

文章编号: 1000-582X(2012)01-141-06

荧光灯光谱、光强对辨别力的影响

严永红^{1a,1b,2}, 田海^{1a,1b,2}, 关杨^{1a,1b,2}, 张明睿^{1a,1b,2}, 曾恒志^{1a,1b,2}

(1. 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 400030;
2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要:为探讨教室照明对生理节律的影响,研究采用汉语双字词卡片和“学习-再认”实验模式,借助信号检测论中辨别力 d 作为指标,测试和分析了 3 种典型色温 T5 荧光灯在 4 种不同照度水平下对学生短时记忆再认能力和脑疲劳的影响。结果表明,受非视觉效应影响,在一定时间长度内,学生在不同光谱、不同照度光环境下的汉语双字词短时记忆再认能力和脑疲劳各不相同,低色温、低照度对大脑具有“唤醒”作用,可提高短时记忆能力;中间色温为最适宜光环境,可使大脑保持适度兴奋,但该色温高照度下,脑疲劳相对较重,学习效率较低;高色温下脑疲劳最重;“时间累积”效应对短时记忆能力的影响显著,应予以重视。

关键词:照明;荧光灯;短时记忆;再认;辨别力;脑疲劳

中图分类号: TU113.19+1

文献标志码: A

The influence of fluorescent lamps with different color temperatures and luminance levels on discrimination

YAN Yong-hong^{1a,1b,2}, TIAN Hai^{1a,1b,2}, GUAN Yang^{1a,1b,2}, ZHANG Ming-rui^{1a,1b,2}, ZENG Heng-zhi^{1a,1b,2}

(1a. Faculty of Architecture and Urban Planning; 1b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing 400030, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

Abstract: Short-term memory measurement is an important method to determine study fatigue as it pertains to learning outcome. This project examines the impact of classroom-lighting on circadian rhythm. A learning-recognition model using two-character Chinese word cards formed the basis of this study. Utilizing the discriminating ability in Signal Detection Theory as an index, students' brain fag (mental exhaustion and fatigue), short-term memory and recognition ability are tested and analyzed. The subjects are placed under T5 fluorescent lamps of 3 typical colour temperatures and with 4 luminance levels. Within a certain length of time, students' brain fag and recognition ability of short-term memory differs under different spectrum conditions and luminance levels. Low colour temperature and low luminance has a wake-up effect that improves short-term memory. Medium colour temperature is the optimum that can keep brain function appropriately excited. Under high luminance level, brain fag is more serious and learning efficiency is lower. Brain fatigue is most pronounced under high colour temperature. Obviously longer exposure time to the Chinese characters will result in higher recognition ability. This study has important implications in

收稿日期: 2011-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50778182);重庆大学中央高校基本科研业务费科研专项“研究生科技创新基金”资助项目(CDJXS10190008);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)

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

how to improve learning through properly designed lighting conditions.

Key words: lighting; fluorescent lamps; short-term memory; recognition; discriminability; brain fag

近年来,随着 David Berson 发现人类第三种感光细胞,研究光对人体生物节律作用的机制和健康照明应用逐渐成为当前国际研究热点之一^[1]。研究发现,人工光的色温、光谱及照度差异除影响视功效外,还对人体生理节律产生显著影响。国内外学者对该课题展开了一系列的研究。如,日本千叶大学石路对照度、色温对人体节律的影响进行了综述^[2]; Peter R Mills 等人通过研究得出高色温的办公室照明可提高员工的幸福感和工作效率^[3]; Sarah Laxhmi Chellappa 等人通过平衡交叉设计得出 6 500 K 色温光环境下对褪黑激素的分泌抑制作用较强,同样能够增强主观机敏性、幸福感和视觉舒适性^[4]; Françoise Viénot 等人在 9 种不同光环境下研究人体视觉敏捷度、视功效、阅读率的影响得出 2 700 K、150 lx 的光环境下阅读速度最高,人眼瞳孔的放缩很大程度决于亮度的影响而非色温^[5]; Bommel 对非视觉生物效应、健康照明和提高生产率照明以及实际意义进行了研究,指出良好的照明已超越已有的概念,照度水平和白光色温可变的动态照明将会成为未来照明的发展模式^[6]。研究方法从最简单的主观评价到复杂的生理节律测试,但未能得出一致的结论。

针对这一问题,重庆大学严永红、关杨等通过一系列综合实验,对比研究了三种色温荧光灯环境下,学生主观心理评价^[7]、色温/照度与瞳孔面积/识别时间关系^[8]、视功效^[9-10]、学习效率-视/脑疲劳关系^[7]、色温/照度-脑波节律关系^[11]、光源光谱能量分布测试与 circadian 条件下光谱能量关系^[11]。通过上述实验证明了荧灯光谱、照度差异与学生视觉心理、学习效率、生理节律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”^[7,12]。对比实验结果发现,除主观心理评价测试结果外,其余各实验结果间的吻合度较高,且与目前国外 LU Shi^[13]、Kozaki^[14]、Noguchi^[15]、Yasukouchi^[16]、Kuller^[17] 等人的研究结果基本吻合。

实验发现,学生对光环境的主观心理评价与视功效、生理节律测试结果并不完全一致,其原因在于采用传统的心理物理学量表法进行测试时,被试的动机、态度、利害得失等主观心理因素常常会干扰实验结果。鉴于此,笔者拟运用视觉短时记忆再认模型,对被试再认辨别力这一生理指标对各种不同色温、光强的光环境进行实验研究,以期得到更为准

确、客观的实验结果。

1 实验模型

1.1 再认模型的生成

根据教育过程卫生检测评价方法,检测学习疲劳方法包括:剂量作业试验、明视觉持久度测定、视觉运动反应时测定、闪光融合临界频率测定和短时记忆测定^[18]。这些方法已广泛运用于医学和教育领域的研究,随着现代实验心理学的发展,运用心理物理学-信号检测论^[19]方法对短时记忆再认进行研究,能更客观、准确地反映人体生理状况和疲劳程度。

1.2 模型的可行性分析

信号检测论能够将主观因素(β)和反应辨别力(d)区分开来:主观因素(β)受被试的动机、态度、利害得失等因素影响;而反应辨别力(d),在信号强度、先验概率、奖惩严格程度及实验动机一定的情况下,取决于个体的感觉鉴别能力,受生理状况和外界环境的影响,外界环境的变化能够引起生理状况的改变。因此在本实验中辨别力 d 指标能够更准确地反映出各种不同光环境对被试生理的影响状况,辨别力 d 的计算方法^[19]为:

$$d' = Z_{\text{击中}} - Z_{\text{虚惊}}, \quad (1)$$

式中, $Z_{\text{击中}}$ 和 $Z_{\text{虚惊}}$ 分别表示击中概率和虚惊概率的 Z 值。

2 不同色温光环境下学生汉语双字词再认实验

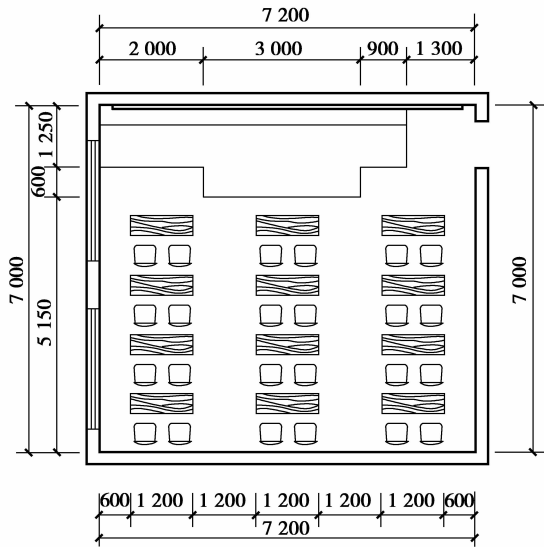
2.1 实验条件

实验场景设置与前期“效率-疲劳”实验^[10]相同(见图 1),在 2 700、4 000、6 500 K 3 种色温荧光灯环境下分别进行测试,桌面平均照度设定为 1 000、750、500、300 lx 4 档,照度均匀度 ≥ 0.7 ^[10]。测试时间为每晚 20:00~23:00 间,为减少实验对正常教学的影响,压缩了实验时间(将自习时间由 45 min 压缩为 20 min),以保证能够在规定的时间内完成整个实验。

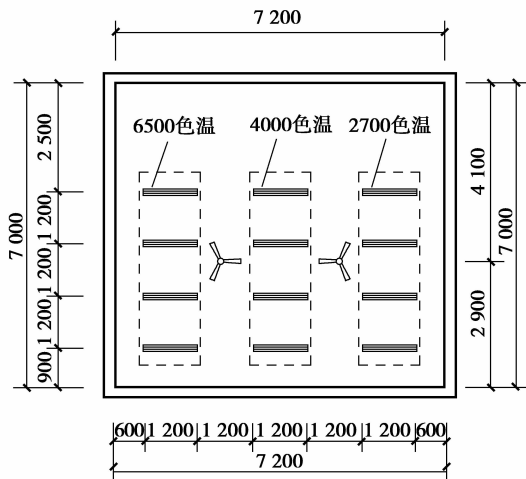
被试对象为年龄在 18~25 岁、矫正视力 5.0 以上、身体健康的在校大学生,实验中随机抽取 32 人,分为 4 组,每组 8 人,男女各半。测试材料为 1 200 个汉语双字词卡片,这些双字词均选自《现代汉语频率词典》(1986)的“频率最高的前 8 000 个词词表”^[20],且无重复,中性特征,无语义关联,实验时将以上卡片

平均分为 24 组,并保证每组词频平均值近似相等。

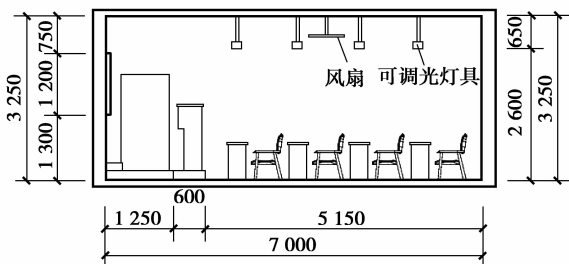
再进行下一轮测试。实验顺序采用拉丁方设计以消除实验顺序误差(见表 1)。



(a)平面图



(b)灯具布置图



(c)剖面图

图 1 实验教室平面图(a)、灯具布置图(b)及剖面图(c)

2.2 实验过程

实验采用“学习-再认”实验模式^[20]。实验前进行练习实验,让被试完全了解实验方法和要求后开始正式实验。正式实验分为作业前、自习(20 min)、作业后测试 3 个部分,每个光环境场景下测试 40 min。测试完成后,让被试充分休息 10 min,主试更换光环境场景(调整照度值或色温),按同样方法

表 1 实验顺序处理表

自变量	300 lx(A)	500 lx(B)	750 lx(C)	1 000 lx(D)
4 水平	实验处理的顺序			
被试组 1	ABCD			
被试组 2	BCDA			
被试组 3	CDAB			
被试组 4	DABC			

3 实验结果与分析

采用“SPSS 统计分析软件包”对实验数据进行统计分析后绘制出各色温组作业前后被试的汉字再认辨别力曲线。

3.1 不同光环境下作业前后汉字再认辨别力对比分析

从图 2 可以看出,在色温 2 700 K 的荧光灯照明条件下,对比各个照度值处,作业前学生的汉语双字词再认辨别力在 500 lx 处最高,而作业后学生的再认辨别力在 300 lx 处最高。作业前曲线相对平缓,说明被试在刚进入各种场景时,生理状况趋于一致,在短时间内照度的改变对被试生理状况影响并不显著;作业后辨别力除 500 lx 处,其余各照度段均较作业前有明显提高,说明低色温下,随着时间的推移,大脑活性提高;但在 500 lx 环境下,大脑兴奋受到抑制,因此,在进行光环境设计时,应注意避开这一照度段。

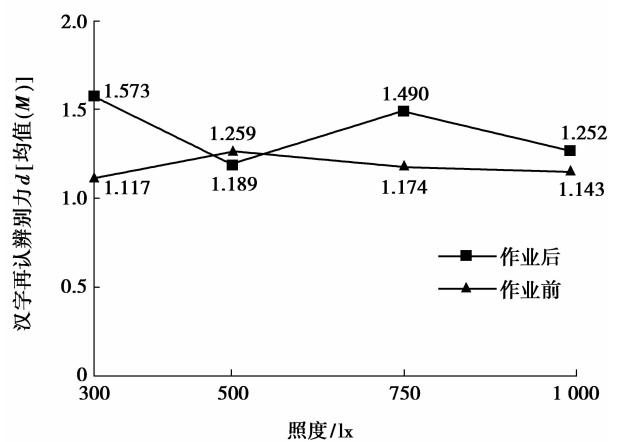


图 2 2 700 K 荧光灯作业前后汉字再认辨别力曲线

4 000 K 光环境下(图 3),在 300~750 lx 照度段,学生作业后的再认辨别力均较作业前有所提升,且再

认能力随照度增加而逐渐升高,在 750 lx 处达到最高值。此后再认能力迅速下降,在 1 000 lx 处作业后再认能力与作业前基本持平。总体来看,说明 4 000 K 色温可使大脑保持适度的兴奋,使大脑思维更为清晰敏捷,但高照度反而对提高学习效率无益。

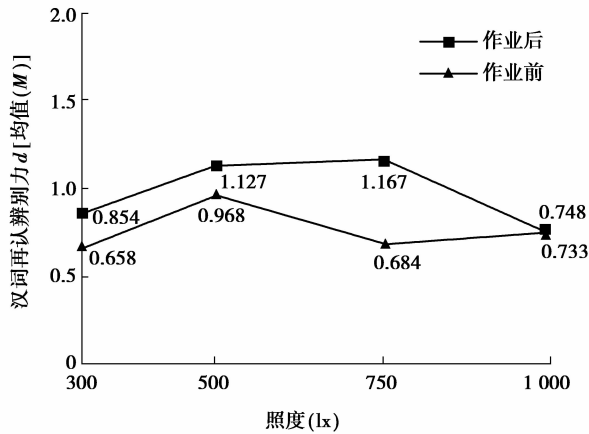


图 3 4 000 K 荧光灯作业前后汉字再认辨别力曲线

6 500 K 光环境下(如图 4),作业前和作业后再认辨别力指数变化幅度较中、低色温组剧烈。作业前,被试在 300 lx 及 1 000 lx 处的再认辨别力较高,但作业后在这两个照度段被试再认辨别力明显下降,说明这两种照度段对学生生理影响较大,提示在高色温下,较暗和较亮的光环境均可对大脑皮层产生显著刺激,使注意力集中,但这种状况是短暂的,随着时间的推移,被试很快出现较严重的脑疲劳;而在 500 lx 和 750 lx 照度段处,情况恰好相反。其中,在 750 lx 照度段处,被试能较长时间地保持清醒状态。

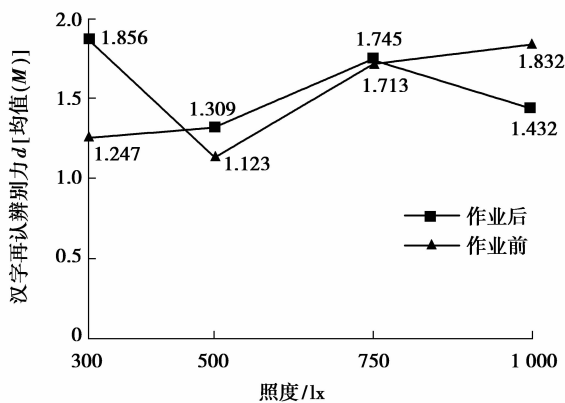


图 4 6 500 K 荧光灯作业前后汉字再认辨别力曲线

3.2 与前期实验结果的对比及讨论

在本课题前期实验中,通过“效率-疲劳实验”,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,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^[7,12],

实验得出了生理节律综合评价指数 ϵ 值计算公式(下简称综合指数), ϵ 值越高,表明光环境质量越好,视/脑疲劳轻、学习效率高^[12]。该实验测试了被试在每种光环境下学习 45 min 前后视/脑疲劳及学习效率的变化,而本实验则主要测试对应光环境在更短时间内(20 min)对被试短时记忆的影响。因此,有必要对这两个实验的结果进行比较。

为便于比较,将图 2-4 的数据进行了合并处理,以辨别力指数差来反映被试在作业后大脑的兴奋程度(见图 5)。

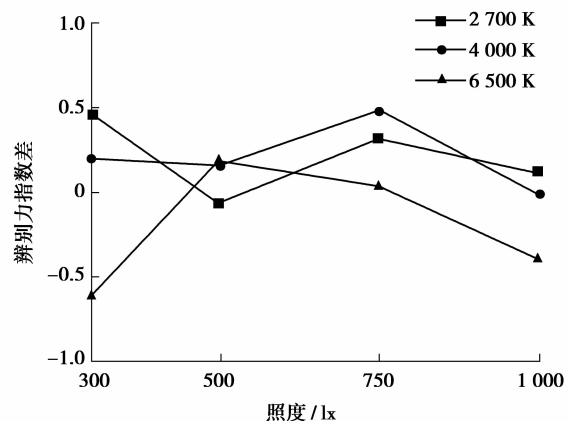


图 5 不同色温下作业前后辨别力指数差曲线

辨别力指数差 = 作业后再认辨别力 - 作业前再认辨别力。 (2)

辨别力指数差 < 0 , 表明在该光环境下经过一段时间的学习,大脑兴奋被抑制,出现了脑疲劳,导致再认辨别力下降。

通过将“效率-疲劳实验”与本实验结果进行对照^[12],发现以下现象:

1) 2 700 K 下 300、500 lx, 4 000 K 下所有照度段, 6 500 K 下 1 000 lx 的辨别力指数差所反映出的脑疲劳与“效率-疲劳实验”结果的一致性较好。

其中,一个值得注意的现象是,从多个实验中同时观察到^[7,11,12],在 2 700 K、300 lx 下,经过一定的时间累积后,被试的学习效率、大脑兴奋性均有大幅度上升,该结果也与 Françoise Viénot 等人的实验结果一致^[5],提示低色温、低照度对大脑可能有唤醒作用。同时,6500 K、1 000 lx 下,被试的各项指标明显低于相同照度的其他两个色温组,证明该光环境下大脑不能保持适度的兴奋度。

此外,4 000 K 下各照度段的辨别力指数差、综合指数^[10] 优于其他 2 个色温组,证明中间色温光环境的优势突出。

2) 2 700 K 下 750 lx、6 500 K 下 300 lx、500 lx 的辨别力指数差所反映出的脑疲劳与“效率-疲劳实验”结果差异较大。

分析其原因,短时记忆实验仅以学习效率差异来反映脑疲劳,而“效率-疲劳实验”的综合指数则包含了视疲劳、脑疲劳和学习效率 3 个指标,因此,单项指标与多项指标存在差异。此外,“效率-疲劳实验”持续的时间(45 min)较本实验更长,视、脑疲劳的累积程度不同,导致实验结果出现差异。

除上述照度段以外,2 700 K 下 1 000 lx、6 500 K 下 750 lx 的辨别力指数差与综合指数绝对值有一定差异,但如果进一步分析辨别力指数差与综合指数中学习效率的关系,则发现其基本一致。

3) 在 3 种色温中,高色温组辨别力指数差、综合指数平均值最低。

从这 2 个指标来看,相对于中、低色温组,高色温组的再认辨别力下降最快,且视、脑疲劳显著,学习效率低。但如仅考虑短时记忆实验结果,对比图 1~3 发现,高色温组的辨别力绝对值却较高。提示在较短的时间内(20 min),高色温可对大脑形成较强的刺激,提高短时记忆能力,但无法维持其再认辨别力。这一结论也与日本千叶大学 Lu Shi 等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一致^[14]。

4 结 语

在实验研究的色温、照度、时间范围内,低色温、低照度光环境对大脑有唤醒作用,有利于学生进行较长时间的学习,但应注意采取适当的措施解除其视疲劳;中间色温可使大脑保持适度的兴奋,使大脑思维更为清晰敏捷。同时,其视疲劳、脑疲劳最轻,是最舒适、理想的光环境,但设计中应避免采用 1 000 lx 左右的高照度,对提高学习效率无益;相对其他 2 种色温,高色温下学生的视、脑疲劳最高。在短时间内,高色温可对大脑产生强烈的刺激,提高学生的短时记忆能力,但无法长时间保持其学习效率。因此,高色温光源不适合作为教室照明的主光源。由于条件限制,本实验的作业时间仅为 20 min,而非常规的 45 min(1 课时),但即使在相对短的时间长度内,色温对大脑短时记忆的影响已明显显现,且其变化趋势与前期“效率-疲劳”实验基本吻合,仅在少数照度段有所偏离。

综合本课题其他几个实验的结果来看,色温、照度可显著影响学生的生理节律及学习效率,其中,时间、照射强度的累积对实验结果的影响较大。因此,

以往依靠问卷调查等主观评价结果来选择教室照明光环境的通行做法缺乏实验数据支撑,具有较大缺陷。应通过严格的生理、心理测试实验来确定最适宜的光环境。

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] 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, 12(2): 59-61, 71.
- [3] MILLS P R, TOMKINS S C, SCHLANGEN L J. The effect of high correlated color temperature office lighting on employee wellbeing and work performance[J]. *Journal of Circadian Rhythms*, 2007, 5:2.
- [4] CHELLAPPA S L, STEINER R, BLATTNER P, et al. Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert? [J]. *The Public Library of Science*, 2011, 6(1): 16429.
- [5] VIENOT F, DURANDA M L, MAHLER E. Kruithof's rule revisited using LED illumination[J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, 56(13): 1433-1446.
- [6] BOMMEL W V, BELD G V D. Lighting for work: a review of visual and biological effects [J]. *Lighting Research and Technology*, 2004, 36(4): 255-269.
- [7] 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]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(4): 85-89.
YAN YONG-HONG, GUAN YANG, LIU XIANG-DE, et al. 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, 32(4): 85-89.
- [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 HAI-JING, YAN YONG-HONG. The experiment on photobiomodulation of classroom lighting [J]. *Light & Lighting*, 2008, 32(4): 1-3.
- [9] 严永红, 关杨, 王宁, 等. 白炽灯下 T5 荧光灯视功效、识别率对比实验研究 [J]. *照明工程学报*, 2010, 21(3): 70-75.
YAN YONG-HONG, GUAN YANG, WANG NING, et al. Visual performance in a classroom with chalkboard illuminated by incandescent lighting and ambient lighting using T5 fluorescents [J]. *Zhaoming Gongcheng Xue Bao*, 2010, 21(3): 70-75.
- [10] 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, 21(5): 59-62.
- YAN YONG-HONG, GUAN YANG, WANG NING, et al. Different color temperature T5 fluorescent lamps photochr matching optimal visual acuity contrast experiment [J]. Zhaoming Gongcheng Xue Bao, 2010, 21(5):59-62.
- [11] 关杨. 光生物效应下教室照明心理—生理综合评价研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [12] YAN Y H, TANG G L, GUAN Y, et al. Evaluation index study of students' physiological rhythm effects under flourescent lamp and LED [C]// Proceedings of the 2010 International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, November 26-28, Zibo, China. [S.l.]: IEEE Press, 2010, 11:134-139.
- [13] SHI LU, KATSUURA T, SHIMOMURA Y, et al. 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.
- [14] KOZAKI T, KIMAMURA S, HIGASHIHARA Y, et al. Effects of color temperature of light sources on slow-wave sleep [J]. Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science, 2005, 24(2):183-186.
- [15] NOGUCHI H, INOUE M, SAKAGUCHI T. Effect of bright light on arousal level in the daytime[J]. Journal of Physiological Anthropology, 2001, 20(5):306.
- [16] YASUKOUCHI A, EJIMA H. The effects of color temperature of light sources on the arousal level and postural change with different mental task [C] // Proceedings of Second International Conference on Human-Environment System, Tokyo, Japan: International Society of Human-Environment System, 1998: 247-250.
- [17] KULLER R, WETTERBERG L. Melatonin, cortisol, EEG, ECG and subjective comfort in healthy humans: impact of two fluorescent lamp types at two light intensities [J]. Lighting Research and Technology, 1993, 25(2):71-80.
- [18] 季成叶. 儿童少年卫生学[M]. 北京:人民卫生出版社, 2007.
- [19] 张学民, 舒华. 实验心理学[M]. 修订版. 北京:北京师范大学出版社, 2007.
- [20] 频率最高的前 8000 个词词表. 现代汉语频率词典[M]. 北京:北京语言学院出版社, 1986.

(编辑 郑洁)

(上接第 131 页)

- [7] 徐斌, 夏四清, 胡晨燕, 等. MBBR 工艺预处理黄浦江微污染原水[J]. 中国给水排水, 2004, 20(8): 5-9.
- XU BIN, XIA SHING, HU CHEN-YAN, et al. MBBR Technology for Pretreatment of Micro-polluted Raw Water in Huangpu River [J]. China Water& Wastewater, 2004, 20(8): 5-9.
- [8] 国家环保局编制. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2005.
- [9] 龙腾锐, 谢朝新, 方振东. 长期储存水中细菌的行为分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(3): 55-58.
- LONG TENG-RUI, XIE CHAO-XIN, FANG ZHEN-DONG. Behavior analysis of the bacteria in long-term storage water [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004, 26(3): 55-58.
- [10] OSTROWSKI M, FEGATELLA F, WASINGER V, et al. Cross-species identification of proteins from proteome profiles of the marine oligotrophic ultramicrobacterium, sphingopyxis alaskensis [J]. Proteomics, 2004, 4: 1779-1788.
- [11] 桑军强, 王占生. BAF 在微污染源水生物预处理中的应用[J]. 中国给水排水, 2003, 19(2): 21-23.
- SANG JUN-QIANG, WANG ZHAN-SHENG. Application of biological aerated filter (BAF) in biological pre-treatment of micro-polluted source water[J]. China Water& Wastewater, 2003, 19(2): 21-23.
- [12] 张崇邦, 黄立南, 栾天罡, 等. 寡营养细菌及其在环境科学中的应用[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 773-777.
- ZHANG CHONG-BANG, HUANG LI-NAN, LUAN TIAN-GANG, et al. Oligotrophic bacteria and their applications in environmental science [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(4): 773-777.
- [13] 刘科军, 吕锡武. 跌水曝气生物接触氧化预处理微污染源水[J]. 水处理技术, 2008, 34(8): 55-62.
- LIU KE-JUN, LV XI-WU. Experiment study on pretreatment of micro-polluted source water with water-dropping aeration biological contact oxidation [J]. Technology of Water Treatment, 2008, 34(8): 55-62.
- [14] 李伟英. 给水生物预处理工艺中生物相变迁规律及作用[J]. 环境与开发, 2000, 15(2): 6-8.
- LI WEI-YING. The changes' regular pattern & function of biological types in technology of biological pretreatment for water supply [J]. Environment and Exploitation, 2000, 15(2): 6-8.

(编辑 郑洁)