

文章编号: 1000-7032(2016)02-0250-06

## LED 照明节律效应随年龄的变化

饶 丰<sup>1,2,3</sup>, 徐安成<sup>1</sup>, 朱锡芳<sup>1\*</sup>

(1. 常州工学院 电气与光电工程学院, 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:** 研究了不同色温 LED 照明时节律效应随年龄的变化规律。在节律因子计算公式中, 引入不同年龄人眼的透射谱, 分析 LED 色温和年龄对节律因子的影响。然后, 测量了 12 名老年和 18 名青年男性在黑暗状态下以及照度为 500 lx、不同色温 LED 照明时的心率, 采用黑暗状态与照明状态的心率变化表征节律效应, 来验证所得的理论规律。结果表明: 色温为 6 500, 5 500, 4 500, 3 500 K 的 LED 照明时, 青年人(20 岁)的节律因子分别为 1.1, 0.7, 0.5, 0.44, 不同色温 LED 照明时心率变化率差异明显; 老年人(65 岁)的节律因子分别为 0.5, 0.3, 0.25, 0.2, 不同色温下心率变化较小。在同一色温 LED 照明时, 节律效应随着年龄的增加而减小。LED 色温不同时, 青年人节律因子的变化较大, 老年人则变化较小。

**关键词:** 生物光学; 节律; 年龄; 色温; 心率

中图分类号: TN312<sup>+</sup>.8; Q495

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20163702.0250

## Change of The Circadian Effect of LED Lighting with Age

RAO Feng<sup>1,2,3</sup>, XU An-cheng<sup>1</sup>, ZHU Xi-fang<sup>1\*</sup>

(1. School of Electrical and Optoelectronic Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;  
2. Changzhou Institute of Modern Optoelectronic Technology, Changzhou 213002, China;  
3. Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Devices of Changzhou City, Changzhou 213002, China)

\* Corresponding Author, E-mail: zhuxf@czu.cn

**Abstract:** The change rule of circadian effects with ages in LED lighting of different color temperatures was studied. The ocular transmittances of different ages were introduced into the calculation formula of circadian action factor, and then the changes with ages and LED temperatures color were obtained. The heart rates of 12 old and 18 young male participates were measured in black and LED lighting of different color temperatures and the illuminance of 500 lx. The difference of heart rate between black and lighting was proposed to determine the circadian effect in order to verify the calculated results. Under the LED lighting conditions with the color temperatures of 6 500, 5 500, 4 500, 3 500 K, the circadian action factors of the young are 1.1, 0.7, 0.6, 0.44, respectively, and the heart rate changes differ significantly among different color temperature LED lighting. The circadian action factors of the old are 0.5, 0.3, 0.25, 0.2, respectively, and the heart rate change little among color temperatures. The circadian action factor of the same color temperature LED lighting decreases as the age increases. The circadian action factor of the young varies across different color temperatures LED lighting, therefore, the old changes little.

**Key words:** biological optics; circadian rhythm; age; color temperature; heart rate

收稿日期: 2015-10-26; 修订日期: 2015-12-10

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(141KJB140001); 江苏省高校优秀中青年骨干教师和校长境外研修计划、江苏高校文化创意协同创新中心项目(XYN1406); 常州市科技支撑计划(CE20155053)资助项目

## 1 引言

2002年,美国Brown大学David M Berson等在老鼠的视网膜上发现了与节律效应相关的自主感光视网膜神经节细胞(ipRGC)。该细胞对视觉无作用,但是,视网膜接收的光信号能够通过它传递到下丘脑视交叉上核,刺激下丘脑的松果体,控制人体某些激素的分泌,进而调节生理节律和激素水平,影响人体的生理指标<sup>[1]</sup>。该效应被称为光的节律效应,其主导波段是460~490 nm波段的蓝光<sup>[2-3]</sup>。LED照明光谱中蓝光成分比较多,因此,研究LED照明与人体节律之间的关系,具有重要的意义。

光对节律效应影响的研究比较多。2005年,Cajochen等发现波长460 nm的LED光能使人体体温升高,心率加快<sup>[4]</sup>。2011年,Cajochen等又发现LED背光源对认知水平和节律影响明显<sup>[5]</sup>。2012年,Smolders等统计了LED照明对人体警觉性的促进作用<sup>[6]</sup>。严永红、黄海静等研究了教室荧光灯照明对学生学习效率、瞳孔和心率的影响,发现4 000 K荧光灯下学生感觉最舒适<sup>[7-8]</sup>。林燕丹等发现适量蓝光可以缓解疲劳<sup>[9]</sup>。居家奇则给出了心率、体温和血压等生理参数随LED光强度和光谱分布的变化关系,并提出了基于心率的光生物作用函数<sup>[10]</sup>。鲁玉红等测量了不同波长的LED蓝光照明下人的心率变化<sup>[11]</sup>。宋丽妍等报道了LED显示屏动态显示对节律效应的统计规律<sup>[12]</sup>。随着研究的深入,基于节律效应的照明与显示的评价也受到了重视,人们提出了采用节律因子评价照明质量的方法<sup>[13-14]</sup>,获得了广泛的认可。但是,该方法考虑的是普适的节律效应,没有区分不同年龄人的差异。事实上,光对节律效应的影响与年龄相关<sup>[15-16]</sup>。

研究表明:光对节律效应的影响主要由入射至视网膜的光度和视网膜节律函数决定。动物临床研究表明,节律函数随年龄的变化不明显<sup>[17]</sup>。但是,入射至视网膜的光与人眼的透光率密切相关,而人眼透光率随年龄的增长而降低,二者有统计规律<sup>[18-19]</sup>。因此,年龄与节律效应之间应该存在内在联系。基于此,本课题组曾经研究了LED背光对节律效应的影响随年龄的变化关系<sup>[20]</sup>,但是,LED背光源与LED照明光源存在明显的差异,该结果不能应用于LED照明中。因

此,本文研究了LED照明的节律效应随年龄的变化规律,为基于光生物节律效应的个性化LED照明设计和评价提供理论依据。

## 2 原理

### 2.1 人眼透射谱

人眼内吸收光的器官主要是晶状体。随着年龄的增长,晶状体前囊膜不断增厚,质量和密度不断增加<sup>[21]</sup>,导致光程越来越长,吸收率越来越高。2012年,国际照明委员会给出了人眼透射谱计算模型<sup>[19]</sup>,图1是据此得到的从新生儿到100岁人眼的值。可见,透射谱随着年龄增长不断下降,其中蓝光下降得最为明显,红光部分变化较小。

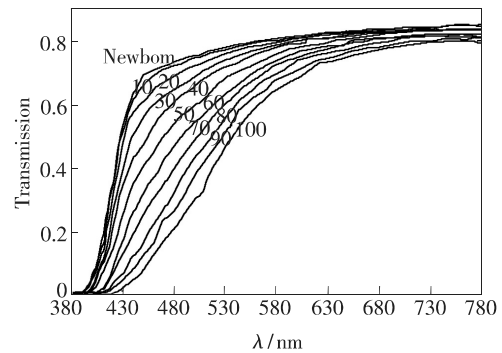


图1 不同年龄人眼晶状体的透射谱

Fig. 1 Lens spectral transmittance of different age

### 2.2 节律函数

节律函数是描述视网膜将光转换为节律效应的加权函数。目前节律函数并没有统一的标准值,国内外研究中常常采用2001年Brainard等根据年轻人(平均24.5岁)褪黑激素受光照影响得到的值<sup>[2-3,14]</sup>,本研究也采用该值。图2中虚线为该值,实线是明视觉视见函数,点划线是6 500 K LED的归一化光谱分布。可见,节律函数在视见

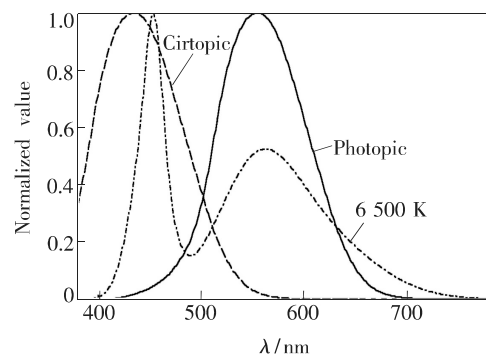


图2 节律函数、明视觉视见函数和白色LED光谱分布。

Fig. 2 Circadian function, photopic vision function and white light LED spectral distribution.

函数的左边,峰值波长 446 nm 左右,与蓝色 LED 的峰值波长(460 nm)较吻合,远小于视觉函数的中心波长 555 nm,因此 LED 照明对节律效应影响较大。

### 2.3 节律因子

节律因子  $K_C$  [13-14,22] 可以由以下公式计算:

$$K_C = \frac{\int_{380}^{780} L(\lambda) C(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} L(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中,  $L(\lambda)$  是角膜前光谱辐亮度分布,  $C(\lambda)$  是节律函数,  $V(\lambda)$  是明视觉视觉函数。由于文献[2]公布的  $C(\lambda)$  对应的平均年龄为 24.5 岁,本研究采用 24.5 岁成年人眼为标准,则其他年龄人眼入射至视网膜的光谱辐亮度分布可写为  $L(\lambda) \cdot \frac{T_n(\lambda)}{T_{24.5}(\lambda)}$ , 式中,  $T_n(\lambda)$  表示人眼透射谱,  $n$  为年龄。不同年龄的节律因子  $K_C(n)$  可以写成:

$$K_C(n) = \frac{\int_{380}^{780} L(\lambda) \frac{T_n(\lambda)}{T_{24.5}(\lambda)} C(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} L(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

很明显,式(1)是式(2)在  $n$  为 24.5 岁时的结果。式中如果采用其他光谱辐射量代替  $L(\lambda)$ , 如光谱辐照度分布、光谱辐射能量分布和光谱辐射功率分布,不影响结果。

## 3 实 验

根据公式(2),只需测量出不同色温下 LED 灯具的光谱分布,就可以得到节律因子随年龄的变化关系。人体的许多参数与节律效应有关,如褪黑激素水平、瞳孔和心率的变化等。采用褪黑激素表征节律效应,耗时长,需要测试者的血液样本,实验复杂且存在伦理风险<sup>[9]</sup>,一般非医学临床研究不采用。瞳孔变化也是重要的表征参数,但是它受视觉通道影响比较严重。因此,本研究采用心率的变化作为表征指标,来验证所得规律。由于节律效应影响因素多且复杂,本实验只在误差范围内做统计分析。

### 3.1 实验样品

本研究选择标称色温分别为 3 500, 4 500, 5 500, 6 500 K 的 1 W LED 若干只,先用杭州远方公司的光谱仪 Hass2000 测量电流为 100 ~ 350

mA(间隔 50 mA)时 LED 在室温下的色温,选择不同条件下实测色温与标称色温相差均不超过 100 K 的 LED,每种 5 只作为实验样品。实验前,LED 样品均老化 12 h,老化电流为额定电流,温度为室温。

### 3.2 实验装置

为了减小热效应对色温的影响,本实验采用多只同色温 LED 串联成灯串作为光源,置入 50 cm 直径的积分球中。积分球一侧开有 10 cm 直径的大孔,供人眼观察用;另一侧开有直径不超过 1 cm 的小孔,供导线通过。如图 3 所示,将光源置于积分球内壁,导线通过小孔连接到恒流电源 DC,在电流驱动下,LED 发光,经过积分球的漫反射,形成均匀光,从大孔出射。改变恒流电源的电流,就可以调节出射光通量。实验装置置于暗室(照度小于 1 lx)中,实验者与积分球之间距离为 1 m,光从孔出射后,均匀地投射至人眼。采用杭州远方公司的 SPIC-200 型手持式光谱仪测量人眼位置的光谱分布,用 Z-10 型照度计测量人眼处的照度。采用 PC-3000 型监护仪测量心率。

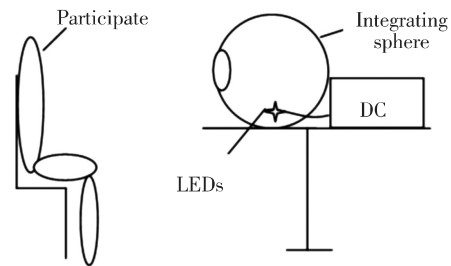


图 3 实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental facility

### 3.3 实验步骤

#### 3.3.1 光谱测量

(1) 选择色温为 3 500 K 的灯具,调整恒流电源的电流,使得人眼处的照度为 500 lx,即日常工作的照度水平。

(2) 测量人眼处的光谱功率分布,代入公式(2)可以得到不同年龄对应的  $K_C$ 。

(3) 依次选择 4 500, 5 500, 6 500 K 的灯具,测量其光谱分布,并计算对应的  $K_C$ ,就可得不同色温下节律因子随年龄的变化关系。

#### 3.3.2 心率测量

在学校招募到男学生志愿者 18 人,年龄为  $(20 \pm 1)$  岁,无眼疾,近视度数小于 3.00 D,散光小于 0.50 D。招募到 12 名退休男志愿者,年龄为

62~74岁,平均65岁,无眼疾,眼屈光度小于3.00 D,散光小于0.50 D。所有参与者均根据自身需要佩戴近视或老花眼镜。测试步骤如下:

(1)在下午3:50~5:00时间段,请测试者坐在椅子上,保持暗室无光,休息待心率平稳(波动小于3 beat/min)后,测量1 min内的平均心率,作为黑暗时的心率。

(2)接通3 500 K的LED灯串,调节电流使得人眼处照度为500 lx,5 min后开始测量心率,每隔1 min测量一次,直到第10 min。测试过程中,所有人不发出声响,受试者保持不动。

(3)将测量的6个心率值去除最大值和最小值,余下4个求平均,作为最终结果。

(4)依次更换4 500,5500,6 500 K的LED灯具,重复1~3次,得到该实验者在不同色温下的心率。

## 4 结果与讨论

### 4.1 LED光谱分布

图4是不同色温的LED灯串的归一化光谱分布。由于实验样品均是采用蓝光芯片与荧光粉复合而成,光谱分布中两峰明显,随着色温的降低,荧光粉峰明显升高。

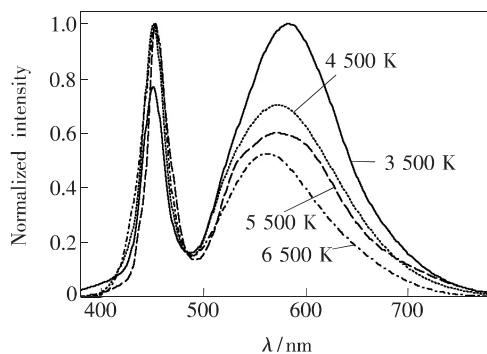


图4 LED光谱分布

Fig. 4 LED spectral distributions

### 4.2 节律因子随年龄的变化

图5是不同色温LED的节律因子随年龄的变化关系。可以看出,对于不同色温LED,20岁时节律因子分别为1.1,0.7,0.5,0.44;70岁时分别为0.5,0.3,0.25,0.2。不同年龄不同色温下,节律效应相差2~6倍。

还可以看出,无论何色温LED,随着年龄的增加,节律因子均不断减小。这是因为人眼透射谱随年龄增长而降低的缘故。同时,LED色温越

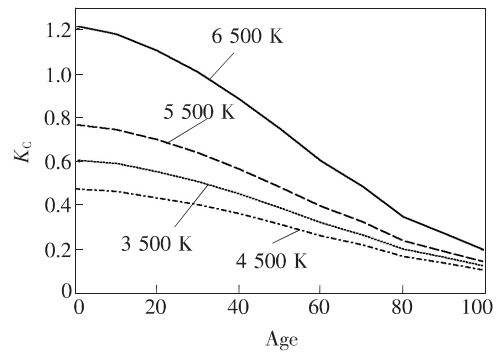


图5 节律因子随年龄的变化

Fig. 5 Circadian factor vs. age

高,节律因子减小得越快。这主要是因为高色温LED的蓝色成分比较多,而人眼透射谱蓝色波段随年龄变化最明显。

对于年轻人,节律因子随色温的差异比较大,随着年龄的增加,这种差异逐渐减小。说明年轻人的节律效应受视网膜照度和色温双重影响,而老年人的节律效应主要取决于视网膜光照度,对色温不敏感。

### 4.3 实验验证

定义心率变化率 $\Delta R$ :

$$\Delta R = \frac{R_{\text{black}} - R_{\text{light}}}{R_{\text{black}}} \times 100\%, \quad (3)$$

$R_{\text{black}}$ 为黑暗时的心率, $R_{\text{light}}$ 为受光后的心率。

图6是老年人和青年人两组人群的心率变化率及其分布。每组从左到右,4个方黑点分别对应500 lx照度,6 500,5 500,4 500,3 500 K 4种色温环境下的同组人员的平均值,竖线表示所测心率的分布范围。统计表明,同一光照条件下,青年人的心率变化大于老年人,因此,节律因子与年龄相关。青年人在6 500 K时的心率变化显著大于

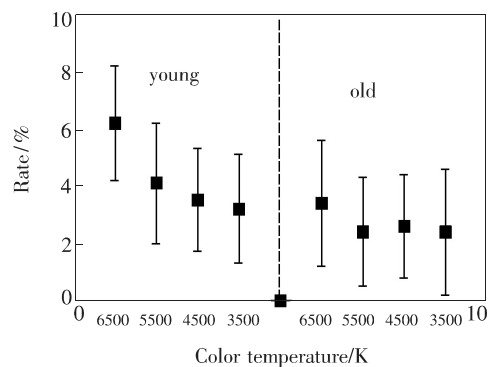


图6 老年人和青年人的心率变化率

Fig. 6 Change rates of heart rate of the young and the old participants

其他色温( $t$ 检测,  $P < 0.01$ ), 5 500, 4 500, 3 500 K 3 种色温之间的心率变化有显著性( $t$ 检测,  $P < 0.05$ )。可见, 对于年轻人, 色温高心率变化大。对于老年人, 6 500 K 与 4 500 K 时的心率变化比较有统计意义( $t$ 检测,  $P < 0.05$ ), 其他情况统计差异不明显( $t$ 检测,  $P > 0.05$ )。因此, 老年人心率变化受色温影响较小。这与节律因子随年龄变化的理论分析相一致。

## 5 结 论

LED 已经广泛地应用到照明领域, 因其蓝光

成分比较高, 带来的节律效应比较明显。同时, 不同年龄人眼的透射谱又不同, 导致同一照明条件下, 不同年龄人的节律效应存在差异。研究表明, 同一色温下, 青年人的节律因子远高于老年人。当色温为 6 500 ~ 3 500 K 时, 青年人的节律因子从 1.1 变化到 0.44, 而老年人仅从 0.5 变化到 0.2, 因此, 同一色温时节律效应随着年龄增大而减小。不同色温的节律效应年轻人变化较大, 而老年人变化较小。本研究为不同年龄人的健康照明设计提供了基础。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] REA M S, FIGUEIRO M G, BULLOUGH J D, *et al.*. A model of phototransduction by the human circadian system [J]. *Brain Res. Rev.*, 2005, 50(2):213-228.
- [ 3 ] 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]. *J. Neurosci.*, 2001, 21(16):6405-6412.
- [ 4 ] CAJOCHEN C, MÜNCH M, KOBIALKA S, *et al.*. High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light [J]. *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, 2005, 90(3):1311-1316.
- [ 5 ] CAJOCHEN C, FREY S, ANDERS D, *et al.*. Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance [J]. *J. Appl. Physiol.*, 2011, 110(5):1432-1438.
- [ 6 ] SMOLDERS K C H J, DE KORT Y A W, CLUITMANS P J M. A higher illuminance induces alertness even during office hours: findings on subjective measures, task performance and heart rate measures [J]. *Physiol. Behav.*, 2012, 107(1):7-16.
- [ 7 ] 黄海静. 大学教室照明中的光生物效应研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
HUANG H J. *Study on The Classroom Lighting in University on Cirtopic* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [ 8 ] 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.  
HUANG H J, YAN Y H. The experiment on photobiomodulation of classroom lighting [J]. *Light Light.*, 2008, 32(4):1-3. (in Chinese)
- [ 9 ] 林丹丹, 郝洛西. 关于中小学生视力健康与光照环境关系的实验研究 [J]. *照明工程学报*, 2007, 18(4):38-42.  
LIN D D, HAO L X. Experimental research on relationship between vision health and luminous environment for the primary and middle school students [J]. *Chin. Illumin. Eng. J.*, 2007, 18(4):38-42. (in Chinese)
- [ 10 ] 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.  
JU J Q. *Research on Digitalized Model of Spectral Response for Biological Effects of Lighting* [D]. Shanghai: Fudan University, 2011: 56-57. (in Chinese)
- [ 11 ] 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.  
LU Y H, WANG Y R, JIN S Z, *et al.*. Influence of different wavelength blue LED on human optical biorhythm effect [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(8):1061-1065. (in Chinese)
- [ 12 ] 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.  
SONG L Y, LI J K, MOU T S. Non-visual effects of flat panel display with light emitting diode backlight on human [J].

- Acta Photon. Sinica*, 2013, 42(7):768-771. (in Chinese)
- [13] REBEC K M, GUNDE M K. High-performance lighting evaluated by photobiological parameters [J]. *Appl. Opt.*, 2014, 53(23):5147-5153.
- [14] OH J H, YANG S J, DO Y R. Healthy, natural, efficient and tunable lighting: four-package white LEDs for optimizing the circadian effect, color quality and vision performance [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2014, 3(2):e141.
- [15] NAKAMURA T J, NAKAMURA W, TOKUDA I T, *et al.*. Age-related changes in the circadian system unmasked by constant conditions [J]. *eNeuro*, 2015, 2(4):e0064-15-1-10.
- [16] BANKS G, HEISE I, STARBUCK B, *et al.*. Genetic background influences age-related decline in visual and non-visual retinal responses, circadian rhythms, and sleep [J]. *Neurobiol. Aging*, 2015, 36(1):380-393.
- [17] LUPI D, SEMO M, FOSTER R G. Impact of age and retinal degeneration on the light input to circadian brain structures [J]. *Neurobiol. Aging*, 2012, 33(2):383-392.
- [18] KESSEL L, LUNDEMAN J H, HERBST K, *et al.*. Age-related changes in the transmission properties of the human lens and their relevance to circadian entrainment [J]. *J. Cataract Refract. Surg.*, 2010, 36(2):308-312.
- [19] LUND D J, MARHALL J, MELLERIO J, *et al.*. A computerized approach to transmission and absorption characteristics of the human eye [S]. CIE 203, 2012.
- [20] 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, 43(4):0417003-1-6.  
RAO F, ZHU X F, XU A C, *et al.*. Effect of retina illuminance, circadian rhythm and blue light hazard of LED backlight display on the human of different ages [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2015, 43(4):0417003-1-6. (in Chinese)
- [21] 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]. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 2012, 53(7):4076-4084.
- [22] BELLIA L, SERACENI M. A proposal for a simplified model to evaluate the circadian effects of light sources [J]. *Lighting Res. Technol.*, 2014, 46(5):493-505.



饶丰 (1983 -), 男, 江西湖口人, 博士, 讲师, 2010 年于南开大学获得博士学位, 主要从事 LED 光色电及光生物效应方面的研究。

E-mail: 1270437521@qq.com



朱锡芳 (1963 -), 男, 江苏常州人, 教授, 2008 年于南京理工大学获得博士学位, 主要从事信息获取和处理等方面的研究。

E-mail: zhuxf@czu.cn