

LED光源光谱对隧道出口段明适应的影响

董丽丽, 秦歌*, 陈烱, 尚雄飞, 许文海

大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026

摘要 随着我国经济的不断发展, 高速公路隧道建设的发展也非常迅猛。前期在隧道的实际工程设计中, 为完全保证隧道车辆通行安全, 隧道内部全线灯具的输出功率和安装布置全部取决于一年四季中最大的洞外亮度值和车辆速度值。这样的设计尽管充分考虑了安全性, 但盲目的增加隧道照明亮度, 不能够缓解视觉适应的问题。随着LED在隧道照明中的应用, LED光源光谱的影响逐渐引起人们的关注。调查研究发现高速公路隧道在出口段交通事故发生率比较高, 主要原因是隧道出口段内外亮度差较大, 驾驶员在驶离时明适应时间较长。LED光源的光谱呈现双峰结构, 在长波长范围内, 光谱含量差异明显。明适应的能力主要与两个因素有关, 一是瞳孔面积的变化; 二是感光色素的光化学反应。不同色温的LED具有不同的光谱特性, 进而通过影响感光色素的合成, 来影响明适应的时间长短。现在市场上可用的隧道照明LED光源的色温可选范围比较广, 所以实验选取了市场上可用的不同色温的大功率的LED光源作为研究对象, 其色温分别是3 000, 3 500, 4 000, 4 500, 5 000, 5 700和6 500 K等7种。邀请了30名视觉功能正常, 矫正视力1.0以上, 且无色盲、色弱等其他眼疾的观察者参加了本次实验。地点选择在长9 m, 高2.8 m, 宽5 m的模拟隧道内。实验参数选取3组亮度值, 分别为4, 8和12 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$; 2个灯具安装高度分别是2.0和2.4 m; 3个安装角度分别是15°, 20°和25°。共评估了126种照明条件。实验结果表明: 隧道出口段亮度越大, 明适应时间越小; 当亮度相同时, 随着色温的增大, 明适应时间减小; 灯具安装角度和安装高度对光谱的影响很小, 改变安装高度和安装角度并不能有效的减小明适应时间。从明适应的角度出发, 通过分析不同色温LED灯的光谱, 为隧道照明设计与应用中出口段LED光源的选择提供数据和理论支撑。

关键词 LED; 光谱; 明适应机理; 明适应时间; 出口段

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)04-1044-07

引言

随着经济的快速发展, 我国高速公路隧道数量在近年来不断增加, 随之而来的安全问题越来越引起人们的关注。调查表明, 隧道出入口路段交通事故发生率较高^[1]。当驾驶员在白昼开车驶离隧道时, 由于洞内外亮度变化剧烈, 会产生“白洞效应”, 出现强烈的眩光而感到眼睛不适, 甚至可能直接闭上双眼, 从而无法看清隧道外的道路情况, 诱发交通事故。而明适应时间的长短直接决定了事故发生的可能性。杜志刚等利用眼动仪系统在26座实际隧道进行实验, 得到隧道长度与视觉明暗适应时间的定量关系, 认为暗适应时间一般不超过23 s, 明适应时间不超过13s^[2]。肖尧等针对隧道出口亮度过渡不合理的环境现状, 利用DIALUX软件仿真,

提出基于防眩原理的渐变图层设计方案来提升视觉舒适性, 降低事故发生的概率^[1]。阎莹等在13座隧道进行瞳孔面积变化的实验, 得出了瞳孔面积与环境照度的关系, 提出了隧道环境照度的推荐值^[3]。

LED作为一种新型光源, 因其环保节能的优点, 被广泛应用于各种照明场所, 在隧道照明中也得到了应用。由于传统照明光源(高压钠灯等)特性的限制, 各国以及CIE的隧道照明标准中都只对隧道各段的亮度、长度和亮度的均匀性进行了规定, 对于光源光谱的选择考虑不足^[4]。而色温作为LED光源光谱的主要特性之一, 它对于人眼视觉效果的影响是不容忽视的。美国伦斯勒理工学院照明研究中心的Rea等研究了光源光谱与人眼视亮度的关系, 发现当照度在0.2~2 Footcandle(fc)范围时, 感知亮度随着光源中蓝光(450 nm)成分的增加而变大^[5]。Bullough等研究了光源光谱特性对室

收稿日期: 2019-03-08, 修订日期: 2019-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(61701069), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132016351, 3132017077)资助

作者简介: 董丽丽, 女, 1980年生, 大连海事大学信息科学技术学院副教授 e-mail: dll_lili@163.com

* 通讯联系人 e-mail: 18137297653@163.com

外场景亮度感知的影响。选用了 2 种 LED 作为测试光源, 分别是: 由琥珀色 LED 产生的黄色光源(1 627 K)以及由红色和蓝色 LED 组合产生的紫红色光源(1 418 K)。实验结果表明: 在两种亮度水平下, 包含蓝光的紫红色光源产生的视亮度均明显高于黄色光源^[6]。鲁玉红等以 30 名视力正常的学生为研究对象, 采用剂量作业法、生理参数法和疲劳评价法研究了人体在峰值波长分别为 468, 457, 453 nm 的蓝光 LED 照明下的光生物节律效应, 认为在 3 种峰值波长蓝光中, 468 nm 的蓝光对人体光生物节律影响最大^[7]。杨勇等研究了相同背景亮度条件下不同色温 LED 对应的视认反应时间, 发现高色温白光 LED 对应的视认反应时间最短。金怀忠和金尚忠等研究了不同色温的白光 LED 对街道照明的适用性, 发现色温较低的 LED 更适合用于道路照明^[8]。饶丰等研究了不同色温 LED 照明时节律效应随年龄的变化规律, 认为在同一色温 LED 照明时, 节律效应随着年龄的增加而减小; LED 色温不同时, 青年人节律因子的变化较大, 老年人则变化较小^[9]。

综上所述, 目前对于隧道明适应的研究很少, 即使有, 也是基于瞳孔面积的变化, 对亮度的影响进行研究, 并未考虑光谱的影响。本工作模拟隧道的照明环境, 利用 7 种不同色温的大功率 LED 进行实验, 获取人眼在不同色温下的明适应时间。结合明适应的机理分析, 对隧道出口段光源的选择提供建议值。

1 LED 的特性

1.1 LED 色温

目前使用的大功率 LED 灯, 大多数是基于蓝光激发黄色荧光粉的原理制造的, 通过调节黄色荧光粉的含量来得到不同色温的 LED。市场上常见的 LED 的色温范围为 2 700~7 000 K。选取 3 000, 3 500, 4 000, 4 500, 5 000, 5 700 和 6 500 K, 7 种色温的 LED 进行实验, 如图 1 所示。以 4 500 K 色温为例, 表 1 给出了第三方测试的特性参数。



图 1 实验用 LED

Fig. 1 The LED used for experiment

表 2 给出了 7 种色温的 LED 在不同亮度下的色温值。从表 2 可以看出, 在不同亮度下, 色温值有所波动, 但波动较小。

1.2 光谱特性

使用柯美能达 CS-2000 分光辐射计测量 7 种色温的光谱

功率分布如图 2 所示。光谱功率分布描述了光在不同波长处的辐射能量。所有曲线均是在 $12 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 的亮度条件下测量, 其他亮度下, 它们之间的比例不变, 趋势相同。

表 1 LED 的特性参数

Table 1 The characteristic parameters of LED

参数	数值
1 名称	LED 隧道灯
2 型号	KY-SD-80W
3 大小	0.12 m × 0.235 m
4 额定电压	220 V
5 总通光量	12 902 lm
6 有效通光量	12 139.5 lm
7 光束角度	125.6°-H × 80.1°-V
8 照明效率	127.6 $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$
9 功率因素	0.981
10 相关色温	4 651 K
11 显色指数	83.1

表 2 不同亮度下、不同色温 LED 的相关色温测量值

Table 2 The measured correlated color temperatures of LED under different luminances

亮度/ ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	LED 色温的实际测量值/K						
	3 000	3 500	4 000	4 500	5 000	5 700	6 500
4	3 037	3 516	4 018	4 510	5 046	5 636	6 498
8	2 997	3 498	4 002	4 516	4 988	5 705	6 502
12	3 002	3 501	3 997	4 504	5 007	5 698	6 486

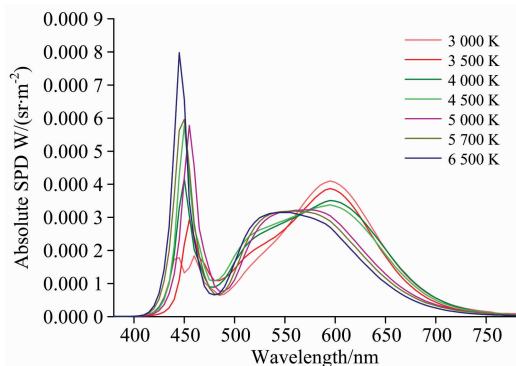


图 2 不同色温的 LED 的光谱功率分布

Fig. 2 Spectral power distribution versus correlated color temperature

从图 2 可以看出, LED 的光谱呈现双峰结构, 在长波长范围内, 光谱含量差异明显。

当驾驶员驶离隧道时, 由于隧道内外亮度差明显, 会产生明适应。明适应的能力主要与两个因素有关, 一是瞳孔面积的变化, 当驶离隧道时, 瞳孔面积会缩小, 来减少进入人眼的光量; 二是感光色素的光化学反应。

人眼视网膜上存在两种感光细胞, 分别为视锥细胞和视杆细胞^[10]。它们的视觉功效各不相同, 前者在明视觉起作用, 用来辨别颜色; 后者在暗视觉起作用, 能够分辨微弱的

光。视锥细胞中的感光色素包括感蓝色素、感红色素、感绿色素，视杆细胞中的感光色素主要是视紫红质。

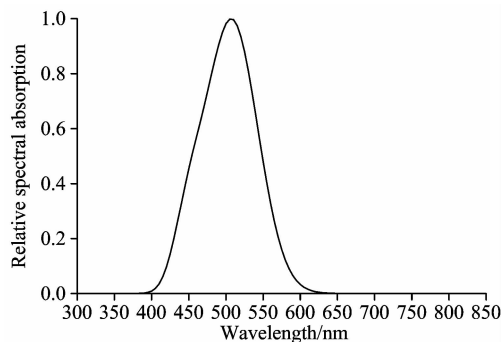


图 3 视紫红质的相对光谱吸收曲线

Fig. 3 The relative spectral absorption curve of rhodopsin

图 3 给出了视紫红质的相对光谱吸收曲线。从图 3 可以看出，视紫红质对大于 620 nm 的红光是不敏感的。所以，大于 620 nm 的红光含量越多，越有利于视紫红质的合成。

当车辆在隧道中行驶时，视杆细胞在暗处蓄积了大量的视紫红质，驶出隧道时，由于洞外光线很强，视紫红质迅速分解，会产生耀眼的光感，驾驶员出现短暂的失明。只有在较多的视紫红质迅速分解之后，对光较不敏感的视锥色素才能在亮处感光而恢复视觉。

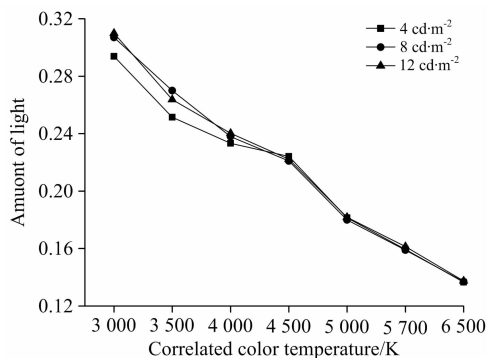


图 4 不同色温的 LED 大于 620 nm 的光的含量

Fig. 4 The amount of light with the wavelength longer than 620 nm emitted from the LED with different correlated colour temperatures

图 4 给出了实验用的不同色温的 LED，在不同亮度下，大于 620 nm 的红光的含量。

从图 4 可以看出，不同色温的 LED 的大于 620 nm 的红光含量有明显的差异，且色温越大，红光含量越少。

视紫红质的合成又与大于 620 nm 的红光的含量有关，含量越多，越有利于视紫红质的合成。而色温主要通过影响视紫红质的合成，进而影响明适应的时间长短。因此，在亮度相同时，色温越大，越不利于视紫红质的合成，明适应时间也越小。

不同色温的 LED 具有不同的光谱特性，对于明适应的影响也是不同的，因此，研究光源色温对明适应的影响很有

必要。

2 实验部分

为了研究光源光谱对明适应的影响，使用 7 种色温的 LED 作为照明光源，以人眼可识别的字母“E”为目标，将明适应时间作为评价的标准。

选取视觉功能正常、矫正视力 1.0 以上、且无色盲、色弱等其他眼部疾病的 30 人进行实验。

为了能够模拟隧道照明的真实情况，在长 9 m，高 2.8 m，宽 5 m 的模拟隧道内进行实验，如图 5 所示。



图 5 模拟隧道

Fig. 5 Simulated tunnel

实验总共 126 种情况。根据《公路隧道照明设计细则》规定的隧道出口段亮度值，选取 3 组亮度值进行实验，分别为 4, 8 和 12 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 。通过 DIALux 软件仿真，在保证均匀度和亮度的情况下，将灯具安装于 2.0 和 2.4 m 高的位置，选择 15°, 20° 和 25°, 3 种安装角度^[11]。

模拟太阳光的光源亮度为 5 000 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ，是隧道洞外亮度的典型值。

图 6 给出了不同安装角度下，色温的测量值。图 7 给出了不同安装高度下，色温的测量值。从图 6、图 7 可以看出，安装角度和高度不同时，色温差异很小。

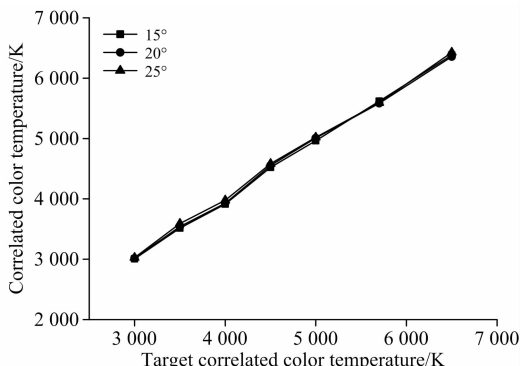


图 6 不同安装角度下，色温的测量值

Fig. 6 The color temperature measurement at different installation angles

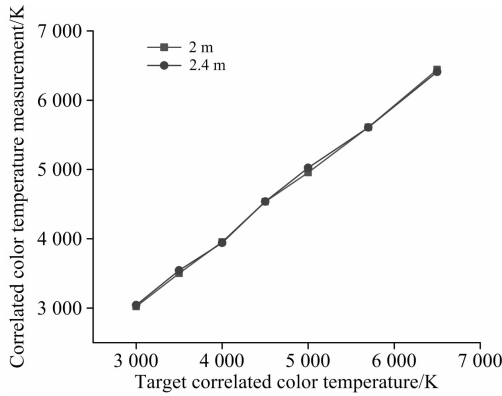


图 7 不同安装高度下, 色温的测量值

Fig. 7 The color temperature measurement at different installation heights

如图 8 所示, 是实验装置的示意图。它由模拟太阳光源、不同色温的实验 LED、调光控制器、目标 E、计时器和手机组成。

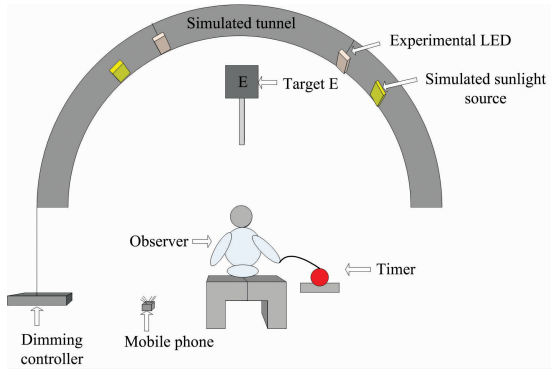


图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental set-up

使用色温为 6 700 K 的 LED 模拟太阳光源, 亮度可达 $10\ 000\ \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$, 它的光谱与太阳光谱不同, 但亮度足够大, 就目前的光源而言, 还没有亮度和光谱都接近太阳光的; 实验 LED 包括 7 种色温, 两个 1 组, 共 14 个 LED, 每次更换不同色温的 LED 时, 保证其位置不变; 调光控制器用于调节不同的亮度以满足实验要求; 目标 E 距离观察者 2 m, 高 1.5 m, 尺寸是正常人眼可识别的大小; 计时器用来测量明适应时间, 精度可以达到 1 ms; 手机播放背景噪声, 用来模拟车辆进入隧道时的实际情况。

图 9 为实验场景, 实验整个过程在暗室中进行, 避免外部杂光的干扰^[12]。

在开始实验之前, 每个被测试者坐在指定的位置进行 2 min 的光适应, 并被告知相关的实验操作方法, 打开手机播放背景噪声。

在充分光适应后, 关闭实验 LED, 打开模拟太阳光光源, 与此同时, 被测试者按下手中的计时器开始计时。当能够正确识别随机出现目标 E 的方向时, 按下计时器停止计时, 研究人员记录明适应时间。

最后变换灯具的安装角度和高度。当一组色温的实验 LED 做完后, 更换其他色温的实验 LED 进行实验。30 名被测试者按照同样的步骤依次进行实验。



图 9 实验场景

Fig. 9 Experimental situation

3 结果与讨论

实验得到了 7 种色温, 3 种亮度、2 个高度、3 个角度条件下, 30 名被测试者的实验数据。去除异常数据后求平均, 结果如图 10 所示。

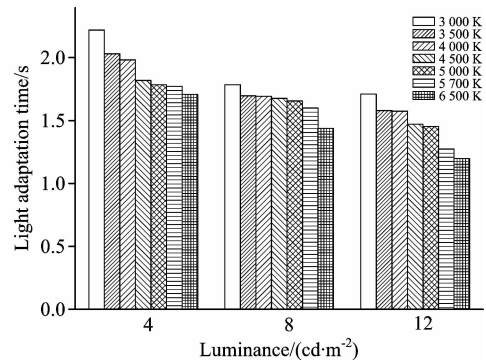


图 10 不同色温的明适应时间

Fig. 10 Light adaptation times under different color temperatures

从图 10 中可以看出, 随着亮度的增大, 明适应时间减小。在亮度相同时, 色温越大, 明适应时间越小, 实验结果与理论分析相符。

利用数据统计分析软件对表 3 中的明适应时间数据进行皮尔森(Pearson)相关性检验, 结果如表 3 所示。从表 3 可以看出, 明适应时间与光源亮度的相关系数为 -0.766 , 相应的显著性(双侧)值为 0。这表明明适应时间对光源亮度在 99% 的水平上是有显著影响的, 且因为相关系数小于 0, 所以光源亮度与反应时间之间存在负相关关系。明适应时间与光源色温的相关系数为 -0.593 , 相应的显著性(双侧)值为 0.005。这表明明适应时间对光源亮度在 99% 的水平上是有显著影响的, 且因为相关系数小于 0, 所以光源色温与明适应时间之间存在负相关关系。

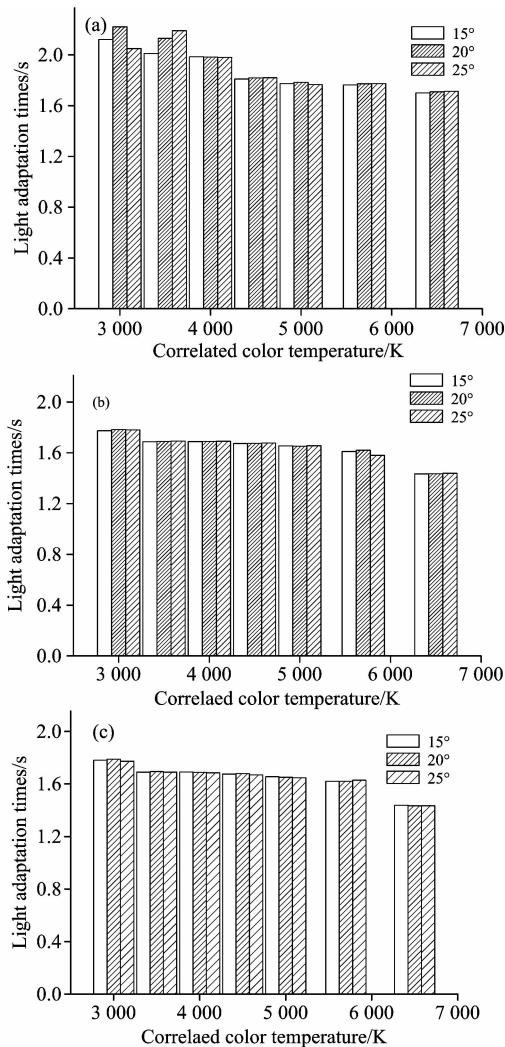
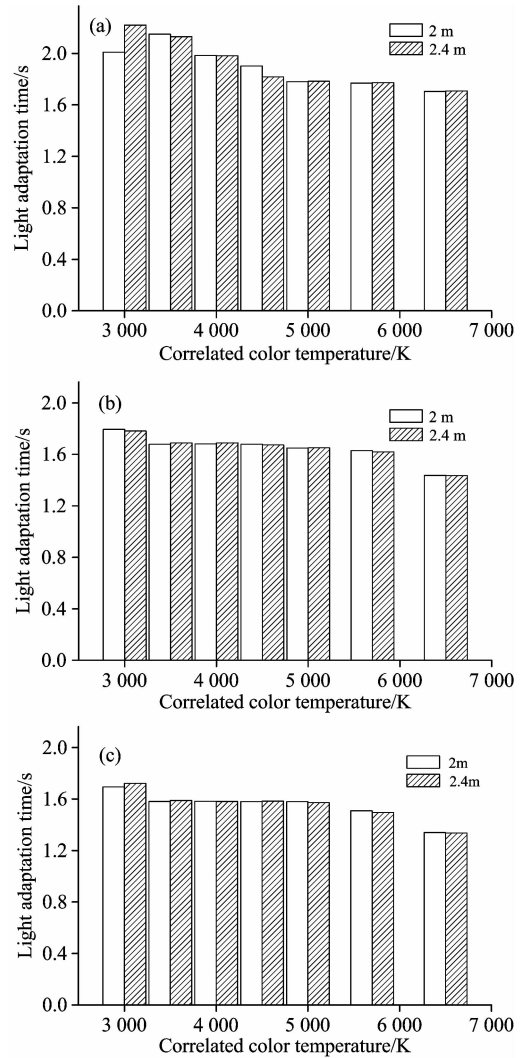
图 11 是不同安装角度时的明适应时间。从图 11 可以看出, 角度的改变对明适应的影响可以忽略。

表 3 光源色温与反应时间之间的相关性统计分析

Table 3 The correlation analysis of CCT and light adaptation time of light source

		明适应时间
光源亮度	Pearson 相关性	-0.766**
	显著性(双侧)	0.00
	N	21
光源色温	Pearson 相关性	-0.593**
	显著性(双侧)	0.005
	N	21

** Significant at 0.01 level

图 11 不同安装角度时的明适应时间
Fig. 11 The light adaptation times at different installation angles图 12 不同安装高度时的明适应时间
Fig. 12 The light adaptation times at different installation heights

4 结 论

结合理论分析与实验,研究了不同 LED 光源光谱对隧道出口段明适应的影响。从明适应机理的角度出发,测量了 30 名被测试者在 7 种色温、3 个隧道出口段亮度、3 种安装角度和 2 种安装高度条件下的明适应时间。根据实验结果与数据分析可知,隧道出口段亮度越大,明适应时间越小;在亮度相同时,明适应时间随着色温的增大而减小;不同灯具安装角度和安装高度下的明适应时间差异很小,改变安装角度和高度,并不能有效减小明适应的影响。

从明适应的角度出发,分析了不同色温 LED 灯的光谱的影响,为隧道照明设计与应用中出口段 LED 光源的选择提供数据和理论支撑。

图 12 是不同安装高度时的明适应时间。从图 12 可以看出,高度的改变对明适应的影响也是很小的。

References

- [1] XIAO Yao, DU Zhi-gang, TAO Peng-peng, et al(肖尧, 杜志刚, 陶鹏鹏, 等). Journal of Wuhan University of Technology(武汉理工大学学报), 2015, (3): 573.
- [2] DU Zhi-gang, HUANG Fa-ming, YAN Xin-ping, et al(杜志刚, 黄发明, 严新平, 等). Journal of Highway and Transportation Research and Development(公路交通科技), 2013, 30(5): 98.
- [3] YAN Ying, YE Fei, WANG Xiao-fei, et al(阎莹, 叶飞, 王晓飞, 等). Journal of South China University of Technology • Natural Science Edition(华南理工大学学报), 2016, 44(12): 89.
- [4] DENG Min, DAI Yan-ming(邓敏, 代言明). Journal of Chongqing University(重庆大学学报), 2016, 39(2): 140.
- [5] Rea M S, Radetsky L C, Bullough J D. Lighting Research and Technology, 2011, 43(1): 7.
- [6] Bullough J D, Radetsky L C, Besenecker U C, et al. Leukos the Journal of the Illuminating Engineering Society of North America, 2014, 10(1): 3.
- [7] LU Yu-hong, WANG Yu-rong, JIN Shang-zhong, et al(鲁玉红, 王毓蓉, 金尚忠, 等). Chinese Journal of Luminescence(发光学报), 2013, 34(8): 1061.
- [8] Jin H, Jin S, Chen L, et al. IEEE Photo. J., 2015, 7(6): Art No. 1601309.
- [9] RAO Feng, XU An-cheng, ZHU Xi-fang(饶丰, 徐安成, 朱锡芳). Chinese Journal of Luminescence(发光学报), 2016, 37(2): 250.
- [10] RAO Feng, ZHU Xi-fang, XU An-cheng, et al(饶丰, 朱锡芳, 徐安成, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2015, 44(4): 199.
- [11] Shi N, Dong L L, Qin L. Study on Lamp-Layout Scheme of Highway Tunnel Lighting Based on DIALux, International Conference on Energy and Environmental Protection, 2016.
- [12] Dong Lili, Qin Li, Xu Weihai, et al. IEEE Photo. J., 2017, 9(6): Art No. 8201616.

Impact of the Spectra of LED Sources on the Light Adaptation in Tunnel Exit

DONG Li-li, QIN Ge*, CHEN Yang, SHANG Xiong-fei, XU Wen-hai

Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract With the development of China's economy, the development of highway tunnel construction is also rapidly. In the early stage of engineering design to ensure the safety of traffic in the tunnel, the power and location of the tunnel lighting sources all depend on the maximum outside luminance value and vehicle speed value through out the year. Although such a design considers safety, but it blindly increases the luminance of the tunnel illumination and it can not alleviate the problem of visual adaptation. However, with the application of LED in tunnels, the impact of LED sources spectra gradually attracted people's attention. Moreover, the investigation found that the traffic accident rate of the highway tunnel in the exit section is relatively high. The main reason is that the luminance difference between the inside and outside of the tunnel is large, and the light adaptation time is long when the driver leavesthe tunnel exit. In order to study the impact of LED sources spectra on the light adaptation in tunnel exit, and to provide a basis for the selection of light source in tunnel exit, the LED source was characterized by a wide spectrum double-peak pattern. In the long wavelength range, the spectral content is different. The light adaptation is mainly related to two factors: the change of pupil area and photochemical reaction of the photopigment. LED light sources with different color temperatures have different spectral characteristics. The spectrum affects the time of light adaptation by affecting the synthesis of photopigment. The experiment selected 7 color temperature LED light sources used in the field of highway tunnel. The color temperatures are: 3 000, 3 500, 4 000, 4 500, 5 000, 5 700 and 6 500 K. Thirty observers were chosen for the experiment. All observers had normal visual corrected visual acuity. None of the observers had night blindness, color blindness or other diseases affecting night vision functions. The experiment was carried out in a simulated tunnel with a height of 2.8 m, length of 9 m and width of 5 m. Three photopic luminance levels for the experimental LEDs ($4, 8$ and $12 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$), three illumination angles ($15^\circ, 20^\circ$ and 25°) and two mounting heights (2.0, 2.4 m) were applied. In total, 126 lighting conditions were evaluated in the experiment. The results show that the higher luminance of the tunnel exit section, the shorter light adaptation times. When the luminance is the same, as the correlated color temperature increases, the light adaptation times decrease. The installation angle and height of the lamps have little effect on the sources spectra. Changing the installation height and angle can not effectively reduce the light adaptation time. This paper provides data and theoretical support for the selection of the color temperature in the

exit section by analyzing the spectrum of LED sources with different color temperatures.

Keywords LED; Spectrum; Light adaptation mechanism; Light adaptation times; Exit section

* Corresponding author

(Received Mar. 8, 2019; accepted Jul. 19, 2019)

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告

《光谱学与光谱分析》2020年征订启事

国内邮发代码: 82-68

国外发行代码: M905

《光谱学与光谱分析》1981年创刊,国内统一刊号:CN 11-2200/O4,国际标准刊号:ISSN 1000-0593,CODEN码:GYGFED,国内外公开发行人,大16开本,332页,月刊;是中国科协主管,中国光学学会主办,钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的学术性刊物。北京大学出版社出版,每期售价95元,全年1140元。刊登主要内容:激光光谱测量、红外、拉曼、紫外、可见光谱、发射光谱、吸收光谱、X射线荧光光谱、激光显微光谱、光谱化学分析、国内外光谱化学分析领域内的最新研究成果、开创性研究论文、学科发展前沿和最新进展、综合评述、研究简报、问题讨论、书刊评述。

《光谱学与光谱分析》适用于冶金、地质、机械、环境保护、国防、天文、医药、农林、化学化工、商检等各领域的科学研究单位、高等院校、制造厂家、从事光谱学与光谱分析的研究人员、高校有关专业的师生、管理干部。

《光谱学与光谱分析》为我国首批自然科学核心期刊,中国科协优秀科技期刊,中国科协择优支持基础性、高科技学术期刊,中国科技论文统计源刊,“中国科学引文数据库”,“中国物理文摘”,“中国学术期刊文摘”,同时被国内外的CJCR,CNKI,CSCD,SCI,AA,CA,Ei,AJ,PJ,MEDLINE,Scopus等文献机构收录。根据中国科学技术信息研究所发布信息,中国科技期刊物理类影响因子、引文量及综合评价总分《光谱学与光谱分析》都居前几位。欢迎国内外厂商在《光谱学与光谱分析》发布广告(广告经营许可证:京海市监广登字20170260号)。

《光谱学与光谱分析》的主编为高松院士。

欢迎新老客户到全国各地邮局订阅,若有漏订者可直接与《光谱学与光谱分析》期刊社联系。

联系地址:北京市海淀区学院南路76号(南院),

《光谱学与光谱分析》期刊社

邮政编码:100081

联系电话:010-62181070,62182998

电子信箱:chnghxygpfx@vip.sina.com

修改稿专用邮箱:gp2008@vip.sina.com

网 址: <http://www.gpxygpfx.com>

