

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.03.002

不同 LED 照明参数对老年人心电生理响应的影响

黄海静^{a,b}, 王雅静^a, 陈 纲^{a,b}

(重庆大学 a.建筑城规学院; b.山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:光的非视觉生物效应与人体健康密切相关,随着 LED 在室内照明中的广泛应用,LED 照明与人体生理健康的关系也日益重要。心电图(ECG, electrocardiograph)是生理参数的主要表征之一。针对 LED 照明,以 3 种色温(3 000、5 000、6 500 K)、5 种照度(300、500、750、1 000、1 500 lx)为主要变量,研究不同光照时长(10、20 min)下,老年人心电指标对光响应的情况。结果显示,照度、色温等光照参数的主效应对老年人的 ECG 无显著影响,但照度和色温的交互作用对老年人的 ECG 影响显著。其中,3 000 K 和 1 000 lx 的交互作用对 P 波时间和 T 波时间影响最大;6 500 K 和 1 500 lx 的交互作用影响最小;5 000 K 和 750 lx 的交互作用对 PR 间期影响最大,6 500 K 和 500 lx 的交互作用影响最小。但较短光照时长下,老年人的 ECG 变化不明显。因此,有必要探讨更长时间(1 h 及以上)光照下,老年人的心电生理响应情况,从而为老年人健康照明参数的确定提供依据。

关键词:老年人; LED; 心电图; 非视觉生物效应; 色温; 照度; 光照时长

中图分类号: TU202

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)03-013-09

The effects of different LED lighting parameters on ECG response of the elderly

HUANG Haijing^{a,b}, WANG Yajing^a, CHEN Gang^{a,b}

(a.School of Architecture and Urban Planning; b. Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The non-visual biological effect of light is closely related to human health. With the wide application of LED in indoor lighting, great attention has been paid to the relationship between LED lighting and human physiological health. Electrocardiograph (ECG) is one of the main characteristics of physiological parameters. Therefore, the response of ECG indicators of the elderly to LED lighting in different light exposure duration (10 min, 20 min) were investigated by taking three levels of color temperature (3000 K, 5000 K and 6500 K) and five levels of illuminance (300 lx, 500 lx, 750 lx, 1 000 lx and 1500 lx) as main variables. Experimental results indicate that ECG indicators of the elderly are not affected by main effects of color temperature and illuminance, but indeed affected by the interaction of illuminance and color temperature, wherein P wave time and T wave time are most affected by the

收稿日期: 2020-01-16

基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究专项资助项目(cstc2017jcyjAX0214); 国家自然科学基金项目(51108479)。

Supported by Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology (cstc2017jcyjAX0214) and National Natural Science Foundation of China(51108479).

作者简介: 黄海静(1974—),女,教授,博士生导师,主要从事建筑光学、绿色建筑、建筑设计及技术科学研究,(E-mail) cqhhj@126.com。

interaction of 3 000 K and 1 000 lx, and least affected by the interaction of 6500 K and 1 500 lx; PR interval is most affected by the interaction of 5 000 K and 750 lx, and least affected by the interaction of 6 500 K and 500 lx. However, the changes of ECG of the elderly are not significantly influenced by the short light exposure duration, so it is necessary to further explore the response of ECG indicators of the elderly under long-term (1 h or more) exposure so as to provide sufficient basis for the determination of healthy lighting parameters for the aged.

Keywords: the elderly; LED; electrocardiogram (ECG); non-visual biological effect; color temperature; illuminance; light exposure duration

目前,养老已成为全社会关注的热点。随着年龄增加,老年人的视知觉及各项身体机能逐渐衰退^[1],并伴随出现各种心理问题。全方位关注老年人生理、心理和社会认知需求,为老年人营造健康生活环境至关重要。光是重要的生活环境因素。在可见光范围内,进入人眼的光不仅产生视觉效应,也会对人体生理、心理产生生物性效应。而第三种感光细胞——本征感光视网膜神经节细胞(ipRGC)的发现^[2]使光与人体生理健康的关系进一步得到重视。对于光环境质量的评价,也由原来单一的视觉效应评价变为视觉效应和非视觉效应的双重评价。前者注重视觉功能性,后者则与人体健康密切相关^[3]。老年人视觉功能衰退,光环境质量对老年人身心健康的影响更不可忽视。分析近10年CIE(国际照明委员会)会议的研究成果及热点可发现,针对老年人与低视力人群的特殊照明研究日益得到国内外学者及社会相关部门的广泛关注^[4-7],其中,基于非视觉生物效应的老年人健康照明研究也取得较大进展。

光对老年人非视觉生物效应的研究主要体现在两方面:一是将光照作为治疗手段。利用光的生物效应对老年人中广泛存在的睡眠、情绪、认知等方面的问题进行有效干预,以达到缓解或改善症状的目的^[8-15];二是以维持健康老年人正常的生理节律为目标,研究老年人的生理参数对于光照强度、光谱、光照时间等光度量的响应情况,根据这种响应特性对照明参数进行合理设置或控制,有助于老年人室内光环境品质的提升和老年人健康照明标准的制定。目前,大多数研究集中在光的疗愈层面,且已取得了丰硕的成果;而对于健康老年人的光照生理响应的研究仍处于探索阶段。有研究显示,随着年龄增长,瞳孔缩小以及晶状体透过率降低将减少到达视网膜的光线,且短波长(蓝光)部分的光谱透射率更低^[16-17]。而ipRGC的最大灵敏度在蓝光区域(460~490 nm)^[18-20]。因此,眼睛老化可能导致老年人的生理节律及其光响应受到影响^[21-23]。Najjar等^[24]对比年轻人和老年人在9种不同波长(420~620 nm)单色光的刺激下褪黑素抑制的情况,发现相比年轻人(484 nm),老年人生物效应的作用光谱的峰值波长向长波方向(494 nm)偏移。居家奇等^[25]以主波长为440、470、490、530 nm的蓝绿光为光源,发现低照度不同彩光照明下年轻人的心率变化明显,而老年人的心率并无明显变化。饶丰等^[26]研究不同色温(6 500、5 500、4 500、3 500 K)LED照明下心率响应情况,发现青年人的心率随色温变化明显,而老年人的心率变化受色温影响较小。综上所述,老年人对于光的生理响应明显不同于年轻人,有必要对老年人照明进行专门研究;同时,当前研究主要针对光源光谱或色温等单一光度量,缺乏照明参数综合作用效应的研究。而光生物效应与光谱分布、光照强度、光空间分布、光照时刻及持续时间等因素密切相关,且这些因素相互作用对人体生理机能产生影响^[27]。因此,为进一步研究光照因素的综合作用对老年人的影响,文中以照度(光照强度)和色温(常见白光LED为实验光源)为主变量,光照时长为次变量,探讨多因素综合影响下老年人的生理指标对光的响应情况。

光生物效应的参数表征主要有3种:一是褪黑激素抑制。基于光照下褪黑素分泌抑制作用的实验方法内在机制明确,生物效应特征明显,但实验过程相对冗长,不具实时性,且人体血液或唾液中褪黑素在白天含量很低,测量精度容易受到影响;二是瞳孔响应。通过不同光照条件下瞳孔收缩变化来表征,实验操作较方便,实时性强,但内在因果关系脉络不完全明确;三是基于心率、血压、体温等其他生理参数的响应。这种方法可以快速、直观、即时地反映光照影响,但实验易受被试状态及环境影响,严格筛选被试和控制实验环境是此方法的关键。根据老年人的生理、心理及视觉特征,综合考虑3种方法的适用性、局限性和实验可操作性,选择第3种生理参数响应来表征。此外,心电图(ECG)是临床上最常用的身体健康检查方法之一,可通过记

录人体心电活动诊断心律失常、心肌缺血等心脏异常情况。文中以心电指标变化表征老年人对光的非视觉生物效应的生理响应。

1 实验设计

通过分析照度、色温及光照时长等光照因素对老年人生理指标的综合影响机制,研究适宜于老年人的光照参数,从而为老年人健康照明研究提供可参考的理论依据。

1.1 实验对象及条件设置

实验以 60 岁以上老年人为征募对象,最终确定志愿者 16 人(男性 10 人,女性 6 人),年龄为 66~80 岁,平均年龄 75.9 岁,均为大学退休教职工。被试者心理状态和身体状况良好,拥有正常色觉和视力或矫正视力,均无眼部疾病和其它病理因素。为避免其他因素干扰,要求被试者实验前一天有充足睡眠,避免疲劳,不得饮酒或服用药物;实验测试时保持平稳、常态心理。

实验空间为 3.6 m×2.4 m×3.6 m,四周由银灰色不透光帘幕围合而成,如图 1(a)所示,作业面上方为悬吊实验灯架,可通过旋转灯架四角固定在钢管上的螺丝调整所需高度,如图 1(c)和图 1(d)所示。地面、墙面(遮光帘)和桌面的反射率分别为 0.5、0.4 和 0.2。照度测点布置,如图 1(b)所示。实验测试时间从 2018 年 11 月 1 日至 12 月 8 日,持续 1 个多月。室内环境温度在 16.6~22 °C 之间,湿度在 74%~78.5% 之间,变化相对稳定。

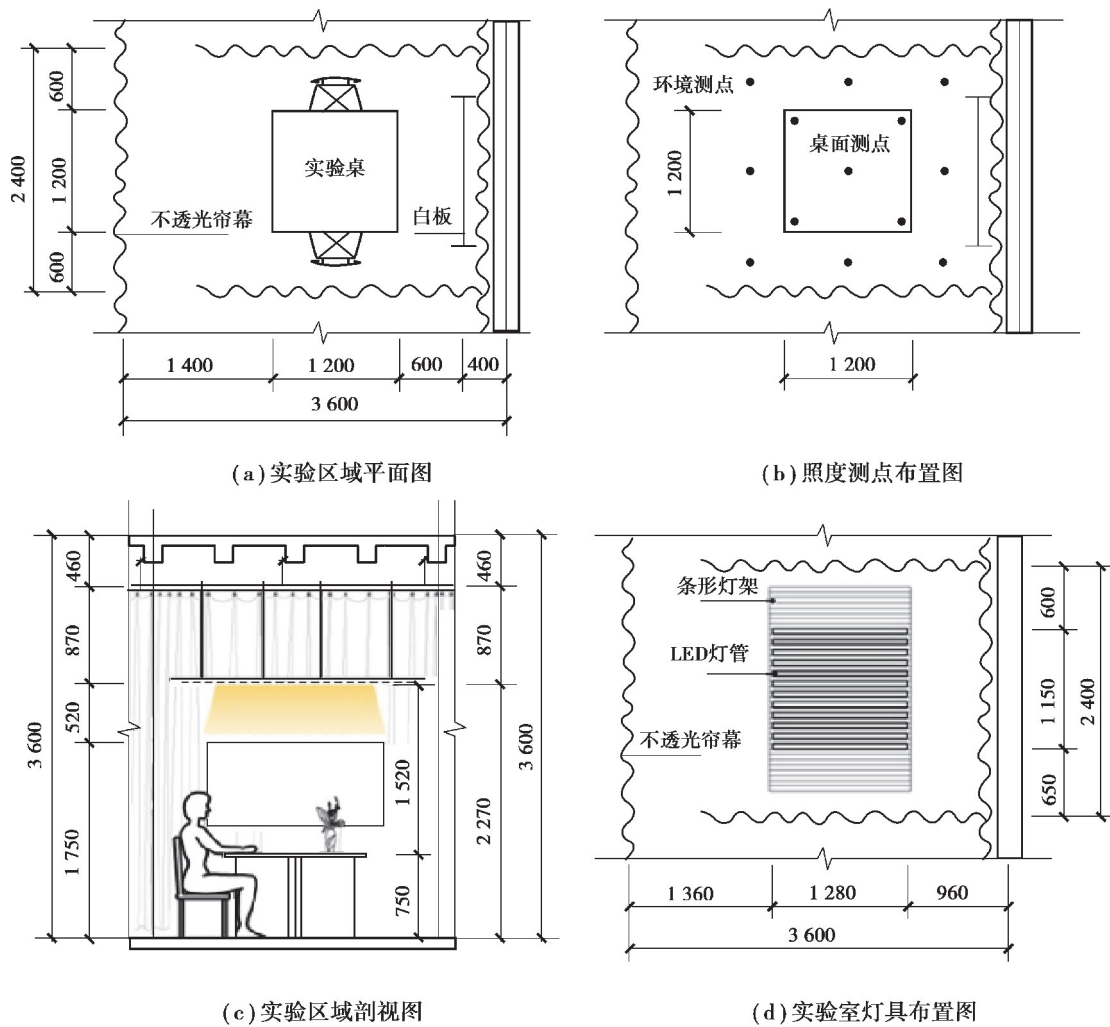


图 1 实验空间示意图

Fig. 1 Relevant diagrams of the experimental space

1.2 实验参数设定

实验光源采用日常用的白光 LED 灯,主要光学参数为照度、色温和光照时长。其中,色温选取 3 000 K (低色温)、5 000 K (中间色温)、6 500 K (高色温)3 种;作业面水平照度根据国内外老年人主要活动场所中的照度规定^[28],选取 300、500、750、1 000、1500 lx 5 种照度等级;光照时长为 10、20 min,共形成 30 组实验场景,探讨不同光环境对老年人生理节律的影响作用。3 种色温 LED 灯的光谱功率分布如图 2 所示。实验采用美国 BIOPAC 公司的 MP150 多导生理测试仪,主要生理参数为心电图(ECG),包括心率(HR)、P 波(心房除极)时间、T 波(心室复极)时间、QRS 波群(心室除极)时间、PR 间期(房室传导时间)、ST 间期(心室除极完成时间)、QT 间期(心室除极与复极总时间)等。由于 QT 间期受心率影响较大,临床上常使用 QTc 间期(QT 间期校正值)来表征。已有研究仅以心率作为参数,难以反映光照对人体心电活动的整体影响,文中选取心率、P 波、T 波、QRS 波群、PR 间期和 QTc 间期 6 个常见的心电参数作为主要指标,来表征光的非视觉生物效应。

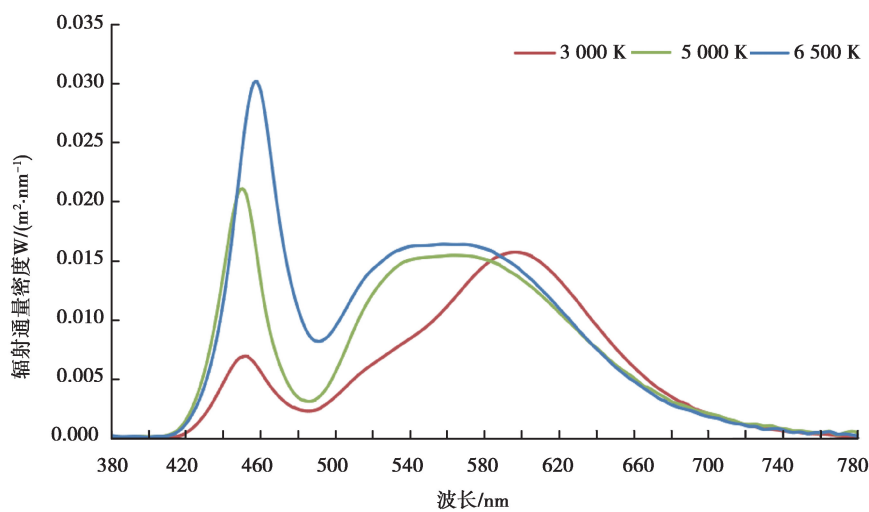


图 2 实验用 3 种色温 LED 灯的光谱功率分布

Fig. 2 Spectral power distribution of the three white LED s

1.3 实验过程设计

所有被试者均参与“5 种照度×3 种色温×2 种光照时长”组合的共 30 组照明场景的实验。为了避免人体固有生理节律的影响,每位被试者需在一天的同一时间段内完成生理测试实验;同时,考虑老年人的暗适应时间以及行走实验室后心电指标稳定时间(一般情况下,老年人的暗适应时间约 2 min 左右,适量运动后生理指标恢复时间约 6 min 左右),设置暗适应和休息时长为 10 min;考虑到心电参数即时变化的特点,以开灯前后 10 min 的短时间心电变化评价老年人对于光照生物效应的即时响应;为了探索光照时长的影响作用,记录光照 10 min 的心电数据后,另记录持续光照 10 min 的数据。每次的实验时长为 40 min 左右,闭灯环境和开灯环境下各 20 min。在黑暗(闭灯)环境下,前 10 min 为暗适应和生理休息时间,后 10 min 为实验时间;在光照(开灯)环境下,每 10 min 为 1 个实验时长,连续测试 2 段,以比较光照 10 min 和 20 min 后老年人的心电数据变化差异。

实验共设 15 种光照环境,每种光照环境测试时分 2 个阶段:1)实验开始之前,要求每位被试者提前 10 min 到达实验室,然后在暗环境中静坐 10 min 进行环境适应,生理参数达到稳定后开始实验,每隔 5 min 记录 1 次心电数据,每次采样 2 min,黑暗环境 20 min 的数据记作 D20;2)打开光源,测量被试者 20 min 内的心电数据,每隔 5 min 记录 1 次。光照 10 min 记作 L10,光照 20 min 记作 L20。受试者在整个光照过程中不允许闭上眼睛,尽量保持眼睛平视前方。具体流程如图 3 所示。此过程为 1 个实验单元,下次实验单元开始时重复上述步骤。

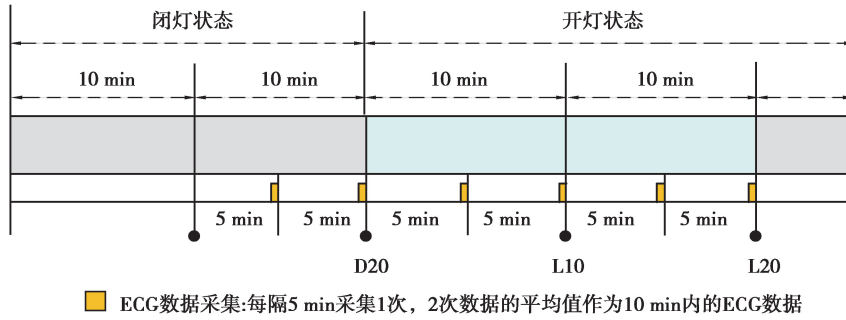


图 3 实验流程图

Fig. 3 Flow chart of the experiment

2 生理响应结果分析

2.1 数据分析方法

为了摒除个体差异、时辰及其他因素对老年人 ECG 数据的影响,以心电参数变化率作为因变量,分析照度、色温、光照时间等照明参数对老年人 ECG 的影响。心电参数变化率越高,对应的光照条件能够产生更强的生理刺激,以此评价不同光照条件的光生物效应强弱^[29]。以 ΔR 表示开灯前后的心电参数变化率,具体计算公式为

$$\Delta R = \frac{R_{\text{dark}} - R_{\text{light}}}{R_{\text{dark}}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中, R_{dark} 为黑暗状态下心电数据; R_{light} 为光照后心电数据。首先,利用 IBM SPSS20.0 统计分析软件检验样本数据正态分布情况。根据 Shapiro-Wilk 检验结果及 Q-Q 图等进行综合判断,发现各光照条件下老年人的 ECG 数据近似服从正态分布;然后,采用多因素方差分析方法,对色温和照度 2 种参数的主效应和交互效应进行分析,检验照明参数的影响是否显著(若 $P < 0.05$, 认为影响显著; $P > 0.05$, 则影响不显著)。如果照明参数对老年人心电变化率的影响显著($P < 0.05$),则进一步比较不同照明条件下的心电变化率均值(ΔR),以确定各光照条件下光生物效应强弱;最后,采用配对 T 检验法,通过光照 10 min 的变化率 ΔR_1 和光照 20 min 的变化率 ΔR_2 之间的差异性比较,分析不同光照时长的影响作用。

2.2 数据分析结果

实验数据统计的方差分析结果,如表 1 所示。由表 1 可知,1)2 种光照时长时,照度、色温的主效应对老年人的心率(HR)、P 波、T 波、PR 间期、QRS 波群时间及 QTc 间期各心电指标的影响均不显著($P > 0.05$); 2)光照时长为 10 min 时,照度、色温的交互作用对老年人的 PR 间期的变化率($P = 0.032, \eta^2 = 0.115$)影响显著,对其他心电指标无明显影响($P > 0.05$);光照时长为 20 min 时,照度、色温的交互作用对老年人的 P 波变化率($P = 0.036, \eta^2 = 0.113$)、T 波变化率($P = 0.025, \eta^2 = 0.119$)影响显著,对其他心电指标无明显影响($P > 0.05$)。

表 1 老年人 ECG 指标变化受不同光照参数影响情况统计表

Table 1 The effects of different lighting parameters on the changes of ECG indicators of the elderly

光照参数	光照时长 /min	心电指标变化率(ΔR)					
		ΔHR	ΔP 波	ΔT 波	ΔPR 间期	ΔQRS 波	ΔQTc
照度	10	○	○	○	○	○	○
	20	○	○	○	○	○	○
色温	10	○	○	○	○	○	○
	20	○	○	○	○	○	○

续表 1

光照参数	光照时长 /min	心电指标变化率(ΔR)					
		ΔHR	ΔP 波	ΔT 波	ΔPR 间期	ΔQRS 波	ΔQTc
照度 *	10	○	○	○	●	○	○
色温	20	○	●	●	○	○	○

注：“●”表示照明参数对心电变化的影响显著，即 $P < 0.05$ ；“○”表示影响不显著，即 $P > 0.05$ 。

进一步比较受照度和色温交互作用影响显著的 P 波、T 波和 PR 间期的变化率均值，结果如图 4 所示。

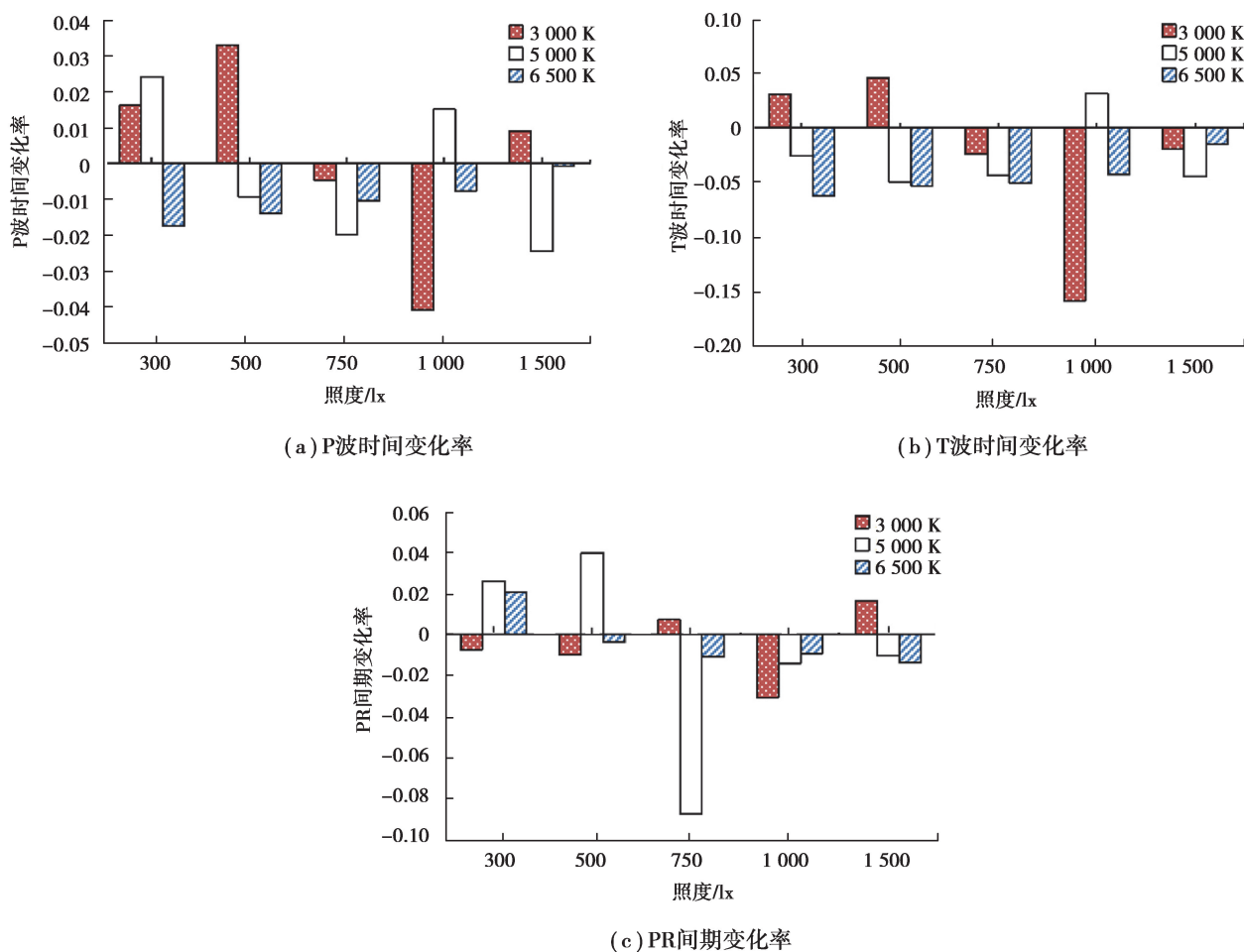


图 4 不同照明条件下 ECG 指标变化率比较

Fig. 4 Comparison of the change rate of ECG indicators under different lighting conditions

1) 对于 P 波时间，由图 4(a) 可知，在 15 种照明条件下，色温 3 000 K 和照度 1 000 lx 的交互作用对 P 波时间变化率的影响最大，产生的非视觉光生物效应最强；而色温 6 500 K 和照度 1 500 lx 的交互作用影响最小，光生物效应最弱。同时，在高色温 6 500 K 照明条件下，随着照度的增加，P 波时间变化率呈现明显的递减趋势；而在低色温 3 000 K 和中间色温 5 000 K 时，变化无规律。

2) 对于 T 波时间，由图 4(b) 可知，与 P 波时间类似，色温 3 000 K 和照度 1 000 lx 的交互作用对 T 波时间变化率的影响最大，光生物效应最强；色温 6 500 K 和照度 1 500 lx 的交互作用影响最小，光生物效应最弱。同样，在 6 500 K 照明条件下，T 波时间变化率随着照度的增加而减小；3 000 K 和 5 000 K 时变化无规律。

3) 对于 PR 间期，如图 4(c) 所示，色温 5 000 K 和照度 750 lx 的交互作用对其变化率影响最大，光生物

效应最强;色温 6 500 K 和照度 500 lx 的交互作用影响最小,光生物效应最弱。

最后,利用配对 T 检验法比较老年人接受光照 10 min 和 20 min 后 P 波、T 波和 PR 间期 2 次变化率的差异。结果显示,P 波时间和 PR 间期的 2 次变化率均无显著差异($P>0.05$),说明 P 波时间和 PR 间期的变化受较短光照时长影响不大;T 波时间除了在 6 500 K、500 lx 照明条件下 2 次变化率有显著差异外($P=0.014$),其他的差别均不明显($P>0.05$),即 T 波时间的变化受较短光照时长影响也较小。

3 讨 论

研究以照度和色温照明参数为主要变量,光照时长为间接变量,重点探讨两方面的内容:一是 LED 照明对老年人 ECG 生理响应的多参数综合影响作用;二是不同 LED 照明对于老年人 ECG 的光生物效应的强弱。通过白光 LED 照明对老年人心电指标影响的实验结果显示,照度、色温的主效应对老年人的心率、P 波时间、T 波时间等心电指标的变化均无显著影响,这与居家奇^[25]、饶丰等^[26]实验发现老年人的心率受彩光光谱、色温的单一影响较小的结论一致。但是,照度和色温的交互效应对老年人的 P 波时间、T 波时间和 PR 间期等心电指标的变化则影响显著。如图 4 所示,色温 3 000 K 和照度 1 000 lx 的交互作用对 P 波时间和 T 波时间的变化率影响最大,色温 6 500 K 和照度 1 500 lx 的交互作用影响最小;色温 5 000 K 和照度 750 lx 的交互作用对 PR 间期的变化率影响最大,色温 6 500 K 和照度 500 lx 的交互作用影响最小。因此,相对于高色温照明条件,低色温和中间色温照明对于老年人生理响应影响更大。究其原因,一是老年人生物效应的作用光谱的峰值波长向长波方向偏移,因而对富含短波段蓝光的高色温光源的敏感度减弱(Najjar 等^[24]);二是老年人的晶状体随着年龄增加而发黄,对长波长的光谱透射率变得比短波长更高(Kessel L 等^[16]、Artigas J M 等^[17])。

实验还发现,在 6 500 K 高色温照明条件下,光对老年人的生物效应(光照对 P 波时间和 T 波时间等心电指标变化率的影响)随照度的增加呈现明显递减趋势,如图 4 所示;而对于年轻人,光的生物效应(光照对褪黑激素的最大抑制率)却随照度的增加而增强(McIntyre 等^[30])。可见,老年人对光的生理响应与年轻人存在明显差别。由于本次实验的老年人大多集中在 70~80 岁之间,这个年龄段的老年人视觉系统老化更明显,此实验结果与老年人晶状体中的光散射引起的对强光和眩光较为敏感的生理机制有一定相关性。所以,建筑空间照明设计时,宜考虑老年人群与其他年龄人群的照明需求差异,设置不同的光照条件。已有研究指出,光照时长也是影响人体光的非视觉生物效应的重要因素^[27],结果显示,较短的光照时长(20 min)对于老年人的心电指标变化影响并不明显。因此,有必要根据老年人日常视觉活动持续时长特点,对更长时间(如 1 h 及以上)光照下老年人的生理响应进行研究,提出有利于老年人生理健康的光照时长建议值。此外,实验时间(11 月—12 月)是重庆天然光极其缺乏的秋冬季节,不能排除季节性(抑郁)情绪可能对老年人产生影响^[31];并且实验时老年人的心理活动及瞳孔活动不可控,这都可能间接地影响其生理变化及其对光响应,因而选择不同季节、更多样本的实验数据分析是减少这种干扰的关键。

4 结 论

1) 照度、色温等光照参数的主效应对老年人的心电指标无显著影响,但是照度和色温的交互效应对老年人的 P 波时间、T 波时间和 PR 间期等心电指标的变化影响显著。

2) 光照时长为 10 min 和 20 min 时,老年人的 ECG 心电指标变化不明显,说明老年人的生理响应受较短时间光照的影响较小。

3) 色温 3 000 K 和照度 1 000 lx 的交互作用对 P 波时间和 T 波时间影响最大、光生物效应最强;色温 6 500 K 和照度 1 500 lx 的交互作用影响最小、光生物效应最弱。色温 5 000 K 和照度 750 lx 的交互作用对 PR 间期影响最大、光生物效应最强;色温 6 500 K 和照度 500 lx 的交互作用影响最小,光生物效应最弱说明不同照明参数的交互作用对心电指标的影响程度不同。

4) 高色温照明条件下,老年人部分心电指标(如 P 波时间和 T 波时间)对光响应随着照度的增加而呈现明显的递减趋势。因此,综合考虑光照对老年人各项生理指标的影响,较短时间内高色温和较高照度水平(6 500 K、500 lx~1 500 lx)的照明条件对老年人的生理节律更有利。

文中仅是对老年人生理参数光响应的一个实验结果,为充分挖掘老年人生理指标随照明参数及光照时间变化的响应规律,将根据老年人日常视觉活动时长特点,探讨更长时间(如1 h及以上)光照的影响,并扩大样本量,通过年轻人与老年人的对比实验,分析不同年龄人群的光生物效应差异程度,从而提出适宜于老年人的照明参数。

参考文献:

- [1] Schlangen L J M. The role of lighting in promoting well-being and recovery within healthcare[M]. Netherlands: PHILIPS, 2010.
- [2] 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.
- [3] Van Bommel W J M. Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work[J]. *Applied Ergonomics*, 2006, 37(4): 461-466.
- [4] 张耀根, 高飞. 室内外照明研究动向[J]. *照明工程学报*, 2008, 19(1): 6-15.
Zhang Y G, Gao F. New trends of interior and exterior lighting[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2008, 19(1): 6-15. (in Chinese)
- [5] 林燕丹. 第27届CIE大会热点学术问题[J]. *照明工程学报*, 2011, 22(4): 107-110.
Lin Y D. Hot academic issues of the 27th CIE conference[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2011, 22(4): 107-110. (in Chinese)
- [6] 张昕, 赵晓波. 国际照明委员会(CIE)第三分部2011研究进展综述[J]. *照明工程学报*, 2012, 23(1): 7-10.
Zhang X, Zhao X B. 2011 research summary of CIE division three[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2012, 23(1): 7-10. (in Chinese)
- [7] Akashi M, Akizuki M, Cobham M, et al. CIE 227: 2017 lighting for older people and people with visual impairment in buildings[R]. International Commission on Illumination, 2017.
- [8] Van Hoof J, Aarts M P J, Rense C G, et al. Ambient bright light in dementia: Effects on behaviour and circadian rhythmicity[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(1): 146-155.
- [9] Van Hoof J, Schoutens A M C, Aarts M P J. High colour temperature lighting for institutionalised older people with dementia[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(9): 1959-1969.
- [10] Riemersma-van der Lek R F, Swaab D F, Twisk J, et al. Effect of bright light and melatonin on cognitive and noncognitive function in elderly residents of group care facilities: a randomized controlled trial[J]. *JAMA*, 2008, 299(22): 2642-2655.
- [11] Zhao X, Ma J, Wu S Y, et al. Light therapy for older patients with non-seasonal depression: a systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2018, 232: 291-299.
- [12] 曾堃, 郝洛西. EEG作为光与情绪实验方法的探讨:以心内科CICU模拟病房白光环境实验为例[J]. *照明工程学报*, 2017, 28(6): 42-47.
Zeng K, Hao L X. Experimental methodology of EEG on luminous environment and emotion—a case study of CICU simulation ward[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2017, 28(6): 42-47. (in Chinese)
- [13] Kuijsters A, Redi J, de Ruyter B, et al. Affective ambiances created with lighting for older people[J]. *Lighting Research & Technology*, 2015, 47(7): 859-875.
- [14] Akyar I, Akdemir N. The effect of light therapy on the sleep quality of the elderly: an intervention study[J]. *The Australian Journal of Advanced Nursing: a Quarterly Publication of the Royal Australian Nursing Federation*, 2014, 31(2): 31-38.
- [15] Kretschmer V, Schmidt K H, Griefahn B. Bright light effects on working memory, sustained attention and concentration of elderly night shift workers[J]. *Lighting Research & Technology*, 2012, 44(3): 316-333.
- [16] 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]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2010, 36(2): 308-312.
- [17] Artigas 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]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2012, 53(7): 4076-4084.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Cajochen C, Münch M, Koblalka S, et al. High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light[J]. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 2005, 90(3): 1311-1316.
- [21] Banks G, Heise I, Starbuck B, et al. Genetic background influences age-related decline in visual and nonvisual retinal responses, circadian rhythms, and sleep[J]. *Neurobiology of Aging*, 2015, 36(1): 380-393.
- [22] Arendt J. Biological rhythms; the science of chronobiology[J]. *Journal of the Royal College of Physicians of London*, 1998, 32(1): 27-35.
- [23] 杨公侠, 杨旭东. 老年人与照明(续完)[J]. *光源与照明*, 2011(2): 45-47.
Yang G X, Yang X D. The elderly and lighting (end)[J]. *Lamps and Lighting*, 2011(2): 45-47. (in Chinese)
- [24] Najjar R P, Chiquet C, Teikari P, et al. Aging of non-visual spectral sensitivity to light in humans: compensatory mechanisms[J]. *PLoS One*, 2014, 9(1): e85837.
- [25] 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.
Ju J Q. Research on digitalized model of spectral response for biological effects of lighting [D]. Shanghai: Fudan University, 2011. (in Chinese)
- [26] 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.
Rao F, Xu A C, Zhu X F. Change of the circadian effect of LED lighting with age[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(2): 250-255. (in Chinese)
- [27] Rea M S, Figueiro M G, Bullough J D. Circadian photobiology: an emerging framework for lighting practice and research [J]. *Lighting Research & Technology*, 2002, 34(3): 177-187.
- [28] 李农, 梁凯. 老年居住建筑照明标准的研究[J]. *照明工程学报*, 2016, 27(1): 60-64,111.
Li N, Liang K. Research on lighting standards of the elderly residential buildings[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2016, 27(1): 60-64,111. (in Chinese)
- [29] 周晓明, 刘丹丹. 等效照度描述LED光源下非视觉生物效应的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(8): 134-141.
Zhou X M, Liu D D. Impact of nonvisual biological effects with the description of the equivalent illuminance for LED lights [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(8): 134-141. (in Chinese)
- [30] McIntyre I M, Norman T R, Burrows G D, et al. Human melatonin suppression by light is intensity dependent[J]. *Journal of Pineal Research*, 1989, 6(2): 149-156.
- [31] 杨春宇, 梁树英, 张青文. 调节和预防大学生季节性抑郁情绪的光照研究[J]. *灯与照明*, 2013, 37(1): 1-3,11.
Yang C Y, Liang S Y, Zhang Q W. The illumination research of regulation and prevention seasonal affective disorder among college students[J]. *Light & Lighting*, 2013, 37(1): 1-3,11. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)