

文章编号: 1008-2786-(2019)5-717-11

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000462

植被发育斜坡土体大孔隙结构多尺度特征

张家明^{1a,b}, 徐则民^{1a*}, 李 峰^{1b}, 李乾坤²

(1. 昆明理工大学 a. 建筑工程学院, 昆明 650500, b. 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 中煤科工集团 南京设计研究院有限公司, 南京 210031)

摘 要: 植被发育斜坡土体中普遍存在大孔隙, 在强降雨过程中大孔隙产生的优先流加快降雨入渗, 影响斜坡稳定。大孔隙结构影响优先流过程和优先流的水动力特性。为探明植被发育斜坡土体大孔隙结构的多尺度特征, 本文在分析土体大孔隙研究进展的基础上, 提出适用于研究植被发育斜坡土体大孔隙的试验方法。以云南省段家营、头寨、象冲、东月各、白泥山和贵州八渡滑坡的植被发育斜坡土体为研究对象, 采用挖掘法、染色示踪法、CT 扫描法、SEM 法定性和定量分析植被发育斜坡土体大孔隙的多尺度几何形态和分布特征。研究表明: 挖掘法、染色示踪法、CT 扫描法、内窥镜检查和 SEM 法适用于分析植被发育斜坡土体的大孔隙结构; 植被发育斜坡土体的大孔隙有腐烂根系通道、根-土间隙、动物通道、团聚体间大孔隙、土-石间隙、干缩裂隙和成因不明大孔隙, 其中前四种是主要类型; 各种大孔隙相互交织组成大孔隙网络系统; 受到植物物种、树龄、动物物种、土体生态系统和立地条件的影响, 不同类型大孔隙的多尺度几何形态和分布特征不同。将先进技术手段与染色剂溶液降雨模拟示踪试验结合起来, 研究大尺度的大孔隙三维几何形态和分布特征是未来的主要工作。

关键词: 滑坡; 强降雨; 优先流; 大孔隙; 几何形态; 分布特征

中图分类号: P642.1

文献标志码: A

在温湿气候区的植被发育斜坡流域, 强降雨常诱发大量滑坡、泥石流灾害, 造成重大财产损失。例如, 1998 年 8 月, 强降雨在日本福岛 100 km² 调查区诱发滑坡 1000 余处, 失稳斜坡均有植被覆盖^[1]。2008 年 11 月 1 日—2 日, 167 mm 强降雨在云南楚雄诱发群发性特大滑坡、泥石流, 其中以植被发育的红河右岸岸坡区的西舍路乡最为严重, 造成 26 人死亡, 31 人失踪, 直接经济损失 9.7 亿人民币^[2]。2013 年 7 月 25 日, 甘肃天水市遭受暴雨袭击, 诱发区域性滑坡、泥石流共 708 处, 25 人死亡, 直接经济

损失高达 82.75 亿人民币^[3]。降雨诱发斜坡失稳是通过雨水渗入土体, 水-土相互作用导致土体破坏来实现的。水-土相互作用对土体强度和稳定性的影响已得到广泛而深入的研究, 形成了清晰的理论框架^[4]。但是对雨水渗入土体过程的研究相对滞后, 已成为降雨诱发滑坡机理研究的瓶颈。许多试验结果已经证实植被发育斜坡土体中存在各种大孔隙^[5], 大孔隙产生的优先流是一种重要的水流运动方式, 优先流加快降雨入渗, 对斜坡稳定不利^[6-7]。但这个观点仍然没有得到普遍接受, 其中一个主要

收稿日期 (Received date): 2015-05-29; **改回日期** (Accepted date): 2019-08-22

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金-云南联合基金重点项目 (U1033601); 云南省人培项目 (KKS201406009); 云南省自然科学基金 (2014FD007)。[Joint Funds of National Natural Science Foundation of China with Natural Science Foundation of Yunnan (U1033601); Science Foundation for Fostering Talents in Basic Research of Natural Science Foundation of Yunnan (KKS201406009); Natural Science Foundation of Yunnan (2014FD0007)]

作者简介 (Biography): 张家明 (1984-), 男, 云南泸西人, 博士, 讲师, 主要研究方向: 工程地质和水文地质。[ZHANG Jiaming (1984-), male, born in Luxi, Yunnan province, Ph. D., lecturer, research on engineering geology and hydrogeology] E-mail: zjm_engeo@163.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 徐则民 (1963-), 男, 河北承德人, 博士, 教授, 主要研究方向: 工程地质和水文地质。[XU Zemin (1963-), male, born in Chengde, Hebei province, Ph. D., professor, research on engineering geology and hydrogeology] E-mail: abc5100@188.com

原因是对于土体大孔隙结构的研究和报道还不够全面。因此,应该加强对植被发育斜坡土体大孔隙结构特征的研究,以提高优先流过程的研究水平,促进强降雨诱发植被发育斜坡失稳的机理研究。

截至目前,很多学者采用多种方法研究了植被发育斜坡土体的大孔隙结构。比如,运用挖掘法调查了植被根系通道和动物洞穴的几何形态、分布特征在深度方向的变化规律,如大孔隙的密度、直径、方向和倾斜程度^[8-9];采用染色示踪法,基于染色剖面图和染色覆盖率-深度图(图1)分析了大孔隙分布模式及大孔隙分布的影响因素,包括植被根系、土体动物、有机质、土体容重、土体颗粒粒径分布^[10-11]和地表微地形^[12];利用水分穿透曲线法主要探讨了不同林下土体大孔隙的等效直径、数目、密度^[13]、大孔隙面积率与深度^[14]、坡位、坡度、坡向^[15]、碎石含量^[16]的关系;张力入渗仪研究了不同林下土体大孔隙的等效直径、数目、密度和大孔隙面积率^[17]随深度的变化规律^[18-19];CT扫描法(X-ray Computed Tomography Scanning)用于研究了两种不同物种蚯蚓洞穴的密度、长度、体积和方向性的差异^[20]及土体的密度、砂粒含量、有机质含量、根系长度密度对大孔隙的体积、孔径、面积、数量、倾斜角度、弯曲度的影响^[21];SEM(Scanning Electron Microscopy)法主要用于观察根系通道壁面几何形态和团聚体间大孔隙形貌^[5]。综上所述,植被发育斜坡土体大孔隙结构研究已经取得了很多成果,但是这些成果相对零散,没有形成系统,导致人们对大孔隙结构的认识不够全面。

表1列出目前大孔隙的主要研究方法,并介绍各种方法的研究尺度、适用条件、优点和缺点。其中,张力入渗仪法和水分穿透曲线法存在以下四个方面的不足:(1)是黑箱方法,研究结果不能显示大孔隙的几何形态和空间分布;(2)属于积水入渗试验,但在植被发育斜坡流域,降雨强度很少能超过表层土体的入渗能力^[22],不会或极少产生积水入渗,研究结果高估大孔隙;(3)基于水分穿透曲线理论和 Poiseuille 方程计算大孔隙,但 Poiseuille 方程假设大孔隙是圆柱状、大孔隙流是层流、孔喉半径是真正的孔隙半径,研究结果低估大孔隙;(4)植被发育斜坡土体有时存在大量碎石,但水分穿透曲线法用环刀采样常远离碎石和植被根系,且试样体积小(89~200 cm³),测试结果不具有代表性。因此,这两种方法不适用于研究植被发育斜坡土体大孔隙。染色示踪法主要通过如图1所示的二值化(黑白)图像来分析大孔隙的分布模式,但这种图像不能辨识出不同类型大孔隙的几何形态。内窥镜检查主要用于观察大孔隙壁面的几何形态和物质组成^[23]。

挖掘法、染色示踪法、CT扫描法和SEM观测技术适用于研究植被发育斜坡土体的大孔隙,而且这些方法的研究尺度不同,具有不同的优点。因此,本研究综合采用以上四种方法全面识别植被发育斜坡土体的大孔隙类型,并定量和定性系统分析大孔隙结构的几何形态和分布特征。

1 研究场地和方法

本研究在云南省的四个试验区(详情见图2和

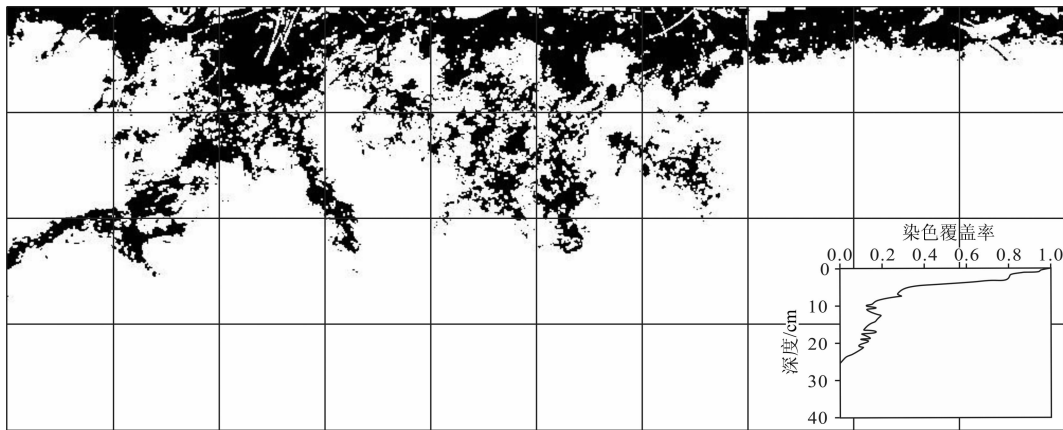


图1 土体典型染色剖面模式(网格尺寸:10 cm × 10 cm)和染色覆盖率-深度图(右下角曲线图)

Fig.1 Typical dye stained patterns for the profile (grid size:10 cm × 10 cm)
and dye stained coverage versus depth (the lower right corner graph)

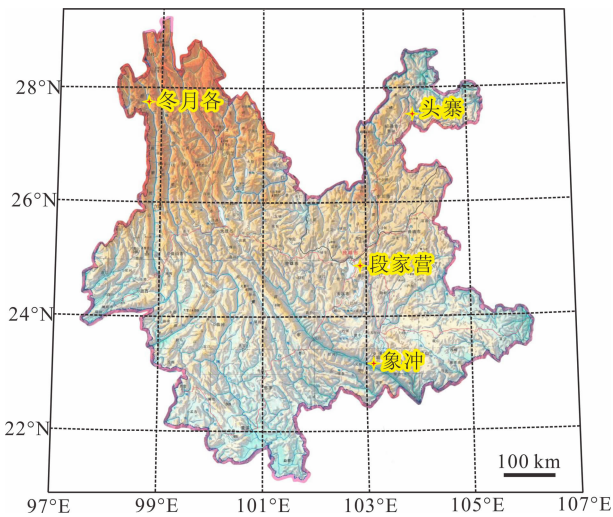


图 2 四个试验区地理位置

Fig.2 Location of the experimental sites in Yunnan province, China

表 2)采用挖掘法和亚甲基蓝溶液降雨模拟染色示踪法研究了植被发育斜坡土体的大孔隙结构。染色示踪试验共 14 个,其中,段家营试验区和头寨试验

区各 5 个,象冲试验区和东月各试验区各 2 个,详细的试验方法流程见文献[10]。详细的试验场地特征见表 3。此外,在头寨试验区采集两个长、宽、深分别为 25 cm、25 cm、50 cm 的长方体土柱,然后在云南省第三人民医院 CT 室用 SIMENS Sensation Open 型 CT 机扫描土柱,用 VolView 3.4 软件三维可视化大孔隙网络结构,详细操作见文献[24]。在段家营试验区、头寨试验区、昆明市白泥山和贵州册亨县南昆铁路八渡车站滑坡后缘分别采集了 12、10、10 和 3 个土样进行大孔隙 SEM 观察。

2 大孔隙类型及特征

上述试验辨识出植被发育斜坡土体的大孔隙有:根系通道、动物洞穴、团聚体间大孔隙、土-石间隙、干缩裂隙和成因不明大孔隙。

2.1 根系通道

根据通道横截面形状,根系通道分为腐烂根系

表 1 土体大孔隙测试方法及其优缺点

Tab.1 Methods for testing macropores in soils and the advantages and disadvantages of the methods

研究方法	研究尺度	适用条件	主要操作流程	优点	缺点
挖掘法 *	剖面尺度: 1 ~ 100 m	任何场地	开挖剖面,观测,拍照,在坐标纸上记录大孔隙的位置	观测范围广,费用低,容易操作,能辨识大孔隙类型	破坏性方法,耗时耗力,只能观测大孔隙二维分布特征,精度低,定性和半定量描述大孔隙
染色示踪法 *	剖面尺度: 1 ~ 10 m	任何场地	喷洒染色剂溶液,开挖剖面,观测,拍照,图像处理和分	观测范围广,费用适中,容易操作,能辨识大孔隙类型,显示具有优先流效应的大孔隙	有机质会吸附染色剂,弱化染色效果,破坏性方法,耗时耗力,只能观测大孔隙的二维分布特征,精度适中
张力入渗仪法	土柱尺度: 小于 0.25 m	没有大根系的场地	平整场地后进行入渗试验	费用低,操作方便、快捷	黑箱方法,不能显示大孔隙,计算方法的假设条件与实际不相符合
CT 扫描法 *	土柱尺度: 直径 25 cm,高度 60 cm	没有大根系的场地	采集土柱样,搬运土样到扫描室,CT 扫描土样,图像处理及分析	非破坏性方法,二维、三维可视化和数据化大孔隙结构,精度高	取样耗时耗力,CT 扫描需要专业设备和技术人员,费用高,试样太小没有代表性,试样太大则难以采样和扫描
水分穿透曲线法	土心尺度: 89 ~ 200 cm ³	没有根系或碎石的土体	环刀采样,室内进行水分穿透试验	费用低、容易操作	黑箱方法,不能显示大孔隙,试样小,不具有代表性,计算方法的假设条件与实际不相符合
内窥镜镜检查	孔隙尺度	腐烂根系通道和动物洞穴	内窥镜插入管插入大孔隙内观察	非破坏性方法,容易操作,精度高,观察大孔隙壁面和物质组成	只能定性评价大孔隙壁面的几何形态和物质组成
SEM 法 *	孔隙尺度	根通道、动物洞穴和团聚体	采集土样,搬运到电镜室,在 SEM 镜下观察	高精度观察大孔隙形貌	只能定性和半定量描述

注: * 表示本文选取的研究方法。

表 2 试验区地理位置

Tab. 2 Geographical location of the experimental sites

试验区	经纬度	地理位置
呈贡区段家营试验区	102°52′04″~102°52′20″E, 24°51′34″~24°51′55″N	金沙江二级支流螳螂川流域的捞鱼河流域
昭通市头寨试验区	103°51′10″~103°51′49″E, 27°33′42″~27°34′7″N	昭通市盘河乡 1991 年头寨特大型滑坡左翼
个旧市象冲试验区	103°12′13″~103°13′0″E, 23°6′30″~23°8′0″N	个旧市卡房镇斗姆阁村东南约 5 km 的象冲沟
怒江州东月各试验区	98°45′18″~98°45′58″E, 27°39′20″~27°40′10″N	怒江州贡山县普拉底乡东月各沟

注:呈贡区段家营和昭通市头寨试验区工程地质条件见文献[25];个旧市象冲试验区工程地质条件见文献[26];怒江州东月试验区工程地质条件见文献[27]。

表 3 试验场地特征

Tab. 3 Conditions of the experimental plots

试验区	挖掘法、染色示踪法			
	试验编号	位置	高程/m	坡度/(°)
呈贡区段家营试验区	1 [#]	马卡山	2041	18
	2 [#]	马卡山	2053	23
	3 [#]	马卡山	2052	23
	4 [#]	马卡山	2051	23
	5 [#]	李凹山	2021	25
昭通市头寨试验区	6 [#]	头寨滑坡 滑源区左翼	2278	23
	7 [#]		2320	36
	8 [#]		2356	20
	9 [#]		2319	36
	10 [#]		2360	20
个旧市象冲试验区	11 [#]	象冲沟右侧	542	25
	12 [#]	苦竹林	660	27
怒江州东月各试验区	13 [#]	东月各右岸	2002	39
	14 [#]	东月各左岸	1888	25

通道和根-土间隙,它们都是植被发育斜坡土体中的重要的大孔隙。腐烂根系通道是指根系木质部已经完全腐烂而形成的空腔状通道,其横截面是圆孔状。图 3 展示了腐烂根系通道不同空间尺度的几何形态和分布特征。图 3a 是蕨科植物根系腐烂形成的通道,根皮已完全腐烂变成黑色有机物,单通道长度在 0.5~0.8 m 之间,通道轴向近似水平或倾斜,不同通道相互交织组成网络系统。如图 3b 所示,刺槐主根的腐烂根系通道垂直向下,穿透深度大于 1.1 m,弯曲率近似 1.0,通道直径在 1.0~2.5 cm 之间,自上而下逐渐减小。在 0.6 m 深度有一根侧向通道,方向近似水平,长度约 35 cm,直径约 1.5 cm。腐烂

根系通道的根皮还没有完全腐烂分解,在根皮个别部位见有 0.2~1.0 cm 的圆形孔洞。腐烂根系通道有利于地表有机质向下迁移,在通道内和外围均有有机质(Organic Matter, OM)分布,土体有机质含量总体自上而下减小。图 3f 高精度地显示直径约 0.03 cm 通道内有植被的种子等有机植物。图 3c 是华山松主根的腐烂根系通道,部分根皮已腐烂分解,通道横截面近似圆孔状,直径约 15 cm,深度高达 1.0 m。图 3d 显示直径约 0.7 cm 的腐烂根系通道被亚甲基蓝溶液染色,说明该通道具有优先流功效。图 3e 展示了活根系沿着直径约 2.2 cm 的圆孔状腐烂根系通道生长,而且活根系没有出现挠曲现象,说明该通道连通性高。当根皮腐烂分解后,会在根系通道壁面保留清晰的根皮组织印模(图 3g~i),有利于通道时效稳定。

图 4 显示了根-土间隙的多尺度特征。如图 4a 所示,在直径约 20 cm 的华山松主根周围 15 cm 范围内,土体团聚体发育、结构疏松、空隙大(图 4f)。究其形成原因:(1)根系周围土体(即根际)微生物数量多,主根的须根腐烂、分解有利于有机质和团聚体的形成;(2)根系径流将地表有机质和微生物优先迁移到深部土体,这些过程都会显著增大根系周围一定范围内土体的孔隙率。图 4b 显示亚甲基蓝溶液沿着根系向下迁移,深度超过 1 m。如图 4c 所示,根系越密集的区域,亚甲基蓝染色面积越大,尤其是在地表 7 cm 以下,亚甲基蓝染色几乎全部分布在根系周围。以上分析表明,根系周围一定范围内的松散土体是重要的优先流路径。植被根系形态有主直根型、散生根型和水平根型,不同植被或立地条件的根系形态不同^[28]。因此,根-土间隙的空间分布特征和尺度范围取决于植被物种、树龄和立地条件。图 4d、图 4e 和图 4g 显示根系周围的亚

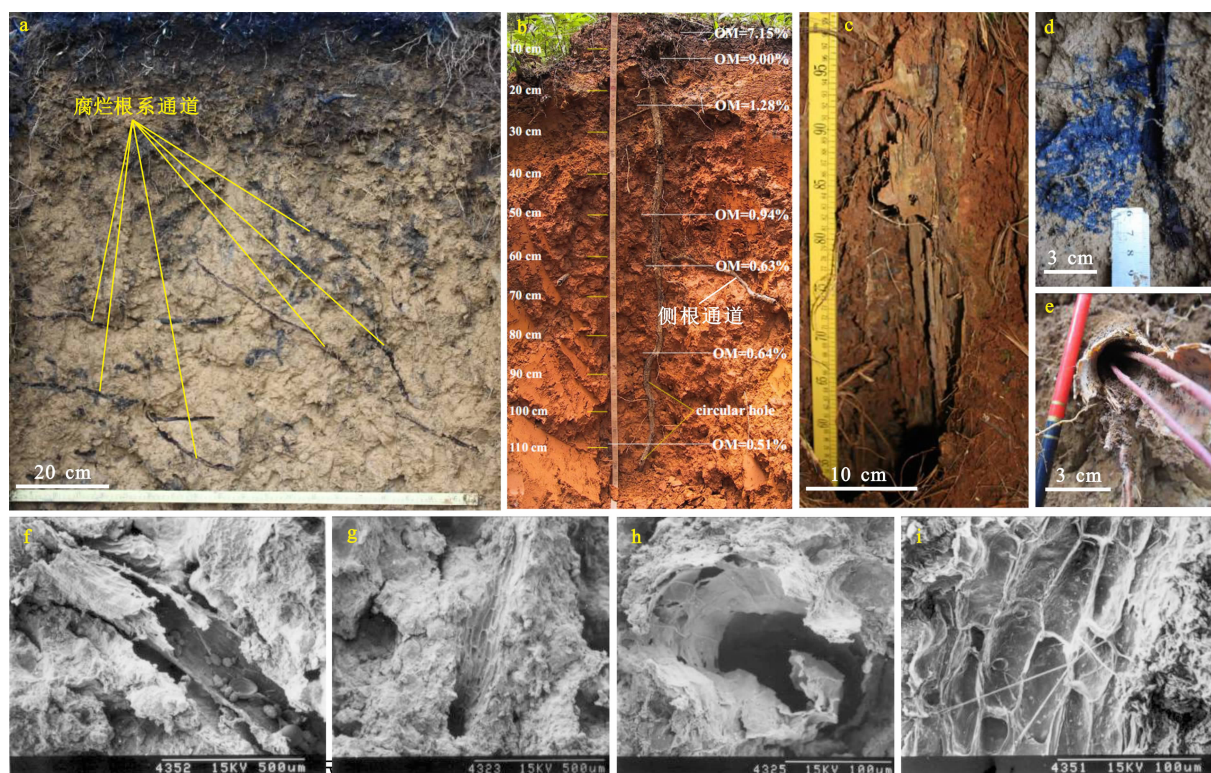


图3 腐烂根系通道:

(a) 头寨试验区开挖剖面;(b) 白泥山开挖剖面;(c)、(e) 段家营试验区的腐烂根系通道;(d) 头寨试验区腐烂根系通道被亚甲基蓝染色;(f) - (i) 南昆铁路贵州册亨县八渡滑坡 0.81 m 深度土体中的腐烂根系通道的 SEM 图片

Fig.3 Decayed root channels: (a) profile in Touzhai; (b) profile in Baini Mountains; (c), (e) decayed root channels in Duanjiaying; (d) decayed roots stained by methylene blue in Touzhai; (f) - (i) scanning electronic micrographs of decayed root channels in Badu landslide at a depth of 0.81 m on Nanning-Kunming railway, Ceheng county, Guizhou province, China

甲基蓝染色区域近似呈环状。图 4h 显示根系周围团聚体发育,根系与周围土体之间不是闭合的,而是存在一定间隙的。以上研究表明,根-土间隙是一个双圆环空间,内环是根与土之间的空隙,外环是根系周围一定范围内的多孔疏松土体。

2.2 动物通道

立地条件不同,土体生态系统差异导致不同试验区的土体动物物种不同。头寨试验区土体的体积含水率整年维持在 $0.46 \pm 0.05 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 范围,土体 pH 值在 4.68 ~ 5.53 之间,显酸性。因此,头寨试验区土体动物以环毛蚓 (*Pheretima tschiliensis*) 为主,其体长约 40 cm,体宽约 0.7 ~ 1.2 cm。环毛蚓通道在坡面上呈随机分布,密度为 5 ~ 8 个/ m^2 。如图 5a 和图 5b 所示,环毛蚓通道被亚甲基蓝溶液染色,通道自上而下曲延穿过土体,垂直深度约 1.1 m,弯曲率在 1.1 ~ 1.48 之间,下端与基岩面连接,并在下端发现大量蚯蚓粪便。蚯蚓是通过伸缩

运动前行,通道直径比蚯蚓体宽大,直径约 1.5 cm,横截面呈圆孔状,通道壁面光滑。

段家营试验区土体的体积含水率在 $0.25 \pm 0.11 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间,土体动物以拟黑多刺蚁 (*Polyrhachis vicina* Roger) 为主,此外还有其他昆虫。如图 5c 所示,枯枝落叶层下边坡表面随机分布大量动物洞穴,图中有 16 个洞穴,据此推算洞穴密度约 470 个/ m^2 。拟黑多刺蚁洞穴主要顺坡分布在地表以下 30 cm 深度范围,洞穴整体结构为迷宫互层式通道网络(图 5d 和图 5e)。单通道洞穴横截面等效直径在 2 ~ 4 cm 之间,小尺度洞穴横截面呈圆孔状,随着尺度增大,横截面逐渐演变为椭圆、扁平状。拟黑多刺蚁洞壁面比蚯蚓洞穴壁面粗糙,呈黑色(图 5f 和图 5g)。洞穴壁面可能有拟黑多刺蚁的分泌物,容易干缩产生裂隙(图 5f)。

2.3 团聚体间大孔隙

如图 6a 和图 6b 所示,团聚体等效直径约

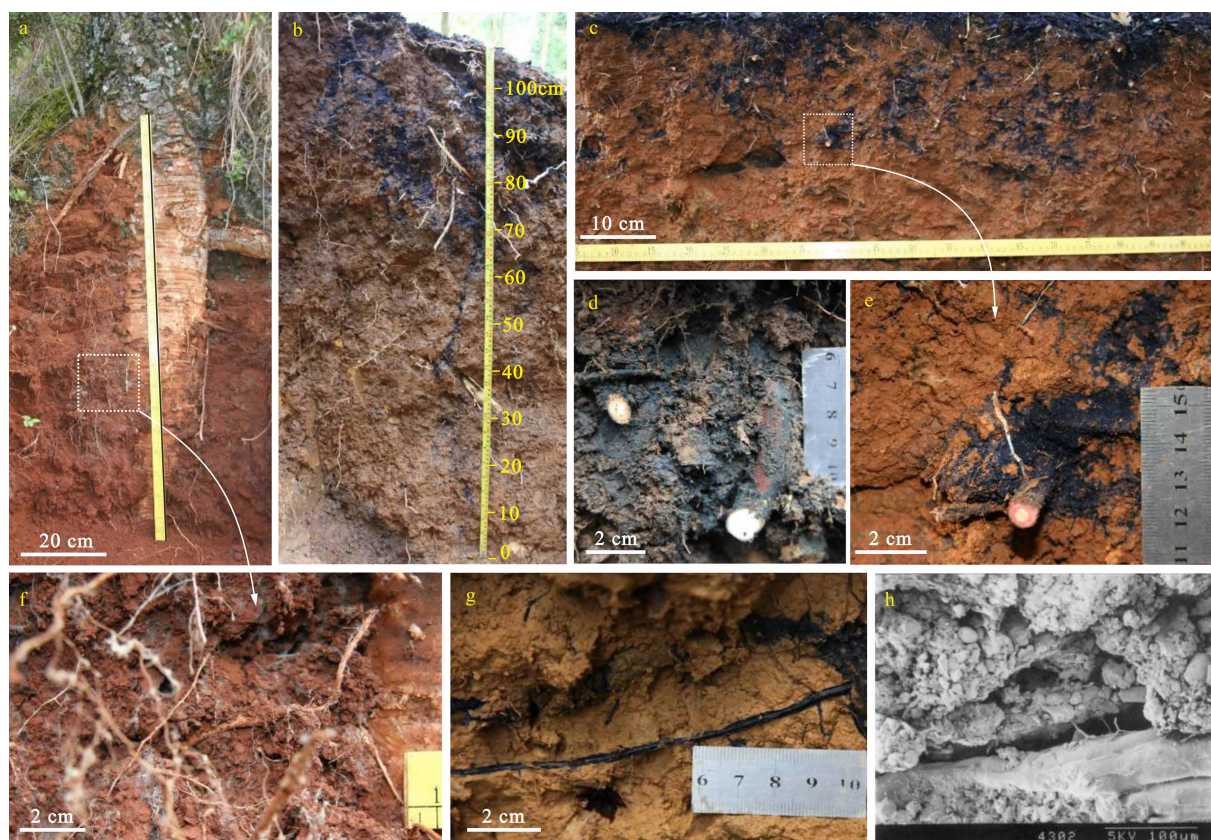


图4 根-土间隙: (a) 段家营试验区华山松主根及周围土体剖面;

(b)、(c) 象冲和段家营试验区染色试验开挖剖面; (d)、(e) 头寨和段家营试验区被染色根系的局部特写; (f) a 中根系周围土体的局部特写; (g) 头寨试验区被染色根系; (h) 贵州册亨县八渡滑坡 0.81 m 深度土体中的根系及其周围团聚体的 SEM 图片

Fig. 4 Root-soil interstice: (a) taproot of *Pinus armandi* Franch and surrounding soil profile in Duanjiaying; (b), (c) profiles in Xiangchong and Duanjiaying respectively; (d), (e) close-up images from stained roots in Touzhai and Duanjiaying respectively; (f) close-up images from soil around root system in fig. 4a; (g) root stained by dye in Touzhai; (h) scanning electronic micrographs of root and aggregates in Badu landslide at a depth of 0.81 m on Nanning-Kunming railway, Ceheng county, Guizhou province, China

70 μm , 团聚体内有许多基质孔隙, 团聚体间大孔隙远大于单体颗粒的粒间孔隙。团聚体主要分布在植被发育斜坡表土层土体和根系周围土体(图 4h 和图 6a), 由团聚体组成的表层土体呈蜂窝状结构。团聚体间大孔隙不仅是重要的优先流路径, 也是重要的储水空间。植被发育斜坡土体饱和导水率自上而下逐渐减小。例如, 头寨试验区表层土体饱和导水率在 8 ~ 18 mm/min, 相当于 160 ~ 1080 mm/h 的强降雨都不会产生地表径流^[25]。在强降雨过程中, 表层土体储蓄全部降水, 其他大孔隙截留表层土体的储蓄水进入深部土体, 加快降雨入渗^[29]。

2.4 土-石间隙

如图 7a 和图 7b 所示, 土体中的碎石被亚甲基蓝溶液染色。图 7c 显示在地表以下 0.5 m 深度位置亚甲基蓝溶液沿着土-石间隙流出。碎石增大土

体孔隙率和降雨入渗^[30]。Cerdà^[31]报道碎石与周围基质土体的接触带有利于雨水快速、深层入渗。以上分析表明, 土-石间隙也是一种大孔隙。土-石间隙的几何形态取决于碎石形状。土-石间隙能否优先导水取决于碎石的空间位置。若碎石出露地表, 雨水直接沿着土-石间隙向下入渗。若碎石埋于地表以下基质土体中, 碎石要与其他大孔隙连通才能发挥优先导流功效, 孤立地存在于基质土体中的碎石不具有优先流效应。

2.5 干缩裂隙

本研究只在段家营试验区的银荆和栓皮栎乔木下观察到土体干缩裂隙, 说明干缩裂隙不是植被发育斜坡土体的主要大孔隙(图 8a 和图 8b)。裂隙开度在 0.1 ~ 0.3 cm 之间, 深度小于 1 cm, 银荆下裂隙块体尺寸不均匀, 块体边缘棱角模糊(图 8a), 而栓

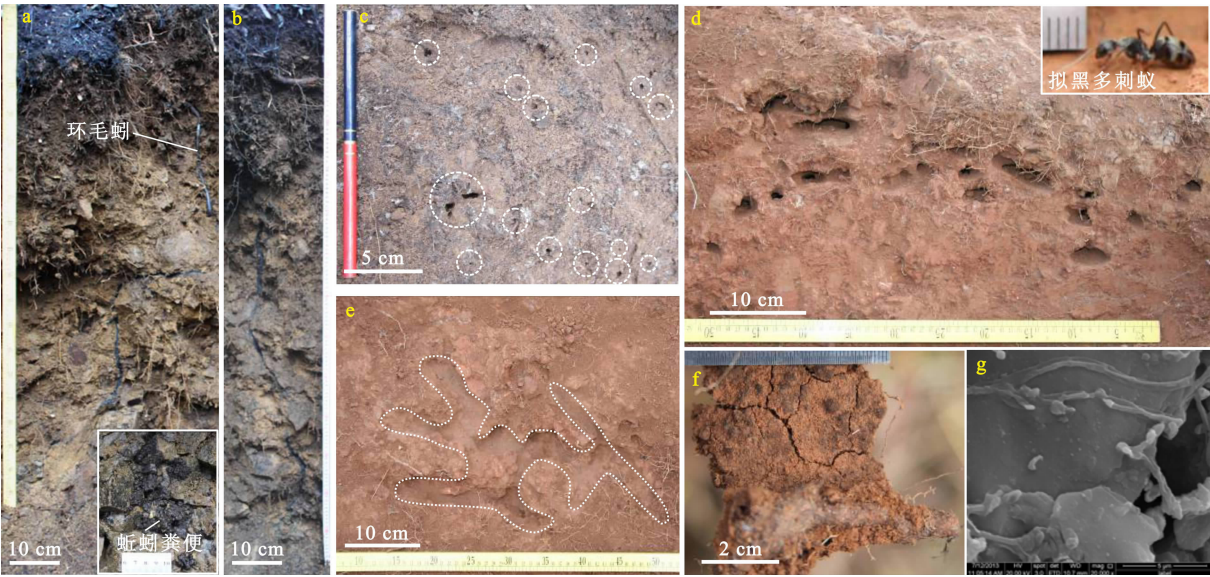


图 5 土体动物洞穴:(a)、(b) 头寨试验区环毛蚓洞穴通道;

(c) 段家营试验区枯枝落叶层下洞穴平面分布;(d)、(e) 段家营试验区拟黑多刺蚁洞穴的垂向和平面分布;

(f)、(g) 拟黑多刺蚁洞穴壁面的微焦照片和 SEM 图片

Fig.5 Soil animal burrows: (a),(b) burrow channels resulted from earthworm (*Pheretima tschiliensis*) in Touzhai;(c) horizontal distribution of burrows covered by litters in Duanjiaying;(d),(e) horizontal and vertical distribution of ant (*Polyrhachis vicina* Roger) burrows in Duanjiaying;(f),(g) microfocal photos and scanning electronic micrographs of animal (*Polyrhachis vicina* Roger) burrow walls

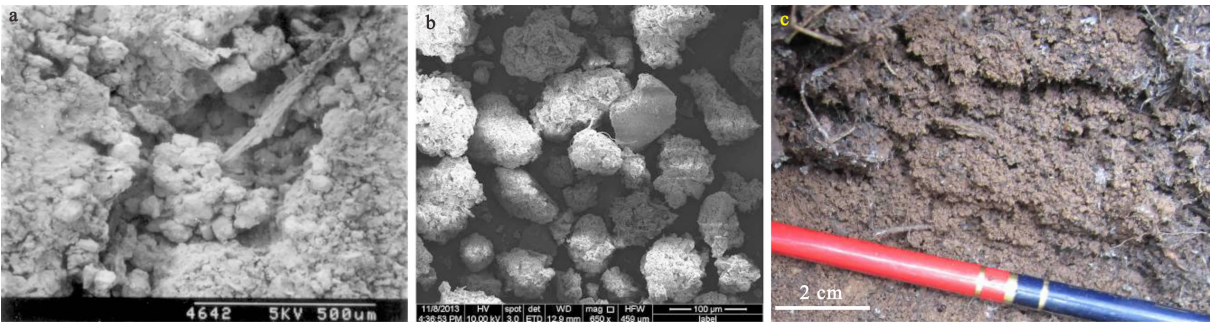


图 6 团聚体间大孔隙

(a)、(b) 白泥山和头寨试验区表土层土体团聚体 SEM 图片;(c) 段家营试验区云南松下表土层土体

Fig.6 Inter aggregate porosity: (a),(b) scanning electronic micrographs of aggregates in top soil

layers in Baini Mountain and Touzhai;(c) top soil under *pinus yunnanensis* in Duanjiaying

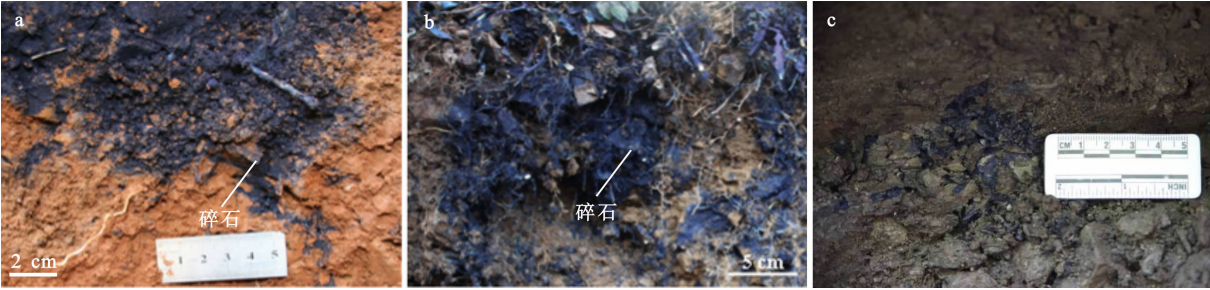


图 7 土-石间隙:(a)、(b)、(c) 段家营、头寨、东月各试验区土体中碎石被亚甲基蓝溶液染色

Fig.7 Soil-stone interstice: (a),(b),(c) stones stained by methylene blue in soils in Duanjiaying, Touzhai, Dongyuege respectively

皮栋下裂隙块体尺寸均匀,块体边缘棱角明显(图8b),说明栓皮栋下的裂隙形成时间晚于银荆下的裂隙。农业土体的裂隙开度在0.1~0.6 cm之间,深度约5 cm,块体边缘棱角显著(图8c)。裸坡土体的裂隙开度在0.1~0.5 cm之间,裂隙块体不发育,块体边缘棱角模糊,裂隙已经被土粒部分填充(图8d),说明裸坡土体的裂隙不稳定。植被发育斜坡土体干缩裂隙不发育的原因是林冠层、地被物和枯枝落叶层对外界气候环境变化的缓冲作用,土体对外界气候环境变化的响应有滞后性和缓和性,但裂隙时效稳定性比农业土体、裸坡土体高。

2.6 成因不明大孔隙

除以上6种大孔隙外,在头寨试验区还发现一些“怪异”的大孔隙。如图9a所示,在腐烂根系通道周围分布蜂窝状的大孔隙,等效直径约0.1 cm,类似团聚体间孔隙与小动物通道的组合,但没有发现与植被、动物有关的有机物。图9b是某土块的张拉面,清晰地显示张拉面集分布等效直径小于0.2 cm的通道,通道没有明显的方向性,部分通道内见有幼嫩的白色根系生长。在扫描电镜下能观察到更多等效直径约0.01 cm的大孔隙(图9c和图9d)。

但没有足够依据判定这些大孔隙的形成原因。

前文独立地介绍了7种大孔隙的多尺度几何形态和分布特征,其中腐烂根系通道、根-土间隙、动物通道和团聚体间大孔隙是植被发育斜坡土体中的重要的大孔隙。Ilek等^[32]认为动物通道和腐烂根系通道更为重要。各种大孔隙往往彼此交织组成网络系统。如图10a所示,蚯蚓洞穴、腐烂根系通道和成因不明大孔隙组成一个系统,优先流相互连通。图10b显示根-土间隙截留腐烂根系通道中的优先水流,提高优先流效应。图10c和图10d显示各种大孔隙相互交织构成网络系统,大孔隙以根系通道为主。

从目前大孔隙几何形态和分布特征的研究内容来看,CT扫描法对大孔隙结构特征的研究最精细,定量化程度更高,但CT扫描法的研究尺度是土柱尺度。从优先流对斜坡稳定性影响的视角看,应该注重从剖面尺度或更大尺度研究植被发育斜坡土体的大孔隙结构。未来的工作应该采用一些先进的技术手段,如高精度三维激光扫描仪技术,配置高频天线的探地雷达技术,结合染色剂溶液降雨模拟示踪试验,研究大尺度的大孔隙三维几何形态和分布特征。

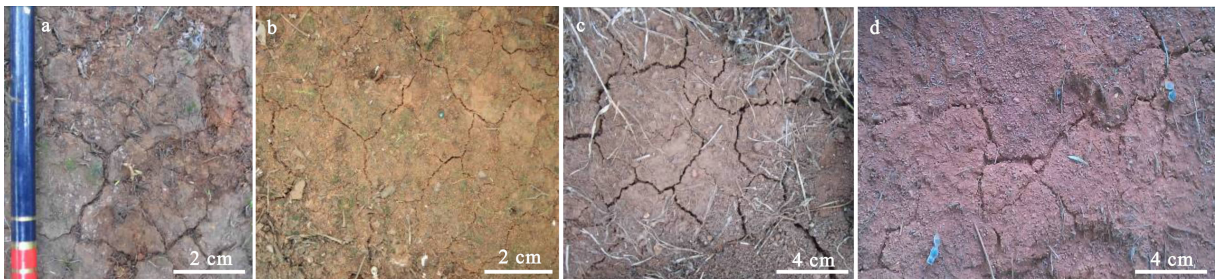


图8 段家营试验区土体干缩裂隙:(a)、(b)银荆、栓皮栋乔木下土体;(c)、(d)农业土体和裸坡土体

Fig. 8 Soil desiccation cracks in Duanjiaying: (a), (b) forest soils under silver wattle and quercus variabilis respectively; (c), (d) agricultural soils and bare slope soils respectively

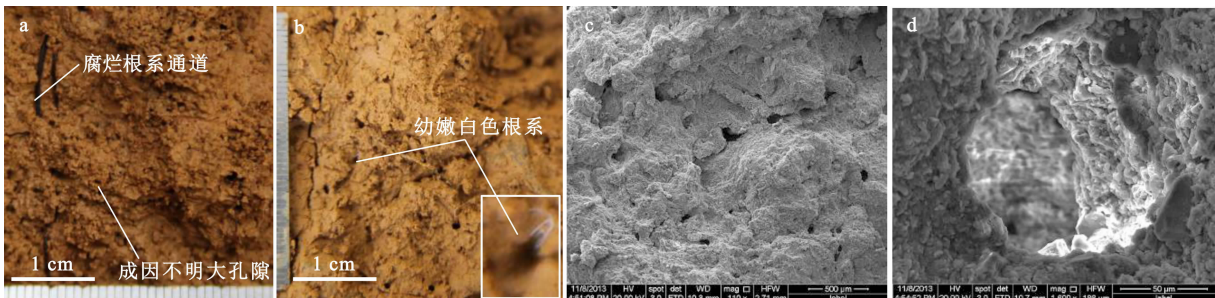


图9 头寨试验区成因不明大孔隙:(a)、(b)土体大孔隙的特写;(c)、(d)大孔隙土体SEM图片

Fig. 9 Macropores without knowing origin in Touzhai: (a), (b) close-up images from macropore soils; (c), (d) scanning electronic micrographs of macropore soils

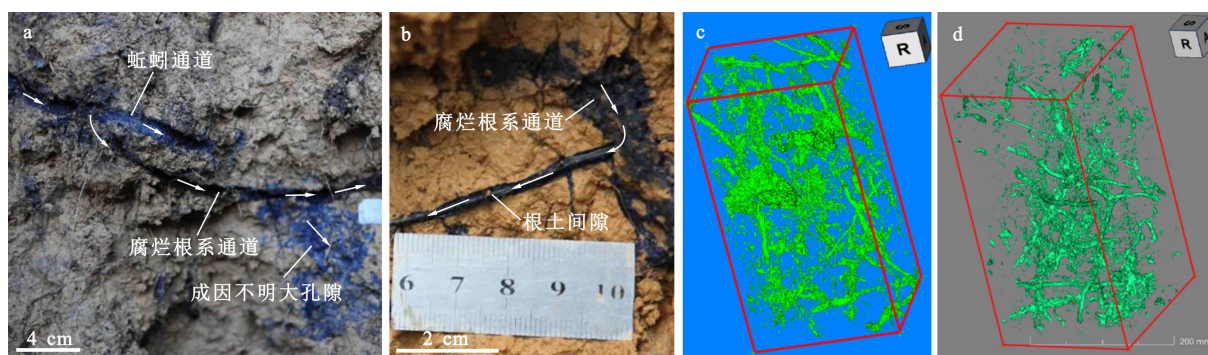


图10 大孔隙网络系统:(a)、(b) 头寨试验区土体优先流路径系统;(c)、(d) CT技术构建的大孔隙3D系统

Fig. 10 Macropores network systems; (a), (b) preferential flow path systems in Touzhai;

(c), (d) three-dimensional macropore networks reconstructed by X-ray computed tomography scanning

3 结论

对现有大孔隙研究方法进行分析,并以云南省段家营、头寨、象冲、东月各、白泥山和贵州八渡滑坡的植被发育斜坡土体为研究对象,采用挖掘法、染色示踪法、CT扫描法和SEM测试技术,探讨了大孔隙结构的多尺度几何形态和分布特征,得到以下结论:

(1)大孔隙的研究方法主要有挖掘法、染色示踪法、CT扫描法、内窥镜检查、SEM法、水分穿透曲线法和张力入渗仪法。不同研究方法的研究尺度不同,具有各自不同的适用条件和优缺点。前5种方法适用于研究植被发育斜坡土体的大孔隙结构。

(2)植被发育斜坡土体的大孔隙有腐烂根系通道、根-土间隙、动物通道、团聚体间大孔隙、土-石间隙、干缩裂隙和成因不明大孔隙,前4种是主要类型,土体是典型的大孔隙异质介质。

(3)各种大孔隙的形成因素不同,其几何形态和分布特征也各不相同。腐烂根系通道是空腔状通道,其横截面呈圆孔状,而根-土间隙是双圆环通道。根系通道的空间结构和分布特征取决于植物物种、树龄和立地条件。动物洞穴是空腔状通道,其横截面有圆孔状、椭圆状、扁平状,通道网络结构和分布特征取决于动物物种、土体生态系统和立地条件。团聚体间大孔隙和成因不明大孔隙是蜂窝状结构,前者主要分布在表层土体和根系周围土体。

(4)将先进技术手段与染色剂溶液降雨模拟示踪试验结合起来,研究更大尺度的大孔隙三维几何形态和分布特征是未来的主要工作。

致谢 感谢侯汝凡在CT扫描研究方面的帮助;

感谢《山地学报》编辑部朱颖彦教授对本文提出宝贵的修改意见。

参考文献 (References)

- [1] CHIGIRA M. Geologic factors contributing to landslide Generation in a pyroclastic area: august 1998 Nishigo Village, Japan [J]. Geomorphology, 2002, **46**(1): 117-128.
- [2] 余峙丹,张辉,郭荣芬. 云南楚雄特大滑坡泥石流气象成因[J]. 气象科技, 2010, **38**(1): 136-140. [YU Shidan, ZHANG Hui, GUO Rongfen. Analysis of meteorological causes of an exceptional landslide and debris flow event in Chuxiong [J]. Meteorological Science and Technology, 2010, **38**(1): 136-140]
- [3] 郭富赞,孟兴民,黎志恒,等. 天水市“7·25”群发性地质灾害特征及成因[J]. 山地学报, 2015, **33**(1): 100-107. [GUO Fuyun, MENG Xingmin, LI Zhiheng, et al. Characteristics and causes of assembled geo-hazards induced by the rainstorm on 25th July 2013 in Tianshui city, Gansu, China [J]. Mountain Research, 2015, **33**(1): 100-107]
- [4] 徐则民,黄润秋. 山区流域高盖度斜坡对极端降雨事件的地下水响应[J]. 地球科学进展, 2011, **26**(6): 598-607. [XU Zemin, HUANG Runqiu. The response of the groundwater in vegetated slopes in mountainous catchments to heavy rain events [J]. Advances in Earth Science, 2011, **26**(6): 598-607]
- [5] 张家明,徐则民,裴银鸽. 植被发育斜坡非饱和带大孔隙[J]. 山地学报, 2012, **30**(4): 439-449. [ZHANG Jiaming, XU Zemin, PEI Yingge. Macropores in vadose zone of well vegetated slopes [J]. Mountain Research, 2012, **30**(4): 439-449]
- [6] SHARMA R H, KONIETZKY H. Instrumented failure of hillslope models with soil-pipes [J]. Geomorphology, 2011, **130**(3/4): 272-279.
- [7] Balzano B, Tarantino A, Ridley A. Preliminary analysis on the impacts of the rhizosphere on occurrence of rainfall-induced shallow landslides [J]. Landslides, 2019, **16**: 1885-1901.
- [8] AUBERTIN G M. Nature and extent of macropores in forest soils

- and their influence on subsurface water movement [R]. Pennsylvania: Northeastern Forest Experiment Station, 1971: 1 – 32.
- [9] NOGUCHI S, TSUBOYAMA Y, SIDLE R C, et al. Spatially distributed morphological characteristics of macropores in forest soils of Hitachi Ohta Experimental Watershed, Japan [J]. *Journal of Forest Research*, 1997, **2**(4): 207 – 215.
- [10] 张家明, 徐则民. 马卡山不同植被群落下非饱和带大孔隙流路径示踪试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, **43**(6): 1922 – 1935. [ZHANG Jiaming, XU Zemin. A dye tracer experiment to study macropore flow paths in unsaturated zone under different vegetation communities in Maka Mountain, China [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2013, **43**(6): 1922 – 1935]
- [11] 张家明, 徐则民, 李峰. 植被发育斜坡土体大孔隙分布特征的染色示踪法研究[J]. 山地学报, 2015, **33**(1): 1 – 7. [ZHANG Jiaming, XU Zemin, LI Feng. Heterogeneous characteristics of macropores in soil of well vegetated slopes by dye tracing method [J]. *Mountain Research*, 2015, **33**(1): 1 – 7]
- [12] NOBLES M M, WILDING L P, LIN H S. Flow pathways of bromide and Brilliant Blue FCF tracers in caliche soils [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **393**(1/2): 114 – 122.
- [13] 刘目兴, 吴丹, 吴四平, 等. 三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(11): 3189 – 3196. LIU Muxing, WU Dan, WU Siping, et al. Characteristic of soil macropores under various types of forest coverage and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(11): 3189 – 3196]
- [14] 陆斌, 张胜利, 李侃, 等. 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(6): 1512 – 1519. [LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al. Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the Qinling Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(6): 1512 – 1519]
- [15] 石辉, 王峰, 李秧秧. 黄土丘陵区人工油松林地土壤大孔隙定量研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, **15**(1): 28 – 32. [SHI Hui, WANG Feng, LI Yangyang. Quantitative study on soil macropores under artificial Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) forest in loess hilly region [J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2007, **15**(1): 28 – 32]
- [16] 时忠杰, 王彦辉, 熊伟, 等. 六盘山典型植被类型土壤中石砾对大孔隙形成的影响[J]. 山地学报, 2007, **25**(5): 541 – 547. [SHI Zhongjie, WANG Yanhui, XIONG Wei, et al. Effect of rock fragments on the formation of soil macroporosity of typical vegetation in Liupan Mountains of westnorth, China [J]. *Mountain Research*, 2007, **25**(5): 541 – 547]
- [17] HLAVÁČIKOVÁH, HOLKO L, DANKO M, et al. Estimation of macropore flow characteristics in stony soils of a small mountain catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **574**: 1176 – 1187.
- [18] 李伟莉, 金昌杰, 王安志, 等. 长白山主要类型森林土壤大孔隙数量与垂直分布规律[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(10): 2179 – 2184. [LI Weili, JIN Changjie, WANG Anzhi, et al. Amount and vertical distribution of macropores in forest soils in Changbai Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, **18**(10): 2179 – 2184]
- [19] WATSON K W, LUXMOORE R J. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, **50**(3): 578 – 582.
- [20] AUCLERC A, CAPOWIEZ Y, GUEROLD F, et al. Application of X-ray tomography to evaluate liming impact on earthworm burrowing activity in an acidic forest soil under laboratory conditions [J]. *Geoderma*, 2013, **202**: 45 – 50.
- [21] 孟晨, 牛健植, 骆紫藤, 等. 华北土石山区森林土壤大孔隙对土壤理化性质及根系的响应[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(3): 94 – 100. [MENG Chen, NIU Jianzhi, LUO Ziteng, et al. Response of soil macropore to soil phychemical properties and root in forest in rocky mountain area of North China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(3): 94 – 100]
- [22] 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 植被护坡的局限性及其对深层滑坡孕育的贡献[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(3): 438 – 450. [XU Zemin, HUANG Runqiu, TANG Zhengguang, et al. Limitations of biotechnical slope protection and contribution of vegetation to deep seated landslide preparation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(3): 438 – 450]
- [23] PAGENKEMPER S K, ATHMANN M, UTEAU D A, et al. The effect of earthworm activity on soil bioporosity-Investigated with X-ray computed tomography and endoscopy [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, **146**(A): 79 – 88.
- [24] 侯汝几. 基于 CT 扫描对植被发育斜坡土体大孔隙和渗透性的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015: 23 – 42. [HOU Ruji. The study of macropore and permeability of well vegetated slope soils based on CT scans [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015: 23 – 42]
- [25] 张家明. 植被发育斜坡非饱和带土体大孔隙对降雨入渗影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013: 16 – 24. [ZHANG Jiaming. Research on the effects of macropores on rainfall infiltration in vadose zone soils of well vegetated slope [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013: 16 – 24]
- [26] 陈积普. 基于数值模拟和模型试验的尾矿库地震动力响应特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015: 15 – 35. [CHEN Jipu. Research on the characteristics of seismic dynamic response of tailings pond based on numerical simulation and mode test [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015: 15 – 35]
- [27] 苏鹏程, 韦方强, 谢涛. 云南贡山 8.18 特大泥石流成因及其对矿产资源开发的危害[J]. 资源科学, 2012, **34**(7): 1248 – 1256. [SU Pengcheng, WEI Fangqiang, XIE Tao. Causal analysis of debris flow on August 18, 2010 in Gongshan, Yunnan province and its harm to the development and utilization of mineral resources [J]. *Resources Science*, 2012, **34**(7): 1248 – 1256]

- [28] 罗汝英, 黄瑞采. 森林土壤学(问题与方法)[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 367–368. [LUO Ruying, HUANG Ruicai. Forested soil (questions and methods) [M]. Beijing: Science Press, 1983: 367–368]
- [29] LÉONARD J, PERRIER E, RAJOT J L. Biological macropores effect on runoff and infiltration: a combined experimental and modelling approach [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, **104**(2): 277–285.
- [30] GRANT W J, STRUCHTEMEYER R A. Influence of the coarse fraction in two maine potato soils on infiltration, runoff and erosion [J]. Soil Science Society of America Journal, 1959, **23**(5): 391–394.
- [31] CERDÀ A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion [J]. European Journal of Soil Science, 2001, **52**(1): 59–68.
- [32] ILEK A, KUCZE J, WITEK W. Using undisturbed soil samples to study how rock fragments and soil macropores affect the hydraulic conductivity of forest stony soils: some methodological aspects [J]. Journal of Hydrology, 2019, **570**: 132–140.

Multi-scale Features of Macropore Structures in Soil of Well Vegetated Slopes

ZHANG Jiaming^{1a,b}, XU Zemin^{1a*}, LI Feng^{1b}, LI Qiankun²

(1. Kunming University of Science and Technology a. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming 650500, China;

b. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming 650093, China;

2. China Coal Technology & Engineering Group Nanjing Design & Research Institute Co. Ltd., Nanjing 210031, China)

Abstract: Macropores are richly developed in well vegetated slope soils, where the preferential flow could facilitate infiltration under the circumstance of heavy precipitation, thus influencing slope stability. The preferential flow process and hydrological regime are dominated by the structure of macropores. In order to study the multi-scale features of macropore structures in well vegetated slope soils, researches on soil macropores were comprehensively reviewed, and in this study a practical approach to macropore examination in well vegetated slope soil was proposed. Several well vegetated slopes in Duanjiaying, Touzhai, Xiangchong, Dongyuege, Baini Mountain (Yunnan province, China) and Badu landslide (Guizhou province, China) were performed as a case study, and tunneling method, dye tracer method, X-ray computerized tomography scanning and scanning electron microscopy (SEM) were combined to qualitatively and quantitatively analyze the multi-scale geometry morphology and distribution characteristics of macropores. The results showed that tunneling method, dye tracer method, X-ray computerized tomography scanning, SEM and endoscopy were suitable to analyze macropores structures in well vegetated slope soils. Macropores in well vegetated slope soils composed of decayed root channels, root-soil interstice, animal burrows, inter aggregate porosity, soil-stone interstice, desiccation cracks and macropores without knowing origin. Thereinto, decayed root channels, root-soil interstice, animal burrows and inter aggregate porosity were primary macropores. Different types of macropores were interconnected, which constituted an important macropores networks. Influenced by plant species, tree-age, animal species, soil ecosystem and site condition, different types of macropores had distinct geometry morphology and distribution properties. It is necessary to combine tracer solution rainfall simulation infiltration experiment with advanced technologies in assessing large-scale three-dimensional geometry morphology and distribution properties of macropores networks.

Key words: landslide; heavy rainfall; preferential flow; macropores; geometry morphology; distribution properties