

中文引用格式:张韡,高晗昊,唐鑫琦,等. 基于随机参数 logit 的山区高速公路事故严重程度研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 101-110.

英文引用格式:ZHANG Wei, GAO Hanhao, TANG Xinqi, et al. Research on severity of mountain highway accidents based on random parameter logit model [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 101-110.

# 基于随机参数 logit 的山区高速公路事故 严重程度研究\*

张韡 副教授, 高晗昊\*\*, 唐鑫琦, 徐坤森  
(长安大学 汽车学院, 西安 陕西 710064)

中图分类号: X951 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.0448

基金项目: 国家自然科学基金资助(51978075)。

**【摘要】** 为了探究平曲线、纵曲线、平纵组合线形对山区高速公路交通事故严重程度的影响, 首先, 统计分析某山区高速公路 263 km 路段的线形数据和该路段 5 年内发生的 1 870 起事故, 并将其分类; 然后, 根据调研数据的结构形式, 建立随机参数 logit 模型, 进而利用该模型研究组合线形对事故严重程度的影响。结果表明: 曲线比例(ROC)、加权曲率(CW)、单元坡度差( $\Delta S_2$ )等因素与仅财产损失事故增加相关, 而坡长组合(CSL)与仅财产损失事故减少相关; 加权曲率( $CW=0.6\sim 0.7$ )和连续上坡与轻伤事故的增加相关, 加权曲率( $CW=0.3\sim 0.4$ )、单元坡度差( $\Delta S_1$ )、曲线比例(ROC)等因素与轻伤事故减少相关; 曲率变化率(VRC)、单元半径比(CRF, CRB)、弯坡组合(CSR)等因素与重伤或死亡事故增加相关, 曲线比例(ROC)与重伤或死亡事故减少相关; 组合线形对事故严重程度有着显著影响。

**【关键词】** 随机参数 logit 模型; 山区高速公路; 事故严重程度; 平纵组合线形; 财产损失事故

## Research on severity of mountain highway accidents based on random parameter logit model

ZHANG Wei, GAO Hanhao, TANG Xinqi, XU Kunmiao

(College of Automobile, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of flat curve, longitudinal curve, and flat-long combination of line shapes on the severity of traffic accidents on mountain highways, firstly, the line shape data of a 263 km section of a mountain highway and the 1 870 accidents occurring on the section in five years were statistically analyzed and classified. Then, according to the structural form of the research data, the stochastic parametric logit model was established, and then the model was utilized to study the effect of the combination of line shapes on the severity of accidents. The results show that: the factors of ratio of curve (ROC), weighted curvature (CW), and delta slope ( $\Delta S_2$ ) are associated with an increase in property damage-only accidents, whereas the combination of slope lengths (CSL) is associated with a

\* 文章编号: 1003-3033(2024)04-0101-10; 收稿日期: 2023-10-11; 修稿日期: 2024-01-20

\*\* 通信作者: 高晗昊(1999—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为道路交通安全。E-mail: tomhanhao@qq.com。

decrease in property damage-only accidents; the weighted curvature ( $CW = 0.6 - 0.7$ ) and continuous uphill slope are associated with an increase in accidents with minor injuries, and the factors of weighted curvature ( $CW = 0.3 - 0.4$ ), delta slope ( $\Delta S_1$ ), and ratio of curve (ROC) were associated with a decrease in accidents with minor injuries; the variation rate of curvature (VRC), contiguous radius of front and behind (CRF, CRB), and combination of slope and radius (CSR) were associated with an increase in accidents with serious injuries or fatalities, and the ratio of curve (ROC) was associated with a decrease in accidents with serious injuries or fatalities; and the combination of linear shapes had a significant effect on the severity of accidents.

**Keywords:** random parameter logit model; mountain highway; severity of accident; horizontal and vertical combined alignments; property loss accident

## 0 引言

公路的线形设计一般要求必须符合《公路工程技术标准》<sup>[1]</sup>《公路线性设计规范》<sup>[2]</sup>等相关规定与技术标准,但不同路段上的事故率却存在明显差异<sup>[3]</sup>,为了厘清线形,尤其是组合线形和事故之间的关系,有必要对其进行深入研究。

交通事故的发生与人、车、路以及环境等因素均密切相关<sup>[4]</sup>,有学者<sup>[5-7]</sup>采用 logit 模型进行多交通要素间的数据分析,但实际研究过程中将多种相关信息全部纳入模型存在困难,由于相关信息的缺失,某些特定因素会在不同事故中对事故严重程度产生不同的影响,即存在未观测到的异质性<sup>[8]</sup>。传统的 logit 模型(如多项式 logit 模型)无法观测说明事故的异质性<sup>[9-10]</sup>,故学者们不断改进,得到了能够观测自变量异质性的模型,如随机参数 logit 模型<sup>[11]</sup>、混合广义有序模型<sup>[12]</sup>、潜类别 logit 模型<sup>[13]</sup>等。在多项式 logit 模型中存在无关选项独立性假设问题,即假定不同道路因素对多起事故的影响是恒定的<sup>[14]</sup>;而在随机参数 logit 中,通过引入随机扰动项,可以很好地反映事故中的异质性。随机参数 logit 模型虽然也有不足之处,且在一定程度上限制了均值异质性<sup>[15]</sup>,但因其灵活性较高,仍具有良好的应用前景。

道路线形主要可以分为平面线形和纵面线形。平面线形影响车辆的前进方向,即车辆在转弯过程中会受离心力作用,而离心力的大小受车速和平曲线半径的影响<sup>[16]</sup>。纵面线形的坡度越大、坡长越长,事故发生的可能性以及事故的严重程度越高<sup>[17]</sup>。但也有学者对此持不同观点,道路曲线半径与驾驶人焦虑水平呈现较为显著的负相关性<sup>[18]</sup>,当驾驶人主观认为道路较安全时,会以较高车速行驶;与之相对,不安全的行驶环境会促使驾驶人主动降

低车速<sup>[19]</sup>。还有学者通过事故修正系数模型分析得出不同线形组合发生事故的风险不同的结论<sup>[20]</sup>。高速公路本质上是空间曲线,其前后路段是密不可分,仅以单一线形指标为研究对象,无法深入挖掘道路线形整体特征对交通事故的潜在影响,具有一定的局限性<sup>[21]</sup>。

鉴于此,笔者拟选用随机参数 logit 模型,重新定义单一的线形参数,将其变为组合线形参数,并代入模型求解,以得到不同组合线形对交通事故的影响程度,以期为有关部门减少严重事故提供依据。

## 1 山区高速公路事故调研

### 1.1 高速公路事故数据统计

以我国某典型山区高速公路 k0+000—k259+900 路段的事故资料为研究对象,查阅该路段的设计图纸,并收集道路交通事故和道路线形 2 类数据信息。从交管部门获得该路段的道路交通事故信息共 1 870 条(2013—2018 年),每条事故信息均包含事故发生时间、事故地点、事故车辆信息、驾驶人相关信息、事故原因、事故后果等内容。以事故严重程度为因变量,以线形为自变量,并在初步统计时重点关注事故结果和事故地点。按照严重程度将事故分为仅财产损失事故、轻伤事故、重伤事故、死亡事故共 4 类。调研事故数据发现,重伤事故和死亡事故的数量较少,且收集到的部分事故数据本身将重伤和死亡事故合并统计,参照文献<sup>[22]</sup>,将重伤事故和死亡事故 2 类数据合并为重伤和死亡事故 1 个因变量。

道路交通系统是由人、车、路(环境)组成的复杂系统,这使得道路交通事故的发生不仅与道路环境因素有关,而且还与驾驶人和车辆因素有关。本文样本数量最多的事故是人因事故,但由于驾驶人的行为直接受道路环境的影响,故除了疲劳驾驶、醉

酒驾驶及显著分心驾驶等特殊人因事故外,大多数事故都会受到道路环境因素的影响。另外,车辆故障因素和极端天气因素在造成交通事故方面与道路环境因素相对独立。所以,为了研究道路环境对事故的影响,本文在统计事故时,排除了车辆故障事故、极端天气事故和完全直接人因事故。

最终在筛选的 1 824 起事故数据样本中,事故被分为仅财产损失事故、轻伤事故、重伤或死亡事故 3 类,仅财产损失事故 1 580 起,轻伤事故 125 起,重伤或死亡事故 119 起,其占比分别为 86.6%、6.8% 和 6.5%。

## 1.2 道路线形数据统计

由于文中侧重于考虑道路线形因素对高速公路事故严重程度的影响,因此,选取道路的线形数据作为主要研究因素。一个完整的道路线形通常由直线、缓和曲线以及平曲线 3 部分构成。其中,平曲线通常具有固定的曲率半径,直线可以理解为曲率为 0 的特殊圆曲线,缓和曲线的曲率半径是逐渐变化的,主要用于过渡 2 种不同曲率的平曲线或直线。

为了分析单一道路线形因素对事故严重程度的影响,首先将文中的山区高速公路进行路段单元划分,划分依据为:把前一个完整线形的圆直点或圆缓点作为起点,把后一个完整线形的缓直点或缓圆点作为终点。由此,将 260 km 的研究路段划分为 307 个路段单元;然后,整理统计每一路段单元中的各线形指标,主要包括:

- 1) 路段单元  $i$  的总长度  $L_i$ 。
- 2) 路段单元  $i$  中第  $n$  个曲线路段中的平曲线长度  $L_{1in}$ , km(下同)。
- 3) 路段单元  $i$  中第  $n$  个曲线路段中的平曲线半径  $R_{1in}$ , km(下同)。
- 4) 路段单元  $i$  中第  $n$  个曲线路段中的前一个缓和曲线路段长度  $L_{2in}$ 。
- 5) 路段单元  $i$  中第  $n$  个曲线路段中的前一个缓和曲线半径  $R_{2in}$ 。
- 6) 路段单元  $i$  中第  $n$  个曲线路段中的后一个缓和曲线路段长度  $L_{3in}$ 。
- 7) 路段单元  $i$  中第  $n$  个曲线路段中的后一个缓和曲线路段长度  $R_{3in}$ 。
- 8) 路段单元  $i$  中第  $n$  个曲线路段中的竖曲线半径  $R_{4in}$ 。
- 9) 路段单元  $i$  中的坡度  $S_i$ 。
- 10) 路段单元  $i$  中第  $n$  个曲线路段中的坡

度  $S_{in}$ 。

11) 路段单元  $i$  中包含的曲线路段数量  $u$ 。

12) 路段单元  $i$  中第  $n$  个曲线路段的拐弯方向  $T_{in}$ ,若  $T_{in}=1$  则第  $i$  个路段单元中第  $n$  个曲线路段是左弯,若  $T_{in}=2$  则是右弯。

## 2 道路组合线形指标选择及定义

### 2.1 平面组合线形指标

平面组合线形主要考虑了前后弯道之间的影响,将道路线形的弯道半径、弯道角度、弯道长度等与平面有关的单一线形数据按照定义的公式得到更能综合反映路段弯道特点的平面组合线形。本文共提出 6 个平面组合线形指标,其定义方式如下:

1) 曲线比例(Ratio of Curve, ROC):指各路段单元中曲线路段所占比例如下:

其计算方法如下:

$$ROC_i = \frac{\sum_{n=1}^u L_{1in} + L_{2in} + L_{3in}}{L_i} \quad (1)$$

式中  $ROC_i$  为路段单元  $i$  中曲线路段所占比例。 $i$  和  $n$  取正整数,以下  $i$  和  $n$  未特殊说明均取正整数。文中未将直线段长度比例单独作为指标是因为目前过度段长度较长或在该情况下弯道半径较大,故未加以考虑。

2) 加权曲率(Weighted Curvature, CW):表示路段单元中曲线路段偏离直线的程度,即道路弯曲程度。当路段单元中存在 2 个及 2 个以上半径不相同的平曲线路段时, CW 定义如下:

$$CW_i = \sum_{n=1}^u \frac{L_{1in}}{R_{1in}} \quad (2)$$

式中:  $CW_i$  为路段单元  $i$  的 CW 数值;  $R_{1in}$  为路段单元  $i$  的第  $n$  条平曲线的半径, km。

3) 曲率变化率(Variation Rate of Curvature, VRC):指路段单元中路线转角值的变化量与路段长度的比值,其计算方法如下:

$$VRC_i = \frac{\sum_{n=1}^u \left( \frac{L_{1in}}{R_{1in}} + \frac{L_{2in}}{2R_{1in}} + \frac{L_{3in}}{2R_{1in}} \right)}{\sum_{n=1}^u L_{1in}} \times \frac{180}{\pi} \times 10^3 \quad (3)$$

式中  $VRC_i$  为路段单元  $i$  的 VRC, ( $^\circ$ )/km。

4) 相邻路段单元半径比(前)(Contiguous Radius of Front, CRF):指当前路段单元与前一路段单元之间的平曲线半径之比。当某一路段单元中存

在 2 个及 2 个以上半径不相同的平曲线路段时,取其比值的最大值作为该路段单元的  $CRF_i$  值。其计算方法如下:

$$CRF_i = \max_{\substack{1 \leq n \leq u \\ 1 \leq n' \leq k}} \left( \frac{R_{lin}}{R_{1(i-1)n'}} \right) \quad (4)$$

式中: $CRF_i$  为当前路段单元  $i$  与前一路段单元  $i-1$  的平曲线半径之比; $k$  为前一路段单元第  $i-1$  段中曲线路段的总数量; $n'$  为第  $n'$  个曲线路段; $R_{1(i-1)n'}$  为路段单元  $i-1$  的平曲线半径,km。

5) 相邻路段单元半径比(后) (Contiguous Radius of Behind, CRB):指车辆行驶在当前路段单元与后一路段单元之间的平曲线半径之比。当某一路段单元中存在 2 个及 2 个以上半径不相同的平曲线路段时,取其比值的最大值作为该路段单元的 CRB。其计算方法如下:

$$CRB_i = \max_{\substack{1 \leq n \leq u \\ 1 \leq n' \leq p}} \left( \frac{R_{lin}}{R_{1(i+1)n'}} \right) \quad (5)$$

式中: $CRB_i$  为当前路段单元  $i$  与后一路段单元  $i+1$  的平曲线半径之比; $p$  为后一路段单元  $i+1$  中曲线路段的总数量; $R_{1(i+1)n'}$  为路段单元  $i+1$  的平曲线半径,km。

6) 连续转弯(Continuous Turns, CT):指在某一路段单元中,是否存在 2 个或 2 个以上转向相反的弯道。其计算方法如下:

$$CT_i = \begin{cases} 0, & T_{i(n-1)} = T_{in}, \forall n \in (2, m) \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $T_{in}$  为路段单元  $i$  中第  $n$  个曲线路段的拐弯方向。

## 2.2 纵面组合线形指标

纵面组合线形主要考虑了前后路段单元坡度的变化程度,并由坡度差、上坡或下坡等与高度变化有关的单一参数定义得到相邻路段单元坡度变化情况,用来定性或定量地描述前后坡度相互之间的影响情况。本文共提出 3 个纵面组合线形指标,其定义方式如下:

1) 相邻路段单元坡度差(前) (Delta Slope 1,  $\Delta S_{1i}$ ):指当前路段单元与前一路段单元之间的坡度差。其计算方法如下:

$$\Delta S_{1i} = |S_i - S_{i-1}| \quad (7)$$

式中: $\Delta S_{1i}$  为当前路段单元  $i$  与前一路段单元  $i-1$  的坡度差,%; $S_i$  和  $S_{i-1}$  分别为当前路段单元  $i$  与前一路段单元  $i-1$  的纵坡值,%。

2) 相邻路段单元坡度差(后) (Delta Slope 2,  $\Delta S_{2i}$ ):指车辆行驶的当前路段单元与后一路段单元之间的坡度差。其计算方法如下:

$$\Delta S_{2i} = |S_i - S_{i+1}| \quad (8)$$

式中: $\Delta S_{2i}$  为当前路段单元与后一路段单元的坡度差,%; $S_i$  和  $S_{i+1}$  分别为当前路段单元与后一路段单元的纵坡值,%。

3) 坡度变化:可以将前后路段单元坡度变化定义为连续上坡、连续下坡、先上坡后下坡再上坡、先下坡后上坡再下坡、先上坡后连续下坡、先下坡后连续上坡、先连续上坡后下坡,共 8 种情况,如图 1 所示。其中, $G_i$  表示车辆行驶时所在路段, $G_{i-1}$  表示前一路段单元, $G_{i+1}$  表示后一路段单元。

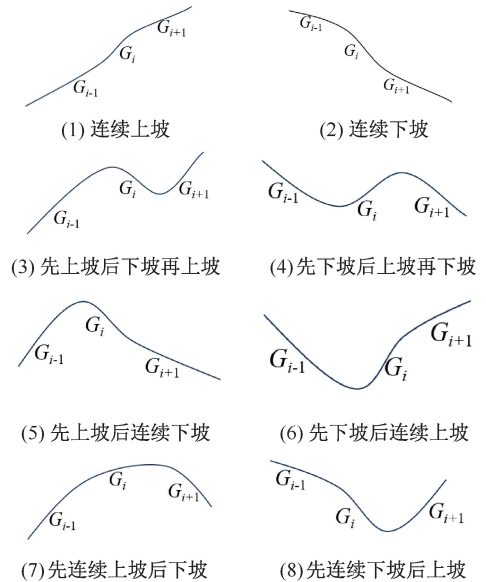


图 1 前后路段单元坡度变化分类

Fig. 1 Classification of slope change before and after road unit

## 2.3 平纵组合线形指标

平纵组合线形将路段单元中平面上的线形和纵面上的坡度变化进行综合考虑,能提供指标评判同时转弯和上下坡路段的变化程度。本文共提出 3 个指标,并进行描述,解决了从无到有的问题,但描述的情况不如平面组合线形指标和纵面组合线形指标具体。平纵组合线形指标及其定义方式如下:

1) 坡长组合 (Combination of Slope Length, CSL):指路段单元中坡度与路段长度的乘积。其计算方法如下:

$$CSL_i = S_i \cdot L_i \quad (9)$$

式中: $CSL_i$  为路段单元  $i$  的 CSL 值,%/km; $S_i$  为路段单元  $i$  的坡度,%; $L_i$  为路段长度,km。

2) 弯坡组合 (Combination of Slope and Radius, CSR):指路段单元中纵坡与平曲线半径的比值。当路段单元中存在 2 个及 2 个以上半径不相同的曲线路段时,取绝对值最大的 CSR 作为该路段的 CSR 值。其计算方法如下:

$$CSR_i = \max_{n=1,2,\dots,u} \left( \left| \frac{S_{in}}{R_{in}} \right| \right) \quad (10)$$

式中:CSR<sub>i</sub> 为路段单元 *i* 的 CSR 值,%/km; S<sub>in</sub> 为路段单元 *i* 中第 *n* 条曲线路段的纵坡,%。

3) 平纵半径比 (Vertical to Horizontal Radius Ratio, VHR):指某一路段单元中竖曲线半径与平曲线半径的比值。当某一路段单元中存在 2 个及 2 个以上平/纵半径不相同的曲线路段时,取数值最大的 VHR 值作为该路段单元的 VHR 值。其计算方法如下:

$$VHR_i = \max \left( \frac{R_{4in}}{R_{1in}} \right), n = 1, 2, \dots, u \quad (11)$$

式中:VHR<sub>i</sub> 为路段单元 *i* 中竖曲线半径与平曲线半径的比值;R<sub>4in</sub> 为路段单元 *i* 中第 *n* 条曲线路段的竖曲线半径,km。

## 3 基于组合线形的事故严重程度模型

### 3.1 随机参数 logit 模型建立

文中将 3 种事故严重程度的发生率作为因变量,将 12 类道路组合线形指标的频数作为自变量,且除“CT”为二分类变量外,其余均为多分类变量。各变量的定义与统计情况见表 1。由表 1 可以看出,需要拟合的候选自变量共有几十个,因为自变量数量大于 3,所以该问题适合用 logit 模型进行求解<sup>[23]</sup>。另外由于不同 logit 模型的适用性,选择构建随机参数 logit 模型。

随机参数 logit 模型表达式如下:

$$P_i(j) = \frac{\exp(\alpha_{i,j} + \bar{\beta}_j^T X_i)}{\sum_{j \in J} \exp(\alpha_{i,j} + \bar{\beta}_j^T X_i)} \quad (12)$$

式中:α<sub>i,j</sub> 为常数项;*i* 代表第 *i* 起事故;*j* 为事故的严重程度,取 1,2,3 分别表示仅财产损失、轻伤、重伤或死亡事故;*J* 为事故的类别数;X<sub>i</sub> 为事故严重程度的影响因素集合,如平曲线长度、缓和曲线长度、纵坡、坡长等;β<sub>j</sub> 为事故严重程度为 *j* 时某一影响因素的待估参数,随机参数 logit 模型中假定 β<sub>j</sub> 服从某种分布,即 β<sub>j</sub> ~ f(β<sub>j</sub> | θ), 则 β<sub>j</sub> 的第 *k* 个分量表

示为:

$$\bar{\beta}_{i',j,k} = u_{k,j} + \sigma_{k,j} v_{i',j,k} \quad (13)$$

式中:*k* 代表第 *k* 个自变量;u<sub>k,j</sub> 为事故严重程度为 *j* 的第 *k* 个自变量的参数均值;σ<sub>k,j</sub> 为事故严重程度为 *j* 的第 *k* 个自变量的参数标准差;v<sub>i',j,k</sub> 为第 *i'* 起事故中事故严重程度为 *j* 的第 *k* 个自变量的不可观测随机效应,均值和方差分别为 0 和 1。

### 3.2 事故严重程度模型多重共线性检验

除“CT”这一变量外,由于本文所有组合线形因素类别数均大于 3,故在将变量纳入模型进行拟合分析前,需要将 *N* 分类自变量转化为 *N*-1 个虚拟自变量 (Variance Inflation Factor, VIF),以自变量的某一分类作为参照变量,来研究不同类别组合线形因素对事故严重程度的影响。本文借助 stata15.0 检验 VIF 值,共有 67 个,VIF 值最大的几项分别是 X<sub>37</sub>(2.99)、X<sub>57</sub>(2.71)、X<sub>122</sub>(2.65)、X<sub>27</sub>(2.54)、X<sub>56</sub>(2.45)、X<sub>121</sub>(2.44) 等。其中,最大的 VIF 值 (X<sub>37</sub>) 为 2.99,小于 10;计算 VIF 均值为 1.93,也远小于 10。因此,本文道路组合线形虚拟变量间不存在严重的共线性问题,可进行建模分析。

### 3.3 事故严重程度模型结果

借助 Nlogit5.0 软件采用最大似然法进行参数估计,以显著水平 0.1 作为筛选显著变量的阈值,将数次拟合后的结果作为多项式 logit 的候选自变量。在多项式 logit 结果的基础上,基于 Halton 抽样法,采用蒙特卡罗法进行参数估计,显著性阈值为 0.1 的变量作为随机参数 logit 的候选自变量。模型参数估计结果见表 2。

由表 2 可知:X<sub>22</sub> 这一变量在轻伤事故中参数估计服从均值为 1.098、标准差为 1.155 的正态分布,其余变量退化为固定参数。将其中显著自变量的参数估计值 β 带入随机参数 logit 模型,可得到不同事故严重程度的可观测效用函数形式如下:

$$U_1 = 1.314 \times X_{13} + 1.117 \times X_{23} - 1.182 \times X_{46} + 0.913 \times X_{76} + 0.786 \times X_{123} \quad (14)$$

式中 U<sub>1</sub> 为仅财产损失事故起数。组合线形变量对仅财产损失事故严重程度的影响如图 2 所示。

$$U_2 = -1.911 \times X_{12} - 2.317 \times X_{22} + 1.416 \times X_{25} - 1.608 \times X_{45} - 1.968 \times X_{64} - 0.727 \times X_{64} - 1.493 \times X_{75} + 0.843 \times X_{121} \quad (15)$$

式中 U<sub>2</sub> 为轻伤事故起数。组合线形变量对轻伤事故严重程度的影响如图 3 所示。

表 1 自变量与因变量的分类与数值

Tab.1 Classification and numerical value of independent variables and dependent variables

变量类别	变量名称	虚拟变量符号	变量定义	频数	占比/%	变量类别	变量名称	虚拟变量符号	变量定义	频数	占比/%
因变量	事故严重程度	$Y_1$	仅财产损失事故	1 580	86.63	纵面线形组合	$\Delta S_1 / \%$	$X_{63}$	1.5~2	373	20.43
		$Y_2$	轻伤事故	125	6.84			$X_{64}$	2~3	255	13.96
		$Y_3$	重伤或死亡事故	119	6.52			$X_{65}$	3~4	135	7.38
				$X_{66}$	>4			138	7.59		
平面线形组合	ROC	$X_{11}$	0~0.4	177	9.68		$\Delta S_2 / \%$	参照	<0.5	117	6.42
		$X_{12}$	0.4~0.5	160	8.77			$X_{71}$	0.5~1.0	373	20.43
		$X_{13}$	0.5~0.6	267	14.65			$X_{72}$	1.0~1.5	440	24.12
		参照	0.6~0.7	198	10.86			$X_{73}$	1.5~2.0	421	23.10
		$X_{14}$	0.7~0.8	313	17.17			$X_{74}$	2~3	251	13.74
		$X_{15}$	0.8~0.9	195	10.70			$X_{75}$	3~4	138	7.54
		$X_{16}$	0.9~1.0	514	28.18			$X_{76}$	>4	85	4.65
	CW	参照	0~0.2	295	16.20		坡度变化	$X_{121}$	连续上坡	268	14.71
		$X_{21}$	0.2~0.3	238	13.05			$X_{122}$	连续下坡	899	49.30
		$X_{22}$	0.3~0.4	122	6.68			参照	先上坡后下坡再上坡	62	3.42
		$X_{23}$	0.4~0.5	236	12.94			$X_{123}$	先下坡后上坡再下坡	70	3.85
		$X_{24}$	0.5~0.6	234	12.83	$X_{124}$		先上坡后连续下坡	204	11.18	
		$X_{25}$	0.6~0.7	219	12.03	$X_{125}$		先下坡后连续上坡	75	4.12	
		$X_{26}$	0.7~0.9	174	9.52	$X_{126}$		先连续上坡后下坡	173	9.47	
	纵面线形组合	VRC/((°)·km <sup>-1</sup> )	参照	0~30	175	9.57	CSL/(%·km <sup>-1</sup> )	$X_{41}$	<1	395	21.66
$X_{31}$			30~40	253	13.85	参照		1~1.5	225	12.35	
$X_{32}$			40~50	322	17.65	$X_{42}$		1.5~2	264	14.49	
$X_{33}$			50~60	229	12.57	$X_{43}$		2~2.5	215	11.76	
$X_{34}$			60~70	179	9.79	$X_{44}$		2.5~3	195	10.70	
$X_{35}$			70~80	98	5.40	$X_{45}$		3~4	226	12.41	
$X_{36}$			80~100	110	6.04	$X_{46}$		>4	303	16.63	
CRF		$X_{81}$	0~0.3	248	13.58	CSR/(%·km <sup>-1</sup> )	参照	<1	231	12.67	
		$X_{82}$	0.3~0.6	370	20.27		$X_{51}$	1~2	254	13.90	
		$X_{83}$	0.6~0.9	588	32.25		$X_{52}$	2~3	343	18.82	
	参照	0.9~1.2	536	29.41	$X_{53}$		3~4	244	13.37		
	$X_{84}$	>1.2	82	4.49	$X_{54}$		4~5	50	2.73		
CRB	$X_{91}$	0~0.3	263	14.44	$X_{55}$	5~6	149	8.18			
	$X_{92}$	0.3~0.6	340	18.66		$X_{56}$	6~10	186	10.21		
	$X_{93}$	0.6~0.9	481	26.36		$X_{57}$	>10	367	20.11		
	参照	0.9~1.2	624	34.22		VHR	$X_{101}$	0~10	234	12.83	
$X_{94}$	>1.2	115	6.31	$X_{102}$	10~15		252	13.80			
CT	$X_{111}$	1	646	35.40	$X_{103}$		15~20	186	10.21		
	参照	0	1 178	64.60	$X_{104}$		20~30	245	13.42		
纵面线形组合	$\Delta S_1 / \%$	参照	>0.5	127	6.95		$X_{105}$	30~40	193	10.59	
		$X_{61}$	0.5~1.0	400	21.93		$X_{106}$	40~50	251	13.74	
		$X_{62}$	1.0~1.5	397	21.76	参照	>50	463	25.40		

$$U_3 = -1.863 - 0.947 \times X_{14} + 0.648 \times X_{36} + 0.476 \times X_{57} + 0.346 \times X_{81} + 0.538 \times X_{92} \quad (16)$$

式中  $U_3$  为重伤或死亡事故起数。组合线形变量对重伤或死亡事故严重程度的影响如图 4 所示。

由上述模型结果可知：在 ROC 为 0.5~0.6，CW=0.4~0.5 时，与后一路段单元坡度差大于 4%，先下坡后上坡再下坡的情况下易于发生山区高速公路仅财产损失事故；在 CSL 大于 4%/km 的情况

表 2 高速公路事故严重程度的随机参数 logit 模型参数估计结果

Tab. 2 Estimation results of random parameter logit model parameters of highway accident severity

事故严重程度	变量	变量定义	参数估计	标准差
仅财产损失事故 $Y_1$	$X_{13}$	ROC=0.5~0.6	1.314***	0.198
	$X_{23}$	CW=0.4~0.5	1.117***	0.184
	$X_{46}/(\% \cdot \text{km}^{-1})$	CSL>4	-1.182***	0.223
	$X_{76}/\%$	$\Delta S_2 > 4$	0.913**	0.341
	$X_{123}$	先下坡后上坡再下坡	0.786**	0.366
轻伤事故 $Y_2$	$X_{12}$	ROC=0.4~0.5	-1.911***	0.405
	$X_{22}$ (均值)	CW=0.3~0.4	-2.317***	1.098
	$X_{22}$ (标准差)	CW=0.3~0.4	3.185***	1.155
	$X_{25}$	CW=0.6~0.7	1.416***	0.303
	$X_{45}/(\% \cdot \text{km}^{-1})$	CSL=3~4	-1.608***	0.296
	$X_{64}/\%$	$\Delta S_1 = 2 \sim 3$	-1.968***	0.274
	$X_{65}/\%$	$\Delta S_1 = 3 \sim 4$	-0.727**	0.294
	$X_{75}/\%$	$\Delta S_2 = 3 \sim 4$	-1.493***	0.264
重伤或死亡事故 $Y_3$	$X_{121}$	连续上坡	0.843***	0.227
	ASC <sub>S3</sub>	常数项	-1.863***	0.132
	$X_{14}$	ROC=0.7~0.8	-0.947***	0.362
	$X_{36}/((^\circ) \cdot \text{km}^{-1})$	VRC=80~100	0.648*	0.359
	$X_{57}/(\% \cdot \text{km}^{-1})$	CSR>10	0.476*	0.275
	$X_{81}$	CRF<0.3	0.346***	0.350
	$X_{92}$	CRB=0.3~0.6	0.538**	0.229

注:\*\*\* 代表显著性水平为 99%; \*\* 代表显著性水平为 95%; \* 代表显著性水平为 90%。

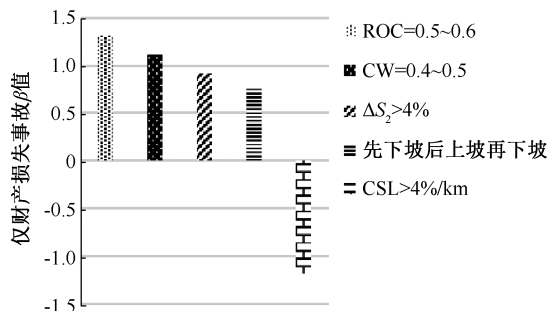


图 2 组合线形变量对仅财产损失事故严重程度的影响  
Fig. 2 Influence of combined linear variables on severity of only property loss accidents

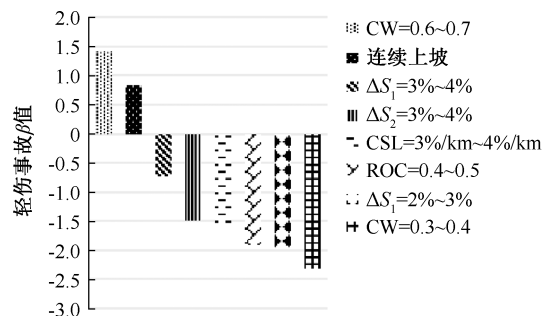


图 3 组合线形变量对轻伤事故严重程度的影响  
Fig. 3 Influence of combined linear variables on severity of minor injury accident

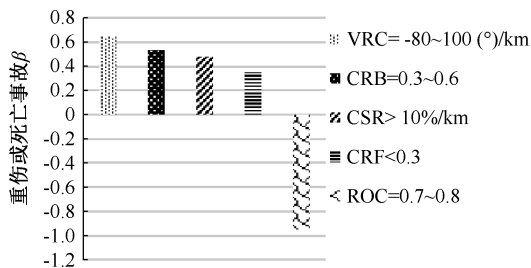


图 4 组合线形变量对重伤或死亡事故严重程度的影响  
Fig. 4 Influence of combined linear variables on severity of serious injury or death accident

下不易于发生山区高速公路仅财产损失事故。

在  $CW = 0.6 \sim 0.7$  时,连续上坡的情况下容易发生轻伤事故;在  $CW = 0.3 \sim 0.4$  时,前一路段单元坡度差为  $2\% \sim 3\%$ , ROC 为  $0.4 \sim 0.5$ , CSL 为  $3\%/km \sim 4\%/km$ ,与后一路段单元坡度差为  $3\% \sim 4\%$ ,与前一路段单元坡度差为  $3\% \sim 4\%$  的情况下不易于发生轻伤事故。

在 VRC 为  $80 \sim 100(^\circ)/km$ ,与 CRB 为  $0.3 \sim 0.6$ ,CSR 大于  $10\%/km$ ,与 CRF 小于  $0.3$  的情况下容易发生重伤或死亡事故;在 ROC 为  $0.7 \sim 0.8$  的情况下不易于发生重伤或死亡事故。

### 3.4 事故严重程度模型的拟合优度检验

为了验证随机参数 logit 模型结果的拟合程度,

可以通过 $\chi^2$ , 赤池信息量准则 ( Akaike Information Criterion, AIC ), 贝叶斯信息准则 ( Bayesian Information Criterion, BIC ), Mcfadden Pseudo  $R^2$  多种指标对模型最后的运算结果进行拟合优度检验, 拟合优度结果见表 3。

表 3 拟合优度指标

Tab. 3 Goodness of fit index

拟合优度指标	随机参数 logit 模型
LL(0)	-2 048. 91
LL( $\beta$ )	-1 067. 78
$\chi^2$	1 962. 26
AIC	2 175. 56
BIC	2 286. 23
Mcfadden Pseudo $R^2$	0. 48

由表 3 可知: 随机参数 logit 模型结果的 $\chi^2$  为 1 962. 26, 在自由度为 20、显著水平 0. 01 的情况下, 大于临界值 $\chi^2(20) = 37. 57$ , 表明该模型的有效性。另外, 表征模型适配性的 AIC 指标和 BIC 指标越小代表拟合程度越高<sup>[24]</sup>, 文中的 AIC 值和 BIC 值均小于 2 300, 相对较小。最后, 伪判定系数  $R^2$  也是一种常用的判断拟合程度的指标<sup>[25]</sup>, 伪判定系数  $R^2$  中常用的 Mcfadden Pseudo  $R^2$  指标在 0. 3~0. 5 范围内, 认为拟合程度良好<sup>[26]</sup>; 文中结果的 Mcfadden Pseudo  $R^2$  值为 0. 48, 属于取值范围内。综上所述, 通过 $\chi^2$ 、AIC、BIC、Mcfadden Pseudo  $R^2$  多种指标都印证了模型结果的有效性。

## 4 组合线形对事故严重程度的影响

### 4.1 平面组合线形因素影响分析

平面线形的 ROC 和 CW 在中等范围时较易发生交通事故。当道路中 ROC 在 0. 5~0. 6 时, 车辆行驶至该类路段上更容易发生仅财产损失事故 ( $\beta = 1. 314^{***}$ ), 当道路的 CW 在中等范围 (0. 3~0. 4) 时, 车辆行驶在道路上发生仅财产损失事故和轻伤事故的可能性较高, 参数估计分别为  $\beta = 1. 117^{***}$ ,  $\beta = 1. 416^{***}$ 。这是由于在中等范围的弯道时, 驾驶人需要多次驶入和驶出弯道, 连续多次转动方向盘, 容易发生不安全操作, 进而导致事故的发生。且由于在弯道前一般驾驶员都会进行减速, 故发生重伤或死亡事故的概率较小, 事故多为轻伤和仅财产损失事故。

VRC 较大的情况下, 易发生重伤或死亡事故 ( $\beta = 0. 648^*$ )。VRC 较大, 可以认为是该路段曲线的转弯半径较小, 弯道较急。驾驶人行驶到该路段时, 需相对大角度、快速地转动方向盘, 当车速过快

时, 易发生侧滑或侧翻等严重程度较高的事故。

相邻路段单元半径相差较大时 (CRF < 0. 3, CRB = 0. 3~0. 6), 发生重伤或死亡事故的可能性相对较高 ( $\beta = 0. 346^{***}$  和  $\beta = 0. 538^{***}$ ), 这是由于前一路段对后一路段产生影响导致的。在前一路段半径较小, 后一路段半径较大时, 驾驶人会产生过于安全的心理预期, 进而采取加速行为, 最终产生危险。反之, 在前一路段半径较大, 后一路段半径较小时, 若车速未降到安全范围之内, 较大的离心力易使车辆发生侧翻侧滑事故。

### 4.2 纵面组合线形因素影响分析

相邻路段的坡度变化与交通事故的发生有着较为复杂的关系。当相邻路段具有中等范围坡度差时 ( $\Delta S_{1i}$ 、 $\Delta S_{2i} = 2\% \sim 4\%$ ), 发生仅财产损失事故和重伤或死亡事故的可能性较大, 而发生轻伤事故的可能性相对较小。当连续上坡时易发生轻伤事故 ( $\beta = 0. 843^{***}$ ), 这是由于不同类型的汽车比功率的不同, 导致不同类型的汽车爬坡时车速不同; 因此后车可能需要超车, 但由于连续上坡增加了超车时间进一步加剧了超车时的危险性, 更使得此时易发生事故。但上坡时车速普遍相对偏低, 所以发生的事故严重程度不高, 易发生轻伤事故。

另外, 相邻路段坡度的性质会影响驾驶员的心理预期, 进而对事故率产生影响。例如先下坡、后上坡、再下坡的组合路段中, 易发生仅财产损失事故 ( $\beta = 0. 796^{**}$ )。这可能是由于前一路段对后一路段产生影响, 先下坡后上坡的上坡路段会使得驾驶人对道路的安全敏感度下降, 并有持续踩下油门踏板提高车速的心理预期, 最终造成在下坡路段车速过快易发生事故。而当与后路段单元的坡度差很大时 ( $\Delta S_{2i} > 4\%$ ), 易发生仅财产损失事故 ( $\beta = 0. 913^{**}$ )。这是由于在坡道交界处, 视野受限进而导致事故; 但是当坡度很大时, 驾驶人可以明确地察觉到坡度的存在, 进而提高警惕、采取安全措施, 故发生的事故多为仅财产损失事故。

### 4.3 平纵组合线形因素影响分析

平纵组合线形中的 CSL 和 CSR 较为影响行车安全。文中的模型结果显示, 当车辆在 CSL > 3%/km 的道路上行驶时, 发生仅财产损失事故和轻伤事故的可能性较低小 ( $\beta = -1. 182^{***}$ 、 $\beta = -1. 608^{***}$ )。该数值越大意味着该路段落差较大, 车辆在行驶过程中有大量势能转化成行车制动系统的热能, 从而易于引发制动失效的恶性事故。由于

该路段所发生的事故大多为严重的恶性事故,反而使得仅财产损失事故和轻伤事故的可能性较低。

当 CSR 值 $>10\%/km$ 时,发生重伤或死亡事故的可能性高( $\beta=0.476^*$ )。这是因为该数值越大意味着此路段陡坡且急弯,车辆的运动状态需要频繁调整,而且车辆的技术性能衰减较快,增加了驾驶人的操作难度,一旦驾驶人出现操作失误,将极易导致侧翻侧滑及冲出路外的恶性事故。

## 5 结 论

1) 文中提出平面组合线形、纵面组合线形、平

纵组合线形等指标,并经过显著性检验。

2) 道路组合线形对事故的严重程度有着显著影响,特别是 VRC 为  $80\sim 100$  ( $^\circ$ )/km、与 CRB 为  $0.3\sim 0.6$ 、CSR 大于  $10\%/km$  以及与 CRF 小于  $0.3$  的路段,更易于发生致人重伤或死亡的恶性道路交通事故。

3) 文中研究数据来源仅为  $260\text{ km}$  的山区高速公路,未考虑“人、车、路、环境”除“路”以外的要素,并未深入研究事故严重程度的影响机制。可以将进一步增加样本量,优化组合线形类型。

## 参 考 文 献

- [1] JTG B01—2014,公路工程技术标准[S].  
JTG B01—2014, Technical standard of highway engineering[S].
- [2] JTG D20—2017,公路路线设计规范[S].  
JTG D20—2017, Design specification for highway alignment[S].
- [3] 赵华祥,杜飞翔,付开华,等.山区公路小半径弯道路段事故严重度影响因素及其异质性比较分析[J].交通信息与安全,2022,40(3):42-50.  
ZHAO Huaxiang, DU feixiang, FU Kaihua, et al. A comparative analysis of heterogeneous effects of various factors on accident severity at sharp curvesections of mountainous highway[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(3):42-50.
- [4] WU Qiong, BOGUS S M, CHEN Feng, et al. Mixed logit model-based driver injury severity investigations in single- and multi-vehicle crashes on rural two-lane highways[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 72: 105-115.
- [5] FOUNTAS G, SARWAR M T, ANASTASOPOULOS P C, et al. Analysis of stationary and dynamic factors affecting highway accident occurrence: a dynamic correlated grouped random parameters binary logit approach[J]. Accident Analysis & Prevention, 2018, 113: 330-340.
- [6] ZHANG Guangnan, LI Yanyan, KING M J, et al. Overloading among crash-involved vehicles in China: identification of factors associated with overloading and crash severity[J]. Traffic Injury Prevention, 2019, 25: 36-46.
- [7] CHANG Fangrong, LI Maosheng, XU Pengpeng, et al. Injury severity of motorcycle riders involved in traffic crashes in hunan, china: a mixed ordered logit approach[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13: 714-728.
- [8] 郭延永,刘攀,吴瑶,等.考虑异质性的贝叶斯交通冲突模型[J].中国公路学报,2018,31(4):296-303.  
GUO Yanyong, LIU Pan, WU Yao, et al. Bayesian traffic conflict model accounting for heterogeneity[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(4): 296-303.
- [9] HALEEM K, GAN A. Effect of driver's age and side of impact on crash severity along urban freeways: a mixed Logit approach[J]. Journal of Safety Research, 2013, 46: 67-76.
- [10] SHAHEED M S, GKRTIZA K, ZHANG Wei, et al. A mixed logit analysis of two-vehicle crash severities involving a motorcycle[J]. Accident Analysis & Prevention, 2013, 61: 119-128.
- [11] MILTON J, SHANKAR V, MANNERING F. Highway accident severities and the mixed logit model: an exploratory empirical analysis[J]. Accident Analysis and Prevention, 2008, 40(1): 260-266.
- [12] ELURU N, BHAT C, HENSHER D. A mixed generalized ordered response model for examining pedestrian and bicyclist injury severity level in traffic crashes[J]. Accident Analysis and Prevention, 2008, 40 (3): 1 033-1 054.
- [13] SHAHEED M, GKRTIZA K. A latent class analysis of single-vehicle motorcycle crash severity outcomes[J]. Analytic Methods in Accident Research, 2014, 2: 30-38.
- [14] 刘忠,田莎,陈青,等.随机系数 LOGIT 模型的最新发展及其应用[J].经济学动态,2012(12):125-130.  
LIU Zhong, TIAN Sha, CHEN Qing, et al. Recent developments and applications of logit models with random coefficients [J]. Economic Perspectives, 2012 (12): 125-130.
- [15] 秦萍,陈颖翔,徐晋涛,等.北京居民出行行为分析:时间价值和交通需求弹性估算[J].经济地理,2014,34(11):17-22.

- QIN Ping, CHEN Ying'ao, XU Jintao, et al. Travel behavior analysis for the residents in Beijing: value of time and travel demand elasticity estimates[J]. *Economic Geography*, 2014, 34(11): 17-22.
- [16] 宋栋栋,杨小宝,祖兴水,等. 基于均值异质性随机参数 Logit 模型的城市道路事故驾驶员受伤严重程度研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(3): 214-220.  
SONG Dongdong, YANG Xiaobao, ZU Xingshui, et al. Examination of driver injury severity in urban crashes: a random parameters logit model with heterogeneity in means approach[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(3): 214-220.
- [17] HASSAN Y, EASA S M. Effect of vertical alignment on driver perception of horizontal curves [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2003, 129(4): 399-407.
- [18] 杨佩佩,熊坚,何扬帆. 公路小半径曲线路段驾驶人焦虑水平模型[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(1): 227-232.  
YANG Peipei, XIONG Jian, HE Yangfan. Anxiety level model of drivers on sharp circular curve road[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(1): 227-232.
- [19] 张韡,魏朗,彭绍勇. 基于能量守恒原理的公路线形安全性评价[J]. *交通运输工程学报*, 2009, 9(4): 85-91.  
ZHANG Wei, WEI Lang, PENG Shaoyong. Safety evaluation of road alignment based on energy conservation law[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, 9(4): 85-91.
- [20] 孟祥海,由冰玉,邱志雄,等. 基于事故修正系数的山区高速公路事故预测模型[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(1): 10-17.  
MENG Xianghai, YOU Bingyu, QIU Zhixiong, et al. Accident prediction model of mountainous freeway based on crash modification[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(1): 10-17.
- [21] 雷桂荣,刘峰,谢华昌,等. 高速公路交通安全与道路线形和主要交通流特性的关系[J]. *公路与汽运*, 2018(5): 41-46.  
LEI Guirong, LIU Feng, XIE Huachang, et al. Relationship between highway traffic safety and road alignment and main traffic flow characteristics [J]. *Highway and Automobile Transportation*, 2018(5): 41-46.
- [22] 赵跃峰,张生瑞,马壮林. 基于部分优势比的公路隧道交通事故严重程度分析模型[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(9): 159-166.  
ZHAO Yuefeng, ZHANG Shengrui, MA Zhuanglin. Analysis of traffic accident severity on highway tunnels using the partial proportion odds model[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(9): 159-166.
- [23] 申昕,沈金星,郑长江,等. 基于 Multinomial Logit 模型的美国北卡罗莱纳州慢行交通事故严重程度分析[J]. *交通与运输*, 2021, 37(5): 24-28.  
SHEN Xin, SHEN Jinxing, ZHENG Changjiang, et al. Severity analysis of slow traffic accidents in north carolina based on multinomial logit model[J]. *Traffic & Transportation*, 2021, 37(5): 24-28.
- [24] 姚荣涵,龙梦,张文松,等. 基于潜在类别-Logit 模型的共享自动驾驶汽车使用意向[J]. *交通信息与安全*, 2022, 40(2): 135-144.  
YAO Ronghan, LONG Meng, ZHANG Wensong, et al. User preferences for shared autonomous vehicles based on latent-class Logit models[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2022, 40(2): 135-144.
- [25] 温惠英,汤左淦. 道路交叉口单车事故严重程度影响因素分析[J]. *公路工程*, 2019, 44(2): 55-61, 102.  
WEN Huiying, TANG Zuogan. Analysis of crash injury severity in single-vehicle crashes occurring at intersections[J]. *Highway Engineering*, 2019, 44(2): 55-61, 102.
- [26] 陈荔,李聪颖,詹立,等. 城市道路交通事故形态影响因素分析与预测[J]. *长安大学学报:自然科学版*, 2022, 42(4): 98-107.  
CHEN Li, LI Congying, ZHAN Li, et al. Influencing factors analysis and prediction of urban road traffic accident patterns[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2022, 42(4): 98-107.

**作者简介:** 张韡 (1973—),男,陕西榆林人,博士,副教授,主要从事交通参与者行为干预、车辆建模与仿真、道路交通安全改善及防治技术、道路交通事故致因理论等方面的研究。E-mail: zhweijx@chd.edu.cn。

