

DOI: 10.5846/stxb201811262571

陈胜楠, 孔喆, 陈立欣, 刘清泉, 刘平生, 张志强. 半干旱区城市环境下油松林分蒸腾特征及其影响因子. 生态学报, 2020, 40(4): 1269-1280.

Chen S N, Kong Z, Chen L X, Liu Q Q, Liu P S, Zhang Z Q. The stand transpiration characteristics of *Pinus tabulaeformis* and its influential factors in a semi-arid urban environment. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1269-1280.

半干旱区城市环境下油松林分蒸腾特征及其影响因子

陈胜楠¹, 孔喆¹, 陈立欣¹, 刘清泉², 刘平生², 张志强^{1,*}

¹ 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

² 内蒙古林业科学研究院, 呼和浩特 010010

摘要: 在城市环境下, 由于不透水地面面积的增加, 土壤-植物-大气之间水汽循环减弱, 水汽调节能力差, 因而研究城市树木蒸腾对环境因子的响应对于城市进行合理的水汽调节具有重要意义。于 2017 年生长季, 在内蒙古呼和浩特市树木园内选择 58 年生油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 作为研究树种, 采用热扩散法测定其树干液流, 并同步监测气象因子和土壤含水量变化, 利用彭曼公式计算冠层气孔导度。结果表明: (1) 生长季内, 油松林分蒸腾存在明显日、月变化, 晴天天气下林分蒸腾日变化呈单峰曲线, 月林分蒸腾量 5 月最大, 其次是 7 月、8 月、6 月和 9 月, 分别为 20.96、19.89、18.09、17.25 mm 和 7.49 mm。(2) 油松林分蒸腾与饱和水汽压差、太阳总辐射、土壤含水量和风速均存在极显著相关关系 ($P < 0.01$), 太阳总辐射、饱和水汽压差和土壤含水量是影响林分蒸腾的主要环境因子 ($R^2 = 0.47$ 、 $R^2 = 0.31$ 和 $R^2 = 0.16$), 风速对林分蒸腾的影响程度最小 ($R^2 = 0.12$); 不同降雨量对林分蒸腾的影响作用不同, 10 mm 以上的日降雨量对油松林分蒸腾作用明显。(3) 除环境因子外, 油松叶片气孔通过响应环境变化控制蒸腾作用, 当饱和水汽压差 < 1.5 kPa 时, 叶片气孔对饱和水汽压差的响应更敏感; 当太阳总辐射 < 250 W/m² 时, 叶片气孔对蒸腾起促进作用, 超过该阈值, 叶片气孔关闭从而抑制树木蒸腾。

关键词: 油松; 林分蒸腾; 环境因子; 冠层气孔导度

The stand transpiration characteristics of *Pinus tabulaeformis* and its influential factors in a semi-arid urban environment

CHEN Shengnan¹, KONG Zhe¹, CHEN Lixin¹, LIU Qingquan², LIU Pingsheng², ZHANG Zhiqiang^{1,*}

¹ College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Inner Mongolia Academy of Forestry, Hohhot 010010, China

Abstract: The water vapor cycle between soil-plant-atmosphere is weakened and its ability for regulation is poor due to the increase in impervious surface areas in urban environments. Therefore, it is of great significance to study the transpiration response of urban trees to environmental factors amidst reasonable water vapor regulation in urban areas. In the growing season of 2017, 58-year-old *Pinus tabulaeformis* Carr. was selected as a research tree species for sap flow measurement, by thermal diffusion, at the Hohhot arboretum, Inner Mongolia. We measured meteorological factors and soil water content simultaneously and estimated canopy stomatal conductance using the Penman Formula. The results showed that (1) stand transpiration of *P. tabulaeformis* had obvious daily and monthly changes in the growing season. The diurnal stand transpiration variation graph showed a single peak curve on sunny days. Monthly stand transpiration reached the maximum in May, followed by July, August, June and September, which was 20.96, 19.89, 18.09, 17.25 mm and 7.49 mm, respectively. (2) There were extreme significant correlations between stand transpiration and vapor pressure deficits, global radiation, soil water content, and wind speed ($P < 0.01$). Global radiation, vapor pressure deficit, and soil water content

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2015BAD07B06-4)

收稿日期: 2018-11-26; 网络出版日期: 2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

were the main environmental factors affecting forest transpiration ($R^2=0.47$, $R^2=0.31$ and $R^2=0.16$), and wind speed had the smallest impact on forest transpiration ($R^2=0.12$). Different rainfall events had varied effects on stand transpiration, but a significant effect when daily rainfall exceeded 10 mm. (3) In addition to environmental factors, leaf stomata of *P. tabulaeformis* controlled transpiration in response to environmental factors. Leaf stomata were more sensitive to vapor pressure deficits when it was < 1.5 kPa, whereas, global radiation, when < 250 W/m², promoted transpiration. When the threshold was exceeded, leaf stomata would close to suppress tree transpiration.

Key Words: *Pinus tabulaeformis*; stand transpiration; environmental factors; canopy stomatal conductance

植物蒸腾是陆地生态系统蒸散发的重要组成部分,对土壤-植被-大气连续体(Soil-Plant-Atmosphere Continuum, SPAC)之间的水文过程起着重要影响。树木作为生态系统中不可缺少的重要组成部分,影响着地区的水分分配和利用,并发挥着重要的生态功能^[1]。树木蒸腾耗水易受环境条件和生理状况的影响,目前很多研究表明,树木蒸腾耗水由外界环境条件和树木生理状况共同控制^[2]。通常饱和水汽压差、太阳辐射和土壤含水量是影响树木蒸腾的主要环境因子^[3-6],风速对树木蒸腾的影响相对较小,降雨可通过改变水分条件来影响树木蒸腾对气象条件的响应程度^[7]。环境因子对树木蒸腾的影响存在区域异质性,在湿润或半湿润地区,树木根系可以从土壤中吸收充足的水分,饱和水汽压差和太阳辐射是驱动树木蒸腾的主要环境因子,土壤含水量对树木蒸腾的影响相对较小^[8-9];在干旱或半干旱地区,由于降雨量少且分布不均,树木蒸腾受土壤含水量的影响较大。在生理控制方面,树木通过调节叶片气孔开闭来响应外界环境变化,进而控制树木蒸腾。叶片气孔对饱和水汽压差^[10]和太阳辐射^[11]的敏感性较强,随着夏季干旱事件发生频率的增加,土壤水分也成为影响叶片气孔活动的一个重要影响因素^[12]。当土壤水分较高时,叶片气孔对各环境因子的敏感性相对较小,冠层气孔导度较高,树木蒸腾保持在较高水平。土壤水分短缺时,随着干旱胁迫程度的加大,叶片气孔对饱和水汽压差和太阳辐射的敏感性增强,树木蒸腾受到抑制作用^[13]。

目前,有关树木蒸腾的研究多集中在丘陵^[14-16]或山地^[17-19]地区,而在城市环境下的研究相对较少。在城市环境下,城市热岛效应会加剧空气温度上升,造成大气对水分需求量增加,导致城市树木比非城市地区的树木消耗更多的水分。由于土壤和水分条件的限制,城市树木叶片气孔对环境因子的敏感性更强,树木蒸腾更容易受强饱和水汽压差和土壤水分短缺的影响^[20],尤其在干旱或半干旱地区,城市树木更容易遭受干旱胁迫。因此,研究城市树木蒸腾耗水规律对于城市林业规划、经营和管理具有重要参考价值。

油松是我国北方常见的造林树种,具有较强的耐旱性,不仅作为用材林被广泛种植于山区,而且其树形优美,具有一定的观赏价值,并通过冠层遮阴和蒸腾发挥降温作用,被广泛应用于城市绿化。为研究树木在城市环境下的蒸腾耗水特征及其环境响应,本文选择油松作为研究对象,测定其树干液流,并同步监测研究区土壤水分状况和气象条件,旨在城市环境下:(1)确定油松生长季内林分蒸腾日、月动态变化特征及规律;(2)分析环境因子对油松林分蒸腾的影响;(3)研究叶片气孔对环境因子的响应状况以及对油松蒸腾的调控作用。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究地点位于内蒙古自治区呼和浩特市赛罕区树木园内(111°41'E, 40°49'N),海拔 1056 m。该区属典型蒙古高原大陆性气候,四季气候变化明显,年温差和日温差大。春季干燥多风;夏季短暂、炎热、少雨;秋季降温迅速,常有霜冻;冬季漫长、严寒、少雪。年平均气温 5.6℃,最冷月气温-12.7—16.1℃;最热月平均气温 17—22.9℃。市区年均降水量 410 mm,降水量集中在 7 和 8 月,年均蒸发量 1784.6 mm。树木园位于市区,占地面积约 27 hm²。园内树木成林分布,四周被居民区和道路环绕,树木受城市环境影响较大。其中油松林地面积 0.6 hm²,密度 705 株/hm²,平均胸径(22.3±4) cm,平均树高(10.6±0.8) m。

1.2 样木边材面积测定

根据研究站点林分调查结果,将油松样地(468 m²)树木按胸径分布,每 3 cm 划为一个径阶,共 6 个径阶,分别为 15—18 cm、18—21 cm、21—24 cm、24—27 cm、27—30 cm 和 30—33 cm。在每个径阶内选取生长状况良好、树干通直和冠幅均匀的树木作为待测样木(表 1)。在生长季初期,用打生长锥的方法进行边材取样,利用染色法测得不同胸径树木的边材长度并计算边材面积,进行统计得到胸径(DBH, cm)与边材面积(A_s , cm²)的关系方程:

$$A_s = 0.2316 \text{ DBH}^{2.3181} \quad (R^2 = 0.97, n = 20) \quad (1)$$

式中: A_s 为树木边材面积(cm²);DBH 为树木胸径大小(cm)。

利用公式(1)计算样地每株树木的边材面积,按照径阶划分进行累加计算各径阶的总边材面积。

表 1 研究点样木基本特征

Table 1 The characteristics of sample trees at the study site

样木 Sample tree	胸径 Diameter at breast height/cm	树高 Height/m	冠幅 Canopy area/m ²	边材面积 Sapwood area/cm ²
1	15	10.8	7	123.3
2	15.6	9.8	13.8	135.1
3	20.4	10.4	12	251.5
4	21.4	9.2	13.3	281
5	24.4	11.2	13.6	380.9
6	24.5	10.8	14.3	384.6
7	27.6	11.4	25.4	506.9
8	31.2	11.9	27.2	673.5

1.3 树干液流测定

在 2017 年生长季,利用热扩散法^[21]对 8 棵油松样木测定树干液流,仪器采用 Granier 插针式热扩散探针(Dynamax, USA),利用公式(1)计算每株标准木的边材面积,并换算出边材深度(表 1),根据样木边材深度选择对应长度的探针。按照操作规范将探针统一安装在树干北向离地面高 1.3 m 处,在该处划定一个 5 cm×5 cm 的区域,剥去木质部以外的树皮,根据所选探针的长度和上下两针的距离使用配套电钻进行钻孔,然后把探针插入到树干。由于太阳总辐射、温度和水分会影响探针测定结果,使用玻璃胶将探针与树干接触处密封,并用遮阳布缠绕树干。把热扩散探针与 CR1000 数据采集器(Campbell Scientific, USA)、加热器连接在一起,使用开关控制器将上述仪器与电池、太阳能电池板连接,保持 12V 稳定工作电压,设置程序使其每隔 30 min 记录一次数据,并且做到定期维护和下载数据。

液流速率计算公式:

$$J_s = 119 \cdot \left(\frac{\Delta T_M - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (2)$$

式中, J_s 为单株样木液流速率(g m⁻² s⁻¹), ΔT 为探针瞬时温差值(°C), ΔT_M 为液流达到零时探针温差的极大值(°C)。

林分日蒸腾量计算公式:

$$E_c = \frac{\sum_{i=1}^{48} (J_{st} \cdot A_{st} \cdot 1800)}{A_c} \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中, E_c 为林分蒸腾量(mm/d); i 为以半小时计,日观测值取值范围(1—48); J_{st} 为各径阶样木平均液流速率(g m⁻² s⁻¹), A_{st} 为各径阶总边材面积(m²); A_c 为样地面积(m²)。

1.4 环境因子的测定

使用 5TE 土壤水分测量仪 (Decagon, USA) 分层测定土壤含水量变化, 根据油松根系的分布将土壤含水量 (VWC) 测定深度设定为 10、30、50、90 cm 和 120 cm。将土壤水分测量仪与 EM50 数据采集器 (Decagon, USA) 连接, 同样设置每隔 30 min 记录一次数据。利用小型自动气象站 (Dynamet, USA) 对气象因子进行连续监测, 气象站安装在树木园内部空旷区距地面 2.5 m 处, 设定数据采集时间间隔为 30 min。主要监测指标有太阳总辐射 (GR)、空气温度 (Ta)、相对湿度 (RH)、降雨量和风速 (WS), 利用下面的公式计算饱和水汽压差 (VPD) [22]:

$$VPD = 0.611 e^{\frac{17.502Ta}{Ta+240.97}} (1 - RH) \quad (4)$$

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

1.5 冠层气孔导度计算

利用彭曼公式的简化公式来计算油松林分冠层气孔导度, 其计算公式如下 [12, 23]:

$$g_c = \frac{\gamma \cdot \lambda \cdot E_c}{\rho \cdot C_p \cdot VPD \cdot 24 \cdot 3600} \quad (5)$$

式中, g_c 表示冠层气孔导度 (mm/s), γ 表示干湿表常数 (kPa/ $^{\circ}C$), λ 表示水汽化潜热 (J/kg), E_c 表示林分蒸腾量 (mm/d), ρ 表示空气密度 (kg/m³), C_p 表示定压比热 (J kg⁻¹ $^{\circ}C^{-1}$), VPD 是饱和水汽压差 (kPa)。由于油松是针叶树种, 林分冠层通透性好, 空气阻力小, 饱和水汽压差在冠层中不存在梯度分布, 并与大气具有强耦合关系 [10], 因此, 公式 5 适用于本研究。

利用 g_c 与 VPD 的经验关系方程式研究冠层气孔导度对大气条件的响应关系, 关系方程如下 [24-26]:

$$g_c = -m \ln VPD + b \quad (6)$$

式中, m 是 g_c 对 VPD 的敏感系数, b 为 VPD 等于 1 时的参考冠层气孔导度。

1.6 数据处理方法

在日尺度上累加得到日林分蒸腾量和太阳总辐射, 取均值计算日平均冠层气孔导度、VPD、土壤含水量和风速。在研究降雨对林分蒸腾的影响时, 选取降雨前后均为晴天的 1 天的数据, 计算降雨后林分蒸腾量增加的比例, 各降雨类别内取均值; 在研究冠层气孔导度对环境因子的响应时, 为减小天气条件对研究结果的影响, 所选数据均为晴天数据。

运用 Excel 2013 对数据进行整理, 使用 Baseline 3.0 软件将原始温差数据处理并转化为液流数据。利用 SPSS 24.0 单因素方差分析对林分蒸腾、冠层气孔导度和环境因子分别进行差异性检验, 并进行多元回归分析, 利用软件 SigmaPlot 12.5 绘制相关图像并进行曲线拟合。

2 结果与分析

2.1 环境因子变化

2017 年生长季各气象因子存在明显的月变化 (表 2, 图 1)。饱和水汽压差和太阳总辐射均在 5 月最大, 9 月最小, 饱和水汽压差最大为 1.51 kPa, 最小为 1.0 kPa; 太阳总辐射最大为 256.92 W/m², 最小为 173.76 W/m²。饱和水汽压差以及太阳总辐射在 5、6 和 7 月之间以及 8 月和 9 月之间的差异性不显著 ($P > 0.05$), 5 月至 9 月饱和水汽压差 (7 月除外) 和太阳总辐射整体呈下降趋势 (表 2)。风速在 5 月最大, 达 0.43 m/s (表 2), 随后呈现不规则的波动 (图 1), 除 5 月外, 其余月份风速差异性不显著 ($P > 0.05$)。

研究期间林地总降雨量为 240.3 mm, 主要分布在 6 至 8 月, 8 月降雨量最大, 达到 82.8 mm (表 2)。按日尺度对降雨量进行范围划分, 降雨量在 2 mm 以下的次数最多, 占整个降雨事件的 41.9%, 累积降雨量为 9.4 mm, 占总降雨量的 3.9%; 降雨量在 20 mm 以上的降雨次数最少, 占整个降雨事件的 7%, 累积降雨量为 82 mm, 占总降雨量的 34.1% (图 2)。降雨量的大小影响土壤含水量的变化, 土壤含水量随降雨量的增加而上升。土壤含水量随着土层深度的增加而下降 (图 2), 各土层深度之间的土壤含水量存在显著差异 ($P < 0.05$)。

当降雨量 < 2 mm时,10 cm以下土层的含水量并未增加;当降雨量 > 5 mm时,雨水可以通过土壤孔隙下渗到深层土壤,50 cm土层的含水量上升;当降雨量 > 10 mm时,90 cm土层的含水量开始上升;当在降雨量达21 mm时,120 cm土层的含水量开始上升并一直稳定在 $0.019\text{--}0.025\text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间。通过挖土壤剖面观察到油松的根系主要分布在30—90 cm之间,该土壤深度为树木根系主要吸水层。

表 2 观测期各气象因子月变化

Table 2 Monthly variations of meteorological factors during observation period

月份 Month	饱和水汽压差 Vapor pressure deficit/kPa	太阳总辐射 Global radiation/(W/m^2)	风速 Wind speed/(m/s)	降雨量 Rainfall/mm
5	1.51 ± 0.49	256.92 ± 63.76	0.43 ± 0.19	28.45
6	1.42 ± 0.61	253.27 ± 80.66	0.31 ± 0.07	61.21
7	1.48 ± 0.5	231.60 ± 67.42	0.28 ± 0.04	49.02
8	1.09 ± 0.4	193.36 ± 59.79	0.29 ± 0.05	82.8
9	1.00 ± 0.2	173.76 ± 36.9	0.30 ± 0.07	18.8

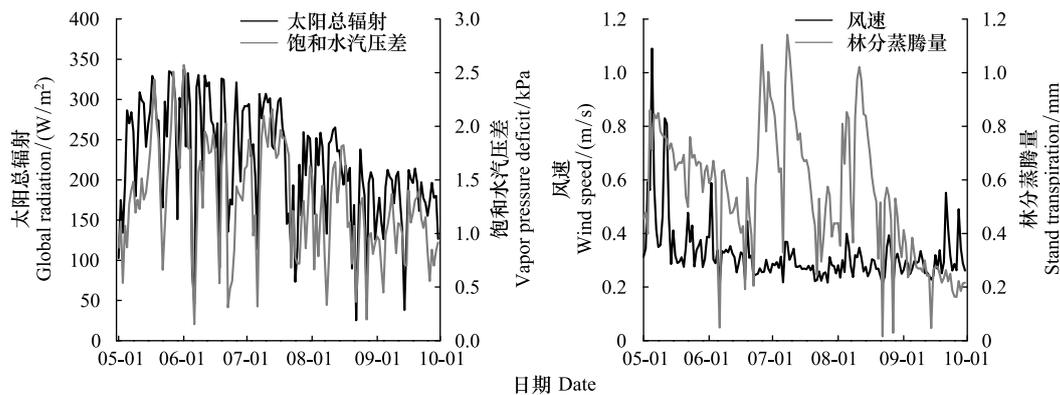


图 1 2017 年生长季太阳总辐射、饱和水汽压差、风速和林分蒸腾量动态变化

Fig.1 The variation of global radiation, vapor pressure deficit, wind speed and stand transpiration in the growing season of 2017

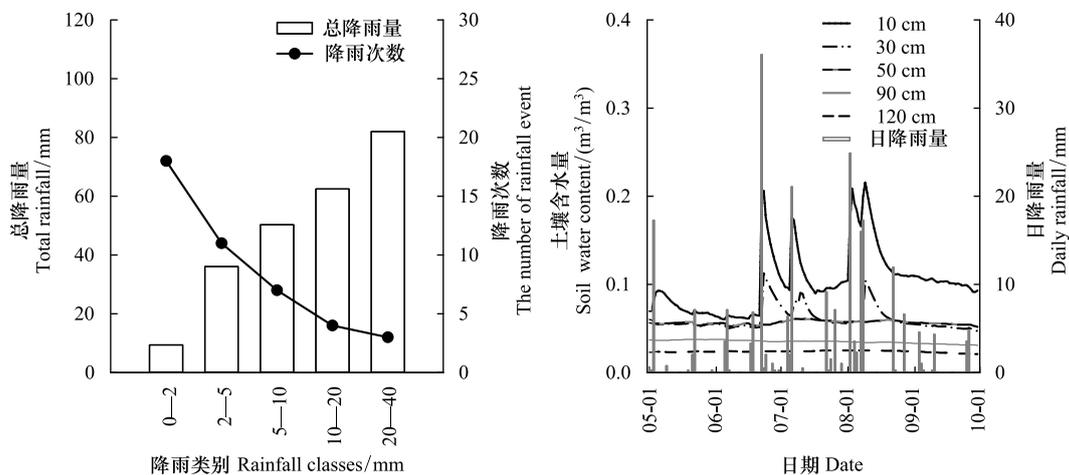


图 2 不同降雨类别总降雨量、各层土壤含水量与日降雨动态变化

Fig.2 The variation of total rainfall in different rainfall classes, soil water content at different soil depths and daily rainfall

2.2 油松林分蒸腾变化特征

油松各月平均林分蒸腾速率日变化均呈单峰曲线(图3),7月和8月林分蒸腾启动时间早于5月、6月和9月,分别为4:30、3:30、5:30、5:00、5:00;9月林分蒸腾速率到达峰值时间晚于5月、6月、7月和8月,分别为14:30、13:00、12:30、13:30、13:00。5至8月,林分蒸腾速率均显著高于9月($P<0.05$),其他月份之间的林分蒸腾速率不存在显著差异($P>0.05$)。

研究期间油松林分蒸腾量表现出明显的月变化,5月总蒸腾量最大,达20.96 mm,其次依次为7月(19.89 mm)、8月(18.09 mm)、6月(17.25 mm)和9月(7.49 mm),林分日蒸腾量表现为7月最大,其次为6月、8月、5月和9月(表3)。各月份中油松林分日蒸腾量与土壤含水量在总体变化趋势上表现一致,5月1日至6月22日,由于降雨量少,土壤含水量降低,林分蒸腾量呈下降趋势;6月23日至7月8日期间,除7月6日(降雨量21.1 mm)外,林分蒸腾量随土壤含水量的增加而增加;7月9日至8月1日,降雨量较少,林分蒸腾量随土壤含水量的减少呈下降趋势;8月2日至8月11日,降雨量增加,林分蒸腾量随土壤含水量的增加呈上升趋势;8月12日至9月30日,降雨量减少,土壤含水量、饱和水汽压差和太阳总辐射都逐渐降低,林分蒸腾量呈快速下降趋势(图1、图2)。

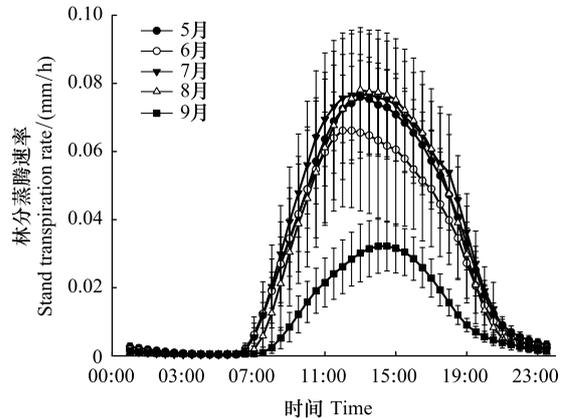


图3 2017年5月至9月油松林分蒸腾速率日动态变化

Fig. 3 Daily variation of stand transpiration rate for *P. tabulaeformis* from May to September in 2017

表3 油松各月林分蒸腾量

Table 3 Monthly stand transpiration of *P. tabulaeformis*

月份 Month	林分月蒸腾量 Monthly stand transpiration/mm	林分日蒸腾量最大值 Maximum daily stand transpiration/(mm/d)	林分日蒸腾量最小值 Minimum daily stand transpiration/(mm/d)
5	20.96	0.86	0.40
6	17.25	1.10	0.05
7	19.89	1.14	0.24
8	18.09	1.02	0.02
9	7.49	0.41	0.04

2.3 林分蒸腾对环境因子的响应

在日尺度上,对整个研究期油松林分蒸腾与各环境因子进行曲线拟合分析,得到油松林分蒸腾与各环境因子的关系。结果显示,油松林分蒸腾与饱和水汽压差、太阳总辐射、土壤含水量和风速均存在极显著相关关系($P<0.01$),随4种环境变量的上升而上升随后趋于稳定(图4)。油松林分蒸腾与饱和水汽压差、太阳总辐射的拟合方程呈指数曲线关系,与土壤含水量和风速呈二次曲线关系,太阳总辐射和饱和水汽压差对林分蒸腾的解释程度较大,分别达到47%和31%,其次是土壤含水量和风速,对林分蒸腾的解释程度分别为16%和12%,其中,风速对林分蒸腾的解释程度最小,随着风速的增加,林分蒸腾量并没有表现出明显的上升趋势。

利用2017年生长季油松林分蒸腾量和环境因子数据,以日为时间尺度,对林分蒸腾量和环境因子进行逐步回归分析,得到油松林分蒸腾与环境因子的回归方程,如式(7)所示:

$$E_c = -0.887 + 0.02GR + 0.394WS + 0.128VPD + 13.838VWC \quad R^2 = 0.72 \quad (7)$$

式中, E_c 表示油松林分蒸腾量(mm/d); GR 为太阳总辐射(W/m^2); WS 表示风速(m/s); VPD 为饱和水汽压差(kPa); VWC 为土壤含水量(m^3/m^3)。

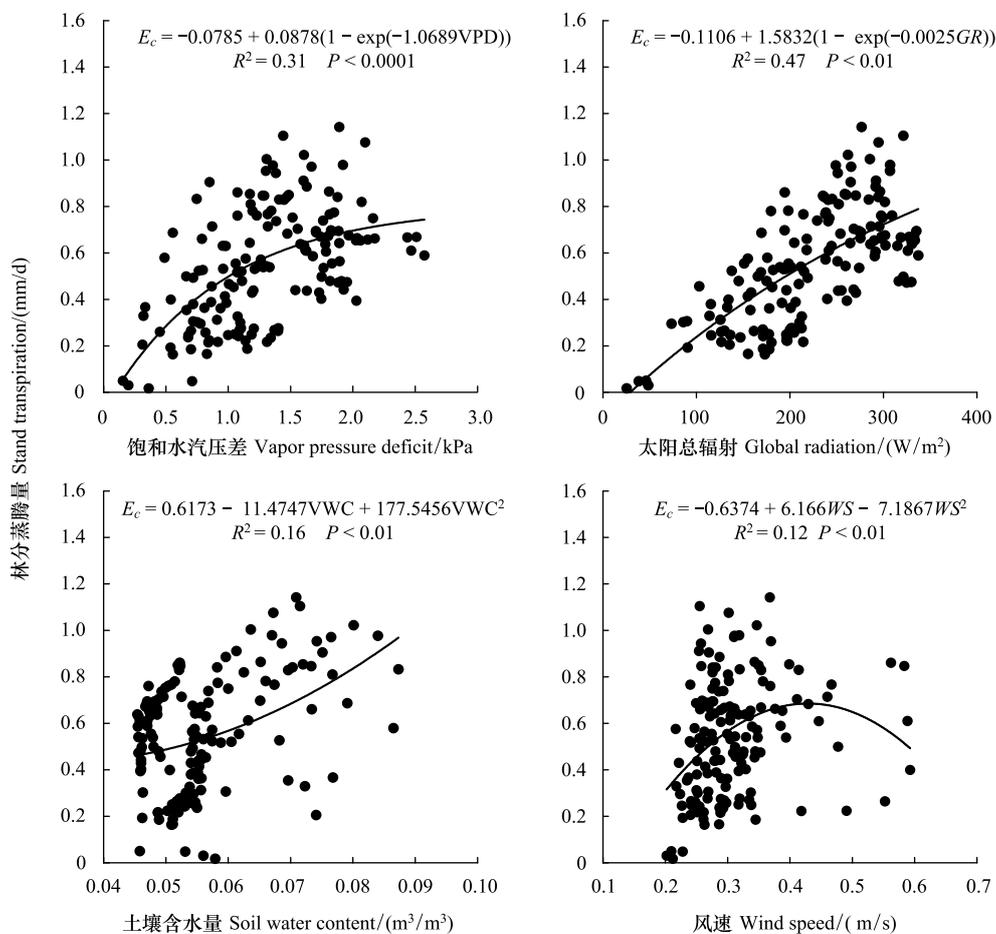


图4 油松林分蒸腾 (E_c) 对饱和水汽压差 (VPD)、太阳总辐射 (GR)、土壤含水量 (VWC) 和风速 (WS) 的响应

Fig.4 The response of *P. tabulaeformis* stand transpiration (E_c) to vapor pressure deficit (VPD), global radiation (GR), soil water content (VWC) and wind speed (WS)

不同降雨量对林分蒸腾的影响存在差异。随着降雨量的增加,油松林分蒸腾量上升加快,10 mm 以上的降雨量对林分蒸腾的促进作用显著大于10 mm 以下的降雨量(图5)。当降雨量为0—2 mm 时,根系层10 cm 以上的土壤含水量增加0.11%,林分蒸腾量增加6.7%;当降雨量为2—5 mm 时,根系层30 cm 以上的土壤含水量增加0.83%,林分蒸腾量增加11.02%;当降雨量为5—10 mm 时,根系层50 cm 以上的土壤含水量增加0.8%,林分蒸腾量增加27.7%;当降雨量为10—20 mm 时,根系层90 cm 以上的土壤含水量增加2.52%,林分蒸腾量增加79.82%;当降雨量为20—40 mm 时,根系层120 cm 以上的土壤含水量增加13.54%,林分蒸腾量增加84.33%。

2.4 冠层气孔导度变化特征

2017 年生长季,油松各月冠层气孔导度表现出明显的月变化(图6),变化范围为0.07—1.83 mm/s。5月、6月、7月、8月和9月的冠层气孔导度分别为0.73、0.71、0.68、0.80 mm/s 和0.39 mm/s。8月降雨量最大,油松林分蒸腾受土壤水分的制约作用较小,饱和水汽压差和太阳总辐射相对较低(表2),叶片气孔开放程度高,导致8月油松冠层气孔导度最大,达0.8 mm/s;9月饱和水汽压差和太阳总辐射呈下降趋势,降雨量少(表2),树木生长需水量逐渐减小,导致油松冠层气孔导度不断减小,达到0.39 mm/s。

2.5 冠层气孔导度对环境因子的响应

为研究叶片气孔对油松林分蒸腾的调控作用,对油松冠层气孔导度与各环境因子进行曲线拟合分析(图7)。结果表明,油松冠层气孔导度与饱和水汽压差、太阳总辐射、土壤含水量存在极显著相关关系($P < 0.01$),

与风速相关关系不显著($P>0.05$)。

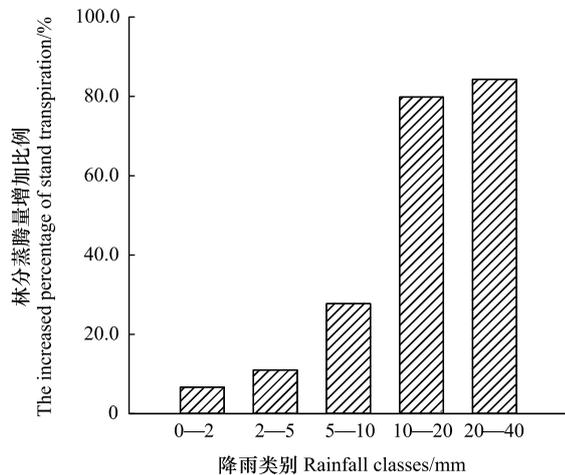


图5 晴天条件下不同降雨前后林分蒸腾量增加的比例

Fig. 5 The increased percentage of stand transpiration at different rainfall classes on fine days

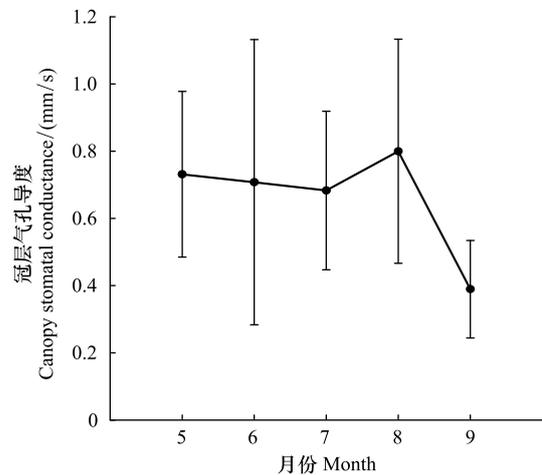


图6 2017年5—9月油松冠层气孔导度月变化

Fig. 6 Monthly variation of canopy stomatal conductance for *P. tabulaeformis* from May to September in 2017

饱和水汽压差对油松冠层气孔导度的解释程度最大,达到 58%。随饱和水汽压差的增加,油松冠层气孔导度逐渐减小,当饱和水汽压差在 0—1.5 kPa 范围时,随饱和水汽压差的增加,油松冠层气孔导度下降趋势较快;当饱和水汽压差 >1.5 kPa 时,油松冠层气孔导度较小且趋于平缓(图 7)。油松冠层气孔导度与太阳总辐射、土壤含水量均呈二次曲线关系,太阳总辐射对油松冠层气孔导度的解释程度较小,达到 10%,当太阳总辐射 <250 W/m^2 时,油松冠层气孔导度随太阳总辐射的增加表现出快速上升的趋势,随后到达峰值,在该范围内油松冠层气孔导度对太阳总辐射的敏感性强;当太阳总辐射 >250 W/m^2 时,油松冠层气孔导度随太阳总辐射的增加逐渐降低(图 7)。土壤含水量对油松冠层气孔导度的解释程度仅次于饱和水汽压差,达到 45%,随着土壤含水量的增加,油松冠层气孔导度持续上升(图 7)。风速对油松冠层气孔导度的解释程度最小,仅为 2%,随着风速的增大,冠层气孔导度没有出现明显的变化(图 7)。

3 讨论

3.1 油松林分蒸腾和冠层气孔导度变化特征

树木生理学、气候反应和生物物理学特征的不同导致树木蒸腾存在量级和季节性的差异^[2],本研究中,油松林分蒸腾量存在明显的日、月变化(图 1,表 3)。

在晴天日尺度上表现为单峰曲线(图 3),这与殷秀辉^[27]和温杰等^[28]的研究结果一致,而马剑芳等^[29]研究表明油松液流速率晴天变化曲线略呈双峰曲线,也有研究结果显示栓皮栎^[30]液流速率日变化呈多峰曲线,尾叶桉和湿加松^[31]表现出单峰曲线,这表明树木蒸腾速率日变化曲线受环境条件的影响,并与树种特性有关。5月至8月,在日进程上,油松林分蒸腾速率较大,对环境因子的敏感性较强,早晨蒸腾启动时间早,随着 VPD 和太阳总辐射的升高,中午林分蒸腾速率呈现先升高后降低的趋势,这是由于部分叶片气孔关闭,导致林分蒸腾速率到达峰值的时间较早。吴春荣^[32]和李浩等^[33]也发现树木在中午时由于光强和温度较高,部分叶片气孔关闭导致蒸腾速率下降。孟鹏等^[34]发现 5 月和 7 月树木叶片气孔对外界条件高度敏感,中午高温低湿造成叶片气孔关闭,导致蒸腾量降低,而 10 月光强减弱,温度降低,叶片气孔多为打开状态,这与本研究的结果相似。本研究中 9 月期间,由于油松林分蒸腾耗水量减小,同时,饱和水汽压差和太阳总辐射较小,导致油松林分蒸腾对环境的敏感性减弱,蒸腾启动时间较晚,林分蒸腾速率到达峰值的时间随饱和水汽压差和

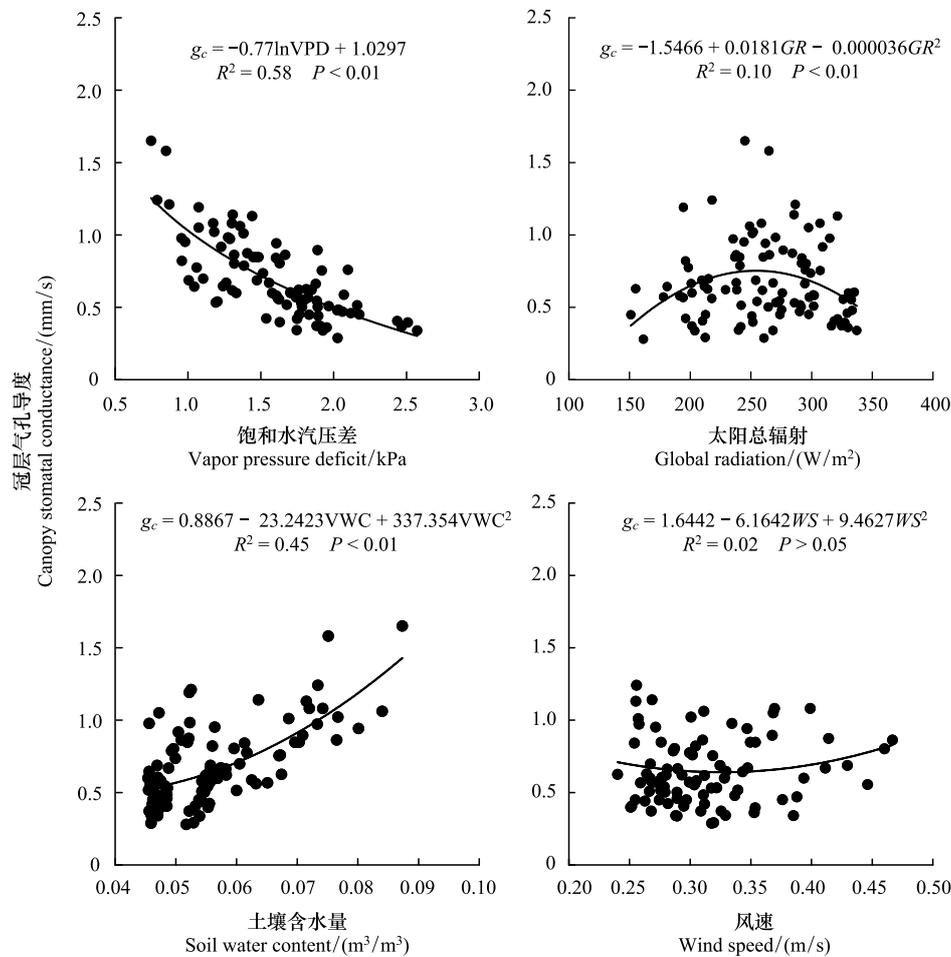


图7 油松冠层气孔导度 (g_c) 对饱和水汽压差 (VPD)、太阳总辐射 (GR)、土壤含水量 (VWC) 和风速 (WS) 的响应

Fig.7 The response of *P. tabulaeformis* canopy stomatal conductance (g_c) to vapor pressure deficit (VPD), global radiation (GR), soil water content (VWC) and wind speed (WS)

太阳总辐射的升高而延长(图3)。

在月尺度上,5月至6月底为早期,饱和水汽压差和太阳总辐射较高,油松生长旺盛,导致蒸腾耗水量大,土壤含水量的不断下降使得叶片气孔对饱和水汽压差和太阳总辐射的敏感性增加,树木通过叶片气孔调节以减小水分散失^[35],部分气孔关闭导致油松冠层气孔导度呈下降趋势;从6月底到8月初,降雨量大,林分蒸腾量随饱和水汽压差、太阳总辐射和土壤含水量的增加而快速上升,除了阴天或降雨量较小的时间段外,林分蒸腾并没有出现明显的降低趋势(图1),这表明在土壤含水量较高的条件下,树木能够获取有效的水分以维持较高的蒸腾,由于树木受水分亏缺的影响较小,叶片气孔开放程度较大,冠层气孔导度保持在较高水平;9月,降雨量逐渐减少,饱和水汽压差和太阳总辐射同步下降,林分蒸腾需水量和土壤含水量逐渐减小,林分蒸腾受饱和水汽压差、太阳总辐射和土壤含水量的作用减弱,呈明显下降趋势(图1),叶片气孔对环境因子的敏感性减弱,冠层气孔导度整体呈下降趋势(图6)。

3.2 环境因子对油松蒸腾耗水的影响

空间异质性和树木木质部解剖结构的不同会导致树木蒸腾耗水对环境因子的响应存在差异。在本研究中,饱和水汽压差、太阳总辐射和土壤含水量是影响油松林分蒸腾耗水的主要环境因子,风速的影响作用相对较小,这与 Jiao^[36]和吴旭等^[37]的研究结果一致。油松林分蒸腾量与饱和水汽压差、太阳总辐射的拟合方程均呈指数曲线关系,与土壤含水量和风速的拟合方程均呈二次曲线关系(图4),而 McCarthy 等^[20]的研究结果表

明树木与饱和水汽压差呈对数曲线关系, Wang 等^[7]的研究结果则表明树木与饱和水汽压差、太阳辐射呈线性相关, 这种差异性与环境条件和树种特性密切相关。无论在城市或者非城市环境条件下, 生物和非生物因素的异质性都会导致树木功能发生显著变化^[20], 在城市环境中, 由于土壤、空气条件以及其他人为干扰活动的不同^[38], 使得城市树木蒸腾耗水发生显著变化。另外, 树木蒸腾耗水的差异性与木质部解剖结构也显著相关, Bush 等^[39]研究发现在半干旱城市环境下, 环孔材木质部表现出较高的脆弱性, VPD 对树木蒸腾具有较强的调节作用, 而散孔材木质部脆弱性较低, 树木蒸腾随 VPD 呈线性增加, 本研究中油松作为针叶树种, 其木质部解剖结构为无孔材, 在低木质部水势的条件下, 可以保持较高的木质部水力导度^[2], 这使得油松与其他树种相比, 在较高的 VPD 和太阳辐射条件可以保持相对较高的蒸腾速率。油松林分蒸腾与 4 种环境因子均存在显著相关关系, 建立的多元线性回归模型复相关系数为 0.72 (公式 7), 在日尺度上可以较好地对林分蒸腾量进行模拟。

降雨通过改变土壤含水量的大小影响林分蒸腾量, 随着降雨量的增加, 林分蒸腾速率上升加快, 这与 Wang 等^[7]的研究结果相反, 因为其研究地点位于苏格兰高地, 年降雨量相对较多且分布均匀, 土壤含水量保持在较高水平, 树木蒸腾不容易受土壤水分亏缺的影响, 另外, 降雨后太阳辐射的增强和空气湿度的降低也使得树木蒸腾在小降雨事件后显著增加, 所以强降雨量并未造成树木蒸腾量显著上升。而本研究选择了降雨前后都是典型晴天的数据, 减小了因天气条件差异对研究结果的影响。本研究位于半干旱地区, 较少的降雨量使得土壤含水量长期处于较低水平, 树木更容易受干旱胁迫的影响, 在生长季, 强降雨事件往往会更有效缓解树木干旱, 与降雨前相比树木蒸腾显著上升。当降雨量 > 10 mm 时, 油松林分蒸腾量增幅超过了 79%。根据土壤含水量的监测数据显示, 当降雨量 > 10 mm 时, 90 cm 以上深度的土壤水分才能得到补给, 这与油松主要根系分布位置相一致, 表明生长季 10 mm 以上的降雨量对油松林分蒸腾量影响更大。而 Zhang^[40]在黄土高原的研究结果显示, 油松蒸腾只有在降雨量超过 15 mm 以上时才会显著增加, 而本研究中油松密度接近其研究的二分之一, 这使得更多的雨水会穿过林分冠层到达地面。Chen 等^[41]研究也发现由于城市树木密度低、水分竞争小, 在降雨量较少的年份城市树木也能获得足够的水分。本研究位于城市公园, 林内未进行灌溉和施肥, 树木受人为干扰作用较小, 较小的降雨能够汇集到林地并下渗到深层土壤, 从而对油松林分蒸腾产生较大影响。

油松林分蒸腾量随土壤含水量和降雨量的增加呈显著上升趋势 (图 4、图 5), 受水分条件的影响显著。随着气候变化的影响, 极端天气事件的发生频率上升^[42], 生长季干旱胁迫程度的增加导致树木生长受阻, 甚至死亡^[43]。因此, 在城市树木规划中, 不仅要考虑美学, 而且要结合树木蒸腾耗水与环境条件的关系, 选树适地。在夏季干旱胁迫发生时, 根据城市树木蒸腾耗水规律, 合理灌溉, 提高树木水分利用效率。

3.3 叶片气孔活动对油松蒸腾的影响

饱和水汽压差、太阳总辐射和土壤含水量是影响油松气孔活动的主要环境因子, 风速的影响相对较小。油松冠层气孔导度主要受饱和水汽压差和土壤含水量的影响, 饱和水汽压差对冠层气孔导度的影响相对较小, 而风速的影响作用不显著 (图 7)。随着饱和水汽压差的增加, 油松冠层气孔导度呈下降趋势, 这是因为树木为了防止水分过度消耗关闭了部分气孔^[11, 26, 44-45]。当饱和水汽压差 > 1.5 kPa 或太阳总辐射 > 250 W/m² 时, 油松叶片气孔对饱和水汽压差和太阳总辐射的敏感性开始减弱, 而刘文娜等^[11]对侧柏冠层气孔导度的研究发现, 饱和水汽压差 > 1 kPa 或光合有效辐射 > 87 W/s 时, 冠层气孔导度敏感性开始降低; 孙林等^[46]对华北落叶松冠层气孔导度的研究结果显示, 当光合有效辐射 > 0.35 mmol m⁻² s⁻¹ 时, 光合有效辐射对冠层气孔导度的驱动作用减小。Peters 等^[2]研究发现城市树木中针叶树在高饱和水汽压差条件下其气孔调节作用增加, 而阔叶树可以保持相对较高的、恒定的气孔调节作用, 这表明气孔调节方式与树种特性相关。土壤含水量也是影响叶片气孔进行水分调节的一个重要因素, 生长季土壤含水量对油松冠层气孔导度的影响较大, 随着土壤含水量的增加, 冠层气孔导度一直处于上升状态, 这表明在干旱时期, 油松林分蒸腾受叶片气孔调节作用较强。大量研究也表明干旱条件下叶片气孔对油松蒸腾耗水具有较强的调节作用^[47], 其叶片水势保持在稳定范围,

油松表现为等水势植物^[28,48]。油松在早期可通过关闭叶片气孔保持稳定的水分状态,但针叶树在低木质部压力下会保持较高的水力导度,也会增加木质部气穴的风险^[2]。在干旱或半干旱区城市林业规划中,根据水分分布不均和干旱发生的特点,可以选择气孔调节相对较强的树种以适应水分短缺的环境。

随着城市热岛效应的加剧,城市蒸散发量增加。在季节性干旱缺少灌溉的条件下,尽管树木可以通过较强的叶片气孔调节作用防止水分过度亏缺,但叶片气孔的关闭同时会阻碍气体交换,降低光合作用,阻碍树木生长^[49]。因此,在干旱或半干旱区,研究城市树木耗水特性及其生态功能,需要进一步考虑水损失与碳吸收之间的平衡^[50]。

4 结论

(1)油松林分蒸腾量存在着明显的日、月变化。在晴天日进程上,油松林分蒸腾量呈单峰曲线,5月至8月液流启动时间和到达峰值时间都较早,9月液流启动时间和到达峰值时间都相对较晚;在月尺度上,林分日蒸腾量的整体变化趋势从5月到9月逐渐减小。

(2)油松林分蒸腾与饱和水汽压差、太阳总辐射、土壤含水量和风速均存在极显著相关关系,其中饱和水汽压差、太阳总辐射和土壤含水量是影响油松林分蒸腾的主要环境因子,风速的影响作用相对较小。降雨量也是影响油松林分蒸腾的重要因素,当日降雨量>10 mm时,水分可以通过下渗作用进入到油松主要根系分布区,能够在早期有效缓解水分亏缺。

(3)叶片气孔对油松蒸腾的调节作用通过响应环境因子变化进行开放或闭合活动,叶片气孔主要受饱和水汽压差和土壤含水量的影响,太阳总辐射对叶片气孔的影响存在阈值,当太阳总辐射<250 W/m²时,叶片气孔对蒸腾起促进作用,超过该阈值,叶片气孔将关闭以抑制蒸腾作用。

参考文献 (References):

- [1] Wang Y L, Liu G B, Kume T, Otsuki K, Yamanaka N, Du S. Estimating water use of a black locust plantation by the thermal dissipation probe method in the semiarid region of Loess Plateau, China. *Journal of Forest Research*, 2010, 15(4): 241-251.
- [2] Peters E B, McFadden J P, Montgomery R A. Biological and environmental controls on tree transpiration in a suburban landscape. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(G4): G04006.
- [3] 王瑞辉, 马履一, 奚如春, 徐军亮. 元宝枫生长旺季树干液流动态及影响因素. *生态学杂志*, 2006, 25(3): 231-237.
- [4] 陈立欣, 李湛东, 张志强, 张文娟, 张晓放, 董克宇, 王国玉. 北方四种城市树木蒸腾耗水的环境响应. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2861-2870.
- [5] 刘华, 余春燕, 白志强, 李倩, 刘端, 韩燕梁. 喀纳斯保护区西伯利亚云杉树干液流动态变化. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2016, 40(1): 65-72.
- [6] 王志超, 杜阿朋. 尾巨桉树干液流动态及其影响因子分析. *东北林业大学学报*, 2016, 44(5): 24-28.
- [7] Wang H L, Tetzlaff D, Dick J, Soulsby C. Assessing the environmental controls on Scots pine transpiration and the implications for water partitioning in a boreal headwater catchment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 240-241: 58-66.
- [8] 倪广艳, 赵平, 朱丽薇, 牛俊峰, 赵秀华, 曾小平. 荷木整树蒸腾对干湿季土壤水分的水力响应. *生态学报*, 2015, 35(3): 652-662.
- [9] 赵平, 邹绿柳, 饶兴权, 马玲, 倪广艳, 曾小平, 蔡锡安. 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化. *生态学报*, 2011, 31(20): 6038-6048.
- [10] Gu D X, Wang Q, Otieno D. Canopy transpiration and stomatal responses to prolonged drought by a dominant desert species in Central Asia. *Water*, 2017, 9(6): 404.
- [11] 刘文娜, 贾剑波, 余新晓, 贾国栋, 侯贵荣. 华北山区侧柏冠层气孔导度特征及其对环境因子的响应. *应用生态学报*, 2017, 28(10): 3217-3226.
- [12] Kumagai T, Tateishi M, Shimizu T, Otsuki K. Transpiration and canopy conductance at two slope positions in a Japanese cedar forest watershed. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1444-1455.
- [13] 莫康乐, 陈立欣, 周洁, 方显瑞, 康满春, 张志强. 永定河沿河沙地杨树人工林蒸腾耗水特征及其环境响应. *生态学报*, 2014, 34(20): 5812-5822.
- [14] 吴芳, 陈云明, 于占辉. 黄土高原半干旱区刺槐生长盛期树干液流动态. *植物生态学报*, 2010, 34(4): 469-476.
- [15] 于占辉, 陈云明, 杜盛. 黄土高原半干旱区人工林刺槐展叶期树干液流动态分析. *林业科学*, 2009, 45(4): 53-59.
- [16] 张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩. 典型黄土区油松树干液流变化特征分析. *环境科学*, 2015, 36(1): 349-356.
- [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. *林业科学*, 2003, 29(2): 1-7.
- [18] 张璇, 张会兰, 王玉杰, 王云琦, 刘春霞, 杨坪坪, 潘声雷. 缙云山典型树种树干液流日变化特征及与气象因子关系. *北京林业大学学报*, 2016, 38(3): 11-20.

- [19] 王艳兵, 王彦辉, 熊伟, 姚依强, 张桐, 李振华. 六盘山半干旱区华北落叶松树干液流速率及主要影响因子的坡位差异. 林业科学, 2017, 53(6): 10-20.
- [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. Urban Ecosystems, 2010, 13(4): 393-414.
- [21] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems. Annales des Sciences Forestieres, 1985, 42(2): 193-200.
- [22] Campbell G S, Norman J M. An Introduction to Environmental Biophysics. 2nd ed. New York: Springer, 1998.
- [23] Brito P, Lorenzo J R, González-Rodríguez Á M, Morales D, Wieser G, Jiménez M S. Canopy transpiration of a semi arid *Pinus canariensis* forest at a treeline ecotone in two hydrologically contrasting years. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 201: 120-127.
- [24] Oren R, Sperry J S, Katul G G, Pataki D E, Ewers B E, Phillips N, Schäfer K V. Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. Plant, Cell & Environment, 1999, 22(12): 1515-1526.
- [25] Ewers B E, Mackay D S, Samanta S. Interannual consistency in canopy stomatal conductance control of leaf water potential across seven tree species. Tree Physiology, 2007, 27(1): 11-24.
- [26] Zhu L W, Zhao P, Wang Q, Ni G Y, Niu J F, Zhao X H, Zhang Z Z, Zhao P Q, Gao J G, Huang Y Q, Gu D X, Zhang Z F. Stomatal and hydraulic conductance and water use in a eucalypt plantation in Guangxi, southern China. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 202: 61-68.
- [27] 殷秀辉, 程飞, 张硕新. 油松树干液流特征及其与环境因子的关系. 西北林学院学报, 2011, 26(5): 24-28.
- [28] 温杰, 陈云明, 唐亚坤, 吴旭, 谢育利, 崔高阳. 黄土丘陵区油松、沙棘生长旺盛期树干液流密度特征及其影响因素. 应用生态学报, 2017, 28(3): 763-771.
- [29] 马剑芳, 马钦彦, 康峰峰, 冯仲科, 王治中, 盖强, 郭伟, 尚红喜, 刘萍. 山西太岳山油松林木夏季树干液流速率的研究. 北京林业大学学报, 2005, 27(S2): 160-164.
- [30] 聂立水, 李吉跃, 翟洪波. 油松、栓皮栎树干液流速率比较. 生态学报, 2005, 25(8): 1934-1940.
- [31] 王志超, 许宇星, 竹万宽, 杜阿朋. 雷州半岛尾叶桉和湿加松人工林的蒸腾耗水规律. 生态学报, 2019, 39(6): 2147-2155.
- [32] 吴春荣, 刘世增, 金红喜, 严子柱, 马全林. 樟子松在西北干旱沙区的蒸腾日变化. 西北林学院学报, 2003, 18(3): 16-18.
- [33] 李浩, 胡顺军, 朱海, 李茜倩. 基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究. 生态学报, 2017, 37(21): 7187-7196.
- [34] 孟鹏, 李玉灵, 尤国春, 王曼. 彰武松、樟子松光合生产与蒸腾耗水特性. 生态学报, 2012, 32(10): 3050-3060.
- [35] Chen L X, Zhang Z Q, Zha T G, Mo K L, Zhang Y, Fang X R. Soil water affects transpiration response to rainfall and vapor pressure deficit in poplar plantation. New Forests, 2014, 45(2): 235-250.
- [36] Jiao L, Lu N, Sun G, Ward E J, Fu B J. Biophysical controls on canopy transpiration in a black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantation on the semi-arid Loess Plateau, China. Ecohydrology, 2016, 9(6): 1068-1081.
- [37] 吴旭, 陈云明, 唐亚坤. 黄土丘陵区刺槐和侧柏人工林树干液流特征及其对降水的响应. 植物生态学报, 2015, 39(12): 1176-1187.
- [38] Pickett S T A, Cadenasso M L. Altered resources, disturbance, and heterogeneity: a framework for comparing urban and non-urban soils. Urban Ecosystems, 2009, 12(1): 23-44.
- [39] Bush S E, Pataki D E, Hultine K R, West A G, Sperry J S, Ehleringer J R. Wood anatomy constrains stomatal responses to atmospheric vapor pressure deficit in irrigated, urban trees. Oecologia, 2008, 156(1): 13-20.
- [40] Zhang H D, Wei W, Chen L D, Yang L. Evaluating canopy transpiration and water use of two typical planted tree species in the dryland Loess Plateau of China. Ecohydrology, 2017, 10(4): e1830.
- [41] Chen L, Zhang Z, Li Z, Tang J, Caldwell P V, Zhang W. Biophysical control of whole tree transpiration under an urban environment in Northern China. Journal of Hydrology, (2011), 402(3-4): 388-400.
- [42] Nalevanková P, Ježík M, Sitková Z, Vido J, Leštianska A, Střelcová K. Drought and irrigation affect transpiration rate and morning tree water status of a mature European beech (*Fagus sylvatica* L.) forest in Central Europe. Ecohydrology, 2018, 11(6): e1958.
- [43] De Cárcer P S, Vitasse Y, Peñuelas J, Jasse J V E J, Buttler A, Signarbieux C. Vapor-pressure deficit and extreme climatic variables limit tree growth. Global Change Biology, 2018, 24(3): 1108-1122.
- [44] Aspinwall M J, King J S, Domec J C, McKeand S E, Isik F. Genetic effects on transpiration, canopy conductance, stomatal sensitivity to vapour pressure deficit, and cavitation resistance in loblolly pine. Ecohydrology, 2011, 4(2): 168-182.
- [45] 胡彦婷, 赵平, 牛俊峰, 孙振伟, 朱丽薇. 三种植被恢复树种的冠层气孔导度特征及其对环境因子的敏感性. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2623-2631.
- [46] 孙林, 管伟, 王彦辉, 徐丽宏, 熊伟. 华北落叶松冠层平均气孔导度模拟及其对环境因子的响应. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2122-2128.
- [47] Litvak E, McCarthy H R, Pataki D E. Water relations of coast redwood planted in the semi-arid climate of southern California. Plant, Cell & Environment, 2011, 34(8): 1384-1400.
- [48] Wu X, Tang Y K, Chen Y M, Wen J, Xie Y L, Lu S B. Sap flow characteristics and responses to summer rainfall for *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* in the Loess hilly region of China. Ecology and Evolution, 2018, 8(1): 617-630.
- [49] Xie J, Zha T, Zhou C, Jia X, Yu H, Yang B, Chen J, Zhang F, Wang B, Bourque C P A, Sun G, Ma H, Liu H, Peltola H. Seasonal variation in ecosystem water use efficiency in an urban-forest reserve affected by periodic drought. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 221: 142-151.
- [50] McCarthy H R, Pataki D E, Jenerette G D. Plant water-use efficiency as a metric of urban ecosystem services. Ecological Applications, 2011, 21(8): 3115-3127.