文章编号：1009-6582(2021)03-0070-009
DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2021.03.009

现代隧道技术

# 环境因素对公路隧道洞外亮度$L_{20}(S)$值的影响研究

张晓坚[1] 梁 波[1,2] 钟升明[1,3]
（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重庆文理学院土木工程学院，重庆402160）

**摘 要** 洞外亮度$L_{20}(S)$作为公路隧道入口段照明的基本参数，影响着过渡段的照明设计，其值受到多种因素的共同作用。洞外亮度测量影响因素较多，文章从洞外天空率、洞门型式以及洞外路面面层颜色等3种因素进行分析，开展各因素对洞外亮度$L_{20}(S)$值的影响研究。调研重庆主城范围内的相应公路隧道，并选择符合要求的隧道为研究对象，结合理论分析与现场测试验证，得出各个指标参数对隧道洞外亮度$L_{20}(S)$的影响规律，提出基于现场亮度测试方法的公路隧道洞外亮度指标。研究结果表明：（1）秋冬季节的洞外亮度$L_{20}(S)$推荐值至少为实际测试亮度值的1倍及以上；（2）路面亮度值与RGB值所呈现规律一致；（3）端墙式洞门的洞外亮度小于削竹式洞门。

**关键词** 公路隧道 隧道洞外亮度 现场试验 天空率 洞外路面 洞门类型
**中图分类号：U453.7** **文献标识码：A**

## 1 引 言

目前对于洞外亮度$L_{20}(S)$值的确定，包括查表法、黑度法、数码相机法以及环境简图法四种计算方法。本文基于“CIE 88—2004规范”推荐的环境简图法及我国《JTGT D70/2-01—2014公路隧道照明设计细则》采用的表格法得到洞外亮度$L_{20}(S)$。其中，环境简图法仅仅依据CIE的隧道照明指南和欧盟的隧道照明标准所确定[1]，未充分考虑我国公路隧道照明现状。环境简图法基于天空、路面、洞内以及洞门四周等因素来确定洞外亮度$L_{20}(S)$值[2]，但针对路面影响因素而言，环境简图法仅考虑路面百分比及其亮度，未考虑路面颜色与洞外亮度$L_{20}(S)$值之间的影响关系。我国规范中推荐的表格法推荐值的制定是根据《CIE 88-1990公路隧道和地下通道照明准则》[3]、BS 5489[4]及EURO STD《照明应用-隧道照明》[5]所确定，未充分体现我国公路隧道洞外亮度的实际情况和节能照明要求，且查表法得到的洞外亮度$L_{20}(S)$高于等效光幕亮度计算值，远大于实际洞外亮度$L_{20}(S)$值。同时查表法仅考虑了天空面积的百分比、洞门朝向或明暗环境、设计车速三种影响因素[6]，忽略了会对洞外亮度$L_{20}(S)$造成影响的洞外天气、洞外路面颜色、洞门类型、环境因素、隧道经纬度等因素。

从洞外天空因素分析，我国《JTGT D70/2-01—2014公路隧道照明设计细则》中表格法仅考虑天空率，并且按照0%，10%，25%和35%~50%划分，在天空率两个极端点进行取值，可知公路隧道洞外亮度$L_{20}(S)$值取值范围从1 500 cd/m$^2$至6 500 cd/m$^2$不等，推荐值最高相差4.5倍。外在条件（包括车速）相同的情况下，日本的东京湾海底隧道[6]在进行照明设计时，分别计算了洞外亮度$L_{20}(S)$取4 kcd/m$^2$和6 kcd/m$^2$两种亮度值的情况，得出两者设备费相差34%，年耗电量（kW·h）相差30%。郑琼水[7]实测了19处隧道入口段的洞外亮度$L_{20}(S)$，对比设计[8]所取4 500 cd/m$^2$的洞外亮度$L_{20}(S)$，照明设施浪费约30%左右，洞外亮度$L_{20}(S)$的最大差值可达2.8倍。

从洞外路面因素分析来看，表格法仅考虑了隧

修改稿返回日期：2020-09-21
基金项目：国家自然科学基金项目（51878107）；国家自然科学基金项目（51678096）.
作者简介：张晓坚（1995-），男，硕士研究生，主要从事隧道照明与地下结构方面的研究工作，E-mail:503722910@qq.com.
通讯作者：梁 波（1964-），男，博士，教授，主要从事隧道与地下工程理论和技术方面的研究工作，E-mail：liang_laoshi@126.com.

道的设计车速并为之分类，未考虑洞外路面材料的颜色以及反射率等。目前，国内外诸多研究者已开展彩色沥青路面铺装材料，大量文献表明彩色沥青路面可以减少交通事故率。根据洞外亮度$L_{20}(S)$值的有关研究表明[9]，路面的材质、色泽对$L_{20}(S)$值影响较大，相比于沥青路面，水泥路面颜色较浅，路面亮度比其高出30%~50%。但现阶段大多数研究未深入研究洞外路面颜色与洞外亮度$L_{20}(S)$值之间的关系，仅仅提出对路面材料选择的建议[10]。

从洞门因素分析，查表法仅考虑了洞门的南北朝向与洞外明暗环境，环境简图法仅考虑了洞内贡献值，即洞内百分比与洞内亮度的乘积。2012年梁鹏昆[11]收集国内外共400余座隧道洞门相关资料，研究得到端墙式洞门为应用最多的洞门型式，其次为削竹式、翼墙式。现阶段基于洞门型式对洞外亮度$L_{20}(S)$值展开研究不多，在隧道设计过程中，对洞门型式的选取主要是考虑隧道规模、使用功能以及周围建筑环境、地形条件等因素，但未考虑过洞门型式对洞外亮度的影响。

综上可知，洞外亮度$L_{20}(S)$取值的准确性既影响隧道照明设计，又影响驾驶员的生理和心理反应的安全舒适性。同时，洞外亮度$L_{20}(S)$作为入口段和过渡段照明的重要影响因子，其取值的合理性也关系到运营成本等一系列问题。因此，着手于洞外亮度$L_{20}(S)$的主要影响因素和部分研究较少的影响因素，选择洞外天空率、洞外路面颜色与洞门类型三个方面开展各指标参数对洞外亮度$L_{20}(S)$的影响研究是非常必要的。

## 2 洞外天空率与洞外亮度$L_{20}(S)$值的关系分析

隧道入口段的天空率不同，或该时刻的天气变化都可能使洞外亮度$L_{20}(S)$值产生较大偏差[12]，多重影响因素使得天空率对洞外亮度$L_{20}(S)$值的研究一直停滞不前，因此本文将对天空率与洞外亮度$L_{20}(S)$值之间的关系进行研究，以指导隧道照明设计。

### 2.1 试验对象

试验对象选取不同天空率、不同洞门型式与接近段路面不同颜色的隧道。调研重庆市主城区中除去高速路或快速路等不便实地调研的31条公路隧道，最终选择同茂隧道西北朝向与正东方向、宝圣隧道西北朝向与东南朝向、火风山隧道正南朝向、江北城东北朝向与西南朝向以及向黄隧道东南朝向共八个洞门为研究对象。调研隧道的具体情况见表1。

表1 调研隧道的相关参数

Table 1 Related parameters of the studied tunnels

| 隧道名称 | 朝向 | 左/右幅 | 停车视距/m | 路面类型 | 洞门型式 | 天气 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 宝圣隧道 | 东南 | 左 | 100 | 深色 | 削竹式 | 晴 |
| 宝圣隧道 | 西北 | 右 | 100 | 深色 | 削竹式 | 晴 |
| 同茂隧道 | 西北 | 左 | 100 | 条纹 | 削竹式 | 多云 |
| 同茂隧道 | 正东 | 右 | 100 | 条纹 | 端墙式 | 晴 |
| 火风山隧道 | 正南 | 右 | 100 | 浅色 | 端墙式 | 阴 |
| 江北城隧道 | 东北 | 左 | 100 | 浅色 | 端墙式 | 多云 |
| 江北城隧道 | 西南 | 右 | 100 | 浅色 | 端墙式 | 晴 |
| 向黄隧道 | 东南 | 右 | 100 | 大红色与浅色 | 削竹式 | 晴 |

### 2.2 实地公路隧道洞外亮度测试

基于实际隧道20°视场中天空率的考虑，本文最终选取宝圣隧道的西北朝向及其东南朝向、火风山隧道正南朝向为研究对象。在“CIE 88—2004规范”推荐的环境简图法[2]所考虑的四个因素研究基础上，将选取的研究对象的隧道洞门的天空部分划分为天空和隧道上方的景物（绿化、建筑物、广告牌等）[13]，在距离洞门至少1倍停车视距处，对人眼视野20°范围内的景物分块，部分隧道分块图如图1所示。再求出各个景物亮度值及相应百分比的乘积之和，得到公路隧道洞外亮度$L_{20}(S)$值[5]。同时采用Auto CAD对所划部分的面积进行读取，从而得到各条隧道天空面积百分比[14]，如表2所示。

架设PR-655光谱辐射亮度计记录调研隧道天空亮度、洞外亮度等洞外环境亮度值[6,15]，收集30组数据，同时基于不同天空率的数据采用数据分析软件进行趋势分析，见图2和图3。

根据图2和图3可知，在1倍停车视距处看向隧

图1　宝圣隧道东南朝向

Fig.1　South-east orientation of Baosheng tunnel

**表2　各隧道天空面积百分比**

**Table 2　Percentages of the sky view area of studied tunnels**

| 隧道名称及朝向 | 宝圣隧道西北朝向 | 宝圣隧道东南朝向 | 火风山隧道正南朝向 |
|---|---|---|---|
| 天空面积百分比/(%) | 1.97 | 5.92 | 2.28 |

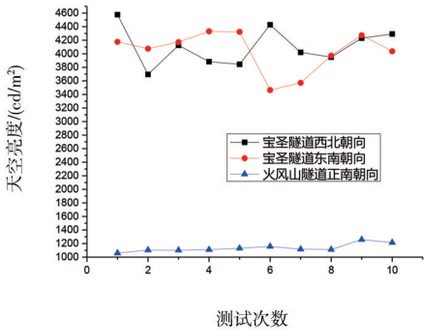


图2　实地测试隧道天空亮度值

Fig.2　Field measured sky brightness values of the investigated tunnels

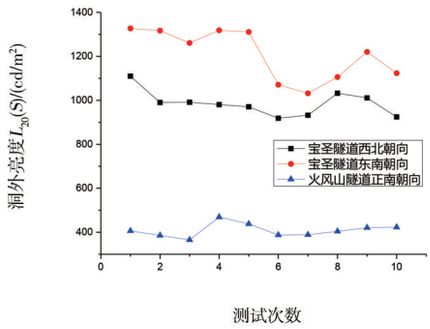


图3　实地测试隧道洞外亮度$L_{20}(S)$值

Fig.3　Field measured brightness values $L_{20}(S)$ outside investigated tunnels

道洞门的20°人眼视野范围内的天空亮度变化范围较大，即从1 058.61~4 576.66 cd/m²不等。实地测试公路隧道天空亮度值变化范围在3 500 cd/m²左右，由于洞外天气、景观布置等因素而具有一定的不确定性。天空亮度值的波动较大程度上影响洞外亮度$L_{20}(S)$值的大小，从图2和图3可以看出，天空亮度值对洞外亮度$L_{20}(S)$的贡献值（所占值比例）的变化趋势与天空亮度值变化趋势一致，即天空亮度值对洞外亮度$L_{20}(S)$的所占比值很大程度影响了$L_{20}(S)$值的大小。

根据表2可知，宝圣隧道西北朝向与东南朝向的隧道洞门、火风山隧道正南朝向的隧道洞门对应三种不同大小的天空率，分别为1.97%，5.92%和2.28%。对于图3中的洞外亮度$L_{20}(S)$值，在三种不同天空率下测得的值不同。进一步分析得知，天空率最大时（5.92%）的$L_{20}(S)$值最大，天空率为2.28%时的$L_{20}(S)$值次之，天空率最小时（1.97%）对应的$L_{20}(S)$值最小，因此天空率的大小与洞外亮度$L_{20}(S)$值的大小变化趋势一致。

## 2.3　查表法洞外亮度建议值

我国《JTGT D70/2-01—2014公路隧道照明设计细则》对洞外亮度$L_{20}(S)$的取值采用查表法。基于以上三条调研隧道的基本条件进行洞外亮度$L_{20}(S)$的表格取值[14]，利用线性内插法求得三个不同天空率的洞门亮度建议值，见表3。

**表3　查表法对调研隧道的洞外亮度建议值**

**Table 3　Brightness values outside investigated tunnels recommended by the tabular method**

| 洞外亮度$L_{20}(S)$ | 宝圣隧道西北朝向 | 宝圣隧道东南朝向 | 火风山隧道正南朝向 |
|---|---|---|---|
| 实际值/(cd/m²) | 918.52~1 109.84 | 1 123.48~1 327.08 | 365.36~469.01 |
| 查表值/(cd/m²) | 1 723.52 | 1 920.77 | 2 353.42 |

由表3可知，采用查表法取得的宝圣隧道西北朝向的隧道洞外亮度$L_{20}(S)$推荐值为实地测试值的1.56~1.88倍；宝圣隧道东南朝向的洞门洞外亮度$L_{20}(S)$推荐值为实地测试值的1.45~1.71倍；火风山隧道正南朝向的隧道洞门洞外亮度$L_{20}(S)$推荐值为实地测试值的5.02~6.44倍。

可见，在秋冬季节的洞外亮度$L_{20}(S)$规范推荐值至少为实际测试亮度值的1倍及以上。随着天空率越大，在太阳光照最强的时间按照最不利的照明情况进行隧道照明时，天空亮度对洞外亮度$L_{20}(S)$值的贡献值越大，公路隧道照明设计需要的光照强度更大，致使隧道照明浪费大量的电量。

## 3 洞外路面亮度与洞外亮度$L_{20}(S)$值的关系分析

对于公路隧道洞外亮度$L_{20}(S)$值而言，在1倍停车视距处的1.5 m高度的人眼20°视野范围之内的所有景物，路面所占面积比例为40%~50%[16]，且路面亮度较高，使得隧道洞外亮度在该项组成上较大[15]。据洞外亮度$L_{20}(S)$值的有关研究表明，路面的材质、色泽对$L_{20}(S)$值影响较大，相比于沥青路面，水泥路面颜色较浅，路面亮度比沥青路面高出30%~50%[9,10]。若采用CIE 88—2004推荐的环境简图法确定洞外亮度$L_{20}(S)$值，也仅仅针对隧道起初设计时所考虑的洞外路面材料，未考虑路面颜色对于洞外亮度$L_{20}(S)$值的影响。基于此，应对公路隧道洞外路面颜色对洞外亮度$L_{20}(S)$值的影响作进一步的研究。

### 3.1 实地公路隧道亮度的计算

为研究洞外路面亮度与洞外亮度$L_{20}(S)$之间的关系，对表1所示的8个公路隧道洞门，依据“CIE 88—2004规范”推荐的环境简图法进行景物的分块，再求出各个景物亮度值及相应百分比的乘积之和，得到公路隧道洞外亮度$L_{20}(S)$值[14]，同时采用Auto CAD进行面积的读取，得到各条隧道路面面积百分比。同时提出环境因素贡献比，即环境因素的亮度与1倍停车视距处人眼20°范围内所占面积百分比的乘积值与洞外亮度$L_{20}(S)$值的比值。

#### 3.1.1 不同颜色的沥青路面亮度计算

由表1可知，同茂隧道的洞外路面材料为深浅条纹相间的沥青路面；向黄隧道洞外30 m范围内为大红色与浅色拼接的沥青路面。其它调研隧道的路面颜色均为沥青原色。各隧道现场实测亮度值及路面面积百分比数据采用数据分析软件进行趋势分析，见表4、图4~图6。

表4 调研隧道对应路面面积百分比

Table 4 Percentages of corresponding pavement area of investigated tunnels

| 隧道名称及朝向 | 宝圣隧道西北朝向 | 宝圣隧道东南朝向 | 同茂隧道正东朝向 | 同茂隧道西北朝向 | 向黄隧道东南朝向 | 火风山隧道正南朝向 | 江北城隧道东北朝向 | 江北城隧道西南朝向 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 路面面积百分比/(%) | 28.70 | 27.66 | 27.90 | 40.84 | 35.86 | 35.57 | 41.95 | 17.28 |

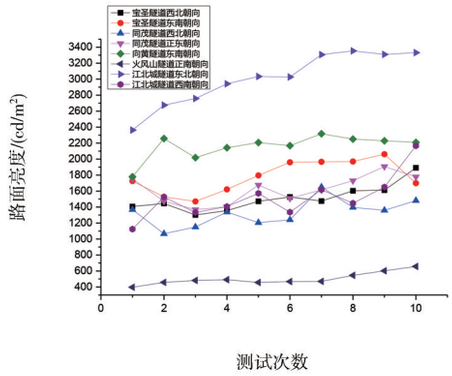


图4 实测隧道路面亮度值

Fig.4 Measured tunnel pavement brightness values

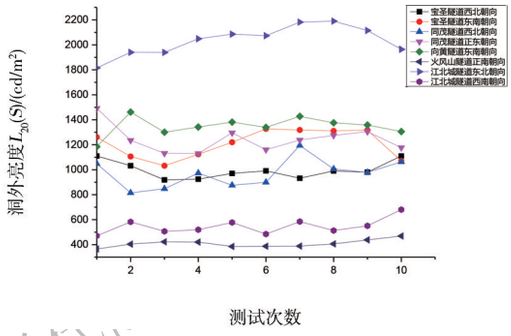


图5 实测隧道洞外亮度$L_{20}(S)$值

Fig.5 Measured brightness values $L_{20}(S)$ outside the investigated tunnels

由表4、图4~图6可知，路面面积所占20°视野范围的面积百分比为17.28%~41.95%，路面亮度对洞外亮度$L_{20}(S)$的贡献比例为32.81%~71.16%。因此，相对于其它影响因素而言，路面面积所占20°视野范围的百分比或路面亮度值占洞外亮度$L_{20}(S)$值的百分比更大。其中路面面积所占比例最小的公路隧道洞门，对应的路面亮度值对洞外亮度$L_{20}(S)$所占的亮度比例不一定最小。

### 3.2 路面颜色对隧道洞外亮度$L_{20}(S)$值的影响分析

采用软件Photoshop CS6对调研隧道路面进行分析，读取并对比各种路面颜色的RGB值，具体结果如图7所示。图中，横坐标1~4依次表示深色路面、深浅色条纹路面、大红色与浅色拼接路面、浅色路面。

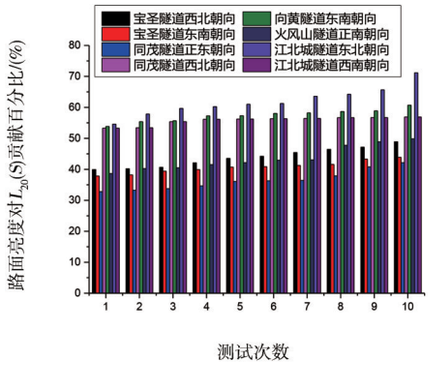


图6 路面亮度值对$L_{20}(S)$贡献百分比

Fig.6 Contribution percentages of pavement surface brightness values to $L_{20}(S)$

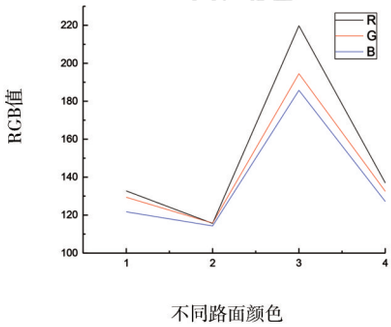


图7 不同路面颜色对应的RGB值

Fig.7 RGB values corresponding to different pavement colors

通过图7可知，针对Photoshop CS6获取的RGB值，数值大小排序规律均呈现为条纹路面＜深色路面＜浅色路面＜大红色与浅色拼接路面。根据RGB原理，红绿蓝三种颜色的叠加和越大，表明明亮程度越大。

对于不同路面颜色的亮度与洞外亮度$L_{20}(S)$值的均值进行研究，结果如图8和图9所示。

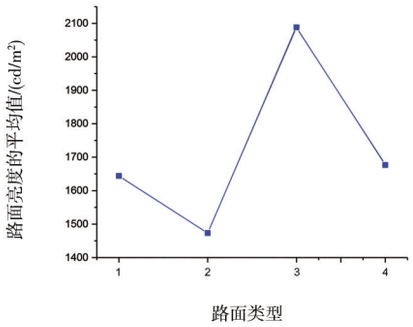


图8 不同路面的路面亮度均值

Fig.8 Means of pavement brightness for different pavement colors

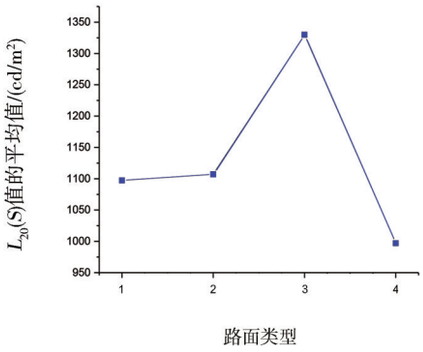


图9 不同路面$L_{20}(S)$值的均值

Fig.9 Means of $L_{20}(S)$ value for different pavement colors

由图8可知，路面采用不同颜色的沥青，其亮度均值由大到小依次为：第三种路面（大红色与浅色拼接）、第四种路面（浅色）、第一种路面（深色）、第二种路面（条纹）。同时，与RGB值的数值规律相同，RGB值对应明亮程度。进一步研究发现，隧道的洞外路面颜色和路面的亮度存在一定关系。依据图9中四种路面类型对应着的洞外亮度$L_{20}(S)$均值所呈现的大小数值不同，由大到小依次为第三种路面（大红色与浅色拼接）、第二种路面（条纹）、第一种路面（深色）、第四种路面（浅色）。

综上所述，基于RGB叠加和越大则明亮程度越大的原理，路面亮度值与RGB值呈现规律一致。基于洞外亮度$L_{20}(S)$值对公路隧道照明设计的影响，隧道洞外亮度颜色应选择RGB叠加之和小的颜色作为沥青表层颜色，使洞外亮度$L_{20}(S)$值尽可能减小。

## 4 洞门型式与洞外亮度$L_{20}(S)$值的关系分析

根据实地调研，选取削竹式与端墙式两种主要洞门型式作为研究对象。针对所选取的调研隧道进行洞外亮度$L_{20}(S)$的现场测试试验，研究洞门类型对“CIE 88—2004规范”推荐的环境简图法计算洞外亮度$L_{20}(S)$的影响。

### 4.1 实地公路隧道亮度测试

#### 4.1.1 削竹式洞门亮度测试

经调研，同茂隧道西北朝向、向黄隧道东南朝向、宝圣隧道东南朝向以及宝圣隧道西北朝向均为削竹式洞门。采用数据分析软件对削竹式洞门的亮度值、洞外亮度$L_{20}(S)$值及洞门面积所占20°视野范围的百分比进行趋势分析，分析结果见表5、图10和图11。

表5 削竹式隧道洞门面积百分比

Table 5 Area percentages of bamboo-truncated type tunnel portals

| 隧道名称 | 同茂隧道西北朝向 | 向黄隧道东南朝向 | 宝圣隧道东南朝向 | 宝圣隧道西北朝向 |
|---|---|---|---|---|
| 洞门面积百分比/(%) | 2.02 | 2.34 | 2.91 | 2.42 |

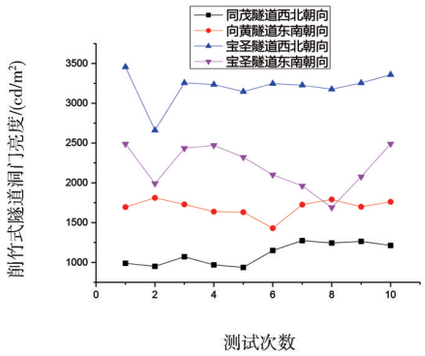


图10 削竹式隧道洞门亮度值

Fig.10 Brightness values of bamboo-truncated tunnel portals

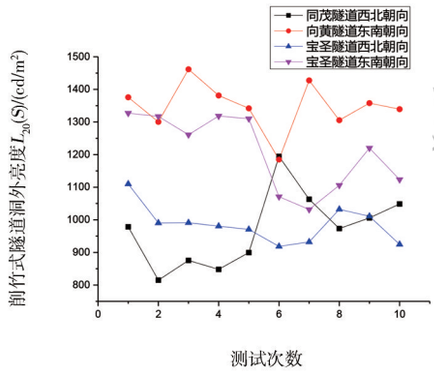


图11 削竹式隧道洞外亮度$L_{20}(S)$值

Fig.11 Brightness values $L_{20}(S)$ outside bamboo-truncated tunnel portals

由现场实测数据表明，对于公路隧道洞门类型为削竹式时，洞门亮度值变化范围较大，从936.7~3 455 cd/m²不等，相应的洞外亮度值变化范围为815.00 ~ 1 427.51 cd/m²。究其原因是当测试削竹式的洞门亮度时，太阳照射在隧道洞门上的光照决定洞门的亮度值。太阳被云层所覆盖，则此时的洞门亮度值低，当太阳直射于洞门时，此时的洞门亮度值较大，因此洞门亮度值变化范围大。

### 4.1.2 端墙式洞门亮度测试

采用环境简图法取洞门处视野20°范围进行研究分析，与削竹式洞门的亮度对比分析相同，对端墙式洞门的亮度值、洞外亮度$L_{20}(S)$值及洞门类型占公路隧道洞外亮度$L_{20}(S)$面积百分比进行分析，分析结果如表6、图12和图13所示。

表6 端墙式隧道洞门面积百分比

Table 6 Area percentages of end-wall type tunnel portals

| 隧道名称 | 同茂隧道正东朝向 | 火风山隧道正南朝向 | 江北城隧道东北朝向 | 江北城隧道西南朝向 |
|---|---|---|---|---|
| 洞门面积百分比/(%) | 8.44 | 11.52 | 3.37 | 8.53 |

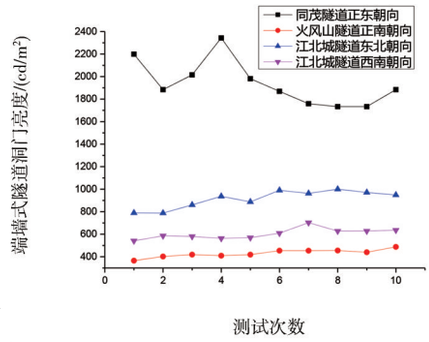


图12 端墙式隧道洞门亮度值

Fig.12 Brightness values of end-wall type tunnel portals

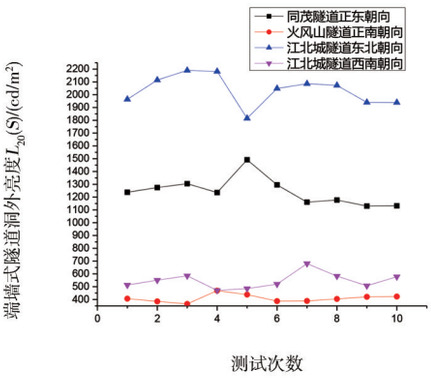


图13 端墙式隧道洞外亮$L_{20}(S)$值

Fig.13 Brightness value $L_{20}(S)$ outside end-wall type tunnel portals

由图12和图13可知，公路隧道洞门类型为端墙式时，洞门亮度值变化范围为365.1~2 343 cd/m²。尽管洞门亮度值变化范围大，洞门亮度对洞外亮度$L_{20}(S)$值的贡献值比例却一直维持在1%~15%范围，大部分位于10%~15%之间。

### 4.2 洞门类型对隧道洞外亮度$L_{20}(S)$值的影响分析

经过对公路隧道洞门亮度及洞外亮度$L_{20}(S)$值的一系列研究表明，采用数据分析软件对图10~图13作不同洞门类型的隧道洞门亮度与洞外亮度$L_{20}(S)$值的箱型图比较，见图14。

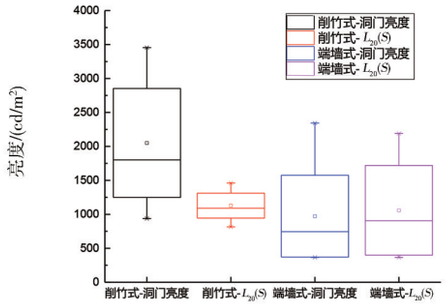


图14 不同洞门类型的亮度与洞外亮度$L_{20}(S)$值

Fig.14 Box plot of brightness and outside-portal brightness values $L_{20}(S)$ for different types of portals

从图14中不难看出，公路隧道削竹式与端墙式洞门亮度差异较大，同时，削竹式洞门亮度高于端墙式洞门亮度。端墙式、削竹式洞门对洞外亮度$L_{20}(S)$值的影响方面差异较小，削竹式洞门的洞外亮度$L_{20}(S)$值变化范围较小，端墙式的变化范围相对较大。同时当洞门为削竹式亦或端墙式时，墙面材料相同的条件下，洞门亮度对洞外亮度$L_{20}(S)$值的贡献值最高相差300 cd/m²。

若该公路隧道洞门建设为削竹式，其洞门面积百分比小（相比于端墙式洞门面积百分比），则无论洞门采用反光标志亦或瓷砖等面饰材料，其洞外亮度$L_{20}(S)$值均处于一定范围内，总体上对洞外亮度$L_{20}(S)$的影响值变化范围较小；所以采用端墙式洞门时，此时的洞门面积百分比较大（相较于削竹式洞门面积百分比），所以端墙式洞门的正面墙壁尽可能采用混凝土或者沥青等亮度较低的材料，不应该采用瓷砖等反射率较高的材料。

## 5 结论与展望

### 5.1 结 论

（1）关于洞外天空率与洞外亮度$L_{20}(S)$值的影响规律，根据现场亮度测试试验可知，秋冬季节的洞外亮度$L_{20}(S)$规范推荐值至少为实际测试亮度值的1倍及以上。同时基于不同天空率的数据采用数据分析软件进行趋势分析，得出天空率的变化趋势与洞外亮度$L_{20}(S)$值的变化趋势一致。

（2）关于洞外路面亮度对洞外亮度$L_{20}(S)$的影响规律，路面RGB值大小排序为条纹路面＜深色路面＜浅色路面＜大红色与浅色拼接路面。四种路面类型对应的洞外亮度$L_{20}(S)$均值所呈现的数值结果为大红色与浅色拼接路面＞条纹路面>深色路面>浅色路面，路面亮度值与RGB值的规律呈现一致。基于洞外亮度$L_{20}(S)$值对公路隧道照明设计的影响，将洞外至少1倍停车视距范围内路面面层由大红色等RGB值较大的面层颜色改为RGB值较小的深暗色，使洞外亮度$L_{20}(S)$值得以降低。

（3）对于洞门类型对洞外亮度$L_{20}(S)$值的影响，根据现场试验数据表明，削竹式洞门亮度高于端墙式洞门，各洞门类型对应的洞外亮度$L_{20}(S)$值的影响方面差异较小。当洞门为削竹式、端墙式时，墙面材料相同的条件下，洞门亮度对洞外亮度$L_{20}(S)$值的贡献值最高相差300 cd/m²。当洞门采用端墙式时，洞门面积百分比较大（相较于削竹式洞门面积百分比），端墙式洞门的正面墙壁应尽可能采用混凝土或者沥青等亮度较低的材料。

### 5.2 展 望

由于本文现场试验所选隧道样本量较少，今后可选取全国范围内的其它公路隧道增加样本量进行更加深入的研究。

其次对于隧道洞外路面及洞门类型，不应局限于本文考虑的类型，还应考虑其它多种因素对洞外亮度$L_{20}(S)$值等影响。

## 参考文献

## References

[1] 张 婷. 辐射-照度转化法确定隧道洞外景物亮度的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
ZHANG Ting. Research of Determining Typical Elements′Luminance at Tunnel Portals by Radiation-Illuminance Conversion Method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[2] Commission Internationale de L′Eclairage. Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses: CIE 088:2004[S]. 2004.

[3] Commission Internationale de L′Eclairage. Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses: CIE 088:1990[S].1990.

[4] British Standard. Code of Practice for the Design of Road Lighting—Part 2: Lighting of Tunnels: BS 5489-2[S].2008.
[5] European Committee for Standardization. Lighting Applications-Tunnel Lighting: CEN. CR14380: 2003[S].2003.
[6] 涂 耘. 公路隧道节能照明系统研究[J]. 公路交通技术, 2008(6): 117-120.
TU Yun. Research on Energy Saving Lighting System in Highway Tunnel[J]. Technology of Highway and Transport, 2008(6): 117-120.
[7] 郑琼水. 隧道入口段照明设计探讨[J]. 公路交通技术, 2007(4): 114-115+122.
ZHENG Qiongshui. Discussion on Illumination Design at Entrance of Tunnel[J]. Technology of Highway and Transport, 2007(4): 114-115+122.
[8] 罗 涛, 林若慈, 赵建平, 等. 北京地区天空亮度的观测与研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(8): 1-4+89.
LUO Tao, LIN Ruoci, ZHAO Jianping, et al. Observation and Study on Sky Luminance Distribution in Beijing[J]. Building Science, 2013, 29(8): 1-4+89.
[9] 曹言瑞, 章海骢. 隧道洞外亮度$L_{20}$值的黑度法测量和洞口装饰的讨论[J]. 光源与照明, 2003(3): 20-24.
CAO Yanrui, ZHANG Haicong. Discussion on Blackness Measurement and Hole Decoration of Luminance $L_{20}$ Value outside Tunnel Tunnel[J]. Lamps and Lighting, 2003(3): 20-24.
[10] 马 非, 陈开良, 王 乾, 等. 不同路面类型下公路隧道照明的效能分析[J]. 照明工程学报, 2018, 29(2): 106-110.
MA Fei, CHEN Kailiang, WANG Qian, et al. Lighting Efficiency Influence of Highway Tunnel Based on Different Pavement Types [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2018, 29(2): 106-110.
[11] 梁鹏昆. 公路隧道洞门形式的分类及其适用条件的研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
LIANG Pengkun. Classification of Road Tunnel Portal Forms and Their Applicable Conditions [D]. Xi′an:Chang′an University, 2012.
[12] 陈仲林, 孙春红. 公路隧道照明设计研究[J]. 灯与照明, 2007, 31(3): 32-35+52.
CHEN Zhonglin, SUN Chunhong. Research on Road Tunnel Lighting Design[J]. Light & Lighting, 2007, 31(3): 32-35+52.
[13] 屈志豪, 赵清碧, 刘相华. 用环境简图法测试隧道洞外亮度$L_{20}(S)$[J]. 公路交通技术, 2004(5): 117-121.
Qu Zhihao, ZHAO Qingbi, LIU Xianghua. Tunnel Ambient Exterior Luminance $L_{20}(S)$ Tested by Environmental Sketch Method[J]. Technology of Highway and Transport, 2004(5): 117-121.
[14] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道照明设计细则:JTGT D70/2-01-2014[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2014.
Ministry of Transport of the People′s Republic of China. Guidelines for Design of Lighting of Highway Tunnels:JTGT D70/2-01-2014 [S]. Beijing: China Communications Press, 2014.
[15] 邓 敏, 张 飞. 实测确定公路隧道洞外景物亮度的方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(3): 118-122.
DENG Min, ZHANG Fei. Method Obtaining Scenery Luminance outside Tunnel Portals with In-situ Testing[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(3): 118-122.
[16] 万明富. 辽宁省高速公路隧道洞外亮度$L_{20}(S)$研究[J]. 公路隧道, 2013(3): 27-29.
WAN Mingfu. Study on the Outer Brightness $L_{20}(S)$ of Expressway Tunnels in Liaoning Province[J]. Highway Tunnel, 2013(3): 27-29.

# Study on the Influence of Environmental Factors on the Brightness Value $L_{20}(S)$ outside Highway Tunnel

*ZHANG Xiaojian*[1] *LIANG Bo*[1,2] *ZHONG Shengming*[1,3]
(1 School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074; 2 State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074; 3 School of Civil Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160)

**Abstract** Brightness $L_{20}(S)$ outside a tunnel, as the basic parameter of lighting at entrance section of a highway tunnel, affects the lighting design of the transition section, and its value is subject to the combined action of various factors. Many factors affect the measurement of brightness outside a tunnel. This paper studies the influence of each

factor on the brightness $L_{20}(S)$ value outside the tunnel based on three factors, i.e. the sky exposure rate outside the tunnel, the form of the tunnel portal and the color of the pavement surface outside the tunnel. Through investigating highway tunnels within the main city of Chongqing, corresponding tunnels which meet the requirements are selected as the research objects. In combination with theoretical analysis and field test verification, the influence law of each index parameter on the brightness $L_{20}(S)$ outside the tunnel is obtained and the indices of brightness outside a highway tunnel are put forward based on field brightness test method. The study results show that: (1) the recommended value of the brightness $L_{20}(S)$ outside a tunnel in autumn and winter should be at least one time and above the actual measured brightness value; (2) the patterns of the values of pavement brightness are consistent with that of the RGB values; and (3) the brightness outside a tunnel with end-wall type portal is smaller than that with bamboo-truncated type portal.

**Keywords** Highway tunnel; Brightness outside the tunnel; Field test; Sky exposure rate; Pavement surface outside the tunnel; Type of the tunnel portal

（上接第51页）

# DRS-Cloud Model Based Evaluation of Construction Safety of Tunnels with High Geotemperature

*GAO Lei BAO Xueying LI Aichun*
(College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070)

**Abstract** With respect to the construction safety of tunnels with high geotemperature, this paper attempts to establish an appropriate and effective evaluation system for a comprehensive evaluation. Firstly, it uses the DSR model to establish an evaluation index system of environment driving force – measurement state – measure response; Secondly, it determines the indicator weights by using the variable weight theory; Thirdly, it obtains the numerical eigenvalues of the integrated cloud model and generates the contours through the cloud model theory, and then determines the evaluation levels by combining the calculated maximum membership degrees; Finally, it applies this evaluation method to the engineering case for verification. The results obtained from the engineering case show that its safety state is slightly worse than medium, and the indicators leading to the decrease of the safety level are screened and picked out. The results show that the indicator system developed by the DSR model is comprehensive and relevant; the variable weight theory makes the indicator weights objective and realistic; the use of the cloud model dissolves the fuzzy and random characteristics of qualitative concepts in the evaluation process and makes the evaluation results more reasonable and effective.

**Keywords** Tunnel with high geotemperature; Construction safety; DSR model; Cloud model; Variable weights