

# 十里河工程对云冈石窟 文物保护影响的研究

□ 谭科艳 徐清 曹晓娟 黄继忠  
黄继国 程建京 陈明

十里河属于海河流域的永定河上游。为了充分利用采煤废水，改善云冈石窟的旅游观赏性，减少对下游册田水库、官厅水库的污染物输入，保障2008年北京奥运会和北京市的长期用水安全，大同市人民政府和大同市水务局决定，在云冈石窟南大约400米的河道中兴建“十里河工程”。云冈村即位于该工程与石窟之间。十里河工程主要包括河谷中两座相距200米的橡皮坝，形成上下两座水库，蓄水后总库面积约为 $1.7 \times 10^5$ 平方米。当水库蓄满水时，地表水位将升高2~2.5米。水库第一次蓄水后，在云冈石窟文物保护研究所的地下建筑和云冈村居民菜窖中发现有地下水出露。鉴于本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；但是，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。为了实现既改善窟区的旅游观赏性又不影响文物保护，大同市政府和大同市水务局特要求国家地质实验测试中心和云冈石窟文物研究所联合对该工程对文物保护的可能影响进行评价研究。

## 一、研究区水文地质条件概况

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，倾角3°~4°。窟区地层组成简单，主要有中侏罗统上部云冈组和第四系中上部的中更新统、上更新统和全新统。第四系地层与下伏侏罗系地层呈角度不整合接

触关系。受燕山运动和喜玛拉雅运动的影响，研究区内各类岩石的裂隙发育。

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，可分为构造节理和非构造节理两类。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。在河谷和河漫滩，自上而下分别为：第四系全新统、侏罗系云冈组粗砂岩。窟区主要分布有侏罗系中统泥岩层、第四系粉土层、砂卵石层和粉质粘土。

窟区地下水包括孔隙水与裂隙水两种类型，各地层的分布与透水性简述如下。(1)第四系粉土层和砂卵石层：粉土层厚度一般为0.2~6.5米，平均1.5米。砂卵石层平均厚度为2.4米，在西院八字墙西侧可达6.0米，西院围墙内其他区域大部分为2.0~3.0米。砾砂层与卵石层都属于透水地层，渗水试验表明二者的渗透性差异不大，砾砂层渗透系数为 $1.2\sim1.6 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ ，卵石层为 $1.6\sim2.1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 。(2)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1.8~6.6米。渗透系数平均值为 $3.3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 。(3)侏罗系中统泥岩隔水层：分布较广，厚度从20厘米到5~6米不等。(4)侏罗系中统砂岩的隔水性：孔隙率较低，透水性较差。

## 二、十里河工程对地下水水位的影响情况模拟

十里河工程以北至窟区，地下水的主要输入方式为天然输入，包括大气降水入渗、河渠的侧渗补给和侧向迳流的流入。输出方式主要有：大气蒸发和东部侧向排泄。但工程建设之前，尚存在通过十里河河

道直接向南侧的侧向排泄。

水文地质条件的研究成果之一是建立了水文地质概念模型，并概化为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孔隙潜水系统。其潜水系统地下水运动数学模型为：

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

其中， $x, y$  为空间坐标(m);  $K(x, y)$  为渗透系数(m/d);  $\mu$  为潜水给水度； $t$  为时间变量(d);  $\epsilon(x, y, t)$  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<sup>3</sup>/d);  $n$  为第二类边界内法线方向单位向量;  $\Gamma_1$  和  $\Gamma_2$  为第一类和第二类边界;  $G$  为计算区范围。

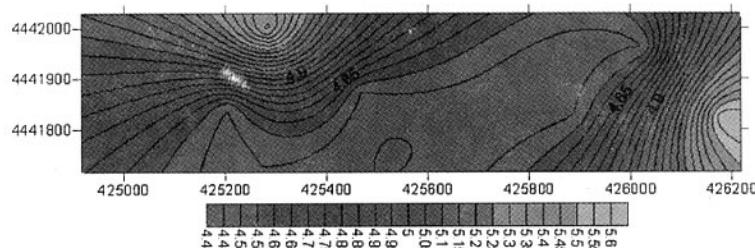
### 三、地下水模拟

#### 1. 不同情况下地下水水位埋深的模拟

本论文采用目前最为普及的地下水模拟软件

ModFlow 软件来模拟工程蓄水前后地下水变化情况，并根据模拟结果提出地下水控制措施。根据十里河工程段的地下水概念模型，模拟参数如下：计算网格为 50 行  $\times$  120 列  $\times$  1 层，单元总数 6000 个。计算单元沿行方向的宽度为 1200 米和沿列方向的宽度为 500 米，计算单元沿层方向的厚度由各分层顶、底板标高确定。通用水头边界：西部为山区补给边界、东部地下水侧向出流边界和南部十里河河段水库边界。隔水边界：研究区北部与云冈石窟山体基岩相连边界。模拟时间为一个水文年。

模拟结果(图一)表明：在工程建设之前(简称情形一)，本区中东部的地下水埋深较浅，深度小于 2.4

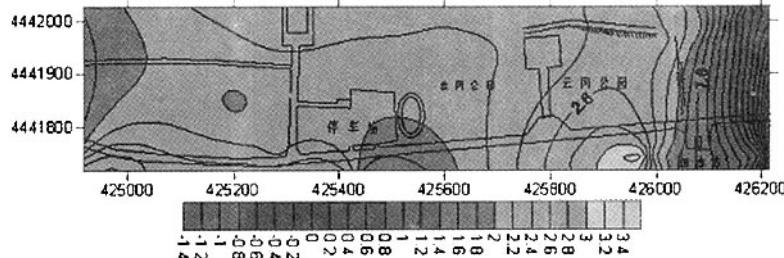


图一 工程建设之前云冈石窟地下水埋深

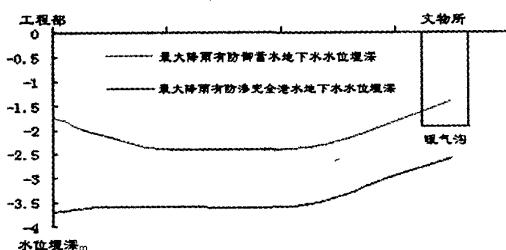
米。而东部边界和云冈石窟一带，地下水水位埋深较深，其他地区水位埋深介于两者之间。在图一中，X 坐标和 Y 坐标为地理坐标，不同的颜色表示地下水水位埋深；水位埋深由浅至深，颜色由蓝至红变化；图中的线条为等深线，数值为深度值(下同)。模拟结果与实际情况是吻合的。根据山西省第十地质工程勘察院的勘察结果，目前十里河河谷的某些地段的地下水位埋深超过 11 米。在云冈村，村民们的地窖深度为 2~3 米，也是干燥无水的。

下面模拟如下情形(情形二)：十里河工程建成后，上库作了防渗处理，而下库不作防渗处理，在上下两个水库全部蓄水，水库水位升高 2 米时，并且遭遇洪水。由于本地区历史上最大一次降雨达到 900mm/a，本情形按此降雨量进行模拟，结果见图二。

模拟结果显示，在情形二条件下，地下水水位将有所上升，最大升幅可达 3.4 米，可造成文物所、停车场及以西地区的地下水水位埋深小于 1.8 米，小



图二 在情形二条件下,地下水水位抬升幅度等值线图



图三 在情形二下工程部-文物所剖面上地下水埋深对比图

于云冈石窟文物研究所的地下建筑的深度;地下建筑物内将有地下水出露(图三)。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:地下水几乎近出露地表。

一般地,如果遭遇洪水,将采取如下措施:预先把水库的水放干。下面我们就模拟这种情况,即:十里河工程建成后,如果上库下部作防渗处理,上下两个水库全部不蓄水,遭遇的洪水量为本地区历史上最大降雨量的三分之二。模拟结果表明,在遭遇洪水时,只要把两库的蓄水实现全部下泄即可保证云冈公园以西的全部地区的地下水埋深全部大于2米,因此对云冈石窟来说是安全的。

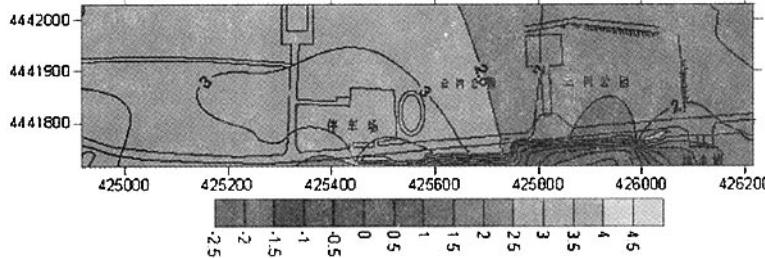
## 2. 一个安全可靠的工程方案

模拟结果还表明,即使是上下两个水库都做了底部和侧向防渗处理,在窟区仍然有地下水水位过高的隐患。为了使得水库可以蓄水、文物研究所等的地下建筑也不遭致破坏,而且不会使本地区的地表植物因地下水水位降低而死亡,我们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5米至加油站自然出露。

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,通过管道排水,可使地下水水位埋深大幅下降(图四)。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2米,尤其停车场一带地下水水位埋深达到4.5米,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1.5米左右,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。

## 四、十里河工程对小气候的影响

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于干涸的河谷。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



图四 实施埋管排水方案后地下水水位埋深等值线图

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2千米，垂直方向不超过400米。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。

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。

十里河工程还将使水面蒸发旺盛，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。

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%~25%。

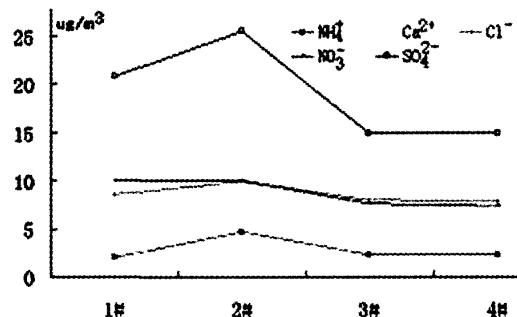
对采自十里河工程入口处的采煤废水进行蒸馏制备，在获得的蒸馏水水样中测得 $\text{SO}_4^{2-}$ 离子的浓度为1.51mg/L， $\text{NO}_3^-$ 离子的浓度为0.18mg/L，高于一般蒸馏水中这两种离子的浓度。当水蒸气与石雕表面接触时，文物表面的湿度会因此增加。而且，由于

从水库中蒸发出来的水蒸气还含有一定数量的 $\text{SO}_4^{2-}$ ，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 $\text{SO}_4^{2-}$ 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。

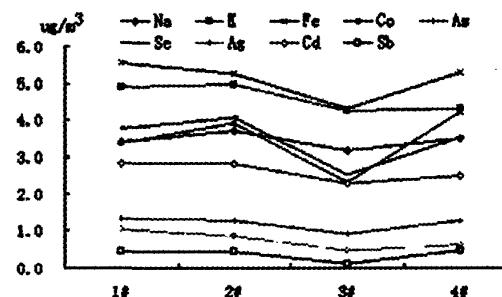
为此，我们进一步在研究区从十里河工程到云冈石窟采集了TSP样品4件，采样位置分别是：#1，水库中间，公路以南约50米；#2，民宅内，公路以北约50米；#3，云冈石窟大门外；#4，石窟前10米处。

图五是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，我们还测定了Na、K、Fe、Co、As、Se、Ag、



图五 剖面上5个典型离子的含量变化曲线图



图六 剖面上9个金属元素的含量变化曲线图

Cd 和 Sb 等 9 个金属元素的含量, 见图六。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 则从公路到石窟门前是有下降的趋势, 可能受公路上行车造成扬尘的影响较大。

## 五、小结

十里河工程的建设对增加云冈石窟景区的观赏性、保护生态环境、减少对下游的污染物输入具有重要意义, 是十分必要的。但在工程建设和水库蓄水中应充分注意地下水水位对文物保护带来的可能影响, 采取适当的措施控制地下水水位, 做到未雨绸缪。

### 主要参考文献:

- 黄继忠、史变青、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年第2期。
- 尚剑宝、上官学兵《山西大同云冈石窟防水保护方案探讨》,《山西建筑》Vol.29(6):75~76页。
- 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年第3期。
- 黄继忠、史变青、解廷藩等《云冈石窟大气粉尘中金属离子的分析》,《雁北师院学报》Vol.14(2), 21~24页。
- 黄继忠、解廷藩、张莉《云冈石窟大气粉尘中无机

(上接 64 页)

牛”、“群仙祝寿”、“延年益寿”、“灵仙祝寿”、“富贵长寿”、“鹿鹤同春”、“鹤立松间”、“龟背翰锦”等吉祥图案, 在“福德祠”、“省分箴”等大型砖雕照壁中也包含有各种喻寿事物。它们雕则造型逼真, 刻则线条流畅, 各具特色, 异彩纷呈。其中以大院大门对面的“百寿图”尤为典型, 整座砖雕照壁的中间书有 100 个篆体“寿”字, 古朴端庄, 形态各异, 一寿变百寿。“百寿图”采用了我国传统造字的“六书”之法, 有的为象形字, 有的为会意字, 有的采自动物类, 如“龟背寿”字, 有的采用植物类, 如“槐叶寿”字等, 形体协调, 浑然天成, 反映了人们祈求长寿的心理状态。这些令人叹为观止的艺术品以艺术审美的形式巧妙地表达出主人的德行志趣和文化品位, 使“寿”文化

离子的分析》,《文物季刊》1997 第 3 期。

- 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 年第 2 期。
- 汪东云、张赞助、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 年第 2 期。
- 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 年第 3 期。
- 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》,《工程勘察》1996 年第 2 期, 37~42 页。
- 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 年第 2 期。
- 汪东云、张赞助、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 年第 2 期。
- 吉林省博物馆学会编译《博物馆技术》, 吉林大学出版社, 1989 年第一版。

(谭科艳、徐清、曹晓娟, 国家地质试验测试中心生物环境地球化学研究室; 黄继忠, 山西省云冈石窟文物保护研究所; 黄继国, 吉林大学资源与环境工程学院; 程建京, 山西省大同市水务局; 陈明, 北京化工大学化学工程学院)

栏目主持 / 赵曙光

走向艺术创造的极致。

“寿”文化可以说是一种渗透于人们生命文化、习俗文化、信仰文化、民居文化、民间艺术而产生的历史沉淀。“寿”在人们的心中已成为吉祥、美好的化身, 成为人们对生命过程进行祝愿的一种文化符号, 而且“寿”文化还将随着时代的变化有更丰富、深邃的内涵。

(作者工作单位: 山西祁县民俗博物馆)

栏目主持 / 米武军