

黄土潜蚀机理及其致灾效应研究综述

张卜平, 朱兴华, 成玉祥, 张智锋, 孙恒飞, 蔡佳乐

A review on loess subsurface-erosion mechanism and its hazard effects

ZHANG Buping, ZHU Xinghua, CHENG Yuxiang, ZHANG Zhifeng, SUN Hengfei, and CAI Jiale

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-06>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型黄土崩塌形成机制

The mechanism of bending-toppling loess collapse caused by headward erosion

成玉祥, 张卜平, 唐亚明 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 86-91

黄土高填方场地裂缝的发育特征及分布规律

Development and distribution characteristics of ground fissures in high loess filled ground

于永堂, 郑建国, 张继文, 刘智 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 85-92

黄土深基坑潜水区降水诱发地面沉降的简化算法

Simplified calculation of settlement due to dewatering of phreatic aquifer in loess area

胡长明, 林成 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 76-83, 139

土层结构对非饱和毛细水盐运移的影响

Influence of soil layer structure on unsaturated capillary water and salt transport

吕擎峰, 单小康, 赵彦旭, 贾博博, 臧斐 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 99-105

广东佛山市高明区李家村岩溶塌陷群成因机理分析

Analysis on the formation mechanism and development process of karst collapses in Lijia Village, Gaoming District of Foshan City

韩庆定, 罗锡宜 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 56-64

基于机器学习的区域滑坡危险性评价方法综述

A review of the methods of regional landslide hazard assessment based on machine learning

方然可, 刘艳辉, 黄志全 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 1-8



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-06

黄土潜蚀机理及其致灾效应研究综述

张卜平^{1,2}, 朱兴华^{1,2}, 成玉祥^{1,2}, 张智锋^{1,2}, 孙恒飞^{1,2}, 蔡佳乐^{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:黄土潜蚀指地表水沿黄土大孔隙、节理裂隙等优势渗流通道饱水入渗时对黄土产生的渗透潜蚀、冲刷搬运及浸水湿陷作用。黄土由于水敏性、结构面发育、优势渗流等特点, 导致黄土地区潜蚀广泛发育, 且黄土潜蚀具有显著的致灾效应, 使得潜蚀诱发的黄土地质灾害的成因机理及防治研究愈发复杂。文章首先梳理了黄土潜蚀的基本概念, 在总结黄土潜蚀主控因素的基础上, 阐述了黄土潜蚀的成因机理, 延伸了黄土潜蚀致灾效应的基本内涵。最后根据黄土潜蚀研究现状, 对未来黄土潜蚀研究作了简要展望, 指出今后需更加重视黄土潜蚀在黄土地质灾害链中关键链接作用方面的研究。文章针对黄土地区潜蚀研究中若干问题的初步思考, 旨在为后续的黄土潜蚀致灾效应研究提供科学建议。

关键词:黄土潜蚀; 节理裂隙; 优势渗流; 水-土耦合; 致灾效应

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)06-0041-12

A review on loess subsurface-erosion mechanism and it's hazard effects

ZHANG Buping^{1,2}, ZHU Xinghua^{1,2}, CHENG Yuxiang^{1,2}, ZHANG Zhifeng^{1,2}, SUN Hengfei^{1,2}, CAI Jiale^{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: Loess subsurface-erosion refers to the erosion, transport and subsidence of loess caused by surface water infiltration along the dominant seepage channels such as loess macropore joints and fissures. Due to the characteristics of water sensitivity, structural surface development, dominant seepage, etc., loess subsurface-erosion has developed extensively in the loess area, and loess subsurface-erosion has a significant disaster effect, making the mechanism and prevention of loess disasters induced by erosion more complicated. This article first combed the basic concepts of loess subsurface-erosion, based on summarizing the main controlling factors of loess subsurface-erosion, expounded the formation mechanism of loess subsurface-erosion, and expanded the basic connotation of loess subsurface-erosion disaster effect. Finally, according to the current research status of loess submergence, a brief prospect is made for the future research of loess subsurface-erosion, and it is pointed out that more attention should be paid to the research on the key linking role of loess subsurface erosion in the loess disaster chain. This article focuses on the preliminary thinking of several problems in the study of loess subsurface-erosion, and aims to provide scientific suggestions for the subsequent study of loess subsurface-erosion hazard effects.

Keywords: loess subsurface-erosion; joints and fissures; preferential flow; water-soil coupling; disaster effect

收稿日期: 2021-05-10; 修订日期: 2021-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(442090053; 42041006; 41877249); 中央高校基本科研业务费资助项目(300102269211)

第一作者: 张卜平(1993-), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害研究。E-mail: zhangbuping@chd.edu.cn

通讯作者: 朱兴华(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害研究。E-mail: zhuxinghua@chd.edu.cn

0 引言

黄土潜蚀是指地表水沿黄土节理裂隙面流动时发生的物理侵蚀和化学溶蚀过程^[1-2]。黄土强水敏性、结构面发育和存在优势渗流现象的三大特征,决定了在黄土中极易发生潜蚀^[3]。研究表明黄土潜蚀具有显著的致灾效应和环境效应^[4-5],与黄土高原地区常见的崩塌、滑坡、泥石流及地裂缝等地质灾害和水土流失密切相关^[6-12],常间接造成人员伤亡和巨大的经济损失^[13-18]。

目前关于黄土潜蚀的研究主要集中在主控因素、成因机理和致灾效应三大方面。彭建兵等^[3]和李喜安等^[2]多年研究成果表明,黄土潜蚀的主控因素包括黄土易灾变的土性、节理裂隙通道和水力条件,但是当前对黄土潜蚀的每一类控制因素认识仍不够深入,且缺少量化的评价指标。成因机理方面,目前流行三种主要学说^[3,19]:化学潜蚀说、机械潜蚀说和复合潜蚀说,其中复合潜蚀说发展最为成熟已被学界普遍接受,但是复合潜蚀说对潜蚀过程中水土相互作用机理尚不明确。致灾效应方面,目前主要集中在潜蚀对黄土滑坡^[13]、崩塌^[14-15]、地裂缝^[16-18]等单种灾害的诱发或加剧作用,而对黄土潜蚀在黄土地质灾害链中的关键链接作用研究不足。

综上所述,目前黄土潜蚀研究还存在很多不足,文章以黄土潜蚀现象为研究对象,梳理黄土潜蚀的基本概念,分析黄土潜蚀的主控因素和成因机理,总结黄土潜蚀的致灾效应,最后就黄土潜蚀机理研究未来发展趋势

作简要展望,旨在为今后黄土潜蚀研究提供科学参考。

1 黄土潜蚀的基本概念

潜蚀一词最初是由前苏联学者 A.M.巴甫洛夫提出用来表征由于地下水对下伏岩层中易溶解部分的溶滤及携出而形成的地表变形现象^[20],近年来被用于描述黄土内部特殊的侵蚀现象。关于黄土潜蚀的定义,王景明^[21]于 1996 年将黄土潜蚀定义为:地表水沿黄土节理尤其是构造节理渗入地下和沟缝内进行侵蚀的侵蚀作用。李喜安等^[2]2010 年将黄土潜蚀定义为:在地表以下地下水的作用使地层发生的各种形式的侵蚀,主要包括物理侵蚀和化学侵蚀。上述两位学者给出的定义各有侧重,但是并不全面。从潜蚀发生的过程来看,由于地表径流相对集中,渗入黄土节理中的水分增多,不断冲刷裂隙壁并溶解黄土中的可溶性物质(碳酸钙),在向下运移的过程中又带走了细小的黄土颗粒,破坏了黄土结构,在自重作用下上部土体坍塌,形成一系列的浅洼地、碟状地、陷穴、暗穴等小的侵蚀形态^[1],当地表水沿黄土中的缝隙渗入地下进行侵蚀时,其侵蚀过程中常常参与了土体塌陷,所以黄土潜蚀可视为水力侵蚀与重力侵蚀共同参与的复合侵蚀类型。文献 1 所述定义概括了黄土潜蚀的发生过程,揭示了黄土潜蚀的复合侵蚀本质,概念清晰,文章即沿用此定义,黄土潜蚀演化过程示意图如图 1 所示。

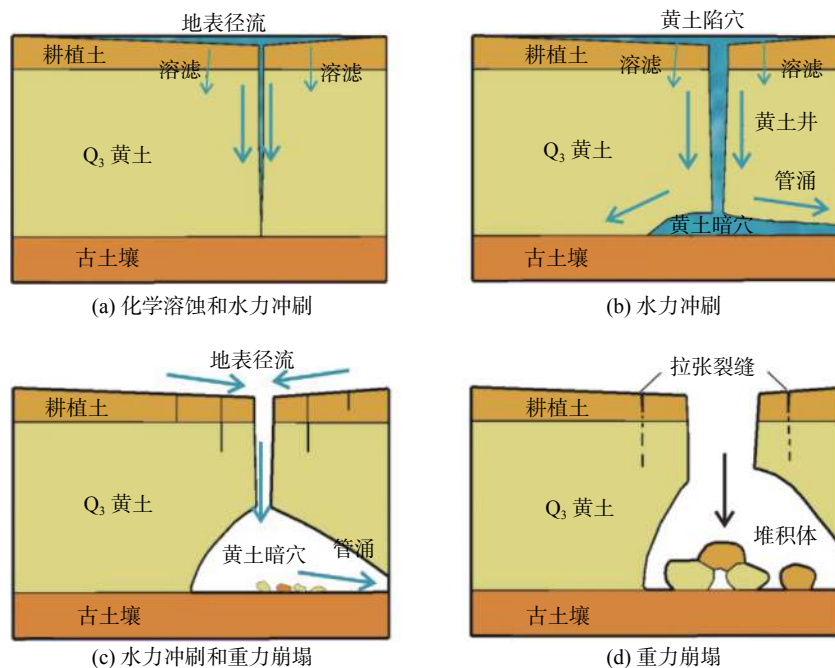


图 1 典型黄土潜蚀演化过程示意图

Fig. 1 Typical subsurface -erosion process of loess

2 黄土潜蚀的主控因素

黄土高原地区黄土潜蚀分布广泛^[6,22-26],影响因素

众多^[22,27],研究表明黄土潜蚀的发生必须具备三个基本条件^[3,21,28]:易潜蚀的土性、优势渗流通道和水动力条件,黄土潜蚀的主控影响因素如图2所示。

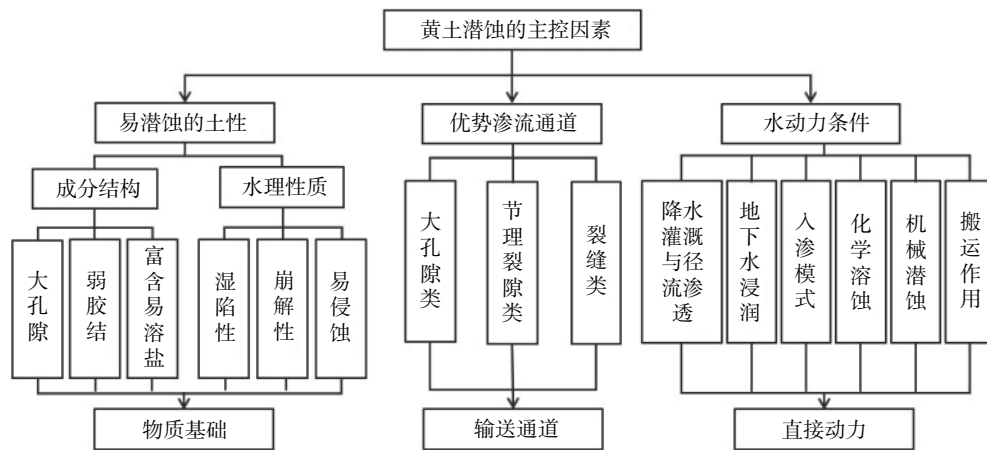


图2 黄土潜蚀主控因素

Fig. 2 Main controlling factors of loess subsurface-erosion

2.1 易潜蚀的土性

黄土结构疏松,胶结程度差,节理发育,决定了黄土具有强水敏性^[29],也是黄土潜蚀发生的物质基础^[27]。研究表明,黄土水敏性中以渗透性、湿陷性、崩解性对黄土潜蚀灾变影响最大^[2-3,22-23]。

黄土的渗透性反映水在黄土中的入渗速度^[30],在一定程度上决定了水对黄土的侵蚀路径及侵蚀速率影响的大小。野外调查发现黄土潜蚀发生的部位通常是渗流作用较强的部位,因而优势渗流与黄土潜蚀的形成具有直接关系^[31-34]。而当前关于黄土优势渗流的研究主要集中在优势渗流规律^[18,35-39]和优势渗流模型的建立等方面^[40-42],这些研究的前提均视优势渗流通道的边界为固定边界,与实际条件下动边界的优势渗流过程出入较大,且对优势渗流与黄土优势通道之间的水土相互作用研究较少。

黄土的湿陷性是指黄土在一定压力下受水浸湿,土结构迅速破坏而发生显著附加下沉的性质^[43]。一般地,黄土潜蚀发育的地区普遍为强湿陷性黄土区,尤其是自重湿陷性黄土区黄土潜蚀发育程度明显较高,因此,黄土的自重湿陷性是黄土潜蚀的直接土性因素^[2-3,33-44],除此以外,黄土的湿陷性还直接或间接影响着黄土的崩解和抗冲等特性^[45]。当前对黄土湿陷性与黄土潜蚀的区域分布相关性较为明确,但是湿陷性对陷穴、暗穴等空间形态发展的控制作用不明,湿陷性与黄土潜蚀速率量化之间的关系不明。

黄土的崩解性直接反映了黄土受侵蚀搬运的难易程度,因此对黄土潜蚀的形成和发展速度也起着至关重要的作用^[46-47]。近年来,李喜安等学者进一步揭示了黄土的崩解性、湿陷性等水理性质及侵蚀速率对黄土潜蚀的影响。研究表明,黄土试块的崩解过程不是无限发展的,而是受浸水边界的限制,即存在明显的“边界效应”。通过不同数量棱边柱体原位崩解试验发现黄土崩解还具有明显的“去棱边效应”,由于坡体内部棱边较少,“去棱边效应”较弱,可见崩解作用对坡体内部潜蚀的影响并不大^[48]。通过黄土洞穴侵蚀速率试验研究发现,黄土洞穴潜蚀过程中,会在洞穴中形成跌水侵蚀,坡度越小,跌水侵蚀的贡献量越大^[2];由于黄土地层在垂向上呈现出古土壤—黄土交替出现的各向异性,且黄土、古土壤抗侵蚀性差别明显,因此会形成差异性溯源侵蚀,从而加速洞穴潜蚀^[2];而黄土中沿节理裂隙的优势渗流不断潜蚀,使得水流具有选择性侵蚀,因此,决定了洞穴延伸方向在三维空间的频繁变化^[49-50],但是由于当前缺乏有效的土体内部侵蚀观测手段,导致对黄土内部潜蚀过程研究极为不足。

黄土中优势渗流、湿陷性和崩解性等特性是黄土潜蚀发生的基础条件之一。不同优势流类别对优势通道的作用差异巨大,例如膜状流主要因自身波动性对渗流通道产生差异性侵蚀,而径流冲刷主要为势能和动能的转换,当前对黄土优势渗流模式的分类及优势流对优势通道的侵蚀效应尚不明确;湿陷性是黄土洞穴发育的

关键因素, 湿陷性对洞穴形态特征及扩展规律具有怎样的控制作用还不明确, 更是缺少量化的评价方法; 目前对于黄土试样的崩解规律研究较为深入, 黄土暗穴中积水后的原位崩解特征和崩解速率是尚待解决的难题, 动水环境下崩解与侵蚀速率之间的关系亟待解决。

2.2 优势渗流通道

黄土中的构造节理、原生垂直节理、风化裂隙以及卸荷裂隙等构成了优势渗流通道, 具有汇水、导水、排水通道的作用, 对黄土潜蚀的形成起到了边界控制作用, 是黄土潜蚀形成和发展必备条件之一^[33,51-57]。研究发现, 黄土中优势渗流通道类别不同对地表水的下潜模式、优势流与优势通道的相互作用过程影响巨大^[51-57], 因此很有必要对黄土中的优势入渗通道进行分类。

目前关于黄土优势渗流通道的分类成果很多, 分类依据主要有渗流规律和不同尺度, 具体见表 1。按照闭合状态、水在裂隙中的渗透或运移情况及裂隙两侧土体在受力后的相互影响程度的分类^[18,58], 对研究裂隙性黄土的渗流规律和潜蚀机理研究具有重要意义。以入渗规律为主的分类体系^[59-60]为进一步研究通道中水土作用规律奠定了基础。从微观、细观和宏观多个尺度对黄土中的优势渗流通道进行分类^[18], 为从多尺度揭示黄土潜蚀机理提供了有利条件。张宇^[42]通过对不同开度、裂隙黄土湿润锋迁移形态、迁移深度宽度以及湿润锋迁移过程中的深度比值分析, 对黄土节理的量化分类进行了初步探索, 但是他的实验节理开度范围在

0.63 ~ 5.04 mm, 仅适用于 5 mm 以内的裂隙开度, 对黄土潜蚀机理研究而言, 还有必要对大开度节理裂隙的分类进行深入探究。

目前, 不同尺度下黄土优势通道的划分未实现量化, 也极少有优势通道与潜蚀作用之间量化关系的研究。黄土中的优势通道与岩体中的节理裂隙相比, 最大的特点是黄土优势通道在优势流作用下其空间形态会发生不断扩宽延伸或局部堵塞, 其结果是, 优势通道要么不断扩宽演化为黄土洞穴, 最终发生地面塌陷, 要么因为通道内部塌陷造成通道局部堵塞, 形成一定的水位, 地下水不断浸润软化通道侧壁, 受黄土湿陷、崩解等特性影响, 通道空间进一步扩大, 形成大面积的积水, 最终导致滑坡等地质灾害的发生。因此, 未来对黄土优势渗流通道的分类需考虑建立动态的、量化的分类体系, 并在分类体系的基础上进行黄土潜蚀作用机理的深入研究。

2.3 水动力条件

水动力作用是黄土潜蚀发生的动力来源^[3], 而黄土区地下水的动力条件又仅受地表水的不同入渗模式的控制。

2.3.1 地表水入渗模式

地表水的不同入渗模式决定了黄土中优势流的动力特性, 影响着黄土潜蚀速率, 控制着黄土潜蚀的成因机理, 已有多位学者对黄土区地表水的入渗模式进行了分类。根据地表水的入渗特征, 可将黄土地区地表水的

表 1 黄土优势渗流通道分类及特征表

Table 1 Classification and characteristic table of dominant seepage channels in loess

作者	分类依据	类别	渗流特征
卢全中等 ^[58]	闭合状态、水在裂隙中的渗透运移	闭合结构面	水在裂隙中渗透的速度与两侧土体中接近, 此时土体可视为连续介质或不均匀连续介质
		裂开结构面	水在裂隙中渗漏, 可视为不连续介质, 但在压力作用下两侧土体可相互影响
		张开结构面	将两侧黄土分成互不影响的两部分, 水在裂隙中可以自由流动, 此时水对土体产生侵蚀, 对土体的性质起着决定性作用
张珊珊等 ^[59,60]	水分入渗规律	I 类优势渗流通道	微小节理(裂隙)、孔隙类, 由于水分快速运移的通道不发育, 所以水分在这类优势通道中基本呈现出均匀入渗的模式
		II 类优势渗流通道	中宽节理(裂隙)、大孔隙及近地表微小洞穴类, 这类优势通道为黄土体中的水分运移发挥着重要作用, 水分运移呈现出快速入渗的模式
		III 类优势渗流通道	宽大节理(裂隙)及黄土洞穴类, 这类优势通道发育及其明显, 尤其是对于落水洞而言, 容易形成水分汇集区并呈现出灌入渗透的模式
彭建兵等 ^[18]	微细宏观不同尺度	微观尺度通道	黄土中的大孔隙, 表现为均匀入渗
		细观尺度通道	具有强渗透性的节理裂隙、断层以及黄土中的虫孔、根孔, 具有优势渗流特性
		宏观尺度通道	水可以自由出入的、开放性的裂缝和落水洞
		小张开度 (0 mm < a < 1.50 mm)	由于节理壁面的水—土互馈作用, 导致裂隙壁面细颗粒随水流运移, 最终堵塞节理, 演变成特殊的大孔隙流
张宇 ^[42]	湿润锋迁移形态、深度和宽度	中等张开度 (1.50 mm ≤ a ≤ 2.50 mm)	处于小开度和大开度之间
		大张开度 (a > 2.50 mm)	水流会直接穿过裂隙铅直入渗, 几乎不与裂隙面发生作用

入渗模式分为四类^[3,61], 其中与黄土潜蚀关系最为密切的优势入渗模式有: 地表径流集中灌入入渗模式、渗透重力水沿优势渗流通道集中入渗模式和混合灌渗入渗模式等三种模式。当黄土地层中存在具备进出口的径流通道时, 一般发生灌入下渗; 当下渗重力水沿优势通

道集中而迅速下潜时, 可视为集中入渗模式; 而当渗透重力水与径流同时存在时, 往往表现为混合入渗模式。张珊珊等^[59-60]则将入渗模式分为均匀入渗、快速入渗和灌入入渗, 这三种入渗模式分别对应三类优势渗流通道(图 3)。

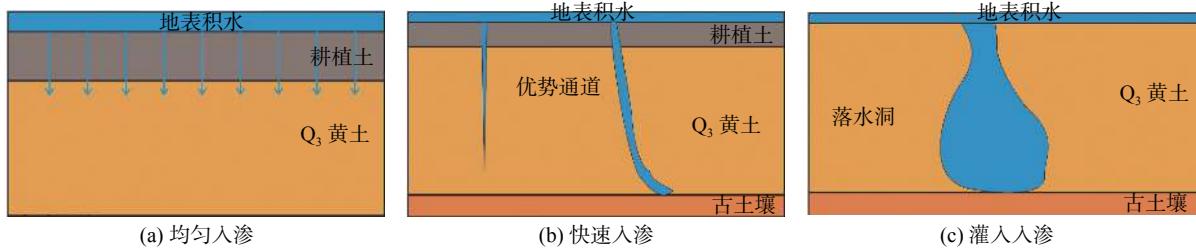


图 3 黄土入渗模式概念图 (据文献 [60], 有修改)

Fig. 3 Conceptual map of loess infiltration mode(modified from Ref.[60])

黄土具有大孔隙、节理裂隙发育的结构构造特征, 且水敏性强, 导致水渗入黄土中的途径多样, 而不同的入渗模式又产生差异明显的水动力条件, 导致黄土潜蚀过程中水动力作用极为复杂。

2.3.2 水动力作用与潜蚀类型划分

地下水的侵蚀作用是黄土潜蚀的最直接动力, 控制着黄土潜蚀的形成。通常地下水与土体相互作用方式主要有物理作用、化学作用和力学作用(图 4)^[62]。其中, 控制黄土潜蚀机制的力学作用有: 静水压力作用和动水压力作用。在静水压力作用下, 黄土中的裂隙会发生扩容变形, 而在动水压力作用下, 会对黄土节理面产生拖曳力和软化黄土强度。地下径流在优势渗流通道中运动时, 对土颗粒施加一种体积力, 在动水压力作用下可以使土体中的细颗粒物质发生移动, 甚至被带出土体以外, 产生潜蚀而使土体破坏, 据此, 可以对黄土潜蚀的类型进行分类。

蚀作用及搬运作用等三类。化学潜蚀一般指地下一切以各种化学作用为主的侵蚀现象, 以化学溶蚀为主。机械潜蚀是在地下径流机械力作用下发生的潜蚀, 包括在多孔介质中的渗流作用下发生的潜蚀和以地下管流、洞穴流的水动力冲刷作用为主的潜蚀。这一分类与常见的水土之间的相互作用类型划分差异较大, 概念比较模糊, 适用性不强。文中根据水土之间的作用类型将黄土潜蚀划分为: 静水潜蚀作用和动水潜蚀作用。静水潜蚀作用指在静水条件下黄土发生的软化崩解和湿陷等促使黄土结构解体的潜蚀作用, 包括物理潜蚀作用和化学潜蚀作用。而动水潜蚀作用才是潜蚀发生的关键, 它是指因动水的冲刷、搬运和沉积作用而发生的潜蚀。静水潜蚀可以为动水潜蚀提供物质来源, 而动水潜蚀的冲刷、搬运、堵塞沉积作用可以进一步促进静水潜蚀作用的发生。

黄土潜蚀是地下水与黄土之间的复杂作用过程, 以当前的科技手段, 很难实现全面考虑各种水土作用类型。如上文所述, 黄土潜蚀过程中水是动力来源, 依据水土之间的不同力学作用对潜蚀类型进行划分, 会大大简化潜蚀机理的研究。

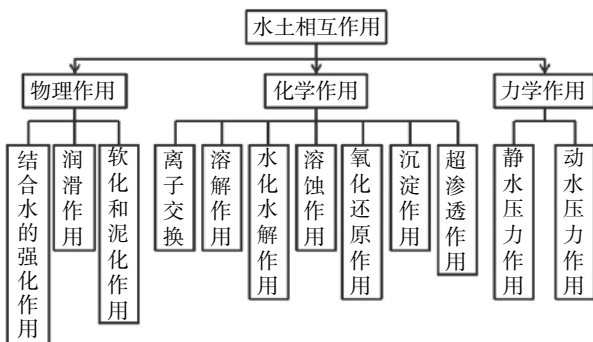


图 4 水土相互作用图

Fig. 4 The picture of water-soil interaction

3 黄土潜蚀的形成机理

早期关于黄土潜蚀机理的研究主要根据潜蚀作用类型进行定性解释, 包括: 机械潜蚀^[63-64]、化学潜蚀^[28]和复合潜蚀^[1]。王景明等^[56]基于黄土构造节理理论, 进一步发展了复合潜蚀成因观点。该观点认为, 黄土潜蚀的形成并不是单一的化学作用或物理作用, 而是多种潜蚀作用复合的结果^[31,46,64-66]。

李喜安等^[2]将潜蚀作用分为机械潜蚀作用、化学溶

近年来, PENG^[67]和 WANG 等^[44]学者从黄土强水敏性、优势渗流通道和地下水动力作用类型等主控因素角度对潜蚀机理进行了系统研究。研究表明,黄土的土性结构和水敏特性是潜蚀发生的物质基础,水动力作用是潜蚀发生的根本源动力,各种优势渗流通道为潜蚀发展过程中物质运移的通道^[67](图 2)。

未来揭示黄土潜蚀的形成机理,需厘清土、水和通道三者之间的耦合关系(图 5)。渗流通道决定了入渗水流的运移模式,起到了汇水、导水和排水的关键作用,也是潜蚀发生的场所;在静水和动水潜蚀作用下,通道会不断扩展演化或堵塞,最终趋于稳定;渗流通道附近的土性易受通道中水流的浸润或冲刷作用,发生崩解、湿陷、软化等,完整性降低,强度减小,最终导致灾害发生;而土体内部结构约束着黄土的水理性质,控制着黄土的抗侵蚀能力,因此对潜蚀速率有重要影响;另外,水动力条件的变化也会造成土壤易溶盐流失,最终导致结构变化,影响土性。黄土潜蚀演化过程异常复杂,又由于发生在地下,难以直接对其进行观测,因此截

至目前也未建立有效的黄土潜蚀的模式。鉴于此,文章提出未来大致研究思路(图 6)。主要研究内容有:①明确黄土潜蚀的主控因素,建立各主控因素的量化评价指标;②通过野外调查和室内简化的模型实验,总结和归纳黄土潜蚀的地质演化模式,进行阶段划分;③在提出地质演化模式的基础上,综合利用水力学、土力学和工程地质学原理等探索建立黄土潜蚀的水土力学耦合模型;④将已建立的力学模型应用于解决重大黄土地质灾害的形成机理。

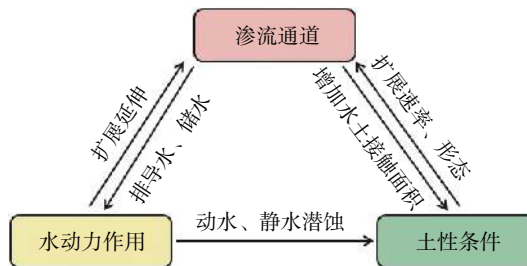


图 5 黄土-水-通道耦合关系图

Fig. 5 The picture of Loess - water - channel coupling relationship

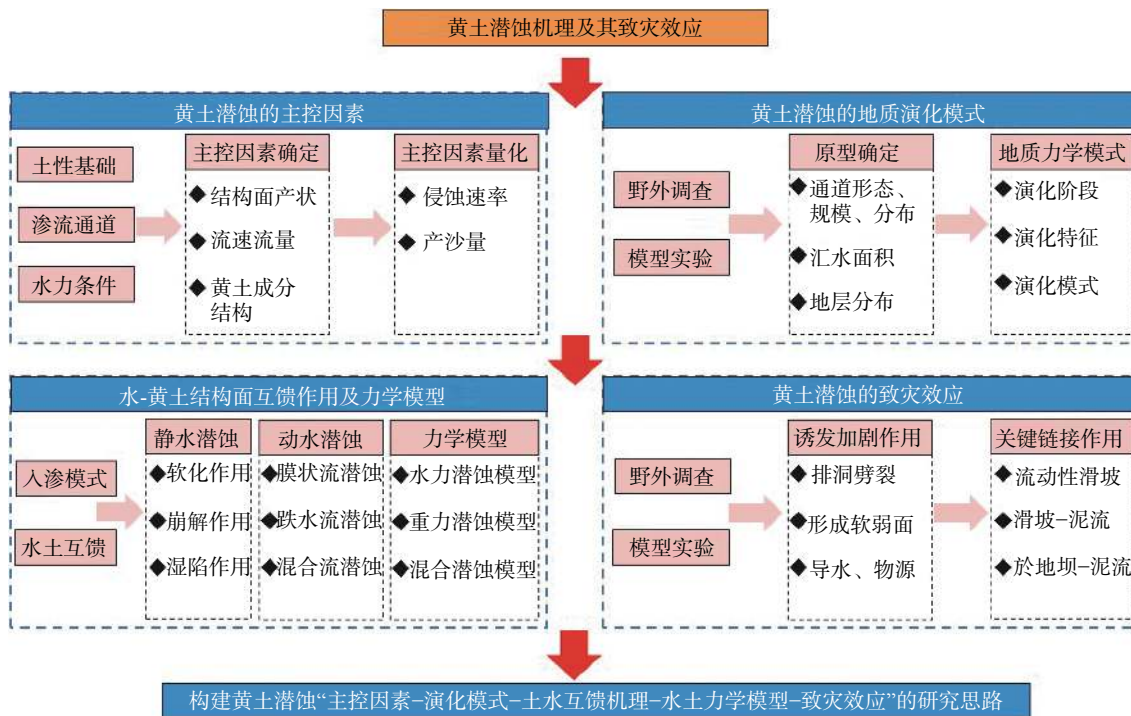


图 6 黄土潜蚀机理及其致灾效应研究思路

Fig. 6 The study idea of loess subsurface-erosion mechanism and it's hazard effects

黄土潜蚀最显著的特征是其多发生在地表以下,而当前缺乏有效的土体内部侵蚀过程观测手段,这严重制约着对黄土潜蚀机理的研究。因此,在未来研究中可以借助室内模型试验的研究手段,将实际的三维潜蚀过程

概化为二维的平面问题,在黄土(剖)面上模拟潜蚀过程,从而间接认知土体潜蚀机理,以便于抽象概化出潜蚀的概念模式,最终实现潜蚀过程的物理数学量化建模,为未来预测潜蚀速率,研究黄土潜蚀的致灾效应提

供科学依据。

4 黄土潜蚀的致灾效应

黄土潜蚀是一种常见的不良地质现象,同时还具有间接诱发或加剧崩塌、滑坡、地裂缝和泥石流等灾害的灾

害效应^[4,67-68]。笔者认为,黄土潜蚀的灾害效应主要表现在两个方面,其一,黄土潜蚀对单种地质灾害的诱发或加剧效应;其二,黄土渗透潜蚀作为水源型黄土灾害链的关键环节^[69],对黄土地质灾害成链所具有的链接效应(图7)。

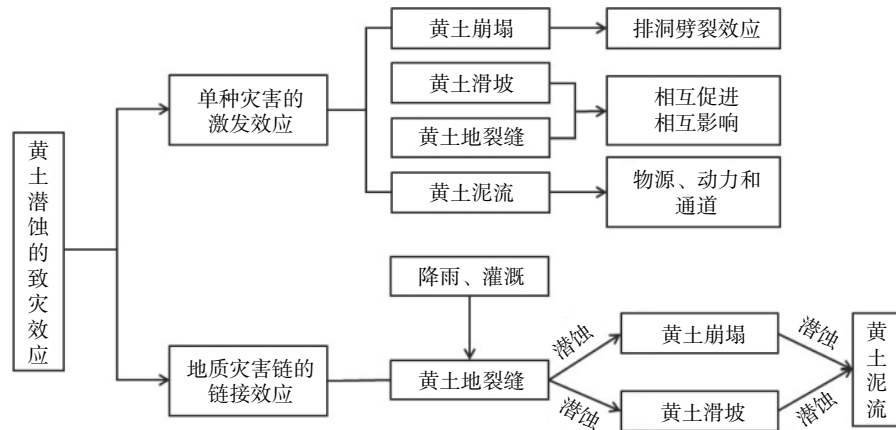


Fig. 7 Disaster effect of loess subsurface-erosion^[67]

4.1 对单种地质灾害的诱发或加剧效应

当潜蚀洞穴为串珠状分布时,具有很强的“排洞劈裂作用”,在劈裂作用下经常造成黄土边坡不同程度的崩塌,其中以串珠状陷穴对边坡的崩塌破坏最为严重^[8,70]。黄土潜蚀与黄土滑坡在某些方面表现为互促关系^[4],黄土滑坡发生后滑体上的土体受拉剪等作用,完整性降低,易被水流渗透潜蚀^[71-72];而在天然斜坡中各类优势渗流通道的导水作用,会在地下形成径流,不断淘蚀斜坡内部,同时改变坡体内部水文条件^[73],软化土体,降低坡体整体稳定性^[74],引发滑坡灾害^[13,75]。黄土潜蚀对黄土泥流也具有极其重要的作用,黄土崩塌、滑坡等灾害形成的堆积体经过潜蚀作用的解体搬运,为黄土泥流提供了充足的物源;而黄土潜蚀通道一般为径流汇集区,潜蚀通道中的径流为黄土泥流的发生提供了充足的水动力^[19,69,76]。黄土地区地裂缝的发育与黄土洞穴潜蚀也呈现出互为因果关系^[4,77]。

目前,对黄土潜蚀诱发或加剧单种地质灾害的形成机理研究较多,但是当前研究手段单一,多数还停留在概念模型的定性分析方面;潜蚀作用对黄土斜坡水文连通性、坡体内部水文地质条件、黄土强度的影响尚待进一步深入研究;受观测手段限制,老滑坡体中潜蚀作用的演化过程仍是亟待解决的科学难题;未来需考虑进行大规模的原位潜蚀试验,开发有效的坡体内部潜蚀过程监测仪器,进一步揭示潜蚀与各类黄土地质灾害之间的

关系。

4.2 对地质灾害链的链接效应

地质灾害往往表现出链生性,即由成因上相互关联,时间上有先后顺序,空间上彼此相依,并呈线性分布的一系列地质灾害体组成,呈连锁反应并依次出现的几种地质灾害所组成的链式灾害结构,叫做灾害链^[78-81]。黄土潜蚀对黄土地质灾害链的链接效应表现为:降雨或灌溉条件下,必然引起黄土体内部的渗透潜蚀,随着黄土体内部湿陷的加剧,导致地表出现裂缝;裂缝在地表扩展或在土体内部进一步发育,形成软弱面,最终导致黄土崩塌或滑坡;在水源充足的条件下,崩塌滑坡体作为泥石流物源,被冲刷输移至流域下游^[5],潜蚀作用导致的老滑坡转化为泥石流如图8所示。

HU等^[5]结合野外调查,将黄土地质灾害链过程典



图8 潜蚀引发黄土泥流

Fig. 8 Loess mudflow is initiated by subsurface-erosion

型的演化模型分为六个阶段,即初始边坡阶段、早期洞穴阶段、洞穴加速侵蚀阶段、洞穴连接阶段、滑坡蠕变阶段和堰塞坝形成阶段。通过占主导地位的黄土潜蚀,将土壤侵蚀、洞穴发育、地下水运动、河流侵蚀、坡体蠕变、滑坡发生、堰塞坝形成等自然地表过程有机地联系在一起,形成了黄土地质灾害链^[82]。文献^[67]指出在灾害链演化过程中,灾害体的物质及能量逐渐增大,最终表现为灾害链产生过程中放大效应。黄土地区地下水的潜蚀作用作为地质灾害链的关键环节,随着土体内部潜蚀的不断推进,地下水与塌落的土体混为一体演变为黄土泥石流,规模和动能增大,很有可能也存在放大效应,这一点有待进一步证实。

5 结论及展望

(1)文章梳理了黄土潜蚀的基本概念、分析了黄土潜蚀三大主控因素、阐述了黄土潜蚀机理研究现状。结果表明,黄土潜蚀的本质是地下水与黄土结构面之间的互馈作用,黄土特殊的土性是潜蚀发生的物质基础;黄土中的节理裂隙为潜蚀发生提供了场所和物质输送通道;地下水是黄土潜蚀发生的最直接动力;根据水土相互作用机理,可将潜蚀分为静水潜蚀作用和动水潜蚀作用。黄土潜蚀的致灾效应主要表现为对单种灾害的诱发或加剧效应、灾害链生成过程中的链接效应和灾害链演化过程中的放大效应。

(2)虽然我国学者高度重视黄土潜蚀问题的研究,取得了突出的成果,但也存在许多不足。如:目前关于黄土潜蚀的影响因素研究不够深入;研究过程中往往将黄土裂隙中的渗流规律和潜蚀机理研究割裂,事实上这两者之间是相互作用相互影响的统一体系;土性、通道与水力条件之间的复杂耦合机制,仍是亟待研究的科学问题;黄土潜蚀对单种灾害的诱发或加剧效应,对灾害链的链接效应以及放大效应等亟需不断深入;另外,当前缺乏有效的土体内部潜蚀过程观测装备,鲜有在室内直接模拟黄土潜蚀的模型实验。

(3)黄土潜蚀问题未来研究应从以下 4 个方面着手。①明确黄土潜蚀的主控因素,建立各种主控因素的量化评价指标;②通过野外调查和室内简化的模型实验,总结和归纳黄土潜蚀的地质演化模式,进行阶段划分;③在提出地质演化模式的基础上,综合利用水力学、土力学和工程地质学原理等探索建立黄土潜蚀的水土力学耦合模型;④将已建立的力学模型应用于解决重大黄土地质灾害形成机理。

参考文献 (References) :

- [1] 陈永宗,景可,蔡强国.黄土高原现代侵蚀与治理[M].北京:科学技术出版社,1988. [CHEN Yongzong, JING Ke, CAI Qiangguo. Modern erosion and control of the loess plateau [M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)]
- [2] 李喜安,宋焱勋,叶万军.黄土洞穴潜蚀工程地质[M].上海:同济大学出版社,2010. [LI Xi'an, SONG Yanxun, YE Wanjun. Engineering geological research on tunnel-erosion in loess[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2010. (in Chinese)]
- [3] 彭建兵,李庆春,陈志新.黄土洞穴灾害[M].北京:科学出版社,2008. [PENG Jianbing, LI Qingchun, CHEN Zhixin. Loess cave disaster [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)]
- [4] 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]. Earth and Environment, 2005, 33(4): 1-7. (in Chinese with English abstract)]
- [5] HU S, QIU H J, WANG N L, 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.
- [6] 朱显谟.黄土区的洞穴侵蚀[J].黄河建设,1958(3):43-44. [ZHU Xianmo. Cave Erosion in Loess Area [J]. Yellow River Construction, 1958(3): 43-44. (in Chinese)]
- [7] 李喜安.黄土暗穴的成因及其公路工程灾害效应研究[D].西安:长安大学,2004. [LI Xi'an. Research on the causes of the dark hole in the loess and the disaster effects of highway engineering[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李喜安,彭建兵,郑书彦,等.公路黄土洞穴灾害与水土流失研究[J].公路,2004,49(12):70-73. [LI Xi'an, PENG Jianbing, ZHENG Shuyan, et al. Loess cave hazard in highways and water and soil loss [J]. Highway, 2004, 49(12): 70-73. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李喜安,彭建兵,陈志新,等.黄土洞穴潜蚀地貌及其利弊综合分析[J].西安科技大学学报,2009,29(1):78-84. [LI Xi'an, PENG Jianbing, CHEN Zhixin, et al. Benefits and hazards of subground erosional geomorphology of loess tunnels [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(1): 78-84. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘林,李金峰,王小平.黄土高原沟壑丘陵区沟道侵蚀与洞穴侵蚀特征[J].水土保持通报,2015,35(1):14-19. [LIU Lin, LI Jinfeng, WANG Xiaoping. Features on gully erosion and tunnel erosion in loess hilly and gully region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 14-19.

(in Chinese with English abstract)]

- [11] 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)]
- [12] 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)]
- [13] 徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡 [J] . 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297 - 1312. [XU Zhangjian, LIN Zaiguan, ZHANG Maosheng. Loess in China and loess landslides [J] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297 - 1312. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 雷祥义, 魏青珂. 陕北伤亡性黄土崩塌成因与对策研究 [J] . 岩土工程学报, 1998, 20(1): 64 - 69. [LEI Xiangyi, WEI Qingke. Study on the origin and countermeasure of the casualty loess landfalls in the Northern Shaanxi [J] . Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 64 - 69. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 武彩霞, 许领, 戴福初, 等. 黑方台黄土泥石流滑坡及发生机制研究 [J] . 岩土力学, 2011, 32(6): 1767 - 1773. [WU Caixia, XU Ling, DAI Fuchu, et al. Topographic features and initiation of earth flows on Heifangtai loess plateau [J] . Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1767 - 1773. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路 [J] . 工程地质学报, 2014, 22(4): 684 - 691. [PENG Jianbing, LIN Hongzhou, WANG Qiyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards [J] . Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 684 - 691. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 乔建伟, 彭建兵, 郑建国, 等. 中国地裂缝发育规律与运动特征研究 [J] . 工程地质学报, 2020, 28(5): 1016 - 1027. [QIAO Jianwei, PENG Jianbing, ZHENG Jianguo, et al. Development rules and movement characteristics of earth fissures in China [J] . Journal of Engineering Geology, 2020, 28(5): 1016 - 1027. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 彭建兵, 王启耀, 庄建琦, 等. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制 [J] . 地质力学学报, 2020, 26(5): 714 - 730. [PENG Jianbing, WANG Qiyao, ZHUANG Jianqi, et al. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the loess plateau [J] . Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 714 - 730. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王斌科. 土壤的洞穴侵蚀研究综述 [J] . 土壤学进展, 1989, 17(1): 9 - 14. [WANG Binke. A review of soil cave erosion research [J] . Advances in Soil Science, 1989, 17(1): 9 - 14. (in Chinese)]
- [20] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 4版. 北京: 地质出版社, 2016: 393 - 440. [ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. Principles of engineering geology analysis (Fourth Edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 393 - 440. (in Chinese)]
- [21] 王景明. 黄土构造节理的理论及其应用[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1996: 1-225. [WANG Jingming. Loess structural joint theory and its application [M]. Beijing: China Water Power Press, 1996: 1 - 225. (in Chinese)]
- [22] 王斌科. 引起洞穴侵蚀的主要因素探索 [J] . 水土保持学报, 1989, 3(3): 84 - 90. [WANG Binke. A study on main factors affecting tunnel erosion [J] . Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 3(3): 84 - 90. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王玉涛, 刘小平, 曹晓毅. 基于主成分分析法的 Q_2 黄土湿陷特性研究 [J] . 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 141 - 148. [WANG Yutao, LIU Xiaoping, CAO Xiaoyi. A study of the collapsibility of Q_2 loess based on principal component analysis [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 141 - 148. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 唐小明, 李长安, 黄长生, 等. 兰州西部地区的黄土潜蚀作用 [J] . 甘肃地质学报, 1999, 8(1): 3 - 5. [TANG Xiaoming, LI Chang'an, HUANG Changsheng, et al. A primary study on the loess suffosion erosion in the area to west of Lanzhou, Gansu Province [J] . Acta Geologica Gansu, 1999, 8(1): 3 - 5. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 赵永伟. 黄土洞穴形成环境与分布规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2004. [ZHAO Yongwei. Research on the formation environment and distribution law of loess caves[D]. Xi'an: Changan University, 2004. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 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)]
- [27] 王斌科, 朱显谟, 唐克丽. 黄土高原的洞穴侵蚀与防治 [J] . 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(1): 26 - 39. [WANG Binke, ZHU Xianmo, TANG Keli. Tunnel erosion and its control in the loess plateau [J] . Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica, 1988(1): 26 - 39. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 张世武, 韩庆宪, 白晓华. 黄土落水洞初步研究 [J] . 中

- 国水土保持, 1992(6): 26-27. [ZHANG Shiwu, HAN Qingxian, BAI Xiaohua. Preliminary study on loess doline [J]. Soil and Water Conservation in China, 1992(6): 26-27. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1986. [LIU Dongsheng. Loess and environment[M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)]
- [30] 张宗祜, 姚足金, 王开申. 中国黄土的主要工程地质问题 [J]. 地质学报, 1973, 47(2): 255-269. [ZHANG Zonghu, YAO Zujin, WANG Kaishen. Main engineering geological problems of Chinese loess [J]. Acta Geological Sinica, 1973, 47(2): 255-269. (in Chinese)]
- [31] 杨柳悦. 黄土中渗流水运动及其对土体的潜蚀特征研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. [YANG Liuyue. Research on movement and erosion characteristics of seepage water in the loess[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 赵跃中, 杨柳悦, 穆兴民, 等. 黄土中渗流水潜蚀特征研究 [J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(10): 37-39. [ZHAO Yuezhong, YANG Liuyue, MU Xingmin, et al. Characteristic of sub-ground erosion in the loess [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(10): 37-39. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 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)]
- [34] 张凤亮, 罗扬, 朱武卫, 等. 垂直节理对黄土渗透性的影响研究 [J]. 工业建筑, 2019, 49(1): 14-20. [ZHANG Fengliang, LUO Yang, ZHU Wuwei, et al. Research on the influence of vertical joints on the permeability of loess [J]. Industrial Construction, 2019, 49(1): 14-20. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 李亮. 地裂缝带黄土的渗透变形试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2007. [LI Liang. Seepage deformation experimental research of fissured loess[D]. Xi'an: Changan University, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 房江锋. 黄土节理抗剪强度和渗透性试验研究及工程应用 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010. [FANG Jiangfeng. Experimental research on shear strength and loess permeability of the intact loess joints and engineering application[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 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 research on the permeation properties of fissured loess[D]. Xi'an: Changan University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 洪勃, 杜少少, 李喜安, 等. 泾河南塬黄土的渗透特征及孕灾机制 [J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 75-79. [HONG Bo, DU Shaoshao, LI Xi'an, et al. Infiltration characteristics and disaster-forming mechanism of loess in south Jinghe tableland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 75-79. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 孙萍萍. 黄土水敏性与降雨诱发浅层黄土滑坡预测 [D]. 西安: 西北大学, 2020. [SUN Pingping. Water sensitivity of loess and prediction of rainfall induced shallow loess landslides[D]. Xi'an: Northwest University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 罗扬. 黄土节理渗流特性的试验研究及节理黄土水分场数值分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011. [LUO Yang. Experimental study on joint seepage characteristics of loess and numerical analysis of joint loess[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 罗扬, 王铁行, 王娟娟. 含节理黄土渗流数值模型研究 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1115-1122. [LUO Yang, WANG Tieshang, WANG Juanjuan. Finite element seepage flow model for unsaturated loess with joints [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6): 1115-1122. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 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 loess body with joints considering opening degree[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 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. [XIE Wanli, WANG Yanshou, MA Zhonghao, et al. Research status and prospect of loess collapsibility mechanism [J]. Geoscience, 2015, 29(2): 397-407. (in Chinese with English abstract)]
- [44] WANG L, LI X, LI L C, et al. Characterization of the collapsible mechanisms of Malan loess on the Chinese Loess Plateau and their effects on eroded loess landforms [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020, 26(9): 2541-2566.
- [45] 蒋定生. 黄土区不同利用类型土壤抗冲刷能力的研究 [J]. 土壤通报, 1979, 10(4): 20-23. [JIANG Dingsheng. Study on the anti-scouring ability of different utilization types of soil in the loess area [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1979, 10(4): 20-23. (in Chinese with English abstract)]
- [46] 李昌贤. 黄土洞穴成因机制研究 [D]. 西安: 长安大学, 2004. [LI Changxian. Research on the genetic mechanism of loess caves. Xi'an: Changan University, 2004. (in Chinese with English abstract)]

- [47] 李滨. 晋西黄土暗穴成因及其对公路危害研究[D]. 西安: 长安大学, 2006. [LI Bin. Research on the causes of the dark holes in the loess of western Shaanxi and their hazards to highways[D]. Xi'an: Changan University, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [48] LI X, WANG L, YAN Y L, et al. Experimental study on the disintegration of loess in the Loess Plateau of China [J] . *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(7): 4907-4918.
- [49] QIAO X Y, LI X A, GUO Y W, et al. In-situ experimental research on water scouring of loess slopes [J] . *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(11): 1-12.
- [50] LI X, WANG L, HONG B, 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.
- [51] 王景明, 张骏. 论黄土节理 [J] . 长安大学学报(地球科学版), 1985, 7(2): 30-41. [WANG Jingming, ZHANG Jun. On loessial joints [J] . *Journal of Chang'an University Earth Science Edition*, 1985, 7(2): 30-41. (in Chinese with English abstract)]
- [52] 王景明, 卜臣. 黄土喀斯特与水土流失灾害 [J] . 中国水土保持, 1990(1): 20-24. [WANG Jingming, BU Chen. Loess karst and disaster due to soil loss [J] . *Soil and Water Conservation in China*, 1990(1): 20-24. (in Chinese with English abstract)]
- [53] 王景明, 卜臣. 黄土喀斯特与水土流失灾害(续) [J] . 中国水土保持, 1990(2): 34-35. [WANG Jingming, BU Chen. Loess karst and soil erosion disasters (Continued) [J] . *Soil and Water Conservation in China*, 1990(2): 34-35. (in Chinese with English abstract)]
- [54] 王景明, 王君. 冀中南黄土潜蚀地貌与黄土构造节理 [J] . 地理研究, 1994, 13(1): 90-93. [WANG Jingming, WANG Jun. Loessic corrosion landform and loessic tectonic joint in the middle south of Hebei Province [J] . *Geographical Research*, 1994, 13(1): 90-93. (in Chinese with English abstract)]
- [55] 康尘云, 王少凯, 贺鸣. 陇西黄土构造节理几何特征分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 131-138. [KANG Chenyun, WANG Shaokai, HE Ming. Geometrical features of tectonic joints in loess of central Gansu and southern Ningxia [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 131-138. (in Chinese with English abstract)]
- [56] 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)]
- [57] 贺可强, 王景明, 张振营. 南水北调穿黄工程区黄土潜蚀地貌发育规律与形成机制初探 [J] . 水文地质工程地质, 1996, 23(5): 30-35. [HE Keqiang, WANG Jingming, ZHANG Zhenying. A preliminary study on the development law and formation mechanism of loess undercutting geomorphology in the Yellow River water transfer project area [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1996, 23(5): 30-35. (in Chinese)]
- [58] 卢全中, 彭建兵. 黄土体结构面的发育特征及其灾害效应 [J] . 西安科技大学学报, 2006, 26(4): 446-450. [LU Quanzhong, PENG Jianbing. Characteristics of structural planes of loess mass in loess plateau of China and its hazard effect [J] . *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2006, 26(4): 446-450. (in Chinese with English abstract)]
- [59] 张珊珊. 黄土斜坡优势通道及优势入渗规律[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [ZHANG Shanshan. The preferential passage and the law of preferential infiltration of loess slope[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [60] 张珊珊, 张茂省, 孙萍萍, 等. 面向黄土地质灾害的优势流研究 [J] . 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 274-280. [ZHANG Shanshan, ZHANG Maosheng, SUN Pingping, et al. Advances in and outlooks of preferential flow study in unsaturated soils [J] . *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2019, 55(2): 274-280. (in Chinese with English abstract)]
- [61] 李喜安, 彭建兵, 陈志新, 等. 黄土地层地表径流下潜模式与地质灾害 [J] . 工程地质学报, 2007, 15(4): 495-499. [LI Xi'an, PENG Jianbing, CHEN Zhixin, et al. On the infiltration modes of surface runoff in the loess layer and geological hazards [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(4): 495-499. (in Chinese with English abstract)]
- [62] 仵彦卿. 地下水与地质灾害 [J] . 地下空间, 1999(4): 303-310. [WU Yanqing. Groundwater flow and geological hazards [J] . *Underground Space*, 1999(4): 303-310. (in Chinese with English abstract)]
- [63] 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型 [J] . 地理学报, 1956, 11(3): 201-222. [LUO Laixing. A tentative classification of landforms in the loess plateau [J] . *Acta Geographica Sinica*, 1956, 11(3): 201-222. (in Chinese with English abstract)]
- [64] 陈传康. 陇东东南部黄土地形类型及其发育规律 [J] . 地理学报, 1956, 11(3): 223-231. [CHEN Chuankang. Types of loess and its development in the southeast of Longdong [J] . *Acta Geographica Sinica*, 1956, 11(3): 223-231. (in Chinese)]
- [65] 刘建平. 陕西省子长地区黄土的潜蚀试验研究[D]. 武汉:

- 中国地质大学, 2008. [LIU Jianping. Experimental study on the subsurface erosion of loess in the Zichang area of Shanxi Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [66] 康锦辉. 黄土洞穴物理潜蚀机理试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2010. [KANG Jinhui. Physical sub-erosion mechanism of loess cave study[D]. Xi'an: Changan University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [67] PENG J B, SUN P, IGWE O, et al. Loess caves, a special kind of geo-hazard on loess plateau, northwestern China [J] . *Engineering Geology*, 2018, 236: 79 – 88.
- [68] 李滨, 彭建兵, 殷跃平, 等. 晋西黄土洞穴成因研究 [J] . *工程地质学报*, 2007, 15(4): 490 – 494. [LI Bin, PENG Jianbing, YIN Yueping, et al. Study on origin of loess caves in west Shanxi [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(4): 490 – 494. (in Chinese with English abstract)]
- [69] 朱兴华, 彭建兵, 同霄, 等. 黄土地区地质灾害链研究初探 [J] . *工程地质学报*, 2017, 25(1): 117 – 122. [ZHU Xinghua, PENG Jianbing, TONG Xiao, et al. Preliminary research on geological disaster chains in loess area [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(1): 117 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [70] 张宇宇. 降雨作用下延安地区黄土崩塌形成的机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2016. [ZHANG Yuyu. Study on the formation mechanism of loess collapse induced by rainfall in Yan'an area[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [71] 李治财, 刘高. 黄土滑坡与黄土洞穴的相关性及其相互作用机理 [J] . *兰州大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(1): 21 – 25. [LI Zhicai, LIU Gao. Correlation and interaction mechanism between loess landslides and loess caves [J] . *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2014, 50(1): 21 – 25. (in Chinese with English abstract)]
- [72] 张坤. 泥流型黄土滑坡与洞穴成因机制及其相互作用 [J] . *铁道建筑*, 2018, 58(5): 95 – 97. [ZHANG Kun. Genetic mechanism and interaction between mudflow loess landslide and cave [J] . *Railway Engineering*, 2018, 58(5): 95 – 97. (in Chinese with English abstract)]
- [73] 高静贤, 戴福初, 朱雨轩, 等. 四川宁南水塘村滑坡形成机理 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(6): 1 – 9. [GAO Jingxian, DAI Fuchu, ZHU Yuxuan, et al. Failure mechanism of the Shuitang Village landslide in Ningnan County, Sichuan Province [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(6): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [74] 袁中夏, 赵未超, 叶帅华, 等. 含水量对黄土边坡稳定性的影响 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(3): 37 – 43. [YUAN Zhongxia, ZHAO Weichao, YE Shuaihua, et al. Influence of water content on loess slope stability [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3): 37 – 43. (in Chinese with English abstract)]
- [75] 贺小黑, 彭鑫, 谭建民, 等. 地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响: 以湖南安化春风滑坡群为例 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(6): 96 – 103. [HE Xiaohai, PENG Xin, TAN Jianmin, et al. Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: Taking Chunfeng Landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(6): 96 – 103. (in Chinese with English abstract)]
- [76] 李治财, 刘高. 滑坡体上黄土洞穴的发育特征及其成因机制 [J] . *中国水土保持*, 2014(4): 60 – 63. [LI Zhicai, LIU Gao. Development characteristics of loess caves on landslides and its formation mechanism [J] . *Soil and Water Conservation in China*, 2014(4): 60 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [77] 马东涛, 崔鹏, 张金山, 等. 黄土高原泥流灾害成因及特征 [J] . *干旱区地理*, 2005, 28(4): 435 – 440. [MA Dongtao, CUI Peng, ZHANG Jinshan, et al. Formation causes and features of mudflows in the loess plateau, China [J] . *Arid Land Geography*, 2005, 28(4): 435 – 440. (in Chinese with English abstract)]
- [78] 蒋臻蔚. 水作用下地裂缝成因机制及数值模拟[D]. 西安: 长安大学, 2011. [JIANG Zhenwei. Earth fissure formation mechanism under the the role of water and its numerical simulation[D]. Xi'an: Changan University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [79] 韩金良, 吴树仁, 汪华斌. 地质灾害链 [J] . *地学前缘*, 2007, 14(6): 11 – 23. [HAN Jinliang, WU Shuren, WANG Huabin. Preliminary study on geological hazard chains [J] . *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 11 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [80] HAN J L, WU S R, WANG H B. Preliminary study on geological hazard chains [J] . *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 11 – 20.
- [81] XU M Z, WANG Z Y, QI L J, et al. Disaster chains initiated by the Wenchuan earthquake [J] . *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(4): 975 – 985.
- [82] WANG Y, SHU Z Y, LI Y Y. Research of slope disaster chain-stage and evolvement rules [J] . *IOP Conference Series:Earth and Environmental Science*, 2020, 455(1): 012076.