

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.05.019

日光色温及显色性实验研究

梁树英, 杨春宇, 张青文, 翁 季

(重庆大学 建筑城规学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要:为了解决建筑色彩多从人文审美等定性研究出发、缺乏科学定量研究的问题,找到不同色温的日光对建筑色彩产生影响的函数关系,达到建筑色彩设计更科学化的目的。分析了典型日光及相关理论,并以典型日光 D_{65} 和 D_{55} 为标准照明体,对日光色温及其与显色性之间的定量关系进行了实验研究,研究结果表明晴天早晨和傍晚的日光色温变化幅度较大,在日出后和日落前 3 h 之间基本稳定地保持在 4 300~5 300 K 之间。日光光源与典型日光(CIE 标准照明体 D)的总色差与两者的色温差之间存在显著的正比例关系,比例系数约为 0.01,其函数关系式为 $\Delta E = 1.0 \times 10^{-2} \times \Delta K$ ($3\ 500 < K < 7\ 500$)。

关键词:日光;光谱分析;典型日光理论;日光色温;色差关系

中图分类号:TU113.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)05-0112-06

Experimental Analysis of Color Temperature and Color Rendering Properties of Daylight

Liang Shuying, Yang Chunyu, Zhang Qingwen, Weng Ji

(Faculty of Architecture and Urban Planning; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Architectural color has been analyzed from humanistic, aesthetic and other qualitative aspects rather than a scientific quantitative perspective. In order to obtain the function relation that different color temperature of daylights influence architectural color and to make architectural color design more scientific, typical daylight and correlation theories have been analyzed. Meanwhile an experiment research of daylight color temperature and color rendering properties while making typical daylights D_{65} and D_{55} as standard illuminants has been carried out. The results indicate that in sunny day the daylight color temperature changes quickly in the morning and evening, and it remains stable from sunrise to 3 hours before sunset (4300K~5300K). And there is a distinct direct proportion relation between color differences and color temperature differences of daylights, the proportional coefficient is 0.01, and the function relation is $\Delta E = 1.0 \times 10^{-2} \times \Delta K$ ($3\ 500 < K < 7\ 500$).

Key words: daylight; spectrum analysis; typical daylight theory; daylight color temperature; color difference relations

建筑色彩包含社会人文及科学技术 2 方面的内容,长期以来建筑色彩设计多是从历史、文脉、习俗、

审美等方面进行的定性分析,忽视了科学的定量研究。建筑色彩是在自然空间中呈现出来的,日光必

收稿日期:2013-02-20

基金项目:国家自然科学基金(51078364、51278507);2012年中央高校研究生科技创新基金自主研究项目(CDJXS12190008);重庆市科委自然科学基金(2010BB6051)

作者简介:梁树英(1984-),女,博士生,主要从事建筑技术研究,(E-mail)Lsyarch@163.com。

杨春宇(通信作者),男,博士生导师,(E-mail)ycu11@163.com。

然会对其产生影响。日光有初升、日出后、正午、日落前和欲落以及晴天直射、晴天背光和阴天等不同时相,不同时相的日光具有不同的色温和光谱功率分布,在其照射下建筑所呈现的色彩也不尽相同。因此,对日光光谱、日光色温及显色性对建筑色彩影响的研究是一项重要的基础理论研究。在日光光谱的研究方面,学者们进行了一系列的研究工作,例如:Hernández-Andrés等^[1]对欧洲南部的日光光谱进行了测量和分析,赵晓艳等^[2]对成都地区的天空光光谱进行了测量和分析,曹婷婷等^[3]分别对大气上界和地表直射太阳光谱和天空光谱进行了测量,还有学者对太阳辐射光谱和天空光谱进行了相关研究^[4-8]。日光色温随气候、季节、时间和天气等的变化而变化,其中时间和天气的变化对日光色温的影响最为明显,李兴国等^[9]对常见的日光色温进行了研究,对比了自然光和人工光的色温差别,郑志雄^[10]标出了日光和天光在部分云彩之下的综合色温。喻柏林等^[11]对光源的色温和CIE标准照明体进行了研究,并研究了典型日光色度轨迹及其相对光谱;还有学者对CIE标准照明体的色度和光谱等进行了研究^[12-13]。杨春宇等^[14-15]对影响建筑色彩观测的因素进行了研究,包括不同色温日光、不同光源等对建筑色彩的影响。目前,对日光光谱的研究主要用于大气污染状况的检测和分析,对日光色温本身的研究也比较有限,还缺乏对日光色温及其显色性之间关系的深入研究。

笔者对一天中具有不同色温的不同时相日光进行跟踪观测,分析一天中日光色温及其照度变化,同时,以典型日光 D_{65} 和 D_{55} 作为参照照明体,对不同色温日光下的标准白板色度变化量进行分析,并进行色差比较,探讨日光色温与显色性之间的定量关系。

1 典型日光及相关理论

1.1 典型日光理论

国际照明委员会(CIE)推荐了4种标准照明体A、B、C、D来规范颜色测量。典型日光(即CIE标准照明体D)在CIE1931色度图上表示为一条位于黑体轨迹上方的典型日光色度轨迹,其是由两类实验数据定出的:一类数据来自1963年Condit等人测量的622例不同地区和不同时相的太阳光和天空光光谱分布;另一类数据是同年完成的两组视觉色度测量,即Nayatani等^[16]和Chambeilin等^[17]分别对加拿大渥太华和英国南部的北天空日光的直接视觉观察。针对Condit等人测量的622例日光光谱分布,Judd等^[18]用统计学的特征矢量分析重新组合出

一定相关色温的典型日光光谱功率分布。由这622例日光光谱分布曲线可以得到1条平均曲线 S_0 ,分析这些曲线偏离 S_0 的变化,可以找到偏离 S_0 的最突出特征矢量 S_1 和第2个最突出特征矢量 S_2 ,以及第3特征矢量 S_3 和第4特征矢量 S_4 等。一般而言,用特征矢量 S_1 、 S_2 和相应的乘数 M_1 、 M_2 就能很好地符合不同色温的日光光谱分布^[19-20](图1)。

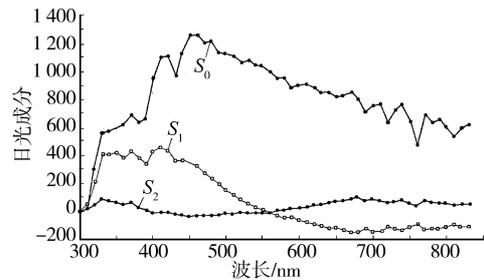


图1 日光光谱分布的平均曲线 S_0 及第1、第2特征矢量曲线

根据典型日光理论,不同色温日光的相对光谱功率分布公式为:

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad (1)$$

相关资料^[11,19]给出了4 000~40 000 K范围内的典型日光的平均曲线 S_0 、特征矢量 S_1 、 S_2 和相应的系数 M_1 、 M_2 的详细研究数据。利用这些数据,根据式(1)即可算出各种相关色温标准照明体D和不同色温日光的相对光谱功率。

1.2 日光光谱功率分布与日光色温

根据前文所述理论,不同时相的日光对应着不同相关色温的标准照明体D,也就对应着不同的相对光谱功率分布。定义典型日光的实验数据来源于实测日光,其相对光谱功率分布与实测日光很相似,和其他标准照明体相比,典型日光的色度点与实际日光更符合,因此CIE推荐研究时实测日光用典型日光 D_{55} (相关色温5 503 K)、 D_{65} (相关色温6 504 K)和 D_{75} (相关色温7 504 K)来代替,并尽可能使用典型日光 D_{65} 。

从光源的显色性来分析,其显色性是由光源的光谱功率分布决定的^[19],连续光谱的光源具有较好的显色性。日光是连续光谱,日光色温能代表其光谱功率分布,也能反映其显色性。从色度实践的角度而言,研究日光的光谱功率分布意义不大,且有一定的难度。因此一般在日光光源条件下,可用日光色温来衡量其显色性,进行色度测量和分析。

色温的感觉量用 MK^{-1} (每兆开)表示,其计算公式为^[21]:

$$10^6 / \text{色温(K)} = MK^{-1} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,色温的感觉量是由倒数色温来度量的。在实际测量中,光源的色温同样相差

200 K,但其感觉量就会有很大不同。例如:5 000 K 和 5 200 K 的 2 个光源,色温感觉量约为 8 MK^{-1} ;而 2 000 K 和 2 200 K 的光源,色温感觉量就约为 45 MK^{-1} 。为了进一步探讨日光色温与色差之间的定量关系,笔者对日光色温及显色性进行了实验研究。

2 日光色温及显色性实验研究

2.1 实验原理

根据实际测量,阴天时日光色温比较稳定,大致处于 6 000~7 000 K 之间,其与典型日光 D_{65} 的色温比较接近,而晴天时日光色温在一天中的变化幅度很大,因此着重研究晴天时日光色温及其照度的变化情况。跟踪观测晴天一天中正当对太阳直射光的标准白板直射面的各项参数,分析一天中日光自身的变化规律,并在 CIE XYZ 和 CIE Lab 色彩空间中将测量数据与 CIE 标准照明体 D(典型日光)下的测量数据进行色差比较,分析日光色温变化对建筑色彩的影响规律。

2.2 实验步骤

在重庆市选择一个夏季全晴天(具体测量日期为 2012 年 8 月 14 日;正午的太阳高度角为 $74^{\circ}49'$;日出和日落分别为 6 时 21 分和 19 时 33 分;日中天为 12 时 56 分;昼长 13 小时 11 分;测量时间为北

京时间,时区为 UTC +8),在室外条件下正对太阳直射光垂直放置标准白板,并将一天分为 16 个不同时段,在不同时间点用 PR650 亮度色度计和 ST-80C 数字照度计测量其直射面的亮度、色度、色温和照度等,并记录相关数据。

将测量数据使用 AIM_XLA(EXCEL 加载宏)进行色度计算和转换,并用 Origin 8.0 软件对数据进行绘图和分析。为了便于计算和分析,色差计算均采用国际上有代表性的 CIEDE2000 色差公式。

2.3 晴天日光色温及照度变化趋势分析

经过测量,晴天日光亮度、色度、色温和照度参数如表 1 所示。将一天中的日光色温和水平照度的数据进行统计分析,得到晴天日光色温及水平照度的变化曲线(图 2)。

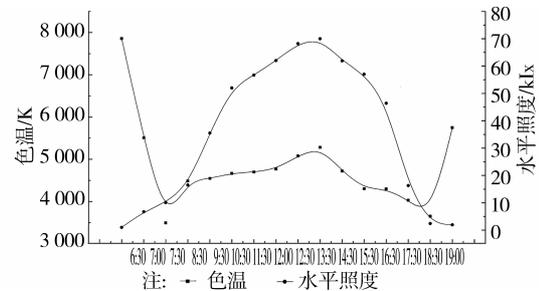


图 2 晴天日光色温及水平照度变化图

表 1 晴天日光亮度、色度、色温和照度测量数据

时间	亮度/($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	1931xy 色坐标值	色温/K	水平照度/klx	垂直照度/klx
6:30	119	0.229,0.313	7 856	1.0	0.4
7:00	987	0.332,0.345	5 510	6.7	3.0
7:30	2 016	0.396,0.392	3 495	10.1	5.4
8:30	3 743	0.361,0.365	4 487	16.5	6.8
9:30	6 048	0.359,0.364	4 547	35.5	10.4
10:30	9 176	0.358,0.363	4 667	52.0	18.2
11:30	9 606	0.355,0.363	4 700	56.7	24.5
12:00	9 750	0.353,0.362	4 768	62.0	28.1
12:30	10 200	0.343,0.355	5 080	68.2	31.5
13:30	11 200	0.338,0.351	5 281	70.0	33.3
14:30	10 700	0.354,0.359	4 722	61.9	20.1
15:30	7 553	0.367,0.364	4 304	57.0	23.0
16:30	6 585	0.365,0.356	4 298	46.4	18.5
17:30	4 517	0.375,0.362	4 030	16.3	9.8
18:30	916	0.419,0.421	3 650	2.4	1.9
19:00	448	0.327,0.337	5 750	1.9	1.0

从表 1 数据和图 2 晴天日光色温及水平照度变化图中可以看出:晴天时,日光色温基本处于 3 500~7 500 K 之间,早晨和傍晚日光色温变化幅度较大,早晨时日光色温急速下降,傍晚时日光色温急速上升,而在 1 d 中的大部分时间(日出 3 h 之后和日落 3 h 之前),日光色温的变化幅度较小,基本稳定地保持在一定的水平上(4 300~5 300 K);而日光亮度、水平照度和垂直照度的变化则比较规律,基本符合太阳的运行轨迹,在一天中先上升后下降,其最大值出现在正午前后。

2.4 日光色温与总色差的关系研究

2.4.1 CIE XYZ 色空间 为了定量分析日光色温变化对建筑色彩的影响规律,研究其显色性,本文分析了不同色温日光下标准白板的色度数据,并以 CIE 推荐的 D₆₅(即相关色温 6 504 K 的典型日光)标准照明体作为参照照明体,将观测数据在 CIE XYZ 色空间中进行色差比较。定义典型日光 D₆₅的 Y、x、y 值分别为 0.994、0.3127、0.329^[14],那么标准白板的色度值就是其与典型日光 D₆₅照明条件下的色彩偏差值。从前文的理论分析可知,光源的光谱功率分布决定了其显色性,日光是连续光谱,日光色温能代表其光谱功率分布,也能反映其显色性。因此,日光色温与其显色性之间必然存在一定的关系。对测量数据通过 AIM_XLA(EXCEL 加载宏)计算和 Origin 8.0 软件分析,得到不同色温日光与典型日光 D₆₅的总色差与两者色温差之间的函数关系图(图 3)。

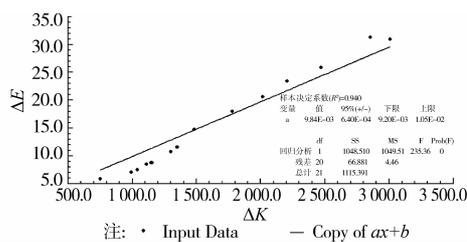


图 3 日光总色差与色温差的关系图 1

通过对数据的进一步拟合,得到日光总色差(ΔE)与色温差(ΔK)之间的函数关系式:

$$\Delta E = 9.84 \times 10^{-3} \times \Delta K \quad (3)$$

式(3)的样本决定系数 R^2 为 0.940,大于 0.9,说明公式的回归效果较好。显然,从式(3)中可以看出,日光光源与典型日光 D₆₅的总色差与两者的色温差之间存在显著的正比例关系,即随着两者色温差的增大,其色差也呈增大的趋势。

由前文的理论分析可知,典型日光是 CIE 规定的标准照明体 D,那么对于不同相关色温的 D 系列

标准照明体,都应该符合日光光源的这种性质,即两者的总色差与色温差之间存在正比例关系。为了证明这一结论,将标准照明体 D₅₅(即相关色温 5 503 K 的典型日光)作为参照照明体,将观测数据再次进行色差比较,通过同样的处理方法得到不同色温日光与典型日光 D₅₅的总色差与两者色温差之间的函数关系图(图 4)。

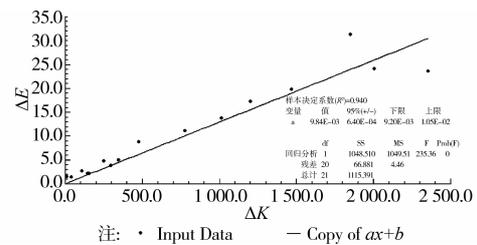


图 4 日光总色差与色温差的关系图 2

通过对数据的进一步拟合,可以得到该直线的函数关系式:

$$\Delta E = 1.29 \times 10^{-2} \times \Delta K \quad (4)$$

式(4)的样本决定系数 R^2 为 0.913,大于 0.9,说明公式的回归效果较好。因此,从式(4)中可以看出,日光光源与典型日光 D₅₅的总色差与两者的色温差之间也存在显著的正比例关系,与上述结论是符合的。

通过上面的分析,可以得出:日光光源与典型日光(CIE 标准照明体 D)的总色差与两者的色温差之间存在函数关系,日光色温(实测晴天日光色温处于 3 500~7 500 K 之间)与典型日光照明条件下的总色差正比于两者的色温差,比例系数约为 0.01,其函数关系式为 $\Delta E = 1.0 \times 10^{-2} \times \Delta K$,即日光色温与典型日光的色温每相差 100 K,对应的总色差 ΔE 约为 1(大约相当于 5 倍的视觉色差识别阈值)。

2.4.2 CIE Lab 色空间 同样以 D₆₅(即相关色温 6 504 K 的典型日光)标准照明体作为参照照明体,本文在 Lab 颜色空间里将不同色温日光光源下标准白板直射面的色度数据进行差值比较,再次探讨日光色温变化对建筑色彩的影响规律。本文定义典型日光 D₆₅的 Lab 值分别为 100、0、0,那么标准白板的色度值就是其与典型日光 D₆₅条件下的色彩偏差值(表 2)。

由表 2 可以看出:与典型日光 D₆₅相比,当日光色温小于典型日光 D₆₅的相关色温 6 504 K 时,色度参数 Δa^* 和 Δb^* 的值为正,根据 CIE Lab 色空间的定义,表示日光光色偏红和偏黄;当日光色温大于典型日光 D₆₅的相关色温 6 504 K 时,色度参数 Δa^* 和 Δb^* 的值为负,根据 CIE Lab 色空间的定义,表示日

光光色偏绿和偏蓝。这与光源色温的定义和特点是符合的。在实际研究中,根据日光的色温,可以快速地判断其影响建筑色彩的颜色偏向。

表 2 实测日光色温 Lab 色差计算表(参考照明体 D₆₅)

测量时间	色温/K	Δa^*	Δb^*
06:30	7 856	-1.96	-9.70
07:00	5 510	2.07	9.81
07:30	3 495	10.24	41.54
08:30	4 487	6.66	23.28
09:30	5 021	7.06	12.95
10:30	5 202	3.17	13.67
11:30	5 346	2.62	11.73
12:00	5 355	2.62	11.73
12:30	5 462	2.09	10.39
13:30	5 392	3.09	10.78
14:30	5 154	4.14	13.49
15:30	4 722	6.16	19.54
16:30	4 298	12.77	20.73
17:30	4 030	14.53	25.19
18:30	3 650	7.72	59.07
19:00	5 750	3.45	5.79

另一方面,本文以典型日光 D₆₅ 作为参照明体,在 Lab 颜色空间里将其他 D 系列标准照明体的色度数据进行了差值比较,探讨不同 D 系列标准照明体条件下的色度差异(表 3)。由表 3 可以看出: D₅₀、D₅₅ 的色温小于 D₆₅,其色度参数 Δa^* 和 Δb^* 的值为正, D₇₅ 的色温大于 D₆₅,其色度参数 Δa^* 和 Δb^* 的值为负,符合上述结论。在实际研究中,探讨日光色温与显色性之间的定量关系时可以采用不同相关色温的典型日光作为参照明体,当以 D₅₀、D₅₅ 和 D₇₅ 作为参照明体进行 Lab 色彩转换时,可根据表 3 修正其 a^* 、 b^* 值。

表 3 不同 D 系列标准照明体 Lab 色差计算表
(参考照明体 D₆₅)

色温/K	Δa^*	Δb^*
D ₅₀ (5 004 K)	1.66	13.38
D ₅₅ (5 504 K)	0.75	8.10
D ₇₅ (7 504 K)	-2.47	-13.69

3 结 论

通过观测和分析日光色温及其照度的变化,晴天日光色温基本处于 3 500~7 500 K 之间,早晨和

傍晚日光色温变化幅度较大,早晨日光色温急速下降,傍晚日光色温急速上升,在日出后和日落前 3 h 之间日光色温的变化幅度较小,基本稳定地保持在 4 300~5 300 K 之间;而日光亮度、水平照度和垂直照度的变化比较规律,基本符合太阳的运行轨迹,在一天中先上升后下降,其最大值出现在正午前后。同时,实验研究表明日光光源与典型日光(CIE 标准照明体 D)的总色差与两者的色温差之间存在显著的正比例关系,比例系数约为 0.01,其函数关系式为 $\Delta E = 1.0 \times 10^{-2} \times \Delta K$ ($3\ 500 < K < 7\ 500$),即日光色温与典型日光的色温每相差 100 K,对应的总色差 ΔE 约为 1(大约相当于 5 倍的视觉色差识别阈值)。另外,通过在 Lab 颜色空间里的差值比较,当日光色温小于典型日光 D₆₅ 的相关色温 6 504 K 时,色度参数 Δa^* 和 Δb^* 的值为正,光色偏红和偏黄;当日光色温大于典型日光 D₆₅ 的相关色温 6 504 K 时,色度参数 Δa^* 和 Δb^* 的值为负,光色偏绿和偏蓝;这与光源色温的定义和特点是符合的。

参考文献:

- [1] Hernández-Andrés J, Romero J, Nieves J L, et al. Color and spectral analysis of daylight in southern Europe[J]. JOSA A, 2001, 18(6): 1325-1335.
- [2] 赵晓艳, 龚敏, 何捷, 等. 成都地区天空光光谱的测量与分析[J]. 光散射学报, 2007, 19(2): 202-205.
Zhao X Y, Gong M, He J, et al. The measurement and analysis of sky-light spectra in Chengdu [J]. The Journal of Light Scattering, 2007, 19(2): 202-205.
- [3] 曹婷婷, 罗时荣, 赵晓艳, 等. 太阳直射光谱和天空光谱的测量与分析[J]. 物理学报, 2007, 56(9): 5554-5557.
Cao T T, Luo S R, Zhao X Y, et al. Measurement and analysis of direct sunlight and skylight spectra [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(9): 5554-5557.
- [4] Myers D R. Direct beam and hemispherical terrestrial solar spectral distributions derived from broadband hourly solar radiation data [J]. Solar Energy, 2012, 86(9): 2771-2782.
- [5] Minemoto T, Nakada Y, Takahashi H, et al. Uniqueness verification of solar spectrum index of average photon energy for evaluating outdoor performance of photovoltaic modules [J]. Solar Energy, 2009, 83(8): 1294-1299.
- [6] Kambezidis H D. The solar resource [J]. Comprehensive Renewable Energy, 2012, 3: 27-84.
- [7] Chance K, Kurucz R L. An improved high-resolution solar reference spectrum for earth's atmosphere measurements in the ultraviolet, visible, and near

- infrared [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(9):1289-1295.
- [8] Eltbaakh Y A, Ruslan M H, Alghoul M A, et al. Measurement of total and spectral solar irradiance: Overview of existing research [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(3):1403-1426.
- [9] 李兴国,田敬. 电视照明[M]. 北京:中国广播电视出版社,1997.
- [10] 郑志雄. 日光和天光在部分云彩之下的综合色温[J]. *感光材料*, 1984(6):33.
Zheng Z X. Color temperature of sunlight and daylight under cloud [J]. *Sensitive Material*, 1984, (6):33
- [11] 喻柏林,荆其诚. 光源的色温和 CIE 标准光源[J]. *国外计量*, 1977(1):41-49.
Yu B L, Jing Q C. Light source color temperature and CIE standard illuminant [J]. *Foreign metric*, 1977, (1):41-49.
- [12] Xu H, Luo M R, Rigg B. Evaluation of daylight simulators. Part 1: Colorimetric and spectral variations [J]. *Coloration Technology*, 2003, 119(2):56-69.
- [13] Yu B, Lee Y K. Difference in opalescence of restorative materials by the illuminant [J]. *Dental Materials*, 2009, 25(8):1014-1021.
- [14] 杨春宇,梁树英,张青文. 城市色彩的观测方法与影响因素研究[J]. *灯与照明*, 2011, 35(4):1-5.
Yang C Y, Liang S Y, Zhang Q W. The research of observation methods and influencing factors of urban color [J]. *Light & Lighting*, 2011, 35(4):1-5.
- [15] 杨春宇,梁树英,张青文. 观测条件对城市建筑色彩测量的影响实验研究[J]. *灯与照明*, 2012, 36(3):1-5.
Yang C Y, Liang S Y, Zhang Q W. An experimental research on influence about observation condition for measure of city architectural color [J]. *Light & Lighting*, 2012, 36(3):1-5.
- [16] Nayatani Y, Wyszecki G. Color of daylight from north sky [J]. *JOSA*, 1963, 53(5):626-629.
- [17] Chambeilin G J, Lawrence A, Belbin A A. Observations on the related colour temperature of north daylight in Southern England [J]. *Light and Lighting*, 1963, (3):70.
- [18] Judd D B, Macadam D L, Wyszecki G, et al. Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature [J]. *JOSA*, 1964, 54(8):1031-1040.
- [19] 何国兴. 颜色科学[M]. 上海:东华大学出版社,2004.
- [20] 陈永敢. 基于颜色科学的城市建筑色彩定量方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [21] [日]中岛龙兴,近田玲子,面出薰. 照明设计入门[M]. 马俊. 译. 北京:中国建筑工业出版社,2005.

(编辑 王秀玲)