

大理白族彩绘的材料特性与耐久机理

——基于成分数据的界面反应研究

王博涵^{1*}, 王宏兰^{2#}

¹云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

²厦门城市职业学院国际旅游学院, 福建 厦门

收稿日期: 2026年7月17日; 录用日期: 2026年8月9日; 发布日期: 2026年8月18日

摘 要

大理白族彩绘以其不起皮、不脱落的耐久性著称, 而学界对其特殊耐久性的材料学机理仍缺乏系统认知。本文总结前人研究成果, 对彩绘颜料层与地仗层的成分数据进行系统再分析, 深入探讨天然原料与墙面材料间的界面反应机理。整理已有数据发现: 彩绘颜料层以多种天然矿物颜料为主, 辅以传统胶结材料构成; 墙皮由糯米浆、麻纤维等物质组成。颜料墙皮二者之间发生“碳化-钙矾石协同固化”反应——石灰碳化生成方解石并与活性硅铝形成C-S-H凝胶, 天然原料中的植物胶通过钙离子桥接形成柔性锚固层, 从而有效抑制起皮脱落。本文通过对比天然原料与丙烯酸乳液等合成材料的成分数据, 进一步探究天然材料耐久更好的机理。本研究可为大理白族彩绘的科学保护与修复提供理论依据。

关键词

大理白族彩绘, 矿物颜料, 地仗材料, 界面反应, 人文地理适应性

Material Properties and Durability Mechanisms of Bai Ethnic Polychrome in Dali

—A Study on Interfacial Reactions Based on Compositional Data

Bohan Wang^{1*}, Honglan Wang^{2#}

¹School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

²School of International Tourism, Xiamen City University, Xiamen Fujian

Received: July 17, 2026; accepted: August 9, 2026; published: August 18, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王博涵, 王宏兰. 大理白族彩绘的材料特性与耐久机理[J]. 分析化学进展, 2026, 16(3): 206-216.
DOI: 10.12677/aac.2026.163023

Abstract

Dali Bai ethnic polychromy is renowned for its exceptional durability, exhibiting almost no peeling or detachment over time. However, the material science mechanisms underlying this unique longevity remain insufficiently understood in academic research. This paper synthesizes previous studies and systematically reanalyzes compositional data from both the pigment layer and the ground layer of the paintings, aiming to investigate the interfacial reaction mechanisms between natural raw materials and wall substrates. The results indicate that the pigment layer is primarily composed of various natural mineral pigments combined with traditional binders, while the plaster layer consists of glutinous rice paste, hemp fibers, and other components. A synergistic curing reaction—referred to as “carbonation-ecttringite collaborative stabilization”—occurs between the pigment and plaster layers: lime carbonates to form calcite, which reacts with reactive silica and alumina to generate C-S-H gels; simultaneously, plant-based glues in natural materials form flexible anchoring layers via calcium ion bridging, effectively inhibiting peeling and detachment. By comparing compositional data of natural materials with synthetic alternatives such as acrylic emulsions, this study further explores why natural materials exhibit superior durability. The findings provide a theoretical basis for the scientific conservation and restoration of Dali Bai ethnic polychromy.

Keywords

Dali Bai Ethnic Polychrome, Mineral Pigments, Ground Coat Materials, Interfacial Reaction, Human-Geographical Adaptability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

油饰彩画作为古建筑的重要组成部分, 赋予了中国古代建筑极高的艺术价值, 在世界建筑史上占有重要地位。然而, 由于制作材料、工艺的局限以及外界环境因素的影响, 建筑彩绘常会出现起皮、脱落等病害。为更好地保护古建筑彩画, 必须对油饰彩画的制作工艺与材料组成有清晰的了解, 以便在修缮保护中尽可能选择原材料与原工艺, 实现最小干预、恢复原貌的目标[1]。

白族民居彩绘于 2008 年被列入第二批国家级非物质文化遗产名录, 普遍流行于云南大理市及周边白族地区, 是大理白族文化的重要组成部分。大理白族彩绘长期暴露于自然环境中却仅发生褪色而极少出现起皮或脱落, 这一独特的耐久性特征使其成为传统建筑彩绘研究的重要样本。本文在现有数据的基础上深入解析其材料体系与结构机理, 对于推动传统工艺科学化保护具有重要的理论价值与实践意义。

近年来, 国内外学者对古建彩绘材料进行了大量研究。严静等利用 XRF、XRD、SEM-EDX 等技术系统分析了中国北方地区古建油饰彩画中的绿色、红色颜料, 发现巴黎绿等人工合成颜料自清代已开始使用[2]。郭瑞对山西民间古建筑油饰彩画的制作材料及工艺进行了深入分析[3], 刘梦雨对清代官修匠作则例中的彩画作颜料进行了系统整理[4], 段振如对白族传统村落周城村的建筑装饰进行了专题研究[5]。然而, 针对大理白族彩绘“只褪色不脱落”这一特殊耐久性的材料学机理, 现有研究尚没有明确阐释相关原因, 所以本文通过总结整合已有数据进行合理推测讨论, 试图构建一个综合解释框架以便于后续研究。

2. 文献检索与研究方法

2.1. 白族彩绘的颜料与胶结材料

白族传统彩绘颜料主要以天然矿物质颜料为主, 常见成分包括石青(碱式碳酸铜)、石绿(碱式碳酸铜)、朱砂(硫化汞)、赭石(氧化铁)、白垩(碳酸钙)等, 并辅以植物性或动物性胶类作为粘合剂; 现代部分作品可能掺用合成颜料, 但非遗传承中仍然坚持以传统矿物为基底。

具体而言, 蓝色系主要来自石青(蓝铜矿), 少数用青金石; 绿色系多用石绿(孔雀石, 即碱式碳酸铜); 红色/朱红传统用朱砂(HgS), 也有用铁红(赭石, Fe_2O_3); 白色常用白垩(碳酸钙)或蛤粉(碳酸钙, 来自贝类), 历史上偶用铅白(碱式碳酸铅, 因毒性现已少用); 黑色多为炭黑(松烟或木炭)。

在胶结材料方面, 白族彩绘独具特色: 传统打底及调色多用猪血灰(猪血 + 桐油 + 石灰)或纸筋灰(熟石膏 + 棉纸纤维), 颜料本身以水或胶液(如鱼胶、桃胶)调和。与清代官式彩画颜料以赤铁矿、铅丹和朱砂为主, 地仗采用砖灰、石灰等用料特征相比, 白族彩绘在颜料选择上体现了鲜明的南方少数民族建筑装饰特色。

2.2. 分析检测方法与数据

研究方法的正确选择是获取可靠分析数据的前提。关于古建油饰彩画的成分分析, 已有学者进行了系统的技术路径探索。严静在其硕士论文中, 借鉴国内外关于油饰彩画剖面结构以及颜料分析的技术手段, 选择古建油饰彩画中常见的矿物颜料进行了 X 射线荧光(XRF)分析、X 射线衍射(XRD)分析、色度分析, 并对古建中用到的传统植物染料进行了红外光谱分析(FT-IR)和色度分析。由于文物样品本身的复杂性, 除采取传统的 XRF、XRD 分析方法外, 还选择了扫描电镜-能谱分析(SEM-EDX)、拉曼光谱(Raman)等分析手段, 对取自蒙古博格达汗宫、甘肃嘉峪关、北京颐和园和山西地区的 28 处古建上的 57 个油饰彩画文物样品进行了分析测试[6]。

王丽琴、严静等利用 X 射线荧光分析、X 射线衍射分析、扫描电镜-能谱分析技术, 系统地分析检测了来自北京、山西、甘肃等中国北方地区的 27 个古建油饰彩画中的绿色颜料, 结果表明其中 15 个样品使用了巴黎绿($\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{AsO}_2)_2$)这种含铜、砷的人工合成颜料, 巴黎绿自清代晚期开始大量应用于古建彩画[2]。严静、王丽琴等利用 X 射线荧光(XRF)、X 射线衍射(XRD)、光学显微镜、扫描电镜能谱(SEM-EDX)等多种仪器组合技术, 对取自北京颐和园古建筑上的 13 个样品的 23 个红色颜料点进行了分析测试, 结果表明红色颜料大多为赤铁矿(Fe_2O_3), 有少量是铅丹(Pb_3O_4), 朱砂(HgS)仅见于一个文物样品上, 另有一部分是有机染料, 赤铁矿和有机染料多存在于表层颜料中, 而铅丹都作打底之用[7]。

在矿物颜料的标准谱图数据方面, 拉曼光谱分析已建立了较为成熟的特征峰数据库。广元千佛崖莲花洞彩绘的拉曼光谱分析结果显示了绘制不同颜色所用的矿物颜料。对广元千佛崖莲花洞彩绘的分析表明拉曼光谱分析对样品量要求小、可实现无损分析[8]。根据相关数据对大理白族彩绘的颜料材料进行分析, 得出以下数据。

在墙皮(地仗)材料及灰浆微观结构分析方面, 研究已取得较为系统的实验数据。对西安明代城墙灰浆样品的 DSC-TGA、FT-IR、XRD、SEM 分析和碘-淀粉实验表明, 灰浆的主要无机成分是方解石晶型的碳酸钙(CaCO_3), 有机成分主要是没有降解的糯米成分。进一步的实验发现, 糯米浆对碳酸钙方解石晶体的大小和形貌有明显的调控作用: 在一定浓度范围内, 糯米浆浓度越大, 生成的方解石结晶度越低, 颗粒越小, 结构也越致密; 同时, 糯米淀粉能够很好地粘结碳酸钙纳米颗粒并填充其微孔隙, 这些是糯米灰浆具有强度大、韧性好、防渗性优越等良好力学性能的微观基础[19]。SEM 电镜结果显示, 与纯石灰浆相比, 掺糯米汁的石灰灰浆在 28 d 碳化龄期下的碳酸钙颗粒变得更为细小(从纯石灰浆的平均粒径约 $5\text{ }\mu\text{m}$ 降至糯米灰浆的约 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$), 颗粒间孔隙率由约 35%降低至约 28%。红外光谱分析进一步揭示, 糯

米灰浆中波数为 1031 cm^{-1} 位置的吸收峰是有机物的特征吸收峰, 反映了糯米成分在碳酸钙结晶作用下发生的特征位移现象(纯糯米淀粉该峰位于 1022 cm^{-1} , 红移了 9 cm^{-1}) [20]。X 射线衍射分析则确认, 泥灰类粘结材料的无机物相组成以方解石和石英为主, 其密度在 $1.81\sim 2.20\text{ g/cm}^3$ 之间[20] [21]。对常见矿物颜料光谱特征表汇总如下(见表 1)。

Table 1. Characteristic raman spectral parameters of common mineral pigments

表 1. 常见矿物颜料拉曼光谱特征参数表[9]-[18]

颜料名称	化学成分	晶体结构	拉曼特征峰(cm^{-1})
朱砂	HgS	三方晶系	343、285、254、143
石青	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	碱式碳酸铜	1096、1056、402、176
石绿(孔雀石)	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	碱式碳酸铜	1090、1051、433、178
赤铁矿	Fe_2O_3	三方晶系	612、408、290、225
白垩(方解石)	CaCO_3	正交晶系	1085、712、282、156
青金石	$(\text{Na,Ca})_{4-8}(\text{AlSiO}_4)_6(\text{SO}_4,\text{S,Cl})_2$	等轴晶系	257、544、1092
雄黄	As_4S_4	单斜晶系	185、198、221、232、272、346、361
雌黄	As_2S_3	单斜晶系	136、154、179、202、292、311、354、383
铅白(碱式碳酸铅)	$2\text{PbCO}_3\cdot\text{Pb}(\text{OH})_2$	三方晶系	1050、1415、857
铅丹(红丹)	Pb_3O_4	四方晶系	120、145、220、310、380、460、540
普鲁士蓝(亚铁氰化铁)	$\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$	立方晶系	284、541、2094、2157
墨绿(铜矿)	$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	斜方晶系	124、147、513、818、914、3350、3435
底料(二水石膏)	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	单斜晶系	1008、1135、414、494、618
炭黑	C	无定形/石墨微晶	1350(D 峰)、1580(G 峰)
铁黄(针铁矿)	$\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$	斜方晶系	245、300、390、480、550
褐铁矿	$\text{FeO}(\text{OH})\cdot n\text{H}_2\text{O}$	无定形/微晶集合体	220、290、380、480、550
高岭石	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	三斜晶系	110、190、270、360、430、510、630

基于上述已建立的分析检测方法, 运用不同的检测方法能从不同角度较全面的分析彩绘颜料与地仗层的材料及其组成元素, 现将各个检测方法的功效、结果及其优缺点汇总如下(表 2)。

Table 2. Comprehensive comparison of different detection methods for components of ancient architectural colored paintings

表 2. 古建筑彩绘成分不同检测方法综合对比表[2] [6] [11] [20] [22] [23]

检测方法	主要检测功效	检测结果	优点	缺点
X 射线荧光光谱 (XRF)	对各色区元素组成进行定性、半定量分析, 检测元素含量	检出样品中 Cu、Hg、Fe、Ca 等特征元素, 并得到各元素相对含量	无损检测, 操作简便, 可快速完成大面积元素筛查	仅能分析元素种类与相对含量, 无法判定物相及晶体结构
X 射线衍射 (XRD)	鉴定矿物晶体结构, 结合标准 PDF 卡片完成物相确认	匹配标准 PDF 卡片, 明确样品中矿物颜料的物相组成	矿物物相鉴定准确率高, 是晶体颜料经典检测手段	无法识别无定形物质与有机材料, 微量组分检出能力弱
傅里叶转换红外光谱 (FTIR)	实现功能团鉴定、化学结构分析及同分异构体区分等功能	测出 1650 cm^{-1} (酰胺 I 带)、 1540 cm^{-1} (酰胺 II 带) 蛋白质特征峰; 检出 1031 cm^{-1} 糯米淀粉特征峰	有机官能团识别能力强, 可精准区分淀粉、蛋白质类有机质	难以单独定性无机矿物颜料, 样品需简单预处理

续表

扫描电子显微镜-能谱分析 (SEM-EDX)	获取样品微观形貌和元素组成信息	清晰呈现层间微观形貌, 得到微区元素分布图谱	微观成像效果好, 可实现微区原位元素分析	仅针对局部微区, 无法代表样品整体, 部分检测需要制样
拉曼光谱	鉴别特殊的结构特征或特征基团	对矿物颜料精准定性, 结合特征峰数据, 完成矿物颜料物相复合	无损检测、分辨率高, 矿物定性精度与灵敏度优异	易受荧光干扰, 深色、多组分混合样品检测效果较差
热重-差热分析 (DSC-TGA)	评估地仗材料碳化程度与热稳定性, 区分材料组分差异	纯石灰浆: 600℃~750℃失重率 40%~45%; 糯米石灰浆: 600℃~750℃失重率 35%~40%; 糯米成分可促进材料充分碳化	可量化热行为、失重比例与热稳定性, 数据直观	属于有损检测, 测试流程复杂、耗时久

3. 界面反应机理分析

3.1. “碳化-钙矾石协同固化”反应机制

传统工艺蕴涵着深刻的科学内涵, 彩绘地仗是一个典型的复合材料, 其优越的性能来自各物质间显著的协同作用。白族彩绘的墙皮(地仗层)主要由糯米浆、石灰(Ca(OH)₂)、细砂及少量麻纤维构成。当石灰涂抹于墙面后, 首先发生碳化反应, 吸收空气中的 CO₂ 生成稳定的方解石晶体(CaCO₃)。更重要的是, 石灰与墙皮中天然存在的活性 SiO₂ 和 Al₂O₃ 反应, 形成无定形 C-S-H 凝胶(水化硅酸钙, 化学式可表示为 xCaO·SiO₂·yH₂O), 这种凝胶具有极佳的黏结性能与致密性。该反应过程与官式建筑中砖灰 + 石灰的地仗体系有相似之处, 但白族彩绘因加入糯米浆而获得了更优的界面性能。

糯米浆中的支链淀粉分子在石灰所提供的碱性环境中发生糊化与交联, 形成具有三维网络结构的高分子薄膜, 能够有效分散应力。植物胶中的蛋白质分子通过 Ca²⁺离子的桥接作用, 与颜料微粒及墙基的羟基发生配位吸附, 在颜料层与地仗层的界面处形成一层具有柔韧性的“锚固层”。该结构能缓冲干湿循环和温度变化所产生的体积变形与应力集中, 从而抑制界面处的起皮与开裂。

为了量化这一反应的效果, 可以对比不同配比灰浆的力学性能。实验数据显示: 纯石灰浆的 28 d 抗压强度约为 0.5~0.8 MPa, 而掺入 3%糯米浆的石灰浆抗压强度可提升至 1.2~1.5 MPa, 提高约一倍; 其粘结强度从 0.1 MPa 提升至 0.25~0.3 MPa [19]。同时, 糯米石灰浆的断裂韧性显著提高, 干缩率从纯石灰浆的 0.5%降至 0.2%左右, 从而大大降低了开裂风险。

3.2. 褪色机理分析

白族彩绘只褪色而不脱落的现象, 根源在于颜料层的界面结合强度远高于颜料颗粒自身的抗老化能力。随着长期的自然暴露, 有机胶结材料(如鱼胶、桃胶以及猪血灰中的动植物蛋白)受到紫外线照射发生光氧化降解, 其化学结构被破坏, 对颜料颗粒的包裹与黏结能力逐渐减弱。具体而言, 蛋白质分子中的肽键在紫外光(波长 < 300 nm)作用下发生断裂, 导致胶结材料失去粘结性能。同时, 部分矿物颜料也会经历老化: 朱砂(HgS)在光照下可能发生 α→β 晶型转变(从红色变为黑色), 赭石(Fe₂O₃)相对稳定, 而碱式碳酸铜在酸性环境中可能发生分解生成可溶性铜盐。

然而由于 CaCO₃ 骨架和 C-S-H 凝胶等无机网络结构保持完整, 颜料层与墙面的物理结合并未完全丧失。颜料颗粒被牢牢“锚定”在无机基质中, 即使有机胶结材料老化失效, 颜料也不会成片剥落, 仅表现为逐渐褪色。这一机理与敦煌壁画中蓝色颜料(青金石、石青)的褪色现象有相似之处, 但白族彩绘因其独特的石灰-糯米浆地仗体系而具有更强的抗剥落能力。

4. 新旧材料对比分析

随着现代建筑修复工程中合成材料的广泛使用, 传统材料与现代材料之间的性能差异日益凸显。以天然原料(石灰 + 糯米浆 + 矿物颜料)制备的彩绘构件, 由于各组分之间形成了充分的化学反应协同作用, 保存年限可达数十年甚至更长。严静对多处古建筑油饰彩画的分析结果表明, 传统矿物颜料在适当保存条件下具有良好的化学稳定性, 而近年来以现代染料代替矿物颜料的做法越来越普遍, 给文物保护带来了新的挑战[6]。

与之对比, 采用丙烯酸乳液或苯丙乳液等现代合成材料调制的彩绘, 由于有机聚合物成膜后界面疏水性强, 在干湿交替和温差变化过程中容易在彩绘层与基层之间产生应力集中, 导致界面开裂。同时, 合成膜层透气性差(透湿系数约 $0.3 \times 10^{-6} \text{ g/m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa}$, 而天然石灰层约为 $2.8 \times 10^{-6} \text{ g/m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa}$), 使基层中的水汽无法顺利排出而长期滞留于界面处, 加速了有机粘结层的水解老化。一般而言, 此类合成材料彩绘在三至五年即会出现龟裂、起皮等病害现象, 虽在短期视觉表现上鲜艳亮丽, 但其长效耐久性能远不及传统的矿物 - 石灰复合体系。

从透气性和水汽平衡的角度分析, 天然石灰 - 糯米浆体系具有适宜的微孔结构(孔隙率约 25%~30%, 孔径分布集中在 $0.1\sim10 \mu\text{m}$ 之间), 含水率和孔隙率控制得当, 能够与大理当地干湿交替的气候形成“呼吸”式平衡, 避免水汽在彩绘层下长期滞留而引发破坏[19][24]。而现代合成树脂涂料则缺乏这种与自然环境的自适应调节能力。加速老化实验(湿热 $80^{\circ}\text{C}/\text{RH}80\% +$ 紫外辐照循环)表明: 天然矿物 - 石灰彩绘在 500h 老化后色差 $\Delta E < 3$, 无明显起皮; 丙烯酸彩绘在 200 h 后即出现起皮, 500 h 后大面积脱落[25]。天然材料与合成材料形成体系的不同指标如下(见表 3)。

Table 3. Performance comparison of natural materials and synthetic materials
表 3. 天然材料与合成材料性能对比

指标	天然石灰 - 糯米浆体系	丙烯酸乳液体系[25]
28 d 抗压强度(MPa) [26]	1.2~1.5	0.5~0.8
透湿系数($\times 10^{-6} \text{ g/m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa}$)	2.5~3.0	0.2~0.4
孔隙率(%) [26]	25~30	5~10
加速老化寿命(h, $\Delta E < 5$)	800~1000	150~250
实际保存年限	20~50 年	3~8 年

5. 人文与地理环境适应性分析

5.1. 自然地理环境对材料选择的影响

大理地区地处云贵高原西缘, 位于东经 $100^{\circ}07'\sim100^{\circ}18'$, 北纬 $25^{\circ}34'\sim25^{\circ}46'$ 之间, 苍山洱海之间形成独特的“洱海盆地”地形(见图 1)。年均温约 15.1°C , 最冷月(1 月)均温 8.2°C , 最热月(7 月)均温 20.9°C , 年较差仅 12.7°C , 气候温和。年降水量约 1050 mm, 但分布极不均匀: 雨季(5~10 月)降水量占全年的 85% 以上, 干季(11~4 月)降水稀少(见图 2)。海拔在 1970 m 至 2200 m 之间, 紫外线强烈(年均紫外线指数 ≥ 8 的天数超过 200 天), 对彩绘材料的耐候性提出极高要求。

当地石灰岩(CaCO_3)资源极为丰富——苍山地质公园内石灰岩出露面积超 200 km^2 , 且苍山地区盛产天然砂石料及各类矿物颜料(孔雀石、蓝铜矿、朱砂等均有矿化点于此)取材便利使石灰基材料成为最易获取且经济实惠的黏结剂。干湿季节交替对墙体材料提出了快速排水和抗溶胀的要求——石灰与糯米浆体系的吸湿等温线呈“S”型, 当环境湿度高于 75% 时可主动向外排湿, 有效避免水分滞留引起的膨胀开

裂。而雨季降水集中且处于坡地导致大理地区的排水条件要求墙体材料具备控制毛细水上渗的能力。

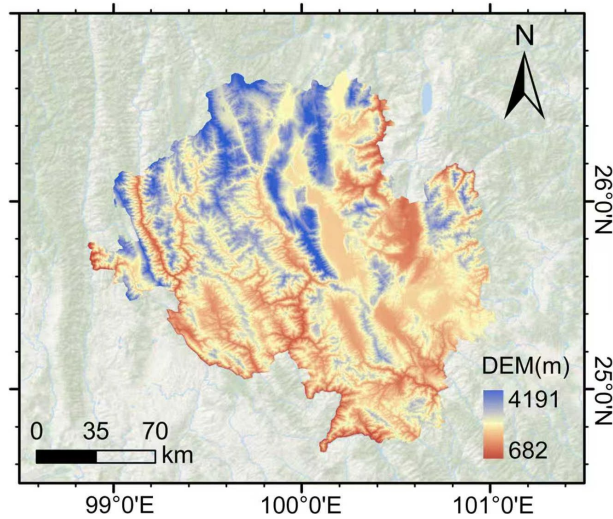


Figure 1. Elevation map of Dali
图 1. 大理地势高程图

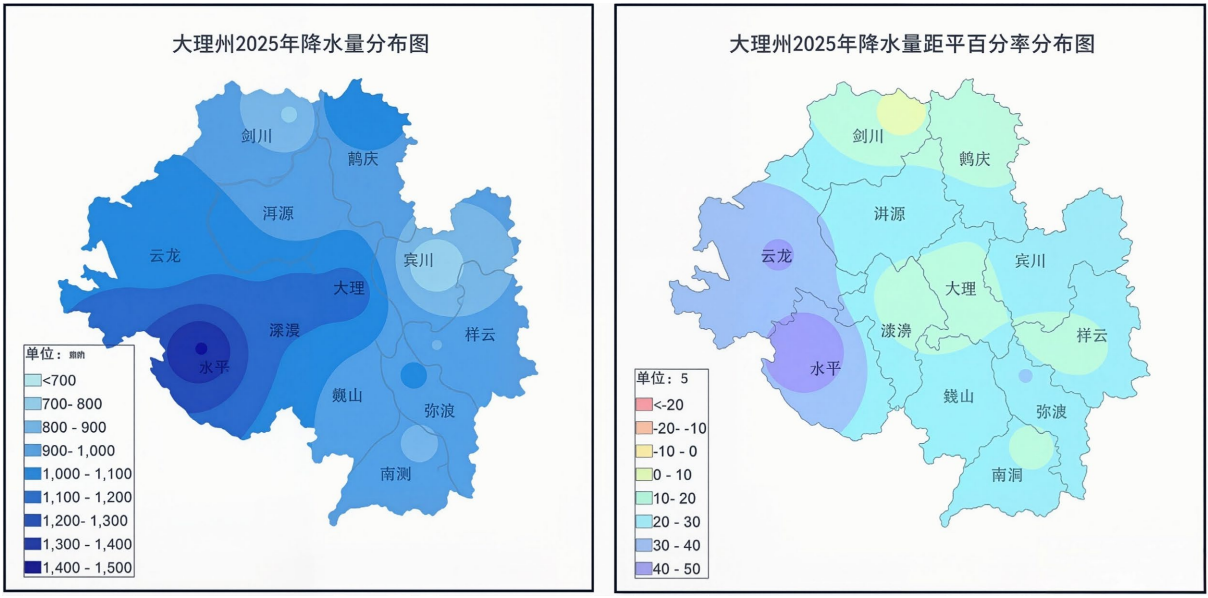


Figure 2. Precipitation distribution map of Dali prefecture [27]
图 2. 大理全州行政区降水图[27]

根据毛细现象基础理论，多孔材料中毛细上升高度与孔隙半径成反比。关于孔隙率与毛细上升高度的公式如下：

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r} \quad (1)$$

式中， r 为多孔材料的毛细管半径，此处即为孔隙率； ρ 为液体密度，通常情况下是雨水； g 是重力加速度(常数)； σ 指液体表面张力，一般情况下是雨水； θ 为液体与毛细管壁的接触角($^\circ$)，完全润湿时 $\theta = 0^\circ$ 。

由于 ρ 、 g 、 σ 、 θ 通常情况下不变，所以为了控制毛细水上渗高度 h ，只能改变墙体材料的孔隙率 r 。

因为 r 与 h 呈负相关关系, 所以孔隙率越大, 毛细上升高度越低; 孔隙率越小, 毛细上升高度越高。但是孔隙率过大则会影响房屋的稳定性等其他因素。经过不断调试, 白族先民巧妙地把石灰-细砂以约 1:2.5 的比例配比, 找到了一个能兼顾各方面需求的最优方案。这个比例筑城墙体的孔隙率约为 28%, 可有效阻断毛细上升通道(毛细上升高度 ≤ 30 cm), 降低墙体持水量, 从而使墙体保持干脆, 延长彩绘保存时间[28]-[30]。

5.2. 白族色彩文化与材料选择

白族的色彩文化与宗教信仰深刻影响了彩绘的原料选用。《南诏图传》等史料表明, 南诏、大理国时期白族建筑中即已开始广泛采用彩绘。白族建筑多为土木结构, 青砖、白墙、灰瓦与彩绘相互协调映衬, 以黑、白、灰为主色调, 着重突出和体现“白色”这一主体审美取向。白色在白族文化中象征纯洁、光明和尊贵, 白族自称“白子白女”, 尚白传统源远流长[31]。

蓝、绿、红、黑等色彩不仅具有装饰意义, 更承载着白族人民对自然的崇拜以及对吉祥幸福生活的祈愿。蓝色代表苍山和洱海的碧波, 绿色象征森林和庄稼的生机, 红色寓意喜庆和避邪, 黑色则用于勾勒轮廓、增强对比。矿物颜料因其色彩饱和度高、耐候性好、且具有天然的美感, 成为白族彩绘的首选。朱砂自古以来被认为有辟邪功能, 常用于门楣、梁柱等关键部位; 石青和石绿则多用于绘制花鸟、山水等自然题材; 赭石用于绘制木质纹理; 炭黑用于书写诗文和绘制边框。这些色彩共同构成了独特的地域色彩符号体系。

5.3. 材料配比的经验智慧

白族工匠在长期的实践建造中形成了科学的材料配比经验。传统灰浆中石灰与细砂的体积比通常为 1:2.5, 这一比例可使灰浆整体堆积密度最优、孔隙率适中; 若石灰占比过高, 砂浆干缩率会超过 0.5%, 极易出现表面开裂缺陷, 而含砂量过大则会直接降低砂浆整体力学强度, 影响墙体稳定性[25][32]。在有机改性材料配比方面, 糯米浆的最佳掺量约为石灰重量的 3%~5%, 现代试验证实, 3%掺量的糯米浆可显著优化石灰砂浆性能, 使材料抗折强度提升约 30%, 同时干缩率降低 40%左右, 有效改善传统石灰砂浆易开裂、韧性差的问题[33][34]。

在白族传统彩绘地仗猪血灰体系中, 猪血与石灰的配比约为 1:3, 桐油掺量控制在石灰重量的 5%~10%。桐油的掺入既能大幅提升灰浆防水层密度与耐候性, 又能为表层彩绘提供适宜的变形余量, 增强彩绘层的柔韧度与附着力, 避免漆膜脆裂脱落[35][36]。整体来看, 白族传统建筑灰浆的各类配比参数并非经验化的偶然结果, 而是历代工匠在数百年营造实践中总结迭代的最优工艺配方, 其材料机理与性能规律与现代建筑材料科学的试验结论高度契合[37]。

6. 结论、局限性与建议

6.1. 结论

本研究通过对大理白族彩绘的颜料、地仗材料及界面反应机理的系统分析, 得出以下主要结论:

- 1) 白族彩绘的天然颜料体系以碱式碳酸铜(石青、石绿)、硫化汞(朱砂)、氧化铁(赭石)和碳酸钙(白垩)等矿物成分为主体, 胶结材料为猪血灰或纸筋灰, 形成了具有地域特色的材料配方。
- 2) 颜料层与墙面地仗层之间的“碳化-钙矾石协同固化”及 Ca^{2+} 桥接吸附机制, 使界面致密且应力协调。SEM 观测显示界面过渡区厚度约 50~100 μm , 无明显裂缝, C-S-H 凝胶与方解石晶体交错生长, 从而有效抑制了起皮脱落现象。褪色主要源于有机胶结材料的光氧化降解及部分矿物颜料晶型转变。
- 3) 天然矿物-石灰复合体系在耐久性和透气性方面均显著优于现代丙烯酸乳液等合成材料。加速老

化实验表明, 天然彩绘的老化寿命约为合成材料的 4~5 倍。

4) 大理独特的干湿交替气候、海拔地形条件及白族“尚白”色彩文化传统, 共同塑造了当地特定原料及配比的选择逻辑。材料配比(石灰:砂 = 1:2.5, 糯米浆 3%~5%)与现代材料科学计算结果高度一致, 体现了传统工艺的科学内涵。

6.2. 局限性与建议

本研究全部基于已有公开文献的成分数据与实验结论开展整合分析与机理推演, 未针对大理白族彩绘实物样品开展自主采样与实验验证。文中提出的界面反应机制、性能对比结论均有待一手实验数据佐证, 对白族特有的猪血灰、纸筋灰等地仗体系的专属研究尚有不足, 适配大理本地气候的老化规律与定量预测模型也有待进一步建立。

为系统验证本文提出的“碳化-钙矾石协同固化”界面反应假说, 明确大理白族彩绘耐久性能的内在机制, 未来可通过以下实证研究展开:

1) 界面反应机理的原位微区验证实验

样品采集严格遵循文物保护最小干预原则, 选取大理喜洲、周城等地建造年代明确、保存状态完好的传统白族民居彩绘, 采用微损取样法采集 3~5 组颜料-地仗层完整剖面样品, 单样尺寸控制在 5 mm × 5 mm 以内, 同步采集同建筑的空白地仗层样品作为对照组, 全程记录取样位置、建筑年代与工艺传承背景。采用显微激光拉曼光谱(μ -Raman)对界面微区进行物相原位成像, 精准识别 C-S-H 凝胶、方解石、钙矾石等反应产物的空间分布规律; 结合场发射扫描电镜-能谱仪(FE-SEM-EDX)表征界面微观形貌与元素迁移特征, 观测方解石晶体形貌、颗粒尺寸及孔隙结构, 量化界面过渡区厚度, 验证钙离子桥接形成的有机-无机锚固层的存在, 原位证实界面反应机理。

2) 材料配比与耐久性能的加速老化实验

严格复原白族传统工艺参数制备试样, 设置三组对照体系: ① 传统基准组(石灰:细砂体积比 = 1:2.5, 3%糯米浆掺量 + 传统矿物颜料涂层); ② 特色地仗实验组(设置猪血灰、纸筋灰两种白族典型地仗体系, 搭配 2%、4%、5%梯度的糯米浆掺量); ③ 现代对照组(丙烯酸乳液 + 合成颜料涂层)。每组制备 3 个平行试样, 统一经 28 天标准养护后开展试验。

设置的加速老化循环药模拟大理高海拔强紫外、干湿交替的气候特征。设置紫外辐照(强度 80 W/m²)联合温湿度循环(相对湿度 40%~90%, 温度 8℃~25℃交替), 累计试验时长 1000 h, 分别在 100 h、300 h、500 h、800 h、1000 h 节点测试试样的色差 ΔE 、层间粘结强度、孔隙率与界面开裂情况, 对比不同配比材料的耐老化性能差异, 量化传统材料体系相对现代合成材料的寿命倍数。老化前后辅以傅里叶变换红外光谱(FTIR)与热重-差热分析(TG-DSC), 测定有机胶结材料的降解程度与无机碳化产物的含量变化, 揭示“有机胶结先老化、无机骨架持粘结”的褪色不脱落演化路径。

3) 现场长期监测与老化预测模型构建

选取保存状态完好、建造年代可考的白族彩绘建筑建立长期监测点, 按季度定期监测环境温湿度、紫外线强度、墙体含水率与彩绘色度、附着力等指标, 积累原位老化基础数据。结合加速老化实验结果, 建立适配大理本地气候的彩绘老化预测模型, 量化不同环境因子对褪色与界面劣化的贡献权重, 为白族彩绘的预防性保护与修复材料选型提供量化依据。

本研究为大理白族彩绘的材料学机理分析提供了系统性的理论推演框架, 后续通过上述实验方案的实证验证, 可进一步完善传统彩绘耐久机理的理论体系, 为白族彩绘的科学化保护、修复与非遗技艺传承提供扎实的实验支撑与实践指导。

基金项目

福建省中青年教育科研项目“新经济下基于全产业链酒店复合技能型人才培养探索与思考”(项目编号: JAS21601); 云南大学大学生创新创业训练计划项目“白韵新绘”——大理白族彩画技艺的数字传承与文创应用(项目编号: ZL20256109)。

参考文献

- [1] 尤贵媚, 章文杰, 曹振伟, 等. 故宫奉先殿彩画地仗制作材料及工艺研究[J]. 广西民族大学学报(自然科学版), 2022, 28(3): 9-13.
- [2] 王丽琴, 严静, 樊晓蕾, 等. 中国北方古建油饰彩画中绿色颜料的光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 453-457.
- [3] 郭瑞. 山西民间古建筑油饰彩画制作材料及工艺分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2014.
- [4] 刘梦雨. 工匠的调色盘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2024.
- [5] 段振如. 白族传统村落周城村建筑装饰研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南艺术学院, 2022.
- [6] 严静. 中国古建油饰彩画颜料成分分析及制作工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2010.
- [7] 严静, 王丽琴, 李立, 等. 北京颐和园古建筑上红色颜料的分析研究[J]. 分析科学学报, 2010, 26(3): 32-35.
- [8] 孙延忠, 姜凯云, 张宁. 广元千佛崖莲花洞彩绘颜料拉曼光谱分析[J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31(2): 77-85.
- [9] 韩斯琴高娃, 哈斯乌力吉, 林翔, 等. 利用拉曼光谱技术检测中蒙药中朱砂的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(10): 2773-2775.
- [10] 杨玉璋, 张居中, 左健, 等. 钟离君柏墓出土彩绘陶器颜料的光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(4): 1130-1133.
- [11] 赵静, 王丽琴. 拉曼光谱在古建彩绘颜料分析中的应用[J]. 光散射学报, 2018, 30(4): 321-328.
- [12] 郑海飞, 孙樯, 张鼎, 等. 0.1~800 MPa 压力下方解石拉曼光谱的实验研究[J]. 岩石学报, 2015, 31(8): 2455-2461.
- [13] 杜广鹏, 范建良. 方解石族矿物的拉曼光谱特征[J]. 矿物岩石, 2010, 30(4): 32-35.
- [14] Burgio, L. and Clark, R.J.H. (2001) Library of FT-Raman Spectra of Pigments, Minerals, Pigment Media and Varnishes, and Supplement to Existing Library of Raman Spectra of Pigments with Visible Excitation. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **57**, 1491-1521. [https://doi.org/10.1016/s1386-1425\(00\)00495-9](https://doi.org/10.1016/s1386-1425(00)00495-9)
- [15] de Faria, D.L.A., Silva, S.V. and de Oliveira, M.T. (1997) Raman Microspectroscopy of Some Iron Oxides and Oxyhydroxides. *Journal of Raman Spectroscopy*, **28**, 873-878. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-4555\(199711\)28:11<873::aid-jrs177>3.0.co;2-b](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4555(199711)28:11<873::aid-jrs177>3.0.co;2-b)
- [16] RRUFF Project. Raman 光谱数据库[DB/OL]. <http://www.ruff.info>, 2026-06-14.
- [17] Urmos, J., Sharma, S.K. and Mackenzie, F.T. (1991) Characterization of Some Biogenic Carbonates with Raman Spectroscopy. *American Mineralogist*, **76**, 641-646.
- [18] Vandenabeele, P., Wehling, B., Moens, L., et al. (2000) Analysis with Micro-Raman Spectroscopy of Natural Organic Binding Media and Varnishes Used in Art. *Analytica Chimica Acta*, **407**, 261-274.
- [19] 杨富巍, 张秉坚, 曾余瑶, 等. 传统糯米灰浆科学原理及其现代应用的探索性研究[J]. 故宫博物院院刊, 2008(5): 105-114+159.
- [20] 郑利平, 武仙竹, 金普军, 等. 重庆巫山大昌蓝家寨遗址石灰基灰浆成分分析[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2014, 31(1): 42-47.
- [21] 李广燕, 何静, 徐明霞. 利用 SEM 探讨传统糯米-石灰灰浆的硬化机理[J]. 江西建材, 2018(4): 15-19.
- [22] 马珍珍, 王丽琴, Krist, G., 等. 红外光谱法研究古代彩绘蛋白胶料光老化的二级结构变化[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(9): 2712-2716.
- [23] 王丽琴, 严静, 樊晓蕾, 等. 中国北方古建油饰彩画绿色颜料的分析研究[J]. 文物保护与考古科学, 2010, 22(3): 15-22.
- [24] 兰明章, 聂松, 王剑锋, 张巧伟, 陈智丰. 古建筑修复用石灰基砂浆的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 1512-1516.
- [25] 龚欣, 韩向娜, 陈坤龙, 等. 丙烯酸酯乳液文物保护材料耐老化性能评价[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(7):

- 2181-2187.
- [26] 曹泽杰, 陆建鸿, 张运华. 高强预糊化糯米灰浆制备与力学性能提升机制[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2119-2128.
- [27] 大理白族自治州 2025 年度气候公报[EB/OL].
https://www.dali.gov.cn/dlzmzf/c100639/pc/content/2032383262200991744/content_2032383262200991744.html, 2026-06-14.
- [28] 范文军. 糯米浆-石灰复合材料固化遗址土吸水与失水特性研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [29] 贾栋钦, 裴向军, 张晓超, 周立宏. 改性糯米灰浆固化黄土的微观机理试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 90-96.
- [30] 王立志, 黄继忠, 任建光, 梁喜平. 平遥古城墙毛细水上升控制方法探索性研究[J]. 文物世界, 2016(6): 64-67.
- [31] 杨富全. 大理白族民居建筑的装饰彩绘艺术研究[J]. 房地产世界, 2021(2): 131-133.
- [32] 杨富巍, 张秉坚. 以糯米灰浆为代表的传统灰浆——中国古代的重大发明之一[J]. 中国科学(E 辑: 技术科学), 2009(1): 1-7.
- [33] 纪晓佳, 宋茂强, 庞苗. 糯米浆三合土的物理力学性能试验研究[J]. 建筑技术, 2013, 44(6): 540-543.
- [34] 李晓, 戴仕炳, 朱晓敏. “灰作六艺”——中国传统建筑石灰研究框架初探[J]. 建筑遗产, 2019(3): 47-53.
- [35] 马涛. 古建筑地仗层材料(猪血灰、油灰)性能与工艺探析[J]. 文物保护与考古科学, 2016, 28(S1): 112-116.
- [36] 周乾. 故宫古建筑油饰技艺中的传统材料研究[J]. 施工技术, 2024, 53(17): 107-111.
- [37] 宾慧中. 滇西北剑川匠系世传营造口诀研究[J]. 建筑遗产, 2016(3): 98-107.