

不同调控模式下寒区土壤物理结构与水力特性改良研究

付强^{1,2} 石净¹ 李天霄^{1,2} 侯仁杰^{1,2}

(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有效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探究季节性冻土区冻结前后施加生物炭和秸秆对农田土壤的改良效果,选取黑土作为研究对象,基于田间试验,设置4种不同调控措施(BL:空白对照;CLS:施用生物炭;JLS:施用秸秆;CJLS:联合施用),分析土壤团聚体稳定性、孔径分布特征、土壤水分特征曲线、土壤累计入渗量、饱和导水率 K_{sat} 的变化,在此基础上,探究土壤持水性、导水性等土壤物理特性变异特征。结果表明,施用生物炭和秸秆有效抑制冻融循环作用对土壤结构的不利影响,有效保持土壤团聚体稳定性。施加外源生物质材料改善土壤孔隙分布,在冻结前期增加中间段孔径(0.3~100 μm)比例,在外源生物质材料和冻融交替作用双重影响下,增加中间段孔径比例19.05%~35.04%,增加土壤空隙(>100 μm)比例4.33%~16.22%,降低极微孔径(0~0.3 μm)比例9.09%~18.18%,其中CJLS处理表现最优。在冻结前期,施用生物炭和秸秆增加张力-5 cm条件下60 min的土壤累计入渗量73.68%、60.52%、151.10%,而在融化期,受外源生物质材料冻融老化影响,其发挥的积极效应有所减弱,土壤累计入渗量最高仅增加112.28%。同时,施加生物炭和秸秆提高冻融前后的土壤饱和含水率,增强土壤持水能力,这有助于提高春季土壤抗干旱能力。在外源生物质材料和冻融循环双重作用下植物可用含水率增加,同时冻融前后 K_{sat} 均增加,但融化期CLS和JLS处理与BL的差异逐渐减缓。研究结果对于合理施用生物炭和秸秆资源、揭示改良土壤物理特性响应机制具有重要意义。

关键词: 生物炭; 秸秆; 持水性; 导水性; 土壤结构

中图分类号: S156; S157 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)09-0374-12

OSID:



Improvement of Soil Physical Structure and Hydraulic Characteristics
in Cold Regions by Different Regulation Modes

FU Qiang^{1,2} SHI Jing¹ LI Tianxiao^{1,2} HOU Renjie^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory for High Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: To investigate the effect of applying biochar and straw on the improvement of agricultural soils before and after freezing in seasonal permafrost areas, black soil was selected as the research object, and four different regulation measures (BL: blank control; CLS: application of biochar; JLS: application of straw; CJLS: combined application) were set up based on field experiments to analyze the stability of soil aggregates, pore size distribution characteristics and soil moisture characteristic curves. The results showed that the variation of soil physical properties such as soil water holding capacity and hydraulic conductivity was investigated based on the variation of soil infiltration and saturated hydraulic conductivity (K_{sat}). The results showed that the application of biochar and straw effectively suppressed the adverse effects of freeze-thaw cycles on soil structure, and effectively maintained the stability of soil aggregates. The application of exogenous biomass materials improved soil pore distribution, increased the proportion of intermediate pore size (0.3~100 μm) in the early freezing period, increased the proportion of intermediate pore size 19.05%~35.04%, increased the proportion of soil voids (greater than 100 μm)

收稿日期: 2023-01-19 修回日期: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金区域联合基金项目(U20A20318)、国家自然科学基金面上项目(51279033、52279035)和国家杰出青年科学基金项目(51825901)

作者简介: 付强(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: fuqiang0629@126.com

by 4.33% ~ 16.22%, and decreased the proportion of very small pore size ($0 \sim 0.3 \mu\text{m}$) by 9.09% ~ 18.18% under the combined effect of exogenous biomass materials and freeze-thaw alternation, and with the CJLS treatment performing the best. In the pre-freezing period, the application of biochar and straw increased the cumulative soil infiltration at 60 min under tension -5 cm by 73.68%, 60.52% and 151.10%, while in the thawing period, the positive effect exerted by freeze-thaw aging of exogenous biomass materials was diminished, and the cumulative soil infiltration was increased by a maximum of 112.28% only. Meanwhile, the application of biochar and straw increased the saturated soil water content before and after freeze-thaw and enhanced the soil water holding capacity, which contributed to the improvement of soil drought resistance in spring. The plant available water content was increased under the dual effect of exogenous biomass materials and freeze-thaw cycles, while K_{sat} was increased both before and after freeze-thaw, but the difference between the CLS and JLS treatments and BL were gradually slowed down during the thawing period. The results of the study had important implications for the rational application of biochar and straw resources, revealing the response mechanisms of improved soil physical properties.

Key words: biochar; straw; water retention; water conductivity; soil structure

0 引言

东北地区是气候变化和土壤冻融循环的典型区域,而冻融作用作为一种非生物应力,破坏土壤物理结构,降低土壤持水性、导水性、渗透性等物理属性,从而导致土壤肥力降低,作物产量下降^[1-2]。同时,东北地区还存在严重的缺水干旱问题^[3]。因此,寻找一种有效的调控措施来改善土壤结构、土壤水分动态,以此提高土壤有机质含量和土壤肥力,从而提高干旱土壤的物理、化学、生物修复能力非常重要。

施用外源生物质材料被认为是改善土壤性质和提高粮食产量的有效策略。生物炭作为热解的一种固态产物,具有高孔隙度、高比表面积、强大的吸附能力以及稳定碳源的优势^[4]。以往土壤试验应用中已被证明能够降低土壤容重,增加土壤总孔隙度(Soil total porosity, TP),从而提高保水增肥能力^[5-6];增加饱和导水率和土壤持水能力;改变土壤孔径分布、团聚体分布^[3],增加土壤团聚体稳定性^[7]。另外,秸秆材料能增加土壤有机质含量,改善土壤团粒性质,有机质会提高孔隙度、改变土壤密度,这是直接影响土壤质量的重要因素^[8];而秸秆覆盖可以保留浅层土壤水分,抑制其蒸发。此外,生物炭和秸秆的联合施用有利于增加土壤的毛管孔隙度、通气孔隙度,从而增加土壤的持水能力,减少水分无效流失^[9-10]。以往研究证实外源生物质材料的作用效果与其粒度分布、施加量有关,同时也取决于土壤类型、质地。OBIA等^[11]通过田间条件下研究不同种类生物炭及其粒径对土壤团聚体稳定性、容重、保水性和孔径分布的影响,粒径 $1 \sim 5 \text{ mm}$ 生物炭显著影响壤土的容重,而不同种类生物炭在次年效应降低。WANG等^[12]研究指出,当生物炭孔隙体积较低或土壤质地较好时,生物炭对土壤水分

保持的影响有限,而高剂量($\geq 10 \text{ t/hm}^2$)、大粒径($\geq 1 \text{ mm}$)的高孔隙生物炭可以提高土壤蓄水能力较弱的粗质地土壤的保水性,从而增强土壤在极端水文条件下的恢复能力。同时KINNEY等^[13]研究认为,400 ~ 600℃热解的生物炭具有理想的水文特性(最小疏水性和高田间持水率),其中生物炭的官能团能很好地揭示生物炭的疏水行为,但这无法解释不同热解温度条件下对田间持水率的影响,因此需要进一步研究土壤孔径分布的影响机制。此外,刘燕青等^[14]研究证明,秸秆覆盖减少土壤无效蒸发20% ~ 90%,但随时间尺度变化,效果逐渐减弱。同时,秸秆覆盖提高土壤含水率和作物水分利用效率,降低对播种、出苗的不利影响。

张如鑫等^[15]基于2年田间小区原位冻融试验,探究不同生物炭施加量(15 、 30 t/hm^2 和无施加处理)对冻融期盐渍化土壤物理性质的影响机制,发现生物炭的持水性随生物炭施加时间的增长而增加,同时施加生物炭抑制冻融期土壤温度变幅,生物炭施加量 30 t/hm^2 作用效果显著。XIA等^[16]发现冻融循环老化生物炭对土壤的改良作用减弱。YAO等^[17]通过室内土柱试验,研究不同大小秸秆对土壤的改良效果。研究发现添加秸秆提高土壤质量,增强保墒能力,且秸秆粉碎程度与土壤入渗量和蒸发量呈正相关,与土壤导水性呈负相关。上述研究很好地说明生物炭或秸秆从外源保持土壤养分、改善土壤结构、提高土壤蓄水保墒能力。然而,大部分研究集中于非冻结期,或是揭示单独添加有机质颗粒对冻土物理性质的改善效果。受冻融作用交替影响,冻融前后的土壤物理性质和物理结构产生差异,从而导致联合施用生物炭和秸秆对土壤改良效果并不清晰。

本文依托田间试验,通过测定冻融前后土壤团

聚体稳定性、土壤水分特征曲线、土壤孔径分布、饱和和导水率、累计入渗量,阐述土壤持水性、导水性的变化规律,探究单独施加生物炭、单独施加秸秆、联合施用对季节性冻土区农田土壤物理结构、水力性质的影响,阐明冻融作用对土壤物理性质的响应机制,进一步确定对季节性冻土区土壤物理结构、水力特性产生有利影响的改良剂组合,为优化生物炭和秸秆资源管理、丰富外源生物质材料对土壤改良机制提供实际参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验于黑龙江省哈尔滨市东北农业大学水利综

合试验场(126°43′07″E,45°44′24″N)进行,海拔为139 m,夏季炎热,冬季寒冷干燥,属于中温带大陆性季风气候。试验区域位置概况及试验场地布置如图1所示。试验场年平均气温为3.6℃,夏季平均气温27.9℃,冬季平均气温为-14.2℃,年平均降雪量为23.6 mm,年平均蒸发量1 326 mm。土壤冻结期从10月中旬开始,11月中旬进入稳定冻结期。土壤融化期从次年4月下旬开始,最大冻深为180 cm,整个冻融期有110 d左右是积雪覆盖期。试验区设置在空闲的农田中,地势平坦,夏季主要种植大豆或玉米作物,每年5月末开始翻耕播种,9月末或10月初收获,而在冬季冻融期内为无植被覆盖状态,积雪不作任何处理。

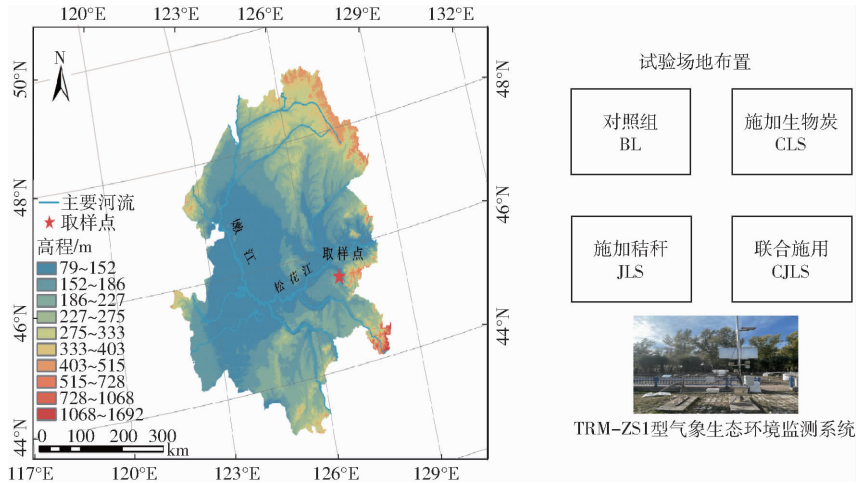


图1 研究区域位置及场地布置示意图

Fig.1 Study area location and site layout map

1.2 试验材料

试验材料按照土壤与去离子水质量比1∶5、生物炭与去离子水质量比1∶10、秸秆与去离子水质量比1∶10制备悬浮混合液,采用pH计(PHS-2F型,力辰科技公司)测定pH值;C、N、H元素含量采用元素分析仪(2400Ⅱ型,PerkinElmer,美国)进行测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾氧

化外加热法测定;生物炭灰分含量采用马弗炉900℃下灼烧4 h后称量测得,秸秆灰分含量采用马弗炉550℃下灼烧4 h后称量测得^[18]。试验秸秆由玉米秸秆粉碎而成,试验生物炭由玉米秸秆在500~600℃厌氧条件下烧制2 h而成,生物炭和秸秆均过2 mm细筛。试验材料基本理化性质如表1所示。

表1 试验材料理化参数

Tab.1 Physical and chemical parameters of test materials

土壤参数	数值	参数	生物炭	秸秆
砂土质量分数/%	49.84±0.83	pH值	9.14±0.10	8.75±0.13
淤泥质量分数/%	35.89±0.71	C质量分数/%	69.60±3.12	46.50±2.19
粘土质量分数/%	17.27±0.48	N质量分数/%	1.28±0.13	1.08±0.21
干密度/(g·cm ⁻³)	1.40±0.011	H质量分数/%	1.93±0.31	4.13±0.18
自然含水率/%	24.30±0.97	灰分质量分数/%	25.18±3.96	8.35±3.41
有机质质量分数/%	25.86±0.53			
pH值	5.76±0.12			

1.3 试验方案与采样

试验于2021年10月—2022年5月进行,田间

试验设置4个试验小区。每个小区为面积25 m²(5 m×5 m)的样地,每一个处理设置3次重复。生

物炭和秸秆于 2021 年秋收后一次性均匀施撒在试验小区的表面,根据生物炭与秸秆的理化特性以及当地农业生产的需要,分别设置 4 种处理:单独施用生物炭 (CLS, 10 t/hm²)、单独施用秸秆 (JLS, 5 t/hm²)、联合施用生物炭与秸秆 (CJLS, 10 t/hm² + 5 t/hm²) 以及自然对照 (BL) 处理,并使用传统农业旋耕机的方式,将生物炭和秸秆与耕层土壤 (0 ~ 30 cm) 混合,使得试验小区各处颜色一致。

在冬季冻融时期各处理均保留自然状态的积雪不做任何干扰,所有处理积雪厚度一致,故本试验不考虑积雪对土壤的影响。

为了探究生物炭和秸秆对不同深度下土壤物理结构的影响,土样取样深度设置为 L1:0 ~ 10 cm、L2:10 ~ 20 cm、L3:20 ~ 30 cm,在稳定冻结前期和融化期随机采样,并采用体积为 100 cm³ 环刀采集不同土层原状土,每个土层 3 次重复,并在 24 h 内测定相关指标。

1.4 研究方法

1.4.1 土壤团聚体稳定性

土壤水稳定性团聚体分布特征采用湿筛法^[19]测定,并选取土壤团聚体稳定性指标——平均重量直径 (MWD, mm)、几何平均直径 (GMD, mm)、>0.25 mm 水稳性团聚体含量 (WR_{0.25}, %)、团聚体破坏百分比 (PAD, %) 4 个指标来评价土壤团聚体稳定性,计算式为

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i W_i \tag{1}$$

$$GMD = \exp \sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{x}_i \tag{2}$$

$$WR_{0.25} = 1 - \frac{M_{x < 0.25}}{M_T} \tag{3}$$

$$PAD = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\% \tag{4}$$

式中 $\bar{x}_i$ ——第 i 粒级的平均直径,mm
 W_i —— $\bar{x}_i$ 相对应粒级团聚体占有所有团聚体百分比, %
 $M_{x < 0.25}$ ——<0.25 mm 团聚体质量,g
 M_T ——团聚体总质量,g
 $DR_{0.25}$ ——干筛法测得 >0.25 mm 的机械稳定性团聚体质量分数, %

1.4.2 土壤水分特征曲线

使用高速冷冻离心机 (CR21G III 型, 日本) 获取不同处理下的土壤水分特征曲线。用环刀取土并置于容器中浸泡 24 h, 使其达到饱和状态后称量, 置于离心机中待达到不同基质吸力 (0、-0.001、-0.003、-0.005、-0.01、-0.033、-0.05、-0.1、

-0.3、-0.5、-1、-1.5 MPa) 的平衡时间后称量, 105℃ 干燥 24 h 后计算不同吸力对应的体积含水率和容重。通过 Van Genuchten 模型 (V-G 模型)^[20]拟合基质吸力与体积含水率之间的关系。

为更好地评价冻融作用下生物炭和秸秆对土壤水力参数的影响, 选取 3 个土壤水分特征参数: 田间持水率 (FC, 吸力 h 为 330 cm 时的土壤体积含水率, cm³/cm³)、永久凋萎系数 (PWP, 吸力 h 为 15 000 cm 时的土壤体积含水率, cm³/cm³)、植物可用含水率 (PAWC, FC 和 PWP 差值, cm³/cm³)。

1.4.3 土壤孔径分布

利用土壤水分特征曲线计算土壤孔径分布, 吸力 h 和孔隙直径 d 的关系可表示为

$$h = \frac{4\sigma}{d} \tag{5}$$

式中 σ ——水表面张力系数, 室温 20℃ 时取 7.5×10^{-4} N/cm

结合本研究的吸力范围, 将当量孔径分为 3 个部分: 极微孔径: 0 ~ 0.3 μm; 中间段孔隙: 0.3 ~ 5 μm (微孔径)、5 ~ 30 μm (小孔径)、30 ~ 75 μm (中等孔径)、75 ~ 100 μm (大孔径); 土壤空隙: >100 μm。

1.4.4 土壤饱和导水率和土壤累计入渗量

使用 SW080B 型张力入渗仪 (渠道科技有限公司) 测定土壤累计入渗量, 并根据单位时间入渗水分量计算饱和导水率。为保证测量时仪器和土壤接触良好, 在测定时, 先铲除直径 40 cm、厚度 3 cm 的土壤表面, 去除植物根系、石块等杂物, 再铺上一层硅质沙子, 将入渗盘放置在沙子上, 仔细检查各部位接触情况。检查完毕后开始测量负压水头 -5 cm 和 -10 cm 下的土壤入渗过程, 1 min 记录一次数据, 直至稳定入渗停止测量。

根据 WOODING^[21] 提出的在半径为 R 的土壤稳定入渗速率计算公式及 GARDNER^[22] 公式

$$Q = \pi r^2 K \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right) \tag{6}$$

$$K(H) = K_{sat} \sqrt{\alpha H} \tag{7}$$

式中 Q ——单位时间入渗水分体积, cm³/h

H ——土壤表面张力, N/cm

K_{sat} ——土壤饱和导水率, cm/h

K ——导水率, cm/h

r ——储水管半径, cm α ——常数

联合式 (6)、(7), 可得

$$Q(H_1) = \pi r^2 K_{sat} \sqrt{\alpha H_1} \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right) \tag{8}$$

$$Q(H_2) = \pi r^2 K_{sat} \sqrt{\alpha H_2} \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right) \tag{9}$$

$$\alpha = \frac{\ln(Q(H_2)/Q(H_1))}{H_2 - H_1} \quad (10)$$

式中 H_1 ——土壤表面张力,取 -5 cm
 H_2 ——土壤表面张力,取 -10 cm

将所求 α 代入 WOODING 公式、GARDNER 公式即可得到土壤饱和导水率。

1.5 统计方法

采用 SPSS 26.0、Origin 2018 和 Microsoft Visio 软件进行数据处理并绘图。采用单因素 ANOVA 分析方法和最小显著性差异 (LSD) 方法检验不同处理之间的差异性和显著性,设置显著性水平 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体稳定性

土壤团聚体是评价土壤质量的重要指标。不同处理下各土层冻融前后土壤团聚体稳定性指标变化特征如图 2 所示 (图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$),下同)。施加生物炭和秸秆增加土壤 MWD、GMD、 $WR_{0.25}$,降低 PAD。以图 2a 为例,与 BL 相比,CLS、JLS、CJLS 处理 MWD 增加

18.50%、16.49%、36.49%, GMD 增加 24.42%、16.09%、27.24%, $WR_{0.25}$ 增加 10.09%、13.03%、20.09%, PAD 降低 9.92%、8.56%、15.32%。在生物炭和秸秆的作用下,土壤团粒易富集形成大团聚体,因而 MWD、GWD 增加,而 $WR_{0.25}$ 是土壤团粒的主要结构,也随之增加。进一步分析图 2b、2c 可知,土层深度由 L1 变化到 L3 层, MWD、GWD 指标变化趋势一致,以 GMD 为例, CLS、JLS 处理降低 11.87%~13.91%、2.69%~3.59%,而联合处理略微增加 1.99%~2.60%,这表明联合施用能更好地维持深层土壤大团聚形态;而 $WR_{0.25}$ 增加 7.21%~8.86%、3.07%~17.34%、1.59%~22.04%。此外,土壤在冻融循环和外源生物质材料双重调控作用下,各指标变化幅度总体呈现减小趋势,以 L1 层的 MWD 变化为例, CLS 处理从 18.50% 变为 5.24%, JLS 处理从 16.49% 变为 7.63%, CJLS 处理下的 MWD 降低到 25.52%。这表明联合施加生物炭和秸秆能有效抑制冻融循环对土壤的破坏作用,提高土壤结构稳定性。此外,随着土壤深度的增加,变化趋势和冻结前期大体一致。

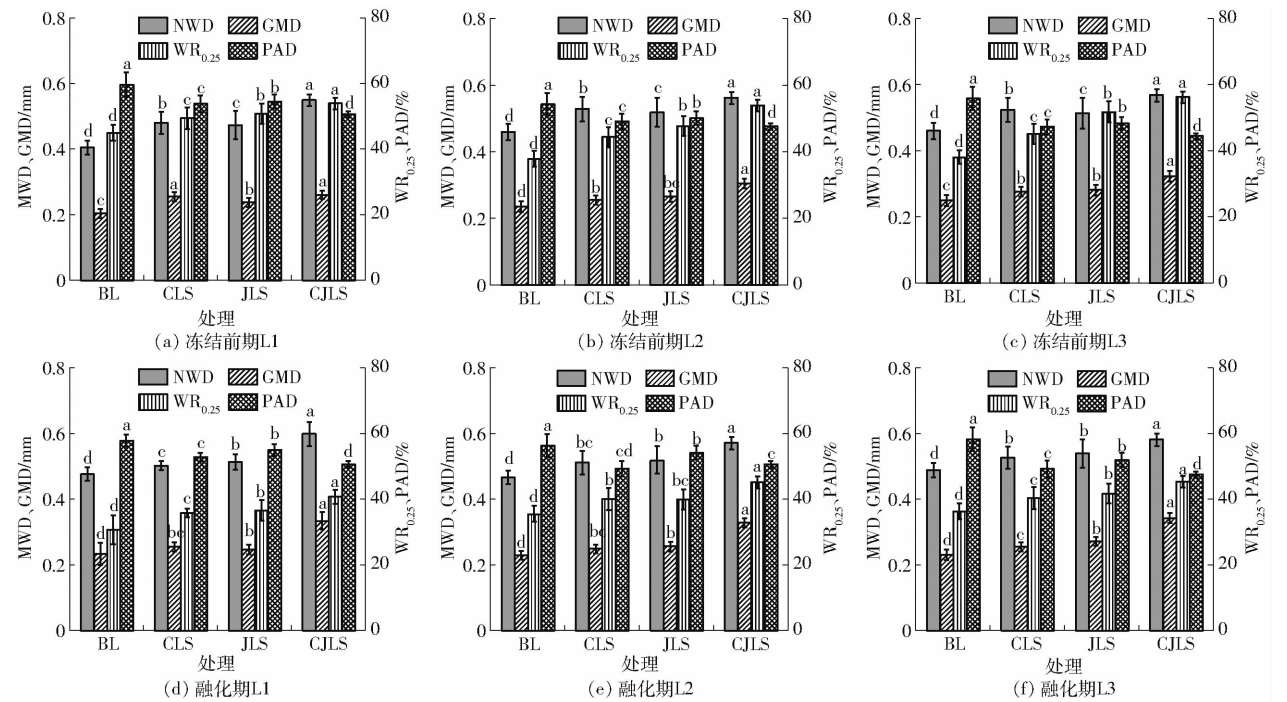


图 2 土壤团聚体稳定性指标

Fig.2 Stability index of soil aggregate

土壤团聚体稳定性是提高土壤抗侵蚀能力、防止土壤退化的重要因素,也是影响土壤溶质运移、土壤持水能力的重要因素。施加生物炭和秸秆提高土壤团聚体稳定性,CJLS、CLS、JLS 作用效果依次减弱,这是由于有机质颗粒能提高土壤颗粒的粘聚性,但生物炭是具有高孔隙度、高比表面积、强大的吸附

能力的碳聚产物,通过内部颗粒凝聚力进一步增加团聚体对熟化膨胀的抵抗力,因此,单独施加生物炭的作用效果优于秸秆。但有研究认为采用热解 700℃ 的山核桃壳生物炭降低团聚体稳定性^[23],而添加热解 550℃ 的桉树木材生物炭、稻草生物炭则对土壤团聚体稳定性没有影响^[24],这些研究结果不

同是土质类型、热解温度变化带来的生物炭特性不同而引起的,因此探究特定土壤条件下生物炭作用效果是有必要的。在经历多次冻融循环作用后,土壤团聚体稳定性降低,但是有机质颗粒的存在弱化冻融对土壤破坏作用。这是冻融作用改变有机质颗粒性质,破坏其完整性,导致降低团聚体稳定性产生的积极效应^[25],因此,改良季节性冻土区农田土壤应注重考虑有机质颗粒老化效应的重要作用。

2.2 土壤孔径分布特征

土壤孔径分布深刻影响土壤水分-溶质运移、作物根系发育过程。不同处理下各土层冻融前后土壤孔径分布变异特征如图 3 所示。冻结前期施加生物炭和秸秆降低土壤空隙($>100\text{ }\mu\text{m}$)、极微孔径($0\sim0.3\text{ }\mu\text{m}$)比例,增加中间段孔径($0.3\sim100\text{ }\mu\text{m}$)比例(图 3a)。以 L1 层为例,与 BL 相比,CLS、JLS、CJLS 处理分别降低土壤空隙比例 35.72%、43.25%、51.11%,降低极微孔径比例 1.85%、1.81%、4.09%,增加中间段孔径比例 10.64%、12.32%、18.90%。这表明施加生物炭和秸秆会抑制两端孔隙的生成,促进土壤孔隙向中间段孔径发育。随着土壤深度的增加,各段孔径变化趋势一致,但极微孔径变化幅度随深度的增加而增加,土壤空隙和中间段孔径变化幅度则先降低后增加。此外,融化期施加生物炭和秸秆增加土壤空隙、中间段孔径比例,降低极微孔径比例(图 3b)。与 BL 相比,CLS、JLS、CJLS 处理分别增加土壤空隙比例 4.33%、0.05%、16.22%,增加中间段孔径比例 19.05%、25.84%、

35.04%,降低极微孔径比例 9.09%、11.21%、18.18%。这表明在冻融循环作用和外源生物质材料调控的双重影响下促进土壤孔隙向大孔径转化。深层土壤受冻融作用影响小于浅层土壤,随着土壤深度的增加,各孔隙变化幅度减小。

土壤孔隙是储存水分和空气的重要场所,密实土壤往往会破坏土壤孔隙空间,导致土壤持水性、通气性降低,同时形成新孔隙结构,降低孔隙的均匀性,影响持水能力。施加生物炭和秸秆则会改善孔径多样性、连通性,从而改善土壤结构及物理特性。AMOAKWAH 等^[26]研究认为施加外源生物质材料是增加土壤微孔($0\sim0.3\text{ }\mu\text{m}$)数量的重要原因。这与本文结论不同,本文发现随着外源生物质材料添加到土壤里,增加的是中间段孔径比例,反而会减少土壤空隙和极微孔径比例,其中联合施用影响最大。中间段孔径比例增加归因于水分迁移及冻融变形,冻融作用使得土壤颗粒重新排列,促使水分向冻结锋面迁移,水分更易在较大孔隙中流动,从而中间段孔径更有储存水分的优势,因而中间段孔径比例增加。此外,WANG 等^[27]的研究也证实冻融交替作用改变土壤孔径分布特征,使孔隙向更大的孔隙发展。冻融变形使得孔径发展逐渐趋于稳定,在外源生物质材料的调控作用下,致使土壤孔隙向中间均匀化发展。通常利用孔隙分布特征来阐释土壤水分迁移运动过程,中间段孔隙依靠重力作用和毛细管力释放水和保留水,土壤和有机质颗粒之间形成的有效孔隙会进一

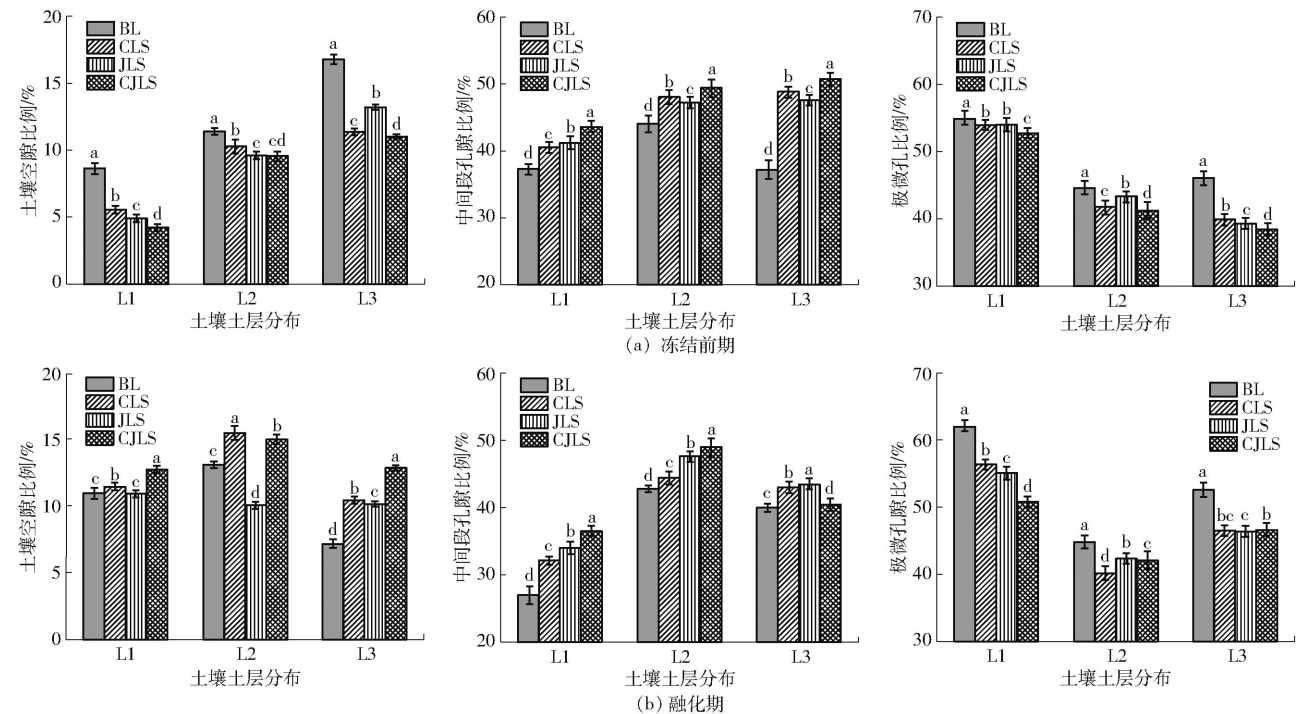


图 3 土壤孔径分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of soil pore size

步增加可容纳水分的空间,一定程度上可增加土壤持水能力。而冻融作用使得土壤孔隙重分布,需重新考虑多因素协同作用下土壤孔径变异特征。而融化期与冻结前期不同的是施加生物炭和秸秆增加土壤空隙比例,土壤空隙会影响水分迁移并可能在未完全融化期出现重新冻结水分的情况^[28],也可能在融化期增加土壤水分入渗能力^[29]。

2.3 土壤渗透能力

图4为不同处理在不同张力的条件下土壤累计入渗量的差异。在相同时间尺度上,各处理变化趋势一致,总体上呈现施加生物炭和秸秆增加土壤累计入渗量,且联合施加效果优于单独施加。

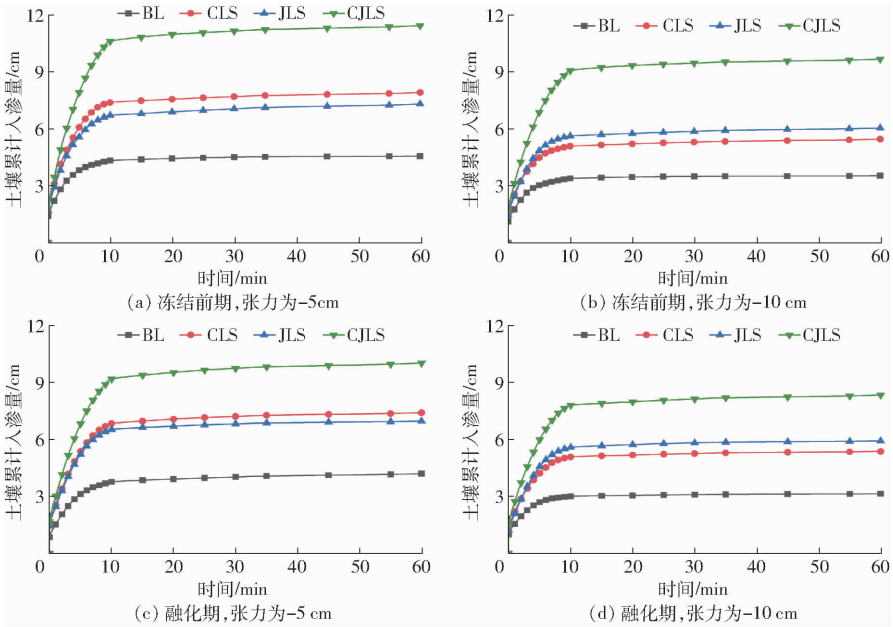


图4 土壤累计入渗量变化曲线

Fig.4 Variation curves of cumulative soil infiltration

土壤入渗能力与土壤质地、土壤机械组成、团聚体分布有关,而土壤入渗能力能够直接影响浅层土壤蓄水保墒能力,直接影响作物生长发育过程^[30-31]。研究结果表明,冻结期和融化期土壤入渗能力与外源生物质材料施加方式有关,额外有机质颗粒的存在改变土壤孔隙分布特征,改变土壤水分运动过程,提高土壤入渗能力。以往研究表明,施加其他物质到土壤中会取代原有的土壤孔隙空间及挤压土壤空气,导致孔隙间的连通性受到破坏,这不利于土壤入渗过程,不利于表层土壤水分的维持^[32]。这与本文研究结果不同,施加外源生物质材料增强入渗能力,并且联合施用处理下对土壤入渗效果具有显著的积极影响。这种变化可能与土壤孔隙数量变化和生物炭的疏水性有关,而有机质颗粒含量是决定颗粒作用影响土壤水分运动的重要因素,随着有机质颗粒的增加,可加强颗粒与水分运动之间的相关性,加强土壤入渗能力;其次,生物炭和秸秆颗

分析图4a可知,在60 min时,CLS、JLS、CJLS处理与BL相比,土壤累计入渗量提高73.68%、60.52%、151.10%,随着张力增加,各处理累计入渗量从大到小由CJLS、CLS、JLS、BL变为CJLS、JLS、CLS、BL。此外,在10 min左右,土壤累计入渗量变化逐渐平缓。在土壤融化期内,不同张力下的土壤累计入渗量变化趋势与冻结前期一致,但变化幅度减小,影响效果减弱,CLS、JLS、CJLS处理与BL相比,土壤累计入渗量提高19.74%~63.16%、32.67%~53.29%、112.28%~120.39%。研究试验结果说明,施加生物炭和秸秆,能使土壤获得更多的入渗水分,一定程度上还可提高融雪水的利用效率。

粒给予水分更多的接触面积,产生更多水-土、水-颗粒等结合体,形成较大的团粒,而团粒的富集在一定程度上可以拓宽土壤水分通道。此外,土壤经历持续的冻融交替,添加的生物炭和秸秆逐渐老化,作用效果减弱,因而融化期的入渗水分总量低于冻结期。这与朱美壮等^[33]研究结果类似,其采用双环入渗仪测定青藏高原多年冻土区土壤的入渗水分,测出冻结期前期入渗速率小于融化期,但最终入渗量大于后者。

2.4 土壤持水能力

土壤水分特征对作物生长发育、水分运移等活动有着至关重要的作用,土壤水分特征曲线可分析土壤持水能力。不同处理各土层冻融前后土壤水分特征曲线变化如图5所示。分析图5a可知,施加生物炭和秸秆可提高土壤饱和和含水率(此时土壤体积含水率达到最大),以L1层为例,与BL相比,CLS、JLS、CJLS分别提高4.16%、6.11%、14.79%。在低

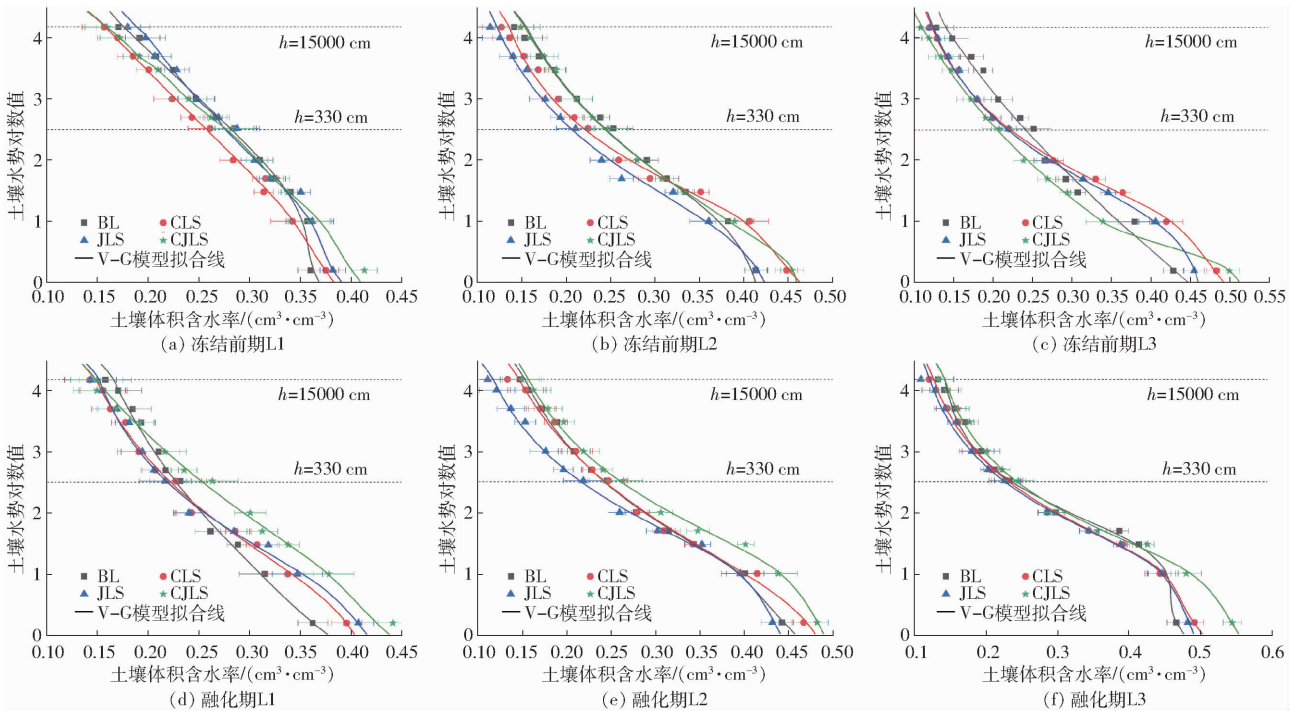


图5 土壤水分特征曲线
Fig.5 Soil moisture characteristic curves

吸力阶段 ($h < 330\text{ cm}$), 曲线斜率由大到小为 CJLS、CLS、JLS、BL, 在中吸力阶段 ($330 < h < 15\ 000\text{ cm}$), 曲线斜率由大到小为 CJLS、BL、JLS、CLS, 而在高吸力阶段 ($h > 15\ 000\text{ cm}$), 曲线斜率由大到小为 BL、JLS、CLS、CJLS。此外, 施加生物炭和秸秆增大土壤体含水率的差值 ($\theta(h)$), 即初始吸力与最终吸力之间的 $\theta(h)$ 逐渐增大。与 BL 相比, CLS、JLS、CJLS 的 $\theta(h)$ 分别增加 15.12%、6.87%、33.96%, 土壤持水能力逐渐增大。分析图 5b、5c 可发现, 随土壤深度的增加, CLS、JLS、CJLS 处理变化趋势一致, 但变化幅度不同, CLS、CJLS 作用效果增加, 可提高土壤饱和含水率 8.43%、12.76% 和 9.91%、16.67%, JLS 作用效果降低, 仅提高 0.02%、6.18%。这可能与冻结前期土壤中间段孔径变化有关, 随土壤深度的增加, CLS 处理下土壤中间段孔径比例超过 JLS 处理; 其次可能是生物炭与土壤形成的“炭-土结合体”随土壤深度的增加而更加稳定的缘故。L3 层 BL、CLS、JLS、CJLS 处理的土壤饱和含水率分别达到 0.429 0、0.455 5、0.500 5、0.501 0 cm^3/cm^3 , 联合施用生物炭和秸秆变化明显。各处理的持水率分别达到 0.300 3、0.364 4、0.335 6、0.392 9 cm^3/cm^3 。此外, 冻融交替作用增加土壤饱和含水率, 增大 CLS、JLS、CJLS 处理与 BL 差异, 以 L1 层为例, CLS、JLS、CJLS 处理和 BL 相比增加 7.72%、10.33%、18.14%。然而随着土层深度增加, 施加生物炭和秸秆下的土壤饱和含水率变化幅度降低。土壤饱和含水率的变化依赖于土壤孔隙分布特征, 从而与土壤

孔隙度变化密切相关。在土壤中添加有机质颗粒增加土壤孔隙度, 在一定程度上增加土壤饱和含水率, 同时, 土壤饱和含水率随土壤深度变化减缓可能与中间段孔径变化(图 3b)有关。

表 2 为不同调控处理下冻融前后的土壤水分特征参数 FC、PWP、PAWC。在土壤冻结前期, 施加生物炭和秸秆降低土壤 FC、PWP、PAWC。具体来说, 以 L1 层为例, 与 BL 相比, CLS、JLS、CJLS 处理田间持水率降低 8.42%、-0.09%、0.09%, 永久凋萎系数降低 0.08%、-0.05%、0.07%, 植物可用含水率降低 8.91%、5.50%、-7.60%。这表明施加秸秆能够减轻田间持水率的降低, 而田间持水率代表土壤储水储气能力, 相较之下单独施加秸秆更有利于土壤储水储气。而随着土壤深度的增加, FC 变化幅度增加, L3 层降低程度高达 11.96%~17.40%, 这表明施加生物炭和秸秆后对深层土壤水力特征参数产生的负面效应大于浅层土壤。

在土壤融化期, 冻融作用改变土壤田间持水率, 从而增加 CLS、JLS、CJLS 处理与 BL 处理间的差异。经过冻融循环后, 各处理 FC 降低 1.15%、4.85%、-1.05%, 而单独施加生物炭或单独施加秸秆后 FC 减小可能是因为生物炭或秸秆施量不足以消除孔隙被土壤粉黏粒堵塞作用, 从而降低 FC。此外, 冻融作用改变 PAWC 变化特征, 由冻结前期施加生物炭和秸秆对其产生负面效应变为融化期施加生物炭和秸秆对其产生积极作用, 以 L1 层为例, CLS、JLS、CJLS 处理 PAWC 增加 0.009 1、-0.000 2、

表 2 土壤水力特征参数

Tab.2 Hydraulic characteristic parameters of soil					
cm ³ /cm ³					
时期	土层	处理	FC	PWP	PAWC
冻结前期	L1	BL	0.284 9	0.170 4	0.114 5
		CLS	0.261 0	0.156 7	0.104 3
		JLS	0.287 6	0.179 4	0.108 2
		CJLS	0.282 5	0.159 3	0.123 2
	L2	BL	0.253 4	0.141 8	0.111 6
		CLS	0.224 8	0.127 3	0.097 5
		JLS	0.210 8	0.114 5	0.096 3
		CJLS	0.247 5	0.148 7	0.098 8
	L3	BL	0.251 6	0.128 8	0.122 8
		CLS	0.221 5	0.119 4	0.102 1
		JLS	0.219 9	0.120 1	0.099 8
		CJLS	0.207 9	0.107 7	0.100 2
融化期	L1	BL	0.262 7	0.199 5	0.063 2
		CLS	0.258 9	0.186 6	0.072 3
		JLS	0.250 0	0.187 0	0.063 0
		CJLS	0.289 9	0.192 3	0.097 6
	L2	BL	0.245 5	0.146 4	0.099 1
		CLS	0.247 1	0.133 1	0.114 0
		JLS	0.218 4	0.110 5	0.107 9
		CJLS	0.263 6	0.149 3	0.114 3
	L3	BL	0.233 9	0.133 5	0.100 4
		CLS	0.230 0	0.121 4	0.108 6
		JLS	0.226 8	0.109 6	0.117 2
		CJLS	0.245 8	0.134 4	0.111 4

0.344 0 cm³/cm³。这是因为冻融作用加强外源生物
质材料颗粒与土壤颗粒结合,土壤水分更好地储存
于生物材料内部。此外,随着土层深度的增加,联合
施用 PAWC 增加趋势逐渐减小。

土壤水分特征曲线(SWRCs)可以反映土壤持
水能力,并通过 SWRCs 下不同土壤中 $\theta(h)$ 的变
化来识别改良剂的作用效果^[34]。施加生物炭和秸秆
改变 SWRCs 曲线形状,CLS、JLS、CJLS 处理的 $\theta(h)$
较 BL 处理均增加,作用效果由大到小依次为 CJLS、
CLS、JLS,这是由于外源生物物质材料干扰土壤团聚
体分布特征,增加土壤颗粒之间的相互吸引作用从
而减少小孔的数量而达到持水的效果。而单独施加
生物炭效果强于单独施加秸秆,由于生物炭的高表
面积和富碳特性,加速土壤大团聚体的形成从而提
高土壤孔隙度;其次,生物炭自身的高孔隙度对水分
具有一定的固持作用,水分进入生物炭内部不易流
失,从而提高土壤持水能力。过量的有机质颗粒添
加到土壤中会增加土壤通气性,从而降低持水性,降
低土壤环境稳定性。FU 等^[35]研究施加不同量生物
炭对季节性冻土区土壤持水性的响应机制也证实这
一观点。

在冻结前期,施加生物炭和施加秸秆降低植物
可用水率 PAWC,仅 L1 层联合施用达到
0.123 2 cm³/cm³,略高于 BL 处理,随土壤深度的增
加,施加生物炭和施加秸秆均表现负面效应。而在
融化期施加生物炭和秸秆增加 PAWC,这种增加是
因为土壤空隙比例增加引起的。冻融作用破碎土壤
团粒,增加有机质颗粒与土壤颗粒间接触面积,从而
提高土壤水分有效性^[36]。以农业的角度来看,冻结
前期 CJLS 处理下的 FC 略小于 BL 处理,而融化期
的 FC 显著增加。因此,联合施用是有效满足季节
性冻土区土壤水分稳定供给的调控模式。

2.5 土壤导水能力

图 6 为不同处理下冻融前后土壤饱和导水率
变化特征。施加生物炭和秸秆增加土壤饱和导水
率,不同处理差异性极显著。分析图 6a 可知,
CLS、JLS、CJLS 处理与 BL 相比,饱和导水率增加
116.31%、86.61%、129.17%,其中联合施加生物
炭和秸秆大幅度影响 K_{sat} 的变化,而单独施加生物
炭的影响效果强于单独施加秸秆,由此可知,生物
炭可以使土壤中水分迁移通道增多。而在土壤融
化期,单独施加生物炭和单独施加秸秆两种处理
与 BL 处理差异逐渐减缓(图 6b),但仍保持增加
的趋势,变化率分别为 79.99% 和 35.01%;而联
合施用生物炭和秸秆的处理与 BL 的差异增加,变
化率高达 192.62%。

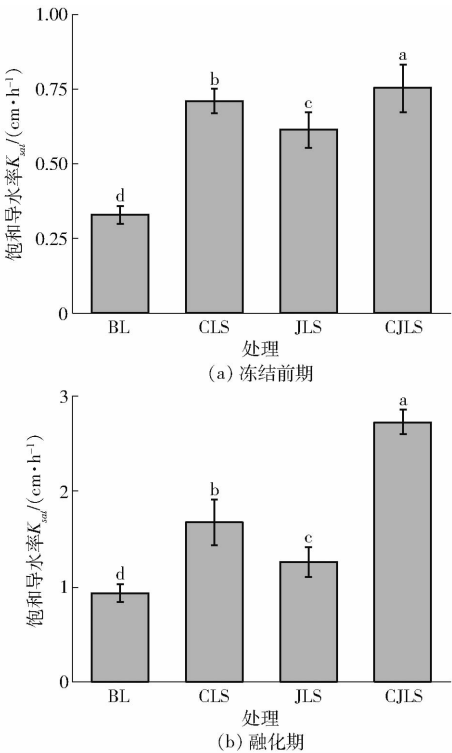


图 6 土壤饱和导水率

Fig.6 Saturated hydraulic conductivity of soil

土壤结构变化引起饱和导水率变化, YARGICOGU 等^[37]研究认为添加细小的生物炭颗粒到土壤中会形成更窄的孔隙通道,降低 K_{sat} 。而在本试验中,施加生物炭和秸秆增加土壤饱和导水率,联合施用对土壤中 K_{sat} 的积极影响最为明显。这可能是壤土孔隙结构较好,“可塑性”较弱,在这种情况下,外源生物质材料很容易打破原有的土壤孔隙系统,形成新的孔隙结构,降低孔隙的均匀性,影响导水能力^[38-39]。由此产生的新孔隙系统也可能因为外部添加剂自身特性产生不同的效果。但冻融后,单独施加生物炭和单独施加秸秆作用效果减弱,这不能简单归因于孔径堵塞而导致的,因为联合施用增加土壤 K_{sat} 。尽管一些研究人员认为施加有机质颗粒量与 K_{sat} 的变化成正比^[40],但有研究人员发现外源生物质材料产生降低效果,甚至无效果^[41]。此外,有研究指出 K_{sat} 的变化与土壤类型、外界环境、土地利用方式有很大关联^[42-44]。因此外源生物质材料对冻融土壤影响机制有待长期关注。

3 结论

(1)冻融循环所产生的冻胀力破坏土壤结构稳定性,破坏大团聚体成细小团聚体,而施加生物炭和秸秆有效提高 GMD、MWD、 $WR_{0.25}$,提高土壤团聚体稳定性。受冻融作用影响,联合调节效果最佳,极大增强土粒与土粒之间的凝聚力,有效抑制冻融作用对土壤的破坏作用。

(2)施加生物炭和秸秆改变土壤孔隙分布,影

响孔径的多样性和连通性。冻结前期降低土壤空隙比例、极微孔径比例,增加中间段孔径比例,随土壤深度的增加,土壤空隙比例和中间段孔径比例的变化幅度呈先减后增,极微孔径则与土壤深度呈正向关系。在冻融循环作用和外源生物质材料调控的双重影响下促进土壤孔隙向大孔径转化,增加 L1 层土壤空隙比例 0.05% ~ 16.22%、中间段孔径比例 19.05% ~ 35.04%。

(3)施加生物炭和秸秆增加张力 -5 cm 条件下土壤 60 min 的累计入渗量 73.68%、60.52%、151.10%,受联合施用影响最大。张力的相对变化较大程度影响 CLS 与 JLS 处理。受外源生物质材料老化影响,融化期累计入渗量低于冻结前期,但在一定程度上有效增加土壤入渗水分,提高春季融雪水利用效率,缓解水分亏损问题。

(4)土壤结构的改善进一步影响土壤孔隙内部储水能力,施加生物炭和秸秆可提高土壤饱和含水率、提高土壤持水能力,其中联合施用最易于土壤水分储存,冻结前期 L3 层土壤持水率可达到 $0.3929\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。此外,在冻结前期,施加生物炭和秸秆降低土壤 FC、PWP、PAWC,受冻融作用影响,施加外源生物质材料增加 PAWC,有效增强土壤对植物的供给作用,更大程度满足作物水分需求。

(5)施加生物炭和秸秆增加冻融前后土壤饱和导水率,作用效果由大到小为 CJLS、CLS、JLS。受冻融作用影响,联合施用表现出较高的土壤饱和导水率,在一定程度抑制土壤蒸发。

参 考 文 献

[1] 韩露, 万忠梅, 孙赫阳. 冻融作用对土壤物理、化学和生物学性质影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2018, 49(3): 736-742.
HAN Lu, WAN Zhongmei, SUN Heyang. Research progress on effects of freezing and thawing on soil physical, chemical and biological properties[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(3): 736-742. (in Chinese)

[2] 方丽莉, 齐吉琳, 马巍. 冻融作用对土结构性的影响及其导致的强度变化[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 435-440.
FANG Lili, QI Jilin, MA Wei. Freeze-thaw induced changes in soil structure and its relationship with variations in strength[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 435-440. (in Chinese)

[3] 魏永霞, 朱焜豫, 刘慧. 连续施加生物炭对黑土区土壤改良与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 291-301.
WEI Yongxia, ZHU Tianyu, LIU Hui. Effects of successive application of biochar on soil improvement and maize yield of black soil areas region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 291-301. (in Chinese)

[4] ALGHAMDI A G. Biochar as a potential soil additive for improving soil physical properties a review[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(24): s12517.

[5] AYAZ M, FEIZIENE D, FEIZA V, et al. The impact of swine manure biochar on the physical properties and microbial activity of loamy soils[J]. Plants Basel, 2022, 11(13): s11131729.

[6] BLANCO C H. Biochar and soil physical properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(4): 687-711.

[7] 于衷浦, 李飞跃. 生物炭在农业资源与环境领域中的应用[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2022, 38(2): 171-178.
YU Zhongpu, LI Feiyue. Application of biochar in the fields of agricultural resources and environment[J]. Journal of Ludong University (Natural Science Edition), 2022, 38(2): 171-178. (in Chinese)

[8] ZHAO Y C, WANG P, LI J L, et al. The effects of two organic manures on soil properties and crop yields on a temperate calcareous soil under a wheat-maize cropping system[J]. European Journal of Agronomy, 2009, 31(1): 36-42.

[9] 郭孟洁, 李建业, 李健宇. 实施 16 年保护性耕作下黑土土壤结构功能变化特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 108-118.

- GUO Mengjie, LI Jianye, LI Jianyu. Change of soil structure and function after 16 years of conservation tillage in black soil[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(22): 108–118. (in Chinese)
- [10] XUE P, FU Q, LI T X, et al. Effects of biochar and straw application on the soil structure and water-holding and gas transport capacities in seasonally frozen soil areas[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 301: e113943.
- [11] OBIA A, MULDER J, MARTINSEN V, et al. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155(2): 35–44.
- [12] WANG D, LI C, PARIKH S J, et al. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils: a multi-scale analysis[J]. Geoderma, 2019, 340: 185–191.
- [13] KINNEY T J, MASIELLO C A, DUGAN B, et al. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 41: 34–43.
- [14] 刘燕青, 王计磊, 李子忠. 秸秆覆盖对土壤水分和侵蚀的影响研究进展[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 429–436. LIU Yanqing, WANG Jilei, LI Zizhong. Research progress on the effect of straw mulch on soil moisture and erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation Research, 2021, 28(6): 429–436. (in Chinese)
- [15] 张如鑫, 屈忠义, 王丽萍. 生物炭对冻融期盐渍化土壤水热肥效应的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 296–303. ZHANG Ruxin, QU Zhongyi, WANG Liping. Effect of biochar on water, heat and fertilizer of salinized soil during freezing and thawing period[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 296–303. (in Chinese)
- [16] XIA H, RIAZ M, MING C, et al. Assessing the difference of biochar and aged biochar to improve soil fertility and cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata) productivity[J]. Journal of Soils and Sediments, 2022, 23(2): 606–618.
- [17] YAO M Z, LI B, WANG T L, et al. Effects of straw size in buried straw layers on water movement in adjacent soil layers[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(2): 74–84.
- [18] 曾根滨, 曹庆云. 饲料中粗灰分含量测定方法的优化探索[J]. 饲料研究, 2017(4): 48–53. ZENG Genbin, CAO Qingyun. Optimization of determination method of crude ash content in feed[J]. Feed Research, 2017(4): 48–53. (in Chinese)
- [19] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils I [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627.
- [20] GENUCHTEN V, TH M A. Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892–898.
- [21] WOODING R A. Steady infiltration from a shallow circular pond[J]. Water Resources Research, 1968, 4(6): 133–142.
- [22] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science, 1958, 85(4): 228–232.
- [23] BUSSCHER W J, NOVAK J M, EVANS D E, et al. Influence of pecan biochar on physical properties of a norfolk loamy sand [J]. Soil Science, 2010, 175(1): 10–14.
- [24] PENG X, YE L L, WANG C H, et al. Temperature and duration dependent rice straw-derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 112(2): 159–166.
- [25] LIU Z, DUGAN B, MASIELLO C A, et al. Effect of freeze-thaw cycling on grain size of biochar[J]. Plos One, 2018, 13(1): e0191246.
- [26] AMOAKWAH E, FRIMPONG K A, OKAE A D, et al. Soil water retention, air flow and pore structure characteristics after corn cob biochar application to a tropical sandy loam[J]. Geofisica Internacional, 2017, 307: 189–197.
- [27] WANG F, LI G, MA W, et al. Effect of repeated wetting-drying-freezing-thawing cycles on the mechanic properties and pore characteristics of compacted loess[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 8839347.
- [28] BOTTINELLI N, ZHOU H, BOIVIN P, et al. Macropores generated during shrinkage in two paddy soils using X-ray micro-computed tomography[J]. Geoderma, 2016, 265: 78–86.
- [29] LI S L, ZHANG Y W, YAN W M, et al. Effect of biochar application method on nitrogen leaching and hydraulic conductivity in a silty clay soil[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 183: 100–108.
- [30] 王一博, 吕明侠, 赵海鹏. 青藏高原多年冻土区活动层土壤入渗特征及机理分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1301–1311. WANG Yibo, LÜ Mingxia, ZHAO Haipeng. Characteristics and mechanism of soil infiltration in active layer of permafrost region of Qinghai–Tibet Plateau[J]. Journal of Glacier and Frozen Soil, 2021, 43(5): 1301–1311. (in Chinese)
- [31] 印家旺, 阿拉木萨, 苏宇航. 科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征比较研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 90–98. YIN Jiawang, A Lamusa, SU Yuhang. Comparative study on soil infiltration characteristics of different land use types in Horqin sandy land[J]. Water and Soil Conservation Notification, 2022, 42(4): 90–98. (in Chinese)
- [32] CASTELLINI M, GIGLIO L, NIEDDA M, et al. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 1–13.
- [33] 朱美壮, 王根绪, 肖瑶. 青藏高原多年冻土区高寒草甸土壤水分入渗变化研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1316–1325.

ZHU Meizhuang, WANG Genxu, XIAO Yao. Study on soil water infiltration change of alpine meadow in permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glacier and Frozen Soil, 2017, 39(6):1316-1325. (in Chinese)

[34] 曹红霞, 康绍忠, 武海霞. 同一质地(重壤土)土壤水分特征曲线研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(1):9-12.

CAO Hongxia, KANG Shaozhong, WU Haixia. Study on soil water characteristic curve of the same texture (heavy loam)[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2002, 30(1): 9-12. (in Chinese)

[35] FU Q, ZHAO H, LI T X, et al. Effects of biochar addition on soil hydraulic properties before and after freezing-thawing[J]. CATENA, 2019, 176: 112-124.

[36] EDEH I G, MAEK O. The role of biochar particle size and hydrophobicity in improving soil hydraulic properties[J]. European Journal of Soil Science, 2022, 73(1): e13138.

[37] YARGICOGU E N, SADASIVAM B Y, REDDY K R, et al. Physical and chemical characterization of waste wood derived biochars[J]. Waste Management, 2015, 36: 256-268.

[38] BODNER G, SCHOLL P, KAUL H P. Field quantification of wetting-drying cycles to predict temporal changes of soil pore size distribution[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 133: 1-9.

[39] 田丹, 屈忠义, 李波. 生物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. Experimental study on the influence of biochar on hydraulic characteristic parameters and water retention characteristics of sand[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(3):135-137. (in Chinese)

[40] 王红兰, 唐翔宇, 张维. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 107-112.

WANG Honglan, TANG Xiangyu, ZHANG Wei. Effect of biochar application on the hydraulic properties of topsoil in purple soil slope farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4):107-112. (in Chinese)

[41] OBIA A, BORRESEN T, MARTINSEN V, et al. Effect of biochar on crust formation, penetration resistance and hydraulic properties of two coarse-textured tropical soils[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 170: 114-121.

[42] 孙召军, 李金山, 贾艳辉. 干湿交替次数对土壤干密度和饱和导水率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 89-96.

SUN Shaojun, LI Jinshan, JIA Yanhui. Effect of dry-wet alternation times on soil dry density and saturated hydraulic conductivity[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 89-96. (in Chinese)

[43] 张伟, 马建刚, 王开德. 滇西南不同土地利用方式坡地土壤大孔隙特征及与饱和导水率的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 84-93.

ZHANG Wei, MA Jian'gang, WANG Kaide. Characteristics of soil macropore and its relationship with saturated hydraulic conductivity in sloping land with different land use patterns in southwest Yunnan[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2023, 51(4): 84-93. (in Chinese)

[44] 王浩飞, 王黎, 朱习爱. 橡胶-益智复合林土壤饱和导水率空间分布格局及其影响因子[J/OL]. 生态学杂志, 2022: 1-11. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20221018.1650.010.html>.

WANG Haofei, WANG Li, ZHU Xia. Spatial distribution pattern of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in rubber-Yizhi compound forest[J/OL]. Journal of Ecology, 2022:1-11. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20221018.1650.010.html>. (in Chinese)

(上接第 351 页)

[25] 冯权泷, 牛博文, 朱德海, 等. 土地利用/覆被深度学习遥感分类研究综述[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 1-17.

FENG Quanlong, NIU Bowen, ZHU Dehai, et al. Review for deep learning in land use and land cover remote sensing classification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 1-17. (in Chinese)

[26] IMPOLLONIA G, CROCI M, MARTANI E, et al. Moisture content estimation and senescence phenotyping of novel Miscanthus hybrids combining UAV-based remote sensing and machine learning[J]. GCB Bioenergy, 2022, 14(6): 639-656.

[27] AHMAD S, KALRA A, STEPHEN H. Estimating soil moisture using remote sensing data: a machine learning approach[J]. Advances in Water Resources, 2010, 33(1):69-80.

[28] 李艳坤, 董汝南, 张进, 等. 光谱数据解析中的变量筛选方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(11): 3332-3338.

LI Yankun, DONG Runan, ZHANG Jin, et al. Variable screening methods in spectral data analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(11): 3332-3338. (in Chinese)

[29] 靳宁, 张东彦, 李振海, 等. 基于多光谱卫星模拟波段反射率的冬小麦水分状况评估[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 243-252.

JIN Ning, ZHANG Dongyan, LI Zhenhai, et al. Evaluation of water status of winter wheat based on simulated reflectance of multispectral satellites[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 243-252. (in Chinese)