



中国古典园林彩画微环境监测及色彩衰变规律研究

刘刚, 雒琛, 党睿, 王立雄, 刘哲, 原野

(天津大学建筑学院, 天津市建筑物理环境与生态技术重点实验室, 天津 300072)

摘要:为得到微环境参数对古建园林彩画色彩衰变量化影响规律,以颐和园为样本,选取颐和园典型彩画作为研究对象,并开发微环境参数监测系统,对彩画所处微环境信息进行全年实时监测,得到温湿度、风速及照度数据。同时,选取颐和园典型彩画进行周期性测试,提取彩画色坐标及亮度参数,并根据所采集的色彩信息计算出色彩的主波长及兴奋纯度,并拟合主波长、兴奋纯度、亮度随时间的衰变曲线。通过将微环境测试数据与色彩衰变曲线进行对比分析,发现温度、湿度、风速对彩画色彩影响较小,光照是造成彩画色彩衰变的主要因素,而且光照对彩画色相、亮度、兴奋纯度3个参数的影响程度不同,不同颜色受光照影响变化程度也有较大差异。

关键词:彩画;色彩衰变;微环境;色坐标;亮度

中图分类号:TU113.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)06-0098-08

Impact of natural light on the traditional architectural color paintings' color decay of Chinese classical garden

Liu Gang, Luo Chen, Dang Rui, Wang Lixiong, Liu Zhe, Yuan Ye

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

Abstract: A micro environment monitoring system has been developed to quantify the impact of micro environmental parameters on color decay of color paintings' at Chinese classical garden. The environment parameters including temperature, humidity, velocity and sunlight in micro environment is a were recorded for the whole year at the Summer Palace. Besides, the color parameters of color painting were recorded periodically. Then fit curve graphs were obtained with dominant wavelength, excitation purity and luminance changed over time. Comparative analysis of micro environmental test data and color decay curve revealed that the temperature, humidity and wind speed has slight impact on the color of color painting, while sunlight is the dominant factor responsible for the color decay of painting. The extents to which the sunlight affect dominant

收稿日期:2015-10-23

基金项目:国家自然科学基金(51308384);天津市自然科学基金(13JCQNJC07600);天津大学北洋学者计划基金(0903061014)。

作者简介:刘刚(1977-),男,博士,副教授,主要从事建筑技术科学研究,(E-mail)lgmike@163.com。

党睿(通信作者),男,博士,(E-mail)dr_tju@163.com。

Received:2015-10-23

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51308384); Natural Science Foundation of Tianjin (No. 13JCQNJC07600); Pei Yang Scholar Plan of Tianjin University (0903061014).

Author brief: Liu Gang (1977-), PhD, associate professor, main research interest: building technology science, (E-mail)lgmike@163.com.

Dang Rui (corresponding author), PhD, (E-mail)dr_tju@163.com.

wavelength, excitation purity and luminance were different, and the impact of sunlight on different colors are different.

Key words: color painting; color decay; micro environment; chromaticity coordinate; luminance

彩画作为园林建筑的特殊组成部分,不仅呈现出优美绚丽的色彩,同时反映着特定历史时代信息,更能体现中华民族深厚的传统文化底蕴。但彩画也是建筑中对环境变化最为敏感的文物类型之一,极易受到侵蚀与破坏。由于彩画大都暴露于室外,受温、湿、风、光等因素影响而出现褪色、开裂、粉化的现象^[1],降低彩画原真性及古文化遗产价值。

学者们基于微环境对各类古代绘画影响问题进行过大量研究工作,敦煌莫高窟作为壁画宝库,是研究的重点对象之一。王亚军等^[2]对莫高窟内的相对湿度进行了监测与分析,发现相对湿度达到70%以上时,文物的病变速率大于相对湿度较低的时候。Zhai等^[3]对利用LED光源进行照明时,照度及色温对观察彩画的影响进行研究,发现照度对观察彩画时舒适度的影响大于色温。而湿度对彩画及文物的影响主要为霉变作用^[4]。温度变化会导致壁画地仗层和颜料层内部应力产生变化,导致壁画开裂^[5]。对于风环境,王旭东等^[6]对莫高窟的风化特征进行了研究,发现莫高窟崖体风化主要为物理风化。博物馆中的书画展品由于对光照的高敏感性,是近年来的另一研究热点。国际照明委员会技术报告^[7]研究表明,光学辐射与展品蜕变有着明晰的关系。Pozzi等^[8]利用拉曼光谱对油画中的红色颜料的成分进行了研究,发现当温度达到70℃时就会对颜料产生破坏。北美照明学会技术报告^[9]提出,光照对材料的损害有积累性,并且不同光敏感度展品可承受的最大光照射量不同。Cuttle^[10]研究了油画受到光化学辐射产生褪色和变色的现象。Sun等^[10]对如何移除壁画表面无用的保护材料而不损害表面本身进行了研究,结果显示,在使用移除不需要的保护材料时,不能用水溶性的材料。党睿等^[11]用低色温高显色性WLED对中国传统书画模型的光照影响实验,得到WLED对书画色相、饱和度、明度的量化影响规律。颐和园作为世界文化遗产,拥有中国最为丰富和系统的园林彩画资源。园中彩画是清晚期彩画风格的代表作,可称作是教科书似的范本,将彩画推向了一个艺术高峰^[1]。对于光照对彩画等文物的影响,马剑等^[1]针对天然光照造成清

代皇家古建筑彩画的褪色、粉化、开裂、脱落等现象,以颐和园彩画为样本,采用太阳辐射模拟系统对实体模型进行实验室天然光照实验,确定天然光照对彩画老化程度的影响。党睿等^[12]针对天然光及人工照明对彩画损害问题,基于现场测量、实验室实验、计算机分析等手段,建立了“颐和园彩画信息数字化保护与应用系统”,为彩画修缮及保护提供信息副本。但莫高窟壁画和中国传统书画在所处物理环境、历史年代、绘画基材颜料等均与古建园林彩画存在较大差异,研究结论并不能直接用于古建彩画。天津大学课题组对于彩画的前期研究主要是基于实验室光照模拟实验,而非采用现场数据实测方法,同时,研究仅针对光照影响,未涉及温度、湿度、风等其他物理环境参数。

为得到物理环境参数对古建园林彩画色彩衰变量化影响规律,以颐和园长廊彩画为研究样本,利用自行开发的微环境监测系统获取彩画所处位置的全年微环境气象数据。通过二位色彩亮度计对彩画进行周期性色彩参数测试,经过数据处理后拟合彩画色彩的主波长、兴奋纯度、亮度随时间变化的曲线^[12],通过曲线分析研究色彩衰变特点。将微环境测试数据与彩画衰变特点进行对比分析,得到物理环境参数对古建园林彩画色彩衰变量化影响规律。建立古建彩画保护数据库,根据得到微环境数据,制定保护措施,避免极端微环境对彩画的影响,并根据彩画色彩衰变规律,指导制定彩画各颜色修复时间及重点修复颜色的方法。

1 技术路线

选取颐和园典型彩画作为研究对象,自行开发微环境监测设备,全天连续监测彩画所处位置的温度、湿度、风速及照度,得到微环境随时间的变化规律。同时,每隔4个月左右对彩画进行测试,提取彩画的色彩信息,并得到主波长、兴奋纯度及亮度随时间的变化规律。对微环境数据及彩画数据进行分析,得到影响彩画色彩衰变的因素以及彩画色彩衰变的规律。

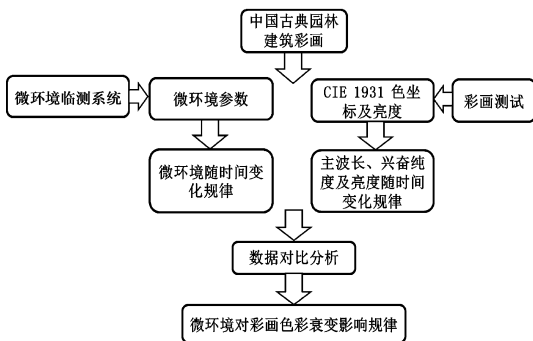


图 1 技术路线

Fig. 1 Technical route

2 实验方案

2.1 实验对象

选取颐和园长廊寄澜亭西侧彩画作为研究对象。长廊位于整个颐和园的中心地带,背靠万寿山,前对昆明湖,物理环境极具代表性。同时,长廊汇集了颐和园彩画的最精华部分,而寄澜亭作为长廊中点,其西侧彩画是尺幅最大、绘制最精美、色彩最丰富的苏式彩画之一,因此,以它作为研究样本。

2.2 测试仪器

1) 微环境监测设备:自行开发能够实时监测温度、湿度、风速、照度等物理环境参数的建筑物理环境多参数监测系统,并已获得国家发明专利(专利号:201410557424.8)。该系统具有精度高、体积小、智能化等特点,完全满足测试要求。

2) 彩画色彩监测设备:CA-2000 二维色彩亮度计,提取整幅彩画色彩的色坐标及亮度。彩画色彩测试均在夜间 D_{65} 标准光源进行,避免环境光对色彩影。

2.3 实验方法

1) 物理环境参数监测。在寄澜亭西侧彩画所处位置安装微环境监测设备,采集频率为每个参量每 1 min 采集 1 组数据,自动连续监测温度、湿度、风速、照度全年信息。所测数据通过无线网络传输到服务器存储。

2) 彩画色彩信息监测。在夜晚没有人工光源干扰的环境下,将 D_{65} 标准光源置于彩画两侧,照亮彩画;然后利用二维色彩亮度计对彩画进行拍照,从照片中提取整幅彩画颜色的色坐标及亮度值。彩画测试约每 6 个月左右进行一次,测试时间分别为:2013 年 11 月 29 日、2014 年 5 月 22 日、2014 年 12 月 2 日、2015 年 6 月 3 日,共进行 4 次。

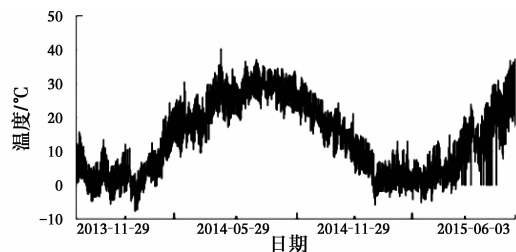
3) 数据处理。选取彩画中的典型颜色测点 4

个。选点的原则为:所选取颜色包含彩画的主要色调;分散选点,以评价物理环境对彩画色彩的整体影响;取样点确定后,每次测试均选择相同的点进行对比研究。获取测点的色坐标 (x, y) 及亮度值 L 后,通过色度学及数学方法将其转换为主波长、兴奋纯度、亮度,并拟合 3 个参数随时间周期性衰变曲线。

3 实验数据

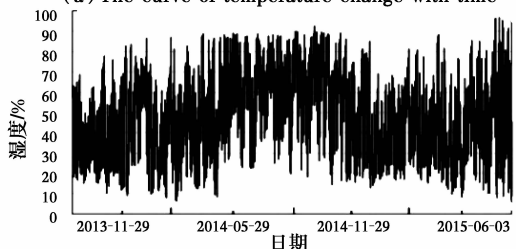
3.1 微环境数据

微环境监测时段为 2013 年 11 月 29 日到 2015 年 6 月 3 日,温度、湿度、风速及照度监测数据随时间变压规律如图 2 所示。



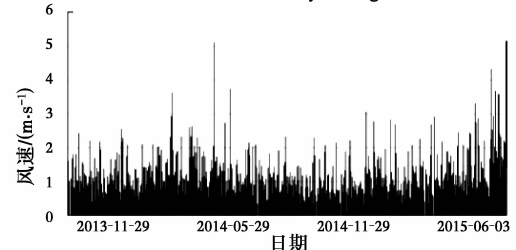
(a) 温度随时间变化曲线图

(a) The curve of temperature change with time



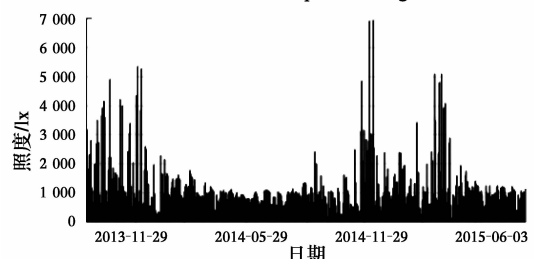
(b) 湿度随时间变化曲线图

(b) The curve of humidity change with time



(c) 风速随时间变化曲线图

(c) The curve of wind speed change with time



(d) 照度随时间变化曲线图

(d) The curve of illuminance change with time

图 2 微环境随时间变化曲线图

Fig. 2 Micro environmental changes with time

3.2 色彩参数

个测点不同周期的 CIE1931 色彩参数见表 1。

1)1931 色坐标及亮度数据。数据彩画样本中 4

表 1 取样点色坐标及亮度

Table 1 Changes of color parameter on specimen

测点	周期 1			周期 2			周期 3			周期 4		
	2013-11-29			2013-11-29—2014-05-22			2014-05-22—2014-12-02			2014-06-03		
	x	y	L/(cd·m ⁻²)	x	y	L/(cd·m ⁻²)	x	y	L/(cd·m ⁻²)	x	y	L/(cd·m ⁻²)
1号点	0.329 2	0.365 7	1.07	0.333 1	0.357 2	1.65	0.335 6	0.348 6	1.78	0.338 9	0.355 9	1.78
2号点	0.363 1	0.393 0	3.03	0.367 6	0.378 5	4.87	0.367 5	0.373 5	5.68	0.362 4	0.367 9	5.76
3号点	0.290 0	0.382 7	5.04	0.296 9	0.385 7	6.26	0.293 2	0.401 6	6.68	0.301 6	0.288 1	6.95
4号点	0.380 5	0.364 2	2.26	0.376 1	0.371 7	2.04	0.375 6	0.379 2	2.29	0.374 9	0.379 6	3.42

2)主波长、兴奋纯度及亮度数据。采用色度学 度进行评价^[15],3 个参数数据见表 2。
和数学方法将(x,y)、L转换为 主波长、兴奋纯度、亮

表 2 取样点兴奋纯度及主波长

Table 2 Dominant wavelength and excitation purity of sampling point

测点	周期 1			周期 2			周期 3			周期 4		
	2013-11-29			2013-11-29—2014-05-22			2014-05-22—2014-12-02			2014-06-03		
	主波 长/nm	兴奋 纯度	亮度/ (cd·m ⁻²)	主波 长/nm	兴奋 纯度	亮度/ (cd·m ⁻²)	主波 长/nm	兴奋 纯度	亮度/ (cd·m ⁻²)	主波 长/nm	兴奋 纯度	亮度/ (cd·m ⁻²)
1号点	553	0.104 1	1.07	559	0.089 8	1.65	565	0.071 5	1.78	566	0.102 8	1.78
2号点	570	0.283 7	3.03	575	0.254 0	4.87	576	0.238 9	5.68	577	0.208 3	5.76
3号点	510	0.126 3	5.04	515	0.114 8	6.26	520	0.142 3	6.68	521	0.115 3	6.95
4号点	583	0.249 7	2.26	579	0.258 9	2.04	577	0.283 5	2.29	576	0.274 0	3.42

3)主波长、兴奋纯度及亮度曲线。根据表 2 数
据,拟合主波长随时间衰变曲线,横坐标为时间,测
试时间分别为:2013 年 11 月 29 日,2014 年 5 月 22

日,2014 年 12 月 2 日,2015 年 6 月 3 日,共进行 4
次,见图 3。

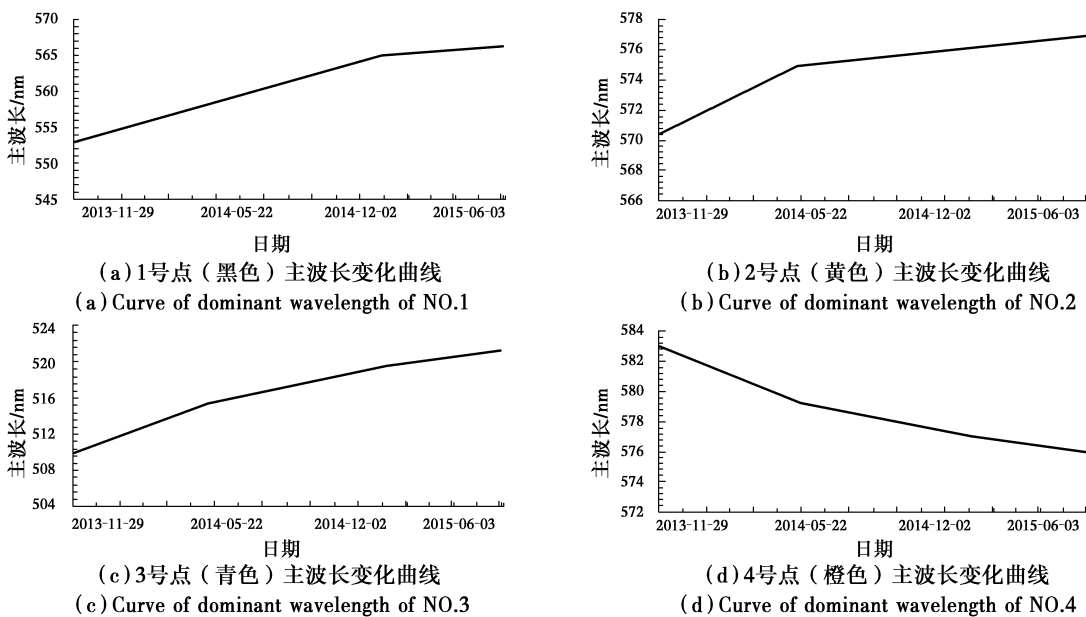


图 3 取样点颜色主波长随时间变化曲线

Fig. 3 Curve of dominant wavelength

根据表 2 数据,拟合兴奋纯度随时间衰变曲线, 见图 4。

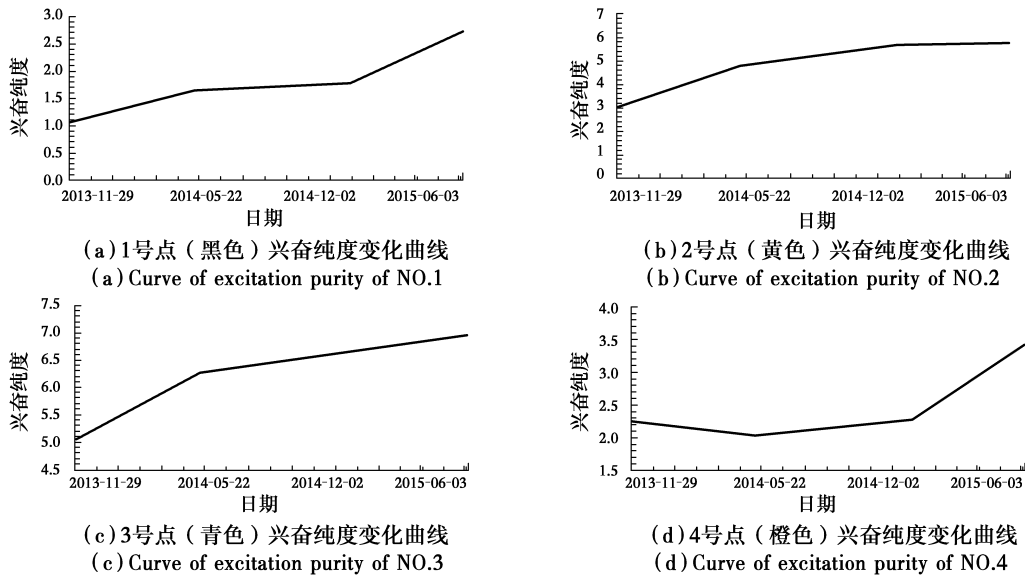


图 4 取样点颜色兴奋纯度随时间变化曲线

Fig. 4 Curve of excitation purity

根据表 2 数据,拟合亮度随时间衰变曲线,横坐标为时间,测试时间分别为:2013 年 11 月 29 日, 2014 年 5 月 22 日,2014 年 12 月 2 日,2015 年 6 月 3 日,共进行 4 次,见图 5。

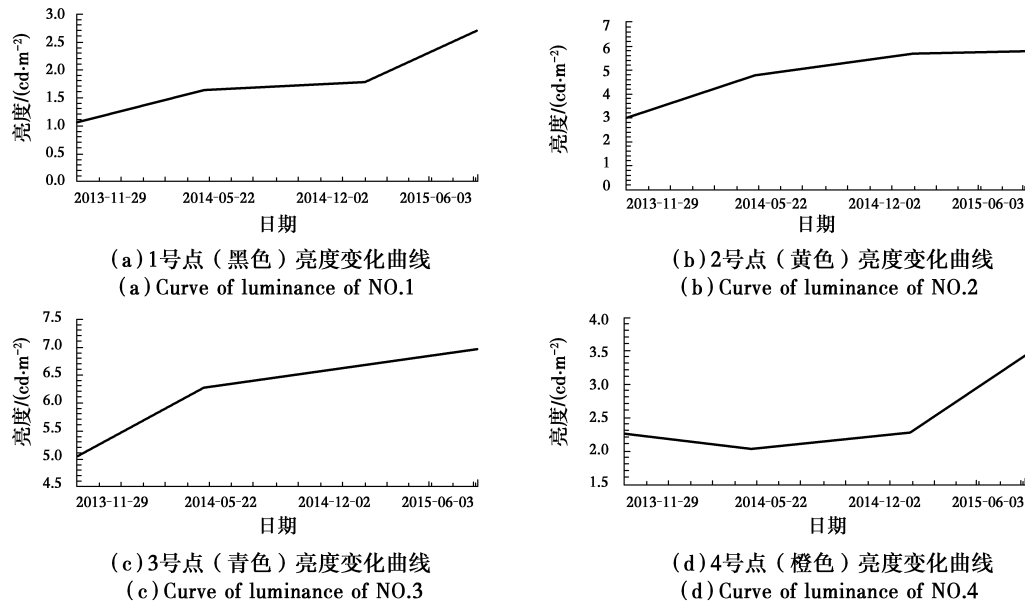


图 5 取样点颜色亮度随时间变化曲线

Fig. 5 Curve of luminance

4 数据分析

4.1 温度影响

由图 2 可知,彩画所处位置没有出现长时间极端高温或极端低温的情况,同时,相关研究表明,当

把温度提高到 50 ℃ 进行老化试验,其对彩画影响的程度较光照而言依然较小^[4-5],而且温度对彩画的影响主要表现在因热作用使地仗层内部温度变化不均匀造成彩画开裂,而非对色彩的影响。因此,温度并不是造成彩画色彩衰变的主要因素。

4.2 湿度影响

由图2可知,彩画所在环境并没有长时间连续处于极端湿度环境中,研究表明,湿度对彩画的不利影响主要为使其发生霉变,霉菌在适宜的温湿度下迅速繁殖,从而造成霉菌斑点附着在彩画上,而非使其褪色变色。因此,湿度亦非是造成彩画色彩衰变的主要因素。

4.3 风的影响

较强气流由于风化作用会使彩画表面发生粉化,从而造成彩画褪色。但根据风环境测试数据,寄澜亭周围由于有大量树木及山体遮挡,在所监测到的759 851个风速数据中,有755 430个数据为0 m/s,占整个数据量的99.4%,且在有风情况时其风速基本小于1 m/s,即所测彩画受风的影响极小,因此,彩画的色彩衰变主要不是因风所导致。

4.4 光照影响

由图2可知,彩画表面日间照度基本在700 lx以上,受光严重,基于图3、图4、图5,重点对天然光照影响彩画色彩衰变规律进行分析。

1) 1号取样点(黑色)。黑色的色坐标变化较大,从第1周期的(0.329 2, 0.365 7)变化到到第4周期的(0.338 9, 0.355 9),随曝光量增加主波长逐渐由552 nm变化到566 nm,说明黑色色相变化较大,色相逐渐发黄迹象明显;前3周期兴奋纯度随时间变化呈逐渐递减的趋势,第4周期突然上升,说明色彩的纯度先逐渐减小再增大,从0.104 1变化到0.071 5,再变到0.102 8,呈波动变化状态;黑色的亮度随时间变化呈逐渐增加趋势,从1.07变化到2.71,说明其色彩有逐渐发白的趋势。而且由于中国古建筑彩画黑色系颜料主要是由碳元素组成,成品粒子往往是轻、松而极细的黑色粉末,它耐光、耐热、耐湿、耐化学品,化学性质较为稳定^[15],黑色颜色变化本应该较小,但测试结果证明,其变色情况较为严重。经分析,原因如下:黑色系颜料能够吸收光谱中各个谱段的光子能量^[16],在天然光条件下,相比于其他颜色,光照对黑色的影响最为明显,而且太阳光光谱较全,太阳直射能量较大,所以,经过长期照射,其色坐标变化较为显著,有较为明显的泛黄现象且饱和度有波动变化趋势。

2) 2号取样点(黄色)。黄色的色坐标从(0.363 1, 0.393 0)变化到(0.362 4, 0.368 2),主波

长从第1周期到第4周期只从570 nm变化到576 nm,说明色彩逐渐向长波方向偏移,结合色度图上,发现其色彩有逐渐从黄色变成橙色的趋势;兴奋纯度随时间变化呈逐渐减小的趋势,从0.283 7变化到0.208 3,说明其色彩饱和度逐渐减小;其亮度从3.03变化到5.68,随时间的变化逐渐减小,说明黄色有逐渐发白的趋势。太阳光光谱较完整,由于黄色主要吸收了蓝绿光谱的能量,而反射其他颜色的光,所以相对于黑色系颜色,吸收光谱范围较窄,能量相对较小,所以色彩变化较黑色系颜色偏小。

3) 3号取样点(青色)。色坐标从(0.290 0, 0.382 7)变化到(0.301 6, 0.388 1),主波长510 nm变化到522 nm,颜色有逐渐向黄色方向偏移的趋势。与2号取样点(黄色)相比,发现青色虽然主波长偏移了12 nm,比黄色更大,但结合色度图发现青色的色相视觉感受几乎没有改变,这主要是由于CIE1931色度图的颜色空间分布不均匀性,青色比黄色的色差宽容度更高。兴奋纯度随时间变化而波动变化,0.126 3变化到0.115 3,其趋势并不明显,说明色彩饱和度呈波动变化趋势;亮度从5.04增加到6.95,说明青色有逐渐发白的趋势,相比黄色,青色的亮度变化较小。分析原因如下:变色现象是由于颜料中的分子获得大于其活化能的能量后,发生光化学反应而降解所导致,而青色虽获得了大量辐射,但主要为中、长波,这部分光谱由于光子振动频率低、能量小,数量虽大,但能量不强。因此,青色在吸收大量的中、长波辐射后色彩衰变并不明显。而且,由于青色只吸收了大部分蓝绿光及黄红光,相对于黑色系颜色,青色吸收光谱能量较小,所以,相对色彩变化较黑色系颜色偏小。根据混色原理,青色是由蓝色和绿色混合而成,因此,颜料呈现青色是由于其反射入射光中能量较高的蓝、绿光谱而吸收其他波段的光谱,而橙色吸收了能量较高的蓝、绿光,所以,青色色彩变化较橙色较小。

4) 4号取样点(橙色)。色坐标从(0.380 5, 0.364 2)变化到(0.374 9, 0.379 6),主波长从583 nm变化到576 nm,说明色彩由橙色逐渐向黄色方向偏移;其兴奋纯度随时间变化而逐渐增呈现先增大后减小的趋势,说明其色彩饱和度先增加后减小,从0.249 7变化到0.283 5,再变化到0.274 0,其变化并没有明显趋势。由于2号取样点(黄色)与4号

取样点(橙色)颜色较为接近,所以黄色主要吸收了蓝绿光,颜色变化与黄粉色基本一致,较黑色偏小,比青色变化程度大。

5 结 论

1)温度、湿度、风速对彩画色彩影响较小,光照是造成彩画色彩衰变的主要因素。

2)光照对彩画色相、亮度、兴奋纯度 3 个参数的影响程度不同。根据研究结果,1 号点(黑色)、2 号点(黄色)、3 号点(青色)及 4 号点(橙色)颜色均有泛黄趋势;4 个测点亮度值均随曝光量增长而呈现加大趋势,说明光照造成彩画色彩发白;兴奋纯度是表征颜色饱和度的物理量,研究结果表明,光照使彩画兴奋纯度变化趋势不明显,黑色、青色、橙色兴奋纯度呈波动变化,黄色兴奋纯度略有降低。

3)不同颜色受光照影响变化程度有较大差异,原因主要取决于颜料对太阳光谱的吸收反射特性,黑色衰变现象最为显著;黄色与橙色颜色衰变程度次之;青色变色程度最小。

参考文献:

- [1] 马剑,党睿. 清代皇家古建筑彩画天然光照衰变研究[J]. 照明工程学报,2009,20(2):20-23.
Ma J, Dang R. Study on decay of natural lighting on colored drawing about royal historic building of Qing Dynasty [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2009, 20(2): 20-23. (in Chinese)
- [2] 王亚军,张艳杰,郭青林,等. 敦煌莫高窟第 87 窟温湿度特征[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2014(1):1-6.
Wang Y J, Zhang Y J, Guo Q L, et al. Dunhuang Mogao grottoes, 87th wat, temperature and humidity characteristics [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science Edition, 2014(1):1-6. (in Chinese)
- [3] Zhai Q Y, Luo M R, Liu X Y. The impact of illuminance and colour temperature on viewing fine art paintings under LED lighting [J]. Lighting Research and Technology, 2015, 47(7): 795-809.
- [4] 何秋菊. 中国古代建筑油饰彩画风化原因及机理研究[D]. 西安:西北大学,2008.
He Q J. The weathering cause and mechanism research of the ancient Chinese architectural paint over with wood oil painting [D]. Xi'an: Northwest University, 2008. (in Chinese)
- [5] 李哲伟. 莫高窟洞窟前室对窟内热湿环境调控机理研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.
Li Z W. The hot and wet environment research of Mogao grottoes cave room before the regulation mechanism of grottoes hot wet environment research [D]. Xi'an: Xi'an Building University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [6] 王旭东,张虎元,郭青林,等. 敦煌莫高窟崖体风化特征及保护对策[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(5):1055-1063.
Wang X D, Zhang H Y, Guo Q L, et al. Dunhuang Mogao grottoes cliff body weathering characteristics and protection countermeasures [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5):1055-1063. (in Chinese)
- [7] Armas J. Lighting for museums [C] // International Symposium-Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, 2011.
- [8] Pozzi F, van den Berg K J, Fiedler I, et al. A systematic analysis of red lake pigments in French Impressionist and Post-Impressionist paintings by surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) [J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2014, 45, 1119-1126.
- [9] Sun M Y, Wang J H, Zhang H, et al. Measurement of the reversible rate of conservation materials for ancient murals [J]. Journal of Cultural Heritage, 2015,16(1):49-56.
- [10] Cuttle C. Light for art's sake, lighting for artworks and museum displays [J]. Lighting Research and Technology, 2008, 40(3): 259.
- [11] 党睿,王立雄,刘刚,等. 白光 LED 对中国传统书画色彩的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2015, 37(1):61-66.
Dang R, Wang L X, Liu G, et al. White LED to the influence of the traditional Chinese calligraphy and painting color [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(1): 61-66. (in Chinese)
- [12] 党睿,刘刚. 园林彩画信息数字化保护与应用[J]. 中国园林,2013(6):111-115.
Dang R, Liu G. Landscape painting information digital protection and application [J]. Journal of Chinese Gardens, and Practices, 2013 (6): 111-115. (in Chinese)
- [13] Dang R, Ma J, Liu G, et al. Digital research colored

- drawing of Summer Palace [C]//2010 International Conference on Control Engineering, 2010.
- [14] 党睿,刘刚. 古建园林彩画色彩及光照保护系统研究与应用[C]//中国科协第249次青年科学家论坛——照明对生态环境影响的量化观测与评价报告文集,2012: 159-166.
- Dang R, Liu G. Color and lighting protection system research and application of historic building landscape painting [C]// Journal of China association for science and technology for the 249th time young scientists BBS - lighting the quantitative observation and evaluation of ecological environmental impact report collection, 2012; 159-166 (in Chinese)
- [15] 武金勇. 先秦两汉绘画颜料研究[D]. 天津:天津大学, 2011.
- Wu J Y. Paints the of pre-Qin and Han dynasties study [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [16] McLaren K. The spectral regions of daylight which cause fading [J]. Journal of the Society of Dyers and Colourists, 1956; 86-89

(编辑 胡英奎)