

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.037

覆盖物对冻融土壤热量空间分布与传递效率的影响

付强 马梓翥 李天霄 侯仁杰

(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了明确覆盖物对冻融土壤热量传递阻碍作用的机理和特性,基于冬季大田试验(2016年11月1日—2017年4月30日),设置裸地、自然降雪覆盖、5 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪、10 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪 4 种处理,分别测定了不同处理条件下 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 cm 深度的土壤总含水率、液态含水率和温度等数据,计算了不同处理条件下冻融土壤的热容量、相变热量和热量变化量等相关参数,进而分析了覆盖物对冻融土壤热量空间分布和传递效率的影响。结果表明:试验期 30 cm 深度范围内土壤热量交换量占比较大,不同时期内热量变化占比可达 54.57% ~ 81.17%;在冻结期 4 种处理条件下,土壤热量传递整体呈现出热量散失的趋势,在融化期 4 种处理条件下,土壤热量传递整体呈现出热量吸收的趋势;自然降雪覆盖、5 cm 秸秆覆盖和 10 cm 秸秆覆盖对于热量传递的影响率分别为 17%、8% 和 17%;4 种处理条件下土壤热量无变化时间段均较长,分别为 29.17%、39.41%、43.33%、50.88%。

关键词: 覆盖物;冻融土壤;热量;空间分布;传递效率

中图分类号: S274.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)02-0292-07

Influence of Different Covers on Heat Spatial Distribution and Transfer Efficiency of Freezing-thawing Soil

FU Qiang MA Ziao LI Tianxiao HOU Renjie

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

Abstract: Soil mulch is one of the important agricultural measures, in order to inquiry the mechanism and characteristics of the mulching hindrance effect on heat exchange between atmosphere and soil. There were four treatments of bare land, natural snowfall mulching, 5 cm straw with natural snow fall mulching and 10 cm straw with natural snow mulching in winter field trial period (2016.11.1—2017.4.30), the total soil water content, liquid water content and temperature at the soil depths of 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm, 70 cm, 80 cm, 90 cm and 100 cm under the four treatments were determined, the heat capacity, phase change heat and heat quantity of freezing-thawing soil were calculated, and then the effects of different mulching treatments on heat spatial distribution and transfer efficiency in freezing-thawing soil were analyzed. The result showed that the depth of 30 cm soil heat exchange was accounted for relatively large, the heat quantity was accounted for up to 54.57% ~ 81.17% in different trial periods. In the freezing period, the soil heat transfers of four treatments showed the heat dissipation overall trend, and in the thawing period, the soil heat transfers of four treatments showed the heat absorption overall trend. The effects of the natural snowfall mulching, straw mulching of 5 cm and 10 cm on the heat transfer rate were 17%, 8% and 17%, respectively. The time periods of no soil heat change were long with proportions of 29.17%, 39.41%, 43.33% and 50.88%, respectively under different treatments. The study had practical significance for the spring soil moisture conservation.

Key words: mulching; freezing-thawing soil; heat; spatial distribution; transfer efficiency

0 引言

土壤覆盖作为重要的农业耕作措施之一,对于

保持土壤墒情、增加土壤温度具有重要的作用,一直以来都是国内外学者关注的焦点。早在 20 世纪 30 年代 HALLSTED 等^[1-2] 就已对秸秆覆盖进行了科

收稿日期: 2017-09-05 修回日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679039)和黑龙江省杰出青年基金项目(JC201402)

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优化利用与管理研究,E-mail: fuqiang0629@126.com

学性的研究,随后其他学者在其研究基础上不断进行了完善。我国对于秸秆覆盖的研究始于 20 世纪 70 年代初^[3],随后开展了广泛的研究工作。其研究内容主要针对覆盖条件下土壤中水、热、微生物、有机物的变化和迁移规律以及对作物产量、植被生长等方面的影响^[4-9]。比较有代表性的研究有: SARKAR 等^[10]提出水葫芦覆盖和稻草覆盖可以有效提高黄芥菜的水分利用率及产量; FAN 等^[11]发现,黄土高原秸秆覆盖处理可以降低土壤日最高温度,提高土壤日最低温度,增加浅层土壤蓄水量,进而提高苜蓿产量和水分利用效率。上述研究多侧重于非冻融土壤,而全球季节性冻土区的面积达到了 23%,尤其是我国,其比例达到了 53.5%^[12],因此,国内外相关学者也广泛开展了覆盖物对冻融土壤水热变化的影响研究^[13-14],如:卢星航等^[13]研究了内蒙古河套灌区不同覆盖对冻融土壤水分和温度的影响;周剑等^[14]指出青藏高原植被覆盖可大幅度延迟土壤冻结起始时间;时学双等^[15]研究发现,与裸地相比,秸秆覆盖可有效降低冻融期土壤温度的变幅;ZHANG 等^[16]和 MUSA 等^[17]也得出了相似的结论。陈军锋等^[18-19]通过室内和室外试验研究了冻融条件下土质和覆盖物对土壤温度变化的影响。

由于气候、地质条件、土壤、覆盖物等人为或自然因素的差异,冻融土壤内部热量分布和传递效率也有所不同,上述研究多侧重于秸秆覆盖,未考虑积雪,尤其是积雪和秸秆覆盖共同作用下对冻融土壤水热的影响。因此,本文以季节性冻土区——黑龙江省为研究对象,通过野外冬季大田试验,考虑积雪和秸秆覆盖的共同作用,分析冻融土壤内部热量空间分布以及覆盖物对其传递效率的影响,以期对季节性冻土区农田土壤水热的高效利用和春季土壤墒情的识别提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2016 年 11 月 1 日—2017 年 4 月 30 日在黑龙江省哈尔滨市东北农业大学节水灌溉试验场进行。试验区位于 45°44'24"N, 126°43'7"E(图 1),气候属于中温带大陆性季风气候,冬长夏短。试验期内最低气温为 -24.4℃,日均最低气温为 -19.3℃,日平均气温为 -5.3℃,累计负积温为 -1 327.6℃,累计降水量 49.2 mm。本试验区犁底层约为 20 cm,为黑土,40~60 cm 为粘质黄土,60 cm 以下为粘质黑土。试验前期通过人工取样测定可知:土壤平均干容重为 1.52 g/m³,饱和含水率为 44.81%,田间持水率为 32.73%。另外,采用

Winner801 型激光粒度仪检测土壤中各种颗粒的机械组成为:黏粒(<0.002 mm)所占比重为 14.27%,粉粒(0.002~0.02 mm)所占比重为 35.89%,砂粒(0.02~2 mm)所占比重为 49.84%。

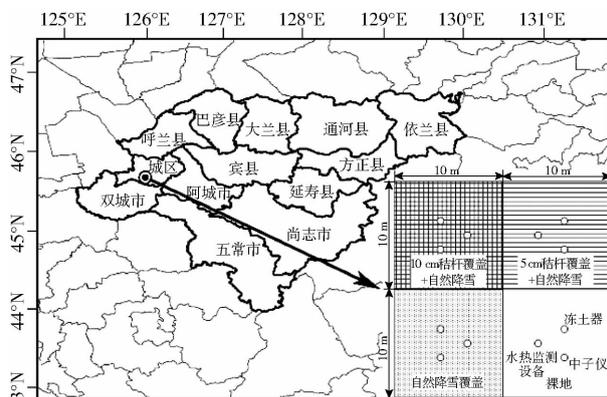


图 1 试验区位置与方案设置

Fig. 1 Test area location and test setting

1.2 试验方案

将试验场地划分为 4 块 10 m × 10 m 的区域,设置裸地、自然降雪覆盖、5 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪(6 000 kg/hm²)和 10 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪(12 000 kg/hm²)4 种处理,各区域秸秆均匀铺设。试验所用秸秆取自于 2016 年收获的大田玉米植株完整的茎叶部分,其中:5 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪处理条件采用平行铺设方式,10 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪处理采用纵横交错铺设方式,裸地处理采用人工清理每次降雪。试验过程中,每个试验小区埋设冻土器 1 根、土壤水热环境监测设备 1 套,用以实时监测土壤的冻深、土壤温度和液态含水率等数据,此外,每套监测设备附近埋设 1 根中子仪测管,用以测量冻融土壤的总含水率。

冻深数据采用人工观测,每日 08:00 进行数据采集。土壤水热监测设备埋深为 100 cm,观测深度分别为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 cm,数据采集间隔为 1 h。结合试验区域气候特点及冻深发展趋势,中子仪测量时间为每 3 d 一次,如有气温极端变化或降雪,则补充测量一次,测量时每个土层深度进行 3 次测量,取其平均值。为了保证数据精度,试验前通过不同深度土壤取样,对中子仪以及土壤水热监测设备进行了校核和标定。

1.3 研究方法

冻结期土壤中的质量含水率与体积含水率为

$$W = \frac{(W_v - W_{vu})\rho_i + W_{vu}\rho_w}{\rho_d + (W_v - W_{vu})\rho_i + W_{vu}\rho_w} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_u = \frac{W_{vu}\rho_w}{\rho_d + (W_v - W_{vu})\rho_i + W_{vu}\rho_w} \times 100\% \quad (2)$$

式中 W ——土壤中的质量总含水率, %

W_u ——土壤中的液态质量含水率, %

W_v ——土壤中的体积含水率, %

W_{vu} ——土壤中的液态体积含水率, %

ρ_d ——土的干密度, kg/m^3

ρ_i ——冰密度, kg/m^3

ρ_w ——液态水密度, kg/m^3

融土比热容 C_{du} 和冻土比热容 C_{df} 分别为

$$C_{du} = \frac{C_{su} + WC_w}{1 + W} \quad (3)$$

$$C_{df} = \frac{C_{sf} + (W - W_u)C_i + W_u C_w}{1 + W} \quad (4)$$

式中 C_{su} 、 C_{sf} 、 C_w 、 C_i ——融土骨架、冻土骨架、水和冰的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

融土容积热容量 C_u ($\text{kJ}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$) 与冻土容积热容量 C_f 为

$$C_u = C_{du}\rho_u = (C_{su} + WC_w)\rho_d \quad (5)$$

$$C_f = C_{df}\rho_f = [C_{sf} + (W - W_u)C_i + W_u C_w]\rho_d \quad (6)$$

式中 ρ_u 、 ρ_f ——融土和冻土天然容重(湿容重), kg/m^3

冻土内水分相变吸收、释放大热量, 水分相变潜热变化过程使得冻土与融土热量变化具有显著的差别^[20]。相变热量 Q_w 可通过土层内含冰量的变化量来计算

$$Q_w = L \rho_d \Delta(W - W_u) \quad (7)$$

式中 L ——水分相变热, 取 $334.56 \text{ kJ}/\text{kg}$ ^[12]

$\Delta(W - W_u)$ ——当前时刻含冰量与上一时刻的差值

忽略土壤内水汽迁移, 则冻土和融土在冻融期的热量变化量 ΔQ_d 和 ΔQ_r 可表示为

$$\Delta Q_d = [C_{sf} + (W - W_u)C_i + W_u C_w]\rho_d \Delta T_e + L \rho_d \Delta(W - W_u) \quad (8)$$

$$\Delta Q_r = (C_{su} + WC_w)\rho_d \Delta T_e + L \rho_d \Delta(W - W_u) \quad (9)$$

式中 ΔT_e ——当前时刻与上一时刻的温度差

当计算深度土层中 $W_i = W - W_u \neq 0$ 时即认为有固态水存在, 采用式(8)计算; 当计算深度土层中 $W_i = W - W_u = 0$ 时无固态水, 采用式(9)计算, 其中 W_i 为土壤中固态水含量。

根据式(8)、(9), 则冻融期不同处理条件下某土层深度处热量变化量 Q_{cdi} 为

$$Q_{cdi} = \begin{cases} \sum_{i=1}^T \Delta Q_d & (W_i \neq 0) \\ \sum_{i=1}^T \Delta Q_r & (W_i = 0) \end{cases} \quad (10)$$

式中 T ——数据序列长度

i ——土层深度, 为 10, 20, ..., 100 cm

则试验期内不同处理地块热量变化总量 Q_{cd} 为

$$Q_{cd} = \sum_{i=10}^{100} Q_{cdi} \quad (11)$$

则某土层深度热量变化量占该处理地块热量变化总量的比值(简称土层热量变化量占比) Q_{cdpi} 为

$$Q_{cdpi} = \frac{Q_{cdi}}{Q_{cd}} \times 100\% \quad (12)$$

为了确定不同深度土层试验期内热量收支状况, 对 24 h 各时间段内热量变化量进行计算和统计, 分别计算土层日吸收热量值 ΔQ_x 和日释放热量值 ΔQ_s

$$\Delta Q_x = \begin{cases} \sum_{i=1}^I \Delta Q_d & (W_i \neq 0, \Delta Q_d > 0) \\ \sum_{i=1}^I \Delta Q_r & (W_i = 0, \Delta Q_r > 0) \end{cases} \quad (13)$$

$$\Delta Q_s = \begin{cases} \sum_{i=1}^J \Delta Q_d & (W_i \neq 0, \Delta Q_d < 0) \\ \sum_{i=1}^J \Delta Q_r & (W_i = 0, \Delta Q_r < 0) \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$I + J = 24$$

式中 I ——计算日内热量变化量为正值的个数

J ——计算日内热量变化量为负值的个数

2 结果与分析

土壤的冻融过程反映了土壤中热量的变化^[21-22], 采用冻深数据绘制各处理地块冻融过程曲线, 如图 2 所示。由图 2 可知, 不同处理条件下冻融过程存在一定的差异, 尤其是最大冻深, 4 种处理的极差达到了 65 cm, 可见覆盖物在一定程度上改变了冻融土壤中热量的分布和传递过程。为了便于分析, 以裸地条件下的冻融过程线作为试验阶段划分的依据, 以冻结速率发生变化的日期作为分界点, 将整个试验期划分为冻结期和融化期, 如图 2 所示。

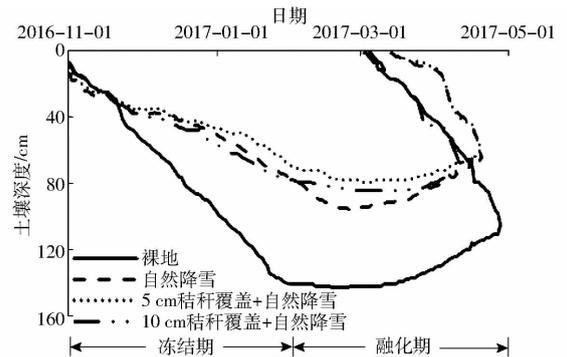


图 2 不同处理条件下冻深变化过程

Fig. 2 Change process of freezing depth under different treatment conditions

2.1 不同处理条件下冻融土壤热量空间分布

在试验过程中,受环境因子的驱动,各土层与环境之间发生着热量交换。根据式(12)计算4种处理条件下各深度土层热量变化量占比 Q_{c_dpi} ,如图3所示。由图3可知,在冻结期,裸地、自然降雪覆盖、5 cm 秸秆覆盖+自然降雪、10 cm 秸秆覆盖+自然降雪4种处理条件下表层10 cm 土层处土壤热量变化量占比依次为34.21%、36.87%、24.19%、26.91%,随着土层深度的增加,在20、30 cm 土层处分别减少为19.78%和10.86%、16.59%和11.27%、18.89%和16.18%、15.89%和11.77%,表层30 cm 区域内的土层热量变化量占比累计分别达到了64.85%、64.73%、59.27%和54.57%;在融化期,4种处理条件下表层10 cm 土层处土壤热量

变化量占比依次为54.93%、56.44%、50.41%、38.36%。随着土层深度的增加,在20、30 cm 土层处分别减少为18.58%和7.66%、15.65%和7.05%、16.58%和6.98%、14.4%和8.48%,表层30 cm 区域内的土层热量变化量占比累计分别达到了81.17%、79.14%、73.98%和61.24%。可见,在土壤冻融循环过程中,土壤受环境因子的驱动效果较为显著,浅层土壤与环境之间的热量交换程度要高于深层,表层30 cm 土层热量交换占到了整个观测深度土层热量交换的54%以上,尤其是融化期裸地处理,达到了81.17%;随着土壤覆盖厚度的增加,表层30 cm 土层内热量变化量占比逐渐降低,波动幅度逐渐减小,表明积雪与秸秆的协同效应减弱了土壤热量的迁移和传递过程。

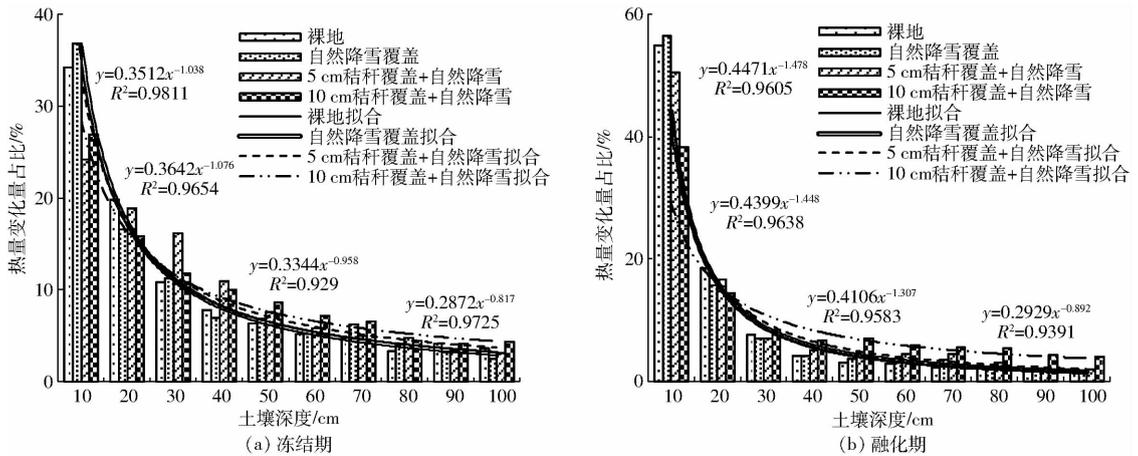


图3 冻融过程中各土层热量变化量占比空间分布
Fig. 3 Heat variation in each soil layer during freezing and thawing processes

2.2 不同处理条件下冻融土壤热量收支特征

根据式(13)和(14)分别计算冻结期和融化期各土层日热量的吸收值与释放值,绘制其随时间的变化曲线,并拟合变化曲线的线性函数,则函数斜率即表示土壤热量释放、吸收的变异幅度。考虑到论文篇幅,仅给出10 cm 土层土壤热量释放、吸收过程曲线,如图4所示,其余土层计算结果如表1所示。由图4可知,表层10 cm 土层处,冻结期,随着气温的不断降低,土壤热量不断散失,4种处理条件下的热量收支趋势线斜率均为负值,分别为-0.179、-0.157、-0.122、-0.098;融化期,随着气温的不断升高,土壤不断吸收外界热量,4种处理条件下的热量收支趋势线斜率均为正值,分别为0.251、0.224、0.161、0.118。可见,无论冻结期还是融化期,裸地处理条件下,10 cm 土层深度热量收支变异幅度均是最大的,而10 cm 秸秆覆盖+自然降雪处理条件下均是最小的。对比表1,其他土层深度同样也存在该规律。因此,本文认为随着土壤表面覆盖物种类及厚度的增加,土壤与环境之间的热量交

换程度逐渐减弱,土壤热量散失或吸收的速率也会逐渐降低。

由表1可知,在裸地处理条件下,20 cm 土层处冻结期日均热量吸收与释放的差值为7564.8 kJ,而随着土层深度的增加,30、40、50、60 cm 土层处的日均热量变化差值分别相对于20 cm 土层处降低了37.12%、58.67%、71.78%和75.19%,而达到深层100 cm 土层处,土壤热量收支变化差值仅仅为1098.5 kJ;在自然降雪覆盖处理条件下,积雪的大热容量性及低导热性阻碍了土壤与环境之间的热量交换。冻结期,在20、30、40、50 cm 土层处的日均热量变化差值分别相对于裸地处理条件下相同土层处的热量变化值逐渐降低。其热量变化趋势线斜率分别相对于裸地处理降低了9.93%、11.34%、10.15%和13.01%。同理,在5 cm 秸秆覆盖+自然降雪、10 cm 秸秆覆盖+自然降雪处理条件下,积雪和秸秆的双重覆盖效果更加抑制了热量的散失,因此,在这2种处理条件下,各个土层处的土壤日均热量变化差值以及变化趋势线斜率分别相对于裸地和

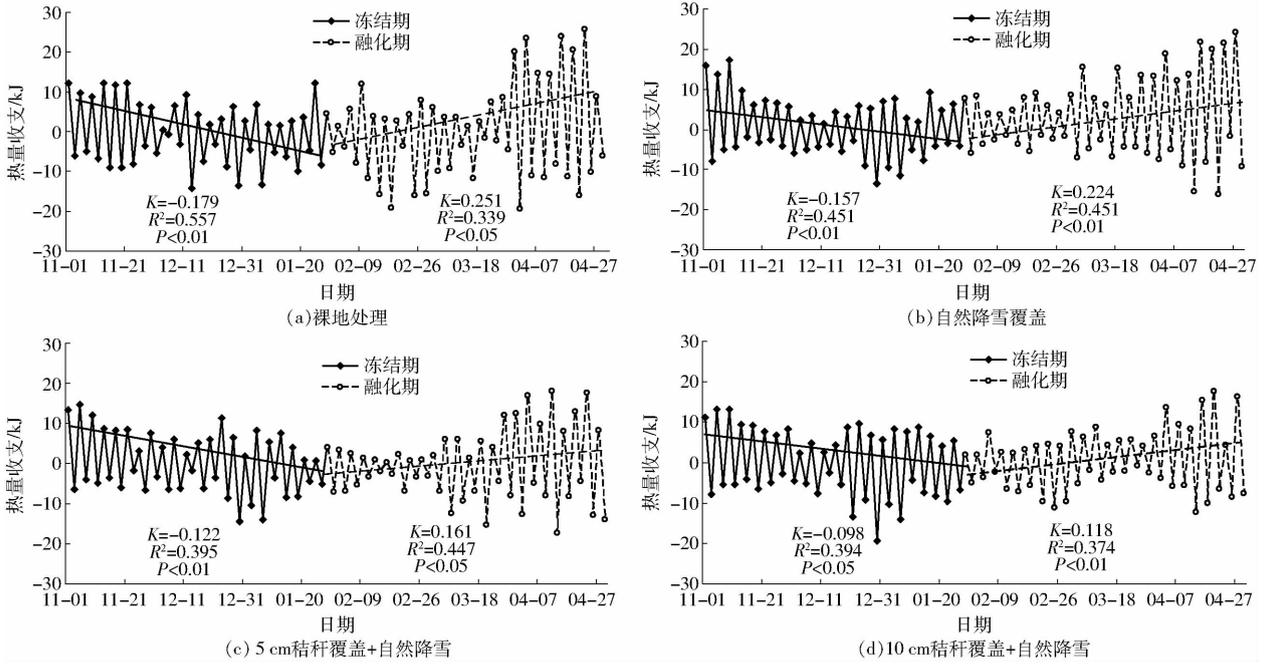


图4 试验期内10 cm 土层处土壤热量变异过程

Fig.4 Soil heat variation during experiment period in 10 cm soil layer

表1 冻融期土壤热量收支空间变异过程

Tab.1 Spatial variation of soil heat balance during freezing and thawing processes

土壤深度/cm	参数	冻结期				融化期			
		裸地	自然降雪覆盖	5 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪	10 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪	裸地	自然降雪覆盖	5 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪	10 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪
10	日均热量差/kJ	12 754.4	8 572.7	4 761.3	2 431.5	31 563.5	26 078.5	17 532.1	8 857.1
	趋势线斜率 K	-0.179	-0.157	-0.122	-0.098	0.251	0.224	0.161	0.118
20	日均热量差/kJ	7 564.8	3 123.7	2 978.4	1 543.7	10 056.7	8 342.1	5 641.5	3 547.2
	趋势线斜率 K	-0.151	-0.136	-0.104	-0.087	0.247	0.207	0.131	0.098
30	日均热量差/kJ	4 756.2	1 989.5	2 218.6	1 086.2	4 518.5	2 865.4	1 559.4	1 098.5
	趋势线斜率 K	-0.141	-0.125	-0.086	-0.073	0.218	0.187	0.131	0.095
40	日均热量差/kJ	3 126.7	1 364.8	1 554.2	1 056.1	2 098.4	1 352.1	986.4	709.3
	趋势线斜率 K	-0.128	-0.115	-0.098	-0.075	0.207	0.187	0.122	0.085
50	日均热量差/kJ	2 134.7	1 564.2	1 098.5	874.2	1 225.3	1 098.4	859.2	731.2
	趋势线斜率 K	-0.123	-0.107	-0.088	-0.071	0.194	0.158	0.117	0.080
60	日均热量差/kJ	1 876.9	1 254.3	911.5	813.6	1 154.2	986.4	732.8	645.2
	趋势线斜率 K	-0.097	-0.088	-0.071	-0.063	0.178	0.131	0.111	0.072
70	日均热量差/kJ	1 546.8	1 126.1	980.2.7	822.1	1 005.1	876.5	743.4	603.6
	趋势线斜率 K	-0.078	-0.073	-0.067	-0.052	0.158	0.106	0.098	0.074
80	日均热量差/kJ	1 321.8	931.4	932.1	775.3	897.1	708.7	667.6	597.3
	趋势线斜率 K	-0.067	-0.062	-0.054	-0.043	0.151	0.102	0.086	0.063
90	日均热量差/kJ	1 436.8	810.4	743.2	710.9	721.1	711.5	657.9	603.5
	趋势线斜率 K	-0.055	-0.044	-0.041	-0.035	0.143	0.101	0.088	0.067
100	日均热量差/kJ	1 098.5	784.2	703.5	693.2	685.1	558.4	543.2	421.3
	趋势线斜率 K	-0.048	-0.032	-0.029	-0.026	0.131	0.084	0.071	0.061

自然降雪覆盖处理均有所降低。与上述结果相似，融化期，4种处理条件下各个土层热量的日均变化差值和趋势线斜率随着土层深度的增加，依次呈现出减小的趋势。如：裸地处理条件下，20、30、40、50 cm 土层处的热量收支变化趋势线的斜率分别为0.247、0.218、0.207和0.194，随着土层深度的增

加，土壤吸收热量的幅度逐渐地减弱。

综合上述分析可知，在整个冻融循环过程中，各个土层与其相邻土层进行着频繁的热量交换。随着土壤深度的不断增加，热量在土壤内传递的损耗逐渐增加，使得热量交换程度在逐渐地减弱。在冻结过程中，土壤热量传递的累计值为负，整体呈现出热

量散失的趋势,而在融化期,随着气温的升高以及辐射能力的增强,土壤从环境中不断地汲取热量,由于积雪的大热容量性、低导热率以及秸秆的储水蓄能效应,导致 4 种处理条件下的土壤与环境之间的热量交换效应逐渐地降低。

2.3 冻融土壤热量双向传递特征分析

为了探索冻融期内土壤热量释放与吸收的平衡状况以及覆盖处理对于土壤热量收支差异的影响,统计 4 种不同处理条件下土壤热量的吸收值与释放值,并将裸地处理吸收与释放热量的绝对值相加作为标准值,与各地块吸收与释放的热量值做对比,具体结果如表 2 所示。由表 2 可知,各个处理在试验期内吸收与释放的热量大致相等,说明在整个冬季试验期土壤内部热量经历了释放-吸收的过程,并基本回到原点。其中裸地热量吸收、释放值占比为 45.07%、54.93%,自然降雪覆盖 28.79%、32.77%,5 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪 20.79%、27.16%,10 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪 11.59%、16.91%,可见覆盖物对于土壤热量双向传递的阻碍作用基本相同,这与文献[23]的研究结果相一致。根据表 2 分别计算自然降雪覆盖、5 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪和 10 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪对于热量传递的阻碍率,其结果分别为 17%、25% 和 34%。由自然降雪覆盖对热量影响效果可知,若各地块自然降雪覆盖对热量传递的影响状况一致,则可以简单推测出秸秆覆盖 + 自然降雪中秸秆覆盖对热量传递影响效果,则有 5 cm 秸秆覆盖对于热量传递的影响率为 8%,10 cm 秸秆覆盖为 17%。图 5 为试验期内 4 种处理热量变化时间统计图。由图 5 可知:4 种处理无热量变化时间点个数占比均较大,其中裸地处理条件下土壤热量无变化时间点个数占比最

表 2 试验期内热量双向传递总量与比值

Tab. 2 Amount and ratio of heat two-way transmission during experiment period

处理	热量变化/kJ		热量变化占比/%	
	吸收	释放	吸收	释放
裸地	5.49	-6.69	45.07	54.93
自然降雪覆盖	3.51	-3.99	28.79	32.77
5 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪	2.53	-3.31	20.79	27.16
10 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪	1.41	-2.06	11.59	16.91

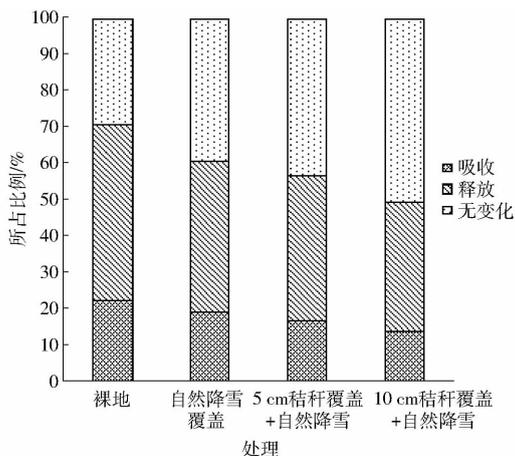


图 5 试验期内热量变化时间统计

Fig. 5 Time statistics of heat change during experiment period

小,为 29.17%。随着覆盖物种类及厚度的增多,其他 3 种处理相对于裸地热量无变化时间点个数占比也在增大,分别增加 10.04%、14.16%、21.64%;4 种处理条件下,热量释放时间段占比相对于热量吸收时间段占比分别高出 26.78%、22.2%、23.78%、21.46%。其中裸地热量释放时间段占比最高,其次为自然降雪覆盖、5 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪、10 cm 秸秆覆盖 + 自然降雪;而热量吸收过程正好相反。这主要由覆盖物的双向阻碍作用导致的。

3 结论

(1) 试验期各处理条件下热量交换主要集中在 30 cm 土层深度范围内,其中冻结期占热量变化总量的 54.57%~64.85%,融化期占热量变化总量的 61.24%~81.17%。随着土壤覆盖厚度的增加,表层 30 cm 土层内热量变化量占比逐渐降低、波动幅度逐渐减小。

(2) 冻结期,随着气温的降低,4 种处理条件下土壤热量传递的累计值均为负,整体呈现出热量散失的趋势;融化期,随着气温的升高和辐射能力的增强,4 种处理条件下土壤热量传递的累计值均为正,整体呈现出热量吸收的趋势。

(3) 覆盖物对于土壤热量双向传递的阻碍作用基本相同,自然降雪覆盖、5 cm 秸秆覆盖和 10 cm 秸秆覆盖对于热量传递的影响率分别为 17%、8% 和 17%。各处理条件下土壤热量无变化时间段均较长,分别为 29.17%、39.41%、43.33%、50.88%。

参 考 文 献

- HALLSTED A L, MATHEWS O R. Soil moisture and winter wheat with suggestions on abandonment [R]. Bull No. 273 Kansas Agric. Exp. Stn, 1936.
- TEBRÜGGE F, DÜRING R A. Reducing tillage intensity—a review of results from a long-term study in Germany[J]. Soil & Tillage Research, 1999, 53(1):15–28.

- 3 柴守玺, 黄彩霞. 旱地冬小麦地膜覆盖的土壤温度效应综述[C]//第十五次全国小麦栽培科学学术研讨会论文集, 2013: 423-428.
- 4 AUSTIN E E, WICKINGS K, MCDANIEL M D, et al. Cover crop root contributions to soil carbon in a no-till corn bioenergy cropping system[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2017, 9(7):1252-1263.
- 5 张俊丽, SIKANDER K T, 温晓霞, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18):192-199.
- ZHANG Junli, SIKANDER K T, WEN Xiaoxia, et al. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(18):192-199. (in Chinese)
- 6 姚宝林, 李光永, 王峰. 冻融期灌水和覆盖对南疆棉田水热盐的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7):114-120.
- YAO Baolin, LI Guangyong, WANG Feng. Effects of winter irrigation and soil surface mulching during freezing-thawing period on soil water-heat-salt for cotton fields in south Xinjiang[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(7):114-120. (in Chinese)
- 7 付强, 侯仁杰, 王子龙, 等. 积雪覆盖下土壤热状况及其对气象因素的响应研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(7):154-161. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150723&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.023.
- FU Qiang, HOU Renjie, WANG Zilong, et al. Soil thermal regime under snow cover and its response to meteorological factors[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7):154-161. (in Chinese)
- 8 巩杰. 旱作麦田秸秆覆盖的生态综合效应研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2002.
- 9 丁红利, 吴先勤, 张磊. 秸秆覆盖下土壤养分与微生物群落关系研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2):294-300.
- DING Hongli, WU Xianqin, ZHANG Lei. Study on the relationship between soil nutrients and microbial community composition after cornstalk mulching [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2):294-300. (in Chinese)
- 10 SARKAR S, PARAMANICK M, GOSWAMI S B. Soil temperature, water use and yield of yellow sarson (*Brassica napus L. var. glauca*) in relation to tillage intensity and mulch management under rainfed lowland ecosystem in eastern India[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93(1):94-101.
- 11 FAN J, GAO Y, WANG Q, et al. Mulching effects on water storage in soil and its depletion by alfalfa in the Loess Plateau of northwestern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 138:10-16.
- 12 徐祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- 13 卢星航, 史海滨, 李瑞平, 等. 覆盖后秋浇对翌年春玉米生育期水热盐及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1):148-154.
- LU Xinghang, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effect of autumn irrigation after mulching on water-heat-salt and yield of following spring maize[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(1):148-154. (in Chinese)
- 14 周剑, 王根绪, 李新, 等. 高寒冻土地区草甸草地生态系统的能量-水分平衡分析[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(3):398-407.
- ZHOU Jian, WANG Genxu, LI Xin, et al. Energy-water balance of meadow ecosystem in cold frozen soil areas [J]. *Journal of Glaciological and Geocology*, 2008, 30(3):398-407. (in Chinese)
- 15 时学双, 李法虎, 普布多吉, 等. 秸秆覆盖对高海拔寒区土壤温度和春青稞生长的影响 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(2):151-160. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160220&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.020.
- SHI Xueshuang, LI Fahu, PUBU Duoqi, et al. Effects of straw mulching on tillage soil temperature and growth of spring highland barley in high altitude cold region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2):151-160. (in Chinese)
- 16 ZHANG H, TANG J, LIANG S. Effects of snow cover plus straw mulching on microorganisms in paddy soil during winter[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 119:339-344.
- 17 MUSA A, LIU Y, WANG A, et al. Characteristics of soil freeze-thaw cycles and their effects on water enrichment in the rhizosphere[J]. *Geoderma*, 2016, 264(11):132-139.
- 18 陈军锋, 杨军耀, 郑秀清, 等. 地下水浅埋条件下单向冻结土壤水热变化试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(12):146-151, 248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141222&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.022.
- CHEN Junfeng, YANG Junyao, ZHENG Xiuqing, et al. Variation of soil temperature and moisture under unidirectional freezing with shallow groundwater[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12):146-151, 248. (in Chinese)
- 19 陈军锋, 郑秀清, 臧红飞, 等. 季节性冻融期灌水对土壤温度与冻融特性的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(3):104-109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130319&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.019.
- CHEN Junfeng, ZHENG Xiuqing, ZANG Hongfei, et al. Effects of irrigation on soil temperature and soil freeze-thaw characteristics during seasonal freeze-thaw period[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(3):104-109. (in Chinese)
- 20 张厚泉. 季节性冻融期土壤水热动态变化规律的数值模拟研究[D]. 太原:太原理工大学, 2009.
- 21 单小琴, 郑秀清, 陈军锋. 季节性冻融期不同地表覆盖对土壤温度时空变化的影响[J]. *节水灌溉*, 2017(8):1-5.
- SHAN Xiaoqin, ZHENG Xiuqing, CHEN Junfeng. Effect of different surface coverage on the temporal and spatial variation of soil temperature during seasonal freeze-thaw period[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(8):1-5. (in Chinese)
- 22 焦永亮, 李韧, 赵林, 等. 多年冻土区活动层冻融状况及土壤水分运移特征[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(2):237-247.
- JIAO Yongliang, LI Ren, ZHAO Lin, et al. Processes of soil thawing-freezing and features of soil moisture migration in the permafrost active layer[J]. *Journal of Glaciological and Geocology*, 2014, 36(2):237-247. (in Chinese)
- 23 付强, 马梓翼, 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/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(12):152-159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141223&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.023.
- FU Qiang, MA Zhaoyi, LI Tianxiao, et al. Variability of soil temperature under different coverage conditions in alpine region of China [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12):152-159. (in Chinese)