

六盘山华山松 (*Pinus armandii*) 林降雨 再分配及其空间变异特征

时忠杰^{1,2}, 王彦辉^{1,*}, 徐丽宏¹, 熊 伟¹, 于澎涛¹, 郭 浩¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 中国环境科学研究院生态研究所, 北京 100012)

摘要: 利用 2004 和 2005 年生长季(6~9 月份)六盘山自然保护区的香水河小流域内华山松天然林的穿透降雨、树干径流和冠层截留量观测资料, 通过对华山松林降雨再分配特征和穿透降雨空间变异及其影响因素的综合分析, 所得结果表明华山松天然林的穿透降雨量、树干径流量和冠层截留量, 分别占大气降雨量的 84.34%、0.72% 和 14.94%。穿透降雨在林内具有较大的空间变异, 其变异程度随降雨量的增加而减小, 冠层对穿透降雨具有一定的聚集效应, 降雨量越高时效应越明显; 华山松冠层结构特征是影响穿透降雨的重要因素, 叶面积指数、冠层覆盖度、冠层厚度及距树干的距离等都会影响穿透降雨的空间分布, 其中以叶面积指数的影响最大。由分析结果可知, 冠层结构特征是决定大气降雨再分配和空间变异的重要生态因素之一。

关键词: 华山松; 林冠截留; 树干径流; 穿透降雨; 空间变异; 六盘山

文章编号: 1000-0933(2009)01-0076-10 中图分类号: Q142, Q149, Q948, S718.5 文献标识码: A

Rainfall redistribution and its spatial variation in the stand of *Pinus armandii* in the Liupan Mountains, China

SHI Zhong-Jie^{1,2}, WANG Yan-Hui^{1,*}, XU Li-Hong¹, XIONG Wei¹, YU Peng-Tao¹, GUO Hao¹

1 Research Institute of Forestry Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Research Institute of Ecology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 0076 ~ 0085.

Abstract: During the growing-season (Jun. — Sep.) of 2004 and 2005, the throughfall, stemflow and canopy interception of a natural forest stand of *Pinus armandii* in Liupan Mountains Nature Reserve of northwestern China were observed. The rainfall distribution, the spatial variability of throughfall and their influencing factors were systematically analyzed. The result indicated that the throughfall, stemflow and canopy interception accounts for 84.34%, 0.72% and 14.94% of the rainfall in open field, respectively. The spatial variability of throughfall within this stand was estimated for different rainfall events. The coefficient of variance of throughfall decreases with increasing rainfall depth. It was found that the canopy has a congregation effect on the throughfall in a certain extend, and this effect increases evidently with increasing rainfall depth. The canopy structure characteristics, such as leaf area index (LAI), canopy density, canopy thickness, and the distance of sampling sites to the stem of sample tree, are very important factors influencing the spatial distribution of throughfall. Of these factors, the influence of LAI is the highest one. It was concluded that the canopy structure is one of the most important ecological factors that affect the rainfall redistribution and spatial variability within forest stand.

Key Words: *Pinus armandii*; canopy interception; stemflow; throughfall; spatial variability; liupan Mountains

基金项目: 国家重点基础研究资助项目(2002CB111501); 国家自然科学基金重点资助项目(40730631); 国家科技部“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD03A1803); 国家科技部社会公益研究专项资助项目(2004DIB3J102); 国家林业局引进国际先进技术资助项目(2003-4-43); 国家林业局森林生态环境重点实验室联合资助项目

收稿日期: 2007-08-09; 修订日期: 2008-01-10

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

森林与水的关系是生态水文学研究的核心问题之一,森林冠层是影响降水传输的第一个作用层,大气降水通过林冠层后形成冠层截留、穿透降雨和树干径流,这一过程使林冠截留了部分降雨,改变了降雨特性和空间分布格局,还可能削减部分降雨动能,是森林生态水文学的基本过程之一。国内外关于森林冠层的降雨再分配已进行了大量研究^[1,2],但针对华山松(*Pinus armandii*)天然林的研究还较少。

穿透降水空间分布的研究报道已有很多。Sinun^[3]在热带雨林中研究发现,101 个测点收集的穿透雨量比林外降水多 10%,22 个点比林外降水少 40%,林窗下的穿透降水占当次雨量的 88%~102% 不等,并认为林冠密度和树种差异与穿透降水的空间分布没明显关系,起主导作用的可能是叶尖滴水。Lloyd^[4]也发现,29% 测点的穿透降水大于当时林外降水量。李振新等^[5]研究了岷江流域冷杉针叶林穿透降水的空间分布特征。时忠杰等^[6]通过地统计方法研究了单株尺度上华北落叶松林下穿透降雨的空间异质性及其分布格局。这些研究都表明,林冠影响了降雨空间分布格局,但从生态学机制入手对穿透降雨空间变异影响的研究还较少。

六盘山区是黄河支流泾河的发源地,是我国西北地区重要的生态屏障。本文以六盘山南段的华山松林为研究对象,从森林降雨再分配的影响过程与机制入手,探讨华山松对降雨的再分配、穿透降雨空间变异及其影响因素,以求更深入地理解森林水文过程和作用机制,进一步明确华山松林生态系统水分传输过程生态学机制,为基于生态水文过程的分布式水文模型的发展和参数化提供基础资料,并为制定有效的水土保持和水源涵养林管理措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

研究地点位于六盘山自然保护区的香水河小流域,处在黄土高原的中西部的宁夏回族自治区南端,是黄河的支流泾河的源头,海拔 2060~2931m,地理位置介于东经 106°09′~106°30′、北纬 35°15′~35°41′之间,属于暖温带半湿润区向半干旱区的过渡带,具有暖温带大陆性季风气候。年平均温度 5.8℃,7 月平均气温 17.4℃,1 月平均气温 -7.0℃;年均降水量为 591.6mm(泾源站),多集中于 6~9 月份。香水河小流域植被保存完好,垂直带谱明显,覆盖度为 70%~80%,植被主要以天然次生林为主,如山杨(*Populus davidiana*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、华山松(*Pinus armandii*)等,人工林主要是华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和油松(*Pinus tabulaeformis*);在山地阳坡还分布着大量灌丛,高海拔(2700m 以上)地区则分布着亚高山草甸群落。流域内土壤以灰褐土为主,此外还分布着一定面积的亚高山草甸土。土壤中砾石较多,成土母质为沙质泥岩、页岩、灰岩风化的残积物和坡积物。

选择的华山松样地位于流域的中部(106°15′27.9″E, 35°29′33.4″N),是华山松地理分布的北缘地带,林下土壤为富含砾石的灰褐土,坡度为 35°,坡向西南,海拔 2220m。研究样地(面积 400m²)中,华山松是主要树种,此外还有花楸(*Sorbus discolor*)等树种,林下植物主要有水栒子(*Cotoneaster multiflorus* Bge.)、刺蔷薇(*Rosa acicularis*)、绣线菊(*Spiraea*)等,草本层主要有华西箭竹(*Fargesia nitida*)等。林冠层郁闭度约为 70%,群落总盖度约为 85%,树木密度为 575 株/hm²,林分平均龄为 27 年,平均胸径为 20.2cm,平均树高为 11.5m,平均枝下高为 2.8m,平均冠幅 6.6m,华山松林木冠层平均叶面积指数为 4.52,枯枝落叶层平均厚度约 3.7cm。样地内树木特征见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 降雨观测

在研究样地外的空旷地上设一标准雨量筒,每次降雨后与穿透降雨一起观测,并与 2km 外的自动气象站雨量作比较,发现并无显著差异。

1.2.2 穿透降雨观测及冠层参数测定

2004 年生长季(6~9 月份)在华山松样地内,随机布置 6 个直径为 20cm 标准雨量筒,测定穿透降雨量。2005 年生长季(6~9 月份),随机布设 14 个标准雨量筒,并测定雨量筒离树干的距离、雨量筒上方的冠层厚

度、郁闭度、叶面积指数等,于每场降雨结束后测定穿透降雨,并计算各测点的穿透降雨率,2005 年各雨量筒测点的冠层结构特征见表 2。

表 1 华山松样地内树木特征

Table 1 Characteristics of sample trees in the stand of *Pinus armandii*

径级 DBH class (cm)	平均胸径 Mean DBH (cm)	平均冠幅直径 Mean diameter of canopy (m)	平均树高 Mean height (m)	平均枝下高 Mean height under branch (cm)	密度 Density of trees (stems hm ⁻²)	叶面积指数 Leaf area index
6.1 ~ 10	8.3	3.7	6.8	3.4	50	4.52 ± 0.74
10.1 ~ 14	12.9	4.8	10.4	4.2	25	
14.1 ~ 18	16.7	5.7	12.0	4.0	125	
18.1 ~ 22	19.2	6.2	12.3	3.0	150	
22.1 ~ 26	24.7	7.8	12.8	2.6	100	
26.1 ~ 30	27.4	8.3	13.2	1.2	125	

表 2 2005 年 6 ~ 10 月华山松林下雨量筒放置位点及对应的上方林冠特征

Table 2 Description of canopy in different observational locations of rain gauges under the *Pinus armandii* stand

雨量筒号 No. of rain gauges	离干距离 Distance of leaving stem (m)	冠厚 Thickness of canopy (m)	盖度 Cover	叶面积指数 Leaf area index
1	1.45	3.2	0.71	5.53
2	1.10	4.2	0.82	5.30
3	0.85	3.8	0.85	4.43
4	0.40	1.8	0.54	4.50
5	2.30	3.7	0.80	5.90
6	1.20	7.9	0.95	6.20
7	1.30	7.2	0.85	6.10
8	1.80	2.0	0.43	4.18
9	1.30	5.2	0.69	3.97
10	2.25	3.9	0.45	3.50
11	3.00	4.0	0.51	4.06
12	1.05	8.8	0.96	6.65
13	1.20	3.5	0.75	4.30
14	2.70	1.8	0.52	3.05

叶面积指数为 2005 年 7 月中旬利用 LAI-2000 冠层分析仪(Li-Cor Inc.)测定,并通过其自带软件按 7°光圈重新计算叶面积指数,然后乘以校正系数(取 1.5)即为叶面积指数值,本研究只测定了 1 次,基本能够反映叶面积指数在不同测定点的叶面积变化。冠层厚度的测定是在雨量筒上方立一 15m 标有刻度的标杆,通过望远镜读取冠层上方和下方的刻度值,差值即为冠层厚度。冠层郁闭度通过长焦距(28mm)的数码相机获取雨量筒上方的黑白照片,然后利用图像分析软件将白点分离出来,计算其点数量,其百分比即为冠层郁闭度。

1.2.3 树干径流观测

按每隔 4cm 为一径级,各选择 1 ~ 2 棵树形和树冠中等的标准树,共 6 个径级 7 棵样树,用 PVC 胶管做槽,用钉子及玻璃胶粘牢于样树上,将树干径流水收集到 25 kg 的塑料桶内。观测时间分别为 2004 和 2005 年的 6 ~ 9 月份。

树干径流量的计算如下:

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{S_N \cdot M_N}{A \cdot 10^4} \quad (1)$$

式中, S 为树干径流量(mm); N 为树干径级数, S_N 为每一径级的单株树干径流量(ml); M_N 为每径级的树木株数; A 为样地面积(m²)。

1.2.4 冠层截留

冠层截留量计算公式:

$$I = P - T - S \quad (2)$$

式中, I 为冠层截留量(mm); P 为大气降雨(mm); T 为穿透降雨(mm), S 为树干径流(mm)。

2 结果与分析

2.1 研究区降水特征

自动气象站数据表明,2004年6~9月份和2005年6~10月份的降雨量分别为497.6mm和581.2mm,分别是多年同期平均降雨量的108.2%和111.1%。为了研究香水河小流域不同降雨特性的雨量分布规律,按无雨时间间隔超过4h时将降雨事件划分为两场不同降雨的原则^[5],统计了2004年6~9月份及2005年6~10月份的香水河小流域雨量点88场降雨特征,图1为香水河小流域2004和2005年生长季的降雨特征频率分布柱状图(图1a、b、c)。研究期间大部分为低雨强、低雨量级、长历时的降雨,平均降雨强度为2.6mm/h,变异系数为140.38%,最小雨强为0.3mm/h,最大雨强达21.6mm/h。其中,37.5%的平均雨强小于1mm/h,在2mm/h以下的降雨约占65%,大于5mm/h的降雨仅占11.36%。强度较大的降雨多为雷暴雨,历时短,雨量大,且多集中于6~7月。从次降雨量看,平均为11.3mm,变异系数为172.5%,次最小降雨量为0.3mm,最大为160mm;次降雨量小于10mm的次数占63.64%,50mm以上的次数仅占3.41%。从降雨历时看,平均次降雨历时为7.7h,变异系数为123.37%,最短的仅10min,最长的为48.7h(2005年6月30日至7月2日),雨量达160mm,降雨历时小于2h的降雨次数仅36.36%,2~20h之间的占54.55%,0~20h的占90.91%。

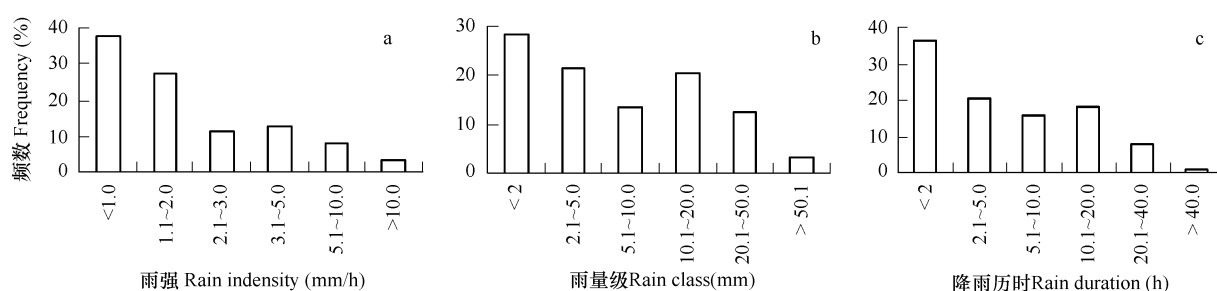


图1 研究期间降雨特征

Fig. 1 Characteristics of gross rainfall during the research (Jun. — Sep. 2004 and Jun. — Oct. 2005)

2.2 林冠对降雨的再分配

2.2.1 林冠截留

由表3可见,2004年生长季(6~9月份)华山松林总截留量为78.6mm,占降雨量的15.80%;2005年生长季(6~9月份)总截留量为77.0mm,占降雨量的14.16%,平均截留率为14.94%。各月截留量存在明显差异,8月份截留量最大,平均为29.0mm;7月与9月份的相当,各平均为19.9mm和19.0mm;而两个年份6月份有较大差异,这可能主要与降雨量大小及强度有关,因为2004年6月份几场降雨强度相对较小,且降雨场数较多,而2005年6月份相对较干旱,且降雨仅有两场,降雨强度也较大。

在林冠截留降雨达到饱和以前,截留量随降雨量的增加而增加,但其增加的比率越来越小,直至其达到冠

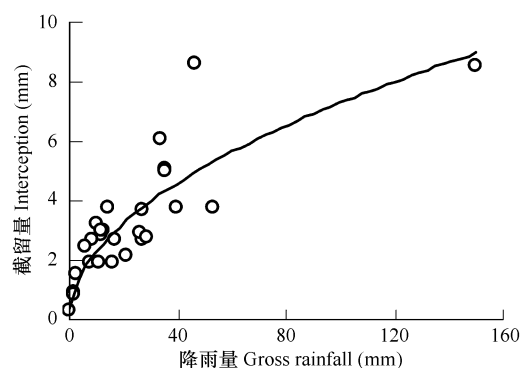


图2 冠层截留与林外降雨量的关系

Fig. 2 Interception loss as a function of gross rainfall in growing-season of 2004 and 2005

层最大持水量。根据实测数据分析表明,本地区华山松林林冠层截留量与林外降雨量呈幂函数关系。拟合方程为

$$I = 0.717P^{0.5041} \quad r^2 = 0.8415, p < 0.01, n = 27 \quad (3)$$

式中, I 为林冠截留量(mm), P 为林外降雨量(mm)(图2)。

2.2.2 树干径流

2004 年生长季树干径流量为 2.7mm,占降雨量的 0.53%,2005 年同期为 4.8mm,树干径流率为 0.89%,平均树干径流率为 0.72%(表3)。根据实测数据分析表明,本地区华山松林树干径流量与林外降雨量呈正相关关系。拟合方程为:

$$Sf = 0.009P - 0.045 \quad r^2 = 0.9631, p < 0.01, n = 27 \quad (4)$$

式中, Sf 为树干径流量(mm), P 为林外降雨量(mm)(图3)。

表3 生长季(6~9月份)华山松林冠对降雨的再分配

Table 3 Redistribution of rainfall on the *Pinus armandii* stand in the growing season (Month 6~9)

年份 Years	月份 Months	降雨量 Rainfall (mm)	截留量 Interception		干流量 Stemflow		穿透降雨 Throughfall	
			(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
2004	6	47.3	14.5	30.66	0.1	0.21	32.7	69.13
	7	154.5	17.9	11.59	0.7	0.45	135.9	87.96
	8	164.1	29.4	17.92	1.0	0.61	133.7	81.47
	9	131.7	16.7	12.68	0.8	0.61	114.2	86.71
	6~9	497.6	78.6	15.80	2.7	0.54	416.3	83.66
2005	6	37.4	5.6	14.97	0.3	0.80	31.5	84.22
	7	239.7	21.8	9.09	2.0	0.83	215.9	90.07
	8	137.2	28.5	20.77	1.2	0.87	107.5	78.35
	9	129.7	21.2	16.35	1.3	1.00	107.2	82.65
	6~9	544.0	77.0	14.15	4.8	0.88	462.2	84.96

对样地内不同观测样树的树干径流分析表明,树干径流存在较大变异,且其变异系数随降雨量的增大而减小(图4)。降雨量较小(<10mm)时的平均变异系数为144.2%,10~20mm降雨时的平均为142.60%,20~40mm时平均为84.05%,40mm以上降雨时平均为69.32%,总平均为109.69%。

拟合方程为

$$CV(\%) = 385.89P^{-0.4589} \\ r^2 = 0.3687, p < 0.05, n = 25 \quad (5)$$

式中, CV 为树干径流的变异系数(%), P 为林外降雨量(mm)(图4)。

2.2.3 穿透降雨

2004 年生长季(6~9月份)华山松林总穿透降雨量为 416.3mm,占降雨量的 83.66%;2005 年生长季为 462.2mm 和 84.96%,2a 平均穿透降雨率为 84.34%(表3)。当大气降雨超过 20mm,穿透降雨率均超过 80%(图5),平均为 87.11%;而小于 20mm 的降雨时,林外降雨量 1.9~8.7mm 时的平均穿透降雨率为 57.68%,林外降雨量 10.4~16.6mm 时的平均穿透降雨率为 76.08%。同其它林分类型的穿透降雨相比,华山松林的穿透降雨率是较大的^[7]。

穿透降雨率随降雨量的增加有增加的趋势,但增加是有极限的,一般以对数方程进行模拟^[8,9]。本研究以 S 形曲线进行模拟效果较好,优于对数方程(图5)。

拟合方程为:

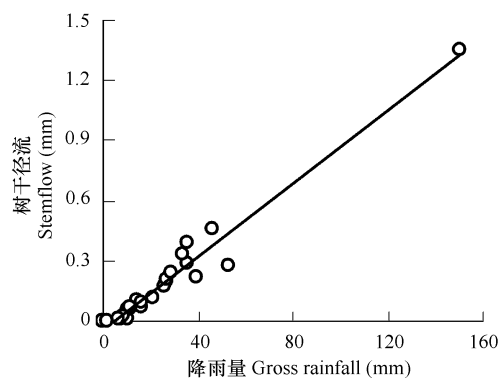


图3 树干径流与林外降雨量的关系

Fig. 3 Stemflow as a function of gross rainfall in growing-season of 2004 and 2005

$$TF(\%) = EXP(4.49 - 1.44/P) \quad r^2 = 0.90(p < 0.01), n = 27 \quad (6)$$

式中, TF 为穿透降雨率(%), P 为降雨量(mm)。

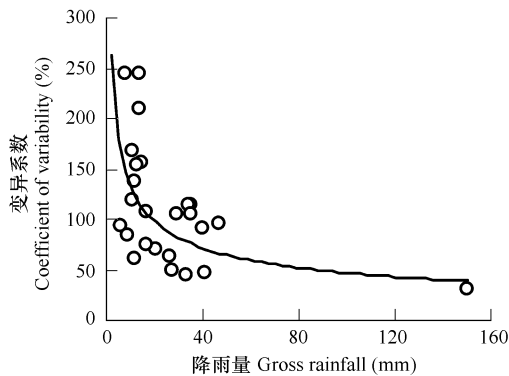


图4 树干径流随降雨量的变异

Fig. 4 Variability of stemflow with the gross rainfall

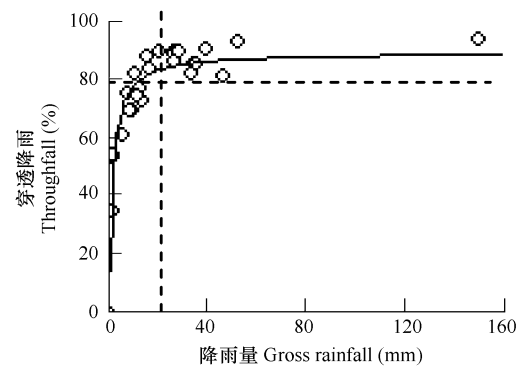


图5 穿透降雨率随降雨量的变化

Fig. 5 Change of throughfall as a percentage of gross rainfall with the rainfall depth

2.3 穿透降雨的空间变异及影响因素

2.3.1 穿透降雨的空间变异

根据2005年14个观测点的穿透降雨数据分析,平均穿透降雨随降雨量的增加有增加的趋势,但存在一定的波动。在降雨量较低时,不同测量点间的穿透降雨率变化较大,降雨量较高时,穿透降雨率变化幅度减小。

在不同的观测点间,穿透降雨空间分配具有很大的变异性,主要受降雨特征及林冠层特征的影响。本研究中,不同观测点间穿透降雨的变异系数与降雨特征有密切的关系,其变异程度随降雨量的增加而降低,二者呈一定的负相关性。如降雨量为1.9 mm时,林下14个观测位点的平均穿透降雨率为54.14%,标准差为23.12%,其变异系数高达42.71%;降雨量在5~10 mm时,平均穿透降雨率为62.58%,平均变异系数为20.23%;降雨量在10~20 mm时,平均穿透降雨率为79.59%,平均变异系数为16.40%;降雨量在20~40 mm时,平均穿透降雨率为86.29%,平均变异系数为14.84%;当降雨量 ≥ 40 mm时,其平均变异系数为15.01%,与20~40 mm的降雨量时相当,在88.2 mm的降雨量时,各观测点穿透降雨率的变异系数只有9.62%。2005年生长季不同观测点的穿透降雨变异系数平均为16.62%,这比Zhang等^[10]的要高(12.7%),比Tobón等^[11]的结果低(22.5%~30.6%)。不同降雨量时穿透降雨的变异系数随降雨量的变化拟合方程为:

$$CV(TF) = 13.63 + 54.03/P \quad r^2 = 0.83, p < 0.05, n = 14 \quad (7)$$

式中, CV 为不同测点间穿透降雨率的变异系数(%), TF 为穿透降雨率(%), P 为降雨量(mm) (图6)。

分析发现,有些观测点的穿透降雨量高于林外降雨量,此处有明显的降雨聚集效应,在较小降雨量时这种聚集效应不明显,但随降雨量增加有增加的趋势。如在10.8 mm降雨时,有8.3%观测点其穿透降雨率大于100%,最大穿透降雨率为100.93%,在28.9 mm降雨时,有46.7%观测点其穿透降雨率高于100%,最大穿透降雨率达113.84%。Sinun等^[3]和Gómez等^[9]的研究均曾发现过这种现象,并分析认为降雨在冠层的影响下发生了聚集效应,这与本研究结果比较相似。但在较小降雨量时,汇集降雨作用不明显,在较高降雨强度时汇集作用更明显。Gómez等^[9]还发现这种聚集效应比较容易发生于树冠的边缘,但也有时会发生在树冠投影边缘线以内。时忠杰等^[6]也曾发现华北落叶松的聚集区域多数发生于树冠半径的中部,有时也会移到树冠的外边缘线。

2.3.2 影响穿透降雨空间变异的因素

影响穿透降雨的因素很多,有气象因素和冠层结构因素,本研究中不同观测点上的降雨量、温湿度等气象因子可以认为是一致的,因此影响穿透降雨的因素主要就是冠层结构特征。本研究考虑了测点上方的冠层盖

度、叶面积指数(LAI)、冠层厚度、测点距主树干的水平距离等因素。

(1) 叶面积指数(LAI) 冠层影响穿透降雨的过程,首先是叶对降雨的截留作用,一部分直接穿过林隙而进入林地,当雨量较大而超过叶截留容量时,部分降雨又通过叶尖集聚而滴落。叶面积指数越大,冠层阻止降雨进入林下的能力就越大,因此叶面积指数对穿透降雨有相当大的影响。对 2005 年生长季 14 个测点上方叶面积指数的测定分析表明,叶面积指数越大,穿透降雨率就越小,二者呈显著负相关(图 7, $r^2 = 0.6282$, $p < 0.05$)。

(2) 冠层盖度 图 8 表明,冠层盖度与平均穿透降雨率呈二次多项式关系,在冠层盖度较小时,穿透降雨率随盖度的增加而增大,当达到高峰值后,穿透降雨率随冠层盖度的增加而减小。这可能是由于在冠层盖度较小时,随盖度增加,叶尖滴水的作用加强,而当盖度继续增大后,林冠层的截留作用增强,而叶尖滴水所起作用相对变小的缘故。

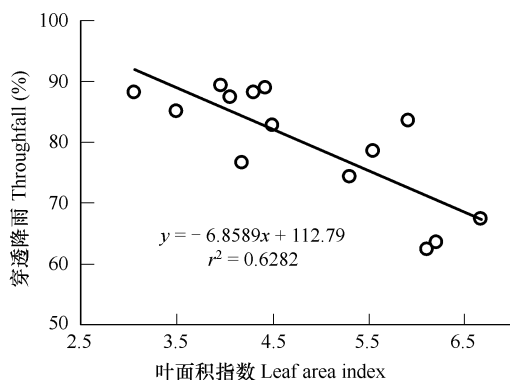


图 7 平均穿透降雨率与叶面积指数的关系

Fig. 7 Scatterplot of the mean throughfall as a percentage of gross rainfall and leaf area index

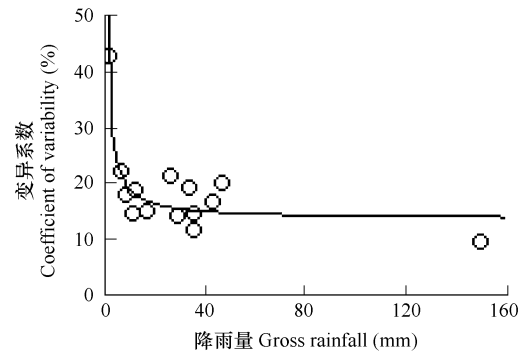


图 6 不同观测点的穿透降雨随降雨量的变异

Fig. 6 Variability of throughfall with the rainfall in the 14 observed sites

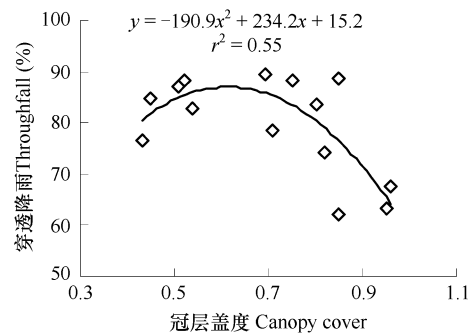


图 8 平均穿透降雨率与冠层覆盖度的关系

Fig. 8 Scatterplot of the mean throughfall as a percentage of gross rainfall and canopy cover

(3) 冠层厚度 本研究中的“冠层厚度”是指测点上方冠层的上界面与下界面之间的距离。分析表明穿透降雨率随冠层厚度的增加而呈下降趋势,二者呈负相关性,决定系数 r^2 为 0.4972 ($p < 0.10$, 图 9)。

(4) 距主树干距离 就单株样树来说,华山松树冠形状基本呈圆锥形,冠下不同测点上方对应的冠层厚度、叶面积指数、郁闭度等均不相同,这影响了穿透降雨的空间分布。此外,样树在样地内是随机分布的,雨量筒测点的穿透降雨可能同时受多株树木的影响,但应该有一个影响最大的样树,选择距离测点最近的样树距离,并认为此株树对测点的穿透降雨影响最大。比较 14 个测点的平均穿透降雨率与其距主树干距离的关系(图 10),表明穿透降雨率与距主树干距离之间的关系可以用二次多项式来拟合,穿透降雨率最小位置并不是在距树干最近的测点,而在距主树干 1~2 m 之间的距离上,李振新等^[5]研究了冷杉针叶林发现穿透降雨率最小值出现于距主树干 2~3 m 之间的距离上。这里仅分析了二者间的关系,但从影响机制来看,实际上还是由于距树干不同距离上的冠层厚度、盖度和叶面积指数等冠层结构因素影响的结果,并非直接由距主树干的距离所决定的,但这一程度上反映了穿透降雨的空间变异。

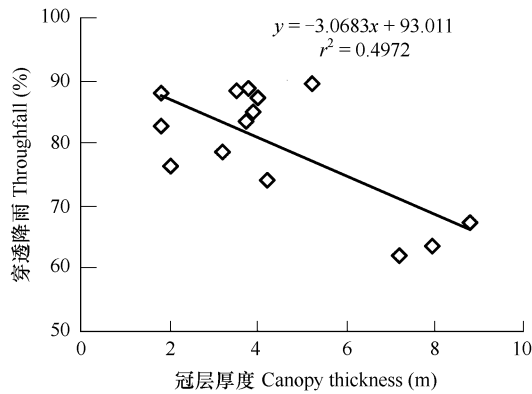


图9 平均穿透降雨率与冠层厚度的关系

Fig. 9 Scatterplot of the mean throughfall as a percentage of gross rainfall and canopy thickness

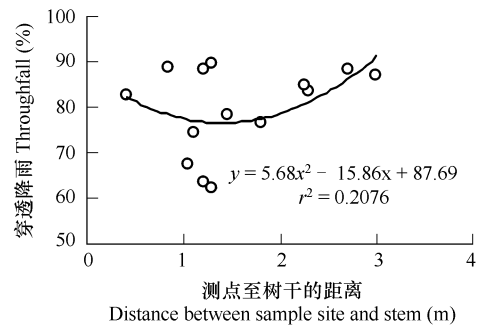


图10 平均穿透降雨率与观测点离开树干的距离的关系

Fig. 10 Scatterplot of the mean throughfall as a percentage of gross rainfall and distance between sampling site and stem

3 结论与讨论

2004 年和 2005 年的华山松林的总穿透降雨、树干径流和截留量分别为 878.5、7.5mm 和 155.6mm, 分别占大气降水的 84.34%、0.72% 和 14.94%。目前大多数研究认为, 林冠截留率一般介于 10% ~ 35%^[10,12], 但在一些地区有时也会超过 50%^[13,14]。与本地区其它植被类型相比, 华山松林与油松林(15.69%)的截留率相当, 比华北落叶松林(17.17%)和辽东栎林(17.94%)的低, 比红桦林(8.59%)的高^[15]。与我国其它地区林冠对降雨的截留状况相比, 本地区华山松林冠截留量比杉木林(25.8%)、热带季雨林(41.43%)、山地雨林(36.5%)、油松林(17.1% ~ 22.85%)小, 比毛竹人工林(11.1%)和常绿阔叶林(10%)的大^[7]。同是华山松林, 不同地区截留率差异也较大。常志勇等^[13]研究的岷江上游油松与华山松混交人工林的截留率达 50%; 孟广涛等^[16]在云南中部研究的华山松人工林的截留率为 20.9%, 均比本研究的截留率高。分析其差异认为, 本地区华山松林为天然林, 密度和盖度均较低, 而常志勇等^[13]和孟广涛等^[16]研究的华山松林密度和冠层盖度均比本研究中林分的高很多。

研究认为, 树干径流率一般介于 0.1% ~ 6.68%^[7], 本地区华山松林的树干径流率除比杉木林的(0.1%)高外, 较其它林分类型的都要小^[7]; 与本地区其它林分类型相比, 华山松的树干径流率低于油松林(1.36%)和辽东栎林(1.92%)的, 高于华北落叶松林(0.63%)和红桦林(0.23%)的^[15]。同其它地区的华山松林相比, 低于常志勇等^[13](1.2%)和孟广涛等^[16](4.9%)的研究结果。分析本区华山松树干径流率比较低的原因认为, 本区华山松属天然林, 林分密度相对较低, 且其树枝分支角度很大, 平均接近 90°, 从而使冠层的水分很多不能通过树枝汇集于树干, 而常志勇等^[13]和孟广涛等^[16]研究的林分为人工林, 密度较大, 也是树干径流较本研究大的原因之一。树干径流虽然总量比较小, 但它增加了树木根基周围的水分, 同时增加了养分对林地的输入, 对于林木生长具有重要的意义。

穿透降雨率随降雨量的增加而增加, 可以用 S 形曲线进行模拟。穿透降雨具有较高的空间变异, 且其变异程度随降雨量的增加而呈反函数关系减弱。国内外许多学者研究了冠下穿透降雨的空间分布, 但研究结论并不一致^[17]: 一种观点认为林冠下穿透降水空间分布具有系统有规律变化的趋势^[6,18~19]; 另一种观点认为林冠下穿透降水的空间分布是随机的, 与空间位置无关^[20], 这可能与不同研究的地点、树种、降水大小等有极大关系^[9]。本研究认为, 在样地水平上, 不同位置上穿透降雨量是具有一定的变化规律的, 不完全是随机的, 它与冠层分布有一定的关系, 本研究中的穿透降雨一般在距树干 1 ~ 2m 处的最低。

李振新等^[5]研究认为冠层以及枝叶性质对穿透降雨的空间分布特征有一定的影响, 并发现冠层覆盖度、枝叶层厚度与林下穿透降雨有一定的负相关性, 但影响并不显著。Sinun^[3]认为叶尖滴水是影响冠层穿透降雨的主导因素, 许多学者^[21,22]的研究也认为, 叶面积对冠层截留和穿透降雨也有重要的影响, 并在截留模型

中有较多的应用。本研究发现,冠层结构特征是影响穿透降雨空间变异的重要因素,华山松林冠层的叶面积指数、冠层盖度和厚度对穿透降雨的空间分布有着重要影响,其中以叶面积指数的影响最大。这与林冠层截留降雨的生态学机制有很大的关系,大气降雨经过华山松林冠层后,由于冠层枝叶的作用,被厚厚的枝叶层截留,因此冠层越厚截留量也就越大;但枝叶在冠层空间上并非均匀分布或完全覆盖的,其冠层覆盖度越大,截留能力也就越强;冠层厚度和覆盖度是反映冠层枝叶特性的指标之一,但它们本身并不能直接反映枝叶对降雨的截留作用,而叶面积指数是反映冠层结构的一个更重要更直接的指标,是截留降雨的最主要部分,它直接截留大气降雨,因此,叶面积指数越大,其截留能力也就越大,穿透降雨就会越小。但冠层截留量是有限度的,当超过其最大截留能力时,叶面积将不再发挥主导作用,反之,由于华山松的叶形为针形,截留的降雨并不是均匀分布在叶的表面,可能主要聚集于叶尖处,在较大的降雨时,水滴在较大强度降雨的冲击下,可能使截留的降雨滴落,加之枝条汇集的降雨在重力作用下滴落,可能使冠下一些位置上的穿透降雨量高于林外大气降雨。但影响林冠穿透降雨空间分布的因素非常复杂,本文的研究结果是华山松林分的特殊性还是对所有针叶树种具有普遍性,目前还很难确定,需进一步研究。

References:

- [1] Liu S R, Wen Y G, Wang B, *et al.* Ecohydrological functions of forest ecosystems in China. Beijing: China forestry Publishing House, 1996. 61—62.
- [2] Wang S Q, Cheng L Z. Characteristics of precipitation and forest stemflow of Dongling Mountainous area. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 61—67.
- [3] Sinun W, Meng W W, Douglas I. Throughfall, stemflow, overland flow and throughflow in the Ulu Segama rain forest, Saban, Malaysia. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 1992, 335: 389—395.
- [4] Lloyd C R, Marques A D O. Spatial viability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1988, 72: 63—73.
- [5] Li Z X, Zheng H, Ouyang Z Y, *et al.* The spatial distribution characteristics of throughfall under *Abies faxoniana* forest in the Wolong Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 1015—1021.
- [6] Shi Z J, Wang Y H, Xiong W, *et al.* The spatial heterogeneity of throughfall under *Larix principis-rupprechtii* single tree's canopy. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2877—2886.
- [7] Zhang Y P, Wang X, Wang Y J, *et al.* Comparison research on hydrological effect of the canopy of the tropical seasonal rainforest and rubber forest in Xishuangbanna, Yunnan. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 12(12): 2653—2665.
- [8] Rodrigo A, Àvila A. Influence of sampling size in the estimation of mean throughfall in two Mediterranean holm oak forests. *Journal of Hydrology*, 2001, 243: 216—227.
- [9] Gómez J A, Vanderlinden K, Gir ldez J V, *et al.* Rainfall concentration under olive trees. *Agricultural Water Management*, 2002, 55: 53—70.
- [10] Zhang G, Zeng G M, Jiang Y M, *et al.* Modelling and measurement of two-layer-canopy interception losses in a subtropical evergreen forest of central-south China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, 10: 65—77.
- [11] Tobón M, Bouten C W, Serink J. Gross rainfall and its portioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology*, 2000, 237: 40—57.
- [12] Whitehead D, Kelliher F M. A canopy water balance model for a *Pinus adianta* stand before and after thinning. *Agricultural Forest Meteorology*, 1991, 55: 109—123.
- [13] Chang Z Y, Bao W K, He B H, *et al.* Interception and distribution effect of mixed artificial *Pinus tabulaeformis* and *Pinus armandi* forests on precipitation in the upper reaches of Minjiang River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 37—40.
- [14] Lankreijer H, Hendriks M J, Klaassen W. A comparison of models simulating rainfall interception of forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 64: 187—199.
- [15] Shi Z J, Wang Y H, Yu P T, *et al.* Study on different forest vegetation's ecohydrological function in Liupan Mountains, Ningxia, China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 134—138.
- [16] Meng G T, Lang N J, Fang X J, *et al.* Hydrological properties and water balance of *Pinus armandii* plantation in cental Dian Planteau, Yunnan Province. *Forest Research*, 2001, 14(1): 78—84.
- [17] Herbst M, Roberts J M, Rosier P T W, *et al.* Measuring and modeling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England. *Agricultural*

and Forest Meteorology, 2006, 141:244—256.

- [18] Whelan M J, Anderson J M. Modeling spatial patterns of throughfall and interception loss in a Norway spruce (*picea abies*) plantation at the plot scale. *Journal of Hydrology*, 1996, 186:335—354.
- [19] Robson A J, Neal C, Ryland G P, *et al.* Spatial variations in throughfall chemistry at the small plot scale. *Journal of Hydrology*, 1994, 158:107—122.
- [20] Loustau D, Berbigier P, Granier A, *et al.* Interception loss, throughfall and stemflow in maritime pine stand I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *Journal of Hydrology*, 1992, 138:449—467.
- [21] Hölscher D, Köhler L, van Dijk A I J M, *et al.* The importance of epiphytes to total rainfall interception by a tropical montane rain forest in Costa Rica. *Journal of Hydrology*, 2004, 292:308—322.
- [22] van Dijk A I J M, Bruijnzeel L A. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2. Model validation for a tropical upland mixed cropping system. *Journal of Hydrology*, 2001, 247:239—262.

参考文献:

- [1] 刘世荣, 温远光, 王兵, 周光益, 等. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京: 中国林业出版社, 1996. 61~62.
- [2] 万师强, 陈灵芝. 东灵山地区大气降水特征及森林树干茎流. *生态学报*, 2000, 20(1):61~67.
- [5] 李振新, 郑华, 欧阳志云, 等. 泮江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征. *生态学报*, 2004, 24(5):1015~1021.
- [6] 时忠杰, 王彦辉, 熊伟, 等. 单株华北落叶松树冠穿透降雨的空间异质性. *生态学报*, 2006, 26(9):2877~2886.
- [7] 张一平, 王馨, 王玉杰, 等. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林林冠水文效应比较研究. *生态学报*, 2003, 12(12):2653~2665.
- [13] 常志勇, 包维楷, 何丙辉, 等. 岷江上游油松与华山松人工林混交林对降雨的截留分配效应. *水土保持学报*, 2006, 20(6):37~40.
- [15] 时忠杰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究. *水土保持学报*, 2005, 19(3):134~138.
- [16] 孟广涛, 朗南军, 方向京, 等. 滇中华山松人工林的水文特征及水量平衡. *林业科学研究*, 2001, 14(1):78~84.