

## 低照度 LED 光下人眼瞳孔的非视觉生物效应

罗 达, 张惠平, 周晓明\*

(华南理工大学 物理与光电学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 基于瞳孔收缩分析研究低照度 LED 光对人的非视觉效应。选择 10 名受测者、6 种彩光 LED 和 5 种低照度, 进行瞳孔受光反射实验; 实验全程用红外视频记录仪拍摄, 由基于 OpenCV 开发的程序完成瞳孔大小的计算。结果显示: 在同一照度水平下, 蓝光波段光源非视觉效应最为显著, 瞳孔稳定收缩率和恢复收缩率随着光源波长向短波方向偏移而增大; 在同一光源下, 瞳孔稳定收缩率与恢复收缩率随照度加强而增大, 并且在 10~70 lx 间两瞳孔收缩率存在线性相关, 相关系数均大于 0.95; 两瞳孔收缩率分别与生物节律因子存在线性相关, 表明用瞳孔收缩率能较好表征非视觉生物效应的大小。

**关键词:** 非视觉生物效应; 瞳孔收缩; PLR; LED; 光谱

**中图分类号:** Q682; TU113.19 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1233001

## Non-visual biological effects of LED light to human pupil under low illumination

Luo Da, Zhang Huiping, Zhou Xiaoming\*

(School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** To study the non-visual effect to human based on the analysis of pupil contraction under low illumination LED light, ten subjects were selected to conduct pupillary light reflex test under different conditions of six kinds LED light with different colors, five kinds of low illumination. All these tests were recorded by infrared video recorder and the pupil size was calculated by the program based on OpenCV. The result shows that steady pupil contraction rate and recovery pupil contraction rate will be larger as the migration from long wave to short wave light source under the same illumination. And the non-visual effect of blue light source is the most significant. Also, steady pupil contraction rate and recovery pupil contraction rate will be larger as the illumination increased under the same light source. And there is a linear relationship between these two pupil contraction rates under the illumination of 10–70 lx with the correlation coefficient of more than 0.95. Two pupil contraction rates have a linear relationship between circadian factor, which shows that the pupil contraction rate could well represent the degree of non-visual biological effect.

**Key words:** non-visual biological effects; pupil contraction; pupillary light reflex; light emitting diode; spectrum

收稿日期: 2016-04-10; 修订日期: 2016-05-20

基金项目: 广东省科技计划(2015A010103005)

作者简介: 罗达(1989-), 男, 硕士生, 主要从事光对人体的非视觉效应方面的研究。Email: l.d16@mail.scut.edu.cn

通讯作者: 周晓明\*(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事物理场生物效应方面的研究。Email: zhouxm@scut.edu.cn

## 0 引言

2002 年 Berson<sup>[1]</sup>发现了哺乳动物视网膜的第三类感光细胞——本征感光视网膜神经节细胞 (Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cell, ipRGC), 打破了人眼只存在视觉通路的观念, 并逐渐建立了非视觉通路。在 ipRGC 作用下, 光参与调节人体激素分泌、昼夜节律和瞳孔大小等<sup>[2-4]</sup>, 从而影响人体非视觉的生物反应, 产生非视觉生物效应。非视觉生物效应在照明领域中引起了广泛关注, 学者们也进行了研究<sup>[5-6]</sup>, 但非视觉生物效应评价方法尚未统一, 现在主要有两类评价方法, 一类是 Brainard 基于人体褪黑素抑制作用提出的评价方法, 另一类是 Berman<sup>[7]</sup>基于人眼瞳孔大小提出的评价方法。由于 ipRGC 引起人体褪黑素抑制和人眼瞳孔收缩的神经通路不同, 所以上述两类光谱响应曲线峰值波长也有所差异, 分别为 464 nm 和 491 nm。在非视觉通路中, ipRGC 除了本征感光响应外也接受来自视杆细胞和视锥细胞的信号<sup>[4,8-9]</sup>, 所以非视觉生物效应受到三类感光细胞的共同作用。但三类感光细胞以怎样的形式共同作用以及他们参与贡献的大小都需要深入研究。

瞳孔受光反射 (Pupillary Light Reflex, PLR), 指瞳孔受光刺激后瞳孔收缩以及撤光后瞳孔放大恢复的过程<sup>[8]</sup>, 可分为四个阶段: 响应潜伏期、最大收缩期、逃逸期、恢复期<sup>[8]</sup>。瞳孔受光反射具有即时性, 具有测试重复性好、实现手段简便等优点<sup>[8]</sup>, 并且不同感光细胞参与瞳孔受光反射的不同阶段, 所以基于瞳孔受光收缩的研究对于探讨三类感光细胞参与非视觉生物效应的作用具有重要意义。研究表明: 视杆细胞、视锥细胞及 ipRGC 共同作用于瞳孔逃逸期<sup>[3]</sup>, 而在瞳孔恢复期的撤光后瞳孔响应 (Post-Illuminate Pupil Response, PIPR) 中 ipRGC 起主导作用<sup>[2,4]</sup>。PIPR 的显著特征是在撤光后 10 s 瞳孔放大, 之后瞳孔直径大小持续了约 30 s, 且较给光前瞳孔直径要小<sup>[8]</sup>。Gooley 等<sup>[10]</sup>研究表明: 在低照度水平下, 可以利用间歇光反复刺激视锥光感受器以增强人的非视觉光反应。徐蔚<sup>[8]</sup>采用高斯函数模型建立明视觉条件下基于瞳孔最大收缩率和稳定收缩率的两条光谱灵敏度响应曲线, 但未导出瞳孔恢复收缩率的光谱灵敏度

响应曲线。

文中用彩光 LED 作为光源, 在低照度水平下进行人眼瞳孔受光反射实验。用红外视频记录仪拍摄实验全过程, 并用数字图像处理方法<sup>[8,11-13]</sup>计算人眼瞳孔大小, 以瞳孔收缩率表征光源对人体非视觉效应大小的生理参数, 比较不同光谱和照度对人的非视觉效应。

## 1 实验设计

### 1.1 瞳孔测量

在普通办公室自行搭建实验环境, 利用内壁铺有白纸、大小为 44 cm×44 cm×42 cm 的实验平台内形成的漫反射光进行瞳孔受光反射实验, 该实验对人体健康无影响。受测者为 10 名自愿参与实验的在校大学生, 其中 8 名男性, 2 名女性, 年龄介于 22~25 岁, 平均年龄为 24 岁, 均拥有正常视力。光源为 6 种彩光 LED, 分别为 Red、Amber、Yellow、Green、Blue 和 Deep Blue, 其峰值波长分别为 635、627、592、536、464、453 nm。5 种光源的照度分别为 10、20、30、50、70 lx。红外视频记录仪由红外摄像头和基于 OpenCV (Open Source Computer Vision Library) 并用 C++ 编写的视频录制程序组成, 红外摄像头为 25 fps。利用 TES1336A 照度仪对人眼处照度进行测量, 采用基于 FPGA (Field Programmable Gate Array) 实现的 PWM (Pulse Width Modulation) 对 LED 进行控制。

实验时间为 19:00~21:30, 每晚测试一种光源、5 种照度, 共进行了 6 晚, 每人共测出 30 组数据。实验环境温度用空调控制在 26~27 °C。受测者在进行一种照度实验前需在黑暗环境下安静 15 min, 实验记录受测者的左眼瞳孔。实验首先记录 10 s 黑暗环境下瞳孔大小, 随后开灯记录 10 s, 关灯后继续记录 40~50 s, 总的拍摄时间为 60~70 s, 依次更换受测者。红外数字图像处理方法是分析实验视频的每一帧图像, 提取目标区域 (受测者左眼区域), 然后调用 OpenCV 区域检测算法, 计算出瞳孔半径大小, 其单位为像素 (pixel)。

### 1.2 生物节律因子

生物节律因子是基于视网膜感光神经节细胞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<sup>[14-15]</sup>, 用  $C/P$  表示, 它表征光源非视觉效应的强

弱。C/P 计算表达式如下：

$$C/P = \frac{K_c \int_{380}^{780} C(\lambda)P(\lambda)d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} V(\lambda)P(\lambda)d\lambda} = \frac{K_c \sum_{380}^{780} C(\lambda)P'(\lambda)d\lambda}{K_m \sum_{380}^{780} V(\lambda)P'(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

式中：C(λ)为非视觉生物效应光谱响应曲线；K<sub>c</sub>为非视觉效应的最大光谱光效函数；K<sub>m</sub>为明视觉最大光谱光效函数，大小为 683lm/W；V(λ)为明视觉光谱光效函数；P(λ)、P'(λ)分别为光源绝对光谱能量分布和相对光谱能量分布，P(λ)=αP'(λ)，其中 α 为常数<sup>[14-15]</sup>。

文中使用 WGD-3 型组合式多功能光栅光谱仪测量 LED 光源相对光谱能量分布，图 1 为测出的 50 lx 下 6 种 LED 的相对光谱能量分布。

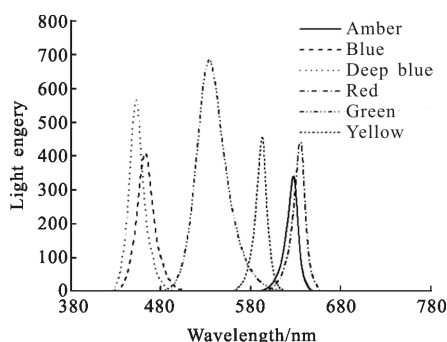


图 1 50 lx 下 6 种 LED 光源的相对光谱能量分布

Fig.1 Relative spectral energy distribution of six kinds of LED light source under 50 lx

## 2 数据分析

### 2.1 瞳孔受光反射

为了分析瞳孔受光反射实验数据，参考文献[2,8]定义了以下几个变量。

- (1) 基准瞳孔半径。指给光前 10 s 瞳孔半径平均值；
- (2) 瞳孔变化率定义为：

瞳孔变化率=

$$\frac{\text{基准瞳孔半径}-\text{第 } i \text{ 时刻瞳孔半径}}{\text{基准瞳孔半径}} \times 100\% \quad (2)$$

- (3) 瞳孔稳定收缩值。指给光后第 5~10 s 内瞳孔半径平均值；

(4) 瞳孔稳定收缩率 (Steady Pupil Contraction Rate, SPCR)定义为：

瞳孔稳定收缩率=

$$\frac{\text{基准瞳孔半径}-\text{瞳孔稳定收缩值}}{\text{基准瞳孔半径}} \times 100\% \quad (3)$$

(5) 瞳孔恢复收缩值，指撤光后第 10~40 s 内瞳孔半径平均值；

(6) 撤光后瞳孔响应(PIPR)定义为：

撤光后瞳孔响应=基准瞳孔半径-瞳孔恢复收缩值 (4)

(7) 瞳孔恢复收缩率(Recovery Pupil Contraction Rate, RPCR)定义为：

瞳孔恢复收缩率=

$$\frac{\text{基准瞳孔半径}-\text{瞳孔恢复收缩值}}{\text{基准瞳孔半径}} \times 100\% \quad (5)$$

瞳孔受光反射过程如图 2 所示。从图 2 中看出：在长波段 Red 光 70 lx 照射下，瞳孔半径大小具有明显的变化，但在撤光 10 s 后，瞳孔半径基本恢复到给光前大小，说明此时 PIPR 并不显著；在短波段 Blue 光 70 lx 照射下，瞳孔半径大小也具有明显的变化，并在撤光 10 s 后明显小于给光前瞳孔大小，说明此时 PIPR 较为明显。

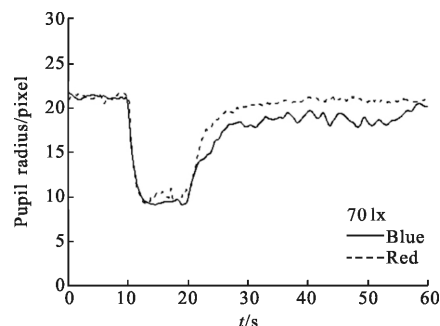


图 2 瞳孔受光反射过程

Fig.2 Process of pupillary light reflex

为进一步分析瞳孔受光反射过程以研究基于瞳孔收缩的非视觉效应，根据公式(3)和公式(5)分别计算 10 名受测者在 6 种 LED 光源、5 种照度下的瞳孔稳定收缩率和瞳孔恢复收缩率。表 1 和表 2 给出了上述两种瞳孔收缩率的平均值(Mean)和标准差(Standard Deviation, SD)。

用 Origin 对表 1 和表 2 实验数据进行单因素方差分析(p=0.05)。结果显示：在 6 种不同光源光照下，瞳孔稳定收缩率平均值和瞳孔恢复收缩率平均值都具有显著性差异，检验结果分别是 F=6.69, p<5×10<sup>-4</sup> 和 F=6.91, p<5×10<sup>-4</sup>。

瞳孔稳定收缩率和瞳孔恢复收缩率分别对应瞳孔受光反射的逃逸期和恢复期，在瞳孔逃逸期中三类感光细胞——视锥细胞、视杆细胞和 ipRGC 共同作用产生非视觉效应<sup>[3]</sup>；而在恢复期的撤光后瞳孔响

表 1 瞳孔稳定收缩率

Tab.1 Steady pupil contraction rate

Illumination/lx		10	20	30	50	70
Red	Mean	49.52	54.40	56.46	57.79	58.50
	SD	5.52	5.40	5.03	4.67	4.95
Amber	Mean	52.30	55.26	55.94	56.69	57.64
	SD	4.76	3.10	4.20	3.59	3.37
Yellow	Mean	50.92	53.94	55.28	56.35	56.78
	SD	4.95	3.53	4.27	4.56	4.34
Green	Mean	54.02	56.40	57.12	58.27	58.12
	SD	4.30	4.36	3.73	4.44	2.87
Blue	Mean	54.31	58.69	59.17	61.22	60.85
	SD	3.87	2.52	3.11	2.81	3.35
Deep blue	Mean	59.75	61.33	62.51	64.32	63.06
	SD	3.43	1.29	2.30	3.12	3.16

应中 ipRGC 起主导作用<sup>[2,4]</sup>。所以,上述两种瞳孔收缩率在在一定程度上体现了光源非视觉生物效应的大小。从表 1 可看出:10~70 lx 范围内的光照也能引起较大的瞳孔稳定收缩率,且均大于 49%;在同一光源照射下,瞳孔稳定收缩率随照度的增加而变大;在同一照度水平下,光源波长越短,瞳孔稳定收缩率越大,而且在蓝光波段达到最大。从表 2 可以看出:在同一光源照射下,瞳孔恢复收缩率随照度的增加而变大;在同一照度水平下,瞳孔恢复收缩率随光源波长向短波方向偏移而变大;在 50 lx、70 lx 照度下,短

波段 LED 光能够引起较大的瞳孔恢复收缩率,说明短波段 LED 光照后人眼瞳孔出现持续收缩的非视觉效应。上述结果与基于心率、心电图<sup>[16-17]</sup>研究非视觉效应的结论一致,即低照度水平下,非视觉生物效应依然存在。

表 2 瞳孔恢复收缩率

Tab.2 Recovery pupil contraction rate

Illumination/lx		10	20	30	50	70
Red	Mean	0.75	1.58	1.83	2.16	2.65
	SD	0.18	0.56	0.49	0.73	0.54
Amber	Mean	1.02	1.90	2.40	2.43	2.95
	SD	0.46	0.75	0.83	0.45	0.93
Yellow	Mean	1.16	2.42	2.90	3.44	3.50
	SD	0.39	0.75	0.93	1.32	1.19
Green	Mean	2.15	3.13	3.72	4.65	4.68
	SD	1.09	1.08	1.03	0.96	0.62
Blue	Mean	1.94	3.95	4.84	6.67	7.24
	SD	1.35	1.51	1.33	2.17	1.84
Deep blue	Mean	3.34	4.77	5.54	6.53	6.55
	SD	0.79	1.63	1.25	1.70	1.43

比较瞳孔稳定收缩率和瞳孔恢复收缩率,发现两者在 10~70 lx 存在线性相关(如图 3 所示),这应当与 ipRGC 都作用于瞳孔受光反射的逃逸期和恢复期有关,或者由于在低照度光水平下,三类感光细胞参与了撤光后瞳孔响应。

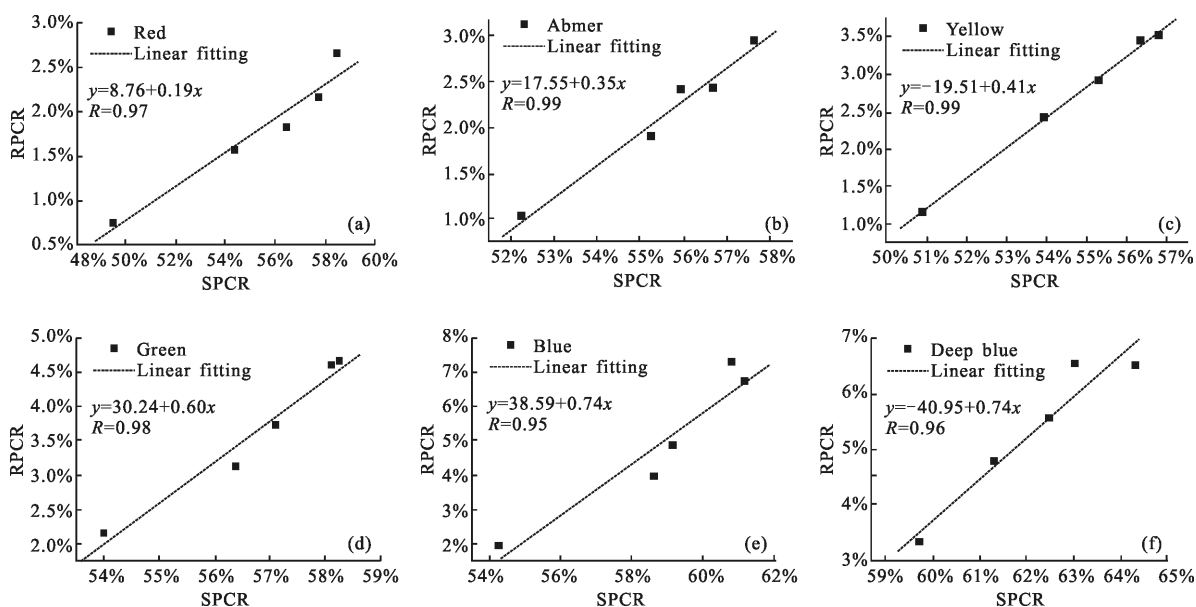


图 3 瞳孔稳定收缩率与瞳孔恢复收缩率之间的关系

Fig.3 Relationship of steady pupil contraction rate and recovery pupil contraction rate



### 2.2 瞳孔收缩率与 C/P 的关系

两种瞳孔收缩率在一定程度上反映了光源非视觉生物效应的大小,而评价非视觉生物效应大小的常用指标是生物节律因子 C/P,有必要定量分析两种瞳孔收缩率和 C/P 的关系。在计算 C/P 时,利用公式(1)和 LED 光源的相对光谱,并且 C(λ)采用 Berman 基于人眼瞳孔大小的光谱响应曲线, K<sub>c</sub> 取 3 616 lm/W,结果如表 3 所示。

表 3 5 种照度水平下 LED 光源的 C/P 值

Tab.3 C/P value of LED light source under five kinds of illumination

Illumina-tion/lx	10	20	30	50	70
Red	3.99×10 <sup>-4</sup>	7.61×10 <sup>-4</sup>	1.41×10 <sup>-4</sup>	3.01×10 <sup>-4</sup>	4.10×10 <sup>-4</sup>
Amber	1.96×10 <sup>-3</sup>	1.52×10 <sup>-3</sup>	2.05×10 <sup>-3</sup>	1.24×10 <sup>-3</sup>	1.65×10 <sup>-3</sup>
Yellow	1.33×10 <sup>-1</sup>	1.31×10 <sup>-1</sup>	1.20×10 <sup>-1</sup>	1.13×10 <sup>-1</sup>	1.03×10 <sup>-1</sup>
Green	2.24	2.37	2.50	2.71	2.89
Blue	45.85	45.09	46.08	46.4	45.79
Deep blue	58.94	58.43	58.61	57.72	58.88

从表 3 可以看出;5 种照度下同一种 LED 光源的 C/P 值存在小范围波动;随着光源波长向短波方向偏移,C/P 逐渐增大,即非视觉生物效应在增强;Red、Amber 和 Yellow 的 C/P 值远小于 1;Blue 和 Deep Blue 光源的 C/P 值比其余 4 种光源高出 1~5 个数量级,说明短波段的 Blue 和 Deep Blue 光源的非视觉生物效应更为明显。

对两种瞳孔收缩率与 C/P 的关系进行分析,发现瞳孔稳定收缩率与 C/P 具有较好的线性相关,SPCR=a+b×C/P,其中系数 a、b 和相关系数 R 如表 4

表 4 瞳孔稳定收缩率与 C/P 的拟合参数

Tab.4 Fitting parameters of steady pupil contraction rate with C/P

Illumina-tion/lx	10	20	30	50	70
a	51.47	54.88	56.06	57.14	57.66
b	0.11	0.10	0.09	0.11	0.08
R	0.85	0.97	0.95	0.96	0.96

所示;瞳孔恢复收缩率与 C/P 线性相关度较低,RPCR=a+b×C/P,其中系数 a、b 和相关系数 R 如表 5 所示。从表 4 和表 5 中可看出,除了在 10 lx 照度下

相关系数 R 较低外,两表其余相关系数分别大于等于 0.95 和 0.90,说明两种瞳孔收缩率能体现光源非视觉生物效应强弱。

表 5 瞳孔恢复收缩率与 C/P 的拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of recovery pupil contraction rate with C/P

Illumina-tion/lx	10	20	30	50	70
a	1.21	2.21	2.67	3.13	3.43
b	0.03	0.04	0.05	0.07	0.07
R	0.81	0.91	0.91	0.90	0.91

### 3 结 论

文中通过瞳孔受光反射实验,以瞳孔收缩率表征光源对人体非视觉生物效应的生理参数,研究低照度彩光 LED 对人体的非视觉效应。结果表明:光源波长越短瞳孔稳定收缩率和瞳孔恢复收缩率越大,在蓝光波段达到最大;光源照度越强两瞳孔收缩率越大。实验发现:在同一光源照射下,瞳孔稳定收缩率和瞳孔恢复收缩率在 10~70 lx 范围内呈现出线性相关性;瞳孔稳定收缩率和瞳孔恢复收缩率分别与生物节律因子都存在线性相关,表明瞳孔收缩率可以较好地反映光源对人体的非视觉生物效应大小。但要更准确、更全面地评价非视觉生物效应,还需建立和完善包括瞳孔收缩率在内的基于人体生理参数的非视觉生物效应光谱响应曲线,进而为照明光源的设计提供理论指导。

#### 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] Gamlin P D, McDougal D H, Pokorny J, et al. Human and macaque pupil responses driven by melanopsin-containing retinal ganglion cells [J]. *Vision Research*, 2007, 47 (7): 946-954.

[3] McDougal D H, Gamlin P D. The influence of intrinsically photosensitive retinal ganglion cells on the spectral sensitivity and response, dynamics of the human papillary light reflex [J]. *Vision Research*, 2010, 50(1): 72-87.

- [4] Lucas R J, Peirson S N, Berson D M, et al. Measuring and using light in the melanopsin age[J]. *Trends in Neurosciences*, 2014, 37(1): 1–9.
- [5] Bellia L, Seraceni M. A proposal for a simplified model to evaluate the circadian effects of light sources [J]. *Lighting Research and Technology*, 2014, 46(5): 493–505.
- [6] Chang A M, Aeschbach D, Duffy J F, et al. Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(4): 1232–1237.
- [7] Berman S M. A new retinal photoreceptor should affect lighting practice [J]. *Lighting Research and Technology*, 2008, 40(4): 373–376.
- [8] Xu Wei. Research on non-visual photosensitive system based on pupil contraction [D]. Shanghai: Fudan University, 2011. (in Chinese)  
徐蔚. 基于瞳孔收缩的非视觉感光系统的研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [9] Dacey D M, Liao H W, Peterson B B, et al. Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN [J]. *Nature*, 2005, 433(7027): 749–754.
- [10] Gooley J J, Mien I H, Hilalire M A, et al. Melanopsin and rod-cone photoreceptors play different roles in mediating pupillary light responses during exposure to continuous light in humans [J]. *The Journal of Neuroscience*, 2012, 32(41): 14242–14253.
- [11] Zhang Zhijia, Zhang Haifeng, Zhou Chunbing, et al. Iris location method based on improved Snake [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 767–771. (in Chinese)  
张志佳, 张海峰, 周纯冰, 等. 采用改进 Snake 模型的虹膜定位方法 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 767–771.
- [12] Chen Chuanhu, Zou Dexuan, Liu Haikuan. Iris location algorithm by counting distances [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2516–2522. (in Chinese)  
陈传虎, 邹德旋, 刘海宽. 应用统计距离实现虹膜定位 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2516–2522.
- [13] Ma Yide, Zhou Lijun, Li Yuan. Iris location algorithm by vector field convolution[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3497–3503. (in Chinese)  
马义德, 周丽君, 李园. 基于矢量场卷积的虹膜定位 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3497–3503.
- [14] Song Liyan, Li Junkai, Mou Tongsheng. Non-visual effects of flat panel display with light emitting diode backlight on human [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(7): 768–771. (in Chinese)  
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.
- [15] Zhou Xiaoming, Shao Zhidong, Xu Jiabin. The impacts of different wave range LED on non-visual effects [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2014, 31(4): 410–414. (in Chinese)  
周晓明, 邵志栋, 徐嘉彬. 不同波段 LED 对人体非视觉的影响 [J]. 深圳大学学报理工版, 2014, 31(4): 410–414.
- [16] Chai Yingbin, Sun Yaojie, Lin Yandan. Non-visual biological effects of different color light under low illuminance conditions [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2012, 23(3): 18–22. (in Chinese)  
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(3): 18–22.
- [17] Zhou Xiaoming, Xu Jiabin, Shao Zhidong. Effects of LED with different colors on human electrocardiogram under extremely low illumination [J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2015, 43(4): 138–142. (in Chinese)  
周晓明, 徐嘉彬, 邵志栋. 极低照度下彩光 LED 对人体心电图的影响 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 138–142.