

裂隙性黄土潜蚀洞穴形成机理模型试验研究

张卜平, 朱兴华, 孙恒飞, 蔡佳乐, 程 茜

A model experimental study of the formation mechanism of internal erosion caves in fractured loess

ZHANG Buping, ZHU Xinghua, SUN Hengfei, CAI Jiale, and CHENG Xi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209052>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究

A model test study of the interface seepage and failure mechanism of loess-filled slope

余岱金, 黄强兵, 康孝森, 陈星, 刘悦 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 119-128

不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

陈林万, 裴向军, 张晓超, 张硕, 钟玉健, 罗欣 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 137-147

降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

陈林万, 张晓超, 裴向军, 张硕, 龚伟翔, 钟玉健 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 151-160

改性糯米灰浆固化黄土的微观机理试验研究

A test study of the microscopic mechanism of modified glutinous rice mortar solidified loess

贾栋钦, 裴向军, 张晓超, 周立宏 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 90-96

预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables

周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

上浮极限状态下饱和土的浮力模型试验和理论分析

Model tests and theoretical analyses of buoyancy in saturated soils during the ultimate limit state of up-lifting

荣雪宁, 徐日庆, 冯苏阳, 朱亦弘, 伍璇 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 90-96



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209052

张卜平, 朱兴华, 孙恒飞, 等. 裂隙性黄土潜蚀洞穴形成机理模型试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 158-167.
ZHANG Buping, ZHU Xinghua, SUN Hengfei, et al. A model experimental study of the formation mechanism of internal erosion caves in fractured loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 158-167.

裂隙性黄土潜蚀洞穴形成机理模型试验研究

张卜平^{1,2}, 朱兴华^{1,2}, 孙恒飞^{1,2}, 蔡佳乐^{1,2}, 程 茜^{1,2}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 黄土台塬边缘裂隙性黄土中洞穴形成机理复杂, 且与滑坡、崩塌等地质灾害的发生具有紧密联系, 给塬边人民的生产生活造成严重威胁。针对裂隙性黄土中潜蚀洞穴如何形成这一科学问题, 以陕西省泾阳县南塬地区典型黄土潜蚀洞穴为试验参考, 利用可视化裂隙性黄土潜蚀洞穴形成机理模型试验装置, 开展了 4 组不同初始裂隙开度条件下黄土潜蚀洞穴形成机理模型试验。研究表明: 黄土裂隙在水流潜蚀下向黄土潜蚀洞穴的发展过程可分为水力侵蚀阶段、浸润淘蚀阶段和重力崩塌阶段; 裂隙性黄土潜蚀洞穴的形成机理可概括为软化崩解-冲刷扩宽-淘蚀临空-重力崩塌; 潜蚀输沙量和泥沙输运特征反映了裂隙性黄土渗流潜蚀的发展速率, 可分为快速潜蚀阶段、波动降低阶段和缓慢稳定潜蚀阶段; 裂隙开度、黄土可蚀性和极限凹槽深度是裂隙性黄土潜蚀洞穴形成的重要影响因子。研究成果对进一步揭示黄土潜蚀的致灾效应提供理论支撑。

关键词: 裂隙性黄土; 潜蚀; 洞穴; 形成机理; 模型试验

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0158-10

A model experimental study of the formation mechanism of internal erosion caves in fractured loess

ZHANG Buping^{1,2}, ZHU Xinghua^{1,2}, SUN Hengfei^{1,2}, CAI Jiale^{1,2}, CHENG Xi^{1,2}

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The formation mechanism of caves in fissured loess at the edge of the loess platform plateau is complex and is closely related to the occurrence of geological hazards such as landslides, which pose a serious threat to the production and life of people in this region. To address the scientific problem of how internal erosion caves are formed in the fissured loess, four sets of experiments on the formation mechanism of internal erosion caves in loess under different initial fissure opening conditions are carried out using the visualisation of the internal erosion caves formation mechanism model of the fissured loess in the South Plateau of Jingyang as a reference. The results show that the development process from the fractured loess to the internal erosion of caves under water flowing erosion can be divided into three stages, including the hydraulic erosion stage, the infiltration and erosion stage

收稿日期: 2022-09-15; 修订日期: 2022-11-11

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(442090053; 42041006; 41877249)

第一作者: 张卜平(1993-), 男, 博士研究生, 主要从事黄土渗透潜蚀机理及致灾效应的学习和科研工作。E-mail: zhangbuping@chd.edu.cn

通讯作者: 朱兴华(1984-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事地质灾害防治方面的科研与教学工作。E-mail: zhuxinghua@chd.edu.cn

and the gravity collapse stage. The formation mechanism of the internal erosion caves in the fractured loess can be summarized as follows: Softening and sputtering, scouring and widening, erosion and cavitation, and collapsing by gravity. The development rate of seepage erosion in the fractured loess is reflected by the sediment quantity and transport characteristics, which can be divided into the rapid erosion stage, the fluctuation reduction stage and the slow and stable erosion stage. The fracture opening, the erodibility of loess and the ultimate groove depth are important factors affecting the formation of internal erosion caves in the fractured loess. The research results provide theoretical support to further reveal the disaster-causing effects of loess internal erosion.

Keywords: fractured loess; internal erosion; caves; formation mechanism; model experiment

地表水沿裂隙性黄土中的节理裂隙饱水入渗时会对裂隙壁面产生渗流潜蚀作用^[1]。在渗流潜蚀作用下黄土裂隙会演化成为一种特殊的地质灾害——黄土潜蚀洞穴^[2-4]。黄土台塬边缘是典型的裂隙性黄土渗流潜蚀集中发育地带^[5-8],间接或直接诱发了大量滑坡、崩塌等地质灾害^[2,9],给黄土台塬附近生活的人民造成了重大经济财产损失^[5-6,10],如2013年6月10日发生的陕西省泾阳县南塬西庙店村滑坡,规模约 $2.6 \times 10^5 \text{ m}^3$,滑动距离305 m,破坏耕地约2.7 ha,给当地居民造成了严重的经济财产损失^[11]。黄土潜蚀洞穴灾害也直接或间接威胁着高速铁路等国家重大基础设施的安全性^[12]。机车长时间持续振动会导致土体松动开裂,降雨沿裂隙进入土体内部发生洞穴潜蚀,进而造成路基沉降、边坡失稳等灾害,严重威胁国家基础设施安全。例如,2020年山西某铁路边坡50 m范围内发育4个黄土潜蚀洞穴,导致发生严重路基下沉。又如,陇海铁路沿线因机车振动与降雨耦合作用加剧了黄土洞穴潜蚀,最终诱发大量黄土滑坡^[12]。可见黄土洞穴潜蚀机理是关乎防灾减灾和国家基础设施安全的关键问题,对黄土洞穴潜蚀机理开展深入研究具有重要的科学价值和实践意义。

随着全球气候变暖,极端降雨事件频发,黄土渗流潜蚀过程及其致灾效应受到人们越来越多的关注^[13-15]。黄土洞穴潜蚀的控制因素主要包括:渗流通道、水敏性(崩解、湿陷、优势渗流等)和水动力条件^[15]。在裂隙性黄土渗流特性方面,目前初步揭示了含裂隙黄土渗流规律^[6],建立了含节理黄土渗透性数学模型^[16-18]。王家鼎教授团队经过大量试验证明机车振动作用会加速积水入渗、推进湿润锋演化及土中气体的逃逸^[12]。但是,当前大多研究成果仅关注水分运移规律,而对渗流过程导致的黄土潜蚀重视不足。此外,黄土与水接触时会发生浸湿、软化和塌落等系列水土耦合过程,最终发生崩解^[19-22]。黄土的崩解性加速了土壤颗粒从母体的剥离过程,从而间接促进了

黄土洞穴潜蚀速率^[19,22],尤其是机车振动作用促进了水分入渗,促进了黄土崩解速率,增强了水土相互作用,导致落水洞和裂缝发育扩展,进而影响斜坡渗流场和应力场,最终导致斜坡失稳^[19]。然而,由于黄土洞穴潜蚀发生位置隐蔽且水土相互作用复杂,导致目前尚无法对黄土崩解性、湿陷性等对黄土洞穴潜蚀速率的贡献进行有效评估。物理模型试验是研究裂隙性黄土渗流潜蚀过程的重要手段之一^[20-21,23-27]。现有的黏性土渗流潜蚀研究大多是以模型中不可见的预设管道为研究对象,不能直接观测渗流潜蚀作用下土体内部潜蚀洞穴的发展演化过程,而且严重忽视了渗流潜蚀过程中大规模重力崩塌的贡献^[28-31]。

为了弥补裂隙性黄土渗流潜蚀研究在上述方面的不足,以泾阳南塬塬边裂隙性黄土潜蚀洞穴为研究对象,采用自主设计的裂隙性黄土渗流潜蚀机理物理模型试验装置,再现了裂隙性黄土内部潜蚀洞穴的形成演化过程,考虑到节理裂隙是控制黄土潜蚀洞穴形成的重要因素^[1],试验设定4种不同初始开度的垂直裂隙,以此研究一定流量条件下不同初始开度裂隙向潜蚀洞穴的演变过程,得到垂直节理裂隙向潜蚀洞穴演变的主要阶段特征,结合各阶段侵蚀演变特征初步探讨了潜蚀洞穴的形成机理。本研究对进一步探索不同土性条件下裂隙性黄土潜蚀洞穴的形成机理具有一定的实际价值和科学意义。

1 研究区黄土裂隙和潜蚀洞穴发育特征

研究区选择黄土裂隙和潜蚀洞穴均极为发育的泾阳南塬西庙店滑坡后缘。泾阳南塬位于陕西省泾阳县境内的泾河右岸,是渭北黄土台塬的重要组成部分。塬面横跨太平、蒋刘、高庄3个行政乡,长达27.1 km,塬面开阔,地形平坦,塬面上覆厚约10~15 m的上更新统马兰黄土,土质疏松、节理裂隙发育,是组成滑坡体的主要物质^[6]。受长期灌溉作用,泾阳南塬塬边发育有大规模的黄土滑坡数十处,其中庙店滑坡

后缘裂缝和潜蚀洞穴极为发育,是研究裂隙性黄土潜蚀洞穴形成过程的良好场地。通过野外调查发现,泾阳南塬西庙店滑坡后缘发育有大量裂缝和潜蚀洞穴(图 1)。裂缝长度不一,一般短于 100 m,90% 以上的裂缝发育在距塬边 30 m 以内的范围,裂缝平均开度小于 30 cm,平均位错小于 40 cm^[31]。塬边潜蚀洞穴与裂缝伴随而生,潜蚀洞穴直径不一,小到 10 cm,大至数米^[6]。深度相差也较大,调查过程中发现一处深度达 3.9 m 的潜蚀洞穴,见图 1(b)。有多处潜蚀洞穴洞壁可见清晰的水流冲刷痕迹,表明降水对洞穴仍然存在潜蚀作用,见图 1(c)。有的多个潜蚀洞穴上部呈串珠状,但是底部已经贯通,形成黄土桥,见图 1(d)。在形成的黄土桥内,可见大量的崩塌块体(图 1c),洞壁可见流水痕迹。另据前人开挖平硐发现,裂隙深部填充有水流携带的沙土堆积物,这充分表明黄土裂隙是潜蚀洞穴形成的关键控制因素^[6]。



图 1 泾阳南塬塬边典型裂缝和潜蚀洞穴

Fig. 1 Typical cracks and sinkholes at the edge of the Jingyang Southern Platform Plateau

2 试验设计

2.1 试验土样

以泾阳南塬庙店滑坡后缘 Q₃ 黄土为试验土样,在野外取重塑 Q₃ 黄土,在室内自然风干,过 2 mm 标准筛备用。土样基础物理参数如表 1 所示。

表 1 土样基础物理参数表
Table 1 Basic physical parameters of the soil sample

参数	天然含水量/%	干密度/(g·cm ⁻³)	比重	液限	塑限
取值	17.3	1.5	2.7	26.1	19.5

2.2 试验装置

试验装置由模型箱、供水装置、尾料收集槽等组成(图 2)。模型箱长 1.0 m,厚 0.1 m,深 1.0 m。选用透

明有机玻璃板加工,便于观察试验现象,底部设角钢支撑台保障试验安全进行。供水箱体积为 1.0 m×1.0 m×1.0 m,水箱中的水通过水泵经流量计注入预制好的裂隙性黄土模型。供水管道中部安装有电磁流量计和流量平衡阀,可以精准控试验流量。为保证裂隙渗流潜蚀过程的顺利进行,在模型箱底部设置长 3 cm,宽 2 cm 的出水口,以便泥沙和较大的土块进入泥沙池中。泥沙池用于收集试验后的含沙浑水。模型箱体上设置有 3 cm×3 cm 的网格线,试验过程中用高清摄像机录制试验全过程视频备用。

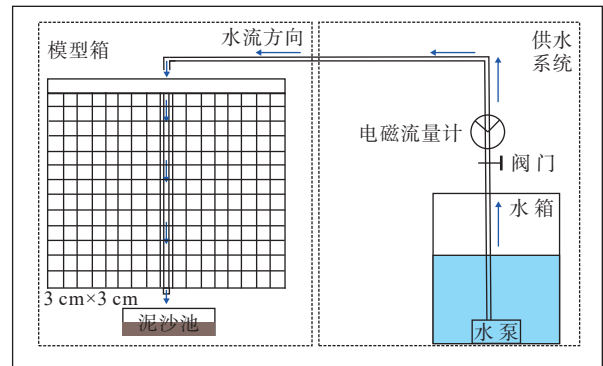


图 2 试验装置

Fig. 2 Testing apparatus

2.3 试验设计

杨华^[6]、杨阳^[31]等对研究区裂缝和潜蚀洞穴的发育情况调查结果表明,研究区黄土裂隙开度 0~30 cm。裂隙倾角多数在 80°左右,靠近地表的裂隙近垂直。裂隙开度与水流条件相互影响,故本次试验采用控制变量法,固定流量,设置裂隙开度分别为 0.5, 1.0, 1.5, 3.0 cm,裂隙倾角取 90°,裂隙深度为 80 cm,裂隙宽度为 10 cm。其它试验设计相关参数见。由于原状裂隙性黄土具有显著的结构性且取样极为困难,为了在室内模型试验中尽可能的重建黄土结构,本试验基于原状黄土天然含水量和干密度等关键性参数,根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)对室内模型土样参数进行控制,以期达到较好的试验效果。

2.4 试验步骤

据第 2.3 节试验工况设计确定试验步骤如下:(1)试样制备。配置与天然含水量(17.1%)相同的重塑土样,用塑料薄膜覆盖 24 h,使土样中水分充分扩散均匀。(2)模型堆填。向模型箱中分层堆填试验模型,每层堆填厚度 20 cm,层与层之间捣毛处理。(3)预制裂隙。在堆填土样前,将长 80 cm、宽 10 cm、厚分别为 0.5, 1.0, 1.5, 3.0 cm 的垂直裂隙预制板固定在模型中间,待土样堆填完毕后缓慢抽出裂隙预制板即可得

到含有不同开度裂隙的裂隙性黄土模型。(4)试验过程记录。在模型箱正前方架设一台高清摄像机,全程录制裂隙演化视频。(5)试验流程。试验开始前打开供水阀门调整至设计流量,然后开始向预制好的裂隙性黄土模型注水开始试验,每次试验注水时间15 min。试验过程中用1 000 mL烧杯在裂隙出口位置接取泥沙,烘干后进行含沙量测算^[20]。(6)数据处理。以模型箱左下角为原点(0,0),模型底边为横轴(x轴),模型侧边为纵轴(y轴)建立直角坐标系。试验结束后通过试验录像读取裂隙壁面不同时间点不同位置的坐标(1~5 min每1 min读数一次;第5分钟以后每2 min读数一次),绘制裂隙性黄土渗流潜蚀过程曲线图。重复上述步骤完成其余各组实验。

3 试验结果与分析

3.1 裂隙性黄土潜蚀过程曲线

水力侵蚀指施加在水与土体接触面上的径流剪切力造成的土壤颗粒的剥蚀,而重力侵蚀则指体积较

大的土块的在重力作用下脱离母体的过程。为便于分析,本文定义侵蚀体积小于 $0.5\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}$ 主要受水力侵蚀作用;侵蚀规模大于 $0.5\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}$ 时认为主要受重力侵蚀作用。由试验可知,当黄土裂隙面较平滑时,径流沿裂隙面以贴壁流的形式运动,随着水力侵蚀的发展,裂隙壁面变得凹凸不平,尤其是在遇到隔水层时,会发生侧向淘蚀形成凹槽,当淘蚀凹槽深度达到一定程度,就会发生重力崩塌。图3为试验得到的裂隙性黄土潜蚀洞穴形成演化过程图(H 为高度, B 为截面宽度),图中任意两条裂隙演化过程曲线之间的间距代表该时间段内的裂隙扩展速率;短时间内两条裂隙演化曲线出现较大间距时表明该时间段内发生了较大规模的集中冲刷或重力侵蚀。如图3(c)中裂隙扩展后期发生较大规模的重力侵蚀,而图3(d)因裂隙开度较大,水流垂直下落,直接流出裂隙。裂隙底部浸润软化和淘蚀现象在4种工况下均存在,但是淘蚀深度有差异。图3(b)中淘蚀凹槽现象最为明显,裂隙上部侵蚀产生的泥沙堵塞了排水通

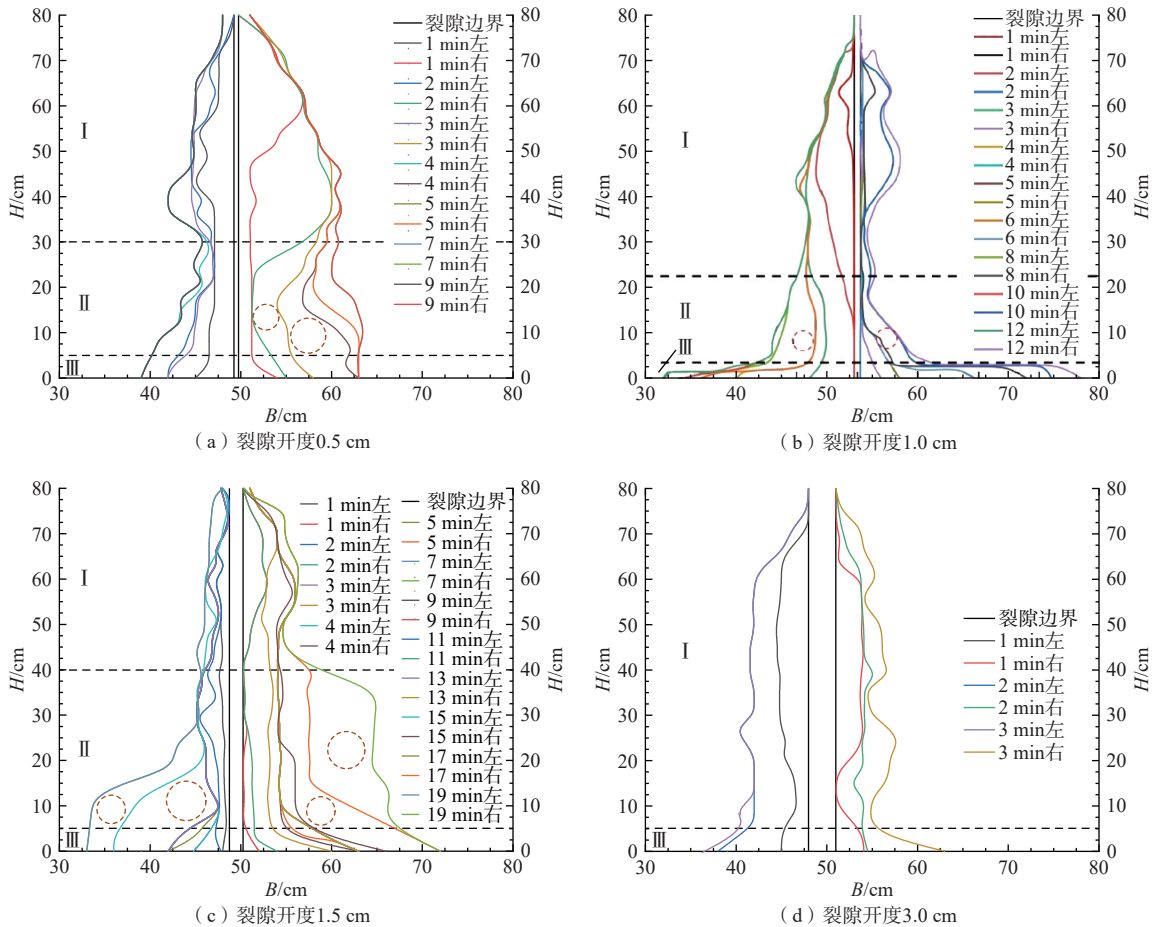


图3 潜蚀洞穴形成演化过程曲线图

Fig. 3 Formation and evolution curve of the sinkhole

道,导致水分沿裂隙底部向两侧扩展,不断浸润软化土体,加上崩解作用和溅蚀作用,最终形成向水平方向扩展的凹槽。这种现象在野外较为常见^[28]。

虽然不同工况下潜蚀洞穴演化过程曲线形态差别较大,但仍有规律可循。此处根据试验现象将裂隙性黄土潜蚀洞穴形成演化过程分为 3 个阶段:水力侵蚀阶段,浸润崩解阶段和重力崩塌阶段;根据水力侵蚀和重力侵蚀的空间分布特征又分为 3 个区:Ⅰ区水力冲刷区、Ⅱ区重力崩塌区、Ⅲ区动静水力交互区。上述“3 区 3 阶段”在裂隙初始开度为 0.5, 1.0, 1.5 cm 工况下均存在,而开度 3.0 cm 时仅有水力侵蚀区和动静水力交互区。为详细论述裂隙性黄土潜蚀洞穴在各阶段的演化特征,以“3 区 3 阶段”最为清晰的初始裂隙开度 1.5 cm 工况为分析对象进行详细阐述。

3.2 裂隙性黄土潜蚀阶段划分

(1) 水力侵蚀阶段

严格来说水力侵蚀伴随潜蚀洞穴形成和演化的全过程,此处水力侵蚀阶段是指水力侵蚀占主导地位

的阶段。当水与裂隙面接触时,黄土首先会发生崩解^[19, 22]。研究表明,黄土的崩解会经历浸湿、软化到塌落 3 个阶段。在浸湿阶段,土样快速吸水使得裂隙壁面在短时间内形成饱和层;当裂隙壁面吸水饱和后随即开始出现土颗粒的剥离;最后进入快速崩解塌落阶段^[19, 22]。试验为动水条件,裂隙壁面黄土崩解剥离后的土颗粒会被径流带走。因此,可以认为黄土的崩解加速了土颗粒剥离母体的过程,进而促进了黄土潜蚀过程的发展。

从裂隙扩展演化过程曲线来看,在 0~5 min 的水力侵蚀阶段(图 3c),裂隙受水力冲刷作用逐渐变宽,裂隙中上部扩展速度较为均匀,裂隙壁面近似为直线。从试验现象来看(图 4),这一阶段水流以贴壁流形式沿着裂隙壁面向下流动,由于预设的裂隙面本身比较光滑,因此裂隙面中上部侵蚀特征相似扩展速度均匀,如图 4(a)。裂隙底部由于溅蚀和淘蚀开始出现凹槽,见图 4(b)和图 4(c),凹槽中沉积了水流带来的泥沙,同时积聚了少量的水。

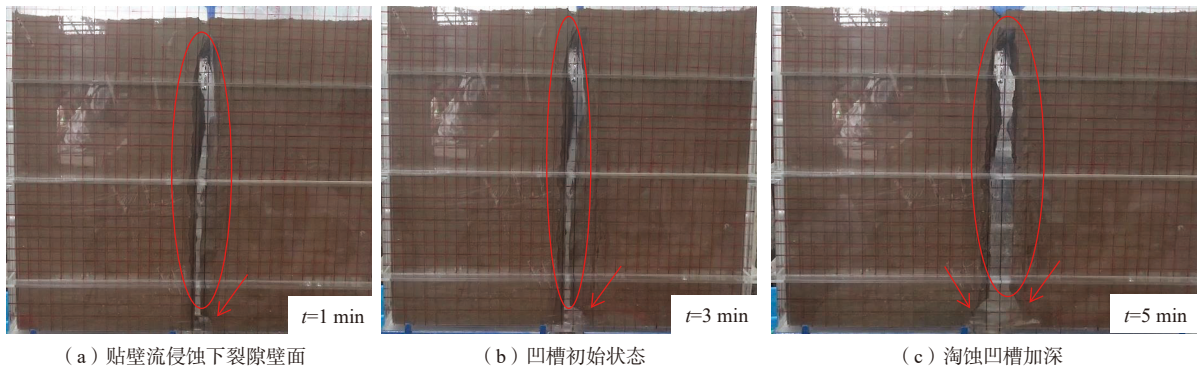


图 4 水力侵蚀阶段潜蚀洞穴的形态特征

Fig. 4 Morphological characteristics of the sinkhole at the hydraulic erosion stage

(2) 浸润淘蚀阶段

浸润淘蚀在水力侵蚀阶段的末期开始出现(5~10 min)。其扩展演化过程表现出沿水平向扩展的迹象(图 3c, 图 4c)。随着淘蚀凹槽的深度加深,溅射水流不能达到淘蚀凹槽深部,主要以滞留的水分产生的崩解和湿陷作用为主,崩解的土颗粒随着波动的水流被带出裂隙,随着浸润崩解淘蚀凹槽的加深,导致凹槽上部土体悬空,应力状态发生变化,逐渐向重力失稳发展。

(3) 重力崩塌阶段

重力崩塌大多发生在裂隙扩展演化的后期(10 min 以后)。此时裂隙底部几乎全部被淘空,而上部裂隙开度已经超过了水流的侵蚀范围,不再发生贴壁流侵

蚀,见图 5(a)。在前期水流淘蚀和浸润的作用下,Ⅱ区的土体含水量逐渐增大,自重增大,而抗拉强度降低,加上淘蚀凹槽已经扩展到临界深度,因此发生较大规模的重力崩塌,见图 5(b)和图 5(c)。

3.3 裂隙性黄土潜蚀输沙特征

实验过程中接取了侵蚀泥沙,经过烘干、称重计算后得到不同裂隙开度条件下的含沙量随时间变化曲线,见图 6(a)。试验开始在注水的一瞬间立即会有泥沙被携带出裂隙,含沙量曲线呈快速升高趋势,在 1~5 min 之间含沙量呈现出波动下降趋势,5 min 以后含沙量逐渐减小。试验开始 5 min 内水力侵蚀较快,水流波动导致含沙量出现相应的波动变化。在 5 min

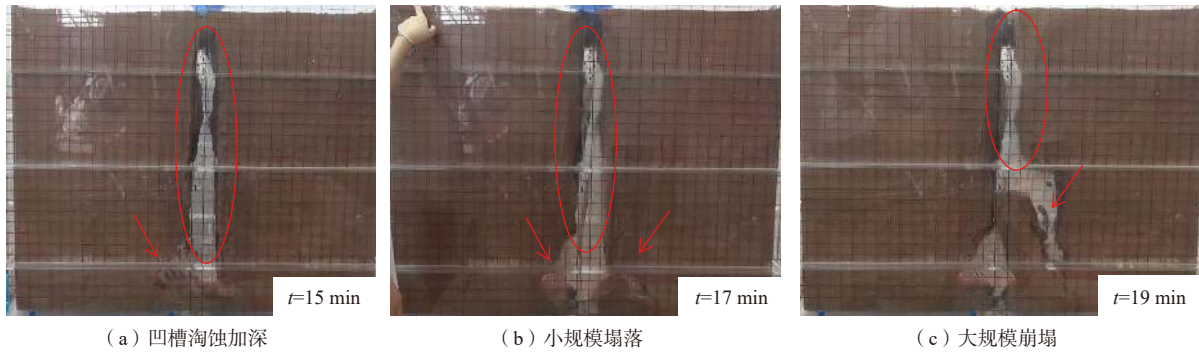
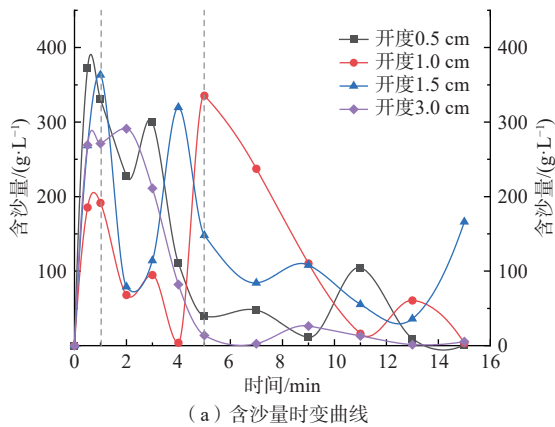


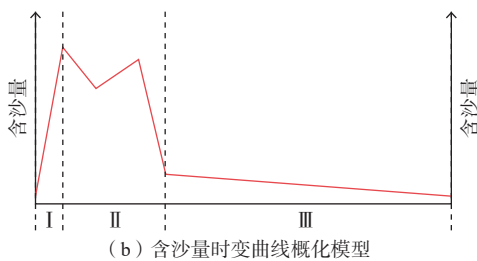
图 5 重力崩塌阶段潜蚀洞穴的形态特征

Fig. 5 Morphological characteristics of the sinkhole at the gravity collapse stage

以后含沙量的波动变化主要是由于发生了重力崩塌。本文将由重力崩塌导致的含沙量突然加速称为潜蚀突进(sudden rapid erosion)现象。侵蚀突进的发生影响着通道的输沙能力,决定着管道是否会发生突然堵塞。依据含沙量随时间变化曲线,将侵蚀过程大致概化为3个阶段,见图6(b)。阶段I为快速侵蚀阶段,以水力冲刷侵蚀为主;阶段II为波动降低阶段,因裂隙内部水流波动导致含沙量呈现出波动降低趋势;阶段III为缓慢稳定侵蚀阶段,这一阶段以重力侵蚀为主,虽然重力侵蚀导致含沙量存在波动现象,但是整体为缓慢侵蚀,上述对侵蚀速率阶段的划分与李喜安等^[23]关于黄土物理潜蚀速率的研究成果相似。



(a) 含沙量时变曲线



(b) 含沙量时变曲线概化模型

图 6 含沙量随时间变化曲线

Fig. 6 Changes of sediment concentration with time

累积含沙量曲线(图7)表明在一定流量条件下,不同初始裂隙开度内部侵蚀可以分为两个阶段:0~5 min快速侵蚀阶段和5~15 min平稳侵蚀阶段。在0~5 min快速侵蚀阶段,开度为0.5 cm条件下侵蚀速率最大,开度1.0 cm侵蚀速率最小。开度3.0 cm和开度1.5 cm时侵蚀速率接近。在稳定侵蚀阶段,侵蚀速率大致相等。含沙量累积曲线上斜率突然增大表明该时间段内平均侵蚀速率快速增大,即出现上侵蚀突进现象。另外,最终累积含沙量代表总侵蚀体积,一般认为,随着裂隙开度逐渐增大,侵蚀量会逐渐减小,但是由于存在侵蚀突进现象,导致最终侵蚀体积规律性不明显。

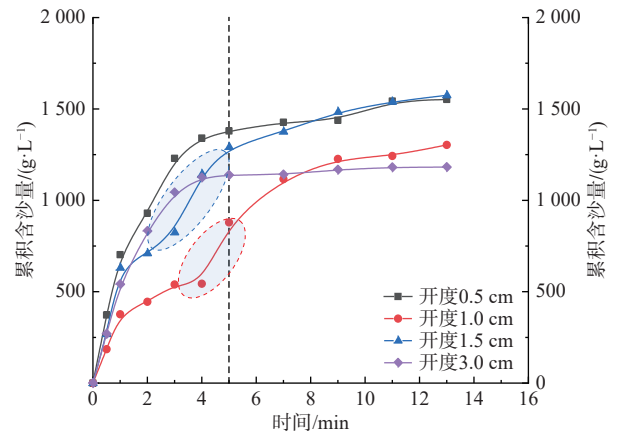


图 7 累积含沙量曲线

Fig. 7 Changes of cumulative sediment concentration with time

4 裂隙性黄土潜蚀洞穴形成机理

裂隙性黄土潜蚀洞穴的形成是一个水力侵蚀和重力侵蚀共同作用的复杂水土耦合过程(图8)^[16, 20, 24, 28]。裂隙性黄土潜蚀洞穴形成机制总结如下:软化崩解阶段,水流沿裂隙缓慢流入土体,与水接触的土体首先

发生浸湿、软化,进而发生崩解^[12],崩解的土颗粒被水流携带出裂隙,此时潜蚀速率较慢,见图 8(a)。冲刷扩宽阶段:随着裂隙宽度增大,流量增大,径流波动性增强,裂隙两壁发生冲刷侵蚀,见图 8(b)。浸润淘蚀阶段:裂隙扩宽和水流量的进一步加大,导致部分水流在重力作用下直接冲击底部相对隔水层,相对

隔水层上部的黄土在积水崩解和溅蚀的共同作用下逐渐形成凹槽,随着凹槽加深,水流不断向水平方向运移,不断浸润底部黄土层,导致崩解、湿陷加剧,见图 8(c)。重力失稳崩塌阶段:最终淘蚀凹槽顶部的土体由于含水量增高,自重增大,且下部临空,发生重力崩塌,见图 8(d)。

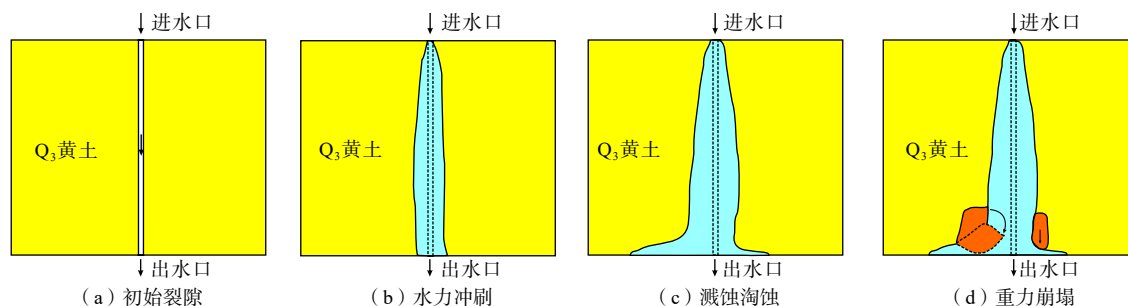


图 8 裂隙性黄土潜蚀洞穴形成过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the formation process of the seepage cave in fractured loess

综上所述,裂隙性黄土中潜蚀洞穴的形成是水力侵蚀、重力侵蚀与黄土崩解湿陷综合作用的结果。裂隙性黄土洞穴潜蚀的形成机理可以概括为:软化崩解-冲刷扩宽-淘蚀临空-重力崩塌。几个过程循环往复,最终形成深度较大,直径较小的黄土潜蚀洞穴,如图 1(b)所示。

5 裂隙性黄土潜蚀洞穴形成机理影响因素探讨

5.1 裂隙开度的影响

裂隙是黄土发生集中渗流潜蚀的必备条件之一。不同裂隙开度条件下,黄土中水分运移特征和水分对裂隙壁面产生的力学效应差别很大。试验中水力侵蚀体积和重力侵蚀体积随初始裂隙开度变化如图 9

所示。在不同初始裂隙开度条件下,水力侵蚀占主导地位,重力侵蚀较弱。水力侵蚀体积随着初始裂隙开度的增大呈现出先增大后减小的趋势,这是因为裂隙开度较小时(0.5 cm)被水流剥蚀的土颗粒没有开阔的运输通道,限制了泥沙的运输。而当裂隙开度增大到一定程度时(3.0 cm),水流直接穿过裂隙,很少对裂隙壁面产生水力侵蚀。重力侵蚀体积随着裂隙开度增大整体呈现出降低的趋势。重力侵蚀在整个过程中虽然占比较少,但是存在突发性和随机性。相当长一段时间内的水力侵蚀体积才能达到突发的一次重力崩塌体积。

5.2 黄土内部可蚀性

黄土可蚀性是影响裂隙性黄土潜蚀洞穴形成的关键内因。影响黄土内部可蚀性的因素众多,包括崩解性、湿陷性和优势渗流特性及土体微结构、易溶盐含量、有机质含量、土体比重、含水量、饱和度等物理性质。黄土内部可蚀性的量化评价方法可采用超剪应力方程^[28, 32]:

$$D_r = k_d(\tau - \tau_c)^b \quad (1)$$

式中: D_r ——剥蚀率/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);

k_d ——可蚀性系数/($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$);

τ ——剪切应力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$);

τ_c ——临界剪切应力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$);

b ——指数。

当剥蚀速率低于运输速率时,且假设剥蚀和输沙

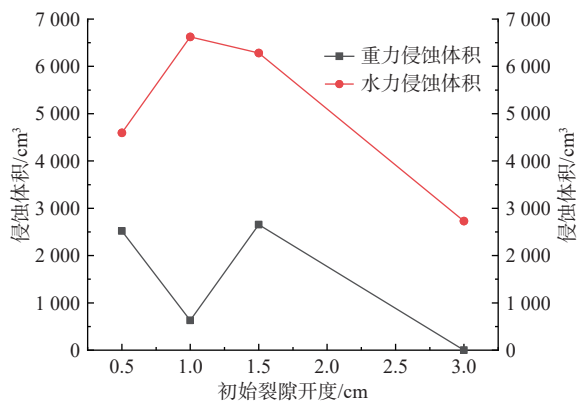


图 9 不同裂隙开度条件下的侵蚀特征

Fig. 9 Erosion characteristics under different crack openings

为线性关系($b=1$)时,式(1)即为输沙率方程:

$$q_s = k_d(\tau - \tau_c) \quad (2)$$

式中: q_s ——输沙率。

可蚀性系数(k_d)和临界剪切应力(τ_c)是评价黄土可蚀性的关键参数。可蚀性系数越大、临界剪切应力越小表明黄土越容易被侵蚀,潜蚀洞穴扩展速率也越快。目前可通过孔蚀试验(hole erosion test, HET)、槽蚀试验(slot erosion test, SET)等手段确定临界剪切应力 τ_c 和可蚀性系数 k_d ^[32]。本文主要探究裂隙开度对黄土潜蚀洞穴形成过程的影响,黄土内部可蚀性的影响是后期研究重点关注的问题。

5.3 极限淘蚀凹槽深度

裂隙性黄土潜蚀洞穴形成过程模型试验中的重力失稳模式可总结为3类:旋转型崩塌(图6b)、拉裂-倾倒型崩塌(图6c)和剪切滑移型崩塌,其中拉裂-倾倒型崩塌最为发育。重力崩塌的力学建模目前已经有很多成熟的模型^[33]。黄土潜蚀引发的潜蚀洞穴底部重力崩塌建模和量化评价的难点在于极限淘蚀深度和淘蚀速率的确定。

对于黄土潜蚀洞穴来说,存在两种情况:一种为出现类似于岩腔的物理凹槽;另一种为因潜蚀洞穴底部通道堵塞形成积水,地下水分蒸发量较少,水分多数沿垂直和侧向迁移,导致洞穴底部土体含水量升高强度降低,失去承载能力,此类可称为软化凹槽。对于物理凹槽,可借鉴极限岩腔深度法^[33],可以建立潜蚀洞穴底部淘蚀凹槽极限深度表达式。本次试验过程中,模型顶部未出现拉张裂缝,因此 $\alpha=0$,故潜蚀洞穴底部淘蚀凹槽的极限深度可以表示为:

$$L_c = \sqrt{\frac{h_1 S_{lt}}{3\gamma}} \quad (3)$$

式中: L_c ——淘蚀凹槽的极限临界深度/m;

h_1 ——崩塌体的高度/m;

S_{lt} ——黄土抗拉强度/kPa;

γ ——黄土重度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。

建立黄土抗拉强度与含水率之间的函数关系,代入式(3)可实现悬空土体稳定性评价。

物料凹槽形成过程中,溅蚀和土体的崩解起到了关键作用。物理淘蚀凹槽处土体受到动静水力交互侵蚀作用,设总侵蚀速率为 $v_{\text{总}}$:

$$v_{\text{总}} = v_{\text{崩解}} + v_{\text{溅蚀}} \quad (4)$$

淘蚀凹槽的扩展速率可以表示为:

$$v_{\text{总}} = v_{\text{崩解}} + v_{\text{溅蚀}} = \frac{dL_c}{dt} \quad (5)$$

通过一定的试验手段测得潜蚀洞穴底部土体的崩解速率和溅蚀速率,即可实现潜蚀洞穴内部重力崩塌发生时间的预测。

对于软化凹槽, Lu 等^[34]研究表明当负地形区存在积水时,会形成向下倾斜的渗流线,渗流线以下的黄土会发生不同程度的自重湿陷变形,导致渗流线上部黄土的非均匀塌陷沉降和旋转变形,同时在黄土上部产生拉应力。在潜蚀洞穴扩展后期,当洞底排水不畅时会形成一定的水位,随着水分向下和侧向扩展,会出现与上述现象类似的情况,渗流线以下的黄土引浸水发生湿陷,强度降低。根据 Lu 等^[34]简化的悬臂梁模型,可以确定潜蚀洞穴重力崩塌扩展的规模,速度以及在地表形成拉张裂缝的深度。

6 结论

(1)黄土潜蚀洞穴形成演化机理可概括为:软化崩解-冲刷扩宽-淘蚀临空-重力崩塌。

(2)黄土洞穴潜蚀速率可分为快速侵蚀阶段、波动降低阶段和缓慢稳定潜蚀阶段;黄土潜蚀洞穴形成过程中存在潜蚀突进现象。

(3)初始裂隙开度主要影响侵蚀类型和规模,随着开度增大,水力侵蚀规模先增大后降低;重力侵蚀规模总体呈现出降低趋势;黄土可蚀性和崩解性是未来评价黄土潜蚀洞穴稳定性的关键参数。

需要说明的是本次试验仅考虑了垂直裂隙一种结构面形式,而黄土中还存在大量的构造节理,致使本研所得到的裂隙性黄土潜蚀洞穴形成机理具有一定的局限性。黄土的水敏性和水动力条件也是黄土潜蚀洞穴等潜蚀地貌形成的关键条件。后期研究还应考虑不同含水量,不同流量和不同裂隙产状的潜蚀洞穴形成机理试验,分析总结多种因素控制下潜蚀洞穴的形成演化过程将更具说服力。

参考文献 (References) :

- [1] 王景明,倪玉兰,孙建中.黄土构造节理研究及其应用[J].工程地质学报,1994,2(4):31-42. [WANG Jingming, NI Yulan, SUN Jianzhong. A study on structural joints in loess and its practical applications[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(4): 31-42. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 彭建兵,李喜安,孙萍,等.黄土洞穴的环境灾害效应

- [J]. *地球与环境*, 2005, 33(4): 1 - 7. [PENG Jianbing, LI Xi'an, SUN Ping, et al. Environmental and disaster effects of loess caves[J]. *Geology-geochemistry*, 2005, 33(4): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 彭建兵, 李喜安, 范文, 等. 黄土高原地区黄土洞穴的分类及发育规律 [J]. *地学前缘*, 2007, 14(6): 234 - 244. [PENG Jianbing, LI Xi'an, FAN Wen, et al. Classification and development pattern of caves in the loess plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 234 - 244. (in Chinese with English abstract)]
- [4] PENG Jianbing, SUN Ping, IGWE O, et al. Loess caves, a special kind of geo-hazard on loess plateau, northwestern China[J]. *Engineering Geology*, 2018, 236: 79 - 88.
- [5] 许领, 李宏杰, 吴多贤. 黄土台缘滑坡地表水入渗问题分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(2): 32 - 35. [XU Ling, LI Hongjie, WU Duoxian. Discussion on infiltration of surface water and their significance to terrace loess landslides[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2008, 19(2): 32 - 35. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 杨华. 裂隙性黄土渗透特性试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016. [YANG Hua. Experimental study on permeability characteristics of fractured loess[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 邹锡云, 许强, 彭大雷, 等. 黑方台典型黄土洞穴形成的影响因素 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(28): 58 - 64. [ZOU Xiyun, XU Qiang, PENG Dalei, et al. Influencing factors of formation of typical loess sinkhole in Heifangtai[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(28): 58 - 64. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 郑鹏飞, 胡江洋, 刘晓京. 黄土边坡落水洞的形成演化机理研究 [J]. *灾害学*, 2019, 34(增刊 1): 224 - 227. [ZHENG Pengfei, HU Jiangyang, LIU Xiaojing. Formation and evolution mechanism of waterfall tunnel on loess slope[J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(Sup 1): 224 - 227. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 孔嘉旭, 庄建琦, 彭建兵, 等. 兰州老狼沟黄土微地貌灾害链时空分布特征与危险性模拟研究 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(5): 1401 - 1415. [KONG Jiayu, ZHUANG Jianqi, PENG Jianbing, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and risk simulation of loess micro geomorphic disaster chain in Laolang gully, Lanzhou[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(5): 1401 - 1415. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 彭建兵, 兰恒星, 钱会, 等. 宜居黄河科学构想 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28(2): 189 - 201. [PENG Jianbing, LAN Hengxing, QIAN Hui, et al. Scientific research framework of livable Yellow River[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 189 - 201. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 彭建兵, 吴迪, 段钊, 等. 典型人类工程活动诱发黄土滑坡灾害特征与致灾机理 [J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(5): 971 - 980. [PENG Jianbing, WU Di, DUAN Zhao, et al. Disaster characteristics and destructive mechanism of typical loess landslide cases triggered by human engineering activities[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(5): 971 - 980. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王家鼎, 许元珺, 张登飞, 等. 黄土振动促渗效应研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(5): 763 - 782. [WANG Jiading, XU Yuanjun, ZHANG Dengfei, et al. Study on the effect of loess vibration on promoting infiltration[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(5): 763 - 782. (in Chinese)]
- [13] HU Sheng, QIU Haijun, WANG Ninglian, et al. The influence of loess cave development upon landslides and geomorphologic evolution: A case study from the northwest Loess Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 2020, 359: 107167.
- [14] 张焱, 邱海军, 胡胜, 等. 黄土洞穴发育条件下滑坡土体性质及其稳定性分析 [J]. *自然灾害学报*, 2020, 29(2): 64 - 75. [ZHANG Yan, QIU Haijun, HU Sheng, et al. Analysis of the properties and stability of landslide soil under the development conditions of loess caves[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020, 29(2): 64 - 75. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 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. [ZHANG Buping, ZHU Xinghua, CHENG Yuxiang, et al. A review on loess subsurface-erosion mechanism and it's hazard effects[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(6): 41 - 52. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 罗扬. 黄土节理的强度与渗流问题研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014. [LUO Yang. Study on strength and seepage of loess joints[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张宇. 考虑张开度的节理发育黄土体水分场试验研

- 究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020. [ZHANG Yu. Experimental study on moisture field of jointed loess considering opening degree[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [18] WANG Jiading, GU Tianfeng, ZHANG Maosheng, et al. Experimental study of loess disintegration characteristics[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(6): 1317 – 1329.
- [19] WANG Li, LI Xian, LI Lincui, et al. Experimental study on the physical modeling of loess tunnel-erosion rate[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(8): 5827 – 5840.
- [20] WANG Li, LI Xian, ZHENG Ziyu, et al. Analysis of the slope failure mechanism a under tunnel erosion environment in the south-eastern Loess Plateau in China[J]. *CATENA*, 2022, 212: 106039.
- [21] 谷天峰, 袁亮, 胡炜, 等. 黑方台黄土崩解性试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(4): 62 – 70. [GU Tianfeng, YUAN Liang, HU Wei, et al. Experimental research on disintegration of the Heifangtai loess[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(4): 62 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李喜安, 郑惠芳, 康景辉, 等. 黄土地层突涌破坏机理物理模拟 [J]. *西安科技大学学报*, 2010, 30(5): 560 – 564. [LI Xi'an, ZHENG Huifang, KANG Jinghui, et al. Physical simulation on the mechanism of soil-bursting failure in loess[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2010, 30(5): 560 – 564. (in Chinese with English abstract)]
- [23] LI Xi'an, WANG Li, HONG Bo, et al. Erosion characteristics of loess tunnels on the Loess Plateau: a field investigation and experimental study[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(9): 1945 – 1958.
- [24] WILSON G V. Mechanisms of ephemeral gully erosion caused by constant flow through a continuous soil-pipe[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(14): 1858 – 1866.
- [25] WILSON G. Understanding soil-pipe flow and its role in ephemeral gully erosion[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(15): 2354 – 2364.
- [26] FOX G A, FELICE R G, MIDGLEY T L, et al. Laboratory soil piping and internal erosion experiments: evaluation of a soil piping model for low-compacted soils[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(9): 1137 – 1145.
- [27] WILSON G V, WELLS R, KUHNLE R, et al. Sediment detachment and transport processes associated with internal erosion of soil pipes[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(1): 45 – 63.
- [28] BERNATEK-JAKIEL A, POESEN J. Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 1107 – 1128.
- [29] JEAN P. Soil erosion in the Anthropocene: research needs[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(1): 64 – 84.
- [30] BERNATEK-JAKIEL A, NADAL-ROMERO E. Can soil piping impact environment and society? Identifying new research gaps[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2023, 48(1): 72 – 86.
- [31] 杨阳. 黄土滑坡裂缝发育特征及其对滑坡孕灾模式的影响——以泾阳南塬黄土滑坡为例 [D]. 西安: 长安大学, 2016. [YANG Yang. Characteristics of cracks in loess landslide and its influence on landslide disaster-prone mode: A case study of loess landslide in Jingyang South Plateau[D]. Xi'an: Changan University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [32] WAN C F, FELL R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(4): 373 – 380.
- [33] 王根龙, 伍法权, 祁生文. 悬臂-拉裂式崩塌破坏机制研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(增刊 2): 269 – 274. [WANG Genlong, WU Faquan, QI Shengwen. Research on failure mechanisms for cantilever and tension crack-type collapse[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(Sup 2): 269 – 274. (in Chinese with English abstract)]
- [34] LU Quanzhong, QIAO Jianwei, PENG Jianbing, et al. A typical Earth fissure resulting from loess collapse on the loess plateau in the Weihe Basin, China[J]. *Engineering Geology*, 2019, 259: 105189.

编辑: 王支农