

半干旱区华北落叶松林冠层蒸腾特征及其影响因子

陈孟涤¹, 覃鑫浩¹, 毛炎新², 王砚峰³

(1. 国家林业和草原局 林草调查规划院, 北京 100714; 2. 国家林业和草原局 经济发展研究中心, 北京 100714;
3. 国家林业和草原局 生态建设工程管理中心, 北京 100714)

摘要:准确量化半干旱区森林植被耗水特征及其影响因子对植被-水-土的综合管理至关重要。选择内蒙古大青山的华北落叶松人工林为研究对象,利用热扩散探针法监测树干液流,同步监测气象因子和土壤体积含水量。结果表明,研究期间华北落叶松冠层蒸腾存在明显月、季节变化,冠层蒸腾季节变化呈单峰曲线,冠层月蒸腾量(mm)为8月(55.08)>7月(54.76)>6月(48.76)>5月(43.13)>9月(40.20)>10月(12.36)。华北落叶松林冠层蒸腾与气温、太阳辐射、大气湿度、饱和气压差、风速、土壤水分均存在极显著相关关系($P<0.01$),回归分析表明气温、太阳辐射和大气湿度是影响冠层蒸腾的主要气象因子;基于边界线的分析表明,冠层蒸腾随太阳辐射、气温变化可用对数增长函数拟合,即随太阳辐射、气温增大,冠层蒸腾先快速后缓慢增大,达到阈值后趋于平稳;冠层蒸腾随大气湿度增加的变化遵循抛物线曲线,阈值为59.41%。次降水量对冠层蒸腾的影响存在差异,降水强度>10 mm的次降水量显著影响华北落叶松人工林冠层蒸腾。总体来看,气温、太阳辐射、大气湿度和降水是影响华北落叶松冠层蒸腾的主要环境因子。

关键词:华北落叶松;冠层蒸腾;树干液流;气象因子;土壤含水量

中图分类号:S718.45 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2022)04-0010-08

Transpiration Characteristics of *Larix principis-rupprechtii* Plantation and Its Impact Factors in the Semi-Arid Area

CHEN Meng-di¹, QIN Xin-hao¹, MAO Yan-xin², WANG Yan-feng³

(1. Academy of Forest and Grassland Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China;
2. Economic Development Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China;
3. Ecological Construction Engineering Management Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: Forest transpiration is a major part in water balance of forestlands. Larch (*Larix principis-rupprechtii*) plantations located in the Daqing Mountains in Inner Mongolia was set to accurately quantify the characteristics of plantation transpiration and its response to environmental factors which is very important for vegetation-water-soil integrated management in semi-arid region. The sap flow, soil water content and meteorological factors were measured simultaneously from May to October 2016. It was found that larch stand transpiration had obvious seasonal and month variations during the study period. The seasonal variations of transpiration showed a single peak curve. The month forest transpiration (mm) was with an order of August(55.08)>July(54.76)>June(48.76)>May(43.13)>September(40.20)>October(12.36). The correlations between larch stand transpiration and air temperature, solar radiation density, air relative humidity, saturated vapor pressure deficit, wind speed and soil moisture were extremely significant ($P<0.01$). Regression analysis showed that the dominant meteorological factors which affected the stand tran-

收稿日期:2021-07-13 修回日期:2022-03-31

基金项目:瑞典宜家供应公司(IKEA SUPPLY AG)委托中国国家林业和草原局调查规划设计院研究项目(2019-28-9)。

第一作者:陈孟涤。研究方向:森林经营、生态学。E-mail:317612110@qq.com

spiration were air temperature, solar radiation density, and air relative humidity. Based on the upper boundary line analysis, the transpiration followed the logarithmic equation with the increase of air temperature and solar radiation density. The transpiration variation showed a trend of fast-slow increase. The transpiration relationship to air relative humidity presented a quadratic equation with a threshold value of 59.41%. The effect of precipitation events on canopy transpiration was different, and the effect was significant when precipitation was above 10 mm. Generally, air temperature, solar radiation density, air relative humidity and precipitation were the main environmental factors that affected the transpiration.

Key words: *Larix principis-rupprechtii*; canopy transpiration; sap flow; meteorological factor; soil moisture

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)成活率高、抗逆性强、生长快,是我国主要造林树种之一,在华北各地、阴山山脉和秦岭山脉等地区均有人工林分布,对当地的水土保持、涵养水源和净化大气等生态效益起着重要的作用。处在阴山山脉地区的森林-草原过渡带上的内蒙古大青山,属于黄河中上游水源涵养林保护区,也是三北防护林、退耕还林实施的重要区域,自 20 世纪 60 年代开始引入的华北落叶松对周边呼包地区提供水源涵养等生态服务。

冠层蒸腾是森林生态系统水量平衡的主要组成部分^[1-3],也是林地散失水分的主要方式,影响着林地生态系统的稳定性^[3-5],尤其是在干旱或半干旱地区,植被蒸腾还会影响到地区生活用水的安全性。已有研究在干旱地区人工植被样地发现了土壤干化干层^[6]、地下水位下降^[7]、“老头”树^[8]、流域径流减少^[4,9]、叶片脱水^[10]等现象,所以资源性缺水地区的植被恢复和森林经营必须遵循地区的水资源承载力,这就需要对恢复植被的耗水特征进行准确定量评价。人工林耗水特征及其对环境因子的响应如何在内蒙古大青山还没有报道。为此,本研究选择阴山地区的大青山华北落叶松人工林为研究对象,测定其液流速率,并同步监测气象因子及林地土壤水分状况,旨在确定生长季内冠层蒸腾的变化特征,并分析环境因子对冠层蒸腾的影响,以期为该地区的植被恢复和人工林精细化经营提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样地设置

内蒙古呼和浩特市古路板林场(111°49'E, 40°56'N)位于阴山山脉中段的大青山,海拔 1 600~2 122 m;根据呼和浩特气象中心的数据显示,近 20 a(1997—2016 年)的年均气温 7.81℃,最低平均气温 7.08℃,最高平均气温 8.96℃,平均日照时数 2 861.6 h,平均大气相对湿度 48.87%;年均降水量 402.60 mm,年降水量波动范围为 177.1~654.1 mm,降水主要集中在 6—9 月。主要天然林树种有

白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*),主要人工林树种有油松(*Pinus tabulaeformis*)、华北落叶松、云杉(*Picea asperata*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)等。在古路板林场的核心区选择 40 a 华北落叶松人工林为研究对象,设置 30 m×30 m 样地 1 块,样地土壤为山地灰褐土,枯落物厚度>10.9 cm;林分密度 1 311 株/hm²,林分郁闭度 0.86,平均胸径 17.33 cm,树高 13.62 m,活枝下高 6.26 m,死枝下高 3.19 m,冠幅 2.75 m;林下灌木以土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)和胡枝子(*Lespedeza bicolor*)为主,平均高度分别为 49.6 cm 和 21.5 cm;林下草本层发育良好,覆盖度 68%,草本种类主要有东方草莓(*Fragaria orientalia*)、羊草(*Leymus chinensis*)、山猪殃殃(*Galium pseudoasprellum*)、歪头菜(*Vicia unijuga*)、地肤(*Kochia scoparia*)、狭叶蓼(*Polygonum angustifolium*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、老鹳草(*Geranium wilfordii*),平均高度 16.7 cm。样地基本情况见表 1。

表 1 华北落叶松标准木的基本特征
Table 1 The basic information of the sample larch trees

标准木	胸径 /cm	树高 /m	冠幅 /m ²	枝下高 /m	边材面积 /cm ²
1	11.4	11.9	2.23	4.6	60.05
2	13.2	12.7	1.29	4.5	78.23
3	15.4	13.1	2.41	6.0	103.31
4	17.2	15.1	2.61	7.4	126.12
5	18.8	12.7	3.57	5.1	148.08
6	20.3	15.4	2.70	6.3	170.08
7	21.2	15.9	3.03	7.1	183.92
8	23.4	15.6	3.36	7.2	219.79

1.2 液流速率的监测

基于径级分布,在 2016 年生长季(5—10 月)选择样树 8 株,利用 SF-L 树干液流探针(Ecomatic, Munich, Germany)测定液流速率,数据采集器为 CR3000 (USA),采集频率为 10 min。液流密度是根据 Granier 等^[11]方法计算的,公式如下:

$$J_s = 0.714 \times [(d_{\text{tmax}}/d_{\text{tact}}) - 1]^{1.231} \quad (1)$$

$$d_{\text{tact}} = T_{t0} - (T_{t2} + T_{t3})/2 \quad (2)$$

式中: J_s 为液流密度 ($\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$); d_{tmax} 指夜间空气湿度为 100% 长达 2 d 时算得的 d_t 值 ($^{\circ}\text{C}$), 即最大的 d_t 值; d_{tact} 为实际的 d_t 值 ($^{\circ}\text{C}$); T_{t0} 、 T_{t2} 、 T_{t3} 分别为探头 S_1 与 S_0 、 S_2 、 S_3 之间的温度差 ($^{\circ}\text{C}$)。

1.3 边材面积测定

按径级比例选取标准木 30 棵 (胸径范围 9.75 ~ 24.60 cm), 在胸高处钻取树芯, 用 Lintab5 年轮分析仪 (Heidelberg, Germany) 测量边材宽度。建立样树边材面积和胸径的数量关系, 利用此数量关系计算样树的边材面积。

1.4 林分蒸腾计算

根据径级分布加权平均计算样地液流速率, 再结合样树的边材面积和样地面积计算林分蒸腾量, 公式如下:

$$T_r = J_c \times \frac{\sum A_s}{S \times 1000} \times 60 \times 24 \quad (3)$$

式中: T_r 为林分蒸腾 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); J_c 为液流速率 ($\text{mL} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$); S 为样地面积 (m^2); A_s 为样树边材面积 (cm^2)。

1.5 气象因子监测

采用小型自动气象站 (WeatherHawk, USA) 对气象因子进行监测, 气象站安装在距离样地 139.8 m 处的林外空旷地。数据采集间隔为 10 min, 监测气象因子有: 太阳辐射强度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)、降水 (mm)、气温 ($^{\circ}\text{C}$)、空气相对湿度 (%) 和风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。饱和水汽压差 (VPD, 式中用 V_{PD} 表示, kPa) 采用如下公式计算。

$$V_{\text{PD}} = 0.611 \cdot \left(1 - \frac{R_H}{100}\right) \cdot e^{\frac{17.502 \cdot T_a}{T_a + 240.97}} \quad (4)$$

式中: R_H 为空气相对湿度 (%); T_a 为高度 2 m 处的气温 ($^{\circ}\text{C}$)。

1.6 土壤水分监测

在观测样地安装 5TE 土壤水分测量仪 (Decagon, USA) 监测 5、15、25、35、45、55、65、75、85、95 cm 土深处的土壤含水量; 数据采集器为 EM50 (Decagon, USA) 连接, 数据采集频率为 10 min。

1.7 数据分析

数据使用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件进行处理。为分析蒸腾对环境因子的响应, 采用 Pearson 相关分析和逐步回归法进行分析。

2 结果与分析

2.1 环境因子季节变化

在观测时期, 平均气温 14.05 $^{\circ}\text{C}$, 最高气温

21.71 $^{\circ}\text{C}$, 平均最高气温 19.82 $^{\circ}\text{C}$, 平均最低气温 8.81 $^{\circ}\text{C}$; 总辐射 494.0 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 变化范围 38.86 ~ 804.29 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; 平均风速 5.14 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大风速 10.53 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; VPD 平均 1.01 kPa, 最大值 2.15 kPa (图 1)。

研究期间降水的季节分配不均匀。其中, 7 月降水量最多, 达到 138.6 mm, 降水事件仅为 7 次; 6 月降水量占总降水量的 17.60%, 降水事件为 14 次, 22% 的降水事件 < 10 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$; 8 月仅 5 次降水, 月降水量占总水量的 14.53%; 9 月降水量为 76.8 mm, 降水次数达到 15 d, 单日降雨量 $\geq 10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 占总降水天数的 20.00%; 5 月和 10 月降水量最少, 只占总降水量的 12.93% 和 10.75%。

土壤水分的季节变化与林地耗水、降水特征有关。进入生长季, 随着林地耗水逐渐增大, 时段内降水量又较少, 土壤含水量开始减小, 但次降水后, 土壤水分有不同程度的回升, 如 5 月 21—24 日连续降水后, 土壤水分回升较高水平; 7 月 11—16 日及 7 月 23—28 日的集中降水, 土壤水分得到迅速升高; 8 月蒸腾量较大, 降水次数较少, 土壤水分随降水呈波动性变化; 进入 9 月, 虽然降水量相对较少, 但降水天数较多, 蒸腾速率减弱, 土壤水分呈现出较小波动; 10 月随着蒸腾速率进一步减弱, 土壤水分呈现出增大趋势, 并维持在较高的水平。此外, 降水强度也影响到土壤水分的变化, 在生长季中期, 次降水 < 10 mm 时, 0~100 cm 土壤水分并未显著增加; 当次降水 > 10 mm 时, 雨水才能穿过冠层、草本层和枯落物层下渗到土壤层。10 月, 当次降水 > 5 mm 时, 雨水能下渗到土壤层。

2.2 冠层蒸腾变化特征

由图 2 可以看出, 冠层蒸腾季节变化总体呈现出先增大后减小的趋势。5 月 1—10 日, 随着树木枝叶展开, 冠层蒸腾迅速增大; 直到 6 月 29 日, 蒸腾波动性较大, 主要与阴雨天气有关, 在降水天气蒸发需求低、饱和气压差低, 蒸腾速率较小; 7 月 11—19 日, 受持续降水影响, 蒸腾波动较大, 雨后冠层蒸腾量快速回升到较高水平; 由于 8 月降水量次数较少, 但生长季中期的冠层蒸腾耗水量大, 土壤含水量下降较快, 冠层蒸腾量呈下降趋势; 之后受降水和温度的双重影响, 9 月冠层蒸腾量呈连续下降的趋势, 10 月初树木落叶后蒸腾呈快速下降的趋势。

华北落叶松林冠层蒸腾量月变化差异明显 (表 2), 8 月和 7 月蒸腾量最大, 分别为 55.08 mm 和 54.76 mm; 其次为 6 月 (48.76 mm)、5 月 (43.13 mm)、9 月 (40.20 mm), 10 月蒸腾量最小, 仅为 12.36 mm。林分最大日蒸腾量表现为 7 月 (2.24

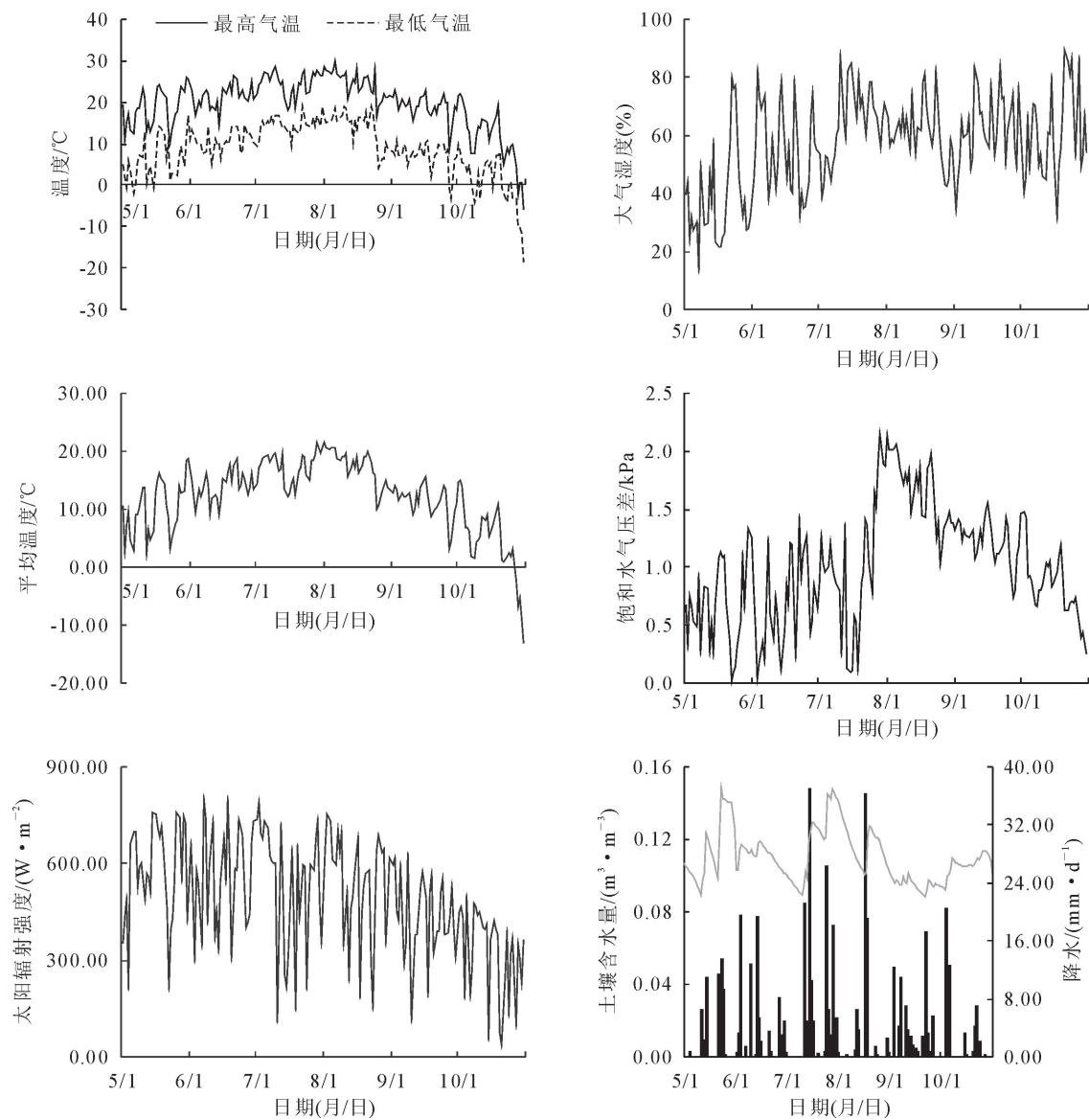


图 1 气象因子和土壤含水量的日变化

Fig. 1 Daily variations of meteorological factors and soil water content

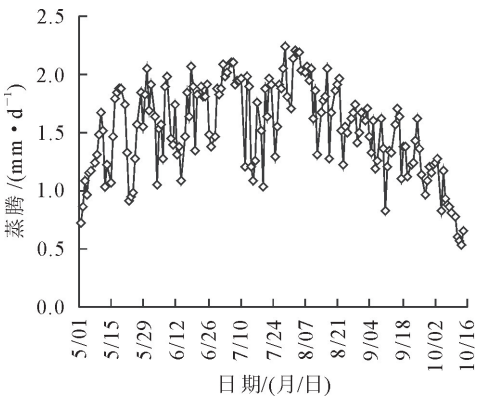


图 2 华北落叶松林冠层蒸腾日动态变化

Fig. 2 Daily variations of larch stand transpiration

$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) > 8 月 ($2.21 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) > 6 月 ($2.08 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) > 5 月 ($2.06 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) > 9 月 ($1.71 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) > 10 月 ($1.28 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$); 5—10 月的林

分最小日蒸腾量分别为 0.72 、 1.05 、 1.03 、 1.23 、 $0.82 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.54 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.3 冠层蒸腾对环境因子的响应

在日尺度上,对华北落叶松林冠层蒸腾与气象因子、土壤水分进行拟合分析,得到落叶松林冠层蒸腾与各环境因子的关系。Pearson 相关分析显示,华北落叶松林冠层蒸腾与气温、太阳辐射、饱和气压差、大气相对湿度、土壤水分存在极显著相关关系 ($P < 0.01$)。华北落叶松林冠层蒸腾与气温、太阳辐射、饱和气压差的拟合方程呈对数函数关系,与大气相对湿度、土壤水分和风速呈二项式函数关系,气温、太阳辐射、饱和气压差对冠层蒸腾的解释程度分别达到 56.22% 、 45.73% 、 23.06% ;风速和土壤水分对冠层蒸腾的解释程度最小,分别为 11.74% 和 11.43% (图 3)。根据以上分析,利用逐步回归分析

法,进一步尝试利用多元线性回归描述冠层蒸腾与环境因子之间的关系,得到式(5)。

$$T_c = -0.083 + 0.003R_H + 0.01S_R + 0.056T \quad (R^2=0.944) \quad (5)$$

式中: T_c 为冠层蒸腾($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); S_R 为太阳辐射($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); R_H 为空气相对湿度(%); T 为温度($^{\circ}\text{C}$)。

为了排除其他因子,分析单一环境因子对冠层蒸腾的影响,使用边界线^[12-13]进一步分析冠层蒸腾对气温、太阳辐射、大气相对湿度等环境因子响应。由图4可知,冠层蒸腾随气温、太阳辐射增加的外包线曲线相似,可用对数增长函数拟合,即随气温、太阳辐射增大,冠层蒸腾先快速后缓慢增大,达到阈值后趋于平稳。拟合的外包线表明,随气温从0升到10 $^{\circ}\text{C}$ 时,蒸腾近线性地快速增加,每增加1 $^{\circ}\text{C}$ 的温度对应的蒸腾增加值为0.11 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;当气温在

10~20 $^{\circ}\text{C}$ 时,蒸腾增加缓慢,每增加1 $^{\circ}\text{C}$ 的温度对应的蒸腾增加值为0.06 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。冠层蒸腾随太阳辐射的变化趋势与其随 T 的变化类似,冠层蒸腾在太阳辐射 $<500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 快速增加,之后变缓。冠层蒸腾随大气相对湿度增加的变化遵循抛物线曲

表2 华北落叶松林各月林分蒸腾量

Table 2 Monthly transpiration of larch plantation

月份	林分月蒸腾 /mm	日蒸腾量/mm		
		最大值	最小值	平均值
5	43.13	2.06	0.72	1.39
6	48.76	2.08	1.05	1.63
7	54.76	2.24	1.03	1.77
8	55.08	2.21	1.23	1.78
9	40.20	1.71	0.82	1.34
10	12.36	1.28	0.54	0.88

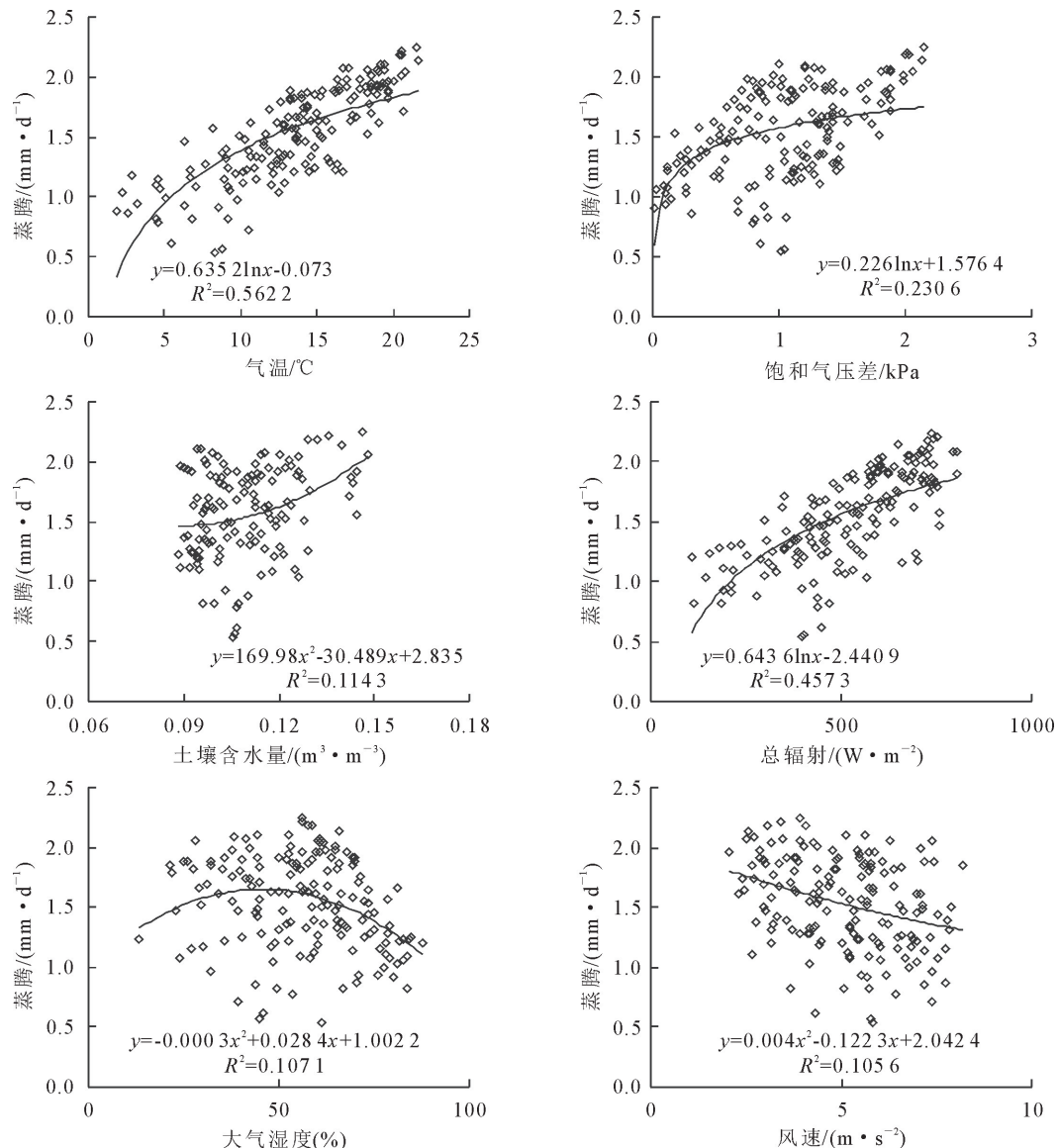


图3 冠层蒸腾对大气相对湿度、饱和水汽压差、太阳总辐射、土壤含水量和风速的响应

Fig. 3 The response of larch stand transpiration to atmospheric humidity, vapor pressure, solar radiation, soil water content and wind speed

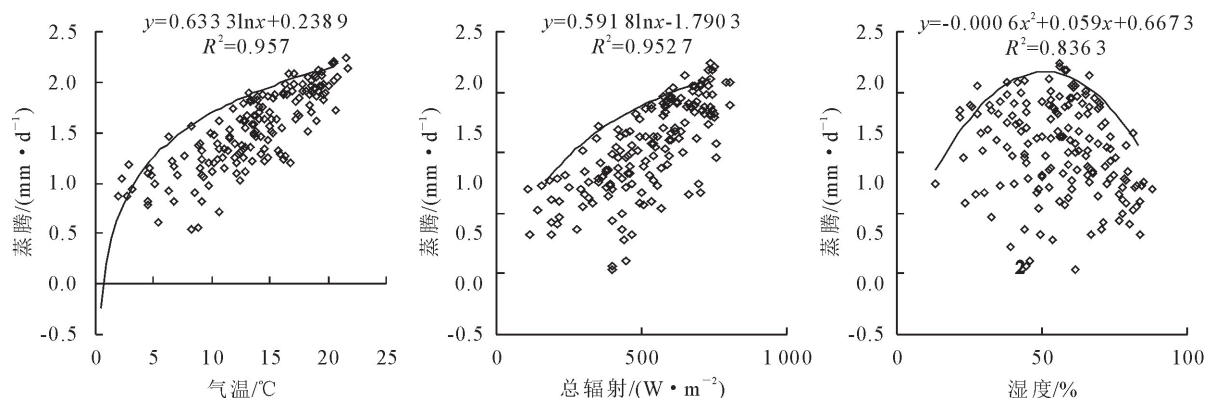


图4 蒸腾与气温、太阳辐射和大气湿度的关系

Fig. 4 Relationship between transpiration and air temperature, solar radiation and atmospheric humidity from data on the upper boundary line

线,在大气相对湿度 $<59.41\%$ 时,蒸腾随大气相对湿度增加呈快速增加,在大气相对湿度超过 59.41% 后,蒸腾反而减少。

次降水量对冠层蒸腾的影响存在差异。随着次降水量的增加,落叶松冠层蒸腾量上升加快, 2 mm 以上的次降水量对冠层蒸腾的促进作用大于 2 mm 以下的降水量(图5)。当次降水量 $<2\text{ mm}$ 时,降水达不到地面,被冠层、枯落物层截留蒸发了;当次降水量为 $2\sim5\text{ mm}$ 时,降水能通过树干到达土壤层,林窗相对较大的地面也能达到土壤层,冠层蒸腾量增加比例 18.57% ;当次降水量为 $5\sim10\text{ mm}$ 时,次降水能达到土壤浅层,蒸腾增加量比次降水量为 $2\sim5\text{ mm}$ 时略大,为 21.66% ;当次降雨 $>10\text{ mm}$ 时,次降水能到深层,对冠层蒸腾促进作用显著,增加比例超过 30% ;当次降水量为 $>40\text{ mm}$ 时,蒸腾增加减缓。

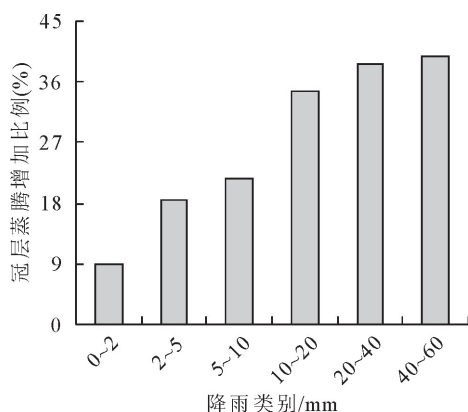


图5 不同次降水后冠层蒸腾增加的比例

Fig. 5 The increased percentage of daily transpiration after different rain classes

3 结论与讨论

3.1 结论

华北落叶松冠层蒸腾存在明显季节变化,林分蒸腾季节变化呈单峰曲线,即先增大后减小的趋势;

月林分蒸腾量为8月(55.08 mm) $>$ 7月(54.76 mm) $>$ 6月(48.76 mm) $>$ 5月(43.13 mm) $>$ 9月(40.20 mm) $>$ 10月(12.36 mm)。Pearson 相关分析显示华北落叶松冠层蒸腾与气温、太阳总辐射、大气湿度、饱和气压差、风速和土壤水分均存在极显著相关关系($P<0.01$);逐步回归分析显示气温、太阳总辐射和大气湿度是影响华北落叶松林冠层蒸腾的主要环境因子;基于边界线的分析表明,冠层蒸腾随太阳辐射、气温增加变化可用对数增长函数拟合,随大气湿度增加的变化遵循抛物线曲线。次降水量对林分蒸腾的影响存在差异,次降水量 $>10\text{ mm}$ 时降水对冠层蒸腾作用明显。

3.2 讨论

华北落叶松林冠层蒸腾季节变化总体表现出先增大后减小的趋势,这与陈胜楠等^[14]对油松人工林、王云霓等^[13]对六盘山南侧半湿润区华北落叶松人工林的冠层蒸腾季节变化趋势一致。生长季不同月份蒸腾量(mm)表现为8月(55.08) $>$ 7月(54.76) $>$ 6月(48.76) $>$ 5月(43.13) $>$ 9月(40.20) $>$ 10月(12.36),这主要与气象因子、土壤水分的综合影响有关。在生长季初期(5月),温度回升,华北落叶松开始萌动生长,太阳辐射增强,饱和气压差增大,导致蒸腾耗水逐渐增加,但此时段降水较少,土壤水分不断下降,制约着冠层蒸腾。6月初,降水量增多,土壤水分得到提高,冠层蒸腾迅速增大,但6月15日后到7月11日,正处在生长季旺期,虽然此时段降水较少,但较高的土壤水分,可以保证冠层蒸腾维持较高的水平;7月11—19日的持续性降水后,冠层蒸腾量随土壤含水量的回升增加到较高水平,7月下旬至8月初研究区气温较高,太阳辐射较强,降水量相对较多,雨热同期的特点满足林分耗水需求,冠层蒸腾保持在较高水平,短暂时波动均是阴雨天气蒸发需求低、饱和气压差低造成的。8月中下旬,土壤水分下降较快,土壤水分不能满足

冠层蒸腾量导致其呈下降趋势。9月,气温下降,加上降水天数较多,太阳辐射和饱和气压差均降低,冠层蒸腾受环境因子的制约作用减弱^[14],同时受树木自身生理特性的影响,冠层蒸腾呈下降趋势。进入10月后,树木开始落叶,气温、太阳辐射、饱和气压差等气象因子进一步降低,蒸腾呈迅速下降的趋势。

在本研究中,气温、太阳辐射强度、饱和气压差、空气相对湿度是影响华北落叶松人工林冠层蒸腾的主要环境因子,这与前人的研究结果基本一致。陈胜楠等^[14]认为太阳总辐射、饱和水汽压差和土壤含水量是影响油松林分蒸腾的主要环境因子;王云霓等^[13]认为不同坡位样地华北落叶松冠层蒸腾均受太阳辐射、饱和气压差、大气湿度和潜在蒸散的影响;高峻等^[15]认为,杏树(*Prunus armeniaca*)蒸腾与气象因子的相关程度为冠层净辐射>大气湿度>温度>风速;刘彩凤等^[16]认为太阳辐射和水汽压差是影响黄土丘陵沟壑区有时刺槐混交林冠层蒸腾的主要因子;熊伟等^[17]对发现太阳辐射强度、空气温度和相对湿度是影响宁南山区华北落叶松日蒸腾量的主要环境因子;刘潇潇等^[18]通过对已发表相关文献搜集与整理发现,黄土高原11个树种树干液流影响因素主要有:太阳辐射、水汽压亏缺、土壤含水量;李洁等^[19]发现影响油松、落叶松、白桦树干液流速率的环境因子依次为:气温、土壤温度和日照时数。

此外,本研究中华北落叶松林冠层蒸腾与气温、饱和气压差、太阳辐射的拟合方程呈对数函数关系,与大气湿度、土壤水分和风速呈二项式函数关系。H. R. McCarthy等^[20]研究认为树木冠层蒸腾与饱和水汽压差呈对数关系;陈亚楠等^[14]研究发现油松林分蒸腾量与饱和水汽压差、太阳总辐射的拟合方程呈指数曲线关系,与土壤含水量、风速的拟合方程均呈二次曲线关系;Wang等^[21]对欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)研究发现,蒸腾主要受饱和水汽压差、太阳辐射的影响,并且呈线性关系;夏桂敏等^[22]认为日均气温和空气饱和气压差是影响花棒(*Hedysarum scoparium*)蒸腾速率最重要的气象因素,蒸腾速率与气温、太阳辐射、空气水汽压差呈线性回归关系。引起以上差异可能与树种特性、环境条件有关^[14]。

次降水通过改变土壤水分间接影响华北落叶松林冠层蒸腾,随着次水量的增多,冠层蒸腾呈增加趋势,这与陈胜楠等^[14]在呼和浩特树木园对油松林研究类似,此研究中当降雨量>10 mm时,油松林分蒸腾量增幅超过了79%,增加比例大于本研究研究(30%);Zhang等^[23]认为降雨量>15 mm时,油松林蒸腾显著增加。但Wang等^[21]在苏格兰的研究

却相反,蒸腾增加比例随着次降水量的增加而减小。造成以上差异可能与研究区气候、林分结构等有关,本研究与Zhang等^[23]及陈亚楠等^[14]研究均处在半干旱区,较小的次降水量,可能下渗不到土壤层,强降雨事件才能到根系土壤层,为冠层蒸腾提供水分;而Wang等^[21]研究区处在湿润区,降水量较大,土壤可利用水分维持在较高水平,未达到显著蒸腾耗水的阈值,而且林分密度(95~134株/hm²)较低,蒸腾不受土壤水分的影响。此外,土地利用类型、树种种类、林龄、根系分布均影响着蒸腾对土壤水分响应的敏感性。如赵鑫等^[24]在毛乌素沙地的研究发现:不同植被类型对土壤水分时空变化的影响具有显著差异;Lagergren等^[25]、Du等^[26]研究均认为林分蒸腾速率对土壤水分变化的响应具有显著的种间差异;王云霓等^[13]认为有效根系层的土壤水分是影响森林蒸腾的关键;Delzon等^[27]研究发现54年生海岸松(*Pinus pinaster*)林分日蒸腾和对干旱敏感性均显著低于10年生的。

参考文献:

- [1] UNGAR E D, ROTENBERG E, RAZ-YASEEF N, et al. Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semiarid region: implications for forest management[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 298(15): 39-51.
- [2] KOMATSU H, SHINOHARA Y, KUMAGAI T, et al. A model relating transpiration for Japanese cedar and cypress plantations with stand structure[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 334(15): 301-312.
- [3] WANG YN, CAO GX, WANG YH, et al. Response of the daily transpiration of a larch plantation to variation in potential evaporation, leaf area index and soil moisture[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 4697.
- [4] WANG YH, YU PT, FEGER KH, et al. Annual runoff and evapotranspiration of forestlands and non-forestlands in selected basins of the Loess Plateau of China[J]. Ecohydrology, 2011, 4(2): 277-287.
- [5] 杨建伟, 周索, 韩蕊莲, 等. 土壤干旱对刺槐蒸腾变化及抗旱性研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 32-36. (in Chinese)
- [6] YANG J W, ZHOU S, HAN R L, et al. Transpiration and drought resistance of *Robinia pseudoacacia* under different soil drought levels[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(5): 32-36. (in Chinese)
- [7] 许喜明, 陈海滨, 原焕英, 等. 黄土高原半干旱区人工林地土壤水分环境的研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 60-64.
- [8] XU X M, CHEN H B, YUAN H Y, et al. The research of artificial forestland on soil water in the semiarid of the Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(5): 60-64. (in Chinese)
- [9] 常兆丰, 樊宝丽, 王强强. 我国防沙治沙的现状、问题与出路——以民勤沙区为例[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(4): 93-99.
- [10] CHANG Z F, FAN B L, WANG Q Q. Status quo, problems

- and solutions to desertification combating in China—a case study of Minqin desert in Gansu[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(4): 93-99. (in Chinese)
- [8] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2016, 31(1): 14-22.
SHAO M A, JIA X X, WANG Y Q, *et al.* A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau[J]. Advanced Earth Science, 2016, 31(1): 14-22. (in Chinese)
- [9] WANG Y H, BONELL M, FEGER K H, *et al.* Changing forestry policy by integrating water aspects into forest/vegetation restoration in dryland areas in China[J]. Agriculture Water and Ecology, 2012, 26(1): 59-67.
- [10] 李文斌, 郭建斌, 蒋坤云, 等. 抗蒸腾型叶面肥对造林树种蒸腾速率的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 30(6): 32-35.
LI W B, GUO J B, JIANG K Y, *et al.* Effects on new anti-transpiration foliar fertilizer on transpiration rate of forestation tree species[J]. Notification of soil and Water Conservation, 2012, 30(6): 32-35. (in Chinese)
- [11] GRANIER A, BREDA N. Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements[J]. Annales des Sciences Forestières, 1996, 53: 537-546.
- [12] KUMAGAI T, TATEISHI M, SHIMIZU T, *et al.* Transpiration and canopy conductance at two slope positions in a Japanese cedar forest watershed[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148: 1444-1455.
- [13] 王云霓, 曹恭祥, 王彦辉, 等. 六盘山南侧华北落叶松人工林冠层蒸腾及其影响因子的坡位差异[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1503-1514.
WANG Y N, CAO G X, WANG Y H, *et al.* Canopy transpiration of *Larix principis-rupprechtii* plantation and its impact factors in different slope locations at the South side of Liupan Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(5): 1503-1514. (in Chinese)
- [14] 陈胜楠, 孔喆, 陈立欣, 等. 半干旱区城市环境下油松林分蒸腾特征及其影响因子[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1269-1280.
CHEN S N, KONG J, CHEN L X, *et al.* The stand transpiration characteristics of *Pinus tabulaeformis* and its influential factors in a semi-arid urban environment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1269-1280. (in Chinese)
- [15] 高峻, 吴斌, 孟平. 杏树蒸腾与降水和冠层微气象因子的关系[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(3): 14-20.
GAO J, WU B, MENG P. Transpiration of apricot trees and their relationship with rainfall and canopy micrometeorological factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(3): 14-20. (in Chinese)
- [16] 刘彩凤, 张志强, 郭军庭, 等. 晋西黄土丘陵沟壑区油松刺槐混交林蒸腾耗水[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(5): 42-48.
LIU C F, ZHANG Z Q, GUO J T, *et al.* Transpiration of a *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* mixed forest in Hilly-gully region of the Loess Plateau, West Shanxi Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(5): 42-48. (in Chinese)
- [17] 熊伟, 王彦辉, 徐德应. 宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应[J]. 林业科学, 2003, 39(2): 1-7.
XIONG W, WANG Y H, XU D Y. Regulations of water use for transpiration of *Larix principis-rupprechtii* plantation and its responses on environmental factors in southern Ningxia hilly area[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(2): 1-7. (in Chinese)
- [18] 刘潇潇, 李国庆, 闫美杰, 等. 黄土高原主要树种树干液流研究进展[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 369-373.
LIU X X, LI G Q, YAN M J, *et al.* Research progress on stem sap flow in major tree species on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 369-373. (in Chinese)
- [19] 李洁, 任启文, 孙杰肖. 张家口崇礼区3种优势树种蒸腾耗水特征研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 40-46.
LI J, REN Q W, SUN J X. Water consumption of three dominant tree species at Qingshuihe watershed of Chongli district in Zhangjiakou[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 40-46. (in Chinese)
- [20] MCCARTHY H R, PATAKI D E. Drivers of variability in water use of native and non-native urban trees in the greater Los Angeles area[J]. Urban Ecosystems, 2010, 13(4): 393-414.
- [21] WANG H L, 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.
- [22] 夏桂敏, 康绍忠, 杜太生, 等. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区花棒蒸腾耗水量[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1194-1202.
XIA G M, KANG S Z, DU T S, *et al.* Transpiration of *Hedysarum scoparium* in arid desert region of Shiyang River basin, Gansu Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1194-1202. (in Chinese)
- [23] ZHANG H D, WEI W, CHEN L D, *et al.* Evaluating canopy transpiration and water use of two typical planted tree species in the dryland Loess Plateau of China[J]. Ecohydrology, 2017, 10(4): e1830.
- [24] 赵鑫, 辛一凡, 张应龙, 等. 不同植被类型对毛乌素沙地背风坡土壤水分时空变化的影响[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(3): 36-43.
ZHAO X, XIN Y F, ZHANG Y L, *et al.* Effects of different vegetation types on temporal and spatial variation of soil moisture on leeward slope of Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(3): 36-43. (in Chinese)
- [25] LAGERGREN F, LINDROTH A. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 112: 67-85.
- [26] DU S, WANG Y L, KUME T, *et al.* Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151: 1-10.
- [27] DELZON S, LOUSTAU D. Age-related decline in stand water use: sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 129: 105-119.