

植被发育斜坡非饱和带大孔隙

张家明 徐则民* 裴银鸽

(昆明理工大学建筑工程学院土木工程系, 云南 昆明 650500)

摘 要: 在气候温湿的滑坡灾害易发区, 根系通道、动物通道、干裂缝、管道及团聚体间的结构性孔隙等大孔隙普遍存在于斜坡非饱和带中。采用微观观察、化学分析和现场试验方法并结合相关学科的研究成果, 分析大孔隙界定、大孔隙类型和主控因素、大孔隙三维空间结构及大孔隙时效稳定。不同测量方法的差异和大孔隙密度时空变异性是目前大孔隙定义缺乏统一性的原因。大孔隙尺寸不能作为唯一标准界定大孔隙, 必须考虑其三维几何形态。多因素控制大孔隙的成因和类型, 其中根系通道、裂缝和结构性孔隙对优先流有显著贡献。需从三维几何学和拓扑学方面进一步研究大孔隙三维结构。枯枝落叶层是大孔隙抵御环境因素扰动的重要屏障, 但大孔隙域与周围基质域水量交换对大孔隙时效稳定是不利的。深入研究以上问题对植被发育斜坡优先流模型的改进和发展是重要的。

关键词: 斜坡非饱和带; 大孔隙; 植被; 定义; 三维网络结构; 时效稳定

中图分类号: P642

文献标识码: A

受到日益加剧的全球变暖趋势的强烈驱动, 极端降雨及与其相伴的山区流域植被发育斜坡群发性失稳事件在中国等多山国家的发生频率越来越高^[1]。文献[1]介绍了近 30 年来国内外植被发育斜坡在暴雨、大暴雨和特大暴雨条件下发生的重大斜坡失稳事件。许多研究表明, 在强降雨条件下, 植被发育斜坡非饱和带中的大孔隙产生大孔隙流或优先流, 加快地下水对降雨的响应是植被发育斜坡尾随降雨失稳的主要原因。徐则民研究认为, 大孔隙可以促进降水入渗, 提高渗流场对降雨过程的敏感度、促进斜坡水循环, 无论从岩体长期演化还是从滑坡灾害激发的角度看, 非饱和带大孔隙对斜坡稳定性都是不利的^[2]。诸多学者的研究都证实以上观点^[3-7]。

植被发育斜坡非饱和带大孔隙流的动力学行为、运动学特征和水文学效应不仅与大孔隙尺寸有

关, 而且还与孔隙三维几何形态有关。大孔隙形态研究是大孔隙流研究的基础问题。识别大孔隙三维几何形态和影响大孔隙形成的水文因素是斜坡水文学的基础问题, 同时他们也是理解植被发育斜坡地下水对降雨响应的关键一步。只有真实描述大孔隙才能正确描述斜坡流域内的水文学行为。

大孔隙广泛存在于耕作土壤^[8-12]、森林斜坡土壤^[3-7, 13-19]、毡状泥炭^[20]、河岸湿地^[21-23]和荒漠^[24]中。然而, 在过去几十年时间里, 出于保护地下水资源的需要, 国外有关大孔隙的研究主要集中于耕作土壤, 但随着生态环境问题的突出和森林斜坡灾害频繁发生, 植被发育斜坡土壤大孔隙研究已成为许多科学家越来越感兴趣的研究课题。但到目前为止, 对植被发育斜坡非饱和带大孔隙研究仍存在诸多不足, 已成为斜坡优先流研究的瓶颈。

既有研究表明, 随着植被发育斜坡土壤深度增

收稿日期(Received date): 2012 - 03 - 21; 改回日期(Accepted): 2012 - 05 - 23。

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), 国家自然科学基金项目(40572159, 40772189)。[Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China with the Natural Science Foundation of Yunnan(U1033601) and the National Natural Science Foundation of China(40572159, 40772189)。]

作者简介(Biography): 张家明 (1984 -) 男, 博士生, 主要从事斜坡水文学研究。[Zhang Jiaming (1984 -), male, doctor, mainly engaged in hill-slope hydrology.] E-mail: zjm_engeo@163.com; Tel: 13888442865

* 通讯作者(Corresponding author): 徐则民 (1963 -) 男, 教授, 博士生导师, 主要从事斜坡水文学研究。[Xu Zemin (1963 -), male, professor, mainly engaged in hillslope hydrology.] E-mail: abc5100@188.com

加,大孔隙尺度和数量逐渐减小;不同地区大孔隙垂直分布范围不同,与植被、土质等因素有关。Pierret 等采用 CT 扫描对瑞士高原草甸斜坡 0~21 cm 深土壤大孔隙分布研究,研究发现大孔隙数量从土壤表面向下逐渐减少^[25]。Nobles 等用亮蓝和溴离子溶液示踪剂在美国德克萨斯州中部格伦罗斯灰岩组植被发育斜坡开展了 21 组染色试验。研究表明,不同试验地点大孔隙垂直分布不同,大孔隙最大垂直分布范围在 0.4~1.1 m 之间,大孔隙数量随深度增加而减小^[26]。Noguchi 等用亚甲基蓝溶液染色示踪研究马来西亚半岛 Bukit Tarek 流域植被发育斜坡大孔隙分布规律。试验表明,在 0~10 cm 层,染色面积占 45%~73%,在 10~20 cm 层,染色面积占 20%~67%,在 20~30 cm 层染色面积占 2.5%~14%,随着土壤剖面深度增加,染色面积减小^[14]。吉林长白山斜坡大孔隙主要分布在 0~50 cm 范围内,且不同植被类型下大孔隙发育程度不同^[27-28]。宁夏六盘山植被发育斜坡大孔隙主要分布在 0~100 cm 范围,植被和石砾是影响该区大孔隙形成的主要因素^[29-31]。石辉等采用水分穿透曲线法研究岷江流域植被发育斜坡大孔隙分布,研究表明大孔隙随深度增加而减小^[32]。王伟等采用同样的方法研究重庆四面山植被发育斜坡大孔隙,研究表明大孔隙主要分布在 0~50 cm 范围^[33]。

从目前研究水平来看,大孔隙的定义比较模糊,对大孔隙的定义没有达成共识,尤其在定量化定义方面。对大孔隙类型和主控因素的研究主要集中于根系通道与植被^[3,30]、动物洞穴与土壤动物区系^[13,17]、裂缝、管道与物理、化学作用^[7,30]、团聚体大孔隙与有机物^[2]。对大孔隙三维形态研究主要集中于大孔隙等效直径和垂直穿透深度^[27,31-33],对连续性、连通度和弯曲度等三维几何形态方面研究不足,致使很多大孔隙流研究将大孔隙模拟成圆孔^[13]或圆形管道^[34],从文献[8]的图 5 和文献[11]的图 6 可以看出,这种模拟工况与实际情况存在很大差异。植被发育斜坡大孔隙时效稳定还没有得到充分研究。

本文采用微观观察、化学分析和现场试验方法并结合相关学科的研究成果,分析大孔隙界定、大孔隙类型和控制因素、大孔隙三维空间结构及大孔隙时效稳定。旨在 1. 讨论大孔隙定义方法和分析大孔隙定义没有形成统一性的基本原因;2. 调查影响大孔隙形成的主要因素;3. 阐述植被发育斜坡大孔

隙特征;4. 分析和讨论大孔隙时效稳定。进一步研究这些问题可以深化对森林涵养水源机理的认识,加深理解森林调节水文的过程,为植被恢复重建提供理论与决策依据,而且在滑坡敏感性评估方面有重要的现实意义和多学科理论价值。

1 大孔隙界定

大孔隙界定是多孔介质研究的基础问题。正像对砂土、粉土和粘土的定义一样,对孔隙这个术语有统一的认识是有必要的^[35]。然而,到目前为止,对孔隙分类有用的术语及其定义几乎没有形成一致性^[35]。Beven 和 Germann 详细讨论了大孔隙的形成和尺度范围^[36]。基于综合考虑既有研究成果,根据定义方法,本文将大孔隙的定义分为定性定义和定量定义,定量定义又分为直接定义和间接定义。

1.1 定性定义

在大孔隙定性定义方面,很多学者做了阐述。Aubertin^[17]认为大孔隙是巨大的孔隙、洞穴、通道、管道、地道或土壤中的空隙,水在重力驱动下流过这些孔隙。Buttle 定义由生物活动造成的相对较大的孔隙、结构裂缝和收缩裂缝为大孔隙^[37]。在 Christiansen 看来,在非饱和带多孔土体中,除基质域孔隙外,额外连通孔隙即为大孔隙^[38]。Skopp^[39]建议根据孔隙功能给孔隙分类。水和溶质在孔隙中缓慢流动,致使所有孔隙流能够相互作用,流动符合达西流和对流扩散方程,这样的孔隙为基质孔隙;土壤中部分孔隙为优先流提供流动路径,不同大小的孔隙水流混合和相互作用受到限制,这种孔隙就是大孔隙。

深入研究大孔隙是由于大孔隙对优先流有重要贡献^[25]。因此,大孔隙定义应该考虑大孔隙的水力学效应。裂隙、裂缝的水力学行为可能与近似圆状孔隙的水力学行为存在差异,我们认为不应该将裂隙、裂隙纳入大孔隙范畴,这一观点已经被 Roberto 证实。Roberto 提出垂直入渗模型,该模型由基质域、裂隙子域和大孔隙子域组成^[40]。从定性的视角定义大孔隙似乎很简单,但是,当考虑大孔隙的复杂结构时,大孔隙的定义变得模糊不清。严格定义,大孔隙是指巨大的孔隙,然而“巨大”一词是个相对的概念,缺乏清晰度,这就导致对大孔隙的定义没有形成一致性。与很多具有相对性的术语的定性定义一样,大孔隙定性定义存在模糊性是不可避免的。因

此 ,大孔隙定义统一化应该从定量方向努力。

1.2 定量定义

1.2.1 直接定义

直接定义就是通过观测、度量大孔隙几何形态来直接定义大孔隙 ,这种定义方法直接明了。表 1 列出根据等效圆柱直径直接定义孔隙的既有方案。一些作者将孔隙分为大孔隙、中孔隙(mesopores) 和微孔隙(micropores) ,微孔隙相当于与土壤基质有关的小尺度孔隙^[19 #2 #56]。而一些作者将孔隙分为微孔隙、很小孔隙(very fine pores) 、小孔隙(fine pores) 、中孔隙(medium pores) 和粗孔隙(coarse pores) ,粗孔隙相当于大孔隙^[44 #47]。也有作者将孔

隙分为隐空隙(cryptovoid) 、超显微空隙(ultramicro-void) 、微空隙(microvoid) 、中空隙(mesovoid) 和大空隙(macrovoid) ^[45]。将孔隙划分为黏结孔隙(bonding pores) 、残余孔隙(residual pores) 、储存孔隙(storage pores) 、传输孔隙(transmission pores) 和裂缝(fissure) 的方案也有作者提出^[51]。也有作者提出超大孔隙(super pores) ^[48]、窄大孔隙(narrow macropores) 和宽大孔隙(wide macropores) ^[11]的术语。

仔细阅读表 1 后 ,可以发现 ,到目前为止 ,不同学者对大孔隙下限尺度的理解还有很大差异 ,下限等效圆柱直径在 30 ~ 10 000 μm 间变化 ,差距大于 2

表 1 基于毛细势和等效圆柱直径的大孔隙定义
Table 1 Some definitions of macropores based on capillary potential and equivalent cylindrical diameter

术语 Terminology	毛细势 Capillary potential/kPa	等效圆柱直径 Equivalent Cylindrical Diameter/μm	文献 Reference
Macropores	> - 3.0		Nelson and Baver [1940] ^[41]
Macropores		> 100	Jongerius [1957] ^[42]
Macropores	> - 10.0	> 30	Marshall [1959] ^[43]
Coarse pores		>5 000	Johnson et al. [1960] ^[44]
Macrovoid		>75	Brewer [1964] ^[45]
Macropores	> - 6.0		McDonald [1967] ^[46]
Coarse pores		>200	Russell [1973] ^[47]
Macropores		30 ~ 300	McIntyre [1974] ^[48]
Macropores	> - 5.0		Webster [1974] quoted in Mosley [1979] ^[49]
Macropores	> 1.0		Ranken [1974] ^[50]
Fissure		> 500	Greenland [1977] ^[51]
Macropores		>1 000	Bouma et al. [1977] ^[52]
Macropores	> - 5.0	>60	Bullock and Thomansson [1979] ^[53]
Macrofissure		200 ~2 000	Reeves et al. [1980] ^[54]
Macropores		>3 000	Beven [1981] ^[55]
Macropores	> - 0.3	>1 000	Luxmoore [1981] ^[56]
Macropores	>0.1	>3 000	Beven and German [1981] ^[57]
Macropores		>100	Watsib and Luxmoore [1986] ^[19]
Macropores		>1 000	Luxmoore et al. [1990] ^[58]
Macropores		>100	Judson and William. [1995] ^[21]
Macropores		>10 000	Léonard et al. [2004] ^[13]
Macropores		>1 000	Carey et al. [2007] ^[59]
Narrow macropores		10 ~ 50	Tippkötter et al. [2009] ^[11]
Wide macropores		>50	
Macropores		>1 000	Lamandé et al. [2011] ^[10]

个数量级。Pierret 等^[25]指出,目前对大孔隙的定义意义不明确,都是基于等效圆柱直径定义大孔隙,在二维图像中是易懂的,但用在三维图像中易产生误解,因为大孔隙直径在以未知梯度沿孔隙管道轴线不停地发生变化。

1.2.2 间接定义

在感兴趣的宏观尺度上,孔隙几何与流动特征有着复杂的关系,这就出现了许多定义孔隙的间接方法。通过测量与大孔隙几何形态有关的参量来定义大孔隙,这种定义方法称为间接定量定义法。

在从孔隙尺寸分级方面解释土水特征曲线的常用方法中所测量的有效孔隙尺寸与毛细势有关^[61]。因此,常根据毛细势定义大孔隙(表1)。但是这种定义方法不能提出一个意义明确的大孔隙定义。有效孔隙尺寸测试与实验技术细节、实验流程有关,因此,这种定义方法必然存在随意性^[42]。土体水力传导率随土壤水分变化而变化,因此,可根据水力传导率给孔隙分类。孔隙体积分数直接关系到水力传导率的增加。然而,这种方法仅限用于水力梯度能够真实测定的情况。

综上所述,大孔隙是一个相对概念,是相对于基质孔隙定义的。大孔隙水流一个主要特征就是不同于传统的 Darcy 水流过程,且研究大孔隙是因为大孔隙对优先流有重要贡献,那些死端孔隙或密封孔隙不具有优先流效应,不应列入大孔隙范畴。因此,大孔隙定性定义应该从地下水动力学视角定义。我们认为孔隙水流过程不符合 Darcy 定律的非层流过程,孔隙水流具有优先快速迁移特性,因此限制孔隙水与周围基质相互作用,这样的孔隙为大孔隙。大孔隙定性定义为定量定义提供理论指导。大孔隙优先流效应不仅取决于大孔隙尺寸,还与孔隙结构有关。Bouma 认为,除孔隙尺寸外,孔隙结构,包括连续性和连通度也是影响定义孔隙的至关重要的因素^[61]。目前,大孔隙直接定量定义仅考虑大孔隙等效圆柱直径,是在二维平面尺度上定义大孔隙,没有考虑大孔隙三维结构特征。大孔隙间接定量定义法将大孔隙网络视为一个“黑箱”,测量与大孔隙结构有关的物理量来定义大孔隙,这种定义方法不便宜大孔隙流模型构建和大孔隙水动力效应研究。因此,以大孔隙定性定义为理论指导,基于大孔隙直接定量定义,综合考虑大孔隙三维几何形态和三维尺寸是未来大孔隙定义方法研究的发展方向。如考虑大孔隙横截面的扁平率,将裂缝排除于大孔隙范围。

2 植被发育斜坡大孔隙特征

根系通道、动物洞穴及通道、裂缝、管道和团聚体间大孔隙广泛存在于植被发育斜坡非饱和带中。目前对大孔隙特征研究主要集中于大孔隙等效直径和穿透深度,应将大孔隙网络视为一个三维网络结构系统,深入研究大孔隙通道的连续性、连通性、弯曲度、分枝数和大孔隙横截面形状变化特征。同时应加强研究大孔隙时效稳定机制。

2.1 大孔隙类型与控制因素

土壤固有性质,如颗粒尺寸分布、矿物学特征和 pH 值等和外界因素,如气候、生态系统等综合影响大孔隙形成过程和性质。因此,辨识大孔隙类型及对应的主要控制因素是很困难的。但研究该问题对推动大孔隙形成机理研究具有重要的理论意义。虽然本文不赞同将裂缝列入大孔隙范围,但在下文还是将其一起讨论。

2.1.1 根系通道与植被

在植被发育斜坡中,植被是控制大孔隙形成、规模及寿命的决定性因素。很多学者为查明植被对根系通道的影响做了很大努力。

在美国俄亥俄州东南部阔叶林区,每 4 046.86 m²(原文为英亩)有超过 4 000 个垂直根孔,尽管大部分大孔隙被部分填充,相比而言还是具有较高渗透性并组成相互联系通道网络自由运移森林土壤中的水^[62]。石辉等利用水分穿透曲线和 Poiseuille 方程研究了岷江上游不同植被下土壤大孔隙状况^[32]。根系腐烂和孔隙扩展在 M8 流域形成连通性很好的管道网络,沿一阶河岸观测坑表面,通道出口直径在 3~100 mm 间变化^[3]。图 1 为某 50 a 树龄的桉树、小叶朴、侧柏及刺槐混交林斜坡中由腐烂刺槐直根形成的大孔隙。整个根系通道上粗下细,根皮残留完整,仅在个别部位见有直径为 2~10 mm 的圆形孔洞。

草本植物根系也会产生相当尺寸的大孔隙系统。Holden 报道羊胡子草在大孔隙的形成中起到重要作用,尤其是直径 > 1 mm 的大孔隙^[20]。图 2 是南昆铁路八渡车站滑坡坡体上层砂粘土微结构的扫描电子显微镜图片。样品取自坡体后部草本植物发育和高度在 1 m 以内的灌木从山梁之间,取样深度 81 cm。从图 2 可以看出,根系已经腐烂消失形成通畅的管状通道,通道直径大约有 110 μm,在通

道侧壁见清晰的根皮组织印模。

根系通道的形成受植被种类和生长情况的影响。不同植被有不同的根系系统,活着的植被根系和落叶与上层土壤相互作用影响根系通道,因此,当植被腐烂后留下不同类型的根系通道。阔叶林植被比针叶林植被更有利于根系通道的形成^[30]。McDonnell 研究认为粗根垂直穿过浅层矿质土,但不能穿透下伏砾石,之后,根系沿砾石表面侧向延伸数米^[3,15]。Watson 报道 25 a 树龄的辐射松最大侧向延伸长度高达 10.4 m^[3]。Mosley 认为根系按这种方式生长,根系腐烂后,淋溶作用扩大根系网络形成根系通道^[49]。一些植被根系遗留很厚的、强烈抵抗腐蚀的树皮,在树皮内形成根系通道,另一些遗留鳞状树皮,这些树皮很容易分开^[17]。根系通道既与活的根系又与腐烂根系有关,很难辨识根系通道与哪个有关,因为新的根系有尾随老根系生长的趋势。根系通道在森林土壤中至少占 35%,但随着深度增加,根系通道有可能快速减少^[17]。根系通道内腔首先被来自于腐烂根系的有机物填充或部分填充,此外,来自于枯枝落叶层的有机残余物也可能填充根系通道。植被有利于大孔隙形成,而孔隙迫使根系穿透土壤,为根系生长提供适合条件。因此植被与根系通道存在相互促进作用。

2.1.2 动物洞穴、通道与土壤动物区系

在植被发育斜坡中,来自根系、枯枝落叶及真菌的腐殖化有机质是打洞土体动物的食物来源。因此,土壤动物区系形成的洞穴和通道也是植被发育斜坡大孔隙的主要组成。自从早期 Ehlers^[63]研究了蚯蚓、蚂蚁和白蚁分别对大孔隙的影响后,土栖大型动物区系对大孔隙的影响是科学家越来越感兴趣的课题。

蚯蚓是大部分森林斜坡土壤区最显而易见的动物群体,主要活动在土壤表层,是造成该层土壤多孔性的主要原因。在潮湿气候区,蚯蚓活动常产生土壤大孔隙,尤其是 anecic 蚯蚓物种的 *Lumbricus terrestris* 蚯蚓^[64]。在美国威斯康星洲所有的森林 Bell 粉砂壤土剖面,不顾中间层的抵抗,在 1 m 左右(原文 3~3.5 英尺)的底心层中仍可发现蚯蚓及其洞穴^[17]。在上文所述的侧柏-桉树-刺槐-小叶朴混交林中,蚯蚓形成的通道密度约 50~100 个/m²。此外,蚂蚁和白蚁形成的大孔隙也是很常见的。在尼日尔首都尼亚美东边 70 km 的 Banizoumbou 村庄附近的非耕地土中,每平方米有白蚁活动造成的孔洞数目高达 123 ± 9.8 个^[13]。在很多森林斜坡中,

小的洞穴动物也是很丰富的,对土壤多孔性有显著贡献。地松鼠、鼯鼠、小鼠、树鼯、囊地鼠和袋熊等洞穴动物常常产生相互联系的迷宫式通道。Hamilton^[17]报道在美国东北部许多森林区,表层土壤松散,这在一定程度上是由小鼠、树鼯造成的大量洞穴引起的。Eadie^[17]在一个新挖开的 149.96 m(原文 492 英尺)长路堑边坡中发现 220 个由鼯鼠造成的表面洞穴,平均 0.67 m(原文 2.2 英尺)就有一个,这些洞穴组成一个不规则的分枝网络。

然而,土栖动物在觅食和排粪过程中可能导致大孔隙尺寸和连通度降低^[20]。土栖动物对大孔隙形成过程的影响取决于动物种类和土壤情况。不同两栖动物有不同的动物洞穴和通道。土壤情况影响土壤动物区系的组成,进而影响动物洞穴和通道的形成。如蚯蚓选择低酸性到中性土壤,完全避开碱性土壤。综上所述,土壤动物区系对动物洞穴和通道形成的影响是复杂的,我们并没真正理解觅食孔洞的形成机理。

2.1.3 裂缝、管道与物理、化学作用

冻融循环和干湿交替均有利于土壤裂纹和裂缝的形成,且冻融循环的影响更显著,形成的裂缝更大,裂缝深度更深。Anderson 等报道,1976 年极端夏季干旱之后,在很多地区的粘土路堤边坡存在大规模收缩裂缝^[7]。在斜坡土壤中,季节变化改变土壤水分情况,收缩-膨胀循环这种物理过程形成不等规模的裂缝网络。然而,裂缝形成对这些物理、化学作用的响应敏感性取决于土质情况,如有机物、粘土含量和 pH 等。粘土含量越高,裂缝更易形成。在植被发育斜坡区,上层矿质土富含有机物。在某些情况下,矿质土表面发展疏水性,增加土壤干裂化的敏感性。

石砾广泛分布于土壤中,如西欧地区面积的 30% 和地中海地区的 60% 是石砾土壤。在中国的西南地区的云南、贵州和四川等省,石砾也是广泛存在于土壤中^[30]。土壤中富含石砾是植被发育斜坡的一个显著特征^[3,6,27-33]。石砾含量主要影响较粗的大孔隙,而对较小的孔隙影响较小^[30]。在富含石砾的植被发育斜坡中,存在前文所述的一些类型的大孔隙,在强降雨条件下,亚表层水流快速流动。由于亚表层水流的磨蚀作用,水流动施加于单个土颗粒的拖曳力(drag force)超过土壤结构能力(the structural competence)^[36]。因此,亚表层水流带走石砾土壤中的细小颗粒,形成土壤管道。这种形成

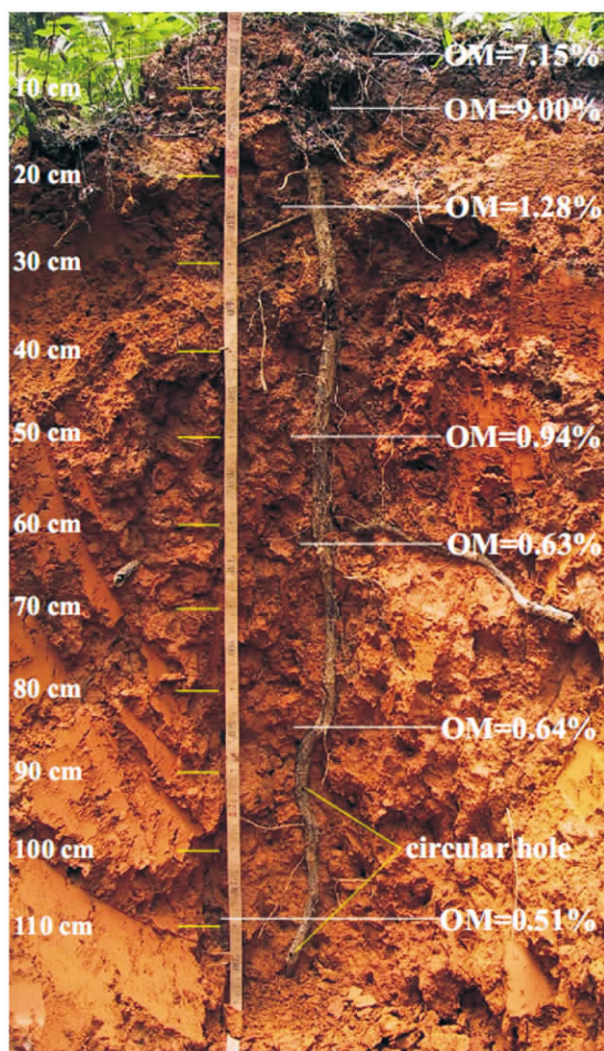


图1 腐烂的刺槐直根及侧根形成的大孔隙

Fig.1 Macropores formed by the decay of Robinias' taproot and lateral roots

过程通常仅发生在有很高渗透性、无粘性的地质体，并且要有很高的水力梯度条件下。

2.1.4 团聚体间大孔隙与有机物

表层土常由多孔团聚体组成，其间由团聚体间大孔隙隔开，团聚体间结构性孔隙的尺寸远远大于单体颗粒的粒间孔隙尺寸^[2]。根系分泌及枯枝落物降解产生的有机物是团聚体形成的物质基础。

有机物(OM, organic matter)可通过多种方式与土体颗粒结合形成团聚体。有机物种类之一的真菌菌丝能够直接网捕细小颗粒形成稳定团聚体。图3是一组由根系、菌丝和枯枝落物胶结形成的团聚体的直观照片。其中a、b来自四川康定某海拔4300 m花岗岩坡积物斜坡区；c、d取自于图1中有机物为7.15%的位置，e、f取自八渡车站滑坡表层土体。

此外，有机物还通过键合方式与土体颗粒结合形成团聚体，而且由多价阳离子键合粘土矿物和细根、菌丝等有机物形成的团聚体更稳定。综上所述，有机物是团聚体形成的关键物质基础。

除以上讨论的影响因素外，斜坡土壤大孔隙还受坡位、坡度、坡形和坡向等地形因素的影响。在此不再深入讨论。

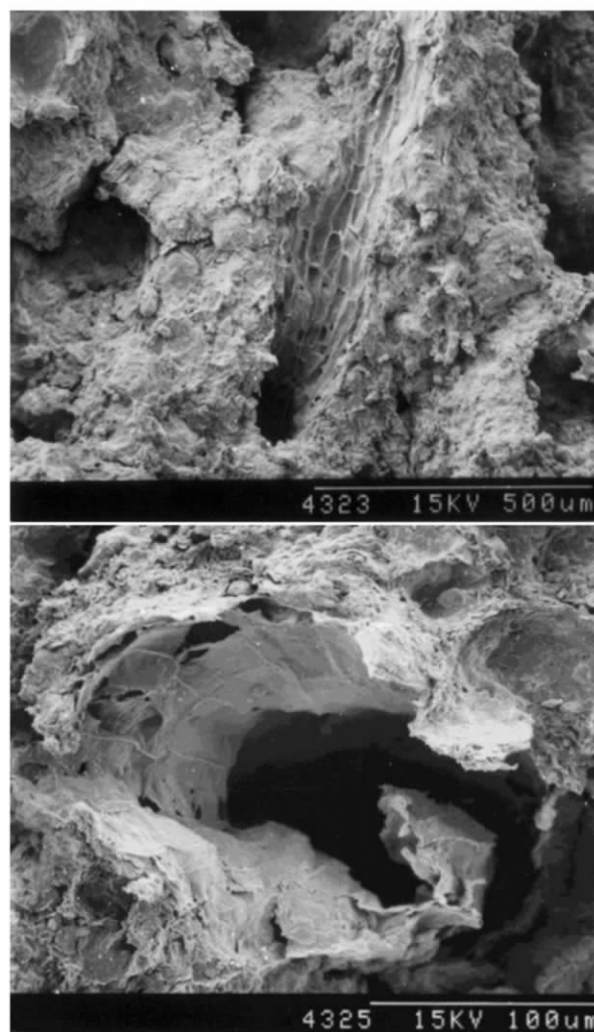


图2 南昆铁路贵州册亨县八渡滑坡81 cm深度土体中的根系通道

Fig.2 The root channels in the vadose zone of Badu landslide at a depth of 81 cm on Nanning - Kunming railway, Ceheng County, Guizhou Province

2.2 大孔隙三维特征

对大孔隙三维特征的理解有助于改进水流模型和对植被发育斜坡地下水对降雨响应的理解。因为水流路径、孔隙尺寸、弯曲度和连续性将影响大孔隙水停流时间和优先流相互作用面积。虽然获得有关

大孔隙三维几何形态的参数是困难的,但是这些问题的研究具有重要的基础意义。

从形态来看,大孔隙可以分为3种形态类型:1. 由洞穴动物和腐烂植物根系形成的圆柱形孔隙;2. 由干湿交替、冻融循环等物理过程形成的裂缝;3. 由耕作和动物产生的团聚体间不规则孔隙^[10]。Green 和 Askew 描述由蚂蚁活动产生的直径在2~50 mm 之间的大孔隙网络至少到地面以下1 m; Ehlers 报道,在耕地和非耕地土中,蚯蚓通道从地表向下到0.6 m 范围内逐渐增加^[36]。在长白山北坡,由土壤动物运动形成的大孔隙数量较多,直径多为2~4 mm^[27]。在六盘山研究区,典型植被下土壤大孔隙半径多在0.4~2.3 mm,加权平均半径为0.57~1.21 mm,平均值为0.89 mm,大孔隙密度变化范围为57~1 117 个/dm²,平均408 个/dm²;半径>1.4 mm 的大孔隙密度较小,其数量仅占大孔隙总数的6.86%^[31]。岷江上游山区几种主要植被下土壤大孔隙半径主要集中于0.3~2.4 mm,平均在0.48~1.17 mm,均值为0.84 mm,均方差为0.226^[32]。在重庆四面山典型亚热带阔叶林土壤中,大孔隙半径多在0.3~3.0 mm,大孔隙率为6.3%~10.5%,随着土壤深度的增加,大孔隙呈现出聚集态的分布特征^[33]。

从目前的研究情况来看,对大孔隙形态的既有

研究主要集中于大孔隙等效孔径和穿透深度。影响大孔隙形成的因素众多,且这些因素相互影响,共同作用,因此,研究结果存在差异。植被发育斜坡大孔隙三维特征还没有得到充分研究。

2.3 大孔隙时效稳定

植被根系进入土壤和根系扩展挤压其附近的土体,局部改变土壤孔隙率和密度。因此,在根系-土体界面附近的土体孔隙比比距根系较远距离的土体孔隙比小^[17]。这是大孔隙时效稳定的基础。植被发育斜坡大孔隙时效稳定是对土壤固有属性和气候变化的响应。

枯枝落叶层对大孔隙时效稳定具有积极功效,但大孔隙域与周围基质域水量交换对大孔隙时效稳定是不利的。枯枝落叶是大孔隙结构的保护屏障,可使其保持稳定并不断发展。具有动能和势能的雨滴撞击地面,动能和势能全部转换成动能,对土体表面有侵蚀效应,导致大孔隙堵塞或密封。当有枯枝落叶覆盖时,雨滴不能直接作用于土壤表面,且松散的枯枝落叶层具有弹性,对雨滴能量转换具有缓冲作用,遏制雨滴对大孔隙结构的侵蚀破坏。此外,枯枝落叶对地表径流有拦截效应,使地表径流快速流经大孔隙,减小对土壤结构的破坏。

由于大孔隙域与基质域的水文学差异,两者之间存在水力梯度。因此,大孔隙可能由于土壤基质

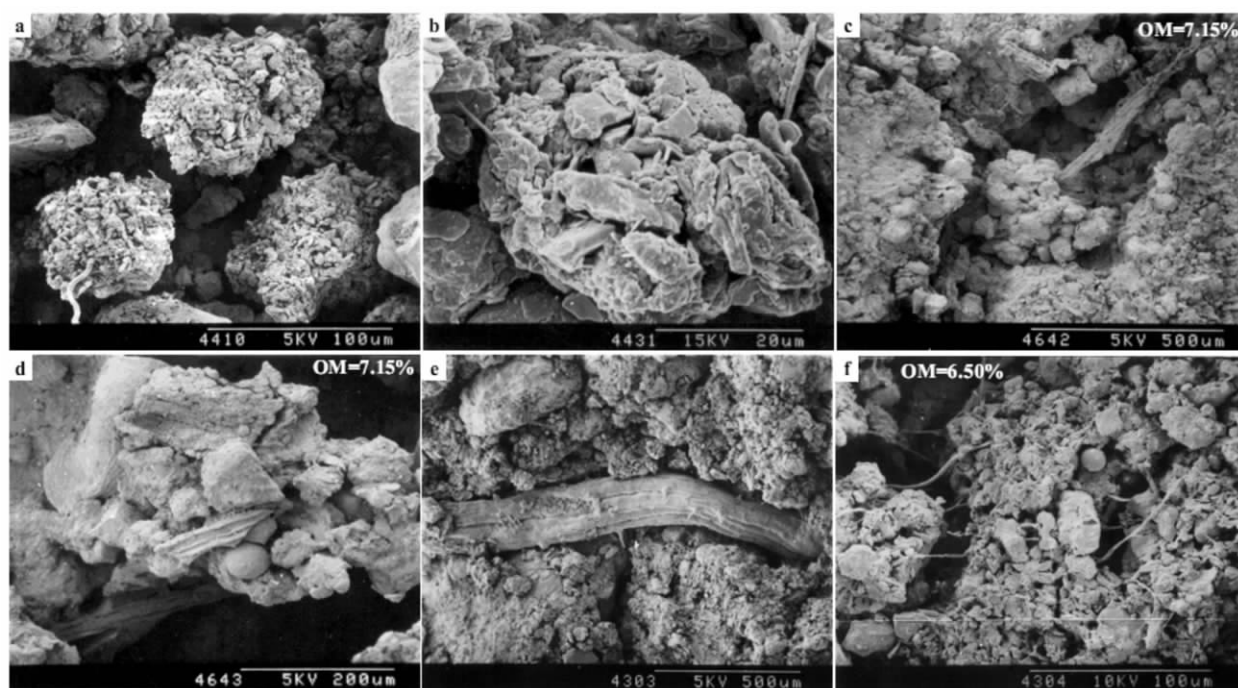


图3 细小根系及菌丝胶结土体颗粒形成水稳定团聚体的 SEM 图片

Fig.3 Scanning electronic micrographs of fine roots and hyphae binding soil particles into water-stable aggregates

的渗透力产生崩塌^[10]。渗流力对大孔隙稳定的影响受很多因素的影响,如土壤基质性质、大孔隙性质和大孔隙-基质界面等。

3 讨论

综上所述,植被发育斜坡非饱和带大孔隙研究已经得到重视,并取得一些成果。但仍存在诸多不足之处,有很多问题有待深入详细研究。

1. 目前关于大孔隙的定义,无论在定性定义方面还是定量定义方面,都存在很大差异,有的甚至相互矛盾,尤其在定量定义方面。我们列出2个限制大孔隙定义统一化的原因:

1) 不同测量方法测量得到的大孔隙尺寸,在很大程度上取决于测量方法。对相同的样品,用X线体层摄影术测量得到的大孔隙长度是用计算机辅助摄影术测量得到的1.5到3倍^[25]。既有测量大孔隙几何参数的方法可分为两类:即非可视化方法和可视化方法。非可视化方法只能直接获得几何参数,而不能得到有关几何形状信息的图像,如张力渗透仪法和水分穿透曲线法,只能获得大孔隙的等效圆形直径。可视化方法通过获得大孔隙真实几何形状图像,并用图像分析获得几何参数。如染色法、二维扫描和三维扫描法。应用二维扫描法测量大孔隙尺寸时,其扫描的平面不一定垂直于大孔隙管道轴线,测量结果必然大于真实值。

2) 大孔隙密度的时间和空间变异性很强。大型动物区系活动、生态系统和气候环境以不等时间规模周期变化。作为对外界环境周期变化的响应,大孔隙密度也随着周期变化。蚂蚁挖洞开口密度通常很低,每平方米有1~3个^[13]。因此,很多小尺度试验区有很大变异性。白蚁每个晚上觅食活动范围在5~20 m²^[13],张力渗透试验区面积小于0.2 m²,不到这个总面积的1%。因此,尽管很粗略,但是必须在感兴趣范围估算大孔隙密度,实验应该报道大孔隙变异的特征范围。

发展并提出一种公认的三维可视化测量大孔隙结构的方法,综合考虑大孔隙结合形态和三维尺寸是未来大孔隙定义研究的发展方向。

2. 在植被发育斜坡非饱和带大孔隙类型和控制因素方面,如前文所述,植被发育斜坡非饱和带土体中不同类型大孔隙往往是彼此纠缠、交织在一起的,但多数情况下还是能够将他们从统一网络系统中分

离出来并进行单独评价的。

在森林土壤中,优先流主要沿着根系和结构空隙流动^[65]。不同植被根系网络结构对根系通道网络系统形成的约束机制是复杂的。根系对周围土体的劈裂作用和挤压有助于根系通道、裂缝的形成和增强大孔隙稳定性,根系腐烂等生物化学作用是根系通道形成的基础。对大孔隙壁及其临近土体的物质组成、矿物组成、化学组分和微观结构等的空间分布特征等进行精细描述,为大孔隙形成的关键过程辨识提供依据。

3. 受研究方法的限制,对大孔隙形态的既有研究主要集中于大孔隙等效直径和穿透深度。从图1可以看出,刺槐主根不是铅垂穿透土体,而是弯曲向下穿过土体。除主根外,还有近似水平伸展的侧根也会形成根系通道。从微观尺度来看,孔隙通道也是弯曲的(图4)。从图2可以看出,根系形成的大孔隙横截面是非规则形状。

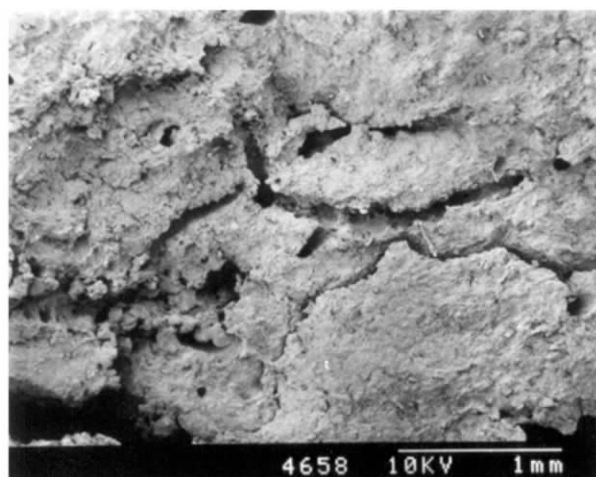


图4 图1所示100 cm处的根系通道

Fig. 4 Root channels in Fig. 1 at the depth of 100 cm

完整描述大孔隙结构需要几何学和拓扑信息。从几何学方面研究大孔隙需要引入“网络”的概念,将大孔隙网络视为一个三维网络系统。研究大孔隙通道的连续性、弯曲度、分枝数和大孔隙横截面形状变化特征。弯曲度是孔隙结构中具有重要意义的三维参数,定义为多孔介质有效平均路径与沿孔隙方向最短距离的比值。弯曲度是一个大于1的无量纲因数,表达弯曲孔隙路径的复杂度。连通性也用于描述孔隙弯曲度。分枝数描述大孔隙网络系统的复杂程度。从数密度、配位数、连通度和类等方面研究

大孔隙几何形态的拓扑特性。

4. 大孔隙时效稳定是对土壤固有属性和外界环境变化的响应。枯枝落叶对大孔隙时效稳定的积极功效是显著的。但有很多微观机理有待深入研究,如来自根系和枯枝落叶的有机质对裂缝、根孔、动物通道和结构性孔隙稳定的控制机理;根系生长和腐烂对大孔隙稳定性影响的力学-生物化学机制;大孔隙壁稳定对粘土矿物的敏感性研究等。

在前文涉及研究内容得到充分研究的基础上,应加强大孔隙流动力学行为和基质流对大孔隙壁应力环境的影响,讨论他们激发大孔隙壁失稳的机理。

4 结论

在气候温湿的滑坡灾害易发区,根系通道、动物通道、干裂缝、管道及团聚体间的结构性孔隙等大孔隙普遍存在于斜坡非饱和带中。既有研究提出了很多大孔隙界定的方案,但都存在很大差异,有的甚至相互矛盾,尤其在定量定义方面。不同测量方法的差异和大孔隙密度时空变异性是目前大孔隙定义缺乏统一性的原因。仅孔隙尺寸不能作为一个充分标准来定义大孔隙,必须考虑大孔隙三维几何形态,如大孔隙弯曲度、连通性和截面扁平率等。植被、土壤动物区系、物理-化学作用和有机物等控制因素决定植被发育斜坡大孔隙成型和类型,其中根系通道、裂缝和结构性孔隙对优先流具有显著贡献。对大孔隙三维特征研究必须引入“网络”的概念,视大孔隙结构为一个三维网络系统,从几何学和拓扑学方面进一步研究。大孔隙时效稳定是对土壤固有属性和外界环境变化的响应。枯枝落叶层对大孔隙时效稳定具有积极功效,但大孔隙域与周围基质域水量交换对大孔隙时效稳定是不利的。

参考文献(References)

- [1] 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 [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]
- [2] Xu Zemin. Vegetation and macropores in vadose zone of hill slopes [J]. *Earth Science Frontiers* 2007, 14(6): 134-142 [徐则民. 植被与斜坡非饱和带大孔隙 [J]. *地学前缘* 2007, 14(6): 134-142]
- [3] McDonnell J J. A rationale for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment [J]. *Water Resources research*, 1990, 26(11): 2821-2832
- [4] Gattinoni P, Francani V. A tool for modeling slope instability triggered by piping [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 2009, 56: 471-477
- [5] Matsushi Y, Hattanji T, Matsukura Y. Mechanisms of shallow landslides on soil-mantled hillslopes with permeable and impermeable bedrocks in the Boso peninsula, Japan [J]. *Geomorphology* 2006, 76: 92-108
- [6] Brand E W, Dale M J, Nash J M. Soil pipes and slope stability in Hong Kong [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology, London*, 1986, 19: 301-303
- [7] Anderson M G, Hubbard M G, Kneale P E. The influence of shrinkage cracks on pore-water pressures within a clay embankment [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology, London*, 1982, 15: 6-14
- [8] Ou Z Q, Jia L Q, Jin H Y, et al. Formation of soil macropores and preferential migration of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) in soils [J]. *Chemosphere*, 1999, 38(9): 1985-1996
- [9] Cullum R F. Macropore flow estimations under no-till and till systems [J]. *Catena* 2009, 78: 87-91
- [10] Lamandé M, Labouriau R, Holmstrup M, et al. Density of macropores as related to soil and earthworm community parameters in cultivated grasslands [J]. *Geoderma* 2011, 162: 319-326
- [11] Tippkötter R, Eickhorst T, Taubner H, et al. Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography (μ CT) [J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 105: 12-20
- [12] Mooney S J. Three-dimensional visualization and quantification of soil macroporosity and water flow patterns using computed tomography [J]. *Soil Use and Management* 2002, 18: 142-251
- [13] Léonard J, Perrier E, Rajot J L. Biological macropores effect on runoff and infiltration: a combined experimental and modelling approach [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment* 2004, 104: 277-285
- [14] Noguchi S, Nik A R, Kasran B, et al. Soil physical properties and preferential flow pathways in tropical rain forest, Bukit Tarek, Peninsular Malaysia [J]. *Journal of Forest Research*, 1997, 2(2): 115-120
- [15] McDonnell J J. The influence of macropores on debris flow initiation [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology, London*, 1990, 23: 325-331
- [16] Newman BD, Campbell AR, Wilcox BP. Lateral subsurface flow pathways in a semiarid ponderosa pine hillslope [J]. *Water Resources research*, 1998, 34(12): 3485-3496
- [17] Aubertin G M. Nature and extent of macropores in forest soils and their influence on subsurface water movement [R]. *Forst Service, U. S. Department of Agriculture*, 1971
- [18] Liu F J, Bales R C, Conklin M H, et al. Streamflow generation from snowmelt in semi-arid, seasonally snow-covered, forested catchments, Valles Caldera, New Mexico [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44: 1-13
- [19] Watsib K W, Luxmoore R J. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer [J]. *Soil Science Socie-*

- ty of America Journal ,1986 ,50: 578 – 582
- [20] Holden J. Flow through macropores of different size classes in blanket peat [J]. Journal of Hydrology ,2009 ,364: 342 – 348
- [21] Harvey J W ,Nuttle W K. Fluxes of water and solute in a coastal wetland sediment. 2. effect of macropores on solute exchange with surface [J]. Journal of Hydrology ,1995 ,164: 109 – 125
- [22] Casey R E ,Taylor M D ,Klaine S J. Localization of denitrification activity in macropores of a riparian wetland [J]. Soil Biology & Biochemistry ,2004 ,36: 563 – 569
- [23] Riise G. Transport of NOM and trace metals through macropores in the lake skjervatjern catchment [J]. Environment International ,1999 ,25(2/3) : 325 – 334
- [24] Devitt D A ,Smith S D. Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave desert ecosystem [J]. Journal of Arid Environments ,2002 ,50: 99 – 108
- [25] Pierret A ,Capowiez Y ,Belzunces L ,et al. 3D reconstruction and quantification of macropores using X – ray computed tomography and image analysis [J]. Geoderma ,2002 ,106: 247 – 271
- [26] Peyton R L ,Haefner B A ,Anderson S H ,et al. Applying X – ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores [J]. Geoderma ,1992 ,53(3 – 4) : 329 – 340
- [27] Li Weili ,Jin Changjie ,Wang Anzhi ,et al. Characteristics of macropores in two forest soils on northern slope of Changbai Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology ,2007 ,18(6) : 1213 – 1218 [李伟莉 ,金昌杰 ,王安志 ,裴铁璠 ,关德新 ,等. 长白山北坡两种森林土壤的大孔隙特征 [J]. 应用生态学报 ,2007 ,18(6) : 1213 – 1218]
- [28] 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 [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]
- [29] Shi Zhongjie ,Wang Yanhui ,Xu Lihong ,et al. Effect of rock fragments on the formation of soil macroporosity of typical vegetation in Liupan Mountains of Westnorth ,China [J]. Journal of Mountain Science ,2007 ,25(5) : 541 – 547 [时忠杰 ,王彦辉 ,徐丽宏 ,等. 六盘山森林土壤的石砾对土壤大孔隙特征及出流速率的影响 [J]. 生态学报 ,2008 ,25(10) : 4929 – 4939]
- [30] Shi Zhongjie ,Wang Yanhui ,Xiong Wei ,et al. The influence of rock fragments on the characteristics of macropores and water effluent of forest soils in the Liupan Mountains ,Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica ,2008 ,25(10) : 4929 – 4939 [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]
- [31] Zhi Zhongjie ,Wang Yanhui ,Xu Lihong ,et al. Soil macropore characteristics under typical vegetations in Liupan Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology ,2007 ,18(12) : 2675 – 2680 [时忠杰 ,王彦辉 ,徐丽宏 ,等. 六盘山典型植被下土壤大孔隙特征 [J]. 应用生态学报 ,2007 ,18(12) : 2675 – 2680]
- [32] Shi Hui ,Chen Fengqing ,Liu Shirong. Macropores properties of forest soil and its influence on water effluent in the upper reaches of Minjiang River [J]. Acta Ecologica Sinica ,2005 ,25(3) : 507 – 512 [石辉 ,成凤琴 ,刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分出流速率的影响 [J]. 生态学报 ,2005 ,25(3) : 507 – 512]
- [33] Wang Wei ,Zhang Hongjiang ,Cheng Jinhua ,et al. Macropore characteristics and its relationships with the preferential flow in broad-leaved forest soils of Simian Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology ,2010 ,21(5) : 1217 – 1222 [王伟 ,张洪江 ,程金花 ,等. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流的关系 [J]. 应用生态学报 ,2010 ,21(5) : 1217 – 1223]
- [34] Weiler M. An infiltration model based on flow variability in macropores: development ,sensitivity analysis and applications [J]. Journal of Hydrology ,2005 ,310: 294 – 315
- [35] Perret J ,Prasher S O ,Kantzas A ,et al. Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores [J]. Soil Science Society of America Journal ,1999 ,63: 1530 – 1543
- [36] Beven K ,Germann P. Macropores and water flow in soils [J]. Water Resources ,1982 ,18(5) : 1311 – 1325
- [37] Buttle J M ,Leigh D G. The influence of artificial macropores on water and solute transport in laboratory soil columns [J]. Journal of Hydrology ,1997 ,17: 290 – 314
- [38] Christiansen J S ,Thorsen M ,Clausen T ,et al. Modelling of macropore flow and transport processes at catchment scale [J]. Journal of hydrology ,2004 ,299: 136 – 158
- [39] Skopp J. Comment on micro – meso – and macroporosity of soil [J]. Soil Science Society of America Journal ,1981 ,45: 1246.
- [40] Greco R. Preferential flow in macroporous swelling soil with internal catchment: model development and applications [J]. Journal of Hydrology ,2002 ,269: 150 – 168
- [41] Nelson W R ,Baver L D. Movement of water through soils in relation to the nature of the pores [J]. Soil Science Society of America Journal ,1940 ,5(c) : 69 – 75
- [42] Jongerius ,A. Morphologic investigation of the soil structure. Me-ded. Stricht. Bodemkartering. Bodem Stud. Wageningen ,the Netherlands. 1957
- [43] Marshall T J. Relations between water and soil [R]. Tech Commun No. 50 ,Commonwealth Bureau of Soils Harpenden ,Commonwealth Agricultural Bureaux ,Farnham Royal. 1959
- [44] Johnson W M ,McCelland J E ,McCaleb S B ,et al. Classification and description of soil pores [J]. Soil Science ,1960 ,89(6) : 319 – 321
- [45] Brewer R. Fabric and mineral analysis of soils [M]. New York: Wiley ,1964
- [46] McDonald P M. Disposition of soil moisture held in temporary storage in large pores [J]. Soil Science ,1967 ,103(2) : 139 – 143
- [47] Russell E W. Soil conditions and plant growth (10th. ed.) [M]. London: Longmans ,1973
- [48] McIntyre D S. Pore space and aeration determinations. p67 – 74 in Loveday J. Methods for analysis of irrigated Soils [M]. Farnham Royal: Commonwealth Agricultural Bureaux ,1974
- [49] Mosley M P. Streamflow generation in a forested watershed ,New Zealand [J]. Water Resources Research ,1979 ,15(4) : 795 – 806

- [50] Ranken D W. Hydrologic properties of soil and subsoil on a steep forested slope [Masters Thesis]. Corvallis: Oregon State University, 1974
- [51] Greenland D J. Soil damage by intensive arable cultivation: Temporary or permanent? [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 1977, 281: 193 – 208
- [52] Bouma J, Jongerius A, Boersma O, et al. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(5): 945 – 950
- [53] Bullock P, Thomasson A J. Rothamsted studies of soil structure analysis and comparison with data from water retention measurements [J]. Soil Science, 1979, 30(3): 391 – 413
- [54] Reeve M J, Hall D G, Bullock P. The effect of soil composition and environmental factors on shrinkage of some clayey British soils [J]. Soil Science, 1980, 31(3): 429 – 442
- [55] Beven K. Micro, meso, macroporosity and channeling flow phenomena in soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45: 1245
- [56] Luxmoore R J. Micro – meso – and macroporosity of soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45: 671 – 672
- [57] Seven K, Germann. Water flow in soil macropores II, A combined flow model [J]. Soil Science, 1981, 32(1): 15 – 29
- [58] Luxmoore R J, Jardine P M, Wilson G V, et al. Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope [J]. Geoderma, 1990, 46: 139 – 154
- [59] Carey S K, Quinton W L, Goeller N T. Field and laboratory estimates of pore size properties and hydraulic characteristics for subarctic organic soils [J]. Hydrological Processes, 2007, 21: 2560 – 2571
- [60] Bear J. Dynamics of fluids in porous media [M]. New York: American Elsevier Publishing Company, Inc., 1972
- [61] Bouma J. Soil morphology and preferential flow along macropores [J]. Agricultural Water Management, 1981, 3: 235 – 250
- [62] Gaiser R N. Root channels and roots in forest soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1952, 16(1): 62 – 65
- [63] Ehlers W. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. Soil Science, 1975, 119(3): 242 – 249
- [64] Langmaack M, Schrader S, Rapp – Bernhardt U, et al. Quantitative analysis of earthworm burrow systems with respect to biological soil – structure regeneration after soil compaction [J]. Biol Fertil Soils, 1999, 28: 219 – 229
- [65] Frank Hagedorn, Maya Bundt. The age of preferential flow paths [J]. Geoderma, 2002, 108: 119 – 132

Macropores in Vadose Zone of Well Vegetated Slopes

ZHANG Jiaming, XU Zemin, PEI Ying

(Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In warm and humid landslide prone area, root channels, faunal tunnels, shrinkage cracks, pipes and inter aggregate porosity are common in vadose zones of hillslopes. By using microscopic observation, chemical analysis and field experiment method, combining the existing research achievements in relative fields, the definitions of macropores, the types of macropores and controlling factors, the three dimensional spatial structure of macropores and the temporal stability of macropores in well vegetated slope were analyzed. The differences between different measurement methods and the temporal and spatial variability of macropores density are causes of no consensus for the definition of macropores. Macropores size alone is not a sufficient criterion for the definition of a macropore, and then three dimensional geometry morphology of macropores must be taken into consideration. The formation and the type of macropores are controlled by several factors. Root channels, shrinkage cracks and inter aggregate porosity makes a significant contribution to preferential flow. The spatial structure of macropores needs to be further investigated from two aspects of three dimensional geometry and topology. Litters protect the soil beneath from rainfall impact and filter out the fine particles that may clog macropores, but water transfer between macropores domain and the surrounding soil matrix domain have negative effects. An indepth research of above questions is important for the improvement and development of preferential flow model of well vegetated slopes.

Key words: vadose zones of slopes; macropores; vegetation; definition; spatial network structure; temporal stability