doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.054

基于 CT 图像的土壤孔隙结构重构

赵　玥[1,2]　刘　雷[1,3]　韩巧玲[1,2]　赵燕东[1,2]

(1.北京林业大学工学院，北京 100083；2.城乡生态环境北京实验室，北京 100083；
3.林业装备与自动化国家林业局重点实验室，北京 100083)

摘要：土壤孔隙的几何结构和空间特征决定了土壤的透气性和保水性，对土壤功能多样性和生态修复具有重要影响，但现有对土壤孔隙的研究中，缺乏可直观性和定量性对孔隙特征进行描述的工具和方法。针对这一问题，本文采用基于面绘制的移动立方体法(Marching cubes，MC)和基于体绘制的光线投射法(Ray casting，RC)还原土壤孔隙的几何形态和空间分布。以单个孔隙和不同孔隙密集程度的土壤孔隙 CT 图像为应用对象进行实验，结果表明，2 种算法的重构效果均不受土壤样本孔隙密集程度的影响。其中，MC 算法重构出的孔隙结构存在边界锯齿化和缺失的现象，且其孔隙体积也小于实际情况；而 RC 算法重构的孔隙轮廓清晰，结构真实，可完整地呈现出孔隙结构的细节信息。为进一步评价 2 种算法的重构性能，采用模型品质、绘制速度和内存消耗 3 个指标进行实验结果的比较分析。结果表明，MC 算法存在二义性的不足，使得孔隙结构存在一定程度的失真，重构的孔隙模型质量一般，但由于其只针对表面体素进行重构，因而具有较快的绘制速度和较小的内存消耗；而 RC 算法采用为每个体素分配不透明度和光强的方法来合成模型，避免了 MC 算法的缺点，能够保持孔隙模型的细节信息，但由于其重构过程中所有体素点都参与运算，使得其绘制速度较慢，内存占用较大。通过对模型品质、绘制速度和内存消耗 3 个指标的综合分析，RC 算法更加适用于土壤孔隙的三维重构，不仅为土壤孔隙的可视化分析提供了一种较为先进的方法，也为研究土壤水分和养分的运移以及空气的交换奠定了技术基础。

关键词：土壤；孔隙结构；三维重构；CT 图像；移动立方体法；光线投射法

中图分类号：S152　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2018)S0-0401-06

Reconstruction of Soil Pore Structure Based on CT Images

ZHAO Yue[1,2]　LIU Lei[1,3]　HAN Qiaoling[1,2]　ZHAO Yandong[1,2]

(1. *School of Technology*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment*, *Beijing Municipal Education Commission*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Key Laboratory of State Forestry Administration for Forestry Equipment and Automation*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The geometric and spatial characteristics of soil pores determine the permeability and water retention of soils, which have important effects on soil functional diversity and ecological restoration. However, in the existing research on soil pores, there is a lack of tools and methods for describing intuitive and quantitative characteristics of pores. To solve this problem, the three-dimensional reconstruction technique based on marching cubes algorithm and ray casting algorithm was used to restore the geometry and spatial distribution of soil pores. The objects of experiment were the CT images of soil pores with a single large pore and different pore densities. The comparison results of the two algorithms showed that the pore structures of different sizes reconstructed by MC algorithm had boundary aliasing and missing phenomena, and the pore volume was also smaller than the actual situation. While the RC algorithm reconstructed the pore contour clearly and the structure was real, the detailed information of each pore structure can be completely represented, and the reconstruction effect was not affected by the porous density of the soil sample. In addition, in order to further evaluate the reconstruction performance of the two methods, three indicators of model quality, rendering speed and algorithm characteristics were

收稿日期：2018-07-15　修回日期：2018-08-20

基金项目：北京市科技计划项目(Z161100000916012)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015ZCQ-GX-04)、国家自然科学基金项目(41501283)、国家重点研发计划项目(2017YFD0600901)和北京市共建项目

作者简介：赵玥(1986—)，女，讲师，博士，主要从事生态信息智能检测、图像处理与模式识别研究，E-mail：zhaoyue0609@126.com

通信作者：赵燕东(1965—)，女，教授，博士生导师，主要从事生态信息智能检测与控制研究，E-mail：yandongzh@bjfu.edu.cn

used to compare and analyze the experimental results. In order to ensure the comparability of the refactoring indicators, all experiments were carried out by using the VTK graphics development library, based on the Visual Studio 2017 programming platform of the same computer. The results showed that the MC algorithm was only for the reconstruction of the pore surface voxels, so it occupied less memory and had faster drawing speed. However, due to the ambiguity of the algorithm, the quality of the reconstructed pore model was general. The RC algorithm calculated all the voxel points of the sample, so it took up a large memory and drew slowly. However, assigning opacity and light intensity were used to each voxel to synthesize the model, avoiding the disadvantages of the MC algorithm, and it was able to maintain the details of the pore model. In summary, the RC algorithm would be able to provide a more advanced method for the visualization of soil pores, laying a technical foundation for studying soil moisture and nutrient transport and air exchange.

Key words: soil; pore structure; three-dimensional reconstruction; CT images; marching cubes; ray casting

0 引言

土壤是土颗粒、有机物质、水分、空气、微生物等空间几何排列组成的疏松物质,土壤孔隙结构则是土壤中各相固体物质之间的空隙[1-3]。土壤孔隙的几何形态、空间分布、连通状态等特征决定了土壤的透气性、保水性,而且其内部物质的含量和结构变化对于生态系统的多样性、农作物的生长、建筑工程的进展等具有重要的影响。因此,对孔隙特征进行直观性描述是对土壤功能多样性和土壤修复研究的重要方向。

电子计算机断层扫描技术(Computer tomography, CT)在土壤领域已有多次的成功应用[4-5],它可以无扰动地、多方位地获得无损的土壤结构的图像。借助于计算机图形处理技术,不仅可以观察到某个断层图像中土壤内部土颗粒和孔隙的分布,也可以计算出土颗粒和孔隙结构的大小、形态等几何特征,但无法得到土柱中孔隙结构的体积、分布、连通状态等三维特征。因此,需结合重构技术还原孔隙三维结构的几何形态和空间分布,以为孔隙结构的可视化研究提供一种先进的技术手段。

三维重构是利用一系列二维图像还原出目标的三维信息(形状、大小等)的计算机技术。三维重构算法分为面绘制和体绘制两类,面绘制通过还原目标表面轮廓特征的方式,构建出被检测物体的三维模型,而体绘制则通过对所有的像素点的颜色和透明度计算,恢复出检测物体表面和内部结构的真实模型。目前,在文献中使用最为广泛的为基于面绘制的移动立方体法(Marching cubes, MC)和基于体绘制的光线投射法(Ray casting, RC)[6],这 2 种算法在内存消耗和模型质量中均取得良好效果。

因此,本文选用 MC 算法和 RC 算法,基于 Visual Studio 2017 编程平台,利用 VTK 图形开发库和 QT 界面库实现土壤孔隙模型的可视化。实验分别以单个孔隙和不同孔隙密集程度的土壤孔隙 CT 图像为应用对象,在不同层面上比较 2 种算法的绘制效果。通过对模型品质、绘制速度和内存消耗 3 个指标的分析,证明 RC 算法对孔隙重构的优越性,为孔隙结构的可视化研究提供一种较为先进的技术选择。

1 土壤样本的采集及图像预处理

1.1 土壤样本的采集

研究所用土壤样本采自黑龙江省的克山农场(125°08′~125°37′E,48°12′~48°23′N),该地区属于典型黑土区,其土壤类型以黏化湿润均腐土为主[7]。于 2017 年 10 月初,采用自制的内径和高分别为 10 cm 的圆柱形有机玻璃管于层深为 0~40 cm 的侵蚀沟壁进行原状土取样。通过机械分层法,每 10 cm 取一次土样,每层重复取样 3 次,即于取样层得到 12 个土壤样本,以供后续 CT 扫描所用。

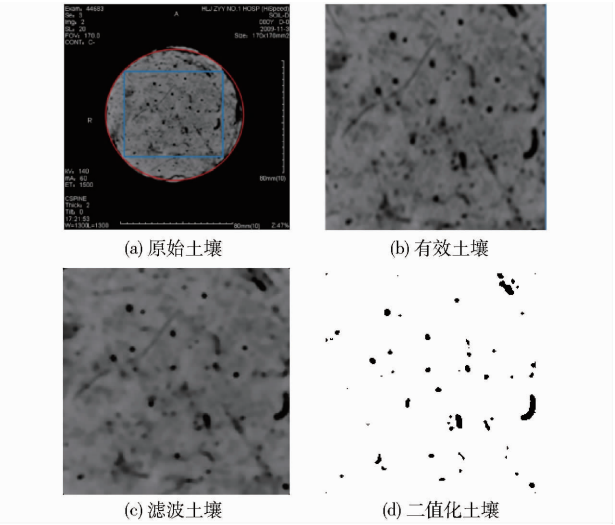
1.2 土壤 CT 图像的获取

选用黑龙江省中医药大学的 Philips Brilliance 64 层 128 排的螺旋 CT 扫描仪对原状土壤样本进行扫描处理。在土壤样本扫描前,采用标准水膜对 CT 机器进行校正以保证扫描图像的精度。仪器的扫描参数设置为:电压 120 kV,电流 195 mA,最小扫描层厚 0.65 mm,窗宽和窗位分别为 2 000 和 800。螺旋扫描每个土壤样本可得 220 幅土壤断层图像。

1.3 土壤 CT 图像的处理

通过 CT 扫描得到 DICOM 格式的土壤图像,为便于计算机的后续处理,将 DICOM 格式的原始土壤 CT 图像转换为 *.bmp 文件的形式保存,如图 1a 所示。原始土壤 CT 图像包含 2 类信息:分别为黑色区域显示的扫描信息和红色圆圈显示的有效土壤图像。由于扫描信息与后续研究无关,土壤边界受硬件技术的影响易产生畸变,进而影响计算机后续处理的效率[8]。因此,本文采用圆的内切正方形法将

土壤 CT 图像剪裁为 289 像素 ×289 像素的正方形图像，如图 1b 所示。



(a) 原始土壤　(b) 有效土壤　(c) 滤波土壤　(d) 二值化土壤

图 1　土壤 CT 图像的预处理

Fig. 1　Preprocessing of soil CT image

由于土壤 CT 图像在成像和传输的过程中会受到噪声影响，而噪声在图像中与孔隙边缘有一定的相似性，从而会影响到孔隙结构辨识的精确性[9-10]。因此，选用自适应中值滤波法去除图像高低脉冲噪声的干扰，以增强孔隙结构信息等有用信息，抑制噪声等无用信息。该方法可以根据预设的条件，在滤波过程中，动态地改变滤波器的窗口尺寸，能够同时兼顾去噪和保护图像的细节。如图 1c 所示，图像中孔隙结构的边界较为清晰，可为后续孔隙结构的辨识提供良好的图像基础。

考虑到孔隙三维重构的精准性和高效性，选用基于灰度-梯度特征改进的模糊 C 均值算法（Improved FCM based on grayscale-gradient features，GGFCM）实现孔隙结构的准确辨识[11]。该方法考虑到土壤孔隙结构小，灰度均一化等特点，基于土壤图像灰度-梯度的特征，通过对像素的模糊划分，精确地完成对土壤孔隙的辨识。如图 1d 所示为 GFFCM 法得到的孔隙结构为黑、其他物质为白的二值图像。图像预处理阶段可为土壤孔隙结构的三维重构提供精准且简练的数据基础。

2　研究方法

2.1　移动立方体法

三维重构技术是从二维图像中获取目标的三维信息，从而提供具有真实性和直观性的三维模型。三维重构技术主要分为面绘制和体绘制，其中，面绘制分为基于轮廓线的表面绘制和基于体素的表面绘制[12-13]。由于土壤孔隙的空间连通性，导致基于轮廓线的绘制方法在某个方向的切平面中会出现多条轮廓线，从而使其在重构时无法精确判断出孔隙的边界[14]；而基于体素的绘制方法以移动立方体算法（Marching cubes，MC）最为经典。

MC 算法的基本思想是根据体素各个顶点的值来判断该体素内部等值面，并通过等值面的连接构造出孔隙模型。采用多幅土壤 CT 图像构造的三维数据是规则的正交数据场，其关系式可表示为

$$F_{i,j,k} = F(x_i, y_j, z_k)$$
$$(i = 1, 2, \cdots, N_x; j = 1, 2, \cdots, N_y; k = 1, 2, \cdots, N_z) \quad (1)$$

式中　x_i、y_j、z_k——三维数据场的 x、y、z 轴的坐标值

N_x、N_y、N_z——x、y、z 坐标像素

在 MC 算法中，体素的 8 个顶点与预先设定的等值面的距离关系可分为 2 类：顶点在等值面上和顶点在等值面外，每类有 $2^8 = 256$ 种状态，根据立方体的反对称性和旋转对称性，这 256 种状态可以简化为 15 种基本形式。其次，根据事先设置好的索引表，便可确定等值面的三角剖分关系。最后，采用线性插值法计算等值面与立方体的交点，进而确定等值面的法向量，完成模型的绘制。

MC 算法可以较准确地绘制出土壤孔隙的三维结构，但与真实结构还有一定差距，无法保留孔隙轮廓的细节信息。相较于面绘制，体绘制法具有更高的绘制精度。

2.2　光线投射法

体绘制可直接将体素投影到显示平面，使得模型更加真实，是可视化研究的重要技术[15-17]。其中最为经典是光线投射法（Ray casting，RC），其计算流程如图 2 所示。

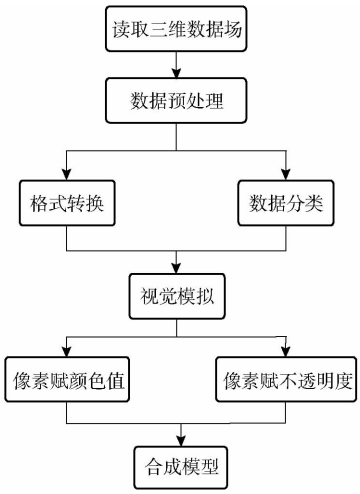


图 2　RC 算法流程图

Fig. 2　Flow chart of RC

由图 2 可知，RC 算法首先对读取的数据场进行格式转换、分类等预处理。其次，从图像序列的像素出发，沿着视线方向发射一条穿过数据场的射线，并

通过采样选取射线上 M 个等间距的像素点;然后根据 3×3 邻域内的 8 像素,采用三线性插值的方式获取该像素的不透明度和灰度。最后,根据光线模型将射线上每个采样点的颜色值进行合成,即可得到该像素的灰度;重复上述操作,获取每个像素的颜色值以合成最终的模型[18-19]。

RC 算法在渲染过程中采用 Alpha 混合技术将某个物体的颜色以一定的透明度与其后面的物体进行累加,其计算公式为[20]

$$c_i = a_s c_s + (1 - a_s) c_d \tag{2}$$

式中 a_s——物体的透明度

c_d——目标物体的真实灰度

c_s——物体真实灰度

c_i——通过透明物体观察目标物体所得到的颜色值

RC 算法对光线的渲染效果好,重构模型精度较高,但由于绘制过程中视角的改变,会导致采样像素的变化,就需要重新进行采样。因此,该方法的计算量较大,模型的实时显示和重构效率较低。

3 实例应用与验证

为测试 2 种算法对土壤孔隙的重构效果,选用二维土壤 CT 图像作为研究对象。通过对单个孔隙和不同孔隙密集程度土壤图像的重构结果的比较,分析 2 种算法的重构性能。为消除土柱顶端和底端畸变的影响,选取土柱中间部位的 200 幅图像进行重构,重构模型尺寸为 289 像素×289 像素×200 像素。

为保证算法在时间和内存消耗上的可比性,所有实验均基于同一台计算机的 Visual Studio 2017 编程平台,采用三维可视化工具 VTK 图像处理库实现。所用计算机处理器为 4.00 GHz Intel Core i7-4790,内存为 16 GB,操作系统为 Windows 7。

3.1 单个孔隙的重构结果

为详细比较 2 种算法对孔隙的重构细节,随机选取原状土壤样本中的小孔隙和大孔隙进行比较分析。如图 3 所示为单个小孔隙三维重构结果的放大图。

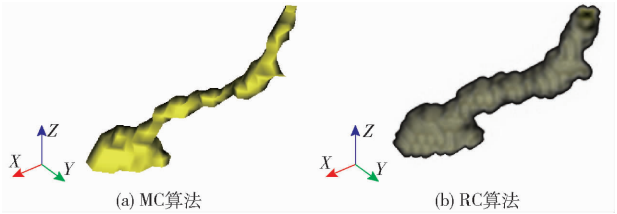


图 3 2 种算法针对小孔隙的重构结果

Fig. 3 Reconstruction result of micropore of two algorithms

由图 3a 可知,在孔隙体积较小时,MC 算法重构的模型表明具有面片感,曲面连接较突兀;而且通过与原始孔隙的对比发现,其重构的孔隙模型比真实结构偏小。而图 3b 所示的 RC 算法绘制的模型中,孔隙轮廓清晰,表面光滑,体积与真实结果较为一致,更好地保留了孔隙的细节信息。

图 4 展示了 2 种算法针对大孔隙的重构结果。由图 4 红圈部分可知,MC 算法只对孔隙表面进行重构,孔隙内部为空白,而且孔隙边缘会丢失体素点,存在一定程度的失真。而 RC 算法重构出的孔隙为实心状态,细节信息可完整地呈现出来,便于更全面地、直观性地观察孔隙结构。

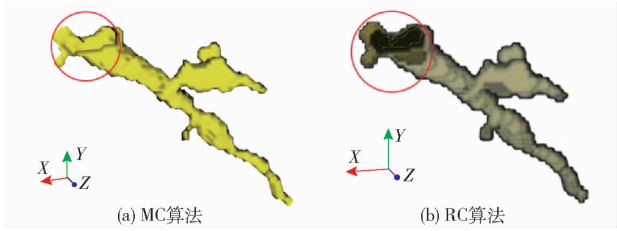


图 4 2 种算法针对大孔隙的重构结果

Fig. 4 Reconstruction result of macropores of two algorithms

综上所述,2 种重构算法对单独孔隙的绘制效果均不受孔隙体积的影响。MC 算法重构的模型存在锯齿现象,在细节处理上精度不足;而 RC 算法能够保持孔隙模型的细节信息,满足土壤孔隙的三维重构的要求。

3.2 不同密集程度的孔隙重构结果

为验证 2 种算法的普适性和重构效果的精确性,本文基于不同孔隙密集程度的土壤 CT 图像进行孔隙真实模型的绘制。根据土壤孔隙率,定义孔隙率小于 0.4 且大于 0 的为低密集程度,孔隙率在 0.4 到 0.7 之间的为中密集程度,孔隙率大于 0.7 且小于 1 的为高密集程度,分别如图 5a、5d、5g 所示。为保证重构算法的高效性和节约计算机的内存开销,所有实验均基于预处理后的孔隙二值图像进行。

如图 5 所示为 2 种算法在不同孔隙密集程度下的重构结果。其中,第 1 列是不同密集程度的土壤孔隙二值图,第 2 列是 MC 算法的重构结果,第 3 列是 RC 算法重构出的孔隙模型。由图 5b、5e、5h 可知,MC 算法针对不同密度的土壤孔隙图像的重构效果没有明显差异,其重构结果均存在像素丢失的现象,重构的孔隙体积也小于实际情况。

由图 5c、5f、5i 可知,RC 算法重构结果中接近中心位置的孔隙颜色较深,这是由于该算法通过阴影渲染来体现重构目标的立体感,若无明暗差异,孔隙模型会缺少真实性。其中,如图 5i 所示,从某个角

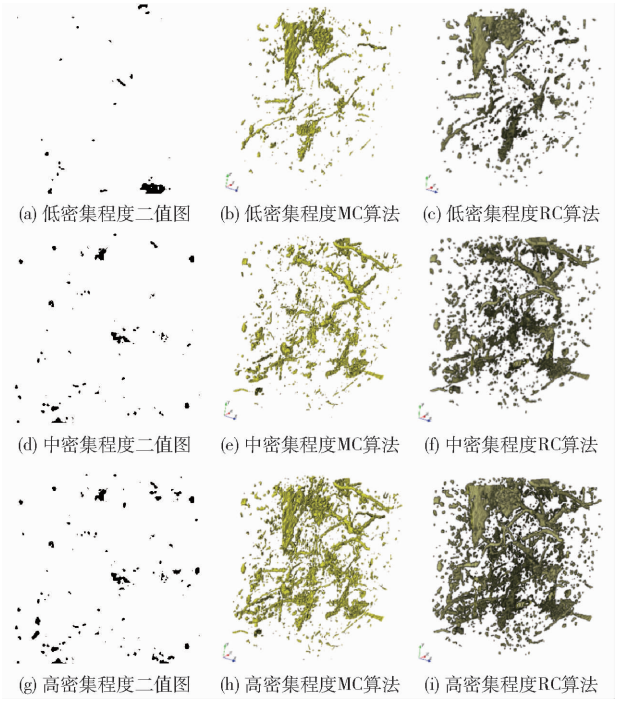


图 5　针对不同孔隙密集程度的土壤图像的重构结果

Fig. 5　Reconstruction results of soil images with different densities

度观察高密度孔隙模型出现了较多部分的重叠，但该现象并不影响重构结果，可通过旋转视角来解决。另外，由于 RC 算法中参与运算的体素点较多，使得计算量较大，在用户交互操作上存在一定卡顿的现象。

综上所述，MC 算法绘制的孔隙模型存在二义性的不足，孔隙模型质量一般；而 RC 算法则避免了 MC 算法的缺点，能更好地保留孔隙的细节信息，使得模型更加真实。

3.3　土壤孔隙重构效果的评价

为进一步评价 2 种算法的重构性能，采用模型品质、绘制速度和内存消耗 3 个指标进行实验结果分析，结果如表 1 所示。为消除计算机硬件的影响，表中的数据是 10 次测量结果的平均值。

由表 1 可知，MC 算法的预处理时间为 5.1 s，是 RC 算法的 40 倍；但 MC 算法的整体绘制时间为 6.5 s，比RC 算法少 3.3 s。这一现象主要是因为 MC 算法的预处理时间不仅包括三维数据场的读取和预处理，还包括体素与等值面的空间几何关系的计算，因此，该算法在预处理阶段涉及了大量的数据运算；而 RC 算法的预处理阶段只进行了三维数据的读取，因此，耗费的时间较短。但是，由于 RC 算法重构过程中，所有孔隙体素均参与了运算，使得其整体绘制时间和内存消耗均高于 MC 算法。另外，由 3.1 节和 3.2 节的重构结果可知，RC 算法构建的孔隙模型能够保留孔隙细节信息，比 MC 算法更加真实。

表 1　2 种算法重构性能的比较

Tab. 1　Comparison of reconstruction performance of two algorithms

重构算法	预处理时间/s	整体绘制时间/s	内存消耗	模型品质
MC 算法	5.10	6.5	小	一般
RC 算法	0.13	9.8	大	高

综上所述，MC 算法具有占用内存小，绘制速度快的优点，但重构的孔隙模型品质一般，不能达到土壤孔隙三维重构的要求。而 RC 算法虽然需要占用较大内存，绘制速度较 MC 法慢，但是其重构的孔隙模型更加真实，而且绘制速度也在可接受的范围内，因此，RC 算法适用于土壤孔隙模型的可视化研究。

4　结论

(1) MC 算法和 RC 算法的重构效果均不受孔隙密集程度的影响。其中，MC 算法重构的孔隙结构存在边界锯齿化和缺失现象，且孔隙体积小于实际情况；而 RC 算法重构的孔隙轮廓清晰，结构真实，可完整地表现孔隙结构的细节信息。

(2) RC 算法的预处理时间为 0.13 s，仅为 MC 算法的 1/40，这一原因是 MC 算法在预处理阶段进行了大量的计算，而 RC 算法则只进行简单的数据读取。但是，RC 算法的整体绘制时间为 9.8 s，比 MC 算法多 3.3 s，这是由于在模型重构的过程中，RC 算法参与运算的孔隙体素数目远大于 MC 算法。

(3) 通过对模型品质、绘制速度和内存消耗 3 个指标的比较分析，表明 RC 算法更加适用于土壤孔隙的三维重构，可为进一步实现土壤孔隙的可视化分析提供一种较为先进的方法。

参　考　文　献

1　HILL R L, HORTON R, CRUSE R M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two mollisols 1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(5): 1264 - 1270.

2　FALCONER R E, HOUSTON A N, OTTEN W, et al. Emergent behavior of soil fungal dynamics: influence of soil architecture and water distribution[J]. Soil Science, 2012, 177(2): 111 - 119.

3　YU X, FU Y, LU S. Characterization of the pore structure and cementing substances of soil aggregates by a combination of

synchrotron radiation X-ray micro-computed tomography and scanning electron microscopy[J]. European Journal of Soil Science, 2017, 68(1): 66 – 79.

4 PETROVIC A M, SIEBERT J E, RIEKE P E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning 1 [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(3): 445 – 450.

5 MUNKHOLM L J, HECK R J, DEEN B. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability[J]. Geoderma, 2012, 181: 22 – 29.

6 LORENSEN W E, CLINE H E. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm[J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1987, 21(4): 163 – 169.

7 王恩姮,卢倩倩,陈祥伟. 模拟冻融循环对黑土剖面大孔隙特征的影响[J]. 土壤学报,2014,51(3):490 – 496.
WANG Enheng, LU Qianqian, CHEN Xiangwei. Characterization of macro-pores in mollisol profile subjected to simulated freezing-thawing alternation [J]. Journal of Soil Science, 2014, 51(3):490 – 496. (in Chinese)

8 赵玥,韩巧玲,赵燕东. 基于 CT 扫描技术的土壤孔隙定量表达优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 252 – 259. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20171031&flag=1. DOI=10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.031.
ZHAO Yue, HAN Qiaoling, ZHAO Yandong. Optimization of soil pore quantitative expression based on computed tomography scanning technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 252 – 259. (in Chinese)

9 ZELELEW H M, ALMUNTASHRI A, AGAIAN S, et al. An improved image processing technique for asphalt concrete X-ray CT images[J]. Road Materials and Pavement Design, 2013, 14(2): 341 – 359.

10 KRINIDIS S, CHATZIS V. A robust fuzzy local information C-means clustering algorithm[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(5): 1328 – 1337.

11 赵玥,韩巧玲,赵燕东. 基于灰度-梯度特征的改进 FCM 土壤孔隙辨识方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 279 – 286. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180333&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.033.
ZHAO Yue, HAN Qiaoling, ZHAO Yandong. Improved FCM method for pore identification based on grayscale-gradient features [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 279 – 286. (in Chinese)

12 NIELSON G M, HAMANN B. The asymptotic decider: resolving the ambiguity in marching cubes[C]// Proceedings of the 2nd Conference on Visualization'91, 1991: 83 – 91.

13 CLINE H E, LORENSEN W E, LUDKE S, et al. Two algorithms for the three-dimensional reconstruction of tomograms[J]. Medical Physics, 1988, 15(3): 320 – 327.

14 WILHELMS J, VAN GELDER A. Octrees for faster isosurface generation[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 1992, 11(3): 201 – 227.

15 LEVOY M. Display of surfaces from volume data[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1988, 8(3): 29 – 37.

16 MAX N. Optical models for direct volume rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1995, 1(2): 99 – 108.

17 RAY H, PFISTER H, SILVER D, et al. Ray casting architectures for volume visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1999, 5(3): 210 – 223.

18 朱奭,常晋义. 一种改进的基于 CUDA 的纹理映射和光线投射结合的体绘制算法[J]. 计算机应用研究,2015,32(6):1884 – 1887.
ZHU Shi, CHANG Jinyi. Improved algorithm of volume rendering combined texture mapping with ray casting based on CUDA[J]. Application Research of Computers, 2015,32(6):1884 – 1887. (in Chinese)

19 THANH C Q T, HAI N T. Trilinear interpolation algorithm for reconstruction of 3D MRI brain image[J]. American Journal of Signal Processing, 2017, 7(1): 1 – 11.

20 BOZORGI M, LINDSETH F. GPU-based multi-volume ray casting within VTK for medical applications[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2015, 10(3): 293 – 300.