



· 文化遗产保护 ·

降雨入渗对干旱区土遗址表面疏松层形成的影响

沈云霞,张钟珊,张晓宇,梁楚昕,史梦雨,邓凯,孙满利

西北大学 中国中亚人类与环境“一带一路”联合实验室/文化遗产研究与保护技术教育部重点实验室/
文化遗产学院,陕西 西安 710127

摘要 高频次小雨入渗-快速蒸发过程是西北干旱地区土遗址表面疏松层发育的关键驱动力。以降雨强度、降雨历时和降雨-蒸发循环次数为主要影响因素,开展降雨入渗侵蚀试验,系统分析侵蚀后土体的表观形态、颗粒组成以及微观结构特征。研究表明:降雨入渗后,土体颗粒间胶结作用减弱,颗粒随雨水向下迁移。颗粒迁移量与各降雨因素呈正相关关系,且迁移粒径呈现先粗后细的规律性变化,整体以粉粒(0.005~0.075 mm)迁移为主。同时,颗粒的迁移导致土体孔隙相对增大,形成大孔($>32\ \mu\text{m}$)为主的孔隙分布特征。颗粒迁移与孔隙结构变化共同促进了表面疏松层的发育。疏松层的下边界对应于湿润锋的位置,其深度与累积降雨循环次数相关性较弱,主要受降雨量影响,并随降雨量呈对数增长趋势。研究结果将为理解干旱区土遗址疏松层形成的复杂机理及制定有效的预防性保护策略提供科学依据与实践参考。

关键词 降雨入渗;土遗址;疏松层;湿润锋;颗粒迁移;孔隙结构

中图分类号:K878 DOI:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-02-003

The influence of rainfall infiltration on the formation of loose layer on the surface of earthen sites in arid area

SHEN Yunxia, ZHANG Zhongshan, ZHANG Xiaoyu, LIANG Chuxin,
SHI Mengyu, DENG Kai, SUN Manli

China-Central Asia "the Belt and Road" Joint Laboratory on Human and Environment Research, Key Laboratory of Cultural Heritage Research and Conservation, School of Culture Heritage, Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract High-frequency light rain infiltration-rapid evaporation process is the key driving force for the development of loose layer on the surface of earthen sites in the arid region of Northwest China. According to the simulation experiments, it has been observed that after rainfall infiltration, the cementation between soil particles deteriorated, and particles mainly composed of powder particles (0.005~0.075 mm) migrated downward. Simultaneously, particle migration induces an increase in soil pore volume, characterized by a dominance of macropores ($>32\ \mu\text{m}$). These changes in particle migration and pore structure directly contribute to the formation of a loose layer. The thickness of this loose layer primarily depends on rainfall intensity rather than cumulative rainfall cycles. This study reveals the influence of rainfall infiltration on the formation of loose

收稿日期:2025-10-17 修回日期:2025-12-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1520905)

第一作者:沈云霞,女,博士,副教授,从事岩土类文物保护、遗址盐风化机理及防治研究,shenyx17@nwu.edu.cn。

通信作者:孙满利,男,博士,教授,博士生导师,从事遗址类文物保护研究,sunml168@sohu.com。

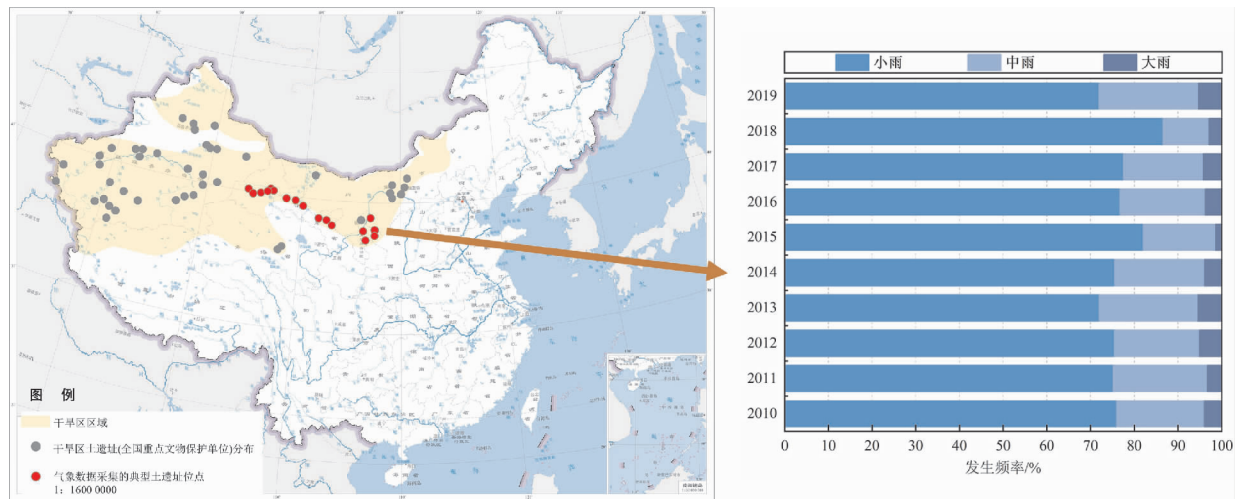
layers on the surface of earthen sites in arid areas, which is of great significance for the preventive conservation of earthen sites.

Keywords rainfall infiltration; earthen sites; loose layer; wetting front; particle migration; pore structure

土遗址是指以土为主要建筑材料的遗址,据第三次全国文物普查结果显示,76.7 万处遗址中的约三分之一归属此类,在我国丰富的文化遗产中占有重要的地位,更是中华民族辉煌文明的生动见证,蕴含着深厚的历史、艺术、科学、社会及文化价值^[1-2]。在我国西北干旱地带,由于其独特的干燥少雨气候条件,诸如交河故城、高昌故城及锁阳城遗址等众多土遗址得以较为完整地保存至今^[3]。然而,土体固有的结构脆弱性使其易受外界环境干扰,当颗粒之间结合力减弱或消失时,土遗址表层风化病害发育,严重损害土遗址的信息承载能力与结构稳定性^[4]。

在众多风化病害中,片状剥蚀尤为突出,其特征是表面形成由结皮层和疏松层构成的二元结构^[5-6]。这一病害的形成机制复杂,涉及风、温度、降雨等多因素的协同作用。已有研究揭示了风蚀过程中沙粒磨损对土体表面的剥离作用^[7],以及温差导致的热劣化加速二元结构形成的现象^[8]。同时,现有研究表明短时强降雨为结皮层的形成提供了发展动力,在短时间的高能雨滴冲刷、击打下,土体表面土颗粒由雨水裹挟形成泥流^[9-10],水分蒸发后,形成致密的、又有一定硬度的结皮层^[11]。而疏松层的形成与雨水入渗并携带颗粒运移有关,但是结皮层一定程度上短暂提高了土

体强度,大大降低了雨水入渗速率^[12],因此,短时强降雨对疏松层的形成作用并不显著。按照气象中降雨量的划分标准^[13](24 h 内降雨量在 10 mm 以下为小雨,10 ~ 25 mm 为中雨,25 ~ 50 mm 为大雨,超过 50 mm 统称为暴雨),我国干旱区典型土遗址(锁阳城遗址、骆驼城遗址、永泰城址、北滩芦沟古堡遗址、骊靛遗址等)所在地近 10 年的气象数据显示(见图 1),全年降雨事件中 70% 以上为小雨,高频次的小雨入渗导致干旱区土遗址常年遭受由此带来的孔隙结构、颗粒粒径等方面的改变。然而,现有研究多聚焦于小雨对土遗址整体稳定性的宏观影响,认为其通过长时间低速率的渗透作用深入土体内部,降低稳定性并可能引发深层次破坏^[14-15]。因此,小雨在片状剥蚀二元结构中,特别是疏松层形成过程中的具体作用机制,需进一步研究和完善。鉴于此,本研究采用室内人工降雨装置,模拟小雨条件下的土样侵蚀过程,通过调控降雨强度、持续时间及循环次数等参数,系统地分析土体在侵蚀后的表观形态、颗粒变化以及微观结构特征。旨在揭示小雨入渗如何促进土遗址表面疏松层的形成,进而为理解干旱区土遗址片状剥离的复杂机理及制定有效的预防性保护策略提供科学依据与实践指导。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2019) 4345 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 干旱区典型土遗址近 10 年不同降雨量的发生频次

Fig. 1 Distribution of occurrence frequency of different rainfall in typical soil sites in arid area in recent ten years

1 材料与方法

1.1 试验材料及制备

1.1.1 材料选择

本次试验用土选自甘肃境内锁阳城遗址北墙坍塌处。试验用土的基本物理性质如表1所示。锁阳城遗址土颗粒粒径主要分布在0.005~0.075 mm(粉粒),土块的天然含水率极小,不足

0.2%,干密度为 1.68 g/cm^3 ,土样孔隙率小于40%,属于低液限黏土。

1.1.2 样品制备

参照我国土工试验方法标准,利用双向静压法,将遗址土压制成 $7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm}$ 的立方体重塑土样,试样干密度为 1.70 g/cm^3 ,初始含水率为12%。样品制备后室内自然风干养护28 d备用。

表1 试验用土的基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of test soil

含水率 /%	干密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	塑限 /%	液限 /%	塑性 指数	孔隙率 /%	小于某粒径土的百分含量/%				
						2 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.075 mm	0.005 mm
0.175	1.68	13.99	23.46	9.47	38.76	99.84	99.17	97.44	82.53	32.81

1.2 试验设计与方法

1.2.1 降雨-蒸发模拟试验

1.2.1.1 模拟设备及方法

本研究所用降雨模拟器是一种专门用于土遗址雨蚀模拟试验的装置^[16]。通过调节装置中的增压水泵的泵速和泵头高度,实现不同强度及雨量的条件模拟(如图2)。试验过程中,重塑土样被放置在下方有集水箱的透水镂空式放置台上,

避免降雨积水导致试样底部崩塌。泵头安装在试样上方约2.5 m左右的高度。蒸发模拟则使用电热鼓风机干燥箱(型号:DHG-9055A)实现。降雨结束后,随即将土样放置烘箱中烘干20 h,为模拟快速蒸发条件,同时考虑干燥箱的通风情况,烘干温度设置为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$,烘干后的土样取出冷却至室温,即完成1次降雨蒸发循环。

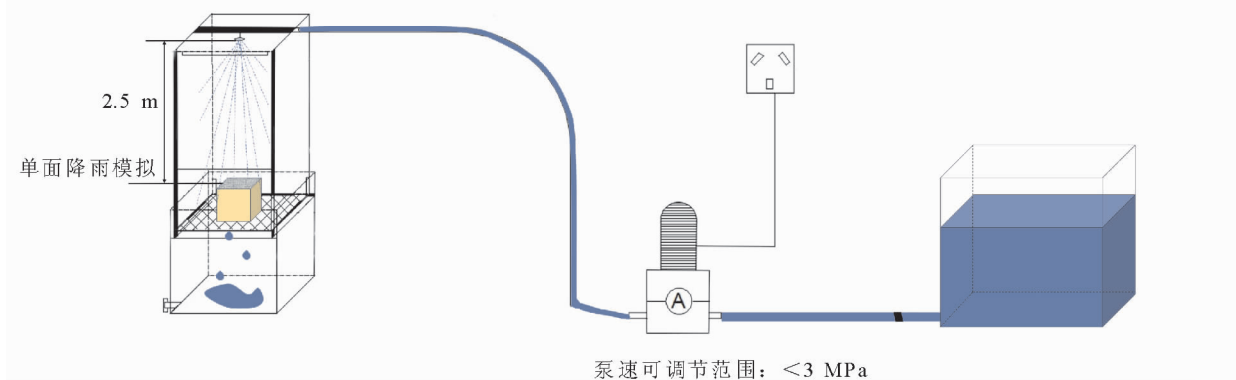


图2 降雨模拟装置示意图

Fig. 2 Rainfall simulation device schematic diagram

1.2.1.2 试验参数设计

室内小雨模拟试验参数包括降雨历时、降雨强度和降雨-蒸发循环次数,3类参数的设计依据预试验结果及现场气象数据。降雨历时的设定以试样不出现明显的坍塌为准则,按照预实验测试结果,设置为5 min、10 min、15 min、20 min、25 min。降雨强度可根据降雨量与降雨历时计算获得。整理锁阳城遗址所在地区近20年的小雨降雨气象数据可知(见图3),平均小雨年降雨量约

在53 mm,平均天数为13 d,由此计算可得20年来日均小雨降雨量为4 mm左右,而气象上对于小雨的降雨量定义为10 mm,因此,降雨强度的参数范围由4~10 mm降雨量与试验设计的最长降雨历时计算得到,即 $0.16 \sim 0.40 \text{ mm/min}$,最终试验降雨强度参数参考此范围设定为 0.25 mm/min 、 0.30 mm/min 、 0.35 mm/min 。降雨蒸发循环次数设置为25次。按照试验参数设计开展正交试验。

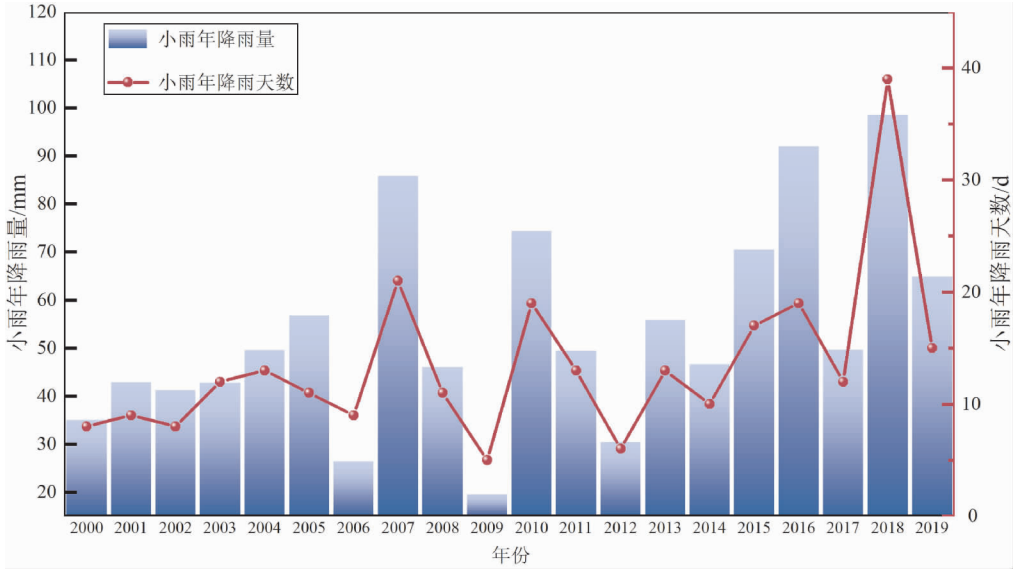


图 3 近 20 年锁阳城遗址小雨年降雨量与天数统计

Fig. 3 Statistics of light rain annual rainfall and days in the past 20 years at the Suoyang Site

1. 2. 2 分析测试

小雨入渗携带颗粒运移,进而引发土体结构改变,因此,模拟试验过程中主要关注土体表观形貌特征、颗粒迁移特征以及微观结构特征的变化。试验过程中,以 5 次降雨为一个间隔,设置累计 5 次、10 次、15 次、20 次、25 次降雨 5 个观测节点。达到设定循环次数节点时,使用相机(型号 SELP1650 SONY CORP)对不同试验阶段土体表观形貌变化特征进行记录;采集降雨后疏松层(据顶部约 3 cm 内的土体)土样进行激光粒度测试(型号 LS-909),对比分析降雨入渗后的土体粒径变化;同时利用扫描电镜(型号 Quanta650F)表征微观孔隙结构的变化特征。

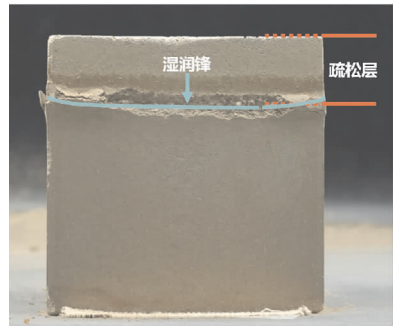


图 4 土体表观形貌

Fig. 4 Apparent morphology of soil

不同试验条件下,湿润锋位置有所差异。随着降雨循环次数的增加,湿润锋深度随之呈现先增大后趋于平缓的特征,且增大速率先大后小,直至湿润锋停止运移(见图 5)。该变化规律表明,在小雨条件下,降雨循环次数对土体湿润锋深度的影响主要体现在前期几次降雨过程中。

2 结果与讨论

2. 1 土体表观形貌特征

图 4 为雨水下渗-蒸发后土体表观形貌。由图可知,多次降雨-蒸发循环后,土体上部出现明显疏松层,在雨水下渗的最大深度处出现湿润锋,并伴有颗粒鼓胀现象。疏松层的形成与雨水的淋滤作用密切相关,而湿润锋是土体湿润区与干燥区的界线,也是评估土体降雨入渗特性的重要指标^[17]。降雨初始,在水势差作用下,雨水自土体表面向内部持续下渗,上部一定厚度土体含水率快速增高,直至饱和,此时湿润锋下移较为迅速^[18]。当降雨停止后,湿润层中的水分在剩余势能支撑下继续下渗,直至势能完全消散。

选取 25 次循环后的湿润锋深度数据,分析降雨强度与降雨历时对湿润锋运移的影响(见图 6、图 7)。图中显示,随着降雨历时延长,湿润锋深度不断加深,其随降雨历时延长呈近似线性的增长趋势;而降雨强度的增大,也会引起湿润锋深度的线性增强趋势。为进一步探讨湿润锋深度与二者的关系,将降雨强度与降雨历时耦合为降雨量指标,绘制散点图并进行拟合(见图 8)。拟合结果表明,湿润锋深度与降雨量整体呈对数增长趋势,即随着降雨量的增加,土体湿润锋不断下移扩展。在降雨量较小时,运移速率较快,而在降雨量增大到约 8 mm 以上时,运移速率则明显放缓。

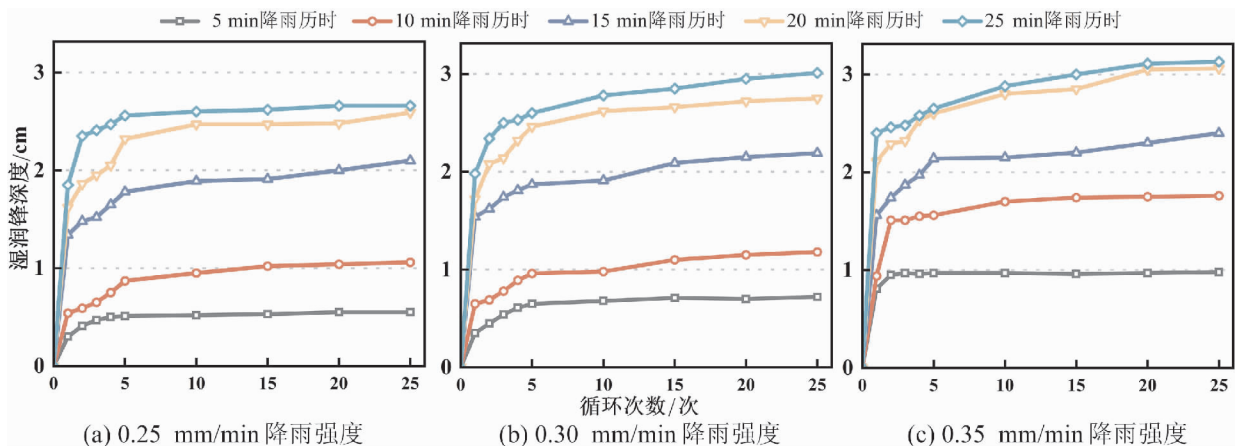


图5 降雨循环次数与土体湿润锋深度的关系图

Fig. 5 The relationship between the number of rainfall cycles and the depth of soil wetting front

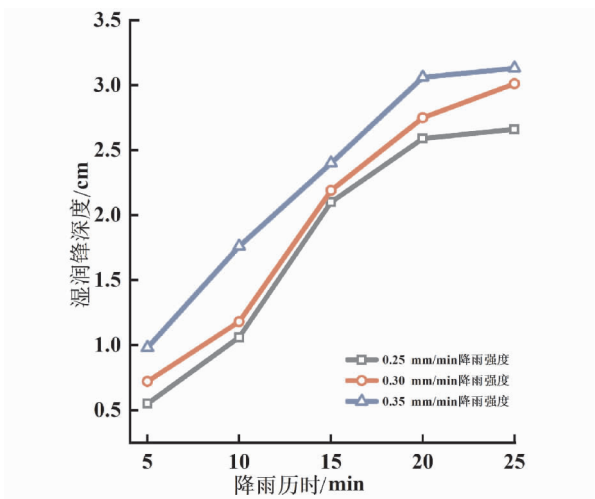


图6 降雨历时与土体湿润锋深度的关系图

Fig. 6 Relationship between rainfall duration and soil wetting front depth

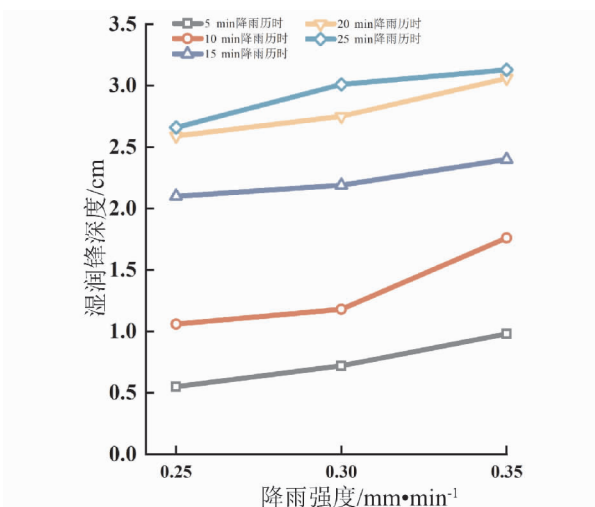


图7 降雨强度与土体湿润锋深度的关系图

Fig. 7 Relationship between rainfall intensity and soil wetting front depth

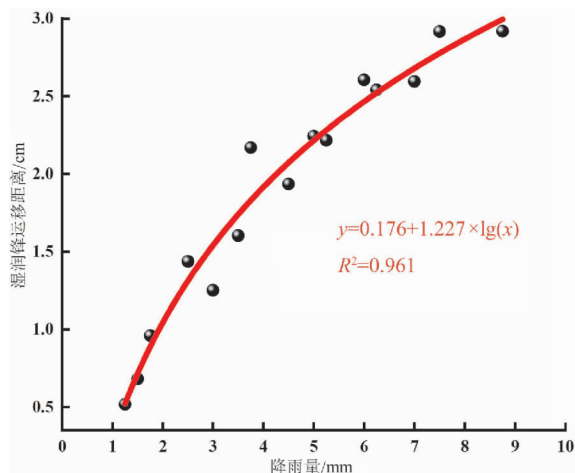


图8 降雨量与土体湿润锋深度的关系图

Fig. 8 Relationship between rainfall and soil wetting front depth

以上规律强调了降雨量作为主导湿润锋迁移的关键因素,其入渗的终点位置直接映射出土体内部颗粒堆积的边界。湿润锋不仅将土体自然划分为结构迥异的疏松层与本体层,而且这一界限在经历多次雨水渗透与快速蒸发循环后,可能成为土体潜在的断裂面。因此,在土遗址保护工作中,湿润锋的具体位置需要得到高度重视,因为它不仅揭示了土体内部的水分动态,还对土遗址加固工作的深度设计具有直接的指导意义。

2.2 颗粒变化特征

随着降雨循环次数的不断增加,浅表层土体中的颗粒被雨水携带并向下迁移的现象愈发显著。为直观展示这一动态过程,绘制了不同降雨指标下,浅表层粒径分布的变化情况。

图9为降雨循环次数与浅表层粒径分布的关系图。由图可知,颗粒迁移量与降雨循环次数呈

正相关关系,降雨循环次数越多,颗粒迁移量越大,且这一规律在不同降雨条件下均保持一致。而由图 10 可知,颗粒迁移量与降雨历时也呈正相关关系,即降雨历时越长,颗粒迁移越显著,且随着降雨强度增大,不同降雨历时下粉粒迁移差异逐渐减小。由降雨强度与浅表层粒径分布的关系可知(见图 11),颗粒迁移量与降雨强度也呈现正

相关关系。但是在不同降雨循环次数下,降雨强度对颗粒粒径变化的影响存在差异。在 5 次循环后,粗粒和粉粒的含量变化显著,由于降雨入渗过程中主要发生细颗粒的迁移^[19],因而该条件下粗颗粒的变化可能是冲刷或溅击引起的;而在 15 次与 25 次降雨循环后,粉粒与黏粒的迁移成为主导。

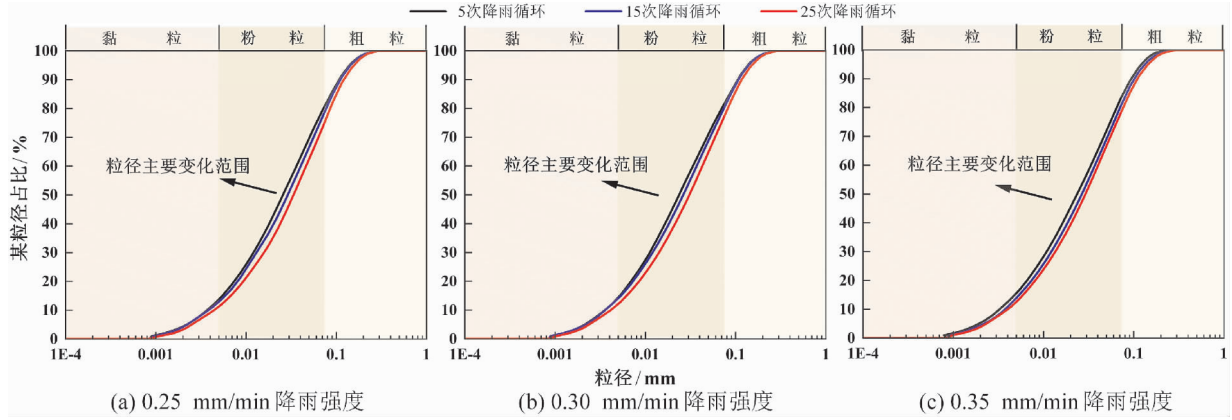


图 9 降雨循环次数与土体粒径的关系图

Fig. 9 The relationship between the number of rainfall cycles and soil particle size

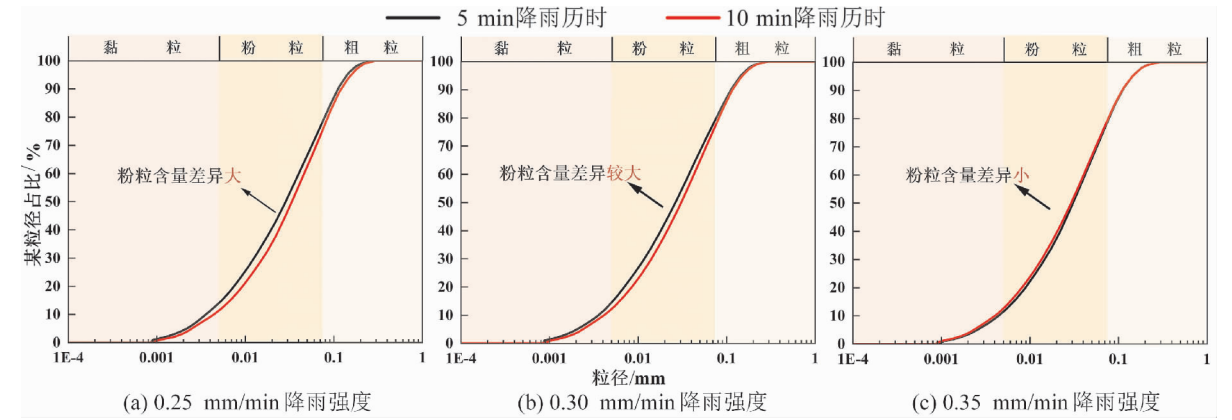


图 10 降雨历时与土体粒径的关系图

Fig. 10 The relationship between rainfall duration and soil particle size

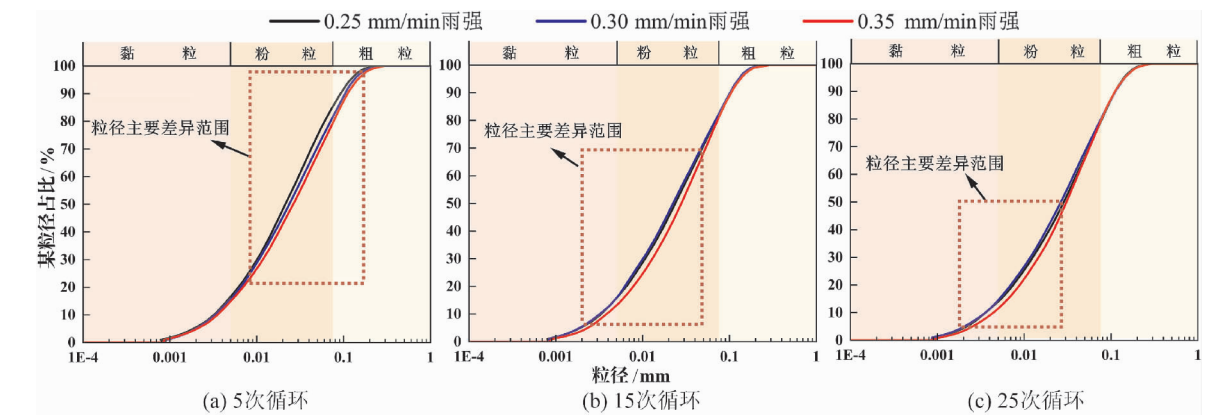


图 11 降雨强度与土体粒径的关系图

Fig. 11 The relationship between rainfall intensity and soil particle size

综上,降雨入渗导致土体颗粒发生迁移,直接导致了疏松层的形成与发育。迁移的颗粒量与降雨工况基本呈正相关关系,但是迁移颗粒的粒径却因工况不同而表现出差异。其中,降雨历时主要引起粉粒(0.005~0.075 mm)的迁移。降雨强度对迁移粒径的影响则受制于循环次数,随着降雨循环次数增加,在降雨强度的正向影响下,迁移粒径从粗粒(>0.075 mm)转为粉粒(0.005~0.075 mm)进而转为黏粒(<0.005 mm)。

以上规律共同揭示了小雨入渗条件下颗粒迁移的演变过程在降雨入渗初始,粗粒与粉粒首先受到冲刷或迁移;随着降雨的反复入渗与干燥,迁移颗粒主体逐渐转变为粉粒及黏粒;最终,在持续的降雨入渗过程中,粒径更小的粉粒及黏粒成为主要被携带运移对象。这是因为多次入渗后,能搬运的粗粒基本被冲刷,雨水开始携带粉粒甚至粒径更小的黏粒下渗,聚集在土体内部并在此处形成水流堵塞,改变土体的渗透性^[19],导致土体结构的不均匀性,即形成疏松层与颗粒沉积区。

2.3 微观形貌特征

2.3.1 微观结构特征

为进一步研究降雨入渗对土体微观结构的影响特征,采集土体浅表层样品进行分析探讨。由上述分析可知,降雨入渗过程中,因颗粒迁移而导致土体结构改变,其中降雨强度是主要影响因素。因此,本节以不同降雨强度下浅表层微观结构差异为例,概括降雨入渗过程中土体微观结构的主要变化,进而揭示疏松层形成的微观动力。

图12直观展示了不同降雨强度下浅表层微观结构形貌特征,参照已有黄土微观结构的分类^[20],对颗粒类型、孔隙特征、颗粒接触特征进行分类和描述。在0.25 mm/min的较低降雨强度下,颗粒以凝块状颗粒为主,还含有少量外包黏土颗粒等黏土级颗粒;孔隙以胶结孔隙为主,胶结形式以胶结为主。随着降雨强度增加至0.30 mm/min,颗粒以絮凝状颗粒为主,黏土级颗粒次之;孔隙以镶嵌孔隙为主,胶结方式主要为半胶结。当降雨强度进一步增大至0.35 mm/min,颗粒则以碎屑颗粒为主,还包含有少量外包黏土颗粒;孔隙主要为支架孔隙,胶结形式也以微胶结为主。

综上,随着降雨强度增大,土体中凝块状、絮凝状颗粒逐渐减少,碎屑颗粒逐渐增多,而黏-粉土集粒以及黏土集粒逐渐消失。孔隙逐渐由胶结孔隙转变为支架孔隙,且颗粒之间胶结变差,胶结方式逐渐以微胶结为主。浅表层微观结构逐渐由相对致密、稳定的组合形式转变为不稳定、易发生形变的形式。这是因为降雨入渗后,浅表层首先饱和,水分首先分布在颗粒接触处、黏粒集团内,由于该集粒孔隙小,黏粒多,因此水分的加入导致其面积或体积增大^[21]。试验中所用黄土的胶结物成分主要为黏粒,当水分接触到胶结物时,黏粒吸水膨胀、散化,降低颗粒之间的黏聚力。黏聚力的降低,改变了土体微观结构的均匀性,同时为降雨运移提供颗粒来源,进而促进土体疏松层的形成与发育。因此,胶结物的散化流失是疏松层形成的主要原因之一。

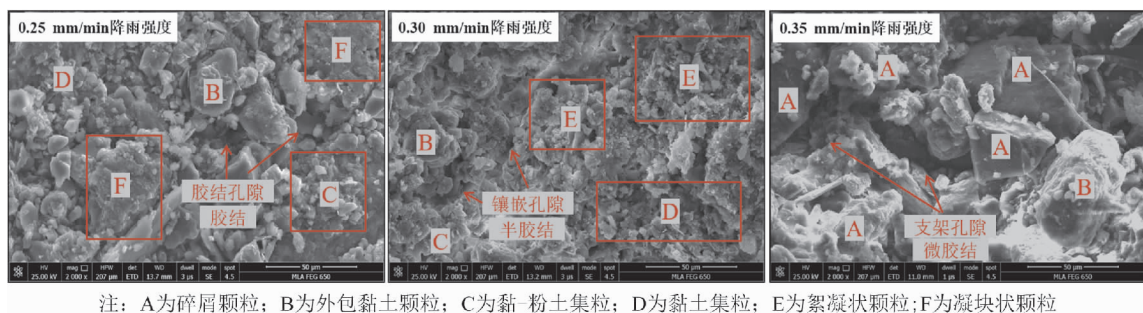


图12 不同降雨强度下的土体浅表层微观形貌

Fig. 12 Microscopic morphology of loose layer under different rainfall intensities

2.3.2 孔径变化特征

IPP软件是一款经过验证可用于土体微观结构分析的处理软件,研究表明当图像放大倍数为500~800X时,软件能较为全面地识别从微孔到大孔的孔隙^[22]。孔隙的识别是通过其count/size模块提取孔径和孔隙面积,从而用孔隙面积比来

代表某一孔径孔隙的分布情况。孔隙面积比指的是孔隙面积与图像总面积的比值。本文利用Image Pro Plus(IPP)6.0软件对土体表面的SEM图像进行处理(见图13)。孔径的分布主要参考雷祥义对黄土孔径的划分^[23]。

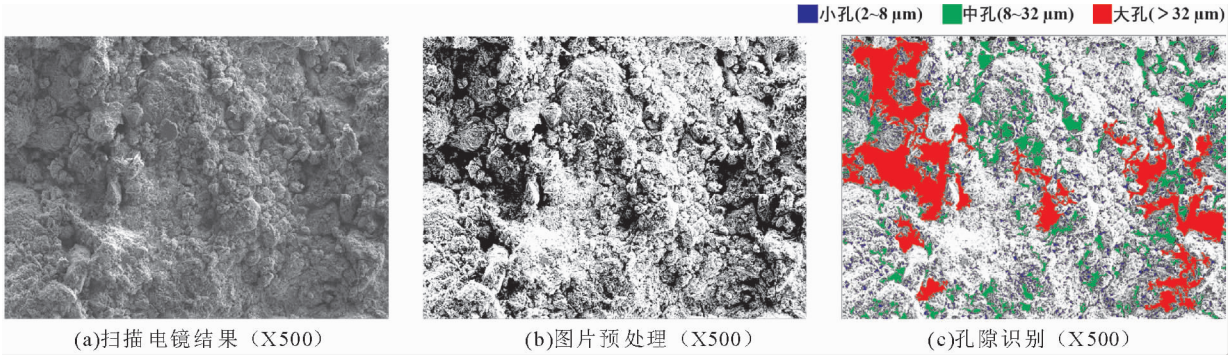


图 13 IPP 软件处理图像

Fig. 13 IPP software processes images

试验结果显示,随着降雨循环次数的累积,土体表面的孔隙结构发生了显著变化,具体表现为小孔与中孔的含量逐渐减少,而大孔的含量逐渐增多。且由图 14 可知,小孔与中孔含量减少的幅度随着降雨循环次数的增加而逐渐减弱,大孔含量的增加则逐渐趋于平缓。图 15 则揭示了降雨历时与浅表层孔径的相关关系,随着降雨历时的增加,孔径变化呈现出一定规律:小孔与中孔的含量减少,且减少的幅度逐渐减弱;大孔则呈现含量

逐渐增大的趋势,增大的幅度逐渐减小。且降雨历时对孔隙结构的改造作用具有普遍性。此外,随着降雨强度的增加,各类孔隙的分布有明显差异(见图 16)。小孔和中孔含量先减少后略有增加,但总体水平仍低于未降雨时的状态;大孔含量则依据降雨循环次数的不同而有所差异,如 5 次循环时大孔分布先增加后减少,15 次循环时大孔含量随着降雨强度增加而增加但增速减缓,而 25 次循环时大孔含量则几乎呈线性增长。

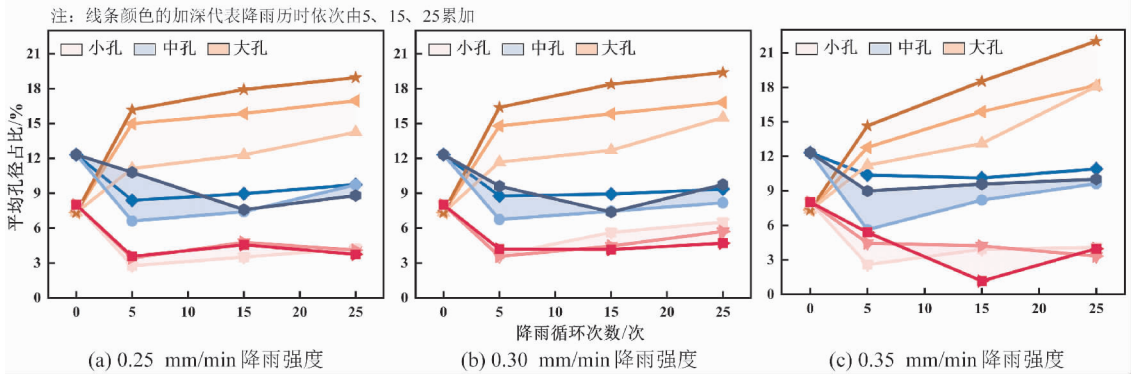


图 14 降雨循环次数与土体孔隙直径的关系图

Fig. 14 The relationship between the number of rainfall cycles and the pore diameter of soil

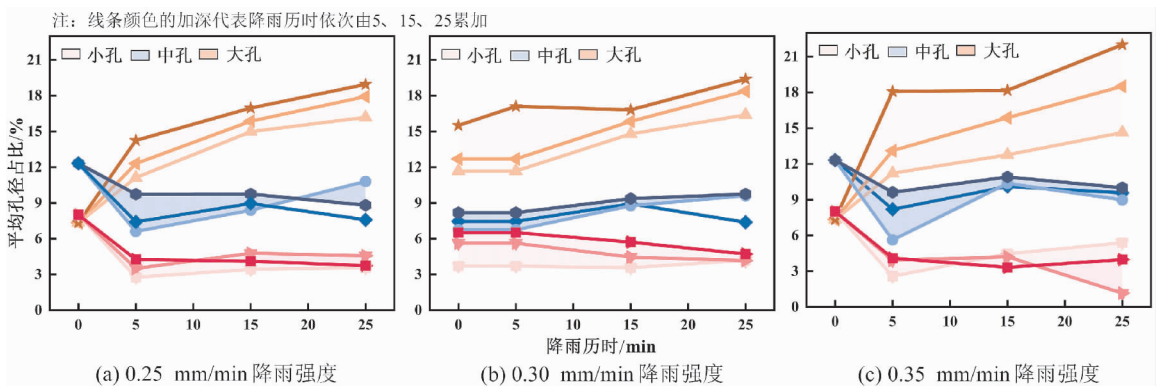


图 15 降雨历时与土体孔隙直径的关系图

Fig. 15 The relationship between rainfall duration and soil pore diameter

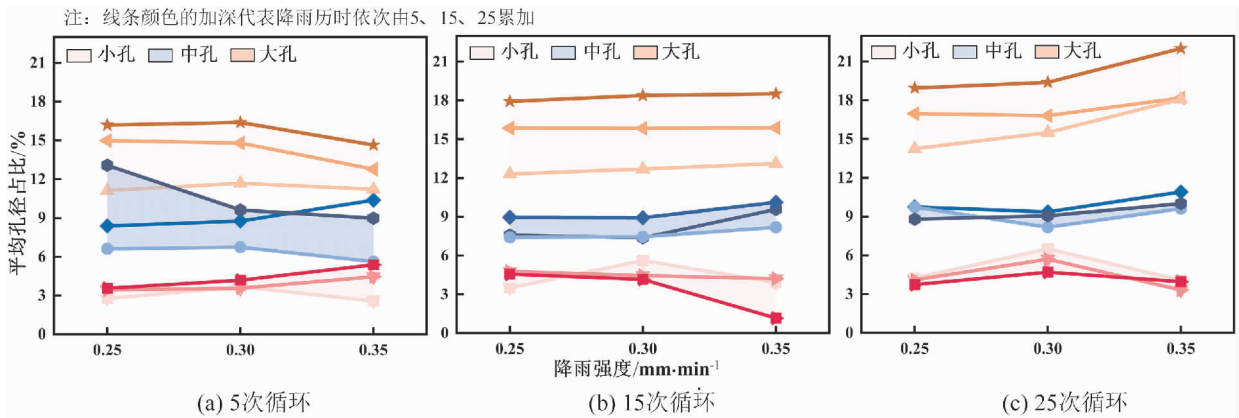


图16 降雨强度与土体孔隙直径的关系图

Fig. 16 The relationship between rainfall intensity and soil pore diameter

这一发现再次强调了降雨循环次数在疏松层孔隙演变中的关键作用,并指出随着降雨强度的提升,浅表层孔径分布逐渐倾向于以大孔为主导的形式,一定程度上代表疏松层的逐渐形成。总之,土体表面各类孔隙分布在不同降雨指标的影响下总体呈现小孔、中孔逐渐减少,大孔逐渐增加的特征,这标志着降雨淋滤作用下,逐渐形成了大孔($>32\ \mu\text{m}$)为主的疏松层微观特征。这一发现将为土遗址未来补强材料的粒径选择提供参考,使土遗址加固保护更具针对性与准确性。同时小雨条件下,降雨淋滤作用促进了孔隙间的连通性,使得孔径相对增大,为雨水的进一步下渗创造了有利条件,也为疏松层结构的形成提供了物理支架。而降雨指标主要通过影响孔隙分布的变化速率来发挥作用,其中,降雨-蒸发循环次数作为关键因素,其累积效应尤为显著。因此,在土遗址的预防性保护中,要格外注意对降雨频次进行监测,当降雨到一定阈值时应采取措施进行干预,以防土遗址在降雨的累积效应中结构疏松甚至崩塌。

3 结论

1) 降雨入渗后,浅表层土体迅速饱和,胶结物吸水膨胀、散化,颗粒之间胶结变差。同时在雨水的淋滤作用下,土体颗粒被携带下渗迁移,孔径相对增大。颗粒的迁移与孔隙结构的改变共同促进了疏松层的形成与发育。

2) 颗粒迁移量与各降雨因素呈正相关,即随着各降雨因素条件的累加,土样的颗粒迁移量增多。但迁移的颗粒粒径在不同降雨条件下有所差

异,如降雨历时主要促进粉粒($0.005\sim 0.075\ \text{mm}$)为主的迁移,降雨强度则对各类粒径的颗粒迁移均有促进作用。

3) 水入渗区域的土体孔径随着颗粒的迁移相对增大,总体呈现小孔、中孔逐渐减少,大孔逐渐增加的趋势,并最终形成以大孔($>32\ \mu\text{m}$)为主的孔径分布特征。

4) 疏松层的边界为湿润锋。湿润锋的位置仅在前几次降雨入渗表现出与累计次数的相关性,而降雨量才是其关键影响因素,二者呈对数增长关系。

参考文献

- [1] 武发思, 杜维波, 杨小菊, 等. 瓜州锁阳城遗址植物群落特征及与土遗址保护间关系[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(4): 667-677.
WU F S, DU W B, YANG X J, et al. Characteristics of plant community and its relationship with earthen heritage protection in Suoyang Ancient City, Guazhou [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(4): 667-677.
- [2] 孙满利, 窦子超. 中国土遗址保护研究进展与趋势: 基于文献的图谱量化分析[J]. 文物保护与考古科学, 2024, 36(4): 143-153.
SUN M L, DOU Z C. Research progress and trends in the conservation of earthen sites in China: Quantitative analysis based on literature [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2024, 36(4): 143-153.
- [3] 王常亚, 石玉成, 刘琨. 西北干旱、半干旱地区土遗址典型病害及其相关性研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(1): 220-227.

- WANG C Y, SHI Y C, LIU K. Typical diseases of earthen sites in arid and semi-arid regions of Northwest China and their correlation analysis[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2023, 45(1): 220-227.
- [4] 周双林. 土遗址防风化保护概况[J]. *中原文物*, 2003(6): 78-83.
- ZHOU S L. On the conservation against efflorescence of earthen sites[J]. *Cultural Relics of Central China*, 2003(6): 78-83.
- [5] DU Y M, CUI K, CHEN S Y, et al. Quantitative research on the development difference of scaling off on the sunward side and night side of earthen sites[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2022, 57: 107-117.
- [6] 崔凯, 张影会, 谌文武, 等. 干旱区夯土遗址表面剥离二元结构特征与形成机制[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(5): 647-654.
- CUI K, ZHANG Y H, CHEN W W, et al. Characteristics and formation mechanism of the binary structure in scaling off the surface of rammed earth ruins in arid areas[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 2019, 55(5): 647-654.
- [7] 毛筱霏, 赵冬, 张卫喜. 夯土墙体风蚀损化效应及加固保护试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 47(4): 555-559.
- MAO X F, ZHAO D, ZHANG W X. Experimental study on the effects of wind erosion and reinforcement for the rammed soil[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition)*, 2015, 47(4): 555-559.
- [8] 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.
- ZHANG H Y, YANG L, LIU P, et al. Study on thermal deterioration simulation test of superficial layer on rammed earthen ruins[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2018, 45(3): 149-156.
- [9] GEEVES G W. Aggregate breakdown and surface seal development influenced by rain intensity, slope gradient and soil particle size[J]. *Solid Earth*, 2015, 6(1): 311-321.
- [10] 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 H Y, LIU P, WANG J F, et al. Generation and detachment of surface crust on ancient earthen architectures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(7): 1883-1891.
- [11] 姚雪, 赵凡, 孙满利. 降雨对榆阳区明长城单体建筑模型破坏的量化研究[J]. *敦煌研究*, 2015(4): 127-135.
- YAO X, ZHAO F, SUN M L. A quantitative study of the destruction caused by rain to the Ming Dynasty Great Wall in Yuyang Borough[J]. *Dunhuang Research*, 2015(4): 127-135.
- [12] 程琴娟, 蔡强国, 李家永. 表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(4): 114-122.
- CHENG Q J, CAI Q G, LI J Y. Summarization on study of surface crust or sealing and its effects on erosion[J]. *Progress in Geography*, 2005, 24(4): 114-122.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 降水量等级: GB/T 28592—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [14] 荣冠, 张伟, 周创兵. 降雨入渗条件下边坡岩体饱和和非饱和渗流计算[J]. *岩土力学*, 2005, 26(10): 1545-1550.
- RONG G, ZHANG W, ZHOU C B. Numerical analysis of saturated-unsaturated seepage problem of rock slope under rainfall infiltration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005(10): 24-29.
- [15] 王建新, 王恩志, 王思敬. 降雨入渗条件下交河故城土质崖体渗流场计算及稳定性分析[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(3): 36-42.
- WANG J X, WANG E Z, WANG S J. Seepage calculation and stability analysis of the soil cliff under rainfall infiltration in ruins of Jiaohu[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(3): 36-42.
- [16] 沈云霞, 邓凯, 毛维佳. 一种用于土遗址雨蚀模拟试验装置: CN216117603U[P]. 2022-03-22.
- [17] 简文彬, 黄聰惠, 罗阳华, 等. 降雨入渗下非饱和坡残积土湿润锋运移试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(4): 1123-1133.
- JIAN W B, HUANG C H, LUO Y H, et al. Experimental study on wetting front migration induced by rainfall infiltration in unsaturated eluvial and residual soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1123-1133.
- [18] 古俊飞, 马海燕, 徐立荣, 等. 不同压力下新型地下灌水器流量及湿润锋变化[J]. *节水灌溉*, 2024(6): 35-39, 45.
- GU J F, MA H Y, XU L R, et al. Changes of flow rate and wetting front of new type underground irrigator under different pressure[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(6): 35-39, 45.
- [19] 任晓虎, 许强, 赵宽耀, 等. 反复入渗对重塑黄土渗透特性的影响[J]. *地质科技通报*, 2020, 39

(2): 130-138.

REN X H, XU Q, ZHAO K Y, et al. Effect of repeated infiltration on permeability characteristics of remolded loess[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(2): 130-138.

[20] 王博. 西安市刘家坡剖面黄土微观结构 SEM 与 XRD 图谱分析[D]. 西安: 长安大学, 2023.

[21] 魏亚妮. 水作用下黄土三维微结构演化及湿陷机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.

[22] 徐盼盼, 张奇莹, 钱会, 等. 基于 SEM 多级化孔隙特征研究: 以重塑黄土为例[J]. *工程地质学报*,

2023, 31(6): 1799-1810.

XU P P, ZHANG Q Y, QIAN H, et al. SEM-based multi-level pore characteristics; A case study of remolded loess[J]. *Journal of Engineering*, 2023, 31(6): 1799-1810.

[23] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. *中国科学*, 1987, 17(12): 1309-1318.

LEI X Y. Pore types and collapsibility of loess in China[J]. *Scientia Sinica*, 1987, 17(12): 1309-1318.

(编辑 李波)