黄土斜坡优先流促滑机理研究现状及展望

李 鑫[1,2], 卢玉东[1,2], 范 文[3], 潘网生[4], 张晓周[1,2], 卢阳春[1,2]

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 4. 黔南民族师范学院, 贵州 都匀 558000)

摘 要: [目的] 对斜坡中因节理、裂隙、孔洞等优势通道的存在而发育的优先流所产生的促滑效应研究现状进行总结,以期引起学者重视优先流理论在斜坡地质灾害研究中的应用,为准确开展滑坡预测预警提供科学依据。[方法] 从优先流的定义与类型出发,分析了优先流的众多影响因素,重点综述和评价了优先流对斜坡稳定性的影响、斜坡优先流探测技术以及稳定性评价模型方面的研究现状,总结了黄土斜坡优先流促滑致灾的 4 个发展阶段,并以典型滑坡作为实证,最后分析了优先流促滑作用机理研究中存在的问题。[结果] 黄土斜坡优势渗流通道中普遍发育的优先流是有限降雨影响深度条件下斜坡失稳的合理解释,然而,优先流在滑坡致灾规律理论及应用上仍需更多实践检验。[结论] 斜坡优先流是斜坡水文学、非饱和土力学、地质灾害学等相关学科方面一项重要的理论,多年来已取得不少成果,今后还需继续深入开展黄土斜坡优先流促滑效应研究,加强多学科交叉和新技术应用,来提高地质灾害科学预测与防治水平。

关键词: 优先流; 黄土滑坡; 斜坡稳定性; 促滑机理

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2019)01-0294-08 **中图分类号**: P642.13^{+}1, P642.22, X43

文献参数: 李鑫, 卢玉东, 范文, 等. 黄土斜坡优先流促滑机理研究现状及展望[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 294-301. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.046; Li Xin, Lu Yudong, Fan Wen, et al. Current status and prospects of research on mechanism of preferential flow-induced sliding in loess slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1): 294-301.

Current Status and Prospects of Research on Mechanism of Preferential Flow-induced Sliding in Loess Slope

Li Xin[1,2], Lu Yudong[1,2], Fan Wen[3],
Pan Wangsheng[4], Zhang Xiaozhou[1,2], Lu Yangchun[1,2]

(1. *School of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 2. *Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 3. *School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 4. *Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun, Guizhou* 558000, *China*)

Abstract: [Objective] Summary and review of the research status on the preferential flow-induced sliding effects developed by the existence of dominant channels such as joints, fissures and holes in the slope were conducted, in order to draw the attention of scholars to the application of preferential flow theory in the study of slope geological hazards and provide scientific basis for accurate forecasting and early warning of landslides. [Methods] According to the definition and types of preferential flow, the influential factors of preferential flow were analyzed, and the current status of the influence of preferential flow on slope stability, the preferential flow detection technology and the stability evaluation model of slope were reviewed and evaluated emphatically. The developing process of preferential flow-induced landslide effect on loess slope was summarized as four

收稿日期: 2018-07-30 **修回日期**: 2018-08-19

资助项目: 国家自然科学基金重点项目"环境影响下黄土边坡灾变力学机制的微—细—宏观多尺度研究"(41630634); 贵州省教育厅创新群体重大研究项目(黔教合 KY 字[2016]054, [2016]055)。

第一作者: 李鑫(1989—), 男(汉族), 陕西省商州区人, 博士研究生, 主要从事黄土渗流及其致灾机理方面的研究。E-mail: lixin@chd.edu.cn。

通讯作者: 卢玉东(1969—), 男(汉族), 河北省唐山市人, 教授, 博导, 主要从事水文地质、工程地质、环境地质方面的研究。E-mail: luyudong@chd.edu.cn。

stages, and the typical landslides were taken as examples. Finally, the issues of the preferential flow-induced sliding mechanism were clarified. [Results] The preferential flow widely developed in the dominant seepage channels of the loess slope is a reasonable explanation for slope instability under the condition of limited rainfall depth. However, the theory and application of preferential flow in landslide hazards prediction still need more practical tests. [Conclusion] Slope preferential flow is an important theory in hillslope hydrology, unsaturated soil mechanics, geo-hazards science and other related disciplines. Many achievements have been made over the years. In the future, it is necessary to further study the effect of preferential flow-induced sliding on loess slopes, and strengthen the application of multidisciplinary and new technologies to improve the level on scientific prediction and prevention of geo-hazards.

Keywords: preferential flow; loess landslide; slope stability; landslide inducing mechanism

黄土是干旱半干旱地区的风成沉积物[1],在其漫长的形成过程中,除了原生孔隙之外,由于动植物活动、冻融循环、干湿交替、水化学溶蚀、物理潜蚀等外界因素的作用下,形成了不同规模、不同尺度、不同时期序列的孔隙、裂隙、节理和孔洞,这些都为降雨入渗提供优势渗流通道[2-4]。降雨或灌溉水沿着这些通道快速下渗,形成优先流,影响着斜坡水文过程及其稳定性。

黄土高原地区干旱少雨,自然降雨对斜坡入渗影响深度仅为 2～3 m[5],然而,事实证明黄土滑坡与降水有着密切的关系[6],优先流则是对该类有限降雨影响深度条件下斜坡失稳触滑现象的合理解释。优先流的存在改变了斜坡径流过程,高度发育的优先流往往促使水分进入斜坡深部,抬升地下水位,降低坡体强度,诱发滑坡、泥石流等地质灾害。因此,研究黄土斜坡优先流对于解释黄土高原地区滑坡灾害的发生机理至关重要。

由于黄土自身的结构性、水敏性、湿陷性,加上外界冻融作用、干湿循环、人类工程活动等,斜坡广泛发育节理、裂缝、落水洞、溶穴等优势通道,为地质灾害发育提供条件[2-4,7]。以往对于这些通道的研究,只停留在滑坡发生时的定性分析上,对于定量化研究较少,甚至没有从优先流的观点上对该类滑坡进行研究。因此,亟待解决水分以何种方式进入优势通道、在优势通道中怎样运移、运移过程中优势通道会怎样发育拓展进而控制降雨的下渗、优先流如何影响斜坡水文过程及诱发斜坡失稳促滑等一系列问题[8]。

众所周知,斜坡的宏观水力学性质本质上由黄土的微观渗流性质决定,虽然已有很多文献对黄土微观结构进行研究,但是在孔裂隙尺度上黄土的渗流特性问题尚未解决。裂缝孔洞发育的斜坡,野外渗流通道探测及水分运动规律仍不清楚,定量刻画斜坡优先流的动力学模型仍未建立,准确进行优先流作用下斜坡失稳机理与滑坡预测仍然存在挑战。

本文总结斜坡优先流的特征与影响因素,归纳优先流作用下黄土滑坡发生机理,并展望未来在优先流诱发滑坡研究应该着重加强的几个重点。以期引起学者重视优先流理论在斜坡地质灾害研究中的应用,为准确开展滑坡预测预警提供科学依据。

1　黄土优先流的定义及主要类型

优先流是用来描述在多种环境条件下发生的非平衡流过程以及水分或溶质运移机理而提出的专业术语[9]。对黄土斜坡来说,优先流是指水分沿着孔隙、裂隙、节理和孔洞等通道以背离达西定律的形式,绕过大部分土壤基质,迅速通过土层,到达斜坡深部的一种普遍的非平衡流现象[2,4]。

根据形成机理与优先流通道形状,优先流可以表现出多种形式,包括指流、大孔隙流、裂隙流、管流、沟槽流、短路流、环绕流、部分置换流、地下强径流、非饱和重力流、摆动流、异质流及低洼再蓄满等[9-11]。其中以指流、大孔隙流、裂隙流、管流较为常见。

(1) 指流。指流是指水分和污染物在非饱和土壤中迁移时,湿润峰以非均匀的入渗形式,绕过大部分土壤基质呈“指状”或“舌状”流动的现象[12]。在黄土斜坡中,由于土壤质地的高度非均质性和各向异性、土壤分层现象、有机质成因的土壤团聚体斥水性的影响,指流普遍发育,影响着斜坡水分的入渗方式和斜坡稳定性。

(2) 大孔隙流。大孔隙流是指水分沿着虫孔、根孔、洞穴等大孔隙通道快速运移而形成的一种优先流[13],也是黄土斜坡中最常见的一种优先流形式。对于斜坡来说,大孔隙的存在增加了斜坡的渗透性,使得水分得以入渗到斜坡更深的部位,在渗透系数较低的位置形成局部饱和带,短时间内影响孔隙水压力,软化土体,增加自重,减小抗剪强度,最终导致斜坡失稳[14]。

(3) 裂隙流。裂隙流实际上与大孔隙流形成机

理相似，是指水分通过一定规模的裂缝，绕过基质快速运移而形成的一种优先流[15]。对于贯通性较好的裂隙，往往有利于斜坡水分的入渗甚至是排泄，然而对于具有盲端的裂隙，水分下渗至裂隙尽头时，会迅速增大局部的孔隙水压力，增加周围土体重力，增大滑坡发生等风险[16-17]。

(4) 管流。管流不同于大孔隙流，管流主要是发育在相互平行或者弯曲且无显著多分叉的截面为圆的孔道中的优先流[18]，由于管流相对于大孔隙流，往往规模较大，渗入的优先流量也更大，对土体渗透性影响显著，进而影响斜坡水文动态和斜坡稳定性。在黄土斜坡中，普遍发育的落水洞、水化学潜蚀溶洞、规模较大的腐烂根系通道，土壤动物通道等优势通道中形成的优先流都属于管状优先流范畴[2]。

2 黄土优先流影响因素

黄土斜坡是地球关键带中一个小的水文系统单元，水分在入渗过程中由大气降水—地表水—土壤—植被—地下水等重要部分组成，在此过程中以均衡的活塞流和非均衡的优先流两种运动形式为主。由于黄土斜坡土体结构复杂，主要以优先流的方式发生垂向和侧向快速下渗。优先流的形成主要受到土体质地、初始含水率、坡度、节理、大孔隙、裂隙、落水洞、披覆特征、降雨、人类活动等因素的影响。

(1) 土体质地。黄土高原是由黄土和古土壤序列交替堆积形成的，在某一个斜坡上，由于黄土和古土壤颗粒粗细、粒径级配与粉粒和黏粒含量、天然密度等差异，会在水分入渗时形成优先流，比如从细粒土中向粗粒土入渗时，由于密度、渗透系数等的差异，会使入渗湿润峰不稳定而形成指状优先流；又如从粉粒含量为主的黄土层入渗至黏粒含量较高的古土壤层时，由于渗透性能的改变，在古土壤层之上会形成侧向优先流[19]。

(2) 初始含水率。初始含水率越小，越易形成指流，且流态越狭长。反之，初始含水率越大，越不易形成指流[20]，但初始含水率越高，水力梯度越大，湿润峰推进速度也愈快。

(3) 坡度。坡度对径流起滞缓作用，坡度愈缓，坡度滞缓作用就愈强，则黄土优先流供水愈充足，湿润前锋推进速度就愈快。坡度愈陡，坡度对径流滞缓作用愈弱，黄土优先流供水愈不充足，湿润前锋推进速度就愈慢。

(4) 节理。黄土节理为地下水提供了主要的运移储存通道和优势导水面，可明显加速水分的入渗，节理愈发育，优先流到达黄土深层部位的时间就愈快[21]。

(5) 植被根系与动物活动通道。植被蒸散发和根系吸水可以改变土壤基质吸力，同时根系生长和腐烂形成的孔道对土体的导水性和强度特性都造成影响，且易于产生优先流影响斜坡稳定性。动物活动通道与优先流也有着密切关系，从小体积的蚯蚓、蚂蚁，到一些大型穴居动物，它们的生存活动所产生的大孔隙极易发展成为优先流的快速入渗通道[22]。

(6) 裂缝。黄土裂缝为优先流提供快速通道，同时二者在拓展发育上相互促进，一方面，优先流的动力侵蚀作用为裂缝的进一步发展提供了动力[7]；另一方面，裂缝的发展为优先流提供了更深入的通道，进一步加剧了裂缝的扩张[23]。

(7) 黄土落水洞。黄土落水洞通过截汇地表径流，充当了地下水补给的优先通道[24]，并且在落水洞底部易形成舌状或漏斗状优先流，很大程度上影响斜坡水文过程及流场分布，降低斜坡稳定性。

(8) 黄土幔覆构造。黄土幔覆构造由胡广韬提出，后多用来进行黄土地层划分、黄土成因、新构造运动及古环境与古气候等的研究[1]。但笔者认为其与优先流关系的研究也极具现实意义，风成黄土依年代在古土壤或古地形上层层覆盖，下老上新，宏观上呈明显的层状纹理结构，且在梁峁地区多为不整合接触关系[25]。在上覆构造水分入渗至下覆构造不整合接触面时，受接触面产状、物质组分、厚度、质地等差异性影响，形成不平衡的湿润峰，即产生优先流入渗现象。

(9) 降雨强度及持时。降雨强度及持时在一定程度上决定着优先流前期供水量，是影响黄土优先流的一个重要因素。雨强愈大，持时愈久，则地表积水厚度增加得愈快。此时水压力势显著控制水流入渗速度，积水厚度越大，优先流下渗亦越快[26]。

(10) 人类生产活动。人类生产活动，特别是农业耕作与农业灌溉，前者改变了表层土体的土壤结构和孔隙度，从而影响渗流形态；后者对优先流的作用更为明显，已有研究表明 70% 的地裂缝与农业灌溉有关，而地裂缝又是优先流渗流的快速通道[27]。同时，不同的土地利用方式对土壤孔隙度、连通性、渗透性等产生主要影响，从而控制优先流的发育程度和运移方式[28]。采矿活动造成的地面塌陷、岩土体裂缝的等变形也形成了优先流路径，导致一系列水资源、土壤等环境问题[29]。人工边坡开挖，改变了坡体应力分布，增加了张剪应力，使坡体发育节理裂隙，提供降雨入渗优先通道[21]。

3 斜坡优先流促滑研究现状

优先流的研究最早开始于美国，1864 年 Schu-

macher 发现土壤水分经过大孔隙入渗时不受控于土壤毛管力,认为在大孔隙入渗中存在优先流。自从 20 世纪 70—80 年代,美国 Long Island 的居民区水井发现有严重的杀虫剂污染,关于优先流的研究开始在土壤学和生态学领域得到重视[9]。经过 40 多年的发展,优先流已经在农田化肥元素迁移、绿洲农业发展、地下水污染、森林水文与生态、水文土壤科学发展等众多领域有了较大进展,而在斜坡水文过程与稳定性评价[23,30-32]、地质灾害机理研究[14-15,33-35]方面虽已取得一些成果,但积累相对薄弱。本文聚焦于优先流对斜坡稳定性影响及促滑效应研究进行综述与总结。

3.1　优先流对斜坡稳定性影响研究现状

斜坡中由于发育各种孔道裂缝等优先渗流通道,水分沿其快速下渗形成优先流,进一步控制斜坡水文过程并对斜坡稳定性产生影响。

Van Asch 等[36]通过模拟黏土质斜坡中孔隙水压力 25 a 变化情况时发现,基质流对于滑坡孔隙水压力的提升作用较小,而优先流的作用显著。主要是由于土体黏粒含量高,在干湿循环、冻融交替作用下,容易发育裂隙网络,使水分灌入其中,由于裂缝底部渗透性较差,水分可以长年赋存,并对坡体主动孔隙水压力起着主要的控制作用,成为诱发滑坡的主要原因[37]。

Hencher[38],Shao 等[14]及 Chen 等[6]研究降雨诱发滑坡的成果都表明,在降雨触发滑坡时,孔隙水压力和含水量对降雨事件产生快速响应,而实际上都是受到大孔隙、裂隙及赋存其中的优先流的显著影响。Yang 等[39]在进行降雨诱发震后滑坡再复活的水力学特性研究时发现,优先流路径主导着滑坡堆积物降雨入渗过程中的水文过程,优先流的存在可以增加垂向渗透性能,加快地下水对降雨的快速响应,增加孔隙压力,降低土壤有效应力,从而导致震后裂缝较为发育的堆积体再次复活发生滑坡。Krzeminska[34]等模拟了裂缝对缓慢移动滑坡水文动态与边坡稳定性的动态响应机制,发现裂缝的体积和连通性对滑坡中孔隙水压力的分布起主控作用。

曾磊[40]在进行模拟黄土斜坡降雨入渗过程时发现,落水洞为地表径流下渗提供了优势通道,其形成的优势流快速渗达斜坡深部,使该区域土层饱和,在弱透水层或者隔水层上部形成上层滞水或局部地下水,使滑带土抗剪强度骤降,引发斜坡失稳。Ghestem等[41]研究发现植被发育的土体中因根系死亡腐烂产生的死孔及正常生长的植物根系形成的孔隙,遇到上部水入渗时,会形成优先流网络,从而增加孔隙水压力,导致浅层滑坡。

潘网生等[42]对黄陵印台山老滑坡的裂缝发育特征进行分析,利用 Geostudio 软件对该滑坡渗流场进行模拟,发现水分沿裂隙入渗产生的优先流作用形成了优势滑动面,对滑坡的整体失稳有重要作用。潘网生等[2,43]分析了泾阳南塬黄土边坡优先流入渗的非均质性与分形特征,总结了灌溉水量、入渗深度、初始含水量、孔隙度、分形维数等对优先流发育程度、非均匀性以及分形特性的影响,发现在同等条件下优先流的发育显著抬升地下水位,与滑坡的发生存在必然联系,表明优先流对斜坡稳定性的影响不容忽视。Cristiano 等[44]在研究优先流对边坡稳定性的影响时发现,斜坡破坏面积与优先流的各向异性关系密切。同霄等[7]对通过降雨监测和数值计算发现,降雨对无优先流发育的黄土斜坡影响深度有限,不足以触发滑坡,存在优势入渗的坡体则面临更大的失稳风险。张珊珊[4]在对斜坡优势通道调查的基础上,根据其成因、开启度、发育程度对优势通道进行分类,并利用 Hydrus2 D 和 Geo-Studio 对不同优势通道类型中的不同优势渗流模式下的入渗过程进行模拟,发现优势通道深度和距塬边的距离是影响斜坡稳定性的重要因素。

张茂省等[45]通过总结考虑黄土水敏性及优势通道作用下水致黄土滑坡机理及规律,建议开展考虑优势渗流条件下利用有限元法分析黄土斜坡失稳性的研究工作。Sidle 等[46]从整个地球动态系统和生态控制的观点出发,提出优先流在影响边坡稳定性方面往往涉及高度的水文动态和生态过程,这些动态过程有助于深入理解暴雨过程斜坡失稳的时间和空间变化规律。

3.2　优先渗流通道及优先流探测技术研究现状

优先流在孔隙、裂缝、孔洞等优先渗流通道中储存、运移,因此优先渗流通道的有效探测与识别是研究优先流渗流规律的关键。在优先流通道探测方面,主要分为有损和无损技术,有损探测手段主要有染色示踪与剖面开挖、摄影、电镜扫描(SEM)与图像处理技术[47],无损手段在宏观尺度上有探地雷达、电阻率层析成像、高密度电法、地震模拟法,微细观尺度上有 X 射线 CT 扫描、核磁共振、中子 CT 等技术[48]。目前在斜坡优先流通道探测与识别上已取得一些成果:

徐宗恒等[49]利用亚甲基蓝染色剂示踪和摄影与图像处理法研究了优先流染色面积、路径数量、入渗深度等因素的关系与变化规律。潘网生等[43]通过碘化钾+淀粉与硝酸铁混合液对黄土斜坡优势流进行染色示踪,并通过剖面开挖、摄影及图像处理对优先流特征进行定量研究。同霄[3]利用电镜扫描、亮蓝染

色剂示踪、灌溉试验以及数值模拟方法，从微观—介观—宏观多尺度揭示黄土中优先流入渗规律与成灾机理。然而染色示踪等这类传统手段对于原始黄土剖面及其中的优势渗流通道具有破坏性，难以重复试验，并且费时费力，而无损探测技术的应用弥补了上述缺点。

Luo 等[50]通过 X 射线 CT 定量研究了原状土中大孔隙结构与优先流的关系。亓星等[51]通过探地雷达发现甘肃黑方台中部与边缘发育有大量孔隙与裂隙，并延伸坡体深部，形成优势渗流通道，这些优势通道一定程度控制着黄土底部含水率的大小，同时灌溉水通过裂隙、孔隙快速入渗到黄土深部，是斜坡失稳的重要诱因。Su 等[48]利用表面波、电阻率层析成像、探地雷达和微震测量超声波通道分析，探测到了树枝状管道优先流，为震后滑坡潜在滑动面和地下水渗流系统研究提供定性和定量化基础。Zhang 等[52]利用 X 射线 CT 对头寨滑坡中发育的优先流孔道进行无损探测与识别，发现斜坡中大孔隙主要以根孔、团聚体孔隙、根土界面孔隙和土石界面孔隙为主，同时大孔隙网络具有明显的内部连通性和垂向连续性。

在实际应用中离子显色增强示踪技术通常与探地雷达、电阻率成像、高密度电法、CT 等相结合，在优先流路径探测上可以获取更好的效果[53]。

优势渗流通道中的水分下渗流态往往为瞬变流，持续时间短，响应速度快，其动态过程很难捕捉，同时需要测量的指标较多，如测定含水率、基质吸力、水头、孔隙水压力、饱和度、流量[23]等，需要灵敏的动态监测技术才能实时监测。目前有借助一些间接手段进行测定，比如 TDR 时域反射仪、中子水分仪、穿透曲线、CT 等[54]，或者利用渗流过程中特定时刻序列的优先流形态来研究动态入渗过程[50]。

3.3 优先流表征与斜坡稳定性评价模型研究现状

优先流实际是发育在大孔隙和裂隙中的快速流动，由于大孔隙与裂隙等优势渗流通道的存在，土体被分为基质域和优先流域[55]。在优先流定量表征方面，已经存在诸多模型，单孔隙模型、双渗透模型、活动非活动模型、两区两阶段模型等[11,53]，对于基质域，控制方程为达西定律或者非饱和 Richard 方程，对优先流域可以用修订的 Richard 方程、Naive stokes 方程、运动波方程、对流弥散方程来描述[56]。

上述优先流模型理论是建立在表征体积单元或者有限渗流小区尺度上的，大多仅适用于平坦或者近水平的地形条件，对于具有复杂地形和错综优先渗流通道发育的斜坡地带优先流触发滑坡进行模拟评价时，需要综合考虑斜坡地形、微地貌特征以及渗流过程的水文效应，并耦合斜坡稳定性评价相关理论与模型，可以更加精准的进行滑坡成灾规律研究和预测预警工作。

Anagnostopoulos 等[57]利用基于过程的分布式水文模型，对斜坡稳定性进行模拟，发现考虑优先流时，可以显著提高斜坡稳定性预测能力。Shao 等[58]开发了一种耦合双渗透模型和无限斜坡稳定性分析模型，模拟了不同雨强和持时组合条件下，斜坡孔隙水压力和安全系数，对斜坡稳定性和失稳面积进行定量化计算，发现优先流的存在加快了斜坡失稳速度，与无优先流发育的斜坡相比，在更小的降雨量条件下即可触发滑坡。Kukemilks 等[23]利用双渗透模型和离散裂缝概化的综合三维水文地质模型 HydroGeoSphere (HGS)与边坡稳定性分析软件 SLOPE/W 相结合对边坡稳定性进行综合评价，发现该综合性模型可以更优化地考虑优先流对斜坡稳定性的影响。

4 黄土优先流促滑机理

4.1 黄土优先流促滑致灾过程描述

根据优先流特征、渗流过程及其对斜坡稳定性的影响，总结起来，可分以下 4 个发展阶段来揭示优先流的促滑致灾机理。

(1) 优先流通道截留地表水体。大气降水或农业灌溉用水，在地表发生水文过程中，其中一部分通过地表径流流走，另一部分则被潜在滑坡后缘的黄土节理、孔隙、地裂缝、落水洞等优先流通道截留。截留量的大小由节理裂缝开度与深度、落水洞的空间体积、植被根系和动物孔洞发育程度决定，优先渗流通道规模越大、越发育，对地表水体的截留量越大。

(2) 优先流通道的有压—无压反复渗透阶段。被截留的水会以较快的速度灌入优先流通道，沿通道方向率先到达通道底部或尽头，在此过程中润湿侧壁。原通道里的无压气体在灌水过程中产生锋面气压势，并将气压势传递到优先流通道网络。随着气压势由有到无，通道水渗透量有所减少。入渗初期，通道内锋面气压最强，气压势对水流入渗率的影响也最大。随着入渗的继续进行，优先流通道里的气体不断逸出，气压势逐渐减小，这种影响也越来越弱。气压势作用于入渗时间的长短还需考虑不同土体渗气阻力系数这一特征，阻力系数越大，影响时间就越长。

随着优先流持续下渗，优先流通道达到暂时饱和状态时，优先流通道里气压势已经极弱，此时渗透阻力减小，渗透系数较大，易形成超前湿润锋。这个阶段的指流、孔隙流及漏斗流等多种形式的优先流均表现出垂向下渗速度大于侧向入渗速度。

当降雨或灌溉水停止补给时,优先流通道开始处于非饱和状态。此时优先流通道中的水分可以迅速被四周处于毛细负压的孔隙夺走,使得优先流通道再次成为充气的通道。所有的这些通道形成网络,与大气联通,并保持零压状态,失去导水功能。但由于通道深部受外界环境影响较小,大气蒸发和植物蒸腾作用不明显,深层土体含水率会保持相对稳定状态,此时易发生类似于浅层包气带水的气液两相转换运动。一旦降雨或灌溉水再次补给时,再一次产生气压渗透。但与前一阶段有气压势渗透不同的是,优先流的湿润锋会以较快的速度越过前期润湿土体,湿润土体含水率愈大,优先流越过的速度则愈快。如此反复补给,优先流通道不断呈现出有气压势—无气压势—有气压势的反复渗透,最终优先流在重力势作用下逐步深入黄土深部。

(3) 滑动面形成。优先流在黄土体内部的运移具有分阶段、渐进式和积累性特征。地下水位较高的情况下,接受持续补给的优先流最终会抵达地下水位线,并且能抬升地下水位。此外,黄土的含水率、液性指标及古土壤面都是影响滑坡滑动面形成的重要因素。优先流通过改变土体含水率而影响液性指标,黄土液性指标越大,土体越软,强度则越低。强度发生改变的黄土粒子在上部荷载作用下易产生破裂,形成软弱泥层,渗透系数降低,在条件成熟情况下极易发展成为滑动面。地下水位较低的情况下,接受持续补给的优先流最终会抵达古土壤面或基岩面,该类弱透水层的相对隔水性及黄土幔覆构造特征对优先流的渗流产生了重要影响,垂向渗流减弱直至停止,顺倾斜坡度的侧向下渗作用加强。此时弱透水层上方的黄土层出现软化,抗滑力减弱,极易发展成为滑动面。

(4) 促滑致灾。上述可能的滑动面形成之后,若雨水或灌溉用水的持续或反复渗入,则会进一步加强优先流作用,使得滑动面上方土体含水率进一步增大,土体持续增重,抗剪强度持续降低。此时黄土斜坡体处于极限平衡状态,当整体滑动推力大于抗滑力时,滑体便打破这种极限平衡,冲破锁固段的束缚,导致滑坡的发生。

4.2　典型滑坡实证

陕西省泾阳南塬黄土滑坡与优先流密切相关。该地区黄土节理、地裂缝、落水洞发育,是优先流入渗的天然通道。许领等研究认为:该地区地表水在滑坡发展早期阶段主要通过黄土节理入渗为主,孔隙渗透为辅;在后期阶段,伴随着地裂缝和落水洞的形成,地表水则由其直接灌入地下,从而诱发黄土滑坡[59]。潘网生[2]、同霄[3]、张珊珊[4]等人在研究泾阳南塬黄土滑坡时也有类似发现。

甘肃省黑方台滑坡素有“现代滑坡博物馆”之称,其形成发展同样与优先流有关。亓星,许强,等认为黑方台台塬黄土中广泛发育的孔隙、孔洞、节理裂隙等优势导水通道,可使灌溉水沿其快速入渗,并可到达土体深部,使裂隙发育区土体含水率明显增大,地下水位迅速抬升,土体强度骤降,从而诱发滑坡[51]。

陕西省白鹿塬北坡“9·17”灞桥灾难性黄土滑坡,使坡前砖厂和陶瓷公司部分车间被埋,致 32 人死亡,优先流是造成该灾难性滑坡的关键因素。庄建琦等[60]通过现场调查、影像分析、历史资料查阅、模型模拟等手段对该滑坡成因及滑动过程进行研究认为,该滑坡成因主要是由于早期人工边坡开挖,坡内应力重分布,坡体顶、底部张剪应力增大,顶部逐渐形成多组裂隙,并在长期水文、地质等作用下加深加剧,尤其是在滑坡发生前半个月内的 3 次强降雨(其中 2 次降雨达到 60 a 一遇的强度),使得地表径流沿着优势通道(黄土节理、裂隙)形成优势渗流,灌渗至边坡深部,贯通滑动面,最终导致滑坡发生。

类似成因的滑坡还有很多,总之,诸多典型滑坡证明,对孔隙、孔洞、节理、裂隙、落水洞等优势通道发育的黄土滑坡来说,优先流发挥着重要的促滑效应。

5　存在问题和展望

5.1　存在问题

优先流的研究起源于土壤学和生态学,在 40 多年的发展过程中,逐渐引进到工程地质领域(如石油工程中油藏运移研究、矿井涌水防治、地质灾害防治),在地质灾害防治方面,优先流促滑研究虽然取得一些成果,但积累相对薄弱,进展缓慢,还存在一些问题需要在以后的研究中予以攻克。

(1) 定量化困难,促滑研究进展缓慢。虽然优先流对斜坡水文过程和斜坡稳定性的影响已经得到普遍认可[4,34],但是由于优先流具有形式多样[9,11,47]、非均匀与不稳定性[43]、影响因素多[9]等特性,加上黄土高原气候特性、黄土的特殊性(如黄土自身的结构性、水敏性、湿陷性)和斜坡地形、微地貌等的影响,黄土地区斜坡优先流机理及促滑效应研究发展缓慢,尤其是黄土斜坡非饱和区优先流促滑作用机理仍然没有统一的定量化模型。

(2) 代表性不足,可重复性差。由于斜坡优先流运移规律隐秘,难以实现大尺度可视化研究,虽然在黄土体尺度上利用 CT 可以进行可视化渗流研究[52],但是相对于整个斜坡来说,随机性大,代表性

较差;在渗流小区尺度可以利用染色示踪和剖面开挖来获取稍大尺度优先流渗流规律[53],但是试验具有破坏性和难以重复性,揭露范围有限,结果依然无法揭示整个斜坡优先流渗流过程中水文响应和压力传播以致触发滑坡的情况。

(3) 尺度效应尚未解决,系统性不足。优先流具有普遍存在性,无论是孔裂隙尺度(微观)、黄土体尺度(介观)还是斜坡甚至小流域尺度(宏观),都存在优先流现象[9],众所周知,黄土的微观(孔裂隙)结构性质决定着宏观水土力学性质与工程地质性质,宏观斜坡渗流与力学监测可直观的展现变形破坏现象,介观尺度可以将二者建立桥接关系。然而,目前在尺度效应处理、实现微观—介观—宏观多尺度水土力学规律的关系的过渡尚未解决,导致滑坡优先流研究成果系统性不足。

5.2 优先流促滑机理研究与滑坡防治展望

5.2.1 *优先流促滑机理研究展望* 为进一步探索优先流对黄土斜坡的促滑机理,需要在以下方面进行深入研究:①继续加强开展影响斜坡优先流的产生发育以及促滑过程的各种因素的关系及其与优先流的关系研究;②微观上,利用 CT、核磁共振等无损手段开展微观孔裂隙识别与精确表征,建立孔裂隙尺度优先流模型;③细观上,结合 CT 与造影技术开展细观黄土块体可视化动态渗流研究,揭示优先流形成与发育过程及土体孔裂隙优先流通道发育拓展动态变化规律。④宏观上,加强染色、显色示踪技术与地质雷达、电阻率成像、高密度电法等无损物探手段在优势通道探测、优先流渗流过程捕捉、裂缝变形监测等方面的应用;⑤加强多学科交叉研究,利用②③④中微观—细观—宏观多尺度手段获取的特征参数结合先进的 3 D 打印、大数据、虚拟现实等技术,建立优先流水力耦合稳定性评价模型,更加真实、准确、可视化地还原、重建优先流渗流与促滑过程。

5.2.2 *优先流滑坡防治展望* 优先流滑坡的防治,主要是要防止雨水沿裂缝渗入滑坡,改变地下水位,软化土体,降低抗剪强度,诱发滑坡。因此,①首先要对裂缝发育斜坡进行详细调查,利用地球物理学方法探测裂缝等优先渗流通道位置及分布,填充夯实裂缝,消除优先流带来的孔隙压力积聚,改善坡体孔隙水压力的分布,提高斜坡稳定性。②其次,要开展黄土优先流滑坡预警预测,在已有优先流模型的基础上,综合考虑黄土地区特殊性、黄土力学本构关系、黄土水文地质性质,研发适合于黄土地区斜坡稳定性预测的优先流模型,结合气象预警,进行失稳阈值优化,为滑坡预测与防治提供科学依据。

[参 考 文 献]

[1] 孙建中. 黄土学(上篇)[M]. 中国 香港:香港考古学会出版,2005.

[2] 潘网生. 黄土优先流渗流特性及斜坡优势滑动面研究[D]. 西安:长安大学,2015.

[3] 同霄. 黄土优势渗流及滑坡成灾过程研究[D]. 西安:长安大学,2017.

[4] 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,2018.

[5] 杜光波,倪万魁. 降雨条件下黄土斜坡的入渗特征分析[J]. 安全与环境学报,2017,17(4):1387-1391.

[6] Chen Guan, Meng Xingmin, Qiao Liang, et al. Response of a loess landslide to rainfall: Observations from a field artificial rainfall experiment in Bailong River Basin, China[J]. Landslides, 2017,15(1/2):1-17.

[7] 同霄,彭建兵,朱兴华,等. 黄土地区降雨的优势入渗深度[J]. 水土保持通报,2017,37(3):231-236.

[8] 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.

[9] Zhang Yinghu, Zhang Mingxiang, Niu Jianzhi, et al. The preferential flow of soil: A widespread phenomenon in pedological perspectives[J]. Eurasian Soil Science, 2016, 49(6): 661-672.

[10] Guo Li, Lin Henry. Addressing two bottlenecks to advance the understanding of preferential flow in soils [J]. Advances in Agronomy, 2018, 147:61-117.

[11] 盛丰,张利勇,吴丹. 土壤优先流模型理论与观测技术的研究进展[J]. 农业工程学报,2016,32(6):1-10.

[12] 史文娟,汪志荣,沈冰,等. 非饱和土壤中指流的研究进展[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(7):128-132.

[13] 张建丰,林性粹,王文焰. 黄土的大孔隙特征和大孔隙流研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):168-171.

[14] Shao Wei, Bogaard T, Bakker M, et al. The influence of preferential flow on pressure propagation and landslide triggering of the Rocca Pitigliana landslide[J]. Journal of Hydrology, 2016,543(B):360-372.

[15] 潘网生,胡向红,卢玉东,等. 黄土孔隙、裂隙及其优先流研究进展[J]. 科学技术与工程,2018,18(8):163-169.

[16] Woerden J. The role of fissures in the hydrology and stability of the Hollin Hill landslide[D]. Utrecht, The Netherlands: Utrecht University, 2014.

[17] 马佳. 裂土优势流与边坡稳定性分析方法[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2007.

[18] Uchida T, Kosugi K, Mizuyama T. Effects of pipeflow on hydrological process and its relation to landslide: A review of pipeflow studies in forested headwater catchments [J]. Hydrological Processes, 2001, 15(11):2151-2174.

[19] 卜囡,尚松浩,毛晓敏,等.层状土入渗试验中指流发育的分形特征及入渗规律[J].水动力学研究与进展,2012,27(2):183-190.

[20] 李贺丽.指流特性及其影响因素的实验研究[D].西安:西安理工大学,2007.

[21] 王新刚,余宏明,胡斌,等.节理控制的降雨入渗通道对黄土开挖边坡稳定性的影响[J].山地学报,2013,31(4):413-417.

[22] Shao Wei, Ni Junjun, Leung A K, et al. Analysis of plant root-induced preferential flow and pore water pressure variation by a dual-permeability model[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(11): 1537-1552.

[23] Kukemilks K, Wagner J F, Saks T, et al. Conceptualization of preferential flow for hillslope stability assessment[J]. Hydrogeology Journal, 2018,26(2):439-450.

[24] 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.

[25] 胡广韬.关中西部黄土层的幔覆构造[J].中国第四纪研究,1965,4(2):85-92.

[26] 吴庆华,朱国胜,崔皓东,等.降雨强度对优先流特征的影响及其数值模拟[J].农业工程学报,2014,30(20):118-127.

[27] 王景明,陈树强.陕西泾阳地裂缝灾害及其成因分析[J].水土保持学报,1989,3(1):31-37.

[28] 高朝侠,徐学选,宇苗子,等.黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响[J].应用生态学报,2014,25(6):1578-1584.

[29] 程方奎.煤矿开采塌陷区土壤裂隙优先流对地表水土流失控制作用模拟研究[D].安徽 淮南:安徽理工大学,2016.

[30] Shao Wei. Numerical modeling of the effect of preferential flow on hillslope hydrology and slope stability[D]. Stevinweg, Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 2017.

[31] Schaik N L M B V, Schnabel S, Jetten V. G. The influence of preferential flow on hillslope hydrology in a semi-arid watershed (in the Spanish Dehesas)[J]. Hydrological Processes, 2010, 22(18): 3844-3855.

[32] Weiler M, Mcdonnell J J. Conceptualizing lateral preferential flow and flow networks and simulating the effects on gauged and ungauged hillslopes[J]. Water Resources Research, 2007,43(3):223-224.

[33] Galeandro A, Doglioni A, Simeone V, et al. Analysis of infiltration processes into fractured and swelling soils as triggering factors of landslides[J]. Environmental earth sciences, 2014,71(6):2911-2923.

[34] Krzeminska D M, Bogaard T A, Malet J P, et al. A model of hydrological and mechanical feedbacks of preferential fissure flow in a slow-moving landslide[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2013,17(3):947-959.

[35] 李玉锋,马强,李显平.降雨诱发碎石土斜坡优先流机理研究[J].水电能源科学,2009,27(6):56-59.

[36] Van Asch T W J, Hendriks M R, Hessel R, et al. Hydrological triggering conditions of landslides in varved clays in the French Alps[J]. Engineering Geology, 1996,42(4):239-251.

[37] Grégory B, Jongmans D, Winiarski T, et al. Application of geophysical measurements for assessing the role of fissures in water infiltration within a clay landslide (Trièves area, French Alps)[J]. Hydrological Processes, 2012,26(14):2128-2142.

[38] Hencher S R. Preferential flow paths through soil and rock and their association with landslides[J]. Hydrological Processes, 2010,24(12):1610-1630.

[39] Yang Zongji, Qiao Jianping, Uchimura T, et al. Unsaturated hydro-mechanical behaviour of rainfall-induced mass remobilization in post-earthquake landslides[J]. Engineering Geology, 2017,222:102-110.

[40] 曾磊.优势渗流通道对黄土斜坡稳定性影响研究:以陕北芦草台滑坡为例[D].西安:长安大学,2011.

[41] Ghestem M, Sidle R C, Stokes A. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability[J]. BioScience, 2011,61(11):869-879.

[42] 潘网生,卢玉东.黄陵县印台山边坡稳定性分析[J].南水北调与水利科技,2015,13(5):946-952.

[43] 潘网生,许玉凤,卢玉东,等.基于非均匀性和分形维数的黄土优先流特征定量分析[J].农业工程学报,2017,33(3):140-147.

[44] Cristiano E, Bogaard T, Barontini S. Effects of anisotropy of preferential flow on the hydrology and stability of landslides[J]. Procedia Earth & Planetary Science, 2016,16:204-214.

[45] 张茂省,胡炜,孙萍萍,等.黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望[J].地球环境学报,2016,7(4):323-334.

[46] Sidle R C, Bogaard T A. Dynamic earth system and ecological controls of rainfall-initiated landslides[J]. Earth-Science Reviews, 2016,159:275-291.

[47] Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques[J]. Journal of Hydrology, 2009,378(1):179-204.

[48] Su Lijun, Xu Xingqian, Geng Xueyu, et al. An integrated geophysical approach for investigating hydrogeological characteristics of a debris landslide in the Wenchuan earthquake area[J]. Engineering Geology, 2016,219(S1):52-63.

(下转第 324 页)