

doi:10.3788/gzxb20154404.0417003

LED 背光显示器对不同年龄人视网膜 照度、节律效应和蓝光危害的影响

饶丰^{1,2,3}, 朱锡芳¹, 徐安成¹, 褚静¹, 张燕¹

(1 常州工学院 光电工程学院, 江苏 常州 213002)

(2 常州现代光电技术研究院, 江苏 常州 213002)

(3 常州市光电子材料与器件重点实验室, 江苏 常州 213002)

摘要:研究了视网膜照度、节律效应和蓝光危害随年龄的变化规律。采用光谱仪测量了 4 款常见发光二极管背光显示器显示白色和蓝色时的归一化光谱分布, 然后结合不同年龄人眼的晶状体透射谱, 计算了视网膜照度因子、节律因子和蓝光危害能效因子, 得到三者与年龄的变化规律。研究表明: 对于同一发光二极管背光显示器, 视网膜照度因子、节律因子和蓝光危害能效因子均随年龄的增加而显著减小; 同一人眼的视网膜照度因子随显示器类型的变化较小; 对于年轻人, 不同类型显示器的蓝光危害能效因子和节律因子差异明显, 特别是显示蓝色时, 但是, 对于老年人, 不同类型显示器的蓝光危害能效因子和节律因子差异较小。

关键词:光生物效应; 节律效应; 蓝光危害; 发光二极管; 显示器; 晶状体透射谱; 年龄

中图分类号: TN27

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)04-0417003-6

Effect of Retina Illuminance, Circadian Rhythm and Blue Light Hazard of LED Backlight Display on the Human of Different Ages

RAO Feng^{1,2,3}, ZHU Xi-fang¹, XU An-cheng¹, CHU Jing¹, ZHANG Yan¹

(1 Colleague of optoelectronic Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou Jiangsu 213002, China)

(2 Changzhou Institute of Modern Optoelectronic Technology, Changzhou Jiangsu 213002, China)

(3 Changzhou Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Devices, Changzhou Jiangsu 213002, China)

Abstract: The changes of retinal illuminance, circadian rhythm and blue light hazard with age were studied. The normalized spectral distributions of four common displays with white and blue background were measured with the spectrometer. The retinal illuminance factor, blue light hazard factor and circadian factor were calculated based on the lens spectral transmission of different ages. The relationships between these three factors and age were obtained. It is shown that the above three factors decrease rapidly as the age increases for the same light emitting diode backlight display. The retinal illuminance factor changes little with the type of display for human of the same age. For the younger, The blue light hazard factor and the circadian factor vary greatly with the displays, especially for the blue background. However, for the older, the variations of blue light hazard factor and the circadian factor are small for different displays.

Key words: Biological effects; Circadian effect; Blue light hazard; light emitting diode; Display; Lens spectrum; Age

OCIS Codes: 170.4460; 330.7331, 330.4875, 330.3350

基金项目:国家自然科学基金(No. 81170873)、江苏省高校自然科学基金项目(No. 14KJB140001)、江苏高校文化创意协同创新中心项目(No. XYN1 406)、常州工学院重点项目(No. YN1209)和常州现代光电技术研究院项目(No. CZGY003)资助

第一作者:饶丰(1983—),男,讲师,博士,主要研究方向为 LED 光色热及光生物安全特性. Email:jxsdrf@aliyun.com

通讯作者:朱锡芳(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为 LED 显示器设计及检测. Email:zhuxf@czu.cn

收稿日期:2014-09-89;**录用日期:**2014-12-06

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

LED因其亮度高、颜色丰富和节能环保,广泛地应用于照明和显示领域.随着科技的发展,人们不但关注LED背光显示器的亮度和色度,还关注对使用者“健康”的影响^[1],如对人体生理节律和蓝光危害的影响^[2-3].

2012年,David Berson等在哺乳动物的视网膜上发现了除视锥细胞和视杆细胞以外的第三种感光细胞,即自主感光视网膜神经节细胞(ipRGC)^[3],ipRGC可以将视网膜接收的光信号传递到下丘脑视交叉上核(SCN),而SCN又与控制人体某些激素分泌的下丘脑的松果体相连,起到调节和控制生理节律和激素水平的作用.ipRGC参与人体的许多光生物效应,包括血压、脉搏、血氧、体温和激素的分泌、人体的警觉性和兴奋程度等.近年来,关于该细胞作用的报道越来越多.2005年,瑞士Basel大学的Cajochen等报道460nm的光使人体温升高,心率加快^[4].2010年,重庆大学严永红等报道教室照明中的蓝光成分对学生的学习效率、瞳孔和心率影响明显^[5].2012年,复旦大学林燕丹等发现低亮度LED对心率影响明显^[6].2011年,居家奇也测量了心率、体温和血压等生理参量随特定强度和光谱的照明的变化^[7].

LED背光显示器已经广泛地进入了生活和生产中,其蓝光波段恰好是ipRGC的主导波段^[2,8],研究表明:以LED为背光源的显示器在显示白场和大部分彩色图像时节律因子较大,对人体生理节律影响比普通光源要强得多^[9].但是,现有的研究一般没有考虑不同年龄人眼的差异.

由于LED背光的蓝色波段也正位于视网膜蓝光危害的主导波段内^[10-11],因此也容易引起视网膜内表皮细胞受损.近年来,随着LED亮度的不断增加,蓝光危害也越来越受到人们的重视.我国浙江大学等研究机构对其测试方法和特性进行了广泛地研究^[12],本课题组也研究了LED蓝光危害随点灯条件的变化规律^[13].然而,目前未见同一显示状态下,不同年龄人眼蓝光危害之差异的报道.

临床研究表明,不同年龄人的眼内介质透射谱不同^[14-15].因此,在同一显示条件下,入射到不同年龄人眼视网膜上的光照度不同,其节律效应和蓝光危害必然也不同.本文拟结合不同年龄眼晶状体的透射谱,研究LED背光显示的视网膜照度、节律和蓝光危害随年龄的变化规律,为LED背光显示器的个性化设计提供理论基础.

1 原理

1.1 晶状体透射谱

人眼透光特性主要由晶状体决定,不同年龄人眼

透射谱的差异主要也是由晶状体决定^[14-15],因此,本研究中仅考虑人眼晶状体的透射谱.

图1是文献^[14-15]统计的不同年龄人眼晶状体透射谱,从上到下,年龄依次是1岁、18岁、21岁、46岁、62岁、73岁和76岁.可见,随着年龄的增长,晶状体的透射谱不断下降,其中,蓝光部分随年龄下降的幅度大于红光部分.这是由于随着年龄的增长,晶状体的前囊膜不断增厚,质量和密度不断增加^[16],其光程越来越长的缘故.

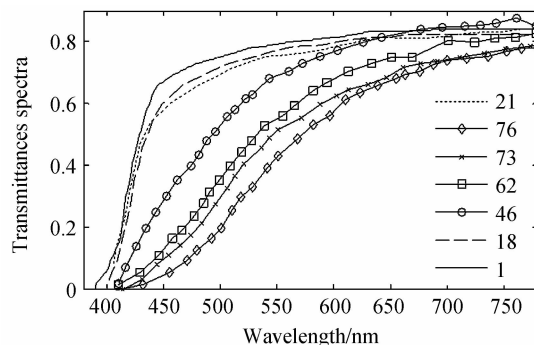


图1 不同年龄人眼晶状体的透射谱

Fig. 1 The lens spectral transmittances of different ages

1.2 节律作用函数,蓝光危害函数和明视觉视见函数

本研究中,节律作用函数来自文献^[3],明视觉视见函数采用国际照明学会1924年公布的数据,蓝光危害加权因子采用GB/T20145-2006的数据^[11].三条曲线见图2,可见,节律效应和蓝光危害主要取决于蓝色波段,视网膜照度主要取决于520~620 nm的红黄波段.

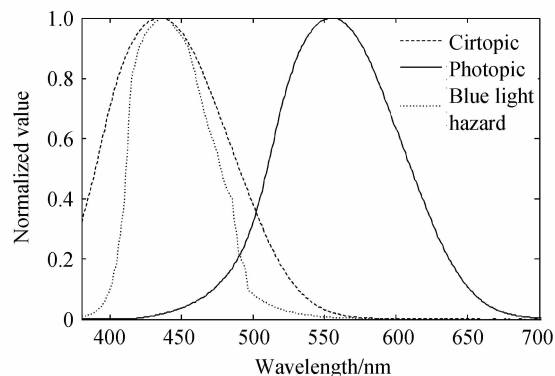


图2 蓝光危害函数、节律作用函数和明视觉视见函数

Fig. 2 Blue light hazard function, circadian function and photopic vision function

1.3 计算公式

在同一照明条件下,由于不同年龄人眼的透射谱不同,视网膜照度也应该不同.本研究中,照度因子定义为视网膜有效光通量与明视觉光通量之比.为了研究的方便,不失一般性,可以采用21岁成年人眼为标准,则21岁人眼受到的光刺激与测量的光度量相同,光刺激分布为 $P(\lambda)V(\lambda)$, $P(\lambda)$ 为光源的相对光谱

分布.考虑晶状体透射谱不同时,其他年龄人眼视网膜上的光刺激分布可以表示为 $P(\lambda) \frac{T_n(\lambda)}{T_{21}(\lambda)} V(\lambda)$, 这样,不同年龄人眼的照度因子 K_I 为

$$K_I = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda) \frac{T_n(\lambda)}{T_{21}(\lambda)} V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中, $V(\lambda)$ 是明视觉视见函数, $T_n(\lambda)$ 是年龄为 n 的晶状体透射谱, $T_{21}(\lambda)$ 是 21 岁人眼的晶状体透射谱.

节律因子 K_C 定义为基于节律作用函数的有效辐射量与明视觉光度量的比值,是近年来人们提出的量化评价光对人体节律效应影响的物理量^[9],即

$$K_C = \frac{K_m' \int_{380}^{780} P(\lambda) C(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中, K_m 为明视觉最大光谱光效能,为 683 lm/W, K_m' 为节律效应的最大光谱光效能,为 3 616 lm/W^[9], $C(\lambda)$ 是节律作用函数, $P(\lambda)$, $V(\lambda)$ 的意义同式(1).

通过测量光谱分布 $P(\lambda)$, 就可以计算出 K_C , 得到仪器测量的光度和人体节律剂量之间的关系. 同理, 可以采用 21 岁人眼为参考, 不同年龄人眼的节律因子表达式为

$$K_C = \frac{K_m' \int_{380}^{780} P(\lambda) \frac{T_n(\lambda)}{T_{21}(\lambda)} C(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

蓝光危害能效因子 K_B 是基于视网膜蓝光危害光谱响应的有效辐射量与明视觉光谱响应的辐射量的比值^[12]. 定义为

$$K_B = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda) B(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

式中, $B(\lambda)$ 是蓝光危害函数, 其他表达式意义如式(1)、(2). 同理, 以 21 岁人眼为参考, 考虑不同人眼的透射谱, 不同年龄人眼的 K_B 表达式为

$$K_B = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda) \frac{T_n(\lambda)}{T_{21}(\lambda)} B(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

这样, 通过测量 LED 背光显示器的光谱分布 $P(\lambda)$, 就可以计算出不同年龄人眼的视网膜照度因子、节律因子和蓝光危害能效因子.

显示器工作时, 图像一般是动态的, 因此进入到人眼的光也是动态的. 研究表明: 长时间工作时, 显示器的各种颜色均出现, 且近似均匀分布, 这样, 进入人眼的照度因子、节律因子和蓝光危害能效因子的值就与白色时的值近似^[9]. 因此, 本文研究显示器在显示白色背景时, 不同年龄人的视网膜照度、节律因子和蓝光危

害能效因子, 作为显示器长时间工作时对人体作用的平均值. 显示器显示蓝色时, 节律效应和蓝光效应最明显. 因此, 本文还研究了显示蓝色图片时的作用.

2 实验设计

本研究选择 4 款不同型号的以 LED 为背光源的常见显示器为研究对象, 编号为 A~D, A 为 9.7 英寸, 2 048×1 536 像素, 设计背光源最大功率 3 W, B, C, D 均为 14 英寸, 1 024×768 像素, 设计背光源最大功率 4 W.

本研究所用的测量装置连接图如图 3, 纯净电源 (220±1 V, 50Hz, 型号: TPS500) 给显示器提供驱动. 光谱仪 (型号: HASS2000) 与积分球通过光纤连接. 积分球直径 50 cm, 一侧开有孔, 显示器的光从孔中进入积分球, 孔直径 10 cm, 小于显示屏, 以保证显示器能够盖住孔, 同时进入积分球的光足够测量用. 测量光谱分布前, 应合理调节光谱仪的积分时间, 以防测量值溢出. 计算机负责控制系统的开关, 并记录光谱仪采集的数据. 在开始测量之前, 使用标准光源对光谱仪定标, 本研究采用色温为 2865K 的 A 光源.

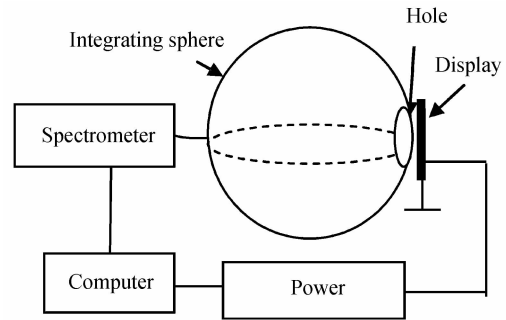


图 3 显示器的光谱分布测试系统

Fig. 3 Measurement system of spectral distribution of display

本研究拟测量 4 款显示器的归一化光谱分布, 先采用 matlab 软件编写背景图像程序, 其中, 颜色设定为纯白色和纯蓝色, 两种颜色的灰度均设定为 255 个等级, 然后测量光谱分布, 具体步骤如下:

1) 将显示器 A 盖在小孔上, 通电正常工作, 将显示设置为纯白色, 将灰度等级自 255 降至 95, 间隔 20, 然后依次测量每一灰度等级对应的归一化光谱分布, 每一灰度测量 10 次; 灰度等级 95 以下明显太暗, 故不测量;

2) 显示器颜色选为纯蓝色, 灰度等级自 255 调至 95, 间隔 20, 然后依次测量每一灰度等级对应的归一化光谱分布, 每一灰度测量 10 次;

3) 将显示器依次该为 B, C 和 D, 重复 1~2, 得到对应的归一化光谱分布.

测量光谱分布后, 就可以计算照度因子、节律因子和蓝光危害能效因子, 比较不同年龄人眼间的差异.

3 结果与讨论

图 4(a)是显示蓝色图片,灰度等级为 255 时,4 款显示器的归一化光谱分布,可见,其峰值波长从小到大依次是 C、B、A 和 D,C 和 D 的峰值波长相差 7 nm,光谱分布中,黄绿色成分从多到少依次为 D、A、B 和 C. 图 4(b)是显示白色图片时,4 款显示器的归一化光谱分布,可见,LED 背光的白光均为三基色光配成,光谱分布中,黄绿色成分从多到少也是 D、A、B 和 C.

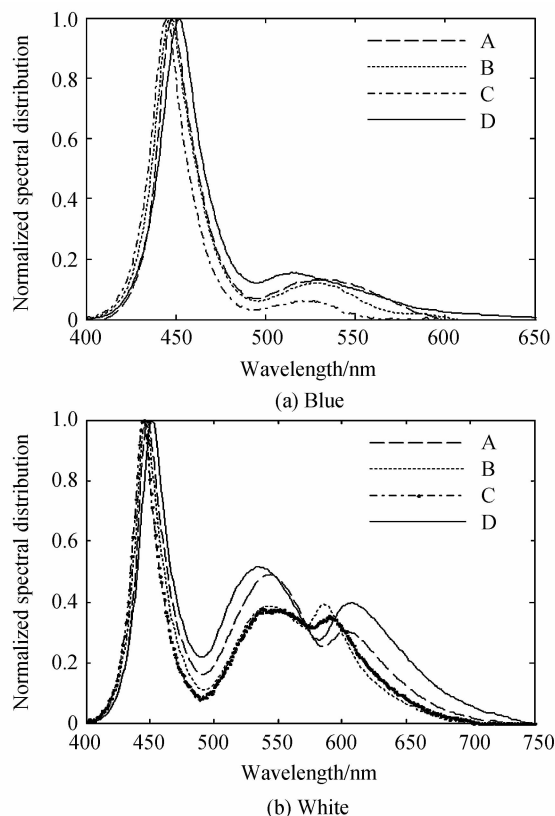


图 4 4 款显示器的归一化光谱分布

Fig. 4 Normalized spectral distributions of four displays

LED 背光光谱分布可能存在波动,本研究采用标准差 STD 表征光谱分布的波动大小^[17],即

$$\text{STD} = \frac{\int_{380}^{780} |P(\lambda) - \bar{P}(\lambda)| d\lambda}{\int_{380}^{780} \bar{P}(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

式中, $\bar{P}(\lambda)$ 为平均光谱分布.

根据 4 款显示器灰阶为 255 时,10 次光谱分布,计算光谱分布随时间的变化,其结果如图 5(a),STD 值不超过 0.025. 根据灰阶自 255 至 95,间隔 20 时 9 次测量得到的光谱分布,计算 STD,结果如图 5(b),其值也不超过 0.04,因此,LED 背光显示器的光谱分布随时间和亮度的变化都很小. 光谱分布变化的主要原因是红黄蓝三色 LED 性能不匹配和热效应^[13],由于用于显示器背光源的 LED 经过了精选,一般将光色电热特性优良且匹配性好的 LED 用在同一个显示器中. 同时,

本研究中选择的 LED 背光功耗较小,均不到 4W,采用的又是高光效 LED,热效应总体比较小. 因此,LED 背光光谱分布随时间和亮度的变化就很小了. 显示器 A、B、C 和 D 在显示蓝色时,光谱分布随时间和亮度的变化也很小,篇幅所限,不再赘述.

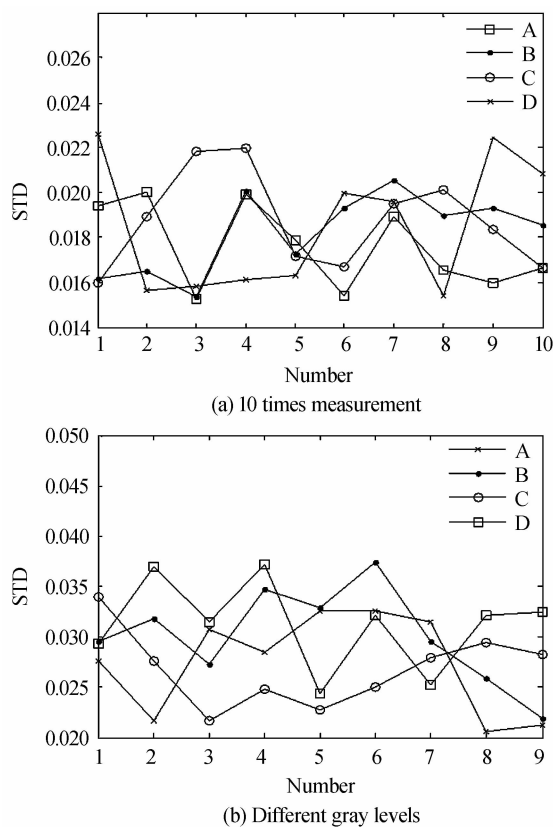


图 5 4 款显示器的标准差

Fig. 5 Standard errors of the four displays

图 6(a)是显示白色图片时,4 款显示器的照度因子随年龄的变化关系,可见,由于晶状体透射谱随年龄的增加不断降低,入射到视网膜上的光越来越少,照度因子不断减小. 在同一显示条件下,1 岁儿童眼的视网膜照度是 21 岁人眼的 1.05 倍左右,而 76 岁的视网膜照度约为 21 岁的 55%,因此,老年人喜欢在光线较强的地方阅读^[18]. 图中误差棒是根据灰度等级 255 时 10 次测量和 9 种不同灰度等级时的光谱分布,计算的照度因子平均标准差. 可以看出,该值一般较小. 这是由于 LED 背光比较稳定的缘故. 从图中还可以看出,对于相同年龄的人眼,四款显示器的照度因子 K_l 差异较小,同时,该差异随年龄的增大略增大. 原因是,对于 LED 背光显示器,对照度起主要作用的是红黄波段(图 4(b)中的红黄峰),在该区间不同显示器的光谱分布虽然有差异,但加权视见函数后,差异迅速变小,同时,同一年龄的年轻人,在该波段内晶状体透射谱的变化率较小,导致不同显示器对应的 K_l 差异不明显. 随着年龄的增加,同一年龄的红黄波段的晶状体透射谱的变化率变大,此时, K_l 的差异也变大.

图 6(b)是显示白色时,4 款显示器的节律因子 K_C 随年龄的变化规律,可见,节律因子随年龄的增加而减小,60 岁之后的节律因子小于 1,不到 21 岁时的 1/4. 因此,适合老年人的节律效应的光环境,对于年轻人,特别是儿童,可能节律效应影响很大,出现亢奋、无法入眠等现象.

图 6(c)是蓝光危害能效因子 K_B 随年龄的变化关系,可见, K_B 随年龄的增加而下降.说明视网膜蓝光危害对年轻人影响较大,对老年人影响较小.图中还可以

看出,光谱分布随时间和亮度的变化给 K_C 和 K_B 带来的误差较小.

对于 K_C 和 K_B ,相同年龄不同显示器之间的差异明显,且该差异随年龄的增大而减小.这是由于节律和蓝光危害的作用波段为蓝色波段,此时,同一年龄年轻人的晶状体透射谱的变化率很大,使得式(3)和(5)中分子的差异明显.随着年龄的增加,同一年龄的蓝色波段的晶状体透射谱随波长的变化率变小,因此,同一年龄,不同显示器 K_C 和 K_B 的差异也在变小.

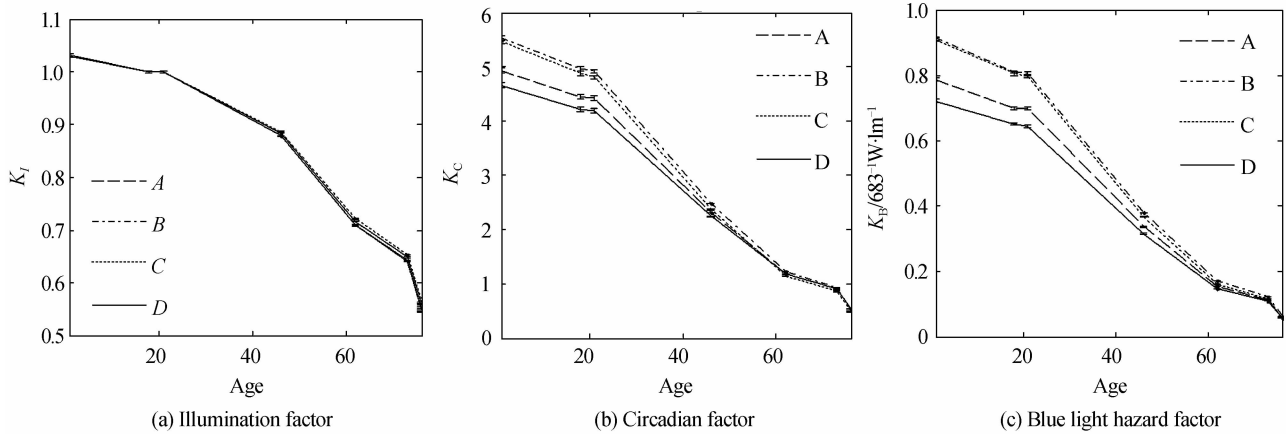


图 6 显示白色时的照度因子、节律因子和蓝光危害能效因子随年龄的变化

Fig. 6 Illumination factor, circadian factor and blue light hazard factor of white light change with age

图 7(a)是显示蓝色图片时,4 款显示器的照度因子随年龄的变化规律.可见,随着年龄的增大,同一显示器的照度因子迅速下降.同时,对于年轻人,不同显示器之间 K_I 的差别较小,对于老年人,差别则较大.其原因也是在黄绿色波段,老年人晶状体透射谱的变化率较年轻人小.

图 7(b)和(c)分别是蓝色背光对应的节律因子和蓝光危害能效因子随年龄的变化关系.可见,随着年龄的增加,同一显示器的两个因子显著单调递减,这是透射谱随年龄的增长不断降低的缘故.可见,使用 LED

背光显示器,如果显示蓝色较多,年轻人要注意合理控制显示器的亮度,以防蓝光危害或影响节律.

同时,可以看出,同一年龄段人眼的这两个参量明显大于白光时的值.原因有二,一是 LED 蓝色波段与蓝光危害和节律主导波段吻合,导致式(3)和(5)中的分子较大,二是显示蓝色时,蓝光成分越大,光度量越小,即式(3)和(5)中的分母较小.同一年龄,不同显示器节律因子或蓝光危害能效因子的差异随着年龄的增加而减小,这主要是由于在蓝色波段,同一年龄人的晶状体透射谱的变化率随年龄的增大而减小.

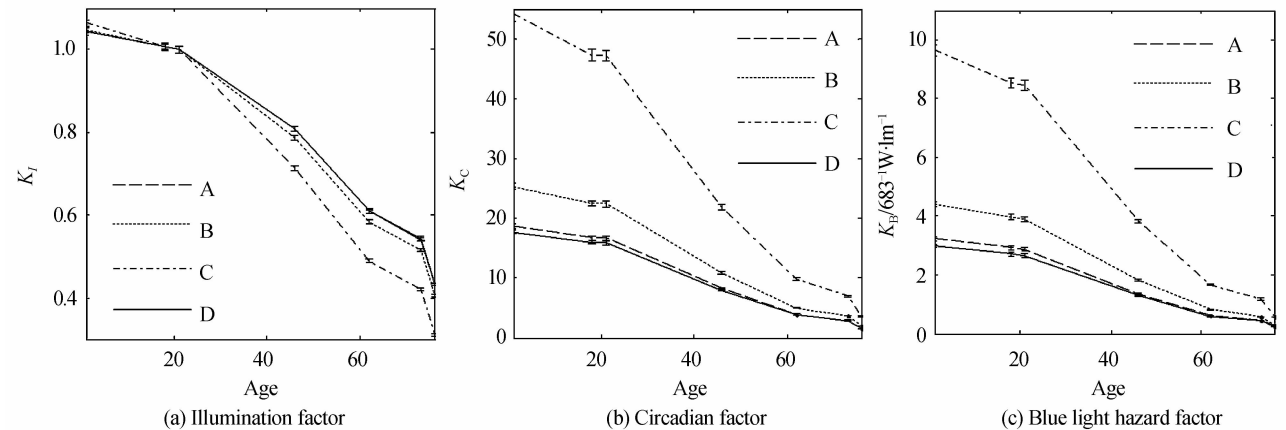


图 7 显示蓝色时的照度,节律因子和蓝光危害能效因子随年龄的变化

Fig. 7 Illumination factor, circadian factor and blue light hazard factor of blue color change with age

从图中还可以看出,同一显示器显示蓝色时,对于 同一年龄人,各因子误差很小,其原因也是光谱分布随

亮度和时间变化很小。

4 结论

本研究分析了4款常见的LED背光显示器的视网膜照度因子、节律因子和蓝光危害能效因子随年龄的变化规律,发现对于同一显示器,无论是显示蓝色还是白色图片,这些参量均随年龄的增大而迅速减小。对于同一年龄段人眼,不同显示器的照度因子差异较小。对于同一年龄的年轻人,不同显示器的节律因子和蓝光危害能效因子差异均较大,但是年长者则差异较小。

光的视觉和非视觉特性对人体具有重要意义,考虑不同年龄人眼的特点,研究照度、节律和蓝光危害随年龄的变化规律,对LED背光显示器的个性化设计具有重要意义。

参考文献

- [1] PETER R B. The impact of light in buildings on human health [J]. *Indoor and Built Environment*, 2010, **19**(1): 8-20.
- [2] SHEN Chong-yu, XU Zheng, ZHAO Su-ling. Study on the safety of blue light leak of LED [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(2): 316-321.
申崇渝,徐征,赵漫玲,等. LED 蓝光泄露安全性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(2): 316-321.
- [3] BERSON D M, DUNN F A T, TAKAO M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock [J]. *Science*, 2002, **295**(5557): 1070-1073.
- [4] CAJOCHEN C, MNNCH M, KOBIALKA S, *et al.* High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation and heart rate to short wavelength light [J]. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 2005, **90**(3): 1311-1316.
- [5] HUANG Hai-jing, YAN Yong-hong. The experiment on photobio- modulation of classroom lighting [J]. *Light & Lighting*, 2008, **32**(4): 1-3.
黄海静,严永红. 光生物效应与教室照明实验探讨[J]. 灯与照明, 2008, **32**(4): 1-3.
- [6] CAI Ying-bing, SUN Yao-jie, LIN Yan-dan. Non-visual biological effects of different color light under low illuminance conditions [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2012, **23**(6): 19-21, 77.
柴颖斌,孙耀杰,林燕丹. 低照度彩光对人眼非视觉生物效应的影响[J]. 照明工程学报, 2012, **23**(6): 19-21, 77.
- [7] JU Jia-qi. Research on digitalized model of spectral response for biological effects of lighting [D]. Shanghai: Fudan university, 2011, 56-57.
居家奇. 照明光生物效应的光谱响应数字化模型研究[D]. 上海:复旦大学, 2011, 56-57.
- [8] BRAINARD G C, HANIFIN J P, GREESON J M, *et al.* Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor [J]. *Journal of Neuroscience*, 2001, **21**(16): 6405- 6412.
- [9] SONG Li-yan, LI Jing-kai, MOU Tong-sheng. Non-Visual effects of flat panel display with light emitting diode backlight on human [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(7): 768-771.
宋丽妍,李俊凯,牟同升. 以发光二极管为背光源的平板显示对人体非视觉的影响[J]. 光子学报, 2013, **42**(7): 768-771.
- [10] ANDREI V A, ALEXANDER L Z, MIKHAIL N M. Concerning biological equivalent of radiation of light emitting diode and lamp light sources with correlated color temperature from 1800K up to 10000K [J]. *Light & Engineering*, 2012, **20**(3): 9-14.
- [11] State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, National Standardization Committee. GB/T 20145-2006 The biological safety of light and lighting system [S]. Beijing: China Standard Press 2006, 3.
国家质检总局, 国家标委会. GB/T 20145-2006 灯和灯系统的光生物安全性[S]. 北京:中国标准出版社, 2006年3月.
- [12] LI Qian, HUANG Yan, CAI Chun-feng. Investigation on the photobiological safety assessment of lighting products [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2013, **24**(S1): 111-114.
李倩,黄艳,蔡春锋. 照明产品的光生物安全探讨及测试技术新进展[J]. 照明工程学报, 2013, **24**(S1): 111-114.
- [13] RAO Feng, YANG Wu. Change of blue light hazard of high power LEDs with lighting condition [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, **13**(23): 154-157.
饶丰,杨武. 大功率LED蓝光危害随点灯条件的变化[J]. 科学技术与工程, 2013, **13**(23): 154-157.
- [14] BLOCK J. The IESNA Lighting Handbook [M]. 9th Edition. New York: IESNA (Illuminating Engineers Society of North America), 2000, 184.
- [15] KESSEL L, JESPER H L, KRISTINA H, *et al.* Age-related changes in the transmission properties of the human lens and their relevance to circadian entrainment [J]. *Journal of Cataract Refractive Surgery*, 2010, **36**(2): 308-312.
- [16] ARTGAS J M, FELIPE A, NAVEA A, *et al.* Spectral transmission of the human crystalline lens in adult and elderly persons: color and total transmission of visible light [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2012, **53**(7): 4076-4084.
- [17] RAO Feng, XU An-cheng, ZHU Xi-fang. A non-contact method for determining junction temperature of LED based on the relative spectral difference [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 09120003.
饶丰 徐安成 朱锡芳. 基于相对光谱差异的非接触式LED结温测量方法[J]. 光子学报, 2014, **43**(9): 09120003.
- [18] ZHAN Yu-fang, MA Jian. The experiment and research of reading lighting environment for the elderly [J]. *Chinese Journal of Gerontology*, 2007, **12**(27): 2231-2234.
张玉芳,马剑. 老年人适宜阅读照明条件的研究[J]. 中国老年学杂志, 2007, **12**(27): 2231-2234.