

生物炭添加对盐渍土 CT 孔隙序列分形特征来源的影响

孙枭沁, 余冬立

(河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098)

摘要: 为了揭示生物炭改良土壤孔隙的复杂结构及其影响因素, 以江苏滨海盐渍土为研究对象, 采用添加生物炭改良盐渍土, 设置 0、2%、5% (占表层 0—20 cm 土重比) 3 个生物炭添加水平。每年 10 月在水稻收割后, 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 孔隙序列。基于多重分形去趋势波动分析理论, 并结合数据重排, 分析施加生物炭对 CT 孔隙序列多重分形特征及其来源的影响。结果表明, 所有处理的 CT 孔隙序列的复杂度均随着年份增长; 2% 生物炭处理的 CT 孔隙序列的复杂程度较 0 和 5% 生物炭处理分别提高 7.54% 和 5.28%; 概率密度函数与长程相关性均影响 CT 孔隙序列的多重分形特征; 孔隙和空间的长程相关性是主要影响因素; 生物炭的添加促使孔隙分形特征更易受到土壤中生物微生物活动的影响。研究结果为量化分析生物炭改良盐渍土孔隙结构提供了理论支持。

关键词: 滨海盐渍土; 生物炭; Micro-CT 扫描; 多重分形去趋势波动分析; 数据重排

中图分类号: TQ424

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)05-0298-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.05.036

Effect of Biochar Addition on the Fractality Source of CT Porosity Series in Saline Soil

SUN Xiaoqin, SHE Dongli

(College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098)

Abstract: In order to reveal the pores complex structure of biochar-amended soils and its influencing factors, the saline/sodic soil in the coastal reclamation area of Jiangsu Province was taken as the research subject. In this study, the surface soils (0—20 cm) were amended by thoroughly mixed biochar with three application rates (0, 2% and 5% by mass of soil, respectively) in a completely randomized design. After harvesting rice in October each year, the surface layer (0—20 cm) of undisturbed soils was taken using a plastic ring and the CT pore series of the soil was obtained through Micro-CT scanning. Based on multifractal detrended fluctuation analysis and data rearrangement, the influence of biochar addition on the multifractal characteristics and their source of CT-porosity series was analyzed. The results showed that the complexity of pore series for each treatment increased with year. Compared with 0 and 5% biochar treatments, the complexity of CT pore series in 2% biochar treatments increased by 7.54% and 5.28%, respectively. Both probability density function and long-range correlation influenced the multifractal characteristics of CT pore series. Long-range correlation between pore and space was the main influencing factor. The addition of biochar made the pore fractal characteristics more susceptible to the influence of microbial activities in soil. This study could provide a theoretical basis for analyzing the pore structure of saline soil with biochar.

Keywords: coastal saline soil; biochar; Micro-CT scanning; multifractal detrend fluctuation analysis; data rearrangement

江苏拥有全国 1/4 的沿海滩涂资源, 滩涂资源是江苏省乃至全国重要的后备土地资源^[1]。然而, 滨海滩涂易受海水入侵形成盐渍土, 导致滨海土壤结构差、含盐量高和有机质缺乏, 限制滨海盐渍土的利用

效率^[2]。因此, 改善滨海盐渍土的土壤质量对于提高其土地利用至至关重要。近年来, 生物炭被广泛应用于农业土壤改良, 用以改善土壤理化性质、孔隙结构和水力性质^[3-4], 增加土壤肥力^[5]。研究^[6]发现, 生物

收稿日期: 2023-02-13

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42177393); 江苏省自然资源科技项目 (2022046); 南通市自然资源和规划科技创新项目 (2022005)

第一作者: 孙枭沁 (1996—), 男, 博士研究生, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: sxqhhu@hhu.edu.cn

通信作者: 余冬立 (1980—), 男, 教授, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: shedongli@gmail.com

炭自身比重较小,质地疏松,可直接改善土壤松紧度,降低土壤容重,进而增加土壤总孔隙度。然而,由于土壤孔隙分布非常复杂且难以识别,生物炭添加对于土壤孔隙空间分布的影响研究较少。随着数字图像处理技术的发展,为准确识别土壤复杂孔隙结构提供了解决方案^[7]。

土壤孔隙的复杂结构是维持土壤物理、化学和生物过程的关键因素^[8]。为了量化描述土壤孔隙的复杂性,学者们将分形理论引入土壤科学中,分数布朗运动是第一个用于描述孔隙空间变化复杂行为的分形模型^[9]。由于生物和非生物因素的影响,孔隙空间容易发生突变形成一个不稳定的序列,在这种情况下,多重分形分析被用作研究非稳定系统复杂结构的工具。多重分形分析能够捕捉土壤孔隙结构的尺度规律特征,通过描述孔隙结构的多重分形谱来表征孔隙空间的复杂结构和异质性^[10]。对于孔隙序列多重分形特征的来源,Kantelhardt 等^[11]指出,非稳定对象的多重分形特征来源于对象的概率密度函数分布,以及时间或空间与对象的长程相关性,并提出多重分形去趋势波动分析,与数据重排的方法(数据随机排列与数据替代等)相结合,确定研究对象多重分形特征的来源^[12]。该理论目前集中于时间序列的应用^[13-14],对于空间序列同样重要,其能够揭示影响孔隙空间复杂结构的因素,特别是揭示生物炭改良后孔隙空间复杂行为的变化及其影响因素。然而,目前该理论在空间序列中鲜有应用。基于此,本研究以江苏沿海围垦区盐渍土为研究对象,基于多重分形去趋势波动分析和图像处理的方法,并结合数据重排,以孔隙切片图像灰度值序列即 CT 孔隙序列作为研究对象,分析施加生物炭对 CT 孔隙序列多重分形特征及其来源的影响,为海涂围垦区土壤结构改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

水稻栽培测坑试验供试盐渍土土样取自江苏省如东县东凌垦区(2007 年围垦),在该地区取 0—100 cm 土层土壤作为测坑试验研究的土壤,其土壤砂粒质量分数为 32.37%,粉粒质量分数为 62.73%,黏粒质量分数为 4.88%,根据美国农业部土壤分类标准,该地区土壤质地为粉砂壤土。试验所采用的生物炭材料是河南“三利”公司生产的小麦秸秆生物质炭。生物质炭的基本理化性质为:pH 9.9,电导率 1.0 S/m,全氮含量 5.9 g/kg,有机碳含量 467.2 g/kg,容重 0.69 g/cm³,颗粒密度 1.83 g/cm³,总孔隙度 62.5%,内部孔隙度 13.2%。

改良盐渍土水稻栽培测坑试验于 2016 年在河海大学江宁校区进行,至 2020 年结束。试验测坑为圆柱形,上方口直径为 840 mm,高 850 mm,测坑容量为 300 L。试验在塑料大棚避雨条件下开展。将东凌垦区取得的 0—100 cm 的土壤混合,过 5 mm 筛,再分层按容重 1.35 g/cm³ 填装入测坑。表层土壤(0—20 cm)采用添加生物炭改良,设置 0,2%,5% (占表层 0—20 cm 土重比)3 个生物炭添加水平。生物炭添加后,选择高产水稻品种“武运梗 23 号”开展作物试验,水稻每年于 6 月移栽,10 月收割。每个试验测坑种植 60 株水稻,水稻生长期内的环境条件与肥料使用与阿力木·阿布来提等^[15] 研究结果一致。考虑第 1 个试验年(2016 年)的土壤沉降和固结,土壤结构测定试验于 2017 年开始,2020 年结束。生物炭添加后土壤性质(4 年均值)见表 1。

表 1 不同生物炭处理下土壤性质

生物炭处理/%	容重/(g·cm ⁻³)	有机质/(g·kg ⁻¹)	pH	盐分/(g·kg ⁻¹)
0	1.31	4.59	7.90	5.18
2	1.29	7.17	8.00	4.76
5	1.23	11.05	8.05	4.57

在水稻收割后,采用 100 cm³ 的塑料环刀取试验测坑表层(0—20 cm)原状土,进行 Micro-CT 扫描。CT 扫描试验在中科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)。扫描参数为:电压 100 kV,电流 100 μ A,扫描分辨率 25 μ m。在获取土壤 CT 图像后,采用 ImageJ 软件对切片图像进行分析处理。为了避免边缘效应,降低计算机处理时间,选择图像中心 512 $\times$ 512 $\times$ 512 voxels 部分作为研究区域^[16]。然后增加图像的亮度和对比度,以确保图像灰度值均匀分布在 0~255。本研究采用灰度值序列反映孔隙度,即切片平均灰度值越高,孔隙度越高。根据调整后的灰度图像,通过 Python 编程分析计算每个切片图像的平均灰度值,以获得平均灰度值连续序列作为 CT 孔隙序列。

1.2 理论方法

1.2.1 多重分形去趋势波动(MF-DFA)分析

本研究采用去趋势波动分析方法研究 CT 孔隙序列的多重分形特征,以揭示生物炭改良土壤孔隙结构的复杂行为。多重分形去趋势波动分析法是 Kantelhardt 等^[11] 提出的用于检测平稳或非平稳数据序列多重分形特征的方法。多重分形去趋势波动分析法算法计算流程为

Step1: 设 $x(i)$ 为数据序列,其中 $i=1,2,3,\cdots,N$, N 为序列长度。数据序列的平均值记录为 $\bar{x}$, 序列的积分轮廓 $y(i)$ 为:

$$y(i) = \sum_{k=1}^i [x(k) - \bar{x}] \quad (1)$$

Step2: 将积分区间分为 $N(s)$, 其中 $N(s) = \text{int}(N/s)$, s 为计算的区间。在 N 不是 s 的倍数的情况下, 需要从数据序列的另一端重复操作。此时积分区间为 $2N(s)$ 。

Step3: 采用最小二乘法计算每个积分区间的局部趋势。

对于每个积分区间 v , $v=1, 2, 3, \dots, N(s)$, 局部趋势 $F^2(s, v)$ 为:

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{y_{[(v-1)s+i]} - y_v(i)\}^2 \quad (2)$$

对于积分区间 v , $v=N(s)+1, \dots, 2N(s)$, 局部趋势 $F^2(s, v)$ 为:

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{y_{[N-(v-Ns)s+i]} - y_v(i)\}^2 \quad (3)$$

Step4: 在去除数据趋势后, 对所有积分区间进行平均, 以获得第 q 阶波动函数

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum [F^2(s, v)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}} \quad (4)$$

Step5: 如果序列是长程幂相关的, 那么波动函数与计算区间存在的关系为:

$$F_q(s) \propto s^{H(q)} \quad (5)$$

式中: $H(q)$ 为广义 Hurst 指数。具体而言, 对于平稳的归一化级数, 多重分形标度指数 $\tau(q)$ 可以用广义 Hurst 指数 $H(q)$ 表示:

$$\tau(q) = qH(q) - 1 \quad (6)$$

结合多重分形参数 α 和 $f(\alpha)$ 的定义^[17], 可以用 $H(q)$ 表示 α 和 $f(\alpha)$:

$$\alpha = H(q) + q(H'(q)) \quad (7)$$

$$f(\alpha) = q[\alpha - H(q)] + 1 \quad (8)$$

式中: $H'(q)$ 为 $H(q)$ 的导数; α 为奇异性指数; $f(\alpha)$ 反映物体子集特征。为了量化研究 CT 孔隙序列的多重分形特征, 选择振幅 $\Delta\alpha$ 和不对称性系数 R 与 Δf 3 个量化指标。

$$\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min} \quad (9)$$

$$R = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_0}{\alpha_0 - \alpha_{\min}} \quad (10)$$

$$\Delta f = f(\alpha_{\min}) - f(\alpha_{\max}) \quad (11)$$

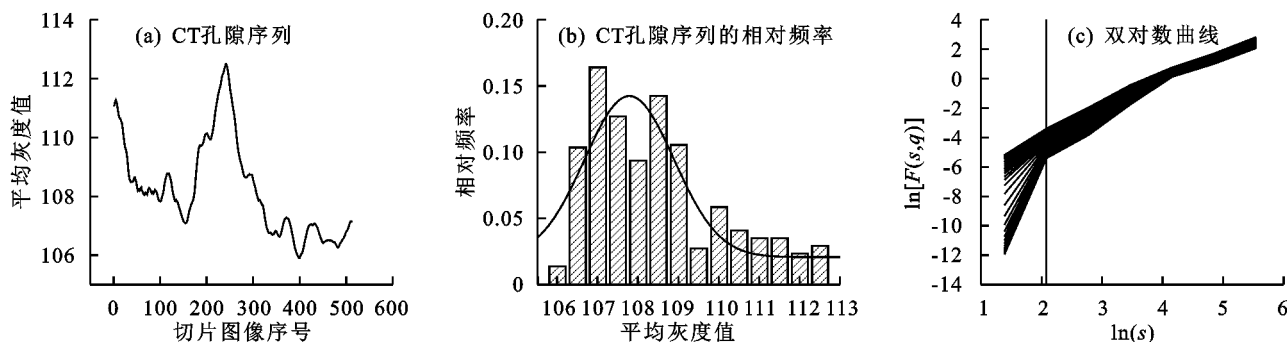
本研究中, 通过 Excel 编程计算 Husrt 指数 $H(q)$ 和多重分形参数, q 的取值范围为 $-4 \sim 4$, 步长为 0.25。

1.2.2 数据重排方法 数据序列的多重分形特征主要有 2 个来源: 一是来源于序列的概率密度函数; 二是来源于时间或空间与序列的长程相关性^[11]。为了分析这 2 个因素对于序列多重分形特征的影响, 学者们提出数据重排的方法, 分为数据随机排列和数据替代 2 种。数据随机排列通过破坏长程相关性对于序列的影响, 确定概率密度函数对于序列多重分形特征的影响; 数据替代能够破坏序列中所有的非线性过程, 保留线性过程, 探究长程相关性对于序列的影响。本研究中数据替代采用傅里叶相位替代方法, 即通过用 $[-\pi, \pi]$ 范围内的随机数替换傅里叶系数的相位来计算原始级数, 同时保持其模量不变, 从而构造傅里叶替代级数。此外, 本研究的数据随机排列和数据替代都保持与原始序列相同的概率密度函数。选择切片图像的 CT 孔隙序列作为原始序列, 通过 R 语言中的 SEASON 包执行数据随机排列和数据替代过程, 每个过程重复 10 次^[18]。

2 结果与分析

2.1 施加生物炭对土壤孔隙多重分形特征的影响

图 1a 为 2017 年 0 生物炭处理 CT 孔隙序列的原始序列。由图 1a 可知, CT 孔隙序列随着深度波动, 总体呈现先降低再升高然后再降低的趋势。图 1b 为 CT 孔隙序列的相对频率, 该处理下, CT 孔隙序列的值集中分布于 107~109, 而 110~113 的占比较少。根据获得的 CT 孔隙序列, 采用去趋势波动方法分析其多重分形特征。在进行多重分形分析前, 需要确定计算的尺度, 即选择波动函数 $F_q(s)$ 与计算尺度 s 双对数曲线图(图 1c)的线性部分开展研究。由图 1c 可知, $\ln[F_q(s)]$ 在 $\ln s = 1.386 (s=4)$ 时明显偏离线性关系。因此, 本研究选择 8~512 的计算尺度计算 CT 孔隙序列的多重分形特征。



注: 图(c)中直线标记本研究的计算尺度; 每条直线代表不同维度 q 下波动函数与计算尺度的关系。

图 1 2017 年 0 生物炭切片图像 CT 孔隙序列、相对频率及双对数曲线

在选择的计算尺度下,根据公式(7)和公式(8)计算多重分形参数 α 和 $f(\alpha)$ 见图 2。所有处理下 CT 孔隙序列的多重分形谱均呈现“左手形状”,表明所有处理下 CT 孔隙序列中大波动占比较高,而小波动占比较低,变异性更大。此外,2017 年不同处理之间的多重分形谱没有明显差异。而从 2018 年开始,与对照组相比,生物炭添加后(2%和 5%)多重分形谱明显左移,不同生物炭添加量对于多重分形谱的影响不明显。

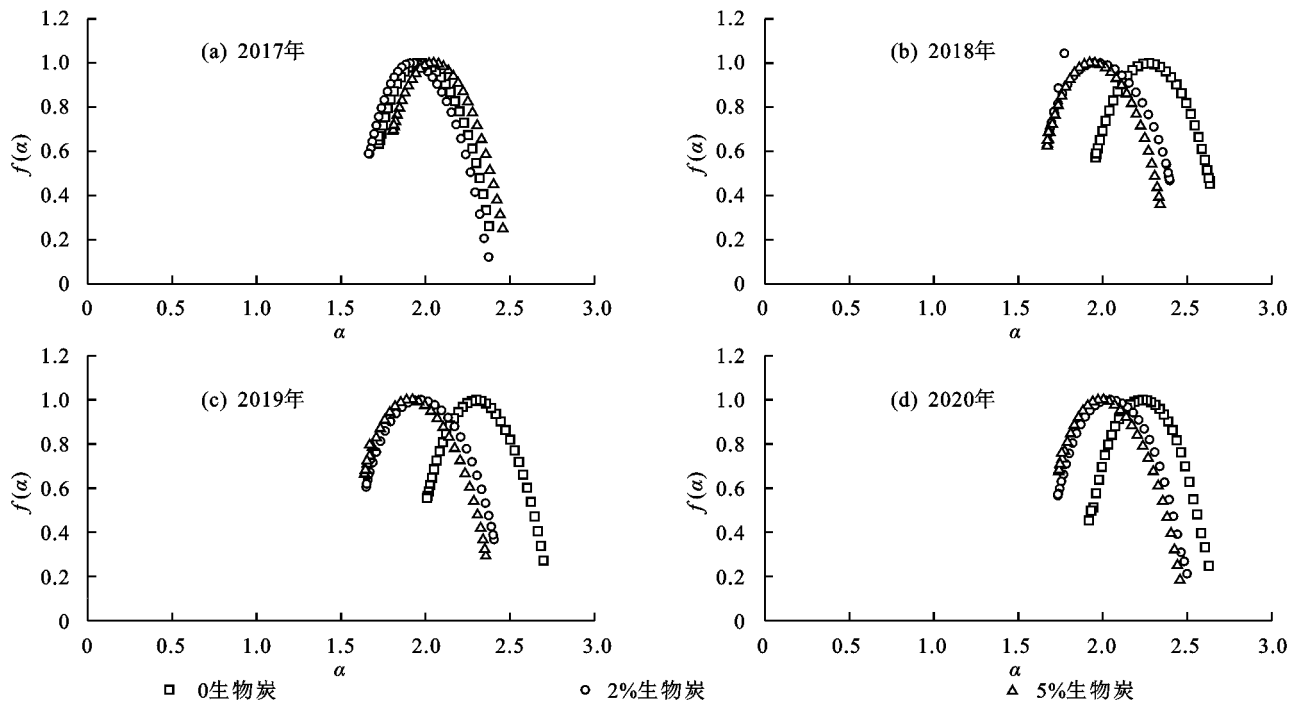


图 2 不同生物炭添加 CT 孔隙序列的多重分形谱

表 2 CT 孔隙序列的多重分形参数

年份	生物炭添加量/%	R	$\Delta\alpha$	Δf
2017	0	1.548	0.642	-0.296
	2	1.714	0.673	-0.523
	5	1.690	0.650	-0.440
2018	0	1.240	0.671	-0.130
	2	1.351	0.723	-0.191
	5	1.347	0.673	-0.326
2019	0	1.298	0.701	-0.222
	2	1.316	0.757	-0.238
	5	1.547	0.719	-0.365
2020	0	1.234	0.709	-0.205
	2	1.374	0.779	-0.297
	5	1.501	0.741	-0.405

注: $\Delta\alpha$ 为振幅; R 与 Δf 为不对称系数。

2.2 不同生物炭添加量对土壤孔隙多重分形特征来源的影响

为了确定 CT 孔隙序列多重分形特征的来源,对 CT 孔隙序列进行随机排列和数据替代(图 3)。由图 3 可知,随机排列系列似乎失去了数据趋势,变成高斯白

为了量化分析 CT 孔隙序列的多重分形特征,根据其多重分形谱,计算其振幅 $\Delta\alpha$ 和不对称性系数 R 与 Δf (表 2)。结果表明,2%生物炭处理的 $\Delta\alpha$ 最大,与 0 和 5%生物炭处理相比,分别提高 7.54%和 5.28%;0 生物炭添加的 $\Delta\alpha$ 最小。此外,所有处理的 $\Delta\alpha$ 均随着年份的增加而增加,0,2%和 5%生物炭处理的 $\Delta\alpha$ 年均增长量分别为 3.47%,5.26%和 4.62%。同时,所有的 Δf 均小于 0, R 均大于 1,表明 CT 孔隙序列对于小波动更为敏感。

噪声。与随机排列序列不同,傅里叶相位替代序列通过改变数据的相位,拥有与原始序列不同的数据趋势。

依据原始序列、随机排列序列和数据替代序列,分别计算其多重分形特征(图 4)。从图 4 可以看出,与随机排列序列和傅里叶相位替代序列相比,原始序列的多重分形谱更宽,表明原始序列的复杂性更强。随机排列序列和傅里叶相位替代序列多重分形谱均呈现出凹抛物线形状,显示出存在良好的多重分形特征,这表明概率密度函数与长程相关性均影响 CT 孔隙序列的多重分形特征。结合图 1 可知,CT 孔隙序列的相对频率不符合高斯正态分布,存在长尾效应,这证实 CT 孔隙序列的多重分形特征与概率密度函数与长程相关性均相关。此外,与随机排列序列相比,数据替代序列的多重分形谱更接近原始序列,这意味着长程相关性是 CT 孔隙序列多重分形特征的主要影响因素,概率密度函数对其影响有限。因此,CT 孔隙序列的多重分形特征主要是由于空间长程相关性的影响。

为了量化分析不同生物炭处理下 CT 孔隙序列的多重分形特征来源及其年际变化,选择 $\Delta\alpha$ 作为

定量化分析指标(图 5)。所有处理下原始 CT 孔隙序列和随机排列序列的 $\Delta\alpha$ 有逐年上升的趋势;而数据替代序列的 $\Delta\alpha$ 随着年份先降低再上升。此外,0 生物炭处理下,数据替代序列的 $\Delta\alpha$ 与原始序列最为

接近,随着生物炭添加量的提高,数据替代序列的 $\Delta\alpha$ 逐渐降低,而随机排列序列的 $\Delta\alpha$ 逐年上升,这意味着生物炭添加提高概率密度函数对 CT 孔隙序列多重分形特征的影响。

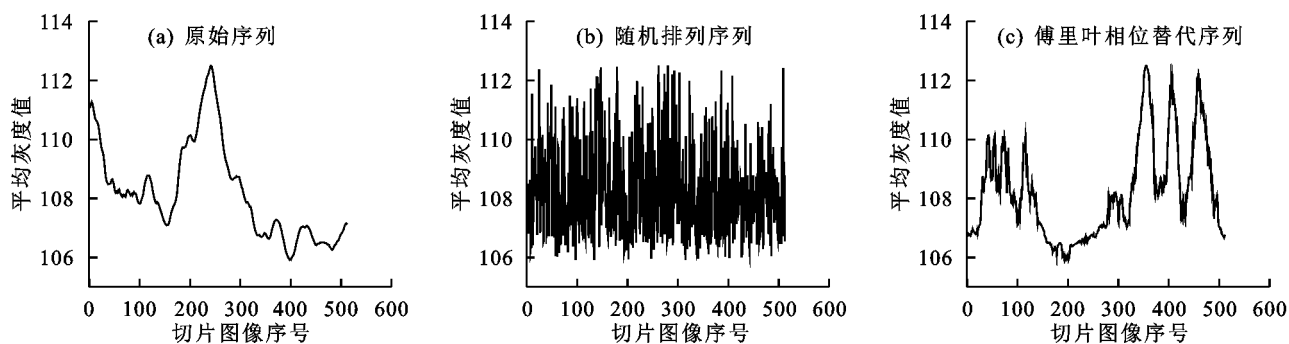
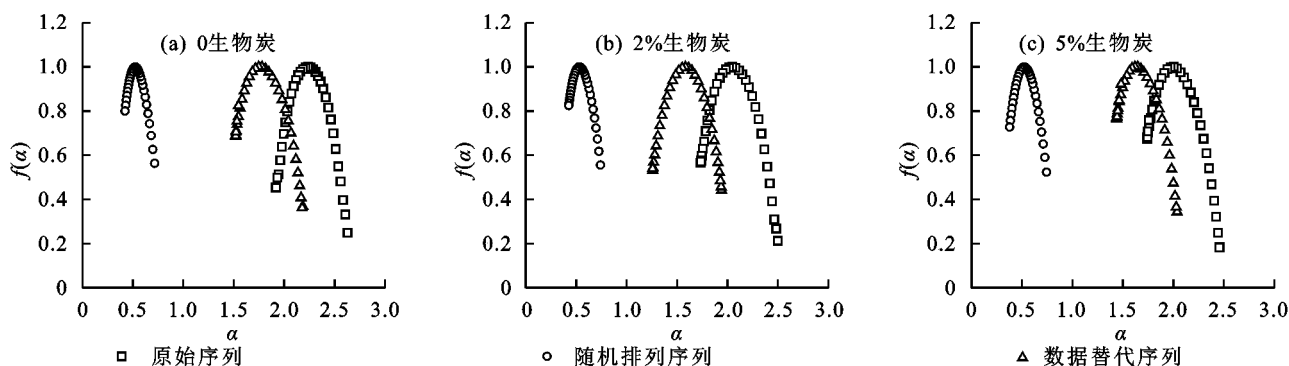


图 3 2017 年 0 生物炭 CT 孔隙序列原始序列、随机排列序列和傅里叶相位替代序列



注:以 2020 年生物炭试验数据为例。

图 4 原始序列、随机排列序列和数据替代序列的多重分形谱

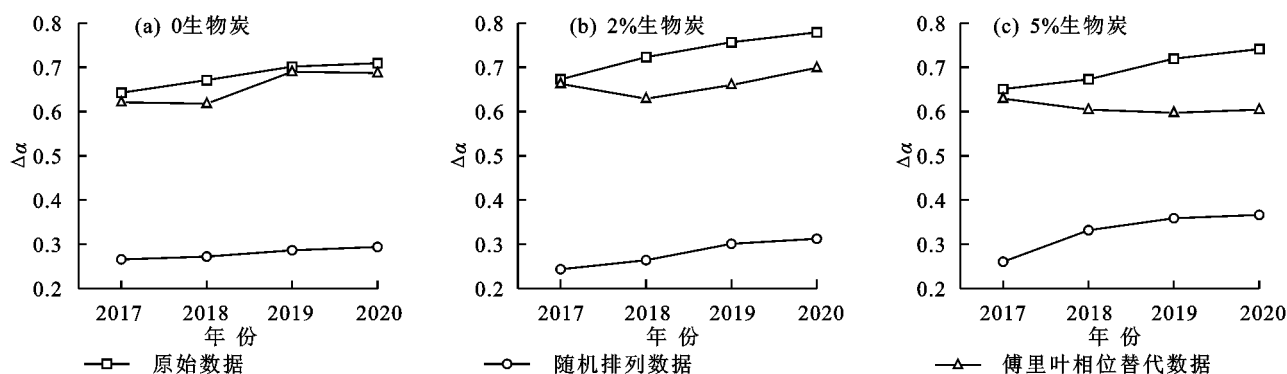


图 5 $\Delta\alpha$ 随生物炭添加量的逐年变化

3 讨论

本试验通过研究 CT 孔隙序列反映表层土壤孔隙空间的复杂行为,结果表明,所有处理的孔隙度随着土层深度更易发生较大的波动。生物炭处理中土壤孔隙度复杂程度更高,这是因为本试验的土壤为滨海盐渍土,其土壤结构差,有机质含量低。生物炭添加后,土壤中的有机质含量显著提高(表 1),有机质含量的增加有助于增加土壤中生物和微生物的活动,增加土壤孔隙丰度,从而提高土壤孔隙的复杂性。与 2% 生物炭相比,5% 生物炭添加后孔隙的复杂度降低($\Delta\alpha$ 减小),但其不对称性增加(R 与 Δf 增加),这可能是因为 5% 生物炭添加后,土壤中孔隙可能被生物炭堵塞或破坏分

裂^[19],使得土壤孔隙度和孔隙的种类降低,孔隙的复杂程度也因此降低,这课题前期研究^[20]结果一致,前期研究通过重构不同生物炭处理下土壤孔隙三维 CT 图像并分析其微孔隙结构发现,5% 生物炭处理的大孔隙度和平均孔隙直径显著降低。

从年际变化分析,所有处理的孔隙复杂度均逐年提高,且生物炭处理的提高幅度更大。这一方面是因为作物耕作的影响。洪艳华^[21]研究发现,在耕作过程中植被残基进入土壤演替形成有机质,提高土壤中有机质含量,促进大水稳性团聚体形成,使得土壤中 $>30 \mu\text{m}$ 的孔隙度显著提高^[22]。此外,耕作过程中由于作物根系的影响,发育出更繁多的孔隙种类^[23],孔隙度的增加和

孔隙种类的增多提高孔隙序列的复杂性。另一方面,与生物炭对于土壤改良的长期效应有关。本研究发现,2017年不同处理之间的孔隙多重分形特征差异不明显,这是因为生物炭对于土壤结构改良是一个缓慢的过程,长期试验才能体现出生物炭对土壤结构的真正影响^[19]。安宁等^[24]通过水稻秸秆炭化还田长期定位试验研究水稻土的孔隙结构特征发现,生物炭处理下的大孔隙占比和孔隙的复杂程度均随着年份有显著提高,这与本试验的研究结果一致。

此外,本研究通过去趋势波动分形结合数据重排的方法探究生物炭改良土壤孔隙度多重分形特征来源发现,概率密度函数与长程相关性均影响孔隙的多重分形特征,其中长程相关性是其主要影响因素。目前对于孔隙序列多重分形特征来源的鲜有研究,部分学者开展了与孔隙空间相关的土壤含水率的研究。例如, San 等^[25]研究发现,葡萄园土壤含水量的复杂分形特征来源于长程相关性,这与本试验结果一致。然而,他们研究中随机排列序列只存在单重分形特征,这意味着土壤含水率的分形特征与概率密度函数无关。这可能是因为灌溉方式的不同, San 等^[25]并未设计灌溉方式,而本试验主要采用地表灌溉。Rodríguez 等^[26]指出,地表灌溉产生局部积水,导致土壤水分空间分布变异性大,从而使得土壤含水率更易受到随机因素(概率密度函数)的影响。

不同处理之间孔隙度多重分形特征来源影响因素存在差异(图5)。0生物炭处理中长程相关性对于孔隙分形特征影响最强,随着生物炭的添加,概率密度函数对于孔隙分形特征影响逐渐加强,这意味着生物炭的添加使得孔隙分形特征更易受到随机因素的影响。这可能是因为生物炭改变生物和微生物的生境,为生物和微生物提供合适的栖息地,增强土壤中生物和微生物的生物量和活动^[27],而微生物^[28]和生物^[23]活动改变土壤孔隙结构,土壤的孔隙度与连通性等发生变化,进而影响土壤孔隙的分形特征。然而,本试验的工作无法给出影响分形特征随机因素的具体来源,需要后期开展对比试验定量分析。

4 结论

(1)2%生物炭处理 CT 孔隙序列的复杂程度高,与0和5%生物炭处理相比,分别提高7.54%和5.28%。所有处理的孔隙复杂度($\Delta\alpha$)均随着年份的增加而增加,0.2%和5%生物炭处理的 $\Delta\alpha$ 年均增长率分别为3.47%,5.26%和4.62%。同时,所有处理的不对称性系数的 Δf 均小于0, R 均大于1,CT孔隙序列多重分形特征对于小波动更为敏感。

(2)原始 CT 孔隙序列的多重分形特征更强;概率密度函数与长程相关性均影响 CT 孔隙序列的多重分形

特征,其中长程相关性是 CT 孔隙序列多重分形特征的主要影响因素,概率密度函数对其影响有限。

(3)0生物炭处理中长程相关性对于孔隙分形特征影响最强,随着生物炭的添加,概率密度函数对于孔隙分形特征影响逐渐加强。生物炭的添加后,孔隙分形特征更易受到随机因素的影响。

参考文献:

- [1] 祝瑜,褚琳琳,朱文东,等.滨海盐渍土土壤物化性质与水动力学性质变异[J].水土保持学报,2022,36(6):379-386.
- [2] 余冬立,郑加兴,刘营营,等.围垦年限和土壤容重对海涂土壤水分运动参数的影响[J].农业机械学报,2015,46(2):120-125.
- [3] 刘森,王志春,杨福,等.生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J].水土保持学报,2021,35(3):1-8.
- [4] 孙泉沁,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.
- [5] 魏永霞,石国新,冯超,等.黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J].农业机械学报,2020,51(5):285-294.
- [6] 黄明逸,张展羽,翟亚明,等.咸淡交替灌溉下生物炭对滨海盐渍土及玉米产量的影响[J].农业工程学报,2020,36(21):88-96.
- [7] 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.
- [8] 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,2019,83:1309-1318.
- [9] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation[J].Journal of Soil Science,1983,34(3):577-597.
- [10] 周虎,李保国,吕贻忠,等.不同耕作措施下土壤孔隙的多重分形特征[J].土壤学报,2010,47(6):1094-1100.
- [11] Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny-Bunde, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series[J].Physica A,2002,316:87-114.
- [12] Sanz E, Saa-Requejo A, Díaz-Ambrona C H, et al. Generalized structure functions and multifractal detrended fluctuation analysis applied to vegetation index time series: An arid rangeland study[J].Entropy,2021,23(5):e576.
- [13] 李玲,武冬冬,王铁军,等.基于数值模拟的土壤水力参数对土壤水长程相关性的影响分析[J].水土保持学报,2022,36(1):80-85,94.
- [14] Telli Ş, Chen H Z, Zhao X F. Detecting multifractality and exposing distributions of local fluctuations: Detrended fluctuation analysis with descriptive statistics pooling[J].Chaos,

- Solitons and Fractals, 2022, 155: e111678.
- [15] 阿力木·阿布来提, 姚怀柱, 宋云飞, 等. 海涂土壤结构改良对水稻叶绿素荧光参数和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3435-3442.
- [16] 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, 181/182: 22-29.
- [17] Peitgen H O, Jürgens H, Saupe D. Chaos and fractals: New frontiers of science[M]. New York: Springer, 1992.
- [18] Mali P. Multifractal characterization of global temperature anomalies[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 121(3): 641-648.
- [19] Blanco C H. Biochar and soil physical properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(4): 687-711.
- [20] 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: e104809.
- [21] 洪艳华. 长期耕作对黑土理化性质及微生物群落结构的影响[D]. 黑龙江 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021.
- [22] 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.
- [23] Soto-Gomez D, Perez-Rodriguez P, Juiz L V, 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: e114129.
- [24] 安宁, 李冬, 李娜, 等. 长期不同量秸秆炭化还田下水稻土孔隙结构特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(12): 2150-2157.
- [25] San J M F, García G B C, Caniego M F J, et al. Long-range correlations of soil water content time series under tillage and different cover crops in a semi-arid vineyard[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(2): 623-634.
- [26] Rodríguez-Sinobas L, Zubelzu S, Martín-Sotoca J J, et al. Multiscaling analysis of soil water content during irrigation events. Comparison between surface and subsurface drip irrigation[J]. *Geoderma*, 2021, 382: e114777.
- [27] Palansooriya K N, Wong J T F, Hashimoto Y, et al. Response of microbial communities to biochar-amended soils: A critical review[J]. *Biochar*, 2019, 1(1): 3-22.
- [28] Crawford J W, Deacon L, Grinev D, et al. Microbial diversity affects self-organization of the soil-microbe system with consequences for function[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2012, 9(71): 1302-1310.
- (上接第 297 页)
- [58] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水土保持术语: GB/T 20465—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [59] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation[M]. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, 1965.
- [60] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [61] Duan X W, Shi X N, Li Y B, et al. A new method to calculate soil loss tolerance for sustainable soil productivity in farmland[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2017, 37(1): 1-13.
- [62] Van den Putte A, Govers G, Diels J, et al. Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture[J]. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33(3): 231-241.
- [63] Govers G, Van Oost K, Poesen J. Responses of a semi-arid landscape to human disturbance: A simulation study of the interaction between rock fragment cover, soil erosion and land use change[J]. *Geoderma*, 2006, 133(1/2): 19-31.
- [64] Maetens W, Vanmaercke M, Poesen J, et al. Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2012, 36(5): 599-653.
- [65] 米艳华, 潘艳华, 沙凌杰, 等. 云南红壤坡耕地的水土流失及其综合治理[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 17-21.
- [66] 杨子生, 贺一梅. 中国西南边疆山区耕地水土流失研究: 以云南省为例[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(1): 1-7.
- [67] Rong L, Duan X W, Zhang G L, et al. Impacts of tillage practices on ephemeral gully erosion in a dry-hot valley region in southwestern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 72-84.
- [68] 张平仓, 程冬兵. 南方坡耕地水土流失过程与调控研究[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(3): 35-39, 49.
- [69] 杨瑞珍. 我国耕地水土流失及其防治措施[J]. *水土保持通报*, 1994(2): 32-36.
- [70] 和俊. 云南省坡耕地水土流失综合治理的探索与实践[J]. *中国水土保持*, 2011(2): 11-13.
- [71] 伍俊年. 金沙江干热河谷区热作资源开发利用研究: 以攀枝花市为例[J]. *中国热带农业*, 2019(4): 11-15.