

降雨-蒸发循环作用下膨胀土裂隙演化特征及水力性能劣化试验研究

王琼¹, 王楠^{2*}, 张泰丽², 叶为民¹, 陈永贵¹

1. 同济大学土木工程学院, 上海, 200092;

2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京, 210016

摘要: 降雨-蒸发循环是诱发膨胀土结构劣化与边坡失稳的关键环境因素。为揭示循环作用下裂隙演化规律及水力性能退化特征, 本文针对不同厚度压实膨胀土开展降雨-蒸发循环条件下的蒸发、开裂与渗透试验。结果表明: 循环作用显著改变水分迁移路径与蒸发阶段特征, 厚度对蒸发强度及阶段演化具有控制作用; 在循环前期, 厚层试样常速率阶段蒸发强度随裂隙发育增强而提高。裂隙在含水率降低过程中持续萌生与扩展, 并随循环次数呈累积增长特征, 活跃发育区主要集中于含水率12.5%~20%, 厚层试样裂隙密度与连通性更高。随着循环次数增加, 体积变形机制由初期整体收缩主导逐步转变为裂隙扩展主导。裂隙网络的形成显著扩大有效渗流通道尺度, 使渗透系数随循环次数呈数量级提升。

关键字: 膨胀土, 裂隙演化, 降雨-蒸发循环作用, 结构劣化, 水力响应;

中图分类号: TU443

收稿日期: 2026-2-28

Experimental Investigation on Crack Evolution Characteristics and Hydraulic Property Deterioration of Expansive Soil under Rainfall-Evaporation Cycles

WANG Qiong¹, WANG Nan^{2*}, ZHANG Taili², YE Weimin¹, CHEN Yonggui¹

1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China

Abstract: Rainfall-evaporation cycles constitute a critical environmental factor inducing structural degradation of expansive soils and slope instability. To elucidate the evolution of cracking behavior and the mechanisms governing hydraulic deterioration under cyclic conditions, evaporation, cracking, and permeability tests were conducted on compacted expansive soils with varying thicknesses subjected to rainfall-evaporation cycles. The results indicate that cyclic wetting and drying markedly alter moisture migration pathways and evaporation stage characteristics, with specimen thickness exerting a controlling influence on evaporation intensity and stage evolution. During the early cycles, the evaporation intensity in the constant-rate stage of thicker specimens increased in response to crack development. Cracks continuously initiated and propagated as water content decreased, exhibiting cumulative growth with increasing cycle number. Active crack development was primarily concentrated within a water content range of 12.5%–20%, and thicker specimens demonstrated higher crack density and connectivity. With increasing cycles, the volumetric deformation mechanism gradually transitioned from being dominated by overall shrinkage in the initial stage to crack propagation in later stages. The formation of a crack network significantly enlarged effective seepage channel dimensions, resulting in an order-of-magnitude increase in hydraulic conductivity with continued cycling.

Keywords: Expansive soil; crack evolution; rainfall-evaporation cycles; structural degradation; hydraulic response.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509900, 2024YFC3012605); 中国地质调查局项目(DD20251300213)

作者简介: 王琼(1982—), 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土工程地质研究。E-mail: qiong.wang@tongji.edu.cn, ORCID: 0000-0002-9075-2067

***通讯作者:** 王楠(1992—), 博士, 助理研究员, 主要从事非饱和土工程地质研究。E-mail: wangnannjzx@163.com, ORCID: 0009-0002-9406-3338

引言

膨胀土是在特定地质作用条件下形成的一类高水敏性特殊黏性土，具有显著的胀缩性、裂隙发育性及超固结性等工程特征（Dong *et al.*, 2019；叶为民等，2022；Li *et al.*, 2023；Xu *et al.*, 2024）。其内部富含蒙脱石、伊利石等强亲水性黏土矿物，使其对含水率变化高度敏感。在水分波动条件下，土体易产生显著体积胀缩变形。在降雨-蒸发循环作用下，反复湿胀与干缩过程会诱发并加剧裂隙的萌生与扩展，逐渐形成贯通性裂隙网络（孙畅等，2022；靳福杰等，2022）。裂隙结构的形成与演化显著改变了土体的水力学行为。一方面，裂隙为降雨入渗提供优先通道，缩短入渗路径，提高等效渗透系数，加速水分在土体中的迁移与再分布；另一方面，裂隙扩展破坏土体结构连续性，降低其整体强度与变形协调能力，使土体在降雨作用下更易发生软化与失稳（Huang *et al.*, 2019；Diel *et al.*, 2019；Zhang *et al.*, 2021）。在气候变化背景下，极端降雨事件日益频发（刘智琪等，2026；王成等，2026），膨胀土边坡在降雨型滑坡中的工程问题愈发突出。裂隙结构及其控制下的水力响应特征直接影响强度衰减过程，是制约边坡稳定性的关键内在因素。

我国膨胀土分布广泛，已在 20 余个省（区）发现，覆盖面积近 60 万 km²，是典型的区域性工程地质问题土体（唐朝生等，2018），其分布情况见图 1。统计资料显示，膨胀土相关工程问题每年造成的经济损失高达数百亿元人民币（白玉霞等，2024）。在降雨型滑坡易发区，膨胀土常作为边坡表层或浅层控制性介质，其胀缩与裂隙发育特征直接影响降雨入渗路径及孔隙水压力响应过程。降雨-蒸发循环作用下形成的裂隙网络显著提高土体渗透性，使降雨更易向坡体内部传导，加速软化与强度衰减，是诱发浅层滑坡的重要内在因素。近年来，国内外学者围绕降雨-蒸发循环条件下的膨胀土裂隙发育规律开展了大量研究（Tang *et al.*, 2010；Zeng *et al.*, 2022；Zhou *et al.*, 2024）。然而，现有研究多集中于宏观体积变化或裂隙形态描述，对裂隙演化过程与水分迁移行为之间的关联性分析相对不足。尤其是在模拟降雨-蒸发交替条件下，不同厚度压实土体的蒸发特征、裂隙发育过程及入渗全过程仍缺乏系统对比试验研究。

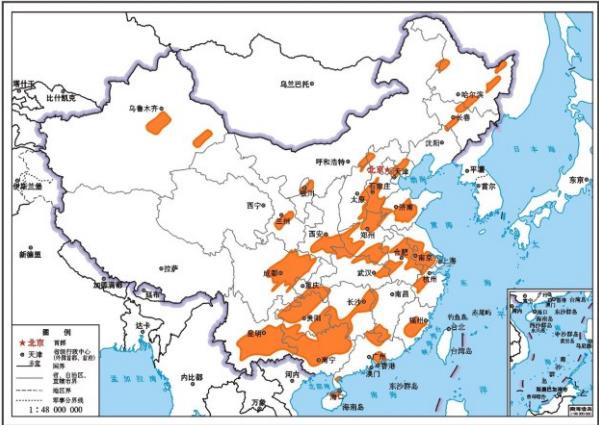


图 1 中国膨胀土分布区域图 (Shi *et al.*, 2002; Nelson *et al.*, 2015)

Fig.1 Distribution of expansive soils in China (Shi *et al.*, 2002; Nelson *et al.*, 2015)

基于此，本文以压实膨胀土为研究对象，设置不同厚度试样，构建降雨-蒸发循环试验体系，系统开展循环作用下蒸发特征、裂隙演化行为及渗透性能变化试验。通过对蒸发过程指标、裂隙结构参数及渗透系数变化规律的综合分析，揭示不同厚度条件下膨胀土在降雨-蒸发循环作用中的结构演变与水力特性变化特征，为降雨-蒸发循环条件下膨胀土水分运移规律研究提供试验基础，强化膨胀土工程理论，对于提升工程防灾减灾能力、适应气候变化背景下的工程安全需求具有重要意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本研究试验土样采自安徽省合肥市淠史杭灌区瓦东干渠边坡，采样深度为 0~0.5 m。采样遵循代表性与均匀性原则，在受大气影响范围内的典型膨胀土区域人工开挖沟槽取土，采集过程中剔除植物根系、砾石及其他杂质，并密封保存运回实验室。依据 GB/T 50123-2019《土工试验标准》对试验土样的基本物理性质及化学指标进行测试，具体参数见表 1。XRD 测试结果表明，土体主要由石英、伊/蒙混层、伊利石、高岭石及钠长石组成，其中黏土矿物含量为 21.4 %。颗粒粒径分析结果表明，土体以细粒土为主，粉粒、黏粒和砂粒含量分别为 58.62 %、41.1 3%和 0.25 %。土水特征曲线（SWCC）通过 WP4C 基质吸力测定仪获取，并基于 van Genuchten 模型进行拟合，建立了含水率-基质吸力关系（图 2b）。

表 1 试验用土的基本物理性质

Table1 Basic index properties of testing soil

土粒 相对密度 G_s	液 限 $w_L/\%$	塑 限 $w_P/\%$	天然 含水率 $w_0/\%$	天然 干密度 $\rho_d/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	自由 膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	阳离子 交换容量 cmol/kg	标准 吸湿率 $W_f/\%$	膨胀 潜势
2.76	63.8	30.2	26.25	1.50	47.8	27.3	5.89	中

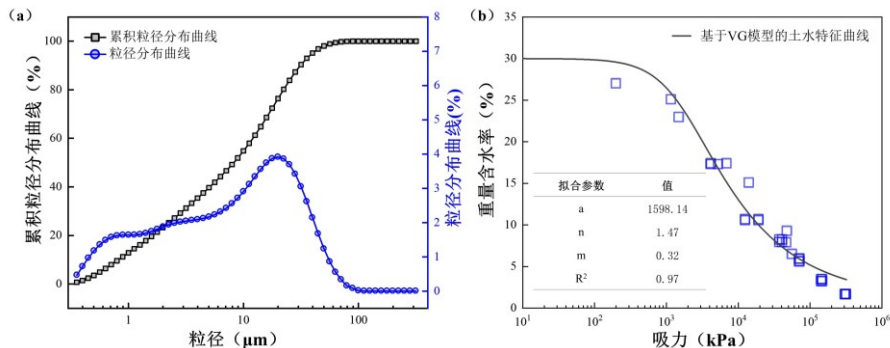


图 2 膨胀土粒径分布特征与土水特征

Fig.2 Particle Size Distribution and Soil–Water Characteristic Curves of Expansive Soil

(a) 粒径分布曲线； (b) 土水特征曲线

1.2 试样制备

采集的扰动土样在室外自然风干。为保证颗粒级配均匀并排除粗颗粒干扰，将风干土块机械破碎后过 0.5 mm 筛，筛后土样置于密封袋中备用。采用数控万能压力机进行静力压实，加载速率控制为 0.2 mm/min。为研究不同厚度条件下压实土在降雨-蒸发循环过程中的裂隙与水分迁移差异，试样初始直径统一为 61.8 mm，厚度分别控制为 10 mm 和 20 mm。压实试样的干密度控制为 1.50 g/cm³。制样完成后，采用真空饱和法对试样进行饱和和处理，使其达到饱和状态，作为降雨-蒸发循环试验的初始条件。

1.3 试验方法

降雨-蒸发循环裂隙试验在室温（20 °C）条件下进行。具体步骤如下：（1）将饱和试样置于室温环境中进行自然蒸发。蒸发过程中，使用精度为 0.01 g 的电子天平连续监测试样质量变化，并采用数码相机定时拍摄记录表面形态及裂隙发育情况。当质量变化趋于稳定时，认为脱湿过程结束，记为第 1 次脱湿（D1）。（2）将干燥后的试样置于饱和装置中，采用真空饱和法进行再饱和和处理。饱和时间为 24 h，完成后称量试样质量并计算含水率，记为第 1 次增湿（W1）。完成一次脱湿-增湿过程定义为一次降雨-蒸发循环。按照上述步骤重复进行循环试验，共实施 5 次脱湿和 4 次增湿过程。降雨-蒸发循环试验流程示意如图 3 所示。

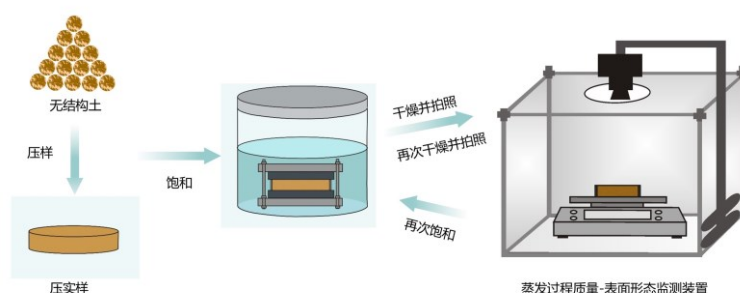


图 3 降雨-蒸发实验过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of the rainfall-evaporation experimental procedure

降雨-蒸发循环渗透试验采用自主设计的渗透装置进行（见图 4）。试样经真空饱和和处理后置于渗透仪中，通过螺杆压紧上下端盖，确保密封可靠。采用体积-压力控制器注入去离子水，注入压力设定为 20 kPa，每隔 2 h 记录一次流量，当渗透系数趋于稳定后结束试验，获得初始状态（W0）渗透系数。随后，按脱湿-增湿-渗透测试过程，依次测定经历 0~5 次降雨-蒸发循环后的饱和渗透系数。

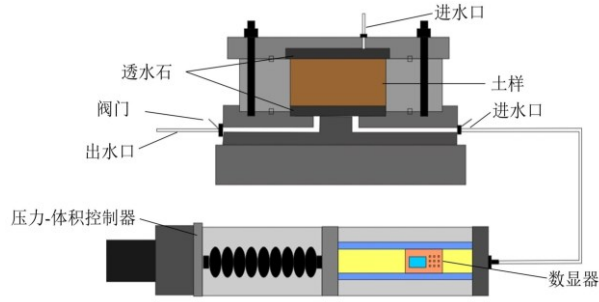


图 4 渗透试验装置

Fig.4 Schematic of the permeability testing apparatus

试样中的饱和渗透系数可以根据达西定律计算。公式如下：

$$Q = kiAt \quad (1)$$

式中， Q 为注入水量，单位为 m^3 ； k 为饱和渗透系数，单位为 m/s ； i 为水力梯度； A 为试样的横截面积，单位为 m^2 ； t 为持续时间，单位为 s 。

1.4 裂隙图像处理

裂隙图像处理流程如下：（1）图像预处理。采用 ImageJ 软件对原始裂隙图像进行框选、裁剪及尺寸标定处理（图 5），以消除边缘干扰并建立像素与实际尺寸之间的转换关系。（2）分析区域划分与参数定义。为定量表征试样整体收缩特征，以半径为 r_1 的圆形区域作为试样整体收缩分析区域（图 6（a））。基于该区域引入“收缩裂隙率”指标，用于表征试样干缩过程中产生的总体面积变化特征。试样边界与环刀内壁之间形成的空隙区域定义为“收缩裂隙率”，用于反映试样整体收缩引起的周边脱离现象。为消除边界收缩对内部裂隙统计的干扰，采用收缩分析区域剔除边界收缩区域后的内部区域作为裂隙分析范围，即图 6（b）所示半径为 r_2 的圆形区域。基于该区域定义“表面裂隙率”，用于量化试样内部裂隙发育程度。

（3）图像增强与特征提取。裁剪并标定后的裂隙图像经灰度化处理后，采用 Otsu 法进行二值化分割，并结合图像对比度进行适当阈值校准；随后通过中值滤波去除噪声，对二值图像进行连通性与边界形态的适当优化。在此基础上进行骨架化处理以提取裂隙中轴线。结合裂隙图像的几何特征，选取收缩裂隙率、表面裂隙率、裂隙总长度及平均裂隙宽度等关键参数，对裂隙演化过程进行定量分析。相关计算公式如下：

收缩裂隙率 SCR：是评估土体整体收缩和开裂程度的关键参数。其定义为裂隙总面积与边界收缩面积之和占试样初始表面面积的比率。其计算公式可表示为：

$$SCR = \frac{A_{sc}}{A_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中： A_{sc} 是裂隙总面积与边界收缩面积之和， A_i 为初始表面面积。

表面裂隙率 BCR : 是用于量化土体内部裂隙发育程度的关键参数。它表示为土体表面裂隙面积与土体总表面面积的比值。其计算公式可表示为:

$$BCR = \frac{A_{bc}}{A_{st}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: A_{bc} 是土体表面裂隙面积, A_{st} 为土体总表面面积。

裂隙总长度 CL : 裂隙图像中每条裂隙长度的总和, 反应裂隙发育规模。计算公式如下:

$$CL = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (4)$$

式中: x_i , y_i 和 (x_{i+1}, y_{i+1}) 是相邻裂隙点的坐标。

平均裂隙宽度 CW : 裂隙总面积与裂隙总长度之比, 反映裂隙发育程度。

$$CW = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \quad (5)$$

式中: w_i 是第 i 条裂隙的宽度, n 是裂隙的总数量。

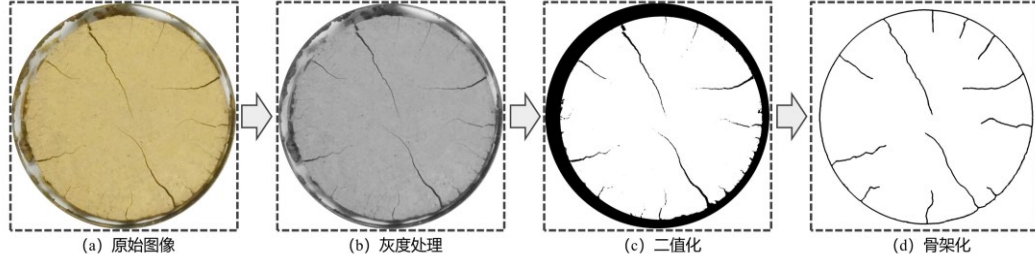


图 5 试样裂隙图像处理过程示意图

Fig.5 Flowchart of crack image processing procedure

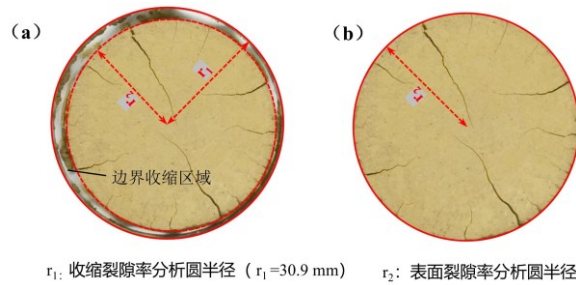


图 6 试样裂隙分析区域划分

Fig.6 Delineation of crack analysis regions in the specimen

(a) 收缩裂隙分析区域; (b) 表面裂隙分析区域

2 试验结果与分析

2.1 降雨-蒸发循环条件下水分迁移与蒸发行为

为揭示不同厚度压实膨胀土在降雨-蒸发循环条件下的水分迁移规律，首先对其蒸发过程特征进行了系统分析。图 7 展示了在 20 °C 室温条件下 10 mm 与 20 mm 厚度压实土样在降雨-蒸发循环作用下的蒸发特征。由图 7 (a) 和 (b) 可见，随着循环次数增加，土样含水率随蒸发时间的演化趋势呈现显著差异，且在相同时间节点，20 mm 厚度土样的含水率曲线波动明显大于 10 mm 厚度土样，表明试样厚度对水分迁移过程具有显著影响。较大厚度意味着更长的水分迁移路径和更复杂的内部水分梯度，从而使含水率变化对降雨-蒸发循环更敏感（骆赵刚等，2020）。

为进一步揭示土体水分迁移特性，根据蒸发速率曲线，将土体蒸发过程划分为四个阶段：常速率阶段、减速率阶段、残余速率阶段和零蒸发阶段（图 8）。由图 7 (c-d) 可见，10 mm 厚度试样在不同循环次数下蒸发速率变化幅度较小，各阶段演化过程整体较为稳定。相比之下，20 mm 厚度试样的蒸发速率随循环次数呈现先增后减的变化趋势，尤其在常速率阶段表现更为明显，其中 WD3 循环时蒸发速率达到峰值，随后逐渐降低。这一现象反映出降雨-蒸发循环初期裂隙发育增强了水分向蒸发面的输运能力，提高了蒸发效率；随着循环次数增加，土体结构逐步调整，裂隙形态趋于稳定，水分迁移能力相应减弱（刘俊东等，2021；王楠等，2024）。相对而言，减速率阶段蒸发速率变化幅度较小，表明该阶段主要受土体内部水分再分布控制，厚度差异及循环次数的影响相对有限。

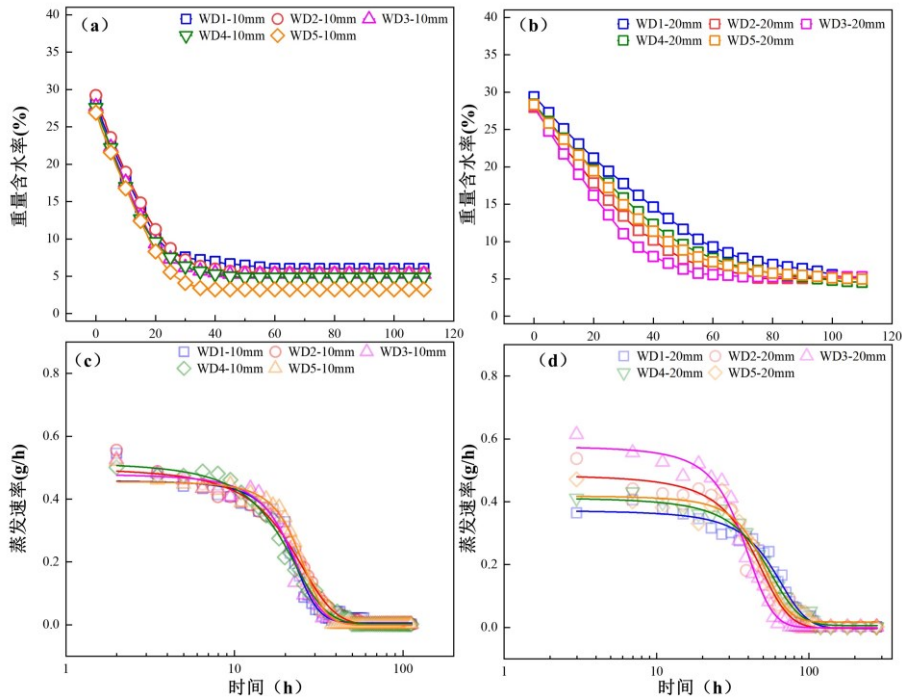


图 7 不同降雨-蒸发循环次数下各厚度试样蒸发特征

Fig.7 Evaporation characteristics of specimens with different thicknesses under varying rainfall-evaporation cycle numbers

(a) 10 mm-蒸发曲线； (b) 20 mm-蒸发曲线； (c) 10mm-蒸发速率曲线； (d) 20 mm-蒸发速率曲线

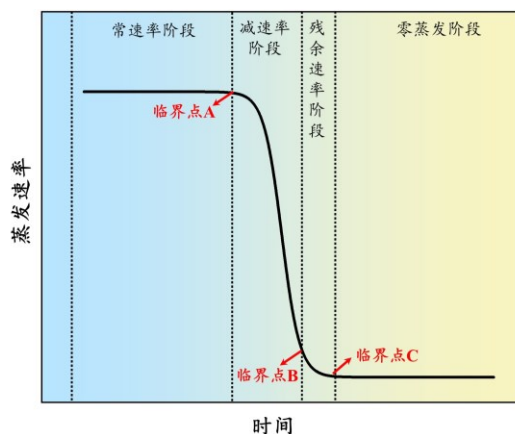


图 8 土体蒸发过程示意图

Fig.8 Schematic illustration of the soil evaporation process

2.2 降雨-蒸发循环驱动下裂隙发育与形态演化特征

为揭示降雨-蒸发循环过程中裂隙形态随土体水分迁移的演化规律，对不同厚度压实土样的裂隙发育特征进行了对比分析。图 9 展示了 10 mm 厚度压实土样在降雨-蒸发循环过程中裂隙随含水率变化的演化特征。由图可见，随着含水率的降低，裂隙逐步扩展，裂隙长度和数量均明显增加。在相近含水率条件下，裂隙发育程度随降雨-蒸发循环次数的增加而显著增强，说明降雨-蒸发循环作用对裂隙扩展具有累积效应。此外，薄层样品在各循环阶段均表现出明显的“向心性”扩展特征，即裂隙由试样边缘向中心发展，但未形成完整贯通裂隙，这种“向心性”裂隙扩展模式主要是受限于厚度条件下的一种均匀收缩响应，其特征是裂隙多从边缘向中心推进，但不形成贯通裂隙，体现了收缩应力的渐进式释放与结构完整性的自稳特性，这一现象也与 Tang 等（2011）的研究结果相一致。图 10 展示了 20 mm 厚度压实土样在降雨-蒸发循环作用下裂隙形态随含水率变化的演化过程。相较于 10 mm 试样，厚层试样裂隙发展更为显著。随着含水率降低，裂隙不断扩展并逐渐交织，形成较为复杂的裂隙网络结构。循环次数增加进一步促进裂隙密度提升及分布复杂化，表现出更加明显的结构劣化特征。

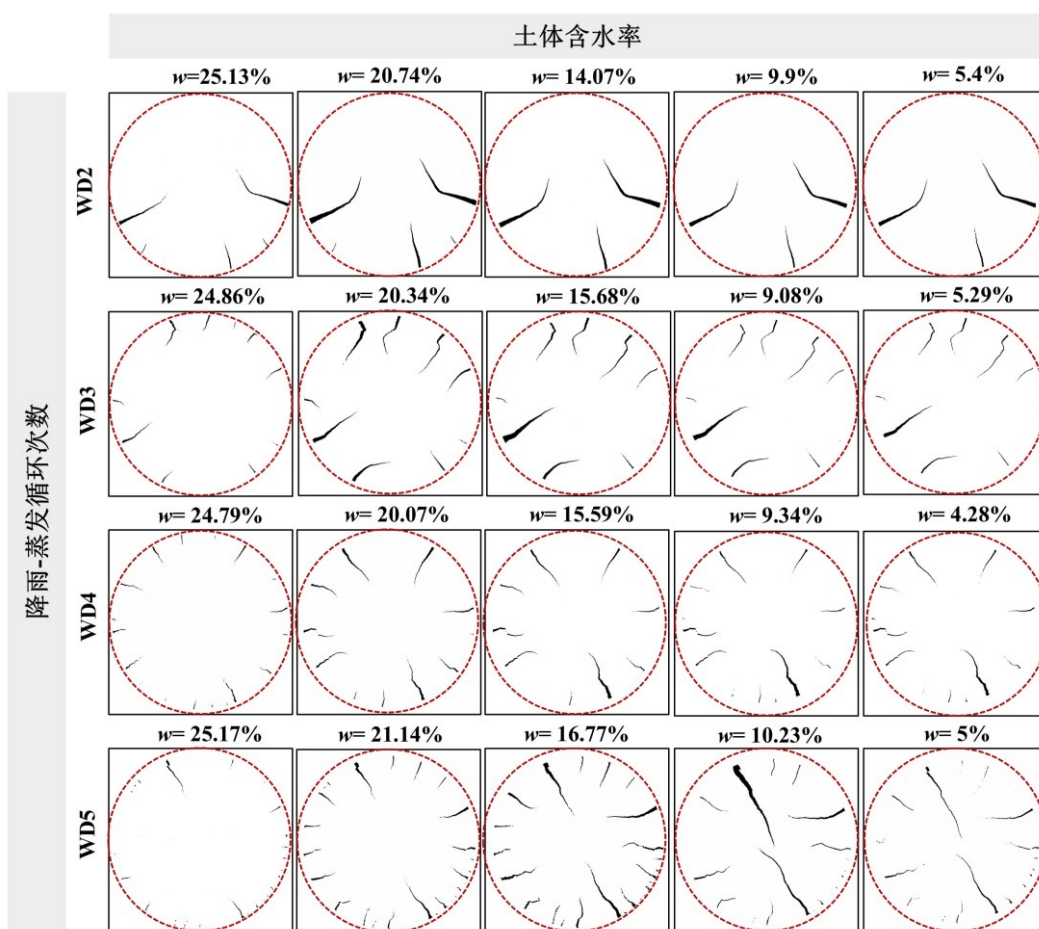


图 9 不同降雨-蒸发循环次数下 10 mm 厚度试样裂隙随含水率演化形态特征

Fig.9 Crack morphology evolution with water content for 10 mm specimens under different cycle numbers

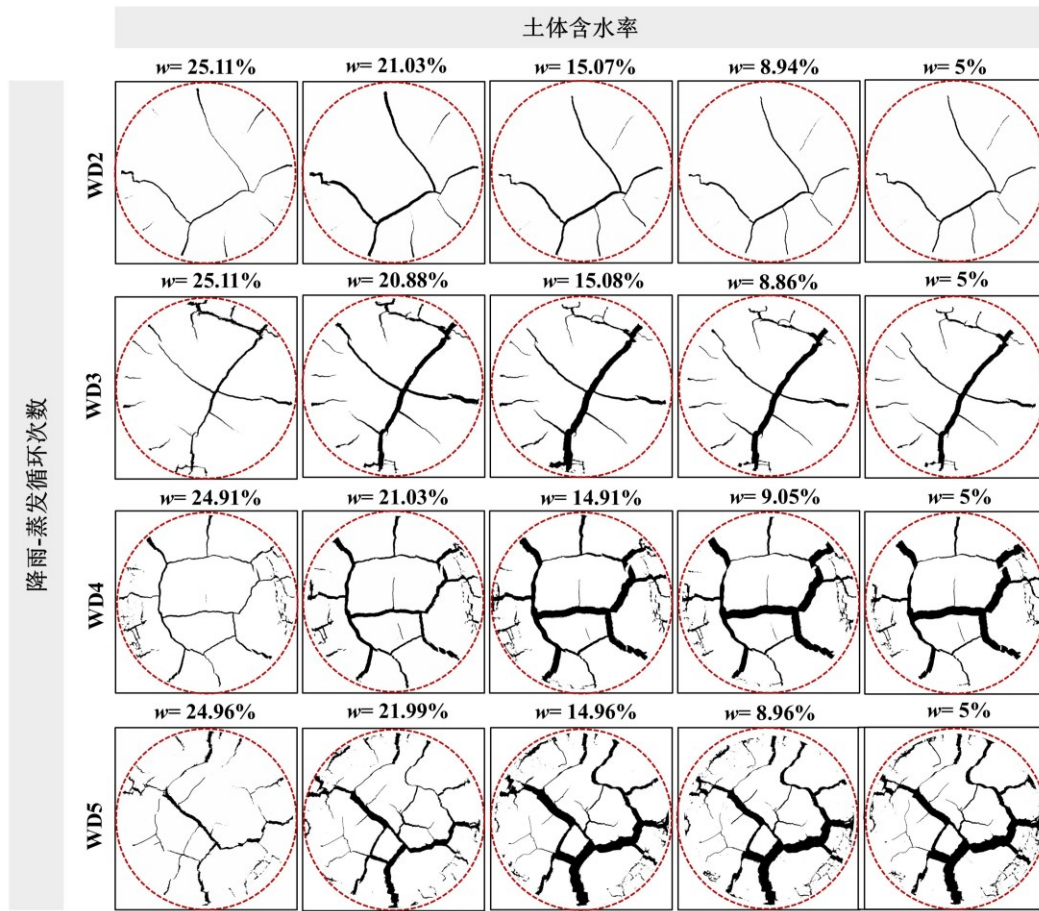


图 10 不同降雨-蒸发循环次数下 20 mm 厚度试样裂隙随含水率演化形态特征

Fig.10 Crack morphology evolution with water content for 20 mm specimens under different cycle numbers

2.3 裂隙结构参数的时序演化及累积效应

借助 ImageJ 软件对裂隙图像进行定量提取与统计分析，系统揭示降雨-蒸发循环条件下压实土裂隙结构的时序演化特征。图 11 展示了不同循环次数下各厚度试样裂隙率随含水率变化的演化规律。10 mm 厚度试样在各循环过程中，收缩裂隙率随含水率降低迅速增加，并在干燥后期趋于稳定。随着循环次数增加，收缩裂隙率-含水率曲线整体上移，表现出明显的累积效应，即在相同含水率条件下，收缩裂隙率随循环次数增加而增大。WD1-WD5 阶段最终收缩裂隙率分别为 15.16 %、17.58 %、19.48 %、20.22 %和 20.25 %，表明降雨-蒸发循环持续促进体积收缩的发展，裂隙累积效应逐渐增强，但在后期趋于稳定。图 11 (b) 显示，20 mm 厚度试样的收缩裂隙率同样随含水率降低迅速上升并最终稳定，WD1-WD5 阶段分别达到 20.39 %、22.41 %、23.45 %、24.03 %和 25.18 %。其演化趋势与 10 mm 试样总体一致，但在相同含水率下，20 mm 试样的收缩裂隙率整体高于 10 mm，且曲线上移幅度更为显著，说明在本试验条件下，厚层试样的体积收缩响应更为强烈，降雨-蒸发循环对其结构演化的放大效应更为明显。图 11 (c) 反映了 10 mm 厚度试样表面裂隙率的演化特征。整体而言，薄层试样的表面裂隙率水平较低，表明其收缩行为以整体体积收缩为主。不同循环阶段表面裂隙率呈现先增后缓的趋势，裂隙主要集中发育于含水率 12.5 %~20 %区

间。WD5 阶段裂隙率达到峰值，但当含水率低于 12.5 %后，各循环条件下的表面裂隙率逐渐收敛，最终稳定在 0.95 %~1.19 %范围内，差异较小。这一现象表明，薄层试样中裂隙扩展主要发生于干燥中期，后期以体积均匀收缩为主，循环次数对最终表面裂隙率的影响有限，其累积效应主要体现在裂隙活跃扩展阶段。图 11 (d) 展示了 20 mm 厚度试样表面裂隙率的演化规律。随着循环次数增加，在相同含水率条件下表面裂隙率持续升高，裂隙扩展特征更为显著。WD4 和 WD5 阶段最终表面裂隙率分别达到 12.49 %和 14.52 %，已占总收缩裂隙率的一半以上，表明干燥收缩模式逐步由均匀体积收缩向裂隙扩展主导转变。裂隙发育最为活跃的区间同样集中在含水率 12.5 %~20 %范围内，与 10 mm 试样的裂隙活跃区段一致，说明该区间为裂隙结构快速演化的关键阶段。与薄层试样不同的是，当含水率进一步降低至 12.5 %以下时，20 mm 试样表面裂隙率虽略有下降，但整体保持较高水平，裂隙形态趋于稳定。这表明较厚试样在干燥后期的结构调整能力有限，裂隙形态一旦形成便不易被进一步压缩或闭合，反映出厚层土体在后期以裂隙结构主导的刚性响应特征更为突出。

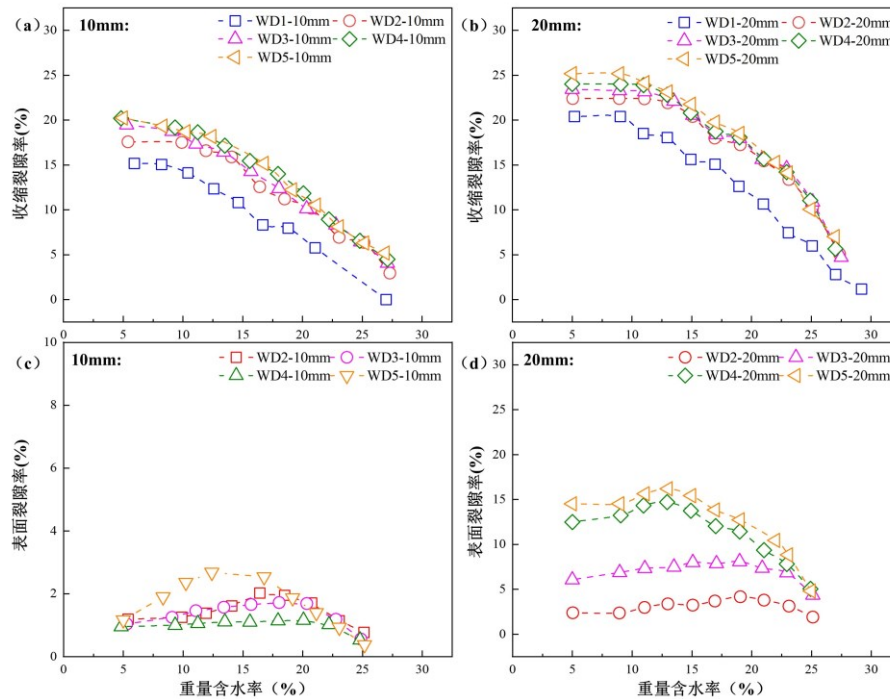


图 11 不同降雨-蒸发循环次数下各厚度试样裂隙率随含水率演化特征

Fig.11 Crack ratio versus water content at different thicknesses and cycle numbers

- (a) 10 mm 厚度试样收缩裂隙率； (b) 20 mm 厚度试样收缩裂隙率；
(c) 10 mm 厚度试样表面裂隙率； (d) 20 mm 厚度试样表面裂隙率；

进一步对裂隙特征参数进行了定量分析，重点探讨了在不同降雨-蒸发循环次数条件下，裂隙长度与裂隙平均宽度随含水率变化的演化规律。（图 12）。图 12 (a) 显示了 10 mm 厚度试样裂隙总长度随含水率的变化特征。结果表明，各循环阶段裂隙长度随含水率降低而显著增加，但当含水率降至 20 %以下时，其增长速率明显趋缓。至 WD5 阶段，裂隙总长度达到峰值，进一步表明降雨-蒸发循环对裂隙发育具有显著的

累积增强效应。图 12 (b) 反映了 20 mm 厚度试样在不同循环次数下裂隙总长度随含水率的演化规律。在 WD2 和 WD3 阶段，裂隙总长度随含水率变化幅度较小，表明裂隙仍处于萌生及初期扩展阶段，贯通程度有限；而在 WD4 和 WD5 阶段，裂隙长度迅速增长，最终分别达到 584.32 mm 和 607.29 mm，显著高于 10 mm 试样对应阶段的结果，表明该阶段降雨-蒸发循环的累积效应更为显著，且厚试样内部裂隙网络发育程度更高。图 12 (c) 表明，在降雨-蒸发循环初期，10 mm 厚度试样更易形成相对较宽的裂隙，但其宽度演化受裂隙长度发展的制约，呈现出一定的协同演化特征。图 12 (d) 进一步揭示了不同循环次数下裂隙平均宽度随含水率变化的规律，整体呈现为先增后减的趋势，反映裂隙演化由扩展主导逐渐向收缩主导转变。与 10 mm 试样相比，20 mm 厚度试样在相同含水率条件下裂隙宽度更大，且随循环次数增加呈显著增宽趋势，说明厚层土体在降雨-蒸发循环作用下更易形成较大尺度的裂隙结构，裂隙发育程度更为剧烈。

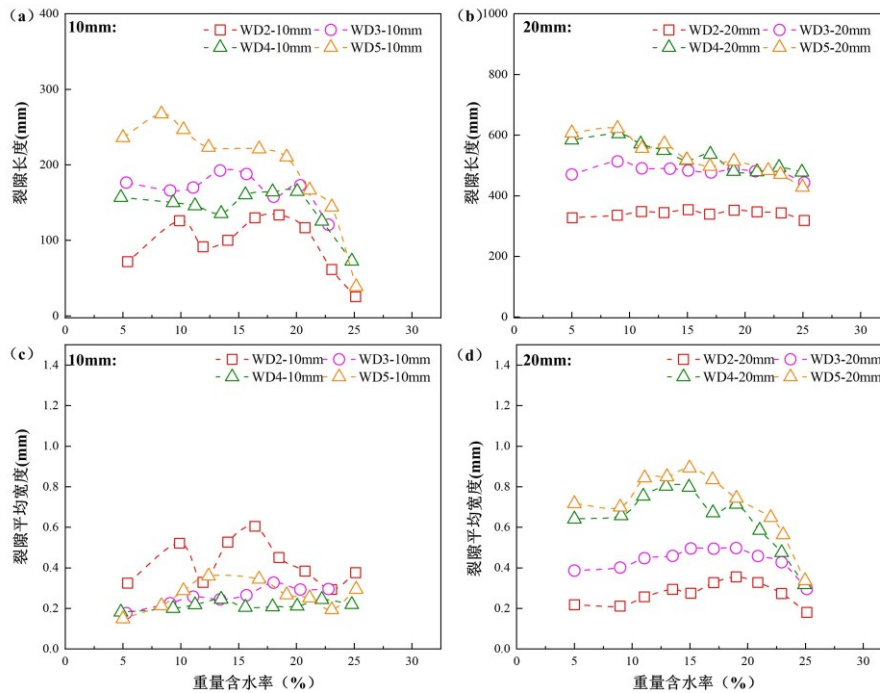


图 12 不同降雨-蒸发循环次数下各厚度试样裂隙参数随含水率演化特征

Fig.12 Crack parameters versus water content at different thicknesses and cycle numbers

(a) 10mm 厚度试样裂隙长度； (b) 20mm 厚度试样裂隙长度；

(c) 10mm 厚度试样裂隙平均宽度； (d) 20mm 厚度试样裂隙平均宽度；

为明确不同循环次数与厚度耦合作用下膨胀土裂隙结构参数的响应特征，在 20 °C 条件下对各厚度试样每次脱湿稳定后的裂隙参数进行了对比分析。图 13 展示了不同降雨-蒸发循环条件下，各厚度膨胀土样在 20 °C 时的最终裂隙参数特征。其中，S1 表示 10 mm 厚度试样的体积收缩率，B1 为 10 mm 厚度试样的表面裂隙率，S2 和 B2 分别为 20 mm 厚度试样的体积收缩率和表面裂隙率。整体来看，厚度对最终收缩与裂隙发育具有调控作用。由图 13 (a) 可见，随着试样厚度增加，最终收缩裂隙率整体呈上升趋势，但增幅相对有限。对于最终表面裂隙率而言，10 mm 厚度试样随循环次数变化不明显，而 20 mm 厚度试样则随降雨-蒸

发循环次数增加呈显著正相关关系。尤其在多次干湿循环后，薄层与厚层试样之间的表面裂隙率差异逐渐扩大。从体积变形机制角度分析，不同厚度试样的干燥收缩方式存在显著差异。上述结果表明，在 20 °C 条件下，薄层试样的干缩变形主要通过整体体积收缩实现，而厚层试样则更多依赖裂隙的发育与扩展来释放收缩应变。进一步结合图 13（b-c）可以观察到，在不同循环次数下，厚层试样裂隙发育程度更高，裂隙网络更为明显，结构非均质性进一步增强。

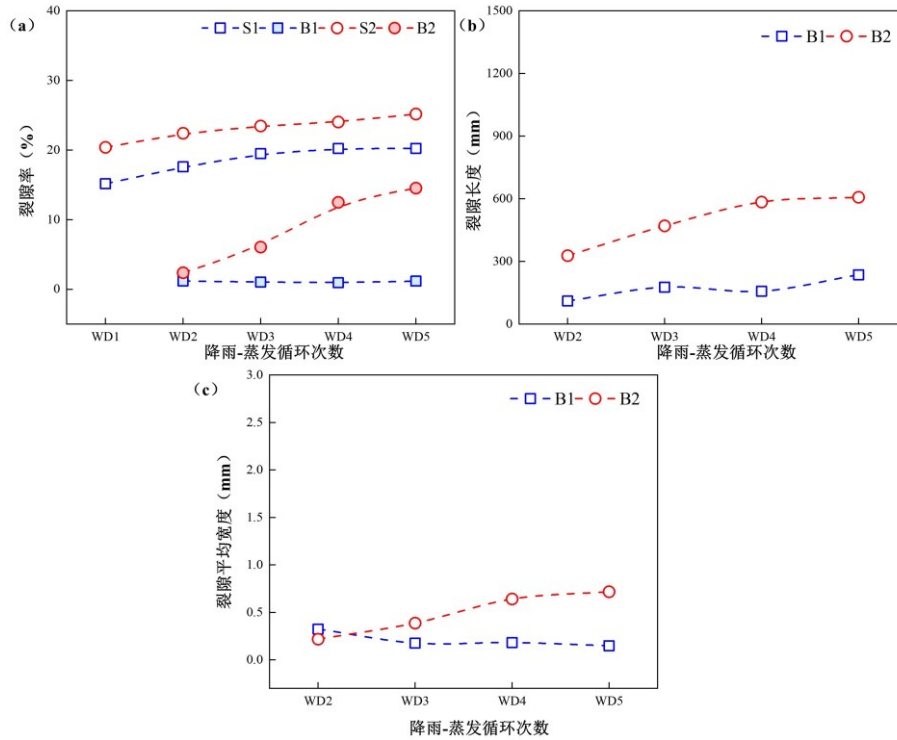


图 13 不同降雨-蒸发循环次数下各厚度试样最终裂隙参数特征

Fig.13 Final crack parameters of specimens with different thicknesses under varying rainfall–evaporation cycle numbers

(a) 收缩/表面裂隙率；(b) 裂隙长度；(c) 裂隙平均宽度；

综上所述，不同降雨-蒸发循环次数各厚度试样裂隙演化存在显著差异。其本质可归因于水分迁移与厚度的耦合作用。在 20 °C 条件下，蒸发速率较低，水分迁移过程相对缓慢。对于 10 mm 薄层试样，由于土体内部水分迁移路径较短，蒸发过程较为均匀，含水率梯度与基质吸力梯度较小，收缩变形以整体协调为主，裂隙发育主要受体积收缩控制，因此表面裂隙率变化不显著。相比之下，20 mm 厚层试样内部水分迁移受限，易形成显著的水分梯度与吸力梯度，表层区域优先产生拉应力集中并形成初始裂隙；随着循环次数增加，裂隙持续扩展以释放体积收缩应变，裂隙数量与面积不断增加，进而导致表面裂隙率显著提高，裂隙分布的空间异质性亦明显增强。从循环演化角度来看，裂隙发育机制呈现由体积收缩主导向裂隙扩展主导的阶段性转变：初始循环阶段以整体体积收缩为主，裂隙尚不显著；随着循环次数增加，土体结构劣化，变形模式逐步转向以裂隙扩展为主导，裂隙发育程度持续增强，结构劣化效应不断累积并加剧。

2.4 裂隙演化对土体水力性能劣化的影响

为系统揭示裂隙演化对土体水力行为的控制作用，分析了降雨-蒸发循环过程中膨胀土渗透性能的演化规律（图 14）。结果表明，随着循环次数由 0 次增加至 5 次，20 mm 厚度试样的饱和渗透系数由 6.63×10^{-11} m/s 增至 3.39×10^{-7} m/s，整体提升约 4 个数量级，呈现出明显的阶段性跃升特征。为进一步刻画其水力响应过程，将渗透系数演化划分为三个阶段：在 WD0-WD3 阶段，渗透系数随循环次数近似呈线性增长，表明渗透通道尚处于逐步发展阶段；在 WD3-WD4 阶段，增长速率显著提高，反映土体内部结构发生加速调整；至 WD4 阶段后，渗透系数发生数量级跃升并趋于高值，表明土体水力传输能力发生突变性增强。

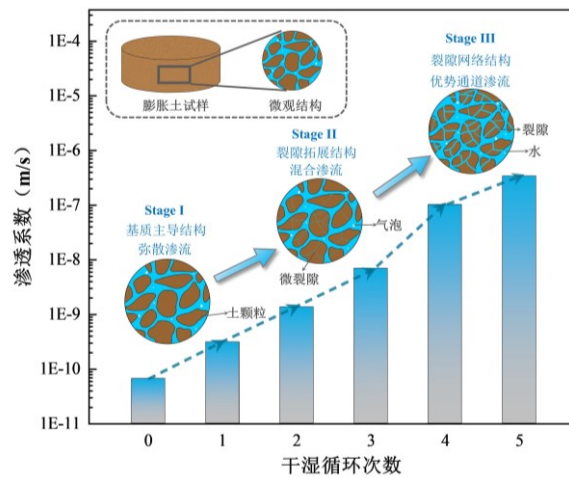


图 14 不同降雨-蒸发循环次数下渗透系数变化特征

Fig.14 Variation characteristics of hydraulic conductivity under different rainfall-evaporation cycle numbers

基于上述水力行为特征，从裂隙结构演化角度对其内在控制机制进行分析。降雨-蒸发循环过程中，膨胀土渗透性能的变化本质上受裂隙网络形成与演化控制，并呈现明显的阶段性响应特征。循环初期（Stage I），土体以连续基质结构为主，裂隙处于萌生及局部扩展阶段，渗流通道尚未连通，降雨入渗主要受基质控制，水分迁移速率较低；随着循环作用持续（Stage II），干湿交替引起的结构损伤不断累积，裂隙由孤立分布逐步向连通结构演化，有效孔隙结构持续重构，优势渗流路径逐渐形成；当进入后期阶段（Stage III），裂隙发展为贯通性网络结构，连通性显著增强，渗流通道尺度明显放大，土体水力行为由基质控制转变为裂隙控制，降雨入渗由弥散型向优势通道型转化，进而诱导渗透系数发生非线性跃迁。与此同时，渗透能力的增强进一步促进水分在土体内部的再分布，强化局部含水率与基质吸力梯度，从而驱动裂隙持续扩展，形成水分迁移-结构损伤-裂隙演化-渗流增强的正反馈机制。从降雨型滑坡的工程响应来看，裂隙网络化及渗透系数的数量级增长显著改变了边坡入渗边界条件与水力耦合过程（Krzeminska *et al.*, 2012）。在持续降雨条件下，该过程加速坡体由非饱和状态向高饱和状态转化，降低土体有效应力与抗剪强度，进而推动变形由渐进发展向快速失稳演化。因此，裂隙演化不仅是膨胀土结构劣化的重要表征，也是控制降雨型滑坡强度衰减及失稳触发过程的关键物理机制。

3 结论

本文围绕降雨型滑坡背景下膨胀土边坡结构劣化问题，开展了降雨-蒸发循环条件下蒸发试验、开裂试样及渗透试验，系统揭示了不同厚度压实膨胀土在循环作用下的水分迁移规律、裂隙演化特征及水力性能响应特征。主要结论如下：

(1) 厚度对水分迁移与蒸发过程具有显著控制作用。厚层试样水分迁移路径更长、含水率梯度更为显著，循环过程中含水率波动幅度更大，对干湿扰动响应更为敏感。蒸发过程呈现明显阶段性特征：循环前期随裂隙发育增强，蒸发速率提高；循环后期结构趋于稳定后，蒸发速率逐步降低。

(2) 裂隙发育随含水率降低表现出持续扩展与累积演化特征。薄层试样裂隙主要由边缘向中心呈“向心式”扩展，整体未形成完全贯通结构；厚层试样裂隙逐步交织连通并形成网络化结构，循环次数增加显著提高了裂隙密度及复杂度。

(3) 裂隙结构参数呈现明显循环累积效应。在相同含水率条件下，裂隙率随循环次数整体升高，且厚层试样始终高于薄层试样。裂隙活跃发育区间集中于含水率 12.5%~20%，裂隙总长度与平均宽度均随循环次数持续增长，厚层试样增幅更为显著。

(4) 降雨-蒸发循环过程中，土体变形机制由体积收缩主导逐步转变为裂隙扩展主导。首次循环以整体体积收缩为主导机制；随着循环累积，裂隙成为释放收缩应变的主要途径。厚层试样内部结构非均质性更强，裂隙主控特征更为突出。

(5) 裂隙网络化导致渗透系数呈数量级增长，显著改变边坡入渗边界条件与水-力耦合响应过程，加速基质吸力衰减与强度弱化，促进浅层边坡由渐进变形向快速失稳转化，是降雨-蒸发循环诱发降雨型滑坡的重要控制机制。

References

- Bai Y. X., Chang S., Xiao H. L., et al., 2024. Research Progress in Ecological Treatment of Expansive Soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 46(S2): 60-66 (in Chinese with English abstract).
- Diel, J., Vogel, H. J., Schlüter, S., 2019. Impact of Wetting and Drying Cycles on Soil Structure Dynamics. *Geoderma*, 345, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.018>
- Dong, J. G., Xu, G. Y., Lv, H. B., et al., 2019. Prediction of Expansive Soil Strength Based on Micro-Scale Properties. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(2), 869-882. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0657-x>
- Huang, Z., Wei, B., Zhang, L., et al., 2019. Surface Crack Development Rules and Shear Strength of Compacted Expansive Soil Due to Dry-Wet Cycles. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(4), 2647-2657. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-00784-y>
- Jin F.J., Wang Y. J., Xu Y. F., et al., 2022. Simulation of Cracks Evolution in Expansive Soil Slope under Evaporation-Rainfall Condition. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 53(1): 239-249 (in Chinese with English abstract).
- Krzeminska, D. M., Bogaard, T. A., Van Asch, T. W., et al., 2012. A Conceptual Model of the Hydrological Influence of Fissures on Landslide Activity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(6), 1561-1576. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1561-2012>
- Li, J. H., Zhang, L. M., 2011. Study of Desiccation Crack Initiation and Development at Ground Surface. *Engineering Geology*, 123(4),

347-358. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.09.015>

- Liu J. D., Tang C. S., Zeng H., et al., 2021. Evolution of Desiccation Cracking Behavior of Clays Under Drying-Wetting Cycles. *Rock and Soil Mechanics*, 42(10): 2763–2772 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. Q., Wu, Q., Wang, L. Q., et al. 2026. Review on Multi-Scale Formation Mechanisms of Rainfall-Induced Cluster Landslides in Southeastern China Under Multi-Factor Coupling Effects. *Earth Science*, 1-24 (in Chinese with English abstract).
- Luo Z. G., Wang S. J., Zhang J. W., et al., 2020. Thickness Effect on Crack Evolution of Expansive Soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 42(10): 1922-1930 (in Chinese with English abstract).
- Nelson, J. D., Chao, K. C., Overton, D. D., et al., 2015. Foundation Engineering for Expansive Soils. *John Wiley & Sons*, 1-385. <https://doi.org/10.1002/9781118996096>
- Shi B, Jiang H, Liu Z, et al. 2002. Engineering Geological Characteristics of Expansive Soils in China. *Engineering Geology*, 67(1-2): 63-71. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00145-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00145-X)
- Sun C., Tang C. S., Cheng Q., Xu J.J., et al., 2022. Stability of Soil Slope Under Soil-Atmosphere Interaction. *Earth Science*, 47(10): 3701-3722 (in Chinese with English abstract).
- Tang, C. S., Cui, Y. J., Tang, A. M., et al., 2010. Experiment Evidence on the Temperature Dependence of Desiccation Cracking Behavior of Clayey Soils. *Engineering Geology*, 114(3-4), 261-266. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.003>
- Tang, C. S., Cui, Y. J., Shi, B., et al., 2011. Desiccation and Cracking Behaviour of Clay Layer From Slurry State Under Wetting-Drying Cycles. *Geoderma*, 166(1), 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.018>
- Tang C. S., Shi B., Cui Y. J., 2018. Behaviors and Mechanisms of Desiccation Cracking of Soils. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 40(8): 1415-1423 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., An, N., Yu, Y., et al. 2026. Study on Differences in Rainfall Thresholds for Landslides Across Different Lithologic Zones in the Hilly Regions of Southeast China *Earth Science*, 1-28 (in Chinese with English abstract).
- Wang N., Wang Q., Ye W. M., et al., 2024. Evolution Characteristics of Shrinkage Cracks in Expansive Soil During Wetting-Drying Cycles. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 55(12): 4532–4543 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y, Liao X, Tang L, et al., 2024. Field Study of HPTRM Combined With Vegetation and Anchor to Protect Newly Excavated Expansive Soil Slope. *Journal of Earth Science*, 35(4): 1277-1288. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1570-4>
- Ye W. J., Kong L. W., Hu R. L., et al., 2022. New Prevention and Treatment Techniques and Their Applications to Landslides and Engineering Slopes of Expansive Soils. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 44(7): 1295-1309 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, H., Tang, C. S., Zhu, C., et al., 2022. Desiccation Cracking of Soil Subjected to Different Environmental Relative Humidity Conditions. *Engineering Geology*, 297, 106536. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106536>
- Zhang, J., Luo, Y., Zhou, Z., et al., 2021. Research on the Rainfall-Induced Regional Slope Failures Along the Yangtze River of Anhui, China. *Landslides*, 18(5), 1801-1821. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01623-7>
- Zhou, Z., Xue, Q., 2024. Investigation of Cracking Behavior of Fine-Grained Clays Exposed to Different Humidity Environments and Engineering Implications Based on X-Ray Computed Tomography. *Construction and Building Materials*, 450, 138643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138643>

中文参考文献

- 白玉霞, 常顺, 肖衡林, 等. 2024. 膨胀土生态治理研究进展. *岩土工程学报*, 46(S2): 60-66. <https://doi.org/10.11779/CJGE2024S20025>
- 靳福杰, 王叶娇, 徐永福, 等. 2022. 蒸发-降雨条件下膨胀土边坡裂隙演化模拟. *中南大学学报(自然科学版)*, 53(1): 239-249. [10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.018](https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2022.01.018)
- 刘俊东, 唐朝生, 曾浩, 等. 2021. 干湿循环条件下黏性土干缩裂隙演化特征. *岩土力学*, 42(10): 2763–2772. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2021.0459>

- 刘智琪, 吴琼, 王亮清, 等. 2026. 多因素耦合作用下东南降雨型群发滑坡多尺度孕育机制研究综述. 地球科学, 1-24.
<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.266>
- 骆赵刚, 汪时机, 张继伟, 等. 2020. 膨胀土裂隙发育的厚度效应试验研究. 岩土工程学报, 42(10): 1922-1930.
<https://doi.org/10.11779/CJGE202010018>
- 孙畅, 唐朝生, 程青, 等. 2022. 土体-大气相互作用下土质边坡稳定性研究. 地球科学, 47 (10) : 3701-3722.
<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.275>
- 唐朝生, 施斌, 崔玉军, 2018. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理. 岩土工程学报, 40(8): 1415-1423.
<https://doi.org/10.11779/CJGE201808006>
- 王成, 安妮, 于洋, 等. 2026. 东南丘陵不同岩性区的滑坡降雨阈值差异研究. 地球科学, 1-28. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.060>
- 王楠, 王琼, 叶为民, 等. 2024. 干湿循环作用下膨胀土裂隙发育与演化特征. 中南大学学报(自然科学版), 55(12): 4532-4543.
<https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2024.12.013>
- 叶为民, 孔令伟, 胡瑞林, 等. 2022. 膨胀土滑坡与工程边坡新型防治技术与工程示范研究. 岩土工程学报, 44(07): 1295-1309.
<https://doi.org/10.11779/CJGE202207009>