

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.01.003

张靖, 陈琳, 周虎, 等. 基于数字图像技术的土壤孔隙结构定量研究进展. 土壤, 2023, 55(1): 21–29.

## 基于数字图像技术的土壤孔隙结构定量研究进展<sup>①</sup>

张靖<sup>1,2</sup>, 陈琳<sup>1</sup>, 周虎<sup>3</sup>, 马东豪<sup>2,4</sup>, 黄平<sup>1,2\*</sup>

(1 中国科学院水库水环境重点实验室, 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 2 中国科学院大学重庆学院, 重庆 400714; 3 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100091; 4 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘要:** 土壤孔隙结构是土壤孔隙的形态大小、数量搭配和空间分布状况的综合反映, 其结构的复杂性和异质性决定着土壤水分迁移、气体扩散和生物活动等过程。近年来数字图像技术的发展虽然实现了土壤孔隙结构的直接可视化和量化, 但孔隙提取的精度仍然受采样方法、设备分辨率和分割技术的限制。本文基于现有土壤孔隙研究方法的发展历程, 以图像获取、图像分割和量化分析为主线, 综述了当前常用土壤孔隙研究方法(间接法和直接法)的基本原理、主要步骤和优缺点, 剖析了从图像中提取孔隙结构的分割技术, 概括了孔隙结构的常用量化指标, 最后针对现有研究方法存在的问题和不足, 对未来研究方法的发展方向进行了展望。

**关键词:** 土壤孔隙; 土壤结构; 数字图像; 图像分析; 分割算法

中图分类号: S152.4 文献标志码: A

### Quantification of Soil Pore Structure Based on Digital Image Technology: A Review

ZHANG Jing<sup>1,2</sup>, CHEN Lin<sup>1</sup>, ZHOU Hu<sup>3</sup>, MA Donghao<sup>2,4</sup>, HUANG Ping<sup>1,2\*</sup>

(1 Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 2 Chongqing School, University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3 College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100091, China; 4 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Soil pore structure is a comprehensive reflection of the shape, number and spatial distribution of soil pores. The complexity and heterogeneity of pore structure determine the processes of soil water movement, gas diffusion and biological activities. In recent years, the development of digital image technology has directly visualized and quantified pore structure, but the accuracy of pore extraction is still limited by sampling method, equipment resolution and segmentation technology. Based on the development history of existing soil pore research methods, taking image acquisition, image segmentation and quantitative analysis as the main line, this paper summarizes the basic principles, main steps, advantages and disadvantages of current commonly used pore research methods (indirect method and direct method), analyzes the segmentation technology of extracting pore structure from images, summarizes the common quantitative indicators of pore structure, and finally aims at the problems and shortcomings of existing research methods, the development direction of future research methods is prospected.

**Key words:** Soil pore; Soil structure; Digital image; Image analysis; Segmentation algorithm

土壤孔隙是评价土壤质量的重要指标之一。结构良好的土壤通常包含两种孔隙类型: 一是由气候、田间管理和生物活动等因素形成的团聚体间的结构孔隙, 二是由土壤颗粒形成的微团聚体内的质地孔隙<sup>[1-2]</sup>(图 1)。土壤孔隙结构是孔隙形态大小、数量搭配和空间分布状况的综合反映, 由孔隙的几何特征(孔隙体积、表面积、分形维数等)和拓扑特征(连通性、

弯曲度和欧拉数等)组成<sup>[3-4]</sup>, 两者共同决定了土壤水分迁移、气体扩散、生物活动和植物有效水的获取等<sup>[5-6]</sup>。因此, 开展孔隙结构的量化研究对于预测土壤水力性质、控制地下水污染、增加土壤肥力和作物产量等方面具有重要意义。

当前, 量化孔隙结构的方法包括间接法和直接法, 间接法以水气信息的变化间接推测孔隙的分布特

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41771266)、三峡后续工作规划项目(5000002021BF40001)和中国科学院西部青年学者项目(202082)资助。

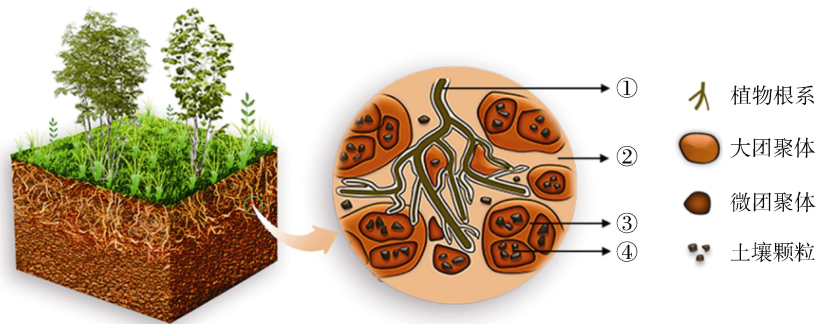
\* 通讯作者(huangping@cigit.ac.cn)

作者简介: 张靖(1997—), 女, 四川巴中人, 硕士研究生, 主要从事根土交互作用研究。E-mail: zhangjing@cigit.ac.cn

征,如压汞法<sup>[7]</sup>、土壤水分特征曲线法<sup>[8]</sup>和气体吸附法<sup>[9]</sup>等,能粗略获取孔隙度和孔隙大小分布信息,但无法衡量孔隙的形态参数和空间构型<sup>[10-11]</sup>。直接法以数字图像为基础,经图像处理实现了孔隙结构的直接可视化 and 量化<sup>[12]</sup>。如土壤切片法<sup>[13]</sup>、扫描电镜法<sup>[14]</sup>和染色示踪法<sup>[15]</sup>等,可满足孔隙二维特征参数的提取,但却具有制样麻烦,操作费时费力,对孔隙结构破坏性大的缺点。计算机断层扫描(computed tomography, CT)技术的发展,实现了原状孔隙结构的三维构建及其拓扑结构(连通度、弯曲度、欧拉数

等)的研究,具有高效、快速、无损的特点,但易受样本大小和空间分辨率之间权衡的影响,主要用于小体积样本研究<sup>[6, 16-17]</sup>。

因此,开展孔隙研究方法的评述,明确已有研究方法的不足,对于孔隙研究方法的创新及其主导的生态过程的研究具有重要意义。本文基于现有孔隙研究方法的发展历程,综述了常用孔隙定量研究方法(间接法和直接法)的基本原理、优缺点及不足,并对未来研究方法的发展方向进行了展望,以为孔隙结构量化、重建和相关土壤过程的研究提供方法和理论支撑。



(①根系分解形成的土壤大孔隙;②大团聚体之间的孔隙;③微团聚体之间的孔隙;④微团聚体内土壤颗粒之间的孔隙。其中①~③为结构孔隙;④为质地孔隙)

图 1 土壤孔隙在土壤中的分布<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Distribution of soil pores in soil

## 1 土壤孔隙结构定量研究方法

### 1.1 土壤孔隙样本采集方法

土壤取样方法因研究目的和研究方法而异,主要分为原状土样和混合土样采集两大类。原状土样可通过环刀、铝盒或 PVC 管等工具采集,采集后的土样用保鲜膜和泡沫封装好,防止水分蒸发和运输过程中的剧烈扰动,以备后续孔隙结构研究<sup>[4, 13]</sup>。混合土样用土钻法、铁铲法采集<sup>[18]</sup>。土钻法先将地表植物小心去除,然后以重锤少击的方式将土钻按压进土壤(注意锤击次数,避免过击造成土壤压实),多点采集后,混合样本,并轻置于塑料密封袋或铝制容器中<sup>[19]</sup>。铁铲取样同土钻法类似,采集的块状土壤需轻轻剥离与工具接触变形的部分,再将其密封保存。采集运回的土样根据土壤的塑性大小,于室内风干过程中将其沿自然结构断面轻轻剥离成直径小于 10 mm 的小土块,并剔除里面的根系和石子,风干后,干筛成不同粒径的团聚体,以便后续团聚体孔隙研究<sup>[20]</sup>。若需挖掘土壤剖面,需划分土壤层次取样,获取剖面图像则尽可能选择高分辨率相机。

### 1.2 土壤孔隙定量研究方法

#### 1.2.1 间接量化法 土壤环境的复杂性和不透明

性,使早期的孔隙结构量化大多建立在假设的基础上,通过水、气信息的变化间接对孔隙结构进行判断<sup>[10]</sup>,如表 1 所示。容重法是应用最早的孔隙研究方法,简单易行,但只能获取总孔隙度信息。压汞法因其孔隙范围测定广,常与其他研究方法结合使用,如 Dal Ferro 等<sup>[22]</sup>结合压汞法和微 CT 技术量化了不同施肥条件下的团聚体孔隙结构特征。汞为非浸润液体,需施加一定压力才能进入孔隙空间,根据 Young-Laplace 方程将压力转换为等效孔径,即可获得孔隙大小分布,但汞无法进入闭合孔隙,易导致孔隙数量被低估,加上“ink-bottle”效应,其测定的孔径往往小于实际孔径<sup>[7]</sup>。孔隙大小分布也可通过土壤水分特征曲线法测定,但其测定时间往往比压汞法长很多<sup>[21]</sup>。气体吸附法利用 N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 和水蒸气等气体分子的吸附量推导孔隙的分布特征,主要用于毫米级土壤样品分析,测定的孔径范围很小,一般在 1~200 nm<sup>[23]</sup>,不能用于孔隙结构的多尺度研究。总之,间接法只能粗略地获取孔隙分布信息,无法衡量孔隙的形态参数,加上其破坏性强,测定的结果往往与实际孔隙具有较大差异。

1.2.2 直接量化法 数字图像技术的发展,使孔隙结构的研究由基于水气信息的间接推测过渡到基于

图像分析的直接量化<sup>[22]</sup>。如表 2 所示，直接量化一般通过专业设备获取土壤结构图像，再经过图像处理和量化分析，即可实现孔隙结构的 2D、3D 可视化以及孔隙结构特征值的提取，此过程明显降低了人为操

作对孔隙的直接破坏，更逼近土壤结构的真实空间分布状况。挖掘拍照法是应用最早直接量化方法，通过挖掘土壤剖面获取土壤图像，虽操作简单，但挖掘过程对孔隙结构扰动大，加上土壤基质与孔隙的对比

表 1 土壤孔隙结构间接量化方法  
Table 1 Indirect quantitative methods of soil pore structure

方法	基本原理	主要步骤	优点	缺点
容重法 <sup>[21]</sup>	根据土壤容重与土壤密度之间的关系进行测定	1、土样采集； 2、土壤容重测定； 3、土壤总孔隙度=(1-容重/密度) × 100	1、简单易行； 2、设备要求低； 3、成本低	1、无法衡量形态参数； 2、只能计算总孔隙度
压汞法 <sup>[7]</sup> (MIP)	利用压汞压力与进汞量之间的关系曲线测定孔隙参数	1、样品采集； 2、不同压力下压入汞； 3、测定压入的汞体积； 4、将压力转换为等效孔径，得到样本孔隙容积分布状况	1、测定速度快； 2、结果重复性好； 3、孔隙测定范围广	1、汞高压侵入会破坏孔隙结构； 2、无法测量封闭孔隙和形态参数； 3、试剂汞有毒
水分特征曲线法 <sup>[8]</sup>	依据土壤基质势与土壤含水量之间的关系推测孔隙分布	1、样品采集； 2、使样品田间持水量； 3、测土壤水分特征曲线； 4、根据水分特征参数推测孔隙大小分布	可测 0 ~ 15 bar 之间的等效孔径	1、耗时费力； 2、不适用于膨胀黏性土矿物； 3、无法衡量形态参数
气体吸附法 <sup>[9]</sup>	利用 N <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub> 或水蒸气等在不同压力下的吸附量推导土壤孔隙分布状况	1、样品预处理； 2、惰性气体吹扫样品； 3、饱和压力测定； 4、获得吸附等温线，建立孔径分布	1、设备要求简单； 2、孔径测定范围广，可达纳米级； 3、具有良好的重现性	1、孔径限制小； 2、需加热时可能会改变气体的物理化学性质； 3、无法衡量形态参数

表 2 土壤孔隙结构直接量化方法  
Table 2 Direct quantitative methods of soil pore structure

方法	基本原理	主要步骤	优点	缺点
挖掘拍照法 <sup>[24]</sup>	通过剖面图像与图像处理技术结合测定孔隙分布情况	1、挖掘土壤剖面； 2、相机拍摄影像； 3、图像处理	1、操作简单； 2、结果直观； 3、设备简单	1、操作费时费力； 2、对孔隙结构破坏大； 3、结果精确度低
扫描电镜法 <sup>[14]</sup> (SEM)	入射电子扫描样本，捕获器捕获的二次电子生成 SEM 图像，对图像进行处理获得孔隙参数	1、样本预处理； 2、SEM 扫描样品获取图像； 3、图像处理	1、无损； 2、高效； 3、制备过程简单	1、结果精度易受样品脱水方式影响； 2、只能做 2D 分析
土壤切片法 <sup>[13]</sup>	采用固化剂固定土壤原状孔隙结构，制备切片，根据切面图像获得孔隙参数	1、样品预处理； 2、制作切片； 3、数码相机拍摄切面图像； 4、图像处理	1、成本低； 2、立体性好； 3、结果直观； 4、可获取孔隙内部信息	1、制作过程繁琐； 2、打磨过程易破坏土壤结构； 3、固化剂不能充分填充孔隙
染色示踪法 <sup>[15]</sup>	根据染色剂对土壤剖面的染色情况获取孔隙结构	1、样方设置； 2、土壤剖面染色； 3、相机拍摄； 4、图像处理	1、操作简单； 2、可视性强； 3、适用于野外	1、破坏性强； 2、结果重复性差； 3、环境污染大
计算机断层扫描(CT)技术 <sup>[6]</sup>	根据土柱不同组对 X 射线的吸收强度差异获取 CT 图像，结合图像处理获得孔隙参数	1、样品采集； 2、CT 扫描； 3、CT 图像获取； 4、图像处理	1、分辨率高； 2、对比度高； 3、扫描速度快； 4、原位无损； 5、多维分析	1、运输过程易对样本造成扰动； 2、存在样本大小与空间分辨率之间的权衡； 3、成本高
核磁共振成像(MRI)技术 <sup>[25]</sup>	氢质子在主磁场和射频磁场中产生共振信号，经计算机放大处理和重建获得磁共振图像	1、样品预处理； 2、核磁共振成像； 3、获得图像； 4、图像分析	1、原位无损； 2、多维分析； 3、可测溶质流速； 4、对比度强	1、易受样本磁性物质干扰； 2、应用成本高

差异小,易造成孔隙数量被低估<sup>[24]</sup>。扫描电镜法可用于土体表面精细结构的研究,但样品在扫描前需经过干燥、喷金处理,以增加其导电性,此过程会不同程度地破坏土体结构,加上设备自身限制,扫描电镜只能用于小样本或大样本的局部观测,导致测定结果的代表性受限<sup>[14, 26]</sup>。用光学显微镜观察土壤切片之前,样品需经过干燥、树脂硬化、切片、抛光等处理,制备过程繁琐,且树脂不能充分填充孔隙,易造成孔隙被低估<sup>[13]</sup>。染色示踪法与拍照挖掘法类似,但需用染料提前着色样地,浸染一定时间后再挖掘着色剖面并拍照,经图像处理获得孔隙结构特征及量化信息,主要用于大孔隙研究<sup>[15]</sup>。上述方法主要用于孔隙 2D 特征的量化,难以满足孔隙立体空间构型信息的获取。CT 技术和核磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)技术的发展,直接实现了原状孔隙的 3D 可视化和定量化,使结果具有较高的鲁棒性<sup>[4, 27]</sup>。相比于 MRI 技术,CT 技术具有较高的空间分辨率,能获取更多的孔隙细节信息,但用于大样本检测时易受样本大小和空间分辨率权衡的影响,形成的图像对比度低<sup>[4]</sup>。相反, MRI 技术在检测大样本时具有较高的对比度,能获取更多的孔隙,但易受土壤磁性粒子影响,不具备普遍适用性,可作为 CT 技术的补充研究方法以扩大孔隙的研究范围<sup>[25]</sup>。在孔隙研究中,CT 技术是当前最广泛使用的方法,主要通过异位研究获取原状孔隙结构特征,但田间条件下的孔隙受诸多因素影响,存在时间和空间上的变异,具破坏性取样特点的 CT 技术仍然难以实现原位孔隙的长期观测,因此,如何可视化和定量化原位孔隙结构的动态演变过程将是未来研究的重点和难点。

## 2 基于数字图像的土壤孔隙分割算法

除图像本身的分辨率、对比度影响之外,分割方法的选择也直接关系到量化数据的准确性和有效性。由于土壤图像背景复杂,包含的噪声较多,量化孔隙结构之前需要先进行目标对象(土壤孔隙)的提取,即图像分割。常用的图像分割算法有全局阈值分割算法、局部阈值分割算法、边缘分割算法、聚类分割算法和深度学习等<sup>[28-30]</sup>。

### 2.1 全局阈值分割算法

全局阈值分割算法是一种简单有效、应用广泛的分割方法。它依据图像的灰度特征来确定一个或多个阈值,将图像中每个像素的灰度值与阈值进行比较,根据比较结果将像素的灰度值分配到合适的类别中,适用于目标与背景灰度值具有明显差别的图像<sup>[31-33]</sup>。

但该方法只考虑像素点灰度值本身的特征,对噪声敏感,容易高估或低估孔隙结构,鲁棒性不高<sup>[34-35]</sup>。常用的全局阈值分割算法包括迭代最佳阈值法和 Otsu 法等。

迭代最佳阈值法从设定初始阈值开始,按照一定方式对其进行改进,直到满足设定的标准,迭代结束,所得数值即为完成孔隙分割的最佳阈值<sup>[36]</sup>。该方法实现了自动选取图像阈值,原理简单,易于实现,对噪声具有一定的鲁棒性,避免了人为确定的主观性误差,能实现图像的批量处理。

Otsu 法(大津法),为迭代法的一种,通过图像灰度特性自适应地选取阈值,进而分割图像中的目标和背景<sup>[37-38]</sup>。其可在一定程度上避免过分割现象,但只适用于单一目标分割,或感兴趣目标属于同一灰度范围,若目标灰度范围过大,可能会造成部分孔隙信息的丢失。

### 2.2 局部阈值分割算法

局部阈值分割算法是以直接寻找区域为基础的分割技术,具有两种基本形式:一是区域生长,从单个像素出发,逐步合成并形成需要的分割区域;二是从全局出发,逐步切割至需要的区域。但该方法对噪声敏感,具有过分割的缺点。主要包括区域生长法、分水岭法等。

区域生长法<sup>[39]</sup>是从预先选定的一组代表不同区域的种子像素开始,根据制定的标准将具有相似灰度、强度、纹理等特征的相邻像素合并到种子像素所代表的区域,将新添加的像素又作为新的种子像素,继续对各像素遍历直到找不到符合标准的像素为止,即可完成孔隙结构的分割判断<sup>[40-41]</sup>。一些研究人员利用该方法实现了土壤大孔隙的分割,在分割过程中,初始种子点(即像素点)的位置和数量对大孔隙分割精度具有较大影响<sup>[42]</sup>。对于具有多个分割目标的图像的应用具有局限性,易造成孔隙过分割。

分水岭法是一种基于拓扑理论的数学形态学方法,通过寻找像素灰度值分布的局部极小值来确定分类阈值,以此完成图像的分割<sup>[1, 43]</sup>。该方法对尺寸较小、颜色较浅的大孔隙具有良好的分割效果<sup>[44]</sup>。但在 CT 图像中,由于土壤基质中含有的砾石等杂质也会产生细微的灰度边界变化,从而可能导致孔隙结构的过分割现象<sup>[25, 45]</sup>。

### 2.3 边缘分割算法

边缘分割算法通过获取不同区域的轮廓线以达到分割的目的,可通过微分算子实现。常用的一阶微分算子有 Roberts、Prewitt、Sobel 等<sup>[46]</sup>。一阶微分算

子用梯度和方向 2 个模板对像素点进行卷积运算,以最大值作为输出实现边缘点提取。但因其基于滤波器进行检测,会使检测能力受到图像特性和噪声的影响<sup>[36]</sup>。LoG 算子是二阶微分算子,其采用 Laplace 算子计算高斯函数的二阶导数,将二阶导数的过零点作为边缘,但在边缘检测和噪声抑制方面存在矛盾<sup>[36]</sup>。Canny 算子为高斯函数的一阶导数,在滤波的基础上增加了非极大值抑制和双阈值处理,通过对信噪比与定位乘积得到最优化逼近算子,实现孔隙边缘精准检测<sup>[47-48]</sup>,是一种具有滤波、增强、检测的多级边缘检测算法。

#### 2.4 聚类分割算法

聚类分割算法是将图像空间中的像素用对应的特征空间点表示,根据它们在特征空间的聚类进行分割,然后将其映射回原图像空间,得到分割结果<sup>[30]</sup>。该算法提高了孔隙分割精度,但其运算速度和稳定性易受初始条件影响,且无法满足孔隙细节信息的获取。主要包括 K-均值聚类算法、模糊 C 均值聚类算法(fuzzy C-means clustering algorithm, FCM)和其他改进算法(如快速模糊 C 均值聚类算法(FFCM))等。

K-均值聚类算法是根据数据到中心点的距离来确定数据的类别。将有  $N$  个数据的集合  $A$  分为  $K$  类,即  $K$  个簇,将簇中对象的均值表示为每个簇的中心点,通过距离计算公式计算出数据到中心点的距离,根据此距离将其归类到合适的聚类中<sup>[30, 49]</sup>。聚类结束时检查聚类中心是否收敛,收敛则终止,否则就继续迭代。该方法是一种全局方法,适用于灰度区域不明显的图像,但算法具有不稳定性,易受噪声和聚类个数的影响。

FCM 算法是最常用的模糊聚类算法<sup>[50-51]</sup>。它通过对目标函数的迭代优化计算图像上的像素点在各个分类中所占比率,实现像素点的初始模糊分类,对于不同的图像具有较强的鲁棒性<sup>[36, 52]</sup>。FCM 算法整体分割效果较好,常用于形状不规则、边界不明确的大孔隙分割,具有无监督、软分割等优点<sup>[53-54]</sup>。但每次迭代计算都需要考虑所有的像素点,耗时较长,在孔隙密集区域会出现孔隙结构相连的情况,且其分割精度、运算效率和稳定性易受初始条件(聚类数目、聚类中心等)的影响<sup>[55-56]</sup>。FFCM 算法为 FCM 算法的改进,使用灰度级参与迭代运算,显著提高了运算速度<sup>[57]</sup>。但在描述复杂的孔隙结构时容易忽略细节信息,对于孔隙边界模糊的图像仍无法准确描述。

#### 2.5 深度学习

基于人工神经网络的深度学习是机器学习的一

部分,它可以是有监督的、半监督的或无监督的。深度神经网络已应用于计算机视觉、医学图像处理、根系和孔隙的分割<sup>[28, 58-59]</sup>。目前,应用于土壤领域主要有卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)和全卷积网络(fully convolutional networks, FCN)等。

CNN 采用误差梯度反馈算法进行模型优化,通过模拟人类视觉进行逐层抽象以获取高级的图像语义信息,从而提高了分割性能。其在纳米尺度上已实现对土壤离子束扫描电镜(FIB-SEM)图像的分割<sup>[60]</sup>。但 CNN 模型参数复杂,易受全连接层区域尺寸和输出特征的限制,导致运行内存浪费<sup>[29, 34]</sup>。FCN 为 CNN 的改进算法,可以解决 CNN 的不足,其本质是将传统 CNN 的全连接层替换为全卷积层,以保证卷积特征能恢复为原始尺寸的二维矩阵,通过图像端对端的输出,实现任意尺寸的图像的输入都能输出相同尺寸的孔隙二值图像<sup>[61]</sup>。其包含卷积层<sup>[62]</sup>、池化层<sup>[63]</sup>和上采样层 3 个不同的采样层。卷积层通过对输入图像的卷积运算,可以提取孔隙结构不同层次的特征。为避免过多的网络参数造成过拟合现象,在保证特征的基础上,需要经过池化层将图像划分成小于原始尺寸的固定矩形区域( $m \times n$ ),通过平均值池化或最大值池化,完成对卷积特征的采集。上采样层是池化过程的逆运算,目的是重构原始尺寸图像,通过对不同层次的二维孔隙特征图中的像素级进行分类,完成孔隙结构分割。FCN 有效利用了图像的多层次特征(如线条、形状和纹理等),既能精确定位不规则的孔隙空间位置,又能准确分割细小的孔隙结构,实现孔隙细节信息的捕获,避免了噪声的影响,保证了图像分割的有效性。虽然深度学习在土壤孔隙、植物根系的分割提取中具有较好的输出结果,但也存在大样本依赖、易过拟合、缺乏可解释性等缺点。

数字图像的分割方法有很多,目前没有针对于土壤图像的特定分割方法。各类分割方法在应用中不断改进,常依据图像本身的特点(分辨率、类型、数量等)进行选择。阈值法仍然是当前最广泛使用的方法,部分已集成到专业的分析软件中,如 Image J、VGStudio MAX 等,主要应用于 CT 图像处理。在各类方法中,阈值法、边缘法和聚类法易受噪声影响,难以获取孔隙的细节信息,存在过分割和欠分割现象。深度学习在土壤领域中应用较晚,它能有效地避免噪声干扰,具有较好的输出结果,但其大样本依赖特性使其在实际应用中受限。因此,有必要建立公共土壤图像数据库,实现数据共享,为深度学习在土壤

领域的应用提供更广阔的空间。

### 3 土壤孔隙结构计量指标

#### 3.1 二维指标

结构量化是孔隙研究的关键,分割后的二值图像可以直观反映孔隙的几何形态和空间分布状况。由于图像以矩阵的形式存储于计算机之中,孔隙信息提取、量化分析的实质就是计算机运用数学的方法分类、统计矩阵中不同的像素点。二值化图像的灰度值仅有两种状态:一是像素值为 0 的黑色区域代表孔隙,二是像素值为 1 的白色区域代表固相基质<sup>[36]</sup>。通过黑色区域像素值的计算,即可获得孔隙数目、孔隙面积、孔隙率、孔隙大小分布、孔隙成圆率和分形维数等参数,如表 3 所示。特征值的大小可直接反映土壤结构状态,如孔隙数目越多,结构越规则,则土壤质地越松散,输水能力越强。

表 3 孔隙二维特征指标及其定义  
Table 3 Two-dimensional pore characteristic indexes and their definitions

二维指标	定义
孔隙数目 <sup>[36]</sup>	像素值为 0 的黑色区域的集合个数
孔隙面积 <sup>[36]</sup>	像素值为 0 的黑色区域(代表孔隙)的像素数
孔隙率 <sup>[64]</sup>	黑色区域(孔隙)面积与图像总面积之比
孔隙大小分布 <sup>[32]</sup>	不同直径孔隙在土壤基质中的分布状况
孔隙成圆率 <sup>[65]</sup>	孔隙的形状与标准圆的接近程度
分形维数 <sup>[66]</sup>	孔隙的自相似特性,表征孔隙的不规则性和扭曲复杂程度

#### 3.2 三维指标

CT 技术和 MRI 技术的发展,实现了土壤孔隙的三维可视化。部分三维指标由二维指标发展而来,其计算不同于二维指标像素值的计算,三维指标是通过体素值确定的,如孔隙体积由孔隙包含的体素之和确定,孔隙面积则定义为边界体素之和<sup>[67]</sup>。除此之外,三维结构还有一些特有指标,如欧拉数、 $\Gamma$  指标、弯曲度和各向异性等。

欧拉数是评估土壤孔隙连通性最常用的指标之一<sup>[68-69]</sup>,用于衡量一个结构在分裂成两个独立对象之前可以断开的连接数量。Euler-Poincaré 公式如下:

$$\chi = \beta_0 - \beta_1 + \beta_2 \quad (1)$$

式中: $\chi$  为三维对象的欧拉数; $\beta_0$  为孤立对象的数量; $\beta_1$  为冗余连接的数量; $\beta_2$  为闭合腔的数量。计算单个对象的欧拉数时, $\beta_0$  始终等于 1, $\beta_1$  和  $\beta_2$  的值决定单个对象的欧拉数<sup>[70]</sup>。 $\beta_1$  的值越大,孔隙的分枝越多。而  $\beta_2$  的数量相对较少<sup>[71]</sup>,多数情况下可以忽略<sup>[69, 71]</sup>。

因此, $\chi$  值越小,孔隙之间的连接越多,连通性越高,反之,孔隙连接越少,独立孔隙越多<sup>[72]</sup>。

除欧拉数外,还有一个无量纲  $\Gamma$  指标, $\Gamma$  指标反映了穿过孔隙系统连续路径的概率, $\chi$  则反映不考虑路径长度的内部连接数量<sup>[73]</sup>。当大多数孔隙属于最大连接簇<sup>[12, 69]</sup>时, $\Gamma$  值就越大。

$$\Gamma_p = \frac{1}{N_p^2} \sum_{k=1}^{N_i} n_k^2 \quad (2)$$

式中: $N_p$  是孔隙  $p$  的体素数量; $N_i$  是所有孔隙簇的数量; $n_k$  是孔隙簇  $k$  中孔隙体素的数量; $\Gamma_p$  反映了两个随机选择的孔隙体素属于同一孔隙簇并受到最大孔隙簇  $n_k$  强烈影响的概率<sup>[37]</sup>。当所有孔隙体素都属于同一连接簇(linked cluster)时,其范围从 0(未连接孔隙簇较多)到 1。 $\Gamma$  指标与孔隙度的关系曲线反映了  $\Gamma$  指标随孔隙度的增加而增加,没有明显的渗流阈值<sup>[74]</sup>。该曲线的斜率反映了相关孔隙簇大小的变化,即数据集样本之间渗流变化的度量<sup>[74]</sup>。

孔隙弯曲度表示孔隙在某一有效垂直长度上的复杂性,定义为实际孔隙长度除以欧氏长度(Euclidean length)<sup>[75-76]</sup>,计算公式如下:

$$T = L_s / L \quad (3)$$

式中: $T$  为孔隙弯曲度; $L_s$  为孔隙路径长度之和; $L$  为孔隙垂直长度。其中, $T$  是大于 1 的无量纲参数。其值越大,表明孔隙流动性越差;其值越小,表明孔隙的分枝越少,越有利于土壤水分流动。

各向异性( $A$ )定义为孔隙投影宽度与投影高度之比<sup>[77]</sup>,关系式如下:

$$A = L_h / L_v \quad (4)$$

式中: $A$  为各向异性; $L_h$  为投影宽度; $L_v$  为投影高度。各向异性对传输过程具有重要影响, $A$  值接近 1 时,土壤常由具有立方或球形孔隙的各向同性介质组成; $A > 1$  时,土壤孔隙多为水平孔隙,反映土壤容易被侵蚀; $A < 1$  时,表明土壤孔隙具有一定方向,存在水平或垂直方向上的延长,低各向异性不利于孔隙水和溶质的保持。

## 4 总结与展望

土壤孔隙的研究已由破坏性取样-室内分析逐步过渡到原位监测-可视化研究阶段,研究尺度跨越米到纳米级,结合图像分析可实现孔隙 2D、3D 重构,能提取更多的孔隙细节信息。但土壤孔隙在时空尺度上受诸多因素的影响,具有较大的异质性,加之目前的研究都是基于小样本取样进行,结果的代表性往往较差。CT 技术、MRI 技术虽已实现原状孔隙的无损



研究,但仍难以实现原位观测同一地点、同一孔隙的动态演变过程,且应用成本较高,很难满足大规模应用推广。因此,今后土壤孔隙定量研究尚有较大的突破空间,如:

1)在图像获取上,亟需探索土壤孔隙原位动态观测系统。土壤孔隙结构及众多的生态过程在内外界因素作用下存在时间变异性和空间变异性。且目前针对土壤孔隙多属异位研究,仅限于样本的单一扫描。因此,亟需开发一种成本低、能定期自动扫描、可原位动态观测孔隙结构演变的无损检测系统。

2)在图像处理中,建立各类土壤图像公共数据库,实现神经网络的无监督学习。在图像处理方面,基于神经网络的深度学习依赖大量的数据样本进行训练,但目前土壤孔隙图像的开放性共享资源非常稀缺,因此有必要建立土壤图像的公共数据库,实现数据共享和整合分析。加之高质量标注数据集的缺乏,且人工标注数据集成本较高,如何在不进行标注的情况下训练网络,实现无监督学习是未来研究的重要方面。

3)多技术耦合,实现土壤多功能探究。如何关联孔隙结构量化数据与土壤生化、物理过程仍然是当前研究的重点和难点。三维 X-CT 与 FIB-SEM 结合,可使图像分辨率达到纳米级,与二维近红外光谱技术的结合,可实现在未扰动土壤样本中生物地球化学过程特性与土壤结构之间相互作用的评估。未来还需继续探索多技术之间的耦合,以土壤结构研究为纽带,实现土壤物理过程的原位观测和量化分析,同时链接土壤生物以及生源物质生物地球化学循环过程。

#### 参考文献:

[1] Zhou H, Mooney S J, Peng X H. Bimodal soil pore structure investigated by a combined soil water retention curve and X-ray computed tomography approach[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(6): 1270–1278.

[2] 张维俊,李双异,徐英德,等.土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展[J].*水土保持学报*, 2019, 33(4): 1–9.

[3] 程亚南,刘建立,张佳宝.土壤孔隙结构量化研究进展[J].*土壤通报*, 2012, 43(4): 988–994.

[4] Qiao J B, Liu X T, Zhu Y J, et al. Three-dimensional quantification of soil pore structure in wind-deposited loess under different vegetation types using industrial X-ray computed tomography[J]. *CATENA*, 2021, 199: 105098.

[5] 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.

[6] Dhaliwal J K, Kumar S. 3D-visualization and quantification of soil porous structure using X-ray microtomography scanning under native pasture and crop-livestock systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 218: 105305.

[7] Wang S F, Lv L, Xue K X, et al. Micropore structure and fractal characteristics of clays due to freeze-thaw and compression based on mercury intrusion porosimetry[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 851673.

[8] Sun X Q, She D L, Fei Y H, et al. Three-dimensional fractal characteristics of soil pore structure and their relationships with hydraulic parameters in biochar-amended saline soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104809.

[9] Liu B, Fan H M, Han W, et al. Linking soil water retention capacity to pore structure characteristics based on X-ray computed tomography: Chinese Mollisol under freeze-thaw effect[J]. *Geoderma*, 2021, 401: 115170.

[10] 周虎,吕贻忠,李保国.土壤结构量化研究进展[J].*土壤学报*, 2009, 46(3): 501–506.

[11] Xiong Q R, Li K, Yang D S, et al. Characterizing coal pore space by gas adsorption, mercury intrusion, FIB-SEM and  $\mu$ -CT[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(10): 209.

[12] Abrosimov K N, Gerke K M, Fomin D S, et al. Tomography in soil science: From the first experiments to modern methods (a review)[J]. *Eurasian Soil Science*, 2021, 54(9): 1385–1399.

[13] Bryk M, Kołodziej B. Suitability of image analysis in evaluating air and water permeability of soil[J]. *Agronomy*, 2021, 11(9): 1883.

[14] 申志福,孙天佑,白宇帆,等.基于电镜成像原理的黏土微结构参数提取方法[J].*岩土工程学报*, 2021, 43(5): 933–939.

[15] 祁子寒,王云琦,王玉杰,等.根系对浅表层土大孔隙分布特征及饱和渗透性的影响[J].*水土保持学报*, 2021, 35(5): 94–100, 107.

[16] Ramesh S, Thyagaraj T. Segmentation of X-ray tomography images of compacted soils[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(1): 11.

[17] Budhathoki S, Lamba J, Srivastava P, et al. Using X-ray computed tomography to quantify variability in soil macropore characteristics in pastures[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105194.

[18] 唐茹,孙钰翔,戴齐,等.土壤团聚体微结构研究方法及其进展[J].*河南农业科学*, 2018, 47(9): 8–15.

[19] 李燕丽,王昌昆,卢碧林,等.基于微根管技术的盐胁迫下小麦根系生长原位监测方法[J].*土壤学报*, 2021, 58(3): 599–609.

[20] 董建新,丛萍,刘娜,等.秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J].*土壤学报*, 2021, 58(4): 921–934.

[21] Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review[J]. *Geoderma*, 2018, 314: 122–137.

- [22] Dal Ferro N, Delmas P, Duwig C, et al. Coupling X-ray microtomography and mercury intrusion porosimetry to quantify aggregate structures of a cambisol under different fertilisation treatments[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 119: 13–21.
- [23] Kravchenko A N, Guber A K. Soil pores and their contributions to soil carbon processes[J]. *Geoderma*, 2017, 287: 31–39.
- [24] 余森. 黄土区典型农林地土壤大孔隙对水分运动参数和微塑料污染的影响机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [25] 杨国生, 左双英, 莫云川, 等. 基于核磁共振技术的贵阳红黏土剪切全过程孔隙演变规律研究[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(5): 1320–1330.
- [26] Wu Y Q, Tahmasebi P, Lin C Y, et al. A comprehensive study on geometric, topological and fractal characterizations of pore systems in low-permeability reservoirs based on SEM, MICP, NMR, and X-ray CT experiments[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 103: 12–28.
- [27] Haber-Pohlmeier S, Tötze C, Lehmann E, et al. Combination of magnetic resonance imaging and neutron computed tomography for three-dimensional rhizosphere imaging[J]. *Vadose Zone Journal*, 2019, 18(1): 1–11.
- [28] Hou L, Gao W, Bom F D, et al. Use of X-ray tomography for examining root architecture in soils[J]. *Geoderma*, 2022, 405: 115405.
- [29] 韩巧玲, 赵玥, 赵燕东, 等. 基于全卷积网络的土壤断层扫描图像中孔隙分割[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2): 128–133.
- [30] Ojeda-Magaña B, Quintanilla Domínguez J, Ruelas R, et al. Pore detection in 3-D CT soil samples through an improved sub-segmentation method[J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(1): 66–82.
- [31] 张季如, 祝杰, 黄丽, 等. 土壤微观结构定量分析的 IPP 图像技术研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(4): 80–83.
- [32] 王庆国, 杨其新, 蒋雅君, 等. 基于阈值分割法的地下工程防水板孔隙结构识别[J]. *铁道标准设计*, 2016, 60(5): 69–74.
- [33] Houston A N, Schmidt S, Tarquis A M, et al. Effect of scanning and image reconstruction settings in X-ray computed microtomography on quality and segmentation of 3D soil images[J]. *Geoderma*, 2013, 207/208: 154–165.
- [34] Han Q L, Zhao Y D, Liu L, et al. A simplified convolutional network for soil pore identification based on computed tomography imagery[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83(5): 1309–1318.
- [35] Houston A N, Otten W, Falconer R, et al. Quantification of the pore size distribution of soils: Assessment of existing software using tomographic and synthetic 3D images[J]. *Geoderma*, 2017, 299: 73–82.
- [36] 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]. *农业机械学报*, 2017, 48(10): 252–259.
- [37] Jarvis N, Larsbo M, Koestel J. Connectivity and percolation of structural pore networks in a cultivated silt loam soil quantified by X-ray tomography[J]. *Geoderma*, 2017, 287: 71–79.
- [38] Smet S, Plougonven E, Leonard A, et al. X-ray micro-CT: How soil pore space description can be altered by image processing[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1–14.
- [39] Kamdi S, Krishna R K. Image segmentation and region growing algorithm[J]. *International Journal of Computer Technology & Electronics Engineering*, 2012, 1(2): 103–107.
- [40] Shih F Y, Cheng S X. Automatic seeded region growing for color image segmentation[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(10): 877–886.
- [41] 黄展鹏, 蒋世忠, 鲍苏苏, 等. CT 系列图像的三维层次化子块生长分割[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(11): 182–184.
- [42] Hashemi M A, Khaddour G, François B, et al. A tomographic imagery segmentation methodology for three-phase geomaterials based on simultaneous region growing[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(5): 831–846.
- [43] Fei Y H, She D L, Gao L, et al. Micro-CT assessment on the soil structure and hydraulic characteristics of saline/sodic soils subjected to short-term amendment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 193: 59–70.
- [44] Avanthi Isaka B L, Ranjith P G, Rathnaweera T D, et al. Quantification of thermally-induced microcracks in granite using X-ray CT imaging and analysis[J]. *Geothermics*, 2019, 81: 152–167.
- [45] 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]. *农业机械学报*, 2018, 49(3): 279–286.
- [46] 魏伟波, 芮筱亭. 图像边缘检测方法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2006, 42(30): 88–91.
- [47] 叶万军, 李长清, 杨更社, 等. 冻融环境下黄土体结构损伤的尺度效应[J]. *岩土力学*, 2018, 39(7): 2336–2343, 2360.
- [48] 熊承仁, 唐辉明, 刘宝琛等. 利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2007, 32(3): 415–419.
- [49] 张天逸, 孙毅然, 刘凡琪, 等. 基于 K 均值聚类算法与 RBF 神经网络的交通流预测方法[J]. *智能计算机与应用*, 2020, 10(8): 148–151.
- [50] Dunn J C. A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters[J]. *Journal of Cybernetics*, 1973, 3(3): 32–57.
- [51] Bezdek J C, Ehrlich R, Full W. FCM: The fuzzy *c*-means clustering algorithm[J]. *Computers & Geosciences*, 1984, 10(2/3): 191–203.
- [52] Sun X L, Zhao Y G, Wang H L, et al. Sensitivity of digital soil maps based on FCM to the fuzzy exponent and the number of clusters[J]. *Geoderma*, 2012, 171/172: 24–34.
- [53] Han Q L, Liu L, Zhao Y D, et al. A neighborhood median weighted fuzzy *c*-means method for soil pore identification[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(5): 746–760.
- [54] Verma H, Agrawal R K, Sharan A. An improved intuitionistic fuzzy *c*-means clustering algorithm incorporating local information for brain image



- segmentation[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 46: 543–557.
- [55] Davarpanah S H, Liew A W C. Spatial possibilistic fuzzy C-mean segmentation algorithm integrated with brain mid-sagittal surface information[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2017, 19(2): 591–605.
- [56] Zhao P Z, Li S, Wang E H, et al. Tillage erosion and its effect on spatial variations of soil organic carbon in the black soil region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 72–81.
- [57] Cai W L, Chen S C, Zhang D Q. Fast and robust fuzzy c-means clustering algorithms incorporating local information for image segmentation[J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(3): 825–838.
- [58] Coelho F F, Giasson E, Campos A R, et al. Geographic object-based image analysis and artificial neural networks for digital soil mapping[J]. *CATENA*, 2021, 206: 105568.
- [59] Cortina-Januchs M G, Quintanilla-Dominguez J, Vega-Corona A, et al. Detection of pore space in CT soil images using artificial neural networks[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(2): 279–288.
- [60] Gerke K M, Korostilev E V, Romanenko K A, et al. Going submicron in the precise analysis of soil structure: A FIB-SEM imaging study at nanoscale[J]. *Geoderma*, 2021, 383: 114739.
- [61] Dai J F, He K M, Sun J. Instance-aware semantic segmentation via multi-task network cascades[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). June 27-30, 2016, Las Vegas, NV, USA. IEEE, 2016: 3150–3158.
- [62] Shen X Y, Hertzmann A, Jia J Y, et al. Automatic portrait segmentation for image stylization[J]. *Computer Graphics Forum*, 2016, 35(2): 93–102.
- [63] Ghiasi G, Fowlkes C C. Laplacian pyramid reconstruction and refinement for semantic segmentation[M]//Computer Vision - ECCV 2016. Cham: Springer International Publishing, 2016: 519–534.
- [64] 何鹏, 魏彪, 陈超, 等. 华南成矿省福建魁岐晶洞花岗岩样品孔隙结构的工业 X-CT 三维可视化研究[J]. *地质学报*, 2014, 88(4): 777–783.
- [65] 何娜娜, 贾如浩, 叶苗泰, 等. 黄土高原旱地苹果园油菜间作对土壤大孔隙结构的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 259–264.
- [66] 王聪颖, 张慧娟, 孙宇瑞, 等. 基于分形理论的土壤粗糙指数与孔隙率映射规律研究[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(11): 32–38.
- [67] Lucas M, Schlüter S, Vogel H J, et al. Roots compact the surrounding soil depending on the structures they encounter[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 16236.
- [68] Ivonin D, Kalnin T, Grachev E, et al. Quantitative analysis of pore space structure in dry and wet soil by integral geometry methods[J]. *Geosciences*, 2020, 10(9): 365.
- [69] Lucas M, Schlüter S, Vogel H J, et al. Soil structure formation along an agricultural chronosequence[J]. *Geoderma*, 2019, 350: 61–72.
- [70] Vogel H J. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections[J]. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48(3): 365–377.
- [71] Vogel H J. Topological characterization of porous media[M]//Morphology of Condensed Matter. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002: 75–92.
- [72] Armstrong R T, McClure J E, Robins V, et al. Porous media characterization using minkowski functionals: Theories, applications and future directions[J]. *Transport in Porous Media*, 2019, 130(1): 305–335.
- [73] Herring A L, Andersson L, Schlüter S, et al. Efficiently engineering pore-scale processes: The role of force dominance and topology during nonwetting phase trapping in porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 79: 91–102.
- [74] Renard P, Allard D. Connectivity metrics for subsurface flow and transport[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 168–196.
- [75] 相方园. 土壤孔隙三维构建与特征表达[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [76] Wu Y S, van Vliet L J, Frijlink H W, et al. The determination of relative path length as a measure for tortuosity in compacts using image analysis[J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2006, 28(5): 433–440.
- [77] Harrigan T P, Mann R W. Characterization of microstructural anisotropy in orthotropic materials using a second rank tensor[J]. *Journal of Materials Science*, 1984, 19(3): 761–767.