



土遗址开裂机理及形态研究

李艳红^{1,2}, 刘轩成³, 闫海涛^{1,2}, 周双林⁴

1. 河南省文物考古研究院, 河南 郑州 450000; 2. 复旦大学 文物与博物馆学系, 上海 200433;
3. 大同市博物馆, 山西 大同 037000; 4. 北京大学 考古文博学院, 北京 100871

摘要 调查了国内不同环境下土遗址的开裂状况, 试图探究遗址开裂与土体性质之间的关系。对各遗址土样的物理性质、水理性质、化学组成及微观结构等进行检测, 并在实验室对其进行自然环境下的开裂模拟试验, 使用 Matlab 软件定量表征遗址土的开裂特征。结果表明, 干旱环境下的土遗址以龟裂缝为主, 影响遗址的展示; 潮湿环境下的土遗址裂缝宽度大且深, 严重影响遗址的安全性。结合土的物性参数分析发现, 土的颗粒组成和矿物组成是遗址土体开裂发生的决定性因素, 遗址的含水量变化是土体开裂的引发条件; 黏粒组含量尤其是蒙脱石的含量越高, 越易形成开裂; 土的水理性质和微观组成是土颗粒组成和矿物组成的体现。室内的开裂模拟试验和现场开裂形态一致, Matlab 定量结果显示苏家垄遗址和河伯所遗址裂隙率最高。因此, 在遗址发掘初期, 建议先分析土体性质, 预估含水量降低过程中可能出现的状态, 以预防遗址发掘中出现的因土体开裂导致的坍塌现象。

关键词 土遗址; 开裂; Matlab; 机理研究

中图分类号: K878 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-02-004

The cracking mechanism and morphology of earthen archaeological sites

LI Yanhong^{1,2}, LIU Xuancheng³, YAN Haitao^{1,2}, ZHOU Shuanglin⁴

1. Henan Provincial Institute of Cultural Heritage and Archaeology, Zhengzhou 450000, China;
2. Department of Cultural Heritage and Museology, Fudan University, Shanghai 200433, China;
3. Datong Museum, Datong 037000, China;
4. School of Archaeology and Museology, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract This study investigates the cracking patterns of archaeological sites under different domestic environmental conditions. The research further explores the correlation between soil properties and cracking mechanisms. Comprehensive analyses were conducted on soil properties including physical characteristics, hydro-physical behaviors, chemical composition, and microstructural features. Simulated cracking experiments under natural environment were performed in laboratory settings, with quantitative characterization of soil cracking characteristics achieved through Matlab software. The results indicate that archaeological sites in arid environments are predominantly characterized by mud cracks, which primarily affect site presentation, while those in

收稿日期: 2025-10-15 修回日期: 2025-12-10

基金项目: 国家文物局文物科学技术研究项目(2023ZCK019)

第一作者: 李艳红, 女, 博士研究生, 馆员, 从事不可移动文物保护研究, alicia_lyh@163.com。

通信作者: 周双林, 男, 副教授, 博士生导师, 从事不可移动文物保护研究, zslin@pku.edu.cn。

humid environments develop wider and deeper fissures that critically endanger structural stability. Soil particle composition and mineralogical constituents were identified as predominant factors governing cracking susceptibility, with moisture content variation serving as the triggering condition. Notably, elevated clay content, particularly montmorillonite concentration, significantly enhances cracking potential. The hydrophysical properties and microstructural characteristics essentially reflect the combined effects of particle and mineral compositions. Laboratory simulations successfully replicated field-observed cracking patterns, with Matlab quantification revealing the highest crack ratios at Sujialong and Hebosuo sites. Consequently, preliminary soil property analysis is recommended during early excavation phases to predict desiccation-induced structural responses, thereby preventing collapse caused by soil cracking.

Keywords earthen archaeological site; cracking; Matlab; mechanism study

土遗址是指以土为主要构筑材料的古遗迹和遗物,受不同地区地理环境差异影响,土遗址的保存状况有所不同。土体开裂是土遗址中最为直观、常见也是最为广泛的一种病害。无论是甘肃的汉长城遗址、吐鲁番的古城遗址等干旱环境,或是郑州大河村遗址^[1]、秦俑坑土遗址^[2]等半湿润环境,还是成都的金沙遗址^[3]、余姚田螺山遗址^[4-5]和广州南越宫署遗址^[6-7]等潮湿环境,土体开裂现象都极为严重,甚至于因开裂而引起坍塌,对土遗址带来毁灭性的破坏。

土遗址中的土体开裂包括两种:一种是与结构稳定性有关的卸荷性质的开裂;一种是由于遗址表层失水而导致的表面开裂。土作为一种三相体系,且属于多孔介质,可发生形变。土的基质吸力^[8]由毛管作用引起的吸力和土壤颗粒表面吸着作用引起的吸力两部分组成。党进谦等研究表明含水量越高,基质吸力越小^[9]。姜世新通过分析黏土表层的基质吸力和对裂缝的定量分析,研究了土体开裂的模型及吹填土开裂的机理^[10]。白玉锋采用液体石蜡置换法测得黄土收缩曲线,模拟外界环境温湿度变化研究机理^[11]。在农业及工程方面,《土壤形态学》^[12]一书中对土壤裂隙进行了明确的定义。《土壤学》^[13]一书中详细介绍了通过胶结物质和外力作用两方面形成了土壤团粒结构和土壤在干湿交替环境中的形成过程。关于土体的失水收缩,唐朝生^[14-15],张俊然^[16],李文杰^[17]等人,通过实验室内模拟不同地区不同类型土的失水收缩过程,研究土样在失水过程中的变化关系以及裂隙的发展规律等。熊东红^[18-19]、蔡光华^[20]、杨骥^[21]、谈云志^[22]、许锡昌^[23]等学者通过室内模拟、SPSS等探究了含水量、基质吸力与开裂等之间的关系。

但是,针对考古遗址土体开裂研究较少,白

露^[24]、刘平^[25]、王雨佳^[26]、曲瑾^[27]、赵凡^[28]等以交河古城、三星堆遗址为例讨论了收缩开裂的形态、机制及裂隙率。土体开裂涉及安全和展示效果,这个问题虽有人注意,但尚未开展深入、系统的研究。开裂现象是土的自然特性,对土遗址保护却是需要解决的难点。因此,以土遗址开裂现象为研究视角,全面调查国内不同地区土遗址开裂形态,依托室内自然开裂模拟实验,综合土体特性,探究土遗址的开裂机制,为土体开裂的控制和遗址的保护提供科学依据。

1 土遗址开裂形态

依据不同地区的保存环境与土性差异,从北向南依次选择具有代表性的土遗址(均为全国重点文物保护单位)进行调查,包括:内蒙赤峰二道井子遗址、辽宁朝阳牛河梁遗址、河南舞阳贾湖遗址、湖北京山苏家垄遗址、四川成都杜甫草堂遗址、云南晋宁河泊所遗址、广西合浦文昌塔墓群遗址。

二道井子遗址是在修建高速公路的过程中发现并发掘的。遗址的保护过程中下穿遗址的公路隧道一直在施工,期间出现了遗址上和附近土体的开裂(见图1)。裂缝延伸较远,且局部较宽,到隧道开挖完成后基本稳定。在遗址表面存在有较小的龟裂缝。二道井子遗址的开裂多数是由沉降和卸荷所致。

牛河梁遗址的土体开裂出现在遗址展示房修建完毕后,随着遗址含水量降低,遗址表面失水干燥出现开裂(见图2),以龟裂缝为主,裂缝宽度约为0.5 cm,呈不规则的网格状,网格大小不一。水从遗址南部较高地面沿着保护房的基础渗透进入遗址的土体下部导致含水量较高进而产生开裂现象。



图 1 赤峰二道井子遗址

Fig. 1 Erdaojingzi site in Chifeng



图 2 辽宁朝阳牛河梁遗址

Fig. 2 Niuheliang site in Chaoyang, Liaoning

贾湖遗址刚发掘时遗址含水量较高,潮湿地面中有部分的龟裂缝出现(见图 3),裂缝宽度小;干燥后裂缝增多且变宽,以多边形存在。探方侧壁在干燥后出现大小不一的多边形裂缝,裂缝宽度较小。遗址所在区域水位较高,经常出现积水,遗址在干湿交替环境下导致开裂加剧。



图 3 河南舞阳贾湖遗址

Fig. 3 Jiahu site in Wuyang, Henan

苏家垄遗址干燥后表面出现横向裂缝(见图 4),裂缝宽度较小,在纵向上有一定的延伸;遗址表面出现较宽的多边形裂缝;遗址侧面不仅存在多边形裂缝,还有平行于土体边缘的宽裂缝,裂缝呈直线形或有一定的弯曲。该遗址含水量高,地下水较为充沛,极易产生较宽较深的裂缝及坍塌现象,对遗址的结构安全性产生极大影响。



图 4 湖北京山苏家垄遗址

Fig. 4 Sujialong site in Jingshan, Hubei

杜甫草堂遗址表面呈多边形裂缝(见图 5),裂缝宽度大于龟裂缝,这种裂缝常见于潮湿环境下的土遗址,和金沙遗址的开裂较为相似,到一定程度时会影响遗址的安全性。遗址所在位置地下水水位较高,且随季节变化会对开裂产生影响。



图 5 四川成都杜甫草堂遗址

Fig. 5 Du Fu thatched cottage site in Chengdu, Sichuan

云南晋宁河泊所遗址为黏性土,土中含有较多贝壳,遗址侧面竖向裂缝分布较多、长且深(见图 6),在竖向裂缝之间分布有龟裂缝,龟裂缝的宽度小于竖向裂缝,遗址底部有水存积,部分遗址出现垮塌,对遗址的安全性产生严重影响。



图6 云南晋宁河泊所遗址

Fig. 6 Hebosuo site in Jinning, Yunnan

广西合浦文昌塔墓群遗址多数情况下属于潮湿含水状态,无开裂(见图7),长期处于揭露状态下龟裂也不明显,如附近的草鞋村遗址相似,裂隙多数是卸荷和雨水冲刷造成的。



图7 广西合浦文昌塔墓群遗址

Fig. 7 Wenchang pagoda tomb site in Hepu, Guangxi

通过对国内不同地区的土遗址调查发现,北方干旱环境下遗址的开裂程度低于南方潮湿环境下的遗址。北方土遗址整体含水量较低,且地下水资源较为匮乏,在保护房或遗址博物馆内部的遗址受环境干湿交替的影响较小。南方土遗址含水量普遍较高,地下水丰富,发掘后随着含水量的降低,土体表面失水并出现收缩开裂,随着地下水的供给导致表面的裂缝逐渐向下延伸,开裂加剧,极易造成遗址的垮塌,影响遗址的展示和安全性。

2 遗址土性分析

对每个遗址点的土样进行物理性质、水理性质、化学组成及结构特征等分析,探究它们之间的关联性。

2.1 分析方法

物理性质测量包括含水量、比重、颗粒分布等。土样的含水量、比重等依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行测定。土样的颗粒分析采用 MasterSizer 2000 激光粒度仪进行测定。测试基本参数:搅拌器速度为 2 500 r/min,遮光度范围为 10% ~ 20%,土壤样品粒径范围为 0.02 ~ 2 000 μm ,使用分散剂为水。水理性质如土样的自由膨胀率、液塑限等依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)委托山西省勘察设计研究院进行测定。

土样的微观结构使用扫描电子显微镜观察,仪器型号为:FEI Quanta G200,加速电压在 15 ~ 20 kV,spot 在 4.0 ~ 4.5,低真空下观察样品,工作距离 10 mm。土样的矿物组成则使用 X 射线衍射仪进行测量,所用仪器为德国 Bruker 公司生产的 D8 型 X 衍射分析仪。工作条件为:Cu 靶 $K\alpha$ 线($\lambda = 1.54\ 056\ \text{\AA}$),工作管压 40 kV,管流 40 mA。扫面起始角 3° ,终止角 70° ,步长 0.02 mm。

2.2 物理性质

各个遗址的含水量、比重及颗粒组成如表 1 所示,比重分布范围在 2.59 ~ 2.71 之间,土壤比重与土壤中的有机质含量和组成土壤固相的矿物有关,有机质中的腐殖质是重要的胶结物质,腐殖质含量越高,土壤比重越小。所有遗址粉粒组的含量均高于 50%,说明土体颗粒以粉粒为主。河泊所遗址中黏粒组含量为 35.5%,为所有遗址中黏粒含量最高的。而黏粒组含量可能会对遗址开裂产生影响,黏粒组含量越高,土体越易开裂。遗址土的孔隙分布和密实度与土的颗粒组成有关,进而影响遗址的开裂形态。粉粒组含量较高且黏粒组含量较低的遗址更不易出现开裂。

2.3 水理性质

表 2 中显示了不同遗址土的自由膨胀率。二道井子的自由膨胀率最低,为 2.0%,而河泊所遗址的最高,为 53.0%,而且土的自由膨胀率随着地区差异较大,整体呈现由南向北逐渐减小的趋势,这也与遗址土中蒙脱石类矿物的含量有关。

表 2 中的界限含水量表明,二道井子遗址的塑性指数小于 10,属于粉土。其他遗址的塑性指数 I_p 均在 10 ~ 13 之间,属于粉质黏土。而且遗址的液限均小于 50%,属于低液限粉土和粉质黏土。塑性指数在一定程度上反映了土中黏粒含量和矿物的亲水性。各遗址黏粒组含量与界限含水

量的关系,除广西文昌塔墓群遗址外,其他遗址的黏粒组含量和液塑限的变化趋势均一致。如杜甫

草堂遗址、河伯所遗址的塑性指数相对较高,而在表 1 黏粒组含量也较高。

表 1 土遗址的物理性质和颗粒组成

Tab. 1 The physical properties and particle composition of archaeological sites

| 序号 | 遗址 | 物理性质 | | 颗粒组成/% | | |
|----|------|------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| | | 含水量 W/% | 土粒比重 Gs | 砂粒组 0.075 ~ 2.000 mm | 粉粒组 0.005 ~ 0.075 mm | 黏粒组 <0.005 mm |
| 1 | 二道井子 | 7.03 | 2.66 | 15.46 | 62.6 | 21.98 |
| 2 | 牛河梁 | 4.26 | 2.69 | 10.78 | 69.52 | 19.74 |
| 3 | 阳泉古城 | 7.37 | 2.70 | 5.53 | 73.41 | 21.04 |
| 4 | 贾湖 | 14.60 | 2.71 | 4.38 | 74.96 | 20.69 |
| 5 | 苏家垄 | 16.52 | 2.67 | 11.2 | 66.15 | 22.65 |
| 6 | 杜甫草堂 | 18.67 | 2.67 | 9.68 | 66.69 | 23.63 |
| 7 | 河伯所 | 8.83 | 2.59 | 9.54 | 54.97 | 35.5 |
| 8 | 文昌塔 | 5.12 | 2.69 | 17.91 | 53.67 | 28.47 |

注:含水量有一定的误差,因为部分遗址处于正在发掘状态,遗址整体含水量比较高;部分遗址已经处于保护状态,遗址整体较为干燥,故而含水量较低。还有部分遗址土取样后并没有及时送到实验室。

表 2 土遗址的水理性质

Tab. 2 Hydraulic properties of archaeological sites

| 序号 | 遗址 | 土的膨胀特性 | | 土的界限含水量 | | 工程分类 |
|----|------|---------------------------|----------------|----------------|---------------|---------|
| | | 自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$ | 液限 $W_L/\%$ | 塑限 $W_p/\%$ | 塑性指数 I_p | 土样分类与定名 |
| 1 | 二道井子 | 2.0 | 24.2 | 15.1 | 9.1 | 粉土 |
| 2 | 牛河梁 | 6.0 | 30.1 | 17.6 | 12.5 | 粉质黏土 |
| 3 | 阳泉古城 | - | 28.0 | 17.2 | 10.8 | 粉质黏土 |
| 4 | 贾湖 | 7.5 | 26.1 | 15.9 | 10.2 | 粉质黏土 |
| 5 | 苏家垄 | 23.0 | 38.2 | 27.2 | 11.0 | 粉质黏土 |
| 6 | 杜甫草堂 | 9.5 | 29.6 | 17.6 | 12.0 | 粉质黏土 |
| 7 | 河伯所 | 53.0 | 41.8 | 29.0 | 12.8 | 粉质黏土 |
| 8 | 文昌塔 | - | 27.9 | 16.8 | 11.1 | 粉质黏土 |

2.4 微观结构和化学组成

各遗址土的部分微观形貌如图 8 所示。二道井子遗址土颗粒大小形状均差异较大,大颗粒表面较为圆滑且呈椭圆状,小颗粒多附着于大颗粒表面,部分填充于两颗粒之间,孔隙相对较大,部分大颗粒表面存在细小裂缝。牛河梁遗址土的大颗粒以棱状、柱状和片状存在,部分颗粒棱角分明,大小颗粒之间通过胶结物质连接形成团聚体,颗粒之间孔隙较小。古城墙遗址土的大颗粒多以块状和片状存在且较为圆滑,小颗粒附着于大颗粒表面并填充于颗粒之间,整体看较为致密,在高倍下看到有小孔隙存在。贾湖遗址土颗粒大小相

对均一,颗粒状较为明显,但中间又有胶结物质连接形成团聚体,仅有少数颗粒棱角分明,颗粒间有孔隙。苏家垄遗址土颗粒大小不一,大颗粒多呈片状或块状且较为圆滑,黏粒含量较高,胶结物质将大小颗粒紧密连结形成团聚体,团聚体之间孔隙较大。杜甫草堂遗址土颗粒大小差异较大,大颗粒棱角分明且以块状、椭球状、片状等形式存在,小颗粒多填充于大颗粒之间形成团聚体,颗粒之间有孔隙。河伯所遗址土颗粒整体相对较小,小颗粒含量较多,通过胶结物质连成整体,小颗粒附着于表面。文昌塔遗址土颗粒较为圆滑,团聚体之间存在孔隙,表面出现细小裂缝。

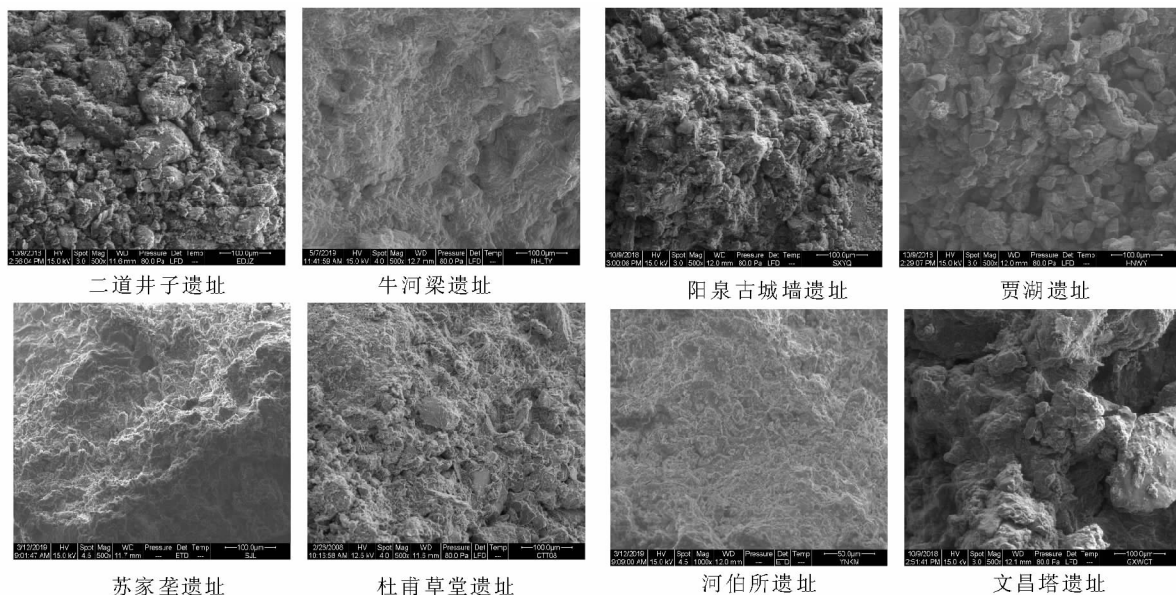


图 8 遗址土的微观形貌

Fig. 8 Microstructure of archaeological site soils

不同地区遗址土样的 X 射线衍射结果如表 3 所示,每个地区土的矿物种类基本相同,包括石英、方解石、钠长石、微斜长石、闪石、高岭石、伊利石、白云石和蒙脱石等。石英为原生矿物,在土中含量较高,抗风化能力较强。钠长石和微斜长石抗风化能力较差,风化后易形成黏土矿物,其中钠

长石相对比较稳定。方解石水溶性较差,在非酸性环境中较为稳定。而高岭石、伊利石和蒙脱石均属于黏土矿物,是组成黏粒的主要矿物成分,多为片状结构,因其结晶状态不同及其与土中水的作用方式不同,在含水量发生变化时,稳定性和胀缩性均会发生变化。

表 3 遗址土的 XRD 数据

Tab. 3 XRD data of archaeological site soils

单位:%

| 序号 | 遗址 | 石英 | 方解石 | 钠长石 | 微斜长石 | 闪石 | 高岭石 | 伊利石 | 白云石 | 蒙脱石 |
|----|------|--------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|
| 1 | 二道井子 | 54.02 | 8.94 | 11.46 | 7.69 | 4.02 | 4.09 | 3.24 | 0.64 | 5.91 |
| 2 | 牛河梁 | 42.36 | 8.82 | 14.58 | 16.10 | 5.14 | 4.26 | 3.75 | 1.18 | 3.82 |
| 3 | 阳泉古城 | 39.41 | 17.02 | 11.91 | 13.53 | - | 4.87 | 10.89 | 2.38 | - |
| 4 | 贾湖 | 69.50 | 1.41 | 5.61 | 7.98 | - | 3.56 | 5.66 | 1.88 | 4.40 |
| 5 | 苏家垄 | 75.87 | 0.48 | 8.14 | 5.25 | - | 2.98 | 1.77 | - | 5.51 |
| 6 | 杜甫草堂 | 45.57 | 4.51 | 17.41 | 7.77 | - | 6.97 | 8.56 | 1.06 | 8.15 |
| 7 | 河伯所 | 57.49 | - | 5.75 | 13.63 | - | 4.80 | 12.29 | 0.35 | 5.69 |
| 8 | 文昌塔 | 100.00 | - | - | - | - | - | - | - | - |

蒙脱石是影响遗址土体收缩开裂的重要矿物组成,本次调查的遗址中二道井子遗址、牛河梁遗址、贾湖遗址、苏家垄遗址、杜甫草堂遗址、河伯所遗址中均含有蒙脱石,以杜甫草堂中含量最高,其次是二道井子遗址、苏家垄遗址和河伯所遗址。文昌塔墓群遗址中的矿物只有石英,因而该遗址形成的开裂形态也非常特殊。结合各个土遗址实际开裂的状况,发现矿物成分尤其是蒙脱石含量

对遗址土体开裂影响较大,但并非决定因素。

2.5 分析结果

土体开裂是十分普遍的现象,影响开裂的三大因素有物质基础、受力状态和边界环境。物质基础是内在因素,即土的矿物组成和基本性质等。各个遗址的分析结果表明,不同地区考古遗址土在物理性质、水理性质、矿物组成及微观结构方面都存在较大的差异。北方地区土遗址含水量普遍

比较低,粉粒组含量较高、黏粒组含量较低,而南方地区土遗址含水量和黏粒组含量都较高。蒙脱石含量是影响土体开裂的一个重要因素,同时还影响着土的液塑限和自由膨胀率等。没有蒙脱石的土样将不会发生自由膨胀。二道井子遗址蒙脱石含量较高,但遗址土中砂粒组较多,因而自由膨胀率较低;贾湖遗址中蒙脱石含量略低于二道井子遗址,但遗址土中砂粒组含量较少,粉粒组和黏粒组含量高,因而自由膨胀率要大于二道井子遗址;河伯所遗址土中蒙脱石含量与二道井子遗址相近,而黏粒组含量远高于二道井子遗址,砂粒组含量很低,因而自由膨胀率极高。

3 开裂模拟试验

为了进一步探究遗址土样的性质对其开裂的影响,室内模拟各遗址土的自然开裂,并使用 Matlab 图像处理技术对土样的开裂形态进行量化计算,分析土样性质与开裂形态的关联性。

3.1 试验材料与方法

3.1.1 模拟试样制备

本文中所有的模具均使用圆形,以减少边界条件对开裂的影响。同时,试验过程中使用的模具需具有以下条件:不亲水、不变形、耐腐蚀等^[11]。故而本次试验采用统一规格的培养皿,直径为 120 mm,高度为 20 mm。

将每个遗址的土在室内放置风干,然后放入 103 ℃ 烘箱中干燥至恒重,碾碎过筛 10 目,称取土 100 g、蒸馏水 50 g 置于培养皿中,搅拌均匀,

并轻微震荡以排除气泡对试验结果的影响,室温下(19 ℃,30%)自然干燥,每隔 3 h 称重并拍照,记录裂隙发展的形态和深度。

3.1.2 Matlab 定量计算

先使用 PS 将边界部分截去,然后使用 Matlab 依次进行灰度化、二值化、杂点去除、骨架化、分割骨架、分割裂缝等处理,并计算最长裂隙长度、平均裂隙长度、裂隙面积、平均裂隙宽度、裂隙率、裂隙块区形状等参数,对开裂形态进行定量表征。

3.2 开裂过程及含水量检测

各个地区的遗址因土样的矿物成分、颗粒度等均有不同,故而在开裂时含水量随时间的变化不同,试样的开裂临界含水量也有所差异。

在本研究中,开裂临界含水量(ω_c)是指在恒定干燥条件下,土样表面首次出现肉眼可见的、长度 ≥ 2 mm 的连续裂缝时,所对应的整体质量含水量。

稳定含水量是指在稳定的实验环境(19 ℃, RH = 30%)下,土样在连续 24 h 内,质量变化率 < 0.1% 时所对应的最终整体质量含水量。

试验发现,同一含水量下不同遗址试样开始出现开裂的时间不同,开裂发展至稳定状态的时间和开裂结束时的含水量也不相同(见图 9)。文昌塔墓群遗址在干燥 50.5 h 后出现开裂,除此之外,其他遗址在 20 h 后出现开裂。二道井子遗址、贾湖遗址、文昌塔墓群遗址开裂发展的时间较短,约 < 15 h;而其他遗址的开裂发展时间则在 40 h 左右。试样开裂前后含水量的变化较为明显。

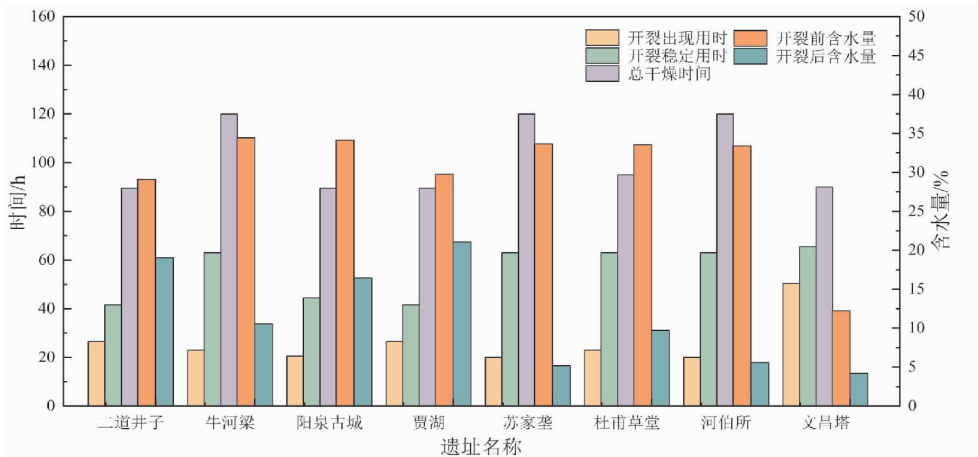


图9 遗址试样开裂时间和含水量

Fig. 9 Time of cracking and water content of samples from archaeological sites

3.3 裂隙形态分析及定量表征

各个遗址土样在室内(19℃,30%)自然干燥后的结果如表4所示。

二道井子遗址试样(见图10)一级裂缝呈放射状存在,属于穿透性裂缝,有一定的连通性,一级裂缝与二级裂缝之间夹角接近90°,二级裂缝之间夹角则小于90°,并未穿透整个样品。裂缝宽度相对较窄,此种开裂影响遗址的展示效果,但对遗址本体危害较小。

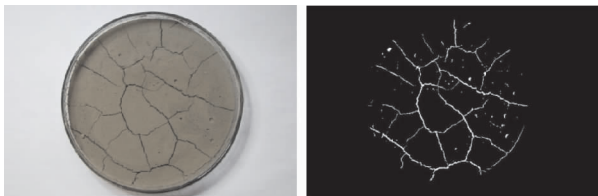


图10 二道井子遗址试样开裂图

Fig. 10 Sample cracking map of Erdaojingzi site

牛河梁遗址试样(见图11)一级裂缝较为明显,连通性较差,与二级裂缝多呈垂直状存在,裂缝形成的块区多为四边形。一级裂缝有一定的宽度且有穿透性,二级裂缝较细,此种裂缝形态影响遗址的外观,对遗址本体的安全性有轻微的影响。

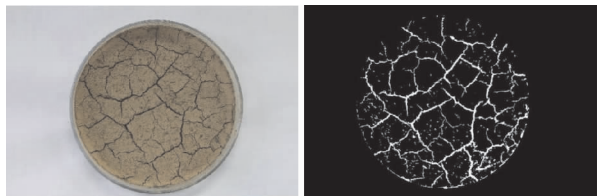


图11 牛河梁遗址试样开裂图

Fig. 11 Sample cracking map of Niuheliang site

阳泉古城墙遗址试样(见图12)未有明显的块区,裂缝之间的连通性相对较差,一级裂缝有一定的宽度且属于穿透性裂缝,二级裂缝多垂直于一级裂缝,较细且未穿透试样。此种开裂影响外观,且对遗址的安全性有一定的影响。

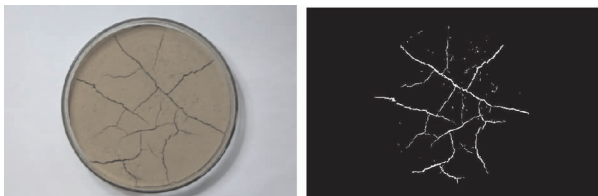


图12 阳泉古城墙遗址试样开裂图

Fig. 12 Sample cracking map of Yangquan ancient city wall site

贾湖遗址试样(见图13)一级裂缝多呈弧形,且属穿透性裂缝,连通性较好,与二级裂缝呈垂直

状存在,二级裂缝未穿透整个试样。裂缝宽度与二道井子遗址相比则稍有增加,除影响遗址外观外,可能会对遗址本体的安全性产生影响。

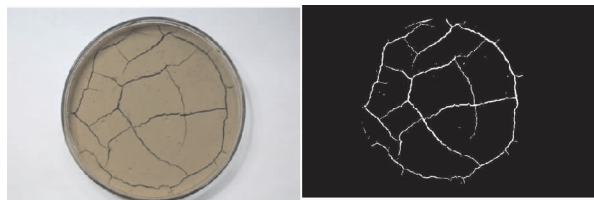


图13 贾湖遗址试样开裂图

Fig. 13 Sample cracking map of Jiahu site

苏家垄遗址试样(见图14)一级裂缝非常明显,且裂缝的连通性较好,大部分裂缝之间夹角小于90°,部分裂缝之间呈直角,裂缝块区形状多为方形。一级裂缝和部分二级裂缝为穿透性裂缝,开裂严重。

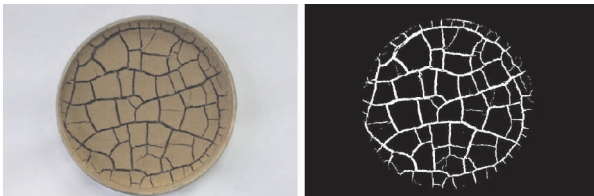


图14 苏家垄遗址试样开裂图

Fig. 14 Sample cracking map of Sujialong site

杜甫草堂遗址试样(见图15)一级裂缝呈弧形且相互之间夹角大于90°,二级裂缝基本垂直于一级裂缝,裂缝之间的连通性较差,且节点少,形成的块区不明显,部分以四边形存在。不仅影响遗址的展示效果,而且会对遗址本体的安全性造成影响。

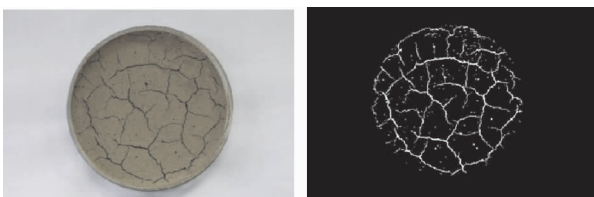


图15 杜甫草堂遗址试样开裂图

Fig. 15 Sample cracking map of Du Fu thatched cottage site

河伯所遗址试样(见图16)一级裂缝非常明显,连通性较好,大部分裂缝之间夹角小于90°,部分裂缝之间呈直角,裂缝块区形状多为四边形,少数呈三角形。一级裂缝和部分二级裂缝为穿透性裂缝,宽度较大,开裂严重,这种开裂不仅影响遗址的外观,而且极易造成坍塌,对遗址的安全性有很大的影响。



图 16 河伯所遗址试样开裂图

Fig. 16 Sample cracking map of Hebosuo site

文昌塔遗址试样(见图 17)裂缝仅存在于表面,裂缝极为细小,类似于起甲状,此种裂缝不会影响遗址本体的结构安全性,但会对遗址表面造成破坏。

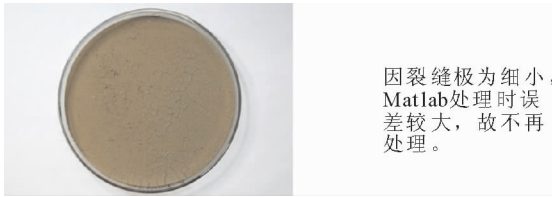


图 17 文昌塔遗址试样开裂图

Fig. 17 Sample cracking map of Wenchang pagoda tomb site

各个遗址土样裂隙定量化表征结果如表 4 所示。在计算的各项定量指标中,仅有裂隙面积与裂隙率间呈正相关,也最能代表遗址的开裂程度(见图 18)。根据裂隙率、裂隙面积发现,苏家垄遗址和河伯所遗址开裂最为严重,其次是牛河梁遗址。

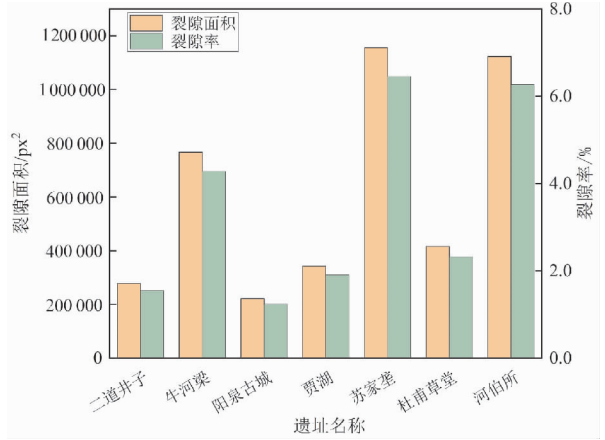


图 18 遗址裂隙面积与裂隙率的关系

Fig. 18 Relationship between fracture area and fracture rate in archaeological sites

表 4 各个遗址土样裂隙定量化表征结果

Tab. 4 Quantitative characterization results of soil desiccation cracks from multiple archaeological sites

| 序号 | 遗址 | 最长裂隙长度 /px | 平均裂隙长度 /px | 裂隙面积 /px ² | 平均裂隙宽度 /px | 裂隙率 /% | 裂隙区块破碎度 |
|----|------|------------|------------|-----------------------|------------|--------|---------|
| 1 | 二道井子 | 96 846 | 2 052.9 | 278 370 | 8.061 0 | 1.55 | 0.014 6 |
| 2 | 牛河梁 | 133 124 | 1 254.5 | 766 178 | 7.819 3 | 4.28 | 0.023 2 |
| 3 | 阳泉古城 | 80 617 | 1 440.1 | 221 806 | 8.931 2 | 1.24 | 0.013 7 |
| 4 | 贾湖 | 207 813 | 5 018.4 | 342 487 | 10.635 9 | 1.91 | 0.006 4 |
| 5 | 苏家垄 | 1 116 319 | 1 394.2 | 1155 563 | 13.929 2 | 6.45 | 0.004 7 |
| 6 | 杜甫草堂 | 147 253 | 1 606.1 | 415 911 | 7.326 6 | 2.32 | 0.018 8 |
| 7 | 河伯所 | 1 070 039 | 8 138.3 | 1 122 929 | 12.575 2 | 6.27 | 0.008 9 |

3.4 开裂比较

无论是从直观的开裂照片还是从裂缝定量表征数据观察,不同遗址的裂缝形态和数量差异很大。苏家垄遗址、河伯所遗址产生的开裂最为严重,裂隙率极高,产生的裂隙形态较为相似,裂缝宽度很大,会对遗址结构安全性产生严重影响。二道井子遗址、牛河梁遗址和杜甫草堂遗址形成的开裂节点和裂缝块区较多,但裂缝宽度均低于上述几个遗址,对遗址结构安全性有一定的影响。

文昌塔墓群遗址的开裂较为特殊,仅在表层出现起甲状开裂,这与土的矿物成分有极大的关系。此外,山西阳泉古城墙遗址的开裂是最少的,裂缝呈放射状。

4 土体性质与开裂的关系

遗址发掘和展示中常见土体开裂的现象,土体是发生开裂现象的载体,也是影响开裂的内在

因素。土体在饱和状态时,土颗粒之间的孔隙全部由液态水填充,随着含水量逐渐降低,土体由饱和态逐渐向非饱和态转变,孔隙之间不完全充满着水,土体体积减小,当含水量降低至一定程度时,土体出现开裂。因此,含水量的降低是遗址土体发生开裂的引发因素。当遗址土体保持高含水量时,土体或将不会开裂^[29]。

土的颗粒组成和矿物组成是土发生开裂的决定因素。当土的砂粒组矿物较高而黏粒组矿物较低时,土体开裂程度较小。土的颗粒组成影响着土颗粒间孔隙的大小,进而影响着失水时土体体积的收缩程度;而矿物组成中蒙脱石遇水膨胀失水收缩,故而在失水干燥时,蒙脱石的存在必然会发生体积收缩导致开裂。

土的水理性质是土中固体物质在遇水时产生的,体现着不同含水量下土与水的结合方式和状态,而土体开裂也是研究土体在含水量变化时的状态,因此,土的水理性质可以为研究土体开裂提供依据,比如模拟土体开裂试验时土的含水量应大于液限。土的自由膨胀率则是与土中蒙脱石和砂粒含量有密切关系,在一定程度上也反应着土的收缩程度。自由膨胀率越大,土体失水过程中出现的收缩开裂也应越大。

土的微观结构则是反映土中不同固态物质之间的结合方式,矿物之间面面结合的稳定性要大于点面之间的结合,土颗粒间形成的蜂窝结构的稳定性要优于絮状结构;同时,也可从微观结构中观察土颗粒之间的孔隙大小进而推测土在失水时收缩的程度,土颗粒之间的孔隙越大,体积收缩越明显。

北方遗址土中黏粒含量少,遗址整体含水量较低,且地下水资源较为匮乏,因而在保护房或遗址博物馆内部的遗址受环境干湿交替的影响较小。南方遗址多为淤泥土,遗址含水量普遍较高,地下水丰富。发掘后随着含水量的降低,土体表面失水并出现收缩开裂,随着地下水的供给导致表面的裂缝逐渐向下延伸,开裂加剧,极易造成遗址的垮塌,影响遗址的展示和安全性。而且,淤泥土比粉土和夯土更易受干湿交替环境的影响。

因此,在研究土体开裂之前,应先分析土体的性质,预估含水量降低过程中可能出现的状态,为遗址发掘中出现的因土体开裂导致的坍塌现象提供预防性保护思路。

5 结论

本文以“现场调查-土性分析-实验模拟-定量表征”的方法研究了国内不同环境下土遗址的开裂形态和开裂机理。结果表明:

1) 干旱环境下的土遗址裂缝多存在于遗址表层,以龟裂缝为主,影响遗址的展示;处于半干旱半潮湿环境的考古遗址裂缝会随地下水的影响轻微向下延伸,除影响遗址展示外,可能会影响遗址的安全性;潮湿环境下的土遗址裂缝宽度大且深,严重影响遗址的安全性。

2) 土的颗粒组成和矿物组成是遗址土体开裂发生的决定性因素,遗址的含水量变化是土体开裂的引发条件。黏粒组含量尤其是蒙脱石的含量越高,越易形成开裂。土的水理性质和微观组成是土颗粒组成和矿物组成的体现,同时也为研究土体开裂提供了一定的依据。

3) 不同遗址土的组成不同,其出现开裂的时间和含水量以及裂缝状态稳定的时间和含水量均不相同。但各遗址土的含水量随着干燥时间的变化趋势则是一致的。苏家垄遗址和河伯所遗址裂隙率最高,裂缝均较宽,严重影响遗址结构安全性;杜甫草堂遗址、贾湖遗址、牛河梁遗址和二道井子遗址的开裂存在一定的宽度和深度,轻微影响遗址结构安全性;而古城墙遗址开裂较小,遗址安全性影响不大;广西文昌塔墓群遗址中只有表面的起甲状开裂,仅影响遗址表面。

以上研究结论可为土遗址的预防性保护提供科学依据和指导。

该研究获得了城市考古与保护国家文物局重点科研基地的大力支持,在此致谢!

参考文献

- [1] 闫海涛. 红烧土遗迹与遗物的化学加固材料研究[D]. 北京:北京大学, 2011:3-21.
- [2] 秦俑坑土遗址保护课题组. 秦俑坑土遗址的研究与保护[J]. 文博, 1995(1):77-84.
Qin Terracotta Pit soil site protection project team. Research and protection of the earthen site of Terracotta Warriors[J]. Relics and Museology, 1995(1):77-84.
- [3] 朱章义, 张擎, 王方. 成都金沙遗址的发现、发掘与意义[J]. 四川文物, 2002(2):3-10.
ZHU Z Y, ZHANG Q, WANG F. The discovery, excavation and significance of Jinsha Site in Chengdu

[J]. *Sichuan Cultural Relics*, 2002(2):3-10.

[4] 孙国平, 黄渭金, 郑云飞, 等. 浙江余姚田螺山新石器时代遗址 2004 年发掘简报[J]. *文物*, 2007(11):4-24.
SUN G P, HUANG W J, ZHENG Y F, et al. Excavation report of the Neolithic Site of Tianluoshan, Yuyao, Zhejiang Province in 2004[J]. *Cultural Relics*, 2007(11):4-24.

[5] 张慧, 李玉虎, 万俐, 等. 浙江余姚田螺山遗址室内与现场加固试验研究[J]. *东南文化*, 2009(3):110-113.
ZHANG H, LI Y H, WAN L, et al. Study on indoor and field reinforcement of Tianluoshan Site in Yuyao, Zhejiang Province[J]. *Southeast Culture*, 2009(3):110-113.

[6] 冯永驱, 陈伟汉, 全洪, 等. 广州南越国宫署遗址 1995—1997 年发掘简报[J]. *文物*, 2000(9):4-24.
FENG Y Q, CHEN W H, QUAN H, et al. Excavation report of the Site of the Palace of Nanyue Kingdom in Guangzhou 1995—1997[J]. *Cultural Relics*, 2000(9):4-24.

[7] 胡晓琴, 王云峰, 范敏, 等. 南越国宫署土遗址防风化加固材料的效果比较[J]. *文物保护与考古科学*, 2011, 23(2):30-35.
HU X Q, WANG Y F, FAN M, et al. Comparison of the effect of anti-weathering reinforcement materials on the earth site of Nanyue Palace[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2011, 23(2):30-35.

[8] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京:水利电力出版社, 1983:112-116.

[9] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土含水量与基质吸力的关系[J]. *水土保持通报*, 1995, 15(4):39-42.
DANG J Q, LI J. Relationship between water content and substrate suction of unsaturated loess[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1995, 15(4):39-42.

[10] 姜世新. 土体开裂的理论研究[D]. 天津:天津大学, 2013:52-53.

[11] 白玉锋. 黄土试样开裂机理试验研究[D]. 西安:长安大学, 2014:51-52.

[12] 罗札诺夫. 土壤形态学[M]. 王浩清, 郑军, 译. 北京:科学出版社, 1988:204-211.

[13] 山西农业大学. 土壤学:北方本[M]. 第 2 版. 北京:农业出版社, 1981:64-69.

[14] 唐朝生, 崔玉军, TANG A M, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(8):1271-1279.
TANG C S, CUI Y J, TANG A M, et al. Volume shrinkage deformation characteristics during soil drying process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(8):1271-1279.

[15] TANG C S, ZHU C C, QING Z, et al. Desiccation cracking of soils: A review of investigation approaches, underlying mechanisms, and influencing factors[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 216:103586.

[16] 张俊然, 许强, 孙德安. 多次干湿循环后土-水特征曲线的模拟[J]. *岩土力学*, 2014, 35(3):689-695.
ZHANG J R, XU Q, SUN D A. Simulation of soil-water characteristic curve after multiple wet and dry cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(3):689-695.

[17] 李文杰, 张展羽, 王策, 等. 干湿循环过程中壤质黏土干缩裂缝的开闭规律[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(8):126-132.
LI W J, ZHANG Z Y, WANG C, et al. The opening and closing law of dry shrinkage cracks in loam clay during wet and dry cycle[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(8):126-132.

[18] 熊东红, 周红艺, 杜长江, 等. 土壤裂缝研究进展[J]. *土壤*, 2006, 38(3):249-255.
XIONG D H, ZHOU H Y, DU C J, et al. A review on the study of soil cracking[J]. *Soils*, 2006(3):249-255.

[19] 熊东红, 杨丹, 李佳佳, 等. 元谋干热河谷区退化坡地土壤裂缝形态发育的影响因子[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1):102-108.
XIONG D H, YANG D, LI J J, et al. The influencing factors of soil crack morphology development in degraded slope land in Yuanmou dry hot valley area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1):102-108.

[20] 蔡光华, 薛强, 刘松玉, 等. 湿干循环作用对压实黏土干裂特性的影响[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(6):1046-1051.
CAI G H, XUE Q, LIU S Y, et al. Effect of wet-dry cycle on cracking characteristics of compacted clay[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(6):1046-1051.

[21] 杨骥, 王媛, 冯迪. 黏性土开裂的细观角度分析[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(6):237-241.
YANG J, WANG Y, FENG D. Microscopic analysis of cracking in clay[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(6):237-241.

[22] 谈云志, 喻波, 刘晓玲, 等. 压实红黏土失水收缩过程的孔隙演化规律[J]. *岩土力学*, 2015, 36

- (2):369-375.
- TAN Y Z, YU B, LIU X L, et al. The pore evolution law of red clay shrinkage during water loss is verified [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(2): 369-375.
- [23] 许锡昌,周伟,陈善雄. 南阳重塑中膨胀土脱湿全过程裂隙开裂特征及影响因素分析[J]. *岩土力学*, 2015, 36(9):2569-2575.
- XU X C, ZHOU W, CHEN S X. Analysis of cracking characteristics and influencing factors of whole process of desiccation in expansive soil in Nanyang[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(9): 2569-2575.
- [24] 白露. 潮湿环境土遗址病害调查及相关问题分析[D]. 北京:北京大学, 2008:3-10.
- [25] 刘平. 土建筑遗址表部干缩开裂机制研究[D]. 兰州:兰州大学, 2009:167-171.
- [26] 王雨佳. 三星堆土遗址潮湿环境下开裂机理试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018:72-73.
- [27] 曲瑾. 三星堆古遗址土城墙开裂机理研究[D]. 成都:西南交通大学, 2020:116-118.
- [28] 赵凡,姚雪,胡芮,等. 三星堆祭祀区地表干缩开裂病害程度与土的性质关联性[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2025, 47(6):95-105.
- ZHAO F, YAO X, HU R, et al. Correlation between desiccation cracking and soil properties in Sanxingdui sacrifice archeology site [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2025, 47(6): 95-105.
- [29] MA S C, YAO Y D, BAO P, et al. Effects of moisture content on strength and compression properties of foundation soils of cultural relics in areas flooded by the Yellow River [J]. *Frontiers in Materials*, 2023, 10: 1186750.

(编辑 张欢)