

# 莫高窟早期三窟壁画和彩塑制作材料研究

范宇权 柴勃隆 于宗仁 张文元 王小伟 苏伯民

(敦煌研究院 保护研究所, 甘肃 敦煌 736200;  
古代壁画保护国家文物局重点科研基地, 甘肃 敦煌 736200)

**内容摘要:**莫高窟早期三窟属于敦煌石窟保存有壁画和彩塑的最早期洞窟,包括第275、272和268等窟。在文献调查的基础上,本文采用无损多光谱分析技术和介入性的剖面分析与X射线衍射分析技术,对这些洞窟的壁画和彩塑制作材料进行了调查和研究。

**关键词:**敦煌,早期石窟,壁画,多光谱调查

**中图分类号:**K854.3; K879.21 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-4106(2010)06-0028-06

## Multi-spectral Non-invasive Investigation and Studies on the Mural Technology in Early Three Caves of Mogao Grottoes

FAN Yuquan, CHAI Bolong, YU Zongren, ZHANG Wenyuan, WANG Xiaowei, SU Bomin  
(Conservation Institute of Dunhuang Academy, Dunhuang Gansu 736200; Key Scientific Research Base of Conservation for  
Ancient Mural (Dunhuang Academy) SACH, Dunhuang Gansu 736200)

**Abstract:** Cave 275,272,268 Mogao Grottoes are the three earliest cave build at the North Dynasties. Upon the textual research ahead, non-invasive multi-spectral investigation and invasive cross-section and X-ray diffraction analysis had been used to study on the murals and painted sculptures in Cave 275, 272 and 268.

**Keyword:** Dunhuang; The Cave of the Early Period; Wall-Paintings; Multi-Spectral Investigation

### 一 前 言

莫高窟早期三窟的壁画和彩塑曾经在后代有过几次重绘,敦煌研究院的考古学家通过对莫高

窟北朝早期石窟的长期考古调查和研究,搞清了不同时期壁画和彩塑的层位关系。在此基础上,针对重层壁画的特点,采用无损多光谱分析技术和介入性的壁画剖面分析与X射线衍射分析技术,在上述洞窟逐层调查和取样分析。

收稿日期:2010-06-20

基金项目:国家文物局科研项目:多光谱无损分析调查技术在敦煌壁画中的应用研究(20060207)

作者简介:范宇权(1969—),男,山西省榆次市人,敦煌研究院保护所研究馆员,博士,从事石窟保护研究工作。

## 二 实 验

### 2.1 仪器和分析条件

理学D/MAX 2500V X射线衍射仪, Cu转靶用于地仗、粉层和颜料层物相分析;徕卡偏光显微镜,带透射光和反射光,最大63X物镜,用于颜料矿物和壁画剖面样品的分析;尼康实体显微镜,最大5X物镜,用于样品的预处理和观察;上海民用电机厂晶相制样机用于壁画剖面样品的制备,偏光显微镜薄片分析使用Cargille实验室专用胶( $n=1.662(25^{\circ}\text{C})$ )。

多光谱摄影系统使用尼康D200相机,Kodak Wratten No. 2E滤膜,JEB BR-150BL高压紫外光源,Kodak标准色卡和18度灰卡;反射光谱分析采用AvaSpec-2048TEC-FT热电致冷型光纤光谱仪,AvaLight-HAL10W卤钨灯光源。UV-II便携式紫外灯(长波和中波)用于壁画内容的初步调查,基恩士VHX-600K数码显微镜用于壁画和彩塑的现场观察(20X-200X)。

## 三 结果与讨论

考古专家经过深入调查和研究的基础,确认莫高窟早期三窟现存有早、中、晚3层不同时期的壁画和彩塑。根据此研究结果,以下分别对莫高窟早期三窟壁画和彩塑的早期层位、中期层位和晚期层位进行讨论。

### 3.1 早期层位壁画和彩塑研究

#### 3.1.1 早期彩塑骨架制作

莫高窟开凿于粗糙的沙砾岩崖体之中,无法直接雕凿石像。樊锦诗调查了莫高窟早期洞窟彩

塑的结构和制作方法,确认是以木料搭制骨架,其外用茭草或芦苇捆扎出大体结构,然后再依次敷抹泥层和颜料层<sup>[1]</sup>。从第275窟主尊手部破损部位可以观察到制作塑像所用的木骨架、草茎和麻绳。证实这些彩塑都是根据塑像肢体的大小和粗细,用不同粗细和长度的树棍作骨架,树棍外裹草茎,并用麻绳缠绕固定,制作出稳固的彩塑骨架后,其外再涂抹泥层。

#### 3.1.2 早期层位壁画和彩塑的地仗层

李最雄对莫高窟不同时期壁画和彩塑地仗有过深入研究,通过对早期洞窟壁画和彩塑地仗的调查与分析,证明早期洞窟壁画和彩塑地仗主要有三层,底层为粗泥层,中层为细泥层,表层为粉层。制作地仗的泥中添加有沙子和植物纤维材料,壁画泥层中观察到有麦草秸,塑像泥层中观察到有麻丝<sup>[2]</sup>。早期三窟早期层位地仗泥层的分析结果见表1。

表1 早期层位地仗层分析结果

窟号	层位	取样位置	地仗层厚度(厘米)			粉土 %	沙 %
			粗泥层	细泥层	粉层		
268	早期	西壁下部	3厘米左右	0.3-0.4	0.01-0.02	59	41
272	早期	东壁下部	3厘米左右	0.3-0.4	0.01-0.03	43	57
275	早期	北壁下部	3厘米左右	0.1-0.2	0.01-0.03	56	44

从早期层位壁画地仗土与莫高窟窟前河流沉积半黏土的分析结果对比可以看出,两者组成相近,这和李最雄的研究结果一致,证明制作壁画和彩塑地仗使用了当地的澄板土,并添加有一定比例的沙和植物材料。对第272和268窟早期层位地仗土的调查,发现同样是用当地的澄板土和沙子等材料混合作(见表2)。

表2 早期层位壁画和彩塑地仗土的X射线衍射分析

样品编号	颜色	窟号	层位	取样位置和样品描述	主要显色物质	其他物相
268-2	红色	268	早期	红地色,西壁南侧,距地面62厘米,距南壁3厘米	偏光显微镜薄片鉴定为土红颜料(显色物质为土状褐铁矿和土状赤铁矿)	长石,石英,伊利石,绿泥石,石膏,蛇纹石
272-14	粉红色	272	早期	西壁南侧,距地167厘米,距南壁95厘米	偏光显微镜薄片鉴定为土红颜料	大量的滑石,少量的蛇纹石、绿泥石和长石,微量的石英和角闪石
275-31	深红色	275	早期	北壁中部,距离地面128厘米,距离西壁247厘米,该处有和周围不同的深红色,表面破损处粉末样	偏光显微镜薄片鉴定为土红颜料	大量长石,少量绿泥石、伊利石、石膏和硬石膏

#### 3.1.3 早层位壁画和彩塑的土红色

段文杰认为莫高窟早期洞窟壁画和彩塑多用土红涂地,以形成浓重醇厚的色调和静谧的境

界<sup>[3]</sup>。莫高窟早期洞窟早期层位壁画土红色的无损反射光谱分析结果见图1,X射线衍射分析结果见表3。其中土红色颜料的反射光谱分析结果和天

表 3 早期层位洞窟壁画和彩塑的土红色 X 射线衍射分析和偏光显微镜分析结果

样品编号	颜色	窟号	层位	取样位置和样品描述	主要显色物质	其他物相
268-2	红色	268	早期	红地色,西壁南侧,距地面 62 厘米,距南壁 3 厘米	偏光显微镜薄片鉴定为土红颜料(显色物质为土状褐铁矿和土状赤铁矿)	长石,石英,伊利石,绿泥石,石膏,蛇纹石
272-14	粉红色	272	早期	西壁南侧,距地 167 厘米,距南壁 95 厘米	偏光显微镜薄片鉴定为土红颜料	大量的滑石,少量的蛇纹石、绿泥石和长石,微量的石英和角闪石
275-31	深红色	275	早期	北壁中部,距离地面 128 厘米,距离西壁 247 厘米,该处有和周围不同的深红色,表面破损处粉末样	偏光显微镜薄片鉴定为土红颜料	大量长石,少量绿泥石、伊利石、石膏和硬石膏

然红土的反射光谱类似。

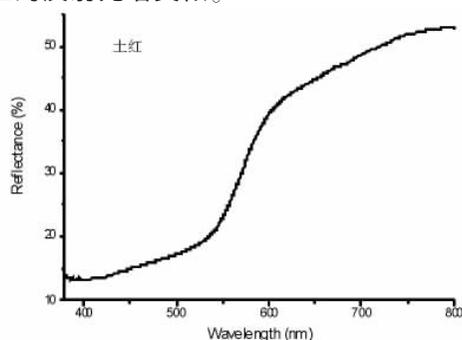


图 1 莫高窟第 275 窟南壁天然土红的反射光谱图

从表3的分析结果可以看出,X射线衍射分析出的主要晶体矿物都不显红色。在偏光显微镜下观察该红色样品,单光镜下显色矿物为红褐色和黄褐色,无多色性;正交镜下不显光性。这些特点和天然红土中显色的土状褐铁矿( $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )及赤铁矿( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )的特性相吻合,而且由于天然红土中的褐铁矿为非晶质或隐晶质,所以在X射线衍射分析时无明显衍射信号<sup>[4]</sup>,说明早期层位壁画的红色地色使用了天然的土红颜料。

### 3.1.4 早期层位壁画和彩塑颜料层分析

将无损多光谱调查技术与介入性的X射线衍射(表4)和偏光显微镜分析应用于第275、272、268等窟早期层位壁画和彩塑颜料层的调查。

#### 3.1.4.1 早期层位壁画中蓝色色料的分析

莫高窟第275窟中部原存有归义军时期加修的隔墙,在上世纪莫高窟的加固工程中隔墙被转移。南北壁局部壁画受墙体的遮盖,壁画色彩和保存状况与未受遮盖的壁画明显不同,因此采用多光谱分析和摄影体系对最初隔墙遮盖处的南北壁进行了研究,同时利用数码显微镜对局部壁画进行了观察(图版1,图2)。

从显微镜照片(图版1)中可以观察到壁画淡蓝绿色颜料层表面有薄的白色覆盖物,在白色覆盖物脱落部位显示出了大颗粒状的蓝色颜料,以及部分细颗粒的绿色颜料。该部位反射光谱测定结果显示出了510 纳米(nm)的反射峰(图2),因此该淡蓝色样品的反色光谱介于蓝绿色之间。通过取样进行X射线衍射分析,证明淡蓝绿色壁画颜料中确实存在有大量石青和少量氯铜矿(表4样品275-7),因此可以认为第275窟使用的蓝色石青矿物颜料中有少量绿色氯铜矿颜料。

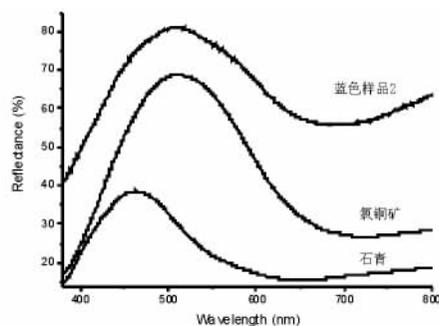


图 2 第 275 窟南壁早期层位淡蓝色样品点 2 的无损反射光谱图与石青和氯铜矿颜料反射光谱图

第275窟南壁隔墙遮盖部位上层千佛的袈裟由深浅不同的黑蓝色绘制,对该部位同样进行了无损多光谱调查(图3,图版2、3)。

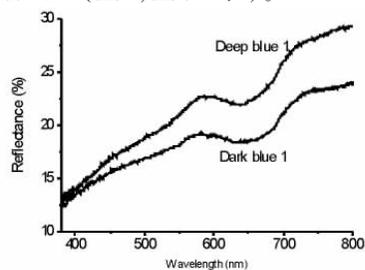


图 3 莫高窟第 275 窟北壁深浅不同黑蓝色颜料的反射光谱图

表 4 早期层位壁画和彩塑颜料层的 X射线衍射和偏光显微镜分析结果

样号	颜色	窟号	层位	取样位置和样品描述	主要显色物相	其他物相
268-1	绿色	268	早期	主室顶部,距西壁 266 厘米,距北壁 28 厘米	氯铜矿	石膏,硬石膏,滑石,石英,蛇纹石,绿泥石,一水草酸钙,
268-3	白色			顶部西侧,距西壁 60 厘米,距北壁 5 厘米	滑石,蛇纹石	石英,硬石膏,少量方解石,微量长石和闪石
268-4	黑色			顶部,距西壁 130 厘米,距北壁 5 厘米	黑铅矿(PbO <sub>2</sub> )	微量石英和方解石
272-3	灰色	272	早期	西壁南侧中部小佛,距离地面 141 厘米,距南壁 69 厘米	黑铅矿,滑石和蛇纹石	微量石膏和绿泥石
272-6	绿色			主室西壁南侧,距离地面 53 厘米,距南壁 47.5 厘米	氯铜矿	大量滑石和石英,少量蛇纹石、伊利石、绿泥石、方解石和硬石膏
272-8	白色			西壁南侧,距地 173 厘米,距南壁 97 厘米	石膏、伊利石和石英	少量的长石、绿泥石和硬石膏,微量的角闪石
275-1	白色	275	早期	主室北壁中部菩萨肩部,距离地面 135 厘米,距离东壁 413 厘米	滑石和长石,少量的蛇纹石	石英和绿泥石
275-2	红色			主室北壁中部菩萨肩部,距离地面 132 厘米,距离东壁 412 厘米	铅丹	滑石,少量的蛇纹石、石英和绿泥石
275-4	棕黑色			主室北壁西侧菩萨,距离地面 159 厘米,距离东壁 502 厘米	黑铅矿 PbO <sub>2</sub>	滑石和蛇纹石,少量的石膏、石英、绿泥石、方解石和云母
275-6	绿色			南壁中部下沿,距离地面 179 厘米,距离东壁 240 厘米	氯铜矿	滑石、石膏、石英,少量的石膏、绿泥石和伊利石
275-7	蓝色			南壁上柱子处,距离地面 233 厘米,距离东壁 205 厘米	石青	少量的石英,微量的滑石、绿泥石、蛇纹石和伊利石

图3中黑蓝色壁画的无损光谱分析结果与莫高窟古代壁画中所用靛蓝色料的光谱图类似,而图版3的显微镜分析照片揭示了黑蓝色色料的微观状况,其中未见明显的晶体矿物。据此认为该千佛黑蓝色袈装绘制时使用了靛蓝类的色料,这是敦煌石窟壁画中目前已知最早的有机色料。

### 3.1.4.1 早期层位壁画和彩塑颜料的分析结果

早期层位壁画主要使用的颜料有:红色为土红和铅丹(大部分铅丹都变为黑色或黑褐色),绿色目前只发现使用了氯铜矿(一些绿色颜料中含有少量石青),白色主要使用了滑石(伴生有大量蛇纹石(A<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>,A=Mg,Fe,Ni],蓝色只在第275窟个别壁画部位发现使用了石青(蓝色石青颜料中混有部分绿色氯铜矿颜料)和靛蓝。

## 3.2 中、晚期层位壁画和彩塑

根据敦煌研究院考古专家的调查和研究,认为第268窟主室顶部和西壁上上部为早期层位壁画,南、北壁多为中期层位(隋代)的重绘壁画覆盖;第267、269、270和271窟为中期层位(隋代)的重绘壁画。第275窟壁画也有部分重新彩绘,其中主室东壁南侧壁画似中期层位(隋代)的重绘;主室窟顶、南、北壁局部壁画,以及窟室中间隔墙均为晚期层位(归义军时期);第275窟主尊彩塑主体为早期原

作,在晚期有过重妆。第272窟主室四壁上部和顶部壁画为早期原作,甬道表层壁画为晚期层位(归义军时期),其下层还有壁画,年代不详;第272窟主室四壁下部为晚期层位(归义军时期)壁画。

### 3.2.1 中期层位的重绘壁画

在中期层位重绘壁画中,使用了和早期层位壁画近似的白色颜料-滑石矿物,滑石中也伴生有蛇纹石,如第275窟中期层位壁画,以及第269窟中期层位壁画。也开始融入新的绘画元素,包括颜料层下制作有白色粉层,大量使用青金石作蓝色颜料等(表5)。

### 3.2.2 晚期层位重绘壁画

敦煌研究院的考古专家研究认为275窟在归义军时期有过重修,晚期层位白色颜料也使用了滑石,但与早期层位壁画伴生有大量蛇纹石的滑石矿物不同,这种滑石主要伴生方解石等矿物。对重修壁画中绿色颜料进行了调查,发现其中只含有绿色的氯铜矿(表6)。

第275窟甬道南壁壁画绘制在白色石灰地仗表面(样品275-39)。根据李最雄对莫高窟崖面现存露天壁画的调查和研究,这种石灰地仗壁画多附属于窟前建筑,属于殿堂建筑壁画的类型<sup>[2]</sup>。该样品所处的第275窟主室前部历史上曾坍塌,处在露天环境之中,样品中所含草酸钙应是这种环境

表 5 中期层位壁画的 X 射线衍射和偏光显微镜分析结果

样号	颜色	窟号	层位	取样位置和样品描述	主要显色物相	其他物相
269-2	蓝色	269	中期	北壁上, 距上沿 17, 距西壁 26 厘米	青金石	一些伊利石、滑石和蛇纹石, 少量绿泥石和硬石膏
269-3	绿色			西壁中部, 距地 103 厘米, 距南壁 30 厘米	氯铜矿	一些滑石和蛇纹石, 少量石膏、绿泥石、伊利石、石英和硬石膏
269-4	白色			西壁中部, 距地 70 厘米, 距南壁 34 厘米	滑石, 蛇纹石	绿泥石、石英、石膏和硬石膏, 微量伊利石
269-6	黑色			西壁中部, 距地 82 厘米, 距南壁 40 厘米	黑铅矿 PbO <sub>2</sub>	一些滑石、蛇纹石、绿泥石、铅丹和石英
269-9	红色			西壁, 距地 67 厘米, 距北壁 25 厘米	偏光显微镜薄片鉴定为土红颜料	一些硬石膏、滑石、绿泥石、伊利石、石英
275-13	红色	275	中期	东壁南侧, 距北沿 26 厘米, 距地 142 厘米	偏光显微镜薄片鉴定为土红颜料	大量的滑石和蛇纹石, 少量的绿泥石、石英、角闪石和方解石
275-14	白色			东壁南侧, 距北沿 8 厘米, 距地 133 厘米	滑石和蛇纹石	少量的绿泥石、石英、角闪石和石膏
275-15	绿色			东壁南侧, 距北沿 15 厘米, 距地 168 厘米	氯铜矿	滑石、石英和蛇纹石, 少量的石膏、方解石和绿泥石
275-16	黑色			东壁南侧, 距北沿 29 厘米, 距地 152 厘米	偏光显微镜薄片鉴定为土红颜料	大量的滑石和蛇纹石, 少量的绿泥石

表 6 晚期层位重绘壁画的地仗、粉层和颜料层的分析结果

样号	颜色	窟号	层位	取样位置和样品描述	主要显色物相	其他物相
272-10	红色	272	晚期	甬道北壁上, 距西沿 9 厘米, 距地 163 厘米	偏光显微镜薄片鉴定为土红颜料	大量的滑石和方解石, 少量的石英、石膏和角闪石, 微量的硬石膏
272-12	绿色			甬道北壁上, 距西沿 32 厘米, 距地 153 厘米	氯铜矿	滑石和方解石, 少量硬石膏、石英、石膏和角闪石, 微量伊利石和绿泥石
272-13	棕色			甬道北壁上, 距西沿 3 厘米, 距地 154 厘米	滑石、方解石和黑铅矿 PbO <sub>2</sub>	少量的角闪石和石膏, 微量的石英、伊利石和绿泥石
272-20	白色			甬道北壁西侧, 距离地面 159 厘米, 距西沿 9 厘米, 壁画破损, 露出两层粉层, 取上层粉层	方解石和滑石	少量石膏、石英和闪石, 微量绿泥石和长石
275-10	红色	275	晚期	东壁北侧, 距地 88 厘米, 距北壁 55 厘米	滑石和方解石	少量石英、角闪石、石膏、硬石膏和铁红
275-11	黑色			东壁北侧, 距地 92 厘米, 距北壁 74 厘米	黑铅矿 PbO <sub>2</sub>	少量滑石、长石、石英、方解石、闪石和石膏
275-35	白色			北壁东侧下部, 距离地面 16 厘米, 距东壁 111 厘米, 壁画破损处的边缘取白色粉末	滑石和方解石	少量石英、角闪石、绿泥石和伊利石, 微量石膏
275-18	绿色			北壁中下部, 距地 84 厘米, 距东壁 231 厘米	滑石、方解石、石英和硬石膏	少量氯铜矿、角闪石、绿泥石和伊利石
275-39	白色			甬道南壁石灰地仗, 距离地面 20 厘米, 距门边 40 厘米, 白色地仗样的里层	方解石	少量的文石、石英, 微量的一水草酸钙和滑石

下微生物活动的产物。

### 3.4 讨论

根据专家、学者多年考古研究的成果, 将多光谱无损分析技术和介入性的壁画剖面分析与 X 射线衍射分析技术相结合, 研究了早期三窟不同层位的壁画制作材料和技术。早期层位壁画和彩塑颜料使用动物胶作胶结材料<sup>[5]</sup>; 主要画面大量使用土红色作背景, 四壁下部也有使用白粉层绘制

的装饰画面; 红色颜料主要使用了天然土红颜料和铅丹; 蓝色颜料只发现在很小范围使用的石膏和靛蓝; 绿色颜料只发现了氯铜矿 (绿色样品多混有少量石膏<sup>[2]</sup>); 白色颜料主要使用了伴生有蛇纹石的滑石矿物, 个别白色颜料样品含有石膏 (见表 4 样品 272-8)。

早期层位壁画和彩塑中所用的滑石是中国蕴藏量较大的矿产, 产量和出口量位列世界前列。中

国滑石矿分布于15个省、市、自治区,但东西部分布不平衡,西部的新疆、西藏等地区目前尚未发现滑石矿藏,只在临近新疆的青海茫崖矿区西田矿有较大的储量(全国6大矿之一)。滑石矿石通常不纯,伴生有其他矿物,其伴生矿物在我国以碳酸盐矿物为主,如方解石、白云石、菱镁矿,其次有绿泥石、石英、透闪石,还有蛇纹石以及云母等。而青海茫崖矿西田矿区的滑石正是超铁镁质蛇绿岩在强烈的自变质作用下形成的<sup>[6]</sup>。青海茫崖临近敦煌,地近丝路南道,在早期层位壁画中发现的含有大量滑石和蛇纹石等矿物的白色颜料,可能和此矿有一定的联系。

苏伯民等对新疆克孜尔石窟的古代壁画有过详细研究,认为克孜尔石窟的古代壁画中蓝色颜料主要使用了青金石,红色颜料使用了朱砂、铅丹和土红,绿色颜料使用了氯铜矿,白色颜料和白粉层主要使用了石膏。因此,莫高窟早期三窟早期层位壁画和彩塑所用颜料与克孜尔石窟有一定的区别,特别是缺少蓝色青金石颜料,以及使用大量白色滑石颜料<sup>[7]</sup>。Gettens最早研究了阿富汗巴米扬石窟的佛教壁画,也发现大量使用蓝色青金石颜料,以及使用石膏制作白色颜料和白粉层<sup>[8]</sup>。中国和中亚地区青金石矿物通常被认为是原产自阿富汗,因此可以认为新疆克孜尔石窟和阿富汗巴米扬石窟的佛教壁画在制作材料和技术上有一定的关系,但这并未影响到莫高窟早期三窟早期层位壁画的制作。对比李最雄对甘肃马蹄寺、天梯山和炳灵寺等石窟壁画颜料的研究成果,发现这三者与莫高窟早期三窟早期层位壁画所用颜料也有差别。这三处石窟早期壁画中大量使用石膏和硬石膏做白色颜料,与克孜尔石窟近似,个别使用了方解石和长石作白色颜料<sup>[9]</sup>。

中期层位重绘壁画既和早期层位壁画有一定的相似之处,如同样使用伴生有蛇纹石的滑石矿物作白色颜料;也开始融入新的绘画元素,包括颜料层下制作有白色粉层,大量使用青金石作蓝色颜料等。因此可以认为在中期层位壁画的制作时期,莫高窟佛教壁画的制作材料和技术开始通过一定途径和阿富汗有了联系。

晚期层位重绘壁画和彩塑中大量使用伴生有方解石的滑石矿物作白粉层和白色颜料,与早期

层位壁画和彩塑中所用滑石的来源不同。

莫高窟早期三窟早期层位壁画的制作材料和技术与巴米扬、克孜尔、马蹄寺、天梯山和炳灵寺等石窟均有区别,从其中所使用的伴生有蛇纹石的滑石矿物来看,可能与丝路南道有一定联系。

## 四 结 论

通过对莫高窟第275、272、268等窟壁画与彩塑的分析,揭示了莫高窟早期三窟早期层位壁画和彩塑与中、晚期重绘壁画和彩塑的不同特点,以及在制作技术与所用绘画材料上的一些差别,并讨论了不同时期壁画材料的来源。

致谢:本研究是在樊锦诗先生和李最雄先生的指导下完成,感谢蔡伟堂先生在壁画年代和层位关系上的指导。偏光显微镜薄片分析由郭清林和赵林毅完成,参加分析工作的还有李燕飞,汤爱玲。

### 参考文献:

- [1] 樊锦诗. 敦煌莫高窟的保存、维修和展望[C]//敦煌研究文集.兰州:甘肃民族出版社,1993.
- [2] 李最雄. 丝绸之路石窟壁画彩塑保护[M].北京:科学出版社,2005:15-17.
- [3] 段文杰. 北凉、北朝时期的敦煌石窟艺术[A]//段文杰敦煌艺术论文集.兰州:甘肃人民出版社,1994:29-30.
- [4] 北京大学地质学系岩矿教研室. 光性矿物学[M].北京:地质出版社,1979:419-426.
- [5] 李实. 高效液相色谱技术在壁画胶结材料分析中的应用[J].敦煌研究,1995(3).
- [6] 朱训. 中国矿情(第3卷)非金属矿产[M].北京:科学出版社,1999:1-749.
- [7] 苏伯民,李最雄,马赞峰,李实,马清林. 克孜尔石窟壁画颜料研究[J].敦煌研究,2000(1).
- [8] R. J. Gettens. The Materials in the Wall Paintings of Bamiyan [J]. Afghanistan, Technical Studies, Vol. 6, 1938.
- [9] 于宗仁,赵林毅,李燕飞,李最雄. 马蹄寺、天梯山和炳灵寺石窟壁画颜料分析[J].敦煌研究,2005(4).