

往返渗流与干湿循环诱发土壤结构损伤的协同效应分析

陈勇^{1,2}, 夏雨², 闵泽鑫², 夏振尧^{1,2}, 王世梅^{1,2}

(1. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 宜昌 443002)

摘要: 库水位周期涨落会促使消落带土壤经历往返渗流和干湿循环作用, 潜蚀和干裂诱发的土壤结构损伤是三峡库区水土流失的关键诱因。为探究潜蚀和干裂的演化进程和协同效应, 采用自主研制的模拟试验系统, 针对不良级配土壤, 分别完成多周期的往返渗流与干湿循环的单独作用及二者交替联合作用, 监测土壤内细颗粒流失规律和表层裂隙发育进程。结果表明: 往返渗流单独作用下壤中潜蚀通道发展呈现随机性和持续性, 干湿循环单独作用下壤表裂隙发育具有记忆性和缓增性, 壤中细颗粒流失率和壤表裂隙率均表现为随周期次数而增多并逐渐趋稳; 二者交替联合作用下, 壤中潜蚀会形成渗流孔洞, 并破坏土壤连续性, 同时增加表层细粒含量, 进而导致裂隙发育加剧; 壤表开裂也会加速细颗粒从土中剥离, 并增大优势通道的扩展, 从而提高随后试验周期的颗粒流失率; 经历5个周期联合作用下的颗粒累积流失率比往返渗流单独作用高116.67%、壤表裂隙率比干湿循环单独作用高73.33%, 对土壤结构损伤具有显著的协同加剧效应。研究成果对加深消落带土壤结构损伤机制的认知、揭示水土流失和岸线后退演化规律具有重要的参考价值。

关键词: 水土流失; 往返渗流; 干湿循环; 颗粒流失率; 裂隙率; 结构损伤

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408066

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-05-0057-11

陈勇, 夏雨, 闵泽鑫, 等. 往返渗流与干湿循环诱发土壤结构损伤的协同效应分析[J]. 农业工程学报, 2025, 41(5): 57-67. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408066 <http://www.tcsae.org>

CHEN Yong, XIA Yu, MIN Zexin, et al. Analysis on soil structural damage induced by synergistic effects of upward-downward seepage and drying-wetting cycle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(5): 57-67. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408066 <http://www.tcsae.org>

0 引言

三峡库区是全国水土流失的重点关注区域, 水土流失面积占区域总面积的32.81%, 位居国家级水土流失重点治理区的首位^[1]。落差30 m的库岸消落带为水土流失的最强烈区, 降雨冲刷和波浪侵蚀是以往研究中关注的重点诱因^[2-3]。然而, 库水位周期涨落诱发的地下水往返渗流和消落带干湿循环, 导致土壤结构损伤以及岸坡重力侵蚀和水土流失加剧的问题, 尚未引起重视。

地下水渗流导致土体潜蚀的研究, 早期多集中在土石坝和堤防等工程^[4-5], 随后逐渐向堰塞坝、堆积层边坡、深厚覆盖层等不良级配地质体方面扩展^[6-8]。探索发现自身结构不稳定土的潜蚀条件是细颗粒尺寸明显小于粗颗粒骨架内的空隙且渗透水流足以带动细颗粒, 从而引发土的孔隙分布规律被改变、连通性变好、孔隙比增大、结构性被破坏并出现颗粒重新排列^[9-12], 进而导致土的物理力学性质、植生性能、持水能力、渗透系数等呈现复杂的变化特征^[13-16]。然而, 上述研究中土壤全过程均处于饱和状态, 并未考虑库水位涨落过程中消落带土壤经历的干湿循环。

干湿循环也会导致土壤的孔隙分布和物理力学性能产生不可逆的变化。从内在本质上看, 干湿循环作用会引起土壤团聚体变形、裂隙发育、非弹性胀缩变形、大孔隙增多, 从而诱发土壤孔隙结构呈现明显损伤, 且对细粒土壤的影响尤为明显^[17-20]; 从外在表征上看, 裂隙发育和结构疏松必然导致土体渗透特性、持水性能、抗剪强度、弹性模量、应力应变关系等均发生不可逆变化, 且在第一次干湿循环后变化幅度最大、在4~5次循环后趋于稳定, 主要原因是土体新裂隙发育逐渐减少、孔隙结构不再发生显著变化^[21-24]。然而, 以往的干湿循环研究中土壤湿化阶段的水压力较小, 不能反映库水位骤降形成的水力梯度对壤中细颗粒流失和孔隙结构的影响。

对于库岸消落带, 库水位上升时库水向内渗入坡体, 土壤处于饱和状态, 库水位下降时岸坡地下水向外渗流会引发土中细颗粒迁移和流失, 土壤露出水面, 经历风吹日晒逐渐干化开裂; 且库水位涨落具有周期性, 消落带土壤被迫经历周期往返渗流和反复干湿循环的交替联合作用, 土壤的结构损伤和性能劣化势必明显加剧。

基于潜蚀与干裂对土体结构损伤的作用机制和外在表征分析, 不难发现两者可能存在相互关联和协同加剧作用。本文针对三峡库区岸坡的不良级配土, 采用自主研制的往返渗流与干湿循环联合模拟试验装置, 设置了往返渗流单独作用、干湿循环单独作用、二者交替联合作用3种试验条件, 分别完成多个周期过程, 并探究细颗粒流失和裂隙发育随作用周期的演化规律, 分析壤表

收稿日期: 2024-08-08 修订日期: 2024-12-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42272317); 国家自然科学基金区域发展联合基金重点项目(U21A2031)

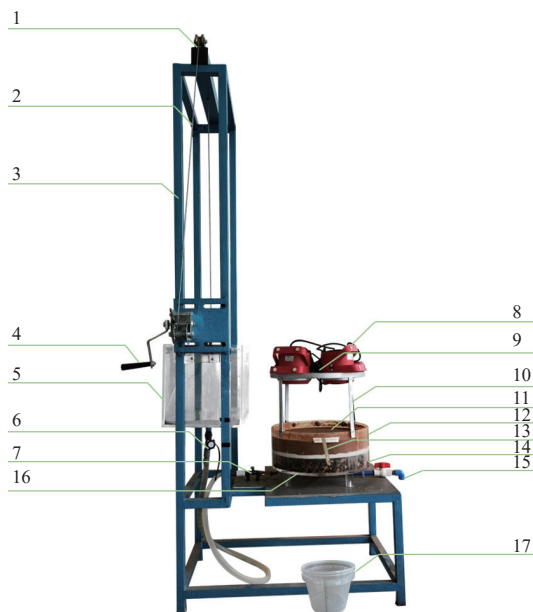
作者简介: 陈勇, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为土-水耦合作用机制及岩土体稳定性评价。Email: cyonger@126.com

干裂对渗流潜蚀的影响、壤中潜蚀对干缩开裂的影响,并总结阐述潜蚀与干裂对土壤结构损伤的协同加剧效应,旨在揭示库水位周期涨落对消落带土壤性能劣化的作用机制,为三峡库区水土流失防治和生态治理提供重要的理论支撑。

1 试验装置及试验方案

1.1 试验装置及流程

根据研究目的,自主研制了往返渗流与干湿循环联合模拟试验系统,如图1所示。



1. 滑轮 2. 钢索 3. 支撑框架 4. 控制手轮 5. 水箱 6. 流量计 7. 进水阀 8. 暖风机 9. 高清摄像头 10. 支撑架 11. 土样 12. 渗流腔室 13. 溢流口 14. 砾石层 15. 排水口 16. 滤网与进水器 17. 收集桶
1. Pulley 2. Steel cable 3. Support frame 4. Control handwheel 5. Water tank 6. Flowmeter 7. Intake valve 8. Unit heater 9. High-definition camera 10. Support frame 11. Soil sample 12. Seepage chamber 13. Overflow port 14. Gravel buffer layer 15. Waterspout 16. Filter screen and annular water inlet 17. Collection barrel

图1 试验装置

Fig.1 Experimental device

该试验装置核心部分包括:

1) 上游供水模块: 一个可上下移动的自溢流水箱(400 mm × 300 mm × 400 mm), 通过滑轮升降来调节水力梯度。箱底有出水管与渗透腔室相连, 管段设有流量计。

2) 土样潜蚀模块: 核心为亚克力材质的渗透腔室(直径 420 mm, 高 160 mm, 壁厚 10 mm), 底部配备环形进水器及排水口, 顶部设有冲水系统和水流溢出口。腔室内铺设 50 mm 厚的 5 mm 粒径碎石层以保证水流均匀, 其上覆盖 0.5 mm 孔径的金属滤网, 以维护土样底部平整并防止细颗粒下漏, 滤网周边以玻璃胶密封, 避免侧壁渗漏; 滤网上方为试验土样装填区域。

3) 颗粒收集部分: 土表设置的冲水系统可使溢出的细颗粒随水流进入溢流口, 其下方配备带刻度的透明桶, 用于收集和计量渗出的“颗粒-水”混合物。

4) 热力循环部分: 由 4 个暖风机和支架组成, 调整

支架高度后安装于渗透腔室上方, 能将土表温度稳定在(50±1.5)℃, 确保土样受热均匀, 并接近实际的热力条件^[25]。

5) 数据采集部分: 包括数显流量计和高清摄像头。流量计位于进水阀门后, 监测进水流量; 摄像头安装于暖风机支撑架中心, 记录壤表孔洞和裂隙的发展。

该试验装置可实现的功能包括:

a 土样饱和: 适当提升水箱水位, 通过水头差使水逐渐进入土样, 直至壤表被水层完全覆盖, 并静置一段时间直至土样饱和。

b 向上渗流潜蚀: 土样饱和后, 抬高水箱直至土样表面可见细颗粒溢出, 并保持水箱高度不变, 同时收集土中流失的细颗粒, 当观察到收集的水流非常清澈时, 认为无细颗粒随之流出, 关闭进水阀。

c 向下自由排水: 开启底部排水阀, 土中水向下自由排出直至腔室水不再排空。由于向下的水力梯度较小, 且土样底部设有滤网, 认为细颗粒仅在土样内部迁移, 可忽略流入碎石层的损失量。

d 土样干化: 土中自由水排完后, 启动热力循环系统, 用高清摄像头拍摄每 30 min 壤表裂隙的发展情况, 对所得图像进行图像识别处理以获取裂隙信息, 确定最佳干燥时间, 完成试样的干化过程。

1.2 控制变量及监测手段

1) 最少饱和时间

缓慢抬升水箱高度实现水力梯度变化, 当土样逐渐被水层覆盖且未见壤表隆起或侧壁有颗粒运移现象时, 保持该水力梯度不变使壤表水层形成, 每间隔 2 h 在壤表取 3 组土样置于烘干箱内烘干测得其含水率, 直至连续 3 次测得含水率值不再变化后, 确定达到该含水率所对应时间为最少饱和时间。

2) 向上渗流临界水力梯度

为保证壤表不会因较高水力梯度的突然增大而出现破坏, 设定水力梯度增量为 $\Delta i = 0.1$, 并以 30 min 为周期转动控制手轮以提升水箱高度, 从而实现水箱水位变化。当观察到壤表逐渐出现孔洞且细颗粒集中流失时, 该水力梯度被定义为临界水力梯度 i_{cr} 。

3) 向下自由渗流的水力梯度

因土样与碎石层的渗透性能差异较大, 水从碎石层底部流出对土样具有负压排水效果^[26-27], 根据碎石层与土样的高度并结合流体连续原理, 可确定向下自由排水的最大水力梯度。

4) 细颗粒流失率

将多个收集桶中的含细颗粒流体静置, 并烘干后称量每次向上渗流时的细颗粒流失质量, 细颗粒流失率 μ_e 按式(1)进行计算。

$$\mu_e = \frac{m_f^e}{m_f} \times 100\% \quad (1)$$

式中 m_f^e 是流失颗粒的质量, g; m_f 是细颗粒的总质量, g。

5) 壤表裂隙率与稳定干燥时间

以图像识别技术获取裂隙信息, 获取方式如图2所

示。将拍摄的高清图像导入图像处理软件进行二值化处理，然后导入图像识别与分析软件（ImageJ）去除噪点并提取裂隙，随后进行裂隙分析与统计。裂隙率通过式

（2）进行计算。当壤表裂隙率在连续 3 次测量中趋于稳定，且误差控制在±2% 以内时，该热力循环的持续时间被确定为稳定干燥时间。

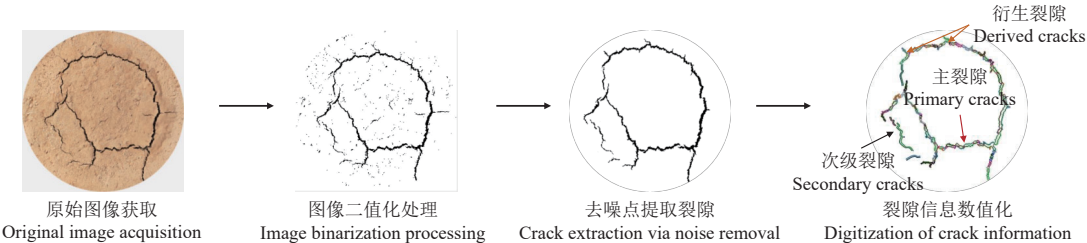


图 2 裂隙信息获取方法
Fig.2 Method of obtaining crack information

$$R = \frac{A_1}{A_0} \times 100\%$$
 (2)

式中 R 为壤表裂隙率，%； A_1 为计算区域裂隙所占总面积， mm^2 ； A_0 为计算区域总面积， mm^2 。其中，面积大小是通过将图像像素与实际长度的比例进行换算，从而得出裂隙的实际长度、宽度等具体数值来确定的。

图 2 中，不同类型裂隙按如下定义：主裂隙为长度大于试样半径且具有壤表贯通趋势的裂隙；次级裂隙的长度小于试样半径且独立于主裂隙；衍生裂隙为主裂隙或次级裂隙发展中向周边扩展的微小延伸段。

1.3 试验材料及试验方案

1.3.1 试验材料

试验土样采自三峡库区秭归段某库岸边坡，根据原状土样的天然孔隙比及干密度，考虑土壤内部稳定性标准并重塑土样，按粒径组（间断级配）<0.075、0.25~0.50、>0.50~1、>1~2、>2~5 mm 分别确定粒组含量，得到级配曲线如图 3 所示，并将粒径小于 0.075 mm 颗粒划分为细粒组，粒径大于 0.075 mm 颗粒划分为粗粒组。土样基本物性参数按照《土工试验方法标准》（GB/T50123-2019）确定，并按相应要求进行重复试验。测得土样的比重为 2.69，干密度为 1.68 g/cm³，饱和含水率为 16.55%，孔隙比为 0.60。根据 KEZDI^[28] 及 BURENKOVA^[29] 提出的土壤内部稳定性几何判定标准，试验土样为内部不稳定土，易发生潜蚀破坏。

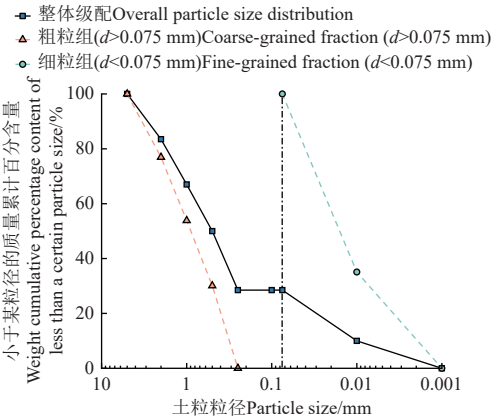


图 3 重塑土样的颗粒级配曲线

Fig.3 Particle size distributions of remodeled soil sample

为保证土样均匀性，采用 LADD^[30] 提出的欠压实技术，制备了直径 400 mm、高 80 mm 的圆盘状土样，土样顶部与溢流口底部平齐。按前述的监测手段进行两次重复试验，最大允许平行差值为±5%，参数值取两次重复试验结果的算数平均值，取整后得到该土样对应的试验控制参数如下：最小饱和时间为 24 h，向上临界水力梯度为 0.8，向下自排水力梯度约为 0.2，自排稳定时间约为 10 min，干燥稳定时间约 15 h。

1.3.2 试验方案

试验条件主要包括多个周期的往返渗流、干湿循环分别单独作用以及两者的交替联合作用。已有研究发现，各类型土样在经历 5 次干湿循环后，土体表观裂隙特征基本趋于稳定^[19-22]。为对比不同试验条件的影响程度，本文将各试验的循环次数均设置为 5 次。结合本设备的功能，采用如表 1 的方案，以分析潜蚀与干裂的协同效应。

表 1 试验方案

Table 1 Testing schedule

控制条件 Controlling conditions	试验步骤 Test procedure	循环次数 Number of cycles
往返渗流 Upward-downward seepage (UDS)	a→b→c→a	5
干湿循环 Drying-wetting cycle (DWC)	a→d→a	5
二者交替联合作用 Two alternately combined effect (TACE)	a→b→c→d→a	5

注：a 为土样饱和；b 为向上渗流潜蚀；c 为向下自由排水；d 为土样干化；为该试验装置的 4 个功能。

Note: a is saturated soil sample; b is upward seepage suffusion; c is free downward drainage; d is the drying of the soil sample, they are four functions of the experimental device.

1) 往返渗流试验：先饱和土样，再逐步将水力梯度提升至 0.8，潜蚀逐渐发生，并拍摄土样表面渗流孔洞的发展形态。当观察到收集筒内不再有细颗粒流入时，关闭进水阀并开启排水阀，以排出壤表和内部的自由水，完成一次往返渗流。排水结束后，关闭排水阀并重新对土样进行饱和处理，以开始下一个周期的试验。每个周期收集的含细颗粒的混合物在静置 12 h 后进行烘干处理，以测定往返渗流条件下的细颗粒流失率。待 5 个循环过程完成后，将腔室剩余的土样分为上下层，分别进行筛分，并通过级配对比来评估细颗粒的运移程度。

2) 干湿循环试验：在土样饱和后启动热力循环系统，

开始干化过程,并连续拍摄土样表面的裂隙发育形态,达到最佳干燥时间后关闭热力系统,并等待土样温度恢复至室内温度,随后再次进行饱和和处理,以完成一次干湿循环。重复上述步骤以实现多个周期的试验,且对每个周期干化后土样的表观裂隙特征及其发展情况进行统计,并计算表观裂隙率,以量化裂隙的演化过程。

3) 往返渗流与干湿循环交替联合试验:在完成第一循环周期的往返渗流试验后启动热力循环系统开展干湿循环试验,试验周期以土样温度恢复至室内温度为终点。试验监测的指标遵循 2) 和 3) 中的描述。

2 试验结果与分析

基于 UDS、DWC 和 TACE 试验结果,将后者分别与前两者对比,分析壤表开裂与渗流潜蚀的相互影响。

2.1 壤表开裂对渗流潜蚀的影响

在往返渗流的周期间歇中增加干湿循环作用,势必影响潜蚀的发育,分别从土表孔洞发展和颗粒流失量化两个方面进行对比分析。

2.1.1 潜蚀孔洞发展形态的对比

UDS 和 TACE 两种试验条件下,土样分别经历 5 个周期作用后,壤表孔洞的发展过程,如图 4 所示。

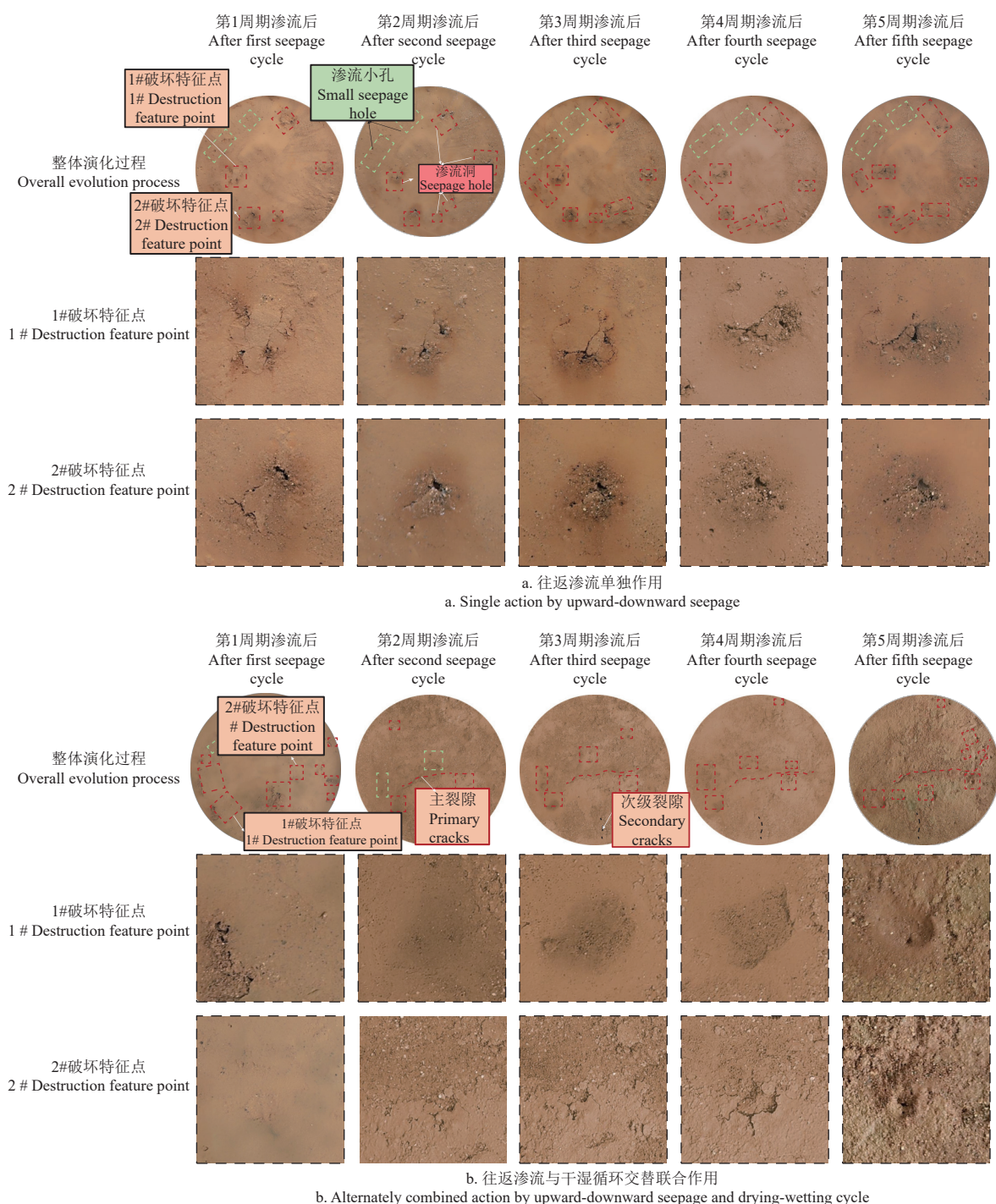


图 4 不同控制条件对壤表及区域形态影响的对比分析

Fig.4 Comparative analysis about the influence of different control conditions on the surface and regional morphology of soil samples

在往返渗流单独作用下，潜蚀孔洞的发展过程如下（图4a）：1）首次向上渗流时，土中细粒克服自身重力、粒间摩擦力和吸引力，发生了位置变化并随水流迁移；而随着细粒逐渐被侵蚀，颗粒间孔隙增大、局部渗透性提高，反映在土样宏观物理性质上即为局部孔隙率和渗透系数增大，进而诱发更多的细粒沿该路径运移，优势通道逐渐形成^[31-32]。受颗粒分布和孔隙结构的影响，壤表分布大量渗流小孔（如图4a）和直径更大的渗流洞（如图4a），溢出点形态呈现多样性且位置呈现随机性。由于壤表处的水力梯度较小且表面并非完全光滑，溢出的细颗粒一部分呈散射状淤积于渗流孔洞附近且向外缘递减，另一部分随水流运动到溢流口后进入细颗粒收集筒，直至不再有细颗粒流失，结束向上渗流后再完成向下排水。2）在第二和第三个试验周期，潜蚀现象再次出现，壤表渗流小孔有所减少，渗流洞愈发明显，并不断破碎洞口周边土团，且由于原有优势通道的存在，渗流孔洞再次出现位置与第一周期基本相同；潜蚀持续发生的现象说明经历向下渗流过程后，壤表孔洞周边的少量细粒会随表层水流进入优势通道，壤内原本堵塞或沉积的细颗粒也会被向下运动的水流冲开或推移，并在后续向上渗流作用下再次发生迁移和流失。如此多次往返，土壤呈现出明显的水力“反复淘洗”特征，潜蚀进程得以延续。3）在经历5个周期后，渗流破坏点位置基本固定，形态趋于稳定，且以渗流洞为主，洞口细颗粒迁移现象不再明显，收集的细粒流失量减小。说明随试验周期的增加，优势渗流通道的存在导致渗透水流主要从孔洞中涌出，土样整体不再承受与潜蚀发生前相同的水压力，限制了潜蚀发展的持久性和全面性。

在往返渗流与干湿循环二者交替联合作用下，壤表的破坏形态与渗流单独作用相比存在明显差异（图4b），主要表现为：1）首次渗流作用时，由于试验控制条件与往返渗流单独作用一致，渗流潜蚀点的形态与分布密度与其基本形似，随后的干化作用会促使壤表裂隙发育。2）第二和第三试验周期内，壤表渗流孔洞位置发生显著变化，主要沿第一次干化形成的裂隙周边密集分布，且裂隙周边细颗粒堆积愈发明显。其原因是干化裂隙的尺寸和面积远大于首次渗流形成的孔洞，即使湿化过程中裂隙出现部分愈合，土样内部损伤依然存在，为随后周期的渗流提供了新的优势通道。3）经历5个试验周期后，多数渗流孔洞形态趋于稳定，并集中分布于主裂隙痕迹遗留处；土表沉积的细颗粒增多，但颗粒堆积现象逐渐过渡为向四周扩散分布。这说明裂隙优势通道的存在导致整体的渗透系数增大，溢出流量增大会促使土表细颗粒重分布。

综合对比表明，不同试验控制条件下的多周期渗流破坏形态存在显著差异：往返渗流多次作用，相比以往的单向渗流，相同之处在于潜蚀的发生与发展具有一定的随机性^[12,33]，不同之处在于前者具有持续性，尽管随着周期增加，渗流孔洞的位置不再改变，潜蚀程度逐渐趋缓，但孔洞的扩大对土壤结构的损伤程度仍较后者更

明显。往返渗流与干湿循环交替联合作用下，壤表的干化裂隙改变了渗流孔洞发生的位置、增大了优势通道的尺寸，对渗流潜蚀的发展进程和壤表细颗粒的分布形态产生了不可逆的影响。

2.1.2 颗粒运移程度的量化分析

细颗粒流失率以及渗流前后的级配变化是评估土样潜蚀程度以及分析颗粒运移规律的两个重要量化指标。各控制条件下颗粒运移和流失的量化对比如图5所示。

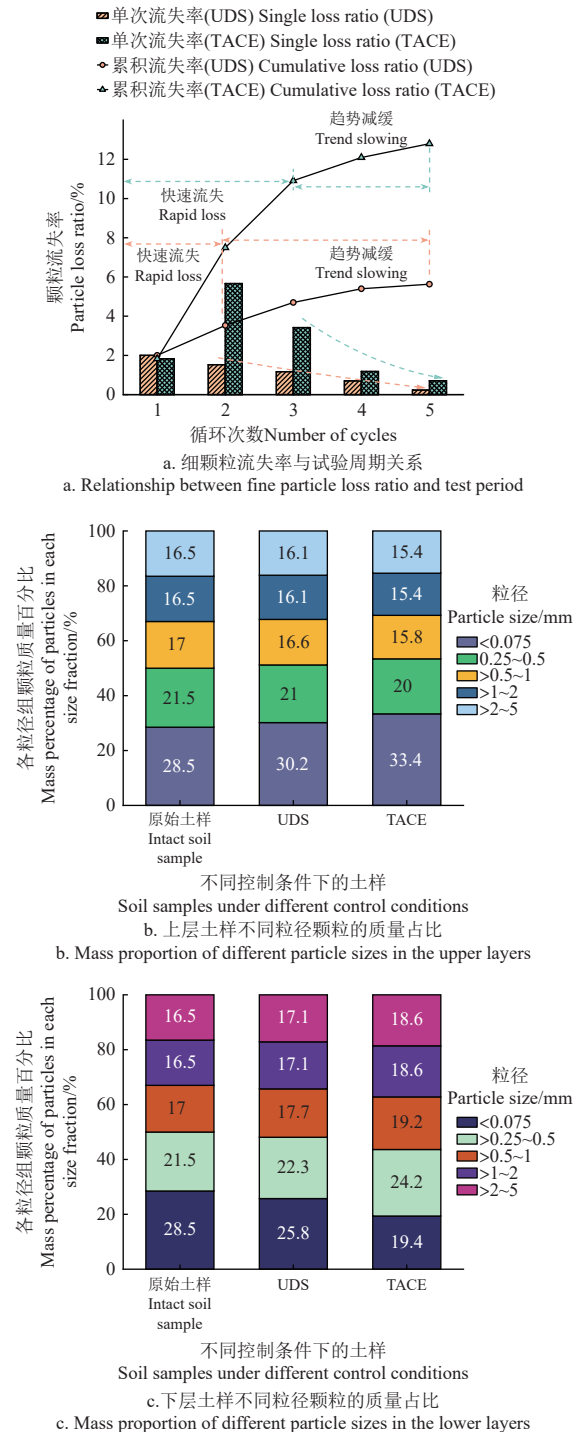


图5 不同控制条件下颗粒流失和运移的量化
Fig.5 Quantification on particle loss and transport under different control conditions

由图5a可知：在往返渗流单独作用下，颗粒流失率

在第一周期约为 2%，并随周期次数的增加而逐次递减，累积流失率则相应的逐渐趋于稳定，达到约 6%。而往返渗流与干湿循环交替联合作用下，第一周期的颗粒流失率基本相同，随后的干湿循环导致土表裂隙发育，充当了第二周期的优势渗流通道，促进了潜蚀发展，单次颗粒流失率增大到约 6%，颗粒流失现象更加显著，并在随后的周期作用下逐渐递减，但每个周期的流失率均大于往返渗流单独作用。土样经历 5 个循环周期的交替联合作用后，累积颗粒流失率达到约 13%，比往返渗流单独作用高出约 116.67%，说明交替联合作用加剧了土中细颗粒的流失和土壤的结构损伤。

在渗流潜蚀过程中，除了部分细颗粒从优势通道中溢出并流失以外，土样内部必然存在强烈的细颗粒运移现象。因内部迁移不易被直接观测，本研究对经历 5 个周期作用后的土样进行分层取样和颗粒级配分析，得到不同控制条件下不同土层的各粒径颗粒质量百分比，以深入分析颗粒运移规律和土壤损伤程度，如图 5b 与图 5c 所示。

对于上层土样，由于潜蚀主要发生在向上渗流过程

中，土样下层中的细颗粒在水力作用下部分向上运移，导致上层中细粒含量增大，而粗粒的质量占比相应减小。往返渗流单独作用使上层细粒含量由原始的 28.5% 增大到 30.2%，交替联合作用使该值增大到 33.4%，增幅更大的主要原因还是干化裂隙的存在导致渗流通道的扩展和颗粒运移的增加。相反的，下层土样的细粒含量减小，而粗粒的占比相应会增大。且下层细粒含量的降幅大于上层细颗粒含量的增幅，说明有部分细粒发生流失。

2.2 渗流潜蚀对壤表开裂的影响

土样在干燥过程中，结构的不均匀性会使“薄弱点”受到较为集中的张拉应力，导致壤表裂隙产生和发育；裂隙张开后裸露出的侧壁会加速该区域水分蒸发，促使裂隙进一步扩展和新生裂隙出现。渗流潜蚀导致细颗粒迁移或流失且部分沉积至土表，会改变土壤内部结构和土表细粒含量，进而影响裂隙的发育特征。

2.2.1 裂隙形态的演化过程

不同控制条件下，各试验周期壤表裂隙的演化过程如图 6 所示。



图 6 不同控制条件下裂隙演化过程

Fig.6 Evolution process of cracks under different control conditions

由图可知，在两种控制条件下，裂隙形态的发生发展过程有显著差异。干湿循环单独作用下的裂隙演化过程如图 6a 所示，主要呈现如下规律：1) 首个试验周期内，随着暖风作用时间的增长，土样表面逐渐脱水，并导致主裂隙的扩展和次级裂隙的产生，随后主次裂隙均逐渐增宽和延伸，最终形成相对稳定且集中的裂隙，土样被明显切割，且裂隙中部较宽而两端较细，主裂隙尾部会伴随出现分叉的衍生裂隙。裂隙稳定后，自下而上的缓慢渗流使土样逐渐饱和，裂隙表面逐渐闭合，并残留凹型痕迹，说明湿化会导致基质吸力和粒间吸附力减少，裂隙侧壁自稳能力降低而坍塌、逐渐被土颗粒松散充填。2) 在第二次干化阶段，主次裂隙均沿原凹型痕迹处发育，开口处由垂直变为圆角，呈现明显的记忆性，说明第一次湿化时闭合的裂隙为“假性愈合”；且裂隙的连

通性增强，宽度略有增大。3) 随后周期的干湿循环作用下，裂隙的演化规律延续第二周期的表现，均呈现为“记忆性开裂”和“假性愈合”，而主次裂隙周边凹陷区域扩张，开口钝化更加明显，裂隙宽度呈缓增特征并逐渐趋于稳定。

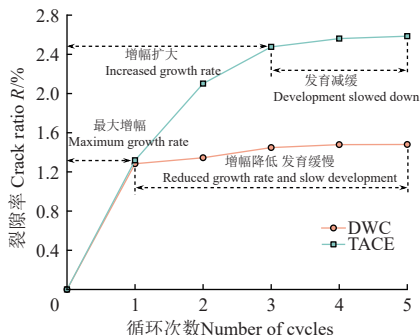
往返渗流与干湿循环交替作用下的裂隙演化过程如图 6b 所示，主要规律如下：1) 首个试验周期内，裂隙的分布和形态与干湿循环单独作用时有显著差异。联合图 5b、图 5c 和图 6b，经历渗流潜蚀后，壤表细颗粒的淤积程度增加，干化作用使主裂隙沿细颗粒较多区域发育并扩展，次级裂隙和衍生裂隙数量增多，连通性差，分布较杂乱，说明裂隙发育与壤表细颗粒分布的均匀程度密切相关；主裂隙长度和宽度均比干湿循环单独作用时更小，因此湿化时裂隙假性愈合残留的凹型痕迹并不

明显。2) 进入第二、三周期后, 由于渗流潜蚀的颗粒运移主要沿裂隙通道发生, 土表细颗粒进一步增多, 导致干化作用下的裂隙发育更加明显, 主次裂缝进一步延伸和扩宽, 部分次级裂隙逐渐连通, 而且裂隙的发育位置仍具有明显的记忆性; 同时, 由于不断有细颗粒迁移并沉积到土表, 裂隙开口处未见钝化现象。3) 经历5个周期的交替联合作用后, 土表裂隙发育基本稳定, 在土表四周均有分布, 对土体的完整性破坏严重。

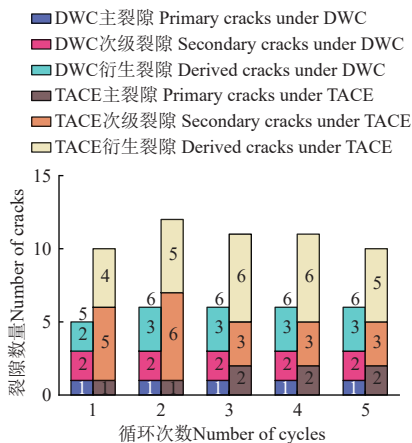
总的来说, 干湿循环单独作用下, 裂隙的演化过程主要体现在新裂隙在旧裂隙处的发生, 并伴随着宽度的缓慢增大和开口的逐渐钝化, 在第二个周期即明显趋缓, 裂隙发育具有较强的记忆性和缓增性; 往返渗流与干湿循环交替联合作用下, 裂隙发育呈现一定的记忆性, 也受到潜蚀过程中细颗粒迁移和沉积的显著影响, 裂隙的连通性以及新生率随周期次数而增强, 在第四个周期才逐渐趋缓, 分布区域和数量比干湿循环单独作用更多, 说明联合作用在时间和空间上都加剧了土壤表层的裂隙发育和整体的结构损伤。

2.2.2 裂隙发育程度的量化

壤表裂隙率及各类裂隙数量随周期次数的变化趋势如图7所示。



a. 裂隙率与试验周期关系
a. Relationship between crack ratio and test periods



b. 主裂隙、次级裂隙及衍生裂隙与试验周期关系
b. Relationship between primary, secondary, derived cracks and test periods

图7 裂隙发育变化趋势

Fig.7 Variation trend of crack development

由图7a可知, 干湿循环、往返渗流与干湿循环交替联合的试验条件下裂隙发育均分为快速增大和增幅趋缓两个阶段, 且在首次干化作用时裂隙率增幅最大, 但在

后续周期作用下曲线发展规律明显不同: 1) 干湿循环单独作用下, 从第二周期开始裂隙率增速明显趋缓, 而交替联合作用下, 第二、三周期的裂隙率仍有较大增速, 至第四周期才开始趋缓, 这与观察的表观形态演化是相符的。2) 两种控制条件下, 裂隙率稳定后的峰值分别约为1.5%和2.6%, 交替联合作用比干湿循环单独作用高约73.33%, 凸显了渗流潜蚀对壤表开裂程度的显著影响。

两种控制条件下, 主裂隙、次级裂隙及衍生裂隙的数量发展如图7b所示, 也存在显著差异: 1) 干湿循环单独作用下, 裂隙总数随作用周期并没有明显增长。而在交替联合作用下, 次级裂隙和衍生裂隙的数量在前两周期逐渐增加; 随后三条次级裂隙在第三次干化阶段连通并形成主裂隙, 主裂隙数量由一条增加为两条, 主要归因于迁移至壤表的细颗粒增多导致次级裂隙不断延伸直至连通。2) 经历5个作用周期后, 交替联合作用下的各类裂隙的总数量均高于单独作用, 再次佐证了渗流潜蚀对壤表裂隙形态和分布规律的显著影响。

3 土体结构损伤机制分析

总结上述试验结果可发现, 初始状态相同的土样在经历了往返渗流、干湿循环的分别单独作用及二者交替联合作用后, 颗粒迁移的随机性和持续性以及裂隙发育的记忆性和缓增性, 在不同控制条件下的表现特征具有显著差异。同时, 潜蚀阶段的颗粒流失和干化阶段的裂隙发育, 都导致了土样不同形式的结构变化, 而且两种形式的结构损伤之间也存在相互影响, 相关演化过程如图8所示。

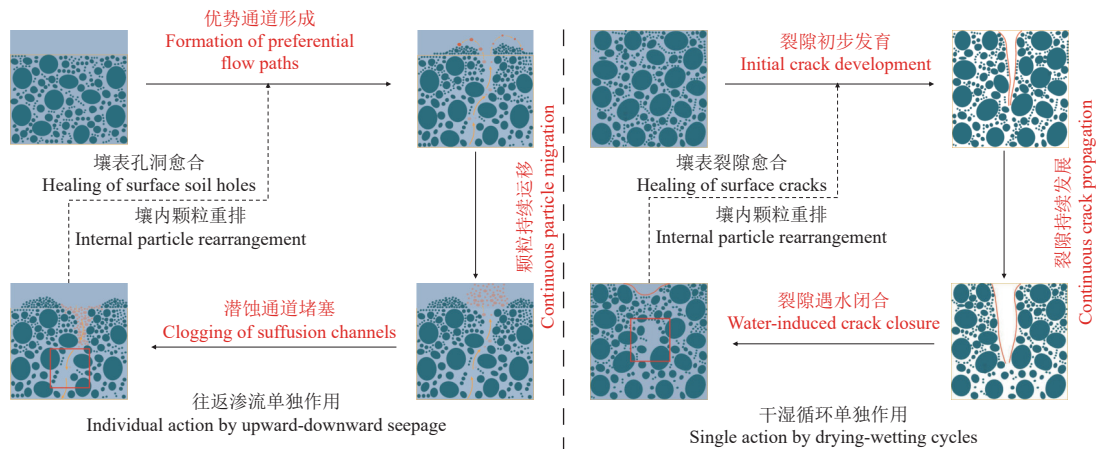
在往返渗流单独作用下, 向上渗透力导致土内细粒随优势通道向外迁移, 部分淤积在壤表, 部分随水流运移至收集筒。在多处优势通道形成后, 渗透水压从通道消散, 通道沿线的细粒脱离并从渗出口流失, 潜蚀进程趋于稳定, 这也是以往研究中认为并非所有细粒都发生运移流失的主要原因^[12,32,34]。而向下渗流会导致土壤内部尤其是优势通道内的细粒重分布, 形成新的悬浮于水中的自由颗粒^[35]。

在干湿循环单独作用下, 土壤表观裂隙扩展或闭合的主要诱发因素是土水势或吸力的循环变化。干化过程中, 随着含水率降低, 土表吸力首先大于其进气值, 空气进入土壤内部, 负孔隙水压力增大, 土壤内产生张拉应力, 当拉应力大于粒间黏聚力, 壤表即发生类似各向同性的收缩, 产生了表观裂隙; 且随着失水加剧、吸力不断增大, 裂隙会不断延展和加深^[36-37]; 当土壤进入湿化阶段, 一方面土壤内黏粒团聚体遇水膨胀使得裂缝出现闭合, 另一方面含水率增大导致吸力衰减、粒间张拉应力减小、孔隙水连通性和渗透性增强, 会促进裂隙愈合, 但裂隙并不能完全恢复, 对土壤的损伤仍然存在^[38]。如此反复干湿交替的过程, 导致土体内部结构逐渐劣化, 微观结构持续损伤, 使得裂隙逐渐加宽和衍生并最终趋于稳定^[22-24]。

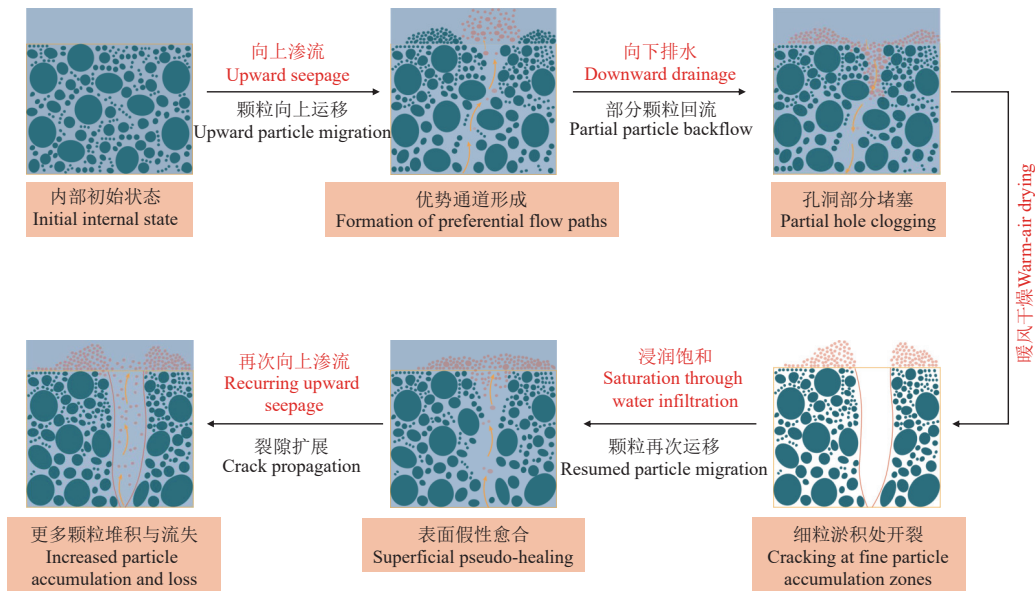
对于二者联合作用, 在往返渗流后的干化阶段, 随

着含水量减小, 土壤颜色逐渐变浅, 壤表出现负孔隙水压力, 细粒聚集处逐渐发育张拉裂缝。同时, 由于潜蚀阶段出现的壤表细粒含量增加且分布不均匀, 导致裂隙发育不再具有随机性, 而是主要在细粒密集堆积区首先

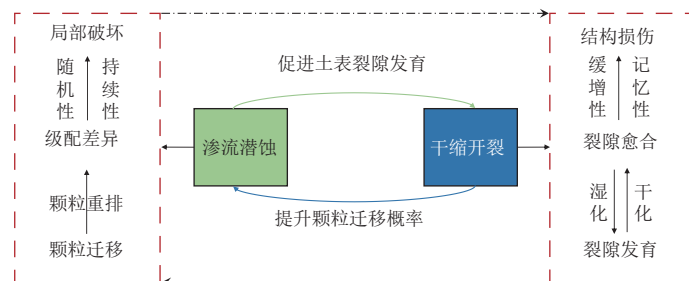
发生, 并逐渐向两端和深处延伸直至稳定, 最终的壤表裂隙分布范围和数量比干湿循环单独作用时更多。此现象说明渗流潜蚀对壤表细粒分布的改变, 会影响后续干化过程的裂隙发育特征, 加剧了土壤的开裂损伤。



a. 单独作用下土体结构损伤机制
a. Mechanism of soil structure damage under individual action



b. 联合作用下土体结构损伤机制
b. Mechanism of soil structure damage under combined action



c. 联合作用下土体结构的损伤过程
c. Evolution of soil structure damage under combined action

图 8 土体结构损伤机制及损伤过程

Fig.8 Damage mechanism and evolution of soil structure

进入湿化阶段后, 壤表裂隙逐渐闭合的主要原因是土体含水率增大, 粒间吸力减小、联结变弱, 裂隙侧壁和开口处细颗粒发生坍塌或跌落, 在裂隙内松散存留, 呈现“假性愈合”的特征。壤表残留有凹型痕迹, 说明

裂隙未被完全填充。

再次开始往返渗流作用时, 由于土壤均匀性在干湿循环时被进一步破坏, 残留的裂隙为向上渗流提供了更宽广的优势通道, 裂隙内的细颗粒继续发生迁移和流失,

且数量上比返渗流单独作用下第二周期的流失量更大。此现象说明干缩开裂对土壤完整性的破坏，会促进渗流阶段的细颗粒流失，加剧了土壤的潜蚀损伤。

往返渗流与干湿循环交替联合的过程，在经历5个周期后才呈现细粒流失率和裂隙率逐渐趋缓，比单独作用持续性更强，因此，联合作用对土壤结构的影响，无论是延续性还是损伤程度都比单独作用更强烈。

综上所述，在周期往返渗流和反复干湿循环的交替联合驱动下，一方面土中细粒迁移和流失改变了土样的颗粒分布和孔隙结构，增大了上层和壤表的细粒含量，改变了裂隙发育位置，扩展了裂隙发育程度，延缓了孔隙结构的稳定趋势，加剧了土壤的开裂损伤；另一方面壤表开裂破坏了土壤的完整性，拓宽了优势渗流通道，加速了细颗粒的剥离，提高了流失的概率，拖延了迁移趋缓的时间，加剧了土壤的潜蚀损伤。简言之，土内渗流潜蚀与壤表干缩开裂是耦合作用的，对土壤结构的损伤具有明显的协同加剧效应。

4 结 论

对比往返渗流、干湿循环以及二者交替联合作用的试验结果，分析渗流潜蚀与干缩开裂的演化规律和耦合作用特征，揭示二者对土壤结构损伤的协同效应。主要结论如下：

1) 在往返渗流单独作用下，土壤主要表现为细颗粒运移优势通道和溢出孔洞的分布具有随机性，流失程度比单向渗流的持续性更强，潜蚀损伤的本质是对土壤整体孔隙结构的改变；在干湿循环单独作用下，土壤主要表现为多周期的裂隙发育位置具有记忆性，裂隙率呈现缓增性，开裂损伤的本质是土壤的完整性被破坏。

2) 往返渗流与干湿循环交替联合作用下，裂隙发育位置和数量受壤表细颗粒非均匀分布的影响，且裂隙率在经历3个周期后才趋稳，同时，裂隙的存在也扩大了优势渗流通道，导致土样上下层差异和细粒流失程度均增大，反映出渗流潜蚀和干缩开裂的耦合作用特征。

3) 经历5个周期后，交替联合作用相比于单独作用，总裂隙率增大73.33%，累积细粒流失量增加约116.67%，对土壤结构的损伤而言，无论是延续性还是严重性都更强烈，表现出显著的协同加剧效应。

本研究重点关注渗流潜蚀和干缩开裂的耦合影响和协同效应，事实上，上述过程还与内部孔隙结构和外部环境条件等因素密切相关，土样的密实度、细粒含量、施加的水力梯度和环境温度等影响，有待进一步研究。

【参 考 文 献】

- [1] 中华人民共和国水利部. 2023年中国水土保持公报[R/OL]. [2024-04-07]. http://swcc.mwr.gov.cn/gonggao/202501/t20250107_1789002.htm
- [2] 贺秀斌, 鲍玉海. 三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 160-168.
HE Xiubin, BAO Yuhai. Research advances on soil erosion and ecological restoration in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 160-168. (in Chinese with English abstract)
- [3] 高歌, 殷水清, 陈涛, 等. 长江流域降雨侵蚀力时空变化及成因分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 84-92.
GAO Ge, YIN Shuiqing, CHEN Tao, et al. Spatiotemporal variation and cause analysis of rainfall erosivity in the Yangtze River Basin of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(3): 84-92. (in Chinese with English abstract)
- [4] KENNEY T C, and LAU D. Internal stability of granular filters[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22(2): 215-225.
- [5] FOSTER M, FELL R, SPANNAGLE M. A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(5): 1025-1061.
- [6] WANG F W, OKEKE A C, KOGURE T, et al. Assessing the internal structure of landslide dams subject to possible piping erosion by means of microtremor chain array and self-potential surveys[J]. Engineering Geology, 2018, 234: 11-26.
- [7] LEI X Q, YANG Z J, HE S M, et al. Numerical investigation of rainfall-induced fines migration and its influences on slope stability[J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(6): 1431-1446.
- [8] 罗玉龙, 张兴杰, 张海彬, 等. 深厚覆盖层地基潜蚀研究综述[J]. 岩土力学, 2022, 43 (11): 3094-3106.
LUO Yulong, ZHANG Xingjie, ZHANG Haibin, et al. Review of suffusion in deep alluvium foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(11): 3094-3106. (in Chinese with English abstract)
- [9] 冯上鑫, 柴军瑞, 许增光, 等. 基于核磁共振技术研究渗流作用下土石混体细观结构的变化[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2886-2894.
FENG Shangxin, CHAI Junrui, XU Zengguang, et al. Meso-structural change of soil-rock mixtures based on NMR technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2886-2894. (in Chinese with English abstract)
- [10] NGUYEN C D, BENAHEM N, ANDO E, et al. Experimental investigation of microstructural changes in soils eroded by suffusion using X-ray tomography[J]. Acta Geotechnica 2019, 14: 749-765.
- [11] 陈勇, 闵泽鑫, 夏振尧, 等. 渗流作用下粉土质砂潜蚀演化特征与预测模型[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(5): 18-25.
CHEN Yong, MING Zexin, XIA Zhenyao, et al. Evolution characteristics and prediction model on suffusion of silty-sand subjected to seepage[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(5): 18-25. (in Chinese with English abstract)
- [12] DENG Z Z, WANG G. A 3D visualization method for identifying fabric characteristics during suffusion using transparent soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2022, 59(10): 1833-1843.
- [13] MEHDIZADEH A, DISFANI M M, EVANS R, et al. Progressive internal erosion in a gap-graded internally unstable soil: Mechanical and geometrical effects[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(3): 04017160.

- [14] WANG G, HORIKOSHI K, TAKAHASHI A. Effects of internal erosion on parameters of subloading cam-clay model[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, 38(2): 1323-1335.
- [15] 汪时机, 曹俊嘉, 李贤, 等. 砂质黏性紫色土粒组缺失对降低持水特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(24): 134-143.
WANG Shiji, CAO Junjia, LI Xian, et al. Effects of grain group absence of sandy clayey purple soil on the reduction of water holding characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(24): 134-143. (in Chinese with English abstract)
- [16] 朱秦, 苏立君, 刘振宇, 等. 颗粒迁移作用下宽级配土渗透性研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(1): 125-134.
ZHU Qin, SU Lijun, LIU Zhenyu, et al. Study of seepage in wide-grading soils with particles migration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(1): 125-134. (in Chinese) (in Chinese with English abstract)
- [17] WANG C, ZHANG Z Y, LIU Y, et al. Geometric and fractal analysis of dynamic cracking patterns subjected to wetting-drying cycles[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 170: 1-13.
- [18] 罗茂泉, 杨松, 马泽慧, 等. 干湿循环下气-液界面张力对黏土收缩开裂的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(2): 369-379.
LUO Maoquan, YANG Song, MA Zehui, et al. Effect of gas-liquid interfacial tension on shrinkage cracking of clay as affected by wetting-drying alternation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 369-379. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘俊东, 唐朝生, 曾浩, 等. 干湿循环条件下黏性土干缩裂隙演化特征[J]. *岩土力学*, 2021, 42(10): 2763-2772.
LIU Jundong, TANG Chaosheng, ZENG Hao, et al. Evolution of desiccation cracking behavior of clays under drying-wetting cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2763-2772. (in Chinese with English abstract)
- [20] 周锐, 王保田, 王东英, 等. 不同干湿条件下中等膨胀土裂隙发展及作用机理分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(21): 98-107.
ZHOU Rui, WANG Baotian, WANG Dongying, et al. Analysis of the crack development and mechanism of moderately expansive soil under different drying-wetting conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(21): 98-107. (in Chinese with English abstract)
- [21] KONG L W, SAYEM H M, TIAN H. Influence of drying-wetting cycles on soil-water characteristic curve of undisturbed granite residual soils and microstructure mechanism by nuclear magnetic resonance (NMR) spin-spin relaxation time (T2) relaxometry[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(2): 208-216.
- [22] TANG C S, CHENG Q, LENG T, et al. Effects of wetting-drying cycles and desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil[J]. *Catena*, 2020, 194: 104721
- [23] LOUATI F, TRABELSI H, JAMEI M, et al. Impact of wetting-drying cycles and cracks on the permeability of compacted clayey soil[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2021, 25(4): 696-721.
- [24] 汪时机, 杨振北, 李贤, 等. 干湿交替下膨胀土裂隙演化与强度衰减规律试验研究[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 113-122.
- WANG Shiji, YANG Zhenbei, LI Xian, et al. Experimental study on crack evolution and strength attenuation of expansive soil under wetting-drying cycles[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(5): 113-122. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张光辉, 魏玉杰, 周小荃, 等. 干湿循环强度与频度对花岗岩红壤孔隙分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(增刊): 106-113.
ZHANG Guanghui, WEI Yujie, ZHOU Xiaoquan, et al. Effects of the intensity and time of wetting-drying cycles on the pore distribution of granite red soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(Supp.): 106-113. (in Chinese with English abstract)
- [26] 韩旭, 徐浩伦, 赵荐, 等. 粉土负压排水规律试验研究[J]. *人民长江*, 2022, 53(3): 175-180.
HAN Xu, XU Haolun, ZHAO Jian, et al. Experimental study on negative pressure drainage law in silty soil[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(3): 175-180. (in Chinese with English abstract)
- [27] 雷怡, 帅飞翔, 孙红月, 等. 边坡负压排水非稳定流研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(1): 162-170.
LEI Yi, SHUAI Feixiang, SUN Hongyue, et al. Study on unsteady flow of slope self-starting drainage method[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2022, 52(1): 162-170. (in Chinese with English abstract)
- [28] KEZDI A. Increase of protective capacity of flood control dikes[R]. Department of Geotechnics, Technical University of Budapest, 1969.
- [29] BURENKOVA V V. Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils[C]//Filters in geotechnical and hydraulic engineering. Balkema, Rotterdam, 1993: 357-360.
- [30] LADD R S. Preparing test specimen using under compaction[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1978, 1(1): 16-23.
- [31] XIONG H, ZHANG Z, SUN X, et al. Clogging effect of fines in seepage erosion by using CFD-DEM[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 152: 105013.
- [32] 张亮亮, 邓刚, 陈锐, 等. 不连续级配无黏性土渗蚀演变特征研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(7): 1412-1420.
ZHANG Liangliang, DENG Gang, CHEN Rui, et al. Experimental investigation on evolution process of suffusion in gap-graded cohesionless soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(7): 1412-1420. (in Chinese with English abstract)
- [33] 殷延洲, 崔一飞, 刘定竺, 等. 松散土体中细颗粒运移的微观过程研究[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(4): 21-29.
YIN Yanzhou, CUI Yifei, LIU Dingzhu, et al. Study on microscopic process of fine particle migration in loose soil[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(4): 21-29. (in Chinese with English abstract)
- [34] LIU Q, ZHAO B, SANTAMARINA J C. Particle migration and clogging in porous media: A convergent flow microfluidics study[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid*

- Earth, 2019, 124: 9495-9504.
- [35] XU Z D, ZHANG L M, ZARCH M K, et al. Experimental study of internal erosion in granular soil subject to cyclic hydraulic gradient Reversal[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2022, 148(5): 04022014.
- [36] NAHLAWI H, KODIKARA J K. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2006, 24: 1641-1664.
- [37] TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer[J]. *Applied Clay Science*, 2011, 52(1-2): 69-77.
- [38] 杨振北, 胡东旭, 汪时机. 膨胀土胀缩裂隙演化及其扰动规律分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 169-177.
- YANG Zhenbei, HU Dongxu, WANG Shiji. Evolution law of expansion-shrinkage crack and its disturbance rule of expansive soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(17): 169-177. (in Chinese with English abstract)

Analysis on soil structural damage induced by synergistic effects of upward-downward seepage and drying-wetting cycle

CHEN Yong^{1,2}, XIA Yu², MIN Zexin², XIA Zhenyao^{1,2}, WANG Shimei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The periodic fluctuations of reservoir water level can often cause the soil in the hydro-fluctuation belt to the upward-downward seepage and dry-wet cycles. The soil structure damage can also be induced by erosion and dry cracking. This study aims to investigate the evolution and synergistic effect of suffusion and dry cracking during soil erosion in the reservoir area. A simulation experimental system was self-developed to separately perform the multiple cycles of upward-downward seepage and dry wet cycles. Their alternating combined effects were also utilized to obtain the poorly graded soils. A systematic investigation was carried out to monitor the fine particle loss in the soil and the development of surface cracks during simulation. An analysis was also made to explore the influence of surface dry cracking on the suffusion and the influence of suffusion during dry shrinkage cracking. A summary was finally given on the synergistic effect of suffusion and dry cracking on soil structure damage. The results showed that there was the random and persistent development of suffusion channels in soil under the individual action of upward-downward seepage. Multiple periodic upward-downward seepage was used to wash away the originally blocked or deposited fine particles, indicating the "repeated washing" behavior. A stronger degree of particle loss was also found than that in the persistence of one-way seepage. The suffusion damage was attributed to the overall pore structure of the soil. The development of soil surface cracks shared the memory and gradual increase under the single action of dry-wet cycles. Once new cracks occurred at the old cracks, there was a slow increase in the width and gradual blunting of openings. There was an increase in the loss ratio of fine particles in the soil and the ratio of soil surface cracks, as the number of cycles gradually stabilized. The cracking damage was characterized by the destruction of soil integrity. The suffusion in soil was induced to form the seepage holes, and then disrupt the soil continuity under the alternating combined action of the two. Thereby, there was an increase in the content of fine particles in the surface layer, leading to the intensified development of cracks. Soil surface cracking was accelerated to detach the fine particles and the expansion of dominant channels, leading to the high particle loss ratio in subsequent cycles. The location and quantity of crack development were attributed to the non-uniform distribution of fine particles on the soil surface. A crack ratio was only stabilized after three cycles. At the same time, the presence of cracks also expanded the advantageous seepage channels, leading to an increase in the differences between the upper and lower layers of the soil sample and the degree of fine particle loss. As such, there was the coupled suffusion and shrinkage cracking. Furthermore, the cumulative particle loss ratio under the combined action was 116.67% higher than that under the single action of upward-downward seepage after five cycles. The surface crack ratio was 73.33% higher than that under the single action of the dry-wet cycle, indicating the significant synergistic effect on the soil structure damage. The finding can provide a strong reference for the mechanism of soil structure damage in the hydro-fluctuation belt. The evolution of soil erosion and shoreline retreat can also offer important theoretical support to soil erosion prevention and ecological governance in the Three Gorges Reservoir.

Keywords: soil and water loss; upward-downward seepage; dry-wet cycle; particle loss ratio; crack ratio; structural damage