

积雪覆盖下土壤热状况及其对气象因素的响应研究*

付强 侯仁杰 王子龙 李天霄 王湘浩

(东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为研究季节性冻土区在积雪覆盖条件下,土壤温度变化趋势及气象因素对土壤热状况的影响,以野外实测试验数据(2013年11月8日—2014年4月28日)为基础,分析裸地、自然降雪、积雪压实和积雪加厚覆盖条件下5、10、20、40、60、100、140 cm深度土壤温度变化特征,采用灰色关联度分析的方法筛选出影响土壤热状况的主要气象因素,进而统计土壤温度与气象因素之间的相关关系。结果表明:积雪的存在阻碍了环境与土壤之间的能量交换,引起土壤温度和土壤冻融过程的差异;随着积雪覆盖深度的增加,土壤的冻融日期会出现延迟现象,土壤温度相对稳定在较高水平,并且地、气之间温差增大;冻融过程中土壤温度变化的主要影响因素为环境温度,积雪覆盖使得气象因素与土壤温度的关联度减弱。

关键词: 土壤温度 积雪覆盖 气象因素 能量交换 热状况

中图分类号: S152.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0154-08

Soil Thermal Regime under Snow Cover and Its Response to Meteorological Factors

Fu Qiang Hou Renjie Wang Zilong Li Tianxiao Wang Xianghao

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

Abstract: This paper discovers the soil temperature and meteorological factors' impact on soil thermal status in seasonal frozen under the condition of snow cover. We measured the soil temperature in the depth of 5, 10, 20, 40, 60, 100, 140 cm under the condition of bare land, nature snow cover, snow compressed and snow thickened. Based on field experimental data, grey correlation analysis was used to select the main meteorological factors affecting the soil thermal conditions and then we calculated the correlation between soil temperature and meteorological factors. Results shows that the existence of snow hampers the energy exchange between soil and environment, causes the difference between the soil temperature and freezed-thawing process, and with the increase of depth of the snow cover, soil freezing and thawing date will be delayed, the soil temperature will be relatively stable at a high level. Meanwhile, the difference of temperature between soil and atmosphere will enlarge. In the process of freezing and thawing, environment temperature is the main controlling factor of soil temperature; snow cover makes the correlation between meteorological factors and soil temperature weaker.

Key words: Soil temperature Snow cover Meteorological factors Energy exchange Thermal regime

引言

季节性冻土广泛存在于我国的东北、华北及西北地区,约占我国国土面积的54%^[1-3],其中大部

分冻土在冬季被积雪覆盖。由于积雪是热的不良导体,具有较低的导热性和较大的热容量^[4],它通过影响能量平衡、大气循环、土壤水分蒸发等过程,对浅层土壤的温度变化产生一定的影响^[5-8]。此外,

收稿日期: 2014-08-28 修回日期: 2014-09-17

* 国家自然科学基金资助项目(51279031,51209039)、黑龙江省自然科学基金资助项目(E201241)、教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-11-0952)、黑龙江省杰出青年基金资助项目(JC201402)和中国博士后科学基金资助项目(2012T50321,2011M500632)

作者简介: 付强,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源系统分析研究,E-mail: fuqiang0629@126.com

积雪覆盖深度、雪层密度以及积雪覆盖时间,强烈地影响冻结期土壤的冻结速率和融化期土壤升温状况^[9]。积雪覆盖在冬季可防止土壤热量的散失,使土壤温度高于大气温度;春季温度回升时则阻止土壤温度升高,使回升时间滞后^[10]。

对于季节性冻土的热状况,国内外学者做了大量的研究。Goodrich 等^[11]研究了积雪与地面之间的能量交换,认为地面热状况随着积雪密度和土壤特性的变化而变化。Konrad 等^[12]认为在土壤温度变化的影响中,水分对温度的影响可能超过大气温度的影响。Shanley 等^[13]指出土壤冻结深度与积雪的覆盖厚度呈反比。陈军锋等^[14]研究了冻融期不同阶段灌水对土壤温度及冻融特性的影响,证明灌水加速了地表冻层的融化。王国亚等^[15]提出积雪覆盖条件下的土壤冻结深度与海拔关系密切,并且随海拔的升高而增大。孙军杰等^[16]以裸地和积雪覆盖两种不同处理对比,表明积雪的存在保持了地温。上述研究多偏重于相同积雪覆盖处理对于土壤热状况的影响,而对于不同的积雪覆盖处理条件下土壤的热迁移及其与气象因素响应状况研究较少。

本文立足于松嫩平原黑土地区,在野外大田试验基础上,分析不同积雪覆盖处理条件下土壤的热状况,并筛选影响土壤温度的主要气象因素,确定土壤温度对于主要气象因素的响应程度。研究成果不仅可为北方春季播种期土壤温度预测,适时安排春播等问题提供参考,而且对于提高松嫩平原黑土区土壤热量利用效率具有重要的理论价值和现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于哈尔滨市香坊区东北农业大学综合试验场,地理位置为 E126°45'32"、N45°44'41",该地区位于黑龙江省南部(图 1),属于中温带大陆性季

风气候,受西伯利亚冷气团和副热带暖气团影响,气候特征是夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。年平均气温为 4.5℃,一年之中最低气温出现在 1 月份,历年平均气温为 -19.6℃,最高气温在 7 月份,历年平均气温为 22.4℃。年平均降水量为 529 mm,降水主要集中在 7、8 月份,约占全年总降水量的 65%,春秋季节降雨较少。经人工分层取样可知,本试验区 0~30 cm 土层为黑色壤土,30 cm 以下为黑色粘土。

1.2 试验方案

该试验场地划分为 4 个试验区域,每个试验区域设置成 10 m×10 m 的规格(图 1)。自然降雪区域埋设冻土器一套,用于测定土壤冻结深度。试验期间,土壤水平方向上温度变化较小,可视为均匀分布,但是为防止融化期试验区域之间融雪水的扩散干扰,引起热量的迁移,试验区之间设置 1 m 深塑料薄膜隔水带,保证各区域土壤温度免受水分扩散影响。各试验区域分别埋设有 JL-04 型温度记录仪,并且定义 0~40 cm 的土层为浅层土壤,40~140 cm 的土层为深层土壤。考虑到浅层土壤温度受环境因素影响较为敏感,变化幅度较为剧烈,深层温度受环境影响较弱,变化幅度较小,因此浅层土壤的测层深度布置相对密集,分别为 5、10、20、40 cm,深层土壤测层深度布置稀疏,分别为 60、100、140 cm。积雪深度由直尺测量,雪层温度由探针式温度计记录,积雪特性指标采用 Snow Fork 雪特性分析仪测定,各项参数指标如表 1 所示。越冬期,4 个试验区分别做裸地处理、自然降雪处理、积雪压实处理和积雪加厚处理。其中,裸地通过人工除雪完成;自然降雪区域不做任何处理,保持自然状态,积雪深度为 23 cm,密度为 0.157 g/cm³;积雪压实区域通过人工抛雪,采用聚乙烯板(质量恒定)夯实,积雪深度为 24 cm,密度为 0.256 g/cm³;积雪加厚区域通过模拟自然降雪,在高处人工抛洒堆积(模拟人工降雪)而成,为使对比效果明显,雪深设置为 65 cm,密度为

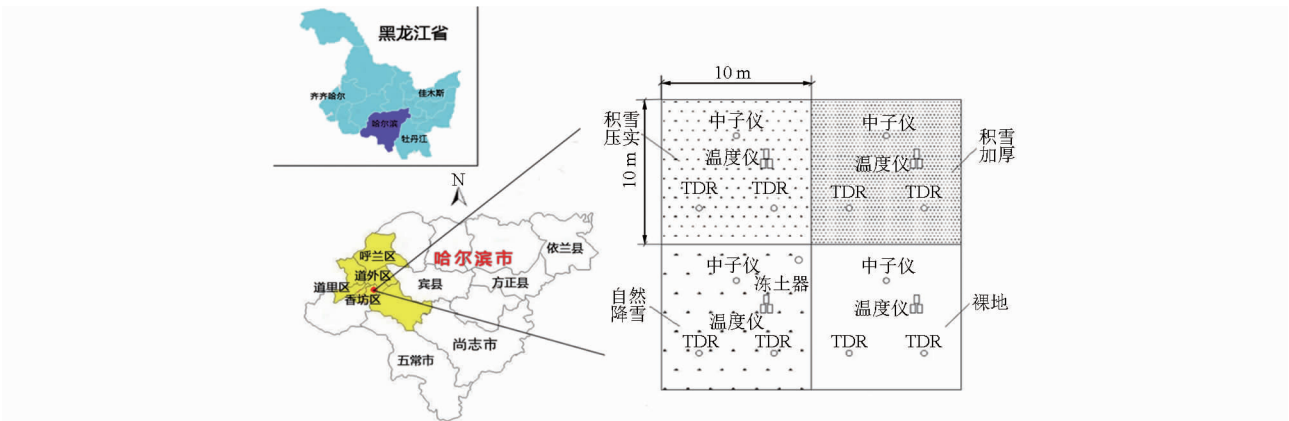


图 1 研究区位置及布置示意图

Fig. 1 Location and layout diagram of study area

0.161 g/cm³。积雪压实相对于自然降雪处理,雪深无明显差异,密度相对增大,积雪加厚相对于自然降雪处理,雪深增加,但密度相近。试验中,在土壤非

冻结时期一次性取土采样,通过烘干法,测定土壤的自然含水率和土壤干容重,该地区土壤各项参数如表 2 所示。

表 1 不同区域积雪参数

Tab.1 Snow parameters in different areas

处理方式	积雪温度/℃				液态含水率/%				雪层密度/(g·cm ⁻³)			
	表层	中层	底层	平均	表层	中层	底层	平均	表层	中层	底层	平均
自然降雪	-16.9	-12.0	-9.8	-12.9	24.3	25.4	22.9	24.2	0.108	0.169	0.194	0.157
积雪压实	-15.5	-10.3	-8.1	-11.3	57.2	49.8	53.7	53.6	0.169	0.325	0.274	0.256
积雪加厚	-14.1	-9.8	-7.6	-10.5	23.9	24.7	26.3	25.0	0.104	0.187	0.192	0.161

表 2 不同积雪覆盖条件下各区域土壤参数

Tab.2 Soil values of regional under the condition of different snow covers

土壤深度/ cm	裸地处理		自然降雪处理		积雪压实处理		积雪加厚处理	
	自然含	土壤干容	自然含	土壤干容	自然含	土壤干容	自然含	土壤干容
	水率/%	重/(g·cm ⁻³)	水率/%	重/(g·cm ⁻³)	水率/%	重/(g·cm ⁻³)	水率/%	重/(g·cm ⁻³)
5~10	22.53	1.19	23.02	1.22	23.80	1.21	23.72	1.21
20	22.98	1.22	23.59	1.23	23.05	1.22	23.28	1.25
40	19.17	1.31	23.73	1.25	22.88	1.25	22.48	1.29
60	23.54	1.39	23.44	1.28	21.09	1.29	22.78	1.30
100	23.30	1.35	21.97	1.29	20.78	1.36	20.61	1.33
140	20.08	1.38	20.31	1.31	20.80	1.38	21.18	1.39

1.3 研究方法

试验中采用 TRM-ZS1 型气象生态环境监测系统自动记录气温、风速、风向、空气湿度、净辐射、长波辐射等指标;利用埋设的 JL-04 型土壤温度记录仪,测定 5、10、20、40、60、100、140 cm 土层的温度;土壤冻深由冻土器测定,试验设置为每日 09:00 人工观测记录各区域土壤冻结深度;不同深度土壤的冻结和消融日期即为温度仪测定的温度数据下降或上升至 0℃ 时的日期。

2 分析与讨论

2.1 土壤冻融特性分析

在季节性冻土区,地面辐射平衡影响着土壤的能量收支和土壤的温度变化,随着太阳辐射的减弱,辐射平衡稳定的处于负值,导致土壤出现不同层次的冻结^[17]。

2.1.1 冻融阶段划分

将冻融期土壤逐日的冻结融化深度绘制成土壤冻融曲线如图 2 所示,分析图 2 可知:土壤从 11 月 9 日开始稳定的进入冻结期到次年的 4 月 28 日土壤融通,整个冻结期历时 170 d。土壤在 3 月 8 日达到最大冻结深度,并且最大冻深为 118 cm。之后,由于温度的升高,土壤的表层开始融化,同时深层的土壤温度也开始升高,冻土区域出现表层自上而下及深层由下而上的“双向”融解现象。

冻融过程中,浅层土壤冻结速率较快,而深层土

壤相对较慢。其中,A-B 段冻结速率为 1.23 cm/d,B-C 段的冻结速率为 0.58 cm/d,A-B 段冻结速率明显高于 B-C 段,而 C-D-E 阶段发生双向融解,融解速率达 2.18 cm/d。因此,试验过程中定义 A-B 阶段(2013 年 11 月 9 日—2014 年 1 月 7 日)为冻结期,B-C 阶段(2014 年 1 月 7 日—3 月 8 日)为稳定期,C-D-E 阶段(2014 年 3 月 8 日—4 月 28 日)为融化期。

2.1.2 积雪覆盖对土壤冻、融日期的影响

以不同深度土壤温度开始稳定在 0℃ 以下时的节点日期记为土壤的冻结日期,以每日土壤温度开始稳定在 0℃ 以上时的节点日期记为土壤消融日期^[18]。考虑到试验区 140 cm 深度处土层在越冬期不会发生冻结现象,因此,在分析不同深度土壤冻融

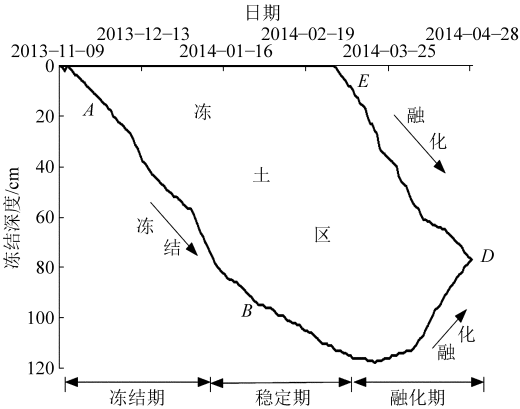


图 2 土壤冻融变化过程曲线

Fig.2 Curve of soil freezing and thawing process

日期时忽略了该土层的冻结-融化状况。在裸地处理、自然降雪、积雪压实及积雪加厚处理情况下不同

深度土壤冻结-融化时间节点,具体见表 3。

由表 3 可知:各试验区内,浅层 5 cm 处的土壤

表 3 不同积雪覆盖条件下各区域土壤冻、融日期

Tab.3 Soil freezing and thawing date of regional under condition of different snow covers

处理方式	项目	观测深度/cm					
		5	10	20	40	60	100
裸地处理	冻结日期	11-06	11-14	11-29	12-13	12-24	01-17
	消融日期	03-18	03-20	03-25	04-05	04-18	03-20
自然降雪	冻结日期	11-06	11-16	12-04	12-17	12-26	01-23
	消融日期	04-02	04-04	04-05	04-14	04-20	04-06
积雪压实	冻结日期	11-07	11-17	12-08	12-19	12-28	
	消融日期	04-03	04-06	04-08	04-16	04-23	
积雪加厚	冻结日期	11-07	11-22	12-11	12-23	01-06	
	消融日期	04-05	04-09	04-11	04-19	04-28	

冻结时间都集中在 11 月 6 日和 11 月 7 日,由于此时试验区无积雪覆盖,试验区之间冻结状况无显著差异。但是随着大气降雪,各试验区的积雪覆盖条件不同,导致 5 cm 处土壤消融时期存在差异,其中积雪加厚处理区域的土壤消融日期为 4 月 5 日,积雪压实处理区域的土壤消融日期为 4 月 3 日,自然降雪区域的土壤消融时间为 4 月 2 日,分别相对于裸地处理推迟 17、15、14 d。当 10 cm 土层发生冻结时,各试验区域积雪覆盖形式不同,积雪加厚处理、积雪压实处理、自然降雪区域的冻结日期分别相对于裸地处理区域推迟 8、3、2 d,消融日期分别相对于裸地处理推迟 19、16、14 d。对于 20 cm 和 40 cm 土层,积雪加厚、积雪压实及自然降雪区域的土壤冻结、消融日期同样相对于裸地处理发生推迟。

在观测深度为 60 cm 处,积雪加厚、积雪压实及自然降雪处理区域土壤的初始冻结日期分别相对于裸地处理推迟 12、4、2 d。而融化期,积雪加厚处理区域的土壤起始融化日期为 4 月 28 日,积雪压实处理区域的土壤消融日期为 4 月 23 日,自然降雪区域的土壤消融日期为 4 月 20 日,分别相对于裸地处理推迟 10、5、2 d。积雪压实和积雪加厚区域中,100 cm 土层未发生冻结,但是比较裸地处理和自然降雪处理情况下 100 cm 土层冻结、融化日期可知,自然降雪区域的土壤冻结融化日期要晚于裸地处理。

以上分析表明,不同积雪覆盖条件会影响土壤的冻结、融化日期。由于积雪的多孔介质特性,对热量的传导度要小于空气,积雪在阻碍土壤对于太阳辐射能量吸收的同时也抑制了土壤自身热量的散失。因此,积雪的存在延长了土壤的冻融日期,并且随着积雪深度的增加及密度的增大,土壤各层次冻结和消融日期的延时效果在自然降雪、积雪压实和

积雪加厚处理区域依次增强。

2.2 积雪覆盖对土壤温度的影响

在试验过程中,冻结期、稳定期和融化期土壤不同层次温度的动态变化过程如图 3 所示,由分析可知:冻结期,不同层次的土壤温度均呈现出下降的趋势。由图 3 可知,裸地处理情况下,浅层 5 cm 处的土壤温差(ΔT)为 17.1℃,而自然降雪覆盖的区域,浅层 5 cm 土层处的土壤温差为 8.1℃,积雪压实和积雪加厚处理区域 5 cm 处的温差分别为 7.3、6.6℃,积雪加厚、积雪压实和自然降雪处理条件下土壤温差分别相对于裸地处理下降 10.5、9.8、9℃。而对于深层 140 cm 地层,积雪加厚处理情况的土壤温差为 4.2℃,积雪压实和自然降雪区域,该土层土壤温差为 4.4、5.6℃,分别相对于裸地处理温差 7.9℃有所减小。分析不同积雪覆盖情况下土壤 10、20、40、60、100 cm 深度处土壤温度在冻结期的变化,均体现出在积雪加厚、积雪压实、自然降雪和裸地处理区域温差依次变小的趋势。

稳定期,各区域土壤温度变化甚微,不同深度土壤温度均在较小的范围内变化浮动。其中裸地处理区域,浅层 0~40 cm 土层的温度分布在 -16~-6℃之间,深层 60~140 cm 之间的土壤温度在 -4.6~3.4℃之间;自然降雪处理区域,浅层土壤温度分布在 -7~-2℃之间,深层土壤温度在 0~4℃之间;积雪压实条件下,土壤的浅层温度分布在 -5~-1℃之间,深层温度稳定在 2~6℃之间;在积雪加厚区域,浅层温度在 -4~0℃之间变动,深层温度稳定在 4~8℃之间。稳定期,积雪的覆盖使得不同深度土壤的温度变化区间相对稳定在一个较高的水平,并且在积雪的压实和加厚处理区域,这种效果更加明显。

融化期,随着环境温度的大幅度升高,浅层土壤

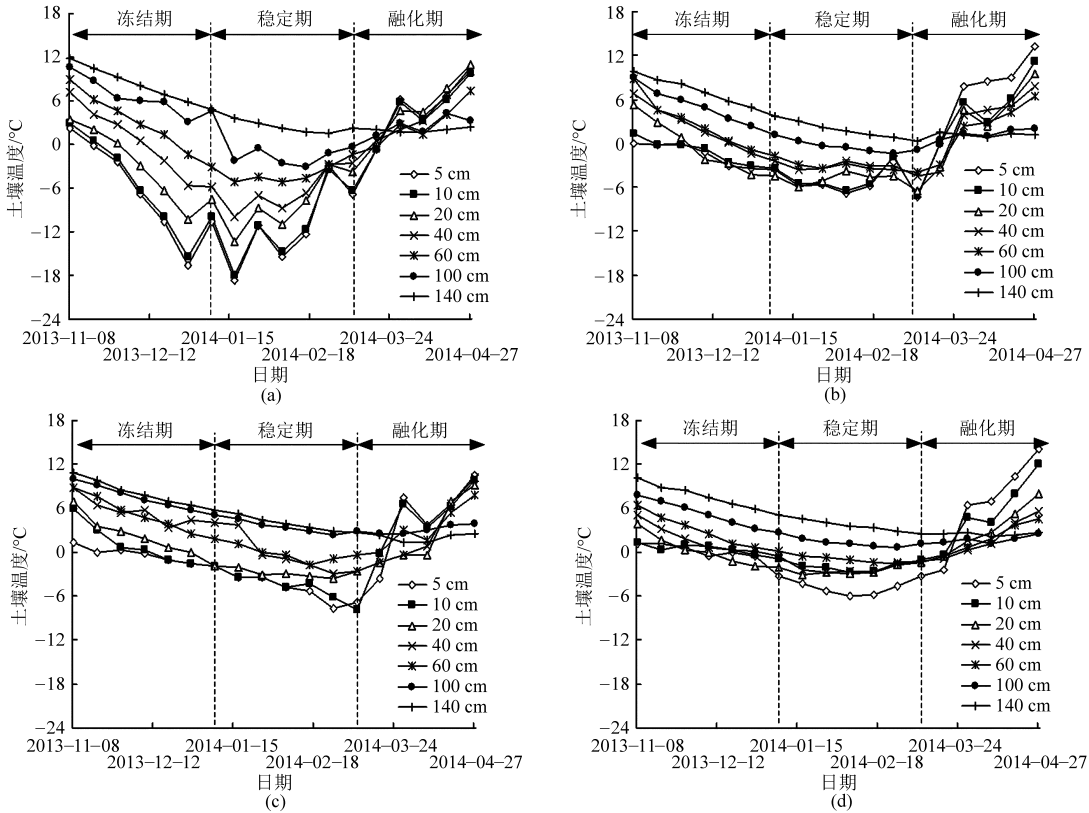


图 3 冻融期土壤温度变化曲线

Fig. 3 Soil temperature change curves at freezing and thawing period

(a) 裸地处理 (b) 自然降雪 (c) 积雪压实 (d) 积雪加厚

的温度迅速回升,由较低温度提升至 0℃ 以上。截至 4 月 27 日,裸地处理情况下,土壤 5 cm 处土层的温度升高至 18℃,自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理温升分别为 15、12、10℃。而深层 140 cm 处土壤在裸地处理、自然降雪、积雪压实和积雪加厚区域的温度分别为 5.3、5.1、4.6、4.3℃,温度升高幅度逐渐变低。

分析冻结期、稳定期、融化期不同处理区域的温差、温度变化区间、温升幅度可知:裸地处理条件下,由于土壤这种多孔介质受环境温度影响较大,不同时期土壤的温度变化较为剧烈。在积雪覆盖区域,由于积雪的大比热容性及其对能量的吸收,导致冻结期环境温度降低时,土壤的温差变小,热量散失减少;稳定期时,积雪的存在为土壤积蓄能量,土壤温度相对较高;融化期,积雪对能量具有一定的反射及储存作用,因此,积雪覆盖条件下土壤温升较慢。积雪覆盖隔绝了土壤与环境之间的能量交换,在越冬期保持了土壤温度,同时,自然降雪、积雪压实、积雪加厚处理的土壤温度曲线依次变得平缓。其中,积雪加厚处理(雪深 65 cm,密度 0.161 g/cm³)的保温效果最为明显,积雪压实处理(雪深 24 cm,密度 0.256 g/cm³)次之,表明积雪的密度和厚度影响着其对能量的反射、储存及热量传导。

2.3 积雪覆盖对地-气之间温差的影响

环境温度的变化在一定程度上影响着地表温度的变化,两者有着相似的变化趋势。在 4 种不同积雪覆盖处理条件下,随着积雪厚度的变化,地表温度与大气温度的变化规律如图 4 所示。分析两者之间的差异可知:

在裸地处理情况下,环境温度与地表温度几乎同步,在 1 月 14 日—1 月 17 日之间,两者均达到温度的最低值,并且大气温度波谷值为 -22.3℃,地表温度波谷值为 -17.6℃,二者温差仅为 4.7℃。同时,在 3 月 19 日气温升至 0℃ 以上,地表温度也随之迅速回升,两者保持了高度的同步性。

在自然降雪处理的区域,地表温度波谷出现在 1 月 28 日,相对于环境温度波谷延迟 12 d,地表与环境之间的最大温差为 13.1℃,远大于裸地处理的温度差距 4.7℃。并且地表温度的变化范围在 -6.2~13.6℃ 之间,远小于环境温度的变化区间,表明积雪的存在影响了地表温度,使地表温度与环境温度之间相似趋势减弱。

在积雪压实和积雪加厚的区域,温差同样保持着增大的趋势。积雪压实区域的地表温度波谷出现在 2 月 4 日,相对于大气温度的波谷延迟 17 d,并且波谷的温度为 -7.6℃,相对于气温波谷降低了

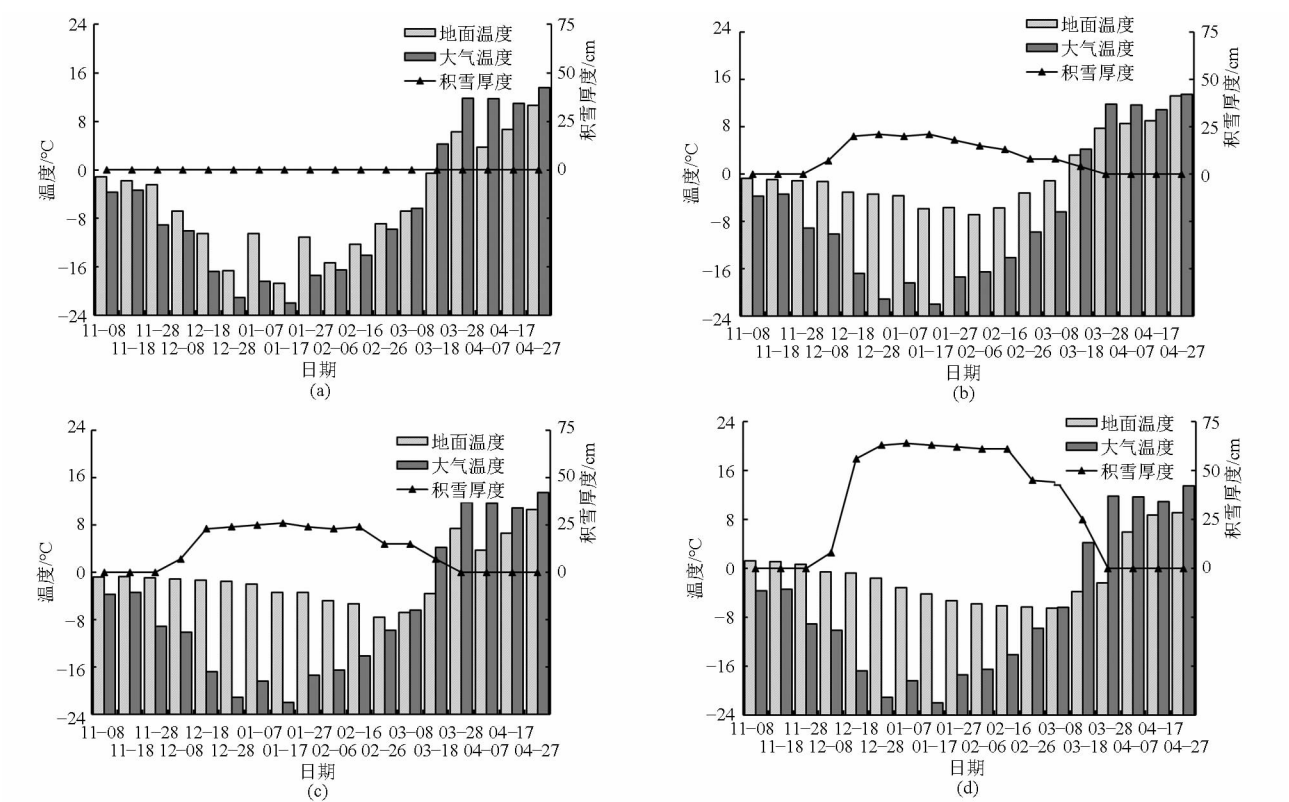


图 4 不同积雪覆盖条件下地面、大气温度变化趋势

Fig. 4 Surface and air temperature changing trend under the condition of different snow covers

(a) 裸地处理 (b) 自然降雪 (c) 积雪压实 (d) 积雪加厚

14.7℃,地、气之间温度差异变大。对于积雪加厚的情况,由于覆盖物的厚度变大,这种保温效果更加明显,地表最低温度出现在 2 月 16 日,地表温度大幅度高于大气温度,同时,当大气温度恢复到 0℃ 以上时,地面温度在 8~10 d 之内仍处于负温,阻碍了土壤温度的回升。对于积雪压实和积雪加厚处理,地表和大气之间的温度差较大,大气温度对地表影响十分微弱。

在积雪覆盖的条件下,由于积雪的大热容量性和强反射性,能够吸纳并释放能量,阻碍了土壤温度的降低,地表和环境之间的温差增大,同时,积雪的存在也大幅度地延缓了地表温度波谷的出现日期。在自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理的条件下,这种差异性表现得越加明显。表明积雪加厚处理(65 cm)和积雪压实处理(密度 0.265 g/cm³)对于地、气之间的隔绝能力要大于自然降雪处理。

2.4 土壤热状况对气象因素的响应

为分析不同的气象要素对土壤温度的作用程度,采用灰色关联分析的方法,以土壤温度作为参变量,以大气温度、环境湿度、大气总辐射量、大气净辐射量、风速、饱和水汽压差等气象因素作为自变量,在 4 种不同积雪覆盖处理条件的试验小区,分别筛选出土壤温度的主要影响因素^[19-22]。

2.4.1 主要影响因素的灰色关联分析

将不同积雪覆盖处理 4 个小区的土壤表层温度

分别作为参变量,将原始数列和各气象因素构成的数列进行无量纲化处理^[23],求得各数列与原始数列的关联系数,进而确定大气温度、环境湿度、大气总辐射量、风速、大气净辐射量和水汽压差在不同积雪覆盖条件下对地温的作用效果。不同积雪覆盖条件下,各气象因素与地表温度关联度如表 4 所示。

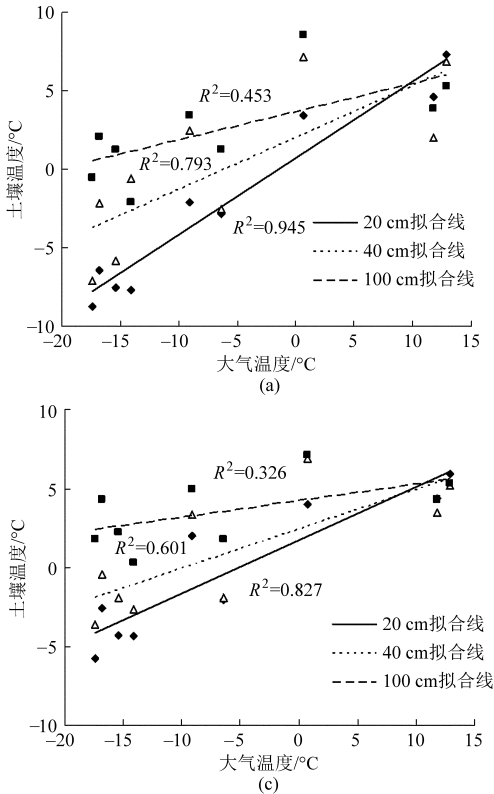
表 4 不同气象因素与土壤温度的关联度

Tab. 4 Correlation of different meteorological factors and soil temperatures

处理方式	环境 温度	环境 湿度	净辐 射量	风速	总辐 射量	饱和水 汽压差
裸地处理	0.952 4	0.551 0	0.912 9	0.900 2	0.864 6	0.895 9
自然降雪	0.896 6	0.542 4	0.851 1	0.831 5	0.796 8	0.826 2
积雪压实	0.882 3	0.513 1	0.857 9	0.847 6	0.701 4	0.740 7
积雪加厚	0.874 4	0.522 5	0.853 1	0.812 5	0.708 4	0.737 9

由表 4 可知,裸地处理、自然降雪、积雪压实、积雪加厚不同处理条件下,在影响土壤热状况的各气象因素中,环境温度与土壤温度的关联度最高。裸地处理条件区域,环境温度与地表温度的关联度为 0.952 4,然而,随着积雪深度增加和密度的增大,覆盖物对地表与环境之间阻隔程度增强,自然降雪、积雪压实和积雪加厚情况下的关联度分别为 0.896 6、0.882 3 和 0.874 4,土壤温度与环境温度的关联度有所降低。除此之外,大气净辐射量对地温也有较

强的影响,裸地处理、自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理小区中,大气辐射与土壤温度之间的关联度同样呈现出减弱的趋势。由此得知,积雪的存在,影响了气象因素与土壤之间的能量交换,使得土壤温度对气象因素的响应程度降低。



2.4.2 土壤温度对主要气象因子的响应

上述分析可知,在所有影响土壤温度的气象因素中,环境温度起着主要的影响作用。基于逐日观测的平均数据,分析了土壤不同深度温度与环境温度之间的相关关系,如图 5 所示。

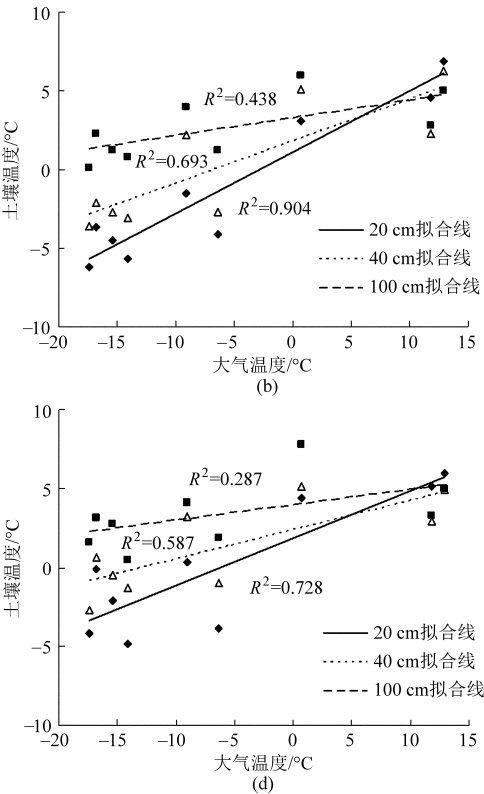


图 5 土壤温度对大气温度的响应

Fig. 5 Response of soil temperature to atmospheric temperature
(a) 裸地处理 (b) 自然降雪 (c) 积雪压实 (d) 积雪加厚

通过分析可知:裸地情况下,在 20 ~ 100 cm 的地层之间,环境温度与浅层 20 cm 处的决定系数 $R^2 = 0.945$,相关性较高,随着深度的增加,在 40 cm 和 100 cm 地层,决定系数分别为 0.793 和 0.453,呈现出随着深度的增加,环境温度与土壤温度相关性逐渐减小的趋势。并且在 100 cm 处,两者之间的关联度仅为 0.453,进一步说明土壤较深层次温度对于环境温度的响应十分微弱。

对比 4 种不同积雪覆盖处理条件下的土壤温度对主要气象因素的响应情况,在自然降雪处理条件下,环境温度与 20 cm 处土壤温度的决定系数 $R^2 = 0.904$,相对于裸地处理条件的决定系数有所减弱,40 cm、100 cm 处土壤温度的决定系数分别为 0.693 和 0.438,呈现出地层由 20 ~ 100 cm 深度增加过程中,决定系数变小的现象。与裸地处理条件对比可知,自然降雪处理条件下不同土层的温度与大气温度的相关性相对降低,同理,在积雪压实和积雪加厚处理的条件下,20 cm 处的决定系数分别为 0.827 和 0.728,小于裸地处理的决定系数 0.945 和自然降雪

条件的 0.904。

综上所述,在土壤温度对环境温度的响应效果中,4 种积雪覆盖处理区域,自 20 ~ 100 cm 不同土层,土壤温度与大气温度的决定系数存在差异,并且在积雪压实和积雪加厚处理区域中,二者决定系数较小,响应作用减弱。进一步证实积雪对太阳辐射能量具有吸收、存储、反射的作用,并且随着积雪密度的增加和覆盖厚度的增大,这种特性表现得更加凸显,影响了外界环境与土壤之间的相互作用,同时也对季节性冻土区土壤温度产生保温、延时变化、减小变幅的效用。

3 结论

(1) 积雪是减缓土壤、大气之间能量交换的一种介质,阻碍了热量的双向运动,这种特性使得积雪覆盖条件下,土壤的冻融日期发生延迟现象。自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理表层 5 cm 处融化日期相对裸地处理推迟均在 10 d 以上,深层 60 cm 处融化日期分别延时 5 ~ 10 d 不等。随着积雪深度的增加和密度的增大,积雪的吸收、储存、反射热量能

力增强,土壤冻融日期延迟现象更加明显。

(2) 积雪的存在有效减小了土壤温度的波幅,保持了地温。对于浅层土壤影响效果较大,深层影响效果较小,积雪的覆盖密度和厚度也在不同程度上影响着土壤的温度变化。冻结稳定期,自然降雪、积雪压实和积雪加厚区域表层 5 cm 处土壤温度相对于裸地提高 11.9 ~ 13.1℃,深层 140 cm 处土壤温度提升幅度在 3.2 ~ 4.7℃之间。积雪降低土壤能量散失,其中积雪压实和积雪加厚的保温效果要优于自然降雪处理。

(3) 积雪作为一种多孔介质,延缓了大气对于土壤温度的影响,地、气之间温度差异增大。在自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理条件下,地、气之间

最大温差由裸地处理条件下的 4.7℃ 大幅增至 13.1 ~ 15.7℃。并且,3 种积雪覆盖条件下,积雪加厚处理(65 cm)的土壤与大气温差最大,其次为积雪压实处理(25 cm),自然降雪处理(23 cm)最小。

(4) 土壤温度与气象因素中的环境温度具有较强的相关性。分析对比 4 个试验小区中环境温度与土壤温度的决定系数,结果表明:同一处理区域由浅到深,土壤温度对大气温度响应程度降低。同时,不同积雪覆盖处理不同程度地阻隔了土壤与大气能量传输,在裸地处理、自然降雪、积雪压实和积雪加厚处理条件下,土壤温度与环境温度之间的相关性呈依次减弱趋势。

参 考 文 献

- 1 徐数祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- 2 李杨,王清,赵安平,等. 长春地区季冻土基本性质对水分迁移的影响[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2008,38(2): 279 - 284.
Li Yang, Wang Qing, Zhao Anping, et al. Influence of basic properties of seasonally frozen soil on moisture movement in Changchun Area[J]. Journal of Jilin University:Earth Science Edition, 2008, 38(2): 279 - 284. (in Chinese)
- 3 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.
- 4 魏丹,陈晓飞,王铁良,等. 不同积雪覆盖条件下土壤冻结状况及水分的迁移规律[J]. 安徽农业科学,2007,35(12): 3570 - 3572.
- 5 杨金凤,郑秀清,孙明. 地表覆盖对季节性冻融土壤温度影响研究[J]. 太原理工大学学报,2006,37(3): 358 - 360.
- 6 Osterkamp T E. The recent warming of permafrost in Alaska[J]. Global and Planetary Change, 2005, 49(3): 187 - 202.
- 7 Gong G, Entekhabi D, Cohen J. Modeled northern hemisphere winter climate response to realistic Siberian snow anomalies[J]. Journal of Climate, 2003, 16(23): 3917 - 3931.
- 8 Brooks P D, Williams M W, Schmidt S K. Microbial activity under alpine snowpacks, Niwot Ridge, Colorado [J]. Biogeochemistry, 1996, 32(2): 93 - 113.
- 9 Mellander P E, Laudon H, Bishop K. Modelling variability of snow depths and soil temperatures in Scots pine stands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 133(1): 109 - 118.
- 10 常娟,王根绪,高永恒,等. 青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响[J]. 生态学报,2012,32(23): 7289 - 7301.
Chang Juan, Wang Genxu, Gao Yongheng, et al. Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(23): 7289 - 7301. (in Chinese)
- 11 Goodrich L E. The influence of snow cover on the ground thermal regime[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, 19(4): 421 - 432.
- 12 Konard J M, Mccammon A W. Solute partitioning in freezing soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990,27(6):726 - 736.
- 13 Shanley J B, Chalmers A. The effect of frozen soil on snowmelt runoff at Sleepers River, Vermont[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(12 - 13): 1843 - 1857.
- 14 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]. 农业机械学报,2013,44(3): 104 - 109.
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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 104 - 109. (in Chinese)
- 15 王国亚,毛炜峰,贺斌,等. 新疆阿勒泰地区积雪变化特征及其对冻土的影响[J]. 冰川冻土,2012,34(6): 1293 - 1300.
- 16 孙军杰,于溪滨,郭松林,等. 不同积雪深度对地面温度的增温效应[J]. 中国农业气象,1995,16(6): 49 - 50.
- 17 苗春燕,郑秀清,陈军锋. 季节性冻融期不同地下水位埋深下土壤温度变化特征[J]. 中国农学通报,2008,24(1): 496 - 502.
- 18 刘光生,王根绪,胡宏昌,等. 青藏高原多年冻土区植被盖度变化对活动层水热过程的影响[J]. 冰川冻土,2009,31(1): 89 - 96.
- 19 刘春景,唐敦兵,何华,等. 基于灰色关联和主成分分析的车削加工多目标优化[J]. 农业机械学报,2013,44(4): 293 - 298.
Liu Chunjing, Tang Dunbing, He Hua, et al. Multi-objective optimization of turning based on grey relational and principal component analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 293 - 298. (in Chinese)
- 20 赵韩,张彦,方良海,等. 灰色关联分析法在汽车零部件故障分析中的应用[J]. 农业机械学报,2005,36(8):125 - 128.
Zhao Han, Zhang Yan, Fang Genhai, et al. Application of grey relation analysis on fault diagnosis of automobile parts[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8):125 - 128. (in Chinese)
- 21 唐振兴,何志斌,刘鹤. 祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应[J]. 生态学报,2012,32(4): 1056 - 1065.
- 22 刘思峰,郭天榜,党耀国,等. 灰色系统理论与应用[M]. 北京:科学出版社,1999.
- 23 景国勋,贾智伟,段振伟. 井下作业温度对事故影响关系的灰色关联分析[J]. 中国安全科学学报,2004,13(10): 60 - 62.