DOI：10.19789/j.1004-9398.2025.02.002
文献引用：刘玉庚，周锐，赵秋月，等．水分对古代夯土城墙的风化作用[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2025，46（2）：12-17. LIU Y G，ZHOU R，ZHAO Q Y，et al. The weathering effect of moisture on ancient rammed earth walls [J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2025，46（2）：12-17.

水分对古代夯土城墙的风化作用*

刘玉庚[1,2**]，周　锐[3]，赵秋月[4]，翟敬源[5]，田义鲁[2]，于洪洋[5]

（1. 成武伯乐第一初级中学，山东 成武　274200；2. 北京瀚文工程设计咨询有限公司，北京　100028；3. 中国地震局地震预测研究所，北京 100036；4. 泰山学院旅游学院，山东 泰安　271000；5. 吉林市文物保护中心，吉林 吉林　132011）

摘要：水是夯土城墙风化劣变的重要因素之一。由于大气降水的冲刷和渗流作用，使夯土城墙不断地受到侵蚀甚至是坍塌。以吉林市龙潭山城遗址西段夯土城墙为研究对象，为了系统研究水分对其劣变的影响，土样采用常规物理性实验、X-射线衍射、扫描电镜测试等实验方法，研究夯土墙的土壤孔隙结构特征变化，对比分析了水分对不同深度夯土段的风化影响。结果表明：自地表水下渗至地下水的过程中，夯土风化程度由大到小排序为地下水作用区、孔隙渗水区、毛细水作用区、裂隙渗水区。

关键词：水；夯土城墙；风化程度；龙潭山遗址
中图分类号：K878.6　　**文献标志码**：A

The weathering effect of moisture on ancient rammed earth walls *

LIU Yugeng[1,2**]，ZHOU Rui[3]，ZHAO Qiuyue[4]，ZHAI Jingyuan[5]，TIAN Yilu[2]，YU Hongyang[5]

（1. Chengwu Bole No.1 Junior High School，Chengwu Shandong　274200；2. Beijing Hanwen Engineering Design Consulting Co.，Ltd，Beijing　100028；3. Institute of Earthquake Prediction，China Earthquake Administration，Beijing　100036；4. Tourism College of Taishan University，Taian Shandong　271000；5. Relics Protection Center of Jilin City，Jilin Jilin　132011）

Abstract：Moisture plays a critical role in the weathering and deterioration of rammed earth walls. The erosion and infiltration lead to the degradation and even collapse of rammed earth walls by atmospheric precipitation continually. Focusing on the western section of the rammed earth wall at the Longtanshan Site in Jilin City，Conventional soil physical experiments，X-ray diffraction analysis，and scanning electron microscopy were employed to examine the changes in the pore structure of soils within the rammed earth walls，systematically assessing the impact of moisture on the deterioration of rammed earth city walls. we conducted a comparative study of the effects of moisture on the weathering of rammed earth at varying depths. The findings indicate that as water infiltrates from the surface to the groundwater，the degree of rammed earth weathering from high to low are，the groundwater-actioned

收稿日期：2023-01-12
*北京市自然科学基金项目（8224095）
**通信作者：Liuyugeng1989@163.com

zone, by the pore water infiltration zone, the capillary water-actioned zone, the fracture infiltration zone.

Keywords: water; rammed earth walls; degree of weathering; Longtanshan Site

CLC: K878.6　　**DC**: A

0　引　言

夯土城墙是夯土遗址的重要组成部分,土是主要建筑材料,是我国一类重要的文化遗产,具有重要的历史价值、科学价值和艺术价值。但夯土遗址在保存过程中,遭受各种环境因素的侵蚀破坏,致使留存下来的夯土保存状况较差,劣化甚为严重。夯土风化的主要影响因素包括温度、湿度、水分、可溶盐、大气污染、微生物和动植物等[1-5]。其中对夯土材料有较大影响的是水,其存在形式主要为大气降水、孔隙水、毛细水和地下潜水等。任克彬等[6]研究了毛细水及干湿循环作用下夯土的强度和黏聚力的变化情况;杨强义等[7]研究了毛细水及干湿循环状态下夯土遗址的风化过程的情况;张秉坚等[8]尝试采用对环境的相对湿度进行定量化分析,用以开展夯土遗址的保护;刘佑荣等[9]建立地下水渗流模型,分析夯土遗址的治水工程技术;Pan等[10]总结潮湿环境下夯土遗址保护材料的研究进展。除了水分影响外,张虎元等[11-12]研究了温度对于夯土遗址表层劣化的影响。

龙潭山城是高句丽王国(公元前37年—公元668年)最北部的城址[13],该城址在研究高句丽民族政治制度、墓葬文化、服饰文化和都城体制等方面具有重要的历史价值。夯土城墙是龙潭山城遗址的重要组成部分,研究水分在夯土风化过程的作用,对于夯土城墙的保护具有重要的参考意义。

1　研究区概况与样品选取

龙潭山城遗址位于吉林省吉林市区东部,西临松花江,距市中心约7 km,海拔388 m,整个城址所在山丘高出附近地表约100 m。遗址所在区域1月平均气温最低,一般为-18.0~-20.0 ℃,极端最低气温可达-40.3 ℃;7月平均气温最高,平均气温为21.0~23.0 ℃,极端最高气温可达36.6 ℃;全年降雨量约700 mm。

据现场调查,夯土城墙沿山脊而建,地表被第四纪松散堆积物覆盖层,下伏地层为二叠系上统杨家沟组(P_{2y})凝灰岩。依据考古资料[14-15],城墙沿山脊夯筑,城墙断面呈梯形,现场调查发现西门城墙残余高度约2.30 m。整个城墙为夯土墙出露高度约2.10 m,下部厚度约0.20 m为坍塌土所覆盖,见图1(a)。城墙分层夯筑,夯层厚0.06~0.12 m,顶宽1.00~1.50 m,夯土成分为黄土掺凝灰岩碎石。

经现场调查发现,依据水分对夯土墙的影响状态,可将龙潭山西门夯土城墙分成5部分(图1(b)):

孔隙渗水区夯土(I),为城墙顶至深1.00 m。植被根系已深入墙体内部,并且局部可见有生物活动的痕迹,城墙夯土的孔隙较大且松散,原有夯土孔隙结构尚可识别,主要以孔隙作为渗透通道。

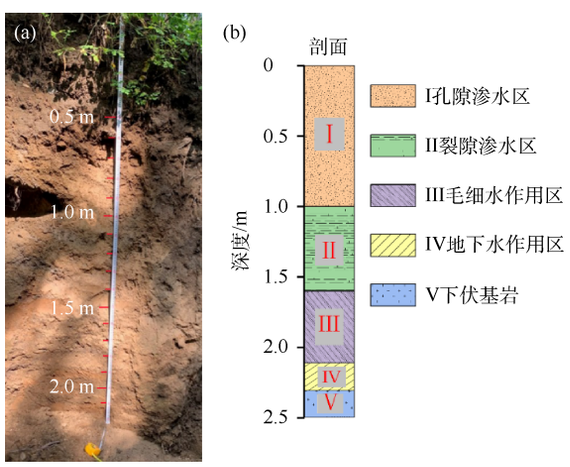


图1　夯土城墙断面示意

(a)城墙断面;(b)城墙剖面示意

裂隙渗水区夯土(II),深1.00~1.60 m。夯土材料主要为粉质黏土含碎石,受植物根系的影响比较小,夯土结构原始状态保存较好,城墙的夯土层理较为明显,以夯土竖向裂隙作为渗透通道。

毛细水作用区夯土(III),深1.60~2.10 m。夯土材料主要为粉质黏土含碎石,夯土结构保存较好,层理清晰可见,潮湿度明显增加受毛细水的影响较大。

地下水作用区夯土(IV),埋深2.10~2.30 m。夯土材料主要为粉质黏土含碎石,但黏土含量明显增加,局部可见有暗色斑点,较第III部分质地较软,含水量较大,受地下水的影响较大。

下伏二叠系上统杨家沟组(P_{2y})凝灰岩(V),埋

深2.30 m以下强风化至中风化,灰黑色,岩质较硬,裂隙发育。

由于文物保护的特殊性,实验尽量采用比较少的样品,进行分析检测,在龙潭山西门夯土城墙断面处,进行采样。依据夯土的外观形态,在剖面深0.75~2.30 m,用直径79.8 mm,高20 mm的环刀间隔0.10 m进行采样,剖面0.85~0.95、1.05~1.15、2.10~2.15 m夯土中含有碎石块,故未取样,共采取了13个夯土样品,采样深度范围如表1所示。采样时间为8月份,降水比较大,在遗址西门附近山坡下有地下水渗出的区域采集了1组地下水样品。

2 实验方法与仪器设备

在中航勘察设计研究院工程试验中心,对土样物理特性进行检测分析,密度、质量含水率、比重、颗粒特征和界限含水率分别用环刀法、烘干法、比重瓶法、筛析法与密度计法联合使用法和液塑限联合测定法,进行测定,以上实验过程详见《土工试验方法标准》[16]。

在中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室,对样品进行黏土矿物测试,选用日本理学高分辨率衍射仪SmartLab X射线衍射仪,利用SmartLab Guidance软件进行分析,所采用仪器参数为:X射线发生器功率为9 kW;测角仪为水平测角仪;可读最小步长:≤0.000 1°;测角仪配程序式可变狭缝;自动识别所有光学组件、样品台;CBO交叉光路,提供聚焦光路及高强度高分辨平行光路;入射端Ka1光学组件;高速探测器D/teX-Ultra250(能量分辨率<20%)。测试过程中仪器稳定。

在中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室,观察夯土微观特征,采用美国FEI Quanta FEG250扫描电镜,实验参数基本设置为加速电压为20.0 kV;工作距离为9.1~10.5 mm;放大倍数为40 000倍。测试过程中仪器稳定。

3 实验结果分析

3.1 土样物理性质指标的差异

土样物理性质实验结果见表1,实验结果表明,粒径>0.005 mm的颗粒质量超过总质量的50.0%,质量含水率为6.7%~15.7%,孔隙比为34.6%~48.2%,液限为27.3%~29.1%,塑限为16.8%~17.3%,塑性指数为10.3~11.8,该土壤可定名为含块石弱碱性粉砂质粉质黏土。地下水检测结果pH 7.28,呈弱碱性。

依据实验结果和现场调查情况,从质量含水率、密度、孔隙率、塑性指数4个指标分析水分(孔隙渗水区、裂隙渗水区、毛细水作用区和地下水作用区)对夯土风化的影响。

密度、孔隙率、塑性指数3项指标的测量结果见图2,三者变化规律基本一致,即在夯土城墙深1.00、1.60、2.10 m处发生明显的转折。夯土密度、孔隙率、塑性指数在孔隙渗水区、裂隙渗水区、毛细水作用区、地下水作用区表现为明显的一致性,但是质量含水率与其他3项却存在一些不同,主要区别在于毛细水作用区。由于采样时间为8月份,处于

表1 城墙夯土基本物理性指标

采样部位	样品名称	采样深度/m	粒径/%		质量含水率/%	密度/(g·cm^{-3})	干密度/(g·cm^{-3})	孔隙比	孔隙率/%	液限/%	塑限/%	pH	塑性指数
			>0.075 mm	0.075~0.005 mm									
I区	XM-1	0.75~0.85	24.0	50.5	11.1	1.69	1.52	0.782	43.9	27.4	17.0	7.85	10.4
	XM-2	0.95~1.05	—	—	12.2	1.88	1.68	0.617	38.2	28.6	17.0	—	11.6
II区	XM-3	1.15~1.25	—	—	6.7	1.89	1.77	0.530	34.6	28.3	17.1	—	11.2
	XM-4	1.25~1.35	—	—	7.3	1.86	1.73	0.563	36.0	28.4	17.1	—	11.3
	XM-5	1.45~1.55	—	—	7.3	1.90	1.77	0.530	34.6	28.0	17.0	—	11.0
	XM-6	1.55~1.65	17.4	53.9	6.7	1.58	1.48	0.830	45.4	27.3	16.8	7.79	10.5
III区	XM-7	1.65~1.75	—	—	6.7	1.57	1.47	0.842	45.7	27.8	16.9	—	10.9
	XM-8	1.75~1.85	—	—	11.0	1.67	1.50	0.801	44.5	28.2	17.1	—	11.1
	XM-9	1.85~1.95	—	—	14.4	1.62	1.42	0.914	47.8	27.7	17.2	—	10.5
	XM-10	1.95~2.05	20.2	48.6	14.2	1.66	1.45	0.864	46.4	27.5	17.1	—	10.4
	XM-11	2.05~2.10	—	—	14.0	1.60	1.40	0.931	48.2	27.5	17.2	—	10.3
IV区	XM-12	2.15~2.25	—	—	15.3	1.81	1.57	0.726	42.1	29.1	17.3	—	11.8
	XM-13	2.25~2.30	31.7	41.4	15.7	1.82	1.57	0.723	42.0	28.8	17.1	7.73	11.7

注:—指无数据。

雨季,上部孔隙渗水区的质量含水率高于裂隙渗水区。受到大气降水的影响,毛细水的上升高度仅上升到1.70 m左右,与密度、孔隙率的分界不一致,主要因素是孔隙率影响了毛细水的上升高度,这与其他学者的研究结果一致[17]。

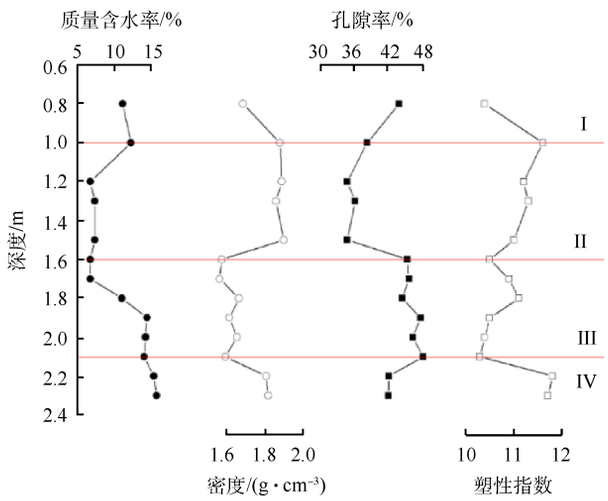


图2　测试结果分析

3.2　黏土矿物和全岩矿物检测结果

黏土矿物的确定和全岩矿物组分数据通过高精度X-射线衍射实验分析获得。依据现场调查结果和土样物理性质指标,对比4部分夯土物理特征后,裂隙渗水区夯土密度较高,孔隙率较低,保持了比较好的原始特征,可初步判定该段内夯土的风化程度最低,因此选择了其余3部分夯土中代表性样品进行检测,分析其风化程度高低。经检测,非黏土矿物石英、长石质量分数为73.8%~79.2%,其次为黏土矿物(17.1%~21.2%),其他矿物质量分数为0.5%~3.2%,浊沸石的产生与可能下伏凝灰岩的风化有关[18-19]。黏土矿物含量可反映土壤风化程度[20],结果显示地下水浸泡作用区夯土的风化程度高于孔隙水作用区夯土的风化程度和毛细水作用区夯土的风化程度(表2、表3)。

3.3　夯土微观结构检测结果

采用Keller与Staudt[21]的微孔隙划分方案进行大孔隙(>50 μm)观察,土壤的大孔隙成因来自生物、物理和化学因素[22]。通过观察土壤大孔隙特征,分析水分作用条件下夯土的微形态变化,进而判断不同深度段夯土的风化程度。选择孔隙渗水区、毛细水作用区和地下水作用区的代表性样品(XM-1,XM-8,XM-13)进行扫描电镜检测(图3)。

样品大孔隙特征:XM-1样品孔隙表面平滑但排列疏松,泥晶碎屑充填粉晶微粒间孔隙,土颗粒大小不一,整体形状呈粒状或块状,颗粒间以点状连接,土壤孔隙度较大;XM-8样品颗粒表面粗糙无序排列,颗粒大小不一,局部呈棉絮状,颗粒排列紧密无序,细小颗粒填充孔隙,颗粒受挤压作用显著,颗粒间呈点状、线状、面状无序排列,孔隙次之;XM-13样品表面平滑,结构较致密,微观图像中细小颗粒附着矿物于表面或嵌入到矿物孔隙中,微小颗粒间联系紧密,大颗粒表面平整光滑,呈片状排列,表面微小颗粒排列紧密,孔隙度小。

孔隙渗水区的夯土受到地表动物扰动、植物根系作用、冻融循环作用和大气降水的淋溶等作用影响,因此该区夯土主要受到生物、物理和化学作用的影响,孔隙度比较大,夯土风化程度较强(图3(a))。毛细水作用区的夯土受到毛细水的循环作用、冻融循环作用等物理作用影响,以及盐类溶解-结晶等化学作用的影响[23-24],因此该区夯土以物理因素影响

表2　全岩矿物X-射线衍射半定量分析结果

样品号	原编号	采样深度/m	矿物质量分数/%						
			石英	钾长石	斜长石	浊沸石	角闪石	石膏	黏土矿物
L1	XM-1	0.80	60.9	2.5	13.6	0.0	3.0	0.0	20.0
L2	XM-8	1.80	60.4	4.6	14.2	0.0	3.2	0.5	17.1
L3	XM-13	2.30	56.4	2.7	14.7	2.2	2.5	0.3	21.2

表3　黏土矿物X-射线衍射半定量分析结果

样品号	原编号	采样深度/m	黏土矿物相对质量分数/%				伊利石与蒙脱石混合层/%
			I/S	It	Kao	C	
L1	XM-1	0.80	69.0	14.0	9.0	8.0	40.0
L2	XM-8	1.80	69.0	15.0	8.0	8.0	40.0
L3	XM-13	2.30	63.0	20.0	9.0	8.0	40.0

注:It为伊利石;Kao为高岭石;C为碳酸钙。

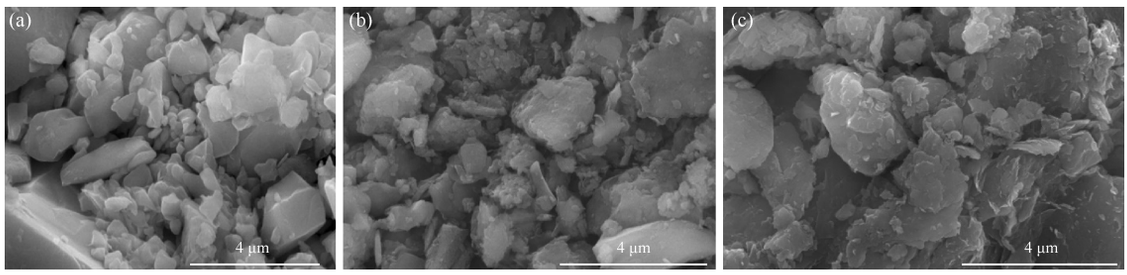


图3　实验样品扫描电镜检测

(a)孔隙渗水区的夯土样品(XM-1);(b)毛细水作用区的夯土样品(XM-8);(c) 地下水作用区的夯土样品(XM-13)

为主、化学因素影响为辅,因此该区的夯土风化程度较弱(图3(b))。地下水作用区的夯土长期受到地下水的浸泡作用,再者下伏凝灰岩的风化会将部分盐类迁移至夯土中,促进夯土孔隙的结构变化,因此该夯土区以化学作用影响为主,夯土的风化程度最强(图3(c))。

4　讨　论

通过对龙潭山城夯土进行采样和实验分析,证明了水分对夯土风化的作用。(1)孔隙渗水区夯土与裂隙渗水区夯土进行比较。通过现场调查发现孔隙渗水区原夯土的结构已基本消失,但是尚可识别;而裂隙渗水区的夯土结构,除在裂隙通道附近有渗水痕迹外,夯土的原始结构保存较好,与前人报道的土壤渗水途径结果基本一致[25-26]。自上而下随深度的增大,夯土的质量含水率、孔隙率逐渐减小,夯土的密度、塑性指数逐渐增大。并且孔隙渗水区夯土由于受到动植物、微生物活动以及大气降水作用的影响,因此孔隙渗水区夯土的风化程度比裂隙渗水区夯土的风化程度强。(2)毛细水作用区夯土与地下水作用区夯土进行比较。自上而下随深度的增加,夯土的质量含水率、密度、塑性指数均逐渐增大。地下水作用区夯土长期浸泡于弱碱性水中,促进了蒙皂石向伊利石的转化[27],通过扫描电镜观察,夯土孔隙结构中细颗粒物质比较多,主要是吸附的重金属元素比较多[28]从而造成夯土密度变大,如图3所示。通过扫描电镜观察分析地下水作用区夯土以化学风化为主。毛细水作用区夯土受到地下水的上升高度及周期性的影响,夯土受到冻融循环等物理风化作用为主和盐类的结晶-溶解循环等化学作用为辅的影响。因此,毛细水作用区的夯土风化程度比地下水作用区夯土的风化程度弱。(3)孔隙渗水区夯土与毛细水作用区夯土进行比较。孔隙渗水区夯土常年受到动植物及微生物活动的影响,雨水的淋溶作用等,从而使土壤颗粒间状态发生改变,增加了土壤颗粒的表面积,促进了土颗粒的风化作用,因此该区的黏土矿物含量较高。通过SEM观察孔隙渗水区夯土孔隙比较大,是生物、物理和化学共同作用的结果。毛细水作用区夯土以物理作用为主,化学作用为辅,并且黏土矿物含量较低。因此,夯土风化程度在孔隙渗水区比毛细水作用区的强。

5　结　论

通过现场采样调查,土样物理性指标实验,对土壤进行黏土矿物检测分析和扫描电镜检测,系统分析了水分对夯土的风化作用。夯土在水的参与下,促进了黏土矿物的转化,促进了夯土的孔隙结构发生变化,进而改变了土壤的结构状态,从而影响了夯土的风化程度。

通过比较讨论,水分对夯土的风化程度由高到低进行排序为地下水作用区夯土、孔隙渗水区夯土、毛细水作用区夯土、裂隙渗水区夯土。依据水分对夯土城墙的风化作用而言,如果要对龙潭山夯土城墙进行有效的保护,依据夯土墙的风化程度顺序,建议采取以下措施:首先结合有利的地形条件降低地下水的水位,确保夯土墙底部不被地下水所浸泡,尽量使毛细水的上升高度下降;其次对夯土墙顶部的植被根系进行清理,对顶部的微生物活动进行治理,尽量保证夯土墙夯土结构的密实状态;最后做好地表水的防渗措施,防止地表水或孔隙水的进一步下渗而引起下部夯土的进一步风化。

参 考 文 献

[1] 孙满利,陈彦榕,沈云霞.土遗址病害研究新进展与展望[J].敦煌研究,2022(2):136-148.

[2] 周双林.土遗址防风化保护概况[J].中原文物,2003(6):78-83.

[3] 贾文熙.土质文物的风化机理与保护刍议[J].中国文

物修复通讯，1996(11)：18-22.
[4] 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(增刊2)：2875-2880.
[5] 刘林学，张宗仁，薛茜，等.古文化遗址风化机理及其保护的初步研究[J].文博，1988(6)：71-75.
[6] 任克彬，王博，李新明，等.毛细水干湿循环作用下土遗址的强度特性与孔隙分布特征[J].岩土力学，2019，40(3)：962-970.
[7] 杨强义，李承蔚.毛细水干湿循环对土遗址风化影响的试验研究[J].地下空间与工程学报，2012，8(3)：517-525.
[8] 张秉坚，周环，王旭东.潮湿环境的定量判别初探：以杭州良渚遗址为例[J].敦煌研究，2010(6)：104-108.
[9] 刘佑荣，陈中行，周丽珍.大型平原土体遗址主要地质病害及其保护治水工程技术研究[J].文物保护与考古科学，2007(3)：11-15.
[10] PAN C，CHEN K，CHEN D，et al. Research progress on in-situ protection status and technology of earthen sites in moisty environment[J]. Construction and Building Materials，2020，253：119-219.
[11] 张虎元，杨龙，刘平，等.夯土遗址表层热劣化模拟试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版)，2018，45(3)：149-156.
[12] 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.
[13] 董学增.吉林市龙潭山高句丽山城及其附近卫城调查报告[J].北方文物，1986(4)：32-35.
[14] 王志刚，梁会丽，徐坤，等.2013年吉林省文物考古研究所考古发掘收获[J].东北史地，2014(3)：17-20.
[15] 安文荣，王志刚，徐坤，等.2014年吉林省文物考古研究所考古发掘收获[J].东北史地，2015(1)：10-12.
[16] 南京水利科学研究院.土工试验方法标准[S].国家质量技术监督局：中华人民共和国建设部，1999.
[17] 张建国，赵惠君.地下水毛细上升高度及确定[J].地下水，1988(3)：135-139.
[18] 白清华，柳益群，樊婷婷.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组浊沸石分布及其成因分析[J].西北地质，2009，42(2)：100-107.
[19] 邢顺全，张书贵.砂岩中自生浊沸石的形成条件及其地质意义[J].大庆油田，1982(2)：79-86.
[20] 刘东生等.黄土与环境[M].北京：科学出版社，1985.
[21] KELLER J U，STAUDT R. Gas adsorption equilibria：experimental methods and adsorptive isotherms[M]. New York：Springer，2004.
[22] 李伟莉，金昌杰，王安志，等.土壤大孔隙流研究进展[J].应用生态学报，2007，18(4)：888-894.
[23] 廖媛.毛细水带反应性溶质运移实验研究[D].武汉：中国地质大学，2013.
[24] 于天文.吉林西部盐渍土水热盐力多物理场耦合模型研究[D].长春：吉林大学，2016.
[25] 张常亮，李萍，李同录，等.黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].水利学报，2014，45(6)：728-734.
[26] 李萍，李同录，付昱凯，等.非饱和黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].中南大学学报(自然科学版)，2014，45(10)：3551-3560.
[27] 靳平平，欧成华，马中高，等.蒙脱石与相关黏土矿物的演变规律及其对页岩气开发的影响[J].石油物探，2018，57(3)：344-355.
[28] 张金池，姜姜，朱丽珺，等.黏土矿物中重金属离子的吸附规律及竞争吸附[J].生态学报，2007(9)：3811-3819.

(责任编辑：李拓宇)