

# 文物保护与环境地质

潘别桐 黄克忠 主编

中国地质大学出版社

## 编者的话

30多年前,原北京地质学院(现中国地质大学)苏良赫和王大纯教授曾先后带领一批教员和学生到云岗石窟、龙门石窟、敦煌莫高窟、大足摩崖石刻等处进行地质勘察。当时,不少人曾惊讶地发问:地质与文物古迹有什么关系?今天,在地质界和文物界已经不会再提这样的问题了。大量的事实证明,地质与文物之间已结下了不解之缘。1988年在希腊召开的一次国际学术讨论会上,入选了有关“工程地质中古遗址、古建筑的保护”的100余篇论文。其中,中国地质工作者写的有关文物保护的文章就有10余篇。其中涉及到各种类型的环境地质问题。可惜的是,当时未能将它们收集出版。

当今世界上从环境地质的角度来研究石质文物的破坏与保护问题的地质学家越来越多。如欧美学者研究空气污染及酸雨对露天大理石刻品的损害;埃及学者研究干旱地区各种盐类特别是可溶盐的结晶作用造成石雕的破坏;印度及东南亚地区的学者研究生物风化对石质文物的危害及防治对策;一些地震多发地区的学者研究石雕的减震措施;许多石质文物实验室正在进行各种保护化学材料对保护石质文物的耐久性、透气透水性、粘结牢固性等性能的研究。

我国的文物极其丰富,遍布于全国各地的地上或地下。随着经济建设的规模和空间越来越大,损害文物的事件也增多,其中有不少是属于环境地质问题。如由于兴建刘家峡水库,改变了炳灵寺石窟的小气候,促使含有蒙脱石的石雕加速风化;新疆修建水库淹没库木吐拉千佛洞的壁画宝库;因开挖铁路隧洞及地下水位变化,引起二王庙古建筑所在的古滑坡复活;地震区内石窟所在岩体的稳定问题;苏州虎丘古塔基础不均匀沉降引起塔的倾斜;活动的沙漠威胁着敦煌壁画;吉林高句丽墓群周围地下水位变化,加速文物的破坏;连云港磷矿地下开采使地面开裂、沉陷,损坏将军崖岩画;湖北铜绿山矿露天开采形成的高边坡影响古矿井遗址的安全;处于黄土塬顶的陕西司马迁墓祠,因河水冲刷造成50多米高的危险陡坡等。

从各省上报的工程维修方案中可以看出,地上或地下的文物所依存的环境,在很多情况下是与地质环境直接相关的。要追究造成文物损坏的原因和寻找防止损坏的措施,就必须借助地质调查和分析的方法。就以石雕的风化与保护为例,石雕是在岩体上开凿的,首先要从石雕风化的原因调查入手,了解它所依存的地质环境以及当地的气候条件与石雕风化的关系,追踪各种形态的水是怎样侵蚀石雕的。其次要调查石雕表面产生的各种盐类的成分、分布、形态及成因,这就需要采用岩矿分析和物质成分分析等各种测试方法,包括偏光显微镜镜下鉴定、扫描电镜、热重分析、X-衍射、红外光谱分析、氧化物化学成分分析等。欲对石雕表面的风化程度和深度进行研究,就需要沿不同深度分段系统取样分析,用物探方法测定风化深度,用地质方法进行裂隙率统计,对石雕的风化速度进行现场观察与室内的强度、吸水率、冻融、安定性等试验。找出病因后,要进行治理,就需要研究如何防止各种形态水

对石雕的破坏,如何在崖顶防渗排水,切断地下水与石雕的联系,排除窟内潮湿结露,防止剧烈的干湿交替变化等办法,对风沙、煤尘又应如何防治,等等。可见,仅石雕防风化保护这一项,就涉及到这么多的地质勘察方法。目前,文物保护中的一些急待研究解决的与地质环境有关的问题,是地质学研究的边缘阵地。仍以研究石雕风化为例,石雕的破损往往仅几个厘米甚至几个毫米就十分严重了,要重点保护的也就是表面这薄薄的一层,用一般地质上研究风化的手段显得粗略不足,还需要借助微观的并且是无损的检测方法来研究石雕风化剥离的深度和盐类聚积的厚度等问题。又如治理石窟中的微量渗水时,必须搞清楚水在岩体内渗流的通道和水的循环作用,这也需要从理论和探测技术上加以研究解决。

我们所收集的论文,尽管未能很全面地反映出文物保护中所有的地质工作内容,但它涉及面广,内容有一定深度,可读性较强,不失为一本有价值的文物保护技术与环境工程地质的参考书。论文涉及到我国的几个主要大型石窟群所出现的环境工程地质问题及其防治对策;还有大型古矿遗址、岩画、石塔的保护问题,其中涉及的地质问题有地下水入渗、溶蚀、矿泉水、矿山边坡、采矿区沉降开裂、沙漠治理、岩石风化机理、震动环境与动力稳定性等;在文物保护的勘察技术研究中,还引进了一些新方法、新技术,如地质雷达探测古矿遗址的空间分布、声波测试石雕的振动参数、检查灌浆效果、 $\gamma$ -核子仪器无损探测石雕的密度与水分、微测深电法研究石雕的风化厚度及材料渗透深度、应用离散元分析石窟边坡岩体的动力稳定性。等等。

如果我们所做的一切努力,能引起广大读者对文物保护中的环境地质问题感兴趣,关注研究文物保护领域中的各类课题,并支持我国文化遗产的保护和研究利用,那么,我们将十分欣慰。我们相信,随着我国经济的飞跃发展,民众的物质文明和精神文明水平的不断提高,将有更多的地质科学工作者投入到文物保护科学技术这个新领域中来。

最后,对关心和支持该论文集出版的王大纯先生、沈照理先生、牟会宠先生和刘景龙同志一并表示感谢!

1992年3月

# 目 录

|                                   |                         |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 1. 中国石窟寺保护的环境地质问题 .....           | 潘别桐、黄克忠 ( 1 )           |
| 2. 洛阳龙门石窟环境病害与防治对策研究 .....        | 潘别桐、刘景龙 ( 9 )           |
| 3. 云岗石窟石雕的风化与保护 .....             | 黄克忠、解廷藩 (19 )           |
| 4. 敦煌莫高窟降尘成分及来源的探讨 .....          | 屈建军、凌裕泉 (34 )           |
| 5. 大冶铜绿山古铜矿遗址赋存环境及原地保护可能性研究 ..... | 潘别桐 (40 )               |
| 6. 麦积山石窟的稳定性问题 .....              | 黄克忠 (79 )               |
| 7. 大足北山石刻区渗水病害成因分析及防治对策 .....     | 方云、潘别桐、谢本立 (87 )        |
| 8. 龙门石窟碳酸盐岩体溶蚀病害及防治对策 .....       | 潘别桐、方云、王建锋 (99 )        |
| 9. 南响堂寺石窟稳定性分析及工程处理方案 .....       | 牟会宠、杨志法 (126)           |
| 10. 巩县石窟寺石刻地质病害研究及防治对策 .....      | 滕伟福、潘别桐、李宏松 (147)       |
| 11. 陕西省彬县大佛寺石窟环境地质病害及防治对策 .....   | 方云、潘别桐 (155)            |
| 12. 福建泉州西塔花岗岩表面粉状物的化学成分及其意义 ..... | 王秀兰、冯丽娟 (161)           |
| 13. 宁明花山古岩画地质病害与防治对策 .....        | 刘佑荣、潘别桐 (165)           |
| 14. 急倾矿体开采对将军崖古岩画的变形破坏影响研究 .....  | ..... 潘别桐、滕伟福、伍法权 (176) |
| 15. 爆破震动对将军崖古岩画保护的效应 .....        | 潘别桐、滕伟福、徐光黎 (186)       |
| 16. 龙门石窟岩体的震动环境和动力稳定性研究 .....     | 刘景龙、潘别桐 (193)           |
| 17. 龙门石窟边坡岩体动力稳定性离散元分析 .....      | 潘别桐、曹美华 (206)           |
| 18. 铜绿山古铜矿遗址地质雷达探测研究 .....        | 李大心 (216)               |

# 中国石窟寺保护的环境地质问题

潘别桐

黄克忠

(中国地质大学)

(中国文物研究所)

## 一、我国石窟寺的时空分布状况

就时间而论,中国的石窟艺术始于汉代(公元2世纪),而最多的是北魏至隋唐时期开凿,一直延续到明、清时代。所以,开凿时间渊源流长。就地区分布而言,西起昆仑,有南疆拜城克孜尔石窟、库车的森木塞姆与玛札伯哈石窟、克子喀拉罕石窟、库木吐拉石窟、焉耆七格星明屋石窟;银山(现今托克逊以西)以东的吐鲁番柏孜克里石窟、胜金口石窟、吐峪沟石窟、雅尔湖石窟;甘肃玉门关以东的河西走廊,毗连新疆,十六国时代,是五凉地区,有敦煌莫高窟、西千佛洞、榆林窟,此外有酒泉文殊山石窟、民乐祁连山石窟、永靖炳灵寺石窟、天水麦积山石窟、固原须弥山石窟、庆阳北石窟寺和凉州天梯山石窟;陕西省境内有彬县大佛寺石窟、耀县东山药王洞石窟、郿县石泓寺石窟和阁子头寺石窟、麟游慈善寺石窟、延安清凉山万佛洞石窟;黄河以东,太行山以西,华北平原的西部,是十六国时代匈奴再兴,鲜卑族崛起的地带,后来北魏统一北中国,就是以这地区为根据地的。因此,现今的山西省境内开凿有举世闻名的云岗石窟,此外还有太原天龙山石窟、平顺宝岩寺石窟、太原晋祠龙山道教石窟;河南省地处中原,交通四通八达,而洛阳又是宋代以前的历朝国都,因而也是石窟遗迹繁盛的一省,有洛阳龙门石窟、巩县石窟寺、浍池鸿庆寺石窟、安阳宝山石窟、汤阳县前咀村石窟、沁阳玄谷山摩崖造像、浚县千佛洞石窟和陕县温塘摩崖造像;山东省石窟主要分布在济南附近和青州的驼山与云门山,如济南附近的佛峪寺摩崖造像、柳埠镇朗公谷千佛崖、四门塔与龙虎塔造像、黄石崖与千佛山的石窟造像,青州云门山、驼山石窟,此外有曲阜九龙山石窟;河北省境内有邯郸南、北响堂山石窟、隆尧宣雾山石窟和宣化下花园石窟;辽宁省有义县万佛堂石窟;内蒙古自治区有巴林左旗林东镇石窟和赤峰县的赤峰洞山石窟;四川省石窟遗迹也是相当多,有广元皇泽寺和千佛崖石窟、大足龙岗山石窟和宝顶圣寿寺石窟、巴中县摩崖造像、安岳县境的石窟造像、乐山凌云寺造像;东南沿海各省的石窟,以浙江为最多,有杭州西湖石窟群、新昌宝相寺摩崖造像,江苏省有南京栖霞寺千佛岩石窟、徐州云龙山石窟、连云港孔望山摩崖造像,此外还有云南剑川石窟,江西赣州通天岩石窟,福建福州乌石山石窟等。

上述表明,在西起昆仑,东至东海,南抵吴越,北达幽燕,直至滇南的南诏的广大区域内,到处都有石窟的开凿,石窟艺术遍及全国。

丰富多采的石窟艺术,为研究我国古代佛教历史、雕刻艺术、社会历史、政治和经济变

革等提供了珍贵的实物资料，是不可再生的文物资源。

从研究地质工程史的角度看，石窟建造是我们祖先利用自然地质条件，进行地质工程活动的历史。黄汲清教授曾在中国地质学会地质学史研究第六届年会上提出进行敦煌莫高窟的地质工程背景问题的研究。敦煌是举世闻名的，为什么要在那里搞一个莫高窟呢？可能是因为玉门砾石层的下部是最老的第四系地层，呈半固结状态，成岩不全，但地层能立着不倒，几千年也不倒；往东往西还有新疆的千佛洞、天水、洛阳龙门、大同云岗……再到四川一带都有石窟塑像。这样就构成了中国佛教建筑的大群体，成为世界文化的大精华。

这些千余年以前修建的石窟，在自然地质和人类生产活动营力的作用下，导致危害石窟艺术保存的种种地质病害。在查明石窟地质背景和地质环境变化的基础上，分析产生各种地质病害的机理，研究病害的防治对策，是当前石窟文物保护地质研究的根本任务。

我国石窟寺保护的工程地质、水文地质和环境地质研究始于 50 年代末，文化部于 50 年代末和 60 年代初，曾先后组织原北京地质学院（现中国地质大学）苏良赫、王大纯教授为首的专家组对敦煌、云岗和龙门石窟进行以保护为目的的地质、水文地质和工程地质调查，揭开了我国石窟寺保护地质研究的序幕。多年来，通过对我国的一些主要石窟，运用现代地球科学的理论、方法和技术研究了危害石窟和石雕艺术品长期保存的环境地质条件，取得了许多重要的进展和成果，其研究水平已经达到国际同类项目的研究水平。本文试图在总结已有研究成果的基础上，探讨我国石窟寺的岩性类型、主要地质病害、防治措施以及今后的研究方向。

## 二、我国石窟寺岩性类型

我国的石窟寺多数开凿在依山傍水的崖壁上，组成崖壁的地层大都未经历过强烈构造变动，岩体的完整性较好，地层产状多为近水平或缓倾。按照岩性可把我国石窟寺分为四种类型：

### 1. 砂岩型石窟

开凿在砂岩或砂岩夹薄层泥岩、页岩中的石窟约占总数的 80% 以上。如新疆拜城克孜尔石窟就是开凿在新第三纪的砂岩夹泥岩地层中，砂岩疏松，成岩程度差；甘肃永靖炳灵寺石窟也是开凿在砂岩夹泥岩中；陕西彬县大佛寺石窟开凿在早白垩世洛河组紫红色中粗粒砂岩夹砾岩或薄层页岩中，岩石疏松，孔隙率高达 20—25%，成岩程度较好；著名的云岗石窟开凿在侏罗纪砂岩夹泥质、粉砂质页岩中；四川大足龙岗山和宝顶山石窟均开凿在早晚侏罗世蓬莱镇组和遂宁组的红色砂岩夹泥岩地层中。属于这一岩性类型的石窟还有新疆的库车森木塞姆、玛札伯哈石窟、吐鲁番柏孜克里石窟、甘肃固原须弥山石窟、凉州天梯山石窟；河南巩县石窟、浉池鸿庆寺石窟；四川乐山凌云寺大佛造像；江西通天严石窟等。

### 2. 砾岩型石窟

闻名中外的甘肃敦煌莫高窟就是开凿在鸣沙山东麓的老第四纪酒泉砾岩中；天水麦积山石窟开凿在老第三纪紫红色砂砾岩夹薄层含砾泥岩中。这些砾岩较疏松，成岩程度差，地层产状呈水平，岩体完整性好。

### 3. 灰岩型石窟

著名的龙门石窟群开凿在中、晚寒武世的白云岩和鲕状灰岩、泥质条带灰岩中，岩体受轻微构造变动，地层产状为  $NW350^{\circ}\angle 25^{\circ}$ ，无断裂构造，岩体完整性好。属于灰岩型的还有山西太原天龙山石窟、晋祠龙山道教石窟；河北邯郸响堂山石窟等。

### 4. 结晶岩型摩崖造像

属此类石窟或造像的较少。江苏连云港孔望山摩崖造像修建于汉代，距今有 1600 多年历史，开凿在前震旦纪朐山组钾长均质混合花岗岩中，岩石坚硬，开凿困难。泉州老君岩造像为伟晶花岗岩。

上述石窟寺的岩性类型表明，我们祖先在建造石窟寺时，是经过地质选址考察的，选择在完整性好，成层厚度大而又较均一的岩体中开凿或雕刻。此外，岩性又要相对较软，易开凿，而且具有较好的自稳能力，未经构造变动，成层厚度大而岩性均一的砂岩、灰岩、砾岩等是最适合于石窟开凿和修建的。表明我们的祖先在当时生产力水平下，已经采用地质工程的观点去指导石窟寺的选址和修建。

由于石窟寺的岩性类型和所处的自然地质环境的不同，经过千年以上自然地质营力和人类工程活动的作用，诱生的环境地质病害类型、机理及防治也各不相同，因此，在实际研究工作中，首先应查明石窟寺的岩石类型和赋存的地质环境。

## 三、石窟寺保护的主要环境地质病害

引起石窟寺破坏的主要环境地质病害（或问题）涉及范围很广，类型很多，成因也很复杂，但按石窟环境地质病害的主要成因，可分为两大类：一类是由于自然地质作用引起的地质病害，如岩石溶蚀，由于岩石裂隙交切及风化地质营力作用，引起雕刻品崩坍脱落、岩石风化、渗水病害、地震塌坍、冲沟切割、沙漠粉尘以及风蚀掩埋等，这类病害称为第一类环境地质病害。另一类是由于人类生产或工程活动，引起自然环境改变，在改变后的自然环境营力作用下，引起原有（第一类）地质病害的加剧或诱生新的环境地质病害，如爆破震动、采矿引起地面和边坡岩体的变形破坏；兴建水库引起小气候环境改变而诱生的岩石风化加剧；酸雨、煤尘引起岩石蚀变；改变河道而引起洪水淹没等，这类病害称为第二类环境地质病害。

下面介绍我国石窟寺常见的几种环境地质病害：

#### 1. 降水、河水、地下水造成的石窟漏水、渗水和积水

这是石窟寺最常见、危害最大的病害。由于大气降水通过石窟顶部渗入到石窟内，导致石窟漏水、软化岩石、浸蚀石雕的病害最为普遍。如山西大同云岗石窟，虽地处半干旱地区，由于岩体裂隙发育，大气降水很容易沿裂隙渗入窟内，软化岩体，浸蚀石雕。类似的受危害严重的还有彬县大佛寺石窟、巩县石窟、大足北山石刻等。受地下水侵蚀最典型的石窟是陕西彬县大佛寺石窟。该石窟后壁切穿了一个砂岩含水层，地下水呈条带状向洞窟内渗流，造成洞壁冲蚀悬空，石雕严重风化。大同云岗石窟第二窟的寒泉洞也揭露了地下水，地下水以下降泉的形式向洞内排泄，因受泉水长期浸泡，致使窟底基础岩体全部碎裂成小块，严重危及洞窟稳定。对于开凿在碳酸盐类岩体（石灰岩、白云岩、白云质灰岩）中的石窟而言，降

水和地下水的入渗，还将溶蚀岩体，造成石窟壁面灰华凝浆积聚，掩盖石雕，损坏石刻。闻名于世的龙门石窟以及邯郸响堂寺石窟、太原天龙山石窟等均已出现此类地质病害。

由于大部分石窟寺是依山傍水修建的，洪水倒灌窟内，会导致石窟积水，浸蚀石雕，损坏石窟文物。这种洪水倒灌窟内危害石窟寺的现象，不仅在大同云岗石窟、巩县石窟发生过，甚至连地处干旱地区的甘肃敦煌莫高窟近年也发生过。

## 2. 边坡岩体失稳

由于多数石窟寺依山傍水，开凿于河谷一侧或两侧的陡崖上。陡峻的边坡岩体，因河流冲蚀卸荷，常常发育岸边卸荷裂隙，这类裂隙走向平行于边坡走向，倾向与坡向近一致，倾角等于或略大于坡角，常常构成石窟寺所在边坡岩体失稳的滑移面或崩落破坏面。岩体中的构造裂隙、风化裂隙、层面、断裂面或剪切带、软弱夹层等结构面，常构成边坡岩体失稳的各种切割面。各种不同成因的岩体裂隙的互相切割，使石窟寺所在边坡岩体形成了可能变形、滑移、崩塌、错落的分离体，导致石窟寺边坡岩体的失稳。此外，石窟寺边坡岩体中各类裂隙发育和交切，还为水的入渗和渗流，盐类的运移和积聚提供了良好通道，危害石窟寺。我国的一些主要大型石窟寺，诸如洛阳龙门石窟、大同云岗石窟、河南巩县石窟、甘肃的麦积山石窟、炳灵寺石窟、新疆的克孜尔石窟以及四川的乐山大佛等，均普遍出现边坡岩体失稳问题。

## 3. 地震危害

因地震造成石窟的大面积崩塌，对一个石窟寺来说往往是致命的。如甘肃凉州的天梯山石窟就因当地频繁强烈的地震，使得它无法保存而于 50 年代进行了搬迁，把该石窟寺全部迁出强震区。敦煌的莫高窟和天水麦积山石窟都在历史上多次遭受强烈地震，引起大面积洞窟倒塌，造成大量珍贵石窟艺术品的毁坏。

## 4. 岩石风化病害

岩石的物理、化学和生物风化作用，时刻在侵蚀石雕，危害石窟寺的保存。地处干旱、半干旱气候区的云岗、克孜尔、炳灵寺等石窟的岩石风化是以冻融、巨大温差、干湿交替作用而引起的物理风化为主，但是含有盐类的地下水渗入石雕岩石中的孔隙，造成盐类沉积、结晶、膨缩等作用，使岩石中矿物产生蚀变的化学风化作用也很普遍。而位于雨量充沛、湿热条件下的四川大足石刻、乐山大佛，除化学风化以外，植物根系腐植酸损害石雕岩石的生物风化作用也很明显。

## 5. 风沙吹蚀病害

风沙吹蚀病害在敦煌石窟可见。紧靠莫高窟的鸣沙山是连绵的沙丘，遇到大风时，沙石源源不断地刮入莫高窟内，使得石窟内的壁画、彩塑受到严重磨蚀。

## 6. 小气候环境改变引起的石窟病害

炳灵寺石窟开凿在白垩纪长石石英砂岩中，该岩石胶结物成分中粘土矿物占 15%，而粘土矿物中蒙脱石含量高达 38%。在修建刘家峡水库后，原来的干旱气候环境变为干湿交替频繁的小气候环境。这种干湿交替的小气候环境，使蒙脱石发生胀缩变形，加速了石雕表面强

烈风化，使原来光滑圆润的石雕开始掉粉，变得粗糙模糊。这种病害也出现在新疆的森木塞姆石窟。

#### 7. 环境污染引起石雕岩石的腐蚀病害

由于工业的发展，大气中的二氧化硫、硝酸根离子含量增加，导致酸雨。此外某些地区大气中煤尘等微粒含量也增大，这些酸雨和煤尘降落在石雕表面，造成石雕岩石的腐蚀。最明显的是连云港的孔望山石刻和巩县石窟，因受酸雨作用，导致石刻岩石的腐蚀，使石雕表面出现麻点。如孔望山汉代摩崖石刻是雕刻在混合花岗岩的陡崖上，由于受酸雨作用，混合花岗岩中的长石矿物被风化，使石刻造像表面出现麻点甚至小的孔洞。河北邯郸响堂山石窟寺，被附近的水泥厂、化工厂及煤矿包围，大气中超标的二氧化硫以及由其形成的酸雨腐蚀着石灰岩质的石雕佛像。此外，大量的水泥粉尘已使石雕穿上一件水泥硬壳“外套”，破坏了石雕的原貌。

#### 8. 采矿引起地面塌坍导致文物破坏

连云港将军崖岩画是 4000 年以前的一幅星像图，有“东方天书”之美称。但由于岩画所在岩体位于锦屏磷矿矿床之顶板，磷矿的开采已经造成大面积的采空区，由于采空区的塌坍、崩落，导致地表岩体产生裂隙，而这些裂隙已经切割星像图所在岩体，危及岩画的安全。另一个典型例子是湖北大冶铜绿山古矿遗址，也因受采矿的影响，而威胁着该遗址的长期保存。这类问题还存在于江西的瑞昌、安徽的铜陵等矿区。

#### 9. 人工爆破震动对石窟寺保存的危害

人工爆破震动对石窟文物保存的危害也已在某些文物保护区内发生。最典型的事例发生在龙门石窟保护区。在龙门保护区内，洛阳水泥厂及乡镇企业连年放炮采石，焦枝铁路及穿越石窟中心区的洛临公路的火车、汽车行驶时的振动，均是导致石窟岩体因振动失稳的动力源。在这类动荷载作用下，使石窟区内的岩体分离体渐趋失稳。这种因人工震动引起的动力稳定问题还出现在连云港将军崖和大冶铜绿山等文物保护区。

### 四、石窟寺环境地质病害的研究方法

石窟寺环境地质病害的研究方法主要是采用基础地质、工程地质和水文地质的一些勘察和研究的方法。在进行石窟寺环境地质病害研究中，首先要查明石窟寺所处的地质环境，因此要进行详细的地质-工程地质测绘，以查明石窟寺所处的地形、地貌、地层岩性、地质构造、物理地质现象、水文地质等条件，此外还要收集水文气象等资料，详细调查由于人类工程引起环境条件演化及其对石窟寺危害的情况。

在进行石窟寺环境地质病害测绘时，目前多使用立壁近景摄影的方法，将石雕、佛像及各种地质现象都详尽地、准确地标在平面、立面和剖面图上。在进行地质-工程地质测绘时，除了表示一般的地层岩性、地质构造、地下水露头以及物理地质现象外，还要将石雕破坏现状、裂隙分布、危岩形状及体积和质量、石雕岩石的风化状况、渗水点出露位置等表示在图上。

石窟内石雕的风化研究，首先研究石雕的风化形态，进行风化成因分类；然后对气象要素（包括气温、湿度、降雨、蒸发、风化、风速和日照等），滴水、渗水、潮湿环境等进行长

期观测与记录；并进行泉水动态调查，石雕风化剖面的系统采样，进行岩石物理力学性质试验，岩石氧化物的化学分析，岩石薄片鉴定及风化产物的差热分析，X-射线衍射分析，光谱分析和扫描电镜鉴定等。综合分析这些成果后，得出石雕风化主要病因的结论。

为探索石雕风化程度，可采用点荷载强度试验，得出抗拉强度 ( $S_r$ ) 和风化石雕抗拉强度指数 ( $\tau$ )。还可利用声波 ( $V_p$ ) 表示石雕表层的风化程度。石雕的风化深度可采用岩石化学成分随深度的变化，或物探小四极剖面法和垂向测深法、微测深法等测出石雕表层岩石的电阻率以及岩相鉴定等方法进行研究。

近年来，在石窟寺环境地质病害研究中，地球物理勘探方法的应用越来越普遍。目前，常用的有直流电阻率法探查渗水途径、窟顶基岩埋深；声波法测岩体风化程度、大裂隙位置、化学灌浆效果；微测深法探测风化层厚度、裂隙延伸方向、保护材料渗透深度；浅层地震法用于探测石窟寺岩体深部裂隙发育情况、石雕内部缺陷以及窟前考古；水声仪测定佛底座水下洞穴位置、形状、大小；地质雷达探测掩埋的洞窟和古墓位置、古矿遗址、浅埋的隐伏溶洞；核子水分密度仪可对石雕的密度与含水量等进行无损探测。此外，精测磁力仪也用于古墓探查、隐伏、断裂、岩溶等探查，并取得可喜成果。

为评价石窟岩体及佛像附近爆破震动、火车、汽车振动等引起的动力稳定性，可采用各类测震仪对各种动力源的振动效应进行实测，为石窟的动力稳定性评价提供可靠依据。位于地震区内的石窟寺，还应进行天然地震调查，评价地震对石窟岩体的影响程度。

石窟寺环境地质问题的分析、评价方法，目前也有新的进展。多数石窟寺开凿在陡立边坡内，所以边坡岩体稳定评价多为边坡与洞室相结合的三维空间问题，如对龙门石窟奉先寺以内的高边坡岩体稳定性评价，曾在德国汉诺威大学地下建筑研究所用三维空间有限元方法进行过分析、计算。为评价爆破震动对边坡岩体稳定性影响，采用了动态离散元分析方法。为了建立岩体结构模型，分析渗漏通道和途径，在岩体节理裂隙的实测基础上，可进行结构面几何参数的统计分析，建立概率模型，进行岩体结构面网络的计算机模拟，得出岩体结构面发育的网络和联通网络系统，为石窟岩体稳定性分析、渗漏通道确定和防渗处理提供了依据。

## 五、石窟寺环境地质病害防治

由于石窟寺的岩性、构造不同，所处的自然环境复杂多变，决定了环境地质病害类型各异，从而所采用的保护方法和防治对策也不尽相同。现将目前我国一些常用保护方法介绍如下：

### 1. 改善石窟所处的环境，避免各种风化营力的继续破坏

这种对策的主要目的是防止各种形态的水对石雕的侵蚀。如在石窟崖顶修建防渗排水工程，改变并疏通地表水的流向，并切断与洞窟的联系，查清裂隙走向、范围，杜绝地表水沿裂隙渗入窟内；窟前地面排水，降低地下水位；排除窟内潮湿结露等。为避免石雕受日光直接照射和风沙、酸性尘埃的危害，防止剧烈的干湿交替变化，可采用修建窟檐等保护办法。

### 2. 为防止石窟岩体的崩塌和滑动而进行加固

60年代石窟寺失稳岩体的加固，主要是采用大型块石砌体或浇灌混凝土护壁和挡墙，以阻止石窟岩体裂隙的发展，防止悬岩坍塌。但这种方法难以保持石窟文物的原状，易破坏崖

壁原有的历史遗存，现已很少采用。目前，使用较普遍的是喷锚加固技术，它以不同长度的锚杆或锚索，采用水平或倾斜的不同方向穿过裂隙岩体，将不稳定岩体锚固在稳定岩体上。然后将锚杆端与细钢筋网焊接后，外面用高压喷甩 5—15cm 厚的混凝土，表层用山体岩粉罩面，沿一定间距留设排水孔，使少量渗水仍能排出。这种方法适合加固已经松弛、多裂隙、洞窟众多而岩石破碎的石窟山体，它可对石窟起加固、支撑、防风化作用，具有很大的承载力和安全储备。缺点是仍会局部改变石窟外貌和掩盖一些历史遗存。最近，有些喷锚加固设计已改变为不加混凝土钢筋网的罩面，而以化学喷涂材料来代替。

对石窟中石雕断裂、洞窟崖壁开裂、崩坍等加固保护的另一方法是灌浆粘结。目前，使用的灌浆粘结材料主要有丙烯酸酯类、环氧树脂类及无机化学材料等。对材料性能要求接近于被加固岩石的物理力学性状，并要求材料的粘结性好、粘度低、可灌性好、室温下可固化，符合耐久性、耐冻融性、耐水性等要求。灌浆设备主要是用空气压缩机和带压力表的灌浆桶。应十分重视灌浆工艺，它直接影响到灌浆的质量。灌浆质量的检查，可采用声波检测技术，对灌浆的深度、范围、岩体强度、变形性能等进行检查，以保证灌浆加固的质量。

### 3. 风化石雕的保护

一般较完整、风化不严重的石雕，都应着手保护、改善其所处的环境。只有当文物已严重风化，不进行保护已无法保存下来时，才采用防护材料对石雕的表面进行直接保护。首先要有依据地指出主要是防止哪种风化营力，并提出防护材料应该达到的主要指标，如要求材料无色、透明、不反光、不酥碱、化学稳定性好、渗透能力强、抗风化能力好、有一定固结强度等。已使用的防护涂料有：高分子有机聚合材料，如有机硅系列、甲基丙烯酸甲酯、聚氨酯等，无机材料中较为成功的有高模数硅酸钾类以及各种复合材料。

为了文物的安全，必须慎重地对防护材料的性能进行各项检测。它们包括：①应用微观方法研究防护层内的材料形态、充填程度及沿深度方向的变化；②检测文物的物理力学性能，如孔隙率、透气性、固结强度、耐磨蚀强度等；③抵御水侵蚀的能力，如表面吸水率、毛细吸水率、最大吸水率、憎水性、透水性等指标；④检测文物抗风化能力，如耐老化性能（包括人工老化及自然曝晒老化）、抗冻融试验、安定性试验、干湿交替试验等；⑤检测文物化学稳定性，如耐酸性，可溶、中溶盐含量、抗污染能力等；⑥检测文物重涂性（加固若干时间后，重涂其它材料的可能性）；⑦检测文物崩解性等。

根据石窟的环境、石质及防护材料性能，可从以上各项中选择若干项进行测试。此外，要在现场长期观察防护效果，作好详细记录。还可以对石雕进行无损伤检测，以评价防护效果。

要治理改造石窟寺的保存环境，并非易事，尤其是当前文物部门缺乏科技人才和资金的情况下，必须取得社会各界的广泛支持与合作，并将各种现代科学技术应用到石窟寺文物保护中去。尽最大努力使我们祖先留下的丰富遗产得以长期保存，传给子孙后代。

## 六、结 语

我国是世界文物大国，我们的祖先遗留下了丰富的、举世瞩目的文物遗存，但由于自然和人类工程活动的影响，导致文物保存环境发生极大变化，产生了一系列危害文物保存的环境或环境地质问题。党和政府虽然十分重视文物保护，制定了文物保护法并每年拨专款进行保护文物工作，但是在人力和财力上还不能完全满足文物保护的需要。尤其是文物保护的研

究工作还须加强，文物保护的环境立法工作也势在必行，文物保护的环境或环境地质标准也急待制定。

对于石窟寺保护而言，目前对全国的几个主要石窟寺进行了系统研究，并已经采取了许多保护措施，但更多的石窟寺的保护工作尚未开展，所以当前急需开展全国石窟寺环境地质病害的普查工作，在此基础上，制定石窟寺保护的环境或环境地质标准和环境立法。

从学科发展而言，通过石窟寺保护的环境地质病害研究，把地球科学的一些理论和方法应用于石窟寺和古文物、古遗址的保护研究，以逐渐形成一门地质学的新兴学科——石窟寺保护或文物保护环境地质学。

石窟寺保护环境地质问题的研究，为我国地质学史、工程地质学史、岩土工程史以及岩石地下工程建筑史等提供了许多实物证据。1987年10月，我们对新疆克孜尔石窟环境地质病害的考察中，发现在汉代已用木灰浆锚杆来加固洞脸边坡，并能在较松软的新第三纪砂岩、泥岩中开挖洞跨10m、洞高15—20m的大洞室。表明在1500—2000年以前我们的祖先在岩石地下工程建筑方面已经达到很高的水平。遗憾的是，目前尚未引起有关方面的重视，这一研究领域还无人问津。

目前，国际上各国对古文物、古遗址保护的环境地质、工程地质以及保护技术的研究十分重视，1988年9月国际工程地质学会在希腊的雅典召开古文物、古遗址保护工程地质国际学术讨论会，在该会上，我国的工程地质和文物保护工作者共提交了11篇论文，是提交论文最多的国家之一。我国的文物保护研究，尤其是石窟寺保护的研究已经引起美国、意大利、德国、日本等国家科学工作者的极大兴趣，并开展了合作研究。我们相信，今后将会有越来越多的从事地质、工程地质、工程物探、岩土工程以及文物保护的工作者投身到这方面的研究中来，为长期保存祖国的古文物而贡献自己的力量。

# 洛阳龙门石窟环境病害与防治对策研究

潘别桐

刘景龙

(中国地质大学)

(龙门石窟研究所)

## 一、前言

龙门石窟位于洛阳市城南 13km。石窟开凿于北魏迁都洛阳(公元 494 年)前后,历经东魏至北宋诸朝,营造 150 多年之久。据解放后调查统计,香山和龙门山两山所存窟龕 2100 多个,佛塔 40 多座,碑刻题记 3600 块,全部造佛 10 万余躯。丰富多采的龙门石窟艺术,为研究我国古代佛教历史和雕刻艺术提供了重要实物资料。

1400 多年以来,龙门石窟除遭受人为破坏外,在自然营力作用下,产生了较严重的地质病害,这些病害使石窟雕刻艺术品遭到较严重的破坏。为查明石窟地质病害类型和机理,寻求防治病害的对策,文化部文物局曾先后于 1963 年和 1964 年邀请原北京地质学院(现中国地质大学)苏良赫和王大纯教授对石窟地质病害状况进行地质、水文地质和工程地质考察。后因“文革”,这项研究工作中断。“文革”后,虽然也进行了一些研究,但均属于局部的和临时性研究。1986 年我们受文物局文物保护科学技术研究所和龙门石窟文物保管所的委托,对石窟的环境病害进行了全面系统深入的研究。分别于 1986 年 9 月至 10 月和 1987 年 9 月至 10 月进行了两次现场地质调查,并在室内进行了岩石薄片鉴定、岩石溶蚀和溶度试验、水化学和水同位素测定、岩块与结构面的物理力学试验和声波试验、岩石化学全分析以及有关计算机模拟分析。通过上述的室内、外综合研究,基本上查明了石窟环境病害的现状、类型和机理,并提出了环境病害防治的对策。

## 二、石窟区自然环境及变化状况

### (一) 石窟地质环境

石窟区位于龙门山——香山断块地块,该断块的四周被宜阳、草店、郃庄和龙门桥断裂切割,其中宜阳(又称花园)断裂和郃庄断裂为 NE 向断裂,走向为 NE45—55°,倾向相反,倾角 60—70°。而草店和龙门桥断裂为 NW 向断裂,走向 NW300—325°,倾向相反,倾角 60—65°。该地块自新生代中更新世以来一直处于整体抬升、遭受剥蚀和侵蚀卸荷作用阶段。伊水横穿地块,形成了深切的峡谷,形如“门阙”,龙门因此得名。伊水深切的峡谷两岸立壁岩体为石窟开凿和雕刻提供了优良的地点。

地块的岩性主要由中、晚寒武世白云岩和石灰岩地层组成，地层产状为：倾向 340—0°，倾角 25—30°。晚寒武世为一套厚层、巨厚层的细晶、微晶和鲕粒白云岩，而中寒武世为一套

表 1 主要岩石矿物成分

| 岩石名称    | 百 分 含 量 (%) |       |      |     |     |
|---------|-------------|-------|------|-----|-----|
|         | 白云石         | 方解石   | 生物碎屑 | 泥质  | 铁质  |
| 中-细晶白云岩 | 90—95       | 1—3   | /    | 2—5 | 1—2 |
| 鲕状灰岩    | 10—15       | 75—85 | 5—10 | /   | /   |

薄层至厚层的泥质条带灰岩和鲕状灰岩。石窟和雕刻品大都开凿在晚寒武世中、上部的厚层、巨厚层细晶、微晶白云岩和中寒武世的鲕状灰岩和条带状灰岩中。表 1 给出了石窟所在岩体的矿物成分。表 2 为石窟所在岩体的岩石化学成分全分析资料。表 3 是石窟

所在岩体的岩石的物理、水理、力学性质试验成果。这资料表明，石窟所在岩体的岩石矿物成分单一，力学强度大，抗变形性能好，但具可溶性，且灰岩的比溶蚀度大于白云岩。

表 2 主要岩石化学成分

| 化学成分                           | 百分含量 (%)    |             |
|--------------------------------|-------------|-------------|
|                                | 白云岩         | 灰 岩         |
| SiO <sub>2</sub>               | 1.32—10.44  | 1.0—3.31    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.33—4.04   | 0.27—1.12   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.29—0.76   | 0.22—0.49   |
| MgO                            | 17.29—21.17 | 2.20—4.54   |
| CaO                            | 24.30—29.97 | 49.59—50.58 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.02—0.06   | 0.02—0.03   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.30—0.79   | 0.07—0.50   |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.14—0.30   | 0.06—0.16   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.02—0.35   | 0.02—0.04   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.01—0.26   | 0.04—0.09   |
| MnO                            | 0.02—0.03   | 0.02        |
| SO <sub>2</sub>                | 0.00—0.02   | 0.03—0.06   |
| 烧失量                            | 43.38—44.16 | 41.66—44.23 |
| 酸不溶物                           | 2.09—17.80  | 1.13—5.02   |

表 3 岩石、物理、水理、力学性质

| 指标名称   | 单 位               | 白云岩                                      | 石灰岩                                        |
|--------|-------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 容 重    | g/cm <sup>3</sup> | 2.73—2.75                                | 2.60—2.65                                  |
| 吸水率    | %                 | 0.4—1.0                                  | 0.3—0.7                                    |
| 含水量    | %                 | 0.03—0.48                                | 0.11—0.30                                  |
| 抗剪断强度  |                   | C=40.0MPa<br>φ=28°                       | C=45.0MPa<br>φ=24°                         |
| 单轴抗拉强度 | MPa               | 4.0—8.0                                  | 5.0—6.6                                    |
| 单轴抗压强度 | MPa               | 110.0—140.0                              | 130.0—140.0                                |
| 静弹模    | MPa               | 6.0×10 <sup>4</sup> —6.2×10 <sup>4</sup> | 6.28×10 <sup>4</sup> —6.32×10 <sup>4</sup> |
| 静泊松比   |                   | 0.23—0.24                                | 0.21—0.25                                  |
| 声波纵波速  | m/s               | 4850—4950                                | 5000—6000                                  |
| 声波横波速  | m/s               | 2850—2950                                | 3500—4000                                  |
| 动弹模    | MPa               | 6.0×10 <sup>4</sup> —7.0×10 <sup>4</sup> | 7.8×10 <sup>4</sup> —10.0×10 <sup>4</sup>  |
| 动泊松比   |                   | 0.15—0.25                                | 0.18—0.28                                  |
| 比溶蚀度   |                   | 0.32—0.44                                | 0.90—1.37                                  |
| 微溶孔    | %                 | 3—10                                     | 5—15                                       |

地块内岩体中无断裂发育。主要发育有与地块周界断裂近似平行的两组构造节理、一组层面节理和一组边岸卸荷节理。构造节理的产状分别为：走向近 EW，倾角近直立和走向近 SN，倾向西，倾角 65—75°。构造节理的间距、延伸长度、张开度等与距地块边界断裂的距离和岩性有关。例如，奉先寺以南的火烧洞—极南洞一带，由于距地块的南界断裂（草店断裂）较近，这一带的构造节理的密度相对较大，延伸长度也较长。又如灰岩中的构造节理规模比白云岩中的构造节理规模为大。层面节理的发育程度与成层厚度和岩性有关，一般而言，薄层的条带灰岩，层间节理发育；而厚层、巨厚层的灰岩和白云岩中，层间节理不发育。卸荷节理的走向与边坡走向近似一致，倾向与坡向相同，倾角随坡面形态而略有变化。调查表明，卸荷节理仅在立壁面 8—15m 深度范围内发育，其密度也随距立壁面的距离而逐渐减小。根据锚杆钻孔揭露，在靠近立壁面附近，卸荷节理密度为 2—3 条/m，而在距立壁面 6—8m 处，

密度变为 0.4—1 条/m。这四组节理把石窟所在岩体切割成不同尺寸、形状各异的块体（称为结构体）。而其中卸荷节理往往构成这些分离体的最可能的滑移或崩落面，也是雨水直接渗入洞内的主要渗漏通道之一。表 4 给出了节理面的强度和变形参数的实验室测量结果。

沿石窟中心区东、西山立壁有许多泉水出露，泉水的出露点要高出河水面 2—5m。泉水温度为 24—26℃。泉水的总流量 80—100L/s。不论水温还是流量常年变化不大。因此，可以肯定本石窟中心区是本区寒武、奥陶纪灰岩-白云岩含水层的集中排泄区。根据调查表明，石窟和雕刻品的高程均高于本区地下水位。因而，可以断定石窟所在岩体是处于地下水位以上的饱气带中。目前石窟内的一些渗水现象是大气降水入渗形成的暂时性水流，而不是含水层构成的渗水。表 5 给出了地下水和河水的水化学成分。

表 4 结构面变形和强度参数值

| 结构面类型 | 变形参数            |                 | 强度参数   |                  |
|-------|-----------------|-----------------|--------|------------------|
|       | 法向刚度<br>(kN/cm) | 切向刚度<br>(kN/cm) | C(MPa) | $\phi(^{\circ})$ |
| 卸荷节理面 | 1.67            | 12.5            | 0.015  | 37.0             |
| 层间节理面 | 20.8            | 29.4            | 0.080  | 25.4             |

表 5 地下水和河水的水化学成分

| 化学成分                            | 含 量(mg/L) |         |        |        |        |        |
|---------------------------------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|
|                                 | 禹王池泉(上)   | 禹王池泉(下) | 珍珠泉    | 老龙洞泉   | 极南洞泉   | 河水     |
| Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> | 1.25      | 2.25    | 13.25  | 4.75   | 1.00   | 8.25   |
| Ca <sup>2+</sup>                | 70.09     | 70.89   | 69.28  | 71.54  | 70.09  | 56.07  |
| Mg <sup>2+</sup>                | 24.92     | 21.98   | 13.09  | 22.08  | 23.35  | 15.34  |
| Cl <sup>-</sup>                 | 7.06      | 7.06    | 4.94   | 10.59  | 4.94   | 10.59  |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>   | 27.80     | 20.47   | 30.89  | 22.01  | 23.94  | 35.53  |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | 294.22    | 294.22  | 319.88 | 294.22 | 294.22 | 204.68 |

石窟中心区碳酸盐岩体中发育有三层水平溶洞，其分布高程分别为：149—152m，170—175m 和 190—200m。149—152m 溶洞高程相当于伊河 I 级阶地高程，应为全新世形成的水平溶洞，目前的泉水出露高程也大致与此层水平溶洞高程相当。170—175m 高程的水平溶洞相当于伊河 I 级阶地高程，相当于晚更新世时期形成的溶洞。190—200m 高程的水平溶洞相当于中更新世早时形成的底部砂砾石堆积层的高程。因此，可以推断，龙门山自中更新世沉积很厚的离石黄土之后，就开始抬升，在抬升过程中经历三次间歇，形成了三层不同高程的水平溶洞，而目前正处于第三次间歇期间。目前在第三层溶洞即泉水出露高程以上的岩体（也就是石窟所在岩体）中，是以垂直溶蚀为主，雨水沿裂隙、层面下渗。这种下渗的水流溶蚀裂隙和层面两侧岩石，加大加多已有的溶洞、溶沟、溶槽，破坏洞窟和雕刻品，同时在洞壁和雕刻品表面形成沉淀物，覆盖洞壁和雕刻品。

石窟开凿 1400 多年以来，在自然营力的作用下，立壁岩体和雕刻品均已受到不同程度风化。由于构成石窟的岩石是成分单一、结构较细密的碳酸盐类岩石，其风化特征和严重程度与开凿在砂页岩、砂砾岩的云岗、敦煌、麦积山、克考尔等石窟有很大差别。龙门石窟岩石主要是以物理风化为主。

根据 1977 年国家地震局武汉地震大队对河南省所做的烈度区划，洛阳地区的地震烈度为 VI 度。因此，天然地震不会对石窟安全造成危害。

## (二) 石窟区气象和水文环境

据洛阳气象站 1951—1984 年资料, 多年平均气温为  $14.7^{\circ}\text{C}$ , 严冬 1 月份最冷, 平均气温为  $0.4^{\circ}\text{C}$ , 盛夏 7 月最热, 平均气温  $27.4^{\circ}\text{C}$ , 年温差  $27^{\circ}\text{C}$ 。历年极端最高气温  $44.2^{\circ}\text{C}$  (1966 年 6 月 22 日), 极端最低气温  $-18.2^{\circ}\text{C}$  (1969 年 2 月 1 日), 极端温差变幅  $62.2^{\circ}\text{C}$ 。

年最大降雨量  $1063.2\text{mm}$ , 年际最大变化量为  $725.3\text{mm}$ 。降水季节分配不均, 多集中于 6、7、8、9 月份, 占全年降水量的 64%, 而 12、1、2 月等 3 个月降水量仅占全年降水量的 5%。

多年平均蒸发量  $1829.7\text{mm}$ , 年最大蒸发量  $1988.6\text{mm}$ , 年最小蒸发量  $1296.7\text{mm}$ 。多年平均相对湿度 64.5%。

历年日最低气温 ( $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ) 的平均历时天数为 73 天, 历年日最高气温 ( $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ) 的平均历时天数为 19 天。历年霜日的平均历时天数为 148 天, 年平均冻结历时天数 73 天, 最大冻结深度  $0.12\text{m}$ 。

发源于栾川县西部伏牛山区的伊水河自南而北流经石窟区。龙门石窟以上伊水河流域面积为  $5318\text{km}^2$ 。石窟区内伊水河河床纵坡降约  $1/700$ , 河谷宽  $250\text{—}300\text{m}$ 。

据龙门水文站记录, 1937 年最大洪水流量为  $7180\text{m}^3/\text{s}$ , 相应该流量的最高洪水位  $154.32\text{m}$ 。最小流量仅  $0.02\text{m}^3/\text{s}$ , 相应该流量的最低水位为  $148.53\text{m}$ 。

## (三) 工程活动引起的环境变化

### 1. 工程活动引起的动力环境

随着社会主义经济建设事业的发展, 石窟附近新建了一些工厂、铁路、公路等, 从而引起了环境的变化。1975 年距石窟中心区  $3\text{km}$  的草店建成洛阳水泥厂, 该厂每年要进行 30 次装药量为  $3\text{t}$  的采石爆破。此外, 还有各乡村、个体户的采石放炮。据位于石窟区内的洛阳地震台测震记录, 1984 年 1—6 月, 平均每日记录到地动位移大于  $2\mu\text{m}$  的地震 10 余次, 而其中地动位移大于  $20\mu\text{m}$  的地震为 3—5 次。测到的最大地动位移量可达  $400\mu\text{m}$ 。根据测震资料表明, 采厂放炮引起奉先寺、万佛洞一带的地动位移为  $12\mu\text{m}$ 。

1969 年建成的焦枝铁路在距西山立壁约  $1\text{km}$  处通过, 而距东山雷鼓台、看经寺仅  $300\text{m}$ 。每天单线行车对开 15 对列车, 据测震资料表明, 每对列车行车引起石窟中心区地动位移为  $0.04\mu\text{m}$ , 振动延时为 6—8 分钟/对。此外, 洛临公路穿过石窟中心区, 各种机动车辆日夜行驶。测震资料表明, 机动车行驶引起的地动位移为  $0.02\mu\text{m}/\text{次}$ 。

这些工程活动, 使石窟裂隙岩体长期处于动力作用环境中, 在这种动力荷载作用下, 立壁岩体的动力稳定性问题是一个重要的环境问题。

### 2. 工程活动引起伊河河床自然平衡条件的破坏

1985 年在石窟中心区南口修建了公路桥。由于大桥桥墩的修建, 伊河河谷过水断面减小, 泄洪能力降低, 使石窟遭受到洪水威胁。此外, 桥墩设置未考虑到会引起洪水的主流线方向的变化问题。由于桥墩的导流作用, 使洪水的主流线直冲西山立壁, 增加了立壁受冲刷的危险性。根据龙门水文站对伊河河谷剖面历年实测断面资料对比, 石窟南口公路桥上游河床淤积抬高, 下游河床 (中心区河床) 受冲刷。1985 年实测中心区河床标高比 1975 年测得的标高

要低 1m 左右。目前伊河主流线紧靠西山立壁。

### 3. 绿化造林引起的环境变化

石窟中心区东、西两山覆盖土层较薄，近年来植树造林，绿化荒山，在立壁顶部和山坡上植被发育，树木丛生。从而改变了中心区的小气候环境。这种环境的改变，其结果导致石窟地质病害的加剧。这是因为：①生态环境改变后，导致岩体中湿度和水分增大；②植物根系沿裂隙生长，加宽裂隙，加剧了洞窟渗水；③植物根系分泌的腐植酸，加剧岩石溶蚀作用。

### 4. 人工抽水引起地下水位的急剧变化

石窟区内出露的泉水是重要的自然和环境资源，据水化学成分分析，石窟区中的泉水是良好的矿泉水。但是由于石窟区及其周围工矿企业兴建，为满足供水需求，加大了石窟区内寒武、奥陶纪含水层的开采量，引起了地下水位的急剧下降。据不完全统计，石窟中心区周围已成井 10 余口，大量抽水已经引起一些泉水干涸。而在停泵时，地下水位恢复，一些干涸的泉水又重新复出，最严重的是老龙洞泉以南各泉由于抽水已经干涸。此外，这种抽水、停泵的交替变化，导致石窟立壁坡脚岩体中地下水位的急剧变动，使岩体处于干、湿交替作用状态。所以，大量抽水使石窟的环境发生严重的改变。

### 5. 工矿企业排放废气、废液引起环境变化

近年来，随着经济建设发展，石窟区内及周围兴建了许多工矿企业，在中心区伊河上游建有造纸厂，在下游建有化肥厂、动力机械厂。此外还有啤酒厂和各种小煤窑、小石灰窑等。这些工矿企业排放的废气、废液，使石窟区的大气环境和地表水、地下水环境发生变化。据水化学分析资料表明，地表水和地下水的氯和硫酸根离子含量有增高趋向，大气中二氧化碳和硫化氢含量也有增高。

## 三、石窟的环境病害

按石窟环境病害成因，把石窟环境病害分成两大类：一是由于自然地质环境引起的病害，如石窟的溶蚀、裂隙交切引起雕刻品脱落等称为第一类环境病害。另一类是由于人类工程活动引起自然环境改变，在改变后的自然环境作用下，引起地质病害加剧，如工程活动依靠的动力环境导致岩体结构松动，影响立壁岩体的长期稳定性等，称这类病害为第二类环境病害。

### （一）第一类环境病害

第一类环境病害是客观自然地质作用的结果，是不以人类的意志为转移，是漫长的地质历史过程自然演变的结果。人们只能在认识这类病害的基础上，采取措施控制或减缓这类病害的发展，而不能根除这类病害。属于这类病害的有：石窟岩体裂隙交切引起立壁和洞窟围岩、雕刻品的崩落、滑移，石窟岩体的溶蚀以及风化等。

#### 1. 石窟岩体的裂隙病害

裂隙病害是指石窟所在立壁岩体、石窟围岩和雕刻品因裂隙交切而造成立壁边坡失稳、洞窟围岩崩落、佛像和雕刻品掉块等破坏现象。