

基于 CT 扫描的斜坡非饱和带土体大孔隙 定量化研究和三维重建

徐宗恒^{1,2}, 徐则民¹, 李凌旭³

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南师范大学 旅游与
地理科学学院, 云南 昆明 650500; 3 云南大学 滇池学院, 云南 昆明 650228)

摘要: [目的] 系统开展植被发育斜坡非饱和带土体中大孔隙定量化和三维重建技术研究, 为水分沿大孔隙迅速运移研究提供可靠理论依据, 对于降雨型滑坡研究具有基础性意义。[方法] 采用 CT 技术对云南省昭通市盘河乡头寨滑坡滑源区左侧斜坡区两个尺寸为 25 cm×25 cm×50 cm 的大尺度土柱进行扫描, 得到一系列平面和纵向 CT 切片图像。图像处理并计算得到了土柱中大孔隙随深度的变化情况以及 3 种物质(砾石、土体基质和大孔隙)的 CT 值范围; 借助 VolView 3.4 体可视化交互系统实现了三维大孔隙通道系统的重组, 研究其在空间内的连通性、分支性和复杂性。[结果] 包括根系通道、动物通道、干缩裂缝及团聚体间的结构性孔隙广泛发育于非饱和带土体中, 且大孔隙分布异质性明显, 波动变异较大, 随着深度的增加大孔隙呈逐渐减小的趋势。三维重组清晰可见土柱内含有较多独立分布的大孔隙通道, 它们具有较好的连通性。[结论] CT 扫描技术作为非破坏性获得技术在斜坡非饱和土体大孔隙定量化和三维重建研究中应用是可行的。

关键词: 植被发育斜坡; CT 扫描; 土体大孔隙; 定量化; 三维重建

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)01-0133-06

中图分类号: P642.22

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.025

Soil Macropores Quantification Study and 3D Reconstruction in Vadose Zones of Hillslope Based on X-Ray Computed Tomography

XU Zongheng^{1,2}, XU Zemin¹, LI Lingxu³

(1. Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. School of Tourism and Geographic Science, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China; 3. Dianchi College, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650228, China)

Abstract: [Objective] Study on soil macropores quantification and 3D reconstruction is particularly important as it can provide reliable theoretical data for preferential flow study. It is also of great importance in precipitation induced landslide studies. [Methods] We took two 25 cm×25 cm×50 cm soil cores from vegetated slope in Panhe Town, Yunnan Province. Base on X-ray computed tomography, a series of plane and longitudinal slice images were collected. By images analysis, variations of soil macropores with the increase of soil depth and CT value of three substances(gravel, matrix, macropore) were studied. Soil macropore 3D reconstruction was achieved by visual interactive system VolView 3.4 to investigate the connectivity, branchedness and complexity of macropore. [Results] The macropores consisting of root channels, faunal tunnels, shrinkage cracks and inter-aggregate porosity were broadly found in vadose zones of vegetated slope soils. Heterogeneity in distribution of soil macropores was significant, and macroporosity decreased with the increasing soil depth. As clearly demonstrated by 3D reconstruction, macropores were well distributed and connected in the soil cores. [Conclusion] We highlight the importance of CT technique in soil macropore quantification and 3D reconstruction.

Keywords: vegetated slope; X-ray computed tomography; soil macropores; quantification; 3D reconstruction

收稿日期: 2014-01-06

修回日期: 2014-01-24

资助项目: 国家自然科学基金云南联合基金重点项目“植被发育斜坡对强降雨过程的地下水响应机制及其灾害效应”(U1033601); 高等学校博士学科点专项科研项目“峨眉山玄武岩岩崩灾害孕育机理”(20135314110005)

第一作者: 徐宗恒(1987—), 男(汉族), 云南省丽江市人, 博士, 讲师, 主要从事斜坡地质灾害研究。E-mail: xuzh208@163.com。

通信简介: 徐则民(1963—), 男(汉族), 河北省承德市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事斜坡稳定性研究。E-mail: abc5100@188.com。

植被发育斜坡区非饱和带土体中,由植被根系腐烂后形成的通道、根系—土体和砾石—土体接触带空隙、动物通道、团聚体间结构性大孔隙、土体干缩以及气候冻融交替产生的裂隙组成的大孔隙系统是水分渗透的重要通道。在降雨特别是暴雨条件下,这些大孔隙通道使得斜坡能同步吸收来自降雨过程的全部或大部分水量而基本不产生地表径流^[1],导致斜坡临时性饱和条件的发育,地下水位的持续变动以及加快加强了斜坡的水—岩相互作用,这对于植被发育斜坡的失稳起到了巨大的推动作用。所以水分沿斜坡土体大孔隙通道迅速下渗是降雨型滑坡孕育的一个基础性环节,而开展大孔隙通道量化研究和三维重建能为水分沿其快速下渗研究提供可靠理论依据,这对于降雨型植被发育斜坡失稳的研究、揭示发生机理具有重要的意义。

土体大孔隙的研究方法有多种,其中 CT 扫描作为一种无损检测技术,非破坏性、精确性、全面性、快速性等优点为研究突破了许多瓶颈问题。例如 Warner 等^[2]用 CT 技术扫描确定了发育有肯塔基蓝草(*Poa pratensis*),20.3 cm 直径的圆柱形土柱内大孔隙的数目、大小等,实现了大孔隙的可视化,并用染色示踪试验揭示了大孔隙在纵剖面上的连续性。Anderson 等^[3]用同样方法对取自耕田和森林土体截面面积为 76.4 mm×76.4 mm 的样品进行扫描,得到大孔隙分布情况并与含有已知尺寸人造大孔隙扫描结果进行对比,结果表明,该方法对土壤结构的评价有很好的运用;冯杰等^[4]对取自于南京郊区农场中内径为 13.1 cm 的原状土柱和含有已知人造直径大孔隙的填充土柱进行了 CT 扫描实验,得到大孔隙在横截面上的大小、数目、形状以及分析了纵断面上的连通性。吴华山等^[5]采集了太湖地区 3 种主要水稻土(白土、黄泥土和乌栅土),利用该方法得出了不同深度土壤剖面上各种大孔隙的数量、面积以及分布状况,所供试的土样直径为 12.8 cm。以上有关研究所针对对象多集中于农业土壤,植被发育斜坡土体涉及较少,然而,农业土壤中大孔隙与植被发育斜坡土体中大孔隙的形成和发育背景有着明显的差异,因为农业土壤大孔隙受耕作模式控制,大孔隙发育受限,再者,农业土壤中植物根系发育规模和侧向展布程度较斜坡土体要低,与根系相关形成的大孔隙数量也会有所降低,所以针对植被发育斜坡土体大孔隙进行研究具有较好的针对性。另外,既有研究多集中于依据土柱平面 CT 切片来分析土体中大孔隙的分布和不同位置处的差异;研究对象尺度较小,缺乏代表性,实际上,依据平面 CT 切片仅能反映出土柱内大孔隙的平

面分布,而不能反映大孔隙通道在空间的连通性、分支性和复杂性,所以需要大孔隙通道进行三维可视化研究来实现,这也是大孔隙量化研究的一个重要方面。本文对两个取自天然斜坡的大尺度(25 cm×25 cm×50 cm)方形原状土柱进行扫描,对得到的一系列水平和纵剖面 CT 切片进行图像处理,分析大孔隙随深度变化情况以及纵剖面上的连通性,然后将数据导入 VolView 3.4 体可视化交互系统对 CT 切片图像进行三维重组研究大孔隙在空间的分布,以期对植被发育斜坡土体渗流等物理特性研究提供理论依据。

1 取样地点和样品

取样点位于云南省昭通市昭阳区盘河乡头寨滑坡滑源区左侧斜坡区,该地曾于 1991 年 9 月 23 日发生过造成 216 人死亡的大型高速远程滑坡,是当时 20 世纪 90 年代中国发生的较为惨重的重大滑坡灾害事件^[6-7]。取样区内发育有长势较好的天然森林植被,通过对林区进行植被调查,试验区植被覆盖率 95% 以上,主要植被类型共计 31 种,有滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)、云南柳(*Salix cavaleriei*)、玉山竹属(*Yushania* sp.)、滇白杨(*Populus rotundifolia* var. *bonati*)、牛奶子(*Elaeagnus umbellata*)、绵毛杜鹃(*Rhododendron floccigerum*)等。取样点地理位置为东经 27°34'2",北纬 103°51'34"。

既有土柱的取样方法主要为采用一端带刃口的 PVC 管在重力击打(或液压系统)作用下敲入土壤中,采取原状样^[4-5,8],但是该方法在植被发育斜坡区并不适用,因为土体中存在的纵横交错根系以及砾石很容易阻碍取样器进入土体,多次敲击会造成土体的扰动。本文取样的方法为:首先去除土体表层范围内的杂物和土体表层疏松腐殖层,然后从外围 100 cm×100 cm 边界逐渐往选定的 25 cm×25 cm 的核心区域缓慢开挖,当土柱成型以后用毛刷将剖面上附着土颗粒及杂物清理干净,使四周平面平整,而后将现场融化好的石蜡浇筑于土柱表面,再将多层保鲜膜、棉布包裹于土柱外表面;最后用特制的木框套取土体并将其送至云南省第三人民医院进行 CT 扫描。为了使得研究结果具有代表性,在距离大约为 10 m 的区域内(定为 TZ₁ 和 TZ₂)共取得 2 个样品(尺寸为 25 cm×25 cm×50 cm)。

2 CT 扫描及原理

云南省第三人民医院用于土样扫描的 CT 仪为 SIMENS Sensation Open 型,进行土样扫描时设置扫

描电流为 176 mA,电压为 120 kV,每个体素的尺寸为 $1.0\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$,总扫描得到的体素为 $250\times 250\times 334$ (voxels),即每一 CT 切片的层间距为 1.5 mm。设置完参数以后,将土样顶部朝向 CT 扫描架的方向推进 X—射线管和探测器之间,启动扫描,放射源发出的 X—射线穿透土样以后,会引起射线强度、速度和频率的改变,不同物质对 X—射线的吸收不同^[9-10],导致投影出来的亮度也不同。在 CT 切片中可以根据亮度(CT 值)将各物质区分开来,物质的 CT 值越高,表征物质密度越高,特殊的,水的 CT 值为 0 HU,空气的 CT 值为 -1 000 HU,该次扫描土样的 CT 值范围为 -1 024~3 071 HU。X 射线数据的变化通过探测器检测得到并形成投影,通过旋转射线源,就可以得到一系列不同深度处的土样 CT 切片,本次扫描每个土柱共得到 334 个切片图像。将得到的切片图像数据导入三维空间内,在空间里将每一个坐标点处用 CT 扫描所记录到的数据进行填充,赋予颜色、透明度等信息就可以将土体三维重组而成。

3 图像处理和计算结果分析

3.1 图像处理

土体中大孔隙量化研究关键环节之一为图像处理中将大孔隙与土体基质相分离,即将图像处理为二值化图像,用黑色(或白色)代表大孔隙,白色(或黑色)代表土体基质,然后进行量化计算。冯杰等^[4]采用的方法为基于 CT 切片对平面图像假定一阈值,将大孔隙和基质分离开来,与已知大孔隙大小进行比较,如果相差太大,再重新假定一阈值进行计算,直到相差值与已知值的比值很小为止;张季如和陶高梁等^[11-12]采用的方法对于同一图像,经多人处理后求平均值,其误差控制在 10% 以内即可。笔者认为这些方法都是很好的大孔隙分离方法,但精确度有待提高,因为阈值的选择是土体内大孔隙分布评价的关键环节之一,如果阈值的选择不同会导致出现不同的处理结果,有时会相差甚多。为了消除选择阈值带来的麻烦,用物质的 CT 值来分离大孔隙可达到很好的分离效果,因为物质的 CT 值代表着物质的密度,不同物质的 CT 值不同。为了得到土体内各物质的 CT 值范围,本文对根系、土体基质以及砾石单独进行 CT 扫描,并对每个土柱的 334 个切片进行了详细分析,得到该次土柱扫描 CT 值范围为 -1 024~3 071 HU,其中土体基质 CT 值范围为 90~1 416 HU,砾石 CT 值

范围为 1 417~3 071 HU,根系和土体中大孔隙 CT 值范围为 -1 024~89 HU,需特别说明的是,所取土柱内含有大量的根系,根系的存在对大孔隙的产生和存在起到积极的作用,且根系通道也是土体内大孔隙通道的一部分^[13-15],所以为了研究方便和提高精确度,本文未将根系独立开来。

图 1 所示为 TZ₂ 土柱某深度处的 CT 切片,定义土柱顶面 Z=0,虽然在采集及运送样品过程中控制了对土体的扰动,但还是会对样品边角处造成少许损伤,所以去除土柱外围一定区域,选定 20 cm×20 cm×40 cm(深度)的立方体土柱为研究对象。

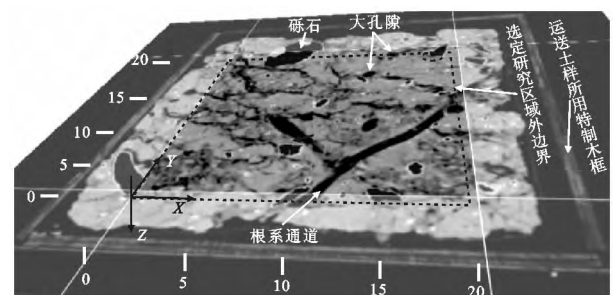


图 1 土柱 CT 切片示例

为了得到大孔隙随着深度增加的变化情况,将得到的 CT 切片导入 Adobe Photoshop CS4 中进行裁剪,得到选定的 20 cm×20 cm 为研究区域(图 1),对裁剪以后的图像此处只需简单选择一个阈值就能将图片处理为二值图像,使切片中土体基质和砾石表现为白色,大孔隙显示为黑色。进行上述步骤处理以后,图像中可能会出现噪点,即与实际情况不一致的独立的像素点,这些像素点的存在会影响解析的精度,所以使用 Image-Pro Plus 6.0 软件图像处理中的形态学开运算滤镜功能,进行降噪处理,除去独立的噪点,再采用膨胀运算(2×2 范围,重复 1 次),将大孔隙边界复原^[16],将得到的二值化图片用 matlab 计算,可得到 CT 切片的大孔隙度(定义为图像中大孔隙面积占整个 CT 切片图像面积比例^[11]),同时每隔 7.5 mm 深度计算 CT 切片上各物质 CT 值的平均值、标准差、最大值和最小值。除了对土柱横断面进行扫描计算外,还对土柱的 2 个纵向进行了扫描,以此来揭示纵剖面上大孔隙的连通性、复杂性和分支性^[4]。

3.2 计算结果分析

对于大孔隙的定义,相关研究并未达成一个共识,并且一直是一个有争议问题,Warner 等^[2]利用

CT 扫描方法观察取自肯塔基蓝草地 (Kentucky bluegrass), 直径为 20.3 cm 的土柱中大孔隙时, 所研究对象为孔径大于 1 mm 的大孔隙; 余长洪等^[17]用浸渍剂固化再切片方法, 研究了黏土和砂壤土中大于 85 μm 的大孔隙; 吴华山等^[5]用 CT 扫描研究的是白土、黄泥土和乌栅土 3 种土样中大于 0.3 mm 孔径的大孔隙, 而本文由于 CT 扫描仪精度的限制, 通过计算, 能识别的最小孔隙为孔径是 0.44 mm 的大孔隙。由图 1 可以看出, 平面零星的分布着几块砾石, 偶见体积较大的砾石; 根系在空间内穿叉而过的迹象明显, 在水平切片上成圆率较高、独立显色面积宽或者纵截面上呈条状分布的位置可能为根系分布, 水平截面上分布有多条宽而窄, 形状各异, 成圆率并不高的大孔隙通道, 这些通道在各水平切片上均会发生变化, 并且分布具有聚集性的特点, 这些大孔隙在空间上相互连通, 形成连通性较好的大孔隙通道。从 CT 切片的纵截面上孔隙分布的特点也可以看出, 大孔隙 (特别是根系形成的大孔隙) 在深度方向上并不是垂直向下的, 而是弯延向下, 在某深度处出现又在此深度处消失, 随之转至另一个纵剖面位置处; 宏观上, 表层 20 cm 范围内未见单体体积较大的砾石, 随着深度的增加, 砾石的数量和体积均有增加和增大的趋势。

CT 值代表着物质的密度, 其变化可以一定程度上反映土柱内物质组成 (包括大孔隙) 的变化。在所得的横截面 CT 切片中, 每隔 7.5 mm 提取一张图像进行计算, 计算得到的各参数结果随深度的变化情况如图 2 所示, 图 2 中 “AV” 表示平均 CT 值, “STD” 表示标准差, “MAX” 表示最大 CT 值, “MIN” 表示最小 CT 值, 由图 2 可以看出, 最小 CT 值沿深度波动较小, 介于 -1 000 ~ -1 024 HU 之间, 最大值则波动较大, TZ₁ 土柱为 2 153 ~ 3 071 HU, TZ₂ 土柱为 2 189 ~ 3 071 HU, 这是由于头寨试验区斜坡非饱和

带长期处于潮湿环境条件中, 在不同季节气态水分子循环入侵砾石结构体, 导致其内部造岩矿物溶解, 形成一定厚度的腐岩壳, 有的甚至形成了腐岩结构体, 腐岩的密度较新鲜岩石要低, 它的存在致使 CT 最大值产生了一定的波动; 另外, 平均 CT 值的变化可以说明土柱内物质随深度的变异程度, 同时在一定程度上可以反映大孔隙随深度的变化趋势。为了表现出平均 CT 值与大孔隙度的变化关系, 将两者单独列于图 3 中, 从图 3 中可以明显看出, 两者随着深度的增加均表现出来很强的波动不稳定性, TZ₂ 的平均 CT 值在 0 ~ 200 mm 内变化波动很小, 而在 200 mm 以下跳跃着升高, 在深度 375 mm 处达到最高值 396.7 HU; TZ₁ 平均 CT 值多集中在 70 ~ 180 HU 之间。对于大孔隙度, TZ₁ 分别在深度 37.5 mm 和底部位置为最大值 (37.95%) 和最小值 (7.04%), TZ₂ 在深度 7.5 mm 和底面处取得最大值 (32.06%) 和最小值 (11.37%), 两个点处大孔隙度均随着深度的增加呈锯齿状整体减小趋势, 主要是由于随着深度增加, 制约着大孔隙形成与发展的因素 (植物根系密度、有机质含量、动物群体数量和个体大小) 也随之减少。总体上, 对于同一土柱, 随深度变化, 大孔隙度和平均 CT 值的变化趋势正好相反, 这是由于在不同的深度处, 若大孔隙的数量较多, 则 -1 024 ~ 89 HU 之间的 CT 值数量就较多, 导致平均 CT 值降低, 但也有特殊的情况存在, 例如在 TZ₁ 深度为 190 ~ 210 mm 处, 两者均呈递减的变化趋势, 这可能是由于该位置处大孔隙的数量与 CT 值较大的物质 (如砾石) 的含量呈正相关关系。图 2 中所示的 “AV + STD” 和 “AV - STD” 表示各个剖面间平均 CT 值随着深度增加而表现出来的波动变异程度。由图 2—3 可以看出, 大孔隙分布在同一深度不同土柱间以及不同深度处同一土柱内均表现出明显的异质性, 且波动变异均较大。

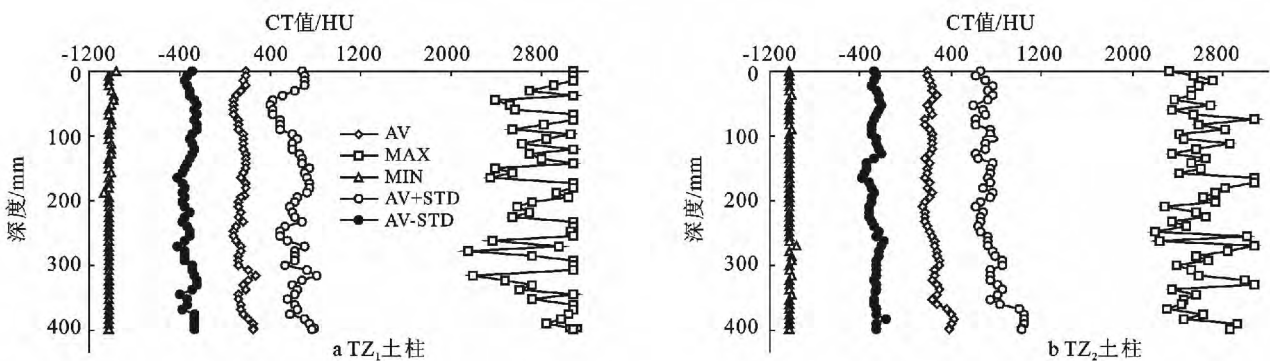


图 2 土柱物质 CT 值随深度的变化

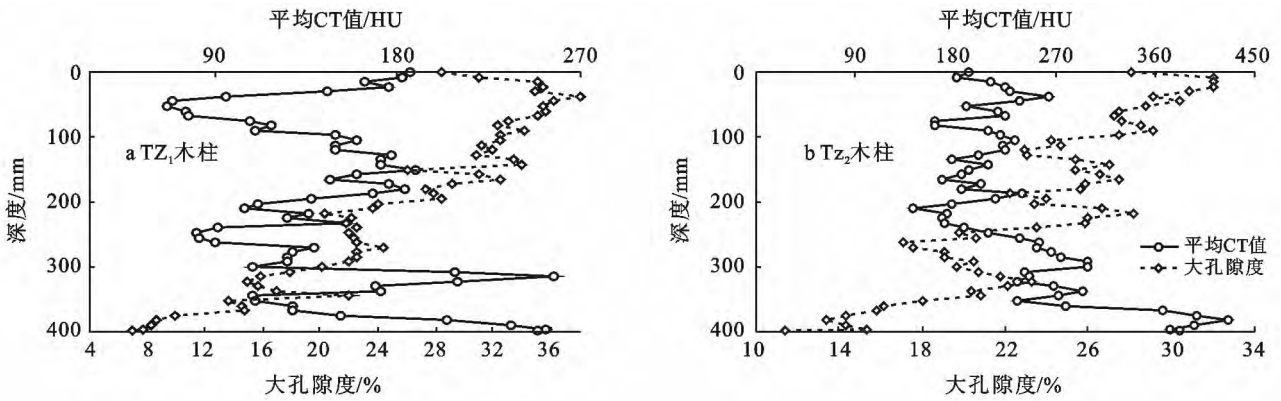


图 3 土柱平均 CT 值和大孔隙度随深度的变化

4 大孔隙结构的三维重组

大孔隙结构的三维重组借助 VolView 3.4 软件来实现, VolView 是美国 Kitware 公司开发的, 是一款开放源代码、直观的体可视化交互系统, 软件目的在于让研究者在 Windows, Mac 或 Linux 下迅速探究和分析复杂三维科学数据^[18], VolView 是基于 Kitware 公司开发的两个非常著名的医学影像处理开发包 VTK 和 ITK 上开发出来的, 并且提供免费的使用下载^[19], VolView 软件平台提供了 DICOM 格式数据访问和处理窗口, 这些数据多来自 CT 扫描数据, 本文正是依此来实现对三维扫描数据进行导入、分析和处理, 其原理是利用 3D 工具里的体绘制 (volume rendering) 功能。

导入 CT 扫描数据以后的三维重组过程其实就是二维 CT 数据按照位置和角度信息进行规则化处

理, 在三维空间里将每一个坐标点处用 CT 扫描所记录到的数据进行填充, 然后赋予颜色, 透明度和 CT 值的过程。VolView 的好处在于它提供了很好的人机交互画面来进行参数调节^[20], 可以将其中 CT 值对应的物质赋予不同的透明度 (取值 0~1), 以及不同的颜色。为了研究 2 个土柱内大孔隙的三维展布情况, 只需将 CT 值为 -1 024~89 之间物质透明度设置为 1 即可。本文中由于土柱内局部多个剖面大孔隙度高达 30% 以上, 将全部大孔隙显示出来将不利于大孔隙观察, 所以为了便于观察和研究, 此处仅将 CT 值为 -1 024~-684 的物质显示出来。图 4(a—b) 和 4(c—d) 为 TZ₁ 和 TZ₂ 从不同方位视角观察部分大孔隙的示意图, 图 4 中方位标示块中“S”和“P”分别表示斜坡下坡、上坡方向的纵剖面; “R”和“L”分别表示土柱右侧、左侧纵剖面; “S”表示的为土柱的顶部方向。

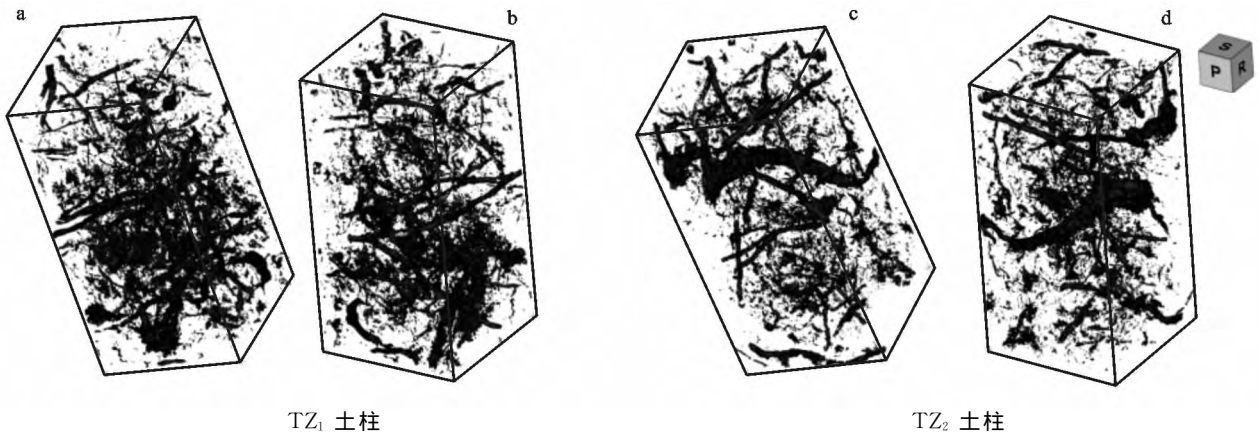


图 4 不同方位视角下土柱内大孔隙三维分布

图 4 很好地表现了土柱内部分大孔隙通道在土柱内的三维展布情况, 从图 4(a—b) 中可以看出, TZ₁ 土柱内部含有较多的错综复杂, 有的弯曲往下, 有的近水平分布的大孔隙通道, 其直径以及数量从土柱顶部至底部慢慢变大增加而后变小减少。相比而言, 图

4(c—d) 中 TZ₂ 内部大孔隙则较多分布在 250 mm 深度之上, 偶见直径较大的通道, 数量总体上没有 TZ₁ 土柱多。TZ₁ 和 TZ₂ 土柱内部均含有较多独立的大孔隙, 这些大孔隙的成圆率不高, 在有些位置能形成连通性好的大孔隙, 但是这些孔隙并不是垂直向下,

而是弯延向下或水平延伸。从宏观上观察, TZ_1 土柱中大孔隙在较多深度处均比 TZ_2 的多, 这与图 3 中的结果一致。CT 切片图像分析与三维观察得到的结果相一致验证了该方法在土体大孔隙定量分析和三维重组研究中的可行性。

5 结论

(1) CT 扫描技术作为非破坏性获得技术在土壤科学研究中得到广泛运用, 其精确性、全面性、快速性等优点是显而易见的, 本文成功将此技术运用到大尺度土柱内部大孔隙定量研究和三维重建中, 表明 CT 扫描技术在斜坡非饱和带土体大孔隙的研究中是可行的。

(2) 对取自于云南省昭通市头寨滑坡滑源区 2 个大尺度土柱进行 CT 扫描, 对获得的平面 CT 切片进行分析处理和分析, 得到土柱内土体基质 CT 值为 $90 \sim 1\,416$ HU, 砾石为 $1\,417 \sim 3\,071$ HU, 根系和土体中大孔隙为 $-1\,024 \sim 89$ HU; 基于 CT 值范围用图像处理对土体大孔隙进行分离, 得到土体内大孔隙度、平均 CT 值、最大 CT 值、最小 CT 值以及标准差随深度增加而变化的情况, 结果表明, 大孔隙分布异质性明显, 波动变异较大, 随着深度的增加大孔隙度呈逐渐降低的趋势, TZ_1 土柱在深度 37.5 mm 和底部位置处取得最大值 (37.95%) 和最小值 (7.04%), TZ_2 样在深度 7.5 mm 和底面处取得最大值 (32.06%) 和最小值 (11.37%)。

(3) 借助 VolView 3.4 体可视化交互系统实现了 2 个土柱内部部分大孔隙的三维可视化, 展示了土柱内部分大孔隙通道空间内的连通性、分支性和复杂性, 三维重组清晰可见土柱内含有较多独立分布的大孔隙通道, 它们具有较好的连通性, 绝大部分呈弯延向下或水平延伸的状态。三维重组定性的表现结果与二维切片计算结果一致, 随着深度的增加, 两个样品土柱内大孔隙呈降低趋势, 且在较多深度处, TZ_1 土柱的大孔隙分布均比 TZ_2 的高。研究结果能为植被发育斜坡区土体大孔隙渗流和物理力学特性研究提供理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] 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, 2011, 26(6): 598-607.
- [2] Warner G S, Nieber J L, Moore I D, et al. Characterizing macropores in soil by computed tomography[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(3): 653-660.
- [3] Anderson S H, Peyton R L, Gantzer C J. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography[J]. Geoderma, 1990, 46(1): 13-29.
- [4] 冯杰, 郝振纯. CT 扫描确定土壤大孔隙[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 611-617.
- [5] 吴华山, 陈效民, 陈黎. 利用 CT 扫描技术对太湖地区主要水稻土中大孔隙的研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 175-178.
- [6] Zhu jiawen, Xu weiya, Yang xingguo, et al. The 28 October 1996 land slide and analysis of the stability of the current Huashiban slope at the Liangjiaren Hydropower Station, Southwest China [J]. Engineering Geology, 2010, 114(1): 45-56.
- [7] 徐则民, 黄润秋, 唐正光. 头寨滑坡的工程地质特征及其发生机制[J]. 地质论评, 2007, 53(5): 691-698.
- [8] Grevers M C J, Jong E D E, Arnaud R J S T. The characterization of soil macroporosity with CT scanning[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1989, 69(3): 629-637.
- [9] Peth S. Applications of microtomography in soils and sediments[J]. Developments in Soil Science, 2010, 34: 73-101.
- [10] 王路君, 左永振, 孔宪勇, 等. CT 技术在岩土工程研究中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(S2): 1754-1775.
- [11] 张季如, 祝杰, 黄丽, 等. 固结条件下软黏土微观孔隙结构的演化及其分形描述[J]. 水力学报, 2008, 39(4): 394-400.
- [12] 陶高梁, 张季如. 表征孔隙及颗粒体积与尺度分布的两类岩土体分形模型[J]. 科学通报, 2009, 54(6): 838-846.
- [13] Heeraman D A, Hopmans J W, Clausnitzer V. Three dimensional imaging of plant roots in situ with X-ray computed tomography[J]. Plant and Soil, 1997, 189(2): 167-179.
- [14] Gantzer C J, Anderson S H. Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 64(1): 101-111.
- [15] Luo Lifang, Lin Henry, Li Shangcai. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(1): 53-64.
- [16] 王伟. 三峡库区紫色砂岩林地土壤优先流特征及其形成机理[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [17] 余长洪, 周明耀. 两种土壤大孔隙结构差异的数字图像分析[J]. 广东水利水电, 2007(1): 27-35.
- [18] Kitware homepage. volview 3.4 now available [EB/OL]. [2015-03-05] <http://www.kitware.com/open-source/volview.html>.
- [19] 李恩中. 医学图像处理与分析软件平台综述[J]. 计算机科学与探索, 2008, 2(5): 467-477.
- [20] 黄易. 三维数据场可视化关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.