

# 活性炭对农田土壤孔隙结构的影响

丁奠元<sup>1,2</sup>, 赵英<sup>2,4</sup>, 方圆<sup>2</sup>, 冯浩<sup>2,3</sup>

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏扬州 225009; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;  
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 分析了农田土壤中施用不同用量活性炭(活性炭用量分别占土壤质量的0、0.1%、0.3%、0.6%、0.9%和1.2%)对土壤总孔隙的影响,及其随着时间(0、30、60 d和90 d)的变化;利用DE双指数模型计算了土壤毛管度度和非毛管孔隙度,定量评价了活性炭对土壤不同大小等级孔隙状况的影响。结果表明:活性炭对土壤的毛管孔隙影响不大,主要增加了土壤的非毛管孔隙,培养90 d时,相比对照处理,活性炭处理(从低到高)的土壤非毛管孔隙度分别增加5.8%、2.5%、8.7%、9.1%和14.7%;活性炭处理减小了土壤容重,增大了土壤总孔隙度,培养90 d时,活性炭处理(从低到高)的总孔隙度比对照处理分别增加1.9%、1.8%、2.3%、2.7%和4.3%;活性炭处理显著减小了土壤毛管孔隙孔径( $P < 0.05$ ),而显著增大了土壤非毛管孔隙孔径( $P < 0.05$ )。活性炭对土壤孔隙的影响随着时间的延长越来越明显,这可能主要与活性炭自身特性和添加活性炭所引起的有机质和微生物变化有关。

**关键词:** 活性炭;土壤孔隙结构;双指数土壤水分特征曲线模型;毛管孔隙;非毛管孔隙

**中图分类号:** S152.5 **文献标志码:** A

## Effect of addition of activated carbon on soil pore structure

DING Dian-yuan<sup>1,2</sup>, ZHAO Ying<sup>2,4</sup>, FANG Yuan<sup>2</sup>, FENG Hao<sup>2,3</sup>

(1. School of hydraulic energy and power engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest Agricultural and Forest University, Yangling 712100, China;

3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

4. College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Addition of organic materials into soil can improve soil structure. The objective of this study is to investigate the effects of activated carbon on the soil pore structure. In the treatments of different amounts of activated carbon (the percentage of soil weight 0%, 0.1%, 0.3%, 0.6%, 0.9% and 1.2%) and durations of incubation (0, 30, 60, 90 d), we measured the soil total porosity, capillary porosity, and no-capillary porosity using the double-exponential water retention equation. Results showed that activated carbon insignificantly affected soil capillary porosity but significantly increased the soil no-capillary porosity, compared with the control treatment after 90 d, the soil no-capillary porosity of the activated carbon treatments (from low to high) increased 5.8%, 2.5%, 8.7%, 9.1% and 14.7%, respectively. Activated carbon decreased soil bulk density and increased soil total porosity, compared with the control treatment after 90 d, the soil total porosity of the activated carbon treatments (from low to high) increased 1.9%, 1.8%, 2.3%, 2.7% and 4.3%, respectively. The activated carbon significantly decreased the radii of soil capillary pores and increased the radii of soil no-capillary pores. The activated carbon may change the composition of soil organic matters and the activity of soil microorganisms, so the effects of activated carbon on the soil pore structure became more obvious over time. These findings may serve as theoretical basis for the use of activated carbon to improve soil structure.

**Keywords:** activated carbon; soil pore structure; double-exponential water retention equation; soil capillary pore; soil non-capillary pore

收稿日期: 2016-08-06

修回日期: 2016-11-29

基金项目: 国家 863 计划项目(2013AA102904); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室主任基金(K318009902-1427); “111”项目(B12007)

作者简介: 丁奠元(1989—), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要研究方向为农业水土资源利用与保护。E-mail: ding@nwsuaf.edu.cn。

通信作者: 冯浩, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为农业水土资源利用与保护。E-mail: nercwsi@vip.sina.com。

土壤孔隙结构的改善可以提高土壤保蓄水分和养分的能力,土壤的毛管孔隙和非毛管孔隙对土壤肥力、植物根系延伸和土壤动物活动影响显著<sup>[1]</sup>,并且对土壤的通透性<sup>[2]</sup>和渗透性<sup>[3]</sup>具有重要影响。近 20 年,人们大量利用有机无机材料对土壤的结构进行改良研究<sup>[4-7]</sup>。其中活性炭作为一种具有较强的吸附性和催化性能的有机物料,原料充足,且安全性高<sup>[8-9]</sup>,耐酸碱、耐热、不溶于水和有机溶剂、易再生,是一种环境友好型的活性材料<sup>[10-11]</sup>。前人研究表明,活性炭作为优良的土壤改良剂,能够较强吸附土壤中有有机生长抑制物质,吸附土壤中的化感物质<sup>[12]</sup>;活性炭单独施用或配合施用都能明显减少小麦对镉的吸收<sup>[13]</sup>,有效促进小麦生长发育<sup>[14]</sup>;活性炭可以降低污染土壤中有效态 Cr<sup>[15-16]</sup>,提高土壤的阳离子交换性能<sup>[17]</sup>,调节土壤的 pH 值<sup>[18]</sup>;适量施用活性炭可以增加土壤的稳渗和吸渗率,抑制土壤蒸发,加强土壤对养分的吸附和保持作用<sup>[19]</sup>。活性炭作为一种高性能的土壤改良剂,其对土壤孔隙结构的改良是改良土壤其它性质的基础,研究意义重大。然而,目前活性炭对土壤的改良作用的研究还处于初步探索阶段,仅仅停留在对研究现象简单的描述上,难以用参数量化。

根据土壤孔隙的性质和大小不同,土壤孔隙从小到大依此可以分为残余孔隙(residual pore)、基质孔隙(matrix pore)、结构孔隙(structural pore)和大孔隙(macro-pore)<sup>[20-21]</sup>。Dexter 等<sup>[20]</sup>提出的双指数土壤水分特征曲线模型(the double-exponential water retention equation,简称 DE 双指数模型)可以较好地估计以上土壤的不同大小等级的孔隙度,表达式如下:

$$\theta = C + A_1 e^{-\left(\frac{h}{h_1}\right)} + A_2 e^{-\left(\frac{h}{h_2}\right)} \quad (1)$$

式中, $\theta$  为土壤体积含水量( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ); $C$ 、 $A_1$  和  $A_2$  分别表示土壤的残余孔隙度(%)、基质孔隙度(%)和结构孔隙度(%,包括大孔隙); $h$  为吸力水头(hPa); $h_1$  和  $h_2$  分别为  $A_1$  和  $A_2$  排空水时的土壤基质吸力(hPa); $e$  为自然常数。DE 双指数模型作为一个定量反映土壤孔隙结构的土壤水分特征曲线(SWRC)模型,已经得到较广泛的应用研究<sup>[22-24]</sup>,然而利用 DE 双指数模型研究活性炭对土壤孔隙结构的影响国内外鲜有报道。

鉴于以上研究现状,笔者拟向土壤中施用不同用量活性炭,首先验证 DE 双指数模型对加入活性炭的土壤水分特征曲线(soil water retention curve, SWRC)的模拟效果;其次利用 DE 双指数模型估算

土壤不同大小等级的孔隙度及其孔径的变化,定量研究活性炭对土壤毛管孔隙、非毛管孔隙和总孔隙的影响,以期为活性炭改良和培肥土壤、改善土壤孔隙结构和土壤耕性提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤采自西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院灌溉试验站,取地表以下 10~30 cm 土壤,去除表层杂草和秸秆,风干碾碎后,过 2 mm 筛备用。土壤有机质含量  $7.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解氮  $22.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )  $41.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾( $\text{K}_2\text{O}$ )  $138.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,属于中等肥力土壤。土壤平均容重为  $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,密度为  $2.67 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,供试土壤具体机械组成见表 1。供试活性炭由天津市科密欧化学试剂有限公司生产(市购),黑色粉末状,分析纯。

表 1 土壤颗粒组成

Table 1 Soil particle size composition

土壤类型 Soil type	粒级组成 Soil particle size composition/%			质地 Texture
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	
壤土 Loam	23.83	62.15	14.02	粉砂壤土 Silty loam

注:砂粒 2~0.05 mm;粉粒 0.05~0.002 mm;黏粒 <0.002 mm。

Note: sand, 2~0.05 mm; silt, 0.05~0.002 mm; clay, <0.002 mm.

### 1.2 试验设计

本试验以不添加活性炭作为对照处理(CK);前期预试验根据活性炭对土壤的改良效果,选择了合适的活性炭添加数量梯度,本研究选取活性炭处理添加比例分别为土壤质量的 0.1% (H1)、0.3% (H2)、0.6% (H3)、0.9% (H4) 和 1.2% (H5)。装土容器采用直径 10 cm,高 35 cm 的 PVC 管。为保证各处理土壤与活性炭充分完全混合,每 6 cm 为一层(共 5 层,装土高度为 30 cm)计算土壤质量,每层土壤分别与对应质量的活性炭充分搅拌混合,分层填装到 PVC 管中。通过捣锤控制土壤的紧实度,控制其容重为  $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。装土之前 PVC 管底部用细纱布封闭,管内均匀涂抹薄层凡士林,管底部放一层滤纸。每次装土前必须保证下层土壤表面打毛,避免上下土层间出现结构和水动力学特性突变等不必要的内边界<sup>[25]</sup>。每个处理 12 个重复,共 72 个土柱。

装土之后,所有土柱放入水桶中,均从底部吸水

达到饱和,放在控水旱棚内培养。培养过程中依据 CK 处理的含水量变化控制灌水,每天定时对 CK 处理土柱称重,当其含水量低于 80% 田间持水量(0~30 d 为 16.0%,30~60 d 为 16.7%,60~90 d 为 19.7%),对所有土柱称重后计算灌水量进行灌水,灌水上限为 CK 处理的 100% 田间持水量。培养期间,控水旱棚环境的平均温度为 36.2℃(±5.3℃),平均相对湿度为 47.0%(±6.5%)。

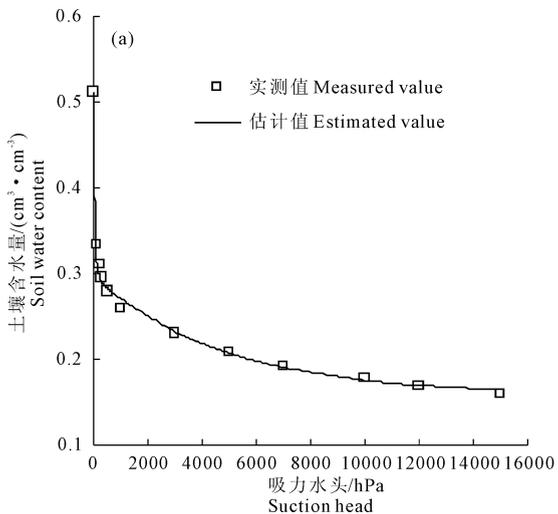
在培养 0、30、60 d 和 90 d 时,每个处理分别取 3 个土柱,用标准环刀(100 cm<sup>3</sup>)从土柱取土(取土深度 5~10 cm),用离心机(HITACHI himac CR21GII)测定 SWRC(20、30、50、100、300、500、700、1 000、1 200 kPa 和 1 500 kPa)。测定土壤容重,并利用土壤密度推算土壤总孔隙度。

### 1.3 试验方法

Kutilek<sup>[21]</sup>提出结构孔隙中的水分运动形式为优先流(preferential flow),根据毛管孔隙和非毛管孔隙的定义<sup>[1]</sup>,本研究将结构孔隙(包括大孔隙)作为非毛管孔隙,将残余孔隙和基质孔隙作为毛管孔隙,即  $A_2$  表示土壤非毛管孔隙度,( $C + A_1$ )表示毛管孔隙度。

假设土壤失水过程是从大孔隙到小孔隙依次进行,且在土壤中水的接触角为 0°。孔隙的吸力  $h$  (hPa)和孔隙半径  $r$ (cm)存在以下关系<sup>[26-27]</sup>:

$$r = \frac{0.149}{h} \quad (2)$$



式(2)表明,土壤孔隙的半径跟吸力成反比例关系,即较小吸力对应土壤较大孔隙,较大吸力对应土壤较小孔隙。由此  $h_1$  和  $h_2$  可以分别表明土壤基质孔隙和结构孔隙孔径的变化趋势。

本研究基于 OriginC 8.0(OriginLab Corporation, Northampton, MA, U. S. A.)利用 DE 双指数模型对实测 SWRC 数据进行拟合,验证 DE 双指数模型对土壤总孔隙度估算效果,并在此基础上估算土壤的毛管孔隙度( $C + A_1$ )和非毛管孔隙度( $A_2$ )。试验中采用 Excel2010、SPSS15.0 和 SigmaPlot 10.0 分别对数据进行处理、分析和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 DE 双指数模型的验证

DE 双指数模型已应用在研究土壤的饱和导水率<sup>[22]</sup>、适宜耕作的土壤含水量<sup>[23]</sup>和有机物对土壤孔隙的影响<sup>[24]</sup>等方面,但是对于添加活性炭后的 SWRC 的模拟效果有待验证。由图 1a 可以看出,DE 双指数模型能够较好地模拟活性炭处理的 SWRC,SWRC 的实测值和 DE 双指数模型模拟值之间的均方根误差(RMSE)介于 0.07~0.098 cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>之间,土壤含水量的模拟值和实测值非常接近 1:1 的线(图 1b),这表明 DE 双指数模型可以准确地反映添加土壤改良剂后土壤含水量随吸力水头的变化规律。

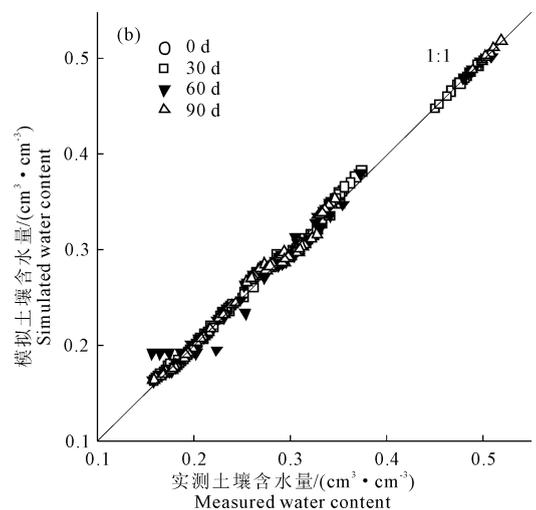
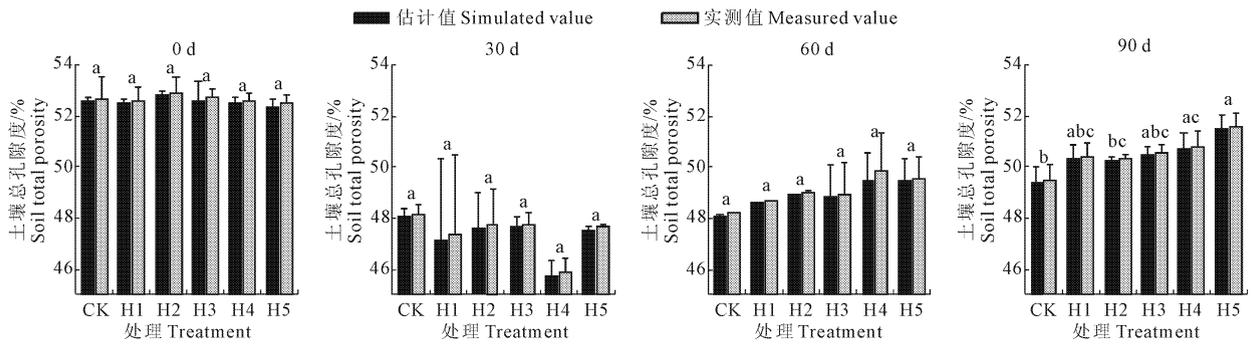


图 1 土壤水分特征曲线实测值与估计值比较(以 90 d H5 为例)

Fig.1 Comparison between curves of measured and estimated soil water retentions (using 90 d H5 as an example)

土壤总孔隙的估计值非常接近实测值(图 2),其 RMSE 为 0.02%, $R^2$  接近于 1。DE 双指数模型不仅可以准确地模拟 SWRC,还可以较好地估算土壤

不同大小等级的孔隙度,因此,DE 双指数模型可以作为一个有效评价土壤孔隙结构的工具。



注:活性炭处理添加比例分别为土壤质量的0%(CK)、0.1%(H1)、0.3%(H2)、0.6%(H3)、0.9%(H4)和1.2%(H5);不同小写字母表示不同处理在5%水平上差异显著;下同。

Note: treatments of activated carbon additions were 0% (CK), 0.1% (H1), 0.3% (H2), 0.6% (H3), 0.9% (H4) and 1.2% (H5) of the soil weight; the different small letters mean significant difference at 5% level between treatments; the same below.

图 2 不同活性炭用量处理下的土壤总孔隙度

Fig.2 Soil total porosity under different amounts of activated carbon additions

### 2.2 活性炭对土壤容重和总孔隙的影响

试验表明不同活性炭处理土壤容重总体表现出先增大后减小的趋势(表 2);在 60 d 以内,活性炭对土壤的容重影响不显著;在培养 90 d 时,与 CK 相比,H4 和 H5 处理显著降低了土壤的容重( $P < 0.05$ )。

生物炭施到土壤后,生物炭自身的物理特性会改变土壤孔隙的大小分布<sup>[28]</sup>,影响土壤的孔隙结构,改良土壤孔隙性质。与生物炭类似,活性炭处理也影响了土壤的孔隙变化。试验结果表明,培养 0 d 时,不同处理的土壤总孔隙度差异很小,在 52.5% 左右(图 2)。培养 30 d 时,可能由于土壤中压实作用和有机质迅速矿化,导致各处理的总孔隙度较 0 d 时均有显著减小( $P < 0.05$ ),其中减小最大为 H4 处理( $P < 0.01$ )。

一方面,培养 60 d 与培养 30 d 相比,各个活性炭处理均增大了土壤的总孔隙度;另一方面,培养 60 d 时添加活性炭的土壤总孔隙度均比 CK 大,表现为  $H4 > H5 > H2 > H3 > H1 > CK$ ;活性炭处理的总孔隙度(从 H1 到 H5)相比 CK 分别增加 1.1%、1.7%、1.5%、3.5%和 2.7%(图 2)。

与培养 60 d 时相比,培养 90 d 时活性炭处理土壤的总孔隙度进一步增加,其中 H5 增加最显著( $P < 0.05$ );不同活性炭处理表现为  $H5 > H4 > H3 > H1 > H2 > CK$ ,其中 H4 和 H5 与 CK 相比,显著增加了土壤的总孔隙度( $P < 0.05$ );活性炭处理的总孔隙度(从 H1 到 H5)比对照处理 CK 分别增加 1.9%、1.8%、2.3%、2.7%和 4.3%,活性炭施用量与各处理土壤总孔隙度呈显著的正相关关系( $P < 0.05$ ,  $R^2 = 0.82$ ),这表明在试验范围内,活性炭施用量越多,土

壤总孔隙度越大(图 2)。

表 2 不同活性炭用量处理下的土壤  $h_1$ 、 $h_2$  和容重的平均值

Table 2 Mean values of  $h_1$ ,  $h_2$  and bulk density relative under different amounts of activated carbon additions

培养时间/d Duration of incubation	处理 Treatments	$h_1$ /hPa	$h_2$ /hPa	容重 Bulk density /( $g \cdot cm^{-3}$ )
0	CK	408.5a	8.8a	1.263a
	H1	377.3a	7.8a	1.266a
	H2	390.6a	8.4a	1.257a
	H3	391.7a	8.5a	1.263a
	H4	384.8a	8.0a	1.266a
	H5	388.1a	8.5a	1.268a
30	CK	478.4a	9.0b	1.384a
	H1	489.4a	12.6a	1.406a
	H2	484.3a	9.8ab	1.395a
	H3	964.4a	9.3b	1.394a
	H4	493.3a	10.1ab	1.445a
	H5	477.9a	9.9ab	1.397a
60	CK	477.0a	8.0a	1.383a
	H1	461.0a	7.8a	1.370a
	H2	231.3a	7.5a	1.361a
	H3	476.9a	7.4a	1.364a
	H4	271.1a	3.9a	1.339a
	H5	470.3a	7.2a	1.348a
90	CK	458.1a	7.3a	1.350b
	H1	531.8c	6.7bc	1.324abc
	H2	515.2bc	6.7bc	1.326bc
	H3	482.9ab	7.0ab	1.320abc
	H4	484.1ab	6.6bc	1.314ac
	H5	469.7ab	6.4c	1.293a

当土样培养 30 d 时,活性炭对土壤总孔隙度的作用不明显;当培养 60 d 时,活性炭的作用开始显现;当培养 90 d 时,活性炭显著增加了土壤总孔隙度,且土壤总孔隙度随着活性炭施用量的增加而增加;活性炭处理对土壤总孔隙度的影响随着时间的推进越来越明显(图 2)。

### 2.3 活性炭对土壤毛管和非毛管孔隙的影响

各处理的毛管孔隙总体呈现出先增大后减小的趋势(图 3a)。当土样培养 0 d 时,各处理毛管孔隙度较小,其值大致在 27% 附近。培养 30 d 时,各处理毛管孔隙度显著增大( $P < 0.05$ )。与培养 30 d 相比,培养 60 d 时,CK、H2 和 H4 处理毛管孔隙度均进一步增大,H1、H3 和 H5 处理毛管孔隙度均减小,表现为  $H2 > H4 > CK > H3 > H1 > H5$ 。培养 90 d 时,H2 的土壤毛管孔隙度最大,其余活性炭处理的毛管孔隙度(H1、H3、H4、H5)分别比 CK 减小 0.5%、1.7%、1.3% 和 2.2%。由表 2 的  $h_1$  的变化得出,在前 60 d 以内,活性炭对土壤毛管孔隙中基质孔隙孔径影响

不显著;在培养 90 d 时,与 CK 相比,H1 和 H2 处理显著减小了基质孔隙孔径( $P < 0.05$ )。

当土样培养 0 d 时,活性炭对非毛管孔隙的影响不明显,各处理非毛管孔隙度大致为 26% (图 3a、b)。培养 30 d 时各处理的土壤非毛管孔隙度极显著减小( $P < 0.01$ ),表现为  $CK > H5 > H3 > H2 > H1 > H4$ 。这可能是由于添加活性炭后,激发了土壤有机质的矿化作用<sup>[29]</sup>,并且表层土壤对下层土壤具有压实作用。一方面,培养 60 d 与 30 d 相比,活性炭处理的土壤非毛管孔隙度均增大,CK 的非毛管孔隙度减小;另一方面,培养 60 d 时不同活性炭处理的非毛管孔隙度均比 CK 大,表现为  $H5 > H3 > H1 > H2 > H4 > CK$ 。培养 90 d 时,土壤的非毛管孔隙度总体随着各处理活性炭施用量的增加而增大,表现为  $H5 > H4 > H3 > H1 > H2 > CK$ 。其中,与 CK 相比,H5 显著增加了土壤的非毛管孔隙度( $P < 0.05$ );活性炭处理(从 H1 到 H5)的非毛管孔隙度比 CK 的分别增加 5.8%、2.5%、8.7%、9.1% 和 14.7%。

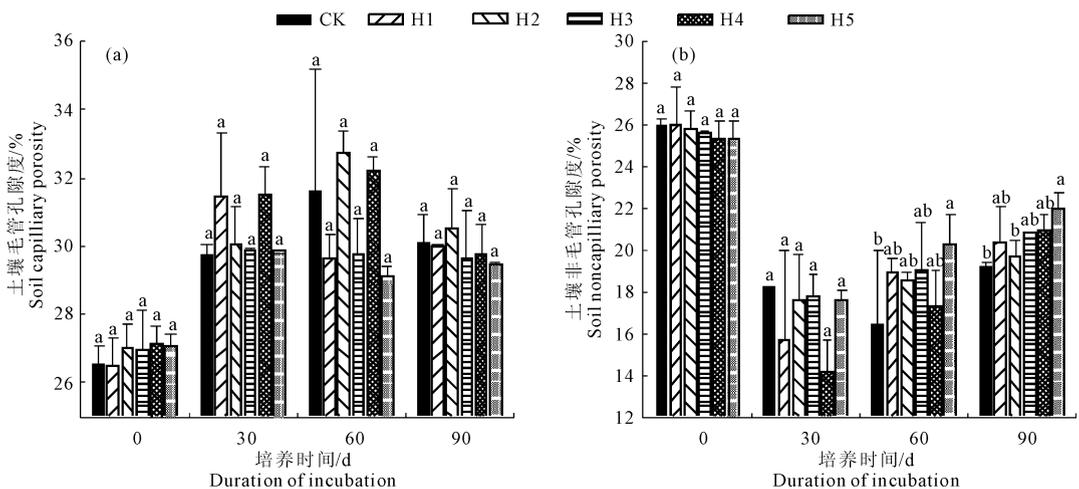


图 3 不同活性炭用量处理下的土壤毛管和非毛管孔隙度

Fig. 3 Soil capillary and noncapillary porosity relative under different amounts of activated carbon additions

由表 2 中的  $h_2$  的变化得出,在培养 30 d,活性炭处理表现出减小土壤非毛管孔隙孔径的趋势,其中 H1 显著减小了土壤非毛管孔隙孔径( $P < 0.05$ )。在培养 60 d 后,活性炭处理均增加了土壤非毛管孔隙孔径;在培养 90 d 时,H1、H2、H4 和 H5 均显著增加了土壤非毛管孔隙孔径( $P < 0.05$ )。

在培养时间内,活性炭对土壤毛管孔隙度影响不显著,培养 90 d 时活性炭减小了土壤的毛管孔径。当土样培养 0 d 和 30 d 时,活性炭对土壤非毛管孔隙影响不明显;当培养到 60 d 时,活性炭增加了土壤非毛管孔隙度和孔径;培养 90 d 时,活性炭增加非毛管孔隙度和孔径的作用更明显,随着活性

炭添加量的增加,土壤非毛管孔隙度和孔径随之增加,且这种效应随着时间的推进越来越明显。

## 3 讨论

研究结果表明活性炭处理减小了土壤的容重,增大了土壤总孔隙度,这与前人<sup>[30-31]</sup>的研究结果一致。土壤的孔隙度与紧实度密切相关,Soane<sup>[32]</sup>总结有机质对土壤紧实度的影响得出,土壤有机质中的长链分子能够有效的黏结矿物颗粒,促进团聚结构的形成和发育;有机质促进微生物生长的同时,微生物的菌丝可以结合矿物颗粒,形成新的土壤结构,改变土壤紧实度。活性炭作为一种有机质,一方面

活性炭颗粒本身具有高度发达孔隙结构和巨大的表面积,并且其表面含有多种官能团<sup>[33]</sup>。活性炭强大的吸附作用,可以从气相或液相中吸附各种物质<sup>[34]</sup>。活性炭这种吸附能力可以聚集土壤中的矿物颗粒,促进土壤团聚结构的形成<sup>[35]</sup>,从而增加了土壤的总孔隙度。另一方面,施用生物炭可以显著改善酶活性,提高土壤酶指数<sup>[36]</sup>和土壤微生物的多样性<sup>[37]</sup>。活性炭与生物炭性质相似<sup>[38]</sup>,施用活性炭的土壤有效激发了土壤中的酶活性<sup>[39]</sup>,增加土壤中微生物的数量,促进了有机质的腐殖质化;炭能够吸附土壤有机分子,通过表面催化活性促进小的有机分子聚合形成土壤有机质<sup>[40]</sup>,进而增加了有机质含量,促进了团聚结构的形成和孔隙结构的发育<sup>[41-43]</sup>。此外,活性炭本身添加量的差异也导致了干湿交替过程土壤结构的形成和重组发生变化,并最终增加了土壤的总孔隙度。

当土样培养 0 d 时,活性炭与土壤颗粒随机混合和重组,没有压实和矿化的影响,此时的非毛管孔隙度较大;在培养 30 d,各处理土壤毛管孔隙度增大,非毛管孔隙度减小,原因可能是在培养过程中,土柱内土壤含水量一直较高(田间持水量的 80% 以上),表层土壤对下层土壤存在一定的压实作用,这种压实作用在土壤培养初期(30 d 以内)作用明显,增加了土壤的毛管孔隙(图 3a, 30 d),减小了土壤的非毛管孔隙<sup>[20]</sup>(图 3b, 30 d),而导致土壤的总孔隙度减小(图 2, 30 d);随着试验的进行(30 d 以后),土壤的压实作用逐渐减小,而活性炭的作用逐渐加强,使得土壤的非毛管孔隙增加(图 3b, 60 d 和 90 d),总孔隙度也随之增加(图 2, 60 d 和 90 d)。

活性炭对毛管孔隙度影响不显著(图 3a),但其明显增加了土壤非毛管孔隙度(图 3b)。原因可能是在土壤干湿交替和有机质矿化过程中,活性炭颗粒上的官能团聚吸附周围的土壤颗粒,并与有机组分重组,形成新的土壤结构;在此过程中,活性炭将土壤的矿物颗粒和微小团聚体重新组合形成新的团聚体,而增加了土壤中大团聚体数量<sup>[16,35]</sup>。根据土壤的颗粒和土壤孔隙的对称分布的关系<sup>[44-45]</sup>,土壤团聚体数量增加导致了团聚体之间非毛管孔隙增加。

试验中(90 d)土壤非毛管孔隙度增加量占总孔隙度增加量的百分比分别为(从 H1 到 H5)116.4%、54.7%、147.4%、130.9%和 132.7%;并且土壤总孔隙度与非毛管孔隙度表现出了极显著的正相关关系(图 4,  $P < 0.01$ ),与毛管孔隙度相关关系不显著,因此,活性炭是通过增加土壤的非毛管孔隙度,有效地

增加了土壤的总孔隙度。

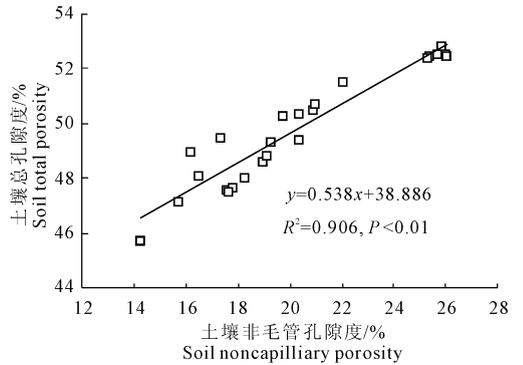


图 4 土壤总孔隙度和非毛管孔隙度之间的关系  
Fig. 4 Relationship between soil total porosity and noncapillary porosity

活性炭通过自身特性,可以有效调节土壤的水、气平衡,创造了土壤微生物生活的优良环境<sup>[39]</sup>,从而促进了作物根系生长<sup>[12]</sup>。本试验着重于短时间(90 d)内活性炭对土壤孔隙结构的影响,活性炭对土壤其它物理化学性质的影响(土壤的导水率、微生物生长和养分的保持特性等),以及大田中活性炭对土壤的改良作用,还需要进一步研究。

## 4 结 论

本研究利用小土柱试验,在不同活性炭用量、不同培养时间条件下,基于 DE 双指数模型,定量地分析了活性炭对农田土壤毛管孔隙、非毛管孔隙和总孔隙的影响,深入探究了活性炭对土壤孔隙结构的影响机理,主要得到以下结论:

- 1) 土壤中的活性炭有效地减小了土壤容重,增加了土壤的总孔隙度;
- 2) 农田土壤中施用活性炭显著增加了土壤非毛管孔隙及其孔径,活性炭是通过增加土壤的非毛管孔隙度,有效地增加了土壤的总孔隙度;
- 3) 活性炭施用量越大,对土壤孔隙的作用效果越显著,并且活性炭对土壤孔隙的影响随着时间的推移越来越明显。

## 参 考 文 献:

- [1] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [2] 彭舜磊, 由文辉, 沈会涛. 植物群落演替对土壤饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 78-84.
- [3] 张治伟, 朱章雄, 王 燕, 等. 岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 71-76.
- [4] 朱咏莉, 刘 军, 王益权. 国内外土壤结构改良剂的研究利用综述[J]. 水土保持学报, 2001, 14(6): 140-142.
- [5] 王 珍, 冯 浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能

- 力的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 75-80.
- [6] 庄文化, 冯浩, 吴普特. 高分子保水剂农业应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 265-270.
- [7] 王增丽, 王珍, 冯浩. 秸秆粉碎氮化还田对土壤体积质量及持水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 211-215.
- [8] 林琳, 王英刚, 刘哲哲, 等. 农业秸秆制备活性炭及其性能研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(5): 2179-2180, 2210.
- [9] Khadiran T, Hussein MZ, Zainal Z, et al. Activated carbon derived from peat soil as a framework for the preparation of shape-stabilized phase change material[J]. Energy, 2015, 82: 468-478.
- [10] 谢志刚, 刘成伦. 活性炭的制备及其应用进展[J]. 工业水处理, 2005, 25(7): 10-12.
- [11] 崔静, 赵乃勤, 李家俊. 活性炭制备及不同品种活性炭的研究进展[J]. 炭素技术, 2005, 24(1): 26-31.
- [12] 张伟, 孙艳艳, 李彦斌, 等. 活性炭处理对连作棉田土壤酶活性的影响[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(4): 789-792.
- [13] 周相玉, 冯文强, 秦鱼生, 等. 镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用对小麦镉吸收的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4289-4296.
- [14] 尹相博, 刘晨, 王志莉, 等. 活性炭对烟农 19 小麦发芽及其幼苗生长的影响[J]. 亚热带植物科学, 2013, 42(2): 124-126.
- [15] 杨林, 陈志明, 刘元鹏, 等. 石灰、活性炭对铬污染土壤的修复效果研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 518-525.
- [16] Zhang Y J, Ou J L, Duan Z K, et al. Adsorption of Cr (VI) on bamboo bark - based activated carbon in the absence and presence of humic acid[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, 481: 108-116.
- [17] 胡淑宜, 林启模. 活性炭改良土壤的试验[J]. 生物质化学工程, 1981, (9): 4-9.
- [18] 周相玉, 冯文强, 秦鱼生, 等. 镁、锰、活性炭和石灰对土壤 pH 及镉有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 199-203, 208.
- [19] 方圆, 冯浩, 操信春, 等. 活性炭对土壤入渗、蒸发特性及养分淋溶损失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 23-26.
- [20] Dexter A R, Czyz E A, Richard G, et al. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil[J]. Geoderma, 2008, 143: 243-253.
- [21] Kutilek M. Soil hydraulic properties as related to soil structure[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79: 175-184.
- [22] Dexter A R, Richard G. The saturated hydraulic conductivity of soils with n - modal pore size distributions[J]. Geoderma, 2009, 154: 76-85.
- [23] Dexter A R, Richard G. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103: 113-118.
- [24] Dexter A R, Richard G, Arrouays D, et al. Complexed organic matter controls soil physical properties[J]. Geoderma, 2008, 144: 620-627.
- [25] 毛丽丽, 张心平, 雷廷武, 等. 用水平土柱与 Green - Ampt 模型方法测量土壤入渗性能的原理与误差[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 6-10.
- [26] Brutsaert W. Probability laws for pore-size distributions[J]. Soil Science, 1966, 101(2): 85-92.
- [27] Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties[J]. Water Resources Research, 1996, 32(9): 2697-2703.
- [28] Major J, Steiner C, Downie A, et al. Biochar Effects on Nutrient Leaching [C]//Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. London: Earthscan Publications, 2009: 271-287.
- [29] 吕殿青, 张树兰, 杨学云. 外加碳, 氮对黄绵土有机质矿化与激发效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 423-429.
- [30] 丁艳丽, 刘杰, 王莹莹. 生物炭对不同质地土壤水分扩散率的影响及机理分析[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3313-3317.
- [31] 刘玉学, 王耀峰, 吕豪豪, 等. 不同稻秆炭和竹炭施用水平对小青菜产量、品质以及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1438-1444.
- [32] Soane BD. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects[J]. Soil and Tillage Research, 1990, 16(1): 179-201.
- [33] 汪昆平, 徐乾前. 几种不同处理方法对活性炭表面化学性质的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(2): 373-380.
- [34] 解强, 张香兰, 李兰廷, 等. 活性炭孔结构调节: 理论与方法与实践[J]. 新型碳材料, 2005, 20(2): 183-190.
- [35] 吴鹏豹, 解钰, 漆智平, 等. 生物炭对花岗岩砖红壤团聚体稳定性及其总碳分布特征的影响[J]. 草地科学, 2012, 20(4): 643-649.
- [36] 陈心想, 耿增超, 王森, 等. 施用生物炭后壤土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 751-758.
- [37] 顾美英, 徐万里, 唐光木, 等. 生物炭对灰漠土和风沙土土壤微生物多样性及与氮素相关微生物功能的影响[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(5): 926-934.
- [38] Nanda S, Dalai A K, Berruti F, et al. Biochar as an exceptional bioresource for energy, agronomy, carbon sequestration, activated carbon and specialty materials[J]. Waste and Biomass Valorization, 2016, 7(2): 201-235.
- [39] 崔红标, 梁家妮, 范玉超, 等. 磷灰石等改良剂对铜污染土壤的修复效果研究 - 对铜形态分布、土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 247-252.
- [40] Liang B, Lehmann J, Sohi SP, et al. Black carbon affects the cycling of non - black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41: 206-213.
- [41] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 159-165.
- [42] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 68-79.
- [43] 尹云锋, 高人, 马红亮, 等. 稻草及其制备的生物炭对土壤团聚体有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 911-914.
- [44] Haverkamp R T, Parlange JY. Predicting the water - retention curve from particle - size distribution: 1. sandy soils without organic matter[J]. Soil Science, 1986, 142: 325-339.
- [45] Hwang S, Yun E, Ro H. Estimation of soil water retention function based on asymmetry between particle and pore-size distributions[J]. European Journal of Soil Science, 2011, 62: 195-205.