

# 不同显示器的蓝光危害及节律效应比较

杨超普<sup>1,2</sup>, 方文卿<sup>3\*</sup>, 王昭<sup>1,4</sup>, 刘明宝<sup>1,2</sup>, 李春<sup>1,2</sup>, 张美丽<sup>1,2</sup>, 周春生<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>商洛学院化学工程与现代材料学院, 陕西 商洛 726000;

<sup>2</sup>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;

<sup>3</sup>南昌大学理学院, 江西 南昌 330047;

<sup>4</sup>西安工业大学材料与化工学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 为从蓝光危害与节律效应角度提供显示器的选购及使用参考, 测量了不同色温(1200~6500 K)下冷阴极荧光灯管(CCFL)背光液晶显示器(LCD)、发光二极管(LED)背光LCD、有机发光二极管(OLED)以及阴极射线管(CRT)这4种常用显示器的光谱分布; 根据人眼响应函数的拟合结果, 计算了不同色温下4种显示器的蓝光危害因子、节律因子、400~500 nm 蓝光占比以及446~477 nm 蓝光占比。结果表明: 4种显示器的蓝光危害和节律效应均随色温升高而增大; 当色温为1200~6500 K时, OLED的蓝光危害因子最小; 可利用400~500 nm 蓝光占比代替蓝光危害因子近似表征蓝光危害的强弱; 当色温为6500 K时, 同时考虑蓝光危害与节律效应, 4种显示器的优劣顺序依次为LED背光LCD、OLED、CCFL背光LCD、CRT。

**关键词** 生物光学; 光生物效应; 蓝光危害; 节律效应; 显示器; 色温

**中图分类号** Q682; TN27 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.121701

## Comparison on Blue Light Hazard and Circadian Effect of Different Displays

Yang Chaopu<sup>1,2</sup>, Fang Wenqing<sup>3</sup>, Wang Zhao<sup>1,4</sup>, Liu Mingbao<sup>1,2</sup>,  
Li Chun<sup>1,2</sup>, Zhang Meili<sup>1,2</sup>, Zhou Chunsheng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Chemical Engineering and Modern Materials, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China;

<sup>2</sup>Shaanxi Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China;

<sup>3</sup>School of Sciences, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China;

<sup>4</sup>School of Materials Science and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

**Abstract** In order to provide references for purchase and usage of displays from the point of view of blue light hazard and circadian effect, the spectral distributions of four kinds of displays including cold cathode fluorescent lamp (CCFL) backlight liquid crystal display (LCD), light emitting diode (LED) backlight LCD, organic light-emitting diode (OLED), and crystal ray tube (CRT) are measured at different color temperatures (1200-6500 K). Blue light hazard factor, circadian factor, 400-500 nm blue light ratio and 446-477 nm blue light ratio of four kinds of displays at different color temperatures are calculated according to the fitting results of response functions of human eyes to visible light. Results show that blue light hazard factor and circadian factor increase with the increase of color temperature; blue light hazard factor of OLED is the smallest in four kinds of displays when the range of color temperature is from 1200 K to 6500 K; 400-500 nm blue light ratio instead of blue light hazard factor can be

**收稿日期:** 2017-05-31; **收到修改稿日期:** 2017-06-27

**基金项目:** 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

used to characterize the strength of blue light hazard; when the color temperature is 6500 K, considering blue light hazard and circadian effect at the same time, the quality order of four displays from good to bad is as follows: LED backlight LCD, OLED, CCFL backlight LCD, and CRT.

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

**OCIS codes** 170.6280; 300.6550; 330.5370

## 1 引言

蓝光危害是指在 400~500 nm 波段辐射下光化学作用对人眼视网膜的损伤<sup>[1-3]</sup>。节律效应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来改变生理节律,调节人体警觉度和生物钟<sup>[4-5]</sup>。

1966年, Noell等<sup>[6]</sup>首次公开报道了蓝光能够引起视杆细胞损伤。2001年, Dawson等<sup>[7]</sup>通过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<sup>[8]</sup>给出了蓝光危害机制,即人眼视网膜的蓝光感光细胞可连续接收光子,无需视觉恢复周期,这增大了细胞氧化损伤的可能性,致使视网膜上皮组织中的脂褐质增多,进而形成玻璃疣,影响了视网膜色素上皮细胞为感光细胞输送营养,导致感光细胞萎缩死亡。2002年, Berson等<sup>[9]</sup>发现了视网膜上与视觉无关的特化感光神经节细胞(ipRGC),该细胞与视交叉上核(SCN)和松果体的神经相连,能够调节人体生物钟,即节律。Brainard等<sup>[10]</sup>最先测定出了非视觉生物光谱响应曲线,即节律函数,用该函数表征不同波长光照对人体节律影响的强弱。鲁玉红等<sup>[11-12]</sup>分别研究了不同波长蓝光LED对人体脑工作能力、工作速率、脉搏变化率、瞳孔收缩率等的影响。

世界卫生组织爱眼协会的报告显示: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数据显示:在4.2亿中国网民中,有63.5%的网民因蓝光辐射而患有视力下降、白内障、失明等不同程度的眼疾。节律效应的危害很隐蔽,在国内暂时还未受到广泛关注。随着“低头族”的大量出现,以及工作学习中电脑的长时间使用,很有必要对常见显示器的蓝光危害和节律效应进行研究。本文测量了冷阴极荧光灯管(CCFL)背光液晶显示器(LCD)、LED背光LCD、有机发光二极管(OLED)以及阴极射线管(CRT)4种常见显示器<sup>[13-14]</sup>在色温为1200~6500 K范围内的光谱分布,对国际照明委员会(CIE)等权威机构给出的人眼响应函数进行拟合,比较分析了4种显示器在不同色温下的蓝光危害和节律效应。该研究可为显示器的选购和使用提供参考。

## 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加权函数 $B(\lambda)$ ;节律作用函数 $C(\lambda)$ 的数据来自参考文献<sup>[15-16]</sup>;CIE在1924年、1951年分别给出了明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 和暗视觉光谱光效率函数 $V'(\lambda)$ 。这4个函数曲线如图1所示。

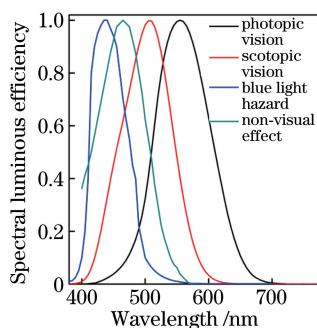


图1 人眼对可见光的响应函数

Fig. 1 Response functions of human eyes to visible light

蓝光危害加权函数  $B(\lambda)$  主要位于 400~500 nm 波段, 峰值波长为 437 nm, 对应于视黄酮 A2E 的吸收峰, A2E 在蓝光作用下会使视网膜色素上皮萎缩以及感光细胞死亡。节律作用函数  $C(\lambda)$  主要位于 446~477 nm 的蓝光波段, 峰值在 464 nm 处, 该波段蓝光最能调节脑内松果体的褪黑色素分泌。明视觉光谱光效率函数  $V(\lambda)$  由视网膜上能够分辨颜色的锥状细胞特性决定, 峰值在 555 nm 处, 适用于  $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  以上的亮度水平。暗视觉光谱光效率函数  $V'(\lambda)$  由视网膜上能够感知光强弱的杆状细胞特性决定, 峰值在 507 nm 处, 适用于  $0.001 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  以下的亮度水平。

参照暗明比  $S/P$  的表达式, IEC/TR 62778—2014 中提出利用蓝光危害因子  $K_B$  对蓝光危害进行量化评估。常用节律因子  $K_C$  量化节律效应强度。 $S/P$ 、 $K_B$  和  $K_C$  的计算公式<sup>[17]</sup>分别为

$$S/P = 1700 \int_{380}^{780} P(\lambda) V'(\lambda) d\lambda \left/ \left[ 683 \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda \right] \right., \quad (1)$$

$$K_B = \int_{380}^{780} P(\lambda) B(\lambda) d\lambda \left/ \left[ K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda \right] \right., \quad (2)$$

$$K_C = K'_m \int_{380}^{780} P(\lambda) C(\lambda) d\lambda \left/ \left[ K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda \right] \right., \quad (3)$$

式中  $K_m$ 、 $K'_m$  分别为明视觉与节律效应最大光谱光效能, 分别为  $683, 3616 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ;  $P(\lambda)$  为光谱分布。若要利用上述 3 个公式进行计算分析, 在测得光谱分布数据的基础上, 还需要知道人眼的 4 个响应函数表达式。利用 OriginPro 软件对  $V(\lambda)$ 、 $V'(\lambda)$ 、 $C(\lambda)$  进行拟合, 拟合公式均为 Asym2Sig 函数, 表达式为  $y = y_0 + A \{1 / \{1 + \exp[-(x - x_c + w_1/2)/w_2]\}\} \{1 - 1 / \{1 + \exp[-(x - x_c - w_1/2)/w_3]\}\}$ 。对  $B(\lambda)$  采用 5 个 Gauss 函数叠加进行多峰拟合, 表达式为

$$y = y_0 + [A_1 / (w_1 \sqrt{\pi/2})] \exp\{-2 [(x - x_{c1}) / w_1]^2\} + [A_2 / (w_2 \sqrt{\pi/2})] \cdot \exp\{-2 [(x - x_{c2}) / w_2]^2\} + [A_3 / (w_3 \sqrt{\pi/2})] \exp\{-2 [(x - x_{c3}) / w_3]^2\} + [A_4 / (w_4 \sqrt{\pi/2})] \exp\{-2 [(x - x_{c4}) / w_4]^2\} + [A_5 / (w_5 \sqrt{\pi/2})] \exp\{-2 [(x - x_{c5}) / w_5]^2\}, \quad (4)$$

式中  $y$  为响应函数值,  $x$  为对应的波长, 其余均为待定参数。

4 个人眼响应函数的拟合结果见表 1。由表 1 可知, 4 个人眼响应函数的相关系数平方  $R^2$  均大于 0.99700, 且各参数的标准误差均较小。可见, 拟合质量较高, 能保证后续计算的精度。

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	$R^2$	Residual sum of squares	Residual mean square
Photopic vision	$y_0 = 3.659 \times 10^{-4}$ , $x_c = 558.416$ , $A = 1.182$ , $w_1 = 89.580$ , $w_2 = 15.731$ , $w_3 = 20.915$	0.99903	0.0042	$1.20059 \times 10^{-4}$
Scotopic vision	$y_0 = -0.0049$ , $x_c = 503.332$ , $A = 1.1828$ , $w_1 = 83.227$ , $w_2 = 19.803$ , $w_3 = 16.081$	0.99738	0.02247	$2.99624 \times 10^{-4}$
Blue light hazard	$y_0 = 6.737 \times 10^{-4}$ , $x_{c1} = 416.136$ , $w_1 = 6.368$ , $A_1 = 1.884$ , $x_{c2} = 423.378$ , $w_2 = 20.781$ , $A_2 = 11.572$ , $x_{c3} = 447.663$ , $w_3 = 40.110$ , $A_3 = 43.260$ , $x_{c4} = 480.622$ , $w_4 = 15.415$ , $A_4 = 2.908$ , $x_{c5} = 471.588$ , $w_5 = 73.451$ , $A_5 = 8.361$	0.99961	0.0037	$4.93971 \times 10^{-5}$
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	0.00245	$7.00378 \times 10^{-5}$

由上述知, 若用蓝光危害因子  $K_B$  和节律因子  $K_C$  来表征蓝光危害与节律效应的强弱, 则计算较为复杂。由图 1 中蓝光危害加权函数  $B(\lambda)$  计算  $\int_{400}^{500} B(\lambda) d\lambda \left/ \int_{380}^{780} B(\lambda) d\lambda = 0.956$ ,  $B(\lambda)$  的半峰宽为 71 nm, 可见蓝光危害加权因子函数 95.6% 位于 400~500 nm 波段, 且有较大的半峰宽, 可近似认为蓝光危害加权因子在 400~500 nm 范围内取值为 1, 其他范围的取值为 0。因此, 本课题组提出尝试用 400~500 nm 蓝光占比  $R_B$

来近似表征蓝光危害的强弱,  $R_B$  为光谱分布函数中蓝光波段 400~500 nm 光谱面积与可见光波段 380~780 nm 光谱面积之比, 其表达式为

$$R_B = \int_{400}^{500} P(\lambda) d\lambda / \int_{380}^{780} P(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

同理, 由于节律作用函数  $C(\lambda)$  主要位于 446~477 nm 波段, 本课题组提出利用 446~477 nm 蓝光占比  $R_C$  来近似表征节律效应的强弱, 其表达式为

$$R_C = \int_{446}^{477} P(\lambda) d\lambda / \int_{380}^{780} P(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

## 2.2 光谱测量

根据显示技术原理的不同, 选取当前最为流行的 4 种显示器 (CCFL 背光的 LCD、LED 背光的 LCD、OLED 及 CRT) 进行实验。4 种显示器均选自全球知名品牌产品, 主要参数见表 2。利用 PR-650 型光谱扫描式彩色频谱仪测量显示器色温分别为 1200, 1900, 2300, 2700, 3400, 4100, 5000, 6500 K 时的光谱分布, 结果如图 2 所示。图 2(d) 中的插图为 400~550 nm 的局部放大图。ISO 3664—2000 定义的标准光源为 D50, 色温为 5000 K, 以 5000 K 作为 4 种显示器的白场色温。在测量显示器光谱分布过程中, 同时测量 5000 K 色温时 4 种显示器在 380~780 nm 的辐照总量, 结果如表 3 所示。

表 2 不同显示器的主要参数

Table 2 Main parameters of different displays

Display type	Home screen material	Screen size /cm	Resolution / (pixel×pixel)	Pixel density / (pixel·cm <sup>-1</sup> )	Dot pitch /mm
CCFL backlight LCD	In-plane switch	60.960	1920×1200	37.008	0.270
LED backlight LCD	Twisted nematic	33.782	1440×900	50.394	0.248
OLED	High definition super active-matrix organic light emitting diode	12.192	1280×720	120.472	0.279
CRT		55.880	1920×1440	42.913	0.240

由图 2 可见, 4 种显示器在 400~500 nm 波段的光谱强度均随着色温的降低而减弱, 但不同显示器的光谱分布差异较大。因此, 有必要进一步定量研究 4 种显示器的蓝光危害与节律效应。

表 3 4 种显示器白场下可见光波段的辐照总量

Table 3 Total irradiance of four displays in visible light band under white field

Display	Total irradiance / (W·m <sup>-2</sup> )
CCFL backlight LCD	0.1980
LED backlight LCD	0.1400
OLED	0.0552
CRT	0.1070

## 3 结果与讨论

分别利用(1)式、(5)式、(6)式计算 4 种显示器在不同色温下的  $S/P$ 、 $R_B$  和  $R_C$ , 结果如图 3 所示。由图 3 可见, 4 种显示器的这 3 个参数均随着色温升高而增大。4 种显示器的暗明比  $S/P$  在小于 3400 K 的低色温下时差距不大。由于显示器的工作色温通常在 5000 K 以上, 因此仅关注 6500 K。显示器的正常使用对应于人眼明视觉, 因此当暗明比  $S/P$  较小时, 显示效率较高。色温为 6500 K 时, 仅从暗明比分析可得显示效率从高到低依次为 LED 背光 LCD、CCFL 背光 LCD、OLED、CRT。由图 3(b) 可见: 当色温在 1200~6500 K 范围内时, OLED 的  $R_B$  最小; 当色温为 6500 K 时, CRT 与 CCFL 背光 LCD 的  $R_B$  均在 40% 左右, 而 LED 背光 LCD 与 OLED 的  $R_B$  约为 32%。由图 3(c) 可见: 当色温大于 3400 K 时, OLED 的  $R_C$  开始大于其他三种显示器的  $R_C$ , 并快速增大; 当色温为 6500 K 时, CRT 与 LED 背光 LCD 的  $R_C$  均为 18% 左右, 而 OLED 与 CCFL 背光 LCD 的  $R_C$  相差约 10%。能否用  $R_B$  与  $R_C$  简单近似地反映蓝光危害和节律效应的强

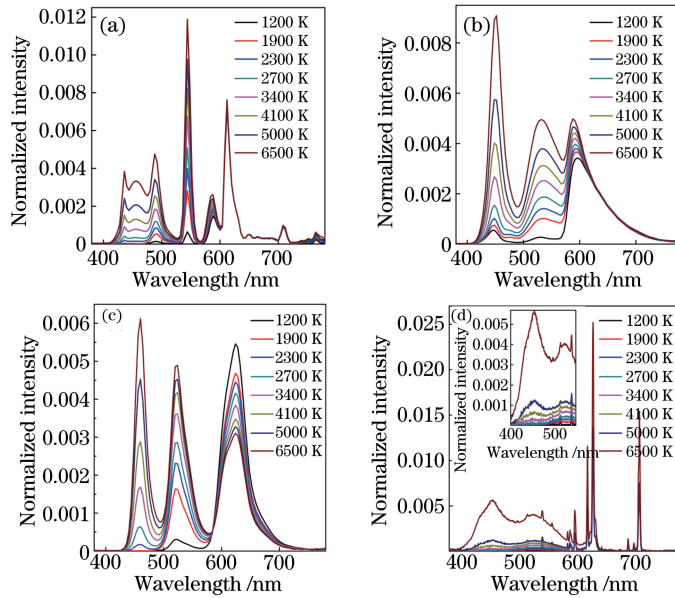


图 2 4 种显示器在不同色温下的归一化光谱分布。(a) CCFL 背光 LCD; (b) LED 背光 LCD; (c) OLED; (d) CRT

Fig. 2 Normalized spectral distributions of four kinds of displays at different color temperatures.

(a) CCFL backlight LCD; (b) LED backlight LCD; (c) OLED; (d) CRT

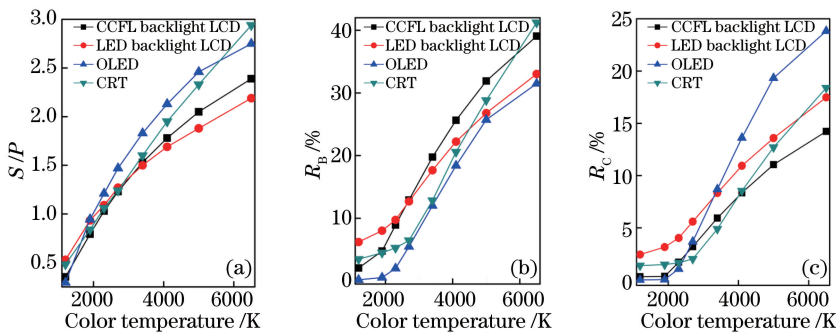


图 3 4 种显示器的  $S/P$ 、 $R_B$  和  $R_C$  随色温的变化

Fig. 3 Variations of  $S/P$ ,  $R_B$ , and  $R_C$  of four kinds of displays with color temperature

弱,还需要对蓝光危害因子、节律因子进行对比分析。

分别利用(2)式和(3)式计算 4 种显示器在不同色温下的蓝光危害因子和节律因子,结果如图 4 和图 5 所示。将图 4 与图 3(b)进行比较后可以发现,两幅图中 4 条曲线的变化趋势及分布几乎完全相同,这说明  $R_B$  与蓝光危害因子仅相差一个比例常数,对于 4 种显示器,在 1200~6500 K 色温范围内,可以用  $R_B$  代替

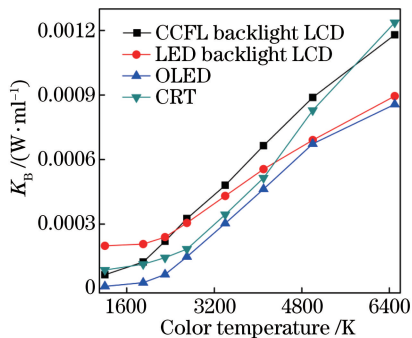


图 4 4 种显示器蓝光危害因子随色温的变化

Fig. 4 Blue light hazard factor of four kinds of displays changing with color temperature

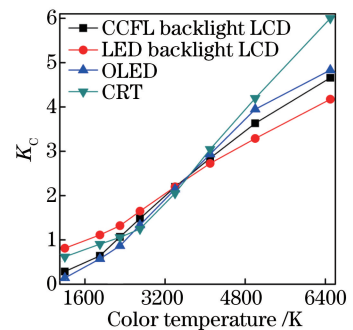


图 5 4 种显示器节律因子随色温的变化

Fig. 5 Circadian factor of four kinds of displays changing with color temperature

蓝光危害因子研究蓝光危害。比较图 5 与图 3(c)后可以发现,二者差距较大,即不能用  $R_C$  近似研究 4 种显示器节律效应随色温的变化。

由图 5 可见:当色温为 3400 K 时,4 种显示器的节律因子几乎相等,均约为 2.1 左右;当色温在 2700 K 以下时,4 种显示器节律因子由小到大的顺序为 OLED、CCFL 背光 LCD、CRT、LED 背光 LCD;当色温大于 4100 K 时,4 种显示器节律因子由小到大的顺序为 LED 背光 LCD、CCFL 背光 LCD、OLED、CRT;当色温为 6500 K 时,CRT 的节律因子远大于其他 3 种显示器。目前市场上的 CRT 已被淘汰,从节律效应角度分析,该趋势有利于降低非视觉效应对人眼的影响。

## 4 结 论

通过计算得到了 4 种显示器在不同色温下的  $R_B$ 、 $R_C$ 、蓝光危害因子及节律因子。当色温在 1200~6500 K 范围内时,4 种显示器的蓝光危害因子与节律因子均随色温升高而增大;可用  $R_B$  代替蓝光危害因子简单地分析比较 4 种显示器蓝光危害随色温的变化;当色温在 1200~6500 K 范围时,OLED 的蓝光危害因子最小;当色温为 6500 K 时,同时考虑蓝光危害与节律效应,4 种显示器从优到劣的顺序为 LED 背光 LCD、OLED、CCFL 背光 LCD、CRT。

## 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 International de L'Eclairage. Photobiological safety of lamps and lamp systems: CIE S 009/E—2002 [S]. 2002.
- [3] O'Hagan J B, Khazova M, Price L L A. Low-energy light bulbs, computers, tablets and the blue light hazard[J]. Eye, 2016, 30(2): 230-233.
- [4] Rao Feng, Xu Ancheng, Zhu Xifang. 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/OL]. (2013-07-15)[201705-30]. <http://www.docin.com/p-734771060.html>.
- [6] Noell W K, Walker V S, Kang B S, *et al.* Retinal damage by light in rats[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 1966, 5: 450-473.
- [7] 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.
- [8] Youssef P N, Sheibani N, Albert D M. Retinal light toxicity[J]. Eye, 2011, 25(1): 1-14.
- [9] Berson D M, Dunn F A, Takao M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock[J]. Science, 2002, 295: 1070-1073.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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, 崔海田, 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.
- [14] 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.
- [15] Enezi J, 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.
- [16] Baczynska K, Price L L A. Efficacy and ocular safety of bright light therapy lamps [J]. Lighting Research & Technology, 2013, 45(1): 40-51.
- [17] 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.