

# 不同密度樟子松固沙林土壤水分特征

冯伟<sup>1</sup>, 杨文斌<sup>1</sup>, 党宏忠<sup>1</sup>, 李卫<sup>1</sup>, 韩辉<sup>2</sup>, 宋晓东<sup>2</sup>, 张学利<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 辽宁省固沙造林研究所, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** [目的] 探讨樟子松固沙林合理栽植密度, 为进一步深入分析樟子松固沙林水量动态平衡、衰退原因及林分稳定性评价提供参考。[方法] 以科尔沁沙地南缘 3 种密度(400、600 和 800 株/hm<sup>2</sup>)的 33 a 樟子松固沙林为研究对象, 连续监测了生长季降雨、0—200 cm 土壤含水量、200 cm 以下渗漏量, 分析了 3 种密度下土壤水分特征及差异。[结果] (1) 3 种密度下土壤水分时空变化趋势基本一致, 0—30 cm 为降雨影响剧烈层, 60 cm 以下受 >40 mm 降雨影响, 降雨结束后均表现蒸渗型水分消退特征, 之后转换为蒸散型; (2) 0—200 cm 土壤体积含水量大小为: 400 株/hm<sup>2</sup> > 600 株/hm<sup>2</sup> > 800 株/hm<sup>2</sup>, 且差异显著 ( $p < 0.05$ ); (3) 200 cm 以下均有水分渗漏, 其中 800 株/hm<sup>2</sup> 最低, 为 0.4 mm。[结论] 丰水年 3 种密度林分基本能够维持水量平衡, 但正常降水或极端降水年份会增加土壤蓄存水消耗, 可能出现水分亏缺或衰退现象。建议生产中樟子松固沙林适宜密度应控制在 400 株/hm<sup>2</sup> 左右。

**关键词:** 樟子松; 土壤体积含水量; 水分渗漏量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0189-06

中图分类号: S791.253, S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.101

## Soil Moisture Characteristics of Sand Fixation Forest of *Pinus Sylvestris* var. *Mongolica* with Different Plantation Densities

FENG Wei<sup>1</sup>, YANG Wenbin<sup>1</sup>, DANG Hongzhong<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>,

HAN Hui<sup>2</sup>, SONG Xiaodong<sup>2</sup>, ZHANG Xueli<sup>2</sup>

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, China;

2. Liaoning Institute of Sand Fixation and Afforestation, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the optimal density of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) plantation for sand fixation in order to provide reference for the analysis of dynamic water balance, decline causes and stand stability evaluation in the study area. [Methods] We took the Mongolia pine filed in the southern edge of Horqin sandy land, Zhanggutai, Liaoning Province as a case study to monitor soil moisture variation(0—200 cm), rainfall in growing season and leakage below 200 cm. The surveys were conducted in three different Mongolia pine fields with various plantation densities (400 plants/hm<sup>2</sup>, 600 plants/hm<sup>2</sup> and 800 plants/hm<sup>2</sup>). [Results] The temporal and spatial variation trends of soil moisture in all the three plantation densities were consistent. Soil layer at 0—30 cm was influenced by rainfall dramatically, while soil layer at 60—200 cm was only influenced by rainfall >40 mm. Soil moisture regression processes dissipated from lysimeter type to evaporation-leakage type after rainfall. Soil moisture showed significant differences among three plantation densities( $p < 0.05$ ) in topsoil(0—200 cm): 400 plants/hm<sup>2</sup> > 600 plants/hm<sup>2</sup> > 800 plants/hm<sup>2</sup>. Water leakage was observed in all three plantation densities below 200 cm. The 800 plants/hm<sup>2</sup> field had the least leakage. [Conclusion] In wet years, water balance can be maintained in all three densities, while water deficit and recession may occur in normal year and years with extreme precipitation. The optimal planting density of Mongolian pine is around 400 plants/hm<sup>2</sup> in the sandy land.

**Keywords:** *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; soil volumetric water content; leakage

收稿日期: 2014-07-26

修回日期: 2014-08-09

资助项目: 国家重点基础研究发展计划“沙区土壤水分时空分布格局与区域分异规律”(2013CB429901); 国家自然科学基金项目“半干旱区低覆盖度固沙林的水分动态及其应对极旱年的调节机理”(31170667)

第一作者: 冯伟(1983—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼伦贝尔市人, 博士研究生, 研究方向为荒漠化防治。E-mail: fw350@163.com。

通信作者: 杨文斌(1959—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治及干旱区林业方面的研究。E-mail: nmlkyywb@163.com。

水分是沙区植被建设极为重要的生态限制因素。干旱、半干旱沙区降水少、蒸发强、土壤含水量低,土壤水是影响植被建设的首要因素<sup>[1-3]</sup>。降水是该区土壤水分主要补给来源,合理有效利用有限水资源成为固沙植被长期稳定和可持续发展的前提基础<sup>[4]</sup>。中国沙区植被建设取得了举世瞩目的成就,有效遏制了沙漠化的发展,促进了局地生态恢复<sup>[5]</sup>,然而,大规模固沙造林均以完全固定流沙为第一目的,大都遵循覆盖度大于 40% 这一标准,结果出现密度大、水分失衡等问题,造成大面积固沙植被衰退或死亡现象,影响了沙区生态恢复及防风固沙效益的可持续性<sup>[5-6]</sup>。针对沙区因土壤进一步旱化、地下水位持续下降而引起的植被衰退、土地退化等一系列生态问题,沙地土壤水分动态特征已成为沙地生态系统维持稳定和生态恢复研究中急需解决的关键问题。

地处农牧交错带的科尔沁沙地是中国最大的沙地,也是沙漠化最严重的地区之一。樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)作为该区防风固沙的主要树种之一,在防治土地沙漠化及三北防护林建设中起着非常重要的作用,据不完全统计,全国沙地樟子松人工林面积达到  $3.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,其在三北沙区带来了巨大的生态、经济和社会效益<sup>[7]</sup>。然而,20 世纪 90 年代以来樟子松固沙林出现了大面积衰退或死亡现象<sup>[8]</sup>,据调查,辽宁省  $3.83 \times 10^4 \text{ hm}^2$  樟子松人工固沙林中有  $2.50 \times 10^4 \text{ hm}^2$  发生衰退现象,约占 65.27%<sup>[9]</sup>。樟子松固沙林衰退是由生物和非生物因素共同作用引起,属于林木衰退病的一种<sup>[10]</sup>。大量研究表明樟子松林提早衰退的主导因素之一是土壤旱化及水分亏缺失衡,然而这些研究多为定点、定时取样测定<sup>[7-13]</sup>,缺乏系统、连续的监测数据,对系统分析樟子松固沙林土壤水分动态过程及土壤水分亏缺状况还缺乏必要的的数据支撑,同时,樟子松固沙林土壤深层渗漏水量缺乏直接的实测数据。因此,本文采用自动监测系统对科尔沁沙地 3 种密度(400,600 和 800 株/ $\text{hm}^2$ )33 a 樟子松林下 0—200 cm 深度土壤水分、200 cm 以下渗漏水量进行野外实时监测,分析 3 种密度樟子松林土壤水分特征及差异,探讨樟子松固沙林合理栽植密度,为进一步深入分析樟子松固沙林水量动态平衡、衰退原因分析及林分稳定性评价提供参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地南缘辽宁省固沙造林研究所试验林场三家子工区( $42^\circ 43' \text{N}$ ,  $122^\circ 22' \text{E}$ ),行政区划

隶属于辽宁省彰武县章古台镇。境内海拔 224.5 m,属亚湿润大陆性季风气候,年平均风速 3.8 m/s,平均相对湿度 62%,平均降水 475.5 mm,平均潜在蒸发量 1 553 mm,为降水的 3.3 倍,地下水位大于 4 m。年平均气温  $6.3^\circ \text{C}$ ,无霜期 155 d。土壤类型以风沙土为主,物理性砂粒含量较高,沙层厚度达 126 m。植被类型多样,沙生植被为主体,主要植物有山里红(*Crataegus pinnatifida* var. *major* N. E. Br.)、榆树(*Ulmus pumila* L.)、山杏[*Armeniaca sibirica* (Linn.) Lam.]、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron* Turcz et Bess.)、中华隐子草[*Cleistogenes chinensis* (Maxim.) Keng]、小黄柳(*Salix gordejewii* Y. L. Chang et Skv.)等。

### 1.2 研究方法

在三家子工区选择 33 a 樟子松固沙林作为监测样地,密度分别为 400 株/ $\text{hm}^2$ (株行距 6.0 m $\times$ 4.2 m,胸径 18.37 cm,树高 9.18 m,冠幅 4.3 m $\times$ 4.2 m);600 株/ $\text{hm}^2$ (株行距 3.0 m $\times$ 5.6 m,胸径 20.20 cm,树高 10.40 m,冠幅 5.0 m $\times$ 5.2 m);800 株/ $\text{hm}^2$ (株行距 3.0 m $\times$ 4.2 m,胸径 16.83 cm,树高 9.45 m,冠幅 4.0 m $\times$ 3.8 m)。3 块样地均由 1980 年采用 2 年生裸根苗营造的 10  $\text{hm}^2$  林分(起初密度为 1 420 株/ $\text{hm}^2$ ) 在 2000 年采取隔行去行、隔株去株的间伐方式获得,立地条件基本一致,林下植被盖度、种类基本相同。

2013 年 4 月 15 日在 3 块样地分别选择长势良好的两行树中间部位挖取 320 cm 深土壤剖面,从下到上依次将土壤深层水量渗漏测试记录仪<sup>[14]</sup>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 以下水量;同时在渗漏测试记录仪右侧 40 cm 处剖面按 10,20,30,60,90,120,150 和 200 cm 安装 ECH<sub>2</sub>O-5( $\pm 2\%$ )(EC-5)土壤水分传感器(美国 Decagon Devices Inc., Pullman, WA)连续监测土壤体积含水量;原状土回填,浇水踏实。同时,在 3 家子工区气象站内(距试验地 300 m)安装美国 AVALON 公司 AV-3 665 R 型雨量传感器(精度 0.2 mm)。

采用 RR-1 016 型数采器记录降雨量、土壤体积含水量、深层渗漏量,其中土壤含水量、渗漏水量每 10 min 记录 1 次,降雨量每 30 min 记录 1 次。为减少扰动及冻融作用的影响,选择 2013 年 6—10 月数据分析不同密度樟子松林土壤水分特征及差异。数

据处理与统计分析采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件。

2 结果与分析

2.1 研究区降雨特征

研究区 2013 年 6 月 1 日至 10 月 31 日降雨 55 d (图 1), 累积降雨 498.8 mm。55 d 降雨中, 日降雨量  $\leq 10$  mm 的降雨 42 d, 累积降雨 92.6 mm, 占同期降雨的 18.6%; 10~20 mm 的降雨 5 d, 累积降雨 73.8 mm, 占同期降雨的 14.8%; 20~30 mm 的降雨 2 d, 累积降雨 45.4 mm, 占同期降雨的 9.1%;  $\geq 30$  mm 降雨 6 d, 累积降雨 287.0 mm, 占同期降雨的 57.5%。表明研究区降雨频次较多, 其中  $\geq 30$  mm 的降雨对降雨总量贡献大。从月降雨分布看, 研究区降雨主要集中在 7、8 月。

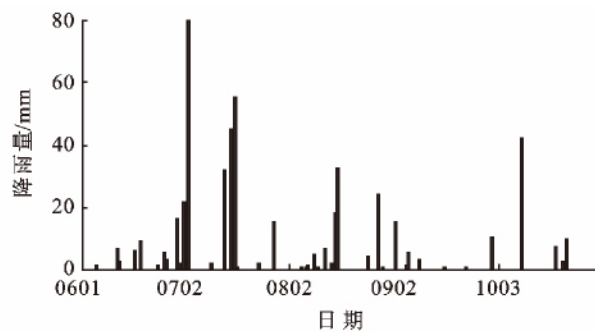


图 1 研究区 2013 年 6—10 月降雨特征

2.2 土壤水分时间变化特征

3 种密度樟子松林土壤水分时间上变化趋势基本一致, 均随着降雨增加各层含水量呈增加趋势, 降雨结束达到最大值后随之降低(图 2); 其中 10 cm 土壤含水量变化频繁, 对  $> 5$  mm 降雨均产生响应; 20 cm, 30 cm 土壤对  $> 10$  mm 降雨均产生响应; 60 cm 以下土层对相同降雨的响应是有差异的, 7 月 1—2 日的 101.4 mm 降雨 3 种密度樟子松林 60—150 cm 含水量均产生响应, 仅 800 株/hm<sup>2</sup> 林分 200 cm 含水量产生响应; 7 月 15—16 日的 100.4 mm 降雨 3 种密度 60—200 cm 含水量均产生响应, 但 400 株/hm<sup>2</sup> 在响应时间上滞后于其他两种密度; 8 月 14 日 50.2 mm, 10 月 9 日 42.4 mm 降雨仅影响到 400 和 800 株/hm<sup>2</sup> 樟子松林 90 cm 土层, 对 600 株/hm<sup>2</sup> 樟子松林 90 cm 以下土壤水分影响较弱(主要因为在 2005 年 60 cm 以上添加过草炭, 增加了土壤持水能力)。以上结果表明, 3 种密度林分 60 cm 以下土壤仅受  $> 40$  mm 降雨影响, 其中  $> 100$  mm 降雨入渗深度达 150 cm 以下。3 种密度林分土壤含水量时间变

化上各层土壤含水量最大值和最小值(图 2)之间均差异显著( $p < 0.05$ ), 表明试验期间 498.8 mm 降雨对 3 种密度樟子松林 0—200 cm 深度土壤水分均产生了显著影响。

从表 1 看出, 3 种密度樟子松林平均土壤含水量垂直变化上均随土层深度增加呈先增加后减少趋势, 且最大值与最小值之间差异显著( $p < 0.05$ ), 其中 400 株/hm<sup>2</sup> 樟子松林最大值出现在 30 cm, 最小值出现在 200 cm; 600 株/hm<sup>2</sup> 樟子松林最大值出现在 60 cm, 最小值出现在 200 cm; 800 株/hm<sup>2</sup> 樟子松林最大值出现在 30 cm, 最小值出现在 150 cm。3 种密度林分除 10 cm, 30 cm 层 600 和 800/hm<sup>2</sup> 之间土壤含水量差异不显著外, 其余各层土壤含水量 3 种密度之间均差异显著( $p < 0.05$ ), 且 400 株/hm<sup>2</sup> 林分 20, 30, 60, 90, 120 和 150 cm 深度土壤含水量均显著( $p < 0.05$ )高于其他 2 种密度, 200 cm 深度显著( $p < 0.05$ )高于 800 株/hm<sup>2</sup> 林分。0—200 cm 土壤平均含水量为: 400 株/hm<sup>2</sup>  $>$  600 株/hm<sup>2</sup>  $>$  800 株/hm<sup>2</sup>, 且差异显著( $p < 0.05$ )。3 种密度樟子松林立地条件与林下植被盖度相同, 种类组成也基本相同, 因此不考虑其他植被对土壤水分的消耗差异, 因此说明随着密度增加显著增加了土壤水分的消耗, 从 0—200 cm 平均体积含水量大小看, 800 比 400 株/hm<sup>2</sup> 樟子松林低 6.14%  $\pm$  0.18%。

表 1 3 种密度樟子松固沙林各层土壤平均体积含水量

土层 深度/cm	不同密度固沙林土壤体积含水量/%		
	400 株/hm <sup>2</sup>	600 株/hm <sup>2</sup>	800 株/hm <sup>2</sup>
10	12.70 $\pm$ 2.13 <sup>Ac</sup>	10.53 $\pm$ 3.28 <sup>Ab</sup>	10.20 $\pm$ 2.58 <sup>Ac</sup>
20	15.53 $\pm$ 1.63 <sup>Ac</sup>	11.52 $\pm$ 1.78 <sup>Bb</sup>	9.79 $\pm$ 2.15 <sup>Cc</sup>
30	19.49 $\pm$ 2.01 <sup>Aa</sup>	12.75 $\pm$ 1.78 <sup>Bb</sup>	13.57 $\pm$ 3.02 <sup>Ba</sup>
60	17.99 $\pm$ 2.72 <sup>Ab</sup>	13.61 $\pm$ 1.63 <sup>Ba</sup>	10.45 $\pm$ 2.52 <sup>Cb</sup>
90	16.16 $\pm$ 2.07 <sup>Ab</sup>	10.18 $\pm$ 1.83 <sup>Bc</sup>	8.16 $\pm$ 1.67 <sup>Cd</sup>
120	16.33 $\pm$ 2.18 <sup>Ab</sup>	10.1 $\pm$ 1.98 <sup>Bc</sup>	8.62 $\pm$ 1.59 <sup>Cd</sup>
150	15.48 $\pm$ 1.03 <sup>Ac</sup>	10.03 $\pm$ 2.21 <sup>Bc</sup>	3.55 $\pm$ 1.98 <sup>Ce</sup>
200	5.81 $\pm$ 0.78 <sup>Bd</sup>	6.80 $\pm$ 1.03 <sup>Ad</sup>	5.24 $\pm$ 1.11 <sup>Ce</sup>
平均值	14.94 $\pm$ 1.83 <sup>A</sup>	10.69 $\pm$ 1.94 <sup>B</sup>	8.80 $\pm$ 2.01 <sup>C</sup>

注: 同一行不同大写字母表示不同密度处理间差异显著 ( $p < 0.05$ ); 同一列不同小写字母表示不同土壤深度间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

2.3 土壤水分季节变化特征

从图 3 看出, 3 种密度樟子松林平均土壤含水量随着雨季到来均呈现增加趋势, 均在降雨量最高的 7 月达到最大值, 随着 8、9、10 月降雨量减少, 3 种密度樟子松林平均土壤含水量没有出现大幅度变化, 呈现

平稳下降趋势。8月累计降雨 94.0 mm,但并没有显著增加 3 种密度樟子松林土壤含水量,只是减缓了土壤含水量下降趋势,说明其虽然没有增加土壤含水量,但却对土壤水分的消耗起到补给作用。土壤含水量 10 月与 6 月相比,400 株/hm<sup>2</sup> 降低 2.01% ± 0.12%,600 株/hm<sup>2</sup> 增加 0.94% ± 1.91%,800

株/hm<sup>2</sup>降低 1.29% ± 1.94%,但差异不显著。以上结果初步说明降雨基本可以满足 3 种密度樟子松林对水分的需求,没有显著消耗土壤中原有蓄存水。从各月土壤含水量大小看,均为 400 株/hm<sup>2</sup> > 600 株/hm<sup>2</sup> > 800 株/hm<sup>2</sup>,进一步证明随着种植密度增加,加大了土壤水分消耗。

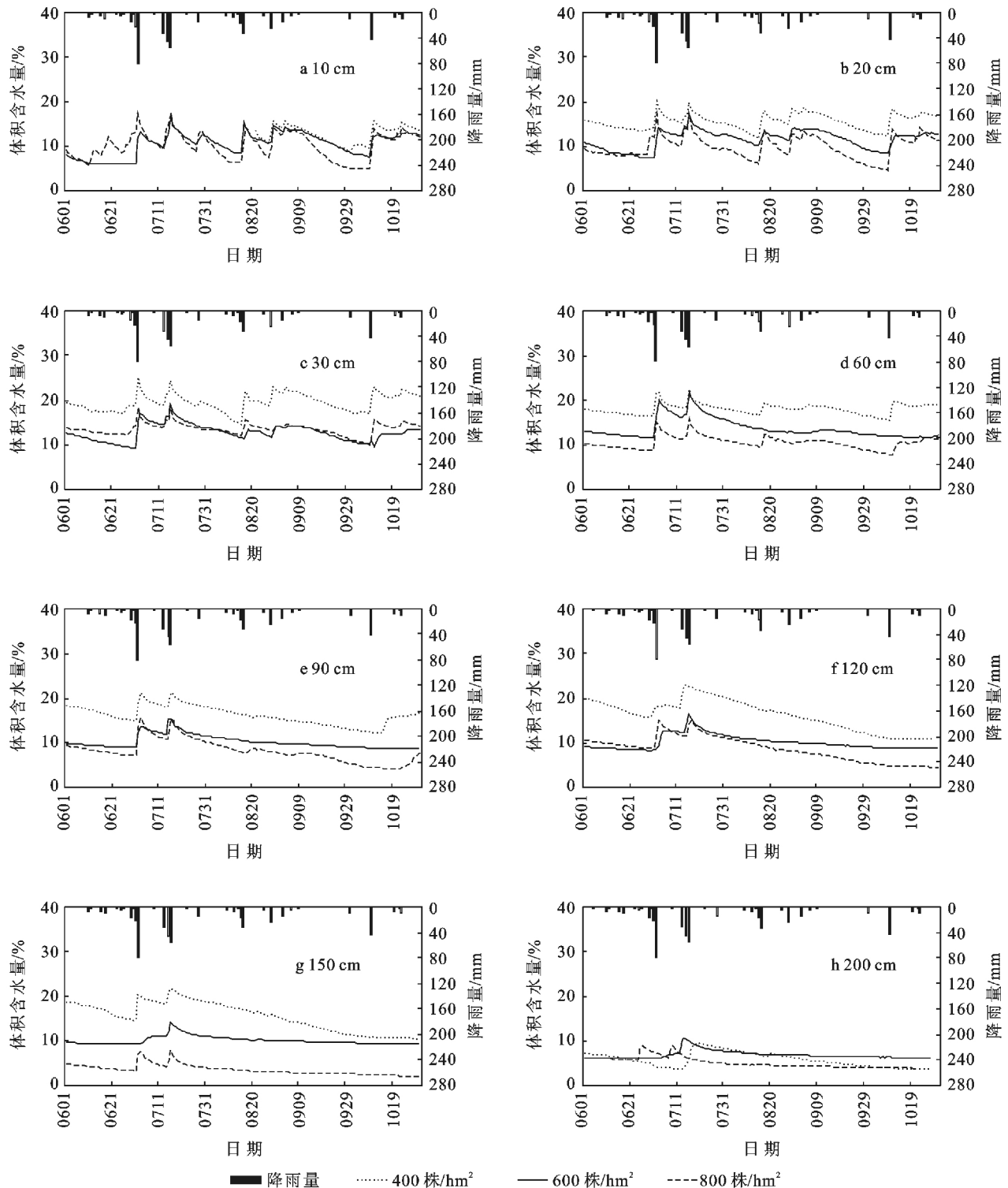


图 2 3 种密度樟子松固沙林各层土壤水分时间动态变化

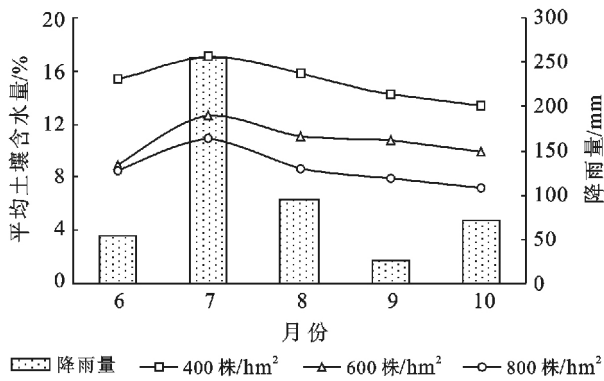


图3 3种密度樟子松固沙林土壤水分变化与降雨的关系

#### 2.4 土壤水分渗漏特征

试验期间3种密度樟子松林下200 cm深度均产生了不同程度渗漏,400株/hm<sup>2</sup>林分渗漏量最大,为1.7 mm,主要集中在6—9月,且在10月仅400株/hm<sup>2</sup>林分有水分渗漏;600株/hm<sup>2</sup>林分渗漏量为0.8 mm,主要集中在6—8月;800株/hm<sup>2</sup>林分渗漏

量为0.4 mm,主要集中在6—7月。以上结果表明,研究区内有小部分降雨通过渗漏补给了200 cm以下土壤水,并随着种植密度增加补给作用减弱,但这种补给作用是微弱的。

#### 2.5 土壤水分消退过程

图4反应了3种密度樟子松林降雨后连续3 d的土壤水分变化规律(此期间没有发生降雨事件),均表现出蒸渗型土壤水分消退特征。400株/hm<sup>2</sup>樟子松林0—70 cm为水分消退层,70—200 cm为水分补给层;600株/hm<sup>2</sup>樟子松林0—35 cm为水分消退层,35—200 cm为水分补给层但特征不明显,主要因为2005年60 cm以上土层作过添加草炭处理,土壤质地发生改变;800株/hm<sup>2</sup>樟子松林0—70 cm为水分消退层,70—200 cm为水分补给层。随着时间增加,3种密度樟子松林土壤水分消耗均转换为蒸散型水分消退过程,也就是说土壤水分的减少将是由于樟子松及地上植被土壤蒸散消耗。

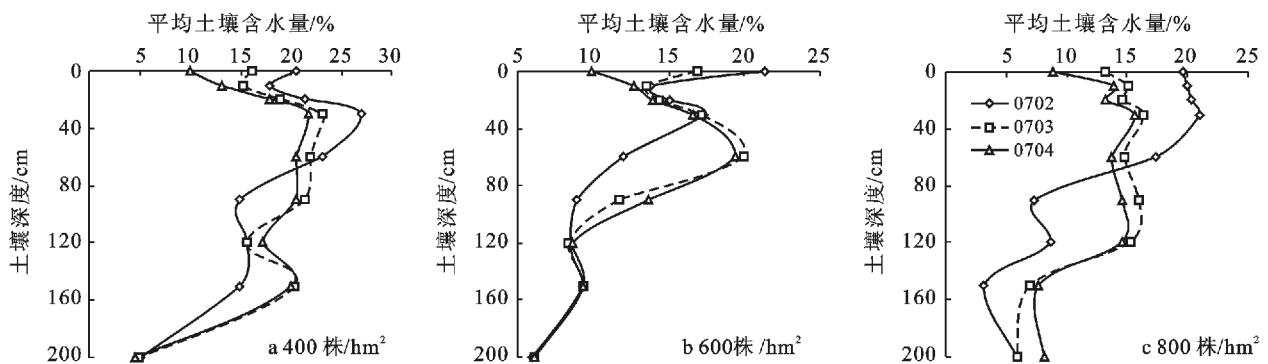


图4 3种密度樟子松固沙林各层土壤水分消退过程

### 3 结论与讨论

试验期间498.8 mm累积降雨对3种密度樟子松林0—200 cm深度土壤水分均产生了显著( $p < 0.05$ )影响,且土壤水分时空变化趋势基本一致,其中0—30 cm为降雨影响剧烈层,60 cm以下仅受 $> 40$  mm降雨影响,降雨结束后均表现蒸渗型水分消退特征,之后转换为蒸散型。同时,随着密度增加土壤含水量显著降低,0—200 cm土壤平均含水量为:400株/hm<sup>2</sup> $> 600$ 株/hm<sup>2</sup> $> 800$ 株/hm<sup>2</sup>,且差异显著( $p < 0.05$ )。

章古台地区1983—2012年均降水474.7 mm,2012年降水772.6 mm,2013年降水605.6 mm。2012,2013年为丰水年,2012年降水为樟子松2013年生长提供了较好的水分条件,本研究中3种密度樟子松林6月与10月土壤含水量差异不显著,2013年降水很好的补给了土壤水分消耗,且3种密度林分均

有少量水分渗漏到200 cm以下,表明3种密度林分均未显著消耗土壤中原有蓄存水,且对200 cm以下土壤水有一定补给作用,在丰水年能够维持正常水量平衡。但如果遇到连续正常降水或极端降水年份,将出现水分亏缺,可能造成衰退或死亡现象,此时林分会明显增加土壤蓄存水消耗,且高密度林分土壤含水量低,不利于固沙林长期稳定及可持续发展,而低密度林分土壤含水量高,其土壤蓄存水供应能力优于高密度林分,能够更好的应对水分亏缺,维持林分正常生长。

苑增武等<sup>[15]</sup>研究表明樟子松人工林土壤水分变化受密度制约,土壤水分条件较好的适宜密度为625~830株/hm<sup>2</sup>;赵晓彬<sup>[16]</sup>认为沙地樟子松造林适宜密度为560株/hm<sup>2</sup>,经自然稀疏后密度为300~400株/hm<sup>2</sup>;曾德慧等<sup>[17]</sup>利用自然稀疏法则推断辽宁章古台地区适宜栽植密度为3000~3500株/hm<sup>2</sup>;孙海红等<sup>[18]</sup>认为600~800株/hm<sup>2</sup>是章古台地区樟子

松固沙林适宜林分密度。科尔沁沙地的气候和土壤条件下,樟子松小面积初始栽植密度应控制在 2 800 株/hm<sup>2</sup> 以下,并应在生长高峰期对林木间伐,20 a 樟子松林密度保持在 2 100 株/hm<sup>2</sup> 左右为宜<sup>[11]</sup>。本研究中樟子松为 33 a,在 2000 年时为 20 a(密度 1 420 株/hm<sup>2</sup>),当年发现有生长衰退现象采取了间伐方式得到了试验中的 3 种密度,3 种密度樟子松林分近年来未出现生长衰退或死亡现象,因此说明在大面积栽植樟子松时,对于 20 a 的控制密度应<1 420 株/hm<sup>2</sup>,控制在 800 株/hm<sup>2</sup> 左右,但针对 33 a 密度应控制的范围还需进一步研究确定,但如果从生态用水方面考虑,对于防风固沙林建议选择低密度(400 株/hm<sup>2</sup> 左右)种植。在生产中作为三北地区主要防风固沙树种之一的樟子松固沙林应当降低种植密度,减少土壤水分消耗,保证樟子松人工固沙林长期稳定及可持续性。同时,低密度林分通过改变配置格局后,能够完全固定流动,促进带间植被与土壤修复<sup>[19-20]</sup>,这样即减少了生态用水,达到了防风固沙效果,又促进了生态恢复。

#### [参 考 文 献]

- [1] 雷志栋,胡和平,杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展,1999,10(3):311-318.
- [2] Simmons M T, Archer S R, Ansley R J, et al. Tree (*Prosopis glandulosa*) effects on grass growth: An experimental assessment of above-and below ground interactions in a temperate savanna [J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(4): 314-325.
- [3] 李新荣,张志山,王新平,等. 干旱区土壤—植被系统恢复的生态水文学研究进展[J]. 中国沙漠,2009,29(5): 845-852.
- [4] Wang Xinping, Berndtsson R, Li Xinrong, et al. Water balance chance for a re-vegetated xerophytes shrub area [J]. Hydrological Science Journal, 2004, 49(2): 283-295.
- [5] 李新荣,张志山,黄磊,等. 我国沙区人工植被系统生态—水文过程和互馈机理研究评述[J]. 科学通报, 2013, 58(5/6): 397-410.
- [6] 姜丽娜,杨文斌,姚云峰,等. 行带式固沙林带间植被恢复及土壤养分变化研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 98-103.
- [7] 朱教君,康宏樟,许美玲. 科尔沁沙地南缘樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林天然更新障碍[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4086-4095.
- [8] 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.
- [9] 吴祥云,姜凤岐,李晓丹,等. 樟子松人工固沙林衰退的主要特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2221-2224.
- [10] 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.
- [11] 移小勇,赵哈林,崔建垣,等. 科尔沁沙地不同密度(小面积)樟子松人工林生长状况[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1200-1207.
- [12] 韩辉,白雪峰,徐贵军,等. 章古台樟子松树干液流的密度特征[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(4): 27-31.
- [13] 焦树仁. 章古台沙地樟子松人工林的水量平衡分析[J]. 辽宁林业科技, 1985(6): 21-27.
- [14] 杨文斌,党宏忠. 土壤深层水量渗漏测试记录仪[P]. 中国, ZL201110252184. 7, 2014-07-02.
- [15] 苑增武,张庆宏,张延新,等. 不同密度樟子松人工林土壤水分变化规律[J]. 吉林林业科技, 2000, 29(1): 1-4.
- [16] 赵晓彬. 樟子松造林密度与沙层水分的关系研究[J]. 防护林科技, 2004(5): 4-6.
- [17] 曾德慧,姜凤岐,范志平,等. 沙地樟子松人工林自然稀疏规律[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 1200-1207.
- [18] 孙海红,刘广,韩辉,等. 章古台地区樟子松人工林土壤水分物理性质的研究[J]. 防护林科技, 2003(1): 15-17.
- [19] 杨文斌,王晶莹. 干旱、半干旱区人工林边行水分利用特征与优化配置结构研究[J]. 林业科学, 2004, 40(5): 3-9.
- [20] 杨文斌,郭建英,胡小龙,等. 低覆盖度行带式固沙林带间植被恢复过程及其促进沙地逆转效果分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1291-1295.