

doi:10.3788/gzxb20154402.0217001

光生物节律因子计算模型的研究

周晓明, 徐嘉彬, 邵志栋

(华南理工大学 物理与光电学院 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘 要:通过实验测量额头温度拟合光生物节律因子-额温差曲线,对现有评价光生物效应作用大小的 BioEq 模型和 CL_A 模型的计算结果进行分析比较.利用不同图片 LCD 屏幕的光谱计算节律因子,发现两种模型对于绿色波段的光抑制较强,而对红色波段的光则与实际不相符.通过对九种不同颜色的 LED 光源测试额头温度,比较模型计算结果与实际光生物效应的作用,发现光生物节律因子与生理体征变化线性递增,其中对 BioEq 模型的直线拟合相关度达到 0.95.

关键词:光生物效应;光生物节律因子;光谱光视效率曲线;光谱

中图分类号:TU113.19

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)02-0217001-4

Research of the Calculation Model of Light Biorhythm Factor

ZHOU Xiao-ming, XU Jia-bin, SHAO Zhi-dong

(School of Physics and Optoelectronics, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Two kinds of model, Biological Equivalent model and Circadian Light model which used to evaluate the biological effect of light were discussed and the differences between them were pointed out by fitting curve between the biorhythm factor and human body temperature after several field test. Calculating with the spectrum produced by the LCD screen, it shows that these two models have a stronger restraint of green light band while the red band of light appear not too consistent with the actual results. By tested the forehead temperature under different colors of LED light and fitting with the calculated biorhythm factor, it demonstrates that the forehead temperature increases with the biorhythm factor linearly. And the linear fitting correlation of biological equivalent model is 0.95.

Key words: Light biological effects; Light biorhythm Factor; Spectral luminous efficiency curve; Spectrum

OCIS Codes: 170.5380; 170.1420; 170.6280

0 引言

2002 年, Berson 等发现了人眼中的第三类感光细胞——本征感光视网膜神经节细胞 (Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cell, ipRGC), 从而打破了人眼只存在视觉通道的观念, 并建立了人眼的非视觉通道. 光生物效应, 亦称光的非视觉生物效应, 是指在第三类感光细胞的作用下, 光参与调解人体生理体征、激素分泌、昼夜节律等的人体生物效应. 从发现

ipRGC 到现在, 光生物效应受到广泛的关注, 现已成为国内外照明新趋势.

光生物效应从眼睛的第三类光感受器开始, 经视网膜上神经节细胞将光信号传递到下丘脑通路, 再进入视神经交叉上核 (Suprachiasmatic Nuclei, SCN), 和脑室外神经核和上部颈神经神经节, 最后传递到松果体腺^[1]. 与视觉系统相比, 光生物效应系统对光的反映较为迟缓并且有较高的阈值^[2], 且对成像没有贡献, 视觉系统的明视觉光谱响应曲线的峰值是 555 nm, 而人

基金项目:华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开放研究项目 (Nos. 2013KA02、2015ZB17)、国家自然科学基金项目 (No. 61372008)、中央高校基本科研业务费重点项目 (No. 2014ZZ0031) 资助

第一作者:周晓明 (1963-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为物理场生物效应. Email: zhouxm@scut.edu.cn

收稿日期:2014-07-14; **录用日期:**2014-10-14

<http://www.photon.ac.cn>

眼节律系统的响应峰值在 460nm 附近^[3-6]. 不同时间点上光对昼夜节律的影响有所不同: 早上的光线能使 SNC 时钟提前, 晚上同样的光线则会使之延迟, 而中午相同的光线对昼夜节律则基本没有影响^[7-8].

通过研究人体夜间褪黑色素的含量变化与单色光的关系, 可以得到光生物效应光谱响应曲线的特性^[5-6]. 而本征感光视网膜神经节细胞是节律系统光传导的核心, 通过它视网膜才能把光转换成神经信号传递到 SCN. 也有证据表明视锥细胞和视杆细胞通过向 ipRGC 提供信息参与到光传导过程中^[4]. 2005 年以来, 国内外研究者提出了一些计算生物节律因子的方法借以定量评价光源产生的光生物效应大小^[3-4, 10-12]. 本文就其中两种方法进行讨论, 分别计算 LCD 手机屏幕和 LED 光源的光生物节律因子, 分析两种方法的适用性, 并通过实验测试实际额头温度变化, 分别拟合两种光生物节律因子-额温差曲线.

1 两中光生物效应节律因子计算模型

1.1 BioEq 模型

用明视觉光谱光视效率曲线归一化光源的光谱能量分布, 然后与基于褪黑色素抑制作用拟合的光生物效应曲线相乘, 通过求积分的方式来评价光源的生物效率因子^[10], 其计算步骤为

1) 不同光源的相对光谱功率曲线 $P(\lambda)_i$ 由一个统一的视觉因子或统一的光通量(比如 100 lm)进行归一化成 $P(\lambda)_{i, \text{norm}}$, 定义为

$$\Phi_{v,i} = K_m \int_{380}^{780} P(\lambda)_{i, \text{norm}} V(\lambda) d\lambda = \text{const} = 100 \text{ lm} \quad (1)$$

$$CL_A = \begin{cases} 1622 \left[\int M_{C\lambda} E_\lambda d\lambda + \left(a_{b-y} \left(\int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \right) - a_{rod} \left(1 - \exp \left(- \int V_\lambda E_\lambda d\lambda / \text{RodSat} \right) \right) \right] & \text{if } \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \geq 0 \\ 1622 \int M_{C\lambda} E_\lambda d\lambda & \text{if } \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 CL_A (Circadian Light) 表示光生物节律因子, 常量 1 622 是 CL_A 归一化的结果, 这样能使照度值 1 000 Lux、色温 2 856 K 的黑体辐射的 CL_A 值等于 1 000. E_λ 是光谱辐射能量分布, $M_{C\lambda}$ 是通过晶状体透射率修正后的黑视素灵敏度曲线, S_λ 是感蓝视锥细胞曲线, mp_λ 是黄斑色素透光率, V_λ 是明视觉光谱光视效率曲线, V'_λ 是暗视觉光谱光视效率曲线, $\text{RodSat} = 6.5 \text{ W/m}^2$ 是 63% 的视杆细胞被漂白时的辐射等级, $k = 0.261 6$, $a_{b-y} = 0.620 1$, $a_{rod} = 3.234 7$.

式(4)中涉及到了人眼中的三种感光细胞, 表达了 ipRGC、杆细胞和蓝-黄拮抗信号的联合反应, 考虑了光

式中 $K_m = 683 \text{ lm/W}$ 为明视觉下最大光视效率值, $V(\lambda)$ 为明视觉光谱光视效率曲线.

2) 光生物节律因子 (Biological Equivalent, BioEq) 等于 $P(\lambda)_{i, \text{norm}}$ 乘以光生物效应曲线 $B(\lambda)$ 的积分

$$\text{BioEq}_i = \int_{380}^{780} P(\lambda)_{i, \text{norm}} B(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

通过光谱仪测得不同光源的光谱 $P(\lambda)_i$, 然后进行上述两个步骤即可得光生物节律因子 BioEq.

把这种计算方式与传统的光度学光通量的计算方法类比可以得出其中的物理含义. 传统的光度学中, 用光通量 Φ 表征光量的多少, 表示为

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

式(3)把电磁能量和光度量联系在一起, 实现了同时考虑辐射能量和考虑人眼作用后对照明特性的度量. 比较式(2)和式(3), 可知 BioEq 就是对归一化后的光谱功率分布曲线进行 $B(\lambda)$ 加权分配后的求和, 它体现了光源在光谱层面上的光生物效应作用的参量化. 光通量表示辐射通量中引起视觉感受的那一部分, 通过式(1)、(2)算得的 BioEq 可以理解为辐射通量中引起光生物效应的部分.

1.2 CL_A 模型

2005 年由 M. S. Rea 等提出并于 2012 年再次优化的光谱灵敏度模型考虑了人眼生理特性^[3-4], 该模型建立在已知的视网膜光敏色素和神经解剖学与生理学的基础上, 依据 Brainard 等^[6]和 Thapan 等发布的光谱灵敏度数据, 模型的计算公式为

在视网膜上的引起的神经信号传递问题.

2 模型结果比较

2.1 LCD 屏幕光谱计算

通过测量智能手机 LCD 屏幕的发射光谱和照度值用分析上述两种模型. 采用 WGD-3 型组合式多功能光栅光谱仪测量光谱, 照度计为 TES-1336A 数位式照度计. 图 1 为选取的三种不同图片在照度值为 114 lux 时的屏幕光谱, 此外还测量了不同照度的白色图片光谱图和相同照度时不同颜色图片的光谱, 两种模型的计算结果如表 1.

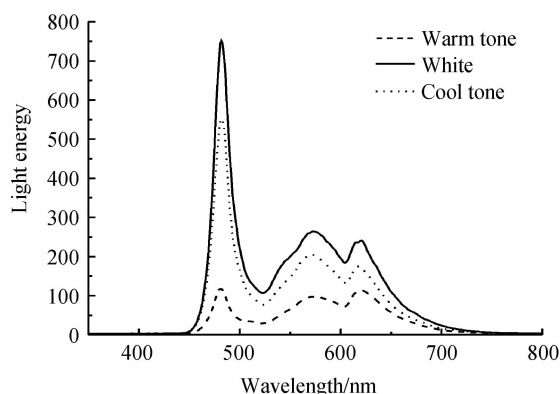


图1 手机屏幕 114 lux 下不同图片光谱

Fig.1 Screen spectrums of different pictures under 114 lux

表1 LCD屏的两种模型相对计算结果

Table 1 The relative calculation results of three kinds of models

LCD	White	Warm Tone	Cool Tone	Blue	Green	Red
lux	20 114 320	114	114	70	70	70
BioEq	0.97 1 1.03	0.71	1.28	2.60	0.29	0.51
CL _A	0.18 1 2.90	0.62	1.06	1.60	0.18	0.30

注:表中各自以 114 lux 白色图片下的计算结果为参考值,其余数值为相对值。

从表1可得,BioEq模型对照度值不敏感,当白色图片照度值改变时,其计算结果变化不大,但对光谱变化明显.而CL_A模型和光源的照度值大小相一致,能反映光谱变化,但计算复杂.两种模型中,光生物效应光谱光视效率曲线峰值处于蓝光波段,在BioEq模型中,蓝光LED光谱的光生物节律因子达到14.53;在70 lux红光的计算结果中,红光图片的计算值大于绿光图片.在褪黑色素抑制作用的测量结果中^[6],红光端的光生物效应较小.由于BioEq模型使用明视觉光谱光视效率曲线进行归一化,在计算过程中绿光部分被极大地抑制,导致与实际不符.而CL_A模型则在计算中使用了条件判断,只要光谱中的明视觉光谱区成分较大,就直接采用黑视素灵敏度曲线乘以光谱进行积分,导致计算结果中绿光端光谱被抑制.

2.2 LED光谱计算与体表温度实验结果

在九种不同颜色的光环境下,记录开灯前后30 min内额头的温度.实验在2 m×3 m的自制空间进行,时段均选在晚上8:00到9:00,通过空调设置环

境温度并用水银温度计测试实际室温并保持室温为27℃左右,实验环境声音在30 dB到32 dB之间,实验期间环境声音没有太大波动.实验进行时只改变环境照明情况,其余环境参量均不发生变化.在开灯前,人眼处照度测量值为0.5±0.1 lx,开灯时光源通过白色墙体和桌面白纸漫反射到达眼睛并在眼睛处形成30lx的照度值,人眼在测试过程中光线照射均匀、照度不变.被测试人员为4名男性,年龄在23到24岁之间,实验时眼睛注视桌面并保持坐姿.在被测试人员身体达到稳定状态后,关灯适应15 min开始试验,使用CME华盛昌DT-8806H红外测温仪每分钟记录一次额头体温,记录15 min;光源选用吉海仕JIHISI-CS3型LED,在开灯适应15 min后开始测量额头体温,每分钟记录一次,记录15 min.每种光源重复3次,共获得12×9组数据.对开灯前后的额温分别求平均值,再计算开灯前后额温的绝对变化得到红、蓝、绿、白、藏青、橙、黄、紫红、紫色九种颜色光开灯前后平均温度差值分别为0.030℃、0.500℃、0.047℃、0.004℃、0.100℃、0.023℃、0.040℃、0.187℃、0.340℃.温差计算公式为

$$\Delta T = \text{有光平均额温} - \text{无光平均额温} \quad (5)$$

不同颜色LED的两种模型计算结果和开灯前后温差值如表2.将温差和模型计算值做散点图,如图2和图3.从图中可以看出光源照射下生理体征(体温变化)与光生物节律因子存在递增的关系.用直线拟合表2中各模型相对值与温差相对值所得方程如图中所示,ΔT-CL_A直线相关度为0.86,ΔT-BioEq直线的相关度为0.95.

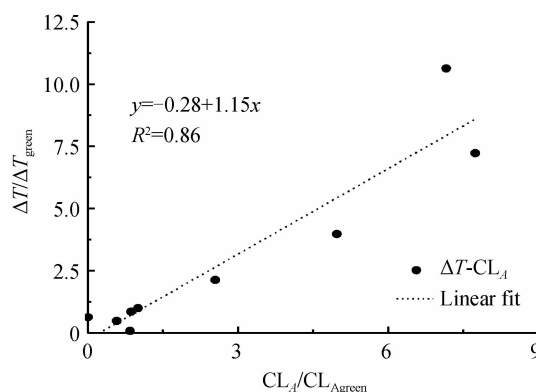


图2 CL_A和T的关系图

Fig.2 The diagram of CL_A and temperature

表2 不同颜色LED灯的相对计算值和温差相对值

Table 2 The relative calculated value of LEDs and the relative temperature difference

	White	Orange	Red	Yellow	Green	Navy Blue	Purplish Red	Purple	Blue
ΔT	0.085	0.489	0.638	0.851	1.000	2.128	3.979	7.234	10.638
BioEq	1.591	0.577	0.005	0.866	1.000	4.233	9.814	15.214	18.070
CL _A	0.840	0.577	0.001	0.865	1.000	2.547	4.979	7.739	7.163

注:表中均取绿光下的计算值作为相对比较值,LED照度值均为30 lux.

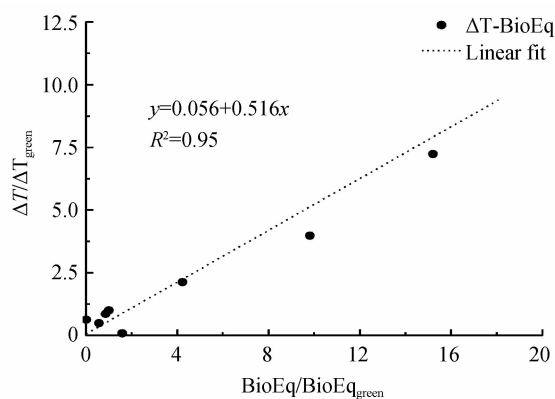


图3 BioEq (或 B/P) 和 T 的关系图

Fig. 3 The diagram of BioEq (or B/P) and temperature

3 结论

本文运用 LCD 和 LED 光源对现有评价光生物效应作用大小的 BioEq 模型和 CL_A 模型进行讨论,并结合实验测量的额头温差与两种模型计算结果进行拟合.结果表明两种模型均对绿色波段的光抑制较强,且在红色波段光的计算结果与实际不符.实际额头温度变化拟合结果表明,两种模型的计算结果与实际生理变化存在线性关系,BioEq 模型的拟合相关性达到 0.95.

参考文献

- [1] WENG Ji, CHEN Zhong-lin, HU Ying-kui, *et al.* The summarize of non-visual biological effect of lighting[J]. *Light and Lighting*, 2007, **31**(1): 1-3.
翁季, 陈仲林, 胡英奎, 等. 光生物效应研究综述[J]. 灯与照明, 2007, **31**(1): 1-3.
- [2] REA M S, SMITH A, BIEMAN A, *et al.* The potential of outdoor lighting for stimulating the human circadian system [EB/OL]. Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies, (2012-12-11) [2014-10-09]. <http://www.lrc.rpi.edu/programs/solid-state/assist/techpaper-outdoorcircadian.asp>.
- [3] REA M S, FIGUEIRO M G, BULLOUGH J D, *et al.* A

model of phototransduction by the human circadian system[J]. *Brain Research Reviews*, 2005, **50**(2): 213-228.

- [4] REA M S, FIGUEIRO M G, BIEMAN A, *et al.* Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system[J]. *Lighting Research and Technology*, 2012, **44**(4): 386-396.
- [5] BRAINARD G C, SLINEY D, HANIFIN J P, *et al.* Sensitivity of the human circadian system to short-wavelength (420nm) light[J]. *Journal of Biological Rhythms*, 2008, **23**(5): 379-386.
- [6] 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**(6): 6405-6412.
- [7] KHALSA S B S, JEWETT M E, CAJOCHEM C, *et al.* A phase response curve to single bright light pulses in human subjects[J]. *The Journal of Physiology*, 2003, **549**(3): 945-952.
- [8] JEWETT M E, RIMMER D W, DUFFY J F, *et al.* Human circadian pacemaker is sensitive to light throughout subjective day without evidence of transients[J]. *American Journal of Physiology*, 1997, **273**(5 Pt 2): R1800-1809.
- [9] 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.
- [10] ALADOV A V, ZAKGEIM A L, MIZEROV M N, *et al.* Concerning biological equivalent of radiation of light-emitting diode and lamp light sources with correlated colour temperature from 1800K up to 10000K [J]. *Light & Engineering*, 2012, **20**(3): 9-14.
- [11] YAO Qi, JU Jia-qi, CHENG Wen-ting, *et al.* Discussion on the visual and non-visual biological effect of different light sources[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2008, **19**(2): 14-19.
姚其, 居家奇, 程雯婷, 等. 不同光源的人体视觉及非视觉生物效应的探究[J]. 照明工程学报, 2008, **19**(2): 14-19.
- [12] JU Jia-qi, CHEN Zhen-liu, LIANG Rong-qing, *et al.* Evaluating the non-visual biological effects of lighting by light dose[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2012, **23**(5): 1-3.
居家奇, 陈枕流, 梁荣庆, 等. 使用光剂量评价照明的非视觉生物效应[J]. 照明工程学报, 2012, **23**(5): 1-3.