

文章编号:1000-582X(2010)07-129-05

## 用鱼镜头数码相机测试天空亮度分布

何 荣<sup>a</sup>, 翁 季<sup>a</sup>, 胡英奎<sup>b</sup>, 林 勇<sup>a</sup>

(重庆大学 a. 建筑城规学院; b. 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘 要:**为了解决天空亮度测试中存在的同步性差和误差大的缺陷,采用带鱼镜头的数码相机测试天空亮度。通过对鱼镜头及数码相机光学特性的研究,得到从数码照片上提取被测天空元亮度及位置信息的方法,确定其曝光参数及线性亮度记录范围,并通过对相机稳定性、鱼镜头透光率等误差进行分析修正,获得了精度较高的天空亮度分布测试值。为采光研究及采光观测提供了重要的技术手段。

**关键词:**天然采光;数码相机;鱼镜头;天空亮度;误差分析

**中图分类号:**TU113

**文献标志码:**A

### Testing sky luminance distribution by fish-eye lens digital cameras

HE Ying<sup>a</sup>, WENG Ji<sup>a</sup>, HU Ying-kui<sup>b</sup>, LIN Yong<sup>a</sup>

(a. College of Architecture and Urban Planning; b. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** To solve the existence of poor synchronization and large error in the sky luminance test, using fish-eye lens digital camera test sky luminance. Through researching on fish-eye lens and the optical characteristics of digital cameras, get the method that extract the luminance and location information of the measured sky element from digital photos, and determine the exposure parameters and the record range of linear brightness. Analyzing and amending the stability of the camera and light transmission rate of fish-eye lens, get a more accurate test values of sky luminance distribution. This provide important techniques means for daylighting research and daylighting observation.

**Key words:** daylighting; digital camera; fisheye; sky luminance; error analysis

在 CIE(国际照明委员会)采光技术指引中,天空亮度分布研究需要 145 个天空元的亮度值<sup>[1]</sup>,而传统的天空亮度测试是通过单台或数台亮度计对天空进行逐点扫描测试获取亮度数据,因此通常扫描一次需要数分钟或更长的时间<sup>[2]</sup>。而当天空亮度多变时(如中间天空状态),由于测试时间的延迟,在测试过程中天空亮度分布已经发生改变,这就带来了极大的测试误差。研究工作者为了解决天空亮度测

试延时性的问题,研究了多种天空亮度测试方法来解决这一问题,如多测光头扫描仪或单轴扫描仪等<sup>[3]</sup>。这些方法的运用可大大缩短天空亮度测试时间,但扫描测试延时性的问题仍未得到根本的解决。

为了解决天空亮度测试的延时性问题,避免由于天空亮度测试时间较长而带来的误差,研究工作者通过鱼镜头拍摄天空的方式来测试天空亮度,在相机光圈及曝光时间确定的前提下,不同的天空

收稿日期:2010-01-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50908239,50908240)

作者简介:何荣(1974-),男,重庆大学博士,主要从事建筑技术科学方向的研究,(Tel)13320269588;(E-mail)he\_ying@cqu.edu.cn。

亮度值会在胶片上形成不同的灰度值,因此根据胶片上某点的曝光灰度值,可以计算出与之相对应天空元的亮度值<sup>[4]</sup>。但该方法受到胶片质量、定影等因素的影响,而且还需要通过光电转换进一步将其转换为数字信号<sup>[5]</sup>,因此存在较大的测试误差。

随着光学技术和电子技术的发展,特别是用于数码相机的鱼镜头的技术突破,被拍摄场景的亮度和色度信息将以数字图像的形式记录下来,并可通过各种数字图像处理软件提取各像素点的亮度信息,最后获得被测对象的亮度值。这种测试方法大大弥补了常规方法的种种缺点,并被科研工作者广泛运用于夜景照明<sup>[6]</sup>、采光设计<sup>[7]</sup>及道路照明<sup>[8-9]</sup>的亮度的测试中。

数码相机测试天空亮度具有瞬时性,可以获得更多的数据测试点,避免了传统方法因测试时间长而造成天空亮度变化产生的误差。近年来国外研究人员采用大视角的数码相机<sup>[10]</sup>及鱼镜头数码相机<sup>[11-12]</sup>测试天空亮度,但对数码相机测试误差未进行深入的分析修正,因而其测试结果具有较大的误差。通过对鱼镜头测试天空亮度方法及测试误差的研究分析,并以此为基础建立可视化的图像处理系统,为研究天空亮度分布提供了方便准确的基础实验数据采集手段。

## 1 实验的基本原理及方法

要准确的获得天空亮度分布信息,首先应获取被测天空各部分的空间位置和亮度的信息。通过拍照的方法获得天空亮度分布信息的原理是利用数码相机的光电转换特性,记录下天空亮度信息,并以被测天空元在照片上的成像位置来记录其位置信息,从而完成被测天空元在空间位置和亮度上的信息记录。再运用相关软件提取图像上的位置及亮度属性,从而获得不同位置的天空元亮度值。其基本原理可按照以下测试流程表示。

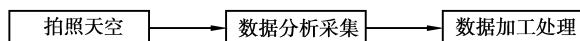


图 1 测试流程图

实验使用的仪器有:BM-5 亮度计、佳能 EOS-5D 数码相机、SIGMA 8 mm F3.5 EX DG 鱼镜头、照相机基座、亮度计基座、计算机及显示器等。

### 1.1 天空亮度分布信息记录

天空亮度分布信息是通过带鱼镜头(180°视场角)的全画幅数码相机拍照天空而得到的。该图

像以灰度的形式反映像面照度的大小,从而反映被拍天空的亮度,并以天空微元面在图像上的位置来记录被测天空的空间位置。鱼镜头的成像规律保证了图像上的位置与被测天空的空间位置的一一对应关系。数码相机感光元件的光学特性保证了被测天空元亮度与成像面照度(相对应的亮度)大小一一对应,而 180°视场角确保所需天空亮度分布信息完全被捕捉。因此,这样的条件下可将天空亮度分布信息完整的记录下来。

#### 1.1.1 被测天空的位置信息

数码图像记录的被测天空位置信息取决于鱼镜头的投影规律。根据鱼镜头的技术参数,并通过实验室天空半球内的测试验证<sup>[4]</sup>,该镜头投影规律为等立体角投影<sup>[14]</sup>,视场  $2\omega = \pi$ ,且在鱼镜头所形成的圆形图像上,与圆中心点距离  $r$  所对应的入射角  $\omega$  满足式(1)

$$\left. \begin{aligned} \omega &= 2\arcsin\left[r \cdot \sin\left(\frac{\omega}{2}\right)\right] \\ \alpha &= \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

因此只要找到鱼镜头所拍图像的中心点并确定图像的方向,就能在鱼镜头所形成的图像上找到与实际天空元相对应的点<sup>[15]</sup>,见图 2。

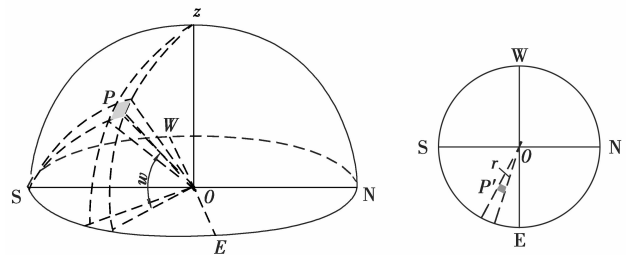


图 2 球面物与平面物对应关系

#### 1.1.2 被测天空的亮度信息提取

与传统胶片式相机相类似,在正常曝光条件下,数码相机同样是将被测天空透过镜头后的亮度值以灰度的形式记录在照片上<sup>[4]</sup>。也可认为数码照片上任意相元  $P(x, y)$  的灰度值与光透过率的关系为

$$D(x, y) = \lg \frac{1}{\tau(x, y)}, \quad (2)$$

其中: $\tau$  为数码照片光透过率; $D$  为数码照片灰度;其大小可用来衡量图片的明暗程度,这种明暗程度与像面照度和曝光时间的乘积——曝光量密切相关,在正常曝光条件下,数码相机的感光元件输出也遵循曝光量的定义,即曝光量  $H$  等于数码相机感光元件面阵上照度  $E$  和曝光时间  $T$  的乘积

$$H(x, y) = E(x, y) \cdot T. \quad (3)$$

式(3)的意义为:数码相机感光元件经过曝光所记录的信息,其效果与像面照度及曝光时间成正比,只要曝光量不变,像面照度和曝光时间可以相互调整,其总曝光量保持不变。

在相机的动态范围内相机镜头后的像面照度由天空元的亮度  $L_i$  确定,因此可以得到数码照片灰度值与天空元亮度之间的关系

$$D(x, y) = v \lg \left( \frac{\pi \tau T}{4F^2} L_i(x, y) \right) + m, \quad (4)$$

上式整理后得被测目标的亮度

$$L_i(x, y) = \frac{4}{\pi \tau} \frac{F^2}{T} 10^{\frac{D(x, y) - m}{v}}, \quad (5)$$

式中: $v$  为数码相机反差系数; $F$  为相机拍摄时光圈; $m$  为系数,动态范围低值所对应的灰度  $D_b$  与曝光量  $H_b$  及反差系数  $v$  表示

$$m = D_b(x, y) - v \lg H_b(x, y)$$

由(4)式可清楚的看出,在正确的曝光下,图像上像元  $P'$  的灰度与对应的天空元  $P$  点的亮度的对数成线性关系。这结论反映了天空亮度与照片灰度之间的一一对应关系,这为对相机亮度灰度定标的可行性及其相互关系研究提供了理论基础。

## 2 天空亮度分布数据采集

### 2.1 数据采集理论基础

在得到记录天空亮度分布信息的图像资料后,首先将数码相机图像传输到计算机储存系统,并在相关图形处理软件中打开。

通过计算机图形处理软件打开后的数字图像其亮度值与计算机显示系统的特性有关,但是其记录格式是一致的。当显示为白色时( $R/G/B$  值均为 255),代表传统胶片的曝光过度,当显示为黑色时,代表传统胶片的曝光不足。因此可以认为数码相机图像亮度值在曝光过度为最亮,在无曝光时为最暗( $R/G/B$  值均为 0)。假设图像对应的最亮亮度值为  $L_s$ ,那么数字图像输出的亮度值可表示为

$$L_0(x, y) = L_s \cdot \tau(x, y), \quad (6)$$

天空亮度与图像灰度级的关系可以从天空亮度与图像灰度的关系,以及图像灰度与图像灰度级的关系导出<sup>[4]</sup>

$$H_D(x, y) = \bar{K} \cdot [L_i(x, y)]^{-v}, \quad (7)$$

式(7)中  $\bar{K} = K_L \cdot L_s \cdot 10^{-m} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot \tau' \cdot \frac{1}{F^2} \cdot T\right)^{-v}$  与景物和图像位置无关。

式(7)两边取对数得到

$$\lg L_i(x, y) = - \text{blg} H_D(x, y) + \text{blg} \bar{K}, \quad (8)$$

式中  $b = \frac{1}{v}$ ,  $\bar{K}$  是仅决定于相机的光圈、曝光时间、感光材料感光特性系数,  $H_D(x, y)$  为数码图像灰度级,数码相机拍摄的数字图像的灰度级  $H'_D$  可用相应的图像提取数字图像像素灰度级值  $R, G, B$  转换而成<sup>[6]</sup>

$$H'_D(x, y) = 0.299R(x, y) + 0.587G(x, y) + 0.114B(x, y), \quad (9)$$

而由式(7)算得的灰度在 0 为全黑,在 255 时为最亮;这与灰度在 0 为最亮,在 255 时最暗正好相反。并且灰度与亮度值是呈线性变化,因此对计算灰度值进行调整,从而与实际的灰度级相一致。调整方法为

$$H_D(x, y) = 255 - H'_D(x, y). \quad (10)$$

式(8)表明,图像处理系统在有效动态范围内,天空亮度对数与图像灰度级对数成线性关系。这与传统胶片相机感光特性曲线相类似,用曲线来表现公式,见图 3 所示,该图显示了图像处理系统的亮度再现特性。

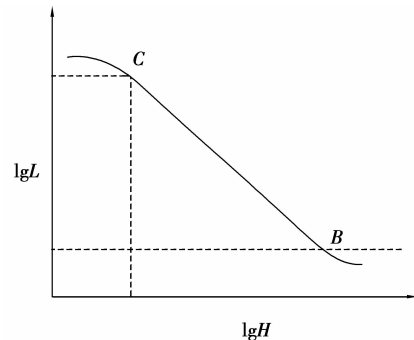


图 3 数码相机  $H-L$  曲线

从图 2 中可以看出,  $BC$  段是可用区域,在该区域中天空亮度对数与图像灰度级成线性关系。这是非常重要的特征,该特征说明天空亮度与图像灰度的一一对应关系。在保证正确的实验条件下,运用前述实验方法得到图像灰度完全反映天空亮度值(通过定标后);另一方面为利用实验定标,寻求天空亮度与图像灰度之间的关系式以及定量各参量奠定了理论基础。

### 2.2 曝光参数及线性亮度记录范围的确定

采用直接天空定标的方法来研究拍摄曝光量对  $H-L_i$  曲线的影响。在同一曝光参数条件下,对不同气候状况及不同天空亮度条件下的天空拍照,并在拍照的同时对天空指定点亮度进行测试,然后提取图片上亮度测试点的灰度级进行线性回归分析,以观察其规律。通过对大量数据点进行回归分析。

发现曝光量灰度值的对数值与亮度值的对数值之间具有较好的线性相关性(见图 4)。在不同气候条件下,同一曝光参数所拍摄的图片,其回归常数比较接

近,其相关系数可达到 0.98 以上,标准差也较小。如:

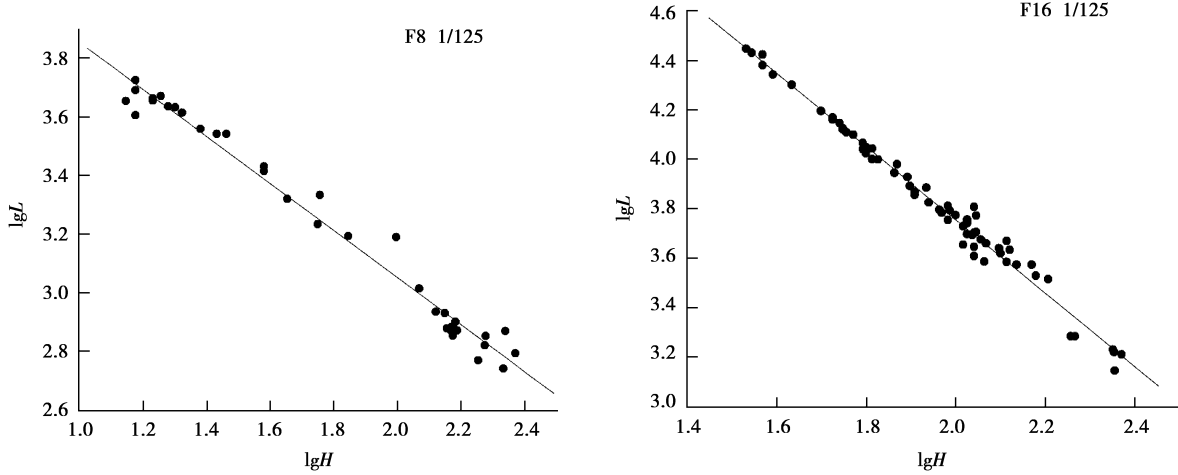


图 4 H-L<sub>t</sub> 曲线回归分析

光圈 F8 和曝光时间 1/125 s 时

$$\lg L_t(x, y) = -0.8019 \lg H_D(x, y) + 4.6539 \tag{11}$$

光圈 F16 和曝光时间 1/125 s 时

$$\lg L_t(x, y) = -1.4829 \lg H_D(x, y) + 6.72 \tag{12}$$

用这种方法,可以将各种曝光参数组合下的线性亮度再现范围求出,测量时根据天空亮度的大致范围,可选择合适的曝光参数(表 1)。

表 1 不同曝光参数下的线性记录亮度范围

光圈	快门速度	亮度范围/(cd · m <sup>-2</sup> )
F8	1/250	1 100-11 580
F8	1/500	2 200-23 160
F8	1/1 000	4 400-46 320
F16	1/250	2 780-56 700
F16	1/500	5 560-113 400
F16	1/1 000	11 120-226 800

### 2.3 数据采集实现手段

为了更加方便的提取天空亮度信息,基于鱼眼镜头与数码相机光亮度与灰度之间的关系研究,并在误差分析的基础上,采用 Delphi 7.0 软件开发一套“天空亮度信息处理系统”;该处理系统可以直接输入拍摄的天空照片获得天空各像素点的亮度值及整个天空亮度分布曲线,程序的主界面如图 5 所示。

将经过标定后相机所拍摄的天空元照片处理为



图 5 天空亮度图像处理系统主界面

像素点为 500×500 的矩形图片,并将被处理后的图片输入到程序中,同时输入亮度特性曲线数值及鱼眼镜头误差修正后,可得到天空亮度分布灰度值及天空亮度回归曲线,见图 6。

## 3 误差分析

### 3.1 数码相机稳定性

数码相机的稳定性是指间隔一定时间连续拍摄后它的响应的性能<sup>[16]</sup>。只有采用具有良好稳定性和重复性的数码相机,才能减少系统误差,提高测试精度。通过实验室测试,在数码相机开机 2 min 稳定后,每隔 1~5 min 对同一灰板(或色板)拍摄 5 次,计算灰度值 I<sub>r</sub>、I<sub>g</sub>、I<sub>b</sub> 的均方差(RMSE)来衡量数码相机的稳定性和重复性,均方差 RMSE 小于 2.14,说明该数码相机稳定性较好。

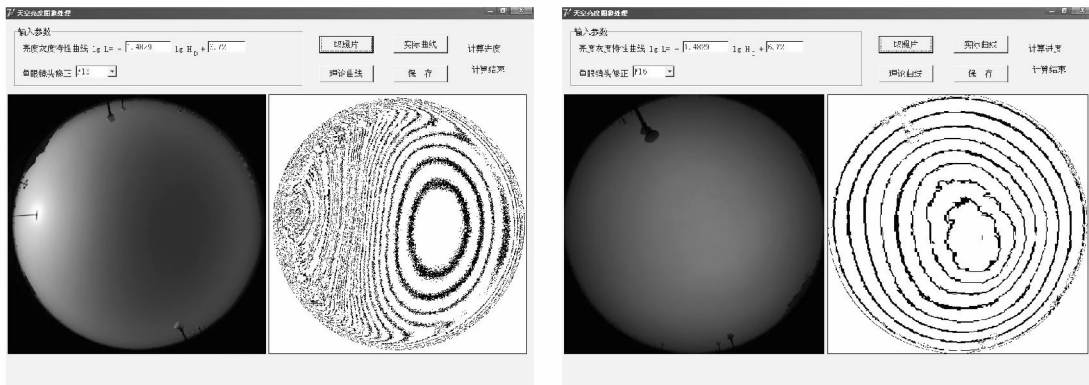


图 5 天空亮度图像处理

### 3.2 鱼镜头透光率

对于照相机镜头而言,即使景物亮度完全均匀,通过镜头后,像面照度也不一定完全均匀,大多数从中央到边缘有一定下降。

天空亮度对数与图像灰度级对数成线性关系,因此当目标物亮度一致时,图像灰度级的差别就反映了镜头透光非均匀性的差别。因此为了对鱼镜头透光非均匀性进行修正,通过积分球获得亮度均匀不变的目标表面,然后用鱼镜头拍摄积分球内表面。通过所得图像灰度的分析,测定了鱼镜头的透过率均匀度,从而确定各光圈相对于光轴的透光率修正。

### 3.3 测试过程误差

除了仪器误差之外,在测试过程中还存在应测试人员操作原因而造成的误差,如数码相机基座水平度的调整;测试照片的处理与读取等。这些误差可以通过更为规范的操作流程及采用数字化技术手段来解决。

### 3.4 实验误差修正

从上面的讨论分析可以看出,只要保证正确的曝光量,以及对测试结果作出一序列修正后,可以得到亮度的线性再现,并有相当的精确度。然而这样的精确度到底有多高,是令人关心的问题。

为了验证实验误差,作了下述实验:选择天空亮度相对稳定的天空,日面状况为 II,云量为 10/10,天空灰暗,天空亮度变化较稳定,见图 7。于 2008 年 3 月 4 日上午 10:36 分测试方位角为北向 0 度的不同高度角亮度值,分别采用亮度计直接测量值与经过拍摄图像修正处理后的亮度值比较得到表 2。

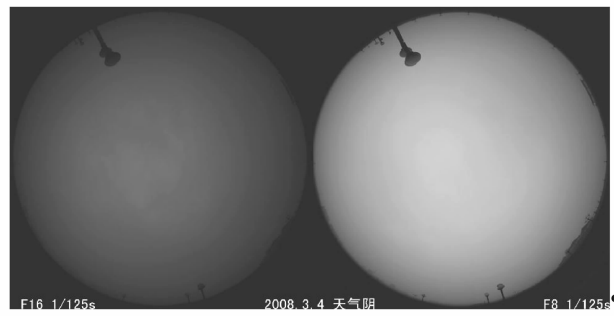


图 7 天空亮度图像

表 2 亮度计直接测量与图像处理系统测量亮度值比较

太阳高度角	直测亮度值 /(cd · m <sup>-2</sup> )	图像系统亮度值 /(cd · m <sup>-2</sup> )	相对 误差/%
10	703	755	7.3
20	849	837	1.4
40	1 137	1 073	3.2
50	1 230	1 191	3.2
60	1 361	1 300	4.4
70	1 465	1 408	3.9
80	1 625	1 575	3.0
90	1 732	1 655	4.4

从表 2 中看出,以直接测量值作为标准,最大相对亮度误差为 7.3%;各太阳高度角平均误差为 4.01%。这样的测试结果,考虑到测试中亮度的变化影响,作为采光设计而言是令人满意的。

## 4 结 语

天空亮度分布是运用天然光的重要基础资料。通过数码相机测试天空亮度图像数字化系统,可得到 250 000 个及以上数据点,相对 CIE 测试技术要求的 145 个测点,这大大提高了天空亮度分布的研究精度;且每次测试耗时较短,解决了传统测试延时性的问题;并可获得较为满意的天空亮度分布数据,该数据具有较小的误差,能满足采光设计及采光研究的要求。

### 参考文献:

- [1] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). CIE TC-3. 07 Guide to recommended practice of daylight measurement [S]. Austria: Commission Internationale de l'Eclairage, 1994.
- [2] EDWARD N G, CHENG V, GADI A, et al. Defining standard skies for Hong Kong [J]. *Building and Environment*, 2007, 42 (2): 866-876.
- [3] Dr Arch L Bellia, Ing A Cesarano, Ing F Minichiello, et al. Videography for sky luminance distribution measurement[J], *Lighting Res. Technol.* 1997,29(1): 40-46.
- [4] 何荣. 用信息分析法研究天空亮度分布 [D]. 重庆:重庆大学建筑城规学院,2008.
- [5] 沈天行. 用图像数字化处理进行采光测试[C]//第五届建筑物理学术会议论文选集. 北京:中国建筑工业出版社,1986: 250-257.
- [6] 沈天行, 杜江涛. 城市夜景照明的测试技术[C]// 国际夜景照明研讨会, 2001 年 11 月 13-14 日, 上海: [s. n.], 2001: 138.
- [7] 沈天行, 张九红. 利用图像数字化处理研究标准全云天空下采光系数[J]. *照明工程学报*, 2006, 17(2): 28-32.  
SHEN TIAN-XING, ZHANG JIU-HONG. The research of testing the daylight factor in the standard luminance of the overcast skies by the method of digitalizing picture processing [J]. *China Illumination Engineering Journal*, 2006, 17(2): 28-32.
- [8] 陈仲林, 翁季, 胡英奎, 等. 用数码相机测量亮度分布 [J]. *照明工程学报*, 2005, 16(3): 11-14.  
CHEN ZHONG-LIN, WENG JI, HU YING-KUI, et al. A study on measurement of luminance distribution by using a digital camera [J]. *China Illumination Engineering Journal*, 2005, 16(3): 11-14.
- [9] 陈仲林, 翁季, 胡英奎, 等. 道路照明测量方法研究[J]. *灯与照明*, 2005, 30(2): 7-12.  
CHEN ZHONG-LIN, WENG JI, HU YING-KUI, et al. A Study on measurement of road lighting [J]. *Light and Lighting*, 2005, 30(2): 7-12.
- [10] SHAHRIAR A N M, HYDE R, HAYMAN S. Wide-angle image analysis for sky luminance measurement [J]. *Architectural Science Review*, 2009, 52 (3): 211-220.
- [11] YASUHIRO M, MIWAKO T, YOSHIKI N. The evaluation of distributed multiple-light arrangement in the daytime and nighttime using brightness image [C]// 26<sup>th</sup> Session of the CIE, July 4-11, 2007, Beijing, China. Beijing, [s. n.], 2007: 249-252.
- [12] DUMORTIER D, COUTELIER B, FAULCON T, et al. A new luminance mapping system based on Nikon Coolpix digital cameras [C]// Lux-Europa Conference, Sept. 19-21, 2005, Berlin, Germany. Berlin: [s. n.], 2005: 308-311.
- [13] KOBAYASHI M B, DUMORTIER D. Use of a digital camera as a sky luminance scanner [C]// 26<sup>th</sup> Session of the CIE, July 4-11, 2007, Beijing, China. Beijing, [s. n.], 2007: 6-9.
- [14] 王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [15] 顾冰, 詹庆旋, 祝志强, 等. 利用数码相机测量亮度分布的实验[J]. *照明工程学报*, 2003, 14(1): 15-18.  
GU BING, ZHAN QING-XUAN, ZHU ZHI-QIANG, et al. Research on measurement of luminance distribution using a digital cameras [J]. *China Illumination Engineering Journal*, 2003, 14(1): 15-18.

(编辑 赵 静)