

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202508180015

黄土力-水-气-化多场耦合灾变机理论述

乔雄^{1,2}, 农宇^{1,2}, 郭楠^{1,2}

(1. 兰州理工大学土木与水利工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 黄土地区工程灾变本质上是力-水-气-化 (Mechanical-hydrological-gas-chemical, MHGC) 等多场耦合作用下土体结构失稳的宏观表现。通过系统梳理黄土在 MHGC 耦合作用下的灾变机理研究现状, 提出了当前黄土耦合机理发展中的问题, 并对其发展趋势进行了分析。分析表明: 不同物理-化学场之间通过吸力-有效应力转换、溶蚀-损伤耦合和气压-渗流反馈等机制发生非线性叠加, 是多尺度灾变演化的根本驱动力。现有本构模型多停留在 HM 或三场简化耦合层面, 化学损伤与气-液-固三相动态作用的统一表征尚显不足。今后应面向灾变精准防控需求, 结合典型工程实例, 深入研究非饱和黄土的 MHGC 等多场耦合特性, 建立其对应的本构关系, 推动黄土及黄土工程从“被动防灾”向“主动调控”的发展, 并进一步向“精准防控”跨越。

关键词: 多场耦合; 黄土; 力学特性; 本构模型; 灾变机制

中图分类号: P642.13⁺1; P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)03-0887-13

Review of Research on Multi-field Coupling Disaster Mechanism of Loess Mechanical-Hydrological-Gas-Chemical

QIAO Xiong^{1,2}, NONG Yu^{1,2}, GUO Nan^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Engineering Research Center of Western Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Engineering disasters in loess regions are fundamentally macroscopic manifestations of soil structural destabilization induced by the coupled Mechanical-Hydrological-Gas-Chemical (MHGC) interactions. This paper provides a critical review of the state-of-the-art research concerning loess disaster mechanisms under MHGC coupling, identifies current theoretical bottlenecks, and delineates future research trajectories. It is revealed that the nonlinear interplay among distinct physicochemical fields—mediated by mechanisms including suction-effective stress conversion, dissolution-damage coupling, and gas pressure-seepage feedback—constitutes the primary driving force behind multi-scale catastrophic evolution. However, existing constitutive models remain predominantly confined to Hydrological-Mechanical (HM) or simplified three-field coupling scenarios, failing to adequately characterize the unified effects of chemical damage and dynamic gas-liquid-solid phase interactions. Consequently, future research endeavors

收稿日期: 2025-08-18; **修回日期:** 2025-10-06; **编辑:** 李龚健。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52168051, 42462028); 甘肃省杰出青年基金项目 (25JRRA057); 兰州市青年科技人才创新项目 (2023-QN-52, 2023-QN-27); 兰州理工大学红柳优秀青年人才支持计划项目 (04-062214)。

作者简介: 乔雄, 男, 副教授, 1980年出生, 主要从事土力学及黄土隧道等方面的教学和科研工作。Email: qiaoxiong@lut.edu.cn。

引用格式: 乔雄, 农宇, 郭楠. 黄土力-水-气-化多场耦合灾变机理论述 [J]. 现代地质, 2026, 40 (3): 887-899. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202508180015.

QIAO Xiong, NONG Yu, GUO Nan. Review of Research on Multi-field Coupling Disaster Mechanism of Loess Mechanical-Hydrological-Gas-Chemical [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40 (3): 887-899. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202508180015.

ors should align with the imperative for precision disaster control. By integrating typical engineering case studies, it is crucial to conduct in-depth investigations into the MHGC coupling characteristics of unsaturated loess and establish comprehensive constitutive relationships. Such advancements are essential to facilitate a paradigm shift in loess engineering from “passive prevention” to “active regulation,” and ultimately, towards “precision control.”

Key words: multifield coupling; loess; mechanical property; constitutive model; disaster mechanism

0 引言

黄土水敏性（湿陷性）问题一直是黄土高原地区工程建设中最普遍且困扰工程师的工程地质问题之一^[1, 2]。在实际工程中，黄土既具有自然属性，又具有人工属性，整体与环境交互强烈^[3-6]。自然属性指黄土存在于开放的自然环境中^[7-9]，受到自然界各种因素的作用和影响，是地质历史的产物，而这些因素几乎都是以场的形式相互作用着，并随着时空的变化也在不断变化着。人工属性指在黄土层上进行各种人类工程活动，反向对黄土产生影响。这种影响也是多因素的，也具有场的属性^[10]。随着西部大开发和城镇化的长期推进，西部黄土高原城市的大量建筑及其基础设施向地下空间开发，在黄土层中纵深发展，处于建筑底层及周围的土层会面临管道泄露或者降雨引起的化学污染入侵而发生水化学环境变化^[11, 12]，处在附加高应力、高渗透水压中的黄土体将发生极其复杂的应力、水流、气体和化学（Mechanical-Hydrological-Gas-Chemical, MHGC）等多场耦合作用，危及黄土结构稳定^[13-15]。这类问题逐渐成为黄土地区工程建设项目中亟需解决的问题，也是未来精准防灾领域的重要研究内容^[16, 17]。

黄土的MHGC等多场耦合研究始于20世纪中末期对湿陷（水-力，即Hydrological-Mechanical, HM）问题的提炼，并在早期基于质量、能量和动量守恒原理，提出了分场迭代耦合分析方法，通过渗流场、温度场与应力场的独立求解实现交互模拟^[18]。后来，Fredlund等^[19]建立的经典非饱和土力学框架为HM耦合研究奠定了基础。但随着微观测试技术的发展，发现黄土的湿陷性与易溶盐含量、黏土矿物类型等化学特性密切相关^[20]。如张爱军等^[21-23]通过伊犁黄土浸水试验研究，证实了易溶盐溶解导致胶结强度大幅度损失，显著加剧自重湿陷量。化学场（Chemical, C）对黄土结

构的影响已不可忽视。同时渗透场包含水分与气体，气体（Gas, G）的加压驱动也成为了影响土体结构强度的重要因素。以甘肃黑方台地区典型的黄土滑坡灾害为例^[24, 25]，该区域在1984—2019年已频繁发生滑坡灾害约150次，沿黄土塬边形成长约10公里的滑坡密集发育带。滑坡类型主要为中、小型黄土层内滑坡，占90%以上；其次为大、中型黄土-泥岩顺层滑坡。其灾变过程是典型的多场耦合作用结果，由于农业长期的大水漫灌（H场）导致地下水位持续抬升，饱和区域不断扩大，显著降低了土体的基质吸力和有效应力，从而大幅削弱了黄土的抗剪强度（M场）。同时，灌溉水中的溶解盐分随水流运移，改变了土体内部的化学环境，加速了碳酸盐等胶结物的溶解和易溶盐的淋滤（C场），从根本上破坏了黄土的结构骨架。此外，地下水位的快速升降与自重应力的提高可能导致孔隙中气体被封闭、压缩，形成超孔隙气压（G场），在特定条件下可能成为触发滑坡的“主要因素”。因此，要全面解释此类复杂灾害的成因，须建立涵盖水、力、气、化等多场耦合作用的理论体系，才能深刻揭示灾变机理，实现精准防控。然而，目前大部分黄土耦合研究处于两场或三场耦合阶段，主要在黄土HM两场耦合方面开展了大量试验、理论研究工作，获得了大量的数据与模型，黄土的力-水-气（Mechanical-Hydrological-Gas, MHG）和力-水-化（Mechanical-Hydrological-Chemical, MHC）三场耦合研究则基于HM耦合条件下得以延伸，尚处在发展阶段，缺乏系统总结^[26-28]。

因此，拟在梳理不同条件下HM耦合机制研究成果的基础上，结合MHG和MHC多场耦合作用下黄土力学特性和相关模型，归纳总结MHGC等多场耦合作用对黄土地质环境和工程构筑物的深层灾变机制，并对其研究的发展趋势进行概述，以推进黄土的力学特性对复杂环境响应的预测精度及应对措施的研究。

1 黄土MHGC耦合灾变机理研究现状

1.1 HM耦合作用

1.1.1 水敏性

黄土是典型的非饱和和结构性土,具有显著的湿陷性(水敏性)^[29, 30],故HM耦合作用显著影响其力学行为^[31, 32]。目前研究新的成果主要表现在HM条件下引起的土体微观结构重组以及造成的土体宏观力学响应两个方面。

(1) 土体微观结构重组。

微观结构重组指土体在HM耦合作用下引起的孔隙形态改变与胶结网络破坏^[33]。为探究HM条件下土体孔隙形态的变化规律,马富丽等^[34]通过一维常含水率压缩试验、扫描电镜与压汞试验发现,侧限压缩条件下,土体初始大孔隙随竖向荷载增加逐渐坍塌为中小孔隙,而水力渗透加速孔隙连通性发展,形成优势渗流通道。同时,葛苗苗等^[35]通过增湿-加载-细观联合试验,发现HM耦合的动态平衡特性对干湿循环过程中细观孔隙变化影响尤为显著,即在黄土增湿至饱和时,孔隙体积膨胀,然后加载孔隙坍塌。这类现象被蔡国庆等^[36, 37]归因于水分侵入导致吸力丧失与有效应力重分布,当吸力较低时,基质吸力提供的“表观黏聚力”损失,颗粒滑移阻力降低,促使结构被压缩。此外,在吸湿-脱湿循环中,土体经历吸湿路径时孔隙扩张速率高于脱湿路径,且残余变形随循环次数增加累积,这就是水力路径差异导致结构演化呈现的滞后效应,表明水分迁移与力学加载的时序耦合对结构稳定性具有不可逆影响^[38]。

胶结网络破坏指土体在水分渗透引起的胶结物溶解,通过削弱颗粒间连接强度,导致孔隙壁局部剥落与微裂隙扩展。如图1所示的微观结构演化过程:当水进入土壤时,土壤含水量增加,土壤中的毛细管力减小,结果孔隙水压力增强,土壤的“收缩”状态逐渐缓解。随着游离水的增加,胶黏剂颗粒之间的离子静电力逐渐减弱,无机盐也溶解^[39]。此时,一些黏性颗粒逐渐从孔喉和土骨架颗粒周围向中间的大孔移动,土体达到饱和状态后,由于土体中孔隙水压力的增加,有效应力降低,土体逐渐呈现“膨胀”状态^[40, 41]。最终当达到一定临界值时,黄土颗粒之间的游离水膜在浸泡在水中后,在外力下起到“润滑剂”的作用,从而引起土体结构损伤。

(2) 土体宏观力学响应。

土体宏观力学响应指土体在外力作用下表现出的整体力学行为,主要包括应力-应变关系、强度特性及变形规律。而非饱和和黄土的HM耦合行为,其核心在于水分变化如何改变土体的有效应力状态。1959年, Bishop^[42]提出了适用于非饱和土的有效应力原理:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

式中, σ' 为有效应力, σ 为总应力, u_a 为孔隙气压力, u_w 为孔隙水压力, $(u_a - u_w)$ 为基质吸力 s , χ 为有效应力参数,是与饱和度 S_r 相关的函数。

然而,由于参数 χ 难以准确确定, Fredlund 和 Morgenstern^[43]提出了双应力状态变量理论,将净应力 $(\sigma - u_a)$ 与基质吸力 $(u_a - u_w)$ 作为两个独立的应力变量来描述非饱和土的力学行为。基于此框

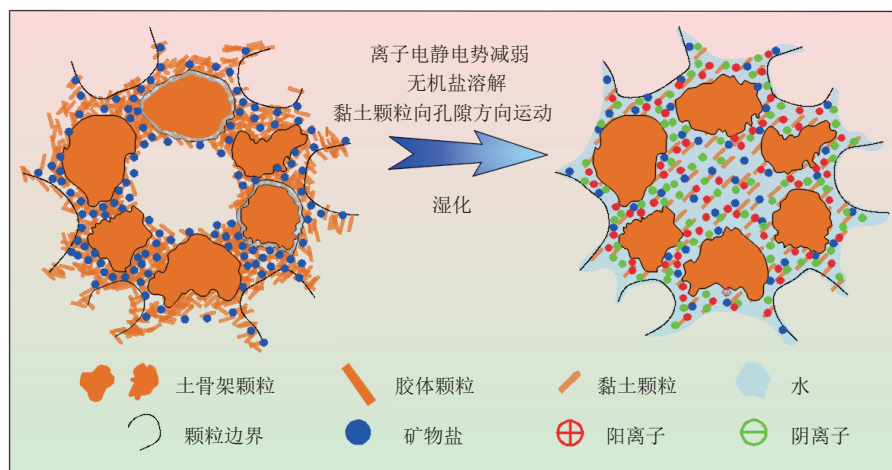


图1 黄土湿化引起的劣化 (据文献 [5] 修改)

Fig. 1 Deterioration caused by loess wetting (modified after reference [5])

架, 非饱和土的体积变化 $\left(\frac{dV}{V}\right)$ 和抗剪强度 τ_f , 可分别表示为:

$$\frac{dV}{V} = \frac{1}{K} d(\sigma_{\text{net}}) + \frac{1}{H} ds \quad (2)$$

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (3)$$

式中, K 为与净应力相关的体积模量; H 为与吸力相关的体积模量; c' 和 φ' 为有效黏聚力和有效内摩擦角; σ_n 为法向总应力; φ^b 为与基质吸力相关的抗剪强度角。

从式(1) - (3)可以看出, 黄土的水敏性(湿陷)具有明确的力学内涵: 当水分侵入(u_w 增大或 S_r 增大)时, 基质吸力 s 急剧下降, 导致有效应力 σ' 降低和抗剪强度 τ_f 减小, 同时引发不可恢复的体积压缩(湿陷)。基于该理论分析, 在Qin等^[44]的三轴剪切试验结果中, 饱和黄土的黏聚力与内摩擦角分别较天然状态降低, 且应力-应变曲线由应变硬化型向理想弹塑性转变, 呈现非线性特征, 高围压下水分对强度弱化的主导作用增强。而蔡国庆等^[38]在平面应变试验中发现HM耦合的空间非均匀性导致力学响应呈现显著各向异性, 即垂直渗透方向的弹性模量较平行方向低, 且剪切带倾角随含水率增加而降低, 反映出水分扩散路径对土体破坏模式的调控。二者的发现在Lan等^[45]的原位监测试验中得到了验证, 即发现在裂隙发育的黄土填方工程中, 当水力梯度超过临界值时, 侧向土压力系数骤降, 同时垂直位移速

率增加, 导致黄土填方填挖界面处的水分扩散导致接触带发生横向回弹。总体机理为水分重分布引起的吸力恢复与有效应力释放, 即渗流力引发的颗粒迁移加剧了结构失稳。此外, 长期HM耦合作用还会诱发蠕变-收缩协同效应, 如图2中的现场监测数据演化曲线所示, 侧向土压力随湿度的周期性波动趋势, 证实了水分迁移对蠕变-收缩协同效应的驱动机制, 即水分对时效变形的加速作用。

综上, HM耦合作用本质在于水分迁移引发的吸力丧失、有效应力重分布和颗粒迁移, 显著影响黄土的结构稳定性与力学行为, 即从细观层面导致黄土结构发生不可逆重组, 包括孔隙形态改变(大孔隙坍塌为中小孔隙, 形成优势渗流通道)和胶结网络破坏(胶结物溶解、有效应力降低); 宏观上则呈现强度衰减(黏聚力和内摩擦角降低)、变形非线性与各向异性(弹性模量方向性差异)以及蠕变-收缩协同效应。

1.1.2 HM耦合本构模型

HM耦合本构模型主要描述土体在水分渗透与力学荷载共同作用下变形与强度关系, 并在填方工程、边坡稳定性分析等领域具有显著应用成效。近年来, 该领域的研究成果主要可归纳为以下三类:

(1) 基于弹塑性理论的宏观模型。

基于经典理论框架改进是近年模型发展的主流方向, 如著名的巴塞罗那模型(BBM)^[46, 47]的形成与发展: Alonso等^[48]首先建立了非饱和土的加载-塌陷(LC)屈服曲线, 如式(4)所示, 其中

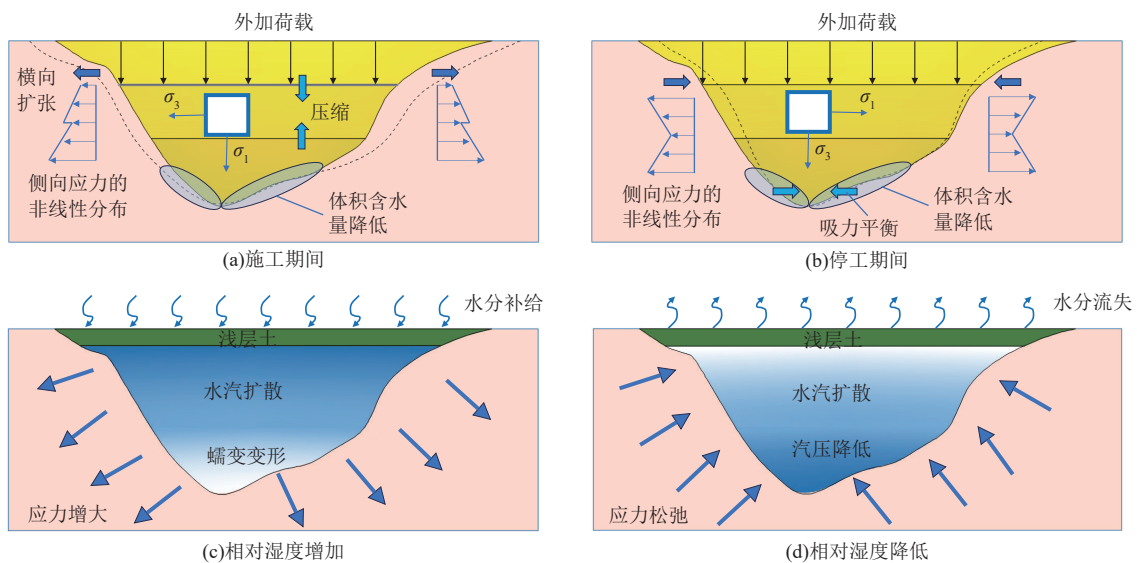


图2 黄土和人工填土在平山造地过程中水力-力学行为演化机理(据文献[45]修改)

Fig. 2 The evolution mechanism of hydraulic-mechanical behavior of loess and artificial fill in the process of land creation by mountain cutting (modified after reference [45])

双应力变量由净应力和吸力组成; 后来通过采用改进的剑桥模型(MCC)的椭圆屈服轨迹(式(5))进一步扩展了轴对称应力状态, 从而形成BBM模型, 即以吸力与净应力为控制变量, 通过吸力相关屈服面描述湿陷变形, 是典型的吸力硬化模型。然而, BBM模型对黄土结构性特征的简化假设^[49](忽略胶结软化效应)导致其在复杂水力路径下的预测偏差较大。为此, 邵帅等^[50]提出了一种与密度状态相关的BBM改进模型, 将初始孔隙比与饱和度引入屈服函数, 修正了吸力相关屈服面的位置与形态, 模型通过等向压缩试验与三轴拉伸试验验证, 预测的湿陷变形误差较传统BBM模型降低, 而且在低围压与高吸力条件下的吻合度较高, 并提出分段拟合策略解决了黄土的高进气值与滞后效应导致低吸力区数据离散性较大的问题。此外, 针对水力路径的滞后效应, 韩博文等^[51]基于BBM模型的部分假设, 在边界模型中引入颗粒黏结力的动态衰减函数, 成功模拟了干湿循环中黄土的累积塑性应变与刚度退化, 进一步深化了BBM模型。但BBM模型等宏观模型的精度仍需要大量的试验进行修正, 同时宏观模型将大部分影响因素归纳为一个参数或一种假设, 无法全面精准描述环境剧烈变化下的力学破坏现象。

$$p_0/p^c = (p_0^*/p^c) \exp([\lambda(0) - \kappa]/[\lambda(s) - \kappa]) \quad (4)$$

$$f = q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0 \quad (5)$$

式中, p_0 为非饱和土的先期固结压力; p_0^* 为饱和条件下的先期固结压力; p^c 是参考应力; $\lambda(0)$ 为饱和状态下对应于某个应力值的压缩指数; $\lambda(s)$ 是吸力 s 的函数; q 是偏应力; M 是临界状态参数; p 是净平均应力; p_s 为临界状态线与轴的交点到原点的距离, 它随吸力的增加而增加。

(2) 基于损伤力学的本构模型。

这类模型将黄土的湿陷过程视为水分和荷载引起的材料内部结构损伤累积的结果。模型通过引入一个或多个损伤变量来描述材料刚度和强度的劣化, 该变量一般为损伤比 ω , 表示破坏过程损伤程度与原始状态之比, 即土体力学特性可表示为原状土及重塑土的加权平均值, 如式(6)所示。基于该原理, 罗爱忠等^[52]将含水率与损伤变量建立指数衰减关系, 描述了HM耦合作用下黄土的结构性损伤演化。在此之上, 姚志华等^[53]进一步建立了弹塑性损伤渗流-固结耦合模型, 能够同

时考虑渗流过程和结构损伤对黄土变形的影响。此类模型的优势在于能直观地描述结构劣化过程, 并与宏观力学性能退化建立联系。然而, 损伤变量的定义和演化规律往往依赖于经验公式, 缺乏坚实的微观物理机制支撑, 如何通过试验准确标定损伤参数仍是一个挑战。

$$S = (1 - \omega)S_i + \omega S_d \quad (6)$$

式中, S 为土的某一种力学指标; S_i 与 S_d 分别为原状土及重塑土的同一力学指标。

(3) 融合微观机制的多尺度模型。

微观结构演化机制参数融入是近年模型发展的另一方向。这类模型试图从更根本的微观结构演化出发, 建立宏观本构关系。如葛苗苗等^[35]通过一维常含水率压缩试验, 依据压实黄土在加载过程中大孔隙坍塌主导体积应变, 而小孔隙分布保持稳定的规律, 提出基于孔隙分形维数的压缩方程, 并通过压汞试验与扫描电镜验证, 分形维数变化量与塑性应变的相关性高, 显著提升了水力耦合变形的微观解释力。但目前该类研究尚处于探索阶段, 如何将复杂的微观信息(如颗粒形态、胶结物分布、孔隙连通性等)系统性地融入宏观本构框架, 并实现参数的有效获取, 需要在未来进一步突破。

综上所述, HM耦合本构模型经历了从宏观现象到损伤表征, 再到微观机制融合的发展历程。然而, 其现有局限性表明仅考虑HM耦合的模型已无法满足对黄土结构性、胶结破坏的不可逆性以及复杂水力路径依赖性方面的描述。

1.2 HMG耦合作用

1.2.1 气体迁移作用

传统的HM耦合研究往往假设孔隙气压恒定或气体能够自由排出, 而在实际非饱和黄土工程中, 气相的存在及其迁移行为对土体结构和渗流场具有显著影响。特别是在降雨入渗或地下水位快速变化时, 孔隙气体的封闭与压缩会形成HMG三场耦合效应, 这一机制是理解复杂黄土灾变的关键补充。这种耦合关系主要体现在土体孔隙结构变化、饱和度与应力状态的协同作用、气体运移与水传输的竞争机制等多维度相互作用中, 形成了复杂的物理化学过程^[54, 55]。

首先, 水分含量的变化显著影响土体渗气特性, 而气体运移又反作用于水分分布与力学响应。非饱和黄土中, 孔隙水与气体共同占据孔隙空间,

形成动态竞争关系。当水分含量增加时,孔隙气体被压缩排出,导致渗气系数呈指数下降^[56],如压实黄土在饱和过程中尤为显著^[57, 58]。这种变化源于水的润湿作用使土颗粒表面形成吸附水膜,缩小气体运移通道,同时引发黏土矿物的膨胀效应,渗气路径迂曲度增加,进一步封闭孔隙喉道^[59-61]。此外,气液两相流的界面张力效应在微观尺度上表现为毛细阻滞作用,尤其在干湿循环过程中,反复的吸湿-脱湿会导致孔隙结构重组,形成更复杂的渗流网络^[62]。

其次,力学应力场通过改变土体孔隙结构直接调控水气运移过程。在三轴试验中,等向应力增大时,原状黄土的渗气系数大幅下降,这是由于围压增大导致孔隙压缩,有效气体通道截面面积减小引起的^[63]。同时,剪切应力引起的土体结构损伤会显著改变渗透特性^[64]。值得注意的是,在浸水入渗条件下,水力梯度的存在会诱导土体发生湿陷变形,这种力学响应进一步改变孔隙分布,即浸水后黄土体积含水率升高时,湿陷量增加,同时孔隙气压增大,形成显著的气阻效应,最后气压加压到一定程度逃逸使得暂时稳定结构损伤^[55, 57]。这是由于应力历史对耦合效应具有记忆性,水力条件平衡后的土体虽孔隙部分恢复,但因颗粒重新排列形成的新结构导致渗气系数无法完全恢复至初始状态,并具有滞后效应。

此外,水-气运移的时序竞争机制在微观孔隙

尺度呈现复杂非线性特征。初期水分入渗时,湿润锋前方气体受压缩形成局部高压区,气压梯度会反向抑制水分下渗速率,导致入渗速率在某一恒定值波动。随着饱和度提高,封闭气泡逐渐溶解于水相,气液两相流逐渐过渡为单相流,此时渗透系数趋近于饱和渗透系数,此时微小的含水量波动即可引发渗流状态的突变^[64]。同时,CO₂等气体的生成与运移会改变孔隙液的化学平衡,如黄土包气带中CO₂气体扩散会加速CaCO₃溶解,增大孔隙连通性,间接提升水力传导率。

在工程实践中,HMG耦合效应直接影响填埋场覆盖层等工程结构的稳定性。当压实黄土作为覆盖材料时,其干密度增加会导致渗气系数下降,形成更优的密封性能。同时当覆盖层饱和度较大时,气体在地表的释放通量较低,这得益于水分占据孔隙形成的物理屏障作用^[65]。然而,密封性良好时会增大滞后气体突破压力,且在干湿循环下会导致覆盖层产生收缩裂缝,并不断潜蚀地层,扩展裂缝深度^[66]。如图3的气体运移与破坏模式所示,高饱和度区域形成的气体封闭屏障导致气压累积,进而反向驱动覆盖层产生收缩裂缝与气蚀通道,这一过程表明了气体迁移对土体稳定性的破坏机制。

综上所述,黄土中水-气-力的耦合作用本质上是多物理场在孔隙尺度协同演化的结果。其中,水分变化通过改变饱和度调控渗气路径,力学应

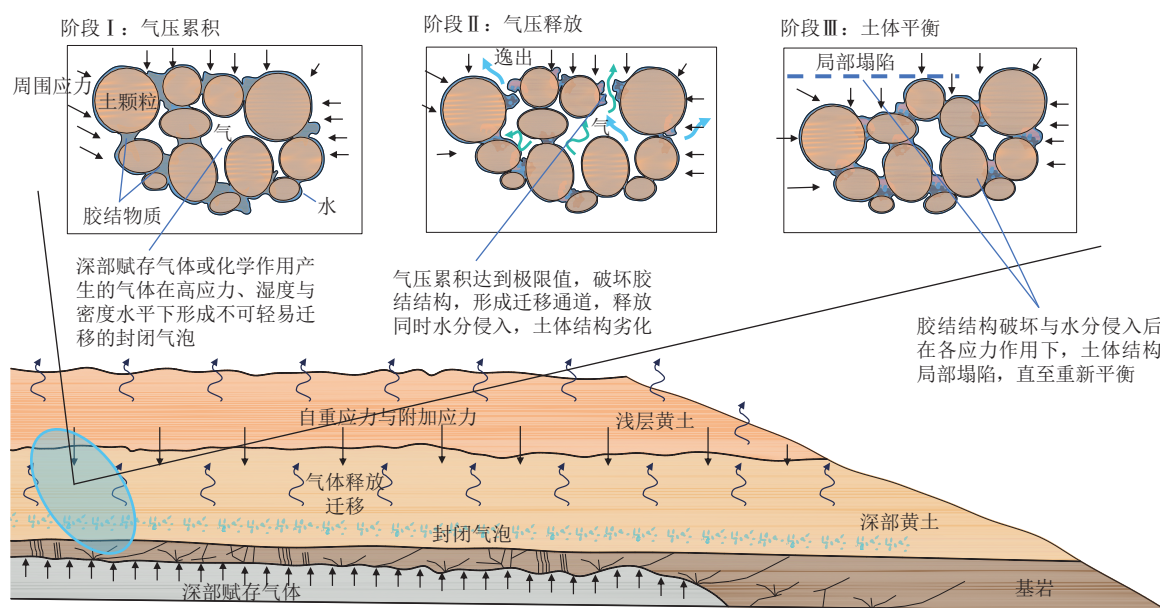


图3 气体迁移引起的黄土破坏过程

Fig. 3 Destruction process of loess caused by gas migration

力主导孔隙结构重构,而气体运移则通过气压累积与化学作用反作用于水力传导。这种动态平衡关系在微观上受控于土颗粒排列方式、孔隙形态分布及界面相互作用,在宏观上表现为渗透特性的非线性变化。

1.2.2 HMG耦合模型

气体迁移理论模型方面,从早期研究聚焦压实土渗透系数与初始含水率/饱和度的关系^[67]、基于基质吸力-孔隙尺寸-饱和度曲线预测渗气系数 k_a ^[68],以及低压梯度下 k_a 的精确测定^[69]来看,土体的HMG耦合模型发展是以求解渗气系数 k_a 的迁移模型进行量化,渗气系数模型代表着土体连通性的强弱变化,进而借此可以分析土体的强度变化。目前黄土渗气预测模型^[70-72]基本均基于Van Genuchten (VG)模型方程与统计传导率模型^[73, 74]建立与发展(式(7)),其渗气行为受外压、密度、初始含水率与饱和度协同调控,饱和度升高显著削弱渗透。具体是应力通过提升饱和度间接降低 k_a ,含水率增加引起的 k_a 衰减相对平缓^[59];压缩引起的孔隙度减小导致 k_a 同步递减^[75]。此外,姚志华等^[76]提出的渗气模型验证了Darcy定律适用于特定黄土,并揭示了压力梯度范围对理论适用性的影响,干密度、含水率的影响规律,以及原状土的各向异性效应的影响。但黄土HMG耦合迁移模型因应变参数的缺失导致其无法并入土体狭义的本构模型体系,对于黄土的力学演变仍作为辅助分析体系。

$$k_a = \sqrt{1 - S_{ew}} (1 - S_{ew}^{1/(1-1/c)})^{2(1-1/c)} \quad (7)$$

式中: S_{ew} 为相对有效饱和度; c 为VG模型拟合参数。

1.3 HMC耦合作用

由于黄土自身化学性质往往在HM耦合作用下发生化学反应,甚至因特殊溶质溶液反应产生气体,并在封闭与压缩情景中引起孔隙气压增大,形成HMC三场或HMGC四场耦合效应,导致黄土的复杂灾变。目前在黄土中进行化学场的耦合研究同样没有明确依据,但化学侵蚀引发的土体结构性劣化与化学改性手段,对土体工程性能的主动提升两个方面的黄土研究可将其视为HMC耦合研究。

1.3.1 化学侵蚀

在实际黄土场地中,由于水循环携带各种化学物质,水分沿渗透路径的优先迁移导致化学物

质分布不均,形成局部高浓度化学侵蚀区^[77, 78],导致常规条件下黄土结构受到化学场的作用^[79]。其内在机制可根据化学变化形式将化学侵蚀对黄土结构的劣化效应分为三类:离子交换、胶结物溶解与胶体分散。

(1) 离子交换指在土体胶体双电子层的扩散层中,补偿离子可以和溶液中相同电荷的离子以离子价为依据作等价交换。离子电荷数越高,阳离子交换能力越强;同价则离子半径越大,交换能力越强,如张阳等^[80]研究发现,重金属污染则通过离子交换与黏土矿物表面结合,压缩双电层厚度,降低土体渗透性,认为阳离子吸附导致颗粒间排斥力减弱与絮凝结构形成。

(2) 胶结物溶解需在特定的环境条件下,例如,Zhang等^[81]通过室内模拟试验发现,酸性环境下,黄土湿陷系数增大, H^+ 离子通过渗透作用侵入土体孔隙,与碳酸盐胶结物发生反应,导致胶结网络崩解,且溶解产物会随水分迁移加剧孔隙堵塞;而拓文鑫等^[82]则通过NaCl溶液浸泡后黄土的收缩系数较纯水条件的研究,即用可溶盐在干湿循环中结晶-溶解循环产生体积应变来揭示胶结物溶解对黄土的影响。

(3) 胶体分散一般发生在离子交换、胶结物溶解之后,如图4所示的化学损伤微观过程:在携带着各种化学污染水分侵蚀条件下,离子交换、盐胶结物溶解过程发生,颗粒间黏土矿物(胶体)因胶结物分解后双电层增厚而发生分散,进一步加剧孔隙结构失稳^[83, 84]。此外,土体结构在力学荷载的协同作用下加速了结构损伤,在 Cu^{2+} 污染与围压耦合条件下,黄土的黏聚力较天然状态降低,且应力-应变曲线呈现脆性破坏特征,其机理为荷载作用下颗粒间接触应力集中诱发胶结断裂与离子迁移通道扩展^[80],使得HMC耦合作用下黄土的结构劣化具有不可逆性。

1.3.2 化学改良

对于黄土结构湿陷特性,学者们提出了多种化学手段进行改良,从而增强黄土的结构稳定性,本质上是HMC耦合的应用,分为引入外源胶凝物质与改变土体化学组成两个方面。

(1) 引入外源胶凝物质的手段本质上就是改良土的一种,在土中掺入无机胶凝材料就是最简单直接的改良方式。如赵晓晴等^[85]通过石灰-碱渣稳定土现场试验发现,掺入石灰与碱渣可使改

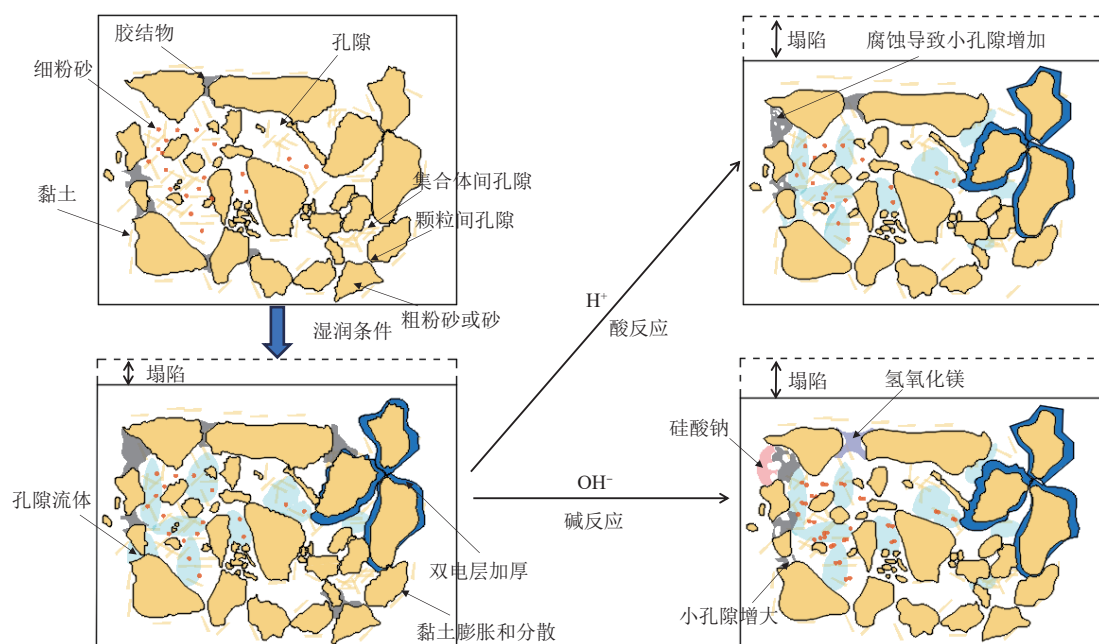


图4 化学污染引起的黄土胶结破坏 (据文献 [84] 修改)

Fig. 4 Cementation failure of loess caused by chemical pollution (modified after reference [84])

良土性能提升, 且碳酸盐含量增加, 形成抗渗性更强的胶结网络; 崔素丽等^[86]采用水泥窑灰改良湿陷性黄土, 现场检测显示改良后地基的碳酸盐含量增加, 其湿陷量大幅降低, 证实了胶结强化效果; 王东星等^[87]通过5年期跟踪监测发现, 粉煤灰-MgO 固化黄土的强度可在前2年保持稳定, 但在酸雨与冻融循环耦合作用下, 凝胶相出现微裂隙与 Ca^{2+} 流失现象, 第3年后强度逐渐衰减。除了使用无机胶凝材料进行胶结, 部分改良方式通过引入有机高分子材料, 其原理是通过物理吸附或化学键合改善土体憎水性与颗粒连接强度, 如彭宇等^[88]利用有机高分子材料抗疏力固化剂对黄土的试验研究, 发现黄土的接触角增加, 渗透系数降低2个数量级, 且扫描电镜显示固化剂在颗粒表面形成连续憎水膜, 有效抑制水分侵入与离子迁移。

(2) 改变土体化学组成的抑制手段现指酸处理方式, 通过可控酸蚀溶解部分碳酸盐胶结物, 重构更稳定的硅铝酸盐网络。如张耀等^[89]通过盐酸处理黄土, 发现适度酸蚀可使湿陷系数降低, 其处治机理来源与预浸水法类似, 但酸处理中不仅是湿陷让土体密实, H^+ 溶解碳酸盐释放的 SiO_2 与 Al_2O_3 还可在孔隙中重新聚合, 会形成以硅氧键为主的胶结结构, 让土体结构更为稳定。

从上述化学侵蚀通过离子交换、胶结物溶解和胶体分散三重机制导致结构不可逆劣化, 与化

学改性手段通过引入外源胶凝物质和改变土体化学组成主动提升工程性能两个方面来看, HMC耦合过程本质是水分-溶质-荷载协同作用对黄土微观结构重组与宏观力学行为的系统性调控。

1.3.3 HMC耦合本构模型

HMC耦合本构模型旨在定量描述土体在水分、力学荷载与化学场协同作用下的变形与强度演化过程^[90, 91]。近年来, 随着环境岩土工程问题的复杂化, 学者们逐步突破传统力学框架, 将化学势、粒间物理化学作用力等概念引入本构模型。但目前HMC耦合下黄土本构模型的研究较少, 张耀^[92]虽基于酸性环境对黄土的影响, 在黄土二元介质破损模型的基础上, 提出了考虑化学因素影响的破损变量, 并通过引入化学损伤模型的表述, 建立了可以预测非饱和黄土在酸污染下的湿陷变形趋势的本构模型。但张耀模型实质上仍属于经验修正公式, 缺乏完整的理论体系, 相比之下, 黏土的HMC耦合本构模型发展更为成熟, 如韦昌富等^[93]建立的基于真实孔压的化学-力学耦合模型, 通过区分真实孔压与测量孔压, 将化学势与力学路径耦合, 系统描述了化学场对粒间应力及抗剪强度的调控机制。同时化学势、粒间物理化学作用力等具有明确的物理意义, 并可通过能量守恒定律求解, 因此, 如何使用黏土的HMC耦合本构模型体系类似的想法, 即引入化学势、粒间物理化学作用力等概念建立新的黄土HMC耦合本构模

型是其构建更完善理论框架的发展方向。

2 黄土耦合机制发展中存在的问题

2.1 气场、化学场及其相互作用概念尚未明确

黄土研究中,气场、化学场及其相互作用长期以来未得到充分重视,其核心问题在于对气体与化学过程的非线性耦合缺乏系统性认知。传统研究多将气场简化为渗气系数的单一参数表征,但实际黄土孔隙中气体运移受到孔隙结构动态调整、水分相变及化学反应三重制约。非饱和黄土中 CO_2 的生成与运移会显著改变孔隙液的pH值和碳酸盐平衡,进而影响土体结构稳定性。如黄土包气带中 CO_2 气体扩散会加速 CaCO_3 溶解,增大孔隙连通性,间接提升水力传导率^[94]。但现有研究未能考虑生物地球化学过程与气体运移的协同效应^[95]。

化学场的作用机制更为复杂。盐分结晶、离子交换和矿物溶解等过程会显著改变黄土的微观结构。黄土中常见的硫酸盐在干湿循环中反复结晶膨胀,可导致孔隙喉道堵塞、微观胶结结构重组等现象。同时, Na^+ 、 Ca^{2+} 等离子浓度变化会通过双电层效应影响黏土颗粒间的排斥力,当孔隙水中 Na^+ 浓度增加时,膨胀压力降低^[96, 97]。而重金属污染物 Zn^{2+} 的存在会改变土体渗透系数,当浓度达到一定时,防土层渗透系数可增大数倍,这种化学污染与气体运移的耦合效应在垃圾填埋场覆盖层设计中尚未被系统考量。表明这类化学耦合现象在现有研究中多被简化为单一离子浓度指标,而忽视了多组分溶液动态平衡对土体宏观行为的控制作用。

气场与化学场的交互作用则表现为气体运移对溶质迁移的驱动效应。微生物活动产生的气体会改变孔隙气体的压缩性,当气压累积至一定程度时,可形成显著的气阻效应,抑制水分下渗速率^[98]。这类多物理化学场的非线性耦合在现有模型中多被割裂处理,如水文地球化学模型常假设气体压力恒定,而渗流模型忽略化学组分变化对孔隙结构的反馈作用^[99]。

2.2 MHGC等多场耦合问题与湿陷性问题争论

黄土湿陷性机理的传统研究长期聚焦于HM耦合作用,将湿陷归结为水分入渗引起的胶结物溶解和结构崩塌。然而,该湿陷过程实质上是MHGC等多场耦合的复杂响应。浸水过程中封闭

气泡的压缩会形成局部超孔隙气压,当气压达到土体抗拉强度时,会引发微裂隙扩展,使湿陷系数增加。这种气-液两相流的相互作用在现行规范中仅通过饱和度单一参数修正,未能反映气压累积的时空异质性特征^[100]。

目前,MHGC等多场耦合视角下的争议焦点在于主导机制识别。部分学者坚持“水力主导论”,认为水分入渗引发的基质吸力丧失是湿陷主因,其依据是室内试验单线法与现场浸水试验沉降预测较吻合的现象^[101]。但在现场砂井浸水试验中室内试验与现场浸水试验沉降预测误差较为明显^[102],且在实际中,降雨入渗常伴随温度波动、化学传质污染效应可使裂隙网络扩展速率提高,形成优先渗流通道。更复杂的是,化学溶蚀与加压气体会改变土体结构强度,浸水试验中伴随的地裂缝、局部塌陷以及填方体空洞等情况无法以水力作用全面说明,这些耦合效应导致传统单一场假设的预测误差较大,不符合未来黄土精准灾变防控规划^[103]。

总体来看,湿陷性争论的本质是还原论与整体论的方法论冲突。单纯抓主要矛盾虽能解释大部分的试验现象,却无法应对场地尺度下多场非线性耦合的复杂响应。因此,考虑黄土多尺度MHGC等多场耦合状态,从微观孔隙的界面反应到宏观场地的多场演化实现全过程表征是解决黄土灾变问题的有效途径。

3 黄土MHGC等多场耦合机制研究发展趋势

综上所述,在黄土研究方面,已涉及了其中两场或三场耦合的研究,各场之间显现出关联性。其研究正经历从单一场分析向多场协同的转变。然而传统“主要矛盾”思维方式阻滞了其发展,应该认识到黄土特殊属性与日益复杂环境属性的交互性,正视黄土的MHGC等多场耦合问题,建立MHGC等全耦合理论体系,才能有效同步工程实践中的复杂灾变防控问题,与国际前沿达成共识^[104-107]。因此,现阶段黄土MHGC等多场耦合机制研究工作应侧重于以下四个方面:

(1)明确黄土MHGC等多场耦合研究概念:常规黄土环境下不涉及强烈的气体迁移、化学反应及其意义重大的工程应用场景,导致黄土完整的MHG、MHC与MHGC等多场耦合研究概念尚未

明确,限制了黄土的MHGC等多场耦合研究。然而目前大量的浸水试验、微观试验都表明了化学成分与黄土胶结结构密切相关,同时常规环境下化学反应实时发生,如二氧化碳即可与湿润黏土颗粒发生反应,因此可推测黄土的MHGC四场及以上的多场耦合特性与其灾变机制必定相关。

(2) 发展多试验联合方案设计与MHGC等多场耦合试验仪器研发:当前黄土MHGC等多场耦合试验仍以单一场或双场耦合作用研究为主,现有仪器设备难以实现渗流场(H)、力学场(M)、气场(G)、化学场(C)和温度场(T)等的同步加载与动态监测。例如传统三轴仪仅能开展水-力耦合试验,高温高压渗透仪虽可模拟化学-热耦合环境,但缺乏力学边界条件的精确控制。同时,单独开展各场序贯试验时,无法捕捉多场交互作用下的非线性响应特征。因此,建立物理试验、原位监测与数值仿真相结合的联合验证体系,是重点突破MHGC等多场耦合边界条件精准控制、多参数原位同步监测与多时间尺度过程解耦等技术难题的有效方法。

(3) 实现MHGC等多场耦合参数的可试验测定与求解:现有的黄土本构模型虽基于水-力双场耦合假设构建参数体系,并逐渐考虑矿物相变、气体迁移与化学溶蚀等导致的胶结物损耗等不可逆过程对力学参数的时变影响;然而,这些交互作用机理仍停留在定性描述阶段,缺乏统一的量化表征方法;同时已有的MHGC等多场耦合模型,存在疑难参数等问题。未来应重点关注化学势-力学功转换机制与溶蚀损伤的叠加效应等关键理论问题及其与经典力学参数的关系,从而建立起具有明确物理意义、理论简明、参数易定和应用方便的MHGC等多场耦合本构方程。

(4) 阐明MHGC多场耦合下黄土结构演化过程:黄土灾变本质上是微观结构劣化向宏观力学失稳发展的跨尺度过程。随着微观技术的发展,矿物成分分析、孔隙结构表征与宏观力学试验联合开展,建立“矿物溶蚀-胶结破坏-孔隙重组-裂隙扩展”的多尺度联动演化模型将是黄土灾变问题研究的重要内容。借助同步辐射显微CT、原位FTIR光谱和聚焦离子束-扫描电镜联用等先进表征手段与多尺度数值模拟平台,分析MHGC等多场耦合作用下黏土矿物界面反应分子动力学规律、胶结相空间分布重构特征是未来描述黄土“分子-

团粒-试样-工程体”稳定结构的有效方法,实现从纳米级矿物溶解到米级灾变体的全过程推演及其精准化防控。

4 结 论

(1) 黄土灾变本质上是由水场触发、力场响应、化学场劣化、气场放大共同驱动的多尺度结构劣化过程。这些场之间通过吸力-有效应力转换、溶蚀-损伤耦合、气压-渗流反馈等机制发生非线性叠加,决定了黄土灾变的时空演化特征。

(2) 现有黄土本构理论在全耦合描述上的模型多为两场或三场耦合的简化模型,且大多停留在现象或半经验层面。特别是对于化学损伤的量化、气-液两相流与固体骨架的动态交互作用,缺乏统一且物理机制明确的理论框架。

(3) 对于实际黄土工程中极其复杂的MHGC等多场耦合问题,建议以灾变防控的国际前沿共识为基础,结合工程实例,深入研究黄土的MHGC等多场耦合特性,系统建立各场耦合下的本构关系,推动黄土及黄土工程从“被动防灾”向“主动调控”的发展进一步向“精准防控”跨越,以有效应对工程实践中的复杂灾变防控问题。

参考文献:

- [1] 谢婉丽,王延寿,马中豪,等.黄土湿陷机理研究现状及发展趋势[J].现代地质,2015,29(2):397-407.
- [2] LI P, VANAPALLI S, LI T L. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(2): 256-274.
- [3] ZHUANG J Q, KONG J X, ZHU Y, et al. The structural evolution of undisturbed loess due to water infiltration[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 14880.
- [4] LI Y R, WANG Y Y, AYDIN A. Loess structure: Evolution and a scale-based classification[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 249: 104665.
- [5] AN M X, LI X, GAO R R, et al. Study on the causes, deformation and failure mechanisms of loess multistage collapse[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(7): 297.
- [6] QIN B, LI X, WANG L, et al. Model interpretation and microscopic characteristics of collapsibility evolution of compacted loess under dry-wet cycles[J]. Catena, 2024, 246: 108413.
- [7] 罗璇,李军,张鹏,等.中国雨水化学组成及其来源的研究进展[J].地球与环境,2013,41(5):566-574.
- [8] 付昱凯,李广林,李同录,等.中更新世黄土的湿陷特性及其湿陷预测模型[J].水文地质工程地质,2025,52(1):

- 159–166.
- [9] 吕一凡, 张春霞, 付扬, 等. 最近880ka以来黄土-古土壤序列粘土矿物和粘粒地球化学特征及东亚夏季风演化[J]. 第四纪研究, 2022, 42(4): 921–938.
- [10] 施斌. 论工程地质中的场及其多场耦合[J]. 工程地质学报, 2013, 21(5): 673–680.
- [11] 韩宝华, 段星星, 何峻岭, 等. 甘肃白银东大沟地区土壤镉地球化学特征及生态风险评价[J]. 现代地质, 2023, 37(3): 745–757.
- [12] 黄天明, 龙吟, 张芬, 等. 典型黄土塬区地下水水化学成因机制及碳循环意义[J]. 第四纪研究, 2023, 43(2): 356–367.
- [13] 李欢玮, 赵广举, 李明, 等. 黄土高原沟壑区典型城郊流域地表水硝酸盐来源示踪[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 761–769.
- [14] 赵再昆, 王铁行, 金鑫, 等. 高温作用下非饱和黄土水热迁移试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 151–161.
- [15] 郭梅, 韩昕, 卢霄霞, 等. 镉污染对黄土物理化学及力学性质的影响[J]. 地质科技通报, 2025, 44(3): 353–362.
- [16] 柴军瑞. 岩土体多相介质多场耦合作用与工程灾变动力学研究简述[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 成都, 2004: 106–109.
- [17] 梁昌玉, 吕大伟, 初航, 等. 浅谈中国工程地质学发展现状及其未来发展趋势: 基于国家自然科学基金(1987—2021)立项数据[J]. 工程地质学报, 2024, 32(1): 349–357.
- [18] 王铁行, 李宁, 谢定义. 土体水热力耦合问题研究意义、现状及建议[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 488–493.
- [19] DG F. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1993: 38–63.
- [20] XU P P, ZHANG Q Y, QIAN H, et al. An investigation into the relationship between saturated permeability and microstructure of remolded loess: A case study from Chinese Loess Plateau [J]. Geoderma, 2021, 382: 114774.
- [21] 张爱军, 邢义川, 胡新丽, 等. 伊犁黄土强烈自重湿陷性的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S2): 117–122.
- [22] 王毓国, 张爱军, 赵庆玉, 等. 易溶盐含量对伊犁黄土持水特性的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S1): 212–217.
- [23] 牛丽思, 张爱军, 赵佳敏, 等. 易溶盐含量对伊犁原状黄土力学特性的影响规律[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1705–1714.
- [24] 李姝, 许强, 张立展, 等. 黑方台地区黄土强度弱化的浸水时效特征与机制分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 2043–2048, 2058.
- [25] 文宝萍, 余志山, 黎志恒, 等. 灌溉条件下黑方台黄土湿陷特征及其内在机理[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(6): 777–785.
- [26] WANG X L, ZHU Y P, HUANG X F. Field tests on deformation property of self-weight collapsible loess with large thickness [J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 14(3): 04014001.
- [27] LAN T G, XU L, LU S F, et al. Hydromechanical analysis of collapse settlement of loess during field immersion tests: Field investigations and numerical modeling[J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(10): 04024211.
- [28] DENG L S, FAN W, YIN Y P, et al. Case study of a collapse investigation of loess sites covered by very thick loess-paleosol interbedded strata[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(11): 05018009.
- [29] AN P, ZHANG A J, XING Y C, et al. Experimental study on settling characteristics of thick self-weight collapsible loess in Xinjiang Ili region in China using field immersion test[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(6): 1476–1491.
- [30] WANG Y Y, LI Y R. Wetting-induced collapse of loess: Tracing microstructural evolution[J]. Engineering Geology, 2024, 340: 107673.
- [31] 张玉, 范特佳, 许晨阳, 等. 平面应变条件下原状Q₃黄土的结构性演化特性研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(9): 65–77.
- [32] LI P, XIE W L, PAK R Y S, et al. Microstructural evolution of loess soils from the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2019, 173: 276–288.
- [33] WEI Y N, FAN W, YU B, et al. Characterization and evolution of three-dimensional microstructure of Malan loess[J]. Catena, 2020, 192: 104585.
- [34] MA F L, YANG J, BAI X H. Water sensitivity and microstructure of compacted loess[J]. Transportation Geotechnics, 2017, 11: 41–56.
- [35] 葛苗苗, 李宁, 盛岱超, 等. 水力耦合作用下非饱和压实黄土细观变形机制试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2437–2448.
- [36] 杨雨. 水-力耦合作用下非饱和土渗流特性演化规律的试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [37] CAI G Q, DIAO X F. A coupled VOF-DEM investigation into contact erosion under the effects of cyclic loading and seepage path[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2025, 62: 1–30.
- [38] 蔡国庆, 刘倩倩, 杨雨, 等. 水-力耦合作用下干燥和湿润砂质黄土渗透特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(3): 74–82.
- [39] FAN Y K, ZHENG M X, WU J H. A study on the shear strength characteristics and microscopic mechanism of coal-bearing soil under dry-wet cycles[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 1096980.
- [40] ZHANG X Z, LU Y D, LI X, et al. Microscopic structure changes of Malan loess after humidification in South Jingyang Plateau, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(10): 287.
- [41] XU X T, SHAO L J, HUANG J B, et al. Effect of wet-dry cycles on shear strength of residual soil[J]. Soils and Foundations, 2021, 61(3): 782–797.
- [42] BISHOP A W. The Principle of Effective Stress [J]. Teknisk Ukeblad, 1959, 39: 859–863.
- [43] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(5): 447–466.
- [44] QIN B, LI X, YANG W F, et al. Study on thermal-hydro-mechanical coupling and stability evolution of loess slope during freeze-thaw process [J]. Earth Surface Processes and Land-

- forms, 2024, 49(6): 2010 – 2026.
- [45] LAN H X, ZHANG T W, PENG J B, et al. Large scale land reclamation and the effects on hydro-mechanical behavior in loess and loess-derived fill [J]. *Engineering Geology*, 2023, 323: 107241.
- [46] 郑方, 邵生俊. 用BBM模型模拟非饱和和重塑黄土的变形强度特性[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(8): 1665 – 1674.
- [47] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 湿陷性黄土变形的各向异性及与浸水路径的无关性[J]. *中国公路学报*, 2006, 19(4): 11 – 16.
- [48] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils [J]. *Geotechnique*, 1990, 40(3): 405 – 430.
- [49] FENG L, ZHANG M S, JIN Z, et al. The genesis, development, and evolution of original vertical joints in loess [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 214: 103526.
- [50] 邵帅, 邵生俊, 高梦洁, 等. 水-力耦合非饱和和黄土的弹塑性模型适用性研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(S1): 436 – 442.
- [51] 韩博文, 蔡国庆, 李舰, 等. 考虑颗粒黏结效应的非饱和土水-力耦合边界面模型[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(11): 2059 – 2068.
- [52] 罗爱忠, 邵生俊. 湿载耦合作用下黄土结构性损伤演化及本构关系[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(4): 841 – 847.
- [53] YAO Z H, CHEN Z H, FANG X W, et al. Elastoplastic damage seepage – consolidation coupled model of unsaturated undisturbed loess and its application [J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(6): 1637 – 1653.
- [54] 张登飞, 陈存礼, 舒迎涛, 等. 原状黄土的结构性与渗气特性的关联性初探[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(7): 1345 – 1351.
- [55] 刘锦阳, 李喜安, 简涛, 等. 马兰黄土渗气率与饱和渗透系数的关系研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(6): 154 – 162.
- [56] 杜俊, 李广, 杜梦寅, 等. 黄土高原不同土地利用方式对土壤 N_2O 通量的影响[J]. *干旱区研究*, 2025, 42(6): 1043 – 1054.
- [57] 张登飞, 陈存礼, 陈惠, 等. 三轴应力条件下原状黄土的吸湿渗水特性[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(S1): 45 – 50.
- [58] 郭慧敏, 张彦军, 刘庆芳, 等. 黄土高原半干旱区土壤呼吸对土地利用变化的响应[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(10): 1686 – 1695.
- [59] 张登飞, 陈存礼, 陈惠, 等. 三轴应力条件下原状黄土的渗气特性[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(S1): 93 – 99.
- [60] 赵乐, 倪万魁, 张镇飞, 等. 不同干密度压实黄土垂直积水入渗特性[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(33): 14310 – 14317.
- [61] 赵志强, 戴福初, 闵弘, 等. 黄土中灌溉水入渗过程的现场试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(3): 569 – 575.
- [62] 管文, 杨海琳, 卢海龙. 多孔介质中天然气水合物相平衡影响因素研究[J]. *地学前缘*, 2025, 32(2): 153 – 165.
- [63] 吕晓立, 郑跃军, 刘可, 等. 兰州不同城镇功能区地下水氟赋存特征及影响因素[J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(2): 215 – 226.
- [64] 张豫川, 刘智璠, 高旭龙, 等. 非饱和黄土场地水分入渗规律及影响因素的现场试验与数值模拟[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(3): 965 – 972.
- [65] 李喜安, 薛泉, 庞涛, 等. 基于原位渗气试验的黄土潜蚀地层渗气率研究[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(5): 1027 – 1034.
- [66] 王锋, 刘德仁, 程富强, 等. 深厚黄土场地浸水试验及湿陷性评价[J]. *水利水运工程学报*, 2023(5): 131 – 138.
- [67] 欧阳恺皋, 闫宏彬, 蒋小伟, 等. 云冈石窟黄土覆盖层对水盐运移的阻滞作用研究[J]. *地学前缘*, 2026, 33(1): 135 – 142.
- [68] 向崢宇, 潘欢迎, 邓斌, 等. 基于蒸发法和联合测定仪测定土壤水分特征曲线和非饱和渗透系数的试验研究[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(4): 210 – 217.
- [69] MATYAS E L. Air and water permeability of compacted soils [M]//Permeability and Capillarity of Soils. Atlantic City: ASTM International 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1967: 160 – 175.
- [70] 刘奉银, 张昭, 周冬. 湿度和密度双变化条件下的非饱和黄土渗气函数[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(9): 1907 – 1914.
- [71] 陈存礼, 张登飞, 张洁, 等. 等向应力条件下原状 Q_3 黄土的渗气特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(2): 287 – 294.
- [72] CHEN C L, ZHANG D F, ZHANG J. Influence of stress and water content on air permeability of intact loess [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(9): 1221 – 1230.
- [73] BURDINE N T. Relative permeability calculations from pore size distribution data [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1953, 5(3): 71 – 78.
- [74] MUALEM Y. Modified approach to capillary hysteresis based on a similarity hypothesis [J]. *Water Resources Research*, 1973, 9(5): 1324 – 1331.
- [75] 曾刚, 李业学, 王婧, 等. 垃圾土气体渗透特性试验研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2019, 44(5): 1317 – 1324.
- [76] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和 Q_3 黄土渗气特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(6): 1264 – 1273.
- [77] 刘华, 张硕成, 鲁洁, 等. 酸碱污染对 Q_3 黄土湿陷表征影响的试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(4): 525 – 531.
- [78] 李培月, 李佳慧, 吴健华, 等. 黄土-古土壤互层对土壤水分运移及土体微结构的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(3): 1 – 11.
- [79] 赵超, 魏翔, 孙建伟, 等. 汉江上游晚更新世以来气候演变特征: 来自朱家村剖面土壤地球化学的证据[J]. *现代地质*, 2025, 39(4): 1059 – 1067.
- [80] 张阳, 崔素丽. Cu^{2+} 污染原状黄土的物化及结构特性[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(1): 63 – 71.
- [81] ZHANG Y, JIN C, HU Z Q, et al. Influence of acid environment on collapsibility of loess [J]. *E3S Web of Conferences*, 2021, 267: 02013.
- [82] 拓文鑫, 倪万魁, 聂永鹏. 干湿循环下盐渍压实黄土湿陷性

- 劣化机理研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(2): 420 – 429.
- [83] LIU Z, LIU F Y, MA F L, et al. Collapsibility, composition, and microstructure of loess in China[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(4): 673 – 686.
- [84] HU W L, CHENG W C, WEN S J, et al. Effects of chemical contamination on microscale structural characteristics of intact loess and resultant macroscale mechanical properties[J]. Catena, 2021, 203: 105361.
- [85] 赵晓晴, 杨天风, 宗钟凌, 等. 石灰-碱渣稳定土力学指标关联性 & 现场试验[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(5): 1319–1332.
- [86] 崔素丽, 黄森, 韩琳, 等. 水泥窑灰改性黄土的湿陷性和强度特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 73 – 78.
- [87] 王东星, 高向云, 杜怡莹, 等. 活性MgO-粉煤灰固化黄土剪切特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(5): 822 – 829.
- [88] 彭宇, 张虎元, 林澄斌, 等. 抗疏力固化剂改性黄土工程性质及其改性机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 762 – 772.
- [89] 张耀, 胡再强, 陈昊, 等. 酸性溶液对黄土结构改良的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 681 – 688.
- [90] 张志红, 陈杨, 张志亮, 等. 高饱和条件下水-力-化耦合模型及数值模拟[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 100 – 106.
- [91] 张志红, 师玉敏, 朱敏. 黏土垫层水力-力学-化学耦合模型研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1283 – 1290.
- [92] 张耀. 酸性环境下黄土结构的演变及其本构模型研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [93] MA T T, WEI C F, XIA X L, et al. Constitutive model of unsaturated soils considering the effect of intergranular physico-chemical forces[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 142(11): 04016088.
- [94] 汪芳, 苗长虹, 刘峰贵, 等. 黄河流域人居环境的地方性与适应性: 挑战和机遇[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 1 – 26.
- [95] SVIRČEV Z, DULIĆ T, OBREHT I, et al. Cyanobacteria and loess: An underestimated interaction[J]. Plant and Soil, 2019, 439(1): 293 – 308.
- [96] 王宏宇, 王娟, 马蓉蓉, 等. 黄土高原特色农业区土壤养分微量元素空间分异规律及影响因素[J]. 地学前缘, 2025, 32(5): 511 – 523.
- [97] 杨蕴, 崔孜铭, 熊贵耀, 等. 温度耦合驱动下土壤-地下水有机污染物迁移规律与模拟研究进展[J]. 土壤, 2023, 55(3): 464 – 473.
- [98] 熊厚金, 张良辉, 邹小平, 等. 岩土工程化学导论[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 403 – 407.
- [99] 刘松玉, 蔡国军, 张炜, 等. 岩土工程勘察、测试与评价进展[J]. 土木工程学报, 2024, 57(10): 108 – 124.
- [100] 张卜平, 朱兴华, 成玉祥, 等. 黄土潜蚀机理及其致灾效应研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 41 – 52.
- [101] 苏忍, 张恒睿, 张稳军, 等. 兰州地铁大厚度湿陷性黄土地层的现场浸水试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 186 – 193.
- [102] 刘建磊, 卫童瑶, 惠寒斌, 等. 大厚度非连续湿陷性黄土浸水变形特征分析[J]. 地质力学学报, 2024, 30(6): 921 – 932.
- [103] 王岩, 王昊, 崔鹏, 等. 气候变化的灾害效应与科学挑战[J]. 科学通报, 2024, 69(2): 286 – 300.
- [104] 吕文茜, 王雁林, 陈新建, 等. 2001—2022年陕北黄土地区地质灾害时空分布及引发因素分析[J]. 灾害学, 2024, 39(4): 207 – 212.
- [105] 肖子亢, 许冲, 李宏, 等. 地质灾害物理仿真实验发展现状及趋势分析[J]. 地质科技通报, 2025, 44(4): 23 – 47.
- [106] 马鹏辉, 彭建兵. 论黄土地质灾害链(一)[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(2): 1 – 11.
- [107] 马鹏辉, 彭建兵. 论黄土地质灾害链(二)[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(3): 15 – 24.