

# 建筑物色彩在城市空间中的衰变规律

杨春宇<sup>1,2</sup>, 梁树英<sup>1,2</sup>, 张青文<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 分析了空间颜色的衰变理论, 包括大气衰变的朗伯定律、粒子散射原理等, 并在不同大气能见度、不同观测距离条件下对建筑物色彩的衰变规律进行了实验研究. 结果表明: 建筑物色彩在城市空间中的衰变符合朗伯定律, 亮度和饱和度随着观测距离的增加呈指数规律衰变, 并与大气衰变系数有着直接关系, 而色相基本保持不变.

**关键词:** 建筑物色彩; 空间颜色衰变; 朗伯定律; 观测距离  
**中图分类号:** TU113.1 **文献标志码:** A

## Decay Law of Architectural Color in Urban Space

YANG Chunyu<sup>1,2</sup>, LIANG Shuying<sup>1,2</sup>, ZHANG Qingwen<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** This paper presents an analysis of the theory of spatial color decay including Lambert-Beer law of atmospheric decay theory, particle scattering theory and so on. By selecting different atmospheric visibilities and various observation distances, an experimental research is conducted on architectural color decay law. The results of research indicate that architectural color decay meets the Lambert-Beer law, brightness and saturation decay with the increasing distance of observation in accordance with an exponential law and the decay are directly related to atmospheric decay coefficient, while color hue basically remains unchanged.

**Key words:** architectural color; spatial color decay; Lambert-Beer law; observation distance

快, 出现了大量新建筑, 旧建筑的外立面也在进行色彩整治和更新, 这对原有的城市环境和整体色彩都产生了重大影响<sup>[1-3]</sup>. 国内越来越多的城市开始意识到建筑物色彩的重要性, 并逐步开展了相关的研究和设计工作<sup>[4-6]</sup>. 但是, 长期以来建筑物色彩设计多是从历史、文脉、习俗和审美等方面进行定性研究, 忽视了科学的定量研究, 从而使建筑师对建筑物色彩在实际空间中的变化情况不甚了解, 无法准确把握建筑物色彩的设计, 导致设计色彩与实际建成色彩出现较大的偏差. 建筑物色彩是在城市空间中呈现出来的, 必然会受到大气散射、观测距离、日光光谱、受光条件和外饰面材料光反射特性等因素的影响. 因此, 研究建筑物色彩在城市空间中的衰变规律是一项重要的基础理论研究. 在大气衰变方面, 国内外学者进行了一系列的研究工作. 杨春宇等<sup>[7]</sup>研究了大气对光散射和吸收的影响; 李炳华等<sup>[8]</sup>研究了大气吸收系数, 还得出中国各地区大气吸收系数的推荐值; 日本学者<sup>[9]</sup>探讨了色度测量时大气衰变系数和光波长的关系; Henry 等<sup>[10]</sup>研究了大气散射对物体颜色的影响; Narasimhan 等<sup>[11]</sup>分析了不同天气条件下的大气散射情况. 目前, 针对大气衰变本身的研究较多, 但还缺乏对大气散射与建筑物色彩衰变之间关系的深入研究.

本文分析了空间颜色的衰变理论, 包括大气衰变的朗伯定律、粒子散射原理等, 并分别在不同大气能见度和观察距离条件下, 测量和分析建筑物外饰面材料色彩样品的色度值, 研究城市空间中建筑物色彩的衰变规律.

## 1 空间颜色衰变理论

吸收和散射是大气对光辐射的主要衰变机理. 吸收是指光辐射的能量转变为热能等其他形式的能

建筑物色彩是组成城市环境的重要因子之一, 对城市环境有着十分明显的影响和作用. 近年来, 随着我国城市建设的迅猛发展和城市改造速度的加

量,散射是指光辐射能量偏离原来的传播方向并在空间重新分配.如果单色光辐射的强度为  $I$ ,其通过的大气厚度为  $dl$ ,通过大气后的强度为  $I'$ ,在不考虑非线性效应的情况下,光辐射强度的变化量  $dI$  与  $I$  及  $dl$  存在正比关系,也就是  $dI/I = (I' - I)/I = -\sigma dl$ . 通过积分可以得到大气透过率

$$T = I/I_0 = \exp\left(\int_0^L \sigma dl\right) = \exp(-\sigma L) \quad (1)$$

式中:  $T$  为传输距离  $L$  上的大气透过率,%;  $I_0$  和  $I$  分别为通过传输距离  $L$  前、后的光强;  $\sigma$  为大气衰变系数. 这就是朗伯定律,指出了光辐射在大气中传播时其光强会随着传输距离的改变呈指数衰变的规律<sup>[12-13]</sup>.

在可见光这个波段上,大气对光辐射的主要衰变机理是散射. 根据大气光学理论,不同的散射粒子,其粒径与可见光波长有不同的线度比例,对应的散射理论也不相同. 当满足  $2\pi r/\lambda > 0.1 \sim 0.3$  时(其中  $r$  为散射粒子的半径,  $\lambda$  为可见光波长),是米氏散射;当满足  $2\pi r/\lambda \ll 1$  时,即是瑞利散射<sup>[14]</sup>.

物体颜色必须在光源的照明下进行观测,因此物体颜色的衰变并不完全等同于光辐射的衰变. 大多数情况下,城市空间中建筑物色彩观测的光源就是自然光. 自然空间中,从物体反射来的可见光,由于大气散射作用而衰变,加上日光本身受到的大气散射作用,从而使物体的外表色彩随着观测距离的增加而改变(见图 1)<sup>[10,15-16]</sup>. 因此,城市空间中建筑物色彩的衰变是物体颜色自身衰变和日光散射共同作用下的结果.

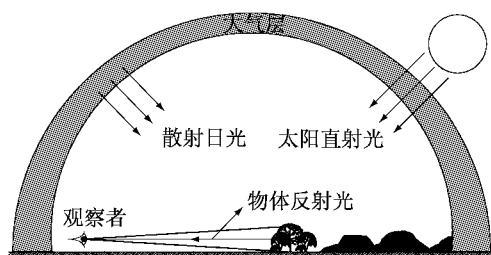


图 1 颜色大气衰变原理示意图

Fig.1 Color atmosphere decay schematic

研究城市空间中建筑物色彩的衰变规律,应该分析其满足的散射性质. 大气衰变包括大气气体分子衰变和气溶胶衰变,根据相关理论,在大气水平均匀条件下,研究建筑物色彩的衰变只需要考虑气溶胶的衰变. 因此,式(1)可改写为

$$T_\lambda = \exp(-\sigma_{\text{al}} L) \quad (2)$$

因为大气衰变系数是波长倒数的函数,可写成如下

形式:

$$\sigma_{\text{al}} = A\lambda^{-q} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{\text{al}}$  为只考虑气溶胶衰变时的大气衰变系数,  $q$  为与波长和能见度密切相关的常数.

由气象上对能见度  $V(\text{km})$  的定义,大气衰变系数

$$\sigma_{\text{al}} = (3.91/V)(\lambda/0.55)^{-q} \quad (4)$$

对式(3)两边取对数可得  $\ln \sigma_{\text{al}} = \ln A - q \ln \lambda$ , 显然  $-q$  是  $\ln \sigma_{\text{al}} \sim \ln \lambda$  的直线斜率,其值可以通过实验求得. 对于可见光,  $\lambda/0.55 \approx 1$ , 式(4)可以简化为  $\sigma_{\text{al}} = 3.91/V$ <sup>[12,17]</sup>.

气溶胶由尘埃、烟雾、霾等粒子组成,不同尺度范围的气溶胶粒子具有不同的散射性质. 根据尺度参数  $\alpha (\alpha = 2\pi r/\lambda)$  的大小,将气溶胶粒子划分为三种类型:小粒径粒子 ( $\alpha \leq 0.3$ )、中等粒径粒子 ( $10.0 > \alpha > 0.3$ )、大粒径粒子 ( $\alpha \geq 10.0$ )<sup>[18]</sup>. 大部分气溶胶粒子的粒径都在  $0.001 \sim 4.000 \mu\text{m}$  之间,相较于可见光的波长,属于中等粒径粒子,其散射行为符合米氏散射理论. 但是,随着气溶胶粒子粒径的持续减小,瑞利散射便会逐渐取代米氏散射,当散射粒子的尺度参数  $\alpha \leq 0.3$  时,就必须要考虑瑞利散射的影响.

根据目前的研究<sup>[9,16,19]</sup>,大气对建筑物亮度  $B$  的衰变公式可以表述为

$$B = B_0 \exp(-\sigma R) + B_H [1 - \exp(-\sigma R)] \quad (5)$$

式中:  $B_0$  为近距离观测时建筑物的亮度,  $B_H$  为建筑物方向的空中亮度,  $R$  为观测距离.  $B_0 \exp(-\sigma R)$  是建筑物反射光的亮度,  $B_H [1 - \exp(-\sigma R)]$  是散射日光的亮度. 随着观测距离增加,建筑物反射光的亮度减小,而散射日光的亮度加大,建筑物的亮度就会逐渐趋于散射日光的亮度;当观测距离大于气象上的能见度时,建筑物的亮度就等于散射日光的亮度.

## 2 建筑物色彩衰变规律实验

### 2.1 实验原理

外观饰面材料色彩对建筑物色彩起着决定性作用. 根据对目前重庆市主城区建筑物外饰面材料使用情况的调查统计,以及对材料本身光反射特性对实验结果影响程度的考虑,选择了亚光型外墙面砖和外墙涂料作为材料样品,并在不同大气能见度和观测距离条件下,对材料样品进行色度测量,结合前文的空间颜色衰变理论分析,研究建筑物色彩各参量的衰变规律.

根据中国气候分区图和全国年平均总照度分

布图,重庆市年总日辐射量、年日照时数及年日照百分率属于 V 类光气候分区,阴天和雾天较多,中等大气能见度和低大气能见度天气出现的频率较高。本文选择“重庆市主城区”作为研究的样本区域,一方面是根据调研,重庆市主城区建筑物饰面材料与全国各城市建筑物饰面材料使用情况大致相同,其光反射特性一致;另一方面是可以较方便地选择到符合国际规定的典型全阴天空观测条件。

## 2.2 实验过程

分别选择中等大气能见度和低大气能见度天气,在中午时间(控制在 10:30~14:30 之间),观测距离 1~100 m 范围内,每间隔 5 m 对被测材料样品直射面使用 PR650 亮度色度计进行测量,并记录下相关的亮度、色度值等参数。

清晨和傍晚日光色温变化较大,会影响建筑物色彩的测量,因此建筑物色彩的观测应尽量选择日出后三小时与日落前三小时之间,本文控制在 10:30~14:30 之间。按照《城市设计学》和《城市色

彩景观规划设计》中对建筑物的定义,结合建筑物色彩的观测,既要记录建筑物饰面材料色彩信息,又要把握建筑物色彩的整体形象以及与环境的关系,“强场”(30 m 以内)和“均衡场”(30~300 m)是较为适当的观测距离<sup>[1,3,19]</sup>,本文选择了 1~100 m 的范围。测量间隔的选择也很重要,间隔过大不能获得足够的分析数据,间隔过小又会导致数据繁复和测量不能在规定时间内完成,经过反复实验,本文选择间隔 5 m 进行测量。

将测量的色度参数(CIE Yxy)使用 AIM\_XLA (EXCEL 加载宏)进行色度计算和转换,得到材料样品的亮度、饱和度和色相颜色参数,并用 Origin 8.0 软件对数据进行绘图和分析。

## 2.3 结果与数据

根据对重庆市主城区建筑物外饰面材料使用情况的调查统计,本文以亚光红色外墙面砖和浅黄色外墙涂料为例,探讨建筑物色彩的衰变规律。具体色彩参数如表 1 所示。

表 1 不同大气能见度和观测距离条件下色样的颜色参数

Tab.1 Color parameters of the samples with different atmospheric visibilities at different distances

测量 距离/m	中等大气能见度						低大气能见度		
	亚光红色外墙面砖			浅黄色外墙涂料			亚光红色外墙面砖		
	B/%	C/%	H/(°)	B/%	C/%	H/(°)	B/%	C/%	H/(°)
1	41.821	34.887	44.023	94.336	35.167	99.165	44.301	35.014	43.490
5	42.365	34.675	46.180	93.687	34.501	100.355	47.513	30.501	49.165
10	46.352	32.005	47.215	92.348	31.215	95.156	59.456	29.814	41.035
15	46.964	30.064	40.621	92.365	29.835	98.168	58.146	23.548	51.036
20	48.435	31.263	39.154	90.468	28.455	99.156	63.458	26.151	50.314
25	50.336	26.462	42.650	90.843	26.870	99.165	69.746	20.113	41.351
30	54.031	24.985	43.561	88.364	25.374	103.025	69.116	15.216	33.146
35	53.103	24.671	41.168	89.365	23.662	95.316	71.542	17.548	44.657
40	55.367	23.142	51.034	88.576	22.830	98.156	73.221	16.941	48.105
45	54.976	22.946	50.104	88.926	21.073	97.165	74.554	11.842	52.013
50	56.468	22.463	42.127	87.782	19.886	99.163	80.254	13.220	38.156
55	58.531	20.631	41.154	87.687	17.767	93.054	78.265	11.546	41.680
60	59.420	18.036	46.310	87.512	17.210	99.154	77.533	17.512	45.156
65	62.341	18.349	50.134	86.953	16.713	97.268	81.773	10.003	44.118
70	62.301	17.652	49.347	87.307	15.772	101.260	82.234	9.101	51.036
75	62.051	16.946	39.405	85.879	14.884	100.356	81.597	9.504	41.251
80	62.879	14.152	44.135	86.214	14.546	99.021	85.421	7.034	44.391
85	66.235	15.721	43.072	84.679	13.255	98.265	83.368	6.044	37.168
90	65.012	14.136	51.350	85.334	12.209	101.155	85.222	6.154	44.164
95	65.303	13.001	52.010	85.311	11.605	99.156	86.169	4.517	50.221
100	66.896	11.946	38.146	84.879	11.140	105.354	86.237	3.154	39.156

注: C, H 分别为亮度、饱和度、色相。

材料的光反射性质分为漫反射、定向反射(规则反射或镜面反射)和混合反射<sup>[20]</sup>。当同类颜色材料其光反射性质相同时,其颜色在空间中的衰变规律也是相同的。根据对上海、西安、广州、天津、杭州、重庆、呼和浩特、贵阳、南阳和邯郸等二十多个大中型

城市建筑物外饰面材料使用情况的调查统计,光混合反射性质的亚光型面砖和光漫反射性质的外墙涂料占绝大多数,定向反射性质的饰面材料所占百分比不大。定向反射性质材料(如玻璃、抛光面金属等)在受直射光照或视看角度与光入射角度相同时,已

无法分辨其颜色,因此对这类高反射亮度的定向反射性质材料还需要做专门的研究。

根据表 1 的数据可以看出,中等大气能见度和低大气能见度条件下,测试样品的色相基本保持不变。亚光红色外墙面砖在中等大气能见度条件下和低大气能见度条件下的色相标准偏差分别为 4.401 和 5.178,浅黄色外墙涂料在中等大气能见度条件下的色相标准偏差为 2.666,相对于 360°色相盘来说,其变化仅占约 1%,基本可以忽略其变化。根据表 1 的数据还可以看出,试样的亮度和饱和度遵循一定规律进行变化。根据空间颜色衰变理论,颜色各参数的变化应该符合朗伯定律。因此,假定亮度和饱和度的变化是呈指数规律衰变的,用 Origin8.0 软件对测试数据进行拟合,得到亮度和饱和度衰变的规律如图 2 和 3 所示。

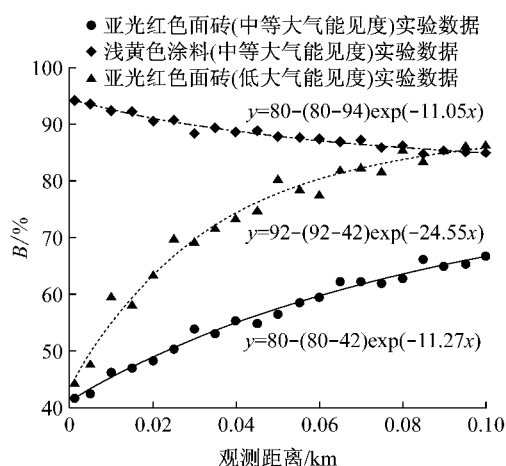


图 2 亮度衰变曲线拟合图

Fig.2 Curve fitting diagram of brightness decay

## 2.4 衰变规律分析

### 2.4.1 亮度衰变规律

根据式(5),建筑物亮度衰变函数关系式可改写为

$$B = B_H - (B_H - B_0)\exp(-\sigma R) \quad (6)$$

将式(6)作为拟合关系式,对亚光红色外墙面砖和浅黄色外墙涂料的亮度实验数据进行分析(见图 2)。在中等大气能见度条件下,得到亚光红色外墙面砖(近距离观测时  $B, C, H$  值为 41.821, 34.887, 44.023)亮度衰变的函数关系式为

$$y = 80 - (80 - 42)\exp(-11.27x) \quad (7)$$

中等大气能见度条件下,浅黄色外墙涂料(近距离观测时  $B, C, H$  值为 94.336, 35.167, 99.165)亮度衰变的函数关系式为

$$y = 80 - (80 - 94)\exp(-11.05x) \quad (8)$$

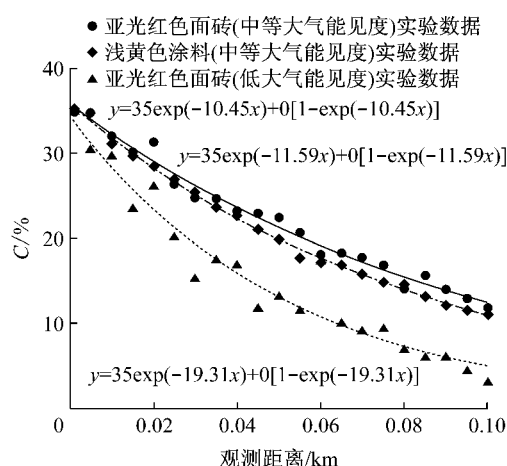


图 3 饱和度衰变曲线拟合图

Fig.3 Curve fitting diagram of saturation decay

低大气能见度条件下,亚光红色外墙面砖亮度衰变的函数关系式为

$$y = 92 - (92 - 42)\exp(-24.55x) \quad (9)$$

式(7)~(9)的样本决定系数  $R^2$  分别为 0.985, 0.961, 0.977, 均大于 0.9, 这说明三个公式的回归效果均较好。显然,式(7)中 42 就是近距离观测时亚光红色外墙面的亮度值  $B_0$ , 80 即为观测方向的空中亮度  $B_H$ , 11.27 则正是此观测条件时的大气衰变系数  $\sigma$ 。式(8)中 94 就是近距离观测时浅黄色外墙涂料的亮度  $B_0$ , 80 即为观测方向的空中亮度  $B_H$ , 11.05 则正是此观测条件时的大气衰变系数  $\sigma$ 。根据前文所述公式  $\sigma_{al} = 3.91/V$ , 中等大气能见度条件下大气衰变系数为 10 左右, 对应的能见度约为 0.39 km, 代表的是中等程度的雾, 这符合实际观测时的气象条件。

### 2.4.2 饱和度衰变规律

对于建筑物色彩的饱和度衰变而言,根据空间颜色衰变理论,建筑物反射光谱中主波长成分会由于大气散射作用而减少,加上散射日光的影响,使建筑物色彩的饱和度产生衰变,其衰变规律也应该是符合朗伯定律的。根据建筑物亮度的衰变公式(5),其饱和度  $C$  的衰变公式可以拟定为

$$C = C_0\exp(-\sigma R) + C_H[1 - \exp(-\sigma R)] \quad (10)$$

与亮度衰变规律的分析方法相同,将式(10)作为拟合关系式,对亚光红色外墙面砖和浅黄色外墙涂料的饱和度实验数据进行分析(见图 3)。中等大气能见度条件下,亚光红色外墙面砖饱和度衰变的函数关系式为

$$y = 35\exp(-10.45x) + 0[1 - \exp(-10.45x)] \quad (11)$$

中等大气能见度条件下,浅黄色外墙涂料饱和度衰变的函数关系式为

$$y = 35\exp(-11.59x) + 0[1 - \exp(-11.59x)] \quad (12)$$

低大气能见度条件下,亚光红色外墙面砖饱和度衰变的函数关系式为

$$y = 35\exp(-19.31x) + 0[1 - \exp(-19.31x)] \quad (13)$$

式(11)~(13)的样本决定系数  $R^2$  分别为 0.984, 0.991, 0.941, 均大于 0.9, 这说明三个公式的回归效果均较好。显然, 式(11)中 35 就是近距离观测时亚光红色外墙面砖的饱和度值  $C_0$ , 右边第二项的 0 即为观测方向的空中饱和度  $C_H$ , 而 10.45 则正是此观测条件时的大气衰变系数  $\sigma$ 。式(12)中 35 就是近距离观测时浅黄色外墙涂料的饱和度值  $C_0$ , 右边第二项的 0 即为观测方向的空中饱和度  $C_H$ , 而 11.59 则正是此观测条件时的大气衰变系数  $\sigma$ 。

观测方向的空中饱和度  $C_H$  为 0 是很容易理解的。根据空间颜色衰变理论, 在大气水平均匀条件下, 建筑物空间颜色的衰变只需要考虑气溶胶衰变, 而大部分的气溶胶都符合米氏散射理论。米氏散射与可见光波长的关系远不如瑞利散射强烈, 其散射程度主要由粒子的尺寸、密度分布和折射率来决定<sup>[12]</sup>, 对不同波长的可见光米氏散射的效果几乎相同。因此, 日光经过米氏散射, 其亮度会降低, 但基本保持了原有的相对光谱功率分布, 其色坐标的变化量也很小。同时大气在气溶胶衰变时呈现为灰白色, 其饱和度非常低, 对建筑物饱和度的衰变影响很小, 可以忽略其影响。根据以上的分析, 可以将饱和度的衰变公式简化为

$$C = C_0 \exp(-\sigma R) \quad (14)$$

采用同样的分析方法, 对低大气能见度条件下的亚光红色外墙面砖的亮度衰变公式(9)和饱和度衰变公式(13)进行比对分析, 再次验证了建筑物色彩的亮度和饱和度随观测距离变化呈指数衰变的规律, 而且这种衰变与大气衰变系数有着直接的关系。根据前文所述公式  $\sigma_{\text{a}} = 3.91/V$ , 从式(9)和(13)中可以看出, 低大气能见度条件下大气衰变系数在 20 左右, 对应的能见度约为 0.19 km, 代表的是浓雾, 这符合实际观测时的气象条件。

#### 2.4.3 色相衰变规律

虽然根据表 1 的数据可以认为在本实验条件下试样的色相变化是可以忽略的, 但在实际情况下, 建筑物颜色的色相必然会受到大气衰变的影响。一般情况下, 从建筑物反射出的光受到气溶胶的米氏散射, 其相对光谱功率分布基本保持不变, 而日光也保

持了其特性, 所以建筑物的色相基本不发生变化。但是, 随着气溶胶粒子粒径的持续减小, 瑞利散射便会逐渐取代米氏散射, 其散射系数的经验公式为

$$\sigma_{\text{m}} = 0.827NS^3/\lambda^4 \quad (15)$$

式中:  $\sigma_{\text{m}}$  为瑞利散射系数,  $N$  为单位体积中的分子数,  $S$  为分子的散射截面面积。从式(15)可以看出, 光波长的四次方与瑞利散射的强度成反比, 即波长越短散射越强, 而波长越长散射越弱。可见光比红外光散射强烈, 可见光中又以蓝光散射最为强烈<sup>[12]</sup>, 因此日光在气溶胶瑞利散射时会偏向蓝色。这种偏蓝的散射日光会影响建筑物的色相, 使其向蓝色部分偏移, 影响程度由各自的饱和度决定, 即散射日光中蓝光和建筑物反射光中主波长所占的比例。当观测距离越远而建筑物自身的饱和度越低时, 其偏蓝的程度就越大; 当观测距离大于气象上的能见度时, 建筑物的色相就与散射日光的色相几乎相等。但需要注意的是, 越好的大气能见度表示了越小的大气衰变系数, 也意味着较小的建筑物色彩衰变, 当大气能见度足够好时, 就可以忽略城市建筑物色彩各参量的变化。

### 3 结论

城市空间中建筑物色彩的衰变是符合朗伯定律的, 亮度和饱和度随着观测距离的增加呈指数规律衰变, 并与大气衰变系数有着直接关系。亮度衰变的函数关系式为  $B = B_H - (B_H - B_0)\exp(-\sigma R)$ , 饱和度衰变的函数关系式为  $C = C_0 \exp(-\sigma R)$ , 一般情况下建筑物色彩的色相基本保持不变。从上述研究可以看出, 亮度的衰变并不意味着“降低”, 其主要由建筑物本身亮度和散射日光亮度的大小决定。当建筑物本身亮度大于散射日光的空中亮度时, “衰变”的结果就是减小, 如本文中浅黄色外墙涂料的亮度衰变; 当建筑物本身亮度小于散射日光的空中亮度时, “衰变”的结果就是增大, 如本文中亚光红色外墙面砖的亮度衰变。总体而言, 随着观测距离的增加, 建筑物的亮度都会逐渐接近大气的空中亮度。从本文的研究还可以看出, 饱和度呈现指数规律下降, 且随着观测距离的增加趋于大气的空中饱和度零。另外, 当气溶胶散射粒子的尺度参数  $\alpha \leq 0.3$  时, 米氏散射便会退化为瑞利散射, 散射日光中的蓝光成分会增加, 建筑物的色相便会向蓝光方向发生一定的偏移, 其偏移程度与观测距离、散射日光中蓝光的比例和建筑物自身的饱和度直接相关。

## 参考文献:

- [1] 尹思瑾.城市色彩景观规划设计[M].南京:东南大学出版社,2004.  
YIN Sijin. Planning and design of the city's colorscape[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2004.
- [2] 杨春宇,陈永敢,张青文.建筑饰面材料色度反射性能测量及方法[J].重庆大学学报,2009,32(7):834.  
YANG Chunyu, CHEN Yonggan, ZHANG Qingwen. Measurement methodology of color reflection performance of building facing materials [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(7): 834.
- [3] 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.  
YANG Chunyu, LIANG Shuying, ZHANG Qingwen. The research of observation methods and influencing factors of urban color [J]. Light & Lighting, 2011, 35(4): 1.
- [4] 赵春水,吴静子,吴琛,等.城市色彩规划方法研究——以天津城市色彩规划为例[J].城市规划,2009,33:36.  
ZHAO Chunshui, WU Jingzi, WU Chen, et al. Urban color planning method: a case study of urban color planning of tianjin [J]. City Planning Review, 2009, 33: 36.
- [5] 王占柱.对城市色彩规划的思考[J].同济大学学报:社会科学版,2010,21(4):31.  
WANG Zhanzhu. Reflections on the urban colors planning[J]. Journal of Tongji University: Social Science Section, 2010, 21(4): 31.
- [6] 郭红雨,蔡云楠.传统城市色彩在现代建筑与环境中的运用[J].建筑学报,2011(7):45.  
GUO Hongyu, CAI Yunnan. Ancient flavor with modern elements: application of traditional urban color to modern architecture and surroundings[J]. Architectural Journal, 2011(7): 45.
- [7] 杨春宇,张青文.建筑材料反射光亮度实验与照明计算方法[J].同济大学学报:自然科学版,2009,37(8):1019.  
YANG Chunyu, ZHANG Qingwen. Construction materials reflective brightness experiment and lighting calculation method [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(8): 1019.
- [8] 李炳华,马名东,李战增,等.大气吸收系数的研究与应用[J].建筑电气,2006(1):22.  
LI Binghua, MA Mingdong, LI Zhanzeng, et al. The application and research of atmosphere absorbing coefficient [J]. Building Electricity, 2006(1): 22.
- [9] 日本照明学会.照明手册[M].李农,杨燕,译.北京:科学出版社,2005.  
Japan Illuminating Engineering Society. Lighting handbook [M]. Translated by LI Nong, YANG Yan. Beijing: Science Press, 2005.
- [10] Henry R C, Mahadev S, Urquijo S, et al. Color perception through atmospheric haze [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2000, 17(5): 831.
- [11] Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather [C]//Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE, 2000: 598-605.
- [12] 姚建铨,于意仲.光电子技术[M].北京:高等教育出版社,2006.  
YAO Jianquan, YU Yizhong. Optoelectronic technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [13] Magatti D, Ferri F, Ragazzi P, et al. Colors of transparent submicron suspensions on approaching the Rayleigh regime[J]. Applied Optics, 2012, 51(12): 2183.
- [14] 胡云.266 nm 激光大气散射特性研究[J].中国科技信息,2007(11):296.  
HU Yun. Research on 266nm laser atmospheric scattering property [J]. China Science and Technology Information, 2007(11): 296.
- [15] McCartney E J. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles[M]. New York: John Wiley and Sons, 1976.
- [16] Romero J, Luzón-González R, Nieves J L, et al. Color changes in objects in natural scenes as a function of observation distance and weather conditions[J]. Applied Optics, 2011, 50(28): 112.
- [17] 宋正方.应用大气光学基础[M].北京:气象出版社,1990.  
SONG Zhengfang. Foundation of applied atmospheric optics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990.
- [18] 王勇俞,梅志斌,邹方勇,等.基于粒子受激散射的烟与气溶胶粒子属性识别[J].消防科学与技术,2007(1):26.  
WANG Yongyu, MEI Zhibin, ZOU Fangyong, et al. Attribute identification of the smoke based on particle scatterance from the aerosol particle [J]. Fire Science and Technology, 2007(1): 26.
- [19] 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.  
CHEN Yonggan. Study on the quantitative method of urban building color based on color science [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [20] 柳孝图.建筑物理[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
LIU Xiaotu. Building physics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.