶人则

值为 1,若驾驶人为小型车驾驶人则值为 0; γ_4 为 0-1 变量,若驾驶人为本地驾驶人则值为 1,本地驾驶人主要指藏族驾驶人,若驾驶人为外地驾驶人则值为 0,外地驾驶人主要指长期生活在低海拔区域的驾驶人; γ_5 为心跳间隔变化率,采用每 2 min 采集数据的平均值; β_0 为待定常数; $\beta_1 \sim \beta_5$ 分别为 $\gamma_1 \sim \gamma_5$ 的系数。

表 4 综合分析结果

Tab. 4 Comprehensive analysis result

参数	β_j 估计值	标准差	Wald 检验值	自由度	显著性水平	$\exp(\beta_j)$
γ_1	0.195	0.02	93.03	1	0.00	1.215
γ_2 (试验点 a)	—	—	31.03	2	0.00	—
γ_2 (试验点 b)	0.920	0.53	3.07	1	0.03	2.509
γ_2 (试验点 c)	2.667	0.49	29.22	1	0.00	14.400
γ_3	-1.928	0.40	22.80	1	0.00	0.146
γ_4	-1.393	0.59	5.60	1	0.02	0.248
γ_5	0.130	0.06	5.10	1	0.02	1.139
β_0	-8.974	0.93	93.37	1	0.00	0.000

驾驶时间的系数为 0.195, $e^{0.195} = 1.215$, 即时间每增加一个单位, 发生疲劳的比率将是原来的 1.215 倍。对于海拔的影响, 模型以试验点 a 为参照, 试验点 b、c 相对于试验点 a 发生疲劳的比率分别为 2.059、14.400, 在试验点 b、c 比试验点 a 更容易发生疲劳。大型车驾驶人对应的系数为 -1.928, $e^{-1.928} = 0.146$, 大型车驾驶人发生疲劳的比率是小型车驾驶人的 14.6%。本地驾驶人对应的系数为 -1.393, $e^{-1.393} = 0.248$, 本地驾驶人发生疲劳的比率是外地驾驶人的 24.8%。心跳间隔变化率的系数为 0.130, $e^{0.130} = 1.139$, 即心跳间隔变化率每增加一个单位, 发生疲劳的比率将是原来的 1.139 倍。

总体来看, 时间、海拔以及是否为大型车驾驶人这 3 个变量的 Wald 检验值较大, 并且其显著性水平均小于 0.05, 说明这 3 个因素对驾驶人疲劳程度具有重要影响, 其中时间的 Wald 检验值明显大于其他变量, 其影响程度最大。

根据数据分析结果可以得出在不同情况下驾驶人疲劳的 Logit 模型。驾驶人在试验点 a、b、c 的疲劳模型分别为

$$\ln\left(\frac{p_a}{1-p_a}\right) = -8.974 + 0.195\gamma_1 - 1.928\gamma_3 - 1.393\gamma_4 + 0.130\gamma_5 \quad (3)$$

$$\ln\left(\frac{p_b}{1-p_b}\right) = -8.974 + 0.195\gamma_1 - 1.928\gamma_3 - 1.393\gamma_4 + 0.130\gamma_5 + 0.920 \quad (4)$$

各参数的综合分析结果见表 4, j 为 0~5, 所有变量均小于 0.05 的显著性水平。在各变量的系数中, 只有 β_3 、 β_4 为负值, 其他均为正值。结果表明驾驶时间越长、海拔越高、心跳间隔变化率越大, 越容易出现疲劳状态, 大型车驾驶人与本地驾驶人具有更强的抗疲劳能力, 模型系数的分析结果也与实际的数据分析结果相一致。

$$\ln\left(\frac{p_c}{1-p_c}\right) = -8.974 + 0.195\gamma_1 - 1.928\gamma_3 - 1.393\gamma_4 + 0.130\gamma_5 + 2.667 \quad (5)$$

由此可反推出试验点 a、b、c 的疲劳程度 p_a 、 p_b 、 p_c 分别为

$$p_a = [\exp(-8.974 + 0.195\gamma_1 - 1.928\gamma_3 - 1.393\gamma_4 + 0.130\gamma_5)] / [1 + \exp(-8.974 + 0.195\gamma_1 - 1.928\gamma_3 - 1.393\gamma_4 + 0.130\gamma_5)] \quad (6)$$

$$p_b = [\exp(-8.974 + 0.195\gamma_1 - 1.928\gamma_3 - 1.393\gamma_4 + 0.130\gamma_5 + 0.920)] / [1 + \exp(-8.974 + 0.195\gamma_1 - 1.928\gamma_3 - 1.393\gamma_4 + 0.130\gamma_5 + 0.920)] \quad (7)$$

$$p_c = [\exp(-8.974 + 0.195\gamma_1 - 1.928\gamma_3 - 1.393\gamma_4 + 0.130\gamma_5 + 2.667)] / [1 + \exp(-8.974 + 0.195\gamma_1 - 1.928\gamma_3 - 1.393\gamma_4 + 0.130\gamma_5 + 2.667)] \quad (8)$$

外地大型车驾驶人与小型车驾驶人的疲劳变化曲面分别见图 8、9, 可知驾驶人心跳间隔变化率主要集中在 4%~6% 之间。

取心跳间隔变化率为 5%, 分别计算得到外地大型车驾驶人与小型车驾驶人在 3 个试验点处的疲劳程度, 所得疲劳曲线见图 10。随着驾驶时间的增加, 疲劳程度增加; 海拔越高, 疲劳时间点出现越早; 大型车驾驶人与小型车驾驶人表现出明显的差异

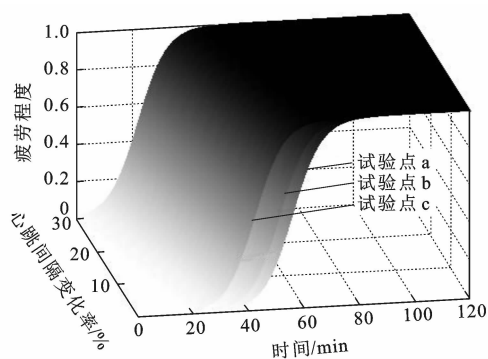


图8 外地大型车驾驶人疲劳变化曲面

Fig. 8 Fatigue change surfaces of nonlocal large vehicle drivers

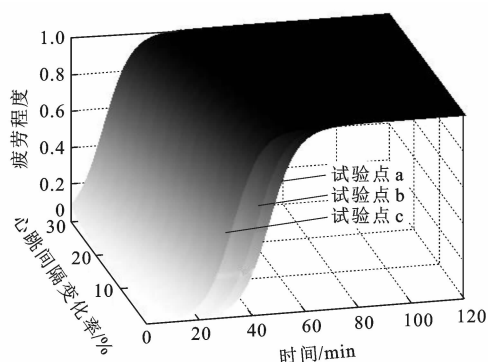


图9 外地小型车驾驶人疲劳变化曲面

Fig. 9 Fatigue change surfaces of nonlocal small vehicle drivers

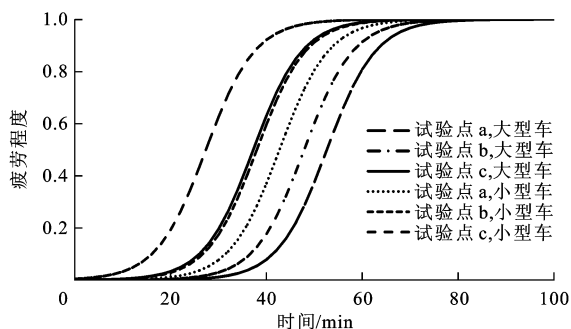


图10 外地大型车与小型车驾驶人疲劳曲线

Fig. 10 Fatigue curves of nonlocal large vehicle and small vehicle drivers

性,大型车驾驶人具有更强的抗疲劳能力。在海拔最高的试验点c处,驾驶人的疲劳时间点明显早于其他2个试验点,海拔越高对驾驶疲劳的影响越大。

5 结 语

(1)提出以心跳间隔变化率为评价指标,通过分析发现心跳间隔变化率可以很好地反映不同驾驶人的心率变化特征,并采用ROC曲线求解驾驶人疲劳状态的临界点,通过临界点处的心跳间隔变化率得到疲劳时间点。

(2)随着海拔的增高,驾驶人心跳间隔变短,出

现疲劳状态的时间点提早。大型车驾驶人的抗疲劳能力强于小型车驾驶人,本地驾驶人的抗疲劳能力强于外地驾驶人。综合驾驶时间、海拔、驾驶人类型、心跳间隔变化率等变量建立不同海拔的Logit模型,通过模型数据分析,发现驾驶时间、是否为大型车驾驶人以及海拔对驾驶人疲劳程度的影响最大。

(3)本文所得结论只是针对20个试验人员而言,如要得出更精确的结论,还需进行大样本量的试验研究。

参考文献:

References:

- [1] 张丽霞,刘涛,潘福全,等. 驾驶人因素对道路交通事故指标的影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(5): 79-84.
ZHANG Li-xia, LIU Tao, PAN Fu-quan, et al. Analysis of effects of driver factors on road traffic accident indexes[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(5): 79-84. (in Chinese)
- [2] 张祖怀. 基于人体生理信号的驾驶疲劳研究方法及其应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
ZHANG Zu-huai. A research method for driving fatigue based on physiological signal and its application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [3] SAHAYADHAS A, SUNDARAJ K, MURUGAPPAN M, et al. Physiological signal based detection of driver hypovigilance using higher order spectra[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(22): 8669-8677.
- [4] LIN C T, WU R C, LIANG S F, et al. EEG-based drowsiness estimation for safety driving using independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers, 2005, 52(12): 2726-2738.
- [5] ORON-GILAD T, RONEN A. Road characteristics and driver fatigue: a simulator study[J]. Traffic Injury Prevention, 2007, 8(3): 281-289.
- [6] DORRIAN J, LAMOND N, KOZUCHOWSKI K, et al. The driver vigilance telemetric control system (DVTCS): investigating sensitivity to experimentally induced sleep loss and fatigue[J]. Behavior Research Methods, 2008, 40(4): 1016-1025.
- [7] 董占勋,孙守迁,吴群,等. 心率变异性与驾驶疲劳相关性研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2010, 44(1): 46-50.
DONG Zhan-xun, SUN Shou-qian, WU Qun, et al. Study of correlation between heart rate variability and driving fatigue[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(1): 46-50. (in Chinese)
- [8] COETZER R C, HANCKE G P. Eye detection for a real-time vehicle driver fatigue monitoring system[C]//IEEE. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2011: 66-71.
- [9] JI Qiang, YANG Xiao-jie. Real-time eye, gaze, and face pose tracking for monitoring driver vigilance[J]. Real-Time Imaging,

- 2002, 8(5): 357-377.
- [10] SUN Wei, ZHANG Xiao-rui, WANG Jian, et al. Blink number forecasting based on improved Bayesian fusion algorithm for fatigue driving detection [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015: 1-13.
- [11] FILTNESS A J, ANUND A, FORS C, et al. Sleep-related eye symptoms and their potential for identifying driver sleepiness[J]. *Journal of Sleep Research*, 2014, 23(5): 568-575.
- [12] DI STASI L L, RENNER R, CATENA A, et al. Towards a driver fatigue test based on the saccadic main sequence: a partial validation by subjective report data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 21(1): 122-133.
- [13] BERGASA L M, NUEVO J, SOTELO M A, et al. Real-time system for monitoring driver vigilance[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, 7(1): 63-77.
- [14] ÅKERSTEDT T, HALLVIG D, ANUND A, et al. Having to stop driving at night because of dangerous sleepiness—awareness, physiology and behaviour[J]. *Journal of Sleep Research*, 2013, 22(4): 380-388.
- [15] THIFFAULT P, BERGERON J. Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2003, 35(3): 381-391.
- [16] LIU C C, HOSKING S G, LENNÉ M G. Predicting driver drowsiness using vehicle measures: recent insights and future challenges[J]. *Journal of Safety Research*, 2009, 40(4): 239-245.
- [17] GHARAGOZLOU F, MAZLOUMI A, SARAJI G N, et al. Correlation between driver subjective fatigue and bus lateral position in a driving simulator[J]. *Electron Physician*, 2015, 7(4): 1196-1204.
- [18] 马 强, 张 娜, 陈学伟, 等. 不同海拔驻地及兵种部队进驻高海拔地区后体能现状比较[J]. *解放军预防医学杂志*, 2014, 32(6): 490-492.
- MA Qiang, ZHANG Na, CHEN Xue-wei, et al. Physical fitness in soldier of different arm of services and stationed at different altitude after reaching higher altitude[J]. *Journal of Preventive Medicine of Chinese People's Liberation Army*, 2014, 32(6): 490-492. (in Chinese)
- [19] 李天彪, 艾力·斯木吐拉. 高原公路驾驶人心率变异性试验分析[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(19): 211-216.
- LI Tian-biao, ELI Ismutulla. Experiment analysis of driver's HRV on plateau highway [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(19): 211-216. (in Chinese)
- [20] 王琳虹, 李世武, 高振海, 等. 基于粒子群优化与支持向量机的驾驶员疲劳等级判别[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(12): 102-107.
- WANG Lin-hong, LI Shi-wu, GAO Zhen-hai, et al. A diver fatigue level recognition model based on particle swarm optimization and support vector machine [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(12): 102-107. (in Chinese)
- [21] 侯 宇, 刘 莎, 朱婷婷, 等. 利用 ROC 曲线评价振动觉阈值检查在糖尿病周围神经病变诊断中的意义[J]. *中南大学学报: 医学版*, 2012, 37(9): 951-956.
- HOU Yu, LIU Sha, ZHU Ting-ting, et al. Vibration perception threshold in diagnosing diabetic peripheral neuropathy by receiver operating characteristic curve [J]. *Journal of Central South University: Medical Sciences*, 2012, 37(9): 951-956. (in Chinese)
- [22] 赵晓华, 许士丽, 荣 建, 等. 基于 ROC 曲线的驾驶疲劳脑电样本熵判定阈值研究[J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(1): 178-183.
- ZHAO Xiao-hua, XU Shi-li, RONG Jian, et al. Discriminating threshold of driving fatigue based on the electroencephalography sample entropy by receiver operating characteristic curve analysis [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48(1): 178-183. (in Chinese)
- [23] 杜洪吉. 疲劳驾驶对驾驶行为的影响及判别方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- DU Hong-ji. Research on the influence of fatigue driving on driving performance and identification method [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [24] 陈卫中, 倪宗瓚, 潘晓平, 等. 用 ROC 曲线确定最佳临界点和可疑值范围[J]. *现代预防医学*, 2005, 32(7): 729-731.
- CHEN Wei-zhong, NI Zong-zan, PAN Xiao-ping, et al. Receiver operating characteristic curves to determine the optimal operating point and doubtful value interval [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2005, 32(7): 729-731. (in Chinese)
- [25] 韦修喜, 周永权. 基于 ROC 曲线的两类分类问题性能评估方法[J]. *计算机技术与发展*, 2010, 20(11): 47-50.
- WEI Xiu-xi, ZHOU Yong-quan. A new performance categories evaluation method based on ROC curve [J]. *Computer Technology and Development*, 2010, 20(11): 47-50. (in Chinese)
- [26] 马小龙. 城市道路中黄灯期间的驾驶行为研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- MA Xiao-long. Research on drive behavior during the yellow light in urban district [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014. (in Chinese)