

松花江干流六种水源涵养林林冠层降水分配

胡天然^{1,2}, 王树力¹ (1. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 黑龙江省水土保持科学研究院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要 以森林水文学为理论基础, 从森林涵养水源的角度运用生态定位研究方法, 选择松花江干流方正县高楞林业局为观测地点, 以当地具有代表性的红松人工林、水曲柳山杨林、水曲柳落叶松林、糠椴次生林、蒙古栎次生林和胡桃楸混交林为研究对象, 并以就近的空旷地降雨作为对照, 对不同森林类型的林冠层截水性能、林内穿透雨量、树干径流等水文特性进行了定量研究。研究结果表明: 各森林类型的林内雨透流率都小于 50.0%, 说明 50.0% 以上的降雨被林冠层截留。其中胡桃楸混交林和水曲柳山杨林的透流率较高, 分别达到 44.2% 和 40.0%; 其次是水曲柳落叶松林和糠椴次生林, 透流率分别为 37.2% 和 34.1%; 红松人工林和蒙古栎次生林的透流率较低, 分别为 27.9% 和 24.7%。林内降雨量(P') 和大气降雨量(P) 呈现显著的直线正相关。树干径流量(G) 和大气降雨量(P) 之间也呈直线正相关。

关键词 松花江; 森林类型; 水源涵养林; 水文特征

中图分类号 S727.21 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)27-154-04

Songhua River Six Water Conservation Forest Canopy Rainfall Distribution

HU Tian-ran^{1,2}, WANG Shu-li¹ (1. Forestry School of Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040; 2. Heilongjiang Institute of Water and Soil Conservation Science, Harbin, Heilongjiang 150040)

Abstract Based on the theory of forestry hydrology, with the point of view of forest water conservation, the located research method was adopted. The observation points were established in Gaoleng Forestry Bureau of Fangzheng County which was the trunk stream of Songhua River. The function of water resource conservation which included the crown canopy precipitation interception, water-holding capacity of litter layer, physical chemistry properties of soil layer and water holding capacity were studied quantitatively in different forest types. As compared with clear terra, the local typical forests of *Pinus koraiensis* plantation, *Populus davidiana* Dode and *Fraxinus mandshurica*, *Larix gmelini* and *Fraxinus mandshurica*, *Tilia mandshurica* rupr secondary forest, *Quercus mongolica* secondary forest and *Juglans mandshurica* mixed forest were conducted in the permanent sample plots. The results indicated that the throughfall of all the forest types were less than 50.00% and more than half rainfall were intercepted by the canopy layer. The throughfall of *P. davidiana* Dode and *F. mandshurica* and *J. mandshurica* mixed forest were the maximal and reached 44.2% and 40.0%, in the next place, the throughfall of *L. gmelini* and *F. mandshurica* and *T. mandshurica* rupr secondary forest was 37.2% and 34.1%, the throughfall of *P. koraiensis* plantation and *Q. mongolica* secondary forest was 27.9% and 24.7%. The relations between rainfall(P') inside forest and the ether rainfall(P) is the marked plus correlative. Trunk runoff (G) has linear positive correlation with atmospheric precipitation (P).

Key words Songhua River; Forest types; Water conservation forest; Hydrographic features

森林是陆地生态系统水文循环的重要参与者, 通过对大气降水的再分配过程(林冠截留、穿透降雨、树干径流)从而影响森林内水量分配的格局, 进而对整个森林生态系统、流域甚至陆地整体的水分循环产生影响^[1]。对林冠层降水分配的影响, 国内外学者已经有大量的研究。研究内容涉及不同的地区、不同森林类型林冠层截留能力^[2]、林内的穿透水量^[3]、树干径流量^[4]及其相关模型^[5]和各种影响因素^[6]等。研究结果证明, 大气降雨通过林冠层以后, 林冠层的截留率为 10%~40%, 林内降水的穿透率为 60%~90%, 树干的径流率为 0.5%~14%; 林冠层对降雨的再分配, 除了受到不同树种、不同林木生长特征等个体因素和林分类型、林分组成、林分密度等群体因素影响外, 同时还受到降雨量、降雨历时、次降雨以及与上一次降雨的时间间隔、降雨时段的气温、相对空气湿度及风速、风向等各种外部因素的影响; 林内穿透雨量(率)、树干径流量(率)以及林冠层截流量(率)与大气降雨量、降雨强度之间的关系基本上呈现正相关模式, 但量与量之间的关系多呈现为线性模型, 而率与量或者率与强度之间的关系多表现为非线性模型。

松花江全长 1 045 km, 是沿途工农业生产和居民生活的重要水源。自 1998 年发生特大洪水以及 2005 年发生特大水污染事件以来, 气候的不断变化以及人为活动的持续干扰已经使松花江干流的水量和水质发生变化。针对该地区的某些森林类型, 对降水再分配的不同影响因素已有一些相关研究^[7], 但是系统比较这一地区多个森林类型降水分配过程的研究较少。该文选择松花江干流具有代表性的水曲柳山杨林、糠椴次生林、蒙古栎次生林、胡桃楸混交林等 6 种珍贵树种的阔叶林为研究对象, 通过对所选林分林冠层水文功能特征定位观测, 定量探讨林冠对降水的再分配作用, 以期对松花江干流生态环境的保护及沿岸水源涵养林结构的优化和生态功能的恢复提供理论依据。

1 研究地概况

研究地点位于黑龙江省方正林业局沙河子经营所, 地理坐标为 129°21' E, 45°60' N。地处张广才岭北麓, 松花江干流东岸, 最高海拔为 1 357 m, 最低海拔 100 m, 平均海拔在 450 m 左右, 平均坡度为 7°。该地属中温带大陆性湿润气候, 年平均气温 2.2 °C, 年 ≥ 10 °C 积温 2 300~2 500 °C, 无霜期 115~120 d, 年平均降水量 560~700 mm。森林类型主要是针阔混交林和阔叶混交林。主要乔木树种为水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphyl-*

基金项目 黑龙江省普通高校重点实验室项目(KJKF-12-10)。

作者简介 胡天然(1979-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 工程师, 博士在读, 从事水土保持技术及 3S 技术在土壤侵蚀方面的应用等研究。

收稿日期 2015-08-05

la)、春榆(*Ulmus japonica*)、红松(*Pinus koraiensis*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)和红皮云杉(*Picea koraiensis*)等。土壤类型主要为暗棕壤、草甸土、棕色针叶林土、沼泽土和白浆土等。

2 研究方法

2.1 样地设置

记录样地 2006 年 5~9 月的降雨,在 6 种

类型林分内各设置面积为 25 m × 25 m 的样地 1 块并进行林内降雨量、树干径流量和树冠截留量的测定,样地概况见表 1。

2.2 大气降雨量的观测

在林外空旷地中设置 HOBO 气象站,观测降水量、降雨等级及次数等,所得观测数据被自动记

表 1 松花江干流 6 种类型林分样地概况

林分类型	坡向	坡度 (°)	林龄 年	平均胸径 cm	平均树高 m	郁闭度 %	密度 株/hm ²	树种比例
水曲柳山杨林	S	5	16	12.3	9.8	85	2 160	5 山杨 3 水曲柳 2 白桦
糠椴次生林	E	15	15	10.8	10.2	90	3 300	9 糠椴 1 春榆
蒙古栎次生林	E	15	37	12.2	18.6	92	1 060	9 蒙古栎 1 春榆
胡桃楸混交林	S	5	17	11.8	11.9	80	1 680	5 胡桃楸 1 水曲柳 1 蒙古栎 1 落叶松 1 白桦 1 春榆
红松人工林	S	10	35	14.5	10.4	90	1 440	6 红松 2 春榆 1 水曲柳 1 白桦
水曲柳落叶松林	S	5	17	12.5	11.4	90	210	5 落叶松 3 水曲柳 1 春榆 1 白桦

录在气象站的存储设备中,计算机读取数据。同时设置普通雨量筒和 200 cm × 20 cm × 15 cm 的集水槽观测大气降雨量。

2.3 林内降雨量的观测

在每一类型森林内都随机放置 3 个 200 cm × 20 cm × 15 cm 的集水槽,水槽距离地面高度为 50 cm,放置时水槽的一端稍高,出水口端稍低,并接一段塑料管导入塑料桶内,每次降雨后及时测量各水槽内的雨量。

2.4 树干径流量的观测

在每类型森林内按径阶大小分别选取 3 株标准木,在标准木树干上距地面 50 cm 的地方,将 3 cm 口径的聚乙烯管剪开,剪去顶端管周的 1/4 后环绕树干 2 周,用大头钉固定好后,再用黄油密封聚乙烯管和树干间的空隙作导水槽,尾端留作导水圆管,下端连接塑料袋(容量 50 kg)收集降雨。每次降雨后进行测定,获得标准木的单株树干径流量。通过加权平均法可以推算出相应林分的单位面积径流量,计算公式如下:

$$G = \frac{1}{M} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{100C_i}{K_i} \times M_i \right)$$

式中: G 为树干径流量(mm); M 为单位面积上的树木株数; C_i 为每个径级树干径流量; K_i 为每个径级的树冠平均投影面积(cm²); M_i 为每一径级树木株数; n 为总径级数。

2.5 林冠截留量的计算

大气降水(P)落到林冠层后所进行的第 1 次再分配可用下述公式表示:

$$P = P' + G + I + L + e$$

式中: P 为大气降雨量(mm); P' 为林内降雨量(mm); G 为树

干径流量(mm); I 为林冠截留量(mm); L 为枝叶滴流量(mm); e 为同期枝叶表面水汽蒸发量(mm)。

在实际观测中, L 、 e 的数值都很小,可近似认为大气降雨量等于林内降雨量、树冠截留量和树干径流量三者之和。因此, $I = P - P' - G$,林冠截留率 $IR = (I/P) \times 100\%$

3 结果与分析

3.1 大气降雨特征

研究区 2006 年共降雨 50 次,降雨量为 471.87 mm。降雨以小雨为主,雨强普遍较小。单次降雨量的最小值为 1.20 mm,最大值为 51.20 mm,平均次降雨量为 9.44 mm。次降雨小于 10.00 mm 的雨量级所占频率最高,占总降雨次数的 64.0%。雨强小于 2.50 mm/h 的小雨最多,占总降雨次数的 64.0%,雨强达到 2.50~7.90 mm/h 的中雨次数占观测降雨总次数的 28.0%,雨强大于或等于 8.00 mm/h 的大雨和暴雨占总降雨次数的 8.0%。从降雨的总体进程来看,由于 5 月份尚未进入雨季,所以仅有少量的降雨,同时雨量均较小,都不超过 10.00 mm。进入 6 月份以后,小雨和中雨较为集中,仅有 1 次大雨的降水过程。大气降水主要集中在植物生长、新陈代谢活动最旺盛的 6、7、8 这 3 个月份,大雨和暴雨全部出现在这 3 个月份内,特别是 8 月份的大雨和暴雨次数最多,这段时期内的降水总量占整个雨季的 91.9%。进入 9 月下旬以后,随着雨季的结束,气温也逐渐转凉,大气降雨的次数及降雨量锐减,降雨均以小雨为主(表 2)。

表 2 观测期间大气降雨量及雨强级分布

月份	降雨量 mm	各雨量(mm)级次数			各雨强(mm/h)级次数				降雨 次数	
		<10.00	10.00~24.90	25.00~49.90	≥50.00	<2.50	2.50~7.90	8.00~15.90		≥16.00
5	14.20	4	0	0	0	4	0	0	0	4
6	142.62	10	6	1	0	10	6	1	0	17
7	134.02	8	6	0	0	8	6	0	0	14
8	157.03	6	1	2	1	6	1	2	1	10
9	24.00	4	1	0	0	4	1	0	0	5
总计	471.87	32	14	3	1	32	14	3	1	50

3.2 林内降雨量及其与大气降雨量的关系

观测期间 6 种森林类型的林内雨透流率都小于 50.0%,说明 50.0% 以上的降雨被林冠层截留。其中胡桃楸混交林和水曲柳山杨林的

透流率较高,分别是 44.2% 和 40.0%,其次是水曲柳落叶松林和糠椴次生林,透流率分别为 37.2% 和 34.1%,红松人工林和蒙古栎次生林的透流率较低,分别为 27.9% 和 24.7%

(表3)。

红松人工林和蒙古栎次生林相对较低的大气降雨透流率与二者较高的郁闭度有关,2种类型林分的郁闭度均达到90%(表4),都有较为茂密的树冠结构,树冠之间交错纵横,枝叶密布,形成了有效的林冠层截留表面积,对大气降水的截持作用较为显著;水曲柳落叶松林的郁闭度虽然也达到了90%,树冠层结构也较为发达,但由于水曲柳树种本身的分枝情况没有落叶松的生长致密,虽然从树冠投影面积上看,其树冠是能够相互衔接的,但是林冠层的空间组成相对较稀

疏,分枝数量和叶片的数量也较少,因此使得整个林分内部的林冠层截留能力有所降低;糠椴次生林的郁闭度比前3个林分都低,这就说明了糠椴森林类型比前3种林分林冠层之间的孔隙要多,使得更多的降雨在没有林冠层拦阻的情况下直接落到林地内;水曲柳山杨林和胡桃楸混交林这2种林分的郁闭度相对较低,组成这2种类型林分的树种林冠层结构较稀疏,这就导致了2种林分的透流率相对较高,产生更多的降雨穿过林冠层进而形成林内降雨。

对比众多学者对林冠层透流状况研究发现,林内降雨量

表3 大气降雨雨量与穿透雨量关系

林分类型	林外雨量 $P//mm$	林内雨量 $P'//mm$	透流率//%	数学拟合公式
红松人工林	348.05	97.15	27.9	$P' = 2.2695P - 4.4683, R^2 = 0.8289$
水曲柳山杨林	466.67	186.79	40.0	$P' = 1.1275P - 2.7050, R^2 = 0.8009$
水曲柳落叶松林	434.06	161.56	37.2	$P' = 1.4727P - 5.4454, R^2 = 0.7733$
糠椴次生林	466.67	159.05	34.1	$P' = 1.6245P - 3.1134, R^2 = 0.8452$
蒙古栎次生林	466.67	115.25	24.7	$P' = 1.5036P - 3.2298, R^2 = 0.8545$
胡桃楸混交林	383.05	169.29	44.2	$P' = 1.6276P - 2.8569, R^2 = 0.8768$

(P')和林外雨量(P)二者呈现显著的直线正相关^[8-9]。该研究通过对观测得到的数据进行回归模拟,也得出了相同的规律。即随着降雨量的增大,林冠层的穿透雨量也随之呈现递增的趋势。红松人工林林内降雨量(P')随林外雨量(P)的增加而增加较快,水曲柳山杨林增加最缓慢。

同时,对透流率与林外雨量进行回归模拟,结果表明同样可以用直线方程来描述透流率(Y)与林外雨量(P)的相关性,不同类型林分二者之间的直线方程为:

$$\text{红松人工林 } Y = 3.8891P + 1.7255, R^2 = 0.7987;$$

$$\text{水曲柳山杨林 } Y = 5.0327P - 2.9844, R^2 = 0.7767;$$

$$\text{水曲柳落叶松林 } Y = 2.5761P + 4.5292, R^2 = 0.7747;$$

$$\text{糠椴次生林 } Y = 3.3792P + 11.2750, R^2 = 0.8749;$$

$$\text{蒙古栎次生林 } Y = 2.3412P + 4.5657, R^2 = 0.8218;$$

$$\text{胡桃楸混交林 } Y = 3.2431P + 0.4544, R^2 = 0.8786$$

3.3 树干径流量及其与大气降雨量的关系 树干径流又称作树干茎流,是指在大气降水过程中顺着树干流到林地内的林内雨量。树干径流除了受到树木冠层特征的影响外,还与树干粗细、树木表面的光滑度和林木枝叶的主侧枝夹角大小等有关。国内外学者通常采用直线方程或者抛物线方程来描述树干径流量(G)与大气降雨量(P)的关系^[10],通过该研究观测的数据发现,用直线方程拟合效果较好。

$$\text{红松人工林 } G = 0.1431P - 0.0451, R^2 = 0.8536;$$

$$\text{水曲柳山杨林 } G = 0.1233P - 0.1539, R^2 = 0.9201;$$

$$\text{水曲柳落叶松林 } G = 0.0721P - 0.0584, R^2 = 0.8818;$$

$$\text{糠椴次生林 } G = 0.3334P - 0.3612, R^2 = 0.8866;$$

$$\text{蒙古栎次生林 } G = 0.0360P - 0.0487, R^2 = 0.8637;$$

$$\text{胡桃楸混交林 } G = 0.0079P - 0.0020, R^2 = 0.8757$$

通过分析数据发现,6种类型森林的树干径流率都是随着降雨量的增加而增大,变化范围为0.74%~16.61%(表4),其中胡桃楸混交林的树干径流率较低,而糠椴次生林较

高。冠幅相对小的林分其相应的树干径流率相对高,而冠幅相对大的林分,树干径流率偏低。6种类型森林的冠幅从大到小顺序依次为:胡桃楸混交林、蒙古栎次生林、水曲柳落叶松林、红松人工林、水曲柳山杨林、糠椴次生林。6种类型森林的树干径流率从大到小顺序依次为:糠椴次生林、水曲柳山杨林、水曲柳落叶松林、红松人工林、蒙古栎次生林、胡桃楸混交林(表4),可以很好地反映出二者之间的关系,即在降雨大小相同的条件下,树干径流率受到树木冠幅的影响,呈负相关。

表4 各类型林分郁闭度、树干径流率

林分类型	冠幅	郁闭度	平均冠层厚度	树干径流率
	m^2	%	m	%
红松人工林	0.62	90	6.1	3.51
水曲柳山杨林	0.46	80	9.6	9.99
水曲柳落叶松林	0.81	90	8.3	7.13
糠椴次生林	0.39	80	3.5	16.61
蒙古栎次生林	1.57	90	8.7	2.47
胡桃楸混交林	6.58	70	4.5	0.74

3.4 林冠截留量及其与大气降雨量的关系 林冠截留量是包括林冠层的蓄水量和降雨过程中林冠层的截留水分蒸发量。跟林冠层蓄水量相比,林冠层截留水分的蒸发一般较小,所以通常而言林冠层的蓄水量就表示为林冠截留量。林冠截留量和大气降雨量呈现显著的相关性,随着降雨量的增加,林冠层的截留量也随之上升并且逐渐趋于稳定,这主要是由于林冠层截留量存在限制,在林冠层的截留量达到饱和以后,林冠层截留量的增加就只是由于大气降雨过程中林冠层所能截持雨量的持续蒸发导致的^[11],林冠层的截留率与降雨的雨强相关程度并不紧密。国内外的众多研究都是使用指数函数来描述林冠层的截留量和林外大气降雨量的函数关系,通常都能得到较好的拟合效果^[12-15]。该研究中的大气降雨量(P)和6种类型森林的林冠层截留量(I)之间的指数函数关系为:

红松人工林 $I = 1.031 3e^{(0.164 2P)}$, $R^2 = 0.851 8$;
 水曲柳山杨林 $I = 0.489 3e^{(0.198 6P)}$, $R^2 = 0.790 9$;
 水曲柳落叶松林 $I = 0.868 2e^{(0.163 8P)}$, $R^2 = 0.717 6$;

糠椴次生林 $I = 0.749 4e^{(0.173 5P)}$, $R^2 = 0.785 0$;
 蒙古栎次生林 $I = 0.834 2e^{(0.177 7P)}$, $R^2 = 0.908 3$;
 胡桃楸混交林 $I = 0.614 8e^{(0.186 6P)}$, $R^2 = 0.771 3$

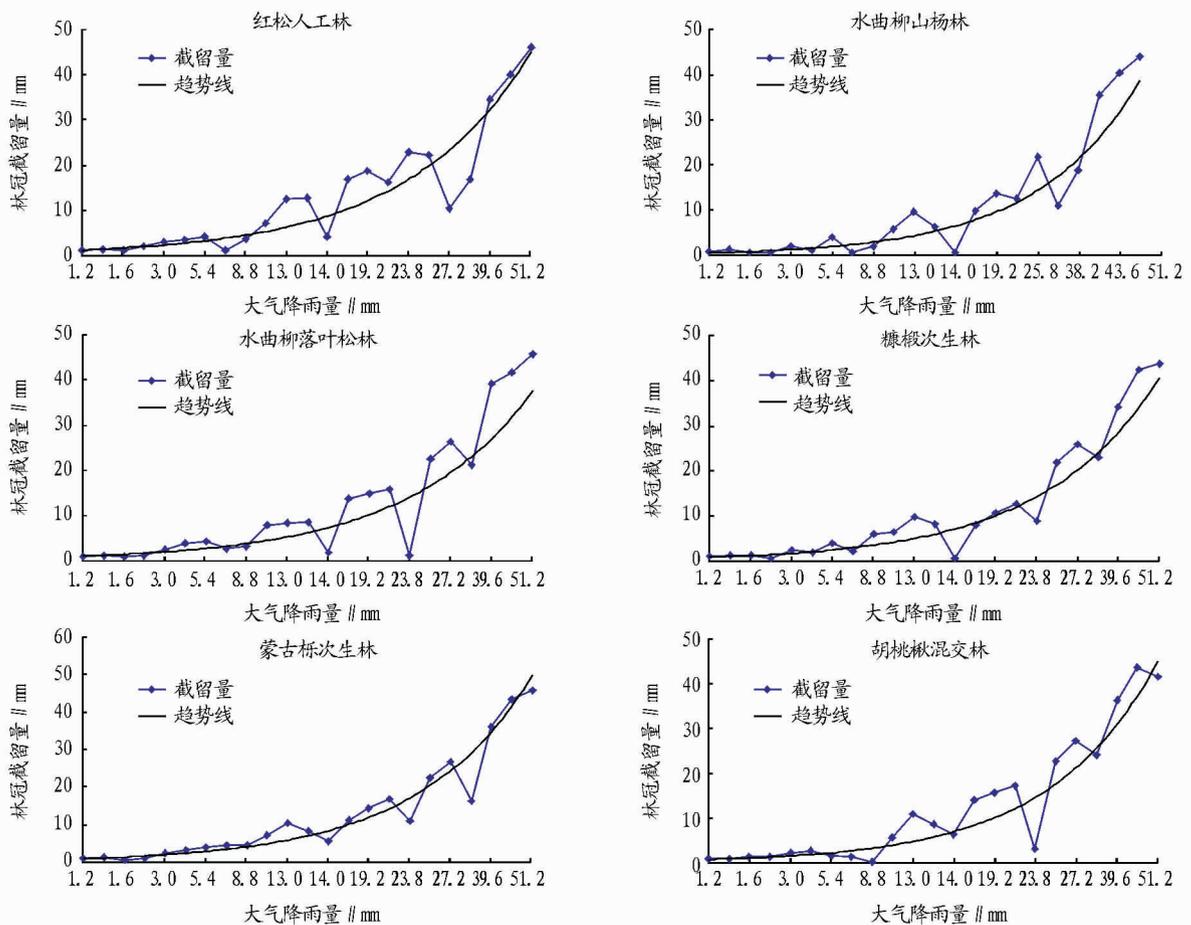


图 2 各类型森林林冠截留量与降雨量的关系

不同类型森林的林冠层截留量都随着降雨量的增加而增大,当降雨量 < 25 mm 时,各种类型森林林冠层的截留量随降雨量的增加变化不大,但是当降雨量达到 25 mm 的时候,各种森林类型的林冠层截留量均发生了飞跃性的增长。6 种不同类型森林林冠层截留量的变化规律稍微有些差异,这主要与不同的森林类型其林冠层的生物学特征、郁闭度、通透状况和冠层厚度等因素有关。当大气降雨先落到林冠层时,受到树叶及树枝表面张力的作用,雨水被吸持在林冠层内,由于林冠能够吸持雨水的表面积很大,所以林冠层在一定的降雨量范围内,所能吸持的水分可以随着大气降雨量的增加而增加。随着冠层吸持水分量的增加,林冠的枝叶表层被降雨充分浸润,林冠层的持水量就趋于饱和,林冠表层的吸持能力逐渐降低。当林冠层吸持足够多的水分达到其饱和持水量(饱和截留量)后,即使降雨量再继续增加其截留量也不会增加了,倘若降雨量增加过高、过快,会使林冠层的吸持表面出现过饱和吸持作用,然后在重力的作用下带走部分已经吸持的水分,反而可能会使冠层的截留量有所降低。从研究结果来看,6 种不同类型森林的截留量均未达到最大值,即在研究地区当年的单次降雨量达到 50 mm 时 6 种不同

林冠层仍具有截留能力(图 2)。

4 结论

(1) 6 种类型森林的透流率状况是:各类型森林的林内雨透流率都小于 50.0%,说明 50.0% 以上的降雨被林冠层截留。其中胡桃楸混交林和水曲柳山杨林的透流率较高,分别达到 44.2% 和 40.0%;其次是水曲柳落叶松林和糠椴次生林,透流率分别为 37.2% 和 34.1%;红松人工林和蒙古栎次生林的透流率较低,分别为 27.9% 和 24.7%。

(2) 6 种森林类型的树干径流率变化范围为 0.74% ~ 16.61%,从大到小顺序依次为:糠椴次生林、水曲柳山杨林、水曲柳落叶松林、红松人工林、蒙古栎次生林、胡桃楸混交林。在相同的降雨条件下,各种森林类型的树干径流率均与林木冠幅呈负相关。

(3) 6 种森林类型的林冠层截留量从大到小排序依次为:蒙古栎次生林、红松人工林、糠椴次生林、水曲柳落叶松林、水曲柳山杨林、胡桃楸混交林。6 种类型森林的林内雨量 and 大气降雨均存在显著的直线相关。林冠层的截留量与大气降雨均呈指数相关。当降雨量 < 25 mm 时,6 种类型森林

(下转第 160 页)

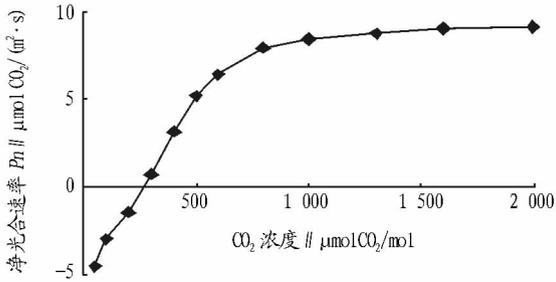


图4 CO₂ 响应曲线

3 结论与讨论

(1) 岩生红豆净光合速率日变化呈单峰曲线,上午10:00达到峰值后逐渐下降,未发现光合“午休”现象,1 d 中光合效率最佳时段在上午;净光合速率日均值高,属阳性树种,固定大气 CO₂ 的能力和强光环境下的光合能力强。蒸腾速率日变化呈双峰曲线,上午和下午各有 1 个峰值,存在一定的“午休”现象;水分利用效率日变化与蒸腾速率相反,呈“W”型曲线;蒸腾速率与水分利用效率日均值均不高,不能有效地利用土壤水分。

(2) 光响应曲线相关系数 R^2 达 0.98,说明该模型拟合效果较好;光饱和点高而光补偿点低,对光环境的适应范围广,岩生红豆属于偏喜光树种。CO₂ 响应曲线相关系数 $R^2 = 0.99$,表明模型能够较为准确地模拟其 CO₂ 响应规律;岩生红豆 CO₂ 补偿点较高而 CO₂ 饱和点略低于香樟、红椿和紫楠等珍贵用材树种,说明其正常生长对 CO₂ 浓度的要求较高。

(3) 野外调查研究亦表明,岩生红豆在疏林下及灌木灌丛中皆能生长良好,但在过荫蔽或光照过强环境下则生长不良,其中以过分荫蔽的环境生长最差(望漠笔架山和贵阳黔灵山皆有此现象)。因此,栽培时给予充足的水分、足够的 CO₂ 和光环境可提高成活率,有利于苗木生长发育。

参考文献

- [1] 赵莉娜,李金亚,刘慧圆,等.有关 IUCN 红色名录中“地点”参数合理应用的讨论[J].植物资源与环境学报,2014,23(3):102-107.
- [2] 袁从军,喻理飞,安明志,等.岩生红豆天然林主要树种生态位研究[J].生态科学,2013,32(4):487-493.
- [3] 王忠.植物生理学[M].北京:中国农业出版社,2005:121.
- [4] 李慧,丁莉.不同生境条件下续断的光合特性研究[J].湖北民族学院学报(自然科学版),2011,29(2):227-231.
- [5] 袁从军,安明志,严令斌,等.两种干扰强度下岩生红豆天然群落特征及物种多样性分析[J].南方农业学报,2013(2):280-284.
- [6] 方小平,张廷忠,姚淑君,等.贵州省林科院树木园珍稀树种引种研究报告[J].贵州林业科技,1996,24(4):7-13.
- [7] YE Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa* [J]. Photosynthetica, 2007, 45 (4) : 637 - 640.
- [8] 许大全.光合作用学[M].北京:科学出版社,2013.
- [9] 姜霞,张喜,丁海兵.黔中 10 个树种苗期水分利用效率及光合特性的差异性研究[J].西部林业科学,2013,42(5):75-81.
- [10] 柴仲平,王雪梅,孙霞,等.红枣光合特性与水分利用效率日变化研究[J].西南农业学报,2010,23(1):168-172.
- [11] 曹生奎,冯起,司建华,等.植物叶片水分利用效率研究综述[J].生态学报,2009,29(7):3882-3892.
- [12] 金华,玉米提·哈力克,阿丽亚·拜都热拉,等.阿克苏 8 种常见树种叶片水分利用效率特征[J].西北林学院学报,2015,30(2):44-50.
- [13] 姬亚琴,杨鹏年.不同土壤含水量条件棉花光合作用日变化特性研究[J].节水灌溉,2015(2):21-23.
- [14] 杨雨华,宗建伟,杨凤岭.不同生长势马尾松光合日变化研究[J].中南林业科技大学学报,2014,34(8):25-29.
- [15] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等.不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J].生态学报,2015,35(9):1-11.
- [16] 尤扬,周建,贾文庆,等.鹅掌柴叶片秋季光合特性[J].东北林业大学学报,2009,37(9):25-26.
- [17] 王雯,韦小丽,张怡.不同地理种源猴樟苗期的光合特性与蒸腾特性[J].贵州农业科学,2011,39(6):39-42.
- [18] 李国泰.8 种园林树种光合作用特征与水分利用效率比较[J].林业科学研究,2002,15(3):291-296.
- [19] 黄林敏,袁从军,严令斌,等.不同遮荫处理对清香木苗木生长与光合速率的影响[J].浙江农业科学,2014(2):217-219.
- [20] 殷国兰,谭斌,杨金亮,等.3 种珍贵用材树种 1 年生苗木光合特性研究[J].西部林业科学,2014,43(3):81-87.
- [21] 陈模芳,韦小丽,张怡.紫楠实生幼苗的光合生理特性[J].贵州农业科学,2013,41(10):55-58.

(上接第 157 页)

的林冠层截留量随降雨量的增加变化不大,而当降雨量达到 25 mm 时,6 种类型森林的林冠层截留量都有大幅度的增长。研究地区单场降雨量达 50 mm 时林冠层仍具有截留能力。

参考文献

- [1] 张增哲,余新晓.中国森林水文研究现状和主要成果综述[C]//全国森林水文学学术讨论会文集.北京:测绘出版社,1989:1-9.
- [2] HAYNES R W, GRAHAM R T, THOMAS M Q. A framework for ecosystem management interior Columbia basin and portions of the Klamath and great basins[J]. Journal of forestry, 1998, 96(6):4-9.
- [3] 鲍文,包维楷,何丙辉,等.森林生态系统对降水的分配与拦截效应[J].山地学报,2004,22(4):483-497.
- [4] 刘建立,王彦辉,于澎涛,等.六盘山叠叠沟小流域华北落叶松人工林的冠层降水再分配特征[J].水土保持学报,2009,23(4):76-81.
- [5] 方江平,项文化,刘韶辉.西藏原始林芝云杉林雨季林冠降水分配特征[J].生态学报,2010,30(14):3679-3687.
- [6] 王佑民.我国林冠降水再分配研究综述[J].西北林学院学报,2000,15(3):1-7.
- [7] 刘强,容祥振,吴兴军.樟子松人工林对降雨的再分配规律[J].东北林业大学学报,2003,53(31):11-13.
- [8] ZIERL B. A simulation study to analyze the relations between crown condition and drought in Switzerland[J]. Forest ecology and management, 2004, 18(8):25-38.
- [9] ROBIN L H. Interception loss as a function of rainfall and forest types: stochastic modeling for tropical canopies revisited[J]. Journal of hydrology, 2003, 280(3):1-12.
- [10] 周择福,张光灿,刘霞.树干茎流研究方法及其述评[J].水土保持学报,2004,18(3):137-140.
- [11] 王彦辉.几个树种的林冠降雨特征[J].林业科学,2001,37(4):2-9.
- [12] SHERIDAN J M. Rainfall and stream flow relation for coastal plain watersheds[J]. Amer Soci Agric Engin, 1998, 13(3):333-344.
- [13] 郭明春,于澎涛,王彦辉,等.林冠截持降雨模型的初步研究[J].应用生态学报,2005,16(9):1633-1637.
- [14] 高成德,余新晓.水源涵养林研究综述[J].北京林业大学学报,2000,22(5):78-82.
- [15] 张光灿,刘霞,赵政.树冠截持降雨模型研究进展及其述评[J].南京林业大学学报,2000,24(1):64-68.