

降雨特征对南亚热带马尾松人工林降水分配格局的影响

张继辉^{1,2}, 郑路^{1,2}, 陈琳^{1,2}, 闵惠琳^{1,2},
李华^{1,2}, 刘士玲^{1,2}, 吴思达^{1,2}, 杨丽梅^{1,2}

(1.中国林业科学研究院热带林业实验中心,广西 凭祥 532600;
2.广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站,广西 凭祥 532600)

摘要: 探究马尾松人工林降雨特征对降水分配格局的影响,为南亚热带人工林经营管理提供科技支撑。依托广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站降水分配观测场,采用野外定位研究方法,以 30 年马尾松人工林为研究对象,观测了 2018 年 1—12 月的林外降雨、林内透流、干流和冠层截留。结果表明:研究区年降雨总量 1 303.6 mm,马尾松林的透流、干流及截留量分别占同期降雨的 60.9%,0.4%,38.7%。产生透流和干流的最小雨量分别为 0.4、2.2 mm。4 个降雨特征指标中(雨量、雨强、历时和 2 次降水间隔时间),降雨量在马尾松降水格局分布中影响最大,雨强和历时对透流量、透流率、干流量、冠层截留量及冠层截留率均有显著影响,而 2 次降水间隔时间仅对透流量、干流量和冠层截留量有显著影响。SPSS 多元线性回归分析表明,3 个冠层水文分量对降雨特征的响应并非同步,降雨特征对林内透流和截留的影响大于干流。

关键词: 降雨特征;透流;干流;冠层截留;降水分配格局

中图分类号:S796 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2021)01-0174-07
DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.01.026

Effects of Rainfall Characteristics on Rainfall Partitioning in
Plantation of *Pinus Massoniana* in South Subtropical

ZHANG Jihui^{1,2}, ZHENG Lu^{1,2}, CHEN Lin^{1,2}, MIN Huilin^{1,2},
LI Hua^{1,2}, LIU Shiling^{1,2}, WU Sida^{1,2}, YANG Limei^{1,2}

(1.Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi 532600;
2.Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi 532600)

Abstract: To provide basic hydrological data for sustainable management of south subtropical forest plantations, we measured rainfall, throughfall, stemflow and canopy interception in a 30-year old *Pinus massoniana* stand at Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station from January to December 2018. The results showed that total annual rainfall was 1 303.6 mm, with throughfall, stemflow and canopy interception accounting for 60.9%, 0.4% and 38.7% of total rainfall, respectively. The minimum rainfall that produced throughfall and stemflow was 0.4 and 2.2 mm, respectively. Among the four rainfall factors (rainfall amount, rainfall intensity, rainfall duration, and interval time between two rainfall events), rainfall amount had the strongest effect on rainfall distribution pattern. Rainfall intensity and rainfall duration had a significant impact on throughfall, throughfall rate, stemflow, canopy interception, and canopy interception rate. Interval time between two rainfall events only had a significant impact on throughfall, stemflow, and canopy interception. Results of multiple linear regression analysis showed that the responses of the three components of rainfall partitioning to rainfall characteristics were not synchronized, with throughfall and canopy interception being more affected by rainfall characteristics than stemflow.

Keywords: rainfall characteristic; throughfall; stemflow; canopy interception; rainfall partitioning

森林生态系统具有重要的生态水文调节功能,包括涵养水源、水土保持、净化水质和调节地表径流等,其在陆地生态系统中占有重要地位^[1]。森林冠层的水文效应包括林内透流、干流、截留 3 部分,其在森林

收稿日期:2020-06-16
资助项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2019MA003);中国林业科学研究院热带林业实验中心科学基金项目(RL-2020-04)
第一作者:张继辉(1993—),男,硕士研究生,主要从事生态水文研究。E-mail:1335902871@qq.com
通信作者:郑路(1969—),男,高级工程师,主要从事森林生态研究。E-mail:1679634722@qq.com

生态系统水文循环过程中占有十分重要的地位。近年来有许多学者针对不同森林植被类型产生的水文效应进行了研究,包括冠层截留与降雨再分配特征^[2-3]、枯落物及土壤水文效应等^[4]。降水通过植被冠层的再分配作用,一方面改变了降雨的林内空间分布格局,另一方面也影响了水分与养分的循环过程^[5]。已有研究^[3]发现,森林冠层截留特征受大气降雨、雨前林冠湿润度、近地面气象条件、下垫面特征、林木特征、林分空间结构等多因素的综合影响,冠层截留降雨是森林水分再分配的第 1 层,直接影响着森林生态系统的水量平衡过程,不仅滞留了一定的大气降雨,而且直接影响了降水营养元素的输入^[2]。林内透流在降雨再分配过程中占比最大,它是林下土壤水分的主要来源^[6];同时,林内降雨也是林地养分淋入的重要途径,近地面漂浮物、森林冠层截持物经穿透雨淋洗后以湿沉降的形式输入到林地上^[7-8]。干流所占比例虽小,但是在此过程中茎流冲刷树干,大量营养物质被携带进入土壤,从而有效改善林木根系的可利用水分和养分条件,促进林木生长^[9]。可见,植被冠层的降雨再分配作用对林木的养分循环、生长发育都具有重要意义^[10-11]。虽然国内外关于冠层截留等降雨再分配过程有过大量的研究报道,但针对特定树种林分的研究报导仍显不足,本研究可以丰富森林水文功能和森林生态系统水分循环机制的认知,提高森林水文模拟的准确性。

南亚热带森林资源丰富,是我国重要的木材资源储备基地,马尾松作为该地区主要经营的常绿针叶树种之一,是极其重要的造林树种,具有极高的生态经济价值^[12-13]。本研究依托广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站降水分配观测场,对研究区马尾松林的大气降雨量、透流量、干流量进行实时监测,分析降雨特征对马尾松人工林降水分配格局的影响,揭示马尾松人工林森林水文过程,为该地区生态保护及人工林经营管理提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于中国林业科学研究院广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站热带林业实验中心伏波实验场站点(106°51′30″—106°52′36″E, 22°02′17″—22°02′23″N),年均气温 21.5℃,≥10℃积温 6 000~7 600℃。年降水量 1 220~1 380 mm,全年降雨主要集中在 7—8 月,达 500~600 mm,占全年降雨的 1/3。全年盛行东风,年平均风速 0.8 m/s,属典型的南亚热带季风气候。土壤为山地红壤,多为花岗岩母质发育而成,属酸性土^[13]。

本研究选取南亚热带马尾松人工林为研究对象,林

龄 30 年,林分密度 349 株/hm²,平均胸径 25.6 cm,平均树高 13.6 m,郁闭度 0.7。海拔 600 m,东南坡向,坡度 22°。乔木主要包括马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、红椎(*Castanopsis hystrix* Miq.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb. Hook.))、米老排(*Mytilaria laosensis* Lec.)等。林下灌木主要包括玉叶金花(*Mussaenda pubescens* Ait. f.)、越南悬钩子(*Rubus cochinchinensis* Tratt.)、酸藤子(*Embelia laeta*)等,草本植物主要包括铁芒萁(*Dicranopteris linearis* (L.) Mez (E. obovata Hemsl.))、扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum* L. sp.)、半边旗(*Pteris semipinnata* L.)等。

1.2 观测方法

(1)林外降雨(P)观测:利用安装在研究样地附近碳通量塔塔顶(35 m)的自记翻斗雨量仪(TE525MM, Campbell, USA, 分辨率 0.2 mm)进行观测,使用 UA-003-64(Campbell, USA)传感仪实时记录数据。

(2)林内透流(C)观测:根据马尾松冠层分布特征,在其林下设置 1 块 30 m×30 m 样地,在样地内网格化布置 15 个直径 16.5 cm 的自记雨量计(水平截雨面积 213.72 cm²)。

林内透流率 C_r (%)的计算公式^[7]为:

$$C_r = \frac{C}{P} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C 为透流量(mm); P 为林外大气降雨量(mm)。

(3)干流(S)观测:以林木径阶分布(2 cm 为 1 个径阶,起始径阶 10.8 cm,共 4 个径阶)为依据选择 5 棵标准木为对象,在树干约 1.3 m 处使用内径 2.5 cm,长约 150 cm 的聚氯乙烯胶管蛇形环绕布设,末端连接数字翻斗流量计(DJ-50ML, 分辨率 50 mL)。

干流量(S , mm)的计算公式^[14]为:

$$S = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \frac{S_n}{K_n} M_n \quad (2)$$

式中: M 为活立木单位面积内的株数(株); S_n 为每个径级干流量(mL); K_n 为每个径级林冠平均正投影面积(m²); n 为各径阶数(阶); M_n 为每个径阶树木对应株数(株)。

干流率(S_r , %)的计算公式^[7]为:

$$S_r = \frac{S}{P} \times 100\% \quad (3)$$

(4)冠层截留计算:

冠层截留量(J , mm)采用水量平衡公式^[7]计算:

$$J = P - (C + S) \quad (4)$$

式中: C 为林内透流量(mm); S 为干流量(mm)。

冠层截留率(J_r , %)的计算公式^[7]为:

$$J_r = \frac{J}{P} \times 100\% \quad (5)$$

(5)2 次降水间隔时间统计:

在一定地点或一定地区观测到 2 次降雨事件之间连续干燥的一段时期。利用安装在研究样地附近碳通量塔塔顶(35 m)的自记翻斗雨量仪的时间记录功能进行观测。

以上指标实行 24 h 实时监测,观测时间为 2018 年 1—12 月,每月中旬前往观测场人工导出数据,持续收集 1 年。研究数据用 SPSS 17.0 软件进行方差分析(ANOVA),相关性分析(Pearson correlation analysis)和多元线性回归分析(Multiple linear regression analysis),显著性水平设为 0.05,用 Excel 2013 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 研究期降雨特征

基于 2018 年友谊关国家定位站 1—12 月的观测

数据,按降雨间隔时间不超过 4 h 划分为 1 场降雨事件^[15],研究期共观测有 180 场降雨(表 1),总降雨量为 1 303.6 mm。从年内降雨分布来看,降雨主要集中在 5—9 月,期间累计降雨量 870.8 mm,占年降雨总量的 66.8%。降雨频次最高的为 8 月,2 月最少。2018 年出现了 118 场一次性降雨量≤5 mm 的降雨,占总次数的 65.6%,累计降雨量 168.7 mm,占总降雨量的 12.9%。;有 18 场降雨为 5~10 mm 的小一中雨,这 18 场的降雨占总降雨次数的 10%;有 30 场中雨(11~25 mm)的总降雨量达到了 460 mm,占总降雨量的 35.3%,降雨次数占比 16.7%;出现了 12 场大雨(26~50 mm)和 2 场暴雨(>50 mm),其降雨量分别占总降雨量的 32.0%和 9.5%,中大雨占比约 7.8%,降雨量共计 540.4 mm,占总降雨量的 41.5%,说明该研究区年内降雨较充沛。

表 1 研究期降雨特征

月份	降雨量级(P)						月降雨量/mm	降水间隔时间/h
	小雨 (≤5 mm)	小一中雨 (5~10 mm)	中雨 (11~25 mm)	大雨 (26~50 mm)	暴雨 (>50 mm)	总计		
1	10	2	2			14	49.0	621
2	7	1				8	17.4	557
3	10	2		1		13	82.2	583
4	6	2	2	1		11	69.0	611
5	9		2		1	12	96.5	632
6	9	2	3	2		16	153.7	494
7	14	3	4			21	116.0	627
8	14		8	5	1	28	401.2	547
9	8	2	3	1		14	103.4	579
10	6	4	1	1		12	78.2	605
11	10			1		11	44.8	578
12	15		5			20	92.2	686
总降雨量/mm	168.7	134.0	460.5	416.6	123.8		1303.6	
总降雨场次	118	18	30	12	2	180		

2.2 马尾松人工林降水分配特征

在 180 场大气降雨事件中,共产生 152 场林内透流和 112 场干流,频率分别为 80%和 60%。透流总量 793.5 mm,干流总量 5.5 mm,截留总量 504.6 mm 分别占大气降水的 60.9%,0.4%,38.7%,再分配比例各月差异较大(表 2)。最高透流率出现在 12 月(87.3%),1 月最小(30.3%)。8 月的透流频率高达 1.0,除 4,12 月外,其他 10 个月透流频率均达 0.8 以上,4 月的透流频率最小(0.6)。最高干流率出现在 5 月(0.7%),4 月最小(0.1%)。6 月的干流频率高达 0.9,7,8,12 月干流频率均达 0.7,2,3,11 月的干流频率最小,均为 0.4。对整年冠层水文事件进行分析,产生透流和干流的最小降雨量分别为 0.4,2.2 mm。

2.3 降雨特征对透流的影响

由图 1 可知,透流量与降雨量、雨强、历时及 2 次

降水间隔时间均表现出极显著的线性相关关系($P<0.01$)。观测期间,透流总量为 793.5 mm,占同期林外降雨总量的 60.9%。其中,透流最大值为 55.7 mm(林外降雨量为 66.2 mm),最小值为 0.02 mm(林外降雨量为 0.4 mm)。透流与大气降雨关系密切。其回归方程为: $y=0.6947x-0.2875(R^2=0.916\ 8,P<0.01)$ 。式中: y 为透流量(mm); x 为大气降雨量(mm)。由方程求得,当降雨量为 0.4 mm 时,透流产生。

由图 1 可知,透流率与降雨量、雨强和历时均表现出极显著的对数函数关系($P<0.01$),与 2 次降水间隔时间无显著性关系($P=0.055$)。当降雨量<13.8 mm 时,透流率随降雨量的增加而急剧增加;降雨量>13.8 mm 时,透流率随降雨量的增加而缓慢增加。其拟合方程为: $y=9.7117\ln x+31.42(R^2=0.308\ 7,P<0.01)$ 。式中: y 为透流率(%); x 为大气降雨量(mm)。透流量、透

流率与降雨强度、降雨历时及 2 次降水间隔时间的关系 与上述关系类似,不再重复叙述。

表 2 降雨分配特征

月份	透流量/ mm	干流量/ mm	截留量/ mm	透流率/ %	干流率/ %	截留率/ %	透流 场次	干流 场次	透流 频率	干流 频率
1	14.9	0.10	34.1	30.3	0.2	69.5	12	8	0.9	0.6
2	9.2	0.02	8.2	52.6	0.1	47.3	7	3	0.9	0.4
3	29.7	0.50	52.0	36.2	0.6	63.3	12	5	0.9	0.4
4	35.2	0.04	33.8	51.0	0.1	49.0	7	7	0.6	0.6
5	73.9	0.60	21.9	76.6	0.7	22.7	9	7	0.8	0.6
6	102.9	0.80	50.0	67.0	0.5	32.5	15	14	0.9	0.9
7	70.3	0.20	45.5	60.6	0.2	39.3	18	15	0.9	0.7
8	241.4	2.30	157.5	60.2	0.6	39.3	27	19	1.0	0.7
9	61.6	0.40	41.4	59.6	0.4	40.0	12	9	0.9	0.6
10	37.6	0.20	40.4	48.1	0.2	51.7	9	7	0.8	0.6
11	36.4	0.10	8.3	81.2	0.3	18.5	10	4	0.9	0.4
12	80.4	0.30	11.5	87.2	0.3	12.5	14	14	0.7	0.7
合计	793.5	5.50	504.6	60.9	0.4	38.7	152	112	0.8	0.6

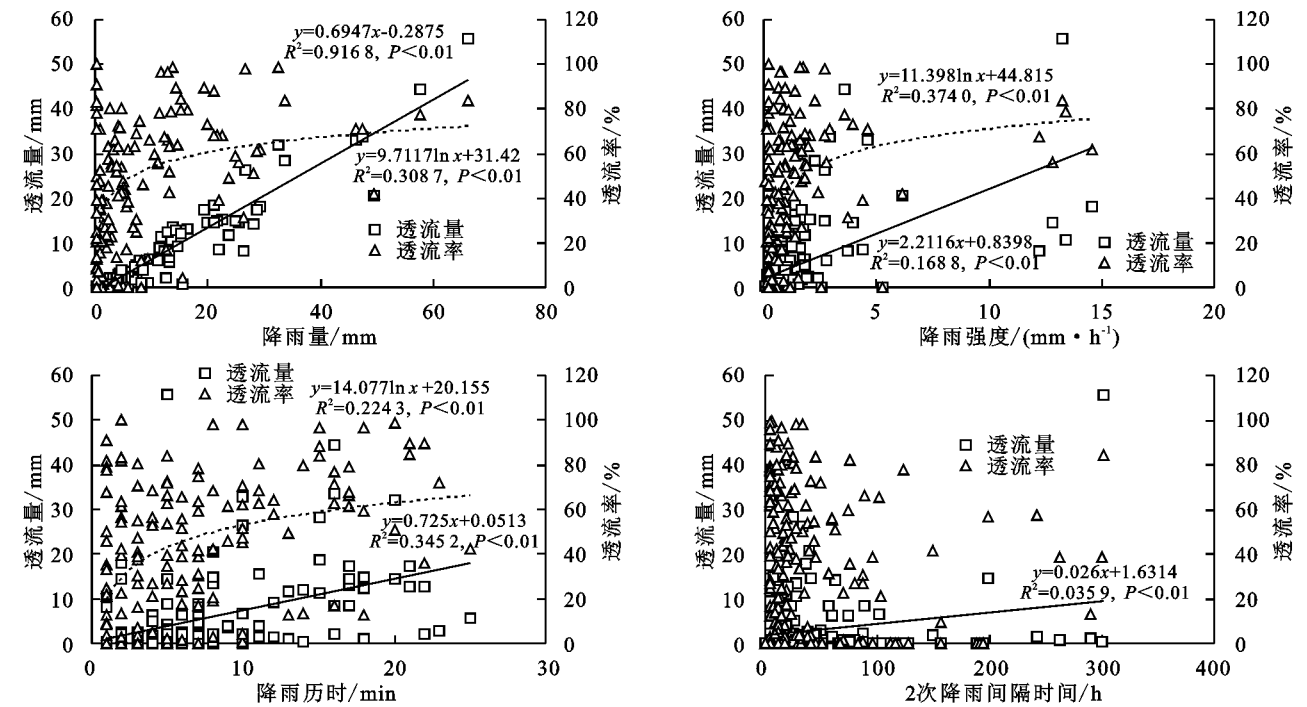


图 1 透流与降雨特征的关系

2.4 降雨特征及林冠截留对干流的影响

由图 2 可知,干流量和降雨量、雨强、历时和 2 次降水间隔时间均呈极显著的线性关系($P<0.01$),观测期间,共观测到 112 次干流事件,占总降雨次数的 62.2%;干流总量为 5.5 mm,约占降雨总量的 0.4%。其中,干流最大值为 0.6 mm(降雨量为 66.2 mm),最小值为 0.001 mm(降雨量为 2.2 mm)。随着林外降雨量的增大,干流呈现显著的增加趋势,干流量与大气降雨量的回归方程为: $y=0.0066x-0.0083(R^2=0.7419, P<0.01)$ 。式中: y 为干流量(mm); x 为大气降雨量(mm)。其他 3 个降雨指标也伴随干流量的增大呈现不同程度的增加趋势,其间相关关系不再重复叙述。干流率与各降雨特征因子均未表现出显

著相关关系($P>0.05$)。

由图 3 可知,干流量与截留量表现出极显著的线性相关关系($P<0.01$),其回归方程为: $y=0.0121x-0.0021(R^2=0.4674, P<0.01)$ 。式中: y 为干流量(mm); x 为截留量(mm),而干流率与截留率也表现出显著相关关系($P<0.05$),马尾松干流与截留关系密切。

2.5 降雨特征对冠层截留的影响

由图 4 可知,截留量与降雨量表现出极显著的线性关系($P<0.01$),与雨强、历时及 2 次降水间隔时间均呈极显著的二次多项式关系($P<0.01$),截留率与降雨量、雨强及历时表现出极显著的二次多项式关系($P<0.01$),且极显著负相关($P<0.01$),与 2 次降

水间隔时间无显著性关系($P=0.051$)。随降雨量的增大,冠层截留量显著增加;随降雨强度、降雨历时及

2 次降水间隔时间的增大,冠层截留量呈现缓慢先增加后降低的趋势。

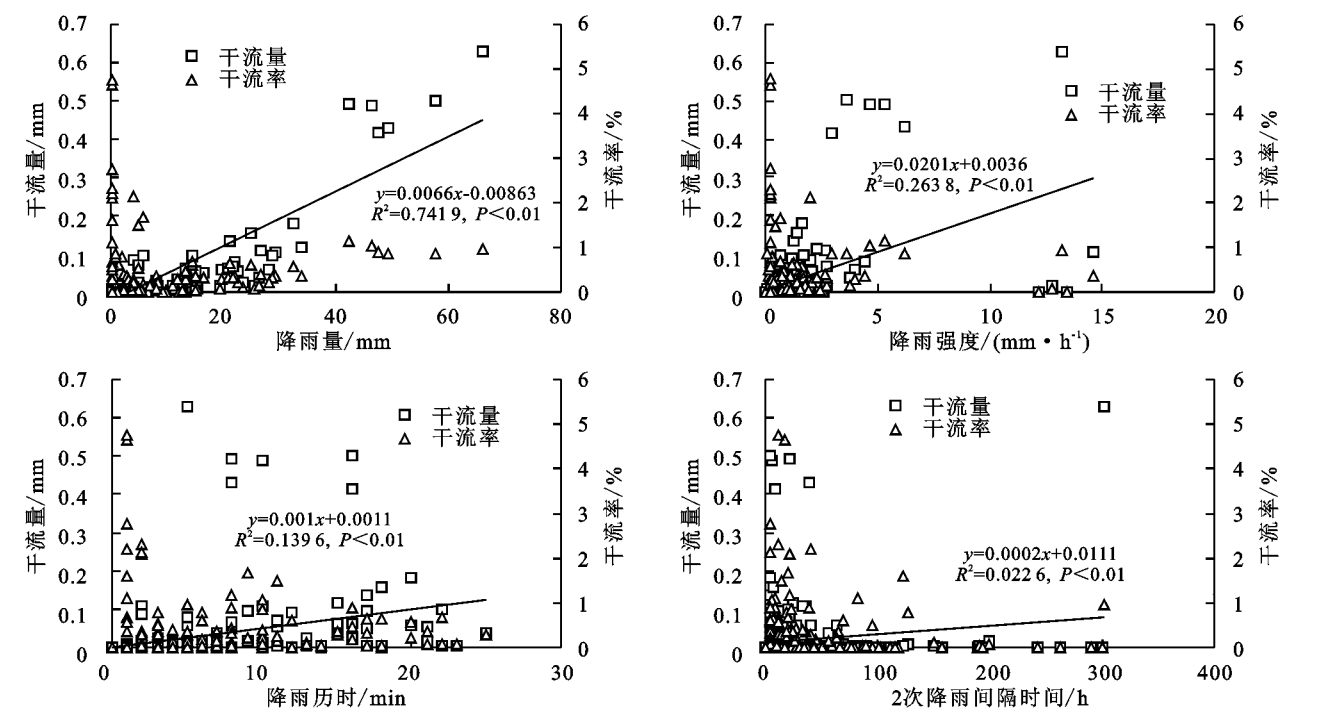


图 2 干流与降雨特征的关系

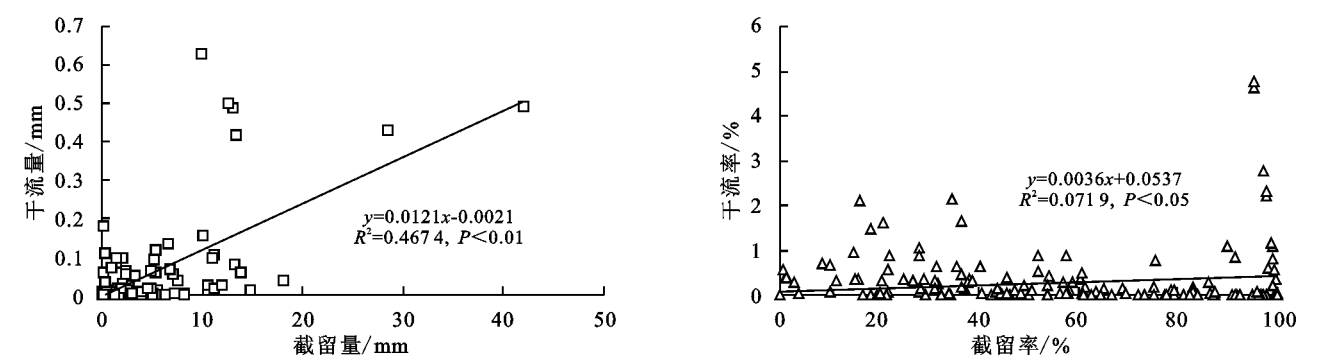


图 3 干流与截留的关系

从图 4 可以发现,冠层截留率均伴随降雨量、降雨强度和降雨历时的增大呈现出明显的先增大后降低的趋势,当降雨量、降雨强度、降雨历时分别小于 29.2 mm、6.2 mm/h、10 h 时,冠层截留率显著增加,其峰值分别达到 38.1%,57.5%,99.01%,超过以上界限值后急剧下降。

3 讨论

观测期间,马尾松降雨分配格局的 3 个冠层水文分量(透流量、干流量、冠层截留量)分别为 793.5、5.5、504.6 mm,3 个分量均与大气降雨量表现出极显著的线性关系($P<0.01$),且拟合度较好($R^2\geqslant 0.62$)。本研究 4 个降雨因素中,降雨量是在马尾松人工林降水分布中占主导地位,降雨强度和降雨历时对透流量、透流率、干流量、冠层截留量及冠层截留率均有显著影响($P<0.01$),而 2 次降水间隔时间仅对透流量、干流量和冠层截留量有显著性影响($P<0.01$)。

本研究发现,冠层截留与降雨量、降雨历时和降雨强度均呈极显著的二次多项式关系($P<0.01$),即当降雨特征值达到 1 个阈值时,树冠截留出现下降趋势(图 4),这与陈书军等^[16]的研究结果相似。3 个冠层水文分量中,大气降雨量与冠层截留的拟合度最好($R^2=0.6211, P<0.01$)。雨水在整个降雨事件中,其绝大部分在初期被冠层所截留,伴随历时的增加,冠层枝叶逐渐进入饱和状态,此时便出现林内穿透降雨,冠层截留部分最终蒸发返还大气^[17],所以降雨历时对截留和透流过程均有显著的调控作用。雨强较小时,大气降雨通过林冠截持可有效滋润冠层枝叶,冠层截留率随之升高,贾永正等^[18]对苏南毛竹林以及杜妍等^[19]在对苏南马尾松林的研究中也得到了相同的结论。

为充分考虑各降雨特征指标之间的相互作用,基于多元线性回归分析以进一步理解降雨特征对南亚热带马尾松人工林降水分配格局的影响。由表 3 可知,3 个冠层水文分量与 4 个降雨因子经逐步回归分

析的自检验后,该模型剔除了降雨强度、降雨历时和 2 次降水间隔时间,选取降雨量与各冠层水文分量进行回归拟合,透流量回归方程的调整 R^2 达到 0.907,回归 $\text{Sig}=0<0.01$,说明透流量与降雨量的回归拟合比较理想。综上表明,南亚热带马尾松人工林透流量、干流量和截留量主要受降雨量影响($P<0.01$),

降雨因子间存在自相关性,3 个水文分量与降雨强度、降雨历时和 2 次降水间隔时间并无直接的线性关系。3 个冠层水文分量对降雨特征的响应并非同步,透流和截留过程受降雨特征的影响大于干流。对干流的估算应包含更多参数,如气象因子、林分空间和非空间结构等。

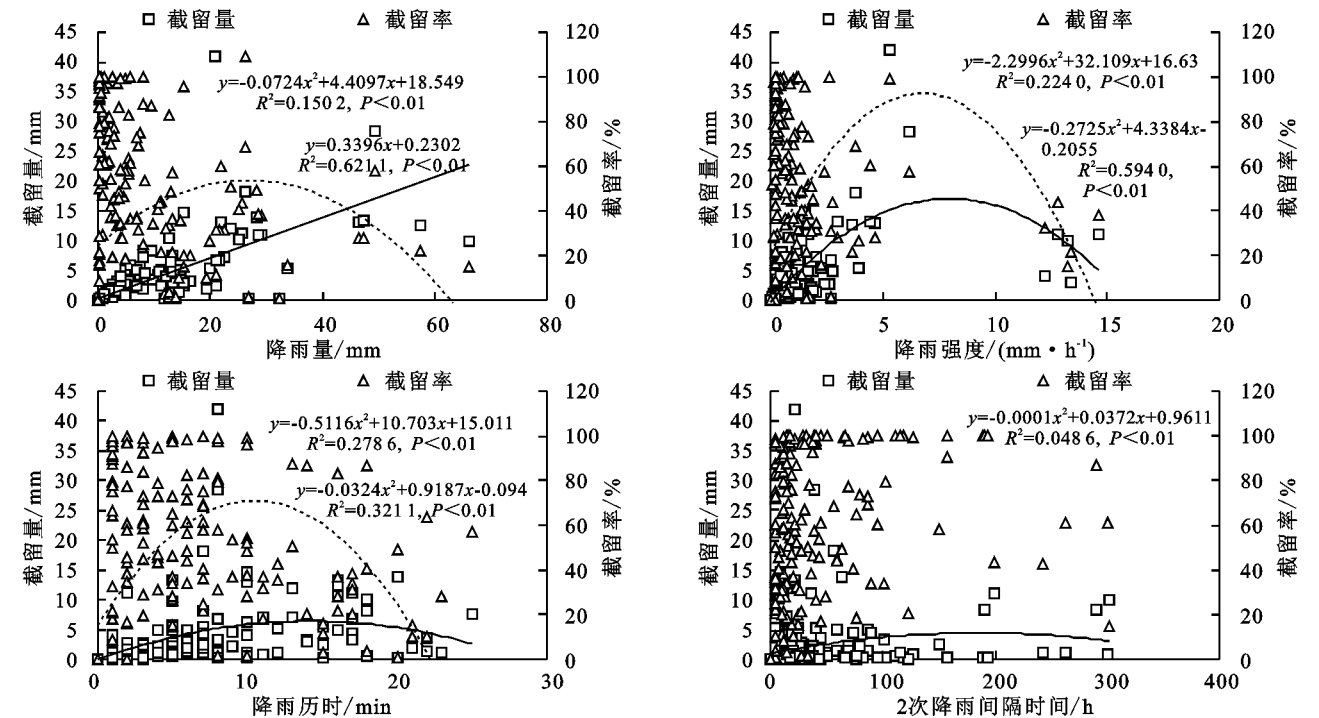


图 4 冠层截留与降雨特征的关系

表 3 降雨特征与降水分配格局之间的回归分析

标准化回归方程	R^2	调整 R^2	Sig	容差	VIF
$C = -0.757 + 0.714P$	0.907	0.907	$P(\text{Sig}) = 0$	$P(\text{容}) = 1$	$P(V) = 1$
$S = 0.003P$	0.412	0.408	$P(\text{Sig}) = 0$	$P(\text{容}) = 1$	$P(V) = 1$
$I = 0.583 + 0.329P$	0.559	0.557	$P(\text{Sig}) = 0$	$P(\text{容}) = 1$	$P(V) = 1$

注: C 为透流(mm); S 为干流(mm); I 为冠层截留(mm); P 为降雨量(mm)。

南亚热带 30 年生马尾松林透流和干流分别占总降雨量的 60.9% 和 0.4%,透流量、干流量随着同期林外降雨量增加而线性增加,该规律与许多学者^[19-21]的研究结果一致,但本研究所得出的数值相比张捷等^[20]研究的 32 年马尾松和袁秀锦等^[21]研究的 47 年马尾松林的透流率(77.5% 和 82.3%)和干流率(11.9% 和 1.4%)要低。本研究中,马尾松人工纯林冠层截留量为 504.6 mm,占同期林外降雨量的 38.7%。马尾松纯林冠层截留率高于西南喀斯特地区涟江流域马尾松(17.04%)^[22]、湘西武陵山区女儿寨小流域马尾松林(18.8%)^[23]、南京东善桥林场马尾松林(25.4%)^[19]、湖北秭归三峡库区马尾松林(16.3%)^[21],我国主要森林的冠层截留率介于 14.7%~31.8%^[24],本研究林分冠层截留率明显高于此范围,与距离该研究区较近的广西南宁桉树冠层截留率(32%)^[25]较为相近,说明广西南亚热带马

尾松冠层截留率处于全国较高水平。

本研究表明,马尾松林透流量、干流量和冠层截留量与同期林外降雨量呈显著正相关关系($P<0.01$)。研究结果差异可能与林龄有关,林龄相对较小的马尾松,其林冠一般成伞形,树冠层相对较厚^[21],降雨多数被林冠所截留,林内穿透降雨较少,随着森林的生长发育和林龄的增长,森林逐渐出现自然稀疏现象^[21],林分密度减小,透流量随之增加^[21]。马尾松林透流率与降雨量呈极显著的对数函数关系($P<0.01$),透流率随着同期林外降雨量的增加而增加,最后趋于稳定状态,这是由于林冠层截留水分达到饱和状态,此时大气降雨多数以穿透降雨的形式落至地面^[9]。

国内学者针对不同林分的透流和干流产生阈值进行了许多研究。当降雨量分别超过 0.85,2.44 mm 时,内蒙古科尔沁沙地樟子松开始出现透流和干流^[26],而兴安落叶松^[8]、红椎^[17]、蒙古栎^[27]、胡桃楸^[28]中则分别需要达到 4.2,7.2 mm,0.6,3.8 mm,6.7,4.3 mm,3.3,3.9 mm 才能产生透流和干流。本研究中,马尾松产生透流和干流的降雨阈值分别为 0.4,2.2 mm。虽然相关研究为探讨不同林分的降水分布特征及其林内分配格局积累了丰富的基础数据,但针对其差异产生的原因及机制的研究较少,尤其是

针对干流阈值产生机制。本研究中,通过分析降雨量与干流的一元线性关系($y=0.0066x-0.0083,R^2=0.7419,P<0.01$),估算产生干流的降雨量阈值为 1.42 mm,这与实际观测值 2.2 mm 存在一定的差异,说明干流的产生受多重因子的交互作用影响。

4 结论

南亚热带马尾松人工林的透流量、干流量及截留量分别占同期大气降雨的 60.9%,0.4%,38.7%。产生透流和干流的最小降雨量分别为 0.4、2.2 mm。3 个冠层水文分量均与降雨量表现出极显著的线性关系($P<0.01$),降雨量在南亚热带马尾松降水分配格局中占主导地位,降雨强度和降雨历时对透流量、透流率、干流量、冠层截留量及冠层截留率均有显著影响($P<0.01$),而 2 次降水间隔时间只对透流量、干流量和冠层截留量有显著性影响($P<0.01$)。基于多元线性回归分析表明,4 个降雨特征指标均能较好地估算透流量($R^2=0.91$)和冠层截留量($R^2=0.56$),但无法精准地估算干流量,降水分配格局中的 3 个冠层水文分量对降雨特征的响应并非同步,降雨特征对林内透流和冠层截留的影响大于干流。

参考文献:

[1] 吕一河,胡健,孙飞翔,等.水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务[J].生态学报,2015,35(15):5191-5196.

[2] 彭焕华,赵传燕,许仲林,等.祁连山青海云杉林冠层持水能力[J].应用生态学报,2011,22(9):2233-2239.

[3] 田风霞,赵传燕,冯兆东,等.祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素[J].生态学报,2012,32(4):62-72.

[4] 宣立辉,康凡,谷建才,等.冀北地区典型林分枯落物层与土壤层的水文效应[J].水土保持研究,2018,25(4):86-91.

[5] 余新晓.森林生态水文研究进展与发展趋势[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(3):391-402.

[6] 时忠杰,张宁南,何常清,等.桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应[J].生态学报,2010,30(7):1932-1939.

[7] 董玲玲,康峰峰,韩海荣,等.辽河源 3 种林分降雨再分配特征及其影响因素[J].水土保持学报,2018,32(4):147-152.

[8] 石磊,盛后财,满秀玲,等.兴安落叶松林降雨再分配及其穿透雨的空间异质性[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(2):90-96.

[9] 刘泽彬,王彦辉,邓秀秀,等.六盘山华北落叶松林下穿透雨空间变异特征[J].生态学报,2017,37(10):3471-3481.

[10] Shen H T, Wang X X, Jiang Y, et al. Spatial variations of throughfall through secondary succession of evergreen broad-leaved forests in eastern China [J].

Hydrological Processes,2012,26(11):1739-1747.

[11] 陈琳,刘世荣,温远光,等.南亚热带红锥和马尾松人工林生长对穿透雨减少的响应[J].应用生态学报,2018,29(7):2330-2338.

[12] Guillaume L, Christian V, Phabvilay S, et al. Linking crop structure, throughfall, soil surface conditions, runoff and soil detachment: 10 land uses analyzed in Northern Laos [J].Science of the Total Environment, 2018,616/617:1330-1338.

[13] 雷丽群,农友,陈琳,等.广西马尾松和红锥纯林降水再分配及冠层淋溶效应[J].生态学杂志,2018,37(10):24-30.

[14] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 33027-2016 森林生态系统长期定位观测方法[S].北京:中国标准出版社,2020:12.

[15] 盛后财,蔡体久,俞正祥.大兴安岭北部兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林下穿透雨空间分布特征[J].生态学报,2016,36(19):6266-6273.

[16] 陈书军,陈存根,曹田健,等.降雨量级和强度对秦岭油松林冠层截留的影响[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(1):41-55.

[17] 雷丽群,郑路,农友,等.降雨特征对红锥人工林降水分配格局的影响[J].生态学杂志,2020,39(2):460-468.

[18] 贾永正,胡海波,张家洋.苏南丘陵区毛竹冠层截留降雨分布格局[J].生态学报,2011,31(12):3537-3542.

[19] 杜妍,孙永涛,李宗春,等.苏南马尾松林分冠层水文过程对降雨的响应特征[J].北京林业大学学报,2019,41(6):120-128.

[20] 张捷,刘洋,张健,等.马尾松人工林林冠层降雨再分配及其氮磷特征[J].生态学杂志,2014,33(6):1451-1458.

[21] 袁秀锦,肖文发,雷静品,等.马尾松林分结构对冠层水文效应的影响[J].生态学杂志,2020,39(2):451-459.

[22] 周秋文,朱红.基于 Horton 模型的涟江流域马尾松冠层截留模拟[J].生态科学,2018,37(2):43-49.

[23] 罗佳,田育新,周小玲,等.女儿寨小流域 3 种植被类型林冠层对降水再分配研究[J].生态科学,2019,38(5):145-150.

[24] Wei X H, Liu S, Zhou G Y, et al. Hydrological processes in major types of Chinese forest [J].Hydrological Processes, 2005,19(1):63-75.

[25] 任世奇,项东云,肖文发,等.广西南宁桉树人工林降雨再分配特征[J].生态学杂志,2017,36(6):1473-1480.

[26] 刘亚,阿拉木萨,曹静.科尔沁沙地樟子松林降雨再分配特征[J].生态学杂志,2016,35(8):2046-2055.

[27] 孙忠林,王传宽,王兴昌,等.两种温带落叶阔叶林降雨再分配格局及其影响因子[J].生态学报,2014,34(14):3978-3986.

[28] 盛后财,郭娜,琚存勇,等.胡桃楸人工林降雨截留分配效应研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(7):128-133.