

建筑潮湿病害田野调查方法研究

——以武当山皇经堂建筑檐廊为例

STUDY ON FIELD SURVEY METHODS OF DAMPNESS DAMAGE IN BUILDINGS:

Taking the Taoist Classics Library in Wudang Mountains as an Example

雷祖康 孙竹青 吕晓裕

Lei Zukang, Sun Zhuqing, Lv Xiaoyu

摘要 / 以武当山皇经堂为例, 通过对皇经堂建筑环境潮湿现状进行详细的现场调研与建筑病理学问题分析, 针对皇经堂的屋顶、檐廊、木构件、匾额壁画等案例进行潮湿劣化评价, 并对具有普适性的建筑潮湿病害调查, 提出系统化调查策略, 以期对当今文物建筑修缮工程计划的拟定, 提出简易、经济与有效的前期作业的田野调查方法建议。

关键词 / 建筑病理学 潮湿病害 色彩量测技术 武当山古建筑群 田野调查方法论

ABSTRACT / Taking Taoist Classics Library in Wudang Mountains as an example, through an on-the-spot detailed investigation, this paper analyses its dampness conditions and some related building pathology problems. It also gives an evaluation of building corrosion and damage level as in the case of the roof, outside corridor, timber parts, plaques, and frescos of Taoist Classics Library. Meanwhile this paper puts forward systematic survey methods in terms of general way of investigating buildings' dampness damage, in hope of offering a simple, economic, and effective field survey method in the preliminary work for drawing up repair plans for historical buildings in current conservation practices.

KEY WORDS / building pathology, dampness damage, color measurement technology, ancient buildings in Wudang Mountains, field survey methodology

武当山皇经堂位于湖北省武当山天柱峰顶端金顶片区内, 紧邻朝拜殿(太和宫)。此皇家讲经诵学的殿堂, 由于檐廊处的门格扇、梁架雀替等木构件雕琢华丽细腻, 描述了众多重要的道教故事, 堂上所悬金匾为清代道光皇帝御赐, 具有重要的历史文化价值。因此, 堂内历代文物与建物构筑, 皆具有迫切保存的历史意义。

本研究所幸受湖北省文化厅古建筑保护中心的国家文物局“指南针计划”专项项目子课题委托, 组织华中科技大学建筑与城市规划学院武当山古建筑群测绘队, 于2010年7月对武当山金顶古建筑群进行详细测绘调查。调查过程中运用建筑病理学基本原理, 尝试探索调查建筑病理问题的调查方法, 实际应用于皇经堂建筑檐廊处的具体调查作业中, 与试图解析造成该建筑严重潮湿危害的建筑病理潜因。

1 调查研究环境概况

皇经堂曾称为讲经堂, 明永乐年间创建, 清道光二十九年(1849年)重建, 民国四年(1915年)再建^[1]。堂前为2层戏楼, 堂西为天乙楼旧址, 堂东临近朝拜殿(太和宫)建筑群之鼓楼。该建筑为三开间硬山抬梁式砖木结构, 屋面主体铺设小青瓦与部分琉璃瓦, 前为廊后封檐, 檐顶为歇山样式。正面为全开式木格扇门, 雕饰精美、色彩艳丽, 题材多为道教人物故事与珍禽神兽。建筑格局面阔进深均为3间, 面阔10.13m, 进深9.20m, 通高9.90m。堂内正中悬挂清道光皇帝御赐“生天立地”金匾, 檐廊正中悬挂“白玉京中”, 左右悬“道济群生”、“孚佑下民”等匾额, 皆具有重要的历史意义(图1~3)。

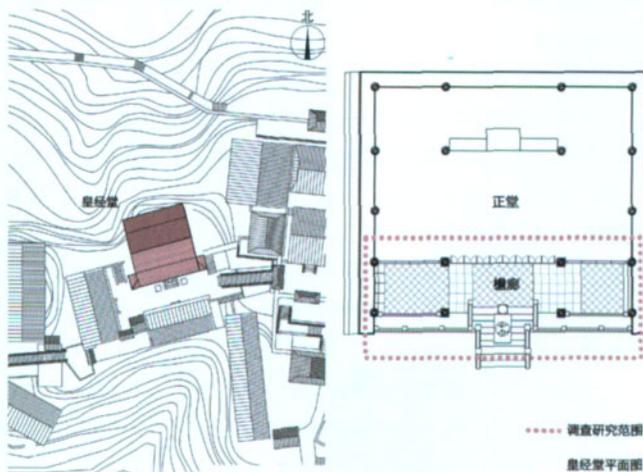
堂内众多木雕、匾额等皆具有重要保存维护价值, 其材质皆

为木料, 最惧水火的危害。研究调查时所见此建筑面临严重的潮湿危害, 对目前的精致文物维护深具潜藏的安全保存威胁。因此, 本研究侧重调查建筑环境与材料的潮湿病害情况与分析形成的病理成因。

2 研究调查理论与方法

2.1 建筑潮湿病理学理论与研究调查内涵

建筑病理学(Building Pathology)为研究建筑病害发生、发展和转变规律的一门科学。它的任务为运用科学方法研究建筑病害的成因、机理以及其形态、特征、功能和动态变化过程, 并研究各种病害的鉴别方法, 从而阐明建筑病害的本质, 为其根治或原



1 调查研究范围(左:皇经堂总平面;右:皇经堂平面)



2 皇经堂建筑处在不同气候环境时的情况(左:降雨后,右:天晴时)



3 精美绝伦且令人赞叹的木雕

生避免保障建筑物正常使用提供理论基础^[2]。根据其基本原理,可将建筑病害分成:损伤、裂缝、腐蚀、冻害、渗漏、老化、倒塌等类型^[3-4]。

本研究根据建筑病害作用机理,将建筑病害问题调查项目分成:物理化学作用形成的潮湿浸润、风化龟裂、表层酥碱、剥落断裂、变形位移、倾倒塌陷、彩料色变与其他损坏等8项;生物作用所形成的木料腐朽、虫蚁蛀蚀、真菌着生与植物寄栖等4项,据此提出建筑潮湿病理问题调查项目基本框架(表1)。

2.2 建筑潮湿病理问题调查方法

建筑病理问题的研究方法,可分成初步作业的现场田野调查(Field Survey and Investigation)与进阶作业的实验室检验与分析(Laboratory Diagnostics and Analysis)二部分。现场田野调查可归纳为:初级诊断的目视观察、触嗅研判与敲击听音3种方法;复次诊断的针刺弹感与仪器量测2种方法。实验室检验与分析作业的:分析检验与试验研究2种方法等(表2)。

2.3 研究环境初步调查

皇经堂建筑的重要保护部位位于工艺精赞的檐廊木雕彩绘和匾额。本研究在进行详细的建筑病理问题调查作业前期,首先进行初步目视调查。调查步骤从建筑室外至室内、从建筑台基起始,逐层检视至屋顶。目视与触嗅、敲击听音研判建筑材料显著的建筑病害问题特征,作为研判进阶详细调查作业的基础(表3)。

初步调查过程中发现,檐廊材料所受潮湿侵害的状态相当严重,且木雕上原十分艳丽的彩料涂着也呈现剥落或褪色的情况。因此,本研究的详细调查作业侧重点为:材料潮湿裂损特性调查与木雕材料颜色检测调查2项目为主。

3 材料潮湿裂损特征调查

3.1 定性调查方法与潮湿病害定性等级评定基准

表1 建筑潮湿病理问题调查项目基本框架

作用机制	病理特征	病理特征说明
物理 化学 作用	潮湿湿润	材料浸泡水后变潮湿,表面出现水渍、污渍。
	风化龟裂	材料表层产生裂缝(纹)、起甲,涂层出现空鼓,打底层出现鼓胀。
	表层酥碱	产生白华泛碱现象。
	剥落断裂	底层出现灰掉剥落,结构材料断裂。
	变形位移	屋架产生位移,结构节点松脱。
	倾倒塌陷	地基产生沉降,甚至形成屋架倒塌。
	彩料色变	涂层颜料化学质变,溶解褪色,尘埃与油污粘附。
	其他损坏	材料构件丢失。
生物作用	木料腐朽	木料严重潮湿处出现软腐,其他处出现褐腐与白腐。
	虫蚁蛀蚀	出现白蚁、蠹甲虫、土蜂孔洞,蛀损木料。
	真菌着生	出现霉菌、菇类附着寄生。
	植物寄栖	出现苔藓、地衣、蕨类等低等植物寄生栖居。

表2 建筑病理问题调查研究方法

调查作业项目	调查技术方法	方法说明	
初步 宏观 调查 作业	现场田野 调查作业 (初级诊断)	目视观察	目视方法进行材料裂隙、毁损、潮湿湿润、生物作用等表面现象观察研判与记录。
		触嗅研判	触觉、嗅觉研判材料毁损与生物作用徵状。
		敲击听音	利用音波反弹共鸣原理,研判材料孔洞密实差异,评断材料断裂、空鼓、孔洞等。
	现场田野 调查作业 (复次诊断)	针刺弹感	利用金属细针刺贯入时的反弹应力波,研判材料结实度、腐朽情况。
仪器量测		量测材料尺度、材料潮湿情况与构件倾斜变形等特性。	
进阶 微观 研究 作业	实验室检验 与分析作业	分析检验	进行材料微观结构观察—SEM与材料成分分析化学检验—EDS, XRD, XRF, FTIR
		试验研究	于实验室中,设计不同差异环境条件,进行材料质变差异等系统化实验研究。

表3 皇经堂檐廊建筑病害特征调查初次诊断结果

构件名称	建筑病害特征	可能产生因素推测	
台基	台基墙面	较大面积生苔藓	屋檐落水,地面返潮
	台阶	磨损,中央浮雕石件缺损开裂	年久磨损
堂前经幢	严重开裂磨损,大面积生苔藓	屋檐正下方落水侵蚀,年久磨损	
地面	外廊(石)	严重破损,潮湿	年久磨损,地面返潮
	室内(木)	潮湿	地面返潮
壁画	外墙	起甲,粉刷剥落,局部生苔藓	雨淋,受潮,风化
	山花	起甲,空鼓,龟裂剥落,褪色	雨淋,受潮,风化
门格扇	外廊	起甲,空鼓,龟裂剥落,褪色	受潮,风化
	严重虫蛀,局部开裂,雕花有破损;龟裂剥落,褪色	虫蛀,受潮,风化	
栏杆	石栏杆	磨损,局部缺损、生苔藓	雨淋,受潮,风化,年久磨损
	木栏杆	褪色,潮湿,开裂,雕饰构件掉落缺少	雨淋,受潮,风化,年久磨损
柱	柱身(木)	开裂,表面腐蚀,虫蛀	受潮,虫蛀
	柱础(石)	潮湿,局部变黑污染(着生霉斑)	受潮
雀替	有缺损,与柱身有脱开	雨淋,受潮,风化,年久磨损	

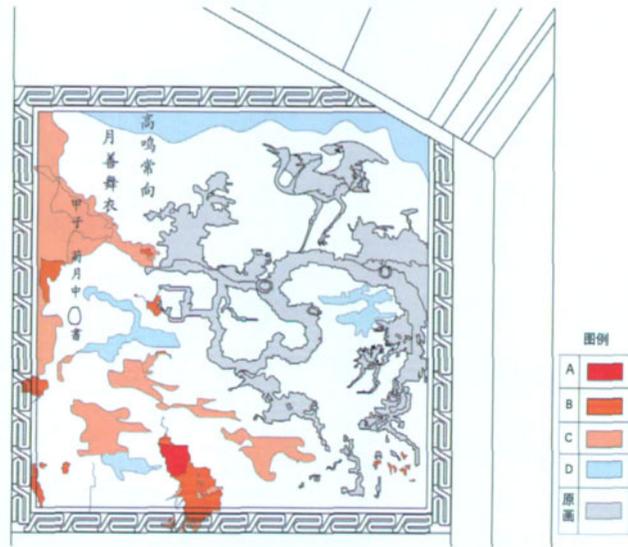
材料潮湿裂损特性调查技术采用定性调查与量化调查两种方式。定性调查主要运用目视观察、触嗅研判与敲击听音等现场田野调查的初级诊断作业。调查过程中,对于建筑潮湿病害损坏严重与轻微的程度症状,以及调查建筑部位与材料的差异,进行不

表4 研究调查的建筑材料潮湿裂损病害等级评定基准

调查项目	严重程度等级				备注
	十分严重 A / D1	影响显著 B / D2	些许显露 C / D3	轻微微量 D / D4	
壁画	壁画结构	底层露蚀	龟裂剥落	空鼓开裂	由于台基表层石材显现为酥碱与生物着生现象,属轻微微量等级,故该项之等级划分为D1~D4等级。
	壁画彩料	地仗剥落	涂层剥落	溶蚀褪色	
木构件	木构结构	断裂缺损	裂缝遍布	细纹开裂	由于台基表层石材显现为酥碱与生物着生现象,属轻微微量等级,故该项之等级划分为D1~D4等级。
	木构虫蚀	结构蛀蚀	表层蛀蚀	少许虫孔	
	木构彩料	严重剥落	部分剥落	质变褪色	
其他	台基表层	苔藓寄栖	着生霉斑	白华酥碱	潮湿浸润



4 廊心墙“松鹤遐龄”壁画现状(左:晴天摄,右:雨雾天摄)



5 壁画潮湿劣化建筑病理调查



6 “孚佑下民”匾额现状



7 匾额潮湿劣化建筑病理调查

同劣化程度评判,以利于调查症状分类与记录。

研究中将一般文物建筑潮湿病害特征等级分成:A.十分严重、B.影响显著、C.些许显露、D.轻微微量等4级。其中,A级为十分严重级,病理症状为:表层粉刷材料层剥落,结构荷载构件裸露于外气或受腐蚀。B级为影响显著级,病理症状为:表层材料严重龟裂、起甲、鼓裂剥落、破断裂变形,材料损坏而无法复原。C级为些许显露级,病理症状为:表层粉刷地仗、涂料层材料内部渗水气膨胀,使材料鼓出空鼓变形、产生裂缝,甚或彩料溶蚀。D级为轻微微量级,病理症状为:材料表面水附着或渗入表材料层内,外表湿润,部分着生霉菌或苔藓寄栖^[5]。

针对皇经堂的文物建筑特性,本研究拟定调查该建筑材料潮湿裂损病害等级评定基准(表4)。其中,檐廊台基部位主要受到潮湿浸润后所产生的酥碱与生物着生等危害,此皆属分类等级的D级,然而在此等级中,材料潮湿程度不同所产生的表面现象仍有所差异,因此研究中将差异情况分成D1~D4四级。

3.2 量化调查方法与潮湿病害量化等级评定基准

建筑材料潮湿主要量化调查的项目为材料含水率(Moisture Content)调查。本研究所采用的调查仪器为德国产 testo 606-1 材料水分仪,该仪器具有体积小重量轻(90g)、精度高(±2%)、测量速率快(0.5sec)、分辨率高(0.1%)与便于携带等优势,十分合适用于进行野外田野调查作业^[6]。

木料潮湿后会呈现出不同的物性徵状^[7-8],研究中按材料的变化特征与木材科学所认定木料干燥与潮湿的划分区界^[9-10],进行木质材料含水等级量化划分评定基准,分成5等级:A.干燥状态,含水率:0~7%;B.正常状态,含水率:7.01%~14%;C.微潮状态,含水率:14.01%~20%;D.过潮状态,含水率:20.01%~34%;E.软腐状态,含水率:35%以上。

3.3 调查环境潮湿劣化病理症状

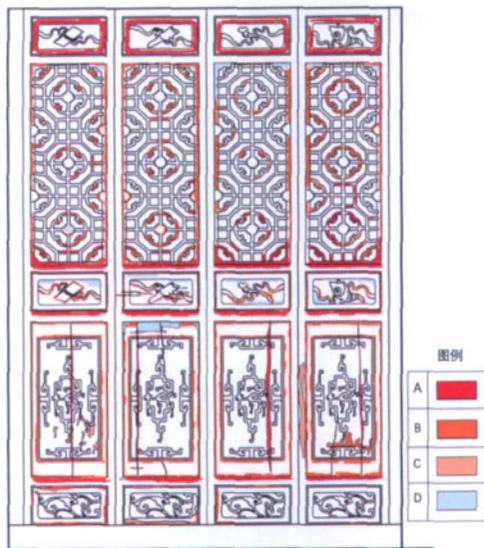
3.3.1 壁画潮湿劣化病理症状

东西廊心墙处各有一幅壁画,其中位于西廊心墙上的壁画意为“松鹤遐龄”题材,上书“高鸣常向,月善舞衣”题字,具有松鹤延年的贺寿之意。其所面临的建筑潮湿病害问题十分严重(图4)。

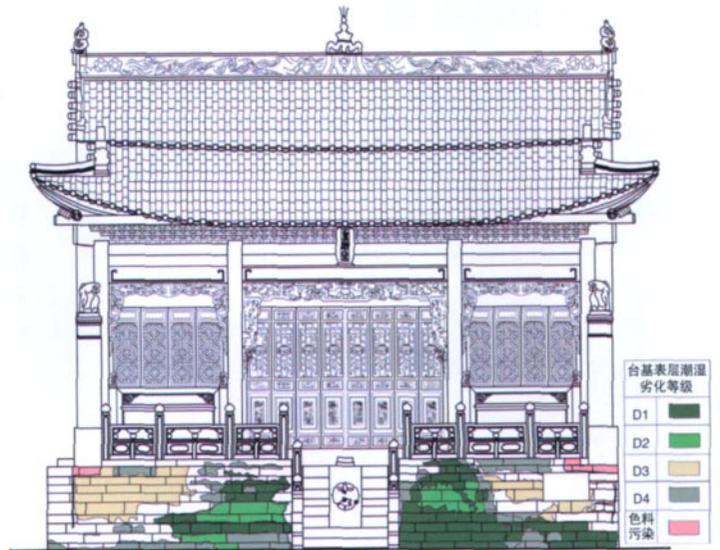
此壁画右上部(近廊内侧匾额处)面临潮湿浸润现象,左半部(近廊外侧)则面临着严重裂损的建筑病害危害。主要多数的病害特征为C等级的彩料溶蚀褪色与表涂层结构材料的空鼓开裂与B等级的涂层龟裂剥落,以及局部位于左下侧出现十分严重的A等级地仗底层剥离露蚀问题(图5)。

3.3.2 匾额潮湿劣化病理症状

檐廊顶处有3幅匾额,正中幅书“白玉京中”,意为皇经堂为天帝的寓所、众神“朝觐”的圣地。但此匾“白玉”二字却已经发黑,原因不明有待验证。左右幅匾额书“道济群生”、“孚佑下民”,为民国十四年(1925年)湖北省长兼督办军务肖耀南敬献,意为“道”能拯救万物众生,助佑天下百姓。但“孚佑下民”幅匾左部严重受潮湿侵害,匾木质底材已经严重腐朽,其上打底层与表漆层已经严重脱落,“民”字仅存部分鎏金纹样依稀可见(图6)。调查过程发现,潮湿来自匾额后侧构造处,由于构件已近檐顶,故可断定匾额潮湿乃是檐廊顶构造缝隙渗透水所致。此水下渗至临近匾额左下侧的“松鹤遐龄”壁画右上部,使得该处被潮湿浸润(图7)。



8 格扇潮湿劣化建筑病理调查



9 台基潮湿劣化建筑病理调查

3.3.3 格扇潮湿劣化病理症状

皇经堂的格扇皆为宫殿、坛庙规格的“六柱格扇”的格式，位于匾额正下方的“龟背锦”格扇也受到严重的潮湿危害。格扇木构件上所饰彩料产生相当严重的溶蚀和剥落，木构基底材料裸露，各层格扇面页底部所受的危害较其他部位严重(图8)。

3.3.4 台基潮湿劣化病理症状

从台基近正中踏跺二侧墙面上着生浓密的苔藓、霉斑情况可知，该墙面常年饱水相当潮湿，且水源不断，导致这些低等植物、真菌等能常时富态生存。此墙面最为潮湿处寄栖地衣、苔藓，外侧稍干处则着生霉菌，再外侧更干处则为泛碱与潮湿湿润等病害现象，生态微系统层次关系相当显著分明(图9)。

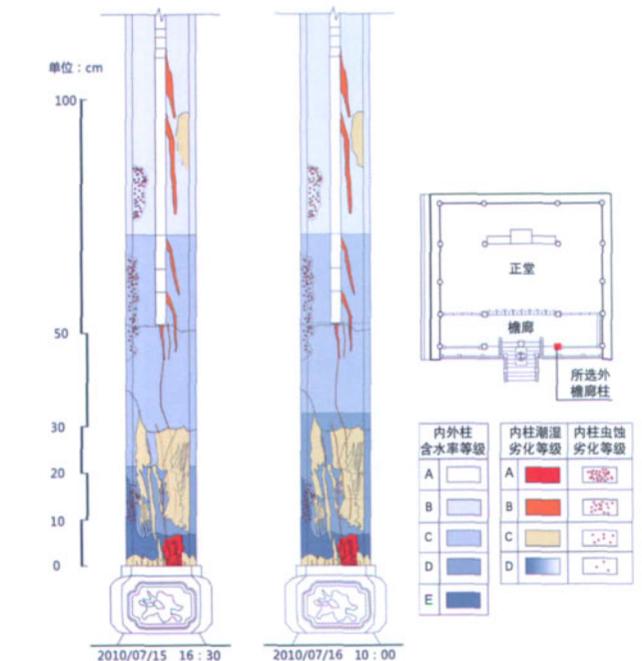
从调研现场研判，可知潮湿水来源于屋顶泄水。降雨强度的急缓会直接影响屋顶泄水速度与檐口泄水的挑流(Trajectory)流射结果。降雨强度弱时，雨水泄水自滴水处缓流垂直滴下。由于檐口滴水流线与台基墙面边线距离过近，因此雨水易受风吹至台基墙面上。降雨强度强时，雨水泄水挑流抛射远离台基墙面，直接排流地坪上，但地坪泄水回流至台基墙底部附近，此亦导致台基墙基部常年聚湿。

3.3.5 木柱潮湿劣化病理症状

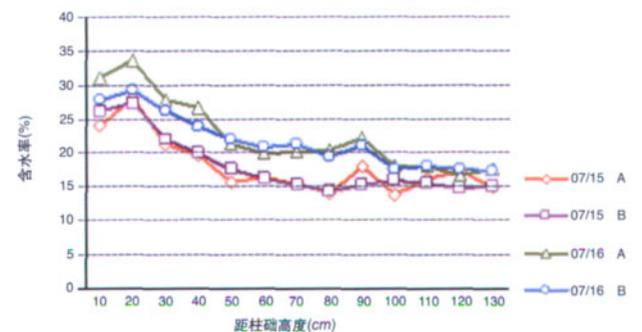
檐廊东侧檐柱与堂内东侧金柱受到潮湿危害情况显著，调查项目分成：木料腐蛀情况与木料含水率情况调查2项。

在调查现场可清楚察觉，此2柱底部接近柱顶(础)侧木料腐朽情况严重。檐柱底因腐朽形成木料残损，曾于维修时以油灰腻子进行修补填塞。调查时以水分仪进行木料潮湿含水率检测。从检测结果可知(图10~13)，檐柱木料潮湿情况较金柱为甚，含水率超过20%，其含湿高度较金柱为高。此含湿高度的差异，从现场研判，可能与地基材料内含水压差有关，亦即檐柱底部地基土壤较金柱底部为湿、含水量高，从而导致其孔隙毛细管压增大，使孔隙水于檐柱内压升的水位高程为高。

木柱的软腐、开裂与虫蛀等病害特性与木料的含水情况有关。从调查结果可知，木料含水率高于20%以上的环境(D与E等级)，主要面临的病害威胁为材料软腐、严重开裂；含水率低于20%以下的环境(B与C等级)，主要面临的病害威胁为部分开裂、虫蛀等。



10 檐廊檐柱潮湿劣化建筑病理调查



11 檐廊檐柱含水率分布情况

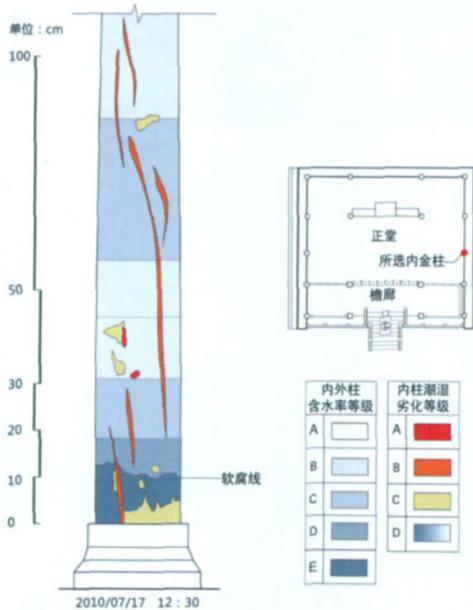
调查时发现有趣现象，檐柱面向阳处由于阳光直射，形成材料温变急骤突变致开裂情况严重。背阳处时常阴暗潮湿，因此遍布虫孔。从此二柱的开裂纹形态研判，此柱皆为逆时针方向转动，即整体建筑屋架已经呈现扭转倾向，可能原因为该堂东侧紧邻鼓楼边坡，产生些微滑移。

4 木雕彩料颜色检测调查

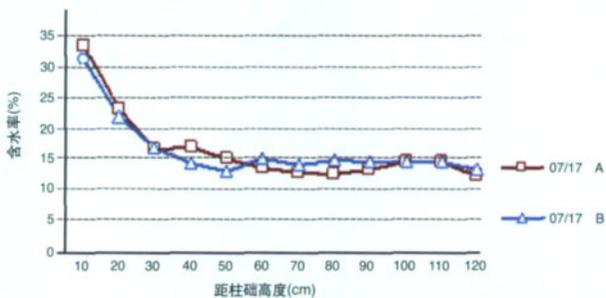
4.1 调查方法说明

彩料若常年处于潮湿环境，会因物理、化学与生物作用而使得颜料产生褪色与变色等质变危害。颜色的褪变色，可利用目视观察进行主观的显量差异研判，也可利用仪器检测技术进行客观量测评价。此量测结果可利用计算机进行颜色的精确定位，研究目前色与原始色的色差，以作为未来进行修复计划拟定时重要参考依据。

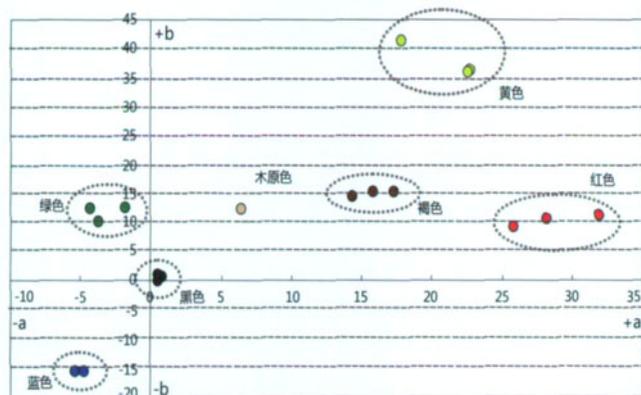
色彩学中进行颜色的评价定位，为利用色度学 (Colorimetric) 中色彩空间体系 (Color Space System)。过去色空间体系众多，



12 堂内金柱潮湿劣化建筑病理调查



13 堂内金柱含水率分布情况



14 格扇彩料 CIE Lab 色空间数值分布

但目前被认定常用的体系主要以孟塞尔表色系统 (Munsell Color System) 与 CIE Lab 色彩空间系统为主^[11-12]。由于量测仪器不能直接测得孟塞尔表色系统的参数，因此目前在文物保护的实务工作中，主要采用 CIE Lab 色彩空间系统的表色方法^[13-14]。

本研究颜色检测采用日本产柯尼卡—美能达 (Konica - Minolta) CR-10 色差计。此为一种体积小、便携式、自带电池的垂斯提缪勒斯三刺激值式手持测色计，采 8 方向照明扩散受光方式，测量口径为 8mm，所有测量均在标准的 D65 光源和 10° 观察条件下进行^[15]，适用于快速色彩量测的野外田野调查作业。

监测前先将选好测点的彩绘表面尘土，以吹球或毛刷清除干净，避免尘土影响量测数据的准确性与真实性。由于木雕表面不平整，难于准确地将探头放于所选的位置，每个位置每次监测都会容易产生误差。因此，在每个颜色区域选 3 个测点，每点每次测 3 次以上，选取多数相近且误差较小的数据进行记录。

4.2 格扇彩料颜色检测分析

本研究选择色彩较丰富的西侧格扇作为调查研究对象。此格扇的色彩用料以黑、褐、红、绿、蓝等色彩为主。经由 CR-10 色差计量测后，将量测各色的 CIE Lab 数值进行色差拟合处理，再将拟合后数值藉由 Photoshop 软件中 Lab 色空间定位予以找寻确认，并填注于调查现状图 (图 14、15)。

5 檐廊建筑环境潮湿病害问题分析

5.1 环境常态潮湿的建筑病理因素分析

从调查结果可知，檐廊环境“相当潮湿”。这种状况对文物建筑产生极大的威胁。然而，此湿源于何呢？从现场的观察可以初步判断，潮湿的原因主要来自 2 处：

1) 廊上错砌瓦垄处的施工缝隙渗透。瓦垄错砌的瓦当与滴水处内侧于原施工时进行油灰填塞，这种做法于使用初期时可暂时隔绝雨水起到防水作用，但由于错缝的工艺作法本身就使得屋瓦的隔水效能降低，同时常年使用后，油灰材料会因热湿交替作用，形成老化造成松脱。此外，屋瓦错缝处易因鸟类栖留，粪便中夹带植物种子造成植物栖生，植物根系会不断地蔓延渗透膨大，崩裂接缝处填缝泥灰，造成檐廊与主体建筑接续部位裂缝渗水之因。

2) 檐廊屋顶角翘檐翘角甚大，促使排降雨水朝正向屋面汇聚。挑檐滴水线与台基墙面线距离甚近，导致雨水甚多被台基墙面材料吸收，而长时汇聚于墙面处。同时，台基侧地坪排水不佳，使得排降雨水无法快速流走，造成台基底部材料长期潮湿。如此，台基墙面就渐泛碱 (产生白华)、着生霉斑苔藓等。植物根系会不断地吸收材料孔隙滞留水，而造成着生范围的结构材料常态处于潮湿状态，如此可见，潮湿台基处附近的檐柱近柱顶 (柱础) 的木料均产生严重的潮腐与虫蚀现象。檐柱顶底部夯土，由于部分冲刷与粘土孔隙压缩，而形成部分沉降现象 (图 16)。

5.2 屋架构造样式与增筑檐廊的推测

皇经堂檐廊建筑由于构造特殊，形成常年环境潮湿的危机问题。然而，檐廊处为何容易形成“常年潮湿”的现象呢？从现场建筑外观研判，主体建筑的样式为七檩前廊硬山式建筑。但进行精细测绘过程中发现，屋顶琉璃筒瓦屋面的盖瓦施作设置并非接续一体，而为分段接合施作，接合处位于檐廊内侧下金檩 (第五檩) 上。瓦垄接合方式并非覆盖顺接，而为上下瓦垄错降的形式，上



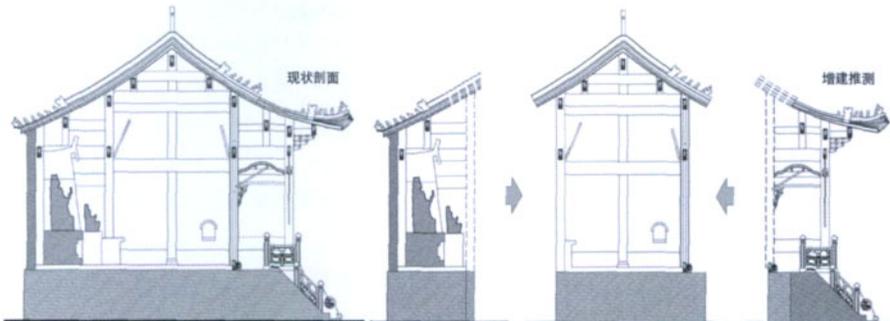
15 格扇现状彩料量测复原绘制



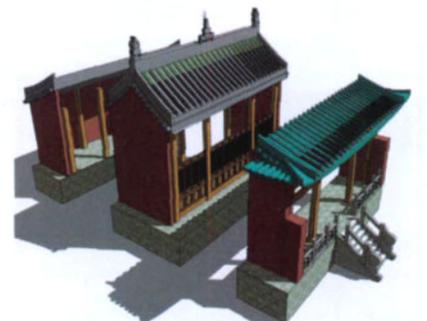
16 檐廊屋顶雨水排水潮湿汇聚成因推测



17 檐廊屋顶后增筑接合缝隙情况



18 皇经堂建筑扩建的可能推测



19 檐廊建筑与主体建筑的组合关系

瓦垄以瓦当、滴水作为瓦口收头处理，此非为一体施工所见的作法(图17)。此作法引发笔者的好奇推测，该建筑檐廊是否为后增筑的构筑物？经由现场不断地线索找寻，在量测山墙的上身砖作与下碱砌石作时发现，廊心墙与山墙间存在明显的拼合竖缝，此处的砖石叠砌并非接续。从这迹象可大胆推测认定，原皇经堂应为五檩硬山式建筑，檐廊为后增筑的构筑物(图18、19)。

然而，这种在过去封建时期相当重要的皇家建筑物，为何不采用严谨的官式七檩建筑作法，而采用后增筑的作法，系当时修筑时的特殊讲究作法？还系因修筑当时的时代环境造就了如此克难的结果？此有趣的疑问则留待未来再进行深入地历史考证。

6 结论

从研究调查结果分析，形成皇经堂檐廊文物保存严重威胁的因素为“水”与“缝”。雨水透过屋顶构造缝隙产生渗漏，地下水透过材料缝隙产生聚湿。此水所形成的“潮湿”造成材料软化，给着生生物提供了充沛良好的水源。因此，要克制“潮湿”问题，施作防水、治水的措施，方可有效地维护珍贵的文化遗产永续延年。

本文研究仅为探索建筑潮湿病害问题调查方法的初始，形成建筑潮湿病害的病理原理十分地复杂，尚待更深入的科学探索，方可期盼未来于建筑潮湿防治方法研究能引领出有效之路。

(国家文物局委托湖北省文化厅古建筑保护中心“指南针计划”专项项目课题“基于传感器集成融合的武当山南岩两仪殿精细测绘与三维建模技术研究”子课题基金资助本研究，华中科技大学建筑学院2007级武当山金顶测绘组全体学生进行测绘作业，提供本研究必备的图纸材料)

参考文献

- [1] 世界文化遗产丛书编委会. 世界文化遗产—武当山[M]. 武汉: 长江文艺出版社, 1998: 141.
- [2] Watt D S. Building Pathology[M]. 2nd ed. MA: Blackwell Publishing Ltd, 2007: 114-119.
- [3] 王立久, 姚少臣. 建筑病理学 - 建筑物常见病害诊断与对策[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 2.
- [4] 文化部文物研究所. 中国古建筑修缮技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 108-109.
- [5] 雷祖康, 孙竹青. 武当山金顶钟鼓楼附近环境的建筑潮湿病害危机问题调查研究[J]. 建筑学报, 2011 (S1), 学术论文专刊05: 35.
- [6] testo(中国)公司. testo 606-1材料水分仪中文操作手册: 3.
- [7] Brian Ridout. Timber Decay in Buildings[M]. London: Spon Press, 2004: 16-19.
- [8] 李坚. 木材科学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 186-187.
- [9] 王松永. 木材物理学[M]. 2版. 台北: 徐氏基金会, 2001: 72-73.
- [10] 池玉杰. 木材腐朽与木材腐朽菌[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 50-51.
- [11] 大田登. 色彩工程学—理论与应用[M]. 陈鸿兴, 等, 译. 台北: 全华图书公司, 2007: 50, 138.
- [12] 徐海松. 颜色信息工程[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005: 147-148.
- [13] Ruth Johnston-Feller. Color Science in the Examination of Museum Objects Nondestructive Procedures[M]. LA: The Getty Conservation Institute, 2001: 20-33.
- [14] 李最雄. 丝绸之路石窟壁画彩塑保护[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 49-52.
- [15] 柯尼卡—美能达(中国)官方网站[OL]. <http://konicaminolta.com.cn>

图片来源

图1、5、7~9、15、16、18、19: 本研究绘制。

图2~4、6、17: 作者拍摄。

图10~14: 本研究测绘。