



敦煌莫高窟 237 窟 光环境研究*



林婧怡 李广龙 赵齐 张雨辰 张昕

(清华大学建筑学院, 北京 100084)

摘要: 基于对莫高窟 237 窟这一典型覆斗式窟光环境的现场实测研究, 论证内外窟形制与空间亮度分布的对应关系, 证明年平均照度分布能够印证光线对于壁画的破坏程度, 并初步推测该空间的使用方式。

关键词: 第Ⅱ光气候区; 覆斗式窟; 天然光照度分布

Luminous Environment Research on No237 Mogao Caves in Dunhuang

Lin Jingyi Li Guanglong Zhao Qi Zhang Yuchen Zhang Xin

(Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

This paper analyzes the daylight environment of Mogao Cave 237 (one of the typical caves in assembly hall style) based on the statistics by field measurement, and discusses the relation between construction style of the cave and its luminance distribution inside. It then demonstrates that the annual average illuminance distribution is in accord with the discoloring and fading of the mural paintings by the effect of daylight, and conjectures the usage of Cave 237.

Key words: the Second Daylight Climate Zone; caves in assembly hall style; illuminance distribution of daylightactive daylight guidance system; hollow mirrored guides

1 引言

本研究隶属于国家自然科学基金资助项目——中国传统建筑光环境保护的子课题。根据项目组制定的研究类型域, 敦煌莫高窟的光环境研究对于第Ⅱ光气候区传统建筑以及中国石窟空间的光环境研究具有重要的参考价值。

敦煌莫高窟光环境研究包括如下三部分: (1)

典型窟光环境的现场实测研究, 已完成 148 窟与 237 窟; (2) 典型窟光环境的缩尺模型比较研究; (3) 典型窟光环境的软件模拟比较研究。237 窟的数据采集于 2009 年 8 月 16 ~ 19 日之间进行, 数据分析于 2009 年 11 月完成。

2 莫高窟 237 窟概况

敦煌地处祁连山、塔克拉玛干沙漠、北塞山、

* 国家自然科学基金资助项目 (中国传统建筑的光环境保护, 课题编号 50708047)

三危山之间的内陆冲击平原。所处地势决定其具有气候干燥，降水量少，蒸发量大，昼夜温差大，日照时间长等特点。年平均降水量 39.9 毫米，蒸发量 2486 毫米。敦煌位于中国第 II 光气候区（图 1），天然光年平均总照度 $26 \leq E_t < 28$ (klx)，年平均散射照度 11.9 klx。全年日照时数为 3246.7 小时。

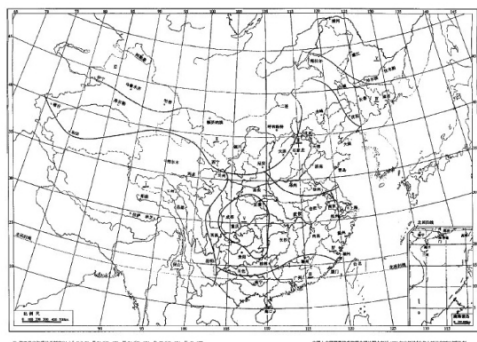


图 1 中国光气候分区

莫高窟海拔在 1320 ~ 1380 米之间，气候极端干燥，降水量少，气温变化大，日照时间长且风沙活动频繁。降水集中于 7 月份（占全年的 80%），年平均降雨量为 25 毫米，蒸发量为 3479 毫米，蒸发量是降水量的 150 倍，干燥指数 32。年平均气温为 11℃，六个月的平均气温低于 0℃。

莫高窟位于敦煌盆地边沿的洪积扇台地上，东临三危山，西接鸣沙山。石窟坐西向东，石窟群开凿在大泉河西岸陡壁之中，南北长约 1700m，高约 25m，有文物的洞窟 492 个，废弃洞窟 200 个左右。（图 2）

237 窟的建造时代为中唐（公元 781 ~ 848 年），西夏、清重修。该窟由内外窟和将其连接的甬道组成，内窟为覆斗形顶，西壁开一龕。内窟西壁龕顶帐形龕内清塑五身，马蹄形佛床，龕下塑壶门三个。外窟顶与四壁、内窟藻井与四壁均满布佛教题材的壁画。

237 窟的内窟类型属于覆斗式窟^①。特征在于顶部采用四方藻井加四批的覆斗顶，且窟室一壁开龕以立塑像的窟室（图 3）。此类型自隋唐之后开始盛行，持续至元朝，是自十六国晚期至元代连续建造的唯一窟室形态。莫高窟中 112、172、220、237、



图 2 莫高窟地貌与 237 窟的位置

249 窟均采用此形制。

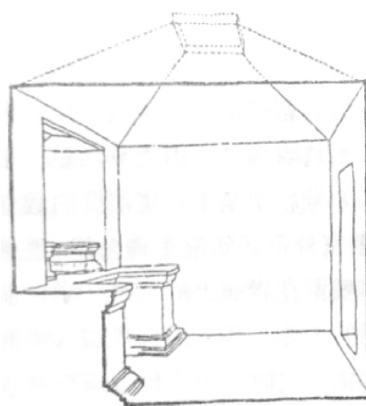


图 3 覆斗式窟形制

3 研究方法

项目组选择全阴天在无参观人流时段对 237 窟内部采光系数分布进行实测。分三组（内窟、外窟、室外无遮挡处各一组）通过对讲机同时工作，每组各一台照度计进行照度记录。石窟内部各界面均匀选择测点。将窟内某点天然光照度值 E_n 除以同一时间室外无遮挡处天空光照度值 E_w ，即可得到该点的采光系数 C ，即： $C = E_n / E_w$ 。

将测定的各点采光系数标注在石窟平面图、剖面图和顶面图上，绘制各面的等采光系数曲线，即可得到直观反映窟内各面采光强弱的采光系数分布伪彩度图。测得的采光系数和年平均散射照度值之

① 覆斗式窟，又称殿堂式窟（将一个洞窟看作一座佛殿，甚至于整个寺院），是最常见的石窟形制。其平面形状一般为方形，后壁开龕，窟顶作盂（盒子）形，犹如一个倒扣的斗，所以又称覆斗式窟。这种形制自西魏之后开始盛行，后来较长时期的石窟营建中都采用了这样的模式。

积，即为年平均照度值。由此可将采光系数分布图中各点的采光系数换算为年平均照度，即可得到 237 窟内各点的年平均照度分布图。

在数据分析过程中，对于各表面的平均采光系数进行了计算，便于将各界面的采光情况进行整体分析。此外，各界面采光系数之间的比例关系对于窟内视觉分析具有重要意义。

测试数据的误差分析如下：（1）测量仪器精度（0.1 lx）不足，导致测量较暗环境时容易产生误差，如窟内北墙和南墙的下部较暗，照度数据在 0.1lx 与 0.2lx 之间浮动较大；（2）莫高窟东侧种植有树木，测量时正值夏季树叶茂密，起风时会产生较大幅度的晃动，一定程度上影响测试精度。

4 结论

通过研究 237 窟内采光系数、年平均照度分布、各界面的平均采光系数及其比例关系，以及参考莫高窟其他洞窟的相关文献，可以得到如下结论：

（1）内外窟的形制与所对应的空间亮度分布的数据关系

外窟与甬道的存在是空间亮度过渡与暗适应的重要环节。237 窟采取了一种莫高窟较为常见的内外窟形制，即内外窟之间由一条甬道相联系。（窟内各面的年平均照度与分布见表 1 与图 4～图 7）。

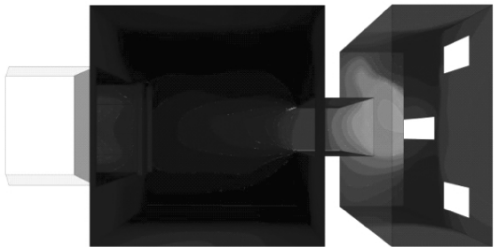


图 4

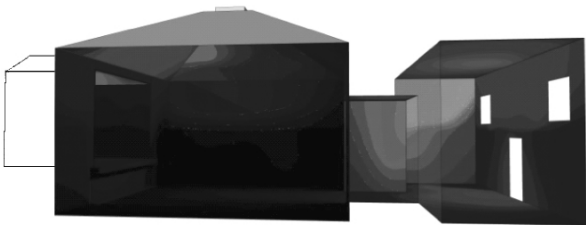


图 5

窟外天然光照度较高，内窟天然光照度较低，由

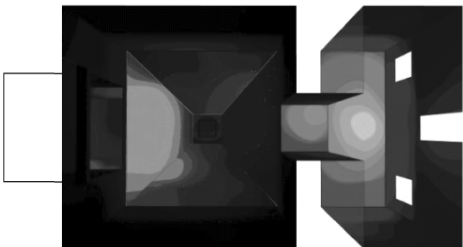


图 6

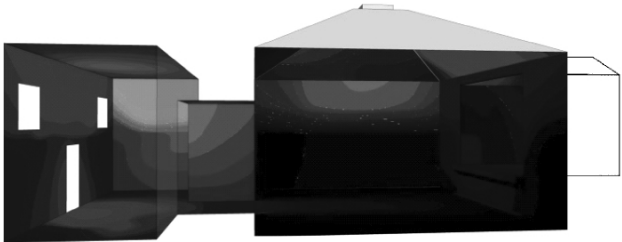


图 7

此形成了窟外与内窟亮度上的对比，不利于人眼对于光亮度变化的适应。237 窟的外窟与甬道形成了由窟外进入内窟前亮度变化的柔和过渡，亮度变化产生了“强—中强—中弱—弱”的亮度层级序列，人眼在亮度过渡中逐渐适应了黑暗，得以看到内窟的塑像和壁画，这是此类洞窟光环境的显著特征。

表 1 窟内各面的年平均照度与比例关系

位置	内容	窟外	外窟	甬道	内窟
地面	年平均照度 (lx)	11900	12.18	10.63	0.21
	比例关系	28333	58	51	1
顶部	年平均照度 (lx)	—	291.51	171.43	2.82
	比例关系	—	102	60	1
北墙	年平均照度 (lx)	5950	10.02	3.92	0.23
	比例关系	25870	42	17	1
南墙	年平均照度 (lx)	5950	8.87	2.53	0.49
	比例关系	12143	11	5	1
东墙	年平均照度 (lx)	5950	8.55	—	0.28
	比例关系	21250	31	—	1
西墙	年平均照度 (lx)	5950	21.51	—	0.70
	比例关系	8500	31	—	1

通过分析外窟各界面洞口的位置以及外窟形制、塑像位置，推测石窟建造者对于室外光线进行了计划性地使用：①外窟东侧墙面开有三个采光口，其中包括两个较高的窗洞口，其平面投影位置与外窟两侧塑像的位置基本对位，窗洞口的高度在 2 米以上，与塑像头部所在位置基本平齐。推测两侧窗洞

口的开启是为了增加塑像头部的亮度，类似的手法在 96 窟中也有所运用。②外窟西墙与甬道相接的洞口高度在 2 米以下，屏蔽了来自高窗洞口的大部分光线，进入内窟的光线主要经由外窟门洞口进入，且主要经过外窟地面的反射。

(2) 年平均照度分布印证光线对于壁画的破坏程度

据观察可知，窟内各处壁画脱落、褪色等损坏程度并不相同，局部较为严重，而这些地方大多为采光系数较高的区域，可以在一定程度上印证光线对于壁画的破坏作用。

通过计算 237 窟各界面的年平均照度可知，内窟顶棚四个倾斜面的年平均照度分别为：东面 0.66lx，西面 11.82lx，南面 1.00lx，北面 1.81lx（图 8）。年平均照度最大的西面正是壁画损坏较为严重的位置，尤其是图 8 所示照度较高的区域。其他三面的壁画保存较为完好。

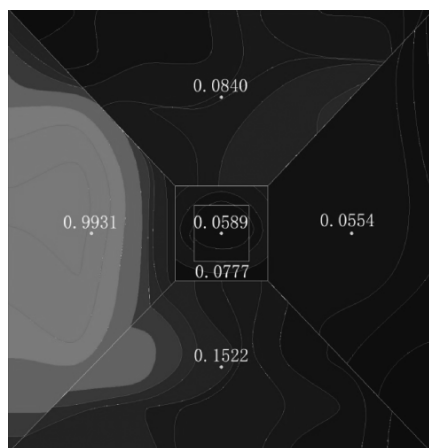


图 8 237 窟内窟顶部年平均照度分布

甬道两壁的年平均照度分别为：北面 3.92lx，南面 2.53lx，壁画亦受到损坏。参照内窟顶部北面（年平均照度为 1.81lx）壁画保存较为完好，以及甬道南面（年平均照度为 2.53lx）壁画受到较严重损坏，可大略推知当平均采光系数超过 0.015 ~

0.02% 之间的某个数值时，其壁画容易受到光线的影响而产生脱落、褪色等损坏。当然，壁画的损坏还与人为破坏、CO₂ 浓度、风沙侵蚀等因素有关，应当综合考虑。

(3) 由内窟的天然光照度分布推测空间使用方式

237 窟内窟形制为殿堂式窟，即将洞窟作为佛殿。由表 1 可知，内窟始终保持在较为昏暗（年平均照度除顶部为 2.82 lx 外，均低于 1 lx）的状态，人眼基本无法进行辨认、识别等作业。初步推测可排除佛教僧徒于天然光状态下在此欣赏壁画、诵经念法的可能性，石窟建造者借此空间的建设表达佛教信仰的可能性更大。

5 结语

莫高窟建成至今历时千余年，窟内各界面材质经过了自然或人为的损坏和改造，导致各表面对于光的反射性能有所改变，现场实测不能准确溯源窟内的历史光环境。

237 窟开凿于中唐，西夏和清代均进行过重修，宋代、西夏时期的重修往往对原有壁画进行重新绘制。重新绘制时需要先将墙壁划毛，以便加抹的地杖层与原壁粘合牢固，然后再绘制新壁画。另外，窟内地面经过了多年磨损和尘灰堆积，反射性能也必然产生变化。目前尚无法得知界面材质变化对于采光系数分布具体的影响。虽然 237 窟内各界面的材质和颜色的变化导致了窟内天然光环境的变化，但并不影响本研究的定性分析部分。莫高窟 237 窟作为内外窟以及覆斗式窟形制的重要代表，其光环境的研究将具有一定参考意义。

参考文献

- [1] ZhangXin, YangGuang, Zhan Qingxuan. Type's domain research on preservation of lighting environment of traditional Chinese architecture, China Illuminating Engineering Journal. 2009 (4).

致谢 感谢敦煌文物研究院苏伯民所长与中国文物研究院张瑾所长的大力支持与帮助。