

DOI: 10.11779/CJGE201710004

干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应(II)

崔凯^{1, 2, 3}, 关喜鹏^{*1, 3}, 谌文武², 陈蒙蒙^{1, 3}, 韩文峰²

(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)

摘要: 盐渍劣化与风蚀损耗效应是干旱区土遗址底部掏蚀病害形成和发展过程中的控制性进程。盐分运移与富集的途径、土体抗风蚀能力盐渍劣化的本质是其中两个关键问题。通过集中降雨过程 3 处土遗址温度、含水率和介电常数的实时监测, 发现地基和掏蚀区两处土体温度、含水率变化存在的较大的时间梯度差异为盐分通过毛细作用向掏蚀区发生运移和聚集提供了动力和运载媒介。以监测结果为依据, 通过对完成不同期次干湿循环养护的不同含盐类型、含盐量的遗址土重塑样的颗粒分析和风洞吹蚀试验, 表明干旱区年际发生的集中式降雨过程所促使的盐分富集增量和干湿次数累加所导致的土体粗粉粒化和粒度均一化是盐渍过程对掏蚀区土体抗风蚀能力产生劣化的本质原因。

关键词: 掏蚀区; 盐渍劣化; 梯度差异; 风蚀模数; 粒度均一化

中图分类号: TU411.2

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)10 - 1777 - 08

作者简介: 崔凯(1980 -), 男, 副教授, 博士生导师, 从事西部地区岩土体劣化破坏过程与机理的研究工作。E-mail: 65226683@qq.com。

Effects of salinized deterioration and aeolian ullage on soils in undercutting areas of earthen ruins in arid regions (II)

CUI Kai^{1, 2, 3}, GUAN Xi-peng^{*1, 3}, CHEN Wen-wu², CHEN Meng-meng^{1, 3}, HAN Wen-feng²

(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)

Abstract: The effects of saline deterioration and aeolian ullage are the important controlling process for the formation and development of undercutting disease at the bottom of earthen sites in arid regions. Among them, the traces of movement and enrichment of salts and the essence of saline deterioration for anti-erosion ability of soil are the two key issues. Through real-time monitoring of the temperature, moisture and permittivity of three typical sites during concentrated rainfall process, it is found that the larger time gradient difference exists between the changes of temperature and moisture content in soils located in foundation and undercutting areas, providing much power and being a transportation medium for salt to migrate and accumulate into undercutting areas by capillary action. Based on the above monitoring results, and by analyzing the particle sizes and conducting wind erosion experiments on remolded samples of site soils which have experienced different stages of wetting-drying cycles and been cured under different salt types and contents, it is shown that the essential reason for deterioration of soil resistance to wind erosion in undercutting areas is the salt enrichment increment caused by the annual concentrated rainfall in the arid areas and coarse-grained soils and the uniform particle sizes caused by wetting-drying cycles.

Key words: undercutting area; salinized deterioration; gradient variation; wind erosion modulus; homogenization granularity

0 引言

底部掏蚀是干旱、半干旱地区危害最为典型的土遗址病害^[1-3], 其发育规模和位置对土遗址的整体稳定性以及失稳模式存在至关重要的影响^[4-5]。盐渍劣化和风蚀损耗效应是掏蚀区形成和发展过程中的控制性进程, 决定着其发展速度、发育规模和演化模式^[6], 是科学认

识和有效保护土遗址过程亟待研究的重要课题。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208245, 41562015); 教育部长江学者创新团队支持计划项目(2017IRT17051); 甘肃省高校基本科研业务费专项资金项目

收稿日期: 2016 - 07 - 25

***通讯作者 (E-mail: 995694065@qq.com)**

在前期研究当中,基于干旱区不同时代点状遗址点掏蚀区的高度、深度和含盐特征的调查结果,通过经历3次干湿循环的遗址重塑试样的赋存环境分析和风洞试验,提出干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应的概念,并分析了盐分类型、盐分含量和挟沙风风速对其产生的显著的影响。然而,对于掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应发生过程中盐分如何向遗址掏蚀区发生运移与富集、盐渍过程对掏蚀区土体抗风蚀能力产生劣化的本质原因这两个关键问题研究存在不足。

因此,基于以上认识,研究通过对分布于干旱地区3处典型遗址降雨过程中掏蚀区和地基土体温度、含水率和介电常数变化的实时监测以及结果分析,来探索盐分向遗址底部运移与富集的原因。在前期对分别掺入NaCl和Na₂SO₄并经历3次干湿循环养护遗址土重塑试样抗风蚀能力研究的基础上,通过分别掺入质量分数为0.2%,0.4%,0.6%,0.8%和1%的NaCl和Na₂SO₄盐分并经历6,9,12次干湿循环养护的遗址土重塑试样的颗粒分析与分维结果以及挟沙风的风洞吹蚀试验结果的联合分析,来揭示盐渍过程对掏蚀区土体抗风蚀能力产生劣化的根本原因,为继续研究干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应提供支撑。

1 典型土遗址降雨过程监测

掏蚀区土的盐渍劣化与风蚀损耗效应是一个复杂而长期的过程。首先盐渍劣化效应发生过程中土遗址中盐分的运移、溶解和结晶都离不开水和温度的同步作用,而且水和温度的同步作用必须是长期而频繁的。分析干旱区土遗址赋存的自然环境因素,能使露天环境保存的土遗址的水分和温度同时发生改变,而且能够长期频现的因素也只有该地区最为常见的集中降雨过程。因此,通过在青海明长城遗址湟中段、甘肃明长城遗址山丹段和永靖段墙体3处干旱地区典型土遗址天然断面上开展的集中降雨过程中掏蚀区和地基土体温度、含水率和介电常数变化的实时监测,来了解该过程中盐分向遗址底部掏蚀区运移与富集的原因。

1.1 监测工作

3处典型土遗址集中降雨过程的监测工作主要是在干旱区夏季雨季(7,8,9月)期间进行。监测点沿断面轴线对称布置,其中 a_1, a_2 为遗址两侧掏蚀区测点, b_1, b_2 为遗址两侧地基处测点(图1)。重点监测降雨前后遗址掏蚀区和地基土体温度、含水率和介电常数的变化,监测周期为12h,采集数据时间间隔

为2h;监测仪器为POGO便携式土壤多参数速测仪。

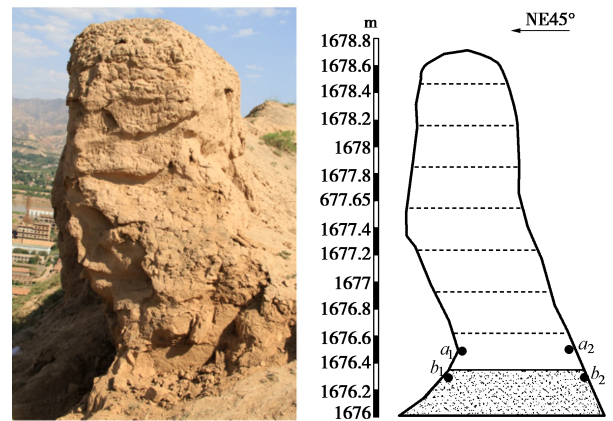


图1 典型土遗址监测点布置图(永靖)

Fig. 1 Arrangement of monitoring points in typical earthen ruins (Yongjing)

1.2 监测结果

3处典型遗址降雨过程监测结果显示:一方面人眼观测在降雨前遗址两侧掏蚀区与地基土体表面颜色基本保持一致;降雨时地基土体颜色加深,掏蚀区土体颜色基本保持与雨前一致;降雨后掏蚀区土体表面颜色迅速加深(图2)。另一方面仪器测试显示在整个监测周期内,雨前2h至雨后2h这个时间区段遗址两侧掏蚀区与地基土体的温度、含水率和介电常数变化最剧烈,而且表现出一定的总体规律性;温度为先降后升,含水率为先升后降,介电常数先升后降。但是在总体比变化趋势一致的前提下,遗址两侧地基和掏蚀区土体的上述3个参数存在着显著的细微差别。①雨前2h、雨中至雨后2h段内任一时刻遗址两侧地基土体的温度、含水率和介电常数值明显高于掏蚀区土体。②雨中至雨后2h间区段内掏蚀区土体的含水率值和介电常数值降低幅度则明显小于地基土体。



图2 降雨后地基中水分向遗址掏蚀区运移现象

Fig. 2 Migration of water from foundation to undercutting area after rainfall

2 颗粒分析与风洞试验

风蚀损耗效应是土遗址掏蚀区形成和发展过程紧接着盐渍劣化效应发生的下一个重要进程。掏蚀区土的盐渍劣化程度从内因的角度直接决定了其抵抗挟沙风的吹蚀和磨蚀作用的能力, 因此, 通过开展了不同含盐量与不同次数干湿循环养护(不同盐渍劣化程度)试块的颗粒分析和风洞吹蚀试验, 来揭示盐渍过程对掏蚀区土体抗风蚀能力产生劣化的根本原因。

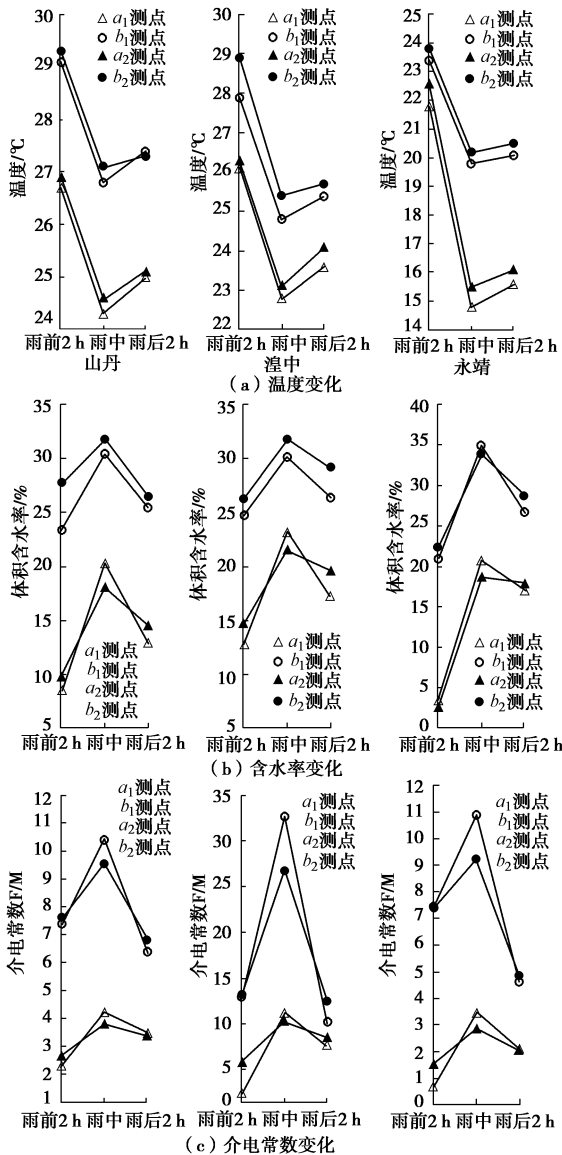


图 3 土遗址降雨过程温度、含水率和介电常数监测结果

Fig. 3 Monitoring results of temperature, moisture and dielectric constant in earthen ruins during rainfall process

2.1 试验工作

将取自甘肃张掖境内明长城遗址坍塌处的遗址夯土进行粉碎脱盐处理^[7], 分别掺入无水 NaCl 和无水 Na₂SO₄, 依据最优含水率 16%和最大干密度 1.72

g/cm³ 采用双向挤压法压制成长为 7.07 cm、含盐量分别为 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%和 1%的立方体试块。将待养护试块置于温湿度控制室进行 6, 9, 12 次分期次干湿循环养护。24 h 完成一个循环, 循环温湿度设定依据 3 处遗址降雨过程的监测结果。每次循环前 12 h 为吸湿过程, 湿度由 40%均匀升至 100%, 温度由 30℃均匀降至 20℃; 每次循环后 12 h 为脱湿过程, 湿度由 100%均匀降至 40%, 温度由 20℃均匀升至 30℃。

将部分上述完成不同期次干湿循环养护的试块置于多功能环境风洞试验段入口下风向 10 m 处, 完成 18 m/s 风速携沙风的 600 s 连续吹蚀试验, 用称重法测定风蚀量并计算风蚀模数。剩余部分完成上述分期次养护的含盐试样彻底粉碎搅拌均匀后按四分法称取 200 g, 采用筛析法和比重计法进行颗粒分析试验, 据分形理论采用最小二乘法拟合计算^[8], 分析计算得出相应的粒度分维值。

2.2 试验结果

一方面, 人眼观测完成养护的试样表面均出现盐析出和颗粒粉化的现象, 与现场观测到掏蚀区土体表面的盐析和粉化现象相一致(图 4); 随着掺入盐分含量和干湿循环次数的增加, 试样的盐析和粉化现象愈加显著, 但掺入 NaCl 试样的盐析和粉化现象明显弱于掺入 Na₂SO₄ 的试样。另一方面, 上述不同循环养护含盐试样的颗粒分析试验结果显示(表 1):

(1) 掺入两种类型任意含量盐分的试块的粗粉粒质量百分含量随着干湿循环次数的增加而呈现递增趋势, 而细粉粒、黏粒和胶粒质量百分含量和粒度分维值则出现递减趋势。

(2) 在给定干湿循环次数条件下, 掺入两种类型盐分的试块的粗粉粒质量百分含量均随掺入盐分含量的增加而增大, 细粉粒、黏粒和胶粒质量百分含量和粒度分维值则随掺入盐分含量的增加而减小。

(3) 在给定干湿循环次数和盐分含量条件下, NaCl 对试块的粗粉粒、细粉粒、黏粒和胶粒质量百分含量和粒度分维值的改造作用明显弱于 Na₂SO₄。

完成上述循环养护含盐试样的 18 m/s 风速携沙风的 600 s 连续吹蚀试验结果显示(图 5):

(1) 吹蚀后的试块表面均出现结核状凸起, 凸起的数量与大小随着掺入盐分含量和干湿循环次数的增加而减少。

(2) 掺入两种类型盐分任意含量盐分的试块的风蚀模数随着干湿循环次数的增加而呈现递增的趋势。

(3) 在给定干湿循环次数条件下, 掺入两种类型盐分的试块的风蚀模数随掺入盐分含量的增加而增大。

表 1 颗粒组成分析结果

Table 1 Results of analysis of grain composition

盐分类型	NaCl					Na ₂ SO ₄					干湿循环次数
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	
粗粉粒含量/% (0.075~0.01 mm)	82.051	83.907	85.121	86.021	87.643	83.585	84.755	85.727	86.444	88.906	6
	83.776	85.402	86.646	88.225	89.029	84.641	85.966	87.434	88.561	90.368	9
	85.829	87.161	88.379	90.793	91.147	86.371	87.856	89.226	91.593	92.786	12
细粉粒含量/% (0.01~0.005 mm)	9.819	8.854	8.539	8.245	7.498	9.715	8.777	8.454	8.175	6.453	6
	9.477	8.643	7.403	6.673	6.225	9.029	7.782	7.143	6.634	5.480	9
	8.300	7.653	6.71	5.216	5.060	8.000	7.650	6.593	5.054	4.466	12
黏粒含量/% (0.005~0.002 mm)	4.568	3.879	3.458	2.987	2.245	3.524	3.124	2.998	2.587	2.108	6
	3.541	3.329	3.321	2.434	2.164	3.364	3.209	2.812	2.219	1.956	9
	2.857	2.589	2.313	2.064	1.869	2.612	2.487	2.078	1.702	1.289	12
胶粒含量/% (0.005~0.002 mm)	3.418	3.057	2.768	2.575	2.307	3.002	2.994	2.705	2.624	2.226	6
	2.948	2.491	2.432	2.391	2.205	2.613	2.543	2.436	2.267	2.060	9
	2.573	2.201	1.986	1.629	1.380	2.029	1.704	1.531	1.328	1.234	12
粒度分维值	2.180	2.150	2.130	2.110	2.090	2.150	2.090	2.030	2.010	1.870	6
	2.030	1.92	1.89	1.850	1.790	2.000	1.910	1.860	1.730	1.600	9
	1.900	1.890	1.840	1.760	1.640	1.890	1.880	1.810	1.670	1.550	12

(4) 在给定干湿循环次数和盐分含量条件下, 掺入 Na₂SO₄ 的试块的风蚀模数明显大于掺入 NaCl 对试块。



(a) 养护完成的试样



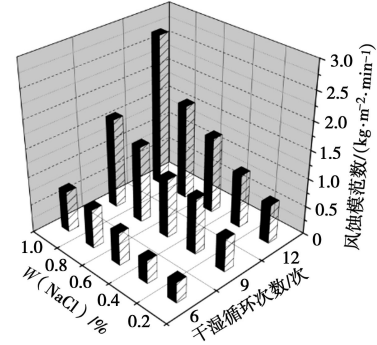
(b) 掏蚀区表面

图 4 试样和掏蚀区表面出现的盐析出和颗粒粉化现象

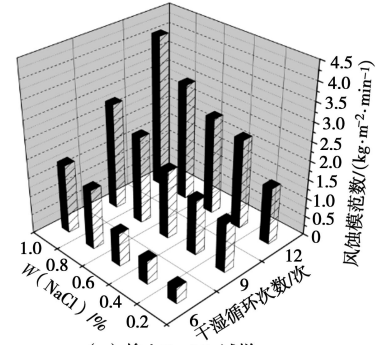
Fig. 4 Exudation of salts and pulverization of particles of samples and undercutting areas



(a) 风蚀后试样形态



(b) 掺入NaCl试样



(c) 掺入Na₂SO₄试样

图 5 风洞试验结果

Fig. 5 Results of wind erosion tests

3 分析与讨论

3.1 盐分迁移与聚集

由上述 3 处典型遗址降雨过程含水率和温度的监测结果分析可知。雨前 2 h 至雨后 2 h 这个时间区段遗址两侧掏蚀区土体的含水率始终低于地基土体, 而且在此时段内两者含水率变化也存在着梯度差异, 具体表现为雨前 2 h 至雨中掏蚀区土体的含水率增加梯度大于地基土体, 雨中至雨后 2 h 掏蚀区土体的含水率减小梯度小于地基土体。这充分说明降雨过程中入渗到地基中的水分在掏蚀区土体和地基土体含水率存在较大的差异的条件下通过毛细作用迅速向掏蚀区展开运移, 这一点与掏蚀区土体降雨过程颜色的变化规律是相吻合的。然而这种高度的吻合情况的发生是有具体原因的, 首先因为西北干旱区土遗址多数是由第四纪土状堆积物经人工砌筑或夯筑而成, 成分主要是以粉质黏土为主, 这类土体具有明显的毛细作用^[9]; 其次降雨前直立于天然地基上的土遗址与地基土体的含水率保持着平衡状态, 降雨时雨水入渗地基使其含水率极速上升, 而对于垂直于地基的遗址底部(掏蚀区)土体含水率影响不大, 但是降雨前两者之间的平衡状态被打破, 需要重新达到平衡水分会向含水率较低的掏蚀区发生运移。在中国干旱区地表有着广泛的内陆盐渍土分布^[10], 而干旱区土遗址绝大多数坐落于天然地表之上, 所以天然地表即土遗址地基。监测结果显示降雨过程含水率变化的同时, 掏蚀区和地基土体的温度也是同时变化的, 温度的变化对地表盐分溶解度有显著的影响。雨前至雨中 2 h 地基土体的温度降低 4℃左右, 其中盐分的溶解度随之降低, 部分盐分结晶析出, 降雨时雨水入渗地基溶解结晶析出的盐分成为盐溶液; 雨中至雨后 2 h 地基温度回升, 盐溶液的溶解力进一步提升, 溶解更多盐分后在毛细作用下向掏蚀区运移。由此可见, 降雨过程中含水率和温度的变化为土遗址掏蚀区盐分运移与聚集提供重要的动力条件和运移媒介。

最后, 介电常数的变化则是掏蚀区盐分运移与聚集最显著的特征。介电常数是反映土体导电能力的重要参数, 与土的含盐量和含水率有密切联系^[11-12]。上述 3 处遗址降雨过程介电常数监测结果显示在雨前 2 h 至雨后 2 h 这个时间区段 3 处遗址地基土体的介电常数值始终高于掏蚀区土体, 而且雨前 2 h 至雨中其值大幅度增长, 雨中至雨后 2 h 其值大幅度下降。但是相较于地基, 掏蚀区土体的介电常数值变化趋势则比较平缓, 尤其在雨中至雨后 2 h 其值的变化则最为平缓。说明在雨中至雨后 2 h 这个时间段内地基土体中

的盐分在水分通过毛细通道向掏蚀区运移的同时向掏蚀区发生聚集即发生水盐运移过程。

3.2 盐渍劣化过程

在降雨过程中在温度和含水率变化的条件下, 盐分除了通过毛细作用向掏蚀区运移之外, 同时也会发生相应相态的转变。 Na_2SO_4 和 NaCl 是干旱区土遗址掏蚀区中最为常见的易溶盐^[6], 研究表明温度对 Na_2SO_4 的溶解度影响显著, 当温度小于 32.5℃时, Na_2SO_4 会以 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体的形式从溶液中析出, 结晶后的体积为结晶前的 3.1 倍^[13]; NaCl 的溶解度虽然不随温度变化而发生显著变化, 但具有明显的吸湿性, 其吸收 2 个水分子后, 体积会增大 1.3 倍^[14]。由上述监测结果可知, 雨前 2 h 至雨中掏蚀区土体的含水率上升、温度下降, 温度的变化范围在 27℃~15℃, 远低于 32.5℃, 这个时段内土体中 Na_2SO_4 因温度降低以 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 析出, 土体中 NaCl 因含水率增加发生吸湿; Na_2SO_4 的结晶和 NaCl 的吸湿会产生明显的体积膨胀。雨中至雨前 2 h 掏蚀区土体的含水率下降、温度上升, 温度的变化范围在 15℃~25℃, Na_2SO_4 发生溶解, NaCl 发生脱湿, 体积收缩。从以上分析不难看出, 掏蚀区土体中盐分在降雨过程中发生相应变化就是盐渍作用。

接下来不同含盐量与不同干湿循环次数(不同盐渍劣化程度)养护试块的 18 m/s 风速携沙风试验结果从干湿频次、含盐类型与含盐含量的角度有力说明了盐渍作用对掏蚀区土体抗风蚀能力具有显著的劣化作用。首先, 试验结果显示在含盐类型和含盐量相同的情况下, 试块的风蚀模数随着循环次数的增加而显著增长, 说明干湿变化越频繁则试块的抗风蚀能力降低越显著, 而且具有累加性。其次, 试验结果显示在干湿循环次数和含盐量相同的情况下, 掺入 Na_2SO_4 的试块的风蚀模数明显大于掺入 NaCl 试块, 说明 Na_2SO_4 对试块的抗风蚀能力劣化作用强于 NaCl 。最后, 试验结果显示在含盐类型和干湿循环次数相同的情况下, 试块的风蚀模数随着含盐量增加而显著增长, 说明含盐量越高则试块的抗风蚀能力降低越显著。据此分析, 露天保存于干旱区的土遗址在常年集中降雨条件下盐分不断在掏蚀区富集增量, 干湿变化成年累加, 促使盐渍作用对掏蚀区土体的抗风蚀能力的劣化作用不断累加, 从而为风蚀损耗效应的发生提供了前提。

3.3 盐渍劣化本质

风蚀模数是指单位时间和单位面积上的土体风蚀量, 是反映土体抗风蚀能力最为直观的物理量, 土体的颗粒组成与结构特征是其重要内在影响因素^[15]。粗

粉粒百分含量是表征粒径在 0.075~0.01 mm 之间颗粒的相对含量的参数, 粒度分维值是表征颗粒分选性和级配关系好坏的良好参数^[16-18], 两者联合分析可以反映土体颗粒组成和粒间联结方式等土体结构的变化。因此, 从上述循环养护含盐试样的颗粒分析试验结果来探索试样颗粒组成与风蚀模数的联系是揭示盐渍过程对掏蚀区土体抗风蚀能力产生劣化的根本原因的可行途径。上述不同盐渍劣化程度试块的风洞试验和颗粒分析试验显示不同频次和程度的盐渍作用会对试样的抗风蚀能力产生不同的劣化效果并且导致试样的颗粒组成与分维特征产生相对应的调整。基于此, 为了探索两者之间存在可能的联系, 首先对不同期次干湿循环养护的含盐试块的风蚀模数 (W_m) 分别与粗粉粒质量百分含量 (C_s) 和颗粒分维值 (P_d) 进行的相关分析。分析结果表明在任意期次循环作用下, 试块的风蚀模数与粗粉粒质量百分含量存在良好的相关关系, 相关系数的绝对值都大于 0.909, 呈高度正相关的关系, 而风蚀模数与粒度分维值存在高度负相关的关系, 相关系数的绝对值均大于 0.921 (表 2)。在确定两者之间存在良好的相关关系之后, 应用回归分析法对试样的风蚀模数与粗粉粒质量百分含量和粒度分维值进行分析, 结果表明掺入 Na_2SO_4 和 NaCl 两种盐分试样的风蚀模数与粗粉粒质量百分含量的回归方程都服从正指数法则, 判定系数 R^2 均大于 0.751; 风蚀模数与颗粒分维值的回归方程都服从负指数法则, 判定系数 R^2 均大于 0.743; 回归方程均有效 (图 6, 表 3)。以上量化分析结果表明随着含盐量和干湿循环的次数的增加试样的颗粒逐渐经历“粗粉化”、粒度均一集中的过程, 这是与典型遗址掏蚀区土体“粉化”的定性观察结果相呼应的。量化分析结果和现场定性观察结果两者的高度一致再次表明了盐渍过程对掏蚀区土体抗风蚀能力的产生劣化作用的实质就是水、盐和温度共同作用下使土体的颗粒粒径粗粉粒化和均一化。

然而, 掏蚀区土体粗粉粒化和粒度均一化过程是土体结构发生调整的客观反映。掏蚀区土体盐分含量和干湿次数的增加使聚积于土颗粒接触点的盐分反复并且增幅发生脱湿干缩-吸湿膨胀与结晶膨胀-溶解收缩作用。在这种持续作用下土体中细粉粒、黏粒和胶粒等小粒径的颗粒不断发生团聚, 盐分包裹或黏结小颗粒从而使团聚体的粒径增大, 黏粒和胶粒等胶结成分减少。土的结构也因此而由接触胶结结构向单一的接触结构逐渐过渡, 中小孔隙增加, 微孔隙减少; 土体的自组织程度逐渐降低, 土粒间的联接力和骨架刚度遭到持续疲劳弱化, 就更加容易遭受携沙风中沙粒的撞击力和剪切力的作用而脱离成为自由土粒, 致使

土体的抗风蚀能力持续降低。

表 2 风蚀模数与颗粒分析参数的相关分析结果

Table 2 Results of correlation analysis between indexes of grain composition and wind erosion modulus

盐分类型	循环次数	风蚀模数与颗粒分析参数相关系数	
		W_m 与 C_s	W_m 与 P_d
NaCl	6	0.958	-0.970
	9	0.985	-0.988
	12	0.909	-0.990
Na_2SO_4	6	0.940	-0.921
	9	0.983	-0.993
	12	0.969	-0.945

表 3 风蚀模数与颗粒分析参数的回归分析结果

Table 3 Results of regression analysis between indexes of grain composition and wind erosion modulus

参数	循环次数	回归方程	判定系数	
			NaCl	Na_2SO_4
W_m 与 C_s	6	$W_m = a_0 + a_1 e^{\frac{C_s}{b}}$	0.770	0.751
	9		0.963	0.984
	12		0.856	0.938
W_m 与 P_d	6	$W_m = a_0 + a_1 e^{-\frac{P_d}{b}}$	0.808	0.743
	9		0.964	0.980
	12		0.955	0.892

其中 a_0, a_1, b 为常数。

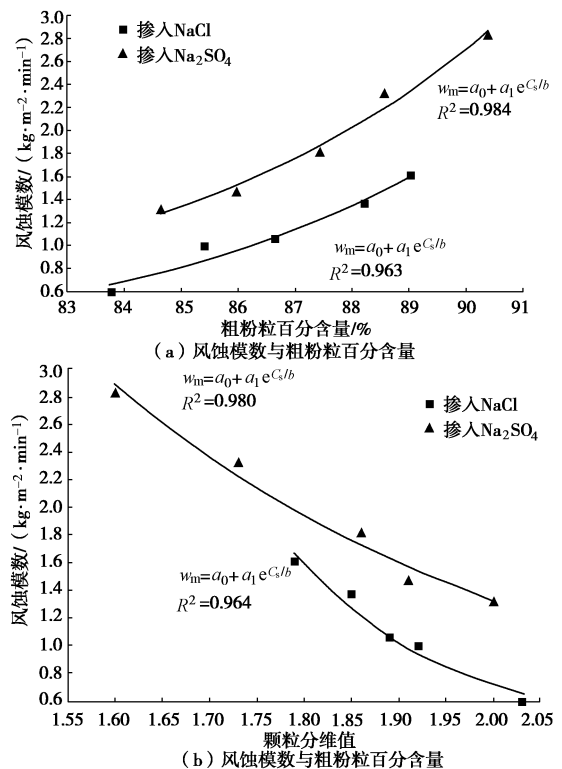


图 6 风蚀模数与粗粉粒含量回归分析 (9 次循环)

Fig. 6 Regression analysis between indexes of grain composition and wind erosion modulus (9 cycles)

3.4 讨论

首先, 以上监测结果表明集中式降雨这种干旱地区夏季最为常发的天气过程造成遗址地基与掏蚀区土体的含水率和温度的差异变化, 为掏蚀区土体的盐渍劣化效应的发生提供了盐分运移和聚集的途径和动力。其次, 上述试验结果表明因集中式降雨规律性的周期年际发生, 导致盐分不断在掏蚀区富集增量和干湿变化成年累加, 从干湿次数和盐分含量的角度加剧掏蚀区土体的盐渍劣化效应的程度。最后, 数学分析结果表明盐渍劣化效应促使掏蚀区土体粗粉粒质量百分含量和粒度分维值出现伴随干湿次数和盐分含量的增加而有序的调整, 从而导致土体抗风蚀能力逐级降低。至此, 研究对于掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应发生过程中盐分如何在遗址向遗址底部发生运移与富集、盐渍过程对掏蚀区土体抗风蚀能力产生劣化的本质原因两个问题给出初步的解释。

4 结 论

(1) 3 处典型遗址集中降雨过程的监测结果显示地基和掏蚀区土体具有温度、含水率和介电常数总体一致的变化趋势, 而两者上述参数的变化也存在着显著的时间梯度差异。

(2) 集中降雨过程中地基与掏蚀区土体的含水率和温度的差异变化, 为掏蚀区土体的盐渍劣化效应的发生提供了盐分运移和聚集的途径和动力, 介电常数的变化则是其最显著的特征。

(3) 不同含量盐分并经历不同期次干湿循环重塑土样的风洞试验和颗粒分析结果显示, 试样的风蚀模数、粗粉粒含量和粒度分维值随着盐分含量和干湿循环的增加而产生有序的调整, 并且风蚀模数与粗粉粒百分含量和粒度分维值的对应关系均服从指数法则。

(4) 盐渍过程对掏蚀区土体抗风蚀能力产生劣化的本质原因是干湿循环次数和盐分含量的增加导致土粒团聚体的粒径逐渐增大, 自组织程度逐渐降低, 土粒间的连接力和骨架刚度遭到持续弱化。

参考文献:

[1] SHAO M S, LI L, WANG S J, et al. Deterioration mechanisms of building materials of Jiahe ruins in China[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2013, **14**(1): 38 - 44.

[2] 胡 玮. 夯土遗址掏蚀病害发育特征与影响因素研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014: 29 - 40. (HU Wei. Development characteristics and influences of rammed earthen sites basal sapping diseases[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014: 29 - 40. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 谌文武, 苏 娜, 杨 光, 等. 风场对半湿润山脊土遗址掏蚀量的影响[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(10): 1807 - 1813. (CHEN Wen-wu, SU Na, YANG Guang, et al. Effect of wind field on sapping quantity of earthen architecture ruins along the ridge in semi-humid area[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(10): 1807 - 1813. (in Chinese))

[5] 王旭东, 石玉成, 刘 琨, 等. 夯土长城墙体掏蚀失稳机理研究[J]. *西北地震学报*, 2011, **33**(增刊): 381 - 385. (WANG Xu-dong, SHI Yu-cheng, LIU Kun, et al. Research on sapping instability mechanism for rammed wall[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011, **33**(S0): 381 - 385. (in Chinese))

[6] 崔 凯, 谌文武, 韩 琳, 等. 干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应[J]. *岩土工程学报*, 2011, **31**(9): 1414 - 1421. (CUI Kai, CHEN Wen-wu, HAN Lin, et al. Effects of salinized deterioration and aeolian ullaage on soils at undercutting area of earthen ruins in arid region [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **31**(9): 1414 - 1421. (in Chinese))

[7] 崔 凯, 谌文武, 匡 静, 等. 干湿交替与盐渍双重作用下干旱半干旱地区土遗址劣化效应[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, **43**(6): 2378 - 2384. (CUI Kai, CHEN Wen-wu, KUANG Jing, et al. Effect of deterioration of earthen ruin with joint function of salinized and alternating wet and dry in arid and semi-arid regions[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, **43**(6): 2378 - 2384. (in Chinese))

[8] MANDELBROT B B. *The fractal geometry of nature*[M]. San Francisco: Freeman, 1982: 95 - 190.

[9] 高世桥, 刘海鹏. *毛细力学*[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (GAO Shi-qiao, LIU Hai-peng. *Capillary mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))

[10] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(5): 837 - 847. (YANG Jing-song. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(5): 837 - 847. (in Chinese))

[11] 曾江源, 李 震, 陈 权, 等. SAR 土壤水分反演中的介

- 电常数实部简化模型[J]. 红外与毫米波学报, 2012, **31**(6): 556 - 562. (ZENG Jiang-yuan, LI Zhen, CHENG Quan, et al. A simplified model of the real part of the soil complex permittivity for soil moisture estimation from SAR image[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012, **31**(6): 556 - 562. (in Chinese))
- [12] 雷磊, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 干旱区盐渍土介电常数特性研究与模型验证[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(16): 125 - 132. (LEI Lei, Tashpolat·Tiyip, DING Jian-li, et al. Constant characteristic and model verification of saline soil dielectric in arid area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, **29**(16): 125 - 132. (in Chinese))
- [13] 赵天宇, 张虎元, 王志硕, 等. 含氯硫酸盐渍土中硫酸钠结晶量理论分析研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(7): 1340 - 1347. (ZHAO Tian-yu, ZHANG Hu-yuan, WANG Zhi-shuo, et al. Theoretical analysis of crystallization of sodium sulphate for sulphate saline soil containing chloride[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(7): 1340 - 1347. (in Chinese))
- [14] 周永祥, 阎培渝. 不同类型盐渍土固化体的干缩与湿胀特性[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(11): 1653 - 1658. (ZHOU Yong-xiang, YAN Pei-yu. Investigation on dry shrinkage and wet expansion of solidified saline soil containing different salts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(11): 1653 - 1658. (in Chinese))
- [15] ZOBECK T M, BADDOCK M, PELT RSV, et al. Soil property effects on wind erosion of organic soils[J]. Aeolian Research, 2013, **10**(5): 43 - 51.
- [16] 刘松玉, 方磊, 陈浩东. 论中国特殊土粒度分布的分形结构[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(1): 23 - 30. (LIU Song-yu, FANG Lei, CHEN Hao-dong. Fractal structure of granularity distribution of regional soils in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(1): 23 - 30. (in Chinese))
- [17] 高国瑞. 近代土质学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013: 133 - 138. (GAO Guo-rui. Neoteric soil geotechnology[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013: 133 - 138. (in Chinese))
- [18] 刘松玉, 张继文. 土中孔隙分布的分形特征研究[J]. 东南大学学报, 1997, **27**(3): 127 - 130. (LIU Song-yu, ZHANG Ji-wen. Fractal approach to measuring soil porosity[J]. Chinese Journal of Southeast University, 1997, **27**(3): 127 - 130. (in Chinese))

中国土木工程学会港口工程技术交流大会·第十届工程排水与加固技术研讨会 (二号通知)

“一带一路”国家战略的实施为交通、水利、市政等行业带来了新的机遇与挑战,“十三五”期间,我国港口建设有序推进,内河水运加快发展,主要港口大型综合性港区布局逐步优化,一大批港口深水航道、防波堤、码头等基础设施正在建设,在技术创新和理论研究、工程经验等方面取得了丰硕的成果。为加强港口技术、工程排水与加固专业领域的学术交流,提供新理论、新技术、新材料的探讨平台,中国土木工程学会港口工程分会、工程排水与加固专业委员会定于2017年11月17日—19日在浙江省宁波市联合举办中国土木工程学会港口工程技术交流大会暨第十届工程排水与加固技术研讨会。

主办单位: 中国土木工程学会港口工程分会; 中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会。

承办单位: 浙江省围海建设集团股份有限公司。

会议议题: ①港口工程领域: 沿海、内河航道泥沙运动特性、波浪与建筑物相互作用理论; 港口工程建设与维护新技术; “一带一路”海外港口建设技术; 人工岛礁建设关键技术; 重

大工程案例和港口技术应用。②工程排水与加固领域: 软土工程特性与理论; 地基处理新技术、新方法; 超软土地基处理及围堤填筑技术; 新型土工合成材料研制与应用; 疏浚底泥处理与资源化利用技术; 城市黑臭河道及城市污染土处治技术。

会议主要安排: 11月17日会议注册; 11月18日, 19日大会特邀报告, 主题报告, 分组讨论; 闭幕式, 优秀论文颁奖, 水下软土地基施工新装备现场考察。

会议费用: 正式代表1000元; 学生代表500元(凭学生证); 住宿费: 会议期间住宿统一安排, 费用自理。

联系方式: 排水加固专委会联系人: 耿之周: 15850597239, 电话/传真: 025-85829563, 地址: 南京市虎踞关34号南京水科院岩土工程研究所(210024), 港口工程分会联系人: 黄瑶: 13520442626 电话/传真: 010-64018684 转9052, 地址: 北京安定门内国子监街28号中交水运规划设计院有限公司, 会议住宿、交通联系人: 屈承飞: 13567925959, 学会邮箱: psjgzwh@163.com。

(中国土木工程学会港口工程分会 供稿)