

施加生物炭对东北黑土区土壤结构及融雪水入渗的影响

刘超^{1, 2, 3, 4}, 付强^{1, 2, 3, 4*}, 侯仁杰^{1, 2, 3, 4}, 李天霄^{1, 2, 3, 4}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 教育部寒地黑土生境健康国际合作联合实验室(东北农业大学), 哈尔滨 150030; 3. 农业农村部农业水资源高效利用重点实验室(东北农业大学), 哈尔滨 150030; 4. 黑龙江省寒区水资源与水利工程重点实验室(东北农业大学), 哈尔滨 150030)

摘要: 东北黑土区季节性冻融破坏土壤结构, 导致土壤退化严重, 融雪水入渗能力下降, 不利于农业生产。为调节东北黑土区土壤结构, 缓解融雪水春涝对农业生产的影响, 以大田试验为依托, 设置4种不同调控措施(CK-对照组、B20-施加 $2.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭、B45-施加 $4.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭、B70-施加 $7.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭), 测定不同梯度生物炭对土壤团聚体、孔径分布、土壤累计入渗量和入渗速率的影响。结果表明: ① 施加生物炭可显著提升土壤团聚体稳定性, 其中B70处理效果最佳, 平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、大于 0.25 mm 水稳性团聚体质量分数($\text{WR}_{0.25}$)分别提高36.47%、29.25%、20.91%, 团聚体破坏百分比(PAD)下降17.34%。② 冻结期, B70处理分别降低土壤空隙和极微孔隙至50.09%、4.13%, 增加中等孔隙18.93%; 融化期, B70处理分别增加土壤空隙和中等孔隙至16.32%、36.47%, 降低极微孔隙17.97%。③ B70处理土壤累计入渗量在冻结期前较CK增加149.24%、融化期末较CK增加117.48%; 不同张力值下, B70处理的稳定入渗速率均为最高。综上, B70处理对提升寒区农田土壤结构稳定性和融雪水入渗速率最佳。

关键词: 冻融循环; 生物炭; 土壤结构; 融雪水

中图分类号: S156; S155.2*7

文献标志码: A

文章编号: 1005-9369(2025)02-0131-13

刘超, 付强, 侯仁杰, 等. 施加生物炭对东北黑土区土壤结构及融雪水入渗的影响[J]. 东北农业大学学报, 2025, 56(2): 131-143. DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2025.02.014.

Liu Chao, Fu Qiang, Hou Renjie, et al. Effects of applying biochar on soil structure and snowmelt infiltration in black soil area of Northeast China[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2025, 56(2): 131-143. (in Chinese with English abstract) DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2025.02.014.

Effects of applying biochar on soil structure and snowmelt infiltration in black soil area of Northeast China/LIU Chao^{1, 2, 3, 4}, FU Qiang^{1, 2, 3, 4}, HOU Renjie^{1, 2, 3, 4}, LI Tianxiao^{1, 2, 3, 4}(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. International Cooperation Joint Laboratory for Health of Cold Black Soil Habitat, Ministry of Education, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources of Ministry of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 4. Key Laboratory of Water Resources and Hydraulic Engineering in Cold Regions of Heilongjiang Province, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179033, 52279035), 国家自然科学基金区域联合基金重点项目(U20A20318); 国家杰出青年科学基金项目(51825901); 黑龙江省优秀青年科学基金项目(YQ2022E007)。

第一作者简介: 刘超(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为农业水土资源高效利用。E-mail: liuchao0730@126.com。

***通信作者:** 付强, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业水土资源高效利用。E-mail: fuqiang0629@126.com。

Abstract: Seasonal freeze-thaw cycles in the Northeast Black Soil region adversely affect soil structure, resulting in significant soil degradation and a reduction in infiltration capacity of snowmelt water, which negatively impacts agricultural productivity. To address soil structural issues in this region and mitigate the detrimental effects of spring flooding from snowmelt on agricultural production, this study conducted field experiments with four distinct control measures: CK (control group), B20 (application of $2.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ biochar), B45 (application of $4.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ biochar), and B70 (application of $7.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ biochar). The effects of varying biochar applications on soil aggregates, pore size distribution, and infiltration characteristics (cumulative and stable rates) were measured. The results indicated as the followings: ① The application of biochar significantly enhanced soil aggregate stability, with the B70 treatment demonstrating the greatest effectiveness. The average mass diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and mass fraction of water-stable aggregates larger than 0.25 mm ($\text{WR}_{0.25}$) increased by 36.47%, 29.25% and 20.91%, respectively, while the percentage of aggregate destruction (PAD) decreased by 17.34%. ② During the freezing period, the B70 treatment reduced soil voids and extremely fine pores to 50.09% and 4.13%, respectively, while increasing medium pores by 18.93%; during the thawing period, the B70 treatment elevated soil voids and medium pores to 16.32% and 36.47%, respectively, and decreased the proportion of extremely fine pores by 17.97%. ③ Regarding cumulative soil infiltration, the B70 treatment exhibited an increase of 149.24% before the freezing period compared to CK and an increase of 117.48% at the end of the thawing period compared to CK. The stable infiltration rate was the highest in the B70 treatment across all the tension values. In conclusion, the B70 treatment was optimal for enhancing soil structural stability and improving snowmelt water infiltration efficiency in cold-region farmland.

Key words: freezethaw cycle; biochar; soil structure; Snowmelt water infiltrates

东北黑土区作为我国粮食安全的“压舱石”，是中国主要粮食产区之一，东北黑土区的土壤质量和生产潜力直接影响国家粮食安全和农业可持续发展。东北黑土区因其独特的土壤结构、肥沃的土壤质地和丰富的有机质而闻名，冬季积雪覆盖时间长达5个月，积雪融水作为重要的淡水资源，对农业生产具有深远影响^[1]。特别在高纬度季节性冻土区，积雪广泛分布，其融水显著影响河流下游地区的农业和生态系统。融雪水作为寒冷地区重要水资源，部分融雪水渗入地下成为地下水，增加土壤水分贮存，其余部分融雪水在地表上层产生滞水和径流^[2]，不利于农业生产。Zhou et al. 通过研究东北黑土区积雪融化和径流过程对农田土壤质量退化的影响发现，深耕或添加生物炭可有效调节土壤团聚体粒径，提高土壤总孔隙度，提高融雪水对冻土层的渗透性能^[3]；王鑫雨等研究发现，融雪速率与径流侵蚀力主要受积雪深度、辐射强度及升温速率影响^[4]；杨鑫等研究发现，冬季累积降雪量、秋季降雨量、春季融雪入渗和径

流呈显著正相关^[5]。

融雪水入渗是涉及热和质量相变的复杂过程。He et al. 研究发现，春季融水入渗主要受冻土期前 10 cm 土壤的孔隙度和土壤冻结初期前 30 cm 土壤的水分含量影响^[6]。冻土中存在不同直径的孔隙。大孔隙中的水分冻结显著增加渗流路径的弯曲度，阻碍液态水流动，相较于小孔隙，大孔隙中的水分冻结较早、解冻较晚，显著降低冻结土壤的渗透性。生物炭作为环保且可再生的碳质材料，在提升土壤质量方面备受关注。魏永霞等研究发现，随施炭量增加，大于 0.25 mm 的土壤团聚体质量分数 ($\text{WR}_{0.25}$)、平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 均呈先增后降的变化趋势^[7]；张宝轩等研究发现，施加生物炭对深度为 $20\sim 40 \text{ cm}$ 土层的影响最为显著，土壤密度较 CK 组降低 10.8%，土壤田间持水量、饱和含水量和土壤孔隙度分别增加 21.6%、19.0% 和 13.5%^[8]；刘世思等研究发现，生物炭可提高土壤保水性能^[9]。

已有研究多集中于单一因素对融雪水入渗的

影响,生物炭在冻融循环条件下对土壤结构及融雪水入渗的影响研究较少。为明确生物炭不同梯度的调控效果,本研究以中国松嫩平原黑土为研究对象,通过测定不同梯度生物炭对土壤团聚体、土壤入渗速率、土壤累计入渗量及土壤饱和导水率等指标影响,探讨生物炭对寒区农田春季融雪水入渗的影响机制。以期为高效利用融雪水资源提供支持。

1 材料与方法

试验于2023年10月至次年5月在黑龙江省水利科技试验研究中心试验田进行(地理中心坐标为:45°22' N、126°45' E)。该地区地势平坦、土壤肥沃,属于温带大陆性季风气候,气候变化明显,土壤受冻融循环作用显著,年平均气温为4.5℃,冬季平均气温为-18.7℃,年均降水量为586.4 mm。

土壤从11月中下旬开始稳定冻结,次年3月下旬开始逐渐融化,最大冻深约为170 cm。试验所用生物炭采购于辽宁省锦州市生物炭制备厂,原料为玉米秸秆。

1.1 试验设计

如图1所示,本试验设置4个试验区域,小区规格为10 m×15 m,各试验小区试验地块安装土壤墒情检测系统(北京东方 ET100),测量10、20、30 cm处土层含水率和土壤温度,埋设冻土器(锦州利成 LQX-DT型)1根,用于监测土壤冻深发展情况。参考团队生物炭实施标准^[15],将试验小区设置4种处理(B20-添加2.0 t·hm⁻²生物、B45-添加4.5 t·hm⁻²生物炭、B70-添加7.0 t·hm⁻²生物炭、CK-对照组,未添加生物炭)。将生物炭一次性均匀撒入试验小区土壤表面,采用液压式深翻犁翻地。

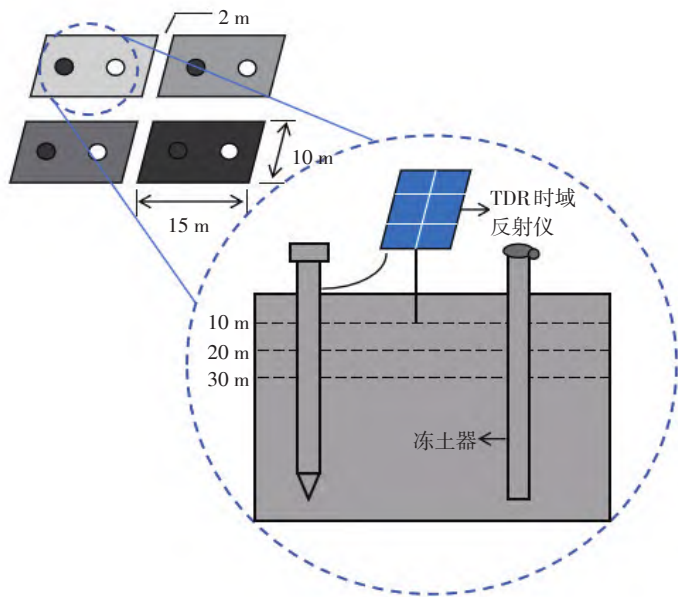


图1 试验设计示意图
Fig. 1 Schematic diagram of experimental design

试验期间环境温度变化和土壤冻深变化如图2所示,环境温度整体呈“先减小、后增大”趋势。初始阶段,环境温度频繁波动,随着冻结期进行,温度逐渐下降,并于2月19日达到最低温(-23.57℃)。此后,温度开始回升,至3月5日升至零上,随后环境温度持续上升。故将2023年11月5日—2024年3月5日定义为冻结期,2024年3月6日—4月30日定义为融化期。在冻结期前期及

完全融化后,分别按照土层深度(h)对0<h≤10 cm(L1)、10 cm<h≤20 cm(L2)、20 cm<h≤30 cm(L3)土层进行分层取样,不同土层3次重复,用于分析土壤结构特征。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 土壤水稳定性团聚体

采用湿筛法测量土壤水稳定性团聚体^[10]。利用各级粒径计算土壤平均重量直径(MWD, mm)、几

何平均直径(GMD, mm)、粒径大于0.25 mm的水稳性团聚体质量分数(WR_{0.25}, %), 以及团聚体破坏百分比(PAD, %)。

$$MWD = \sum_{i=1}^n (W_i \ln \bar{x}_i) \quad (1)$$

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

$$WR_{0.25} = 1 - \frac{M_{R<0.25}}{M_T} \quad (3)$$

$$PAD = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \quad (4)$$

式中: W_i 为 $\bar{x}_i$ 对应的粒级团聚体所占体积比例; $\bar{x}_i$ 为第*i*粒级别的平均直径(mm); $M_{R<0.25}$ 为直径小于

0.25 mm团聚体总质量(g); M_T 代表团聚体的总质量(g)。DR_{0.25}为>0.25mm机械稳定性团聚体含量(%)。

1.2.2 土壤孔径分布

通过土壤水分特征曲线(V-G模型拟合)间接计算土壤孔径分布^[11]。根据本研究的吸力范围对土壤孔径进行分段, 分为极微孔径($d < 0.3 \mu\text{m}$)、微孔径($0.3 \mu\text{m} < d \leq 5.0 \mu\text{m}$)、小孔径($5.0 \mu\text{m} < d \leq 30.0 \mu\text{m}$)、中等孔径($30.0 \mu\text{m} < d \leq 75.0 \mu\text{m}$)、大孔径($75.0 \mu\text{m} < d \leq 100.0 \mu\text{m}$)、土壤空隙($d > 100.0 \mu\text{m}$)6个孔径段。并将孔径划分为3个类别进行分析: 土壤空隙($d > 100 \mu\text{m}$)、中等孔隙($0.3 \mu\text{m} < d \leq 100 \mu\text{m}$)、极微孔径($d < 0.3 \mu\text{m}$)。

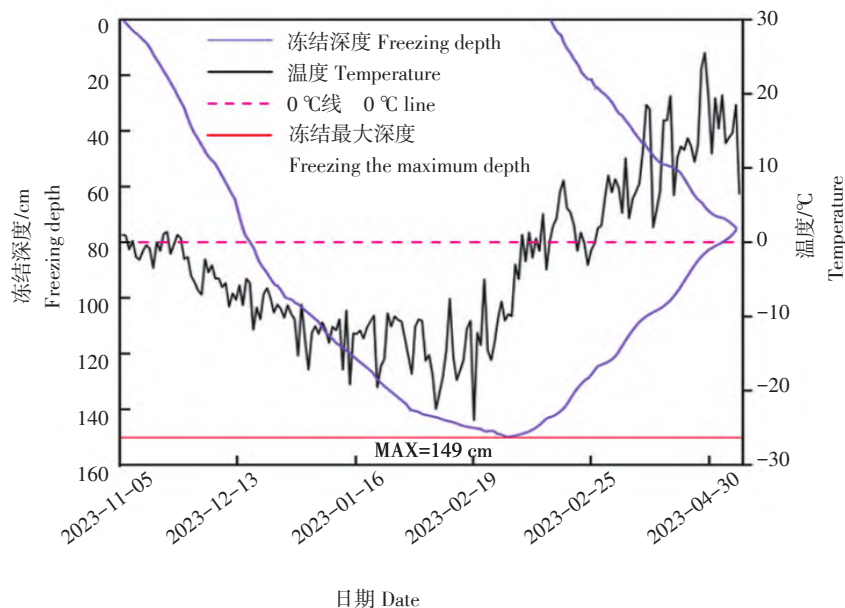


图2 环境温度和土壤冻深变化的测定结果

Fig. 2 Measurement results of changes in environmental temperature and soil freeze depth

1.2.3 土壤融雪水入渗测定

本研究选取土壤累计入渗量与入渗速率作为融雪水入渗特征的评价指标。累计入渗量表征特定时间土壤总吸水量, 入渗速率则动态描述水分进入土壤的过程, 将两者结合可更全面地解析土壤水分运移机制。采用张力入渗仪测定累计入渗量与入渗速率, 试验前校准, 以确保数据的准确性。测量时, 先清除土壤上层直径40 cm、厚度2 cm土壤, 铺一层硅质沙子, 分别测定-5 cm和-10 cm负压水头入渗过程, 土壤入渗速率计算公式如下:

$$Q = \pi r^2 K \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right] \quad (5)$$

$$K(h) = k_{\text{sat}} \sqrt{\alpha h} \quad (6)$$

$$Q(h_1) = \pi r^2 k_{\text{sat}} \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right] \quad (7)$$

$$Q(h_2) = \pi r^2 k_{\text{sat}} \left[1 + \frac{4}{\pi r \alpha} \right] \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\ln \left[\frac{Q(h_2)}{Q(h_1)} \right]}{h_2 - h_1} \quad (9)$$

式中: Q 为单位时间入渗水分体积($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$); K 为导水率($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); r 为储水管半径(cm); H 为土壤表面张力; k_{sat} 为土壤饱和导水率; α 为常数。

1.3 数据处理方法

本研究利用SPSS 27.0和Origin 2022软件进行数据处理、统计分析与图形绘制。运用单因素方差分析(ANOVA)方法比较各处理组间差异,并利

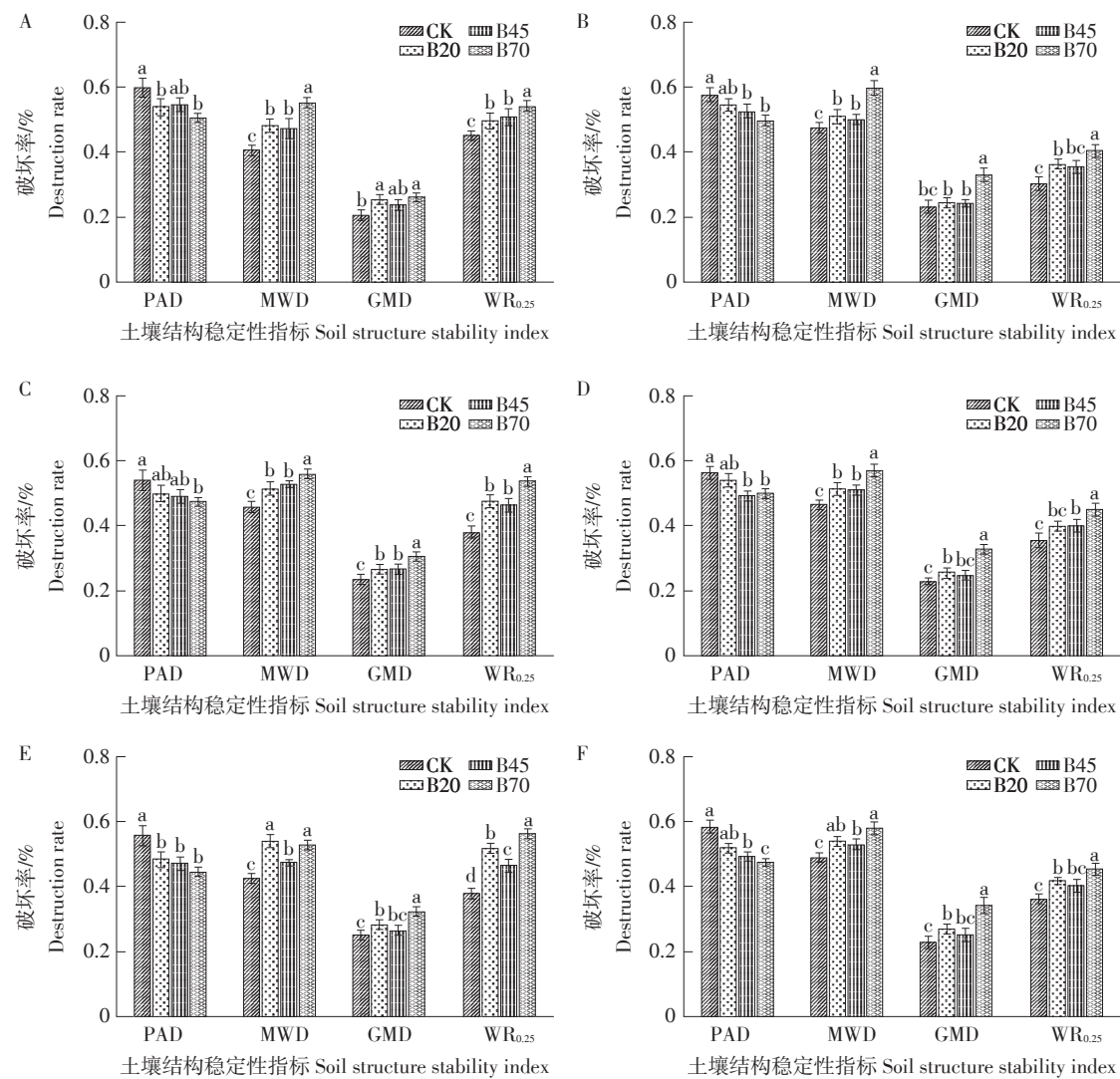
2 结果与分析

2.1 土壤结构参数变化特征

2.1.1 土壤团聚体稳定性

土壤水稳性团聚体分布及其结构稳定性指标

随生物炭施用量的变化特征见图3。增加生物炭施加量可提高土壤平均重量直径、几何平均直径和大于0.25 mm水稳性团聚体的比例,同时减少破碎团聚体的比例。如图3A所示,与CK组相比,不同生物炭施用量处理(B20、B45、B70)下的MWD分别提高18.93%、16.65%、36.47%,GMD分别提高24.54%、18.12%、29.25%,WR_{0.25}分别提高12.16%、13.29%、20.91%,而PAD则分别下降11.38%、10.56%、17.34%。说明施加生物炭有助于形成土壤大团聚体,提高团聚体稳定性。



小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。A. 冻结前期L1; B. 融化期末L1; C. 冻结前期L2; D. 融化期末L2; E. 冻结前期L3; F. 融化期末L3。

Different lowercase letters indicates significant differences between treatments (P<0.05). A. Before freezing L1; B. The end of freezing L1; C. Before freezing L2; D. The end of freezing L2; E. Before freezing L3; F. The end of freezing L3.

图3 土壤团聚体稳定性的测定结果

Fig. 3 Measurement results of soil aggregate stability

如图3C、E所示,冻结前随土层深度从L2增加到L3, MWD和GMD变化趋势一致。以GMD为例,与CK组相比B20和B45处理下, GMD变化幅度分别降至14.02%、4.72%,经B70处理后, GMD的变化幅度略微增至2.59%。这一结果表明, B70处理可增强土壤中大团聚形态稳定性。而 $WR_{0.25}$ 变化幅度与CK组相比, B20、B45、B70处理分别增至9.56%、18.45%、23.15%。此外,在B70处理下,土壤结构稳定性指标总体变化幅度呈降低趋势。例如,对比冻融前后L1层土壤MWD变化可发现, B20处理下,变化幅度从18.59%降至7.74%, B45处理从16.65%降至5.35%, B70处理效果最为显著,从36.47%降至25.63%。结果表明, B70生物炭处理在抵御冻融循环对土壤结构的破坏方面具有显著优势,有效提升土壤稳定性。此外,随土壤深度增加,融化期末变化趋势与冻结前期相似。以GMD为例,施加生物炭后,冻融处理前后L1层的B70处理GMD增加幅度最大,为27.62%。L2层除B20处理略微增长外,CK、B45和B70处理的GMD均有所降低。在L3层, B45和B70处理均呈GMD增加趋势,分别为10.45%和11.40%。结果表明, B70处理在L1层的效果最为显著(见图3)。

2.1.2 土壤孔径分布特征

不同处理下,土壤各层经历冻融循环前后孔径分布特征如图4所示。冻结初期,施加生物炭有助于减少土壤中土壤空隙和极微孔径、增加中等孔隙比例。与CK组相比,3种不同梯度的生物炭处理(B20、B45、B70)对L1层的影响显著,分别降低土壤空隙44.33%、36.83%、50.09%,减少极微孔径1.85%、1.89%、4.13%,中等孔径分别增加12.44%、10.75%、18.93%。L2层土壤在冻结前期与CK组相比, B20、B45和B70处理分别降低土壤空隙15.58%、7.81%、10.18%,极微孔隙比例分别减少3.07%、11.13%、10.11%,中等孔隙增加4.89%、8.58%、10.42%。L3层土壤变化规律与L2层相似, B20、B45、B70处理分别使土壤空隙降低21.08%、32.26%、45.68%,极微孔隙减少14.92%、13.36%、21.42%,中等孔隙增加36.05%、31.13%、8.38%。分析认为,施加生物炭可有效抑制形成土壤空隙和极微孔隙,并促进孔隙结构向中等孔隙转变。在融化期,施加生物炭可增加土壤孔隙度,特别是中等孔隙,减少极微孔隙比例。

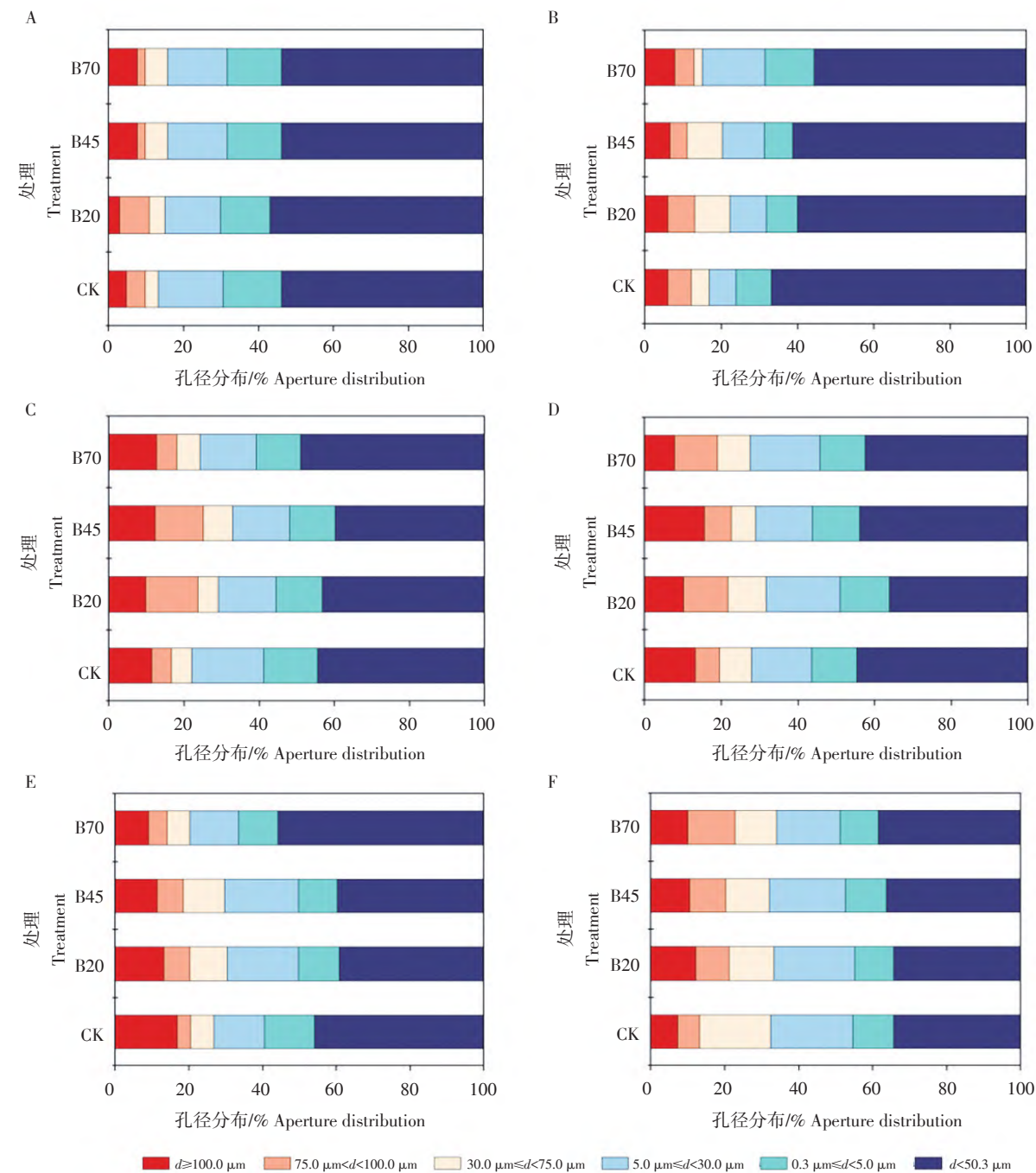
通过分析融化期L1层土壤,结果表明,与CK组相比, B20、B45和B70处理,土壤空隙分别降低0.07%、4.34%、16.32%;中等孔隙分别增加26.88%、18.09%和36.47%;极微孔隙分别降低12.32%、9.96%、17.97%。L2层土壤, B20、B45和B70处理与CK组相比,土壤空隙分别降低23.48%、18.07%、41.03%;极微孔隙降低18.84%、1.43%、4.61%;中等孔隙增加17.65%、14.33%、20.21%。与CK组相比, L3层土壤中B20、B45和B70处理,分别降低土壤空隙67.38%、44.48%、37.08%;极微孔隙减少13.42%、16.47%、12.37%;中等孔隙分别增加8.52%、9.25%、12.42%。冻结前后L3层土壤施加生物炭后土壤空隙减少比例最大。土壤空隙变化在冻结前期随土壤深度增加而降低,而中等空隙变化随土壤深度增加而减小。分析认为,施加生物炭可有效改良土壤孔隙结构,不同土层中, L3层冻结前后极微孔径减少显著($P<0.05$)。冻结前期,土壤空隙变化随土层深度增加呈递减趋势;而中等孔隙与土壤深度呈显著负相关($P<0.05$)。

2.2 施加不同梯度生物炭对土壤累计入渗量和融雪水入渗速率的影响

2.2.1 施加不同梯度生物炭对土壤累计入渗量的影响

图5A、B、C、D分别为张力值-5、-10时土壤累计入渗量。相同张力值下所有处理均表现出相似变化趋势。由图5可知,施加生物炭可提升土壤累计入渗量,其中B70处理优于B20、B45处理。与CK组相比, B20、B45、B70处理使土壤累计入渗量分别增加61.75%、72.97%、149.24%(见图5A)。当张力值从-5 cm降至-10 cm时,累计入渗量变化趋势由B70、B45、B20、CK,转变为B70、B20、B45、CK,且变化幅度减小。融化阶段,不同张力条件下土壤总入渗量变化趋势与冻结初期相似,但变化幅度降低,其影响强度也相应减弱。由图5B可知,与CK组相比, B20、B45、B70处理下,土壤累计入渗量分别增加44.96%、53.39%、117.48%。

当张力值为-5 cm时,CK组累计入渗量由1.41 cm逐渐增加,10 min时,累计入渗量增至4.33 cm,随后增长缓慢;60 min时,累计入渗量增至4.56 cm。B20、B45、B70变化趋势与CK组变化趋势相似,10 min时,累计入渗量分别增至6.82、7.45、10.63;60 min时,累计入渗量分别增至7.32、7.92、11.45 cm。



A. 冻结前期 L1; B. 融化期末 L1; C. 冻结前期 L2; D. 融化期末 L2; E. 冻结前期 L3; F. 融化期末 L3。

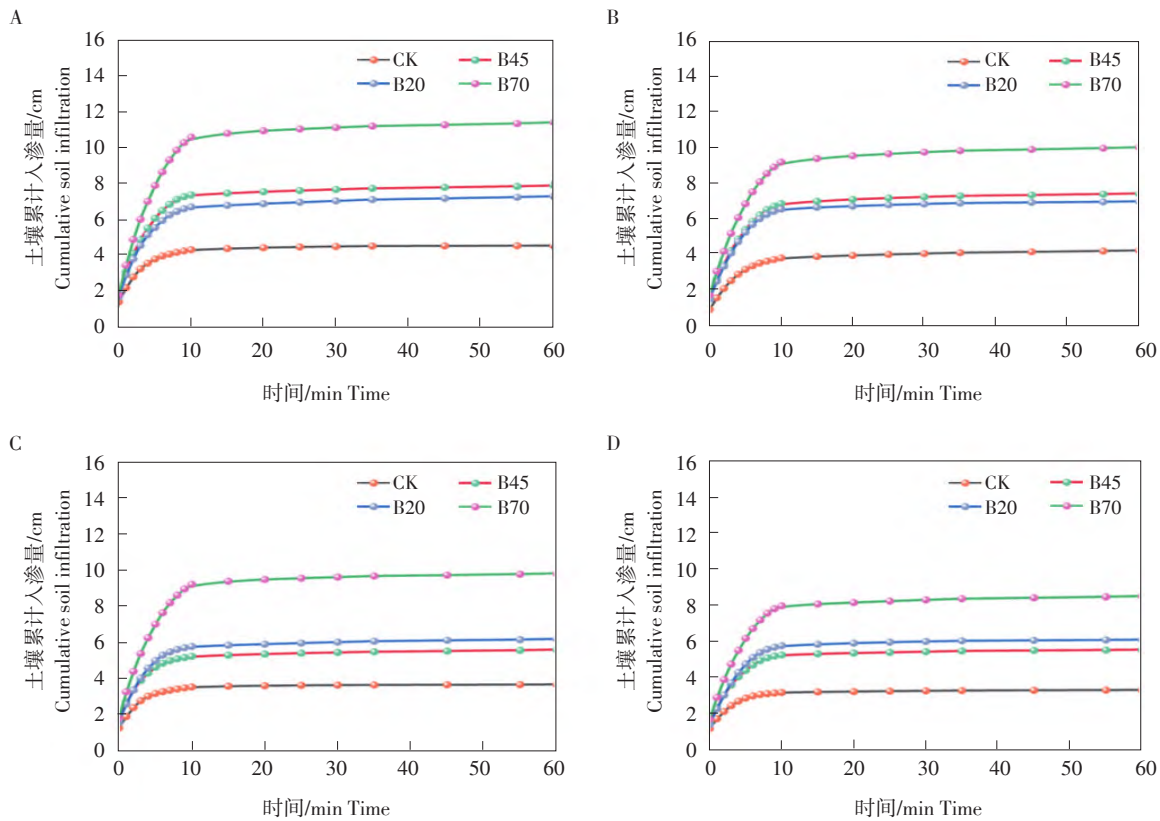
A. Before freezing L1; B. The end of freezing L1; C. Before freezing L2; D. The end of freezing L2; E. Before freezing L3; F. The end of freezing L3.

图4 土壤孔隙分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of soil pores

当张力值为-10 cm 时, CK 组累计入渗量由 1.12 cm 逐渐增加, 10 min 时, 累计入渗量增至 3.39 cm; 60 min 时, 累计入渗量增至 3.53 cm。B20、B45、B70 处理与 CK 组变化趋势相似, 10 min 时, 累计入渗量分别增至 5.08、5.63、9.07 cm; 60 min 时,

累计入渗量分别增至 6.05、5.46、9.69 cm; 融化期末, 两张力值条件下达到稳定时间与冻结前期变化趋势相似, 均在近 10 min 时, 土壤累计入渗量趋于稳定。B70 处理对提升土壤水分入渗能力效果显著, 可有效增强融雪水利用效率。



A. 张力值为-5 cm时冻结前期的土壤累计入渗量; B. 张力值为-5 cm时融化期末的土壤累计入渗量; C. 张力值为-10 cm时冻结前期的土壤累计入渗量; D. 张力值为-10 cm时融化期末的土壤累计入渗量。

A. Cumulative soil infiltration volume before freezing when the tension value is -5 cm; B. Cumulative soil infiltration at the end of melting when the tension value is -5 cm; C. Cumulative soil infiltration volume before freezing when the tension value is -10 cm; D. Cumulative soil infiltration at the end of melting when the tension value is -10 cm.

图5 土壤累计入渗量

Fig. 5 Cumulative soil infiltration amount

2.2.2 施加不同梯度生物炭对土壤融雪水入渗速率的影响

由图6A、C可知,当张力值为-5 cm时,CK组处理入渗速率由 $1.41 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 逐渐降低,25 min时,降至 $0.04 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$,随后趋于平缓;60 min时,入渗速率降至 $0.02 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。B20、B45、B70变化趋势与CK组相似,25 min时,入渗速率分别降低0.08、0.07、 $0.10 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$;60 min时,降至0.05、0.04、 $0.06 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。当张力值为-10 cm时,CK组入渗速率由 $1.12 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 逐渐降低,25 min时,入渗速率降至 $0.02 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$,随后趋于平缓;60 min时,入渗速率降至 $0.01 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。B20、B45、B70变化趋势与CK组相似,25 min时,分别降至0.06、0.05、 $0.70 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$;60 min时,入渗速率降至0.03、0.03、 $0.05 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。所有处理入渗速率均下降,与张力值为-5 cm时相比,CK、B20、

B45、B70处理稳定入渗速率分别降低50.00%、40.00%、25.00%、16.67%。

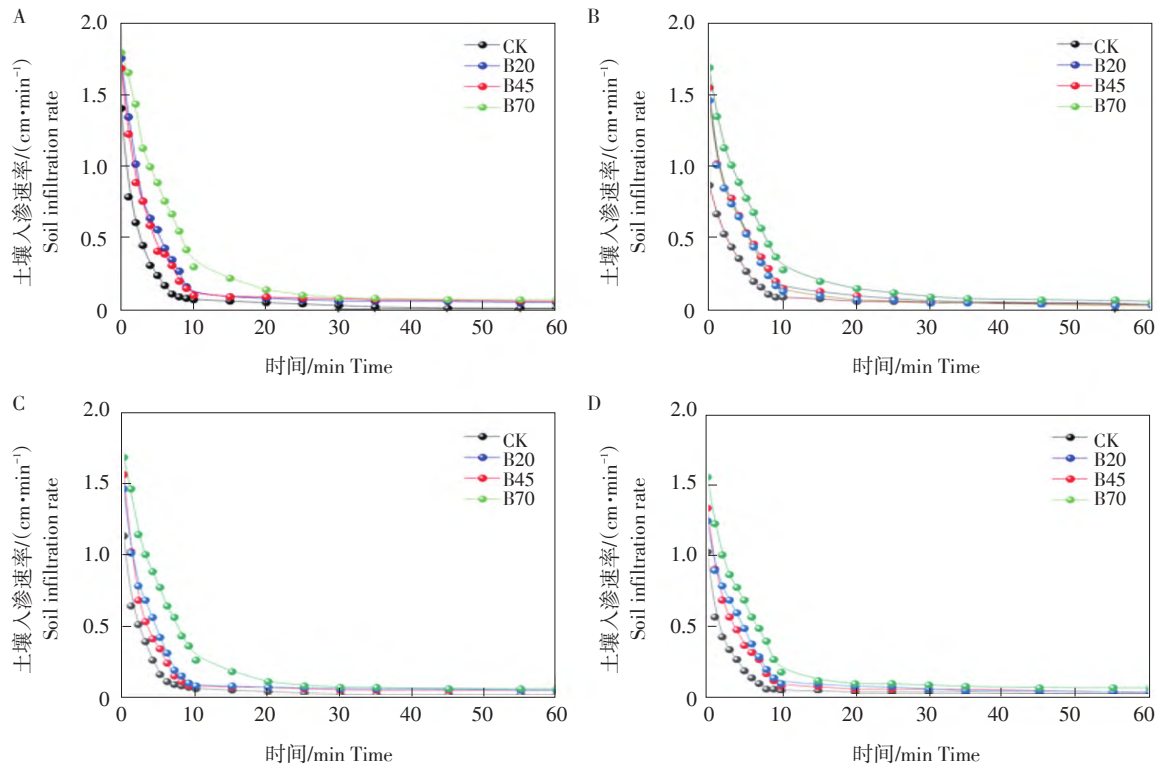
如图6B、D所示,当张力值为-5 cm时,CK组处理入渗速率由 $0.87 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 逐渐降低,25 min时,入渗速率降至 $0.06 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 后趋于平缓;60 min时,入渗速率降至 $0.05 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。B20、B45、B70变化趋势与CK组变化趋势相似,25 min时,入渗速率分别降至0.07、0.08、 $0.12 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$;60 min时,入渗速率降至0.04、0.05、 $0.07 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。当张力值降至-10 cm时,CK组处理入渗速率由 $1.01 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 逐渐降低,20 min时,入渗速率降至 $0.04 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 后趋于平缓;60 min时,入渗速率为 $0.03 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。B20、B45、B70变化趋势与CK组相似,20 min时,入渗速率分别降低至0.06、0.04、 $0.80 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$;60 min时,入渗速率降至0.02、0.03、 $0.05 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。所有处理稳定入渗速率均下降,与张力值为-5 cm

相比, CK、B20、B45、B70 处理稳定入渗速率分别降低 40.00%、50.00%、40.00%、28.57%。

2.3 土壤结构与融雪水入渗相关指标的相关性

由图 7 可知, 融化阶段累计入渗量与 MWD 和 $WR_{0.25}$ 间差异极显著 ($P<0.05$), 相关系数 (R) 高达 0.999。土壤孔隙度与累计入渗量间相关性在冻结期和融化期表现出相反趋势, 且在融化期 L3 土层中显著。中等孔径与极微孔径在 L1 土层均差异显著

($P<0.05$), 说明孔径变化对土壤水分动态具有重要影响。对于 MWD 而言, 其相关性在冻结前期主要集中在 L1 土层; 而在融化阶段, 所有土层相关性均显著增强。当张力值为 -5 cm 时, 相关性随土壤深度的增加而逐渐降低; 相反, 在张力值为 -10 cm 时, 相关性随土壤深度增加而增强。 $WR_{0.25}$ 与累计入渗量表现出极高相关性, 特别是在 L3 层, 相关系数 (R) 达 0.997。

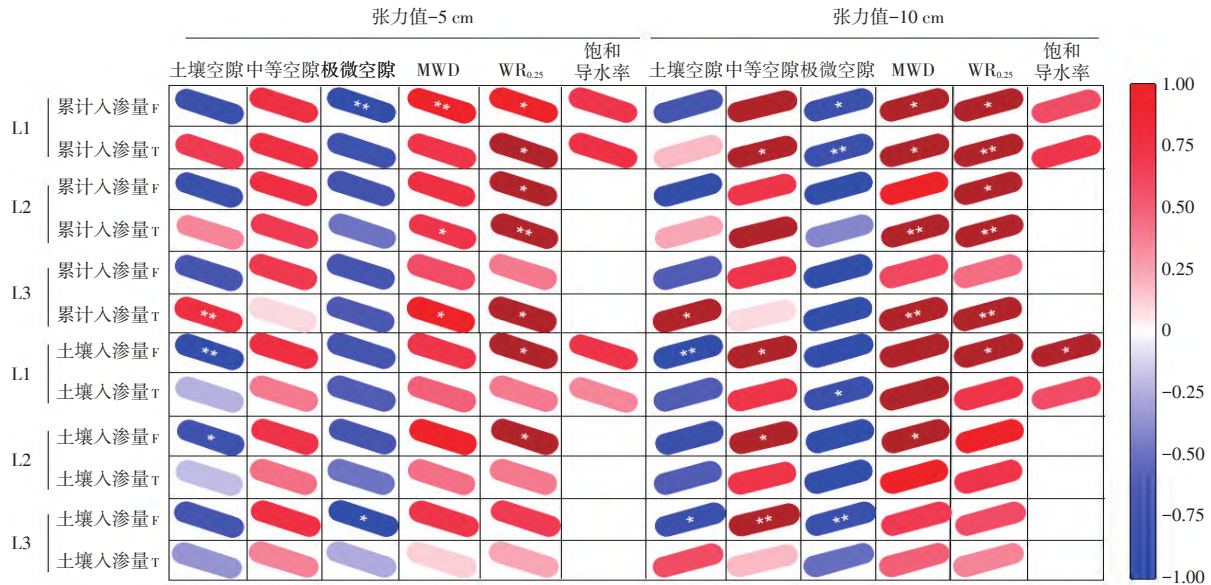


A. 张力值为-5 cm 时冻结期的土壤入渗速率; B. 张力值为-5 cm 时融化期的土壤入渗速率; C. 张力值为-10 cm 时冻结期的土壤入渗速率; D. 张力值为-10 cm 时融化期的土壤入渗速率。
A. Soil infiltration rate freezing when the tension value is - 5 cm; B. Soil infiltration rate during the melting period when the tension value is - 5 cm; C. Soil infiltration rate freezing when the tension value is - 10 cm; D. Soil infiltration rate during the melting period when the tension value is - 10 cm.

图6 土壤入渗速率
Fig. 6 Soil infiltration rate

通过分析土壤入渗速率与土壤孔径间的相关性发现, 土壤空隙、极微孔径与土壤入渗速率呈负相关, 其他参数则呈正相关。在 L1 层, 土壤空隙与土壤入渗速率间呈极显著负相关 ($P<0.01$), 相关系数 (R) 高达 -0.999, 表明 L1 层的土壤空隙结构对入渗速率具有显著抑制作用。此外, 不同土壤深度及冻融循环条件下, 孔径类型对土壤入渗速

率的影响也存在显著差异。在冻结前期, 中等孔径对土壤入渗速率的影响呈显著正相关, 其相关系数 (R) 高达 0.994, 远超融化期。综上所述, 土壤孔径分布特征在分析土壤入渗速率变化中具有重要作用, 而土壤入渗速率与物理结构参数间的复杂关系则进一步凸显土壤水分运动机制的重要性。



F表示冻结期, T表示融化期。蓝色表示负相关, 红色表示正相关, 颜色深浅为相关性的强度。*表示差异显著($P<0.05$), **表示差异极显著($P<0.01$)。

F represents the freezing period, T represents the thawing period. Blue indicates negative correlation, red indicates positive correlation, and the intensity of the color represents the strength of the correlation.* indicates significant differences ($P<0.05$), ** indicates extremely significant differences ($P<0.01$).

图7 各指标间相关性分析结果

Fig. 7 Correlation analysis results among the indicators

3 讨论

3.1 施加生物炭对土壤结构的作用机制

生物炭作为土壤改良剂, 主要在物理特性上影响土壤团聚体稳定性^[12]。本研究发现, 施加生物炭可提高土壤团聚体的稳定性, 其中, 以B70处理效果最佳, 可能是因为高剂量的生物炭为土壤提供更多有机碳和改性表面, 促进土壤团聚体的形成和稳定, 增加土壤孔隙度, 增强土壤持水能力。生物炭的高比表面积和多孔性有助于黏结土壤颗粒, 使其作为团聚体的胶结剂, 增强颗粒间的凝聚力, 提高团聚体的稳定性和渗透性^[13]。但Busscher et al. 研究发现, 山桃壳生物炭降低团聚体稳定性, 桉树木材生物炭对土壤稳定性无显著影响^[14]。因此, 在特定土壤条件下探讨生物炭的作用效果尤为重要。经历冻融循环后, 土壤中的水分结冰, 导致土壤体积膨胀, 破坏土壤团聚体和孔隙结构。而在融化期间, 冰晶融化, 土壤结构重新排列, 间接影响孔隙度和渗透性。本研究发现, 施加生物炭可一定程度上减弱冻融循环对土壤结构的破坏, 维持较高的孔隙度和渗透性, 说

明施加生物炭可为土壤提供保护机制, 减轻冻融过程中冰晶形成和膨胀对土壤团聚体的破坏作用。另一方面, 土壤团聚体是土壤结构形成的基础, 其粒径分布是反映土壤质量的重要因素^[15], 生物炭多孔结构可降低温度变化产生的不利影响, 提高团聚体稳定性。本研究结果表明, 施加生物炭可提高土壤中大团聚体、降低破碎团聚体比例。这种变化有助于提高土壤入渗能力, 减少融雪水地表径流, 提高融雪水分利用效率^[16]。

土壤孔径分布对土壤水分-溶质运移和作物根系发育过程具有重要影响。本研究发现, 冻融前期, 施加生物炭可降低土壤空隙和极微孔径比例, 增加中等孔隙比例, 说明施加生物炭可抑制生成两端孔隙, 促进土壤孔隙向中等孔隙转化。从L1层到L3层, 随着土壤深度增加, 除极微孔径变化幅度呈先降后增趋势外, 各段孔径变化趋势保持一致。此外, 在融化期施加生物炭可增加土壤孔隙和中等孔隙比例, 降低极微孔径比例。这说明在冻融循环和生物炭的双重作用下, 促进土壤空隙向大孔径转化。深层土壤较浅层土壤不易受冻融作用影响, 随着土壤深度增加, 各孔隙变

化幅度逐渐减小。

土壤孔隙是水分和空气的重要储存空间^[17]。土壤密实化破坏孔隙结构,导致土壤入渗能力下降,且密实化会促进形成新孔隙结构,降低孔隙均匀性,影响土壤持水能力^[18-19]。本研究发现,施加生物炭可改善孔径多样性和连通性,优化土壤孔隙结构。Amoakwah et al. 研究发现,施加生物炭是增加土壤极微孔隙数量的重要原因^[20];这与本研究结果不同,本研究中,随着生物炭施加量的增加,中等孔隙增加、土壤空隙和极微孔隙降低。中等孔隙的增加是因为水分迁移与冻融变形作用。冻融作用促使土壤颗粒重新排列,推动水分向冻结面迁移,使水分更易在较大空隙中流动,增强中等孔隙储水能力。此外,Wang et al. 研究发现,冻融作用改变土壤孔径分布特征,促使孔隙向更大孔径发展^[21],冻融变形使孔径发展逐渐趋于稳定。在生物炭调控作用下,土壤空隙向中间均匀化发展。中等孔隙依靠重力作用和毛细管力,释放和保留水分,而土壤与有机质颗粒间形成的有效孔隙,增加水分容纳空间,提高土壤持水能力。与冻结前期不同,在融化期施加生物炭增加土壤空隙比例。土壤孔隙变化影响水分迁移,在未完全融化期使水分重新冻结^[22],也会在融化期增强土壤水分入渗能力。

3.2 施加生物炭对融雪水入渗的影响

在寒区水文循环中,融雪水入渗是关键环节,对农业生产、水资源管理和生态环境保护具有深远影响^[23]。特别是在季节性冻土地区,融雪水入渗过程因冻结土壤层的存在而变得复杂^[24]。冻结土壤层形成物理屏障,在冻结状态下,土壤孔隙中的水分被冰晶替代,降低土壤孔隙度和渗透性^[25],阻碍融雪水的垂直运动。这使雪水更多地积聚在土壤表层或冻层上部,形成土壤上层滞水^[26],增加地表径流风险。冻结土壤层的融化,不仅导致土壤结构变化,也影响融雪水的入渗和分布。在冻结土壤层融化过程中,土壤空隙度和渗透性增加,重新分布土壤水分^[27],为融雪水的入渗提供有利条件。Jiang et al. 研究发现,冻结土壤层融化期间,融雪水的入渗速率和入渗量随土壤温度和水分条件的变化而变化^[28]。生物炭对土壤持水性和导水性的调节作用是影响融雪水入渗过程的另一关键机制。生物炭的多孔结构和高比表面积为融

雪水提供更多吸附位点,可有效吸附和保持水分^[29],显著提高土壤持水性。在融雪水入渗过程中,施用生物炭会改变其入渗机制。李帅霖等研究表明,生物炭能改善土壤结构,增加孔隙度,促进融雪水入渗^[16]。这主要归因于生物炭颗粒对土壤孔隙结构的改变,进而影响水分运动过程。已有研究表明,土壤中外来物质的添加可能占据原有孔隙空间,压缩土壤空气,破坏孔隙间的连通性,对土壤渗透性产生负面影响,不利于表层土壤水分的维持^[30];这与本研究结果不同,本研究中,施加生物炭,可增强土壤入渗能力,其中B70处理对土壤入渗效果最为显著。这是因为生物炭改善了土壤水分分布,特别是在双层土壤结构中,表层施用生物炭,更直接地影响土壤表面特性和入渗初期的行为。施加生物炭,不仅增强表层土壤蓄水能力,还显著提高下层土壤持水性。这可能主要源于土壤孔隙数量的变化,以及生物炭的疏水性质。生物炭施用量是影响其对土壤水分运动的关键因素,随着生物炭施用量的增加,生物炭颗粒与水分运动间的相关性增强,提高土壤的渗透能力。此外,随着生物炭施加量的增加,生物炭颗粒为水分提供更多接触面积,促进水-土、水-生物炭颗粒结合体形成较大团粒结构,有助于拓宽土壤中的水分通道。土壤随着冻融循环过程,生物炭作用效果随之减弱,导致融化期的总入渗水量低于冻结期。

土壤入渗能力可直接体现入渗速率^[31]。本研究表明,无论是在冻结期还是融化期,B70处理下土壤入渗速率均为最大值。这可能是因为入渗初期,表层土壤与生物炭直接混合,增强土壤导水能力。此外,入渗初期表层土壤含水率较低,土壤未达到饱和状态^[32]。随着入渗过程的进行,表层土壤含水率逐渐增加,并逐渐趋近饱和,此时土壤入渗速率逐渐减缓,最终趋于稳定。这是因为当土壤达到最大持水量时,水分运动主要受重力作用向下迁移,对基质势的影响减弱,直至基质势降为零。本研究发现,土壤孔隙与极微孔隙同土壤入渗量和入渗速率呈负相关,这是因为融雪水入渗导致土壤孔隙结构发生变化。融雪水入渗后,土壤孔径分布趋于细化,大团聚体破碎成小颗粒堵塞通道,极微孔隙增加,阻碍水分下渗,导致地表滞水。特别在结构不稳定土壤中,表层

含水率上升,入渗滞后导致径流量增加^[33]。

4 结 论

施加生物炭可显著提升土壤团聚体的稳定性,其中B70处理效果最为显著。与CK组相比,冻结期L1、L2、L3层的MWD、GMD和WR_{0.25}均有所增加,PAD降低。融化期L1、L2、L3层的MWD、GMD和WR_{0.25}同样呈增加趋势,PAD持续降低。

施加生物炭可减少土壤空隙和极微孔隙,增加中等空隙,B70处理优于其他处理。同时,施加生物炭可增加土壤的累积入渗量和入渗速率,B70处理效果最为显著。在冻结期前,B70处理土壤累计入渗量较CK组增加149.24%,在融化期末,土壤累计入渗量较CK组增加117.48%。张力值分别为-5、-10 cm时,B70处理稳定入渗速率均为最高,达到稳定入渗速率时间分别为25和20 min。

综上所述,施加生物炭对提升寒区农田土壤结构稳定性和融雪水入渗效率效果显著,其中B70处理效果最佳,可为高效利用融雪水资源提供技术支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 汪光宗,王宝山,张继成,等.电-生物耦合慢滤处理高寒牧区融雪水的效能[J].中国给水排水,2024,40(17):42-48.
- [2] Harder P, Pomeroy J W, Helgason W D. Implications of stubble management on snow hydrology and meltwater partitioning[J]. Canadian Water Resources Journal, 2019, 44(2): 193-204.
- [3] Zhou Z Q, Liu S S, Zhu B Y, et al. The effect of the construction of a tillage layer on the infiltration of snowmelt water into freeze-thaw soil in cold regions[J]. Water, 2024, 16(22). DOI: 10.3390/W16223224.
- [4] 王鑫雨,范昊明.东北黑土区融雪径流侵蚀力时空分布[J].水土保持学报,2024,38(1):40-48,59.
- [5] 杨鑫,刘刚,谢云,等.东北黑土区北部典型小流域融雪径流及发生条件分析[J].中国水土保持科学,2019,17(4):34-40.
- [6] He H L, Dyck M F, Si B C, et al. Soil freezing-thawing characteristics and snowmelt infiltration in Cryals of Alberta, Canada[J]. Geoderma Regional, 2015, 5. DOI: 10.1016/j.geodrs.2015.08.001.
- [7] 魏永霞,石国新,冯超,等.黑土区坡耕地施加生物炭对土壤结构与大豆产量的影响[J].农业机械学报,2019,50(8):309-320.
- [8] 张宝轩,王月铭,陈思涵,等.生物炭对苹果园地土壤理化性质及果实品质的影响[J].北方园艺,2024(13):82-91.
- [9] 刘世思,裴青宝,宋奕欣,等.生物炭添加量对红壤水分运移的影响[J].水资源与水工程学报,2024,35(5):217-224.
- [10] 张乃木,宋娅丽,王克勤.基于干、湿筛法下滇中森林土壤团聚体酶活性特征对氮沉降的响应[J].水土保持学报,2023,37(1):246-253.
- [11] 高晓飞,高燕,刘刚.使用有限数据推求土壤水分特征曲线VG模型的参数[J].灌溉排水学报,2024,43(S1):61-66.
- [12] 马新雨,刘子剑,孙树臣,等.4年单季生物炭与秸秆还田对潮土土壤团聚体及有机碳影响[J].灌溉排水学报,2025,44(1):74-81,88.
- [13] 刘东,何禹衡,张亮亮,等.不同条件下冻融循环过程对土壤结构的影响研究[J].东北农业大学学报,2023,54(7):58-72.
- [14] 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.
- [15] 李越,徐曼,谢永红,等.不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响[J].环境科学,2024,45(2):974-982.
- [16] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):135-144.
- [17] 孟晨,牛健植,余海龙,等.土壤大孔隙三维特征影响因素和测定方法研究进展[J].北京林业大学学报,2020,42(11):9-16.
- [18] Goldberg-yehuda N, Nachshon U, Assouline S, et al. The effect of mechanical compaction on the soil water retention curve: Insights from a rapid image analysis of micro-CT scanning[J]. Catena, 2024, 242. DOI: 10.1016/J.CATENA.2024.108068.
- [19] 张光辉,魏玉杰,周小荃,等.干湿循环强度与频度对花岗岩红壤孔隙分布的影响[J].农业工程学报,2022,38(S1):106-113.
- [20] Amoakwah E, Frimpong K A, Okae-anti D, et al. Soil water retention, air flow and pore structure characteristics after corn cob biochar application to a tropical sandy loam[J]. Geoderma, 2017, 307. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.08.025.
- [21] Wang F, Li G Y, 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(1). DOI: 10.1155/2020/8839347.
- [22] 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. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.11.011.
- [23] Qin Y, Hong C P, Zhao H Y, et al. Snowmelt risk telecouplings

for irrigated agriculture[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(11): 1007–1015.

[24] 郗鸿峰, 程婷婷, 洪沛东, 等. 季节性冻土区融雪入渗对地下水的补给作用分析[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(2): 23–29.

[25] 戴长雷, 常龙艳, 孙思淼, 等. 寒区冻土层水理性质研究[J]. *黑龙江大学工程学报*, 2013, 4(2): 1–8, 18.

[26] 孙宝洋, 吴志广, 李占斌, 等. 冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 57–65.

[27] Bing H, He P, Zhang Y. Cyclic freeze–thaw as a mechanism for water and salt migration in soil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 675–681.

[28] Jiang R Q, Li T X, Liu D, et al. Soil infiltration characteristics and pore distribution under freezing–thawing conditions[J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(4): 2133–2146.

[29] 高言, 沈洪政, 杨婷, 等. 不同生物炭添加量对土壤水分运动过程的影响及模拟研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(9): 134–140.

[30] Castellini M, Giglio L, Niedda M, et al. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 154. DOI: 10.1016/j.still.2015.06.016.

[31] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 40–45.

[32] 曾辰, 王全九, 樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 24–30.

[33] 曹伟, 盛煜, 吴吉春, 等. 黄河源区不同类型冻土土壤水分入渗特性[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 655–664.