

文章编号:1000-582X(2010)08-085-06

道路照明条件下驾驶员瞳孔大小变化规律

胡英奎^{a,b}, 翁季^b, 李毅^b, 陈仲林^b, 张青文^b
(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 建筑城规学院, 重庆 400045)

摘要:为了研究道路照明条件下驾驶员瞳孔大小随亮度水平的变化规律,采用道路照明反应时间测试装置和 iView X 眼动仪,对 4 位被测者在分别由高压钠灯(HPS)、金卤灯(MH)和 LED 灯作为光源提供的 13 种背景亮度下的瞳孔面积进行测量。结果表明,在道路照明条件下,人眼瞳孔与背景亮度之间基本呈负指数关系,人眼瞳孔面积随背景亮度的变大而减小,且减小的速度随背景亮度的变大而减小,瞳孔大小在达到某背景亮度水平后逐渐趋于稳定;对于实验所用的 3 种光源,人眼瞳孔大小在背景亮度为 $0.7\sim 1.2\text{ cd/m}^2$ 的范围内会出现波动。

关键词:道路照明;中间视觉;瞳孔大小;亮度;照明节能

中图分类号: TU113.6;U491.5

文献标志码: A

The change rule of driver's pupil size under road lighting conditions

HU Ying-kui^{a,b}, WENG Ji^b, LI Yi^b, CHEN Zhong-lin^b, ZHANG Qing-wen^b

(a. College of Civil Engineering; b. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In order to study the rule of drivers' pupil changing with luminance under road lighting condition, pupil area of 4 subjects under 13 lighting levels of high pressure sodium(HPS), metal halide (MH) and LED are measured, with reaction time test equipment for road lighting and iView X eye tracking system. The results indicate that the relationship between pupil area and background luminance is negative exponential function, pupil will shrink while luminance is increased, the shrink velocity of pupil will decrease while luminance's increasing, and pupil area will tends to be constant when luminance reach some level. Under the three lighting sources used in the experiment, pupil area will fluctuate while the background luminance is between 0.7 cd/m^2 and 1.2 cd/m^2 .

Key words: road lighting; mesopic visual; pupil size; luminance; energy saving of lighting

良好的道路固定照明能使驾驶员产生较好的视觉功效,从而有效减少交通事故的发生。研究表明^[1],在其它条件一定的情况下,人眼的视觉功效是由瞳孔大小决定的:瞳孔收缩能提高视觉功效;反之,瞳孔放大会降低视觉功效。瞳孔的大小变化影响视觉功效,从而影响交通安全。因此,研究驾驶员

瞳孔大小在道路照明条件下的变化规律对于保证道路交通安全有着重要意义。

人眼瞳孔大小不但受人本身生理、心理因素的影响,还受照明等外部环境因素的影响。不同的研究者已针对不同的应用对影响人眼瞳孔大小因素进行了研究。李勇等研究了阅读过程中疲劳、心理负

收稿日期:2010-03-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50908240,50878217)

作者简介:胡英奎(1978-),男,重庆大学博士研究生,主要从事中间视觉理论及交通照明研究,
(E-mail)hyk@cqu.edu.cn。

荷对瞳孔大小的影响^[2];黄平研究了个体自我认识水平对瞳孔直径变化的影响^[3];练平等研究了正常人瞳孔及瞳孔对光反射的特征^[4];Cheng等在4、0.4、0.04 lx 3种照度水平下测试了20位眼科病人的瞳孔^[5],结果表明,瞳孔大小与环境照度水平高度相关;Elisa Colombo等研究了在0.5 cd/m²的背景亮度下人眼瞳孔在突然出现的眩光作用下的变化过程^[6];Daniela Iacoviello采用人工神经网络分析了人眼受到光刺激后瞳孔的变化过程^[7];Sofie Moresi等研究了在手指可能受到伤害的反应准备过程中的瞳孔的放大过程^[8];Shigekazu Higuchi等研究了在光照下人眼瞳孔大小与褪黑激素抑制作用关系的个体差异^[9]。上述研究主要集中在人的心理或生理因素对瞳孔大小或瞳孔变化规律的影响,而对照明条件等外部因素对瞳孔大小的影响研究较少。郭雪斌^[10]、潘晓东^[11]等基于视觉负荷引起的瞳孔变化对隧道入口段照明进行了研究,但从瞳孔变化的角度进行道路照明的研究还未见报道。

为了在保证夜间行车安全的前提下实现道路照明节能,采用高压钠灯(HPS)、金卤灯(MH)和LED灯3种常用道路照明光源作为背景光源,利用道路照明反应时间测试装置^[12]和iView X眼动仪测量了4位视觉正常的被测者在13种背景亮度水平下的瞳孔面积,研究了驾驶员瞳孔大小随照明水平的变化规律,并为道路照明设计提出了建议。

1 瞳孔面积的测量

瞳孔面积的测量利用道路照明反应时间测试装置配合iView X眼动仪完成。测试的背景光分别由HPS、MH和LED提供,3种光源的基本参数见表1。

表1 3种背景光源的基本参数

光源类型	功率/W	相关色温/K	峰值波长/nm
HPS	250	1988	595
MH	250	4796	535
LED	30	7240	455

考虑中国^[13]、美国^[14]、日本^[15]等国际主流道路照明标准及CIE(国际照明委员会)推荐标准中对道路照明水平的规定值,为了便于统计瞳孔大小的变化规律,实验过程中背景亮度取0.10、0.30、0.50、0.70、0.80、1.00、1.20、1.50、1.80、2.00、2.50、3.00、3.50 cd/m²共13种亮度水平。考虑到人眼亮适应的时间比暗适应的时间短,在测试过程中,背景亮度从低向高变化。

4位被测者(分别记为ZSP、ZD、ZJC、JX)均为男性,年龄都在24~30岁,都拥有正常的色觉和校正视力,在测试之前都经过了若干轮的测试训练,都熟悉测试过程和设备的操作方法。

测试过程中,被测者头戴眼动仪头盔,注视测试装置观测箱中的十字标记,瞳孔面积由眼动仪记录并保存在计算机中。每位被测者在每个背景亮度下至少记录20段瞳孔数据,每段数据的时长都在250 ms以上,iView X眼动仪每20 ms采集1次瞳孔面积的数据,即每位被测者在每个背景亮度下至少被采集260个瞳孔大小的数据。在进行数据处理时,删除由于眨眼等原因造成的瞳孔面积异常数据,对每位被测者在每个背景亮度下的所有瞳孔面积有效数据取平均值,即得到该测试者在该背景亮度下的瞳孔面积数据。4位被测者在3种光源提供的13种背景亮度下的瞳孔面积见表2。

表2 被测者的瞳孔面积

mm²

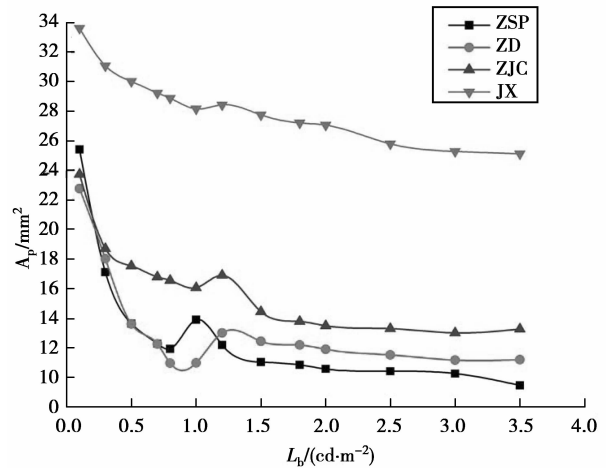
背景亮度 L_b / ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	HPS下的瞳孔面积				MH下的瞳孔面积				LED下的瞳孔面积			
	ZSP	ZD	ZJC	JX	ZSP	ZD	ZJC	JX	ZSP	ZD	ZJC	JX
0.10	14.60	21.53	22.29	37.36	20.12	18.94	24.54	29.58	25.40	22.75	23.71	33.60
0.30	11.63	20.04	21.61	35.30	11.66	17.70	23.42	27.92	17.13	18.04	18.72	31.06
0.50	10.87	16.00	20.83	33.07	9.94	13.76	23.11	25.95	13.65	13.62	17.56	30.01
0.70	11.07	15.03	20.40	31.98	11.09	13.00	22.41	25.21	12.30	12.28	16.81	29.23
0.80	11.38	13.96	20.30	32.77	12.22	12.76	21.73	24.94	11.95	10.98	16.58	28.87
1.00	10.67	14.21	20.29	28.38	7.70	12.77	22.35	25.48	13.91	10.99	16.08	28.14
1.20	9.69	13.66	19.70	27.21	7.88	12.18	20.88	25.05	12.21	13.03	16.92	28.42
1.50	9.34	12.87	19.23	26.82	8.63	11.00	20.78	24.81	11.06	12.45	14.46	27.74

续表

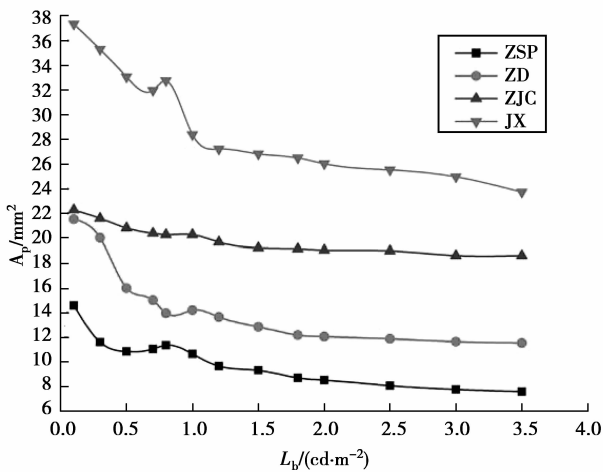
1.80	8.72	12.21	19.16	26.49	8.35	9.90	19.49	24.31	10.86	12.21	13.80	27.20
2.00	8.54	12.07	19.06	26.02	7.76	9.20	18.61	23.94	10.58	11.92	13.51	27.04
2.50	8.09	11.90	19.00	25.52	8.44	9.18	17.75	23.96	10.42	11.54	13.32	25.77
3.00	7.78	11.66	18.62	24.96	6.49	9.17	17.33	23.47	10.26	11.19	13.02	25.27
3.50	7.60	11.55	18.62	23.72	7.30	9.15	17.09	23.42	9.46	11.22	13.29	25.10

2 瞳孔大小与背景亮度的关系

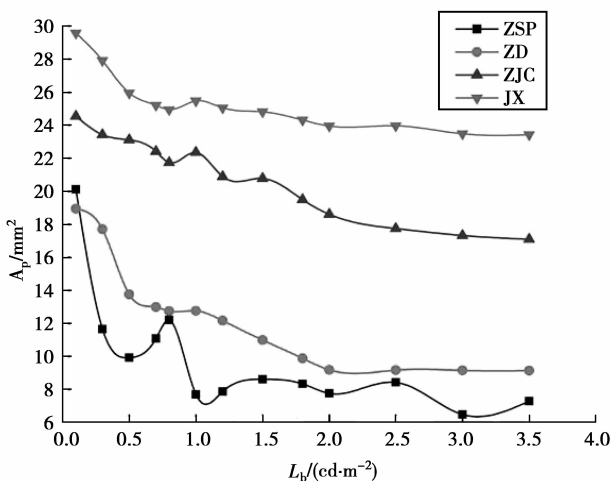
图 1 为 4 位被测者在 HPS、MH 和 LED 光源下的瞳孔面积与背景亮度的关系曲线。从图 1 可以看出,在相同的光源下,不同的被测者在相同的背景亮度下瞳孔面积并不相同,有时甚至相差巨大。如在 MH 提供的 3.50 cd/m² 的照明条件下,被测者 ZSP 的瞳孔面积为 7.30 mm²,而 JX 的面积则达 23.42 mm²,为 ZSP 的 3.2 倍。由此可见,个体差异对瞳孔大小的影响巨大。



(c) 被测者在 LED 下的瞳孔面积



(a) 被测者在 HPS 下的瞳孔面积



(b) 被测者在 MH 下的瞳孔面积

图 1 4 位被测者在 3 种光源下的瞳孔面积与背景亮度的关系

虽然瞳孔大小的个体差异较大,但总体上来看,4 位被测者的瞳孔面积在 3 种光源下基本上都是随背景亮度的增加而变小,即瞳孔随着背景亮度的升高而缩小,且瞳孔随着背景亮度的升高而缩小的速度逐渐减小。如,在 HPS 提供的背景亮度从 0.1 cd/m² 升高到 1.2 cd/m² 的过程中,4 位被测者 ZSP、ZD、ZJC 和 JX 的瞳孔面积分别减小了 33.62%、36.55%、11.60% 和 27.17%,而在背景亮度从 1.2 cd/m² 升高到 3.5 cd/m² 的过程中,4 位被测者的瞳孔面积则分别减小了 21.54%、15.45%、5.51% 和 12.83%;在 MH 提供的背景亮度从 0.1 cd/m² 升高到 1.5 cd/m² 的过程中,4 位被测者的瞳孔面积分别减小了 57.11%、41.92%、15.32% 和 16.13%,而在背景亮度从 1.5 cd/m² 升高到 3.5 cd/m² 的过程中,4 位被测者的瞳孔面积则分别减小了 15.41%、16.82%、17.76% 和 5.60%;在 LED 提供的背景亮度从 0.1 cd/m² 升高到 1.5 cd/m² 的过程中,4 位被测者的瞳孔面积分别减小了 56.46%、45.27%、39.01% 和 17.44%,而在背景亮度从 1.5 cd/m² 升高到 3.5 cd/m² 的过程中,4 位被测者的瞳孔面积则分别减小了 14.47%、

9.88%、8.09%和 9.52%。这说明,当背景亮度升高到一定的水平后,瞳孔随着背景亮度的升高而缩小的速度逐渐减小,瞳孔大小逐渐趋于稳定,即背景亮度达到一定的水平后,背景亮度的改变对瞳孔大小的影响逐渐减小。

从图 1 还可以看出,虽然被测者瞳孔大小变化的总体趋势是随着背景亮度的升高而变小,但在变化的过程中,还存在瞳孔大小的波动情况。如,在 HPS 作为背景光源的情况下,在背景亮度从 0.7 cd/m^2 增加到 1.0 cd/m^2 的过程中,除 ZJC 以外的其余 3 位被测者都出现了瞳孔扩大后再缩小的变化过程;在 MH 作为背景光源的情况下,在背景亮度从 0.7 cd/m^2 增加到 1.2 cd/m^2 的过程中,4 位被测者都出现了瞳孔扩大后再缩小的变化过程;在 LED 作为光源的情况下,背景亮度在 1.2 cd/m^2 左右,4 位被测者也都出现了瞳孔扩大后再缩小的变化过程。这说明对于实验用的这 3 种光源而言,在 $0.7 \sim 1.2 \text{ cd/m}^2$ 的亮度范围内,瞳孔大小的变化会出现波动,只是即使在同一种背景光源下,不同被测者瞳孔出现波动的亮度也会有所差异;且同一被测者在不同的光源下出现波动点的背景亮度也有所不同,从实验用的这 3 种光源来看,随着光源中短波成分的增多,同一被测者出现波动点的背景亮度逐渐升高。在此亮度范围内,被测者的瞳孔大小的变化出现波动的原因还需要进一步的研究。

从瞳孔面积随背景亮度变化的曲线来看,除瞳孔变化过程中出现的波动外,瞳孔面积与背景亮度之间大致呈负指数变化关系。即:

$$A_p = a + b e^{-\frac{L_b}{c}}, \quad (1)$$

式中, A_p 为瞳孔面积, mm^2 ; L_b 为背景亮度, cd/m^2 ; a 、 b 、 c 为系数。

用式(1)拟合瞳孔面积与背景亮度之间的关系,拟合结果见表 3,表中 R^2 为复相关系数, SE 为标准误差。

表 3 被测者瞳孔面积与背景亮度关系拟合结果

光源	被测者	拟合结果				
		a	b	c	R^2	SE
HPS	ZSP	7.39	6.88	1.12	0.927 5	0.581 7
	ZD	11.71	12.10	0.57	0.973 9	0.561 8
	ZJC	18.54	4.13	0.95	0.987 5	0.141 0
	JX	23.66	15.47	1.03	0.964 3	0.903 8

续表

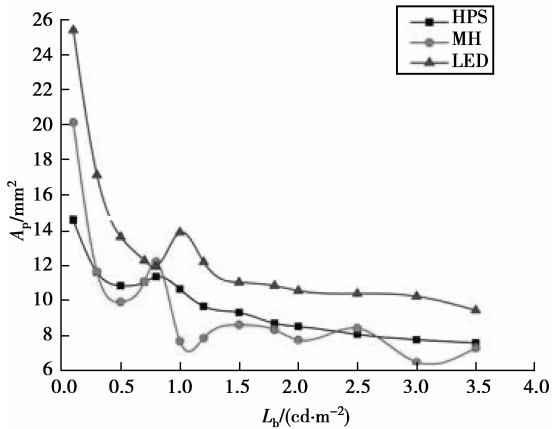
MH	ZSP	8.08	16.23	0.28	0.850 5	1.508 9
	ZD	8.91	11.49	0.78	0.963 3	0.671 3
	ZJC	13.00	11.87	3.02	0.974 9	0.430 1
	JX	25.06	8.49	1.11	0.960 9	0.518 7
LED	ZSP	10.88	20.65	0.27	0.949 5	1.042 6
	ZD	11.60	17.07	0.25	0.945 2	0.873 8
	ZJC	13.29	10.84	0.66	0.925 6	0.896 4
	JX	25.06	8.49	1.11	0.960 9	0.518 7

从上述拟合结果来看,除被测者 ZSP 在 MH 下的瞳孔面积数据用式(1)拟合得到的复相关系数 R^2 小于 0.9 外,其余数据用式(1)拟合得到的 R^2 都在 0.9 以上。从图 1(b)可以看出,在 0.7 cd/m^2 和 0.8 cd/m^2 的背景亮度下,ZSP 在 MH 下的瞳孔面积的波动非常明显,若不考虑这 2 组数据用式(1)对 ZSP 在 MH 下的瞳孔面积数据进行拟合,得到的参数 a 、 b 、 c 的值分别为:7.83、20.71 和 0.19,复相关系数 R^2 和标准误差 SE 分别为:0.972 2 和 0.705 9。这说明,除个别异常变化点外,ZSP 在 MH 下的瞳孔面积与背景亮度之间的关系仍然符合负指数关系。若将 $0.7 \sim 1.2 \text{ cd/m}^2$ 背景亮度范围内出现的瞳孔大小波动的数据删除,再用式(1)进行拟合,则拟合效果会更好。因此,若不考虑人眼瞳孔大小在 $0.7 \sim 1.2 \text{ cd/m}^2$ 的背景亮度下出现的波动,瞳孔大小与背景亮度之间存在负指数函数关系;而即使考虑该背景亮度范围内的测试数据,除个别情况外,该函数关系也基本成立。

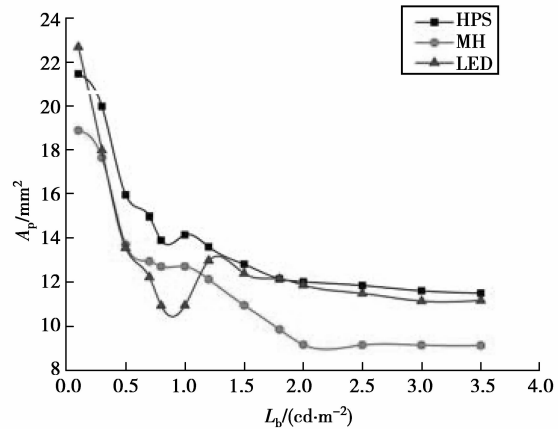
4 位被测者在实验所用的 3 种照明光源下瞳孔面积与背景亮度之间的关系曲线见图 2。从图 2 可以看出,同一被测者的瞳孔面积在不同照明光源提供的相同背景亮度下也不相同。这说明不同光源对测试者瞳孔大小的影响效果并不相同。如,在测试的亮度范围内,ZSP 的瞳孔在 LED 下比在 HPS 下大,而在 MH 下的瞳孔变化存在波动,该波动的产生可能是由于实验误差或被测者的心理因素造成的,在除 0.8 cd/m^2 以外的所有背景亮度下,在 MH 下的瞳孔都小于在 LED 下的瞳孔;ZD 在 HPS 下的瞳孔面积大于在 MH 下的瞳孔面积,除个别背景亮度外,在 HPS 下的瞳孔面积都大于在 LED 下的瞳孔面积;ZJC 在 MH 下的瞳孔面积大于在 LED 下的瞳孔面积,在小于大约 1.8 cd/m^2 的背景亮度下,在 MH 下的瞳孔面积大于在 HPS 下的瞳孔面积,在大

于大约 1.8 cd/m^2 的背景亮度下,在 MH 下的瞳孔面积反而小于在 HPS 下的瞳孔面积;JX 在 LED 下的瞳孔面积大于在 MH 下的瞳孔面积,在 HPS 下的瞳孔面积也大于在 MH 下的瞳孔面积。这说明,不同光源对不同的人会产生不同的视觉效果。如,

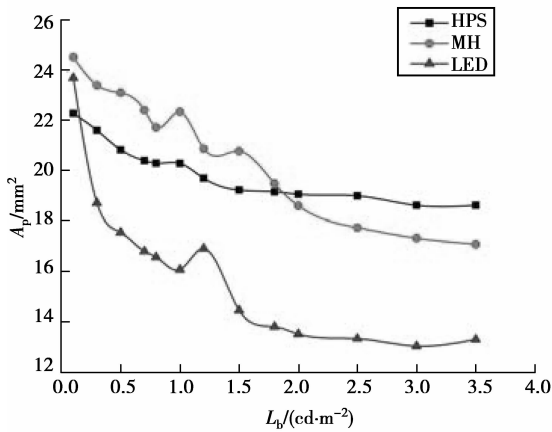
与其它 2 种光源相比,在相同的背景亮度下,ZJC 在 LED 下的瞳孔最小,而 ZSP 在 LED 下的瞳孔却是最大;JX 在 MH 下的瞳孔最小,而在背景亮度小于大约 1.8 cd/m^2 时 ZJC 的瞳孔最大。



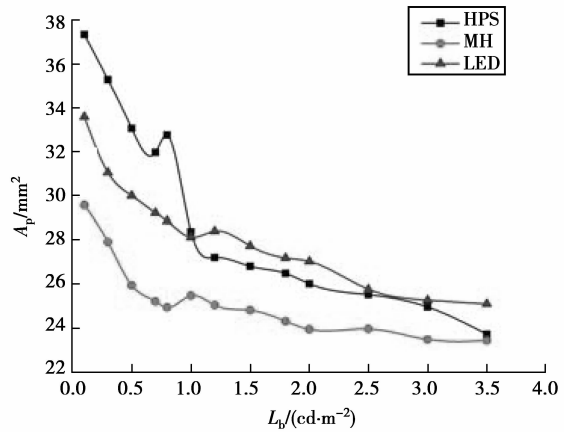
(a) ZSP 的瞳孔面积随背景亮度变化的曲线



(b) ZD 的瞳孔面积随背景亮度变化的曲线



(c) ZJC 的瞳孔面积随背景亮度变化的曲线



(d) JX 的瞳孔面积随背景亮度变化的曲线

图 2 4 位被测者在 3 种光源下的瞳孔大小

3 利用瞳孔大小变化规律确定道路照明亮度

从图 1 和图 2 可以看出,在道路照明的亮度水平下,随着背景亮度的增加人眼瞳孔缩小。这与以往的研究结果是一致的,也从人眼生理机能的角度证明了提高道路照明水平,有利于提高驾驶员的视觉功效,从而有利于保证夜间行车安全。但在 0.1 cd/m^2 到 3.5 cd/m^2 的亮度范围内,在低亮度条件下,瞳孔面积变化较快;在高亮度条件下,瞳孔面积变化较慢。这说明,当背景亮度达到一定的水平

(对于实验用的这 3 种光源,该亮度大约为 $1.2 \sim 1.5 \text{ cd/m}^2$)后,亮度的提高对瞳孔收缩产生的影响就不明显了,因此,道路照明的亮度达到此水平后,再提高其亮度,对行车安全的影响就不显著了,而道路照明亮度的提高却需要消耗大量的电能^[16]。以实验用的 3 种光源作为道路照明光源时,若以人眼瞳孔面积的变化作为评价指标,综合考虑交通安全和照明节能,道路照明的亮度宜取 $1.2 \sim 1.5 \text{ cd/m}^2$,亮度低于 1.2 cd/m^2 时可能会影响行车安全;高于 1.5 cd/m^2 则不利于照明节能。

从实验所用的这 3 种光源来看,人眼瞳孔在背景亮度大约为 $0.7 \sim 1.2 \text{ cd/m}^2$ 的范围内会出现波

动,即在该亮度范围内的某高亮度下的瞳孔可能会大于低亮度下的瞳孔而不利于行车安全,因此道路照明的亮度水平应尽量避免出现在该亮度范围内,特别是应避免采用该范围内瞳孔面积最大值所对应的亮度水平。但由于人眼瞳孔大小在此亮度范围内出现波动的原因目前还不明确,且同一个人在不同的光源下出现波动的亮度水平不同,不同的人在同一种光源下出现波动的亮度水平也不完全相同,因此要确定每种光源下出现该现象的背景亮度还需要进行更深入的研究。

不同光源对不同人的瞳孔会产生不同的影响效果。相对于其它光源,某种光源可能会使一些人瞳孔收缩,而使另外一些人瞳孔放大,从现有的实验结果还无法找出其中的规律性。因此,目前还无法从瞳孔大小的变化规律确定道路照明的适用光源。道路照明光源的选择仍然应该从光源的发光效率、寿命、显色性、经济性以及对驾驶员的反应时间的影响等因素考虑。

4 结 论

通过对4位被测者在3种道路照明常用光源提供的13种背景亮度下的瞳孔面积的测量分析,可以得到如下结论:

1)在道路照明条件下,人眼瞳孔面积随背景亮度的变大而减小,且减小的速度随背景亮度的变大而减小,瞳孔大小在达到某背景亮度水平后逐渐趋于稳定。对于实验所用的这3种光源,该亮度大约为 $1.2\sim 1.5\text{ cd/m}^2$,道路照明的亮度宜在该亮度范围内选取。

2)在道路照明条件下,人眼瞳孔与背景亮度之间基本呈负指数关系,不同的人在不同的光源下,该关系式的参数有所不同。

3)对于实验所用的3种光源,人眼瞳孔大小在背景亮度为 $0.7\sim 1.2\text{ cd/m}^2$ 的范围内会出现波动。在此过程中,瞳孔的放大对行车安全不利,在进行道路照明设计时,应尽量避免使路面亮度出现在该亮度范围内。

4)人眼瞳孔在背景亮度为 $0.7\sim 1.2\text{ cd/m}^2$ 的范围内出现波动的原因还需进行进一步的研究。

参考文献:

[1] 陈仲林,胡英奎,翁季. 用司辰视觉研究道路照明安全[J]. 照明工程学报, 2007, 18(1): 31-34.
CHEN ZHONG-LIN, HU YING-KUI, WENG JI.

Study on road lighting safety with citopic[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2007, 18(1): 31-34.

[2] 李勇,阴国恩,陈燕丽. 阅读中疲劳、心理负荷因素对瞳孔大小的调节作用[J]. 心理与行为研究, 2004, 2(3): 545-548.
LI YONG, YIN GUO-EN, CHEN YAN-LI. The regulating effect of fatigue and mental load on pupil size in text reading [J]. Studies of Psychology and Behavior, 2004, 2(3): 545-548.

[3] 黄平. 身体自我概念水平对个体瞳孔直径变化的影响研究[D]. 武汉: 武汉体育学院, 2009.

[4] 练莘,顾欣祖,叶秀兰. 正常人瞳孔及瞳孔对光发射的特征[J]. 中国实用眼科杂志, 2005, 23(10): 1038-1041.
LIAN PING, GU XIN-ZU, YE XIU-LAN. The characteristics of the pupil and the pupillary light reflex in normal subjects [J]. Chinese Journal of Practical Ophthalmology, 2005, 23(10): 1038-1041.

[5] CHENG C K, RAO S K, CHENG L L, et al. Assessment of pupil size under different light intensities using the Procyon pupillometer[J]. Journal of Cataract & Refractive Surgery, 2006, 32(6): 1015-1017.

[6] COLOMBO E, COMASTRI S A, ISSOLIO L, et al. Pupil light reflex produced by glare under mesopic adaptation [J]. Journal of Light & Visual Environment, 2007, 31(2): 70-79.

[7] DANIELA IACOVIELLO. Analysis of pupil fluctuations after a light stimulus by image processing and neural network [J]. Computer and Mathematics with Applications, 2007, 53(8): 1260-1270.

[8] MORESI S, ADAM J J, RIJCKEN J, et al. Pupil dilation in response preparation [J]. International Journal of Psychophysiology, 2008, 67(2): 124-130.

[9] HIGUCHI S, ISHIBASHI K, ARITAKE S, et al. Inter-individual difference in pupil size correlates to suppression of melatonin by exposure to light [J]. Neuroscience Letters, 2008, 440(1): 23-26.

[10] 郭雪斌,崔显忠,杜志刚. 公路隧道进出口视觉负荷评价方法及应用[J]. 公路, 2008(10): 258-261.

[11] 潘晓东,宋永超,杨轶,等. 基于视觉负荷的公路隧道进出口环境改善范围[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2009, 37(6): 777-780.
PAN XIAO-DONG, SONG YONG-CHAO, YANG ZHENG, et al. Visual environment improving scope at entrance and exit of highway tunnel based on visual load [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(6): 777-780.

(下转第102页)

- [5] 肖成志, 刘晓朋, 孙建诚. 三维网垫喷播植草护坡防径流冲刷的机理研究[J]. 人民长江学报, 2009, 40(19): 93-96.
XIAO CHENG-ZHI, LIU XIAO-PENG, SUN JIAN-CHENG. Research on mechanism of runoff-erosion prevention by 3-D mat planting grass for slope protection[J]. Yangtze River, 2009, 40(19): 93-96.
- [6] 王钊. 国外土工合成材料的研究应用[M]. 香港: 现代知识出版社, 2002.
- [7] 章梦涛, 付奇峰, 吴长文. 岩质坡面喷混快速绿化新技术浅析[J]. 水土保持研究, 2000, 7(3): 65-66.
ZHANG MENG-TAO, FU QI-FENG, WU CHANG-WEN. Analysis of the on spray vegetation method in fastly greening the rock slopes[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000, 7(3): 65-66.
- [8] 许文年, 王铁桥, 叶建军. 岩石边坡护坡绿化技术应用研究[J]. 水利水电技术, 2002, 33(7): 35-37.
XU WEN-NIAN, WANG TIE-QIAO, YE JIAN-JUN. Applied study of greening technology on rock slope protection [J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2002, 33(7): 35-37.
- [9] SHAN W, SUN Y Y, WANG Q, et al. Mechanism of biotechnical slope protection for highway slope and anchorage effect of deep-rooted plants[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(11): 59-60.
- [10] 肖衡林, 王钊, 张晋锋. 三维土工网垫设计指标的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1800-1804.
XIAO HENG-LIN, WANG ZHAO, ZHANG JIN-FENG. Study on the design indexes of three dimensional geomat[J]. Rock and Soil Mechanics, 25(11): 1800-1804.
- [11] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第90页)

- [12] 张青文, 陈仲林, 胡英奎. 道路照明反应时间测定仪的研制与应用[J]. 实验技术与管理, 2008, 25(6): 72-75.  
ZHANG QING-WEN, CHEN ZHONG-LIN, HU YING-KUI. The development and application of the reaction time instrument for road lighting [J]. Experimental Technology and Management, 2008, 25(6): 72-75.
- [13] 中华人民共和国建设部. CJJ 45-2006 城市道路照明设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [14] ANSI/IESNA RP-8-00. American National Standard Practice For Roadway Lighting[S]. New York, 2000.
- [15] 李景色, 李铁楠. 修订我国《城市道路照明设计标准》中的几个问题(之一)[J]. 照明工程学报, 2004, 15(1): 38-42.  
LI JING-SE, LI TIE-NAN. Some problems about revising the 《Standard for Lighting Design of Urban Road》[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2004, 15(1): 38-42.
- [16] 杨春宇, 郑文崇, 陈士群. 夜景亮度及建筑材料光反射特性与照明节能[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(5): 90-94.  
YANG CHUN-YU, ZHENG WEN-CHONG, CHEN SHI-QUN. Light reflecting characteristics of building materials and energy saving of nightscape luminance[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(5): 90-94.

(编辑 陈移峰)