

黑土农田冻结—融化期土壤剖面温度变化特征

王一菲¹, 郑粉莉^{1,2}, 周秀杰³, 覃超¹,
富涵¹, 左小锋¹, 刘刚¹, 张加琼¹

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 黑龙江省气象数据中心, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: [目的] 研究东北黑土区农地土壤温度变化特征, 为冻融作用程度量化分析和冻融作用对土壤侵蚀影响提供基础数据。[方法] 利用 2015—2018 年黑龙江省宾州河流域典型农地 2 m 土壤剖面 11 月至翌年 4 月土壤温度观测资料以及气温数据, 分析了冻结和融化过程中土壤温度变化特征以及土壤温度对气温变化的响应, 确定土壤冻结与融化过程中耕层土壤冻融循环次数。[结果] 11 月至翌年 2 月的冻结期, 土壤温度随土层深度的增加而增加; 3—4 月份土壤温度梯度发生反向改变, 当土壤完全消融后, 土壤温度随着土层深度的增加而递减, 土壤最大冻结深度为 80 cm。研究结果还表明, 0—60 cm 土层的土壤温度均与气温呈极显著正相关, 其相关性随土壤深度增加而减小; 而 80 cm 以下土层, 土壤温度均与气温呈负相关。[结论] 研究区土壤冻结和融化过程分别呈单向冻结和双向融化现象, 冻融循环主要发生在农地耕层 0—20 cm 土层, 其年最大冻融循环次数分别为 12 次和 7 次, 为设计黑土冻融循环模拟试验提供了数据支持。

关键词: 土壤温度; 冻融循环; 气温; 东北黑土区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)03-0057-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.010; Wang Yifei, Zheng Fenli, Zhou Xiujie, 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.

Soil Profile Temperature Variation in Farmlands During Freeze-thaw Period in Mollisol Region

Wang Yifei¹, Zheng Fenli^{1,2}, Zhou Xiujie³, Qin Chao¹,
Fu Han¹, Zuo Xiaofeng¹, Liu Gang¹, Zhang Jiaqiong¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, State Key Laboratory of Soil Erosion and

Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Heilongjiang Meteorological Data Center, Harbin, Heilongjiang 150000, China)

Abstract: [Objective] This study explored the characteristics of soil temperature changes in farmlands of Mollisol region in Northeast China in order to provide basic data for quantifying the degree of freeze-thaw action and its impacts on soil erosion. [Methods] Based on the data of soil temperature in 2 m soil profile and air temperature from November to next April in 2015—2018 at the typical farmland in Binzhou River basin of Heilongjiang Province, we analyzed the characteristics of soil temperature variation and its responses to air temperature changes during freeze-thaw processes and freeze-thaw times in plough layer in farmlands. [Results] The soil temperature increased with the increase of soil depth from November to next February, while declined with the increase of soil depth when the soil was completely melted. The maximum frozen depth was

收稿日期: 2019-03-08

修回日期: 2019-04-22

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“黑土区多种外营力互作的坡面侵蚀过程与机制”(41571263); 国家重点研发计划战略性国际科技合作重点专项“黑土侵蚀防治机理与调控技术”(2016YFE0202900)

第一作者: 王一菲(1995—), 女(汉族), 山西省朔州市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: wangyifei1988@126.com。

通讯作者: 郑粉莉(1960—), 女(汉族), 陕西省蓝田县, 二级教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与环境效应研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn。

80 cm in farmlands of the research region. Meanwhile, there was a significant positive correlation between soil temperature in 0—60 cm depth and air temperature, and this correlation decreased with the increase of soil depth. In contrast, soil temperature under 80 cm depth was negatively correlated with air temperature. [Conclusion] There was a unidirectional freezing and bidirectional thawing in the study area. The freeze-thaw action mainly occurred at 0—20 cm in the topsoil layer of farmland, both maximum freeze-thaw cycle times were 12 and 7, respectively, which provided the scientific basis for the design of simulated Mollisol freeze-thaw cycle experiments.

Keywords: soil temperature; freeze-thaw cycle; air temperature; Mollisol region in Northeast China

东北黑土区属于季节性冻融区,冬季冻胀作用和春季冻融日夜循环加剧了坡面侵蚀和沟蚀的发生和发展。已有研究表明,反复的冻融循环会改变土壤结构、影响土壤团聚体水稳性和抗剪强度等^[1-3],从而造成土壤抗侵蚀性降低,增加了水蚀和风蚀物质来源^[4]。特别在东北黑土区土壤解冻期,表层土壤解冻,而深层土壤解冻不完全,从而形成一个临时不透水层,一方面其阻滞土壤水分下渗,易形成壤中流,增加融雪侵蚀强度;另一方面,当土壤水分沿这个冻与不冻接触面流动时,由于两层间的摩擦阻力减小,也可能加剧融雪侵蚀的发生^[5]。因此,冻融作用增加了东北黑土区土壤侵蚀强度。而土壤温度是土壤热量传递与冻融变化的重要指标^[6],也是表征冻融作用强弱的关键指标;掌握农地土壤温度变化特征可为量化冻融作用程度和冻融作用对土壤侵蚀影响提供基础数据。

目前,对于东北黑土区土壤温度的变化研究主要集中在不同耕作方式、不同覆盖条件对黑土土壤温度的影响^[7-10],而对于冻融期土壤温度变化特征的研究较少。张科利等^[11]的研究结果表明,土壤解冻速率与土壤腐殖质层厚度有关,腐殖质厚的土壤剖面解冻速率要比腐殖质层薄的土壤剖面的解冻速率小;李帅等^[12]利用黑龙江省逐日气温与表层地温(0—20 cm 深度)数据建立了地温预报方程,通过预测表层土壤温度的变化来指导当地播种期以及农业结构的调整;赵显波等^[13]将黑土耕层土壤冻结融化过程分为 5 个阶段,并分析了冻融过程后耕层土壤水分的变化情况。Zhao 等^[14]对 2009 年东北克山地区冻融期土壤温度变化进行观测,发现克山地区土壤的冻结时间在 129~155 d,土壤最大冻结深度为 191~229 cm。吕红玉等^[15]对佳木斯 1981—2010 年地温进行研究发现,0—80 cm 深度土壤存在冻融变化,且 80 cm 土壤平均冻结期在 118 d 左右。此外,气温对土壤最大冻结深度和土壤冻融循环次数有重要影响,随着年平均气温的不断升高,季节冻土的冬季最大冻结深度不断减小^[16]。Frauenfeld 等^[17]指出欧亚高纬度地区在 1930—2000 年来季节性冻土的最大冻结深度减少 31.9 cm,平均每 10 a 减少 4.5 cm。高思如等^[18]对 1990—2014 年西藏季节冻土进行研究,发现西藏地

区平均气温升高 1 ℃,最大冻结深度减小约 16.1 cm。土壤冻融次数也与气温呈负相关,Peng 等^[19]的研究表明在 1967—2013 年期间,青海—西藏地区年平均气温显著升高的同时,土壤冻融循环次数也在显著下降。近年来由于平均气温的上升,东北地区土壤有冻结深度减小、冻结期变短、融化期变长的趋势,而随着解冻期(3 月)气温的上升以及降雪量的增加,土壤融雪侵蚀有加剧的可能^[20-21]。然而,目前关于东北黑土区农地土壤剖面冻融循环特征以及土壤温度对气温变化响应的研究较少,尤其是针对不同地区土壤冻结与融化过程中耕层土壤冻融循环次数的研究还鲜见报导。

为此,本文拟利用 2015—2018 年 11 月至翌年 4 月东北薄层黑土区农地土壤剖面温度原位观测数据,并结合当地气象资料,分析该区土壤温度变化特征以及土壤温度变化对气温变化的响应,查清研究区土壤冻结与融化过程中耕层土壤冻融循环次数,以期与研究冻融作用对土壤侵蚀的影响提供基础数据,也为合理安排当地春季作物播种期等农事活动提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验观测地点位于黑龙江省宾州河流域,其地理坐标为 127°24′04″E,45°45′13″N。宾州河流域位于松嫩平原东部,流域面积为 375 km²,农地面积占总面积的 60%左右^[22],属于温带大陆性季风气候,年平均气温 3.9 ℃,年降水量约为 548.5 mm,气温年较差较大,农地冬季封冻,春季解冻,冻融作用强烈。宾州河流域是典型的薄层黑土区(黑土层厚度小于 40 cm),土壤类型以黑土为主,黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)和砂粒(>0.05 mm)的含量分别为 29.4%,61.3%和 9.3%;土壤有机质含量约为 20.2 g/kg(重铬酸钾氧化—外加加热法),pH 值为 6.1(水浸提法,水土比 2.5:1)^[23]。

1.2 观测方法

在宾州河流域典型农地布设土壤温度监测系统 L93-1 温度记录仪(上海发泰精密仪器仪表有限公司),该系统设有 8 个温度传感器,每隔 1 h 自动记录

一次土壤温度,测量精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在土壤剖面各层埋置土壤温度传感器时,先开挖土壤剖面,然后根据土壤剖面各土层的土壤密度从下层至上层回填土壤,在回填土壤过程中将温度传感器按土壤剖面分层埋置。共开挖 2 个 200 cm 的土壤剖面,并分别将温度传感器埋置于 $5, 20, 40, 60, 80, 120, 160$ 和 190 cm 的土层深度,即每个土层深度的温度观测有 2 个重复。

研究时段内的逐小时气温数据由中国气象局—黑龙江省气象数据中心提供。研究区农地冻融过程多发生在 11 月至翌年的 3 月下旬,因此为完整记录土壤冻融过程中的温度变化,本研究采集 2015—2018 年宾州河流域典型农地 2 m 土壤剖面 11 月至翌年 4 月的土壤温度数据,并结合气温数据分析东北黑土区农地土壤冻融过程中土壤剖面温度变化特征

及其对气温变化的响应。

1.3 数据处理

本文使用 SPSS 23.0 软件对试验数据进行相关性分析,使用 Excel 2010 软件进行绘图。土壤日均温 and 年均温均为相应时段监测数据的算术平均值。

2 结果与分析

2.1 冻融过程中土壤温度对气温变化的响应

土壤温度变化是土壤随着太阳辐射和大气温度的变化而吸收或释放能量的过程^[24]。在 11 月至翌年 4 月的整个冻融过程中,土壤温度变化与气温的变化趋势一致(图 1),其总体呈先下降后上升的变化趋势,且随着土层深度的增加,土壤温度波动变化受气温的影响逐渐减少。

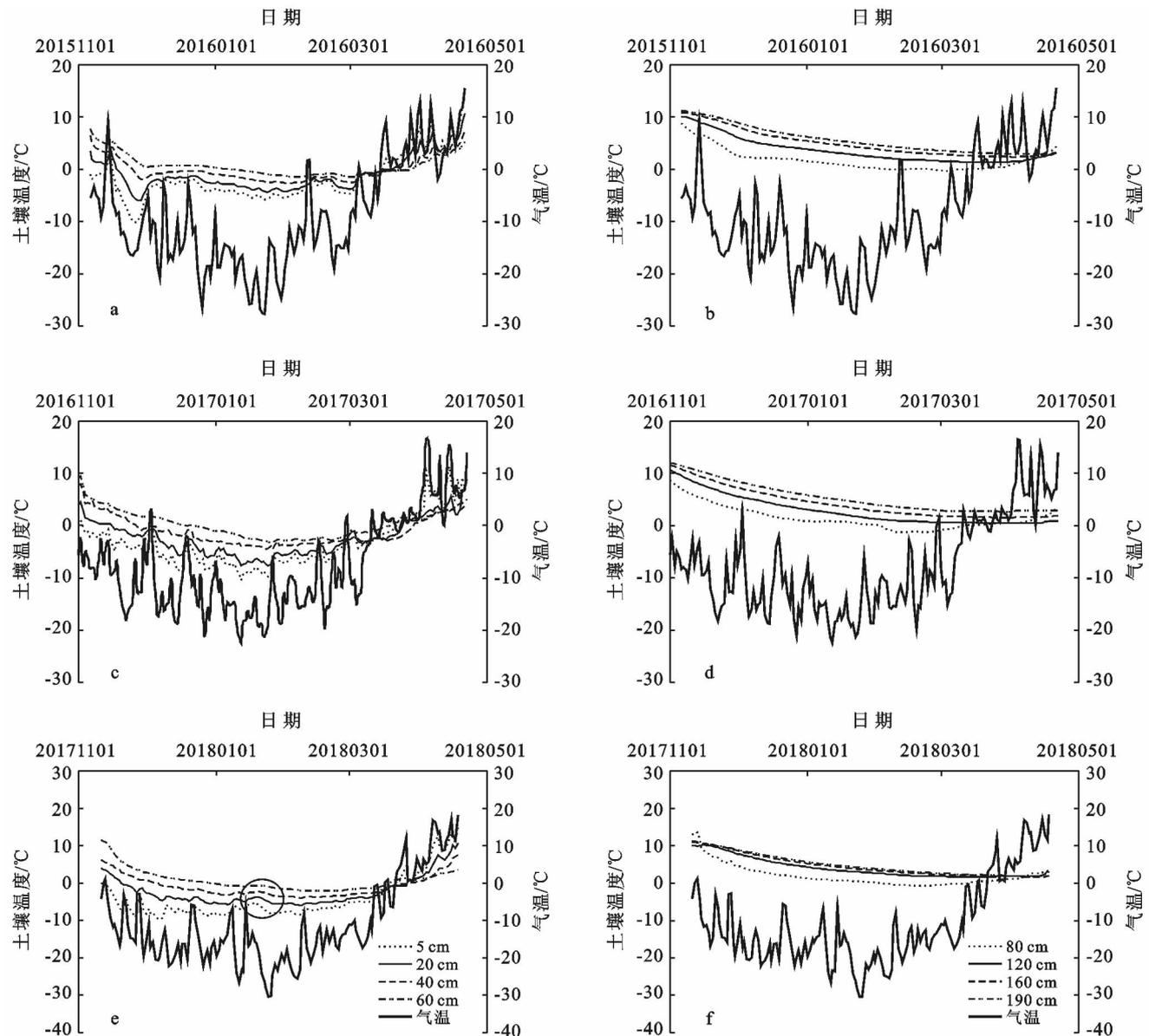


图 1 2015—2018 年冻融期大气温度与土壤温度变化关系

在每年 11 月份,气温迅速下降,各土层温度随之下降。当土壤进入冻结期后,土壤温度变化较为平缓,不同监测深度的土壤温度均高于气温。在当年 3 月份,随着气温的快速上升,土壤温度开始快速升高且变化幅度较大。研究区 11 月至翌年 4 月气温的变化范围为 $-30.40 \sim 18.33$ °C,其温差达到 48.73 °C。与气温相比,土壤温度的变化幅度较小。土壤温度最高值和最低值均出现在 0—5 cm 土层中,其值分别为 15.22 °C 和 -10.13 °C,其温差达到 25.35 °C;5—20 cm 土层的土壤温度变化于 $-6.00 \sim 10.74$ °C 之间,温差达到 16.74 °C。随着土层深度的增加,土壤温度变化幅度逐渐减小,当土层深度达到 40 cm 以上时,土壤温度的变化范围为 $-2.00 \sim 14.40$ °C,40 cm 以下各层土壤温差均介于 8.28~9.72 °C 的范围内。

与气温变化相比,土壤温度变化出现滞后现象,且滞后时间随土壤深度的增加而增大。例如在 2018 年 1 月 11 日,日均气温陡然升高,并在 1 月 14 日达到升温以来的峰值(图 1c),而 40 cm 以内的土壤在 1 月 13 日至 1 月 14 日开始升温,并在 1 月 18 日至 1 月 20 日达到升温以来的峰值。40 cm 以下土层土壤温度受气温变化影响较小,并未出现明显的峰值。

利用 5 日滑动平均法来计算气温与土壤温度稳定超过 0 °C 的时间,发现与气温稳定超过 0 °C 的日期相比,0—5 cm 土层土壤温度稳定超过 0 °C 的日期滞后 0~1 d,而 5—40 cm 土层土壤温度滞后于气温 3~11 d。

将 2015—2018 年 11 月至翌年 4 月土壤冻融过程中各土层土壤温度与气温进行相关分析(表 1),发现除了 60—80 cm 土层外,其余各土层土壤温度均与气温呈显著相关,其中 0—60 cm 土壤温度与气温呈极显著正相关($p < 0.01$),且随土层深度增加,土壤温度与气温的相关性减弱;而 80 cm 土层以下,土壤温度与气温呈显著或极显著的负相关。这表明土壤温度变化受到气温变化的影响,且随着土层深度的增加,土壤温度变化受气温变化的影响逐渐减小。

已有研究指出 0—5 cm 土壤温度变化与气温变化具有很好的一致性,其相关系数达到了 0.8 以上($p = 0.01$)^[24-25]。杜军等^[26]通过对近 45 年拉萨气温与同期 0—40 cm 土壤温度的相关分析发现,二者相关系数均在 0.573 以上($p = 0.01$),这与本文的研究结果相符。3 月份气温开始回升之后,120—190 cm 土壤温度还在持续降低,这是深层土壤与气温相关系数呈负数的主要原因。

表 1 2015—2018 年冻融期不同深度土壤温度和气温的相关系数

年份	土层深度/cm							
	0—5	5—20	20—40	40—60	60—80	80—120	120—160	160—190
2015—2016	0.840**	0.813**	0.648**	0.371**	0.141	-0.161*	-0.268**	-0.319**
2016—2017	0.903**	0.788**	0.612**	0.464**	0.115	-0.254**	-0.306**	-0.315**
2017—2018	0.907**	0.830**	0.648**	0.372**	0.134	-0.192*	-0.297**	-0.334**

注: ** 表示极显著相关($p < 0.01$), * 表示显著相关($p < 0.05$), - 表示负相关。

2.2 冻融过程中农地土壤剖面温度变化特征

地表土壤热量主要源于太阳辐射,土壤吸收热量后,在土壤内部产生热传导,导致土壤温度在不同土层深度间存在差异^[27]。这里基于整个冻结融化期的土壤温度实测资料,对 2015—2018 年冻融过程中月均土壤温度进行分析,研究农地不同深度土壤温度变化特征。图 2 表明,11 月至翌年的 2 月,土壤温度随土层深度的增加而增加;3—4 月份,表层土壤升温较快,土壤温度梯度发生反向改变;当土壤完全消融后,土壤温度随着土层深度的增加而递减,且各土层土壤温差呈现先降低后增加的趋势。以 2017—2018 年为例,在土壤冻结期的 11 月到翌年的 2 月,0—5 cm 土层土壤温度月均值最低为 -7.73 °C,不同土层深度最大土壤温度差值可达 14.95 °C;3 月份 0—80 cm 土层土壤升温明显,而 80—190 cm 土层土壤温度变化较小,不同土层深度土壤温度差异减小至 4.12 °C;4

月份,不同深度土壤温度差异逐渐增大,温差达到 7.14 °C。

2.3 冻融过程中农地土壤冻融循环特征

2.3.1 土壤冻结与消融过程

采用土壤温度日均值开始持续 < 0 °C 作为冻结开始时间,持续 > 0 °C 作为消融开始时间^[28-29],分析研究区 2015—2018 年不同土层深度土壤冻结融化发生日期与持续时间。结果表明(图 3),土壤冻结和融化过程分别为单向冻结和双向融化。在冻结过程中,观测期间农田土壤冻结方式为单向冻结。在土壤冻结初期,气温在 0 °C 上下波动,0—5 cm 土壤开始昼融夜冻,至 11 月中旬,0—5 cm 土层形成了白天不能解冻的冻层;此后随着气温的逐渐降低,冻层稳定向下发展,冻结开始日期逐渐滞后;至次年 2 月上旬,冻结深度达到最大,其值为 80 cm。研究区 0—80 cm 土层内存在冻融交替,而 80 cm 以下土层的土壤温度始终高于 0 °C,没有冻融现象发生。从

土壤开始冻结至土壤达到最大冻结深度历时 81~82 d; 其中 0—5 cm 土层土壤冻结时长为 130~137 d, 随土 层深度的增加, 土壤冻结天数呈减少趋势, 对于 60—80 cm 土层, 土壤冻结时长仅为 34~38 d。

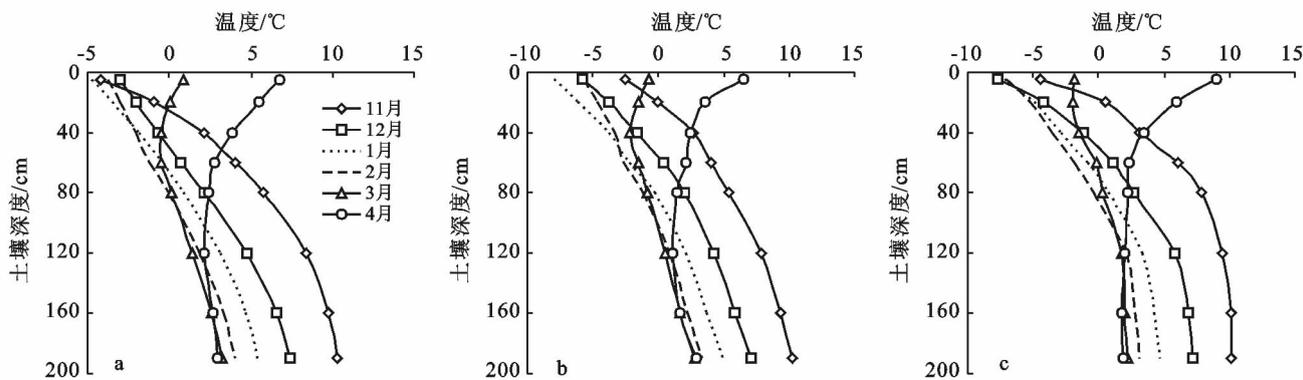


图 2 2015—2018 年冻融期土壤温度随土层深度的变化特征

在土壤消融阶段, 由于受地表气温回升和深层不冻结土层热流的双重影响^[30], 土壤融化过程从地表向下和冻结层下部向上同时进行, 土壤消融过程受到气温和降雪等因素的影响。在 2016 年, 60—80 cm 土层最先在 3 月 11 日消融, 之后, 由于气温的回升, 0—20 cm 土层开始出现昼融夜冻现象。至 3 月 24 日, 5—20 cm 土层完全解冻, 而 0—5 cm 土壤仍然处于昼融夜冻过程中, 白天解冻, 在夜晚重又形成冻层, 此时形成“双冻层”^[31], 即 0—5 cm 的表冻土层与

20—60 cm 的原冻层, 双冻层之间的解冻土层厚度在 15 cm 以下。

2017 年解冻期土壤解冻模式与 2016 年相似。在 2018 年, 60—80 和 40—60 cm 土层在 3 月 14 日至 3 月 19 日依次融化。随着气温的升高, 3 月 22 日, 0—5 cm 土壤出现昼融夜冻现象, 随后 5—40 cm 土层消融, 在 3 月 31 日, 0—5 cm 土层才完全消融。所有土层在 3 月下旬完全消融, 融化时长为 17~19 d, 远小于土壤冻结所需时间。

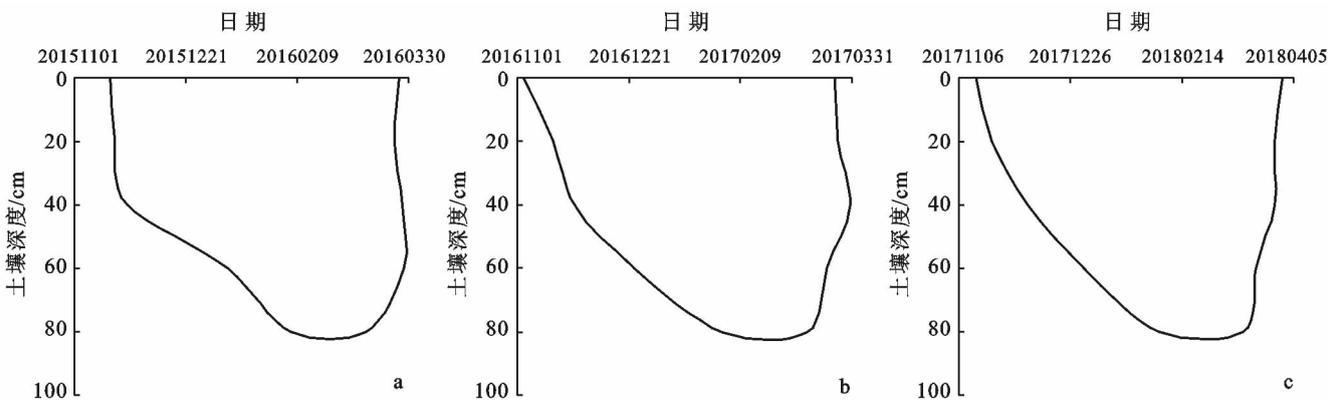


图 3 2015—2018 年冻融期土壤冻结深度变化特征

2.3.2 土壤冻融循环次数 一般认为如果某一深度的土壤温度存在经过 0 °C 的日变化时, 则该层土壤存在冻融现象。因此, 这里将土壤日最高温度 (T_{max}) 大于 0 °C 且土壤日最低温度 (T_{min}) 小于 0 °C 作为土壤存在冻融循环现象的依据^[32-33]。研究表明, 不同深度的土壤经历的冻融循环次数有较大差别。在 11 月至翌年 4 月土壤冻结与融化过程中, 随着土层深度的增加, 土壤经历的总的冻融循环次数减少, 冻融循环现象主要出现在耕层 0—20 cm 土层。此外冻融循环的开始日期也随着土层深度的增加而推迟。在

2015—2016 年, 0—5 cm 土层深度的土壤在 2015 年 11 月 15 日至 11 月 16 日经历 2 次冻融循环后完全冻结, 并一直持续到 2016 年 3 月 15 日; 到 3 月 16 日 0—5 cm 土壤开始昼融夜冻, 在 3 月 25 日土壤完全解冻之前经历了 10 次昼融夜冻循环。5—20 cm 土壤在 2015 年 11 月 18 日经历 1 次冻融循环后完全冻结, 直至 2016 年 3 月 18 日 5—20 cm 土壤开始昼融夜冻, 在 3 月 23 日土壤完全解冻之前经历了 6 次昼融夜冻循环。总体上, 0—5 cm 土壤在整个冻结融化过程中共经历了 12 次冻融循环, 即晚秋早冬的 2 次

冻融循环和春季 10 次冻融循环;而 5—20 cm 土壤共经历 7 次冻融循环,即晚秋早冬的 1 次冻融循环和春季 6 次冻融循环。在 2016—2017 年,0—5 cm 土壤共经历了 10 次冻融循环,即晚秋早冬的 2 次冻融循环和春季 8 次冻融循环,5—20 cm 土壤共经历了 5 融循环,即晚秋早冬的 2 冻融循环和春季 3 次冻融循环。在 2017—2018 年,0—5 cm 土壤共经历了 12 次冻融循环,即晚秋早冬的 3 次冻融循环和春季 9 次冻融循环,而 5—20 cm 土壤共经历了 2 次冻融循环,即晚秋早冬的 1 次冻融循环和春季 1 次冻融循环。综合多年观测,0—5 cm 和 5—20 cm 土壤经历的最大冻融循环次数分别为 12 次和 7 次。与 0—5 cm 土壤相比,5—20 cm 土壤开始经历冻融循环的日期要推迟 1~9 d。

2.4 冻结期与消融期农地耕层土壤温度的日变化特征

以 2016 年 1 月 22 日(图 4a)和 2016 年 3 月 25 日(图 4b)的日土壤温度数据为代表,分析冻结期与消融期农地耕层土壤温度日变化特征。可以看出,在

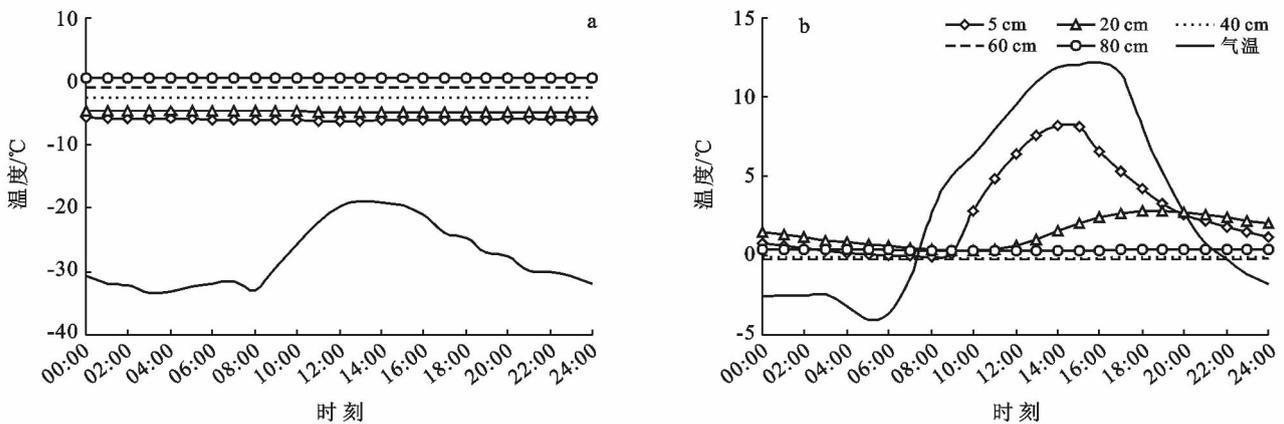


图 4 2016 年 1 月 22 日冻结期(a)和 2016 年 3 月 25 日消融期(b)土壤温度日变化特征

3 讨论

积雪具有高反照率,大热容量和高绝热率的特性^[34],能够阻碍气象因子对土壤导热率和热通量的影响,改变土壤湿度,进而对土壤冻融过程产生影响^[35]。为此,根据 CLM(community land model)模式的雨—雪判据,将 2.5 °C 作为降雨和降雪临界温度^[36],根据黑龙江省气象数据中心提供的逐日降水 and 气温得到了日降雪数据,发现 2015—2016 年、2017—2018 年降雪总量分别为 52.7 和 34.0 mm。在 2015—2016 年,降雪集中在 12 月份,降雪量达到 25.6 mm,气温也在持续降低,而 5 cm 土壤温度有所回升,与 11 月 5 cm 土壤月均温相比,温度回升 1.21 °C;在 2017—2018 年 12—1 月气温持续降低的情况下,1 月份 5 cm 土壤月均温度回升 0.55 °C(图 5)。在

冻结期(图 4a),尽管气温有明显的峰值变化,但土壤温度日变化曲线接近直线,0—5 cm 土壤温度日振幅仅为 0.4 °C。而进入消融期后(图 4b),气温日变化大于冻结期,表层土壤温度日振幅也明显增大。0—20 cm 土层土壤温度呈“正弦曲线”形式变化,0—5 cm 土层土壤温度的日振幅最大,土壤最高和最低温度出现的时间最早。随着土层深度的增加,土壤温度的日振幅逐渐减小,土壤温度最高和最低出现的时间逐渐滞后。气温在 13:00—14:00 之间达到最大值,0—5 cm 土层土壤温度最高值出现在 14:00 左右,升温率为 1.43 °C/h,最低值出现在 8:00 左右,降温率为 0.48 °C/h,升温迅速而降温缓慢。与 0—5 cm 土层相比,5—20 cm 土层的土壤温度变化幅度明显减少;在土壤温度日变化过程中,5—20 cm 土层土壤温度最高值出现在 19:00 左右,最低值出现在 10:00 左右,升温率和降温率分别为 0.28 和 0.17 °C/h,也是升温迅速而降温缓慢,但其变化速率低于 0—5 cm 土层。

2018 年 3 月,研究区降雪量为 13.1 mm,占当年总降雪量的 34%,导致当年 0—5 cm 土壤消融缓慢。这是由于在冻结期,土壤与大气间的热量传递主要是由土壤向大气传递,而积雪覆盖阻隔了土壤和大气的热量交换,加之深层土壤向浅层土壤输送热量,使得表层土壤温度升高,减缓土壤冻结速度。而在消融期,气温逐渐升高,土壤与大气间的热量传递主要是由大气向土壤传递,积雪覆盖则导致表层土壤升温缓慢,使得土壤开始消融日期滞后^[37-38]。

除了积雪影响外,土壤湿度也对土壤温度产生影响,且二者存在着一定的相关关系^[39]。赵显波等^[40]的研究表明,在土壤冻结融化期,阳坡 0—15 cm 黑土耕层土壤湿度随土壤温度变化呈线性相关关系,且线性相关显著。在冻融过程中,土壤水分在土壤温度梯度的作用下发生运移^[41],而水的比热容较大,土壤水

分在产生相变的过程中会释放或者吸收大量热量,降低土壤温度的波动幅度,延缓土壤冻结与融化进程^[42-43]。因此土壤含水量的多少会极大地影响土壤冻融过程与土壤温度变化状况。气温、降雪、土壤特性(土壤类型,体积密度、孔隙率和热和水力传导率)

等因素的差异会使土壤冻结融化过程与土壤冻融特征有所不同^[33],本文仅讨论了东北典型薄层黑土区农地土壤温度对气温的响应,有关气温、降雪深度、土壤水分等对土壤冻融过程综合影响将在之后的研究进行讨论。

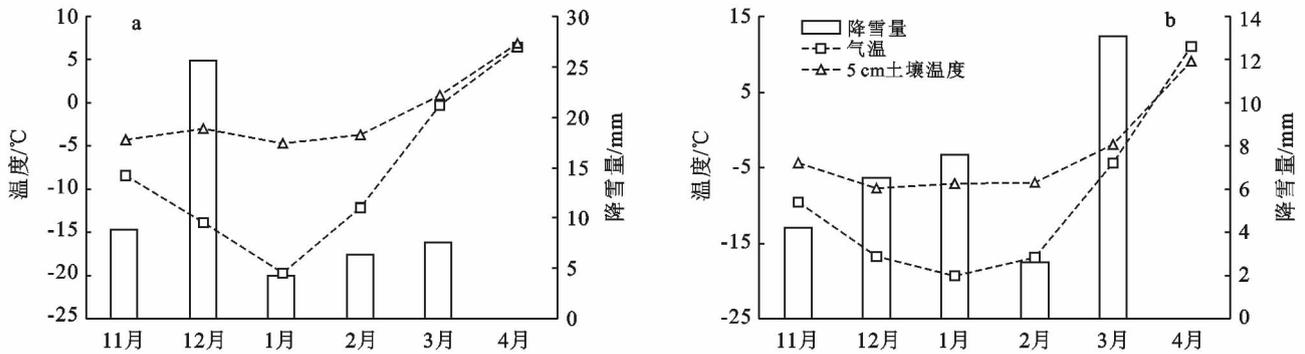


图5 2015—2016年(a)和2017—2018年(b)冻融期降雪量、气温与表层土壤温度变化状况

4 结论

(1) 研究区11月至翌年的2月,土壤温度随土层深度的增加而增加,且表层土壤温度变化幅度大于深层土壤;3—4月,表层土壤升温较快,土壤温度梯度发生反向改变;当土壤完全消融后,土壤温度随着土层深度的增加而减小。研究期内气温变化范围为 $-30.40\sim 18.33\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差达 $48.73\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与气温变化相比,土壤温度的变化幅度较小,且随着土壤深度的增加,土壤温度变化幅度呈减小趋势,其中0—20 cm土壤温度变化幅度较大,其变幅分别为 25.35 和 $16.74\text{ }^{\circ}\text{C}$;40—190 cm土壤温度变化介于 $-2.00\sim 14.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,各土层土壤温差变化介于 $8.28\sim 9.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。

(2) 除60—80 cm土层外,其余各土层土壤温度均与气温呈显著相关,其中0—60 cm土壤温度与气温呈极显著正相关,且随土层深度增加,土壤温度与气温的相关性减弱;而80 cm土层以下,土壤温度与气温呈显著或极显著负相关。

(3) 研究区土壤冻结和融化过程分别呈单向冻结和双向融化现象。冻结期,土壤在2月上旬达到最大冻结深度,其值为80 cm。从土壤开始冻结至土壤达到最大冻结深度历时81~82 d,其中0—5 cm土层土壤冻结时长为130~137 d;随土层深度的增加,土壤冻结天数呈减少趋势,至60—80 cm土层时土壤冻结时长仅为34~38 d。土壤融化期,80 cm以内土壤在3月下旬完全消融,融化时长为17~19 d。在11月至翌年4月土壤冻结与融化过程中,冻融循环现象主要出现在耕层0—5和5—20 cm土层,期间二者经历的最大冻融循环次数分别为12和7次。

(4) 冻结期内,土壤温度日变化曲线接近直线;消融期内,0—20 cm土层土壤温度呈正弦曲线变化;且随着土层深度的增加,土壤温度的日振幅逐渐减小,土壤最高和最低温度出现的时间逐渐滞后。

[参 考 文 献]

- [1] Tang Liang, Cong Shengyi, Geng Lin, et al. The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils[J]. Cold Regions Science & Technology, 2017,145:197-207.
- [2] Viklander P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998,35(3):471-477.
- [3] 王恩姮,赵雨森,陈祥伟. 季节性冻融对典型黑土区土壤团聚体特征的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(4):889-894.
- [4] 张瑞芳,王瑄,范昊明,等. 我国冻融区划分与分区侵蚀特征研究[J]. 中国水土保持科学,2009,7(2):24-28.
- [5] 张瑞芳,范昊明,王瑄,等. 辽宁省冻融侵蚀发生的气候环境条件分析[J]. 水土保持研究,2008,15(2):8-12.
- [6] 李卫朋,范继辉,沙玉坤,等. 藏北高寒草原土壤温度变化与冻融特征[J]. 山地学报,2014,32(4):407-416.
- [7] 胡伟,张兴义,严月. 不同土地利用方式下冻融期黑土水热过程观测研究[J]. 土壤与作物,2018,7(3):312-323.
- [8] 张少良,张兴义,于同艳,等. 秸秆覆盖对农田黑土春季地温的影响[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(6):169-173.
- [9] He Jin, Li Hongwen, Kuhn N J, et al. Effect of ridge tillage, no-tillage, and conventional tillage on soil temperature, water use, and crop performance in cold and semi-arid areas in Northeast China[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010,48(8):737-744.

- [10] Shen Yan, Mclaughlin N, Zhang Xiaoping, et al. Effect of tillage and crop residue on soil temperature following planting for a Black soil in Northeast China [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):4500.
- [11] 张科利, 彭文英, 王龙, 等. 东北黑土区土壤剖面地温和水分变化规律[J]. *地理研究*, 2007, 26(2): 314-320.
- [12] 李帅, 王萍, 陈莉, 等. 黑龙江省春季浅层(0—20 cm)地温变化特征及预报[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 55-62.
- [13] 赵显波, 刘铁军, 许士国, 等. 季节冻土区黑土耕层土壤冻融过程及水分变化[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 233-240.
- [14] Zhao Yusen, Wang Enheng, Cruse R M, et al. Characterization of seasonal freeze-thaw and potential impacts on soil erosion in Northeast China[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92(3): 567-571.
- [15] 吕红玉, 张林媛, 张宏茹, 等. 1981—2010 年三江平原 40—320 cm 深地温变化特征[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(6): 1346-1352.
- [16] Henry H A L. Climate change and soil freezing dynamics: historical trends and projected changes [J]. *Climatic Change*, 2008, 87(3/4): 421-434.
- [17] Frauenfeld O W, Zhang Tingjun. An observational 71-year history of seasonally frozen ground changes in the Eurasian high latitudes [J]. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(4): 044024(8pp).
- [18] 高思如, 曾文钊, 吴青柏, 等. 1990-2014 年西藏季节冻土最大冻结深度的时空变化[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(2): 223-230.
- [19] Peng Xiaoqing, Frauenfeld O W, Cao Bin, et al. Response of Changes in Seasonal Soil Freeze/Thaw State to Climate Change from 1950 to 2010 across China[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2016(121): 1984-2000.
- [20] 范昊明, 张瑞芳, 周丽丽, 等. 气候变化对东北黑土冻融作用与冻融侵蚀发生的影响分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(6): 48-53.
- [21] 王飞, 范昊明, 郭成久, 等. 我国两大冻融侵蚀区气候环境变化对比分析[J]. *生态环境*, 2008(1): 173-177.
- [22] 冯志珍, 郑粉莉, 易祎. 薄层黑土微生物生物量碳氮对土壤侵蚀—沉积的响应[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1332-1344.
- [23] 王彬, 郑粉莉, 王玉玺. 东北典型薄层黑土区土壤可蚀性模型适用性分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 126-131.
- [24] 陈继康, 李素娟, 张宇, 等. 不同耕作方式麦田土壤温度及其对气温的响应特征: 土壤温度日变化及其对气温的响应[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(7): 2592-2600.
- [25] 李栋梁, 柳苗, 钟海玲, 等. 青藏铁路沿线地面气温和地温的年际变化趋势及与地形的关系[J]. *高原气象*, 2005, 24(5): 694-699.
- [26] 杜军, 李春, 廖健, 等. 近 45 年拉萨浅层地温对气候变化的响应[J]. *气象*, 2007, 33(10): 61-67.
- [27] 巩玉玲, 王兆锋, 张德锂, 等. 拉萨灌丛草甸区土壤温度变化特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2): 411-420.
- [28] 俞洁辉, 刘新圣, 罗天祥, 等. 念青唐古拉山北麓草甸海拔分布上限土壤温湿度的季节变化[J]. *地理学报*, 2012, 67(9): 1246-1254.
- [29] 王澄海, 尚大成. 藏北高原土壤温、湿度变化在高原干湿季转换中的作用[J]. *高原气象*, 2007, 26(4): 677-685.
- [30] 刘小燕, 刘巧玲, 刘廷玺, 等. 科尔沁草甸地冻融期土壤水热盐动态迁移规律[J]. *水科学进展*, 2015, 26(3): 331-339.
- [31] 樊贵盛, 郑秀清, 贾宏骥. 季节性冻融土壤的冻融特点和减渗特性的研究[J]. *土壤学报*, 2000, 37(1): 24-32.
- [32] 刘帅, 于贵瑞, 浅沼顺, 等. 蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布[J]. *土壤学报*, 2009, 46(1): 46-51.
- [33] 王学佳, 杨梅学, 万国宁. 藏北高原 D105 点土壤冻融状况与温湿特征分析[J]. *冰川冻土*, 2012, 4(1): 56-63.
- [34] 边晴云, 吕世华, 文莉娟, 等. 黄河源区不同降雪年土壤冻融过程及其水热分布对比分析[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(4): 906-911.
- [35] 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.
- [36] Wen Lijuan, Nagabhatla N, Lü Shibua, et al. Impact of rain snow threshold temperature on snow depth simulation in land surface and regional atmospheric models [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, 30(5): 1449-1460.
- [37] 边晴云, 吕世华, 陈世强, 等. 黄河源区降雪对不同冻融阶段土壤温湿变化的影响[J]. *高原气象*, 2016, 35(3): 621-632.
- [38] Fu Qiang, Hou Rijie, Li Tianxiao, et al. The critical depth of freeze-thaw soil under different types of snow cover[J]. *Water*, 2017, 9(6): 370-387.
- [39] 付强, 侯仁杰, 王子龙, 等. 冻融期积雪覆盖下土壤水热交互效应[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 101-107.
- [40] 赵显波, 刘振平, 许士国, 等. 季节冻土区黑土耕层土壤冻融循环期湿度与温度变化研究[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 931-939.
- [41] 高红贝, 邵明安. 温度对土壤水分运动基本参数的影响[J]. *水科学进展*, 2011, 22(4): 484-494.
- [42] 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.
- [43] 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.