

不同色温 LED 背光屏的蓝光危害和非视觉生物效应

杨超普^{1,2}, 方文卿^{3*}, 刘明宝^{1,2}, 李 春^{1,2}, 张美丽^{1,2}, 周春生^{1,2}

¹商洛学院化学工程与现代材料学院, 陕西 商洛 726000;

²商洛学院陕西省尾矿资源综合利用重点实验室, 陕西 商洛 726000;

³南昌大学理学院, 江西 南昌 330047

摘要 测量不同色温 LED 背光屏的光谱分布, 根据相关原始数据对多个函数表达式进行高质量拟合。通过 MATLAB 研究了照度因子、蓝光危害因子和节律因子随色温的变化。在可见光范围, 对不同色温 LED 背光屏的蓝光占比进行计算。结果表明: 照度因子随年龄和色温增大而减小; 蓝光危害因子和节律因子均随色温升高而增大, 随年龄增大而减小; 当色温为 1200 K 时, LED 背光屏蓝光占比与烛光蓝光占比的比值为 0.783, 6500 K 时为 10.294。青年人受 LED 背光屏的蓝光危害和非视觉生物效应影响相对较大, 在使用时应尽量调低色温。该研究为 LED 背光屏的个性化设计及色温调节提供了理论参考。

关键词 生物技术; 光生物效应; 蓝光危害; 节律效应; 色温; 液晶屏

中图分类号 Q682; TN27 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.101701

Blue Light Hazard and Non-Visual Biological Effect of LED Backlight Displayer at Different Color Temperatures

Yang Chaopu^{1,2}, Fang Wenqing^{3*}, Liu Mingbao^{1,2}, Li Chun^{1,2}, Zhang Meili^{1,2}, Zhou Chunsheng^{1,2}

¹ College of Chemical Engineering and Modern Materials, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China;

² Shaanxi Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China;

³ College of Science, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China

Abstract The spectral distributions of LED backlight displayer are measured at different color temperatures. Several function expressions are fitted according to the related initial data. The variations of illumination factor, blue light hazard factor and circadian factor with color are studied with the utilization of MATLAB. In the visible range, the blue-light-ratio of LED backlight displayer at different color temperatures is calculated. The result show that illumination factor decreases with the increase of the age and color temperature; blue light hazard factor and circadian factor increase with the increase of color temperature, and decrease with the increase of the age. When the color temperature is 1200 K, the ratio of blue-light-ratio of the displayer to blue-light-ratio of candle is 0.783, and the ratio is 10.294 when the color temperature is 6500 K. The influences of the blue light hazard and non-visual biological effect on young people are relatively large, and the young people should try to reduce color temperature of LED backlight displayer. This research provides theoretical reference for personalized design and color temperature

收稿日期: 2017-04-16; **收到修改稿日期:** 2017-05-26

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFB0403700)、国家 863 计划(2011AA03A101)、陕西省尾矿资源综合利用重点实验室开放基金(2014SKY-WK012)、陕西省教育厅专项科研计划(16JK1241)、商洛市科技计划(SK2015-29)、商洛学院科研基金(13SKY-FWDF005)

作者简介: 杨超普(1987—),男,硕士,讲师,主要从事照明与显示的光生物安全方面的研究。E-mail: ycpslu@163.com

* **通信联系人.** E-mail: fwq@ncu.edu.cn

adjustment of LED backlight displayer.

Key words biotechnology; photobiological effect; blue light hazard; circadian effect; color temperature; liquid crystal display

OCIS codes 170.6280; 300.6550; 330.5370

1 引言

可见光的生物危害主要为蓝光危害与非视觉生物效应。蓝光危害是指人眼在 400~500 nm 波段辐射下因光化学作用而出现视网膜损伤的潜在危害^[1-3]。非视觉生物效应通常是指可见光中的蓝光成分通过抑制松果体分泌褪黑色素,刺激肾上腺分泌皮质醇,进而改变生理节律,调节人体警觉度和生物钟,即节律效应^[4-5]。

1966年, Noell等^[6]首次公开报道了蓝光能够引起视杆细胞损伤。随后,大量研究证实可见光的蓝光波段会对视网膜造成光化学损伤^[7-8]。2001年, Dawson等^[9]对恒河猴进行发光二极管(LED)蓝光危害试验,证实了蓝光能够对灵长类动物的视网膜造成损害。2011年, Youssef等^[10]分析了光对视网膜的危害原理和人眼的自我保护机制。光生物安全标准 IEC 62471-2006 和 GB/T 20145-2006 给出了蓝光危害加权函数原始数据及可见光波段蓝光危害效能因子的计算公式。2013年,国家电光源质量监督检验中心(上海)依据 GB/T 20145-2006 对 27 种 LED 光源和灯具进行了蓝光危害测试,得到了视网膜蓝光危害评估结果^[11]。

2002年, Berson等^[12]发现了视网膜上与节律相关的特化感光神经节细胞(ipRGC),该细胞与视交叉上核(SCN)和松果体的神经连接,能够调节人体生物钟,即非视觉生物效应。Branard等^[13]最先测定出了非视觉生物光谱响应曲线,即节律函数,并用它表征不同波长光对人体节律影响的强弱。2013年,鲁玉红等^[14]报道了不同波长蓝光 LED 对人脑工作能力和工作速率等的影响。2016年,周晓明等^[15]研究了调光方式不同的 LED 照射引起的人体脉搏变化率和瞳孔收缩率。

世界卫生组织爱眼协会的报告指出,全球每年超过 3 万人因蓝光辐射而失明。中华医学会眼科学分会的有关数据显示,63.5%的中国网民因蓝光辐射而患有视力下降、白内障和失明等不同程度的眼疾。LED 广泛应用于显示屏的背光,当前多数 LED 背光屏可调节色温,不同色温下光谱分布的差别较大^[16-17]。根据国际照明委员会(CIE)等权威机构给出的蓝光危害因子、节律作用函数、明视觉光谱光效曲线数据,以及不同色温(1200~6500 K)LED 背光屏光谱分布的原始数据,本课题组利用 OriginPro 软件对人眼响应函数和不同色温光谱分布进行了拟合。结合不同年龄的人眼透射率,采用 MATLAB 软件研究了照度因子、蓝光危害因子和节律因子随背光屏色温的变化。该研究可为 LED 背光屏色温调节提供参考,为 LED 背光屏的个性化设计提供理论基础。

2 实验

2.1 实验原理

GB/T 20145-2006 给出了可见光段波的蓝光危害因子,1924年 CIE 公布了明视觉视见函数,节律作用函数的数据参考文献^[18-19]。由 1 图可见:蓝光危害峰值位于 437 nm 处,对应于视黄酮 A2E 的吸收峰, A2E 在蓝光作用下可使视网膜色素上皮萎缩及感光细胞死亡;节律作用函数主要位于 446~477 nm 的蓝光波段,峰值位于 464 nm 处;明视觉视见函数主要位于 520~620 nm 的绿光波段,峰值位于 555 nm 处。

为了便于计算分析,需明确响应函数的表达式。根据图 1 的数据,利用 OriginPro 软件对明视觉视见函数和节律作用函数进行拟合。拟合公式均为 Asym2Sig 函数:

$$y = y_0 + A \cdot \frac{1}{1 + \exp[-(x - x_c + w_1/2)/w_2]} \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \exp[-(x - x_c + w_1/2)/w_3]} \right\}, \quad (1)$$

式中 y 为响应函数值; y_0 、 x_c 、 A 、 w_1 、 w_2 、 w_3 为 6 个待定参数; x 为对应波长, nm。利用 5 个 Gauss 函数叠加对蓝光危害加权函数进行多峰拟合,表达式为:

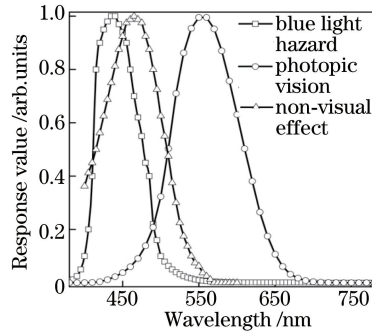


图1 人眼对可见光的响应函数

Fig. 1 Response functions of human eyes to visible light

$$y = y_0 + \frac{A_1}{w_1 \sqrt{\pi/2}} \exp\{-2 [(x - x_{c1}) / w_1]^2\} + \frac{A_2}{w_2 \sqrt{\pi/2}} \exp\{-2 [(x - x_{c2}) / w_2]^2\} + \frac{A_3}{w_3 \sqrt{\pi/2}} \times \exp\{-2 [(x - x_{c3}) / w_3]^2\} + \frac{A_4}{w_4 \sqrt{\pi/2}} \exp\{-2 [(x - x_{c4}) / w_4]^2\} + \frac{A_5}{w_5 \sqrt{\pi/2}} \exp\{-2 [(x - x_{c5}) / w_5]^2\}, \quad (2)$$

式中 y 为响应函数值; x 为对应波长, nm; 其余均为待定参数。

3 个响应函数的各待定参数的拟合结果及相关系数的平方 (R^2) 如表 1 所示。

表 1 人眼响应函数的拟合结果

Table 1 Fitting results of human eyes response functions

Function	Fitting results of each parameter	R^2
Photopic vision	$y_0 = 3.659 \times 10^{-4}$, $x_c = 558.416$, $A = 1.182$, $w_1 = 89.580$, $w_2 = 15.731$, $w_3 = 20.915$, $y_0 = 6.737 \times 10^{-4}$, $x_{c1} = 416.136$, $w_1 = 6.368$, $A_1 = 1.884$, $x_{c2} = 423.378$, $w_2 = 20.781$	0.99903
Blue light hazard	$A_2 = 11.572$, $x_{c3} = 447.663$, $w_3 = 40.110$, $A_3 = 43.260$, $x_{c4} = 480.622$, $w_4 = 15.415$, $A_4 = 2.908$, $x_{c5} = 471.588$, $w_5 = 73.451$, $A_5 = 8.361$	0.99961
Non-visual effect	$y_0 = -0.014$, $x_c = 467.419$, $A = 1.741$, $w_1 = 54.288$, $w_2 = 30.582$, $w_3 = 17.736$	0.99949

要对使用者产生蓝光危害与非视觉生物效应, 相应波段的光线应透过人眼角膜、晶状体、玻璃体, 进而照射至视网膜^[20]。随着年龄增长, 人眼透射率不断下降, 标准 CIE 203-2012 给出了人眼透射率随年龄变化的计算模型^[21]:

$$D_\tau(\lambda) = 0.06 + (0.15 + 3.1 \times 10^{-5} a^2) (400/\lambda)^4 + 151.5492 \exp\{-[0.057(\lambda - 273)]^2\} + 2.13 \times (1.05 - 6.3 \times 10^{-5} a^2) \exp\{-[0.029(\lambda - 370)]^2\} + 11.95 \times (0.059 + 1.8610^{-4} a^2) \times \exp\{-[0.021(\lambda - 325)]^2\} + 1.43 \times (0.016 + 1.32 \times 10^{-4} a^2) \exp\{-[0.008(\lambda - 325)]^2\}, \quad (3)$$

$$\tau(\lambda) = 10^{-D_\tau(\lambda)}, \quad (4)$$

式中 $D_\tau(\lambda)$ 为光密度, a 为年龄, λ 为波长, τ 为透射率。分别计算不同年龄人眼在可见光波段的透射率, 结果如图 2 所示。

IEC/TR 62778-2014 中提出了利用蓝光危害因子 K_B 对蓝光危害进行量化评估的计算公式:

$$K_B = \frac{\int_{380}^{780} p(\lambda) B(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} p(\lambda) v(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

式中 K_m 为明视觉效应的最大光谱光效能, 取值为 $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$; $p(\lambda)$ 为光谱分布; $B(\lambda)$ 为蓝光危害加权函数, $v(\lambda)$ 为明视觉视见函数。常用节律因子量化非视觉生物效应强度, 公式^[22-24]为:

$$K_c = \frac{K'_m \int_{380}^{780} p(\lambda) c(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} p(\lambda) v(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

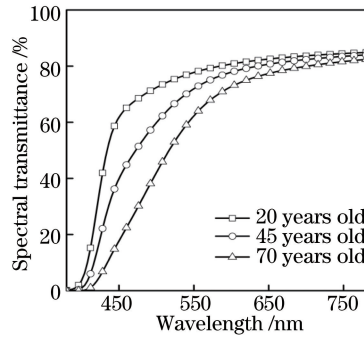


图 2 不同年龄人眼的透射率

Fig. 2 Transmittance of human eyes at different ages

式中 K'_m 为节律效应最大光谱光效能, 取值为 $3616 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$; $c(\lambda)$ 为节律作用函数。考虑到不同年龄人眼的透射率不同, 以 20 岁人眼为标准, LED 背光屏对其他年龄人眼的蓝光危害因子与节律因子分别为

$$K_B = \frac{\int_{380}^{780} p(\lambda) [T_n(\lambda)/T_{20}(\lambda)] B(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} p(\lambda) v(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

$$K_c = \frac{K'_m \int_{380}^{780} p(\lambda) [T_n(\lambda)/T_{20}(\lambda)] c(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} p(\lambda) v(\lambda) d\lambda}, \quad (8)$$

式中 $T_n(\lambda)$ 为 n 岁人眼的透射率。照度因子为视网膜有效光通量与明视觉光通量之比, 能够反映在同一照明条件下不同年龄人眼透射率导致视网膜光照度的不同。以 20 岁人眼为标准, LED 背光屏对其他年龄人眼的照度因子为^[25]

$$K_i = \frac{\int_{380}^{780} p(\lambda) [T_n(\lambda)/T_{20}(\lambda)] v(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} p(\lambda) v(\lambda) d\lambda}. \quad (9)$$

2.2 光谱测量与拟合

研究对象为一款全球知名手机, 其屏幕为 LED 背光液晶显示屏, 屏幕尺寸为 5.5 inch (1 inch = 2.54 cm), 像素大小为 1920 pixel × 1080 pixel。通过手机色温调节软件调节屏幕的色温, 利用 PR-650 型光谱扫描式彩色频谱仪测量 1200, 1900, 2300, 2700, 3400, 4100, 5000, 6500 K 色温下的光谱分布。对光谱数据进行归一化处理, 结果如图 3 所示。

利用 OriginPro 软件的 Multi-peaks fit 拟合功能, 采用 5 个 Gauss 函数叠加, 根据 (2) 式拟合不同色温下屏幕的光谱分布, 6500 K 色温下的拟合过程如图 3(b) 所示。当色温为 1200, 1900, 2300, 2700, 3400, 4100, 5000, 6500 K 时, LED 背光屏的光谱相关系数平方 R^2 分别为 0.99901, 0.99632, 0.99702, 0.99694, 0.99636, 0.99594, 0.99712, 0.99677。由此可见, 各色温下光谱拟合的 R^2 均大于 0.995, 且各参数的标准误差均较小, 因此该方法能够高质量地拟合不同色温 LED 背光屏的光谱分布。

3 结果与讨论

3.1 蓝光占比

蓝光占比 K_b 是指光谱分布中发生蓝光危害的主要波段的积分面积 ($\int_{400}^{500} p(\lambda) d\lambda$) 与可见光波段积分面积 ($\int_{380}^{780} p(\lambda) d\lambda$) 的比值, 可在一定程度上反映蓝光危害的强弱, 其计算公式为

$$K_b = \frac{\int_{400}^{500} p(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} p(\lambda) d\lambda}. \quad (10)$$

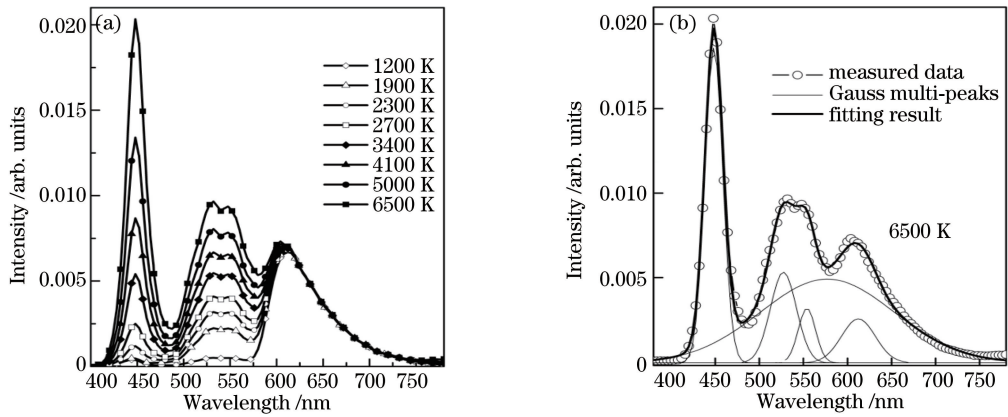


图 3 (a)不同色温下 LED 背光屏的归一化光谱;(b) 6500 K 色温下测量数据与拟合结果的比较以及拟合过程中的高斯分峰
Fig. 3 (a) Normalized spectra of LED backlight displayer at different color temperatures; (b) comparison of measured data at 6500 K and corresponding fitting result and Gauss multi-peaks during fitting

利用(10)式计算不同色温下 LED 背光屏的蓝光占比,结果见表 2。为了对蓝光占比的大小有更直观的认识,以普通蜡烛烛光照射在白色纸张上,在距蜡烛 20 cm 处测量白纸的反射光谱分布,由(10)式计算得到烛光的蓝光占比为 3.315,然后分别计算不同色温下 LED 背光屏的蓝光占比与烛光蓝光占比的比值 R ,结果见表 2。

表 2 不同色温下 LED 背光屏的蓝光占比及其与烛光蓝光占比的比值

Table 2 Blue-light-ratio of LED backlight displayer at different color temperatures and the ratio of blue-light-ratio of the displayer to blue-light-ratio of candle

Color temperature /K	Blue light ratio /%	R	Color temperature /K	Blue light ratio /%	R
1200	2.595	0.783	3400	16.744	5.051
1900	3.621	1.092	4100	22.161	6.685
2300	6.350	1.916	5000	27.747	8.370
2700	10.225	3.084	6500	34.126	10.294

由表 2 知:LED 背光屏的蓝光占比随着色温升高而增大;当 LED 背光屏色温为 6500 K 时,其蓝光占比为烛光蓝光占比的 10.294 倍。可见,从减弱蓝光危害的角度考虑,在不影响正常显示的前提下应尽可能地调低屏幕色温。

3.2 照度因子

根据(9)式及相关函数的拟合结果,利用 MATLAB 计算得到了照度因子随色温的变化,结果见图 4。由图 4 可知,当色温相同时,随着年龄增加,人眼的透射率降低,照度因子不断减小。以 5000 K 色温为例,LED 背光屏对 45 岁中年人与 70 岁老年人视网膜的照度因子分别为 20 岁青年人的 84.7% 与 69.3%。对于 45 岁中年人和 70 岁老年人,随着 LED 背光屏色温升高,照度因子逐渐下降,且年龄越大,下降的速度越大。以 70 岁老年人为例,随着色温由 1200 K 升至 6500 K,照度因子由 0.780 下降至 0.685。可见,老年人在使用

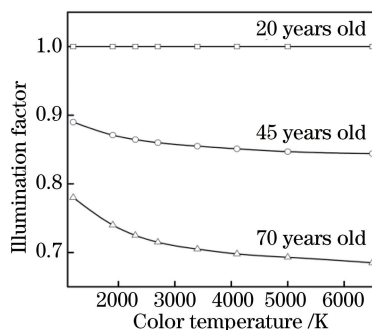


图 4 照度因子随色温的变化

Fig. 4 Variations of illumination factor with color temperature

LED 背光屏时应适当调高屏幕亮度,调低色温,增大照度因子,以便达到适宜的视觉效果。

3.3 蓝光危害因子

根据(7)式及相关函数的拟合结果可知,利用 MATLAB 计算得到了蓝光危害因子随色温的变化,结果见图 5。由图 5 可知,在相同的色温下,年龄越小,蓝光危害因子越大。以 5000 K 色温为例,LED 背光屏对 20 岁和 45 岁人眼的蓝光危害因子分别为 70 岁人眼的 3.614 倍与 1.964 倍。当年龄相同时,随着色温升高,蓝光危害因子增大,且年龄越小,增大的速度越快。以 20 岁的青年人为例,当色温由 1200 K 升至 6500 K 时,蓝光危害因子增大了 8.81 倍。这是因为 20 岁人眼的透射率较大,且蓝光波段的人眼透射率随年龄变化较大。另由图 5 可见,随着色温升高,蓝光占比逐渐升高。因此,从降低蓝光危害角度考虑,青年人在使用 LED 背光屏时更应调低色温。

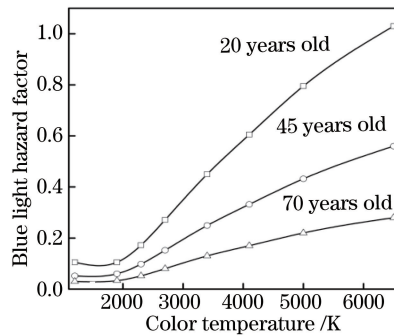


图 5 蓝光危害因子随色温的变化

Fig. 5 Variations of blue light hazard factor with color temperature

3.4 节律因子

根据(8)式及相关函数的拟合结果,利用 MATLAB 计算得到了节律因子随色温的变化,结果见图 6。由图 6 可知,节律因子随色温及年龄的变化规律与蓝光危害因子随色温和年龄的变化规律相同。以 5000 K 为例,LED 背光屏对 20 岁和 45 岁人眼的节律因子分别为 70 岁人眼的 2.969 倍和 1.771 倍。以 20 岁人眼为例,随着色温由 1200 K 升至 6500 K,节律因子增大了 12.19 倍。可见,青年人的非视觉生物效应更严重,且随色温变化较大。因此,从减小非视觉效应角度考虑,青年人应适当减少使用 LED 背光屏的时间,在使用时应尽可能地调低色温。

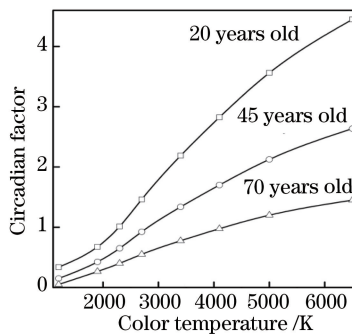


图 6 节律因子随色温的变化

Fig. 6 Variations of circadian factor with color temperature

4 结 论

通过函数拟合和数值计算,分别研究了照度因子、蓝光危害因子和节律因子随色温的变化。LED 背光屏的蓝光占比随色温升高而增大,随着色温由 1200 K 升至 6500 K,LED 背光屏蓝光占比与烛光蓝光占比的比值由 0.783 增至 10.294。照度因子随着色温和使用者年龄的增大而减小,且受年龄的影响更大。蓝光危害因子随着色温升高而快速升高,随着使用者年龄增加而减小。节律因子随色温升高而快速增大,随使用者

年龄的增大而减小。结果表明,青年人受 LED 背光屏蓝光危害和非视觉生物效应的影响相对较大,在使用过程中应适当调低色温,缩短使用时间。该结论可为 LED 背光屏的个性化设计及屏幕色温设置提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] Liu Jie. Study on blue light hazard and non-visual biological effect of various light sources [D]. Shanghai: Fudan University, 2014.
刘婕. 光源的蓝光危害和非视觉生物效应研究[D]. 上海: 复旦大学, 2014.
- [2] Commission Internationale de L'Éclairage. Photobiological safety of lamps and lamp systems: CIE S 009/E_2002 [S]. [S.l.]: [s.n.], Wiley Periodicals, Incorporation.
- [3] O'Hagan J B, M Khazova M, Price L L. Low-energy light bulbs, computers, tablets and the blue light hazard [J]. *Eye*, 2016, 30(2): 230-233.
- [4] Rao Feng, Xu Ancheng, Zhu Xifeng. Change of the circadian effect of LED lighting with age [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(2): 250-255.
饶丰, 徐安成, 朱锡芳. LED 照明节律效应随年龄的变化 [J]. *发光学报*, 2016, 37(2): 250-255.
- [5] 国际半导体照明联盟, 国家半导体照明工程研发及产业联盟, 中国照明学会. 普通照明 LED 与蓝光(白皮书) [R]. [S.l.]: [s.n.], 2013.
- [6] Noell W K, Walker V S, Kang B S, *et al.* Retinal damage by light in rats [J]. *Investigative Ophthalmology*, 1966, 5(5): 450-473.
- [7] Ham W T, Jr, Mueller H A, Sliney D H. Retinal sensitivity to damage from short wavelength light [J]. *Nature*, 1976, 260(5547): 153-155.
- [8] Gorgels T G, van Norren D. Ultraviolet and green light cause different types of damage in rat retina [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 1995, 36(5): 851-863.
- [9] Dawson W, Nakanishi-Ueda T, Armstrong D, *et al.* Local fundus response to blue (LED and laser) and infrared (LED and laser) sources [J]. *Experimental Eye Research*, 2001, 73(1): 137-147.
- [10] Youssef P N, Sheibani N, Albert D M. Retinal light toxicity [J]. *Eye*, 2011, 25(1): 1-14.
- [11] Yu Anqi. Detection analysis and rich bluing analysis and suggestions of LED lighting products' blu-ray hazard [J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2013(1): 29-34.
俞安琪. LED 照明产品蓝光危害的检测分析和富蓝化的分析及建议 [J]. *上海节能*, 2013(1): 29-34.
- [12] Berson D M, Dunn F A, Takao M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock [J]. *Science*, 2002, 295(5557): 1070-1073.
- [13] Branard 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.
- [14] Lu Yuhong, Wang Yurong, Jin Shangzhong, *et al.* Influence of different wavelength blue LED on human optical biorhythm effect [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(8): 1061-1065.
鲁玉红, 王毓蓉, 金尚忠, 等. 不同波长蓝光 LED 对人体光生物节律效应的影响 [J]. *发光学报*, 2013, 34(8): 1061-1065.
- [15] Zhou Xiaoming, Luo Da, Zhang Huiping. Human non-visual effects under LED light with different dimming methods [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(7): 892-898.
周晓明, 罗达, 张惠平. 不同调光方式 LED 照射下的人体非视觉效应 [J]. *发光学报*, 2016, 37(7): 892-898.
- [16] Zhu Xiangbing, Cui Haitian, Qian Liyong, *et al.* Study on night vision compatible backlight module of LED liquid crystal display [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091203.
朱向冰, 崔海天, 钱立勇, 等. 夜视兼容的 LED 液晶显示器背光模组的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091203.
- [17] Feng Qibin, Li Yani, Li Qigong, *et al.* Lens array with double freeform surface for LED backlight in LCD imaging engine of helmet-mounted display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1123003.
冯奇斌, 李亚妮, 李其功, 等. 用于头显液晶像源 LED 背光的双自由曲面透镜阵列设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1123003.
- [18] Enezi J al, Revell V, Brown T, *et al.* A "melanopic" spectral efficiency function predicts the sensitivity of melanopsin

- photoreceptors to polychromatic lights[J]. *Journal of Biological Rhythms*, 2011, 26(4): 314-324.
- [19] Baczynska K, Price L L A. Efficacy and ocular safety of bright light therapy lamps [J]. *Lighting Research & Technology*, 2013, 45(1): 40-51.
- [20] Yang Yanrong, Dai Yun. Evaluation of the effect on eye aberration on retinal imaging quality based on the root mean square error and correlation coefficient[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0333001
杨彦荣, 戴云. 基于均方根误差和相关系数评价人眼像差对视网膜像质的影响 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0333001.
- [21] Commission Internationale de L' eclairage, International Commission on Illumination, Internationale Beleuchtungskommission. A computerized approach to transmission and absorption characteristics of the human eye[R/OL]. [2017-04-15]. <http://www.gbv.de/dms/ilmenau/toc/699884675.PDF>.
- [22] Gall D, Lapuente V. Beleuchtungsrelevante aspekte bei der auswahl eines förderlichen lampenspektrums [Z/OL]. [2017-04-15]. <http://www.lichtundgesundheit.de/cyberlux/wp-content/uploads/2009/07/Gallbeleuchtung.pdf>.
- [23] Bellia L, Seraceni M. A proposal for a simplified model to evaluate the circadian effects of light sources [J]. *Lighting Research and Technology*, 2013, 46(5): 493-505.
- [24] Zhou Xiaoming, Xu Jiabin, Shao Zhidong. Research of the calculation model of light biorhythm factor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(2): 0217001.
周晓明, 徐嘉彬, 邵志栋. 光生物节律因子计算模型的研究 [J]. *光子学报*, 2015, 44(2): 0217001.
- [25] Rao Feng, Zhu Xifang, Xu Ancheng, *et al*. Effect of retina illuminance, circadian rhythm and blue light hazard of LED backlight display on the human of different ages [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(4): 0417003.
饶丰, 朱锡芳, 徐安成, 等. 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 [J]. *光子学报*, 2015, 44(4): 0417003.