

多年冻土区白桦次生林蒸腾特征及其对影响因子的响应

尚友贤, 满秀玲, 徐志鹏

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 探究多年冻土区白桦次生林蒸腾特征对影响因子的响应, 为准确评估该地区森林生态系统水文效应提供科学参考。运用热扩散式探针法, 从 2021 年 5—9 月对多年冻土区的白桦树干液流进行监测, 并同步观测影响因子变化情况。结果表明: 整个观测期, 白桦次生林蒸腾表现出明显的小时、日、月变化。(1) 白桦次生林小时蒸腾特征表现为优势木 > 中等木 > 被压木, 蒸腾动态在晴天呈单峰曲线, 在雨天呈双峰曲线。日尺度上, 白桦次生林蒸腾平均值为 1.47 mm/d, 且最大值出现在 7 月。在整个观测期, 林分蒸腾表现出明显的月变化, 即 7 月 > 6 月 > 8 月 > 9 月 > 5 月, 分别为 65.08, 62.43, 54.27, 22.92, 19.84 mm; (2) 林分累计蒸腾量共计 224.54 mm, 占同期降雨量的 32.41%, 其中优势木为林分蒸腾的主要贡献者, 占林分总蒸腾量的 62.64%; (3) 在小时尺度上, 林分蒸腾量主要受空气温度和饱和水汽压差所影响; 日尺度上, 林分蒸腾与潜在蒸散、空气温度、太阳辐射、饱和水汽压差、叶面积指数以及土壤温度极显著正相关 ($p < 0.01$); 与空气相对湿度极显著负相关 ($p < 0.01$); 与土壤含水量关系不显著 ($p > 0.05$), 潜在蒸散、叶面积指数、饱和水汽压差以及空气温度是驱动林分日蒸腾的主要影响因子; 月尺度上, 空气温度对林分蒸腾的影响最大, 其对林分蒸腾的解释度高达 93.90%。

关键词: 多年冻土区; 林分蒸腾; 大气因子; 叶面积指数; 土壤含水量

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)02-0310-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.02.036

Transpiration Characteristics and Its Response to Influence Factors of *Betula platyphylla* Secondary Forest in Permafrost Area

SHANG Youxian, MAN Xiuling, XU Zhipeng

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040)

Abstract: To investigate the response of transpiration characteristics of *Betula platyphylla* secondary forest to influencing factors in permafrost area, and to provide scientific reference for accurate assessment of the hydrological effects of forest ecosystems in this region. The sap flow of *Betula platyphylla* was measured using thermal dissipation probes from May to September 2021 in permafrost area, and the influence factors were observed simultaneously. The results showed that the stand transpiration of *Betula platyphylla* secondary forest showed obvious hourly, daily and monthly changes during the study period. (1) The hourly transpiration characteristics of *Betula platyphylla* secondary forest was exhibited that dominant trees > intermediate trees > suppressed trees. Furthermore, diurnal variations of daily transpiration performed a single peak curve pattern in sunny days, while the bimodal curve was observed in rainy days. Meanwhile, the daily mean stand transpiration of *Betula platyphylla* secondary forest was 1.47 mm/d, with the maximum value appeared in July. A significant monthly variation of transpiration was found during the whole observation period and ranked as follows: July > June > August > September > May, which was 65.08, 62.43, 54.27, 22.92 and 19.84 mm, respectively. (2) The cumulative transpiration of the stand was 224.54 mm, accounting for 32.41% of the total precipitation over the same period, and the transpiration of the dominant trees was the main contributors to the stand transpiration, accounting for 62.64% of the stand transpiration. (3) At the hourly scale, transpiration was mainly affected by air temperature and vapor pressure deficit. At the daily

收稿日期: 2022-08-16

资助项目: 国家重点研发项目 (2021YFD2200405)

第一作者: 尚友贤 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: shangyouxian2022@163.com

通信作者: 满秀玲 (1964—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: mannefu@163.com

scale, transpiration was positively correlation with potential evapotranspiration, air temperature, solar radiation, vapor pressure deficit, leaf area index and soil temperature ($p < 0.01$), which was significant negative correlation with air relative humidity ($p < 0.01$) and no significant correlation with soil water content ($p > 0.05$), and potential evapotranspiration, leaf area index, vapor pressure deficit and air temperature were the main factors driving the daily stand transpiration. At the monthly scale, air temperature had the greatest impact on stand transpiration, which explained 93.90% of stand transpiration.

Keywords: permafrost area; stand transpiration; atmospheric factors; leaf area index; soil moisture content

林分蒸腾是森林生态系统水文循环的重要组成部分,也是耦合土壤水分和大气交互的重要纽带。然而,近几十年来,全球气温变暖所引发的降雨格局越来越复杂多变。加之世界各地,尤其是中国为了应对气候变暖所实施的大面积植树造林工程,使得森林覆盖率显著增加的同时极大影响林水关系,导致区域乃至全球范围内的林水矛盾尤为突出^[1]。要解决这一问题需深入理解林分蒸腾的环境响应机制,这是因为林分蒸腾不仅是调控区域水分循环以及可持续利用水资源的关键环节,也是林地水分散失的主要途径,其占到森林总蒸散的 50%~90%^[2]。因此,探讨变化环境下林分的蒸腾特征及其对环境因子的响应,将对现有森林的经营管理以及更好地解决林水矛盾方面具有重大理论意义^[2]。

目前,对于林分蒸腾与环境因子间的关系研究,主要表现在大气蒸发需求、土壤水热特征以及冠层物候变化等 3 个方面。如在林分蒸腾与大气因子关系方面,贾国栋等^[3]得出影响北方土石山区树木蒸腾的主要因素为太阳辐射和风速;而太阳辐射、蒸汽压亏缺以及相对湿度是影响六盘山华北落叶松林蒸腾的主要气象因子^[2]。在林分蒸腾对土壤水热响应方面,黄雅茹等^[4]研究发现,土壤温度和土壤含水量能共同解释库姆塔格沙漠树木蒸腾的 70%;黄土高原西北部的植被蒸腾对土壤含水量的响应阈值为 28%^[5]。在冠层物候变化对林分蒸腾的影响方面,学者对北方亚湿润山区植物蒸腾与冠层结构关系的研究^[6]发现,当叶面积指数 $< 3.50 \text{ m}^2/\text{m}^2$,其随叶面积指数呈线性增长。此外,Liu 等^[7]研究发现,黄土高原西北部的植被蒸腾受潜在蒸散、叶面积指数及土壤含水量三者共同影响。这些研究结果表明,不同区域、不同树种蒸腾对环境因子的响应存在明显差异。然而,尽管目前关于林分蒸腾对环境因子的响应研究已有很多,但是针对白桦次生林对环境响应的研究仍较为缺乏,尤其对于我国寒温带多年冻土区的白桦林次生林鲜有报道。因此,在全球气候变暖的背景下深入研究白桦次生林对环境因子的响应非常必要。

大兴安岭多年冻土区具有丰富的森林资源和重

要的生态地位。近年来由于火灾频发,导致该区产生大片的白桦次生林,占本区森林总面积的 41.15%^[8]。白桦次生林作为该地区的先锋树种,在区域环境改善、气候调节、保持水土以及水源涵养等方面发挥着不可或缺的作用。因此,本文以大兴安岭多年冻土区白桦次生林为研究对象,开展其蒸腾与影响因子间的关系研究,旨在揭示不同时间尺度下白桦次生林蒸腾动态特征及探讨不同时间尺度下影响白桦次生林蒸腾的主要制约因子,为多年冻土区白桦次生林水分利用效率研究和准确评估该地区森林生态系统水文效应提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于大兴安岭多年冻土区,观测样地设于黑龙江省漠河森林生态系统国家定位观测研究站(53°27'10"—53°28'01"N,122°20'17"—122°20'57"E),本区属寒温带大陆性季风气候,夏季最高气温 36.70℃,冬季极端低温-52.30℃,年均气温-4.90℃,是我国主要的多年冻土分布区域。年平均降水量约 350~500 mm。白桦(*Betula platyphylla*)林作为此地的重要森林植被类型,具有自然更新和下种能力较强的特点。另外还分布有樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林、山杨(*Populus davidiana*)林以及兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林。白桦次生林固定观测样地面积为 100 m×100 m,密度为 1 244 株/hm²,林龄 61±7 年,林分郁闭度 0.80±0.10,平均树高 14.60±3.30 m,平均胸径 13.50±5.80 cm。

1.2 白桦树干液流观测

经过前期踏查,在漠河森林生态系统国家定位观测研究站白桦次生林固定样地内(100 m×100 m)设置 1 块面积为 20 m×30 m 的调查样地(样地内共有白桦 71 株、落叶松 6 株、山杨 3 株)。然后将样地内的白桦按照相对直径法^[9]划分为 3 个等级(其中优势木 20 株、中等木 29 株、被压木 22 株),并按照分化等级共选取 9 株长势良好、无病虫害的样树,于 2021 年 5—9 月采用 Granier 热扩散法对选定样树树干液流

进行测定。探针的安装步骤为:首先在树干 1.30 m 处用小刀刮去树干死皮,并用电钻钻出 2 个平行且垂直间距为 5 cm 的小孔;然后将探针的加热端和参考端分别插入;之后在安装好的探针根部均匀涂抹 G4 复合物,再用薄膜和保温膜包裹处理,以防止雨水进入损坏探针。所选探针长度为 20 mm,为防止太阳辐射对观测结果造成影响,探针均安装在北方。所测得的数据均用 CR1000 数据采集器采集,数据采集的时长设置为 10 min/次。所选样树基本信息见表 1。

表 1 样树基本信息

分化等级	样本数	胸径/cm	树高/m	边材面积/cm ²
被压木	3	8.53±1.31	10.43±0.91	34.91±11.61
中等木	3	14.23±2.38	13.81±1.88	112.82±39.69
优势木	3	21.21±2.27	15.83±0.85	273.53±67.36

注:表中数据为平均值±标准差。

树干液流计算公式为^[9]:

$$J_s=0.0119\times[(\Delta T_{\max}-\Delta T)/\Delta T]^{1.231}\tag{1}$$

式中: J_s 为单株白桦树干液流密度 $[g/(cm^2\cdot s)]$; ΔT 为两探头间温度差($^{\circ}C$); $\Delta T_{\max}$ 为液流密度为零时两探头间的最大温度差($^{\circ}C$)。

林分蒸腾量计算公式为^[10]:

$$T_h=\frac{(Jsa_1\times AS_1+Jsa_2\times AS_2+Jsa_3\times AS_3)\times 3600}{S\times 1000}\tag{2}$$

式中: T_h 为白桦次生林小时蒸腾量(mm/h); Jsa_1 、 Jsa_2 、 Jsa_3 分别为选取的样树中被压木、中等木以及优势木的平均液流密度 $[g/(cm^2\cdot s)]$; AS_1 、 AS_2 、 AS_3 分别为样地内所有被压木、中等木、优势木的总边材面积(cm^2); S 为白桦次生林样地总面积(m^2)。日林分蒸腾量由小时蒸腾量累加得到(T , mm/d)。

1.3 边材面积测定

为避免生长锥对样地树木造成破坏,故采用已得出的大兴安岭白桦边材与胸径之间的拟合方程^[11]:

$$AS=0.2535\times D^{2.2813}\quad (R^2=0.990\ 1)\tag{3}$$

式中: AS 为边材面积(cm^2); D 为胸径(cm)。

利用公式(3)计算样地内每株白桦的边材面积,然后按照分化等级进行累加后得到样地内各分化等级的总边材面积,其中优势木总边材面积为 5 260.13 cm^2 ,中等木和被压木总边材面积分别为 3 003.50, 700.62 cm^2 。

1.4 环境因子测定

太阳有效辐射 $[PAR, \mu mol/(m^2\cdot s)]$ 、太阳净辐射(R_n , W/m^2)、空气温度(T_a , $^{\circ}C$)、空气相对湿度(RH , $\%$)等气象因子由样地内的全自动气象站连

续监测。土壤温度(T_s , $^{\circ}C$)和土壤含水量(SMC , $\%$)分别在 5, 10, 20, 30, 40 cm 土层深度处采用 CS650 土壤水分电导率温度传感器测定。所有监测数据采用 CR1000 数据采集器采集,设置的数据采集时间为每 10 min/次。林外降雨量(P , mm)采用 HOBO 自记式雨量计获取。

饱和水汽压差(VPD , kPa)、饱和水汽压(e_s , kPa)和实际水汽压(e_a , kPa)计算公式为^[12]:

$$VPD=0.661\exp^{[17.72T_a/(T_a+237.3)]}(1-RH/100)\tag{4}$$

$$e_s=0.661\times\exp^{[17.72T_a/(T_a+237.3)]}\tag{5}$$

$$e_a=RH\times e_s\tag{6}$$

式中: T_a 和 RH 分别为空气温度($^{\circ}C$)和空气相对湿度($\%$)。

利用监测得到的气象因子数据计算潜在蒸散量(PET , mm/d),公式为^[2]:

$$PET=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma(900/T_a+273)U_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)}\tag{7}$$

式中:饱和水汽压梯度($kPa/^{\circ}C$)由 Δ 表示; R_n 为太阳净辐射(W/m^2); G 为土壤热通量 $[MJ/(m^2\cdot d)]$,日尺度忽略不计; T_a 为大气温度($^{\circ}C$); γ 值为 0.066 4,表示空气干湿度常数($kPa/^{\circ}C$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa)。

土壤剖面含水量(SPM , $\%$)计算公式为^[13]:

$$SPM=\frac{\theta_1\times L_1+\sum_{i=2}^5\frac{\theta_{i-1}+\theta_i}{2}\times L_i}{L}\tag{8}$$

式中: $\theta_i\times L_i$ ($i=1, 2, 3, 4, 5$)表示 5, 10, 20, 30, 40 cm 土层处的土壤含水量; L 为整个测量剖面的土层深度(40 cm)。

1.5 冠层叶面积指数测定

在 2021 年 5—9 月的晴天,利用植物冠层分析仪(LAI-2200, Li-Cor, United States)每隔 5~7 天测定 1 次试验林分的叶面积指数(LAI, m^2/m^2)。测量时在样地内随机选取 25~30 个点进行测量。之后通过数据拟合得到实测叶面积指数值与相对应测量日期之间的数量关系方程,然后通过插值法计算观测期内每日对应的叶面积指数值。拟合方程见图 1j。

1.6 数据处理

本研究采用 Excel 进行数据处理与统计,用 SPSS Statistics 25.0 进行林分蒸腾与影响因子间的 Person 相关性分析,采用逐步回归法构建方程解释环境因子对林分蒸腾的综合影响。文中所有制图均采用 Origin 2021 软件完成。本研究中将持续或短暂降雨发生的天气作为雨天。在林分日蒸腾与影响

因子间的相关性分析以及拟合部分,所用的土壤水分数据为计算出的 0—40 cm 土壤剖面含水量,土壤温度数据取 0—40 cm 实测数值平均值。

2 结果与分析

2.1 影响因子变化特征

由图 1 可知,研究期内空气温度日变化范围为 0.96~23.66 °C,太阳有效辐射为 19.69~189.61 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,潜在蒸散为 0.27~11.88 mm/d,土壤温度为 0.01~15.91 °C,饱和水汽压差为 0.01~2.00 kPa,均表现出先增大后减小的变化趋势。日均值分别为 13.90 °C,104.78 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,4.74 mm/d,9.82 °C 和 0.45 kPa。观测期间林地累计降水量 692.80 mm,高于研究区多年平均降水量,其中约 42.7%的降水集中在 7—8 月(图 1f)。土壤水分对降雨的反应迅速,0—40 cm 土层深度的含水量随降雨量变化呈现出不同程度的波动,其中以 5 cm 深度处最为明显(图 1g)。土壤剖面含水量在 13%~32%范围内波动(图 1h),由于 7 月 1 日至 8 月 10 日降雨较频繁,共计 230.60 mm,故此时段土壤剖面含水量保持在相对稳定状态。相对湿度的浮动程度较大,范围为 45.90%~98.70%(图 1i)。此外,叶面积指数在生长前期开始迅速增加,到达叶盛期后进入稳定阶段,然后随着生长季的结束迅速下降,其中最大值出现在 7 月(图 1j)。

2.2 典型天气下白桦次生林小时蒸腾特征

图 2 为将观测期所有晴天和雨天内不同分化等级白桦蒸腾量和气象因子按小时尺度进行平均后绘制的变化曲线。由图 2 可知,在晴天(图 2a),林分小时蒸腾量与气象因子均呈现明显的“几”字形单峰日变化,且其变化规律几乎相同,但不同步。其中优势木和中等木蒸腾约于早晨 6:00,7:00 启动,于 22:00 以后蒸腾减弱;被压木则于 8:00 左右启动,20:00 后蒸腾结束。三者均在正午 12:00 达到峰值,优势木峰值(0.14 mm/h)分别为中等木(0.01 mm/h)和被压木(0.02 mm/h)的 2,7 倍。但太阳有效辐射和饱和水汽压差的峰值滞后于蒸腾 3,1 h。雨天(图 2b),林分小时蒸腾量以及气象因子的日变化幅度显著减少,均呈波动的双峰曲线,且蒸腾量和饱和水汽压差的变化曲线基本同步,较太阳有效辐射提前 2 h。优势木和中等木蒸腾于上午 8:00 启动,20:00 以后蒸腾逐渐停止活动,并且优势木、中等木的蒸腾波动相对较小,而被压木蒸腾一直处于极低值状态,但不完全为 0。

2.3 白桦次生林日、月蒸腾特征

5—9 月,白桦次生林蒸腾特征表现出明显的日、

月变化特征,且均表现为先增加后降低的趋势(图 3a、图 3b)。在整个观测期内,白桦次生林日蒸腾量变化范围为 0.09~3.49 mm/d,平均值为 1.47 mm/d。5 月展叶期,样地土壤开始解冻,白桦次生林日蒸腾量表现出缓慢上升趋势,日蒸腾均值为 0.64 mm/d;随着研究区气温逐渐升高以及土壤完全解冻,到 6 月林分日蒸腾均值为 2.08 mm/d;直到 7 月中旬达到峰值(3.49 mm/d),7 月林内日蒸腾均值为 2.09 mm/d,较 5 月增幅达到 226.56%;8 月随着生长季的结束,白桦次生林生长减缓,从而导致蒸腾拉力减小,故林内日蒸腾开始出现递减趋势,此时蒸腾日均值为 1.75 mm/d,相较于 7 月降幅为 16.26%;9 月,白桦次生林日蒸腾均值低至 0.76 mm/d,相较于 8 月降幅达到 56.25%。5—9 月白桦次生林累计蒸腾量为 224.54 mm,占到同期降雨量的 32.41%。月累计蒸腾量表现为 7 月>6 月>8 月>9 月>5 月,分别为 65.08,62.43,54.27,22.92,19.84 mm。整个观测期对林分蒸腾贡献最大的是优势木,为 140.67 mm,占林分累计蒸腾量的 62.64%;其次是中等木(72.18 mm,占比 32.15%);贡献最小的是被压木,为 11.69 mm,占林分累计蒸腾量的 5.21%。

2.4 不同时间尺度下蒸腾对环境因子的响应

2.4.1 白桦次生林小时蒸腾对影响因子的响应 在小时尺度上,白桦次生林蒸腾量与相对湿度呈极显著负相关($p<0.01$),与土壤剖面含水量呈负相关($p>0.05$),与其他环境因子均呈极显著正相关($p<0.01$)(表 2)。由表 3 可知,空气温度对蒸腾量的解释度最大,为 22.70%;其次为饱和水汽压差(20.20%);土壤剖面含水量解释度最低,仅为 0.30%。由表 3 以及蒸腾量与环境因子间的综合逐步回归方程(表 4)可知,白桦次生林蒸腾量受空气温度和饱和水汽压差的共同影响,综合方程对其的解释度为 26.90%。其中,空气温度对蒸腾量的贡献量最大,贡献量为 22.70%,饱和水汽压差的贡献量为 4.20%。

2.4.2 白桦次生林日蒸腾对影响因子的响应 白桦次生林日蒸腾与影响因子间的相关性分析(表 2)表明,其与潜在蒸散、空气温度、太阳辐射、饱和水汽压差、叶面积指数以及土壤温度呈极显著正相关($p<0.01$);与空气相对湿度呈极显著负相关($p<0.01$);与土壤含水量相关性不显著($p>0.05$)。其中,林分日蒸腾与潜在蒸散的相关性最高,相关系数为 0.853;其次为空气温度、饱和水汽压差以及叶面积指数,相关系数依次为 0.779,0.635,0.591;再次为太阳有效辐射和土壤温度,相关系数分别为 0.564 和 0.467;其与相对湿度的相关性最低,为-0.315。

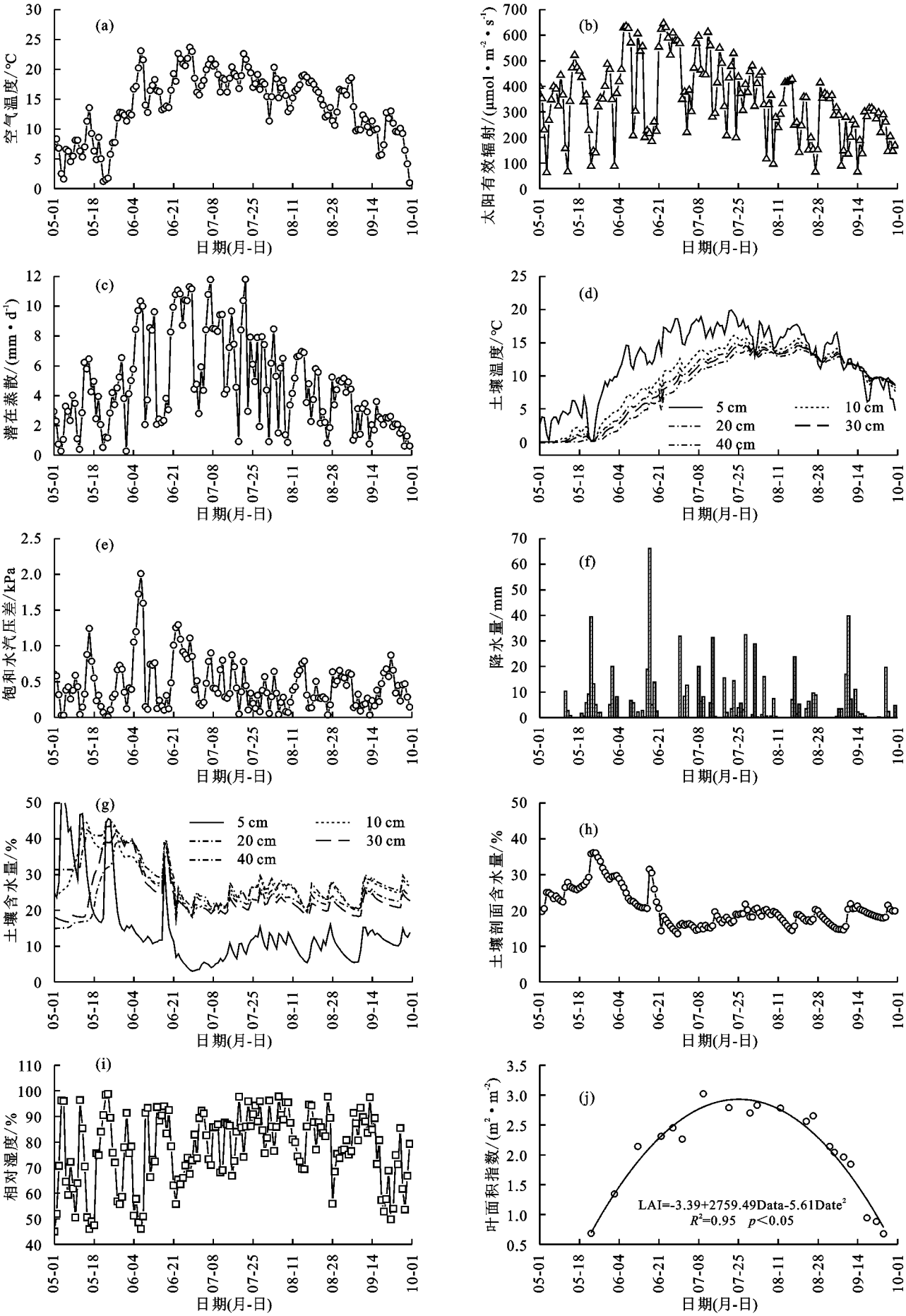


图 1 观测期间影响因子日变化

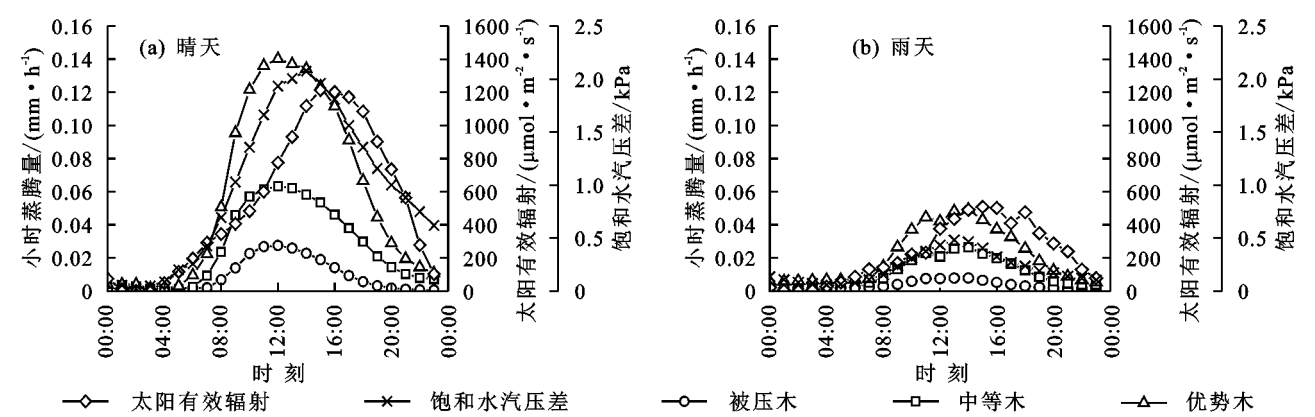


图2 典型天气下白桦次生林小时蒸腾量与气象因子日进程变化特征

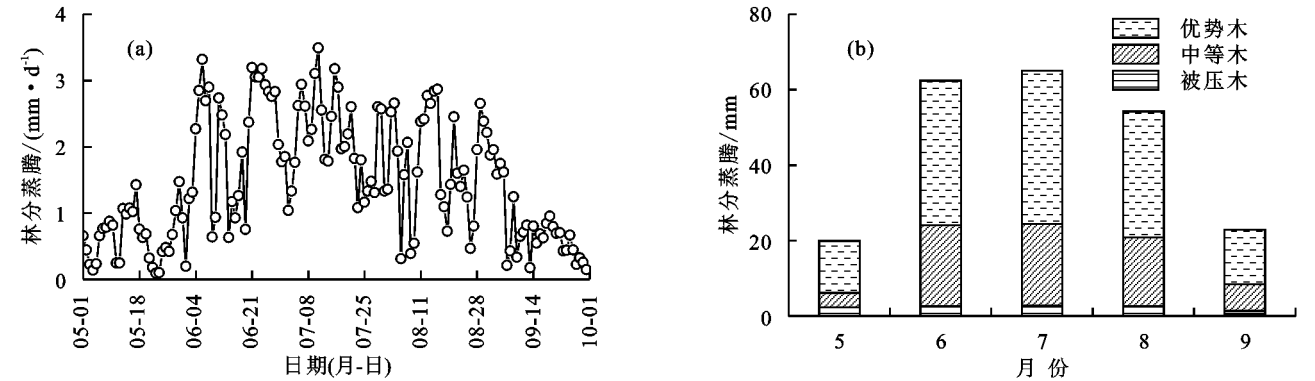


图3 白桦次生林日、月蒸腾动态特征

表2 不同时间尺度下白桦次生林蒸腾与环境因子的相关分析

环境因子	相关系数		
	小时尺度	日尺度	月尺度
T_a	0.479**	0.779**	0.977**
RH	-0.267**	-0.315**	0.476
VPD	0.449**	0.635**	0.493
PET	—	0.853**	0.919*
LAI	—	0.591**	0.878*
SPM	-0.181	-0.050	-0.497
PAR	0.043*	0.564**	0.739
S_t	0.230**	0.467**	0.615

注:—表示无数据;PET为潜在蒸散;LAI为叶面积指数;SPM为土壤剖面含水量; S_t 为土壤温度; T_a 为空气温度;PAR为太阳有效辐射;VPD为饱和水汽压差;RH为相对湿度;*表示在0.05水平上显著相关;**表示在0.01水平上极显著相关。下同。

表3 不同时间尺度下白桦次生林蒸腾与环境因子的拟合度

环境因子	小时尺度		日尺度		月尺度	
	R^2	显著性	R^2	显著性	R^2	显著性
T_a	0.227	0	0.631	0	0.939	0.004
RH	0.071	0	0.132	0	0.227	0.418
VPD	0.202	0	0.420	0	0.243	0.398
PET	—	—	0.731	0	0.792	0.028
LAI	—	—	0.364	0	0.690	0.049
SPM	0.003	0.033	0.003	0.058	0.247	0.395
PAR	0.012	0.010	0.320	0	0.394	0.154
S_t	0.053	0	0.224	0.016	0.171	0.270

进一步对林分日蒸腾与各环境因子间的响应关系进行拟合分析发现,空气温度、太阳有效辐射、饱和水汽压差和相对湿度对林分蒸腾的解释率分别达到63.10%,32.00%,42.00%和13.20%(表3)。其中当饱和水汽压差在0~0.80 kPa变化时,林分蒸腾增加趋势较快;当其超过0.80 kPa时,林分蒸腾增加较小且趋于平缓(图4c)。另外,拟合发现潜在蒸散与白桦次生林日蒸腾之间表现为饱和指数关系(图4e),其对白桦次生林日蒸腾解释度高达73.10%(表3)。白桦次生林日蒸腾与叶面积指数拟合方程符合线性关系(图4f),拟合方程的解释度为36.40%,白桦次生林日蒸腾与土壤温度也呈线性关系(图4g),其对林分蒸腾的解释度为22.40%,而土壤含水量对白桦次生林蒸腾的解释程度较小,拟合决定系数(R^2)仅为0.003(表3)。

另一方面,由白桦次生林日蒸腾与各环境因子的多元逐步回归结果(表4)可知,潜在蒸散、叶面积指数、饱和水汽压差以及空气温度是驱动白桦次生林日蒸腾变化的主要影响因素。综合关系模型的解释度达到85.30%。其中对林分日蒸腾量贡献最大的为潜在蒸散,贡献量为73.10%,其次是叶面积指数和蒸汽压亏缺,贡献量分别占7.00%和3.20%,空气温度的贡献量相对较低,为2.00%。

2.4.3 白桦次生林月蒸腾对影响因子的响应 由图5可知,月尺度白桦次生林蒸腾量与空气温度、土壤

温度、潜在蒸散、太阳有效辐射以及叶面积指数变化均表现为先增后减的趋势。

经相关性分析(表 2)表明,白桦次生林月蒸腾与空气温度呈极显著正相关($p<0.01$),与潜在蒸散和叶面积指数呈显著正相关($p<0.05$),与其他环境因子相关性均不显著($p>0.05$)。通过月蒸腾与各环境

因子间的回归分析拟合度(表 3)发现,空气温度对其解释度高达 93.90%,其次为潜在蒸散和叶面积指数,两者对蒸腾量的解释度分别为 79.20%和 69.00%。另外,月蒸腾与各环境因子的逐步回归方程中只引入空气温度这一因子,该方程式对月蒸腾量的解释度为 93.90%(表 4)。

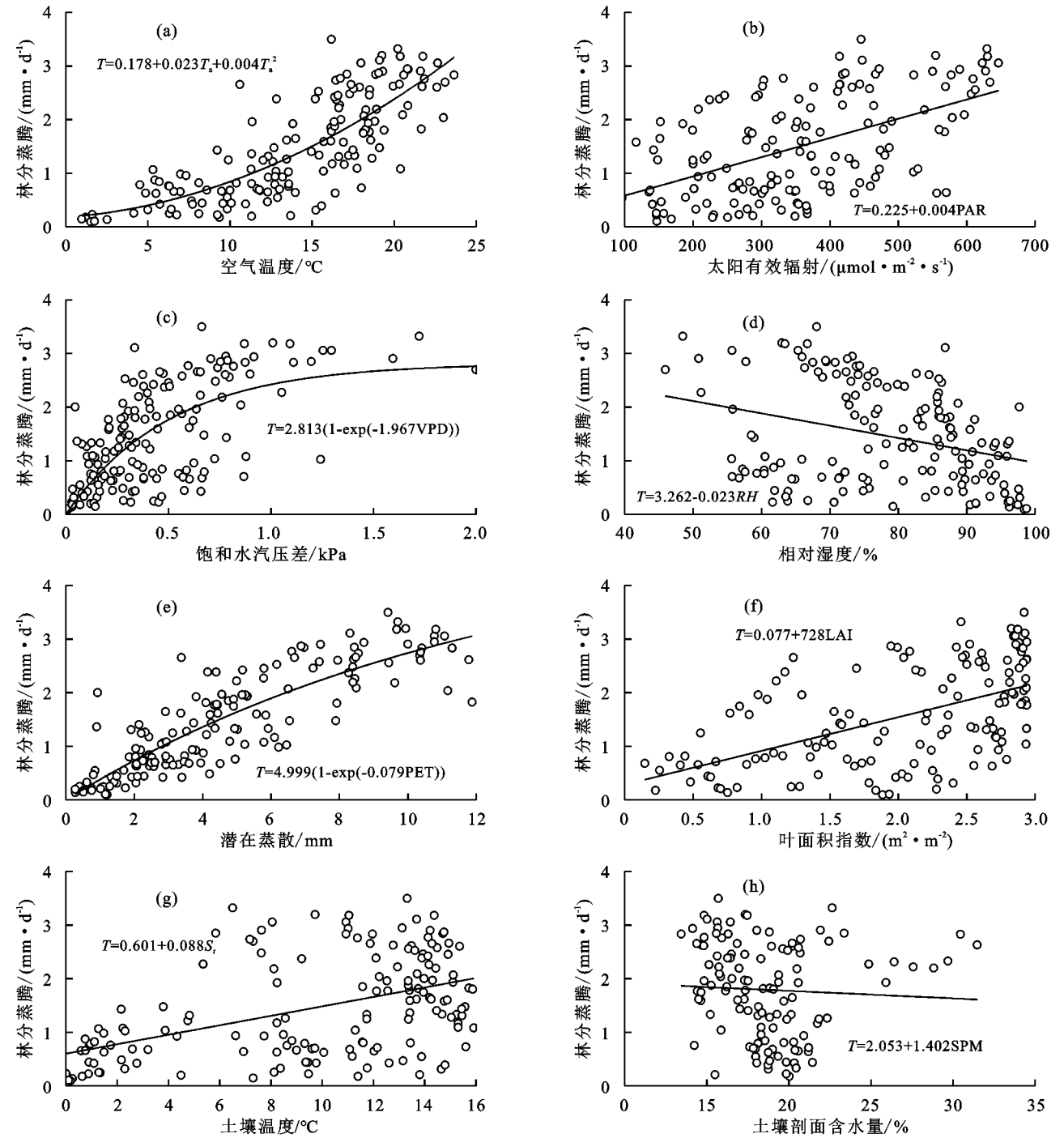


图 4 白桦次生林日蒸腾对影响因子的响应

3 讨论

3.1 白桦次生林蒸腾特征

树木生理学以及对气候反应的不同导致其蒸腾存在量级和季节性的差异,本研究中,白桦次生林蒸腾量存在明显的小时、日、月尺度变化。在小时尺度

上,白桦次生林蒸腾峰值表现为优势木>中等木>被压木,这与寒温带的兴安落叶松^[9]以及温带的青海云杉(*Picea crassifolia*)^[14]研究结果相似。另外,晴天蒸腾曲线呈单峰型格局,这与李洁等^[15]以及吕静^[16]对白桦的研究结果相一致,并且分化等级越高,蒸腾

启动时间越早,结束时间越晚。主要原因是优势木在林内占据有利的空间位置,容易从环境中获得较多的水热资源^[17],能更加充分获取光照能量,从而促进树干液流,使蒸腾加快。

表 4 不同时间尺度下林分蒸腾与影响因子间逐步回归方程

时间尺度	进入因子	回归方程式	R^2	R^2 变化量
小时尺度	T_a	$T=-0.029+0.006T_a$	0.227	0.227
	VPD	$T=-0.019+0.005T_a+0.037VPD$	0.269	0.042
	PET	$T=0.413+0.245PET$	0.731	0.731
日尺度	LAI	$T=-0.043+0.222PET+0.262LAI$	0.801	0.070
	VPD	$T=-0.191+0.113PET+0.297LAI+0.595VPD$	0.833	0.032
	T_a	$T=-0.063+0.130PET+0.480LAI+0.816VPD-0.046T_a$	0.853	0.020
月尺度	T_a	$T=-0.506+0.142T_a$	0.939	0.939

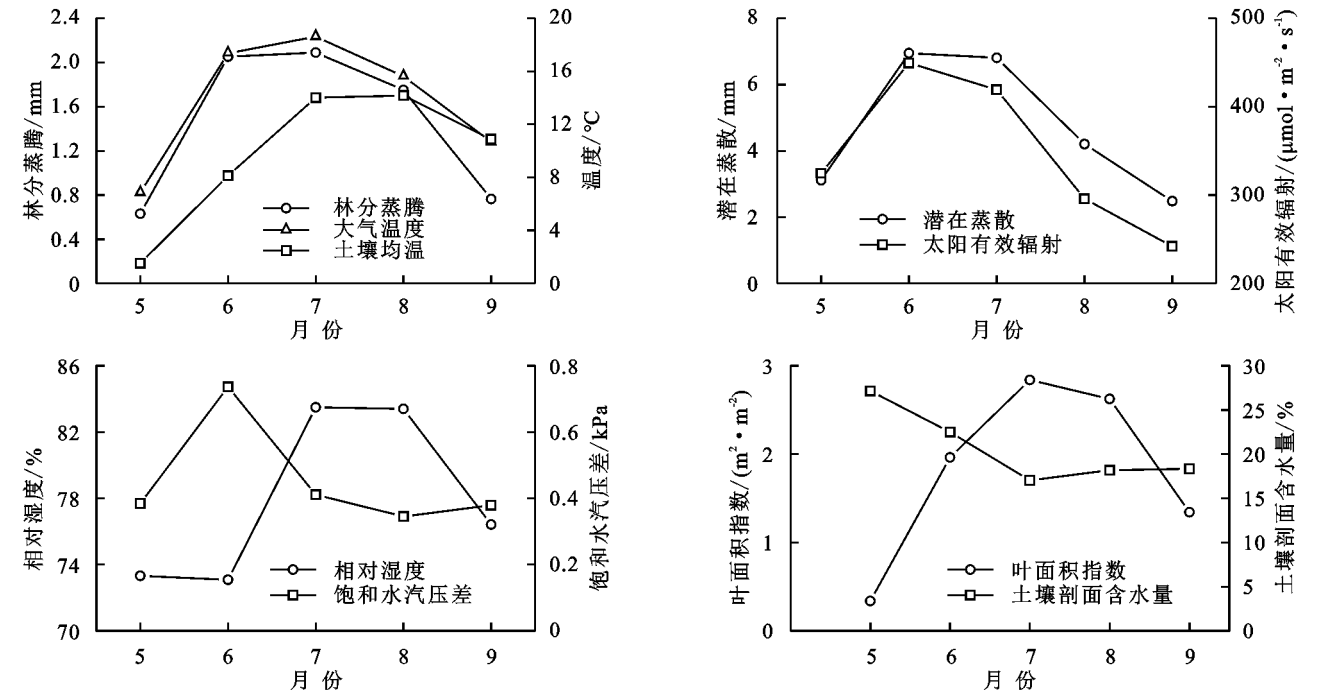


图 5 白桦次生林蒸腾量与环境因子月均值变化特征

本研究表明,日尺度上,多年冻土区白桦次生林蒸腾峰值出现在7月中旬,这与大兴安岭南段的白桦林研究^[16]结果相一致,而李洁等^[15]对冀北的白桦研究发现蒸腾峰值出现在8月。由此可见,相同的树种由于其生境的差异导致蒸腾特征的不同。月尺度上,白桦次生林累计蒸腾特征表现为7月>6月>8月>9月>5月,这是因为林分蒸腾月变化与环境因子的总体变化关系密切。5月,研究区空气温度、潜在蒸散较低,且叶面积指数较小,导致林分蒸腾量较小;6—7月,空气温度和潜在蒸散逐渐升高,加之此时正值白桦生长盛期,叶面积指数迅速增大,此时林分蒸腾较为剧烈,故蒸腾量较大;8—9月,研究区气温开始回落,叶片逐渐枯黄,潜在蒸散和叶面积指数出现同步下降趋势,此时白桦次生林蒸腾能力逐渐减弱,故蒸腾开始明显下降。另外,白桦次生林在整个观测期内累计蒸腾量为224.54 mm,这低于青海省大通县白桦林^[18]。有研究^[19]指出,植物根系及木质部的水

分汲取因低温而受到影响,使得植物光合作用和冠层间的气体交换受到制约,因而致使冠层气孔关闭,从而影响蒸腾。本研究区属寒温带气候,年平均气温较低(−4.90℃),生长季较短,同时土壤存在永冻层,这种特殊的气候可能限制了白桦次生林蒸腾。

3.2 白桦次生林蒸腾对影响因子的响应

通过分析小时尺度上白桦次生林蒸腾量与环境因子间关系可知,对白桦次生林蒸腾量影响较大的环境因子为空气温度和饱和水汽压差。张荣等^[20]研究得出,对刺槐蒸腾速率影响较大的小时尺度环境因子依次为太阳辐射、空气温度、饱和水汽压差;马菁等^[10]得出饱和水汽压差在小时尺度上与蒸腾密切相关,这与本文结论相似。

本研究中白桦次生林日蒸腾与太阳辐射、空气温度、饱和水汽压差呈正相关关系,与相对湿度呈负相关关系,这与青海云杉^[14]、兴安落叶松^[21]的研究结果相似。且林分蒸腾与太阳辐射、空气温度呈线性以

及二次曲线增长关系。这是因为植物的叶片气孔随着太阳辐射的升高而增大,从而导致冠层气体交换速率的增快,同时环境中的水汽压梯度由于大气温度的增加逐渐变大,此时水分汽化进程加剧,使得蒸腾速度增大。而林分的蒸腾速度也因饱和水汽压差的变化而受到影响^[22],当饱和水汽压差达到 0.80 kPa 后,林分日蒸腾变缓并逐渐接近饱和,这与于松平等^[2]、马菁等^[10]的研究结果基本相似,林分蒸腾随饱和水汽压差的增加存在饱和值可能是因为过大的饱和水汽压差导致植物为响应环境变化而关闭气孔,从而保障自身体内的水分安全。此外,本研究结果表明,潜在蒸散对白桦次生林日蒸腾的贡献率高达 73%,是影响林分日蒸腾的关键控制因子,并且其与林分蒸腾间的响应关系为饱和指数函数。这是因为随着太阳辐射和空气温度的升高,潜在蒸散的增加促进蒸腾作用,但过大的潜在蒸散导致植物叶片水势降低,叶片为适应环境关闭一部分气孔,从而使得蒸腾变缓。

土壤温度和土壤含水量也是促进植物蒸腾的重要因子。孙旭等^[23]和黄雅茹等^[4]发现,土壤温度与蒸腾在日尺度上呈正相关,本研究的结果一致。植物通过根系吸收土壤水分进行蒸腾活动,而植物根系的活性和土壤水分黏性受土壤温度的约束,在一定程度上,土壤温度的增加可以促进蒸腾。土壤含水量决定可供植物根系吸收水分的多少,但与其他研究^[5]不同,本研究中林分日蒸腾与土壤含水量相关性不显著,且呈负相关,这可能与研究期间频繁的降雨有关。整个研究期间,林地土壤剖面含水量均保持在 13% 以上,且从 6 月中旬到 9 月末波动较小(图 1h),说明频繁的降雨及时补充土壤水,使其与蒸腾间的关系变弱,甚至有抑制蒸腾的现象。罗超等^[24]研究发现,土壤含水量与蒸腾间的关系在其相对充足时不显著;反之,其转变成为影响蒸腾的关键控制因子;Wang 等^[25]在年降雨量相对较多的苏格兰高地也有植物蒸腾与土壤含水量相关性不显著的结论;陈彪等^[26]也研究发现,当样地表层土壤含水量一直>12%时蒸腾与土壤水之间并未显著相关,这也从侧面说明这一点。此外,冯永建等^[27]研究华北落叶松蒸腾与土壤水势的关系发现,在水分充足时,其与蒸腾呈负相关,与本研究结论一致。

本研究发现,白桦次生林日蒸腾与叶面积指数间呈极显著正相关,这与对华北落叶松^[28]林分蒸腾的研究结果相似。然而与本文不同的是华北落叶松处于土壤干旱条件时其蒸腾与叶面积指数间呈饱和指数关系。说明不同的土壤水分条件可能是影响林分

蒸腾与叶面积指数间呈不同曲线关系的关键,本试验观测年份为降雨充足的年份,降雨补充土壤水,因为具有较高的土壤水分有效性,故根系从土壤汲取水分的速度能平衡冠层叶片蒸腾的速度,因而两者间呈线性关系。

在月尺度上,孙旭等^[23]研究认为,土壤温度是影响北京蟒山油松蒸腾的主导环境因子;张荣等^[20]研究得出,刺槐蒸腾主要受到土壤含水量、空气温度以及土壤温度所影响。与上述结论不同的是,本文发现空气温度为驱动白桦次生林蒸腾的主要环境因子,可能是不同树种对不同地域的环境因子响应不同,从而产生差异。本研究还发现,逐步回归方程中的综合环境因子对白桦次生林蒸腾量的解释度(R^2)随着时间尺度的增大而增大(表 4),小时、日、月尺度的解释度分别为 26.90%,89.30%,93.90%,说明在越长的时间尺度上,环境因子对白桦次生林蒸腾量的控制也逐渐加强,因此今后有必要进行年尺度方面的研究。

4 结论

(1)研究期内白桦次生林蒸腾量随着分化等级的增大而增大,且不同天气条件明显影响白桦次生林蒸腾的日变化进程,晴天林分蒸腾历时较长,峰值较高,雨天则启动缓慢,蒸腾较低。

(2)白桦次生林月蒸腾量在 7 月最大,5,9 月相对较低,观测期内白桦次生林累积蒸腾量共计 224.54 mm,且林分蒸腾在很大程度取决于优势木。

(3)白桦次生林通过响应外界环境变化来调控其蒸腾作用,且在不同的时间尺度下,林分蒸腾与环境因子间的关系存在差异。在小时尺度下,空气温度和饱和水汽压差为驱动林分蒸腾的主导因子;日尺度下,潜在蒸散、叶面积指数、饱和水汽压差以及空气温度为主导因子;月尺度下,空气温度为主导因子。

参考文献:

- [1] Wang L, Liu Z B, Guo J B, et al. Estimate canopy transpiration in larch plantations via the interactions among reference evapotranspiration, leaf area index, and soil moisture[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 481: e118749.
- [2] 于松平,刘泽彬,郭建斌,等.六盘山华北落叶松林分蒸腾特征及其影响因素[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(1):131-140.
- [3] 贾国栋,陈立欣,李瀚之,等.北方土石山区典型树种耗水特征及环境影响因子[J].生态学报,2018,38(10):3441-3452.
- [4] 黄雅茹,马迎宾,辛智鸣,等.怪柳不同季节树干液流特征及其与土壤含水量及土壤温度的关系[J].西北林业

- 院学报,2021,36(5):1-10.
- [5] 曹恭祥,王云霓,郭中,等.六盘山南侧华北落叶松人工林蒸腾对土壤水分和潜在蒸散的响应[J].应用生态学报,2020,31(10):3376-3384.
- [6] Tie Q, Hu H C, Tian F Q. Environmental and physiological controls on sap flow in a subhumid mountainous catchment in North China[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2017,240:46-57.
- [7] Liu Z B, Wang Y H, Tian A. Modeling the response of daily evapotranspiration and its components of a larch plantation to the variation of weather, soil moisture, and canopy leaf area index[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2018,123(14):7354-7374.
- [8] Zhou Y, Hartemink A E, Shi Z, et al. Land use and climate change effects on soil organic carbon in North and Northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2019,647:1230-1238.
- [9] 刘家霖,满秀玲,胡悦.兴安落叶松天然林不同分化等级林木树干液流对综合环境因子的响应[J].林业科学研究,2016,29(5):726-734.
- [10] 马菁,郭建斌,刘泽彬,等.六盘山华北落叶松林分蒸腾日内变化及其对环境因子的响应[J].北京林业大学学报,2020,42(5):1-11.
- [11] 王媛.大兴安岭南段白桦蒸腾特征研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [12] Yang S J, Zhang Y J, Goldstein G, et al. Determinants of water circulation in a woody bamboo species: Afternoon use and night-time recharge of culm water storage [J]. Tree Physiology,2015,35(9):964-974.
- [13] Xu Z P, Man X L, Duan L L, et al. Improved subsurface soil moisture prediction from surface soil moisture through the integration of the (de) coupling effect[J]. Journal of Hydrology,2022,608:e127634.
- [14] 万艳芳,于澎涛,刘贤德,等.祁连山青海云杉树干液流密度的优势度差异[J].生态学报,2017,37(9):3106-3114.
- [15] 李洁,任启文,孙杰肖.张家口崇礼区 3 种优势树种蒸腾特征研究[J].西北林学院学报,2018,33(6):40-46.
- [16] 吕静.大兴安岭南段白桦昼夜蒸腾特征及其影响因素分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [17] Wan Y F, Yu P T, Wang Y H, et al. The variation in water consumption by transpiration of Qinghai spruce among canopy layers in the Qilian Mountains, North-western China[J]. Forests,2020,11(8):e845.
- [18] 王莉.青海大通高寒区典型林地耗水特征研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [19] 杜梦鸽,王善举,樊军,等.祁连山青海云杉低液流特征及其影响因素[J].应用生态学报,2022,33(4):931-938.
- [20] 张荣,毕华兴,王宁,等.不同时间尺度下刺槐蒸腾耗水与环境因子关系[J].水土保持学报,2022,36(5):204-211.
- [21] Xu Z P, Man X L, Cai T J, et al. How potential evapotranspiration regulates the response of canopy transpiration to soil moisture and leaf area index of the Boreal Larch Forest in China[J]. Forests,2022,13(4):e571.
- [22] Han C, Chen N, Zhang C K, et al. Sap flow and responses to meteorological about the *Larix principis-rupprechtii* plantation in Gansu Xinlong mountain, northwestern China[J]. Forest Ecology and Management,2019,451:e117519.
- [23] 孙旭,杨文慧,焦磊,等.不同时间尺度北京蟒山油松树干液流对环境因子的响应研究[J].生态学报,2022,42(10):4113-4123.
- [24] 罗超,查同刚,朱梦洵,等.浅层地下水对华北地区河岸杨树林树干液流的影响[J].应用生态学报,2016,27(5):1401-1407.
- [25] Wang H, Tetzlaff D, Dick J J, et al. Assessing the environmental controls on Scots pine transpiration and the implications for water partitioning in a boreal headwater catchment[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2017,240:58-66.
- [26] 陈彪,陈立欣,刘清泉,等.半干旱地区城市环境下樟子松蒸腾特征及其对环境因子的响应[J].生态学报,2015,35(15):5076-5084.
- [27] 冯永建,马长明,王彦辉,等.华北落叶松人工林蒸腾特征及其与土壤水势的关系[J].中国水土保持科学,2010,8(1):93-98.
- [28] 王亚蕊,王彦辉,于澎涛,等.华北落叶松人工林蒸散及产流对叶面积指数变化的响应[J].生态学报,2016,36(21):6928-6938.