

苏南丘陵区毛竹林林冠水文特征

杜妍, 庄家尧, 周勇

(南京林业大学 水土保持与生态修复实验室, 南京 210037)

摘要:为探讨苏南丘陵区毛竹林内冠层水文特征,准确揭示冠层水文动态变化规律。2013 年 1 月到 2014 年 12 月连续两年对苏南丘陵区毛竹林(*Phyllostachy edulis*)林内水文效应进行了定位监测,使用自制装置收集树干径流、集水槽收集穿透雨、雨量筒收集林外降雨。研究不同的降雨量等级、降雨强度等级下,树干径流、穿透雨和林冠截留随降雨特征变化规律,并建立了回归模型,通过降雨量、相对湿度、降雨强度、风向、空气温度、相对湿度、叶面积指数定量分析了影响林冠截留的主要因素。结果表明:研究期内苏南丘陵区毛竹林外累计降雨量为 2 419.1 mm,林内累计穿透雨量、树干径流量、林冠截留量分别占同期降雨量的 58.70%,6.14%,35.16%;降雨量与穿透雨量、树干径流量呈现极显著线性关系,与林冠截留量的线性相关性较显著;毛竹林生长旺季月平均叶面积指数不断增加的同时,各月林冠截留总量随之增加,月平均林冠截留率整体呈下降趋势。研究区毛竹林林冠部分和树干的持水能力分别为 0.38 mm,0.1 mm,且降雨事件中形成树干径流的最小雨量为 1.30 mm。通过相关性分析得到影响毛竹林林冠截留主要气象因子为降雨量和降雨强度。研究可为苏南丘陵区毛竹林降雨再分配特征研究提供科学的数据支撑,为毛竹林集约发展提供理论基础。

关键词:毛竹林; 穿透雨; 树干径流; 林冠截留; 叶面积指数

中图分类号:S715.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0308-07

Hydrological Characteristics of the Canopy of *Phyllostachy edulis* Forest in Hilly Areas of Southern Jiangsu Province

DU Yan¹, ZHUANG Jiayao, ZHOU Yong

(Soil and Water Conservation and Ecological Restoration Laboratory,
Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract:To investigate the canopy hydrological characteristics of the bamboo forest in the hilly area of southern Jiangsu, and to reveal the dynamics of canopy hydrology, the hydrological effects of the *Phyllostachy edulis* forest in the hilly area of southern Jiangsu were monitored for two consecutive years from January 2013 to December 2014. The trunk flow was collected by the self-made device, throughfall was collected by the sump, and the rain outside of the forest was collected by cylinder. The changes of trunk runoff, throughfall and canopy interception with rainfall characteristics were studied under different rainfall levels and rainfall intensity levels, and regression models were established, the main influence factors on canopy interception were quantitatively analyzed through rainfall, relative humidity, rainfall intensity, wind direction, air temperature, relative humidity, leaf area index. The cumulative rainfall outside of the bamboo forest in the hilly area of southern Jiangsu was 2 419.1 mm during the study period. The cumulative rainfall, trunk runoff and canopy interception in the forest accounted for 58.70%, 6.14%, and 35.16% of the rainfall during the same period, respectively. The amount of rainfall has the significantly linear relationship with the amount of throughfall and trunk runoff, and has the linear correlation with the canopy interception. The average monthly leaf area index of the bamboo in growing season was increasing, and the monthly total amount of canopy interception increased over the time. The average canopy interception rate showed the decreasing trend as a whole. The water holding capacity of the canopy part and trunk of the bamboo forest in

收稿日期:2019-07-08

修回日期:2019-07-22

资助项目:国家重点研发计划项目“低效人工林增效与生态服务提升综合集成与示范”(2017YFC0505506)

第一作者:杜妍(1995—),女(蒙古族),内蒙赤峰人,硕士研究生,从事森林水文与水土保持研究 E-mail:1807814130@qq.com

通信作者:庄家尧(1969—),男,安徽凤阳人,副教授,研究生导师,从事森林水文与水土保持研究 E-mail:nlzjiayao@njfu.edu.cn

the study area was 0.38 mm and 0.1 mm, respectively, and the minimum rainfall causing the trunk runoff among the rainfall events was 1.30 mm. It can be seen that the main meteorological factors affecting the canopy interception of the bamboo forest are rainfall and rainfall intensity through correlation analysis. This study can provide the scientific data support for the study of rainfall redistribution characteristics of bamboo forest in the hilly area of southern Jiangsu Province, and provide the theoretical basis for the intensive development of bamboo forest.

Keywords: *Phyllostachy edulis*; penetrating rain; trunk runoff; canopy interception; leaf area index

降雨和降雨再分配过程是森林生态系统水分补给的重要过程,维持着森林生态系统的稳定,可直接作用于物质循环和人文资源的利用,其中林分冠层的降水再分配功能在水文生态功能中占据着重要的地位^[1]。森林次降雨即森林通过林冠层截留和再分配来调节大气降水,也称为第二次降雨^[2]。穿透雨、树干径流和林冠截留由降雨通过林冠层重新分配得到,穿透雨所占比例最大,树干径流最小^[3]。降雨再分配的过程较为复杂,受气象因子等环境因素和林冠特征的多重影响^[4],深入分析有助于了解生态水文循环、森林涵养水源和防治水土流失等方面生态水文过程^[5]。国内外学者通过对林冠水文过程研究,取得了许多重要成果,孙忠林等^[6]通过对比分析蒙古栎林和杂木林林冠水文过程,发现降雨再分配过程因降雨特征和林冠特征不同而存在差异。石磊等^[7]通过长期定位监测探究大兴安岭落叶松林对降雨的截留再分配的分布规律,结果表明降雨再分配的水文分量为穿透雨最多,林冠截留量次之,树干径流量最少。赵明杨^[8]通过“林分自创性”假说和实际观测变量建立了可在黄土高原地区森林水文效应分析中使用的BF神经网络模型,模拟预测结果较好。苏南丘陵区人口众多,水资源需求较大,毛竹是该区典型树种之一,在涵养水源、维护生态平衡及全球碳平衡等方面竹林发挥着不可取代的作用^[9]。毛竹(*Phyllostachy edulis*)林分布面积约占全国竹林总面积的60%^[10],是国内分布面积最广的竹种,毛竹具有生长迅速、用途广、生物量大等特点^[11],是集生态、社会、经济价值于一体的优良树种^[12]。虽然目前很多研究涉及到毛竹林林冠水文效应,但是关于林冠对降雨再分配在不同雨量级和雨量强度下的变化及毛竹林冠截留影响因子缺少深入探讨。因此,本文通过长期定位观测苏南丘陵区毛竹林林冠水文过程,分析毛竹林林冠下降雨再分配过程,以期深入研究苏南丘陵区毛竹林生态水文规律,为毛竹林的集约化管理及降雨分配对林下更新的影响和森林资源的保护提供科学合理的理论基础。

1 试验区概况

研究区位于南京市东善桥林场铜山分场,地形为苏南丘陵,纬度是 $1^{\circ}35'—31^{\circ}39'N$, $118^{\circ}50'—118^{\circ}52'E$ 。土壤类型为黄棕壤,研究区属亚热带季风气候,区内气候温暖湿润,四季分明,水热资源比较丰富,生长季长,降水丰沛。林分类型以马尾松(*Pinus massoniana*),麻栎(*Quercus acutissima*),杉木(*Cunninghamia lanceolata*),毛竹(*Phyllostachy edulis*)林为主,均为苏南丘陵区典型林分。海拔在38~388 m,年平均降水量1 100 mm,无霜期229 d,年平均气温 $15.1^{\circ}C$,年日照时数2 199 h。毛竹林平均林龄1~5 a,郁闭度0.89,密度2 025株/hm²,平均树高10.8 m,平均胸径8.3 cm,平均冠幅2.7 m,坡度 17° ,坡向NE,土壤pH介于4.21~5.12。

2 材料与研究方法

为避免林冠、林缘对降雨量测定的影响,在样地边缘20 m处设置两台RG3-M翻斗式自记雨量计,每产生0.2 mm降雨记录一次降雨数据,每5 min自动采集一次数据,通过两台数据平均进行降雨量数据的校准,降雨历时按降雨间隔八小时进行划分。每15 min测定一次空气温度、湿度、风向风速(美国产Decagon小型自动气象站)。测定叶面积指数用美国产LAI-2200植被冠层分析仪,选择晴朗早晨或阴天进行测量,相应的树冠进行同一个方向的测量。选取毛竹林林分中生长条件较好的典型坡面进行观测,在400 m²(20 m×20 m)的样地内设置3个集水槽,通过集水槽来收集穿透雨,为了避免植被过高对穿透雨的影响,需要定期清理。

树干径流的收集采用自制器材,树干径流仪呈半圆形容容器,制作材料为喷塑铁皮,将冠层以下、根部以上树干合围,使用塑料水管将树干径流导入双翻斗式雨量计(精度:0.5 mm)中,按照4 cm一个径级来划分,选取有代表性的样木(共6株)安装仪器进行观测,试验数据剔除误差较大的数据后平均,按林冠投影面积换算成单位面积来计算树干径流。在一次完整的林冠水文过程中,林冠截留量较分散、难以集中收集,本研究根据水量平衡原理^[13]计算林冠截留量 $I(mm)$: $I = P -$

SF—TF,式中: P 为降雨量(mm);SF 为树干径流量(mm);TF 为穿透雨量(mm)。

3 结果与分析

3.1 研究区降水特征

研究区 2013 年 1 月至 2014 年 12 月累计降雨 2 419.1 mm,降雨天数为 171。图 1 为研究期间降雨分布特征,由图可知,研究期内最大月降雨量出现在 2014 年 5 月份,期间连续出现大雨或暴雨等极端天气,使降雨量占比较大,降雨总量达到 311.9 mm;期间最小降雨量在 2014 年 8 月份,仅为 17.2 mm。由于研究区位于秦岭淮河以南,梅雨期和台风雨期降水量较多,降雨主要集中在 5 到 7 月份,降雨总和超过全年降雨量的 60%。

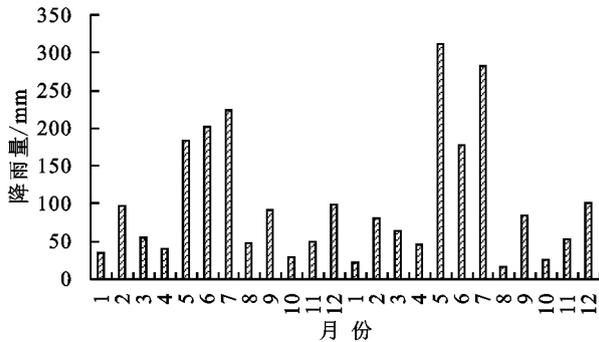


图 1 研究期内降雨量分布

根据降雨量大小,将研究期间全年降雨分为 8 个降雨等级。各等级降雨分布情况见表 1,其中降雨量 ≤ 10 mm 的小雨事件,占总降雨天数的频率较大,为

表 2 穿透雨、树干径流、林冠截留与气象因子 Pearson 相关系数

项目	降雨量	降雨强度	风速	风向	空气温度	相对湿度
穿透雨 T	0.997**	0.401**	0.304**	-0.002	0.115	0.200
树干径流 S	0.974**	0.333**	0.610**	0.120	0.157	0.183
林冠截留 I	0.928**	0.403**	-0.057	-0.096	0.064	0.120

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3.3 穿透雨变化特征

将研究期间内穿透雨、穿透雨率和林外降雨量进行回归分析(穿透雨量,穿透雨率,林外降雨量),结果如图 2 所示,由图可知:毛竹林穿透雨和林外降雨呈显著线性相关关系,雨量较小时,降雨几乎全部被林冠截留,当穿透雨为零时,X 轴截距即为形成穿透雨的最小降雨量,此数值被王艳萍等^[13]作为林冠部分的持水能力的定量结果,由拟合方程可得形成穿透雨的最小降雨量为 0.38 mm,雨量较大时,穿透雨和林外降雨基本同时产生。

研究期间穿透雨率主要集中在 0%~0.8%,毛竹林穿透雨率随着林外降雨量的增加呈现增加趋势,后期增加趋势逐渐变缓。主要是因为由于林冠层截留

61.99%。研究期间出现暴雨 7 次、大暴雨 3 次,分析降雨量可发现,降雨量 ≥ 50 mm 的降雨事件占降雨天数最少,但是占总降雨量的比例最大,为 39.31%,而小雨事件下的降雨量仅占总降雨量 15.69%。

表 1 降雨特征汇总表

雨量级/ mm	降雨 天数/d	降雨 频度/%	降雨量/ mm	占降雨总量 百分比/%
≤ 1	21	12.28	9.6	0.40
1~2	24	14.04	39.5	1.63
2~5	33	19.30	127.4	5.27
5~10	28	16.37	202.9	8.39
10~15	26	15.20	331	13.68
15~25	14	8.19	274	11.33
25~50	15	8.77	483.7	20.00
≥ 50	10	5.85	951	39.31

3.2 降雨再分配的影响因子

在森林降雨过程中,气象因素、环境因素随降雨过程一同变化,由于环境因子的易变化性,在分析降雨再分配过程中主要关注林分自身特征及气象因子,通过对降雨过程中穿透雨、树干径流和林冠截留与气象因子的相关性分析,结果见表 2。降雨强度和降雨量为具有较强的相关性,是降雨再分配过程中的主导变化因子,树干径流、穿透雨和风速相关性为极显著,穿透雨、树干径流和林冠截留与风向、空气温度、相对湿度相关性并不显著。整体来说,降雨量、降雨强度和林冠水文过程的相关性高于风速等因子,表明降雨特征是影响林冠水文过程的主要因子。

了大部分降雨,到达地面的降水所占比例很小,随着降雨量增大,穿透雨率到达一定的临界值。

不同雨量级、雨强等级下穿透雨量、穿透雨率变化特征如图 3 所示,由图可知:毛竹林穿透雨量、穿透雨率在降雨量 ≤ 1 mm 阶段最小,其中最小穿透雨量为 2.6 mm,最小穿透雨率为 27.08%。在降雨量大的 ≥ 50 mm 阶段穿透雨量、穿透雨率最大,最大穿透雨量为 573.4 mm,最大穿透雨率为 60.29%。

雨量级较大时毛竹林穿透雨量也随之增多。分析其原因,当降雨量较大时,超过了林冠层的承载能力,大量降雨直接落到地面。穿透雨和穿透率随着降雨量和雨量级的增加而增大,最后趋于稳定。毛竹林的穿透雨率随降雨强度等级的增大而增大,且增加趋势逐渐变缓。研究期内

在 ≤ 0.3 mm/h 阶段, 毛竹林的穿透雨量和穿透雨率均处于最低水平, 最小穿透雨量为 26.6 mm, 穿透雨率为

42.63%。相对而言, 在 ≥ 2 mm/h 阶段, 毛竹林林分的穿透雨量最大, 为 608.2 mm, 穿透雨率为 58.87%。

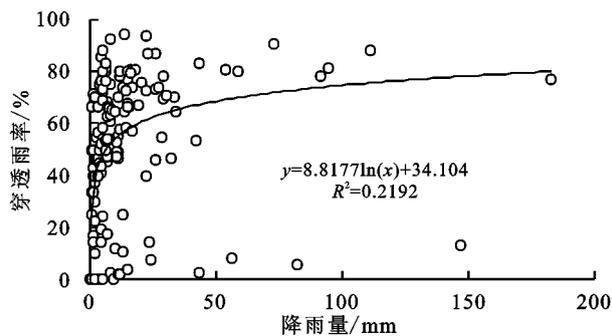
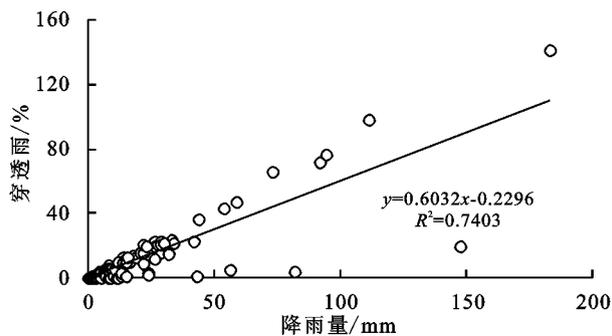


图 2 穿透雨、穿透雨率与降雨量的关系

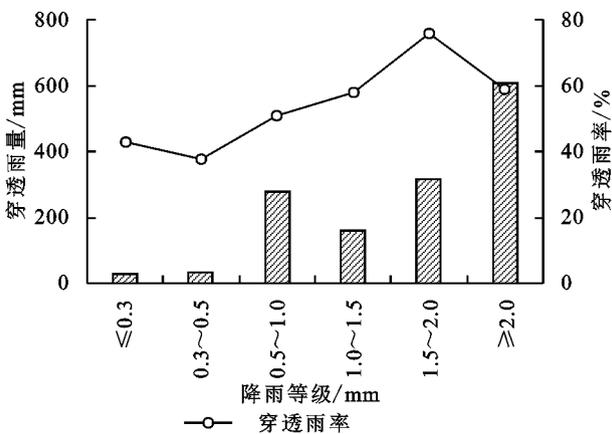
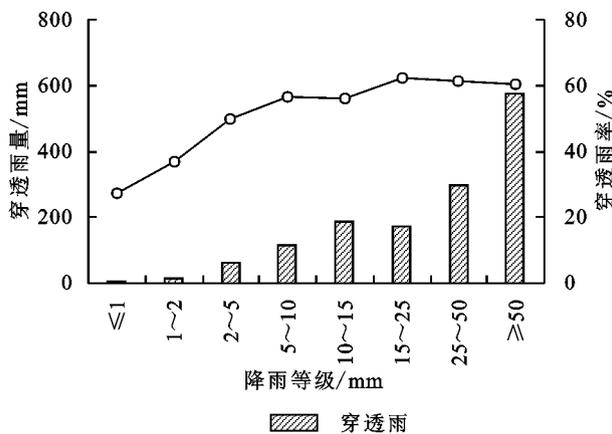


图 3 不同降雨等级、降雨强度的穿透雨和穿透雨率

3.4 树干径流变化特征

树干径流占总降雨量比重较小, 却是林分养分传输、供给过程的重要途径, 对森林水文功能及养分循环过程起着积极作用。研究期内, 毛竹林树干径流量为 148.45 mm, 树干径流率为 6.14%。将研究期间内树干径流量和林外降雨量进行回归分析, 发现两者间存在较好的线性关系, 即随着林外降雨量级大时树干径流量随之增大, 拟合线性方程为: $y = 0.0676x - 0.0878$, $R^2 = 0.9133$ (x 为林外降雨量; y 为树干径流量)。方程里 X 轴的截距为 1.30 mm, 此值即为产生树干径流的最小降雨量(图 4)。

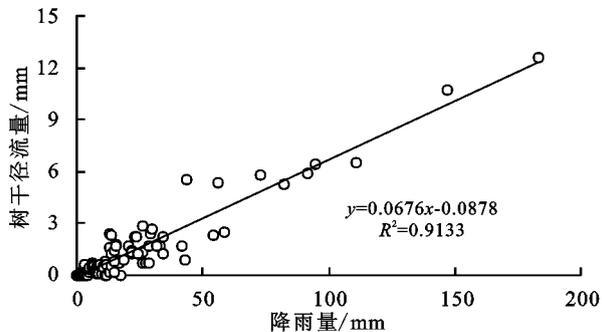


图 4 树干径流量与降雨量的关系

由于树干径流率和降雨量的规律不显著, 本文重点分析不同雨量级、雨强下树干径流量、树干径流率

的关系, 结果如图 5 所示, 在降雨量 ≥ 50 mm 阶段, 树干径流量和树干径流率达到最大值, 为 63.39 mm, 树干径流率为 6.67%; ≤ 1 mm 阶段, 最小树干径流量和树干径流率分别为 0.12 mm 和 1.27%。随着降雨等级的增大, 毛竹林的树干径流率呈现上升趋势, 树干径流增长速率随着变快, 在 15~25 mm 阶段, 由于毛竹林胸径较小, 增长速度趋于稳定。毛竹林树干径流率随降雨强度的增大而增大。研究期内毛竹林在 0.3~0.5 mm/h 阶段, 树干径流量和树干径流率处于最低水平, 为 2.83 mm, 树干径流率是 3.27%。在 ≥ 50 mm/h 阶段, 树干径流量和树干径流率最高, 为 70.58 mm, 树干径流率是 6.83%。这是由于毛竹树干较光滑, 产生径流的摩擦力较小驱动力较大, 容易形成树干径流。

3.5 林冠截留变化特征

将研究期间内林冠截留量和林外降雨量进行回归分析, 结果如图 6 所示, 由图可知: 随着林外降雨量的增加林冠截留也随之增加, 毛竹林林冠截留量占降雨总量为 23.02%, 分析原因为毛竹树干光滑, 树皮不易吸附, 产生的阻挡较小, 所以容易产生较高的树干径流率。林冠截留率随着降雨量的增加而减小, 到达某一临界值趋于平缓, 采用指数函数拟合降雨量与林冠截留率的关系。

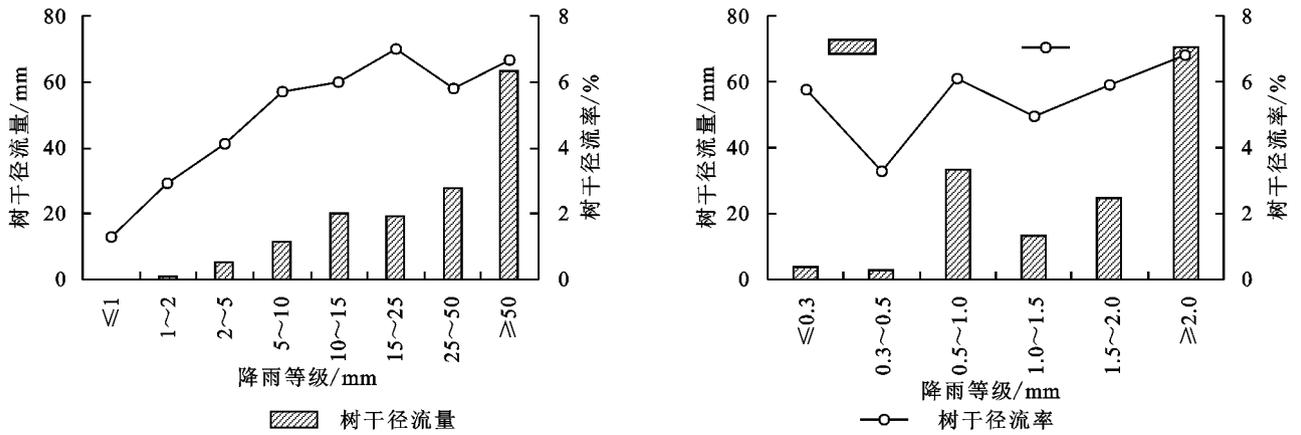


图 5 不同降雨等级、降雨强度的树干径流和树干径流率

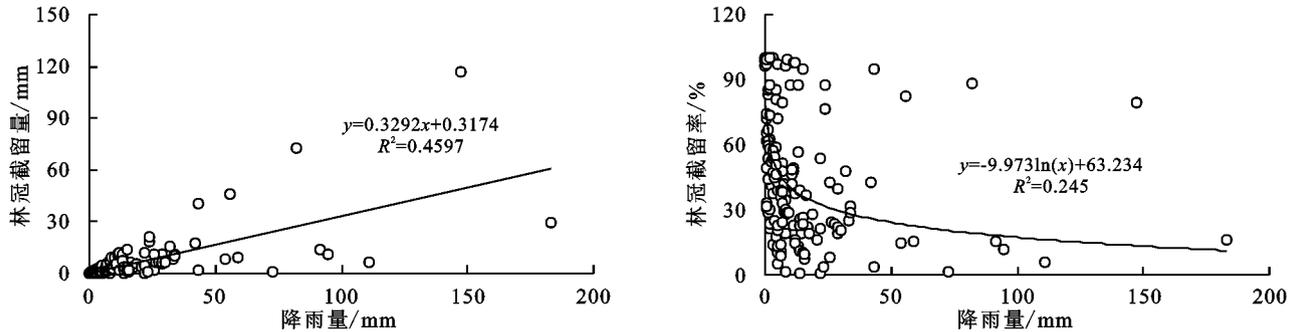


图 6 林冠截留量、林冠截留率与降雨量的关系

如图 7 所示,研究期内毛竹林在 ≤ 1 mm 阶段最小,最小林冠截留为 6.9 mm,最大林冠截留率为 71.64%。

林冠截留量在 ≥ 50 mm 阶段最大,为 314.2

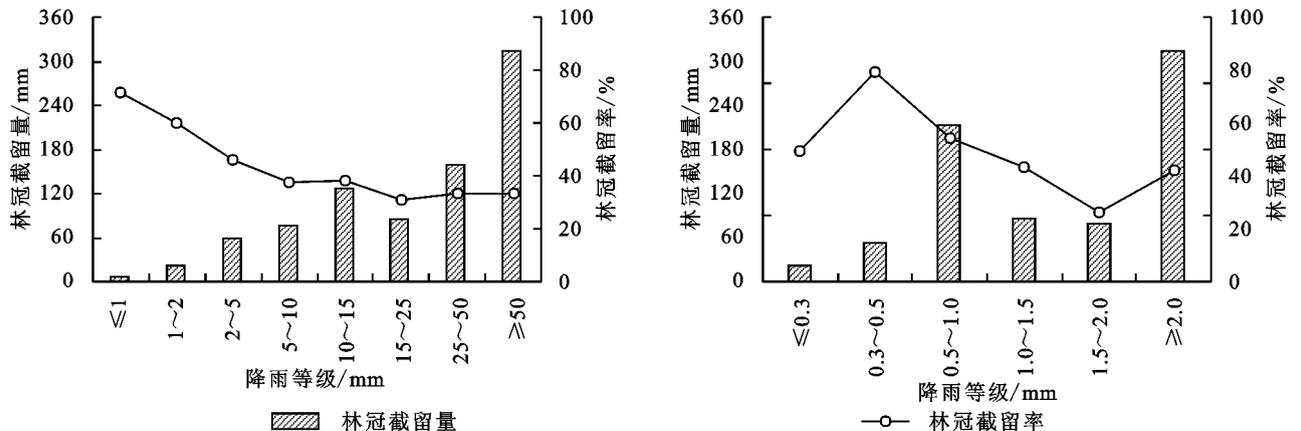


图 7 不同降雨等级、降雨强度的林冠截留量和林冠截留率

3.6 林冠截留的影响因子

林冠截留过程中环境因子、气象因子随降雨特征时刻变化,变化过程较为复杂,其中林冠结构主要有冠层面积特征、叶片特征、枝叶角度等,将林冠截留量和叶面积指数进行曲线方程拟合,结果如图 8 所示,林冠截留量随着叶面积指数呈现线性增加趋势,相反的,由于研究期内叶面积指数较大的月份,对应的降雨量强度较高,出现林冠截留率随叶面积指数增加而降低的现象。

mm,对应林冠截留率为 33.04%。林冠截留量随着降雨强度等级的增加呈现减小趋势,在降雨强度最大的等级 ≥ 2 mm/h 阶段林冠截留量最大,最大截留量为 349.8 mm,占此强度等级下降雨量的 33.85%。

对毛竹林林冠截留与各个气象因子进行相关性分析发现,降雨量、相对湿度和降雨强度与林冠截留呈现极显著负相关,林冠截留与风向、空气温度、相对湿度相关性并不显著,降雨量和降雨强度是影响毛竹林林冠截留主要因子。将研究区第一年夏秋两个季度的叶面积指数与林冠截留进行回归分析,降雨量划分为 3 个等级,小雨(≤ 10 mm),中雨(10~25 mm),大雨(≥ 25 mm),结果如图 9 所示,小雨条件下,随着叶面积指数的增加林冠截留率呈现上升趋势;中雨量

级下,规律并不显著;大雨量级下,林冠截留率随叶面

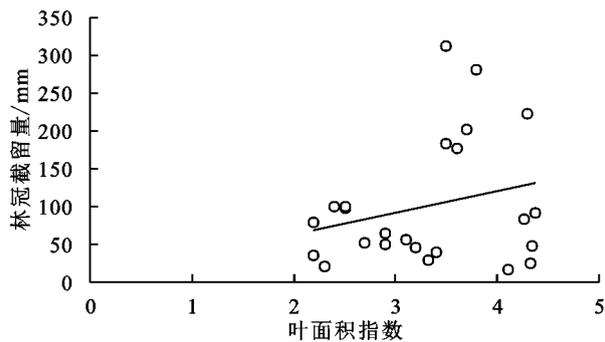


图8 叶面积指数和林冠截留的关系

4 讨论

(1) 研究期内,苏南丘陵区毛竹林穿透雨量为 1 420 mm,穿透雨率为 58.70%。毛竹林穿透雨的变化明显受到降水量的影响,穿透雨量与林外降雨量呈现明显的线性关系,这与多数研究结果相似^[13-15],孙忠林等^[15]研究两种温带落叶阔叶林对降雨的分配时得出,当降雨量超过一定阈值时产生穿透雨,阈值的大小取决于森林层次和郁闭度,两者越高,阈值越大。刘章文等^[16]通过研究祁连山 4 种灌丛,得出穿透雨率为 52.3%~63.5%,降雨量与穿透雨量呈显著的线性和穿透雨率呈指数函数关系。胡珊珊等^[17]研究不同林分,得出穿透雨占总降雨量的 60%~90%,较其他两个组分更高。穿透雨量和穿透雨率随着降雨量的增加而增加,到某一临界值趋势变缓;与多数研究结果相似,Zhang 等^[18]通过研究沙蒿和柠条的穿透雨特征,得出穿透雨量和降雨量呈线性上升趋势,和降雨强度呈指数增加,并存在理论上的极大值,穿透雨率和降雨量、降雨强度呈指数上升趋势。随着林外降雨量的增多,毛竹林冠截留量逐渐达到饱和,穿透雨也相对稳定。穿透雨率随着降雨等级和降雨强度的变化呈现递增趋势,但是穿透雨率增加趋势不明显,在相似雨强下变化幅度较大。形成穿透雨的最小降雨量(林冠枝叶部分的持水能力)为 0.38 mm,王晓燕等^[19]研究结果范围处于 0.35~1.45 mm,受林型、林龄、林分密度、林冠层特征等因素影响产生了此差异。穿透雨的空间分布差异会受到林冠结构空间差异影响^[20],直接关系着径流形成的空间分布、根系生长、林地土壤水分补充和养分循环^[21]。

(2) 研究期内,毛竹林的树干径流率为 6.1%,研究期内降水相对丰富,中到大雨相对集中,易产生树干径流,由于降雨强度的影响以及树冠、树皮等对降雨的截留等因素,大雨,暴雨等出现频率较高,易产生树干径流;树皮越

积指数增加而呈现下降趋势。

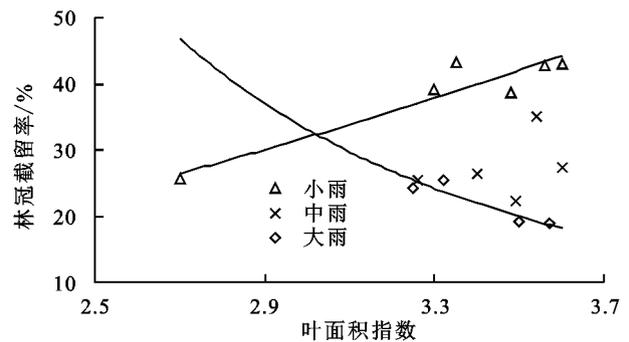


图9 不同雨量级下叶面积指数和林冠截留率的关系

粗糙,树冠持水能力越强,越难产生树干径流,毛竹林相对较光滑,形成树干径流最小降雨量为 1.30 mm。

(3) 降水到达地面的首次水量分配即为林冠层截留,一方面影响到达地表水分^[22],一方面能削减部分雨滴产生的动能,对减缓林地土壤侵蚀起到很好的效果^[23]。林冠截留大部分被蒸发,小部分被植物根系等吸收利用,植物可利用水的多少受到林冠截留大小影响,对林下更新、水分的补给与养分的循环有很大影响^[24]。研究期内,林冠截留率为 35.16%,处于不同林分林冠截留能力中的高水平(10%~40%)^[17],林冠截留率随着降雨量级和降雨强度的增加呈现递减趋势。与张一平等^[14]对林冠截留的研究一致,林冠降雨再分配不仅受到降雨量大小的影响,也被降雨强度所制约。毛竹林平均截留率为 28.11%,由于研究区小雨事件较为集中,降雨强度较低的场降雨事件所占比较高,林冠能截留了大部分雨水,且毛竹林叶面积指数、郁闭度(0.89)较高,相比于胡珊珊等^[17]对油松林(16.75%),李道宁等^[25]对江西大岗山毛竹林(19.2%)的研究结果较高。林冠截留受林冠结构、降雨特征、林分种类和密度、气象等多种因素的影响^[26]。通过研究叶面积指数与林冠截留的关系,针对林冠截留量,McJannet 等^[27]国外学者和 Bulcock^[28]得出随着叶面积指数增加而增加的结论,相反的,由于研究期内叶面积指数较大的月份,对应的降雨量也较强,出现林冠截留率随叶面积指数增加而降低的情况。本文仍有不足之处,叶面积指数采用平均值而非每场降雨同期数值,需长期定位观测,进一步研究温度、风速风向等气象因子对林冠截留过程的影响,以期得到更加准确的结论。

5 结论

毛竹林穿透雨量与林外降雨量呈现明显的线性关系,穿透雨率和降雨量、降雨强度呈指数上升趋势,

形成穿透雨的最小降雨量(林冠枝叶部分的持水能力)为 0.38 mm。毛竹林树干径流量、树干径流率均随着林外降雨量的增大呈上升趋势,形成树干径流最小降雨量为 1.30 mm。毛竹林林冠截留量与降雨量呈较好的线性关系,林冠截留率随着降雨量级和降雨强度的增加呈现递减趋势。林冠截留量随着叶面积指数呈线性增加趋势,与之相反,林冠截留率出现随叶面积指数增加而降低的现象。

降雨强度与降雨量是影响毛竹林林冠截留最强的因子,风速与空气温湿度次之,空气温度与风向是影响林冠截留率最强的因子,降雨量、降雨强度与空气湿度次之。本文仅分析研究区两年的观测数据,日后还需长期定位观测,为毛竹林水文生态过程及其机理得到更加完善科学的理论与数据支撑。

参考文献:

- [1] 邓世宗,韦炳式.不同森林类型林冠对大气降雨量再分配的研究[J].林业科学,1990,26(3):271-276.
- [2] 梁文俊,丁国栋,臧荫桐,等.华北土石山区油松林对降雨再分配的影响[J].水土保持研究,2012,19(4):77-80.
- [3] 余新晓,张志强,陈丽华,等.森林生态水文[M].北京:中国林业出版社,2004.
- [4] 周彬,韩海荣,康峰峰,等.太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征[J].生态学报,2013,33(5):1645-1653.
- [5] 何常清,薛建辉,吴永波,等.岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配[J].应用生态学报,2008,19(9):1871-1876.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 赵明扬,孙长忠,康磊.黄土高原油松人工林水文效应的人工神经网络模型[J].西南林业大学学报,2013,33(3):52-55,86.
- [9] 高国龙,杜华强,韩凝,等.基于特征优选的面向对象毛竹林分布信息提取[J].林业科学,2016,52(9):77-85.
- [10] 肖丽霞,萧江华,胡小松,等.中国竹产业现状和发展研究[J].世界竹藤通讯,2005,3(3):29-32.
- [11] 陈双林,萧江华,薛建辉.竹林水文生态效应研究综述[J].林业科学研究,2004,17(3):399-404.
- [12] 周本智,傅懋毅.庙山坞自然保护区毛竹林细根生产和周转研究[J].江西农业大学学报,2008,30(2):239-245.
- [13] 王艳萍,王力,卫三平. Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用[J].生态学报,2012,32(17):5445-5453.
- [14] 张一平,王馨,王玉杰,等.西双版纳地区热带季节雨林与橡胶林林冠水文效应比较研究[J].生态学报,2003,23(12):2653-2665.
- [15] 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.
- [16] 刘章文,陈仁升,宋耀选,等.祁连山典型灌丛降雨截留特征[J].生态学报,2012,32(4):333-342.
- [17] 胡珊珊,于静洁,胡堃,等.华北石质山区油松林对降水再分配过程的影响[J].生态学报,2010,30(7):1751-1757.
- [18] Zhang Y, Wang X, Hu R, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, northwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2015,527:1084-1095.
- [19] 王晓燕,毕华兴,高路博,等.晋西黄土区刺槐人工林林冠截留模拟[J].中国水土保持科学,2012,10(2):44-49.
- [20] Zimmermann A, Germer S, Neill C, et al. Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rain forest[J]. Journal of Hydrology, 2008,360(1/4):87-102.
- [21] Keim R F, Skaugset A E, Weiler M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall[J]. Journal of Hydrology, 2005,314(1/4):263-274.
- [22] 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.
- [23] Nanko K, Onda Y, Ito A, et al. Spatial variability of throughfall under a single tree: Experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011,151(9):0-1182.
- [24] Marin C T, Bouten W, Sevink J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia[J]. Journal of Hydrology, 2000,237(1/2):40-57.
- [25] 李道宁.江西省大岗山主要森林类型水源涵养功能研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.
- [26] 巩合德,王开运,杨万勤,等.川西亚高山原始云杉林内降雨分配研究[J].林业科学,2005,41(1):198-201.
- [27] McJannet D, Vertessy R. Effects of thinning on wood production, leaf area index, transpiration and canopy interception of a plantation subject to drought[J]. Tree Physiology, 2001,21(12/13):1001-1008.
- [28] Bulcock H H, Jewitt G P W. Spatial mapping of leaf area index using hyperspectral remote sensing for hydrological applications with a particular focus on canopy interception[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010,14(2):383-392.