

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.094



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



## 三星堆祭祀区地表干缩开裂病害程度 与土的性质的关联性

赵凡<sup>1</sup>, 姚雪<sup>2</sup>, 胡芮<sup>1</sup>, 黎俊豪<sup>1</sup>, 鲁海子<sup>1</sup>

(1. 四川省文物考古研究院, 成都 610041; 2. 西南民族大学 旅游与历史文化学院, 成都 610041)

**摘要:**干缩开裂是潮湿环境考古遗址的典型病害,为探究三星堆祭祀区地表干缩开裂病害程度与土的性质的关联性,通过土的性质分析和病害量化表征评估,采用灰色关联度法分析土的性质相关的 6 项指标与裂隙发育程度、裂隙破坏程度两方面的关联度,探讨各项指标对病害程度的影响及机制,并分析通过干预土的性质实现病害防控的可行性。结果表明,土的性质相关指标与病害程度的关联度大小排序依次为:黏粒含量>黏土矿物含量>塑性指数>初始干密度>初始含水率、有机质含量。其中,黏粒含量、黏土矿物含量和塑性指数为影响病害发育的控制性指标,此类指标越大,病害程度越严重;初始干密度、初始含水率、有机质含量为影响病害发育的参考性指标,初始干密度越小,裂隙破坏程度相对越严重。通过土的性质干预仅能在一定程度上控制病害发育,例如通过提高初始干密度改变裂隙形态。

**关键词:**三星堆;考古遗址;干缩开裂;病害程度;土的性质

**中图分类号:**TU449 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)06-0095-11

## Correlation between desiccation cracking and soil properties in Sanxingdui sacrifice archeology site

ZHAO Fan<sup>1</sup>, YAO Xue<sup>2</sup>, HU Rui<sup>1</sup>, LI Junhao<sup>1</sup>, LU Haizi<sup>1</sup>

(1. Sichuan Provincial Cultural Relics and Archeology Research Institute, Chengdu 610041, P. R. China;

2. College of Tourism Historical Culture, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, P. R. China)

**Abstract:** Desiccation cracking is a typical deterioration in archeological sites in wet environments. To explore the correlation between the development degree of desiccation cracking and soil properties in the Sanxingdui sacrifice archeology site, we conduct soil property analysis and quantitative characterization of deterioration, adopt the Grey Relation Analysis (GRA) to calculate the correlation degree between the six relevant indicators of soil properties and the development degree and damage degree of desiccation cracking. This research aims to

**收稿日期:**2023-05-19

**基金项目:**国家重点研发计划(2020YFC1522900);四川省科技计划(2023YFS0463);教育部人文社会科学研究项目(22YJCZH219)

**作者简介:**赵凡(1987-),男,副研究馆员,主要从事岩土文物保护研究,E-mail:zhaofan\_163@163.com。

姚雪(通信作者),女,博士,E-mail:yaozhishixue0726@126.com。

**Received:** 2023-05-19

**Foundation items:** National Key Research and Development Program (No. 2020YFC1522900); Sichuan Science and Technology Program (No. 2023YFS0463); Humanities and Social Science Fund of Ministry of Education of China (No. 22YJCZH219)

**Author brief:** ZHAO Fan (1987-), associate research librarian, main research interest: rock and soil of cultural relics conservation, E-mail: zhaofan\_163@163.com.

YAO Xue (corresponding author), PhD, E-mail: yaozhishixue0726@126.com.

study the magnitude and mechanism of each indicator's influence on the deterioration degree, and explore the feasibility of preventing and controlling deterioration by intervening in soil properties. The result shows that the correlation degree between soil properties and the desiccation cracking degree in descending order is as follows: clay particle content > clay mineral content > plasticity index > initial dry density > initial moisture content and organic matter content. The clay particle content, clay mineral content, and plasticity index are control indexes affecting the development of desiccation cracking, showing a positive correlation with it. The initial dry density, initial moisture content, and organic matter content are relevant indices, the smaller the initial dry density the more considerable the damage degree of desiccation cracking. Intervening in soil properties can only control the development of desiccation cracking to a certain extent; for example, increasing the initial dry density can change the morphology of desiccation cracking.

**Keywords:** Sanxingdui; archeological site; desiccation cracking; deterioration degree; soil properties

自2019年底以来,对三星堆遗址祭祀区开展了新一轮考古发掘,出土了大量精美的青铜器、象牙、金器、玉器等文物,揭露了6座祭祀坑(K3~K8)以及沟槽、小型圆形坑、房址等祭祀活动遗迹,引起了学界和社会的高度关注<sup>[1]</sup>。发掘工作正式启动前,考古遗址上方修建了保护大棚,避免了大气降水及地表水对遗址本体的冲刷侵蚀;然而也阻断了遗址土体上部的水分补给。在夏季强烈蒸发条件下,地表不断失水,短时间内发育出严重的干缩开裂病害,破坏了遗址土体的完整性并影响其环境风貌。观测发现,病害程度的区域特征与土的性质关系密切。

考古遗址发掘过程中,其赋存环境经历了由相对稳定的地下埋藏向不稳定的地上保存转变。在土体温度场、湿度场、应力场等急剧变化并相互耦合作用下,遗址常以突变或渐变的形式发育出各类病害<sup>[2]</sup>。尤其对于潮湿环境中的考古遗址,前期在地下埋藏环境中,土体含水率相对较高,后期经发掘暴露于较为干燥的大气环境中,含水率将因蒸发作用不断减小,直至与环境趋于平衡,导致土体表层失水收缩,发育出干缩开裂等病害<sup>[3]</sup>。根据前人调查结果,干缩开裂是潮湿环境下考古遗址的典型病害,在杭州良渚遗址<sup>[4]</sup>、南京报恩寺遗址<sup>[5]</sup>、荆州熊家冢遗址<sup>[6]</sup>、成都金沙遗址<sup>[7]</sup>等均有发生。目前,在土遗址保护领域,对于该病害的研究较少,主要通过调查分析及试验研究,对病害的表现形式、影响因素、形成机理等有了初步认识。王旭东<sup>[3]</sup>探讨了潮湿环境下土遗址的保护理念和技术,将干缩开裂作为裂隙病害的一种类型;张虎元等<sup>[4]</sup>对潮湿土遗址进行了界定及病害分类,指出遗址由地下环境转为较为干燥的大气环境将导致土体失水,发生收缩开裂;郭青林等<sup>[5]</sup>对南京报恩寺遗址地宫土的工程地质特性与病害的关系进行了分析,认为较高的塑性指数是土体表面开裂的主要影响因素;曲瑾等<sup>[8]</sup>

采用饱和糊状试样对三星堆月亮湾城墙剖面的干缩裂缝进行了研究,探讨了其开裂扩展机理。

黏性土干缩开裂也是岩土工程、环境工程、土壤学等领域的研究热点,学者们针对裂隙形态结构、量化方法、形成机理、影响因素等开展了大量研究。总体而言,学界对此现象和规律认识较为一致,即干缩开裂是一种常见自然现象,会破坏土体完整性,弱化土的工程性质。失水收缩是开裂形成的前提,宏观上是内部应力作用下的一种张拉破坏,受土的性质、失水速率、环境温度、土层结构等因素影响。基质吸力和抗拉强度是控制裂隙发育的关键力学指标<sup>[9-12]</sup>。关于土的性质对黏性土干缩开裂的影响,现有研究主要采用小比尺物理模型及简单数学模型,研究初始含水率<sup>[13]</sup>、初始干密度<sup>[14]</sup>、黏粒含量<sup>[15]</sup>、黏土矿物<sup>[16]</sup>、塑性指数<sup>[17]</sup>、有机质含量<sup>[18]</sup>等相关指标的影响机制,且多关注单个或两个指标的具体影响,尚未涉及真实环境中复杂对象在多个指标综合作用下各项指标影响大小的比较和影响机制的研究。

针对干缩开裂这一潮湿环境下考古遗址的典型病害,围绕土的性质对黏性土干缩开裂的影响,将三星堆祭祀区地表作为真实环境下的原位观测对象,通过对10个地表样方土的性质分析和干缩开裂病害的量化表征评估,采用灰色关联度法分析了土的性质中初始含水率、初始干密度、黏粒含量、黏土矿物含量、塑性指数、有机质含量6项指标与裂隙发育程度、裂隙破坏程度的关联度,探讨各项指标对病害程度的影响与机制,以及通过土的性质干预实现病害防控的可行性。

## 1 病害现状调查

### 1.1 病害发育进程

前期遗址地表首次揭露后(2020年4月至8月中旬),工作人员及时采用塑料薄膜覆盖保湿,随后

进行临时保护性回填,在此基础上修建了保护大棚。该阶段土体表层的含水状态与初始地下埋藏环境基本一致,未见明显干缩开裂病害。

后期遗址地表二次揭露后(2020年8月下旬至9月中旬),直接暴露于保护大棚内部。在夏季强烈蒸发条件下,土体表层水分不断由表及里散失,短时间内(约10~20 d)发育出明显的干缩开裂病害。其间,根据地表上方空气温湿度连续监测数据及地表土体含水率的间断测试结果,近地表空气温度范围为15.6~46.4℃,平均值为26.4℃,其中40℃以上天数达16 d;相对湿度范围为18.7%~98.7%,平均值为81.2%,温湿度日变化波动明显且趋势相反。当土样含水率由21.8%降低至9.6%时,下降速度前期较快,后期逐渐趋缓(图1)。根据干缩开裂病害的形态变化观察结果,结合唐朝生等<sup>[9]</sup>对黏性土压实试样失水收缩特性的阶段划分,并参考地表土体含水率的变化情况,病害发育进程可大致定性为“裂纹快速萌生-裂隙网络形成-裂隙基本稳定”3个阶段:第1阶段土体表面快速萌生树枝状裂纹;第2阶段裂纹不断延伸和扩展,土体表层逐渐形成相互贯通的裂隙网络;第3阶段裂隙延伸和扩展逐渐趋缓,土体表层裂隙网络形态基本稳定(图2)。

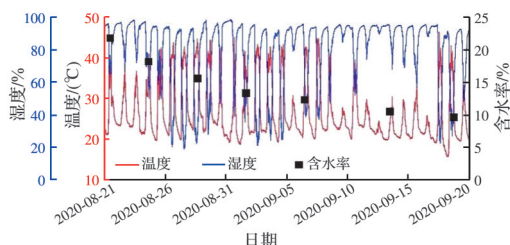


图1 地表空气温湿度和土样含水率变化

Fig. 1 Changes in surface air temperature, humidity, and soil moisture content

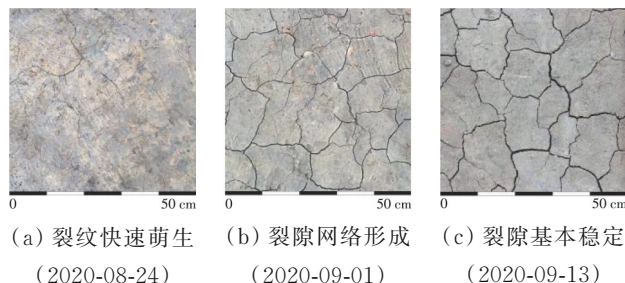


图2 干缩开裂病害发育阶段

Fig. 2 Development stages of desiccation cracking disease

## 1.2 病害表现形式

干缩开裂病害主要表现为大致呈竖向、相互交错的裂隙网络。根据裂隙网络的形态特点,可将其分为两类裂隙:一类为宽大且相互贯通的主干裂隙,裂隙间交点倾向于“Y”形,将土体表层切割成较

大的裂块;另一类为细小、贯通性较差的次级裂隙,与主干裂隙的交点倾向于“T”形或“十”形,将上述裂块切割成较小的裂区(图3)。这与唐朝生等<sup>[19]</sup>、林奎等<sup>[20]</sup>对干缩开裂形态的描述基本一致,也可用Nahlawi等<sup>[21]</sup>提出的干缩开裂裂纹扩展准则解释。

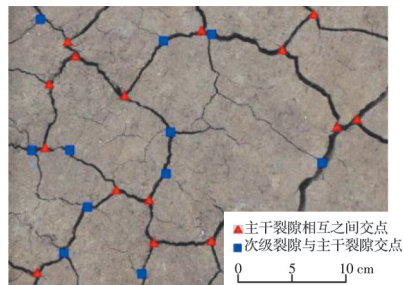


图3 裂隙网络形态特点

Fig. 3 Characteristics of fracture grid morphology

## 1.3 病害区域特征

干缩开裂病害在遗址地表分布广泛,病害程度区域特征明显,主要体现为不同区域的裂隙尺寸及裂隙网络形态各不相同。根据考古工作中土质土色的辨识结果,不同区域土的类型也存在差异。通过黏性土干缩开裂影响因素的分析,在遗址地表揭露时间与赋存环境相同的条件下,土体干缩开裂影响因素中,失水速率、环境温度、土层结构等条件基本一致,土的性质差异应为上述病害区域特征的主要原因。观测发现,相邻区域土的类型不同,病害程度差异显著(图4),进一步验证了上述分析。由此可知,病害程度区域特征与土的性质差异关系密切。

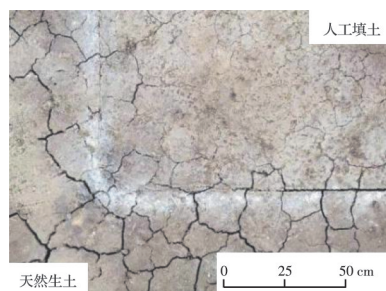


图4 不同类型土病害程度差异对比

Fig. 4 Comparison of deterioration degree among different soil types

## 2 遗址土的性质分析

### 2.1 土样简介

在遗址地表二次揭露之初(干缩开裂病害未发育),为查明地表土的性质,依据取样尽量减小对遗址本体破坏的原则,采集地表上层代表性原状土样10件,控制取样深度约10 cm,取样位置见图5。土样包括天然生土和人工填土两类,其中SJ-M-6和SJ-M-10为发掘揭露重要建筑遗迹回填区的人工填



土,其余为祭祀坑同时期的天然生土。

2.2 测试方法

依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),测试土样的含水率、密度、比重、颗粒组成、

界限含水率、收缩系数、有机质含量等主要物理及水理性质;同时,采用X射线衍射仪测试土样矿物成分的种类及相对含量。

2.3 结果分析

表1为土样主要物理及水理性质。由表1可知,10件遗址地表土样中,6件为粉质黏土,4件为黏土。含水率为20.7%~24.3%,属较高含水率非饱和土;天然密度为1.91~2.07 g/cm<sup>3</sup>,干密度为1.56~1.69 g/cm<sup>3</sup>,密实度存在一定差异;比重为2.71~2.74;有机质含量为0.35%~0.95%。颗粒组成以粉粒和黏粒为主、砂粒次之,其中黏土的黏粒含量为43.71%~54.19%,粉质黏土的黏粒含量为17.38%~23.56%。与粉质黏土相比,黏土的液限和塑限整体偏大,缩限整体偏小。黏土的塑性指数为17.2~18.9,粉质黏土的塑性指数为10.4~15.6;黏土的液性指数为-0.10~0.02,处于坚硬-硬塑状态,粉质黏土的液性指数为0.03~0.75,处于硬塑-可塑状态;黏土的收缩系数为0.37~0.42,粉质黏土的收缩系数为0.31~0.40。

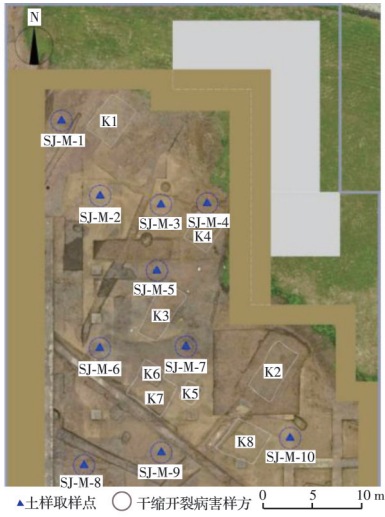


图5 土样采样点及干缩开裂病害样方位置

Fig. 5 Locations of soil samples and desiccation cracking quadrats

表1 土样主要物理及水理性质

Table 1 Main physical and hydro-physical properties of soil samples

土样 编号	含水 率/%	天然密 度/(g/ cm <sup>3</sup> )	干密度/ (g/ cm <sup>3</sup> )	比重	饱和 度/%	颗粒组成(%)				液 限/%	塑 限/%	缩 限/%	塑性 指数	液性 指数	收缩 系数	有机 质含 量/%	土的定名
						0.5~ 0.25	0.25~ 0.075	0.075~ 0.005	< 0.005								
						mm	mm	mm	mm								
SJ-M-1	21.8	2.01	1.65	2.74	90.5	0.00	4.03	46.07	49.9	39.7	22.5	15.1	17.2	-0.04	0.38	0.95	黏土
SJ-M-2	24.3	2.03	1.63	2.72	99.3	2.18	21.74	58.70	17.38	27.0	16.3	15.7	10.7	0.75	0.31	0.78	粉质黏土
SJ-M-3	22.9	1.95	1.59	2.73	86.8	5.02	19.26	56.66	19.06	29.8	16.3	13.9	13.5	0.49	0.38	0.59	粉质黏土
SJ-M-4	22.5	2.07	1.69	2.73	99.8	2.34	4.89	45.18	47.59	39.8	22.2	14.2	17.6	0.02	0.37	0.48	黏土
SJ-M-5	20.7	1.99	1.65	2.72	86.7	0.00	9.40	69.84	20.76	35.9	20.3	14.9	15.6	0.03	0.40	0.51	粉质黏土
SJ-M-6	23.5	2.03	1.64	2.71	98.2	2.59	16.96	60.83	19.62	27.2	16.8	16.7	10.4	0.64	0.34	0.79	粉质黏土
SJ-M-7	22.2	1.91	1.56	2.74	80.8	0.00	3.06	42.75	54.19	42.5	23.6	12.9	18.9	-0.07	0.42	0.38	黏土
SJ-M-8	21.9	1.94	1.59	2.73	83.6	1.15	4.63	50.51	43.71	40.9	23.7	14.3	17.2	-0.10	0.38	0.53	黏土
SJ-M-9	21.6	1.95	1.60	2.71	84.8	4.4	23.60	53.77	18.23	27.4	16.6	16.3	10.8	0.46	0.32	0.35	粉质黏土
SJ-M-10	22.5	1.94	1.58	2.72	85.3	6.42	17.04	52.98	23.56	29.8	18.3	15.1	11.5	0.37	0.34	0.87	粉质黏土

表2为土样矿物成分。由表2可知,土样原生矿物以石英和钠长石为主,二者总含量为58.2%~81.8%;钾长石、钠镁闪石、白云母次之,浅闪石仅在土样SJ-M-9中检出。次生矿物均为黏土矿物,以蒙脱石为主,斜绿泥石次之。黏土矿物是控制黏性土工程性质的重要因素,黏土中含量为15.7%~32.1%,粉质黏土中含量为2.7%~17.9%;尤其是蒙脱石,在黏土中的含量高达15.7%~30.1%。

总体上,土样均为黏性土,其中黏土和粉质黏土在颗粒组成、界限含水率、矿物成分等方面差异明显,但同类土各项性质指标之间具有较好的一致性。根据土的性质对黏性土干缩开裂影响的相关

研究<sup>[13-18]</sup>,本研究选取初始含水率、初始干密度、黏粒含量、黏土矿物含量、塑性指数、有机质含量6项作为土的性质指标,分析其与干缩开裂病害程度的关联性;其中,初始含水率和初始干密度为土样测试值。

3 病害量化表征评估

3.1 病害表面形态记录

根据干缩开裂病害的发育进程特点,选择裂隙网络形态基本稳定阶段的同一时间(2020-09-16),以前期土样取样点为圆心、1 m为半径的圆形区域作为样方(图4),样方编号与土样取样点编号一致。

表 2 土样矿物成分  
Table 2 Mineral composition of soil samples

样品 编号	石英	钠长 石	钾长 石	镁钠 闪石	浅闪 石	白云 母	蒙脱 石	斜绿 泥石
SJ-M-1	51.9	19.4	5	5.9		2.1	15.7	
SJ-M-2	58.1	23.7	6.4	5.7		3.3		2.8
SJ-M-3	52.3	25.1	11.1	6.1		2.7		2.7
SJ-M-4	42.4	17.7	13.9			4.4	21.6	
SJ-M-5	51.8	16.8		10.4		3.1	17.9	
SJ-M-6	38.7	29.8	7.2	13.1		6.3		4.9
SJ-M-7	45.4	12.8	5.3			4.4	26.1	6
SJ-M-8	50.1	13.5				4.3	30.1	2
SJ-M-9	49.3	21.5	5.9		11.5	4.6		7.2
SJ-M-10	34.8	30.5	11.4	9.6		7.4		6.3

每个样方内部按照系统抽样法,等间距选择 5 处 50 cm×50 cm 的正方形区域作为典型病害记录区,具体布设见图 6。每个记录区借助定位标识,采用数码相机记录病害表面形态正射图像。

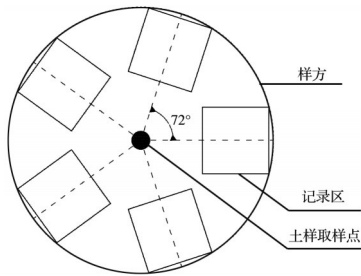


图 6 典型病害记录区布设  
Fig. 6 Spatial distribution of typical deterioration recording areas

3.2 病害特征量化表征

参考唐朝生等<sup>[22]</sup>、黎伟等<sup>[23]</sup>提出的土体干缩开裂表面形态量化表征方法,采用数字图像处理技术,以病害正射图像为原图,通过 MATLAB 软件自编程序完成灰度图转换、分区阈值二值化、杂点去除、桥接、骨架化等图像处理流程(图 7),计算得到表面裂隙率、裂隙总长度、裂隙平均宽度、裂隙节点个数、裂隙条数、土块个数和分形维数 7 项病害特征表征指标(表 3)。其中,分形维数采用盒维数法计算,结果见表 4。

3.3 病害程度量化评估

对于土遗址病害程度的评估,根据评估目的,既有侧重病害现象的,也有侧重病害结果的<sup>[24]</sup>。为了保证干缩开裂病害程度评估结果的全面性,从病害自身发育和破坏结果两个方面分别定义裂隙发育程度和裂隙破坏程度,对病害程度进行综合评估;前者主要反映裂隙尺寸大小,后者主要反映裂隙网络密度。

由于各项病害特征表征指标的物理意义不同,其对裂隙发育程度和裂隙破坏程度的影响权重存

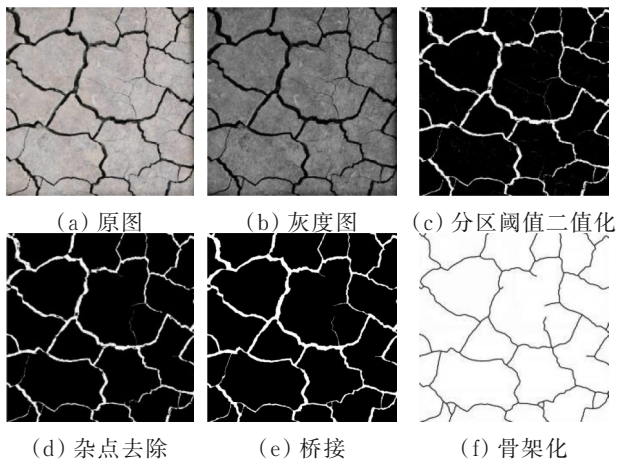


图 7 病害图像处理流程(图像尺寸为 50 cm×50 cm)  
Fig. 7 Deterioration image processing workflow  
(image size: 50 cm×50 cm)

表 3 病害特征表征指标  
Table 3 Deterioration characterization indexes

序号	名称	符号	定义
1	表面裂隙率	$R$	裂隙面积与总面积之比
2	裂隙总长度	$L$	裂隙迹线长度之和
3	裂隙平均宽度	$W$	裂隙面积与裂隙总长度之比
4	裂隙节点个数	$N_n$	裂隙迹线的交点与和端点个数之和,包含裂隙与四周边界的交点
5	裂隙条数	$N_s$	裂隙 2 个相邻节点之间迹线条数之和
6	土块个数	$N_a$	裂隙和四周边界切割土体形成土块个数之和
7	分形维数	$K$	描述裂隙分形自相似性程度大小,反映裂隙形态的复杂性和不规则性

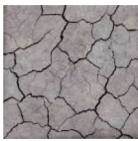
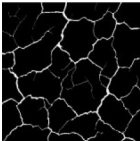

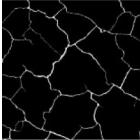

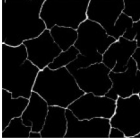



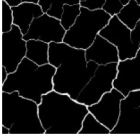

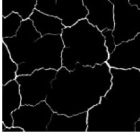

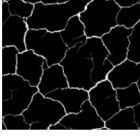

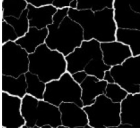

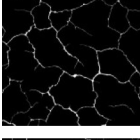

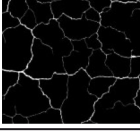
在差异。为此,选用 AHP 算法(层次分析法),在定性评价的基础上,通过定量计算确定各项表征指标对裂隙发育程度和裂隙破坏程度的影响权重。主要步骤如下:首先,通过业内 3 位专家综合评分,分别构建各项表征指标对裂隙发育程度、裂隙破坏程度影响权重的评判矩阵;然后,将其转换为标准数学矩阵,采用均值法进行归一化处理,分别计算各项表征指标对裂隙发育程度、裂隙破坏程度的影响权重  $Q_i$ ;最后,对计算结果进行一致性检验,结果显示,一致性指标( $C.I.$ )和随机一致性比率( $C.R.$ )均小于 0.1,通过检验,结果见表 5。

在上述基础上,采用极值法对表 4 中病害特征表征指标结果进行归一化处理,计算样方各项表征指标的无量纲数  $Z_i$ 。根据式(1),将每个样方各项表征指标的无量纲数  $Z_i$  乘以对应的影响权重  $Q_i$  后求和,分别计算每个样方的裂隙发育程度评估值  $D_1$  和裂隙破坏程度评估值  $D_2$ ,结果见表 6。

$$C=\sum_{i=1}^N Q_i Z_i, i=1,2,3 \cdots 7$$

(1)

表 4 病害代表性图像及病害特征表征指标  
Table 4 Representative images of deterioration and deterioration characterization indexes

样方编号	病害代表性图像		病害特征表征指标平均值						
	原图	数字图像	$R/\%$	$L/\text{cm}$	$W/\text{mm}$	$N_n$	$N_s$	$N_a$	$K$
SJ-M-1			6.38	469	3.40	98	89	25	1.98
SJ-M-2			4.63	394	2.94	71	74	19	1.95
SJ-M-3			4.49	413	2.72	76	77	21	1.95
SJ-M-4			7.86	391	5.03	72	72	21	1.96
SJ-M-5			6.42	435	3.69	78	81	25	1.97
SJ-M-6			4.74	364	3.25	73	73	17	1.96
SJ-M-7			6.37	510	3.12	92	94	26	1.99
SJ-M-8			6.29	492	3.20	94	95	27	2
SJ-M-9			4.29	440	2.44	91	92	24	1.96
SJ-M-10			4.58	472	2.43	92	91	25	1.98

注:图像尺寸为 50 cm×50 cm。

4 结果与讨论

4.1 土的性质对病害程度的影响

目前,在土的性质对黏性土干缩开裂的影响方面,各项指标对干缩开裂的影响强弱尚不明晰。遗址地表干缩开裂病害发育受土的性质相关指标综

合影响,且部分指标之间可能存在一定关联性,这就构成了灰色系统。灰色关联度分析是基于灰色系统理论建立的一种研究系统内部因素间关联性大小的分析方法,能最大程度减少因信息不对称造成的数据损失,尽量客观地描述系统中各因素(子系统)



表 5 表征指标对病害程度影响权重的评判矩阵及结果

Table 5 Judgement matrix and results of the influence weights of characterization indexes on deterioration degree

病害程度	表征指标	评判矩阵								权重 $Q_i$
			$R$	$L$	$W$	$N_n$	$N_s$	$N_a$	$K$	
裂隙发育程度 <sup>①</sup>	表面裂隙率	$R$	1	4	4	7	5	6	6	0.36
	裂隙总长度	$L$	1/4	1	2	4	3	4	4	0.08
	裂隙平均宽度	$W$	1/4	1/2	1	4	3	3	3	0.15
	裂隙节点个数	$N_n$	1/7	1/4	1/4	1	1/3	1	1/2	0.04
	裂隙条数	$N_s$	1/5	1/3	1/3	3	1	3	2	0.07
	土块个数	$N_a$	1/6	1/4	1/3	1	1/3	1	1	0.20
	分形维数	$K$	1/6	1/4	1/3	2	1/2	1	1	0.09
裂隙破坏程度 <sup>②</sup>	表面裂隙率	$R$	1	1/2	2	1/3	1/6	1/4	1/3	0.08
	裂隙总长度	$L$	2	1	3	1/3	1/5	1/5	1/3	0.04
	裂隙平均宽度	$W$	1/2	1/3	1	1/4	1/6	1/5	1/5	0.03
	裂隙节点个数	$N_n$	3	3	4	1	1/3	1/2	1	0.15
	裂隙条数	$N_s$	6	5	6	3	1	2	3	0.24
	土块个数	$N_a$	4	5	5	2	1/2	1	2	0.33
	分形维数	$K$	3	3	5	1	1/3	1/2	1	0.14

注:①C.I. 为 0.042,C.R. 为 0.032,通过检验;②C.I. 为 0.045,C.R. 为 0.034,通过检验。

表 6 病害程度评估值

Table 6 Assessment values of deterioration degree

样方编号	裂隙发育程度 $D_1$		样方编号	裂隙破坏程度 $D_2$	
	裂隙发育程度 $D_1$	裂隙破坏程度 $D_2$		裂隙发育程度 $D_1$	裂隙破坏程度 $D_2$
SJ-M-1	0.63	0.75	SJ-M-6	0.12	0.07
SJ-M-2	0.13	0.10	SJ-M-7	0.70	0.86
SJ-M-3	0.16	0.22	SJ-M-8	0.69	0.92
SJ-M-4	0.60	0.22	SJ-M-9	0.28	0.60
SJ-M-5	0.52	0.48	SJ-M-10	0.38	0.71

间关联的强弱、大小等关系<sup>[25]</sup>。相比传统线性分析法,该方法在判定模糊系统中各要素的关联序方面具有一定优势,不仅所需数据量小,而且计算过程也简单。

采用灰色关联度分析法分别计算了土的性质相关的 6 项指标与裂隙发育程度、裂隙网破坏程度之间的关联度。主要步骤如下:首先,以样方土的性质相关指标作为比较数列  $\chi_i$ ,以病害程度评估值作为参考数列  $\chi_0$ ,采用均值法将比较数列  $\chi_i$  和参考数列  $\chi_0$  转换为无量纲数;然后,按照式(2)计算每个样方比较数列  $\chi_i$  与参考数列  $\chi_0$  的绝对差值  $\Delta_i(k)$ ,并筛选出全部样方绝对差值中的最大值  $\max\Delta_i(k)$  和最小值  $\min\Delta_i(k)$ ;最后,按照式(3)计算各项比较数列与参考数列的关联度在全部样方中的平均值  $\gamma_i$ ,该平均值即土的性质各项相关指标与病害程度的关联度<sup>[26]</sup>。

$$\Delta_i(k)=|x_0-x_i|,i=1,2\cdots 6;k=1,2\cdots 10 \quad (2)$$

$$\gamma_i=\frac{1}{N}\sum_{k=1}^N\frac{\min\Delta_i(k)+\rho\max\Delta_i(k)}{\Delta_i(k)+\rho\max\Delta_i(k)}, \quad (3)$$

$$i=1,2\cdots 6;k=1,2\cdots 10$$

式中: $\rho$ 为分辨系数,通常取 0.5<sup>[26]</sup>。

在上述基础上,对土的性质相关指标与病害程度关联度的计算结果进行排序和分级,结果见图 8。

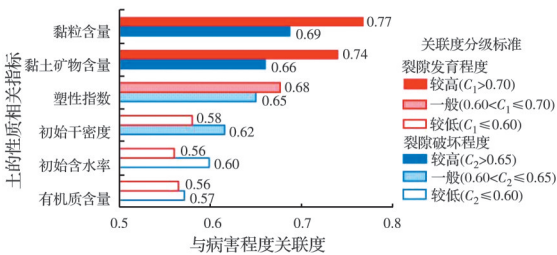


图 8 土的性质相关指标与病害程度的关联度排序及分级

Fig. 8 Ranking and classification of relevancy between soil property-related indexes and deterioration degree

由图 8 可见,总体上,土的性质相关指标与病害程度的关联度大小排序依次为:黏粒含量>黏土矿物含量>塑性指数>初始干密度>初始含水率、有机质含量。其中,黏粒含量和黏土矿物含量与病害程度关联度高;塑性指数与病害程度关联度一般;初始干密度与裂隙发育程度关联度较低,而与裂隙破坏程度关联度一般;初始含水率和有机质含量与病害程度关联度较低。除初始干密度外,其余各项指标与裂隙发育程度和裂隙破坏程度两方面的关联度分级均相同,说明从这两方面对病害程度进行综合评估,所得结果既具有整体一致性,又可反映局部差异性。

4.2 土的性质对病害程度影响的机制

目前,在土的性质对黏性土干缩开裂影响方面,以单个或两个指标作为变量时,各项指标对干

缩开裂的影响机制较为明确。然而,针对遗址地表,干缩开裂病害发育受土的性质相关指标综合影响,以多个指标作为变量时,各项指标的实际影响机制尚不清楚。

首先从数理统计角度,分别绘制土的性质相关

的 6 项指标与裂隙发育程度、裂隙破坏程度之间的关系散点图并拟合曲线(图 9),初步了解各项指标与病害程度之间的统计规律;然后结合相关领域研究成果,对统计规律特征进行了解释;最后阐明各项指标对病害程度影响的机制。

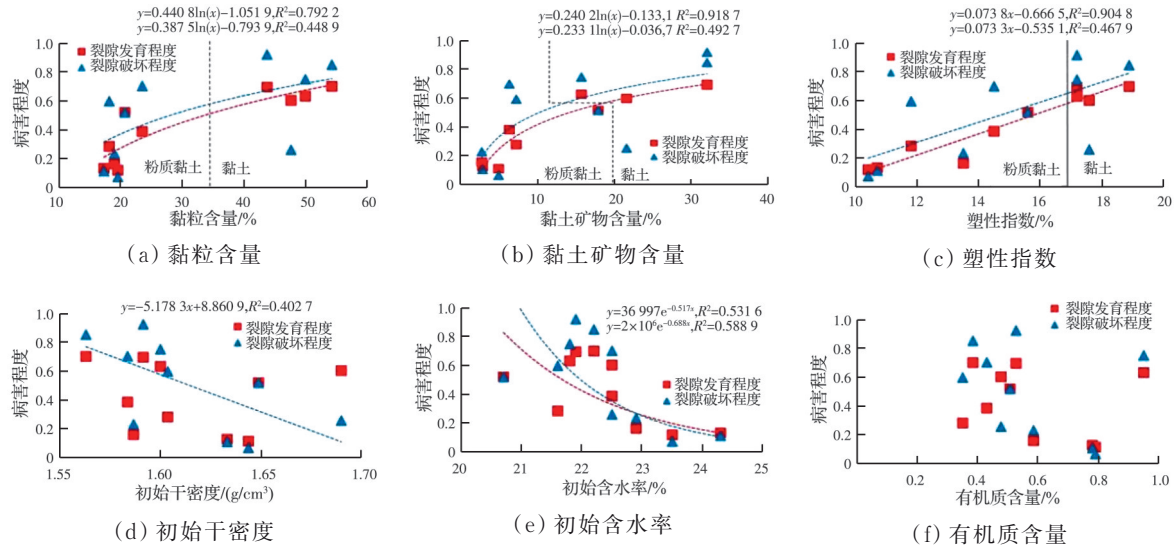


图 9 土的性质相关指标与病害程度的关系

Fig. 9 Relationship between soil property-related indexes and deterioration degree

1) 黏粒含量。由图 9(a)可见,黏粒含量与裂隙发育程度、裂隙破坏程度均呈正相关,可拟合为对数函数关系,且与裂隙发育程度拟合度较高。黏粒含量越高,干缩开裂病害程度越严重;随着黏粒含量的增加,裂隙发育程度的增速趋缓。黏土和粉质黏土中黏粒含量分化明显,前者的病害程度总体较后者严重。

干缩开裂本质上是黏性土在失水过程中因土体收缩导致结构形态变化的宏观体现,通常土体收缩性越大,干缩开裂程度越高<sup>[27]</sup>。根据黏性土“粒间收缩”理论:土粒粒径越小,在高含水率条件下,土粒外围吸附结合水形成的水化膜越厚,粒间结合水占据的空间也越大;相应地,在含水率减小时,土粒外围失去结合水引起的水化膜厚度减小越多,且由于基质吸力作用,土粒重排靠拢形成的粒间孔隙越大,土体收缩性越大<sup>[28]</sup>。理论上,黏粒含量越高,土体收缩性越大,干缩开裂病害程度也越严重,上述统计规律与此相符。由此可见,黏粒含量是影响干缩开裂病害发育的主要控制性指标,该指标越大,病害程度越严重。

2) 黏土矿物含量。由图 9(b)可见,黏土矿物含量与病害程度之间的统计规律特征和黏粒含量相似。

黏土矿物是一类具有层状构造的含水铝硅酸盐,通常对黏性土收缩性的影响主要体现在两方

面:一是颗粒细小(一般粒径小于  $2 \mu\text{m}$ ),呈扁平状,具有较大比表面能,通过“粒间收缩”影响土体收缩性,与黏粒含量的影响方式相同;二是层状晶体结构,尤其具有活动性晶格的蒙脱石,其晶格层间易失去结合水,通过“层间收缩”影响土体收缩性<sup>[29]</sup>。在高含水率条件下,蒙脱石层间和粒间会吸附大量层间水和结合水;当含水率减小时,层间和粒间失水量大,土体收缩性也更大。Omid 等<sup>[17]</sup>通过试验发现,蒙脱石试样的收缩应变达  $16.4\%$ 。理论上,黏土矿物含量越高(尤其蒙脱石含量越高),土体收缩性越大,干缩开裂病害程度也越严重,上述统计规律与此相符。由此可见,黏土矿物含量是影响干缩开裂病害发育的主要控制性指标,该指标值越大,病害程度越严重。

3) 塑性指数。由图 9(c)可见,塑性指数与裂隙发育程度、裂隙破坏程度均呈正相关,可拟合为线性函数关系,且与前者的拟合度高。塑性指数越大,干缩开裂病害程度越严重;随着塑性指数增大,裂隙发育程度的增速稳定。相比粉质黏土,黏土的塑性指数更大,前者的病害程度总体较后者严重。

塑性指数是土在可塑状态下的含水率变化范围,与土的粒径大小和矿物成分密切相关。一般而言,土粒粒径越小、黏土矿物(尤其蒙脱石等膨胀性黏土矿物)含量越多,塑性指数越大。理论上,塑性指数综合反映了前两项指标对干缩开裂病害程度



影响的机制:塑性指数越大,土体收缩性越大,干缩开裂病害程度也越严重,上述统计规律与此相符,但具体特点与前两项指标略有差异。其主要原因为:遗址地表干缩开裂病害发育过程中,土样初始含水率(20.7%~24.3%)小于液限(27.0%~42.5%),且初始含水率与塑限之间的差值(-1.4%~8%)也小于塑性指数(10.4%~18.9%),导致塑性指数对病害发育的影响体现不充分。由此可见,塑性指数可作为影响干缩开裂病害发育的次要控制性指标,该指标值越大,病害程度越严重。

4)初始干密度。由图9(d)可见,初始干密度与裂隙发育程度相关性不明显,与裂隙破坏程度呈负相关,可拟合为线性函数关系,拟合度中等。初始干密度越小,裂隙破坏程度越严重。

初始干密度对土的收缩性影响主要体现在两方面:一是该指标值越小,粒间孔隙越大,在含水率减小时“粒间收缩”越明显,土体收缩性越大;二是该指标值越小,力学强度越低,含水率减小时抑制张拉破坏的作用越弱,土体收缩性也越大。理论上,初始干密度越小,土体收缩性越大,干缩开裂病害程度也越严重,上述统计规律与此存在一定差异,具体表现为仅体现出对裂隙破坏程度的影响,即初始干密度越小,裂隙网络密度越大,土体结构越破碎。初步分析其主要原因为:前3项指标对土体收缩性的影响显著,弱化了初始干密度与病害程度之间的联系,尤其无法反映对裂隙发育程度的影响。由此可见,初始干密度为影响干缩开裂病害发育的参考性指标,该指标值越小,裂隙破坏程度相对越严重。

5)初始含水率。由图9(e)可见,初始含水率与裂隙发育程度、裂隙破坏程度均呈负相关,用指数函数拟合,拟合度中等。初始含水率越低,干缩开裂病害程度越严重。

初始含水率对土的收缩性影响主要体现在:该指标值越大,粒间孔隙填充水量越多,在含水率减小时“粒间收缩”越明显,土体收缩性越大。理论上,初始含水率越大,土体收缩性越大,干缩开裂病害程度也越严重,上述统计规律与此相反。初步分析其主要原因,除该指标与病害程度关联较低,导致其对病害程度的影响无法体现外,还与土样初始含水率相对较低且范围较小有关。参考唐朝生等<sup>[13]</sup>对不同初始含水率压实试样的干燥收缩试验结果:初始含水率越大,收缩变形量越大,两者呈指数函数关系;初始含水率为35%、26%和19%的试样,干燥结束后径向收缩应变(与干缩开裂表面形态关系密切)分别为8.60%、4.90%~4.92%和2.24%~2.40%。若将遗址地表土样初始含水率(20.7%~24.3%)与之类比,其径向收缩应变约在

3.0%~4.1%,整体量级较低且变化范围较小,对土体收缩性的影响较小。由此可见,初始含水率为影响干缩开裂病害发育的参考性指标,对病害程度影响不明显。

6)有机质含量。由图9(f)可见,有机质含量与裂隙发育程度、裂隙破坏程度的相关性均不明显。

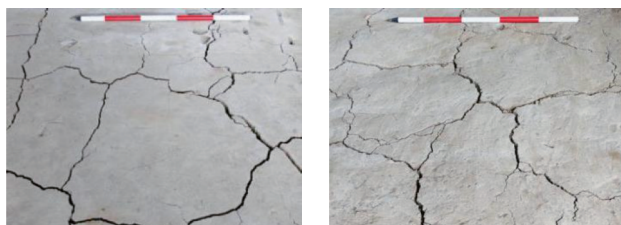
有机质含量对土的收缩性的影响机制存在争议:一种观点认为,有机质吸水性极强,可通过增大土粒收缩性促进土体开裂;另一种观点认为,有机质结构特殊,可通过稳定团聚体结构抑制土体开裂<sup>[18]</sup>。如王翔等<sup>[30]</sup>开展了不同生物炭掺量对下蜀土和红黏土干缩开裂特征影响的试验研究,结果表明,生物炭对前者土体开裂具有抑制作用,而对后者具有促进作用,其影响机制包括:作为非塑性材料占据土体收缩空间,以及影响土粒水化膜厚度两方面。根据现有研究,有机质含量对土体收缩性的影响机制尚不明确,上述统计规律也能一定程度反映该现状。同时,遗址地表土样有机质含量仅为0.35%~0.95%,远低于有机质土的下限(5%),其对土体收缩性影响微弱。由此可见,有机质含量为干缩开裂病害发育的参考性指标,对病害程度的影响不明显。

#### 4.3 干预土的性质以防控病害的可行性

由土的性质特点可知,黏粒含量、黏土矿物含量、塑性指数和有机质含量由土粒材料组成决定,属于固定常量,无法进行干预;初始干密度和初始含水率分别由土体密实程度和含水状态决定,属于状态变量,可随外部条件改变进行干预。根据前述研究结果,初始干密度和初始含水率为影响干缩开裂病害发育的参考性指标,对病害程度的影响较小,仅通过干预土的性质难以预防病害发生。但初始干密度越小,裂隙破坏程度相对越严重,因此可采取适当方式对初始干密度进行干预,以在一定程度上控制病害发育。例如,由样方SJ-M-4和SJ-M-7对比可知:土的性质中,前者初始干密度(1.69 g/cm<sup>3</sup>)大于后者(1.56 g/cm<sup>3</sup>),其他指标接近(表1、表2);病害程度评估结果表明,前者裂隙破坏程度(0.22)小于后者(0.86)(表4);病害代表性图像形态显示,前者裂隙网络密度也小于后者(表4)。

据此开展现场探索性试验:以地表干缩开裂典型病害区域作为试验区,首先采用滴灌方式对试验区内多个点位的较深裂隙尖端同时进行缓慢间歇式补水,将裂隙分布深度带的土体自下而上均匀、充分润湿至最优含水率;之后对表层土体碾压夯实,使其接近最大干密度;最后自然养护,直至干缩开裂病害发育至裂隙基本稳定阶段。观测发现,裂隙网络密度明显减小,但裂隙自身宽度略有增大,以宽大且相互贯通的主干裂隙为主(图10),这种裂

隙形态可为后期采取灌浆加固措施治理病害提供较好条件。需注意的是,宽大裂隙在一定程度上可为水分运移提供便利,促进裂隙进一步发育。因此,可考虑在满足遗址保护原则和要求的前提下,在地表揭露初期,采用适当的碾压夯实等方法,提高初始干密度,进而改善裂隙形态。



(a) 裂隙形态1

(b) 裂隙形态2

图10 提高初始干密度后裂隙的形态

Fig. 10 Fracture morphology after increasing the initial dry density

## 5 结论

1) 遗址地表干缩开裂病害发育进程大致经历了“裂纹快速萌生-裂隙网络形成-裂隙形态稳定”3个阶段,主要表现为大致呈竖向、纵横交错且相互交切的裂隙网络。

2) 土的性质相关指标与病害程度关联度大小排序依次为:黏粒含量>黏土矿物含量>塑性指数>初始干密度>初始含水率、有机质含量。

3) 黏粒含量、黏土矿物含量和塑性指数为影响病害发育的控制性指标,此类指标值越大,病害程度越严重。初始干密度、初始含水率、有机质含量为影响病害发育的参考性指标,初始干密度越小,裂隙破坏程度相对越严重。

4) 通过干预土的性质无法预防病害发生,仅能在一定程度上控制病害发育,例如提高初始干密度,以改变裂隙形态。

## 参考文献

- [1] 冉宏林, 雷雨, 赵昊, 等. 四川广汉市三星堆遗址祭祀区[J]. 考古, 2022(7): 15-33.
- RAN H L, LEI Y, ZHAO H, et al. Sacrificial area of the Sanxingdui site in Guanghan city, Sichuan [J]. Archaeology, 2022(7): 15-33. (in Chinese)
- [2] 孙满利, 张景科. 文物保护学的理论探讨[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 192-198.
- SUN M L, ZHANG J K. Theoretical discussion on conservation of cultural heritages [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(2): 192-198. (in Chinese)
- [3] 王旭东. 潮湿环境土遗址保护理念探索与保护技术展望[J]. 敦煌研究, 2013(1): 1-6, 125.
- WANG X D. Exploration of conservation philosophy for earthen sites in humid environments and an outlook on future conservation technology [J]. Dunhuang Research, 2013(1): 1-6, 125. (in Chinese)
- [4] 张虎元, 李敏, 王旭东, 等. 潮湿土遗址界定及病害分类研究[J]. 敦煌研究, 2011(6): 70-75, 128.
- ZHANG H Y, LI M, WANG X D, et al. Status and countermeasures of conservation of earthen monuments in moist circumstances [J]. Dunhuang Research, 2011 (6): 70-75, 128. (in Chinese)
- [5] 郭青林, 王旭东, 张虎元, 等. 南京报恩寺遗址土工程地质特征与病害关系研究[J]. 敦煌研究, 2011(6): 76-80, 129.
- GUO Q L, WANG X D, ZHANG H Y, et al. The relationship between the engineering-geological characteristic and the deterioration of the earth at Nanjing Baoensi temple [J]. Dunhuang Research, 2011(6): 76-80, 129. (in Chinese)
- [6] 陈光利, 魏彦飞, 袁万红, 等. 熊家冢土遗址保护概述[J]. 东南文化, 2009(3): 114-118.
- CHEN G L, WEI Y F, YUAN W H, et al. An overview on the soil site preservation of Xiongjiazhong [J]. Southeast Culture, 2009(3): 114-118. (in Chinese)
- [7] 马涛, 王展, 纪娟, 等. 南方典型遗址博物馆文物病害与环境的关联研究[J]. 文博, 2015(4): 71-77, 112.
- MA T, WANG Z, JI J, et al. The study on the relationships between the diseases of the cultural relics and the environments of the typical site museums in southern China [J]. Relics and Museology, 2015(4): 71-77, 112. (in Chinese)
- [8] 曲瑾, 马建林, 杨柏. 三星堆城墙干缩裂缝开裂与扩展机理[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 610-618.
- QU J, MA J L, YANG B. Crack initiation and propagation mechanism of earth wall at Sanxingdui city [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 610-618. (in Chinese)
- [9] 唐朝生, 施斌, 刘春. 膨胀土收缩开裂特性研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 663-673.
- TANG C S, SHI B, LIU C. Study on desiccation cracking behaviour of expansive soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 663-673. (in Chinese)
- [10] 刘平, 张虎元, 陈毅, 等. 土的干缩开裂研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊1): 352-358.
- LIU P, ZHANG H Y, CHEN Y, et al. Review on desiccation cracking of clay soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(Sup 1): 352-358. (in Chinese)
- [11] 周明涛, 杨森, 秦健坤, 等. 土壤裂隙研究的回顾与展望[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 988-995.
- ZHOU M T, YANG S, QIN J K, et al. Review on the research of soil cracks [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(4): 988-995. (in Chinese)

- [12] 冷挺,唐朝生,徐丹,等.膨胀土工程地质特性研究进展[J].工程地质学报,2018,26(1):112-128.  
LENG T, TANG C S, XU D, et al. Advance on the engineering geological characteristics of expansive soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 112-128. (in Chinese)
- [13] 唐朝生,崔玉军, TANG Ann-Minh, 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. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1271-1279. (in Chinese)
- [14] 叶伟,马福恒,胡江,等.压实黏土干缩裂缝扩展规律试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 102-109.  
YE W, MA F H, HU J, et al. Experimental study on propagation law of shrinkage cracks in compacted clay [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 102-109. (in Chinese)
- [15] ALBRECHT B A, BENSON C H. Effect of desiccation on compacted natural clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(1): 67-75.
- [16] 夏冬生,刘清秉,项伟,等.蒙脱石含量对黏土表面干缩裂隙影响试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 83-86, 92.  
XIA D S, LIU Q B, XIANG W, et al. Impact of montmorillonite content on desiccation cracks on clay surface [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(9): 83-86, 92. (in Chinese)
- [17] OMIDI G H, THOMAS J C, BROWN K W. Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1996, 89(1): 91-103.
- [18] ZHANG Z B, ZHOU H, LIN H, et al. Puddling intensity, sesquioxides, and soil organic carbon impacts on crack patterns of two paddy soils [J]. Geoderma, 2016, 262: 155-164.
- [19] 唐朝生,施斌,崔玉军.土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1415-1423.  
TANG C S, SHI B, CUI Y J. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1415-1423. (in Chinese)
- [20] 林鑫,唐朝生,程青,等.基于数字图像相关技术的土体干缩开裂过程研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1311-1318.  
LIN L, TANG C S, CHENG Q, et al. Desiccation cracking behavior of soils based on digital image correlation technique [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1311-1318. (in Chinese)
- [21] NAHLAWI H, KODIKARA J K. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2006, 24(6): 1641-1664.
- [22] 唐朝生,王德银,施斌,等.土体干缩裂隙网络定量分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2298-2305.  
TANG C S, WANG D Y, SHI B, et al. Quantitative analysis of soil desiccation crack network [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2298-2305. (in Chinese)
- [23] 黎伟,刘观仕,姚婷.膨胀土裂隙图像处理及特征提取方法的改进[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3619-3626.  
LI W, LIU G S, YAO T. Improvement of methods for crack image processing and crack feature extraction of expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3619-3626. (in Chinese)
- [24] 孙满利,陈彦榕,沈云霞.土遗址病害研究新进展与展望[J]. 敦煌研究, 2022(2): 136-148.  
SUN M L, CHEN Y R, SHEN Y X. New progress and prospects in research on earthen site deterioration [J]. Dunhuang Research, 2022(2): 136-148. (in Chinese)
- [25] DENG J. Introduction to grey system theory [J]. Journal of Grey System, 1989, 1: 1-24.
- [26] 湛文武,夏云云,雷宏,等.基于灰色关联度和AHP层次分析法评价定风速下的土遗址劣化效应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 311-317.  
CHEN W W, XIA Y Y, LEI H, et al. Evaluation of the degradation effects of earthen sites at constant wind speed based on gray correlation degree and analytic hierarchy process [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2021, 57(3): 311-317. (in Chinese)
- [27] TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer [J]. Applied Clay Science, 2011, 52(1/2): 69-77.
- [28] TAY Y Y, STEWART D I, COUSENS T W. Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liners [J]. Engineering Geology, 2001, 60(1-4): 263-274.
- [29] 章李坚. 膨胀土膨胀性与收缩性的对比试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
ZHANG L J. Comparative experimental study on expansibility and shrinkage of expansive soil [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [30] 王翔,顾凯,张玉萍,等.生物炭对不同土体干缩开裂特性的影响及其机理研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 876-882.  
WANG X, GU K, ZHANG Y P, et al. Effects of biochar on desiccation cracking characteristics of different soils and their mechanism [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(4): 876-882. (in Chinese)