

生物炭和秸秆影响农田冻融土壤水热盐运移机理分析

付强^{1,2} 陈旭阳^{1,2} 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高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 在冻融循环过程中,土壤水分、热量及盐分发生显著迁移,这些动态变化加剧了土壤盐碱化,进而对农业生产稳定性和土壤肥力持续性产生深远影响。基于大田试验,将生物炭和秸秆分别施加于0~15 cm土层(BQ和CQ)、15~30 cm(BS和CS),另设空白对照组(CK),监测冻融期0~15 cm、15~30 cm、30~45 cm 3层土壤的含水率、温度及含盐量,探讨生物炭与秸秆在不同施用深度对土壤水、热、盐动态变化的影响。同时,采用结构方程模型分析不同土层间水分、温度和盐分的相互关系。研究结果表明:试验周期内,施加生物炭和秸秆显著改善了土壤水、热、盐特性。其中,BQ、BS、CQ、CS处理在0~45 cm土层平均含水率分别较对照组提高2.85、3.13、1.56、2.15个百分点;各处理均有效提升了土壤温度并减小了冻融期温度波动;BQ和BS处理在0~45 cm土层平均含盐量较对照组分别增加0.34、0.40 g/kg,且施加生物炭通过吸附盐分有效抑制了盐分迁移。结构方程模型结果表明:水分迁移会对热量传递和溶质运移造成影响,生物炭和秸秆施用改变了不同土层间水、热、盐的相关性。研究结果可为季节性冻土区土壤生态环境调控提供理论依据和技术支撑。

关键词: 生物炭; 秸秆; 农田冻融土壤; 结构方程; 水热盐运移

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2025)05-0501-11

OSID:



Effects of Biochar and Straw on Transport of Water, Heat and Salt in Freeze-thawed Soil in Farmland

FU Qiang^{1,2} CHEN Xuyang^{1,2} 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: During freeze-thaw cycles, significant migration of soil moisture, heat, and salts occurs, which exacerbates soil salinization, thereby having a profound impact on agricultural production stability and the sustainability of soil fertility. Based on field experiments, biochar and straw were applied to the 0~15 cm soil layer (BQ and CQ) and the 15~30 cm layer (BS and CS), with a blank control group (CK) as a comparison. The moisture content, temperature, and salt concentration in the 0~15 cm, 15~30 cm, and 30~45 cm layers were monitored during the freeze-thaw period to investigate the effects of biochar and straw applied at different depths on soil moisture, heat, and salt dynamics. A structural equation model was used to analyze the relationships between moisture, temperature, and salts across different soil layers. The results showed that during the experimental period, the application of biochar and straw significantly improved the water, heat, and salt characteristics of the soil. Specifically, the average moisture content in the 0~45 cm soil layer for the BQ, BS, CQ, and CS treatments was increased by 2.85, 3.13, 1.56, and 2.15 percentage points, respectively, compared with that of the control group. All treatments effectively increased soil temperatures and reduced temperature fluctuations during the freeze-thaw period. The average salt concentration in the 0~45 cm soil layer for the BQ and BS treatments was increased by 0.34 g/kg and 0.40 g/kg, respectively, compared with that of the control group. Furthermore, the application of biochar effectively suppressed salt migration by adsorbing salts.

收稿日期: 2024-11-17 修回日期: 2025-01-19

基金项目: 国家自然科学基金区域联合基金重点项目(U20A20318)、国家自然科学基金项目(52179033、52279035)和黑龙江省优秀青年科学基金项目(YQ2020E002)

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

The structural equation model results indicated that moisture migration affected both heat transfer and solute movement, and the application of biochar and straw changed the correlations between water, heat, and salts across the different soil layers. These findings can provide theoretical and technical support for regulating soil ecological environments in regions with seasonal frozen soil.

Key words: biochar; straw; farmland freeze-thaw soil; structural equation; water, heat and salt migration

0 引言

中国东北地区土壤冻融循环频繁,导致农田水土环境复杂多变,给农业生产带来了严峻挑战。在冻融过程中,大量融雪水渗入土壤,显著影响了土壤中盐分的垂直迁移,促进表层盐分溶解,加速其向下层土壤迁移^[1]。随着土壤含水率的增加,盐分再分布现象愈加明显,进一步加剧了土壤盐碱化^[2]。同时,伴随全球气候变暖,降雪量和融雪速率的变化加剧了融雪水入渗引发的盐分迁移,增加了土壤盐碱化风险,为农业生产带来了更多的不确定性。

生物炭作为一种土壤改良剂,在调控土壤水、热、盐迁移方面具有显著潜力,引起了国内外学者广泛关注。生物炭具有多孔结构和高比表面积等特性,能够增强土壤保水性和导水性^[3],以及调节土壤温度和减缓温度波动^[4-5],可为作物提供更为稳定的生长环境。此外,生物炭在提升土壤阳离子交换能力(CEC)方面表现突出^[6],能够有效吸附并保持钠、钾、钙、镁等盐分^[7],减少盐分垂直迁移,进而降低土壤盐碱化风险。它还能通过固定氮、磷等养分,减少硝态氮、氨态氮流失,提高养分利用效率^[8]。生物炭不仅能增加土壤中的有机碳(TOC)和溶解性有机碳(DOC)含量^[9],还能通过提高土壤有机质含量,进一步促进微生物活性,从而改善土壤结构^[10]。

秸秆作为农业废弃物,将其还田后可有效调控土壤水、盐运移^[11],不仅能够增加土壤有机质含量,而且可以提升土壤保水和导水能力^[12]。其分解后的产物可以增强土壤微生物活性,增加微生物碳氮含量,促进碳氮循环^[13]。在秸秆分解过程中产生的有机酸有助于吸附土壤中的盐分,限制盐分过度迁移^[14]。同时,冻融期间覆盖秸秆可降低土壤表层温度的变化幅度^[15],减少土壤表层水分散失。由此可见,秸秆和生物炭对于改善土壤的保水、保温及抑制盐分迁移方面具有重要作用。

目前研究大多集中在生物炭和秸秆不同施加量对土壤水、热、盐的影响,研究对象多以作物生育期为主。关于不同深度施用生物炭和秸秆对土壤水、热、盐耦合迁移的影响研究相对较少,且机理性问题尚不清楚。同时,现有研究大多将生物炭和秸秆施

加在土壤表层,表层生物炭或秸秆容易受到地表径流和风蚀的影响,尤其是在冻融期,融雪水和降雨会加剧生物炭或秸秆流失。其次,改善犁底层附近土壤透水性结构与结构也是施用的一大关键。犁底层通常位于 20~30 cm 深处,由于长期耕作而形成的紧实层会阻碍水分和养分渗透^[16],导致水、盐等物质在表层积累。通过将生物炭或秸秆施用到土壤深度 15~30 cm,可以有效改善犁底层物理结构,促进水分下渗,增强土壤对水分和盐分迁移的调控能力。

基于上述问题,本文从秸秆和生物炭施加深度的视角,研究不同深度施加生物炭与秸秆对冻融期土壤水、热、盐迁移的调控机制,包括:不同深度施加生物炭冻融土壤水热盐运移规律;不同深度施加秸秆土壤水热盐迁移规律;生物炭和秸秆施加深度对冻融土壤水、热、盐迁移的影响机理,为确定季节性冻土区施加生物炭与秸秆施加方式,以及提高水资源高效利用和防治土壤盐碱化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验时间为 2022 年 10 月—2023 年 4 月,地点位于黑龙江省水利科技试验研究中心(45°22'N, 126°45'E),如图 1 所示。该试验区地处松嫩平原南部边缘,属典型的中温带大陆性季风气候。夏季温暖湿润,冬季寒冷漫长,冬季从 11 月持续到次年 3 月中旬,年平均气温约为 4.5℃,极端最低气温可达 -38℃,极端最高气温可达 38℃。平均年降水量约为 529 mm,主要集中在 7、8 月,占全年降水量的 65%。冬季积雪覆盖厚度通常为 20~40 cm,土壤冻深一般为 1.5~2.0 m。试验区土壤类型为壤土^[17],其理化性质如表 1 所示。

1.2 试验设计

试验共设置 5 个处理(图 1):BQ(0~15 cm 施加生物炭)、BS(15~30 cm 施加生物炭)、CQ(0~15 cm 施加秸秆)、CS(15~30 cm 施加秸秆)、CK(对照组),每个处理面积为 5 m×5 m,地块间距为 4 m。其中:生物炭购自吉林宏源嘉廉禾生物质能源有限公司,原料为玉米秸秆,通过 500~600℃ 高温裂解制成;秸秆是从田间收获的玉米秸秆,在通风、避光

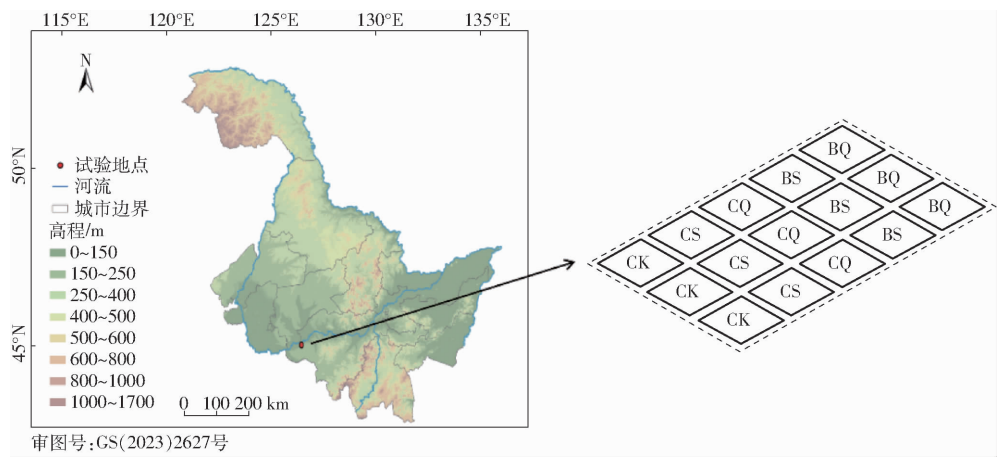


图 1 研究区域位置
Fig. 1 Map of study area

表 1 试验区土壤理化参数

Tab. 1 Physicochemical parameters of soil in experimental area

土壤深度/ cm	干容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	电导率/ ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	阳离子交换量/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH 值	N 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	P 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	K 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质含 量/%
0 ~ 15	1.29	0.25 ± 0.03	15.04 ± 1.43	5.76 ± 0.08	55.23 ± 2.47	13.84 ± 0.96	145.37 ± 5.42	3.02 ± 0.13
15 ~ 30	1.39	0.31 ± 0.07	18.44 ± 0.46	6.11 ± 0.14	41.78 ± 2.95	10.15 ± 0.85	124.68 ± 4.33	2.79 ± 0.18
30 ~ 45	1.43	0.33 ± 0.04	20.78 ± 1.45	6.58 ± 0.26	38.56 ± 2.33	8.43 ± 0.68	110.32 ± 5.18	2.66 ± 0.12

环境中风干后,粉碎成直径 2 mm 的细颗粒用于处理。参考文献[18],生物炭和秸秆施加量均设置为 3 kg/m²。每种处理设置 3 组平行试验,在各个试验地块安装土壤墒情监测仪(ET100 型,东方智感(浙江)科技股份有限公司)。

在土壤冻结前,先将 BS 和 CS 处理 0 ~ 15 cm 土壤剥离,然后将生物炭或秸秆均匀施加于 15 ~

30 cm 土层中,随后将之前剥离的土壤覆盖回原位。对于 BQ 和 CQ 处理,则直接将生物炭或秸秆施加于 0 ~ 15 cm 土层。为了避免不同深度土层生物炭和秸秆混合,采用人工起垄,垄高为 15 cm。整个试验期降雪不做处理,保持自然覆盖状态。

将试验期间裸地处理区域土壤逐日冻结深度绘制成冻深变化过程曲线,如图 2 所示。

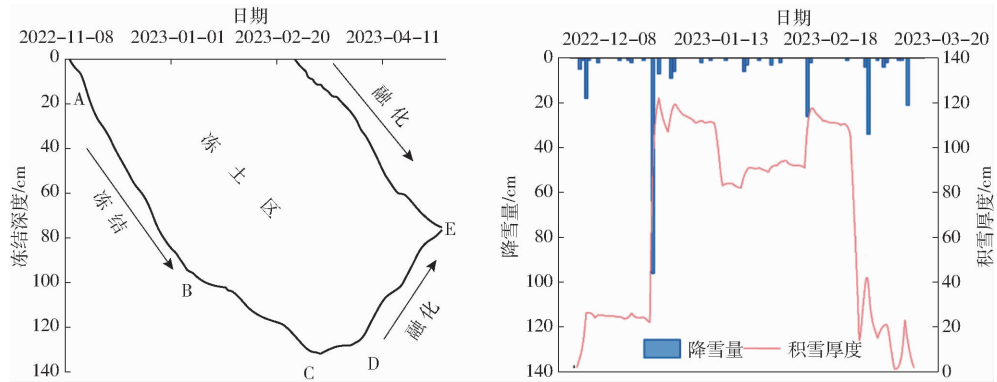


图 2 土壤冻结曲线与降雪量和积雪厚度

Fig. 2 Freeze-thaw curve of soil and its relation to snowfall amount and thickness

土壤从 2022 年 11 月 8 日进入稳定冻结阶段,到 2023 年 5 月 9 日完全融通,整个冻结期历时 182 d。2023 年 3 月 1 日,随着气温回升至 0℃ 以上,土壤自上而下开始融化,正式进入融化期。3 月 8 日,土壤冻深达到最大值(131.43 cm)。随后,深层土壤在地壳内自然地热的作用下,通过热传导逐渐由下向上融化,自此整个冻土区域进入“双向”融解

阶段。

根据土壤冻结过程的动态变化,将整个试验周期划分为冻结期(2022 年 11 月 8 日—2023 年 3 月 1 日)和融化期(2023 年 3 月 2 日—2023 年 5 月 9 日)。为准确反映各阶段土壤水分、热量和盐分的动态变化规律,并确保试验数据连续性和阶段性,试验设置为每隔 7 d 进行 1 次取样。在不同处理区

内,按照“S”形路线进行土壤采样^[19],依据“随机多点混合”原则确保样品的代表性。清除地表积雪后,使用配备体积为 100 cm³ 环刀的取土器按 L1 层(0~15 cm)、L2 层(15~30 cm)、L3 层(30~45 cm)分组采集原状土样,重复采样 3 次用于测定土壤结构。同时,在每个试验小区 3 个不同位置,使用夯击式土钻分层各采集 300 g 土样,并依据不同的处理阶段和土壤深度对样品进行标记,以便明确区分不同处理和深度样本(图 3)。

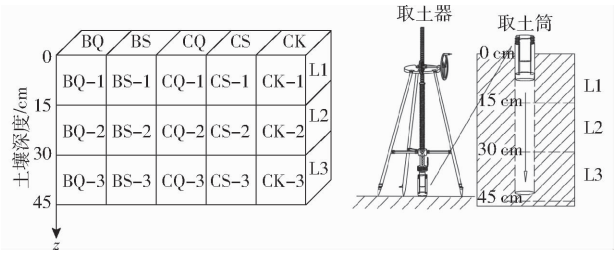


图 3 土壤采样及分层样品标记示意图
Fig. 3 Schematic of soil sampling and layered sample labeling

BQ-1、BQ-2、BQ-3 分别表示 BQ 处理在不同深度(L1、L2、L3 层)取样,其他处理土样命名规则相同。将取回的土样置于 3℃ 人工气候室保存,以确保样品在测定前保持原始状态。

1.3 土壤水热盐参数测定

土壤含水率用干燥法测定;土壤温度使用土壤墒情监测仪进行实时监测,监测时间间隔为 1 h;土壤电导率(EC)使用 Conductometer 检测器测定,含盐量的计算参照经验公式^[20],即

$$y = 3.0111x$$

式中 y——土壤含盐量,g/kg
x——土壤上清液电导率,mS/cm

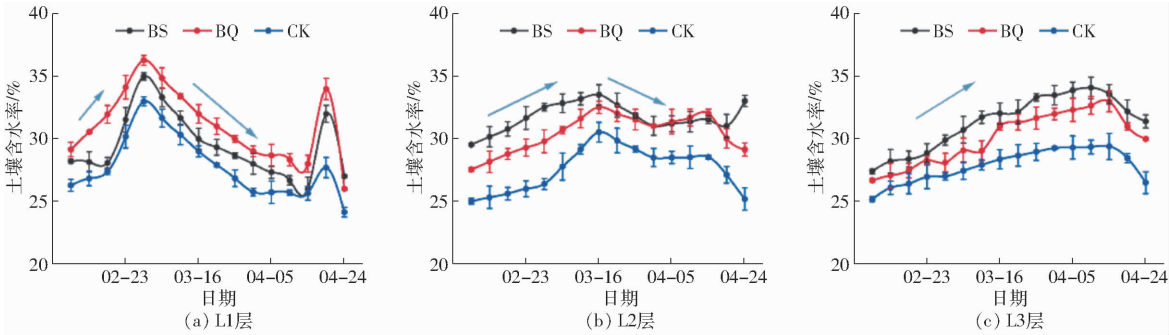


图 4 施加生物炭下土壤含水率变化曲线
Fig. 4 Changes in soil water content under biochar application

2.1.2 土壤温度变化特征

不同深度施加生物炭后土壤温度变化如图 5 所示。在 0~15 cm 土层,1 月 31 日—3 月 8 日,BS-1 和 BQ-1 温度分别升高 12.37℃ 和 11.6℃,相较于对照组,其温度增量分别高 3.31、2.10℃。在融化

1.4 数据分析

利用 Origin 2021 绘制图形。使用 IBM SPSS Statistics 27 对生物炭、秸秆处理组与空白对照组之间的差异进行单因素方差分析(ANOVA)。采用 Amos 28.0 软件建立结构方程模型(Structural equation model, SEM),分析冻融循环中不同土层水分变化与温度和盐分变化之间的相关性及其驱动作用。

2 结果与分析

2.1 施加生物炭下农田冻融土壤水热盐变化特征

2.1.1 土壤含水率变化特征

不同深度施加生物炭对土壤含水率的影响如图 4 所示。施加生物炭后,L1、L2、L3 各层土壤含水率均高于对照组。BQ 和 BS 处理在 0~45 cm 土层整体平均含水率分别较对照组提高 2.85、3.13 个百分点。在 L1 层,BQ-1 的含水率始终保持最高水平,平均值较 BS-1 和 CK-1 高 2.17、3.86 个百分点。在 L2 层,各处理土壤含水率先逐渐增长,并在 3 月 16 日达到峰值,BS-1 和 BQ-1 峰值分别较 CK-1 高 2.93、1.96 个百分点。而后逐渐降低,并于 3 月 29 日达到谷值。由于地下冻土逐渐融化,未冻结水分在毛细作用驱动下向上迁移,导致 L2 层含水率逐步回升。在 L3 层,各处理土壤含水率均在 4 月达到峰值,与对照组相比,BS-3 和 BQ-3 含水率峰值分别提高 4.59、3.02 个百分点。随后含水率经历小幅波动后逐渐下降。在下降阶段(4 月 13—24 日),经计算得 BS-3 含水率标准差分别比 BQ-3 和 CK-3 降低 43% 和 39%,表明 BS-3 含水率波动性较小。

期,土壤温度受天气变化的影响呈现较高波动性,然而,施加生物炭处理组土壤温度变化幅度较小,波动性较弱,表现出更稳定的温度变化趋势。由图 5 可知,3 种处理地表 0 cm 土层温度分布规律相似,在 15~30 cm 土层,BS-2 和 BQ-2 温度分布较为集

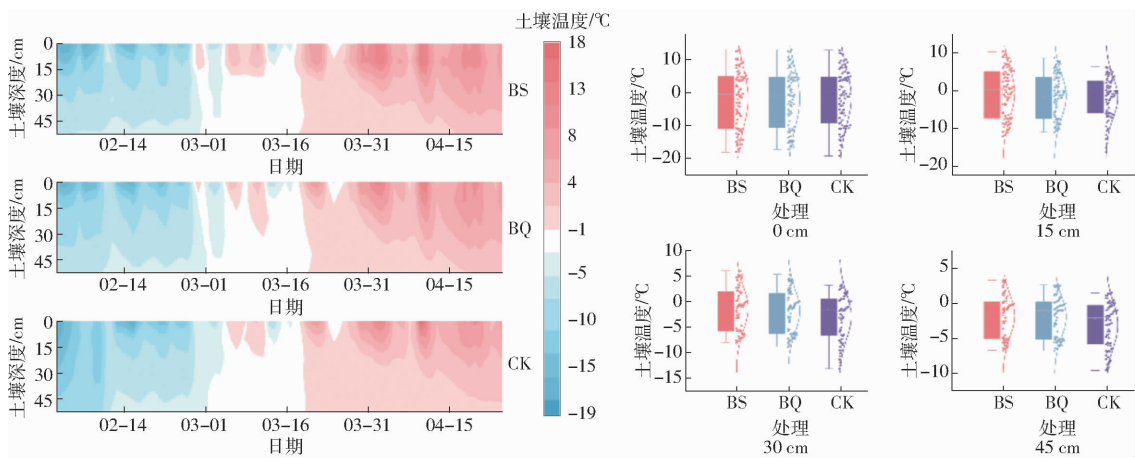


图 5 施加生物炭下土壤温度特征

Fig. 5 Characteristics of soil temperature under biochar application

中且维持较高水平,最高温度分别比 CK - 2 高 3.43、2.16℃。而且 CK - 2 的温度分布较为分散,波动较大。在 30 ~ 45 cm 土层,土壤温度整体回升较为缓慢,生物炭处理温度分布依然集中,且高于对照组。结果显示,BS - 3、BQ - 3 温度平均值分别比 CK - 3 高 2.75、2.10℃,表明生物炭在 30 ~ 45 cm 土壤中仍具有调节温度的作用。

2.1.3 土壤含盐量变化特征

不同深度施加生物炭后土壤含盐量变化如图 6 所示,图中“密度”表示不同深度土壤含盐量的分布

频率,即土壤中含盐量区间的出现频率。土壤含盐量整体呈现先升高后下降趋势,施加生物炭提高了土壤含盐量。BQ 和 BS 处理 0 ~ 45 cm 平均含盐量较对照组增加 0.34、0.40 g/kg。在 L1 层,BQ - 1 土壤含盐量从初始的 1.25 g/kg 升至峰值 1.43 g/kg,最终下降至 1.01 g/kg。尽管有所降低,但仍较对照组高 0.53 g/kg,表现出更强的盐分保留能力。由图 6j ~ 6l 可知,BQ - 1 含盐量集中分布在 1.0 ~ 1.4 g/kg 范围内,波动较大;而 BS - 1 分布范围为 0.63 ~ 99 g/kg,整体含量低于 BQ - 1,且分布更为均匀,表明 15 ~

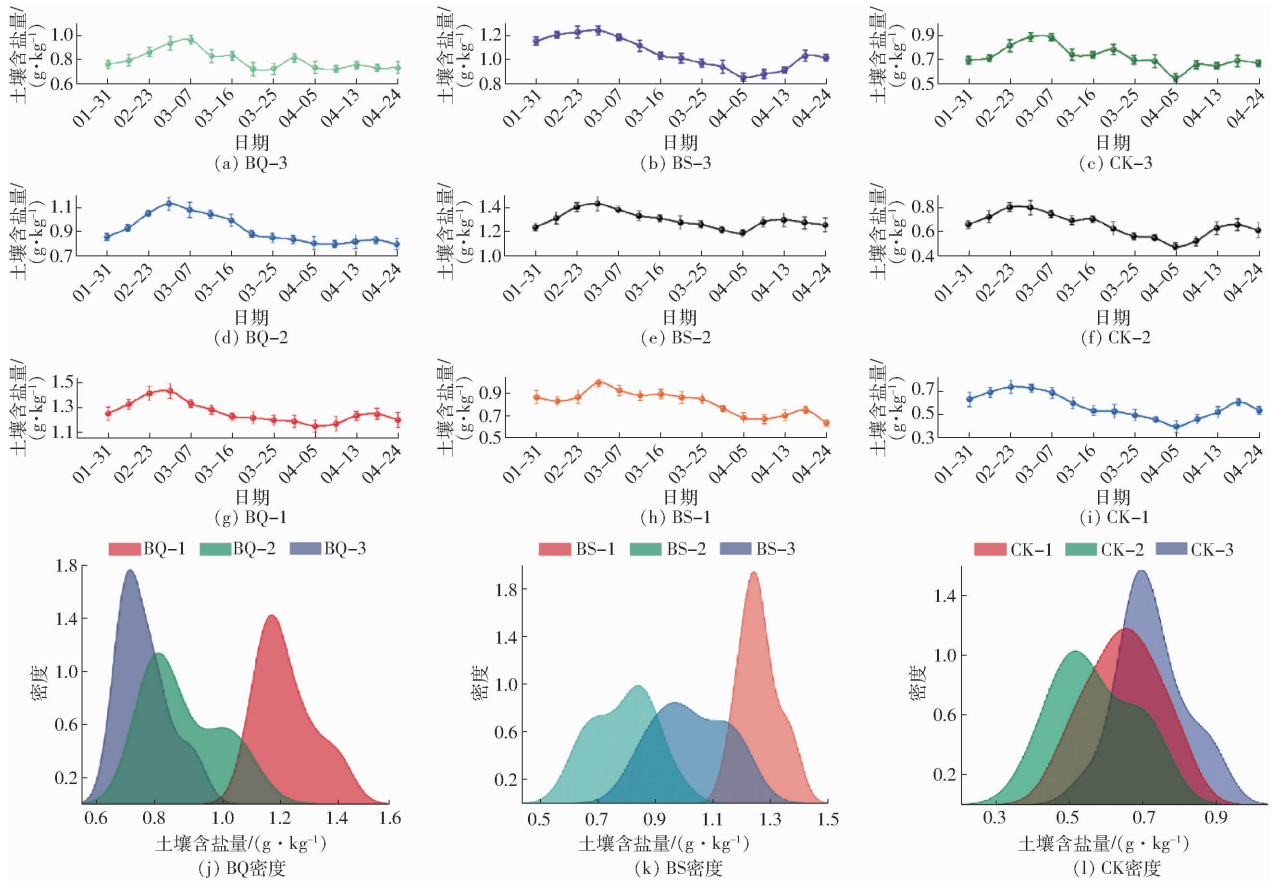


图 6 施加生物炭下土壤含盐量特征

Fig. 6 Characteristics of soil salinity under biochar application

30 cm 土层施用生物炭在抑制盐分向表层迁移方面更为有效。在 L2 层,土壤含盐量在冻结期逐渐增加,并于 3 月 1 日达到峰值。与对照组相比,BS-2 和 BQ-2 含盐量峰值分别增加 0.682 7、0.618 2 g/kg。BS-2 含盐量分布较为集中,经计算标准差为 0.067 g/kg,较对照组标准差减少 0.029 g/kg,显示生物炭有助于降低盐分波动。随着下层冻土逐渐融化,水分向上迁移,导致土壤盐分累积。从 4 月 5 日到 19 日,BS-1 和 CK-1 含盐量分别增加 0.07、0.21 g/kg,BS-1 增量相对较小,表明生物炭减少了盐分向地表迁移。由图 6j ~ 6l 可知,BQ 和 BS 处理盐分密度分布较为分散,而 CK 处理分布区域出现较多重叠部分,表明施加生物炭改变了土壤盐分的分布特性。

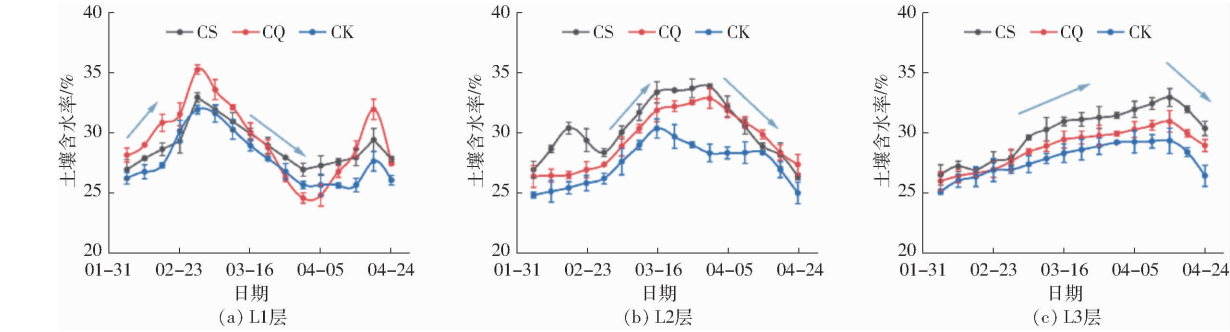


图 7 施加秸秆下土壤含水率变化曲线
Fig. 7 Changes in soil water content under straw application

较小。CQ-3 和 CS-3 平均含水率分别较对照组高 1.56、2.68 个百分点。

2.2.2 土壤温度变化特征

不同深度施加秸秆后土壤温度变化如图 8 所示,CQ 和 CS 处理均提高了土壤温度。CQ 处理在地表 0 cm 处升温效果更为优异,整个试验周期内,其平均温度分别较 CS 处理和对照组提高 0.72、1.36℃。在冻结期,CQ 和 CS 处理在 0 ~

2.2 施加秸秆下农田冻融土壤水热盐变化特征

2.2.1 土壤含水率变化特征

不同深度施加秸秆后土壤含水率变化如图 7 所示,L1、L2、L3 层土壤含水率呈现不同变化趋势。在整个试验周期,CQ 和 CS 处理在 0 ~ 45 cm 土层平均含水率较对照组分别提高 1.56、2.15 个百分点。L1 层各处理土壤含水率随时间变化呈现相似规律,先逐渐增加,于 3 月 1 日达到峰值后逐渐降低。与对照组相比,CQ-1 和 CS-1 含水率峰值分别高 3.31、1.01 个百分点。在下降阶段,CQ-1 含水率下降趋势明显,自 3 月 25 日开始低于对照组,并于 3 月 29 日达到谷值,随后再次升高,并于 4 月 15 日达到新的峰值。L2 层含水率在融化期间先上升后缓慢下降,而 L3 层则持续上升,波动性

30 cm 土层升温效果相近。而在 30 ~ 45 cm 土层,CS-3 升温效果更为突出,平均温度为 -4.46℃,分别较 CQ-3 和 CK-3 高 1.35、3.10℃。在融化期,当气温出现骤降波动时,CQ 和 CS 处理有效缓解了降温幅度,土壤温度下降幅度较 CK 处理更小。箱线图显示,施加秸秆缩小了土壤冻融期温度变化范围。在 15 ~ 30 cm 土层,CQ-2 和 CS-2 温度变化范围分别较对照组

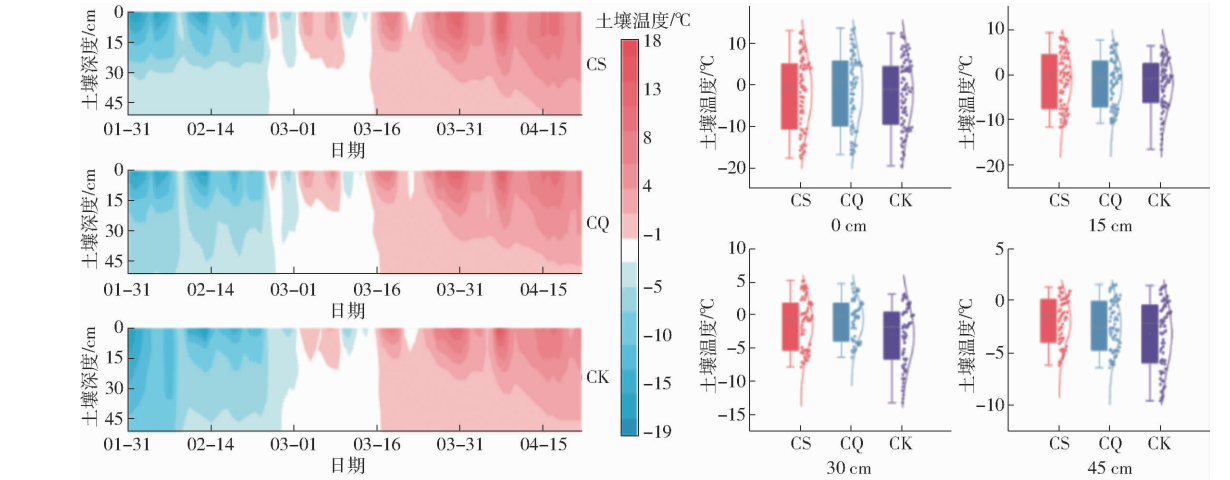


图 8 施加秸秆下土壤温度变化特征
Fig. 8 Temperature variation characteristics of soil under straw application

缩小 5.43、1.91℃,表明 CQ 和 CS 处理均具有良好的保温能力。

2.2.3 土壤含盐量变化特征

不同深度施加秸秆后土壤含盐量变化如图 9 所示。随着土层加深,土壤含盐量变化幅度逐渐减小,波动趋于平缓。CQ 处理在各土层中含盐量波动较大,而 CS 处理整体变化相对平稳。在 L1 层,CQ 处

理含盐量高于 CS 处理,平均值高 0.42 g/kg。而在 L2 和 L3 层,含盐量大小排序发生反转,CS 处理土壤平均含盐量分别较 CQ 处理高 0.15、0.07 g/kg。且相比 CQ 处理,CS 处理含盐量数值变化分布更均匀。这表明,CS 处理 30~45 cm 土层中能够保持较高且稳定的含盐量,有助于维持盐分的稳定性,减少盐分垂直迁移。

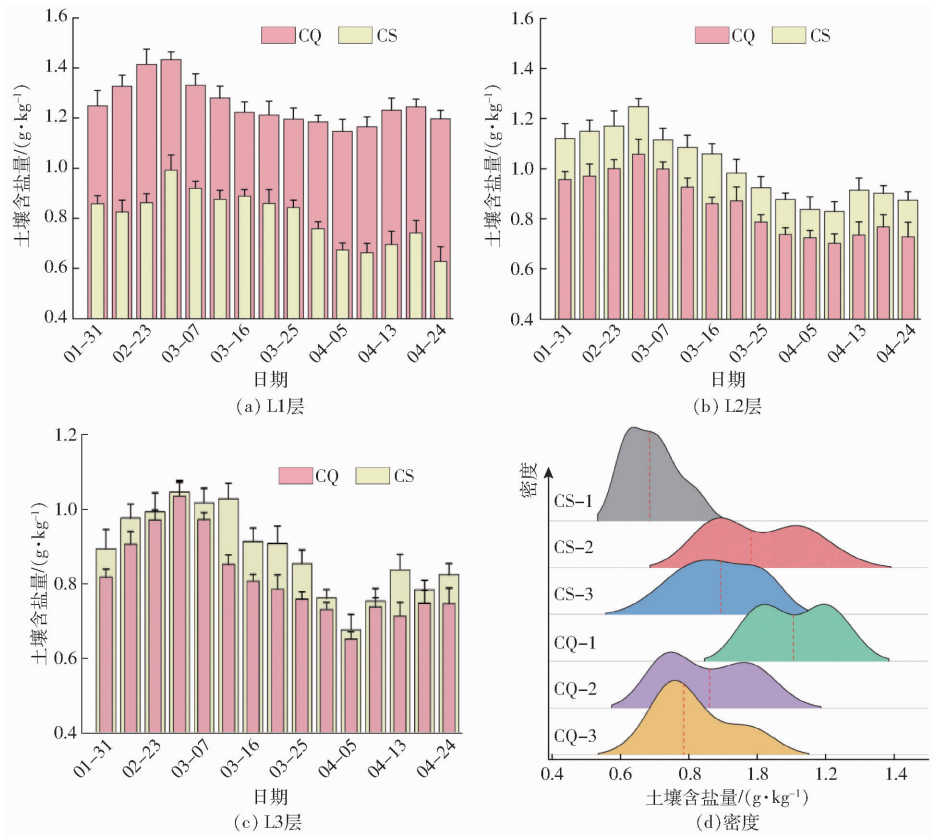


图 9 施加秸秆下土壤含盐量特征

Fig.9 Characteristics of soil salt content under straw application

2.3 冻融循环下土壤水、热、盐迁移结构方程

采用结构方程模型分析了不同土壤深度中水、热和盐三要素的相互作用关系,揭示其在冻融循环中的复杂动态,量化水分在土壤中的迁移驱动对温度和盐分变化的影响。如图 10 所示,图中线上数值表示路径系数,*表示 $P < 0.05$,**表示 $P < 0.01$,***表示 $P < 0.001$ 。实线箭头表示显著相关路径,虚线箭头表示无显著相关路径。结果表明,温度主要受上下层温度的影响,水分对温度的直接影响较小。在各处理组中,仅 L2 层水分对 L2 层温度具有较高的显著相关性($P < 0.01$),而对 L1 和 L3 层的相关性较小,或未表现出显著相关性。15~30 cm 土层施用生物炭和秸秆改变了不同土层水分和温度之间的相关系数 r 。与对照组相比,BS 和 CS 处理降低了 L1 层水分向 L2 层运移的相关性,相关系数从 0.90 分别降至 0.50 和 0.72,同时降低了 L2 层水分向 L3 层运移的相关性,相关系数从 0.87 分别降至

0.28 和 0.30。此外,L1 层与 L2 层之间的温度相关系数也从 0.98 分别降低至 0.62 和 0.72。

水分迁移对盐分分布的影响因处理不同而存在显著差异。在 CK 处理中,L1 层水分与 L2 层盐分的相关系数为 -0.24,显示出水分的淋洗作用。L2 层向 L1 层的盐分迁移相关系数显著($r = 0.65, P < 0.05$),表明 15~30 cm 土层盐分通过水分向地表迁移的动力较强,而在 BS 处理中,相关系数显著减小($r = 0.22$),且无显著相关路径($P \geq 0.05$)。与对照组相比,BQ 和 CQ 处理降低了 L1 层盐分向 L2 层运移的相关性,相关系数从 0.77 分别降至 0.41 和 0.58。

3 讨论

3.1 生物炭对农田冻融土壤水热盐运移的影响机理

生物炭改善了土壤的水分保持能力。在冻结期,BS 和 BQ 处理含水量均高于对照组。这是由于

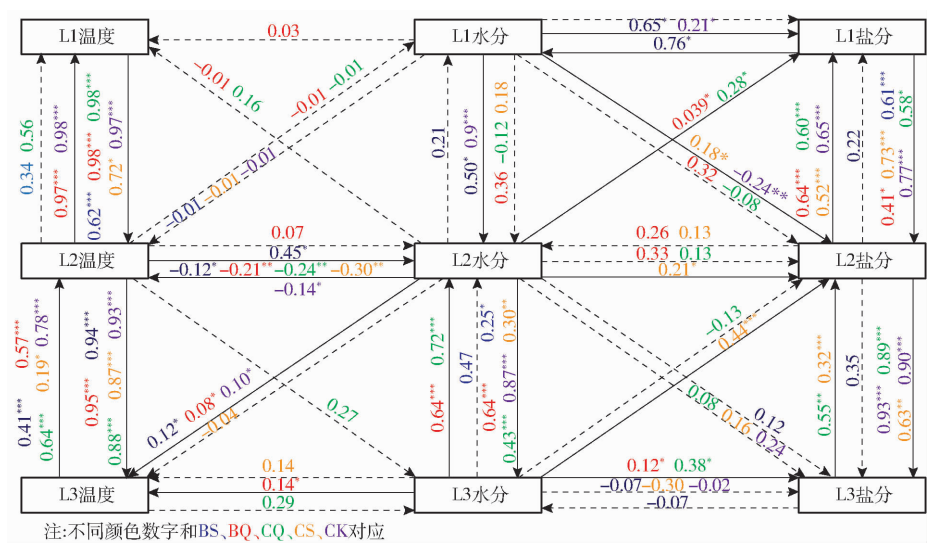


图 10 冻融循环下土壤水分对温度和盐分的影响

Fig. 10 Influence of soil moisture on temperature and salt content under freeze-thaw cycles

施加生物炭通过降低土壤容重和提升土壤毛管孔隙度,从而改善土壤结构^[21],促进水分冻结,并最终增加了固态含水率。同时,土壤水分自上而下逐渐冻结,孔隙变小,未冻结水分因毛细作用向上迁移^[22]。生物炭由于吸附迁移的水分,使得生物炭在低温下更容易发生冻胀,增加了其孔容和比表面积^[23],从而进一步扩大土壤孔隙并强化蓄水效果,使 BS 和 BQ 处理提高了液态水含量。研究发现,BQ-1 在融化初期含水率较高,这可能部分归因于土地起垄导致地势不平整,以及积雪层逐渐融化变薄,使部分土表裸露于空气中,直接接受太阳辐射。施用生物炭后,0~15 cm 土层土壤颜色较对照组更深,增强了土壤在可见光和近红外波段对太阳辐射的吸收^[24],从而提升了地表温度。加速了剩余积雪的融化,促进融雪水更快下渗,提高了土壤含水率。

土壤温度变化易受到外界天气条件和极端天气的影响,而施加生物炭有效减弱了这种影响,使得 BQ 和 BS 处理土壤温度波动幅度减小。尤其是在 0~15 cm 土层,BQ 处理在土壤表层形成炭土冰壳(图 11)。这一冰壳结构减少了热量传导,进一步延缓了下层冻土融化。

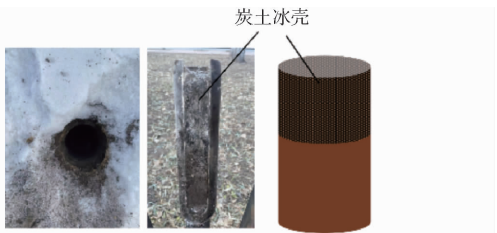


图 11 炭土冰壳示意图

Fig. 11 Biochar-amended soil ice crust schematic

BS 处理通过增强土壤保温能力有效稳定了土壤温度。这是由于生物炭施加在 15~30 cm,吸收

了 0~15 cm 水分,增加了土壤比热容,同时生物炭的多孔结构为微生物提供了理想的生存环境,激发了微生物活性。微生物呼吸产生的热量被土壤储存,进一步减缓了热量传导和散失^[25],从而降低了温度波动趋势,使土壤在昼融夜冻的短暂循环中表现出更稳定的温度变化。

在冻融循环过程中,土壤中水分在温度梯度驱动下发生迁移,导致盐分重新分布。冻结过程中,水分携带溶解盐分向冻结前沿移动,形成冻结层盐分富集^[26]。融化过程中,融雪水的渗透和蒸发作用可能导致盐分向下层迁移,形成深层盐分积累,或随水分蒸发向表层聚集,引发地表盐碱化风险。试验结果表明,在融化期 BQ 和 BS 处理相比对照组含盐量变化幅度更小,说明生物炭施用减弱了融雪水对盐分的淋洗作用。这是由于生物炭可以通过增强土壤的保水性和吸附钠离子^[11],有效减少土壤中的盐分迁移。同时生物炭的多孔结构促进了阳离子交换反应,吸附了土壤中的盐分^[10]。

此外,生物炭施用方式对盐分分布产生了重要影响。研究表明,BQ 处理盐分波动较大,而 BS 处理盐分波动较小,说明 15~30 cm 施加生物炭有助于增强耕层土壤的养分固持能力,将养分留在作物根系层,减少地表盐碱化风险和养分流失。在 L2 层向 L1 层盐分迁移路径中,BS 处理路径系数减小为 0.22,尽管路径相关性未达到显著性水平($P \geq 0.05$),但路径系数减小趋势与各层盐分分布的数据(图 6)一致,进一步验证了生物炭对盐分垂直迁移的干扰机制。然而,深度 0~15 cm 施加生物炭虽然能够提高土壤含水率和含盐量,但可能导致地表土壤中过多盐分析出,从而增加盐碱化风险。

3.2 秸秆对农田冻融土壤水热盐运移的影响机理

施用秸秆通过增加土壤孔隙度和改善结构^[27],并凭借自身较强的吸水性^[28],有效吸附和保持更多水分,从而影响水分运移过程。即在0~15 cm土层,秸秆的吸水作用促使更多水分冻结,从而增加了土壤的固态含水率。进入融化期,秸秆增加了土壤的水分渗透性,降低了地表径流量^[29]。在3月下旬,BQ-1含水率出现明显下降,甚至低于对照组。这主要是由于光照强度增强、气温升高以及长时间无降水的条件下,掺杂秸秆的地表土壤水分蒸发加剧,导致0~15 cm土层含水率低于对照组。这一结果与YUSEFI等^[30]的研究结论不同,其研究表明,将秸秆覆盖在土壤深度5 cm能够显著减少蒸发损失。造成差异的原因在于,秸秆粉碎不同于完整的秸秆直接覆盖,将干燥的秸秆粉末掺入土壤会增强土壤的透气性并提高土壤温度,从而加剧表层水分蒸发,容易加剧春旱现象。而后随着降水的到来以及秸秆吸水性作用的逐步显现,恢复了秸秆的保水效果。

本研究中,CQ处理在地表0 cm处升温效果更为显著,这可能是由于秸秆在0~15 cm土层中形成了一层隔热保护层,降低了土壤热导率^[31],减少了热量向外界散失。此外,随着秸秆逐渐分解,微生物活动释放的热量进一步调节了土壤温度^[32],对土壤的保温和热稳定性产生了重要影响。

CS处理通过施用秸秆减缓融雪水滞留,降低了对盐分的淋洗作用,并通过增加土壤阳离子含量,影响钙、镁、钾等离子的吸附和释放^[33],从而提升了土壤盐分水平。同时秸秆分解后的有机质调节了土壤pH值,才能在厌氧条件下,更多地与矿物颗粒结合,形成矿物结合有机碳(MinOC),这种稳定形式在15~45 cm土层有效限制了盐分的自由移动^[34]。此外,秸秆分解释放的二氧化硅和溶解性有机物增强了黏土颗粒的分散性,优化了土壤结构,为盐分的吸附与迁移创造了更加有利的条件^[35]。与此同时,秸秆分解过程中微生物代谢活动释放大量养分(如氮和磷),这些养分不仅提高了土壤肥力,还通过微生物代谢作用调控盐分的固定与转化过程^[36]。

3.3 生物炭与秸秆对农田冻融土壤水热盐运移影响对比

生物炭和秸秆调控土壤水分运移和温度的效果和机理上表现差异,如图12所示。

材料特性对比:生物炭因其高比表面积和多孔性,增强了土壤的持水性和养分固持能力。在冻融循环中,这种特性能够通过降低土壤容重和增强毛细吸附作用,吸附水分并抑制盐分迁移。

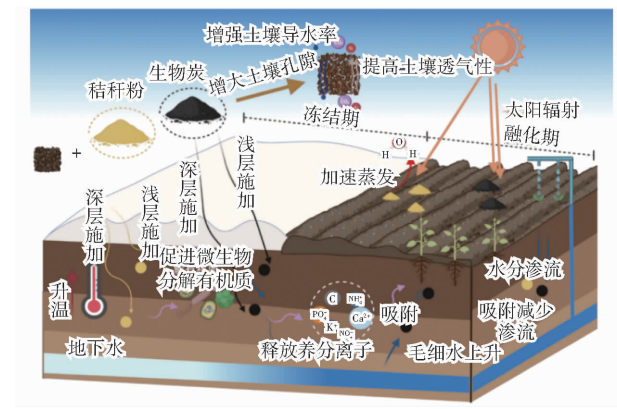


图12 生物炭和秸秆对农田冻融土壤水热盐运移影响机理图

Fig. 12 Mechanism of biochar and straw effects on water, heat, and salt migration in freeze-thaw farmland soil

而秸秆主要依赖纤维质吸水膨胀^[37],在短期内增加土壤孔隙度和表层水分保持能力,但在高光照和低降水条件下容易加剧土壤表层蒸发,稳定性方面略显不足。

温度与热力学效应差异:生物炭通过降低土壤导热率和优化土壤结构,在冻结期能够更有效减少昼夜温差,提升整体土壤热稳定性。而秸秆的作用则更多体现在表层隔热效应。秸秆覆盖土壤后,在表层形成隔热保护层,减少热量向外界散失。

盐分调控能力和适用性对比:15~30 cm施用生物炭不仅能减少盐分的垂直迁移,还通过阳离子交换机制稳定盐分分布,抑制其垂向迁移。相比之下,秸秆虽然在分解过程中释放有机酸和溶解性有机物,能够部分调节土壤盐分分布,但其分解速度较为缓慢,尤其是在低温冻融环境中,微生物活性受到抑制,秸秆难以在短时间内完全分解为有效的改良成分。这种慢速分解特性不仅限制了秸秆对盐分的快速吸附和调控能力,还可能导致其效果滞后于冻融期土壤盐分动态变化的需求,从而难以在短时间内达到理想的土壤改良效果。因此,生物炭适用于需要快速且持久改善土壤盐分分布的情境,而秸秆因其分解特性和功能局限性,更适合用于长期的土壤结构改良和表层改良策略。

4 结论

(1)冻融循环影响土壤水分、热量和盐分运移:在融化初期,融雪水入渗导致土壤水分增加,CK-1含水率在3月1日到达峰值(31.99%),之后出现下降。同时盐分受淋洗作用向下迁移至更深土层。在融化后期,随着冻土层融化,水分向上迁移,带动盐分随水分上升,进一步改变盐分的垂直分布。冻融过程不仅促进了水分的垂直迁移,还改变了土壤

中盐分的垂直分布。

(2)生物炭施用对土壤水、热、盐的动态变化具有显著影响:在 15~30 cm 土层施用生物炭时,表现出更为优越的改良效果,特别是在保水性和盐分固持方面。4 月 13—24 日 BS-3 含水率标准差比对照组降低 39%。4 月 5—19 日 BS-1 盐分增量较对照组减少 0.14 g/kg,有效降低了盐分波动性,并抑制了盐分向表层迁移。

(3)秸秆施用对改善土壤存在局限性:在 0~15 cm 土层施用秸秆时,能够提升土壤含水率和保温能力,冻融期地表平均温度比对照组提高 1.36℃。然而,在融化后期含水率下降较快,CQ-1 在 3 月 25 日—4 月 8 日含水率低于 CK-1,容易加

剧春旱现象。此外,秸秆在 15~30 cm 土层施用时,由于低温环境下秸秆分解较慢,土壤盐分改善效果较为有限,CS 处理组土壤含盐量仅比 CQ 组高 0.07 g/kg,差异不明显。

(4)在冻融循环过程中,水分迁移对温度及盐分分布之间存在正向或负向的关系:在对照组中,L1 层水分与 L2 层盐分的相关系数为 -0.24,表明水分迁移与盐分累积之间存在负相关关系。BS 和 CS 处理使 L1 层至 L2 层的温度相关系数分别下降 0.36 和 0.26,BQ 和 CQ 处理同样使 L1 层盐分向 L2 层的迁移减少,相关系数分别下降 0.36 和 0.19。表明生物炭和秸秆施用对水分、温度和盐分之间的相互作用产生了不同程度的影响。

参 考 文 献

- [1] JIA B, CHEN W, CHEN H, et al. Effects of snowmelt and rainfall infiltration on the water and salt migration of earthen sites during freeze-thaw process[J]. International Journal of Architectural Heritage, 2023, 17(4): 573–584.
- [2] LIU Y, WU J, ZHAO H, et al. Ions transport in seasonal frozen farmland soil and its effect on soil salinization chemical properties[J]. Agronomy, 2023, 13(3): 660.
- [3] WANG D, LI C, PARIKH S, et al. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils—a multi-scale analysis[J]. Geoderma, 2019, 340: 185–191.
- [4] GAO Y, LI T, FU Q, et al. Biochar application for the improvement of water-soil environments and carbon emissions under freeze-thaw conditions: an in-situ field trial[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 723: 138007.
- [5] QI H, WANG Z, LIN H, et al. Effects of biochar application before and after freeze-thaw on soil hydrothermal and cotton growth under drip irrigation[J]. Water, 2022, 14(23): 3818.
- [6] DOMINGUES R R, SÁNCHEZ-MONEDERO M, SPOKAS K, et al. Enhancing cation exchange capacity of weathered soils using biochar: feedstock, pyrolysis conditions and addition rate[J]. Agronomy, 2020, 10(6): 824.
- [7] LI A, DENG H, JIANG Y, et al. Super-efficient removal of heavy metals from wastewater by Mg-loaded biochars: adsorption characteristics and removal mechanisms[J]. Langmuir, 2020, 36(5): 1263–1272.
- [8] CAO H, NING L, XUN M, et al. Biochar can increase nitrogen use efficiency of *Malus hupehensis* by modulating nitrate reduction of soil and root[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 135: 25–32.
- [9] 薛里,张忠学,齐智娟,等.节水灌溉下生物炭与有机肥添加对黑土区稻田净碳排放的影响[J].农业机械学报,2024, 55(9):382–390,441.
XUE Li, ZHANG Zhongxue, QI Zhijuan, et al. Effects of biochar and organic fertilizer addition on net carbon emission of paddy field in black soil area under water-saving irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9):382–390,441. (in Chinese)
- [10] ZHANG A, ZHOU X, LI M, et al. Impacts of biochar addition on soil dissolved organic matter characteristics in a wheat-maize rotation system in Loess Plateau of China[J]. Chemosphere, 2017, 186: 986–993.
- [11] 范雷雷,史海滨,李瑞平,等.秸秆覆盖对沟灌水盐迁移与玉米水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2021,52(2): 283–293.
FAN Leilei, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effects of straw mulching on soil water-salt transportation and water use efficiency of maize under furrow irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 283–293. (in Chinese)
- [12] TANG M, LIU R, LUO Z, et al. Straw returning measures enhance soil moisture and nutrients and promote cotton growth[J]. Agronomy, 2023, 13(7): 1850.
- [13] ZHAO S, QIU S, XU X, et al. Change in straw decomposition rate and soil microbial community composition after straw addition in different long-term fertilization soils[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 136: 85–93.
- [14] ZHANG Y, LV J, DONG X, et al. Influence on uranium(VI) migration in soil by iron and manganese salts of humic acid: mechanism and behavior[J]. Environmental Pollution, 2019, 260: 113369.
- [15] 付强,颜培儒,李天霄,等.冻融期秸秆和积雪覆盖条件下土壤热容量的特性研究[J].应用基础与工程科学学报, 2018, 26(4): 757–766.
FU Qiang, YAN Peiru, LI Tianxiao, et al. Characteristics of soil heat capacity under different straw and snow covers in freezing and thawing period[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(4): 757–766. (in Chinese)

[16] 陈登利. 犁底层的形成与预防[J]. 农机推广,2000(1):30.

[17] NGAPGUE F, KENOU W C G, TCHOUATA J H K, et al. Geotechnical identification and classification of soils as flexible pavement subgrade of the section fongo tongo-melong[J]. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2020, 8: 183 – 200.

[18] 黑龙江省水利学会. 旱田生物炭施用技术规范：T/HHES 006—2024[S]. 哈尔滨:黑龙江省水利学会, 2024.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版 北京:中国农业出版社, 2000.

[20] 王国丽. 秸秆隔层厚度对盐碱地水盐肥运移及食葵生长的影响机制[D]. 北京:中国农业科学院,2021.
WANG Guoli. Effects of straw interlayer thickness on water, salt and fertilizer transport and sunflower growth in saline-alkali soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese)

[21] TOKOVÁ L, IGAZ D, HORÁK J, et al. Effect of biochar application and re-application on soil bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity, water content and soil water availability in a silty loam haplic luvisol[J]. Agronomy, 2020, 10(7): 1005.

[22] 魏志森,张少良,闫思华,等. 生物炭施用对冻结期退化黑土水热盐动态变化的影响[J]. 水土保持学报,2024,38(4): 322 – 334.
WEI Zhimiao, ZHANG Shaoliang, YAN Sihua, et al. Effects of biochar application on the dynamic of soil moisture-temperature-salt in degraded mollisols during freezing period[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 322 – 334. (in Chinese)

[23] 鞠文亮,荆廷德. 陈化处理对棉花秸秆生物炭理化性质的影响[J]. 环境科学学报,2017,37(10):3853 – 3861.
JU Wenliang, JING Yande. Effect of aging treatment on physicochemical characteristics of cotton straw biochar[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(10): 3853 – 3861. (in Chinese)

[24] 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: 1478 – 1487.

[25] 谭春玲,刘洋,黄雪刚,等. 生物炭对土壤微生物代谢活动的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2022, 30(3):333 – 342.
TAN Chunling, LIU Yang, HUANG Xuegang, et al. Effect of biochar on soil microbial metabolic activities[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(3): 333 – 342. (in Chinese)

[26] LEE X, HUANG Y, YANG F, et al. Biochar manages salt-degraded land and conserves water: effects and mechanism[J]. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2020, 22: 2159.

[27] 周晓飞,解玉红,裴宇航,等. 添加秸秆粉对盐碱土壤理化性质的影响[J]. 湖北农业科学,2011,50(23):4806 – 4808.
ZHOU Xiaofei, XIE Yuhong, PEI Yuhang, et al. Effect of adding straw powder on the physical and chemical properties of saline alkali soil[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011,50(23):4806 – 4808. (in Chinese)

[28] LI Y, CHEN H, FENG H, et al. Influence of straw incorporation on soil water utilization and summer maize productivity: a five-year field study on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2020, 233: 106106.

[29] YANG J, LIU H, LEI T, et al. Effect of straw-incorporation into farming soil layer on surface runoff under simulated rainfall [J]. Catena, 2021, 199: 105082.

[30] YUSEFI A, FIROUZI A F, AMINZADEH M. The effects of shallow saline groundwater on evaporation, soil moisture, and temperature distribution in the presence of straw mulch[J]. Hydrology Research, 2020, 51: 720 – 738.

[31] LU L, JIANG L, FENG Q, et al. The prediction of thermal conductivity of agricultural residues from straw for biomass energy [J]. Advanced Materials Research, 2013, 779 – 780: 1419 – 1422.

[32] TARAFDAR J, MEENA S, KATHJU S. Influence of straw size on activity and biomass of soil microorganisms during decomposition[J]. European Journal of Soil Biology, 2001, 37(3): 157 – 160.

[33] CHEN X, OPOKU-KWANOWAA Y, LI J, et al. Application of organic wastes to primary saline-alkali soil in Northeast China: effects on soil available nutrients and salt ions[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2020, 51: 1238 – 1251.

[34] CHEN X, XU Y, GAO H, et al. Biochemical stabilization of soil organic matter in straw-amended, anaerobic and aerobic soils [J]. The Science of the Total Environment, 2018, 625: 1065 – 1073.

[35] TRAN T T, DAO T T, DINH V M, et al. Effects of microsized rice straw on soil clay dispersibility[J]. European Journal of Soil Science, 2022, 73(1): 13219.

[36] XU N. Effect of adding straw powder on microbial biomass and respiration intensity of saline alkali soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(4):205 – 208.

[37] 赵洪凯,赵培培. 秸秆基吸水材料的研究进展[J]. 化工新型材料,2021,49(8):42 – 45, 50.
ZHAO Hongkai, ZHAO Peipei. Research progress on straw-based water absorption materials[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(8): 42 – 45, 50. (in Chinese)