

# 云冈石窟覆盖层特征及其对石窟渗水的影响

董佩,王旭升,万力,钱静

中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083

**摘要** 云冈石窟砂岩山体存在一定厚度的第四系覆盖层,能够起到阻滞降水入渗、减缓石窟渗水危害的作用。覆盖层下部砂砾层透水性强,对阻滞石窟渗水作用不大,而上部的粉土层属于低渗透介质,其厚度是决定石窟存在渗水风险与否的关键。人工入渗试验结果表明,当粉土层厚度小于 0.7m 时,容易导致地表积水快速下渗到砂岩顶部,而其厚度大于 1.1m 可以有效阻滞水分下渗;地表积水可以在具有薄层粉土的地方快速下渗,然后通过侧向渗流影响石窟渗水;植物根管的存在会显著加快水分下渗的速率,因此,云冈石窟山顶应尽可能少植树以降低石窟渗水风险。

**关键词** 入渗;降水入渗系数;地下水;云冈石窟

中图分类号 P641.1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.10.009

## Characteristics of the Overlying Sediments in Yungang Grottoes and Its Impact on Surface Water Infiltration

DONG Pei, WANG Xusheng, WAN Li, QIAN Jing

School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract** The quaternary sediments overlying on the sandstones in the Yungang Grottoes with a certain of thickness are able to slow down surface water infiltration and reduce the damage of the grottoes from water intrusion. The gravel sand layer in the lower part of the sediments is not important because of its high permeability, whereas the upper silty soil layer plays an essential role for stopping infiltration due to its low permeability. The thickness of the silty soil is the key factor. When a surface pond of water exists, based on artificial infiltration test, it is indicated that the water would quickly move to the top of sandstone if the thickness of the silty soil is less than 0.7m, however it could be effectively blocked if the thickness of the silty soil is greater than 1.1m. Surface water could also quickly infiltrate into a thin silty soil and then have influence on the grottoes through lateral seepage. The root canals of plants would significantly speed up the infiltration rate. Accordingly, in order to reduce the risk of water intrusion, planting trees on the top of Yungang Grottoes should not be encouraged.

**Keywords** infiltration; infiltration coefficient of precipitation; groundwater; Yungang Grottoes

### 0 引言

云冈石窟位于山西省大同市西郊,始建于 1500 余年之前的北魏时期,是中国规模最大的古代石窟群之一,是中国悠久而灿烂的古代文化的重要组成部分,也是极其珍贵的文化旅游资源。1961 年,国务院将云冈石窟列为全国重点文物保护单位。2001 年,云冈石窟被录入《世界遗产名录》。

据史书记载,云冈石窟的石雕造像有大小石佛 10 万尊。

但由于自然界各种营力的作用和人为的破坏,目前仅存造像 51000 余尊。其中,自然风化对云冈石窟造成了很大破坏,是石窟保存的最大问题。侏罗统砂岩是云冈石窟的主体基岩,经长期风化作用产生了比较严重的病害,即以粉末状、叶片状、板状、带状等各种形式发生表层结构的松散和脱落。根据前人研究<sup>[1-4]</sup>,水分和盐分的变化是这种石质文物损坏的主要成因。例如,云冈石窟周边的煤矿开采和煤炭运输曾经产生

收稿日期:2012-11-12;修回日期:2013-01-07

基金项目:国家科技支撑计划项目(2009BAK53B02)

作者简介:董佩,博士研究生,研究方向为水-气二相渗流,电子信箱:dongpei1985@126.com;王旭升(通信作者),教授,研究方向为渗流力学和水文模型,电子信箱:wxsh@cugb.edu.cn

含硫粉尘,这些粉尘被大量吸附在砂岩表面,通过水分吸收可以转化成酸性溶液,乃至增加砂岩孔隙硫酸盐的含量,加速砂岩的风化损坏。在风化过程中,盐分只有在水分的参与下才能够发挥作用。借助于水分的迁移和聚散,盐分也发生运移、溶解和结晶等各种变化,从而产生破坏石质材料结构的机械力<sup>[5-8]</sup>。因此,弄清楚石质文物水分的来源和下渗途径,是石窟文物保护的前提工作。

在云冈石窟,侏罗统砂岩并非完全暴露在大气中接受降水的侵蚀,而是大部分隐藏在第四系沉积物下部,降水一般只有先渗入到这一覆盖层,才能对石窟造成影响。尽管从直观上看覆盖层起到了阻滞水分下渗、保护石窟的作用。但覆盖层如何影响石窟渗水,需要多厚的覆盖层才能显著降低石窟渗水的风险,目前还没有统一的认识。本文在近几年对云冈石窟覆盖层进行探查研究的基础上,从场地土壤水运动特征的角度分析这个问题。

## 1 研究区概况

云冈石窟所在的大同地区,属大陆性季风半干旱气候:春季少雨、干旱、风多、风大;夏季温暖,雨量集中。区内多年平均降雨量 423.8mm,大部分集中在 7—8 月;多年平均水面蒸发量 1745.8mm,以 6 月最大;冻结期从 11 月份至翌年 3 月,冻结深度可达 1.5m。

研究区地表水系并不发达。十里河分布于石窟南侧和西侧,为石窟范围内唯一较大的季节性河流,水位约 1126m,比石窟底部低 12~14m,是区域上的排泄基准面;河床坡降为 0.1%~0.2%,一般流量为 0.64~1.03m<sup>3</sup>/s,常年径流均由南北两岸各支流、泉水、降水及矿坑排水补给。冬季冻结,河床冰封至次年 3—4 月方可解冻。

研究区内地层产状近似水平,以侏罗统砂岩分布最为广泛,属于河流冲积相沉积,主要为中粗粒长石-石英砂岩。在厚层砂岩中,含有不完全连续的泥岩夹层。局部地段泥岩夹层厚度大于 1m,延伸长度可达 50m 以上。在石窟的高度范围内(5~17m),往往有 1~2 层延伸空间较大的泥岩夹层,对石窟周边岩体水分运移有很大影响。砂岩顶部覆盖厚度不均的第四系沉积物。

石窟山体地势东北高,西南低。从宏观上决定了地下水自东北流向西南的趋势。窟区地下水的类型包括孔隙水和裂隙水两种。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了储水空间,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;构造裂隙是主要的石窟地下渗水通道,形成交叉裂隙网络使水分直接渗入石窟,局部还可以在砂岩的泥岩夹层上形成上层滞水,成为石窟地下水的补给源。由于地下水位偏低,石窟周边岩体和覆盖物大部分处于厚达 20~40m 的包气带,但在包气带内局部也可能存在由泥岩夹层引起的上层滞水。由于降

水量少、风速大、蒸发强,又有植被蒸腾作用,大气降水的净入渗量不大。在厚层包气带的影响下,地下水的补给微弱且季节性变化不显著。这从钻孔水位年变幅小于 1m 得到反映。地下水主要通过侧向径流的方式向十里河排泄,少量地下水受到泥岩夹层的顶托作用,以泉的方式排泄至石窟边缘。如,2 号窟发育的泉水流量为 1.7~1.9m<sup>3</sup>/d,常年稳定。

经过多年调查研究,认为云冈石窟砂岩表层的液态水可能存在 4 种来源或迁移转化途径:大气降水通过裂隙的下渗、砂岩内残留孔隙水的渗出、地下水的毛细上升以及空气中水汽的凝结<sup>[9-12]</sup>。除了石窟空气中的水汽凝结外,其他水分的根本来源是石窟山顶大气降水的入渗,都会受到第四系覆盖层的影响。

## 2 覆盖层分布特征

石窟顶部的外部主要分布第四系覆盖层。覆盖层厚度可达 9.0m 以上,平均厚度约 3.7m。由于区域地下水位低于窟底,窟顶第四系地层透水但不含水。除大气降水入渗形成的暂时性上层滞水和包气带水外,不存在连续水体形式地下水。该覆盖层具有双层结构,上部为粉土层,下部位砂砾层。

粉土层含粉质黏土、砂质粉土和黄土,厚度一般为 0.2~6.5m,呈北东走向、条带状分布于研究区的中部(图 1)。在石窟顶部的南侧边缘地带,粉土层厚度往往很薄(小于 0.5m),甚至直接暴露砂岩。在明代古城墙及其东西两侧地区,粉土层的厚度可以达到 0.5m 以上,使得 8~16 号窟的后缘山顶有较厚的粉土层覆盖。

位于粉土层下部的砂砾石层,结构并不均匀,混杂中粗砂、细砂乃至粉质黏土。其厚度比粉土层稳定,一般为 1.0~2.5m,但古城墙西侧地区偏厚,可达 6.0m,古城墙所围区域的厚度也可达 2.0~3.0m。

近期在考古探坑中发现,西区和中区石窟顶部的粉土层内包含大量瓦片、砖块等人工堆积物。说明覆盖层受到了较为强烈的人类活动干扰,并不完全是自然沉积而成。具有黏性的土壤能够滞流水分,在植被的作用下把大量水分蒸散消



图 1 云冈石窟山体顶部粉土层厚度分布  
Fig. 1 Distribution of the silty soil layer overlying on the rock mountain top in the Yungang Grottoes

耗掉,对减少降水下渗是有利的。5~9号窟山顶原有建筑场地,粉土层经过了人工处理,结构更加密实、黏性更大,对阻滞水分下渗是有利的。

### 3 覆盖层土壤水动力学特征

#### 3.1 土质特征

在云冈石窟山顶的重点调查区采集粉土样,进行室内实验分析。采用沉降法测定土壤颗粒的级配曲线(图2)。虽然野外判定土样属于粉土,但级配曲线表明,颗粒小于0.075mm的占50%以上,而且颗粒小于0.005mm的占30%以上。说明土样以黏土颗粒为主,在分类上属于粉质黏土。这种黏性土持水性强,而透水性差,能够有效地阻滞降水下渗。

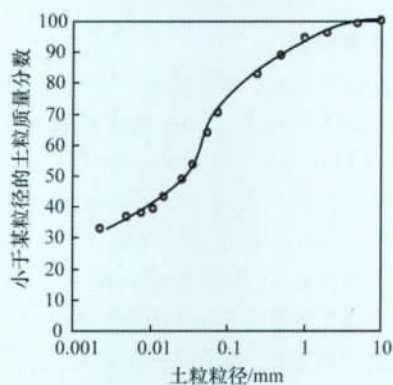


图2 云冈石窟覆盖层粉质黏土的粒径分配曲线  
Fig. 2 Particle size distribution curve of the silty soil cover layer in Yungang Grottoes

分别采用压力膜仪法和张力计法测定了粉质黏土和土质砂砾的水分特征曲线,两者均可以用 van Genuchten 公式(V-G 公式)描述(图3)<sup>[13]</sup>

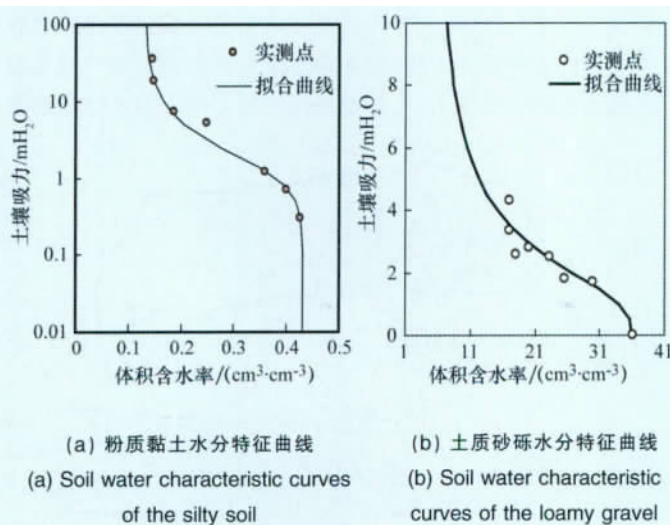


图3 云冈石窟覆盖层土壤水分特征曲线  
Fig. 3 Soil water characteristic curves of the overlying sediments in Yungang Grottoes

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad h \geq 0 \quad (1)$$

其中, $\theta$ 为含水量, $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\theta_s$ 和 $\theta_r$ 分别为饱和及残余含水率, $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $h$ 为毛细吸力, $\text{cmH}_2\text{O}$ ;  $\alpha, n, m$ 为经验参数;  $m$ 和 $n$ 的关系为  $m = 1 - \frac{1}{n}$ 。

另外,通过对渗坑实验的数据进行整理<sup>[14]</sup>,确定了覆盖层土壤的饱和和渗透性系数。粉土层渗透系数为  $6.8 \times 10^{-5} \sim 3.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ,平均值为  $9.6 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ,属于低渗透性土壤;砂砾层渗透系数为  $1.2 \times 10^{-2} \sim 2.1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ ,属于强透水介质。

综合上述土壤测试结果,可以把覆盖层2种土质的土壤水动力学特性总结为表1所示。总体而言,粉质黏土和土质砂砾的含水性和土壤水分特征曲线相差并不明显,但两者的透水性存在显著差异。上部的粉土层透水性很差,能够阻滞降水入渗,而下部的土质砂砾则透水性很强,一旦有水分渗入,则很容易继续下渗,进入到砂岩的风化裂隙带。因此,覆盖层下部的砂砾层对阻滞石窟渗水没有太大作用。

表1 覆盖层土壤水动力学特性  
Table 1 Soil hydraulic characteristic of the overlying sediments

材料	饱和渗透	渗透系数	饱和含	残余含	V-G 模型	
	系数范围	平均值	水率	水率	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$n$
	$/(m \cdot d^{-1})$	$/(m \cdot d^{-1})$	$/(cm^3 \cdot cm^{-3})$	$/(cm^3 \cdot cm^{-3})$		
粉质黏土	0.2~0.8	0.46	0.43	0.14	0.57	2.12
土质砂砾	10~20	13.3	0.36	0.05	0.45	2.7

#### 3.2 水分下渗特征

大同地区夏季经常有暴雨,容易在地面形成积水。如果这些地面积水顺利下渗到覆盖层底部,就容易造成石窟的渗水危害。为了查明覆盖层土壤中水分下渗的特征,本文在一个开挖的植树坑侧面,针对粉土层进行了进行了人工渗水试验。平整地面后,在剖面顶部挖一个断面为三角形的槽,长70cm,宽10cm,盛满水,保持水面与三角形的顶边几乎平齐。剖面高度约53cm,均为粉土,表层含植物根茎。从12:36开始入渗,拍照记录湿润峰面下移过程(图4)。12:43时最大下渗深度达5cm,12:47剖面左侧突然出现跳跃性湿润斑块,上部湿润区有水涌出,确定为灌木根管形成的优势渗漏通道。湿润斑块受到涌水的影响,在1min之内与上部湿润区汇合。渗漏通道的形成可能与左侧顶部残留的一小截灌木茎干有关。12:49时最大深度9cm,12:54最大深度11cm,中部锋面在13:20到达20cm深处。去除植物根管和土质不均匀造成的干扰,提取了稳定性峰面在不同时刻到达的深度(表2)。

依据 Green-Ampt 入渗理论<sup>[15]</sup>,湿润锋面推进深度  $z_f$  与时间  $t$  的关系为

$$t = \frac{\theta_s - \theta_r}{K_s} \left[ z_f(t) - (s_f + H) \ln \frac{z_f(t) + s_f + H}{s_f + H} \right] \quad (2)$$

其中, $s_f$ 为干燥土壤的吸力, $\text{mH}_2\text{O}$ ;  $H$ 为地面积水厚度, $\text{m}$ ;  $\theta_r$

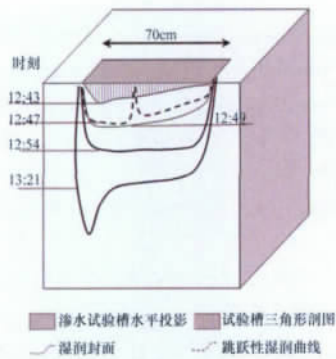


图4 覆盖层人工入渗试验中湿润锋面推进过程  
Fig. 4 Schema of wetting front movement in the artificial infiltration test

表2 人工入渗试验湿润锋面推进记录

Table 2 Data record of wetting front movement in the artificial infiltration test

时刻	$t/\text{min}$	$z_f/\text{cm}$
12:36	0	0
12:43	7	5
12:47	11	9
12:54	18	11
12:55	19	12
12:57	21	13
13:04	28	16
13:10	34	18
13:21	45	20

为初始含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $K_s$  为饱和渗透系数,  $\text{cm}/\text{s}$ 。由此对入渗锋面推进的试验结果进行了分析。根据场地条件, 取已知参数  $H=5\text{cm}$ ,  $\theta_i=0.14$ ,  $\theta_s=0.43$ ,  $K_s=5.18 \times 10^{-5}\text{cm}/\text{s}$ 。由此得到的入渗锋面理论深度与实测结果具有很好的一致性(图5), 并获得  $s_f=3.97\text{mH}_2\text{O}$  和  $D=0.62\text{m}^2/\text{d}$ 。

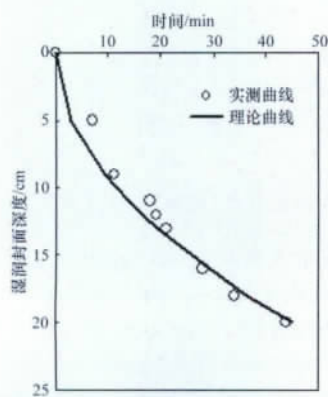


图5 湿润锋面模拟过程与实测值的对比  
Fig. 5 Comparison between observed value and simulated value for the wetting front in the artificial infiltration test

### 3.3 覆盖层对石窟渗水的影响

在云冈石窟这样的半干旱区, 雨季强降雨入渗和春季融雪下渗是地下水获得补给的主要途径。大同地区风力大、蒸发作用强烈, 夏季小雨入渗到粉土层后, 经土壤蒸发和植物蒸腾很快会散发到大气中, 基本不可能引发石窟渗水。而强降雨和冰雪的融化容易形成地表积水, 产生较为持续的土壤水分下渗。这种下渗过程持续 0.5~1d, 就可能到达石窟的顶部, 顺着砂岩裂隙渗入到石窟内部。一般积水数天后, 干燥天气可以重新使土壤水转化为大气水。因此, 12~24h 内入渗峰面在覆盖层的深度是判断石窟有无渗水风险的关键数据。

利用前述 Green-Ampt 入渗理论和人工入渗试验取得的参数, 可以推算地表积水产生的入渗峰面在 0.5d 内到达 0.7m 深度, 在 1d 内到达 1.1m 深度。可见如果粉土层厚度小于 0.7m, 地表积水穿透覆盖层并造成石窟渗水的风险较大, 而如果粉土层的厚度大于 1.1m, 基本不会造成石窟渗水。在众多石窟中, 只有 8~9 号窟和 14~16 号窟的北半部山顶粉土层厚度达到 0.5m 以上, 可以有效地阻滞直接渗水。其他石窟, 特别是东部的 1~4 号窟顶部粉土层很薄, 基本上起不到阻滞渗水作用。尽管绝大多数石窟顶部粉土层厚度小于 1.0m, 但也不能因此就认定渗水风险很大。地面积水的产生还需要有合适的洼地, 石窟顶部所在的山体边缘地带基本上都是斜坡地形, 难以形成积水, 这在很大程度上削弱了雨水的下渗条件<sup>[6]</sup>。

地表积水也可以在其他地方先穿透覆盖层, 聚集在砂岩的顶面, 顺着砂砾层和砂岩的强风化裂隙带流动到石窟所在位置, 产生渗水。B2 勘探孔的东北部和 B1 勘探孔的西北部, 存在粉土层薄弱地带, 有利于雨水下渗, 可能是这种侧向运移水分的来源区。

当然, 上述粉土层厚度的关键数据并不适用于所有地点。植物根管较发达的地方, 根据图 4 所示的观测试验, 根管可以形成快速下渗通道, 因此大量根管存在情况下即使粉土层很厚也无法阻止水分的快速下渗。根据实际调查, 云冈石窟灌木丛的根系深度可达 30cm, 而乔木的根系深度可达 60cm 甚至更深。无根管扰动的粉土层有效防渗厚度要达到 0.7m, 如果把根层考虑进去, 则在灌木丛和乔木地带粉土层的有效防渗厚度需要增加到 1.0m 和 1.3m 时, 即使粉土层很厚也无法阻止水分的快速下渗。因此, 在云冈石窟山顶应尽可能减少植树以减轻石窟渗水风险。

## 4 结论

云冈石窟砂岩山体存在一定厚度的第四系覆盖层, 能够起到阻滞降水入渗、减缓石窟渗水危害的作用。这个覆盖层具有双层结构特征, 上部的粉土层属于粉质黏土, 透水性很差; 下部的砂砾层属于土质砂砾, 透水性很强。真正能够对降水入渗起阻滞作用的是上部粉土层, 而粉土层厚度是决定石窟是否存在渗水风险的关键。

雨季强降雨入渗和春季融雪下渗容易形成地表积水, 是云冈石窟渗水的主要途径。根据试验调查结果推算, 地面积水在粉土层产生的入渗峰面, 可以于 0.5~1.0d 内到达 0.7~

1.1m 深度。当粉土层厚度小于 0.7m 时,容易导致地表水分快速下渗到砂岩顶部;如果考虑积水和植物根系的影响,粉土层厚度只有大于 1.1m 才可以有效地阻滞水分下渗。尽管绝大多数石窟顶部粉土层厚度小于 1.0m,但由于具有斜坡地貌不易产生积水,渗水风险不如理论上那么大。地表积水在其它具有薄层粉土的地方快速下渗,也可能通过侧向渗流影响石窟渗水。植物根管的存在会显著加快水分下渗的速率,因此,云冈石窟山顶应尽可能减少植树以减轻石窟渗水风险。

参考文献(References)

[1] 黄继忠,张俊芳. 粉尘对云冈石窟石雕影响的研究 [J]. 文物保护与考古科学, 2004, 16(1): 1-8.  
Huang Jizhong, Zhang Junfang. Sciences of Conservation and Archaeology, 2004, 16(1): 1-8.

[2] 黄继忠. 世界文化遗产云冈石窟的防水保护[J]. 文物保护与考古科学, 2008,20(S1): 114-121.  
Huang Jizhong. Sciences of Conservation and Archaeology, 2008, (S1): 114-121.

[3] 尚剑宝,上官学兵. 山西大同云冈石窟防水保护方案探讨 [J]. 山西建筑, 2003(6): 76-77.  
Shang Jianbao, Shanguan Xuebing. Shanxi Architecture, 2003 (6): 76-77.

[4] 甘向群. 云冈石窟凝结水研究与防治[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.  
Gan Xiangming. Study and control of condensation water in Yungang Grottoes[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.

[5] 杨善龙. 敦煌莫高窟崖体中水、盐分布现状初步研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.  
Yang Shanlong. A preliminary study of the moisture and salt distribution in the cliff of Mogao Grottoes at Dunhuang [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.

[6] Yamanaka T, Inoue M, Kaihotsu I. Effects of gravel much on water vapor transfer above and below the soil surface [J]. Agricultural Water Management, 2004, 67(2): 145-155.

[7] Thaulow N, Sahu S. Mechanism of concrete deterioration due to salt crystallization[J]. Materials Characterization, 2004(53): 123-127.

[8] Charola A E. Salts in the deterioration of porous materials: An overview [J]. Journal of American Institute for Conservation, 2000, 39(3): 327-343.

[9] 吴宝燕,张爱国,朱丽君. 云冈石窟水害及其治理措施 [J]. 地下水, 2008, 30(5): 116-118.  
Wu Baoyan, Zhang Aiguo, Zhu Lijun. Ground Water, 2008, 30 (5): 116-118.

[10] 黄继忠,万力,彭涛,等. 云冈石窟水分来源探查工程及若干成果[J]. 工程勘察, 2012(11): 1-4.  
Huang Jizhong, Wan Li, Peng Tao, et al. Geotechnical Investigation and Surveying, 2012(11): 1-4.

[11] 张红梅,马国栋,速宝玉,等. 大同云冈石窟文物渗水病害防治方案探讨[J]. 水文地质工程地质, 2004(5): 64-67.  
Zhang Hongmei, Ma Guodong, Su Baoyu, et al. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004(5): 64-67.

[12] 万力,曹文炳,王旭升,等. 云冈石窟水汽转化特征的初步研究[J]. 工程勘察, 2012(11): 6-11.  
Wan Li, Cao Wenbing, Wang Xusheng, et al. Geotechnical Investigation and Surveying, 2012(11): 6-11.

[13] Van Genuchten M Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.

[14] 傅志斌,彭涛. 云冈石窟防水保护工程勘察报告[R]. 北京: 建设部综合勘察研究设计院, 2003.  
Fu Zhibin, Peng Tao. Exploration report of waterproof protection project in Yungang Grottoes [R]. Beijing: China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, 2003.

[15] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911, 76(4): 1-24.

[16] 李金柱. 降水入渗补给系数综合分析[J]. 水文地质工程地质, 2009(2): 29-33.  
Li Jinzhu. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009(2): 29-33.

(责任编辑 张玉肖,岳臣)



《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。