

苏文豪,甘淑,赵文栋.昆明市呈贡区马卡山斜坡非饱和带土体大孔隙分类及影响因素[J].江苏农业科学,2019,47(2):254-257.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.02.062

昆明市呈贡区马卡山斜坡非饱和带土体 大孔隙分类及影响因素

苏文豪¹,甘淑^{1,2},赵文栋³

(1.昆明理工大学国土资源工程学院,云南昆明 650093; 2.云南省高校高原山地空间信息测绘技术应用工程中心,云南昆明 650093;
3.云南师范大学旅游与地理科学学院,云南昆明 650093)

摘要:斜坡非饱和土体中大孔隙决定着土体的渗透特征,从而在降雨条件下决定着斜坡土体对水分的吸收-渗透能力。研究通过现场试验手段(染色示踪试验),选择亚甲基蓝染色剂,以模拟喷洒降雨方式并开挖斜坡非饱和剖面观察染色剂染色情况,以期得到斜坡非饱和带土体大孔隙的类别及影响因素,从而对斜坡土体大孔隙的存在状态有一个系统的认识。试验结果表明,斜坡非饱和带土体中大孔隙分为植物根系及腐烂后形成的通道、裂隙通道、团聚体间的结构性孔隙、动物通道等4类,其中植被是大孔隙形成和演化的决定性因素,植被根系生长延伸、对土体的挤压、死亡腐烂等因素都会形成大孔隙,加上其细小的根系能网捕土体细颗粒而成结构性大孔隙,此外,植被的枯枝烂叶层的覆盖能为大孔隙的长久存在提供保护效应。

关键词:非饱和带;大孔隙;类型;影响因素

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)02-0254-04

在不同时期,对大孔隙研究的主要方向和出发点都不同。过去的几十年间,研究主要目的是为了保护地下水资源,研究方向集中于耕作土壤。近年来,由于气候变暖、森林斜坡灾害频发、生态环境突出等问题,众多学者逐渐将目光转向斜坡非饱和带土体大孔隙。相关研究指出,土壤水分在非饱和带土体中沿着一些优先途径集中流动而产生优先流的多种表现形式^[1],对于生态环境保护提供了研究思路。由于大孔隙具有一个重要特征是水流的快速流动,这能使斜坡大孔隙对斜坡区土壤的人渗产生巨大的影响,进而关系到坡面径流和坡体深层蓄水。当今生态科学研究中森林植被涵养水源的生态功能一直是许多科学家乃至人民群众关注的社会问题。森林涵养水源和调节径流的主要方式是产生壤中流,而大孔隙在这个过程中发挥着重要作用^[2]。

随着全球气候变暖趋势的加剧,气候温湿地区的滑坡灾害频发,伴随着极端降雨而发生的山区流域斜坡群发性失稳事件给中国及世界各地等多山国家的人民群众带来了巨大的

经济损失和人员伤亡。许多专家学者对其形成机制进行了研究。研究表明,斜坡发育非饱和带土体中的大孔隙能够在强降雨条件下产生大孔隙流或优先流,从而使降雨得到地下水的快速响应。这是斜坡群发性失稳事件发生的主要原因^[3]。其次,在强降雨的情况下,斜坡中广泛存在的大孔隙内会形成大孔隙流,导致斜坡土体基本上能够快速吸收渗透来自降雨过程的全部水量,这使得地下水的补给环境能够得到极大地优化,进而在不同程度上加快了地下水对降雨影响的响应,从而造成斜坡尾随降雨失稳的群发性失稳事件。

综上所述,对森林斜坡土体大孔隙的研究是当今社会中一个趋势和必经之路,开展斜坡土体大孔隙研究,可为森林斜坡灾害、生态环境保护提供理论决策依据。

1 大孔隙界定及测定方法

1.1 大孔隙界定

要想深入研究大孔隙的性质、功能和形态,必须对大孔隙进行准确的定义,这也是完善大孔隙研究体系过程中必要的理论基础和依据。然而大孔隙具有空间分布复杂性、形成的多因素性、几何形态多样性等特性,所以在现实研究中,很难对大孔隙进行严格定义。

依据不同的指标来对大孔隙进行定义^[4],根据毛管势定义大孔隙,认为大孔隙是可以传导表面滞水穿过土壤剖面管道流的大孔隙,将大孔隙的毛管势定义为 $>-300\text{ Pa}$,并根据

收稿日期:2017-09-30

基金项目:国家自然科学基金(编号:41561083);云南省自然科学基金(编号:2015FA016)。

作者简介:苏文豪(1993—),男,云南普洱人,硕士研究生,主要从事资源生态环境遥感研究。E-mail:893811315@qq.com。

通信作者:甘淑,博士,教授,主要从事资源遥感研究。E-mail:893811315@qq.com。

雅安:四川农业大学,2007。

[17]赵转军,南忠仁,王胜利,等. Cd/Zn 及 Cd/Zn/Ni 复合污染对胡萝卜生长吸收特征的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(4):642-647.

[18]武文飞,南忠仁,王胜利,等. 干旱区绿洲土壤 Cd-Zn 复合污染

对胡萝卜的影响及富集迁移规律[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2012,48(2):1-8,14.

[19]许中坚,吴灿辉,邱喜阳,等. 铅-锌-镉复合污染物在土壤-芥菜/油菜系统中的迁移及交互作用[J]. 水土保持学报,2007,21(6):1-6.

水的表面张力和毛管上升力方程计算出大孔隙的当量孔径为 $>1\text{ mm}$; 根据功能定义大孔隙, 可以提供优先水流路径的团聚体间根孔或动物通道、孔隙、土壤胀缩过程形成的裂隙; 根据水流动力定义大孔隙, 能传导非平衡管道水流的孔隙为大孔隙。以上述观点为背景基础, 国内有关学者也给出了大孔隙的概念^[5]: 不论孔隙大小、形状, 能够提供优先水流路径的任何孔隙都是大孔隙。石辉等认为, 土壤大孔隙可以从不同的方面定义, 因为没有有一个能够绝对标准地将土壤大孔隙和其他孔隙分开的方法^[6]。(1) 从大孔隙空间尺度方面看, 大孔隙孔径为 $0.03 \sim 3.00\text{ mm}$; (2) 大孔隙在排空大孔隙内全部水量时要施加的压力为 5 Pa ; (3) 大孔隙的土壤导水率大小为 $1 \sim 10\text{ mm/h}$ 。张家明等将众多学者的观点和既有的研究成果进行了综合考虑, 并且根据定义方法, 客观具体地将大孔隙定义从定性定义、定量定义 2 个方面进行阐述, 定量定义又分为间接定义和直接定义, 该定义方法具有客观性和普遍性^[3]。在定性定义方面, 指出大孔隙定义应该考虑大孔隙水力学效应, 严格定义大孔隙是指巨大的孔隙, 而由于“巨大”是个相对的概念, 这导致大孔隙的定义无法形成一致性。因此, 从定性定义的角度来说, 大孔隙存在模糊性无法避免。定量定义又分为直接定义和间接定义。直接定义这种定义方法直接明了, 主要是通过度量、观测大孔隙几何形态来直接定义大孔隙的。基于直接定义方法, 不同作者会将孔隙划分为不同的类型, 如大孔隙、中孔隙、微孔隙。间接定义是一种通过测量与大孔隙几何形态有关的参量来定义的。基于此方法, 张家明等认为, 孔隙水流过程不符合达西定律的非层流过程, 孔隙水流具有优先快速迁移的特征, 因此, 孔隙水与周围基质间的相互作用受到限制, 此类孔隙为大孔隙。

目前, 由于研究方法和研究目的的不同自然就对大孔隙划分范围方面存在分歧, 导致对大孔隙并未形成统一的界定。

1.2 大孔隙测定方法

邱琳等指出, 目前, 对大孔隙的测定有直接测定法和间接测定描述法, 而直接测定法更符合大孔隙的定义^[7]。直接测定法包括图像处理法、目测观测法、CT 扫描法等。在对各种试验方法的对比后发现, 各个方法都有其优缺点: CT 扫描法虽然可以观测土壤的三维结构且是一种非破坏性的测定技术, 但是使用此方法的费用较昂贵; 目测观测法虽然成本低, 但由于是利用人眼观测, 人类肉眼观察能力有限, 准确性较差。除上述方法外, 还有切片法、MRI (磁共振) 法、张力入渗仪法和水分穿透曲线法。石辉等利用水分穿透曲线法研究了岷江上游不同植被覆盖下土壤的大孔隙状况, 分析出了大孔隙的数目和半径范围^[6-7]。王彬俨等也采用了水分穿透曲线测定法, 结合染色示踪法对北京昌平区农地土壤大孔隙特征进行了研究, 得到了土壤大孔隙的分布特征^[8]。切片法具有能够获得较高分辨率的图像, 能够使测得的孔隙数量较准确, 但是其缺点是要以缩小研究区域为提高图像分辨率为代价, 结果缺乏代表性, 并不能真实地反映大孔隙数量。相对于切片法来说, 染色示踪法所获得的图像分辨率较低, 但是它能对更大区域进行研究, 并且相对来说此种方法更为省时省力。程竹华等在国内使用此方法于土壤中的优先流研究中^[9]。

染色示踪法是直接在野外或实验室将染色剂采用喷淋、浇灌等方式对土壤进行染色, 利用数码相机对染色土壤剖面

进行拍照, 对所获得的数字图像进行处理分析, 不仅可以对大孔隙流类型及分布进行辨析, 而且还可以直接查看分析大孔隙流径^[10]。染色示踪方法工艺简单, 染色剂相对其他现代技术的投入代价低、操作简单, 而且所用染色剂有鲜明的颜色, 能直观地显示出大孔隙特征等优点。

2 试验区概况及试验过程

2.1 试验区概况

昆明市呈贡区地处 $102^{\circ}45' \sim 102^{\circ}59'E$ 、 $24^{\circ}21' \sim 24^{\circ}45'N$ 之间, 其中丘陵面积占 33.1% , 山区面积占 49.5% , 坝区面积占 17.4% 。呈贡区属低纬度高原平坝地区, 地势总体上北高南低, 东高西低, 呈缓坡状, 平均海拔 $1\,950\text{ m}$ 。

选定的试验点位于昆明市呈贡区段家营村马卡山 (图 1), 距离呈贡大学城云南师范大学 4 km 。段家营试验区马卡山最高峰海拔 $2\,085\text{ m}$, 坡脚 (段家营) 海拔 $2\,002\text{ m}$, 坡高 83 m , 平均坡度 35° 。马卡山斜坡林区物种资源丰富, 有长势较好的天然森林植被, 且斜坡区林内生态环境受外界扰动较小。通过对试验区内草本植物的基盖度和植被覆盖度进行调查, 得到试验区草本植被基盖度为 1.14% , 植被覆盖度为 90% 。



图1 段家营试验区试验点分布

2.2 试验过程

本研究对呈贡区马卡山斜坡发育土体中大孔隙的研究采用染色示踪方法。在进行染色示踪试验之前, 试验点的选择要考虑多种因素, 坡度不宜过大, 一般在 $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$, 需要考虑地面的平整度和试验点与周围植被的距离关系, 避开植被根系对于开挖剖面及观测产生的影响。综合考虑以上因素, 对呈贡马卡山斜坡试验区进行实地考察后选择了 2 个试验点, 试验点选择见图 1。根据气象部门对降雨类型的划分标准, 确定各点模拟的特大暴雨 DJY1 雨强为 59 mm/h , 喷洒量为 250 L 、喷洒时间 250 min 、等效降雨 250 mm ; DJY2 点雨强为 43 mm/h , 喷洒量 150 L 、喷洒时间 200 min 、等效降雨 150 mm 。

在选定的 2 个试验区域沿规格为长宽各 1 m 的正方形区域四边开挖约 5 cm 宽、 20 cm 深的凹槽, 然后向凹槽内埋入用螺栓固定好的由木板组成的长 1 m 、宽 1 m 、高 0.25 m 的矩形框, 将矩形框内外侧紧临框壁 5 cm 部分的土体夯实, 然后在距木板约 0.2 m 区域开挖 1 个用于拍摄图像的凹槽 ($1.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 1\text{ m}$)。

前期准备工作做好之后, 将亚甲基蓝染色剂 (根据与其他染色剂的价格和染色效果进行对比, 最终选择亚甲基蓝) 配合工业乙醇充分溶解, 兑水配置 1.5 g/L 浓度的染色溶液,

用喷洒方式均匀喷洒在框定的土体内,喷洒时间和喷洒量等指标严格依照前面所提到的标准。待喷洒完染色溶液 15 h 后,顺着已挖好的凹槽在 2 个试验点分别开挖 4 个间距 25 cm 的剖面,最后用数码相机对破面进行拍照,在拍照过程中尽可能地保持相机和剖面处于一个水平面上。图像拍摄完成后,对其进行几何校正以纠正在拍摄时产生的变形,然后再进行图像假彩色合成,使染色区域相比于未染色区域突出地显示,便于观察。

3 结果与分析

3.1 斜坡非饱和带土体大孔隙类型

3.1.1 植被根系通道 处于生长过程中或者已经死亡的根系在土壤中所形成的孔道是植被根系通道。根孔的深度、数量和孔径的大小受根系的直径、体积、数量、伸长长短等因素的影响。官琦等研究结果,大孔隙数量随着土壤深度增加有明显的减少趋势^[11]。其中根系通道是土体中大孔隙的主要成分。植被根系活动形成的大孔隙主要是由于根系的生长、延伸而导致与土壤的穿插、挤压外围土体致使土体膨胀和裂化而产生,通过这种方式产生的通道对于水分的入渗过程有着重要的影响。其次,植被根系腐烂后,它所处的孔道是植被根系通道大孔隙产生的最主要因素。图 2-a 为试验区土体剖面拍摄的由植被根系腐烂后形成的根系通道,染色部分证明了根系植被根系的导水作用。另外根系腐烂后其皮表层粘于通道壁上,增强了大孔隙的稳固性。图 2-b 为植被根系通道的细节展示,由腐烂的植被根系产生的相当规模的连续孔隙和根系挤压产生的裂隙,成为水分快速传导的通道,而裂隙则加快了水分的入渗。

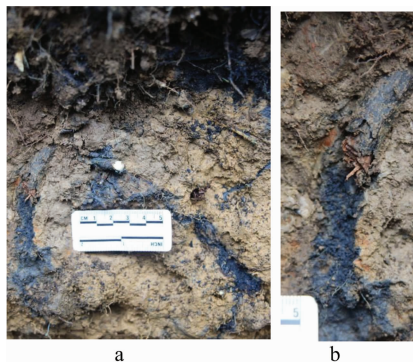


图2 植被根系通道

3.1.2 动物通道 动物通道产生的大孔隙和植被的发育有着密不可分的关系。动物要想在土体中获得生存,就需要具有相应的生存环境,植被枯枝落叶腐化和根系在腐烂之后,可以为土壤动物提供可供生存的有机质,一些尚未腐化的枯枝落叶则为动物通道提供了天然的保护伞。所以,动物通道可以在植被发育斜坡土体中形成较大的规模,大大提高了土体渗透性能。相关研究指出,土壤动物形成的大孔隙直径变化幅度一般在 1~50 mm 左右,基本是管状的。土壤动物主要是鼯鼠、蚯蚓、蚂蚁等,通过对土壤的翻动、挖掘过程而形成孔道。本试验在呈贡段家营的动物区系主要是拟黑多刺蚁和蚯蚓,图 3-a 为试验区垂直剖面上拍摄的蚯蚓活动形成的通道,图 3-b 为 DJY2 试验点处拟黑多刺蚁活动形成的通道,

呈椭圆状,直径多为 1~50 mm,主要分布于 30 cm 土体内,不同位置处的通道还彼此相互连通。

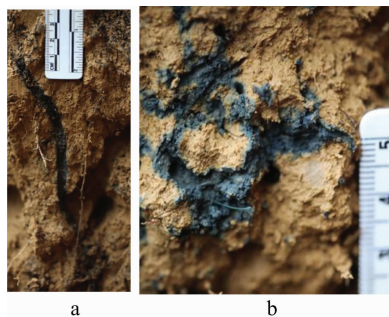


图3 动物通道

3.1.3 团聚体间结构性大孔隙 有机质是团聚体间结构性大孔隙形成的物质基础,它能够团聚体的形成提供胶结物。在植被发育斜坡区土体中,各类植物的枯枝落叶、根系、动物活动产生的微生物、排泄物以及动植物死亡腐化等因素都可以提高有机质含量,而有机质又可形成胶结物,其中分解较慢的有机胶结物对团聚体稳定性的影响最为重要。在团聚体形成过程中,由于植被根系具有数量庞大、细小、表面积大、单位体积大等特点,可以很容易网捕很多细小的土体颗粒形成团聚体(图 4),利用分泌出的有机胶结物,再将多个单体团聚体紧密胶结在一起。各个团聚体之间形成的结构性大孔隙可引起土体渗透性能的大幅度提高。

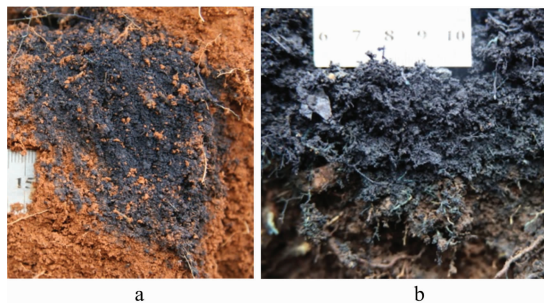


图4 土体间团聚体

3.1.4 裂隙通道 除了以上所说的植被根系通道、动物通道、团聚体间结构性大孔隙 3 种类型的大孔隙外,植被发育斜坡土体还存在大量的裂隙。由于受到季节的影响,土壤水分的丧失或增加会使土壤发生收缩和膨胀,胀缩程度与土壤质地有关,在黏质土处于干燥状态时,土体的收缩会产生裂隙或裂缝状的大孔隙。在干燥季节,斜坡土体由于水分的蒸发和被植被吸收之后结构体收缩,在地表产生裂隙,而在湿润季节,土体表面相对紧密地闭合。除了不同矿物组成土体在干湿环境下形成裂隙和植被的蒸腾作用与非饱和带土体中水分丧失而形成的裂隙之外,植被在生长过程中穿插以及对周围土体的挤压也会造成土体开裂,不过由前二者形成的裂隙所占比重较大,而后者并不是裂隙产生的主要原因。试验点土体所发育的干缩裂隙通道表面宏观表现见图 5,不同环境下土体的干缩裂缝的发育规律是不同的,视域范围内土体被粗糙的裂缝迹线切割,被分割形成的块区面积大小不一,各单条裂缝相互串联形成网状结构,而且宏观上裂缝的发育程度与上覆的腐殖质有关,若腐殖质较薄较少则所切割的块区数目

多,但是裂缝开度和深度均比腐殖质较厚时的小,且缺少腐殖层保护的裂缝常被土体颗粒所填堵。



图5 试验区发育的土体干裂缝

3.2 大孔隙形成的影响因素

基于染色示踪试验得到的结果,已经将大孔隙分为植被根系通道、动物通道、团聚体间结构性大孔隙、土体干湿交替产生的裂隙,这些大孔隙在降雨条件下对水分入渗产生着重要的影响,其中植被根系密度、土体中有机质的含量、土壤动物活动、土体颗粒组成、气候条件等是制约大孔隙形成和演化的重要因素。

3.2.1 根系生长情况 在呈贡区试验点对根系密度测定可知,斜坡土体的根系随深度的增加而减少,并且根系的伸展范围局限于 0.5 m 范围内,植被根系相关形成的大孔隙在降雨条件下对水分入渗起到了积极作用,通过植被根系影响降雨入渗的大孔隙类型主要有植被死亡后其根系腐烂形成的大规模、大尺度通道,植被根系生长过程中挤压土体致使土体和根系伸长部分产生变形形成管状虚脱、植被根系生长产生的轴压引起周围土体的膨胀和裂缝通道。

3.2.2 有机质含量 结构性大孔隙的存在在降雨条件下发挥着重要的导水作用。这源于有机质能够促进以团聚体为基础结构性大孔隙的发育。有机质在土体中的迁移,是斜坡非饱和带土体中大孔隙研究中重要内容之一,在土体深层,由于植被根系无法无限伸长,土壤动物活动范围也有限,有机质在土壤中大量存在的区域为离土体表层 20 cm 之内。植物在生长过程中通过根系这架桥梁作用对土体进行物质交换,植被根系在其生长过程中会释放一定含有机质的分泌物和组织,枯枝落叶层和死亡根系在腐烂和分解后产生大量有机质,为斜坡非饱和带土体提供有机质,促进了结构性大孔隙的发育。

3.2.3 动物活动 对土壤大孔隙形成和演化过程有重要影响因素的动物通常是蚯蚓、地鼠、蚂蚁等打洞动物。土壤动物通过进出洞穴来获取营养和食物,在活动过程中对土体中的洞穴内壁产生反复摩擦并对其结构施加反复影响,从而形成了一定规模的大孔隙通道,蚯蚓排泄废物之后在洞穴中活动而摩擦洞穴内壁,使排出的排泄物粘黏于洞壁上形成光滑的保护层,不仅使通道稳定性增加,避免尘土堵塞通道,同时也使水分渗透通道减少了摩擦,使水分能快速流通而减少损失。

3.2.4 气候因素 植被发育斜坡土体中大孔隙的形成除了受控于上述因素外,还受气候因素的影响,表现为干湿循环和冻融交替而产生干缩裂隙通道。裂隙网络的形成与温度变化和土体含水率有关,土体温度急剧变化及含水率较大时有利

于裂隙网络形成。通过试验结果,这种由气候因素导致的裂隙网络形成在富含有机质的土体中显得更加突出。

4 结论

本研究在现场开展模拟喷洒降雨,通过开挖斜坡非饱和剖面观察染色剂染色得到斜坡非饱和带土体大孔隙的类别以及影响因素,其中染色剂为亚甲基蓝溶液,染色效果较好,试验达到理想结果。

通过染色示踪试验,结果表明,呈贡马卡山斜坡非饱和带土体大孔隙的类型主要有植被根系及腐烂后形成的通道、动物活动形成的通道、团聚体间结构性大孔隙、土体干缩以及气候冻融交替形成的裂隙。植被根系、有机质含量、动物活动、气候因素等是影响大孔隙形成和发育的因素。其中,植被根系占主导地位,气候因素对富含有机质土体中的裂隙形成作用具有时效性。

植被是大孔隙形成和演化的决定性因素,主要表现在以下几个方面:植被根系生长延伸对土体造成挤压致使变形而形成大孔隙通道;根系死亡腐烂后,其路径形成大孔隙;一些细小根系能网捕土体的细颗粒,加以微生物和有机质的影响形成团聚体,小的团聚体又被网捕后形成较大的结构性大孔隙;植被根系分泌物和枯枝落叶层形成的有机质作用较大,是团聚体形成的物质基础,同时,也是土壤动物所需的营养成分和食物来源;植被的枯枝落叶层为动物活动和土体表面形成的裂隙提供了天然的保护伞。

参考文献:

- [1] 李伟莉,金昌杰,王安志,等. 土壤大孔隙流研究进展[J]. 应用生态学报,2007,18(4):888-894.
- [2] 石 辉,刘世荣. 森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义[J]. 山地学报,2005,23(5):23-29.
- [3] 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.
- [4] 刘 伟,区自清,应佩峰. 土壤大孔隙及其研究方法[J]. 应用生态学报,2001,12(3):465-468.
- [5] 冯 杰,郝振纯. CT 扫描确定土壤大孔隙分布[J]. 水科学进展,2002,13(5):611-617.
- [6] 石 辉,陈凤琴,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.
- [7] 邱 琳,吴华山,陈效民,等. 利用染色示踪和图像处理技术对土壤大孔隙进行定量研究[J]. 土壤,2007,39(4):621-626.
- [8] 王彬俨,程金花,张洪江,等. 北京昌平区农地土壤大孔隙特征[J]. 水土保持学报,2012,26(3):189-193.
- [9] 程竹华,张佳宝,徐绍辉. 黄淮海平原三种土壤中优势流现象的试验研究[J]. 土壤学报,1999,36(2):154-161.
- [10] 荐圣淇,赵传燕,彭焕华,等. 利用染色示踪与图像处理技术研究根系对土壤大孔隙的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2011,47(5):62-66.
- [11] 官 琦,王志奇,任 健. 基于 VR 法的土体大孔隙三维可视化[J]. 价值工程,2014,33(29):220-223.