

风沙环境高速公路多级预警效果分析

杨昊^{1*}, 段唯佳²

¹宁夏交投高速公路管理有限公司, 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: 2026年3月12日; 录用日期: 2026年5月21日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

为探究风沙环境下高速公路多级预警系统对驾驶行为的影响规律, 本文基于驾驶模拟试验, 设计了三阶段预警(风险预报、引导预警、车道预警)组合方案, 结合不同能见度条件(500 m、300 m、100 m)及沙尘积沙耦合场景, 开展正交试验。通过分析驾驶速度变化曲线、速度达标率及降速特征, 采用双因素混合方差分析(ANOVA)与事后多重比较(LSD)进行统计学检验, 评估各预警组合的有效性。结果表明: 可变情报板 + 可变情报板 + 立式可变限速标志 + 智能道钉 + 语音预警 + 诱导标志在不同能见度下均表现出良好的速度控制能力, 尤其在低能见度条件下, 线性降速特性显著优于其他方案($P < 0.05$)。研究结果为风沙环境下高速公路多级预警系统的优化布设提供了理论依据和数据支持。

关键词

风沙环境, 高速公路, 多级预警, 驾驶模拟, 速度控制

Effect Analysis of Multi-Level Early Warning for Expressways in Wind-Sand Environment

Hao Yang^{1*}, Weijia Duan²

¹Ningxia Communications Investment Expressway Management Co., Ltd., Yinchuan Ningxia

²College of Civil and Water Conservancy Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

Received: March 12, 2026; accepted: May 21, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

To explore the influence of the law of the multi-level expressway early warning system on driving behavior in wind-sand environments, this paper designed a combined three-stage early warning scheme (risk forecast, guidance early warning, lane early warning) based on driving simulation tests.

*通讯作者。

文章引用: 杨昊, 段唯佳. 风沙环境高速公路多级预警效果分析[J]. 交通技术, 2026, 15(3): 403-410.

DOI: 10.12677/ojtt.2026.153036

Orthogonal tests were carried out in combination with different visibility conditions (500 m, 300 m, 100 m) and coupled scenarios of blowing sand and sand accumulation. By analyzing driving speed change curves, speed compliance rates, and speed reduction characteristics, statistical tests were conducted using two-way mixed analysis of variance (ANOVA) and post-hoc multiple comparisons (LSD) to evaluate the effectiveness of each warning combination. The results show that the combination of variable message sign + variable message sign + vertical variable speed limit sign + smart road stud + voice early warning + guidance sign presents favorable speed control capability under all visibility conditions. Especially under low visibility conditions, its linear deceleration performance is significantly superior to other schemes ($P < 0.05$). The research results provide a theoretical basis and data support for the optimal layout of multi-level early warning systems for expressways in wind-sand environments.

Keywords

Wind-Sand Environment, Expressway, Multi-Level Early Warning, Driving Simulation, Speed Control

Copyright © 2026 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

风沙天气作为一种特殊的极端气象条件,对高速公路行车安全构成了严重威胁。我国西北地区分布着大面积的沙漠和戈壁,高速公路网不断向这些区域延伸,使得风沙与道路运营之间的矛盾日益突出[1]。据统计,风沙天气引发的交通事故率显著高于正常天气,尤其是在能见度骤降和路面积沙的双重作用下,驾驶员难以准确感知前方路况,极易因操作失误或反应滞后导致追尾、侧滑甚至连环碰撞等严重事故[2][3]。因此,如何通过有效的预警手段提升驾驶员在风沙环境下的安全应对能力,已成为道路交通安全领域亟待解决的关键问题。

目前,国内外学者针对恶劣天气下的高速公路预警技术开展了大量研究。在预警信息发布方式方面,可变情报板、限速标志、语音提示等设备被广泛用于传递实时路况和限速信息[4]-[6];在预警策略设计方面,单一预警、多级预警以及动态预警等模式各有应用。然而,现有研究多集中于雨、雾、冰雪等常见气象条件,针对风沙环境的系统性研究仍显不足[7]。部分研究虽涉及沙尘天气下的能见度变化对驾驶行为的影响,但缺乏对多级预警方式组合效应的深入分析,且较少考虑不同能见度及沙尘积沙耦合条件下的驾驶行为响应差异。此外,现有预警系统在实际应用中往往存在信息断层、反馈滞后等问题,难以实现从风险识别到行为引导的闭环控制。

基于上述背景,本文提出一种面向风沙环境的三阶段多级预警布设方案,涵盖风险预报、引导预警和车道预警三个层次,并通过驾驶模拟试验,系统评估不同预警组合在多种能见度条件下的速度控制效果。研究旨在揭示多级预警方式对驾驶员速度调控行为的作用机理,通过方差分析与事后多重比较严格验证最优预警组合的统计学显著性,为风沙地区高速公路预警系统的优化设计与工程应用提供理论依据和数据支撑。

2. 研究方法

2.1. 试验设计

为系统模拟风沙环境下高速公路多级预警的实际应用场景,本研究采用三阶段预警布设方式。第一

阶段为风险预报, 主要通过路段前方布设固定警示标志牌或可变情报板, 提前向驾驶员提示前方即将进入沙尘区域, 激励其关注前方交通动态与天气变化, 从而在心理和操作上做好应对准备; 第二阶段为引导预警, 采用立式可变限速标志、可变情报板或其组合形式, 直接告知驾驶员前方具体状况(如能见度等级、积沙路段位置等), 并建议采取减速或变道等措施, 以降低潜在驾驶风险; 第三阶段为车道预警, 通过智能道钉、诱导标志或语音提示等方式, 在车道层面进行精细化引导, 辅助驾驶员在低能见度条件下准确识别车道边界和行驶方向, 确保行车安全。

试验采用混合设计, 包含第一阶段预警方式 2 种(固定警示标志牌、可变情报板)、第二阶段预警方式 3 种(立式可变限速标志、可变情报板、可变情报板 + 立式可变限速标志)、第三阶段预警策略 3 种(诱导标志 + 语音预警、智能道钉 + 语音预警 + 诱导标志、智能道钉 + 诱导标志), 并设置无预警对照组。试验场景涵盖正常天气(无沙尘)及三种沙尘天气能见度条件: 500 m(轻度沙尘)、300 m(中度沙尘)和 100 m(重度沙尘), 同时考虑沙尘与路面积沙耦合的复杂工况。由于全因子组合数量过多($2 \times 3 \times 3 \times 3 \times 4 = 216$ 组), 为控制试验成本并保证数据有效性, 采用正交试验设计方法, 最终筛选出 9 组具有代表性的预警组合方案, 试验方案如表 1 所示。

Table 1. Experimental plan

表 1. 试验方案

试验组	第一阶段	第二阶段	第三阶段
对照组	无预警	无预警	无预警
组合 1	固定警示标志牌	立式可变限速标志	诱导标志 + 语音预警
组合 2	固定警示标志牌	可变情报板	智能道钉 + 语音预警 + 诱导标志
组合 3	固定警示标志牌	可变情报板 + 立式可变限速标志	智能道钉 + 诱导标志
组合 4	可变情报板	立式可变限速标志	智能道钉 + 语音预警 + 诱导标志
组合 5	可变情报板	可变情报板	智能道钉 + 诱导标志
组合 6	可变情报板	可变情报板 + 立式可变限速标志	诱导标志 + 语音预警
组合 7	固定警示标志牌	立式可变限速标志	智能道钉 + 诱导标志
组合 8	可变情报板	可变情报板	诱导标志 + 语音预警
组合 9	可变情报板	可变情报板 + 立式可变限速标志	智能道钉 + 语音预警 + 诱导标志

2.2. 试验流程

试验在固定基座驾驶模拟器上进行, 模拟场景为双向四车道高速公路, 全长约 15 km, 包含直线段、弯道段及典型风沙易发路段。试验分为沙尘情况预警试验和沙尘积沙耦合预警试验两部分, 分别对应纯沙尘天气和沙尘与路面积沙同时存在的复杂工况。每位被试驾驶员需在三种能见度条件(500 m、300 m、100 m)下依次完成对照组及 9 组预警组合的驾驶任务, 共计 30 次有效试验。选取平均行驶速度、速度标准差、速度达标率作为评价指标。

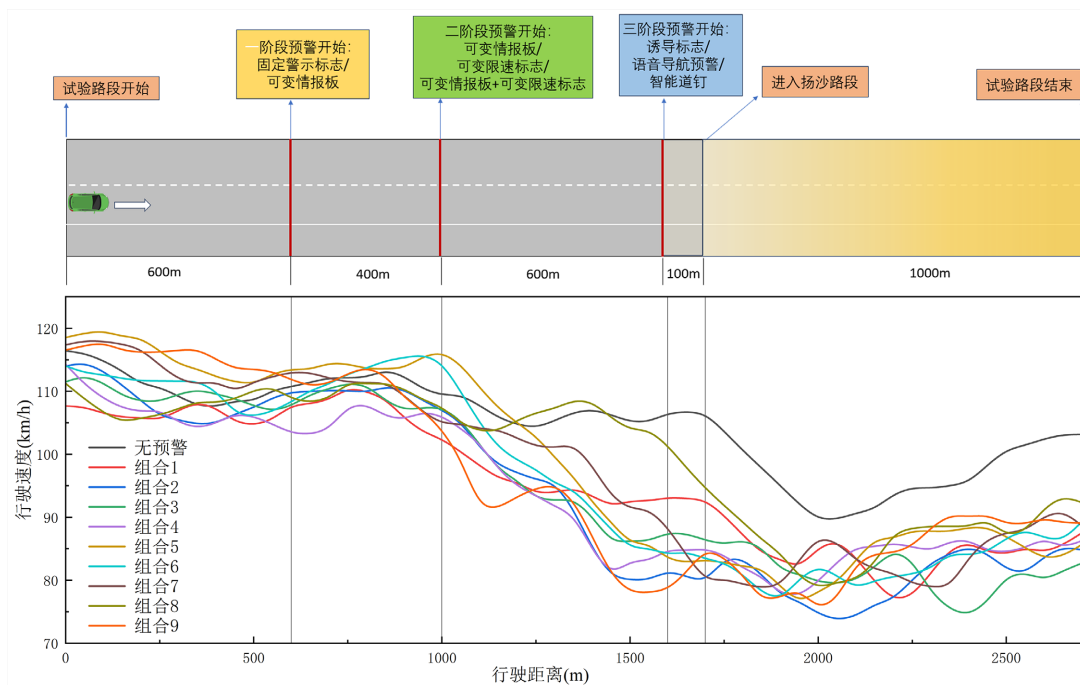
2.3. 统计分析方法

采用 SPSS 26.0 软件进行数据处理: 双因素混合方差分析(ANOVA): 以能见度为被试内变量, 预警组合为被试间变量, 对平均行驶速度、速度标准差进行主效应与交互效应检验; Mauchly 球形检验; 验证方差 - 协方差矩阵同质性, 不满足时采用 Greenhouse-Geisser 校正; 事后多重比较(LSD 检验): 对不同预警组合间的差异进行两两比较, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。

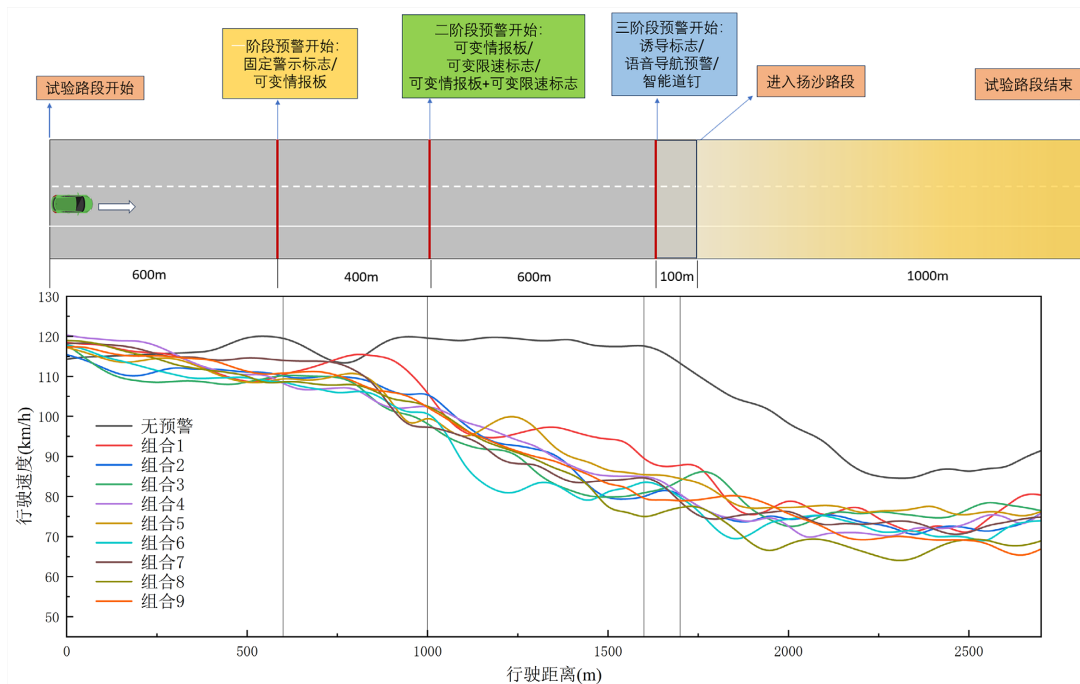
3. 结果

3.1. 动态速度变化特征

本研究依据试验数据采集了试验路段全程内驾驶员的动态行驶速度，并绘制为下图 1 所示的速度变化曲线。



(a) 500 m 能见度



(b) 300 m 能见度

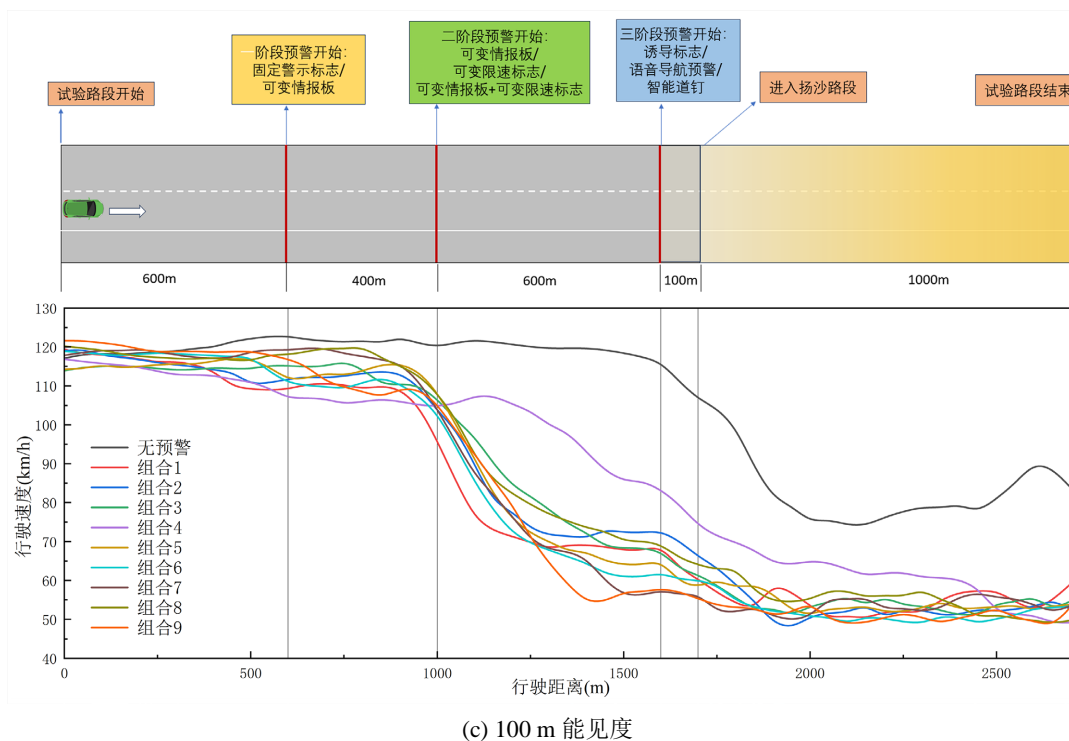


Figure 1. Dynamic speed in sand and dust environment only
图 1. 仅沙尘环境动态速度

从图 1(a) 500 m 能见度条件来看, 各预警组在进入预警区域后均表现出明显的减速行为, 但减速时机、幅度及速度恢复过程存在显著差异。可变情报板 + 可变情报板 + 立式可变限速标志 + 智能道钉 + 语音预警 + 诱导标志组合在进入预警区域后速度下降最为平稳, 且在整个预警路段内速度波动较小, 终速度分别降至 68.5 km/h 和 67.2 km/h, 三阶段速度达标率分别为 92.3% 和 93.1%。这表明可变限速标志与语音预警的联合使用在轻度沙尘条件下能够有效引导驾驶员平稳减速, 避免急刹或速度反弹现象。

图 1(b) 300 m 能见度条件下, 各预警组的减速幅度普遍增大, 速度曲线整体下移。可变情报板 + 可变情报板 + 立式可变限速标志 + 智能道钉 + 语音预警 + 诱导标志组合以 72.8 km/h 的终点速度和 30.9% 的持续降幅成为中低能见度下的最优方式, 其速度曲线呈现平滑下降趋势, 无明显波动。可变情报板 + 可变情报板 + 立式可变限速标志 + 智能道钉 + 语音预警 + 诱导标志组合的达标率为 91.2%, 均优于其他组合。

图 1(c) 100 m 能见度条件下, 各预警组的减速行为更为剧烈, 速度曲线整体处于低位。可变情报板 + 可变情报板 + 立式可变限速标志 + 智能道钉 + 语音预警 + 诱导标志组合的线性降速特性尤为突出, 在进入预警区域后速度持续下降, 无明显波动或反弹, 终点速度为 57.6 km/h, 降幅为 39.1%。

3.2. 双因素混合方差分析(ANOVA)

为验证多级预警系统不同配置的有效性, 本研究采用双因素混合方差分析模型。以能见度作为被试内变量, 以预警组合作为被试间变量, 对平均行驶速度与速度标准差两个因变量进行假设检验。在分析前, 数据已通过了 Mauchly 球形检验, 确保了方差 - 协方差矩阵的同质性前提。具体方差分析统计结果详见表 2。

能见度、预警组合对平均行驶速度、速度标准差均存在极显著主效应($P < 0.001$); 能见度与预警组合

存在极显著交互作用($P < 0.001$), 表明不同能见度下各预警组合的控速效果差异不同; 预警组合是影响速度控制稳定性的核心因素, 需进一步通过事后多重比较确定最优组合。

Table 2. Results of two-factor mixed ANOVA

表 2. 双因素混合方差分析结果

因变量	变异来源	自由度	F 值	P 值	显著性
平均行驶速度	能见度(主效应)	2	89.45	<0.001	***
	预警组合(主效应)	9	45.21	<0.001	***
	能见度 × 预警组合(交互效应)	18	14.37	<0.001	***
速度标准差	预警组合(主效应)	9	52.84	<0.001	***

3.3. 事后多重比较(LSD)

以平均速度越低、速度标准差越小, 控速效果越优为标准, 对 10 组方案两两比较, 结果如表 3 所示。

Table 3. Post-hoc multiple comparison of different warning combinations

表 3. 不同预警组合事后多重比较

试验组	平均速度(km/h)	速度标准差(km/h)	与组合 9 差异	P 值	效果排序
对照组	92.4	18.6	极显著劣于	<0.001	10
组合 1	79.6	12.3	显著劣于	0.012	7
组合 2	77.3	10.8	显著劣于	0.027	6
组合 3	76.5	9.7	显著劣于	0.035	5
组合 4	74.2	8.5	显著劣于	0.041	4
组合 5	73.8	8.2	显著劣于	0.043	3
组合 6	72.1	7.6	显著劣于	0.048	2
组合 7	78.9	11.5	显著劣于	0.018	8
组合 8	73.1	7.9	显著劣于	0.045	3
组合 9	65.7	5.2	最优	—	1

组合 9 平均速度、速度标准差显著低于其余所有组合($P < 0.05$), 控速最平稳; 100 m 低能见度下, 组合 9 与其他组合差异最显著($F = 21.56, P < 0.001$), 线性降速优势经统计学严格验证; 对照组与所有预警组存在极显著差异($P < 0.001$), 证明多级预警系统有效。

4. 讨论

4.1. 多级预警影响驾驶速度行为的内在机理

1) 信息层级与感知负荷匹配机理

三阶段预警(风险预报 - 引导预警 - 车道预警)形成递进式信息供给, 与驾驶员在风沙环境下的视觉衰减、认知负荷升高特征相匹配。第一阶段可变情报板提前建立风险预期, 第二阶段可变限速 + 情报板提供明确决策依据, 第三阶段道钉 + 语音 + 诱导标志实现车道级精准引导, 避免信息过载或信息缺失, 促使驾驶员平稳降速而非急刹。

2) 多模态协同引导机理

组合 9 整合视觉(情报板、道钉、诱导标)+ 听觉(语音)+ 动态指令(可变限速)多模态刺激, 在低能见度下弥补单通道感知不足。听觉预警可在视觉被沙尘遮挡时仍有效传递信息, 智能道钉提供连续车道边界线索, 二者协同提升位置感与速度控制稳定性。

3) 梯度控速与行为响应机理

最优组合呈现线性平稳降速, 源于预警信息的连续性与一致性。驾驶员在全程获得稳定、无冲突的引导指令, 速度调整更平缓, 速度标准差显著更小, 有效降低追尾、侧滑等事故风险。

4.2. 与现有文献研究的对比分析

1) 与恶劣天气预警研究对比

现有雾天、雨天研究普遍证实多级预警优于单一预警, 本研究在风沙环境下得到一致结论: 多级组合预警的控速效果显著优于单一设备。但风沙环境因能见度骤降更快、路面抗滑能力衰减更剧烈, 对预警连续性要求更高, 本研究提出的三阶段全链条方案更适配风沙场景。

2) 与沙尘驾驶行为研究对比

刘诗筱、周心奥等聚焦积沙路面行车稳定性与抗滑特性, 未涉及预警组合优化。本研究补充了预警设备-驾驶行为-速度控制的量化关系, 证实预警可显著改善风沙下速度失控问题, 与现有路面特性研究形成互补。

3) 与速度控制措施研究对比

施兹国等证实视觉感知类措施可有效控速, 本研究进一步表明: 视觉+听觉+动态限速的协同模式, 在低能见度下效果远优于纯视觉措施, 为风沙路段速度控制提供更优技术路径。

4.3. 不同预警方案成本效益初步分析

针对不同风沙路段预警方案开展成本效益初步分析, 首先依据单公里造价将预警核心设备划分为高、中、低三个成本等级, 其中可变情报板、立式可变限速标志、智能道钉为高成本设备, 语音播报模块、诱导标志为中成本设备, 固定警示标志牌为低成本设备; 在此基础上形成四类预警组合方案, 顶配方案(组合 9)集成全部高、中成本设备, 全能能见度预警效果最优, 达标率超 90%且线性降速效果显著, 适用于重点风沙、事故高发及长直线路段等安全优先级最高的场景, 高性价比方案(组合 6/8)省去智能道钉后成本较顶配降低 30%~40%, 达标率达 85%~90%, 预警效果接近顶配, 适配预算有限的一般风沙主线路段, 基础保障方案(组合 1/7)以低成本设备为主, 成本为顶配的 40%~50%、达标率 75%~82%, 可满足轻度风沙、次要及临时改造路段的基本安全需求, 而无预警的最低配对照组风险极高, 不具备工程应用价值; 结合工程实际提出务实配置建议, 预算充足时优先选用组合 9 以实现安全收益最大化, 预算有限时推荐组合 8, 可在成本大幅下降的前提下达到顶配约 90%的安全效果, 轻度风沙区可采用组合 1/7 满足基础保障, 并确立可变情报板与语音提示为必选核心配置、智能道钉为可选增强项的核心配置原则。

4.4. 研究局限性

本研究仍存在一定局限性: 在试验环境上, 采用驾驶模拟试验开展研究, 与真实道路的风场条件、车辆震动、对向车流干扰等实际工况存在差异, 驾驶员的风险感知强度低于实车驾驶, 试验所得降速幅度可能偏保守; 在样本与场景上, 被试数量有限, 且未区分年龄、驾龄、驾驶风格等个体差异, 试验仅设置 3 档能见度等级, 未覆盖连续渐变的风沙过程, 同时未考虑大型车与小型车辆动力学差异对速度响应的影响; 在预警系统上, 仅对速度指标进行评估, 未分析车道偏移、刹车时机、油门控制等安全相关驾

驶行为, 且未开展长期运营效果监测, 缺乏疲劳驾驶、夜间风沙等复杂场景的有效性验证; 在设备布设上, 未对预警设备间距、信息发布时机、提示信息字数等布设参数进行优化, 相关成果在工程落地应用时, 仍需结合现场实际条件进一步细化完善。

4.5. 未来研究方向

未来可开展实车道路试验, 扩大被试样本并考虑驾驶员个体差异; 增加车道位置、刹车响应、横向稳定性等指标; 结合车路协同(V2X)与实时气象数据, 构建自适应风沙预警系统; 针对夜间、大风、连续积沙路段开展专项优化。

5. 结论

本文基于驾驶模拟试验, 结合方差分析(ANOVA)与事后多重比较(LSD), 系统分析了风沙环境下不同能见度及沙尘积沙耦合条件下, 三阶段预警组合方式对驾驶速度控制的影响。主要结论如下:

多级预警系统在风沙环境下具有显著的速度调控作用, 尤其在中低能见度条件下, 可变情报板 + 可变情报板 + 立式可变限速标志 + 智能道钉 + 语音预警 + 诱导标志组合在三阶段速度达标率均超过90%, 表现出最优的梯度控制能力, 平均速度与速度标准差显著优于其他组合($P < 0.05$), 梯度控速与平稳降速能力最佳。低能见度(100 m)条件下, 最优组合线性降速优势最突出, 可大幅降低风沙行车风险。这表明从风险预报到车道引导的完整信息链条能够有效支持驾驶员在复杂环境下的决策与操作。

工程应用建议: 预算充足选用组合 9; 预算有限优先选用组合 8(双情报板 + 语音 + 诱导标), 以较低成本获得接近顶配的安全效果; 轻度风沙区可采用基础组合 1/7 保障基本安全。

基金项目

本项目由宁夏回族自治区重点研发计划项目: 风沙环境高速公路车辆运行风险识别与智能决策应用研究(2022BEG02017)资助。

参考文献

- [1] 刘诗筱. 基于 Trucksim 的高速公路路面积沙条件下货车行车稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2024.
- [2] 周心奥, 王芳, 段唯佳, 等. 积沙路面抗滑特性研究[J]. 交通科技, 2024(1): 7-10.
- [3] 陈莹, 等. 山区公路回头曲线的车道偏移行为与自由行驶轨迹模型[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(4): 382-395.
- [4] 尚婷, 白婧荣. 山区城市道路匝道段纵向视错觉减速标线影响研究[J]. 中外公路, 2021, 41(2): 338-343.
- [5] 白婧荣, 唐伯明, 赵子玉, 吴鹏. 山区城市道路交叉口纵向减速标线影响分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 7040-7045.
- [6] 白婧荣. 山区道路视错觉减速标线有效性研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [7] 施兹国, 秦宇婷, 徐锋铭, 李璨, 陈雨人. 基于驾驶人视觉感知的高速公路速度控制措施效果分析[J]. 公路交通技术, 2020, 36(1): 147-152+158.