

## 小麦秸秆生物炭对休耕期黄土农田土壤热性质的影响

聂瑾, 赵保卫\*, 刘辉, 杨哲, 马锋锋

(兰州交通大学, 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 为了研究小麦秸秆生物炭输入对休耕期农田土壤热性质的影响, 共设置了3个小麦秸秆生物炭施用量水平进行田间小区试验, 分别为  $0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (BC0)、 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (BC1)、 $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (BC4), 每个处理3个重复。对各小区土壤含水率、热容量、导热率、热扩散率和温度等指标进行了测定。结果表明: 生物炭施加能显著降低土壤导热率和热扩散率, 施加量越多, 导热率和热扩散率值越低; 热容量多次表现为随生物炭施加量的增加呈先降低后升高的趋势。土壤含水率受降雨和冻结波动较大, 在无降水且无冻结条件下随生物炭量的增加而减少, 而在低温冻融期随生物炭量的增加而增加。各热参数均与含水率变化趋势基本一致, BC1与BC4处理的各热参数与含水率之间均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。5 cm段土壤温度多次表现出随生物炭施加量的增加先升高后降低; 20 cm段土壤温度随生物炭施加量的增大而减小。各处理的导热率、热扩散率均与5 cm段土壤温度呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与20 cm段土壤温度呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。可见, 在田间状态下, 小麦秸秆生物炭主要通过影响土壤含水率进而影响土壤热性质, 影响程度与生物炭施用量有关; 小麦秸秆生物炭能通过影响土壤热性质进而影响土壤温度。

**关键词:** 生物炭; 土壤热性质; 土壤含水率; 土壤温度

近年来, 将作物秸秆在高温、限氧条件下热裂解所制备成的生物炭, 因其具有较高稳定性和吸附性, 在固碳缓解全球变暖<sup>[1-3]</sup>、缓解土壤环境污染<sup>[4-5]</sup>等环境领域具有重要作用而被广泛研究。此外, 在农业领域作为土壤改良剂或肥料的载体还田, 还可以缓解由于长期过量使用化肥和高强度生产所导致的农田土壤板结、土壤肥力下降问题<sup>[6]</sup>, 提高作物产量及品质<sup>[7]</sup>。然而, 生物炭的施入会加深土壤颜色并改变土壤质地, 影响地表土壤反照率<sup>[8-9]</sup>和热性质<sup>[10]</sup>, 从而可能影响土壤温度及其变化幅度<sup>[8, 11]</sup>, 间接干扰土壤的内部活动及作物的生长发育<sup>[12-13]</sup>。

太阳辐射到达地面后, 土壤热量的储存、传导、分布取决于土壤热性质<sup>[14]</sup>。土壤热性质参数主要有: 土壤导热率、土壤热容量、土壤热扩散率。不同土壤的热性质不同, 导热和贮热能力存在差异, 因而不同土壤吸收一定的热量后其温度增减幅度不同<sup>[15]</sup>。土壤的热性质主要受质地、容重和

水力特征的影响<sup>[16]</sup>, 土壤中的水分运动和热量传输是一个不可分割的统一系统。生物炭施入土壤会改变土壤的质地、容重和水力特性, 间接导致土壤热性质的变化<sup>[17]</sup>, 但在田间情况下, 生物炭主要是以何种方式影响土壤热性质还不明确。黄土高原地区是中国干旱区和湿润区的过渡带, 水土流失严重, 植被稀疏, 对气候变化敏感, 土壤热状况是影响地表能量平衡进而影响黄土地区下垫面结构的重要因素<sup>[18-19]</sup>, 土壤热状况由温度反映。张阳阳等<sup>[8]</sup>通过田间试验研究表明, 裸地条件下当生物炭施加量为  $0.5$ 、 $4.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (即  $5$ 、 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 时, 地表反照率较对照的最大降幅分别为  $24.3\%$ 、 $26.7\%$ , 但对土壤温度均无显著影响, 该研究未探讨生物炭施入后对土壤热性质的影响。刘志鹏等<sup>[17]</sup>通过设置3个生物炭施用量水平 ( $0$ 、 $25$ 、 $50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 进行田间区组试验发现, 小麦秸秆生物炭能显著降低田间土壤的导热率和热扩散率, 但该研究未探讨热性质变化后土壤温度对其的响应。现阶段, 生物炭应用导致土壤热性质改变进而对土壤温度产生何种影响的研究较少, 且主要集中于在实验室模拟, 基于休耕期西北黄土田间试验的研究也较为缺乏。

因此, 本研究通过设置不同施用量的小麦秸秆生物炭进行田间小区试验, 原位测定休耕期农田土

投稿日期: 2020-11-25; 录用日期: 2021-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51766008、21467013、21167007)。

作者简介: 聂瑾 (1994-), 硕士研究生, 研究方向为土壤学。

E-mail: 1078308731@qq.com。

通讯作者: 赵保卫, E-mail: baoweizhao@mail.lzjtu.cn。

壤的含水率、温度以及各热性质参数等, 研究生物炭施加对农田土壤热状况的影响, 为生物炭在西北黄土地区的农业生产应用和生态治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验田位于甘肃省兰州市安宁区北环路保利领秀山 (36° 6' 37" N, 103° 44' 22" E), 当地属于温带大陆性气候, 年平均气温 10.3℃, 年平均降水量 327 mm, 主要集中在 6 ~ 9 月, 年均蒸发量为 900 mm, 年平均日照时数为 2446 h, 年总辐射量为 5314 ~ 7212 MJ · cm<sup>-2</sup>, 无霜期为 180 d。地带性土壤以栗钙土、灰钙土为主, 少数地带为黑麻土和黄绵土, 结构性差, 透水透气性差。试验区 0 ~ 20 cm 土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 土壤的基本理化性质

	pH	容重 (g · cm <sup>-3</sup> )	含水率 (%)	有机质 (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮 (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷 (g · kg <sup>-1</sup> )	孔隙率 (%)
土壤	7.82	1.27	14.16	14.37	1.23	1.17	52.1

表 2 生物炭的基本理化性质

	pH	BET 比表面积 (m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> )	含水量 (%)	容重 (g · cm <sup>-3</sup> )	热容量 (MJ · m <sup>-3</sup> · K <sup>-1</sup> )	导热率 (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	孔隙率 (%)
生物炭	9.56	22.76	1.34	0.4	2.37	0.13	89.7

### 1.3 测试方法

为避免不良气象因素对测量的影响, 测定选在晴朗少云或无云的 12: 00 ~ 13: 00, 使用 Acclima SDI-12 Sensor Reader 原位测定 0 ~ 20 cm 土壤温度及含水率, 使用便携式土壤热物性测量仪 KD2 Pro 原位测定 0 ~ 5 cm 土壤热容量、导热率、热扩散率及温度, 每个小区随机选取 3 个测量点, 测量频率为 2 min。试验期内共进行 9 次测量, 其中第 3 次 (2019 年 10 月 16 日) 由于其他原因只保留含水率数据。使用环刀 (直径 5 cm, 容积 100 cm<sup>3</sup>) 在每个处理小区内随机采集 0 ~ 10 cm 表层原状土壤样品 2 个, 所有原状土壤样品使用烘箱在 105℃ 下烘干 24 h 后测定土壤容重。

生物炭基础理化性质的测定根据《木质活性炭试验方法》(GB/T 12496.19-2015) 进行测定。土壤基础理化性质按照《土壤检测》(NY/T 1121.11-2006) 进行测定。

### 1.2 研究方法

试验所使用的小麦秸秆生物炭由江苏麦科特炭业公司提供, 500℃ 温度下碳化 6 h。生物炭基本性状见表 2。参考已有关于生物炭合理施用量的研究结果<sup>[8, 17]</sup>, 本试验设置 3 个处理: 0 kg · m<sup>-2</sup> (BC0)、1 kg · m<sup>-2</sup> (BC1)、4 kg · m<sup>-2</sup> (BC4), 每个处理设置 3 个重复, 共计 9 个试验小区。采用随机区组设计, 每个小区面积 2.4 m × 2 m = 4.8 m<sup>2</sup>, 各小区之间设宽 0.2 m 的地垄防止小区间相互干扰。小麦秸秆生物炭于 2019 年 10 月 11 日一次性均匀施入各试验小区, 后期不再追施。施撒生物炭前使用小型翻耕机对试验田进行翻耕, 将生物炭均匀施入各试验小区后, 再次使用翻耕机将生物炭均匀混合至 0 ~ 20 cm 土层。休耕试验期内不进行人工浇水。

### 1.4 数据处理

所有数据经 Excel 2010 进行整理, 用 SPSS 22.0 进行相关性分析, 用 Origin 8.0 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭施入对土壤容重的影响

生物炭施加对农田土壤容重的影响如图 1 所示。试验期内 BC1 和 BC4 处理的土壤容重较 BC0 均有所下降, BC0 处理的容重变化范围为 1.22 ~ 1.31 g · cm<sup>-3</sup>, BC1 处理比 BC0 处理降低了 0.5% ~ 7%, BC4 处理比 BC0 处理降低了 2% ~ 11%。BC0、BC1、BC4 的容重平均值依次为 1.27、1.23、1.20 g · cm<sup>-3</sup>, 说明土壤容重随生物炭施加量的增大而减小。

### 2.2 生物炭施入对土壤含水率的影响

试验期内共有两次有效降水 (2019 年 10 月 14 日降雨、2019 年 12 月 3 日降雪), 其中 12 月 4 日与 8 日的两次测量冻结较明显。图 2 为生物炭施加

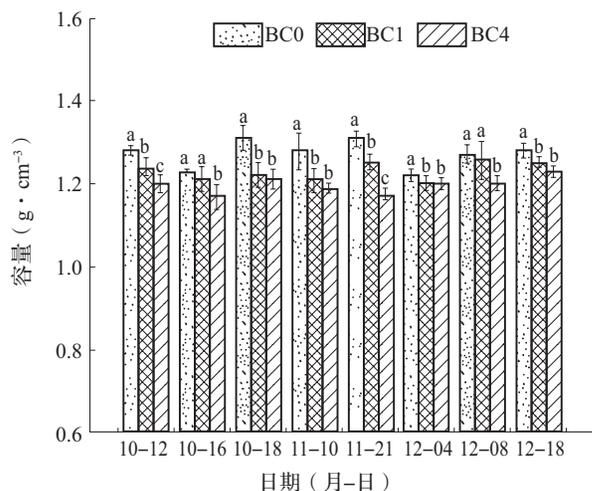


图1 生物炭输入对土壤容重的影响

注：柱上小写字母不同表示各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

对田间土壤含水率的影响。试验期内 BC0、BC1、BC4 处理的含水率变化范围依次为 11.3% ~ 18.6%、10.9% ~ 16.3%、10.7% ~ 17.3%，含水率平均值依次为 14.2%、13.7%、13.9%。从图 2 可以看出，在无降水休耕期（2019 年 10 月 16 日 ~ 12 月 4 日），土壤含水率随生物炭施加量的增大而减少，表现为  $BC0 > BC1 > BC4$ ；而在低温冻融期（2019 年 12 月 8 日 ~ 12 月 18 日），土壤含水率随生物炭施加量增大而增大，含水率梯度关系为  $BC4 > BC1 > BC0$ 。

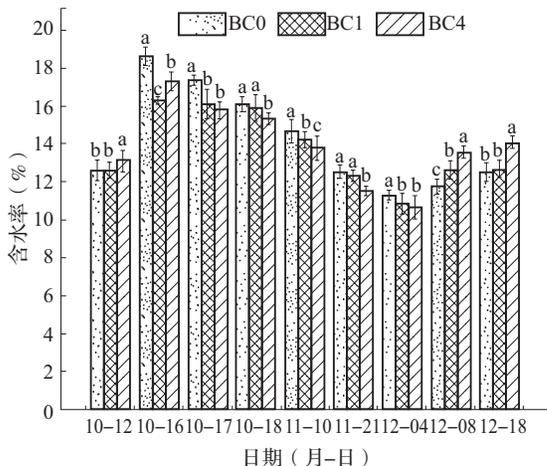


图2 生物炭输入对土壤含水率的影响

各处理的含水率在整个试验期内变化趋势一致，最大值均出现在降水后第 1 d（2019 年 10 月 16 日），最小值出现在降雪后第 1 d（2019 年 12 月 4 日），各处理的土壤含水率均在降水前后变化剧烈，受降水影响升降明显。在无降水休耕期（2019 年 10 月 16 日 ~ 12 月 3 日），即没有地

面入渗补给的条件下，各处理的土壤含水率均单向减少，降雪后 15 d 内的低温冻融期（2019 年 12 月 4 日 ~ 18 日），各处理的土壤含水率均逐步提升。

### 2.3 生物炭施入对土壤热容量的影响

生物炭施加对土壤热容量的影响如图 3 所示。BC0 处理的土壤热容量变化范围为  $1.34 \sim 2.02 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ，BC1 处理的土壤热容量较 BC0 降低范围为 2% ~ 33%，而 BC4 处理较 BC0 处理降低了 1% ~ 17%。施炭处理整体降低了土壤热容量，在无降水、无冻结的条件下，各处理的土壤热容量大小关系均为  $BC0 > BC4 > BC1$ ，呈不对称的“V”形。各处理的土壤热容量与含水率之间的相关系数如表 3 所示。整个试验期内，BC1 与 BC4 处理的热容量与含水率呈显著正相关关系，相关系数分别为 0.867\*\*、0.791\*。

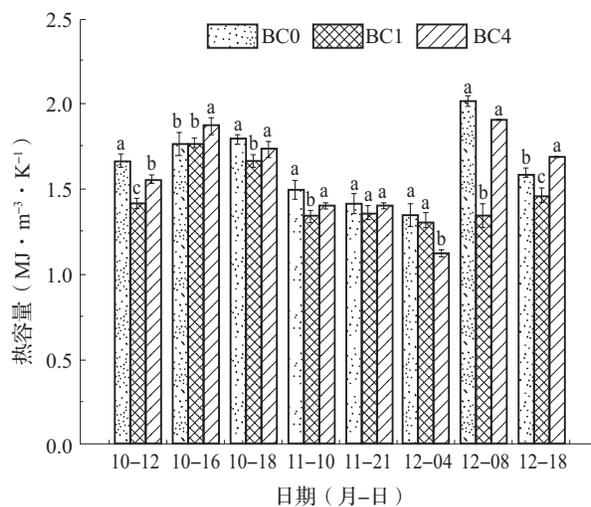


图3 生物炭输入对土壤热容量的影响

表3 热容量、导热率、热扩散率与土壤含水率的 Pearson 相关系数

	热容量 - 含水率	导热率 - 含水率	热扩散率 - 含水率
BC0	0.278	0.898**	0.836**
BC1	0.867**	0.904**	0.865**
BC4	0.791*	0.912**	0.756*

注：\*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关，\*\*表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关。下同。

### 2.4 生物炭施入对土壤导热率的影响

农田土壤导热率的变化如图 4 所示。试验期 BC0 处理的土壤导热率为  $0.34 \sim 0.88 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，BC1 处理的导热率变化范围为  $0.30 \sim 0.82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，

相较于 BC0 处理降低了 3% ~ 24%; BC4 处理的导热率为 0.25 ~ 0.79 W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>, 较 BC0 处理降低了 10% ~ 25%。在无降水 and 无冻结条件下, 导热率大小关系均为 BC0>BC1>BC4。未施炭处理的土壤导热率始终大于施炭处理, 即施加生物炭能降低田间土壤导热率。各处理的土壤导热率与含水率之间呈显著正相关关系 ( $P<0.01$ , 表 3)。

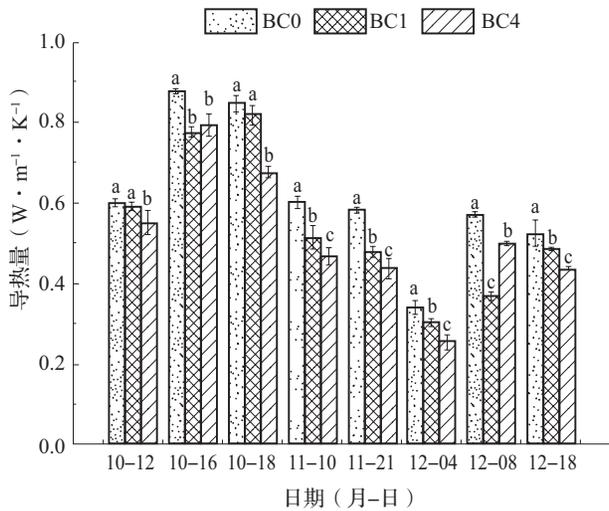


图 4 生物炭输入对土壤导热率的影响

### 2.5 生物炭施入对土壤热扩散率的影响

试验期内土壤热扩散率的变化如图 5 所示。试验期内 BC0 处理的土壤热扩散率变化范围为 0.256 ~ 0.503 mm<sup>2</sup> · s<sup>-1</sup>, BC1 处理的土壤热扩散率比 BC0 降低了 4% ~ 14%, BC4 处理较 BC0 处理降低了 4% ~ 25%。除第 1 次测量外, 各处理的土壤热扩散率大小关系均为 BC0>BC1>BC4, 生物炭施加显著降低了土壤的热扩散率。各处理的热扩散

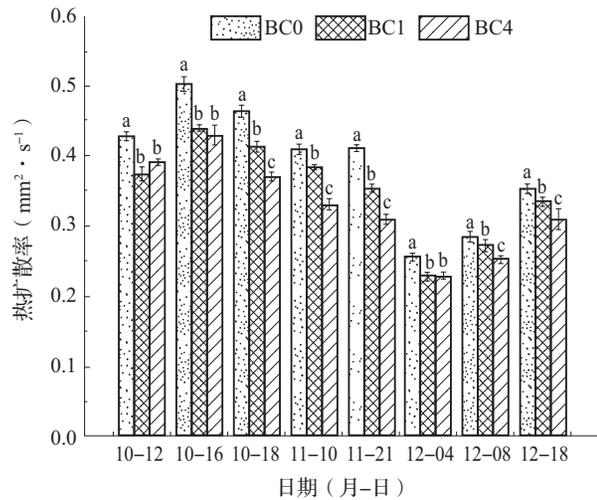


图 5 生物炭输入对土壤热扩散率的影响

率在 10 月 16 日 (降水后第 1 d) 达到峰值, 12 月 4 日 (降雪后第 1 d) 为谷值。各处理的土壤热扩散率与含水率之间呈显著正相关关系 ( $P<0.05$ , 表 3)。

### 2.6 生物炭施入对土壤温度的影响

试验期内生物炭对 5 和 20 cm 段土壤温度的影响如图 6 所示。BC0 处理的 5 cm 段土壤温度变化范围为 0.30 ~ 24.40 °C, 最大值在 10 月, 最小值在 12 月。自 2019 年 11 月起, 试验田 5 cm 段土壤温度大小均表现为 BC1>BC0>BC4, 即随生物炭施加量的增加先升高后降低, 呈倒“V”形, 与图 3 热容量所呈现的“V”形响应。BC0、BC1 及 BC4 处理 5 cm 段平均土壤温度依次为 10.64、11.35、10.84 °C, BC1 处理比 BC0 处理高 7%, BC4 处理比 BC0 处理高 2%。试验期内各处理的 20 cm 段土壤温度均高于 5 cm 段土壤温度, 且各处理的 20 cm

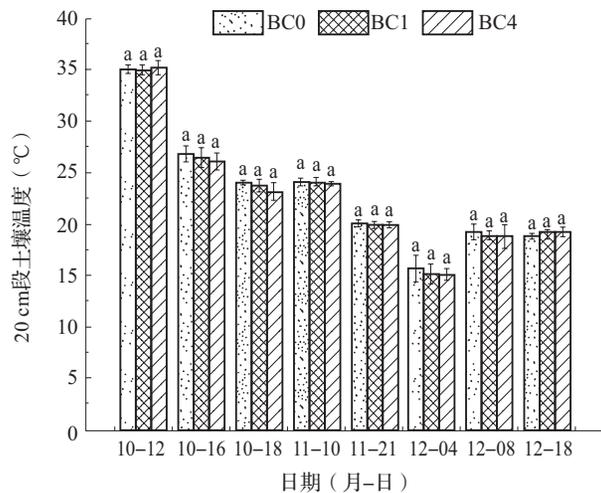
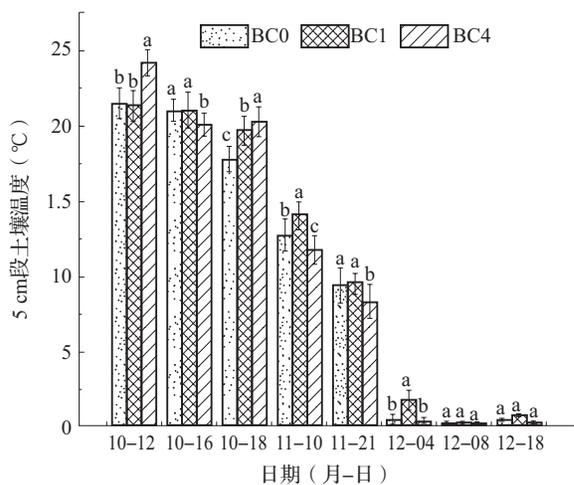


图 6 生物炭输入对 5 和 20 cm 土壤温度的影响

段土壤温度在试验期内差异极小,除施炭后第1次(2019年10月12日)及最后1次测定(2019年12月18日)外,施炭处理的20 cm段土壤温度都低于BC0处理,温度均表现为BC0>BC1>BC4,施炭处理可显著降低20 cm段土壤温度。BC0处理的20 cm段土壤温度最大值为35.21℃,最小值为15.10℃,BC0、BC1和BC4处理的20 cm段土壤温度平均值依次为23.00、22.82、22.71℃,BC1、BC4处理较BC0处理分别降低

0.8%、1%。不同生物炭处理的土壤热参数与土壤温度的相关系数如表4所示。各处理的导热率与土壤温度均显著正相关( $P<0.05$ ),且BC0处理的土壤导热率与土壤温度呈极显著相关( $P<0.01$ );热扩散率与5和20 cm段土壤温度均呈极显著正相关( $P<0.01$ );对于热容量,BC1处理的热容量与5 cm段土壤温度显著相关( $P<0.05$ )。此外,5 cm段土壤温度的季节差异明显,而20 cm段土壤温度随季节变化不明显。

表4 热容量、导热率、热扩散率与土壤温度的 Pearson 相关系数

	热容量 - 5 cm 段土壤温度	导热率 - 5 cm 段土壤温度	热扩散率 - 5 cm 段土壤温度	热容量 - 20 cm 段土壤温度	导热率 - 20 cm 段土壤温度	热扩散率 - 20 cm 段土壤温度
BC0	0.141	0.884**	0.942**	0.357	0.915**	0.914**
BC1	0.756*	0.897**	0.897**	0.740	0.861*	0.949**
BC4	0.299	0.832*	0.895**	0.512	0.868*	0.933**

### 3 讨论

#### 3.1 生物炭施入对土壤容重的影响

小麦秸秆生物炭的施加能够显著降低田间土壤的容重。首先,生物炭的容重一般在 $0.09 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间,远低于土壤容重,生物炭施入土壤对容重造成稀释作用,导致土壤容重降低<sup>[20-22]</sup>。生物炭自身质地疏松多孔,土壤中施加生物炭后总孔隙度增加,空气占比提高,固相颗粒占比降低,直接改善土壤结构,降低土壤容重<sup>[20, 23]</sup>;其次,生物炭可增加微生物活性及菌根数量,促进团聚体的形成和稳定性,有效改善土壤结构,间接降低土壤容重<sup>[24]</sup>;本试验结果与前人的研究结果基本一致。

#### 3.2 生物炭施入对土壤含水率的影响

在休耕期无地面入渗补给的条件下(2019年10月16日~12月4日),土壤含水率随生物炭施加量的增大而减少。造成这种现象的原因,一方面是生物炭的添加总体增大了土壤的孔隙度,使得土壤毛管作用减弱以及持水力减小<sup>[25]</sup>;另一方面,添加生物炭能引起地表土壤温度升高<sup>[26]</sup>,进而增加土壤水分的蒸发,使得土壤水分降低。温度会影响土壤中的水汽扩散以及土壤水分的粘滞系数<sup>[27]</sup>,因而温度的增减会影响土壤含水率。低温冻融期(2019年12月4日~18日),土壤含水率随生物炭施加量增大而增大,这可能是因为小麦秸秆生物炭的亲水性表面积和

孔隙度都较大,水分吸附在生物炭表面,储存于其微孔内<sup>[28]</sup>,且冻融低温条件下蒸发作用相对较弱,生物炭施加使得土壤养分含量增高,阻碍热量向蒸发面的传递,降低水分蒸发速率<sup>[29]</sup>,从而增大了土壤含水率。综上,在休耕期无降水补给的较高温度下,施加生物炭促使水分蒸发起主导作用,水分蒸发量大于持水量,因而使含水率随生物炭施加量的增大而降低;低温冻融条件下,生物炭的持水能力高于蒸散能力而占主导作用,综合作用表现为含水率随生物炭施加量的增加而增大。

自然条件下,土壤含水率的变化主要受降水及蒸散发等因素制约<sup>[30]</sup>,西北地属干旱、半干旱地带,日照强烈,年蒸发量大于降水量。在本研究中,各处理的含水率在无降水休耕期因蒸散作用均单向减少,与前人的研究结果基本一致<sup>[31-32]</sup>。各处理的土壤含水率均在降水前后升降明显,说明田间浅层土壤含水率在休耕期的波动还受降水影响。降雪后15 d内的低温冻融期(2019年12月4日~18日),各处理的土壤含水率均逐步提升,可能是受土壤水分冻结的影响。当土壤发生单向冻结时,水分从土壤暖端(深层)向冷端(表层)转移<sup>[33]</sup>,因此冻融期土壤上层的含水率较冻结前高。此外,壤土的持水性较强<sup>[33]</sup>,在发生冻结时,土壤表层的水分汽化脱离土壤量相对较少,从土壤深层迁入到表层的水量大于汽化量,导致冻结后各处理的含水率均有所增加。综上,说明了休耕期田间土壤含

水率还与冻结有关。

### 3.3 生物炭施入对土壤热容量的影响

土壤的热容量是单位体积或质量的土壤温度升高或降低 1℃时所吸收或放出的热量,是包括矿物质、有机质、水分(或溶液)及空气等在内的所有组分的热容量之和。生物炭具有高于土壤本身矿物质颗粒的热容量,施入能显著提高土壤热容量<sup>[34]</sup>,但由于增大了土壤的孔隙度,降低了土壤容重,也能导致土壤热容量的降低<sup>[17]</sup>。研究表明,容重一定时,体积热容量是土壤含水率的函数<sup>[16]</sup>。马效松等<sup>[35]</sup>研究了不同含水率条件下,热容量随生物炭施加量的变化,结果表明在含水率相同时,土壤体积热容量随生物炭施加量的增加而降低。本研究中,各处理的土壤热容量在降水前后升降迅速,原因是水分的渗入挤占了土壤结构中的原有空气,且水的热容量远高于空气的热容量,因而土壤热容量迅速上升;之后随水分的蒸发,热容量逐渐降低。说明在田间条件下,土壤热容量对降水的响应敏感。研究期内,降水后第 1 d 各含水率均处于峰值时,热容量随生物炭含量的增大而增大,此外均表现为施炭整体降低了农田土壤热容量,这可能是由于雨后各处理的含水率较高且接近饱和时,生物炭自身的高热容量对土壤热容量的直接提高作用占主导;而当土壤含水率相对较低时,生物炭通过降低农田土壤含水率间接降低土壤热容量起主要作用。本研究中,在无降水休耕期(2019年10月18日~11月21日),BC1处理较BC4处理对热容量的降低作用更大,可能是由于田间条件下,外界影响因素较多,表层土壤水热交替剧烈,生物炭自身较高热容量引起的正效应与降低含水率及增大孔隙度所引起的负效应存在相互抵消,即当生物炭施加量较低,为  $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  时,降低含水量引起的负效应起主要作用;当施加量较高,为  $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  时,生物炭自身高热容量引起的正效应抵消了部分降低作用,呈现 BC4 处理的热容量高于 BC1。此外在冻融期(2019年12月4~18日),也可能是因为农田土地冻结与融化情况不均匀,测量点冻融差异导致热容量变化规律与前人研究结果有所不同。

### 3.4 生物炭施入对土壤导热率的影响

施用生物炭导致的孔隙结构和含水率的变化以及疏水表面结构是导致休耕期农田土壤导热率降低的原因。首先,当生物炭施入土壤后,增大了农田

土壤的孔隙度且有效改善土壤的通气性。土壤空气含量高意味着土壤颗粒之间相互接触减少,土壤颗粒间接触热阻率增大<sup>[29]</sup>,导致热量传递缓慢,导热率减小。其次,生物炭表面的芳香结构能提高自身斥水性,从而提高土壤斥水性,降低农田土壤导热率<sup>[36]</sup>。马欣等<sup>[37]</sup>分析了黄土高原地区土壤含水量和土壤热参数的变化特征,发现土壤热性质随含水率变化最明显。在本研究中,土壤导热率与土壤含水率变化趋势一致,也说明了土壤导热率还与含水率相关。本试验中,12月BC0和BC4处理的导热率迅速增大可能是降雪后低温导致的土壤水分冻结所致。由于温度降低使土壤中液态水转化为固态冰,而冰的导热率( $2.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )是水的4倍<sup>[35]</sup>,因此各处理的导热率均升高。10月16日BC1处理的导热率低于BC4处理的导热率可能是因为当天土壤BC1处理的含水率低于BC4处理,而田间土壤导热率对含水率响应敏感所致。12月8日BC1处理的导热率显著低于BC4处理可能是因为农田土地冻结与融化情况不均匀,测量点的冻融差异所致。

### 3.5 生物炭施入对土壤热扩散率的影响

热扩散率是热容量和导热率的函数,因而热扩散率也随孔隙度和含水率变化而变化。在本田间试验中,生物炭显著降低了土壤热扩散率,究其原因,一方面是生物炭自身的热扩散率较小,另一方面,生物炭施加造成土壤含水率降低,间接导致土壤热扩散率降低。生物炭的施加增大了土壤总孔隙度,也提高了土壤有机质含量,改善了农田土壤的土壤条件。而质地轻、土壤条件越好的土壤热量传递越慢,热扩散率值也越低<sup>[38]</sup>,因而试验期内,生物炭添加使农田土壤的热扩散率显著降低,且生物炭施加量越多,对热量扩散的阻碍作用就越强。本试验中,土壤热扩散率与土壤含水率变化趋势一致,呈显著正相关关系,说明土壤热扩散率变化与含水率密切相关,这与前人的研究结果基本一致<sup>[39-40]</sup>。土壤热容量和导热率均受含水率影响较大,因而前期和中期的热扩散率与含水率的变化趋势相一致,但12月受降雪土壤冻结和生物炭施加的影响,热容量和导热率的变化幅度不同,综合作用导致冻结后不同处理的热扩散率呈现与二者不同的变换趋势。

### 3.6 生物炭施入对土壤温度的影响

已有研究表明在田间自然条件下,生物炭添加

到土壤后对土壤温度的影响不是单纯增加或降低,而是具有“削峰填谷”的作用,即在夏季的中午降低土壤温度,但在冬季又可增加土壤温度。在本试验中,生物炭显著降低了土壤导热率和热扩散率,即施用生物炭后在通过相同热量的条件下土壤温度变化缓慢了,这也为生物炭对土壤温度的“削峰填谷”作用提供了解释依据。

试验田地属黄河上游地区,10月至翌年5月期间,深层土壤向表层土壤释放热量,其余月份则主要为表层土壤向深层土壤传导热量<sup>[41]</sup>,较深层土壤温度变化的原因主要是辐射累积<sup>[37]</sup>。本研究中,随着生物炭量的增加,20 cm段土壤温度逐渐降低,可能是因为生物炭的施加阻碍了深层土壤向该层土壤的热量传导。对于热容量不同的土壤而言,当相等的热量进入土壤后,热容量大的土壤升温小,热容量小的土壤升温大。试验期内生物炭施加对5 cm段土壤温度的影响没有明显的规律性,但多次表现出随生物炭施加量的增加呈先升高后降低的趋势,这主要是因为BC1处理的热容量值低于BC0及BC4处理,而热容量值低的土壤升温快,因此呈现为BC1处理的5 cm段土壤温度高于BC0和BC4处理。一方面,生物炭施加降低了地表反照率,使地表吸收的太阳辐射增加,导致地表温度升高,因此BC1处理的5 cm段土壤温度高于BC0处理;另一方面,温度升高促进农田土壤水分的蒸发,水汽上升所消耗的太阳辐射能量增加,又使地表温度下降,BC4处理较BC1处理蒸发剧烈,导致BC1>BC4,加之BC4处理对深层土壤向上层土壤传导热量的阻碍效果强于BC1处理,也导致BC1>BC4。5 cm段土壤温度的季节差异明显,而20 cm段土壤温度随季节变化不明显,主要是因为5 cm段土壤温度受近地表气温影响相对较大。

生物炭的施加会通过影响土壤热性质进而影响土壤温度,同时土壤温度的差异也会反过来影响土壤热性质参数。含水率的变化会引起土壤温度的变化,土壤温度同时也会反过来影响土壤水的运移及形态,维持土壤水热状况的动态平衡。

#### 4 结论

在休耕期无降水条件下,农田土壤的容重和含水率均随生物炭用量的增加而降低,而在低温冻融期,土壤含水率随生物炭含量的增加而增大,表明

生物炭对休耕期田间土壤含水率有“削峰填谷”的作用。土壤导热率和热扩散率随生物炭施加量的增加而降低,而热容量随生物炭施加先减小后增大,且试验期内土壤热容量、导热率、热扩散率的波动均与土壤含水量的变化具有一致性,相关性分析也表明不同处理的热性质参数均与土壤含水率显著相关,但与土壤容重相关性不大,说明小麦秸秆生物炭主要通过影响土壤含水率进而影响土壤热参数。而含水率随降水和冻结有明显波动,且在无降水休耕期单向减少,即休耕期田间土壤热参数差异除受生物炭影响以外,同时还间接受蒸散、降水和冻结的影响。

对于5 cm段土壤,当生物炭施加量为 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时对其有增温作用,施加量为 $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时对其有降温作用,受季节影响波动较大;对于20 cm段土壤,其温度受近地表气温影响较小,随生物炭施加量的增大而减小,即生物炭阻碍了休耕期农田土壤热量向上传导。在田间条件下,生物炭能通过影响土壤热性质来实现对农田土壤温度的调节。农田土温变化是各因素综合作用的结果,因此,应综合考虑生物炭对土壤光热参数的影响,从而揭示生物炭对西北农田土壤热状况的影响。

#### 参考文献:

- [1] Sohi S P. Carbon storage with benefits [J]. *Science*, 2012, 338 (6110): 1034-1035.
- [2] Tan Z, Lin C S K, Ji X, et al. Returning biochar to fields: A review [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 116: 1-11.
- [3] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. *Nature Communications*, 2010, 1 (1): 56.
- [4] Bielská L, Škulcová L, Neuwirthová N, et al. Sorption, bioavailability and ecotoxic effects of hydrophobic organic compounds in biochar amended soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624 (MAY15): 78-86.
- [5] 李力, 陆宇超, 刘娅, 等. 玉米秸秆生物炭对Cd(II)的吸附机理研究 [J]. *农业环境保护*, 2012 (11): 2277-2283.
- [6] 何绪生, 张树清, 余雕, 等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27 (15): 16-25.
- [7] Schmidt, Hans P, Martinsen, et al. Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 1380-1389.
- [8] 张阳阳, 胡学玉, 张迪, 等. 生物炭对农田地表反照率及土壤温度与湿度的影响 [J]. *环境科学研究*, 2015 (8): 1234-1239.

- [9] 张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 等. 生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响 [J]. 环境科学, 2017, 38 (4): 1622-1632.
- [10] 董心亮, 林启美. 生物质炭对土壤物理性质影响的研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26 (12): 1846-1854.
- [11] 赵建坤, 李江舟, 杜章留, 等. 施用生物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.
- [12] Hatfield J L, Prueger J H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development [J]. *Weather & Climate Extremes*, 2015, 10 (PA): 4-10.
- [13] Koch O, Tscherko D, Kandeler E. Temperature sensitivity of microbial respiration, nitrogen mineralization, and potential soil enzyme activities in organic alpine soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21 (4): 1-11.
- [14] Hillel D. *Introduction to Environmental Soil Physics* [M]. US: Academic Press, 2003. 167-186.
- [15] 李毅, 邵明安, 王文焰, 等. 质地对土壤热性质的影响研究 [J]. 农业工程学报, 2003, 19 (4): 62-65.
- [16] De Vries D A. *Thermal properties of soils* [M] //Van Wijk W R. *Physics of plant environment* [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963.
- [17] 刘志鹏, 徐杰男, 余冬立, 等. 添加生物质炭对土壤热性质影响机理研究 [J]. 土壤学报, 2018, 55 (4): 933-944.
- [18] 奥银焕, 吕世华, 张宇, 等. 金塔绿洲不同下垫面土壤热状况对比分析 [J]. 太阳能学报, 2008, 29 (4): 465-470.
- [19] 张强, 曹晓彦. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究 [J]. 大气科学, 2003, 27 (2): 245-254.
- [20] Oezcimen D, Karaosmanoglu F. Production and characterization of bio-oil and biochar from rapeseed cake [J]. *Renewable Energy*, 2004, 29 (5): 779-787.
- [21] Bird M I, Ascough P L, Young I M, et al. X-ray microtomographic imaging of charcoal [J]. *Journal of archaeological science*, 2008, 35 (10): 2698-2706.
- [22] Alburquerque J A, Salazar P, Barrón V, et al. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33 (3): 475-484.
- [23] Glaser B, Lehmann J, Zech W, et al. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2002, 35: 219-230.
- [24] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70 (5): 1719-1730.
- [25] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥热效应的影响试验研究 [J]. 生态环境, 2014 (7): 1141-1147.
- [26] 许健, 牛文全, 张明智, 等. 生物炭对土壤水分蒸发的影响 [J]. 生态学杂志, 2016, 27 (11): 3505-3513.
- [27] 贾东于, 文军, 张堂堂, 等. 黄土高原降水对土壤含水量和导热率的影响 [J]. 高原气象, 2014, 33 (3): 712-720.
- [28] Blanco-Canqui H. Biochar and soil physical properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 84 (4): 687.
- [29] 刘经星, 李春桃, 梁玉祥, 等. 质地对土壤热扩散率的影响 [J]. 中国沙漠, 2010, 30 (3): 577-581.
- [30] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化 [J]. 山地学报, 2003, 21 (2): 149-156.
- [31] 夏自强, 郭必芳, 蒋洪庚, 等. 温度变化对土壤水运动及土壤水与潜水水分交换的影响 [J]. 水科学进展, 1995, 6 (S1): 15-22.
- [32] 夏自强, 赵胜利. 地膜覆盖对土壤温度, 水分的影响及节水效益 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 1997, 25 (2): 39-45.
- [33] 高永, 胡春元, 董智, 等. 土壤冻结过程中水分迁移动向的研究 [J]. 林业科学, 2000, 36 (4): 126-128.
- [34] Zhang Q Z, Wang Y D, Wu Y F, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77 (5): 1478-1487.
- [35] 马效松, 付强, 徐淑琴, 等. 生物炭对北方寒区农田土壤热性能参数的影响 [J]. 农业机械学报, 2019, 50 (10): 298-305.
- [36] Bachmann J, Horton R, Ren T, et al. Comparison of the thermal properties of four wettable and four water-repellent soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65 (6): 1675-1679.
- [37] 马欣, 张堂堂, 陈金雷. 黄土高原典型塬区土壤热性质变化特征研究 [J]. 高原气象, 2019, 38 (3): 507-517.
- [38] 杜好田, 焦峰, 姚静, 等. 黄土丘陵区降水变化对退耕草地土壤水分特征的影响 [J]. 水土保持研究, 2019, 26 (5): 81-88.
- [39] 叶万军, 董西好, 杨更社, 等. 含水率和干密度对黄土热参数影响的试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (3): 656-662.
- [40] 皇甫红旺, 晋华. 含水率对土壤热物性参数影响的试验研究 [J]. 节水灌溉, 2016 (10): 55-58.
- [41] 李锁锁, 吕世华, 奥银焕, 等. 黄河上游地区辐射收支及土壤热状况季节变化特征 [J]. 太阳能学报, 2009, 30 (2): 156-162.

**Effects of wheat straw biochar on soil thermal properties in fallow period**

NIE Jin, ZHAO Bao-wei\*, LIU Hui, YANG Zhe, MA Feng-feng ( School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730000 )

**Abstract:** In order to study the effect of wheat straw biochar input on soil thermal properties in fallow period. Three wheat biochar application levels were set up in this study:  $0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (BC0),  $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (BC1) and  $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (BC4), and each treatment was repeated for 3 times, and field plot experiments were carried out. The soil moisture content, heat capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity and temperature of each plot were measured. The results showed that the application of biochar significantly reduced the soil thermal conductivity and thermal diffusivity, and the more the application amount, the lower the value of thermal conductivity and thermal diffusivity. The heat capacity was firstly decreased and then increased with the increase of the amount of biochar applied. Soil water content fluctuated greatly by rainfall and freezing, and decreased with the increase of biochar content in the absence of precipitation and freezing conditions, while increased with the increase of biochar content in the freezing-thawing period at low temperature. All the thermal parameters were basically consistent with the variation trend of water content, and the thermal parameters of BC1 and BC4 were significantly positively correlated with water content ( $P < 0.05$ ). The soil temperature in 5 cm section increased firstly and then decreased with the increase of biochar application amount. The soil temperature in the 20 cm section decreased with the increase of biochar application amount. The thermal conductivity and thermal diffusion of all treatments were significantly positively correlated with the soil temperature in the 5 cm section ( $P < 0.05$ ), and significantly positively correlated with the soil temperature in the 20 cm section ( $P < 0.01$ ). It can be seen that biochar affected the change of soil thermal properties in farmland mainly by affecting water content, and the degree of influence was related to the application amount of biochar. The addition of wheat straw biochar could affect soil temperature in farmland by affecting soil thermal properties.

**Key words:** biochar; soil heat capacity; soil moisture content; soil temperature