

分类号_____

密级_____

UDC _____

中 国 地 质 科 学 院
硕 士 学 位 论 文

“十里河工程”对周边环境及
云冈石窟文物保护影响的研究

谭 科 艳

指导教师姓名 陈明 研究员

专业名称 分析化学

论文答辩日期 2006年1月 学位授予日期_____

答辩委员会主席 黄继忠 评阅人_____

2006年1月6日

摘要

十里河位于海河流域的永定河上游，“十里河工程”于 2003 年建成，主要包括河谷中两座相距 200m 的橡皮坝，形成上下两座水库，蓄水后总库面积约为 $1.7 \times 10^5 \text{m}^2$ 。当水库蓄满水时，地表水位将升高 2~2.5m。

水库第一次蓄水后，在云岗石窟文物保护研究所的地下建筑和位于该工程与石窟之间的云冈村居民菜窖中发现有地下水出露。鉴于该地区基岩节理和其他形式的破碎发育，水库蓄水有可能是造成窟区地下水位上升的原因，并有可能影响到石雕文物的保护，而且水库蓄水对研究区地表生态环境和小气候也会产生一定的影响。地下水位过高，可能会使高盐度地下水通过毛细管作用上升至石雕文物，加速文物风化；如果地下水水位过低，则景区的花草树木将会枯萎，影响保护区的生态环境。本论文即对该工程对文物保护的上述可能影响进行了模拟研究。

在当地水文地质条件的基础上，根据 9 个钻孔的现场实测资料和历史观测数据，采用目前最为普及的地下水模拟软件 ModFlow 模拟“十里河工程”对云岗石窟研究区域地下水位的影响，预测了水库蓄水与文物保护区内地下水水位涨落的响应关系，并提出了排水工程的合理化建议。同时本论文通过对工程完工后对当地小气候、植被的影响的研究，分析了其对文物保护可能产生的影响。

模拟结果表明：在最大降雨年，水库蓄水与文物保护研究所地下建筑和云冈村居民地窖中地下水出露有密切关联。在正常降雨年，水库蓄水不会对云岗石窟文物保护和居民菜窖产生直接影响，但鉴于该地区基岩节理和其他形式的破碎发育，地下水含盐量高，可能会通过毛细作用上升到石雕底部，今后要加强监测。建议方案为人工抽排或埋设地下排水管道使其自然排渗。

同时分析实验证明：该工程建设，会对水域周围的气候产生一定调节作用，缓和温度、风速、湿度的变化，可在一定程度上减缓环境条件的剧烈变化造成石雕损坏的现象，有利于文物保护。

Abstract: Shilihe is located on the upriver of Yongdinghe in the drainage area of Haihe. "Shilihe Project" was built in 2003, including two rubber dams with 200 meters distance. So these two rubber dams form two reservoirs in the Shilihe area. The total area of the reservoirs is about $1.7 \times 10^5 \text{m}^2$ after sluice. When the reservoirs are full of water, the surface water level would hoist 2-2.5m.

After the first sluice of the reservoirs, there was groundwater outlet in the underground building of the Shanxi Institute of Yungang Grottoes and the cellars of the Yungang villagers'. The sluice of the reservoirs may cause the upraise of the underground water in the grottoes' area and influence the protection of the grottoes' cultural relic, also it may influence the entironment and the microclimate of the earth's surface in the area, whereas the bedrock joint and the shatter crack are developed in the area. Because of the too-high underground water level, it may accelerate the weathering of the cultural relic with the high salinity moving up to the grottoes' cultural relic through capillarity. On the other hand, because of the too-low underground level, the entironment of the protection area would be influenced by the perished plant in the area. This thesis is based on the simulate study on the mentioned above probable influence to the cultural relic of the project.

Based on the condition of the local hydrology, according to the true measured data of 9 drills and the historic observed data, using the most popular groundwater simulate software ModFlow to simulate the influence of "Shilihe Reservoir" to the underground water in the area of Yungang Grotto. The responsive relationship between the sluicing of the reserve and the groundwater fluctuation in the area of culture relic protection is forecasted, rational suggestion for the construction of the project is given. The influence of the project to the protection of the cultural relic is analyzed through studying the influence to the local microclimate and vegetation.

It is indicated: In the largest rainfall year, the sluice of reservoirs is

responsible to the outlet of underground water of the Shanxi Institute of Yungang Grottoes and the cellars of the Yungang villagers'. In the normal rainfall year, the sluice of the reservoirs will not cause the outlet of underground water of the Shanxi Institute of Yungang Grottoes and the cellars of the Yungang villagers'. But it should be supervised whereas the bedrock joint and the shatter crack are developed in the area. The suggested precept is manual taking-out or burying underground drainage pipelines to natural drain.

At the same time, the analyzing experiment proves: The construction of the project can adjust the climate of the water area, mitigate the variety of the temperature、wind speed、humidity. It also can decrease the damage to the grottoes because of the acute variety of the environment. Thus the project is propitious to the protection of the cultural relic.

声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国地质科学院或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名： 谭列艳

日 期： 2006 年 1 月 6 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国地质科学院有关保留、使用学位论文的规定，即：中国地质科学院有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；中国地质科学院可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

签 名： 谭科艳

导师签名： 陈 红

日 期： 2006 年 1 月 6 日

前言

一、地理位置

云冈石窟位于我国山西省大同市西郊约 16km 处，地理位置为东经 113° 20'，北纬 40° 04'，有大同至左云县公路从石窟前穿过，交通便利，参见图 1。石窟向北背依武周山、向南面临十里河，东西长约 1km，现存主要洞窟 45 个，窟龕

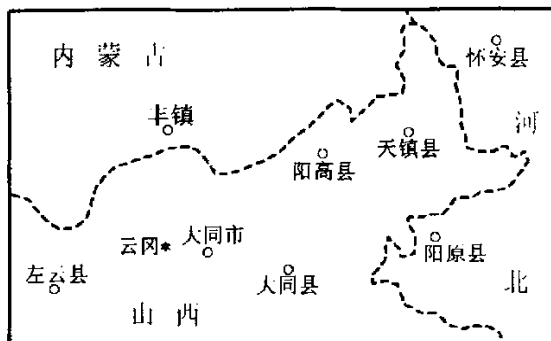


图 1 云冈石窟的地理位置

Fig 1. The location of Yungang Grottoes

252 个，有大小造像共计 51000 多尊，参见图 2。北魏地理学家酈道元(公元 466-527)这样描述它：“凿石开山，因岩结构，真容巨壮，世法所稀，山堂水殿，烟寺相望”。

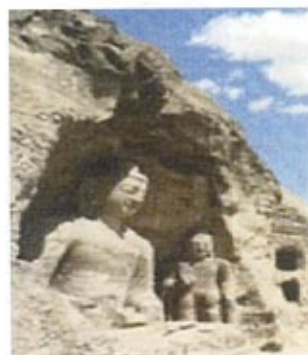


图 2 云冈石窟大佛石雕

Fig 2. The stone carving of Buddha in Yungang Grottoes

云冈石窟始凿于北魏兴安二年，距今大约已有 1500 多年的历史。云冈石窟以石雕造像气魄雄伟（见图 3）、内容丰富多彩、历史悠久和规模宏大而著称于世，是我国南北朝时期佛教艺术的集大成者，也是研究我国古代政治、社会、文化、艺术和宗教信仰的文化宝库。因其强大的

艺术魅力，云冈石窟与甘肃敦煌的莫高窟、河南洛阳的龙门石窟并称为我国三大佛像石窟，是我国规模最大的古代石窟群之一。同时，云冈石窟也是中外文化交流的历史结晶，在吸收和借鉴印度佛教艺术的同时，有机地融合了中国传统艺术风格，因此在中国乃至世界雕刻艺术史上具有重要的地位，它不仅是中华民族的瑰宝，也是全人类共同拥有的艺术宝库，2001 年被列入由联合国教科文组织世界遗产委员会承办的《世界遗产目录》中。

二、十里河工程简介

“大同市十里河采矿区采煤废水调蓄回用工程” (以下简称“十里河工程”) 位于大同市十里河中、下游的云冈石窟风景区南侧，离云冈石窟约 400 米。十里河是桑干河的主要支流之一，而桑干河属永定河水系。十里河发源于山西省左云



图 3 云冈石窟全景

Fig 2. A panorama of Yungang Grottoes

县，干流长约 89km，流域面积约 1130km²。十里河工程所处河道两岸为煤炭能源主要集聚区，到处荒山秃岭，旱季少流甚至断流，而雨季则河水暴涨暴落，其枯水期流量多为采煤废水，水土流失非常严重。

建国以来，由于人口和煤炭工业的不断发展，河道被厂矿和居民点大量挤占，加上矿区和当地居民生活垃圾随意倾倒，使得本来就脆弱的生态环境遭到严重破坏，不仅影响了云冈石窟风景区旅游事业的发展，而且加剧了下游册田水库、官厅水库的淤积和水质破坏，甚至直接影响到数百公里外的首都北京的防洪安全和供水水质。

按照 21 世纪初首都北京水资源可持续发展利用规划的要求，为保持上游地区生态平衡和水资源的可持续利用，提升大同市的城市品位及促进旅游业的发展，大同市政府决定兴建了“大同市十里河采矿区采煤废水调蓄回用工程”。该工程修建了两道拦河橡胶坝，低水头拦蓄清水流量，在河道上形成一个面积大约为 $17 \times 10^5 \text{m}^2$ 左右的水上公园。预计该工程一方面可为云冈石窟旅游区增加景色，另一方面可以废水回用，为林业用地用水提供水资源，改善云冈流域的生态环境。

工程布置方案为：在河道左侧兴建两个各长 105m 和 137m 的橡胶坝（坝高

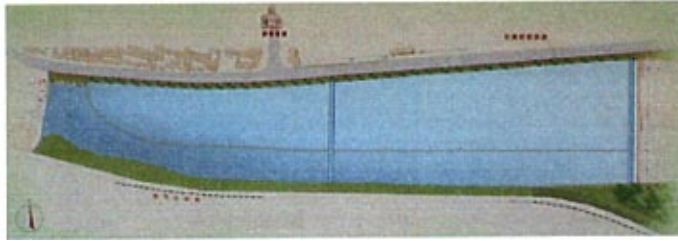


图 4 十里河工程效果图
Fig 4 The designed Shilihe watershed.

2.5m）形成上下游两座小型水库；河道右侧兴建 50m 长的橡胶坝（坝高 2.5m）用于汛期行洪和非汛期蓄水，即：小于 $100\text{m}^3/\text{s}$ 时，河道右侧橡胶坝泄洪，左侧蓄水；当河道流量大于 $100\text{m}^3/\text{s}$ 时，全河道泄洪。设计防洪标准为 5 年，橡胶坝的设计标准为一百年（见图 4）。

三、本论文的研究目的

云冈石窟不仅仅是中华民族的瑰宝，也是世界文化的遗产。前人的研究表明：在云冈石窟附近进行的任何工程建设，都会或多或少影响到云冈石窟。事实上，由于石窟文物保护的需要，1998 年，中央政府、山西省政府和大同市政府共同投资 2.3 亿元，将 109 国道云冈段改线，以避免运煤引起的粉尘污染和地面震动对石窟的影响。同时，随着 2008 年北京奥运会的日益临近，改善北京周边地区的生态环境，保护密云水库和官厅水库这两个北京市的主要地表饮用水水源，



图 5 项目组成员与山西云冈石窟文物研究所座谈
Fig 5. Discussing with the specialists from Shanxi Institute of Yungang Grottoes



图 6 项目组成员在采集大气总悬浮颗粒物
Fig 6. Collecting TSP samples

缓解日趋紧张的北京市供水矛盾，显得越来越迫切。这也是兴建十里河工程的初衷之一。

十里河工程的表面积约为 $17 \times 10^5 \text{m}^2$ ，离云冈石窟只有 350~400 米，约占十里河本段河谷面积的三分之一；水库蓄水时，地表水位将升高 2~2.5m，必然将对当地的地表水、地下水、大气湿度、生态环境等产生一定的影响。

概括起来，本论文研究的主要目的可以概括为：（1）十里河工程对当地地下水水位（主要是埋深）的影响，可能出现的问题与解决问题的途径。（2）十里河工程对周边生态环境保护有何影响，可能出现的问题与解决问题的途径。（3）十里河工程对当地小气候的影响，可能出现的问题与解决问题的途径。

撰写论文期间，我们多次赴云冈石窟保护区进行实地考察，并与大同市水务局、山西云冈石窟文物研究所等的领导和专家进行深入讨论，参见图 5。采集了当地的大气总悬浮颗粒物样品 4 件（图 6），送至中国科学院大气物理研究所分析测定其中的无机离子和重金属含量；采集水库水样（采煤废水）1 件，由国家地质实验测试中心测定了其蒸发水中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 含量。我们还对当地的生态环境和植被发育情况进行了调查。

本论文通过实地勘察、分析测试、计算机模拟和理论分析等手段，从地质、水文与环境地质、生态环境、大气等条件可能的变化进行研究，对它们的影响进行预测，并对可能出现的负面影响提出预防和改进措施。

四、关于本论文

第一章回顾了新中国成立以来各级政府和部门对云冈石窟文物保护所做的工作，概括了自 1994 年以来公开发表的有关云冈石窟文物保护的研究论文，着重总结石窟文物保护的地质-水文地质、生态环境和气象条件。阐述了十里河工程的来源、必要性和紧迫性。

第二章详细描述了云冈石窟窟区和十里河工程施工地段的地形地貌、地质、水文地质、气象条件、地质灾害和生态环境等，主要为第三章的计算机模拟提供扎实的基础资料。

第三章讨论了十里河工程对周边生态环境改善的积极作用，在进一步概括研究区的水文地质条件的基础上，用世界上广泛使用的 ModFlow 软件，介绍了相关的研究方法和数学模型，分二种情形对十里河工程对研究区的地下水水位的影响进行了研究，预测了可能出现的问题，并提出了解决问题的方法。

第四章考察了云冈风景区及其周边地区植被根系发育状况和地下建筑物情况，确定了地下水水位的约束条件。用定性和定量的方法研究了十里河工程对窟区周边大气条件的影响，特别是大气湿度的改变可能对石窟文物保护产生的影响。通过测定大气总悬浮颗粒物的变化情况，初步研究了工程建设对文物风化所产生的影响。

第五章全面概括了前四章的研究内容，给出十里河工程对周边环境和对文物保护影响的具体结论，并对十里河工程建设中应注意的问题提出了建议。

特别感谢大同市水务局、山西云冈石窟文物研究所、大同市气象局专业气象站、大同市水文队、以及大同市十里河采矿区采煤废水调蓄回用工程项目部对本论文的支持。

由于水平有限，时间紧张，本论文有不当之处，敬请批评指正。

第 1 章 云冈石窟的保护与生态条件的改善

第 1.1 节 云冈石窟保护工作回顾

由于长达 15 个世纪多的自然风化、长期战乱和人为因素，云冈石窟遭受严重破坏。新中国成立后，文物部门对云冈石窟做了大量的发掘和保护工作。此外，地质、煤炭、水利等部门在此也作了不少基础地质、水文地质和工程勘察工作，主要包括：

- 1950 年国家文物局对云冈石窟进行了勘测和调查。
- 1955 年成立专门的云冈石窟保护机构。
- 1960 年，国家文物局召开“云冈石窟保护会议”。
- 1961 年国务院宣布云冈石窟为全国第一批重点文物保护单位。
- 1965 年正式圈定云冈石窟保护范围、重点保护区、安全保护区、地下保护线，形成一个立体交叉的多层保护体系。
- 在 20 世纪 60 年代~90 年代，云冈石窟的保护工作从未中断，在危岩加固、残断落石归位、抢救濒临坍塌的洞窟、石窟风化和加固等方面做了大量的工作。修建了石窟崖顶绝对保护区的保护性围墙。
- 1990 年在云冈石窟召开了“云冈石窟石雕风化治理规划”专家论证会。
- 1992 年至 1993 年，历时两年对第 1~4 窟，第 9~20 窟进行了科学系统的考古发掘，发现大量遗物和遗迹，取得了前所未有的成绩。发掘遗物中有北魏、唐、辽、金及其他时期的石雕造像、虎头门墩、龙头、狮子、石制磨盘、石盖、钱币、瓦当、各种筒板瓦建筑构件以及生活器皿等 600 余件。为此，云冈石窟窟前考古发掘成果于 1993 年被评为“全国十大考古新发现”之一。
- 为治理大气降水渗入洞窟引起石雕风化，由国家文物局牵头，山西云冈石窟文物研究所与中国文物研究所及美国盖蒂保护研究所合作，针对云冈石窟顶部防渗排水工程进行了现场试验。1995 年，在山顶明城堡内，在不破坏原有植被和自然地形地貌的情况下，垫高低凹蓄水地带，打通阻水脊梁，将水送至堡南专设的排水明渠，按预定方向排走。
- 石窟顶部的防渗排水试验研究受到高度重视：云冈石窟石雕风化主要是受水的长期侵蚀及各种盐类富集于石雕表面而造成。雨水通过窟顶的风

化裂隙、岸边裂隙、构造裂隙等进入窟内而侵蚀石雕是最普遍和最严重的一种破坏形式。据统计，目前有 8 个洞窟渗水严重，至于洞窟后壁潮湿现象就更加普遍。鉴于裂隙的分布没有规律，而窟顶和后壁的渗水有些是崖顶积水沿裂隙直接进入窟内的（也可能有远处的补给水），1993 年，山西云冈石窟文物研究所委托中国城市设计研究院对云冈石窟进行总体规划和窟前区详细规划。经过规划部门及文物部门近两年的研究论证，国家和省文物局召集专家组多次审核，有关人员反复修改，于 1995 年形成了《云冈石窟规划》的最后文本，报请国家文物局，并于 1996 年 10 月获得批准。

- 根据《文物保护法》及有关法律法规，结合大同市的实际情况，山西云冈石窟文物研究所起草了《大同市云冈石窟保护管理条例》。该条例于 1997 年 8 月 22 日在大同市第十届人大常委会第三十一次会议上通过，1997 年 9 月 28 日在山西省地第八届人大常委会第三十次会议上批准。
- 1998 年，中央、山西省和大同市政府共同投资 2.3 亿元，将 109 国道云冈段改线，以避免运煤引起的粉尘污染和地面震动对石窟的影响。
- 为了更好地保护好云冈石窟，进一步扩大石窟的知名度，促进云冈石窟、大同市乃至山西省旅游业的发展，1999 年大同市政府提出申报云冈石窟列入《世界文化遗产名录》。这对云冈石窟保护工作是一次有力的推动和全面的促进。2001 年 12 月，在芬兰召开的第 25 届世界遗产委员会全会上，云冈石窟被列入《世界文化遗产名录》。
- 2002 年 2 月 5 日，山西省人民政府与国家文物局在太原联合召开了“大同云冈石窟防渗保护工作会议”，开始了全面治理影响云冈石窟文物保存最根本的因素——水害的系统性工程：云冈石窟防水保护工程。
- 2002 年~2003 年，由北京建设综合勘察研究设计院实施了《云冈石窟防水保护工程》，对云冈石窟所在的水文地质单元内的地形地貌、区域地质构造、地层岩性、水文地质及工程地质条件、各类水的来源-补给-径流-排泄条件-运动规律等进行了详细研究，查明了窟内渗水的主要来源。
- 2003 年 5 月，山西省第十地质工程勘察院对“十里河工程”进行了岩土工程勘察。查明了场地地形、地貌特征；堤坝范围内地基土层结构及其沉积时代、成因类型、变化规律及其物理力学性质；地下水埋藏条件和场地土类型及场地类别。计算了河流最大冲刷深度、初步判定堤坝地基

渗透变形特征等。

第 1.2 节 云冈石窟保护条件研究

一、前人的研究工作

一些学者发表了对于云冈石窟文物保护的文章，并着重从自然条件、大气条件、水文地质、地下水等的角度探讨了环境因素对云冈石窟的影响。主要有：

- 1997 年，黄继忠、解廷藩和张莉的《云冈石窟大气粉尘中无机离子的分析》：应用化学分析和现代仪器分析的方法对云冈石窟大气粉尘中的无机离子进行分析，结果表明：粉尘中的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 含量很高，而 NH_4^+ 、 F^- 含量一般，降尘中的 SO_4^{2-} 含量高于粉尘中的 SO_4^{2-} 含量，而 NO_3^- 含量在降尘和粉尘中没有明显差别，说明 SO_4^{2-} 离子对石质文物的影响更为严重。
- 1998 年，黄继忠和张俊芳的《应用电法勘探调查云冈石窟岩体裂隙》：讨论了应用电法勘探来调查云冈石窟岩体裂隙的可能性和具体方法。
- 1999 年，黄继忠、史变青和解廷藩的《云冈石窟大气总悬浮微粒金属元素富集特征及污染源初探》：采用 PIXE 和 ICP 对云冈石窟大气粉尘中的金属元素进行定性和定量测定。根据元素的富集情况及其与其它城市的比较，云冈地区大气颗粒物含量居高的主要起因在于云冈地区的风沙、运煤车辆引发的降尘、二次扬尘、周围工矿企业和民用燃煤等。
- 2003 年，周尚忠的《仿自然条件对云冈石窟风化的研究》。研究表明，云冈石窟雕像发生风化的条件是：
 - 外界能量：主要是风、温差、光照。
 - 酸性腐蚀气体：主要是 SO_2 、 NO_2 和 CO_2 。
 - 电解质溶液：主要是降水、渗水中溶解的各种阴阳离子。如 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 OH^- 。

并建议：

- 在石窟周围划定保护区，保护区外围落实减少风沙的措施，如建挡风墙、植树、植草，对裸露的地面进行硬化和绿化，以减少地面扬尘和空气中的颗粒物浓度等。
- 认为植物能吸收石窟区的 SO_2 、 NO_2 和 CO_2 等酸性气体，减少化学气体和颗粒物对石窟雕像的侵蚀。

- 外壁雕像前缘进行遮阳处理，减少光照和降低温差以及自然降水对雕像的冲刷和淋蚀。
- 建设防渗水工程，减少窟内渗水和切断窟内渗水源。
- 搬迁保护区周围的企业和居民，使用洁净能源，减少烟尘、SO₂、NO₂和CO₂等污染物的排放。
- 2003年，尚剑宝和上官学兵的《山西大同云冈石窟防水保护方案探讨》，指出了防水对于云冈石窟保护的重要性，并提出3套防水保护方案：
 - 方案一：通过排水幕将岩层渗水排入廊道，较好地排截岩层渗水，并且利用“烟囱效应”通过排水孔及廊道形成排气系统，有利于排水孔和石窟间岩体干燥、观测渗水量和渗水点，在运行管理中有效、直观地掌握水的分布和运动规律，但施工稍复杂。
 - 方案二：可通过深层排水孔将渗水排入地下，但排水途径复杂，目前掌握资料较少，尚需作进一步的论证。
 - 方案三：可通过防渗帷幕将渗水拦截，但由于灌浆浆液中水泥颗粒比水分子大若干倍，浆液不能进入，遇不密实的介质仍有部分渗水经过帷幕向石窟渗透，不能完全解决渗水问题。可较好地解决渗水问题，但帷幕作为相对不透水层，隔断了排水孔和石窟后山体的透气通道，难免会引起石窟内凝结水的增加，对保护石窟不利，且投资相对较大。
- 2003年，黄继忠的《云冈石窟的科学保护与管理》，详细回顾了云冈石窟的保护与管理历史，对云冈石窟今后的加固、保护和管理提出了许多建设性的意见。
- 2003年，黄继忠的《云冈石窟地质特征研究》，讨论了云冈石窟的基本地质特征，指出云冈石窟的工程地质问题主要表现为：裂隙发育、顶部渗水、岩体崩塌和石雕风化等。认为：尽管石窟的风化原因是复杂的、多方面的，既与其所处环境的气候、空气质量等因素有关，但更主要的是与其所开凿的岩体及其地质环境有关。气候和空气质量等要素是石窟风化的外因，岩体及其地质属性是石窟风化的内因，外因只是通过内因起作用，内因才是决定其风化程度的根本原因，所以研究石窟的地质特征对于研究石窟风化原因及石窟保护具有十分重要的意义。
- 2003年，李海，石云龙和黄继忠还发表了《大气污染对云冈石窟的风化

侵蚀及保护对策》。

二、影响云冈石窟保护的环境条件

总结云冈石窟近半个世纪的保护工作和研究成果看，周边环境对石窟的保护至关重要，概括起来有：

- 基本地质-工程地质条件。包括：地层的岩性、建造、组构、构造、裂隙发育程度和孔隙等。
- 水文地质与地下水条件。包括：地下水稳定水位与最高最低水位、水位波动及其频率、地形地貌、地下水的埋藏-补给-径流排泄条件、地下水潜水的出露、潜水及承压水的顶底板标高、流量流速、包气带土壤的地层结构、地表水（常流量、常水位、最大流量和最高水位、流速等）、河床的岩性及底基层厚度等。
- 大气（气象）条件。包括：气温（常年平均气温、最高温度及其出现的时间和持续时间、最低气温及其出现时间和持续时间）、湿度（常年平均湿度、最高湿度及其出现的时间和持续时间、最低湿度及其出现时间和持续时间）、风速（常年平均风速、最高风速及其出现的时间和持续时间、最低风速及其出现时间和持续时间）、风向（常年主导风向、分月主要风向、风速最大及最小时风向）、混合层高度、逆温发生频率及发生时间、日照条件（最大日照时间、最小日照时间以及它们的出现的时间、平均日照时间）、气压、云蒸发量等。
- 大气污染。包括：气体中主要污染物（二氧化硫、氮氧化物、降雨的 pH 值、氧化性物质含量、盐类总量）、水体中各种物质含量（碱性物质、盐类、pH 等）。
- 周边生态环境。包括：石窟周围植被发育程度、绿化面积。
- 人为活动。包括：居民区、民用燃煤质量、企业的类型与燃煤、农田灌溉和生活污水的排放等。

从 2002 年 2 月至 2003 年 4 月，为了了解自然环境因素对石窟风化的影响，周尚忠利用一年多的时间，仿照当地自然条件对云冈石窟的石质进行了破坏性的模拟实验。模拟实验的方法是：取与云冈石窟石质基本一致的岩石，用切割机切成约 5cm×5cm×5cm 的正方形石块，模拟当地自然条件进行破坏性试验，然后观察石块的外观、形状、重量及硬度变化。

实验表明：云冈石窟的石质以石英和长石为主，钙、泥胶结，分子间引力小，结构疏松。在外界能量(太阳能、风能等)的作用下，外层石质容易脱落。风力较大时外层石质的光滑度也有所变化，这是风中夹带的颗粒物对石质表面冲击的结果。云冈石窟区的常年风力都在二三级以上，而且周围生态环境极差，空气中颗粒物浓度较高。2002年，年平均总悬浮颗粒物浓度是 $0.355\text{mg}/\text{m}^3$ (环境空气质量标准为 $0.08\text{mg}/\text{m}^3$)。当风速为 $9\text{m}/\text{s}$ (相当于5级)时， $100\mu\text{m}$ 直径的颗粒物能量是 $2.2 \times 10^{-23}\text{J}$ ，远低于石英($1.4 \times 10^{-18}\text{J}$)和长石($2.1 \times 10^{-18}\text{J}$)的晶格能。但由于石英和长石之间是由钙、泥胶结而成，其分子间力很小，在颗粒物的冲击之下容易松动和分裂。所以风对云冈石窟雕像外层石质的冲刷不容忽视。云冈石窟区的年光照时间是 $2800\text{h} \sim 3000\text{h}$ ，阳光中红外和紫外线能量可达 $7.6 \times 10^{-26}\text{J}$ 。该数值虽小于石英和长石的晶格能，但仍从实验数据可以看出：温度的剧烈变化对石质有一定的破坏性。所以天长日久的太阳照射、冬夏昼夜温差的变化对石窟雕像外层石质的破坏亦不能忽视。另外夏季的降雨对表层石质的冲撞(重力势能)也对石质有影响。

周尚忠认为：单纯的水对石质的破坏性较小，但含有电解质的降水和渗水，特别是酸性水破坏力很大。在酸性介质中，石质容易出现裂纹，变得疏散，硬度大为下降。随着酸度的增高，石质的溶解度增高。而本地区降雨、降雪、渗水中的酸根离子浓度较高，含有大量电解质，对雕像有腐蚀作用，可使石英和长石分离，石像的石质变的疏散而脱落，出现风化情况。另外，落在雕像上的降水溶解了雕像上降尘中的可溶物也可使降水中的电解质浓度增高。

周尚忠还认为：空气中的影响文物保护的有害化学气体主要是指 SO_2 、 NO_2 和 CO_2 ，颗粒物主要是指TSP和降尘。在高浓度的 SO_2 气体环境中，石质结构发生剧烈变化，出现裂纹，同时硬度降低。原因可能是：空气中的化学气体与石质中的钙长石(CaCO_3)发生化学反应，破坏了石质中钙长石的晶体结构。钙长石的晶体结构为无色正交，而 CaSO_4 和 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的晶体结构是无色单斜，结构不稳定。颗粒物在风的协同作用下对石质冲击，在有水和潮湿的环境中颗粒物中的可溶物溶于水，使水中的电解质含量增高，从而使石质结构发生变化而风化。

黄继忠等人的研究结果表明：稳定的周边环境对文物保护是有利的，而温度和湿度的快速交替将造成风化速度的增加，严重破坏云冈石窟中石雕；空气中 SO_2 含量的减少有利于文物的保护；相对较干的环境可以减慢风化速度。

第 1.3 节 十里河工程的必要性和迫切性

兴建“十里河工程”，对改善当地的生态环境和保护北京市地表水水源地区的生态环境都是十分必要。

北京是中国人口最稠密的地区之一，也是世界上缺水最严重的大城市之一，其水资源总量、年降水量、地表水和地下水拥有量在国内排名靠后。

- 多年来平均年降水只有 595 mm，年可用水资源总量 $4.333 \times 10^{10} \text{m}^3$ （包括入境水量），人均水资源不足 300m^3 ，仅为全国的 1/8，世界的 1/30，远远低于国际公认的 1000m^3 的缺水下限。
- 与 1949 年相比，2000 年北京市总用水量增长了 40 倍，其中工业用水增长了 31 倍，城市自来水售水量增加了 85 倍。而与此同时，北京市地表水资源少，依赖境外来水的官厅、密云两大水库上游来水不断减少，水质逐渐恶化。由于上游地区用水增加和近年来干旱少雨，两库来水量已由 50 年代的年均 $3.13 \times 10^{10} \text{m}^3$ 减少到 90 年代的 $1.2 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，且来水衰减的趋势越来越明显。
- 日益严重的水污染和水土流失加剧了水库水质恶化和淤积。官厅水库淤积已达 $6.5 \times 10^9 \text{m}^3$ ，水质长年超过五类标准，到 1998 年已不能作为生活饮用水源。密云水库水质也有恶化的趋势。地下水可采资源量减少，与 1961 年相比平原地区地下水储量减少了 $5.9 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，部分地区已疏干，并出现 2000km^2 的漏斗区；地下水的过量开采，造成水位持续大幅度下降，产生地面沉降。解决北京的水资源问题，已经到了刻不容缓的地步。
- 随着经济和社会的发展，特别是随着 2008 年奥运会的召开，北京的用水量将进一步增加。根据北京市政府和水利部编制的“21 世纪初期首都水资源可持续利用规划”，预计
 - 在 2005 年之前，年需水量为 $4.927 \sim 5.059 \times 10^{10} \text{m}^3$ 。平水年地表水和地下水每年可提供水量为 $4.133 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，而枯水年和特枯水年只能提供 $3.779 \sim 3.409 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，缺口为平水年 $7.94 \times 10^9 \text{m}^3$ ，枯水年和特枯水年亏 $1.28 \times 10^{10} \text{m}^3$ 和 $1.65 \times 10^{10} \text{m}^3$
 - 到 2010 年，年需水量约为 $5.270 \sim 5.395 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，而提供的地表水和地下水为平水年 $4.088 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，枯水年和特枯水年为 $3.754 \sim 3.399 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，缺口高达 $1.182 \sim 1.996 \times 10^{10} \text{m}^3$ 。

引发北京市水资源缺乏的重要因素之一是资源性方面的因素。北京市处于平水带和缺水带交替的地区，水资源并不丰富。一方面上游用水量的增加导致入境水量的急剧减少。另一方面地下水严重超采引起的自产水量减少。北京地区降水的特点，一是年内高度集中，每年6—9月的降水量占年降水量的85%左右；二是年际变化大，最小年降水量为 $4.6 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，而最大年降水量可达 $2.36 \times 10^{11} \text{m}^3$ ；三是丰枯连续出现的频率较高，一般连丰时间或连枯时间为2~3年，最长连丰6年，最长连枯9年。由此导致汛期易于发生洪涝而枯水期往往供水紧张，这就对工程调控能力和水资源统一管理提出了更高的要求。

导致北京市水资源缺乏的另一个重要因素是不断加剧的水污染。水资源是量与质的高度统一，21世纪我国面临着水量的危机，同时水质危机更加严重，甚至因水质问题所导致的水资源危机大于水量危机。非汛期流入官厅水库的水体基本是污水，河北宣化以下的河水基本为超V类，1997年后官厅水库已不能作为生活饮用水源。为缓解首都水资源严重紧缺的状况，水利部和北京市政府联合制定了《21世纪初期首都水资源可持续利用规划》并经国务院批准实施。规划明确提出稳定密云、恢复官厅水库饮用水源功能的治理与保护方针。这项成果将为官厅水库流域水质的改善、首都经济和社会的可持续发展、2008年奥运会的成功，以及首都饮水安全，提供了技术支撑和措施保证。国家已经决定将向河北、北京、山西三省市投入 $6.9 \times 10^{10} \text{m}^3$ 元，以恢复官厅水库的饮用水功能，保证其水质达到三级，并力争达到二级。其中包括帮助官厅水库上游地区发展节水灌溉农业，建立污水处理厂，治理甚至关闭污染严重的皮革、造纸企业，并通过实施水土保持、退耕还林工程，使水库的水质恢复到可作为饮用水的标准。“十里河工程”正是这项宏大工程的内容之一。

十里河河道两岸为煤炭能源主要集聚区，四处荒山秃岭，水土流失非常严重，其枯水期流量多为采煤废水。建国以来，由于人口和煤炭工业的不断发展，河道被厂矿和居民点大量挤占，加上矿区和当地居民生活垃圾随意倾倒，使得本来就脆弱的生态环境遭到严重破坏，不仅影响了云冈石窟风景区旅游事业的发展，而且加剧了下游册田水库、官厅水库的淤积和水质破坏，甚至直接影响到数百公里外的首都北京的防洪安全和供水水质。

由此可见，改善大同地区的生态环境显得十分迫切。“十里河工程”兼顾了“保持北京上游地区生态平衡和水资源的可持续利用”和“改善云冈石窟风景区的景观条件”，有其一定的合理性。

第 2 章 基本环境地质-气象-生态条件

第 2.1 节 地形地貌

云冈石窟坐落在十里河的三级基座阶地砂岩中，保护区总面积约 3.6km^2 。石窟南测为十里河，河流与石窟之间为云冈村。窟顶以北为低山丘陵区，整体北高南低，地势平缓但略呈波状起伏，最大高差 55m 左右。

十里河在石窟西侧由北向南向东绕行至云冈村以南，再由西向东而行，形成石窟东冲沟-西河谷的态势。石窟



图 2.1 云冈石窟附近的 SPOT 图像
(拍摄时间: 2002 年 11 月 9 日)

建于砂岩透镜体之中，与十里河谷的垂直高差约 30m。窟区被南北向大冲沟分割为东谷和西谷。其中，东谷较陡，至谷口其标高低于石窟底板；西谷地势较高，虽然坡降较大，但其谷口地面标高于石窟底板。整体上，云冈顶部高台地属构造剥蚀低山陵，高程为 1163~1218m。十里河河谷属于侵蚀堆积阶地，高程为 1124—1140m，河床两侧为河漫滩，一级阶地较发育，二、三级阶地只有部分残存。参见图 2.1。

十里河相关河段整体西高东低，长约 1000m，河谷宽度 150~200m，左岸为大同市至左云县公路，右岸为陡坡，有运煤铁路通过。河谷和河漫滩的地面标高 1127~1131m，相对高差只有 4.0m，而左右两岸地形较陡，所属地貌单元为侵蚀剥蚀高丘陵区。

第 2.2 节 基本地质条件

北京建设综合勘察研究设计院（2002~2003）和山西省第十地质工程勘察院（2003）分别对云冈石窟窟区、“十里河工程”所处河道地基土层和河漫滩进行了详细勘察。根据他们的成果，第 2.2 节和第 2.3 节将讨论云冈石窟景区和十里河河谷和河漫滩（包括云冈村）的基本地质与水文地质条件。

一、区域地层

窟区地层单元组成简单，主要有中侏罗统上部云冈组（J_{2y}）和第四系的中更新统（残积—冲积）、上更新统（冲积—洪积）、全新统（冲积—坡积）。第四系地层与下伏侏罗系地层呈角度不整合接触关系。

（一）第四系

1、全新统（Q₄）：主要分布在河谷、沟谷、山脚下及石窟北部高台地的局部低洼处，包括河流冲洪积、少许坡积及有人类活动的近代沉积物，以粉土、砂土及砾石为主。砾石分选性差，磨圆度不等，母岩成分为区内岩石。坡积物为粉土夹碎石，厚度 0~5m。

2、上更新统（Q₃）：广泛分布于窟顶北部的高台地上，属古河床相的冲洪积层，以粉土（次生黄土）为主，夹砂土、卵砾石透镜体，具水平层理，质地较坚硬。粉土：灰黄色、浅褐黄色，多孔隙，含碳酸盐，垂直节理发育，含砂砾 5% 左右，局部夹卵砾石薄层或透镜体。上部中密，稍湿，含植物根系，局部含钙质结核；下部砂砾含量增多，手搓砂感强，砾石磨圆度较好，偶见卵石，最大粒径 2~5cm，厚度 0.20~6.50m，东院、西院围墙内平均厚度 1.06m，其中，东院烽火台附近、西院明城堡内及以东的粉土层均较薄，一般为 0.3~0.5m，局部缺失。

3、中更新统（Q₂）：分上下两层。上层为砂土，分布于窟顶高台地，灰黄色~褐黄色，成份复杂，分选性较差，大多含有粘性土，以砾砂为主，粗砂、中粗砂、细砂、粉砂均有揭露，夹粉土或粉质粘土薄层或透镜体；厚度变化较大，一般 1.0~2.5m，最大 4.3m；层顶埋深 0.2~2.0m，上与粉土接触，下与卵石层或基岩接触。下层为卵石层，一般出露在砂土层之下，层底一般与砂岩或泥岩直接接触，卵石含量 50%~70%，中、粗砂含量大于 15%，粉、细砂含量一般在 10% 左右，大多含有粘性土，卵石粒径一般 3~6cm，最大超过 15cm，颗粒级配较好，分选性差，呈松散状；卵石母岩成分为砂岩、变质岩、火成岩和灰岩，局部夹有厚度不大的浅棕红色粉质粘土，主要分布在窟区西院的西部、东院的烽火台东部和南部。

（二）侏罗系中侏罗统云冈组（J_{2y}）

由上而下分为六段。

1、第六段 (J_{2y6}): 出露于石窟东北部、围墙西北角、变电站附近的山头上及水泉村以南等处, 岩性为黄绿色、黄灰色中粒钙质长石岩屑砂岩, 砂状结构, 厚层层状构造, 石质疏松, 易风化, 常呈砂粒脱落, 岩石中常见石英质砾石, 少许肉红色长石碎块, 砾石多为角砾, 直径约 2~4mm。可见厚度 5.7~8.0m。

2、第五段 (J_{2y5}): 广布于云冈石窟之北、水泉村以南地区, 石窟陡崖之上多有出露。岩性为淡紫红色、灰紫色、暗紫色泥岩及含铁质、泥质、粉砂质泥岩, 呈薄层状~中厚层状, 泥岩中粉砂以石英、长石及岩屑为主, 约占 25%, 其中夹有紫灰色、淡紫色、灰黄色细粒铁质、钙质长石岩屑砂岩, 本层厚 0.1~2.0m。该段岩石中普遍含有大量球形、椭圆形的砂质、铁质白云岩结核, 一般直径为 10~15cm, 最大 30cm, 可作为鉴别本段的标志, 厚度 4.3~11.0m。

3、第四段 (J_{2y4}): 出露于窟区西院围墙外和吴官屯河南岸, 多形成悬崖陡壁, 为石窟佛像群上部岩层, 岩性为黄褐色、灰黄色、黄色及肉红色含砾粗中粒长石岩屑砂岩, 粗粒铁质、钙质长石岩屑砂岩, 中粗粒长石岩屑砂岩及中粗粒钙质长石岩屑砂岩。局部地段夹多层黄灰色薄层状细粒~中细粒泥质长石岩屑砂岩, 单层厚度 10~20cm, 变化大。质地较疏松, 易风化, 具交错层理。厚度变化大, 东院东部厚 8.5m, 西院月牙墙附近厚 7.5m, 2窟~20窟之间厚达 16.0~18.8m。

4、第三段 (J_{2y3}): 呈东西向断续出露于石窟佛像群区及两侧, 岩性为灰绿色、灰紫色泥质粉砂岩夹暗紫色粉砂质泥岩, 东部表现为两者互层。6窟以西以灰黄色泥质长石岩屑砂岩为主, 具水平层理, 厚度 1.1~3.5m; 20窟以西至月牙墙一带以紫色泥岩夹紫色、灰紫色泥质、铁质细粒长石岩屑砂岩为主, 厚度 5m 左右。质地松软, 易风化成碎片~碎块。

5、第二段 (J_{2y2}): 出露于石窟佛像群区, 呈东西向分布, 位于悬崖陡壁的下部, 岩性为厚层~巨厚层黄色、灰黄色粗中粒钙、铁质长石岩屑砂岩, 粗中粒长石石英砂岩, 钙质长石岩屑砂岩夹灰黄色细粒长石岩屑砂岩。交错层理发育, 以大型板状斜层理为主, 另有楔状交错层理。斜层理的倾斜优选方向以东和南东为主, 显示出古河流的流向。东段 2窟以西和西院月牙墙以西夹灰色砂质泥岩和泥质长石岩屑粉砂岩, 厚度 0.9~4.4m。岩石中局部见冲蚀槽, 出现泥岩的充填构造。本段岩石厚度变化大, 从东到西分别为 2.1m~15.1m~10.3m。

6、第一段 (J_{2y1}): 仅出露于一窟以东, 岩性为紫红色细粒铁质、钙质长石岩屑砂岩及紫红色灰紫色泥岩, 夹 0.6m 灰白色中粒钙质长石岩屑砂岩。薄层状、块状, 岩石质地松软, 易风化成碎块, 可见最大厚度 9.8m。

二、区域地质构造

云冈石窟地处山西中台隆大同一平鲁拗陷区的东北端箱形向斜的轴部，地层走向北东，倾角 $3^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 。大同地区为多次构造活动地区：燕山运动之后，喜玛拉雅运动在本区仍有构造活动，如大同断陷盆地的形成、第四系玄武岩喷发、口泉断裂（大同盆地西缘断裂）在整个第四纪仍在发生右旋扭动。因此，云冈地区在燕山运动形成的构造断裂系统会遭受喜玛拉雅运动的影响，发生不同力学性质作用的迭加（偶合）或次生充填作用，造成断裂、节理系统力学性质的转化，使节理导水性发生变化，如扭性节理中方解石脉的充填现象便是这种迭加作用的产物。

（一）褶皱

1、晋华宫向斜：轴面走向 $NE30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ，倾向东，倾角约 60° ，枢纽水平，为歪斜向斜构造，北东段被大同弧形断裂截断。核部及其北西翼为云冈组，南东翼依次为云冈组、青磁窑组及寒武系。北西翼地层产状为走向 $N30^{\circ}E$ ，倾向 SE ，倾角 6° ，南东翼地层产状走向 $N30^{\circ}E$ ，倾向北西，倾角 $28^{\circ}\sim 32^{\circ}$ 。

2、烽火台挠曲：位于云冈石窟东院3窟至2窟之间。挠曲带宽 $120\sim 130m$ ，延伸方向 $N40^{\circ}\sim 45^{\circ}E$ ，倾向 SE ，倾角 $10^{\circ}\sim 12^{\circ}$ ，为一缓斜挠曲构造。

（二）断裂

1、吴官屯断裂：走向 $N10^{\circ}\sim 15^{\circ}E$ ，断面直立，直线延伸，为正断裂，云冈地区长度 $7\sim 8km$ 。断裂带宽 $2\sim 3m$ ，由两盘碎石、断块充填，地表形成冲沟。西盘为灰黄色长石岩屑砂岩，岩石破碎，产状近水平，在断裂面附近岩层向下弯曲；东盘为紫红色泥质粉砂岩及紫红色泥岩，走向 $N30^{\circ}E$ ，倾向 SE ，倾角 5° 。在断裂东侧形成雁列式的 $N30^{\circ}\sim 50^{\circ}E$ 方向的次级羽状断层，显示东盘向南移动的特点。

2、大同西弧形断裂带：位于窟区东南青磁窑一带，与本区构造关系密切。北段走向 $N30^{\circ}W$ ，倾向 NE ，倾角 $75^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，南段走向 $N30^{\circ}E$ ，倾向 SE ，倾角 66° ，断裂呈弧形，云冈地区出露 $8km$ ，断裂延伸方向近南北，断裂带宽 $10\sim 20m$ ，有糜棱岩及半胶结状断层角砾岩充填。西盘（下盘）为寒武系紫色叶岩，薄层—中厚层泥质条带（团块）灰岩，其产状受逆冲作用影响，多与断层产状一致，走

向近南北，直立，其内发育 3~5 条南北向次级脆性断层，形成 200~300m 宽的断层破碎带。东盘(上盘)为太古代强混合岩化的黑云角闪质变质岩石，其中 60~70% 为不规则的肉红色花岗岩脉，且逆冲到寒武系之上。

3、吴官屯东断层：走向 N30°E，倾向 SE，倾角 70°，断层带宽 0.5m，由长石岩屑砂岩碎石充填，上盘(南东盘)为砂岩，下盘(北西盘)为紫色粉砂岩，上盘(南东盘)下降，为正断层。

4、吴官屯南断层：为直立正断层，由两条平行断层组成，走向 N50°E，断面直立，断层带宽度 0.3~0.5m，由砂岩、泥岩碎块充填，胶结程度差，南东盘见水平擦痕。

5、1142.2 高程点断层：走向北 40°东，倾向 SE，倾角 50°，下盘(南东盘)岩性为黄色长石岩屑砂岩，上盘(北西盘)为紫红色中粒砂岩。两盘紧闭，岩石破碎，局部见镜面。北西盘(上盘)上升，为逆断层。

6、1135 高程点断层：走向 N50°E，倾向 SE，倾角 80°，断带宽度 0.4m，由岩石碎屑及砂土充填。南东盘(上盘)下降，为正断层。

7、云冈村西北断层：走向 N50°E，倾向北西，倾角 70°，北西盘(上盘)为灰黄色长石岩屑砂岩，南东盘(下盘)为紫红色泥岩。两盘岩石破碎，断层带宽 0.5m，由碎石充填。上盘下降，为正断层。

8、二窟西挤压破碎带：走向近南北，面直立，两盘岩性为长石岩屑砂岩和泥质砂岩，有破碎带，破碎带宽度约 2m，被泥沙及碎石充填，地貌为一冲沟。

9、工人村南断层：走向 N25°E，倾向 NW，倾角 14°，两盘岩石挤压破碎，断层带紧闭，宽度 10~15cm，被灰绿色、紫红色泥岩及砂岩碎屑充填，见长石岩屑砂岩构造透镜体。北西盘(上盘)向南东逆冲，为逆冲断层。

上述断裂分为二级，吴官屯断裂与大同西弧形断裂带为一级构造，其余断裂为派生的次级构造。

三、云冈石窟窟区的节理

(一) 节理类型及特征

窟区节理主要发育在厚层~巨厚层状长石岩屑砂岩中，泥质岩石次之。对全区四个区段进行观察、测量，实测节理 588 条。按其成因可分为构造节理和非构造节理两类：

- **构造节理：**由构造运动形成，按其力学性质可分为三类：
 - **张节理：**为窟区东部最发育的节理，成群出现，西部较少。倾角近直立，延伸方向近东西，延续性好，大致平行石窟断面，平面上呈弯曲锯齿状，常呈折尾、分叉、尖灭及串珠状出现。节理面凹凸不平，裂隙张开，一般宽度 1~3cm，最大达 20cm，有泥沙质充填和铁质薄膜。
 - **压节理：**主要分布在窟区东段，切穿东西向张节理，西段则少见。延伸方向近南北，倾角直立，裂隙面紧闭，较平直光滑，局部有开口并被泥砂及岩石碎屑充填，偶见细小方解石脉，局部（二窟西）形成挤压破碎带。
 - **剪节理：**区内发育两组平面“X”型节理，主要分布在石窟西段。节理走向 N45°E 和 N60°W，倾角直立。两组节理交叉出现，互相切割，同时切割张性和压性节理。节理面平直光滑、紧闭，有少许填充物，延伸较远，节理面上有水平擦痕，在岩石露头上常切割成菱形断块。
- **非构造节理：**为外动力地质作用下形成的节理，按其成因分为两类：
 - **卸荷节理：**又可分为两种，其一为继承性的卸荷节理，其二为卸荷节理。
 - ◆ **继承性的卸荷节理：**为石窟区较发育的节理类型，东西向延伸，倾角直立，是继承张性节理发育而成，主要特征是使张节理裂隙加宽，延续性变好，填充物增多。
 - ◆ **卸荷节理：**也是窟区常见的节理类型。卸荷节理的成因有两种，即工程卸荷与自然卸荷。卸荷节理有两种形式，一种卸荷节理为近东西向延伸，长度大，多为直立，向下倾角变缓，在横剖面上形成弧形或不规则状，地表多开口，向下 3~5m 变窄乃至消失。另一种卸荷节理为沿崖壁和窟内壁面，以 45° 的倾角倾向临空面。
 - **风化节理：**仅出现在地表浅部的一种节理，其形态复杂，延伸短，弯曲、不规则，开口，深度小，有泥砂、碎石充填。但分布均匀，密度大。

（二）节理的间断现象：

在垂直剖面上，厚层砂岩中发育的高角度节理往往不切断薄层泥质粉砂岩和薄层泥岩层，出现节理间断现象。

（三）节理密度及优势方向：

本区节理测量面积 4340m²，测得节理 588 条，每平方米节理数平均为 0.136 条。其中，41°~60°方向 162 条，占 27.6%；81°~90°方向 174 条，占 29.6%；291°~310°方向 57 条，占 9.7%；351°~360°方向 63 条，占 10.7%；其它方向上的节理不发育。节理优势方向是 41°~60°和 81°~90°，即北东向剪切节理和东西向张节理（迭加卸荷）为区内最发育的节理。

四、十里河河谷和河漫滩的地层

在河谷和河漫滩，自上而下分别为：

（1）第四系全新统（Q₄）：表层覆盖与河谷中，厚度在 2.5~4.0m 左右，为冲洪积成因的碎石土、砾石堆积、粉砂土和风化半风化粗砂岩，混杂人工堆积杂填土。据山西省第十地质工程勘察院 2003 年勘察结果，由表及深可分 3 个亚层：

第一层：主要由褐灰色、黑灰色松散粉土，含砂砾石、煤屑和生活垃圾，下部夹薄层粉砂层，见水平层理。厚度及地层埋深约 1.5m。

第二层：褐黄色、浅黄色松散粉砂层，层位较稳定，局部见植物根系，厚度及层底埋深 0.3-0.8m。

第三层：为层位稳定的褐黄色圆砾石层。砾石的主要成分为长石石英砂岩和灰岩，占 60-80%，砾径以 0.2-1.0cm 为主，大的有 3-4cm。次圆状-次棱角状，含砾石和漂石，磨圆和分选程度差，杂乱排列，局部含土。厚度 1.1-3.1m，层底埋深 1.5~3.9m。山西省第十地质工程勘察院对该层作了注水试验，在三个坑中测得渗透系数分别为： 1.98×10^{-3} cm/s、 1.80×10^{-3} cm/s 和 3.42×10^{-3} cm/s，为中等透水体。

（2）侏罗系云冈组（J_γ）粗砂岩：位于第四系全新统（Q₄）之下。上部为中等风化褐黄色、锈黄色钙质胶结的致密坚硬-粗粒结构-块状构造的粗砂层，层理清晰，裂隙发育。下部位浅黄色、灰白色钙质胶结新鲜粗砂层，节理裂隙不发育。上下两部分的主要矿物成分都是石英和长石。

由于覆盖较厚，断裂构造和节理的发育情况不清楚。

第 2.3 节 水文地质条件

一、窟区水文地质条件

窟区主要发育有东西向、北东向、北西向三组裂隙。裂隙之间相互切割、迭加，加上风化裂隙的作用，使窟区裂隙的发育与分布变得比较复杂，尤其是石窟开凿后，边坡岩体的平衡受到破坏，卸荷应力的作用又进一步加剧了东西向构造裂隙的开裂，使之延伸加长，裂隙宽度增大，对洞窟岩体的破坏性最大。如：在距窟沿 9~12m 处发育有 2~3 条东西向裂隙，最宽达 20cm，平均宽约 2~3cm，横穿窟区，裂隙呈“V”字形，上宽下窄，深度达 3~5m，目前大多数已封堵。东西向主要裂隙的两侧还分布有次一级的羽状、枝状、雁状等小裂隙，和北东、北西向裂隙交叉成网状，分布在窟内不同部位，形成以东西向卸荷裂隙为主的渗水通道。由于厚层砂岩中发育的高角度节理往往不能切断薄层泥质粉砂岩和薄层泥岩层，出现垂直剖面上节理间断的现象，使地下水在从上部地层向下渗流的过程中遇到层层阻隔，不能顺畅地向下运动，从而延长了地下水的渗流路径，并使渗入石窟的水量减少。窟区西部的吴官屯断层，两盘岩体破碎，但断距小，多数为泥砂、碎屑所充填。其产状近直立，且距石窟较远，对石窟没有影响。吴官屯断层东侧发育的次级羽状小断层的一端延伸方向面临冲沟，即使断层内有水，也会沿坡排入沟内。

（一）地下水类型

窟区地下水包括孔隙水与裂隙水两种类型。

孔隙水：包括第四系孔隙水与砂岩孔隙水。第四系孔隙水赋存于第四系地层孔隙中，主要沿十里河河谷两侧分布。由于地水位明显低于石窟底板，对石窟没有影响。砂岩孔隙水是由表面张力或毛细力吸附在砂岩孔隙中的水分。这种水虽然不能以重力水或自由水的形式运动，但可以在湿度梯度、温度梯度作用下迁移或呈气态水形式运动。根据岩石吸水率的测定结果，云冈砂岩的含水量约为 1.05~3.16%。

裂隙水：包括风化裂隙水与构造裂隙水，是石窟渗水的主要来源。风化裂隙形成于岩体的表面，具有深度小、密度大的特点，为大气降水入渗或地表径流入

渗提供储水空间,在一定条件下,还可在岩石表面形成局部的暂时性储水,成为石窟地下水的补给源。

(二) 第四系地层的富水性与透水性

第四系粉土层的分布、厚度与透水性:粉土层厚度一般为0.2~6.5m,平均厚度为1.5m。围墙内较薄,围墙外较厚。围墙内粉土层平均厚度为1.1m,总体积为 $3.67 \times 10^5 \text{m}^3$ 。东院及西院明城墙等构筑物附近粉土层平均厚度为1.0m左右。围墙内粉土层厚度小于1.0m的总面积约 195000m^2 ,渗透系数 $6.8 \times 10^{-5} \sim 3.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$,平均渗透系数 $9.6 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 。

第四系砂卵石层的分布、厚度与透水性:砂卵石层在西院八字墙西侧较厚,达6.0m,西院围墙内其它区域大部分为2.0~3.0m。砂卵石层的平均厚度为2.4m。本层上部以砾砂为主,常相变为中粗砂、细砂、粉砂、粉砂质粘土的透镜体;厚度变化较大,一般1.0~2.5m,最大4.3m;顶板埋深0.2~2.0m。下部以卵石层为主,其底板一般与砂岩或泥岩直接接触,西院西部、东院烽火台东部和南部厚度较大,最大厚度4.0m,顶板埋深0.5~3.7m。

砾砂层与卵石层都属于透水地层,根据现场试坑渗水试验,二者的渗透性差异不大,砾砂层渗透系数为 $1.2 \times 10^{-2} \sim 1.6 \times 10^{-2} \text{cm/s}$,卵石层渗透系数为 $1.6 \times 10^{-2} \sim 2.1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$,这主要是因为卵石层中混有粘性土而降低了渗透性能。鉴于渗透性相近,在勘察与设计中将砾砂层与卵石层合并成一层来研究,实际上二者的空间分布也是相互穿插的。砂卵石层综合渗透系数为 $1.2 \times 10^{-2} \sim 2.1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 。

(三) 基岩风化壳的富水性与透水性

基岩面起伏大致和地形起伏一致,大部分基岩面坡度比地形坡度缓。除崖壁及冲沟附近,几个坡度变化明显的地方有:西院明城墙豁口处,基岩面向西南倾斜,平均坡度为0.118;西院八字墙内基岩面向冲沟(西谷)倾斜,平均坡度为0.110;西院明城墙东部基岩面有一较缓的沟槽,与东、西两院围墙间的大冲沟(东谷)连通,该基岩面沟槽底部坡度为0.015。东院基岩面主要受1窟东侧大冲沟控制,1窟~3窟一带基岩面平均坡度为0.111。

区内强风化层的厚度一般为1.3~4.5m;其中,西院围墙内强风化层平均厚度为3.2m,东院围墙内强风化层平均厚度为3.5m。强风化层的分布不均匀,较厚的区域从西向东有:西院八字墙的“撇”处(21窟~51窟顶部北侧)、西院明城墙

内、西院明城墙东南角、西院东南角(5窟~7窟顶部北侧)、东院储水池一带(3窟顶部东北)以及东院烽火台北侧,强风化层厚度均在4.0m以上。在靠近崖壁一带,自西向东21窟~52窟顶部,高程1152~1157m之间,破碎比较严重;5窟—6窟顶部,高程1162m左右,破碎比较严重;1窟—3窟顶部北侧,高程1156~1163m,破碎比较严重。明城墙内,基岩破碎形成一条北西向条带,连通5窟~6窟顶部的破碎区,并且由北向南,破碎带高程走低。这些破碎带的存在是石窟渗漏产生的重要原因之一。再往北,西院西北角和东北角的破碎区,由于其高程走势分别为北西和南东向,对石窟渗漏不会产生影响。东院北部的大片裂隙、破碎带可为二窟泉提供部分大气降水入渗的水源。东院东侧浅部破碎区与东南冲沟连通,对石窟的渗漏无影响。

窟渠围墙内中风化层分布也不均匀,厚度一般在1.4~9.6m之间,平均厚度为4.2m。靠近崖壁,裂隙比较发育的有3个区域:1)21窟~35窟顶部,高程在1150m左右。2)7窟、8窟顶部B7钻孔一带,高程在1155m左右,容易积聚入渗的大气降水。3)1窟、2窟北部,高程在1160m左右。这三个破碎区,均与浅部的裂隙带连通,导水性良好。

除5窟、6窟顶部裂隙较发育(高程1150左右)外,西院深部的裂隙分布已比较稀疏,横向连通性较差,属于微风化层。东院内1窟、2窟北部仍零星分布着裂隙聚集区,高程在1157m左右,围墙内微风化层平均厚度约5.0m。

基岩风化壳由于受基岩顶面起伏状况、埋藏深浅、岩性不同及汇水面积大小等因素的影响,富水性差异很大。当覆盖层厚度大、水分蒸发慢、基岩面地形低洼、岩体破碎、又有一定的汇水面积时,风化壳富水性较强。砂岩风化壳的富水性和透水性较好,砂质泥岩与泥岩风化壳的富水性和透水性则较差。基岩风化壳中形成一个个相对独立的富水区,呈“鸡窝”状。探槽试验说明泥岩风化壳被揭露后,除释放自身的储水外,周边来水范围有限,水量很少,没有稳定的补给来源,泥岩风化壳富水性与渗透性均很差。钻探过程中曾发现,钻孔循环液在基岩风化带漏失很快,漏失量较大,基岩风化带岩芯较破碎,说明基岩风化带的透水性较好,其横向水力联系也应比较好,基岩风化带可成为地下水水平方向流动的通道。

(四) 隔水层

1、第四系粉质粘土相对隔水层:主要分布于场地的北侧(石窟围墙以北)、

东院烽火台西南及东院东北角 15 号孔附近，范围不大，厚度 1.8~6.6m。渗透系数平均值为 $3.3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 。

2、侏罗系中统(J_2)泥岩隔水层：泥岩层的分布较广，厚度从 20cm 到 5~6m 不等。 J_2y_1 、 J_2y_2 、 J_2y_3 、 J_2y_5 段泥岩层以透镜体形式断续分布于砂岩之中，层位较多，厚度变化较大。总体而言，泥岩在窟区东西两侧出露层位多，出露标高较高，在窟区中部出露层位少，出露标高较低。泥岩在石窟东西两侧(1 窟以东、20 窟以西)的厚度较大，层位较多，并在石窟的顶部、中部、底部均有发育；窟区中部(3 窟-20 窟)泥岩发育较少且多集中在石窟顶部；在石窟开凿部位，5 窟~13 窟基本上没有泥岩发育，14 窟~20 窟在石窟中部发育一薄层(厚约 20cm)砂质泥岩透镜体。泥岩隔水层的厚度，窟区北部比南部大，深度在 30m 以上。

- J_2y_5 段泥岩：分布在 1165m 高程左右，其上为第四系覆盖层。主要分布于西院八字墙东侧和东院地形较高的区域。西院八字墙东侧厚度较薄，一般 3.0m 左右；东院分布较厚，一般 5.0~6.0m，连续性好。
- J_2y_3 段泥岩：分布在 1145~1155m 高程左右，主要分布于西院西侧和东院，厚度及高程变化大。在 1152m 高程左右有泥岩小夹层分布，向北 10m 该夹层尖灭；东院内该段泥岩层在电法剖面上有反映，和 J_2y_5 段泥岩层及富水区一起形成整个低阻带。
- J_2y_2 段泥岩夹层：主要分布在 1140~1145m 高程，在石窟崖壁露头有清楚的反映。该层厚度 2.0~3.0m，薄的地方几十公分，不连续。
- J_2y_1 段泥岩：标高在 1125m 左右，厚度 3~5m，分布较广。

3、侏罗系中统(J_2)完整砂岩的隔水性：根据干密度、比重试验结果测得砂岩的孔隙率较低，因而完整砂岩的透水性较差。水位恢复试验表明，在地下水位以下(地表 23m 以下)，砂岩地层平均渗透系数为 $7.0 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ ，说明完整的砂岩岩体有隔水作用。勘察结果表明，砂岩的透水性与裂隙的发育程度及张开度有直接关系。水位观测试验和荧光素示踪连通试验表明，完整砂岩地层的透水性很差，特别是横向水力联系很差。可视为隔水层。但由于砂岩中发育多种裂隙，改变了岩体的透水性能，且由于裂隙发育的不均匀性，导致砂岩岩体的透水性存在较大的差异。通过分析地质测绘、钻探和井下电视资料，窟区砂岩与覆盖层接触带 2~3m 范围内裂隙发育、岩石破碎、透水性很强，其深度与强风化带的发育深度一致；其下 10~15m，裂隙数量大幅度降低，透水性减弱，其深度与中风化带的发育深度基本吻合；中风化层以下很少发现渗水点。可以认为，除少数裂隙发育

带以外，微风化和未风化的砂岩岩体可视为隔水层。

（五）节理

节理(裂隙)调查结果表明，在区内不同地段，节理发育各有特色，但整体上以东西向张节理为主。在 1 窟东、2 窟西、1 窟、2 窟等， $81^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 和 $271^{\circ}\sim 280^{\circ}$ 为节理的优势方向，即近东西向张节理(迭加卸荷作用)为本区段最发育的节理；在 4 窟西冲沟、3 窟、6 窟和 7 窟， $81^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 和 $351^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 为该区段节理优势方向， $41^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 和 $311^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 方向也有一定发育，即近东西向张节理和近南北向压节理为本区段最发育的节理；在 13 窟西冲沟、9 窟、10 窟、14 窟、16 窟、17 窟和 29 窟，节理优势方向以 $81^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 为主， $41^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 次之， $351^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 方向节理也有一定发育，即近东西向张节理(迭加卸荷)在本区段最发育，其次为北东向剪切节理。在 ⑦号断层附近， $41^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 和 $301^{\circ}\sim 310^{\circ}$ 为该段节理优势方向，即北东向和北西向两组“X 型”剪切节理最发育，近东西向张节理次之。

（六）裂隙带的分布规律

1、裂隙带的平面分区：裂隙发育区范围为自崖壁向北 25~30m 的区域，基岩裸露，或覆盖层较薄，卸荷、风化裂隙比较发育，岩芯破碎，风化深度大。裂隙发育过渡区位于距崖壁 30~155m 区域，过渡区的裂隙发育不均匀。裂隙不发育区分布于距崖壁 155~300m 区域内，裂隙发育明显减少，发育深度变浅。

2、裂隙带的垂直分带：在裂隙发育区和裂隙发育过渡区裂隙带在垂直方向可分为三个带，即裂隙发育带(I带)、裂隙不发育带(II带)和裂隙较发育带(III带)。

- 裂隙发育带(I带)：埋深 0~12m 左右，处在基岩顶面风化壳中，岩芯不完整，呈块状、碎块状。个别在泥岩夹层处，岩芯不完整，也有裂隙发育。
- 裂隙不发育带(II带)：埋深 12~25m 左右，岩芯完整，一般没有风化痕迹。
- 裂隙较发育带(III带)：埋深 25m 以下，裂隙发育极不均匀。

裂隙分带特点主要为：由南至北，由浅到深，裂隙的数量由多到少，裂隙张开度由大到小直至消失，地层的渗透性能由强变弱，地下水运移速度由快变慢，岩石的风化程度由强变弱，岩石强度由差变好。从井下电视和岩芯观察，浅部裂隙大多数被充填，充填率 85%左右。深部裂隙紧密闭合，并有方解石、钙质薄膜充填，不透水。

（七）地下水水化学特征

取钻孔、井、泉、矿坑排水、雪水、洞内滴水等水样 16 件进行了水质全分析。结果表明：按照矿化度分级标准，本区地下水矿化度、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 离子含量较低，说明其所处区域地下水的水循环比较强，渗流路径短，主要为垂直补给。少数钻孔的矿化度与 SO_4^{2-} 和 Cl^- 离子含量高，说明其所处区域地下水的水循环比较弱，从而从一个侧面反映了窟顶地层中地下水呈“鸡窝”状不均匀分布的特点。

（八）地表径流

石窟的东谷因与石窟距离较远，即使在暴雨时或者水沟水位高，一般也不会对石窟产生不良影响。而西谷的出水口小，又与石窟距离近，谷底及两侧的岩体裂隙发育，如果遇到暴雨使得水沟水位升高，可能对石窟产生不良影响。来自石窟窟区的地表水和地下水流经云冈村进入十里河，云冈石窟窟底（高程在 1136m 以上）高于十里河河水水位 10m 以上。

二、十里河河谷和河漫滩的水文地质条件

十里河是区内唯一的季节性河流，主要方向为由西向东，发源于左云县，在石窟以东约 10km 处汇入桑干河。一般地表径流流量 $0.64\sim 1.03\text{m}^3/\text{s}$ ，枯水期较小，在 $0.062\sim 1.5\text{m}^3/\text{s}$ 之间；3~4 月份融雪期间，流量稍有增加，在 $1.03\sim 3.05\text{m}^3/\text{s}$ 之间；7~9 月份雨季流量最大，在 $2.23\sim 5.34\text{m}^3/\text{s}$ ；暴雨期间，洪水来势凶猛，达 $145\sim 351\text{m}^3/\text{s}$ ；可查历史上最大洪峰流量 $880\text{m}^3/\text{s}$ （1969 年 7 月 30 日）。十里河常年径流均由南北两岸各支流、泉水、大气降水及矿坑排水补给，冬季冻结，河床冰封至次年 3~4 月份方可解冻。

表 2.1 十里河地表水的基本情况

多年平均径流量	0.412 亿立方米	地表水 SO_4^{2-}	1017.28mg/L 对混凝土中等腐蚀性
历年最大径流量	1.47 亿立方米	地表水 Cl^-	217.31mg/L 对混凝土弱腐蚀性
最小年径流量	0.106 亿立方米	地表水 HCO_3^-	273.58mg/L
历年最大洪峰流量	75 m^3/s	地表水 pH 值	8.2
多年平均含沙量	63 kg/m^3	—	—
年最大输沙量	727 万吨	—	—
多年侵蚀模量	2780 t/km^2	—	—

十里河主流流向基本与地层走向垂直，河水补给地下水。近年来，十里河流域缺水少雨，河道长年干涸，目前河水主要为煤矿采煤废水。根据历史资料统计，十里河地表水的基本情况见表 2.1。

山西省第十地质工程勘察院（2003）：河谷中含水岩系主要为碎屑岩类裂隙水含水岩系和松散岩类孔隙水含水岩系。前者的含水层岩性为中侏罗统钙质砂岩、砂页岩和砂砾岩等，含孔隙裂隙潜水或承压水，裂隙发育不均匀，中等-弱富水性。水位埋深 11.30~24.40m，单位涌水量 0.026~0.37L/s.m。水化学类型： $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ ，矿化度 1.780~1.907G/L，pH 值 7.5~7.8。地下水主要接受大气降水的垂直入渗补给及上部松散层的入渗补给，以水平方式向沟谷下游排泄，最后以侧渗方式向大同盆地排序。后者主要分布于十里河的河床和河漫滩中，含水层由粗砂和圆砾组成，厚度>0.5~10m 不等。1990 年测量资料显示，十里河河床中第四系松散层中含孔隙潜水，静止水位埋深 0.65m，单位出水量 2.59L/s.m。富水性中等-强。2003 年勘察结果表明，该层已成为不含水透水层。山西省第十地质工程勘察院于 2001 年在云冈新村钻孔抽水试验测得：中侏罗统粗砂岩的渗透系数为 $5.9 \times 10^{-5} \sim 9.26 \times 10^{-4} \text{cm}/\text{s}$ ，渗透等级弱~中等。

第 2.4 节 气象条件

本区为大陆性半干旱气候，年平均气温 6.5℃，一月份最冷，月平均气温 -11.7℃，七月份最热，月平均气温 23.1℃，月平均变化幅度约 40%；雨季集中在 7~9 月份，月最高降雨量达 100mm 以上；六月份最大蒸发量为 801.8mm，十二月份蒸发量为 74.9mm；年积雪在 20mm 左右，冻结期为十月下旬到次年四月，标准冻结深度 1.5m，全年无霜期 120d。

表 2.2 基本气象条件

大气条件		降水量与蒸发量		风和阳光	
最高气温	37.2°C	降水量集中期	7、8 和 9 月	常年盛行	西北风
最低气温	-27.2°C	多年平均降水量	384.0mm	平均风速	2.9m/s
年平均气温	6.5°C	最大降水量	880~900mm	年平均 8 级以上大风日	42.8d
一月平均气温	-11.7°C	最低降水量	约 101.0mm	最高风速	26.6m/s

续表 2.2 基本气象条件

七月平均气温	21.6°C	平均蒸发量	2057.4mm	年平均日照时间	2753.3 小时
全年无霜期	120-135d	最大蒸发量	2386.3mm	—	—
标准冻深	1.5m	—	—	—	—
平均湿度	52	—	—	—	—
最低湿度	0	—	—	—	—
平均气压	895.3 hpa	—	—	—	—
最高气压	917.9hpa	—	—	—	—
最低气压	876.5hpa	—	—	—	—

第 2.5 节 地质与生态环境

由于云冈石窟四周被煤矿包围，煤矿开采引起的振动、环境污染、地面塌陷、地下水位降低及煤矿停采后地下水位的恢复均可能对石窟的安全产生重要影响。

一、空气污染

由于受周边采煤及燃煤的影响，空气中煤的粉尘较多， SO_2 含量较高，常形成酸雨、酸雪。窟区雪水水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$ 型。从窟顶不同地点、不同深度取上样进行可溶盐分析的结果表明，在土壤浅表层 (<1.5~2.0m)，自上至下，有石膏含量逐渐增高， SO_4^{2-} 的含量逐渐减少现象，这是由于大气降水中硫酸与土壤中 CaCO_3 作用形成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 沉淀和土壤酸化的结果。大气降水在入渗过程中，酸的浓度降低，其侵蚀能力下降，表层土由于接受酸雨作用的机会大于深部的土层，因此 SO_4^{2-} 的含量必然呈上多下少的规律。经过多年治理，石窟区的空气质量已有所改观，但要彻底根除这种病害，尚待时日。值得指出的是，在窟顶覆盖层薄 (<1.0m)、基岩裸露和崖壁地段，这种酸化和 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

的形成所产生的风化作用不容忽视。

二、生态环境

由于周边煤矿大量开采，地下水位日趋下降，河、泉干枯，生态环境受到严重破坏。另一方面，随着近年来经济的高速发展，生产、生活用煤的用量加大，燃煤产生的SO₂等气体排入大气层形成酸雨、酸雪，加剧了生态环境的恶化。

三、采煤振动及煤层顶板大面积冒落

根据“云冈石窟测震工作报告”，在石窟保安煤柱以外，采煤放炮、煤层顶板大面积冒落、运煤火车与汽车行驶的产生的振动对石窟无破坏性影响。煤矿开采过程中，煤层坚硬顶板大面积的突然冒落常形成地震，尽管震源较浅，且距石窟较远，震级也比较小（一般相当于2~4级地震），但由于振动较频繁，造成的影响远大于运煤车辆行驶和采煤放炮的振动影响，对石窟安全的危害也较严重。是石窟保护过程中不可忽视的问题，必须严加防范。

四、煤矿采空区

石窟四周煤矿众多，国营、地方国营、乡镇、民办煤矿星罗棋布，开采面积与采深日趋扩大。在石窟以外的地区，已发现地表有规模大小不等的多处塌陷漏斗。为了确保石窟的安全，已采取了预留保安煤柱的措施。从目前的效果看，这一措施是可行的，但应加强对石窟四周小煤窑的监控与管理，确保煤矿开采不进入保安煤柱范围。保安煤柱一旦遭到破坏，将对石窟安全与稳定性构成严重威胁。

五、煤矿排水疏干与降低地下水位

云冈石窟周围有几十个煤矿，仅云冈镇所属的煤矿就有13个。煤矿生产过程中常年抽排地下水，导致地下水位下降，民用井干枯。地下水位的下降使石窟基底处于地下水毛细作用带以上，石窟干燥，对保护石窟有利。

六、地面沉降

由于地下水位下降，使地层中的孔隙水压力降低，有效应力增加，引起地面沉降。由地下水位下降引起的地面沉降主要发生在松软的第四系地层中，而云冈

石窟主要开凿在砂岩地层中，因而对石窟稳定没有影响。

七、地下水位回升

煤矿停产后，因煤矿生产需要而进行的井下排水也随之停止，地下水位必然随之回升，但不会对石窟产生影响。主要原因有以下几点：其一，云冈石窟开凿在云冈组地层中，而含煤地层则位于云冈组地层的下部；其二，云冈石窟开凿在地势较高的陡崖石壁上，高于现有地下水位 10m 以上，也高于河床水位；其三，随着社会的发展，工农业及生活用水量大增，同时，本区干旱少雨，地下水原有的补给与排泄平衡已经改变，因此，地下水位已不能再恢复到原有水平，煤矿停产后地下水位的回升对云冈石窟应无影响；其四，即使煤矿停产后地下水位的回升对云冈石窟有影响，也可采用人工降水等工程措施加以控制。

八、地面塌陷

山西大同地区煤质好、煤层厚，煤层开采后顶板冒落引起的地面塌陷也很严重。因此，必须严格控制与监管煤矿开采活动，严禁进入预留的石窟保安煤柱范围内采煤作业。根据“云冈石窟安全保护问题的调查报告”，中国煤炭科学研究院北京开采所特采室 1988 年 7 月对保安煤柱进行了重新设计，石窟安全围护带宽度由过去的 20m 扩大到 30m，增加了 10m。过去大同地区在计算地表塌陷保护范围时使用的表土层与基岩层移动角一直按 80° 设计，从未发生过问题，说明取值比较合理。但考虑到云冈石窟的重要性，以 75° 移动角对地表塌陷保护范围进行重新设计，较通常值小 5° ，使保安煤柱范围增加，对石窟安全保护更为有利。经过对各煤层开采引起的地表塌陷的预测和分析，按设计要求进行煤矿生产对石窟没有影响。即使石窟周边煤矿采完后，地表最终下沉盆地的边缘距石窟的最远距离也有 505m，预留的保安煤柱是可靠的。

第 3 章 十里河工程对石窟文物保护的影响

十里河属海河流域永定河上游，十里河工程正是按照 21 世纪初首都北京水资源可持续发展利用规划的要求，为保持上游地区生态平衡和水资源的可持续利用而设计的。随着 2008 年北京奥运会的日益临近，改善北京周边地区的生态环境，保护密云水库和官厅水库这两个北京市的主要地表水源，缓解日趋紧张的北京市供水矛盾，显得越来越迫切。

该工程于 2003 年 9 月开工，2003 年冬天中旬首次蓄水。工程完成后，在上下两库全部蓄水的情况下，在距离云冈石窟大约 400m 之处成了一个表面积约为 $17 \times 10^5 \text{km}^2$ 。该面积大约占十里河本段河谷面积的三分之一。当水库蓄满水时，地表水位将升高 2~2.5m，对当地的地表水、地下水、大气湿度、地表生态环境、下游生态环境的保护和云冈石窟文物的保护产生一定的影响。

十里河工程对环境与文物保护既可能产生正面影响也可能产生负面影响。虽然我们通过实地踏勘、采样分析和大量的计算机模拟对十里河工程对周边环境与云冈石窟文物保护的影响进行了探讨，对解决问题的可能方法和措施提出合理化建议。但是，由于水库竣工的时间还很短，一些现象还没显露出来，尚不能进行更加深入的研究。因此本论文的结论还需要在将来的实践和研究工作中得到进一步验证。

第 3.1 节 十里河工程与生态环境改善

十里河工程所属的云冈峪流域，属干旱-半干旱地带的黄土丘陵阶地区，地形破碎，基岩出露强烈(图 3.1)，土层贫瘠且薄，总面积约 186km^2 ，其中水土流失面积超过 184km^2 ，占总面积的 99.3%，土壤侵蚀模数为 $8000 \text{T}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ，其中风蚀模数 $3500 \text{T}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。植物多样性差，生态环境极其脆弱，植被覆盖率不到 5%。往年在区内植树存活率极低，被称为“植树禁区”。

十里河工程的建成，可大大改善云冈石窟的旅游观赏性，图 3.2 为十里河工程左岸的效果图。由于该工程距离云冈石窟较近，将来经过适当规划，可以成为云冈石窟风景区的一部分。

同时，十里河工程蓄水水源来自采煤废水，在水库入库口设计有沉淀池，可以沉淀部分煤灰废渣，减少对下游的污染物输入。这对改善下游水质，特别是下

游的册田水库和官厅水库的水质，对保障 2008 年北京奥运会和北京市的长期用水安全，具有重要意义。



图 3.1 十里河工程地形破碎，基岩出露
Fig3.1 The fragmentized base rock



图 3.2 十里河工程左岸效果图
Fig3.2 Designed left bank of the watershed

第3.2节 十里河工程对地下水和石窟的可能影响

当前常用的地下水模拟模型包括解析模型、数值模型、水均衡模型及物理模型等。数值模拟模型以其精度高、物理意义明确，而逐渐成为地下水模拟的重要发展趋势。目前国际上较为流行的地下水数值模拟软件主要有 FeFlow 和 ModFlow，在本项目中我们选择 ModFlow。

ModFlow 模型是美国地质调查局(USGS)的 McDonald 和 Harbaugh 于上个世纪 80 年代开发出来的，是一套专门用于孔隙介质中三维地下水流数值模拟的计算机软件。自 ModFlow 问世以来，它已在全美甚至全世界范围内，在有关地下水的科研、生产、环境保护、城乡发展规划和水资源利用等许多行业和部门得到了广泛应用，成为最为普及的地下水运动数值模拟的计算机软件。

ModFlow 不仅可以用于模拟孔隙介质地下水的运动，而且可以用来解决裂隙介质中的地下水流动问题。经过合理的概化，ModFlow 还可以用来解决空气在土壤中的流动(Guo, 1995)。将 ModFlow 与溶质运移模拟的软件结合起来，还可以用来模拟诸如海水入侵等地下水密度为变量的问题(Guo 和 Benett, 1997)。ModFlow 程序结构合理，易于理解，便于操作，代表了未来地下水流数值模型发展的大趋势，有很强的实用性。

首先对研究区地下水的结构与功能特征和边界条件概括如下。

一、地下水系统的结构、功能特征与输入-输出特征

(一) 第四系全新统 (Q₄) 松散层类孔隙潜水层

十里河工程以北至云冈石窟段近地表主要为土黄色、灰黄色亚砂土, 平均厚度为 1~2m, 其下由含灰黄色卵砾石的砂岩构成, 砾径一般为 2~3 cm, 大者有 8~10cm, 含量 40%左右, 最大厚度 7.7 m, 平均厚度为 3.3 m。

该段十里河古河道靠近北边较发育, 该层内富含第四系全新统松散层类孔隙潜水, 且含水层的分选性较好, 透水性较好, 富水性较强。前人测得渗透系数为 $1.98 \times 10^{-3} \sim 3.42 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 给水度介于 0.01~0.3 之间。

(二) 侏罗系云冈组裂隙含水层

研究区内第四系全新统卵砾石与下伏侏罗系云冈组砂岩直接接触。云冈组砂岩为灰白色、浅黄色, 中粗粒结构, 风化较强烈, 裂隙发育, 岩石破碎, 沿裂隙面多有水锈痕迹, 含裂隙水。

(三) 地下水系统的输入和输出特征

根据大同水文队的资料表明, 该研究区内地下水水位年际变化不大, 相对比较稳定, 因而得出该地区地下水年际输入和输出量基本持平的特点。

1、输入

十里河工程以北至云冈石窟地区, 地下水系统的输入方式主要为天然输入, 主要包括大气降水入渗、河渠的侧渗补给和侧向迳流的流入。

- 大气降雨入渗补给: 根据工程入渗补给资料来看, 在该区砂砾石孔隙潜水系统中, 大气降雨补给是主要方式之一。该研究区的潜水水位埋深为 0.5~2.0m, 降水入渗强度大, 如果降水集中, 降水强度大, 持续时间长, 那么降水对地下水的补给量将会很大。根据大同市气象局提供的多年统计资料可以得出, 该地区的年平均降雨量为 384mm, 最大年平均降雨量为 900mm。通过输入输出平衡计算, 得出区内平水年的降水入渗补给量大约为 360mm/a。
- 水库入渗补给: 北京建设综合勘察研究设计院的勘察资料表明, 十里河云冈石窟段河床水位高程与该区地下水位基本保持一致, 因此, 河水与

研究区的孔隙潜水之间存在密切的水力联系：河水通过侧渗方式补给和排泄地下水。当在十里河上拦河蓄水 2m 时，十里河的水位将大大高于研究区的孔隙潜水水位，据估计水库补给地下水水量为 2800m³/d。

- 侧向补给：侧向迳流补给是该研究区孔隙潜水系统的另一主要输入方式。北部云冈石窟山体的基岩和西部十里河拐弯处是该地区地下水的侧向补给边界。据估计侧向补给总量为 2500m³/d。

2、输出

在十里河工程建设之后，以北至云冈石窟内地下水系统的输出方式主要有：天然的大气蒸发输出和东部的侧向排泄。而在工程建设之前，尚存在通过十里河河道直接向南侧的侧向排泄。

- 大气蒸发：该研究区地处我国西北部山区，年平均大气蒸发远远大于大气降水量，根据大同气象局提供的资料，该区年平均蒸发量为 2057.4mm，最大年蒸发量为 2386.3mm，最大蒸发深度为 5m。
- 地下水侧向排泄：十里河工程以北至云冈石窟地区的总体地形为北高南低，西高东低，地下水的总体流向与地表地形基本一致。因此，该地区的孔隙潜水主要在研究区的东部及东南部的河道低洼地带通过侧向径流的方式排泄。据估算，该地区的孔隙潜水侧向流出量为 3700m³/d。

二、边界特征

（一）北部环境与边界

研究区的地下水系统的北部边界基本沿着云冈石窟山体。云冈石窟山体基岩自西向东主要由灰绿色、灰紫色泥质粉砂岩夹暗紫色粉砂质泥岩、紫色泥岩夹紫色、灰紫色泥质、铁质细粒长石岩屑砂岩构成；其下部岩性为厚层—巨厚层黄色、灰黄色粗中粒钙、铁质长石岩屑砂岩，粗中粒长石石英砂岩，钙质长石岩屑砂岩夹灰黄色细粒长石岩屑砂岩。山体东部还出现岩性为紫红色细粒铁质、钙质长石岩屑砂岩及紫红色灰紫色泥岩，夹 0.6m 灰白色中粒钙质长石岩屑砂岩。据此可将北部边界视为隔水边界。

（二）南部环境与边界

南部边界确定为十里河北岸，因河水主要由矿区的采煤废水经人工抽排形

成，故在本次研究中把南部边界看作定水头边界。当十里河工程实施以后，可仅把一号坝与二号坝之间的边界视为定水头边界，把一号坝以西的坝区边界视为通用水头边界。

（三）西部环境与边界

西部边界为人为划定边界。其地层岩性为土黄色、灰黄色亚粘土、亚砂土，下覆含灰黄色卵砾石的砂岩。由于这里接受的西部山区地下水的侧向补给量较大，十里河又在此处拐弯，故这些岩层均含有较丰富的地下水。受该区西高东低的地形影响，地下水可以以水平径流的方式向东部排泄。因此，将西部边界定为具有通用水头的透水边界。

（四）东部环境与边界

东部边界也是人为划定边界。其含水层的岩性与西部基本一致，由于此处地势低于西部，因而把这一边界定为具有排泄功能的透水边界。

从第二章、本章前述资料及实地考察情况来看，本研究区地下水系统的补给项由垂向补给、侧向补给和河流补给构成。总体来说以河流补给为主，垂向侧向补给其次，侧向补给最小。而地下水系统的排泄项有垂向蒸发消耗排泄、侧向径流排泄和河流排泄，其中以侧向蒸发消耗为主，垂直蒸发排泄其次。河流的排泄受地下水位的影响较大，一般在该地区仅发生在7~9月份的暴雨所产生的地表径流时。

十里河工程施工以后，由于水库的蓄水，将使原本与研究区地下水位相差不大的河道水位上升2~2.5m，势必造成河流的对研究区的侧向补给量大幅增加，超过了大气降水的垂向补给，从而造成该地区地下水位的整体抬高，使得原来位于下层砂岩的地下水水位升至上层卵砾石层，以致研究区范围内的低洼地带和沟渠出现地下水出露。

三、水库蓄水和云冈风景区地下水的响应关系

2003年冬，十里河工程初步建成时曾对水库进行首次蓄水。由于水库刚建成，在1号坝以西的地段尚未作防渗处理，因此在蓄水后发现，在本来干燥的云冈村（特别是靠近大同~左云县公路附近的）居民的菜窖中发现大量地下水处理，

继而在山西云冈石窟文物研究所的暖气沟中也发现来源不明的积水，初步怀疑与水库蓄水有直接关系，故对水库进行完全泄水。

为了研究水库对当地地下水系统的影响，大同市十里河采矿区采煤废水调蓄回用工程项目部于2004年4月在研究区实施了浅井钻探，并从5月1日开始进行了连续25天的地下水水位观测，部分结果如表3.1。由表可见，在水库蓄水后，尽管对水库实施了完全泄水，但本地区地下水水位仍然较高，绝大部分井位处地下水水位埋深不足4米，最浅处（#4井）不足1.3米。图3.3为实测地下水水位埋深等值线图。该资料为通过计算机模拟研究和预测十里河工程对该地区地下水系统的影响提供了基础保证。

表 3.1 地下水水位观测结果（部分）

Table 3.1 The measured groundwater surface from May 1st to 25th, 2004

编号	水位 标高 (m)	地面 标高 (m)	5月 1日	5月 3日	5月 5日	5月 7日	5月 9日	5月 11日	5月 13日	5月 15日
k1	28.54	31.77	28.5	28.5	28.51	28.5	28.5	28.51	28.49	28.49
k2	27.77	32.48	27.75	27.77	27.78	27.78	27.8	27.8	27.74	27.78
k3	28.25	32.33	28.24	28.25	28.25	28.27	28.23	28.23	28.19	28.28
k4	28.11	30.72	28.1	28.11	28.11	28.14	28.14	28.11	28.09	28.07
k5	28.00	31.64	28.08	28.23	28.31	28.33	28.28	28.19	28.17	28.15
k6	27.87	29.16	27.79	27.86	27.84	27.82	27.8	27.74	27.73	27.71
k7	23.49	25.41	23.44	23.49	23.58	23.55	23.47	23.5	23.37	23.26
k8	26.02	27.78	26.05	26.03	26.03	26.03	26.00	25.96	25.95	25.88
k11	26.77	28.57	26.79	26.87	26.93	26.93	26.93	26.9	26.84	26.88
编号	水位 标高 (m)	地面 标高 (m)	5月 17日	5月 19日	5月 21日	5月 23日	5月 25日	备注		
k1	28.54	31.77	31.77	28.5	28.58	28.61	28.62	水位标高、地面标高 和地下水水位的标 高数值需要加1100.		
k2	27.77	32.48	32.48	27.92	28.05	28.03	28.04			
k3	28.25	32.33	32.33	28.71	28.85	28.73	28.65			
k4	28.11	30.72	30.72	28.09	28.09	28.09	28.08			
k5	28.00	31.64	31.64	28.19	28.31	28.31				
k6	27.87	29.16	29.16	27.75	27.74	27.69	27.66			
k7	23.49	25.41	25.41	23.2	23.17	23.15	23.11			
k8	26.02	27.78	27.78	25.88	25.71	25.63	25.57			
k11	26.77	28.57	28.57	26.86	26.87	26.87	26.88			

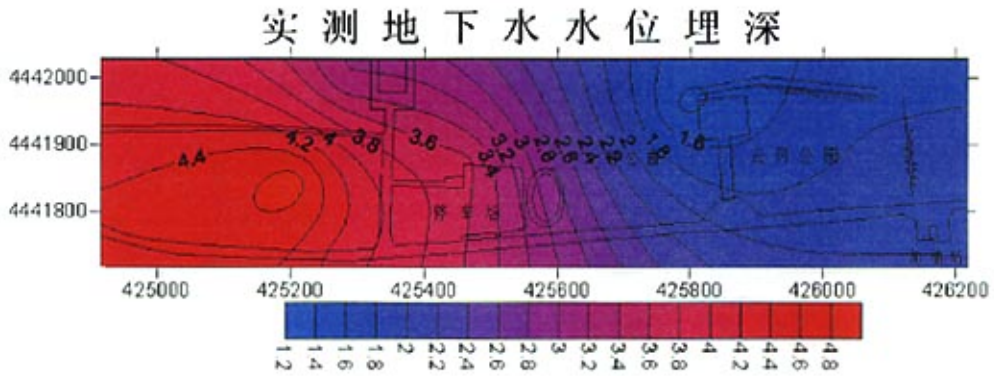


图 3.3 为实测地下水水位埋深等值线图。

Fig3.3 Contour map of the measured depth of groundwater surface

四、地下水水位的约束条件

作为一个综合治理项目，十里河工程除了防洪蓄水、改善景观条件和废水回用的功能外，还应当兼顾周围植被发育、小气候变化、地下建筑和文物保护的影响。这些问题几乎都与地下水系统有直接关系。

经过实地考察，获得如下数据：

- 目前云冈村民用菜窖的深度在 2m 左右；
- 山西云冈文物研究所的暖气沟离地表约 1.8m；
- 本地区草本植物根系深度可以在 0.5~1.0m，参见图 3.4，但人工植树的根系可更深，区内古树根系可深达数米；
- 云冈石窟石雕文物一般离河谷地表面尚有数米，因此地下水位的抬升直接影响文物的可能性极小，但可以影响相关建筑物的安全和使用。



图 3.4 草本植物的根系深度

Fig3.4 The depth of root of the herb

五、数学模型

从上述建立的水文地质概念模型可以看出，全区可概化为一个孔隙潜水系统，含水介质为非均质各向同性，具有一类和二类混合边界，地下水为非稳定流

的潜水系统，其地下水运动数学模型为：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[K(H-Z) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(H-Z) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \varepsilon(x,y,t) - W(x,y,t) = \mu \frac{\partial H}{\partial t} & x,y \in G, t \geq 0 \\ H(x,y,0)|_{t=0} = H_0(x,y) & x,y \in G + \Gamma_1 + \Gamma_2, t \geq 0 \\ H(x,y,t)|_{\Gamma_1} = H_1(x,y,t) & x,y \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ K(H-Z) \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = -q(x,y,t) & x,y \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{cases}$$

式中， x, y 为空间坐标 (m)； $K(x, y)$ 为渗透系数 (m/d)； μ 为潜水给水度； t 为时间变量 (d)； $\varepsilon(x, y, t)$ 为垂向补给强度 (m/d)； $W(x, y, t)$ 为垂向排泄强度 (m/d)； Z 为含水层底板标高 (m)； $H(x, y, t)$ 为地下水待求水位 (m)； $H_0(x, y)$ 为渗流场内初始水位值 (m)； $H_1(x, y, t)$ 为第一类边界水位值 (m)； $q(x, y, t)$ 为第二类边界的单宽流量 (m³/d)； \bar{n} 为第二类边界内法线方向单位向量； Γ_1 和 Γ_2 为第一类和第二类边界； G 为计算区范围。

本数学模型属非均质潜水非稳定数学模型，其泛定方程是非线性二阶偏微分方程，又具有混合边界和不规则解域，无法求其解析解，故采用不规则网格有限差分法进行模拟计算。

六、情形一

本情形是指：十里河工程建成后，上库作了防渗处理，上下两个水库全部蓄水，水库水位升高2米时，并当遭遇洪水时可能出现的情况。由于本地区历史上

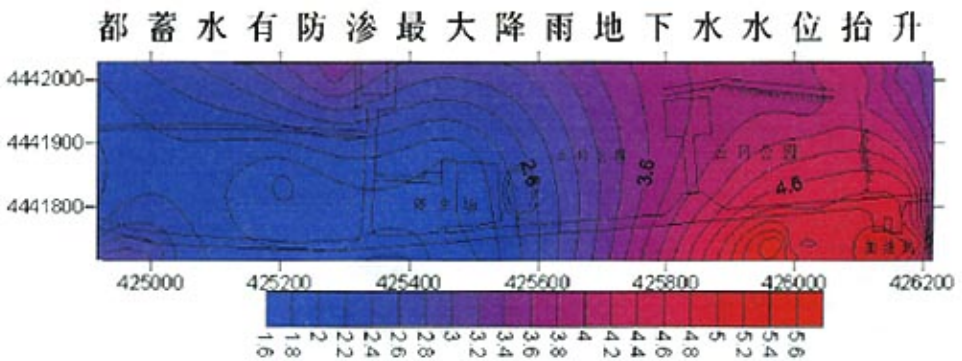


图 3.5 在情形一条件下，地下水水位抬升幅度等值线图

Fig3.5 The raised extent of groundwater surface in case No.1

最大一次降雨达到 900mm/a，本情形按此降雨量进行模拟。

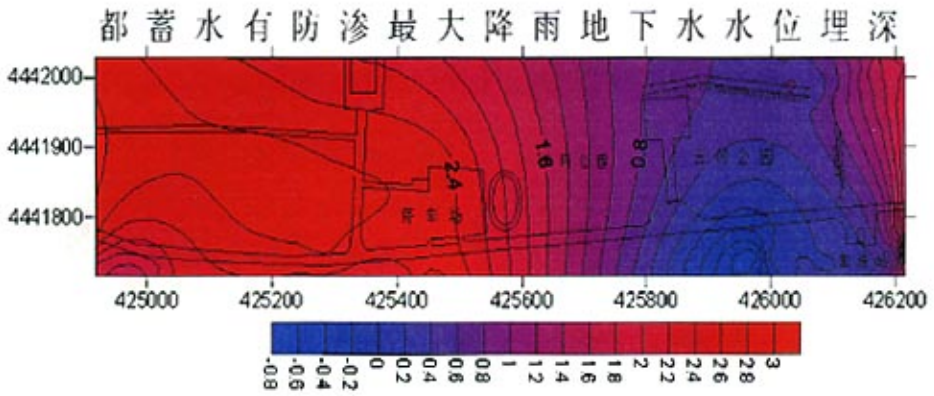


图 3.6 在情形一条件下，地下水水位埋深等值线图
Fig3.6 The buried depth of groundwater surface in Case No.1

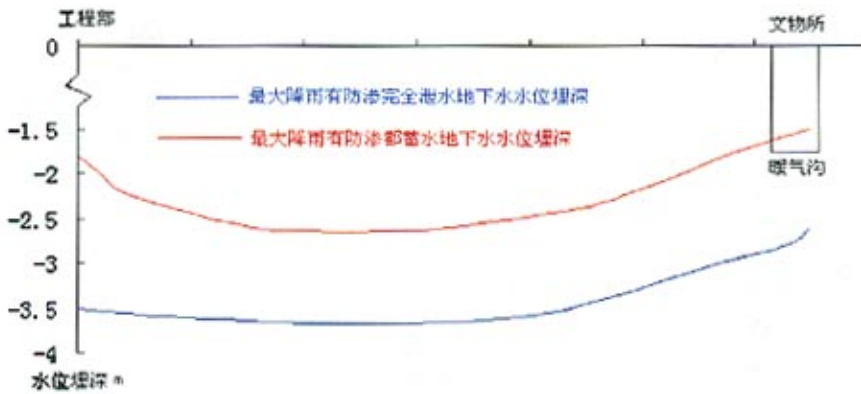


图 3.7 在情形一下工程部-文物所剖面上地下水埋深对比图
Fig 3.7 A comparison diagram between the depth of groundwater surface in Case No.1

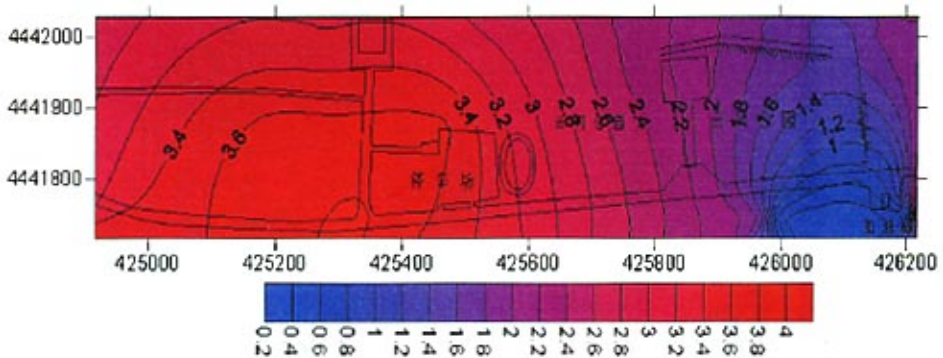


图 3.8 情形一遭遇洪水但水库完全泄水时地下水水位埋深等值线图
Fig3.8 The buried depth of groundwater surface in Case No.1
while flooding and no storage in the watershed storage

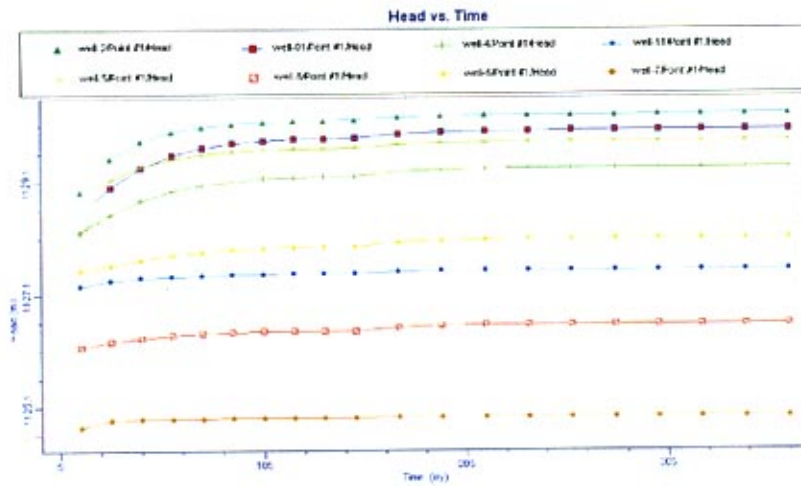


图 3.9 地下水水位达到平衡所需时间
Fig3.9 The height of water head changing with time

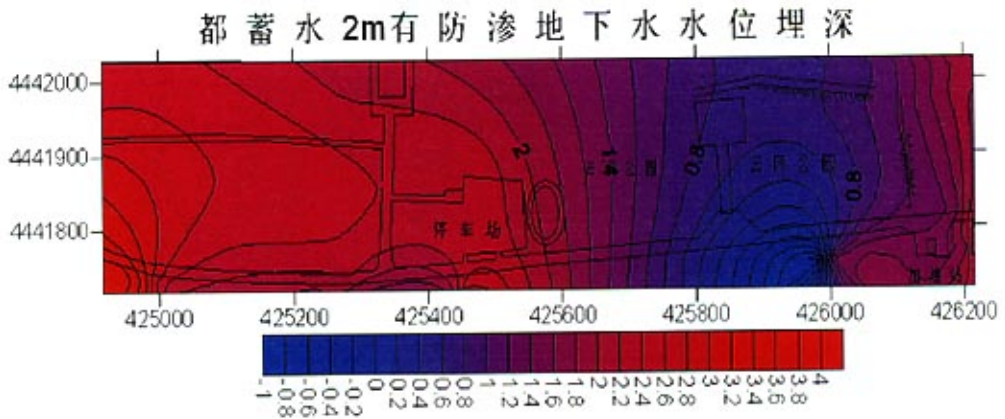


图 3.10 情形二情况下，地下水水位埋深等值线图
Fig3.10 The buried depth of groundwater surface in Case

表 3.2 抽水方案

Table 3.2 The scheme of pumping

抽水井编号	抽水量 (m ³ /d)
pum-1	200
pum-2	200
pum-3	230
pum-4	230
pum-5	400

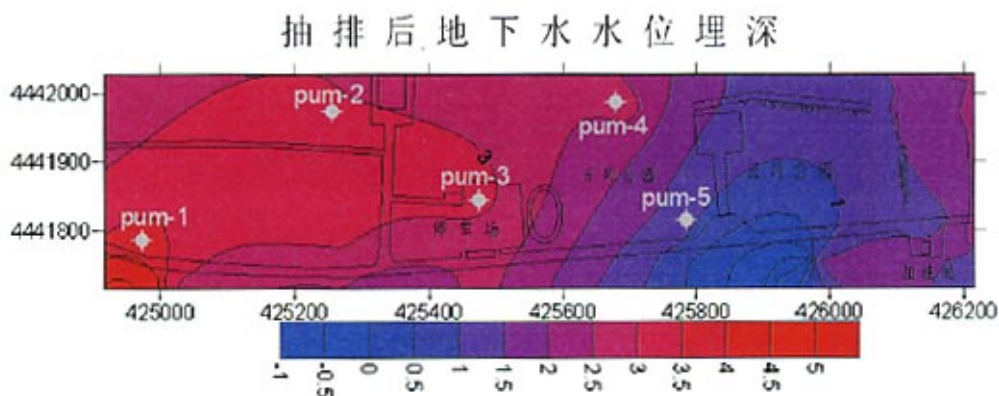


图 3.11 实施抽水方案后地下水水位埋深等值线图
Fig3.11 The buried depth of groundwater surface after pumping

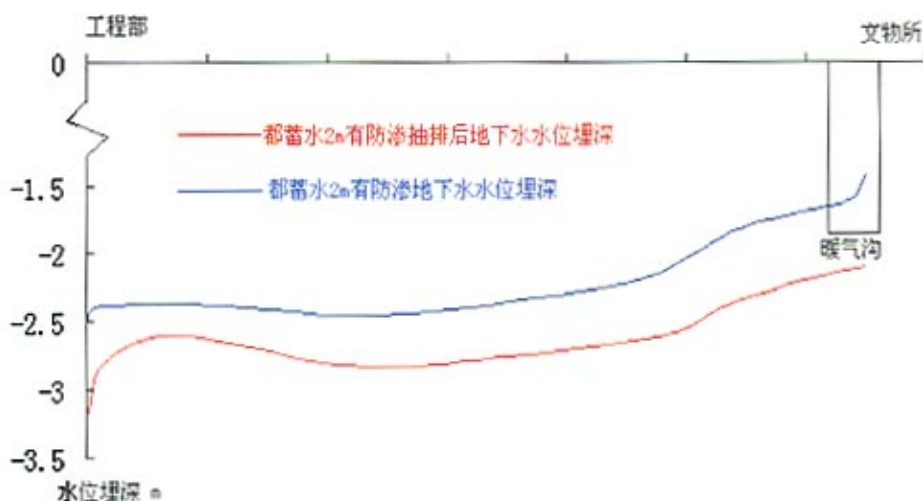


图 3.12 实施抽水方案前后地下水水位埋深对比图
Fig3.12 A comparison of the buried depth of groundwater surface before and after pumping

在文物所西侧至云冈中学一线以东的地区，水位埋深小于 1.6 米，必然会对文物所地下建筑物构成威胁。特别是文物研究所的暖气沟地面标高尚低于大门口，沟深约 1.8 米，因此，暖气沟中必将会有地下水出露。如果果然出现上述结果，山西云冈石窟文物保护研究所是不会接受的。那么如何解决这个问题，既使得水库可以蓄水，而文物研究所等的地下建筑也不会不遭致破坏呢？另外，本地区的地表植物也不应因地下水水位降低而死亡。

为此，我们设计了一个抽水方案。共设计了 5 口抽水井，井位见图 3.11，每口井的抽水量见表 3.2。

经过两个月的抽水，地下水位可达到平衡，其埋深等值线图见图 3.11。由图可见，通过抽水，可使地下水水位埋深大幅下降（图 3.12）。从停车场至文物研究所一线以西地区，地下水水位埋深全部大于 2m，可保证整个风景区内地下建筑物的安全。

同时，我们还设计了一个埋设地下排水管道的方案，管道布设在十里河北岸，马路南侧处，起始点从一号坝至永胜加油站北侧。埋设深度从一号坝北侧 5m 至加油站自然出露。

模拟显示：水库给整个片区的贡献为 $1.2 \times 10^7 \text{m}^3/\text{y}$ ，排水管道年总排水量为 $1.34 \times 10^7 \text{m}^3/\text{y}$ 。

地下水位达到平衡时，其埋深等值线图见图 3.13。由图可见，通过管道排水，可使地下水水位埋深大幅下降（图 3.14）。从停车场至文物研究所一线以西地区，地下水水位埋深全部大于 2m，尤其停车场一带地下水水位埋深达到 4.5m，这样可保证整个风景区内地下建筑物的安全。同时，在云冈公园地下水水位埋深在 1.5m 左右，这个深度既有利于植被的发育生长，又能够保证足够的生态用水。

埋管蓄水 2m 地下水水位埋深

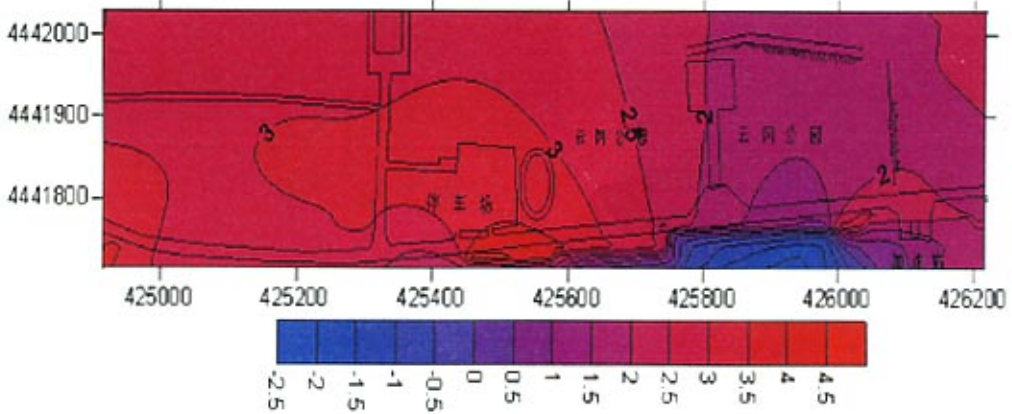


图 3.13 实施埋管排水方案后地下水水位埋深等值线图
Fig3.13 The buried depth of groundwater surface after burying pipe

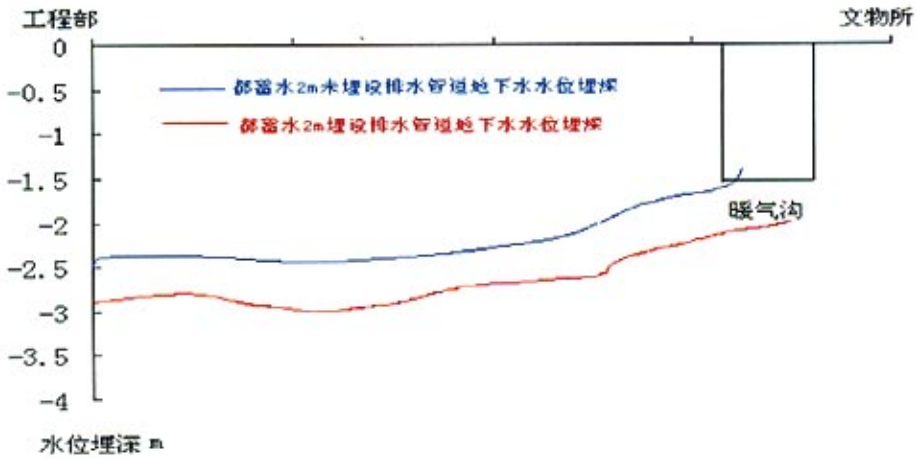


图 3.14 实施埋管排水方案前后地下水水位埋深对比图

Fig3.14 A comparison of the buried depth of groundwater surface before and after burying pipe

八、若干可采用的蓄水方案

除了上述抽排和埋设排水管方案外，本项目还模拟了几种特定的蓄水方案，以了解不同蓄水条件下地下水水位的变化情况。这些方案包括：

- 方案一：上库蓄水 2.5m，下库蓄水 1.6m；
- 方案二：上库蓄水 2.5m，下库蓄水 1.4m；
- 方案三：上库蓄水 2.0m，下库蓄水 1.6m；
- 方案四：上库蓄水 2.0m，下库蓄水 1.4m；
- 方案五：上库蓄水 1.6m，下库蓄水 1.4m。

图 3.15 是上述五种蓄水方案时的模拟结果。由图可见，水库建成后，当地地下水水位的埋深主要取决于下库的蓄水高度。当下库蓄水高度为 1.6m 时（方案一和三），文物所暖气沟中将有地下水出露。而当下库蓄水高度为 1.4m 时（方案二、四和五），地下水水位将维持在一个较低的水平。为了使得水库可以尽量多的蓄水，建议在通常情况下应采用第二种蓄水方案。

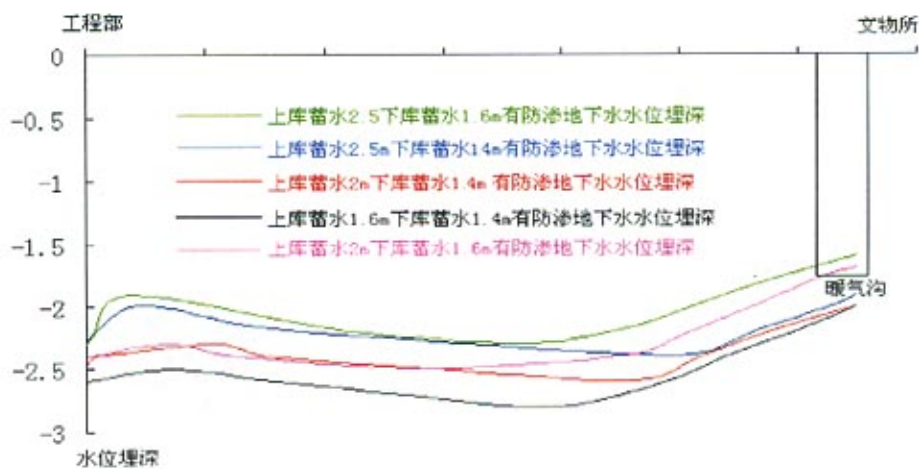


图 3.15 不同蓄水方案时，地下水水位的对比图

Fig 3.15A comparison of the groundwater surfaces in different ponding scheme

第4章 十里河工程对小气候和文物保护的影响

第4.1节 定性研究

影响石窟雕像风化腐蚀的气象因素包括：气温（包括常年平均气温、最高温度及其出现的时间和持续时间、最低气温及其出现时间和持续时间）、湿度（包括常年平均湿度、最高湿度及其出现的时间和持续时间、最低湿度及其出现时间和持续时间）、风速（包括常年平均风速、最高风速及其出现的时间和持续时间、最低风速及其出现时间和持续时间）、风向（常年主导风向、分月主要风向、风速最大及最小时风向）、混合层高度、逆温发生频率及发生时间、日照资料（最大日照时间、最小日照时间及其出现的时间、平均日照时间）、气压、以及云蒸发量等。

十里河工程形成的水体，其辐射性质、热容量和导热率不同于陆地和原来相对干涸的河谷。库面将改变当地地球表面与大气间的热交换，使库区附近气温得到调节，水库及其附近的气温“日较差”和“年较差”变小。其次由于陆面转化为水面，也改变了与大气间的水分交换。库面加强了水分蒸发，使库区附近空气湿度增加，从而影响降水量的变化。一般情况下，夏季由于水面较凉，气层稳定，库区云和降水减少。冬季由于水面较暖，气层较不稳定，云和降水增多。在下风方向，由于气流湿润，降水机会增多。因此，工程的建设在整体上可以减缓本地区温度和湿度的波动范围，对石窟文物的保护或能起到积极作用。

十里河工程会还对其周围气候变化起到一定的调节作用，但其影响范围一般不大。岸上水平方向最大不超过 2km，垂直方向不超过 400m。水体在减缓气候变化影响方面，至少起两个主要作用：在温室气体（尤其是碳化合物）管理方面的作用；在物理上缓冲气候变化影响方面的作用。位于我国北方其温室气体管理方面的作用较小，因此缓冲气候物理（温度、湿度、降水、风速、水汽压及雾日等）变化成为其主要影响作用。

目前国内外在水利工程对文物保护影响方面的研究仍然是一项空白，尚无明确的研究数据资料。本论文主要从十里河工程对周围气候的影响变化以及空气污染情况方面入手进行探讨和研究。

一、对气温的调节作用

由于水面对太阳辐射的反射率小，透射率大，水面获得的辐射能量比陆面多，而且通过传导和对流将热量贮存于深层水体，起到“热汇”作用；冷却时，它又能通过水下的湍流交换和水面辐射交换及蒸发将热量送回到邻近空气，起到“热源”作用。因此，水域上方气温变化缓慢。

根据国内现有水域气候资料现实，水体对周围气温具有一定的调节作用，但是影响范围不大。水体周围年平均气温变化不超过 2°C ，冬春季月平均气温可增高 $0.3\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。夏季月平均气温可降低 $0.9\sim 1.2^{\circ}\text{C}$ ；极端最高气温可降低4度左右，极端最低气温可增高 3°C 左右；夏季相对“凉快”，冬季相对“暖和”，初霜推迟，终霜提前，无霜期平均延长约20天左右。

二、对空气湿度和降水的调节作用

十里河工程将使得水面上蒸发旺盛，空气湿度增加。但由于水温升温缓慢，水域上方空气稳定，年降水量和云量都减少，雷雨云都沿水域周围移动，强雷暴(如冰雹等)过程越过水域时，强度也减弱，待越过水域一定距离后又逐渐加强。

前人研究成果表明，水域周围年平均水汽压增加 $200\sim 100\text{Pa}$ ，冬季水汽压增加较少，仅增加 $20\sim 30\text{Pa}$ ；夏季水汽压增加较多，增加 $120\sim 180\text{Pa}$ ；春秋季节介于两者之间。

三、对风速的影响

由于地表水体的热力特性，使水体附近气温的日、年变化均较小；由于水陆之间的热力差异，使得水域沿岸形成一种与海陆风相似的“湖陆风”。白天，风从水面吹向岸上；夜间，风从岸上吹向水面；由于水面的光滑，摩擦力小，而使风从陆面吹向水面时，风速会增大。由于这种局部环流的存在，使水域与周围陆地之间的热量、水汽的水平交换加强，有效缓解了水域周围气候的变化。有资料显示，新建水库水域平均风速比建库前增加 $15\%\sim 25\%$ 。

综上所述，建设十里河工程将会对周围气候产生一定的影响，云冈石窟离十里河工程的水平距离大约为400m，正位于其影响范围内。因此，需对该工程的影响情况进行评估。

第 4.2 节 定量研究

一、主要影响因素

工程影响空气湿度的主要因素包括：水汽压和相对湿度。大气中水汽的含量虽然不多，却是大气中极其活跃的成分，在天气和气候中扮演着重要的角色。

水汽压 (e) 是大气压力中水汽的分压力，和气压一样用百帕来度量。以前气压和水汽压常以水银柱的毫米数来测度， $100\text{Pa}=0.75008\text{mmHg}$ 。在一定温度下空气中水汽达到饱和时的分压力，称为饱和水汽压(E)。饱和水汽压随着气温的升高而迅速增加。

绝对湿度(a)指单位体积湿空气中含有的水汽质量，也就是空气中的水汽密度，单位为 g/cm^3 或 kg/m^3 。绝对湿度不容易直接测量，实际使用比较少。如果水汽压的单位为百帕，绝对湿度的单位取 kg/m^3 ，则两者关系为：

$$a = \frac{2.167e}{T} (\text{kg}/\text{m}^3)$$

式中 T 表示温度。

相对湿度(f)指空气的水汽压 e 与同一温度下的饱和水汽压 E 之比，以百分数表示是：

$$f = \frac{e}{E} \times 100\%$$

相对湿度的大小表示空气接近饱和的程度。当 $f=100\%$ 时，表示空气已经达到饱和；未饱和时， $f<100\%$ ；过饱和时 $f>100\%$ 。相对湿度的大小不仅与大气中水汽含量有关，而且还随气温升高而降低。

水汽压的大小与蒸发的快慢有密切关系，而蒸发的快慢在水分供应一定的条件下，主要受温度控制。白天温度高，蒸发快，进入大气的水汽多，水汽压就大；夜间出现相反的情况。这基本上是由温度决定的。

一般地，在海洋或大陆上的冬季，每天有一个最高值出现在午后，一个最低值出现在清晨。但是在大陆上的夏季，水汽压有两个最大值，一个出现在早晨 9~10 时，另一个出现在 21~22 时。在 9~10 时以后，对流发展旺盛，地面蒸发的水汽被上传给上层大气，使下层水汽减少；21~22 时以后，对流虽然减弱，但温度已降低，蒸发也就减弱了。与这个最大值对应的是两个最小值，一个最小值发生在清晨日出前温度最低的时候，另一个发生在午后对流最强的时候。

相对湿度的大小，不但取决于水汽压，还取决于温度。气温升高时，虽然地面蒸发加快，水汽压增大，但这时饱和水汽压随温度升高而增大得更多些，使相对湿度反而减小。同样的道理，在气温降低时，水汽压减小，但是饱和水汽压随温度下降得更多些，使相对湿度反而增大。所以相对湿度在一天中有一个最大值出现在清晨，一个最低值出现在午后。

水汽压的年变化和气温的年变化相似。最高值出现在7~8月，最低值出现在1~2月。相对湿度因为与水汽压和温度都有关系，年变化情况比较复杂。一般情况下，相对湿度夏季最小，冬季最大。但是在季风气候地区，冬季风来自大陆，水汽特别少，夏季风来自海洋，高温而潮湿，所以相对湿度以冬季最小，而夏季最大。不过湿度的年、日变化，实际上比较复杂。因为除温度以外，各个地方地面干湿不同，蒸发的水分供给有很大差异。对流运动使水汽从下层向上层传输，使低层水汽减少，上层水汽增加，也会影响湿度的日变化。气流的性质也有很大影响，夏季低纬度海洋来的气流高温高湿，冬季高纬度大陆来的气流寒冷而干燥，也会影响湿度的年、日变化。

二、研究方法

空气湿度变化的影响因素较多，一般来说主要有当地气温、降水、气压、地面水体及植物蒸发、风速风向、地形特征等。大同市十里河工程建设后，在其他因素确定情况下，其水域空气水汽压的变化应与水面的蒸发量成线性关系，即：

$$e = kq$$

式中 k 为折算系数； q 为水面蒸发量。

折算系数受到当地气温、风速风向、水汽传质等因素的影响，应在工程当地进行较长时间的跟踪检测，采用数学统计方式来确定。

然而水库水面蒸发测量技术难度极大，目前所能达到的量测精度依然不高，加上因财力的限制，我国水库水面蒸发观测站点稀少；致使水库水面蒸发量的确定至今仍很困难。目前我国各地采用的水库水面蒸发量确定方法，主要有器测折算法和模型计算法两种。

器测折算法分两种类型：一种是在水库内设置了漂浮蒸发器，将漂浮蒸发器观测的蒸发量折算成水库自然水体的水面蒸发量；另一种是无漂浮蒸发观测，而只有陆地蒸发观测，它需将陆地蒸发器(或蒸发池)观测的蒸发量，折算成水库自然大水体的水面蒸发量。一般认为漂浮蒸发器所处的气候环境(水域气候)、周围

下垫面条件、近地面层空气非均匀性影响均较陆地蒸发器(或蒸发地)更接近水库自然大水体,故对漂浮蒸发器测得的蒸发量进行适当的修正(折算),可较好地代替水库自然大水体的水面蒸发量;将陆地蒸发器观测的蒸发量,折算成水库自然大水体的水面蒸发量,因折算系数的空间变异很大,且受微地形严重影响,异地移用误差较大。

气候模型计算法是无漂浮蒸发观测的水库进行水面蒸发量计算的常用方法,一般是将附近的气象观测资料,代入移用的计算模型中,求出水库月、年水面的蒸发量。

水面蒸发计算模型因子的选择,应根据水面蒸发的物理机制,围绕所选因子能否客观地反映维持水面蒸发过程及其时空差异的基本原则,选取备用因子;再对备用因子进行逐个试验和筛选,以选出对水面蒸发起关键作用的几个因子,作为模型因子。而选择适当的气象要素作为水面蒸发计算模型的因子,是一条行之有效的途径。用以反映空气热力学特性的气象要素有水温、气温、水气温差等;用以反映空气动力学特性的气象要素有气压、风速等。相对湿度、饱和差及饱和水汽压差是描述空气饱和状态和湿度梯度的气象要素,它们在一定程度上反映了空气的稳定状况,故也可视为反映空气动力学特性的气象要素。目前国内外绝大多数水面蒸发计算模型是以温、湿、风为因子建立起来的,但不同的学者采用的方式不同。目前采用的计算模型主要有道尔顿模型和彭门模型。

1、闵騫一道尔顿模型计算法

闵騫在道尔顿模型中引入了饱和水汽压函数、水气温差、相对湿度及风速函数等模型因子,对单因子模型道尔顿模型 $E/\Delta e = f(W)$ 进行扩展,提出了多因子

水面蒸发模型,即:

$$E/\Delta e = f(\Delta T, r, W)$$

式中 E 为水面蒸发量; Δe 为饱和水汽压差; ΔT 为水气温差; r 为相对湿度; W 为风速函数。

(1) 水气温差函数

在超温水体水面蒸发量计算中,水气温差一般使用幂函数形式,自然水体作为超温水体的一种特例(无热水进入),也可使用同种形式的水气温差函数。故令

$$g(\Delta T) = \alpha + \beta \Delta T^\delta,$$

式中 ΔT 为自然水体表面水温 t 与水面以上 150cm 高度处的气温 T 的差值； α 、 β 和 δ 为特定系数。

(2) 相对湿度函数

令 $E = \Delta e \phi(r)(i + jW)$ ，则 $\phi(r) = E[\Delta e(i + jW)]$ ，其中的 i 、 j 通过 $E/\Delta eW$ 相关分析确定， r 为水面以上 150cm 高度处的空气相对湿度，以小数表示。

(3) 风速函数

从理论上说，风速是影响水面蒸发的重要气象因素，但在建模中是最难以模拟的。各地在建立单站水面蒸发量经验公式时，普遍有此反映。在道尔顿模型中，风速函数 $f(w)$ 一般使用线性函数 $f(W) = A + BW$ 或幂函数 $f(W) = A + BW^n$ ，其中幂指数 n 有 2.0、0.85、0.76、0.5 等几种。

2、热量平衡计算法

由于诸多因素的影响，目前人们对水体的实际蒸发量还难以直接可靠地测定，于是借助水量平衡方程利用降水与径流资料确定蒸发量，就成为水资源工作者常采用的一种途径。但水在其三态转换时，总是有热量的吸入或释出。因此蒸发与地面上的热量平衡有着十分密切的关系，实质上，蒸发过程是一个太阳净辐射的能量转化过程，而这一转化过程又受到某些气象因素的影响。因此，依据能量观点，利用气象资料确定蒸发量，是以蒸发成因为基础的新方法。热量平衡计算模型是从热量平衡角度出发，提出的一种利用一般气象观察资料确定蒸发量的方法。

晋华根据彭门公式结合气候影响因子，提出了热量平衡计算模型。

$$E = \frac{Q_R + Q_H}{L(1 + a/b)}$$

式中 Q_H 称为感热方量，其值可用以下彭门经验公式计算。

$$Q_H = 2.63L \frac{a}{b} (e_{sa} - e_a)(1 + 0.54V)$$

式中 $(e_{sa} - e_a)$ 为观察高度上的饱和差； V 为观察高度上的风速； L 为汽化参数，

$L = 597 - 0.57t$ ；其中 t 为气温($^{\circ}\text{C}$)； a 、 b 为与气压、观察高度汽温及饱和水汽压有

关的参数, $a = 0.380 \frac{P}{L}$, P 为气压; $b = (\frac{6463}{t} - 3.927)P$ 。

辐射平衡值 Q_R 可用 $Q_R = (1-b)(0.248 + 0.752S)Q_0$ 来计算, 其中 S 为日照百分率; Q_0 为晴空条件下的总辐射值; 若令

$$E_c = \frac{QR}{L(1+a/b)}; E_a = \frac{Q_H}{L(1+a/b)}$$

则热量平衡计算公式可改为: $E = E_c + E_a$ 。

国内外研究实验表明, 道尔顿模型的单站拟合效果较好, 但模型参数的空间变化很大, 异地移用误差较大, 尤其是风速函数为线性函数的 $f(W)=A+BW$ 的道尔顿模型, 异地移用效果较差。原因主要: 一是所采用的风速函数太简单, 难以反映水面蒸发与风速关系的空间差异和变化规律; 二是没有包含能较好地反映不同地区气候差异和不同水体气候效应差异的气象因子。

3、本论文采用的研究方法

本论文采用晋华提出的热量平衡计算模型, 该模型在山西等地进行了多年的实测检验, 证明数据拟合较好, 结果误差小, 可以获得令人满意的数据结果。

蒸发量根据当地气象数据和十里河工程资料可以进行测算。当地气象资料: 年平均气温 $7\sim 10^{\circ}\text{C}$, 一月份最低, 月平均气温 -11.4°C , 七月份最高, 月平均气温 23.1°C ; 年平均降雨量 423.8mm , 雨季集中在 $7\sim 9$ 月份, 月最高降雨量达 100mm 以上; 年平均蒸发量 1748mm , 其中六月份最大蒸发量为 801.8mm , 十二月份蒸发量为 74.9mm ; 年积雪 20mm 左右, 冻结期为十一月下旬到次年四月, 标准冻结深度 1.5m , 全年无霜期 120 天。采用热量平衡计算模型可预测蒸发量如下: 年平均蒸发量 2010mm , 六月份最大蒸发量为 962.1mm , 十二月份蒸发量为 83.8mm 。

三、研究结果

根据上述计算可知十里河工程建设后, 将会使水域周围蒸发量增大, 相应的必然会造成空气湿度的增加。

表 4.1~4.7 是石窟不同部位空气湿度变化和预测结果的对比表。从上面的对比图表中可以看出, 建设十里河工程之后, 空气湿度有一定的增加, 增加的幅度是随着气候环境的条件而变化的。

表 4.1 五窟前空气湿度变化对比表

Table 4.1 The change of air humidity in the front of Cave No. 5

	03 年 1 月	04 年 1 月	预测 0401	03 年 2 月	04 年 2 月	预测 0402	03 年 3 月	04 年 3 月	预测 0403	03 年 4 月	04 年 4 月	预测 0404
平均值	64.3	55.73	64.08	62.67	62.67	72.07	69.67	45.06	51.81	58.00	49.19	56.57
最大值	77.32	68.20	78.43	84.65	74.48	85.65	87.00	68.04	78.25	86.82	81.75	94.01
最小值	30.81	22.36	25.71	46.87	28.83	33.15	49.88	17.99	20.69	27.78	19.28	22.17

表 4.2 五窟后空气湿度变化对比表

Table 4.2 The change of air humidity behind the Cave No. 5

	03 年 1 月	04 年 1 月	预测 0401	03 年 2 月	04 年 2 月	预测 0402	03 年 3 月	04 年 3 月	预测 0403	03 年 4 月	04 年 4 月	预测 0404
平均值	67.59	58.13	66.85	69.92	61.93	71.22	75.18	58.80	67.62	69.56	62.72	72.13
最大值	77.10	72.22	83.05	90.88	80.60	92.69	90.59	79.01	90.86	91.61	93.61	107.65
最小值	31.30	23.91	27.50	53.87	49.87	57.35	56.87	48.42	55.68	56.97	23.28	26.77

表 4.3 六窟空气湿度变化对比表

Table 4.3 The change of air humidity in the Cave No. 6

	03 年 1 月	04 年 1 月	预测 0401	03 年 2 月	04 年 2 月	预测 0402	03 年 3 月	04 年 3 月	预测 0403	03 年 4 月	04 年 4 月	预测 0404
平均值	60.90	55.11	63.38	57.84	51.71	59.46	63.53	42.33	48.68	52.27	51.42	59.13
最大值	74.32	71.34	82.04	85.81	82.07	94.38	83.73	73.54	84.57	75.50	94.85	109.08
最小值	29.69	20.36	23.41	17.93	21.36	24.56	24.09	19.12	21.99	34.42	17.96	20.65

表 4.4 七窟空气湿度变化对比表

Table 4.4 The change of air humidity in the Cave No. 7

	03 年 1 月	04 年 1 月	预测 0401	03 年 2 月	04 年 2 月	预测 0402	03 年 3 月	04 年 3 月	预测 0403	03 年 4 月	04 年 4 月	预测 0404
平均值	68.75	59.93	68.92	67.66	55.46	63.78	72.52	48.75	56.07	59.86	51.61	59.35
最大值	82.87	72.30	83.15	92.15	84.71	97.42	92.66	73.92	85.01	90.27	82.12	94.44
最小值	32.14	24.63	28.32	51.60	36.62	42.11	53.48	36.86	42.39	44.89	37.53	43.16

表 4.5 十二窟空气湿度变化对比表

Table 4.5 The change of air humidity in the Cave No. 12

	03年 1月	04年 1月	预测 0401	03年 2月	04年 2月	预测 0402	03年 3月	04年 3月	预测 0403	03年 4月	04年 4月	预测 0404
平均值	61.23	52.77	60.69	57.15	41.14	47.31	60.63	37.12	42.68	54.55	51.55	59.28
最大值	72.52	64.81	74.53	81.68	70.47	81.04	81.68	67.83	78.00	74.80	91.98	105.78
最小值	28.96	20.23	23.26	44.55	19.94	22.93	44.19	16.87	19.40	38.33	23.17	26.65

表 4.6 十六窟空气湿度变化对比表

Table 4.6 The change of air humidity in the Cave No. 16

	03年 1月	04年 1月	预测 0401	03年 2月	04年 2月	预测 0402	03年 3月	04年 3月	预测 0403	03年 4月	04年 4月	预测 0404
平均值	73.20	61.80	71.07	68.74	50.49	58.07	71.92	42.38	48.74	62.45	42.65	49.04
最大值	87.22	77.47	89.09	96.81	82.50	94.88	97.81	68.61	78.90	89.78	72.91	83.85
最小值	35.58	22.63	26.02	53.59	28.18	32.41	53.61	28.06	32.27	41.64	27.07	31.13

表 4.7 气象站空气湿度变化对比表

Table 4.7 The change of air humidity provided by weather station

	03年 1月	04年 1月	03年 2月	04年 2月	03年 3月	04年 3月	03年 4月	04年 4月
平均值	72.82	61.45	68.74	50.49	50.96	34.54	60.17	34.79
最大值	92.69	79.56	96.81	82.50	84.80	59.14	94.71	70.18
最小值	34.37	22.02	53.59	28.18	19.04	0.00	16.44	9.89

第 4.3 节 小气候变化对文物保护的影响

在云冈石窟附近，大气的总悬浮颗粒物（TSP）包括由天然污染源和人为污染源释放到大气中直接造成污染的物质，如风扬起的灰尘、燃烧和工业烟尘（参见图 4.1），也包括通过某些大气化学过程所产生的微粒，如二氧化硫转化生成硫酸盐。

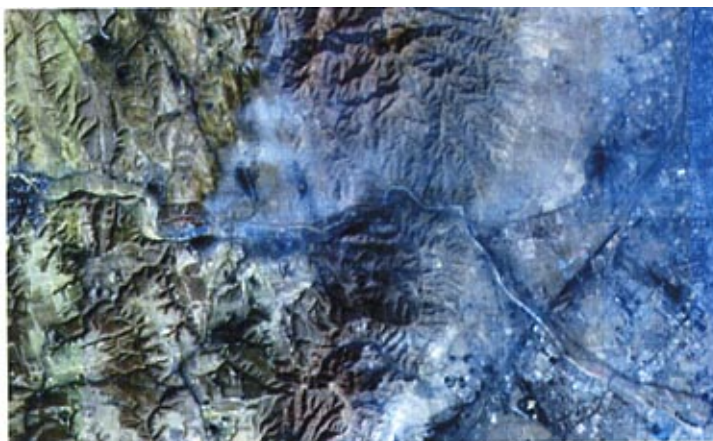


图 4.1 云冈石窟附近大气中的的烟雾影像
Fig4.1 The foggy SPOT image of the studied area

云冈石窟长期受到本地区周边采煤和燃煤的影响，除了空气中煤尘含量较高外， SO_2 含量也较高，并常常形成酸雨甚至酸雪。黄继忠、解廷藩和张莉（1997）测得云冈石窟大气粉尘中 SO_4^{2-} 的浓度离子的浓度与污染较严重的上海市平均值相当，为 $6.15\sim 23.53 \text{ ug/m}^3$ ，并认为 SO_4^{2-} 离子是对石质文物保护的影响最为严重的环境因素之一。云冈石窟石雕的原材料为钙质胶结的粗砂岩，其中的 CaCO_3 容易与 SO_4^{2-} 结合发生化学风化作用形成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。

空气湿度的变化对云冈石窟雕像风化的影响是比较明显的，主要是文物对空气湿度有一定的反应效果。此外由于湿度增加造成酸雨酸雪现象对文物同样会造成相应的损害。文物对湿度的反应主要表现在以下四个方面：

- 大小和形状的变化：石质文物的大小和形状的变化不太明显。
- 化学反应：对石质文物，湿度高时吸水形成含水化合物，部分可溶盐溶解，导致石材性质改变，变得疏松，易于受到水流侵蚀，湿度低时文物释放水分，易于在表面形成龟裂，便于风化现象的发生，一般研究认为，从防止化学反应的角度来说，石质文物适宜的湿度范围为 40~50%，同时高湿度，有利于致酸污染物（二氧化硫等）的转化，易于形成硫酸等腐蚀性物质，对石质文物的损害较大。
- 生物性残损：一般来说，当湿度小于 65~70%时，可以防止霉菌生长，而细菌生长需要更高的湿度。

- 湿度增加对酸雨的影响：云冈石窟紧邻大同煤矿采矿区，工业燃料的燃烧以及运输车辆尾气的排放造成该地区酸雨前体物含量较高，主要为 SO_2 和 NO_2 。这些致酸污染物在高湿度条件下，转化为酸性物质硫酸和硝酸的速度大大加快，有研究结果显示，湿度在 70% 时，二氧化硫的氧化速度比湿度在 40% 快了 30 倍以上，从另一个方面，加快了石质文物的损害。

因此，湿度变化对石窟的影响是两方面的。湿度在 40~70% 的范围内是适合石质文物保存的。从表 4.1~4.7 可以看出：2004 年湿度总体与 2003 年比较，是在减小的，但云冈石窟地区比市区的湿度偏高，一般湿度范围都基本在石质文物的适宜范围内。

第 4.4 节 对大气中金属元素和无机离子含量的影响

本论文采集了十里河工程入口处的采煤废水，在实验室经蒸馏制备，在获得的水样中测得： SO_4^{2-} 离子的浓度为 1.51mg/L， NO_3^- 离子的浓度为 0.18mg/L，这个浓度要高于一般蒸馏水中这两种离子的浓度。

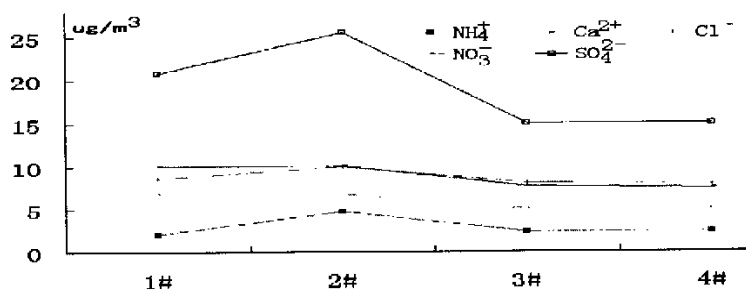


图 4.2 剖面上 5 个典型离子的含量变化曲线图

Fig4.2 The concentrations of 5 typical ions on the profile

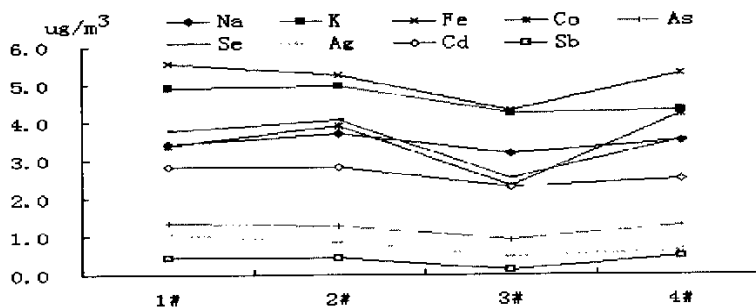


图 4.3 剖面上 9 个金属元素的含量变化曲线图

Fig4.3 The concentrations of 9 elements on the profile

当水蒸气与石雕表面接触时，文物表面的湿度会因此增加。由于从水库中蒸发出来的水蒸气还含有一定数量的 SO_4^{2-} ，可以导致对文物的酸腐蚀，会加快文物的风化。然而，云冈石窟中的 SO_4^{2-} 的来源主要是大气总悬浮颗粒物（TSP），而大气湿度的增加对减少 TSP 的数量有利，而且，适度增加有利于绿化面积的增加，也可减少 TSP 的形成。因此，两者若轻若重，还需要作深入研究。为此，我们进一步在研究区从十里河工程到云冈石窟采集了 TSP 样品 4 件，采样位置分别是：#1，水库中间，公路以南约 50m；#2，民宅内，公路以北约 50m；#3，云冈石窟大门外；#4，石窟前 10m 处。

图 4.2 是 4 个样品的 5 个典型离子的含量变化曲线图。X 坐标为样品号，Y 坐标为离子的含量，单位 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。这 5 个离子的浓度变化有一个共同的特点：在民宅中含量最高，水库之间其次，从民宅向石窟方向有衰减的趋势。注意到#1 和#2 样品的采样点位分别位于大同-左云县公路南北两侧，都距离大约 50 米，因此，受到公路车辆通行造成的扬尘的影响差别不大。而#1 样品中的含量要比#2 样品小，说明十里河工程的建成对减少大气中有害无机离子的浓度是有益的。

另外，测定了 Na、K、Fe、Co、As、Se、Ag、Cd 和 Sb 等 9 个金属元素的含量，见图 4.3。由图可见，Na、Se 和 Co 的变化趋势类似于上述的无机离子的变化趋势；而 Sb、Ag 和 As 的受采样位置影响的变化不明显；Fe、K 和 Cd 则从公路到石窟有下降的趋势。

表 4.8 是上述四个 TSP 样品中无机离子的当量浓度，

$$\text{当量浓度} = \frac{\text{离子浓度}}{\text{总原子量} \times \text{电荷数}}。由$$

表可见，各离子的当量浓度和典型

离子的含量变化相似，说明水库的建成对减少大气扬尘中有害物质的浓度是有益

表 4.8 各离子的当量浓度

Table 4.8 The equivalent concentration of the ions

离子	1#	2#	3#	4#
Na^+	0.76	0.93	0.76	0.79
NH_4^+	2.04	4.67	2.35	2.29
K^+	1.78	1.97	1.62	1.49
Ca^{2+}	6.81	6.71	5.01	4.99
Mg^{2+}	3.63	3.96	2.82	2.96
F^-	0.44	0.34	0.47	0.51
Cl^-	8.61	9.99	8.01	7.86
NO_3^-	10.07	10.1	7.67	7.34
SO_4^{2-}	20.89	25.58	14.91	14.95

的。

由此可见，从 TSP 中有害离子和重金属离子的含量看，十里河工程的建成有利于降低研究区大气中有害物质的含量，对文物保护是有利的。

第5章 结论与建议

一、结论

1、云冈石窟是全人类共同所有的世界文化遗产，在云冈石窟附近所进行的任何工农业生产活动和工程建设，都应考虑到云冈石窟文物的保护工作。十里河工程在云冈石窟景区南侧，其面积将占十里河本段河谷总面积的三分之一，必然会对石窟区的地下水、大气和生态环境等方面产生一系列的影响。因此，对十里河工程对周边环境和云冈石窟文物的影响进行深入研究是十分必要的。

2、前人对云冈石窟文物做了大量的保护工作，地质、煤炭、水利和山西云冈石窟文物研究所等部门在此也作了不少基础地质、水文地质和工程勘察工作，许多作者对气象条件、环境、地质、水文地质、地下水条件和人类活动对云冈石窟文物保护的影响做了很多研究，为本项目的完成提供了大量的可参考资料。

3、十里河工程兼顾了“保持北京上游地区生态平衡和水资源的可持续利用”和“改善云冈石窟风景区的景观条件”，是有其一定的合理性的。一方面，十里河工程的建设，可以大大改善当地的旅游生态环境，提升大同市的城市品位，促进旅游业的发展。另一方面，工程的建设可以影响当地小气候和地下水状态，有利于植被的发育和生态环境的改善，对于改善北京周边地区的生态环境，保持官厅水库上游地区生态平衡和水资源的可持续利用，缓解日趋紧张的北京市供水矛盾是十分必要。

4、十里河在石窟西侧由北向南向北绕行至云冈村以南，再由西向东而行，形成石窟东冲沟-西河谷的态势，所属地貌单元为侵蚀剥蚀高丘陵区。石窟建于砂岩透镜体之中，石雕脚部与十里河谷的垂直高差仅数米。景区的管理部门、文物研究所和云冈公园等的一些地下建筑物的地势更低。特殊的地形地貌和长期形成的建筑格局对十里河工程提出了更高的要求。

5、云冈石窟地处山西中台隆大同—平鲁拗陷区的东北端箱形向斜的轴部，地层走向北东。窟区地层单元组成简单，主要有中侏罗统上部云冈组和第四系中上部冲积-洪积-坡积形成的中更新统、上更新统、全新统。第四系地层与下伏侏罗系地层呈角度不整合接触关系。大同地区为多次构造活动地区，在燕山运动形成的构造断裂系统会遭受喜马拉雅运动的影响，发生不同力学性质作用的迭加

(偶合)或次生充填作用,造成断裂、节理系统力学性质的转化,使节理导水性发生变化。北东向剪切节理和东西向张节理为区内最发育的节理。在河谷和河漫滩,主要发育第四系全新统和中侏罗统上部云冈组。

6、窟区地下水包括孔隙水与裂隙水两种类型。孔隙水包括第四系孔隙水与砂岩孔隙水。第四系孔隙水赋存于第四系地层孔隙中,主要沿十里河河谷两侧分布;砂岩孔隙水是由表面张力或毛细力吸附在砂岩孔隙中的水分。后者可以在湿度梯度、温度梯度作用下迁移或呈气态水形式运动,从而影响石窟文物的保护。第四系粉土层和第四系砂卵石层在河谷和河漫滩广泛发育,两者都属于透水地层,根据现场试坑渗水试验,二者的渗透性差异不大,在进行地下水的计算机模拟时,两者可以看作是同一层。本区为大陆性半干旱气候,十里河是季节性河流,主流流向基本与地层走向垂直,河水补给地下水。近年来,十里河流域缺水少雨,河道长年干涸,目前河水主要为煤矿采煤废水。

7、全区可概化为一个孔隙潜水系统,含水介质为非均质各向同性,具有一类和二类混合边界,地下水为非稳定流,潜水系统地下水运动数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[K(H-Z) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(H-Z) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \varepsilon(x,y,t) - W(x,y,t) = \mu \frac{\partial H}{\partial t}, x,y \in G, t \geq 0 \\ H(x,y,0) \Big|_{t=0} = H_0(x,y), x,y \in G + \Gamma_1 + \Gamma_2, t \geq 0 \\ H(x,y,t) \Big|_{\Gamma_1} = H_1(x,y,t), x,y \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ K(H-Z) \frac{\partial H}{\partial \bar{n}} \Big|_{\Gamma_2} = -q(x,y,t), x,y \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{cases}$$

式中, x,y 为空间坐标(m); $K(x,y)$ 为渗透系数(m/d); μ 为潜水给水度; t 为时间变量(d); $\varepsilon(x,y,t)$ 为垂向补给强度(m/d); $W(x,y,t)$ 为垂向排泄强度(m/d); Z 为含水层底板标高(m); $H(x,y,t)$ 为地下水待求水位(m); $H_0(x,y)$ 为渗流场内初始水位值(m); $H_1(x,y,t)$ 为第一类边界水位值(m); $q(x,y,t)$ 为第二类边界的单宽流量(m^3/d); \bar{n} 为第二类边界内法线方向单位向量; Γ_1 和 Γ_2 为第一类和第二类边界; G 为计算区范围。

8、作为一个综合治理项目,十里河工程除了防洪蓄水、改善景观条件和废水回用的功能外,还应当兼顾周围植被发育、小气候变化、地下建筑和文物保护的影响。这些数据包括:云冈村民用菜窖的深度在2m左右;山西云冈文物研究所的暖气沟离地表约1.8m;本地区草本植物根系深度可以在0.5~1.0m,人工植树的根系可更深,区内古树根系可深达数米。十里河工程建成后,上库作了防渗处理,上下两个水库全部蓄水,水库水位升高2米时,并当遭遇洪水时,地下水

水位将大幅度上升。此时，文物所、停车场及以西地区的地下水水位埋深小于 1.8 米；在文物所，地下水水位埋深小于暖气沟深度；在云冈公园东部直至研究区东部边缘，地下水水位埋深更浅；地下水几近出露地表。解决办法：当如果遭遇洪水，那么最可能做的事情是把水库的水预先放干。

9、在正常年，如果上库有防渗，下库无防渗，上下库均蓄水 2m，当地下水水位达到平衡时，在云冈石窟大门口和窟区内，地下水水位埋深大于 2.2m。考虑到石窟文物比大门口要高出数米，目前还看不出地下水水位的抬升能对文物本身产生直接影响。但是，由于本地区基岩节理和其他形式的破碎发育，地下水有可能通过毛细作用上升到石雕底部。鉴于该地区地下水水质较差，如果上升到石雕的底部，可能会对石雕产生腐蚀作用，特别是可能破坏石雕的基础。因此，在将来的检测和研究工作中要密切注意这个问题。但在文物所附近，水位埋深小于 1.6 米，必然会对文物所地下建筑物构成威胁。解决的办法是进行人工抽排。但人工抽排不是唯一的解决途径。我们可以通过适当地调整蓄水方案来保证重要的地下建筑物的安全，同时保证水库可以尽量多的蓄水。本项目成果显示，在“上库蓄水 2.5m，下库蓄水 1.4m”的情况下，可以取得较为满意的效果。

10、由于地下水位的整体抬升，本工程完工后，本地区的植被将比现在发育。由于植物可以吸收大气中有害的化学物质，因此，植被的发育将减少对文物表面的侵蚀作用。植被发育还可降低风速以及大气中飞尘的含量，因而也对石窟文物保护有利。

11、由于水体的高吸热容量和放热容量，该工程的建设，会对水域周围的气候产生一定的调节作用，缓和了温度、风速、湿度的变化，可以在一定程度上减缓环境条件剧烈变化造成雕像损坏的现象，这对于文物保护是有利的。从湿度影响文物的三个方面来看，保护文物最佳的湿度范围一般在 40~70%之间。云冈石窟地区的自然湿度就比市区的湿度高，该工程的建设会使大部分月份的周围空气湿度增加，这是其对周围气候影响的主要方面。采用热平衡计算模型，通过蒸发量的变化对湿度变化进行了初步估算预测。对 2004 年 1~4 月份的预测结果显示，十里河工程建设之后，空气湿度会有有一定的增加，湿度增加的幅度是随着气候环境的条件而变化的，既在温度变化不大的情况下，湿度随着蒸发量的增加而增加的，预测结果还显示十里河工程建设之后，在 2004 年的 1~4 月份，湿度都在石制文物的最佳湿度范围内。随着自然降水的增加，自然湿度增加后，湿度与蒸发量的关系不太明确，在高湿度时期（7、8、9 三月份），湿度不会随着蒸

发量的增加而增加，该时段云冈石窟地区的湿度主要是受自然降水的控制的。因为数据有限，由于十里河工程的建设而造成的云冈石窟地区的湿度变化是否会超出石制文物要求的正常湿度范围，还需要进一步的试验监测数据支持。

12、由于该工程的建设导致湿度一定程度的增加及一些含盐物质进入大气后，对致酸污染物的氧化有多大的影响，还没有特别明确的数据支持，但一般的研究成果是二氧化硫等致酸污染物的氧化速度随着湿度的增加而加快。由于十里河工程所蓄水源来自采煤废水，废水中含有大量的硷类及其他盐类物质，这些物质也会随着水蒸气的蒸发散发到大气中，这些物质从理论上来说，对石制文物的风化腐蚀具有催化作用的。但十里河工程的建设究竟导致有多少这些污染物质进入到大气中，对云冈石窟有多大的影响，因为时间的原因，还没有检测数据的支持，尚需要进一步的研究。

二、建议

1、当遇到强降水时，一般只要预先把两个水库放干，并把2号库作为泄洪区即可。

2、建议采取适当的蓄水方案，以保证生态环境的改善，同时不至于对文物造成直接影响。

3、在将来的研究工作中要注意两个方面的研究：一是石窟文物保存的最佳条件；二是注意监控地下水对石雕文物基底的可能破坏，以便及时排除隐患。

4、相关管理部门在工程建设、调试及运行期间应进行一系列的跟踪检测，掌握更多的实测数据资料。经过一段时间的积累后，采用统计分析的方法对湿度计算模式进行进一步修正，准确的预测十里河工程的建设对周围环境的具体影响，从而更加有效的对云冈石窟文物进行有效的保护。

5、应加大对石窟区空气环境的治理力度，减少空气中酸雨前体物二氧化硫等污染物的含量，降低十里河工程的不利影响。在污水进入十里河工程前，进行必要的处理，去除水体中的大部分污染物质，以免这些物质通过蒸发进入大气，加速二氧化硫等致酸污染物的转化，减少这些物质对云冈石窟的不良影响。

三、说明

由于目前所能掌握的资料很少，工程竣工的时间还尚短，虽然做了许多实测工作，也利用了大量前人测量资料，但由于主要结论都来自于理论分析和计算机模拟。因此，得出的结论还需要得到今后监控资料的验证。

参考文献

- [1] 黄继忠、史变青和解廷藩。云冈石窟大气总悬浮微粒金属元素富集特征及污染源初探。《东南文化》。1999年, No. 2 (总第124期)
- [2] 周尚忠。仿自然条件对云冈石窟风化的研究(大同市环境监测站,山西 大同 037006)
- [3] 尚剑宝,上官学兵. 2003. 山西大同云岗石窟防水保护方案探讨. 山西建筑. Vol. 29(6):75-76
- [4] 黄继忠,张俊芳. 应用电法勘探调查云冈石窟岩体裂隙. 文物季刊 1998 第三期. 86~90
- [5] 黄继忠、史变青和解廷藩等, 1998. 云冈石窟大气粉尘中金属离子的分析. 雁北师院学报. Vol114(2), 21~24
- [6] 黄继忠,解廷藩和张莉,云冈石窟大气粉尘中无机离子的分析. 文物季刊 1997 第三期. 86~90
- [7] 屈建军,张明泉。敦煌莫高窟岩体盐风化过程的初步研究。地理科学。1996(2)37-42。
- [8] 汪东云,张赞勋,付林森,姚金石,谢本立。大足北山典型石窟风化产物化学特征及其破坏作用。地下空间。1994年02期 130-137。
- [9] 屈建军,凌裕泉,张伟民,王旭东。敦煌莫高窟大气降尘的初步研究。文物保护与考古科学, 1991年03期
- [10] 付林森,汪东云,姚金石,谢本立。北山石窟风化产物可溶盐形成的水文地球化学机理张赞勋工程勘察。1996年02期 37-42
- [11] 屈建军,张伟民,王远萍,戴枫年。敦煌莫高窟岩体风蚀机理及其防护对策的研究中国沙漠, 1994年02期
- [12] 汪东云,张赞勋,付林森,姚金石,谢本立。宝顶山石窟岩体风化破坏的作用因素分析 工程地质学报, 1994年02期
- [13] 吉林省博物馆学会编译。博物馆技术。吉林大学出版社, 长春, 1989年第一版

硕士期间发表论文情况

- 1、“十里河工程”对云冈石窟文物保护影响的研究，2005 云冈国际学术研讨会 (INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON YUNGANG STUDIES)，第一作者，国际会议大会发言。(2005 年 7 月 28 日)。
- 2、“十里河工程”对云冈石窟文物保护影响的研究，第一作者，将发表于《文物保护》，2006 年。

致 谢

经过数月的努力，我终于完成了多年学习生活的总结——硕士学位论文。这次论文选题领域涉及到地质学、环境学、大气污染、分析测试、计算机模拟等诸多学科，因此在完成论文过程中不可避免的遇到了很多困难和曲折。如果没有我的老师、同学、家人对我的指导、帮助、鼓励和支持，我会无法达到论文研究的预期目标。因此我要向他们表示诚挚的谢意。

首先要感谢我尊敬的导师陈明研究员。陈老师从论文的选题、基本思路以及研究方法和实验技术等方面对我进行了细致的指导，并提出了宝贵的意见，使我的知识得到了全面的巩固和拓展。“学高为师，德高为范”，硕士三年来，陈老师严谨的科研态度、渊博的学识、敏锐的洞察力以及一丝不苟的工作作风深深地激励和鞭策着我，使我受益匪浅。

其次要感谢山西云冈石窟文物保护研究所黄继忠所长在我撰写论文期间给予了详尽指导，感谢黄怀增老师在我撰写论文期间不厌其烦给予我地质学方面的详细指导，感谢大同水务局程建京经理给我提供了详实的勘测数据资料，感谢国家地质实验测试中心环境室徐清老师给予我有关计算机建模及 **ModFlow** 软件模拟方面的指导，感谢国家地质实验测试中心环境室曹晓娟师姐与我积极探讨课题并帮助我进行计算机软件模拟，感谢吉林大学黄继国老师给予大气研究实验方面的支持与帮助。

最后要感谢我的父母多年来付出无数心血对我的培育。

谨向所有关心和帮助过我的老师、同学及朋友们致以最衷心的感谢！

2006年1月