

科尔沁沙坨地—草甸地冻融期地温与最大冻结深度的变化规律

岳翠桐, 刘小燕, 刘廷玺, 付青云, 曹文梅, 刘巧玲

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 探究科尔沁沙坨地—草甸地土壤温度与冻结深度的变化规律, 为合理指导该区农工生产和建设提供支持。[方法] 基于 2007—2015 年冻融期人工观测数据, 对比分析科尔沁沙坨地与草甸地冻融期多年土壤温度与最大冻结深度变化规律。[结果] 研究区 100 cm 处沙坨地与草甸地多年土壤温度的标准差变化规律基本一致, 草甸地要小于沙坨地, 但融解后期由于草甸地融解期历时较长, 其标准差大于沙坨地; 同时考虑土壤温度和土壤水分对最大冻结深度的影响时, 沙坨地在 200 cm 处和草甸地在 140 cm 处的 R^2 分别为 0.959 和 0.788。[结论] 研究区内沙坨地先冻结与先融解, 沙坨地最大冻结深度较草甸地深, 同时考虑土壤温度与土壤水分的最大冻结深度的拟合优度最好, 沙坨地与草甸地中最大冻结深度与土壤温度和土壤水分均呈负相关关系。

关键词: 科尔沁沙坨地—草甸地; 季节冻土区; 冻融期; 最大冻结深度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0084-08

中图分类号: S152.7, S152.8

文献参数: 岳翠桐, 刘小燕, 刘廷玺, 等. 科尔沁沙坨地—草甸地冻融期地温与最大冻结深度的变化规律[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6):084-091. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.015

Change Rules of Soil Temperature and Maximum Freezing Depth During Freezing-thawing Period in Horqin Sand and Meadow Land

YUE Cuitong, LIU Xiaoyan, LIU Tingxi, FU Qingyun, CAO Wenmei, LIU Qiaoling

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner

Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] The changes of soil temperature and maximum frozen depth in Horqin sand and meadow land were to provide support for reasonable guide of the agricultural production and construction. [Methods] Based on the artificial observation data from 2007 to 2015 during the freezing and thawing period, variability of soil temperature and maximum frozen depth in Horqin sand and meadow land were analyzed and compared during the freezing-thawing period. [Results] Changes of the standard deviation of soil temperature in sand and meadow land at 100 cm were basically the same, and values of meadow land were less than the ones of sand land. But the later melting period of meadow land lasted longer time, whereby its standard deviation was greater than the one of sand. Considering the impact of soil temperature and soil moisture on maximum frozen depth at the same time, the determinant coefficient of R^2 at depth of 200 cm in sand and 140 cm in meadow land were 0.959 and 0.788, respectively. [Conclusion] Sand land froze and melted in advance in the study area, maximum frozen depth in sand was deeper than the one of meadow land. If soil temperature and soil moisture were considered at the same time, correlation coefficient to the maximum frozen depth was greater than the corresponding value of only single variable included. Soil temperature and soil moisture

收稿日期: 2016-04-19

修回日期: 2016-05-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“寒旱区冻融期土壤水—热—盐—能耦合运移的野外试验与模拟”(50769003), “科尔沁沙地(沙丘—草甸地)冻融期土壤水—热—盐耦合运移机理及其模拟方法”(51169012), “荒漠化地区水文过程及其生态响应研究”(51139002)

第一作者: 岳翠桐(1989—), 女(汉族), 黑龙江省齐齐哈尔市人, 硕士研究生, 研究方向为寒冷干旱地区土壤水热盐运移规律。E-mail: moonlightyct@qq.com。

通讯作者: 刘小燕(1989—), 女(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事冻土物理学方面的研究。E-mail: liuxy6675@163.com。

were negative correlated with the maximum frozen depth in sand and meadow land.

Keywords: Horqin sand and meadow land; seasonal frozen soil regions; freezing and thawing period; maximum freezing depth

土壤冻融是一个复杂的过程,伴随着相变的发生和土壤物理、化学及物理化学、力学的变化过程,土壤中的水分、热量与盐分发生着复杂的迁移,并具有强烈的耦合作用^[1-2]。冻土层是在土壤包气带中存在的一种特有的含冰土体,具有弱透水性、储水性和抑制蒸发的作用,使寒区冻融阶段的融雪水入渗、土壤墒情变化状态以及降水、径流、蒸发的“三水”转换关系均不同于非寒区^[3]。特别是融解期的下层冻结锋面对融解水的阻隔作用与自身融解产生的水分,对春季农作物的生长提供了充足的水分^[4]。近年来干旱缺水及水体污染灾情的日益加重,农业生产的可持续发展受到此现象的严重威胁^[5]。冻结层的冻结与融解对土壤的墒情变化有着重要作用^[6]。季节性冻土融解期土壤温度对土壤湿度、土壤的形成、地表植被的生长以及地表水热能量的再分配具有重要作用^[7],掌握冻融期土壤温度的变化规律对作物的种植与生长、合理的灌溉等具有重要意义^[8-12],冻融期土壤温度是土壤水分运动的驱动力,土壤温度不仅与土壤结构及地表覆盖物有关还与大气、地势、土壤性质等因素有关^[13],越冬期土壤温度决定初春土壤温度^[14],影响着土壤水分入渗,且冻结土壤其入渗能力也远小于非冻结层土壤,冻结土壤具有明显的减渗特性^[15],具有持水保墒作用。冻土是气候变化的指示剂,气候的变化可影响到最大冻结深度的变化,气候变暖可使最大冻结深度减小,土壤季节性冻结深度可能是总辐射、土壤含水量、土壤特性、地理纬度、海拔高度、积雪等因素共同作用的结果^[16-19],气温、基土土质、地下水埋深、表面接受的日照和遮阴程度也会对最大冻结深度造成不同程度的影响^[20-22],而且在道路工程建设方面,冻结深度的确定对基础工程的冬季施工具有极其重要的意义^[23],因此,了解土壤温度与冻结深度的变化规律,对合理指导春播与合理解决寒区及其地方的开发、工程建设等实际问题具有重要意义。

1 研究区概况及试验点布置

研究区选在位于科尔沁沙地的东南缘的内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼后旗阿古拉镇,内蒙古农业大学阿古拉生态水文试验站,地理位置 $122^{\circ}33'00''-122^{\circ}41'00''E$, $43^{\circ}18'48''-43^{\circ}21'24''N$, 面积约为 55 km^2 , 该区域属温带半干旱大陆性季风气候,多年平均降水量为 389 mm , 主要集中在的 $6-9$ 月,多年平均气温 $6.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 极端最高气温 $33.48\text{ }^{\circ}\text{C}$, 极端最低

气温 $-27.64\text{ }^{\circ}\text{C}$, 沙坨地最大冻结深度为 205 cm , 草甸地最大冻结深度为 200 cm , 多年平均风速 3.8 m/s , 地貌特征为固定沙丘、半固定半流动沙丘、流动沙丘与草甸、农田、湖泊相结合,沙丘草甸相间分布,主要土壤类型为风沙土,其次为草甸土。选取 2007 年 10 月 1 日至 2015 年 5 月 26 日冻融期土壤数据,根据试验区地形地貌状况,选择人工观测的 12 个试验点分析土壤温度的年际变化规律及最大冻结深度变化规律,试验点按土壤类型可分为沙丘地与草甸地两类,人工观测点中沙坨地和草甸地各 6 个试验点,沙坨地试验点分别为 A_1, A_3, B_2, E_1, F_1 和 F_3 , 草甸地试验点分别为 C_2 草甸、 C_2 玉米、 C_3, D_1, E_2 , 和 E_3 , 将研究区分为三条线,尽量使试验点的地貌类型包括草甸、固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘,在三条线上布设了 12 个试验点,西线为 A_1, D_1, E_1 和 F_1 , 中线为 B_2, C_2 玉米、 C_2 草甸和 E_2 , 东线为 A_3, C_3, E_3 和 F_3 , 其中重点试验点 A_3, C_3 在 2007 年安装了土壤气象自动监测系统,且 A_3 为沙坨地 C_3 为草甸地,便于两个不同土壤类型的试验点数据进行对比分析,其他 8 个部分试验点则在 2015 年安装了土壤气象自动观测系统,为使 A_3 点与 C_3 点人工观测数据更完整,其土壤温度和土壤水分数据分别在 5 d 一测的基础上加测了 2 d 一次。

土壤温度观测的两种仪器分别是曲管地温计和电子地温传感器,曲管地温计的观测频率为每 5d 一次,电子地温传感器的观测频率为 12 个点均为每 5 d 测量一次和重点试验点 A_3, C_3 加测每 2 d 一次;曲管地温计观测深度分别为 $5, 10, 20, 40$ 和 80 cm , 电子地温传感器观测深度分别为 $10-50\text{ cm}$ 每隔 10 cm 测一次, $70, 100, 140,$ 和 200 cm , 沙坨地在此基础上加测到 300 cm ; 土壤水分观测仪器为 CNC503B(DR) 土壤水分中子仪,和土壤温度观测频率相同,其中沙坨地与草甸地每 5d 一测的观测深度为 $10-100\text{ cm}$ 每隔 10 cm 测一次,草甸地中 $100-160\text{ cm}$ 每隔 20 cm 测量一次,沙坨地为 $100-280\text{ cm}$ 每隔 20 cm 测量一次;沙坨地与草甸地每 2 d 一测的观测深度为草甸地 $10-160\text{ cm}$ 每隔 10 cm 观测一次,沙坨地 $10-280\text{ cm}$ 每隔 10 cm 观测一次。

2 结果与讨论

2.1 沙丘地—草甸地土壤温度年际变化规律

对研究区 12 个人工观测试验点 2007 年 10 月 1

日至 2015 年 5 月 26 日土壤冻融期间的 20,40 和 100 cm 土壤温度 5 d 测 1 次数据进行分析,由于沙坨地 F₃ 点处于阴坡位置,相对于其他 5 个试验点 F₃ 点土壤各层温度均较小,排除地形因素对研究结果的影响,沙坨地选取 A₁,A₃,B₂,E₁ 与 F₁ 共 5 个试验点,草甸地选取 C₂ 草甸、C₂ 玉米、C₃,D₁,E₂ 与 E₃ 共 6 个试验点。

2.1.1 沙坨地土壤温度时空分布特征 将沙坨地各试验点冻融期间相同时间相同土层深度的土壤温度进行平均,得到沙坨地同一土层的平均土壤温度,记为沙坨地这一层位的土壤温度,同理后述的草甸地也做同样处理。图 1 为沙坨地 20,40 和 100 cm 处冻融期间不同年份的土壤温度变化曲线。

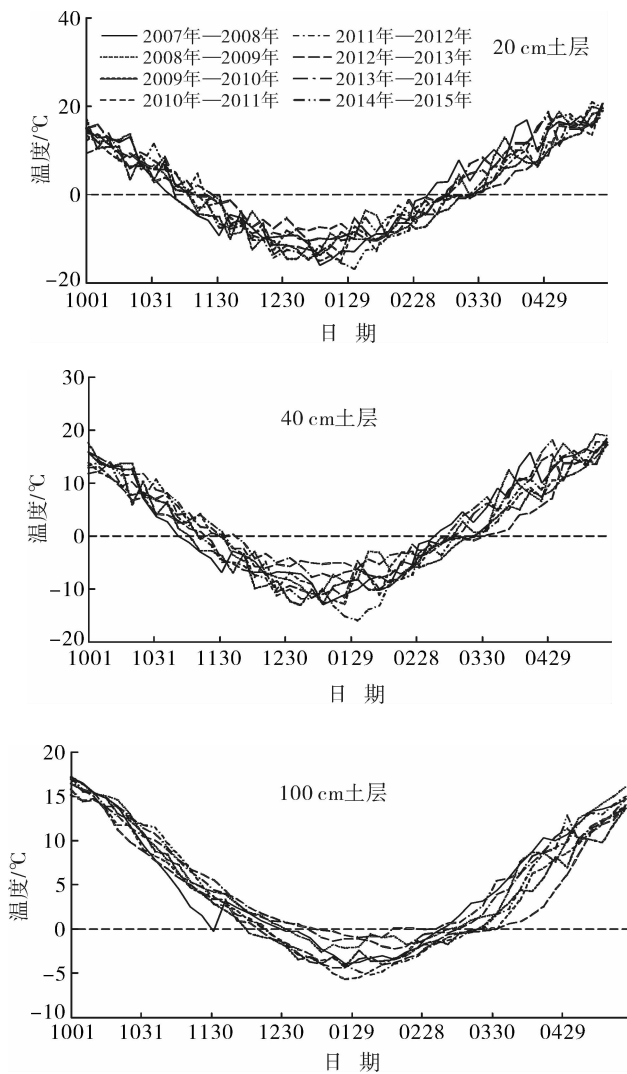


图 1 沙坨地 20,40 和 100 cm 处不同年份冻融期间的土壤温度变化曲线

由图 1 可看出 20,40 与 100 cm 处沙坨地土壤温度最低值分别在 2011—2012 年,2011—2012 年与 2010—2011 年出现,且沙坨地中 A₃,B₂,E₁,F₁ 和 F₃ 这 5 个试验点最大冻结深度出现在 2010—2011 年

间,与沙坨地土壤温度 100 cm 处最低值出现时间阶段相同,最大冻结深度与深层土壤温度关系密切。沙坨地随着深度的增加,土壤温度曲线越平滑,温度波动不明显;表层土壤受气温外界因素影响较大,土壤温度波动较明显,深层土壤受其上层土壤温度的滞后效应影响。由图 1 可以看出,在冻结初期,土壤温度达到 0 °C 以下时 40 cm 处土壤较 20 cm 处土壤与 100 cm 处土壤较 40 cm 处土壤分别滞后 5—10 d 与 15—45 d。

2.1.2 草甸地土壤温度时空分布特征 计算方法同上,可以得到草甸地土壤温度,图 2 为草甸地 20—100 cm 处不同年份土壤温度变化曲线,草甸地 20,40 与 100 cm 处土壤温度最低值分别出现在 2011—2012 年,2012—2013 年与 2012—2013 年,2007—2015 年度冻融期间草甸地中 6 个试验点的最大冻结深度均出现在 2012—2013 年,与 100 cm 处土壤温度最低值出现时间相同。

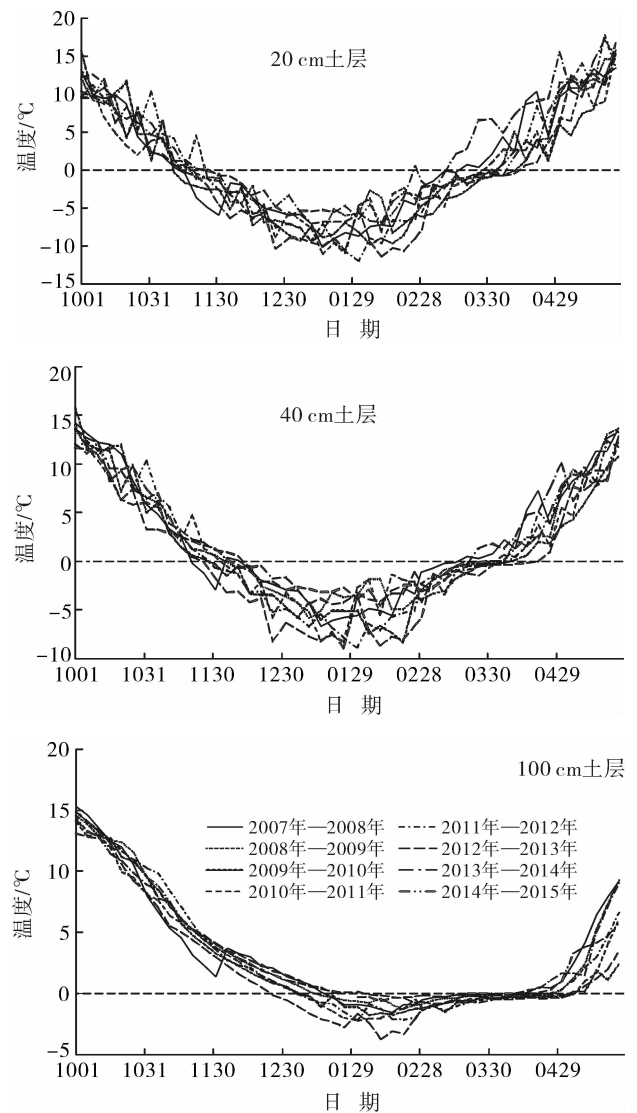


图 2 草甸地 20,40 和 100 cm 处不同年份冻融期间的土壤温度变化曲线

由图 2 可以看出,20 cm 处土壤温度波动剧烈,表层土壤受外界环境因素影响较大,100 cm 处土壤温度波动较平缓,深层土壤受外界因素影响较小,主要受上层土壤温度滞后效应影响;标准差反映了数据的离散程度,沙坨地冻融期间各土层土壤温度 2007—2015 年度标准差的值较草甸地要大,沙坨地各层土壤温度更离散,图 3 中可看出草甸地下层 100 cm 处土壤的温度变化较沙坨地更稳定,由于草甸地下层土壤含水率较大,土粒之间空隙较小,透气性差,土壤导热率小,昼夜变幅小,草甸地下层土壤温度变化范围小。

草甸地与沙坨地在 100 cm 处的土壤温度标准差波动曲线基本一致(图 3),而在融解期后期沙坨地与草甸地不同,草甸地标准差波动曲线为增大,沙坨地则为减小。

10 月 16 日至 12 月 1 日为 100 cm 处温度下降至 0 °C 以下阶段,标准差开始增大,不同年份的 100 cm 处土壤温度波动剧烈;后随着温度继续下降,沙坨地与草甸地标准差均减小;随着温度的再次下降,直至 100 cm 处土壤达到最低温度,由于每年最低温度不同,其温度离散程度不同,沙坨地与草甸地标准差均再次增大;随着温度的再次上升,2 月 11 日至 3 月 26 日沙坨地与草甸地 100 cm 处土壤达到 0 °C 以上,沙坨地与草甸地土温标准差均减小;沙坨地在 100 cm 处达到 0 °C 以上后标准差开始增大,达到稳定温度后标准差再次减小。

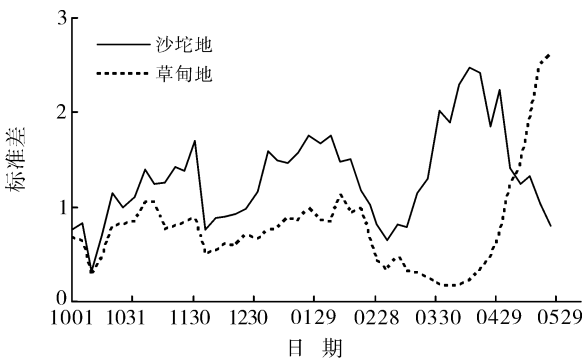


图 3 沙坨地与草甸地 2007—2015 年度冻融期间 100 cm 处土壤温度标准差

由图 3 可以看出,草甸地 100 cm 处土壤温度则在 0 °C 处于较长时间,融解历时较长,标准差较小,随着 100 cm 处土壤温度增加到 0 °C 以上未达到稳定状态,标准差再次增大,这与沙坨地融解后期标准差在土壤温度达到 0 °C 后未稳定期间规律相同。

2.1.3 沙坨地与草甸地土壤温度时空分布特征对比

对沙坨地与草甸地 20,40 与 100 cm 处 2007—2015 年度冻融期间的土壤温度分别进行平均,得出沙坨地与草甸地 20,40 与 100 cm 处多年平均温度,表 1 与图 4 中均可看出冻融期间各土层中沙坨地较草甸地提前达到 0 °C,沙坨地的冻融历时较草甸地要短,且沙坨地与草甸地的冻融历时均随着深度的增加而减小;沙坨地各层中的土壤最低温度均比草甸地要低,土壤最高温度较草甸地要高,100 cm 处沙坨地达到土壤最低温度的日期较草甸地提前 20 d;随着深度的增加,沙坨地与草甸地土壤最低温度的差值也在减小,20,40 与 100 cm 处的差值分别为 4.9,4.5 与 1.8 °C,将图 1 与图 2 中的 100 cm 土层进行对比可看出,草甸地的融解历时要比沙坨地长;沙坨地与草甸地各土层之间均有个滞后效应,下层土壤后受上层土壤温度影响后达到 0 °C。

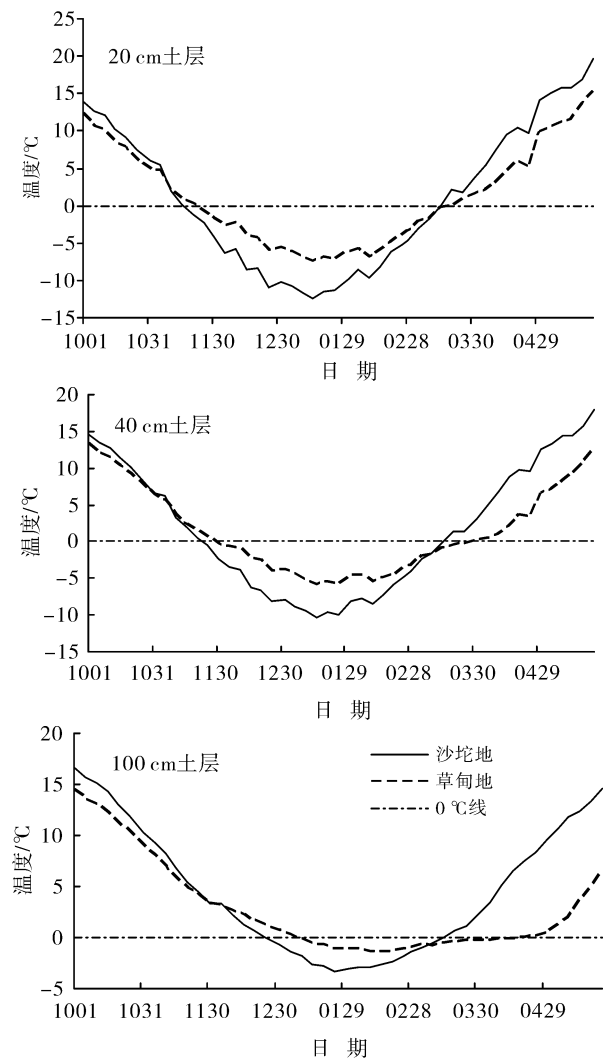


图 4 沙坨地与草甸地各土层多年土壤平均温度

表 1 沙坨地与草甸地 20,40 与 100 cm 处冻结期与融解期特征

土壤深度/cm	沙坨地 20 cm	草甸地 20 cm	沙坨地 40 cm	草甸地 40 cm	沙坨地 100 cm	草甸地 100 cm
冻结期达到 0℃日期	1121	1126	1126	1201	1226	0111
融解期达到 0℃日期	0321	0326	0321	0410	0316	0426
冻融历时/d	121	121	116	122	81	106
最低土壤温度/℃	-12.4	-7.5	-10.3	-5.8	-3.3	-1.5
地温最低值出现日期	0116	0116	0116	116	0126	0216
最高土壤温度/℃	19.6	15.2	18	13.3	16.6	14.4
地温最高值出现日期	0526	0526	0526	1001	1001	1001

2.2 沙坨地与草甸地土壤温度最大值、最小值与最大冻结深度的变化

空间上沙坨地与草甸地各层土壤温度的最大值与最小值出现的试验点不同,表 2—3 分别为沙坨地与草甸地在时间与空间上最大值、最小值出现的试验点与时间,草甸地中土壤温度的最小值均在 C₃点;在时间上沙坨地 10—70 cm 处与草甸

地 10—40 cm 处土壤温度最小值多出现在 1 月 16 日左右,沙坨地 100 cm 处与草甸地 50—100 cm 处土壤温度最小值多出现在 1 月 26 日,其下层土壤温度最小值一般在 2—5 月出现,沙坨地 10—70 cm 与草甸地 10—30 cm 处土壤温度最大值均在 5 月下旬出现,其下层土壤温度最大值多出现在 10 月初。

表 2 沙坨地试验点各层土壤温度最小值与最大值在空间与时间上的分布

土壤深度/cm	10	20	30	40	50	70	100	140	200	300
最小值出现的点	F ₃	F ₃	F ₃	A ₁	A ₁	A ₁	F ₁	F ₁	A ₃	A ₁
最小值出现日期	20080116	20080116	20080116	20130126	20120111	20090106	20110126	20110126	20100306	20100501
最大值出现的点	A ₁	A ₁	A ₃	A ₁	A ₃	A ₃	A ₃	A ₃	A ₃	A ₃
最大值出现日期	20120521	20120521	20140531	20150426	20140531	20140531	20131001	20131001	20131001	20131001

表 3 草甸地试验点各土层土壤温度最小值与最大值在空间与时间上的分布

土壤深度/cm	10	20	30	40	50	70	100	140	200
最小值出现的点	C ₃	C ₃	C ₃	C ₃	C ₃	C ₃	C ₃	C ₃	C ₃
最小值出现日期	20110116	20110116	20130109	20130109	20130126	20130126	20130127	20130127	20120316
最大值出现的点	C ₂ 草甸	C ₂ 草甸	C ₂ 草甸	D ₁	D ₁	D ₁	D ₁	E ₃	D ₁
最大值出现日期	20140521	20140521	20140521	20091001	20091001	20091001	20091001	20121001	20141001

分别绘制沙坨地与草甸地各试验点 2007—2015 年冻融期间的土壤温度等值线,对每年土壤温度 0 度线进行分析,表 4 为沙坨地与草甸地的最大冻结深度与融通深度,沙坨地 F₃点在 2010—2011 年达到最大冻结深度 210 cm,草甸地 C₂玉米点在 2012—2013 年草甸地达到最大冻结深度 192 cm;对各点每年的最大冻结深度与融通深度进行平均,2007—2015 年冻融期间沙坨地平均冻结深度最大的点为 F₃点,其值为 175 cm,与 F₃点处于阴坡的地形有关,平均冻结深度最小的点为 B₂,为 117.75 cm。草甸地中 2007—

2015 年冻融期间平均冻结深度最大点为 D₁,其值为 169.5 cm,平均冻结深度最小的点为 C₃,为 131.5 cm。虽然草甸地中各层土壤温度最小值均出现在 C₃点,但平均最大冻结深度却在 D₁点,说明冻结深度不止与土壤温度有关。C₂草甸地平均冻结深度明显比 C₂玉米地浅,C₂玉米地秋收后为裸露地表,无明显覆盖物,其各层土壤平均温度比 C₂草甸地要低,所以其平均冻结深度更深;沙坨地平均最大冻结深度要比草甸地深,草甸地平均土壤融通时间要比沙坨地慢,这与土壤含水率与土壤自身岩性颗粒大小等用关。

表 4 2007—2015 年冻融期沙坨地与草甸地试验点平均最大冻结深度与融通深度

	cm					
沙坨地	F ₃	F ₁	A ₃	A ₁	E ₁	B ₂
冻结深度	175	161.25	157.25	141.5	124.375	117.75
融通深度	112.813	89.25	87.375	34.375	80.625	49.625
草甸地	D ₁	C ₂ 玉米	E ₃	C ₂ 草甸	E ₂	C ₃
冻结深度	169.5	166.5	145.833	140.125	135.875	131.5
融通深度	140	128.875	127.167	108.562	108.125	87.375

2.3 沙坨地与草甸地最大冻结深度与土壤温度和土壤含水率的关系

找出 2007—2015 年每个试验点达到最大冻结深度的时间,再找出该时间对应的各层土壤温度与土壤水分,后对每个试验点不同层位的多年土壤温度、土壤水分进行平均,结果如图 5—6 所示。

图 5—6 显示,沙坨地中 100—300 cm 处土壤含水率较大的 E₁ 与 B₂ 点的冻结深度较小,而 F₁ 与 F₃ 含水率较小的点则冻结深度较大,这与深层土壤含水量有关,且 F₁ 与 F₃ 点的土壤温度较其他点小,土壤的冰点与融点均受土壤自身的性质影响,其中都随含水率的增大而升高。

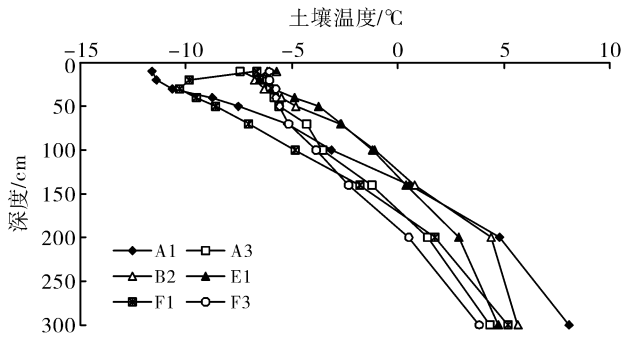


图 5 沙坨地试验点各层土壤多年平均温度和含水率变化

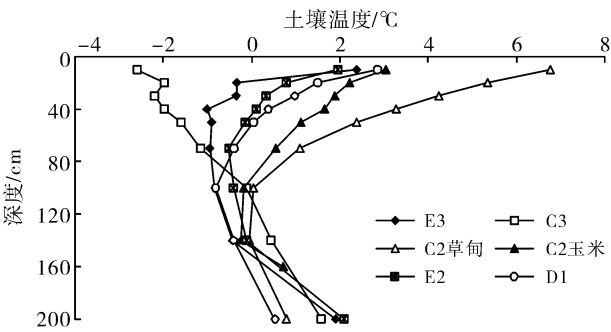
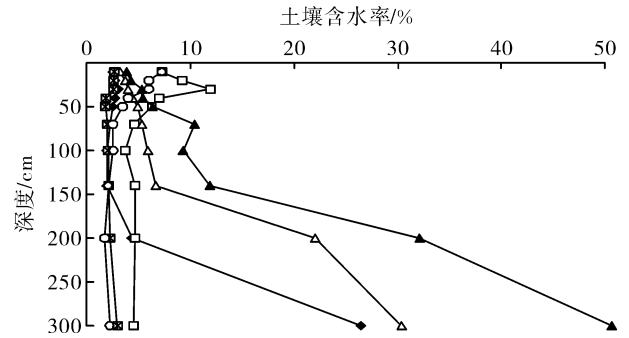
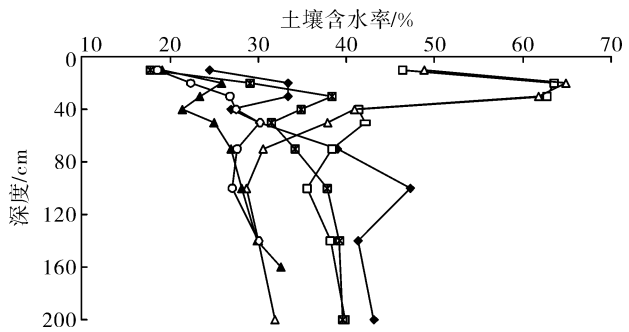


图 6 草甸地试验点各层土壤多年平均温度和含水率变化



沙坨地地下水埋深均很深,不考虑地下水对冻结深度的影响,把各点最大冻结深度与最大冻结深度出现时的土壤温度和土壤水分进行回归分析,表 5—6 列出了仅考虑土壤温度或土壤水分条件或同时考虑两者的回归系数 R^2 值,可以看出沙坨地冻结深度同时考虑土壤温度和水分的的影响时拟合程度较好。200 cm 处的拟合最好,与不同层位比较 F 显著性统计量最小,为 0.008,标准误差也最小,为 5.727,且最大冻结深度与此层的温度和水分呈负相关,随着温度降低,土壤含水率的减小,土壤的最大冻结深度增加。沙坨地试验点中 F₃ 点土壤温度最小与含水率最小,故其为沙坨地中最大冻结深度最深的点;仅考虑土壤温度时冻结深度随着深度增加影响增大,140 cm 处

达到最大随后随着深度增加减小;单独考虑土壤水分时随着深度增加影响先减小后增大,达到 300 cm 处时水分影响最大, F 显著性统计量与标准误差均达到最小值,所以上层 140 cm 处土壤温度和 300 cm 处的土壤水分对沙坨地最大冻结深度影响较大,同时考虑两者作用时则 200 cm 处土层影响最大。沙坨地平均最大冻结深度与 200 cm 土层处多年多点平均的土壤水分和温度的回归方程为:

$$d_s = -0.965w_s - 7.69T_s + 179.228 \quad (1)$$

式中: d_s ——沙坨地平均最大冻结深度; w_s ——200 cm 处沙坨地平均土壤含水率; T_s ——200 cm 处沙坨地平均土壤温度。

表 5 沙坨地各层土壤温度与水分对冻深的拟合优度

项目	土层深度/cm									
	10	20	30	40	50	70	100	140	200	300
温度和水分 R^2	0.356	0.206	0.137	0.088	0.207	0.556	0.789	0.954	0.959	0.771
温度 R^2	0.003	0.001	0.005	0.081	0.204	0.555	0.774	0.917	0.696	0.199
水分 R^2	0.337	0.130	0.062	0.032	0.179	0.385	0.465	0.462	0.656	0.739

对草甸地各点最大冻结深度与最大冻结深度出现时的每一层位温度和水分进行回归分析,其拟合优度 R^2 结果详见表 6。土壤温度和水分同时考虑时其回归系数较大,随着层深增加先增大,在 40 cm 处达到一个较大值,50 cm 处减小后又增大,在 140 cm 处达到最大值,与冻结层的上下冻结锋面有关;若草甸地最大冻结深度只考虑温度的影响下其拟合优度 R^2 在 160 cm 处达到最大值;与沙坨地不同,沙坨地中温度在 140 cm 处影响较大,而草甸地中各层土壤水分影响较各层土壤温度均要大,草甸地中土壤水分对最大冻结深度起主要作用,这与草甸地的地下水埋深较浅有关,在冻结过程中地下水可向上补给,使

上层土壤水分含量增加;草甸地在 140 cm 处同时考虑土壤温度与土壤水分作用下的最大冻结深度方程为:

$$d_m = -1.868W_m - 31.454T_m + 211.881 \quad (2)$$

式中: d_m ——草甸地平均最大冻结深度; W_m ——140 cm 处草甸地平均土壤含水率; T_m ——140 cm 处草甸地平均土壤温度。

最大冻结深度与土壤温度、水分呈负相关,土壤含水率越大则冻结深度越小,140 cm 处 D_1 点与 C_2 玉米点平均土壤含水率较小,它们的平均冻结深度较大,而 E_2 与 C_3 土壤平均含水率较大,它们的平均冻结深度就较小。

表 6 草甸地各层土壤温度与水分对冻深的拟合优度

项目	土层深度/cm								
	10	20	30	40	50	70	100	140	160
温度和水分 R^2	0.438	0.586	0.714	0.759	0.587	0.727	0.691	0.788	0.588
温度 R^2	0.129	0.102	0.132	0.125	0.114	0.120	0.127	0.469	0.561
水分 R^2	0.320	0.438	0.597	0.659	0.552	0.619	0.276	0.463	0.410

3 结论

(1) 100 cm 处沙坨地土壤温度最低值在 2010—2011 年出现,沙坨地中 A_3 , B_2 , E_1 , F_1 和 F_3 5 个试验点最大冻结深度也出现在 2010—2011 年期间;草甸地 100 cm 处土壤温度最低值出现在 2012—2013 年,草甸地中 6 个试验点的最大冻结深度均出现在 2012—2013 年;草甸地下层 100 cm 处土壤的温度变化较沙坨地更稳定,土壤温度标准差更小,由于草甸地下层土壤含水率较大,土粒之间空隙较小,透气性差,土壤导热率小,昼夜变幅小,草甸地下层土壤温度变化范围小。

(2) 沙坨地与草甸地在冻结初期与融解初期到达 0°C 时的土壤温度标准差较小,此期间温度波动范围小;冻融期间各土层中沙坨地较草甸地提前达到 0°C ,沙坨地的冻融历时较草甸地要短,沙坨地各层中的土壤最低温度均比草甸地要低,土壤最高温度较草甸地要高,随着深度的增加,沙坨地与草甸地土壤最低温度的差值也在减小,草甸地的融解历时要比沙坨地长。

(3) 对 2007—2015 年度冻融期间各点的最大冻结深度进行平均,沙坨地平均冻结深度最大的点为 F_3 点,其值为 175 cm,平均冻结深度最小的点为 B_2 , 为 117.75 cm;草甸地中平均冻结深度最大点为 D_1 , 其值为 169.5 cm,平均冻结深度最小的点为 C_3 , 为 131.5 cm,虽然草甸地中各层土壤温度最小值均出现

在 C_3 点,但平均最大冻结深度却在 D_1 点,说明最大冻结深度不止与温度有关;沙坨地平均最大冻结深度要比草甸地深,草甸地平均土壤融通时间要比沙坨地慢,这与土壤含水率与土壤自身岩性颗粒大小等用关。

(4) 对冻融期沙坨地与草甸地试验点的每一层土壤温度与含水率进行多年平均,沙坨地冻结深度同时考虑土壤温度和水分的影响时拟合程度较好,200 cm 处的拟合最好,与不同层位比较 F 显著性统计量最小,标准误差也最小,且最大冻结深度与此层的温度和水分呈负相关,随着温度降低,土壤含水率的减小,土壤的最大冻结深度增加;草甸地冻结深度同时考虑土壤温度和水分的影响时 140 cm 处拟合程度较好,土壤水分与土壤温度均与最大冻结深度呈负相关,与沙坨地不同,草甸地全层土壤水分对最大冻结深度的影响基本上较土壤温度要大,草甸地中土壤水分对最大冻结深度起主要作用,与草甸地的地下水埋深较浅有关。

[参 考 文 献]

- [1] 郑秀清,樊贵盛,邢述彦. 水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动[M]. 北京:地质出版社, 2002.
- [2] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 科学出版社, 2001:1-8.
- [3] 王晓巍,付强,丁辉,等. 季节性冻土区水文特性及模型研究进展[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 953-959.
- [4] 杨金凤. 季节性冻融期不同地表条件下土壤水热动态变化规律的试验研究[D]. 山西太原:太原理工大

- 学,2006.
- [5] 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.
- [6] 孙凯.墒情(旱情)监测与预测预报方法研究[D].北京:中国农业大学,2005.
- [7] 胡铭,刘志辉,陈凯,等.雪盖影响下季节性冻土消融期的土壤温度特征分析[J].水土保持研究,2013,20(3):39-43.
- [8] Wildung R E, Garland T R, Buschbom R L. The inter-dependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1975,7(6):373-378.
- [9] Flerchinger G N, Pierson F B. Modeling plant canopy effects on variability of soil temperature and water[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 56(3):227-246.
- [10] 李天霄,付强,孟凡香,等.北方寒区冬季土壤蒸发量主要影响因子评价[J].黑龙江水专学报,2010,37(1):93-96.
- [11] Monica A H, Alison D. The molecular biology of plant acclimation to low temperature[J]. Journal of Experimental Botany, 1996,47(3):291-305.
- [12] 胡钰,香宝,刘玉萍,等.交替冻融对东北地区典型土壤氮磷浓度的影响[J].环境工程技术学报,2012,2(4):333-338.
- [13] 邢述彦.越冬期土壤温度场及其影响因素初探[J].太原理工大学学报,2004,35(2):134-136.
- [14] 王效琴,邢述彦.冬春季耕地与覆膜对地温影响的研究[J].太原理工大学学报,2000,33(6):587-589.
- [15] 付强,王立权,李天霄,等.冻深对北方高寒地区土壤入渗特性的影响研究[J].灌溉排水学报,2013,32(1):10-12.
- [16] 李韧,赵林,丁永建,等.青藏高原总辐射变化对高原季节冻土冻结深度的影响[J].冰川冻土,2009,31(3):422-430.
- [17] 李韧,赵林,丁永建等.青藏高原季节冻土的气候学特征[J].冰川冻土,2009,31(6):1050-1056.
- [18] 杨小利,王劲松.西北地区季节性最大冻土深度的分布和变化特征[J].土壤通报,2008,39(2):238-243.
- [19] 郭慧,李栋梁,张强,等.甘肃河西季节冻结深度年代际变化特征及其气候成因分析[J].冰川冻土,2005,27(4):503-508.
- [20] 王秋香,李红军,魏荣庆,等.1961-2002年新疆季节冻土多年变化及突变分析[J].冰川冻土,2005,27(6):820-826.
- [21] 高春香,苏立娟,宋进化,等.内蒙古东北部冻土分布与地温关系[J].内蒙古气象,2004(1):19-22.
- [22] 高荣,韦志刚,董文杰,等.20世纪后期青藏高原积雪和冻土变化及其与气候变化的关系[J].高原气象,2003,,22(2):191-196.
- [23] 李超,刘建军,程建军,等.季节性冻土地区土壤冻结深度的研究[J].低温建筑技术,2009,31(10):81-83.

(上接第83页)

- [10] Bosabalidis A M, Kofidis G. Comparative effects of drought stress on leaf anatomy of two olive cultivars [J]. Plant Science, 2002, 163(2): 375-379.
- [11] 李芳兰,包维楷,吴宁.白刺花幼苗对不同强度干旱胁迫的形态与生理响应[J].生态学报,2009,29(10):5406-5416.
- [12] 黄彩变,曾凡江,雷加强,等.不同灌溉量对头状沙拐枣幼苗生长和生理特性的影响[J].西北植物学报,2014,34(12):2500-2507.
- [13] 蔡马,韩蕊莲,靳淑静,等.土壤干旱对黄土高原2种半灌木植物生长与耗水规律的影响[J].西北林学院学报,2012,27(6):26-32.
- [14] 崔大练,马玉心.紫穗槐幼苗在不同干旱胁迫下生长特性的研究[J].林业科技,2010,35(3):1-3.
- [15] Petzold R, Kai S, Feger K H. Transpiration of a hybrid poplar plantation in Saxony (Germany) in response to climate and soil conditions [J]. European Journal of Forest Research, 2011, 130(5):695-706.
- [16] Du Sheng, Wang Yilong, Kume Tomonori, et al. Sap-flow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(1):1-10.
- [17] 周自云,梁宗锁,刘启明.不同土壤水分条件对酸枣生物量与耗水特性的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(8):90-96,103.
- [18] 喻晓丽,邸雪颖,宋丽萍.水分胁迫对火炬树幼苗生长和生理特性的影响[J].林业科学,2007,43(11):57-61.
- [19] 安玉艳,梁宗锁,郝文芳.杠柳幼苗对不同强度干旱胁迫的生长与生理响应[J].生态学报,2011,31(3):716-725.
- [20] 答竹君,艾应伟,宋婷,等.道路边坡土壤水分空间和季节变异性分析[J].水土保持通报,2011,31(1):72-75.