

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.027

# 施加生物质炭对盐渍土土壤结构和水力特性的影响

孙泉沁<sup>1</sup> 房凯<sup>2</sup> 费远航<sup>1</sup> 余冬立<sup>3</sup>

(1. 河海大学农业工程学院, 南京 210098; 2. 宿迁市水务局, 宿迁 223800;

3. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 以江苏省沿海围垦区盐渍土为研究对象, 基于 Micro-CT 图像扫描技术, 分析施加生物质炭后改良盐渍土土壤孔隙度、土壤水分特征曲线以及非饱和导水率等土壤特性的变化, 并建立分形模型预测土壤水力性质, 以此揭示施用生物质炭对于海涂围垦区盐渍土土壤结构和水力特性的影响。试验设置 0%、2%、5% (与表层 0~20 cm 土壤质量比) 3 个生物质炭添加水平, 重复 3 次。结果表明: 施加 5% 生物质炭显著降低盐渍土土壤容重, 增加土壤总孔隙度和大孔隙度; 大于 0.25 mm 水稳性团聚体质量分数显著增加, 增加土壤孔隙分形维数; 提高土壤饱和含水率和饱和导水率; 结合 Micro-CT 图像扫描技术和孔隙分形理论预测改良盐渍土土壤水分特征曲线和非饱和导水率, 预测效果精度高, 能够用于实际问题的研究。

**关键词:** 海涂围垦区; 盐渍土; 生物质炭; Micro-CT 扫描技术; 分形维数

中图分类号: S152.4<sup>+</sup>5; S156.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)02-0242-08

## Structure and Hydraulic Characteristics of Saline Soil Improved by Applying Biochar Based on Micro-CT Scanning

SUN Xiaoqin<sup>1</sup> FANG Kai<sup>2</sup> FEI Yuanhang<sup>1</sup> SHE Dongli<sup>3</sup>

(1. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Water Conservancy Bureau of Suqian, Suqian 223800, China

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The saline/sodic soil in the coastal reclamation area of Jiangsu Province was taken as the subject investigated. Based on Micro-CT scanning technology, the changes in total porosity, soil water characteristic curve and unsaturated hydraulic conductivity of saline/sodic soil after applying biochar were analyzed and the soil hydraulic properties were predicted based on fractal models. Therefore, the effects of biochar application on soil structure and hydraulic characteristics in coastal reclamation area were revealed. The surface soil (0~20 cm) was amended by thoroughly mixed biochar with three levels of application rates (0, 2% and 5% by mass of soil) in a completely randomized design with three replicates for each treatment. The results showed that bulk density of soil was significantly reduced and total porosity and macroporosity of soil were increased obviously after applying 5% biochar. Besides, the proportion of water-stable aggregates with size greater than 0.25 mm, the fractal dimension of soil pores was significantly increased. The saturated water content and saturated water conductivity of soil were also improved. Combined with the Micro-CT scanning technology and the fractal theory, the water characteristic curve and the unsaturated hydraulic conductivity of the improved saline/sodic soil were predicted. The accuracy of the prediction was high, which can be used in the study of practical problems.

**Key words:** reclamation area; saline soil; biochar; Micro-CT scanning technology; fractal dimension

收稿日期: 2018-08-15 修回日期: 2018-10-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41471180)、江苏省国土资源科技项目(2017032)、江苏省水利科技项目(2016008)和中国科学院“西部之光”计划项目

作者简介: 孙泉沁(1996—),男,博士生,主要从事农业水土过程与侵蚀控制研究,E-mail: 753576501@qq.com

通信作者: 余冬立(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土过程与侵蚀控制研究,E-mail: shedongli@hhu.edu.cn

## 0 引言

地球科学的各个分支学科,包括水文地质学、土壤科学、环境科学及岩土工程等,均需对土壤水力性质(水分特征曲线、水力传导度等)进行测定和估算。确定土壤水力性质的方法包括直接测定和间接估算两大类;在实际操作中,土壤水力性质具有较大空间变异性,直接方法测定耗时耗力,且测定的参数往往存在精度不高等问题<sup>[1]</sup>。20世纪70年代以来,根据土壤特性间接推求水力性质的方法引起了国内外学者广泛关注<sup>[2]</sup>,间接方法中使用分形几何方法估计土壤水力性质得到了较大的应用。TYLER等<sup>[3]</sup>首次应用分形维数推求土壤水分特征曲线;KRAVCHENKO等<sup>[4]</sup>根据海绵分形理论,提出孔隙表面分形维数计算方法,改进了Brook-Corey模型。分形方法与其他间接方法的主要区别在于分形方法确定的土壤水力特性参数具有明确的物理意义,其中分形维数可以反映土壤孔隙的不规则度和复杂性。目前大量研究主要通过颗粒大小分布来确定土壤分形维数,但土壤的分形维数不仅与颗粒大小分布有关,还与土壤孔隙形状与排列方式有关;然而土壤孔隙数目、结构与排列方式非常复杂且很难识别。Micro-CT扫描和计算机图像处理技术迅速发展,可以在不破坏样品的情况下对研究对象的内部结构进行测定,且成像及分析速度快,能有效还原土壤孔隙状况,解决识别分析土壤孔隙这一难题<sup>[5]</sup>。

近年来,生物质炭被广泛应用于农业土壤改良<sup>[6]</sup>。生物质炭是生物有机材料(生物质)在缺氧或绝氧环境中,经高温热裂解后生成的高度芳香化、富含碳素的多孔固体颗粒物质<sup>[7]</sup>。前人研究发现施加生物质炭可改善土壤理化特性<sup>[8]</sup>,吸附土壤中重金属元素以及其他污染物,并对碳氮元素等具有良好的固持作用,增加土壤肥力。目前施加生物质炭对于土壤结构和水力性质的影响研究较少,并且研究没有得到一致结论<sup>[9]</sup>,但是土壤的结构和水利性质能够直接或者间接地影响土壤中水盐运移、养分保持以及微生物活动等其他性质。基于此,本文以江苏省沿海围垦区盐渍土为研究对象,基于分形理论和土壤CT图像扫描技术,分析施加生物质炭后改良盐渍土土壤孔隙率、水稳性团聚体水分特征曲线以及非饱和导水率等土壤特性的变化,并建立分形模型预测土壤水力性质,以揭示施用生物质炭对海涂围垦区土壤结构和水利特性的影响,为海涂围垦区土壤治理提供理论依据,并为土壤水利性质的估算提供新的思路。

## 1 模型建立

### 1.1 土壤水分特征曲线的分形模型

AVNIR等<sup>[10]</sup>指出,对具有不同分形孔隙分布的土壤,孔隙体积与半径的关系为

$$-\frac{dV(>r)}{dr} \propto r^{E-D} \quad (1)$$

式(1)的积分形式为

$$V(>r) = -\beta r^{E-D} + V_0 \quad (2)$$

式中  $r$ ——孔隙半径

$V$ ——半径大于  $r$  的孔隙体积

$D$ ——描述孔隙大小分布的分形维数

$E$ ——欧氏几何中的拓扑维数,取2或3

$\beta$ ——常数

$V_0$ ——积分常数

式(2)是采用分形理论研究土壤水力性质的基本公式。

根据毛细管上升方程(Young-Laplace方程),孔隙半径  $r$  与对应水吸力  $\Psi$  的表达式为

$$\Psi(r) = \frac{2\gamma \cos\varphi}{\rho_w g r} \quad (3)$$

式中  $\Psi(r)$ ——孔隙半径为  $r$  的毛细压力

$\gamma$ ——水的表面张力系数

$\varphi$ ——水与孔隙表面的接触角

$\rho_w$ ——水的密度

$g$ ——重力加速度

在施加压力  $\Psi(r)$  后,所有半径大于  $r$  的孔隙水全部排出,所有半径小于  $r$  的孔隙被水充满。

在上述公式的基础上,KRAVCHENKO等<sup>[4]</sup>根据Menger海绵分形理论,推导出孔隙表面分形维数  $D_s$  与颗粒半径和质量分数之间的关系,将  $D_s$  代入Brook-Corey模型的指数项,求解土壤水分特征曲线。

KZ-BC模型为

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) (h_\alpha/h)^{3-D_3-D} \quad (4)$$

式中  $h$ ——土壤吸力,cm

$\theta(h)$ ——土壤含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

$\theta_s$ ——土壤饱和含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

$\theta_r$ ——土壤剩余含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

$h_\alpha$ ——进气值,cm

$D_{3-D}$ ——三维空间内孔隙表面分形维数

本文采用式(4)模拟土壤水分特征曲线。

### 1.2 水力传导度模型建立

#### 1.2.1 水力传导度的经典模型

非饱和导水率在实际中较难直接测量,因此通过土壤水分特征曲线和饱和导水率进行估测。土壤

水分特征曲线的 van Genuchten 模型公式为

$$\frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (5)$$

其中  $m = 1 - 1/n$

式中  $\alpha$ ——进气值的倒数,  $\text{cm}^{-1}$

$n, m$ ——形状参数

文献[11]将推导出的土壤水分特征曲线模型和 Mualem 导水模型相结合,提出非饱和导水率  $K(\theta)$  的计算公式<sup>[11]</sup>为

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \theta^{1/2} [1 - (1 - \theta^{1/m})^m]^2 \quad (6)$$

其中  $\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$  (7)

式中  $K(\theta)$ ——非饱和导水率,  $\text{cm/h}$

$K_s$ ——饱和导水率,  $\text{cm/h}$

$\theta$ ——无量纲含水率

本文采用式(6)对土壤非饱和导水率进行计算。

### 1.2.2 水力传导度的分形模型

水力传导度模型应用比较广泛的是 Mualem 模型,其表达式为

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \theta^{1/2} \frac{\int_0^{\theta'} \frac{1}{h^2(x)} dx}{\int_0^1 \frac{1}{h^2(x)} dx} \quad (8)$$

其中  $\theta' = \frac{\theta}{\theta_s}$  (9)

TYLER 等<sup>[12]</sup>用 Sierpinski 地毯概念模型,得到了土壤水分特征曲线的分形模型

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left( \frac{h}{h_\alpha} \right)^{D_2-D-2} \quad (10)$$

将式(10)代入 Mualem 模型,可以得到 Mualem 模型的分形形式

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{\frac{5D_2-D-7}{D_2-D-2}} = \left( \frac{h}{h_\alpha} \right)^{\frac{5D_2-D-7}{2}} \quad (11)$$

式中  $D_{2-D}$ ——二维空间孔隙分形维数

根据截面约定,三维空间分形维数  $D_{3-D}$  与二维空间分形维数  $D_{2-D}$  的关系为  $D_{2-D} = D_{3-D} - 1$ 。本文采用式(11)对土壤水力传导度进行分析和预测。模型预测结果采用均方根误差(RMSE)进行评价。

## 2 试验材料和方法

### 2.1 试验材料

供试土样取自江苏省如东县东凌垦区(2007年围垦),取样深度为0~100 cm。试验土壤类型为粉砂壤土,土壤砂粒质量分数为32.4%,粉粒质量分

数为62.7%,黏粒质量分数为4.9%,土壤有机碳质量比为3.8 g/kg。生物质炭材料是河南三利公司生产的小麦秸秆生物质炭。该生物质炭在350~550℃温度下热裂解得到。生物质炭的基本理化性质如下:pH值为9.9,电导率为1.0 S/m,有机碳质量比467.2 g/kg,全氮质量比5.9 g/kg,容重0.69 g/cm<sup>3</sup>,密度1.83 g/cm<sup>3</sup>,总孔隙度62.5%,内部孔隙度13.2%。

### 2.2 试验设计与实施

2016年在河海大学南方地区高校灌排与农业水土环境教育部重点实验室进行改良盐渍水稻栽培测坑试验。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。供试土壤经风干、过5 mm筛之后,分层按容重1.35 g/cm<sup>3</sup>填装入测坑。试验采用添加生物质炭改良盐渍土,设置0(对照组)、2%、5%(与表层0~20 cm土壤质量比)3个生物质炭添加水平,重复3次。供试水稻品种为武运粳23号(每个测坑30穴,每穴2株)。每个测坑内预埋暗管用于抽取地下水。试验在塑料大棚避雨条件下开展。水稻于6月29日移栽,11月4日收割。

### 2.3 试验指标及测定方法

#### 2.3.1 土壤结构参数

##### (1) 土壤容重、孔隙度

于水稻收割后,采用100 cm<sup>3</sup>环刀取原状土,将取回的原状土样品使用干燥箱在105℃下干燥24 h,然后测定土壤容重。土壤总孔隙度计算式为

$$P = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_B} \quad (12)$$

式中  $\rho_b$ ——土壤干容重,  $\text{g/cm}^3$

$\rho_B$ ——土壤比重,取2.65  $\text{g/cm}^3$

$P$ ——土壤总孔隙度

##### (2) 水稳性团聚体

采用湿筛法测定土壤的水稳性团聚体。将取回的水稻土风干,过孔径为5 mm和2 mm筛,土样分为0~2 mm、2~5 mm、大于5 mm 3个级别,然后按3个级别土样在原状土中比例混合土样20.0 g。将混合土样置于由孔径为5、2、1、0.5、0.25 mm组合的套筛上,将套筛缓缓浸没水中,静置10 min,然后以30次/min的速度筛分5 min。湿筛后,将每一层筛上的团聚体分别洗入铝盒并干燥称量,计算其在土样中的质量分数。

##### (3) 土壤分形维数、大孔隙度

采用 Micro-CT 扫描结合图像处理分析土壤的分形维数和大孔隙度。用内径3.6 cm、高6 cm的透明有机玻璃管取各处理原状土柱进行 Micro-CT 扫

描。CT扫描参数为:设备型号 SkyScan1176,电压 90 kV,电流 278  $\mu\text{A}$ ,曝光时间 325 ms,旋转角  $0.5^\circ$ ,扫描分辨率 35.774  $\mu\text{m}$ 。为避免边缘效应,选取中间完好的直径为 3.2 cm、高为 3.8 cm 的土柱。CT扫描获取连续切片数字图像 1 062 幅。应用 Image J 软件对获得的图像进行处理分析。将 CT 扫描的数字图像录入软件,选定研究区域,增加图片的亮度和对比度,然后使用中值滤波进行图像的平滑滤波,去除图像中的噪声和脉冲干扰,即直径小于 2 像素 (71.548  $\mu\text{m}$ ) 的噪点,接着对图片进行手动阈值分割,得到土壤-孔隙的二值图像 (图 1),图像中白色为土壤基质,黑色为孔隙。最后对二值图像分析处理,使用 Image J 软件中 Bone J 插件计算分形维数<sup>[13]</sup>; Volume Viewer 计算大孔隙度<sup>[14]</sup>, PAGENKEMPER 等<sup>[15]</sup>将大于体素分辨率的孔隙定义为大孔隙,因此,本文将孔径大于 71.548  $\mu\text{m}$  的孔隙定义为大孔隙。图 2 为 Image J 软件处理得到的扫描土样三维图像 (选取中间的  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 4\text{ cm}$  部分)。

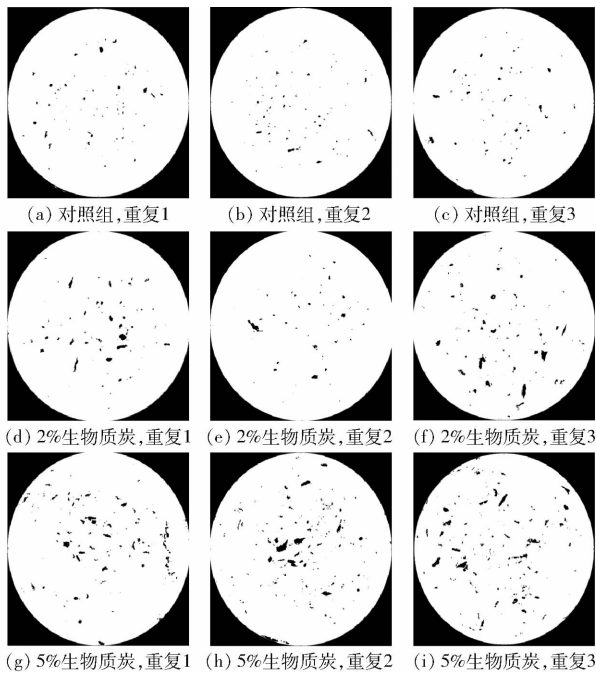
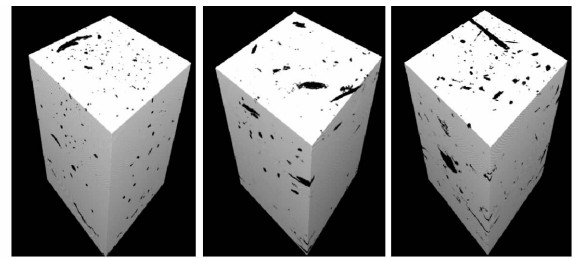


图 1 土壤-孔隙二值图像

Fig. 1 Binary images of soil and pore



(a) 对照组 (b) 2% 生物质炭 (c) 5% 生物质炭

图 2 土壤-孔隙三维图像

Fig. 2 3D images of soil and pore

### 2.3.2 土壤水力参数

采用定水头法<sup>[16]</sup>测定土壤的饱和导水率。采用吸力平板法<sup>[17]</sup>测定土壤水分特征曲线,吸力值设定为 0、15、30、60、100、300、600、900 cm。获得的土壤水分特征曲线散点输入 RETC 软件并使用经典单峰 van Genuchten 模型进行拟合,得到试验土壤的水力参数。

## 3 试验结果

### 3.1 施加生物质炭对盐渍土土壤结构和水力特性的影响

根据表 1,施加高量生物质炭 (5%) 显著影响土壤容重 ( $P < 0.05$ )。对照组土壤容重为  $1.43\text{ g/cm}^3$ ,显著高于 5% 生物质炭施加后的土壤容重  $1.35\text{ g/cm}^3$ 。相应地,施加高量生物质炭 (5%) 对土壤总孔隙度也有显著影响 ( $P < 0.05$ )。5% 生物质炭施加下土壤的总孔隙度为 0.49,显著高于对照组的 0.46。同时,生物质炭施加显著增加土壤中大于 0.25 mm 水稳性团聚体质量分数 ( $P < 0.05$ ),对照组大于 0.25 mm 水稳性团聚体质量分数为 11%,施加 2% 和 5% 生物质炭后增加 54.5% 和 63.6%。此外,土壤总孔隙度与大团聚体的相关系数达到了 0.83。

同样,高量生物质炭的施加显著增加了土壤孔隙分形维数和大孔隙度 ( $P < 0.05$ )。对照组的大孔隙度为 0.0295,高量生物质炭的添加 (5%) 土壤大孔隙度增加了 78%。施加 5% 生物质炭土壤分形维数为 2.602,显著高于对照组的 2.527。土壤总孔隙

表 1 施加不同量生物质炭土壤的结构参数

Tab. 1 Structural parameters of applying different amounts of biochar

处理	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	总孔隙度	大于 0.25 mm 水稳性 团聚体质量分数/%	大孔隙度	$D_{3-D}$
对照组	1.43 <sup>a</sup>	0.46 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	0.0295 <sup>a</sup>	2.527 <sup>a</sup>
2% 生物质炭	1.41 <sup>a</sup>	0.47 <sup>a</sup>	17 <sup>ab</sup>	0.0250 <sup>a</sup>	2.519 <sup>a</sup>
5% 生物质炭	1.35 <sup>b</sup>	0.49 <sup>b</sup>	18 <sup>b</sup>	0.0525 <sup>b</sup>	2.602 <sup>b</sup>
相关系数 R	-0.99		0.83	0.88	0.91

注:R 为总孔隙度与其他参数的相关系数;同一列不同小写字母表示生物质炭处理下差异显著 ( $P < 0.05$ ),下同。

度与大孔隙度的相关系数达到了0.88。

根据表2,单峰 van Genuchten 模型拟合的土壤水分特征曲线效果很好,决定系数均在0.99以上;模型形状参数 $\alpha$ 在高量生物质炭施加后略微减小, $n$ 略微增大。而土壤饱和含水率差异明显( $P < 0.05$ )。添加2%和5%生物质炭后,土壤饱和含水

率为 $0.472 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 和 $0.477 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,显著高于对照组的 $0.452 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。同时,随着生物质炭添加量增加,盐渍土土壤饱和和导水率呈增大趋势。对照组土壤饱和和导水率为 $0.493 \text{ cm}^3/\text{h}$ ,添加2%生物质炭后,土壤饱和和导水率增大18.3%;添加5%生物质炭后,土壤饱和和导水率增大25.9%。

表2 施加不同量生物质炭土壤的水力参数

Tab.2 Hydraulic parameter of applying different amounts of biochar

处理	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$n$	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	$R^2$
对照组	0	0.452 <sup>a</sup>	0.0312 <sup>a</sup>	1.470 <sup>a</sup>	0.493 <sup>a</sup>	0.998
2% 生物质炭	0	0.472 <sup>b</sup>	0.0301 <sup>a</sup>	1.502 <sup>a</sup>	0.583 <sup>a</sup>	0.997
5% 生物质炭	0	0.477 <sup>c</sup>	0.0306 <sup>a</sup>	1.485 <sup>a</sup>	0.620 <sup>a</sup>	0.998

### 3.2 分形模型的验证

#### 3.2.1 土壤水分特征曲线模型验证

采用式(4)KZ-BC模型模拟土壤水分特征曲线

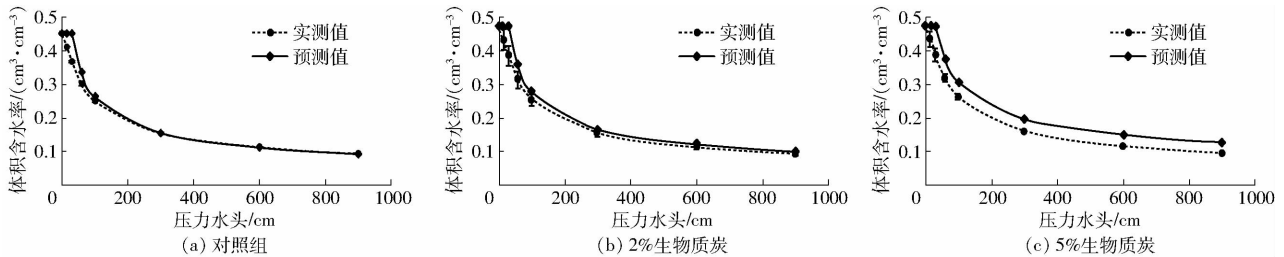


图3 生物质炭施加后土壤水分特征曲线预测值和实测值对比

Fig.3 Comparison of predicted and measured soil water characteristic curves after biochar application

结果表明,不同生物质炭处理下土壤的水分特征曲线形态比较一致,即在低压力下,随着吸力的增大,体积含水率减小。然而,生物质炭的添加显著提高了土壤的持水性,即相同吸力下,生物质炭改良的土壤持水量明显高于对照组。KZ-BC模型的预测结果与实测值较为接近,并且与实测值的变化趋势相同,但高量生物质炭(5%)的添加KZ-BC模型过高地估计土壤体积含水率。采用KZ-BC分形模型模拟土壤水分特征曲线 $R^2$ 较高(表3),故该模型能够满足精度需要。分形模型预测的水分特征曲线与实测曲线间的均方根误差(RMSE)如表3所示,RMSE值越小,表明模型预测越精确。

#### 3.2.2 土壤水力传导度模型验证

通过土壤水分特征曲线和饱和和导水率的实测数

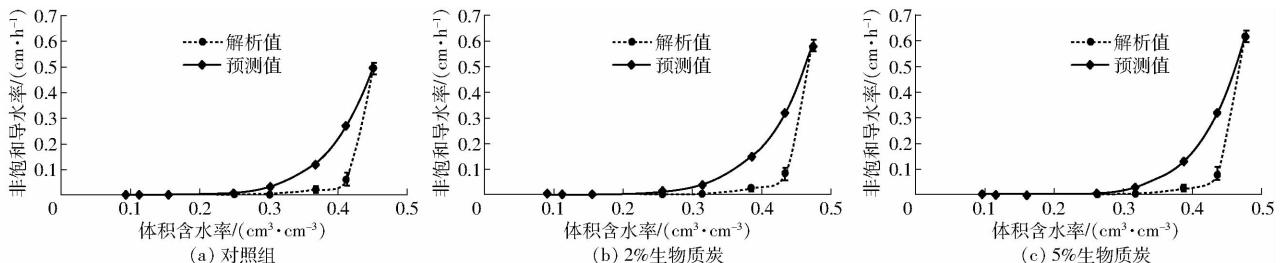


图4 生物质炭施加后土壤非饱和导水率解析值与预测值的对比

Fig.4 Comparison of predicted and measured parsing hydraulic conductivities after biochar application

线,式中参数取值如表1和表2所示,添加0、2%、5%生物质炭各处理改良盐渍土土壤水分特征曲线的分形模型预测值和实测值如图3所示。

表3 分形模型预测土壤特性精度参数

Tab.3 Precision parameters of fractal model predicting soil properties

处理	土壤水分特征曲线		非饱和导水率	
	RMSE/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$R^2$	RMSE/ ( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	$R^2$
对照组	0.0352	0.98	0.0824	0.88
2% 生物质炭	0.0385	0.98	0.0951	0.86
5% 生物质炭	0.0477	0.84	0.0910	0.88

据,采用式(6)计算土壤水力传导度,同时采用Mualem分形模型式(11)预测土壤水力传导度。式中参数如表1和表2所示。添加0、2%、5%生物质炭改良盐渍土土壤非饱和导水率解析值和Mualem模型预测值如图4所示。

从图 4 可看出,不同生物质炭处理下非饱和导水率变化趋势相同,即随体积含水率的增加,非饱和导水率迅速增加。此外,生物质炭的添加增加了土壤的导水性,尤其是在近饱和段的土壤非饱和导水率。采用 Mualem 分形模型预测土壤非饱和导水率  $R^2$  较高(表 3),该模型精度满足要求。根据土壤水分特征曲线和饱和导水率实测数据解析获得的非饱和导水率曲线与 Mualem 分形模型预测的非饱和导水率曲线间的均方根误差(RMSE)如表 3 所示。

## 4 讨论

### 4.1 施加生物质炭对盐渍土土壤结构及水力特性的影响

本试验结果表明,施加生物质炭后 1 年即能达到改善盐渍土土壤结构的效果(表 1)。高量施加生物质炭能够显著降低盐渍土土壤容重。相对而言,生物质炭容重较小、质地疏松,试验盐渍土容重大,加入生物质炭可以改善土壤的松紧程度,降低土壤容重。且生物质炭的施加促进了土壤颗粒团聚过程,有利于团聚体内部和团聚体之间多级孔隙的形成。LEI 等<sup>[18]</sup>在壤质土中添加 5% 质量分数的木屑生物质炭,经过 180 d 的室内培养发现土壤大团聚体显著增加,这与本文研究结果类似。高量生物质炭的施加促进大团聚体形成,使得盐渍土中散粒结构团聚,从而大孔隙增加。表 1 结果同样表明,生物质炭的添加导致总孔隙度的增加主要来自于大团聚体和大孔隙度的增加,这与前人的结论一致<sup>[19]</sup>。

高量生物质炭的添加显著增加了土壤饱和含水率。这可能是因为生物质炭的添加显著增加了大团聚体数量和大孔隙度,从而土壤的总孔隙度显著增加,进而土壤的比表面积增大,土壤保水能力提高,饱和含水率显著增大<sup>[20]</sup>。同样,高量生物质炭的添加会提高土壤饱和导水率。可能是因为生物质炭添加后,土壤孔隙结构更加丰富,并且生物质炭自身具有良好的通气性和透水性可以改善土壤的通气透水性,从而改善其导水性能,增大饱和导水率。但是研究发现施加生物质炭对土壤水力性质影响与土壤质地、生物质炭用量、种类等因素相关。TRYON<sup>[21]</sup>研究发现,施加生物质炭可以增大砂土含水率,降低黏土含水率,对于壤土则没有显著影响。BROCKHOFF 等<sup>[22]</sup>研究砂土发现,生物质炭与土壤体积比为 25.0% 的处理可显著增加草地根区的土壤含水率,同时土壤饱和导水率随生物质炭施用量的增加而降低。田丹等<sup>[23]</sup>研究发现,增加生物质炭用量能够增加砂土持水性能且花生壳炭处理的砂土持水性比秸秆木炭处理的更优。故研究生物质炭对

于土壤水力性质的影响要充分考虑这些因素,本试验土壤为滨海盐渍粉砂壤土,添加生物质炭对土壤水力性质的影响结论与曹雨桐等<sup>[6]</sup>结论一致。本文试验结果表明施加生物质炭能够有效改良其土壤结构与水力性质,与文献[24]的客土法相比成本较低,可以大面积应用,与地面覆盖法<sup>[25]</sup>改良盐渍土相比,见效快且能有效改良盐渍土的土壤结构与水力特性,因此研究施加生物质炭改良盐渍土性质具有重要意义。但本研究只验证了添加生物质炭 1 年后盐渍土土壤结构及水力特性的变化,后期拟开展长期定位试验研究探索时间序列上生物质炭施加对盐渍土的特性影响。

### 4.2 基于 Micro-CT 扫描技术与分形理论结合的盐渍土水力性质预测

本试验结果表明,结合 Micro-CT 结构扫描技术与分形理论模型可以较为精准地预测盐渍土水力性质。刘建立等<sup>[26]</sup>认为采用颗粒大小估计分形维数的分形模型预测土壤水力性质在其适用范围内具有足够的精度,可以用于实际问题的研究,但土壤的分形维数不仅仅与颗粒大小相关,还与其形状和排列方式密切相关,因此使用颗粒大小估计土壤的分形维数显然是不完备的。本试验采用的图像处理软件分析土壤的孔隙分形维数,相较于以往的根据颗粒大小估计的分形维数<sup>[26]</sup>,能更完备地反映土壤孔隙状态。KATUWAL 等<sup>[27]</sup>研究发现,采用 Micro-CT 扫描技术得到的孔隙结构参数能够一定程度上解释水流的运动,但是无法解释流动的变异性,可采用更高的分辨率或者不同的分辨率合并研究孔隙变化对于水流的影响。同时,本试验得到的分形维数预测土壤的水力性质精度高,能够满足试验研究的需要,与传统颗粒大小估计的分形维数预测相比<sup>[26]</sup>,该方法快捷、准确。对于预测土壤水分特征曲线,高量生物质炭(5%)的添加使得 KZ-BC 模型的预测结果整体都大于实测值,这可能是由于高量生物质炭添加后土壤孔隙结构显著变化,而在不同的压力下,影响土壤含水率的孔隙不同,在本模型中,整个压力水头段采用了一个分形维数来描述孔隙对土壤水分的影响,从而使得分形维数  $D_v$  偏大,在相同的压力水头下,KZ-BC 模型得到的土壤含水率要高于实际土壤含水率。后期研究可以考虑对孔隙进行分级,分别计算其分形维数,进而预测土壤的水力性质<sup>[28]</sup>。在预测非饱和导水率时,分形模型过高地估计土壤的非饱和导水率,这可能是因为整个土层是不完全均匀的,会存在一些影响水流流动的致密层,使得水流流动十分复杂。在这种情况下,仅仅采用一个分形模型可能是不够的,需要结合土

壤的性质(各向异性、连通性、不均匀性)综合考虑<sup>[29]</sup>。因此,本文采用 Micro-CT 扫描技术与分形模型模拟土壤的水力性质虽然取得了较好的模拟结果,但是今后可以进一步优化模型,充分考虑土壤的性质,从而使模型预测更为精确。

## 5 结论

(1)施加高量生物质炭(5%,与表层 0~20 cm

土壤质量比)显著降低盐渍土土壤容重,增加土壤总孔隙度和大孔隙度,促进水稳性团聚体形成,增加土壤孔隙分形维数,提高土壤饱和含水率和饱和导水率。

(2)结合 Micro-CT 图像扫描技术和孔隙分形理论预测改良盐渍土土壤水分特征曲线和非饱和导水率,预测效果精度高,与传统颗粒大小估计分形维数相比,更快捷、准确,能够用于实际问题的研究。

## 参 考 文 献

- [1] NIU Q, FRATTA D, WANG Y H. The use of electrical conductivity measurements in the prediction of hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522:475-487.
- [2] VAN GENUCHTEN M T, KAVEH F, RUSSELL W B, et al. Direct and indirect methods for estimating the hydraulic-properties of unsaturated soils [C]//*Land Qualities in Space and Time, Proceedings of a Symposium Wageningen*, 1989:61-72.
- [3] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(4):987-996.
- [4] KRAVCHENKO A, ZHANG R. Estimating the soil water retention from particle-size distributions: a fractal approach [J]. *Soil Science*, 1998, 163(3):171-179.
- [5] PEYTON R L, GANTZER C J, ANDERSON S H, et al. Fractal dimension to describe soil macropore structure using X ray computed tomography[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(3):691-700.
- [6] 曹雨桐, 余冬立. 施用生物质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.
- CAO Yutong, SHE Dongli. 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. (in Chinese)
- [7] ANTAL M J, GRONLI M. The art, science, and technology of charcoal production [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003, 42(8):1619-1640.
- [8] 勾芒芒, 屈忠义, 王凡, 等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(7):1-12.
- GOU Mangmang, QU Zhongyi, WANG Fan, et al. Process in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigating emissions in agricultural fields[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7):1-12. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180701&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180701&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.001. (in Chinese)
- [9] 赵建坤, 李江舟, 杜章留, 等. 施用生物质炭对土壤物理性质影响的研究进展[J]. *气象与环境学报*, 2016, 32(3):95-101.
- ZHAO Jiankun, LI Jiangzhou, DU Zhangliu, et al. Effects of biochar application on soil physical properties: a review [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2016, 32(3):95-101. (in Chinese)
- [10] AVNIR D, FARIN D, PFEIFER P. Chemistry in noninteger dimensions between two and three. II. Fractal surfaces of adsorbents[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1983, 79(7):3566-3571.
- [11] GENUCHTEN M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5):892-898.
- [12] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal processes in soil water retention[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(5):1047-1054.
- [13] DARHE A, THULLNER M. The relationship between fractal properties of solid matrix and pore space in porous media[J]. *Geoderma*, 2005, 129(3-4):279-290.
- [14] BOLTE S, CORDELIÈRES F P. A guided tour into subcellular colocalization analysis in light microscopy[J]. *Journal of Microscopy*, 2006, 224(3):213-232.
- [15] PAGENKEMPER S K, PETH S, PUSCHMANN D U, et al. Effects of root-induced biopores on pore space architecture investigated with industrial X-ray computed tomography[J]. *Urology*, 2013, 193(4):e166.
- [16] 霍丽娟, 李一菲, 钱天伟. 定水头法和降水头法测定黄土的饱和导水率[J]. *太原科技大学学报*, 2010, 31(3):256-259.
- HUO Lijuan, LI Yifei, QIAN Tianwei. Determination of saturated hydraulic conductivity of loess soil by constant-head method and falling-head method [J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2010, 31(3):256-259. (in Chinese)
- [17] 何晓文, 许光泉, 李青青. 充填结构包气带水分运动参数试验研究[J]. *地下水*, 2012, 34(6):13-16.
- HE Xiaowen, XU Guangquan, LI Qingqing. Research on filling with water movement of air bag structure by parameters [J]. *Underground Water*, 2012, 34(6):13-16. (in Chinese)
- [18] LEI O, ZHANG R. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2013, 13(9):1561-1572.
- [19] HERATH H M S K, CAMPS-ARBESTAIN M, HEDLEY M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol[J]. *Geoderma*, 2013, 209:188-197.

- [20] BRUUN S, ELZAHERY T, JENSEN L. Carbon sequestration with biochar-stability and effect on decomposition of soil organic matter [C] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2009, 6(24):242011.
- [21] TRYON E H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils [J]. Ecological Monographs, 1948, 18(1):81-115.
- [22] BROCKHOFF S R, CHRISTIANS N E, KILLOM R J, et al. Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar [J]. Agronomy Journal, 2010, 102(6):1627-1631.
- [23] 田丹, 屈忠义, 李波, 等. 生物质炭对砂土水力特征参数及持水特性影响试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 135-137.  
TIAN Dan, QU Zhongyi, LI Bo, et al. Influence of biochar on sandy soil hydraulic characteristic parameters and moisture holding properties [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(3):135-137. (in Chinese)
- [24] 李品芳, 杨永利, 兰天, 等. 天津滨海盐渍土客土改良后的土壤理化性质与持水特性 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(7):149-156.  
LI Pinfang, YANG Yongli, LAN Tian, et al. Physicochemical properties and water holding characteristics of Tianjin coastal saline soil improved by foreign soil [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7):149-156. (in Chinese)
- [25] 程珊珊, 李瑞利, 石福臣. 应用耐盐植物改良滨海盐渍土的研究 [C] // 2015 年中国环境科学学会年会论文集, 2015: 4418-4424.
- [26] 刘建立, 徐绍辉. 根据颗粒大小分布估计土壤水分特征曲线: 分形模型的应用 [J]. 土壤学报, 2003, 40(1):46-52.  
LIU Jianli, XU Shaohui. Figuring soil water characteristic curve based on particle size distribution data: application of fractal models [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(1):46-52. (in Chinese)
- [27] KATUWAL S, MOLDRUP P, LAMANDE M, et al. Effects of CT number derived matrix density on preferential flow and transport in a macroporous agricultural soil [J]. Vadose Zone Journal, 2015, 14(7):1-13.
- [28] 程亚南. 土壤孔隙结构的微观模拟 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.  
CHENG Ya'nan. Micro-simulation of soil pore structure [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [29] PERIARD Y, GUMIERE S J, LONG B, et al. Use of X-ray CT scan to characterize the evolution of the hydraulic properties of a soil under drainage conditions [J]. Geoderma, 2016, 279:22-30.

(上接第 217 页)

- [18] 雷相东, 洪玲霞, 陆元昌, 等. 国家级森林资源清查地面样地设计 [J]. 世界林业研究, 2008, 21(4): 36-40.  
LEI Xiangdong, HONG Lingxia, LU Yuanchang, et al. Revelation on forestry resource inventory and monitoring contrasted the United States, France, Germany and Japan with China 2008 [J]. World Forestry Research, 2008, 21(4): 36-40. (in Chinese)
- [19] 邓成, 梁志斌. 国内外森林资源调查对比分析 [J]. 林业资源管理, 2012(5): 13-17.  
DENG Cheng, LIANG Zhibin. The comparative analysis on forest resources inventories of China and other countries [J]. Forest Resource Management, 2012(5): 13-17. (in Chinese)
- [20] 叶荣华. 年度森林资源清查: 美国的经验与借鉴 [J]. 林业资源管理, 2013(4): 1-4, 10.  
YE Ronghua. Annual forest inventory: US experience and lessons [J]. Forest Resource Management, 2013(4): 1-4, 10. (in Chinese)
- [21] FOWLER G W, 唐宗楨. 森林边界效应引起的固定面积圆形样地的统计偏差 [J]. 林业资源管理, 1982(4): 51-56.  
FOWLER G W, TANG Zongzhen. Statistical deviation of fixed area circular plot caused by forest boundary effect [J]. Forest Resource Management, 1982(4): 51-56. (in Chinese)
- [22] 姜文军, 那海豹. 对控制样地调查采用圆形调查方法优越性的讨论 [J]. 林业勘查设计, 2004(2): 42.  
JIANG Wenjun, NA Haibao. Discussion on the advantages of circular survey method in control sample survey [J]. Forest Exploration Design, 2004(2): 42. (in Chinese)
- [23] 李茂深. 群状抽样在森林资源调查中的应用 [J]. 林业资源管理, 1987(3): 42-46.  
LI Maoshen. Application of cluster sampling in forest resource survey [J]. Forest Resource Management, 1987(3): 42-46. (in Chinese)
- [24] 王海宾, 邓华锋, 程志楚, 等. 基于 3S 的森林植被面积空间抽样方法 [J]. 森林与环境学报, 2015, 35(1): 74-80.  
WANG Haibin, DENG Huafeng, CHENG Zhichu, et al. Study on forest vegetation area spatial sampling method based on 3S [J]. Journal of Forest and Environment, 2015, 35(1): 74-80. (in Chinese)
- [25] 李云霄, 彭道黎, 何彦然, 等. 基于多阶抽样的林地蓄积量估测方法——以三峡库区为例 [J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(5): 130-133.  
LI Yunxiao, PENG Daoli, HE Yanran, et al. Estimating method of the forest volume based on multi-stage sampling—taking Three Gorges Reservoir area as an example [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(5): 130-133. (in Chinese)
- [26] TOMTER S M, KULIESIS A, GSCHWANTNER T. Annual volume increment of the European forests—description and evaluation of the national methods used [J]. Annals of Forest Science, 2016, 73(4): 849-856.