

沙漠公路积沙路段驾驶员心理负荷变化研究

冯紫荻^{1*}, 辛妙妙¹, 马小花¹, 郑鼎州¹, 贾 斌¹, 王 芳²

¹宁夏交通职业技术学院, 宁夏 银川

²宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川

收稿日期: 2025年11月4日; 录用日期: 2025年11月25日; 发布日期: 2025年12月8日

摘 要

随着跨沙漠高速公路的快速发展, 道路积沙问题频发并威胁行车安全; 鉴于当前该场景研究尚不充分, 本文围绕积沙路段驾驶员的心理负荷及驾驶行为展开研究。首先通过主成分分析法对心生理指标降维, 得到心电综合指标; 进而基于熵值法构建驾驶员心理负荷模型, 再通过K-Means聚类分析, 得到普通道路不同积沙厚度下的心理负荷分级情况, 并修正道路线形条件下的驾驶员心理负荷。结果表明, 路面积沙厚度增加会降低驾驶员信息感知与处理能力; 相较于熟练驾驶员, 新手驾驶员生理指标显示其处于更高的应激状态, 可能导致不稳定的驾驶行为; 积沙厚度4~6 mm时行车风险最高, 路面管养部门需及时清沙, 而0~2 mm时行车风险较高, 相关部门应设置预警设施。

关键词

积沙路段, 心理负荷, 驾驶行为, 行车风险, 主成分分析

Driver Mental Psychological Variation on Sand-Covered Sections of Desert Highways

Zidi Feng^{1*}, Miaomiao Xin¹, Xiaohua Ma¹, Dingzhou Zheng¹, Bin Jia¹, Fang Wang²

¹Ningxia Communications Technical College, Yinchuan Ningxia

²School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

Received: November 4, 2025; accepted: November 25, 2025; published: December 8, 2025

Abstract

With the rapid development of cross-desert highways, road sand accumulation problems frequently occur and threaten driving safety. In view of the insufficient research on this scenario, this paper focuses on the psychological load and driving behavior of drivers in the sand-covered section. First,

*通讯作者。

文章引用: 冯紫荻, 辛妙妙, 马小花, 郑鼎州, 贾斌, 王芳. 沙漠公路积沙路段驾驶员心理负荷变化研究[J]. 土木工程, 2025, 14(12): 2859-2868. DOI: 10.12677/hjce.2025.1412307

principal component analysis was applied to reduce the dimensionality of psychophysiological indicators, and the comprehensive indexes are obtained. Subsequently, an entropy-based method was employed to construct a driver psychological load model. K-Means clustering analysis was then performed to establish psychological load classifications under varying sand accumulation thicknesses on standard road sections. Finally, the model was calibrated for road alignment conditions. The results show that the increase of road area sand thickness will reduce the driver's information perception and processing ability. Compared with experienced drivers, novice drivers exhibited physiological indicators suggestive of a heightened stress response, which may lead to erratic driving behavior; when the sand accumulation thickness is 4~6 mm, the driving risk is the highest, and the pavement maintenance department needs to clear the sand in time, while the driving risk is higher when the sand accumulation thickness is 0~2 mm, and the relevant departments should set up early warning facilities.

Keywords

Sand-Covered Sections, Psychological Load, Driving Behavior, Driving Risk, Principal Component Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在沙漠地区, 风沙对公路的破坏尤为严重[1], 路面积沙是其中的典型危害之一。尤其在宁夏地区, 沙漠面积广、沙尘天气频繁[2], 随着高速公路建设的快速发展, 沙漠高速公路里程显著增加, 路面积沙现象愈发突出, 这严重削弱了道路抗滑能力, 给车辆行驶带来极大安全隐患。

早期认知负载理论在交通领域的应用, 多聚焦于驾驶员操纵培训。Paas [3]通过仿真驾驶训练研究得出, 驾驶员接收的路况信息越多, 瞬时负载便同步增加; 当瞬时负载资源占用过多时, 会引发认知障碍, 进而导致认知负荷骤增。美国高速公路管理局的研究表明, 驾驶员的注意力分布受自身认知需求影响显著[4], 认知需求越高, 驾驶员越倾向于专注前方路况, 进而降低对周围环境信息的感知能力[5]。与此同时, 另有学者提出, 在认知需求持续增长的情况下, 需重点关注如何将注意力聚焦于最敏感的变化区域[6]。

当前, 心生理检测技术持续进步, 为驾驶员心理及认知负荷研究提供了更便捷实用的方法。Raymond J E 等[7]-[10]通过采集大量心生理数据, 研究驾驶员心理负荷变化, 极大丰富了认知负载理论的研究成果。此外, 随着手机与车载辅助设备的广泛应用, 驾驶员在驾驶中易出现分心行为, 导致道路交通事故率显著上升。Almahasneh H 等[11]-[13]通过试验设计, 采集并分析驾驶员执行驾驶主任务及通话、交谈等次级任务时的心生理数据, 结果表明驾驶员心理负荷与次级任务难度呈正相关。Agathe Backer-Grondahl 等[14][15]则结合先进心生理检测技术与智能交通技术, 深入研究了不同天气、交通环境下驾驶员的心生理特性。此外, 众多学者将心理负荷与大脑唤醒、行为绩效等相结合展开研究, 相关成果已成功应用于交通领域。R. M. Yerkes [16]通过实验指出, 心理唤醒与工作效率并非简单线性关系, 适度唤醒可达到最佳工作效果, 过强或过弱均会产生负面影响。Coughlin [17]对驾驶任务的研究表明, 驾驶员心理负荷过高时表现为高度紧张, 通过适当干预可将其降至最佳水平; 而心理负荷过低的主要特征为疲劳、厌倦或打盹, 通过提醒可调整至最佳状态。正常行驶时, 心理负荷过高或过低通常不会引发安全隐患, 但突发状况下, 不当的心理负荷水平可能导致严重交通事故。因此, 为维持最佳驾驶状态、获得最优驾驶表现,

驾驶员的心理负荷需保持在适度范围[18]。

驾驶员在积沙路段行驶时，心理状态与驾驶状况会受到显著影响，导致生理、心理状态发生变化，进而增加心理负荷。这种负荷的增加会导致驾驶员反应速度减慢、判断失误或操作失误，从而对行车安全构成重大威胁。因此，本研究通过多指标联合分析，旨在更精准地反映驾驶员心理负荷，聚焦于积沙条件下的驾驶员心理负荷及驾驶行为特性，研究结果为提升沙漠公路行车安全提供理论依据。

2. 研究方法

2.1. 主成分分析法与熵值法

首先通过主成分分析法分析心电和脑电特性，再通过熵值法推导得出心理负荷计算公式。主成分分析是常用的数据集简化技术，也是因子分析的经典方法之一，旨在将多个意义单一、相关性较高的变量转换为意义综合的变量，通过减少变量个数实现降维目的。

“熵”源于热力学，是衡量体系混乱程度的指标。熵值法通过计算熵值判断指标离散程度：离散程度越大，指标对综合评价的影响越显著，权重也越高。驾驶心理负荷增大会降低驾驶员的车速控制能力，进而影响驾驶稳定性。因此，基于心电、脑电特性的驾驶心理负荷为负向指标，需采用逆向归一化处理；基于驾驶稳定性的驾驶心理负荷为正向指标，采用正向归一化处理。对基于心电、脑电特性和基于速度特性的两种心理负荷模型，在完成归一化处理后，按熵值法步骤计算各自的权重系数。

2.2. 试验路段

选取乌玛高速公路 K273+000 至 K372+000 段作为试验路段，该路段面层为沥青混凝土路面，直线段与曲线段长度接近，纵坡多在 5% 以内，且道路两侧以沙漠景观为主、植被覆盖率低，符合试验段要求。试验路段的现场图及卫星图如图 1 所示。选取无风无雨条件下进行试验，以确保试验环境稳定，减少环境对试验的干扰。试验构造积沙厚度为 0~2 mm、2~4 mm、4~6 mm 的路段，并以无积沙路面作为对照；同时选取该路段纵坡(坡度 > 5%)、平曲线(半径 < 1000 m)及弯坡组合路段，以平直路段作为对照，研究不同路面积沙厚度及道路线形对驾驶员心理生理特征的影响。

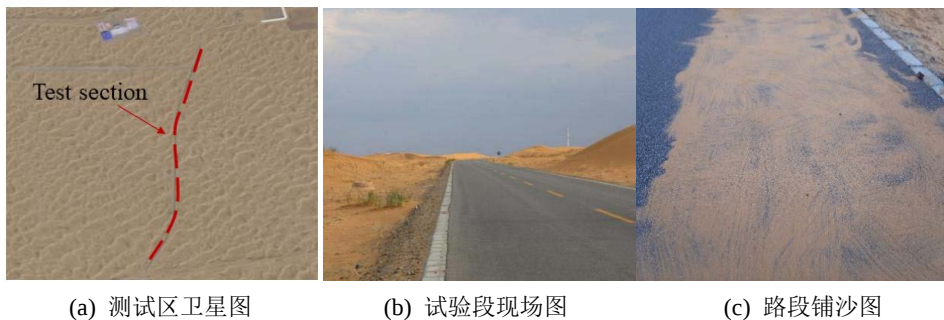


Figure 1. The scene diagram of the test road section
图 1. 试验路段的现场图

3. 驾驶员心理负荷结果评价

3.1. 综合指标因子分析

3.1.1. 基于心电特性的综合指标 X_{ECG} 因子分析

心电指标的主成分分析结果见表 1 和表 2。表 1 按降序列出 6 个主成分及其贡献率、累积贡献率，其

中第一主成了解释了 51.322%的变量信息，第二主成了解释了 33.735%的变量信息。最终提取 2 个主成分，其累积贡献率达 85.057%。据此得到心电综合指标 X_{ECG} 的表达式如公式(1)所示。

Table 1. Total variance explained
表 1. 总方差解释

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差贡献率/%	累积贡献率/%	总计	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.079	51.322	51.322	3.079	51.322	51.322
2	2.024	33.735	85.057	2.024	33.735	85.057
3	0.668	11.140	96.197			
4	0.179	2.992	99.188			
5	0.040	0.663	99.852			
6	0.009	0.148	100.000			

Table 2. Component matrix
表 2. 成分矩阵

心电指标	成分	
	1	2
HR	-0.517	0.833
MEAN	0.536	-0.815
SDNN	0.820	0.520
RMSSD	0.816	0.540
PNN50	0.907	0.178
LF/HF	-0.604	0.267

$$\begin{aligned} X_{ECG1} &= -0.517x_1 + 0.536x_2 + 0.820x_3 + 0.816x_4 + 0.907x_5 - 0.604x_6 \\ X_{ECG2} &= 0.833x_1 - 0.815x_2 + 0.520x_3 + 0.540x_4 + 0.178x_5 + 0.267x_6 \\ X_{ECG} &= (X_{ECG1} \times 51.322\% + X_{ECG2} \times 33.735\%) / 85.057\% \\ &= 0.018x_1 + 0.000x_2 + 0.701x_3 + 0.706x_4 + 0.618x_5 - 0.25x_6 \end{aligned} \tag{1}$$

式中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 分别表示 HR、MEAN、SDNN、RMSSD、PNN50 及 LF/HF， X_{ECG} 为心电综合指标。

3.1.2. 基于脑电特性的综合指标 X_{EEG} 因子分析

脑电指标的主成分分析结果见表 3 和表 4。两表按降序列出 3 个主成分及其贡献率、累积贡献率，其中第 1 主成了解释了 65.801%的变量信息，第 2 主成了解释了 27.612%的变量信息。最终提取 2 个主成分，其累积贡献率达 93.414%。据此得到脑电综合指标 X_{EEG} 的表达式如公式(2)所示。

Table 3. Total variance explanation
表 3. 总方差解释

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差贡献率/%	累积贡献率/%	总计	方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	1.974	65.801	65.801	1.974	65.801	65.801
2	0.828	27.612	93.414	0.828	27.612	93.414
3	0.198	6.586	100.000			

Table 4. Component matrix
表 4. 成分矩阵

心电指标	成分	
	1	2
β 波	0.909	0.279
δ 波	0.922	0.221
α/β 值	-0.546	0.838

$$\begin{aligned} X_{EEG1} &= 0.909x_1 + 0.922x_2 - 0.546x_3 \\ X_{EEG2} &= 0.279x_1 + 0.221x_2 + 0.838x_3 \\ X_{EEG} &= (X_{EEG1} \times 65.801\% + X_{EEG2} \times 27.612\%) / 93.414\% \\ &= 0.723x_1 + 0.715x_2 - 0.137x_3 \end{aligned}$$

(2)

式中 x_1 、 x_2 、 x_3 分别表示 β 波 PSD 积分值、 δ 波 PSD 积分值、 α/β 值， X_{EEG} 为降维后的脑电综合指标。

先计算各指标的最大值(max)与最小值(min)，再求两者差值(max - min)；对正向指标采用 $(x_i - \min)/(\max - \min)$ 公式、负向指标采用 $(\max - x_i)/(\max - \min)$ 公式进行标准化。最终计算结果如表 5 所示。

Table 5. The calculation results of entropy method
表 5. 熵值法计算结果

指标	权重系数
心电综合指标 X_{ECG}	54.91%
脑电综合指标 X_{EEG}	46.09%

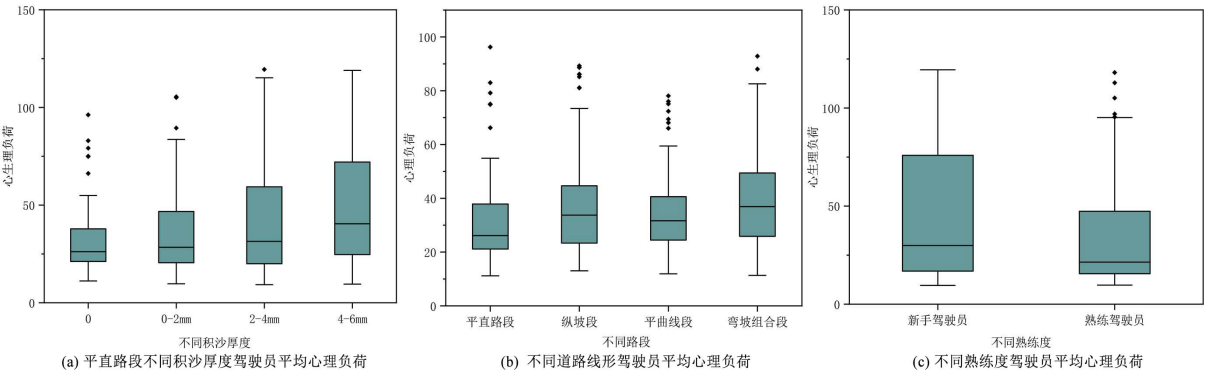
因此，推导得到驾驶员心理负荷计算公式(3)：

$$M = 0.5491 \times X_{ECG} + 0.4609 \times X_{EEG}$$

(3)

3.2. 驾驶员心理负荷结果分析

基于所得心理负荷公式计算驾驶员心理负荷，绘制不同积沙厚度、不同道路线形及不同驾驶熟练度下的驾驶员心理负荷箱线图见图 2。不同积沙厚度下驾驶员平均心理负荷见表 6，不同道路线形下驾驶员平均心理负荷见表 7。



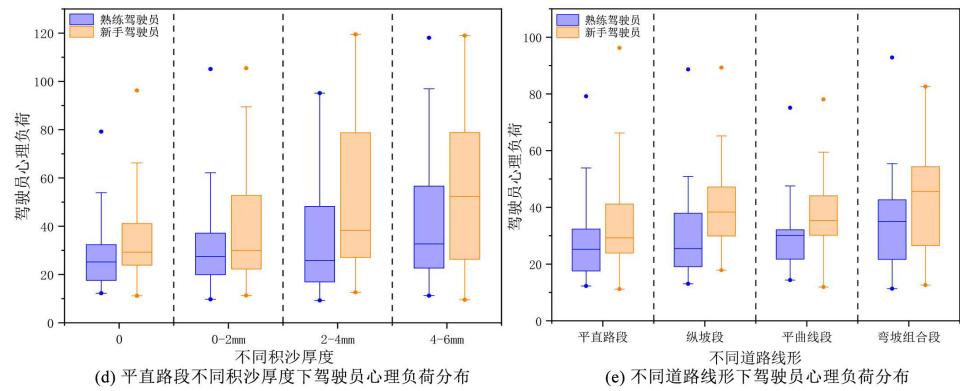


Figure 2. Driver's psychological load under different conditions
图 2. 不同条件下驾驶员心理负荷

Table 6. The average psychological load of the driver under different sand thickness
表 6. 不同积沙厚度下驾驶员平均心理负荷

指标	0	0~2 mm	2~4 mm	4~6 mm
新手驾驶员	34.96	39.24	50.97	54.64
熟练驾驶员	28.64	31.81	35.23	44.67

Table 7. The average psychological load of drivers in different road sections
表 7. 不同路段驾驶员平均心理负荷

指标	平直路段	纵坡段	平曲线段	弯坡组合段
新手驾驶员	34.96	41.03	38.91	42.58
熟练驾驶员	28.64	33.19	30.76	35.63

由图 2 及表 6、表 7 可知，驾驶员平均心理负荷随积沙厚度增加而增大，当积沙厚度达 4~6 mm 时达到最大值；不同路段中，弯坡组合段的平均心理负荷最大，且新手驾驶员的平均心理负荷显著高于熟练驾驶员。其中，新手驾驶员的心理负荷按积沙厚度排序为：4~6 mm > 2~4 mm > 0~2 mm > 无积沙；熟练驾驶员的排序为：4~6 mm > 0~2 mm > 2~4 mm > 无积沙；两类驾驶员按路段的心理负荷排序均为：弯坡组合段 > 纵坡段 > 平曲线段 > 平直路段。

对不同积沙厚度、不同路段条件下驾驶员的平均心理负荷开展事后比较，相关结果如表 8、表 9 所示。

Table 8. Post hoc comparison of one-way ANOVA on the effect of different sand accumulation thicknesses on mental workload
表 8. 不同积沙厚度对心理负荷影响的单因素方差分析事后比较

比较组	均值差	标准差	p 值	显著性
无积沙 VS 0~2 mm	3.73	1.47	0.038	*
无积沙 VS 2~4 mm	11.3	1.47	<0.001	***
无积沙 VS 4~6 mm	17.86	1.47	<0.001	***
0~2 mm VS 2~4 mm	7.57	1.47	<0.001	***
0~2 mm VS 4~6 mm	14.13	1.47	<0.001	***
2~4 mm VS 4~6 mm	6.56	1.47	<0.001	***

Table 9. Post hoc comparison of the effect of road alignment on mental workload**表 9.** 不同道路线形对心理负荷影响的单因素方差分析事后比较

比较组	均值差	标准差	p 值	95%置信区间	显著性
平直路段 VS 纵坡段	5.31	1.56	0.002	[1.58, 9.04]	**
平直路段 VS 平曲线段	3.04	1.56	0.048	[0.31, 6.77]	*
平直路段 VS 弯坡组合段	7.31	1.56	<0.001	[3.58, 11.04]	***
纵坡段 VS 平曲线段	-2.27	1.56	0.465	[-6.00, 1.46]	ns
纵坡段 VS 弯坡组合段	1.99	1.56	0.572	[-1.74, 5.72]	ns
平曲线段 VS 弯坡组合段	4.27	1.56	0.025	[0.54, 8.00]	*

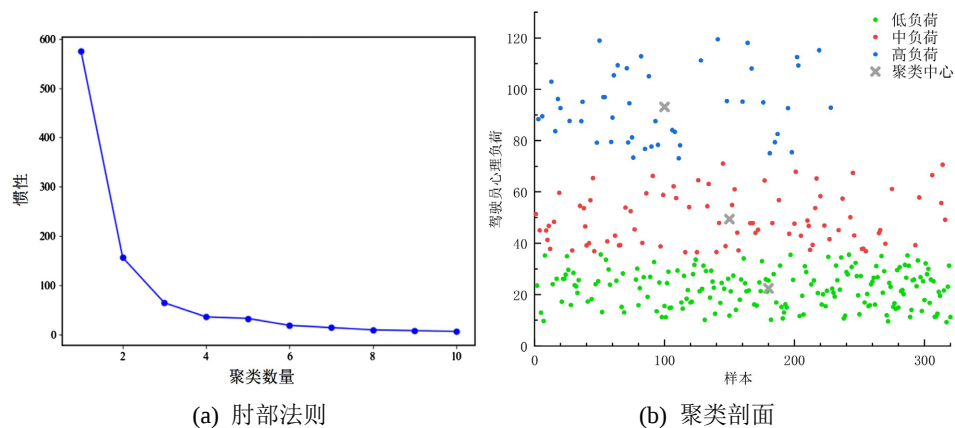
单因素方差分析及事后检验结果显示：所有积沙厚度组(0~2 mm、2~4 mm、4~6 mm)的驾驶员心理负荷均显著高于无积沙条件(* $p^* < 0.05$)，且二者呈现明显的反应关系，即随着积沙厚度增加，心理负荷逐步上升，其中 4~6 mm 积沙厚度下的心理负荷达到峰值；同时，弯坡组合路段引发的驾驶员心理负荷显著高于平直路段、纵坡段及平曲线段(* $p^* < 0.05$)，是对心理负荷控制最不利的路段形式。

3.3. K-Means 聚类分析

K-Means 聚类算法是一种广泛应用的无监督迭代型聚类算法，具有快速简单、鲁棒性强的特点。该算法通过启发式迭代更新聚类中心，直至得到最优聚类结果。本研究对驾驶员心理负荷进行 K-Means 聚类分析，将其划分为低负荷、中负荷、高负荷三类。采用 SPSS 软件进行聚类分析，设置聚类数为 3、最大迭代次数为 50，聚类分析结果见表 10 和图 3。

Table 10. K-Means clustering analysis results**表 10.** K-Means 聚类分析结果

心理负荷级别	最终聚类中心	每个聚类中的个案数目	占样本总量的比重
低负荷	22.40	189	59.06%
中负荷	49.43	83	25.94%
高负荷	93.12	48	15.00%

**Figure 3.** K-Means clustering analysis result diagram**图 3.** K-Means 聚类分析结果图

由表 10 和图 3 可知，不同负荷等级的聚类结果如下：低负荷聚类中心值为 22.40，对应驾驶员心理负荷范围为 9.27~35.61；中负荷聚类中心值为 49.43，对应范围为 36.53~71.05；高负荷聚类中心值为 93.12，

对应范围为 73.10~119.49。

计算得到驾驶员在不同道路线形及不同积沙厚度下的心理负荷情况，绘制百分比堆积图见图 4。由图 4 可知，驾驶员在路面无积沙条件下行驶时，心理负荷普遍较低，需警惕因负荷偏低引发的心智游移现象；同时，驾驶员心理负荷随路面积沙厚度增加而升高，当积沙厚度为 4~6 mm 时，驾驶员高负荷与中负荷状态占比合计最高达 80%，因此需采取相应措施缓解其心理压力。

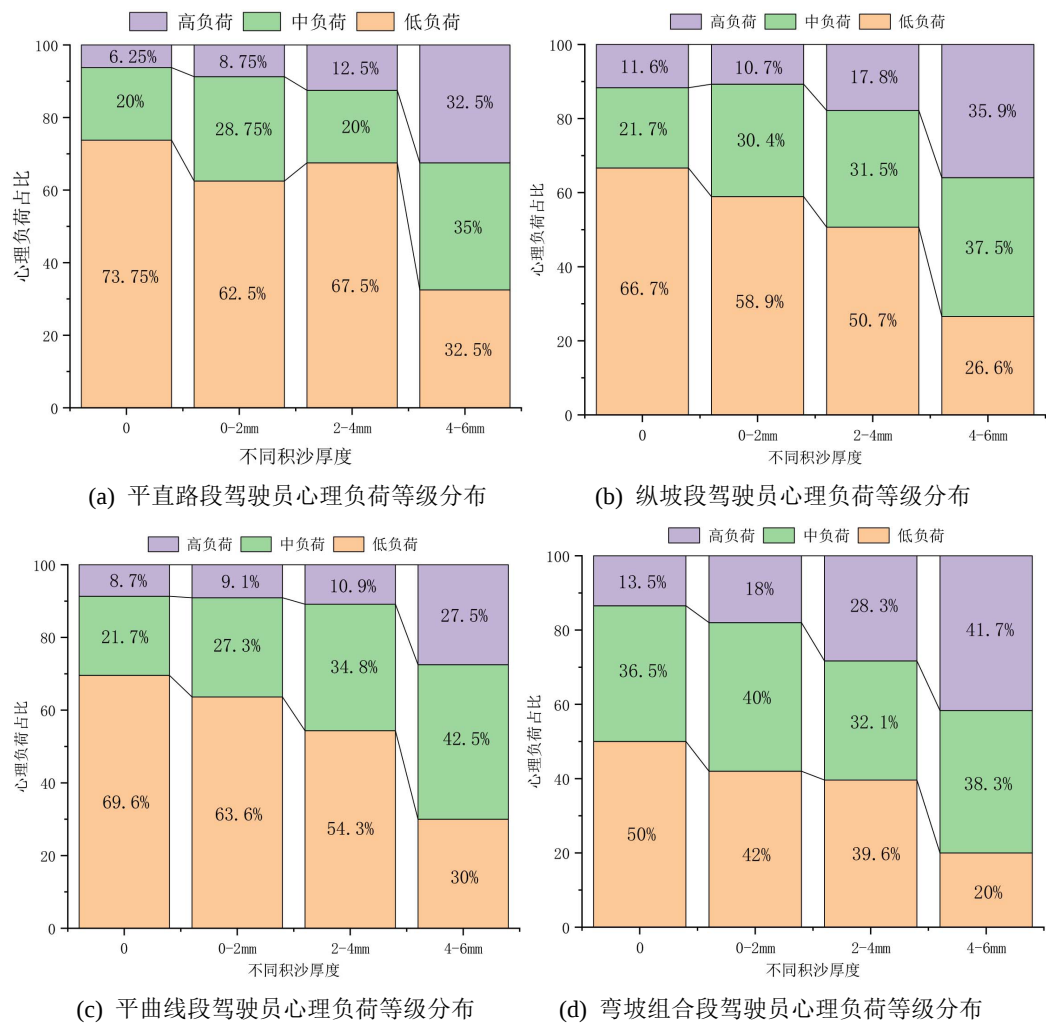


Figure 4. The distribution of psychological load level of drivers with different road alignments

图 4. 不同道路线形驾驶员心理负荷等级分布

4. 结论

本文首先通过主成分分析来对驾驶员的生理和行为特征指标进行降维，进而基于熵值法构建了驾驶员心理负荷模型，并运用 K-Means 聚类分析方法进行了研究。得到结论如下：

(1) 随着路面积沙厚度增加，驾驶员信息感知与处理能力下降，进而使其生理状态更趋紧张、焦躁，甚至出现疲劳，驾驶行为稳定性降低。进一步来看，路面积沙厚度对大部分心生理及行为特性指标均有显著影响；尤其对于新手驾驶员，其在积沙路面环境下警惕性更高，心率水平显著高于熟练驾驶员。这表明路面积沙这一路况变化对驾驶员心生理状态具有重要影响，且对新手驾驶员的影响更为突出。

(2) 驾驶员在无积沙路面行驶时,心理负荷普遍较低,需警惕因负荷偏低引发的心智游移现象;同时,驾驶员心理负荷随路面积沙厚度增加而升高,当积沙厚度为 4~6 mm 时,高负荷与中负荷状态占比合计最高达 80%。因此需采取相应措施缓解其心理压力,尤其是在积沙较厚的路段。

(3) 驾驶员平均心理负荷随积沙厚度增加而升高,当积沙厚度达到 4~6 mm 时达到峰值;不同路段中,弯坡组合段的平均心理负荷最大,且新手驾驶员的平均心理负荷显著高于熟练驾驶员。其中,新手驾驶员按积沙厚度的心理负荷排序为:4~6 mm > 2~4 mm > 0~2 mm > 无积沙;熟练驾驶员的排序为:4~6 mm > 0~2 mm > 2~4 mm > 无积沙;两类驾驶员按路段的心理负荷排序均为:弯坡组合段 > 纵坡段 > 平曲线段 > 平直路段。

(4) 当积沙厚度达到 4~6 mm 时,驾驶员行车风险最高,该厚度已对行车安全构成严重威胁,应及时通知路面管养部门开展路面清沙作业;而当积沙厚度为 0~2 mm 时,驾驶员行车风险相对较高,此时暂无需进行路面清沙,相关部门需设置预警设施,若出现风沙天气及时向驾驶员发布预警。

5. 研究局限性

本研究通过主成分分析、熵值法与 K-Means 聚类方法,构建驾驶员心理负荷模型并系统探究沙漠公路积沙路段的影响,证实路面积沙厚度、道路线形及驾驶员熟练度对驾驶员心理状态与驾驶行为存在显著影响,虽取得阶段性成果,但仍存在局限性:被试驾驶员主要来自宁夏地区且样本量有限,可能影响结论的地域代表性与普适性;试验仅在无风无雨的理想天气下开展,未模拟沙漠公路常见的风沙、扬尘等复杂气象条件,未能纳入此类因素与积沙厚度的交互效应分析,后续研究将通过扩大样本地域范围与数量以提升结论外部效度,同时引入复杂气象变量构建贴近真实的试验场景,并整合眼动追踪、功能性近红外光谱等技术,从多维度解析驾驶员心理负荷机制,为沙漠公路行车安全管控提供更精准的理论支撑。

基金项目

宁夏交通学校智慧公路现代产业学院建设项目(二标段),项目编号:HT202312280085。

参考文献

- [1] 倪国庆. 沙漠高速公路路基风沙流响应规律及沙障互配模式研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [2] Chen, X., Luo, J., Zhang, S., et al. (2008) Desert Highway Sets Technological Innovation and Development. *Highway and Transportation Technology (Applied Technology Edition)*, 4, 295-301.
- [3] Paas, F., van Gog, T. and Sweller, J. (2010) Cognitive Load Theory: New Conceptualizations, Specifications, and Integrated Research Perspectives. *Educational Psychology Review*, 22, 115-121. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9133-8>
- [4] Beuse, N. (2012) Visual-Manual NHTSA Driver Distraction Guidelines for in-Vehicle Electronic Devices. *Federal Register*, 77, 11200-11250.
- [5] 朱顺应, 周知星, 吴景安, 等. 高速公路纵坡和驾驶经验对驾驶员生理和心理的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2025, 39(6): 238-244.
- [6] Wang, Y., Reimer, B., Dobres, J. and Mehler, B. (2014) The Sensitivity of Different Methodologies for Characterizing Drivers' Gaze Concentration under Increased Cognitive Demand. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 26, 227-237. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.08.003>
- [7] Zhu, Z., Lu, Y., Fu, C. and Xu, T. (2014) Research on the Safety Audit Methods for Two-Lane Highway Based on HRV. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, Article ID: 308028. <https://doi.org/10.1155/2014/308028>
- [8] Raymond, J.E., Shapiro, K.L. and Arnell, K.M. (1992) Temporary Suppression of Visual Processing in an RSVP Task: An Attentional Blink? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 849-860. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.18.3.849>

-
- [9] Dale, G. and Arnell, K.M. (2014) Multiple Measures of Dispositional Global/local Bias Predict Attentional Blink Magnitude. *Psychological Research*, **79**, 534-547. <https://doi.org/10.1007/s00426-014-0591-3>
- [10] Kajiwara, S. (2014) Evaluation of Driver's Mental Workload by Facial Temperature and Electrodermal Activity under Simulated Driving Conditions. *International Journal of Automotive Technology*, **15**, 65-70. <https://doi.org/10.1007/s12239-014-0007-9>
- [11] Almahasneh, H., Chooi, W., Kamel, N. and Malik, A.S. (2014) Deep in Thought While Driving: An EEG Study on Drivers' Cognitive Distraction. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **26**, 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.08.001>
- [12] Sonnleitner, A., Treder, M.S., Simon, M., Willmann, S., Ewald, A., Buchner, A., et al. (2014) EEG Alpha Spindles and Prolonged Brake Reaction Times during Auditory Distraction in an On-Road Driving Study. *Accident Analysis & Prevention*, **62**, 110-118. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.08.026>
- [13] Faure, V., Lobjois, R. and Benguigui, N. (2016) The Effects of Driving Environment Complexity and Dual Tasking on Drivers' Mental Workload and Eye Blink Behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **40**, 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.04.007>
- [14] Backer-Grøndahl, A. and Sagberg, F. (2011) Driving and Telephoning: Relative Accident Risk When Using Hand-Held and Hands-Free Mobile Phones. *Safety Science*, **49**, 324-330. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.09.009>
- [15] Reimer, B., Mehler, B., Coughlin, J.F., Roy, N. and Dusek, J.A. (2011) The Impact of a Naturalistic Hands-Free Cellular Phone Task on Heart Rate and Simulated Driving Performance in Two Age Groups. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **14**, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2010.09.002>
- [16] Yerkes, R.M. and Dodson, J.D. (1908) The Relation of Strength of Stimulus to Rapidity of Habit-Formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, **18**, 459-482. <https://doi.org/10.1002/cne.920180503>
- [17] Coughlin, J.F., Reimer, B. and Mehler, B. (2011) Monitoring, Managing, and Motivating Driver Safety and Well-Being. *IEEE Pervasive Computing*, **10**, 14-21. <https://doi.org/10.1109/mpv.2011.54>
- [18] 张辉映. 基于驾驶员心理负荷的高速公路积沙路段行车稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2023.