材料學輯要
Compendium of Materials Science
ISSN Print: 3079-5524
ISSN Online: 3079-5532
https://doi.org/10.63313/MS.8001

酶联免疫吸附法在壁画胶料分析中的应用

贾萌

北京联合大学/应用文理学院，北京市 海淀区

发布日期：2026年10月20日

摘　要

壁画胶料的成分鉴别是研究古代壁画制作工艺及保存状况的重要依据。酶联免疫吸附法（ELISA）基于抗原与抗体的特异性结合及酶促信号放大机制，可用于微量蛋白质类胶料的检测。本文通过文献梳理与方法分析，概述ELISA的基本原理及检测流程，并结合古代墓葬壁画中狗胶原蛋白的鉴别，以及浙江省文物建筑壁画、四川广汉龙居寺中殿壁画等材料研究案例，探讨其在胶料识别、制作工艺研究及文物保护中的应用价值。同时，分析古代蛋白质降解、抗体特异性、基质干扰及结果解释等方面的局限，提出多技术交叉验证与现场快速筛查的发展方向。ELISA可为壁画蛋白质类胶料的鉴别提供有效依据，但仍需结合文物材料特征及其他分析技术进行综合判断。

关键词

酶联免疫吸附法；壁画胶料；蛋白质鉴别；文物保护；科技考古

Application of Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (ELISA) in the Analysis of Mural Binding Materials

Meng Jia

College of Applied Arts and Sciences, Beijing Union University, Haidian District, Beijing, China

Abstract

The identification of mural binding materials provides important evidence for investigating ancient mural production techniques and assessing their preservation conditions. Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA), based on specific antigen – antibody interactions and enzyme-mediated signal amplification, can be applied to the detection of trace proteinaceous binding materials. Through a literature review and methodological analysis, this paper outlines the fundamental principles and procedures of ELISA. Drawing on studies concerning the identification of canine collagen in ancient tomb murals and the analysis of mural materials from historic buildings in Zhejiang Province and the central hall of Longju Temple in Guanghan, Sichuan

文章引用：贾萌. (2026). 酶联免疫吸附法在壁画胶料分析中的应用. 材料学辑要, 1(2), 1 – 6. ISSN Print: 3079-5524, ISSN Online: 3079-5532.
DOI: 10.63313/MS.8001

Province, it discusses the application value of ELISA in binding material identification, mural production studies, and cultural heritage conservation. Furthermore, limitations related to ancient protein degradation, antibody specificity, matrix interference, and result interpretation are examined. Future directions, including cross-validation using complementary analytical techniques and rapid on-site screening, are proposed. ELISA can provide valuable evidence for identifying proteinaceous binding materials in murals; however, its results should be interpreted in conjunction with the characteristics of cultural heritage materials and other analytical techniques.

Keywords

Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA); Mural binding materials; Protein identification; Cultural heritage conservation; Archaeological science

Copyright © 2026 by author(s) and Erytis Publishing Limited.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

壁画是记录古代社会生活、宗教信仰与艺术实践的重要文化遗产。其绘制通常涉及颜料、地仗层和胶结材料等多种物质，材料选择与施用方式既影响画面呈现，也与壁画的附着性、稳定性和后续病害密切相关[1,7]。与相对易于识别的部分无机颜料相比，壁画中的有机胶料含量可能较低，且经历长期埋藏或暴露后易发生老化、降解和环境污染，因而其准确鉴别面临一定困难。

古代残留物分析能够从物质层面补充传统考古和艺术史研究，为认识历史时期的材料使用和技术传播提供依据[2]。在此背景下，针对目标蛋白质的免疫学检测逐渐受到关注。酶联免疫吸附法（ELISA）具有靶向性较强、检测灵敏度较高等特点，已应用于古代乳制品残留物及丝绸文物等有机材料研究[3-4,6]。在壁画领域，研究者也尝试通过 ELISA 识别胶结材料中的动物源蛋白质，如狗胶原蛋白[8]。本文通过对文献和在壁画胶结物检测中的应用进行总结，为壁画材料分析和保护研究提供参考。

2. 壁画胶料研究与 ELISA 检测基础

2.1. 壁画胶料的研究意义

胶料在壁画材料体系中主要承担黏结与固着作用，其组成和使用方式关系到颜料层与基底之间的结合状态。通过对壁画胶料的分析研究，不仅能够揭示古代壁画的材料选择与制作工艺，还可为探讨不同历史时期和地区的绘画技术提供科学依据。同时，胶料的老化与降解可能引起颜料层起甲、剥落等病害。因此，开展壁画胶料的成分鉴别与特性研究，对于认识古代壁画制作工艺、分析壁画病害成因以及制定科学合理的文物保护修复方案具有重要意义。浙江省文物建筑壁画彩绘颜料与胶结物的检测研究[1]、四川广汉龙居寺中殿壁画制作材料与工艺研究[7]，均说明将胶结材料纳入综合材料研究具有必要性。

胶料种类与壁画年代、地域及工艺传统之间的联系不能仅由单一蛋白质检测结果直接推定，而应与壁画层位、其他材料证据和历史背景相互印证。

2.2. ELISA 的基本原理

酶联免疫吸附法（ELISA）是一种在生物医药领域所应用的分析技术，基本原理是基于抗原-抗体的

特异性结合反应以及酶的催化放大作用，能够实现对特定物质的高灵敏度检测。

免疫反应基础：ELISA 利用抗原（如待检测的古代残留物中的特定蛋白质、多肽等物质）与相应抗体之间的高度特异性结合反应。抗体能够精准识别并结合目标抗原，形成抗原-抗体复合物。这种特异性结合就像一把 “钥匙”（抗体）对应一把 “锁”（抗原），确保检测的准确性和特异性。抗体的选择与制备：针对不同的检测目标，需要选择或制备特异性的抗体。这些抗体可以通过多种方法获得，如利用动物免疫反应产生多克隆抗体，或通过生物技术手段制备单克隆抗体。特异性抗体的质量和性能直接影响 ELISA 检测的效果。

该方法用于壁画胶料分析时，检测对象通常为某一类预设的蛋白质抗原或其残存的可识别表位。研究者根据拟检胶料选用相应抗体，对微量样品进行提取和免疫检测，并通过阳性、阴性及空白对照评价信号可靠性。ELISA 的优势是能够对明确目标开展灵敏筛查，其局限则在于不能对样品内未知的全部有机成分作无差别识别。

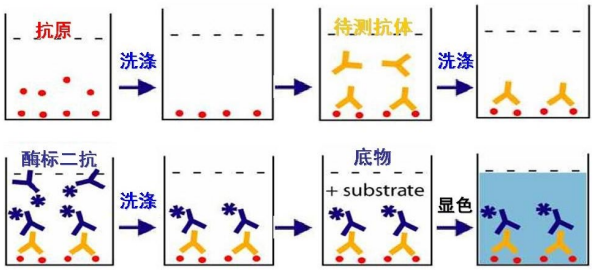


Figure 1. Principle of Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (ELISA)
图 1. 酶联免疫吸附法原理

3. ELISA 在壁画胶料分析中的应用

酶联免疫吸附法在壁画胶料研究中的应用主要体现在特定动物源蛋白质的识别及其与综合材料分析技术的互补作用两个方面。与一般性的有机物成分检测方法相比，ELISA 具有目标针对性较强、适用于微量目标蛋白质分析等特点，能够为壁画胶料的成分鉴别提供补充证据。但受古代蛋白质降解、抗体交叉反应及复杂样品基质等因素影响，单一免疫检测结果仍难以全面反映胶料的原始组成及其动物来源。因此，在实际研究中，应结合壁画材料特征及其他分析技术，对检测结果进行综合判断。通过多技术联合分析与交叉验证，可进一步提高壁画胶料鉴别的可靠性，为古代壁画制作工艺研究及文物保护修复提供更加充分的科学依据。

3.1. 古代墓葬壁画中动物源胶料的识别

动物源胶料是古代壁画制作过程中使用的重要有机胶结材料之一。对动物源胶料进行成分鉴别，不仅有助于揭示古代壁画的材料组成及制作技术，还能够为研究不同地区和历史时期的绘画材料选择提供科学依据。然而，由于古代壁画长期受到环境温湿度变化、微生物活动及自然老化等因素的影响，胶料中的蛋白质可能发生不同程度的降解，使其原始成分的识别面临一定困难。

颜菲等[8]以古代墓葬壁画胶结材料中的狗胶原蛋白为研究对象，探索了酶联免疫吸附法（ELISA）在特定动物源蛋白质鉴别中的应用可行性。该方法利用抗原与抗体之间的特异性结合反应，通过选择针对目标胶原蛋白的免疫试剂，对壁画胶结材料中可能存在的相应蛋白质成分进行识别。与仅判断样品中是否存在有机物的分析方法相比，ELISA 具有较强的目标针对性，能够在预先设定检测对象的条件下，

为进一步确定胶料的可能来源提供分析线索。尤其对于样品量有限、目标蛋白质含量较低的古代壁画材料，ELISA 具有一定的应用潜力。

不同动物来源的胶料可能在材料获取、加工工艺及使用性能等方面存在差异，其选择与应用也可能受到当地自然资源、传统工艺及社会经济条件的影响。通过对壁画胶料中目标蛋白质的识别，可以为比较不同地区、不同历史时期壁画制作材料的不同提供基础信息，为进一步探讨古代绘画材料的使用及技术提供参考。

3.2. 壁画综合材料研究中的定位

古代壁画通常由地仗层、颜料层及相关胶结材料等共同构成，不同材料之间相互联系，共同影响壁画的制作效果和保存状态。壁画制作材料的研究不仅包括对颜料矿物成分的分析，还涉及胶结材料、地仗结构及制作工艺等多个方面。

陈尔新等[1]开展了浙江省文物建筑壁画彩绘颜料和胶结物的检测研究，赵凡等[7]则对四川广汉龙居寺中殿壁画的制作材料与工艺进行了研究。这些研究从壁画材料组成及制作技术等方面提供了相关案例，为理解胶结材料在古代壁画制作体系中的作用提供了文献依据。壁画中的颜料、胶料及地仗材料并非相互独立，其材料选择和组合方式往往与具体的绘制工艺密切相关。因此，在研究壁画胶料时，需要结合颜料成分、地仗层结构及彩绘工艺等信息，对其材料特征和使用方式进行综合分析。

在壁画材料分析中，不同检测技术具有各自的适用范围。X 射线衍射、拉曼光谱等技术可用于分析部分无机颜料和矿物材料的组成；傅里叶变换红外光谱能够提供有机物及部分无机物的分子结构信息，但在复杂混合物中，对特定动物来源蛋白质的鉴别能力往往受到限制。与上述分析技术相比，ELISA 主要利用抗原与抗体之间的特异性识别，对预先选定的蛋白质目标进行检测，因而能够在壁画蛋白质类胶料的鉴别中发挥补充作用。将 ELISA 与其他材料分析技术相结合，有助于从无机成分、有机胶结材料及微观结构等不同层面认识壁画的制作材料与工艺特征。

以四川广汉龙居寺中殿壁画为例，其制作材料与工艺研究为理解古代壁画材料体系提供了具体案例[7]。在此类综合材料研究中，胶料分析不应仅停留在对某一有机成分的识别，还应结合颜料层与地仗层之间的结构关系，探讨胶结材料在壁画制作过程中的作用。需要说明的是，综合材料研究中涉及的不同检测结论，应当根据原始文献所采用的具体分析方法加以区分，不能将其他检测技术获得的结果直接视为 ELISA 的实验成果。

此外，胶料成分与壁画保存状况之间的关系也是综合材料研究的重要内容。壁画在长期保存过程中受到环境湿度、温度变化及盐分迁移等因素的影响，不同材料之间可能产生复杂的物理化学变化。蛋白质类胶料发生老化后，其结构和性能可能发生改变，从而影响颜料层的黏结状态。通过对胶料成分及其保存状况的研究，可以为认识壁画病害形成的材料因素提供参考。但壁画病害通常由多种因素共同作用形成，因此，不能仅依据胶料种类判断病害成因，而应结合环境调查、材料检测及病害特征开展综合评价。

3.3. 与其他考古有机残留物研究的关联

有机残留物分析是科技考古研究的重要组成部分，通过对考古遗存中残留的蛋白质、脂类及其他有机化合物进行检测，可以为认识古代人类的生产生活方式、物质利用及文化活动提供科学依据。由于部分有机物在长期埋藏和保存过程中容易发生降解，其残留量通常较低，且易受到环境污染及其他物质的干扰，因此，对分析方法的灵敏度、特异性及可靠性提出了较高要求。ELISA 作为一种基于免疫识别的分析技术，能够针对特定蛋白质开展检测，在部分考古有机残留物研究中具有一定应用价值。

ELISA 在壁画研究之外亦具有方法借鉴价值。洪川等[6]对古代牛奶残留物开展酶联免疫吸附测定研究，说明免疫学技术可用于考古样品中目标蛋白质的识别。丝绸文物研究中蛋白质组学与免疫学技术的结合[3-4]，则从另一类有机文物材料展示了蛋白质检测方法的应用空间。不同材料的蛋白质保存状态和基质环境并不一致，相关经验可供参考，但检测方案不能未经验证便直接移用于壁画样品。

4. ELLSA 的优势局限与应用发展

4.1. 方法优势

相较于不具备特定蛋白识别能力的常规宏观观察，ELISA 能够围绕明确目标开展针对性检测；在试剂和流程适配的条件下，还可用于较少样品量的分析。这对取样受严格限制的壁画研究具有现实意义。其操作步骤具有一定的标准化潜力，便于设置对照及开展样品间比较。

但“微量取样”不等同于“完全无损”。壁画 ELISA 往往仍需要取得样品并进行前处理，研究中应严格遵循文物保护要求，控制取样位置和数量。

4.2. 局限性

古代样品长期经历温湿度变化、盐害及微生物作用，原始蛋白质及抗体可识别表位可能发生变化，导致信号减弱甚至假阴性。其次，抗体特异性与亲和力直接影响检测可信度；若对相近蛋白质存在交叉识别，则可能出现假阳性。颜料、无机盐、污染物及后期修复材料都可能干扰提取与显色过程。最后，ELISA 主要回答预设目标是否被检出，难以独立完成对复杂未知混合胶料的全面组成解析。

因此，对疑似阳性结果应结合空白对照、参照材料和重复检测加以核查；对阴性结果也应考虑样品降解或提取效率不足的可能。不能仅凭一次免疫信号建立完整的材料来源。

4.3. ELLSA 在科技考古中的发展方向

4.3.1. 多技术联合与证据交叉验证

将 ELISA 与傅里叶变换红外光谱、拉曼光谱及 X 射线衍射等技术结合，可从蛋白质相关信号、分子振动特征及部分无机物相等不同角度理解壁画材料体系。各方法的适用对象和检出能力存在差异，光谱或衍射结果并不能自动验证某一动物物种来源。对于争议性胶料鉴别，可依据研究条件进一步引入其他适当的蛋白质分析方法开展独立核验。

4.3.2. 现场快速筛查与微量分析

针对考古现场和文物保护现场的实际需求，未来可探索简化前处理、缩短检测时间和减少取样量的免疫检测流程，使其在条件允许时承担初步筛查任务。不过，现场环境的温湿度、粉尘及样品复杂性可能增加测试误差，便携化方案仍需经过灵敏度、特异性和稳定性验证；关键鉴定结论可以结合实验室复核。

5. 总结

ELISA 基于抗原—抗体特异性识别及酶促信号检测，为壁画胶料中目标蛋白质的分析提供了可行的技术路径。既有古代墓葬壁画狗胶原蛋白研究展示了其在动物源胶料识别方面的应用潜力，浙江省文物建筑壁画和四川广汉龙居寺中殿壁画等综合材料研究则表明，胶料信息需要置于壁画整体制作工艺中进行解释。

由于古代蛋白质降解、抗体交叉反应及复杂基质干扰等因素，ELISA 检测结果不宜被视为独立且充分的材质定论。通过加强取样与质控规范、引入多技术交叉验证，并逐步探索可验证的现场快速筛查方案，有望进一步发挥该方法在壁画科学研究和保护实践中的作用。

参考文献

[1] 陈尔新, 张秉坚, 林袁顺, 等. 浙江省文物建筑壁画彩绘颜料和胶结物的检测研究[J]. 东方博物, 2018(03): 107-113.

[2] 杨益民. 古代残留物分析在考古中的应用[J]. 南方文物, 2008(02): 20-25.

[3] 陈茹茹. 基于蛋白质组学和免疫学技术的丝绸文物分析研究[D]. 浙江理工大学, 2020. DOI:10.27786/d.cnki.gzjlg.2020.000303.

[4] 古锦翠. 基于蛋白质组学与免疫学方法的丝绸文物分析鉴定研究[D]. 浙江理工大学, 2019.

[5] 周智波, 杨杰, 高愚民. 克孜尔石窟出土蓝色颜料研究[J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31(04): 109-115. DOI:10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2019.04.013.

[6] 洪川, 蒋洪恩, 杨益民, 等. 酶联免疫吸附测定法在古代牛奶残留物检测中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 2011, 23(01): 25-28. DOI:10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2011.01.016.

[7] 赵凡, 王冲, 陈尔新, 等. 四川广汉龙居寺中殿壁画制作材料与工艺研究[J]. 文物保护与考古科学, 2020, 32(04): 8-15. DOI:10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2020.04.002.

[8] 颜菲, 葛琴雅, 李强, 等. 应用酶联免疫吸附法(ELISA)初探古代墓葬壁画胶结材料中的狗胶原蛋白[J]. 文物保护与考古科学, 2014, 26(01): 71-75. DOI:10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2014.01.002.