

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230907004

极端暴雨下不可移动文物脆弱性分析*

——以河南“7·20”暴雨为例

赵超辉^{1,2}, 万金红^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院,北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心,北京 100038)

摘要: 暴雨灾害往往会对不可移动文物造成极大破坏,对灾后文物的损毁情况进行分析研究,可为不可移动文物的预防性保护工作提供重要参考。通过对2021年河南“7.20”暴雨中188处不可移动文物灾后调查资料的整理统计,分析了受灾文物损毁情况的差异性特征,归纳不可移动文物在暴雨灾害中的损毁形式表现为暴雨冲刷、积水浸泡造成的缓慢侵蚀破坏和洪水冲击、泥石流破坏造成的急剧动力破坏形式。另外,选取过程降雨量来表征暴雨灾害的危险性强度,构建了基于Lognormal概率分布函数的受灾文物损失状态脆弱性曲线模型,分别从结构材料、建筑规模、保存状态三方面综合分析不可移动文物的脆弱性特征。研究结果表明,砖土结构文物相比于砖木、砖石结构文物的脆弱性更强,当降雨量超过100 mm时有较高概率发生严重破坏,砖木、砖石结构文物在降雨量超过340 mm时有较高概率发生严重破坏;建筑面积在100 m²以下文物的脆弱性最高,极端暴雨灾害更容易对其造成严重破坏;相同降雨量下保存状态越差,文物脆弱性越强,其中保存状态较差的文物在极低降雨量(≤25 mm)有较高概率发生严重破坏。

关键词: 不可移动文物;暴雨灾害;灾后调查;破坏特征;脆弱性曲线

中图分类号: K87;TU87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0283-10

Analysis of Vulnerability of Immovable Cultural Relics in Extreme Rainstorm

——Taking the "7.20" Rainstorm in Henan as An Example

ZHAO Chaohui^{1,2}, WAN Jinhong^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Extreme rainstorms often cause great damage to immovable cultural relics. Analysis on the post-disaster damage can provide crucial insights for effective preventive measures. Through compiling post-disaster survey data from 188 immovable cultural relics affected by the "7·20" rainstorm in Henan Province in 2021, different characteristics of damage were analyzed. Damage types were categorized into: slow erosion and deterioration caused by rainstorm runoff and water immersion, as well as sudden destruction due to flood impact and debris flow. In addition, accumulated rainfall was used to characterize the hazard intensity of rainstorm disasters, and a vulnerability curve model based on Lognormal probability distribution function was constructed. The vulnerability characteristics of im-

* 收稿日期:2023-09-07;修回日期:2023-10-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFF0906102)、《不可移动文物灾害防御指南》编制(WH1204B032023)资助

作者简介:赵超辉(1997—),男,硕士研究生。主要从事防洪减灾研究。E-mail:3152735104@qq.com

通讯作者:万金红(1980—),男,高级工程师。主要从事防洪减灾、水文气候史研究。E-mail:roaringwan@sina.com

movable cultural relics were comprehensively analyzed, considering structural materials, building scale, and preservation state. The results showed that brick-soil structure relics were more vulnerable than brick-wood and brick-stone structures, with a higher probability of serious damage when rainfall exceeded 100 mm. Brick-wood and brick-stone structure relics had a higher probability of serious damage when rainfall exceeded 340 mm. Cultural relics with construction areas under 100 m² were particularly vulnerable, experiencing severe damage during extreme rainstorms. Cultural relics in poor preservation states were more vulnerable and had a higher probability of serious damage even at very low rainfall intensity (less than 25 mm).

Keywords: immovable cultural relics; rainstorm disaster; post-disaster survey; damage characteristics; vulnerability curves

0 引言

我国拥有丰厚的历史文化底蕴,文物古迹资源丰富,第三次全国不可移动文物普查统计显示,全国范围内拥有各类不可移动文物共计 76.7 万余处^[1]。然而,由于年代久远、自然环境侵蚀以及人为活动影响等因素,不可移动文物的主体结构较为脆弱,加之洪涝、地震等自然灾害频繁发生,长期处于露天环境下的不可移动文物易受到严重破坏^[2]。尤其是近年来,受气候变暖和城镇化影响,极端暴雨天气频频发生,由此引发的地区暴雨洪涝风险居高不下^[3],不可移动文物面临暴雨洪涝灾害的威胁也日益加剧。根据《中国世界文化遗产 2020 年度保护状况总报告》显示^[4],暴雨洪涝灾害占不可移动文物遭受自然灾害中的比重高达 90%,远超过其他类型的自然灾害。

作为人类文化遗产的重要组成部分,不可移动文物具有宝贵的艺术价值和历史价值,且一旦被破坏将难以被复制。近年来,为减轻不可移动文物灾害风险、提高文物防灾减灾能力和预防性保护能力,学者们针对暴雨洪涝灾害下的不可移动文物风险管理开展一系列研究。如王思思等^[5]在总结其他国家遗产地洪水风险管理体系及应对思路的基础上,初步提出了我国遗产地的洪水风险分析框架,即将洪水风险图与遗产地分布图相叠加,通过加入文物古迹风险性、历史文化价值等特殊板块,并结合指标体系方法来评估遗产地的洪水风险。乔文慧等^[6]综合考虑了暴雨洪涝灾害系统的各项要素,结合城市防洪、救灾与重建能力,构建了广州市不可移动文物的风险评估模型。汪怡等^[7]基于灾害风险评估理论,从致灾因子、孕灾环境以及文物本体 3

方面,构建了山西省不可移动文物暴雨洪涝灾害风险评估模型。徐灏等^[8]将不可移动文物作为暴雨灾害的影响对象,通过分析灾害对其的影响因素构建指标体系,提出了一种基于机器学习的不可移动文物风险评估方法。已有研究多关注于构建暴雨灾害风险评估方法,鲜有利用极端暴雨灾后不可移动文物的调查数据进行定量化脆弱性分析研究。

2021 年 7 月 17 日~23 日,河南省遭遇历史罕见特大暴雨洪涝灾害,郑州、安阳等多座城市内涝积水、河道洪水、山体泥石流多灾并发,造成全省 1 478.6 万人受灾,直接经济损失高达 1 200.6 亿元^[9]。此次暴雨灾害过程造成的毁灭性影响不仅体现在社会民众的生命财产安全上,还给众多不可移动文物带来严重破坏。本研究基于河南暴雨中受灾文物灾后调查资料,进行灾情数据的定量分析和建筑破坏结果的定性研究,构建了不可移动文物量化脆弱性曲线,旨在定量化揭示了暴雨灾害危险性强度与不可移动文物脆弱性之间的关系,从而为不可移动文物暴雨洪涝灾害风险评估研究和预防性保护工作提供重要参考。

1 资料与方法

1.1 研究区

河南省位于我国中东部、黄河中下游地区,具有雨热同期、四季分明、气候灾害频繁的特点^[10]。河南省历史文化久远,是华夏文明的发祥地^[11]。夏朝建立以后,先后有 20 多个朝代在此建都,200 多个皇帝在此执政,夏朝至清朝末期长达 4 000 余年的岁月中,河南省一直是古代民众进行社会活动频繁且集中的区域^[12],留下了深厚的文物遗产资源。第三次全国不可移动文物普查结果显示,河南省内登

记的不可移动文物共有6.5万余处,包含古遗址、古墓葬、古建筑、石窟石刻、近现代重要史迹等多种类型^[13];在文物等级方面,河南省拥有世界级文化遗产8处,全国重点文物保护单位420处,省级文物保护单位1521处,入选国家级非物质文化遗产名录125个^[14]。

1.2 研究资料

本研究收集了河南“7.20”暴雨中188处损毁不可移动文物的灾后调查资料(资料来源于河南省文物局),主要包括文物基本信息、受灾范围、灾损情

况等信息。降水数据采用国家气象信息中心提供的河南省119个国家气象站2021年7月17日0时至7月23日24时的每日雨量观测记录。

灾后调查涉及文物建筑、墓葬遗址、石窟石刻三类不可移动文物,根据文物特点及实际受灾情况,受灾文物的损毁程度被划分为严重损毁、较重损毁、一般损毁三个等级^[15],表1为不可移动文物损毁程度的划分标准及样本分布情况。据统计,受灾文物主要以严重损毁情况居多,约占总数的54.8%;发生较重损毁和一般损毁情况的不可移动文物相对较少,分别占总数的26.6%、18.6%。

表1 不可移动文物损毁等级划分标准及样本分布

Table 1 Damage classification standards and sample distributions of immovable cultural relics			
损毁等级	文物建筑	石窟石刻	遗址墓葬
严重损毁	建筑完全被冲毁或大面积坍塌;未发生坍塌,但梁架等支撑结构失衡,墙体倾斜变形,基础周边垮塌严重。	石窟本体结构失稳,或载体出现大面积坍塌;附属设施损毁、坍塌,危及文物安全。	遗址墓葬本体被冲毁或出现大面积坍塌;保护设施损毁,诱发整体结构安全危害。
较重损毁	建筑发生局部坍塌,支撑梁架和墙体局部变形,但整体结构稳定;基础周边局部垮塌,未造成安全隐患。	石窟本体局部受损,或载体出现局部坍塌;附属结构失稳,但不影响文物本体安全。	遗址墓葬本体出现较多病害,局部发生坍塌、掏蚀,并有进一步恶化的趋势。
一般损毁	整体保存较好,小范围渗漏、破损等轻微破坏,对结构稳定性影响较小。	整体保存较好,载体发生小面积坍塌,保护设施轻微损毁。	整体保存较好,局部表面剥落、开裂,不影响结构安全。
样本量	165	15	8

1.3 基于概率分布的脆弱性曲线拟合方法

利用样本数据建立的承灾体脆弱性曲线,能够量化揭示灾害强度与承灾体损失程度的关系^[16]。承灾体脆弱性曲线大致可分为两类:一类为“损失率脆弱性曲线”,表示致灾因子危险性强度与损失率的关系,常通过拟合Logistic函数^[17]、指数函数^[18]等函数构建;第二类多指“损失状态脆弱性曲线”,表示致灾危险性强度下超过某一损失状态的概率,主要通过概率分布函数和参数估计构建^[19-20]。

鉴于灾后调查只是大致评估出受灾文物的损毁状态,难以直接拟合损失率与灾害强度的关系,故选用“损失状态脆弱性曲线”进行损毁文物脆弱性分析,具体过程为:假设致灾因子危险性强度对应损失状态的超越概率服从对数正态(Lognormal)分布^[21],概率密度函数和累计密度函数分别为:

$$f_{\omega}(x, \mu_{\omega}, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu_{\omega})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$F_{\omega}(X) = \int_0^X f(h, \mu_{\omega}, \sigma) dx \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, x 、 X 表示致灾因子危险性强度值; ω 表示损毁情况,由于模型可独立或者同时估计多个损失状态的发生概率^[16],且河南“7.20”暴雨中的受灾文物多发生严重损毁情况,本研究仅独立估计该受损等级发生时的概率,即 $\omega=1$ 视为发生严重损毁情况, $\omega=0$ 视为发生一般或较重损毁情况; μ_{ω} 和 σ 分别表示 $\ln(x)$ 均值和标准差。概率分布参数 (μ_{ω}, σ) 采用极大似然法进行参数估计,似然函数为:

$$L = \prod_i^N F_{\omega}(X_i)^{\omega_i} [1 - F_{\omega}(X_i)]^{1-\omega_i} \quad (3)$$

式中, X_i 为第 i 个样本的致灾因子危险性强度值; ω_i 表示第 i 个样本的损毁情况; $F_{\omega}(X_i)$ 表示第 i 个样本发生严重损毁情况的概率; $1 - F_{\omega}(X_i)$ 表示第 i 个样本发生一般损毁或较重损毁情况的概率。另外,采用似然比检验方法来评估模型参数反映真实约束的显著性水平^[22],检验水准取0.05。

2 不可移动文物破坏特征

2.1 不可移动文物损毁统计特征分析

根据河南“7.20”暴雨降水数据及不可移动文物灾后调查评估结果,统计了不同损毁程度受灾文物在各降雨量区间对应的样本频率,绘制频率分布直方图(图1)。

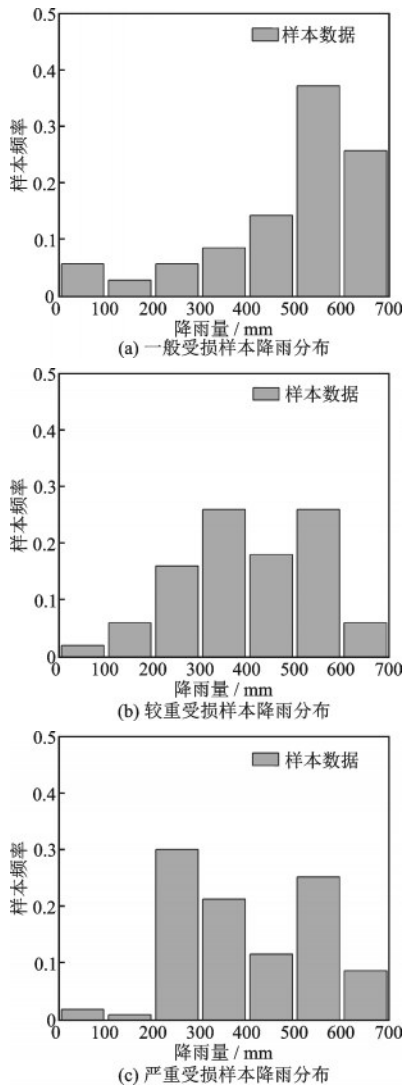


图1 不同损毁情况下受灾文物降雨量分布

Fig.1 Rainfall distributions of damaged cultural relics under different damage conditions

分析样本频率的统计结果特征(图1),可以看出:(1)一般损毁情况的样本频率总体上随着降水量增加呈现逐渐增长趋势;(2)降雨量小于300 mm时,较重损毁情况的样本频率随着降雨量增加而逐渐增加,降雨量达到300~600 mm范围时,分布较

为平均,降雨量超过600 mm时,样本频率呈现下降趋势;(3)严重损毁文物对应的降雨量主要分布在200 mm以上范围内,并且各区间的样本频率总体上随降雨量的增加而逐渐减小,而降雨量小于200 mm时仅有少量文物发生严重损毁情况;(4)通过比较相同降雨量区间内不同损毁程度的样本频率来看,降雨量小于200 mm时破坏级别主要为一般损毁和较重损毁,降雨量在200~400 mm时主要表现为较重损毁和严重损毁,而当降雨量超过400 mm以后,降雨量与文物损毁等级并未呈现正相关关系,造成文物不同损毁程度的原因可能是结构材料、保存状态等因素的差异^[23]。

图2为不同类型受灾文物的降雨量分布情况,图中显示石窟石刻类受灾文物的降雨量大多在400 mm以上,表明此类文物抵抗暴雨灾害的能力较强,在低降雨量下不易被破坏。文物建筑、墓葬遗址类受灾文物的降雨量分布类似,但受灾文物建筑的降雨量均值和中位数略低,表明文物建筑抵抗暴雨灾害的能力较弱。结合受灾情况调查发现,受灾文物建筑多为民居建筑,文物保护等级低且长期无人居住或使用,户主普遍缺乏充足的资金和动力来保护、维修这些文物建筑,致使其年久失修、保存状况差,在暴雨过程也更容易发生损毁。

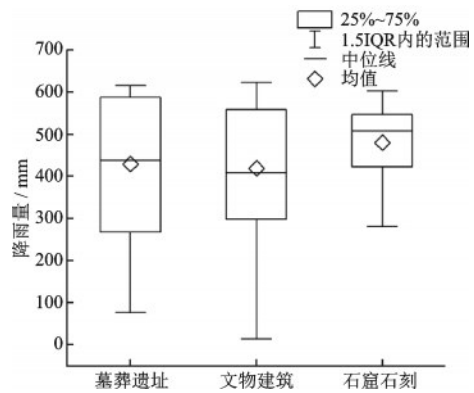


图2 不同类型受灾文物的降雨量分布

Fig.2 Rainfall distributions of damaged cultural relics in different damage types

2.2 不可移动文物物理损坏特征分析

基于灾后调查资料,归纳暴雨灾害对不可移动文物造成的破坏表现为以洪水冲击、泥石流灾害为主的急剧动力破坏和以暴雨冲刷、积水浸泡为主的缓慢侵蚀破坏^[24],实际情况下四种破坏形式可能会

同时发生。上述破坏形式中,暴雨冲刷是造成受灾文物损毁最为普遍的成因,超过90%的样本发生此类破坏,因积水浸泡造成文物损毁的情况占总体样本的比例接近半数,洪水冲击、泥石流灾害造成文物破坏的情况相对较少,约占总体样本的比例分别为15%、10%。表2统计了不同破坏形式中各级损毁程度的比例,可见泥石流灾害对不可移动文物的破坏性最强,其中严重损毁比例接近3/4,一般损毁比例仅占5%,暴雨冲刷、积水浸泡、洪水冲击破坏中严重损毁比例均超过50%,但三者的损毁程度分布不存在显著性差异。

表2 四种破坏形式中文物损毁情况分布

Table 2 Distribution of damaged cultural relics under four forms of destruction 单位: %

破坏形式	一般损毁	较重损毁	严重损毁
暴雨冲刷	19	26	55
积水浸泡	12	20	68
洪水冲击	11	32	57
泥石流灾害	5	21	74

(1)暴雨冲刷

河南“7.20”极端暴雨降水强度大、持续时间长^[25],对受灾文物的冲刷作用明显。对于古建筑和近现代建筑,雨水使得屋顶瓦件衔接处的灰浆逐渐被浸湿,粘结性减弱,瓦片在自重和暴雨冲刷作用下发生滑落脱落(图3(a))。另一方面,当雨水渗漏至建筑内部结构,室内木制构件浸湿后材料性能改变^[26],出现发霉、脱皮和形变破坏,严重者甚至发生局部坍塌(图3(b)、图3(c)、图3(d));渗入墙体后,墙皮与墙砖的粘结性能减弱,出现层状剥离破坏(图3(e))。除主体结构破坏外,地面径流也会对建筑地基产生较强的侵蚀作用,地基附近的松散土体被水流带走形成地坑,进而引发建筑基础滑动,威胁文物主体安全(图3(f))。

对于处于缺乏保护措施的露天土墓葬、土遗址,降雨及产生的径流使得表层覆土不断被湿化崩解,降低了土体结构的强度和胶结能力,在后期暴雨冲刷下形成裂隙、冲沟等病害^[27],严重者会导致构筑物垮塌(图4(g)、4(h))。石窟建筑是在陡崖上开凿形成,崖壁裂隙为雨水提供了良好的排渗通道^[28],暴雨冲刷导致岩体原有构造裂隙进一步扩大,形成大量危岩体,加剧了石窟建筑的坍塌破坏(图4(i))。



图3 暴雨冲刷破坏典型案例

Fig.3 Typical cases of damage caused by rainstorm runoff

(2)积水浸泡

河南“7.20”暴雨降水强度大,受限于场地排水系统的排水能力限制,雨水难以迅速排放,便在低洼处汇集积聚。长时间的积水浸泡,一方面降低了地基土的承载能力,造成土质松软、地基下沉,进而引发建筑结构开裂、倾斜、位移等破坏^[29](图4(a)、4(b));另一方面,积水还会劣化建材力学性能^[30],影响文物建筑整体稳定性。另外,当文物入口处低

于周围地面时,积水将涌入建筑内部,致使其内部空间被沉积物淤埋,加重损毁程度(图4(c))。



(a) 洛阳香山寺墙体倾斜开裂 (b) 安阳黄华塔林中佛塔倾斜
(c) 巩义巩县石窟雄宝殿室内进水

图4 积水浸泡破坏典型案例

Fig.4 Typical cases of damage caused by water immersion

(3)洪水冲击

极端暴雨引起河道水位上涨,泄流量增加,河道洪水及其中携带各类杂物会对沿河附近的建筑物造成严重冲击破坏(图5(a))。跨河古桥梁主要



(a) 巩义孟氏石坊被洪水冲毁 (b) 鹤壁汤和桥栏杆望柱断裂缺失

图5 洪水冲击破坏典型案例

Fig.5 Typical cases of damage caused by flood impact

由桥墩、桥台、桥基础以及护栏等结构组成,受此次极端暴雨洪水影响,多座古桥梁结构缝隙之间的填充物被冲走,导致裂隙扩大,并且桥面栏杆、望柱等附属构件也多被洪水冲毁(图5(b))。同时,古桥周边附属工程也存在被河道洪水破坏的情况,如安阳双石桥下游泊岸被洪水冲垮缺失、安阳永和桥河道护坡开裂垮塌,危及文物本体安全。

(4)泥石流灾害

泥石流灾害大多发生在高坡、土崖附近,破坏方式与文物相对位置有关^[31]。受灾文物位于灾害点上方时,泥石流灾害会破坏建筑地基的岩土结构,进而引发文物主体结构倾斜滑移,严重者会导致整座建筑坍塌(图6(a));在灾害点下方时,雨水通过浸透土质山体使其与下层坡面的附着力减小,饱含水分的固体堆积物向下方高速运动,文物只能被动承受而发生结构破坏(图6(b))。此外,泥石流灾害发生后,部分淤泥会继续覆盖在文物建筑表面,进一步加重文物损毁程度(图6(c))。

3 不可移动文物脆弱性分析

研究选择“7.20”暴雨过程累计降雨量来表示致灾因子的危险性强度^[6-8],构建以累计降雨量为横轴、严重损毁超越概率为纵轴的脆弱性曲线模型。首先,考虑墓葬遗址、石窟石刻类受灾文物的样本量偏少,仅针对文物建筑的总体样本数据建立脆弱性曲线;

其次,结合灾后调查资料及不可移动文物脆弱性要素^[32],选择文物建筑—结构材料、结构材料—建筑规模、结构材料—保存状态的组合进行脆弱性

表3 受损文物建筑脆弱性曲线参数估计值

Table 3 Estimated parameters of vulnerability curves in damaged cultural relics buildings

参数/结构材料	总体	建筑规模			保存状态		
		小规模	中等规模	大规模	较差	一般	较好
总体	5.60[0.20]	4.72[0.34]	6.20[0.31]	5.40[0.45]	4.06[0.51]	5.71[0.29]	6.04[0.32]
μ							
砖石结构	5.79[0.36]	5.34[0.70]	6.46[0.62]	5.35[0.76]	/	5.12[0.86]	6.65[0.60]
砖木结构	5.85[0.25]	3.97[0.54]	6.54[0.34]	5.83[0.64]	3.19[1.07]	5.95[0.42]	6.13[0.376]
砖土结构	4.58[0.46]	4.98[0.53]	4.36[0.77]	/	3.85[0.75]	4.47[0.78]	/
σ							
总体	2.20[0.70]	2.05[0.24]	2.18[0.63]	1.94[0.38]	1.97[0.21]	2.11[0.47]	2.21[0.79]
砖石结构	2.01[0.34]	1.94[0.42]	1.98[0.38]	1.83[0.54]	/	2.00[0.41]	1.91[0.34]
砖木结构	2.24[0.82]	2.02[0.29]	2.26[0.80]	1.94[0.39]	1.91[0.41]	2.24[0.81]	2.10[0.42]
砖土结构	2.00[0.34]	1.97[0.35]	1.92[0.37]	/	1.93[0.34]	1.96[0.29]	/

注:(1)按建筑面积将文物规模划分为小规模($\leq 100 \text{ m}^2$)、中等规模($101 \sim 1000 \text{ m}^2$)、大规模($\geq 1000 \text{ m}^2$)三类

(2)括号中的数字为蒙特卡洛模拟估计参数值的标准差



图6 泥石流灾害破坏典型案例

Fig.6 Typical cases of damage caused by debris flow disaster

分析。表3为不同属性组合文物建筑的脆弱性曲线参数,在0.05显著水平下,表中参数均通过显著性检验。

3.1 不同结构材料文物建筑脆弱性曲线对比

根据表3参数,绘制不同结构材料文物建筑脆弱性曲线结果(图7)。

如图7所示,砖木、砖石结构文物发生严重损毁情况的概率差别不大,两者在降雨量超过340 mm时严重损毁概率达到0.5以上;砖土结构文物在相同降雨量下严重损毁概率要高于砖木结构和砖石结构文物,当累计降雨量超过100 mm时严重损毁概率达到0.5以上。这表明砖土结构文物相比于砖木、砖石结构文物的暴雨灾害易损性更强,尤其是在低降雨量区间的易损性差异随降雨量的增加而愈发明显。结合灾后调查资料分析,面对极端暴雨时土质材料抗冲性、抗侵蚀能力弱,夯土堆筑或青

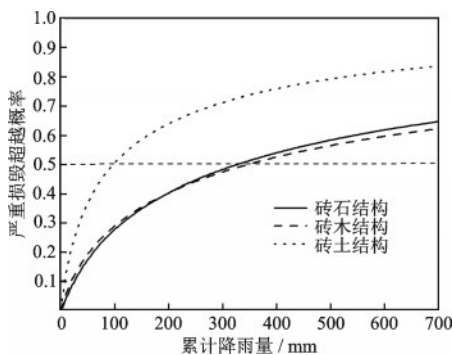


图7 不同结构材料文物建筑的脆弱性曲线

Fig.7 Vulnerability curves of cultural relics buildings with different structural materials

砖土坯混砌的文物建筑墙体易被雨水浸湿软化而丧失承载力,造成文物建筑大面积坍塌;砖木、砖石材料对雨水敏感性弱,整体稳定性要优于砖土结构文物,遭受暴雨灾害时主要以局部破坏为主。

3.2 不同建筑规模文物建筑脆弱性曲线对比

图8为不同规模文物建筑的脆弱性曲线,总体来看,在相同累计降雨量下,不同规模文物发生严重损毁状态的概率由高到底依次为小规模、大规模、中等规模,表明小规模文物在暴雨灾害中的易损性最高,大规模文物次之,中等规模文物最低。造成这一现象的主要原因是,建筑规模越大,受暴雨灾害的影响也就越大,但小规模文物大多结构简单,腐朽老化严重,结构稳定性差,在极端暴雨过程中更容易发生严重破坏。

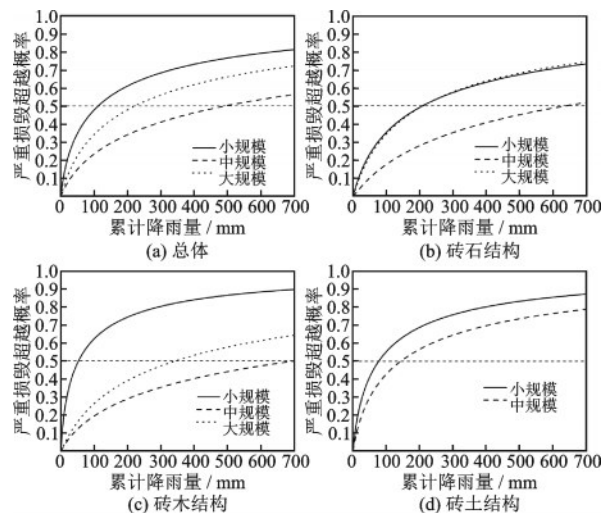


图8 不同规模文物建筑的脆弱性曲线

Fig.8 Vulnerability curves of cultural relics buildings in different scales

进一步比较相同结构材料不同规模文物的脆弱性曲线,可以发现大规模、小规模砖石结构文物在降雨量超过210 mm时严重损毁概率达到0.5以上,中等规模砖石结构文物严重损毁概率在降雨量超过640 mm时达到0.5以上。对于砖木结构,小规模文物严重损毁概率在低降雨区间的增幅较大,降雨量超过55 mm时严重损毁概率能达到0.5以上,大规模、中等规模文物严重损毁概率达到0.5对应的累计降雨量值分别为340、695 mm。对于砖土结构,小规模文物严重损毁概率在降雨量超过80 mm时严重损毁概率达到0.5以上,中等规模文物在降雨量超过145 mm时严重损毁概率达到0.5以上。

综合以上数据来看,小规模砖木、砖土结构文物面对暴雨灾害时的防灾减灾能力较弱,在较低降雨量下容易发生严重破坏,值得重点关注。

3.3 不同保存状态文物建筑脆弱性曲线对比

图9为不同保存状态文物建筑的脆弱性曲线,总体来看,在同一降雨量下,文物保存状态越差,严重损毁概率的增幅越快,脆弱性越强。对比相同结构材料不同保存状态文物的脆弱性曲线,保存状态一般、较好砖石结构文物分别在降雨量超过170、700 mm时严重损毁概率达到0.5以上。对于砖木结构,当降雨量超过25 mm时,保存状态较差文物严重损毁概率能够达到0.5以上,保存状态一般、较好文物严重损毁概率达到0.5对应的降雨量依次为385、460 mm。对于砖土结构,保存状态较差、一般的文物分别在降雨量大于25、90 mm时严重损毁概率达到0.5以上。对比以上数据,可以发现保存状态较差的砖土、砖木结构文物易损性远高于其他类别的文物,尤其是在低降雨量区间有更大可能出现严重损毁情况,应重点加以防范灾害风险。

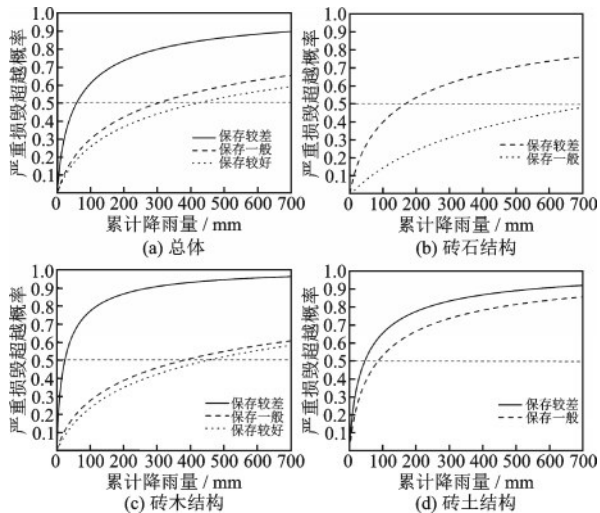


图9 不同保存状态文物建筑的脆弱性曲线

Fig.9 Vulnerability curves of cultural relics buildings in different preservation states

4 结论与建议

研究对河南“7.20”暴雨灾害事件中损毁文物灾后调查资料进行描述性统计分析,并在调查资料的基础上结合暴雨降水数据构建了不可移动文物脆弱性曲线模型,形成了以下结论:

(1)从受灾文物描述统计特征看,降雨量在400 mm以下时,文物受灾破坏程度与降水强度总体上呈正相关关系,降雨量超过400 mm时,灾害强度造成受灾文物呈现不同破坏结果的影响减弱。另外,分析了石窟石刻、文物建筑、墓葬遗址类文物的受灾损毁情况的差异性特征。

(2)归纳总结极端暴雨灾害对不可移动文物造成破坏表现为暴雨冲刷、积水浸泡两种缓慢侵蚀破坏以及洪水冲击、泥石流破坏两种急剧动力破坏。

(3)从脆弱性曲线来看,相同降雨量下,砖土结构文物相比于砖木、砖石结构文物易损性更强,尤其是在低降雨区间的表现更为显著。从建筑规模分析,小规模文物在暴雨灾害中的防灾减灾能力较弱,尤其是小规模砖木、砖土结构文物在较低降雨量下更容易发生严重破坏。从保存情况分析,保存状态较差的砖土、砖木结构文物容易在低降雨量下出现严重损毁状态。

根据上述研究结论,对暴雨灾害下的不可移动文物预防性保护工作提出相关建议:

(1)暴雨灾害中,文物发生的典型破坏大多与建筑材料腐朽老化有关。由于不可移动文物大多已经存在了漫长岁月,其结构材料的性能已发生较大改变,建议对文物建筑开展日常修缮工作,及时进行更换朽槽配件。

(2)四种破坏形态中,泥石流灾害对文物的破坏性最强,建议加强对文物周边地质灾害隐患的关注,通过自然环境监测数据的积累与分析,评估暴雨灾害对不可移动文物本体及周边环境的影响,进而识别滑坡、泥石流等地质灾害的风险隐患,并通过针对性的制定防护计划与应急预案,提高不可移动文物的预防性保护能力。

(3)由于结构材料、建筑规模、保存状态的差异,部分文物有极大概率在低降雨量条件下发生严重破坏,应重点开展此类文物的预防性保护工作,可通过采取铺盖防水薄膜或架设保护棚等防护措施,来减轻暴雨灾害对文物造成的破坏性影响。

参考文献:

[1] 丁燕,于冰.文物保护单位名录汇总情况分析与规范化探讨[J].中国文化遗产,2021,18(3):51-57.
Ding Y, Yu B. Analysis and standardization of the list of cultural relics protection units [J]. China Cultural Heritage, 2021, 18 (3): 51-57. (in Chinese)

- [2] 赵夏, 乔云飞. 基于历史自然灾害研究的不可移动文物自然灾害风险管理与预防思考[J]. 中国文化遗产, 2021, 18(4): 12-18.
Zhao X, Qiao Y F. Natural disaster risk management and prevention of unmovable cultural relics based on historical natural disaster research[J]. China Cultural Heritage, 2021, 18(4): 12-18. (in Chinese)
- [3] 赵超辉, 王金红, 张云霞, 等. 城市内涝特征、成因及应对研究综述[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 220-228.
Zhao C H, Wan J H, Zhang Y X, et al. Review of the characteristics, causes and governance of urban flood in China[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 220-228. (in Chinese)
- [4] 中国文化遗产研究院. 中国世界文化遗产2020年度保护状况总报告[J]. 中国文化遗产, 2021, 18(5): 64-79.
China Academy of Cultural Heritage. General report on the protection of world cultural heritage in China 2020 [J]. China Cultural Heritage, 2021, 18(5): 64-79. (in Chinese)
- [5] 王思思, 王昊玥. 国际城市及遗产地洪水风险管理的启示[J]. 人民黄河, 2020, 42(5): 40-46.
Wang S S, Wang H Y. Enlightenment of flood risk management in international cities and heritage Sites [J]. Yellow River, 2020, 42(5): 40-46. (in Chinese)
- [6] 乔文慧, 王强. 城市文化遗产洪涝灾害风险评估模型构建——以广州市为例[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(2): 127-131, 150.
Qiao W H, Wang Q. Flood risk assessment model for urban cultural heritage—a case study of Guangzhou [J]. Areal Research and Development, 2020, 39(2): 127-131, 150. (in Chinese)
- [7] 汪怡, 梁龙, 孙延忠, 等. 山西省不可移动文物洪涝灾害风险研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(3): 35-47.
Wang Y, Liang L, Sun Y Z, et al. Research on flood disaster risk of immovable cultural relics in Shanxi Province [J]. Journal of Natureal Disasters, 2022, 31(3): 35-47. (in Chinese)
- [8] 徐灏, 宫阿都, 包文轩. 基于机器学习的不可移动文物暴雨灾害风险评估——以山西省为例[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(4): 25-35.
Xu C, Gong A D, Bao W X. Machine learning-based storm disaster risk assessment of immovable cultural relics: A case study of Shanxi Province [J]. Journal of Natureal Disasters, 2023, 32(4): 25-35. (in Chinese)
- [9] 国务院灾害调查组. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R]. 北京: 国务院灾害调查组, 2021.
Disaster Investigation Group of the State Council. Henan Zhengzhou "7.20" heavy rainstorm disaster investigation report [R]. Beijing: 2021. (in Chinese)
- [10] 河南省人民政府. 河南概况 [EB/OL]. [2021-04-30]. <https://www.henan.gov.cn/2018/05-31/2408.html>.
The Government of Henan Provincial. Overview of Henan [EB/OL] [2021-04-30]. <https://www.henan.gov.cn/2018/05-31/2408.html>. (in Chinese)
- [11] 许甲甲. 河南省文物古迹空间分布及旅游开发布局研究[D]. 江西: 东华理工大学, 2018.
Xu J J. Study on spatial distribution and tourism development of cultural relics in Henan Province [D]. Jiangxi: East China University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [12] 朱耀先, 周远方. 河南大遗址旅游产业开发研究[J]. 学习论坛, 2014, 30(10): 65-69.
Zhu Y X, Zhou Y F. Henan ruins tourism industry development research [J]. Tribune of Study, 2014, 30(10): 65-69. (in Chinese)
- [13] 河南省人民政府. 河南第三次全国文物普查获国家终审普查不可移动文物65519处 [EB/OL]. [2011-11-01]. <https://www.henan.gov.cn/2011/11-01/309051.html>.
The Government of Henan Provincial. There are 65, 519 immovable cultural relics in the third national cultural relics census of Henan Province [EB/OL] [2011-11-01]. <https://www.henan.gov.cn/2011/11-01/309051.html>. (in Chinese)
- [14] 河南省人民政府. 2021年河南省国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL] [2022-03-12]. <https://www.henan.gov.cn/2022/03-12/2413033.html>.
The Government of Henan Provincial. Statistical bulletin of national economic and social development of Henan Province in 2021 [EB/OL] [2022-03-12]. <https://www.henan.gov.cn/2022/03-12/2413033.html>. (in Chinese)
- [15] 李向东, 吴崇可. 强降雨环境下文物受灾情况调查评估及预防性保护措施——以河南“7·20”特大暴雨灾害为例[J]. 中国文化遗产, 2023, 113(1): 91-98.
Li X, Wu C K. Investigation and assessment of the disaster situation of cultural relics under heavy rainfall environment and preventive protection measures—Taking the "7·20" torrential rain disaster in Henan Province as an example [J]. China Cultural Heritage, 2023, 113(1): 91-98. (in Chinese)
- [16] 蒋新宇, 马雪莹, 杨丽娇. 回归分析框架下洪涝灾害脆弱性曲线构建方法综合比较研究[J]. 水利学报, 2023, 54(2): 184-198.
Jiang X Y, Ma X Y, Yang L J. Comprehensive comparative study on the construction method of flood vulnerability and fragility curves under the framework of re-

- gression analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(2):184-198. (in Chinese)
- [17] 曹诗嘉,方伟华,谭骏.基于海南省“威马逊”及“海鸥”台风次生海岸洪水灾后果卷调查的室内财产脆弱性研究[J].灾害学,2016,31(2):188-195.
Cao S J, Fang W H, Tan J. Vulnerability of building contents to coastal flooding based on questionnaire survey in hainan after typhoon rammasun and kalmeagi[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31 (2) : 188-195. (in Chinese)
- [18] Li W J, Wen J H, Xu B, et al. Integrated assessment of economic losses in manufacturing industry in shanghai metropolitan area under an extreme storm flood scenario[J]. Sustainability, 2019, 11(1):126-126.
- [19] Yang L J, Kajitani Y, Tatano H, et al. A methodology for estimating business interruption loss caused by flood disasters: insights from business surveys after Tokai Heavy Rain in Japan [J]. Natural Hazards, 2016, 84 (Sup1):411-430.
- [20] Shinozuka M, Feng Q M, Lee J, et al. Statistical analysis of fragility curves[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000,126(12): 1224-1231.
- [21] Art B O. Empirical likelihood ratio confidence intervals for a single functional[J]. Biometrika, 1988, 75 (2) : 237-249.
- [22] Thomas D C, Peter H, Joseph R. Empirical likelihood is bartlett-correctable [J]. The Annals of Statistics, 1991,19(2);1053-1061.
- [23] Xu C, Gong A, Liang L, et al. Vulnerability assessment method for immovable cultural relics based on artificial neural networks——an example of a heavy rainfall event in Henan Province[J].International Journal of Disaster Risk Science, 2023, 14(1):41-51.
- [24] Ilan K, Robin S. An overview of flood actions on buildings[J]. Engineering Geology, 2004, 73(3) : 297-309.
- [25] 杨浩,周文,汪小康,等.“21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,2022,48(5):571-579.
Yang H, Zhou W, Wang X K, et al. Analysis on extremity and characteristics of the“21·7”severe torrential rain in Henan Province [J]. Meteorological Monthly, 2022, 48(5):571-579. (in Chinese).
- [26] 许萍,刘壮壮,秦嘉琦,等.基于Fluent模拟降雨对木结构古建筑室内温湿度影响[J].林产工业,2021,58(8):85-89,92.
Xu P, Liu Z Z, Qin J Q, et al. Influence of rainfall on the indoor temperature and humidity of an ancient timber building based on fluent simulation[J]. China Forest Products Industry, 2021, 58(8):85-89, 92. (in Chinese)
- [27] 孙延忠. 洪涝灾害下的古遗址脆弱性影响因素分析[J]. 中国文化遗产, 2021, 18(4): 19-23.
Sun Y Z. Analysis about the influencing factors of the vulnerability of ancient sites under the flood disaster[J]. China Cultural Heritage, 2021, 18(4): 19-23. (in Chinese)
- [28] 刘世杰,兰恒星,包含,等. 石窟寺典型工程地质变形破坏模式及分类体系[J]. 地球科学, 2022, 47(12):1-14.
Liu S J, Lan H X, Bao H, et al. Classification system of typical engineering geological deformation and failure modes in grottoes [J]. Earth Science, 2022, 47 (12) : 1-14. (in Chinese)
- [29] 朱才辉,刘钦佩,周远强. 古建筑砖-土结构力学性能及裂缝成因分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40 (9) : 175-186.
Zhu C H, Liu Q P, Zhou Y Q. Mechanical properties and cracking analysis of brick-clay structure of ancient building [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40 (9): 175-186. (in Chinese)
- [30] 李钢,秦佩瑶,董志骞,等. 地震与洪水作用下结构风险分析与设计研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(2): 237-250.
Li G, Qin P Y, Dong Z Q, et al. Research progress on risk analysis and design for structures under multiple hazards of earthquake and flood [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42 (2) : 237-250. (in Chinese)
- [31] 胡凯衡,崔鹏,葛永刚. 舟曲“8.8”特大泥石流对建筑物的破坏方式[J]. 山地学报, 2012, 30(4):484-490.
Hu K H, Cui P, Ge Y G. Building destruction patterns by August 8, 2010 debris flowmin Zhouqu, Western China [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30 (4) : 484-490. (in Chinese)
- [32] 孙延忠,乔云飞. 不可移动文物脆弱性的概念及内涵[J]. 自然与文化遗产研究, 2022, 7(5): 26-31.
Sun Y Z, Qiao Y F. The concept and connotation of the vulnerability of immovable cultural relics [J]. Study on Natural and Cultural Heritage, 2022, 7 (5) : 26-31. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)