

DOI: 10.5846/stxb202107151903

王云霓, 郭晔, 徐丽宏, 曹恭祥, 陈胜楠, 梁海荣. 不同时间尺度下华北落叶松人工林冠层蒸腾与环境因子的关系. 生态学报, 2023, 43(6): 2419-2428.

Wang Y N, Guo Y, Xu L H, Cao G X, Chen S N, Liang H R. Relationship between canopy transpiration of larch plantation and environmental factors at different time scales. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2419-2428.

不同时间尺度下华北落叶松人工林冠层蒸腾与环境因子的关系

王云霓^{1,2}, 郭 晔³, 徐丽宏^{2,*}, 曹恭祥¹, 陈胜楠⁴, 梁海荣¹

1 内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010

2 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091

3 国家林业和草原局发展研究中心, 北京 100714

4 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

摘要: 在半干旱区连续 2 年监测华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 的树干液流、气象因子和土壤体积含水量, 分析不同时间尺度下人工林冠层蒸腾与环境因子的关系。结果表明: 不同时间尺度下, 华北落叶松人工林冠层蒸腾的季节变化均呈单峰曲线, 即先增大后减小的趋势; 2016 年、2017 年日蒸腾量分别为 1.58 mm/d 和 1.71 mm/d, 生长季蒸腾总量分别为 241.30 mm 和 260.97 mm。在日尺度下, 气温、太阳辐射强度和饱和水汽压差是影响华北落叶松人工林冠层蒸腾主要环境因子; 月尺度下, 气温、风速、降水和土壤水分是冠层蒸腾的主要影响因子; 冠层蒸腾与降水、大气相对湿度相关关系由日尺度下的负相关到月尺度的正相关, 相关性增强。总体来看, 随时间尺度由小到大, 气温、风速、大气相对湿度、降水、土壤水分对冠层蒸腾的影响作用增大, 而太阳辐射强度、饱和水汽压差的作用减弱; 在未来增温增雨趋势下, 研究区生长季将延长, 华北落叶松人工林冠层蒸腾量可能会加大。

关键词: 冠层蒸腾; 时间尺度; 气象因子; 土壤含水量

Relationship between canopy transpiration of larch plantation and environmental factors at different time scales

WANG Yunni^{1,2}, GUO Ye³, XU Lihong^{2,*}, CAO Gongxiang¹, CHEN Shengnan⁴, LIANG Hairong¹

1 Inner Mongolia Academy of Forestry, Hohhot 010010, China

2 Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 China National Forestry-Grassland Development Research Center, Beijing 100714, China

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

Abstract: Canopy transpiration is a major part of forestland water balance and a fundamental datum in understanding the planted forest ecophysiology in dry regions. Quantitatively analyzing variation of canopy transpiration induced by the environmental factors is beneficial for a better estimation forestland water balance and prediction the plantation ecophysiology. But the response mechanism of canopy transpiration to environmental factors may be different in different time scales, so it needs to be further understood. This study was conducted in a 42-year-old *Larix principis-Rupprechtii* plantation (a density of 1933 trees/hm²) at the middle position of a north facing slope in the Inner Mongolian Daqingshan National

基金项目: 内蒙古自治区关键技术攻关计划项目(2021GG0033); 内蒙古自治区林业和草原局科研能力提升项目; 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS03101)

收稿日期: 2021-07-15; **网络出版日期:** 2022-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xulh@caf.ac.cn

Nature Reserve, a semi-arid region of China. Firstly, the sap flow velocity in ten healthy and dominant *Larix principis-Rupprechtii* trees, soil volumetric water content and meteorological factors including air temperature, precipitation, solar radiation intensity, air relative humidity and wind speed, were observed during two growing seasons (May 1 to September 30) in 2016 and 2017 which precipitation was 435.00 mm and 348.80 mm, respectively. Then, sap flow velocity values which was measured by the thermal diffusion method, were upscaled to the forest canopy level. Finally, the relationship between canopy transpiration and the environmental factors at different time scales was analyzed. The results showed that the seasonal changes of canopy transpiration showed a single peak curve under the different time scales, that was, the trend of increase first and then decrease. In 2016 and 2017, the average value of daily canopy-level transpiration was 1.58 mm/d and 1.71 mm/d, respectively, and the total transpiration in the growing season was 241.30 mm and 260.97 mm, respectively. On the daily scale, air temperature, solar radiation intensity and saturated vapor pressure deficit markedly affected canopy transpiration. At the monthly scale, air temperature, wind speed, precipitation and soil volumetric water content were the main influencing factors of canopy transpiration. The correlation between transpiration and precipitation and air relative humidity increased from negative correlation on the daily scale to positive correlation on the monthly scale. In general, with time scale from small to large, the effects of air temperature, wind speed, air relative humidity, precipitation and soil water content on canopy transpiration increase, while the effects of solar radiation intensity and saturated vapor pressure deficit decrease. With the trend of increasing temperature and rainfall in the future, the growing season of *Larix principis-Rupprechtii* in the study area will be prolonged, and the canopy transpiration may increase.

Key Words: canopy transpiration; time scale; meteorological factors; soil moisture

冠层蒸腾是森林植被耗水和林地水分散失的主要途径^[1-3],直接影响着林地可利用水分、生态系统的稳定性^[3-4]和区域水资源安全^[5-8]。对于给定林分,影响冠层蒸腾的立地条件和林分结构是固定^[2,4],冠层蒸腾主要受气象因子和土壤可利用水分的影响^[2,9],量化冠层蒸腾与环境因子的关系是更好地计算和预测变化环境下的森林耗水动态变化的需要^[2]。目前大部分研究采用日尺度上观测数据分析冠层蒸腾与环境因子的关系^[2-3,9],建立了冠层蒸腾与环境因子的多元线性模型^[10-12,5]或非线性复合模型^[13-17]。然而,受立地水热条件、树种、林分结构等影响,森林冠层蒸腾表现出明显的种间差异^[18-21]、时空差异^[2,9,22]及林龄差异^[18,23-24]和密度差异^[1]。要想全面理解环境因子对冠层蒸腾的影响,就需扩大研究区和研究树种。此外,不同时间尺度下冠层蒸腾对环境因子的响应机制可能不同^[24-27],如:张静和王力^[24]在日、月尺度下对黄土塬区的苹果(*Malus pumila*)林、魏新光等^[25]在时、日和旬尺度下对山地枣(*Ziziphus jujube*)林、莫康乐等^[26]在日、月尺度下对欧美 107 杨树(*Populus euramericana* cv. “74/76”)林的冠层蒸腾研究均显示:影响冠层蒸腾的环境因子存在尺度差异。所以对于不同时间尺度的影响机理认识有待深入。另外,对于雨养林区,开展月、季节、年等长时间尺度的耗水研究,对预测和评价森林植被耗水特征、林地产水对环境因子的响应及林水协调管理、基于水分承载力的人工林多功能精细化经营更具有应用价值。

内蒙古大青山是黄土高原、土默川平原交界处的典型山地,为大黑河、小黑河等多条河流的源头,是黄河上中游地区重要的水源涵养林保护区,其独特的生态区位是呼包乌地区的重要生态屏障,该区地貌、气候、土壤和植物区系具有典型的阴山山地代表性。自 20 世纪 60 年代先后实施了大青山人工造林及退耕还林等多项生态建设、自然保护区建设工程,该地区人工林面积持续增加,所带来的生态效益得到社会的公认与肯定。然而,随着人工林走向成熟,人工林耗水量逐渐增加,生态系统稳定性逐渐降低,已经影响了森林多功能的发挥,所以干旱半干旱地区的植被建设及经营管理必须遵循水分承载力,而准确定量评价恢复植被的蒸腾耗水特征是前提。此外,人工林成熟后耗水规律和特征发生变化,且缺乏不同时间尺度的研究。因此,在气候变化和植被恢复的背景下,有必要对内蒙古大青山人工林冠层蒸腾的变化特征及其对环境因子响应的的时间尺度差异进行研究。基于此,本研究以内蒙古大青山的华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林为研究对象,建

立固定样地,同步监测液流速率、气象因子和林地土壤水分状况,在不同时间尺度下分析冠层蒸腾的变化特征及其对环境因子响应的尺度差异,旨在为该地区基于水资源承载力的人工林经营和植被建设提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样地设置

内蒙古大青山国家级自然保护区(40°34′—41°14′N,109°47′—112°17′E),处在半湿润气候区向半干旱、干旱气候区的过渡地带,是森林、灌丛—草原的过渡带,平均海拔 1700 m。冬季寒冷;春秋风大,干燥;夏季温凉,相对湿润;1960—2019 年武川县气象数据显示:年均气温 3.25℃,平均最低气温-2.13℃,最冷出现在 12 月;平均最高气温 10.52℃,最热出现在 7 月,极端最高气温 33.60℃;年降水量变化范围为 191.50—553.10 mm,多年平均降水量 351.09 mm,每年 6—8 月的降水量最多,见图 1;平均大气相对湿度 54.46%;年日照时数为 3348.30 h,年蒸发量多年平均为 1846.80 mm。根据 2015—2018 年调查,阳坡植被以本氏针茅(*Stipa capillata*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、百里香(*Thymus serpyllum*)、线叶菊(*Filifolium sibiricum*)、羊茅(*Festuca ovina*)、白莲蒿(*Artemisia stechmanniana*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)等草原群落为主;阴坡以虎榛子(*Ostyopsis davidiana*)、柄扁桃(*Prunus pedunculata*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、三裂绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等灌丛及蒙古栎(*Quercus mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、华北落叶松、油松(*Pinus tabulaeformis*)、杜松(*Juniperus rigida*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等乔木林为主。土壤一般呈微酸性,质地以棕壤、褐土为主。

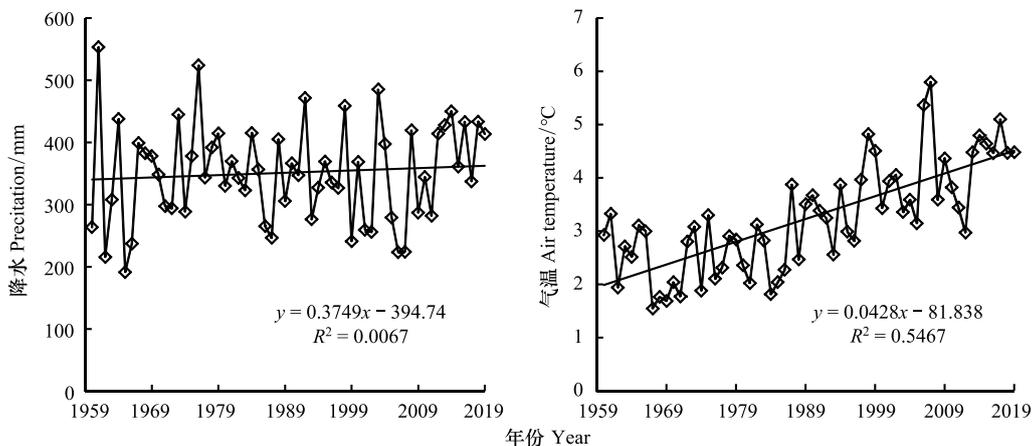


图 1 近 60 年间(1960—2019 年)气温和降水的年际变化

Fig.1 Interannual variation of air temperature and precipitation during the 60 years from 1960 to 2019

自国家实施“三北防护林计划”、“退耕还林工程”、“野生动植物保护及自然保护区建设工程”及自治区固沙、遏制水土流失的各项林业工程实施以来,华北落叶松是内蒙古大青山植被建设与修复最主要的人工树种之一,主要分布在阴坡和半阴坡。本研究以阴坡中坡位的 42 a 华北落叶松人工林为研究对象,设置大小为 30 m×30 m 的样地 1 块,样树分布均匀,无较大的林窗,郁闭度为 0.88,林分密度为 1933 株/hm²,平均胸径为 14.39 cm,平均树高为 12.30 m,南北冠幅为 3.55 m,东西冠幅为 1.95 m,活枝下高为 9.54 m;林下灌木零星分布着山刺玫(*Rosa davurica*)、蒙古荚蒾(*Viburnum mongolicum*)、三裂绣线菊,平均高度分别为 56.17 cm、51.78 cm 和 47.43 cm;林下草本层相对较好,覆盖度 50%,以蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、小红菊(*Dendranthema chanelii*)、东方草莓(*Fragaria orientalis*)、狭叶蓼(*Polygonum angustifolium*)等为主,草本层高度为 12.15 cm;枯落物厚度为 5.20—13.40 cm,土壤为山地灰褐土,土厚度大于 100.00 cm。

1.2 液流速率测定

在生长季(5 月 1 日—9 月 30 日),利用 SF-L 树干液流探针(TDP sensors, SF-L, Ecomatic, Munich,

Germany)测定标准木液流速率,数据采集频率为 10 min。根据 Granier^[28]方法,基于探针 S_1 与 S_0 、 S_2 、 S_3 之间的温度差 (d_{i0} 、 d_{i2} 、 d_{i3} , °C) 和夜间空气湿度为 100% 长达 2 d 时算得的 d_{iact} 值 (d_{imax} , °C) 计算液流速率 (J_s , mL $cm^{-2} min^{-1}$), 见公式(1)和(2)。

$$J_s = 0.714 \times [(d_{imax}/d_{iact}) - 1]^{1.231} \quad (1)$$

$$d_{iact} = d_{i0} - (d_{i2} + d_{i3})/2 \quad (2)$$

1.3 边材面积的计算

在样地外围,按固定样地径级分布选取标准木 40 棵,胸径为 6.31—29.60 cm;在胸高处钻取树芯,用 Lintab5 年轮分析仪(Heidelberg, Germany)测量树皮厚度和边材宽度;基于标准木的胸径(D , cm)、边材宽度计算边材面积(A_{s-tree} , cm^2),并构建边材面积和胸径的数量关系($A_{s-tree} = 0.8267D^{1.76}$, $R^2 = 0.9681$),然后计算样地内所有单株的边材面积。

1.4 林分蒸腾的计算

基于样地液流速率(J_c , mL $cm^{-2} min^{-1}$)、样地边材面积($A_{s-stand}$, m^2/hm^2)和时间转换系数计算冠层蒸腾(T_r , mm/d)^[2],见公式(3)。

$$T_r = J_c \times A_{s-stand} \times 60 \times 24 \quad (3)$$

1.5 环境因子监测

利用小型自动气象站(HOBO, USA)监测气温(T , °C)、降水(P , mm)、太阳辐射强度(SR , W/m^2)、大气相对湿度(RH , %)和风速(W_s , m/s)等气象因子,数据采集频率为 10 min。饱和水汽压差(VPD, kPa)是采用公式(4)来计算,数据均来自小型自动气象站的监测。

$$VPD = 0.611 \times [1 - (RH/100)] \times e^{[17.502T/(T+240.97)]} \quad (4)$$

采用 waterdog2800 土壤水分自动测量系统(Spectrum, USA)分层测定土壤含水量变化,监测点为 5 cm、15 cm、30 cm、50 cm、70 cm、90 cm 土深处;10 min 记录一次数据。不同土层加权平均得到 0—100 cm 土深的土壤体积含水量(VSM)。

基于土壤体积含水量(VSM, %)、土壤厚度(h , cm)和土壤水分监测层数(n)计算土壤储水量(SWS, mm),公式见(5)。

$$SWS = \sum_i^n (0.1 \times VSM_i \times h_i) \quad (5)$$

1.6 数据分析

液流速率、冠层蒸腾、气象因子和土壤体积含水量等数据在 Excel 2010 进行换算及作图,在 SPSS 19.0 软件采用 Pearson 相关分析蒸腾与环境因子的关系。

2 结果与分析

2.1 环境因子的季节变化

不同年份气象因子具有明显的季节变化,见图 2。2016 年和 2017 年日均温的最大值均出现在 7 月,分别为 21.71°C 和 24.88°C;2017 年的平均气温略高,为 15.75°C。风速和太阳总辐射年际变化较小,2016 年平均风速为 5.08 m/s,太阳辐射为 528.29 W/m^2 ,2017 年平均风速为 5.57 m/s,太阳辐射为 548.91 W/m^2 。

2016 年生长季的降水量为 435.00 mm,次降水量最大为 37.00 mm;单次降水 > 10 mm 共 16 次,占总降水量的 68.09%;单次降水 < 5 mm 共 33 次,降水总和为 66.60 mm。2017 年生长季的降水量为 348.80 mm,次降水量最大为 43.20 mm;单次降水 > 10 mm/d 共 13 次,占总降水量的 67.66%;单次降水 < 5 mm/d 共 30 次,降水总和为 66.40 mm。与多年生长季平均降水量(299.50 mm)相比,2016 年和 2017 年均均为相对湿润年份。2016 年 5—9 月的月降水量分别占生长季降水量的 14.48%、19.72%、31.86%、16.28%、17.66%,降水事件分别为 10 次、14 次、12 次、9 次和 15 次。2017 年 6 月月降水量最多,占总降水量的 25.92%,降水事件为 8 次;7 月和 8 月降

水量接近,分别占总降水量的 23.22%、22.65%,降水事件分别为 12 次、11 次;9 月降水量最少,为 43.20 mm。

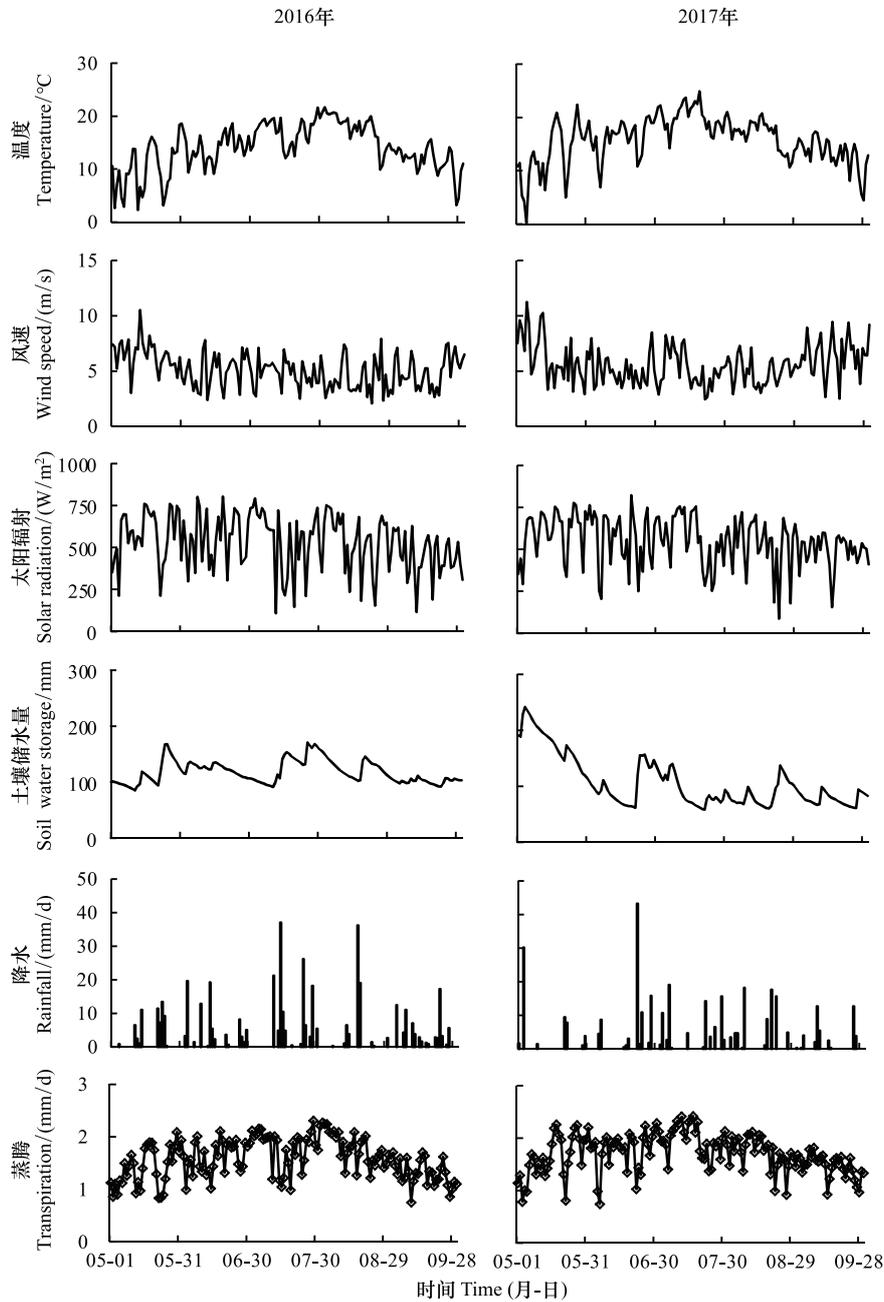


图 2 日尺度下华北落叶松林分蒸腾与环境因子的季节变化

Fig.2 Seasonal patterns of larch stand transpiration and environmental factors under day scale

2.2 不同时间尺度下的冠层蒸腾

图 2 可以看出,日尺度下,冠层蒸腾在不同年份均呈现出先增大后减小的季节变化趋势。随着 5 月气温升高,树木枝叶迅速生长,冠层蒸腾迅速达到较高水平,2016 年 5 月 17 日冠层蒸腾达到 1.90 mm/d,2017 年 5 月 18 日,冠层蒸腾达到 2.26 mm/d。冠层蒸腾在 6 月波动性较大,主要与气象有关,降水天气导致太阳辐射、气温、饱和气压差均较低,蒸腾速率较小,但降水后冠层蒸腾大于降水前。随着气温继续升高,太阳辐射增强,降水量的增加,7—8 月的水热同期使冠层蒸腾继续增大,不同年份最大值分别为 2.31 mm/d、2.42 mm/d;2016 年 7 月,冠层蒸腾受降水影响而波动较大。随着气温的降低,进入 8 月后冠层蒸腾呈下降趋势,但还维持在较

高水平,9月中旬冠层蒸腾开始下降明显。总体上来看,2017年生长季冠层蒸腾高于2016年;在日尺度下,不同年份华北落叶松人工林冠层蒸腾随着气温、太阳辐射强度和饱和水汽压差的升高而增加,与风速、降水、大气相对湿度呈负相关(见表2)。

表2 不同时间尺度下华北落叶松冠层蒸腾与环境因子的关系

Table 2 The relationship of larch stand transpiration to environmental factors under different time scale

尺度 Scale	年 Year	回归方程 Regression equation	相关系数 R^2	Pearson 相关系数 Pearson correlation coefficient						
				气温 T	太阳辐射强度 SR	大气湿度 RH	风速 W_s	饱和水汽压差 VPD	降水 P	土壤水分 VSM
日 Day	2016	$T_r = 0.048 + 0.06T + 0.001SR$	0.990	0.833 **	0.730 *	-0.293	-0.347	0.726 *	-0.335	0.210
	2017	$T_r = 0.043 + 0.06T + 0.001SR$	0.990	0.866 **	0.723 *	-0.323	-0.312	0.738 *	-0.393	0.215
月 Month	2016	$T_r = 27.99 + 2.764T - 0.325RH$	0.998	0.945 **	0.457	0.438	-0.597 *	0.398	0.526 *	0.932 **
	2017	$T_r = 20.238 + 2.031T$	0.887	0.942 **	0.397	0.494	-0.741 *	0.546	0.762 *	0.405

T_r : 蒸腾 Transpiration; T : 气温 Air temperature; P : 降水 Rainfall; SR : 太阳辐射强度 Solar radiation intensity; RH : 大气相对湿度 Air relative humidity; W_s : 风速 Wind speed; VPD : 饱和水汽压差 Saturated vapor pressure deficit; VSM : 土壤体积含水量 Soil volumetric water content; ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

月尺度下,冠层蒸腾的季节变化趋势跟日尺度下的一致,均呈单峰曲线(图3)。2016年冠层蒸腾表现为8月(55.67 mm) > 7月(55.29 mm) > 6月(48.46 mm) > 5月(42.82 mm) > 9月(39.06 mm)。2017年度,7月冠层蒸腾最大,达到61.55 mm;8月和6月的冠层蒸腾次之,分别为53.20 mm和52.79 mm;9月冠层蒸腾最小,为43.73 mm。

2.3 不同时间尺度下冠层蒸腾与环境因子的关系

2.3.1 月尺度下冠层蒸腾与降水量的关系

从月尺度下华北落叶松人工林冠层蒸腾与降水量的关系(图3)可以看出,除了个别月份稍有不足,水分供给相对较充足,基本都能满足蒸腾耗水需求。2016年5—9月的供(降水)求(蒸腾)比例为:1.47、1.77、2.51、1.27、1.97。2017年月降水与月蒸腾的比例最高是1.71(6月),此时林地产水功能较好,生产上可做好水分管理;5月和9月的降水与蒸腾比例为1.11和0.98,说明在5月、9月的水分供求基本达到平衡;但5月是枝叶旺长时期,也是需水旺期,林分管理时要注意土壤水分的动态。此外,月尺度下冠层蒸腾与降水量变化趋势不一致,即降水量小的月份,冠层蒸腾不一定小,降水量大的月份冠层蒸腾不一定多。如:2017年7月降水量低于6月,但7月冠层蒸腾远高于6月的;2016年7月降水量高达138.60 mm,占生长季降水量的31.86%,但同期蒸腾只有55.29 mm,仅占生长季总量的22.91%。

2.3.2 不同时间尺度下蒸腾与环境因子的相关关系

不同年份不同尺度下冠层蒸腾与气温均呈极显著正相关,月尺度上相关系数高于日尺度下的(表2),2016年相关系数在日、月尺度下分别为0.833和0.945,2017年则由0.866增大到0.942;月尺度下的冠层蒸腾与风速的关系与日尺度下一致,呈负相关,但月尺度风速作用更显著;随着时间尺度的增大,太阳辐射强度和饱和水汽压差的作用减小,太阳辐射强度在日尺度下显著影响冠层蒸腾,而在月尺度未达到显著水平。冠层蒸腾与降水、大气相对湿度的相关系数由日尺度下的负相关到月尺度的正相关,且相关性也增大;不同年份月尺度下冠层蒸腾与降水均达到显著正相关,2016年和2017年冠层蒸腾与大气相对湿度的相关系数由日尺度下-0.293、-0.323增大到月尺度下的0.438、0.494。不同尺度下,土壤水分均与冠层蒸腾呈正相关,但月尺度

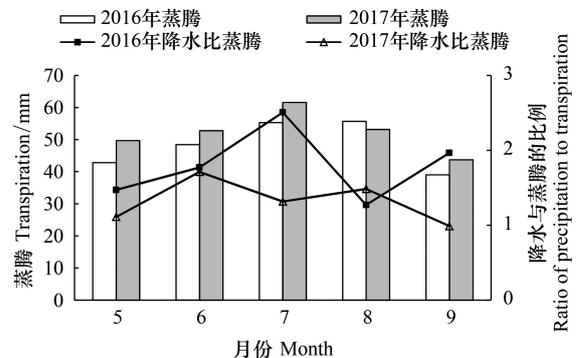


图3 月尺度下冠层蒸腾、降水与冠层蒸腾的比例

Fig.3 The transpiration and ratio of precipitation to transpiration under month scale

影响更大。总体来看,随着时间尺度的推进,气温、风速、大气相对湿度、降水、土壤水分的作用增大,而太阳辐射强度、饱和水汽压差的作用减弱。

2.4 林地储水量对降水量、冠层蒸腾的响应

土壤储水量变化特征受植被耗水、降水分布格局的综合影响(图2、图4)。生长季初期5月因融雪径流土壤储水量较大,但随着植被生长和气温回升,林地耗水增大,土壤储水量消耗较快,而此时降水量相对较少,土壤储水量得不到有效补充,故土壤储水量总体呈下降回落趋势,此时段内土壤储水量的波动主要受次降水的影响,次降水补充后土壤储水量会迅速回升。如,2016年5月21—25日连续降水,土壤储水量从94.48 mm提高到168.18 mm;2017年5月21—22日连续降水17.20 mm,土壤储水量从145.31 mm上升到173.06 mm。6—7月,冠层蒸腾达到相对较高的水平,林地蒸散耗水较大,土壤储水量消耗增加,特别2017年6月降水分配不均,中上旬降水量较少,土壤储水量总体呈快速下降趋势,直至6月22—24日连续降水55.40 mm后,土壤储水量由61.69 mm提高到156.27 mm,之后呈下降趋势;进入7月后,除了上旬几次降水,土壤储水量短暂回升到140.03 mm,之后波动中下降,7月21日土壤储水量降低到57.91 mm,7月下旬降水次数较多,土壤储水量波动中又回升到93.66 mm;2016年6月降水次数较多,土壤储水量波动较大,在6月12—15日连续降水27.00 mm后,土壤储水量达到本月最大值,即136.80 mm,之后一直呈下降趋势,直至7月11—16日78.20 mm及7月23—25日33.40 mm的集中降水,土壤储水量得到迅速补充,达到171.01 mm。8月冠层蒸腾维持在较高水平,但月降水相对较少,土壤储水量呈减小趋势,除了2016年8月17—18日降水55.20 mm后,土壤储水量回升到145.61 mm,之后下降到105.39 mm。进入9月,随着气温、太阳辐射的降低,及树木自身生理特性的影响,蒸腾速率减小,林地耗水减少,2016年9月降水次数多,在减小冠层蒸腾的同时增加土壤储水量,但降水量相对较小,土壤储水量变化不大,基本保持平稳;而2017年9月中上旬,降水较少,土壤储水量呈下降趋势,降低到60.95 mm(9月25日)。

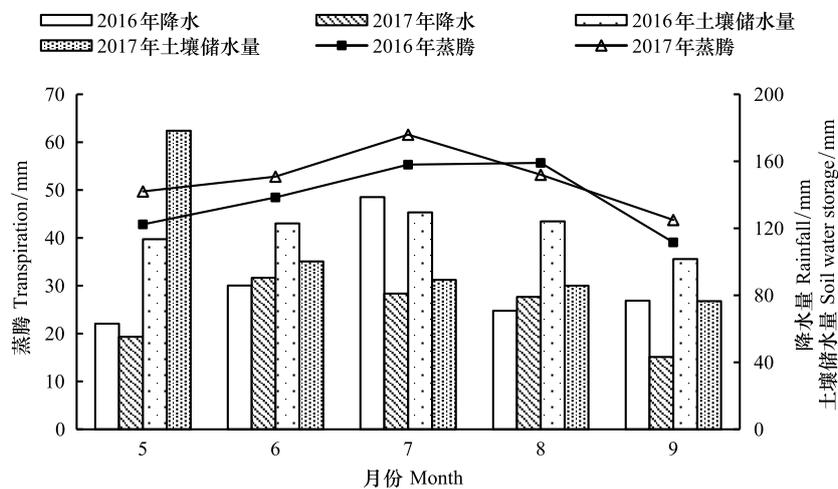


图4 月尺度下降水量、土壤储水量、华北落叶松冠层蒸腾

Fig.4 The precipitation, soil water storage and larch stand transpiration under month scale

3 讨论

3.1 日尺度下冠层蒸腾与环境因子的关系

本研究中,日尺度下,气温、太阳辐射强度、饱和气压差是影响华北落叶松人工林冠层蒸腾的主要环境因子,这与前人的研究基本一致。如:陈胜楠等^[17]对呼和浩特树木园油松人工林、王云霓等^[9]对六盘山南侧华北落叶松人工林、刘彩凤等^[29]对黄土丘陵沟壑区油松刺槐(*Robinia pseudoacacia*)混交林的研究均发现:太阳总辐射和饱和水汽压差是影响冠层蒸腾的最主要环境因子;熊伟等^[30]认为宁南山区华北落叶松林冠层蒸腾

主要受太阳辐射强度、空气温度和相对湿度的影响;莫康乐等^[26]研究认为欧美 107 杨树人工林日尺度下冠层蒸腾与净辐射、饱和水汽压差和土壤体积含水率显著相关。但受研究区气候特征、立地条件等影响,森林植被冠层蒸腾的主导影响因素表现出明显的差异。如:王云霓等^[9]认为降水量及其分配格局是导致冠层蒸腾主要影响因子存在差异的原因之一;Kumagai 等^[22]对日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)林的、Mitchell 等^[31]对澳大利亚桉树(*Eucalyptus*)林的、Tromp-van Meerveld 和 McDonnell^[32]对美国佐治亚州山核桃(*Carya* sp.)的、王云霓等^[9]对六盘山华北落叶松林的研究均显示:冠层蒸腾的主导影响因子存在坡位差异;刘军等^[33]研究发现,上坡位毛红椿(*Toona ciliata*)样地的液流速率主要受土壤体积含水量和土壤水势的影响,而下坡位样地主要受土壤温度和土壤水势的影响。另外,蒸腾的影响因素还与树种、林分结构、树形因子等因素有关。如,吕同汝等^[19]对亚热带岩溶区女贞(*Ligustrum lucidum*)和刺槐的、Brinkmann 等^[20]对挪威云杉和欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)的、王志超等^[21]对雷州半岛地区尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)和湿加松(*Pinus elliottii*×*P. caribaea*)人工林的、Lagergren 等^[34]对挪威云杉(*Picea abies*)和欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)的研究均发现:土壤水分对蒸腾(速率)的影响具有种间差异;Kumagai 等^[22]认为,土壤水分对较大胸径树木蒸腾的影响更大;Xu 等^[1]研究发现六盘山同龄华北落叶松林冠层蒸腾受林分密度的影响。

3.2 蒸腾环境影响因子的时间尺度差异

研究不同时间尺度下冠层蒸腾与环境因子的关系主要是为了分析影响冠层蒸腾主导环境因子的尺度差异,可以在冠层蒸腾不方便连续监测的地区,利用其与主导影响因子的关系估算蒸腾,不但增加精度,还容易实现^[35-36],同时也为改善水文模型提高蒸腾模拟的精度及精准经营提供基础^[37-38]。本研究中,随着时间尺度的扩大,气温、风速、大气相对湿度对冠层蒸腾的作用增大,而太阳辐射、饱和水汽压差的作用减弱。这与已有的研究不尽相同。如:张静和王力^[24]对黄土塬区的苹果林蒸腾研究发现:随着时间尺度增大,温度、风速、太阳辐射和饱和气压差的作用均增强;桑玉强等^[37]对栓皮栎(*Quercus variabilis*)液流研究发现:随着尺度的推进,液流与气象因子和水面蒸发的相关性增强;王文杰等^[35]对兴安落叶松(*Larix gmelinii*)研究显示:随着时间尺度的减小,光照对树干液流的影响逐渐增大,土壤温度和湿度的影响逐渐降低;桑玉强和张劲松^[36]对华北山区核桃(*Juglans regia*)研究发现:太阳辐射和风速的影响均增强,相关系数分别由日尺度下 0.654、-0.108 增大到月尺度下的 0.935、-0.908;杨文慧等^[39]对黄土丘陵刺槐林的研究认为:半小时尺度单株液流速率与太阳辐射相关性最高,日尺度单株液流速率与饱和水汽压亏缺相关性最高。

本研究发现,降水随着时间尺度的扩大与冠层蒸腾的相关性增加,这在前人研究中也发现。如:莫康乐等^[26]在日、月、年尺度上讨论杨树林冠层蒸腾的影响因子时,提出月、年蒸腾主要取决于同期降水量,与同期降水量存在显著线性正相关关系;Zeppel 等^[27]在日、季、年尺度上探讨桉树(*Eucalyptus crebra*)-柏树(*Callitris glaucophylla*)共生林蒸腾时,认为年尺度下冠层蒸腾与降水量存在线性正相关关系;张静和王力^[24]对苹果林蒸腾研究发现:除了 7 月,苹果林月蒸腾与降水呈正相关;Llorens^[40]对地中海山区欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)、韩辉等^[41]对科尔沁沙地南缘樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)的蒸腾研究发现:降水是造成林分蒸腾年际差异的主要原因;桑玉强等^[37]研究发现:年际间栓皮栎液流变化趋势与降水量存在较好的一致性,但月尺度上变化趋势不一致。另外,降水通过改变土壤水分条件影响蒸腾,本研究发现次降水后冠层蒸腾增加,这与陈胜楠等^[17]在内蒙古林科院树木园、张静和王力^[24]在黄土塬区、Raz-Yaseef 等^[42]在以色列南部亚特尔林区的研究结果一致,但次降水对蒸腾的影响存在差异,这种差异可能与研究树种的自身生理特征及立地特征等因素有关。首先,降水是通过影响土壤水分间接影响冠层蒸腾,对于本文、陈胜楠等^[17]、桑玉强等^[37]的研究中,降水是唯一的土壤水分补给,但是受降水格局、降水强度、植被层和枯落物层的截留状态、降水前土壤水分状态、土壤贮水量和下渗速率等因素的影响,降水量对不同林分结构的林地土壤水分的补给是存在差异的,故对冠层蒸腾的影响是存在差异的。如:陈胜楠等^[17]研究认为:次降雨为 0—2 mm、2—5 mm、5—10 mm、10—20 mm、20—40 mm 时,降水能影响土壤水分厚度分别为 10 cm、30 cm、50 cm、90 cm、120 cm,蒸腾增加量为 6.70%、11.02%、27.70%、79.82%、84.33%;Raz-Yaseef 团队研究发现当降水<30 mm 时,在粘性较重的土壤上,水

分连表层 5 cm 都难以渗透^[43],蒸腾随着>30 mm 次降水占总降水的比例的增加而增加^[42];Zhang 等^[44]研究发现:>15 mm 的次降水才显著影响油松林冠层蒸腾;其次,张静和王力^[24]研究中的苹果,在 7 月正处在果实膨大期,需水量大,果树主要利用 100—300 cm 土层的水分,只有强降水才能达到果树土壤水分利用层;王云霓等^[9]、Raz-Yaseef 等^[42]和莫康乐等^[26]研究发现:有效根系层的土壤水分是影响冠层蒸腾的关键。此外,不同林种蒸腾对降水的响应也不同。如:温杰等^[45]研究认为:9 月降水导致土壤水分对沙棘树干液流的解释量增加 4.20%,而 8 月和 9 月的降水导致土壤水分对油松树干液流的解释量降低了 0.30%。

4 结论

不同时间尺度下,华北落叶松人工林冠层蒸腾的季节变化均呈单峰曲线,即先增大后减小的趋势。在日尺度下,华北落叶松人工林冠层蒸腾与气温、太阳辐射强度和饱和水汽压差呈极显著或显著正相关关系;月尺度下,气温、风速、降水和土壤水分是冠层蒸腾的主要影响因子;冠层蒸腾与降水、大气相对湿度的相关系数由日尺度下的负相关到月尺度的正相关,相关性高于日尺度,不同年份月尺度下冠层蒸腾与降水均达到显著正相关。总体来看,随着时间尺度的推进,气温、风速、大气相对湿度、降水、土壤水分的作用增大,而太阳辐射强度、饱和水汽压差的作用减弱。根据中国及研究区气候变化的趋势来看,研究区未来气温将会升高,华北落叶松生长季将延长,降水量也呈增加趋势,可能会加大华北落叶松人工林蒸腾耗水,这对区域的水资源安全及降温增湿、水源涵养等生态功能的影响还需要进一步的跟踪研究。

参考文献(References):

- [1] Xu L H, Cao G X, Wang Y N, Hao J, Wang Y H, Yu P T, Liu Z B, Xiong W, Wang X. Components of stand water balance of a larch plantation after thinning during the extremely wet and dry years in the Loess Plateau, China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 24: e01307.
- [2] 曹恭祥,王云霓,郭中,季蒙,王彦辉,徐丽宏.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. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3376-3384.
- [3] Wang Y N, Cao G X, Wang Y H, Webb A A, Yu P T, Wang X J. Response of the daily transpiration of a larch plantation to variation in potential evaporation, leaf area index and soil moisture. *Scientific Reports*, 2019, 9: 4697.
- [4] Li Z H, Yu P T, Wang Y H, Webb A A, He C, Wang Y B, Yang L L. A model coupling the effects of soil moisture and potential evaporation on the tree transpiration of a semi-arid larch plantation. *Ecohydrology*, 2017, 10: e1764.
- [5] Bosch D D, Marshall L K, Teskey R. Forest transpiration from sap flux density measurements in a Southeastern Coastal Plain riparian buffer system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 187: 72-82.
- [6] Wang Y H, Mike B, Karl-Heinz F, Yu P T, Xiong W, Xu L H. Changing forestry policy by integrating water aspects into forest/vegetation restoration in dryland areas in China. *Agriculture Water & Ecology*, 2012, 26(1): 59-67.
- [7] Wang Y H, Yu P T, Feger K H, Wei X H, Sun G, Bonell M, Xiong W, Zhang S L, Xu L H. Annual runoff and evapotranspiration of forestlands and non-forestlands in selected basins of the Loess Plateau of China. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 277-287.
- [8] Yu P T, Krysanova V, Wang Y H, Xiong W, Mo F, Shi Z J, Liu H L, Vetter T, Huang S C. Quantitative estimate of water yield reduction caused by forestation in a water-limited area in northwest China. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(2): L02406.
- [9] 王云霓,曹恭祥,王彦辉,徐丽宏,张文军,王晓江.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. *应用生态学报*, 2018, 29(5): 1503-1514.
- [10] Bernier P Y, Bartlett P, Black T A, Barr A, Kljun N, McCaughey J H. Drought constraints on transpiration and canopy conductance in mature aspen and jack pine stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/2/3/4): 64-78.
- [11] 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.
- [12] Wang H L, Tetzlaff D, Dick J 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.
- [13] Oren R, Pataki D E. Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests. *Oecologia*, 2001, 127(4): 549-559.
- [14] Phillips N, Oren R. Intra-and inter-annual variation in transpiration of a pine forest. *Ecological Applications*, 2001, 11(2): 385-396.
- [15] Ungar E D, Rotenberg E, Raz-Yaseef N, Cohen S, Yakir D, Schiller G. Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semiarid region: implications for forest management. *Forest Ecology and Management*, 2013, 298: 39-51.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Ewers B E, Gower S T, Bond-Lamberty B, Wang C K. Effects of stand age and tree species on canopy transpiration and average stomatal conductance of boreal forests. *Plant, Cell & Environment*, 2005, 28(5): 660-678.
- [19] 吕同汝, 蒋勇军, 吴泽, 茆杨, 邱菊, 吴超. 亚热带岩溶区典型常绿和落叶树种的蒸腾特征及其对环境因子的响应. 生态学报, 2022, 42(3): 1047-1058.
- [20] Brinkmann N, Eugster W, Zweifel R, Buchmann N, Kahmen A. Temperate tree species show identical response in tree water deficit but different sensitivities in sap flow to summer soil drying. *Tree Physiology*, 2016, 36(12): 1508-1519.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Delzon S, Loustau D. Age-related decline in stand water use: sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129(3/4): 105-119.
- [24] 张静, 王力. 黄土塬区苹果园蒸散与环境因素的关系. 林业科学, 2018, 54(3): 29-38.
- [25] 魏新光, 陈滇豫, 汪星, 汪有科, 卫新东. 山地枣林蒸腾主要影响因子的时间尺度效应. 农业工程学报, 2014, 30(17): 149-156.
- [26] 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.
- [27] Zeppel M J B, Yunusa I A M, 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*, 2006, 127(3): 413-422.
- [28] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.
- [29] 刘彩凤, 张志强, 郭军庭, 查同刚, 孙建新. 晋西黄土丘陵沟壑区油松刺槐混交林蒸腾耗水. 中国水土保持科学, 2010, 8(5): 42-48.
- [30] 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, 39(2): 1-7.
- [31] Mitchell P J, Benyon R G, Lane P N J. Responses of evapotranspiration at different topographic positions and catchment water balance following a pronounced drought in a mixed species eucalypt forest, Australia. *Journal of Hydrology*, 2012, 440/441: 62-74.
- [32] Tromp-van Meerveld H J, McDonnell J J. On the interrelations between topography, soil depth, soil moisture, transpiration rates and species distribution at the hillslope scale. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(2): 293-310.
- [33] 刘军, 陈文荣, 徐金良, 邹军, 姜景民, 李彦杰, 刁松峰. 毛红椿人工林树干液流动态变化对坡位的响应. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2209-2214.
- [34] Lagergren F, Lindroth A. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112(2): 67-85.
- [35] 王文杰, 孙伟, 邱岭, 祖元刚, 刘伟. 不同时间尺度下兴安落叶松树干液流密度与环境因子的关系. 林业科学, 2012, 48(1): 77-85.
- [36] 桑玉强, 张劲松. 华北山区核桃液流变化特征及对不同时间尺度参考作物蒸散量的响应. 生态学报, 2014, 34(23): 6828-6836.
- [37] 桑玉强, 张劲松, 孟平, 党宏忠, 高峻, 贾长荣, 任迎丰. 栓皮栎人工林树干液流对不同时间尺度气象因子及水面蒸发的响应. 生态学报, 2010, 30(23): 6661-6668.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Llorens P, Poyatos R, Latron J, Delgado J, Oliveras I, Gallart F. A multi-year study of rainfall and soil water controls on Scots pine transpiration under Mediterranean Mountain conditions. *Hydrological Processes*, 2010, 24(21): 3053-3064.
- [41] 韩辉, 张学利, 党宏忠, 徐贵军, 张晓, 王斯彤, 陈帅, 张柏习. 科尔沁沙地南缘樟子松林蒸腾强度的年际变化及与降水、地下水位间的关系. 林业科学, 2020, 56(11): 31-40.
- [42] Raz-Yaseef N, Yakir D, Schiller G, Cohen S. Dynamics of evapotranspiration partitioning in a semi-arid forest as affected by temporal rainfall patterns. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 157: 77-85.
- [43] Raz-Yaseef N, Yakir D, Rotenberg E, Schiller G, Cohen S. Ecohydrology of a semi-arid forest: partitioning among water balance components and its implications for predicted precipitation changes. *Ecohydrology*, 2010, 3(2): 143-154.
- [44] 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.
- [45] 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.