

DOI: 10.11766/trxb201710300388

添加生物质炭对土壤热性质影响机理研究*

刘志鹏¹ 徐杰男¹ 余冬立² 李学林¹ 王景梵¹

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要 生物质炭添加对一系列土壤理化性质具有显著影响, 然而其对土壤热性质的影响机理仍不明确。本研究结合田间定位试验和室内控制实验揭示了生物质炭添加对壤质土热性质的影响机理。两年田间区组试验中小麦秸秆生物质炭施用量设 0 t hm⁻²、25 t hm⁻² 和 50 t hm⁻² 三个水平。使用热脉冲法分别在室内控制土壤含水量和田间自然条件下测定土壤热容量、导热率和热扩散系数。同时测定了不同生物质炭处理下土壤容重、土壤水分特征曲线、孔隙分布以及作物生长季表层土壤含水量。结果表明, 生物质炭添加会对土壤热性质产生显著影响, 其主要途径为 (1) 通过降低土壤容重, 增加土壤大孔隙, 从而显著降低土壤导热率, 对土壤热容量和热扩散系数也有降低效应, 但受土壤含水量水平影响; (2) 通过改变土壤水力学特性, 增加土壤含水量, 从而提高土壤热容量、导热率和热扩散系数。田间状态下, 生物质炭影响土壤热性质的两个途径同时存在而作用相反, 综合效应表现为生物质炭添加小区的土壤体积热容量有增加趋势, 且与生物质炭施用量有关; 生物质炭添加会显著降低土壤导热率和热扩散系数。

关键词 热容量; 导热率; 热扩散系数; 孔隙度; 土壤水分

中图分类号 S152.8 **文献标识码** A

土壤热量状况直接影响土壤温度、水分蒸发、热量传递、各种化学反应、微生物活性、温室气体排放、植物种子萌发及根系活动等一系列土壤过程^[1-2]。一定太阳辐射条件下, 土壤热性质是土壤热状况的内在决定因素, 对土壤中水热耦合运动具有重要影响, 是研究陆地表层土壤-植被-大气连续体中物质和能量交换过程的基本物理参数^[2-3]。土壤中固体(矿物和有机质)、液体和气体三相比例和组成的变化直接影响土壤热性质, 进而作用于土壤中的化学反应、微生物活动以及土壤-大气间的水热交换过程。目前, 已有大量研究揭示了不同质地土壤热性质随土壤含水量、容重及盐分含量等单

个因素变化而变化的规律^[4]。然而, 作为土壤固相的重要组成成分, 土壤有机质含量变化及由此引起的土壤结构和持水性能的改变对土壤热性质的综合影响机理仍不明确。

全球气候变化背景下, 土壤固碳被认为是消除温室气体效应的重要手段之一^[5]。近年来, 农业废弃物生物质炭转化与还田作为迅速提高土壤有机碳库容的关键途径在国际上备受关注^[6]。关于生物质炭添加对土壤团聚体、土壤肥力、作物产量以及温室气体排放等方面影响的报道日益增多^[7-8]。然而, 人为输入稳定性有机质(生物质炭)在改变土壤固、液和气三相比例和组成情况下将如何影响

* 国家自然科学基金项目(41401241, 41471180)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20140724) Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41401241, 41471180), Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (No. BK20140724)

作者简介: 刘志鹏(1987—), 男, 安徽六安人, 博士研究生, 主要从事土壤物理学领域研究。E-mail: zpliu0306@njau.edu.cn

收稿日期: 2017-10-30; 收到修改稿日期: 2017-12-08; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-01-19

土壤热性质及水热动态仍不清楚，其是否会通过影响土壤能量平衡及土壤-大气间水汽交换过程反馈于全球气候变化也有待深入研究。

因此，在土壤固碳应对全球气候变化背景下，研究生物质炭添加对土壤热性质的影响并探讨其内在机理，将为合理评价人为固碳行为对地气系统间水热交换过程的影响提供科学依据；有助于从土壤热量角度更全面地揭示生物质炭提高土壤肥力的作用机制，并为生物质炭改良土壤的田间水热管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

田间试验在江苏省南京市江宁区河海大学节水园试验基地进行 (31° 57' N, 118° 50' E)。试验点海拔为114 m，地势平坦。该区受亚热带湿润气候控制，四季分明，雨水充沛，年平均降雨量为1 107 mm，潜在年蒸发量为900 mm，年平均温度为15.4 °C，六月下旬至七月上旬为梅雨季节。

本研究使用的生物质炭材料为河南三利新能源公司生产的商用小麦秸秆生物质炭，热裂解温度为350~550 °C，约30%的秸秆生物质转化为生物质炭^[9]，其基本理化性质见表1。生物质炭孔隙度、

密度和容重使用压汞仪测定 (Poremaster GT60, Quanachrome)；生物质炭内部孔径使用BET氮吸附法测定 (Quaadratorb SI, Quantachrome)；生物质炭表面固液接触角使用角度仪测定 (EasyDrop DSA20E, KRÜSS)。生物质炭处理的随机区组试验在温室中进行，试验地土壤类型为黄棕壤，耕层土壤根据质地可明显分为上下两层，0~30 cm为壤土层，30~60 cm为黏壤土层，两层土壤的基本理化性质见表1。参考已有关于生物质炭合理施用量的研究结果^[7,10]，本研究中生物质炭用量设三个水平：0 t hm⁻² (BC0, 对照)，25 t hm⁻² (BC25) 和50 t hm⁻² (BC50)；每个处理设3个重复，共9个小区，各小区面积为2.7 m² (3 m × 0.9 m)，随机区组排列。第一季作物移栽前，过2 mm筛的生物质炭颗粒被均匀地翻耕混合入0~25 cm土层中，后期不再追施生物质炭。种植作物为番茄 (*Solanum lycopersicum* Mill.)，分别于2014年4月14日—8月24日和2015年4月19日—8月18日进行了连续两季种植，株距为50 cm，行距为90 cm，灌溉方式为滴灌，种植季温室内温度 (4—8月) 控制为28 °C。按照当地农户耕作习惯，复合化肥 (N-P-K, 15:15:15) 按照400 kg hm⁻²用量等量均匀施入各试验小区。作物生长过程中，人工拔除杂草，并施用适量杀虫剂控制病虫害^[11]。

表1 生物质炭和试验地土壤基本理化特征

Table 1 Basic properties of the biochar and soil in the study

		pH	电导率 ^① (dS m ⁻¹)	有机碳 ^② (g kg ⁻¹)	全氮 ^③ (g kg ⁻¹)	钙Ca (g kg ⁻¹)	氯Cl (g kg ⁻¹)	容重 ^④ (g cm ⁻³)	密度 ^⑤ (g cm ⁻³)
生物质炭 Biochar		9.9	1.0	467.2	5.9	0.000 16	1.44	0.69	1.83
土层Soil	0~30	7.7	1.42	1.3	0.18	0.16	0.11	1.35	-
layer (cm)	30~60	8.0	0.42	0.8	0.11	0.04	0.02	1.41	-
		总孔隙度 ^⑥ (%)	内部孔隙度 ^⑦ (%)	颗粒间孔隙度 ^⑧ (%)	粉粒 ^⑨ (%)	砂粒 ^⑩ (%)	黏粒 (%)	质地 Texture	
生物质炭 Biochar		62.5	13.2	49.3	-	-	-	-	
土层 Soil	0~30	49	-	-	30	50	20	壤土 Loam	
layer (cm)	30~60	47	-	-	23	42	35	黏壤土 Clay loam	

①Electrical conductivity, ②Organic carbon, ③Total nitrogen, ④Bulk density, ⑤Density, ⑥Total porosity, ⑦Interporosity, ⑧Intraporosity

1.2 土壤热性质测定

土壤热性质, 即热容量、导热率和热扩散系数, 采用热脉冲法测定, 使用Decagon公司KD2 Pro便携式热性质测定仪, 探针使用SH-1双针传感器(直径1.3 mm, 长度3 cm, 两针间隙6 mm)。探针测量值根据Decagon公司提供的热性质已知的聚甲醛树脂材料(Delrin)进行标定。热脉冲法测定土壤热性质具有简便、稳定可靠的优势, 在相关研究中已得到广泛应用^[12-13], 其基本原理和算法可参见相关中英文文献[14-15], 此处不再赘述。

1.3 样品采样与室内试验

第二季作物收获后, 使用环刀(直径5 cm, 容积100 cm³)在每个处理小区内随机采集0~10 cm表层原状土壤样品3个。所有原状土壤样品使用烘箱在105 °C下烘干24 h后测定土壤容重, 并计算土壤总孔隙度(1-容重/比重, 比重值使用2.65)。每个试验小区的3个原状土样中, 1个用来测定土壤热性质, 另外2个用来测定土壤水分特征曲线。对于烘干后用于热性质测定的环刀, 使用塑料薄膜和铝制环刀盖将其两端密封, 保证水分无法流失。使用50 ml医用注射器从环刀上端注入蒸馏水, 随后密封上端并将环刀放置在20 °C室温下静止72 h, 等土体内部水分含量达到平衡后, 分别从环刀上下两端使用热脉冲探针测定土壤热性质, 取其平均值代表该原状土热性质。土壤体积含水量共设9个水平: 0(烘干土)、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%和40%。

土壤水分特征曲线测定吸力值分别设为-1.5、-3.0、-10.5、-32.1、-63.6、-100、-200、-500、-3 000和-5 000 cm水柱。前7个吸力值采用高岭土沙箱和悬挂水柱法测定(M1-0802E, Eijkelkamp); 后3个吸力值在平板压力膜仪中测定(1500, Soilmoisture)。获得的土壤水分特征曲线散点导入RETIC软件中并使用经典单峰van-Genuchten模型进行拟合:

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

式中, θ_r 和 θ_s 分别为土壤滞留含水量和饱和含水量; 拟合过程中 θ_s 使用测定的总孔隙度; 参数 α , n 和 m 分别为曲线的形状参数, m 等于 $1 - 1/n$ 。通过拟合得到的土壤水分特征曲线可计算土壤孔隙分

布。根据Young-Laplace公式:

$$D = \frac{3}{h} \quad (2)$$

式中, D 为孔隙直径(mm), 并假设土壤孔隙为均匀的圆柱形毛管; h 为相应尺寸孔隙对应的土壤水吸力, 使用水柱高度(cm)表示。计算得到的土壤孔隙划分为三组^[16]: 大孔隙(> 0.03 mm)、中孔隙(0.03~0.002 mm, 对应田间持水量)和小孔隙(< 0.002 mm, 对应永久凋萎点)。

此外, 每季节作物收获后, 在每个小区内随机选择3个点, 在田间自然状态下使用KD2Pro探针在原位测定土壤热性质。作物生长过程中, 每7天在各小区内采集表层0~10 cm扰动土, 105 °C下烘干24 h后测定土壤质量含水量, 并根据容重计算得到土壤体积含水量。

1.4 数据处理

使用单因素方差分析(ANOVA)检验生物质炭添加对土壤热性质影响的显著性, 使用最小显著差别法(LSD)对不同处理间的均值进行多重比较检验, 统计分析的显著性水平平均设为0.05。统计分析使用SPSS 2.0软件完成。

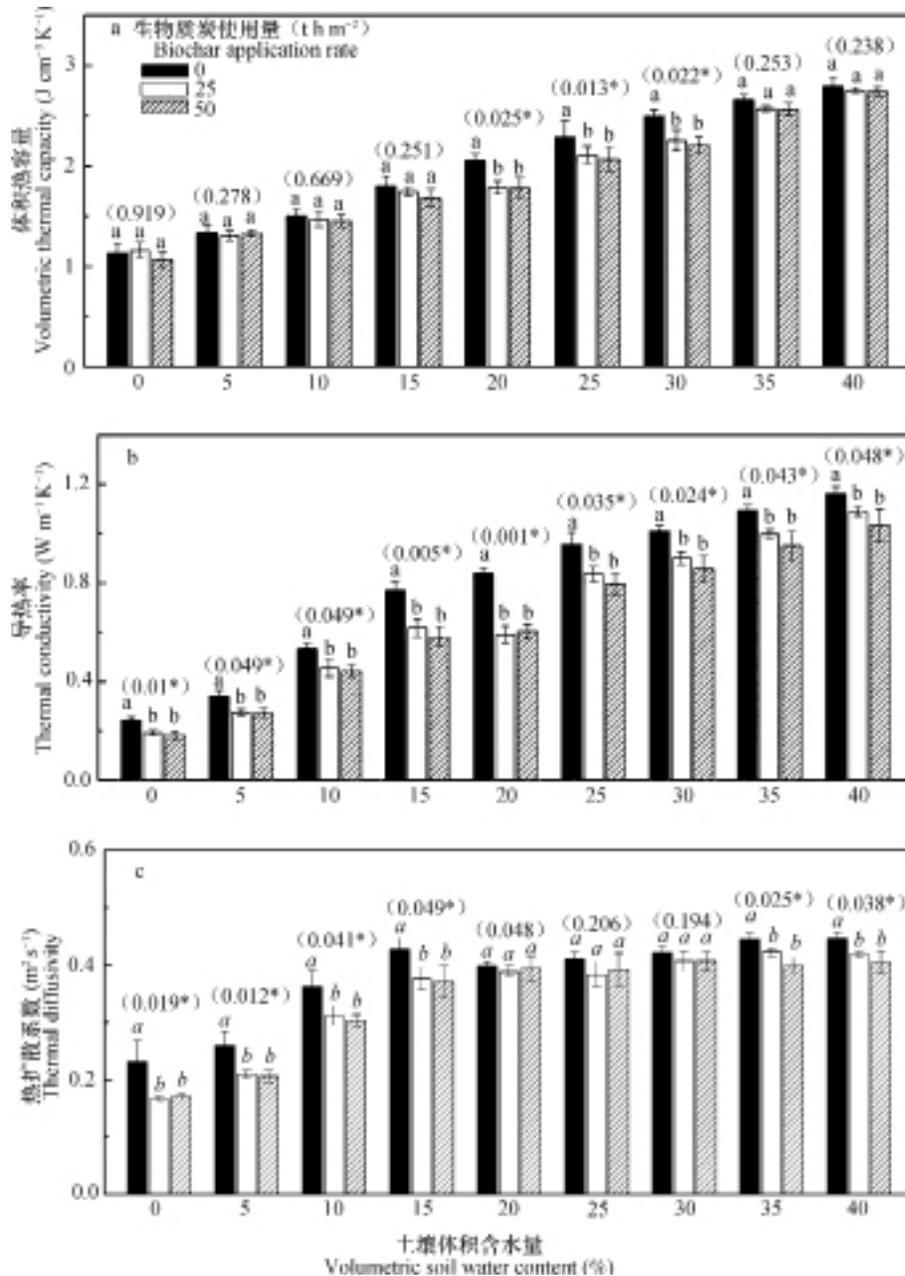
2 结 果

2.1 不同生物质炭和土壤含水量处理下原状土热性质

图1给出了不同生物质炭施用量和土壤含水量条件下原状土测定的土壤热性质。如图1a所示, 不同生物质炭处理下, 土壤体积热容量均随土壤体积分含水量的增加而增加, 在0至40%含水量情况下, 0 t hm⁻², 25 t hm⁻²和50 t hm⁻²生物质炭施用量下土壤体积热容量分别在1.13~2.80 J cm⁻³ K⁻¹, 1.16~2.75 J cm⁻³ K⁻¹和1.07~2.74 J cm⁻³ K⁻¹之间变动。方差分析结果显示, 在较低(0~15%)和较高(35%~40%)土壤含水量情况下, 生物质炭添加对土壤体积热容量没有显著影响($p > 0.05$)。而当土壤含水量达到20%~30%之间时, 生物质炭添加显著影响($p < 0.05$)土壤体积热容量; 25 t hm⁻²和50 t hm⁻²施用量下的土壤热容量显著($p < 0.05$)低于未添加生物质炭的原状土, 而25 t hm⁻²和50 t

hm²施用量之间无显著差别 ($p>0.05$)。如图1b所示, 当土壤含水量从0增加至40%含水量情况下, 土壤导热率在不同生物质炭处理下分别从0.24 W m⁻¹ K⁻¹增加至1.16 W m⁻¹ K⁻¹ (0 t hm⁻²), 从0.19 W m⁻¹ K⁻¹增加至1.09 W m⁻¹ K⁻¹ (25 t hm⁻²) 和从0.18 W m⁻¹ K⁻¹增加至1.03 W m⁻¹ K⁻¹ (50 t hm⁻²)。方差分析结

果显示, 在各土壤含水量条件下, 生物质炭添加均显著影响 ($p<0.05$) 土壤导热率; 施用生物质炭的土壤导热率均显著小于对照, 而25 t hm⁻²和50 t hm⁻²施用量之间土壤导热率差异不显著 ($p>0.05$)。如图1c所示, 土壤热扩散系数在较低含水量 (<20%) 情况下, 随着土壤含水量增加而迅速



注: 括号中为同一含水量下生物质炭对热性质影响方差分析 p 值; *表示在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著; 不同斜体字母表示均值在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著 Note: The value in the brackets is p of ANOVA of the effects of biochar application on soil thermal properties in the soils the same in soil water content; * denotes significance at $\alpha = 0.05$ level; and different italic letters mean significant differences between means $\alpha = 0.05$ level

图1 不同生物质炭和土壤含水量处理下原状土热性质

Fig. 1 Soil thermal properties of undisturbed soil cores relative to biochar treatment and soil water content

增加，当土壤含水量较高 (>20%) 时，随土壤含水量增加表现出平衡或略微减小的趋势。土壤热扩散系数在不同生物质炭处理下分别在 $0.23 \sim 0.45 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (0 t hm^{-2})， $0.16 \sim 0.42 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (25 t hm^{-2}) 和 $0.17 \sim 0.41 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (50 t hm^{-2}) 之间变动。方差分析结果显示，在较低 ($0 \sim 15\%$) 和较高 ($35\% \sim 40\%$) 土壤含水量情况下，生物质炭添加对土壤热扩散系数具有显著影响 ($p < 0.05$)，施用生物质炭的土壤热扩散系数显著低于对照，而 25 t hm^{-2} 和 50 t hm^{-2} 施用量之间土壤热扩散系数差异不显著 ($p > 0.05$)。当土壤含水量在 $20\% \sim 30\%$ 之间时，生物质炭施用对土壤热扩散系数无显著影响 ($p > 0.05$)，不同生物质炭处理间土壤热扩散系数无显著差异 ($p > 0.05$)。

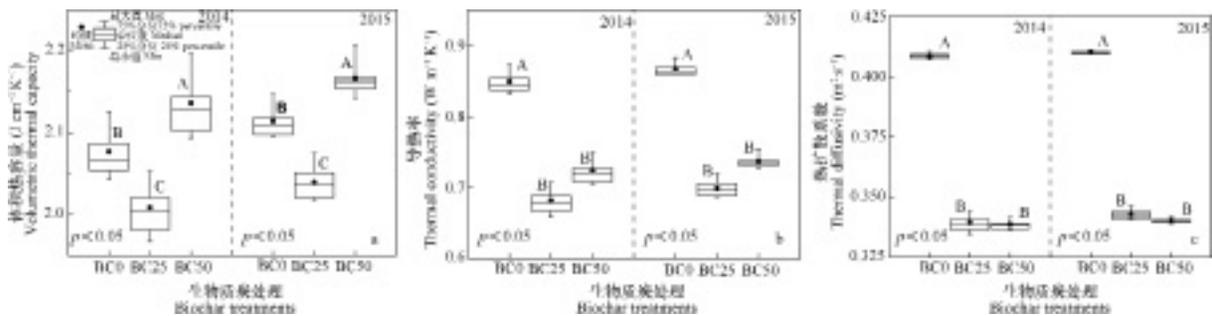
2.2 不同生物质炭处理下田间原位土壤热性质

图2给出了自然条件下田间原位测定的不同生物质炭处理小区土壤热性质。土壤热容量、导热率和热扩散系数均在两季作物收获后的测定中表现出相同的趋势。如图2a所示，方差分析结果显示，生物质炭施用对田间状态下土壤体积热容量具有显著影响 ($p < 0.05$)； 50 t hm^{-2} 生物质炭施用量下土壤体积热容量显著高于对照 ($p < 0.05$)，而 25 t hm^{-2} 生物质炭施用量下土壤体积热容量显著低于对照 ($p < 0.05$)。如图2b和图2c所示，方差分析结果表明，田间状态下生物质炭添加显著影响 ($p < 0.05$) 土壤导热率和热扩散系数。施用生物质炭土壤的导热率和热扩散系数均显著小于 ($p < 0.05$) 未添加生物质炭的土壤，而 25 t hm^{-2} 和 50 t hm^{-2} 施用量之间导热率和热扩散系数无显著差别 ($p > 0.05$)。

2.3 生物质炭施用对土壤孔隙结构的影响

图3a显示了不同生物质炭处理小区田间状态下土壤容重变化特征。方差分析结果表明，施用生物质炭对土壤容重具有显著影响 ($p < 0.05$)；对照小区土壤容重均值为 1.40 g cm^{-3} ，显著高于 ($p < 0.05$) 施用生物质炭小区；土壤容重随生物质炭施用量的增加而下降， 50 t hm^{-2} 生物质炭施用量下土壤容重均值为 1.13 g cm^{-3} ，显著低于 25 t hm^{-2} 生物质炭施用量下的 1.21 g cm^{-3} 。相应的，生物质炭对土壤总孔隙度也具有显著影响 ($p < 0.05$)； 25 t hm^{-2} 和 50 t hm^{-2} 施用量下土壤总孔隙度分别为 54% 和 57% ，显著高于 ($p < 0.05$) 对照小区的 47% 。

图3b为不同生物质炭处理小区原状土样品测定得到的土壤水分特征曲线，单峰 van-Genuchten 模型拟合参数见表2。从图4中散点及模型拟合曲线可以看出，生物质炭添加明显影响土壤水分特征曲线形状，尤其在低吸力段。模型拟合效果很好，决定系数均在 0.98 以上；模型形状参数 α 随生物质炭施用量的增加呈显著增加趋势 ($p < 0.05$)； n 和 m 在 50 t hm^{-2} 施用量下略微增大，拟合得到的土壤滞留含水量在 25 t hm^{-2} 施用量下显著小于对照和 50 t hm^{-2} 施用量；差别最为明显的参数为土壤饱和含水量。图3c显示了根据土壤水分特征曲线和式 (2) 计算得到的不同生物质炭处理下土壤孔隙度分布特征。方差分析结果表明，施用生物质炭对土壤大孔隙度 ($> 0.03 \text{ mm}$) 和小孔隙度 ($< 0.0002 \text{ mm}$) 具有显著影响 ($p < 0.05$)；而对土壤中孔隙度 ($0.03 \sim 0.0002 \text{ mm}$) 无显著影响 ($p > 0.05$)。土壤大孔隙随生物质炭施用量的增加而显著增加 ($p < 0.05$)；中等孔隙在不同生物质炭施用量下无显



注：不同字母表示均值在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著 Note: Different letters above the boxes mean significant differences between means of soil thermal properties

图2 不同生物质炭处理小区田间原位测定土壤热性质

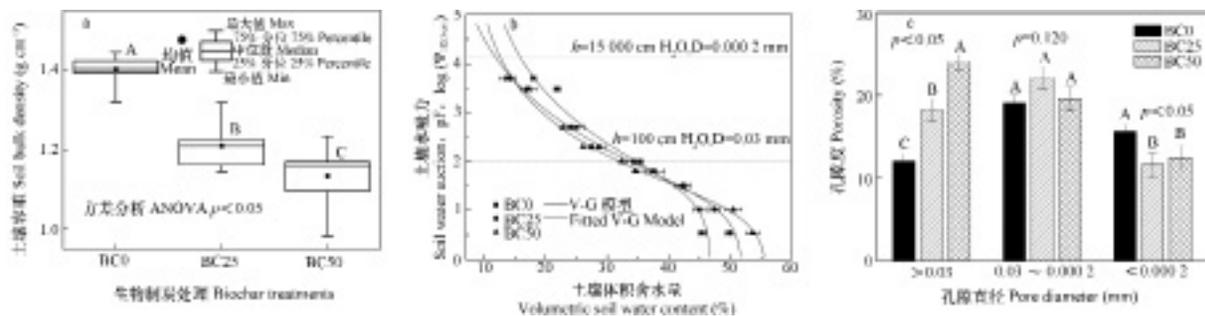
Fig. 2 Soil thermal properties measured in-situ of the treatment plot relative to biochar application rate

表2 不同生物质炭处理下土壤水分特征曲线拟合参数

Table 2 Fitting parameters of the van-Genuchten model related to biochar treatment

生物质炭处理 Biochar treatments(t hm ⁻²)	V-G模型拟合参数V-G model parameter					
	α	n	m	饱和含水量 ^① θ_s (%)	滞留含水量 ^② θ_r (%)	决定系数 R^2
BC0	0.038 a	1.253 a	0.202 a	46.8 a	7.85 a	0.98
BC25	0.061 b	1.239 a	0.193 a	53.8 b	1.83 b	0.99
BC50	0.083 c	1.312 b	0.238 a	56.7 c	7.18 a	0.99

注：同一行中不同字母表示在 $\alpha = 0.05$ 水平拟合参数均值存在显著差异 Note: Different letters in the same row mean significant differences ($\alpha = 0.05$) between means of fitting parameters ① Saturated soil water content, ② Residual soil water content



注：不同字母表示均值在 $\alpha = 0.05$ 水平上差异显著 Note: Different letters above the boxes denote significant differences among mean values of soil bulk density

图3 不同生物质炭处理小区土壤容重、水分特征曲线、孔隙度分布特征

Fig. 3 Soil bulk density, soil water retention curve and pore size distribution of the treatment plot relative to biochar application rate

著差异；施用生物质炭土壤中的小孔隙显著低于对照 ($p < 0.05$)，而 25 t hm⁻² 和 50 t hm⁻² 施用量下土壤小孔隙并无显著差异 ($p > 0.05$)。

2.4 生物质炭施用对土壤水分含量的影响

图4显示了两季作物生长过程中田间条件下不同生物质炭处理小区表层土壤体积含水量。2015年生长季中表层土壤含水量整体高于2014年生长季，各生长季土壤水分内均表现出明显波动。方差分析结果表明，生物质炭添加对土壤表层含水量具有显著影响 ($p < 0.05$)；施用生物质炭的土壤体积含水量整体显著高于未施用生物质炭土壤 ($p < 0.05$)。

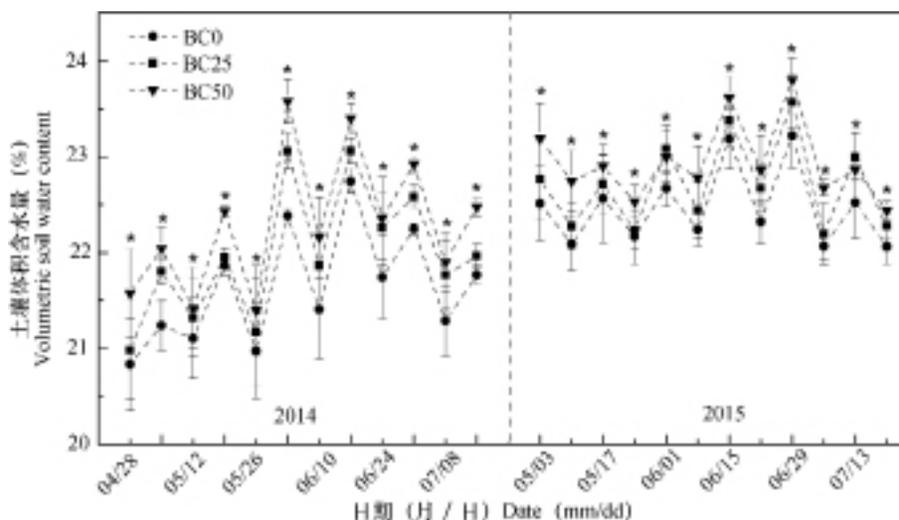
图1和图2结果表明，生物质炭添加对土壤热性质会产生显著影响，而因生物质炭自身特殊的物理、化学和生物学稳定性^[6-7]，其影响也必将具有持久性。总体而言，生物质炭对土壤热性质的影响具有综合性，主要表现为(1)通过改变土壤固相物质组成直接影响土壤热性质；(2)通过短期和长期效应改变土壤结构，并通过改变土壤孔隙状况间接影响土壤热性质；(3)在土壤结构改变的同

时，影响土壤水力学性质，进而通过作用于土壤水分状况间接影响土壤热性质。

3 结果

3.1 改变固相物质组成直接影响土壤热性质

作为内部多孔的有机物质，生物质炭颗粒自身的热性质显著区别于土壤矿质颗粒。本研究中生物质炭颗粒自身的体积热容量测定值为 $1.09 \text{ J cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$ ，然而使用热脉冲探针测定过程中无法避免地包含进了生物质炭颗粒间和颗粒内部的孔隙体积，通过剔除生物质炭孔隙(总孔隙度为62.5%)的影响后，生物质炭物质的体积热容量约为 $2.9 \text{ J cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$ ，其明显高于土壤矿质颗粒的平均热容量 ($1.9 \text{ J cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$) 和土壤有机质的热容量 ($2.5 \text{ J cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$)^[2, 17]。Zhang等^[18]也报道了玉米穗生物质炭的质量热容量为 $1.55 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，约为华北平原砂壤土的2.14倍。因此，在不考虑生物质炭改变容重的情况下，一定体积内生物质炭的加入意味着一部分矿质颗粒或土壤有机质会被这种具有较高热容量



注：*表示生物质炭对土壤含水量具有显著影响 Note：* denotes significant effect of biochar on soil water content

图4 不同生物质炭处理小区表层土壤体积含水量

Fig. 4 Volumetric soil water content in the plot relative to biochar application rate

的多孔有机物质代替。由此可以推断，在一定含水量和容重条件下，土壤体积热容量应随生物质炭的加入而提高。在考虑生物质炭内部和颗粒间孔隙存在的情况下，本研究使用的生物质炭导热率测定为 $0.135 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，其明显低于石英（ $7.7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ）和 20°C 纯水（ $0.594 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ）的导热率^[19]。因此，在不考虑土壤孔隙度和土壤含水量变化的情况下，生物质炭添加将导致土壤导热率下降。土壤热扩散系数为土壤导热率和土壤热容量的比值，导热率的下降和热容量的增加势必导致热扩散系数的下降。然而，以上理论推导均不考虑土壤结构和孔隙状况的变化。

3.2 改变土壤孔隙状况间接影响土壤热性质

图3结果表明生物质炭添加将显著改变土壤总孔隙度和孔隙大小分布。类似研究中虽使用了不同类型生物质炭和不同质地土壤，但研究结果均相对一致，即生物质炭添加会显著降低土壤容重并提高土壤总孔隙度^[8,16,20-21]。在给定体积和含水量的多孔介质中，总孔隙度的增加意味着充气孔隙的增加和固相物质的减少。空气的体积热容量为 $0.00125 \text{ J cm}^{-3} \text{ K}^{-1}$ ，其远小于土壤矿质颗粒和有机质的体积热容量^[2]。因此，生物质炭添加导致土壤孔隙度增加，并由此引起土壤体积热容量的减小。然而，如图1a所示，生物质炭添加对土壤体积热容量减小效应仅在土壤含水量为 $20\% \sim 30\%$ 之间表现显著。而在 $0 \sim 15\%$ 土壤含水量下在各生物质炭处理间体积热容量并无显著差异。这可能由于低含水量或低

热容量情况下，生物质炭自身较高热容量引起的正效应与增加孔隙度引起的负效应之间发生了抵消作用。当土壤含水量较高（ $>35\%$ ）时，生物质炭各处理间土壤体积热容量差异也不显著，这可能与高含水量下土壤中充气孔隙的迅速减少有关；同时高土壤含水量对应的高热容量也可能进一步掩盖由于孔隙度增加而引起的土壤热容量降低。Zhao等^[22]在连续7年施用生物质炭的田间试验中也发现，生物质炭添加对砂壤土体积热容量影响不显著。对于土壤导热率而言，充气孔隙的增加势必更多地隔离土壤矿质颗粒和土壤水分之间的接触，仅有土壤矿质颗粒和水分导热率几百分之一的空气将极大地阻碍热量在土壤中的传导。Usowicz^[23]和Ochsner等^[3]均指出相对于土壤含水量，土壤中充气孔隙的比例对土壤导热率的影响更大。另一方面，生物质炭会以固体颗粒形式存在于土壤矿质颗粒之间，由于其自身较低的导热率，热量在矿质颗粒之间的传导也将被大大降低。

如图5b所示，生物质炭添加对土壤导热的影响受土壤含水量的影响趋势一致，在各含水量水平上均表现为显著的降低效应。土壤热扩散系数的变化趋势决定于土壤导热率和土壤热容量的相对变化快慢。图5c中，生物质炭添加对土壤热扩散系数的影响随土壤含水量的变化而变化。当土壤含水量较低（ $0 \sim 15\%$ ）和较高（ $>35\%$ ）时，由于土壤导热率的显著降低和土壤热容量的不显著变化，使得生物质炭添加显著降低了土壤热扩散系数；而当土壤含

水量中等（20%~30%）时，生物质炭添加均显著降低了土壤导热率和热容量，而且二者降低的速率大致相同，导致不同生物质炭处理间土壤热扩散系数差异并不显著。

图3a中结果显示生物质炭添加显著降低土壤容重，且相关研究表明生物质炭对土壤容重的降低作用在颗粒较粗质地土壤中更加明显^[21]。一方面，由于生物质炭自身密度较低（1.83 g cm⁻³），且其具有大量内部孔隙，与土壤颗粒混合后会产生直接的稀释作用，导致土壤容重降低。然而，Burrell等^[21]和Hardie等^[16]均发现生物质炭自身的稀释作用并不能完全解释土壤容重的显著减小。相关研究表明，生物质炭不仅作为惰性多孔有机物质消极地存在于土壤中，更可作为一种土壤改良剂在提高土壤通气性和持水性、降低土壤酸度、促进土壤微生物活动和植物根系生长等方面扮演积极作用，并由此促进土壤颗粒团聚过程，利于团聚体内部和团聚体之间的多级孔隙的形成^[16,20-21,24]。Ouyang和Zhang等^[25]在壤质土中以5%质量百分比混合了木屑生物质炭，通过180 d的室内培养试验后发现了土壤大团聚体显著增加。Herath等^[8]在黏壤土中施用玉米秸秆生物质炭（10~17.3 t hm⁻²）295 d后同样发现土壤大团聚体和土壤大孔隙均显著增加。图5中结果同样表明，生物质炭添加导致土壤总孔隙度的增加主要来自于大孔隙（> 0.03 mm）的增加，而非来自生物质炭内部孔隙的贡献（平均孔径为3.74 nm），这与Hardie等^[16]的研究结果一致。因此，生物质炭添加促进土壤大团聚体和土壤大孔隙的形成，是其影响土壤热性质的一个重要途径。Ju等^[26]研究发现在中等土壤含水量条件下，无团聚体结构（< 0.1 mm）土壤的导热率显著小于有团聚体结构（< 2 mm）的土壤。Usowicz等^[27]

基于统计物理模型也论证了土壤导热率对土壤团聚体大小的依耐性。Zhang等^[18]和Zhao等^[22]在连续多年施用生物质炭的土壤中也发现了土壤导热率和热扩散系数的显著降低，并认为土壤团聚体和大孔隙的形成是解释这一现象的重要原因。

3.3 影响土壤水分状况间接影响土壤热性质

图5显示了不同生物质炭处理下原状土热性质与土壤含水量之间密切的正相关关系（ $R^2 > 0.97$ ）。因此，土壤含水量的轻微变动均会极大地影响土壤热性质。从图3的结果可以看出，生物质炭添加显著改变土壤孔隙状况，并会由此改变土壤水力学性质，进而影响土壤含水量动态。Barnes等^[28]发现黏壤土施用生物质炭后土壤饱和和导水率提高了328%，土壤入渗量也显著提高。Jien和Wang等^[29]的研究也发现添加生物质炭会显著增加土壤入渗并减少地表径流。如图4所示，施用生物质炭小区的土壤体积含水量显著高于对照，类似的结果在Peng等^[30]的研究中也有报道。因此，提高土壤含水量是生物质炭添加影响土壤热性质的又一重要途径。由此推断，在不考虑土壤结构变化的条件下，随着土壤含水量的提高，施用生物质炭小区应具有较高的土壤热容量和导热率。

值得注意的是，田间状态下生物质炭增加土壤孔隙度和增加土壤含水量的效应同时存在（图3和图4），而二者对土壤热性质的影响恰恰相反。因此，图2中的结果为二者综合效应的反映。对于土壤热容量而言，在50 t hm⁻²生物质炭施用量下，由提高土壤含水量引起的正效应明显高于通过增加孔隙度带来的负效应，导致土壤热容量显著高于对照（图2a）；而在25 t hm⁻²生物质炭施用量下，增加土壤孔隙度带来的负效应占主导，使得土壤热容量显著低于对照（图2a）。对于土壤导热率而言，

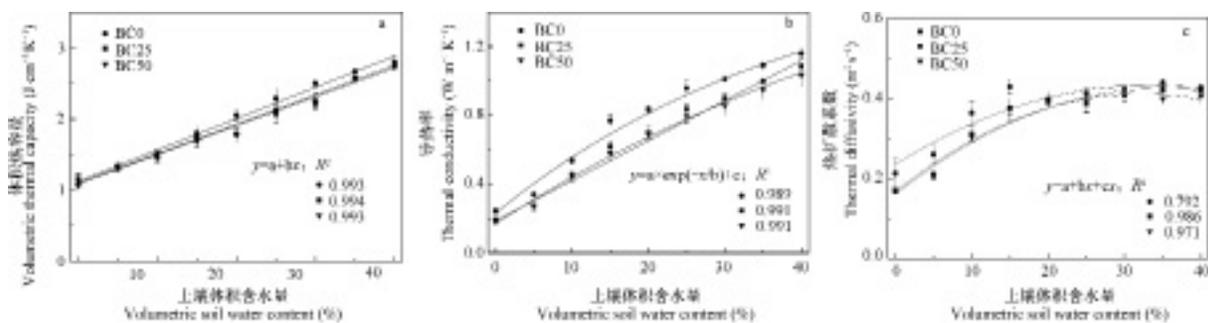


图5 不同生物质炭处理下原状土热性质与土壤含水量关系

Fig. 5 Relationships between soil thermal properties and soil water content in the plot relative to biochar application rate

不同生物质炭施用量下由增加孔隙度引起的负效应明显抑制了由提高含水量带来的正效应, 使得土壤导热率显著低于对照(图2b)。施用生物质炭对土壤导热率和土壤热容量的这种综合影响导致了土壤热扩散系数的显著降低(图2c), 这一结果与Zhang等^[18]和Zhao等^[22]在长期施用生物质炭小区中田间原位测定的结果一致。

3.4 影响土壤斥水性间接影响土壤热性质

除了上述的两个重要途径外, 生物质炭还可能通过影响土壤斥水性间接影响土壤热性质。如图6所示, 本研究使用的生物质炭材料自身的固液接触角明显大于 90° , 表现出强斥水性^[31], 类似的结果在相关研究中均有报道^[8,32-33]。另有研究表明, 施用强斥水性生物质炭后, 土壤基质自身的斥水性也有所提高^[32,34-35]。Bachmann等^[36]在研究中指出土壤斥水性的提高会通过提高土壤水分与固相基质的接触角影响热量在水分和固态物质间的传导, 导致土壤导热率的降低。然而, 由于相关研究的缺乏, 土壤斥水性对土壤热性质的影响机理至今仍不明确。另一方面, 目前关于生物质炭自身斥水性特征及其对土壤基质斥水性的影响的研究很少, 加之斥水性与水分含量之间存在的复杂关系, 本研究未能明确生物质炭如何通过影响土壤斥水性作用于土壤热性质, 期待在今后的研究中进一步深入探讨。

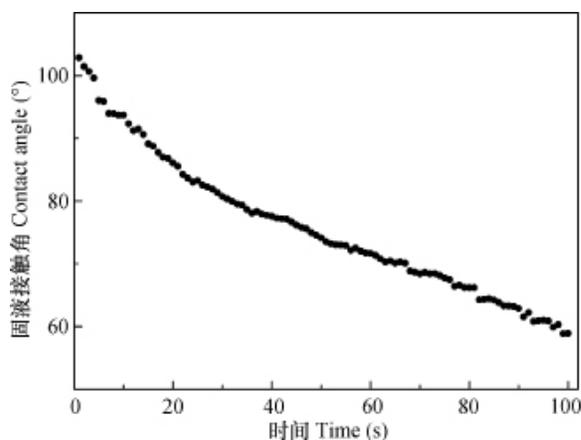


图6 秸秆生物质炭表面固液接触角

Fig. 6 Solid-liquid contact angle on the surface of wheat-straw derived biochar

4 结 论

本研究结合田间定位和室内控制实验, 研究了生物质炭添加对土壤热性质的影响机理。结果表明

生物质炭添加会对土壤热性质产生显著影响, 其主要途径为(1)通过降低土壤容重, 增加土壤大孔隙, 从而显著降低土壤导热率, 对土壤热容量和热扩散系数也有降低效应, 但同时受土壤含水量水平影响;(2)通过改变土壤水力学特性, 增加土壤含水量, 从而提高土壤热容量、导热率和热扩散系数。田间状态下, 生物质炭影响土壤热性质的两个途径同时存在而作用相反, 综合效应表现为生物质炭添加小区的土壤体积热容量有增加趋势, 但与生物质炭施用量有关; 而土壤导热率和热扩散系数显著降低。

参 考 文 献

- [1] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 北京, 2000
Huang C Y. Soil science (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [2] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学. 北京: 中国高等教育出版社, 2000
Shao M A, Wang Q J, Huang M B. Soil physics (In Chinese). Beijing: China High Education Press, 2000
- [3] Ochsner T E, Horton R, Ren T. A new perspective on soil thermal properties. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65: 1641—1647
- [4] Abu-Hamdeh N H, Reeder R C. Soil thermal conductivity: Effects of density, moisture, salt concentration and organic matter. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 1285—1290
- [5] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304: 1623—1627
- [6] Lehmann J. Black is the new green. Nature, 2006, 442 (10): 624—626
- [7] Jeffery S, Meinders M B J, Stoof C R, et al. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. Geoderma, 2015, 251/252: 47—54
- [8] 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. Geoderma, 2013, 209/210: 188—197
- [9] 潘根兴, 张阿凤, 邹建文, 等. 农业废弃物生物黑炭转化还田作为低碳农业途径的探讨. 生态与农村环境学报, 2010, 26 (4): 394—400
Pan G X, Zhang A F, Zou J W, et al. Biochar agro-byproducts used as amendment to croplands:

- An option for low carbon agriculture (In Chinese).
Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26
(4): 394—400
- [10] Jones D L, Rousk J, Edwards-Jones G, et al. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 45: 113—124
- [11] Agbna G H D, She D L, Liu Z P, et al. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. Scientia Horticulturae, 2017, 222: 90—101
- [12] 米美霞, 樊军, 邵明安. 利用热脉冲技术研究石字覆盖对土壤内部蒸发的影响. 土壤学报, 2013, 50 (1): 75—82
Mi M X, Fan J, Shao M A. Study of effects of gravel mulch on soil evaporation using heat pulse technology (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (1): 75—82
- [13] 陆森, 任图生, 杨决, 等. 多针热脉冲技术测定土壤热导率误差分析. 农业工程学报, 2010, 26 (6): 20—25
Lu S, Ren T S, Yang Y, et al. Error analysis of multi-needle heat pulse probe for soil thermal conductivity measurement (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2010, 26 (6): 20—25
- [14] Bristow K L, Kluitenberg G J, Horton R. Measurement of soil thermal properties with a dural-probe heat-pulse technique. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 1288—1294
- [15] 任图生, 邵明安, 巨兆强, 等. 利用热脉冲-时域反射技术测定土壤水热动态和物理参数I. 原理. 土壤学报, 2004, 41 (2): 225—229
Ren T S, Shao M A, Ju Z Q, et al. Measurement of soil physical properties with thermo-time domain reflectometry. I. Theory (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 (2): 225—229
- [16] Hardie M, Clothier B, Bound S, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? Plant Soil, 2014, 376: 347—361
- [17] de Vries D A. Thermal properties of soils//van Wijk W R. Physics of plant environment. Amsterdam, Netherland: North-Holland, 1963: 210—235
- [18] Zhang Q, Wang Y, Wu Y, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77: 1478—1487
- [19] Lu S, Ren T S, Gong Y S, et al. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. Science Society of America Journal, 2007, 71: 8—14
- [20] Obia A, Mulder J, Martinsen V, et al. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-texture tropical soils. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 35—44
- [21] Burrell L D, Zehetner F, Rampazzo N, et al. Long-term effects of biochar on soil physical properties. Geoderma, 2016, 282: 96—102
- [22] Zhao J, Ren T, Zhang Q, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal properties in the North China Plain. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80: 1157—1166
- [23] Usowicz B. Evaluation of methods for soil thermal conductivity calculations. International Agrophysics, 1995, 9 (2): 109—113
- [24] Abel S, Peters A, Trinks S, et al. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. Geoderma, 2013, 202/203: 183—191
- [25] Ouyang L, Zhang R. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperature on soil physical properties. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13: 1561—1572
- [26] Ju Z, Ren T, Hu C. Soil thermal conductivity as influenced by aggregation at intermediate water contents. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75: 26—29
- [27] Usowicz B, Lipiec J, Usowicz J B, et al. Effects of aggregate size on soil thermal conductivity: Comparison of measured and model-predicted data. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 57: 536—541
- [28] Barnes R T, Gallagher M E, Masiello C A, et al. Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments. PLoS One, 2014, 9 (9): e108340
- [29] Jien S, Wang C. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. Catena, 2013, 110: 225—233
- [30] Peng X, Zhu Q, Xie Z, et al. The impact of manure, straw and biochar amendment on aggregation and erosion in a hillslope Ultisol. Catena, 2016, 138: 30—37
- [31] Bughici T, Wallach R. Formation of soil-water repellency in olive orchards and its influence on infiltration pattern. Geoderma, 2016, 262: 1—11
- [32] Ojeda G, Mattana S, Àvila A, et al. Are soil-water functions affected by biochar application? Geoderma, 2015, 249/250: 1—11

- [33] Jeffery S, Meinders M B J, Stoof C R, et al. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. *Geoderma*, 2015, 251/252: 47—54
- [34] Eibisch N, Durner W, Bechtold M, et al. Does water repellency of pyrochars and hydrochars counter their positive effects on soil hydraulic properties? *Geoderma*, 2015, 245/246: 31—39
- [35] Smetanová A, Dotterweich M, Diehl D, et al. Influence of biochar and terra preta substrates on wettability and erodibility of soils. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 2013, 57: 111—134
- [36] Bachmann J R, Horton R, Ren T, et al. Comparison of the thermal properties of four wettable and four water-repellent soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65: 1675—1679

Effects of Biochar Addition on Thermal Properties of Loamy Soil

LIU Zhipeng¹ XU Jienan¹ SHE Dongli² LI Xuelin¹ WANG Jingfan¹

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract 【 Objective 】 Soil thermal properties, including soil thermal capacity, conductivity, and diffusivity, play crucial roles in partitioning of surface-energy and heat transmission across the soil profile and consequently affect spatiotemporal dynamics of soil temperature that determines soil micrometeorology. As a soil amendment being able to improve a series of soil physiochemical properties, Biochar has gained wide attention. However, little information is available in the literature on integrated effects of biochar application on soil thermal properties. 【 Method 】 A two-year field experiment using wheat straw derived biochar was conducted in a field of loamy soil in East China. The experiment was designed to have three treatments different in biochar application rate: 0 t hm⁻² (BC0), 25 t hm⁻² (BC25) and 50 t hm⁻² (BC50) and three replicates for each. A total of 9 plots were arranged in a random complete block design. Tomato was grown under drip irrigation for two seasons. Soil thermal properties, i.e. thermal capacity, conductivity and diffusivity, were measured using the heat-pulse method in two ways: (1) lab-analysis of undisturbed soil cores collected from the plots with set soil water content; and (2) in-situ measurement under natural conditions. Besides, soil bulk densities, soil water retention curves, soil pore size distributions and soil water contents of the plots were also measured. 【 Result 】 In soils with controlled soil water content, soil thermal capacity increased with soil water content in the range from 1.13 J cm⁻³ K⁻¹ to 2.80 J cm⁻³ K⁻¹, from 1.16 J cm⁻³ K⁻¹ to 2.75 J cm⁻³ K⁻¹ and from 1.07 J cm⁻³ K⁻¹ to 2.74 J cm⁻³ K⁻¹ in Treatment BC0, BC25 and BC50, respectively. Soil thermal capacity was significantly decreased by biochar application in the treatments moderate in soil water content (20% ~ 30%), whereas the effects was insignificant in the treatments low (0 ~ 15%) or high (> 35%) in soil water content. Similarly, soil thermal conductivity increased with soil water content, in the range from 0.24 W m⁻¹ K⁻¹ to 1.16 W m⁻¹ K⁻¹, from 0.19 W m⁻¹ K⁻¹ to 1.09 W m⁻¹ K⁻¹ and from 0.18 W m⁻¹ K⁻¹ to 1.03 W m⁻¹ K⁻¹ in Treatment BC0, BC25 and BC50, respectively, and was significantly higher in the treatments amended with biochar, regardless of soil water content. Soil thermal diffusivity varied in the range from 0.23 m² s⁻¹ to 0.45 m² s⁻¹, from 0.16 m² s⁻¹ to 0.42 m² s⁻¹, and from 0.17 m² s⁻¹ to 0.41 m² s⁻¹ in Treatment BC0, BC25 and BC50, respectively. Soil thermal diffusivity was significantly lower in the treatments amended with biochar either low (0 ~ 15%) or high (>35%) in soil water content, while insignificant difference was detected in thermal diffusivity between treatments moderate in soil water content (20% ~ 30%), but different in biochar application rate. Under field conditions, soil thermal capacity was significantly higher in Treatment BC50 than in Treatment BC0,

but significantly lower in Treatment BC25 than in Treatment BC0. Biochar application had significant effects on soil thermal conductivity and diffusivity under field conditions. Treatments BC25 and BC50 were significantly lower in thermal conductivity and diffusivity than Treatment BC0 and lower in soil bulk density, too. However, soil total porosity was significantly increased by biochar application, which was mainly attributed to the increase in macropores (> 0.03 mm). Besides, biochar application also affected soil water retention curves in shape and soil water content was significantly higher in the treatments applied with biochar than Control during the growing seasons. 【 Conclusion 】 Biochar application can significantly affect soil thermal properties through the two main mechanisms as follows: (1) biochar application promotes soil aggregation, thus forming large volumes of air filled pores; and (2) biochar application alters soil hydrological properties, thus increasing soil water content and hence soil thermal capacity and conductivity. In field conditions, the negative effects biochar application brings about on soil structure are much stronger than the positive ones it has on soil water content.

Key words Thermal capacity; Thermal conductivity; Thermal diffusivity; Porosity; Soil water

(责任编辑: 檀满枝)