doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.034

生物炭对北方寒区农田土壤热性能参数的影响

马效松[1]　付　强[1,2]　徐淑琴[1,2]　李天霄[1]　侯仁杰[1]　于鑫彤[1]

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为揭示生物炭对土壤热特性参数的影响规律,以施加不同生物炭的北方寒区农田土壤为研究对象,设置土壤含水率水平分别为 0%、8%、16%、24%、32%、40%,利用 ISOMET2114 型热性能分析仪,测定土壤在 15 ~ -15℃温度范围内导热率、热扩散率和体积热容量的变异特征,探究生物炭调控作用下土壤热特性参数对水热环境的响应机理。研究结果表明:在冻结与非冻结状态下,随土壤含水率增加,土壤导热率、体积热容量和热扩散率均表现出增大趋势,在 3℃条件下,生物炭含量为 0 t/hm^2、含水率为 24% 和 32% 时,土壤导热率相对于含水率为 16% 时分别增加 0.141 4、0.580 5 W/(m·K)。随生物炭含量增加,土壤导热率和热扩散率呈降低趋势,体积热容量在非冻结情况下呈降低趋势,在冻结情况下则呈增大趋势,在 -3℃条件下,含水率为 32%、生物炭含量为 4 t/hm^2 和 6 t/hm^2 时,土壤体积热容量相对于 0 t/hm^2 水平分别增加 0.16、0.20 J/(cm^3·K)。土壤导热率与含水率呈对数函数关系,土壤体积热容量与含水率呈线性函数关系,土壤热扩散率与含水率呈二次函数关系。本研究结果可为准确描述北方寒区农田土壤热性能和生物炭改良土壤技术提供理论依据。

关键词: 北方寒区; 生物炭; 土壤导热率; 土壤体积热容量; 土壤热扩散率

中图分类号: S152.8; S156.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0298-08

Influence of Biochar on Soil Thermal Properties in Northern Cold Regions

MA Xiaosong[1]　FU Qiang[1,2]　XU Shuqin[1,2]　LI Tianxiao[1]　HOU Renjie[1]　YU Xintong[1]

(1. *School of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *Key Laboratory of High Efficiency Use of Agricultural Water Resources*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In order to reveal the influence of biochar on soil thermal properties, the farmland soils with different biochar contents were studied in northern cold regions. Soil moisture levels were set at 0%, 8%, 16%, 24%, 32% and 40%, respectively. The variation characteristics of soil thermal conductivity, thermal diffusivity and thermal capacity within the temperature range of 15 ~ -15℃ were measured by ISOMET2114, and the response mechanism of soil thermal characteristic parameters to soil hydrothermal regime was investigated with different biochar contents. Results showed that with the increase of soil moisture, the soil thermal properties had increasing trend while freezing and non-freezing. Under the condition of 3℃ and biochar content of 0 t/hm^2, the soil thermal conductivity was increased by 0.141 4 W/(m·K) and 0.580 5 W/(m·K), respectively, with the soil moisture content at 24% and 32%, compared with that at 16%. With the increase of biochar, the soil thermal conductivity and thermal diffusivity were decreased, and the thermal capacity was decreased while non-freezing and increased while freezing. Under the condition of -3℃ and moisture content of 32%, the soil thermal capacity was increased by 0.16 J/(cm^3·K) and 0.20 J/(cm^3·K), respectively, with the biochar content of 4 t/hm^2 and 6 t/hm^2, compared with that of 0 t/hm^2. There was a logarithmic relationship between soil thermal conductivity and moisture content, a linear relationship between thermal capacity and moisture content, and a quadratic relationship between thermal diffusivity and moisture content. The effects of biochar on thermal properties of frozen and non-frozen soils were studied with different soil

收稿日期: 2019-03-28　修回日期: 2019-06-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51679039)和国家杰出青年科学基金项目(51825901)

作者简介: 马效松(1987—),男,博士生,主要从事冻融土壤水热互作机理研究,E-mail: 18800430226@163.com

通信作者: 徐淑琴(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事冻融土壤水热互作机理研究,E-mail: 693079197@qq.com

moisture contents, and the influence of biochar on the thermal properties of frozen soils was firstly analyzed using freezing characteristic curve, which provided theoretical basis for accurately describing the soil thermal condition and applying biochar to improve the soil in northern cold region.

Key words: northern cold region; biochar; soil thermal conductivity; soil thermal capacity; soil thermal diffusivity

0　引言

土壤热性能参数决定土壤中热量的储存、传导和分布，主要受土壤质地、容重、水分含量的影响[1]，其测量方法主要有稳态法和非稳态法[2]。针对非冻结土壤热特性参数变异特征，苏李君等[3]研究了砂土、壤土、粘土在不同含水率水平下的导热率变化规律；ABU-HAMDEH[4]研究发现，在含水率较高情况下，粘土体积热容量增长速率大于砂土；KIM 等[5]研究了土壤水分特征曲线和导热率的关系，发现土壤吸力与导热率呈双线性关系；MENGISTU 等[6]以南非砂土为研究对象，探究 5 种温度和 5 种含水率交叉作用下土壤热性能参数变化规律。针对冻结状态下土壤热性能变化规律，WANG 等[7]研究了单向冻结条件下土壤导热率、体积热容量、热扩散率在垂直空间上的波动性；ORAKOGLU 等[8]通过室内冻融循环试验，探究冻融循环次数对土壤导热率的影响，进而构建土壤导热率对冻融次数的响应函数；HU 等[9]借助 3 种模型分别计算冻土导热率和冻结深度，发现 Luo 模型适用于冻结土壤；GORI 等[10]在前人研究基础上，提出一个无经验常数模型来计算冻土导热率，模拟精度较高。

生物炭能够显著调节土壤理化性能及生态效应，具有减少 CO_2 等温室气体排放[11]、改善土壤透气性[12]、增强土壤抗侵蚀能力[13]、提高土壤保水性[14]、调节土壤微生物群落结构[15]、促进土壤养分吸收[16]、吸附土壤重金属[17]等作用。然而，针对生物炭对土壤热特性调控效果的研究较少，其中 ZHI 等[18]借助室内模拟试验，探究不同碳水组合条件下华南红壤土热特性参数的变化特征；ZHANG 等[19]通过大田试验，研究生物炭覆盖调控耕作模式下土壤导热率和反射率的变化规律；JIANKUN 等[20]研究作物生育期内生物炭对土壤导热率、体积热容量的调节效果。以上研究大多侧重于作物生长期生物炭对土壤热性能调节的影响，而对于非生长季冻结土壤热特性调控研究相对欠缺。

本文针对北方寒区农田土壤，设置 3 种生物炭施加模式、6 种含水率水平，分别测定冻结和非冻结条件下的土壤导热率、体积热容量、热扩散率，进而分别构建土壤热特性参数响应函数。本研究成果将有助于揭示生物炭对土壤热特性参数影响机理，同时也为农业土壤水热调控和准确掌握寒区农田土壤热量变化机制提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

本试验试验地点位于哈尔滨市东北农业大学冻土试验场，该区域地理坐标 126°45′32″E，45°44′41″N。气候属于温带大陆性季风气候，冬长夏短，春秋季节气温升降变化快，全年平均降水量为 570 mm，夏季为集中降水期，占全年降水量的 60% 以上，全年平均蒸发量为 1 500 mm。夏季最高月平均气温为 28℃，冬季最低月平均气温为 -24℃。该区域地下水埋深 6.8 m，无霜期 145 d，最大冻结深度 1.95 m。

1.2　试验设计

本研究所用生物炭为辽宁省锦州市生物炭制备厂生产，生物炭原料为秸秆，在高温 500 ~ 600℃ 裂解而成，将其磨细过 2 mm 筛备用，生物炭理化性质见表 1。结合当地生产实践经验，采用随机区组设计，生物炭施加设置 3 个水平：BC0（0 t/hm^2）、BC1（4 t/hm^2）、BC2（6 t/hm^2），每个水平 3 次重复，共计 9 个试验小区。每个小区埋设 ET100 型土壤温度和水分传感器，自动测定 10 cm 土层水热状况。同时，埋设冻土器 1 根，每天 09:00 人工记录土壤冻深值。试验前期，将生物炭抛撒于地表，并将土壤翻耕处理，确保生物炭与土壤充分混合，试验区土壤理化性质见表 2。在经历一个冻融期后，借助环刀在每个试验小区表层 0 ~ 10 cm 土层处取原状土，将土样干燥，并用注水法将原状土壤配制成含水率为 0%（干燥土）、8%、16%、24%、32%、40% 试样。将土样覆

表 1　生物炭理化性质

Tab. 1　Physical and chemical properties of biochar

参数	容重/（g·cm^{-3}）	比表面积/（m^2·g^{-1}）	pH 值	电导率/（dS·m^{-1}）	碳质量比/（g·kg^{-1}）	氮质量比/（g·kg^{-1}）	硝态氮质量比/（mg·kg^{-1}）	铵态氮质量比/（mg·kg^{-1}）	导热率/（W·m^{-1}·K^{-1}）	体积热容量/（J·cm^{-3}·K^{-1}）
数值	0.4	84.3	9.7	1.2	603	6.4	0.7	1.6	0.137	2.4

盖塑料保鲜膜防止水分散失,随后将土样正面放置 24 h,倒置 24 h 以确保水分在土样中分布均匀。在人工气候室中分别测定 -3、-6、-9、-12、-15℃冻结土壤热特性参数,并测定 0、3、6、9、12、15℃非冻结土壤的热特性参数。在测量过程中用塑料薄膜覆盖土样,防止水分散失。

表 2 试验土壤理化性质

Tab. 2 Physical and chemical properties of experimental soil

参数	容重/($g\cdot cm^{-3}$)	总孔隙度/%	饱和导水率/($cm\cdot min^{-1}$)	碳质量比/($g\cdot kg^{-1}$)	氮质量比/($g\cdot kg^{-1}$)	硝态氮质量比/($mg\cdot kg^{-1}$)	铵态氮质量比/($mg\cdot kg^{-1}$)	塑限含水率/%	液限含水率/%
数值	1.42	46.42	0.06	2.1	0.84	84.2	46.5	24	35

1.3 试验方法

土壤热性能参数测定:利用 ISOMET2114 型热性能分析仪测定土壤导热率、体积热容量、热扩散率。土壤团聚体含量测定:分别采用干筛法和湿筛法[21-22]测定土壤大于 0.25 mm 机械稳定性团聚体含量和大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量。土壤容重和孔隙率测定:用干燥法测定土壤容重,并计算总孔隙度。土壤冻结特征曲线测定:采用核磁共振法[23-24]。

1.4 数据处理方法

利用 Excel 2013 记录试验数据,同时,用 SPSS 23.0 分析数据,进而借助 LSD 法检验土壤导热率、体积热容量、热扩散率的差异显著性($P<0.05$),最后利用 SigmaPlot 12.5 软件绘图。

2 结果与分析

在研究中,不同生物炭处理条件下,土壤冻融期温度和水分变化规律见图 1。冻融期内,BC0、BC1、BC2 土壤温度变化趋势整体一致,但生物炭施加降低土壤温度波动性,即 BC1、BC2 土壤在冻结期温度降低速度缓慢,在融化期温度升高速度缓慢;同时,不同生物炭处理条件下土壤含水率变化趋势整体一致,但 BC1、BC2 土壤含水率整体高于未施加生物炭土壤。基于土壤冻深实测数据,将土壤冻融过程主要划分为 3 个阶段[25-26],即:快速冻结期(2017 年 11 月 1 日—2018 年 1 月 15 日),该时段土壤温度迅速降低,土壤平均冻结速率为 1.1 cm/d,BC2、BC1 处理条件下土壤平均温度相对于 BC0 高出 2.57℃和 1.31℃;稳定冻结期(2018 年 1 月 15 日—2018 年 3 月 23 日),该阶段冻结速率相对减慢,平均冻结速率为 0.6 cm/d,BC2、BC1 处理条件下土壤平均温度相对于 BC0 高出 1.64℃和 0.74℃;融化期(2018 年 3 月 23 日—2018 年 5 月 20 日),此时土壤开始融化,土壤平均融化速率为 2.2 cm/d,BC0 处理条件下土壤平均温度相对于 BC1、BC2 分别高出 1.03℃和 1.84℃。

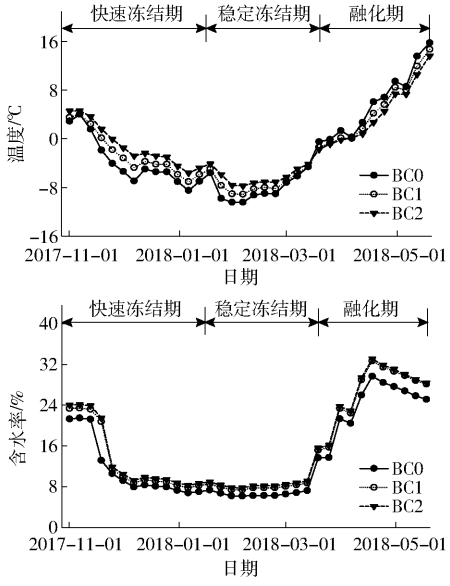

图 1 冻融期不同生物炭处理条件下土壤水热变化曲线

Fig. 1 Changing curves of soil water and heat under different biochar treatment conditions during freezing-thawing period

2.1 非冻结土壤热特性参数

当土壤温度大于 3℃后其热性能参数几乎不发生变化[2],本研究中,选取 3℃作为典型温度,不同生物炭处理条件下土壤热特性参数变化特征见图 2(图中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同)。由图 2a 可知,土壤导热率随体积含水率增加呈上升趋势,并且在体积含水率在 0% ~32% 之间时,导热率增加速度较快,且在体积含水率在 24% ~32% 范围时,提升幅度最大。而在体积含水率在 32% ~40% 时,导热率增加速度缓慢,此阶段土壤含水率接近饱和,水分对土壤导热率影响减弱。与此同时,随生物炭施用量增加,土壤导热率整体水平呈现降低趋势,具体比较可知,生物炭含量为 0 t/hm^2,含水率为 24%、32% 时,土壤导热率相对于含水率为 16% 时分别增加 0.141 4、0.580 5 W/(m·K)。此外,在 BC1 处理条件下,土壤体积含水率为 0%、8%、16%、24%、32%、40% 水平时,其导热率分别相对于 BC0 降低 0.036 8、0.134 1、0.131 4、0.154 7、0.132 5、0.137 2 W/(m·K)。同理,在 BC2 处理条件下,其各个含水率水平下土壤导热率分别相对于 BC1 和 BC0 呈现不同程度的降低趋势。

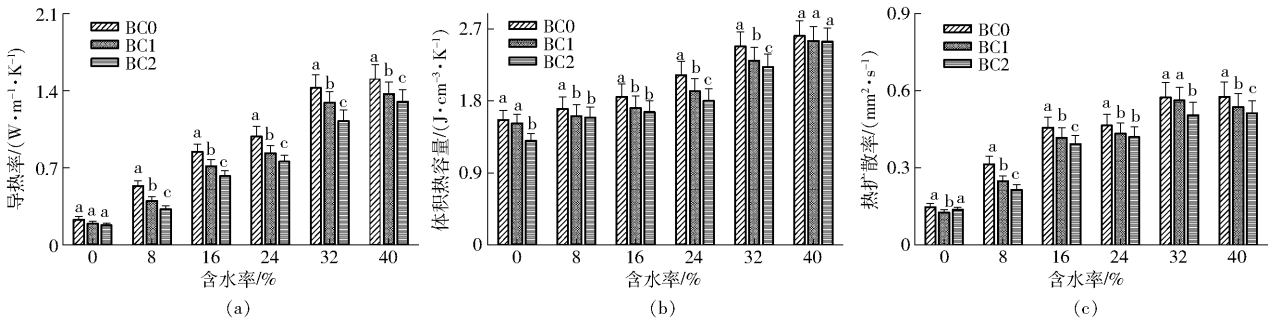

图 2　不同生物炭含水率处理条件下未冻结土壤热性能参数

Fig. 2　Thermal properties of unfrozen soil under different biochar moisture content treatment conditions

由图 2b 可知，土壤体积热容量随体积含水率增加同样表现出增加趋势，在体积含水率为 24% ~ 32% 时，土壤体积热容量同样提升幅度最大。同理，在体积含水率相同条件下，随生物炭施用量增加，体积热容量呈现下降趋势，土壤体积含水率为 0%、8%、16%、24%、32%、40% 时，BC1 体积热容量分别相对于 BC0 降低 0.042 3、0.090 0、0.140 0、0.202 0、0.180 0、0.062 3 J/(cm³·K)，并且 BC2 处理条件下，其降低效果更显著。

同理，分析土壤热扩散率和体积含水率之间关系可知(图 2c)，随土壤含水率水平提升，土壤热扩散表现出逐渐提升趋势。同样，随生物炭含量增加，进一步减弱土壤热扩散效应。综上所述，含水率与非冻结土壤热特性参数呈正相关关系，生物炭与其呈负相关关系。

2.2　冻结土壤热特性参数

当土壤温度介于 0 ~ -3℃之间时，冻结土壤中水分相变最剧烈[27]，因此，进一步探究 -3℃冻结条件下土壤热特性参数变化规律，如图 3 所示。整体分析可知，冻结条件下土壤导热率随体积含水率增加而递增，其变化趋势与非冻结状态下一致，但是其整体导热率水平显著提升。在含水率为 0%、8%、16%、24%、32%、40% 时，BC0 在冻结状态下与非冻结状况相比土壤导热率增加 -0.005 5、0.190 3、0.154 4、0.465 0、0.363 9、0.405 0 W/(m·K)。同理，在含水率为 8% ~ 40% 时，BC1、BC2 与 BC0 相同，也随土壤冻结，导热率显著增大，这主要是由于冰与水热性能差别较大。此外，随生物炭施用量增加，冻结土壤导热率整体水平也呈现下降趋势。当含水率为 0%、8%、16%、24%、32%、40% 时，BC1 处理条件下土壤导热率相对于 BC0 分别降低 0.036 7、0.135 5、0.086 0、0.238 0、0.177 7、0.188 0 W/(m·K)。

此外，由图 3b 可知，不同处理条件下土壤体积热容量随体积含水率增加而递增，并且在含水率为 24% ~ 32% 之间时，土壤体积热容量提升幅度最大。与此同时，不同生物炭处理条件下冻结土壤体积热容量相对于未冻结情况变小。其中，在含水率为 0%、8%、16%、24%、32%、40% 时，BC0 在冻结状态下与非冻结状态相比，土壤体积热容量降低 0.106 3、0.200 0、0.282 0、0.522 0、0.780 0、0.892 3 J/(cm³·K)。同理，在冻结状态下 BC1、BC2 土壤体积热容量同样相对于未冻结状表现为降低趋势。然而，当含水率为 0% 时，随生物炭含量增加，冻结土壤体积热容量呈下降趋势；当在含水率为 8%、16%、24%、32%、40% 水平时，随生物炭含量增加，体积热容量呈递增趋势，在 -3℃条件下，含水率为 32%，生物炭含量为 4 t/hm² 和 6 t/hm² 时，土壤体积热容量相对于 0 t/hm² 水平分别增加 0.16、0.20 J/(cm³·K)，与未冻结土壤表现出相反变化规律。

由图 3c 可知，土壤热扩散率变化趋势与土壤导热率相似，同样表现出随含水率提升，其热扩散能力显著提升，并且随生物炭施加量增加，其热扩散效果

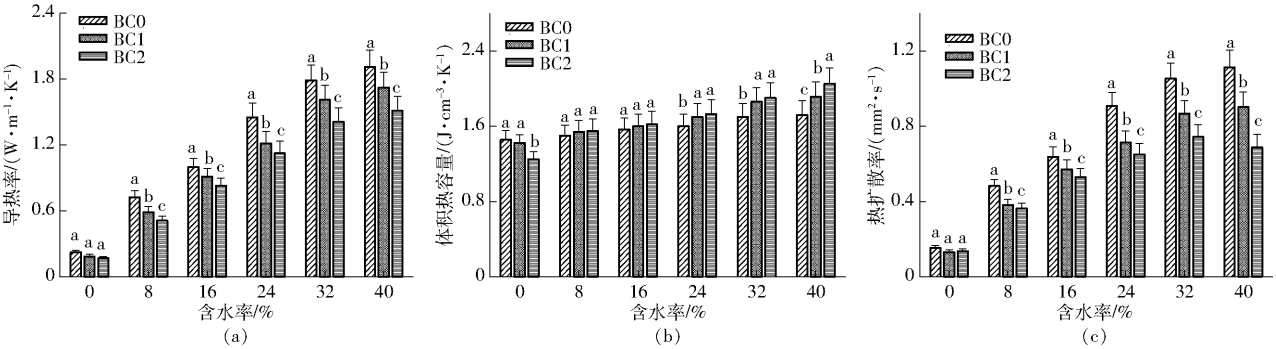

图 3　不同生物炭含水率处理条件下冻结土壤热性能参数

Fig. 3　Thermal properties of frozen soil under different biochar moisture content treatment conditions

有所减弱。另外,在冻结情况下,不同处理条件下土壤热扩散能力相对于未冻结状态大幅度提升。

2.3 温度对土壤热特性参数的影响

上述研究表明,生物炭对冻结与非冻结土壤热特性参数具有显著调控效果。因此进一步研究不同生物炭处理条件下,土壤导热率(TBC0、TBC1、TBC2 为 BC0、BC1、BC2 的导热率)和体积热容量(HBC0、HBC1、HBC2 为 BC0、BC1、BC2 的体积热容量)随温度变化规律,如图 4 所示。当土壤含水率为 0% 时,土壤导热率随温度变化幅度较小,在温度为 15 ~ -15℃之间时,随生物炭含量增加,土壤导热率和体积热容量整体水平均呈现降低趋势。

由图 4b 可知,当土壤含水率为 8% 时,随温度降低,土壤导热率呈增加趋势,体积热容量呈降低趋势。BC0、BC1、BC2 处理条件下,导热率显著升高的温度区间与体积热容量显著降低的温度区间均为 3 ~ -6℃。但随土壤生物炭含量增加,土壤导热率整体水平有所降低,土壤体积热容量在 0℃以上时,整体水平呈现降低趋势,在 0℃以下时,其整体水平则表现升高趋势。

同理,当土壤含水率在 16%、24%、32%、40% 水平下,随温度降低,土壤导热率呈现增加趋势,并且在含水率为 40% 时,其提升幅度最大。并且随含水率增加,导热率变化显著温度区间不断扩大,由图 4f 可知,导热率变化显著的温度区间最大,为 3 ~ -15℃。随土壤生物炭含量增加,导热率整体水平有所降低;随温度降低,土壤体积热容量呈现降低趋势,在含水率为 40% 时,其降低幅度最大。随含水率增加,体积热容量变化显著的温度区间不断扩大,同样在含水率为 40% 时,体积热容量变化显著的温度区间最大,为 3 ~ -15℃。此外,随生物炭含量增加,土壤体积热容量在 0℃以上时,整体水平呈现降低趋势,在 0℃以下时整体水平则表现出升高趋势。

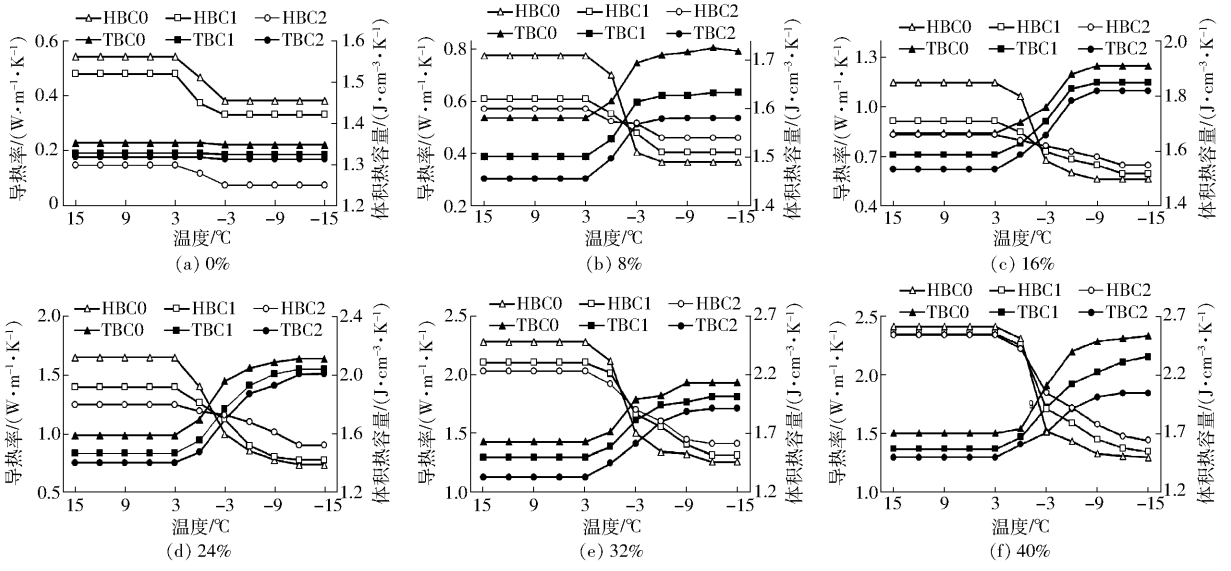

图 4 不同生物炭温度处理条件下土壤热性能参数变化曲线

Fig. 4 Changing curves of soil thermal properties under different biochar temperature treatment conditions

2.4 生物炭对土壤性质的影响

2.4.1 冻结特征曲线

由图 5 可知,不同生物炭处理条件下土壤未冻水含量均随温度降低而降低。当冻结温度低于 -13℃后,BC2、BC1、BC0 处理条件下土壤未冻水含量趋于稳定,并且分别保持在 14.8%、12.6%、10.5%。由此可知,在冻结过程中,施加生物炭能够增加土壤中未冻水含量,在土壤温度为 -3℃时,BC2、BC1 处理条件下土壤未冻水含量相对于 BC0 土壤增加 15.0 个百分点和 11.0 个百分点。此外,随温度降低,3 种土壤未冻水含量减小速率也具有显著差异,其中,BC0 土壤试样在 0 ~ -3℃冻结速率较快,土壤未冻水含量减少 25.9 个百分点;BC1 土壤试样在 0 ~ -5℃冻结速率较快,土壤未冻水含量减少 23.0 个百分点;同样,BC2 土壤试样在 0 ~ -5℃冻结速率较快,土壤未冻水含量减少 19.0 个

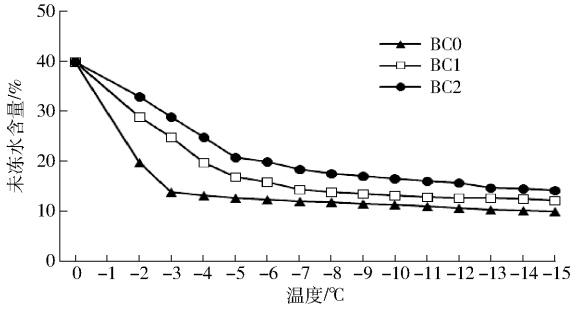

图 5 不同生物炭处理条件下土壤冻结特征曲线

Fig. 5 Soil freezing characteristic curves under different biochar treatment conditions

百分点。

2.4.2　土壤物理特性

施加生物炭不仅影响冻结过程中土壤未冻水含量变化，还显著影响土壤结构性质，不同生物炭处理条件下土壤物理特性如表 3 所示。本研究中，施加生物炭通过调节土壤孔隙结构，使土壤总孔隙度增加，降低土壤容重，提高机械稳定性团聚体含量和水稳性团聚体含量。具体分析可知，施加生物炭后，BC1、BC2 处理条件下，土壤容重相对于 BC0 降低 5.6% 和 9.2%；而 BC1、BC2 处理条件下，土壤总孔隙度相对于 BC0 提高 3.01 个百分点和 4.9 个百分点；同理，BC1、BC2 处理条件下，大于 0.25 mm 土壤机械稳定性团聚体含量相对于 BC0 提高 5.9 个百分点和 9.6 个百分点；此外，生物炭调控作用也显著提升大于 0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量。

表 3　不同生物炭处理条件下土壤物理特性

Tab.3　Physical properties of soil treated with different biochar

处理	容重/($g\cdot cm^{-3}$)	总孔隙度/%	大于 0.25 mm 机械稳定性团聚体含量/%	大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量/%
BC0	1.42	46.42	82.5	33.5
BC1	1.34	49.43	88.4	39.1
BC2	1.29	51.32	92.1	43.4

3　讨论

本研究中，分别构建非冻结土壤（3℃）与冻结土壤（−3℃）热特性参数与含水率之间响应函数，结果如图 6 所示。土壤导热率和含水率呈对数函数关系（$R^2>0.89$），体积热容量和含水率呈线性函数关系（$R^2>0.93$），而热扩散率与含水率呈二次函数关系（$R^2>0.95$），二者之间均表现出较强的相关性，但施加生物炭能够减弱土壤导热率、体积热容量、热扩散率与含水率之间的相关性。

3.1　非冻结土壤热性能影响因素分析

土壤热特性参数随含水率增加而递增。土壤由固、液、气三相组成，空气导热率（0.024 W/（m·K））极低，土壤水分增加填充空气占据的孔隙空间，有助于土壤颗粒之间形成水桥，从而提高颗粒之间接触面积，进而提高导热率。然而，由于水体积热容量较大（4.2 J/（cm^3·K）），是土壤颗粒体积热容量 4 倍，所以土壤含水率增加，体积热容量显著增大。此研究结论与文献[1,3,6]一致，但本研究通过试验发现，土壤热特性参数在含水率为 24% ~32% 之间增加较大，可知土壤热特性参数在塑限含水率和液限含水率之间提升幅度显著。

施加生物炭后，非冻结土壤热特性参数呈降低趋势。由于生物炭导热率较小（0.137 W/（m·K）），且具有较高的比表面积和孔隙度，其施加到土壤中会增大土壤总孔隙度，增加机械稳定性团聚体含量和水稳性团聚体含量，因此，土壤单位体积内孔隙直径增大、气体增多，阻碍热量传递，进而降低土壤导热率；然而，生物炭施加会降低土壤干密度，而非冻结土壤体积热容量是关于土壤干密度的递增函数，因此，体积热容量呈降低趋势；此外，生物炭能够增加土壤斥

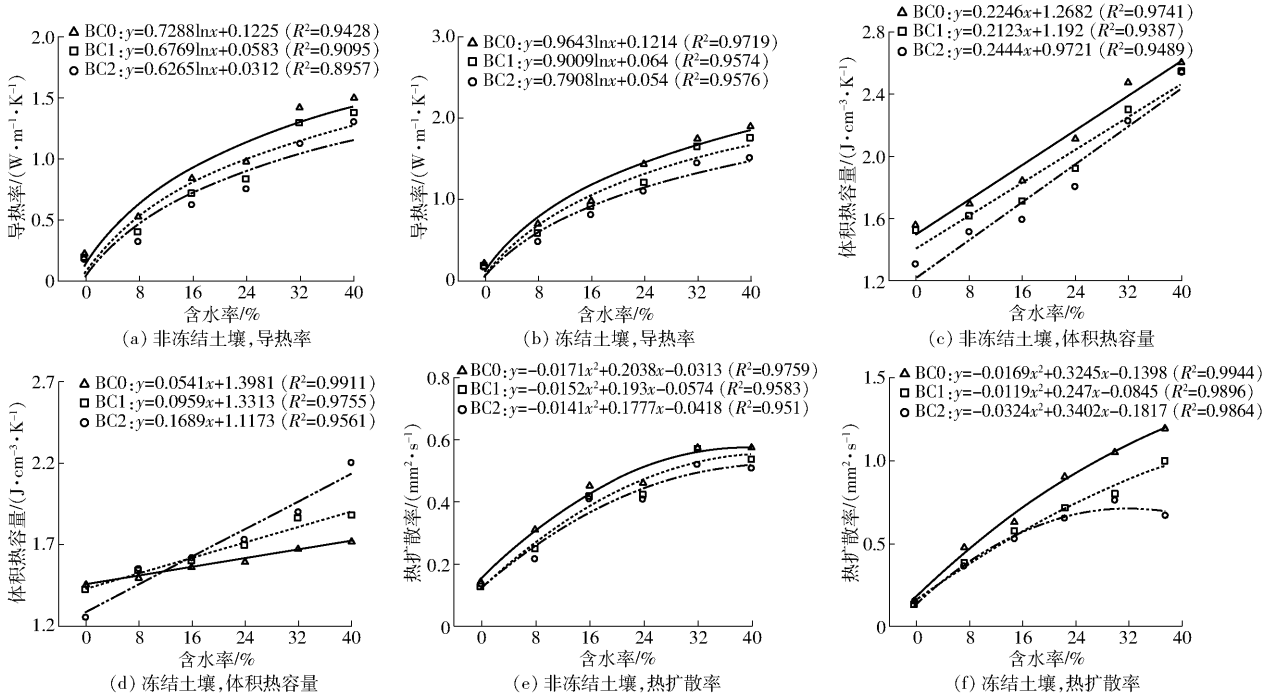

图 6　不同生物炭处理条件下土壤热性能相关性分析

Fig. 6　Correlation analysis of soil thermal properties under different biochar treatments

水性,通过增大土壤水分与固相物质接触角,从而阻碍热量在土壤水分和固态物质间传导。并且生物炭能够降低土壤温度波动性,在温度调节上有“削峰填谷”作用,因此,土壤热扩散率降低。ZHI 等[18]和 ZHANG 等[19]也通过试验发现生物炭具有降低非冻结土壤热性能参数的作用,但以上学者研究施加生物炭对土壤热特性参数影响规律时温度条件恒定,此外,未考虑冻结条件下土壤热特性参数变化规律,本研究通过试验,验证在 15 ~0℃范围内施加生物炭后,土壤热特性参数均呈降低趋势。

3.2 冻结土壤热性能影响因素分析

不同处理条件下,冻结土壤热性能发生显著变化,由于水与冰热性能差别较大,此外,温度变化影响土壤颗粒中原子振动能变化[28],进而导致粒子储存或传递能量的能力也发生变化。冻结土壤热特性参数随含水率增加而递增,在含水率为 0%(干土)时,冻结状况下导热率低于未冻结土壤,由于热量传递是分子运动,温度降低导致土壤颗粒中分子振动频率降低,因此,导热率降低。但由图 4 可以看出,在 8% ~40% 含水率范围内,冻结土壤导热率显著大于未冻结土壤,主要是由于温度降低,土壤中液态水转化为固态冰,冰导热率(2.16 W/(m·K))较高,是水的 4 倍,所以冻结土壤导热率增大。然而,冰热扩散率是水的 9 倍,所以土壤冻结会导致热扩散率增大。此外由于冰体积热容量(2.14 J/(cm^3·K))小于水,在冻结过程中土壤体积热容量降低。TIAN 等[29]和 ALEKSYUTINA 等[30]在研究冻结土壤热特性参数时,也得出类似结论,而本文在上述研究基础上,考虑施加生物炭对土壤冻结过程中热性能参数的影响。

随生物炭含量增加,土壤导热率和热扩散率呈降低趋势,与未冻结土壤一致。由图 1 可以看出,施加生物炭后,在冻融期土壤温度变化速度减慢,其波动性较低,这也验证了施加生物炭降低冻结土壤热扩散率的结论。然而,冻结土壤体积热容量随生物炭含量增加呈降低趋势,由土壤冻结特征曲线可知,生物炭施加可以显著增加土壤中未冻水含量,并且水体积热容量约是冰的 2 倍,因此,在冻结条件下生物炭可以增大土壤体积热容量。

综上所述,本文探索施加生物炭对北方寒区农田土壤热特性参数影响规律,引入冻结特征曲线,分析施加生物炭对冻结土壤热特性参数影响机理,结果发现:随生物炭含量增加,土壤导热率和热扩散率呈降低趋势,在冻结情况下,体积热容量呈升高趋势,在非冻结情况下则呈降低趋势。考虑到试验复杂性,为更有效揭示生物炭对土壤热性能参数影响规律,还应进一步通过数值模拟方法进行深入研究。

4 结论

(1)冻结土壤导热率和热扩散率相对于非冻结土壤有所增大,然而,土壤体积热容量呈降低趋势。不同生物炭调控下,土壤热特性参数均随含水率增加而递增,在 3℃条件下,生物炭含量为 0 t/hm^2、含水率为 24% 和 32% 时,土壤导热率相对于含水率为 16% 时分别增加 0.141 4、0.580 5 W/(m·K)。土壤导热率与含水率呈对数函数关系,体积热容量与含水率呈线性函数关系,而热扩散率则与含水率呈二次函数关系。

(2)施加生物炭能够有效改变土壤结构性质,增大土壤总孔隙度,提高机械稳定性团聚体含量和水稳性团聚体含量,降低土壤容重。大田试验中,施加生物炭能提高土壤持水能力,增加土壤 10 cm 处水分含量,降低土壤温度波动性。通过研究还发现,生物炭能够延迟土壤水分冻结,改变土壤冻结特征曲线,在 0 ~ -15℃条件下,BC1、BC2 土壤未冻水含量显著提高。

(3)在冻结与非冻结条件下,土壤导热率和热扩散率均随生物炭含量增加而降低。然而,对于非冻结土壤体积热容量随生物炭含量增高而降低,对于冻结土壤体积热容量随生物炭含量增加而增大,表现出与非冻结土壤相反的趋势。其中,在含水率为 32% 时,BC1 和 BC2 土壤体积热容量相对于 BC0 增加 0.16、0.20 J/(cm^3·K)。

参 考 文 献

[1] 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.
LI Yi, SHAO Ming'an, WANG Wenyan, et al. Influence of soil textures on the thermal properties[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4):62 -65. (in Chinese)

[2] KURZ D, ALFARO M, GRAHAM J, et al. Thermal conductivities of frozen and unfrozen soils at three project sites in northern Manitoba[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017,140 :38 -40.

[3] 苏李君, 王全九, 王铄,等. 基于土壤物理基本参数的土壤导热率模型[J]. 农业工程学报,2016, 32(2):127 -133.
SU Lijun, WANG Quanjiu, WANG Shuo, et al. Soil thermal conductivity model based on soil physical basic parameters[J]. Transactions of the CSAE,2016, 32(2):127 -133. (in Chinese)

[4] ABU-HAMDEH N H. Thermal properties of soils as affected by density and water content[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(1):97 -102.

[5] KIM D, KIM G, BEAK H, et al. Relationship between thermal conductivity and soil-water characteristic curve of pure bentonite-based grout [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 84:1049 – 1055.
[6] MENGISTU A G, VAN RENSBURG L D, MAVIMBELA S S W, et al. The effect of soil water and temperature on thermal properties of two soils developed from aeolian sands in South Africa[J]. CATENA, 2017, 158:184 – 193.
[7] WANG T,ZHOU G, JIANG X, et al. Assessment for the spatial variation characteristics of uncertain thermal parameters for warm frozen soil[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 134:484 – 498.
[8] ORAKOGLU M E, LIU J, NIU F, et al. Experimental and modeling investigation of the thermal conductivity of fiber-reinforced soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108:824 – 832.
[9] HU G, ZHAO L, WU X, et al. Comparison of the thermal conductivity parameterizations for a freeze-thaw algorithm with a multi-layered soil in permafrost regions[J]. CATENA, 2017, 156:244 – 251.
[10] GORI F, CORASANITI S. New model to evaluate the effective thermal conductivity of three-phase soils[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013, 47:1 – 6.
[11] WOOLF D, AMONETTE J E, STREET-PERROTT F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change[J]. Nature Communications, 2010, 1(5):1 – 9.
[12] LIU Zuxiang, CHEN Xiaomin, JING Yan, et al. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil[J]. CATENA, 2014, 123:45 – 51.
[13] OUYANG L,WANG F,TANG J, et al. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties[J]. Journal of Soil Science & Plant Nutrition, 2013, 13(4):991 – 1002.
[14] BAYABIL H K, STOOF C R, LEHMANN J C, et al. Assessing the potential of biochar and charcoal to improve soil hydraulic properties in the humid ethiopian highlands: the anjeni watershed[J]. Geoderma,2015, 243 – 244:115 – 123.
[15] FOSTER E J, HANSEN N, WALLENSTEIN M, et al. Biochar and manure amendments impact soil nutrients and microbial enzymatic activities in a semi-arid irrigated maize cropping system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 233: 404 – 414.
[16] ROBERTSON S J, RUTHERFORD P M, LOPERZ-GUTIERREZ, et al. Biochar enhances seedling growth and alters root symbioses and properties of sub-boreal forest soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(2):329 – 340.
[17] O'CONNOR D, PENG T, ZHANG J, et al. Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: a review of in situ field trials[J]. Science of the Total Environment, 2018, 619 – 620:815 – 826.
[18] ZHI P L, JIE N X. Mechanisms of biochar effects on thermal properties of red soil in south China[J]. Geoderma,2018, 323: 41 – 51.
[19] ZHANG Q, WANG Y, WU Y, 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.
[20] JIANKUN Z, TUSHENG R, QINGZHONG Z, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal properties in the north China plain[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(5):1157 – 1166.
[21] 李倩倩,许晨阳, 耿增超, 等.生物炭对塿土土壤容重和团聚体的影响[J].环境科学,2019,40(7):1 – 14.
LI Qianqian, XU Chenyang, GENG Zengchao,et al. Impact of biochar on soil bulk density and aggregates of Lou soil[J]. Environmental Science, 2019, 40(7):1 – 14. (in Chinese)
[22] 陈超, 李娟, 李劲彬,等. 生物炭和秸秆施用对复配土壤物理性状及团粒结构的影响[J].西部大开发, 2017,2(2):36 – 40,49.
CHEN Chao, LI Juan, LI Jinbin, et al. Effect of biological carbon and straw on physical properties and aggregate structure of compound soil[J]. Western Development, 2017,2(2):36 – 40,49. (in Chinese)
[23] 马田田,韦昌富,周家作,等. 土体的冻结特征曲线和持水特性[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 1):172 – 177.
MA Tiantian, WEI Changfu, ZHOU Jiazuo, et al. Freezing characteristic curves and water retention characteristics of soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015, 37(Supp. 1):172 – 177. (in Chinese)
[24] 陈晓飞,都洋,马巍,等. 养分含量对土壤冻融特征曲线的影响[J]. 冰川冻土, 2004, 26(4):440 – 448.
CHEN Xiaofei, DU Yang, MA Wei, et al. Effect of soil nutrient on the characteristic curves of soil freezing and thawing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(4):440 – 448. (in Chinese)
[25] 付强,侯仁杰,王子龙,等. 积雪覆盖下土壤热状况及其对气象因素的响应研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(7): 154 – 161.
FU Qiang, HOU Renjie, WANG Zilong, et al. Soil thermal regime under snow cover and its response to meteorological factors [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):154 – 161. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20150723&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/ j. issn. 1000-1298. 2015. 07. 023. (in Chinese)
[26] 付强,侯仁杰, 王子龙,等. 冻融土壤水热迁移与作用机理研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(12):100 – 109.
FU Qiang, HOU Renjie, WANG Zilong, et al. Soil moisture-heat transfer and its action mechanism of freezing and thawing soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(12):100 – 109. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20161214&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 12. 014. (in Chinese)
[27] KURYLYK B L, WATANABE K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils[J]. Advances in Water Resources, 2013, 60:160 – 177.
[28] BOVESECCHI G, COPPA P. Basic problems in thermal-conductivity measurements of soils[J]. International Journal of Thermophysics, 2013,34(10):1962 – 1974.
[29] TIAN Z, LU Y, HORTON R, et al. A simplified devries-based model to estimate thermal conductivity of unfrozen and frozen soil[J]. European Journal of Soil Science, 2016, 67(5):564 – 572.
[30] ALEKSYUTINA D M, MOTENKO R G. The effect of soil salinity and the organic matter content on the thermal properties and unfrozen water content of frozen soils at the west coast of baydara bay[J]. Moscow University Geology Bulletin, 2016, 71(3): 275 – 279.