

不同水分条件下 3 种灌木幼苗的耗水及生长特征

薛强¹, 赵廷宁¹, 赵平², 杨建英¹, 杨阳¹, 许泽宁³

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

2. 北京东方园林生态股份有限公司, 北京 100012; 3. 安徽省高速公路控股集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: [目的] 研究岳武高速公路填方边坡 3 种绿化灌木幼苗在不同土壤水分条件下的耗水特征及生长表现, 为该地区边坡早期植被恢复和护坡植物维护提供参考。[方法] 选取马棘、二色胡枝子、紫穗槐幼苗为试验材料, 采用盆栽称重法测定其在不同土壤水分处理下〔田间持水量(FC)的 30%~45%, 45%~60%, 60%~75% 和 75%~90%〕的阶段耗水特征及生长变化。[结果] 3 种灌木幼苗的日耗水变化曲线均呈单峰型特征, 峰值出现在中午时分; 月耗水量、总耗水量均随土壤含水量的升高而增大, 且差异显著; 不同水分条件下灌木幼苗的株高、地径、生物量增量差异显著, 马棘长期处于 30%~45% FC、二色胡枝子和紫穗槐长期处于 30%~45% FC、45%~60% FC 水分条件下其幼苗生长受到抑制; 土壤水分含量对灌木幼苗的水分利用效率影响较大, 75%~90% FC 和 30%~45% FC 均会降低幼苗的水分利用效率。[结论] 综合考虑灌木幼苗的耗水量及生长特征, 认为马棘幼苗土壤含水量维持在 45%~60% FC、胡枝子和紫穗槐维持在 60%~75% FC 时能够实现幼苗正常生长, 同时又能实现水分的高效利用。

关键词: 灌木幼苗; 耗水特征; 水分利用效率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0078-06

中图分类号: S732

文献参数: 薛强, 赵廷宁, 赵平, 等. 不同水分条件下 3 种灌木幼苗的耗水及生长特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 078-083. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.014

Water Consumption and Growth Characteristics of Three Shrubs Seedlings Under Different Soil Water Conditions

XUE Qiang¹, ZHAO Tingning¹, ZHAO Ping², YANG Jianying¹, YANG Yang¹, XU Zening³

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University,

Beijing 100083, China; 2. Beijing Orient Landscape Co. Ltd., Beijing 100012,

China; 3. Anhui Province Expressway Holding Group Co., Ltd., Hefei, Anhui 230000, China)

Abstract: [Objective] The water consumption characteristics and growth performances of three shrubs seedlings on the embankment slope of Yuexi-Wuhan highway under different soil water conditions were studied to provide a theoretical basis for the local slope vegetation restoration and plants maintenance of slope protection. [Methods] Three shrubs, *Indigofera pseudotinctoria*, *Lespedeza bicolor* and *Amorpha fruticosa* were cultivated using pot method. Water consumption and seedlings growth of them were measured under four different water treatments [30%~45%, 45%~60%, 60%~75% and 75%~90% of the field water capacity(FC)of pot soil]. [Results] Result indicated that the diurnal variation of water consumption of the three shrub seedlings presented an unimodal shape. The peak values appeared in the noon. The monthly water consumption and total water consumption increased significantly with the increase of soil moisture. There existed significant differences in height, basal diameter and biomass increment for all of the three shrub seedlings among different soil water content. The growth of *Indigofera pseudotinctoria* in long time of 30%~45% FC, and the growths of *Lespedeza bicolor* and *Amorpha fruticosa* in long time of 30%~45% FC and 45%~60% FC, respectively were inhibited. Soil water content had a great influence on the water use effi-

收稿日期: 2016-03-31

修回日期: 2016-05-21

资助项目: 安徽省交通科技项目“高速公路生态型护坡技术应用研究”(AHGS2013-5)

第一作者: 薛强(1990—), 男(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持、工程绿化。E-mail: 734572863@qq.com。

通讯作者: 赵廷宁(1962—), 男(汉族), 河北省阳原县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程绿化和水土保持方面的研究。E-mail: zhtning@bjfu.edu.cn。

ciency of three shrubs seedlings. Soil water conditions of 75%~90% FC and 30%~45% FC reduced the water use efficiency (WUE). [Conclusion] If seedlings water consumption and growth characteristics were both considered, soil moisture of *Indigofera pseudotinctoria* should maintain at 45%~60% FC, *Lespedeza bicolor* and *Amorpha fruticosa* at 60%~75% FC. On these conditions of soil moisture, they can grow at normal rate with relative efficient uses of water.

Keywords: shrubs seedlings; water consumption characteristics; water use efficiency

近年来,高速公路建设突飞猛进,极大促进了沿线地区的经济发展。截至2014年年底,中国高速公路总里程已达 1.11×10^5 km,高居世界第1位^[1]。高速公路在建设过程中势必会形成大量新的裸露坡面,加剧了水土流失,引发严重的生态问题^[2]。随着社会环保意识的增强和国外先进边坡绿化技术的引进,人们逐渐发现高速公路边坡绿化可以很大程度地解决这一问题^[3]。目前,中国高速公路生态护坡技术主要采用客土喷播植草技术、挂网喷播植草技术、框格梁植生袋护坡技术、拱形梁植草护坡技术、植被毯植草护坡技术、生态袋植草护坡技术^[4],并在不同类型的边坡中得到应用^[5-6]。高速公路边坡绿化作为公路建设的重要组成部分,不仅具有美化环境的功能,而且可以起到固土护坡的作用^[7]。岳武高速公路地处大别山腹地,沿线以山地、丘陵为主,地形起伏较大,大量挖方、填方形成大面积的裸露边坡。其中填方边坡为土质边坡,主要采用植物纤维毯生态型护坡技术进行防护。绿化植物以马棘(*Indigofera pseudotinctoria*)、二色胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)为主。由于边坡土壤质地疏松,结构性差,有机质含量低,边坡蓄水难,失水快,加之路基抬高影响地下水位上升,使得边坡土壤十分容易干旱。为保证填方边坡绿化后植被能够迅速郁闭,以降低水土流失危害,边坡在植被建植初期需要进行浇水、覆盖等特殊养护。但由于高速公路边坡灌溉条件复杂,取水及运输受到高速公路环境自身条件等的限制,如何在植被生长初期既保证幼苗快速生长又达到水分高效利用成为需要解决的问题。有鉴于此,本研究以岳武高速公路填方边坡绿化3种灌木幼苗为材料,在盆栽条件下进行土壤水分控制试验,研究其在不同土壤水分条件下的耗水特征及生长表现,旨在为该填方边坡早期植被恢复及适宜土壤水分含量的确定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于安徽省安庆市岳西县莲云乡境内,地理坐标为 $30^{\circ}52'43''\text{N}$, $116^{\circ}17'21''\text{E}$,海拔高度374 m。该区地处皖西大别山腹地,皖西南边陲,属北亚热带湿润性季风气候,雨热同期,四季分明。年平均气温

14.4℃,7月(最高月)平均气温26.3℃,1月(最低月)平均气温2.0℃,大于10℃年积温为4700℃。年平均日照总时数2070.5 h,年辐射总量为4600 MJ/(m²·a),多年平均水面蒸发量为1343 mm。年平均无霜期213 d,多年平均降雨量1445.8 mm,年际间降水和年内降水季节分布不均衡,降雨多集中在5—9月,占全年降雨总量的75%左右。年平均相对湿度78%。盆栽所用土壤来源于岳武高速公路岳西互通区附近填方边坡,土壤类型属于砂质土,田间持水量为17.62%,土壤容重为1.54 g/m³,土壤有机质含量10.3 g/kg,全氮0.52 mg/kg、速效磷4.56 mg/kg、速效钾47.84 mg/kg,土壤粒径组成为: $d > 2$ mm占44.8%, $2 > d > 1$ mm占26.3%, $1 > d > 0.05$ mm占16.6%, $0.05 > d > 0.01$ mm占3.7%, $d < 0.01$ mm占8.6%。

1.2 试验材料与设计

试验选用马棘、二色胡枝子、紫穗槐3种岳武高速公路边坡主要绿化灌木幼苗为试验材料。于2014年4月3日将大小相近、饱满的种子播种于花盆内(内径26.0 cm,深30.0 cm),每盆播8粒,盆与土共计10 kg。待出苗后对长势不好的幼苗进行逐步淘汰,最终每盆保留大小一致、生长良好的幼苗4株,之后进行常规管理,确保苗木健康生长。

控水试验从2014年5月1日开始,此时马棘平均株高10.70 cm,平均地径1.13 mm,胡枝子平均株高10.02 cm,平均地径1.13 mm,紫穗槐平均株高11.19 cm、平均地径1.26 mm。采用完全随机区组设计,设定4个水分处理,分别为田间持水量(FC)的30%~45%(严重缺水)、45%~60%(中度缺水)、60%~75%(轻度缺水)和75%~90%(水分充足),分别用 W_1 , W_2 , W_3 和 W_4 表示。每个处理水平设置4个重复。花盆用塑料薄膜覆盖来排除土壤蒸发。试验在岳武高速监理办大院内进行,降雨时用可移动遮雨棚进行遮雨,无雨时露天放置。采用称重法控制土壤含水量。将花盆浇透水后待水分消耗至设计范围内,用电子天平(TC-30KH,最大测量量程30 kg,精确度1 g)称出其总重量作为初始重量。整个试验期每隔1周采用土壤水分速测仪校正因幼苗生长增加重量对补水量的影响,确保各花盆的土壤含水量保持在设计范围内。试验期为2014年5—10月。

1.3 测定内容与方法

(1) 耗水量测定利用盆栽称重法。每 2~3 d(根据天气变化进行调整,晴天 2 d 测 1 次,雨天 3 d 测 1 次)定时(18:00)对花盆称重,称重后通过埋在花盆内的塑料管补水至原重量,记录花盆质量与补水量,以盆重减少量作为其耗水量。月耗水量以当月每 2~3 d 累积补水量的总和计算;总耗水量以整个试验期补水量的总和计算;耗水日进程分别选取 2014 年 5、8 和 10 月具有代表性的 1 d 进行测定,从 7:00—19:00,每隔 2 h 称花盆质量 1 次,以花盆质量减少量作为该树种在该时间段内的耗水量。

(2) 生长指标测定试验处理前对所有待测花盆进行标记,同时随机选择每种灌木幼苗各 2 盆,测定其株高、地径,取平均值;将整个幼苗从盆中取出后小心清洗干净,烘干称重,取其平均值作为试验处理前干物质量。之后每隔 30 d 对株高和地径测定 1 次。株高用刻度尺(mm)测量,地径用游标卡尺测量。试验结束后分别选取不同灌木不同水分处理具有代表性的植株 5 株进行干物质量测定。

株高增长量=试验结束后株高-试验处理前株高

地径增长量=试验结束后地径-试验处理前地径

生物量增量=试验结束后干物质量-试验处理前干物质量

水分利用效率(WUE)=生物量增量/总耗水量。

1.4 数据处理

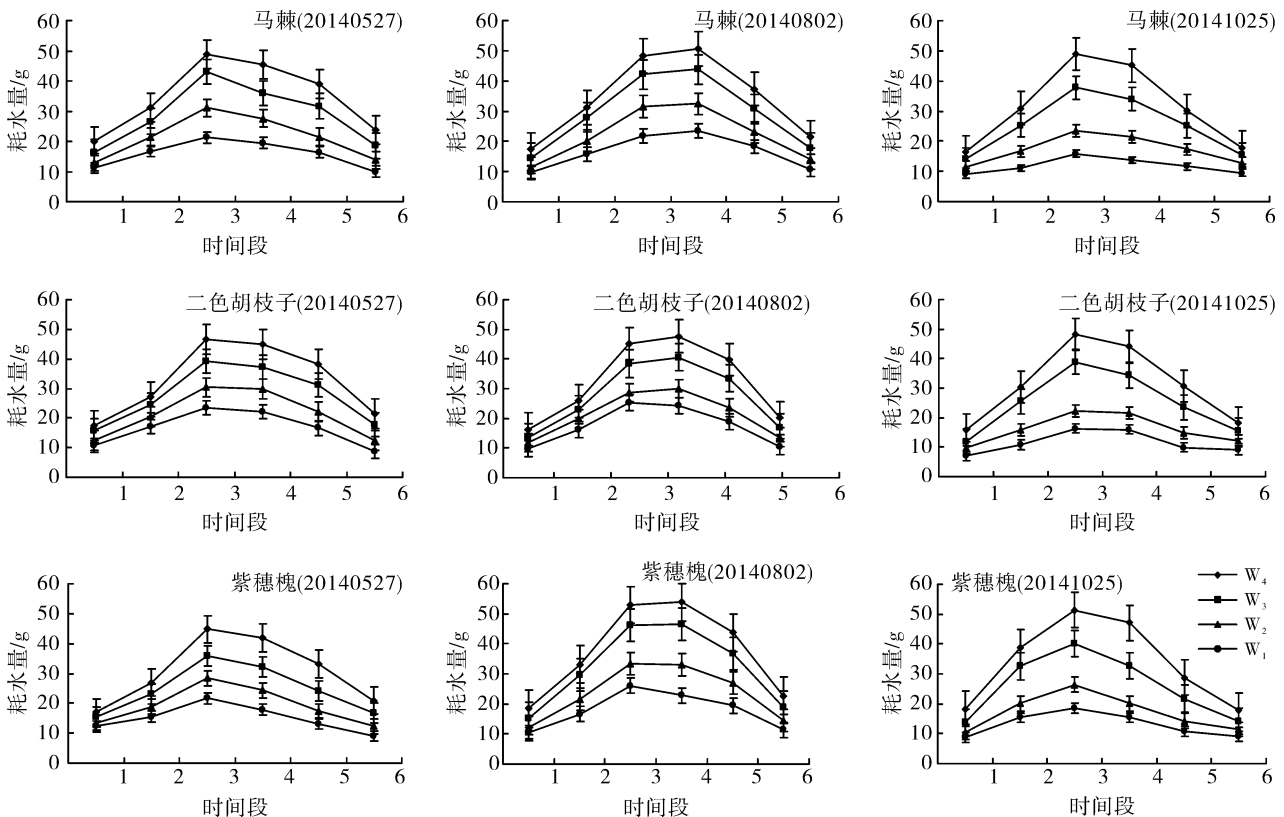
利用 Excel 进行数据整理及图表制作;利用 SPSS 19.0 软件对数据进行方差分析,采用 Duncan 法进行多重比较,并用字母法标记。

2 结果与分析

2.1 不同土壤水分条件下 3 种灌木幼苗耗水日变化

从图 1 中可以看出,3 种灌木幼苗在 4 种土壤水分条件下的耗水日变化曲线变化趋势基本一致,均呈单峰型特征,但在不同测定日和不同土壤水分条件下各自变化规律不同。

在 5 月 27 日的峰值均出现在 11:00—13:00 期间,之后缓慢下降;8 月 2 日的耗水高峰出现在 11:00—15:00 期间,高耗水时段较长,这与当地此时段太阳辐射较强、温度较高有关;10 月 25 日的峰值同样出现在 11:00—13:00 期间,之后耗水量随太阳辐射强度减弱、温度降低而快速减小。从不同土壤含水量处理对植物耗水量的影响来看,3 种灌木幼苗的日耗水量均随土壤含水量的升高而增大,大小顺序依次表现为: $W_4 > W_3 > W_2 > W_1$ 。



注:各分图横坐标值中时间段 1 表示 7:00—9:00;2 表示 9:00—11:00;3 表示 11:00—13:00;4 表示 13:00—15:00;5 表示 15:00—17:00;6 表示 17:00—19:00。

图 1 试验地不同土壤水分条件下 3 种灌木的日耗水变化

2.2 不同土壤水分条件下 3 种灌木幼苗月耗水量变化

从表 1 可以看出,3 种灌木幼苗在 4 种土壤水分条件下的月耗水量呈现出明显的变化特征,总的变化趋势是先上升后下降。从 5 月控水试验开始,耗水量快速增大,7 月有所下降,这可能与该地区 7 月上旬出现的连续阴雨天气(梅雨季节)有关,月耗水量在 8 月达到峰值,8 月植物处于快速生长阶段,加之太阳辐射较强,温度较高,导致耗水量达到最大值,之后逐

月降低,到 10 月降到最低。

从水分处理水平对各月耗水量的影响来看,各处理之间的耗水量在同一月份存在明显差异,表现为土壤含水量越高,耗水量越大,这说明在相同环境条件下,土壤水分是影响苗木耗水的关键因子之一。方差分析表明,马棘在整个试验期 W_4 和 W_3 的耗水量显著大于其他条件;二色胡枝子和紫穗槐在 W_4 条件下显著大于其他条件。从植物耗水量角度考虑,选择水分较低的处理植物耗水量较低,节水效果明显。

表 1 不同土壤含水量条件下 3 种灌木幼苗月耗水量变化

灌木名称	处理	月耗水量/kg					
		5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
马棘	W_4	1.55±0.14 ^a	2.01±0.17 ^a	1.81±0.16 ^a	2.12±0.18 ^a	2.01±0.15 ^a	1.51±0.14 ^a
	W_3	1.24±0.11 ^b	1.75±0.10 ^b	1.54±0.13 ^b	1.82±0.15 ^b	1.79±0.12 ^b	1.30±0.15 ^b
	W_2	0.66±0.08 ^c	0.99±0.09 ^c	0.87±0.09 ^c	1.01±0.11 ^c	0.98±0.11 ^c	0.73±0.10 ^c
	W_1	0.58±0.07 ^c	0.69±0.07 ^d	0.68±0.05 ^d	0.73±0.10 ^d	0.70±0.05 ^d	0.59±0.06 ^c
二色胡枝子	W_4	1.50±0.19 ^a	1.64±0.13 ^a	1.24±0.11 ^a	1.76±0.16 ^a	1.60±0.11 ^a	11.33±0.10 ^a
	W_3	1.08±0.12 ^b	1.25±0.11 ^b	1.09±0.08 ^b	1.31±0.13 ^b	1.22±0.12 ^b	0.91±0.11 ^b
	W_2	0.95±0.08 ^b	1.04±0.09 ^c	0.94±0.08 ^b	1.13±0.09 ^c	1.03±0.08 ^c	0.77±0.08 ^b
	W_1	0.63±0.06 ^c	0.69±0.07 ^d	0.58±0.06 ^c	0.73±0.08 ^d	0.62±0.09 ^d	0.53±0.07 ^c
紫穗槐	W_4	1.51±0.17 ^a	1.80±0.17 ^a	1.70±0.15 ^a	1.84±0.15 ^a	1.74±0.12 ^a	1.38±0.08 ^a
	W_3	1.01±0.09 ^b	1.26±0.13 ^b	1.12±0.12 ^b	1.38±0.12 ^b	1.28±0.10 ^b	1.00±0.09 ^b
	W_2	0.92±0.09 ^b	1.04±0.09 ^c	0.94±0.11 ^b	1.12±0.10 ^c	1.04±0.09 ^c	0.76±0.06 ^b
	W_1	0.63±0.07 ^c	0.65±0.06 ^d	0.62±0.08 ^c	0.73±0.08 ^d	0.69±0.05 ^d	0.54±0.04 ^c

注:同一列中同种植物不同字母表示相同月份不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.3 不同土壤含水量对 3 种灌木幼苗生长的影响

2.3.1 株高和地径 株高和地径是描述植物生长最基础的形态指标。由图 2 可以看出,截止试验结束时,3 种灌木幼苗在不同水分条件下株高和地径生长均出现明显的差异,表现为高水处理显著优于低水处理。方差分析表明,控水试验 2 个月后,马棘株高 W_4 与 W_3 , W_2 差异显著, W_3 , W_2 与 W_1 处理差异显著,而 W_3 与 W_2 处理之间差异不显著;其地径 W_4 , W_3 , W_2 大于 W_1 处理,且差异显著,而 W_4 , W_3 , W_2 处理之间差异不显著;马棘在 W_4 , W_3 , W_2 条件下长势较好,而在 W_1 条件下株高和地径生长缓慢,这表明在长期 W_1 条件下其生长受到了明显抑制。二色胡枝子和紫穗槐株高 W_4 , W_3 处理高于 W_2 , W_1 处理,且差异显著,而 W_2 与 W_1 处理之间除了 10 月差异显著外,其他月份都没有达到显著水平;其地径 W_4 , W_3 处理同样大于 W_2 , W_1 处理,且差异显著,而 W_4 和 W_3 处理之间差异不显著;从图 2 中可以看出,二色胡枝子和紫穗槐在 W_4 和 W_3 条件下长势较好,而在 W_1 和 W_2 条件下株高和地径生长缓慢,株高和地径生长均受到不同程度的抑制。试验结束时,分别计算 3 种灌木幼

苗株高和地径增长量,同样验证马棘在 W_1 条件下、二色胡枝子和紫穗槐在 W_1 , W_2 条件下生长受到抑制的结论(表 2)。

2.3.2 生物量增量和水分利用效率 同一树种在不同土壤水分条件下总耗水量差异显著,大小顺序表现为: $W_4 > W_3 > W_2 > W_1$ 。马棘在 W_4 条件下的总耗水量分别是 W_3 , W_2 和 W_1 条件下的 1.21, 2.18 和 2.88 倍,二色胡枝子在 W_4 条件下分别是 W_3 , W_2 和 W_1 的 1.32, 1.54 和 2.39 倍,紫穗槐在 W_4 条件下分别是 W_3 , W_2 和 W_1 的 1.40, 1.71 和 2.59 倍。3 种灌木幼苗的生物量增量同样表现为随土壤含水量的升高而增大。马棘生物量增量在 W_4 条件下最大, W_3 和 W_2 次之且差异不显著, W_1 最小;二色胡枝子和紫穗槐在 W_4 和 W_3 条件下的生物量增量大于 W_1 和 W_2 , 且差异显著,而 W_4 与 W_3 , W_2 与 W_1 之间差异不显著。用生物量增量与总耗水量分别计算 3 种灌木幼苗在 4 种土壤含水量条件下的水分利用效率 WUE, 由表 2 可知,马棘在 W_2 处理下的 WUE 显著大于其他处理, W_3 次之, W_4 和 W_1 最小;而二色胡枝子和紫穗槐 W_3 处理显著大于其他处理, W_4 和 W_1 次之, W_2 最小。

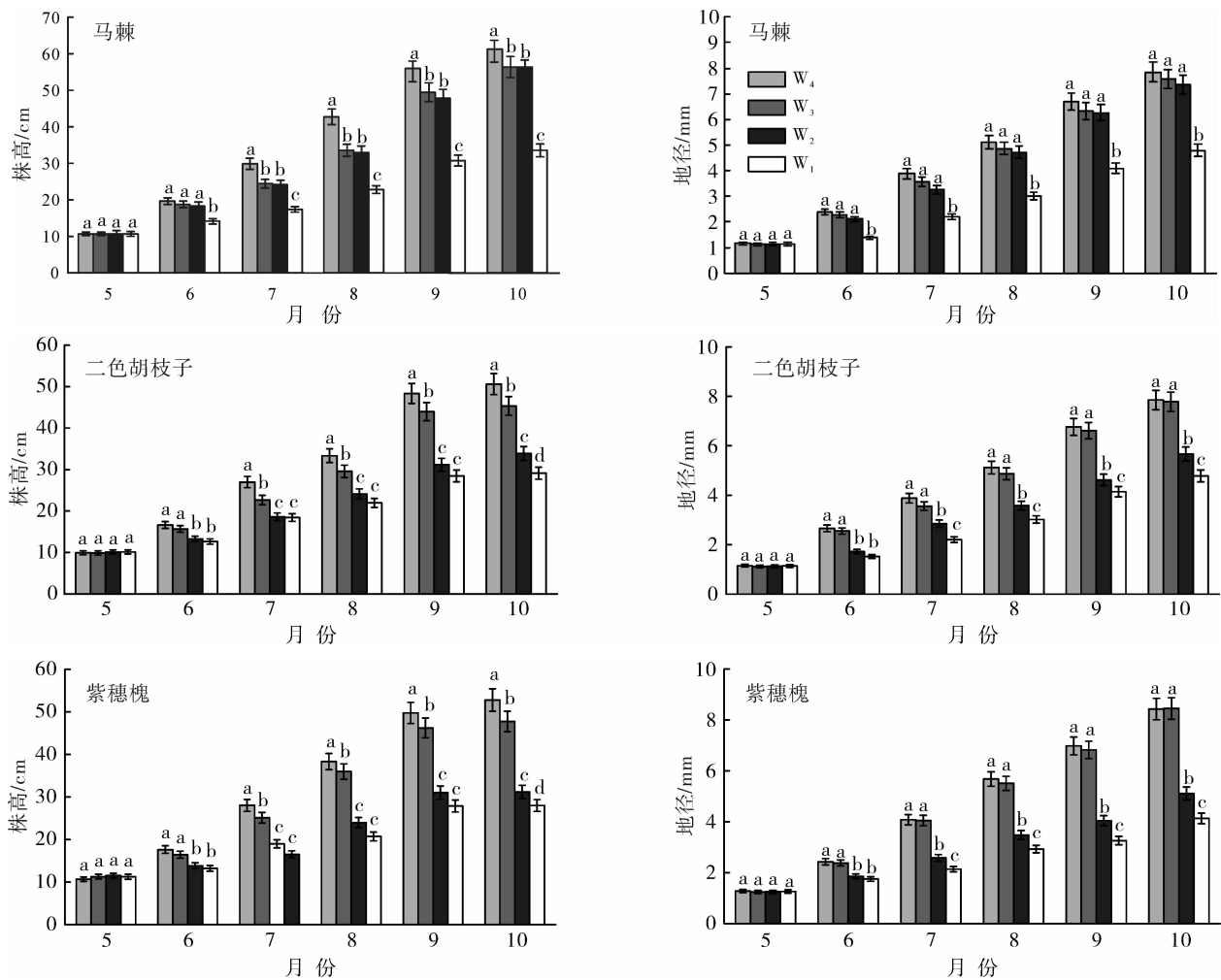


图 2 不同土壤含水量条件下 3 种灌木幼苗株高、地径生长变化

表 2 灌木幼苗株高增长量、地径增长量、生物量增量、总耗水量、水分利用效率变化

灌木名称	处理	株高增长量/cm	地径增长量/mm	生物量增量/g	总耗水量/kg	水分利用效率/(g·kg ⁻¹)
马棘	W ₄	50.42±1.52 ^a	6.70±0.63 ^a	16.44±1.08 ^a	11.44±1.04 ^a	1.49±0.097 ^c
	W ₃	45.65±1.02 ^b	6.66±0.61 ^a	14.83±0.96 ^b	9.54±0.75 ^b	1.55±0.075 ^b
	W ₂	44.77±0.25 ^b	6.54±0.58 ^a	14.59±1.03 ^b	5.24±0.90 ^c	2.78±0.114 ^a
	W ₁	22.96±0.20 ^c	3.65±0.47 ^b	5.74±0.83 ^c	3.97±0.05 ^d	1.44±0.083 ^c
二色胡枝子	W ₄	40.67±1.01 ^a	6.69±0.68 ^a	14.58±0.93 ^a	9.06±1.02 ^a	1.72±0.084 ^b
	W ₃	35.48±1.00 ^b	6.66±0.64 ^a	14.39±0.87 ^a	6.86±0.92 ^b	2.10±0.103 ^a
	W ₂	23.73±0.43 ^c	4.55±0.55 ^b	9.48±0.68 ^b	5.87±0.86 ^c	1.41±0.079 ^c
	W ₁	18.99±0.41 ^d	3.65±0.41 ^c	6.05±0.43 ^b	3.79±0.91 ^d	1.60±0.085 ^b
紫穗槐	W ₄	42.09±1.32 ^a	7.15±0.72 ^a	15.55±1.14 ^a	9.97±1.24 ^a	1.56±0.145 ^b
	W ₃	36.45±1.22 ^b	7.21±0.78 ^a	14.91±1.08 ^a	7.13±0.86 ^b	2.09±0.086 ^a
	W ₂	19.66±0.98 ^c	3.86±0.42 ^b	7.45±0.58 ^b	5.73±0.91 ^c	1.30±0.079 ^c
	W ₁	16.73±0.75 ^d	2.87±0.35 ^c	5.60±0.46 ^b	3.85±0.77 ^d	1.45±0.085 ^b

3 讨论与结论

水分是植物生长的条件和基础,而土壤含水量是影响植物耗水量最直接的因素^[8]。有研究表明^[9],苗木耗水量随干旱程度的增加而减少,在受到严重干旱

胁迫时,灌木树种的耗水量降至正常水分条件下的 16.9%。本试验中,3 种灌木幼苗的耗水量同样明显受土壤水分的影响,月耗水量及总耗水量均表现为:水分充足>轻度缺水>中度缺水>严重缺水,且不同处理间差异较大。试验期间,3 种灌木幼苗的耗水量

高峰出现在 6—9 月,该阶段也是灌木幼苗快速生长阶段。在岳西地区,降雨主要集中在 5—9 月,基本能够满足 3 种护坡灌木幼苗快速生长所需水分。

植物的生长不仅与其遗传特性有关,而且还受外界环境因子的影响,过低的土壤水分会对植物的生长状况、形态结构及生理生态过程产生显著影响^[10-11]。水分胁迫会对植物光合器官生长产生抑制,致使光合面积减少,光合产物总量也随之降低,从而使植物生长受到限制^[12]。研究表明^[13],土壤干旱会对二色胡枝子光合色素的合成与分解、色素的种类及变化造成影响,进而影响光合作用,最终影响植物的生长;紫穗槐为适应干旱环境,在外部形态上主要通过降低株高、减小地径、减少复叶上的小叶数量、缩小小叶面积等方式,以利于在逆境下保存水分,增强抗旱能力,提高其生存能力^[14]。本试验研究发现,不同土壤水分条件下马棘、二色胡枝子、紫穗槐幼苗的形态指标差异明显,表现为高水处理显著优于低水分梯度。3 种灌木幼苗在较高水分条件下株高和地径均生长良好,试验 2 个月后,灌木幼苗生长差距拉开,马棘在 30%~45%FC 条件下、二色胡枝子和紫穗槐在 30%~45%FC 和 45%~60%FC 条件下生长受到不同程度的抑制。除土壤水分条件外,植物耗水量还受气象条件影响^[15-16],在太阳辐射强、气温高的条件下,其耗水量会显著增加,所以在对边坡进行灌溉时,一般选择早晨或晚上进行,以利于水分能够被植被高效利用。

长期水分胁迫会抑制植物生物量的积累,但适度水分胁迫会提高植物水分利用效率。研究表明,3 种水分处理下酸枣生物量表现为:适宜水分(田间持水量的 75%)>中度胁迫(田间持水量的 55%)>重度胁迫(田间持水量的 35%),干旱胁迫造成酸枣过早停止生长,导致植株矮小^[17];火炬树幼苗在受到中度胁迫(田间最大持水量的 25%~30%)和重度胁迫(田间最大持水量的 15%~20%)时,其总生物量的积累受到抑制^[18];3 种土壤水分条件下(田间持水量的 75%,55%和 40%)杠柳水分利用效率随着水分供应的减少表现出逐渐升高的变化趋势^[19]。本试验中,3 种灌木幼苗的生物量增量均随土壤含水量的升高而增大,马棘在 30%~45%FC 条件下、二色胡枝子和紫穗槐在 30%~45%FC,45%~60%FC 条件下的生物量增量显著小于其它条件,生长受到抑制。不同土壤水分条件下植物总耗水量间差异显著,马棘在 60%~75%FC 和 75%~90%FC 条件下、二色胡枝子和紫穗槐在 75%~90%FC 条件下总耗水量显著大于其他条件。进一步计算水分利用效率(WUE)

发现,随着土壤含水量的降低,3 种灌木幼苗水分利用效率呈现先升高后降低的规律,表明马棘、二色胡枝子、紫穗槐幼苗在适度水分胁迫下有利于提高水分利用效率。其中,马棘在 45%~60%FC 处理下的水分利用效率最高,且显著高于其他处理;而二色胡枝子和紫穗槐在 60%~75%FC 处理下最高,且显著高于其它处理。

综上所述,综合考虑 3 种灌木幼苗的耗水量及生长表现,认为马棘幼苗土壤含水量维持在 45%~60%FC、二色胡枝子和紫穗槐维持在 60%~75%FC 时耗水量较低,同时幼苗长势良好,能够对边坡起到很好的防护作用,实现水资源的高效利用。通常情况下,道路边坡坡下土壤含水量高于坡上和坡中^[20],在高速公路植物护坡应用时,建议将二色胡枝子和紫穗槐配置在水分条件相对较好的坡下部位,而将马棘配置在水分条件相对较差的坡上、坡中部位。在公路边坡植物苗期进行浇水养护时,建议优先采用滴灌方式进行浇水,当采用水车浇水时应使用高压喷雾器使养护水成雾状均匀地湿润坡面,同时注意控制好喷头与坡面的距离、出水量和移动速度,避免形成地表径流、造成基质冲刷。在浇水时间上通常选择早晨、晚上,避免中午高温时分浇水增大蒸发量,同时避免灼伤植被叶片。

[参 考 文 献]

- [1] 交通运输部. 2014 年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京:交通运输部,2014.
- [2] 刘春霞,韩烈保. 高速公路边坡植被恢复研究进展[J]. 生态学报,2007,27(5):2090-2098.
- [3] 郭小平,朱金兆,周心澄,等. 植被护坡技术及其应用[J]. 中国水土保持科学,2004,2(4):112-116.
- [4] 赵方莹,赵廷宁. 边坡绿化与生态防护技术[M]. 北京:中国林业出版社,2009:58.
- [5] 杨阳,杨建英,赵平,等. 两种框格梁生态护坡技术及其应用效果:以安徽岳武高速公路为例[J]. 中国水土保持科学,2015,13(5):118-124.
- [6] 耿志军,王永平. 挂网客土喷播在山区旅游公路边坡绿化中的应用[J]. 公路交通科技:应用技术版,2010(10):402-404.
- [7] 廖乾旭,李阿根,徐礼根,等. 高速公路边坡生态恢复的问题与对策[J]. 中国水土保持科学,2006,12(4):100-102.
- [8] 程福厚,赵岩丽,张纪英,等. 盆栽梨树的耗水规律[J]. 中国农学通报,2011,27(6):45-49.
- [9] 李吉跃,周平,招礼军. 干旱胁迫对苗木蒸腾耗水的影响[J]. 生态学报,2002,22(9):1380-1386.

(下转第 91 页)

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°33′00″—122°41′00″E, 43°18′48″—43°21′24″N, 面积约为 55 km²,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℃,极端最高气温 33.48℃,极端最低

气温 -27.64℃,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 A₁, A₃, B₂, E₁, F₁ 和 F₃,草甸地试验点分别为 C₂ 草甸、C₂ 玉米、C₃, D₁, E₂, 和 E₃,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 A₁, D₁, E₁ 和 F₁,中线为 B₂, C₂ 玉米、C₂ 草甸和 E₂,东线为 A₃, C₃, E₃ 和 F₃,其中重点试验点 A₃, C₃ 在 2007 年安装了土壤气象自动监测系统,且 A₃ 为沙坨地 C₃ 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 A₃ 点与 C₃ 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 A₃, C₃ 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 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 cm 每隔 10 cm 测一次,草甸地中 100—160 cm 每隔 20 cm 测量一次,沙坨地为 100—280 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 cm 每隔 10 cm 观测一次,沙坨地 10—280 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。

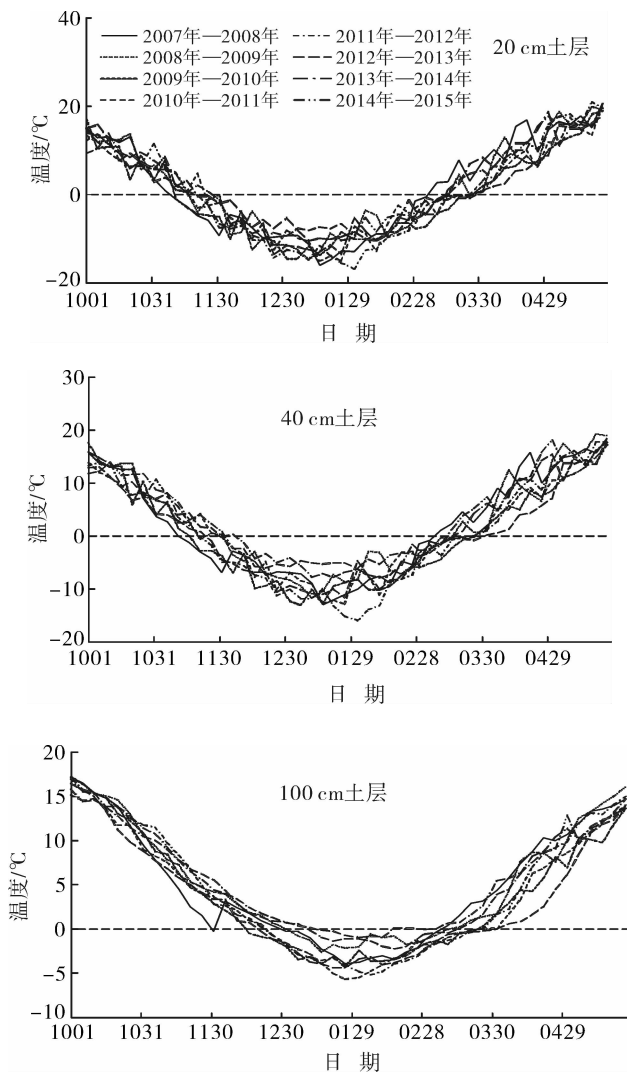


图 1 沙坨地 20,40 和 100 cm 处不同年份冻融期间的土壤温度变化曲线

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。

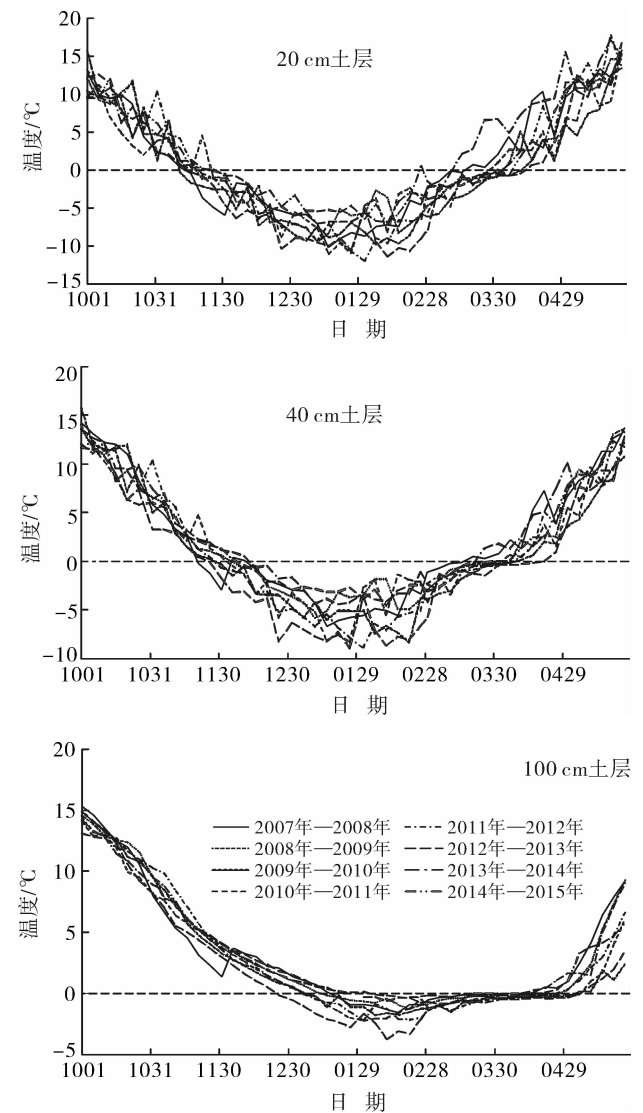


图 2 草甸地 20,40 和 100 cm 处不同年份冻融期间的土壤温度变化曲线

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。

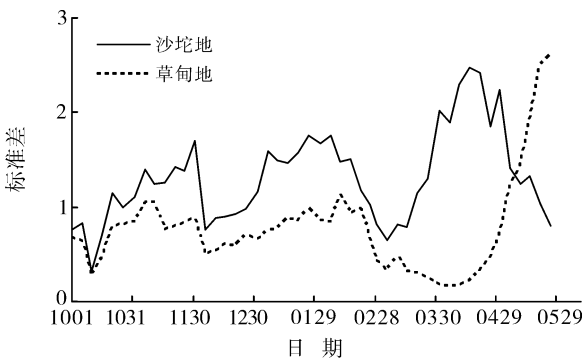


图 3 沙坨地与草甸地 2007—2015 年度冻融期间 100 cm 处土壤温度标准差

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。

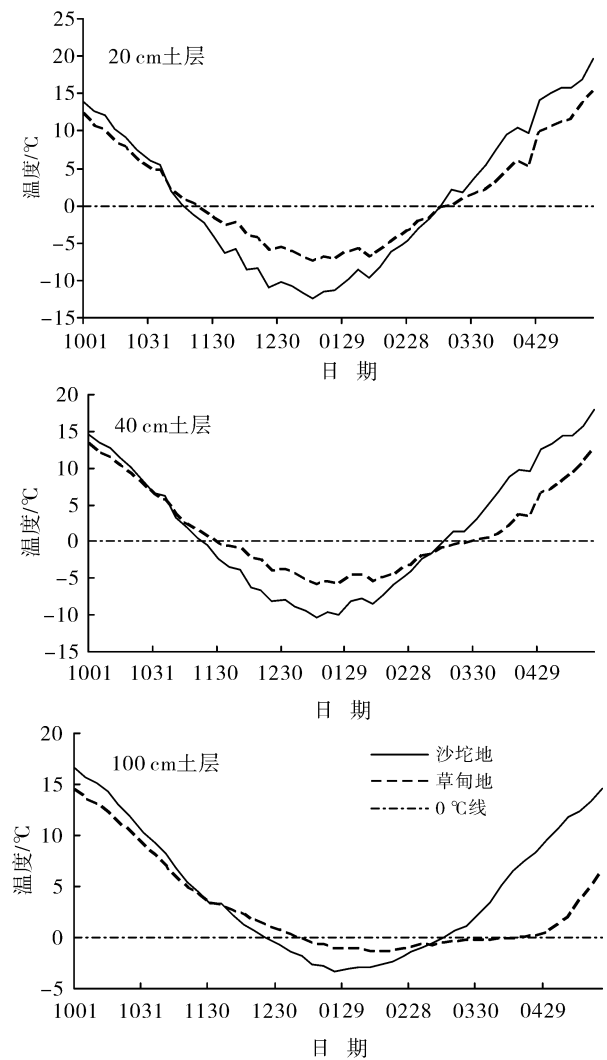


图 4 沙坨地与草甸地各土层多年土壤平均温度

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。

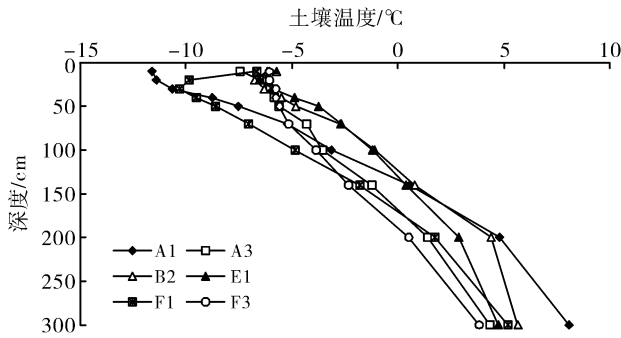


图 5 沙坨地试验点各层土壤多年平均温度和含水率变化

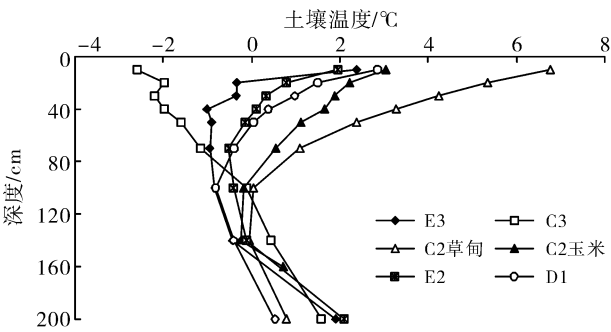
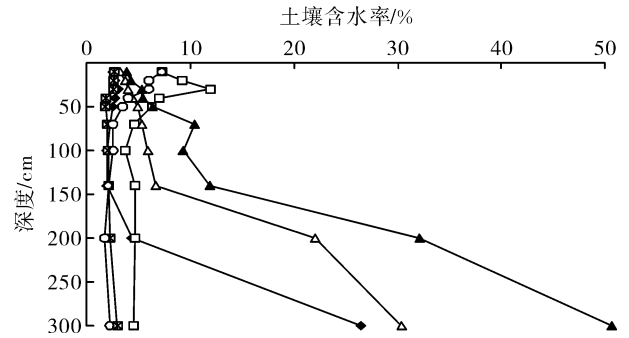
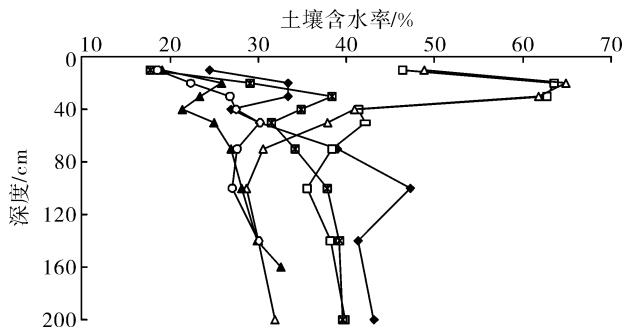


图 6 草甸地试验点各层土壤多年平均温度和含水率变化



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.