

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.09.004

# 静态光侵扰对室内活动的侵扰阈值研究

范晴<sup>1</sup>, 张明宇<sup>1</sup>, 宋捷翘<sup>1</sup>, 于娟<sup>1</sup>, 杨兴棕<sup>2</sup>

(1. 天津大学 天津市建筑物理环境与生态技术重点实验室, 天津 300072;

2. 浙江阳光照明电器集团股份有限公司, 杭州 312300)

**摘要:** 用于道路、标识等功能照明的静态光源所产生的光侵扰影响居民室内活动。从居民的主观感受出发, 通过主观评价实验, 结合阈值的操作定义, 计算正常室内照明情况下, 静态光侵扰的2种常见光色(黄光、白光)、4种面积比(侵扰满窗、1/4窗、1/16窗、1/64窗)条件下的亮度侵扰阈值。结果表明, 侵扰光亮度与侵扰程度成强相关; 面积比与侵扰程度呈负的强相关; 进而得到亮度阈值与侵扰面积比的幂函数关系式。

**关键词:** 城市照明; 静态光源; 光侵扰; 主观评价; 阈值

**中图分类号:** TU113.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2021)09-031-09

## Study on the trespass threshold of static light trespass on indoor activities of residents

FAN Qing<sup>1</sup>, ZHANG Mingyu<sup>1</sup>, SONG Jieqiao<sup>1</sup>, YU Juan<sup>1</sup>, YANG Xingzong<sup>2</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory of Architectural Physics and Environmental Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China; 2. Zhejiang Yankon Group Co., Ltd., Hangzhou 312300, P. R. China)

**Abstract:** Research shows that light trespass produced by static light sources for functional lighting such as roads and signs affects residents' indoor activities. Through subjective evaluation, the experiment based on the subjective feelings of residents was carried out combining, with the operation definition of threshold, and the luminance trespass thresholds of two kinds of light colors (yellow and white light), four area ratios (trespass full windows, 1/4 windows, 1/16 windows, 1/64 windows) of urban static white light trespass with normal indoor lighting conditions were calculated. The results show that the intensity of trespass is closely related to the degree of trespass, the area ratio is negatively correlated with the degree of trespass and a power function equation of the luminance threshold and area ratio is obtained.

**Keywords:** urban lighting; static light source; light trespass; subjective evaluation; threshold

**收稿日期:** 2020-12-04

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51208351); 天津市应用基础与前沿技术研究计划(15JCYBJC22000)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51208351), and Research Project for Application Foundation and Frontier Technology of Tianjin(15JCYBJC22000).

**作者简介:** 范晴(1994—), 女, 博士研究生, 主要从事建筑光环境研究, (E-mail)294634856@qq.com。

**通讯作者:** 张明宇, 博士, 副教授, (E-mail)zmy0526@163.com。

邻近道路的居住区受到夜间道路照明的光侵扰影响,居住区内绿地景观照明、停车场照明也是光侵扰来源。上述类别的静态光源不仅数量多、使用范围广,而且光源还具有亮度高、持续时间长的特点,这些因素加剧了居住区的光侵扰问题。

CIE150 号文件<sup>[1]</sup>针对光侵扰防治,规定了灯具最大发光强度和窗户垂直面上的照度值,此外,还针对夜景照明、广告标识等,规定了阈值增量<sup>[2]</sup>。Ho 等<sup>[3-4]</sup>指出广告牌亮度虽然满足 CIE 规定,但由于其覆盖面积大,高密度的分布和安装不当仍然造成严重的光侵扰,从城市规划角度提出了解决措施。Jung 等<sup>[5]</sup>对韩国 235 个地点调研得到 78% 的 LED 屏亮度超标并从窗户对居民产生光侵扰现象。CIE 标准也对防治光侵扰提出了相关建议<sup>[6]</sup>。2018 年,CIE 成立了针对夜间光侵扰防治的 TC4-58 技术会议。2020 年,中国环境监测总站提出针对城市 LED 广告屏光污染政策研究。

中国现行规范<sup>[7]</sup>采用 CIE 防治要求。现有研究<sup>[3-4]</sup>在提出光侵扰的防治措施时以规范要求为准。但是在居民受到光侵扰时,仅“垂直照度”这一项指标不能完全解释其真实感受,利用软件仿真对光侵扰进行评估发现实际测量值与模拟值仍存在差异<sup>[8]</sup>,目前的不舒适眩光评价方法和模拟软件也不能代替主观感受<sup>[9]</sup>。另外,对黑暗环境下的睡眠活动及正常室内照明下视觉活动的不良影响已有较多论述<sup>[10-13]</sup>。静态光侵扰的问题已被广泛关注,但仍缺乏足以量化其影响程度的研究。亮度、色温、侵扰面积比(侵扰光源面积/窗口面积)是影响静态侵扰的主要因素<sup>[6,11-13]</sup>,从居民对光侵扰的主观感受角度出发,采用亮度、色温、侵扰面积比研究静态光侵扰阈值问题,更接近于居民的真实反映。

开展静态光侵扰对居民室内活动干扰程度的判定与评价研究,应从居民的主观感受出发,研究静态光的亮度侵扰阈值。亮度表征是静态光对人产生侵扰的实际情况,亮度阈值是在实际操作与控制层面上的静态光侵扰防治的量化依据。文中通过实验室内再现居室环境,研究正常室内照明情况下,不同光色和面积比条件下的静态侵扰光对居民看电视的干扰影响,计算得出静态光侵扰的 2 种常见色温对应光色和不同侵扰光源面积比的侵扰阈值,讨论静态光侵扰亮度阈值与侵扰面积比间的关系。为居住建筑室外照明干扰光的限制规范标准制定以及道路和景观照明设计标准修订提供数据基础,也为静态光侵扰的防治提供量化依据。

## 1 典型静态光侵扰主观评价实验

### 1.1 实验设置

实验采用李克特量表(Likert Scales)问卷,使用了 5 个等级;用数字 1~5 表示,数字越大代表干扰影响越严重,1 表示“完全无干扰”,5 表示“严重干扰”。实验参数采用组内随机排列、组间拉丁方设计的方式进行排序,消除个体差异因素和排序因素等导致的结果误差或无关变量效果<sup>[14]</sup>。被试为天津大学在校学生,共计 36 人,年龄为 18~30 岁,均通过色盲测试(isihara color blindness test),情绪良好,无生理疾病,近期无高强度工作等。

实验室模拟起居室参数如表 1 所示,剖面布置如图 1 所示。

表 1 实验室设置具体参数  
Table 1 Laboratory setting specific parameters

位置尺寸	长/mm	宽/mm	高/mm	备注
空间	3 170	4 050	3 000	无
窗口	1 500	1 500	900	固定在可移动的隔板上
LED 屏幕	2 000	2 000	830	被试可见视野范围内 LED 屏幕布满窗口

为避免“色彩对比”影响实验准确度,实验室内表面材质均使用色彩饱和度和低的灰色系,其表面反射系数均符合标准<sup>[15]</sup>。室内照明光源选用色温为 5 000 K 的 T5 日光灯管,实测工作面(0.75 m)照度为 330 lx,满足起居室照度标准要求<sup>[15]</sup>;实验室内的声环境良好;内装有空调,允许被试自主调节空调,保证室内温度舒适。选取看电视活动,播放内容为黑白手绘动画系列短片,保证被试对视觉作业的专注程度,各个短片对人

的感知觉影响程度保持一致。同时,在不对任务产生干扰的前提下设置了答题提示,确保被试顺利完成主观评价实验。

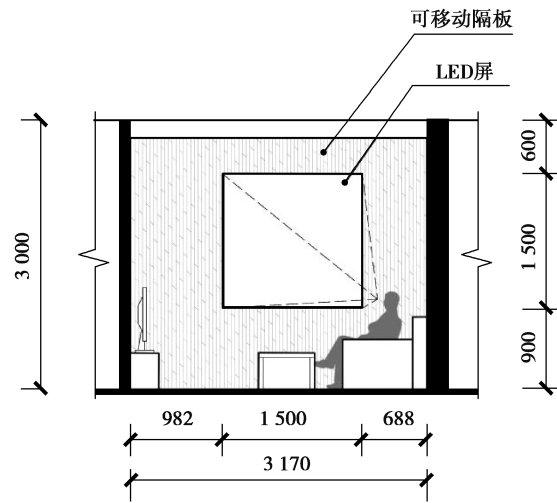


图 1 实验室剖面图

Fig. 1 Laboratory profile

### 1.2 实验变量

通过预评价实验筛掉了评分为 1“无干扰”和 5“严重干扰”的参数值,调整实验变量步长,最终的实验参数共计 44 组:2 种常见光色(黄光、白光各 22 组不同的静态光侵扰参数,预评价实验数据表明色温与干扰程度无显著影响,在前期现场调研数据中,侵扰光源光色为暖黄色和中性白占比较大,分别为 33%、40%<sup>[13]</sup>,实验选取色温为 2 000 K 的黄光,色温 5 000 K 的白光),4 种面积比(满窗、1/4 窗、1/16 窗、1/64 窗)的实验变量如表 2 所示。

表 2 实验变量参数

Table 2 Experimental variable parameters

等级	数值类别	各级面积比对应亮度/(cd · m <sup>-2</sup> )			
		1	1/4	1/16	1/64
1	目标值	25	25	25	—
	黄光标定值	29.2	29.2	29.2	—
	白光标定值	26.5	26.5	26.5	—
2	目标值	50	50	50	—
	黄光标定值	56.4	56.4	56.4	—
	白光标定值	51.9	51.9	51.9	—
3	目标值	100	100	100	—
	黄光标定值	104.8	104.8	104.8	—
	白光标定值	103	103	103	—
4	目标值	200	200	200	—
	黄光标定值	196.8	196.8	196.8	—
	白光标定值	203	203	203	—

续表 2

等级	数值类别	各级面积比对应亮度/( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )			
		1	1/4	1/16	1/64
5	目标值	400	400	400	—
	黄光标定值	416.9	416.9	416.9	—
	白光标定值	423	423	423	—
6	目标值	—	800	800	—
	黄光标定值	—	806.7	806.7	—
	白光标定值	—	790	790	—
7	目标值	—	1600	1600	1600
	黄光标定值	—	1617	1617	1617
	白光标定值	—	1669	1669	1669
8	目标值	—	—	3200	3200
	黄光标定值	—	—	3225	3225
	白光标定值	—	—	3208	3208

注:1.黄光为色温为 2 000 K 的暖黄色,白光为色温为 5000K 的中性白;2.实测亮度值与标定亮度值中间的误差范围为:0.3%~12.8%。

### 1.3 实验步骤

被试进入实验室,填写甄别问卷,对被试进行色盲测试。被试坐在沙发上,根据自身需求调节至实验环境舒适。待被试适应且实验环境稳定时,由主试进行实验记录(实验编号、日期时间、室内物理环境指标等),并向被试讲解实验任务和流程,确保被试完全理解。在正式实验开始前,进行 2 组以上预实验帮助被试熟悉流程,在确认熟悉流程后开始正式实验,被试观看所播放的动画短片,同时 LED 屏幕显示干扰静态光。短片暂停时提示被试填写问卷。待正式实验结束,主试回访被试并填写问卷。实验流程如图 2 所示。

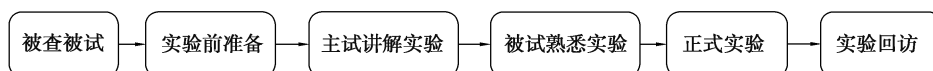


图 2 实验步骤流程图

Fig. 2 Experimental procedure flow chart

## 2 实验结果与阈值计算

### 2.1 实验数据整理分析

主观评价实验共获得 1 584 组实验数据(36 被试 $\times$ 44 组实验)。

#### 2.1.1 被试评分

统计了被试评分的算术平均分、 $\geq 4$  得分所占百分比(%),如表 3 所示。

表3 被试评分的算术平均分、 $\geq 4$ 得分所占百分比Table 3 Arithmetic average score of subject score,  $\geq 4$  points percentage

等级	亮度/ ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	色温	各级面积比对应平均分/ $\geq 4$ 得分所占百分比/%			
			1	1/4	1/16	1/64
1	25	黄光	1.53/8.33	1.28/5.56	1.31/0.00	—
		白光	2.17/5.56	1.89/0.00	1.39/2.78	—
2	50	黄光	1.56/25.00	1.61/8.33	1.44/2.78	—
		白光	2.81/0.00	2.36/2.78	1.69/0.00	—
3	100	黄光	2.28/36.11	1.86/13.89	1.50/2.78	—
		白光	3.11/8.33	2.42/2.78	1.86/0.00	—
4	200	黄光	2.83/47.22	2.14/36.11	1.58/2.78	—
		白光	3.33/22.22	3.14/0.00	1.94/0.00	—
5	400	黄光	4.03/86.11	2.78/41.67	2.06/2.78	—
		白光	4.42/77.78	3.11/25.00	1.89/2.78	—
6	800	黄光	—	3.67/63.89	2.33/16.67	—
		白光	—	3.92/58.33	2.53/5.56	—
7	1 600	黄光	—	4.22/94.44	2.83/13.89	1.78/0.00
		白光	—	4.50/75.00	2.58/27.78	1.64/2.78
8	3 200	黄光	—	—	3.31/63.89	2.08/13.89
		白光	—	—	3.83/41.67	2.19/5.56
平均分 $\leq 2$ 共计			2	4	9	2
平均分 $\geq 4$ 共计			2	2	0	0
$\leq 2$ 得分所占百分比 $> 50\%$ 共计			0	0	0	0
$\geq 4$ 得分所占百分比 $> 50\%$ 共计			2	4	2	0

评分 $\geq 4$  对应评价为“比较干扰”和“严重干扰”,评分 $\leq 2$  对应评价为“完全无干扰”,“有点干扰”。平均分 $\geq 4$  的共 4 组,占总数的 9.09%,平均分 $\leq 2$  的共 17 组,占总数的 38.64%。根据阈限的操作定义,阈值为 50% 次数引起反应的那个刺激的大小<sup>[14]</sup>。评分 $\leq 2$  所占百分比 $> 50\%$  共计 0 组,评分 $\geq 4$  所占百分比 $> 50\%$  共计 8 组,占总数的 18.2%。

### 2.1.2 问卷信度分析

黄光和白光侵扰实验的信度系数分别为 0.938 和 0.941,信度分析一致性较高。

### 2.1.3 相关性分析

由 SPSS 分析结果可知,在不同面积比时,黄光和白光侵扰实验的主观评价得分(平均分)与亮度和面积比呈显著相关,Pearson 相关系数均大于 0.9。

## 2.2 阈值计算

根据上述阈值定义<sup>[14]</sup>。文中拟定评分 $\geq 4$ (对应评价为“比较干扰”和“严重干扰”)时计算的 50% 阈值为静态光侵扰的干扰评价阈值(以下简称“阈值”),为针对静态光侵扰防治的控制标准。而主观评价分数 $\leq 2$  时求得的 50% 阈值为刚刚能引起人们感受的阈值,即静态光侵扰控制的较高标准。以黄光侵扰条件下,面积比为 1 时,评分 $\geq 4$  的百分比结果为例,计算阈值如表 4 所示。

表 4 黄光侵扰实验面积比为 1 时评分  $\geq 4$  的百分比结果Table 4 Yellow light infested area ratio when the experimental area ratio is 1 when the score is  $\geq 4$ 

数据统计	亮度/( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )				
	400	200	100	50	25
评分 $\geq 4$ 的百分比/%	86.11	47.22	36.11	25.00	8.33

绝对阈值采用直线内插法<sup>[14]</sup>(linear interpolation)计算,将 50% 的刺激值对应的绝对阈值设为  $X$ :

$$\frac{400 - 200}{86.11 - 47.22} = \frac{X - 200}{50 - 47.22},$$

$$X = 214.29.$$

即黄光侵扰实验面积比为 1 时的亮度阈值为  $214.29 \text{ cd/m}^2$ 。同理得出典型静态光侵扰亮度阈值,如表 5 所示。

表 5 阈值计算结果

Table 5 Threshold calculation results

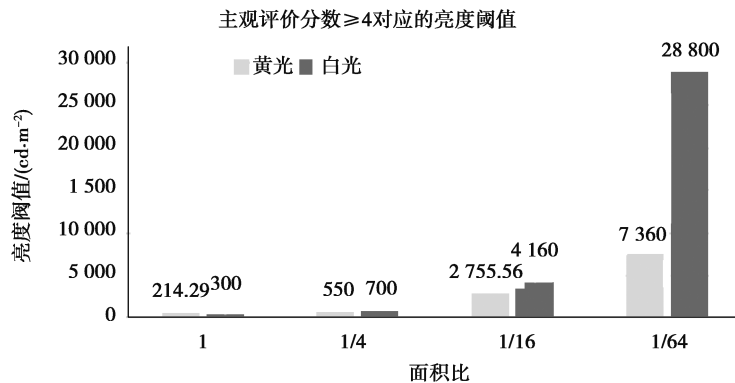
类别	2 000 K 的黄光侵扰				5 000 K 的白光侵扰			
	1	1/4	1/16	1/64	1	1/4	1/16	1/64
评分 $\leq 2$ 的亮度阈值	44.44	56.25	1 694.12	4 200	150	325	1 028.57	6 080
评分 $\geq 4$ 的亮度阈值	214.29	550	2 755.56	7 360	300	700	4 160	28 800

参考现行值和目标值的概念,将上述的控制标准定义为目前需要达到的现行值,将较高标准定义为未来发展需要达到的目标值。对比两者亮度阈值后发现,现行值与目标值存在明显差异。通过对静态侵扰光的实际测量与调研分析可知,现行值(控制标准)更符合我国静态光侵扰现状。文中的后续分析,均是采用评分  $\geq 4$  的亮度阈值。

### 3 静态光侵扰干扰评价阈值分析

#### 3.1 黄、白光侵扰干扰程度对比分析

主观评价分数  $\geq 4$  的亮度阈值(如表 5 和图 3 所示),证明被试抗白光侵扰程度大于黄光侵扰程度。

图 3 主观评价分数  $\geq 4$  对应的亮度阈值Fig. 3 Subjective evaluation score threshold  $\geq 4$  luminance threshold

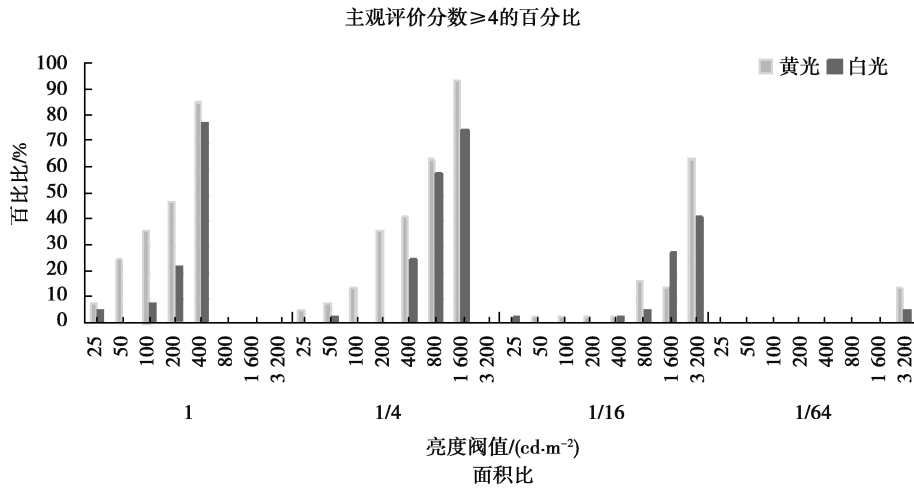


图 4 主观评价分数≥4的百分比

Fig. 4 Subjective evaluation score ≥ 4 percentage

对比 2 种光色的被试评分≥4 的百分比,如图 3 所示,发现面积比为 1 和 1/4 时,相同亮度的侵扰条件下,被试抗白光的侵扰程度高于抗黄光的侵扰程度;当面积比为 1/16 和 1/64 时,有 3 组实验结果出现被试抗白光侵扰程度低于抗黄光侵扰程度,发现在面积比小的时候,光色对抗光侵扰程度无显著影响。分析原因如下:1)实验时间为 8 月,被试在气温炎热的时候会偏好冷色;另外,实验室内环境照明与实验变量白光 5 000 K 色温近似,可能导致被试包容度对实验白光偏高。2)当实验侵扰面积比为 1/16 窗口和 1/64 窗口时,超出被试主视野范围,辨色不敏感,人们抗光侵扰程度与黄光、白光没有明显的区别。

### 3.2 静态光侵扰面积比对干扰程度的影响

由图 3 和表 5 可知,黄光、白光亮度阈值随面积比的减小而增大,面积比同黄光、白光亮度阈值成反比,发现面积比与静态光侵扰程度有显著影响。当面积比在 1~1/4 窗口范围时,黄光、白光亮度阈值的变化趋势缓慢,亮度阈值随面积比的减小增幅减少,在此侵扰面积比范围内应严格控制静态侵扰光的亮度值,不得超出 700 cd/m<sup>2</sup>,以限制光侵扰的干扰影响;面积比在 1/4~1/16 窗口范围时,亮度阈值随面积比减小亮度阈值增加变快,亮度值应该控制为 500~4 160 cd/m<sup>2</sup>,以限制光侵扰的干扰影响;面积比在 1/16~1/64 窗口范围时,亮度阈值随面积比减小陡然增加,光侵扰产生干扰程度很小。

### 3.3 SPSS 曲线回归分析

基于面积比显著影响侵扰亮度阈值的结论,进一步开展了两者的关系研究。

#### 3.3.1 黄光侵扰实验

如表 6 所示,曲线方程为幂函数曲线, $R^2$  值为 0.986,函数模型有统计学意义。

函数方程式为

$$y = 198.84x^{-0.88}, \tag{1}$$

式中: $y$  为亮度阈值; $x$  为面积比。

表 6 黄光的参数估计值

Table 6 Estimated parameters of yellow light

方程	模型			参数值	
	$R^2$	$F$	Sig.	常数	$b_1$
幂	0.986	176.480	0.007	198.84	-0.883

注:因变量:亮度阈值;自变量:面积比

### 3.3.2 白光侵扰实验

如表7所示,曲线方程为幂函数曲线, $R^2$ 值为0.975,函数模型有统计学意义。

函数方程式为

$$y = 219.81x^{-1.12}, \quad (2)$$

式中: $y$ 为亮度阈值; $x$ 为面积比。

表7 白光的参数估计值

Table 7 Estimated parameters of white light

方程	模型			参数值	
	$R^2$	$F$	Sig.	常数	$b1$
幂	0.975	73.397	0.012	219.811	-1.118

注:因变量:亮度阈值;自变量:面积比

## 4 结 论

通过对静态光侵扰的不同亮度、光色和面积比主观评价实验,进行静态光侵扰的定量化研究,计算了不同光色、不同面积比所得的亮度阈值。从评分 $\geq 4$ 分的百分比来看,在面积比较大时,被试抗白光的侵扰程度高于抗黄光的侵扰程度;在面积比越小时,被试抗光侵扰程度与光色没有明显的区别;面积比与侵扰程度呈强相关,面积比越大,亮度阈值越小,受侵扰程度越大。因此,在我国静态光侵扰防治中应着重控制侵扰面积;对计算出的亮度侵扰阈值进行曲线回归,得到黄光和白光的亮度侵扰阈值与面积比之间的幂函数关系。通过对主观评价结果的计算,得到4种面积比(1、1/4、1/16、1/64)条件下的黄光、白光亮度阈值,实验评价主观感受实现了对静态光侵扰现象的定量化研究,得到的数值及函数关系可为定量化防治静态光侵扰提供指导。

### 参考文献:

- [1] Cie. CIE 150: Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations, 2nd edition: CIE 150: 2017[R]. CIE Central Bureau 2003.
- [2] CIE NO.180. Technical Report, Road Transport Lighting for Developing Country[R]. CIE Central Bureau, 2007.
- [3] Ho C Y, Lin H T, Huang K Y. A study on light trespass of dynamic LED advertising sign flickering on adjacent residents at night[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 368/369/370: 593-598.
- [4] Ho C Y, Lin H T. Analysis of and control policies for light pollution from advertising signs in Taiwan[J]. Lighting Research & Technology, 2015, 47(8): 931-944.
- [5] Jung D K, Kang Y K, Lee J W, et al. The present status of the light trespass(illuminance) by advertising signs[J]. Journal of the Korean Society of Living Environmental System, 2019, 26(3): 313-320.
- [6] CIE NO. 136, 2000, Guide to lighting of urban areas[R]. CIE Central Bueau, 2000.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市夜景照明设计规范:JGJ/T 163—2008 [S].北京:中国建筑工业出版社,2009. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Code for lighting design of urban nightscape. Beijing: JGJ/T 163-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [8] Jung D K, Park H K, Joonsig J. The comparison between measurement and prediction values for the vertical illuminances by relax program in the survey region[J]. Journal of The Korean Society of Living Environmental System 2018, 19(1): 98-104.
- [9] Sim Y J, Kim I T, Choi A S, et al. A preliminary study of an evaluation method for discomfort glare due to light trespass[J]. Lighting Research and Technology, 2017, 49(5): 632-650.
- [10] 崔哲, 郝洛西, 林怡. 昼夜节律生理机制最新国际研究动态[J]. 照明工程学报, 2014, 25(3): 4-12. Cui Z, Hao L X, Lin Y. Current international research trends on circadian rhythm [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2014, 25(3): 4-12. (in Chinese)



- [11] 于娟,王立雄,张明宇,等.城市居住区夜间光侵扰问题调查研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015,37(6): 114-119.  
Yu J, Wang L X, Zhang M Y, et al. Survey of light trespass for urban residential area[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015,37(6): 114-119. (in Chinese)
- [12] 于娟,王立雄,张明宇,等.城市照明色光对居民室内活动的干扰阈值[J].土木建筑与环境工程, 2019,41(1): 136-143.  
Yu J, Wang L X, Zhang M Y, et al. The threshold of the disturbance to residents indoor activities by colored light from urban lighting[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2019,41(1): 136-143. (in Chinese)
- [13] 宋捷翹.静态光源对居住建筑室内活动的侵扰阈值研究[D]. 天津:天津大学,2016.  
Song J Q. Studies on the threshold of static lighting trespass effect on resident activities in residential buildings [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [14] 杨治良.实验心理学[M]. 杭州:浙江教育出版社,1998.  
Yang Z L. Experimental psychology [M]. Hangzhou: Zhejiang Education Press, 1998.(in Chinese).
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑照明设计标准:GB 50034—2013 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Standard for lighting design of buildings: GB 50034-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)

~~~~~  
(上接第 16 页)

- [26] Burd, H J, Frydman S. Bearing capacity of plane-strain footings on layered soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(5): 241-253.
- [27] Griffiths, D, V. Computation of bearing capacity on layered soils[J]. In Proceedings of the 4th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Edmonton, Alberta, Canada, May. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1982, 1: 163-170.
- [28] Lee K M, Manjunath V R, Dewaikar D M. Numerical and model studies of strip footing supported by a reinforced granular fill-soft soil system[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(5): 793-806.
- [29] Michalowski R L, Shi L. Bearing capacity of footings over two-layer foundation soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(5): 421-428.
- [30] Tang, C, Phoon K K. Statistics of model factors and consideration in reliability-based design of axially loaded helical piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(8): 04018050.
- [31] Corder, G W Foreman, D I. Nonparametric statistics: a step-by-step approach[M]. 2nd Ed., John Wiley& Sons, Hoboken, NJ, 2014.
- [32] Yamaguchi H. Practical formula of bearing value for two layered ground[C]. Proceedings 2nd Asian Reginal Conf. Soil Mech. Found. Eng., Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 1963; 1, 176-180.
- [33] Zhou H Z, Zheng G, Zhao J P. Design charts and simplified approach for the bearing capacity of strip footings on sand overlying clay[C]//Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. Springer, Cham, 2018.

(编辑 陈移峰)