

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201912016



# 不同入射方式条件下“智能镜面” 利用太阳辐射的实验

吴正旺

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 362021)

**摘要:** 选取几种典型天气,对几种主要入射方式下“智能镜面”将太阳辐射定向反射进入建筑室内的照度、紫外线辐射强度和眩光情况进行实测及比较.结果表明:采取不同入射方式改善建筑室内的天然采光效果是可行的.入射俯仰角不佳会产生严重的眩光,但采取侧后方入射方式时,眩光得到改善;而采取水平入射时,其反射光的照度及紫外线辐射强度较高.此外,在大气能见度高的天气条件下,太阳辐射的入射率较高、强度较大;而在多云及阴天的天气条件下,紫外线入射率较高,但绝对值较小.

**关键词:** 智能镜面; 镜面反射; 入射方式; 照度; 紫外线

**中图分类号:** TU 113.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2020)05-0612-06

## Experiment of Solar Radiation Using “Smart Mirror” Under Different Incident Conditions

WU Zhengwang

(School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 362021, China)

**Abstract:** Several typical weather conditions were selected to measure and compare the illumination, ultraviolet intensity and glare of “smart mirror” directionally reflecting solar radiation into buildings under various incident modes. The experimental results show that the improvement of indoor natural lighting is feasible by the incidence, the incidence pitch angle has a great influence on the glare. The lateral rear incidence can effectively reduce the glare, and the horizontal incidence has the highest illumination and ultraviolet intensity. The experiment also shows that the incidence of illumination enhances with increase of the high atmospheric visibility. Under cloudy weather conditions, the incidence of ultraviolet radiation is high, but the absolute value is small.

**Keywords:** smart mirror; mirror reflection; incident mode; illumination; ultraviolet ray

我国城市中还存在着大量日照不足的建筑室内空间<sup>[1]</sup>,特别在旧城区,其日照标准普遍较低<sup>[2]</sup>.不少建筑的内部空间昏暗、阴冷,对市民的卫生和心理<sup>[3]</sup>都产生了不良影响,降低了宜居性<sup>[4]</sup>.为此,基于镜面反射原理对太阳辐射进行利用一直受到诸多学者的重视<sup>[5]</sup>.沈天行等<sup>[6]</sup>提出利用建筑外墙及阳台等空间,将反射材料固定在栏板或窗间墙上,把日照反射进入其南向建筑的室内.诺曼·福斯特(Norman Foster)在设计香港汇丰银行总部时,利用两面反光镜将太阳的直射辐射经 2 次反射后进入建筑中庭,改善了采光效果<sup>[7]</sup>.苟中华等<sup>[8]</sup>利用双弧面板将太阳的散射辐射引入高层建筑的底层室内,提高了室内照度.张一飞<sup>[9]</sup>进一步提出利用光学折射元件将太阳辐射折射到居住区场地中的阴影区,以改善其日照质量.栗德祥等<sup>[10]</sup>在清华大学超低能耗大楼中利用“向日葵+光导管”将室外日照导入地下空间,

**收稿日期:** 2019-12-10

**通信作者:** 吴正旺(1972-),男,教授,博士后,主要从事生态规划与设计的研究. E-mail: wuzhengwang@126.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51378018)

改善了地下空间的天然采光效果。吴正旺等<sup>[11]</sup>将信息技术与太阳能利用相结合<sup>[12]</sup>，研制“自动追踪、定向反射”日照的“模块式无风力矩智能镜面”(以下简称“智能镜面”)装置<sup>[13]</sup>，自动追踪太阳辐射，并将其定向反射至建筑室内的北部。

然而，以上研究都存在着一个共同的问题，即如果反射的角度不当，就难以达到目标。即如果角度过大，会明显降低太阳辐射的利用率；而如果角度过小，又可能由于入射方位角或俯仰角不合理而产生眩光。因此，在实际应用中采取何种入射角度及方式，使其既能避免眩光、改善采光效果，又不显著降低利用率，这在太阳辐射的利用中已成为一个重要的研究课题。基于此，本文主要研究不同入射方式下“智能镜面”利用太阳辐射的特征。

## 1 实验部分

### 1.1 实验概况

从 2018 年 12 月至 2019 年 5 月，选取晴天、多云、雾霾等典型天气，对水平入射、上(下)方入射及前(后)方入射等主要几种“智能镜面”入射方式下，各教室的太阳辐射照度、紫外线和眩光情况进行监测及比较。不同“智能镜面”入射方式的照射示意图，如图 1~3 所示。

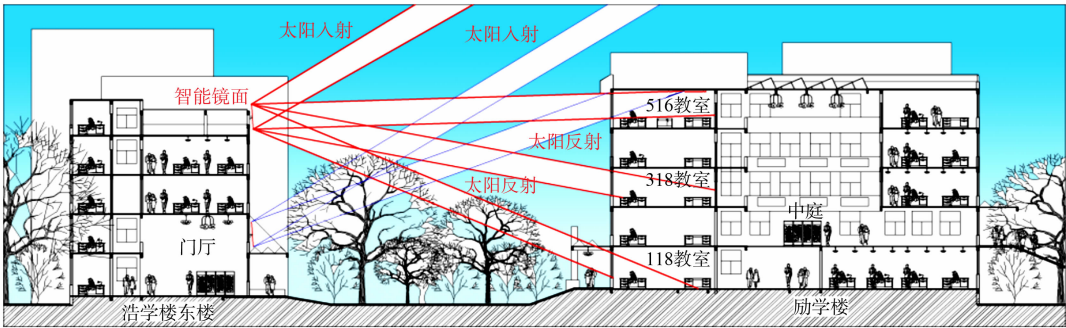


图 1 入射方式的剖面示意图

Fig.1 Section view of incident mode

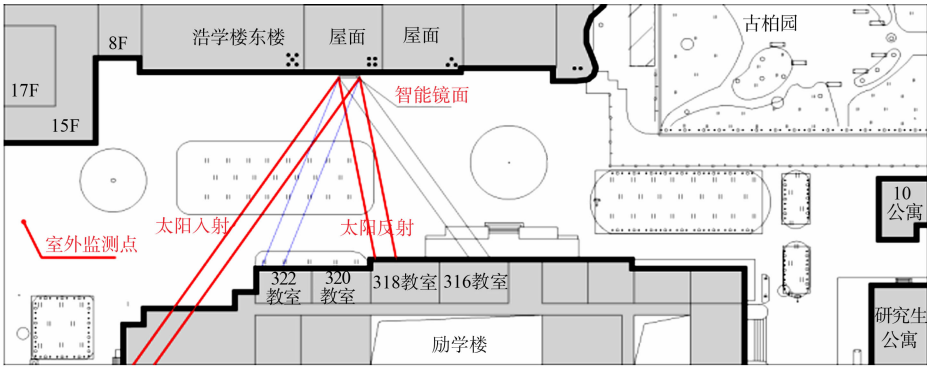


图 2 入射方式的平面示意图

Fig.2 Plane schematic diagram of incident mode

### 1.2 实验设备

自制“智能镜面”1 面；KONICA 牌 ILLUMINANCE METER T-10 型照度计 5 台(精度为 1 lx)；泰玛斯(TENMARS)牌 UVAB 紫外线测试仪 5 台(解析度为 0.001 mW · cm<sup>-2</sup>，感应波长为 290~390 nm，精确度为 3%)。

### 1.3 实验对象

实验对象为北方工业大学浩学楼的 5 层



图 3 入射方式的实景图

Fig.3 Real picture of incident mode

屋面, 以及其南向励学楼一层的 118, 122, 三层的 316, 318, 320, 五层的 516, 520 等教室. 将 1 面“智能镜面”安装在北方工业大学浩学楼的 5 层屋面上, 太阳辐射被定向反射进入励学楼的 122, 316, 318, 520 等 4 间测试教室里, 而眩光实验的测试教室为 118, 316, 318, 320, 516 等教室.

### 1.4 实验方法

1) 在各种典型的天气条件下, 以照度计、紫外线监测仪对各教室及室外的太阳辐射进行照度、紫外线辐射强度监测. 照度计及紫外线测试仪垂直于入射光线, 每次监测 1 min, 取其照度值的最大值. 将照度计平放在室外地面上 1 m 处, 以头部阴影遮住照度计的探头, 测量 4 个方向的室外漫射光强度, 取其平均值. 以真人模特模拟各教室中正在学习的状态, 以其主观感受对眩光情况进行评价.

2) 太阳辐射中, 可见光约占总能量的 50%, 红外区约占 43%, 紫外区约占 7%<sup>[14]</sup>. 虽然镜面对可见光、红外线、紫外线均能有效反射<sup>[15]</sup>, 但由于可见光占比最大, 而对室内空气杀菌起主要作用的是紫外线<sup>[16]</sup>. 因此, 本实验以照度作为太阳辐射利用率的主要指标, 同时, 以紫外线辐射强度为卫生指标<sup>[17]</sup>, 推断“智能镜面”反射的太阳辐射的杀菌效果. 实验以同一组同学(共 2 人)在 30 min 之内, 先后对 118 室、320 室、316 室、318 室和 516 室等教室的眩光强弱作出主观评价, 对桌面阅读活动进行模拟.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 不同俯仰角条件下的照度情况比较

当俯仰角取顺时针为正时, 不同俯仰角条件下各教室的照度( $E$ )比较, 如表 1 所示. 表 1 中:  $I_{UV}$  为紫外线辐射强度; 122 教室的入射光线为上方入射, 俯仰角  $24^\circ$ ; 316 教室的入射光线为水平入射, 俯仰角  $-2^\circ$ ; 318 教室的入射光线为上方入射, 俯仰角  $11^\circ$ ; 520 教室的入射光线为下方入射, 俯仰角  $-21^\circ$ ; 所有教室的照度测量均在入射教室靠窗 50 cm 处; 采光系数( $\zeta$ ) = (室内照度/室外照度)  $\times 100\%$ .

表 1 不同俯仰角条件下各教室的照度比较(俯仰角取顺时针为正)

Tab. 1 Comparison of illumination in various classrooms under different pitch angles (positive for clockwise pitch angle)

监测日期	天气情况		南向室外		$E/\text{lx}$				$\zeta/\%$
	天气概况	大气能见度/ $\text{km}$	$I_{UV}/\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$	$E/\text{lx}$	122 教室	316 教室	318 教室	520 教室	
2018 年 12 月 11 日	晴, 优 西北风 4 级	33.0	3 320	99 600	41 200	54 100	52 800	48 200	54.3
2018 年 12 月 12 日	晴, 优 西南风 3 级	14.5	2 343	91 600	38 300	50 100	43 400	—	54.7
2018 年 12 月 20 日	多云, 良 西南风 2 级	11.3	1 129	54 700	—	9 330	16 000	21 600	39.5
2019 年 1 月 5 日	多云, 轻度霾 东北风 3 级	16.1	1 125	40 500	—	15 740	12 780	19 660	48.5
2019 年 1 月 12 日	多云, 轻度霾, 无风	8.1	487	19 910	—	13 790	12 930	7 710	69.3
2019 年 3 月 26 日	晴, 优, 西南风 1 级	11.3	3 258	76 400	21 140	28 430	18 730	36 300	47.5
2019 年 3 月 28 日	多云, 轻度霾, 西南风 3 级	16.1	30	10 350	4 990	9 640	8 430	7 910	76.4
2019 年 5 月 21 日	晴, 优, 东北风 1 级	30.0	4 968	112 600	37 100	37 500	29 730	60 200	53.5

实验选取晴天、多云, 以及轻度雾霾等典型天气进行监测. 实验发现, 不同俯仰角条件下, 太阳辐射被定向反射进入各教室的照度最大相差可达 48.2% 以上, 而不同天气条件下采光系数也不同. 在晴天和雾霾天气条件下, 采光系数较大的入射方式是水平入射和下方入射, 最大可达 76.4%. 采取上方入射时, 俯仰角的绝对值越大, 入射的照度就越低. 以 2018 年 12 月 12 日为例, 当日天气晴, 采取水平入射的 316 教室的照度为 50 100 lx, 而采取上方入射的 122 教室的照度为 38 300 lx, 二者相差 24%. 在 2019 年 5 月 21 日, 采取下方入射的室外照度 112 600 lx, 而室内则达到 60 200 lx, 采光系数达 53.5%. 在 2019 年 3 月 28 日, 当日天气为多云、轻度霾, 采取水平入射的 316 教室的照度为 9 640 lx, 而采取下方入射

时,122 教室的照度为降至 4 990 lx,二者相差 48.2%。

从表 1 可知:不同天气条件下,在相同俯仰角时,其太阳照度变化也不同,大气能见度越高,室内照度越高.以 122 教室为例,在 2018 年 12 月 11 日,12 日,2 天的天气均为晴,室外照度分别为 99 600 和 91 600 lx,二者相差 8%;但 11 日的大气能见度为 33.0 km,而 12 日大气能见度为 14.5 km,其太阳辐射入射照度分别为 427 和 334 lx,二者相差 22%。

从表 1 还可知:若以照度为指标,则“智能镜面”最高能将约 69.3%的太阳照度定向反射进入建筑室内.以 2018 年 12 月 11 日,12 日,20 日,2019 年 1 月 5 日,12 日为例,当日室内照度与室外照度之比最大分别为 54.3%,54.7%,39.5%,48.5%,69.3%.需要注意的是,虽然多云且有轻度霾的天气条件下室内外照度的比值最高,但其照度的绝对值却是最低的,反映出可供利用的太阳辐射最少,且照度中太阳辐射的散射辐射占比较大。

### 2.2 不同俯仰角情况下紫外线的入射情况比较

当俯仰角取顺时针为正时,在不同俯仰角条件下各教室紫外线辐射强度( $I_{UV}$ )的比较,如表 2 所示.表 2 中: $E$  为照度;122 教室的入射光线为上方入射,俯仰角 24°;316 教室的入射光线为水平入射,俯仰角-2°;318 教室的入射光线为上方入射,俯仰角 11°;520 教室的入射光线为下方入射,俯仰角-21°;所有教室的照度测量均在入射教室靠窗 50 cm 处;室内、外紫外线强度之比的最大值( $\gamma_{max}$ )=(室内紫外线辐射强度/室外紫外线辐射强度) $\times 100\%$ 。

表 2 不同俯仰角条件下各教室的紫外线辐射强度比较(俯仰角取顺时针为正)

Tab.2 Comparison of ultraviolet radiation intensity in various classrooms under different pitch angles (positive for clockwise pitch angle)

监测日期	天气情况		南向室外		$I_{UV}/mW \cdot cm^{-2}$				$\gamma_{max}/\%$
	天气概况	大气能见度/km	$I_{UV}/mW \cdot cm^{-2}$	$E/lx$	122 教室	316 教室	318 教室	520 教室	
2018 年 12 月 11 日	晴,优,西北风 4 级	33.0	3 320	99 600	427	565	517	467	17.0
2018 年 12 月 12 日	晴,优,西南风 3 级	14.5	2 343	91 600	344	424	430	—	18.0
2018 年 12 月 20 日	多云,良,西南风 2 级	11.3	1 129	54 700	—	126	113	98	11.2
2019 年 1 月 7 日	阴,良,西北风 4 级	14.5	160	5 910	—	124	114	69	77.5
2019 年 1 月 12 日	多云,轻度霾,无风	8.1	487	19 910	—	113	132	74	27.1
2019 年 3 月 25 日	晴,良,东北风 1 级	30.0	3 981	108 800	—	623	381	514	15.6
2019 年 3 月 28 日	多云,良,西南风 3 级	16.1	30	10 350	5	15	7	5	50.0
2019 年 5 月 21 日	晴,优,东北风 1 级	30.0	4 968	112 600	570	581	606	802	16.1

从表 2 可知:不同俯仰角入射条件下,各教室内的紫外线辐射强度相差可达 24%以上,在晴天、多云等天气条件下,紫外线辐射强度最高的入射方式是水平入射.然而在阴天条件下,如 2018 年 12 月 11 日,当日室外太阳辐射中紫外线辐射强度为 3 320  $mW \cdot cm^{-2}$ ,经上方入射进入励学楼的 122 教室后,减弱为 427  $mW \cdot cm^{-2}$ ,相当于室外的 12.9%;而经水平入射进入 316 教室后,减弱为 565  $mW \cdot cm^{-2}$ ,相当于室外的 17%,二者相差达 24.4%。采取由下方向上入射的 520 教室,其紫外线辐射强度介于上述二者之间。

从表 2 还可知:在主要几种典型天气条件下,当天空云量较大时,紫外线入射的比例较高.最高的是 2019 年 1 月 7 日和 3 月 28 日,这 2 天的天气为阴和多云,室外紫外线辐射强度分别为 160,30  $mW \cdot cm^{-2}$ ,而 316 教室的紫外线辐射强度分别达 124,15  $mW \cdot cm^{-2}$ ,约为室外紫外线辐射强度的 77.5%及 50%。需要注意的是,虽然阴天、多云等天气条件下室内外紫外线的比值最高,但其紫外线的绝对值却是较低的,与雾霾天接近.室内、外紫外线辐射强度绝对值最高的天气仍是晴天,如 2018 年 12 月 11 日,12 日,以及 2019 年 5 月 21 日,其紫外线辐射强度分别达 3 320,2 343 和 4 968  $mW \cdot cm^{-2}$ 。相应地,入射

到室内的紫外线也远高于阴天、多云天.

2.3 不同水平方位角和俯仰角情况下的眩光情况比较

从本次实验看,在眩光控制中,“智能镜面”采取何种入射水平方位角将太阳辐射定向反射极为关键.在 2018 年 12 月 12 日 12:00,天气为晴、西南风 3 级,大气能见度为 14.5 km,开展不同水平方位角入射条件下各教室的眩光测试(水平方位角以顺时针为正),得到如下几点结果.

1) 118 教室的入射光线为左侧上方入射,水平方位角  $11^{\circ}$ ,主观感受为无眩光、舒适,照度为 11 810 lx. 2) 316 教室的入射光线为后方入射,水平方位角  $-35^{\circ}$ ,主观感受为无眩光,但佩戴眼镜者有轻微眩光,照度为 5 450 lx. 3) 318 教室的入射光线为侧方入射,水平方位角  $11^{\circ}$ ,主观感受为有轻微眩光,照度为 7 890 lx. 4) 320 教室的入射光线为前方入射,水平方位角  $21^{\circ}$ ,主观感受为有明显眩光,照度为 9 080 lx. 5) 516 教室的入射光线为左后方入射,水平方位角  $-35^{\circ}$ ,主观感受为无眩光、较舒适,照度为 237 lx.

以上结果说明 316 教室、318 教室和 320 教室的太阳辐射入射的俯仰角相同,水平方位角较大(前方入射)的 320 教室产生了明显的眩光,而水平方位角较小(侧方入射)的 318 教室其眩光不明显,水平方位角最小(后方入射)的 316 教室眩光进一步减少.

入射俯仰角对眩光的控制有重要作用<sup>[18]</sup>. 实验中,118 教室、318 教室及 516 教室分别采取了较大、较小及水平俯仰角入射等 3 种水平方位角入射方式,516 还采取了向上入射将太阳辐射反射至室内天棚的方式. 从使用者的主观评价看,在入射俯仰角较小的条件下,入射光对佩戴眼镜者有明显干扰,容易产生不适,但在较大俯仰角及水平入射等条件下均未有明显眩光产生. 例如,在 316 教室,其入射俯仰角为  $11^{\circ}$ ,在佩戴眼镜时刻感觉到左侧眼角处镜框被照亮,取下眼镜后不适消失,同时在水平方位角相同而俯仰角更小的 516 教室也没有发生相似情况.

不同入射条件下各教室的眩光实景比较,如图 4 所示. 从图 4 可知:关闭人工照明,不同入射方式下,各教室在桌面照度相差较大. 以 2018 年 12 月 12 日为例,照度最大的是采取侧上方入射的 118 教室,照度达 11 810 lx,难以进行阅读、书写等教学活动;从上侧后方入射的 316 教室桌面照度则减少为 5 450 lx,可以进行阅读、书写等教学活动;桌面照度最小的是采取水平侧后方入射的 516 教室,为 237 lx,能较为舒适地进行阅读、书写等教学活动.



图 4 不同入射条件下各教室的眩光实景比较

Fig. 4 Comparison of actual glare in classrooms under different incident conditions

3 结论

研究表明,采取不同入射方式改善建筑室内的天然采光效果是可行的. 不同入射方式下“智能镜面”对太阳辐射利用中的照度、紫外线及眩光都有明显不同,相差巨大,应根据实际需要采取相适宜的入射



方式. 如果主要是为了改善天然采光效果,则宜采取在使用者侧后方水平入射的方式,特殊情况下可以用下方入射方式;如果要兼顾天然采光和防止炫光,则宜采取在使用者的左后方、左侧上方等入射方式.

实验表明,太阳辐射在入射前、后的照度、紫外线辐射强度的衰减不同.照度衰减主要受大气能见度影响,其室内、外太阳辐射照度的最大比值可达 69% 以上.紫外线辐射强度则不论在晴天、阴天或轻度雾霾天气条件下,都有  $110\sim 560\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$  的紫外线进入室内.实验还发现,在阴天、雾霾天气条件下,被反射进入室内的照度及紫外线的绝对值显著降低,且在多种入射方式下,使用者均可感受到炫光.

参考文献：

[1] 柴源. 基于山东地区的建筑日照计算相关参数研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.

[2] 王佳莹. 哈尔滨高层住宅日照分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[3] 王绍汉, 张洪珍, 阎辉. 北京农村住宅日照卫生标准的研究: 居室内阳光紫外线对小狗抗佝偻病的实验研究[J]. 北京医科大学学报, 1986, 18(3): 185-188, 243.

[4] 周星升, 王燕, 王艳. 对现行居住区规范中日照问题的几点探讨[J]. 规划师, 2007, 23(增刊 1): 43-46. DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-0022. 2007. z1. 014.

[5] 赵桃柯, 李伟. 后排建筑外表面反射比对北向教室采光影响的数值模拟研究[J]. 天津城市建设学院学报, 2013, 19(3): 165-168. DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-6853. 2013. 03. 002.

[6] 沈天行, 袁磊. 将日光引入北向住宅底层的技术[J]. 建筑学报, 2004(4): 78-79. DOI: 10. 3969/j. issn. 0529-1399. 2004. 04. 024.

[7] 吴焕加. 香港汇丰银行大厦[J]. 建筑工人, 1997(6): 54.

[8] 苟中华, 刘少瑜, 巴哈鲁丁. 高层高密度居住环境中的自然采光系统: ANIDOLIC 技术应用初探[J]. 建筑学报, 2010(3): 24-26. DOI: 10. 3969/j. issn. 0529-1399. 2010. 03. 006.

[9] 张一飞. 寒地居住区日照质量改良光学折射模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(2): 16-20. DOI: 10. 11918/j. issn. 0367-6234. 2014. 02. 004.

[10] 栗德祥, 周正楠. 解读清华大学超低能耗示范楼[J]. 建筑学报, 2005(9): 16-17. DOI: 10. 3969/j. issn. 0529-1399. 2005. 09. 006.

[11] 吴正旺, 吴彦强. 利用“镜面反射”减少日照间距并节能节地的可行性论证[J]. 华中建筑, 2016(11): 58-61. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-739X. 2016. 11. 014.

[12] 王劲, 陈林. 智能采光实时追日的电能管理系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2009(7): 53-56. DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-623X. 2009. 07. 015.

[13] 孙倩, 陈一飞. 绿色建筑中的智能照明系统及采光控制技术集成[C]// 第六届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集. 北京: 中国城市科学研究会、中国绿色建筑委员会、北京市住房和城乡建设委员会, 2010: 5.

[14] 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 中国近 30 年太阳辐射状况研究[J]. 应用气象学报, 1998, 9(1): 25-32.

[15] 王金台, 路国忠. 太阳热反射隔热涂料[J]. 涂料工业, 2004, 34(10): 17-19, 62. DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-4312. 2004. 10. 006.

[16] 柯强, 李文红, 陈英旭. 紫外线杀菌效能的研究[J]. 环境污染与防治, 2003, 25(3): 136-138, 144. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-3865. 2003. 03. 004.

[17] 吴兑. 太阳紫外线辐射及其生物效应[J]. 气象, 2001, 27(4): 54-57. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0526. 2001. 04. 013.

[18] 崔苗苗, 任全, 王蕾, 等. 基于眩光评价的多媒体教室采光节能优化设计研究[J]. 建筑节能, 2019, 47(7): 71-75. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-7237. 2019. 07. 015.

(责任编辑：黄仲一      英文审校：方德平)