

# 基于眼动指标的公路隧道洞口景观设计舒适性及安全性评价

叶飞, 应凯臣, 苏恩杰, 魏艳春, 梁晓明

(长安大学公路学院, 陕西西安710064)

**摘要:** 基于云南省板仓隧道洞口景观设计方案,选取洞门线型、洞门颜色、洞口绿化及洞门肌理4个主要影响因素,采用正交试验设计方法,建立9种模型方案。利用自主研发的驾驶模拟试验系统及眼动仪设备开展驾驶模拟试验,选取瞳孔直径和视线偏离时间作为评价指标。结果表明:4个因素对行车舒适性及安全性的影响排序为洞门肌理>洞口绿化>洞门颜色>洞门线型;模型5(绿色端墙、壁画装饰、城墙式、洞口一般绿化)和模型9(灰色端墙、壁画装饰、曲线型、洞口精致绿化)的景观设计方案出现了驾驶分心现象,存在驾驶安全隐患。基于试验结果,从美学角度对隧道洞口景观设计提出了优化建议。

**关键词:** 隧道洞口景观;驾驶模拟试验;舒适性;安全性;眼动指标

**中图分类号:** U453.1

**文献标志码:** A

## Comfort and Safety Evaluation of Tunnel Portal Landscape Design Based on Eye Movement Index

YE Fei, YING Kaichen, SU Enjie, WEI Yanchun, LIANG Xiaoming

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Based on the portal landscape design scheme of Ban-lun Tunnel in Yunnan Province, we selected four primary influencing factors including portal linetype, portal color, portal greening, and portal texture. An orthogonal experimental design was adopted, and nine model schemes were established. A driving simulation test was conducted using a driving simulation test system and eye tracker, meanwhile, the pupil diameter and the sight deviation time were selected as evaluation indexes. The results show that in terms of portal landscape driving comfort, the order of importance of the four factors is as

follows: portal texture, portal greening, portal color, and portal linetype. The distractions of drivers appear in the fifth model (green end wall, mural, city wall type, and natural greening), and the ninth model (grey end wall, mural, arc line type, elaborate greening), leading to the potential safety hazard of driving. Based on the experimental results, some optimization suggestions were put forward for the tunnel portal landscape design from the aesthetic aspect.

**Key words:** tunnel portal landscape; driving simulation test; comfort; safety; eye movement index

随着物质文化水平的提高,人们对各类人工构筑物的要求不仅满足于结构安全,还对其景观舒适性愈发重视。隧道洞口作为一种特殊结构的建筑物,是隧道工程外露的脸面和窗口,其景观设计对通行者的视觉感受和驾驶体验有直接的影响。恰到好处的洞口景观设计一方面可以给驾乘人员带来美的享受,放松身心;另一方面也可作为文化的载体以及环境中的象征符号,展示地方文化,体现时代精神。因此,隧道洞口景观设计广受国内外关注。

关于隧道洞口景观,国内外相关学者已开展了大量研究。贾玲利等<sup>[1]</sup>统计了欧美、中国和日本隧道洞口景观的研究现状,并指出已有研究大多围绕景观的设计原则及方法,而关于隧道洞口景观评价方面的研究甚少,仅占4%。在隧道洞口景观设计方案,关宝树<sup>[2]</sup>强调了隧道洞口景观设计的重要性,并对隧道洞口景观基本概念、景观设计因素、景观实用设计方法进行了详细介绍;熊世龙<sup>[3]</sup>提出了景观设计构思原则,并对隧道洞口景观设计的洞门规划、装饰应用等方面进行了论述;Peila等<sup>[4]</sup>对隧道洞口设

收稿日期: 2020-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(52078046, 51878060)

第一作者: 叶飞(1977—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为隧道及地下工程。

E-mail: xianyefei@126.com



论文  
拓展  
介绍

计的技术以及建筑和景观等方面进行了分析和探讨,给出了隧道洞口景观的设计流程图;Ye等<sup>[5]</sup>结合大量典型公路隧道洞口景观案例,分别从乡土人情、人文精神、周边景色与洞门的交融、景区主题强调以及个性彰显等方面,分别阐述了隧道洞口景观构造方式及实际效果。在隧道洞口景观评价方面,关向群<sup>[6]</sup>强调了隧道洞口景观设计的重要性和发展趋势,并探讨了如何评价隧道洞口景观等;关宝树<sup>[2]</sup>详细分析了SD(semantic differential)法,并介绍了日本学者利用SD法进行的隧道洞口景观评价试验;张威振等<sup>[7]</sup>采用定性定量相结合的分析方法并结合具体案例,指出隧道洞口设计应全方位综合考量;贾玲利等<sup>[8]</sup>以层次分析法为基本理论,同时考虑结构安全性、艺术性、经济性和生态安全性等因素,建立了评价指标体系;刘飞<sup>[9]</sup>详细分析了洞门选型的主要影响因素,并以安全、环保、经济为一级评级指标,采用层次分析法对不同类型洞门进行了评价。Lee等<sup>[10]</sup>提出,长大隧道中应将洞口亮度、洞门形状、壁画装饰纳入主要评价因素,并对韩国仓湾隧道洞口景观设计展开了评价。由于隧道洞口本身的特殊性,该路段事故发生率较高,因此隧道洞口行车安全也引起了相关学者的广泛关注。陈芳<sup>[11]</sup>从洞口的三大功能(基本功能、安全功能、景观功能)出发,采用SD法,分析洞外亮度对驾驶员行车安全性和舒适性的影响。胡江碧等<sup>[12]</sup>利用真车驾驶试验建立了洞口亮度折减系数、行车速度与驾驶员瞳孔面积变化率之间的关系模型,反映这些参数对行车安全性的影响;苑郁林<sup>[13]</sup>从驾驶员的生理和心理特性出发,以洞门构造物、洞门颜色、洞口铭牌设置等因素作为评价指标,对隧道洞口景观设计提出了建议。李国锋等<sup>[14]</sup>、叶飞等<sup>[15]</sup>基于隧道洞口美学的已有研究,对隧道洞口美学进行了较为全面的分析,并提出了隧道洞口美学设计评价体系,实现了评价结果由定性向定量的转化。陈孟柯等<sup>[16]</sup>利用三维仿真软件UC-Win/Road对景观设计方案进行建模分析,采用驾驶

模拟试验从驾驶员心率的角度对景观设计方案的合理性进行了评价。

总体而言,国内外对隧道洞口景观的研究越来越多,但在景观评价中很少将景观与驾驶人的动态视觉特征联系起来,忽视景观带给驾驶人的感受,并且评价样本以图片为主,缺乏真实体验感和空间层次感;隧道洞口段行车安全方面的研究,主要集中在洞口亮度对行车安全的影响,关于隧道洞口景观是否会分散驾驶人注意力,影响驾驶舒适性及行车安全性方面的研究相对较少。因此,依托板仑隧道洞口景观设计方案,通过改变洞门线型、洞门颜色、洞口绿化和洞门肌理设计,利用驾驶模拟试验及ETG(eye tracking glasses)眼动仪设备来评价隧道洞口景观对驾驶人驾驶舒适性和安全性的影响,并对隧道洞口景观设计中发挥空间较大的影响因子进行分析。

## 1 隧道洞口景观评价试验方案

### 1.1 依托工程概况

板仑隧道坐落于云南省富宁县,隧道全长1 977.5 m。隧道穿越地段属于中国地势的第二阶梯,植株整体呈丛生状,外貌不整齐,岩石出露,次生特征明显。板仑隧道进口洞门为端墙式洞门,端墙长59.85 m、高13.25 m,洞门进口宽11.00 m、高8.55 m。

### 1.2 试验方案设计

公路隧道洞口属于交通敏感地段,其景观设计要保证驾驶过程的舒适性及安全性,不能过于华丽而分散驾驶人注意力,影响行车安全。本试验以板仑隧道洞口景观设计为基础(见图1),结合文献<sup>[15]</sup>提出的隧道美学设计思路和设计人员的设计习惯,选取端墙式洞门景观设计中对洞门装饰造型影响较大的4个因子(洞门线型(A)、洞门颜色(B)、洞口绿化(C)、洞门肌理(D))对隧道洞口景观设计展开

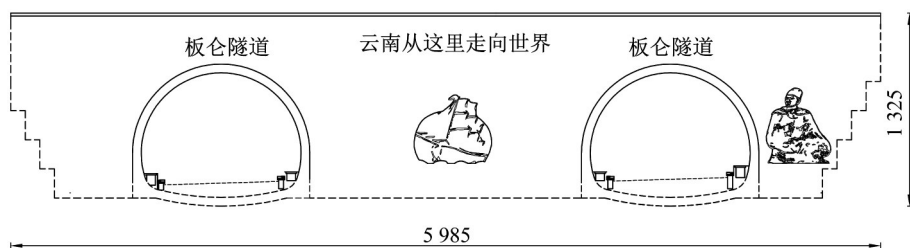


图1 板仑隧道洞门景观设计(单位:cm)

Fig.1 Portal landscape design of Ban-lun Tunnel (unit: cm)

研究。

本试验基于 $L_9(3^4)$ 正交表(见表1),设计4个因子在3个水平下的9种试验设计方案(见表2),并建立对应的隧道洞口景观模型(见图2)。

表1 各因子及水平列表

Tab.1 List of factors and levels

水平	因子			
	A	B	C	D
I	直线型	蓝色	精致绿化	壁画装饰
II	城墙式	绿色	简单绿化	横竖条纹
III	曲线型	灰色	一般绿化	无

表2 正交试验设计方案

Tab.2 Design schemes of orthogonal experiment

正交试验 方案	各因子对应的水平			
	A	B	C	D
1	I	I	I	I
2	I	II	II	II
3	I	III	III	III
4	II	I	II	III
5	II	II	III	I
6	II	III	I	II
7	III	I	III	II
8	III	II	I	III
9	III	III	II	I

2 驾驶模拟试验

2.1 试验原理

2.1.1 隧道洞口景观设计舒适性评价原理

在行车过程中,驾驶人有80%的信息靠视觉获

得。通过瞳孔在视网膜成像,随后身体机能对信息做出反馈。众多研究表明,瞳孔是衡量人体生理和心理负荷的灵敏指标<sup>[17]</sup>。当驾驶人瞳孔面积增大时,表明视觉和心理上受到较大的负荷压力<sup>[18]</sup>。因此,采用驾驶模拟试验,对驾驶员的眼动指标瞳孔直径进行测定,利用眼动仪记录并分析驾驶人瞳孔直径的变化规律,瞳孔直径越大则表明驾驶人心理负荷越重,对应设计的洞口景观舒适性就越差。

2.1.2 隧道洞口景观设计安全性试验原理

驾驶人视线偏离前方道路时间是判断驾驶分心最直接、最有效的指标。通过眼动仪提取驾驶人注视点、注视时间等视觉特性参数分析隧道洞口景观设计安全性。隧道洞口景观设计安全性评价借鉴Klauer等<sup>[19]</sup>的研究成果,利用眼动仪记录驾驶人在行驶过程中视线轨迹,并统计视线总偏离道路时间。若视线偏离道路时间超过2 s(包括6 s时间段内视线多次离开前方道路的总时间超过2 s),则判定该隧道洞口景观会分散驾驶人注意力,威胁行车安全。

2.2 试验设备

2.2.1 驾驶模拟系统

采用自主研发的隧道洞口景观环境仿真驾驶模拟系统(见图3)。系统基于赛车游戏Euro Truck Simulator 2,并通过代码编写使得建模软件Blender、SpeedTree Cinema和操纵设备等软硬件平台之间得以兼容,构建逼真的隧道洞口驾驶模拟场景。此系统最大的优势是可以随机生成汽车流,使得试验过

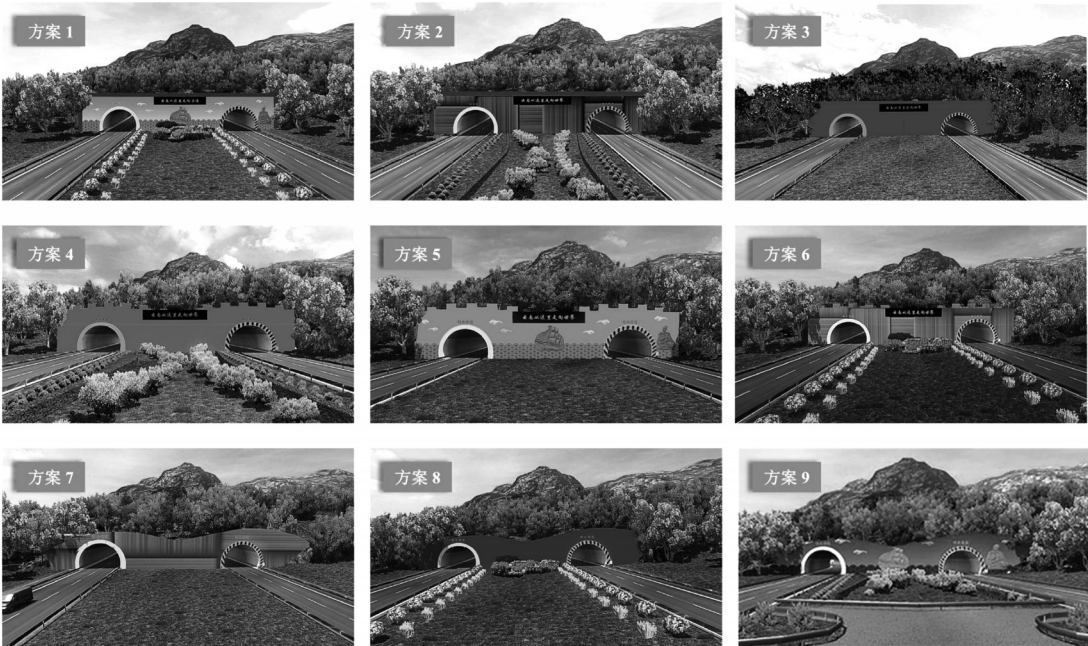


图2 9种模型方案效果

Fig.2 Renderings of nine model schemes



程沉浸感较强,最大程度还原真实驾驶的心理状态。



图3 驾驶模拟系统

Fig.3 Driving simulation system

### 2.2.2 眼动仪

利用德国制造的ETG眼动仪采集眼动数据,如图4所示。ETG眼动仪具有造型小巧、便于携带、佩戴舒适等特点,并且对设备使用环境要求低;同时,数据采集可靠,自动补偿偏差,便于后期动态视频数据处理。



图4 眼动仪

Fig.4 Eye tracker

## 2.3 试验过程

### (1)熟悉驾驶设备

选择10名具有3年以上驾龄的驾驶人,要求驾驶技术娴熟,并且有良好的驾驶习惯,视觉机能正常,无心理与生理缺陷和重大交通安全事故经历。

正式试验前要求驾驶人在指定场景下驾驶20 min以上,以熟悉驾驶模拟设备的操作,如图5所示。

### (2)眼动仪标定

熟悉训练完成后,进行眼动仪的标定,标定方式采用三点标定法,并通过第四点进行校验。标定合格方可进行正式试验,若不合格则重新标定,直至满足要求。标定过程如图6所示。



图5 试验者熟悉训练

Fig.5 Familiarity training of participants

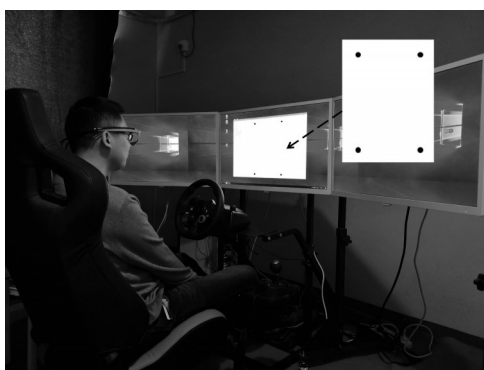


图6 试验者标定过程

Fig.6 Calibration process of participants

### (3)正式试验

为避免过多的试验要求对驾驶人造成驾驶干扰,驾驶人按照自身习惯根据车况和道路环境自由控制车速,依次通过9个隧道模型,并进行正反2次试验。驶过每个隧道后,试验者需休息10 min以重新建立测试开始的心理、物理条件,重新标定,直至完成所有模拟试验。试验过程如图7所示。

## 3 试验结果分析

### 3.1 隧道洞口景观舒适性评价分析

试验结束后,利用分析软件BeGaze导出相关眼动数据,并提取每个注视事件的平均瞳孔直径。试验数据表明,驾驶人瞳孔直径变化规律近似相同,进入隧道洞口前瞳孔直径迅速增大。图8为部分驾驶人瞳孔直径变化曲线。

由于驾驶人的瞳孔直径变化趋势相同,因此将BeGaze软件所提取的注视事件瞳孔直径平均值作为当前试验模型的驾驶人瞳孔直径,再取所有驾驶人的瞳孔直径平均值作为最终9个设计方案对应的瞳孔直径,如表3所示。



a 试验者一



b 试验者二

图7 试验过程

Fig.7 Test process

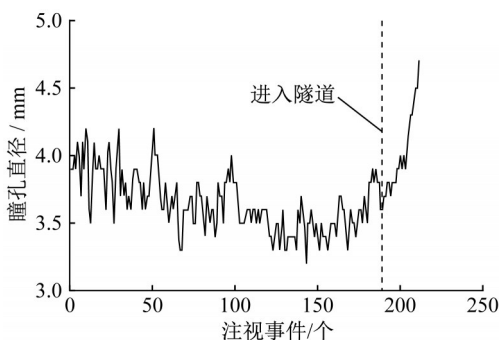


图8 部分驾驶人瞳孔直径变化曲线

Fig.8 Curve of pupil diameter for several participants

表3 驾驶人平均瞳孔直径

Tab.3 Average pupil diameter of participants

设计方案	瞳孔直径/mm
1	3.194
2	3.207
3	3.456
4	3.372
5	3.199
6	3.218
7	3.309
8	3.220
9	3.089

### 3.1.1 建立评价模型

假定A(洞门线型)、B(洞门颜色)、C(洞口绿化)、D(洞门肌理)4个因子间没有相互作用。设因子A在3个水平上的效应分别为 $a_I$ 、 $a_{II}$ 、 $a_{III}$ ,则因子B、C和D这3个因子的水平效应分别为 $b_I$ 、 $b_{II}$ 、 $b_{III}$ ,  $c_I$ 、 $c_{II}$ 、 $c_{III}$ ,  $d_I$ 、 $d_{II}$ 、 $d_{III}$ 。数学评价模型如下所示:

$$Y_1 = \mu + a_I + b_I + c_I + d_I + \varepsilon_1$$

$$Y_2 = \mu + a_I + b_{II} + c_{II} + d_{II} + \varepsilon_2$$

$$Y_3 = \mu + a_I + b_{III} + c_{III} + d_{III} + \varepsilon_3$$

$$Y_4 = \mu + a_{II} + b_I + c_{II} + d_{III} + \varepsilon_4$$

$$Y_5 = \mu + a_{II} + b_{II} + c_{III} + d_I + \varepsilon_5$$

$$Y_6 = \mu + a_{II} + b_{III} + c_I + d_{II} + \varepsilon_6$$

$$Y_7 = \mu + a_{III} + b_I + c_{III} + d_{II} + \varepsilon_7$$

$$Y_8 = \mu + a_{III} + b_{II} + c_I + d_{III} + \varepsilon_8$$

$$Y_9 = \mu + a_{III} + b_{III} + c_{II} + d_I + \varepsilon_9$$

式中:  $Y_i (i=1\sim 9)$  为模型评分值;  $\varepsilon_i (i=1\sim 9)$  为独立同分布正态变量, 分布为  $N(0, \sigma^2)$ ;  $\mu$  为母体均值。

对母体做如下基本假设:

$$H_{01}: a_I = a_{II} = a_{III} = 0$$

$$H_{02}: b_I = b_{II} = b_{III} = 0$$

$$H_{03}: c_I = c_{II} = c_{III} = 0$$

$$H_{04}: d_I = d_{II} = d_{III} = 0$$

若假设  $H_{01}$  成立, 则代表洞门线型对隧道洞口景观舒适性无显著影响, 反之有显著影响; 同理, 若假设  $H_{02}$ 、 $H_{03}$ 、 $H_{04}$  成立, 则代表洞门颜色、洞口绿化、洞门肌理对隧道洞口景观舒适性无显著影响, 反之则有显著影响<sup>[20]</sup>。

### 3.1.2 极差检验

利用极差计算方法可以计算出每一个影响因子在3个水平下驾驶人瞳孔直径的极差, 极差越大, 表示该因子对隧道洞口景观舒适性的影响越大。极差计算式如下所示:

$$R_j = \max k_{ji} - \min k_{ji} \quad (1)$$

式中:  $R_j$  为第  $j$  个影响因子的极差;  $k_{ji}$  为第  $j$  个因子水平为  $i$  的平均瞳孔直径。

计算因子A(洞门线型)在3个水平下驾驶人瞳孔直径平均值, 计算式如下所示:

$$k_{AI} = \frac{1}{3} (Y_1 + Y_2 + Y_3) = 3.286$$

$$k_{AII} = \frac{1}{3} (Y_4 + Y_5 + Y_6) = 3.263$$

$$k_{AIII} = \frac{1}{3} (Y_7 + Y_8 + Y_9) = 3.206$$

由式(1)可得, 因子A(洞门线型)在3个水平下的瞳孔直径极差为

$$R_A = k_{A\text{I}} - k_{A\text{III}} = 0.080 \quad (2)$$

同理可得其他3个因子驾驶人瞳孔直径的极差值,如下所示:

$$\begin{cases} R_B = k_{B\text{I}} - k_{B\text{II}} = 0.083 \\ R_C = k_{C\text{III}} - k_{C\text{I}} = 0.111 \\ R_D = k_{D\text{III}} - k_{D\text{I}} = 0.189 \end{cases} \quad (3)$$

隧道洞口景观洞门线型、洞门颜色、洞口绿化、洞门肌理4个因子3个水平下驾驶人瞳孔直径极差分析如图9所示。

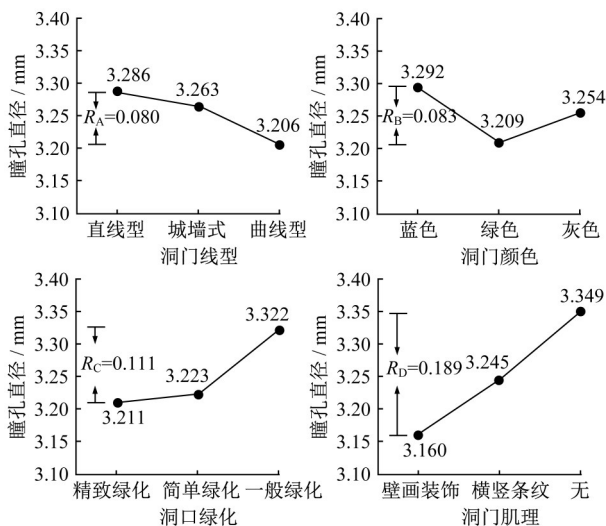


图9 各因子3个水平下瞳孔直径极差分析

Fig.9 Analysis of pupil diameter range at three levels of each factor

### 3.1.3 讨论

(1)由式(2)和式(3)及图9可知,4个因子中,隧道洞门肌理对隧道洞口景观行车舒适性影响最大,洞门线型对隧道洞口景观行车舒适性影响最小,4个因子对隧道洞口景观行车舒适性影响排序为洞门肌理>洞口绿化>洞门颜色>洞门线型。

(2)隧道洞门线型方面,以曲线型最为舒适。城墙式相比直线型,对行车舒适性并未产生显著影响。

(3)隧道洞门颜色方面,以绿色洞门最为舒适。由于整体洞口景观环境采用绿色为主体的大背景,因此隧道洞门颜色选取时需考虑周围环境因素,因地制宜,与周围环境相协调。

(4)洞口绿化方面,采用精致绿化的洞口最为舒适,因此隧道洞口景观设计时应注重绿化环境的设计,采用不同色相、季相植物相互搭配。

(5)隧道洞门肌理方面,采用壁画装饰最为舒适,但采用华丽的壁画装饰有可能分散驾驶人注意

力,影响行车安全。简单的横竖条纹处理相比无肌理壁面,行车舒适性有较大提升,因此在隧道洞门肌理选择时,应优先考虑简单横竖条纹处理方式。

### 3.2 隧道洞口景观安全性评价分析

试验结束后,利用BeGaze软件对试验过程中的眼动视频进行分析,观察并记录试验者眼睛每次注视的位置、时间以及视线扫描路径等信息,如图10所示。



图10 眼动仪数据分析过程

Fig.10 Analytical process of data from eye tracker

根据文献[19],将视频以6 s为1个单位进行回放。若发现试验者视线偏移道路则标记事件并编号,最后统计分析试验者视线偏移道路的事件及总时间,若方案中出现视线偏离大于2 s的事件则视为不安全方案。9个方案试验者视线偏移道路统计结果如图11所示。图案数量表示试验者在对应方案中出现的偏离事件次数,其中黑色表示视线偏离大于2 s的事件,灰色表示视线偏离为1~2 s(不含2 s)的事件,白色表示视线偏离小于1 s(不含1 s)的事件。对应的景观安全性评价结果如表4所示。

由图11可知,方案5、方案9中部分试验者视线偏离道路持续时间超过了2 s,出现了驾驶分心情况,表示该设计方案存在不安全因素。

从视频回放及驾驶人视线偏移道路的位置来看,方案5试验者产生分心的主要原因是观看洞门墙面壁画——郑和下西洋(见图12),而方案1也采用了壁画装饰的手法,却没有出现驾驶分心的状况。通过对比分析发现,方案5洞门颜色(绿色)与周围环境融为一体,而壁画采用混凝土颜色,在整个以绿色为主的大环境下,混凝土颜色的壁画特别明显,过分吸引了驾驶人的注意力,而方案1洞门颜色采用蓝色,在洞门衬托下壁画就显得不那么突兀,因此隧道洞口景观设计万万不可出现“万绿丛中一点红”的现象。

另外,方案9试验者产生分心的主要原因是关



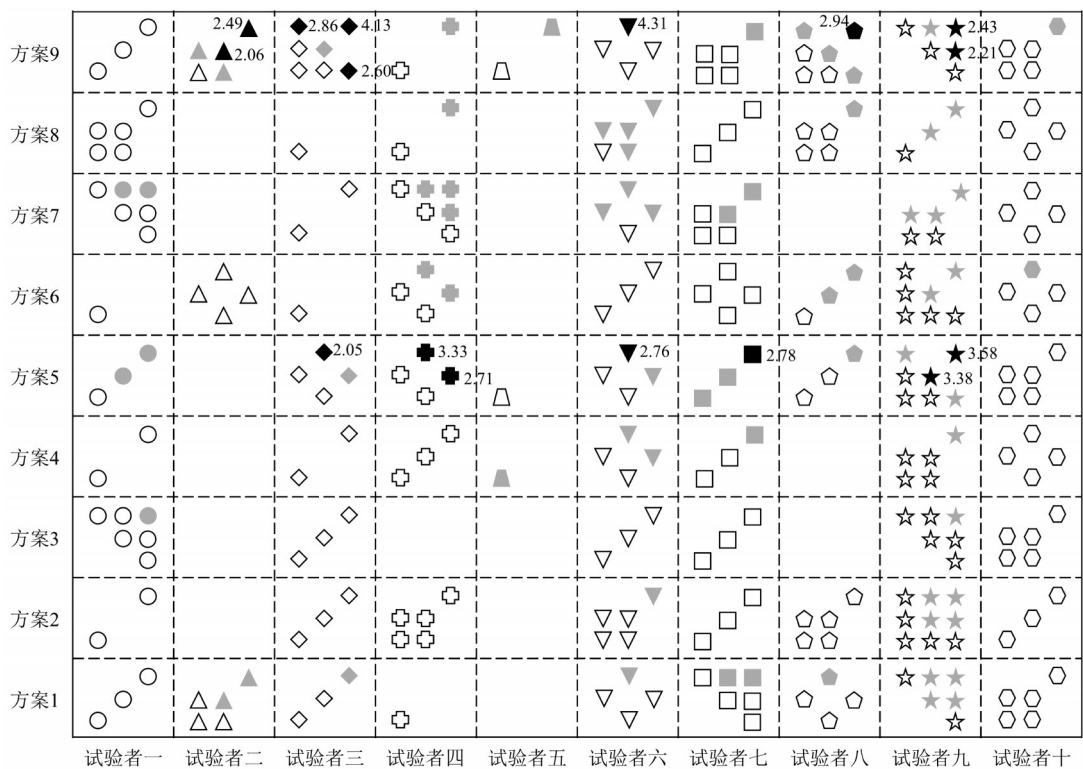


图 11 9 种方案试验者视线偏移道路统计(单位:s)

Fig.11 Summary of line deviation of participants' sight for nine models(unit: s)

表 4 9 种方案景观安全性评价结果

评价结果								
方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6	方案7	方案8	方案9
安全	安全	安全	安全	不安全	安全	安全	安全	不安全

注洞门上方曲线和注视壁画装饰(见图 13)。方案 7 和方案 8 端墙洞门顶部也采用了曲线形状,方案 1 洞门壁面也采用了壁画装饰,然而试验者未出现分心情况。这说明曲线形状、壁画装饰在一定程度上吸引了试验者注意力,但不是十分严重。当 2 个因素叠加时,就会造成景观设计过于繁琐而使驾驶人分心,因此隧道洞口景观设计应力求简洁明了,不可过于繁琐。

方案 1、方案 6 和方案 8 的隧道洞口中央分隔带绿化装饰比较精致,但这 3 个模型下驾驶人出现视线偏离道路的情况较少,并且没有出现驾驶人分心的现象;方案 5 和方案 9 采用简单的绿化装饰,却出现不同程度的驾驶分心情况,这表明隧道洞口前设置绿化装饰带一般不会过分吸引驾驶人,造成驾驶分心。因此,在景观设计中要合理设置绿化装饰来美化隧道洞口。

3.3 工程应用

鉴于上述对隧道洞口景观设计的研究,板仑隧

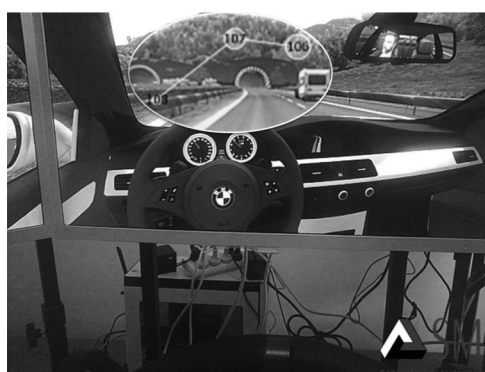


a 分心事件一



b 分心事件二

图 12 方案 5 试验者视线偏移道路  
Fig.12 Line deviation of participants' sight for scheme 5



a 分心事件一



b 分心事件二

图13 方案9试验者视线偏移道路

Fig.13 Line deviation of participants' sight for scheme 9

道进口洞门景观设计最终选择试验方案1:洞门线型选择直线型,洞门墙体颜色采用蓝色,洞门肌理选择壁画装饰,洞口绿化采用精致绿化,如图14所示。



图14 板仑隧道

Fig.14 Ban-lun Tunnel

仅考虑洞门线型,该洞门试验方案采用的直线型美景度不如曲线型,但通过洞门景观设计总体评价可以看出,该方案下行车安全且舒适性较好。因此,隧道洞口景观设计不能仅基于单一因子确定,应根据现场环境,考虑因子之间的交互作用和影响。

## 4 结论

(1)采用驾驶模拟试验和眼动仪设备,记录驾驶人行车过程中的视觉信息眼动指标,进行隧道洞口景观舒适性及安全性评价。

(2)端墙式隧道洞口景观舒适性影响因素排序为洞门肌理>洞口绿化>洞门颜色>洞门线型;方案5和方案9中部分试验者视线偏离道路持续时间超过了2 s,出现了驾驶分心情况,表明设计方案不安全。

(3)隧道洞门壁面采用大面积混凝土时,首选简单横竖条纹肌理,洞门肌理色彩与洞门色彩差异不宜过大,并尽量避免出现“万绿丛中一点红”的现象。

(4)隧道洞口若采用曲线型洞门或奇特线型洞门时,隧道洞口景观其他部分设计应力求简单,避免过多特殊元素叠加。

(5)隧道洞口景观绿化装饰一般不存在过分吸引驾驶人注意力,进而造成驾驶分心的情况,故景观设计时可以重点关注,通过合理设置绿化装饰来美化隧道洞口景观。

### 作者贡献声明:

叶飞:提出了研究方法和研究思路,指导论文撰写。

应凯臣:具体方案的制定,模型构建,论文撰写等。

苏恩杰:负责驾驶模拟试验实施,数据采集。

魏艳春:初稿的审阅和修改,负责数据整理和分析。

梁晓明:试验结果可视化处理。

### 参考文献:

- [1] 贾玲利,赵东平.隧道洞口景观现状及发展趋势研究[J].土木工程学报,2008,41(1):88.  
JIA Lingli, ZHAO Dongping. A study on the trend of development and present state of tunnel entrance landscaping [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(1): 88.
- [2] 关宝树.隧道工程设计要点集[M].北京:人民交通出版社,2003.  
GUAN Baoshu. Key points of tunnel engineering design [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [3] 熊世龙.浅议公路隧道洞门设计[J].公路,1999(10):22.  
XIONG Shilong. Discussion on the design of highway tunnel portal [J]. Highway, 1999(10): 22.
- [4] PEILA D, PELIZZA S. Criteria for technical and environmental design of tunnel portals [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2002, 17(4): 335.
- [5] YE F, HE C, WANG S M, et al. Landscape design of mountain highway tunnel portals in China [J]. Tunnelling &



- Underground Space Technology, 2012, 29: 52.
- [6] 关向群. 隧道洞口景观设计实用方法和工程应用[J]. 铁道学报, 2005(1): 132.
- GUAN Xiangqun. Practical method of tunnel entrance landscape design and its engineering application [J]. Journal of the China Railway Society, 2005(1): 132.
- [7] 张威振, 刘维萍. 高低湖区下的观光隧道设计方案探讨[J]. 隧道建设, 2016, 36(6): 728.
- ZHANG Weizhen, LIU Weiping. Discussion on design scheme of Songyahu Sight-seeing Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(6): 728.
- [8] 贾玲利, 赵东平. 隧道洞口绿色景观及其评价体系研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(9): 154.
- JIA Lingli, ZHAO Dongping. Study on green tunnel entrance landscape and its evaluation system[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(9): 154.
- [9] 刘飞. 基于环境保护的隧道洞门选型研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- LIU Fei. Road tunnel portal selection based on environmental protection [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [10] LEE D H, KO Y J. Design development and evaluation of visual environment improvement facility for long road tunnel-focused on the case of Inje Tunnel [J]. Archives of Design Research, 2010, 23(3): 207.
- [11] 陈芳. 公路视觉环境对行车安全的影响[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- CHEN Fang. The impact of road visual environment on traffic safety[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [12] 胡江碧, 李然, 马勇. 高速公路隧道入口段照明安全阈值评价方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(3): 92.
- HU Jiangbi, LI Ran, MA Yong. Safety threshold evaluation method for expressway tunnel lighting in entrance section[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(3): 92.
- [13] 苑郁林. 以驾驶人的心理和生理特性探讨山区高速公路隧道洞口的景观设计[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 30.
- YUAN Yulin. On the landscape design of mountain highway tunnel portals considering the psychological and physiological behaviors of a driver [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 30.
- [14] 李国锋, 马国民, 李文辉, 等. 公路隧道洞口动态景观设计问题研究[J]. 公路, 2018, 63(12): 325.
- LI Guofeng, MA Guomin, LI Wenhui, *et al.* Study on dynamic landscape design issue of highway tunnel portal [J]. Highway, 2018, 63(12): 325.
- [15] 叶飞, 徐长鑫, 魏艳春, 等. 山岭公路隧道洞口美学探析[J]. 隧道建设, 2019, 39(4): 563.
- YE Fei, XU Changxin, WEI Yanchun, *et al.* Aesthetic analysis of mountain highway tunnel entrance [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 563.
- [16] 陈孟柯, 马健霄, 王羽尘, 等. UC Win/Road在隧道绿化景观设计中的应用[J]. 物流工程与管理, 2019, 41(1): 117.
- CHEN Mengke, MA Jianxiao, WANG Yuchen, *et al.* The application of UC Win/Road in tunnel greening landscape design [J]. Logistics Engineering and Management, 2019, 41(1): 117.
- [17] KIRCHER K, AHLSTROM C. The impact of tunnel design and lighting on the performance of attentive and visually distracted drivers[J]. Accident Analysis and Prevention, 2012, 47: 153.
- [18] VERNEY S P, GRANHOLM E, MARSHALL S P. Pupillary responses on the visual backward masking task reflect general cognitive ability [J]. International Journal of Psychophysiology, 2004, 52: 23.
- [19] KLAUER S G, DINGUS T A, NEALE V L, *et al.* The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: an analysis using the 100-car naturalistic driving study data [R]. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2006.
- [20] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2014.
- WANG Rongxin. Mathematical statistics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2014.