

DOI: 10.11779/CJGE201602014

风场对半湿润山脊土遗址掏蚀量的影响

谌文武^{1, 2}, 苏 娜^{1, 2}, 杨 光^{1, 2}

(1. 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; 2. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 在青海省半湿润地区, 地处高海拔且常年遭受几种主风向作用下的土遗址, 风力掏蚀成为其破坏的最重要因素之一。主要根据多年的气候数据及已观测的掏蚀量, 并结合室内风洞试验与流体动力学 (CFD) 中常用的软件 Fluent 进行模拟分析, 主要揭示风力掏蚀病害形成和发展过程中的影响因素, 进一步结合工程地质学和力学理论进行分析研究, 提出风蚀量与风速、风蚀时间之间的定量关系。为防治和监测此类病害的发生和发展, 预报一次风蚀事件的风蚀量, 及其对土遗址稳定造成的影响提供有益的参考。

关键词: 干旱区; 土遗址; 掏蚀区; 风场

中图分类号: TU94

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)02-0305-06

作者简介: 谌文武(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地质工程、岩土工程、文物保护工程科研与教学工作。

E-mail: sungp@lzu.edu.cn。

Effect of wind field on sapping quantity of earthen architecture ruins along ridge of semi-humid areas

CHEN Wen-wu^{1, 2}, SU Na^{1, 2}, YANG Guang^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The sapping caused by prevailing wind erosion is one of the most important factors in the deterioration of earthen architecture ruins located in semi-humid areas in Qinghai Province. Based on the climatic data for many years in the area and sapping quantity of the ruins, in combination with the results of laboratory tests and simulation analyses using Fluent software in computational fluid dynamics, the influence factors for the formation and development of wind erosion diseases of the earthen architecture ruins are evaluated. Furthermore, the effect of wind velocity, duration and area of wind erosion on the sapping quantity of the ruins are assessed quantitatively according to the analysis principles of engineering geology and mechanics. This study may be helpful for prevention, monitoring and control of formation and development of sapping diseases, forecast of sapping quantity of specific wind erosion as well as its effect on the stability of the earthen ruins.

Key words: arid area; earthen architecture ruin; sapping zone; wind field

0 引 言

中国西北地区, 分布着众多以土质材料为主体的古代人类遗存或遗迹, 即土遗址, 如新疆的交河故城、宁夏的西夏王陵、甘肃和青海的明长城 (图 1) 等。如何科学有效地保护这些具有丰富社会价值、历史价值、文化价值的土遗址现已成为了世界性的难题^[1-3]。

作为赋存于自然环境中的人类历史文化遗存, 土遗址受到环境因素尤其是气候因素的影响显著。在生物圈、水圈、大气圈与岩石圈相互作用的漫长过程中, 温度、降雨、季节性冻土、盐渍化、风沙和人类活动等严重危害着遗址的安全与稳定, 使遗址遭受由基底掏蚀凹进、裂隙发育、表面片状剥离等病害大量发育到快速消亡的量变引起质变的过程。因此, 从

气候因素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, 其中病害机理的研究成为焦点^[4-5]。

地处西北荒漠、戈壁地区的土遗址, 遭受着强烈而长期的风蚀作用, 极端情况下, 风蚀破坏甚至是导致某些土遗址破坏的直接原因。早在 20 世纪 50 年代, 宿白^[6]就已提及风沙对古代土建筑物磨蚀残损的严重性。

近年来, 国内外学者对土遗址的化学加固、保护

基金项目: 文化遗产保护领域科学和技术研究课题 (2013-YB-HT-013); 国家自然科学基金项目 (51578272); 国家自然科学基金青年基金项目 (51208245)

收稿日期: 2015-03-25

等方面做了大量的工作^[6-9],但对土遗址风蚀耐久性机理研究却很少,而有关土壤的风蚀过程研究,已经积累了大量的成果。在参考土壤风蚀的相关研究的成果上,开展土遗址的风蚀耐久性定量研究,进一步深化古代生土建筑风蚀机理认识水平。

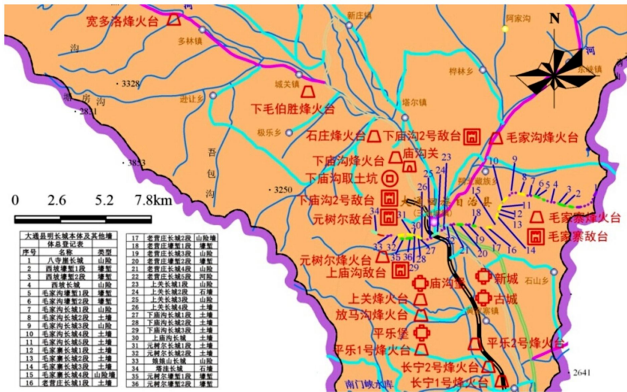


图1 青海省明长城大通段整体分布图

Fig. 1 Distribution of Datong section of Great Wall in Qinghai Province

1 气候和掏蚀区病害特征分析

选取青海省大通县境内娘娘山山脊处的明长城为研究对象,该段明长城墙体保存较为完整,掏蚀病害的形成受风场影响显著,主要掏蚀类型为风力掏蚀(图2)。

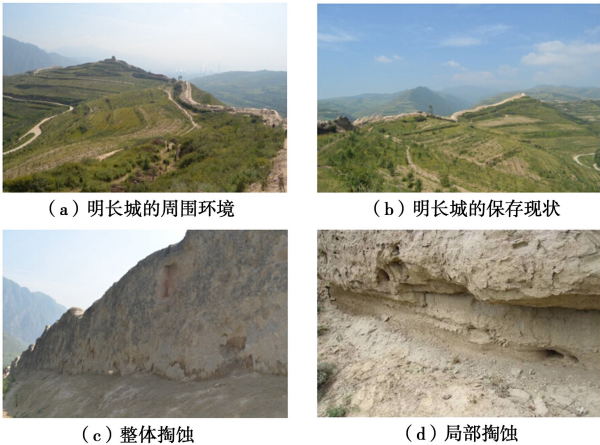


图2 研究区的掏蚀形态

Fig. 2 Sapping states in study area

1.1 气候特征

大通县属高原大陆性气候。多年气象资料统计结果表明:大通县月平均气温为 3.7℃,年内最最高气温在 7 月。平均为 13.9℃。最低气温在 1 月,月平均为 -11.2℃。在全球变暖的大形势下,大通县的气温呈上升趋势,如 1961 年—1970 年的月平均气温为 2.7℃,2004 年—2013 年的月平均气温为 5.4℃。

大通县多年平均降水量为 519 mm,季节分配很不均匀。春季(3 月—5 月)占年总量的 19%;夏季(6 月—8 月)占 55%;秋季(9 月—11 月)占 24%;冬季(12 月—2 月)最少,仅占 2%。整体而言,降雨量也呈上升趋势。

1.2 掏蚀区病害发育特征

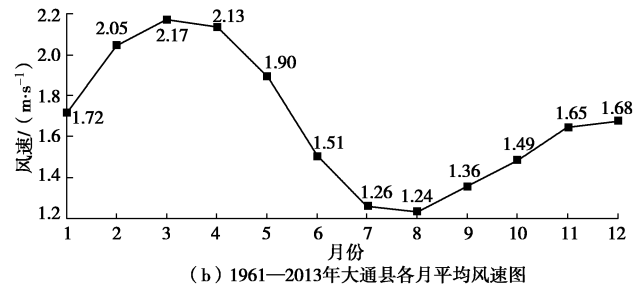
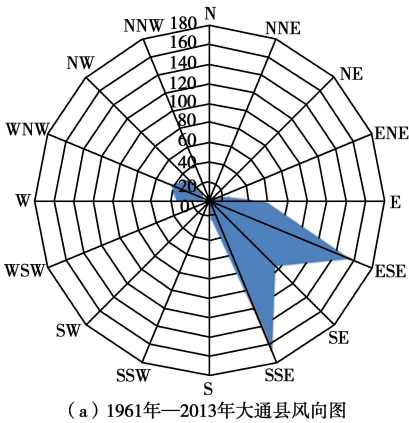
掏蚀是由土遗址在风、雨、水、盐类活动等因素单独或组合作用下不断向遗址本体凹进形成的,是中国西北地区土遗址的一种典型病害,可分为酥碱、风力掏蚀和流水掏蚀 3 种。

本文研究区处于山脊,周围缺乏遮挡物,且常年遭受几种主风向的影响,因而本区掏蚀病害主要为风力掏蚀。风力掏蚀是指在风的磨蚀和旋蚀作用下,土遗址墙体、基础或地基薄弱处形成的掏蚀坑、掏蚀槽或掏蚀洞,甚至局部被穿透^[10]。

2 影响不同方位土遗址掏蚀量的因素

2.1 风力掏蚀中风所产生的影响

多年的气象资料统计结果显示,大通县主导风向为东东南、东南、南东南。该地区历年各月平均风速为 1.7 m/s 左右,结果表明风速呈现先增大后减小的趋势,月平均最大风速为 3.4 m/s (1963 年),月平均最小风速为 0.5 m/s (1983 年)。且 2 月—5 月份风力最强,尤其以 3 月、4 月风速最高,平均风速均为 2.1,2.0 m/s;7 月、8 月与 9 月风速达全年最小,平均风速分别为 1.2,1.2,1.3 m/s (图 3)。



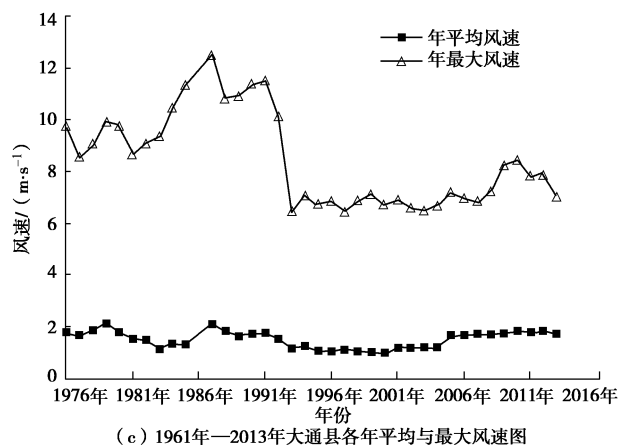


图3 研究区的气候特征

Fig. 3 Climatic characteristics of study area

大风在气象学上泛指风速在 $17.2 \sim 20.7 \text{ m/s}$ 的空气运动, 在地表植被覆盖率低、地表干燥的地区, 一场大风往往演化成为沙暴或者携砂风。1961年—2013年大通县平均大风日数为 9.3 d 。1965年为最多, 为 31 d , 1993年—1994年、1998年—1999年、2003年、2006年和2008年均无大风。

2.2 掏蚀量的现场勘察

根据现场勘察结果, 该段明长城墙体走向处于 $5^\circ \sim 155^\circ$ 之间, 墙体迎风面、背风面的走向区间分别为 $5^\circ \sim 155^\circ$ 、 $185^\circ \sim 335^\circ$, 墙体两侧均按顺时针方向每 5° 进行分区, 标号为 $5^\circ \sim 9^\circ$ 为 1, $10^\circ \sim 14^\circ$ 为 2, ..., $150^\circ \sim 154^\circ$ 为 31。图4中以单位风蚀面积为基准, 在降雨量、蒸发量、含盐量等因素相同的情况下, 迎风面的掏蚀量明显大于背风面。在主风向 30° 左右附近, 墙体的掏蚀量显著增加, 表明在此地区, 掏蚀量受风力的影响显著。

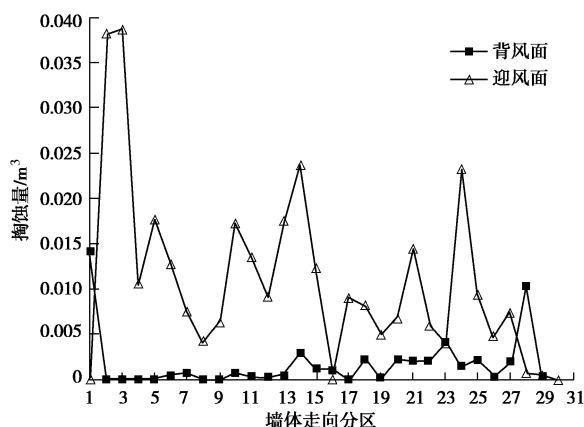


图4 不同走向墙体迎风面及背风面的掏蚀量

Fig. 4 Sapping quantity at both sides of wall in various directions

3 风力掏蚀的主要影响及模型

3.1 风力掏蚀的主要影响

土遗址的主要建筑材料是土, 在遗址底部掏蚀凹

进的过程中, 风成为掏蚀的主要营力之一, 通过风携带的砂粒对土的撞击作用和风形成涡流对土进行磨蚀而完成的^[12-18]。

土体风蚀表现为在风力作用下, 地表颗粒被吹起和搬运的过程。在净风吹蚀下, 土体表面主要受风的剪切应力作用。挟沙风作用下的风蚀过程, 其影响因素较多, 且变化也大。首先是土体表面要受到风的剪切力作用。其次, 挟沙风的运动具有气、固两相特征。跃移沙粒在风场中运动时, 除受到重力和空气的作用外, 还会因为碰撞等导致沙粒旋转, 其转速每秒高达几百至上千转, 因此具有更大的动能, 对土体表面直接撞击, 使风蚀量加大, 撞击的角度和速度也会对风蚀量产生不同的影响。另外, 粒径较大的沙粒在蠕移过程中对土壤表面产生磨蚀作用, 也加大了对地表结构的破坏, 使土体变得更易风蚀。

3.2 风蚀模型

由于针对土遗址的风蚀研究目前还未成熟, 在采用国内外现有的土壤风蚀研究的基础上, 结合露天土质文物的特性, 提出了适用于露天土质文物的风蚀模型, 即波查罗夫 (Bocharov) 模型^[19-20]:

$$E = f(W, S, M, A) \quad (1)$$

式中, E 为风蚀程度, W 为风况特征, S 为土壤表层特点, M 为气候要素特征, A 为人类对土壤表面的干扰程度以及与农业活动有关的其他一些因子。

该模型中的风况由以下参数决定: 风速 (瞬时、日平均、年平均、最大等)、风向、气流湍流程度以及风速的频率分布。土壤特征包括机械组成、湿度、团块结构 (不可蚀成分含量)、表面结壳、土壤结构的水稳性等。气象要素包括气温、土壤温度 (土壤冻结)、降雨强度与降雨量、空气相对湿度等。

4 风洞试验

对于影响土风蚀的因素学者做了大量的科学研究, 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。但是对于主要影响土遗址中风速及吹蚀时间研究的较少^[21]。

试验选择青海省大通县明长城墙体的原状土样经充分碾磨, 去离子水和分子筛双重脱盐后, 以 1% 的质量分数向其中均匀掺入 NaCl 制成 $7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm}$ 的重塑立方体试块。经过 3 次干湿循环过程后, 分别选取 $18, 22, 28, 30 \text{ m/s}$ 的风速的挟沙风对立方体试块进行 $100, 300, 600 \text{ s}$, 测得试样在不同风速、相同吹蚀时间内的风蚀量。结果显示在一定吹蚀时间段内风蚀量随风速的增大而迅速增长; 试样在不同的时间段内, 风蚀量的差值也随着风速的增大而迅

速增大(图 5)。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,对土遗址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风蚀损耗效应产生的突出影响。

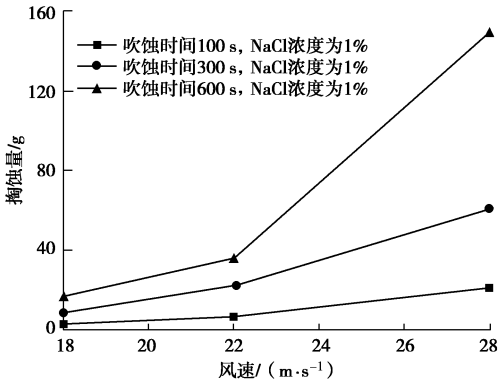


图 5 掏蚀量的影响因素

Fig. 5 Influence factors of sapping quantity

5 Fluent 数值模拟

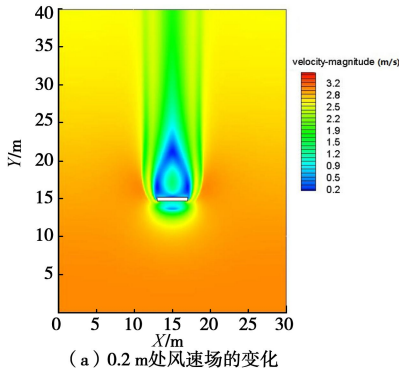
本文利用计算流体力学(CFD)软件 Fluent 对土遗址周围的风场进行模拟。模拟所使用的模型尺寸参考青海省大通县中典型土遗址的现状,取值为长 4 m、高 1.2 m、宽 0.5 m,通过不同参数的选取,进而得出相应的结论^[22-23]。

5.1 风力掏蚀的主要影响

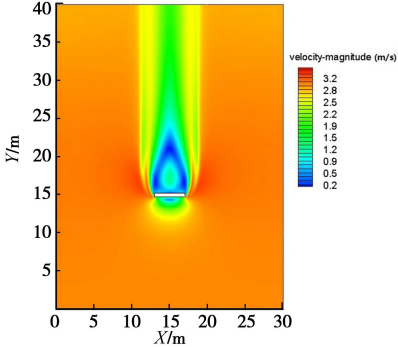
现场勘察得知,墙体的掏蚀一般都发生在底部与顶部,运用数值模拟的方法,研究选取此段长城中常见的墙高 1.2 m,以 0.2 m 为单位六等分,分别得出不同高度处风场的不同高度风蚀效果水平截面图。结果显示:①随着横切墙体高度不断增加,风对墙体的影响逐渐减小;②在墙体的底部,由于墙体本身对风有着阻挡作用,在迎风面风速呈椭圆式递减,而背风面,风速先变小后增大;③整个风速场的最大速度在墙体背风面的所能影响的范围内最外侧(图 6)。

5.2 不同走向墙体的掏蚀量

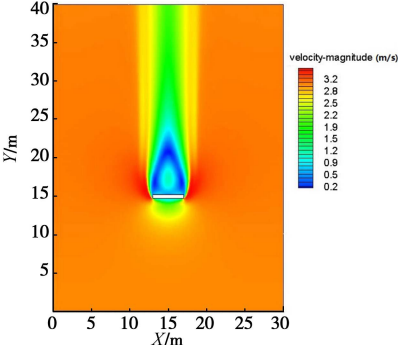
在同一风场下,不同走向的土遗址,所受到的力是不同的。对于研究区的墙体而言,墙体的各个点所受到的作用力不同^[23],导致土遗址的掏蚀量存在差异。



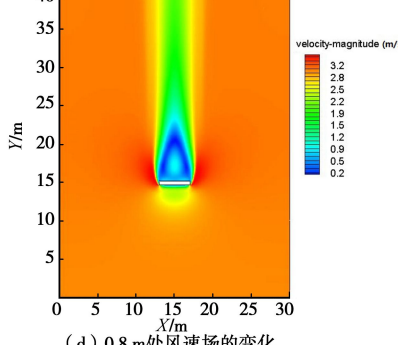
(a) 0.2 m 处风速场的变化



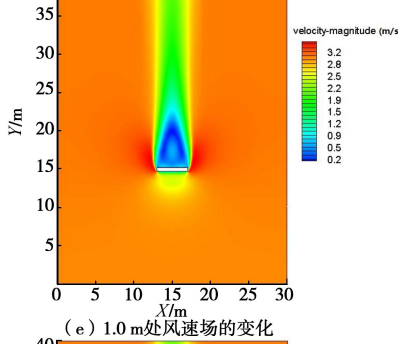
(b) 0.4 m 处风速场的变化



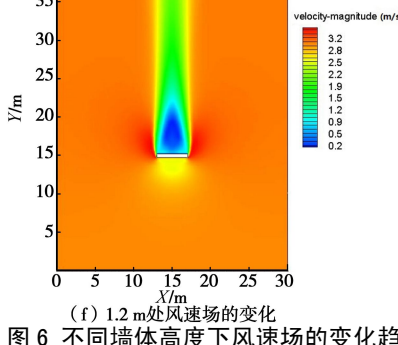
(c) 0.6 m 处风速场的变化



(d) 0.8 m 处风速场的变化



(e) 1.0 m 处风速场的变化



(f) 1.2 m 处风速场的变化

图 6 不同墙体高度下风速场的变化趋势

Fig. 6 Trend of change in wind velocity at various heights in wall

整体而言, 风速越大, 墙体周围的风速场也越强, 对墙体的掏蚀也越明显。墙体的大致破坏情况以 90° 内不同方位的受力分布图可显示(图 7)。本文中取 20° , 40° , 60° 时, 在同等其他条件不变的条件下, 墙体所受的风场示意图, 大致表现为: 随着墙体的走向不断接近风向, 墙体的破坏逐渐严重, 且在最接近迎风面处, 墙体所遭受的风力大于本身风蚀场的风力, 导致破坏及其严重。

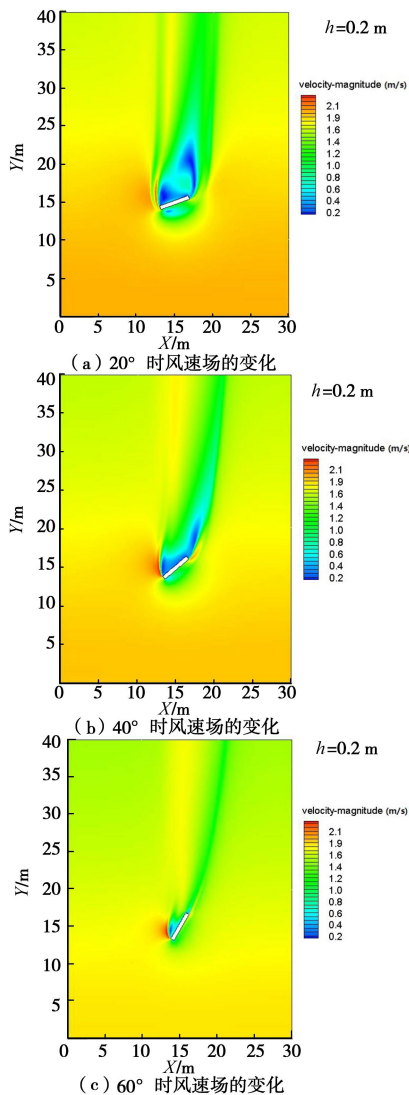


图 7 不同走向的墙体风速场的变化趋势

Fig. 7 Trend of change in wind velocity of wall in various directions

6 结论与建议

土遗址是一个复杂、开放而特殊的系统, 是与其赋存环境相统一的有机整体。光、热、水是环境系统的基本要素, 也是遗址各种病害的起因。在不同赋存环境下的土遗址病害所反应的结果是不同的。因此, 正确认识环境因素, 对不同赋存环境的土遗址, 进行不同的分析研究。制定相对应科学的保护对策和实施

合理高效的保护措施具有重要的科学意义和应用价值。初步结论与建议如下:

(1) 通过现场勘察, 发现在其他气象因素一定的情况下, 迎风面与背风面的掏蚀量相差很大。

(2) 在主风向的引导下, 迎风面不同方位的墙体所受到掏蚀量的破坏也是不同的, 主风向 30° 区间内的掏蚀量显著增加。

(3) 后期针对明长城土遗址进行保护的时候, 要充分考虑到共性之中的特性, 做到更有效, 更经济, 更科学的方案设定。

参考文献:

- [1] 孙满利, 李最雄, 王旭东, 等. 干旱区土遗址病害的分类研究[J]. 工程地质学报, 2007, **15**(6): 772 - 779. (SUN Man-li, LI Zui-xiong, WANG Xu-dong, et al. Classification of deteriorations associated with many earthen heritage sites in arid areas of Northwest China[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, **15**(6): 772 - 779. (in Chinese))
- [2] 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, 2009, **30**(9): 2741 - 2751. (CUI Kai, CHEN Wen-wu, ZHANG Jing-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 - 2751. (in Chinese))
- [3] 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耗损效应[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(9): 1413 - 1418. (CUI Kai, CHEN Wen-wu, HAN Lin, et al. Effects of salinized deterioration and aeolian ullage on soils in undercutting area of earthen ruins in arid region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(9): 1413 - 1418. (in Chinese))
- [4] 崔凯, 谌文武, 匡静, 等. 干湿交替与盐渍双重作用下干旱和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))
- [5] 沈云霞. 干湿循环作用下含盐类遗址土盐渍劣化试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. (SHEN Yun-xia. Experiment study on salinized deterioration of the Saline ancient relics soil under dry-wet cycles[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese))
- [6] 宿白. 敦煌莫高窟保护问题[J]. 文物参考资料, 1955(2): 39 - 48. (SU Bai. Preservation of dunhuang mogao caves[J].

- Reference Material of Cultural Relic, 1955(2): 39 - 48. (in Chinese))
- [7] 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**(S): 381 - 385. (in Chinese))
- [8] 赵海英, 李最雄, 韩文峰, 等. 西北干旱区土遗址的主要病害与成因[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 disease and their cause of earthen ruins in arid region of Northwestern China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(S2): 2875 - 2880. (in Chinese))
- [9] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 2 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 ed. Beijing: Geological Press, 1994. (in Chinese))
- [10] 刘 炜. 我国北方 7 省室外土遗址病害分布特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2012. (LIU Wei. The study of issue distribution characters of northern Chinese earthen sites[D]. Xi'an: Northwest University, 2012. (in Chinese))
- [11] CHEPIL W S. Properties of soil which influence wind erosion[J]. Soil Science, 1951: 69 - 70.
- [12] BUSCHIAZZO Daniel E, ZOBECK Ted M, ABASCAL Sergio A. Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina[J]. Journal of Arid Environments, 2007: 29 - 39.
- [13] 严耿升, 张虎元, 王旭东, 等. 古代生土建筑风蚀的主要影响因素分析[J]. 敦煌研究, 2007(5): 78 - 82. (YAN Geng-sheng, ZHANG Hu-yuan, WANG Xu-dong, et al. Analysis of main influence factors of wind erosion of ancient earthen architecture[J]. Dunhuang Research, 2007(5): 78 - 82. (in Chinese))
- [14] 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 and Water Conservation, 2005, **19**(3): 58 - 61. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 荣姣风, 张海涛, 毛 宁. 土壤风蚀量随风速的变化规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, **22**(2): 149 - 153. (RONG Jiao-feng, ZHAN GHai-tao, MAO Ning. Study on the changing laws of wind-blown mass affected by wind speed[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, **22**(2): 149 - 153. (in Chinese))
- [17] 董治宝. 土壤风蚀预报简述[J]. 中国水土保持, 1999(6): 17 - 19. (DONG Zhi-bao. Briefly of wind erosion forecast of soil[J]. Soil and Water Conservation in China, 1999(6): 17 - 19. (in Chinese))
- [18] 郭 宏. 文物保护环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (GUO Hong. Introduction to relics preservation environment[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [19] 何文清, 赵彩霞, 高旺盛, 等. 不同土地利用方式下土壤风蚀主要影响因子研究——以内蒙古武川县为例[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(11): 2092 - 2096. (HE Wen-qing, ZHAO Cai-xia, GAO Wang-sheng, et al. Main affecting factors of soil wind erosion under different land use patterns——A case study in Wuchuan County, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, **16**(11): 2092 - 2096. (in Chinese))
- [20] 陈渭南, 董光荣, 董治宝. 中国北方土壤风蚀问题研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展, 1994, **9**(5): 6 - 12. (CHEN Wei-nan, DONG Guang-rong, DONG Zhi-bao. Achievements and needs of studies on Wind erosion in northern China[J]. Advances in Earth Sciences, 1994, **9**(5): 6 - 12. (in Chinese))
- [21] 严耿升, 张虎元, 郭青林, 等. 土质文物的风蚀模型[J]. 敦煌研究, 2009(6): 93 - 99. (YAN Geng-sheng, ZHANG Hu-yuan, GUO Qing-lin, et al. Wind erosion model of earthen architecture ruins[J]. Dunhuang Research, 2009(6): 93 - 99. (in Chinese))
- [22] 张春来, 董光荣, 董治宝, 等. 用风洞试验方法计算土壤风蚀量的时距问题[J]. 中国沙漠, 1996, **16**(2): 200 - 204. (ZHANG Chuan-lai, DONG Guang-rong, DONG Zhi-bao, et al. Time problem in calculating soil wind erosion rate with wind tunnel experiment[J]. Journal of Desert Research, 1996, **16**(2): 200 - 204. (in Chinese))
- [23] 高 莹, 金陶胜, 赵彦琳, 等. 基于多孔介质模型的土壤风蚀风洞湍流涡发生器设计的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(11): 85 - 89. (GAO Ying, JIN Tao-sheng, ZHAO Yan-lin, et al. Numerical simulation of vortex-generator design in soil wind erosion tunnel based on porous medium model[J]. Transactions of the CSAE, 2011, **27**(11): 85 - 89. (in Chinese))
- [24] LEENDERS J K, VAN BOXEL J H, STERK G. Wind forces and related saltation transport[J]. Geomorphology, 2005: 357 - 372.