

东灵山地区大气降水特征及森林树干茎流

万师强, 陈灵芝

(中国科学院植物研究所, 北京 100093)

摘要:对东灵山地区大气降水特征及森林树干茎流进行了研究, 结果表明: 年降水量大部分集中在 6~9 月份, 日降水量级低于 5.0mm 的小雨较多; 单次降水以雨强小于 2.0mm 的阵性降水为主。单株树木的干流量以辽东栎(30.3mm)最大, 棘皮桦(2.9mm)最小; 两个生长季各林分的干流深是: 辽东栎林 66.68mm, 35.19mm; 落叶松林 43.76mm, 23.12mm; 混交林 32.77mm, 17.36mm; 油松林 22.15mm, 11.75mm。各森林类型的干流量 S 与降水量 P 和前 24h 降水量 P_1 呈显著正相关关系。

关键词: 东灵山; 降水; 树干茎流

Characteristics of precipitation and forest stemflow of Dongling Mountainous area

WAN Shi-Qiang, Chen Ling-Zhi (Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: Studies on characters of precipitation and forest stemflow in Dongling Mountainous area were carried out. The results indicate that: eighty percent of annual precipitation falls within the period from June to September, and it consists of frequent, small and low-intensity rains. *Quercus liaotungensis* produces the largest stemflow per tree among the four species, and *Betula dahurica* produces the smallest. Depth of stemflow of four stands in 1996 and 1997 is 66.68mm, 35.19mm; 43.76mm, 23.12mm; 32.77mm, 17.36mm and 22.15mm, 11.75mm, respectively. Quantity of stemflow is positively correlated with the present rainfall and rainfall within the last 24 h.

Key words: Dongling Mountainous area; precipitation; stemflow

文章编号: 1000-0933(2000)01-0061-07 中图分类号: Q948.112 文献标识码: A

我国暖温带地区面积广阔, 人口稠密, 除东部沿海外, 其余地区降水较少, 属缺水较严重的地区; 因此有关大气降水特征及森林水文作用的研究对于了解本区水资源状况, 提高水分利用效率具有十分重要的意义; 东灵山地处太行山北段小五台山余脉, 属暖温带半湿润季风气候区, 该地区是北京市重要的水源涵养地之一; 树干茎流是森林冠层水量平衡中的重要组成部分, 主要在树木根部下渗分布, 其中的水分和养分易于被根吸收, 因而对树木生长起着相当重要的作用, 特别是在干旱、半干旱条件下, 树干茎流对于造林树种的成活至关重要。

试验地设在位于北京市门头沟区东灵山的中国科学院北京森林生态系统定位研究站, 地理位置是东经 115°26', 北纬 39°38', 海拔 1050~1250m, 年均气温 2~8℃, 年均降水量 659.6mm, 土壤为棕壤。

辽东栎林海拔 1250m, 坡度为 35°, 坡向 N30°W, 乔木层以辽东栎(*Quercus liaotungensis*)占绝对优势, 伴生有少量棘皮桦(*Betula dahurica*)、五角枫(*Acer mono*), 密度为 850 株/hm²; 平均高度 7.7m, 平均胸径 16.6cm, 郁闭度约为 0.75; 灌木层主要由小花溲疏(*Deutzia parviflora*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、迎红杜鹃(*Rhododendron mucronulatum*)、二色胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等; 草本层主要由紫花野菊(*Dendranthema zawadski*)、黎芦(*Veratrum nigrum*)、野古草(*Arundinella hirta*)等。落叶阔叶混交林海拔

1200m, 坡度为 28°, 坡向 N35°W; 乔木层以辽东栎、棘皮桦、糠椴 (*Tilia mandshurica*) 占优势, 平均高度 8.4m, 郁闭度 0.85; 中下层乔木盖度约 75%, 包括五角枫、大叶白蜡 (*Fraxinus rhynchophylla*)、蒙椴 (*T. mongolica*)、北京花楸 (*Sorbus discolor*) 等种类; 灌木层主要有六道木 (*Abelia biflora*)、毛榛 (*Corylus mandshurica*)、胡枝子等; 草本层主要有野古草、野青茅 (*Calamagrostis arundinacea*)、细叶苔草 (*Carex rigescens*)、银背凤毛菊 (*Saussurea nivea*)、铃兰 (*Convallaria majalis*) 等。油松人工林海拔 1150m, 坡度 30°, 坡向 N60°E, 林龄 27a, 密度 1800 株/hm², 平均胸径 14.8cm, 郁闭度 0.75, 林下灌木层和草本层较贫乏。落叶松人工林海拔 1200m, 坡度 26°, 坡向 N40°W, 林龄 23a 左右, 密度 2500 株/hm², 平均胸径 11.5cm, 郁闭度 0.80, 灌木和草本层稀疏。

1 试验方法

1.1 大气降水的测定

在定位站标准气象观测场内, 放置一只直径为 20cm 的雨量筒, 每日子 8:00 和 20:00 两次测量降水; 另外放置一套翻斗式自记雨量计, 记录降水量, 降水历时和降水强度。

1.2 树干茎流的测定

关于树干茎流的测定, 多数研究者^[1~3]采用按径级法选测株然后分别加权求算各径级和林分的树干茎流量; 卢俊培等^[4,5]曾尝试在热带林中按林木重要值选定测株; 刘曙光^[6]认为由于森林冠层对降水的再分配作用, 要准确测定森林的树干茎流量, 单层林中可采用样树法或全样地法, 而复层林中则必须采用全样地法。

1996 年和 1997 年生长季在试验区 4 种森林类型(油松林、辽东栎林、落叶阔叶混交林和落叶松林)中, 选择标准样地, 取一定面积(辽东栎林为 100m² 其它林地 25m²)内的全部树木, 用一端剖开的聚乙烯管环绕树干 1 周, 固定并用橡皮泥封密封胶管与树干之间的空隙; 环绕树干的聚乙烯管与水平面间有 30°左右的倾角, 便于水分流下, 管的下端接 25kg 的塑料桶, 每次雨后逐株称量。

2 结果和分析

2.1 大气降水及其特征

作为主要气象因子之一的大气降水是陆地上水分的主要来源, 陆地上水资源的分布状况不仅决定了自然界物种和植被的形成和分布, 同时也对人类社会的生活和生产产生重要影响。对大气降水等气象资料的收集和分析也是生态研究网络必不可少的一项工作。

大气降水特性包括降水量、降水强度、降水持续时间以及降水在年际和年内的分布等因素。本文有关降水的统计资料来自北京森林站从 1992 年 7 月到 1997 年 6 月的 453 次降水记录。其间降水总量为 3298.2mm, 平均每年 659.6mm。

降水变率是指年降水量的距平数与多年平均降水量之比的百分数, 用以表征某一地区降水的年际变化程度。一个地区降水量丰富, 变率小, 说明水资源利用价值高; 变率愈大, 表明降水愈不稳定, 反映了该地区旱涝程度较高, 我国各地的降水变率, 一般是长江以南 20% 左右, 黄淮之间 20%~30%, 华北超过 30%, 西北内陆大于 40%^[7]。东灵山地区年降水量最大值 776.4mm, 最低为 467.7mm, 多年平均降水变率为 18.8%, 小于华北地区的降水变率, 这个结果意味着, 在东灵山地区, 由于海拔升高以及森林植被的影响, 一方面引起降水量增加; 茅世森等^[8]的研究结果表明, 北京森林站的年降水量要比相距 30km 同属小五台山余脉的门头沟区斋堂高出 19.5%~22%; 另一方面使年际之间的降水趋于平均, 一定程度上缓解了该地区的旱涝程度。

在一年中, 降水总量的 80% 以上集中在 6~9 月份, 这一时期气温较高(见图 1), 正是植物的生长季节, 有利于生物量的积累。东灵山地区年内各月的降水量变化很大, 月降水量最大值为 1994 年 7 月, 达 330.4mm, 最小值为零(1995 年 1 月和 1996 年 2 月); 年内降水分配不均, 一方面在冬春季造成干旱, 另一方面, 夏季降水的过分集中易形成大雨或暴雨, 结果产生大的地表径流并冲刷地表, 造成水土流失。本站记录到的最长连续降水日数是从 1994-12-20~1995-02-26, 为 69d, 最大 24h 降水为 72.9mm; 一次连续降水最长持续时间 43h, 产生雨量 77.1mm。

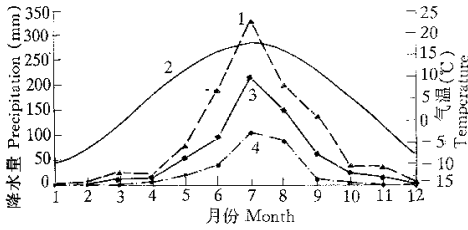


图 1 月降水量和气温变化示意图

Fig. 1 Monthly changes of precipitation and temperature

①、③、④月降水量最大,平均,最小值 Maximum, average, minimum of monthly precipitation, ②月平均气温 Average monthly temperate

由图 2 可见,在全部降水日数中 61.4% 的日降水量低于 5.0mm,这一数值稍高于地处海洋性温湿气候的美国 Coweeta 水文站^[9];而量级在 10.0mm 以上的降水日数不到全部降水日数的四分之一,但其降水量占总降水量的 72.5%。从单次降水(指在自记雨量计上可记录到的、与其前后发生的降水相隔时间在 1h 以上)的持续时间来看,超过 70% 的单次降水持续时间小于 3h,这说明本地以阵地性降水为主。

降水强度通常用于计算地表径流和土壤侵蚀的模拟模型中。本文也曾利用雨强对树干茎流进行拟合,结果见后。从图 3 可以看出,利用自记雨量计测到的 824t 降水中,超过 3/4 的时间,降水强度低于 2.0mm/h,而超过一半的总降水量其雨强小于 5.0mm/h。

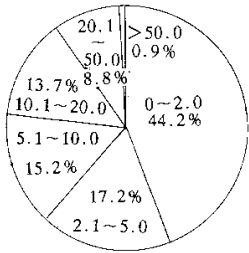


图 2.1 在全部降雨天中 60% 的降水量小于 5.0mm

Fig 2.1 More than 60% precipitation in total raining days is less than 5.0mm

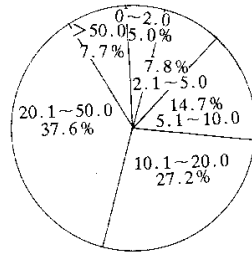


图 2.2 10.15~50.0mm 的日降水总和占总降水量的 64%

Fig 2.2 The total amount of daily rainfall with range of 10.1~50.0mm make up 64% of total precipitation

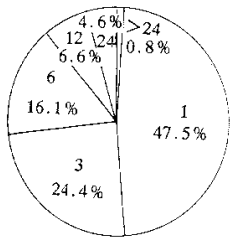


图 2.3 70% 以上的单次降水持续时间小于 3h

Fig 2.3 The duration for more than 70% of rainfall event is less than 3h

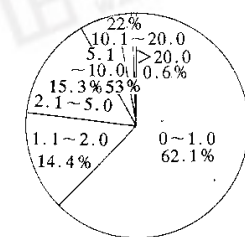


图 3.1 四分之三的降水时间雨强小于 2.0mm/h

Fig 3.1 Intensity is less than 2.0mm/h in three quarters raining time

2.2 树干茎流

2.2.1 单株树木的树干茎流(以下简称干流) 理论上,在一次降水过程中,只有当树体表面充分湿润并有持续降水时才产生干流,即存在一个产生干流的降水临界值;研究发现,该值受前 24h 降水量和树种两种因素影响。本次降水之前很短的时间内有降水,树体表面尚未充分干燥,仍然保留相当的水分,则在本次降水中只需很少的雨量就能形成干流,若前 24h 无降水(特别是多日无降水时),产生干流的临界值

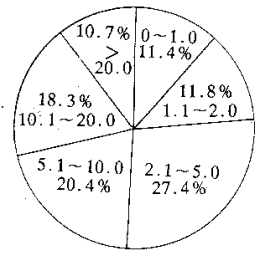


图 3.2 总降水量的 50% 以上雨强小于 5.0mm/h

Fig 3.2 More than 50% rain intensity of total precipitation is less than 5.0mm/h

则较大,另外,形成干流的临界值还由于树种的不同而有很大差别,一般来说,油松和棘皮桦为 4.0mm,落叶松为 3.5mm,辽东栎为 2.0mm。

研究结果(表 1)表明,在降水特性相同的情况下,树种间的干流量差异很大;在测定的 4 个树种中,平均单株树干茎流量以辽东栎为最大为 1002.7kg,其次为落叶松为 140.6kg,油松为 95.9kg,棘皮桦最小为 57.8kg。以平均单株树冠的垂直投影面积为基础,换算成单位面积上的干流水深及其占同期降水量(723.6mm)的百分比为辽东栎,29.94mm,4.14%;落叶松,16.74mm,2.31%;油松,8.65mm,1.20%;棘皮桦,2.86mm,0.40%。

表 1 1996 年 4 个树种各测株的干流量(kg)

Table 1 Stemflow of four tree species in 1996

树种 Tree species	序号 No.	胸径 Breast diameter	冠幅 Crown area	干流量 Stem- flow	树种 Tree species	序号 No.	胸径 Breast diameter	冠幅 Crown area	干流量 Stem- flow
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	1	15.8	11.04	108.40	棘皮桦 <i>B. dahurica</i>	12	25.0	24.85	84.09
	2	10.0	6.83	86.32		13	22.6	18.47	69.34
	3	17.3	17.35	110.94		14	15.1	17.35	19.94
	4	14.7	8.55	127.10		15	11.8	7.79	177.52
	5	16.5	11.64	46.71		16	13.5	10.18	206.89
辽东栎 <i>Q. liaotungensis</i>	6	21.5	37.53	1078.68		落叶松 <i>L. principis- rupprechtii</i>	17	9.9	5.31
	7	21.0	26.88	696.12	18		10.0	6.38	73.66
	8	23.6	41.85	1834.02	19		10.5	8.81	51.42
	9	25.8	44.18	1379.39	20		9.9	5.11	132.52
	10	14.6	12.72	473.80	21		16.4	15.21	122.18
	11	23.5	37.66	551.10					

表 2 4 个树种平均单株干流量(kg)差异显著性检验

Table 2 The difference of stemflow per tree among four tree species was tested using ANOVA

	辽东栎 <i>Q. Liaotungensis</i>	棘皮桦 <i>B. dahurica</i>	落叶松 <i>L. principis- rupprechtii</i>
油松 <i>P. tabulae- formis</i>	19.04**	0.81	1.81**
辽东栎 <i>Q. liaotun- gensis</i>		19.85**	20.85**
棘皮桦 <i>B. dahurica</i>			1.00**

注: ** 差异极显著

同一树种各测株的干流量不仅取决于树木的大小,而且取决于树冠的结构。由表 1 可知,树木的平均干流量一般随径级和冠幅的增大而增大;但由于树冠结构的不同,有些胸径和冠幅较大的树木(如 5 号 和 19 号测株)其干流量反而较小,这与 Helrey^[10]和董世仁等的结论一致;其原因可能与各测株的分枝角度有关,分枝角度增大,树木干流量减小。Richard Lee^[11]的研究结论:干流水主要来自树木的枝条而不是来自叶片从另一侧面证明了这一点。

由表 2 可知,在 4 个树种平均单株干流量相互之间进行的差异显著性检验中,除油松与棘皮桦之间在 0.10 水平上显著外,其余均在 0.01 水平上达到极显著,可见树种间的干流量差异十分明显。

树种间干流量之所以相差很大,与不同树种的形态结构有关。干流产生的过程,是树叶表面截获的降雨汇入枝条,再汇入树干,最后进入林地;因此,叶片的形状、大小、排列方式、叶柄的粗细、枝条与树干的夹角、树皮的特性都影响干流量的大小。

辽东栎叶片大而光滑,叶柄粗壮,能承受较大雨滴的冲击,截获较多的降水;其枝条与树干间的夹角平均为 38° ,有利于水分向下流动,汇入树干,其树皮坚实且裂成纵向条纹,水分被吸收很少,大部分成为干流,因此辽东栎形成干流的降水临界值低,干流量大。同为阔叶树的棘皮桦虽然枝条分枝角度小(平均 29°),但其叶片小而柔软,叶柄细小,叶片呈下垂状态,降水大都直接从叶片滴下,另外其枝干表面的死树皮厚而松软,即能吸收较多的水分,又不利于水分流动,因此其树干茎流最小。

落叶松针叶很短,紧附于小枝上,针叶截获的水分大都直接顺枝条向下流动,加上枝干表面光滑,即使枝条分枝角度较大(平均 75°),也能产生较多干流。油松的针叶坚硬稠密,能截获较多的降水,但其枝条大都从主干上水平伸出且在顶端稍向下垂,针叶截获的降水直接滴下成为穿透降水而不能流向树干,另外,基枝干表面死树皮厚而松软,不利于水分向下流动,这也是其干流量小的主要原因。

由于干流主要在树木根部下渗分布,易于被根吸收,因而对树木生长起着相当重要的作用,特别是在干旱、半干旱条件下,干流对于维持树木体内水分平衡,减缓缺水对树木生长造成的影响,提高大气降水的利用效率无疑具有十分重要的意义。

2.2.2 不同森林类型的干流量 董世仁等^[1]认为,油松林在降水量增加到 4mm 左右时干流出现;干流量同降水量间具有良好的直线关系;卢俊培和刘曙光等^[4,6]也持相同观点。事实上,降水特性的各个方面都对干流量产生影响,因此本文采用降水量、平均雨强、最大雨强、降水持续时间和前 24h 时降水量 5 个自变量对各森林类型的干流量进行多元回归分析,结果发现,4 种森林类型的干流量(mm)除与降水量 P (mm)密切相关外,还与前 24h 降水量 P_1 (mm)显著相关,但与其它 3 项降水特性相关不显著(见表 3)。

表 3 4 种森林类型干流量(mm)的回归方程

Table 3 Regression equation of stemflow in four forests

森林 Forest	B_0	b_1	b_2	复相关 系数 R	回归方程显 著性检验 F	回归系数显著性检验 E_1	E_2
油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	-0.1402	0.0384	0.0048	0.9866	858.492	1715.307	12.484
辽东栎林 <i>Q. liaotungensis</i> forest	-0.1696	0.1020	0.0049	0.9927	1599.916	3177.385	13.436
混交林 Mixed deciduous broad-leaved forest	-0.1945	0.0560	0.0070	0.9915	1371.029	273.408	20.011
落叶松林 <i>L. principisrupprechtii</i> forest	-0.1925	0.0708	0.0077	0.9884	997.580	1991.640	11.089

* $E_{0.01}(2,47)=5.09, E_{0.01}(1,47)=7.20$

由表 3 中的回归系数显著性检验值可知, E_1 远远大于 E_2 , 这说明影响干流量的主要因素是降水量 P , 前 24h 降水量 P_1 对干流量的影响较小, 实际上 P_1 只是在降水量较小的情况下才有明显作用。所有回归方程的显著性检验值 F 均大于 $F_{0.01}(2,47)=5.09$, 这说明用降水量和前 24h 降水量来

模拟各森林类型的干流量是可靠的。

从两个生长季测定的结果来看, 4 种森林类型的干流量均以辽东栎林最大, 油松林最小; 由于两个生长季降水量差别明显(723.6mm 和 386.4mm), 致使两年各森林类型的干流量变化很大(辽东栎林为 66.68mm 和 35.19mm; 落叶松林为 43.76mm 和 23.12mm; 混交林为 32.77mm 和 17.36mm; 油松林为 22.15mm 和 11.75mm), 但是各森林类型的干流率则大致相同, 分别为 9.22% 和 9.11%、6.05% 和 5.98%、4.53% 和 4.49%、3.06% 和 3.04% (见表 4)。但是各森林类型的干流率随着季节的推移并无明显的变化规律, 这一点与华北油松人工林的研究结论不同^[1]。

4 种森林类型的干流率在低雨量(0~15mm)时随降水量的增加而迅速增大; 随着降水量继续增加到 15~20mm 时, 干流率则逐渐接近一个稳定的数值(表 5), 干流率曲线趋于平缓(图 4)。利用干流量与降水量的一元线性回归方程, 计算各森林类型干流率的理论最大值, 油松林为 3.80%, 辽东林为 10.16%, 混交林为 5.54%, 落叶松林为 7.02%。

表4 4种森林类型干流量(mm)和干流率(%)的月际变化
Table 4 Monthly changes of stemflow and S/P in four forests

年·月· Year- Month	降水量 Precipi- tation (mm)	油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest		辽东栎林 <i>Q. liaotungensis</i> forest		混交林 Mixed deciduous broadleaved forest		落叶松林 <i>L. principis- rupprechtii</i> forest	
		干流量	干流率	干流量	干流率	干流量	干流率	干流量	干流率
		Stemflow	S/P(%)	Stemflow	S/P(%)	Stemflow	S/P(%)	Stemflow	S/P(%)
1995-05	71.3	2.20	3.09	6.58	9.23	3.54	4.96	4.64	6.51
1996-06	67.9	1.48	2.18	5.17	7.61	2.64	3.89	3.01	4.43
1996-07	283.4	8.75	3.09	25.66	9.05	12.59	4.44	16.62	5.86
1996-08	210.3	7.19	3.42	20.09	9.65	10.36	4.93	13.91	6.61
1996-09	65.3	1.71	2.62	6.03	9.23	2.46	3.77	3.38	5.18
1996-10	25.4	0.81	3.19	2.96	11.65	1.18	4.65	2.21	8.70
合计 Total	723.6	22.15	3.06	66.68	9.22	32.77	4.53	43.76	6.05
1997-05	80.3	2.52	3.14	7.36	9.17	3.72	4.63	4.90	6.10
1997-06	47.3	1.08	2.28	3.85	8.14	1.62	3.42	2.34	4.95
1997-07	63.5	1.80	2.83	5.50	8.66	2.67	4.20	3.57	5.62
1997-08	128.1	4.22	3.29	12.20	9.52	6.21	4.85	8.15	6.36
1997-09	67.2	2.12	3.15	6.28	9.25	3.14	4.67	4.16	6.19
合计 Total	386.4	11.75	3.04	35.19	9.11	17.36	4.49	23.12	5.98

表5 4种森林类型干流量(mm)随降水量(mm)的变化
Table 5 Changes of stemflow with precipitation in four forests

降水量 Precipi- tation (mm)	次数 Times	降水量 (mm)	油松林 <i>P. tabulae formis</i> forest		辽东栎林 <i>Q. liaotungensis</i> forest		混交林 <i>mixed deciduous</i> <i>broad-leaved</i> forest		落叶松林 <i>L. principis rupprechill</i> forest	
			Stemflow	S/P(%)	Stemflow	S/P(%)	Stemflow	S/P(%)	Stemflow	S/P(%)
			≤2.5	13	24.4	0.018	0.07	0.584	2.39	0.050
2.6~5.0	13	46.9	0.536	1.14	2.864	6.11	0.640	1.36	1.483	3.16
5.1~10.0	16	113.4	2.223	1.96	9.885	8.72	3.784	3.34	5.034	4.44
10.1~15.0	18	239.6	6.876	2.87	21.391	8.93	10.191	4.25	14.973	6.25
15.1~20.0	5	81.9	2.567	3.13	7.894	9.64	3.919	4.79	5.043	6.16
20.1~30.0	7	162.7	5.757	3.54	15.525	9.54	8.263	5.08	10.356	6.37
30.1~40.0	2	73.7	2.604	3.53	7.233	9.81	3.817	5.18	4.916	6.67
40.1~50.0	2	84.6	3.012	3.56	8.334	9.85	4.413	5.22	5.675	6.71
50.1~60.0	1	57.3	2.060	3.60	5.673	9.90	3.015	5.26	3.865	6.75
60.1~70.0	1	68.9	2.505	3.64	6.855	9.95	3.664	5.32	4.686	6.80
>70.0	2	156.6	5.740	3.67	15.629	9.98	8.375	5.35	10.702	6.83

运用饱和曲线对其进行拟合,则各森林类型干流率与降水量的回归方程为:

$$\text{油松林 } S/P(\%) = 3.6719(1 - \exp(-0.1057p))$$

$$\text{辽东栎林 } S/P(\%) = 9.8439(1 - \exp(-0.2354p))$$

$$\text{混交林 } S/P(\%) = 5.3579(1 - \exp(-0.1128p))$$

$$\text{落叶松林 } S/P(\%) = 6.7800(1 - \exp(-0.1473p))$$

万方数据

相关指数分别为 0.9711、0.9558、0.9635 和 0.9636。

5 结论

5.1 本站年均降水量 659.6mm,大部分集中在 6~9 月份;日降水量小于 5.0mm 的日数占全部降水日数的 60% 以上,而占总降水量的 72.5% 的日降水量大于 10.0mm;超过四分之三的降水时间,其雨强小于 2.0mm/h;一半以上的总降水量以小于 5.0mm/h 的雨强产生。

5.2 树种间的树干茎流量差异十分明显;在降水量相同的情况下,树干茎流量与树种的形态结构有关;1996 年各树种平均单株树干茎流量以辽东栎(30.3mm)为最大,其次是落叶松(16.1mm)和油松(8.9mm),棘皮桦(2.9mm)最小;分别占同期降水量(723.6mm)的 4.19%,2.22%,1.23%和 0.40%。

5.3 两个生长季各森林类型的干流量的大小顺序是辽东栎林(66.68mm, 35.19mm) > 落叶松林(43.76mm, 23.12mm) > 混交林(32.77mm, 17.36mm) > 油松林(22.15mm, 11.75mm),各森林类型的干流率则分别为 9.22% 和 9.11%、6.05% 和 5.98%、4.53% 和 4.49%、3.06% 和 3.04%。

5.4 4 种森林类型的干流量 S 均与降水量 P 和前 24h 降水量 P_1 呈显著正相关关系;干流率在低雨量(0~15mm)时随降水量的增加而迅速增大;当降水量继续增加时,干流率曲线逐渐趋于平缓。

参考文献

[1] 董世仁,等. 华北油松人工林的透流、干流和树冠截留. 北京林业大学学报,1987,9(1):58~67.
 [2] 郭景唐,刘曙光. 华北油松人工林树枝特征函数对干流量影响的研究. 北京林业大学学报,1988,10(4):11~16.
 [3] 魏晓华,周晓峰. 三种阔叶次生林的茎流研究. 生态学报,1989,9(4):325~329.
 [4] 卢俊培,曾庆波. 热带森林水文学研究综述. 热带林业科技,1987(2):1~9.
 [5] 周光益等. 热带林茎流收集及计算方法探索. 生态学杂志,1994,13(5):63~66.
 [6] 刘曙光. 降雨在林冠中的分割研究透视. 林业科技通讯,1990(12):16~18.
 [7] 潘树荣,等. 自然地理学. 北京:高等教育出版社,1985.
 [8] 茅世森,宋凤山. 小龙门地区的气候特征. 见:陈灵芝主编. 暖温带森林生态系统结构与功能的研究. 北京:科学出版社,1997,28~37.
 [9] Swift L W Jr, et al. Climatology and Hydrology. W. T. Swank, D. A. Crossley, Jr. eds. *Ecological Studies 66: Forest Hydrology and Ecology at Corveeta*. Springer-Verlag, 1984.
 [10] Helrey J D. A summary of rainfall interception by certain conifers of North America. *Proceeding of the international symposium for hydrology professors biological effects in the hydrological cycle, Purdue University, Lafayette, Indiana*. 1971. 103~113.
 [11] Rachard Lee. 张建列译. 森林水文学. 哈尔滨:东北林业大学出版社,1984.

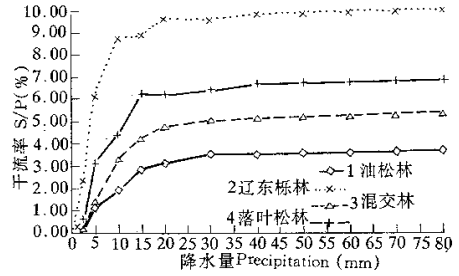


图 4 4 种森林类型干流率随降水量的变化
 Fig. 4 Changes of S/P (%) with precipitation in four forests