

# 山区高速公路异常驾驶行为致因组态分析\*

熊健坤, 邓院昌, 蒋昀轩

中山大学智能工程学院 / 广东省智能交通系统重点实验室, 广东 深圳 518107

**摘要:**以云南省腾陇高速自然驾驶试验数据为基础,构建驾驶人特征、车辆操作、道路环境与异常驾驶行为之间的分析框架。首先,基于车辆运动、道路环境和驾驶人信息构建致因分析数据集,并结合模糊综合评价结果作为异常驾驶行为风险等级依据;其次,采用结构方程模型(SEM)识别异常驾驶行为的关键影响因素及作用路径;在此基础上,引入模糊集定性比较分析(fsQCA)方法,识别高风险与非高风险异常驾驶行为的多重致因组态。结果表明:驾驶人特征对异常驾驶行为具有显著负向影响,车辆操作和道路环境具有显著正向影响;高风险异常驾驶行为主要由低技能-高冒险型、环境压力型和操作-环境耦合型3类组态导致,非高风险异常驾驶行为表现为“稳健防御型”组态,揭示了不同风险因素组合导致异常驾驶行为的形成路径。

**关键词:**交通安全;山区高速公路;异常驾驶行为;结构方程模型;模糊集定性分析

**中图分类号:**U491 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0137(XXXX)XX-0001-09

## Configurational analysis of the causes of abnormal driving behaviors on mountainous expressways based on SEM-fsQCA

Xiong Jiankun, Deng Yuanchang, Jiang Yunxuan

Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation Systems / School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-Sen University, Shenzhen 518107, China

**Abstract:** Naturalistic driving data from the Tengchong-Longling Expressway in Yunnan Province are used, and an analytical framework involving driver characteristics, vehicle operation, road environment, and abnormal driving behaviors is constructed. A causation analysis dataset is developed based on vehicle motion data, road environment data, driver information, and risk levels obtained through fuzzy comprehensive evaluation. Structural equation modeling is applied to examine the linear influence paths, and fuzzy-set qualitative comparative analysis is used to identify configurations leading to high-risk and non-high-risk abnormal driving behaviors. The results show that driver characteristics have a negative effect on abnormal driving behaviors, while vehicle operation and road environment have positive effects. High-risk abnormal driving behaviors are mainly induced by three configurations: low-skill and high-risk-taking type, environmental-pressure type, and operation-environment coupling type, whereas non-high-risk behaviors are characterized by a robust defensive configuration.

**Key words:** traffic safety; mountainous expressway; abnormal driving behavior; structural equation model; fuzzy-set qualitative analysis

\* 收稿日期:2026-06-04

录用日期:2026-07-05

网络首发日期:XXXX-XX-XX

基金项目:国家自然科学基金(U1611461)

作者简介:熊健坤(2001年生),男;研究方向:交通安全;E-mail:xiongjk@mail2.sysu.edu.cn

通信作者:邓院昌(1972年生),男;研究方向:交通安全;E-mail:dengych@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20260143

截至2025年底,我国高速公路总里程达19.1万公里,位居世界首位。然而,高速公路交通事故长期高发,事故数占比4.14%,死亡人数占比达9.01%(曾强等,2020)。随着路网向复杂地理区域延伸,山区高速公路因线形复杂、桥隧比高等特征,事故严重程度普遍高于普通公路。而交通系统由人、车、路、环境等要素协同构成,其中驾驶人行为动态性最强、不确定性最高。研究表明,90%以上的交通事故由异常驾驶行为引发(Ma et al., 2020; 冯永刚等, 2024; 吕能超等, 2023)。因此,聚焦山区高速公路开展异常驾驶行为研究,对提升安全管理水平具有重要意义。

现有研究主要从人、车辆、道路、环境等因素展开分析,其研究方法从早期的简单相关分析,逐步发展为涵盖结构方程模型、贝叶斯网络、回归模型等在内的多元方法。国内学者通常采用模型对驾驶行为进行致因分析。陈红等(2025)通过综合结构方程模型和贝叶斯网络两种因果推断方法,分析了青年货车驾驶人危险驾驶行为的心理影响机制。尚婷等(2022)在拓展计划行为理论基础上引入了驾驶习惯解释变量。缪灵一等(2025)构建多元有序 Logistic 模型对公交站台邻近慢行共享路段中影响乘客与非机动车冲突严重程度的关键因素进行了建模分析。王永岗等(2021)基于2 091名出租车司机调查问卷,构建工作满意度、鲁莽驾驶及违章驾驶与交通事故的结构方程模型,探究出租车驾驶员工作情况、不良驾驶行为对事故的影响情况。刘丁等(2026)基于结构方程模型和模糊集定性比较分析方法对建筑工人不安全意向的形成机理及组态路径进行研究。国外学者同样注重理论整合及方法创新。Hosseinelou et al. (2026)通过整合规范激活模型、计划行为理论以及驾驶时多任务处理和自我驱动驾驶感知,检测攻击性驾驶行为发生的心理影响机制。Liu et al. (2025)将统计模型与机器学习模型结合揭示因果关系,采用二元 Logistic 模型探究5种危险驾驶行为与影响因素之间的关系,并通过随机森林的 SHAP 解释对结论进行了证明和补充。Song et al. (2021)基于结构方程模型,探究驾驶员人口学特征、感觉寻求、风险感知与危险驾驶行为之间的关系,并构建了驾驶员特征对性别调节的危险驾驶行为的中介模型。Atombo et al. (2016)利用计划行为理论和驾驶员行为问卷的信念测量,预测了在动机因素影响下驾驶人超速和违规超车的意图。

现有研究主要采用结构方程模型(SEM)、回归分析等经典方法探究单变量的净效应,亦有学者通过定性比较揭示多因素之间的并发因果关系。然而,针对山区高速公路这一特定场景下的研究相对匮乏。因此,本文首先整合研究中所采集的多源数据,通过适配性检验构建适用于因子分析的数据集。其次,运用结构方程模型探究人-车-路-环境中各潜变量的路径关系。最后,在结构方程模型的理论框架基础上,引入模糊集定性比较方法(fsQCA),识别导致高与非高风险驾驶行为发生的多重等效致因组态。

## 1 数据准备与检验

### 1.1 数据来源

本文数据来源于云南省腾陇高速自然驾驶试验。试验路段为盈江至清平互通段,该路段位于山岭重丘区,具有连续纵坡、桥隧比例高、隧道群分布密集、平曲线与纵坡组合复杂等典型山区高速公路特征。试验通过惯性传感器、毫米波雷达和视频采集设备获取车辆运动状态、周边车辆交互信息及驾驶环境信息,并通过问卷收集驾驶人基本属性数据(见图1)。

试验共招募42名驾驶人,采集车辆速度、纵向加速度、横向加速度、航向角、前后车距离、前后车相对速度、天气、照明、平曲线半径、纵坡坡度等多源数据。原始数据共包括940 223条惯性导航数据、590 608条前雷达数据和379 581条后雷达数据,被试平均驾驶时长为81.93 min。经过时间同步、异常数据剔除和数据去噪等预处理后,最终提取出55 054条有效数据,形成用于后续风险评价、识别建模和致因分析的数据基础。

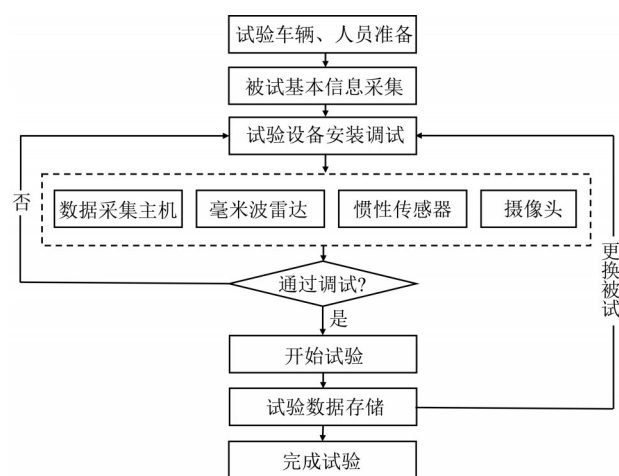


图1 试验流程图

Fig. 1 Test flowchart

## 1.2 数据准备

异常驾驶行为是在人、车、路、环境这4个变量共同作用下产生的(王可等, 2020; 程国柱等, 2024)。据此, 本文将驾驶人特征、车辆操作和道路环境设定为外生潜变量, 将异常驾驶行为设定为内生潜变量, 构建结构方程模型分析框架。考虑到模型中同时包含问卷类有序变量和车辆运行、道路环境等连续型变量, 需对多源数据进行统一编码处理。

为表征异常驾驶行为风险水平并构建后续 SEM 与 fsQCA 所需变量, 本文采用模糊综合评价法对驾驶风险进行量化。模糊综合评价能够综合考虑多个风险指标的不确定性与模糊性, 将多个单项风险指标映射为统一的风险等级, 适用于复杂交通场景下驾驶行为风险评价。

设评价指标共有  $n$  个, 则因素集表示为  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。设评价结果共有  $m$  个等级, 则评语集表示为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。

为了评价异常驾驶行为风险, 则因素集为异常驾驶行为的评价指标, 表示为  $U = \{\text{超速风险系数, 急变速风险系数, 急转弯风险系数, 跟车风险系数, 变道风险系数}\}$ 。

根据我国突发公共事件总体应急预案将异常驾驶行为划分为低、中、高3个风险等级, 表示为  $V = \{\text{低风险, 中风险, 高风险}\}$ 。

对于第  $i$  个风险分析样本, 将其5个风险系数分别代入对应隶属度函数, 得到各指标对低、中、高风险等级的隶属度。若第  $j$  个风险指标对第  $k$  个风险等级的隶属度记为  $r_{jk}$ , 则第  $i$  个样本的模糊关系矩阵可表示为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1d} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nd} \end{bmatrix}.$$

考虑到驾驶风险由多个指标共同决定, 本研究采用梯形隶属度函数分别描述低风险、中风险和高风险状态, 并参考郭蕊等(2026)和何雅琴等(2019)关于交通风险评价及交通影响等级划分中分位阈值的确定方法, 以分位值法确定隶属函数参数, 具体如下: 25%分位数作为安全状态边界参数  $a$ , 50%分位数作为低、中风险分界参数  $b$ , 85%分位数作为高风险边界参数  $d$ , 并取  $[b, d]$  区间的中心值作为参数  $c$ 。偏小型、中间型和偏大型隶属度函数分别见如式(1)~(3)所示。

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1, & x < a, \\ \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 0, & x > b, \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 0, & x < a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b, \\ 1, & b \leq x < c, \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x < d, \\ 0, & x \geq d, \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_3(x) = \begin{cases} 0, & x < c, \\ \frac{x-c}{d-c}, & c \leq x \leq d, \\ 1, & x > d. \end{cases} \quad (3)$$

采用 CRITIC 法确定 5 类风险指标权重, 得到权重向量:

$$W = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5),$$

而超速、急变速、急转弯、跟车过近和危险变道的权重向量

$$W = (0.175\ 2, 0.210\ 6, 0.192\ 8, 0.229\ 3, 0.192\ 0),$$

其中跟车风险系数权重最大, 急变速风险系数次之, 二者在综合风险评价中的信息贡献相对较高。

将权重向量与模糊关系矩阵进行合成, 得到综合评价向量:

$$B_i = W \cdot R_i = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}),$$

式中  $b_{i1}$ 、 $b_{i2}$ 、 $b_{i3}$  分别表示样本  $i$  隶属于低风险、中风险和高风险的综合隶属度。最终依据最大隶属度原则确定风险等级:

$$\text{Risk}_i = \arg\max(b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}).$$

若  $b_{i1}$  最大, 则该样本划分为低风险; 若  $b_{i2}$  最大, 则划分为中风险; 若  $b_{i3}$  最大, 则划分为高风险。通过上述方法, 最终获得 2 262 个风险分析样本, 并划分为低风险、中风险和高风险 3 类风险等级, 如图 2 所示。其中, 风险等级变量作为异常驾驶行为风险表征结果用于 SEM 分析, 并作为 fsQCA 结果集合进行后续组态分析, 从而实现风险评价、线性因果分析与组态因果分析的有效衔接。

驾驶人特征源自问卷题项的有序分类数据, 以定向选择得分为观测变量。道路环境与车辆操作参数多为连续型, 需依规则离散化。张航等(2022)以限速 120 km/h 高速公路平曲线半径推荐值 1 000 m 为阈值, 划分曲线平缓程度; 乔建刚等(2023)按 3.5%、3.5%~2.5%、2.5%~1.5% 分级标准划分纵坡坡度; 车辆操作依据运动数据, 采用 25% 分位区间划分为 4 个等级, 赋码 1、2、3 和 4; 天气情况为试验期间实际记录的天气状态; 异常驾驶行为风

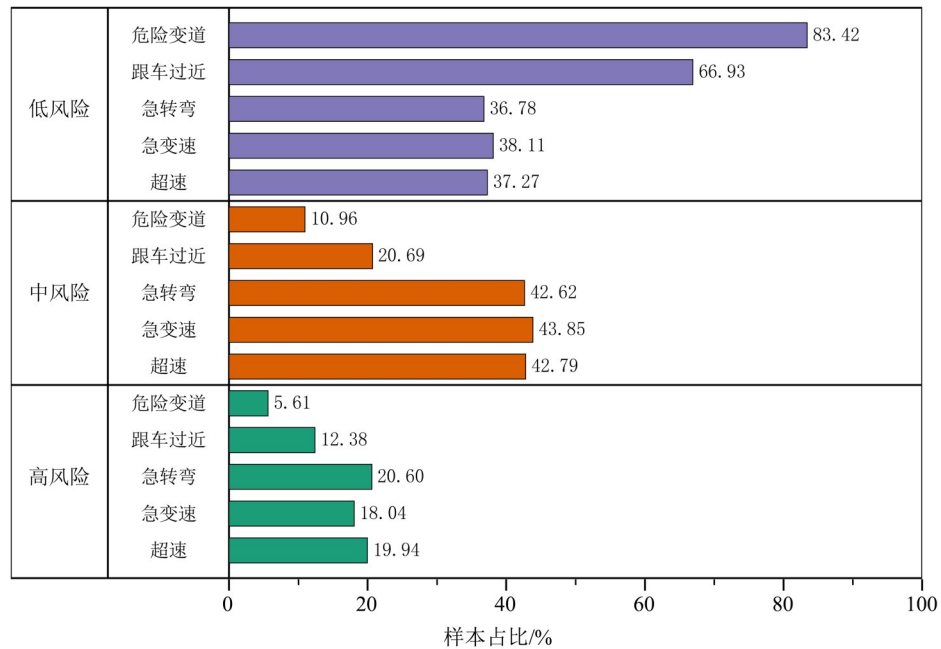


图2 样本占比分布图

Fig. 2 Sample proportion layout

险等级则基于模糊综合评价结果,以类值1、2、3表征,均作为观测变量。变量信息见表1。

利用因子分析构建驾驶行为影响因素模型(Peng et al., 2020),并通过正态性、信度与效度检验评估数据对结构方程模型的适用性。采用均值、标准差、偏度和峰度检验各观测变量的分布,结果显示偏度绝对值 $<3$ ,峰度绝对值 $<8$ (王晨伊等, 2024),这表明数据可用于后续分析。

进一步地,利用 Cronbach's Alpha、KMO 和 Bartlett 球体检验,得到驾驶人特征、车辆操作、道路环境和异常驾驶行为的 Cronbach's Alpha 分别为 0.702、0.787、0.731 和 0.798, KMO 值分别为 0.708、0.775、0.724 和 0.826, Bartlett 球体检验  $P < 0.001$ ,表明各潜变量具有良好的内部一致性与结构效度。

## 2 基于SEM模型的影响因素分析

### 2.1 结构方程模型

选取驾驶人特征、车辆操作、道路环境3个外生潜变量,以异常驾驶行为作为内生潜变量,根据已有研究基础(徐文翔, 2022),绘制出如图3所示的结构。结构模型中,各变量间的关系如表2~3所示。为了检验数据是否满足结构方程模型要求,采用均值、标准差、偏度和峰度对各观测变量进行正态性检验,结果见表4。各观测变量偏度绝对值均小于3、峰度绝对值均小于8,满足结构方程模型对数据分布的基本要求(王晨伊等, 2024)。因此,样

本数据未出现明显偏态或峰态,可用于后续模型分析。

### 2.2 结果分析与讨论

在结构方程模型分析中,模型拟合优度检验是确保理论模型与实际数据相匹配的关键前提。模型拟合优度检验旨在确保所构建的理论模型能得到实际数据的有效支持。本文应用 Amos 24.0 软件对模型进行拟合,根据拟合结果可以得到模型的拟合指数。选取相对卡方( $\chi^2/df$ )、均方根误差逼近度(RMSEA)、比较拟合指数(GFI)、归一化拟合指标(NFI)、增量拟合指数(TLI)、比较拟合指数(CFI)、调整拟合度指数(AGFI)共7项指标进行检验,结果如表5所示,各项指标实际值达到最优标准值,表明模型与数据之间建立了良好的拟合关系。

### 2.3 数据分析

根据假设建立的结构方程模型,采用最大似然估计法进行参数估计,最终得到模型的估计结果,如图4所示。图中箭头表示变量之间的关系,箭头上的数值表示路径系数, $e_i$ 表示误差编号为*i*的误差变量。如表6所示,各路径均在 $P < 0.05$ 水平下显著,表明本文提出的5个研究假设均得到支持。主要结论如下:

(1)驾驶人特征与异常驾驶行为呈显著负相关(路径系数为 $-0.149$ ,  $P < 0.05$ ),假设1成立。即年龄、驾驶里程、实际驾龄(均 $P < 0.001$ )与驾驶人特征正相关,经验越丰富,异常驾驶行为风险越低。

表1 观测变量信息表  
Table 1 Information table of observed variables

| 观测变量      | 变量符号  | 类值 | 含义                    | 观测变量  | 变量符号  | 类值 | 含义          |
|-----------|-------|----|-----------------------|-------|-------|----|-------------|
| 年龄        | $a_1$ | 1  | $\leq 25$             | 平曲线半径 | $c_2$ | 1  | 直线路段        |
|           |       | 2  | $(25, 35]$            |       |       | 2  | 平曲线交替       |
|           |       | 3  | $(35, 45]$            |       |       | 3  | 曲线路段, 但曲线平缓 |
|           |       | 4  | $> 45$                |       |       | 4  | 曲线路段, 但曲线急促 |
| 驾驶里程/万 km | $a_4$ | 1  | $< 1$                 | 纵坡坡度  | $c_4$ | 1  | 坡度很小        |
|           |       | 2  | $[1, 3)$              |       |       | 2  | 坡度小         |
|           |       | 3  | $[3, 5)$              |       |       | 3  | 坡度较大        |
|           |       | 4  | $> 5$                 |       |       | 4  | 坡度大         |
| 实际驾龄/年    | $a_3$ | 1  | $< 5$                 | 天气情况  | $c_1$ | 1  | 晴天          |
|           |       | 2  | $[5, 10)$             |       |       | 2  | 阴天          |
|           |       | 3  | $[10, 15)$            |       |       | 3  | 雾天          |
|           |       | 4  | $> 15$                |       |       | 4  | 雨天          |
| 性别        | $a_2$ | 1  | 男                     | 照明情况  | $c_3$ | 1  | 照明充足        |
|           |       | 2  | 女                     |       |       | 2  | 照明较充足       |
| 速度        | $b_1$ | 1  | $Q_0 \sim Q_{25}$     |       |       | 3  | 照明欠佳        |
| 纵向加速度     | $b_2$ | 2  | $Q_{25} \sim Q_{50}$  |       |       | 4  | 无照明         |
| 横向加速度     | $b_3$ | 3  | $Q_{50} \sim Q_{75}$  | 超速    | $D_1$ | 1  | 低风险         |
| 航向角       | $b_4$ | 4  | $Q_{75} \sim Q_{100}$ | 急变速   | $D_2$ |    |             |
|           |       |    |                       | 急转弯   | $D_3$ | 2  | 中风险         |
|           |       |    |                       | 跟车过近  | $D_4$ | 3  | 高风险         |
|           |       |    |                       | 危险变道  | $D_5$ |    |             |

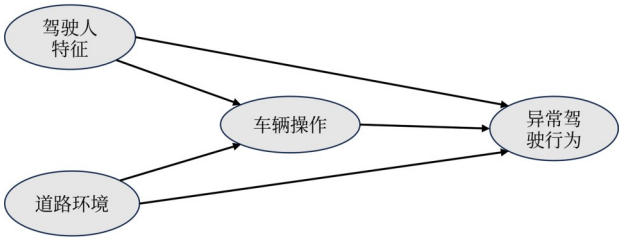


图3 结构图  
Fig. 3 Structural Diagram

表2 变量关系假设表  
Table 2 Hypothesis table of variable relationships

| 假设编号 | 假设内容               |
|------|--------------------|
| H1   | 驾驶人特征与异常驾驶行为有负相关关系 |
| H2   | 车辆操作与异常驾驶行为有正相关关系  |
| H3   | 道路环境与异常驾驶行为有正相关关系  |
| H4   | 驾驶人特征与车辆操作存在相关关系   |
| H5   | 道路环境与车辆操作存在相关关系    |

表3 信度和效度检验结果  
Table 3 Results of reliability and validity tests

| 变量     | 克隆巴赫系数 | KMO 值 | Bartlett 球体检验 $P$ 值 |
|--------|--------|-------|---------------------|
| 驾驶人特征  | 0.702  | 0.708 | $< 0.001$           |
| 车辆操作   | 0.787  | 0.775 | $< 0.001$           |
| 道路环境   | 0.731  | 0.724 | $< 0.001$           |
| 异常驾驶行为 | 0.798  | 0.826 | $< 0.001$           |

(2) 车辆操作与异常驾驶行为呈显著正相关 (路径系数为 0.228,  $P < 0.001$ ), 假设 2 成立。其中速度的影响最大 (路径为系数 1.03,  $P < 0.001$ ), 超速显著增加了事故风险; 而横向加速度、纵向加速度、航向角同样正向影响异常驾驶行为。

(3) 道路环境与异常驾驶行为呈显著正相关 (路径系数为 0.135,  $P < 0.05$ ), 假设 3 成立。4 个观测变量因子载荷均  $> 0.7$ , 天气与照明条件影响最突出, 隧道“黑白洞效应”加剧了高风险行为。车辆操作对异常行为的直接解释力强于道路环境 (路径系数

表4 正态性检验结果  
Table 4 Results of normality test

| 观测变量  | 平均值   | 标准差   | 偏度     | 峰度     |
|-------|-------|-------|--------|--------|
| 年龄    | 1.853 | 0.688 | 0.714  | 1.039  |
| 性别    | 1.248 | 0.432 | 1.169  | -0.635 |
| 实际驾龄  | 1.702 | 0.838 | 0.959  | 0.036  |
| 驾驶里程  | 2.995 | 1.119 | -0.620 | -1.088 |
| 车速    | 2.499 | 1.119 | 0.002  | -1.363 |
| 纵向加速度 | 2.500 | 1.120 | -0.001 | -1.364 |
| 横向加速度 | 2.502 | 1.119 | -0.002 | -1.362 |
| 航向角   | 2.501 | 1.118 | -0.001 | -1.360 |
| 天气情况  | 2.595 | 1.240 | -0.013 | -1.635 |
| 平曲线半径 | 2.434 | 1.029 | 0.298  | -1.078 |
| 照明情况  | 2.911 | 1.228 | -0.451 | -1.485 |
| 纵坡坡度  | 2.404 | 0.826 | 0.210  | -0.476 |
| 超速    | 1.824 | 0.735 | 0.289  | -1.114 |
| 急变速   | 1.796 | 0.721 | 0.326  | -1.038 |
| 急转弯   | 1.835 | 0.739 | 0.273  | -1.133 |
| 跟车过近  | 1.456 | 0.705 | 1.223  | 0.059  |
| 危险变道  | 1.223 | 0.535 | 2.350  | 4.416  |

表5 模型拟合优度检验结果  
Table 5 Goodness-of-fit results

| 拟合指标        | 拟合结果  | 最佳取值        | 拟合情况 |
|-------------|-------|-------------|------|
| $\chi^2/df$ | 1.310 | <3          | 优    |
| RMSEA       | 0.037 | <0.05       | 优    |
| GFI         | 0.932 | $\geq 0.85$ | 优    |
| NFI         | 0.848 | $\geq 0.85$ | 优良   |
| TLI         | 0.950 | $\geq 0.85$ | 优    |
| CFI         | 0.958 | $\geq 0.85$ | 优    |
| AGFI        | 0.908 | $\geq 0.85$ | 优    |

绝对值更大),因此应重点监测驾驶人的操控行为

表6 模型标准化路径系数<sup>1)</sup>  
Table 6 Standardized path coefficients of the model

| 路径           | 路径系数   | 标准差   | 临界比      | 显著判断 |
|--------------|--------|-------|----------|------|
| 驾驶人特征→异常驾驶行为 | -0.149 | 0.072 | -2.064*  | 显著   |
| 道路环境→异常驾驶行为  | 0.135  | 0.068 | 1.983*   | 显著   |
| 车辆操作→异常驾驶行为  | 0.228  | 0.068 | 3.367*** | 显著   |
| 驾驶人特征→车辆操作   | -0.308 | 0.098 | -3.140** | 显著   |
| 道路环境→车辆操作    | -0.235 | 0.092 | -2.550*  | 显著   |

1)\* $P<0.05$ , \*\* $P<0.01$ , \*\*\* $P<0.001$

并辅以道路设施完善。  
(4)驾驶人特征与车辆操作呈显著负相关(路径系数为-0.308,  $P<0.01$ ),道路环境与车辆操作呈显著负相关(路径系数为-0.235,  $P<0.05$ ),假设4、5成立。经验丰富的驾驶人操作更沉稳,恶劣环境促使驾驶人采取谨慎操控。

3 基于fsQCA模型的多因素组态分析

3.1 数据校准及必要性检验

fsQCA用于识别导致结果发生的多重等效因果路径。基于案例研究的方法,选取条件变量与结果变量信息完整的232个有效样本作为组态分析案例,再将不同因素对应的观测变量打分取平均值,作为变量的综合得分,以此构建数据集。其中,fsQCA中的条件变量基于各条件对应观测变量的编码结果计算综合得分后进行校准。驾驶人特征(DC)采用年龄、实际驾龄和驾驶里程3个具有等级递增含义的变量均值表征;性别为名义分类变量,不具有连续程度含义,故未纳入DC综合得分计算。车辆操作(VO)、道路环境(RE)和异常驾驶行为(AD)分别采用其对应观测变量编码值的算术均值表征。随后采用直接校准法,以95%、50%和5%分位值分别作为完全隶属、交叉点和完全不隶属阈值(表7),并利用fsQCA4.1软件完成校准。

必要性检验用于判断某一条件是否为结果发生的必要条件。当一致性 $\geq 0.9$ 时,可认为该条件构成必要条件。表9显示,各条件对AD及~AD的一致性最大值仅为0.695和0.733,均远低于0.9阈值,表明不存在导致高风险或非高风险异常驾驶行为的单一必要条件,进一步采用fsQCA进行组态分析的合理性印证,即:异常驾驶行为并非由某一因素单独决定,而需从多因素组合视角加以解释。

3.2 多因素组态分析

组态分析前,将隶属度表转化为真值表,并设

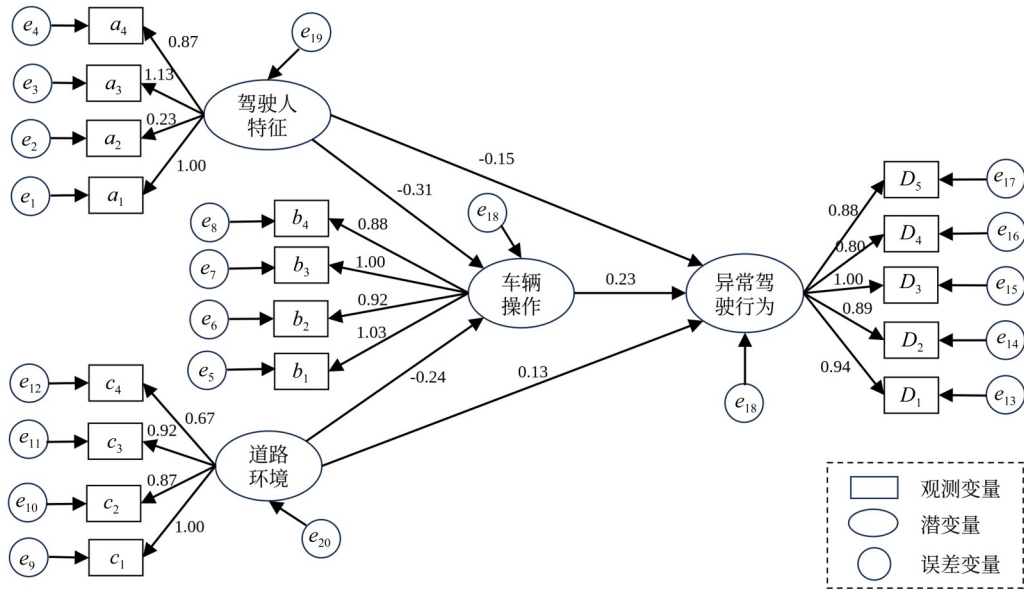


图4 结构方程模型图

Fig. 4 SEM diagram

表7 锚点阈值

Table 7 Anchor point thresholds

| 锚点变量       | 完全隶属<br>阈值 | 交叉点阈值  | 完全不隶<br>属阈值 |
|------------|------------|--------|-------------|
| 驾驶人特征(DC)  | 3. 667     | 2. 667 | 1. 333      |
| 车辆操作(VO)   | 3. 750     | 3. 000 | 1. 500      |
| 道路环境(RE)   | 3. 750     | 2. 750 | 1. 500      |
| 异常驾驶行为(AD) | 3. 000     | 2. 400 | 1. 400      |

表8 必要性检验结果<sup>1)</sup>

Table 8 Results of necessity test

| 条件变量 | AD     |        | ~AD    |        |
|------|--------|--------|--------|--------|
|      | 一致性    | 覆盖度    | 一致性    | 覆盖度    |
| DC   | 0. 584 | 0. 648 | 0. 733 | 0. 644 |
| ~DC  | 0. 680 | 0. 763 | 0. 600 | 0. 533 |
| VO   | 0. 695 | 0. 764 | 0. 607 | 0. 529 |
| ~VO  | 0. 572 | 0. 648 | 0. 730 | 0. 654 |
| RE   | 0. 695 | 0. 724 | 0. 660 | 0. 545 |
| ~RE  | 0. 563 | 0. 677 | 0. 666 | 0. 633 |

1)~表示逻辑非条件,即该条件不存在或处于消极水平。

置案例频数为1、充分性阈值为0.8。分析输出简约解、中间解与复杂解。通常以中间解为主要依据：同时出现在简约解与中间解中的条件为核心条件，仅出现在中间解中的条件为边缘条件。本研究样本量充分，未产生逻辑余项，三种解的结果一致。

在一致性阈值为0.8的条件下，共得到3条高风险异常驾驶行为路径：S1(~DC×VO)、S2(~DC×

RE)、S3(VO×RE)，以及1条非高风险路径：NS1(DC×~VO×~RE)。如表9所示，高风险路径的总体覆盖率为0.731，总体一致性为0.795；非高风险路径的总体一致性为0.842，表明组态解释力强。

表9 组态结果<sup>1)</sup>

Table 9 Configuration results

| 条件变量  | 变量值    |        |        |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|
|       | AD     |        |        | ~AD    |
|       | S1     | S2     | S3     | NS1    |
| DC    | ⊗      | ⊗      |        | ●      |
| VO    | ●      |        | ●      | ⊗      |
| RE    |        | ●      | ●      | ⊗      |
| 原始覆盖率 | 0. 525 | 0. 511 | 0. 500 | 0. 437 |
| 唯一覆盖率 | 0. 123 | 0. 108 | 0. 097 | 0. 437 |
| 一致性   | 0. 840 | 0. 828 | 0. 841 | 0. 842 |
| 总体覆盖率 | 0. 731 |        |        | 0. 437 |
| 总体一致性 | 0. 795 |        |        | 0. 842 |

1) ●表示该变量存在；⊗表示该变量不存在；空白则表明该变量存在或不存在都不会对条件变量产生影响。

### 3.3 稳健性检验

为检验组态结果的稳健性，通过调整一致性阈值和案例频数进行验证。原始参数设置为：一致性阈值为0.8、案例频数为1，并分别将一致性阈值提高至0.84、案例频数提高至5进行重复分析。结果(表10)显示，各组态路径及总体覆盖率、一致性均保持不变，即研究结果具有良好的稳健性。

表 10 稳健性检验结果  
Table 10 Results of robustness tests

| 对比内容            | 原始参数                               | 调整策略①                              | 调整策略②                              |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| AD 路径           | $\sim DC \times VO$                | $\sim DC \times VO$                | $\sim DC \times VO$                |
|                 | $\sim DC \times RE$                | $\sim DC \times RE$                | $\sim DC \times RE$                |
|                 | $VO \times RE$                     | $VO \times RE$                     | $VO \times RE$                     |
| $\sim AD$ 路径    | $DC \times \sim VO \times \sim RE$ | $DC \times \sim VO \times \sim RE$ | $DC \times \sim VO \times \sim RE$ |
| AD 总体覆盖率        | 0.731                              | 0.731                              | 0.731                              |
| $\sim AD$ 总体覆盖率 | 0.437                              | 0.437                              | 0.437                              |
| AD 总体一致性        | 0.795                              | 0.795                              | 0.795                              |
| $\sim AD$ 总体一致性 | 0.842                              | 0.842                              | 0.842                              |

3.4 结果分析与讨论

依据 SEM 分析结果,选取对异常驾驶行为具有显著影响的驾驶人特征、车辆操作和道路环境作为 fsQCA 条件集合,进一步探究其组合效应。对于高风险异常驾驶行为,共识别出三条路径:

(1)低技能—高冒险型(S1: $\sim DC \times VO$ )。一致性为 0.840,原始覆盖度为 0.525。该组态表现为驾驶人特征缺失且车辆操作激进,无论道路环境如何,均易引发高风险行为。驾驶技能非熟练(实际驾龄 < 3 年且里程 < 30 000 km)导致决策与操作能力不足,激进操作将进一步放大风险。管理重点在于夯实基础技能并矫正冒险习惯。

(2)环境压力型(S2: $\sim DC \times RE$ )。一致性为 0.828,原始覆盖度为 0.511。该组态表现为驾驶人特征缺失与高道路环境压力(如山区高速公路的急弯、陡坡、恶劣天气等)共存。低技能驾驶人应对能力有限,多因素耦合显著增加风险。干预措施包括加强复杂路况模拟训练及优化环境诱导设施(如视线诱导标志、可变信息板)。

(3)操作—环境耦合型(S3: $VO \times RE$ )。一致性为 0.841,原始覆盖度为 0.500。该组态表现为激进车辆操作与复杂道路环境相互作用。即便驾驶人技能熟练,在恶劣环境下不当操作仍可导致高风险行为。建议采用高抗滑路面材料、优化排水设计等工程措施。

由三条高风险组态可知,激进车辆操作是高风险异常驾驶行为的重要触发因素,但其作用受驾驶人特征和道路环境影响。在 S1 中,激进操作与驾驶人特征缺失共同作用,说明经验不足驾驶人的操作风险更易转化为高风险结果;在 S3 中,激进操作与

复杂道路环境耦合,表明复杂路况会进一步放大不当操控的风险。S2 则说明,对于经验不足的驾驶人,复杂道路环境本身也可能成为诱发高风险行为的重要压力源。

针对非高风险异常驾驶行为,识别出一条路径:稳健防御型(NS1: $DC \times \sim VO \times \sim RE$ ),其一致性为 0.842,原始覆盖度为 0.437。该组态要求同时具备熟练驾驶人特征、平稳操作与良好道路环境,三者共同保障驾驶安全。现实中较难完全达到,但可通过车路协同等技术拓宽安全行为边界。

4 结 语

本文通过整合结构方程模型和模糊集定性比较分析,从线性因果与并发组合两个视角揭示异常驾驶行为致因,相比仅关注单一因素影响的传统研究,进一步揭示了不同风险因素组合下异常驾驶行为的形成路径。首先,SEM 分析验证了驾驶人特征、车辆操作、道路环境与异常驾驶行为之间的线性影响路径,并量化了各关键因素的净效应。其次,fsQCA 进一步识别出导致高风险和非高风险异常驾驶行为的多重前因条件组态,总结出“低技能—高冒险型”、“环境压力型”、“操作—环境耦合型”、“稳健防御型”多条组态。结果证实了高风险异常驾驶行为形成,为山区高速公路风险驾驶人识别、重点路段安全管控以及差异化交通安全干预提供了理论依据。但由于技术设备和客观条件的限制,研究内容存在一些局限,有待进一步完善。比如:在后续研究中,可通过标准的量表数据、生理数据等多模态信息,对驾驶人的状态进行更精确的描述,从而建立更准确的致因分析模型。

## 参考文献:

- 陈红,刘洋,梁子君,等,2025.青年货车驾驶人危险驾驶行为影响因素分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),44(10):65-73.
- 程国柱,李天仪,汪国鹏,2024.基于冰雪路面危险驾驶行为谱的行车风险识别方法[J].交通运输系统工程与信息,24(4):127-138.
- 冯永刚,郑亮,2024.危险驾驶行为在分心与事故间的中介效应分析[J].中国安全生产科学技术,20(8):210-217.
- 郭蕊,陈艳艳,张云超,等,2026.高速公路隧道交通风险评估及影响因素关联分析[J].吉林大学学报(工学版),56(4):1009-1018.
- 何雅琴,容煜伦,柳祖鹏,2019.基于分位速度的城市突发事件交通影响等级划分方法[J].交通运输系统工程与信息,19(6):163-167+175.
- 刘丁,张梦娟,黄子珊,2026.异质性视角下建筑工人不安全隐患的形成机理及组态路径研究—基于SEM和fsQCA方法[J].中国安全生产科学技术,22(3):171-178.
- 吕能超,王玉刚,周颖,等,2023.道路交通安全分析与评价方法综述[J].中国公路学报,36(4):183-201.
- 缪灵一,邓院昌,刘菲菲,2025.公交站台邻近慢行共享路段交通冲突分析[J].中山大学学报(自然科学版)(中英文),64(5):68-75.
- 乔建刚,董进国,陶瑞,等,2023.基于心生理反应的山区高速公路线形安全分析[J].科学技术与工程,23(7):3066-3074.
- 尚婷,吴鹏,唐杰,等,2022.基于Ex-TPB的驾驶人隧道内换道行为影响因素分析[J].江苏大学学报(自然科学版),43(5):497-503.
- 王晨伊,侯若依,程程,等,2024.绿色高铁对旅客出行幸福感影响研究——基于京张高铁案例的分析[J].价格理论与实践,(2):126-131.
- 王可,陆键,蒋愚明,2020.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,20(6):236-249.
- 王永岗,张衡,彭志鹏,等,2021.基于结构方程模型的出租车事故影响因素分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),40(6):36-42.
- 徐文翔,2022.危险驾驶行为表征、识别、致因和预测研究[D].上海:同济大学.
- 曾强,王雪松,张璇,等,2020.基于时空交互模型的高速公路季节事故频次影响因素分析[J].中国公路学报,33(11):255-263.
- 张航,梁家明,吕能超,2022.超高速公路圆曲线半径参数的可靠性分析[J].交通信息与安全,40(2):38-44.
- Atombo C, Wu C, Zhong M, et al, 2016. Investigating the motivational factors influencing drivers' intentions to unsafe driving behaviours: Speeding and overtaking violations [J]. Transport Res F-Traf, 43: 104-121.
- Hosseinlou M, Gholizadeh A, 2026. Understanding aggressive driving: A dual-theory approach using the norm activation model and the theory of planned behavior [J]. Transp Letters, XX: 1-13.
- Liu H, Li T, Yang J, et al, 2025. A hybrid exploratory approach for understanding risk driving behaviors of bus drivers: A case study of Nanjing, China [J]. Transport Res F-Traf, 109: 520-539.
- Ma Y, Tang K, Chen S, et al, 2020. On-line aggressive driving identification based on in-vehicle kinematic parameters under naturalistic driving conditions [J]. Transp Res Part C Emerg Technol, 114: 554-571.
- Peng Z, Wang Y, Luo X, 2020. How does financial burden influence the crash rate among taxi drivers? A self-reported questionnaire study in China [J]. Traffic Inj Prev, 21(5): 324-329.
- Song X, Yin Y, Cao H, et al, 2021. The mediating effect of driver characteristics on risky driving behaviors moderated by gender, and the classification model of driver's driving risk [J]. Accident Anal & Prev, 153: 106038.

(责任编辑 王海蓉)