

基于树干液流通量的沙地樟子松合理 林分密度的确定

韩 辉¹, 张学利¹, 党宏忠^{2*}, 徐贵军¹, 张柏习¹, 尤国春¹

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

摘要:应用热扩散式树干茎流计(TDP)对辽宁省章古台樟子松人工固沙林生长季期间树干液流速率进行了连续5年的测定,结合同步观测的降水、林冠截留量、林内蒸发散量和土壤水分含量,利用水量平衡的方法,推算了现阶段樟子松应有的合理密度。结果表明:4月上中旬沙地樟子松液流启动,10月中下旬液流基本结束,生长季(4—10月)各月平均液流速率分别为2.58、4.78、5.19、5.01、4.84、4.30、1.93 cm·h⁻¹,以6月份的最高,其次依次为7、8、5、9月份,4、10两月平均液流速率较低。通过推算,径阶14、16、18、20 cm的樟子松纯林的合理密度分别应为688、531、422、344株·hm⁻²,现有同径阶的林分普遍存在密度过大的问题。研究结果对于现有林分的科学经营具有重要的指导意义。

关键词:液流速率;樟子松;章古台;密度

中图分类号:S791.253

文献标识码:A

Study on Proper Stand Density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantation in Sandy Land Based on Stem Sap Flow Velocity

HAN Hui¹, ZHANG Xue-li¹, DANG Hong-zhong², XU Gui-jun¹, ZHANG Bai-xi¹, YOU Guo-chun¹

(1. Liaoning Institute of Sand Fixation and Afforestation, Fuxin 123000, Liaoning, China;

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

Abstract: The precise determination of transpirational water-consumption is of great significance of the judgement of stand water balance. The present proper density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation was calculated by means of water balance based on 5 years' observation of the precipitation, the canopy interception, the forest evapotranspiration, the soil water content and the sap flow velocity (SFV) which was measured by thermal dissipation probe (TDP) during the growing season. The sap flow observation of *P. sylvestris* var. *mongolica* in Zhanggutai started in early April and ended in late October, the monthly average SFV during the growing season from April to October were 2.58, 4.78, 5.19, 5.01, 4.84, 4.30 and 1.93 cm·per hour respectively, the highest SFV appeared in June, higher SFV appeared in July, August, May and September successively and lower SFV appeared in April and October. Through calculating, the proper density of *P. sylvestris* var. *mongolica* in 14, 16, 18, 20 cm diameter class were 688, 531, 422 and 344 plants per hectare. Over-high density was the common problem existed in pure stands in the same diameter class.

Key words: sap flow velocity; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; Zhanggutai; stand density

收稿日期: 2015-01-19

基金项目: 辽宁省科技厅项目(2014207008)

作者简介: 韩 辉(1975—),男,高级工程师.主要研究方向:森林生态水文.电话:0418-6511225,E-mail:hanhui950023@163.com.

* 通讯作者: 博士,副研究员.主要研究方向:生态水文.E-mail:hzdang@caf.ac.cn

樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litvin.) 因具有较强的抗旱性和良好的速生性,成为我国三北地区主要的造林树种之一。在干旱、半干旱区,土壤水分往往是限制植物生长的最主要因子之一,樟子松人工林生长状况与水分间的关系因而成为急需明确的焦点问题之一^[1-7],自1991年章古台发生大龄樟子松人工林大面积衰弱死亡^[8-10]以来,对樟子松人工林稳定性^[11]以及樟子松人工林适宜密度的探讨成为了研究的热点^[12-14]。

TDP 茎流计采用热扩散原理,在保持树木自然状态不变的条件下,能连续精确测定整株树木的液流速率,结合对被测部位边材面积的测定,可以方便地求得边材液流通量即蒸腾耗水^[15-22]。对于樟子松,过去主要通过对比林木生长量的比较^[14]、或通过叶生物量估算樟子松耗水并进而估算密度^[12],用 TDP 测量液流速率也有报道^[23-24],本研究利用 TDP 茎流计连续 5 年(2010—2014 年)测定了章古台樟子松液流速率,结合边材面积的测定,运用水量平衡原理,推算樟子松人工林的合理密度。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

该项研究在辽宁省固沙造林研究所实验林场进行。该实验林场位于科尔沁沙地东南缘,地理位置 42°43' N, 122°22' E, 年均气温 6.3 °C, 全年无霜期

150~160 d, 年均降水量 475.5 mm, 降水变率大, 60%~70% 集中在 6—8 月, 年蒸发量 1 553.2 mm, 约为降水量的 3.27 倍。该区土壤以风沙土为主, 沙土颗粒均匀, 沙层厚度 126~128 m, 沙层的颜色和机械粒径成层更迭分布, 变化比较明显, 沙土瘠薄, 有机质含量较低, 一般为 0.3~0.99 g·kg⁻¹。主要代表性植物有色木槭 (*Acer mono* Maxim)、山里红 (*Crataegus pinnatifida* Bge. var. *major* N. E. Br.)、榆树 (*Ulmus pumila* L.)、大果榆 (*Ulmus macrocarpa* Hance)、山杏 (*Armeniaca sibirica* (L.) Lam)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor* Turcz.)、盐蒿 (*Artemisia halodendron* Turcz. ex Bess.)、中华隐子草 (*Cleistogenes chinensis* (Maxim.) Keng) 等。

1.2 材料与方法

1.2.1 材料 试验地均为林龄一致的樟子松纯林。在试验地的中间位置设置 25 m×40 m 观测样地, 将 TDP 茎流计于不同年份分别安装于各样地内, 于安装茎流计的春季在样地内进行每木检尺, 测量胸径、树高、冠幅(表 1)。根据平均胸径大小在样地内选取胸径相近且树干通直、生长良好、无病虫害的樟子松作为树干液流测定样木, 样木株数随探针数量而定。2010、2011 年 TDP 探针安装方向 2 根在树干的东面, 2 根在树干的南面, 1 根在树干的西面, 1 根在树干的北面, 其它年份均在树干北面, 具体安装过程见文献[25]。

表 1 樟子松树干液流观测样地基本情况

观测样地	观测时期	样木株数	林龄/a	密度/(株·hm ⁻²)	平均胸径/cm	活枝下高/m	树高/m	冠幅东西/m	冠幅南北/m
T1	2010-04-12-10-16	6	32	404	16.2	3.7	9.4	4.3	3.8
T2	2011-04-17-10-14	6	33	404	16.7	-	-	-	-
T3	2012-04-18-09-18	6	53	391	20.7	6.5	11.5	4.4	4.3
T4	2013-04-26-10-31	4	35	560	20.7	4.3	10.4	5.0	4.8
T5	2014-03-28-10-31	8	36	404	18.4	3.7	9.7	4.6	4.0

样地 T1、T2、T5 为同一块试验地, 1980 年用 2 年生樟子松裸根苗造林, 2000 年采取隔行去行、隔株去株间伐方式由 1 420 株·hm⁻² 调整为 404 株·hm⁻², 调整后株行距为 4 m×6 m, 封育至今。2010 年调查林下胡枝子、鼠李 (*Rhamnus davurica* Pall.) 等灌木盖度为 5%, 羊草 (*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)、野艾蒿 (*Artemisia lavandulaefolia* DC.)、毛秆野古草 (*Arundinella hirta* (Thunb.) Tanaka) 等草本盖度为 95%。样地 T3 为章古台 1955 年引种樟子松成功后造林最早的地块, 至 2012 年有卫生伐、修枝等营林措施。样地 T4 林缘有大果榆分布, 林内有

大果榆更新小苗存在, 小苗盖度 5%。

应用 FLGS-TDP 植物茎流计 (Dynamax, U. S. A) 测量并计算树干液流速率, 计算公式如下。

$$V_s = 0.0119 K^{1.231} \times 3600^{[25-26]}$$

式中: V_s 为液流速率 (cm·h⁻¹); $K = (dT_m - dT)/dT$, 其中 dT_m 为无液流时加热探针与参考探针的最大温差值, dT 为瞬时温差值。

$$\text{液流通量}(F) \text{ 计算式为: } F = \sum_{i=1}^n V_i \times A_s \times \Delta t$$

式中: F 为液流通量 (g); n 为取样次数; V_i 为第 i 次取样时的液流速率 (cm·h⁻¹); A_s 为边材面积

(cm^2); Δt 为取样间隔时间(h)。

1.2.2 樟子松可利用水量公式的确定 天然降水是章古台地区土壤水分的主要来源,当地沙土容易漏水漏肥,地表径流、壤中流和入渗到 300 cm 以下深层中的水量很少,可略去不计^[9,12]。又因当地沙土机械组成的特性以及地下水位下降难以被樟子松利用^[27]。章古台地区林分水量平衡公式^[12]可简写成: R_f (穿透雨量) + R_p (树干径流量) = E_1 (地表蒸发量) + E_2 (林下灌草蒸腾量) + S (乔木蒸腾量) + W (土壤贮水量变化量),观测表明,虽然土壤贮水量随当年气候条件年际变化较大,但多年连续观测的结果却几乎没有变化,即 $W = 0$ 。把 $E_1 + E_2$ 定义为林内蒸散量,根据土壤水分植被承载力的论述^[28-29]和水量平衡公式确定章古台土壤水分植被承载力,章古台地区一定时期林地土壤水分补给量 = Σ 林外降水量 - Σ 林冠截留量,樟子松可利用水量 = Σ 林外降水量 - Σ 林冠截留量 - Σ 林内蒸散量。

1.2.3 林冠截留量的测定 林冠截留量通过测定林外降水量、林内降水量、树干径流量来求算^[30]。在样地 T1、T2、T5 内进行。

1.2.4 林内蒸散量的测定 林内蒸散量包括土壤蒸发、草本蒸腾、枯落物截留。测量方法:用自制的小型蒸渗仪进行测量。自制小型蒸渗仪圆柱型,由内筒(盛放原位土壤柱体)、内筒底、漏斗渗漏器(用于采集土壤柱体渗漏水)、底座(用于放置土壤柱体和漏斗渗漏器)构成,材料为白钢。4月初或5月初,将3个装有原状土的自制蒸渗仪埋入待测林地的土壤中,上口略高出地面,周围土壤基本保持原状。生长季每隔5天定期用精度为1g的ACS-30型电子秤称量带原状土的内筒质量,如有入渗产生,用雨量器直接测量。蒸散量公式:

$$ES = (G_{前} - G_{本}) / 0.01 \times 3.14 + P - H$$

式中:ES 为林内蒸散量,单位 mm; $G_{前}$ 为内筒前一次称量的质量,单位:kg; $G_{本}$ 为内筒本次称量的质量,单位:kg; P 为上一次称质量距本次称质量期间的林内降水量,单位:mm; H 为上一次称质量距本次称质量期间自制蒸渗仪漏斗渗漏器承接的水量,单位:mm。2010、2011、2013、2014年在样地 T1 内进行。

1.2.5 樟子松边材面积的测定方法见文献^[30]利用胸径计算边材面积时胸径采用年初时与年末时的平均值。

1.2.6 林地土壤贮水量变化量的观测 分别于4

月初和10月末,在样地 T5 内的 0~300 cm 土层内,每 20 cm 取一层土样,采用烘干法测定不同土层的土壤含水量。9月末用环刀法测定各层土壤密度,土壤贮水量由公式 $W = \Sigma w_i = 0.1 \omega_i \gamma_{di} h_i$ 计算, W 为土壤贮水量(mm); ω_i 为第 i 层土壤含水率(%); γ_{di} 为第 i 层土壤干密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); h_i 为第 i 层土壤厚度(cm)。土壤贮水量变化量按公式 $\Delta W = W_{10\text{月末贮水量}} - W_{4\text{月初贮水量}}$ 计算。

1.2.7 地下水位变化量的观测 于2013年末在样地 T5 旁打井1眼,井深 20 m,在测绳的一端系上铅坠,从井口下放到触及水面以下,记下测绳位于地平面处的刻度,则该刻度到测绳水浸湿处的高度即为地下水位的深度。2014年3月末和10月末各测量1次,两者的差值即为地下水位的变化量。

1.2.8 土壤含水量的观测 用 TDR 仪器测量 0~180 cm 层次土壤体积含水量:于2013年8月末在样地 T5 内的行间埋设 TDR 测管,2014年4—10月每月10、20、30日测量土壤体积含水率,每 20 cm 为一个层次记录1次数据。

1.2.9 环境因子的监测 利用样地 T5 林外的 CAWS600-B 型自动气象站监测林外降水、太阳辐射、空气温度、空气相对湿度和风速。

2 结果与分析

2.1 晴天、雨天、多云天气状况时樟子松液流速率日变化

于2014年4—10月各月选出1日晴天作为各月晴日液流速率运动日变化,以1株样木为例(图1),可以看出,4月、10月相似,8月、9月相似,这4个月属单峰,5月、6月、7月相似,这3个月属双峰,

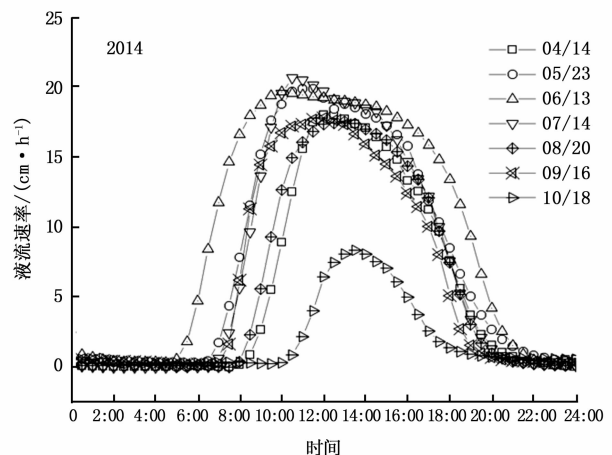


图1 典型晴天液流速率日变化过程

液流启动时间由早到晚依次为6月、5月、7月(9月)、8月、4月、10月。

以2014年6月1日至12日为例说明各种天气对液流速度的影响(图2)。6月1、3、4、5、10日为晴天,2日8:30—12:00,6日3:30—13:30时,7日00:30—21:00时,8日16:00—17:00时,9日4:30—7:00时,12:30—16:00时,11日12:00—13:00时段为降雨天气,可以看出,降雨持续时间的长短明显影响液流速率,短时降雨可使液流速率显著降低,但雨后液流速率马上恢复,但如果全天都在降雨,则液流速率几乎为零。多云天气时(12日)液流速率峰值呈锯齿状。

2.2 樟子松液流速度的季节变化

樟子松树干液流速率见表2,可以看出不同年份液流速率数值相差较大。2011年液流速率偏小的

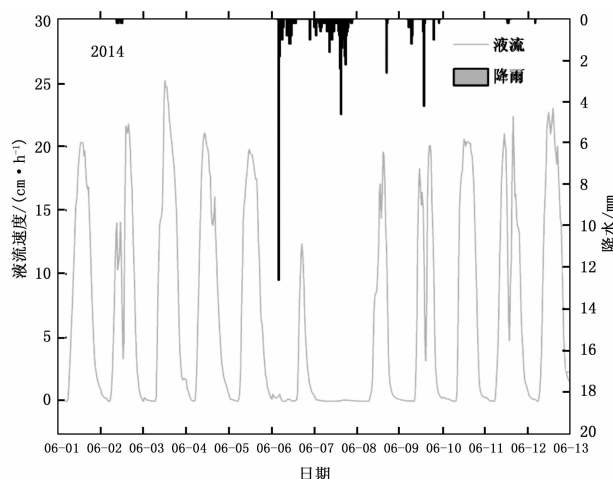


图2 不同天气情况下液流速度的日变化过程

主要原因是2011年降水量(354 mm)比年均降水量(476 mm)小25.6%,土壤含水量相应降低。

表2 樟子松树干液流

年份	平均液流速率/($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)									液流通量 总量/mm	同期降水 量/mm	液流通量/ 降水量/%
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	加权平均			
2010年	-	2.12	4.81	6.45	3.91	5.75	5.56	2.81	4.70	144.1	605.7	23.8
2011年	-	1.40	2.00	2.51	2.94	3.48	2.90	1.55	2.50	81.5	297.2	27.4
2012年	-	1.94	4.21	4.69	5.07	4.49	3.02	1.29	3.74	176.4	694.8	25.4
2013年	-	2.24	6.33	5.91	7.27	6.70	5.12	2.07	5.42	361.0	552.8	65.3
2014年	2.04	5.21	6.56	6.39	5.87	3.76	4.91	1.94	5.10	221.4	369.9	59.9
平均值	-	2.58	4.78	5.19	5.01	4.84	4.30	1.93	4.29	-	-	-

多年观测得知,液流启动时间一般在4月上中旬,结束时间一般在10月中下旬(图3),2014年春季气温较常年偏高,树液在3月末就开始流动,计算加权值时,3月没有计算在内。由于液流受天气、土壤含水量等因素影响较大,在推算樟子松合理密度时液流速率采用5年的平均值,每个月按日历天数计算,其中4月与10月按20天计算(实际生长天数)。

2.3 土壤含水量对液流速率的影响

液流速率受土壤含水量影响比较大,在土壤含水量波动较大时呈现出很大的波动性。我们定义土壤含水量在连续急速下降之前的数值为湿润期;在连续下降期间的土壤含水率数值为干旱期;有效降水后,土壤含水量连续急速上升后的数值为再湿润期。发现2014年7月14日—8月24日在土壤含水量经历由湿润—干旱—湿润过程中(图3),液流速率日峰值在此时间段内呈现出“V”型走势。2010年6月1日—7月23日期间降水较少,土壤较干旱,液流呈现出类似“U”型走势。2013年全年降水量比较多,土壤较湿润,5—9月各月液流速率数值相差不

大(5月15日—27日数据缺失)。总体而言,4月和10月液流速率小,其他月份相差不大。

2.4 气象因子对液流的影响

从图4中可以看出,液流速率与辐射的变化趋势基本一致,辐射的峰值出现时间要比液流速率峰值早0.5 h左右。空气温度对液流速率影响很大,对液流速率的影响与辐射的影响是相似的。空气湿度的变化与辐射呈负相关,辐射大则相对湿度小,相对湿度的增加会降低液流速率。风速与液流速率间没有明显的相关关系。

2.5 樟子松林分的水分再分配过程

林冠对降水的截留是樟子松林分水分循环中的一个重要分量。分别于2010、2011、2013和2014年,在样地T1中对樟子松林冠的截留进行了监测。实测林冠截留量占同期降水量的9.54%,树干径流量占0.2%。林冠截留量受降水强度、林分密度、叶面积指数影响较大。1983、1984两年的测定表明林龄25年,密度分别为 $1250 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $859 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的樟子松林,林冠截留量分别占同期降水量的21.4%、16.4%,树干径流量分别占降水量的3.1%、

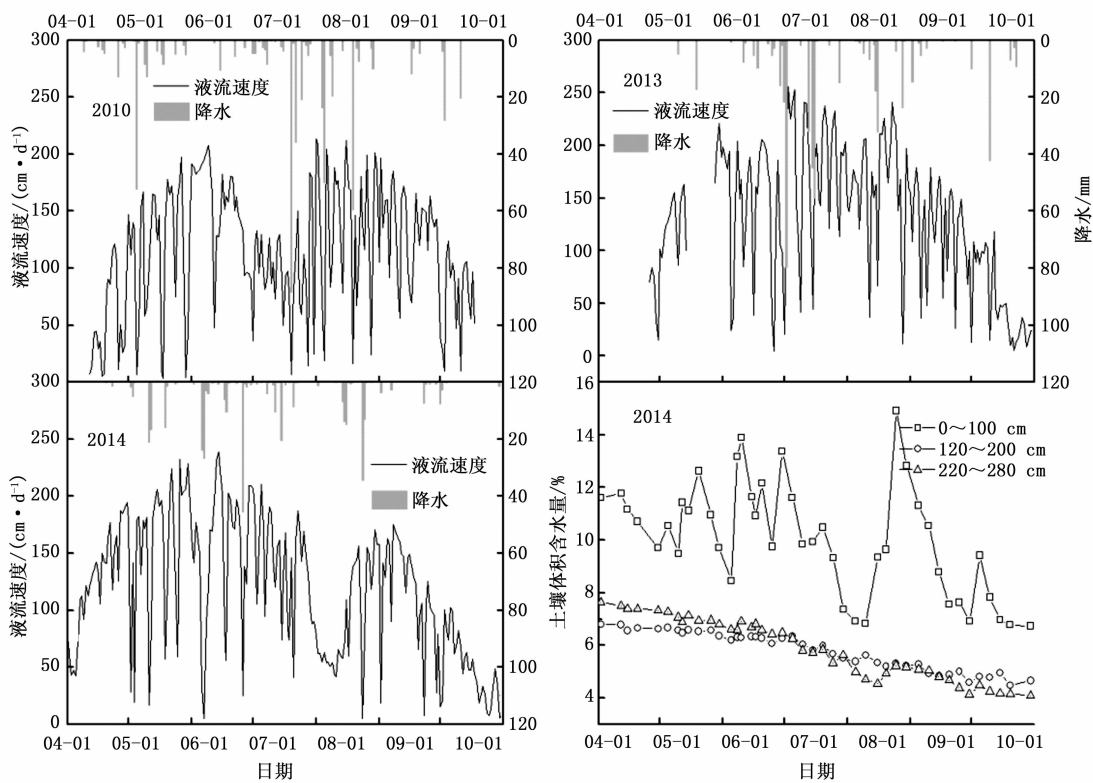


图3 不同年份降水对液流速率的影响

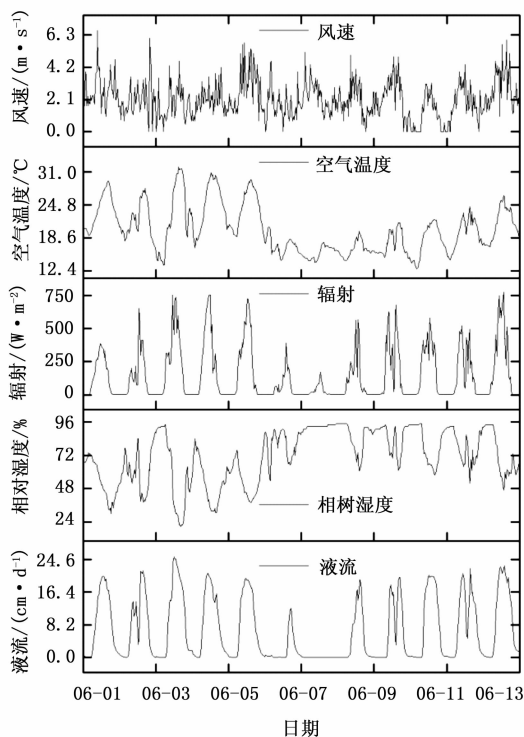


图4 气象因子与液流速率间的关系

2.7%^[1]。可见树干径流量所占比例较小,可忽略不计。本文采用平均值。

林内蒸散量是樟子松林水分循环中的另一个重要分量。几年来用自制蒸渗仪测量林外、林内蒸

散量得知,林外蒸散量占林外降水量的85.4%,林内蒸散量占林内降水的84.0%(见表3)。2011年、2014年生长季降水比常年严重偏少,属严重干旱年,林内蒸散量所占比例比较高。林内蒸散占林内降水的比例在不同年份变化较大,如在1983—1984年林龄25年,密度分别为859株·hm⁻²和1250株·hm⁻²的樟子松林地内用自制蒸渗仪测得林内蒸散量(土壤蒸发+草本蒸腾+枯落地截留量)占林内降水的比例分别为46.0%、21.3%和45.2%、17.7%,平均为31.5%^[1]。2010—2014年本试验林测得的值平均为84%,为了更具有代表性,在推算合理密度时取两者的均值,即(31.5%+84.0%)/2=57.8%作为林内蒸散量占林内降水量的比例为宜。

为了验证自制蒸渗仪测得蒸散量的准确性,以测得的2014年生长季樟子松人工林水量平衡各因子为例(见表4),樟子松林地流入量明显小于流出量,两者的差值应由土壤贮水量减少量和地下水来补充。流入量与流出量的差值较0~300cm土壤贮水量变化量和地下水位变化量少15.0mm(-237.6-(-52.6)-(-170.0)),可以认为是土壤300~374cm(4月初地下水位)层次土壤贮水量的减少量和测量这些因子时的误差所致。则2014年樟子松

人工林水量平衡各项因子数值是合理的,可以基本上认为自制蒸渗仪测量蒸散量的方法是可行的。实际上在降水量小的情况下樟子松也可以利用地下水来补充其水分消耗,从而使土壤水分出现了亏缺^[1]。

表3 2010—2014年的降水量与蒸散量

观测样地	时间	林外			林内		
		蒸散量/mm	降水量/mm	蒸散量/降水量/%	蒸散量/mm	降水量/mm	蒸散量/降水量/%
T1	2010-05-13-10-30	428.4	502.6	85.2	369.6	474.1	78.0
T2	2011-05-10-10-30	284.8	281.4	101.2	226.2	267.7	84.5
T2	2013-05-18-10-24	361.1	539.3	67.0	344.9	459.4	75.1
T5	2014-04-02-10-15	371.1	368.8	100.6	338.9	322.7	105.2
	合计	1 445.4	1 692.1	85.4	1 279.6	1 523.9	84.0

表4 2014年生长季樟子松人工林水量平衡各项因子

单位:mm

林外降水量	林冠截留量	流入			流出			流入-流出	0~300 cm土壤贮水量变化量	地下水位变化量
		林内降水量	树干茎流量	合计	樟子松液流通量	林内蒸散量	合计			
369.9	47.2	322.0	0.7	322.7	221.4	338.9	560.3	-237.6	-52.6	-170.0

已知生长季降水量、林冠截留量和林内蒸散量,可推算出樟子松林分可利用水量。章古台 1983—2014年平均降水量 477.4 mm,生长季 4—10月的降水量 448.8 mm,林冠截留率按 15.5% 计算。1—3月和 11—12月 5个月的降水量为 28.6 mm,可利用水量按 50% 计算。土壤贮水量变化量视为 0,因此生长季林内可供樟子松利用的水量为 $(448.8 \times (1 - 15.5\%) + 28.6 \times 50\%) \times (1 - 57.8\%) = 166.1 \text{ mm}$ 。

2.6 樟子松合理密度的计算

研究表明樟子松带皮胸径与边材面积的关系式为: $A_s = 0.7117 D_{BH}^{1.9472}$ ^[25]。其中, A_s 为樟子松边材面积, D_{BH} 为樟子松带皮胸径。用生长锥钻取胸径在 14~30 cm 范围内的樟子松木芯后,用有色溶液浸染

木芯,未观测到心材。根据液流通量公式,已知可利用水量、液流速率、液流时间,可计算出章古台每公顷樟子松胸径最大边材面积应为: $1.661 \times 10^9 / (2.58 \times 480 + 4.78 \times 744 + 5.19 \times 720 + 5.01 \times 744 + 4.84 \times 744 + 4.30 \times 720 + 1.93 \times 480) = 83 541.6 \text{ cm}^2$ 。

利用樟子松带皮胸径与边材面积关系式可计算出不同径阶的边材面积,则每公顷各径阶樟子松合理密度 = 每公顷最大边材面积/各径阶边材面积(见表 5)。这里确定的合理密度是指可以维持沙地樟子松人工林水量平衡而应采取的密度,如果特殊需要培育小径材或大径材可适当增加密度或者减少密度。

表5 章古台樟子松不同径阶合理密度

生长因子	林龄/a											
	14~15	16~18	19~22	23~25	26~30	31~34	35~40	>40				
胸径/cm	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
密度/(株·hm ⁻²)	2 047	1 326	929	688	531	422	344	286	241	206	179	156

3 结论与讨论

樟子松液流速率晴天为单峰或双峰曲线,多云天气为锯齿状的多峰曲线,降雨时间长短明显干扰液流活动,胸径大小与液流速率相关性不大^[31]。章古台樟子松液流速率与辐射、温度的变化基本一致,与空气湿度变化相反。在土壤水分经历由湿润-干旱-湿润过程中液流速率日峰值在此期间呈现出“V”型或“U”波动走势,液流速率在大时间尺度上受土壤含水量的波动而波动。液流速率月平均值最大值在各年里出现的月份并不固定,这是多种因素

共同作用的结果。

许多学者从不同角度对樟子松人工林的合理密度进行了大量的研究工作。以 25~30 a 生樟子松(胸径 14~16 cm)为例,原戈认为章古台地区 750~600 株·hm⁻²为宜^[8];曾德慧从水量平衡角度认为 965~699 株·hm⁻²为宜^[12];杨文斌在内蒙古呼和浩特东南郊区(年降水量 400 mm)测樟子松耗水量,认为 525 株·hm⁻²为宜^[3];苑增武在黑龙江省西部地区的讷河县用生物生产力比较的方式,认为樟子松中龄林 820~620 株·hm⁻²为宜^[4];张日升通过对不同密度樟子松生长量的比较,认为 21 a(胸

径 12 ~ 14 cm) ~ 31 a(胸径 18 ~ 20 cm)密度应控制在 1 000 ~ 500 株 · hm⁻²[17]。本研究利用液流速率、边材面积推算出了不同径阶(龄级)樟子松人工林的合理密度。推算的 14 ~ 16 cm 径阶樟子松密度为 688 ~ 531 株 · hm⁻²,比原戈、曾德慧、苑增武推算结果小,比杨文斌推算结果高一些,与张日升推算结果基本一致,结论的异同应是研究方法、测试手段和地理区域的不同造成的。

本项研究中只测定了 30 年生以上林分,并且认为不同林龄液流速率无差异,因为林地内林木分布均匀不存在被压木,没有区分优势木、中等木、劣势木液流速率的差别,只是选取平均木的液流速率做为计算的依据;林冠截留率、林内蒸散量所占降水量的比例直接影响着林内补充水量的多寡,此处用多年均值来计算,没有考虑林龄、叶面积指数的影响;自制小型蒸渗仪所测数值与实际蒸发散可能存在取样带来的误差,将在以后的研究中加以完善。

参考文献:

- [1] 焦树仁. 辽宁章古台樟子松人工林水分动态的研究[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1987, 11(04): 296 - 307.
- [2] 柴永红, 田炜煜, 张红叶. 樟子松在哲里木盟沙地造林的成效[J]. 内蒙古林业科技, 1989, 03: 16 - 18 + 13.
- [3] 杨文斌, 杨明, 任建民. 樟子松等人工林土壤水分收支状况及其合理密度的初步研究[J]. 干旱区资源与环境, 1992, (4): 47 - 54.
- [4] 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, 7.
- [5] 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 - 5, 8.
- [6] 张继义, 赵哈林, 崔建垣, 等. 科尔沁沙地樟子松人工林土壤水分动态的研究[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 1 - 6.
- [7] 罗玲, 廖超英. 榆林沙区不同立地条件引种樟子松生长特性的对比研究[J]. 西北农业学报, 2008, 17(3): 182 - 185, 204.
- [8] 原戈. 辽宁省沙地樟子松人工林衰退原因与治理对策[J]. 辽宁林业科技, 2000(6): 1 - 4.
- [9] 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.
- [10] 宋晓东, 刘桂荣, 陈江燕, 等. 樟子松枯死原因与防治技术研究[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2003, 4(2): 166 - 169, 177.
- [11] 曾德慧, 姜凤歧, 范志平, 等. 樟子松人工固沙林稳定性的研究[J]. 应用生态学报, 1996, 7(4): 337 - 343.
- [12] 曾德慧, 姜凤歧. 从水量平衡角度探讨沙地樟子松人工林的合理密度[J]. 防护林科技, 1995, (1): 4 - 7, 26.
- [13] 刘朝霞, 吕荣, 常金宝, 等. 沙地樟子松人工林适宜初植密度的确定及中龄林期密度调控研究[J]. 内蒙古林业科技, 1998, (1): 9 - 12, 33.
- [14] 张日升, 肖巍, 于红军, 等. 沙地樟子松人工林合理经营密度的研究[J]. 辽宁林业科技, 2014, (4): 12 - 15.
- [15] 隋旭红, 张建军, 文万荣. 晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4791 - 4798.
- [16] 党宏忠, 李卫, 张友焱, 等. 新疆杨边材贮存水分对单株液流通量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7801 - 7807.
- [17] 党宏忠, 杨文斌, 李卫, 等. 民勤绿洲二白杨树树干液流的径向变化及时滞特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2501 - 2510.
- [18] 孙龙, 王传宽, 杨国亭, 等. 应用热扩散技术对红松人工林树干液流通量的研究[J]. 林业科学, 2007, 43(11): 8 - 14.
- [19] 王华田, 马履一. 利用热扩式边材液流探针(TDP)测定树木整株蒸腾耗水量的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6): 661 - 667.
- [20] 王小菲, 孙永玉, 李昆, 等. 干热河谷大叶相思树干液流季节动态及其与气象因子的关系[J]. 林业科学研究, 2013, 26(2): 145 - 150.
- [21] 党宏忠, 张劲松, 李卫. 柠条主根液流与叶面积关系初探[J]. 林业科学研究, 2009, 22(5): 635 - 640.
- [22] 蒋文伟, 汤富彬, 刘志梅, 等. 天目山柳杉古树的液流特征研究[J]. 林业科学研究, 2012, 25(1): 58 - 64.
- [23] 张友焱, 周泽福, 党宏忠, 等. 利用 TDP 茎流计研究沙地樟子松的树干液流[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 78 - 80.
- [24] 孙慧珍, 赵雨森. 水曲柳和樟子松树干液流对不同天气的响应[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(1): 1 - 3.
- [25] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems[J]. Annales of Forest Science, 1985, 42(2): 193 - 200.
- [26] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, (3): 309 - 320.
- [27] 徐海涛. 章古台沙地影响樟子松生长主要生态因子的初探[J]. 辽宁林业科技, 1989, (2): 20 - 25, 5.
- [28] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1640 - 1647.
- [29] 郭忠升, 邵明安. 土壤水分植被承载力研究成果在实践中的应用[J]. 自然资源学报, 2009, (12): 2187 - 2193.
- [30] 韩辉, 白雪峰, 徐贵军, 等. 章古台地区樟子松人工林水量平衡初步研究[J]. 辽宁林业科技, 2012, (6): 8 - 11, 14.
- [31] 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, 82.