

Multi-scale soil structure by using X-ray CT

Haitao Zhang

Hangzhou Customs, Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract

With the growth of global population, food security and ecological environment problems are becoming more and more serious, and it is very urgent to have a deep understanding of soil structure. Multi-scale soil structure determines the functional performance of soil ecosystem, and it is difficult for traditional research methods to balance the scale span and structural details. Although X-ray CT technology has been introduced into soil research, data mining and cross-scale correlation analysis are not mature, and it need to carry out targeted research. This study uses X-ray CT technology to carry out a systematic study on multi-scale soil structure. By introducing the technical principles, it explains the process of obtaining high-resolution images of soil structure, and analyzing the characteristics of soil pore and particle distribution at different scales of soil, so as to provide technical reference and theoretical basis for the study of soil physical properties, agricultural production and ecological environment protection.

Keywords

X-ray CT; multi-scale; soil structure

利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构

张海涛

浙江省杭州海关, 中国 · 浙江 杭州 310000

摘 要

随着全球人口增长, 粮食安全问题愈发严峻, 深入理解土壤结构变得十分迫切。多尺度土壤结构决定土壤生态系统的功能表现, 传统研究方法难以兼顾尺度跨越与结构细节。X射线CT技术虽已引入土壤研究, 但数据挖掘、跨尺度关联分析尚不成熟, 亟需开展针对性研究, 本研究运用X射线CT技术, 对多尺度土壤结构展开系统性研究。通过介绍技术原理, 说明利用其获取土壤结构高分辨率影像的过程, 分析不同尺度土壤孔隙、颗粒分布等特征, 为土壤物理性质研究、农业生产与生态环境保护提供技术参考和理论依据。

关键词

X射线CT; 多尺度; 土壤结构

1 引言

土壤是地球生态系统中最主要的组成部分之一, 土壤内部结构对土壤通气性、透水性和养分循环都有着直接的影响。多尺度土壤结构分析可以深刻揭示土壤的复杂物理特性, 在农业灌溉、土地利用规划以及生态修复方面具有重要的指导作用。传统的土壤结构研究手段在分辨率及无损检测上具有一定的局限性, 而 X 射线 CT 技术以高分辨率和非侵入性的特点为多尺度土壤结构的研究开拓了一条新的途径。但目前将这一技术应用于土壤结构的多尺度研究中还存在着数据处理繁杂和分析标准不够一致等诸多问题。因此, 应用 X 射线 CT 进行土壤结构多尺度研究探索对于促进土壤研究科学性与精准性有实际意义。

2 X 射线 CT 技术原理

X 射线 CT 技术, 也被称为 X 射线计算机断层扫描技术, 是一种高效的无损检测方法, 它的工作原理是基于 X 射线与物体之间的互动以及计算机图像的重建技术。

X 射线是有穿透性的, 在物体中传播时会和物体内部原子发生作用, 一部分射线被吸收, 而另一部分射线不断地渗透。不同材料吸收 X 射线的能力是有差别的, 这种差别是由材料的密度和原子序数及其他性质决定的。在 X 射线 CT 扫描系统中, X 射线源会发射 X 射线束, 并围绕被检测的物体进行旋转扫描。

3 利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构的价值

土壤的结构对于土壤的功能和生态系统的健康起到了决定性的作用, 因此, 采用 X 射线 CT 来研究土壤的多尺度结构是非常有价值的, 从农业生产的角度看, 认识土壤结构对提高农作物的产量与品质是非常重要的, 土壤的孔隙结构, 决定着水分、养分贮存和传输能力, 利用 X 射线 CT 技

【作者简介】张海涛 (1979-), 男, 本科, 助理工程师, 从事信息工程研究。

术可以准确地观察到土壤孔隙在各种尺度上的尺寸、形状和连通性^[2]。从微观尺度研究发现了土壤微小孔隙分布规律，其对土壤微生物存活及活动空间有显著影响，进而与土壤肥力关系密切。从宏观尺度对土壤团聚体间孔隙结构进行研究，有利于灌溉与施肥方案的优化，使得水分与养分能被作物更加高效地吸收与利用，降低资源浪费，以提高作物产量与质量。

4 利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构的方法

4.1 多尺度样本规划与适配 CT 成像特性

在进行 X 射线 CT 用于多尺度土壤结构研究的过程中，合理地规划多尺度样本是至关重要和首要的一步。这一步骤旨在与 CT 成像特性相匹配，以获取对土壤结构有全面和准确了解的信息，土壤结构表现出不同尺度上的特点，从微观尺度的小孔隙和颗粒，到宏观尺度的土壤团聚体和土层，均对土壤功能产生显著影响^[3]。所以有必要对不同大小土壤进行取样，在微观尺度的样品采集中，采用专门设计的小型采样器具准确地采集含有土壤颗粒和孔隙等微观结构的微小样品，以保证样品能清晰地体现微观层面结构细节。针对宏观尺度上的样品，选取大体积代表性土壤，并覆盖多种土壤团聚体以及不同土层，来显示土壤的宏观结构特征。对样本进行规划时，充分考虑了 CT 设备成像能力，不同 CT 设备，其分辨率和扫描范围都不相同，高分辨率 CT 设备适用于微观尺度样本成像，并能清晰地显示微小孔隙及颗粒形貌；但对宏观尺度样本，则需选用扫描范围更大的 CT 设备，才能完整地包容样本和获得整体结构信息。

表 1 多尺度样本规划

样本尺度	采样方法	CT 设备要求
微观尺度	使用专门设计的小型采样器具采集含有土壤颗粒和孔隙的微小样品	高分辨率 CT 设备，能清晰显示微小孔隙及颗粒形貌
	选取大体积代表性土壤，覆盖多种土壤团聚体及不同土层	扫描范围更大的 CT 设备，能完整包容样本并获得整体结构信息

4.2 扫描参数自定义以确保图像分辨率

扫描参数定制在应用 X 射线 CT 进行多尺度土壤结构研究时，是保证图像分辨率至关重要的一步，直接关系到研究结果是否准确可靠，X 射线 CT 扫描参数有很多，其中管电压、管电流、扫描时间和层厚都是相互联系在一起的，一起决定着扫描图像的好坏^[4]。管电压的高低决定 X 射线能量的大小，更高管电压可以产生更强的穿透，适合对更高密度土壤样本或者更大规模宏观样本进行扫描；但是管电压过大会使图像对比度下降，不利于某些微小结构显示。管电流会对 X 射线的强度产生影响。提高管电流可以增加图像的信噪比，使图像更加清晰，但同时也会增加样本的辐射剂量，因此需要在这两者之间找到一个平衡点。扫描时间还关系到图像质量，扫描时间越长，可采集 X 射线信号越多，

图像分辨率越高、精度越高，但会使实验周期变长，设备损耗变大。层厚即 CT 扫描得到的断层图像，较薄层厚可提供更为精细的结构信息，适用于微观尺度上土壤结构的研究；但过薄层厚将增大数据量及处理难度，对宏观样本来说未必合适。

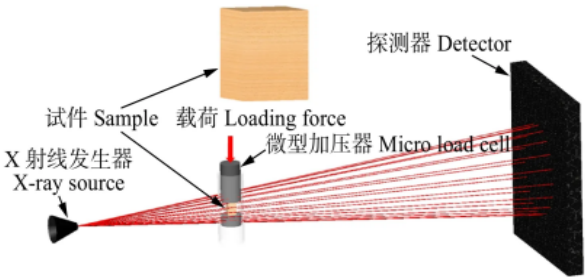


图 1: 扫描技术

4.3 图像降噪分割，CT 原始数据提纯

图像降噪分割技术是在利用 X 射线 CT 对多尺度土壤结构进行研究时，对 CT 原始数据进行净化处理的核心步骤，这对于准确解读土壤结构具有至关重要的作用，CT 扫描所得原始图像中常常含有多种噪声及伪影等干扰因素，影响土壤结构精确识别与分析^[5]。噪声可来自 X 射线探测器电子噪声、样品不均匀性和扫描时外界干扰。这些噪声使得图像模糊、对比度下降，造成土壤结构细节不易区分。伪影可能是由于扫描工具的缺陷、样本的独特形态或材料等因素引起的，例如环形伪影、条状伪影等，这些伪影可能会在图像中产生不真实的结构性信息，从而影响对实际土壤结构的评估。

为了消除噪声及伪影，必须使用适当的图像降噪算法，常用降噪算法有均值滤波、中值滤波和高斯滤波。均值滤波对图像进行像素邻域内均值计算平滑处理，可以有效地消除随机噪声，但图像边缘会被模糊；中值滤波技术是通过使用邻域像素的中值来替代当前的像素值，这种方法在抑制椒盐噪声等噪声方面表现出色，同时也能有效地保留图像的边缘信息；高斯滤波是根据高斯函数加权平均图像以消除噪声，同时能够保持平滑。针对图像噪声特点及土壤结构特点，选用适当的降噪算法或者几种算法联合应用，使降噪效果最佳。图像分割就是要从背景中分离影像上的土壤结构，并提取所关心的土壤结构相关信息，土壤结构比较复杂，含有各种组分及孔隙，图像分割存在一定的困难。常见的图像分割方法主要包括阈值分割、区域生长法和边缘检测法。阈值分割是指按照设定灰度阈值对图像进行分割，该分割方法简单、速度快，但是对灰度没有显著改变的土壤结构分割结果可能较差；区域生长法以种子点为起始点，按照某种生长准则把邻近像素归并到一个区域中，适合土壤团聚体和其他构造的划分；边缘检测方法是通过对图像中像素的灰度变化来识别土壤结构的边界，这种方法在识别具有明显边缘特征如土壤孔隙的结构方面表现得较为有效。

4.4 结构参数的量化和土壤微形态的解析

在利用 X 射线 CT 对多尺度土壤结构进行研究的过程中,结构参数的量化被视为核心步骤之一。通过对 CT 图像的深入分析,能够提取出关键的参数,进而对土壤的微观形态进行更为深入的解读。土壤微形态中蕴藏着大量信息,例如孔隙尺寸、形态、连通性以及土壤颗粒排列方式、团聚体结构等等,对了解土壤物理、化学及生物学性质具有重要意义。结构参数量化是指把这些复杂土壤微形态特征换算成特定值,用于定量分析与对比。

孔隙结构参数就是一个重要研究目标。孔隙度为土孔隙体积占总体积之比,反映土孔隙相对含量,利用 CT 图像二值化处理从土壤颗粒中分离出孔隙,并计算孔隙占据像素个数,进而获得孔隙度。孔隙的大小分布揭示了不同大小孔隙之间的比例关系,通过使用图像分析工具,对孔隙进行了详细的测量和分类,并统计了各种尺寸范围内孔隙的数量与体积,绘制孔隙大小分布曲线,以认识土壤孔隙分布特征。孔隙连通性对土壤中水、养分及气体等物质的输送有显著影响,在 CT 图像上对孔隙间的连通性进行分析,并计算出连通性孔隙个数及长度,来评价孔隙连通性。土壤颗粒、团聚体等参数均不可忽略。土壤中的颗粒形态可以通过各种形状参数,例如圆度和球度来进行描述,通过对颗粒轮廓特性的测量和相应形状因子的计算,可以更深入地了解这些颗粒的形态特性。团聚体稳定与否是土壤结构稳定与否的一个重要标志,在 CT 图像上对团聚体破碎程度进行模拟,并对其稳定性进行定量。

4.5 三维模型构建直观地展示土壤结构

三维模型构建作为应用 X 射线 CT 对土壤结构进行多尺度研究的一种重要结果展示手段,可以把复杂土壤结构直观立体地展现出来,给研究者带来更加全面和深刻的认识,经过对 CT 图像降噪、分割以及结构参数量化等处理之后,根据上述处理图像数据建立三维模型,常见三维重建算法包括面绘制算法、体绘制算法等,面绘制算法首先在二维断层图像上提取对象的表面信息,生成三角网格模型,然后利用光照模型以及纹理映射的方法将模型渲染到真实感上。该方法产生的三维模型可以清楚地显示土壤结构表面形貌,例如土壤团聚体形状和孔隙张开位置。体绘制算法直接处理三维体数据,根据每个体素的属性值,通过设置不同的透明度和

颜色,将三维数据直接展示为具有立体感的图像。体绘制算法能较好地保存土壤结构内部信息、显示土壤内部孔隙分布与连通状况、土壤颗粒不同深度上的分布特点。

在三维模型的搭建上,充分发挥图像处理软件及三维建模工具作用,在 AVIZO、ImageJ 及其他专业软件中导入处理好的 CT 图像,这些软件提供大量三维重建及可视化功能。在这款软件里,根据土壤的结构特性和研究的需求,对重建参数进行了调整,例如调整体素的大小、光线的方向和颜色的映射等,以实现最佳的三维模型展示效果。针对微观尺度土壤结构,利用高分辨率三维模型凸显微小孔隙及颗粒细节;针对宏观尺度土壤结构,构建了一个含若干土层及团聚体的整体模型,以显示土壤结构宏观分布特征。三维模型建立后,可多角度观察分析。采用旋转、缩放和剖切作业对土壤结构进行了不同角度观测,对土壤孔隙连通性、团聚体内部结构和土壤颗粒排列方式有了深刻认识。

5 结语

本研究在 X 射线 CT 技术辅助下综合解剖多尺度土壤结构,以期土壤科学研究提供一套比较系统的方法和思路。研究中所揭示的土壤结构特征在促进农业生产和生态保护方面都起到了积极的促进作用。但是由于技术与方法的局限,目前的研究还存在着一些不足之处。今后,X 射线 CT 技术需要不断优化应用于土壤研究,加深对多尺度下土壤结构和土壤功能之间关系的探究,从而为土壤有关问题的研究提供更加科学的基础。

参考文献

- [1] 王万萍.利用X射线荧光光谱法检测土壤中重金属的准确性研究[J].黑龙江环境通报,2024,37(11):151-153.
- [2] 张凤圆,隋本会,胡士昌.土壤镉砷含量的高光谱定量反演与X射线荧光光谱技术的结合研究[J].现代盐化工,2024,51(05):24-26.
- [3] 蒋秉松,吴龙华,李柱.能量色散X射线荧光光谱技术在土壤重金属分析中的应用研究现状[J].岩矿测试,2024,43(04):659-675.
- [4] 杨帆,胡正峰,张颖,赵欣.便携式单波长激发能量色散X射线荧光光谱法在土壤重金属速测中的应用[J].环境污染与防治,2024,46(09):1272-1279.
- [5] 倪晓芳,张长波,唐晓勇.基于模式识别的X射线荧光光谱法用于土壤重金属快速检测[J].光谱学与光谱分析,2024,44(09):2692-2700.