

81-87

## 敦煌莫高窟主要病害及防治对策TU746

石玉成 张杰

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

**摘要** 概述了敦煌莫高窟地震、地质灾害、风沙、壁画和彩塑病害、旅游公害、人类社会经济活动所产生的不良影响等主要灾害的特征, 详细分析了其致灾因素和背景并对综合减灾的战略措施提出了可操作性的建议, 以便为敦煌石窟的科学保护和文物修复工作提供理论基础和实践依据。

**关键词:** 灾害, 防护措施, 敦煌石窟

敦煌莫高窟

## 1 前言

敦煌位于我国西北甘肃省河西走廊的最西端, 自古以来就是中西交通的咽喉之地, 亦是汉唐时期繁华的丝路重镇, 举世闻名的莫高窟就是这丝绸之路的一颗璀璨明珠。据唐代圣历元年(689年)的碑文记载, 莫高窟自前秦建元二年(366年)开凿, 至镌碑时已有窟龕一千余个, 此后历代续建, 亦有塌毁。至今在长1 680 m的山崖上遗存4~14世纪10个时代的洞窟750余个, 其中492个洞窟内共存壁画约45 000m<sup>2</sup>, 彩塑2 000多身。规模宏大的莫高窟蕴藏着丰富的艺术珍品, 在中国和世界艺术领域中都占有极其重要的地位, 1987年被联合国教科文组织列入世界文化遗产清单。

敦煌莫高窟开创至今已有1 600多年。在漫长的历史长河中, 石窟在自然因素的作用和人为活动的影响下, 岩体逐渐风化开裂, 窟内塑像倒塌, 壁画酥碱、起甲、剥落等多种病害发展, 威胁着石窟及其艺术作品的安全。历史留给我们丰富而珍贵的文化遗产, 同时也赋予我们不容推卸的保护重任。开展莫高窟防灾减灾、文物保护工作, 分析研究各种病害、成因机制及综合防治对策, 对于弘扬中华民族灿烂文化, 进一步开发和利用旅游资源, 具有重要的意义。

## 2 主要病害概述

## 2.1 地震灾害

莫高窟所在地区是属于地震活动较频繁的地带。自公元417年以来, 可查考的地震现象有15次。从1927年至今的67a中, 共发生过有感地震13次, 其中1927年、1932年和1952年的地震较强烈, 地震动衰减到敦煌地区的地震烈度为VI~VII度。1927年5月23日古浪地震, 震级 $M_S=7.9$ , 震中烈度达VII度, 相距750 km的敦煌感到“悬物微动”, 莫高窟第196窟洞顶顺岩层层理震落一块2.0 m×1.5 m×0.25 m的晚唐壁画, 并将佛龕上高约2.5 m的塑像砸坏。1932年12月25日玉门南昌马堡地震, 震级 $M_S=7.7$ , 震中烈度为X度, 相距350 km的

收稿日期: 1995-11-03

第一作者简介: 石玉成, 男, 1966年11月出生, 助研, 主要从事工程地震和防灾减灾研究。

敦煌城“栋宇轧轧有声”，倒塌旧民房 100 多间。1952 年 1 月 23 日地震，震中在三危山中， $M_s=5.4$ ，距莫高窟仅 40 余公里，震中烈度Ⅷ度，莫高窟第 211 窟洞顶又震落一块  $0.4\text{ m} \times 0.25\text{ m} \times 0.03\text{ m}$  的初唐壁画。1962 年 12 月 12 日在进行莫高窟加固工程之际，亦曾发现有地震现象。在 70 年代，敦煌地区先后发生 3.0、3.2、3.7、3.4 级地震。1988 年、1989 年莫高窟连续出现有感地震，但烈度均在Ⅵ度以下。此外，莫高窟毗邻地区地震活动亦较为活跃，进入 80 年代以来，周边地区曾多次发生 4.0 级以上的地震<sup>[1]</sup>。

历史上，石窟曾多次坍塌，至于崩塌与地震是否有直接关系，由于缺乏资料尚无法判断。但是，脆弱的洞窟岩体已经受不起较大地震的冲击，况且莫高窟又属于地震多发区，这应引起我们的充分重视。

## 2.2 地质灾害

### 2.2.1 岩体裂隙

洞窟群岩体中的地质不连续面的发育程度、产状、组合形态及其与洞壁的关系对洞室稳定性影响极大，边坡岩体中主要存在以下 4 组裂隙：

(1) 平行于崖面的近直立纵向裂隙。该组裂隙对洞窟安全影响最大，分布范围广，延伸长，从 096 窟到 015 窟之间的地段最为严重，多切过洞身，甚至深切到底层洞窟洞顶。部分地段的裂缝仍在发展之中。

(2) 垂直于崖面的横向裂隙。仅有一小部分断续出现于洞窟顶部或洞窟的一侧及其前后室的壁画上，一般细而短，下部张开约 1~5mm，大致呈波状顺崖面向上延伸 2~5m 即行消逝，裂面粗糙，其危害相对要小一些。

(3) 斜切崖面的陡倾构造裂隙。裂隙面平直、闭合、无充填，其产状与其南部三危山新构造运动所产生的逆断层的产状大致吻合。该组裂隙有切割岩体的作用，能助长崩塌的形成。

(4) 水平裂隙。沿酒泉组地层层面发育，主要分布于洞窟区的南段，在崖面上呈一水平线断续显示。该组裂隙在洞室拱顶附近出露时比较有害。

### 2.2.2 崩塌、悬崖、危石

由于崖壁高陡、洞窟开挖过密、隔墙过薄等原因，削弱了崖脚对上部岩体的支撑能力，加之风化作用、重力作用及地震影响，崩塌、悬崖、危石比比皆是，尤其是在加固之前，窟区全段都遭受过不同程度的崩塌，洞窟前室均已坍去大半。尽管 60 年代以来，已对有严重险情的 7 个区段进行了全面加固修缮，但崖壁和洞窟崩塌的危险并没有彻底解除。特别是尚未加固的区段，许多危石仅与母岩断续相连，随时有崩塌的可能。

### 2.2.3 洞顶坍塌剥落

酒泉砾石层水平层理较为发育，且岩层中常含细砂夹层及透镜体，沿层理面易形成剥离裂隙，以致造成洞顶坍塌剥离现象，从而使大量壁画和部分彩塑遭到破坏。292、446、467 等洞窟曾发生过零星剥落现象。460、477 等洞窟坍塌与剥落则伴随着裂缝的发展而情况严重。196、211 窟曾因地震促成坍塌现象，损失壁画面积达十数平方米。

### 2.2.4 暗洞

对于莫高窟是否有埋藏洞窟的问题，专家的意见是肯定的。本世纪初发现的“藏经洞”即是例证。60 年代在对洞窟进行全面勘测期间，曾在 053~467 窟洞底发现约  $35\text{ m}^2$  的大型暗洞。据专家推测，在窟区南北两端很可能有低于第一层洞窟而被风沙掩埋的洞窟，只是由于涉及洞窟安全的因素太多而尚未进行全面的勘探证实。暗洞对于边坡岩体的稳定性是一个潜在的隐患，同时对于加固工程的设计也会产生不良的影响。

### 2.2.5 岩体风化和盐类风化灾害

风化是石窟病害中很普遍、很严重的问题。岩体的风化程度与其物理化学性质、岩体的结构和构造以及石窟所处的自然环境条件有很大的关系。例如,在崖壁上部岩体中,夹含砾石英砂岩薄层,尽管其强度较高,但由于交错层理发育,抗风化能力极差,风化后退后成凹槽状,直接控制上部岩体的稳定性。另一个典型例子是,由于砂砾岩岩体被严重风化、风蚀,上层洞窟的窟顶在逐渐变薄,个别洞窟(如460窟)的窟顶已被穿透。轻者造成壁画大面积剥离脱落,重者造成壁画连同岩体大块坍塌并殃及佛龕内塑像。

盐类风化是由矿物结晶膨胀和矿物水化膨胀两种机制共同作用的风化过程。莫高窟岩体盐分组成主要是 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgSO}_4$ 等,岩体中的易溶盐在水分参与下发生溶解、迁移和重结晶作用,使岩体颗粒之间粘结力减弱,导致岩体破裂或散落并产生壁画酥软、粉化等病害。据调查,大约20%的洞窟不同程度地遭受盐风化破坏。

### 2.2.6 干湿—冻融灾害

莫高窟地处沙漠腹地,气候干燥而寒冷,尤其是在秋末冬初,随着昼夜气温的剧烈变化,冻融循环频繁出现,形成冻胀现象,促成砂砾岩体的崩解破坏。其次,随着干湿循环,砂砾岩中所含有的粘粒成分将发生连续不断的胀缩变化,从而造成岩体结构松弛,形成膨胀破坏。

### 2.3 风沙危害

莫高窟自创建至今,石窟、壁画和彩塑都不同程度地受到损坏,其中风沙危害最为严重。一方面,风沙流强烈风蚀或剥蚀,致使洞体遭受“薄顶”之灾,直接危及壁画的保存条件和环境。另一方面,严重积沙不仅堵塞栈道、窟门,污染窟区环境,妨碍游人参观,而且沙尘一旦进入洞窟,对壁画、塑像的磨蚀亦相当严重。

### 2.4 壁画、彩塑及木构古建筑病害

洞窟里的壁画和彩塑,经过千百年的风吹沙打,水泡雨淋,阳光曝晒以及人类的破坏以后,产生了多种病害。自然的损害有大面积脱落、粉层起甲、地仗酥碱、壁画变色和褪色、发霉、虫蛀等;人为的损害有剥取、烟熏、重层、刻划、油渍、磨损、穿洞等<sup>[2]</sup>。其中以大面积脱落、起甲、酥碱、烟熏、发霉、变色为主要病害。彩塑除地仗层酥碱、颜料层龟裂起甲、颜料粉化脱落、变色和褪色等病害与壁画病害相同外,还有木架腐朽不堪、佛象错位倾斜、断肢掉头、倒毁、刻划磨损等病害。据统计,莫高窟有遭受各类病害的壁画约4000m<sup>2</sup>,占壁画总面积的10%,有病害的彩塑共100多身,占彩塑总数的5%,上述受损洞窟总数超过250个,占洞窟总数的50%以上。40多年来,有些病害经过治理已得到控制,有些病害仍在发展之中。

莫高窟现存的5座唐末宋初石窟木构窟檐是我国不多见的早期木构建筑实物,具有很高的文物价值,经过上千年的沧桑历程,木质构件已风化、开裂、腐朽、松动,自70年代末进行涂刷保护之后,病害已得到控制。

### 2.5 旅游公害

莫高窟在历史上是以宗教活动为主的场所,由于当时人口较少,交通不便,人为的环境污染相对较少。但随着莫高窟的对外开放,国内外出现了“敦煌热”,前来观光旅游的人数逐年上升。窟内环境的监测分析表明,观众对洞窟内小气候的影响是显著的。参观者呼出的CO<sub>2</sub>、水汽及释放出来的热量使窟内温度、湿度以及CO<sub>2</sub>浓度骤然上升,高出平时几倍,尤其是旅游旺季,洞窟将处于长时间不得恢复的“疲劳”状态,对壁画的保护产生不良影响。旅游业的兴起也带动了当地接待业、商业和饮食业的发展,莫高窟常住人口和流动人口逐年增加,势必严重影响窟区的大气环境质量。另外,游人的大量增加也使铺设在悬崖上的栈道和上下通道以及薄底

洞窟底板处于超负荷状态,对于石窟的长期保护和正常营运也是一个潜在的隐患。

少数游客缺乏起码的道德法制观念,洞内吸烟、拍照,随意涂写、刻划,机械性地损伤画面,破坏了壁画艺术形象的完整性。

### 3 病害成因和背景分析

#### 3.1 地理气候及水文特征因素

敦煌莫高窟地处荒漠戈壁腹地,由于常年受到蒙古高压的影响,气候极端干旱,降水量少,温差和湿差大,风沙活动也很频繁。据记载,年平均降雨量仅30mm左右,而年蒸发量却高达4200mm,在最干燥的时候,常有空气相对湿度为零的记录<sup>[3]</sup>。这种特殊的气候是莫高窟文物长期得以保存的得天独厚的自然条件。但由于莫高窟地区日夜间温差悬殊,同时,随着季节和太阳光强度的变化,洞内湿度升降幅度很大,这样就使壁画的地仗层和颜料层遭受冷热、干湿交替变化的影响,天长日久,即产生严重的起甲龟裂、变色褪色现象。当地唯一的地表水——大泉沟河流水量虽很小,但对底层洞窟有入渗作用,加之洞窟窟门小或长期被风沙掩埋,致使窟内通风不良,壁画因长期受潮而酥碱、发霉,同时也造成塑像木骨架腐朽、泥层酥碱脱落等病害。

莫高窟一带的地表普遍为沙丘所覆盖,西邻鸣沙山,沙源丰富。该区偏西风频率虽较小,但风力强,且具突发性的特点,输沙力最高,是造成洞前积沙和崖体风蚀的主要原因,而偏东风,频率虽较低,但对洞窟崖面亦有强烈的剥蚀作用。

#### 3.2 地质和新构造运动

莫高窟遗址所在的敦煌盆地,是一个由石板山、阿尔金山和鹰嘴山所围限的山间断陷盆地。受北截山断裂及阿尔金山断裂控制,盆地呈北东向狭长展布。莫高窟一带在第四纪早期酒泉砾石层沉积过程中曾产生了3~4次的冲积锥前移现象,造成了迭式冲积锥,在大泉沟的左右岸可见到I~III级台地,这都说明该地区新构造运动比较活跃。从本地区地震活动空间的分布特征来看,该区地震活动主要受河西走廊断裂带、祁连山断裂带、柴达木断裂带及阿尔金断裂带控制。据各方面资料分析,从现在起到下世纪初,该区仍处于地震活跃期,发生5级以上地震的概率较大。

#### 3.3 洞窟地层因素

莫高窟的洞窟围岩由一套酒泉组砾岩地层构成,其物质成分、组织结构、胶结程度和风化程度等特性直接影响着洞窟的稳定性。与典型砾岩相比,洞窟砾岩胶结程度不高,强度低,呈现出“坚而不硬,松而不散”的特性。局部层位以大型透镜体状产出,交错层理发育,抗风化能力极差。洞窟顶拱的片落、掉块以及崖面上缘部位的崩塌等病害与岩体的这种工程地质性质有着很大的关系。

由于边坡岩体的长期卸荷回弹及洞窟围岩应力的重分布、河流侵蚀下切作用、地震活动等原因,陡壁岩体中发育大量不同产状的裂隙,使岩体的整体性质遭到破坏,因而常常在石窟上部形成悬崖、危石。同时,壁画地仗层也因洞窟崖体产生裂隙而随之开裂。

莫高窟地层是在干燥气候下形成的,易溶盐含量高,为壁画盐害提供了盐分条件,同时岩体内的裂隙为降水下渗和盐分溶解迁移提供了通道,导致盐类晶体析出,造成壁画酥软、粉化,甚至大面积脱落。

#### 3.4 石窟寺及其窟内文物本身的特殊性

敦煌石窟过度密集的洞窟形成许多隐患,部分洞室间隔墙及顶、底板岩层厚仅0.1~0.3

m, 严重削弱了岩体的强度, 在 428 窟及 303 窟南北一带早期洞窟较为集中的地段尤为明显。同时, 由于开窟没有统一布局及当时技术水平的限制, 不可能对洞窟的几何形状、跨度、高度、洞窟立体组合关系、施工工艺等作出合理的设计。如 290、289 窟下层的 44 窟的前室很深很宽, 290、289 窟之间的墙壁成为 44 窟 8 m 跨度前室顶板中部的集中荷载, 这是造成 290、289 窟前部塌毁的直接原因。总之, 莫高窟这种开挖在半胶结弱质砾岩直立边坡上的薄顶、薄底、薄墙、无衬砌密集洞群与边坡岩体的各种地质病害有着内在的联系。

壁画及彩塑病害的产生除与窟外大气候、窟内小气候变化以及其它环境因素有着直接的联系外, 还与壁画当时的制作工艺、颜料成分、胶结材料老化<sup>[4]</sup>以及地仗层盐分组成特征等因素有关。

### 3.5 人类社会行为因素

除了前文提到的旅游公害外, 人类在从事其它社会经济活动中的短视行为、认识上的偏差及防灾意识的淡薄都能直接或间接地引起灾害的发生, 并可能产生下列新的灾种:

(1) 汽车、飞机等交通工具以及其它人类工程活动所导致的环境振动对石窟文物的安全可能会产生一定的危害。有关莫高窟振动防护最大振动量限值问题尚需进一步研究。

(2) 随着近几年经济的发展, 敦煌县城及其周围村镇大力兴办乡镇企业, 其中不少是化工企业, 设备简陋, 工艺落后, “三废”不经处理任意排放, 目前已对莫高窟的环境质量产生了轻微影响。

(3) 窟前的雨水下水道及绿化灌溉对底层洞窟的渗透作用, 加大了洞内湿度, 使各种病害加剧。

(4) 人们为了石窟保护和壁画修复所进行的一系列工程活动和尝试, 客观上会产生一些次生灾害或使病害加剧。

## 4 综合防治对策

莫高窟保护的实质就是探讨石窟文物与自然环境、文化环境、管理机构、服务设施、旅游者等方面的相互协调和统一, 最大限度地保护和延长其天然工作寿命。根据各种病害的发育规律、现状和发展趋势, 结合文物保护的特点, 灾害防治的基本方针应体现“突出重点、讲求实效, 防治并重、综合治理, 保持文物原貌、协调周围环境”的原则。

### 4.1 继续进行石窟文物的防灾减灾基础研究

#### 4.1.1 石窟崖体及其加固附属建筑物地震稳定性研究

在各种自然灾害中, 地震以其袭击的突然性和灾害的严重性成为最突出的灾种。60 年代国家投入巨资, 采用重力挡墙的形式对有严重险情的区段进行了加固修缮, 在当时起到了防止石窟大面积崩塌的作用, 但以今天的观点看来, 这种重力挡墙式结构, 在加固形式上不甚合理, 联合国教科文组织对其能否抵挡未来地震的袭击也持不同看法<sup>\*</sup>。因此, 洞窟及其附属建筑物的地震稳定性评价仍是莫高窟文物保护的首要任务。

#### 4.1.2 石窟地质灾害的调查、评价以及风沙运动规律和危害方式的进一步研究

对地质灾害发生的地质环境进行系统调查, 及时作出评价和预测, 在此基础上, 掌握各种地质灾害的特征、形成机制、主导因素、激发因素和危害状况, 为病害整治提供依据。

进一步研究莫高窟地区的风沙活动特征、活动强度、危害方式和沙丘移动规律, 大力加强

\* 联合国教科文组织中国遗产考察团. 中国遗产考察报告. 1988.

防治流沙的科学试验。

#### 4.1.3 壁画和彩塑的保护研究

注重相关学科的交叉与结合,加强对壁画、彩塑病害机理的综合研究,重视壁画颜料、胶结剂、地仗材料分析以及修复材料、修复工艺的科学试验和专家论证工作。在具体实施过程中,注意消除影响文物产生病害的原因,避免产生新的致灾因素。

#### 4.2 加强工程性防抗措施,重视防治方案的论证工作

继续完成未加固区段的加固工程,对现有附属建筑物的位移、沉降部位及早采取抗震措施,对崖体裂隙进行灌浆加固以增强石窟岩体自身的抗震能力;在窟顶建立综合防护体系,以扼制日益严重的风沙危害;采取有效措施对石窟表面和薄顶洞窟进行防风化加固;对上层洞窟顶部裂隙作防渗处理,断绝岩体中水分的来源;对窟前绿化灌溉和雨水下水道采取工程防渗措施,避免底层洞窟出现高湿度情况。

建立以领导和有关专家为核心的减灾防灾决策机构,病害整治对策实施之前,应从技术可行、经济合理、实施可能等各方面进行多方案论证,注意各种病害成因之间的相互联系和相互作用,提高防灾减灾的客观性和科学性。

#### 4.3 建立、健全石窟病害的动态监测设施和环境监测体系

对自然变异的监测减灾是先行性措施,应逐步建立和完善石窟岩体地质灾害的动态监测设施和环境质量监督监测体系,加强对崖体裂隙、密集洞窟的相互关系及变化情况、现有附属建筑物的加固作用和自身位移的长期监测工作;继续监测窟区各种气象现象(包括风沙活动规律)和大气环境质量;针对洞窟的不同类型,有选择地开展窟内小气候环境和旅游公害的监测;同时还须监测环境振动对石窟文物的影响状况。

#### 4.4 加强环境管理,强化石窟管理机构职能

##### 4.4.1 制定一套比较完整的环境保护方针、政策、法规、标准与管理制度

对石窟区划定保护范围及建设控制地带,与建设部门和环保部门共同制订环境保护规划,禁止在保护区内建设可排放有害物的工程项目以免出现新的污染源,地方行政主管部门应逐步调整城市工业和乡镇企业的产业结构,将敦煌建设成为一个旅游型城市。对于莫高窟附近地区已建的企业,若污染严重,目前又无治理措施,应限期取缔。

窟区应加强生活污水管理,严格控制窟区内汽车的行驶和停放,限制各种服务摊点和饮食餐厅的数量和规模,杜绝游人在窟顶及其附近的登山活动。

##### 4.4.2 完善石窟开放管理制度,严格执行有关法规

根据游人对洞窟小气候环境影响的规律,确定莫高窟饱和旅游容量,控制入窟的人数,轮流开放洞窟并限定开放洞窟的数量,制定严格的参观线路,以延长洞窟栈道寿命,改善窟内通风条件,定期关闭洞窟进行检查。

建立、健全监督执法队伍,加强旅游管理,防止人为损伤,净化窟区环境。此外,注意采用多种形式向游人宣传莫高窟作为人类文化遗产的重要价值和有关旅游规定,增强游人的文物保护意识。

#### 4.5 建立包括石窟档案、病害防治及环境监测数据在内的综合信息系统

石窟文物保护是一项多部门、多学科的综合性工作。通过计算机信息技术的设计,收集窟区的环境监测数据、洞窟的开凿年代、艺术价值、几何尺寸、围岩特性、裂缝分布、工程措施、科学试验、文物病害及其诊断分析、灾害防治、壁画和彩塑的修复、窟内小气候观测等方面的基础资料,建立数据库并实现信息的处理、存贮、管理、检索和传输等多种功能的一体化。

#### 4.6 加大灾害防治资金的投入

必要的经济投入是做好石窟病害防治和环境保护工作的物质基础和重要的保证条件。文物保护属于公益性事业,国家应把防灾减灾工作纳入国民经济和社会发展战略规划中去,加大专项投资份额,同时还应多渠道争取更广泛的社会支持和国际资助,要充分发挥莫高窟作为世界文化遗产的优势,扩大开放,进一步加强国际合作与交流,加大宣传力度,积极鼓励国际、国内组织、友人、个体的自愿捐赠,使防灾减灾工作在资金上得到保证。

### 5 结束语

石窟文物的防灾减灾研究是一项多学科交叉的综合性课题。一方面,既要认识到自然灾害系统的危害性,同时也要注意各种人文因素在相当广泛的范围内参与了灾害的形成。另一方面,也要充分意识到文物病害的防治是一项社会活动,需要将科技进步、政府职能和民众参与三者很好地结合起来,才能达到防灾减灾的目的。在此基础上,通过实施保护工作的整体规划,创造一个适于石窟文物长期保存的最佳环境,并达到从理论上深入认识各种病害产生和变化的机理,进而采取有效的防治措施,使中华丝路明珠永放光芒。

#### 参考文献

- 1 谢毓寿,蔡美彪.中国地震历史资料汇编.北京:科学出版社,1986.
- 2 李云鹤.莫高窟壁画修复初探.敦煌研究,1988,(3):5~9.
- 3 李实,等.敦煌莫高窟的气象观测,见:敦煌研究文集.兰州:甘肃民族出版社,1993.
- 4 李最雄.敦煌壁画中胶结材料老化初探.敦煌研究,1990,(3):69~83.

#### THE DUNHUANG CAVES' MAIN DISEASES AND PRECAUTIONS AGAINST THEM

SHI Yucheng ZHANG Jie

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000*)

#### Abstract

The main disasters and diseases such as earthquakes, geological hazards, windblown sand, frescoes' and painted sculptures' diseases, damages caused by tourism, harmful effects of human activities etc. in the Mogao Grottoes are summarized. The factors and background causing the disasters are analyzed and the comprehensive countermeasures against diseases are put forward. The results in this paper provide a theoretical and practical basis for the scientific conservation of these grottoes and the restoration of cultural relics.

**Key words:** Disaster, Preventive measures, Dunhuang Caves