

158/0...
2011
2
“十一五”国家科技支撑计划重点项目



“十一五”文化遗产保护领域 国家科技支撑计划重点项目论文集 大遗址保护关键技术研究 与 开发 (II)

科技部社会发展科技司 编
国家文物局博物馆与社会文物司(科技司)



文物出版社

封面设计 周小玮
责任印制 张道奇
责任编辑 张晓曦

图书在版编目(CIP)数据

大遗址保护关键技术研究与发展(Ⅱ) / 科技部社会发展科技司, 国家文物局博物馆与社会文物司(科技司)编.
—北京: 文物出版社, 2010. 11

(“十一五”文化遗产保护领域国家科技支撑计划重点项目论文集)

ISBN 978 - 7 - 5010 - 3083 - 5

I. ①大… II. ①科…②国… III. ①文化遗址 - 文物保护 - 中国 - 文集 IV. ①K878. 04 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 216733 号

“十一五”文化遗产保护领域国家科技支撑计划重点项目论文集

大遗址保护关键技术研究与发展(Ⅱ)

科技部社会发展科技司 编
国家文物局博物馆与社会文物司(科技司)

*

文物出版社出版发行

(北京东直门内北小街2号楼)

<http://www.wenwu.com>

E-mail: web@wenwu.com

北京达利天成印刷装订有限责任公司印刷

新华书店经销

787 × 1092 1/16 印张: 42

2010年11月第1版 2010年11月第1次印刷

ISBN 978 - 7 - 5010 - 3083 - 5 定价: 165.00元

“十一五”文化遗产保护领域
国家科技支撑计划课题成果论文集
编辑委员会

主任委员：

王伟中 宋新潮

委员：（以姓氏笔画为序）

马 涛 马清林 马燕合 王旭东 刘华彬 闫 金
宋永华 苏伯民 吴来明 吴顺清 陈建明 陈港泉
周文生 苗建民 郑明燕 罗 静 段 勇 麻名更

序 言

历史悠久、弥足珍贵的中华民族文化遗产，既是不可再生、不可替代的深厚物质资源，更是博大精深、绵延不断的文化资源和精神资源，有着重要的历史、艺术和科学价值，对国家的统一、民族的团结、社会的和谐、人民的幸福具有重要的意义。

文化遗产保护科技是一个开放的复杂巨系统，包括人文社会科学、自然科学、工程技术科学等一切与文化遗产保护相关的科学和技术。作为多学科高度交叉综合的集成体，文化遗产保护科技已经在文化遗产价值的调查、认定、研究、展示、利用和传承，文化遗产本体的保存、保全和修复，以及对文化遗产相关环境的控制与治理中发挥着越来越重要的作用。文化遗产保护科技的进步对文化遗产事业的发展具有决定性影响，已成为推动着我国从文化遗产大国向文化遗产保护强国转变的核心要素，同时也将对国家科学和技术整体发展做出贡献。

“十一五”期间，在科技部的大力支持下，文化遗产领域有4个项目15项课题列入国家科技支撑计划第一批启动项目。包括“文化遗产保护关键技术研究”、“中华文明探源工程”、“大遗址保护关键技术与开发”、“古代建筑保护技术及传统工艺科学化研究”。随后，“石质文物保护关键技术及南京报恩寺地宫出土文物保护关键技术研究”、“中华文明探源工程及相关文物保护关键技术研究”又相继获得批复实施。国家文物局以组织实施国家科技支撑计划等重大科研项目为契机，努力推动体制机制创新，积极寻找建立跨学科、跨领域、跨行业、跨部门的合作机制与模式。通过重大科技计划的实施，统筹考虑行业的技术研发、装备升级、人才培养、基地建设和体制机制创新，实现了文化遗产保护科技的跨越式发展。

截止2010年初，第一批启动的4个项目15项课题已全部通过了结项验收，据不完全统计，共研发新技术（工艺）21项，新产品、新材料、新装置36项，获得自主知识产权和专利179项，制定技术标准40项，培养博

士、硕士研究生 301 名，发表文章 513 篇，出版专著 15 本。一些科研成果已广泛应用于第三次文物普查、长城资源调查、重点文物保护单位、大遗址保护工程、灾后文化遗产抢救性保护、馆藏文物保存环境改善、博物馆展示提升等重大工程和重点工作，文化遗产保护科技含量大幅提升，行业自主创新能力得到显著提高。

为进一步做好科技成果的推广工作，我们就文化遗产领域科技支撑计划的部分成果汇编成册，这既是文化遗产保护科技成果的展示，也是向所有关心文化遗产保护的社会各界的回报。

值此，向勇于实践、不断创新的科技工作者，向文化遗产的保护者和守卫者致以崇高的敬意。

编 者

目 录

第一部分 古代壁画脱盐关键技术研究

- 莫高窟第 351 窟壁画疱疹和壁画地仗可溶盐分析 陈港泉 于宗仁 (3)
- 基于莫高窟成盐元素相关关系探究壁画盐害作用机理
..... 靳治良 陈港泉 钱 玲 苏伯民 吕功煊 (16)
- 沉淀电导滴定法用于敦煌莫高窟壁画地仗中阴离子的现场快速分析
..... 周 雷 杜红英 陈港泉 苏伯民 胡之德 (25)
- 敦煌壁画盐害的毛细管电泳快速检测分析 ... 杜红英 周 雷 苏伯民 胡之德 (33)
- 离子色谱技术在研究古代壁画可溶盐活动规律的应用
..... 王永进 于群力 周伟强 (41)
- 正交法制备淀粉接枝丙烯酰胺高吸水树脂
..... 马建泰 康红卫 陈港泉 苏伯民 樊再轩 (45)
- 敦煌莫高窟第 85 窟空鼓壁画灌浆加固材料筛选实验
..... 樊再轩 史迪文·瑞克比 丽莎·席克德 乔 海 唐 伟 杨金建 (50)
- 敦煌莫高窟第 85 窟壁画修复技术研究
..... 樊再轩 斯蒂文·里克比 丽莎·舍克德 乔 海 唐 伟 杨金建 (62)
- 纸条检测法对第 85 窟壁画空鼓灌浆脱盐效果的评估
..... 陈港泉 Michael Schilling 李燕飞 Neville Agnew
..... Joy Keeney Stephen Rickerby 于宗仁 Lisa Shekede (69)
- 新型合成脱盐材料在治理莫高窟盐害壁画中的试验研究
..... 苏伯民 陈港泉 樊再轩 马建泰 康红卫 李 茸 (76)
- 莫高窟第 98 窟酥碱壁画保护修复试验研究
..... 樊再轩 陈港泉 苏伯民 李燕飞 乔 海 唐 伟 (90)
- 陕西白水仓颉庙酥碱壁画脱盐修复的初步试验
..... 陈港泉 樊再轩 于群力 苏伯民 李燕飞 乔 海 唐 伟 (99)
- 北方地区寺庙、殿堂壁画可溶盐活动规律的实验室模拟研究
..... 王永进 于群力 阎 敏 马林燕 陈港泉 (108)
- 北岳庙古建墙体含水率、可溶盐对殿堂壁画的影响调查
..... 于群力 杨秋颖 马 涛 (117)

第二部分 土遗址保护关键技术研究

Traditional Mortar Represented by Sticky Rice Lime Mortar: One of the Great Inventions
in Ancient China ... Yang Fuwei Zhang Bingjian Pan Changchu Zeng Yuyao (125)

经 PS 加固土遗址水饱和强度及加固效果的环境影响研究
..... 李黎 陈锐 邵明申 裴强强 吴宏伟 王思敬 李最雄 (137)

我国丝绸之路土遗址的病害及 PS 加固 李最雄 赵林毅 孙满利 (148)

多元层状陡立土质边坡差异性风蚀效应研究
..... 崔凯 谌文武 韩文峰 梁收运 张景科 (160)

土建筑遗址表部结皮与剥离 张虎元 刘平 王锦芳 严耿升 王旭东 (170)

多元层状边坡土体风蚀速率与微结构参数关系
..... 崔凯 谌文武 张景科 韩文峰 梁收运 (185)

土建筑遗址表部土体收缩特征曲线测定
..... 刘平 张虎元 严耿升 赵天宇 王晓东 (195)

PS 材料加固遗址土试验研究
..... 和法国 谌文武 赵海英 孙满利 张景科 (207)

战国秦时期夯土长城加固强度试验研究
..... 赵海英 李最雄 韩文峰 汪稔 谌文武 (217)

交河故城瞭望台保护加固技术 孙满利 王旭东 李最雄 梁收运 张鲁 (227)

潮湿环境下古代土遗址的原位保护加固研究
..... 周环 张秉坚 陈港泉 赵海英 曾余瑶 郭青林 李最雄 王旭东 (237)

PS 材料加固遗址风蚀试验研究
..... 赵海英 李最雄 汪稔 王旭东 韩文峰 (252)

楠竹加筋复合锚杆管材力学性能试验研究
..... 王晓东 张虎元 吕擎峰 张艳军 严耿升 (259)

敦煌莫高窟崖体风化特征及保护对策 王旭东 张虎元 郭青林 吕擎峰 (268)

锚固灌浆过程中及工后交河故城崖体的变形特征研究
..... 张景科 谌文武 崔凯 和法国 任非凡 韩文峰 (282)

楠竹加筋复合锚杆施工工艺优化研究
..... 任非凡 谌文武 张景科 梁收运 和法国 王冠 崔凯 (296)

砂砾岩石窟灌浆材料 PS - F 机制研究 郭青林 王旭东 范宇权 李最雄 (306)

交河故城土体裂隙灌浆材料性能试验 杨涛 李最雄 汪万福 (316)

土遗址墙体含水量与电阻率关系研究 周仲华 郑龙 孙博 (327)

西夏王陵四号陵冲沟发育过程、特征及其影响因素	康 超 谌文武 崔 凯 孙光吉 程 佳	(335)
潮湿土遗址隔水防潮技术总结研究	周双林 杨 琴 张鹏宇	(342)
表土结皮形成影响因素述评	刘 平 张虎元 王锦芳 严耿升	(349)
西北地区石窟与土建筑遗址保护研究的现状与任务	王旭东	(360)
综合变形监测方法在新疆交河故城崖体加固中的应用	张 鲁 郭青林 裴强强 刘典国 韩 龙	(369)
环境对交河故城破坏机理研究	孙满利 李最雄 王旭东 谌文武	(377)
PS 材料加固交河故城土体试验研究	和法国 谌文武 张景科 任非凡 崔 凯	(387)
交河故城台地土体结构面的面波探测方法初步研究	崔 凯 谌文武 张景科 和法国 任非凡	(393)
交河故城东北佛寺墙体裂隙发育程度反演研究	张景科 谌文武 李最雄 郭青林	(400)
甘肃瓜州锁阳城遗址环境问题分析及整治对策	杨善龙 郭青林 蔺青涛 张国彬 刘晓东 宏 伟	(408)
中国干旱环境下土遗址保护关键技术研究新进展	王旭东	(416)
PS 材料加固西北干旱区土遗址试验研究	赵海英 李最雄 韩文峰 汪 稔	(428)
中国古代土工建造方法	张虎元 赵天宇 王旭东	(438)
古代生土建筑风蚀的主要影响因素分析	严耿升 张虎元 王旭东 张艳军	(455)
土层锚杆抗拔承载力确定方法及影响因素分析	王晓东 张虎元 吕擎峰 张艳军 王旭东	(464)
楠竹加筋复合锚杆内粘结剂力学性能试验	张虎元 张艳军 王旭东 王晓东 吕擎峰	(474)
洞窟壁画等温吸湿 - 放湿数理模型	闫 玲 张虎元 吕擎峰 王旭东 张正模	(484)
楠竹加筋复合锚杆应力传递理论模型	张艳军 张虎元 吕擎峰 王晓东 严耿升	(492)
温度作用下高陡濒危古遗址载体变形响应特征	张景科 谌文武 和法国 孙冠平 郭青林	(499)
不同浓度 PS 滴渗夯土墙表面渗透直径的分布规律	张景科 谌文武 孙满利 李最雄 王旭东	(511)
西北地区古代建筑土遗址的保护研究	李 黎 孙满利 赵海英 李最雄 王思敬	(522)

干旱区土遗址病害的分类研究	孙满利	李最雄	王旭东	谌文武	(533)
土遗址保护研究现状综述与进展	孙满利				(544)
土质文物的风蚀模型	严耿升	张虎元	郭青林	王晓东	龙玉凤 (552)
现场 PS 喷洒渗透加固深度与喷洒工艺的对比研究	张景科	孙满利	谌文武	李最雄	王旭东 (564)
传统建筑泥灰类加固材料的性能研究与机理探讨	曾余瑶	张秉坚	梁晓林		(572)
敦煌寿昌城表面风化特征研究	孙满利	王 菲	王旭东	李最雄	郭青林 (585)
环境因素对 PS 加固土遗址效果的影响	邵明申	李 黎	裴强强	王思敬	李最雄 (594)
降雨入渗条件下交河故城土质崖体渗流场计算及稳定性分析	王建新	王恩志	王思敬		(601)
交河故城 PS - C 灌浆加固材料可灌性的实验室研究	杨 璐	孙满利	黄建华	曾 涛	高 燕 (612)
交河故城土遗址边坡降雨非饱和入渗分析	王建新	王恩志	王思敬		(619)
楠竹加筋复合锚杆成孔工艺研究	任非凡	谌文武	张景科	和法国	崔 凯 (625)
温度在夯土建筑遗址风化中的作用	孙 博	周仲华	张虎元	郑 龙	(633)
莫高窟崖顶强风化层 PS 花管注浆加固试验研究	张虎元	刘 平	王旭东	王晓东	郭青林 张永霞 (640)
交河故城濒危崖体 36 区天然条件下水平位移变化特征	张景科	谌文武	和法国	崔 凯	任非凡 唐 军 (653)

第一部分

古代壁画脱盐关键技术研究

(课题编号：2006038029003)

莫高窟第 351 窟壁画疱疹和壁画地仗可溶盐分析

陈港泉^{1,2}, 于宗仁^{1,2}

(1. 敦煌研究院保护研究所, 敦煌, 736200;

2. 古代壁画保护国家文物局重点科研基地, 敦煌, 736200)

内容摘要: 本文采用能谱、X 射线衍射等分析方法对莫高窟第 351 窟的壁画疱疹进行了分析, 确定了疱疹病害的物质组成为 NaCl。壁画地仗中可溶盐的分析表明, 可溶盐的分布状况与疱疹病害的发生有密切的联系, 各种离子在壁画地仗中的分布有其各自的特征, 水分将大量的可溶盐带入壁画地仗, 水分蒸发后 NaCl 结晶形成了疱疹病害。

关键词: 莫高窟 壁画 疱疹 可溶盐

第 351 窟处于莫高窟南区的北端一层, 距地面高 2.3m。窟有前室、主室, 属莫高窟中型洞窟, 主室面积约 64m², 地面到井心约 7.6m。

第 351 窟开凿于五代时期, 西夏时期曾对整窟壁画进行过重绘, 属于西夏早期的风格。前室南北壁的两幅西方净土变是西夏较流行的题材之一, 表现形式比唐、北宋时期的简单, 风格粗犷。前室西壁甬道门南北两侧的文殊变、普贤变为西夏少见的题材。主室的二龙戏珠井心采用西夏很流行的浮雕贴金的方法, 龙身细长, 嘴尖细, 显得很灵活, 具有明显的西夏早期壁画的风格与特点^[1]。

1 第 351 窟疱疹病害的现状

第 351 窟的壁画存在着壁画颜料脱落、退色、霉变等多种病害, 其中主室北壁、南壁西侧比较均匀地分布着许多泡状的突起, 称之为壁画的疱疹病害。泡状突起直径大的一般约 3mm (图 1), 小的 1mm 左右 (图 2); 高约 1-2mm 不等。疱疹脱落后, 形成一个个小坑 (图 3), 对壁画造成很大的损伤。这种病害在莫高窟第 194 窟 (图

4)^[2]、第3窟^[3]、第35窟前室西壁南侧、第467窟甬道、第471窟西壁南侧和龕内南北两壁、第356窟东壁北侧等都有发现,具有一定的普遍性。

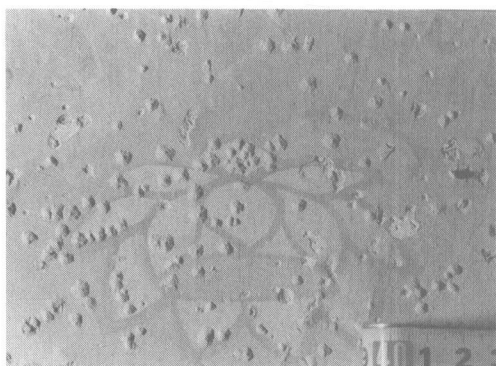


图1 莫高窟351窟疱疹状病害

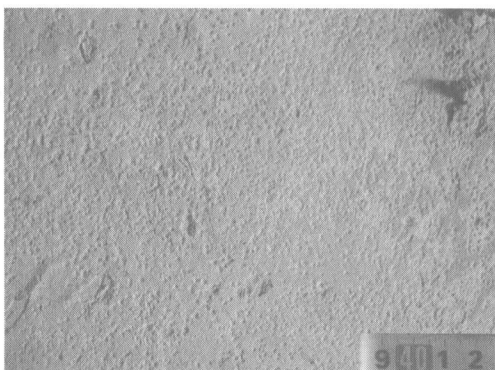


图2 莫高窟351窟疱疹状病害(颗粒较小)



图3 莫高窟第351窟疱疹使颜料破裂、脱落后,形成小坑

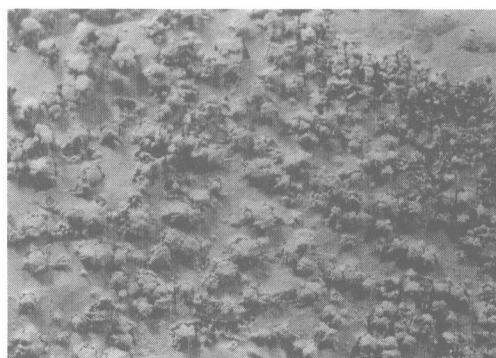


图4 莫高窟第194窟疱疹病害

疱疹病害在第351窟的分布较有规律,集中分布于主室北壁、南壁西侧上部以及龕的左右两侧壁上。从疱疹分布的特点来看,疱疹的形成是由于盐的作用,而且与水的因素密切相关。

2 壁画制作材料分析

2.1 颜料分析

第351窟的壁画颜料较单一,主要有白色、红色、绿色三种。对掉落的颜料层碎片作剖面分析,其颜料层平均厚度约0.3mm(图5)。

通过能谱、X 射线衍射分析, 确定三种颜色的元素组成和物相成分。

能谱分析仪器: 美国 Kevex 公司 X 射线能量色散谱仪。分析条件: 加速电压 20KV, 工作距离 20mm, 计数率 1000, 速电流 175picoAmps。

能谱分析结果显示, 绿色颜料中含有大量的 Cu 元素, 红色颜料中 Fe 的含量较高, 这为 X 射线衍射分析提供了参考。白色颜料中重金属含量极少, 可能为黏土类矿物。见表 1 和图 6。

采用 X - 射线衍射法对这三种颜料进行分析。分析仪器: 日本 Rigaku D/Max 2500V, 分析条件: 转靶 40KV, 100mA; 连续 $\theta/2\theta$ 扫描。

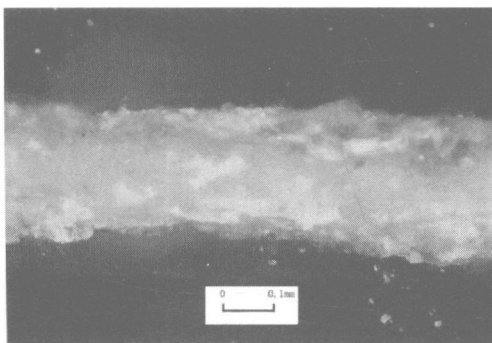


图 5 莫高窟第 351 窟颜料层剖面图

表 1 三种颜料的能谱分析结果

样品	元素相对百分含量 (%)												总量
	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Cu	Pb	
白色	31.78	0.64	13.90	2.50	31.40	1.64	0.99	0.88	15.20	0.81	0.0	0.25	99.99
绿色	15.13	0.88	5.40	4.48	14.03	0.58	14.12	1.38	10.08	1.12	31.8	0.98	99.98
红色	21.01	0.74	6.17	7.11	22.42	2.18	1.43	2.45	13.31	21.41	0.0	1.76	99.99

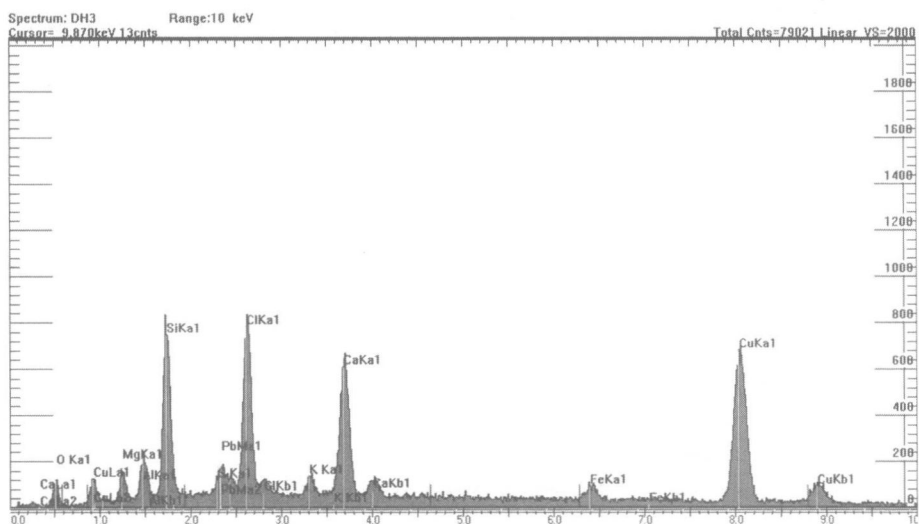


图 6 绿色颜料的能谱图

X-射线衍射分析表明,莫高窟第351窟壁画颜料红色是三氧化二铁,绿色为氯铜矿,白色为以碳酸钙和滑石为主的混合物。

2.2 地仗分析

(1) 粒度分析,采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型粒度分析仪、Sci-rocco M 干粉进样器对壁画地仗进行粒度分析,结果见表2。

表2 壁画地仗粒度分析结果

粒径	>2mm	1-2mm	0.5-1mm	0.1-0.5mm	0.1-0.005mm	0.002-0.005mm	<0.002mm
占百分比	0	7.3	14.6	27.4	35.7	6.2	8.8

(2) 地仗泥层结构和纤维观察。351窟壁画地仗由粗泥层和细泥层构成,并含有大量的纤维如麦草、棉(麻)。由于不便取样,地仗各泥层的厚度以及纤维的量没有计算。但从图中可以清晰看到泥层结构、纤维的状况(图7、8)。



图7 莫高窟第351窟地仗泥层结构和麦草

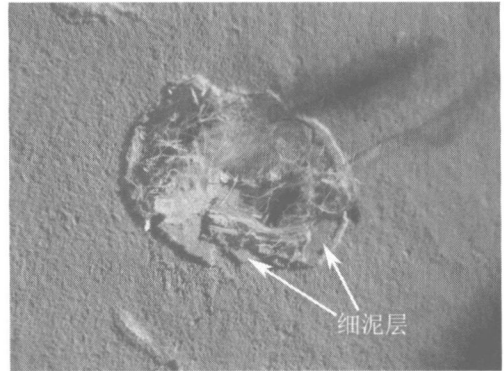


图8 莫高窟第351窟地仗泥层结构和棉(麻)纤维

3 疱疹分析

从第351窟北壁不同位置揭取疱疹并收集,通过能谱、X射线衍射分析等确定疱疹的组成。疱疹底面和剖面见图9、10。

3.1 扫描电镜-能谱分析

使用日本电子光学公司 JSM-5600LV 低真空扫描电子显微镜,美国 Kevex 公司 X射线能量色散谱仪对疱疹结核部位进行观察、分析。

疱疹的中心结核部分质地非常坚硬,用钢针将表面的黏土刮去,尽量裸露出核心部分,扫描电镜观察并用能谱对核心部位作元素分析(图11-14),能谱分析结果见表3。

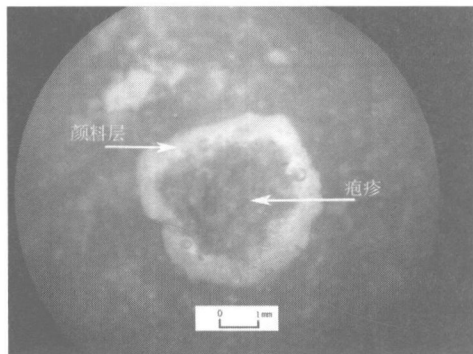


图 9 莫高窟第 351 窟疱疹底部状况

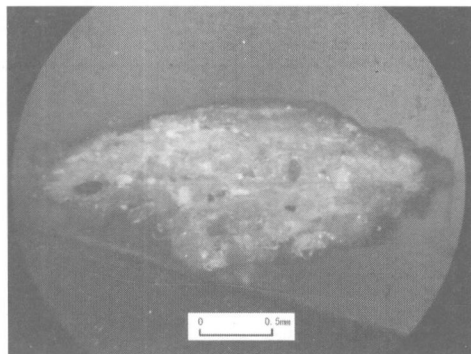


图 10 莫高窟第 351 窟疱疹剖面的状况

表 3 疱疹核心区域的能谱分析结果

元素相对百分含量 (%)										
O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	总量
12.79	15.10	1.42	3.69	12.24	0.95	42.89	2.35	5.63	2.94	100

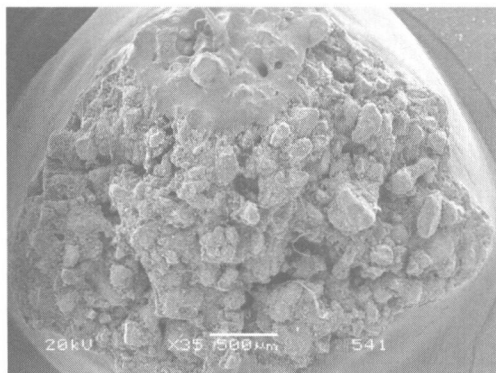


图 11 疱疹扫描电镜图 (35 倍)

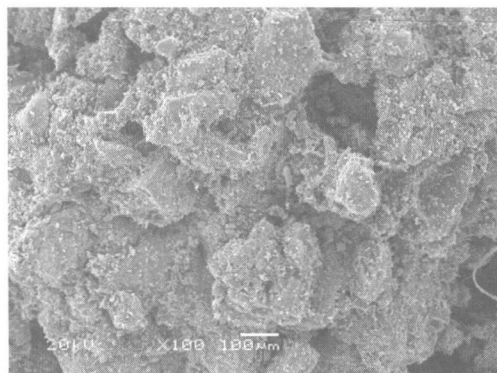


图 12 疱疹扫描电镜图 (100 倍)

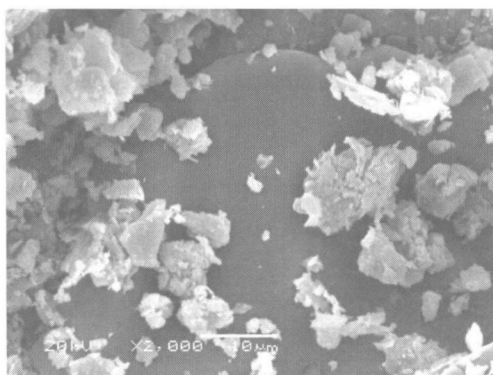


图 13 疱疹扫描电镜图 (2000 倍)