

干湿循环作用对黄土特性影响的研究现状与展望

杨创维

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2024年12月16日; 录用日期: 2025年1月8日; 发布日期: 2025年1月21日

摘要

干湿循环作用是我国西北黄土地区工程发生灾害的主要原因之一, 探究干湿循环作用对黄土特性影响有着重要的理论和工程意义。本文对目前干湿循环下黄土试验研究成果进行了归纳总结, 分别从土-水特征曲线、强度、变形、渗透性以及黄土边坡等多个方面阐述了当前的研究现状, 为后续的相关研究提供参考。

关键词

黄土, 干湿循环, 土-水特征曲线, 渗透性

Research Status and Prospect of the Influence of Dry-Wet Cycle on Loess Characteristics

Chuangwei Yang

Geological Science and Engineering College, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Dec. 16th, 2024; accepted: Jan. 8th, 2025; published: Jan. 21st, 2025

Abstract

This literature review summarizes the experimental research results of loess and slopes under dry-wet cycle by reviewing the characteristics of loess under dry and wet cycles and the influence of dry and wet cycles on loess slope in recent years, and elaborates the current research status from the aspects of soil-water characteristic curve, strength, deformation, permeability, microstructure and influence of loess slope, so as to provide reference for subsequent related research.

Keywords

Loess, Dry-Wet Cycle, Soil-Water Characteristic Curve, Permeability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着“一带一路”和“西部大开发”等一系列国家战略的实施,西北黄土地区建设规模不断扩大。许多高筑边坡、路基、坝体等工程活动直接使用或建造于黄土之上,而西北黄土地区属于半干旱大陆季风气候,随着气候周期性变化,使得黄土处于降雨和蒸发的作用下产生干湿循环的交替变化。长期的干湿循环作用会使得黄土的力学性质产生不可逆的变化,从而导致黄土边坡和构筑于黄土之上的路基、坝体等工程产生失稳破坏问题。如图 1:2018 年 4 月 30 日 4 时 57 分,山西省吕梁市离石区枣林乡彩家庄南沟发生山体崩塌,共有 9 人遇难。该崩塌原因就是黄土由于长期处于干湿循环作用下导致其崩积物结构变得非常松散。由于黄土特殊的构造以及黄土高原特殊的气候,极易引起黄土灾害问题。故对于干湿循环下黄土的相关研究具有重要意义。目前,国内外多位学者对干湿循环作用下黄土进行了各种各样的研究。本文对相关的试验研究成果进行了系统的总结。



Figure 1. Site map of the Nangou mountain collapse in Caijiazhuang, Zaolin Township, Lishi District, Luliang City, Shanxi Province

图 1. 山西省吕梁市离石区枣林乡彩家庄南沟山体崩塌现场图

2. 干湿循环对黄土土 - 水特征曲线的影响

土 - 水特征曲线是表示土壤水吸力与土壤含水量的关系曲线,可以反应不同土的持水和释水特性。通过土 - 水特征曲线可以计算土的抗剪强度、渗透系数等。所以土 - 水特征曲线对研究黄土有着非常重要的意义。

Hong Yang [1]等通过对五种砂岩的在干燥和湿润情况的 SWCC 的研究分析,发现干燥和湿润情况的

SWCC 存在相当大的滞后, 并利用减 - 增湿土 - 水特征曲线所围成的“滞回圈”面积来刻画其滞回特性。刘奉银[2]等通过试验研究了初始干密度对非饱和黄土土 - 水特征曲线的影响, 并且对指定干密度的试样进行了 2 次干湿循环, 针对前人用“滞回圈”面积刻画土 - 水特征曲线的滞回特性的问题上, 提出用“滞回度”概念刻画土 - 水特征曲线滞回特性的新尝试, 并指出应综合考虑“滞回圈”面积和“滞回度”两个指标去描述土 - 水特征曲线滞回特性。初步研究了黄土土 - 水特征曲线在干湿循环下的滞回特性规律。但“滞回度”的变化规律及其应用则有待进一步研究。赵天宇[3]等通过对不同干密度和不同干湿循环状态下重塑黄土土 - 水特征曲线的研究, 且在前人的基础上对重塑黄土的进行了 3 次干湿循环, 研究发现第 2 次脱湿后与第 3 次脱湿后重塑黄土的 SWCC 基本重合。即表明多次干湿循环后重塑黄土的 SWCC 会趋于稳定。从宏观和微观两方面分析了干湿循环对黄土土 - 水特征曲线的影响。并通过观察干湿循环后黄土的微结构扫描电镜, 得出影响了黄土的土水特征曲线的原因: 干湿循环作用使土中胶结物被溶蚀, 孔隙贯通或扩张, 土体中大孔隙增多, 饱和含水率增大, 持水能力降低, 进而影响了黄土的土水特征曲线。赵文博[4]等通过对竖向应力及干湿循环对黄土土 - 水特征曲线的影响的研究, 发现脱湿曲线的含水率普遍高于增湿曲线的含水率, 形成明显的滞回圈。这与刘奉银[2]等研究得出规律一致。此外研究发现随着干湿循环次数的增加, 压实黄土脱湿率和增湿率均减小, 滞回圈大小也减小。刘朋飞[5]等通过对甘肃东乡原状马兰黄土基质吸力和体积含水量进行了干湿循环测试, 根据实验数据采用 Gardner、Van Genuchten 和 Fredlund and Xing 三种典型的模型对其方程进行拟合, 得到非饱和黄土在吸湿和脱湿过程中 SWCC 参数, 进而得出非饱和黄土吸湿脱湿过程三种模型的土水特征曲线。模型显示黄土非饱和黄土脱湿、吸湿过程存在滞后性, 这与刘奉银[2]、赵文博[4]等研究结果一致。此外, 本文作者还根据模型方程对非饱和黄土的渗透性系数进行了预测。由于吸湿与脱湿过程黄土渗透系数差异大, 需具体情况进行选择。常洲[6]等通过对 Q3 黄土进行不同干湿循环路径下的饱和渗透试验与土 - 水特征测试, 分析发现: 原黄土饱和渗透系数劣化度与干湿循环次数间关系可采用双曲线函数进行描述。而且依据 V-G 模型对土样土 - 水特征测试数据进行拟合, 研究发现 V-G 模型对原状黄土干湿循环过程中土 - 水特征曲线拟合效果良好, 与刘朋飞[5]等得出结论一致。并在 V-G 模型的基础上建立了考虑干湿循环参数的饱和渗透系数劣化模型与土 - 水特征曲线模型。

综上, 众学者都发现干湿循环对黄土的土 - 水特征曲线主要表现就是滞回现象, 有些学者深入的研究了造成滞回现象的原因并从不同方向解释它。而且提供了一些建立土 - 水特征曲线模型与土 - 水特征曲线方程的一些方法。但是对于造成滞回现象的微观机理方面的研究还需要进一步深入研究。

3. 干湿循环对黄土强度的影响

对于一个工程, 土的强度永远是最重视的问题。对于黄土这种极其特殊的土类, 其强度问题研究也必不可少, 而干湿循环对黄土影响又非常显著, 所以有不少学者进行了相关研究。

慕现杰[7]等通过对膨胀土进行干湿循环试验以及直剪试验和无侧限抗压强度试验等, 研究发现随着循环次数的增加, 膨胀土的抗剪强度逐渐减小。并且发现抗剪强度逐渐减少的主要由于干湿循环破坏了土的原有结构, 使得凝聚力减小, 减小趋势随循环次数的增多而减小, 内摩擦角也会稍微减小。在干湿循环对黄土强度的影响方面, 部分学者[8]-[11]等通过对多次干湿循环的黄土进行室内三轴实验, 发现黄土抗剪强度峰值随干湿循环次数的增长而降低, 这与慕现杰[7]等研究的干湿循环下膨胀土强度变化得到的结论一致。在此基础上还发现黄土强度峰值随着干湿循环次数增加强度峰值会趋于稳定。此外, 刘宏泰[9]等通过室内三轴压缩和三轴渗透试验, 发现土样初始含水率越低, 干湿循环对其强度的影响越大; 干湿交替达到一定次数以后土体结构会重新达到平衡, 强度也将趋于稳定。但并未研究含水率等对干湿循环下黄土的影响。而袁志辉[10]等通过系统地开展了常规三轴试验, 对比干湿循环下原状和重塑黄土的

强度规律。研究发现干湿循环对黄土强度的影响的变化规律,此外作者还基于摩尔-库仑强度理论提出了干湿循环下黄土强度衰减值的计算方法。王晓亮[11]等得到干湿循环下黄土的强度变化规律相同,但其对与粘聚力以及内摩擦角影响结论为:干湿循环作用主要造成黄土粘聚力的降低,而对内摩擦角几乎没有影响。在压实黄土的研究方面,赵俊刚[12]等通过试验设计、数据模拟及理论分析等手段,进行干湿循环对压实黄土的研究得出干湿循环导致压实黄土的孔隙比增加,干密度降低,同时强度也急剧下降,这与前人[8]等研究结果一致。并且得出随干湿循环次数增加粘聚力减小,内摩擦角变化不明显。这与王晓亮[11]等研究结果一致。此外研究发现干湿循环导致使得经压实后消除了湿陷性的黄土重新具有了湿陷性。胡长亮[13]等为了解干湿循环引起的压实黄土强度劣化规律,开展压实黄土的干湿循环三轴试验。得出与前人[8]-[12]一样的变化规律,而且基于变化规律建立了综合考虑干密度、干湿循环幅度以及下限含量的压实黄土干湿循环强度劣化模型。李祖勇[14]等则通过在不同含水率和不同增湿减湿作用下进行无侧限抗压强度试验和单轴压缩试验。得到的强度研究与前人[8]-[12]等研究一致。此外研究发现无论试样经历增湿减湿循环多少次,黄土的弹性模量随着含水率的降低在持续增大,泊松比随着含水率的降低逐渐减小。袁志辉[15]等通过单轴抗压强度试验探讨了黄土抗压强度与含水率、干湿循环次数的变化规律。试验结果与前人研究一致,即黄土单轴抗压强度随干湿循环次数的增加而减小,经历多次干湿循环后趋于稳定。另外,本文从微观阐述了土体宏观变化的微观规律:含水率和干湿循环次数的变化会使得土颗粒的接触方式和胶结作用减弱,进而影响黄土强度。潘振兴[16]等以延安地区的黄土为研究对象,开展不同含水率、不同次数的原状黄土增湿-减湿循环试验。研究发现随着干湿循环次数和含水率的增多,使黄土土体颗粒的胶结作用产生弱化,使得抗剪强度、黏聚力和内摩擦角降低。这与袁志辉[15]等研究结果一致。研究还发现当干湿循环次数不变时,含水率增大会使黄土的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角都出现降低的趋势。而当含水率不变时,干湿循环的增加会使抗剪强度、黏聚力都出现下降的趋势,但内摩擦角无明显变化。结论与王晓亮[11]等研究结果一致。此外,研究发现在干湿循环之后,黄土内部微小孔隙逐渐减少,且随着循环次数的增加,这种现象越来越明显,说明干湿循环对黄土的内部孔隙扩展处于一个动态变化的过程,表现为黄土内部微小孔隙随干湿循环次数的增加逐渐向大的微小孔隙过渡。郝延周[17]等对最优含水率条件下压实黄土试样进行不同路径的干湿循环试验和三轴剪切试验,研究发现干湿循环作用下的压实黄土应力-应变关系曲线随着干湿循环次数的增加在坐标中先逐渐下移,然后又逐渐上移,最终逐渐趋于稳定。干湿循环对压实黄土三轴剪切强度具有劣化作用。

尹今朝[18]等通过对黄土试样进行干湿循环处理后,开展土工三轴剪切试验,发现湿陷性黄土样品的力学特性和土体结构在干湿循环中的变化规律具有同步性,有效黏聚力、内摩擦角与裂隙率的关系分别可用线性和二次函数拟合。赵俊宇[19]等通过对重塑黄土进行反复干湿循环下的直剪、离心和核磁试验,在前人的研究基础上,对比分析了孔隙-水力-强度的相互影响机制,指出孔隙变化是持水特性和强度参数劣化的内在原因。周立阳[20]等对干湿循环效应下裂隙性黄土的裂隙演化规律与单轴压缩力学特性进行了深入探讨。研究发现不同干湿循环次数下裂隙性黄土单轴抗压强度与裂隙倾角关系曲线均呈现出“双V”变化特征。

此外,有学者研究了干湿循环下黄土的抗拉强度。袁志辉[21]等采用单轴拉伸法对原状和重塑黄土干湿循环下的抗拉强度进行试验,研究表明原状和重塑黄土的抗拉强度随干湿循环次数的增加而减小,最后基本趋于稳定。证明多次的干湿循环作用打破了原状黄土的原有结构,使得其抗拉结构强度消失。

还有学者对干湿循环下黄土进行了动强度等相关研究。王铁行[22]等开展干湿循环试验、土动三轴试验和扫描电镜试验,研究发现:压实黄土的动强度和动强度指标随干湿循环次数增加先减小再逐渐增大。动内摩擦角与动黏聚力的劣化规律相反。动黏聚力的劣化度明显大于动内摩擦角的劣化度。动强度指标最大劣化度与干湿循环幅度的关系呈近似线性关系。此外通过孔隙类型的演化规律揭示了干湿循环作用

下动强度劣化的微观机制。

国外也有相关研究。Wan Jun Ye [23]等为了解干湿循环作用下黄土结构损伤演化过程,通过考虑初始含水率、干湿循环幅值和干湿循环次数 3 个影响因素,对干湿循环作用下黄土进行了三轴试验。研究发现利用试验数据所得应力-应变曲线,确定了黄土抗剪强度和指数与干湿循环次数和幅值的关系。随着干湿循环次数和幅值的增加,黄土试样的抗剪强度、强度指数的黏聚值和幅值逐渐减小。随着干湿循环次数和幅值的增加,强度指数内摩擦角变化不明显,说明干湿循环对黄土内摩擦角的影响不显著。这与潘振兴[16]等研究结果一致。

综上,研究显示干湿循环对黄土强度的主要影响是会随着干湿循环次数增加而降低,最后会趋于稳定。如表 1 所知,学者们从抗拉强度、抗剪强度和抗剪强度指标和动强度和动强度指标等各个方向研究干湿循环对黄土强度造成的影响。大多数学者是通过三轴试验对干湿循环下黄土的强度进行研究分析,也有学者采用单轴试验,不同研究采用的试验方法不同。故为了方便不同研究结果之间进行对比,有必要建立统一的试验方法和标准。

Table 1. Relevant research directions on the influence of wet dry cycles on the strength of loess

表 1. 干湿循环对黄土强度影响的相关研究方向

研究方向	研究试验方法	试验结论	相关文献
抗剪强度和抗剪强度指标	三轴实验、直剪试验、无侧限抗压强度试验	随着循环次数的增加,黄土的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角逐渐减小。	[8]-[19] [24]
抗拉强度	单轴拉伸试验	黄土的抗拉强度随干湿循环次数的增加而减小	[20]
动强度和动强度指标	动三轴试验	压实黄土的动强度和动强度指标随干湿循环次数增加先减小再逐渐增大	[21] [22]

4. 干湿循环对黄土变形的影响

干湿循环对黄土变形的影响也不容小觑,特别是黄土的湿陷性对工程活动影响极大。有一部分学者对此进行了相关研究。

4.1. 干湿循环下黄土的湿陷性研究

王飞[24]等通过对不同压实度下的压实黄土试样进行干湿循环试验,研究发现干湿循环作用后,不同压实度下的黄土土样湿陷系数均明显增大,且压实度越高,干湿作用对压实黄土湿陷特性的影响越显著。此外,研究发现干湿循环到达一定次数,出现二次湿陷,即证明了黄土二次湿陷的存在。除此之外,王飞[24]等对干湿循环条件下压实黄土变形特性试验研究,发现压实黄土的割线模量等压缩特性参数会随干湿循环作用发生明显变化,发现黄土侧限压缩应变会随着干湿循环次数增大而增加,且压实度越高,影响越显著。赵俊刚[12]等通过对于干湿循环的压实黄土进行研究,得出干湿循环使得经压实后消除了湿陷性的黄土重新具有了湿陷性。这与李飞的研究结果一致。此外,分析了干湿循环导致压实黄土重新湿陷的原因:干湿循环导致压实黄土的孔隙比增加,干密度降低,同时强度也急剧下降。

李向宁[25]等通过对干湿循环过程中压实黄土的胀缩变形特性的研究,得到了土体膨胀阶段应变和收缩阶段孔隙比与基质吸力的拟合关系以此表征压实黄土的胀缩变形特性。宋洋[26]等采用室内固结试验结合理论分析研究结果与王飞[24]得到的结果一致。此外,在其基础上建立了不同含水率黄土的应力-应变关系模型和受干湿循环影响的黄土本构方程。国外也有相关研究,Cheng, L 等[27]受干湿循环的影

响, 黄土颗粒发生膨胀和收缩, 导致颗粒之间的亲水性矿物分离, 胶凝材料减少。粘结强度的减弱最终加速了黄土的塌陷性。

上述研究表明了压实度越高, 干湿循环对黄土的变形影响越明显。而且干湿循环会使消除湿陷性的黄土重新具有了湿陷性。

4.2. 干湿循环下黄土的裂隙研究

叶万军[28]等通过 CT 扫描成像技术研究土样不同干湿循环次数下土样内部裂隙的演化规律, 发现黄土微裂隙会随着干湿循环次数增加而逐渐发育, 但不会一直发育, 还发现了水力梯度是影响土体裂隙发育扩张的关键因素。尹今朝[18]等通过对干湿循环作用下的湿限性黄土的裂隙发展研究, 通过在叶万军[28]等研究基础上发现黄土的裂隙率与循环次数之间为指数型关系, 而且发现干密度的减少是黄土表面裂隙改变和力学性能衰减的本质原因。袁志辉[29]等对不同含水率和干湿循环条件下的陕西洛川原状黄土的微观结构变化进行研究, 发现原状黄土孔隙平均形状系数和孔隙定向频率经过干湿循环后增大, 这与叶万军[28]和尹今朝[18]等研究结果一致。并且分析了含水率和干湿循环对孔隙结构变化的原因。即黄土水敏性极强, 增湿会使土体胶结物质溶解, 破坏土体原有结构。毛爱迪[30]等对干湿循环作用下软基黄土孔隙结构特性试验研究表明干湿循环次数的增加, 试样两侧压实度不同会加快裂隙的发育速度。刘禹阳等开展了对原状黄土的干湿循环试验、三轴压缩试验和扫描电镜试验, 通过对黄土宏观和微观结合分析, 发现 Q2 原状黄土微观孔隙损伤劣化呈现两阶段变化特点, 第 1 阶段为孔隙正向扩张发育和反向塌陷压缩双重作用下的波动式损伤积累上升阶段; 第 2 阶段为张拉应力持续削弱, 低于微裂隙的启裂门槛后, 同等干湿循环强度无法进一步驱动微裂隙扩展, 微观孔隙损伤劣化步入稳定阶段。此外, 国外也在这方面进行了研究。WK Ni [31]等通过对不同干湿循环下原状黄土与重塑黄土微观组织参数对比与定量分析, 研究发现原状黄土颗粒的平均直径随干湿循环次数增加会逐渐接近重塑黄土。另外研究表明, 在干湿循环作用下, 重塑后的黄土在形状参数上表现出相似的变化, 但方向性变化不同。结合干湿循环下的保水曲线, 推断黄土颗粒微观结构变化的原因: 盐分在不同水中溶解和重结晶对团聚体大小和形状有影响, 黏土胶结作用对黄土颗粒的排列有影响。W Ye [32]等以铜川与罗川的黄土为研究对象, 发现随着干湿循环次数的增加, 两个地区黄土试样内裂隙数增加, 且最终会趋于稳定, 这与国内学者研究结果一致。

可以看出目前干湿循环对黄土变形的影响的相关研究比较少, 而对于造成其变形的微观机理的研究尚欠缺。

5. 干湿循环对黄土的其他研究

5.1. 对渗透性的研究

渗透性作为研究土的一种手段, 一些学者也对其进行了深入研究。刘宏泰[9]等研究发现重塑黄土的渗透系数会随着干湿循环次数增加明显增大, 而且围压对渗透系数的影响很大。刘朋飞[5]等通过对原状马兰黄土的土水特征曲线方程进行数据拟合, 采用 Gardner 和 Van Genuchten 模型对其非饱和渗透系数进行预测。付理想[33]等对原状黄土和重塑黄土进行干湿循环实验, 研究表明重塑土的渗透系数呈现增大趋势, 这与刘宏泰[9]等研究结果一致。此外, 研究表明原状土的渗透系数在实验中总体呈现减小趋势。而景静[34]等相比于刘朋飞[5]对渗透系数的预测, 采用将土-水特征曲线和 Childs & Collis Geroge 渗透系数模型结合进行研究非饱和黄土渗透系数, 研究表明该方法可以很好地描述和预测非饱和黄土的渗透系数。毛爱迪[30]等通过对干湿循环作用下软基黄土的研究, 发现一次压实的试样与存在交界面试样的渗透系数的变化规律。而且发现干湿循环对高压实度的重塑黄土影响不大。

学者们发现干湿循环对原状黄土以及重塑黄土的渗透系数的影响不同。重塑黄土的渗透系数会随着干湿循环次数增加明显增大，而原状黄土则总体呈现减少趋势。此外，多名学者采用不同方法对干湿循环下黄土的渗透系数进行预测。没有进行更深入的研究，然而滑坡等泥石流灾害与土的渗透性密切相关。因此，要加强对干湿循环对于黄土的渗透性的研究。

5.2. 对边坡的研究

2010年西南山区干旱加暴雨的极端干湿气候对大面积、大规模的泥石流滑坡灾害有促进作用[35]。研究表明，干湿循环导致泥石流滑坡容易发生的原因是干旱时出现大量裂隙，降水渗流沿裂隙集中下渗增加渗流压力，减少阻力与增加下滑力综合作用的结果。很多实际工程也显示边坡等工程的稳定性与干湿循环有着密切的关系。故干湿循环对黄土边坡的研究有着十分重大的意义。李聪[36]等通过对干湿循环下完全扰动黄土路基的回弹模量的研究，发现水对回弹模量的影响程度随着干湿循环次数增加有降低的趋势。此外，一些学者通过数值模拟对干湿循环下黄土边坡进行研究。王晓亮[11]等通过用GeoStudio软件中的SLOPE/W模块对不同坡度，不同干湿循环次数后的边坡进行稳定性分析，研究发现边坡安全系数会随着干湿循环次数的增加而不断降低。杜京房[37]等使用Mein-Larson降雨入渗模型，通过结合改进强度折减法分析降雨和干湿循环对黄土边坡稳定性研究，结果表明改进强度折减法计算结果更安全合理。另外，还有学者通过模型试验对干湿循环下黄土边坡进行研究。孙志杰[38]等采用模型试验模拟干湿循环条件下边坡的变形破坏过程进行研究，研究表明非对称边坡在干湿循环累积下会呈现不同的变形特性，而且发现了缓坡与陡坡的变形破坏顺序与形式等。国外也有相关研究，WYe[32]等通过对铜川与罗川两个地区的黄土进行研究，干湿循环含水量变化范围较大，导致黄土试样抗剪强度降低。相同的干湿循环时间。黄土边坡发生剥落危险往往是因为干湿循环过程对黄土抗剪强度的降低和黄土裂缝的发展导致。

可以发现学者们主要从数值模拟与模型试验两个方向研究干湿循环对黄土边坡的影响。但该方面研究还是较少，还需要加强对干湿循环对黄土边坡的研究。

6. 结论

前辈学者对干湿循环黄土在不同方面进行各种研究，取得了丰硕的成果，获得了一些共有的规律以及结论。但是也存在着试验方法、干湿循环方法以及幅度等不统一，无法进行对比分析。

另外，虽然不同研究者用了各种不同的方法研究出各种成果，但是在微观机理等研究方面进行深入探讨的不多。特别是在干湿循环对于土体劣化微观机理的研究以及对边坡破坏方面的研究。此外，由于地域性差异等，众学者通过试验等得到的预测模型往往非常复杂，需要根据不同的工程需要来选择不同的预测模型。

针对以上当前研究中存在的问题，笔者认为今后的研究应当注重以下几个方面。

1) 建立一个统一的试验方法以及标准，包括制样方法以及干湿循环方法、周期等，以便日后进行分析对比。

2) 建议对于干湿循环对边坡的分析要进行模型试验以及数值模拟相结合的方法，以期得到更好的试验研究成果。

3) 加强微观分析试验的研究，分析干湿循环对于黄土边坡、渗透性、强度等影响的微观机制，有利于从本质上了解干湿循环对于黄土的影响。

基金项目

华北水利水电大学第十五届研究生创新能力提升工程项目(NCWUYC-202315074)。

参考文献

- [1] Yang, H., Rahardjo, H., Leong, E. and Fredlund, D.G. (2004) Factors Affecting Drying and Wetting Soil-Water Characteristic Curves of Sandy Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, **41**, 908-920. <https://doi.org/10.1139/t04-042>
- [2] 刘奉银, 张昭, 周冬, 等. 密度和干湿循环对黄土土-水特征曲线的影响[J]. 岩土力学, 2011(S2): 132-136, 142.
- [3] 赵天宇, 王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲线[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2445-2453.
- [4] 赵文博, 徐洁, 程青, 等. 竖向应力及干湿循环对黄土土-水特征曲线的影响[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(36): 189-193.
- [5] 刘朋飞, 殷跃平, 李滨, 等. 非饱和黄土干湿循环土水特征曲线试验及渗透系数预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(4): 125-129.
- [6] 常洲, 晏长根, 安宁, 等. 干湿循环作用下原状黄土渗透性及其对土-水特征曲线的影响[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(1): 143-150+166.
- [7] 慕现杰, 张小平. 干湿循环条件下膨胀土力学性能试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(z1): 580-582.
- [8] 段涛. 干湿循环情况下黄土强度劣化特性研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2009. .
- [9] 刘宏泰, 张爱军, 段涛, 等. 干湿循环对重塑黄土强度和渗透性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 38-42.
- [10] 袁志辉, 倪万魁, 唐春, 等. 干湿循环下黄土强度衰减与结构强度试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1894-1902, 1942.
- [11] 王晓亮. 干湿循环对黄土抗剪强度和结构性及边坡稳定性影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [12] 赵俊刚. 干湿循环对压实黄土性能的室内影响研究[J]. 甘肃科技, 2017, 33(14): 48-51.
- [13] 胡长明, 袁一力, 王雪艳, 等. 干湿循环作用下压实黄土强度劣化模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2804-2818.
- [14] 李祖勇, 王磊. 干湿循环作用下西安特殊黄土的力学特性[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(32): 315-319.
- [15] 袁志辉, 唐春, 杨普济, 等. 干湿循环下原状黄土抗压强度试验研究[C]//2018 年全国工程地质学术年会论文集. 2018: 155-161.
- [16] 潘振兴, 杨更社, 叶万军, 等. 干湿循环作用下原状黄土力学性质及细观损伤研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(6): 1186-1192.
- [17] 郝延周, 王铁行, 汪朝, 等. 干湿循环作用下压实黄土三轴剪切特性试验研究[J]. 水利学报, 2021, 52(03): 359-368.
- [18] 尹今朝, 胡同. 湿陷性黄土力学性质与裂隙发展干湿循环效应[J]. 人民黄河, 2022, 44(2): 143-146, 152.
- [19] 赵俊宇, 许增光, 柴军瑞, 等. 干湿循环条件下重塑黄土强度与持水特性的试验研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(9): 169-172, 139.
- [20] 周立阳, 许健, 胡科, 等. 干湿循环效应下裂隙性黄土单轴压缩力学特性[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(1): 133-140, 192.
- [21] 袁志辉, 倪万魁, 唐春, 等. 干湿循环效应下黄土抗拉强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3670-3677.
- [22] 王铁行, 郝延周, 汪朝, 等. 干湿循环作用下压实黄土动强度性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1242-1251.
- [23] Ye, W., Bai, Y., Cui, C. and Duan, X. (2020) Deterioration of the Internal Structure of Loess under Dry-Wet Cycles. *Advances in Civil Engineering*, **2020**, Article ID: 8881423. <https://doi.org/10.1155/2020/8881423>
- [24] 王飞, 李国玉, 穆彦虎, 等. 干湿循环条件下压实黄土变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(08): 2306-2312, 2320.
- [25] 李向宁, 倪万魁, 王熙俊, 等. 干湿循环过程中压实黄土的胀缩变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 179-188.
- [26] 宋洋, 刘思源, 王晨焯. 含水率和干湿循环对原状黄土变形特性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 148-155.
- [27] Cheng, L., Zhang, Z., Liu, C., Zhang, Y., Lv, Q., Zhang, Y., et al. (2024) Effects of Freeze-Thaw and Dry-Wet Cycles on the Collapsibility of the Ili Loess with Variable Initial Moisture Contents. *Land*, **13**, Article 1931.

<https://doi.org/10.3390/land13111931>

- [28] 叶万军, 李长清, 马伟超. 干湿循环作用下黄土节理裂隙发育扩张的机制研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(30): 122-127.
- [29] 袁志辉, 唐春, 杨普济, 等. 考虑含水率和干湿循环影响的原状黄土孔隙微观结构研究[J]. 南昌工程学院学报, 2021, 40(4): 48-55.
- [30] 毛爱迪. 干湿循环作用下软基黄土孔隙结构特性试验研究[J]. 资源信息与工程, 2021, 36(6): 96-99, 102.
- [31] Ni, W., Yuan, K., Lü, X. and Yuan, Z. (2020) Comparison and Quantitative Analysis of Microstructure Parameters between Original Loess and Remoulded Loess under Different Wetting-Drying Cycles. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 5547. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62571-1>
- [32] Ye, W. and Zhang, Y. (2018) Effect of Dry-Wet Cycle on the Formation of Loess Slope Spalling Hazards. *Civil Engineering Journal*, **4**, 785-795. <https://doi.org/10.28991/cej-0309133>
- [33] 付理想, 梅岭. 干湿循环对原状及重塑黄土渗透系数的影响分析[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2018, 28(1): 1-6.
- [34] 景静, 孙文, 江肖鹏. 干湿循环对非饱和黄土渗透系数的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(6): 224-229.
- [35] 陈宁生, 王凤娘. 2010 年极端干湿循环对我国西南山区大规模泥石流滑坡灾害的促进作用[C]//2015 年全国工程地质学术年会论文集. 2015: 63-69.
- [36] 李聪, 邓卫东, 崔相奎. 干湿循环条件下完全扰动黄土路基回弹模量分析[J]. 交通科学与工程, 2009, 25(2): 8-12.
- [37] 杜京房, 仝飞. 干湿循环与降雨对黄土边坡稳定性的影响研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(4): 783-791.
- [38] 孙志杰, 苗鹏勇. 干湿交替环境下黄土边坡坡表变形演化规律模型试验[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(10): 117-123.