

DOI: 10.5846/stxb202108192297

孙旭, 杨文慧, 焦磊, 李宗善, 周伟奇, 王效科, 张咏, 王傲雪. 不同时间尺度北京蟒山油松树干液流对环境因子的响应. 生态学报, 2022, 42(10): 4113-4123.

Sun X, Yang W H, Jiao L, Li Z S, Zhou W Q, Wang X K, Zhang Y, Wang A X. Relationships between sapflux density of *Pinustabuliformis* trees and environmental factors at different temporal scales in Mangshan National Forest Park of Beijing, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4113-4123.

不同时间尺度北京蟒山油松树干液流对环境因子的响应

孙 旭^{1,2}, 杨文慧³, 焦 磊^{3,*}, 李宗善¹, 周伟奇^{1,2}, 王效科^{1,2}, 张 咏⁴, 王傲雪⁵

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院生态环境研究中心北京城市生态系统研究站, 北京 100085

3 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

4 北京市十三陵林场, 北京 102200

5 北京市植物园管理处, 北京 100093

摘要: 探究不同时间尺度蒸腾与环境因子的关系并明确其主控因子, 对于理解蒸腾对环境响应规律和驱动机制具有重要的理论意义。以北京蟒山国家森林公园的油松为例, 开展树干液流及气象指标、土壤温湿度等环境因子的长期定位观测, 并分析不同时间尺度油松液流速率与环境因子的关系。研究结果表明, 在日尺度上, 土壤温度、大气相对湿度、土壤湿度与液流速率呈极显著正相关, 这 3 个因子对液流速率变化的贡献量分别占 28.3%、11.7% 和 10.1%; 在月尺度上, 土壤温度对液流速率的影响最大, 贡献量占比 49.7%, 土壤湿度和相对湿度的贡献量分别为 7.3% 和 6.4%; 在年尺度上, 相对湿度对液流速率的年际变化的贡献量高达 93.3%, 是关键控制因子。随着时间尺度的扩展, 环境因子对油松液流速率的控制作用逐渐增强。本研究的结果可以为植物蒸腾的时间尺度转换、未来全球气候变化背景下植物蒸腾耗水特征的预测提供理论依据。

关键词: 树干液流; 气象因子; 土壤温度; 时间尺度; 油松

Relationships between sapflux density of *Pinustabuliformis* trees and environmental factors at different temporal scales in Mangshan National Forest Park of Beijing, China

SUN Xu^{1,2}, YANG Wenhui³, JIAO Lei^{3,*}, LI Zongshan¹, ZHOU Weiqi^{1,2}, WANG Xiaoke^{1,2}, ZHANG Yong⁴, WANG Aoxue⁵

1 Beijing Urban Ecosystem Research Station, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

4 Beijing Ming Dynasty Tombs Forest Farm, Beijing 102200, China

5 Beijing Botanical Garden Management Office, Beijing 100093, China

Abstract: Investigating the relationships between sapflux density and environmental factors and clarifying the determining factors are crucial for deeply understanding mechanism of environmental controls on transpiration. In this study, sapflux density (J_s) of *Pinustabuliformis* trees, meteorological variables, soil moisture (SM) and soil temperature (T_s) were continuously monitored in Mangshan National Forest Park in the Northwest Beijing, China. The results showed that the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877539, 41390462)

收稿日期: 2021-08-19; 网络出版日期: 2021-10-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljiao@snnu.edu.cn

factors that mainly affects J_s were varied at different temporal scales. At daily scale, T_s , relative humidity (RH), SM were positively significantly correlated with J_s . The relative contributions of T_s , RH and SM were 28.3%, 11.7% and 10.1%. At monthly scale, T_s was also the dominant factor that determine J_s and its contribution was 49.7%. The contributions of SM and RH were 7.3% and 6.4%, respectively. At annual scale, RH dominated the temporal variations in J_s and its contribution was 93.3%. The results also showed that the controls of environmental factors on J_s increased with temporal scaling from short time (day) to longer (month and year). This study would provide basic knowledge on temporal scale transformation of plant transpiration and predication of plant water consumption in the context of climate change.

Key Words: sapflow; meteorological factors; soil temperature; temporal scales; *Pinus tabulaeformis*

蒸腾是植物根系从土壤中吸收水分,再通过茎、枝、叶的运输将水分扩散到大气中的生理过程,其输送的水量约占陆地蒸散发的 60% 左右,也是重要水文过程之一^[1-2]。有关蒸腾的研究,多集中于植物蒸腾耗水量的估测、时空变化规律、及其对生物和环境因子的响应特征等方面。其中,环境因子作为影响蒸腾的重要方面,相关研究受到普遍关注^[3-5]。根据影响机理的差异,可以将环境因子分为两大类:一是大气蒸发动力,提供植物蒸腾的环境驱动力,包括太阳辐射、空气温度、相对湿度、风速等;二是水分供给,提供植物蒸腾所需的水分^[6-8],主要是指土壤水分或者地下水。大量的研究表明,植物蒸腾对环境因子的响应具有一定差异性,体现在不同区域、不同物种的蒸腾的主控因素有所不同,这与区域环境条件差异、植物对环境的响应差异有关^[9-13]。

同时,也有研究发现植物蒸腾对环境因子的响应具有明显的时间尺度效应,即在不同时间尺度上影响蒸腾的关键因子存在差异。例如, Hayat 等^[14]发现干旱区的沙柳 (*Salix psammophila*) 小时尺度液流速率主要受到太阳辐射的控制,在季节尺度上土壤水分则决定了液流速率与其它环境因子的关系,而在年尺度上叶面积指数和土壤含水量决定了蒸腾动态变化过程^[14]。对于生长于湿润区的马占相思树 (*Acacia mangium*) 来说,小时尺度的蒸腾速率与光合有效辐射和饱和水汽压亏缺密切相关,而在日尺度上蒸腾速率则与二者的关系不密切,在年尺度上蒸腾主要受到叶面积指数的控制^[15]。还有, Zeppel 等^[16]也发现澳大利亚的针阔混交林蒸腾速率在日、季节和年尺度上的控制因素不同。但是,由于受到观测时间较短的制约,目前人们对于不同区域、不同植物蒸腾年际变化规律、驱动因素时间尺度差异的认识仍不够深入。而开展长期序列的蒸腾观测并探究不同时间尺度蒸腾对环境的响应,既可以明确不同时间尺度蒸腾动态变化趋势,又可以为未来气候变化背景下预测植物蒸腾的耗水特征及生态系统可持续管理提供理论支持^[14, 17-18]。

油松 (*Pinus tabulaeformis*) 是我国北方地区常见的造林、绿化树种。油松树干液流的研究开展广泛,针对其液流速率与环境因子之间关系的研究多集中于小时、日等较小的时间尺度,在月尺度和年尺度上的研究比较缺乏^[10, 19-21]。北京十三陵林场蟒山国家森林公园是北京市面积最大的国家森林公园,以人工林和次生混交林为主,其中油松是分布最广树种,为维护北京地区的生态安全发挥了重要的功能。本文以北京蟒山的油松为研究对象,开展树干液流和环境因子的长期定位观测,探究不同时间尺度液流速率与环境因子的关系,以明确控制其蒸腾时间动态变化的主要环境因子,有助于理解油松蒸腾对环境响应规律和驱动机制,为评估油松林生态功能的时间变化提供理论支撑。

1 研究方法

1.1 研究区域

研究样地位于北京市西北郊昌平区十三陵林场蟒山国家森林公园内,其地理坐标为 116°16'43"E、40°16'35"N,海拔约 659m。蟒山国家森林公园距离北京中心约 40km,属燕山支脉——军都山的一部分。公园总面积 8622hm²,植被类型以人工林和次生混交林为主,人工林面积有近 8143hm²,森林覆盖率为 96.5%,是北京市面积最大的国家森林公园。该区域位于温带季风区,属于暖温带大陆性季风气候,全年四季分明,1 月份平均

温度为-4.1℃,7 月份平均温度为 25.8℃,常年降雨量介于 500—600mm 之间。蟒山国家森林公园内的山坡大部分是阳坡和半阳坡,坡度 30°左右,山路多成 V 型。在山的下部形成冲积扇,较为平缓。土壤以山地褐土为主,土层厚度平均在 30—40cm,含砾石较多,土壤较粘重。研究样地的分布示意图及现场照片(图 1)。

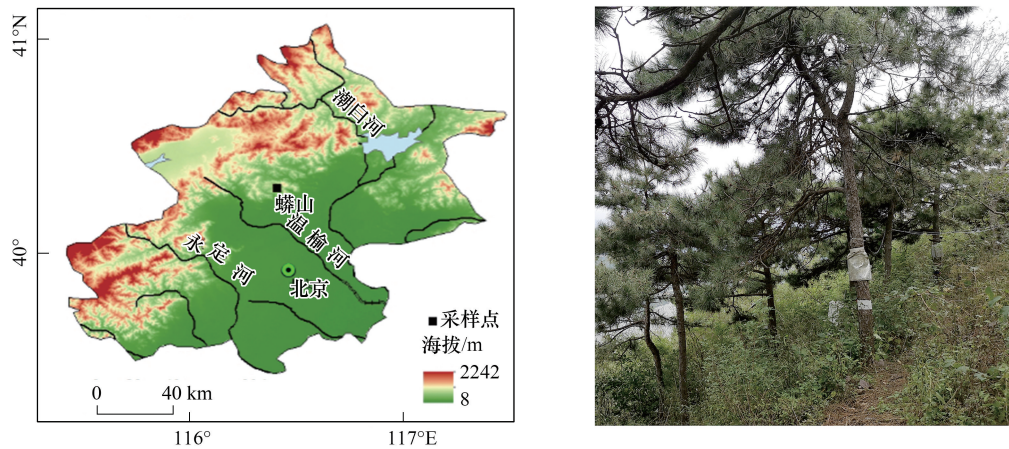


图 1 北京蟒山油松观测样点示意图

Fig.1 Observation plot of *Pinustabulaeformis* in Mangshan, Beijing

1.2 树干液流观测

在公园园内选择长势良好的油松林设置固定观测样地。在样地内选择 3 株油松作为树干液流的观测样木,其胸径、株高、冠幅的数据信息(表 1)。目前有关乔木蒸腾的测定方法多采用热扩散技术,此方法具有连续、准确和成本低等优点^[22],适用于多介质异质性的下垫面,已成为国际上有关植物蒸腾耗水研究的先进方法^[23]。在观测样木的茎上、距离地面 1.3m 处安装美国 Dynamax 公司生产的 FLGS-TDP 探针(长度 30mm)测量液流速率,记录间隔 30min/次。观测期从 2014 年 4 月 16 日至 2018 年 12 月 31 日。为避免太阳辐射对探针温度的影响,探针统一安装在茎的北侧,并用铝膜包裹,用防水胶带和玻璃胶密封铝膜和茎的连接处,防止降雨对探针的影响^[24]。

表 1 油松样木信息表

Table 1 Information of *Pinustabulaeformis* sample trees

序号 Serial number	胸径/cm Diameter at Breast Height	高度/m Height	冠幅/(m×m) Crown width
1	17	3.5	1.5×2
2	16.3	3.8	1.8×2.2
3	18.5	3.8	1.0×2.8

液流速率(J_s , $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)的计算基于上下两个探针温度差值的经验公式^[22]:

$$J_s = 119 \times \left(\frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231}$$

式中, ΔT (℃)是上面加热探针和下面参考探针之间的温度差值, ΔT_m (℃)是夜晚当 J_s 值为 0 时 ΔT 的值,即 ΔT 的最大值。

将 3 株样木液流速率的算术平均值作为样地油松树干液流值。

1.3 环境因子观测

本研究中观测的环境因子包括气象指标、土壤含水量和土壤温度,具体观测如下:

气象指标:在样地附近的开阔地安装一套自动气象站,采用 CMP-6 总辐射传感器连续观测太阳总辐射

(Solar Radiation, R_s , W/m^2)、采用 HMP-155 空气温湿度传感器分别监测空气温度 (Air temperature, T_a , $^{\circ}C$) 和相对湿度 (Relative Humidity, RH , $\%$)、采用 TE-525MM 翻斗式雨量桶测量降雨量 (Rain, mm)、采用 034-B 传感器测量风速 (Wind Speed, m/s)、风向 (Wind Direction, $0-360^{\circ}$) 等指标。采用 CR1000 数据采集器实时记录各传感器的监测数据。上述数据记录间隔 30 min, 与树干液流观测同步。采用空气温度和相对湿度数据计算饱和水汽压亏缺 (Vapor pressure deficit, VPD , kPa)^[25]。

土壤湿度和温度: 在油松样地内, 采用土壤三参数传感器 (HydraProbeII) 观测土壤含水量 (soil Moisture, SM , m^3/m^3) 和土壤温度 (Soil Temperature, T_s , $^{\circ}C$)。观测深度为 10cm、20cm、30cm, 共计 3 个层次, 数据记录间隔 30min, 与气象因子和树干液流观测同步。将 3 个深度土壤含水量和温度的算术平均值作为样地土壤含水量和土壤温度的数值。

1.4 数据分析方法

在日尺度、月尺度和年尺度上, 采用 Pearson 相关分析法量化油松树干液流与环境因子之间的相关性。采用逐步回归分析法构建不同时间尺度油松树干液流的表达式, 根据逐步回归的 R^2 变化值来量化各因子相对贡献并确定关键影响因子。所有的数据分析采用 SPSS 16.0 软件包 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 完成, 作图采用 Origin 8.0 软件。图 2 为观测期内树干液流数据与环境指标因子的逐日变化特征。

2 结果与分析

2.1 日尺度

在日尺度上, 油松液流速率对各环境因子的响应关系 (图 3)。日尺度液流速率与空气温度、相对湿度、饱和水汽压亏缺、太阳辐射、土壤含水量、土壤温度呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.490、0.083、0.320、0.428、0.483、0.536 (表 2); 液流速率与风速呈极显著负相关, 相关系数为 -0.070。根据逐步回归分析结果, 日尺度液流速率拟合公式如下:

$$J_s = -1.859 + 12.063 \times T_s + 1430.121 \times SM - 2.783 \times RH + 0.412 \times R_s - 66.891 \times VPD - 12.183 \times W_s, \\ R^2 = 0.538, P < 0.0001$$

式中, 土壤温度对液流速率变化的影响最大 (表 3), 贡献量占 28.3%; 其次是相对湿度和土壤含水量, 贡献量分别占 11.7% 和 10.1%; 太阳辐射、饱和水汽压亏缺和风速的贡献量分别为 2.1%、1.2% 和 0.4%。

表 2 不同时间尺度油松液流速率与环境因子的相关性

Table 2 Correlation between *Pinustabulaeformis* sapflux density and the environmental factors at different temporal scales

环境因子 Factors	Pearson 相关系数 Pearson correlation coefficient		
	日尺度液流速率 $J_s/(g\ m^{-2}\ s^{-1})$ Daily sapflux density	月尺度液流速率 $J_s/(g\ m^{-2}\ s^{-1})$ Monthlysapflux density	年尺度液流速率 $J_s/(g\ m^{-2}\ s^{-1})$ Annuallysapflux density
空气温度 T_a	0.490 **	0.637 **	-0.404
相对湿度 RH	0.083 **	0.529 **	-0.966 **
饱和水汽压亏缺 VPD	0.320 **	0.301 *	-0.296
风速 W_s	-0.070 **	-0.152	-0.002
太阳辐射 R_s	0.428 **	0.359 **	0.859
土壤含水量 SM	0.483 **	0.555 **	-0.014
土壤温度 T_s	0.536 **	0.705 **	-0.052

$P < 0.05$ 表示该值在 $P < 0.05$ 显著, $P < 0.01$ 表示该值在 $P < 0.01$ 极显著; T_a : 空气温度 air temperature; RH : 相对湿度 relative humidity; VPD : 饱和水汽压亏缺 vapor pressure deficit; W_s : 风速 wind speed; R_s : 太阳辐射 solar radiation; SM : 土壤水分 soil moisture; T_s : 土壤温度 soil temperature; J_s : 液流速率 sapflux density

2.2 月尺度

在月尺度上, 油松液流速率对各环境因子的响应关系详见 (图 4), 除了风速以外, 液流速率与其它环境因

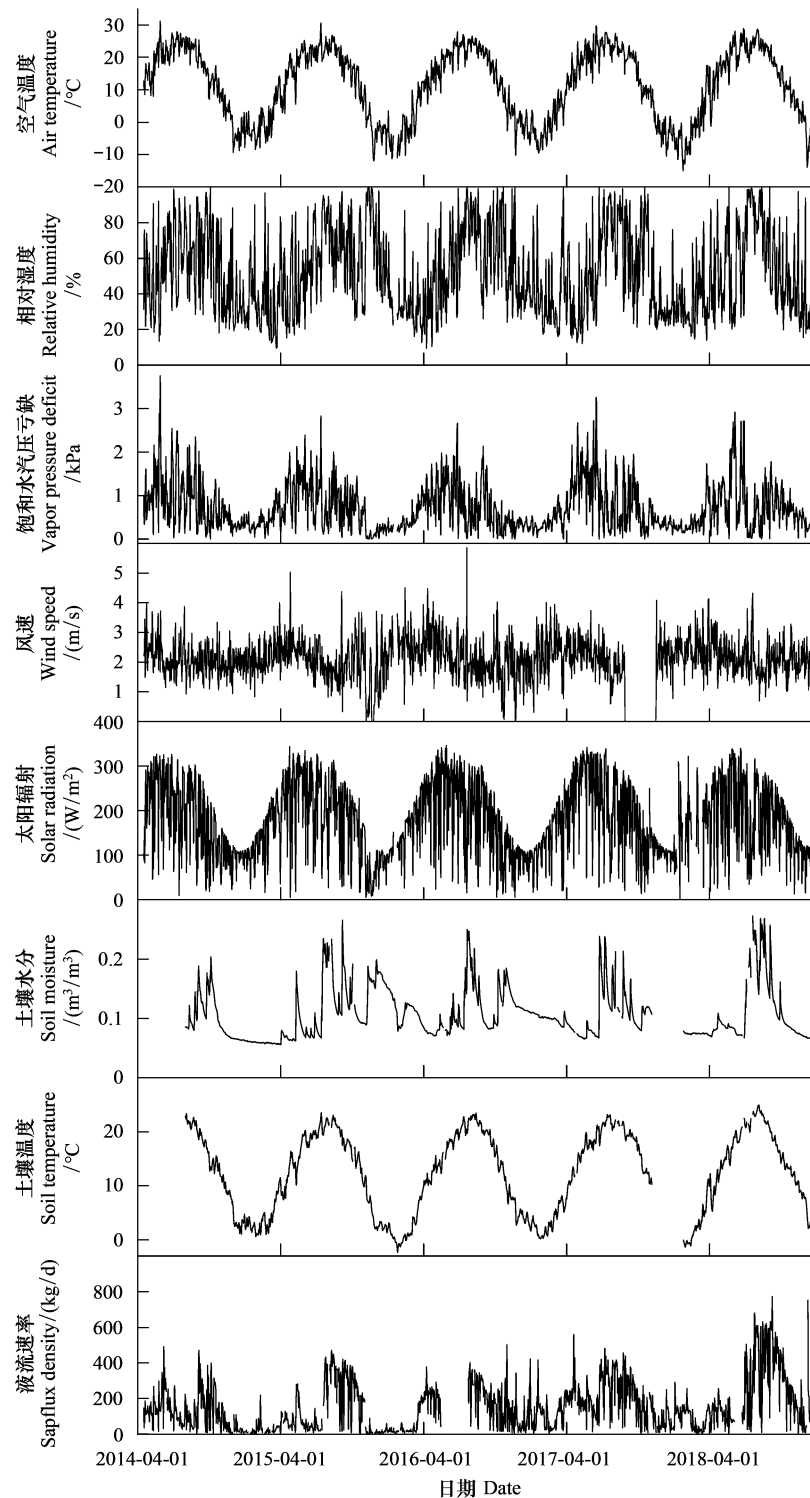


图 2 观测期内油松液流速率和各环境因子的时间动态变化

Fig.2 Temporal changes of *Pinus tabulaeformis* sapflux density and the environmental factors during the observation period

子呈极显著正相关。液流速率与土壤温度的相关性最强,相关系数为 0.705,其次是与空气温度的相关系数为 0.637,再次是与土壤含水量、相对湿度、太阳辐射和饱和水汽压亏缺的相关系数分别为 0.555、0.529、0.359 和 0.301。根据逐步回归分析结果,月尺度液流速率拟合公式如下:

$$J_s = -8.100 + 12.251 \times T_s + 1832.275 \times SM - 3.549 \times RH, R^2 = 0.611, P < 0.001$$

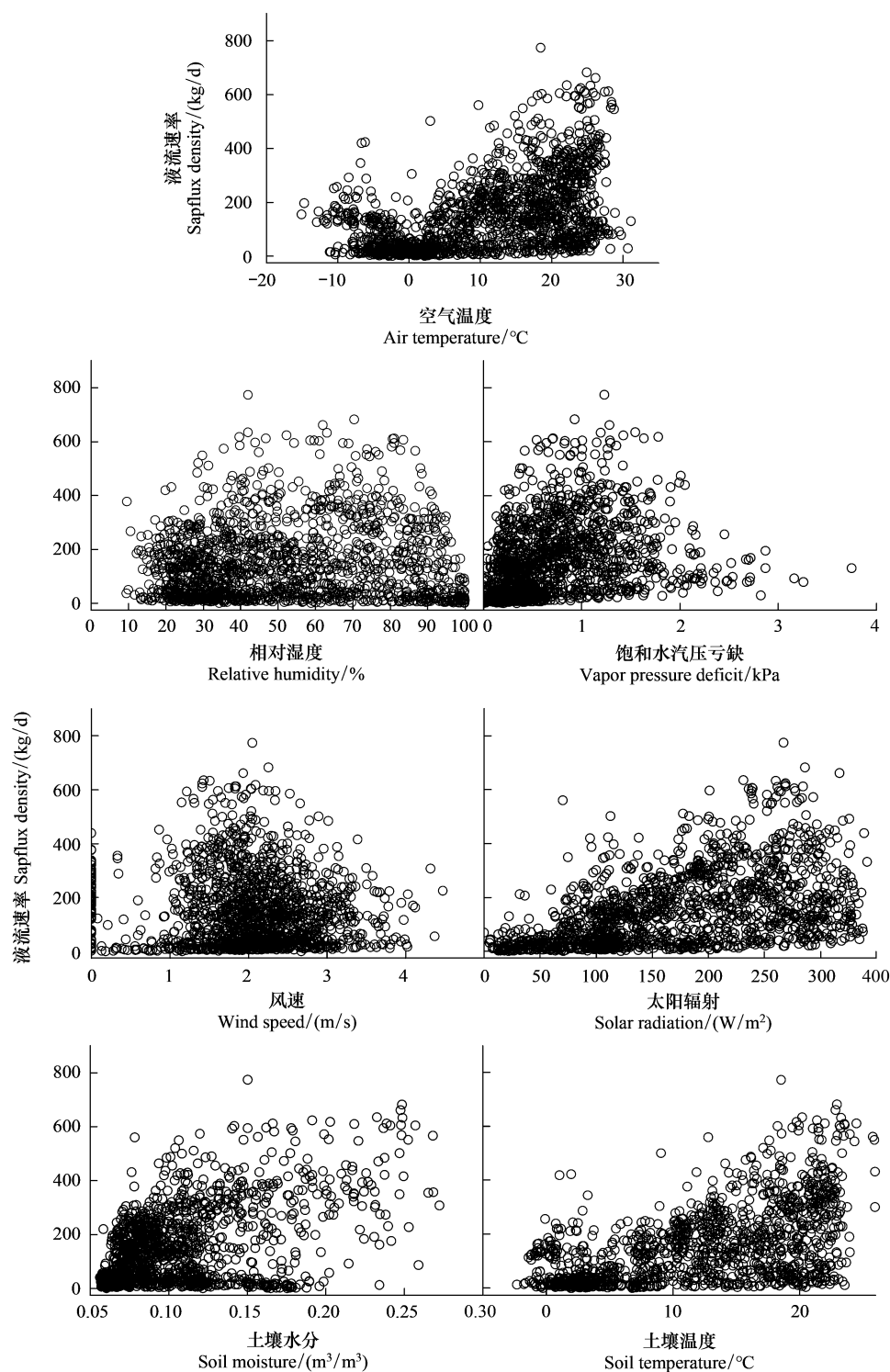


图3 日尺度油松液流速率对环境因子的响应图

Fig.3 Response of *Pinustabulaeformis* sapflux density to environmental factors at daily scale

从逐步回归 R^2 的变化量可以看出(表3),土壤温度对液流速率的影响最大,贡献量占比49.7%,土壤含水量和相对湿度的贡献量分别为7.3%和6.4%。

2.3 年尺度

在年尺度上,油松液流速率对各环境因子的响应关系详见(图5),除了相对湿度与液流速率呈极显著负

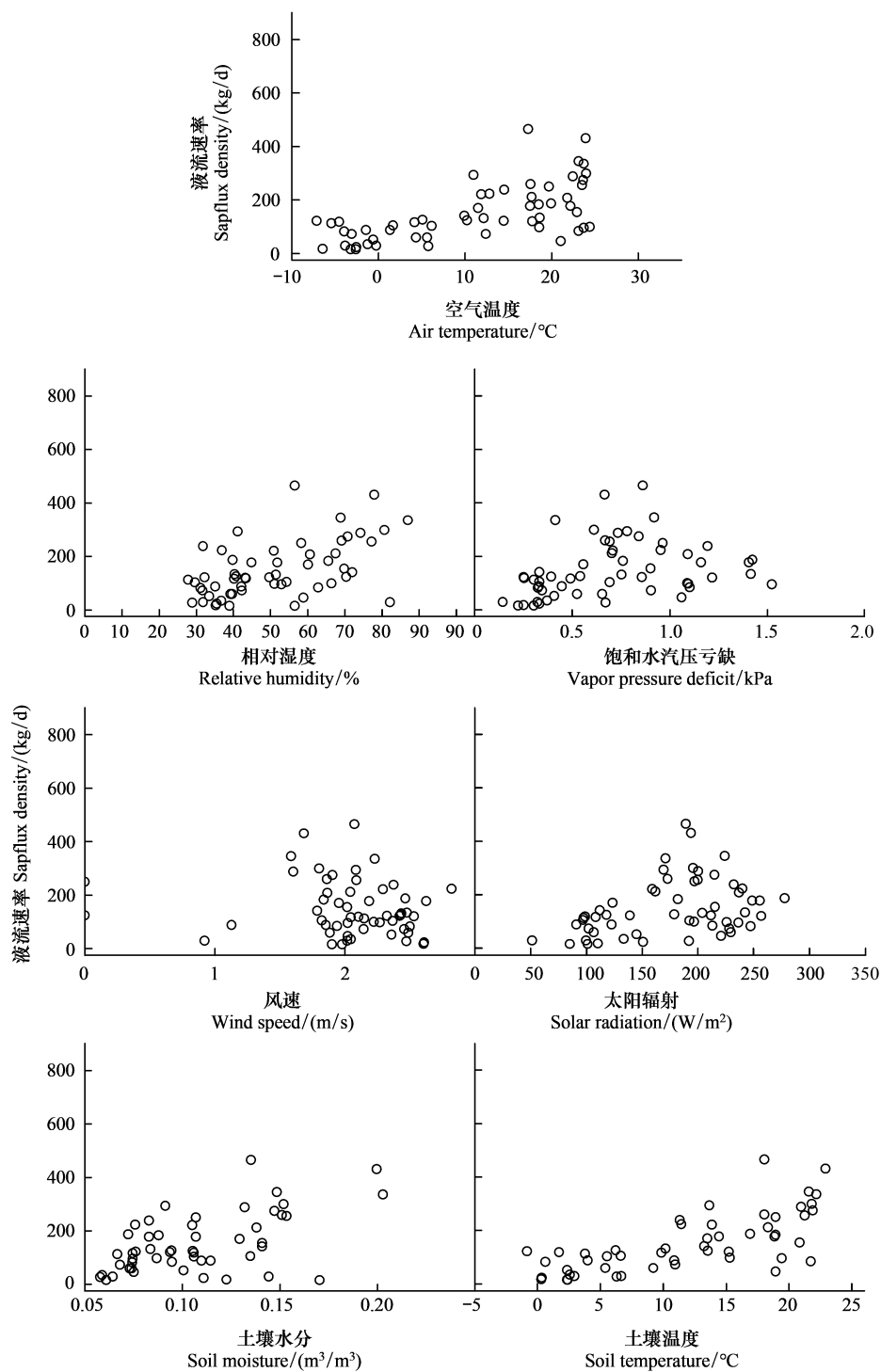


图 4 月尺度油松液流速率对环境因子的响应图

Fig.4 Response of *Pinus tabulaeformis* sapflux density to environmental factors at monthly scale

相关(相关系数-0.966)以外,其它环境因子与液流速率不存在统计学意义的相关性。根据逐步回归分析结果,年尺度液流速率拟合公式如下:

$$J_s = 862.948 - 15.621 \times RH + 43.889 \times W_s, R^2 = 0.996, P = 0.004$$

从逐步回归 R^2 的变化量可以看出(表 2),相对湿度与液流速率的关系更密切,贡献量占比 93.3%,风速的

贡献量为 6.3% (表 3)。

表 3 不同时间尺度油松液流速率与环境因子逐步回归 R^2 变化量

Table 3 Changes of stepwise regression R^2 of *Pinustabulaeformis* sapflux density and environmental factors at different temporal scales

因子 Factors	逐步回归 R^2 变化量 Changes of stepwise regression R^2		
	日尺度 Daily	月尺度 Monthly	年尺度 Annually
土壤温度 T_s	0.283	0.497	—
土壤含水量 SM	0.101	0.073	—
相对湿度 RH	0.117	0.064	0.933
太阳辐射 R_s	0.021	—	—
饱和水汽亏缺 VPD	0.012	—	—
风速 W_s	0.004	—	0.063
大气温度 T_a	—	—	—

3 讨论

大量的研究表明,在日尺度和月尺度上,不同区域、不同类型植物的液流速率或蒸腾速率主要受到太阳辐射和饱和水汽压亏缺因子的控制,通常也将这几个因子作为预测液流速率及蒸腾速率的重要指标^[26–29]。例如,黄土高原的半干旱区的刺槐人工林,其日尺度蒸腾速率与太阳辐射和饱和水汽压亏缺的关系密切^[30];月尺度上,在多个环境因子中,刺槐林月尺度蒸腾与太阳辐射的相关性最强^[31]。在我国干旱区的古尔班通古特沙漠,梭梭茎的日尺度液流速率与太阳辐射极显著正相关,相关系数大于其它环境^[17]。我国北方干旱区的蒙古松(*Pinus sylvestris* var.*mongolica*)冠层蒸腾最主要的控制因子是太阳辐射和饱和水汽压亏缺^[32]。对油松而言,陈胜楠等^[19]在半干旱区对油松开展一个生长季的定位观测也表明,太阳辐射、饱和水汽压亏缺是影响日尺度油松蒸腾速率的主要因子。太阳辐射和饱和水汽压亏缺影响植物蒸腾的机理已经得到普遍的认识。太阳辐射是植物进行光合作用的主要能量来源,是植物进行水汽交换的主要驱动力,主要通过诱导气孔开张来影响蒸腾,随着太阳辐射的增强液流速率或者蒸腾速率也随之增加。水汽压亏缺影响植物与大气的水汽压差,通过改变气孔导度、空气阻力等影响植物的蒸腾速率,蒸腾速率会随着饱和水汽压亏缺而增加,当饱和水汽压亏缺增加到一定程度时,蒸腾速率达到饱和^[10,18,20]。

但是,本研究的结果同前人关于日尺度、月尺度树干液流与环境因子关系的相关研究结果并不一致。本研究发现,在日尺度上油松液流速率虽然与太阳辐射和饱和水汽压亏缺呈极显著正相关(相关系数分别为 0.428 和 0.320),但是土壤温度和大气温度的相关性更强(相关系数分别为 0.536 和 0.490),尤其是土壤温度对液流速率变化的贡献率最大(28.3%)。而在月尺度上,液流速率与土壤温度呈极显著正相关(相关系数为 0.705),贡献率高达 49.7%,远远大于其它环境因子。这说明土壤温度是控制北京蟒山油松液流速率的最主要环境因子。王玥等^[33]的研究揭示了土壤温度对油松液流速率的影响机理:土壤温度升高会促进液流速率的启动,并通过控制林下土壤水分要素进而影响油松林地蒸散发。前人的众多研究并未发现土壤温度与液流速率之间的关系,主要是由于忽视了对土壤温度的观测,未将土壤温度作为关键环境影响因子加以考虑。因此,通过本研究表明了土壤温度对液流速率的重要性,野外应加强对土壤温度的观测。在年尺度上,本研究发现相对湿度对油松液流速率的影响最大(相关系数-0.966、贡献率 93.3%)。这与之前的研究结果不一致。对于黄土高原的人工刺槐林而言,而蒸腾的年际差异主要受到土壤含水量的影响^[31]。而 Zeppel 等^[16]则认为降雨对植被蒸腾年际变化的影响较大。相对湿度是表征大气干燥度和植物与大气之间的水汽压差,进而通过改变气孔导度、空气阻力等影响植物的蒸腾速率。在年尺度上,相对湿度对油松液流速率影响的机理仍需进一步深入研究。通过本研究还发现,越在长时间尺度上,逐步回归拟合度越大(日、月、年尺度的 R^2 分别为 0.538、0.611、0.933),说明了随着时间尺度的增长环境因子对油松液流速率的控制越强,其它类型的影响因子

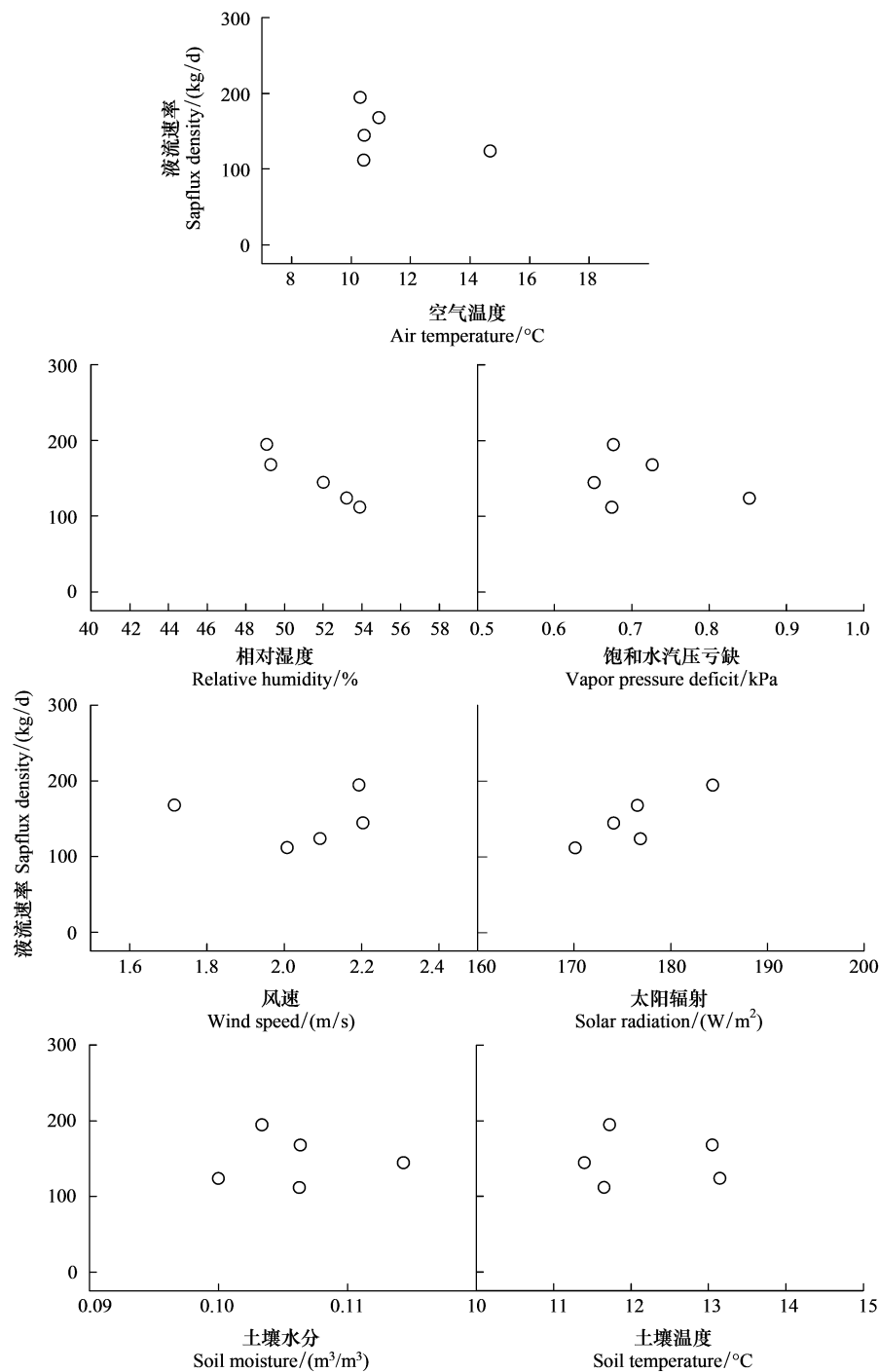


图5 年尺度油松液流速率对环境因子的响应图

Fig.5 Response of *Pinus tabulaeformis* sapflux density to environmental factors at annually scale

(如植物因素:叶面积指数等)的控制力下降。

4 结论

本研究通过长期的定位观测发现,控制北京蟒山油松液流速率的环境因子具有时间尺度效应。在日尺度上,液流速率主要受到土壤温度的影响,其次是大气相对湿度和土壤湿度;在月尺度上,土壤温度依然对液流速率的影响最大,其次是土壤湿度和相对湿度;在年尺度上,相对湿度控制液流速率的年际变化。随着时间尺

度的扩展,环境因子对油松液流速率的控制作用逐渐增强。本研究的结果可以为植物蒸腾的时间尺度转换、未来气候变化背景下预测植物蒸腾的耗水特征提供理论依据。

参考文献 (References):

- [1] Kool D, Agam N, Lazarovitch N, Heitman J L, Sauer T J, Ben-Gal A. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, Jan 15, 2014, 184 56-70.
- [2] Schlesinger W H, Jasechko S. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, Jun 1, 2014, 189 115-117.
- [3] Renner M, Hassler S K, Blume T, Weiler M, Hildebrandt A, Guderle M, Schymanski S J, Kleidon A. Dominant controls of transpiration along a hillslope transect inferred from ecohydrological measurements and thermodynamic limits. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20 (5): 2063-2083.
- [4] Tfwala C M, van Rensburg L D, Bello Z A, Zietsman P C. Transpiration dynamics and water sources for selected indigenous trees under varying soil water content. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019/09/15/, 2019, 275 296-304.
- [5] 杨文慧, 焦磊, 买尔当·克依木, 李宗善, 高光耀, 王聪, 白应飞, 孙婧雅, 温润泉. 疏伐对黄土丘陵区刺槐林蒸腾的影响. *生态学报*, 2021, 41 (12): 4923-4934.
- [6] Grossiord C, Sevanto S, Borrego I, Chan A M, Collins A D, Dickman L T, Hudson P J, McBranch N, Michaletz S T, Pockman W T. Tree water dynamics in a drying and warming world. *Plant, Cell & Environment*, 2017.
- [7] Novick K A, Ficklin D L, Stoy P C, Williams C A, Bohrer G, Oishi A C, Papuga S A, Blanken P D, Noormets A, Sulman B N, Scott R L, Wang L, Phillips R P. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 09/05/online, 2016, 6 1023.
- [8] Jiao L, Lu N, Fang W, Li Z, Wang J, Jin Z. Determining the independent impact of soil water on forest transpiration: A case study of a black locust plantation in the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2019/05/01/, 2019, 572 671-681.
- [9] O'Brien J J, Oberbauer S F, Clark D B. Whole tree xylem sap flow responses to multiple environmental variables in a wet tropical forest. *Plant, Cell & Environment*, May, 2004, 27 (5): 551-567.
- [10] 张涵丹, 王伟, 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, (1): 349-356.
- [11] Wang Y, Cao G, Wang Y, Webb A A, Yu P, Wang X. Response of the daily transpiration of a larch plantation to variation in potential evaporation, leaf area index and soil moisture. *Scientific Reports*, 2019/03/18, 2019, 9 (1): 4697.
- [12] 方伟伟, 吕楠, 傅伯杰. 植物夜间液流的发生、生理意义及影响因素研究进展. *生态学报*, 2018, 38 (21): 7521-7529.
- [13] 张雷, 孙鹏森, 刘世荣. 树干液流对环境变化响应研究进展. *生态学报*, 2009, 29 (10): 5600-5610.
- [14] Hayat M, Zha T, Jia X, Iqbal S, Qian D, Bourque C P A, Khan A, Tian Y, Bai Y, Liu P, Yang R. A multiple-temporal scale analysis of biophysical control of sap flow in *Salix psammophila* growing in a semiarid shrubland ecosystem of northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020/07/15/, 2020, 288-289 107985.
- [15] Ma L, Lu P, Zhao P, Rao X, Cai X, Zeng X. Diurnal, daily, seasonal and annual patterns of sap-flux-scaled transpiration from an *Acacia mangium* plantation in South China. *Annals of Forest Science*, 2008, 65 (4): 402-402.
- [16] Zeppel M J, Yunusa I A, Eamus D. Daily, seasonal and annual patterns of transpiration from a stand of remnant vegetation dominated by a coniferous *Callitris* species and a broad-leaved *Eucalyptus* species. *Physiologia Plantarum*, Jul, 2006, 127 (3): 413-422.
- [17] Zheng C, Wang Q. Water-use response to climate factors at whole tree and branch scale for a dominant desert species in central Asia: *Haloxylon ammodendron*. *Ecohydrology*, 2014, 7 (1): 56-63.
- [18] Zeppel M J, Murray B R, Barton C, Eamus D. Seasonal responses of xylem sap velocity to VPD and solar radiation during drought in a stand of native trees in temperate Australia. *Functional Plant Biology*, 2004, 31 (5): 461-470.
- [19] 陈胜楠, 孔磊, 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 (04): 1269-1280.
- [20] 贾国栋, 陈立欣, 李瀚之, 刘自强, 余新晓. 北方土石山区典型树种耗水特征及环境影响因子. *生态学报*, 2018, 38 (10): 3441-3452.
- [21] 杨芝歌, 史宇, 余新晓, 张艺, 陈杰, 王奇. 北京山区典型树种树干液流特征及其对环境因子的响应研究. *水土保持研究*, 2012, 19 (02): 195-200.
- [22] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, Dec, 1987, 3 (4): 309-320.
- [23] Peters R L, Fonti P, Frank D C, Poyatos R, Pappas C, Kahmen A, Carraro V, Prendin A L, Schneider L, Baltzer J L, Baron-Gafford G A, Dietrich L,

- Heinrich I, Minor R L, Sonnentag O, Matheny A M, Wightman M G, Steppe K. Quantification of uncertainties in conifer sap flow measured with the thermal dissipation method. *New phytologist*, 2018, 219 (4): 1283-1299.
- [24] Lu P, Urban L, Zhao P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: Theory and practice. *Acta Botanica Sinica*, Jun, 2004, 46 (6): 631-646.
- [25] Campbell G S, Norman J M. An introduction to environmental biophysics[M]. 2nd ed. New York; Springer-Verlag, 1998.
- [26] Liu X, Biondi F. Transpiration drivers of high-elevation five-needle pines (*Pinus longaeva* and *Pinus flexilis*) in sky-island ecosystems of the North American Great Basin. *Science of the Total Environment*, 2020/10/15/, 2020, 739 139861.
- [27] Ghimire C P., Lubezyski M W, Bruijnzeel L A, Chayarro-Rincon D. Transpiration and canopy conductance of two contrasting forest types in the Lesser Himalaya of Central Nepal. *Agricultural and Forest Meteorology*, Oct 15, 2014, 197 76-90.
- [28] 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*, Sep 3, 2008, 148 (10): 1444-1455.
- [29] Ichihashi R, Komatsu H, Kume T, Onozawa Y, Shinohara Y, Tsuruta K, Otsuki K. Stand-scale transpiration of two Moso bamboo stands with different culm densities. *Ecohydrology*, 2015, 8 (3): 450-459.
- [30] Jiao L, Lu N, Sun G, Ward E J, Fu B. 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.
- [31] Zhang J G, Guan J H, Shi W Y, Yamanaka N, Du S. Interannual variation in stand transpiration estimated by sap flow measurement in a semi-arid black locust plantation, Loess Plateau, China. *Ecohydrology*, Jan, 2015, 8 (1): 137-147.
- [32] Song L, Zhu J, Li M, Zhang J, Zheng X, Wang K. Canopy transpiration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in a sparse wood grassland in the semiarid sandy region of Northeast China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 3/15/, 2018, 250-251 192-201.
- [33] 王玥, 鄢春华, 邱国玉. 土壤温度对油松树干液流启动与停止的影响. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55 (03): 580-586.