土 壤 学 报
Acta Pedologica Sinica

DOI: 10.11766/trxb202304070130

孙枭沁，佘冬立. 生物质炭改良盐渍土 CT 孔隙图像的多重分形与相对熵特征[J].土壤学报, 2024

SUN Xiaoqin, SHE Dongli. The Multifractal and Relative Entropy Characteristics of Pore Structure of CT Images in Biochar-amended Saline Soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024

生物质炭改良盐渍土 CT 孔隙图像的多重分形与相对熵特征*

孙枭沁[1, 2]，佘冬立[2†]

（1. 河海大学水土保持学院，江苏常州 213200；2. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098）

摘 要：定量化分析土壤结构对于了解土壤的物理、化学和生物过程有至关重要的作用。结合尺度分析理论和图像处理技术可从微观角度阐明土壤结构演变过程，解决生物质炭添加对土壤结构影响的争议问题。本研究以江苏滨海盐渍土为研究对象，设置 0%、2%、5% （占 0~20 cm 表层土壤质量比）3 个生物质炭添加水平改良盐渍土。每年在水稻收割后，采用塑料环刀取表层（0~20 cm）原状土，进行 Micro-CT 扫描获取土壤 CT 孔隙结构，采用不同的理论方法（多重分形分析和相对熵分析）分析生物质炭改良土壤 CT 孔隙的复杂尺度行为。结果表明，多重分形分析适合于灰度图像，而相对熵分析适合于二值图像。所有处理的孔隙复杂度逐年增加，生物质炭添加能够加快土壤孔隙结构的发育，孔隙复杂度增加速率更快。在不同生物质炭处理中，2%生物质炭处理的孔隙结构复杂程度最高（$\Delta\alpha = 0.061$，$\mathrm{Range}\Delta E = 0.436$），土壤的孔隙结构改善效果最好。高生物质炭的添加量（5%生物质炭处理）减少孔隙结构的复杂度（$\Delta\alpha = 0.045$，$\mathrm{Range}\Delta E = 0.531$），降低生物质炭的改良效果。本研究从孔隙微观角度为生物质炭改良孔隙结构提供理论依据。

关键词：滨海盐渍土；生物质炭；Micro-CT 扫描；多重分形；相对熵

中图分类号：S15　　**文献标志码：**A

The Multifractal and Relative Entropy Characteristics of Pore Structure of CT Images in Biochar-amended Saline Soils

SUN Xiaoqin[1,2], SHE Dongli[2†]

(1 .College of Soil and Water Conservation, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213200, China; 2.College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract：【Objective】Soil structure is the key to understanding physical, chemical, and biological processes that play a vital role in biodiversity and agricultural productivity. However, due to the mutual influence and simultaneous progress of these process, soil structure evolution has become irregular, unstable, and highly complex. With the development of computer technology on CT scanning images, different scaling and descriptive statistical analysis allow for a better study of soil

*国家自然科学基金项目（41825021，42177393）、江苏省自然资源科技项目（2022046）、江苏省水利科技项目（2021062）共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.41825021 and 42177393), the Natural Resources Science and Technology Project of Jiangsu Province (No.2022046), and the Water Science and Technology Project of Jiangsu Province (N .2021062).
†通讯作者 Corresponding author，E-mail:shedongli@hhu.edu.cn
作者简介：孙枭沁（1996-），男，江苏人扬中人，博士，讲师，主要从事农田水土过程与侵蚀控制研究。E-mail: sxqhhu@hhu.edu.cn
收稿日期：2023-04-07；收到修改稿日期：2023-11-14；　网络首发日期（www.cnki.net）

pore structure or architecture. 【Method】In this study, the saline/sodic soil in the coastal reclamation area of Jiangsu Province was taken as the object of investigation. Based on multifractal and relative entropy theory, combined with Micro-CT technology, the scaling features of the pore structure of biochar-amended saline soil were revealed. 【Result】In this study, the surface soils (0-20 cm) were amended by thoroughly mixing with biochar at three application rates (0%, 2% and 5% by mass of soil) in a completely randomized design. This experiment lasted for four years from 2017 to 2020. To reveal the scaling characteristics of CT pores, two methods were applied: multifractal analysis (MFA) and relative entropy (E). The results showed that different theoretical methods should be used to analyze the complex scaling behavior of soil pores. The multifractal method was suitable for grey images, while the relative entropy method was suitable for binary images. The pore complexity of all treatments increased from one year to the next. Also, the addition of biochar accelerated the developments of soil pore structure and induced a faster rate of increase in pore complexity. Among different biochar treatments, the pore complexity of 2% biochar treatment was the highest ($\Delta\alpha = 0.061$，$\mathrm{Range}\Delta E = 0.436$) and the improvement effect was the best. The addition of high biochar (5% biochar treatment) reduced the pore complexity ($\Delta\alpha = 0.045$，$\mathrm{Range}\Delta E = 0.531$), reducing the improvement effect of biochar. 【Conclusion】This study can provide a theoretical basis for the use of biochar to improve pore structure from a microscopic point of view.

Key-words: Coastal saline soil; Biochar; Micro-CT scanning; Multifractal; Relative entropy

土壤结构是土壤中固体成分（矿物和有机质）和土壤孔隙的空间排列。定量化分析土壤结构对于了解土壤的物理、化学和生物过程有至关重要的作用[1]。近年来，随着 CT 扫描技术的发展，实现了在不破坏土壤结构条件下实时获取土壤的孔隙结构[2]。然而，由于土体内物理、化学和生物过程相互影响以及各种地质过程和人类活动的影响，土壤结构呈现不规则、不稳定和高度复杂性，需要采用合适的理论定量化描述土壤结构。因此，学者将分形理论引入土壤科学中，前期分形理论集中于质量和表面分形维数的研究[3]。随着分形理论的发展，分形理论逐渐演变为多重分形分析。多重分形分析能够捕捉土壤孔隙结构的尺度规律特征并对微小的局部变化非常敏感，2003 年 Posadas 等[4]首次基于图像处理研究土壤孔隙结构的多重分形特征。目前，多重分形分析更多应用于二值图像的分析，对于灰度图像自身的研究很少。对于二值图像而言，阈值将影响其的多重分形参数[5]，然而，目前图像阈值的准确确定仍然是一个悬而未决的问题[6]。

此外，一些学者指出二值图像并非满足数学多重分形，并且仅在大尺度中存在多重分形特征[7-8]。当计算二值图像的多重分形特征时，图像的大小限制了可用于研究的尺度。此时仅通过少量尺度获得的多重分形参数是不可靠的，必须使用其他的多尺度分析方法。Bird 等[7]认为在二值图像中应用相对熵的方法能够更准确地提取土壤孔隙尺度变化的信息。与分形方法不同，相对熵不需要任何其他先验假设，因此相对熵可以在所有的研究尺度上进行。该方法已经成功应用于不同的土壤样带数据[9]，但在定量表征土壤孔隙结构方面鲜有应用。

近年来，生物质炭作为农作物秸秆等有机物质在缺氧或者限氧条件下热裂解得到的产物[10]，已被广泛应用于土壤改良。研究发现，生物质炭能够提高土壤有机碳含量、改善土壤物理结构[11]，然而生物质炭对于土壤孔隙结构的具体影响仍然存在争议。An 等[12]认为生物质炭处理后土壤的孔隙结构和水稻生产力显著提高，而 Fan 等[13]发现生物质炭处理样品的孔隙率和大孔隙度最低，改良效果不明显。因此，需结合分形理论和图像处理技术从微观角度阐明生物质炭添加对土壤结构的影响。基于此，本研究以江苏沿海围垦区盐渍土为研究对象，基于多重分形理论和相对熵理论，结合 Micro-CT 扫描技术，对比分析这两种方法在灰度图

像和二值图像中的应用前景，并揭示生物质炭施加后土壤孔隙结构的多重分形特征和相对熵特征的变化，从而为生物质炭改良土壤结构提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

为了探究生物质炭对土壤结构的改善效果，在 2016—2020 年在河海大学江宁校区开展改良盐渍土水稻栽培测坑试验。试验测坑为圆柱形，上部直径为 840 mm，高度为 850 mm，试验坑的容量为 300 L。试验在塑料大棚避雨条件下开展。测坑内装填土壤于 2015 年取自江苏省如东垦区，该地区土壤质地为粉砂壤土，其土壤基础性质见表 1。供试土壤按 1.35 $g\cdot cm^{-3}$ 的容重分层装入测坑。表层土壤（0~20 cm）采用生物质炭改良，设置 0%、2%和 5%（占表层土壤质量比）3 个生物质炭添加梯度。本试验所采用的生物质炭是河南三利公司生产的小麦秸秆生物质炭，其基础性质见表 1。水稻于每年 6 月移植，10 月收获。

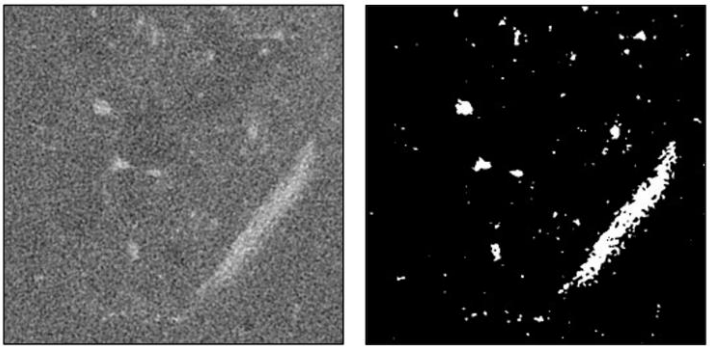
表 1 土壤和生物质炭的基础性质

Table 1 The basic properties of saline soil and biochar

土壤 Soil	砂粒 Sand/ %	粉粒 Silt/ %	黏粒 Clay/ %	质地 Soil texture	容重 Bulk density/($g\cdot cm^{-3}$)		有机碳 Organic carbon/($g\cdot kg^{-1}$)	
	32.37	62.75	4.88	粉砂壤土	1.38		3.81	
生物质炭 Biochar	pH	电导率 Electrical conductivity / ($dS\cdot m^{-1}$)	全氮 Total nitrogen /($g\cdot kg^{-1}$)	内部孔隙度 Internal porosity /%	有机碳 Organic carbon / ($g\cdot kg^{-1}$)	容重 Bulk density /($g\cdot cm^{-3}$)	颗粒密度 Particle density / ($g\cdot cm^{-3}$)	颗粒大小 Particle size /nm
	9.9	1.0	5.9	49.3	467.2	0.69	1.83	4.40

考虑到第一年（2016 年）土壤的沉降与固结，结构扫描试验从 2017 年开始。在水稻收割后，在每个测坑中心选择平整的土壤平面，用小铲子清除土壤表面的杂物，采用 100 cm^3 的标准塑料环刀取表层原状土（0~20 cm）进行 Micro-CT 扫描。CT 扫描试验在中国科学院南京土壤研究所进行，采用高分辨率 X 射线数字岩心分析系统（Phoenix Nanotom S，GE，USA）。Micro-CT 扫描通过计算机控制射线源发出射线束，数控扫描平台承载塑料环刀所取的原状土，在计算机控制下以 $0.5°\cdot s^{-1}$ 的速度旋转，平板探测器负责采集扫描的数据，最后计算机通过采集到的投影数据重建土壤的 CT 切片图像。本研究中扫描 X 射线的最大能量为 100 kV 的电压和 100 μA 的电流，扫描精度为 25 μm。

本试验采用 ImageJ 软件分析 CT 扫描图像。为了避免边缘效应并降低计算机处理时间，选择图像中心 512×512×512 voxels 部分作为研究区域。然后增加图像的亮度和对比度，以确保图像灰度值的范围为 0~255，如图 1(a)所示。接着采用中值滤波（2×2×2 voxels）对灰度图像进行滤波处理，去除图像中的噪点。当灰度图像转换为二值图像时，阈值的确定决定了二值图像能否准确反映原始图像的信息[14]。本研究通过以下方法确定图像阈值：（1）复制灰度图像并导入 ImageJ 软件；（2）采用软件默认方法手动调整阈值，对复制的图像进行二值化；（3）仔细比较原始灰度图像和二值图像，通过视觉判断确定适当的阈值，二值图像如图 1b 所示。土壤 CT 孔隙度采用 Volume Fraction Plugin 计算。为获取土壤孔隙分布，采用 LocalThickness 插件分割二值图像，分割后孔隙重建图如图 1（c）所示。不同的颜色代表不同的孔径，颜色越亮表示孔径越大。根据分割后图像，采用 Histogram 得到土壤孔隙分布。



（a）灰度图像 Grey image　　（b）二值图像 Binary image

注：图 b 中白色为孔隙，黑色为土壤基质。Notes: In Figure 1 b, the white part represents the pores and the black part represents the soil matrix.

图 1 土壤样本的典型 2D CT 扫描图像

Fig. 1 Typical 2D CT scanning images of a selected soil sample

1.2 多重分形分析

多重分形分析是分析系统尺度不变性的标准工具[15-16]。在本研究中，采用盒计数法计算三维图像的多重分形特征。首先，对于大小为$R \times R \times R$的图像，采用大小为r的盒子去覆盖图像，所需的盒子数量记为$N(r)$，每个盒子存在孔隙的概率密度函数记为$\mu_i\ (r)$。对于非均匀系统，概率密度函数$\mu_i\ (r)$和计算尺度ε存在以下关系：

$$\mu_i(r) \sim r^{\alpha} \tag{1}$$

式中，α为奇异性指数。此时，根据缩放关系定义$f(\alpha)$:

$$N(\alpha, r) \sim r^{-f(\alpha)} \tag{2}$$

式中，$f(\alpha)$反映点集的分形维数。α与$f(\alpha)$的映射图称为多重分形谱。当多重分形谱显示出倒 U 的形状时，说明分析的对象显示出多重分形特征。此外，根据度量矩的标度律，也可判断研究对象是否存在多重分析特征，即定义配分函数$\chi(r, q)$在不同维度q下为：

$$\chi(r, q) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} (\mu_i(r))^q \tag{3}$$

根据式(1)和式(3)，配分函数$\chi(r, q)$与计算尺度ε满足：

$$\chi(r, q) \sim r^{-\tau(q)} \tag{4}$$

$$\tau(q) = -\lim_{r \to 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{n(r)} (\mu_i(r))^q}{\log(r)} \tag{5}$$

式中，$\tau(q)$为q维度的累积量生成函数。当$\chi(r, q)$与r的双对数曲线图满足线性关系时，则研究对象具有多重分形特征。

基于多重分形理论，为了定量化描述对象的多重分形特征，选择以下 5 个量化参数：(1) α_0; (2) α_1; (3) α_2; (4) 振幅 $\triangle\alpha$; (5) 不对称性系数 $\triangle f$。$\triangle\alpha$与$\triangle f$的计算公式如下：

$$\Delta\alpha = \alpha_{max} - \alpha_{min} \tag{6}$$

$$\Delta f = f(\alpha_{min}) - f(\alpha_{max}) \tag{7}$$

α_0、α_1和α_2与D_0、D_1和D_2一一对应，分别反映了研究对象的容量维数、信息维数和关联维数；$\triangle\alpha$反映了对象的复杂程度，$\triangle\alpha$越大，对象的复杂程度越大；$\triangle f$反映了多重分形谱的形状，$\triangle f < 0$，多重分形谱呈现“左钩形状”，研究对象的大概率子集占比更高；$\triangle f > 0$，多重分形谱呈现“右钩形状”，研究对象的小概率子集占比更高。在本研究中，采用 ImageJ 中 MULTIFRAC 插件分析灰度图像和二值图像孔隙结构的多重分形特征[17]，其中q的取值范围为[-5,5]，步长为 0.1。

1.3 相对熵分析

熵的尺度特性是量化系统异质性的标准工具[17]，其揭示系统的异质性如何随着尺度的增加而演变。Tarquis 和 Bird[18]指出并非所有系统的熵会随着尺度产生明显的变化，为放大熵随着尺度的变化，提出了相对熵$E(r)$，相对熵($E(r)$)可用式（8）表示：

$$E(r) = -\sum_i \mu_i(r) \log \mu_i(r) + \log \frac{r}{R} \tag{8}$$

根据相对熵，计算不同尺度下的相对熵增量能够在较小的尺度上量化系统结构[16]。本研究中，选择分辨率作为尺度衡量对象，当分辨率增加 2 倍时，相对熵增量ΔE定义为：

$$\Delta E = E(2r) - E(r) \tag{9}$$

本研究采用以下 5 个参数量化相对熵结果：(1) $\Delta E_{\max}$; (2) $\Delta E_{\min}$; (3) Range $\Delta E(r)$; (4) $r(E_{\max})$; (5) $r(E_{\min})$。$\Delta E_{\max}$和$\Delta E_{\min}$分别代表相对熵增量的最大值和最小值；$r(E_{\max})$和$r(E_{\min})$分别代表相对熵增量取最大值和最小值时的像素值；Range $\Delta E(r)$表示熵增量的幅度，可表示为：

$$\text{Range}\ \Delta E(r) = \Delta E_{\max} - \Delta E_{\min} \tag{10}$$

RangeΔE越小，系统的混乱程度越低，分形特征越强。在本研究中，采用 EXCLE 编程计算灰度图像和二值图像孔隙结构的相对熵特征。

2 结 果

2.1 添加生物质炭对 CT 孔隙度和孔径分布的影响

所有处理的 CT 孔隙度如表 2 所示。2%生物质炭处理的 CT 孔隙度最大，而 5%生物质炭处理的 CT 孔隙度最小。从土壤孔径分布来看，所有处理约有 50%的孔隙半径在 0~5 pixels 之间，其中 2017 年 5%生物质炭处理 0~5 pixels 孔隙占比最高，达到了 67.76%。随着生物质炭施用年限的增加，2020 年 5%生物质炭处理下 0~5 pixels 孔隙占比降低了 47%，10~25 pixels 孔隙占比显著提高。此外，与 0%和 2%生物质炭处理相比，5%生物质炭最大孔隙半径更小（20~25 pixels）。

表 2 不同生物质炭处理的 CT 孔隙度

Table 2 The CT-porosity of different biochar treatments

年份 Year	生物质炭添加量 Biochar application amount/%	CT 孔隙度 CT-porosity	年份 Year	生物质炭添加量 Biochar application amount/%	CT 孔隙度 CT-porosity
2017 年	0	0.040	2019 年	0	0.056
	2	0.053		2	0.077
	5	0.035		5	0.047
2018 年	0	0.066	2020 年	0	0.064
	2	0.078		2	0.078
	5	0.045		5	0.053

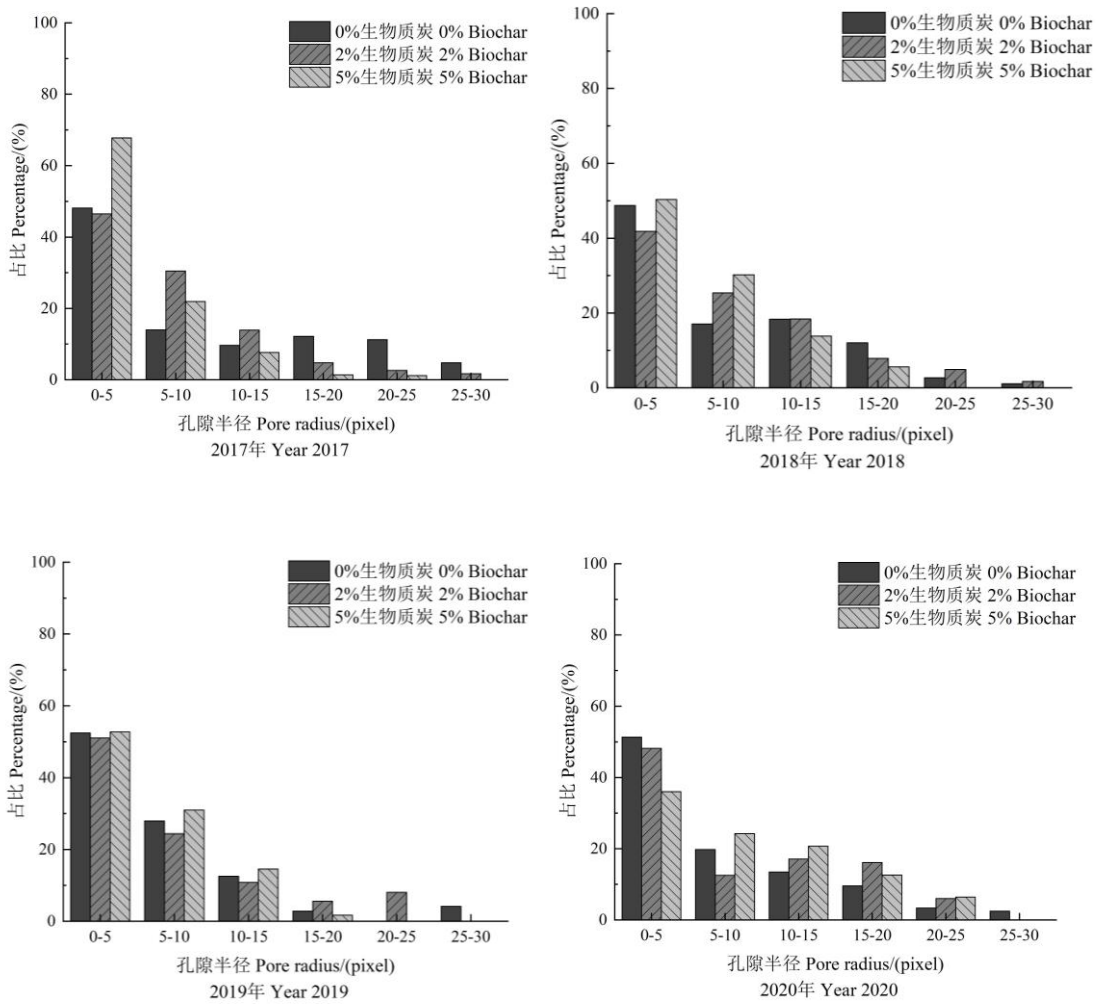
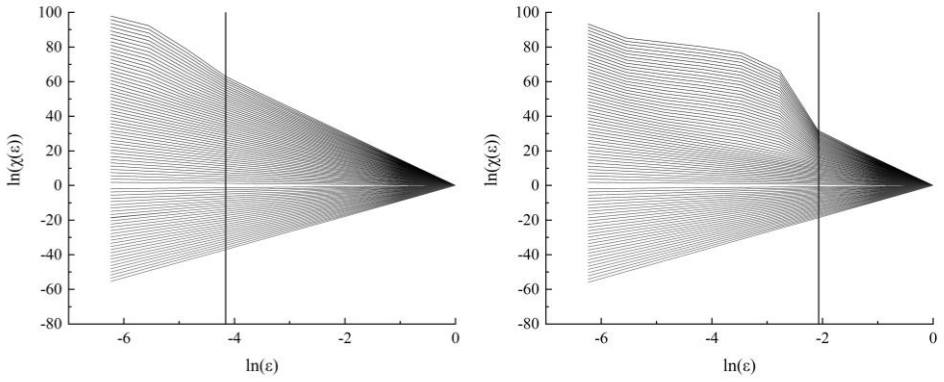


图 2 不同生物质炭处理的土壤孔径分布

Fig. 2 The pore size distribution of different biochar treatments

2.2 添加生物质炭对 CT 孔隙多重分形特征的影响

在进行多重分形分析前，需确定多重分形的计算尺度[19]，即选择$\ln(\chi(\varepsilon))$与$\ln(\varepsilon)$的直线部分进行计算（图 3）。由图 3 可知，$\ln(\chi(\varepsilon))$随着尺度增加先缓慢降低，然后突然下降，最后在大尺度上呈现线性关系。对于灰度图像，$\ln(\chi(\varepsilon))$与$\ln(\varepsilon)$在 8~512 pixels 尺度存在线性关系；然而这种关系在二值图像中仅存在于 64~512 pixels 尺度中。因此，本文选择 8~512 pixels 尺度计算灰度图像的孔隙多重分形特征；选择 64~512 pixels 尺度计算二值图像的孔隙多重分形特征。



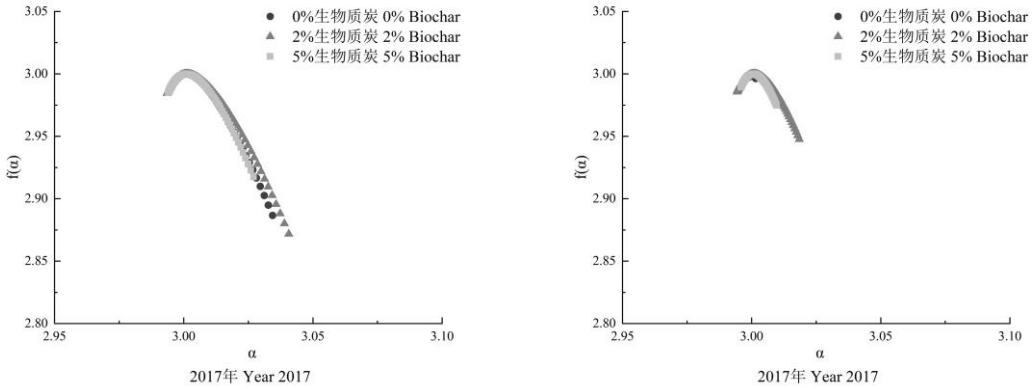
（a）灰度图像 Grey image　　（b）二值图像 Binary image

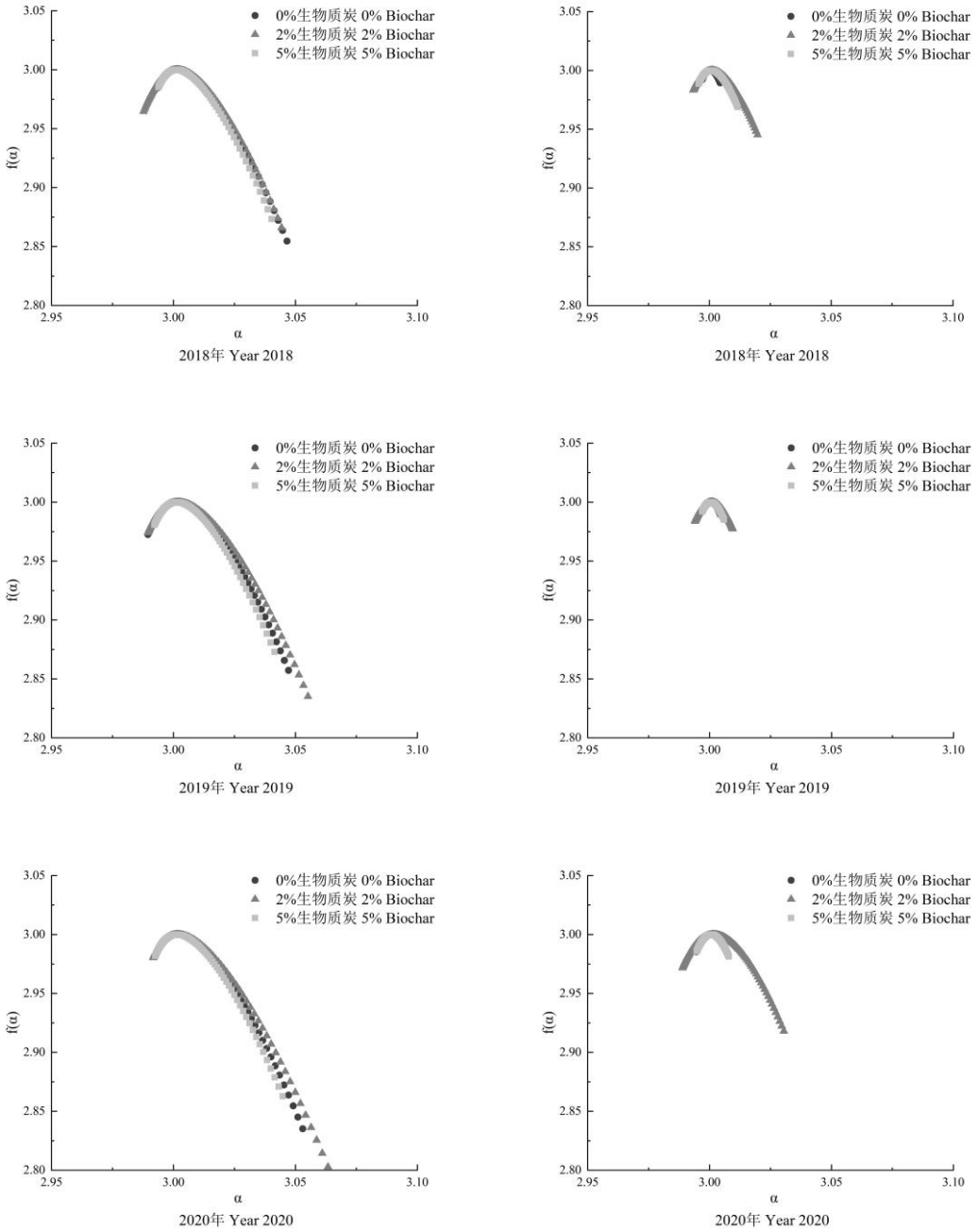
注：以 2017 年 0%生物质炭处理为例；$\varepsilon = r/R$；黑色直线标记计算所选择的最小尺寸：灰度图像为 8 pixels，二值图像为 64 pixels；图中直线代表不同维度q下配分函数与计算尺度的关系，由上至下是q从-5 至 5，步长为 0.1 的结果。Notes: Take the 2017 0% biochar treatment as an example. The black line mark in the figure calculates the minimum size selected: 8 pixels for grey images and 64 pixels for binary images. The lines in the figure represent the relationship between the partition function and the calculation scale under different dimensions q, with q ranging from -5 to 5 from top to bottom, in steps of 0.1.

图 3 配分函数$\chi(r)$与计算尺度r的双对数曲线图

Fig. 3 Log-log plot of $\chi(\varepsilon)$ versus ε, at different mass exponents

三维多重分形的结果如图 4 所示。灰度图像和二值图像在各自的计算尺度下均显示出多重分形特征。在灰度图像和二值图像中，2%生物质炭处理的土样多重分形谱均更宽，表明 2%生物质炭处理拥有更丰富更复杂的孔隙结构。此外，所有处理的多重分形谱均为短左钩形，这表明在所有处理中，大孔隙更为常见，而小孔隙占比较少，变异性指数更高。此外，灰度图像较二值图像具有更宽的多重分形谱，特别是 0%生物质炭处理，其二值图像的多重分形谱几乎呈现一个点，这意味着二值图像孔隙的多重分形特征很弱。由此可知，灰度图像在更小的尺度上存在多重分形特征，且得到的孔隙多重分形特征更强。因此，本文采用灰度图像分析不同处理间孔隙的多重分形特征差异。





注：第一列代表灰度图像计算结果，第二列代表二值图像计算结果。Notes: The first column represents the results of grey images. The second column represents the results of binary imagest.

图 4 灰度图像与二值图像的多重分形谱

Fig. 4 The multifractal spectrum of grey and binary images

不同处理的多重分形参数如表 3 所示。由表 3 可知，不同处理的α_0、α_1和α_2差异不明显，表明这三个参数不能良好地区分生物质炭处理导致孔隙结构的变化。$\Delta\alpha$能够量化孔隙结构的复杂度。2%生物质炭处理的$\Delta\alpha$最大，较 0%和 5%生物质炭处理分别增加了 14.7%和 34.9%。此外，所有处理的$\Delta\alpha$逐年增加，0%、2%和 5%生物质炭处理的$\Delta\alpha$年均增长率为 16.7%、17.7%和 19.2%，生物质炭处理的$\Delta\alpha$年均增长率更高。所有处理在所有年份的Δf均小于 0，表明本试验所有土样的孔隙均以大孔隙为主，小孔隙的占比更低。

表 3 土壤孔隙结构的三维多重分形参数

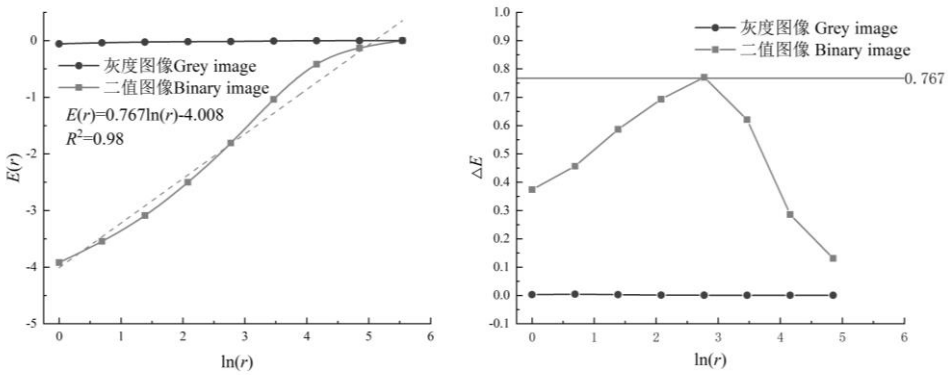
Table 3 The multifractal parameters of 3D grey images of pore structure

年份 Year	生物质炭添加量 Biochar application amount/%	α_0	α_1	α_2	$\triangle\alpha$	$\triangle f$
2017 年	0	3.001	2.999	2.998	0.040	-0.099
	2	3.001	2.999	2.997	0.047	-0.113
	5	3.001	2.999	2.998	0.033	-0.067
2018 年	0	3.001	2.999	2.997	0.053	-0.112
	2	3.002	2.999	2.996	0.057	-0.130
	5	3.001	2.999	2.997	0.046	-0.098
2019 年	0	3.002	2.998	2.996	0.058	-0.115
	2	3.002	2.998	2.995	0.066	-0.139
	5	3.001	2.999	2.997	0.049	-0.108
2020 年	0	3.002	2.999	2.997	0.060	-0.149
	2	3.002	2.998	2.996	0.072	-0.178
	5	3.001	2.999	2.997	0.052	-0.119

注：土壤孔隙结构的多重分形参数采用灰度图像计算。Note: The multifractal parameters of soil pore structure were calculated using grey images.

2.2 添加生物质炭对 CT 孔隙相对熵特征影响

灰度图像和二值图像相对熵结果如图 5 所示。由图 5 可知，灰度图像的相对熵和相对熵增量均接近于 0，说明相对熵方法不适合灰度图像土壤孔隙结构的分析。在二值图像中，相对熵并未随着尺度的增加呈现良好的线性关系，而是会随着尺度的增加上下波动。通过相对熵增量的分析，发现相对熵增量随着尺度的减小先迅速增大，再缓慢下降，在 16 pixels 尺度下相对熵增量达到最大值 0.767，这意味着在该尺度下，二值图像的自相似性发生破坏，图像不存在分形特征。



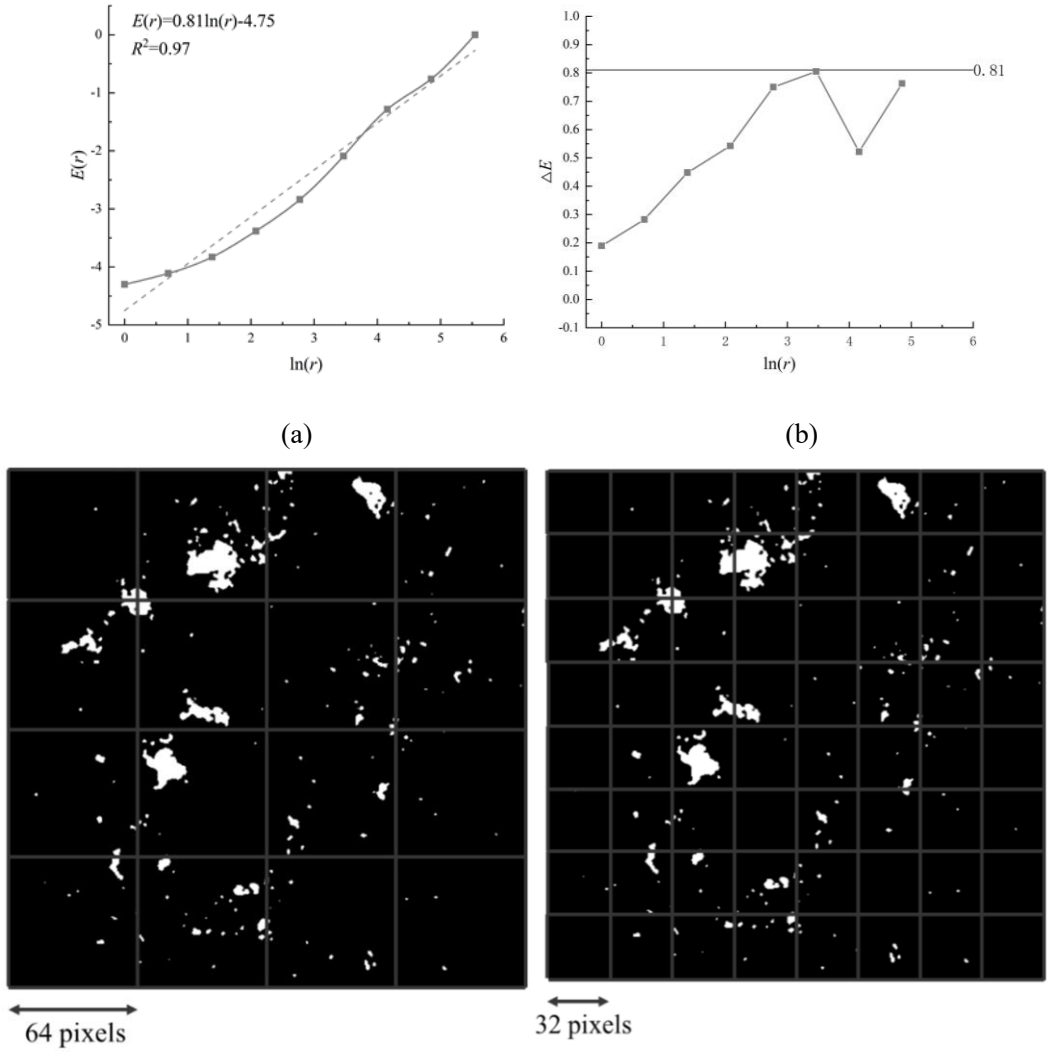
注：以 2017 年 0%生物质炭扫描土样为例。Note: Take the 0% biochar scanned soil sample in 2017 as an example.

图 5 灰度图像和二值图像的相对熵结果

Fig. 5 The relative entropy of grey and binary images

为了更直观化展示二值图像孔隙结构与尺度的关系，选择 2017 年 0%生物质炭处理的一张二值图像开展相对熵分析，如图 6 所示。由图 6（b）可知，相对熵增量在 64 至 32 pixels 时迅速增加，达到最大值 0.81。图 6（c）和图 6（d）展示了在 64 pixels 和 32 pixels 网格下的二值切片图像，可以发现当计算网格由 64 pixels 降低至 32 pixels 时，部分计算网格几乎

完全被孔隙填满，此时这些计算网格的自相似性发生破坏，从而导致图像的分形特征发生破坏。



注：以 2017 年 0%生物质炭的一张二值图片为例。Note: Take a binary image of 0% biochar in year 2017 as an example.

图 6 二值图像的二维切片图像相对熵结果图

Fig. 6 The relative entropy of a slice binary image

二值图像三维相对熵参数如表 4 所示。0%生物质炭处理的$\Delta E_{\max}$和Range(ΔE)高于生物质炭处理；而 2%生物质炭处理的$\Delta E_{\max}$和Range(ΔE)较 5%生物质炭处理分别降低 7.97%和 17.90%，说明 2%生物质炭处理的土壤孔隙拥有最强的分形特征，而未添加生物质炭处理的分形特征最弱。此外，所有处理的ΔE均在 128 pixels 处取得最小值；生物质炭添加后，$r(\Delta E_{\max})$有降低趋势。年份同样影响相对熵结果，根据表 4，所有处理的Range(ΔE) 随着年份逐渐减小，其中 2%和 5%生物质炭处理的下降速率（8.28%和 7.85%）均高于未添加生物质炭处理（7.29%），$r(\Delta E_{\max})$随着年份增加有增加的趋势。

表 4 土壤孔隙结构的三维相对熵参数

Table 4 The relative entropy parameters of 3D binary images of pore structure

年份	生物质炭添加	$\Delta E_{\max}$	$\Delta E_{\min}$	RangeΔE	$r(\Delta E_{\max})$/	$r(\Delta E_{\min})$/

Year	量 Biochar application amount/%				pixels	pixels
2017	0	0.771	0.131	0.640	16	128
	2	0.612	0.117	0.495	16	128
	5	0.593	0.011	0.582	8	128
2018	0	0.749	0.184	0.565	32	128
	2	0.528	0.051	0.477	16	128
	5	0.642	0.079	0.563	16	128
2019	0	0.625	0.083	0.541	32	128
	2	0.495	0.096	0.400	16	128
	5	0.573	0.039	0.533	16	128
2020	0	0.562	0.062	0.500	32	128
	2	0.519	0.146	0.372	32	128
	5	0.539	0.093	0.445	16	128

注：土壤孔隙结构的相对熵参数采用二值图像计算。Note: The relative entropy parameters of soil pore structure were calculated using binary images.

3 讨 论

本试验结合多重分形理论与相对熵理论探究生物质炭改良土壤微观孔隙的复杂行为，结果表明，灰度图像较二值图像在更小的尺度上存在更强的多重分形特征。这是因为当灰度图像转化为二值图像时，图像像素完全被孔隙或土壤基质填满，灰度图像中部分信息发生丢失[20]，因此二值图像微观孔隙仅在更大尺度上存在多重分形特征（64~512 pixels），此时可用于计算孔隙多重分形特征的尺度仅有 4 个，使得到的孔隙多重分形特征很弱。而相对熵方法则通过放大二值图像的孔隙结构随着研究尺度变化的差异性，能够研究所有尺度下二值图像孔隙结构，更好地表征弱多重分形对象的多尺度异质性。综上所述，为分析土壤微观孔隙的复杂尺度行为，多重分形方法适合于灰度图像分析，相对熵方法适合于二值图像。

由灰度图像的多重分形结果（表 3）可知，2%生物质炭处理孔隙的复杂度最高，不对称性最强，这说明该处理中小孔隙占比更低，变异性更强。这可能是因为生物质炭的添加有助于促进水稳性大团聚体的形成，大团聚体能够显著增加孔隙的连通性[21]，使得盐渍土中孤立小孔隙的数量显著降低，连通的大孔隙增加，从而使得土壤孔隙的复杂度与不对称性均提高。高生物质炭添加量（5%生物质炭）降低了盐渍土的孔隙复杂度与不对称性，这可能是因为可能与生物质炭和土壤互相填充，导致大孔径的孔隙被占据而减少所致（图 2）[22]。此外，不同处理之间的α_0、α_1和α_2差异不明显，表明这三个参数无法反映生物质炭处理对于土壤孔隙结构的影响，这与本团队之前的研究一致[23]。相对熵的方法给出了类似的结果。由二值图像的相对熵参数可知（表 4），生物质炭处理的$\Delta E_{\max}$和RangeΔE更低，说明生物质炭添加后土壤孔隙的多重分形特征增加。此外，随着生物质炭用量的增加，特别是 5%生物质炭的处理，$r(\Delta E_{\max})$有降低的趋势，这意味着土壤中孔隙的最大孔径有降低的趋势（图 2），这一结果证实了生物质炭会与土壤相互作用，破坏土壤中原有的大孔隙。

此外，生物质炭对于土壤孔隙结构有持续性影响。随着生物质炭施用年限的增加，所有处理的$\Delta\alpha$逐年增加而RangeΔE逐年降低，这意味着孔隙的复杂程度随着年份有增加的趋势。本研究在水稻种植前均会对测坑中的土壤开展翻耕，在此过程中改变土壤孔隙的界面形态特征使得土壤通透性增加，土壤中生物活动强度增大，生物孔隙与植物根系交错形成更为复杂

的孔隙结构[24]。生物质炭的添加则有助于增强土壤中生物和微生物的活动[25]，因而孔隙结构复杂度拥有更快的变化速率。Soto-Gómez 等[26]指出更复杂的孔隙结构改善孔隙形态、增加孔隙数量和连通性，这意味着土壤导水透气性得到改善，生物质炭的添加能够提高滨海盐渍土孔隙复杂度并加快土壤孔隙结构的发育，从而实现土壤改良。

4 结 论

应采用不同的理论方法分析土壤微观孔隙的复杂尺度行为，多重分形方法适合于强分形特征对象（例如灰度图像），相对熵方法适合于弱多重分形特征对象（例如二值图像）。2%生物质炭处理的孔隙结构复杂程度最高，土壤的孔隙结构改善效果最好。与 0%和 5%生物质炭处理相比，$\triangle\alpha$分别提高了 14.7%和 34.9%，RangeΔE分别降低了 7.97%和 17.90%。高生物质炭的添加量（5%生物质炭处理）减少孔隙结构的复杂度，降低生物质炭的改良效果。所有处理的孔隙复杂度随着年份逐年增加。生物质炭的添加能够加快土壤孔隙结构的发育，生物质炭处理的孔隙复杂度增加速率更快。2%和 5%生物质炭处理的$\triangle\alpha$年均增长率为 17.7%和 19.2%，RangeΔE年均降低率为 8.28%和 7.85%，均高于 0%生物质炭处理（16.7%和 7.29%）。

参考文献（References）

[1] Torre I G, Martín-Sotoca J J, Losada J C, et al. Scaling properties of binary and greyscale images in the context of X-ray soil tomography[J]. Geoderma, 2020, 365: 114205.

[2] Sun X Q, Fang K, Fei Y H, et al. Structure and hydraulic characteristics of saline soil improved by applying biochar based on micro-CT scanning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 242-249. [孙枭沁, 房凯, 费远航, 等. 施加生物质炭对盐渍土土壤结构和水力特性的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 242-249.]

[3] Sun X Q, She D L, Fei Y H, et al. An improved pore-solid fractal model for predicting coastal saline soil hydraulic properties based on changepoints determined by genetic algorithm-support vector regression[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 224: 105502.

[4] Posadas A N D, Giménez D, Quiroz R, et al. Multifractal characterization of soil pore systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(5): 1361-1369.

[5] Tarquis A M, Heck R J, Andina D, et al. Pore network complexity and thresholding of 3D soil images[J]. Ecological Complexity, 2009, 6(3): 230-239.

[6] 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.

[7] Bird N, Díaz M C, Saa A, et al. Fractal and multifractal analysis of pore-scale images of soil[J]. Journal of Hydrology, 2006, 322(1/4): 211-219.

[8] Zhou H, Perfect E, Lu Y Z, et al. Multifractal analyses of grayscale and binary soil thin section images[J]. Fractals, 2011, 19(3): 299-309.

[9] Tarquis A M, Castellanos M T, Cartagena M C, et al. Scale and space dependencies of soil nitrogen variability[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2017, 24(1): 77-87.

[10] Wang J, Huang C Z, Feng S Y, et al. Using biochar amendment to improve the physicochemical properties of soil in coastal tidal area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(10):125-130, 138. [王娟, 黄成真, 冯绍元, 等. 生物炭对滨海滩涂区土壤理化特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(10):125-130, 138.]

[11] Cao Y T, She D L. Effects of biochar and PAM application on saline soil hydraulic properties of coastal reclamation region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11): 3684-3690. [曹雨桐, 佘冬立. 施用生物炭和聚丙烯酰胺对海涂围垦区盐碱土水力性质的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3684-3690.]

[12] An N, Zhang L, Liu Y X, et al. Biochar application with reduced chemical fertilizers improves soil pore structure and rice productivity[J]. Chemosphere, 2022, 298: 134304.

[13] Fan R Q, Zhang B H, Li J Y, et al. Straw-derived biochar mitigates CO_2 emission through changes in soil pore structure in a wheat-rice rotation system[J]. Chemosphere, 2020, 243: 125329.

[14] Tarquis A M, Heck R J, Grau J B, et al. Influence of thresholding in mass and entropy dimension of 3-D soil images[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2008, 15(6): 881-891.

[15] Holley R, Waymire E C. Multifractal dimensions and scaling exponents for strongly bounded random cascades[J]. The Annals of Applied Probability, 1992, 2(4): 819-845.

[16] Tarquis A M, McInnes K J, Key J R, et al. Multiscaling analysis in a structured clay soil using 2D images[J]. Journal of Hydrology, 2006, 322(1/4): 236-246.

[17] Torre I G, Heck R J, Tarquis A M. MULTIFRAC: An ImageJ plugin for multiscale characterization of 2D and 3D stack images[J]. SoftwareX, 2020, 12: 100574.

[18] Tarquis A M, Bird N R A, Whitmore A P, et al. Multiscale entropy-based analysis of soil transect data[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 563-569.

[19] Torre I G, Losada J C, Heck R J, et al. Multifractal analysis of 3D images of tillage soil[J]. Geoderma, 2018, 311: 167-174.

[20] Baveye P C, Laba M, Otten W, et al. Observer-dependent variability of the thresholding step in the quantitative analysis of soil images and X-ray microtomography data[J]. Geoderma, 2010, 157(1/2): 51-63.

[21] Rong H, Fang H, Zhang Z B, et al. Effects of aggregate size distribution on soil pore structure and soil organic carbon mineralization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 476-485. [荣慧, 房焕, 张中彬, 等. 团聚体大小分布对孔隙结构和土壤有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 476-485.]

[22] Wang H, Jiao X Y, Wang J S, et al. Effects of biochar on water characteristics of soil and *Sorghum* growth under conditions of soil water stress[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 253-257, 287. [王浩, 焦晓燕, 王劲松, 等. 生物炭对土壤水分特征及水胁迫条件下高粱生长的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 253-257, 287.]

[23] 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.

[24] Gan L, Li J, Li S, et al. Soil pore characteristics of sugarcane field under different tillage treatments in Guangxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 122-130. [甘磊, 李健, 李帅, 等. 广西甘蔗地不同耕作方式下土壤孔隙特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 122-130.]

[25] Long J Q, Miao S J, Li N, et al. Effects of biochar application on the structural properties of organic matter fractions in Mollisols[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(5)：775-785 [龙杰琦, 苗淑杰, 李娜, 等. 施用生物炭对黑土各组分有机质结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(5)：775-785]

[26] Soto-Gómez D, Pérez-Rodríguez P, Vázquez Juíz L, et al. 3D multifractal characterization of computed tomography images of soils under different tillage management: Linking multifractal parameters to physical properties[J]. Geoderma, 2020, 363: 114129.

（责任编辑：檀满枝）