

中文引用格式:梁波,秦灿,牛佳安,等. 基于Topsis改进因子分析的公路隧道入口段视觉负荷研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1):77-84.

英文引用格式:LIANG Bo, QIN Can, NIU Jia'an, et al. Visual load in threshold zone of highway tunnel based on Topsis improved factor analysis method[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1):77-84.

# 基于 Topsis 改进因子分析的公路隧道入口段 视觉负荷研究\*

梁波<sup>1,2</sup>教授, 秦灿<sup>\*\*1</sup>, 牛佳安<sup>1</sup>, 肖靖航<sup>1</sup>, 文森<sup>3</sup>

(1 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2 重庆交通大学 省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074; 3 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

中图分类号: X910

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.01.0039

资助项目: 重庆交通大学研究生科研创新项目(2022B0004); 重庆市人才团队项目(2019-9-95)。

**【摘要】** 为探究直线公路隧道入口段驾驶者的视觉负荷, 首先, 通过实车试验采集 5 种视觉指标, 采用 Topsis 改进因子分析法建立视觉负荷评价模型; 然后, 分析不同时间及位置下视觉负荷的变化特征, 基于构建的视觉负荷曲线提出行车舒适评价标准, 并运用已发表数据验证构建负荷模型的泛化能力; 最后, 通过敏感度分析探究视觉指标对视觉负荷的影响程度。结果表明: 当驾驶者位于距洞口-13~55 m(12:00)、-10~49 m(15:00)时, 视觉负荷超过临界值(0.906), 驾驶者的行车舒适度和安全性极低; 洞口驾驶者的视觉负荷值和接近度远大于洞内和洞外; 18:00 的视觉负荷和接近度远低于 12:00 和 15:00。视觉指标的敏感度参数从大到小依次为注视时间、瞳孔面积、注视次数、扫视幅度、扫视速度。

**【关键词】** Topsis 改进因子分析; 公路隧道入口段; 视觉负荷; 行车安全; 视觉指标

## Visual load in threshold zone of highway tunnel based on Topsis improved factor analysis method

LIANG Bo<sup>1,2</sup>, QIN Can<sup>1</sup>, NIU Jia'an<sup>1</sup>, XIAO Jinghang<sup>1</sup>, WEN Sen<sup>3</sup>

(1 College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2 State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong

University, Chongqing 400074, China; 3 China Merchants Chongqing Communications

Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing, 400067, China)

**Abstract:** In order to investigate the visual load of drivers at the threshold zone of linear highway tunnels, five visual indicators of drivers were collected through the real vehicle test. A visual load evaluation model was developed by the Topsis improved factor analysis method, the visual load at different times and locations was analyzed, the evaluation criteria of driving comfort were proposed based on the constructed visual load curve, the generalization ability of the constructed load model was verified by using published data, and finally, the influence of visual indicators on visual load was investigated by sensitivity

\* 文章编号: 1003-3033(2024)01-0077-08; 收稿日期: 2023-08-12; 修稿日期: 2023-11-10

\*\* 通信作者: 秦灿(1994—), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要研究方向为公路隧道运营安全与节能。E-mail: qinc714@163.com。

analysis. The results show that when the driver locates about  $-13\text{ m}$  to  $55\text{ m}$  (12:00) and  $-10\text{ m}$  to  $49\text{ m}$  (15:00) from the entrance, the visual load exceeds the boundary value (0.906), indicating the driver's driving comfort and safety is extremely low. The visual load and closeness of the drivers near the entrance are much greater than those inside and outside the entrance, and the visual load and closeness at 18:00 are much lower than those at 12:00 and 15:00. The sensitivity parameters of the visual indicators are fixation duration, pupil area, fixation time, saccade range, saccade speed in descending order.

**Keywords:** Topsis improved factor analysis; threshold zone of highway tunnel; visual load; traffic safety; visual indicators

## 0 引言

隧道入口段的交通事故数占隧道交通事故总数的 28.6%,是隧道事故高发区域<sup>[1]</sup>。隧道入口段光环境变化剧烈且洞内外存在较大的亮度差异,促使驾驶者产生黑洞效应,从而对前方车辆或目标物视认不清而产生感知障碍,严重威胁隧道的行车安全<sup>[2]</sup>。因此,探究公路隧道入口段驾驶者的信息感知情况是改善隧道行车安全的关键。

已有研究表明:分析视觉负荷变化规律,有助于了解隧道环境下驾驶者获取视觉信息的具体过程,反映驾驶者对隧道光环境信息的真实感知,从而对隧道照明环境进行针对性的改善<sup>[3]</sup>。驾驶者行车过程中产生的视觉负荷是多因素、多信息共同作用的结果,目前,针对驾驶者视觉负荷的评价主要通过生理参数测量的方法,即通过量化表征眼动参数来评价驾驶者视觉负荷,主要分为视觉特性参数和瞳孔生理变化 2 个方面。视觉特性参数方面,陈培焱等<sup>[4]</sup>将驾驶者眨眼次数增加值作为评价指标,对隧道进出口路段不同频闪、频率条件下驾驶者视觉负荷变化特性展开了研究。彭金栓等<sup>[5]</sup>基于注视行为引入注视熵率值的概念,分析了熟练程度及交叉口不同通行方式对驾驶人视觉负荷特性的影响。瞳孔生理变化方面,段萌萌等<sup>[6]</sup>采用瞳孔面积最大瞬态速度和视觉震荡持续时间作为评判视觉负荷大小的依据,描述了驾驶者在隧道出入口的视觉负荷变化规律。王首硕等<sup>[7]</sup>基于瞳孔面积变化速率,应用双因素方差分析法进行小汽车与货车、入口段与出口段的差异性显著检验,并结合变异系数分析了驾驶者视觉负荷的整体变化规律。综上可知:现有关于视觉负荷的研究大多根据单一视觉指标提出视觉负荷评价指标,无法基于多个视觉特征指标综合评价驾驶者的视觉负荷。另外,上述研究没有探究不同时间、位置条件下驾驶者的视觉负荷差异,以及视觉指标对视觉负荷的相对重要程度,也没有提出量

化驾驶者视觉舒适程度的具体评价标准。

鉴于此,笔者拟通过实车试验采集驾驶者注视时间、注视次数、扫视幅度、扫视速度和瞳孔面积等数据,基于 Topsis 改进因子分析法建立综合多种视觉指标的视觉负荷模型,研究公路隧道入口段不同位置、时间条件下驾驶者视觉负荷的变化特征,基于构建的视觉负荷曲线提出行车舒适评价标准,并运用已发表数据验证构建负荷模型的泛化能力,通过敏感度分析探究视觉指标对视觉负荷的影响程度,以期更准确地评价隧道入口区域的安全性,为研究交通安全设施提供理论依据。

## 1 视觉指标数据采集试验

### 1.1 试验工况与设备

为确保驾驶者在行驶时不受线形和纵坡等光环境以外因素的影响,选取火凤山隧道作为试验隧道,并在晴天 12:00 进行试验。火凤山隧道坐落于中国重庆,入口段线形为直线,入口段朝向为向阳面,坡度在 2% 以下,隧道全长 1 km,隧道设计速度为 50 km/h,洞门为削竹式。试验隧道和设备如图 1 所示。



(a) 火凤山隧道



(b) 眼动仪

图 1 试验隧道和设备

Fig. 1 Test tunnel and equipment

### 1.2 试验流程

选择 20 名被试进行现场实车试验,年龄在 20~50 岁,矫正视力均在 5.0 以上,且有 1 年以上驾龄。试验前,向被试说明试验路线、试验流程及注意事项。试验时,给被试配戴好眼动仪,采用定标法对被

试注视点进行校准定标,确保其注视区域与眼动仪捕捉的注释区域一致。试验时,被试在自由流状态下行车,记录不同时间下被试的视觉指标数据。

## 2 基于 Topsis 改进的因子分析法

### 2.1 评价指标体系构建

选取注视时间  $z_1$ 、注视次数  $z_2$ 、扫视幅度  $z_3$ 、扫视速度  $z_4$  和瞳孔面积  $z_5$  作为视觉负荷的评价指标,以描述隧道光环境变化对于驾驶者紧张情绪的影响以及驾驶者获取隧道光环境信息的难易程度。

### 2.2 Topsis 改进因子分析法

因子分析的本质思想是在多指标间存在较强相关性的前提下,通过降维的方式简化数据结构,以发现数据的隐藏规律和内在联系。Topsis 法是评价多目标决策方法的一种有效方法,其基本思想是将备选样本按最优方案和最差方案进行排序。具体计算步骤如下。

1) 设有  $n$  个样本,每个样本有  $m$  个观测值,将原始数据进行标准化处理,并转化为矩阵形式。

2) 计算系数相关矩阵  $R$ ,并进行主成分分析。

3) 求解  $R$  的特征值和相应的特征向量,通过特征值大小确定。通常,特征值应大于 1。

4) 求解  $p$  个公共因子的加载矩阵  $A$ ,  $A = [A]_{m \times p}$ 。为体现公共因子变量的含义,旋转载荷矩阵,以尽量减少最高载荷变量的数量。

5) 当因子变量确定后,用 Thompsons 因子回归法计算每个样本的公共因子得分。

6) 通过下式计算综合因子得分  $y$ 。

$$y = \frac{\lambda_1}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} f_1 + \frac{\lambda_2}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} f_2 + \dots + \frac{\lambda_p}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} f_p \quad (1)$$

式中: $\lambda_i (i=1, 2, \dots, p)$  为方差贡献率; $f_i$  为公因子得分。

7) 建立指标体系,设研究对象集为  $S_{ii} (i=1, 2, \dots, n)$ ,指标集为  $V_{jj} (j=1, 2, \dots, n)$ , $t$  为测试点。

8) 对  $S_{ii}$  进行因子分析,得到对象集  $S_{ii}$  的因子  $f_{ik}$  和每个对象集的因子得分矩阵  $(Y_{ii})_{n \times l}$ 。

9) 以因子得分作为评价指标,形成一个具有  $l$  个指标、 $n$  个评价对象和  $y_{ii}$  数据的新指标体系。此外,通过下式进行一致化处理。

$$Z_{ii} = \frac{Y_{ii}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n Y_{ii}^2}} \quad (2)$$

式中: $Z_{ii}$  为一致化处理矩阵; $Y_{ii}$  为因子得分集。

10) 在矩阵中找到各列的最大值  $Z_{\max}$  和最小值  $Z_{\min}$ ,由下式得出最优向量  $Z^+$  和最劣向量  $Z^-$ 。

$$Z^+ = (Z_{\max,1}, Z_{\max,2}, \dots, Z_{\max,l}) \quad (3)$$

$$Z^- = (Z_{\min,1}, Z_{\min,2}, \dots, Z_{\min,l}) \quad (4)$$

11) 通过下式计算第  $i$  个评价对象与最优方案  $D_i^+$  和最劣方案  $D_i^-$  的接近程度。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^l (Z_{\max,j} - Z_{ji})^2} \quad (5)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^l (Z_{\min,j} - Z_{ji})^2} \quad (6)$$

12) 通过下式计算第  $i$  个评价对象与最优因子方案的接近度  $C_i$ ,  $C_i$  越大表示第  $i$  个评价对象的效果越好。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (7)$$

## 3 视觉负荷评价模型构建

### 3.1 相关性检验

因子分析前,需要通过 KMO 检验和 Bartlett 球形检验判断变量之间的相关性,以判断数据是否适合进行因子分析,KMO 检验和 Bartlett 球形检验结果见表 1。从表 1 可以看出,KMO 值为 0.87,大于 0.7, Bartlett 球形检验显著,表明变量间的相关性较强,可从原始变量间提取公共因子,满足因子分析的前提。

表 1 KMO 检验和 Bartlett 球形检验

Tab. 1 KMO test and Bartlett's sphericity test

KMO 检验	Bartlett 球形检验		
KMO 值	近似卡方	自由度	显著性 $p$ 值
0.788	187.037	10	0.00

### 3.2 公因子提取

为了能够使选择的公因子个数满足数据的实际情况,第 1 次因子分析先判断其碎石图,再选择公因子个数,然后再利用选好的公因子个数进行第 2 次因子分析。碎石图计算结果表明:前 2 个公因子的特征值均大于 1,对数据有较大影响,因此,选择公因子数为 2。表 2 为公因子提取过程的相关计算参数,其中公因子方差越高表明公因子对指标的解释度越高,也代表了指标选择的合理性。从表 2 可以看出,5 种指标的公因子方差提取值均大于 0.8,说明选择的公因子能够很好地反映原始变量的主要信息。

表 2 因子分析相关参数

Tab. 2 Related parameters to factor analysis

标准化变量	公因子方差		因子载荷矩阵		因子得分系数矩阵	
	初始	提取	公因子 $F_1$	公因子 $F_2$	公因子 $F_1$	公因子 $F_2$
注视时间 $Z_1$	1	0.847	0.92	0.017	-0.267	0.095
注视次数 $Z_2$	1	0.964	0.98	0.056	0.278	-0.027
扫视幅度 $Z_3$	1	0.998	0.063	0.997	-0.066	0.997
扫视速度 $Z_4$	1	0.883	0.933	0.11	0.26	0.032
瞳孔面积 $Z_5$	1	0.883	0.934	0.1	0.261	0.022

### 3.3 因子旋转

表 3 为因子旋转的公因子方差贡献矩阵。在因子旋转后,前 2 个公因子的特征值远大于剩余 3 个,累计方差贡献率达到 90%以上,表明旋转后的方差贡献矩阵反映的驾驶者视觉负荷内容更加全面。由表 2 的因子载荷矩阵可知:在第 1 个公因子中,注视

时间、注视次数、扫视速度和瞳孔面积的因子载荷分别达到 0.920、0.980、0.934 和 0.933;在第 2 个公因子中,扫视幅度的因子载荷达到 0.997。因此,选取旋转后的前 2 个公因子作为量化模型的计算基础,可以很好地将驾驶者视觉负荷与隧道光环境信息进行联系。

表 3 公因子方差贡献矩阵

Tab. 3 Common factor variance contribution matrix

成分	初始特征值			提取载荷平方比			旋转载荷平方比		
	总计	方差/%	累计/%	总计	方差/%	累计/%	总计	方差/%	累计/%
1	3.59	71.8	71.8	3.59	71.8	71.8	3.55	71.11	71.11
2	0.98	19.7	91.49	0.98	19.7	91.49	1.01	20.39	91.5
3	0.2	4.15	95.65	—	—	—	—	—	—
4	0.17	3.56	99.21	—	—	—	—	—	—
5	0.03	0.79	100	—	—	—	—	—	—

### 3.4 因子得分

根据表 2 中的因子得分系数矩阵,得到的公因子得分函数如下:

$$\begin{cases} F_1 = -0.267Z_1 + 0.278Z_2 - 0.066Z_3 + \\ \quad 0.26Z_4 + 0.261Z_5 \\ F_2 = 0.095Z_1 - 0.027Z_2 + 0.997Z_3 + \\ \quad 0.032Z_4 + 0.022Z_5 \end{cases} \quad (8)$$

将公因子的方差贡献率作为权重,并以方差贡献率之和作为基础进行权重归一化处理,综合线形加权模型,得到驾驶者视觉负荷评价模型  $S$ :

$$S = \frac{1}{0.9150}(0.7111F_1 + 0.2039F_2) \quad (9)$$

## 4 视觉负荷结果与分析

### 4.1 视觉负荷评价

通过式(9)计算得到的视觉负荷值有正有负,为便于对比评价,采用极值处理法将所有数据进行归一化,计算结果如图 2 所示。由图 2 可知:驾驶者的视觉负荷从大到小为 12:00、15:00、18:00,且 18:00 的驾驶者视觉负荷值变化较为平缓,舒适性

高,行车更加安全。而且离洞口较远时,视觉负荷值较小且增加较为缓慢,表明驾驶者较为舒适,行车风险较低;逐渐驶向洞口时,视觉负荷和视觉不适急速增加,行车风险增加;驶向洞内后,视觉负荷和视觉不适缓慢下降,行车风险降低。

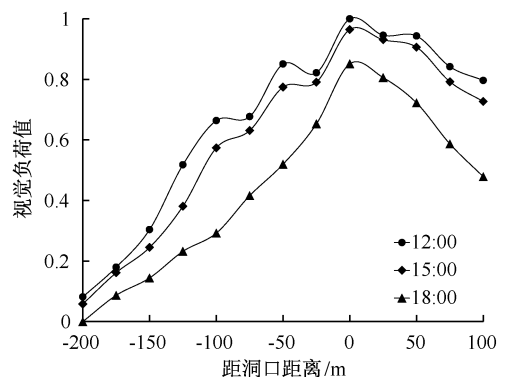


图 2 视觉负荷曲线

Fig. 2 Visual load curve

基于上述分析,视觉负荷量化曲线能较好地体现驾驶者的视觉负荷情况和行车安全性。因此,可将视觉负荷值作为驾驶者行车安全的评价标准。结合视觉负荷量化曲线的突变点与斜率变化,并将视

觉负荷值 85%分位数定义为视觉负荷变化临界值(该值可评估瞬时视觉负荷是否接近驾驶者的生理极限),得到可评估驾驶者行车舒适度的视觉负荷评价标准,并实时判别当前所处的险态驾驶级别,行车舒适评价标准见表 4<sup>[8-9]</sup>。结合图 2 和表 4 可知:当驾驶者位于距洞口 -13 ~ 55 m (12:00)、-10 ~ 49 m (15:00) 时,视觉负荷超过临界值(0.906),此时驾驶者的行车舒适度和安全性极低;当驾驶者距洞口 -137 m (12:00)、-119 m (15:00)、-74 m (18:00) 时,视觉负荷高于 0.416,驾驶者感觉到明

显不适,具有较强的行车隐患,且随着行车距离的增加,视觉不适感增加,行车安全性逐渐下降。这表明:通过视觉负荷评价模型可以对单个或多个视觉指标进行综合的量化分析,从而得到不同时间、位置条件下驾驶者视觉负荷的具体变化规律,提出的行车舒适评价标准可以确定驾驶者视觉不适的具体位置和范围,可作为评价驾驶者视觉承受限度的表征参数和分析隧道环境安全性的依据,并为直线公路隧道入口段的照明改善设置和洞口遮光棚设置提供参考。

表 4 基于视觉负荷的行车舒适评价标准

Tab. 4 Driving safety evaluation standard based on visual load

行车舒适度	舒适	稍不舒适	不舒适	很不舒适	极不舒适
视觉负荷范围	[0, 0.144)	[0.144, 0.416)	[0.416, 0.677)	[0.677, 0.906)	[0.906, 1]

4.2 不同位置与时间条件下视觉负荷排序

为分析时间、位置与视觉负荷评价模型计算结果之间的相关性,并挖掘直线公路隧道入口段驾驶者视觉的变化规律,通过 Topsis 改进因子分析法对洞外(距洞口距离 -75、-50、-25 m)、洞口(距洞口距离 0、25、50 m)和洞内(距洞口距离 75、100、125 m)3 个位置区段,以及 3 个时间区段(12:00、15:00、18:00)的视觉负荷值进行指标排名,排名结果见表 5。

表 5 不同时间、位置区段的视觉指标排序

Tab. 5 Rank of visual indicators for different times and locations

区段	分类	接近度	排名
时间区段	12:00	0.514 9	1
	15:00	0.493 2	2
	12:00	0.321 3	3
位置区段	洞外	0.478 7	3
	洞口	0.626 1	1
	洞内	0.533 1	2

同时,为体现基于 Topsis 改进因子分析法指标排序的准确性和严谨性,采用单因素方差分析法,对不同位置的视觉负荷进行差异性显著检验,结果如图 3 所示。

对比图 3 和表 5 可知:差异性显著检验结果与指标排序结果基本一致。对不同位置的视觉负荷而言,洞口驾驶者的视觉负荷值和接近度远大于洞内,而洞内的视觉负荷值和接近度略大于洞外的视觉负荷值。AMUNDSEN 等<sup>[10]</sup>发现,事故主要发生在隧道洞口附近,比隧道内的危险性高 4 倍左右。梁波等<sup>[11]</sup>认为,瞳孔面积在入口内和出口内最大,出口

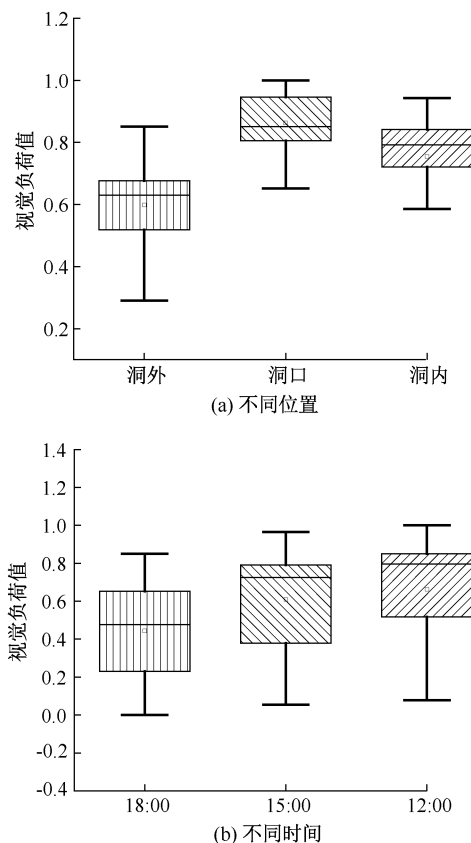


图 3 视觉负荷差异显著性分析

Fig. 3 Significance analysis of the differences in visual load

外和入口外相差不大,心率和呼吸频率均在入口内最大。由图 3 和表 5 可知:不同时间视觉负荷的排序依次为 12:00、15:00、18:00,且 18:00 的视觉负荷和接近度远低于 12:00 和 15:00。梅家林等<sup>[12]</sup>研究发现,不同时段隧道入口区域驾驶者的瞳孔面积瞬时变化速度按大小排序为:正午(15.028 mm<sup>2</sup>/s)、

夜晚 (6.869 mm<sup>2</sup>/s)、傍晚 (4.034 mm<sup>2</sup>/s)。ROBATSCH 等<sup>[13]</sup>发现,58.8%的交通事故发生在白天,远远高于下午。直线公路隧道入口段不同时间、不同位置下视觉负荷的排序结果与已有文献中关于隧道入口段的事故率、驾驶者心理压力、生理指标的变化情况基本一致,表明基于 Topsis 改进因子分析提出的视觉负荷模型可探究不同位置、不同时间条件下驾驶者视觉负荷的具体差异。

### 4.3 案例分析

为体现提出的视觉负荷评价模型的广泛应用性,应用该模型对已发表文献中不同行车条件下单个或多个视觉特征指标进行了量化。其中,案例 1 中平均车速为 80 km/h,隧道为长隧道,入口段线型为直线,试验车辆为大型车、中型车及小型车,视觉指标为瞳孔面积<sup>[14]</sup>;案例 2 为模拟驾驶试验,驾驶者在自由流状态下行驶,隧道为特长隧道,入口段线型为直线,视觉指标为瞳孔面积<sup>[15]</sup>;案例 3 中驾驶者在自由流状态下夜间行驶,隧道为长隧道,入口段线型为曲线,试验车辆为小型车,视觉指标为注视时间、注视次数、扫视幅度、瞳孔面积<sup>[16]</sup>。3 个案例的视觉指标量化结果如图 4 所示。

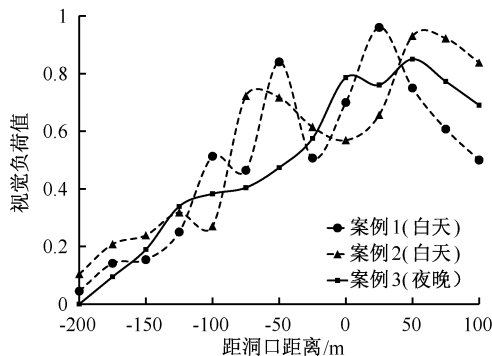


图 4 不同案例的视觉负荷曲线

Fig. 4 Visual load curves for different cases

由图 4 可知:白天的视觉负荷增长速率大于夜晚,且夜晚的视觉负荷曲线波动较小,表明夜晚的驾驶者在隧道洞口附近行车时视觉舒适性更高,危险性较低。由图 4 可知:当驾驶者位于距隧道洞口 16~29 m (案例 1)、47~78 m (案例 2)时,驾驶者行车极不舒适,危险性较高;当驾驶者距隧道洞口 -108 m (案例 1)、-91 m (案例 2)、-73 m (案例 3)时,驾驶者感觉到了视觉不适,且随着行车距离的增加,行车不适感逐渐加强,行车风险逐渐增加。通过本节研究结果可知:本文提出的视觉负荷模型和行车舒适评价标准可量化不同行车条件下单个或多个

视觉特征指标,具有较好的适用性。

### 4.4 敏感度分析

基于提出的视觉负荷量化模型,采用敏感度分析可探究瞳孔面积、扫视幅度、扫视速度、注视时间、注视次数对视觉负荷的影响程度<sup>[17]</sup>。在敏感度分析中,输入单一变量来确定驾驶者的视觉负荷,而其余变量为平均值且不变,具体计算见下式,计算结果如图 5 所示。

$$S_i = S_L(x_i) - S_M(x_i) \quad (11)$$

$$SA_i = \frac{S_i}{\sum_i S_i} \times 100\% \quad (12)$$

式中: $S_L$ 和 $S_M$ 分别为输出变量最大值和最小值; $S_i$ 为输出变量最大差值; $SA_i$ 为敏感度参数值,%。

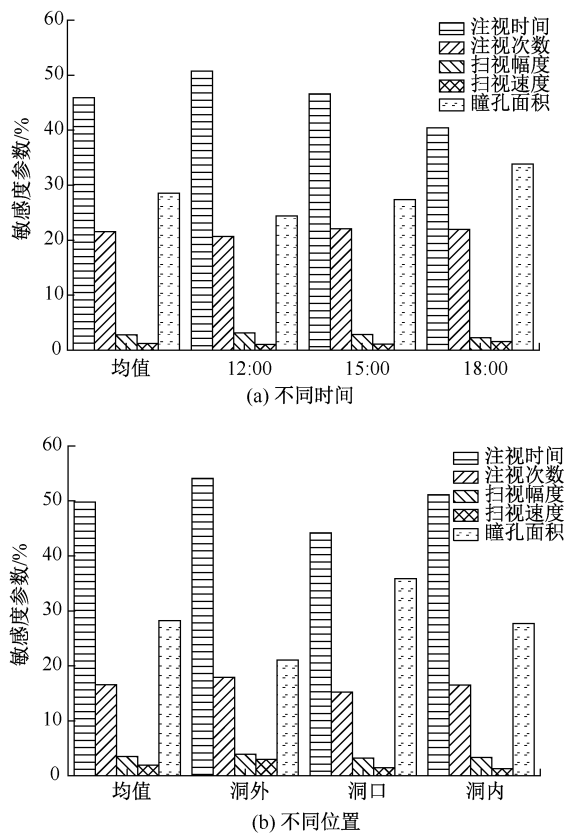


图 5 视觉指标的敏感度参数

Fig. 5 Sensitivity parameters of visual indicators

从图 5 可知:不同时间、不同位置下视觉指标的敏感度参数从大到小依次为注视时间、瞳孔面积、注视次数、扫视幅度、扫视速度。已有文献表明:驾驶者的扫视速度、扫视幅度与隧道弯曲半径正相关<sup>[18]</sup>,而文中试验隧道入口段为直线,因此,在 5 个视觉指标中,扫视速度和扫视幅度的敏感度参数最小,表明在该隧道中扫视速度、扫视幅度对视觉负荷

的影响最小。由图 5a 可知:从 12:00 到 18:00, 驾驶员注视时间的敏感度参数逐渐下降, 驾驶员瞳孔面积的敏感度参数逐渐上升。由图 5b 可知:洞口处驾驶员瞳孔面积的敏感度参数高于洞内、洞外, 而注视时间的敏感度参数低于洞内、洞外。这是因为驾驶员的视觉振荡主要发生在隧道明暗适应过程, 驾驶员的瞳孔变化情况隧道洞口附近时最为明显<sup>[19]</sup>。综上所述, 基于视觉负荷量化模型对视觉指标进行敏感度分析, 可探究不同时间、位置条件下各视觉指标对于视觉负荷的相对重要程度, 并对驾驶员的视觉指标进行重要性排序。这有助于探究驾驶员视觉指标与隧道光环境的内在联系, 帮助研究者筛除相对重要程度较低的视觉指标, 减少信息采集和数据分析的工作量。

## 5 结 论

1) 当驾驶员位于距洞口 -13 ~ 55 m (12:00)、-10 ~ 49 m (15:00) 时, 视觉负荷超过临界值, 此时驾驶员的行车舒适度和安全性极低; 当驾驶员距洞

口 -137 m (12:00)、-119 m (15:00)、-74 m (18:00) 时, 视觉负荷高于 0.416, 驾驶员感觉到明显不适, 具有较强的行车隐患。

2) 距离洞口较远时, 驾驶员的视觉负荷缓慢增加; 在洞口附近时, 视觉负荷快速上升至最大值; 驶向洞内时, 视觉负荷缓慢下降。

3) 对不同位置的视觉负荷而言, 洞口驾驶员的视觉负荷值和接近度远大于洞内和洞外, 洞内的视觉负荷值和接近度略大于洞外的视觉负荷值; 不同时间视觉负荷的排序依次为 12:00、15:00、18:00, 且 18:00 的视觉负荷和接近度远低于 12:00 和 15:00。

4) 不同时间、不同位置下视觉指标的敏感度参数从大到小依次为注视时间、瞳孔面积、注视次数、扫视幅度、扫视速度; 从 12:00 到 18:00, 驾驶员注视时间的敏感度参数逐渐下降, 驾驶员瞳孔面积的敏感度参数逐渐上升; 洞口处驾驶员瞳孔面积的敏感度参数高于洞内、洞外, 而注视时间的敏感度参数低于洞内、洞外。

## 参 考 文 献

- [1] 王辉, 刘浩学, 赵炜华, 等. 公路隧道环境中交通事故特征分析[J]. 公路, 2009(11): 144-147.
- [2] 张雪榆, 潘存书, 林伟, 等. 山地城市多车道交织区驾驶人心理负荷研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(3): 25-32.  
ZHANG Xueyu, PAN Cunshu, LIN Wei, et al. Psychological load of drivers in multi-lane interweaving areas of urban roads [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(3): 25-32.
- [3] 梁波, 梁加林, 何世永, 等. 公路隧道光环境信息感知及试验研究[J]. 隧道建设: 中英文, 2020, 40(9): 1 251-1 260.  
LIANG Bo, LIANG Jialin, HE Shiyong, et al. Study on light environment information perception and experiment method of highway tunnel [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(9): 1 251-1 260.
- [4] 陈培焱, 吴刚, 马小翔, 等. 基于驾驶员视觉负荷的格栅式减光罩频闪效应研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2020, 44(5): 785-788, 793.  
CHEN Peiyan, WU Gang, MA Xiaoxiang, et al. Flickering frequency effect of grille light-reducing hood based on drivers' visual load [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2020, 44(5): 785-788, 793.
- [5] 彭金柱, 高翠翠, 郭应时. 基于熵率值的驾驶人视觉与心理负荷特性分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2014, 33(2): 118-121.  
PENG Jinshuan, GAO Cuicui, GUO Yingshi. Drivers' visual characteristics and mental load based on entropy rates [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2014, 33(2): 118-121.
- [6] 段萌萌, 唐伯明, 胡旭辉, 等. 高隧道比路段隧道出入口驾驶员视觉负荷研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(3): 113-119.  
DUAN Mengmeng, TANG Boming, HU Xuhui, et al. Driver's visual load at tunnel entrance and exit of sections with high ratio of tunnels [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(3): 113-119.

- [7] 王首硕, 杜志刚, 文竞舟, 等. 低等级公路光学长隧道驾驶员视觉负荷研究[J]. 隧道建设:中英文, 2020, 40(2): 209-214.  
WANG Shoushuo, DU Zhigang, WEN Jingzhou, et al. Study on drivers' visual load in low-grade optical long tunnel [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(2): 209-214.
- [8] 丁旭, 王海晓, 高明星, 等. 公路隧道出入口驾驶员视觉负荷评价与建模[J]. 隧道建设:中英文, 2022, 42(4): 679-687.  
DING Xu, WANG Haixiao, GAO Mingxing, et al. Evaluation and modeling of driver's visual load at entrance and exit of a highway tunnel [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(4): 679-687.
- [9] 刘东旗. 不同隧道路段驾驶员眼动特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.  
LIU Dongqi. Study on eye movement characteristics of drivers in different tunnel sections [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [10] AMUNDSEN F, ENGBRETSSEN A. Studies on traffic accidents in norwegian road tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(1): 3-11.
- [11] 梁波, 文森, 肖尧, 等. 特长隧道出入口驾驶者生理负荷与行车安全性研究[J]. 隧道建设:中英文, 2021, 41(9): 1461-1467.  
LIANG Bo, WEN Sen, XIAO Yao, et al. Study on the physiological load of drivers and traffic safety at the entrances and exits of long tunnels [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(9): 1461-1467.
- [12] 梅家林, 杜志刚, 郑号染, 等. 不同时段特长隧道入口区域视觉负荷研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 176-181.  
MEI Jialin, DU Zhigang, ZHENG Haoran, et al. Research on visual load at entrance area of extra-long tunnel in different periods [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 176-181.
- [13] ROBATSCH K, NUSSBAUMER C. Tunnels mit gegenverkehr und richtungsverkehr/tunnels with uni- and bi-directional traffic [M]. Graz: Ministry of Building and Technology, 2004: 28-56.
- [14] 王春雨. 隧道路段驾驶员视觉安全技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.  
WANG Chunyu. Research on visual safety technology of driver in tunnel section [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [15] 王琳. 基于驾驶仿真的V形海底隧道视觉减速标线设置研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.  
WANG Lin. Research on visual deceleration mark setting of V-shaped submarine tunnel based on driving simulation [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021.
- [16] 孙亚男. 寒区夜间快速路隧道入口新驾驶员眼动特性研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2022.  
SUN Ya'nan. Study on eye movement characteristics of new drivers at the entrance of expressway tunnel at night in cold area [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2022.
- [17] NGUYEN T, KASHANI A, NGO T, et al. Deep neural network with high-order neuron for the prediction of foamed concrete strength[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2018, 34(4): 316-332.
- [18] JIAO Fangtong, DU Zhigang, WANG Shoushuo. Drivers' saccade characteristics in curves of extra-long urban underwater tunnels[J]. Transportation Research Record, 2020, 2674(2): 102-111.
- [19] WANG Shoushuo, DU Zhigang, JIAO Fangtong. Drivers' visual load at different time periods in entrance and exit zones of extra-long tunnel [J]. Traffic Injury Prevention, 2020, 21(8): 1-6.

作者简介: 梁波 (1964—),男,四川隆昌人,博士,教授,博士生导师,主要从事隧道与地下工程结构、运营安全分析和技术应用方面的研究。E-mail:liang\_laoshi@126.com。

