

LED 照明的非视觉生物效应随色温变化研究

杨超普^{1,2,4}, 方文卿^{3*}, 韩昌万^{1,4}, 阳帆^{2,3}, 刘明宝^{1,4}

¹商洛学院化学工程与现代材料学院, 陕西 商洛 726000;

²南昌大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330031;

³南昌大学国家硅基 LED 工程技术研究中心, 江西 南昌 330047;

⁴商洛学院陕西尾矿资源综合利用重点实验室, 陕西 商洛 726000

摘要 为了定量分析 LED 照明非视觉生物效应随色温的变化规律, 选择 8 种大色温范围(2678~7258 K)的 LED 照明光源, 特别是超低色温 LED, 采集 380~800 nm 可见光波段光谱分布数据。分别计算 8 种 LED 照明光源的 1931CIE-XYZ 标准色度系统色坐标 Z 值、415~508 nm 波段蓝光占比 R_c 和节律因子 K_c , 并采用最小二乘法进行线性拟合。研究结果表明: 当色温在 2678~7258 K 之间时, LED 照明光源非视觉生物效应随色温的增大而增强; 1931CIE-XYZ 标准色度系统色坐标 Z 值和 415~508 nm 波段蓝光占比可定量表征非视觉生物效应强弱; 色坐标 Z 值、415~508 nm 波段蓝光占比 R_c 和节律因子 K_c 随色温变化的函数表达式分别为 $Z = 0.01499 + 5.24009 \times 10^{-5} \times T_c$, $R_c = 1.41985 + 0.00508 \times T_c$, $K_c = 0.11895 + 6.06953 \times 10^{-4} \times T_c$, 相关系数平方 R^2 分别为 0.94427, 0.93589, 0.9598。色坐标 Z 值与节律因子 K_c 、415~508 nm 蓝光占比 R_c 与节律因子 K_c 的函数表达式分别为 $K_c = 11.40331 \times Z - 0.01209$, $K_c = 0.11698 \times R_c + 0.00618$, 相关系数平方 R^2 分别为 0.97991 和 0.97644。以上结论可为 LED 照明光源非视觉生物效应的定量分析以及高品质健康 LED 照明产品的开发提供参考。

关键词 视觉光学; LED; 色温; 非视觉生物效应

中图分类号 O433.4; TN312+.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.243301

Variation of Non-Visual Biological Effect of LED Lighting with Color Temperature

Yang Chaopu^{1,2,4}, Fang Wenqing^{3*}, Han Changwan^{1,4}, Yang Fan^{2,3}, Liu Mingbao^{1,4}

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

²School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

³National Engineering Technology Research Center for LED on Silicon Substrate, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China;

⁴Shaanxi Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China

Abstract In this study, eight LED lighting sources with a large color-temperature range (2678-7258 K), especially the ultralow-color-temperature LED, are selected to quantitatively analyze the variation in the non-visual biological effect of LED lighting with the color temperature. The spectral distribution data for the visible band at 380-800 nm are collected. The color-coordinate Z value of the 1931CIE-XYZ standard chromaticity system, the blue-light proportion R_c of the 415-508-nm band, and the rhythm factor K_c denote that the non-visual biological effect of the LED light source increases along with an increase in the color temperature from 2678 K to 7258 K. Furthermore, the color-coordinate Z value of the 1931 CIE-XYZ standard colorimetric system and the blue-light proportion at 415-508 nm can be used for quantitatively characterizing the strength of the non-visual biological effect. The functional

收稿日期: 2019-04-08; 修回日期: 2019-05-15; 录用日期: 2019-06-13

基金项目: 国家重点研发计划“战略性先进电子材料”重点专项(2017YFB0403700)、陕西省教育厅专项科研计划(16JK1241)、商洛市科技计划(SK2015-29)

* E-mail: fwq@ncu.edu.cn

expressions with respect to the changes in the color-coordinate Z value, the blue-light proportion R_C in 415-508 nm, and the rhythm factor K_C with the color temperature are $Z = 0.01499 + 5.24009 \times 10^{-5} \times T_C$, $R_C = 1.41985 + 0.00508 \times T_C$, and $K_C = 0.11895 + 6.06953 \times 10^{-4} \times T_C$, respectively. Further, the corresponding squares of the correlation coefficient R^2 are 0.94427, 0.93589, and 0.9598. The functional expressions of the color-coordinate Z value and the blue-light proportion R_C at 415-508 nm with respect to the rhythm factor K_C are $K_C = 11.40331 \times Z - 0.01209$ and $K_C = 0.11698 \times R_C + 0.00618$, respectively; the squares of the correlation coefficient R^2 are 0.97991 and 0.97644, respectively. These observations can be used for the quantitative analysis of the non-visual biological effect of the LED lighting sources and provide guidance for the development of high-quality-health LED illumination products.

Key words visual optics; LED; color temperature; non-visual biological effect

OCIS codes 330.1730; 300.6550; 260.3800

1 引言

非视觉生物效应是指可见光中的蓝光成分通过特化感光神经节细胞(ipRGC),经视交叉上核(SCN)抑制松果体分泌褪黑色素(Mel)、刺激肾上腺分泌皮质醇,进而改变人体生理节律,调节警觉度和生物钟^[1-3]。2002年,Berson等^[4]发现人眼视网膜上与视觉无关,但与节律相关的ipRGC,自此拉开了人造光源非视觉生物效应研究的序幕。al Enezi等^[5]和Baczynska等^[6]分别对Brainard等^[7]测定的节律作用函数 $C(\lambda)$ 数据进行了修正,为非视觉生物效应的定量计算提供了基础。2017年,Hall等因发现光调节昼夜节律的分子机制,获诺贝尔生理学 and 医学奖,将人造光源非视觉生物效应研究推向高潮^[3]。国际照明委员会(CIE TN 003:2015)、国际标准化组织/光与照明技术委员会(ISO/TC274 N 201)及2016年美国医学会等均呼吁关注人造光源的非视觉生物效应。非视觉生物效应已成为当前人造光源研究的前沿与焦点。

LED因具有高效节能、绿色环保、寿命长、响应快、控制灵活和安全可靠等显著优势,成为继油灯、白炽灯和荧光灯之后的第四代革命性照明光源。我国LED照明占照明行业总销售额的比例从2011年的5%快速增长至2016年的70%以上^[8]。基于冷阴极荧光灯管(CCFL)背光液晶显示器(LCD)、LED背光LCD、有机发光二极管(OLED)和阴极射线管(CRT)4种显示器的研究均表明:当色温在1200~6500 K之间时,非视觉生物效应均随色温的增大而增强^[9-10]。与显示器相比,大范围调节LED照明色温较为困难。另外,CIE定义的标准照明体D65色温为6500 K,而目前主流白光LED照明色温主要集中在5600~6500 K之间,这给大色温范围内研究LED照明的非视觉生物效应随色温的变化带来了一定的困难。近年来,为了降低LED照明的

非视觉生物效应,具有五基色和宽激发峰全光谱等特性的多种低色温LED照明产品应运而生^[11-12],使LED照明产品的色温范围进一步扩大。在大色温范围内,特别是在3000 K以下的超低色温下,定量研究LED照明的非视觉生物效应随色温的变化规律,对开发低非视觉生物效应LED照明产品意义重大。

2 实验

2.1 原理

人眼视网膜上已发现三类感光细胞,分别为锥状细胞、杆状细胞和ipRGC,其对应的功能分别为分辨颜色、感知光强和非视觉生物效应。三类感光细胞的可见光响应曲线分别为明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 、暗视觉光谱光效率函数 $V'(\lambda)$ 和节律作用函数 $C(\lambda)$,如图1所示。节律作用函数 $C(\lambda)$ 数据为2013年Baczynska K的修正结果。

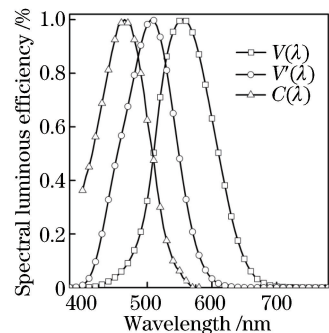


图1 人眼对可见光的响应函数

Fig. 1 Response functions of human eyes to visible light

前人提出利用节律因子 K_C 量化非视觉生物效应强弱^[13-14],其计算公式为

$$K_C = \frac{K'_m \int_{380}^{780} P(\lambda) C(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中: K_m 、 K'_m 分别为明视觉与节律效应的最大光谱

光效能,分别为 683 lm/W 和 3616 lm/W; $P(\lambda)$ 为被测光源光谱分布函数。

由图 1 可知,节律作用函数 $C(\lambda)$ 峰值在 464 nm 处,半峰全宽对应波长左右分别为 415 nm 和 508 nm。计算得出: $K_C = \int_{415}^{508} C(\lambda) d\lambda / \int_{380}^{780} C(\lambda) d\lambda \times 100\% = 83.21\%$, 即:节律作用函数主要位于 415~508 nm 蓝光波段,该波段蓝光占据了整个可见光非视觉生物效应的 83.21%。因此,本文尝试利用光源光谱分布中 415~508 nm 波段面积占 380~780 nm 可见光波段面积的比值来近似表征非视觉生物效应强弱,计算公式为

$$R_C = \frac{\int_{415}^{508} P(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda) d\lambda} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: R_C 为 415~508 nm 波段蓝光占比。

色坐标是色度学的重要内容之一,即颜色的坐标,也称为表色系。1931CIE-XYZ 标准色度系统色坐标由 X、Y、Z 三个数值组成,分别代表红基色比例、绿基色比例和蓝基色比例,由于存在 $X + Y + Z = 1$ 的约束条件,故色坐标仅需给出 X、Y 两个数

值即可,在 1931 CIE-XYZ 色度图中,一组 (X, Y) 对应一个坐标点。LED 照明非视觉生物效应强弱直接由光谱分布中的蓝光剂量决定,1931CIE-XYZ 标准色度系统色坐标 Z 值代表对应光谱分布的蓝基色比例。故本文提出利用色坐标 Z 值来表征 LED 照明节律效应强弱。

选择不同色温 LED 照明光源,采集光谱分布,利用(1)、(2)式,以及色坐标计算软件,分别计算不同色温 LED 照明光源的节律因子 K_C 、415~508 nm 波段蓝光占比 R_C 和色坐标 Z 值,研究 LED 照明的非视觉生物效应随色温的变化。

2.2 光谱采集

选择多种正规厂家生产的合格 LED 灯具,使其在光学暗室中正常稳定工作。利用杭州慧谱仪器有限公司生产的 SPEC-3000A 型积分球光谱仪,分别采集被测可变色温 LED 灯、LED 蜡烛灯、LED 小夜灯和 LED 光健康灯等不同色温 LED 照明产品 380~800 nm 可见光波段光谱分布数据,光谱扫描步长为 1 nm。对不同色温 LED 照明光谱分布数据进行归一化处理,结果如图 2 所示。

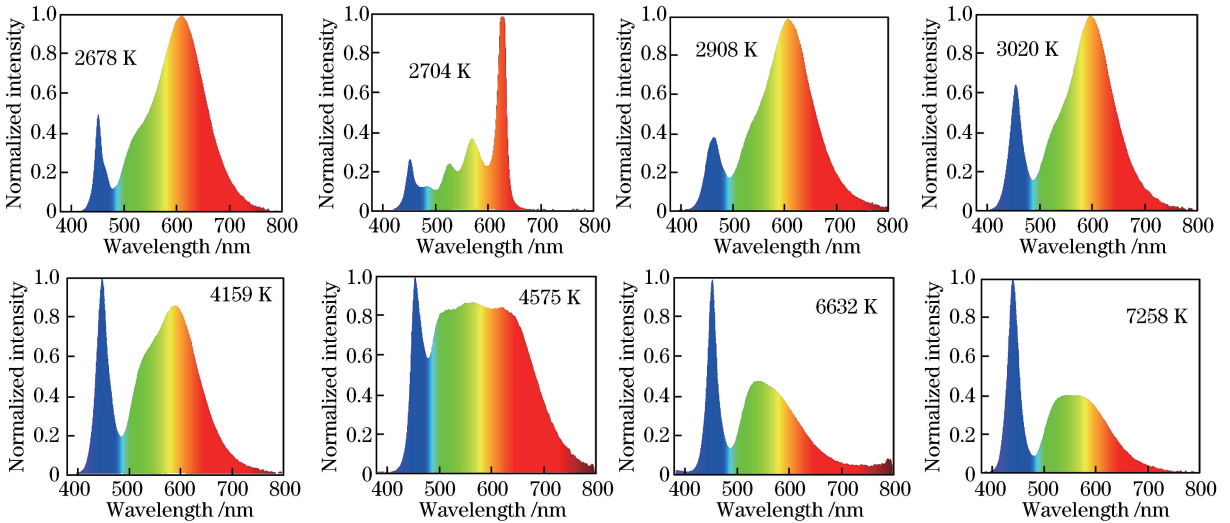


图 2 不同色温 LED 照明归一化光谱分布

Fig. 2 Normalized spectral distributions of LED lighting at different color temperatures

由图 2 可见,不同色温 LED 照明光谱分布形状各不相同,且蓝光剂量差距较大。LED 照明非视觉生物效应强弱随色温的变化而变化。通过比较 8 种不同色温 LED 照明光谱分布可知,色温为 2704 K 的 LED 照明光谱分布与其他 7 种色温 LED 照明差别最大,其光谱由 5 个峰叠加而成,峰值分别为 455, 482, 528, 572, 623 nm, 该 LED 照明采用无粉 LED 混光技术,通过五基色 LED(蓝、青、绿、黄、红)

封装得到全光谱白光^[11,15]。另外,色温为 4575 K 的 LED 照明光谱分布面积明显大于其他 7 种色温 LED 照明,该 LED 照明具有较大的光通量,荧光粉激发峰(半峰全宽约为 249.2 nm)明显宽于其他 6 种 LED 照明,故该 LED 照明光谱分布中蓝光占比较小,可有效降低非视觉生物效应,是一种全光谱健康 LED 照明。在 8 种 LED 照明中,除 2704 K 五基色 LED 照明之外,其余 7 种 LED 照明均采用

450 nm蓝光 LED 激发黄色荧光粉,混合出白光。当色温大于 4159 K 时,8 种 LED 照明在 450 nm 附近的蓝光峰高度超过激发荧光粉峰。

3 结果与讨论

3.1 色坐标 Z 值计算分析

分别将图 2 所示的 8 种 LED 照明归一化光谱分布数据导入 OSRAM COLOR CALCULATOR 色度分析软件,得到对应的 1931CIE-XYZ 标准色度系统 X、Y 值,再由 $Z = 1 - X - Y$ 计算对应色坐标的 Z 值。绘制 8 种不同色温 LED 照明色坐标 Z 值随色温的变化,如图 3 所示。

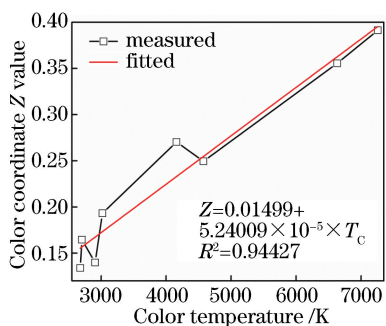


图 3 LED 照明 1931 CIE-XYZ 标准色度系统 Z 值随色温变化

Fig. 3 Z value of LED lighting of 1931 CIE-XYZ standard chromaticity system varies with color temperature

由图 3 可见,8 种不同色温 LED 照明,当色温在 4575~7258 K 之间时,色坐标 Z 值随色温的增加呈线性递增趋势;当色温在 2678~4575 K 之间时,色坐标 Z 值随色温的增加出现较大幅度的波动。通过整体分析可知,8 种不同色温 LED 照明色坐标 Z 值随色温的增加呈线性递增趋势。利用 OriginPro 软件的 Fit linear 功能,采用最小二乘法的线性拟合得到 Z 值与色温 T_C 的关系式: $Z = 0.01499 + 5.24009 \times 10^{-5} \times T_C$,相关系数平方 $R^2 = 0.94427$ 。拟合结果表明,当色温在 2678~7258 K 之间时,8 种不同色温 LED 照明色坐标 Z 值随色温的增加总体呈较明显的线性递增趋势,即:随着色温的增加,LED 照明的蓝基色比例增加,非视觉生物效应增强。

3.2 蓝光占比计算分析

利用(2)式分别计算 8 种不同色温 LED 照明归一化光谱分布中 415~508 nm 波段蓝光面积与 380~780 nm 可见光波段面积的比值。绘制 8 种不同色温 LED 照明蓝光占比随色温的变化,如图 4 所示。

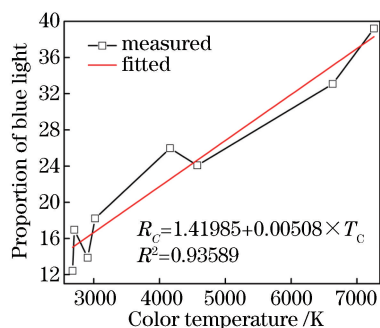


图 4 LED 照明 415~508 nm 蓝光占比随色温变化
Fig. 4 Proportion of 415-508 nm blue light of LED lighting varies with color temperature

通过对比图 4 与图 3 可知,图 4 中 8 种不同色温 LED 照明除色温为 7258 K 的 LED 照明之外,其余 7 种色温 LED 照明 415~508 nm 波段蓝光占比随色温的变化规律与图 3 中色坐标 Z 值类似。与图 3 所述结果相同,8 种不同色温 LED 照明 415~508 nm 波段蓝光占比随色温的增加总体呈线性递增趋势。利用 OriginPro 软件的 Fit linear 功能,采用最小二乘法的线性拟合得到蓝光占比 R_C 与色温 T_C 的关系式为: $R_C = 1.41985 + 0.00508 \times T_C$,相关系数平方 $R^2 = 0.93589$ 。拟合结果表明,当色温在 2678~7258 K 之间时,8 种不同色温 LED 照明 415~508 nm 波段蓝光占比随色温的增加总体呈较明显的线性递增趋势,即:随着色温的增加,LED 照明的 415~508 nm 波段蓝光占比依次增加,非视觉生物效应增强。

3.3 节律因子分析

利用(1)式分别计算 8 种不同色温 LED 照明的节律因子。绘制 8 种不同色温 LED 照明节律因子随色温的变化,如图 5 所示。

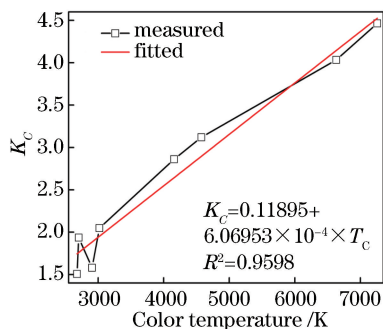


图 5 LED 照明节律因子随色温变化

Fig. 5 Rhythm factor of LED lighting varies with color temperature

由图 5 可见,当色温在 3020~7258 K 之间时,8 种不同色温 LED 照明的节律因子随色温的增加呈

较明显的线性递增趋势。当色温在 2678~3020 K 之间时,节律因子随色温的增加出现较大幅度的波动。与上文所述结果相同,8 种不同色温 LED 照明节律因子随色温的增加总体呈线性递增趋势。利用 OriginPro 软件的 Fit linear 功能,采用最小二乘法的线性拟合得到节律因子 K_C 与色温 T_C 的关系式; $K_C=0.11895+6.06953 \times 10^{-4} \times T_C$,相关系数平方 $R^2=0.9598$ 。拟合结果表明,当色温在 2678~7258 K 之间时,8 种不同色温 LED 照明节律因子随色温的增加呈较明显的线性递增趋势,即:随着色温的增加,LED 照明的节律因子增大,非视觉生物效应增强。

3.4 误差分析

为了进一步验证利用色坐标 Z 值与 415~508 nm 蓝光占比 R_C 表征不同色温 LED 照明光源非视觉生物效应强弱的可行性,分别研究不同色温 LED 照明的节律因子 K_C 与色坐标 Z 值、415~508 nm 蓝光占比 R_C 之间的关系,结果分别如图 6 和图 7 所示。利用 OriginPro 软件分别拟合色坐标 Z 值与节律因子 K_C 、415~508 nm 蓝光占比 R_C 与节律因子 K_C 的函数表达式,分别为: $K_C=11.40331 \times Z-0.01209$, $K_C=0.11698 \times R_C+0.00618$,相关系数平方 R^2 分别为 0.97991 和 0.97644。由拟合结果可知,色坐标 Z 值与节律因子 R_C 、415~508 nm 蓝光占比 R_C 与节律因子 K_C 均呈较强的线性关系,故可利用色坐标 Z 值与 415~508 nm 蓝光占比 K_C 来表征不同色温 LED 照明光源非视觉生物效应的强弱。

为了进一步验证利用色坐标 Z 值与 415~508 nm 蓝光占比 R_C 表征不同色温 LED 照明光源

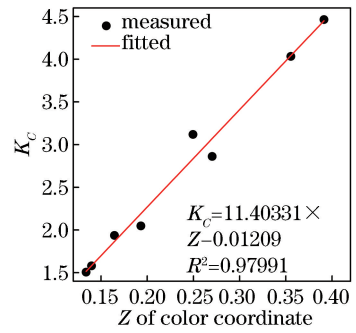


图 6 LED 照明色坐标 Z 值与节律因子 K_C 的关系
Fig. 6 Relationship between LED lighting color coordinate Z value and rhythm factor K_C

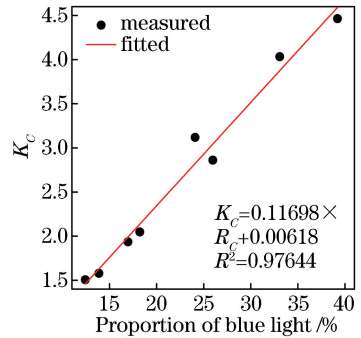


图 7 LED 照明 415~508 nm 蓝光占比 R_C 与节律因子 K_C 的关系

非视觉生物效应强弱的准确性,分别利用 $R_C=11.40331 \times Z-0.01209$ 、 $K_C=0.11698 \times R_C+0.00618$ 计算不同色温 LED 照明的节律因子,并将其与直接由(1)式计算所得的结果进行对比,计算对应的相对误差,结果见表 1。

表 1 不同方法计算得到的节律因子 K_C 及相对误差

Table 1 Rhythm factors K_C and relative errors calculated by different methods

Color temperature /K	Rhythm factor K_C	Calculated K_C according to Z		Calculated K_C according to R_C	
		Result	Relative error /%	Result	Relative error /%
2678	1.5061	1.5148	0.576	1.4591	3.120
2704	1.9360	1.8649	3.673	1.9902	2.798
2908	1.5801	1.5821	0.126	1.6283	3.049
3020	2.0480	2.1910	6.982	2.1366	4.326
4159	2.8614	3.0702	7.299	3.0437	6.371
4575	3.1188	2.8330	9.164	2.8229	9.489
6632	4.0332	4.0418	0.212	3.8753	3.917
7258	4.4642	4.4500	0.318	4.5916	2.853

由表 1 可知,根据色坐标 Z 值与节律因子 K_C 的关系式 $K_C=11.40331 \times Z-0.01209$ 计算不同色温 LED 照明的节律因子,得到 8 种不同色温 LED 照明的最大相对误差为 9.164%,平均相对误差为

3.544%;根据 415~508 nm 蓝光占比 R_C 与节律因子 K_C 的关系式 $K_C=0.11698 \times R_C+0.00618$ 计算不同色温 LED 照明的节律因子,8 种不同色温 LED 照明的最大相对误差为 9.489%,平均相对误差为

4.490%。由此可见,利用色坐标 Z 值与 415~508 nm 蓝光占比 R_c 表征不同色温 LED 照明光源非视觉生物效应强弱,具有较高的准确性。

4 结 论

选择 8 种具有代表性的 LED 照明光源,色温范围为 2678~7258 K,采集 380~800 nm 可见光波段光谱分布数据。分别计算 8 种 LED 照明光源的 1931CIE-XYZ 标准色度系统色坐标 Z 值、415~508 nm 波段蓝光占比 R_c 和节律因子 K_c 。定量分析 LED 照明的非视觉生物效应随色温变化,得到以下结论:

1) 当色温在 2678~7258 K 之间时,LED 照明光源的非视觉生物效应随色温的增大而增强;

2) 1931CIE-XYZ 标准色度系统色坐标 Z 值和 415~508 nm 波段蓝光占比可定量表征非视觉生物效应强弱;

3) 色坐标 Z 值、415~508 nm 波段蓝光占比 R_c 、节律因子 K_c 随色温的变化函数表达式分别为 $Z=0.01499+5.24009 \times 10^{-5} \times T_c$, $R_c=1.41985+0.00508 \times T_c$, $K_c=0.11895+6.06953 \times 10^{-4} \times T_c$, 相关系数平方 R^2 分别为 0.94427、0.93589 和 0.9598。

4) 色坐标 Z 值与节律因子 K_c 、415~508 nm 蓝光占比 R_c 与节律因子 K_c 的函数表达式分别为 $K_c=11.40331 \times Z-0.01209$, $K_c=0.11698 \times R_c+0.00618$, 相关系数平方 R^2 分别为 0.97991 和 0.97644。

以上结论可为 LED 照明光源非视觉生物效应的定量分析以及高品质健康 LED 照明产品的开发提供参考。

参 考 文 献

- [1] ISA, CSA, CIES. General lighting LED and blue light (White Paper) [R/OL]. (2013-07-30) [2019-04-07]. <https://wenku.baidu.com/view/ad3edb14804d2b160b4ec067.html>.
国际半导体照明联盟(ISA), 国家半导体照明工程研发及产业联盟(CSA), 中国照明学会(CIES). 普通照明 LED 与蓝光(白皮书)[R/OL]. (2013-07-30) [2019-04-07]. <https://wenku.baidu.com/view/ad3edb14804d2b160b4ec067.html>.
- [2] Yang C P, Fang W Q, Liu M B, *et al.* Blue light hazard and non-visual biological effect of LED backlight displayer at different color temperatures

[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 101701.

杨超普, 方文卿, 刘明宝, 等. 不同色温 LED 背光屏的蓝光危害和非视觉生物效应[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 101701.

- [3] Yang C P, Fang W Q, Liu M B, *et al.* A visualization evaluation method for blue light hazard and circadian effect of light source[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(11): 3476-3482.
杨超普, 方文卿, 刘明宝, 等. 一种光源的蓝光危害与节律效应可视化评估方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(11): 3476-3482.
- [4] 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.
- [5] al 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): 314-323.
- [6] Baczynska K, Price L L A. Efficacy and ocular safety of bright light therapy lamps [J]. *Lighting Research & Technology*, 2013, 45(1): 40-51.
- [7] 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]. *The Journal of Neuroscience*, 2001, 21(16): 6405-6412.
- [8] Dou L P. Lighting industry enters the era of LED lighting[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2017, 28(5): 88-93.
窦林平. 照明行业进入 LED 照明时代[J]. *照明工程学报*, 2017, 28(5): 88-93.
- [9] Yang C P, Fang W Q, Tang J C, *et al.* Change of blue light hazard and circadian effect of LED backlight displayer with color temperature and age [J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27021-27032.
- [10] Yang C P, Fang W Q, Wang Z, *et al.* Comparison on blue light hazard and circadian effect of different displays [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121701.
杨超普, 方文卿, 王昭, 等. 不同显示器的蓝光危害及节律效应比较[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121701.
- [11] Liu J L, Mo C L, Zhang J L, *et al.* Progress of five primary colours LED lighting source technology[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2017, 28(1): 1-4, 29.

- 刘军林, 莫春兰, 张建立, 等. 五基色 LED 照明光源技术进展[J]. 照明工程学报, 2017, 28(1): 1-4, 29.
- [12] Li Q, Xin Y. Advancement and trends of full spectrum LED[J]. China Light & Lighting, 2017 (3): 12-16.
李琪, 辛易. 全光谱 LED 发展现状及应用前景[J]. 中国照明电器, 2017(3): 12-16.
- [13] Dai Q, Shan Q F, Lam H, *et al.* Circadian-effect engineering of solid-state lighting spectra for beneficial and tunable lighting[J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20049-20058.
- [14] Dai Q, Cai W J, Shi W, *et al.* A proposed lighting-design space: circadian effect versus visual illuminance[J]. Building and Environment, 2017, 122: 287-293.
- [15] Tian H J, Hao T T, Guan T, *et al.* Discomfort glare caused by R/G/B/W four-color light emitting diode sources[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 132301.
田会娟, 郝甜甜, 关涛, 等. R/G/B/W 4 色 LED 光源不舒适眩光研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(13): 132301.