

# 干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应

崔凯<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 谌文武<sup>2, 4\*</sup>, 韩琳<sup>2, 4</sup>, 王旭东<sup>2, 4</sup>, 韩文峰<sup>2, 4</sup>

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 4. 国家古代壁画保护工程技术研究中心, 甘肃 敦煌 736200)

**摘要:** 掏蚀区的形成和发展是中国干旱地区受气候因素控制最为典型和危害最为普遍的土遗址病害之一, 研究基于吐鲁番高昌故城、瓜洲锁阳城、西宁明长城和银川西夏王陵 4 处典型遗址掏蚀区特征描述和盐分监测结果, 证实了土遗址底部掏蚀区有盐渍土带的客观存在。结合经充分脱盐后人为掺入不同类型和含量盐分并经历 3 次干湿循环的遗址土重塑土样的弹性波速测试实验和风洞实验结果分析, 揭示了土遗址掏蚀病害形成和发展过程中盐渍劣化和风蚀损耗两种重要效应; 进而对其机理进行深入分析和阐释, 并揭示了盐分类型、盐分含量和挟沙风风速对其产生的显著的影响; 进一步结合工程地质学和力学理论进行分析, 归纳出三类由其导致的土遗址变形破坏演化机制, 为防治和监测此类病害的发生和发展及其对土遗址稳定造成的影响提供有益的参考。

**关键词:** 干旱; 土遗址; 掏蚀区; 盐渍劣化; 风蚀损耗

**中图分类号:** TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)09-1412-07

**作者简介:** 崔凯(1980-), 男, 副教授, 博士后, 从事西北干旱区岩土劣化机理与过程研究工作。E-mail: cuik09@yahoo.com.cn。

## Effects of salinized deterioration and aeolian ullage on soils in undercutting area of earthen ruins in arid region

CUI Kai<sup>1, 2, 3, 4</sup>, CHEN Wen-wu<sup>2, 4</sup>, HAN Lin<sup>2, 4</sup>, WANG Xu-dong<sup>2, 4</sup>, HAN Wen-feng<sup>2, 4</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China (Lanzhou University), Ministry of Education, Lanzhou 730000, China; 3. Western Center for Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education of China, Lanzhou 730050, China; 4. National Engineering Research Center for Conservation of Ancient Wall Painting, Dunhuang 736200, China)

**Abstract:** The formation and development of undercutting area is one of the typical diseases controlled by climatic factors and will commonly and directly do harm to earthen ruins in arid region. Based on the results of feature description and salinity monitoring of undercutting area in some typical relics in Turpan Gaochang ancient ruins, Guazhou Suoyang ruins, Yinchuan Xixia King tomb and Xining Ming Great Wall, it is found that aeolian bond exists in the bottom undercutting area of earthen ruins. Based on the results of wind tunnel and elastic wave velocity experiments in laboratory on remodeling samples mixed with different salt contents and undergoing three dry-moisture cycles after desalination, it is revealed that salinized deterioration and aeolian ullage are two important effects in the process of the diseases. In-depth analysis and interpretation of mechanism of disease are performed so as to discover influences of salt type, salt content and wind velocity on the two effects. Through engineering geology and mechanical theory analysis, three categories of deformation and failure mechanism of evolution due to ruin's undercutting are summarized. It may be useful for controlling and monitoring the disease and its impact on stability of ruins.

**Key word:** aridity; earthen ruin; undercutting area; salinized deterioration; aeolian ullage

## 0 引 言

如何科学有效地保护诸如土遗址一类的不可移动文物已经成为了世界性的难题。土遗址是赋存在一定环境中人类历史文化的遗存, 环境因素尤其是气候是对土遗址有显著的影响因素, 从土遗址的病害形成到消亡无处能摆脱气候因素的控制。因此, 从气候因素

**基金项目:** 国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAK30B02); 国家“十二五”科技支撑计划课题(2010BAK67B16); 教育部西部灾害与环境力学重点实验室开放基金项目(klmwde201006); 古代壁画保护国家文物局重点科研基地开放课题; 兰州理工大学博士后、博士科研发展基金项目(BS0420902)

**收稿日期:** 2010-05-28

\*通讯作者

入手来研究土遗址的病害机理、制定科学的保护对策已成为诸多学者和研究人员的共识<sup>[1-2]</sup>,其中病害机理的研究成为焦点<sup>[3-7]</sup>。

中国西北干旱地区遗存了数目众多的土遗址,干旱、少雨、多风和高蒸发量的恶劣气候使这些土遗址逐渐经历由病害发育到消失殆尽的量→质变过程,其中遗址底部掏蚀区的发育和发展就是受气候因素控制最为普遍和典型、对遗址安全赋存危害最大的过程之一<sup>[8-9]</sup>。在少量降雨和快速蒸发的条件下,盐分迅速在遗址根部发生汇集形成土遗址的盐渍带,盐渍带土在反复的盐胀作用下结构和强度遭受破坏;而后在干旱区常见挟沙风的磨蚀和吹蚀作用下发生损耗,质量迅速损失,从而形成底部空腔,空腔的进一步扩展将会诱发遗址发生局部破坏甚至整体倾覆。

土遗址底部掏蚀区的发育和发展问题包含土遗址盐渍带的形成、发展以及风蚀损耗等系列问题,涉及到盐渍土、风以及两者之间的相互作用的研究,是一个较为复杂而新颖的研究方向。研究的基础是工程地质学中的盐渍土问题和风沙物理学中的风蚀问题,属于这两个学科的交叉,国内外关于该命题的文献成果实不多见。

本文以西北干旱地区典型土遗址的盐分监测数据为依据,通过对实验条件下掺入不同含量、不同类别的盐分的遗址土的弹性波速的测试和风洞模拟实验提出了土遗址底部掏蚀区的形成和扩展过程中的盐分劣化和风蚀损耗两个重要效应的概念,初步分析了其作用机理和影响因素,并归纳了与之相关的土遗址演化机制。

## 1 气候和掏蚀区特征分析

### 1.1 气候特征

中国西北干旱半干旱地区主要包含新疆、甘肃、青海、宁夏、内蒙古和西藏的部分地区,这些地区气候一般具有大陆性干旱荒漠气候的特征,即少雨、多风和高蒸发量。根据50多年(1951年—2009年)的气象资料统计表明,吐鲁番(新疆)、瓜洲(甘肃)、西宁(青海)、银川(宁夏)等干旱半干旱区土遗址分布地区常具有降雨量一般不超过400 mm,且多以集中式降雨为主要形式;大风、沙尘暴强劲且频繁,常有风速超过5 m/s的起沙风出现;日照丰富,蒸发旺盛的典型气候特征(表1)。

### 1.2 掏蚀区特征

在对吐鲁番高昌故城、瓜洲锁阳城、西宁明长城和银川西夏王陵的研究和保护工程工程实践中,均发现在这些土遗址底部都存在着规模不一的立面凹进,

这些凹进一般发育在距地表30 cm的范围之内,内凹深度由3~50 cm不等(图1)。另外,各遗址现场盐分监测结果显示遗址的底部表面的易溶盐含量远远该高于中部和顶部,含盐量在3.2%~3.6%之间分布,且易溶盐阴离子主要以 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 为主,阳离子以 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 为主(表2)。

表1 研究地区典型气候特征

地点	典型气候特征		
	年均降雨量/mm	年均蒸发量/mm	年大风日/d
吐鲁番(新疆)	16	2837.7	26.7
瓜洲(甘肃)	46	2148.9	68.5
西宁(青海)	368	1762.7	32.4
银川(宁夏)	203	1583.2	25.7



图1 典型遗址上发育的掏蚀区

Fig. 1 Undercutting areas in several typical relics

## 2 概念与形成机理

### 2.1 概念的提出

由典型土遗址掏蚀区的含盐特征的分析,得出掏蚀区已成为盐渍土带的结论;再由其赋存地区气候特征的分析,得出风是掏蚀区形成主要外营力的结论;两者联合分析,可以得出在干旱区反复的集中式降雨和快速蒸发条件下,易溶盐分迅速的向土遗址底部表面转移致使土遗址底部形成“盐渍带”,盐渍带土在其所含盐分周期性的溶解收缩—结晶膨胀—再溶解收缩过程中,原有的骨架遭受破坏,结构变松散,强度降

表2 典型遗址盐分监测结果

Table 2 Results of survey of salinity in typical relics

取样遗址	取样位置	含水率/%	阴离子含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )				阳离子含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )				易溶盐总量/(mg·kg <sup>-1</sup> )
			CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	NH <sub>3</sub> -N	
高昌故城东门柱	顶部	0.66	15	212	938	36	144	13	374	未检出	1661
	中部	0.79	0	197	6681	2112	1548	251	2393	未检出	13345
	底部	2.02	0	184	12527	8467	1045	952	8561	未检出	32047
锁阳城外城马面	顶部	0.78	0	197	3539	159	1239	62	331	未检出	5543
	中部	1.00	0	214	6489	513	1567	120	1189	未检出	10243
	底部	0.83	0	186	14368	8756	4531	162	7864	未检出	36128
西夏陵4号陵角台	顶部	0.54	15	212	864	87	113	19	397	未检出	1619
	中部	1.20	0	213	5416	441	1348	125	1176	未检出	8765
	底部	1.64	0	183	13477	9321	4165	158	7491	未检出	35218

低,发生劣化,即土遗址盐渍劣化效应;而后在干旱区多见的挟沙风强烈的擦蚀、磨蚀和旋蚀作用下,结构松散的盐渍带土迅速瓦解成为自由土粒,并被气流搬运至它处,从而在土遗址的盐渍土带形成向内凹进的空腔,即土遗址风蚀损耗效应。

## 2.2 形成机理研究

### (1) 盐渍土带的形成

高昌故城、锁阳城和西夏陵3处遗址掏蚀区的易溶盐检测结果有力的证明掏蚀区土的易溶盐总量已大于0.3%,属于盐渍土<sup>[10]</sup>,即掏蚀区确实有盐渍土带的存在;由此,盐渍带的形成机理成为揭示盐渍带存在和形成的关键,而关于青海西宁(大通)明长城墙体降雨前后的盐分监测的结果和分析则较好地阐释了盐渍土带的形成机理。

研究选择了青海西宁市大通县一段发育有掏蚀区的典型明长城墙体,墙体残高1.8m,掏蚀区高0.4m;首次降雨前对墙体表面进行的纵向间隔0.2m的系统采取的易溶盐样品的分析结果显示,易溶盐含量呈现由顶部向掏蚀区逐渐递增的规律,降雨后12h的分析结果显示易溶盐含量同样呈现上述依次递增的规律,但由降雨前后的盐分分析结果对比得知降雨后相同取样点的易溶盐含量总体明显高于降雨前(图2)。以上盐渍带规律映证了在干旱区集中式降雨、强烈的蒸发作用和显著的毛细作用使墙体易溶盐迅速向遗址底部表面发生二维运移,盐分发生富集形成盐渍带,这也正是盐渍带形成的真正原因之所在。

### (2) 盐渍劣化

弹性波在岩土介质中传播速度的高低可以直接表征岩土体力学性质和工程地质性质的优劣<sup>[11]</sup>,因此,波速测试常被用于检测岩土体的强度测试中,实验依据此原理选择青海明长城墙体的原状土样经充分碾磨,经去离子水和分子筛双重脱盐后,以0%,0.5%,

1%,3%,5%的质量分数向其中均匀掺入NaCl制成7.07cm×7.07cm×7.07cm的重塑立方体试块,经3次干湿循环过程后,采用RSM-SY5声波检测仪对试块进行波速测试。

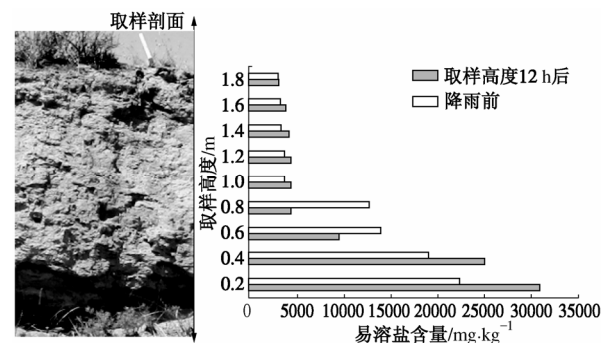


图2 典型剖面易溶盐含量分布

Fig. 2 Distribution of salts at typical profile

实验结果显示,试块的横波和纵波波速随着掺入NaCl含量的增长而呈现递减的趋势(图3),说明在掏蚀区有盐渍土带存在的前提和基础具备之后,盐渍土带的盐分则在干旱地区昼夜温差和少量降雨→高速蒸发的气候特征影响下发生结晶吸水膨胀—失水收缩的反复过程,含有盐分土的骨架结构经历往复的扩展和缩紧过程,结构迅速破坏,土粒之间连接逐渐变得微弱,致使强度严重劣化,即掏蚀区土发生盐渍劣化的机理之所在。

### (3) 风蚀损耗

风洞实验是研究土的风蚀问题最为直观的手段<sup>[12-13]</sup>,因此,研究选取干旱区常见大风风速18m/s的挟沙风对上述试块在全长为85m、洞体长为55m、风速由4m/s至40m/s连续可调的风洞实验机内进行100s,300s,600s连续吹蚀,对经历和未经历盐渍劣化过程的遗址土的风蚀特征进行对比研究。

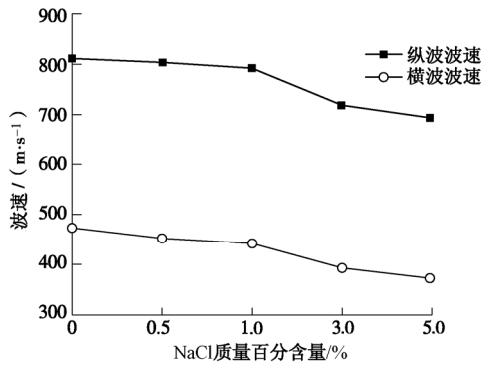


图 3 试块弹性波速与 NaCl 含量的关系

Fig. 3 Relation between NaCl content and elastic wave velocity

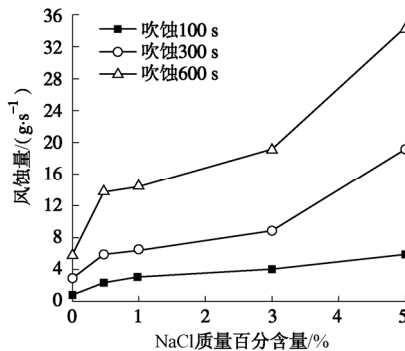


图 4 不同吹蚀时间内土的风蚀量与 NaCl 含量的关系

Fig. 4 Relation between NaCl content and quantity of wind erosion at different time

实验结果显示, 在 18 m/s 的挟沙风吹蚀下, 实验中所有样品均产生风蚀。在相同的吹蚀时间内, 试样的风蚀量随着掺入 NaCl 含量的增长而呈现递增的趋势; 在不同的吹蚀时间内, 未掺入任何盐分的试样风蚀量的增长率明显较掺入 NaCl 并经历干湿循环(发生盐渍劣化)的试样增长率低(图 4)。以上 3 点也充分表明首先具有气、固两相特征的挟沙风中做蠕移、跃移和悬移运动和因为碰撞等原因高速旋转的沙粒对遗址土产生了显著的擦蚀、磨蚀和旋蚀作用。盐渍劣化过程使土遗址盐渍带土的风蚀能力产生差异, 加速了盐渍带土的风蚀过程, 因而发生了在相同时间和空间尺度内的因风蚀损耗量差异造成的土遗址底部形成向内凹进的空腔的作用过程。

### 3 影响因素

对于影响土风蚀的因素学者做了大量的科学研究<sup>[14-18]</sup>, 认为土的颗粒组成、土壤砂通流量、风速、风的类型等为其主要影响因素。但是对于影响土遗址盐渍带土风蚀因素的研究尚数少见。因此, 研究采用室内风洞等实验手段对经脱盐后人为分别掺入不同的质量分数 NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 并经过 3 次干湿循环的青海明长城墙体原状土重塑立方体试块进行了不同风速和吹蚀时间的吹蚀实验, 揭示了盐分类型、盐分含量和挟沙

风风速对土遗址盐渍带土盐渍劣化与风蚀损耗效应的影响。

#### 3.1 盐分类型

对分别掺入质量分数为 0%, 0.5%, 1%, 3% 的 NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的上述试块进行 18 m/s 风速的挟沙风 100 s 连续吹蚀实验的结果显示, 在相同吹蚀条件下, 掺入相同含量 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 试块的风蚀量明显高于掺入相同含量 NaCl 的风蚀量, 掺入不同含量 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 试块风蚀量的增长率也明显高于掺入不同含量 NaCl 风蚀量的增长率(图 5)。这两点说明 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 对土遗址盐渍带土的劣化和损耗过程的影响比 NaCl 更为显著, 也较为直观的反映了不同含盐类型对于土遗址盐渍带土盐渍劣化与风蚀损耗效应的影响。

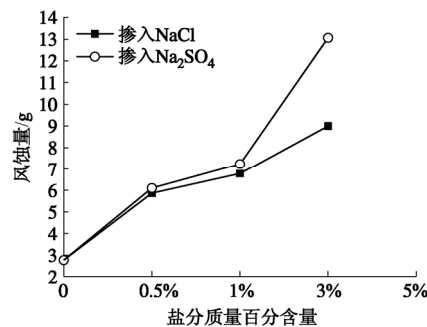


图 5 不同含盐类型试块相同吹蚀条件的风蚀量变化

Fig. 5 Relation between salt type and quantity of wind under the same erosion condition

#### 3.2 盐分含量

28 m/s 风速的挟沙风对未掺入任何盐分和分别掺入质量分数为 0.5%, 1%, 3% 的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的上述试块的 100 s, 300 s, 600 s 连续吹蚀实验表明, 相同吹蚀时间内盐分含量大的试块的风蚀量和风蚀量随时间的增长率均大于盐分含量小的试块的风蚀量和风蚀量随时间的增长率(图 6)。说明土中盐分含量越高, 盐分得膨胀-收缩的反复作用就越活跃, 土粒之间晶体结构遭受的破坏就越强烈, 土体表面粉末化程度越高, 风蚀量越大。因此, 盐分含量的多少直接决定着盐渍劣化程度的高低, 也为风蚀损耗进程的快慢奠定了物质基础。

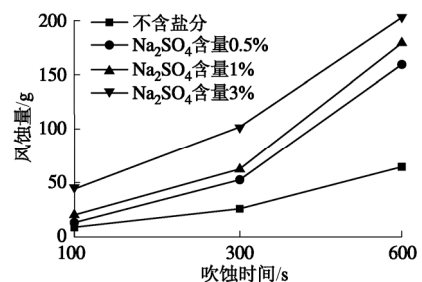


图 6 不同含盐量试块 28 m/s 挟沙风连续吹蚀的风蚀量变化  
Fig. 6 Relation between salt content and quantity of wind erosion under the same wind

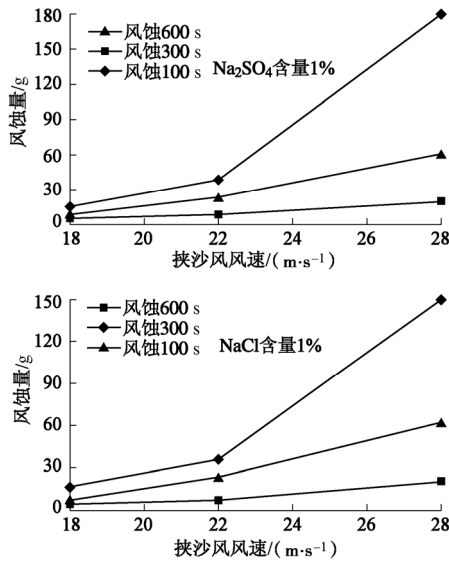


图 7 含盐试块不同吹蚀条件的风蚀量变化

Fig. 7 Relation among salt content and type, quantity of wind erosion under erosion condition

### 3.3 挟沙风风速

实验分别选取 18 m/s, 22 m/s, 28 m/s 的风速的挟沙风对分别掺入质量分数为 1%NaCl 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的立方体试块进行 100 s, 300 s, 600 s, 测得试样在不同风速、相同吹蚀时间内的风蚀量。结果显示在任意一个吹蚀时间段内两种掺入相同含量、不同类型盐分试样的风蚀量都随风速的增大而迅速增长; 试样长风蚀时间段与短风蚀段风蚀量的差值也随风速的增大而迅速增打 (图 7)。这个结果表明挟沙风的风速越大, 风中携带的砂粒越多, 砂粒的机械动能越高, 对盐渍带土的撞击和磨蚀效果就越显著; 从而反映了挟沙风的风速对土遗址盐渍带土风蚀损耗效应产生的突出影响。

## 4 演化机制

任何事物都要经历由产生到消亡的过程, 夯土墙体这种西北干旱地区最为常见的、受掏蚀病害最为严重的一类土遗址也必然经历由遗址底部盐渍带土经历了盐渍劣化和风蚀损耗, 到底部掏蚀区形成向内凹进的小规模空腔, 再到空腔规模逐渐扩展并导致遗址局部或整体失稳并发生破坏的演化过程。正确认知其演化机制, 是评价其稳定性、预测其演化趋势和实施有效保护的关键。对于掏蚀诱发的土遗址的演化机制的研究国内外尚罕见报道, 但夯土墙可以近似看作存在双侧临空面的特殊土质边坡, 因此, 其演化机制的研究可以借鉴日臻完善的边坡演化机制的研究<sup>[4,19-22]</sup>。根据其空腔规模、土体性质和破坏形式的分析, 可将其演化机制基本归纳为分层坠落、块状滑塌和整体

倾倒 3 种。

### 4.1 分层坠落

由于盐分在墙体底部的聚集, 其失水 - 吸水过程迅速导致遗址底部土体劣化, 形成与上部土体抗风蚀能力的差异, 在相同地区的风场条件下产生显著的差异风蚀损耗效应, 在墙体迎风面底部形成向墙体内凹的空腔。随着该效应的继续作用, 空腔的凹进深度不断增长, 空腔上覆夯层的下部临空面出现, 在夯层之间缺乏足够黏聚力和自身重力的影响下, 形成外挑的单个危险块体, 当其难以自持的情况下发生坠落破坏。其它夯层继而依次发生相同的过程, 最终实现分层坠落。可依次分为初始阶段 (阶段 1)、差异风蚀阶段 (阶段 2)、危险块体形成阶段 (阶段 3)、单个危险块体坠落阶段 (阶段 4)、多个危险块体形成和坠落阶段 (阶段 5) (图 8)。

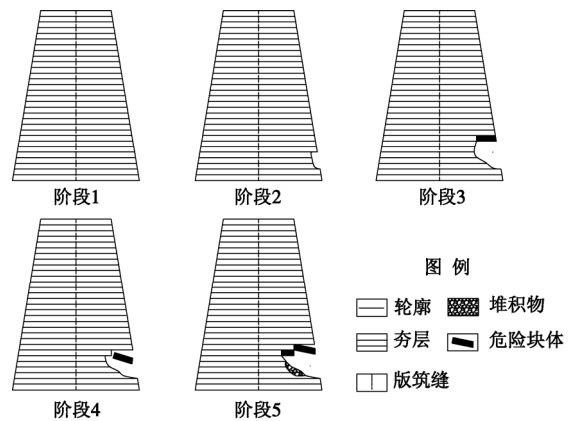


图 8 分层坠落演化过程

Fig. 8 Evolution process of layered dropping

### 4.2 块状滑塌

同样墙体底部盐渍带土完成劣化过程, 在风场作用下产生差异风蚀损耗效应, 在迎风面形成内凹的空腔; 随着差异风蚀损耗效应的继续, 空腔的规模不断增长, 下部临空面出现, 由于建造技法的区别使夯层之间有足够黏聚力, 未发生分层坠落; 但是随着空腔的持续增长, 空腔根部开始发育压性裂缝, 裂隙逐步向上部发展, 当裂隙发育到与夯土版筑缝连通时, 形成完整的滑移后缘; 在自身重力的作用下, 被裂隙切割而成的块体发生滑塌破坏。可依次分为初始阶段 (阶段 1)、差异风蚀阶段 (阶段 2)、压性裂隙形成阶段 (阶段 3)、裂隙扩展阶段 (阶段 4)、块体滑塌破坏阶段 (阶段 5) (图 9)。

### 4.3 整体倾倒

这种模式出现在当地存在两个主导风向的情况下, 在两个迎风面各形成一个内凹的空腔, 随着差异风蚀损耗效应的继续, 空腔的规模不断增长, 临空面出现; 在夯层之间有足够黏聚力的情况下, 随着两个

空腔规模的持续膨胀, 遗址根部逐渐萎缩, 遗址版筑缝被拉开, 同时根部开始发育压性裂缝, 当裂隙发育到与版筑缝连通时, 遗址无法维持自稳状态, 严重开裂分解为两部分; 在自身重力的作用下发生分向倾倒破坏。可依次分为初始阶段(阶段1)、差异风蚀阶段(阶段2)、版筑缝开裂与裂隙形成阶段(阶段3)、裂隙与版筑缝连通阶段(阶段4)、整体倾倒破坏阶段(阶段5)(图10)。

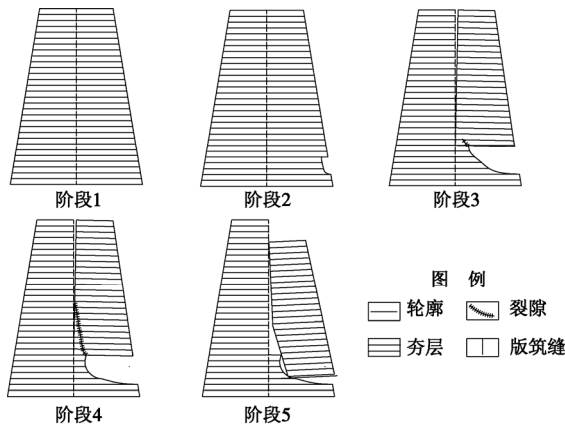


图9 块状滑塌演化过程

Fig. 9 Evolution process of nubbly collapsing

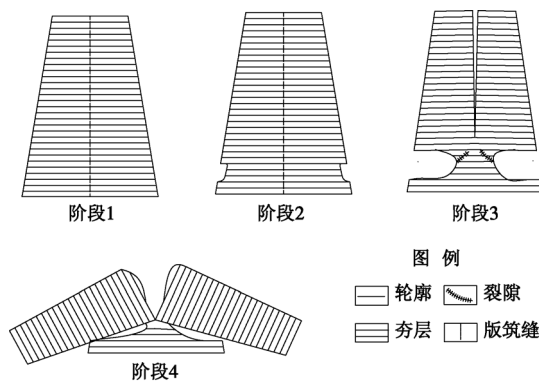


图10 整体倾倒演化过程

Fig. 10 Evolution process of third toppling

## 5 结 论

(1) 基于吐鲁番高昌故城、瓜洲锁阳城、西宁明长城和银川西夏王陵四处典型遗址盐分监测结果和室内实验结果, 证明了土遗址底部掏蚀区有盐渍带的客观存在, 并揭示了西北干旱半干旱地区土遗址受气候因素控制最为普遍和典型的掏蚀病害形成过程中产生的盐渍劣化和风蚀损耗两种重要效应。

(2) 室内对掺入不同类型、含量并经历干湿循环的试样的弹性波速实验和风洞试验阐释了干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化和风蚀损耗效应作用机理。

(3) 土遗址掏蚀区土盐分类型与含量的差异从本

质上决定了盐渍劣化和风蚀损耗效应的产生和发展, 表现为掺入相同含量  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  试块的风蚀量比掺入相同含量  $\text{NaCl}$  的风蚀量大, 试块中盐分的质量百分含量越高, 其风蚀量越高。挟沙风风速对土遗址盐渍带土风蚀损耗效应产生的突出影响, 表现为挟沙风的风速越大, 其作用效果就越显著。

(4) 由盐渍劣化和风蚀损耗效应导致土遗址形成空腔后的演化机制可根据空腔规模、土体性质和破坏形式的差异大致归纳概括为分层坠落、块状滑塌和整体倾倒3种。

## 参考文献:

- [1] 萧默. 敦煌建筑研究[M]. 北京: 文物出版社, 1989. (XIAO Mu. Research on construction of Dunhuang[M]. Beijing: Wenwu Publishing House, 1989. (in Chinese))
- [2] 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. (HUANG Ke-zhong. Conservation of cultural relic and construction building of rock-soil[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998. (in Chinese))
- [3] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京: 科学出版社, 1994. (LI Zui-xiong. Conservation of ancient sites on the Silk Road[M]. Beijing: China Science Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 崔凯, 谌文武, 韩文峰, 等. 多元层状陡立土质边坡差异性风蚀效应研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1414 - 1421. (CUI Kai, CHEN Wen-wu, HAN Wen-fen, et al. Study on effects of differences wind erosion for multivariate layered steep soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1414 - 1421. (in Chinese))
- [5] LEWIN S Z. The mechanism of masonry decay through crystallization[J]. Conservation of Historic Stones Buildings and Monuments, 1982(1): 120 - 144.
- [6] 王旭东. 中国西北干旱环境下石窟和土遗址保护加固研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2003. (WANG Xu-dong. The conservation and consolidation of the grottoes and the earthen architecture site in the arid region of Northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2003. (in Chinese))
- [7] 张虎元, 刘平, 王锦芳, 等. 土建筑遗址表面结皮形成与剥离机制研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1883 - 1891. (ZHANG Hu-yuan, LIU Ping, WANG Jin-fang, et al. Generation and detachment of surface crust on ancient earthen architectures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 1883 - 1891. (in Chinese))
- [8] 李最雄, 赵林毅, 孙满利. 中国丝绸之路土遗址的病害及PS加固[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1047 - 1053. (LI Zui-xiong, ZHAO Lin-yi, SUN Man-li. Deterioration of

- earthen sites and consolidation with PS material along Silk Road of China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(5): 1047 - 1053. (in Chinese)
- [9] 赵海英, 李最雄, 韩文峰, 等. 西北干旱区土遗址的主要病害及成因[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(增刊 2): 2875 - 2880. (ZHAO Hai-ying, LI Zui-xiong, HAN Wen-feng, et al. Main diseases and their causes of earthen ruins in region of Northwest China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(S2): 2875 - 2880. (in Chinese))
- [10] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2002. (GB50021—2001 The code for prospecting the geological engineering[S]. 2002. (in Chinese))
- [11] 闫治国, 朱合华, 邓涛, 等. 三种岩石高温后纵波波速特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(11): 2010 - 2014. (YAN Zhi-guo, ZHU He-hua, DENG Tao, et al. Experimental study on longitudinal wave characteristics of tuff granite and breccia after high temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(11): 2010 - 2014. (in Chinese))
- [12] 刘玉璋, 董光荣, 李长治. 影响土壤风蚀主要因素的风洞实验研究[J]. 中国沙漠, 1992, **12**(4): 41 - 49. (LIU Yu-zhang, DONG Guang-rong, LI Chang-zhi. Study on some factors influencing soil erosion. by wind tunnel experiment[J]. Journal of Desert Research, 1992, **12**(4): 41 - 49. (in Chinese))
- [13] DANIEL E B, TED M Z, SERGIO A. Abascal. Wind erosion quantity and quality of an entic haplustoll of the semi-arid pampas of argentina[J]. Journal of Arid Environments, 2007, **69**: 29 - 39.
- [14] 崔凯, 谌文武, 张景科, 等. 多元层状边坡土体风蚀速率与微结构参数关系[J]. 岩土力学, 2006, **30**(9): 2741 - 2746. (CUI Kai, CHEN Wen-wu, ZHANG Jin-ke, et al. Relationships between microstructure parameters and wind erosion rate of multivariate layered soil in slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(9): 2741 - 2746. (in Chinese))
- [15] 移小勇, 赵哈林, 张铜会, 等. 挟沙风对土壤风蚀的影响研究[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(3): 58 - 61. (YI Xiao-yong, ZHAO Ha-lin, ZHANG Tong-hui, et al. Influence of wind-sand flow on soil erosion[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, **19**(3): 58 - 61. (in Chinese)).
- [16] CHEPIL W S. Properties of soil which influence wind erosion[J]. Soil Science, 1951: 69 - 70.
- [17] 马月存, 陈源泉, 隋鹏, 等. 土壤风蚀影响因子与防治技术[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(11): 1390 - 1394. (MA Yue-cun, CHEN Yuan-quan, SUI Peng, et al. Research advances in affecting factors and prevention techniques of soil wind erosion[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, **25**(11): 1390 - 1394. (in Chinese))
- [18] HINRICH L B, BRIAN L M, GEORGE A O'Connor. Soil chemistry[M]. 3rd edition. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [19] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 第二版. 北京: 地质出版社, 1994. (ZHANG Zhou-yuan, WANG Tian-shi, WANG Lan-sheng. Fundamentals of the engineering geology analyses[M]. 2nd edition. Beijing: Geological Press, 1994. (in Chinese))
- [20] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析的原理. 方法. 程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (CHEN Zu-yu. Soil slope stability analysis-theory, methods. programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese))
- [21] STRPHEN G E, JEROME V D. Catastrophic Landslides: effects, occurrence, and mechanisms[M]. New York: Geological Society of America, 2002.
- [22] TETSUYA K, HISASHI A, AKIRA M, et al. Effect of the development of notches and tension cracks on instability of limestone coastal cliffs in the Ryukyus, Japan[J]. Geomorphology, 2006, **80**: 236 - 244.