

光源色温对脑波节律及学习效率的影响

严永红^{1,2a,2b}, 晏宁³, 关杨^{1,2a,2b}, 曾恒志^{1,2a,2b}

(1. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640; 2. 重庆大学 a. 建筑城规学院, b. 教育部山地城镇新技术重点实验室, 重庆 400045; 4. 重庆医科大学附属第二医院, 重庆 400010)

摘要:通过测试3种不同色温、3种照度下学生脑电图 α 波、 β 波指数的变化, 观察光照对人体生理节律的影响。实验发现, 不同色温、光照强度下的脑波指数变化率差异存在显著性。其兴奋度及敏感性随光源色温、照度值增加, 大体呈正相关关系。学习效率随光源色温、照度值增加而降低, 呈负相关关系。推测原因似与高色温、高照度状态下更易出现疲劳, 低色温、低照度状态下可能对大脑存在“唤醒”作用, 以及大脑功能分区、光源光谱组成有关。实验结果显示教室光环境的选择, 应考虑学生学习的长期性、高负荷等特点, 考虑“时间累积”效应的综合影响, 并值得进一步研究。

关键词:照明; 学习效率; 大脑; 色温; 脑波节律; 疲劳

中图分类号: TU113.191 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)01-0076-04

Impact on Brain Wave Rhythm and Learning Efficiency by Color Temperature of Artificial Light Sources

YAN Yong-hong^{1,2a,2b}, YAN Ning³, GUAN Yang^{1,2a,2b}, ZENG Heng-zhi^{1,2a,2b}

(1. State Key Lab of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China; 2a. Faculty of Architecture and Urban Planning, b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing 400045, P. R. China; 3. Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing, 400010, P. R. China)

Abstract: This experiment tests the change rate of students' α & β brain waves under different illuminance levels combining with three color temperatures (CCTs) to indicate the influence of light spectrum on human physiological rhythm. The result shows that the brain electrical activities have significant differences under various CCTs and illuminance levels. The excitement and sensitivity of brain are roughly proportional to the light CCTs and illuminance. Brain electrical activities are more sensible to high CCT illuminations. Keeping mental work in the same time period with the same study intensities, brain fatigue comes earlier and stronger in excitable state at high illuminance and high CCT illumination than in peaceful state at low illuminance and low CCT illumination. This situation leads to the learning efficiency of students decreased sharply. An interesting phenomena is that when working in low illuminance and low CCT environment, learning efficiency of students rises with time passing by. That indicates this kind of lighting environment may lead to 'awake' effect of brain. In some environments which have the same illuminance levels with different CCTs that bring about the similar brain activities, learning efficient change rates are different because of the diversity of light spectrum which may induce the different stimulus intensity. Further research work is needed to explain this phenomenon. This experiment points out that the long-term mental workload character during the process of study and comprehensive effect of 'time accumulation' must be seriously considered in classroom lighting design.

Key words: lighting; efficiency; brain; color temperature; brain waves; fatigue

收稿日期: 2011-04-21

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基金资助(2009KB15); 国家自然科学基金资助项目(50778182, 51178483)

作者简介: 严永红(1967-), 女, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事建筑光环境、生态建筑技术等研究, (E-mail) 65120701@126.com。

研究光照对人体健康的影响是近年来国际照明、医学领域一个重要的研究方向^[1]。早在 1996 年,日本学者 Sato M. 已提出荧光灯光源对人体生理功能存在着视觉及非视觉效应 2 种不同影响^[2]; 2002 年,David Berson 等人发现并确认了人眼的非视觉效应(Citropic effect)现象^[3-4];Yasukouchi 等通过实验描述了照明光源对人体非视觉生理功能作用的神经通路^[5];此后,研究人工光源色温、光强对人体节律、认知能力的影响逐渐成为研究领域的一个学术热点^[6-10]。

针对教室人工照明对学生视力、学习效率、生理节律等的综合影响,中国已开展了一系列的研究工作,如:同济大学林丹丹、郝洛西对学生在不同照度、色温荧光灯环境下的视疲劳程度、主观评价、工作绩效进行了对比研究^[11];王智勇等对不同色度纸张对荧光灯和白炽灯反射的光谱进行了比对^[12];重庆大学严永红、关杨等通过一系列视觉实验,对比研究了 3 种色温荧光灯在不同光源背景下的视功效、识别率差异^[13-14],及荧光灯、LED 色温对学生学习效率、视/脑疲劳的综合影响^[15-16];严永红、田海等测试了荧光灯色温、照度对学生短时记忆再认能力的影响。严永红等通过上述实验证明了荧光灯光谱、光强度差异与学生视觉心理、视疲劳、学习效率等诸多因素存在密切的相关性,建立了“光谱/光强度-生理节律-学习效率模型”^[16]。本实验即在此基础上,拟通过测试不同色温、照度下学生脑波节律的变化,对模型的可靠性进行初步印证,对“脑波与生理节律综合评价指数”的一致性进行对照研究。深入探讨教室光环境对人体节律的影响。

1 色温与脑波节律关系实验

1.1 实验条件步骤

基于本课题前期“效率—疲劳”实验^[15-16]的数据,脑波节律实验选取了 8 名在校大学生进行筛选实验。被试年龄在 18—21 岁间,身体健康,双眼矫正视力在 5.0 以上,均为右利手,男女各半。预实验中发现女性月经周期对测试结果存在干扰,且长发不便于安装电极。经医生建议,剔除了女性被试。而 4 名男性被试中,一名被试在非实验条件下左右脑活跃性差异过大,另一名被试半饥饿状态下脑波活性不稳定,均不具有代表性,被排除。最终确定 2 名身体健康、脑电活动变化稳定的被试进行正式实验。

脑电波生理测试实验使用了重庆医科大学附二院体检用房作为实验用房,该房间无窗、恒温、恒湿,排除了天然光及温湿度变化对测试结果的影响。测试时间选择每天 14:00—18:00,保证被试每次实验均处在相近的生理节律周期中,以确保其测试数据

的相对连续性和可比性。

实验用房中安装悬挂式教室专用荧光灯具一套,亮度可实现 0~100% 可调。根据实验需要,分别内装 2×40 W 色温为 2 700 K、4 000 K、6 500 K, Ra=85 的 T5 荧光灯管以形成不同色温、照度的光环境。

实验开始前清理测试环境,排除所有可能对实验干扰的电磁辐射源。为了解脑波活性与工作绩效间的关系,实验采用安非莫夫字母表对被试人进行光照前后的学习效率测试,学习材料为建筑类教科书,强度适中,每一光环境实验耗时 50 min。

试验完成后使用脑功能趋势分析模块,提取实验过程各测试段 α 波、 β 波指数,分析不同光环境下被试脑电活动特点。

1.2 实验方案

在本课题前期实验中,分别测定了不同色温下被试视疲劳、脑疲劳和学习效率 3 个指标。初步建立起了“光谱/光强度-生理节律-学习效率模型”,有关该实验的详细介绍参见文献^[15-16],实验得出了生理节律综合评价指数计算公式:

$$\epsilon = \beta_1 \times (\gamma - \gamma_{\min}) / (\gamma_{\max} - \gamma_{\min}) + \beta_2 \times (\delta_{\max} - \delta) / (\delta_{\max} - \delta_{\min}) + \beta_3 \times (\eta - \eta_{\min}) / (\eta_{\max} - \eta_{\min})$$

式中: ϵ 为生理节律综合评价指数; γ 为学习效率; δ 为视疲劳; η 为脑疲劳; β_1 、 β_2 、 β_3 为各项的权值,均设定为 1。

根据该公式, ϵ 值越高的光环境,越有利于提高被试学习效率、减轻视/脑疲劳。为排除有缺陷的光环境,还必须考虑 γ 、 δ 、 η 3 项指标的达标情况。用基准标识 Ψ 来区分光环境有无缺陷:基准标识 Ψ 为 0,表明该单项达标,1 为未达标。 Ψ 值的计算方法详见文献^[15-16]。在此基础上,依 ϵ 值大小,对实验涉及的光环境进行了从最佳到最差的排序^[16]。为进一步了解 ϵ 值与脑波节律间的关系,特选取了排序表中各色温最佳及最差的 6 个荧灯光环境进行脑波节律对照实验,见表 1。

表 1 不同色温对应最佳、最差照度表

照度指标	K		
	2 700	4 000	6 500
最佳照度值/lx	300	1 000	750
最差照度值/lx	750	300	1 000

注:最佳照度值,指本色温组中综合指数 ϵ 最高、基准标识 Ψ 满足至少 2 项指标要求的照度值。

1.3 实验测试指标

使用脑电监护系统(Solar3000N)长程脑电监护模块持续记录实验过程中被试脑电图。脑电电极安装采用国际脑电图学会建议采用的标准电极安放法,安装于大脑前额及顶叶中央区,记录其中 FP_1 (左

前额区)、FP₂(右前额区)、C₃(左侧中央区)、C₄(右侧中央区)的脑电数据。这4个区域几乎覆盖了人的前脑,是与学习和记忆密切相关的部分。实验主要记录了各光环境下各被试的 α 波和 β 波的脑波指数,即在单位时间内这两种脑波占有所有脑波的比例。

α 波受抑制程度和对 β 波活化程度近似代表了该光环境对大脑皮层活跃性的作用强度。即特定光环境下 α 波和 β 波的变化率绝对值越大,则该光环境下大脑的兴奋性越高^[17]。基于此,实验采用脑波指数变化率来衡量各光环境对大脑觉醒水平的影响:

脑波指数变化率=[(自习后脑波指数-自习前脑波指数)/自习前脑波指数]×100%

2 实验结果与分析

由于人大脑左右半球不同分工存在先天差异,为了避免人为引进干扰因素,按左右半脑分别统计脑电波指数变化率。由于实验被试均为右利手,因此左、右侧半脑的脑电数据分别代表了优势、非优势半球的脑电活动情况。

2.1 各光环境下 Alpha、Beta 波指数变化率对比

各光环境下脑波指数变化率结果详表2、表3。

表2 各光环境下 α 波指数变化率统计表 /%

照度/lx	2 700 K		4 000 K		6 500 K	
	优势半球	非优势半球	优势半球	非优势半球	优势半球	非优势半球
300	-44.48	-41.74	-41.28	-43.53	—	—
750	-44.22	-41.75	—	—	-29.11	-35.53
1 000	—	—	-45.27	-57.94	-46.7	-64.72

表3 各光环境下 β 波指数变化率统计表 /%

照度/lx	2 700 K		4 000 K		6 500 K	
	优势半球	非优势半球	优势半球	非优势半球	优势半球	非优势半球
300	39.89	35.61	39.29	26.5	—	—
750	44.05	56.01	—	—	58.78	37.97
1 000	—	—	53.81	13.65	62.57	-11.11

对比表中各项数据,可得到如下发现:

1) α 波指数随色温、照度的升高逐渐增加。在低色温区, α 波变化率几乎不受照度的影响;中间色温区 α 波变化率开始加大;高色温区上升幅度则更大。大脑左右半球的 α 波指数变化率的趋势相同,但右侧半球(非优势半球)的变化率幅度更大。提示 α 波指数的变化与实验光环境色温不呈现简单的线性关系。

2) β 波指数的变化与照度的关系更为复杂,在左右双侧半球显示出相反的趋势。在左侧半球无论何种色温,照度越高, β 波变化率越大。右侧半球 β 波在低色温区随照度变化趋势同优势半球,但在中、高色温区,照度越高, β 波变化率反而下降。

从优势半球的 α 、 β 波指数来看,低色温下,脑波指数变化率小,表明在低色温光环境下,大脑活性较低;而在中、高色温环境下,脑波指数变化率大,大脑更为活跃。但大脑活性高是否同时意味着学习效率提高?传统照明设计理论认为,高色温环境有利于提高人的警醒程度和工作效率,因此,常在工厂、办公室、教室等与工作/学习效率密切相关的光环境中使用高色温光源。但本课题前期的系列实验却得出了完全相反的结论^[13-15],为进一步明确脑波活性与学习效率间的关系,在本实验下一小节中,将对各实验光环境下被试进行照射前后的学习效率对比。

2.2 各光环境下学习效率测试对比

各光环境下学习效率测量结果详表4。

表4 脑电实验中不同色温、照度学习效率变化率

色温/K	2 700		4 000		6 500	
	300	750	300	1 000	750	1 000
变化率/%	23.7	-14.98	-9.05	6.4	-37.56	-0.7

数据显示,随着色温的增加,被试接受同样照度光线照射后学习效率较接受照射前降低。使学习效率提升的光环境为2 700 K、300 lx及4 000 K、1 000 lx。使学习效率下降的光环境为2 700 K、750 lx,4 000 K、300 lx及6 500 K。而的脑电实验表明,随着色温的增加,大脑皮层的活性提高,提示学习效率的变化趋势与光照色温及照度下脑波指数的变化趋势相反。

从实验结果可以发现,随着色温和照度的增加,优势半球大脑皮层的活性有不断提高的趋势,非优势半球的活性则呈降低趋势;学习效率随着光环境色温和照度的增加逐渐降低(中间色温除外)。据此可初步认为,高色温虽更能刺激大脑活性,但并不能提高学习效率。这一结论与国内其他研究者公布的结果^[11]存在明显不一致的现象,但与日本千叶大学Lu SHI等人所做的运动状态下色温与 α 波指数、主观评价关系实验结果相似^[18]——“实验证明7 000 K下脑波活性最高,但疲倦感最强,疲劳消除最慢;3 000 K下大脑活性相对最低,但对放松和运动后体力恢复有利;5 000 K下最有活力、舒适度最高,是最适宜运动的光环境;”本实验结论也与Inou等人“光源色温对人体脑力活动及临界闪烁融合频率的影响”^[19]、Kozaki T等人“色温对睡眠慢波的影响”^[9]等多个实验结果相吻合。此外,本实验结果与课题前期视功效、效率-疲劳实验等系列实验的结论也基本一致,因此,可推断本结论具有相当的可信度。

此外,本实验低色温、低照度下随光照时间延长而出现的学习效率大幅度提高的现象,在系列实验中均被观察到,是一个很值得进行深入研究的问题。

在实验中,学习效率测试方法主要测试被试者记忆的准确性及反应速度。医学界认为记忆准确性主要与大脑非优势半球功能有关。实验结果再次证实了这个理论,且实验结果更进一步说明记忆的准确性是与非优势半球 β 波指数的变化有关。

令人不解的是,反应速度主要与优势半球的功能有关。但在实验中却发现效率测试结果与优势半球脑波变化呈相反的变化趋势。该现象目前还未能找到合理的解释,推测可能与安非莫夫字母表测试方法偏重于记忆有关。在下一步的实验中,拟更换作业内容,对这一问题进行更深入的实验探讨。

3 结论

基于研究结果得到以下结论:在实验研究的色温、照度范围内,色温和照度的增加能提高大脑皮层的兴奋性。但学习效率变化率与非优势半球 β 波指数的变化有关,与光环境色温和照度的增加成负向运动。因此,单纯提高教室照明的色温和照度对改进学习效果无益。教室光环境的选择应考虑学生学习的长期性、高负荷等特点,考虑“时间累积”效应,及学生视疲劳、心理活动等多因素的综合影响。应对不同色温光源的光谱能量组成与人体节律间关系展开深入研究,探讨低色温、低照度下视疲劳解除机制,为教室照明节能提供一种新方法。本课题其他相关实验结果提示,无论是荧光灯还是LED,高色温光环境均可加重学生视、脑疲劳,不应作为教室照明的主光源。

参考文献:

- [1] CIE. The Influence of Daylight and Artificial Light on Diurnal and Seasonal Variations in Humans—a Bibliography [R]. CIE Publication 139-2001.
- [2] SATO M. Non-visual effects of illumination of fluorescent lamp on physiological aspects [C]// Proceedings of Third International Congress on Physiological Anthropology, Nara, JAPAN: International Society of Physiological Anthropology, 1996: 61-62.
- [3] SAM M BERMAN, ROBERT D Clear. Past Vision Studies can Support a Novel Human Photoreceptor [C]//International Lighting Conference “Lighting in the 21 Century” Proceedings, Leon Spain, 2005.
- [4] 居家奇,陈大华,林燕丹. 照明的非视觉生物效应及其实践意义[J]. 照明工程学报, 2009, 3(1): 25-28.
JU JIA-QI, CHEN DA-HUA, LIN YAN-DAN. The non-visual biological effect of lighting and its practical meaning [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2009, 3(1): 25-28.
- [5] YASUKOUCHI A ISHIBASHI K. Non visual effects of the color temperature of fluorescent lamp on physiological aspects in humans[J]. J Physiol Anthropol Appl Human Sci, 2005, 24(1): 4143.
- [6] GEORGE C BRAINARD, IGNACIO PROVENCIO. Photoreception for the Neurobehavioral Effects of Light in Humans [C]//2nd CIE Expert Symposium on “Lighting and Health”, 2006, 6-21.
- [7] 孟扬,贺珍妮,尹健,等. 夜间光照对褪黑激素抑制的量化计算[J]. 生物化学与生物物理进展, 2010, 37(6): 686-689.
MENG YANG, HE ZHEN-NI, YIN JIAN. Quantitative algorithm for melatonin suppression by light at night [J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2010, 37(6): 686-689.
- [8] WEST K E, JABLONSKI M R, WARFIELD B, et al. Blue light from light-emitting diodes elicits a dose-dependent suppression of melatonin in humans [J]. Journal of Applied Physiology, 2011, 110(3): 619-626.
- [9] KOZAKI T, KIMAMURA S, HIGASHIHARA Y. Effects of color temperature of light sources on slow-wave sleep [J]. J Physiol Anthropol Appl Human Sci, 2005, 24(2): 183-186.
- [10] 石路. 照明光源色温对人体中枢神经生理功能的影响 [J]. 人类工效学, 2006, 6(2): 59-61, 71.
SHI LU. Influence of colour temperature on physiological function of central nervous system [J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2006, 6(2): 59-61, 71.
- [11] 林丹丹,郝洛西. 关于中小学生学习视力健康与光照环境关系的实验研究 [J]. 照明工程学报, 2007(4): 38-42.
LIN DAN-DAN, HAO LUO-XI. Experimental research on relationship between vision health and luminous environment for the primary and middle school students [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2007(4): 38-42.
- [12] 王智勇. 照明与近视关联的研究进展 [J]. 中国学校卫生, 2008, 1(1): 89-91.
WANG ZHI-YONG. Research progress of the relationship between lighting and myopia [J]. Journal of School Health, 2008, 1(1): 89-91.
- [13] 严永红,关杨,王宁,等. 不同色温 T5 荧光灯光色配比识别率对比实验研究 [J]. 照明工程学报, 2010(5): 59-62.
YAN YONG-HONG, GUAN YANG, WANG NING, et al. Different color temperature T5 fluorescent lamps photochromic matching optimal visual acuity contrast experiment [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2010(5): 59-62.
- [14] YAN YONG-HONG, GUAN YANG, TANG G, et al. Experimental research of visual performance with different optical spectrum light sources [C]//International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, 2010, 11: 591-595.

- [2] LEE Y, HOUSE J, SHIN D. Fault diagnosis and temperature sensor recovery for an air-handling unit [J]. ASHRAE Transactions, 1997, 103 (1):621-633.
- [3] WANG S, CHEN Y. Fault-tolerant control for outdoor ventilation air flow rate in building based on neural network[J]. Building and Environment, 2002, 37 (7): 691-704.
- [4] WANG S, XIAO F. AHU sensor fault diagnosis using principal component analysis method[J]. Energy and Buildings, 2004, 36:147-160.
- [5] WANG S, CUI J. A robust fault detection and diagnosis strategy for centrifugal chillers[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning and Refrigerating Research, 2006, 12 (3): 407-428.
- [6] DU Z, JIN X. Detection and diagnosis for sensor fault in HVAC systems [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(3):693-702.
- [7] XU X, XIAO F, WANG S. Enhanced chiller sensor fault detection, diagnosis and estimation using wavelet analysis and principal component analysis methods[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28 (2/3): 226-237.
- [8] SALSBURY T, DIAMOND R C. Fault detection in HVAC systems using model-based feedforward control [J]. Energy and Buildings, 2001, 33 (4):403-415.
- [9] LIU X, DEXTER A. Fault-tolerant supervisory control of VAV air-conditioning systems [J]. Energy and Buildings, 2001, 33 (4):379-389.
- [10] WANG S, WANG J. Robust sensor fault diagnosis and validation in HVAC systems[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2002, 24 (3): 231-262.
- [11] MONTGOMERY D, GEORGE C. Applied Statistics and Probability for Engineers [M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [12] 师旭超, 郭志涛. 膨胀土等级判别的遗传支持向量机多分类方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(4): 44-48.
- SHI XU-CHAO, GUO ZHI-TAO. Multi-classification method of GA-SVM on identifying grade of expansive soils [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(4): 44-48.
- [13] CLARK D. Building Systems and Equipment Simulation Program HVACSIM+, User's Manual [M]. National Bureau of Standards and Technology, Washington, DC, 1985.
- [14] NASSIF N, KAJL S, SABOURIN R. Modeling and validation of existing VAV system components, in: Proceeding of eSim 2004 [C]//Canadian Conference on Building Simulation, Vancouver, 2004:135-141.
- [15] BRANDEMUECHL M, GABELS, ANDERSEN I. A toolkit for secondary HVAC system energy calculation [C]//American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE, 1993.

(编辑 王秀玲)

(上接第 79 页)

- [15] 严永红, 关杨, 刘想德, 等. 教室荧光灯色温对学生学习效率 and 生理节律的影响[J]. 土木建筑与环境, 2010 (4):85-89.
- YAN YONG-HONG, GUAN YANG, LIU XIANG-DE. Productivity and physiological response of students subjected to fluorescent lamps with different colour temperatures and luminance level[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010 (4): 85-89.
- [16] YAN YONG-HONG, GUAN YANG, TANG G LEE, et al. Evaluation index study of students' physiological rhythm effects under fluorescent lamp and LED [C]//2010 International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, 2010: V11-134-139.
- [17] 陈芷若. 神经电生理[J]. 现代电生理学杂志, 2008(3): 188-191.
- CHEN ZHI-RUO. Electric neurophysiology [J]. Journal of Modern Electrophysiology, 2008(3):188-191.
- [18] LU SHI, TETSUO KATSUURA, YOSHIHIRO SHIMOMURA, Koichi IWANAGA. Effects of different light source color temperatures during physical exercise on human EEG and subjective evaluation[J]. Journal of the Human-Environmental System, 2009, 12(1): 27-34.
- [19] INOUE M, KATSUURA T, HARADA H. The effect of color temperature on visual fatigue[J]. J Physiol Anthropol Appl Human Sci, 1997, 16(5):218.

(编辑 胡玲)