

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190158

土壤大孔隙三维特征影响因素和测定方法研究进展

孟 晨^{1,2} 牛健植³ 余海龙⁴ 杜灵通^{1,2} 尹正聪⁵

(1. 宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复省部共建国家重点实验室培养基地, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021; 3. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 4. 宁夏大学资源环境学院, 宁夏 银川 750021; 5. 德克萨斯 A&M 大学地理学院, 美国 德克萨斯 77843)

摘要:土壤大孔隙是优先流的主要通道, 对土壤水分、空气和化学物质及污染物的优先运移起着重要作用, 土壤大孔隙三维形态特征的量化分析及影响因素研究是目前大孔隙的研究重点, 研究成果可为理解土壤水分运动机理及评估地下水污染等提供科学支撑。本文从大孔隙三维形态特征参数的定义(大孔隙体积、表面积、长度、数量、迂曲度、倾斜角度、路径数量、孔径、节点、连接度、圆度等), 各参数测定方法及软件(Avizo 9.0、VG Studio MAX 2.2、Arc/Info 10.0、ImageJ 等), 大孔隙特征影响因素(根系、土壤动物、干湿及冻融交替、人为因素等)3 个方面, 综合介绍了土壤大孔隙三维特征的研究现状及进展, 并基于此预测了今后的研究趋势, 以期今后大孔隙三维特征的深入研究提供参考。

关键词: CT 扫描; 大孔隙形态; 几何结构; 量化方法; 三维重建

中图分类号: S152.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)11-0009-08

引文格式: 孟晨, 牛健植, 余海龙, 等. 土壤大孔隙三维特征影响因素和测定方法研究进展 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 9-16. Meng Chen, Niu Jianzhi, Yu Hailong, et al. Research progress in influencing factors and measuring methods of three-dimensional characteristics of soil macropores [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(11): 9-16.

Research progress in influencing factors and measuring methods of three-dimensional characteristics of soil macropores

Meng Chen^{1,2} Niu Jianzhi³ Yu Hailong⁴ Du Lingtong^{1,2} Yin Zhengcong⁵

(1. Key Laboratory of Land Degradation and Ecosystem Restoration in Northwest China,

Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

2. Key Laboratory of Rehabilitation and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwest China,

Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

3. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

4. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

5. Department of Geography, Texas A&M University, College Station, Austin 77843, Texas, USA)

Abstract: Macropore is the main channel for preferential flow, therefore it largely impacts the transportation of water, air, and chemical materials in soil. Recently, it has become a focus of interest for quantitative analysis and influencing factors of three-dimensional(3D) morphological characteristics of soil macropores, since it could provide fundamental explanations for water soil movement patterns and groundwater pollution assessment. This paper examines state-of-the-art research development regarding 3D morphological characteristics of soil macropore by revisiting the concept (macropore volume, surface area, length, number, tortuosity, inclination angle, path number, macropore diameter, node, connectivity, roundness, etc.), quantitative measurements and software (Avizo 9.0, VG Studio MAX 2.2, Arc/Info 10.0, Image J, etc.) and

收稿日期: 2019-03-22 修回日期: 2019-12-03

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2019AAC03045), 国家自然科学基金项目(41961001、41967027), 宁夏重点研发计划项目(2019BFG02010)。

第一作者: 孟晨, 助理研究员。主要研究方向: 水土保持与土壤水文。Email: mengchen@nxu.edu.cn 地址: 750021 宁夏回族自治区银川市西夏区贺兰山西路 489 号。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

impact factors (root system, soil animal, alternation of dry wet and freeze-thaw, human factors, etc.) of soil macropore characteristics. On the basis of summarizing the current research status, this paper summarizes the relevant research conclusions, and also proposes the direction of future work by reviewing current work.

Key words: CT scan; macropore morphology; geometry; quantitative method; three-dimensional(3D) reconstruction

土壤大孔隙会导致水、空气、化学物质在土壤中的快速运移,这一观点已被广泛认可^[1-3]。土壤大孔隙对生态环境的影响具有两面性:正面影响表现在土壤大孔隙增强了土壤水分入渗及储水能力,从而减少了地表径流,对水土流失的防治产生积极影响,此外大孔隙的产生会使得土壤通气性增强,从而有利于土壤污染物及植物残渣的分解,也有利于土壤微生物活动^[4];土壤大孔隙对生态环境的负面影响表现为大孔隙的存在使得土壤水分、污染物、化肥等会快速运移至地下水,不仅使植物不能充分吸收肥料,降低了肥料利用率,还使肥料及污染物进入地下水,从而威胁饮用水安全,危害人类健康^[5]。

植物根系活动、蚯蚓运动、干湿裂缝造成的土壤大孔隙三维特征具有差异性^[2-3,6-8]。研究发现大孔隙对水分的传导性决定于大孔隙的三维几何结构和拓扑结构(三维网络的物理布局),大孔隙度、大孔隙数量、长度、孔径分布、连续性、迂曲度以及连通性都是

十分重要的特征,这些特征参数均会影响水流和溶质的运移^[9-14]。土壤类型和土地用途、植被根系空间分布都是影响大孔隙特征的主要因素^[15-18]。通过多学科交叉融合(CT 技术+图像处理分析+土壤大孔隙数据统计分析)对不同条件的土壤大孔隙三维特征进行量化,并分析其影响因素,有利于进一步研究大孔隙对土壤水分的影响机制,阐明土壤水分运移机理。本文总结了目前国内外大孔隙三维特征的相关研究,围绕大孔隙三维形态特征的定义、量化方法及影响因素 3 个方面,综合介绍土壤大孔隙三维形态特征的研究现状,并对研究结论进行了总结,探讨未来的发展趋势,旨在为今后大孔隙三维形态特征的研究提供一定参考。

1 大孔隙三维特征参数的定义

大孔隙在土壤中的形态复杂多样,本节将总结近些年研究的大孔隙三维特征的参数及其定义(表 1)。

表 1 大孔隙特征及其定义

Tab. 1 Characteristics and definition of macropores

大孔隙特征 Macropore characteristics	定义 Definition
体积密度 Volume density/(mm ³ ·mm ⁻³)	单位土柱体积内大孔隙的总体积 Total volume of macropores per unit volume of soil column ^[19-20]
表面积密度 Surface area density/(mm ² ·mm ⁻³)	单位土柱体积内大孔隙的总表面积 Total surface area of macropores per unit volume of soil column ^[19-20]
长度密度 Length density/(mm·mm ⁻³)	单位土柱体积内大孔隙的总实际长度 Total actual length of macropores per unit volume of soil column ^[20]
网络密度(数量密度) Network density (quantity density)/(number·mm ⁻³)	单位土柱体积内大孔隙的总数量 Total number of macropores per unit volume of soil column ^[20-24]
迂曲度 Tortuosity	大孔隙的实际长度与直线长度的比值,可表示大孔隙的弯曲程度 Ratio of actual length of macropores to the length of straight lines, indicating the bending degree of macropores ^[20,25]
倾斜角度 Inclination angle/(°)	大孔隙的纵向与地平面的夹角,表示大孔隙的倾斜程度 Angle between vertical direction of macropores and ground plane, indicating the inclination degree of macropores ^[18,20,23,25-26]
路径数量 Number of path	连续且独立的穿透土柱顶端及底端的大孔隙的数量 Number of continuous and independent macropores penetrating top and bottom of column ^[19]
平均孔径 Average diameter of macropore/mm	单位体积内所有大孔隙直径的平均值 Average value of all macropore diameter per unit volume ^[20]
节点数量 Number of node	连接两个大孔隙分支的交叉点数量 Number of intersections connecting two macropore branches ^[19]
节点密度/(个·mm ⁻³) Node density/(number·mm ⁻³)	单位体积土壤内大孔隙节点的数量 Number of macropore nodes per unit volume soil ^[19]
连接度 Connectivity	大孔隙空间内两点间独立路径的数量,连接土壤表面和底部的大孔隙数量 Number of independent paths between two points in macropore space, and the number of macropores connecting the surface and bottom of soil ^[24,27]
圆度 Roundness	大孔隙表面积接近理论圆的程度 Degree of surface area of macropores approaching the theoretical circle ^[28]

1.1 土壤大孔隙数量、孔径分布、体积、表面积

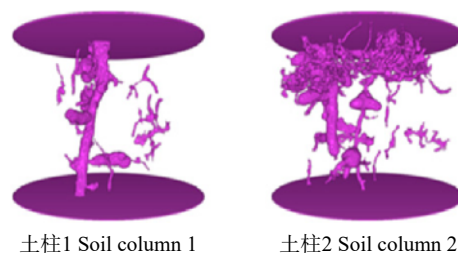
虽然土壤大孔隙数量可通过染色-切片法及穿透曲线法计算得到, 但染色-切片法是在二维平面进行孔隙数量的计算, 而大孔隙具有一定的拓扑结构, 基于二维平面的大孔隙数量计算, 会将一个大孔隙分割成多个计算, 从而造成误差。穿透曲线法是基本水流方程估算大孔隙数量, 计算结果不够精确。CT 扫描法可基于三维结构最精确地计算大孔隙的数量。所有的软件及方法基本都能计算作为以往大孔隙三维特征研究中最常见指标之一的大孔隙数量。大孔隙孔径分布是影响水分入渗的重要因素, CT 扫描法结合软件分析可精确计算出土壤中每个孔隙的半径, 从而进一步统计大孔隙的孔径分布。CT 扫描法利用 3D 图像处理软件将 CT 扫描的切面图重组, 基于三维图像能计算得出土壤大孔隙体积。大孔隙表面积指的是大孔隙最上端的横截面积, 其对土壤水分入渗有很大影响。

1.2 土壤大孔隙真实长度、直线长度、迂曲度

土壤大孔隙的真实长度, 也称几何长度, 指弯曲的大孔隙的总长度, 直线长度指大孔隙头至尾的直线距离。迂曲度指大孔隙真实长度与大孔隙直线长度的比值, 代表着大孔隙的弯曲程度。研究发现^[19], 土壤中大孔隙平均迂曲度越大, 其水分入渗速率越慢。

1.3 土壤大孔隙节点数量、节点密度、路径数量、连通性、倾斜角度、圆度

大孔隙节点数量即为大孔隙的分支数量, 节点密度越大则大孔隙网络连通性越好^[19], 连通性指大孔隙空间内两点间独立路径的数量^[27]。Smet 利用 CT 对土壤大孔隙三维特征进行测定后发现土壤大孔隙连接度及分形维数会对土壤饱和导水率产生显著影响^[29]。Zhang 等^[30]利用 CT 对不同控制措施土壤大孔隙三维特征进行测定(图 1), 结合参数计算发现, 土柱 1 大孔隙度仅为 2.44%, 但具有连续性很好的大孔隙, 土柱 2 的大孔隙度为 3.83%, 高于土柱 1, 但没有连续性强的孔隙, 而土柱 1 的饱和导水率是土柱 2 的 50 倍, 可见大孔隙连通性对土壤水分入渗的重要作用。对大孔隙连接度进行测量要考虑两个重要因素, 其一为孔径, 因为大孔隙的连接性是依赖孔径大小的, 孔隙越小其连通性越大^[31]。其二为孔隙两点间的尺度或距离, 距离越短越有可能产生多路径^[27,31]。有学者^[26]为了量化土壤大孔隙的穿透数量及其内部的连通性, 测量了原装土柱中两端之间大孔隙独立路径数量及大孔隙网络的节点密度, 表明土壤大孔隙度与节点数量成正比, 意味着大孔隙数量越多则连通性越强。大孔隙倾斜角指的将大孔隙视为直线时与水平面的夹角, Luo 等^[19]研究表



引自文献 [30]。Cited from reference [30].

图 1 不同控制措施土壤大孔隙三维可视图

Fig. 1 Three-dimensional(3D) visualization of soil macropores with different control measures

明, 不同土地利用方式下的土壤大孔隙夹角差异显著, 其中牧场土壤大孔隙平均夹角为 37.7° , 明显小于耕地土壤(42.3°)。大孔隙圆度可用于描述大孔隙表面积的形状, 利于帮助进一步理解大孔隙形态的土壤水分影响。

目前 CT 扫描结合图像处理技术及一些计算方法可以量化诸多大孔隙三维特征参数, 这些参数也可以很好的描述大孔隙三维特征, 在此基础上可进一步分析大孔隙三维结构特征对土壤水分的影响。但大孔隙拓扑结构十分复杂多样, 随着今后软件及算法的发展进步, 需探索出更多大孔隙三维参数, 如圆柱度、不均匀系数等, 以更贴切、准确地量化大孔隙三维特征, 为相关研究奠定基础。

2 大孔隙三维形态特征的量化

大孔隙在土壤中形态复杂多样, 随着电子计算机断层扫描(CT)技术的发展, 诸多研究人员利用各类 CT 设备(医用、工业、纳米)分析土壤孔隙结构^[19,27,32-40]。但由于设备、软件、分析技术的差异与限制, 以往基于 CT 扫描技术的大孔隙三维特征研究也存在一定差异。基于 CT 射线扫描, 数学形态学^[41]被用于量化蚯蚓洞三维特征, 包括蚯蚓洞孔径、分布、每个分支的长度、连通性以及分支密度, 利用数学形态学算法, 可以进行孔隙图像及结构的处理分析。Perret 等^[33]研发了一种 26 邻近算法(26-neighbor algorithm), 用于量化计算大孔隙的网络数量、长度、迂曲度、水力半径、网络数量密度及连接度等三维特征参数。Lindquist^[42]研发了一种程序软件包, 用于计算大孔隙的孔径分布、喉部面积分布、有效孔径比以及迂曲度。Peyton 等^[43]利用 X 射线 CT 扫描方法, 测定了未干扰土柱的大孔隙半径, 并结合应用几何分型方法描述了大孔隙结构。

随着技术的发展, 出现了诸多三维图像分析软件, 极大地提高了图像处理效率。本文对以往 4 种最常用的土壤大孔隙特征参数计算软件能获取的参数及精度进行了统计(表 2)。Luo 等^[19,44]利用医用

表 2 大孔隙特征测定方法及其精度

Tab. 2 Measuring method and precision of macropore characteristics

计算软件 Computing software	能得到的大孔隙特征 Available macropore characteristics	测定精度 Accuracy of measurement
Avizo 9.0	体积、表面积、长度、数量、倾斜角度、迂曲度、路径数量、节点数量、节点密度、孔径、连接度等 Volume, surface area, length, number, inclination angle, tortuosity, number of path, number of node, node density, diameter of macropore, connectivity, etc.	毫米级 Millimeter-scale
VG Studio MAX 2.2	体积、表面积、长度、网络密度/数量密度、倾斜角度、迂曲度、孔径、连接度等 Volume, surface area, length, network density/quantity density, inclination angle, tortuosity, diameter of macropore, connectivity, etc.	毫米级 Millimeter-scale
Arc/Info 10.0	体积、网络密度/数量密度、孔径、圆度等 Volume, network density/quantity density, diameter of macropore, roundness, etc.	毫米级 Millimeter-scale
ImageJ	体积、表面积、长度、网络密度/数量密度、连接度、迂曲度、路径数量等 Volume, surface area, length, network density/quantity density, connectivity, tortuosity, number of path, etc.	毫米级 Millimeter-scale

CT 扫描定量分析了土壤大孔隙三维结构特征, 并利用专业图像处理软件 Avizo 9.0 绘制出了孔径 > 0.75 mm 的大孔隙的立体图像, 使大孔隙实现了可视化, 并为大孔隙流模拟研究提供了必要参数。Guo 等^[28] 利用德国福希海姆西门子医疗保健的一种快速全身计算机控制横轴向断层扫描仪, 分析了污水灌溉对黏土农田土壤大孔隙的影响, 其扫描分辨率约为 0.264 mm, 然后利用 Photoshop CS3 及 Arc/Info 10.0 软件对 CT 扫描断层图像进行处理, 利用常用的预置空气管法进行阈值选取, 最终分别分析了孔径在 0.264 ~ 1 mm 之间的大孔隙及孔径 > 1 mm 的大孔隙, 并计算得到了大孔隙的数量、孔隙度、圆度等特征参数。Xu 等^[45] 利用一种美国凤凰城产的工业纳米 CT 技术分析了长期施有机肥对稻麦轮作体系温室土壤大孔隙三维特征的影响, 其 CT 扫描精度可达 50 μm , 而分析软件则使用 VG Studio MAX 2.2 (德国 Volume Graphics 公司), 最终在重建了大孔隙三维图像的基础上, 量化了大孔隙度、孔径分布、连接度、各向异性程度、分形维数等大孔隙三维特征参数。Soto-Gómez 等^[22] 利用美国哈特菲尔德国际影像科学有限公司生产的牙科用锥束 i-CAT 系统分析了大孔隙三维特征对溶质运移的影响, 其中大孔隙三维特征的量化计算软件为 ImageJ, 利用基于 ImageJ 软件的 Bone-J 颗粒分析插件, 最终可计算得到大孔隙路径和分支的数量、平板体素、端点体素、实际长度及几何长度, 并可通过实际长度与几何长度计算出大孔隙迂曲度。Hu 等^[23] 利用荷兰飞利浦 64 排螺旋 CT 医学扫描仪分析了中国北部内蒙古草原的土壤大孔隙三维特征, 软件则利用近些年科研人员使用较多的三维可视化及分析应用软件 Avizo 9.0, 得到了大孔隙密度、沿柱深度的大孔隙分布、大孔隙尺寸分布(按大孔隙体积分类)、大孔隙总体积及总表面积、大孔隙节点数量等参数。

对比最常见的分析软件可见, 以上 4 种分析软

件对土壤大孔隙的分析精度均可达到毫米, 而具体的精度主要取决于 CT 扫描设备的水平, 今后随着 CT 扫描设备技术的发展及图像处理与分析方法的进步, 对土壤大孔隙量化的精度也将不断提升, 目前来说, 纳米 CT 及微型 CT 的扫描精度最高, 工业 CT 次之, 医用 CT 精度最差, 但是纳米 CT 及微型 CT 对扫描物的体积限制较严格, 而工业 CT 及医疗 CT 可扫描体积更大的物体。此外, 4 种软件对比, Avizo9.0 相对其他软件能得到更多的大孔隙三维特征参数, 因此其也成为了近些年研究人员使用较多的软件。

从以往利用 CT 扫描研究土壤大孔隙特征的发展历程可看出, CT 及图像处理技术在土壤大孔隙三维特征的重建与计算上还有很大发展空间, 包括精度提升及大孔隙三维特征参数的丰富: 找寻更好的量化计算方法, 得到更精确的计算结果, 探索更多利于描述大孔隙拓扑结构特征的参数, 是未来大孔隙三维特征的研究重点。

3 大孔隙三维特征的影响因素

土壤大孔隙三维特征复杂多样, 是由于受到众多因素的影响, 本节将总结相关研究结果, 以为今后土壤大孔隙三维特征的深入研究提供参考。

3.1 根 系

植物根系活动是土壤大孔隙产生的主要因素之一^[46], 不同地区及不同植被群落的土壤大孔隙特征存在较大差异。时忠杰等利用穿透曲线法研究了宁夏六盘山地区不同植被群落的土壤大孔隙特征, 表明阔叶林土壤大孔隙面积高于针叶林^[47]。张家明等^[48] 探究了草本群落和木本群落的斜坡土壤大孔隙分布特征, 发现其非均匀性和变异性差异显著。根系生长会创造水流通通道, 改善土壤结构, 起到保持水土作用, 另一方面, 大孔隙增加了土壤储水能力^[49]。根系腐烂后成为根孔, Lamandé等^[8] 研究表明根系腐

烂在土壤中创造高密的大孔隙; Lesturgez 等^[50] 的研究表明牧草(柱花草 *Stylosanthes guianensis*) 2 年生长后产生了大量根系, 随后的根系衰败产生了大量大孔隙; Devitt 等^[51] 比较了有无根系土壤的水文运移规律, 表明有根系的土壤有更多水分流入, 且水分入渗更深, 可见根系活动使大孔隙向更深层土壤发育。Hu 等^[52] 研究发现, 相比于高寒草甸, 根系发育更好的芨芨草 (*Achnatherum splendens*) 及金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 灌丛覆盖的土壤具更深更长的大孔隙。Meng 等^[20] 研究发现, 根系好的土壤的大直径的大孔隙占比例更高。根系密度大的土壤中大孔隙迂曲度更小。大孔隙的弯曲度、数量和长度等孔隙特征的演化与根系性状、植物种类和土壤有机质组成等因素有关, 随着时间的迁移, 诸如孔隙长度、迂曲度等特征会随之产生变化^[53-55]。可见根系对土壤大孔隙空间结构产生积极影响, 可加速土壤水分运移, 减小地表径流; 但从反面思考, 若大密度种植植被, 土壤根系密度过大, 会使土壤大孔隙密度过大, 导致土壤肥料快速运移至地下水, 肥料利用率低, 还会造成地下水污染。此外, 大孔隙三维特征参数与植被根系是怎样随着时间的推移而相互作用, 这一问题仍然没有答案, 在今后的研究中, 需要对此方面进行更为详细的研究。

3.2 土壤动物

蚯蚓洞穴对土壤水分、溶质的运移有重要影响^[56-58]。Edwards 等^[56] 认为蚯蚓洞穴有很强的连续性, 其造成的大孔隙对水分传导很重要, 即使它们只占土壤总孔隙度很小一部分。Capowiez 等^[59] 利用 CAT 扫描技术观察土壤中的蚯蚓洞穴, 发现其有很强连续性, 且不会变换方向。Bastardie 等^[11] 利用 X 射线断层扫描技术探究了 3 种不同蚯蚓的洞穴特征及土壤水力特性, 表明差异显著, 主要是由于不同蚯蚓洞穴的连续性 & 穿透深度的差异。可见, 土壤动物活动会对大孔隙形态特征产生显著影响, 尤其是高连续性 & 低迂曲度, 会十分有利土壤水分快速运移, 因此今后研究中不能忽略土壤动物活动产生的大孔隙, 虽然其仅占很小比例。

3.3 干湿及冻融交替

气候是引起土壤大孔隙变化的因素之一^[60-64], 干湿及冻融交替会对土壤大孔隙特征参数产生影响^[61], 耕作导致的孔隙结构改变, 也会因干燥湿润循环而恢复^[62]。区自清等^[63] 认为冻融交替和干湿交替均可使土壤产生大孔隙和优先水流, 并且冻融交替的影响更显著, 干湿交替引起的裂隙具有很小的迂曲度 & 很高的连续性, 当其贯穿土壤时, 会对土壤水及溶质的快速入渗起到决定性影响。

Watanabe 等^[64] 在填充冻结岩心的圆柱上添加了人工大孔隙后进行了土柱渗透实验, 首次提供了水在大孔隙中冻结的直接观测证据, 可见干湿及冻融交替会与土壤大孔隙产生相互影响。在今后研究冻融地区土壤大孔隙对土壤水分的影响时, 需要重点考虑水分在大孔隙中的冻结现象, 而目前需要找寻更好的试验方法, 证明水分在什么样的条件下(温度变化、孔隙结构)会在大孔隙中冻结, 从而影响入渗。

3.4 人为因素

研究发现, 耕作方式会对土壤大孔隙产生显著影响^[64]。免耕及保护性耕作会对土壤造成更少干扰, 不易破坏垂直方向连通性强的孔隙, 且利于土壤生物存活, 从而利于形成高连通性的孔隙^[65-66]。有学者^[67-68] 发现免耕土壤的水分入渗速率显著高于秋翻土壤, 且其水分可运移至更深土层, 可认为免耕利于在深层土壤形成连续的孔隙。Hangen 等^[69] 发现保护性耕地的土壤入渗染色深度远大于传统耕地, 因保护性耕地大孔隙连通性更好。可见, 人为耕作等活动也会导致土壤大孔隙的破坏或产生。

除此之外, 土壤大孔隙三维特征还受到其他因素影响, 如化学物质、本身土壤性质、土壤石砾等, 如此众多因素共同作用导致了土壤大孔隙的不规则性, 也为模型构建等相关研究带来了困难。到目前为止, 还缺乏分析大孔隙三维特征影响因素的贡献度, 今后研究分析大孔隙三维特征参数的主要影响因子是必要的, 进行室内控制实验, 以及针对不同环境条件对大孔隙三维特征影响因子进行分析, 可探究大孔隙三维特征的主要影响因子。

4 展 望

准确测定和量化土壤大孔隙的三维特征, 利于土壤水文及地下水污染等研究发展, 可帮助进一步理解土壤污染物、化学物质、化肥等溶质的运移过程, 从而为灌溉与施肥方案、土地合理利用、土壤水分运移的预测及地下水污染的评估等提供理论基础, 进一步保证生态环境与地下水安全。虽然 CT 技术的应用可使得大孔隙结构三维可视化, 并进一步量化了诸多大孔隙三维特征参数, 然而由于设备及技术限制, 在量化分析土壤大孔隙三维特征时仍存在不少难点。比如在大孔隙图像处理过程中, 图像预处理及阈值的选取多离不开主观评价, 因此无法避免产生误差, 在今后研究中可引进图像质量客观评价等方法, 以提升图像预处理及阈值选取的精度; CT 扫描技术对物体的大小有较大限制, 扫描大直径土柱的精度会显著降低, 而采集较小直径的土柱会破坏本来连续的大孔隙, 从而影响水分入渗试验结

果。因此,在今后大孔隙三维特征研究中,需进一步改善 CT 扫描技术与图像处理方法,并进一步优化对大孔隙连通性等三维特征参数的定义与计算,从而进一步完善大孔隙三维特征相关研究。目前对土壤大孔隙三维特征参数的影响因子研究有待进一步提升,需要深入分析不同环境条件影响土壤大孔隙三维特征的主要因素,以及对大孔隙形成造成了怎样的影响,可用于解释大孔隙形成过程及土壤水分运移、地下水污染的原因,并为多孔介质孔隙模型及汇流模型的建立提供参考。

参 考 文 献

- [1] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311–1325.
- [2] Lin H, Bouma J, Wilding L P, et al. Advances in hydropedology[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 85: 81–89.
- [3] Jarvis N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(3): 523–546.
- [4] Hao Z C, Feng J. Recent advances in water and solute movement in macro-porous soil[J]. *Irrigation and Drainage*, 2002, 21(1): 67–71.
- [5] Grdins A I, Jarvis N, Van Genuchten M T. Twodimensional modelling of preferential water flow and pesticide transport from a tile-drained field[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(3): 647–660.
- [6] Katuwal S, Norgaard T, Moldrup P, et al. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography[J]. *Geoderma*, 2015, 237: 9–20.
- [7] Lamande 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.
- [8] Lamandé M, Schjønning P. Transmission of vertical stress in a real soil profile (II): effect of tyre size, inflation pressure and wheel load[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 114(2): 71–77.
- [9] Marquart A, Goldbach L, Blaum N. Soil-texture affects the influence of termite macropores on soil water infiltration in a semi-arid savanna[J/OL]. *Ecohydrology*, 2020: 1–11 [2020–10–13]. <https://doi.org/10.1002/eco.2249>.
- [10] 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(3): 247–271.
- [11] Bastardie F, Capowiez Y, De Dreuzy J R, et al. X-ray tomographic and hydraulic characterization of burrowing by three earthworm species in repacked soil cores[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24(1): 3–16.
- [12] Peth S, Horn R, Beckmann F, et al. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 897–907.
- [13] Li X, Lu Y D, Zhang X Z, et al. Quantification of macropores of Malan loess and the hydraulic significance on slope stability by X-ray computed tomography[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(16): 1–19.
- [14] Lin H S, McInnes K J, Wilding L P, et al. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions into a well-structured subsoil[J]. *Transactions of the ASAE*, 1996, 39(1): 131–135.
- [15] 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.
- [16] Udawatta R P, Anderson S H, Gantzer C J, et al. Influence of prairie restoration on CT-measured soil pore characteristics[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(1): 219–228.
- [17] Mooney S J, Morris C. A morphological approach to understanding preferential flow using image analysis with dye tracers and X-ray computed tomography[J]. *Catena*, 2008, 73(2): 204–211.
- [18] Stewart J B, Moran C J, Wood J T. Macropore sheath: quantification of plant root and soil macropore association[J]. *Plant and Soil*, 1999, 211(1): 59–67.
- [19] Luo L, Lin H, Li S. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1–2): 53–64.
- [20] Meng C, Niu J, Li X, et al. Quantifying soil macropore networks in different forest communities using industrial computed tomography in a mountainous area of North China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(9): 2357–2370.
- [21] Timms W A, Acworth R I, Crane R A, et al. The influence of syndepositional macropores on the hydraulic integrity of thick alluvial clay aquitards[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(4): 3122–3138.
- [22] Soto-Gómez D, Pérez-Rodríguez P, Vázquez-Juiz L, et al. Linking pore network characteristics extracted from CT images to the transport of solute and colloid tracers in soils under different tillage managements[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 177: 145–154.
- [23] Hu X, Lu Y L, Liu Y, et al. Exclosure on CT-measured soil macropore characteristics in the Inner Mongolia grassland of northern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(3): 718–726.
- [24] Larsbo M, Koest E L J, Jarvis N. Relations between macropore network characteristics and the degree of preferential solute transport[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(12): 5255–5269.
- [25] Müller K, Katuwal S, Young I, et al. Characterising and linking X-ray CT derived macroporosity parameters to infiltration in soils with contrasting structures[J]. *Geoderma*, 2018, 313: 82–91.
- [26] Li Y, He S, Deng X, et al. Characterization of macropore structure of Malan loess in NW China based on 3D pipe models constructed by using computed tomography technology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 271–279.

- [27] 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(6): 1530–1543.
- [28] Guo X, Zhao T, Liu L, et al. Effect of Sewage irrigation on the CT-measured soil pore characteristics of a clay farmland in northern China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(5): 1043–1056.
- [29] Smet S, Beckers E, Plougonven E, et al. Can the pore scale geometry explain soil sample scale hydrodynamic properties?[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6: 20–36.
- [30] Zhang Z, Liu K, Zhou H, et al. Linking saturated hydraulic conductivity and air permeability to the characteristics of biopores derived from X-ray computed tomography[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 1–10.
- [31] Vogel H J, Roth K. A new approach for determining effective soil hydraulic functions[J]. *European Journal of Soil Science*, 1998, 49(4): 547–556.
- [32] 吴华山, 陈效民, 陈集. 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.
- Wu H S, Chen X M, Chen J. Study on macropore in main paddy soils in Tai-Lake Region with CT[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 175–178.
- [33] Perret J, Prasher S O, Kantzas A, et al. A two-domain approach using CAT scanning to model solute transport in soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(3): 995–1010.
- [34] Yu X L, Lu S G. Double effects of biochar in affecting the macropore system of paddy soils identified by high-resolution X-ray tomography[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 3(3): 1–12.
- [35] Yi J, Yang Y, Liu M X, et al. Characterising macropores and preferential flow of mountainous forest soils with contrasting human disturbances[J]. *Soil Research*, 2019, 57(6): 601–614.
- [36] Ferro N D, Strozzi A G, Duwig C, et al. Application of smoothed particle hydrodynamics (SPH) and pore morphologic model to predict saturated water conductivity from X-ray CT imaging in a silty loam cambisol[J]. *Geoderma*, 2015, 255: 27–34.
- [37] Hu X, Li Z C, Li X Y, et al. Influence of shrub encroachment on CT-measured soil macropore characteristics in the Inner Mongolia grassland of northern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 150: 1–9.
- [38] Mooney S J, Morris C. Quantification of soil macropores at different slope positions under alpine meadow using computed tomography in the Qinghai Lake Watershed, NE Qinghai-Tibet[J]. *Eurasian Soil Science*, 2019, 52(11): 1391–1401.
- [39] Wang J, Qin Q, Guo L, et al. Multi-fractal characteristics of three-dimensional distribution of reconstructed soil pores at opencast coal-mine dump based on high-precision CT scanning[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 182: 144–152.
- [40] Hellner Q, Koestel J, Ulén B, et al. Effects of tillage and liming on macropore networks derived from X-ray tomography images of a silty clay soil[J/OL]. *Soil Use and Management*, 2018, 34(2): 12418 [2019–08–13]. <https://doi.org/10.1111/sum.12418>.
- [41] Serra J. Image analysis and mathematical morphology[M]. San Diego: Academic Press, Inc., 1983.
- [42] Lindquist W B. Network flow model studies and 3D pore structure[J]. *Contemporary Mathematics*, 2002, 295: 355–366.
- [43] 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): 329–340.
- [44] Luo L, Lin H, Halleck P. Quantifying soil structure and preferential flow in intact soil using X-ray computed tomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 1058–1069.
- [45] Xu L Y, Wang M Y, Shi X Z, et al. Effect of long-term organic fertilization on the soil pore characteristics of greenhouse vegetable fields converted from rice-wheat rotation fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631: 1243–1250.
- [46] Zhang Y, Niu J, Zhu W, et al. Effects of plant roots on soil preferential pathways and soil matrix in forest ecosystems[J]. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(2): 397–404.
- [47] 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*, 2008, 18(12): 2675–2680.
- Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, et al. Soil macropore characteristics under typical vegetations in Liupan Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 18(12): 2675–2680.
- [48] 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 J M, Xu Z M, Li F. Heterogeneous characteristics of macropores in soil of well vegetated slopes by dye tracing method[J]. *Mountain research*, 2015, 33(1): 1–7.
- [49] Liu B, Xie G, Zhang X, et al. Vegetation root system, soil erosion and ecohydrology system: a review[J]. *AER-Advances in Engineering Research*, 2015, 40: 271–279.
- [50] Lesturgez G, Poss R, Hartmann C, et al. Roots of *stylosantheshamata* create macropores in the compact layer of a sandy soil[J]. *Plant and Soil*, 2004, 260(1–2): 101–109.
- [51] 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(1): 99–108.
- [52] Hu X, Li Z C, Li X Y, et al. Quantification of soil macropores under alpine vegetation using computed tomography in the Qinghai Lake Watershed, NE Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geoderma*, 2016, 264: 244–251.
- [53] Musso A, Lamorski K, Sławiński C, et al. Evolution of soil pores and their characteristics in a siliceous and calcareous proglacial area[J/OL]. *Catena*, 2019, 182: 104154 [2019–11–12]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816219302966>.
- [54] Pires L F, Araujo-Junior C F, Auler A C, et al. Soil physico-hydric properties changes induced by weed control methods in coffee plantation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 246: 261–268.
- [55] Ng C W W, Tasnim R, Capobianco V, et al. Influence of soil nutrients on plant characteristics and soil hydrological

- responses[J]. *Géotechnique Letters*, 2018, 8(1): 19–24.
- [56] Edwards W M, Norton L D, Redmond C E. Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(2): 483–487.
- [57] McCoy E L, Boast C W, Stehouwer R C, et al. Macropore hydraulics: taking a sledgehammer to classical theory[J]. *Soil Processes and Water Quality*, 1994: 303–348.
- [58] Mallants D, Mohanty B P, Vervoort A, et al. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores[J]. *Soil Technology*, 1997, 10(2): 115–131.
- [59] Capowiez Y, Pierret A, Daniel O, et al. 3D skeleton reconstructions of natural earthworm burrow systems using CAT scan images of soil cores[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998(1): 51–59.
- [60] Hirmas D R, Giménez D, Nemes A, et al. Climate-induced changes in continental-scale soil macroporosity may intensify water cycle[J]. *Nature*, 2018, 561: 100.
- [61] Mohammed A A, Kurylyk B L, Cey E E, et al. Snowmelt infiltration and macropore flow in frozen soils: overview, knowledge gaps, and a conceptual framework[J/OL]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 180084 [2019–05–16]. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0084>.
- [62] Urbina C A, Van Dam J C, Hendriks R F A, et al. Water flow in soils with heterogeneous macropore geometries[J/OL]. *Vadose Zone Journal*, 2019, 18(1) [2019–12–13]. <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/vzj2019.02.0015>.
- [63] 区自清, 贾良清, 金海燕, 等. 大孔隙和优先水流及其对污染物在土壤中迁移行为的影响[J]. *土壤学报*, 1999, 36(3): 341–347.
- Qu Z Q, Jia L Q, Jin H Y, et al. Macropores and preferential flow and their effects on pollutant migration in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(3): 341–347.
- [64] Watanabe K, Kugisaki Y. Effect of macropores on soil freezing and thawing with infiltration[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(2): 270–278.
- [65] Guo Y, Fan R, Zhang X, et al. Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2019, 73: 134617 [2019–12–11]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971934608X>.
- [66] Gao L, Becker E, Liang G, et al. Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon[J]. *Geoderma*, 2017, 288: 97–104.
- [67] McGarry D, Bridge B J, Radford B J. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, 53(2): 105–115.
- [68] 李文凤, 张晓平, 梁爱珍, 等. 免耕对黑土蚯蚓数量和土壤密度的影响[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2007, 23(4): 489–493.
- Li W F, Zhang X P, Liang A Z, et al. Impacts of no-tillage on earthworm and soil bulk density in black soil in northeast China[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2007, 23(4): 489–493.
- [69] Hangen E, Buczko U, Bens O, et al. Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 63(3): 181–186.

(责任编辑 范娟
责任编委 孙向阳)