

毛乌素沙地樟子松固沙林土壤水分对降雨的动态响应

冯伟¹, 李卫², 杨文斌², 吴丽丽²

(1. 锡林郭勒职业学院, 内蒙古 锡林浩特 026000; 2. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要:为分析半干旱区毛乌素沙地樟子松固沙林土壤水分对降雨的动态响应特征,采用 AV-3665R 雨量计、ECH₂O-5 土壤水分传感器、深层渗漏水量测试仪自动监测樟子松固沙林 2013—2014 年降雨、0—200 cm 土壤含水量、200 cm 以下渗漏量。结果表明:樟子松固沙林 5—10 月累积降雨均显著($p < 0.01$)影响 0—200 cm 层土壤水分变化,其中 5—6 月降雨对 150 cm 以下土层影响较小、9 月后降雨对土壤水分补给作用显著;小于 45.2 mm 降雨对 150 cm 以下土层无直接补给作用;大于 53.8 mm 降雨对 200 cm 层土壤水分有补给作用,且表层初始含水量较高时,降雨入渗快、历时时间短、补给作用大。降雨量、土壤表层初始含水量对降雨后樟子松固沙林土壤水分入渗过程及特征有显著影响。

关键词:毛乌素沙地; 樟子松固沙林; 土壤体积含水量; 降雨入渗; 动态响应

中图分类号:S152.7;S727.23

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)03-0101-07

Dynamic Response of Soil Moisture to Rainfall in the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Sand Fixation Forest of Mu Us Sandy Land

FENG Wei¹, LI Wei², YANG Wenbin², WU Lili²

(1. Xilingol Vocational College, Xilinhot, Inner Mongolia 026000, China;

2. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: To investigate dynamic response of soil water content to rainfall in the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand fixation forest of Mu Us sandy land in the semi-arid area. AV-3665R-type rain sensor, ECH₂O-5 soil moisture sensor and logger of deep soil water leakage were used to monitor rainfall, soil water in 0—200 cm layer and leakage below 200 cm depth from May to October in 2013, 2014. The results showed that cumulative rainfall significantly ($p < 0.01$) affected soil moisture in 0—200 cm layer, the rainfall in May and June had little effect on the soil layer below 150 cm depth and the effect of rainfall after September on soil water supply was significant; less than 45.2 mm rainfall had no direct recharge to the soil layer below 150 cm depth, more than 53.8 mm rainfall had a recharge effect on the soil moisture of the 200 cm layer, and when the initial surface water content was high, the rainfall infiltration was fast, the duration time was short, and the recharge effect was significant. Soil water infiltration process and characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand fixation forest were significantly affected by rainfall and initial surface soil water content.

Keywords: Mu Us sandy land; *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand fixation forest; soil volumetric water content; rainfall infiltration; dynamic response

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是我国北方重要的固沙造林树种之一,也是“三北”防护林工程重点树种。自 1962 年在辽宁省章古台科尔沁沙地引种固沙造林成功后,已有近 60 a 的历史^[1],自 20 世纪 80 年代以来,章古台沙区樟子松固沙林出现了

大面积衰退或死亡现象^[2],其中非常重要的原因之一就是土壤水分失衡^[3-5]。20 世纪 70 年代初,内蒙古鄂尔多斯毛乌素沙地引种樟子松固沙造林成功^[6],已有近 50 a 的历史,近年生长良好,还未见大面积衰退或死亡的报道,仅部分地区出现了生长缓慢现象^[7];

收稿日期:2018-07-25

修回日期:2018-08-16

资助项目:国家自然科学基金“半干旱区沙地水分深层渗漏及动态模拟”(41771306)

第一作者:冯伟(1983—),男,内蒙古呼伦贝尔人,博士,助理研究员/讲师,主要从事生态学、荒漠化防治及水土保持方面的研究工作。E-mail:fw350@163.com

通信作者:杨文斌(1959—),男,内蒙古呼和浩特人,博士,研究员,主要从事干旱区林业、荒漠化防治及沙区生态水文过程研究。E-mail:nmlkyywb@163.com

目前,其研究主要集中在造林技术^[8]、造林效果^[9]、生长特性^[7,10]、水分生理^[11]、光合生理^[12]、蒸腾耗水^[13]、土壤理化性质^[14-15]、碳储量^[16]等方面,而有关土壤水分的研究还缺乏系统连续的观测,在分析樟子松固沙林雨养条件下的持续稳定性方面也缺少连续的土壤水分数据支撑。同时,毛乌素沙地樟子松固沙林在“三北”防护林体系中作用重大,章古台沙区的樟子松固沙林衰退原因也将会成为毛乌素沙地的研究重点之一。因此,本文以毛乌素沙地樟子松固沙林为研究对象,采用自动监测系统连续监测降雨、0—200 cm 土壤含水量、200 cm 以下渗漏量,系统分析樟子松固沙林土壤水分对降雨的响应特征及水量平衡初步估算,为毛乌素沙地水量平衡、土壤水承载力、植被稳定性及水循环过程机理分析提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区伊金霍洛旗查干淖尔嘎查(39°05'N,109°36'E)。伊金霍洛旗位于北纬 38°56'—39°49',东经 108°58'—110°25',处于鄂尔多斯东南部、毛乌素沙地东北缘,境内海拔 1 070~1 556 m,丘间地地下水埋深 5.3~6.8 m。属中温带典型大陆性季风气候,年平均风速 3.6 m/s,平均日照时数 2 900 h,平均相对湿度 52%,平均降水 358.2 mm,平均潜在蒸发量 2 563 mm,为降水的 7.2 倍。年平均气温 6.2℃,无霜期 127~136 d。土壤类型以风沙土为主。沙生植被、草甸植被等隐域性植被为主体,多年生草本占绝对优势,半灌木和小灌木分布较广,灌木和乔木种类不多。主要固沙植被油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙柳(*Salix psammophila*)、樟子松、花棒(*Hedysarum scoparium*)等。

1.2 研究方法

2012 年 9 月采用定点监测的方法,在研究区选择 28 a 生樟子松固沙林(带距 9 m,冠幅 280 cm×240 cm,株高 6 m;零星分布油蒿、草本等;少量物理结皮;0—200 cm 平均土壤容重 1.53 g/cm³,粒径:0.1~0.5 mm 占 86.39%、<0.1 mm 占 13.60%),在固沙林中部挖取 320 cm 深土壤剖面,从下到上依次将土壤深层渗漏水量测试仪(ywb-001)排水部(15 cm)、计量部(35 cm)、集流部(5 cm,砾石、陶粒填充)、毛管持水部(65 cm,原状土填充)紧靠完整剖面一侧嵌入,此时毛管持水部上沿在土壤 200 cm 深度,计量部将记录渗漏到 200 cm 以下的水量^[17];同时在渗漏水量测试仪右侧 40 cm 处的剖面按 10 cm,30 cm,60 cm,90 cm,150 cm,200 cm 安装 ECH₂O-5

(±2%)土壤水分传感器测定土壤体积含水量;原状土回填,浇水踏实;地上部安装 AVALON 公司 AV-3665R 型雨量传感器;采用美国产 CR200X 数采器记录降雨量、土壤含水量、渗漏量数据,其中土壤含水量为每 1 h 记录一次,降雨量、渗漏量每 0.5 h 记录一次。因探头位置为 10 cm,代表 0—10 cm 土层含水量时误差较大,因此采用烘干法测定典型降雨后表层 0—10 cm 土壤水分体积含水量,采用自制小型土钻,长 22 cm,顶端一把手,钻头长 20 cm,内径 3.5 cm,樟子松固沙林带间每 2 m 一个取样点。

为减少冻融作用及降雪对土壤水分的影响,选择 2013 年、2014 年的 5 月 1 日—10 月 31 日数据分析樟子松固沙林土壤水分对降雨的动态响应。土壤蓄水量(mm)=土壤体积含水量(L/L)×土层厚度(mm)。降雨损失量(降雨截留、土壤蒸发、植物蒸腾)(mm)=降雨量(mm)-渗漏量(mm)-蓄水变化量(mm)。数据处理与统计分析采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 16.0 软件,方差分析采用 LSD 检验。

2 结果与分析

2.1 研究区降雨分布特征

从图 1 可以看出,研究区 2013 年 5 月 1 日—10 月 31 日共发生 74 d 降雨事件,总降雨 386.2 mm,24 h 降雨量≤5 mm 的 53 d,共降雨 76.4 mm,占总降雨的 19.8%,24 h 降雨量介于 5~10 mm 的降雨事件 7 d,共降雨 57.8 mm,占总降雨的 15.0%,24 h 降雨量≥10 mm 的降雨 14 d,总降雨量 252.0 mm,占总降雨的 65.2%;2014 年 5 月 1 日—10 月 31 日共发生 80 d 降雨事件,总降雨 297.0 mm,24 h 降雨量≤5 mm 的 57 d,共降雨 67.8 mm,占总降雨的 22.8%,24 h 降雨量介于 5~10 mm 的降雨事件 16 d,共降雨 110.6 mm,占总降雨的 37.20%,24 h 降雨量≥10 mm 的降雨 7 d,共降雨 118.6 mm,占总降雨的 39.9%。在干旱缺水条件下,该区降雨强度为 12.0 mm/h 时也无径流发生^[18],研究期间最大降雨强度为 11.2 mm/h,说明研究区无地表径流,樟子松固沙林的降雨再分配包括降雨损失(降雨截留、土壤蒸发、植物蒸腾)、土壤蓄水和深层渗漏等要素。

2.2 土壤体积含水量对降雨的动态响应

试验期间樟子松固沙林各层土壤体积含水量时间变化上最小值和最大值见表 1。方差分析表明,2013 年、2014 年各层土壤体积含水量最小值和最大值之间差异均显著($p<0.01$),表明降雨对 0—200 cm 层土壤水分均产生了显著影响。

图 2 为试验期间樟子松固沙林各层土壤体积含

水量随时间动态变化,从图中可以看出,2013 年 5 月—10 月 10 cm,30 cm 层土壤体积含水量波动频繁,每次波动峰值都与降雨时间相对应。其中 2013 年 5 月 1 日—6 月 17 日共发生 14 d 降雨事件,降雨总量 31.0 mm(最大一天降雨量为 8.4 mm),仅 10 cm 深度土壤体积含水量出现波动,变幅为 3.25%~12.97%,最大值出现在 8.4 mm 降雨后 1 d;在此期间 30 cm 层土壤含水量呈持续下降趋势,降幅 2.88%;60 cm,90 cm,

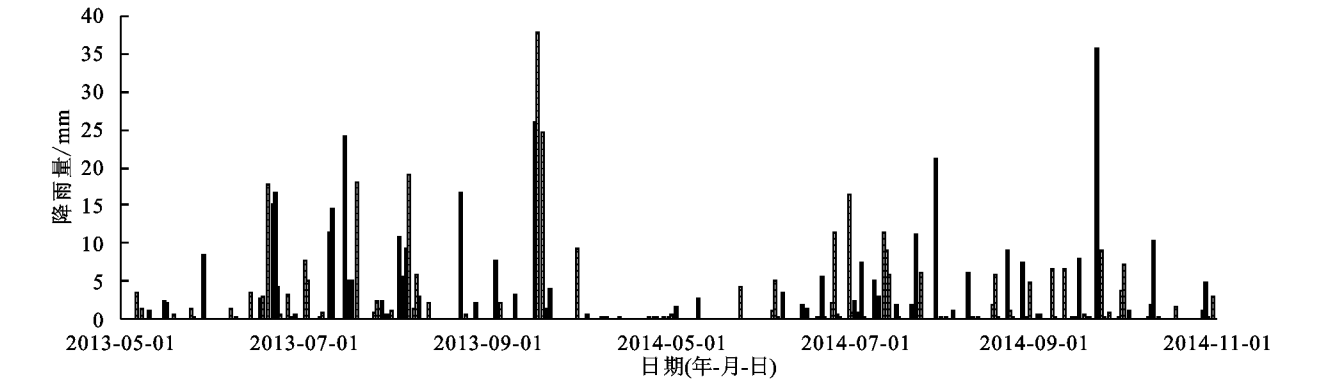


图 1 试验期间研究区降雨分布特征

表 1 樟子松固沙林各层土壤体积含水量时间上变化峰值(日平均值)

土层深度	2013 年 5—10 月		2014 年 5—10 月	
	最小值(时间)	最大值(时间)	最小值(时间)	最大值(时间)
10cm	3.25%(6 月 13 日)	23.48%(9 月 17 日)	3.37%(5 月 23 日)	19.90%(7 月 30 日)
30 cm	5.96%(6 月 19 日)	16.86%(9 月 17 日)	3.92%(6 月 21 日)	15.82%(9 月 23 日)
60 cm	5.86%(10 月 31 日)	12.32%(7 月 15 日)	2.67%(9 月 18 日)	10.68%(9 月 24 日)
90 cm	6.09%(10 月 29 日)	13.31%(7 月 15 日)	2.25%(9 月 24 日)	7.54%(10 月 1 日)
150 cm	6.16%(9 月 16 日)	12.77%(7 月 16 日)	1.96%(9 月 21 日)	3.88%(5 月 1 日)
200 cm	6.67%(9 月 16 日)	11.87%(7 月 17 日)	3.93%(8 月 18 日)	6.46%(5 月 1 日)

从图 2 还可以看出,2014 年 5 月—10 月 10 cm,30 cm 层土壤体积含水量波动频繁,每次波动峰值都与降雨时间相对应。其中 2014 年 5 月 1 日—6 月 28 日共发生 16 d 降雨事件,降雨总量 41.2 mm(最大一天降雨量为 11.4 mm),仅 10 cm 深度土壤体积含水量出现波动,变幅为 3.37%~16.69%,最大值出现在 11.4 mm 降雨后 1 d;在此期间 30 cm,60 cm,90 cm,150 cm,200 cm 层土壤体积含水量呈持续下降趋势,降幅分别为 5.03%,1.71%,1.79%,1.40%,2.15%,其中 30 cm 层降幅最大;2014 年 6 月 29 日—10 月 31 日间发生降雨 64 d,降雨总量 255.8 mm,90 cm 以上各层土壤体积含水量都发生了波动,其中 10 cm,30 cm 层波动频繁,60 cm,90 cm 仅在生长季末 9 月 22 日的 36.0 mm 降雨事件后波动 1 次,150 cm,200 cm 层土壤含水量呈微弱的持续下降趋势,期间降雨没有显著影响其土壤水分。

以上结果表明,樟子松固沙林 10 cm,30 cm 深度土壤水分受降雨影响剧烈,也是受蒸散影响最强的土层;在雨季初期,水分影响到较深土层需要较长时间

150 cm,200 cm 土层体积含水量基本稳定;2013 年 6 月 18 日—10 月 31 日间发生降雨 60 d,降雨总量 355.2 mm,200 cm 以上各层土壤体积含水量均发生了波动,其中 10 cm,30 cm 层波动频繁,60 cm 波动 6 次,90 cm 波动 4 次,150 cm 波动 3 次,200 cm 波动 2 次,波动均发生在相应降雨后;其中 150 cm,200 cm 的波动是虽与降雨时间基本一致,但其波动变化是与之前的降雨累积共同作用的结果。

的入渗,且在 5 月—6 月降雨基本不影响 150 cm,200 cm 土壤水分变化,水分的补给和消耗维持在相对平衡状态。同时,从土壤水分波动变化看,樟子松固沙林生长季末期 9 月份的较大降雨事件(2013 年 9 月 16—18 日累积降雨 88.6 mm,2014 年 9 月 22—23 日累积降雨 45.2 mm)对 0—200 cm 土层水分补给作用显著,对维持樟子松固沙林土壤水量平衡至关重要;但 2014 年 9 月的较大降雨没有显著影响到 150 cm 以下的土壤水分,结合降雨后 150 cm,200 cm 土壤水分变化看,表明 45.2 mm 降雨对樟子松固沙林 150 cm 以下土层无直接补给作用。

2.3 土壤蓄水量对降雨的动态响应

图 3 为试验期间樟子松固沙林 0—200 cm 土壤蓄水量动态变化图,可以看出,蓄水量的波动变化均与降雨事件相对应,总体上看,2013 年降雨后蓄水量 6 月—10 月均高于 5 月,2014 年仅 7 月、10 月高于 5 月。试验期间樟子松固沙林 2013 年蓄水量减少 2.77 mm,其中,生长季初期(5 月 1 日—31 日)0—200 cm 蓄水量减少 2.34 mm,期间的 20.8 mm 降雨未直接补给土

壤水分;生长季中期(6月1日—8月31日)0—200 cm 蓄水量增加 40.73 mm(有 0.7 mm 渗漏到 200 cm 以下),期间的 246.4 mm 降雨对土壤水分有直接补给作用;生长季末期(9月1日—10月31日)0—200 cm 蓄水量减少 34.37 mm,期间的 119.0 mm 降雨对土壤水分也无直接补给作用。试验期间 2014 年蓄水量减少 8.57 mm,其中,生长季初期(5月1日—31日)0—200 cm 蓄水量减少 50.9 mm,期间的 8.8 mm 降雨未直接补给土壤水分;生长季中期(6月1

日—8月31日)0—200 cm 蓄水量增加 3.89 mm,期间的 181.8 mm 降雨对土壤水分有直接补给作用;生长季末期(9月1日—10月31日)0—200 cm 蓄水量增加 44.71 mm,期间的 106.4 mm 降雨对土壤水分有直接补给作用。以上结果说明,樟子松固沙林在生长季初期降雨不能够满足水分的损失,需要消耗土壤中已有蓄存水;生长季中期降雨能够满足水分的损失,且有部分降雨蓄存在土壤中;生长季末期土壤蓄水量对降雨的响应存在差异。

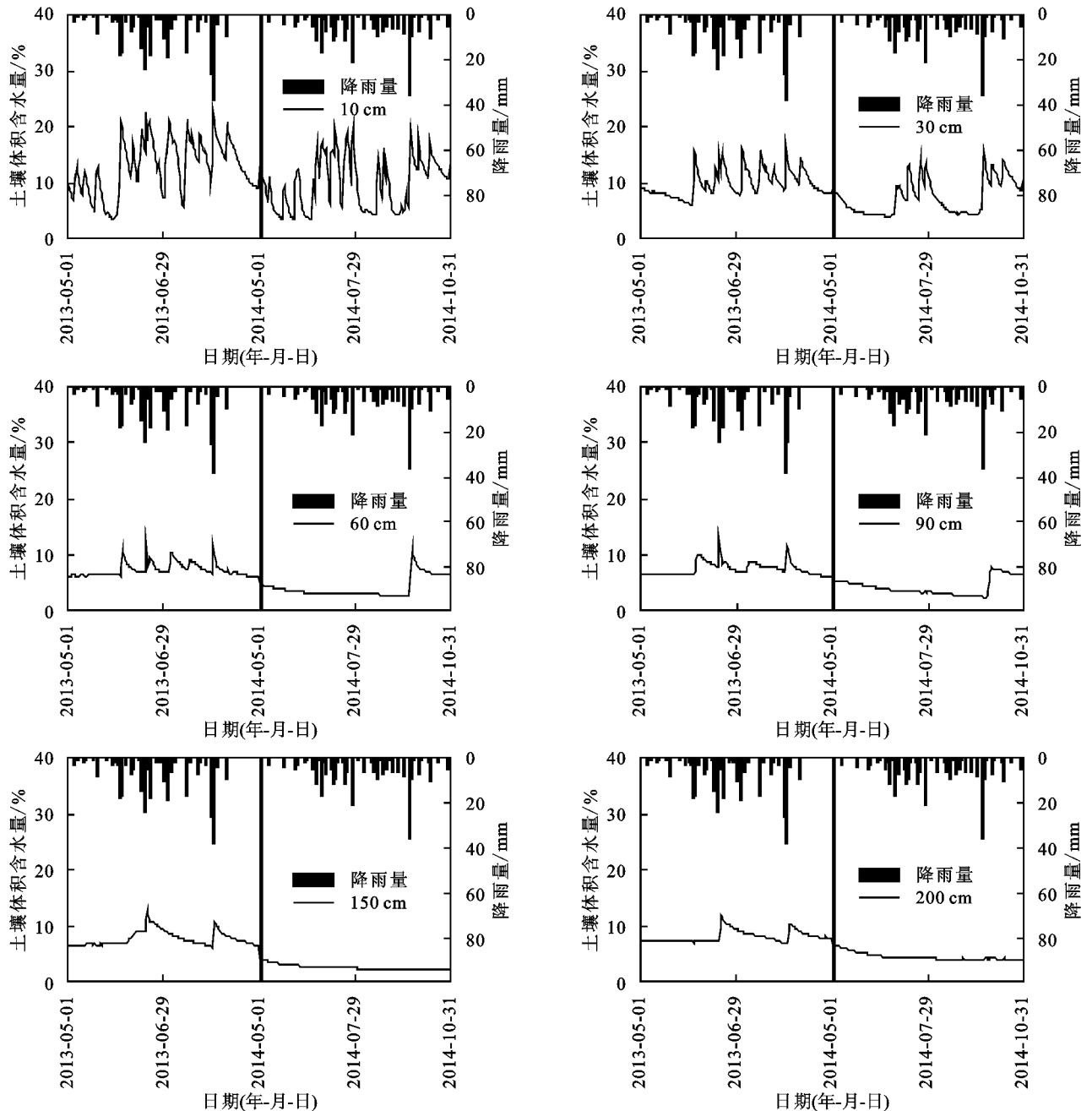


图2 樟子松固沙林各层土壤体积含水量动态变化

2.4 典型降雨事件后 0—10 cm 表层土壤水分动态过程

从图4可以看出,樟子松固沙林小于 8.0 mm 降

雨事件后 0—10 cm 层土壤体积含水量下降趋势基本相同,土壤体积含水量与降雨后天数呈指数式下降趋势($R^2 > 0.95$)。4.4 mm, 7.4 mm, 6.6 mm 降雨后

0—10 cm 层土壤体积含水量分别为 5.38%,9.59%,7.12%;降雨后第 1 天分别下降了 2.29%,2.53%,2.33%,降雨后第 2 天分别下降了 0.53%,2.29%,0.66%;降雨后第 3 天分别下降了 0.50%,1.40%,

0.47%;降雨后第 4 天分别下降了 0.50%,0.97%,1.16%。以上结果表明,降雨后第 1 天时 0—10 cm 表层土壤水分损失量最大,占降雨后 4 d 总损失量的 1/3 以上,分别占总损失量的 60.0%,35.2%,50.4%。

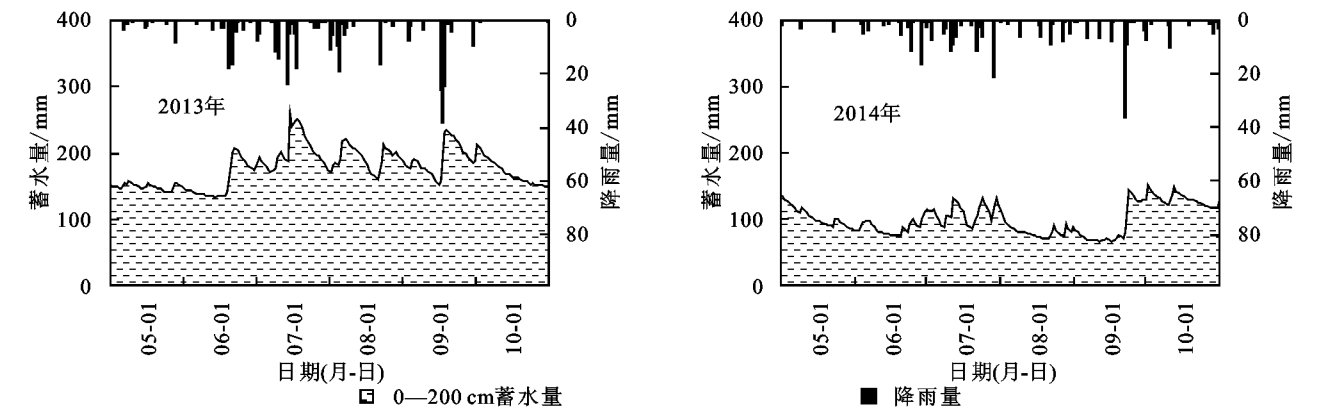


图 3 樟子松固沙林 0—200 cm 土壤层蓄水量动态变化

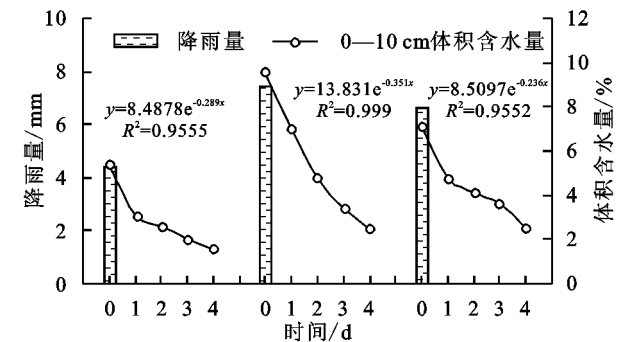


图 4 典型降雨后樟子松固沙林表层 0—10 cm 土壤体积含水量动态变化

2.5 典型降雨事件后土壤水分入渗特征

从试验期间 2013 年 10 cm,30 cm 层土壤体积含水量峰值看(表 1),10 cm,30 cm 土壤体积含水量最低值均出现在 6 月 19 日之前,最大值均出现在 9 月 17 日,且在 6 月 18 日时表层 0—30 cm 土壤水分维持在相对较低水平(5.46%),9 月 15 日表层 0—30 cm 土壤水分维持在相对较高水平(9.22%)。从图 2 看出,在 6 月 19 日、9 月 16 日后土壤 0—200 cm 各层均出现了波动变化,因此,选择 2013 年 6 月 18 日后单场 53.8 mm 及 9 月 15 日后单场 88.6 mm 的典型降雨事件分析不同初始含水量下降雨入渗变化特征。

表 2 典型降雨事件后樟子松固沙林各层土壤水分湿润锋特征及峰值

0—30cm 层初始含水量	土层 深度/cm	湿润锋对降雨的响应				降雨后 含水量峰值/%
		湿润锋 时间/h	降雨 时间/h	累积 降雨量/mm	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	
较低水平(5.46%)	10	7	3	6.0	2.00	20.63
	30	24	8	28.8	3.60	16.26
	60	49	24	38.8	1.62	11.93
	90	78	71	53.8	0.76	11.04
	150	215	—	58.0	—	9.59
	200	335	—	70.6	—	8.26
较高水平(9.22%)	10	4	2	6.0	3.00	23.92
	30	10	3	21.0	7.00	19.15
	60	18	6	43.0	7.17	15.92
	90	20	10	56.8	5.68	14.34
	150	39	27	64.0	2.37	11.84
	200	86	62	88.6	1.43	11.45

试验期间观测的最大含水量最多仅维持在小于 2 h 内保持不变,说明最多只是瞬时达到饱和含水量,试验期间的降雨入渗过程均为非饱和条件下。从表 2 看出,在 0—30 cm 初始含水量较低水平时,从 6

月 19 日 10:00(1 h)开始到 7 月 2 日 23:00(335 h)后,湿润锋到达 200 cm 土层,历时 335 h,期间累积降雨 70.6 mm;从湿润锋到达各层土壤所需降雨量和时间看,53.8 mm 单次降雨(降雨强度 0.76 mm/h)

入渗深度为 90 cm 以下,累加 16.8 mm 降雨在第 335 h 湿润锋达到 200 cm 土层,然而从图 2 看出在 7 月 3 日前的 6 次降雨(累积 16.8 mm,最大降雨量 7.6 mm)仅影响到 30 cm 以上土层含水量变化,没有影响到 60 cm 以下土层水分的变化,对深层土壤水分无直接补给作用,表明 53.8 mm 单场降雨开始后 335 h 湿润锋可到达 200 cm 土层。在 0—30 cm 初始含水量较高水平时,从 9 月 16 日 10:00(1 h)到 9 月 19 日 0:00(86 h),湿润锋到达 200 cm 土层,历时 86 h,期间累积降雨 88.6 mm;从湿润锋到达各层土壤所需降雨量和时间看,88.6 mm 单次降雨(降雨强度 1.43 mm/h)入渗深度为 200 cm 以下,能够影响到 200 cm 以下土壤水分的变化,表明 88.6 mm 单场降雨开始后 86 h 湿润锋可到达 200 cm 土层。从湿润锋时间、降雨时间看,均为 0—30 cm 土层含水量较高水平时用时短,且累积降雨量、降雨强度越大各层湿润锋到达时间越短、降雨后含水量峰值越大,综合分析得出,大于 53.8 mm 的降雨事件对樟子松固沙林土壤水分有补给作用,且表层初始含水量较高时,降雨后入渗较快、历时较短、对土壤水分补给作用较好。

2.6 典型降雨事件后土壤水分消退过程

试验期间 2013 年 9 月 15 日—18 日的单场 88.6 mm 的累积降雨事件后 9 d 内的土壤水分消退过程见图 5,在此期间仅 9 月 19 日有 1.4 mm 降雨,之后的 8 d 均无降雨事件。从图中可以看出,樟子松固沙林降雨后土壤水分表现出蒸渗型水分消退特征(9 月 19 日因降雨湿润锋到达 200 cm 存在时间滞后性),0—60 cm 为土壤水分消退层,60—200 cm 为土壤水分补给层;且 9 月后樟子松固沙林进入生长末期,0—60 cm 土壤水分的消退主要贡献给蒸发或入渗补给。结合樟子松固沙林土壤水分动态变化(图 2),分析得出如在生长季时,樟子松固沙林将由蒸渗型土壤水分消退特征转换为蒸散型土壤水分消退特征,即土壤水分的消耗主要用于植物蒸腾及土壤蒸发,且 0—90 cm 为土壤水分主要消退层。

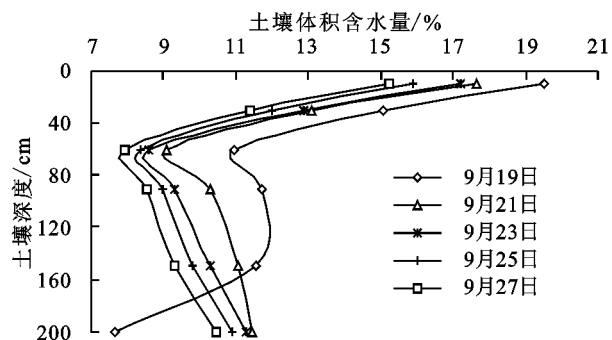


图 5 典型降雨后樟子松固沙林 0—200 cm 土壤水分消退

2.7 水量平衡初步估算

采用水量平衡方程初步估算了樟子松固沙林试验期间土壤水量平衡。降雨后樟子松固沙林土壤水量平衡包括 0—200 cm 蓄水变化量、200 cm 以下渗漏量、降雨损失量(截留、土壤蒸发、植物蒸腾)。从表 3 可以看出,在 2013 年、2014 年的 5 月—10 月 0—200 cm 层土壤蓄水量均有减少,说明生长季樟子松固沙林均消耗了土壤中已有蓄存水,分别消耗 2.77 mm,8.57 mm;但在降雨较好的 2013 年,还有少量水分渗漏到 200 cm 以下(0.8 mm),且 2013 年 11 月降雨 7.8 mm,而 2014 年即无渗漏 11 月也无降雨,可以得出 2013 年樟子松固沙林能够维持土壤水量平衡,但降雨较少的 2014 年樟子松固沙林已开始表现出水分亏缺现象。

以上结果说明,在丰水年与欠水年交替的过程中樟子松固沙林能够通过自我调节降低对土壤水分的消耗,能够基本维持水量,但如果遇到极端干旱年份或连续欠水年或没有 9 月份较大降水的补给,樟子松固沙林很可能出现严重水分亏缺现象。

表 3 试验期间樟子松固沙林土壤水量平衡初步估算

时间	降雨量/ mm	0—200 cm 蓄水变化量/mm	200 cm 以下 渗漏量/mm	降雨 损失量/mm
2013 年 5—10 月	386.2	-2.77	0.8	385.4
2014 年 5—10 月	297.0	-8.57	0.0	297.0

3 结论

(1) 试验期间 2013 年、2014 年累积降雨显著($p<0.01$)影响樟子松固沙林 0—200 cm 土壤水分的变化;其中 5 月—6 月的降雨对 150 cm 以下土层影响较小,水分的补给和消耗维持在相对平衡状态,9 月后的降雨对土壤水分补给作用显著。

(2) 典型降雨事件后(<8.0 mm、无连续降雨)樟子松固沙林表层 0—10 cm 土壤体积含水量与降雨后天数呈指数式下降趋势($R^2>0.95$),且降雨后第 1 天土壤水分损失量最大,占降雨后 4 d 总损失量的 1/3 以上。

(3) 小于 45.2 mm 降雨对樟子松固沙林 150 cm 以下土层无直接补给作用;大于 53.8 mm 降雨对樟子松固沙林 200 cm 层土壤水分有补给作用,且表层初始含水量较高时,降雨后入渗快、历时短。降雨量、土壤表层初始含水量对降雨后樟子松固沙林土壤水分入渗过程及特征有显著影响。

(4) 试验期间 2013 年 386.2 mm 降雨能够维持樟子松固沙林土壤水量平衡,但降雨较少的 2014 年(297.0

mm 降雨)已开始表现出水分亏缺现象。当遇到极端干旱年份或连续欠水年或没有 9 月份较大降水补给时,樟子松固沙林很可能出现严重水分亏缺现象。

参考文献:

[1] 焦树仁. 辽宁省章古台引种樟子松造林研究[J]. 防护林科技, 2009(6):10-14.

[2] 朱教君,曾德慧,康红章,等. 沙地樟子松人工林衰退机制[M]. 北京:中国林业出版社,2005.

[3] 吴祥云,姜凤岐,李晓丹,等. 樟子松人工固沙林衰退的规律和原因[J]. 应用生态学报, 2004,15(12):2225-2228.

[4] 朱教君,康宏樟,宋立宁,等. 科尔沁沙地南缘樟子松人工林地下水埋深季节变化[J]. 生态学杂志, 2009, 28(6):1767-1772.

[5] 焦树仁. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施[J]. 林业科学, 2001,37(2):131-138.

[6] 高崇华,李志忠,付强. 毛乌素沙地引种樟子松调查报告[J]. 内蒙古林业科技, 1996(1):29-32.

[7] 樊晓英,廖超英,谢燕,等. 毛乌素沙地东南部樟子松生长状况调查分析[J]. 西北林学院学报, 2008,23(4):112-116.

[8] 王怀彪,潘鹏,高保山. 毛乌素沙地樟子松抗旱造林关键技术研究[J]. 西北林学院学报, 2009,24(6):70-73.

[9] 张雷,洪光宇,李卓凡,等. 基于层次分析法的毛乌素沙地 3 种造林模式恢复成效评价[J]. 林业资源管理, 2017

(6):108-112.

[10] 格日勒,斯琴毕力格,金荣,等. 毛乌素沙地引种樟子松生长特性的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004,18(5):159-163.

[11] 张友焱. 毛乌素沙地几种树种水分生理特性研究[D]. 北京:北京林业大学,2006.

[12] 丁晓纲,何茜,李吉跃,等. 毛乌素沙地樟子松和油松人工林光合生理特性[J]. 水土保持研究, 2011,18(1):215-219.

[13] 樊文会. 毛乌素沙地三典型造林树种蒸腾耗水特性研究[D]. 北京:北京林业大学,2012.

[14] 马成忠,邓继峰,丁国栋,等. 不同初植密度樟子松人工林对毛乌素沙地南缘土壤粒度特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017,31(1):230-235.

[15] 段民福. 毛乌素沙地榆林沙区樟子松人工林土壤理化性质时空变异规律研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.

[16] 徐松,廖超英,多杰吉,等. 毛乌素沙地樟子松人工林不同坡向的碳储量及空间分布研究[J]. 水土保持研究, 2015,22(6):14-18.

[17] 杨文斌,党宏忠. 土壤深层水量渗漏测试记录仪[P]. ZL201110252184.7, 2011.

[18] 吴永胜,哈斯,乌格特莱勒. 毛乌素沙地南缘沙丘表面径流特征[J]. 科学通报, 2011,56(34):2917-2922.



(上接第 100 页)

[27] 胡岫,刘骏,毛学刚. 中国东北地区 2007—2010 年植被覆盖度及其变化[J]. 东北林业大学学报, 2017,45(7):45-50.

[28] 李新辉,宋小宁,周霞. 半干旱区土壤湿度遥感监测方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2010,26(1):90-93.

[29] 陈斌,张学霞,华开,等. 温度植被干旱指数(TVDI)在草原干旱监测中的应用研究[J]. 干旱区地理, 2013,36(5):930-937.

[30] 刘立文,张吴平,段永红,等. TVDI 模型的农业旱情时空变化遥感应用[J]. 生态学报, 2014,34(13):3704-3711.

[31] 王丹,南瑞,韩俊杰,等. 黑龙江省土壤湿度及其对气温和降水的敏感性分析[J]. 气象与环境学报, 2012,28(2):49-53.

[32] Liyang L, Jishan L, Xiuzhi C, et al. The Microwave Temperature Vegetation Drought Index(MTVDI)based on AMSR-E brightness temperatures for long-term drought assessment across China (2003—2010) [J]. Remote Sensing of Environment, 2017,199:302-320.

[33] 薛飞. 利用风云卫星数据的东北地区土地覆盖监测研究[D]. 成都:电子科技大学,2017.

[34] 孙舒婷. 大兴安岭森林地表温度的遥感估算及分析研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2015.