

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.020; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.020.

师劭彤, 李森, 冯超群, 等. 休眠期前后樟子松树干液流变化特征及其对环境因子的响应[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 215-223.

Shi Shaotong, Li Sen, Feng Chaoqun, et al. Changes of SAP flow of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and its response to environmental factors before and after dormancy[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 215-223.

休眠期前后樟子松树干液流变化特征及其对环境因子的响应

师劭彤^{1,2}, 李森^{1,2}, 冯超群^{1,2}, 程少颖^{1,2}, 雷声坤³, 刘忠华^{1,2}

(1.北京林业大学 生物科学与技术学院, 北京 100083;

2.林木育种与生态修复国家工程研究中心, 北京 100083; 3.榆林市榆阳区林业局, 陕西 榆林 719000)

摘要: [目的]探究毛乌素沙地樟子松不同时期耗水量规律, 阐明其对多种环境因子的响应关系, 揭示樟子松树干液流速率由生长期向休眠期的变化过程。[方法]2023 年 9 月 1 日—12 月 21 日利用热扩散探针技术连续监测樟子松液流变化, 同步测量了大气温度、太阳辐射以及饱和水汽压亏缺等多个环境因子。[结果](1) 在整个观测期内随休眠季来临大气温度、太阳辐射、饱和水汽压差均呈现出逐渐降低的显著性季节变化趋势。(2) 在日尺度上 11 月 4 日前樟子松树干液流存在显著的昼高夜低的单峰曲线, 4 日之后其液流昼夜变化没有明显的规律, 故定义 2023 年该试验地樟子松林于 11 月 4 日开始进入休眠期。(3) 在休眠前期樟子松液流日积累过程呈现“S”型, 胸径不同液流日积累总量存在显著差异。(4) 在休眠前期和休眠期内樟子松对环境因子的响应程度不同, 进入休眠期后其树干液流较为稳定, 影响液流速率的因素明显减少。[结论]毛乌素地区樟子松树干液流在 11 月初开始进入休眠期, 休眠前期树干液流主要受大气温度、空气相对湿度以及饱和水汽压差的影响, 其树干液流速率呈现显著的“先升高后降低”趋势, 随休眠期来临影响树干液流的因素显著减少, 液流变化趋势趋于稳定。

关键词: 樟子松; 树干液流; 日变化; 环境因子

中图分类号: S791.253; S715.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0215-09

Changes of SAP flow of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and its response to environmental factors before and after dormancy

Shi Shaotong^{1,2}, Li Sen^{1,2}, Feng Chaoqun^{1,2}, Cheng Shaoying^{1,2}, Lei Shengkun³, Liu Zhonghua^{1,2}

(1.College of Biological Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083,

China; 2.National Engineering Research Center of Forest Breeding and Ecological Restoration,

Beijing 100083, China; 3.Forestry Bureau of Yuyang District, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the water consumption rule of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in different periods in Mu Us Sandy land, to elucidate its response to various environmental factors, and to reveal the change process of SAP flow rate from growth period to resting period. [Methods] From September 1 to December 21, 2023, the thermal diffusion probe technology was used to continuously monitor the change of SAP flow of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, and to simultaneously measure atmospheric temperature, solar radiation, saturated water vapor pressure deficit and other environmental factors. [Results] (1) Atmospheric temperature, solar radiation and saturated water vapor pressure difference showed a significant seasonal trend of decreasing gradually with the approach of dormancy season during the whole observation period. (2) On the daily scale, there was a significant unimodal curve of SAP flow with day high and night low

收稿日期: 2024-05-29

修回日期: 2024-06-21

接受日期: 2024-06-27

资助项目: 国家林业和草原局项目(DNA-2021); 榆林市榆阳区林业局项目(2024XHFW049, 2024XHFW059)

第一作者: 师劭彤(2000—), 女, 河北邯郸人, 在读硕士, 研究方向为树木生长发育及其调控。E-mail: shishaotong@bjfu.edu.cn

通信作者: 刘忠华(1969—), 男, 北京人, 博士, 副教授, 主要从事木本植物生长发育及其调控机理研究。E-mail: liuzh6@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

before November 4, and there was no obvious pattern of diurnal variation of SAP flow after November 4, so it was defined that the pine forest in the test site began to enter a dormant period around November 4. (3) In the early dormancy period, the daily accumulation of liquid flow showed an ‘S’ pattern, and the total daily accumulation of liquid flow was significantly different with different DBH. (4) The response degree of pine to environmental factors was different in the early and dormant periods. After entering the dormant period, the SAP flow was relatively stable, and the factors affecting the flow rate were significantly reduced. [Conclusion] SAP flow in the Mu Us area began to enter the resting period in early November, and the SAP flow rate in the early dormant period was mainly affected by atmospheric temperature, air relative humidity and saturated water vapor pressure difference. The SAP flow rate showed a significant trend of ‘first increasing and then decreasing’. The factors affecting SAP flow significantly decreased with the arrival of the resting period, and the flow variation trend tended to be stable.

Keywords: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; SAP flow; diurnal variation; environmental factors

2023 年初,国家林业和草原管理局携手国家发展和改革委员会等 7 个部门,共同颁布了《全国防沙治沙规划(2021—2030 年)》,确定了毛乌素沙地在内的 7 个区域为全国防沙治沙重点建设区域。毛乌素沙地位于陕西省榆林市与内蒙古自治区鄂尔多斯市的交界地带,其覆盖面积达 4.22 万 km²^[1]。近年来,毛乌素沙地荒漠化问题已得到有效解决,并成功实现逆转,绿洲化过程显著^[2]。樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)作为毛乌素地区治沙造林提质增效的先锋物种,其树干液流特征的研究一直是生态研究的热点内容之一^[3],但是有关其休眠期前后树干液流差异的研究仍然较少,研究生长期向休眠期树干液流量的转变过程,有利于揭示樟子松应对季节变化和水分亏缺的抗逆性原理。

蒸腾作用在 SPAC(Soil-Plant-Atmosphere Continuum)即土壤植物大气连续体中起着关键作用^[4],植物根系吸收的水分绝大部分通过气孔以蒸腾作用的方式扩散到大气中^[5-6],已有大量研究聚焦于在生长期各种环境因子对树干液流的影响;李明阳等^[7]认为在分析樟子松边材液流的环境影响因素时,应聚焦于蒸发需求类相关因子,这一类别具体涵盖了诸如大气水分亏缺、空气温度以及太阳辐射强度等关键性环境变量;高铭雨等^[8]对陕北地区山地苹果树(*Malus pumila*)蒸腾耗水规律进行研究,发现山地苹果树在各生长阶段中,其树干液流的日间变化趋势与多项气象因素显著相关:太阳辐射强度、空气温度、饱和水汽压亏缺、风速及露点温度均展现出正向关联,而与相对湿度则存在明显的负相关性;李宝等^[9]在对雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)的液流速率进行分析时,发现其主要受制于温度条件、饱和水汽压差及光合有效辐射的显著影响,这些因素与液流速率之间展现出较高的相关性系数,体现了它们的主导作用。

樟子松活立木蒸腾耗水规律的准确测定,能够为毛乌素地区低水分消耗树种的筛选、优化林分密度配置以及科学规划城市绿地建设等提供坚实的理论支撑与实践指导^[10-11]。本研究运用热扩散探针技术,对不同胸径樟子松树干边材液流进行持续性的监测^[12],并结合同期获取的气象参数监测数据进行分析。本研究旨在探究毛乌素沙地樟子松进入休眠期的大致时间,深入剖析休眠前后樟子松液流速度动态变化趋势差异、各种环境因子的季节性波动模式以及液流变化与外部环境因素之间的互动联系与响应机制。此研究可以深化我们对毛乌素沙漠南缘樟子松人工林蒸腾特性的认识,为半干旱地区生态系统恢复以及树种选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验开展于陕西省榆林市榆阳区境内小纪汗林场(38.38°N, 109.57°E),地处毛乌素沙地南缘,目前营林总面积 24 412 hm²是国家防沙治沙综合示范区,也是“三北”防护林建设的重点林场之一。该基地海拔 1 160 m,年平均气温 8.3 °C,年平均降水量 365.7 mm,土壤质地为沙土,属于典型的大陆性边缘季风气候,四季冷暖分明,干湿各异^[1]。樟子松是林场内主要造林树种每公顷 405 株,约有 13 000 hm²,林场内还有新疆杨(*Populus alba* var. *pyramidalis* Bunge)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica* Krasch)、叉子圆柏(*Juniperus sabina* L.)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom)、塔落木羊柴(*Corethroedendron lignosum* var. *leave* L. R. Xu & B. H. Choi)等多种沙生植被类型。目前,基地内的樟子松林,已经由 50 cm 高的小苗长成 4~6 m 的大树,初步形成针阔叶混交林、草灌乔结合的稳定防护林体系。

1.2 样地设置及样树选择

本试验以毛乌素沙地南缘主要造林树种樟子松作为研究目标,分别选取树龄为12,17,22 a且生长状况良好、无病虫害、树干圆满通直的3棵樟子松样树作为观测对象,试验周期为2023年9月1日—12月21日。樟子松样树基本情况见表1。

沙地樟子松边材面积采用Dang等^[13]的边材面积计算方法:

$$y = 0.7117x^{1.9472} \quad (R^2 = 0.99, N = 25) \quad (1)$$

式中: y 为边材面积(mm^2); x 为胸高直径(mm)。

表1 樟子松样树信息

Table 1 Features of sample trees in the *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

序号	胸径/ mm	树高/ m	冠幅/ m	树龄/ a	边材面积/ mm^2
1	20.5	1.9	0.6	12	255.002
2	126.7	3.72	1.5	22	8847.562
3	54.8	3.26	0.8	17	1730.017

1.3 环境因子测定

气象因子的测定时间与樟子松树干液流测定同步进行。在样地附近设置小型自动气象站,利用气象站对太阳辐射(SR , W/m^2)、风速(W , m/s)、空气相对湿度(RH , %)、大气温度(T_a , $^{\circ}\text{C}$)、饱和水汽压差(VPD , kPa)、降雨量(R_a , mm)6个不同指标进行监测,监测时间间隔为30 min(此数据来源于中国地质调查局西安地质调查中心,乔冈)。同时在样地附近设置土壤水分观测样点,在4个不同深度(−10, −20, −40, −100 cm)安装土壤水分传感器对土壤体积含水率(SWC , %)进行监测。

饱和水汽压差是指在一定温度下,饱和水汽压与空气中的实际水汽压之间的差值,它表示的是实际空气距离水汽饱和状态的程度,即空气的干燥程度。饱和水汽压差可由空气相对湿度和大气温度估算得出。饱和水汽压差公式计算如下^[14]:

$$\text{VPD} = 0.61078e^{\frac{17.27 \times T_a}{T_a + 237.3}} \times (1 - \text{RH}) \quad (2)$$

式中: VPD 为饱和水汽压差(kPa); RH 为空气相对湿度(%); T_a 为大气温度($^{\circ}\text{C}$)。

1.4 树干液流测定

本试验采用热扩散法,是目前应用最广泛的测量树干液流的方法,包括加热探针和参考探针^[15],探针长度30 mm直径2 mm,记录时间间隔为10 min,原理由Granier提出^[16-17]。采用热技术手段能够实现树干液流传输速度的即时监测,尤其便利了户外现场的研究应用^[17-18],该方法有助于透彻揭示树木蒸腾作用的动力学特征及相关内在机制。尤为重要的是,

当与气象环境因素的并行监测数据相结合时,可进一步剖析蒸腾水分损耗与外界环境条件之间的响应机制。安装时要求樟子松树干通直,探针安装区域保证上下30 cm均无损坏。为消除太阳辐射对测量准确性可能产生的干扰,所有探针均被规范安装于树干背阴面(即北侧),并采取铝箔包裹的防护措施;此外,利用防水胶带及玻璃胶严密封闭铝箔与树干接触部,以确保雨水无法渗透,影响探针的正常功能^[19]。

本试验采用的是北京雨根科技有限公司生产的RRTDP30植物茎秆液流传感器,通过采集器获得实时温差值,10 min内通过单位边材面积液流量为^[7,13]:

$$F_s = 118.99 \times 600 \times A_s \times \left(\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (3)$$

式中: F_s 为单位时间内液流量(g); A_s 为导水边材部分的横截面积(m^2); ΔT 为加热探针和参考探针之间的温度差; ΔT_{\max} 为一天中两探针温差的最大值。

一天内通过单位边材面积的液流总量为:

$$W_s = \sum_{i=1}^{144} F_{s_i} \quad (4)$$

式中: W_s 为总液流量(g); F_s 为10 min内液流量(g)。

1.5 数据分析

采用Excel 2016软件对2023年9—12月份樟子松树干液流速率与气象因子进行数据整理;采用SPSS软件对树干液流与气象因子的数据进行Pearson相关性分析;采用Origin 2024软件作图。

2 结果与分析

2.1 环境因子变化特征

如图1所示,大气温度(T_a)、太阳辐射(SR)、饱和水汽压差(VPD)均展现出显著的季节性变化特点。整个观测期内日均气温为 6.47°C ,日均气温变化范围 -20.15°C (12月21日)~ 24.13°C (9月4日)。日平均气温(T_a)、日最高气温(T_{\max})和日最低气温(T_{\min})均呈现出逐步递减的趋势,具体而言,最高温度为 30.40°C ,记录于9月3日;而最低气温则低至 -25.60°C ,发生在12月21日。整个观测期内日均太阳辐射值为 $5\,941.63\text{ W}/\text{m}^2$,日均太阳辐射最大值为 $12\,914.40\text{ W}/\text{m}^2$,最小值为 $374.20\text{ W}/\text{m}^2$,分别出现在9月3日和12月14日,日均太阳辐射值自9月1日—12月21日呈现缓慢下降趋势。整个观测期内日均饱和水汽压差值呈现缓慢下降趋势,日均饱和水汽压差值为 1.02 kPa ,日均饱和水汽压差值的变化范围为 $0.12\sim 2.32\text{ kPa}$,最高值和最低值分别出现于9月5日和12月21日。根据数据所示,气温、太阳辐射强度及饱和水汽压差的峰值均在9月上旬达

到顶点,分别为 $30.40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $12\ 914.40\text{ W/m}^2$, 2.32 kPa ,最小值均出现在 12 月末。

在试验监测阶段,共记录到 17 次雨量事件,总计降水量达 76.2 mm 。其中单次降雨的最大量为 15.6 mm ,而最小降雨量则为 0.2 mm 。值得注意的是,降雨量不足 5 mm 的轻度降雨事件共出现了 11 次,其总量为 10.6 mm ,占整个监测周期内总降水量的 13.9% ,降雨强度超过 5 mm 的较大降雨事件共有 6 次发生,累计贡献了 65.6 mm 的降水量,占据了总降水量的 86.1% 。

在 -10 , -20 , -40 , -100 cm 这 4 个深度安装土壤水分探头,如图 1 所示,不同深度土壤体积含水

率变化范围分别为 $0.20\%\sim 10.65\%$, $0\sim 11.69\%$, $0\sim 9.28\%$, $0.26\%\sim 1.24\%$,平均土壤体积含水率分别为 6.07% , 6.05% , 6.13% , 0.64% 。在降水事件发生之后,观察到 10 cm 和 20 cm 深度土壤的水分含量急剧增加, 40 cm 深度的土壤体积含水率变化不显著,呈现出较为温和的变化态势,相比之下 100 cm 深度的土壤体积含水率几乎不受降雨事件的影响。在观测阶段中,单日最大降水量记录为 15.6 mm ,此事件发生在 10 月 17 日,直接促使 10 cm 与 20 cm 表层土壤含水率攀升至峰值。表层土壤体积含水率极易受到降雨事件的影响,呈现出较大的波动;反之,深层土壤体积含水率则表现出较高的稳定性。

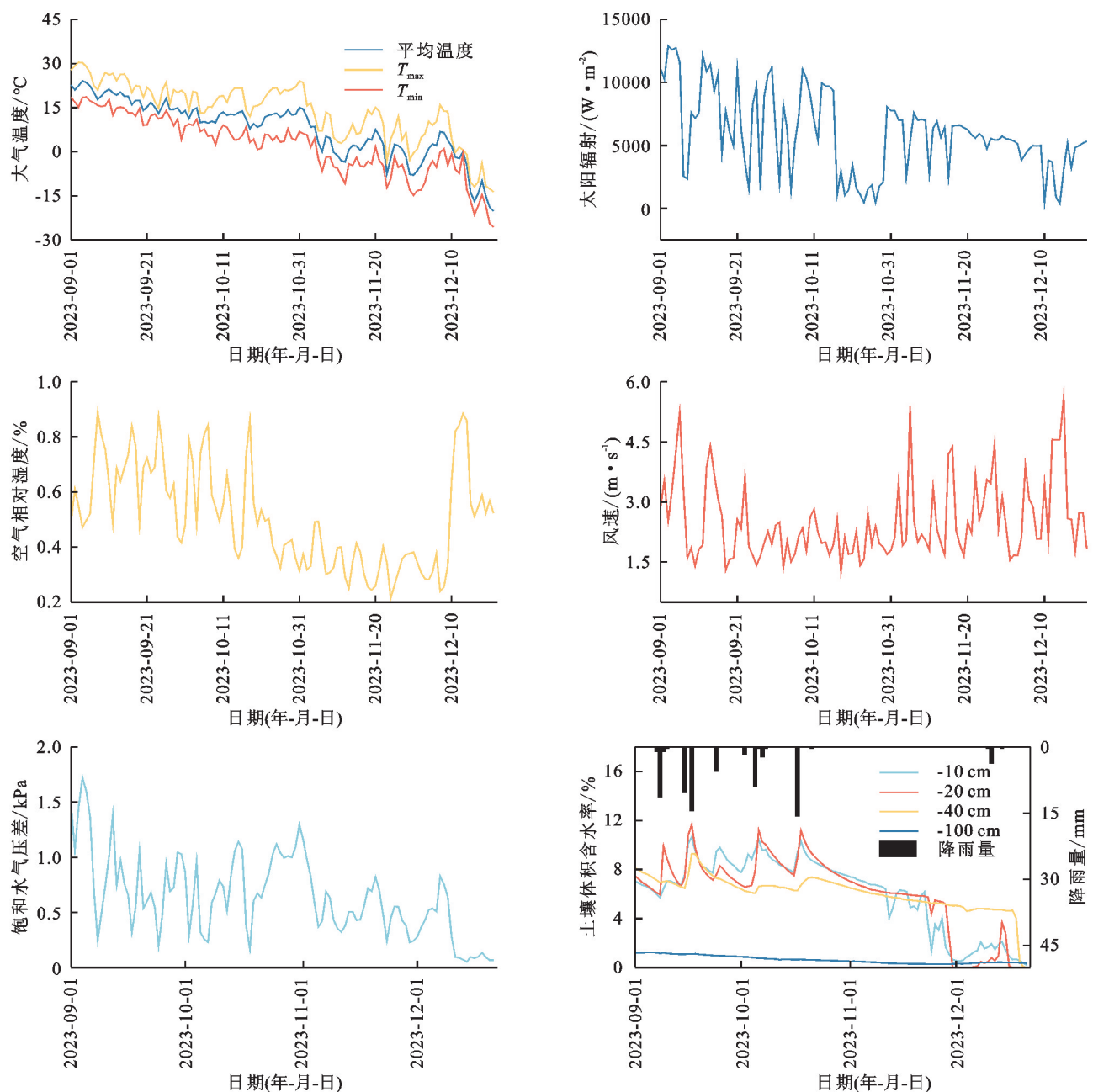


图 1 环境因子变化特征

Fig. 1 Temporal variations of environmental factors

2.2 树干液流变化及休眠时间确定

由图2可以看出,11月3日前樟子松树干液流速率存在明显的昼夜变化规律,除阴雨天气外,3棵样树树干液流日进程变化趋势均呈现严格的昼高夜低的单峰曲线,白天液流速率显著高于夜间,夜间基本没有树干液流。不同胸径的樟子松样树单日液流速率的峰值不同,样树1胸径为20.5 mm,其液

流速率峰值变化范围为21.241~51.142 g/h;样树2胸径为126.7 mm,其峰值变化范围为872.758~1 346.270 g/h;样树3胸径为54.8 mm,其峰值变化范围为95.278~202.079 g/h,随胸径增加最大液流速率也增加。11月4日后樟子松单日树干液流速率波动较大,不存在单峰曲线也没有明显的峰值,故定义其11月初开始进入休眠期。

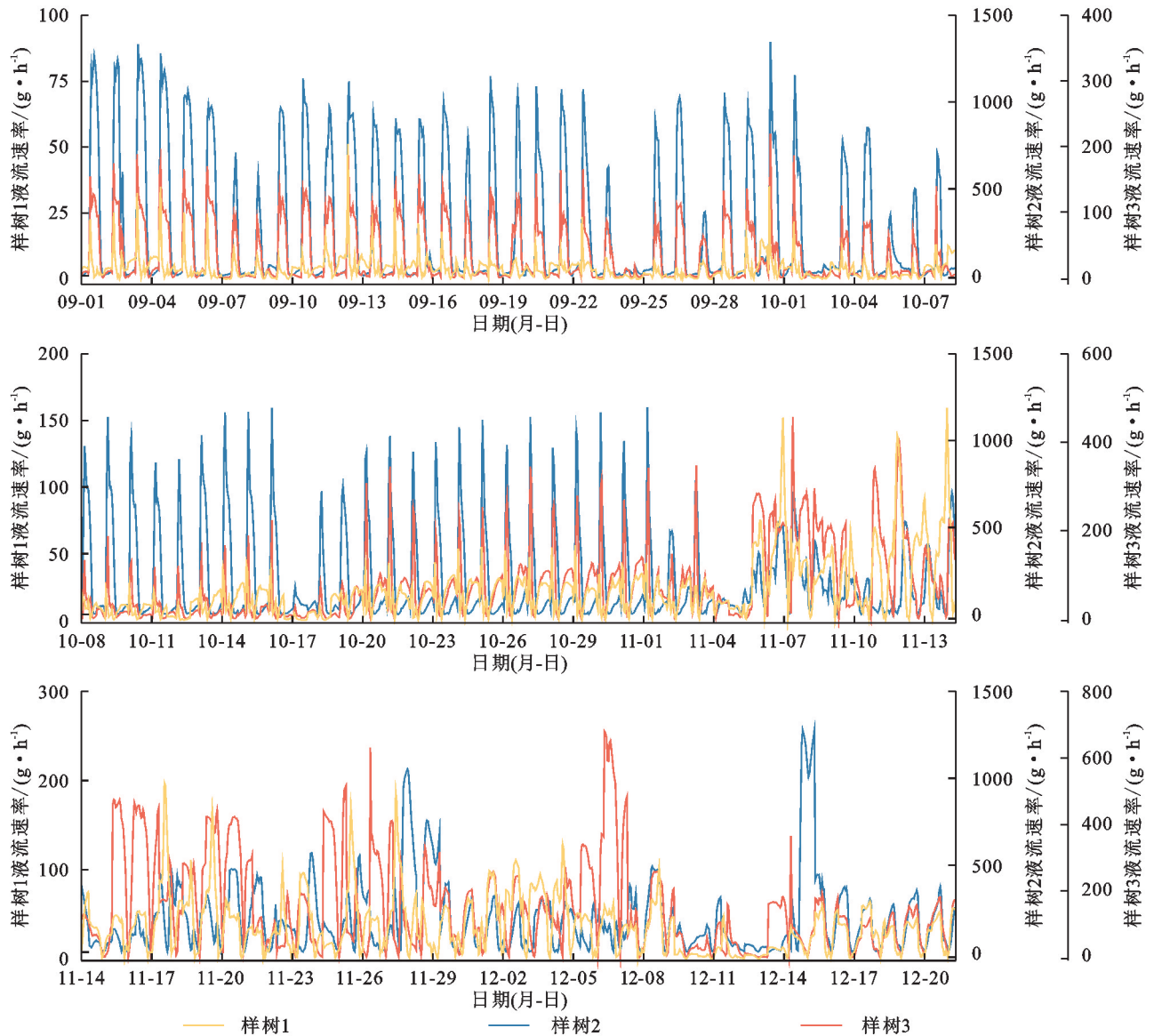


图2 液流速率连日变化

Fig. 2 Diurnal fluctuation of sap flow velocity

对休眠前期和休眠期小时尺度液流速率分别进行平均,如图3所示,在休眠前期样树2和样树3液流启动时间和结束时间大致相同,均于上午7:00左右开始启动,此后单位小时液流量迅速升高,样树2在12:00达到峰值,其小时尺度最大液流量为796.450 g,样树3在11:00达到峰值,其小时尺度最大液流量为114.784 g,经历峰值后单位小时液流量逐步下降于20:00左右降到最低,存在微弱的夜间液

流,樟子松样树1的小时尺度液流速率则没有呈现显著的先升高后降低的变化趋势。

进入休眠期后,单日内樟子松树干液流速率较为稳定,3棵样树平均每小时液流量均不高于200 g,样树1 h尺度平均液流量为37.616 g,样树2 h尺度平均液流量为176.159 g,样树3 h尺度平均液流量为147.762 g。休眠期单日小时尺度平均液流量与胸径呈正相关关系。

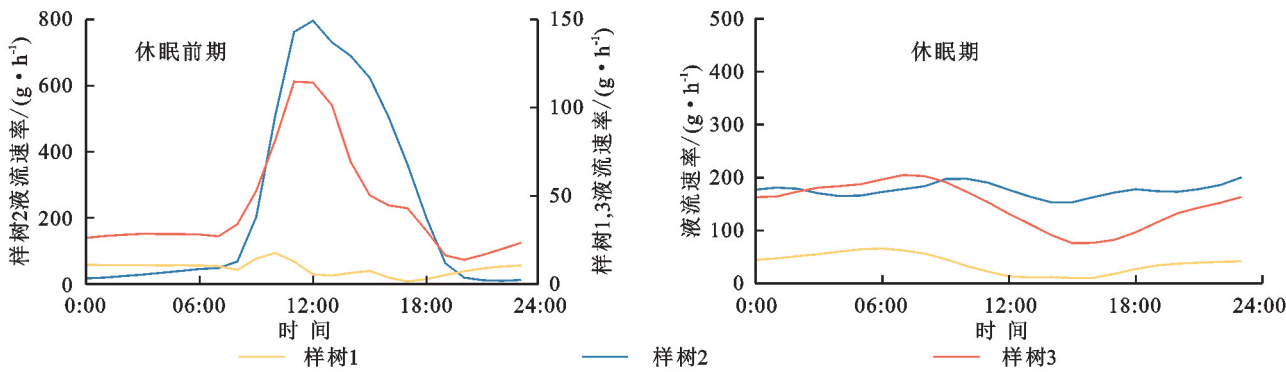


图 3 液流速率变化规律

Fig. 3 Variation of SAP flow rate

2.3 休眠期前后液流日变化及液流积累过程差异

对休眠前期和休眠期 3 棵樟子松样树的液流日积累过程进行观测,不同胸径樟子松树干液流总积累量存在显著差异(表 3),单日树干液流量积累过程也明显不同(图 4)。胸径为 126.7 mm 的樟子松样树 2 在休眠前期其液流日积累过程曲线为“S”型,树干液流开始于 7:00 左右,在 9:00—18:00 液流速率为一天中最高,18:00 起液流速率逐渐减缓,夜间液流速率基本为零,在休眠前期其平均单日液流总积累量为 5 826.496 g。进入休眠期后单日内其液流速率较为稳定,约为 181.094 g/h,单日液流积累总量为 4 346.263 g。夜间也有较为稳定的液流,不存在先升高后降低的过程。样树 3 胸径为 54.8 mm,其液流速率在休眠前期也存在先升高后降低的趋势,自 9:00 液流速率开始升高,16:00 逐渐平缓,夜间也存在

较低的液流速率,其休眠前期平均单日液流积累总量为 1 048.398 g,休眠期平均单日液流积累总量为 3 491.513 g。樟子松样树 1 胸径为 20.5 mm,其休眠前后液流积累过程没有显著差异,其休眠前期平均单日液流积累总量为 212.445 5 g,休眠期平均单日液流积累总量为 881.933 6 g。休眠前期和休眠期樟子松树干液流日积累进程存在显著差异,胸径不同单日总积累量也有显著差异。

表 3 液流日积累量差异

Table 3 Daily accumulation difference of SAP flow

胸径/mm	边材 面积/mm ²	液流积累量/g	
		休眠前期	休眠期
20.5	255.002	212.4455	881.9336
126.7	8847.562	5826.4960	4346.2630
54.8	1730.017	1048.3980	3491.5130

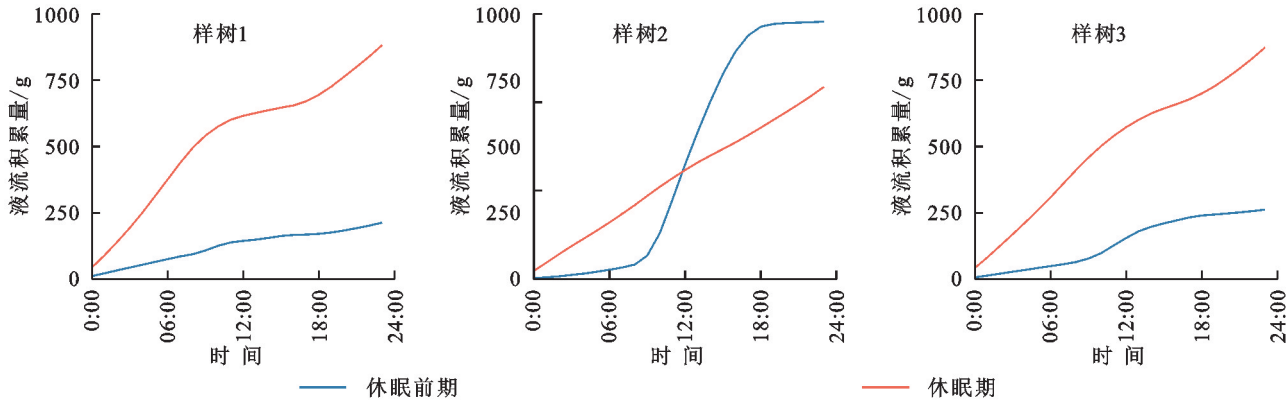


图 4 樟子松液流速率积累量

Fig. 4 Daily accumulation of SAP flow velocity in *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

2.4 休眠期前后液流影响因素分析

利用双变量相关性分析进行 Pearson 相关系数检验,由图 5 可知,在休眠前期樟子松单日液流量与大气温度、太阳辐射、风速、饱和水汽压差呈显著正相关,与空气相对湿度和浅层土壤体积含水率呈显著负相关($p<0.05$)(浅层土壤体积含水率是指-10,-20,-40 cm 深度的土壤体积含水率平均值)。进

入休眠期后单日内樟子松树干液流量仅与空气相对湿度和太阳辐射呈现显著相关($p<0.05$),与其他各项参数均无显著相关性($p>0.05$)。

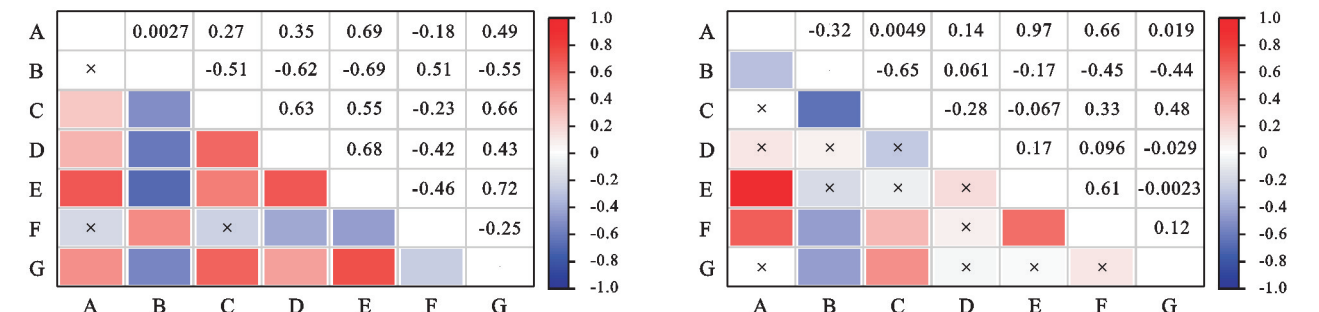
3 讨论

3.1 樟子松树干液流对环境因子的响应

外部环境要素是促进树干内液流运动的关键驱

动力^[13,20],已有大量研究表明,树干液流速率与各项环境因子之间存在响应关系^[21-22]。本文采用相关性分析发现,日尺度上毛乌素地区樟子松树干液流速率

对环境因子的响应在休眠前期和休眠期存在显著差异,进入休眠期后树干液流速率波动较小,对环境因子的响应减弱。



注:×表示在 0.05 级别无显著相关性;A 表示大气温度;B 表示空气相对湿度;C 表示太阳辐射;D 表示风速;E 表示饱和水汽压差;F 表示浅层土壤体积含水率;G 表示单日液流总量。

图5 日尺度下液流速率与环境因子的相关性

Fig. 5 Correlation analysis between SAP flow velocity and environmental factors on the daily scale

土壤含水量是维系生态恢复的重要因子^[23]。在本研究中,休眠前期樟子松树干液流速率与表层土壤体积含水率之间存在显著负相关,表层土壤体积含水率受降雨事件的影响显著,故推测降雨事件的发生通过影响表层土壤体积含水率来对树干液流速率造成影响,这一点与孔喆等^[24]对北京顺义区欧美杨(*Populus euramericana*)树干液流速率对土壤含水量的响应关系之间的研究结果一致。因此在进行树木蒸腾耗水研究时,不能只研究其对气象因子的响应,也要关注土壤因素对树木根系吸水造成的影响。

3.2 休眠期与生长期樟子松树干液流差异

树干液流是指在叶片蒸腾的驱动作用下,水分从木质部由下向上运输的过程,11月初气温逐渐降低,树木各项生理机能减弱,叶片开始衰老变色,依赖叶片蒸腾作用拉力的树干液流速率也开始降低,液流速率日变化波动逐渐平缓,樟子松开始由夏季生长期逐步进入休眠期。本研究中11月4日前,樟子松树干液流速率呈现显著的“单峰曲线”,单日液流总积累量过程呈现“S”型,与樊文会^[3]对毛乌素沙地樟子松树干茎流的研究结果一致,11月4日后樟子松单日树干液流速率日变化没有显著的峰值,积累过程也不存在“S”型曲线,与生长期樟子松树干液流规律存在显著差异,故定义该试验地樟子松于11月4日左右开始进入休眠期。

在休眠前期樟子松样树2和样树3树干液流速率日变化曲线呈现“几”字形,符合植物生长规律,而样树1的小时尺度树干液流速率并没有表现出先升高后降低的趋势,并且其单日总液流量积累过程也与样树2,3存在显著差异,猜测可能是其胸径太小木质部发育不完全导致的。

另一个值得注意的现象是,休眠期夜间也有较为

稳定的高于生长期夜间的液流量。此前已有研究表明,在所有物候期中,夜间液流对整日液流的贡献在落叶期达到最高^[25]。随休眠期来临樟子松树干液流速率昼夜差距逐渐减小,夜间液流占整日树干液流的比例逐渐增加。进入休眠期后樟子松树干液流速率日变化较为稳定,与生长期“昼高夜低”的单峰曲线形成鲜明对比,这一转变揭示了樟子松在面对冬季严寒到来之前的适应性和预备机制,此机制极有可能是确保毛乌素沙地多样植物种群安然越冬的关键因素之一^[26]。

4 结论

11月初毛乌素沙地樟子松日间液流速率受环境因子影响显著降低,开始进入休眠期,说明在樟子松的生命活动中,生长期与休眠期的往复更迭,与四季更替所引发的物候变迁具有同步性^[27]。在休眠前期,环境因子对树干液流的影响存在差异,大气温度、空气相对湿度以及饱和水汽压差是影响毛乌素沙地樟子松蒸腾耗水的主要环境因素,同时,降雨事件的发生也对树干液流有一定的影响作用。随休眠期来临樟子松液流速率对环境响应减弱,其单日树干液流积累量逐渐降低,揭示了樟子松在进入休眠阶段物候期间生理功能响应的动态演变过程。在生长期和休眠期樟子松单日树干液流变化规律存在显著差异,因此研究树木蒸腾耗水时不能忽略休眠期液流,应该充分考虑植物生长的季节性周期变化,以期揭示樟子松树干液流由生长期向休眠期转变过程的分子机理。

参考文献(References):

- [1] 宋云民.毛乌素沙地主要树种水分特征及植被恢复模式研究[D].长沙:中南林业科技大学,2007.
Song Y M. Research on water characteristics of tree

- species and revegetation mode in Maowusu Desert[D]. Central South University of Forestry & Technology, 2007.
- [2] 杨皓钦,王海兵,左合君,等.毛乌素沙地绿洲化土地变化模式及稳定性[J].应用生态学报,2024,35(3):687-694.
Yang H Q, Wang H B, Zuo H J, et al. Change pattern and stability of oasisization land in Mu Us Sandy Land [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3): 687-694.
- [3] 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.
Fan W H. Study on water consumption characteristics of three typical afforestation trees in Mu Us Sandy[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [4] He Q Y, Yan M J, Miyazawa Y, et al. Sap flow changes and climatic responses over multiple-year treatment of rainfall exclusion in a sub-humid black locust plantation[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 457: 117730.
- [5] Song L N, Zhu J J, Li X, et al. Transpiration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* trees at different positions of sand dunes in a semiarid sandy region of Northeast China[J]. Trees, 2022, 36(2): 749-762.
- [6] Sun X, Li J, Cameron D, et al. Sap flow monitoring of two Australian native tree species in a suburban setting: implications for tree selection and management [J]. Plant Science: An International Journal of Experimental Plant Biology, 2022, 317: 111194.
- [7] 李明阳,党宏忠,陈帅,等.毛乌素沙地南缘樟子松树干液流特征及其对环境因子的响应[J].干旱区资源与环境,2023,37(4):153-161.
Li M Y, Dang H Z, Chen S, et al. Sap flow variation in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation at the southern margin of Mu Us sandy land and its response to environmental factors [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(4): 153-161.
- [8] 高铭雨,刘敏,王俊,等.陕北安塞山地苹果树干液流变化特征及其对环境因子的响应[J].延安大学学报:自然科学版,2024,43(2):49-55.
Gao M Y, Liu M, Wang J, et al. Characteristics of apple SAP flow and its response to environmental factors in Ansai Mountain area of northern Shaanxi Province [J]. Journal of Yanan University: Natural Science Edition, 2024, 43(2): 49-55.
- [9] 李宝,常顺利,孙雪娇,等.天山北坡雪岭云杉森林的蒸腾耗水规律[J].西部林业科学,2022,51(5):106-112.
Li B, Chang S L, Sun X J, et al. Transpiration and water consumption patterns of *Picea schrenkiana* forests in northern Tianshan[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(5): 106-112.
- [10] 郭孟霞,毕华兴,刘鑫,等.树木蒸腾耗水研究进展[J].中国水土保持科学,2006,4(4):114-120.
Guo M X, Bi H X, Liu X, et al. Review on the water consumption of tree transpiration[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(4): 114-120.
- [11] 赵春彦,司建华,冯起,等.树干液流研究进展与展望[J].西北林学院学报,2015,30(5):98-105.
Zhao C Y, Si J H, Feng Q, et al. Stem sap flow research: progress and prospect[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 98-105.
- [12] Granier A, Biron P, Bréda N, et al. Transpiration of trees and forest stands: short and long-term monitoring using sapflow methods[J]. Global Change Biology, 1996, 2(3): 265-274.
- [13] Dang H Z, Han H, Chen S, et al. A fragile soil moisture environment exacerbates the climate change-related impacts on the water use by Mongolian Scots pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in northern China: long-term observations[J]. Agricultural Water Management, 2021, 251: 106857.
- [14] 任启文,张岩,李联地,等.不同时间尺度下落叶松液流速率与森林小气候的关系[J].中南林业科技大学学报,2018,38(12):30-37,44.
Ren Q W, Zhang Y, Li L D, et al. Relationship between sap flow velocity of *Larix principis-rupprechtii* and forest microclimate in different time scales [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(12): 30-37, 44.
- [15] 宋博华,高歌,高珊,等.基于热技术的活立木液流测量方法综述[J].浙江农林大学学报,2022,39(2):456-464.
Song B H, Gao G, Gao S, et al. Overview of the methods for sap flow measurement of standing tree based on thermal technology[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(2): 456-464.
- [16] 赵小宁,田晓楠,李新,等.Granier 原始公式计算树干液流速率的适用性分析:以毛白杨为例[J].植物生态学报,2023,47(3):404-417.
Zhao X N, Tian X N, Li X, et al. Analysis of applicability of Granier's original equation for calculating the stem sap flux density: take *Populus tomentosa* as an example[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(3): 404-417.
- [17] Siqueira J M, Paço T A, Silva J M D, et al. Biot-Granier Sensor: a novel strategy to measuring sap flow in trees[J]. Sensors, 2020, 20(12): 3538.
- [18] 郑怀舟,朱锦懋,魏霞,等.5种热动力学方法在树干液流研究中的应用评述[J].福建师范大学学报:自然科学版,2007,23(4):119-123.
Zheng H Z, Zhu J M, Wei X, et al. Review on the five

- thermodynamic technology applied in the research of sap flow [J]. Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition, 2007, 23(4): 119-123.
- [19] 党宏忠,冯金超,韩辉.沙地樟子松边材液流速率的方位差异特征[J].林业科学, 2020, 56(1): 29-37.
- Dang H Z, Feng J C, Han H. Characteristics of azimuthal variation of sap flux density in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* grown in sandy land[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(1): 29-37.
- [20] 党宏忠,却晓娥,冯金超,等.晋西黄土区苹果树边材液流速率对环境驱动响应[J].应用生态学报, 2019, 30(3): 823-831.
- Dang H Z, Que X E, Feng J C, et al. Response of sap flow rate of apple trees to environmental factors in Loess Plateau of Western Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 823-831.
- [21] Zhang J G, Guan J H, Shi W Y, et al. Interannual variation in stand transpiration estimated by sap flow measurement in a semi-arid black locust plantation, Loess Plateau, China[J]. Ecohydrology, 2015, 8(1): 137-147.
- [22] Ryan M G, Phillips N, Bond B J. The hydraulic limitation hypothesis revisited[J]. Plant, Cell & Environment, 2006, 29(3): 367-381.
- [23] 李浩,胡顺军,朱海,等.基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究[J].生态学报, 2017, 37(21): 7187-7196.
- Li H, Hu S J, Zhu H, et al. Characterization of stem sapflow *Haloxyylon ammodendron* by using thermal dissipation technology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7187-7196.
- [24] 孔喆,陈胜楠,律江,等.欧美杨单株液流昼夜组成及其影响因素分析[J].林业科学, 2020, 56(3): 8-20.
- Kong Z, Chen S N, Lü J, et al. Characteristics of *Populus euramericana* sap flow over day and night and its influencing factors [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(3): 8-20.
- [25] Zhao C Y, Si J H, Feng Q, et al. Nighttime transpiration of *Populus euphratica* during different phenophases[J]. Journal of Forestry Research, 2019, 30(2): 435-444.
- [26] 朱仲龙,贾忠奎,马履一,等.休眠前期玉兰树干液流的变化及其对环境因子的响应[J].应用生态学报, 2012, 23(9): 2390-2396.
- Zhu Z L, Jia Z K, Ma L, et al. Dynamic change of *Yulania* sap flow before dormancy in response to environmental factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9): 2390-2396.
- [27] Olsen J E. Light and temperature sensing and signaling in induction of bud dormancy in woody plants[J]. Plant Molecular Biology, 2010, 73(1): 37-47.

~~~~~  
(上接第 214 页)

- [24] 魏红,满秀玲.中国寒温带不同林龄白桦林碳储量及分配特征[J].植物生态学报, 2019, 43(10): 843-852.
- Wei H, Man X L. Carbon storage and its allocation in *Betula platyphylla* forests of different ages in cold temperate zone of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(10): 843-852.
- [25] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.
- [26] 代林利,陈义堂,伍丽华,等.不同林分密度杉木林养分积累与垂直空间分配[J].应用生态学报, 2022, 33(2): 311-320.
- Dai L L, Chen Y T, Wu L H, et al. Characteristics of nutrient accumulation and vertical spatial distribution in *Cunninghamia lanceolata* plantation with different stand densities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(2): 311-320.
- [27] Lesschen J P, Cammeraat L H, Kooijman A M, et al. Development of spatial heterogeneity in vegetation and soil properties after land abandonment in a semi-arid ecosystem [J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(11): 2082-2092.
- [28] 李欣颖,张萌,郭洋楠,等.采煤沉陷区林下植物多样性与土壤因子的关系[J].水土保持学报, 2022, 36(1): 268-276.
- Li X Y, Zhang M, Guo Y N, et al. Relationship between understory plant diversity and soil factors in coal mining subsidence area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 268-276.