

• 土木工程 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202300986



本刊网刊

## 西北干旱区遗址夯土崩解特征与基质吸力关联性研究

崔凯<sup>1</sup>, 王冠众<sup>1</sup>, 裴强强<sup>1,2</sup>, 黄井镜<sup>1,2</sup>, 高晓甜<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 2. 敦煌研究院, 甘肃 敦煌 736200)

**摘要:** 夯土降水流失是西北干旱地区夯土遗址缓慢消亡的主要形式之一, 然而, 与夯土水土流失相关的研究工作尚未得到有效开展。本文通过 15 处遗址夯土(包含 3 种气候区域和 5 个朝代)的精细化崩解过程试验和土水特征试验, 开展时空序列下遗址夯土崩解特征与基质吸力关联性研究。结果表明: 基质势的梯度变化和吸力-时间变化率是决定遗址夯土崩解特征呈现显著分类性和时空性规律的主要原因。其中, 相比崩解过程仅包含吸湿软化阶段和稳定阶段的难崩解型夯土, 11 处易崩解型夯土时空性规律更为显著。易崩解型夯土吸湿软化阶段的吸湿速率排序为极端干旱区>干旱区>半干旱区, 崩解阶段的崩解速率排序为半干旱区>极端干旱区>干旱区和明代>汉代>清代>唐代>宋代; 各崩解特征指标与吸力-时间变化率之间存在较好的指数型增函数量化关系, 相关系数均大于 0.8; 吸湿软化阶段的吸力-时间变化率 2 000 kPa/s 可作为判别崩解类型的阈值条件。

**关键词:** 夯土; 崩解特征; 分类性; 时空性; 基质吸力; 基质势; 吸力-时间变化率

**中图分类号:** TU42

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3246(2025)05-0167-12

中国西北地区分布着珍贵的夯土遗址建筑, 从先秦至明清, 遗存下来的长城、烽燧、古堡等见证了中国土质建筑文化的辉煌, 是中华民族最为宝贵的文物及文化遗产资源<sup>[1]</sup>。多年来, 受极端环境影响, 夯土遗址建筑的赋存安全存在极大隐患, 尤其是西北地区短历时强降雨、多风沙的气候环境使遗址表面水土流失严重, 引发各类病害发育, 进而导致遗址局部失稳和坍塌, 甚至使部分遗址段落消亡<sup>[2-4]</sup>。针对这一普遍现象, 降雨强度对遗址土体侵蚀的影响是以往研究的重点, 而土体内在属性对水土侵蚀的影响研究并未引起足够重视<sup>[5]</sup>。因此, 及时开展与内在属性相关联的遗址夯土抗蚀性研究是目前土遗址保护领域亟待解决的基础性科学问题之一, 对遗址本体的侵蚀防治具有重要意义。

目前, 土体内在属性对土体自身抗蚀性的影响研究是岩土工程领域的热点趋势之一<sup>[6-8]</sup>。其中, 崩解性与水土流失关系最为紧密, 甚至被学者直接作为衡量土体抗蚀能力的重要指标<sup>[9-10]</sup>。有关黄土<sup>[11-12]</sup>、红壤土<sup>[13-14]</sup>、花岗岩残积土<sup>[15-16]</sup>等土体的崩解性试验研究

已经取得了一些实质性进展, 部分学者在此基础上将基本性质指标作为影响因素, 深入分析了重塑体或原状土体的崩解特征, 但研究结果也因土体自身材料属性不同而有所差异<sup>[17-20]</sup>。在众多土体崩解性影响因素指标中, 基质吸力一直被认为是与土体崩解关联性最高且最能直接反应土水作用程度的重要指标, 但由于崩解过程对基质吸力的测试极具挑战性, 限制了基质吸力对土体崩解特性的深入研究。尽管近年来有部分学者开始对吸力预测模型进行研究<sup>[21-23]</sup>, 但只有少数学者将两者结合起来进行分析。其中: Kim 等<sup>[24]</sup>将土体崩解归因于吸力突然降低时吸力对土壤结构所提供额外强度的损失; Xia 等<sup>[25]</sup>在对华南地区花岗岩不同剖面风化土崩解特征研究中发现, 土体中空气压缩产生的排斥力超过土壤颗粒之间的吸力是影响土体发生崩解的主要原因; 黎澄生等<sup>[26]</sup>通过对花岗岩残积土的初期崩解规律研究, 得出土体的初期崩解破坏是由于粒间综合作力用的突然衰减导致土体内部产生的拉应力大于土颗粒之间的强度; 王菁莪等<sup>[27]</sup>在基质吸力对重塑黄土崩解性研究中得出, 土体初始饱和度

收稿日期: 2023-12-04 修回日期: 2024-03-10 网络出版日期: 2024-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52068050; 41562015); 国家重点研发计划项目(2023YFF0905900)

作者简介: 崔凯(1980—), 男, 教授, 研究方向: 岩土工程; 地质工程; 文物保护工程。E-mail: cuik09@lut.edu.cn

越低,初始吸力值越大,土体吸湿和崩解越快。然而,相比于自然土体,遗址夯土由人工夯筑而成,是带有文化属性的特殊土体。已有少量研究成果对特定区域条件下的崩解指标变化规律进行定性表述,但目前土遗址保护领域中关于遗址夯土崩解特征及其与基质吸力的关联性研究尚鲜有报道,缺乏对遗址夯土崩解过程、崩解特征及崩解影响因素的深入量化分析<sup>[28]</sup>。

鉴于此,本文结合当下岩土工程领域中内在属性对土体抗蚀性影响研究的热点趋势和土遗址保护领域中亟待解决的与遗址表面土水流失相关的侵蚀机制问题,以土体崩解性为例,将基质吸力作为主要影响因素综合进行不同时空区域条件下遗址夯土崩解特征与基质吸力的关联性研究,以期揭示出遗址夯土崩解机制,为后续遗址冲沟发育机理研究奠定基础,同时为中国西北地区夯土遗址保护提供更为科学的借鉴。

## 1 研究地点选取及夯土基本性质测定

### 1.1 遗址点选取与现场取样

土遗址是具有显著时代与地域特征的文化信息载体,研究在充分考虑建造时代、区域和建筑形制的基础上选择 15 处具有典型性特征的夯土遗址作为研究地点,并在遗址坍塌处进行现场取样。同时,对取得的样本土体及时进行密封保存,以最大限度保证土体不被扰动。在雷墩子(HE<sub>LDZ</sub>)、老师兔(TE<sub>LST</sub>)、墩湾(SE<sub>DW</sub>)、嘉峪关明长城(ME<sub>JYG</sub>)、五截堡(QE<sub>WJB</sub>)、南乐堡(HA<sub>NLB</sub>)、大庙城(TA<sub>DM</sub>)、回回城(SA<sub>HH</sub>)、永昌明长城(MA<sub>YC</sub>)、文一城(QA<sub>WY</sub>)、玉山城(HS<sub>YS</sub><sup>A</sup>)、柳州故城(TS<sub>LZ</sub><sup>A</sup>)、等等城(SS<sub>DD</sub><sup>A</sup>)、永登明长城(MS<sub>YD</sub><sup>A</sup>)和满城(QS<sub>MC</sub><sup>A</sup>)等 15 处遗址开展了包含极端干旱区(E)、干旱区(A)、半干旱区(S<sup>A</sup>)3 个气候区域和 5 个递进朝代汉(H)、唐(T)、宋(S)、明(M)、清(Q)的取样工作。研究地点分布如图 1 所示。

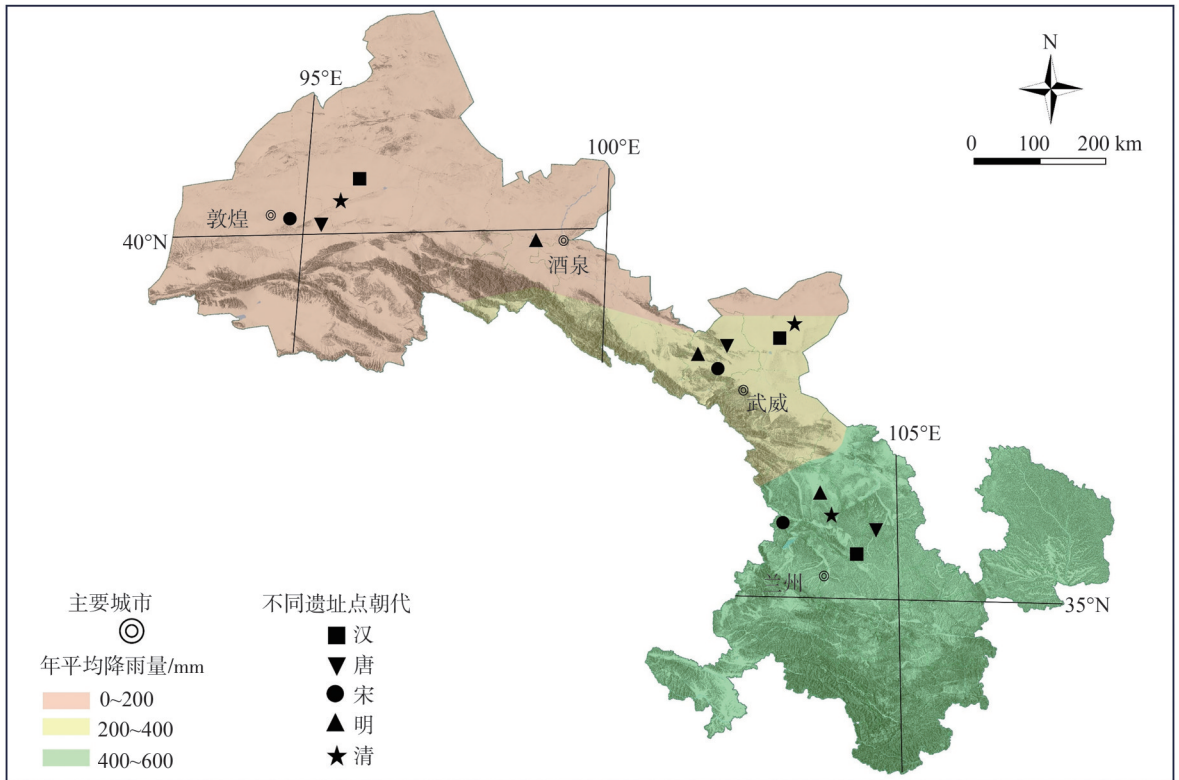


图 1 研究地点分布

Fig. 1 Distribution of study sites

### 1.2 夯土基本性质测定

参照规范《工程岩土试验方法标准》(GB/T50125—2019)对 15 处遗址夯土样本进行常规物性指标测定与计算,包括土体颗粒组成成分、天然含水率、密度和比重等常规试验指标及与本研究相关的干密度、饱和密度和饱和含水率等计算指标。具体试验指标测试结果如表 1 所示,计算指标根据规范进行换算。

通过常规土体基本性质试验发现,15 处遗址夯土颗粒组成成分以粉粒为主,胶黏粒和砂角砾次之,占比范围分别为 74.13%~86.05%、5.92%~17.32% 和 0.96%~13.99%。且原状遗址夯土初始含水率普遍较低,其值分布在 0.75%~4.08% 之间,同时土体密度和比重并无明显差异变化,整体分布在 1.43~1.74 g/cm<sup>3</sup> 和 2.25~2.83 范围内。

表 1 遗址夯土基本物理指标  
Tab.1 Basic physical index of rammed earth

气候区域	研究地点	颗粒组成成分指标			其余常规试验指标		
		胶黏粒/%	粉粒/%	砂角砾/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	天然含水率/%	比重
极端干旱区	HE <sub>LDZ</sub>	8.58	81.16	10.25	1.50	1.35	2.51
	TE <sub>LST</sub>	8.33	78.98	12.69	1.67	0.95	2.83
	SE <sub>DW</sub>	7.91	82.59	9.49	1.74	1.07	2.76
	ME <sub>JYG</sub>	11.88	74.13	13.99	1.56	1.30	2.63
	QE <sub>WJB</sub>	12.77	80.92	6.31	1.54	0.75	2.53
干旱区	HA <sub>NLB</sub>	9.41	80.15	10.44	1.54	1.89	2.31
	TA <sub>DM</sub>	9.92	84.46	5.62	1.46	1.75	2.50
	SA <sub>HH</sub>	9.32	84.75	5.93	1.60	3.75	2.65
	MA <sub>YC</sub>	5.92	81.92	12.17	1.66	1.30	2.69
	QA <sub>WY</sub>	11.72	75.88	12.41	1.65	0.89	2.43
半干旱区	HS <sub>YS</sub> <sup>A</sup>	15.13	77.32	7.55	1.49	3.11	2.25
	TS <sub>LZ</sub> <sup>A</sup>	13.78	79.60	6.62	1.43	3.13	2.58
	SS <sub>DD</sub> <sup>A</sup>	12.99	86.05	0.96	1.54	1.89	2.50
	MS <sub>YD</sub> <sup>A</sup>	8.95	79.10	11.95	1.58	1.48	2.62
	QS <sub>MC</sub> <sup>A</sup>	17.32	81.17	1.51	1.51	4.08	2.41

## 2 遗址夯土崩解试验与土水特征试验

### 2.1 精细化崩解试验

#### 2.1.1 试验原理与过程

夯土精细化崩解试验采用自制崩解仪进行(图 2),分别通过电子天平(最大量程为 200 g,精度为 0.000 1 g)、数据采集器、水流流速自动控制器、崩解池、吊篮(边长为 7 cm×7 cm 的金属网,网孔直径为 0.1 cm)、支架和传感器(RS232C)等主要装置对崩解过程进行精细化测试。其中,试样采用边长约 3 cm 的原状立方体试块。具体试验步骤为:首先,将吊篮悬挂于电子天平下接口处,调整吊篮使其处于崩解池内适当位置,将天平归零处理并平放试样于吊篮中;而后,通过流速控制装置匀速向崩解池内注水,直至水面漫过土体顶部后停止注水,观察并及时记录试验现象,待数据采集器收集的数据在一定时间内稳定不变后,停止数据采集,土体崩解过程结束。

试验结束后对崩解过程中试样进行受力分析发现,其主要受重力、浮力及吊篮拉力(即天平质量读数)作用。其中:试样重力变化与崩解过程中试样的初始质量、吸湿量和崩解量相关;而初始质量可通过数据采集的初始点获取,吸湿量、崩解量和浮力需结合崩解过程的具体分析得到。最终,基于试样质量变化建立相关力学平衡方程如式(1)所示:

$$m_0g + m_wg - m_dg = m_tg + F_b \quad (1)$$



图 2 自制崩解仪

Fig. 2 Homemade disintegrating device

式中, $m_0$ 为试样初始质量, $m_w$ 为吸湿质量, $m_d$ 为崩解质量, $m_t$ 为数据传感器采集的质量, $F_b$ 为试样浮力, $g$ 为重力加速度。

结合天平数显质量变化数据和试验现象对遗址夯土崩解过程进行精细划分,并根据式(2)计算各阶段崩解特征指标:

$$v = \Delta m / \Delta t \quad (2)$$

式中: $v$ 为崩解特征值,为吸湿速率或崩解速率; $\Delta m$ 为不同阶段试样质量变化量; $\Delta t$ 为不同阶段所经历的时间。

#### 2.1.2 试验结果

15处遗址夯土天平质量读数与时间变化曲线及崩解过程中相关试验现象如图3所示,结果表明:

1)有11处遗址夯土属于易崩解型,整个崩解过程包括5处关键节点和3个阶段,5处关键节点分别为浸水点、浮力最大点、崩解开始点、应力极值点和稳定点;3个阶段分别为崩解前期吸湿软化阶段、崩解阶段和稳定阶段。其中,吸湿软化阶段主要以吸湿作用为主,并伴随少许崩离作用,主要表现为土体表面及边角的松散土颗粒遇水后从母体分离,崩解量微弱可以忽略;崩解阶段主要以迸离和解离作用为主,迸离作用在试验过程中表现为土体局部表面的气爆,该作用增大了土颗粒脱离母体的作用程度。而解离作用最直观的表现是土体的开裂,使土体产生大量而快速的崩解;稳定阶段土体不发生崩解,试样质量恒定(图3(a)、(c))。

2)TA<sub>DM</sub>、SA<sub>HH</sub>、TS<sub>LZ</sub><sup>A</sup>、SS<sub>DD</sub><sup>A</sup>这4处遗址夯土属于难崩解型夯土,崩解过程仅包括3处关键节点和两个阶段:3处关键节点分别为浸水点、浮力最大点和稳定点;两个阶段分别为前期吸湿软化阶段和稳定阶段。其中:吸湿软化阶段土体同样以吸湿作用为主,并伴随少许的崩离作用发生;稳定阶段土体不发生崩解,试样质量处于稳定状态。同时,切开难崩解型夯土剖

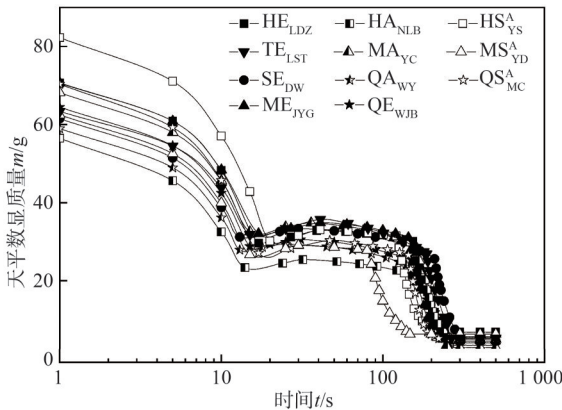
面发现,核心部位土体仍未浸湿,已软化的部分土体在外力作用下才会发生解体(图3(b)、(d))。

进一步结合天平质量读数变化曲线对崩解过程中不同阶段崩解特征指标进行求解。根据式(1)计算试样质量变化时,当易崩解型夯土处于崩解开始点或难崩解型夯土处于稳定点,此时土体完全浸没,点前阶段以吸湿作用为主,其崩解质量和试样浮力按照式(3)计算;当易崩解型夯土处于应力极值点或稳定点时,假定试样完全饱和且已崩解土体均处于饱和状态,按照式(4)计算。

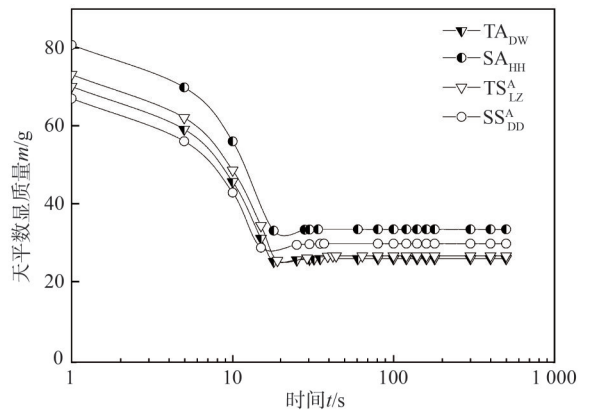
$$\begin{cases} m_d = 0, \\ F_b = \rho_w g m_0 / \rho \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} m_w = m_0 (\omega_{sr} - \omega) / (1 + \omega), \\ F_b = \rho_w g (m_0 / \rho - m_d / \rho_{sr}) \end{cases} \quad (4)$$

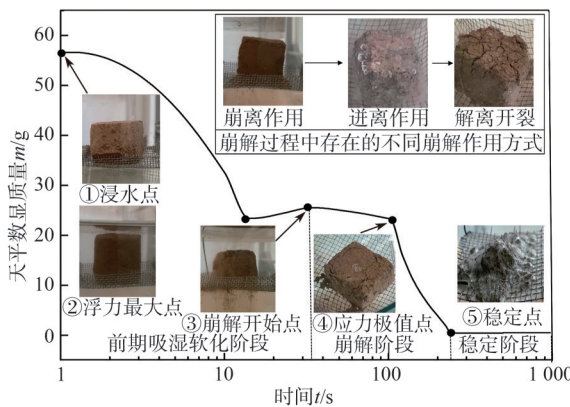
式(3)、(4)中: $\rho_w$ 为水的密度,取值为1.0 g/cm<sup>3</sup>; $\rho$ 为试样天然密度; $\omega$ 为天然含水率,相关取值见表1; $\omega_{sr}$ 为饱和含水率,由表1中的比重、天然密度和天然含水率数据计算得到; $\rho_{sr}$ 为饱和密度,由饱和含水率、比重和水的密度换算得到。



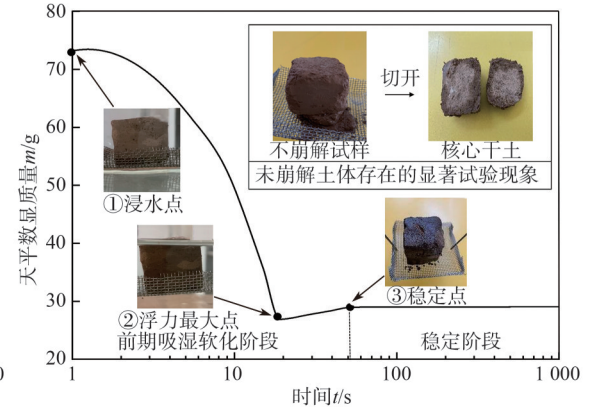
(a) 易崩解型天平数显质量



(b) 难崩解型天平数显质量



(c) 易崩解型崩解概化曲线



(d) 难崩解型崩解概化曲线

图3 夯土崩解过程曲线

Fig. 3 Disintegration process curves of rammed earth

最终,将不同关键节点处的数据指标依次代入式(1)、(2),得到吸湿软化阶段平均吸湿速率 $v_m$ 、崩解

阶段平均迸离速率 $v_b$ 和平均解离速率 $v_s$ ,如图4所示,结果表明:

1) 11处易崩解型遗址夯土吸湿软化阶段的平均吸湿速率整体分布在0.14~0.27 g/s之间(图4(a)),且同一朝代、不同气候区域吸湿速率表现出极端干旱区>干旱区>半干旱区的特点,而不同朝代之间无明显变化规律。

2) 11处易崩解型遗址夯土崩解阶段的进离速率整体分布范围在0.12~0.24 g/s之间(图4(b)),解离速

率整体分布于0.43~0.69 g/s(图4(c)),且同一朝代、不同气候区域的遗址夯土整体上表现出半干旱区>极端干旱区>干旱区的特点,同一气候区域不同朝代表现出明>汉>清>唐>宋代的特点。

3)  $TA_{DM}$ 、 $SA_{HH}$ 、 $TS_{LZ}^A$ 、 $SS_{DD}^A$  4处难崩解型遗址夯土吸湿软化阶段的平均吸湿速率整体分布在0.09~0.13 g/s之间,指标自身无明显区域和朝代特征(图4(a))。

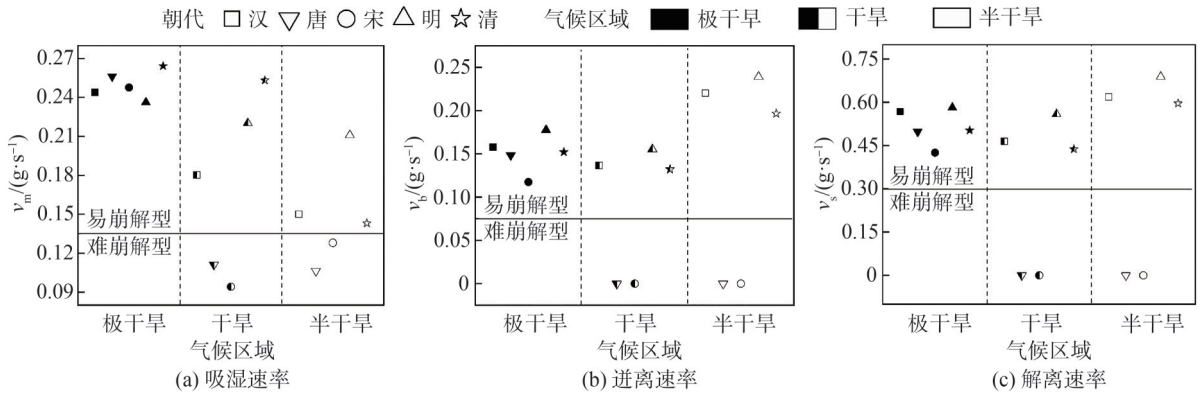


图4 夯土崩解特征值

Fig. 4 Disintegration characteristic values of rammed earth

2.2 土水特征试验

2.2.1 试验原理与过程

土水特征试验采用压力板仪法和滤纸法进行联合测试。压力板仪法利用轴平移技术测量低基质吸力,滤纸法利用率定曲线测量高基质吸力,滤纸为NO.203慢速,灰分0.01。并分别通过分段施压和率定曲线获取相关数据点,进而采用VG(van genuchten)模型进行拟合得到完整土水特征曲线。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (a\phi)^n)^m} \quad (5)$$

式中: $\theta$ 为土体体积含水率,由质量含水率和干密度指标计算得到; $\phi$ 为基质吸力; $\theta_s$ 为拟合得到的饱和和体积含水率; $\theta_r$ 为拟合得到的残余含水率; $a$ 、 $m$ 、 $n$ 为拟合常数; $\theta_s$ 、 $\theta_r$ 、 $a$ 、 $m$ 、 $n$ 用以判别模型适用性。

2.2.2 试验结果

相关拟合参数如表2所示,15处原状遗址夯土土水特征曲线如图5所示,结果表明:

1) VG模型适用于11处易崩解型夯土,同时初始基质吸力分布在83 424~194 322 kPa之间,且不同吸力区间单位体积含水率条件下的吸力变化程度为牢固吸附区(189 000~702 000 kPa数量级变化)>水膜结合区(320~440 kPa数量级变化)>毛细饱和区(28~74 kPa数量级变化),而吸力指标自身无显著时空规律变化(图5(a))。

2) VG模型适用于 $TA_{DM}$ 、 $SA_{HH}$ 、 $TS_{LZ}^A$ 、 $SS_{DD}^A$  4处难崩解型夯土,同时初始基质吸力值集中分布在60 524~

表2 拟合参数

Tab. 2 Fitting parameter

夯土类型	研究地点	参数					决定系数 $R^2$
		$a$	$m$	$n$	$\theta_s$	$\theta_r$	
易崩解型夯土	HE <sub>LDZ</sub>	$2.40 \times 10^{-3}$	1.057	0.600	41.318	1.396	0.998
	TE <sub>LST</sub>	$9.19 \times 10^{-4}$	1.091	0.566	47.030	0.743	0.997
	SE <sub>DW</sub>	$5.69 \times 10^{-5}$	2.753	0.393	40.227	0.047	0.998
	ME <sub>JYG</sub>	$6.40 \times 10^{-3}$	0.506	0.849	39.548	0.019	0.999
	QE <sub>WJB</sub>	$2.60 \times 10^{-3}$	1.024	0.617	40.643	1.587	0.995
	HA <sub>NLB</sub>	$6.90 \times 10^{-3}$	0.503	0.758	32.737	0.596	0.996
	MA <sub>YC</sub>	$8.46 \times 10^{-3}$	0.527	0.740	40.102	0.029	0.996
	QA <sub>WY</sub>	$6.70 \times 10^{-3}$	0.491	0.811	33.545	0.310	0.996
	HS <sub>YS</sub> <sup>A</sup>	$1.74 \times 10^{-2}$	0.493	1.305	35.185	4.652	0.997
	MS <sub>YD</sub> <sup>A</sup>	$3.71 \times 10^{-2}$	0.273	1.421	39.337	1.664	0.998
	QS <sub>MC</sub> <sup>A</sup>	$1.57 \times 10^{-2}$	0.372	1.196	37.503	4.823	0.998
	TA <sub>DM</sub>	$1.70 \times 10^{-5}$	3.550	0.408	31.720	0.031	0.998
	SA <sub>HH</sub>	$5.95 \times 10^{-5}$	2.735	0.440	33.812	3.908	0.999
	TS <sub>LZ</sub> <sup>A</sup>	$1.45 \times 10^{-6}$	11.860	0.441	36.790	3.600	0.999
	SS <sub>DD</sub> <sup>A</sup>	$2.33 \times 10^{-5}$	3.257	0.441	38.796	0.121	0.999

77 085 kPa之间,且不同吸力区间单位体积含水率条件下的吸力变化程度为牢固吸附区(90 000~122 000 kPa数量级变化)>水膜结合区(39 000~50 000 kPa数量级变化)>毛细饱和区(6.1~7.1 kPa数量级变化),而吸力量化指标自身无显著时空性规律变化(图5(b))。

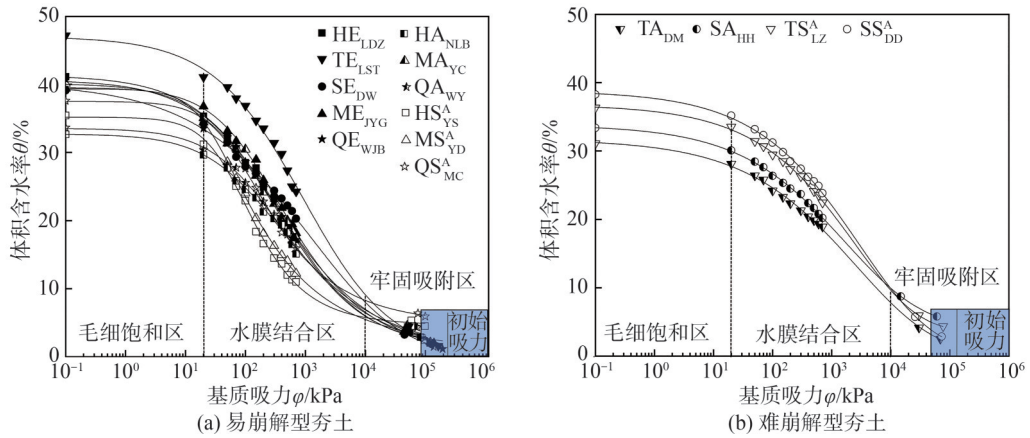


图5 土水特征曲线

Fig. 5 Soil-water characteristic curves

### 3 崩解特征与基质吸力关联性分析与讨论

从试验结果看,遗址夯土崩解指标与土水特征试验条件下的吸力指标仅表现出一定分类差异性,而时空性规律并未一一呼应。因此,仍需有效吸力指标进一步证明两者间关联关系,以得到影响夯土崩解特征的决定性因素。从崩解过程中基质势能变化角度,结合试验现象,对夯土崩解性进行定性影响分析,而后通过土水特征试验条件下的吸力相关指标对崩解性进行初步量化分析,并最终基于夯土崩解过程提出有效吸力指标进一步量化表征其与崩解特征间的相关关系,为关联结果佐证。

#### 3.1 势能变化对土体崩解特性的影响

根据非饱和土力学势能理论,在土体崩解全过程中,随着土中含水量变化土体存在非饱和与饱和两种状态,且总土水势在两种状态下分别具有如下关系:

$$\varphi_{t1} = \varphi_m + \varphi_g \quad (6)$$

$$\varphi_{t2} = \varphi_p + \varphi_g \quad (7)$$

式(6)、(7)中: $\varphi_{t1}$ 为试样在非饱和状态下的总土水势; $\varphi_{t2}$ 为试样在饱和状态下的总土水势; $\varphi_m$ 为基质势,是负值; $\varphi_p$ 为压力势,以标准大气压为基准,是正值; $\varphi_g$ 为重力势,参考基准自行设定。

当土体处于非饱和状态时,根据式(6),土中基质势是影响总土水势梯度变化的主要因素,基质势使土中水由高势能向低势能处流动。当土体处于饱和状态时,根据式(7),基质势变化为0,土中压力势是影响总土水势的主要因素,此状态下压力势与总土水势值恒定。而实际上土体并非均质,土中孔隙也并不全部连通,土体饱和后土中封闭孔隙气体受到挤压,压力会反作用于土体颗粒引起土中压力势发生改变,进而使总土水势产生梯度变化,并引发土体产生形变与强度

的衰减。结合崩解过程试验现象来看,难崩解型夯土切开后土体局部表面湿润,而内部核心部位仍为干土,存在明显干湿分界面(图3(d))。据此可以推断出,遗址夯土中水渗入的方式是从局部表面向土体内部核心部位逐级渗透,且在某个特定时间范围内,土体干湿分界面处会同时存在局部饱和和非饱和两种状态。假设在某个特定时间点,干湿分界面处已经湿润的部分处于局部饱和状态,未浸湿部分处于非饱和状态,则在干湿分界面处的总土水势梯度变化如式(8)所示:

$$\Delta\varphi_t = \Delta\varphi_p + \Delta\varphi_m \quad (8)$$

式中, $\Delta\varphi_t$ 为总土水势变化梯度, $\Delta\varphi_p$ 为压力势变化梯度, $\Delta\varphi_m$ 为基质势变化梯度。

首先,干湿分界面处未被浸湿的土体基质势较低,水分会因基质势的梯度变化从湿润处向干处渗透;其次,由于土体中封闭孔隙气体被压缩,压力反作用于土体颗粒并传导到分界面,使原本应该具有稳定孔压的局部饱和土体在分界面处呈现出压力势梯度变化,并阻碍水分向土体内部渗透。对于易崩解型夯土,显然基质势梯度变化对总土水势作用更大,使水分持续入渗到土体内部,直至完全饱和。土体从非饱和状态过渡到完全饱和的过程中基质势梯度变化的程度越大,饱和后由封闭气体产生的压力势梯度变化越大,伴随土水能量快速释放,封闭孔隙与原有连通孔隙贯通,从土体内部逐渐向土体局部表面延伸,直至土体开裂,这一现象在易崩解型夯土崩解过程中明显存在(图3(c))。而对于难崩解型夯土,水分从局部表面向土体内部入渗到一定时间就不再入渗,核心土体仍是干土。阻碍水分继续入渗的原因是在干湿分界面处土体基质势梯度变化与压力势梯度变化相等,使总土水势不产生梯度变化,在没有外力干扰下土水系统会一直维持稳定,较难发生崩解。

因此,基质势梯度变化在某种程度上影响土体崩

解,进而导致崩解特征表现出相应的分类差异和时空性规律。

### 3.2 基质吸力对土体崩解特性的影响

从 15 处遗址夯土土水特征试验结果看,单一土水特征曲线下吸力指标表现出的变化规律与崩解特征并未完全一一对应,两类夯土仅在初始吸力和牢固吸

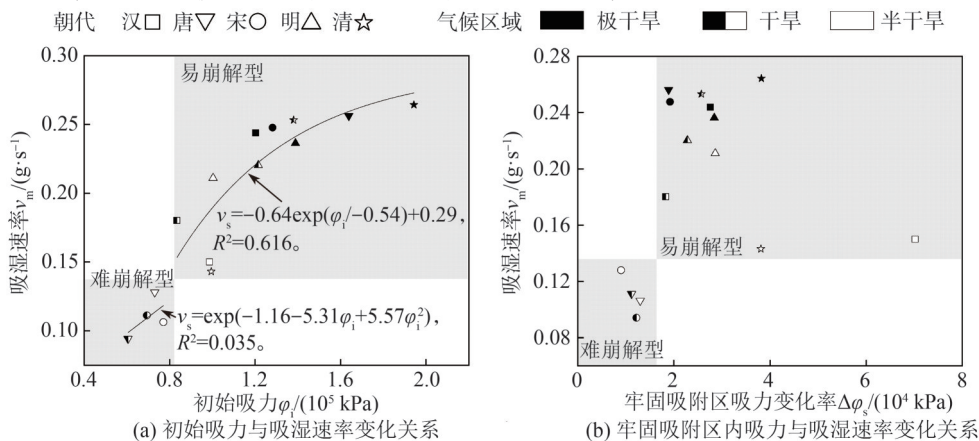


图 6 初始吸力、牢固吸附区内吸力变化与吸湿速率相关关系

Fig. 6 Correlation between the moisture rate and the initial suction, the suction change in solid adsorption zone

上述结果仅能从初始吸力或牢固吸附区内单位含水率条件下的吸力变化程度上对 15 处遗址夯土的崩解特征进行初步分类,同时二者间相对较弱的量化关系不能突出基质吸力变化对夯土崩解性的重要作用。因此,需要有效吸力指标进一步表征两者之间的关联关系。经仔细分析可知,出现这一结果是由于脱离实际崩解过程用单一土水特征曲线下的吸力指标去研究遗址夯土崩解特征时,忽略了不同崩解阶段吸力的实际变化程度。为了将崩解过程与吸力变化过程紧密联系在一起,通过时间变量将其统一在同一时间维度下,结合土水特征曲线计算崩解过程中各关键点处的实际吸力值(图 7),而后在由关键点划分的不同崩解阶段中计算不同阶段内吸力的实际变化程度,并进一步提出有效吸力指标即吸力-时间变化率(式(8))以综合表征不同崩解阶段吸力随时间变化程度,最终计算结果见图 8,具体量化分析如下:

$$\alpha(\beta) = \Delta\phi / \Delta t \tag{9}$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为吸湿软化阶段和崩解阶段的吸力-时间变化率,  $\Delta\phi$  为相应阶段的吸力变化量。

在分类差异特征方面, 11 处易崩解型夯土吸湿软化阶段的吸力-时间变化率均大于 2 000 kPa/s, 其值整体分布在 2 156~6 463 kPa/s 之间, 且随着吸力-时间变化率的增大, 吸湿速率呈指数型增大, 相关系数为 0.876; 而崩解阶段的吸力-时间变化率分布在 2.655 8~4.668 6 kPa/s 之间, 随着吸力-时间变化率的增大, 迸离速率与解离速率均呈指数型增大, 相关系数分别为

附区内单位含水率条件下的吸力变化程度上存在分类差异, 且时空性规律并不显著, 如图 6 所示。图 6 中, 仅易崩解夯土吸湿软化阶段的吸湿速率与初始吸力之间存在相对较好的指数型增函数量化关系, 相关系数为 0.616, 其他崩解特征指标与吸力指标间的关系较为离散, 不再一一列出。

0.836 和 0.826。在时空规律性方面, 易崩解型夯土吸湿软化阶段的吸力-时间变化率在同一朝代的极端干旱区 > 干旱区 > 半干旱区 ( $HE_{LDZ} > HA_{NLB} > HS_{YS}^A$ ,  $ME_{JYG} > MA_{YC} > MS_{YD}^A$ ,  $QE_{WJB} > QA_{WY} > QS_{MC}^A$ ), 同一区域不同朝代之间无显著变化规律, 整体上与吸湿速率呈现的变化规律相呼应; 崩解阶段的吸力-时间变化率在同一朝代不同气候区域的表现则为半干旱区 > 极端干旱区 > 干旱区 ( $HS_{YS}^A > HE_{LDZ} > HA_{NLB}$ ,  $MS_{YD}^A > ME_{JYG} > MA_{YC}$ ,  $QS_{MC}^A > QE_{WJB} > QA_{WY}$ ), 同一区域不同朝代之间的表现为明代 > 汉代 > 清代 > 唐代 > 宋代 ( $ME_{JYG} > HE_{LDZ} > QE_{WJB} > TE_{LST} > SE_{DW}$ ,  $MA_{YC} > HA_{NLB} > QA_{WY}$ ,  $MS_{YD}^A > HS_{YS}^A > QS_{MC}^A$ ), 整体上与崩解速率呈现的变化规律相呼应。

而  $TA_{DM}$ 、 $SA_{HH}$ 、 $TS_{LZ}^A$ 、 $SS_{DD}^A$  这 4 处难崩解型夯土在分类差异特征方面, 吸湿软化阶段吸力-时间变化率均小于 2 000 kPa/s, 整体分布在 1 664~1 890 kPa/s 之间, 且随着吸力-时间变化率的增大, 吸湿速率呈线性增大, 相关系数为 0.540, 但两者伴随的时空性规律并不显著, 整体上难崩解型夯土在吸湿软化阶段的吸力-时间变化率与吸湿速率结果相呼应。

因此, 基于上述分析最终可以得出, 吸力-时间变化率与崩解特征之间存在较好的对应关系, 且二者间良好的量化关系决定了遗址夯土崩解特征具有分类差异和一定时空性规律。关于分类特征, 难易两种崩解类型夯土在吸湿软化阶段的吸力-时间变化率的上限值和下限值分别为 1 890 和 2 156 kPa/s, 对两限值平

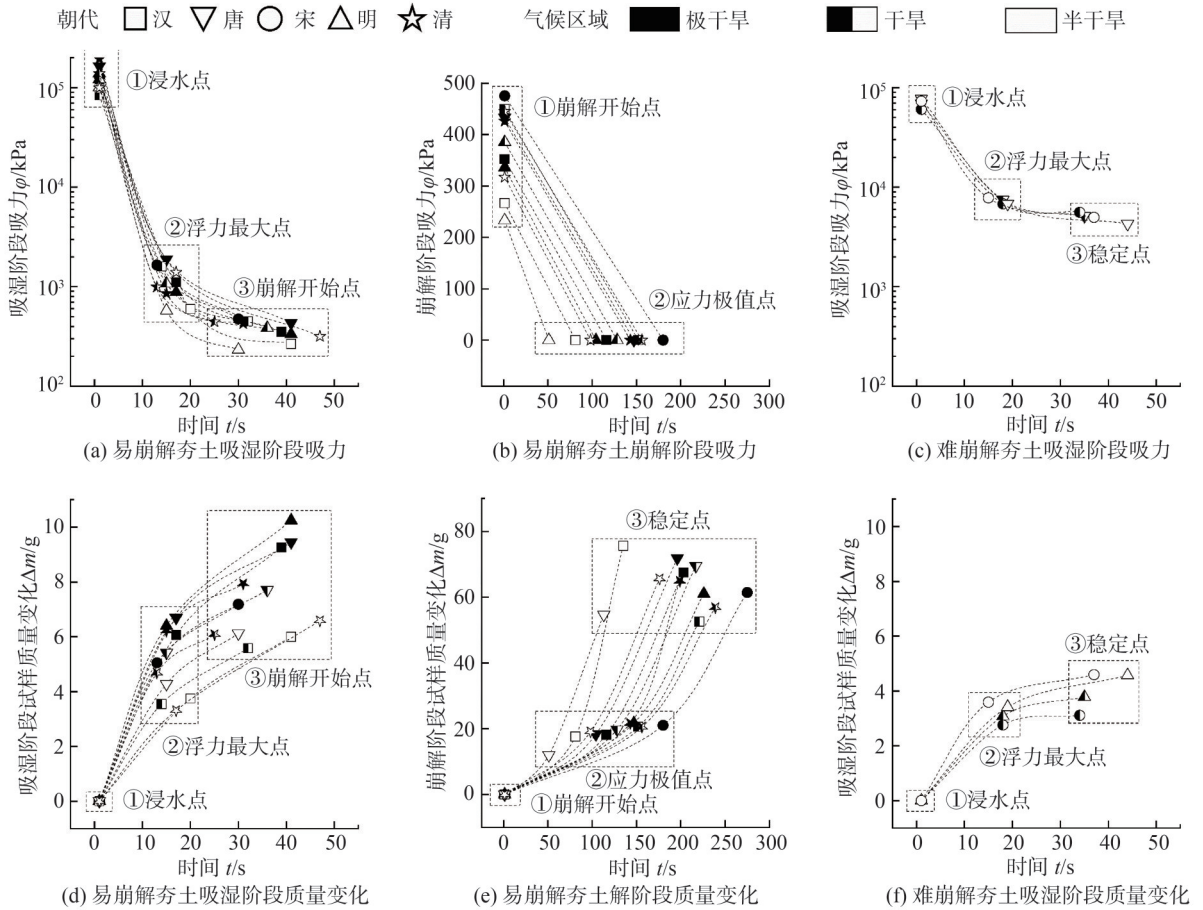


图 7 崩解过程中吸力和试样质量随时间变化关系

Fig. 7 Relationship between suction and sample mass with time during disintegration process

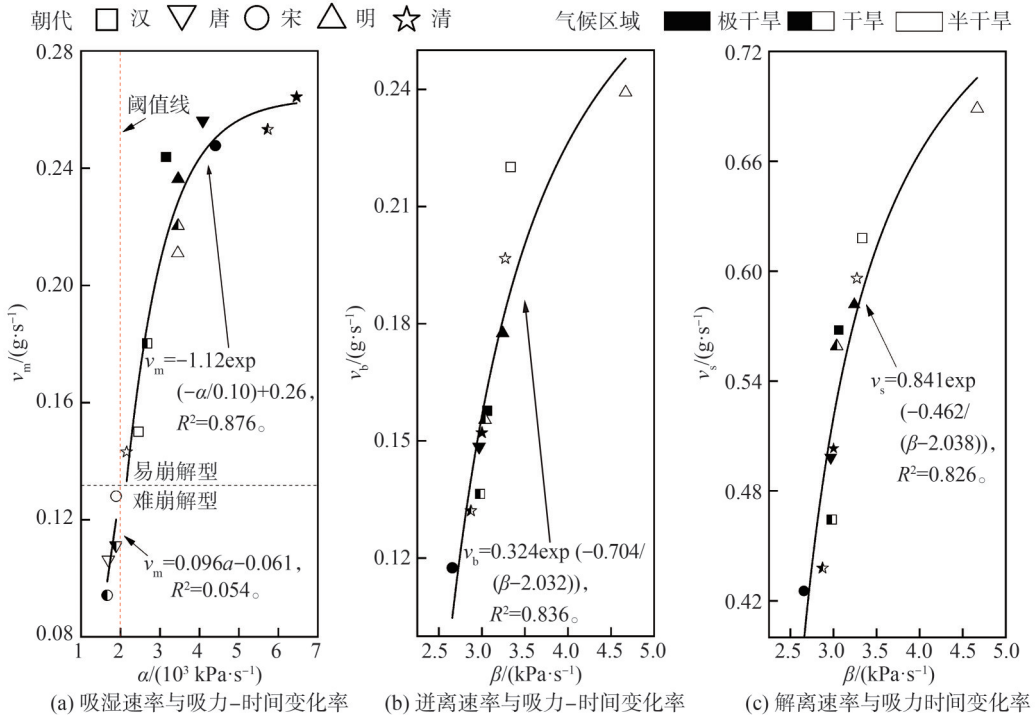


图 8 不同崩解阶段吸力-时间变化率与崩解特征指标相关关系

Fig. 8 Correlation between suction-time change rate and disintegration characteristic index in different stages

均取整后得到2 000 kPa/s可作为遗址夯土崩解分类的阈值条件。关于时空性规律,吸湿速率和崩解速率表现出的时空性规律本质上是由崩解过程中土体内水分流动的难易程度决定,其土中水分流动的快慢可通过吸力-时间变化率进一步表征。在前期吸湿软化阶段,通常遗址所处区域越干旱,水分相对越容易进入土体,吸力-时间变化率也越大,土体吸湿越快。在崩解阶段,发生迸离作用时期的土体并未完全达到饱和,土体仍会吸湿,但吸湿作用相对较弱。此状态下水分向土体更深层次流动的路径将更加复杂,尽管流动路径会受土体内孔隙和颗粒的空间分布影响及颗粒矿物成分等制约,但仍可通过吸力-时间变化率进行表征,其值越大,土中水流动相对越快,吸湿速率和崩解速率也越大,进而导致土体崩解阶段的崩解速率呈现出一定的时空性规律。

### 3.3 讨论

遗址夯土基质吸力和崩解性作为评价土水相互作用程度与土体抗蚀能力的重要指标,其关联性机制对遗址冲沟病害发育机理研究具有重要意义。

一方面,基于非饱和土势能理论,土体在整个浸水过程中由非饱和向饱和状态的过渡,在两种状态下势能转化是存有差异的。通常土体的总土水势包括了压力势、基质势、重力势和溶质势和温度势等。本研究在对势能分析时没有考虑温度势,是因为试验是在等温条件下进行;没有考虑溶质势是因为虽然土体中都有溶质势存在,但其中的溶质极易随水的运动而呈匀称状态分布,对土体内水的运动影响不大;而重力势更多的是取决于分析时所选择的参考平面标准。因此,压力势和基质势的变化对总土水势的影响分析至关重要。在此条件下,当基质势与压力势梯度变化相等时,总土水势梯度变化为0,在没有其他外力作用下,土水系统将一直维持平衡稳定状态,较难发生崩解。然而,从15处遗址夯土崩解结果来看,这种情况并不常见。多数情况下土体总土水梯度变化小于0,基质势梯度变化程度更大、作用时间更长,且当基质势梯度变化为0时,瞬间增大的封闭孔隙压力使土体内部结构遭受破坏,表面产生大量裂纹,发生快速崩解。由此可见,基质势的梯度变化是导致差异化崩解的主要原因,同时也表明基质势的梯度变化程度与土体崩解性关联紧密。

另一方面,从土水特征试验结果来看,脱离崩解过程考虑的吸力相关指标不能充分展现吸力变化与土体崩解特征间的关联关系,比如初始吸力指标。这是由于单一状态下的指标无法全面衡量事物动态变化过程,只有吸力状态发生改变,才有可能导致相应

的崩解状态发生变化。初始吸力是一个定值,单纯研究初始吸力和崩解过程各阶段的关系或脱离崩解过程去考虑吸力变化与崩解各阶段的相关关系时,存在一定局限。而试验结果也证明了单一土水特征曲线下吸力相关指标与崩解特征指标之间关联性较弱。进而结合崩解过程引入有效吸力指标即吸力-时间变化率,其与崩解特征指标间表现出了良好量化关系,是对本研究中二者关联关系的进一步补充和佐证。

## 4 总结与展望

本文揭示出吸力-时间变化率对夯土崩解性起到的决定性作用,证明二者之间存在较好的关联关系,同时得出阈值吸力-时间变化率2 000 kPa/s可作为遗址夯土崩解性分类差异特征的精确判别条件。然而,影响夯土崩解性的原因是复杂的,本文对于遗址夯土崩解性与基质吸力的关联性研究仅是对夯土崩解机制研究的初步探索。遗址夯土作为具有时空属性的文化信息载体,其夯筑工艺、所处朝代的经济状况、政治策略和遗址用途等均会对其整体质量状况产生影响,并在一定程度上可通过土体自身抗蚀性能得到印证。而崩解性作为土体抗蚀性能评价的重要指标之一,多方面深化夯土崩解机制研究工作,无论对于自然科学还是人文科学来讲都意义重大。从15处遗址夯土崩解结果来看,唐代和宋代的夯土较难崩解,以时代属性考虑出现这样的结果可能是由于唐代时期国力鼎盛繁荣,而宋代《营造法式》的出现使夯筑工艺达到顶峰。同时,唐宋时期调查的遗址多为城堡,相比于用于边防的大量明代塞外长城墙体其夯土质量可能更高,抗蚀能力更强。

因此,在今后研究中对于文献考古方面的数据挖掘工作应给予一定关注,用以丰富本文研究成果。此外,后续工作还应从夯土自身组构的微观层面出发,进一步对遗址夯土的矿物成分、颗粒与孔隙的空间组合及排列形式等进行深入分析,同时结合SEM(scanning electron microscope)、CT(computed tomography)层析技术以深化夯土崩解机制研究。

### 参考文献:

- [1] Huang Kezhong. Protection of geotechnical cultural relics and buildings[M]. Beijing: China Construction Industry Press,1998.[黄克忠. 岩土文物建筑的保护[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.]
- [2] Zhang Qiyong, Chen Wenwu, Fan Wenjun. Protecting earthen sites by soil hydrophobicity under freeze-thaw and dry-wet cycles[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120089.
- [3] Du Yumin, Cui Kai, Chen Siyu, et al. Quantitative research on the development difference of scaling off on the sun-

- ward side and nightside of earthen sites[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2022, 57: 107–117.
- [4] Wang Tongyang, Guo Qinglin, Pei Qiangqiang, et al. Destruction or protection? Experimental studies on the mechanism of biological soil crusts on the surfaces of earthen sites[J]. *Catena*, 2023, 227: 107096.
- [5] Yao Xue. Analysis of rainfall erosion models for a typical site of the Ming Great Wall in Yuyang District[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2018, 30(6): 82–89. [姚雪. 榆阳区明长城典型遗址的雨蚀破坏模式分析[J]. *文物保护与考古科学*, 2018, 30(6): 82–89.]
- [6] Xiao Hai, Liu Gang, Zhang Qiong, et al. Quantifying contributions of slaking and mechanical breakdown of soil aggregates to splash erosion for different soils from the Loess plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 150–158.
- [7] Sutarto T E. Effect of bulk density, age, and water content on the erosional strength of streambank soils[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1500(1): 012082.
- [8] Zhang Guodong, Ling Sixiang, Liao Zixing, et al. Mechanism and influence on red-bed soft rock disintegration durability of particle roughness based on experiment and fractal theory[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 419: 135504.
- [9] Nsabimana G, Li Hong, Bao Yuhai, et al. Soil aggregate disintegration effects on soil erodibility in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Environmental Research*, 2023, 217: 114928.
- [10] Qi Yongzheng, Guan Yunfei, Wang Liyan, et al. The influence of soil disintegration in water on Slope Instability and failure[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020(1): 8898240.
- [11] Li Xian, Wang Li, Yan Yongli, et al. Experimental study on the disintegration of loess in the Loess Plateau of China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(7): 4907–4918.
- [12] Zhang Ze, Vadim P, Svetlana N, et al. Disintegration characteristics of a cryolithogenic clay loam with different water content: Moscow covering loam (prQ III), case study[J]. *Engineering Geology*, 2019, 258: 105159.
- [13] Liu Baochen, Wang Liangyu, Zhou Haofeng, et al. Experimental study on disintegration of Guilin red clay[J]. *Sustainability*, 2023, 15(10): 7833.
- [14] Thyagaraj T, Das A P. Physico-chemical effects on collapse behaviour of compacted red soil[J]. *Géotechnique*, 2017, 67(7): 559–571.
- [15] Zhang Xianwei, Liu Xinyu, Chen Cheng, et al. Evolution of disintegration properties of granite residual soil with microstructure alteration due to wetting and drying cycles[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(3): 93.
- [16] Liu Weiping, Song Xinqiang, Huang Faming, et al. Experimental study on the disintegration of granite residual soil under the combined influence of wetting-drying cycles and acid rain[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1): 1912–1927.
- [17] Wang Jiading, Gu Tianfeng, Zhang Maosheng, et al. Experimental study of loess disintegration characteristics[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(6): 1317–1329.
- [18] Luo Xiaoyan, Gao He, He Pei, et al. Experimental investigation of dry density, initial moisture content, and temperature for granite residual soil disintegration[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(11): 1060.
- [19] Sun Yinlei, Ma Siteng, Kuang Yanwen, et al. Effect of mineral compositions on mechanical properties of granite residual soil[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e02140.
- [20] Kholghifard M, Ahmad K, Ali N, et al. Collapse/swell potential of residual laterite soil due to wetting and drying-wetting cycles[J]. *National Academy Science Letters*, 2014, 37(2): 147–153.
- [21] Javid A H, Bulut R. Equilibrium suction prediction model for subgrade soils in Oklahoma[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(10): 04023165.
- [22] Najdi A, Encalada D, Mendes J, et al. Evaluating innovative direct and indirect soil suction and volumetric measurement techniques for the determination of soil water retention curves following drying and wetting paths[J]. *Engineering Geology*, 2023, 322: 107179.
- [23] Bakhshi A, Alamdari P, Heidari A, et al. Estimating soil-water characteristic curve (SWCC) using machine learning and soil micro-porosity analysis[J]. *Earth Science Informatics*, 2023, 16(4): 3839–3860.
- [24] Kim C K, Kim T H. Behavior of unsaturated weathered residual granite soil with initial water contents[J]. *Engineering Geology*, 2010, 113(1/2/3/4): 1–10.
- [25] Xia Dong, Zhao Bingqin, Liu Daxiang, et al. Effect of soil moisture on soil disintegration characteristics of different weathering profiles of collapsing gully in the hilly granitic region, South China[J]. *PLoS One*, 2018, 13(12): e0209427.
- [26] Li Chengsheng, An Ran, Shu Rongjun, et al. Initial-disintegration analysis of granite residual soil and approximate simulation of mathematical morphology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(4): 845–854. [黎澄生, 安然, 舒荣军, 等. 花岗岩残积土初期崩解规律与数学形态学方法近似模拟[J]. *岩石力学与工程学报*,

- 2020,39(4):845–854.]
- [27] Wang Jinge, Xiang Wei, Bi Renneng. Experimental study of influence of matric suction on disintegration of unsaturated remolded loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11):3258–3262. [王菁莪, 项伟, 毕仁能. 基质吸力对非饱和和重塑黄土崩解性影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(11):3258–3262.]
- [28] Zhou Hua, Chen Xiaopeng, Zhang Zhongjian, et al. Experimental study on the disintegration of rammed earth and suggestions for its protection of sravasti in old Summer Palace[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(28): 11428–11433. [周华, 陈晓鹏, 张中俭, 等. 圆明园舍卫城遗址夯土崩解试验研究及保护建议[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(28):11428–11433.]

## Study on the Correlation Between Disintegration Characteristics of Rammed Earth and Matric Suction in the Northwest Arid Area

CUI Kai<sup>1</sup>, WANG Guanzhong<sup>1</sup>, PEI Qiangqiang<sup>1,2</sup>, HUANG Jingjing<sup>1,2</sup>, GAO Xiaotian<sup>1</sup>

(1. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China)

### Abstract:

**Objective** Soil erosion at earthen sites in northwest China remains one of the primary factors compromising site stability. Simultaneously, soil disintegration and matric suction are considered key indicators influencing the degree of soil–water interaction. However, for rammed earth exhibiting temporal and spatial properties, the characteristics of disintegration and the variation in matric suction during the disintegration process remain unclear. This study investigates the correlation between disintegration behavior and matric suction to identify the fundamental factors influencing the disintegration of rammed earth.

**Methods** The fine disintegration process of rammed earth was examined using a custom-built disintegration apparatus. This apparatus primarily consisted of an electronic balance, a data acquisition system, an automatic flow rate controller, a disintegration tank, a sample basket, a support frame, and sensors. The test specimen was an undisturbed cubic soil sample with a side length of approximately 3 cm. First, the sample basket was suspended from the lower interface of the electronic balance. Its position within the disintegration tank was adjusted to the appropriate height, the balance was zeroed, and the specimen was placed horizontally within the basket. Water was then injected into the disintegration tank at a constant rate via the flow control device until the water level exceeded the top surface of the soil, at which point the water injection was stopped. Test phenomena were promptly observed and recorded. Once the data collected by the acquisition system stabilized over a defined period, data collection was terminated, marking the end of the soil disintegration process. The disintegration process was then categorized into distinct stages based on variations in the disintegration data, and characteristic values for each stage were calculated. The soil–water characteristic curve (SWCC) was determined using both the pressure plate method and the filter paper method. The pressure plate method employed axis translation technology to measure the low suction range, whereas the filter paper method relied on a calibration curve to assess the high suction range. The filter paper used was No. 203 slow–filter paper with an ash content of 0.01%. Relevant data points were obtained through staged pressure application and the calibration curve. Then, the complete soil–water characteristic curve was fitted using the Van Genuchten (VG) model.

**Results and Discussions** The results of the refined disintegration process tests demonstrated that rammed earth disintegration exhibited classification characteristics and distinct spatiotemporal regularity. The disintegration process for the 11 easily disintegrated rammed earth samples consisted of a hygroscopic softening stage, a disintegration stage, and a stabilization stage. In contrast, the difficult-to-disintegrate rammed earth displayed only the hygroscopic softening stage and the stabilization stage. During the disintegration stage, the primary soil behaviors involved breaking and separation. Simultaneously, spatiotemporal regularity was more pronounced in the easily disintegrated rammed earth. In the hygroscopic softening stage, the hygroscopic rate followed the sequence: extreme arid area > arid area > semi-arid area. During the disintegration stage, the disintegration rate followed the sequence: semi-arid area > extreme arid area > arid area, and Ming Dynasty > Han Dynasty > Qing Dynasty > Tang Dynasty > Song Dynasty. In addition, the VG model was found suitable for characterizing the soil–water characteristic curve of rammed earth, with a fitting coefficient exceeding 0.99. Only the initial suction values for the two types of rammed earth exhibited distinct classification characteristics, while their spatiotemporal regularity remained insignificant. This outcome resulted from the fact that the calculation of suction indices in the SWCC test was independent of the soil disintegration process. Therefore, an index termed the suction–time change rate was proposed, which integrated the disintegration process and suction changes within the same temporal dimension for comprehensive characterization. The results revealed a one-to-one correspondence between the suction–time change rate and the disintegration characteristics, both in classification and spatiotemporal regularity. In addition, a suction–time change rate of 2 000 kPa/s during the hygroscopic softening stage can serve as a threshold condition for distinguishing the type of disintegration. A strong quantitative relationship was observed, fitting exponential growth functions with

correlation coefficients greater than 0.8. Analysis of the gradient changes in matrix potential energy during the disintegration process also indicated a specific correlation between these factors. These findings provided theoretical support for subsequent studies on the erosion mechanisms of site gullies. Finally, the spatiotemporal factors influencing rammed earth disintegration were recognized as complex. For the Tang and Song Dynasty sites, the rammed earth was more resistant to disintegration. Whether this was related to the economic development and tamping technology of the dynasty, or geopolitical and military strategies, or the different structural functions arising from variations in building types, or to the differences in the quantity of aggregates and the spatial arrangement characteristics between particles and pores under the spatiotemporal conditions caused by the variation in building materials, these issues required further research and ongoing enhancement of the related archaeological literature and excavation efforts.

**Conclusions** The results revealed a correlation between matrix suction and the disintegration of rammed earth, indicating that the rate of change in suction over time is the decisive factor influencing the degree of disintegration. This conclusion is supported by an analysis of the gradient changes in matrix potential and pressure potential during the disintegration process. These findings provide significant reference value for research on the erosion development mechanisms of gullies at the site.

**Key words:** rammed earth; disintegration characteristic; classification; spatiotemporal regularity; matrix suction; matrix potential energy; suction-time change rate

(编辑 周璇)

引用格式: Cui Kai, Wang Guanzhong, Pei Qiangqiang, et al. Study on the correlation between disintegration characteristics of rammed earth and matrix suction in the northwest arid area[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(5): 167–178. [崔凯, 王冠众, 裴强强, 等. 西北干旱区遗址夯土崩解特征与基质吸力关联性研究[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(5): 167–178.]