

夯筑土体风蚀损化效应及加固保护试验研究

毛筱霏, 赵 冬, 张卫喜

(西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 在我国西北干旱地区, 由于干燥、风沙等自然环境因素的作用, 风蚀损化是土建筑遗址破坏的主要因素之一。基于新疆吐鲁番高昌故城遗址保护工程的现场勘察与试验结果, 针对典型的风蚀病害, 分析了土体风蚀损化的演变机理, 在土体物理、化学等材性试验的基础上, 设计了针对夯土墙体的风洞、电镜微结构分析试验。研究表明, 对于高昌故城夯土材料, SiO_2 含量占到 58.31%, 土体间粘性介质相对较少, 另外, Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 离子的含量较多, 盐分在地下毛细水和包气带水上移、雨水冲刷下移等因素作用下迁徙也会加剧土体的风蚀损化效应; 以有机硅改性丙烯酸乳液喷涂渗透加固土样, 通过风洞、微结构观测试验, 携沙风中沙粒的磨损效应是遗址风蚀损化的主要原因, 通过风的类型、风速、吹蚀时间以及加固土样与原状土样风蚀前后微结构特征参数等因素的对比, 可见采取土体表层喷涂加固的方式可有效降低风蚀损化效应的进程。

关键词: 土建筑遗址; 风蚀损化; 喷涂加固

中图分类号: TU 43

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)04-0555-5

Experimental study on the effects of wind erosion and reinforcement for the rammed soil

MAO Xiaofei, ZHAO Dong, ZHANG Weixi

(School of Science, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: As the affection of drying, wind and other natural factors, wind erosion is one of the major damage factors for earthen architecture sites in the northwest arid or semi-arid region of China. Based on the survey and measuring for the protected project in Gaochang Ruins, the evolution mechanism of wind erosion was analyzed for the typical disease. On the basis of physics, chemistry and others tests, wind tunnel and electron microscopy tests were designed to analysis the rammed wall. The results showed that SiO_2 content account for 58.31% in rammed soil, and so the viscous medium between soil particles was less. On the other hand, the ion content of soluble salt were more, just as Cl^- 、 Na^+ and Ca^{2+} . As the salt migrate under the effect of capillary water, the effect of wind erosion increased obviously. Through the wind tunnel and microstructure observation tests, test results shown that the net wind had no affection on the site soil. And the abrasion effect of sand in wind was the major reason of wind erosion for earthen site. By comparing the type, speed of wind, the micro-structural characteristics and other factors between reinforced soil and undisturbed soil, it is obvious that spraying reinforcement to the surface soil can effectively reduce the processes of wind erosion.

Key words: Earthen architecture sites; wind erosion; spraying reinforcement

土遗址是指以生土作为主要建筑材料、人类历史上生产、生活等活动遗留下来的历史遗迹。作为人类早期生产、生活、文化、宗教等活动的场地或场所, 土遗址具有鲜明的时代特点, 蕴涵着丰富的历史文化信息, 展现着一定历史时期人类社会活动、社会关系、上层建筑、经济基础以及当时生态环境等方面的状况。作为人类活动的重要实物遗存, 同其他文物一样, 具有很高的历史、艺术和科学价值, 代表了一定历史时期建筑成就, 是历史的见证, 是现今社会发展的源头^[1]。

由于我国西北干旱、半干旱地区干燥、少雨、地广人稀的自然环境及多种文化不断交融的历史、文化环境, 使得土遗址的分布最为广泛。截止第六批公布的国家重点文物保护单位, 西北地区土遗址

类数量已逾 400 个^[2]。较为典型的如新疆吐鲁番的交河故城、高昌故城; 河北易县的战国故城等; 宁夏东部贺兰山下的西夏王陵、长城等, 等等。

在西北干旱、半干旱环境下, 风沙侵蚀对土遗址的破坏相当严重^[3]。千百年来, 风沙侵蚀等因素的作用下, 遗址土体表面风化、酥碎、掏蚀, 有的甚至整体开裂、大面积坍塌, 现存遗址中大部分面临着毁灭性的威胁。因而, 遗址土体防风化、风蚀加固具有突出的普遍性和紧迫性。

在以往土遗址加固试验的基础上, 结合新疆高昌故城遗址保护工程, 对遗址的风蚀、掏蚀机理进行了分析, 归纳与之相关的风蚀损化演变机理; 以有机硅改性丙烯酸树脂乳液、硅溶胶为主剂, 对土样表层进行了加固保护处理, 通过风洞、电镜等试

验,分析对比加固前后土体抗风蚀能力的变化,评估加固措施的有效性,以期为后期保护措施完善提供基础资料。

1 风蚀损化机理分析

风力是土体风蚀的源动力,其对土体的破坏作用主要体现在吹蚀与磨蚀两方面。其实质是土体表面的细小颗粒在风力的作用下被吹蚀、搬运的过程^[4]。前期试验及现场勘察表明,距离地表越近,风的磨蚀作用越强烈。当风沙遇到遗址土体时,由于地形突变,将使贴地层气流的运动受到阻碍,从而形成涡流。

夯筑遗址墙基部位是一个盐分富集带。由于土质遗址多数暴露在恶劣的环境中,在地下毛细水和包气带水上移、雨水冲刷下移等作用下,土体中可溶盐向墙基富集,改变土体特性,降低土体强度。

根据伯努利定律:

$$(1/2)\rho v^2 + \rho gh + p = \text{const} \quad (1)$$

式中: v 为流动速度; g 为地心加速度(地球); h 为流体处于的高度(从某参考点计); p 为流体所受的压强; ρ 为流体的密度。

当气流减小,则施加在墙基处的压力增大,从而对墙基造成极强的侵蚀,形成常见的墙基凹蚀现象。图1为高昌故城内夯土墙体根部风化、掏蚀典型病害。



图1 墙体根部掏蚀凹进
Fig.1 Wind erosion of wall root

在西北干旱地区,由于植被的缺乏,携沙风更为常见。携沙风的运动具有气、固两相特征,在气流作用下的沙粒有3种运动形式,即蠕移、跃移和悬移^[5]。跃移是最为重要的运动形式,跃移沙粒在风场中运动时,除受到重力、空气的拖曳力外,还会因为碰撞等原因导致沙粒旋转,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,使土体表面酥碎,导致风蚀量加大。

图2为高昌故城内排房遗址夯土墙体表面风化、酥碎病害。



图2 墙面风化剥落
Fig.2 Wind erosion of wall surface

另外,粒径较大的沙粒在蠕移过程中对土体表面产生磨蚀作用,也加大了对土体结构的破坏,使土体变得更易风蚀。研究表明,当气流挟带沙粒时,由于沙粒持续而猛烈地冲击地面对地表的物质结构具有很大的破坏力,风蚀强度会急剧增加,与净风风蚀效应相比,可成倍甚至几十倍增加。

2 试样制备及土体特性

2.1 试样的制备

在西北干旱、半干旱地区,生土建筑类型各异,有素土夯筑,土坯砌筑,垛泥等多种建造工艺,其中以夯筑形式最为常见。本次试验所选取土样为高昌故城西城墙内侧倒塌的夯土。

参照美国 ASTM 有关规程及我国土工试验方法标准,风化试验试块采用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的立方体^[6]。

土体表面加固试剂为国民淀粉产品 KD8 与硅溶胶改性配制而成(有机硅改性丙烯酸乳液),喷涂浓度以 3、5、8、10(百分比)依次递增,多次多道工艺进行喷涂渗透加固。

加固溶液经计算后准确控制,按最大饱和度 $S_r = 85\%$ 计算^[7],加固液用量为:

$$U = (1 - \gamma_d / G_s \gamma_w) V \cdot 85\% \quad (2)$$

式中: γ_d 为试样干密度(g/cm^3); V 为试样总体积; G_s 为试样土的密度,通常取 $G_s = 2.70\text{ g}/\text{cm}^3$; γ_w 为水的密度。

2.2 土体工程特性

为更详细的了解遗址土体特性,为后期保护措施有的放矢,特对原状土样进行了室内材性试验。

依据《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999),对所采集原状土样的物理、化学和易溶盐分别进行

了室内试验, 对每个土样每个分析项目平行测定 3 次, 取平均值后检测结果见表 1-表 3。

表 1 土样的基本物理参数
Tab.1 Physical parameters of samples

土样	湿容重 /g·cm ⁻³	含水 量/%	干容重 /g·cm ⁻³	液限	塑限	比重	孔隙 比	孔隙 率	饱和度
夯土	1.913	2.706	1.856	0.251	14.605	2.665	0.454	6	21.62

表 2 夯土原状土样化学全分析结果
Tab.2 Chemical parameters of samples

成分	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	CaO/%	MgO/%
含量	58.31	14.15	4.62	6.63	2.45
成分	Na ₂ O/%	K ₂ O/%	TiO ₂ /%	烧失量/%	合计/%
含量	3.04	2.16	0.42	7.14	98.80

表 3 夯土原状土样易溶盐分项结果
Tab.3 Analysis of soluble salt

易溶盐	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
mmol/kg	5.63	73.72	2.24	21.45	6.39	26.60	2.38
%	0.033	0.261	0.024	0.084	0.016	0.060	0.008

3 试验及结果分析

3.1 风洞试验

根据吐鲁番气象局 1979~2009 年的气象统计资料, 30 年间, 该地区 8~10 级大风年平均为 46.6 d, 沙暴年平均为 21.3 d, 风向以西北风为主。风蚀也因此成为此类地区露天遗址的主要破坏营力^[8]。

风洞试验由中国科学院寒区旱区与环境工程研究所协作完成。试验风洞为直流闭口吹气式, 由动力段、整流段、试验段和扩散段四部分组成。洞体长 37.78 m, 截面积 0.6 m×1.0 m, 试验段长 16.23 m, 有 1° 抬角, 以消除风洞的轴向加速度, 风速由 1~40 m/s 连续可调, 紊流强度在 0.4% 以下, 吹蚀方式为正面连续吹蚀。

试验时首先对样品称量, 然后将试块水平摆放在风洞内, 开始试验。试验风速以吐鲁番市气象局提供的 2001~2005 年气象统计资料为依据, 并以这五年内该地区年极大风速为参考。

首先, 用 30 m/s 的净风对样品进行正面连续 4 分钟的吹蚀试验, 结果所有试块质量均无损失, 可见净风对土体表面的风蚀作用非常有限。然后分别用 7、10、12、15、20、25 和 30 m/s 的挟沙风对样品进行不同时间的风蚀试验。

图 3 给出了原状土样吹蚀前后风蚀效应对比。可以直观看出, 挟沙风对土体产生的风蚀效果非常显著, 其中迎风面最为严重。这充分说明挟沙风中携带的沙粒对土的撞击和磨蚀效应非常显著, 一旦挟沙风中的沙粒撞击土体表面, 土体颗粒就极

易脱离土体表面, 宏观表现就是土体表面破损, 从而使风蚀量迅速增长。

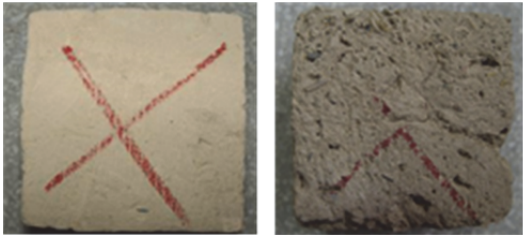


图 3 原状土样吹蚀前后情形
Fig.3 Wind erosion of original samples

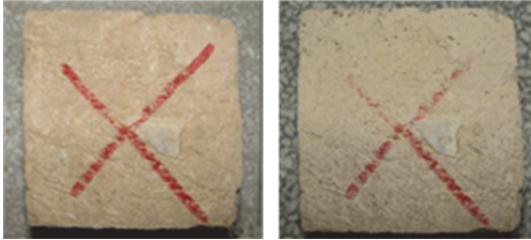


图 4 加固土样吹蚀前后情形
Fig.4 Wind erosion of consolidated samples

图 4 为加固土样吹蚀前后风蚀效应对比。可见加固后土样的抗风蚀能力得到明显提高。

在风洞试验中, 用以拟合模型的风蚀量均指单位时间的平均风蚀量, 即风蚀模数^[9]:

$$E=Q_w/(A_w\times t) \tag{3}$$

式中: E 为风蚀模数(g·m⁻²·min⁻¹); Q_w 为风蚀总量(g); A_w 为风蚀面积(m²); t 为风蚀时间(min)

对于经加固的试样, 风蚀模数基本相当, 但与未加固试样比较, 抗风蚀能力有大幅度提高, 在 15 m/s 及其以下挟沙风吹蚀下, 风蚀模数降低了 5~6 倍, 在 15 m/s 以上挟沙风吹蚀下, 抗风蚀能力的提高幅度相当大。图 5 给出了原状及加固土样各三组在不同风速作用下风蚀模数平均值的对比。

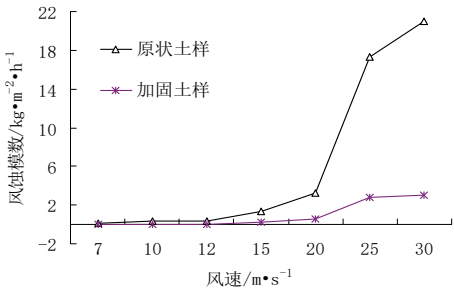


图 5 夯土试样风蚀量对照
Fig.5 Wind erosion comparison of rammed soil

图 6 为 15 m/s 挟沙风在 2、4、6 和 8 分钟不同吹蚀时间作用下对原状土样及加固土样共 6 组试样的吹蚀量对比。可见原状土样的最小风蚀量为 14.6 g, 最大风蚀量为 27.4 g; 加固土样的最小风蚀量为 4.8 g, 最大风蚀量为 12.6 g, 两种土样的质量均有

明显损失,充分说明挟沙风中的沙粒比净风中的空气分子具有更大的动能,能对土体结构产生破坏,从而增大风蚀量.另外,土样的风蚀量均随吹蚀时间的增长而呈现增长趋势.综上所得,经加固试样的抗风蚀能力明显强于原状试样,均有很好的耐风蚀性.

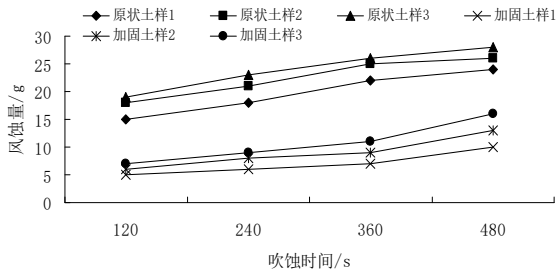


图 6 15 m/s 挟沙风不同吹蚀时间作用下风蚀量对照
Fig.6 Wind erosion amount of 15 m/s wind carrying sand in different time

为揭示试样风蚀量随风速变化的规律,对图中曲线进行拟合发现,原状土样及加固土样其风蚀量随风速增大总呈现指数增长的规律.拟合结果可表述为

$$y=a+b\cdot\exp(x/c)$$
 (4)

式中: y 为风蚀量; x 为风速; a 、 b 、 c 为常数; r 为相关系数.

3.2 电镜扫描分析试验

土质材料在工程环境下所表现的众多复杂工程特性和现象,都与其内部结构的形态和变化有关,其物理力学性质是微结构状态的总体反应.因此,揭示土体工程特性与其微结构形态及变化之间的内在规律性,对进一步深入研究土体风蚀损化机理及加固保护材料具有重要的意义^[10].

土的微结构是指土孔隙、团粒和孔隙的大小与形状、空间排列与分布、接触连结方式等.试验采用 AMRAY100-B 扫描电子显微镜,对夯土原状土样以及加固后的土样进行了电镜分析,放大 1 000 倍后各土样表面电镜分析结果见图 6~7.

从扫描电镜图像中可见原状土为团聚状结构,颗粒间相互连接,土体单粒和集粒聚合在一起,胶结效应较为明显.风蚀土样表面颗粒较为松散,形成或大或小的孔隙,颗粒间粘结力较小,原始结构

极易发生变化.这种颗粒类型、粘结力之间的差异,必然导致土体抵抗外界破坏因素能力的差异.

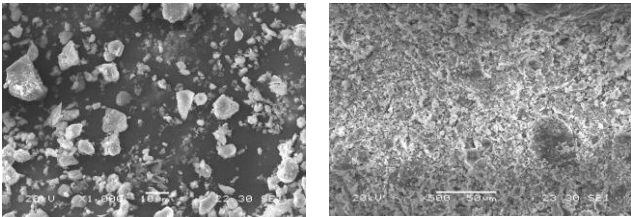


图 6 原状土样风蚀前后图像对比
Fig.6 SEM figures of original samples

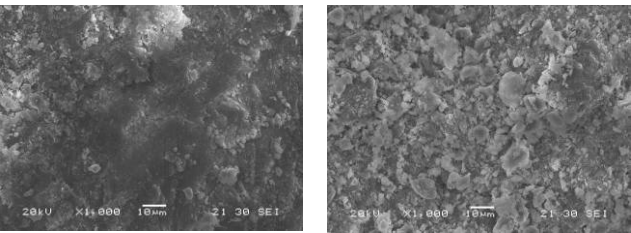


图 7 加固土样风蚀前后图像对比
Fig.7 SEM figures of ram soil and consolidated sample

与原状样相比,加固后土样的颗粒被胶结在一起,土体结构明显得到了加强,使土体的分散性大大降低,从而可以大幅度提高土体的强度和水稳性.风蚀后土样相对比可以看出,由于加固土样颗粒间的连接性加强,结构更加密实,风蚀后土体的粒子为片状结构,颗粒间亦有连接,孔隙较少,抵抗挟沙风中沙粒的撞击和磨蚀能力必将加强.因而,较未加固土样风蚀效应大幅度降低.

已有研究结果表明,等效直径、扁圆度、充填比和面积比等是适宜表征土微结构特征的重要参数.等效直径 D_e 为与颗粒(孔隙)面积相等的等效圆的直径,近似的表征单个颗粒(孔隙)的大小;扁圆度 R_f 为颗粒(孔隙)的长轴和短轴之比,数值大于 1,其值越大说明颗粒(孔隙)越趋于长条形,反之,愈接近于球体;充填比 K_{ci} 为颗粒(孔隙)面积与其外接圆面积比的平方根,其值越大说明颗粒(孔隙)越趋于圆形;面积比 A_{fra} 为颗粒(孔隙)面积占总图像面积的百分比,可以从平面面积上说明颗粒(孔隙)的多少.各组试验微结构参数结果见表 4.

表 4 土样纵波波速、风蚀速率与微结构参数测试结果
Tab.4 Test parameters of microstructure with longitudinal wave velocity and wind erosion rate and

土样	纵波波速 V_p	风蚀速率 (Qw) / $g \cdot s^{-1}$		微结构特征参数							
		15m/s	30m/s	等效直径/ D_e		扁圆度/ R_f		充填比/ K_{ci}		面积比/ A_{fra}	
				颗粒	孔隙	颗粒	孔隙	颗粒	孔隙	颗粒	孔隙
原状土	943	0.019	0.135	0.432	0.457	2.068	1.927	0.858	0.892	0.557	0.443
加固土样	689	0.128	0.671	0.368	0.513	1.826	2.369	0.901	0.927	0.366	0.634

针对遗址土体风蚀损化效应,选择各组试样的纵波波速和风蚀速率为因变量,选取孔隙等效直径

D_e 、扁圆度 R_f 、充填比 K_{ci} 和面积比 A_{fra} 等微结构特征参数为自变量进行相关关系的多元回归分析, 分析结果见表 5。

表 5 土样纵波波速、风蚀速率与微结构参数相关系数
Tab.5 Correlation coefficient of microstructure with longitudinal wave velocity and wind erosion rate

微结构特征参数	等效直径/ D	扁圆度/ R_f	充填比/ K_{ci}	面积比/ A_{fra}
纵波波速	0.721 4	0.646 9	0.275 8	0.709 1
风蚀速率/ Q_w	15m/s	0.809 4	0.764 7	0.434 8
	30m/s	0.800 1	0.792 5	0.493 1

通过多元回归分析计算, 得到土样纵波波速与微结构参数的回归方程为:

$$Vp = 196.23 - 65.56D_e - 274.23R_f + 1812.52K_{ci} - 829.34A_{fra}$$

回归分析复相关系数达到 0.92, 且经过回归公式计算的数值与实际值误差率不超过 5.2%, 说明该公式回归效果较好, 计算精度较高。

4 结论

通过对我国西北干旱、半干旱地区土建筑遗址的调查研究可见, 风蚀是土体表面强度损失的最主要因素, 对遗址土体风蚀损化的机理演变规律进行归纳, 在材性试验的基础上, 设计了针对夯土墙体的风洞、电镜微结构分析试验, 主要结论如下:

(1)通过材性试验可见, SiO_2 含量占到 58.31%, 土体间粘性土质相对较少, 另外, Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 离子的含量较多, 盐分在毛细水和包气带水上移、雨水冲刷下移等作用下也会加剧土体的风蚀损化效应;

(2) 通过风洞、微结构观测试验, 可以看出净风对遗址土体基本没什么影响, 携沙风是遗址风蚀损化的主要因素, 对比风的类型、携沙风的风速、吹蚀时间以及加固土样与原状土样风蚀前后微结构特征参数等因素可见, 通过有机硅改性丙烯酸乳液喷涂加固可有效降低土体风蚀损化效应的进程。

参考文献 References

[1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997:15.
LIU Zudian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997, 15.
[2] 李最雄, 王旭东, 田琳. 交河古城土建筑遗址的加固试

验[J]. 敦煌研究, 1997(3): 171-176, 188.
LI Zuixiong, WANG Xudong, TIAN Lin. Experimentation of chemical consolidation on ancient earth-structure sites of Jiaohe[J]. Dunhuang Research, 1997(3): 171-176, 188.
[3] 周双林. 土遗址防风化保护概况[J]. 中原文物, 2003, 6: 78-83.
ZHOU Shuanglin. Survey of preserving from efflorescence of earthen archaeological sites [J]. Cultural Relics of Central China, 2003(6): 78-83.
[4] AGNEW N, PREUSSER F, DRUZIK J R. Strategies for adobe preservation[C]//Proceeding of the 5th International Meeting of Experts on the Conservation of Earthen Architecture. 1987:3-11.
[5] RICHARD Coffman, CHARLES Selwitz, NEVILLE Agnew. A study of the interaction of chemical consolidation with adobe and adobe consolidation[J]. The Getty Adobe Research Project at Fort Selden II.
[6] 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 Zhouyuan, WANG Tianshi, WANG Lansheng. Fundamentals of the engineering geology analyses[M]. 2nd edition. Beijing: Geological Press, 1994.
[7] 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 Wenwu, HAN Wenfen, 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.
[8] 赵海英, 王旭东, 李最雄, 等. PS 材料模数、浓度对干旱区土建筑遗址加固效果的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 557-562.
ZHAO Haiying, WANG Xudong, LI Zuixiong, et al. Impact of modulus and concentration of potassium silicate material on consolidating earthen architecture sites in arid region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 557-562.
[9] 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 Yuzhang, DONG Guangrong, LI Changzhi. Study on some factors influencing soil erosion. by wind tunnel experiment[J].Journal of Desert Research, 1992, 12(4): 41-49.
[10] WEI Jing, WANG Jianhua. Consolidation properties of highly plastic clay during osmotic pressure consolidation test[J]. Transactions of Tianjin University, 2003, 9(4): 308-311.
[11] DANIEL E B, TED M Z, SERGIO A. Wind erosion quantity and quality of an antic haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 69: 29-39.
[12] 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.

(编辑 吴海西)