

文章编号:1005-1538(2023)03-0080-07
DOI: 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.20211202348

云冈石窟顶部第四纪土壤覆盖层含水率变化特征及 洞窟渗漏水问题探讨

任建光^{1,2}, 孟田华², 黄继忠³, 石美凤⁴, 任志伟¹

(1. 云冈研究院, 山西大同 037007; 2. 山西大同大学, 山西大同 037000;
3. 上海大学, 上海 200444; 4. 山西博物院, 山西太原 030024)

摘要: 为研究云冈石窟顶部土壤覆盖层的含水率变化情况, 建设了土壤环境监测网收集云冈石窟土壤含水率实时监测数据, 并分析其时空变化特征及影响因素。结果表明, 平坦地形条件下云冈石窟顶部第四纪土壤覆盖层含水率时空变化特征明显: 年变化具有周期性, 垂向上随深度逐层降低(冬季除外)。春、夏季土壤含水率抬升、储水, 秋、冬季下降、失水; 在春、夏日土壤含水率呈白天上升、夜晚下降趋势, 秋、冬日则呈白天下降、夜晚也下降趋势。土壤含水率时刻处于不停的运动变化之中, 受温度、大气降水、微地形等众多因素影响, 山体边坡浅层土壤可能为侧向饱和流的人渗通道。降雨对土壤含水率的影响深度与实际入渗深度不一致。云冈窟内顶板及岩壁上部、中部含水率主要受降雨渗透窟顶土壤层、沿岩体裂隙通道进入洞窟的渗漏水控制, 而岩壁底部含水率更多受窟前不饱带和与地下毛细水的影响。多年的防水实践也证明云冈洞窟渗漏水主要来自于石窟顶部及附近区域。防渗排水始终是云冈洞窟渗漏水治理的主导思路, 建议应根据窟顶土壤厚度、地形地貌和遗址分布等分区治理, 充分发挥土壤的防渗作用, 减少对土壤覆盖层的过度干预。防渗层材料在具有防渗作用的前提下, 应具备一定的透气性, 满足“洞窟—覆盖层—大气环境”之间的水汽循环。

关键词: 云冈石窟; 第四纪土壤覆盖层; 含水率; 洞窟渗漏水

中图分类号: K879.2 **文献标识码:** A

0 引言

水对岩石有物理机械破坏和水岩化学作用^[1]。影响云冈石窟的水有: 雨水冲刷、洞窟渗漏、凝结水和毛细水四种类型, 其中, 洞窟渗漏破坏力最强, 2016年7月24日晚云冈石窟降雨50 mm, 次日查看40个洞窟中有25个出现渗漏, 第3窟出水点达36处。迄今云冈洞窟渗漏水治理项目已进行过6次, 取得了积极的防治效果, 但在实施过程中却没有研究窟顶土壤覆盖层含水率的变化特征及在窟顶防渗中的作用。

云冈石窟顶部土壤覆盖层分四层: 第1层为全新统人工堆积填土层(Q₄), 以耕作土为主, 局部为杂填土和粉土素填土; 第2层为上更新统粉土层(Q₃), 以粉土层为主, 局部夹粉质黏土和粉砂透镜

体; 第3层为中更新统粗砂、砾砂层(Q₂), 以粗砂—砾砂为主, 局部含粉土、黏土、粉土和砾砂; 第4层为侏罗系强风化岩石层(J_{2y})。随深度加深土壤中砾粒、砂粒增多, 粉粒减少, 渗透性增大。云冈石窟顶部土壤层薄厚不均, 各类土壤在地表均有出露。西部窟群顶部、第一道保护界墙以外及第1~3窟顶部土壤层较厚, 约8 m; 窟顶西部北魏佛教寺庙遗址、云冈第5~8窟窟顶北部辽金佛教寺庙遗址、明代云冈戍堡内部及外围土壤层为3~5 m; 山体崖头及边坡区域土壤层极薄, 甚至岩体裸露。在窟顶西区、中区土壤层钻孔内没有发现地下水存在, 大气降水是该区域土壤层的唯一补给水源。

本研究通过建设土壤环境监测网收集云冈石窟土壤含水率实时监测数据, 分析其时空变化特征及影响因素, 探讨降雨在土壤中的下渗深度及由此引

收稿日期: 2021-12-07; 修回日期: 2022-04-25

基金项目: 国家社会科学基金(19BKG035)资助

作者简介: 任建光(1971—), 男, 汉族, 山西阳高人, 硕士研究生, 文博副研究馆员, 研究方向为文物保护和遗产监测, E-mail: 274174236@qq.com

通信作者: 黄继忠(1965—), 男, 研究员, 研究方向为石质文物保护和研究, E-mail: hjzhong@163.com

发的洞窟渗漏等工程地质问题,探索窟顶土壤覆盖层的防水作用,进而提出合理的防渗建议。

1 土壤含水率监测系统建设

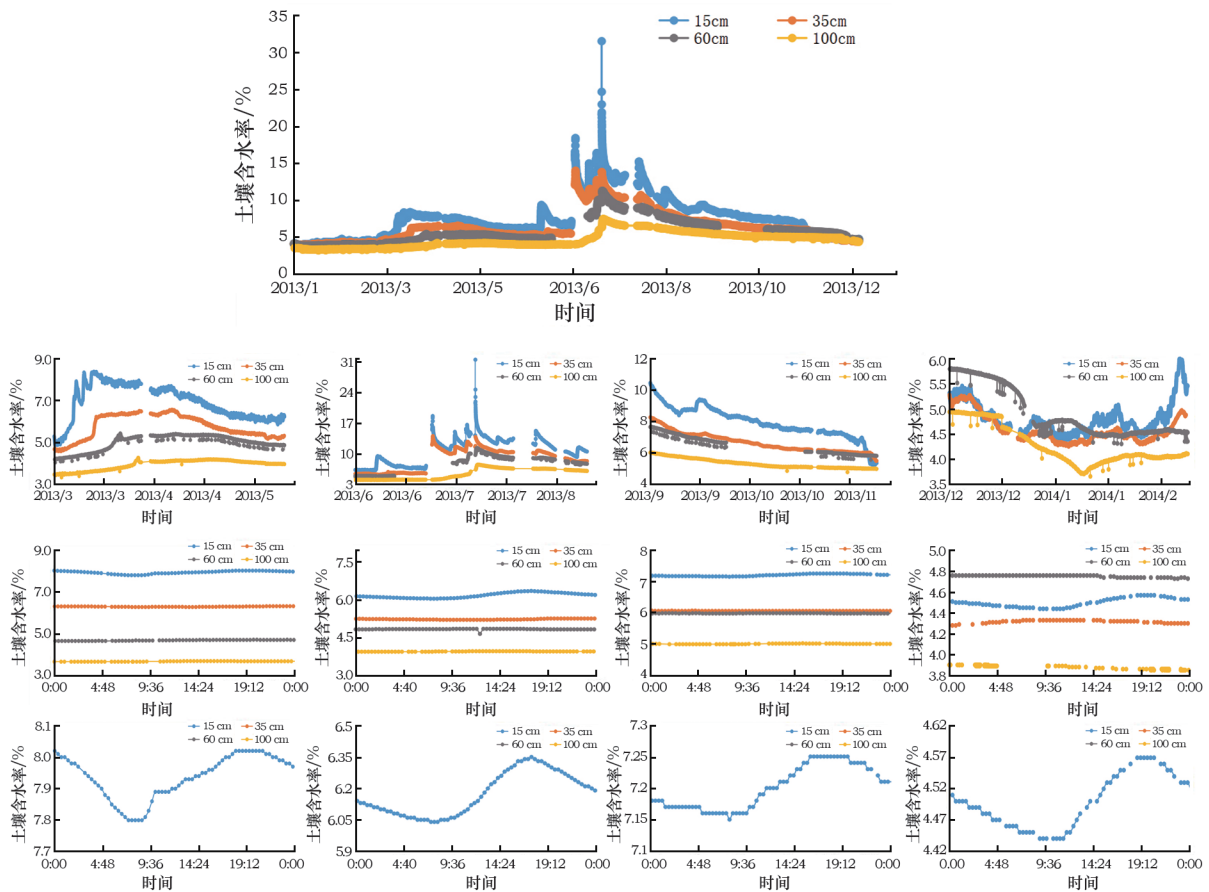
云冈石窟土壤含水率监测系统包括:数据采集、传输、储存、呈现与统计分析等部分。现有的云冈石窟土壤含水率实时监测系统分阶段实施:第一阶段为2009年国家“十一五”科技支撑计划“石窟水分来源综合探查技术研究”项目支助下建设,监测点位于云冈第5窟顶部、距南崖壁约100m,地势相对平坦,共埋置了4个土壤含水率监测传感器,放置深度分别为距地表15cm、35cm、60cm和100cm,数据经中继收集传至网关,无线传输、储存,最后呈现在监测软件上,时间为两年,现已废弃;第二阶段为2016年进行的五华洞环境监测工程内容,分别选择在西部窟顶地势比较高的坡地和第18窟顶部后方地势比较低洼的凹陷区域作为土壤含水率监测点,每个点放置一组,包含3个传感器,埋置深度为20cm、70cm和150cm,另外在昙曜五窟前不饱和带上也埋置了一组,3个传感器距地表深度为20cm、70cm和130cm;第三阶段是在第3窟顶部靠近边坡地势相对平坦的地方埋置了一组土壤传感

器,传感器的埋深分别为20cm、70cm和110cm。最后两次埋置的土壤含水率监测设备都是通过无线传至网关后,再通过光纤传输至遗产监测中心储存、大屏呈现和分析利用。所有土壤含水率传感器的监测精度为0.001%。除窟前不饱和带监测点曾被人工扰动过外,其余监测点土质都为原状土,平坦区域、低洼凹陷区域的土表结构较致密,而坡地区域与石窟边坡区域土表结构松软,石窟边坡处的土壤中还含有较多的粗砂、砾石等物。

2 结果分析

2.1 土壤含水率时空变化特征

云冈第5窟顶部平坦地形条件下(图1)土壤含水率年变化具有周期性,为一年,曲线包含两个凸起和一个凹陷;垂向上含水率及其变化幅度随深度逐层减小(冬季除外)。春季气温回升、冻土融化,土壤含水率开始抬升,曲线形成了第一个凸起,进入土壤储水期;夏季土壤含水率持续上升,出现第二个凸起,降雨使表层含水率呈明显的锯齿状振荡;秋季土壤含水率下降,进入失水期,秋末浅层土壤含水率开始低于底层;冬季土壤含水率处于凹陷阶段,各层土壤含水率值降到年内最低、变化紊乱。



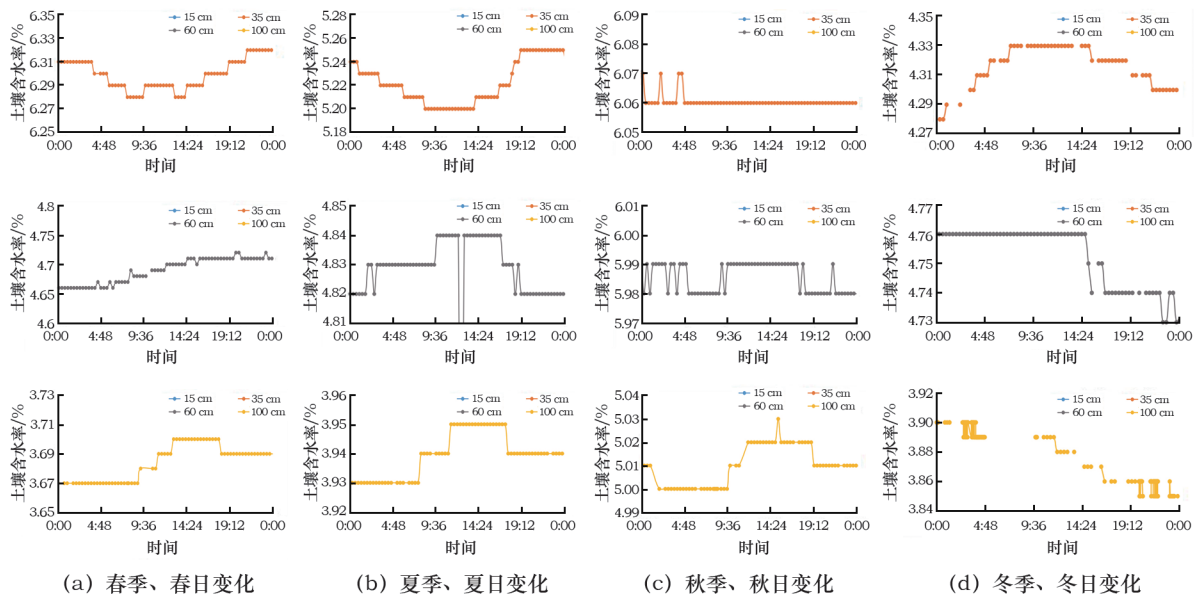


图 1 平坦地形条件下土壤含水率年、季节、日变化曲线图

Fig. 1 Annual, seasonal and daily variation curves of soil moisture content under flat terrain conditions

春日 15 cm 与 35 cm 层土壤含水率夜晚下降、白天上升,60 cm、100 cm 层含水率白天上升,其余时间保持平衡;夏日 15 cm、35 cm 层含水率仍夜晚下降、白天上升,60 cm、100 cm 层含水率呈凸起状,上午阶梯状上升,傍晚快速下降,其余时间保持平衡;秋日 15 cm 层土壤含水率却是夜晚上升、白天下降,35 cm 层仅 0 至 5 点有上升波动,其余时间保持平衡,60 cm、100 cm 层夜晚下降,白天上升;冬日 15 cm 层含水率夜晚下降,白天上升,35 cm 层却为夜晚上升,白天下降,60 cm、100 cm 层土壤含水率呈下降趋势。可见,云冈石窟顶部土壤含水率时刻处于不停的运动变化之中,以液态水的形式储存于土粒间,除降雨,以水汽运移(扩散、对流)的形式实现含水率的变化。另外,数据分析还发现土壤具有较强自我调节含水率的能力,在每年年终测得的土壤含水率相差无几,不会因年降水量、蒸发量的大不同而出现大偏差。

2.2 影响因素

云冈石窟顶部土壤含水率受温度、降雨等外界诸多因素的影响。温度差是土壤含水率变化的内在动力,当气温高于土壤表层温度时,空气中的水汽向土壤表层运移,反之,土壤表层的水汽向外界扩散;在土壤中,与相邻土层间的温度差导致土壤中的水汽在该层聚集、消散,聚集时含水率升高、消散则降低,故每年 2 月中旬至 9 月上旬,温度差促使水汽向

土壤深处运移,9 月中旬至明年 2 月上旬,土壤内水汽向土表移动。大气降水是影响土壤含水率变化的另一关键因素,云冈石窟 2013 年降水量 423.8 mm,多集中在夏季,除去地面径流排泄和蒸发外,部分降雨下渗进入土壤内,不仅引起土壤表层含水率振荡,也会对深层土壤含水率变化产生影响。

微地形对云冈石窟顶部土壤含水率影响明显(图 2)。在窟顶选择平坦、坡地、低洼凹陷、石窟边坡不同地形及窟前地面进行土壤含水率实时监测。窟顶坡地类似平坦地形,含水率及变化幅度逐层下降。而窟顶低洼凹陷区域 20 cm 土表含水率 > 150 cm 底层 > 中间 70 cm 层土壤含水率,底层含水率异常需详细研究。窟顶边坡 70 cm 中间层 > 110 cm 底部 > 20 cm 表层土壤含水率,中间土壤层可能为侧向饱和流的人渗通道。窟前非饱和带各层土壤含水率较接近,表现为“表层和底部高,中间低”,主要是表层土壤受降水量影响较大,而深层土壤更多的受地下水影响。

蒸发强度决定表层土壤水汽向外界扩散的程度。而不同土壤类型中土粒越细,沙粒含量越少,含水率越大,云冈石窟顶部出露的粗砂、砾石土壤层,含水率最低。植被会使地表径流雨水流速减小,增加下渗到土体内部的雨水。土壤表层结皮是干旱、半干旱地区普遍存在的现象,它的存在对降雨入渗的阻碍非常明显^[2]。

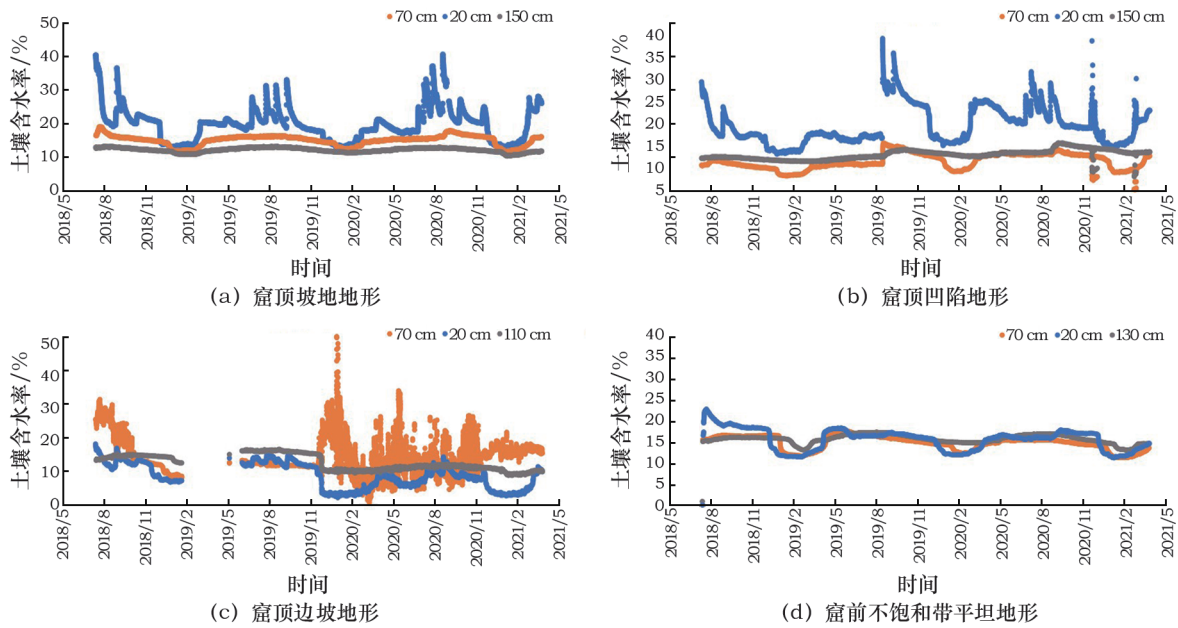


图2 窟顶坡地、凹陷、边坡及窟前不饱和带微地形条件下土壤含水率变化特征

Fig. 2 Characteristics of soil moisture content changes under micro terrain conditions of cave top slope, depression, slope and unsaturated zone in front of the cave

3 工程地质问题

云冈石窟顶部土壤覆盖层存在洞窟渗漏等工程地质问题,涉及降雨在土壤中的入渗深度、洞窟渗漏水来源探讨及防治等内容。

3.1 降雨在土壤中的入渗深度

图3所示,以0.06%/h作为土壤含水率对大气降水的最小响应阈值,云冈石窟2013年春季降雨3.2~5 mm,15 cm土壤层有响应。夏季降雨量2~8 mm时,土壤响应深度15 cm;降雨量11~22 mm时,响应深度35 cm;当降雨为37~65.7 mm时,响应深度105 cm。进入秋季降雨明显减少,为1.4~7.3 mm,土壤响应深度为15 cm,9月中旬之后的降雨已无法影响到15 cm土壤层。可见,降雨量与土壤含水率的响应深度息息相关,一般降雨量越大,影响深度越深,但也会受到季节、土质结构、植物根系^[3]等因素的影响。云冈石窟顶部土壤含水率对当地自然降雨最大响应深度为105 cm。有许多学者将土壤含水率对降雨响应深度认为其入渗深度^[4],其实二者并不相同。

降雨在土壤中入渗最初先使上层土壤蓄水,当含水率达到该层土壤的田间持水量时,湿润层才逐步下移湿润下层土壤^[6-7]。图4所示,2013年7月1日云冈石窟降雨65.7 mm,此次降雨中15 cm土壤层吸收水分较快,当含水率增长到田间持水量30%

时,部分雨水脱离该层土壤开始下渗,此时间相对漫长,直至失水率趋于零,雨水通过该层土壤的下渗现象停止。35 cm土壤层的吸水现象也明显,吸水率最大值为2.8%/h,说明雨水已下渗到该层土壤,但其最大含水率为13.8%,没有达到该层土壤田间持水量,失水率接近零,确认此次降雨只下渗到35 cm土壤层后再没有以重力水的形式继续下渗,之后,部分土壤含水率仍以水汽运动的形式,在土壤中进行消退(再分配)。60 cm、100 cm处土壤有吸蓄水现象,吸水率最大值分别为0.37%/h与0.15%/h,最大土壤含水率11.3%、7.5%远没有达到土壤的田间持水量,故没有雨水下渗现象发生。60 cm、100 cm土壤层在没有得到上层下渗雨水补给的情况下出现含水率增加现象,再次证明各层土壤含水率对降雨事件存在普遍响应现象。

可见,降雨在云冈石窟顶部土壤中的入渗不是无止境的,存在一个极限的入渗深度^[5]。从1955年以来云冈石窟所在的大同地区90 mm以上的暴雨有两次,1981年7月23日97.8 mm(广灵县)与2012年7月21日99.6 mm(浑源县),100 mm是云冈石窟的极限降雨量。降雨量与渗透深度之间不一定是简单的线性关系,前期入渗深度随降雨量的增加明显加深,但后期入渗深度随降雨量增大而变缓,因此,小于100 mm的自然降雨在云冈石窟顶部平坦及坡地微地形条件下是不能下渗到0.70 m的粉

土层,但遭遇低洼汇水区、大流量排水沟等情况时,地表积水容易渗透厚度小于0.7 m的粉土层快速下渗到砂岩顶部,而其厚度大于1.1 m可以有效阻滞水分下渗^[8]。

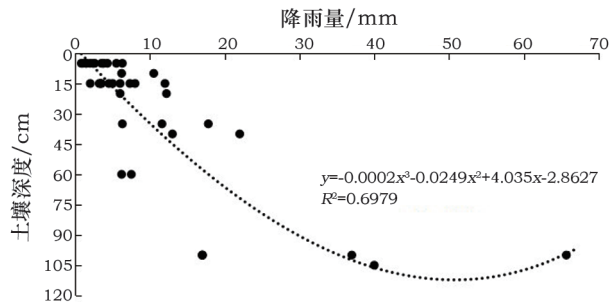


图3 土壤含水率对大气降水响应深度
Fig. 3 Response depth of soil moisture content to atmospheric precipitation

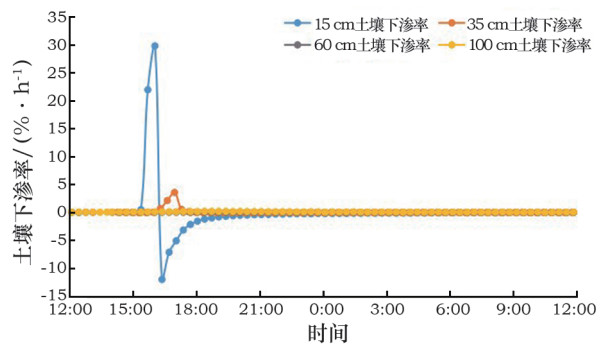


图4 土壤下渗率随时间的变化曲线
Fig. 4 Curve of soil infiltration rate over time

3.2 洞窟渗漏水来源探讨

为明确探析洞窟渗漏水来源问题,在云冈第3窟后室西北角岩壁底部(0.5 m)、中部(2.5 m)和上部(4.5 m)各埋置了一个岩石含水率监测传感器,监测结果显示(图5):岩壁上部岩石含水率均值4.703% > 岩壁底部3.088% > 岩壁中部1.181%,表现为“上下高、中间低”。其中,岩壁中部、岩壁上上部岩石含水率变化趋势一致,夏季高、冬季低,二者可能为同一水源。将岩壁上上部岩石含水率与第3窟顶部20 cm土壤层含水率变化曲线进行比较(图6),可以断定岩壁上部的水源为大气降水渗透厚度小于20 cm土壤层、沿裂隙通道进入窟内顶部或上部的渗漏水,并沿岩壁由上而下渗流控制了岩壁中部岩石含水率的变化。多年的窟顶防水实践也证实石窟内大部分渗漏水来源于石窟顶部及附近区域,是否有远处水源的补给还需做详细调查。

图7所示,岩壁底部岩石含水率变化特征与岩壁上上部、中部不同,与窟顶20 cm土壤层含水率也没

有相关性,但与窟前地面土壤含水率变化趋势较一致,推测可能受窟前不饱和水与地下毛细水的影响,降雨使窟前土壤表层形成一定深度的临时饱和区,地下水也通过窟前土壤与岩石孔隙或裂缝毛细上升侵蚀石窟底部,但冬季时岩壁底部还可能受其它水源影响。云冈第3窟岩壁底部、岩壁上上部易发生冻融损伤,更易受干湿交替等作用的影响^[9],这与之前所认为的窟底毛细水的风化作用已基本得到控制的结论相悖^[1]。

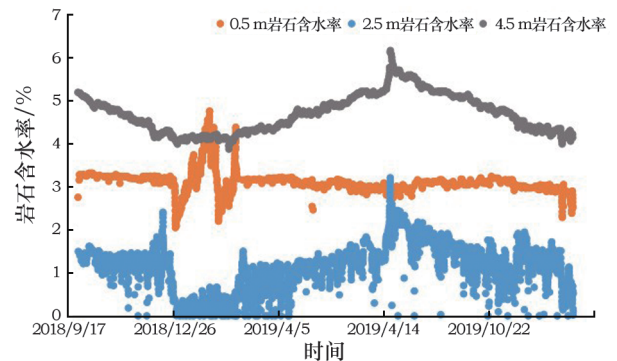


图5 第3窟后室西北角岩壁底部(0.5 m)、中部(2.5 m)和上部(4.5 m)岩石含水率变化曲线图

Fig. 5 Water content change curves of rock at the bottom (0.5 m), middle (2.5 m) and upper part (4.5 m) of the northwest angle of the back chamber of Cave 3

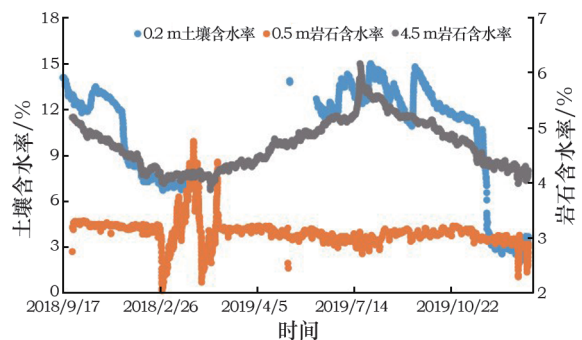


图6 第3窟顶部浅层土壤含水率与其后室西北角岩壁底部(0.5 m)、上部(4.5 m)岩石含水率关系曲线图

Fig. 6 Relation curves between the water content of shallow soil at the top of Cave 3 and the water contents of rock at the bottom (0.5 m) and upper part (4.5 m) of rock wall at the northwest angle of the back chamber

云冈石窟开凿于武周山南崖壁,崖头土层极薄,岩石裸露,部分石窟如第3、5、14及无名窟侧边为断崖式沟畔,云冈石窟顶部地形起伏复杂,微型低洼汇水区、无防渗措施的排水沟及小动物洞穴、人工地道及山体上植树坑、人为扰动的遗留等都可能成为大气降水下渗的有利条件。另外,2010—2011年第5

窟顶部以北大片区域考古发掘破坏了土壤表层结皮及内部结构,回填后土壤层变得疏松,减弱了对雨水下渗的阻碍作用,特别是冶炼遗址与古水井回填、塌陷变成了雨水下灌通道。云冈石窟受地下毛细水、凝结水和渗漏水等多种水患侵蚀,夏季无降雨时主要受凝结水影响,降雨后渗漏水、地下毛细水的作用凸显,渗漏水不但侵蚀作用强烈,也更有利于窟内岩壁表面凝结水的形成。

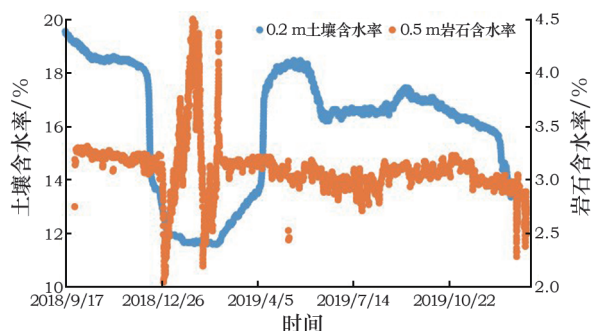


图7 第3窟后室西北角岩壁底部(0.5 m)岩石含水率与窟前不饱和带(0.2 m)土壤含水率关系曲线图

Fig.7 Relation curves between water content of rock at the bottom (0.5 m) of rock wall in the northwest angle of the back chamber of Cave 3 and soil water content of unsaturated zone (0.2 m) in front of the cave

4 结论

云冈石窟顶部第四纪土壤覆盖层由人工堆积填土层、粉土层、粗砂-砾砂层及侏罗纪强风化岩石层构成,土层薄厚不均,最厚处约8 m,崖头及山体边坡土层最薄,甚至岩石裸露。在窟顶平坦地形条件下土壤含水率年变化具有周期性,垂向上随深度逐层降低(冬季除外)。春夏季土壤含水率抬升、储水,秋冬季下降、失水。在春、夏日土壤含水率呈白天上升、夜晚下降趋势,秋、冬日则呈白天下降、夜晚也下降趋势。土壤含水率时刻处于不停的运动变化之中,具有较强的自我调节能力,除降雨,土壤主要以水汽运移(扩散、对流)的形式实现含水率的变化。温度、大气降水、植被覆盖率为土壤含水率呈正相关,有利于土壤储水;而蒸发、土壤结皮促使含水率消退和阻碍雨水入渗。微地形山体边坡浅层土壤可能为侧向饱和流的入渗通道。

大气降水是云冈石窟顶部土壤含水率的唯一补给水源。降雨对土壤含水率的影响深度与实际入渗深度不一致。对不超过100 mm的暴雨0.7 m的粉土层是其极限渗透深度,当遭遇低洼汇水区、大流量

排水沟时,大于1.1 m粉土层才能有效阻滞水分下渗。云冈窟内顶板及岩壁上、中部含水率主要受降雨渗透窟顶土壤层、沿岩体裂隙通道进入窟内的渗漏水控制,而岩壁底部含水率更多受窟前不饱和与地下毛细水的影响。多年的防水实践也证明云冈洞窟渗漏水主要来自于石窟顶部及附近区域。

防渗排水是云冈洞窟渗漏水治理的主导思路。如洞窟已发生渗漏,建议在洞窟内安装小功率除湿机等设备适当增加空气流动,使窟壁的潮湿区域快速干燥,同时做好窟内渗漏出水点的封堵和导水工作。在云冈石窟顶部及附近区域建议应根据窟顶土壤厚度、地形地貌和遗址分布等分区治理。在粉土层厚度超过1.1 m的区域,建议封堵塌陷漏洞、动物洞穴、人为扰动遗留等,最大限度发挥土壤自身所具有的“阻水减渗”功能,减少对土壤覆盖层的过度干预;对粉土层厚度超过0.7 m但不足1.1 m的区域,建议畅通排水,减少雨水在山顶上的滞留时间;对粉土层厚度不足0.7 m的防水区域,建议采取“基岩裂隙封堵-夯实粘土层-铺设防渗层-覆盖粘土保护层、植被层”的防渗措施,并修建完善的排水系统。防渗层材料在具有防渗作用的前提下,应具备一定的透气性,满足“洞窟-覆盖层-大气环境”之间的水汽循环。

参考文献:

- [1] 黄继忠,袁道先,万力,等.水岩作用对云冈石窟石雕风化破坏的化学效应研究[J].敦煌研究,2010(6):59-63.
HUANG Jizhong, YUAN Daoxian, WAN Li, et al. Study on the chemical effect of water-rock interaction on the weathering damage of stone carvings in Yungang Grottoes [J]. Dunhuang Research, 2010(6):59-63.
- [2] 徐先英,孙保平,丁国栋,等.干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应[J].生态学报,2008(3):895-905.
XU Xianying, SUN Baoping, DING Guodong, et al. Dynamic changes of sap flow in typical sand-fixing shrubs in arid desert regions and their responses to environmental factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008(3):895-905.
- [3] 吴淑杰,韩喜林,李淑珍.土壤结构、水分与植物根系对土壤能量状态的影响[J].东北林业大学学报,2003,31(3):24-26.
WU Shujie, HAN Xilin, LI Shuzhen. Effects of soil structure, water content and plant root system on soil energy status [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2003, 31(3):24-26.
- [4] 高思远,张建军,李梁,等.黄土区水土保持林地的蓄水动态及雨水渗透深度[J].中国水土保持科学,2019,17(2):17-26.
GAO Siyuan, ZHANG Jianjun, LI Liang, et al. Water storage dynamics and rainwater penetration depth of soil and water conservation forests in loess regions [J]. Science of Soil and Water Conservation,

- 2019, **17**(2):17-26.
- [5] 陈伟,莫海鸿,陈乐求. 非饱和土边坡降雨入渗过程及最大入渗深度研究[J]. 矿冶工程,2009, **29**(6):13-16,21.
CHEN Wei, MO Haihong, CHEN Leqiu. Study on rainfall infiltration process and maximum infiltration depth of unsaturated soil slope [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2009, **29**(6):13-16, 21.
- [6] 曾觉廷. 土壤支持重力水的移动规律及其对小麦生长的影响 [J]. 土壤学报,1965, **13**(3):293-299.
ZENG Jueting. The movement law of soil-supported gravitational water and its effect on wheat growth [J]. Acta Pedologica Sinica, 1965, **13**(3):293-299.
- [7] SUN W J, CUI Y J. Determining the soil-water retention curve using mercury intrusion porosimetry test in consideration of soil volume change [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2020, **12**(5):1070-1079.
- [8] 董佩,王旭升,万力,等. 云冈石窟覆盖层特征及其对石窟渗水的影响[J]. 科技导报,2013, **31**(10):62-66.
DONG Pei, WANG Xusheng, WAN Li, *et al.* Characteristics of Yungang Grottoes overburden and its influence on water seepage in grottoes [J]. Science and Technology Review,2013, **31**(10):62-66.
- [9] 刘海康,张思渊,张鑫鑫. 不同初始含水率下砂岩冻融劣化特性试验研究[J]. 科学技术与工程,2017, **17**(26):322-327.
LIU Haikang, ZHANG Siyuan, ZHANG Xinxin. Experimental study on freeze-thaw deterioration characteristics of sandstone under different initial water content [J]. Science Technology and Engineering,2017, **17**(26):322-327.

Discussion on the variation characteristics of water content of Quaternary soil cover on the top of Yungang Grottoes and the problem of water seepage in caves

REN Jianguang^{1,2}, MENG Tianhua², HUANG Jizhong³, SHI Meifeng⁴, REN Zhiwei¹

(1. Yungang Research Institute, Datong 037007, China; 2. Shanxi Datong University, Datong 037000, China;

3. Shanghai University, Shanghai 200444, China; 4. Shanxi Museum, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Under the condition of flat terrain, the spatial and temporal characteristics of the water content of Quaternary soil cover on the top of Yungang Grottoes are obvious: the periodic annual change and vertical decrease with the depth layer by layer (except in winter). The soil water content increases to store water in spring and summer and decreases to lose water in autumn and winter. In spring and summer, the soil water content increases during the day and decreases at night; in autumn and winter, it decreases both during the daytime and at night. The soil water content is constantly changing, affected by many factors such as temperature, atmospheric precipitation and micro-topography, etc. The shallow soil of the mountain slope may be the infiltration channel of the lateral saturated flow. The influence depth of rainfall on soil water content is inconsistent with the actual infiltration depth. The water contents of the roof and the upper and middle parts of the rock wall is mainly controlled by rainfall infiltrating the topsoil layer of the cave and seepage water entering the cave along rock fissure channels, while the water content at the bottom of the rock wall is more affected by the unsaturated zone in front of the cave and underground capillary water. Years of waterproofing practice have also shown that the seepage water of Yungang Grottoes mainly comes from the top of the grottoes and nearby areas. Anti-seepage drainage has always been the leading idea for the management of seepage water in Yungang Grottoes. It is suggested that regional treatment be carried out according to the topsoil depth, terrain feature and site distribution, to give full play to the anti-seepage effect of soil and reduce excessive intervention in the soil cover. Under the premise of anti-seepage effect, the material for the anti-seepage layer should have certain permeability to meet the requirements of water vapor circulation between the cave, cover layer and atmospheric environment.

Key words: Yungang Grottoes; Quaternary soil cover; Water content; Seepage water in the cave

(责任编辑 潘小伦;校对 谢燕)