

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.017



城市照明色光对居民室内活动的干扰阈值

于娟,王立雄,张明宇,宋捷翹,杨笛

(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)

摘要:城市照明的发展与 LED 的广泛使用致使居住区室外光环境日益明亮,且常见彩色光,居民的室内休闲娱乐活动所受到的影响也日见显著。从居民的主观感受出发,通过主观评价实验,得出正常室内照明情况下城市照明色光对居民看电视的干扰阈值,包括表征居民视觉感知的“明度阈值”和表征光源实际情况的“亮度阈值”。讨论了城市照明色光对居民室内活动干扰的季节差异、性别差异和色调差异,并对阈值结论的应用性进行了讨论。

关键词:城市照明;色光侵扰;居住区;阈值;主观评价

中图分类号:TU113.6 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)01-0136-08

Threshold of the disturbance to residents indoor activities by colored light from urban lighting

Yu Juan, Wang Lixiong, Zhang Mingyu, Song Jieqiao, Yang Di

(Tianjin Key Laboratory of Architectural Physics and Environmental Technology, Tianjin University,
Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: The development of urban lighting and the widespread use of LED have led to increasingly bright outdoor light conditions, common colored light in residential areas and increasingly impacts on residents' indoor recreational activities before curfew. From the perspective of residents' subjective feelings, the subjective evaluation experiment results in the interference threshold of urban colored light on residents' watching TV activities under the condition of normal indoor lighting, which includes the "lightness threshold" characterizing residents' visual perception and the "brightness threshold" characterizing of light source reality. This paper analysed that the seasonal difference, gender difference and hue difference of urban lighting color interfered with residents' indoor activities. And the applicability of threshold conclusion was also discussed.

Keywords: urban lighting; colored light trespass; residential area; threshold; subjective evaluation

随着城市照明建设的发展,城市居住区光环境日益明亮。同时,LED 的广泛应用导致城市夜景常

见彩色光,形成了色光侵扰这种新的光侵扰形式,即在亮度侵扰的基础上叠加了彩色光因素的光侵扰形

收稿日期:2018-05-14

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

作者简介:于娟(1987-),女,博士生,主要从事建筑光环境研究,E-mail: 601463949@qq.com。

张明宇(通信作者),博士,副教授,E-mail: zmy0526@163.com。

Received:2018-05-14

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51208351); Research Project for Application Foundation and Frontier Technology of Tianjin(15JCYBJC22000)

Author brief: Yu Juan (1987-), PhD candidate, main research interest: building lighting environment, E-mail: 601463949@qq.com.

Zhang Mingyu (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: zmy0526@163.com.

式。色光侵扰导致了城市居住建筑光侵扰问题的进一步加剧。

国际照明委员会(CIE)对光侵扰的防治限制参数为“光强”和“垂直照度”^[1-2],中国现行规范^[3]“等同采用”CIE防治要求。因此,目前规范只是针对亮度侵扰进行防治,缺乏对色光侵扰的对应防治要求。已有研究^[4-5]也多是依据规范要求来探讨光侵扰防治措施。事实上,“垂直照度”并不能代表居民对光侵扰的实际感受,且目前的不舒适眩光评价方法和模拟软件也不能有效评价居民对光侵扰的实际感受^[6]。同时,对“色光”的研究依旧处于情感偏好层面^[7-8],以优化照明设计、美化城市夜景为研究目的,缺乏从居民感受出发的色光侵扰判定与评价研究成果。另外,光侵扰对暗黑环境下睡眠活动的干扰已有较深入的研究^[9],但前期调查显示^[10-11],光侵扰对正常室内照明情况下居民的室内视觉任务亦产生干扰。因此,色光侵扰的防治问题亟待解决,开展色光侵扰对居民室内活动干扰程度的判定与评价的研究应运而生。

笔者通过主观评价实验,得出正常室内照明情况下城市照明色光对居民看电视的干扰阈值,包括明度阈值和亮度阈值,明度表征的是居民对色光侵扰的视觉感知程度,亮度表征的是色光侵扰源的实际情况。因此,明度阈值是从居民主观感受角度出发的色光侵扰防治量化依据,亮度阈值是在实际操作与控制层面上的色光侵扰防治量化依据。笔者还研究了城市照明色光对居民室内活动干扰的季节差异、性别差异和色调差异,并对阈值结论的应用性进行了讨论。

1 典型色光侵扰干扰评价实验

1.1 实验设置

实验采用“李克特量表法”设计实验问卷,使用5个等级表达干扰程度:1表示“完全无干扰”,2表示“有点干扰”,3表示“一般干扰”,4表示“比较干扰”,5表示“严重干扰”。

探讨色光侵扰的季节差异性,主要是考虑热环境季节差异性对干扰程度的影响,论证被试在不同季节对色光干扰程度的感受是否存在差异性。为此,实验选择在差异性较为明显的冬、夏两季。夏季实验被试36人,冬季实验被试70人(为探讨性别差异性,男女比例1:1)。被试年龄范围为18~29岁,矫正视力均在1.0以上,均通过色盲/色弱检查测试。

实验变量范围来源于实际调研,调研所得色光侵扰的主波长范围为350~770 nm、亮度范围为0~4 250 cd/m²、表征侵扰源面积视觉感知大小的 S_w/S_l (人眼中的窗口与侵扰源面积比)范围为1~328。实验评价项最初设定为6种色相×5级明度(亮度)×5级 S_w/S_l (图1),共计150项。

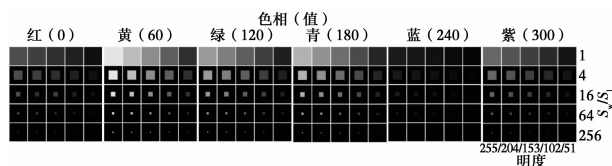


图1 典型色光侵扰干扰评价实验评价项

Fig. 1 Evaluation items of the subjective evaluation experiment of typical colored light trespass

1)6种色相 350~770 nm基本涵盖了可见光的波长范围,选取了0/360(红)、60(黄)、120(绿)、180(青)、240(蓝)、300(紫)6种饱和度最高的典型色光设为实验评价项。

2)5级明度(亮度) 各色光亮度范围如图2所示,量级差异较大,依据光谱光视效率理论,相同亮度不同色相的色光给人不同明亮感觉^[12]。因此,实验使用了明度参数,以保证6种色光之间的可比较性。选取了255、204、153、102、51共5级明度值,对应亮度值(复现设备LED屏幕实测值)涵盖调研亮度范围,对应亮度等级符合主观亮度的韦伯定律规律。

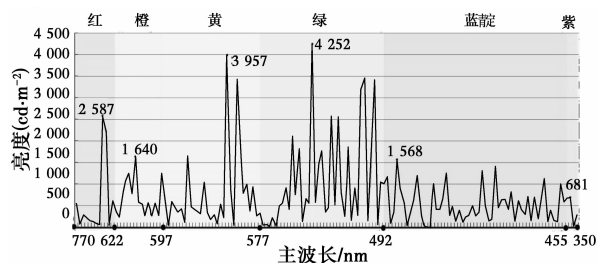


图2 色光主波长及对应亮度

Fig. 2 Dominant wavelength and luminance of the colored light

3)5级 S_w/S_l $S_w/S_l=328$ 为存在动态光的偶然案例,实验评价项 S_w/S_l 的设置范围缩小至1~256,划分为1、4、16、64、256共5个等级。

经预实验结果论证,删除了评价得分过高(>4,比较干扰)和过低(<2,有点干扰)的实验评价项,并调整了明度变量步长(间距由51调整为25.5,为便于复现,变量值取整数),最终实验优化为66项评价项(6色相×11项评价项),见表1。

表 1 大批次实验变量设置情况

Table 1 The setting of variables of the main experiment

S _w / S _i	明度	各色相色光实测亮度/(cd·m ⁻²)					
		红	黄	绿	青	蓝	紫
128		221.6	646.5	433.1	494.8	57.4	278.6
1	102	117.5	336.0	228.1	262.0	31.2	147.2
	77	53.6	149.5	103.1	119.2	14.7	66.8
	179	565.3	1 699.4	1 116.9	1 266.0	141.0	714.7
	153	364.7	1 081.1	716.9	815.6	92.6	459.9
4	128	221.6	646.5	433.1	494.8	57.4	278.6
	102	117.5	336.0	228.1	262.0	31.2	147.2
	77	53.6	149.5	103.1	119.2	14.7	66.8
	230	1 138.8	3 499.9	2 267.6	2 555.0	276.1	1 445.2
16	204	814.5	2 477.0	1 615.9	1 825.8	200.2	1 031.8
	179	565.3	1 699.4	1 116.9	1 266.0	141.0	714.7

选取 LED 显示屏复现光侵扰,与以往研究使用的投影仪设备相比,其发光亮度高,亦可实现多种颜色、不同亮度和面积图像的播放和调控,更符合实验需求。实测 LED 显示屏复现亮度如表 1 所示。

实验室模拟起居室布置见图 3。空间尺寸:开间 3 170 mm、进深 4 050 mm、高 3 000 mm;窗口尺寸:1 500 mm×1 500 mm,窗台高 900 mm,窗口固定在可移动的隔板上;LED 屏幕尺寸:2 000 mm×2 000 mm,调节 LED 屏幕高度至 830 mm,窗口左侧距离墙面 982 mm,以保证位于沙发中心位置的视点(坐姿)所见 LED 屏幕布满整个窗口。

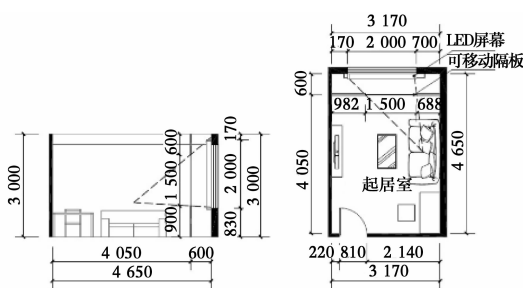


图 3 实验室剖面图、平面图与室内布置
Fig. 3 The sectional view/floor plan and interior layout of the laboratory

实验室内各可见表面,全部采用饱和度较低的灰色系材质,以消除“颜色对比”对色光侵扰实验的影响。表面反射系数均在标准^[13]建议值范围内。室内照明光源为 T5 日光灯管,色温为 5 000 K。实测 0.75 m 水平面照度为 324 lx,满足起居室书写、阅读 300 lx 的标准要求^[13];实验室位于天津大学北洋科学楼 715 室,实验室内的声环境良好;由于体感舒适度因人而异,实验室内装有空调,允许被试自主调节空调。

1.2 实验步骤

1) 筛查被试 被试进入实验室,首先填写甄别问卷(包括年龄、性别、职业、视力情况、身体与情绪状态),然后由主试对其进行色盲测试。主试依据甄别问卷和色盲测试结果,判定被试是否适合参加实验。

2) 实验前准备 被试就位,适应实验环境,自主调控空调至舒适状态。待实验环境稳定,主试填写实验记录表格(包括实验日期和时间、拉丁方实验编号、室内温湿度等)。

3) 讲解实验 主试对实验要求、实验步骤等内容进行讲解,确认被试对讲解内容理解无疑问。

4) 熟悉实验 被试通过两组实验熟悉流程,主试确认被试熟知实验流程后退出实验室,开始正式实验。

5) 正式实验 被试坐在居室正中的沙发之上直视电视,观看电视节目,LED 屏幕播放干扰色光。电视节目暂停并提示答题时,填写调查问卷。

6) 实验回访 正式实验结束之后,主试回访被试(填写回访问卷并访谈)。

选取看电视活动,是因为电视节目具备一定的吸引力,能保证被试对视觉作业的专注程度。为保证实验结果不受电视节目精彩程度的影响,一方面,电视播放内容为黑白色铅笔手绘动画短片系列,每个短片故事内容不同但精彩程度相差无几;另一方面,实验采用了拉丁方设计,避免实验顺序误差。另外,实验设置了答题提示,在不影响被试对视觉作业的注意力情况下,保证主观评价实验的顺利进行。

2 实验结果

2.1 问卷可信度

夏季实验和冬季实验的信度系数分别为 0.979 和 0.986,均大于 0.8,一致性较好。

2.2 平均分统计

表 2、图 4 为实验所得评分的算术平均数统计,数据表明:冬季实验评分平均分低于夏季实验。

表 2 夏季实验与冬季实验所得评分的算术平均数统计
Table 2 Arithmetic mean statistics of the score of summer and winter experiment

S _w /S _l	明度	各色相夏季实验评分平均分						各色相冬季实验评分平均分					
		红	黄	绿	青	蓝	紫	红	黄	绿	青	蓝	紫
1	128	4.25	4.56	4.53	4.22	3.89	4.58	3.80	3.43	3.62	3.62	2.99	4.05
	102	4.00	4.06	3.67	3.58	3.28	4.08	3.44	3.22	3.15	3.12	2.36	3.28
	77	3.14	2.92	2.61	2.53	2.53	3.06	2.36	1.87	2.36	2.13	2.00	2.56
4	179	4.14	4.53	4.22	4.08	3.39	4.44	3.39	3.44	3.06	3.10	2.49	3.1
	153	3.58	4.25	3.89	3.47	3.39	3.97	2.95	2.53	2.62	2.39	2.17	2.86
	128	3.58	3.53	2.81	2.83	2.78	3.31	2.36	2.35	2.05	2.19	2.03	2.65
	102	2.72	2.56	2.56	2.14	2.17	2.92	2.02	2.03	1.99	1.79	1.57	2
16	77	2.17	2.25	2.06	2.08	2.00	2.11	1.65	1.37	1.56	1.59	1.34	1.59
	230	3.19	3.89	3.33	3.22	3.03	3.61	2.44	2.29	2.62	2.27	1.92	2.56
	204	2.94	3.03	3.11	2.86	2.64	3.42	2.09	1.97	2.17	2.04	1.83	2.37
	179	2.75	2.61	2.61	2.61	2.39	2.94	1.94	1.74	1.92	2.00	1.58	2.35

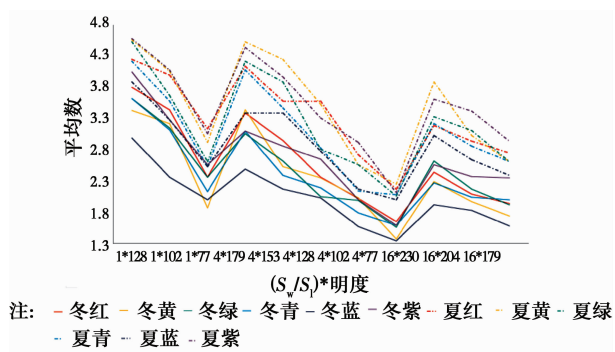


图 4 夏、冬实验相同评价项评分统计
(实线为冬季、虚线为夏季)

Fig. 4 Statistics of the same evaluation items of summer and winter experiment (the solid line is for winter and the dotted line is for summer)

2.3 相关性分析

夏季实验与冬季实验的偏相关分析结果均显示:平均分与明度、亮度为强相关,与 S_w/S_l 成负的相关,与色相无相关。

2.4 回归分析

依据相关性结论,分别对各色相的平均分、明度和 S_w/S_l 3 项相关变量进行回归分析,除冬季实验紫色的回归程度稍弱,其它的回归程度均为良好,方程显著,各参数的影响显著。

夏季实验回归方程为

$$\text{红色: } Y = 0.015B - 0.133S + 2.133 (R^2 = 0.833)$$

$$\text{黄色: } Y = 0.021B - 0.166S + 1.565 (R^2 = 0.889)$$

$$\text{绿色: } Y = 0.018B - 0.135S + 1.613 (R^2 =$$

0.812)

$$\text{青色: } Y = 0.017B - 0.113S + 1.362 (R^2 = 0.875)$$

$$\text{蓝色: } Y = 0.015B - 0.112S + 1.472 (R^2 = 0.838)$$

$$\text{紫色: } Y = 0.021B - 0.147S + 1.455 (R^2 = 0.865)$$

冬季实验回归方程为

$$\text{红色: } Y = 0.019B - 0.190S + 1.046 (R^2 = 0.820)$$

$$\text{黄色: } Y = 0.019B - 0.187S + 0.864 (R^2 = 0.836)$$

$$\text{绿色: } Y = 0.016B - 0.160S + 1.183 (R^2 = 0.706)$$

$$\text{青色: } Y = 0.016B - 0.157S + 1.117 (R^2 = 0.726)$$

$$\text{蓝色: } Y = 0.014B - 0.143S + 0.923 (R^2 = 0.743)$$

$$\text{紫色: } Y = 0.016B - 0.157S + 1.388 (R^2 = 0.686)$$

式中:Y 为平均分;B 为明度;S 为 S_w/S_l。

3 典型色光侵扰干扰评价阈值获取

阈值为 50% 次数引起反应的那个刺激的大小^[14]。选定评分 ≥ 4 (对应评价为“比较干扰”和“严重干扰”)时求得的 50% 阈限值为色光侵扰的干扰评价阈值(以下简称“阈值”)。

3.1 明度阈值

表 3、表 4 为明度阈值统计结果。

表 3 夏季实验阈值计算
Table 3 Threshold calculation of summer experiment

S_w/S_l	色相	拟合方程(y 为百分比, x 为明度)	R^2	阈值	直观图
1	红	$y=0.8676x-23.988$	0.9169	85.3	红 85.3
	黄	$y=1.1405x-48.21$	0.9597	86.1	黄 86.1
	绿	$y=1.2489x-68.568$	0.9235	94.9	绿 94.9
	青	$y=1.2489x-74.068$	0.9235	99.3	青 99.3
	蓝	$y=1.0335x-63.166$	0.9997	109.5	蓝 109.5
	紫	$y=1.1405x-48.21$	0.9597	86.1	紫 86.1
4	红	$y=0.6328x-37.537$	0.8545	138.3	红 138.3
	黄	$y=0.9587x-73.086$	0.9065	128.4	黄 128.4
	绿	$y=0.7397x-54.531$	0.9399	141.3	绿 141.3
	青	$y=0.7091x-58.403$	0.8992	152.9	青 152.9
	蓝	$y=0.4782x-34.454$	0.8268	176.6	蓝 176.6
	紫	$y=0.8599x-64.333$	0.9846	133.0	紫 133
16	红	$y=0.2617x-29.548$	0.8929	304.0	红 304
	黄	$y=0.5776x-77.708$	0.7848	221.1	黄 221.1
	绿	$y=0.3929x-48.585$	0.8732	250.9	绿 250.9
	青	$y=0.3055x-35.179$	0.8911	278.8	青 278.8
	蓝	$y=0.3058x-41.898$	0.75	300.5	蓝 300.5
	紫	$y=0.5453x-65.836$	0.9377	212.4	紫 212.4

注:阈值为 $y=50$ 时的 x 值。

表 4 冬季实验阈值计算
Table 4 Threshold calculation of winter experiment

S_w/S_l	色相	拟合方程(y 为百分比, x 为明度)	R^2	阈值	直观图
1	红	$y=0.8394x-42.35$	0.948	110.0	红 110
	黄	$y=0.7715x-41.127$	0.9114	118.1	黄 118.1
	绿	$y=0.7679x-39.901$	0.969	117.1	绿 117.1
	青	$y=1.2489x-74.068$	0.9235	99.3	青 122.5
	蓝	$y=1.0335x-63.166$	0.9997	109.5	蓝 149.2
	紫	$y=1.1405x-48.21$	0.9597	86.1	紫 111.4
4	红	$y=0.6328x-37.537$	0.8545	138.3	红 187.3
	黄	$y=0.9587x-73.086$	0.9065	128.4	黄 199.6
	绿	$y=0.7397x-54.531$	0.9399	141.3	绿 256
	青	$y=0.7091x-58.403$	0.8992	152.9	青 260.2
	蓝	$y=0.4782x-34.454$	0.8268	176.6	蓝 449.8
	紫	$y=0.8599x-64.333$	0.9846	133.0	紫 217.3
16	红	$y=0.2617x-29.548$	0.8929	304.0	红 360.7
	黄	$y=0.5776x-77.708$	0.7848	221.1	黄 339.9
	绿	$y=0.3929x-48.585$	0.8732	250.9	绿 835.6
	青	$y=0.3055x-35.179$	0.8911	278.8	青 513.6
	蓝	$y=0.3058x-41.898$	0.75	300.5	蓝 1139.4
	紫	$y=0.5453x-65.836$	0.9377	212.4	紫 716.1

注:阈值为 $y=50$ 时的 x 值。

3.2 亮度阈值

亮度阈值在实际操作与控制层面更具实际应用性。因所得明度阈值存在大于实际最大明度 255 的案例,所以,不能测得全部明度阈值所对应的实际亮度,因此,通过线性回归获取亮度阈值。

首先,依据表 3、表 4,拟合明度阈值与 S_w/S_l 的函数关系;已知各色相明度所对应亮度(表 1),可确定明度阈值与亮度阈值的函数关系;从而进一步推导出亮度阈值与 S_w/S_l 的函数关系,计算各色相亮度阈值。表 5 为亮度阈值统计结果,图 5、图 6 分别为夏季和冬季实验亮度阈值图,结果表明,各色光的干扰亮度阈值数值相差范围较大,属于不同数量级。

表 5 夏季实验与冬季实验亮度阈值统计

Table 5 Luminance threshold statistics of summer and winter experiment

季节	S_w/S_l	各色相亮度阈值/($cd \cdot m^{-2}$)					
		红	黄	绿	青	蓝	紫
夏季	1	61.9	192.5	171.2	224.6	36.9	90.1
	4	365.0	748.7	675.4	949.4	143.4	322.4
	16	2 152.3	2 913.1	2 664.3	4 014.2	557.9	1 154.3
冬季	1	137.0	510.8	278.9	452.8	93.5	147.6
	4	723.1	2 347.0	4 462.4	3 379.7	1 435.7	1 999.0
	16	3 816.8	10 784.1	71 398.4	25 227.3	22 035.0	27 082.3

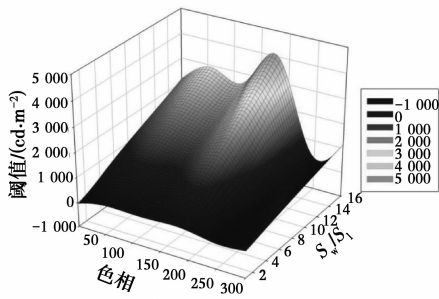


图 5 夏季实验亮度阈值直观图

Fig. 5 Visual map of the luminance threshold of summer experiment

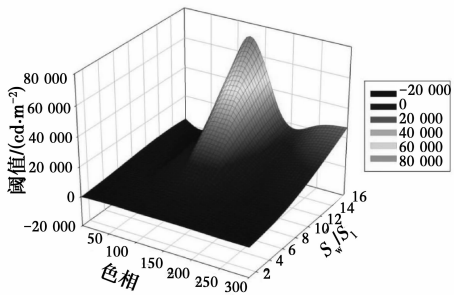


图 6 冬季实验亮度阈值直观图

Fig. 6 Visual map of the luminance threshold of winter experiment

4 阈值讨论与应用

4.1 季节差异性

表 2、图 4 数据表明:冬季评分的平均值低于夏季。进一步讨论明度阈值,如图 7 所示,冬季阈值均大于夏季阈值。因此,冬季的色光侵扰包容度高于夏季。

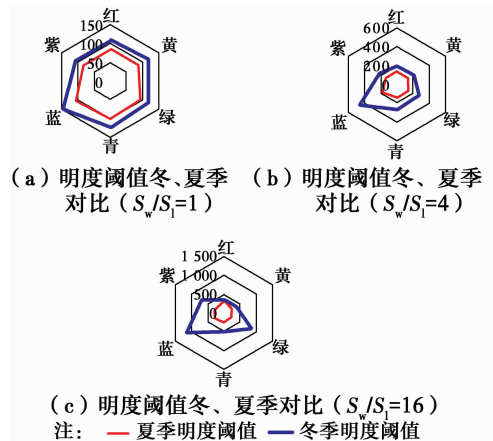


图 7 冬、夏季实验明度阈值对比

Fig. 7 The lightness threshold comparison between summer and winter experiment

4.2 性别差异性

如表 6 所示,冬季实验男性评分大部分大于女性评分,仅 23.8% 的评价项男性评分小于女性(表 7)。因此,除黄色外,对其他 5 色相色光侵扰而言,男性的包容度均小于女性。

表 6 相同评价项得分差(男一女)

Table 6 The difference of the same evaluation items between male and female (male minus female)

S_w/S_l	明度	各色相色光实测亮度/($cd \cdot m^{-2}$)					
		红	黄	绿	青	蓝	紫
1	51	-0.18	-0.29	0.17	0.02	-0.26	0.00
	77	-0.03	-0.20	-0.03	0.20	0.28	0.09
	102	0.14	-0.31	0.29	0.45	0.09	0.37
4	128	0.28	-0.12	0.37	0.37	-0.15	0.49
	153	0.28	-0.08	0.14	0.46	0.63	-0.22
	77	0.03	-0.0	-0.2	0.37	0.06	-0.37
16	102	0.25	0.00	0.15	0.15	0.06	0.06
	128	0.26	0.17	-0.03	0.49	0.23	0.37
	153	0.51	0.08	0.09	0.31	-0.06	0.23
16	179	0.37	0.14	0.06	0.60	-0.29	0.32
	179	179	0.34	0.17	0.18	0.17	0.63
	204	204	0.28	0.34	0.26	0.34	0.28
16	230	230	-0.23	0.37	0.66	0.45	0.20
	255	255	-0.54	-0.29	0.46	0.32	0.38

表 7 评价项男性评分小于女性统计

Table 7 Statistics of evaluation items of which the male score is smaller than females'

色相	总数	负值数	比例/%
红	14	2	14.29
黄	14	8	57.14
绿	14	4	28.57
青	14	0	0.00
蓝	14	4	28.57
紫	14	2	14.29
合计	84	20	23.81

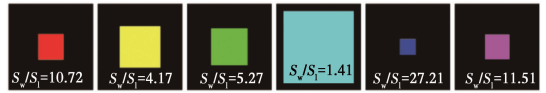


图 9 各色相夏季实验安全 S_w/S_l 直观图
Fig. 9 Tolerable S_w/S_l visual map of each color in summer experiments

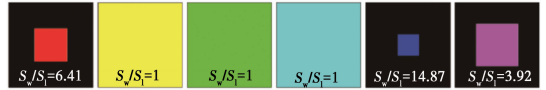


图 10 各色相冬季实验安全 S_w/S_l 直观图
Fig. 10 Tolerable S_w/S_l visual map of each color in winter experiments

4.3 明度阈值色调差异性

依据颜色色调的冷暖感理论:蓝色、青色为冷色调,红色、黄色为暖色调。图 8 表明:除夏季 $S_w/S_l=16$ 时,红色明度阈值大于其它色相,其余冷色调的明度阈值均大于暖色调。因此,对于明度阈值,冷色调色光侵扰的包容度高于暖色调。

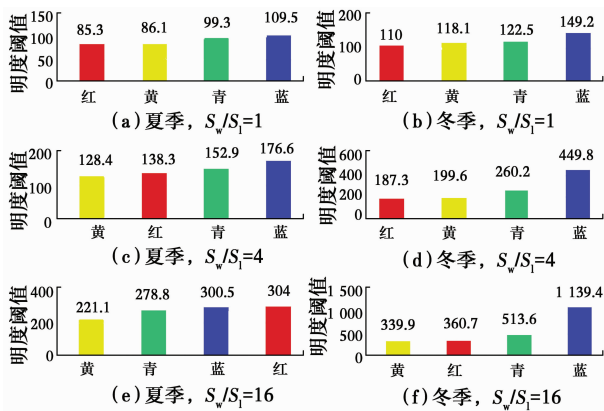


图 8 冷暖色相阈值对比

Fig. 8 The lightness threshold comparison between cold and warm hue

4.4 亮度阈值色调差异性

对于亮度阈值的讨论,引入“安全 S_w/S_l ”概念,指当侵扰源亮度取目前规范规定的最高限值 $1\ 000\ \text{cd}/\text{m}^2$ 时,产生的侵扰感知程度在“4 比较干扰”程度以下(平均分 <4)时, S_w/S_l 的数值。

安全 S_w/S_l 表征的是当限定侵扰源亮度后,可接受的侵扰源大小。如图 9、图 10 所示,亮度 = $1\ 000\ \text{cd}/\text{m}^2$ 时,对黄、绿、青 3 色相的侵扰面积的包容度较红、蓝、紫 3 色相高。将黄、绿、青 3 色相定义为“清爽色”,将红、蓝、紫 3 色相定义为“浓郁色”。对于亮度阈值,清爽色光侵扰的包容度高于浓郁色。

5 结论

色光侵扰程度与色相无相关性、与 S_w/S_l 负相关、与明度和亮度正相关;明度阈值和亮度阈值与 S_w/S_l 的线性关系均符合幂函数曲线;冬季色光侵扰的包容度高于夏季;除黄色外,红、绿、青、蓝、紫 5 色相色光侵扰,男性的包容度小于女性;对于明度阈值,冷色调的包容度高于暖色调;对于亮度阈值,“清爽色”的包容度高于“浓郁色”。

光侵扰的防治可从亮度控制和 S_w/S_l 控制两方面着手,对于不宜进行亮度控制的路灯,可通过控制 S_w/S_l 来避免光侵扰干扰;如若必要,制定冬、夏两季不同光侵扰标准限值,夏季室外照明亮度应低于冬季;暖色调的景观照明,可考虑通过控制开灯时长,缩短侵扰时长的方式防治其产生的光侵扰;对于需持续的照明,如标示指引性广告照明、庭院灯等功能性彩色光照明,宜采用冷色调;相同亮度要求下,建议居住区光环境使用清爽色系照明,清爽色作为居住区夜间照明色光的设计较好。

参考文献:

[1] CIE. Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations; CIE 150: 2003 [R]. CIE Central Bureau, 2003.

[2] CIE. Guide to lighting of urban areas; CIE 136: 2000 [R]. CIE Central Bureau, 2000.

[3] 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)

- [4] HO C Y, LIN H T, KUANG K Y. A Study on light trespass of dynamic LED advertising sign flickering on adjacent residents at night [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 368-370: 593-598.
- [5] HO C Y, LIN H T. Analysis and control policies for light pollution from advertising signs in Taiwan [J]. *Lighting Research and Technology*, 2015, 47(8): 931-944.
- [6] 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.
- [7] 肖俊宏. 景观照明中色光偏好定量方法研究[D]. 天津:天津大学,2008.
XIAO J H. Research on quantificational method of chromatic-light preference in landscape illumination [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [8] 刘晓希. 室外商业展示照明的色光情感量化研究[D]. 天津:天津大学,2010.
LIU X X. The research on quantificational method of chromatic-light emotion of outdoor commercial illumination for display [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 柳孝图. 建筑物理[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
LIU X T. Building physics [M]. 3rd edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [13] 建筑照明设计标准:GB 50034—2013 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
Standard for lighting design of buildings: GB 50034-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (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)

(编辑 胡英奎)