

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxcxb.2024.04.011

李爽, 郭美莲, 范昊明, 等. 季节性冻融期不同秸秆还田方式下黑土温度特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 288-299.

LI Shuang, GUO Meilian, FAN Haoming, et al. Dynamics of soil temperature under different methods of straw restoration in black soil during seasonal freeze-thaw period[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 288-299.

季节性冻融期不同秸秆还田方式下黑土温度特征

李爽^{1,2}, 郭美莲³, 范昊明^{1,2}, 贾燕锋^{1,2}, 马仁明^{1,2}

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 辽宁省水土流失防控与生态修复重点实验室, 沈阳 110866;

3. 辽宁智测自然资源调查规划有限公司, 沈阳 110866)

摘要: [目的] 为探究不同秸秆还田方式对季节性冻融期黑土温度的影响。[方法] 通过田间温度监测, 以大豆田为研究对象, 设置秸秆覆盖还田(FG)和秸秆翻混还田(FH)2种还田方式, 还田量分别为秸秆总量的30%(59 670 kg/hm²), 60%(119 340 kg/hm²), 90%(179 010 kg/hm²), 并设置裸地为对照(CK)共7种处理。各处理自地表向下沿土壤垂直剖面分别设置5, 10, 20, 30 cm 4个土层深度, 分析冻融期不同秸秆还田方式及还田量下土壤温度变化特征。[结果] (1) 秸秆还田使土壤进入不同冻融阶段的时间滞后于裸地, 且有效提高土壤最低温度和降低最高温度的变化范围, 其中最大提温、降温率均发生在FG90处理, 分别为3.0~6.1, 1.5~5.2℃。(2) 秸秆还田减弱土壤的温度变异性, 与气温的相关性, 最大变异系数和相关系数发生在裸地5 cm土层, 分别为6.54, 0.82; 最小发生在FG90处理30 cm土层, 分别为0.82, 0.26。土壤温度变异性大小关系为CK>FG30>FH30>FH60>FG60>FH90>FG90, 土壤温度与气温相关性大小关系为CK>FH30>FG30>FH60>FH90>FG60>FG90。(3) 裸地冻结和解冻速率最大且冻融周期最短, 冻结速率为0.19℃/h, 解冻速率为0.60℃/h, 最小冻结速率发生在FH90处理, 为0.04℃/h, 最小解冻速率发生在FG90处理, 为0.05℃/h。(4) 随土层深度的增加, 土壤始冻阶段、始融阶段逐渐增加, 但冻结时长逐渐减小, FG90处理延缓冻融效果最明显, 始冻阶段、始融阶段分别为8, 10天。[结论] 研究结果定量描述冻融期不同秸秆还田措施下黑土温度特征, 明确不同秸秆还田措施之间对土壤温度影响的差异, 对于黑土区秸秆资源合理利用及保护性耕作具有重要指导意义。

关键词: 秸秆还田; 黑土; 土壤温度; 冻融

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0288-12

Dynamics of Soil Temperature Under Different Methods of Straw Restoration in Black Soil During Seasonal Freeze-Thaw Period

LI Shuang^{1,2}, GUO Meilian³, FAN Haoming^{1,2}, JIA Yanfeng^{1,2}, MA Renming^{1,2}

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Soil Erosion Control and Ecological Restoration, Shenyang 110866, China; 3. Liaoning Zhice Natural Resources Survey Planning Co., Ltd., Shenyang 110866, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of different straw returning methods on the temperature of black soil during seasonal freeze-thaw period. [Methods] By monitoring the field temperature, the soybean field was selected as the research object, and two types of returning methods were set, namely, straw mulching (FG) and straw mixing (FH). The amount of returned straw was 30% (59 670 kg/hm²), 60% (119 340 kg/hm²) and 90% (179 010 kg/hm²), respectively, and the bare land was designated as the control treatment (CK) in a total of seven treatments. Four soil depths of 5, 10, 20 and 30 cm below the surface along the vertical profile of soil were set to analyze the characteristics of soil temperature changes during the freezing and thawing period under different straw return methods and amounts. [Results] (1) Straw

收稿日期: 2024-01-08

修回日期: 2024-02-08

录用日期: 2024-02-18

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-26

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500700, 2016YFE0202900)

第一作者: 李爽 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事秸秆还田及土壤侵蚀规律研究。E-mail: lshuang@stu.syau.edu.cn

通信作者: 马仁明 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事寒区复合侵蚀及土壤微观结构研究。E-mail: marenming@syau.edu.cn

returning to the field resulted in the soil entering various freeze-thaw stages at a time lagging behind that of the bare land, and effectively raised the range of the minimum soil temperature and lowered the maximum temperature, of which both the maximum temperature raising and lowering occurred in the FG90 treatment, which were 3.0~6.1 °C and 1.5~5.2 °C, respectively. (2) Straw returning weakened the soil temperature variability and correlation with air temperature. The maximum coefficient of variation and coefficient of variation occurred in the bare soil layer of 5 cm, which were 6.54 and 0.82, respectively. The minimum occurred in the 30 cm soil layer of the FG90 treatment, with values of 0.82 and 0.26, respectively. The relationship between soil temperature variability was CK>FG30>FH30>FH60>FG60>FH90>FG90, and the relationship between soil temperature and air temperature was CK>FH30>FG30>FH60>FH90>FG60>FG90>FG90. (3) The freezing and thawing rates of bare land were the highest and the freezing-thawing periods were the shortest, with a freezing rate of 0.19 °C/h and thawing rate of 0.60 °C/h. The minimum freezing rate occurred in FH90 treatment (0.04 °C/h) and the minimum thawing rate occurred in FG90 treatment (0.05 °C/h). (4) With the increase of soil depth, the soil freezing stage and thawing stage gradually increased, but the freezing duration gradually decreased. The effect of delaying freeze-thawing was most obvious in the FG90 treatment, with the freezing stage and thawing stage of 8 and 10 days, respectively. [Conclusion] The results of the research quantitatively described the temperature characteristics of black soil under different straw return measures during freezing and thawing periods, and clarified the differences in soil temperature effects between different straw return measures, which is of great significance in guiding the rational use of straw resources and conservation tillage in black soil areas.

Keywords: straw turnover; black soil; soil temperature; freeze-thaw

Received: 2024-01-08

Revised: 2024-02-08

Accepted: 2024-02-18

Online(www.cnki.net): 2024-04-26

据统计^[1],中国的季节性冻土面积约占国土面积的54%,主要位于中国的东北、华北及西北地区。季节性冻融期是黑土地区的典型气候特征之一,季节性气候变化对土壤温度有着重要的影响。土壤温度作为一个重要的土壤物理性质,同时也是地表主要物理参量之一,在季节性冻土消融期土壤温度的变化对土壤湿度、土壤的形成、地表植被的生长及地表水热能量的再分配具有重要的影响^[2-3]。近年来,关于黑土区不同秸秆还田措施对土壤温度的影响研究主要集中在作物的生长期^[4-5],而冻融期土壤温度变化特征研究相对较少。秸秆还田作为一种保护性耕作措施可以调节土壤温度和改变土壤自然冻融过程^[6-7],不同的秸秆还田方式可能影响土壤的保温性能和热量传导性能,从而对土壤温度产生影响。因此,了解季节性冻融期不同秸秆还田方式下黑土温度变化特征,有助于进一步了解不同秸秆还田方式对土壤温度的调控差异和机理。

目前,国内外在秸秆还田对土壤温度方面的影响已有大量研究^[8-10],秸秆还田影响土壤温度的机理主要体现在秸秆的保温效应、蓄热效应、保湿效应和改善土壤结构等方面^[11-13]。太阳辐射作为地表热量的主要来源,直接影响土壤内部热量的收支;此外,气

温、地表状况和土壤水热特性对土壤温度也有一定的影响^[14-15]。秸秆形成一层覆盖在土壤表面的保护层,减弱太阳对地表的直接辐射,可以减少土壤表面的蒸发和对热量的收支,而秸秆作为传热介质的同时本身具有一定的热物理性能,可以吸收和储存一定的热量,对土壤温度同样起到一定的调控作用^[16]。秸秆还田可以促进土壤有机质的积累,改善土壤结构,有机质的积累可以增加土壤的孔隙度和通气性,改善土壤的保水能力和热传导性,从而影响土壤温度的分布和变化^[17-18]。马永财等^[19]在东北黑土区研究秸秆覆盖还田对土壤温湿度及玉米产量的影响,明确秸秆覆盖对土壤温度有良好的调控作用,并且这种作用是双向的;YIN等^[20]进行为期3年的小麦秸秆还田试验,研究表明,土壤温度差异主要体现在5—15 cm土层,同样说明秸秆还田对浅层土壤温度影响显著;MA等^[21]通过4年的大田试验,研究不同秸秆还田方式对大麦—棉花轮作系统土壤温度的影响,明确秸秆还田具有降低土壤表层日最高温的作用,降低效果为2.4~3.2 °C。虽然已经有大量关于秸秆还田对土壤温度的影响研究,但大多是在非冻融期的研究,孙开等^[22]在北疆研究秋耕对季节性冻融期土壤热状况影响,分析秸秆还田对土壤温度、冻融循环和温度梯度

的影响,但未考虑秸秆覆盖量的影响,还田量的多少不仅关系到资源的有效利用,而且还不同程度对土壤导热率和热通量产生影响,进而改变土壤的温度变化^[23]。季节性冻融期,土壤温度发生周期性变化,冻融循环作用是土壤侵蚀的驱动因子之一,然而,地表覆盖可以推迟土壤冻融时间,减小冻结深度,减缓冻融作用^[24-25]。因此,研究季节性冻融期不同秸秆还田方式对黑土热状况的影响,进而分析不同还田方式对季节性冻融期土壤温度的影响机理和差异性,对于黑土资源的保护具有重要意义。

黑土区属于温带半湿润大陆季风性气候,冬季寒冷漫长,季节性冻土分布广,每年秸秆产量约 2.1 亿 t,秸秆资源丰富^[26-28]。秸秆还田技术作为一种改良土壤基质的农业措施在该区域已得到普遍应用,秸秆还田不仅提高秸秆利用率,而且保护生态环境,对于维持生态系统的平衡和可持续发展具有重要意义^[29]。因此,本文以黑龙江省黑土区大豆田为研究对象,应用大豆秸秆进行还田处理,研究冻融期不同秸秆还田方式对土壤温度的影响,明确自然状态下土壤温度季节变化规律,以期室内模拟试验提供科学依据,同时也为保护环境和提高土壤质量做出贡献。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

克山县隶属黑龙江省齐齐哈尔市,位于黑龙江省西部,是小兴安岭伸向松嫩平原的过渡地带,地形起伏变化大,地势东北高西南低,主要地貌类型为丘陵平原、漫川漫岗。具有寒温带大陆性季风气候^[30-31],有效积温 2 503.6 °C,多年平均气温 1.1 °C,多年平均日照时间 2 703.3 h,无霜期 122 天。研究区作物主要以玉米、大豆为主,秸秆资源丰富。研究区土壤在冬季面临较长低温期,春季消融解冻,是典型的季节性冻土区。

研究区位于克山县水土保持观测站粮食沟观测场(48°03′04″—48°03′33″N, 125°49′04″—125°49′44″E)。土壤类型为黑土,土地利用类型为垄作农田,试验选用当年的大豆田作为研究小区,时间选择为冬春季。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 试验设计 试验设置秸秆覆盖还田和秸秆翻混还田 2 种还田方式,还田量分别为秸秆总量的 30% (59 670 kg/hm²), 60% (119 340 kg/hm²), 90% (179 010 kg/hm²),并设置裸地为对照处理(CK)共 7 种处理。试验小区规格为 5.0 m×2.5 m,相邻小区间隔 1.0 m。试验秸秆选用当年秋收后的大豆秸秆,直接覆盖处理秸秆长度为 5~10 cm,由人工将秸秆均匀覆盖在小区表面。翻混还田处理秸秆长度为 2~5 cm,先

由人工将秸秆均匀覆盖在小区表面,再用整地机将秸秆和表层 20 cm 土壤混合。试验地土壤 0—20 cm 土层初始含水率为 38.14%,土壤容重为 1.19 g/cm³。

1.2.2 观测方法 在每个试验小区中心位置设置精创 GSP-6 温湿度记录仪(温度测量范围为-40~85 °C)自动采集土壤温度数据,记录仪测量精度为±0.5 °C,将温度探头沿土壤垂直剖面呈对角线方式布设(图 1),分别测量 5,10,20,30 cm 土层深度的土壤温度。测量时间为 2019 年 11 月 1 日至 2020 年 4 月 30 日,各温度采集点每 1 h 自动记录 1 次土壤温度,每日 24 次。

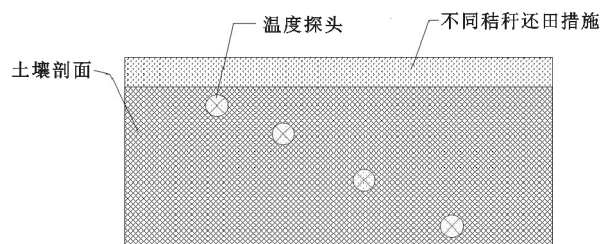


图 1 温度探头布设示意

Fig. 1 Schematic diagram of temperature probe layout

1.2.3 研究方法 为了准确分析和比较不同还田方式下土壤冻融特性,将土壤从 0 °C 以上降至 0 °C 以下和从 0 °C 以下升至 0 °C 以上视为 1 次完整的冻融循环^[22],1 次冻融循环中,土壤温度处于 0 °C 以上的时间为土壤解冻时长;处于 0 °C 以下的时间为土壤冻结时长,由于本研究土壤温度为逐时监测,因此在统计土壤冻融次数时,土壤解冻、冻结时长最小均为 1 h,即土壤温度处于 0 °C 以上或 0 °C 以下的时间≥1 h 时认为土壤处于解冻、冻结状态。将单位时间土壤温度由 0 °C 升至最高温的变化率定义为土壤的解冻速率;土壤温度由 0 °C 降至最低温的变化率定义为土壤的冻结速率。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据处理和绘制表格,SPSS 26.0 软件进行相关性系数的求解,Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 冻融阶段划分

一般认为土壤日最大值温度连续<0 °C 或>0 °C 时,土壤完全冻结或完全消融,当土壤日最大值>0 °C 而日最小值<0 °C 时,土壤存在日冻融循环^[32]。本试验观测期为 2019 年 11 月 1 日至 2020 年 4 月 30 日,根据潘大全等^[33]对土壤冻融阶段的划分,将黑土冻融过程划分不稳定冻结阶段、冻结稳定发展阶段和融化阶段(图 2)。各处理除 FG90 处理外均在 2019 年 11 月 2 日进入不稳定冻结阶段,FG90

处理较其他处理晚2天。CK、FG30、FH30处理均在2019年11月26日进入冻结稳定发展阶段,FG60、FH60处理较CK晚3天,FG90较CK晚5天,FH90

较CK晚4天。CK、FG30、FH30、FH60处理均在3月20日进入融化阶段,FG60较CK晚3天,FG90较CK晚5天,FH90较CK晚2天。

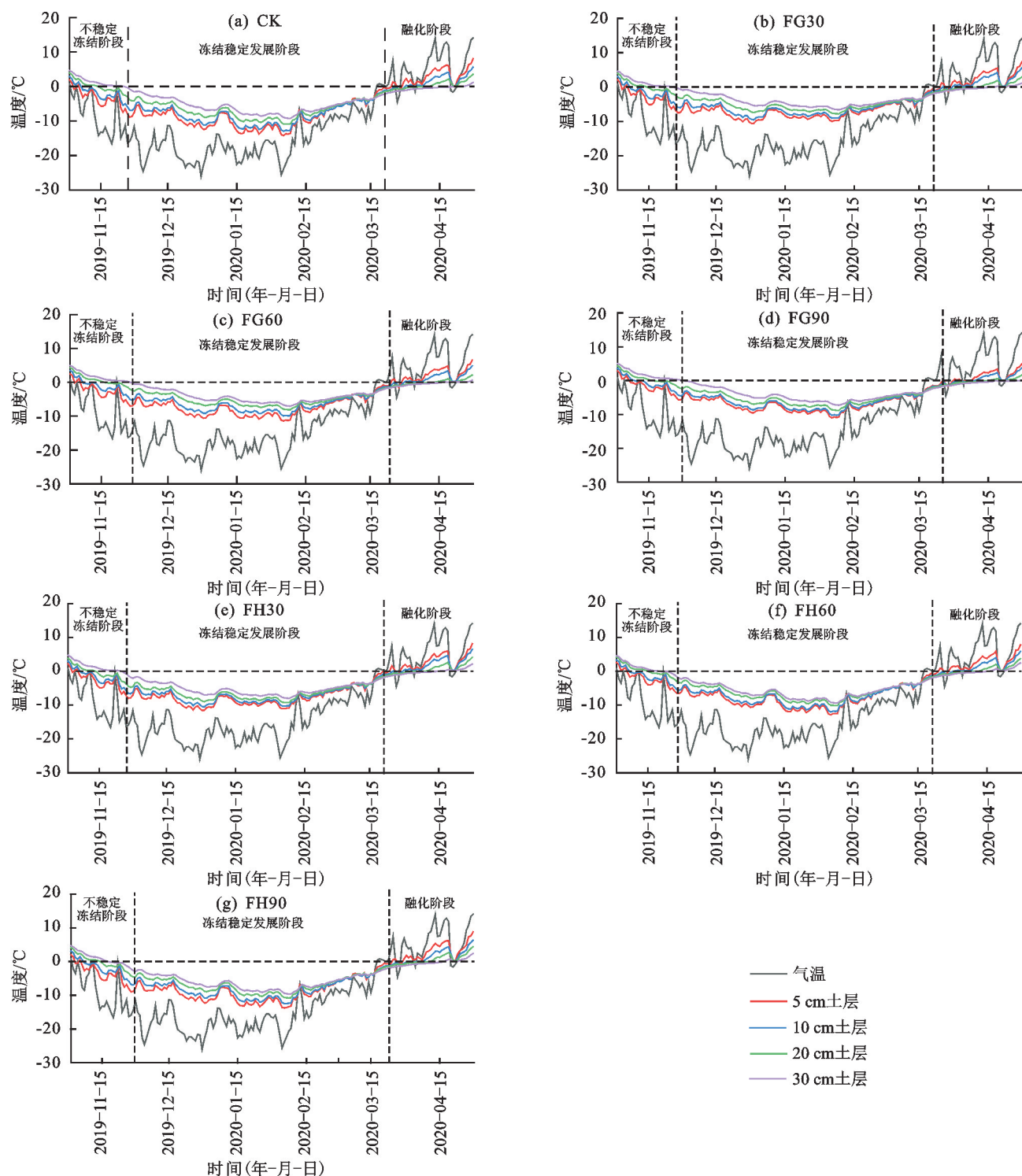


图2 不同秸秆还田方式冻融期划分

Fig. 2 Schematic diagram of freeze-thaw period division of different straw returning methods

不稳定冻结阶段,土壤温度随气温波动较大,白天土壤温度在 0°C 以上,夜间土壤温度在 0°C 以下,发生昼融夜冻现象,CK处理5 cm土层温度于2019年11月2日23:00首次降至 0°C 以下。此阶段0~30 cm土层CK最低温变化范围为 $-11.0\sim-3.0^{\circ}\text{C}$,

最高温变化范围为 $3.7\sim5.1^{\circ}\text{C}$ 。与CK相比,随秸秆还田量的增加覆盖还田处理土壤最低温度分别提高 $1.9\sim2.0, 2.4\sim2.6, 2.9\sim4.5^{\circ}\text{C}$,最高温度分别降低 $0.1\sim0.3, 0.2\sim0.5, 0.3\sim1.0^{\circ}\text{C}$,翻混还田处理土壤最低温度分别提高 $0.2\sim1.4, 1.3\sim1.6, 1.8\sim3.2^{\circ}\text{C}$,

最高温分别降低 0.2, 0.3, 0.2~0.6 °C。2 种还田方式均提高土壤最低温度和降低土壤的最高温度, 进而减小土壤温度变化范围。从对温度最值的调节效果上看, 秸秆覆盖还田好于秸秆翻混还田, 并且随秸秆还田量的增加其效果越明显。

冻结稳定发展阶段, 随大气温度的降低土壤冻结速率加快, 土壤温度处在 0 °C 以下并逐渐向下层土壤发展, CK 处理 0—30 cm 土层最低温度变化范围为 -15.7~-9.7 °C, 最高温度变化范围为 -1.6~-0.4 °C。与 CK 相比, 随秸秆还田量的增加覆盖还田处理土壤最低温度分别提高 2.3~2.4, 2.6~3.4, 3.0~6.1 °C; 最高温度分别降低 0.1~0.2, 0.2, 0.3~0.5 °C, 翻混还田处理土壤最低温度分别提高 0.1~0.2, 1.6~1.7, 2.4~3.4 °C, 最高温度分别降低 0.1, 0.1~0.2, 0.2 °C。此阶段, 土壤最高温度和最低温度均在 0 °C 以下, 且秸秆覆盖还田对土壤温度变化范围的影响强于翻混还田。

融化阶段, 各层土壤温度开始上升, 并出现 0 °C 以上温度, 此阶段土壤温度变化与不稳定冻结阶段相似, 均在 0 °C 左右波动。CK 处理 5 cm 土层温度于 2020 年 3 月 20 日 15:00 首次升至 0 °C 以上, 并随气温的上升, 各处理不同土层解冻速率加快。CK 处理 0—30 cm 土层最低温变化范围为 -2.9~-1.9 °C, 最高温变化范围为 1.6~12.8 °C。与 CK 相比, 随秸秆还田量的增加覆盖还田分别提高土壤最低温度 0.1~0.2, 0.2~0.3, 0.1~0.6 °C, 最高温度分别降低 0.1~1.1, 0.7~2.2, 1.5~5.2 °C, 翻混还田最低温度分别提高 0.1, 0.1~0.2, 0.1 °C, 最高温度降低程度与覆盖还田相同。秸秆还田对土壤温度的影响依然表现为提高土壤的最低温度和降低土壤的最高温度, 且秸秆覆盖还田提高土壤最低温度的效果好于翻混还田。

2.2 不同秸秆还田方式对土壤温度的影响

2.2.1 土壤温度分布 为了解土壤剖面温度分布情况, 绘制等温线图(图 3), 可以更加直观地观察土壤温度季节分布, 等温线的疏密和形状反映土壤温度的变化情况, 等温线越密集, 表示热量传导越快; 等温线越稀疏, 表示热量传导越均匀; 等温线呈现出平行的形状, 表示温度变化较为均匀; 等温线呈现出弯曲的形状, 表示温度变化较为剧烈^[34]。

由图 3 可知, 整个冻融期各处理 5—20 cm 土层等温线密集程度明显强于 20—30 cm 土层, 说明 5—20 cm 土层受气温影响较大, 土壤容积热容量较小, 温度变化剧烈, 导致 5—20 cm 土层热量传导快于 20—30 cm 土层, 而 20—30 cm 土层在土壤表层覆盖的秸秆及土层深度的共同作用下土壤容积热容量大

于 5—20 cm 土层, 等温线近乎平行, 说明该土层温度变化较为平缓。覆盖在土壤表面的秸秆降低土壤对热量的吸收和释放能力, 使得土壤温度变化缓慢, 提高土壤温度的稳定性; 同时能量的传递需要一定的时间, 并且随土层深度的增加, 土壤容积热容量增大消耗掉部分能量, 因此, 20—30 cm 土层温度较 5—20 cm 土层温度变化缓慢。

2.2.2 土壤温度变异及与气温的相关性 为研究冻融阶段各土层温度变化规律, 选取不稳定冻结阶段和融化阶段 2 个阶段进行分析, 列出土壤温度变异性表(表 1)。

由表 1 可知, 不稳定冻结阶段, 各处理平均温度最小值均出现在 5 cm 土层, 随土层深度的增加平均温度逐渐增大, CK 处理土壤平均温度随土层深度的增加上升幅度最大, 为 0.19 °C/cm, FG90 上升幅度最小, 为 0.14 °C/cm。各处理间平均温度最小值大小排序为 FG90>FH90>FG60>FH60>FG30>FH30>CK, 最大值均出现在 30 cm 土层, 大小排序为 FG90>FG 60>FG30>CK>FH90>FH60>FH30。从整体来看, 覆盖还田对土壤温度平均值的影响程度大于翻混还田, 并且随秸秆还田量的增加 2 种处理对平均值的影响程度均逐渐增大, 而出现翻混还田平均温度最大值小于 CK 的情况, 可能是因为秸秆与土壤混合后增大土壤孔隙, 进而提升土壤孔隙与空气的连通性所造成的。各处理土壤最高温度和最低温度均随土层深度的增加而变大, 最高温度峰值出现在 30 cm 土层, 最低温度峰值出现在 5 cm 土层。各处理随土层深度的增加温度变异性表现为由强变弱的趋势, 变异性表现为 CK>FG30>FH30>FH60>FG60>FH90>FG90, 说明秸秆还田降低土壤温度的波动幅度, 并且这种作用随秸秆还田量的增加而增强。

相关性方面, 各处理表层土壤与气温的相关性最高, 随土层深度的增加相关性逐渐减弱, 而秸秆还田处理与气温的相关性系数低于 CK, 说明秸秆覆盖减弱土壤温度对大气温度的响应程度, 减弱程度表现为 FG90>FG60>FH90>FH60>FG30>FH30>CK。

融化阶段, 各处理土壤平均温度最大值均出现在 5 cm 土层, 最小值均出现在 30 cm 土层, 且随土层深度的增加而降低。CK 处理土壤平均温度随土层深度的增加下降幅度最大, 为 0.44 °C/cm, FG90 和 FH90 下降幅度最小, 为 0.3 °C/cm。各处理间平均温度最大值大小排序为 CK>FH30>FH60>FH90>FG30>FG60>FG90, 最小值排序为 FH30>FH60>FH90=FG30>FG60>CK>FG90。可以看出, 2 种处理均降低土壤的平均温度最大值, 并且随还田量的增加其效

果越明显。从整体来看,覆盖还田降低土壤平均温度最大值的 effect 好于翻混还田,而提高土壤平均温度最小值 effect 翻混还田好于覆盖还田。土壤最高温度方面与不稳定冻结阶段表现相反,即随土层深度的增加最

高温度逐渐减小且峰值出现在 5 cm 土层,土壤最低温度随土层深度的增加并无明显递增或递减趋势,但峰值仍然出现在 5 cm 土层。土壤温度变异性及其与气温的相关性与不稳定冻结阶段变化一致。

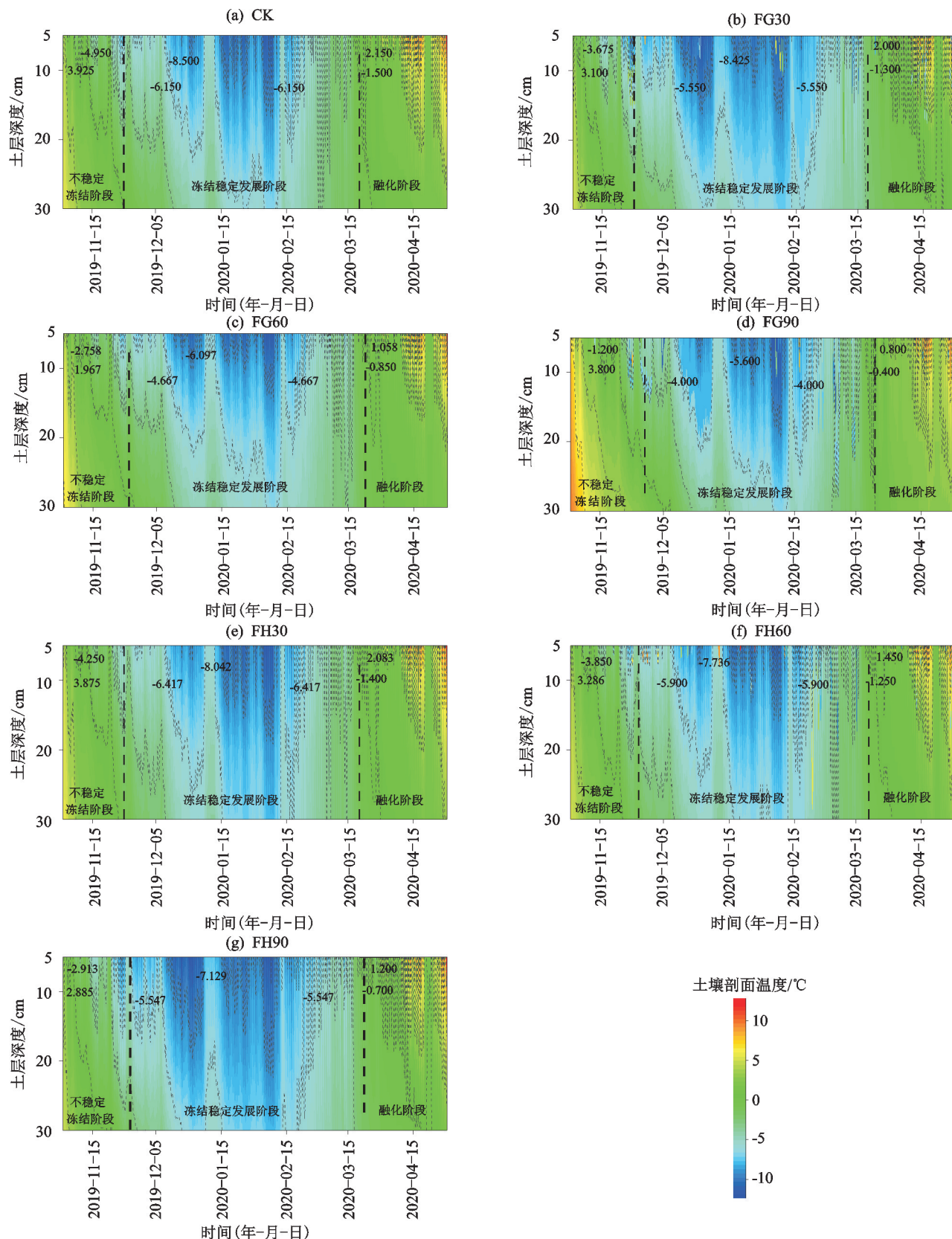


图 3 土壤温度分布

Fig. 3 Soil temperature distribution

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

表 1 冻融期各处理不同土层土壤温度变异特征

Table 1 Characteristics of soil temperature variation characteristics in different soil layers under different treatments during freeze-thaw period

处理	土层深度/cm	不稳定冻结阶段					融化阶段				
		平均温度/℃	最高温度/℃	最低温度/℃	CV	R ²	平均温度/℃	最高温度/℃	最低温度/℃	CV	R ²
CK	5	-3.6	3.7	-11.0	6.54	0.75	2.5	12.8	-2.9	3.55	0.82
	10	-2.3	4.2	-8.1	2.54	0.66	1.3	8.2	-2.5	1.75	0.65
	20	-0.3	4.8	-5.0	2.01	0.55	0.4	4.8	-2.1	1.59	0.47
	30	1.1	5.1	-3.0	1.06	0.52	-0.6	1.6	-1.9	1.43	0.31
FG30	5	-3.1	3.6	-9.1	5.97	0.71	2.1	11.7	-2.7	3.17	0.80
	10	-1.9	4.1	-7.0	1.82	0.66	1.2	8.1	-2.0	1.71	0.67
	20	-0.1	4.5	-3.6	1.25	0.55	0.2	3.9	-2.0	1.54	0.44
	30	1.2	4.8	-1.0	0.86	0.51	-0.4	1.5	-2.3	1.33	0.29
FG60	5	-2.7	3.5	-8.4	3.50	0.66	1.8	10.6	-2.6	3.00	0.76
	10	-1.3	3.6	-6.0	1.35	0.64	0.9	7.1	-2.0	1.71	0.61
	20	0.5	4.3	-2.7	1.17	0.52	-0.1	3.0	-2.1	1.29	0.38
	30	1.6	4.6	-0.6	0.85	0.51	-0.5	0.9	-2.4	1.27	0.27
FG90	5	-1.8	3.4	-6.5	3.13	0.62	0.9	7.6	-2.6	2.55	0.67
	10	-0.8	3.5	-5.1	1.26	0.60	0.3	5.4	-2.5	1.44	0.54
	20	0.5	3.7	-2.6	0.98	0.52	-0.4	2.4	-2.5	1.08	0.36
	30	1.7	4.1	-0.1	0.82	0.50	-0.8	0.1	-2.8	0.93	0.26
FH30	5	-3.6	3.7	-10.8	5.74	0.73	2.5	11.7	-2.9	3.49	0.79
	10	-2.0	4.0	-8.0	2.47	0.66	1.6	8.2	-2.0	1.68	0.68
	20	-0.6	4.6	-4.6	1.22	0.51	0.5	3.9	-2.0	1.46	0.51
	30	0.8	4.9	-1.6	0.95	0.44	-0.2	1.5	-2.3	1.37	0.33
FH60	5	-3.0	3.7	-9.7	3.52	0.69	2.4	10.6	-2.7	3.34	0.76
	10	-1.5	4.0	-7.9	1.60	0.58	1.3	7.1	-2.0	1.65	0.61
	20	-0.6	4.5	-4.3	1.30	0.47	0.5	3.0	-2.1	1.58	0.43
	30	0.9	4.8	-1.4	0.93	0.44	-0.3	0.9	-2.4	1.33	0.34
FH90	5	-2.4	3.5	-7.8	3.19	0.68	2.1	7.6	-2.6	3.30	0.74
	10	-2.1	3.9	-6.5	1.53	0.58	1.1	5.4	-2.5	1.55	0.61
	20	-0.4	4.3	-3.8	1.30	0.43	0.3	2.4	-2.5	1.52	0.46
	30	1.1	4.5	-1.2	0.87	0.42	-0.4	0.1	-2.8	1.32	0.34

注:CV 为土壤温度变异系数;R² 为不同土层土壤温度与大气温度的相关性系数。

2.3 不同秸秆还田方式对土壤冻融过程的影响

2.3.1 土壤冻结、解冻特征 一般认为当土壤温度在 0℃ 以下时,土壤发生冻结,相反,当土壤温度在 0℃ 以上时,土壤发生融化,当土壤温度在 0℃ 左右波动时,土壤发生冻融交替现象^[34],因此将 0℃ 定为土壤发生冻融的临界温度。对此,将土壤的冻融特征进行统计(表 2),以便分析土壤的冻结、解冻特征。

由表 2 可知,不稳定冻结阶段,随气温的降低各处理 5 cm 土层最先发生冻融循环,CK 处理 5 cm 土层在发生 4 次冻融循环后,在气温的影响下迅速进入冻结稳定发展阶段,其他土层未发生冻融循环。FH30 处理 5 cm 土层发生 2 次冻融循环,其他土层未发生冻融循环。其余处理 5 cm 土层只发生 1 次冻融循环。土壤冻结速率表现为 CK>FG30>FH30>FG60=FH60=FG90>FH90;解冻速率表现为 CK>FG30>FH30>

FG60>FH60=FG90>FH90。可以看出,CK 的冻融速率均大于其他处理,还田量为 30% 时秸秆覆盖还田的冻融速率大于秸秆翻混还田,还田量为 60% 时,2 种还田方式的冻结速率相同,但覆盖还田的解冻速率大于翻混还田,并且当还田量为 90% 时,翻混还田冻融速率最小。秸秆还田通过降低土壤的冻融速率减弱土壤的冻融过程,随秸秆还田量的增加土壤冻融过程的缓解程度越明显。秸秆覆盖还田土壤冻融周期均大于 CK,但翻混还田的冻融周期均小于 CK,可能是秸秆和土壤混合时改变土壤结构,促进土壤内部孔隙的连通性所造成的。

融化阶段,各处理依然是 5 cm 土层最先达到 0℃ 以上并发生冻融循环,从整体来看,随秸秆还田量的增加土壤冻融次数逐渐减小,具体表现为 CK=

看出,相同秸秆还田量下翻混还田冻融次数多于覆盖还田,说明秸秆覆盖还田缓解冻融过程的效果好于秸秆翻混还田。土壤冻结速率大小为 $CK>FH30>FH60=FG30>FG60=FG90>FH90$;解冻速率为 $CK=FG30>FG60>FH30>FH60>FH90>FG90$ 。从整体上看,随秸秆还田量的增加土壤冻融速率呈逐渐减小的趋势,其中,FG60 和 FG90 处理冻结速率相同。当秸秆还田量为 30% 和 60% 时,翻混还田冻结速率大于覆盖还田,覆盖还田解冻速率大于翻混还

田,当还田量为 90% 时,翻混还田解冻速率大于覆盖还田。

可以看出,覆盖还田对土壤的解冻过程影响较大,而翻混还田方式对土壤的冻结过程影响较大。10 cm 土层最大冻融速率依然发生在 CK 处理,但在土层深度和秸秆还田的共同影响下,土壤冻融速率和冻融频次明显小于 5 cm 土层,各处理除 CK 发生 10 次冻融,其他处理只发生 1 次冻融循环,进一步说明秸秆还田对土壤冻融过程有良好的缓解作用。

表 2 表层土壤冻融特征统计

Table 2 Statistics of freeze-thaw characteristics of surface soil

冻融阶段	处理	土层深度/cm	冻结速率/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$)	解冻速率/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$)	平均冻结 时长/h	平均解冻 时长/h	平均冻融 周期/h	冻融次数
不稳定 冻结 阶段	CK	5	0.19	0.60	22.3	12.8	35.0	4
	FG30	5	0.18	0.44	49.0	31.0	80.0	1
	FG60	5	0.10	0.30	92.0	35.0	127.0	1
	FG90	5	0.10	0.20	116.0	43.0	159.0	1
	FH30	5	0.16	0.33	8.0	20.0	12.0	2
	FH60	5	0.10	0.20	17.0	23.0	40.0	1
	FH90	5	0.04	0.08	34.0	24.0	58.0	1
融化 阶段	CK	5	0.17	0.56	11.7	11.2	22.9	21
		10	0.10	0.29	12.2	12.1	24.3	10
	FG30	5	0.12	0.56	13.3	11.4	24.7	16
		10	0.05	0.17	40.0	17.0	57.0	1
	FG60	5	0.07	0.49	17.8	17.6	35.3	10
		10	0.05	0.10	80.0	27.0	107.0	1
	FG90	5	0.07	0.22	19.5	19.3	38.8	6
		10	0.04	0.05	89.0	29.0	118.0	1
	FH30	5	0.16	0.45	13.0	11.5	24.5	21
		10	0.09	0.15	64.0	35.0	99.0	1
	FH60	5	0.12	0.44	13.8	12.1	25.9	12
		10	0.06	0.10	104.0	92.0	196.0	1
	FH90	5	0.05	0.42	14.5	14.5	29.0	9
		10	0.04	0.06	16.0	12.0	28.0	1

2.3.2 土壤冻结时长 根据黄葭悦等^[35]的研究,对冻融期不同处理各土层始冻阶段、始融阶段和冻结时长进行统计分析(表 3),将不同土层土壤温度开始降至 0℃ 及以下的日期定为该土层的始冻日期,土壤温度开始 0℃ 及以下的日期定为该土层始融日期,不同土层的始冻日期距 CK 始冻日期的实际天数为始冻阶段,将各土层的始融日期距 CK 始融日期的实际天数为始融阶段,实际天数越大说明该土层进入冻结或融化的时间越晚。

从土壤的垂直剖面来看,各处理 5 cm 土层始冻阶段、始融阶段最小,并随土层深度的增加土壤的始冻阶段、始融阶段逐渐增加,即 5 cm 土层在不稳定冻结阶段最先开始冻结,在融化阶段最先开始融化,当秸秆覆

盖量 90% 时,土壤表面覆盖层厚度大于其他处理,在阻碍土壤对热量的吸收的同时也阻碍土壤对热量的释放,这种双向阻碍作用使得土壤温度变化缓慢,延缓温度变化幅度。因此,FG90 处理 5 cm 土层较其他处理进入始冻阶段、始融阶段的时间较晚。从延缓土壤冻融的效果上看,秸秆覆盖还田增加土壤始冻、始融天数的作用强于秸秆翻混还田,并随土层深度的增加,土壤的始冻、始融天数越大。随土层深度的增加各处理土壤冻结时长逐渐减小,各处理间,5 cm 土层最多相差 3 天,10 cm 土层最多相差 4 天,20 cm 土层最多相差 5 天,30 cm 土层最多相差 4 天。当还田量为 30% 时,2 种还田方式 5,10 cm 土层冻结时长与裸地相同,随秸秆还田量的增加土壤冻结时长逐渐增加。

表 3 不同土层土壤冻结时长特征

Table 3 Characteristics of soil freezing duration in different soil layers

处理	土层深度/cm	始冻阶段/d	始融阶段/d	冻结时长/d	处理	土层深度/cm	始冻阶段/d	始融阶段/d	冻结时长/d
FG30	5	0	0	117	FH30	5	0	0	117
	10	0	0	116		10	0	0	116
	20	1	4	106		20	0	5	108
	30	3	5	92		30	1	5	94
FG60	5	0	3	120	FH60	5	0	0	117
	10	0	3	119		10	0	1	117
	20	3	4	104		20	2	4	105
	30	4	8	94		30	3	5	92
FG90	5	2	5	120	FH90	5	0	2	119
	10	3	7	120		10	0	3	119
	20	4	9	108		20	1	4	106
	30	8	10	92		30	5	6	91

3 讨论

土壤温度除受太阳辐射和气温的直接影响外,土壤结构和含水量等因素对土壤温度也产生不同的影响^[12,14],此外,在季节性冻融期,积雪覆盖的存在同样对土壤温度有一定的影响^[36]。不同秸秆还田方式对太阳辐射和气温的阻碍作用及对土壤结构的改变有所不同,因此,不同秸秆还田下土壤温度的变化存在一定差异。在本研究中 2 种秸秆还田方式均提高土壤最低温度和降低最高温度范围,这与孔凡丹等^[5]的研究结果一致。在土壤温度的调节效果上看,覆盖还田优于翻混还田,原因是太阳辐射和气温作为土壤温度变化的主要因素,而秸秆覆盖还田直接覆盖土壤表面,对太阳辐射和气温的阻碍作用强于翻混还田。热量传导快慢与土壤热容量具有一定关系,而土壤热容量受土壤含水量影响较大^[16],李瑞平等^[18]研究表明,土壤热容量随土层深度的增加,逐渐增大。因此,在本研究中出现 5—20 cm 土层温度变化剧烈程度强于 20—30 cm 土层的情况。对于土壤热量的传输方向的研究与前人^[34]得出的结论一致,即热量自发地从高温向低温传递。孙开等^[22]从土壤温度梯度的角度描述冻融期土壤热量的传输,当土壤内部存在温度梯度时,土壤热量发生传递。

土壤温度平均值在不稳定冻结阶段和融化阶段随土层深度的增加表现不同,原因是土壤温度受气温影响较大,当气温变化时,表层土壤与气温相关性较高,不稳定冻结阶段,表层温度随气温的降低而最先降低,融化阶段,表层土壤温度随气温的升高而最先升高。而秸秆还田降低土壤最高温和提高土壤最低温的原因是秸秆还田对于土壤热量的双向阻碍作用造成的^[2]。从还田量方面看,随秸秆还田量的增加,秸秆阻碍土壤对气温响应程度逐渐增大,因此,土壤

温度在秸秆还田的作用下变得平缓。2 种还田方式对土壤温度的影响有所不同,原因是 2 种还田方式对土壤温度的影响机理有所不同。覆盖还田可以在地表形成隔热层,减少土壤与外界环境的热量交换,而翻混还田对土壤进行翻动,提高土壤通透性,促进土壤与大气之间的能量交换^[18]。对于秸秆还田对土壤温度与气温的相关性研究与前人^[25,33]的研究结论一致,即表层土壤温度的变异性及其与气温的相关性表现最强,并随土层深度的增加变异性和相关性逐渐减小,但前人^[22,37]对土壤温度变异性最大发生哪个冻融阶段的研究有所不同,本研究土壤温度变异最大发生在不稳定冻结阶段。

季节性冻融期,不同秸秆还田方式对土壤冻融过程有一定的影响,本研究发现,不稳定冻结阶段,各处理只有 5 cm 土层发生冻融循环,10 cm 及以下土层第 1 次降至 0℃ 以下后直接进入冻结稳定发展阶段,即未发生昼融夜冻现象,原因可能是能量传递到下层需要一定时间,当能量传递到 10 cm 土层时气温骤降,致使该土层未发生冻融,这与黄霞月等^[35]得出的结论一致。与此不同的是,融化阶段 10 cm 土层也发生冻融循环,但除 CK 发生 10 次外,其他处理均发生 1 次,原因可能是秸秆还田对温度的调控作用降低土壤冻融频次。土壤的冻结速率在不同冻融阶段均小于解冻速率,原因是水的热容量较大,在冻结过程中释放更多的凝结潜热,使得土壤温度下降缓慢^[33]。各处理,随秸秆还田量的增加土壤冻融速率逐渐减小,冻融周期逐渐增大,原因是积雪和秸秆覆盖减小土壤导热率的变化和活跃层深度^[23]。在本研究中,不同冻融阶段土壤的冻结时长均大于解冻时长,这与戴黎聪等^[38]在青藏高原得出的土壤的冻结时间是土壤消融时间的 1.6 倍结论基本一致;土壤的始冻阶段、始融阶段随土层深度的增加而增加,说明深层土

壤的温度变化总是滞后于浅层土壤,对于相同土层,秸秆还田对温度的平抑作用也使其出现滞后现象,并且随秸秆还田量的增加,滞后现象越明显,本研究秸秆还田对土壤的20,30 cm土层影响较大,原因可能是热量传递到深层土壤需要一定时间,再加上土壤表面覆盖一层隔热保护层,进一步阻碍热量的传递,增强土壤温度变化的滞后现象,这与陈军锋等^[6]的研究结论一致;地表覆盖可以推迟土壤的冻结日期和消融日期^[39],使得土壤冻结时间出现比CK长的现象,对于相同土层随秸秆覆盖量的增加,土壤冻结时长逐渐增大,但从土壤垂直剖面来看,随土层深度的增加,土壤冻结时长逐渐减小,原因是深层土壤与气温的相关性减弱,土壤温度趋于稳定,并且在融化阶段可能受土壤双向融解的影响^[36],使其进入消融的日期早于浅层土壤,因此,缩短土壤冻结时长。

4 结论

2种还田方式在一定程度上具有延缓土壤进入不同冻融阶段的作用,均降低土壤最高温度变化范围和提高最低温度变化范围,FG90处理效果最佳。5—20 cm土层热量传导速率和温度变化剧烈程度强于20—30 cm土层。不稳定冻结阶段,土壤平均温度最小值和最低温度峰值平均出现在5 cm土层,平均温度最大值和最高温度峰值均出现在30 cm土层;融化阶段,土壤平均温度最大值、最低温度峰值和最高温度峰值出现在5 cm土层,平均温度最小值出现在30 cm土层。CK各土层温度变异性与与气温的相关性均强于秸秆还田处理,秸秆覆盖还田对土壤温度的调控效果最佳。不稳定冻结阶段冻融循环主要发生在5 cm土层,融化阶段主要发生在5,10 cm土层,2个阶段土壤解冻速率均大于冻结速率,且覆盖还田延缓土壤冻融过程的效果最佳。土壤始冻阶段、始融阶段随土层深度的增加逐渐增大,冻结时长逐渐减小。综上,2种秸秆还田方式对土壤温度均有一定的调控作用,但秸秆覆盖还田调控土壤温度及延缓土壤冻融过程的效果最佳。

参考文献:

- [1] 付强,侯仁杰,李天霄,等.冻融土壤水热迁移与作用机理研究[J].农业机械学报,2016,47(12):99-110.
FU Q, HOU R J, LI T X, et al. Soil moisture-heat transfer and its action mechanism of freezing and thawing soil[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(12):99-110.
- [2] 付强,马梓昇,李天霄,等.北方高寒区不同覆盖条件下土壤温度差异性分析[J].农业机械学报,2014,45(12):152-159.
FU Q, MA Z A, LI T X, et al. Variability of soil temperature under different coverage conditions in alpine region of China[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(12):152-159.
- [3] 张慧智,史学正,于东升,等.中国土壤温度的空间插值方法比较[J].地理研究,2008,27(6):1299-1307.
ZHANG H Z, SHI X Z, YU D S, et al. Spatial prediction of soil temperatures in China using different methods[J].Geographical Research,2008,27(6):1299-1307.
- [4] 李瑞平,谢瑞芝,罗洋,等.典型黑土区不同保护性耕作方式对玉米生长发育及产量形成的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2024,32(1):71-82.
LI R P, XIE R Z, LUO Y, et al. Effects of different conservation tillage methods on maize growth and yield formation in typical black soil area[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2019,32(1):71-82.
- [5] 孔凡丹,周利军,郑美玉,等.秸秆覆盖对黑土区大豆生长及产量构成因素的影响[J].大豆科学,2022,41(2):189-195.
KONG F D, ZHOU L J, ZHENG M Y, et al. Effects of straw mulching on growth and yield components of soybean in black soil area[J].Soybean Science,2022,41(2):189-195.
- [6] 陈军锋,郑秀清,秦作栋,等.冻融期秸秆覆盖量对土壤剖面水热时空变化的影响[J].农业工程学报,2013,29(20):102-110.
CHEN J F, ZHENG X Q, QIN Z D, et al. Effects of maize straw mulch on spatiotemporal variation of soil profile moisture and temperature during freeze-thaw period[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(20):102-110.
- [7] 程宏波,柴守玺,陈玉章,等.西北旱地春小麦不同覆盖措施的温度和产量效应[J].生态学报,2015,35(19):6316-6325.
CHENG H B, CHAI S X, CHEN Y Z, et al. Effect of mulching method on soil temperature and grain yield of spring wheat in arid agricultural areas of northwestern China[J].Acta Ecologica Sinica,2015,35(19):6316-6325.
- [8] MA E D, ZHANG G B, MA J, et al. Effects of rice straw returning methods on N₂O emission during wheat-growing season[J].Nutrient Cycling in Agroecosystems,2010,88(3):463-469.
- [9] ZHAO J L, LU Y, TIAN H L, et al. Effects of straw returning and residue cleaner on the soil moisture content, soil temperature, and maize emergence rate in China's three major maize producing areas[J].Sustainability, 2019,11(20):e5796.
- [10] 姚凡云,曹玉军,王虹霏,等.秸秆还田对东北半干旱区玉米||花生轮作系统土壤水热特性及作物产量的影响[J].玉米科学,2020,28(4):86-95.
YAO F Y, CAO Y J, WANG H F, et al. Effects of

- straw returning on soil hydro-thermal properties and crop yield of maize || peanut rotation system in semi-arid area of Northeast China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(4): 86-95.
- [11] ZHAO H L, SHAR A G, LI S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178-186.
- [12] 葛选良, 钱春荣, 张锋, 等. 不同秸秆还田模式玉米产量和耕层土壤物理特性的研究[J]. *东北农业科学*, 2022, 47(3): 88-93.
- GE X L, QIAN C R, ZHANG F, et al. Studies on yield of maize and physical properties of surface soil under the different straw returning patterns[J]. *Journal of North-east Agricultural Sciences*, 2022, 47(3): 88-93.
- [13] 张静, 温晓霞, 廖允成, 等. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 612-619.
- ZHANG J, WEN X X, LIAO Y C, et al. Effects of different amount of maize straw returning on soil fertility and yield of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(3): 612-619.
- [14] 李娜娜, 池宝亮, 梁改梅. 旱地玉米秸秆地膜二元覆盖的土壤水热效应研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 248-253.
- LI N N, CHI B L, LIANG G M. Study on soil hydro-thermal effect of dual mulching of corn straw mulching film in dry land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 248-253.
- [15] 王一菲, 郑粉莉, 周秀杰, 等. 黑土农田冻结-融化期土壤剖面温度变化特征[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(3): 57-64.
- WANG Y F, ZHENG F L, ZHOU X J, et al. Soil profile temperature variation in farmlands during freeze-thaw period in mollisol region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(3): 57-64.
- [16] 米美霞, 樊军, 邵明安, 等. 地表覆盖对土壤热参数变化的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 58-66.
- MI M X, FAN J, SHAO M A, et al. Study of effects of the surface mulch on soil thermal properties using heat pulse technology[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 58-66.
- [17] 于洋, 张常仁, 杨雅丽, 等. 长期免耕不同秸秆覆盖量对黑土碳氮含量及碳氮循环相关酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(3): 695-704.
- YU Y, ZHANG C R, YANG Y L, et al. Effects of long-term no-tillage with different straw mulching amount on carbon and nitrogen content and enzyme activities related to carbon and nitrogen cycle in black soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(3): 695-704.
- [18] 李瑞平, 罗洋, 隋鹏祥, 等. 玉米秸秆不同还田方式对黑土耕层温度影响的短期效应[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(10): 2693-2702.
- LI R P, LUO Y, SUI P X, et al. Short-term effect of different returning methods of maize straw on the temperature of black soil plough layer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(10): 2693-2702.
- [19] 马永财, 滕达, 衣淑娟, 等. 秸秆覆盖还田及腐解率对土壤温湿度与玉米产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(10): 90-99.
- MA Y C, TENG D, YI S J, et al. Effects of straw mulching and decomposition rate on soil temperature and humidity and maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(10): 90-99.
- [20] YIN W, FAN Z L, HU F L, et al. No-tillage with straw mulching promotes wheat production via regulating soil drying-wetting status and reducing soil-air temperature variation at arid regions[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 145(12): e126778.
- [21] MA L J, KONG F X, WANG Z, et al. Growth and yield of cotton as affected by different straw returning modes with an equivalent carbon input[J]. *Field Crops Research*, 2019, 243: e107616.
- [22] 孙开, 王春霞, 蓝明菊, 等. 秋耕对北疆季节性冻融期土壤热状况的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 63-71.
- SUN K, WANG C X, LAN M J, et al. Effect of autumn tillage on soil thermal conditions during the seasonal freeze-thaw period in the North Xinjiang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 63-71.
- [23] 付强, 颜培儒, 李天霄, 等. 冻融期不同覆盖和气象因子对土壤导热率和热通量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(20): 98-105.
- FU Q, YAN P R, LI T X, et al. Influence of different coverage and meteorological factors on soil thermal conductivity and heat flux during freezing and thawing period[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(20): 98-105.
- [24] 张新民, 高雅玉, 李泽霞, 等. 不同休闲期农田管理措施下季节性冻融对土壤团聚体的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(12): 65-74.
- ZHANG X M, GAO Y Y, LI Z X, et al. Change in soil aggregation during the freezing-thawing fallow season was affected by agronomical management[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(12): 65-74.
- [25] 陈晨, 张权坤, 史露佳, 等. 季节性冻融期南疆棉田土壤温度变化研究[J]. *现代农业科技*, 2016(11): 232-235.
- CHEN C, ZHANG Q K, SHI L J, et al. Study on soil temperature change of cotton field in southern Xinjiang during seasonal freeze-thaw period [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016(11): 232-235.

- [26] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等.东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2022,36(2):1-12.
ZHANG G H, YANG Y, LIU Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):1-12.
- [27] 陈盛洋.玉米秸秆还田技术现状及未来发展[J].南方农业,2015,9(33):120-121.
CHEN S Y. Present situation and future development of corn stalk returning technology[J].South China Agriculture, 2015,9(33):120-121.
- [28] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].水土保持学报,2004,18(2):66-70.
FAN H M, CAI Q G, WANG H S. Condition of soil erosion in phaeozem region of Northeast China[J].Journal of Soil Water Conservation, 2004,18(2):66-70.
- [29] 宫秀杰,钱春荣,于洋,等.我国玉米秸秆还田现状及效应研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(9):10-13.
GONG X J, QIAN C R, YU Y, et al. Research progress on the present situation and effect of corn stalk returning to field in China[J].Jiangsu Agricultural Sciences, 2017,45(9):10-13.
- [30] 赵娅君,郑粉莉,安小兵,等.典型黑土区坡耕地融雪、风力、降雨复合侵蚀效应[J].应用生态学报,2023,34(9):2421-2428.
ZHAO Y J, ZHENG F L, AN X B, et al. Combined erosion effects of snowmelt, wind and rainfall on sloping farmland in typical black soil areas[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(9):2421-2428.
- [31] 张哲寰,赵君,宋运红,等.黑龙江省克山县土壤-作物系统硒元素地球化学特征[J].地质与资源,2020,29(6):585-591,555.
ZHANG Z H, ZHAO J, SONG Y H, et al. Geochemical characteristics of selenium in soil-crop system in Keshan County, Heilongjiang Province[J].Geology and Resources, 2020,29(6):585-591,555.
- [32] 陈瑞,杨梅学,万国宁,等.基于水热变化的青藏高原土壤冻融过程研究进展[J].地理科学进展,2020,39(11):1944-1958.
CHEN R, YANG M X, WANG N, et al. Soil freezing-thawing processes on the Tibetan Plateau: A review based on hydrothermal dynamics[J].Progress in Geography, 2020,39(11):1944-1958.
- [33] 潘大全,陈军锋,薛静,等.不同冻融阶段灌水对土壤蒸发影响的模拟研究[J].灌溉排水学报,2022,41(11):68-77.
PAN D Q, CHEN J F, XUE J, et al. Change in evaporation from soil as affected by irrigation at different freeze-thaw stages[J].Journal of Irrigation and Drainage, 2022,41(11):68-77.
- [34] 马晶晶,王佩,邓钰婧,等.青海湖流域高寒草甸季节冻土土壤温湿变化特征[J].土壤,2022,54(3):619-628.
MA J J, WANG P, DENG Y J, et al. Characteristics of seasonal frozen soil temperature and moisture changes in alpine meadow in Qinghai Lake watershed[J].Soils, 2022,54(3):619-628.
- [35] 黄霞悦,赵传燕,臧飞,等.不同海拔下青海云杉林土壤冻融期水热变化特征[J].兰州大学学报(自然科学版),2022,58(6):711-719.
HUANG J Y, ZHAO C Y, ZANG F, et al. Characteristics of soil water-heat in different altitude gradients during freezing and thawing periods for Qinghai spruce forest[J].Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2022,58(6):711-719.
- [36] 戴黎聪,柯浔,张法伟,等.青藏高原季节冻土区土壤冻融过程水热耦合特征[J].冰川冻土,2020,42(2):390-398.
DAI L C, KE X, ZHANG F W, et al. Characteristics of hydro-thermal coupling during soil freezing-thawing process in seasonally frozen soil regions on the Tibetan Plateau[J].Journal of Glaciology and Geocryology, 2020,42(2):390-398.
- [37] 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].农业机械学报,2015,46(7):154-161.
FU Q, HOU R J, WANG Z L, et al. Soil thermal regime under snow cover and its response to meteorological factors[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):154-161.
- [38] 付强,蒋睿奇,王子龙,等.不同积雪覆盖条件下冻融土壤水分运动规律研究[J].农业机械学报,2015,46(10):152-159.
FU Q, JIANG R Q, WANG Z L, et al. Soil moisture movement during freezing-thawing period under different snow covers[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(10):152-159.
- [39] 张音,海米旦·贺力力,古力米热·哈那提,等.天山北坡积雪消融对不同冻融阶段土壤温湿度的影响[J].生态学报,2020,40(5):1602-1609.
ZHANG Y, HAIMIDAN H, GULIMIRE H, et al. The influence of snowmelt on soil temperature and moisture in different freezing-thawing stages on the north slope of Tianshan Mountain[J].Acta Ecologica Sinica, 2020,40(5):1602-1609.