

# 重庆缙云山不同林分耗水动态特征及其环境影响因素

杨易昆

(重庆三峡职业学院 重庆 404100)

**摘 要:**以重庆缙云山为试验站点,于 2018 年 1—12 月,采用 LI-6400 XT 便携式光合测定系统测定了针阔混交林、常绿阔叶林和毛竹林 3 种典型林分耗水动态特征,定量分析了不同林分蒸腾、蒸发水分利用效率与环境因子的关系。结果表明:缙云山不同林分土壤蒸发量呈“几”字形变化规律,在 7—8 月达到最大,4—6 月呈急剧增加趋势;9 月以后不同林分土壤蒸发量有所降低,相同月份土壤蒸发基本表现为针阔混交林>毛竹林>常绿阔叶林。缙云山不同林分蒸腾速率呈单峰型曲线,1—6 月属于缓慢增加趋势,在 7—8 月达到最大,8 月以后急剧降低,11—12 月基于平稳趋势,相同月份蒸腾速率基本表现为常绿阔叶林>针阔混交林>毛竹林。不同林分蒸腾速率日变化规律呈单峰型曲线,从早上 6:00 开始,不同林分叶片蒸腾速率随着一天内光合有效辐射强度的增加、气孔开放而急剧增加,在 8:00 达到最大值,随后蒸腾速率缓慢降低,相同时间蒸腾速率基本表现为常绿阔叶林>针阔混交林>毛竹林。缙云山不同林分水分利用效率与蒸腾速率变化趋势相一致,二者呈显著的线性关系( $p<0.05$ )。不同林分水分利用效率生理生态因子的相关系数高于蒸腾速率与各生理生态因子的相关系数,其中蒸腾速率和水分利用效率与气孔导度( $G_s$ )、光合有效辐射强度(PAR)均呈显著或极显著的正相关,与空气相对湿度(RH)没有显著的相关性( $p>0.05$ ), $G_s$ 和 PAR 对不同林分的蒸腾速率和水分利用效率贡献最大。回归分析表明,不同林分蒸腾速率和水分利用效率与生理生态因子间有线性关系,影响不同林分的蒸腾速率和水分利用效率的主导因素包括  $G_s$  和 PAR。

**关键词:**缙云山;林分;蒸腾作用;水分利用效率

中图分类号:S715.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0126-06

## Water Consumption Regularity and Its Environmental Influencing Factors in Different Forests of Jinyun Mountain in Chongqing City

YANG Yikun

(Chongqing Three Gorges Vocational College, Chongqing 400020, China)

**Abstract:** Taking Jinyun Mountain of Chongqing as the experimental site, we measured the dynamic characteristics of water consumption in three typical stands of mixed coniferous and broad-leaved forest, evergreen broad-leaved forest and bamboo forest by using LI-6400 XT portable photosynthetic assay system from January to December, 2018, and quantitatively analyzed the relationship between transpiration and evaporative water use efficiency and environmental factors. The results showed that soil evaporation in different stands of Jinyun Mountain presented the pattern of several changes, reaching the maximum in July-August and increasing sharply in April-June, after September, soil evaporation in different stands decreased, and soil evaporation in the same month decreased in the order: broad-leaved forest>mixed forest>needle moso bamboo forest; the transpiration rates of different stands in Jinyun Mountain presented a single-peak curve, which increased slowly from January to June, reached the maximum in July to August, and decreased sharply after August, based on the stationary trend in November to December, the transpiration rates in the same month basically decreased in the order: broad-leaved forest>mixed forest>needle moso bamboo forest; different forest transpiration rates showed unimodal type curve change rule since 6:00 am, leaf transpiration rate increased with different within a day of photosynthetic active radiation intensity, stomatal opening, and sharply peaked at 8:00, and then transpiration rate declined slowly, the same time transpiration rate decreased in the order: evergreen broad-leaved forest>mixed forest>needle moso bamboo forest; the variation trend of

收稿日期:2019-05-20

修回日期:2019-06-04

资助项目:重庆市教委科学技术研究项目“白及组培育苗技术条件优化研究”(KJ1403309)

第一作者:杨易昆(1984—),男,重庆人,硕士,讲师,研究方向园林植物。E-mail:158000745@QQ.com

water use efficiency and transpiration rate in different stands of Jinyun Mountain was consistent. Partial correlation analysis shows that different physiological and ecological factors of forest stand water use efficiency (WUE) correlation coefficient is higher than the transpiration rate and the correlation coefficient of the physiological and ecological factors, the transpiration rate and water use efficiency and stomatal conductance (Gs), intensity of photosynthetic active radiation (PAR) are significant or extremely significant positive correlation, and transpiration rate and water use efficiency have no significant correlation with air relative humidity (RH) ( $p > 0.05$ ), Gs and PAR of different forest stand have the largest contribution to the transpiration rate and water use efficiency. Regression analysis shows that there is a linear relationship between transpiration rate and WUE of different stands and physiological and ecological factors, and the dominant factors affecting transpiration rate and WUE of different stands include Gs and PAR.

**Keywords:** Jinyun Mountain; forest; transpiration; water use efficiency

随着工业化进程的不断推进,在促进经济发展的同时,也带来了一系列的生态环境问题,特别是矿石燃料的利用<sup>[1-3]</sup>,导致水污染及大气污染等问题较为严重;与此同时,随着二氧化碳等温室气体的不断增加,局地气温明显升高,原有的生态环境被改变,影响了植物的生活史,加之水资源短缺问题突出,新世纪的可持续发展迎来严重挑战<sup>[4]</sup>;水热条件在植物生长过程中起着至关重要的作用,水分及养分成为不可或缺的影响因素,对于林木而言,其各个器官离不开必要的养分支撑及水分供给,叶片的光合作用离不开光照,这是能量转换及供给的条件,在此过程中蒸腾作用导致了较为明显的耗水现象,从另一个角度来看,这也是对水分利用的途径之一,在其整个生长周期中持续,对其新陈代谢起着决定性作用<sup>[5-6]</sup>。

从不同植被来看,其对水分需求存在较大差异,这在其对环境适应性方面起着较大的影响<sup>[7-9]</sup>,综合来讲,在对植被适应性研究的过程中,不仅依赖于养分等条件,还涉及到耗水性<sup>[10]</sup>,这也是目前生物学研究的一个关注点。随着研究技术水平的不断提升,对于蒸腾作用下耗水的作用机理有了更深入的了解及分析,更为先进的检测手段运用其中,尤其是对蒸散率的分析对比,以及涡度技术等手段的运用,使得植被研究越来越深入细化<sup>[11-12]</sup>。随着气孔阻力及冠层水势等方面的研究细化,植被相关的耗水研究有利于改善其生长条件。

林木蒸腾不仅是其正常的生理过程,同时更能够调节局地气候,受到多种环境因子的影响和制约,体现了其与水分之间的关系,也体现着其与光照关系,不仅土壤含水量等状况与之密切相关,大气环境也起着重要作用。对三峡库区而言,不仅是我国重要的水资源地,同时该区域也分布着大量的森林资源,具有多种多样的植被分布,其森林生态在局地生态环境中起着举足轻重的作用,成为重要的生态系统之一,同时在涵养水源方面发挥着关键作用<sup>[13]</sup>。从多个角度

来探究该区域林木资源耗水具有重要现实意义,能够进一步了解该区域森林生态环境和促进林木资源保护<sup>[14]</sup>。然而目前的研究还缺乏对林分耗水动态特征及其环境影响因素的探讨。基于此,以重庆缙云山为试验站点,于 2018 年 1—12 月,采用 LI-6400XT 便携式光合测定系统测定针阔混交林、常绿阔叶林和毛竹林 3 种典型林分蒸腾速率及其耗水动态特征,定量分析蒸腾、蒸发水分利用效率与环境因子的关系,为我国林木资源开发及保护奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

对于本研究而言,将重庆缙云山作为所选择的试验区,其位于北碚区,属于华蓥山褶皱带,21 世纪初成功申报为国家级自然保护区,该区域面积广阔,对于该区域而言,其受光照影响而具有约 270 d 的无霜期,降雨主要集中在夏季且年均降雨约为 1 600 mm,根据该区域今年气象资料分析得知,其拥有约 14℃ 的年均温;受到所在区域影响,其亚热带季风气候较为明显,全年较为温和,平均的日照较高,具有较为充足的热量条件,对于林木生长较为有利,观测样地基本情况见表 1。

### 1.2 土壤蒸发耗水

对于土壤而言,在热量作用下,其难免会出现蒸发的现象,在此过程中难以避免地消耗了水分,从而形成了耗水途径,为了对其进行量化研究,本试验通过称重法开展测量:首先在样地进行土样采集,并置于铁桶,要求其半径及高度分别为 15,31 cm,然后进行每日加水,并做好记录,各月中旬对其进行数据采集,为了增强试验对比,特对土样分为两类,一类具有植被生长,另一类则无,各土样进行三次数据采集并做好记录。

与无植被覆盖的土样相比而言,植被覆盖的土样具有较低的蒸发量,能够更好地涵养水源,不仅对局地湿度进行调节,更利于水土保持,对于植被的生长

提供较好的水分条件,有利于林地管理,其蒸发量、裸地分别用 Se,Be 代表,为进一步细化研究,特对蒸发

量差 Er 计算如下<sup>[15]</sup>:  
$$Er=Se-Be$$

表 1 观测样地基本情况

项目	海拔/m	坡度/(°)	坡向	胸径 DBH/cm	株高/m	林龄/a	郁闭度
针阔混交林	756	15~20	SW	9.23	9.52	23	0.6389
	712	8~25	NW	8.45	9.63		0.7214
	736	9~36	SE	9.01	12.04		0.7995
常绿阔叶林	549	15~35	SE	10.23	11.58	21	0.7631
	562	23~27	SW	11.14	13.02		0.7102
	578	16~29	NW	10.78	14.47		0.6897
毛竹林	623	9~18	SW	6.25	15.03	25	0.5349
	658	13~19	N	5.89	13.02		0.5602
	641	23~31	NW	5.13	14.16		0.5894

1.3 叶片光合蒸腾特性及环境因子

对于不同林分的光合效应分析,本试验借助于 LI-6400XT 光合分析系统,同时对蒸腾特性展开分析;具体来讲,重点对比分析其光合速率、蒸腾速率,同时对比其气孔导度、空气温度及湿度,在开展测定分析前注重对设备的检测,以提升试验准确性。

1.4 叶片水平光合、蒸腾日季动态

对于叶片光合及蒸腾进程分析过程中,要选择叶片完全展开的生长季,且适宜在晴天开展观测,并做好记录,进而进行连续的观测研究。

对于不同的林木类型,分别选择 3 种不同林地,然后从中各选取三片叶片开展相应的指标测定,在此过程中做好叶片标记,需要注意的是在夹叶片的过程中注意选取同样位置,以免造成大面积的叶片夹伤而影响试验效果准确性,降低试验误差;在开展指标测定的过程中,注重使 Li 6400 叶室保持平衡,从而提升试验准确性,并降低叶片遮阴而出现较大误差;此外,在测定过程中,不对温度及湿度进行特别处理,尽量使其与外界基本一致。

本试验过程中指标的测定选择在上午 6:00 至下午 7:00,测定频率为每小时,并做好数据记录,在试验数据的提取中以平均值为取数。

1.5 数据处理

SPSS 15.0 和 Excel 2010.0 进行数据分析和统计,单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著法(LSD)检验其差异显著性。

2 结果与分析

2.1 缙云山不同林分土壤蒸发耗水

图 1 反映了缙云山不同林分土壤蒸发量,由图可知,全年中不同林分土壤蒸发量呈“几”字形变化规律,在 7—8 月达到最大,4—6 月呈急剧增加趋势;

1—4 月,缙云山不同林分土壤蒸发量基本保持一致或者不变,9 月以后不同林分土壤蒸发量有所降低,相同月份土壤蒸发基本表现为针阔混交林>毛竹林>常绿阔叶林。

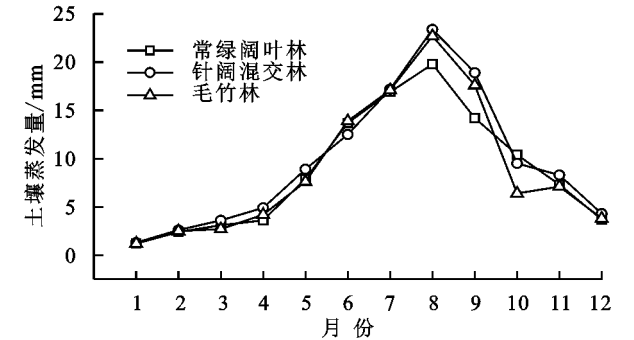


图 1 缙云山不同林分土壤蒸发耗水

2.2 缙云山不同林分蒸腾耗水日变化规律

图 2 分别给出了缙云山不同林分在 2108 年不同时期的蒸腾速率日变化情况。由图可知,全年不同林分蒸腾速率呈单峰型曲线,1—6 月属于缓慢增加趋势,在 7—8 月达到最大,8 月以后急剧降低,11—12 月基于平稳趋势;2018 年常绿阔叶林蒸腾速率变化范围为 1.29~3.56 mmol H<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup>·s),针阔混交林蒸腾速率变化范围为 1.28~3.24 mmol H<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup>·s),毛竹林蒸腾速率变化范围为 1.26~2.97 mmol H<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup>·s),相同月份蒸腾速率基本表现为常绿阔叶林>针阔混交林>毛竹林。不同林分蒸腾速率日变化规律呈单峰型曲线,从早上 6:00 开始,不同林分叶片蒸腾速率随着一天内光合有效辐射强度的增加、气孔开放而急剧增加,在 8:00 达到最大值,随后蒸腾速率缓慢降低。常绿阔叶林蒸腾速率变化范围在 0.85~3.27 mmol H<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup>·s),针阔混交林蒸腾速率变化范围在 0.34~2.58 mmol H<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup>·s),毛竹林蒸腾速率变化范围在 0.26~2.31 mmol H<sub>2</sub>O/(m<sup>2</sup>·s),相同时间蒸腾速率基本表现为常绿阔叶林>针阔混交林>毛竹林。

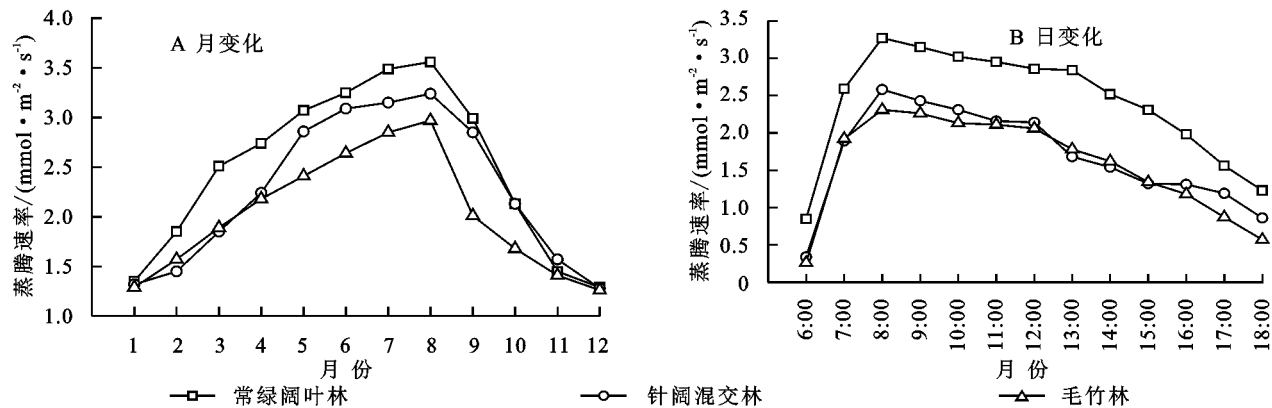


图 2 缙云山不同林分蒸腾耗水日变化规律

2.3 缙云山不同林分水分利用效率日变化规律

由图 3 可知,全年不同林分水分利用效率呈单峰型曲线,1—6 月属于缓慢增加趋势,在 7—8 月达到最大,8 月以后急剧降低,11—12 月基于平稳趋势;2018 年常绿阔叶林水分利用效率变化范围在 4.16~22.16 mmol CO<sub>2</sub>/(mol H<sub>2</sub>O),针阔混交林水分利用效率变化范围在 3.02~16.25 mmol CO<sub>2</sub>/(mol H<sub>2</sub>O),毛竹林水分利用效率变化范围在 2.78~13.24 mmol CO<sub>2</sub>/(mol H<sub>2</sub>O),相同时间水分利用效率基本表现为常绿阔叶林>针阔混交林>毛竹林。不同林分水分利用效率日变化规律呈单峰型曲线,从早上 6:00 开始,不同林分水分利用效率随着一天内光合有效辐射强度的增加、气孔开放而急剧增加,在 8:00 达到最大值,随后水分利用效率缓慢降低,

在下午则由于光合有效辐射强度降低,水蒸汽压差逐渐减小,环境因子对叶片光合机构胁迫的减弱,随着叶片净光合速率值的增加而增加。常绿阔叶林水分利用效率变化范围在 4.16~22.16 mmol CO<sub>2</sub>/(mol H<sub>2</sub>O),针阔混交林水分利用效率变化范围在 3.02~16.25 mmol CO<sub>2</sub>/(mol H<sub>2</sub>O),毛竹林水分利用效率变化范围在 2.78~13.24 mmol CO<sub>2</sub>/(mol H<sub>2</sub>O),相同时间水分利用效率基本表现为常绿阔叶林>针阔混交林>毛竹林。由图 4 可知,不同林分水分利用效率与蒸腾速率呈显著的线性相关,其中常绿阔叶林水分利用效率与蒸腾速率相关系数  $R^2=0.856, p<0.01$ ;针阔混交林水分利用效率与蒸腾速率相关系数  $R^2=0.863, p<0.01$ ;毛竹林水分利用效率与蒸腾速率相关系数  $R^2=0.875, p<0.01$ 。

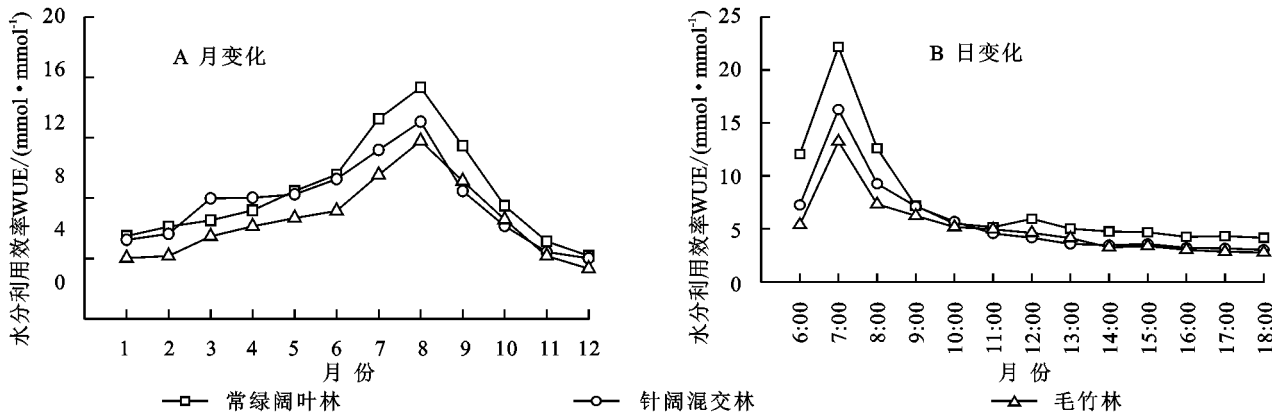


图 3 缙云山不同林分水分利用效率日变化规律

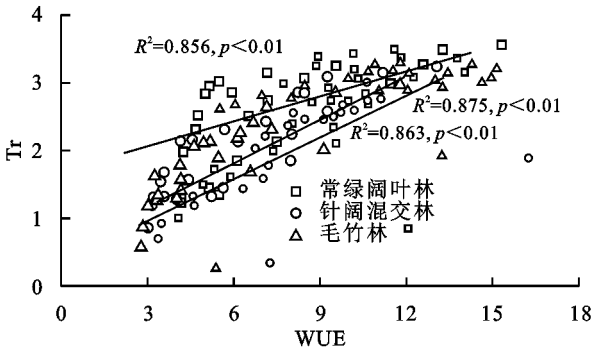


图 4 缙云山不同林分蒸腾速率与水分利用效率的相关关系

2.4 缙云山不同林分蒸腾耗水的影响因素分析

树木叶片蒸腾速率表示为  $T_r$ ,水分利用效率表示为  $WUE$ ,其他生理生态因子分别为:气孔导度 ( $G_s$ )、光合有效辐射强度 ( $PAR$ )、空气温度 ( $T_{air}$ )、空气相对湿度 ( $RH$ ) 以及水蒸汽压差 ( $VPD$ )。通过偏相关分析可知(表 2),缙云山不同林分蒸腾速率和水分利用效率与各生理生态因子间的相关性明显不同,不同林分水分利用效率生理生态因子的相关系数高于蒸腾速率与各生理生态因子的相关系数。



其中蒸腾速率和水分利用效率与  $G_s$ ,  $PAR$ ,  $T_{air}$ ,  $RH$  呈正相关,与  $VPD$  呈负相关。蒸腾速率和水分利用效率与  $G_s$  和  $PAR$  均呈显著或极显著的正相关,与  $RH$  没有显著的相关性( $p>0.05$ )。上述结果表明,影响蒸腾速率和水分利用效率的生理生态因子呈

不同的组合,反映了树木叶片蒸腾耗水与生理生态因子间复杂的相互关系;同时,在各生理生态因子的作用下,水分利用效率比蒸腾速率更为敏感, $G_s$  和  $PAR$  对不同林分的蒸腾速率和水分利用效率贡献最大。

表 2 蒸腾速率和水分利用效率与其他因子相关性

林分	参数	$G_s$	$PAR$	$T_{air}$	$RH$	$VPD$
常绿阔叶林	$Tr$	0.856**	0.802**	0.513*	0.019	-0.623*
	$WUE$	0.903**	0.869**	0.629*	0.258	-0.756**
针阔混交林	$Tr$	0.765**	0.743**	0.498	0.154	-0.514*
	$WUE$	0.779**	0.625*	0.536*	0.219	-0.482
毛竹林	$Tr$	0.623*	0.615*	0.359	0.058	-0.503*
	$WUE$	0.689*	0.519*	0.214	0.174	-0.369

利用多元线性逐步回归分析方法,逐步剔除对叶片蒸腾速率影响效应不显著的生理生态因子;分别建立了不同林分蒸腾速率和水分利用效率对各生理生态因子的最优多元线性回归模型,进入模型的因子即为各时期影响树木叶片蒸腾速率的主要生理生态因子。在逐步回归分析过程中,使用各变量的  $F$  显著性取值(sig.)作为标准,以 0.001 作为因子进入模型的评判临界值,以 0.50 作为从模型中剔除因子的评判临界值。统计见表 3,不同林分蒸腾速率与影响因子之间最优多元线性回归方程调整后的决定系数介于 0.675~0.702,不同林分水分利用效率与影响因子之间最优多元线性回归方程调整后的决定系数介于

0.713~0.803,说明不同林分蒸腾速率和水分利用效率与影响因子之间最优多元线性回归模型拟合效果很好。对回归方程的显著性检验结果均为极显著水平,表明不同林分蒸腾速率和水分利用效率与进入方程的各生理生态因子间有线性关系。由表 3 可知,常绿阔叶林蒸腾速率受到  $G_s$  和  $PAR$  的影响,水分利用效率受到  $PAR$  和  $T_{air}$  的影响;针阔混交林蒸腾速率受到  $G_s$  和  $VPD$  的影响,水分利用效率受到  $PAR$  和  $G_s$  的影响;毛竹林蒸腾速率受到  $PAR$  的影响,水分利用效率受到  $G_s$  和  $T_{air}$  的影响。综上所述,影响不同林分的蒸腾速率和水分利用效率的主导因素包括  $G_s$  和  $PAR$ 。

表 3 蒸腾速率与水分利用效率与各因子的关系模型

林分	参数	回归方程	$R^2$	Adjust $R^2$	$p$	$F$	$n$
常绿阔叶林	$Tr$	$Tr=18.26G_s+0.417PAR-1.265$	0.752	0.702	$<0.001$	154.89	27
	$WUE$	$WUE=0.005PAR-0.158T_{air}+1.125$	0.803	0.754	$<0.001$	136.25	27
针阔混交林	$Tr$	$Tr=15.16G_s+1.269VPD+0.047$	0.716	0.689	$<0.001$	149.84	27
	$WUE$	$WUE=0.017PAR-0.279G_s+1.159$	0.755	0.701	$<0.001$	162.02	27
毛竹林	$Tr$	$Tr=0.003PAR+0.875$	0.685	0.675	$<0.001$	154.47	27
	$WUE$	$WUE=16.13G_s-0.147T_{air}+0.144$	0.713	0.697	$<0.001$	160.32	27

3 讨论

对于森林耗水而言,主要有两个途径:一是土壤在热力蒸发过程中不可避免地产生了水分消耗,二是植被对水的消耗。对于试验样地林木而言,虽然其林木存在较大差异,但是其土壤蒸发量呈现出较为明显的先升后降的走势:在前 4 个月的生长周期,其蒸发量变化较小,差异并不明显,而在 4—6 月则出现剧增的蒸发量,其峰值出现在 7,8 月份,而后出现较为明显的下降,通过对比得知,林木对于蒸发产生了较为明显的影响。

温度及湿度对林木蒸腾产生直接作用,除此之外,辐射及含水量等因素也会产生较大的影响,不同

地区具有较大差异的外界环境,因此产生的影响并不完全一致<sup>[16-17]</sup>。在不同的环境因子影响下,林木的蒸腾效果也出现了较大差异,其蒸腾效果均与辐射及太阳温度息息相关;而冠层、胸径以及株高也会产生较大制约作用<sup>[18-19]</sup>;此外,土壤含水量及温度、辐射强度对林木蒸腾的影响较为明显,在环境因素不断增强的情况下,林木的蒸腾强度也会变大<sup>[20]</sup>。受不同环境因子的制约,不同林分具有较大差异的蒸腾速率<sup>[21-22]</sup>,且其日、季节变化特点较为明显,就其蒸腾速率而言,其单峰曲线较为明显,前 6 个月的增加速度较慢,而 7 月、8 月快速上升,且出现峰值,而后开始逐渐下降,直至进入平稳状态;而从同一时间来看,其蒸腾速率最强的是常绿阔叶林,其次是针阔混交林,而毛竹林最低;从其日

变化而言,其依然呈现单峰变化趋势,从早上 6:00 开始其蒸腾速率不断上升,在 8 点前后达到高峰,而后下降,其林分的变化同全年变化一致。

对于林木而言,其能够通过根系进行大量的水分吸收,同时在叶片气孔的支持下发生水分的蒸腾,从而散失水分,因此来说气孔能够显著制约林木蒸腾,由于环境因子存在较大不同,因此其对林木蒸腾的影响也存在较大差异,本研究以缙云山不同林分为探究对象,并在不同时期开展不同的蒸腾观测,并记录其环境因子变化,通过偏相关分析可知,无论是蒸腾速率,还是水分利用效率,其均与  $G_s$ ,  $PAR$ ,  $T_{air}$ ,  $RH$  的正向变化关系明显,而其与  $VPD$  之间的负向变化较为明显,且二者与  $G_s$  和  $PAR$  的相关性达到显著水平,而与  $RH$  之间的相关性并未达到显著水平;不同的环境因子组合,对蒸腾作用的影响不尽相同,对于水分利用亦是如此,这说明环境因子的影响具有明显复杂性;与蒸腾速率相比而言,水分利用对环境的反映更强;通过回归分析得知,多元线性回归具有显著的拟合程度,这表明环境因子的影响具有线性关系,综合来讲, $G_s$  和  $PAR$  具有更强的影响效果。

## 4 结 论

(1) 重庆缙云山不同林分(针阔混交林、毛竹林、常绿阔叶林)土壤蒸发量呈“几”字形变化规律,在 7—8 月达到最大,4—6 月呈急剧增加趋势;9 月以后不同林分土壤蒸发量有所降低,相同月份土壤蒸发基本表现为针阔混交林>毛竹林>常绿阔叶林。不同林分蒸腾速率呈单峰型曲线,7—8 月达到最大,相同月份蒸腾速率基本表现为常绿阔叶林>针阔混交林>毛竹林。

(2) 不同林分蒸腾速率日变化规律呈单峰型曲线,从早上 6:00 开始,不同林分叶片蒸腾速率随着一天内光合有效辐射强度的增加、气孔开放而急剧增加,在 8:00 达到最大值,随后蒸腾速率缓慢降低,相同时间蒸腾速率基本表现为常绿阔叶林>针阔混交林>毛竹林。缙云山不同林分水分利用效率与蒸腾速率变化趋势相一致,二者呈显著的线性关系。

(3) 不同林分水分利用效率生理生态因子的相关系数高于蒸腾速率与各生理生态因子的相关系数,其中蒸腾速率和水分利用效率与气孔导度( $G_s$ )、光合有效辐射强度( $PAR$ )均呈显著或极显著的正相关,与空气相对湿度( $RH$ )没有显著的相关性( $p>0.05$ ), $G_s$  和  $PAR$  对不同林分的蒸腾速率和水分利用效率贡献最大。回归分析表明,不同林分蒸腾速率和水分利用效率与生理生态因子间有线性关系,影响不同林分的蒸腾速率和水分利用效率的主导因素包括  $G_s$  和  $PAR$ 。

## 参考文献:

- [1] Nolan C, Overpeck J T, Allen J R M, et al. Past and future global transformation of terrestrial ecosystems under climate change[J]. *Science*, 2018,361(6405):920-923.
- [2] Marx A, Kumar R, Thober S, et al. Climate change alters low flows in Europe under global warming of 1.5, 2, and 3 C[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018,22(2):1017-1032.
- [3] Leifeld J, Menichetti L. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies[J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): 1071, doi:10.1038/s41467-018-03406-6.
- [4] Tito R, Vasconcelos H L, Feeley K J. Global climate change increases risk of crop yield losses and food insecurity in the tropical Andes[J]. *Global Change Biology*, 2018,24(2):592-602.
- [5] Mills L S, Bragina E V, Kumar A V, et al. Winter color polymorphisms identify global hot spots for evolutionary rescue from climate change[J]. *Science*, 2018, 359(6379):1033-1036.
- [6] Hasegawa T, Fujimori S, Havlik P, et al. Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8 (8):699-703.
- [7] Poblador S, Thomas Z, Rousseau-Gueutin P, et al. Riparian forest transpiration under the current and projected Mediterranean climate: Effects on soil water and nitrate uptake[J]. *Ecohydrology*, 2019,12(1):1-16.
- [8] da Costa A C L, Rowland L, Oliveira R S, et al. Stand dynamics modulate water cycling and mortality risk in droughted tropical forest[J]. *Global Change Biology*, 2018,24(1):249-258.
- [9] Jiao L, Lu N, Fang W, et al. Determining the independent impact of soil water on forest transpiration: A case study of a black locust plantation in the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019,572:671-681.
- [10] Muñoz-Villers L E, Holwerda F, Alvarado-Barrientos M S, et al. Reduced dry season transpiration is coupled with shallow soil water use in tropical montane forest trees[J]. *Oecologia*, 2018,188(1):303-317.
- [11] Kauwe M G D, Medlyn B E, Pitman A J, et al. Examining the evidence for decoupling between photosynthesis and transpiration during heat extremes[J]. *Biogeosciences*, 2019,16(4):903-916.
- [12] Urban J, Rubtsov A V, Urban A V, et al. Canopy transpiration of a *Larix sibirica* and *Pinus sylvestris* forest in Central Siberia[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019,271:64-72.

### 3 结论

(1) 纳米碳有助于土壤水分入渗,随着纳米碳施加比例的增加(0.1%,0.5%,0.7%及 1.0%),有效增加了土壤对降雨的容纳能力,且纳米碳施加量越大,土壤入渗量增加越明显。其中,裸地增幅最大,为 17%,植被覆盖条件下,苜蓿的增幅最大,为 12%。

(2) 在 Hydrus 模拟坡面剖面 6 个测点共计 30 cm 深的土壤含水率的基础上,通过拟合优度  $R^2$ ,平均绝对值误差 MAE 和均方根误差 RMSE 等对反推结果的准确性进行评价,验证了 Hydrus 在坡面降雨入渗的适用性。

(3) 利用 Hydrus 模型模拟黄土坡面水流入渗过程,反推土壤水力参数,得知随纳米碳含量施加的增加,土壤进气吸力  $\alpha$ 、形状系数  $n$ 、饱和导水率  $K_s$  等均显著增加,进一步表明纳米碳对坡面土壤有增渗保水的作用。

#### 参考文献:

- [1] 李健,陈海迟.黄土丘陵区坡面水土流失规律研究[J].干旱区资源与环境,1996,10(1):71-76.
- [2] 田卫堂,胡维银,李军,等.我国水土流失现状和防治对策分析[J].水土保持研究,2008,15(4):204-209.
- [3] 吴江琪,马维伟,李广,等.黄土高原 4 种植被类型对土

壤物理特征及渗透性的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):133-138.

- [4] Yi C Q, Fan J. Application of HYDRUS-1D model to provide antecedent soil water contents for analysis of runoff and soil erosion from a slope on the Loess Plateau [J]. Catena, 2016,139:1-8.
- [5] 刘小璐,鲁克新,李鹏,等.不同降雨条件下坡面土壤水分入渗过程研究与模拟[J].干旱区资源与环境,2018,32(11):114-118.
- [6] 董起广.基于 HYDRUS 的黄土高原丘陵沟壑区土壤水分入渗模拟[J].节水灌溉,2018(8):90-92,98.
- [7] 陈晓鹏.纳米碳对黄土区水土流失及养分运移特征的影响研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- [8] Karandish F, Šimůnek J. An application of the water footprint assessment to optimize production of crops irrigated with saline water: A scenario assessment with HYDRUS[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208:67-82.
- [9] 荐圣淇,赵传燕,彭焕华,等.利用染色示踪与图像处理技术研究根系对土壤大孔隙的影响[J].兰州大学学报:自然科学版,2011,47(5):62-66.
- [10] 吕金榜,周蓓蓓,王全九.地表下纳米碳混合层对土壤入渗过程的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):126-130.
- [11] 陈风琴,石辉.缙云山常绿阔叶林土壤大孔隙与入渗性能关系初探[J].西南师范大学学报:自然科学版,2005,30(2):350-353.

(上接第 131 页)

- [13] 裴承敏,王云琦,张守红,等.重庆缙云山毛竹林次降雨再分配特征及穿透雨的空间异质性[J].水土保持学报,2018,6(5):202-207.
- [14] 周烨,何太蓉,武雪倩.重庆缙云山国家级自然保护区典型林分凋落物持水性研究[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2018,3(2):11-15.
- [15] Gavinet J, Ourcival J M, Limousin J M. Rainfall exclusion and thinning can alter the relationships between forest functioning and drought[J]. New Phytologist, 2019,223:1267-1279.
- [16] Ghimire C P, Bruijnzeel L A, Lubczynski M W, et al. Transpiration and stomatal conductance in a young secondary tropical montane forest: contrasts between native trees and invasive understorey shrubs[J]. Tree Physiology, 2018,38(7):1053-1070.
- [17] Staal A, Tuinenburg O A, Bosmans J H C, et al. Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon [J]. Nature Climate Change, 2018,8(6):539-543.
- [18] Hu Y, Zhao P, Shen W, et al. Responses of tree transpiration and growth to seasonal rainfall redistribution

in a subtropical evergreen broad-leaved forest[J]. Ecosystems, 2018,21(4):811-826.

- [19] Zhang Z, Zhao P, Zhao X, et al. The tree height-related spatial variances of tree sap flux density and its scale-up to stand transpiration in a subtropical evergreen broadleaf forest[J]. Ecohydrology, 2018,11(7):1979-1983.
- [20] Baumgarten M, Hesse B D, Augusta H, et al. Responses of species-specific sap flux, transpiration and water use efficiency of pine, spruce and birch trees to temporarily moderate dry periods in mixed forests at a dry and wet forest site in the hemi-boreal zone[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2019,75(1):13-29.
- [21] Zhang X, Wang Y, Wang Y, et al. Effects of social position and competition on tree transpiration of a natural mixed forest in Chongqing, China [J]. Trees, 2019,5(2):1-14.
- [22] Collins A R, Burton A J, Cavaleri M A. Effects of experimental soil warming and water addition on the transpiration of mature sugar maple[J]. Ecosystems, 2018,21(1):98-111.