

辽河源3种林分降雨再分配特征及其影响因素

董玲玲, 康峰峰, 韩海荣, 程小琴, 赵金龙, 宋小帅

(北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要: 于2013和2014年5—9月对辽河源自然保护区油松林、山杨林和华北落叶松林的穿透雨、树干茎流和林冠截留进行了监测, 分析森林冠层对降水再分配的影响。结果表明: (1) 油松林、华北落叶松林和山杨林的穿透雨率分别为78.8%, 81.1%和83.8%, 3种林分穿透雨量与林外降雨量呈线性正相关, 穿透雨月变化与林外降雨量月变化趋势一致, 油松林、山杨林和华北落叶松林产生穿透雨的临界降雨量分别为1.5、0.9、1.2 mm; 3种林分的树干茎流率分别为油松林0.8%、华北落叶松林1.0%、山杨林3.7%, 树干茎流量与降雨量成正比。(2) 林冠截留能力为油松林(20.4%) > 华北落叶松(17.9%) > 山杨林(12.4%), 油松林的林冠截流率显著高于山杨林, 在降雨量较小时表现更加明显, 降雨特征和冠层结构对林冠截流都产生影响。

关键词: 辽河源; 林外降雨; 穿透雨; 树干茎流; 林冠截流

中图分类号: S715.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)04-0145-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.023

Traits and Influencing Factors of Rainfall Redistribution in Three Types of Forest in Liaoheyuan

DONG Lingling, KANG Fengfeng, HAN Hairong, CHENG Xiaoqin, ZHAO Jinlong, SONG Xiaoshuai

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Throughfall, stem flow and canopy interception of three types of forest (*Pinus tabulaeformis* forest, *Larix principis-rupprechtii* forest and *Populus davidiana* forest) were studied in Liaoheyuan Natural Reserve, Hebei province, through a field investigation from May to September in 2013 and 2014. The results showed that: (1) Throughfall rates of *P. tabulaeformis* forest, *L. principis-rupprechtii* forest and *P. davidiana* forest were 78.8%, 81.1% and 83.8%, respectively. Throughfall amounts of three forests all showed positive linear correlation with rainfall amounts outside the forests. The monthly variations of throughfall were consistent with the monthly trend of rainfall outside the forest. Throughfall happened when rainfall exceeded 1.5 mm for *P. tabulaeformis* forest, 0.9 mm for *P. davidiana* forest and 1.2 mm for *L. principis-rupprechtii* forest. Stem flow rates in the three types of forests were 0.8%, 1.0% and 3.7%, respectively, and the regression analysis showed that stem flow amounts of the three forests had positive linear relationship with rainfall amount. (2) The capacity of canopy interception ranked from higher to lower as *P. tabulaeformis* forest (20.4%) > *L. principis-rupprechtii* forest (17.9%) > *P. davidiana* forest (12.4%). The canopy interception of *P. tabulaeformis* forest was significantly greater than that of the *P. davidiana* forest, which was more obvious under small rainfall events, and the rainfall characteristics and canopy structure had an influence on the canopy interception.

Keywords: Liaoheyuan; extra forest rainfall; throughfall; stem flow; canopy interception

森林生态系统是陆地生态系统重要的组成部分之一, 具有涵养水源、净化水质、调节径流和保持水土等多方面的功能。森林冠层通过对降雨的调节、转化和再分配, 不仅改变了降雨在森林内的空间分布格局, 也影响了与之相关的水分和养分循环^[1]。降雨通过森林冠层重新分配为穿透雨、树干茎流和林冠截

留, 穿透雨所占比例最大是森林土壤水分的主要来源, 树干茎流占比虽小, 但是可以改善树木根系周围的可利用水条件从而促进林木个体生长^[2], 林冠截留除小部分被植物吸收利用外, 大部分通过蒸发返回到大气中, 林冠截留大小影响着植物可利用水的多少, 从而影响到林下更新、水分与营养循环, 尤其对于

降雨量较小的地区影响更大^[3]。森林的降雨再分配是一个复杂的过程,受降雨等环境因素和树种特征的多重影响^[4-6],深入分析冠层降雨再分配特征和规律,有助于了解森林涵养水源、减少地表径流等方面生态水文过程^[7-8],也有助于深入了解降水再分配对林下更新的影响。

辽河源自然保护区是辽河的发源地之一,该区域存有大量的油松天然林、山杨天然林和华北落叶松林等,对辽河流域的水源涵养与水土保持具有较大的作用,同时辽河源保护区也是京津地区防风固沙的重要生态绿色屏障。保护区处于半干旱半湿润区域,年降雨量较小,深入分析典型林分的降雨再分配特征及其影响因子,揭示降雨再分配的格局与过程,对保护区森林综合生态效益的发挥有重要意义。本文以辽河源自然保护区的油松林、山杨林、华北落叶松林为研究对象,通过定位观测林外降雨、穿透雨和树干茎流,基于两年的观测数据研究 3 种林冠层对降雨的分配特征并分析主要影响因子,旨在为辽河源水源涵养林建设、管理和保护提供理论依据。

1 研究区概况

研究地点位于河北省平泉县辽河源自然保护区(41°01′—41°21′N, 118°22′—118°37′E)。位于七老

图山东南段,为内蒙古高原和冀北山地的过渡地带,境内平均海拔 1 180 m,地带性土壤主要为棕壤土和褐土。保护区处于暖温带向寒温带过渡地带,属于半湿润半干旱大陆性季风型山地气候,四季分明,年均气温 7.3 ℃,无霜期 110~125 d,全年日照时间 2 000~2 900 h,年平均降水量 540 mm,年平均蒸发量 1 800 mm,历年平均晴天日数 170 d。

森林植被种类乔木层主要有油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等;灌木层有锦带花(*Weigela florida*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、榛(*Corylus heterophylla*)、土桩绣线菊(*Spiraea pubescens*)等;草本层以细叶苔草(*Carex rigescens*)为主。

2 材料与方法

2.1 样地设置

2012 年在研究区内典型地带设立油松林、山杨林和华北落叶松林 3 个标准样地,样地大小为 20 m×30 m,对植被情况进行调查,对样地树木进行每木检尺,测量树高、冠幅、胸径等因子。利用冠层分析仪(型号 WinScanopy 2010a)于 2015 年 7 月植物生长旺季进行冠层拍照,获取叶面积指数等冠层结构信息,各样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

林分类型	林龄/ a	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	密度/ (株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m	叶面积 指数	林隙 分数/%	开度/ %	平均 叶倾角/(°)	平均冠层 厚度/m
油松林	30	1004	27	西	1017	16.1	11.3	2.7	12.4	13.3	26.7	7.2
华北落叶松林	25	990	18	西	1500	11.7	9.6	2.8	10.5	11.0	21.3	4.5
山杨林	25	998	19	西	917	16.2	11.3	3.3	9.8	10.4	25.2	1.4

2.2 林外降雨测定

林外降雨量通过自动气象站(CR1000)进行测定,气象站安装在试验区外空旷地,数据记录时间间隔为 30 min。

2.3 穿透雨测定

在每个样地内随机布设 3 个 2 m 长、0.2 m 宽、0.2 m 深的 PVC 收集槽,收集槽高出地面 50 cm,且与地面成 10 度倾角,较低的一端下放一个容量为 16 L 的塑料桶。于 2013 年和 2014 年的 5—9 月进行穿透雨的观测,每次降雨事件发生后及时收集数据,测定塑料桶内的雨量体积,并同时清除槽内、桶内的枯枝落叶等杂质。

2.4 树干茎流测定

采用径阶标准木法进行树干茎流测定,每个样地中按照胸径 2~4 cm 为一个径级对数木进行分级,各级树木中选取 1 株标准木进行树干茎流观测,每个样地选取 5 株标准木,将直径为 2.0~3.0 cm 的聚乙烯

橡胶管从中缝剪开,沿刮平树皮的树干缠绕 3 周做成截水槽,缠绕时与水平面成 30°角,一侧边缘嵌入树皮之内,以便干流进入橡胶管,橡胶管与树干之间缝隙用凡士林封严,橡胶管出水口距地面 30 cm 高,下端引入收集容器(16 L),于 2013 年和 2014 年的 5—9 月进行观测,每次降雨事件发生后及时测定。

树干茎流量的计算公式:

$$S = (1/M) \sum_{i=1}^n C_i / K_i M_i \quad (1)$$

式中: S 为树干茎流量(mm); M 为单位面积上的树木株数(株/m²); C_i 为每一径级的树干茎流量(mm); K_i 为每一径级的树冠平均投影面积(m²); n 为径级数; M_i 为每一径阶树木的株数(株)。

树干茎流率的计算公式:

$$R = S/P \times 100\% \quad (2)$$

式中: S 为树干茎流量(mm); P 为林外降雨量(mm)。

树干茎流漏斗比率(funneling ratio)的计算公式:

$$F=V/(B \times P) \quad (3)$$

式中: F 为树干茎流漏斗比率; V 为树干茎流体积(m^3); B 为胸径断面积(m^2); P 为降雨量(mm)。

2.5 林冠截留的计算

林冠截留量根据水量平衡方程计算,用林外降雨量减去林内穿透雨量和树干茎流量,得出林冠截留量。计算公式为:

$$I=P-T-S \quad (4)$$

式中: I 为林冠截留量(mm); P 为林外降雨量(mm); T 为林内穿透雨量(mm); S 为树干茎流量(mm)。

林冠截留率计算式为:

$$R(\%)=\frac{I}{P} \times 100\% \quad (5)$$

式中: R 为林冠截留率(%); P 为林外降雨量(mm); I 为林冠截留量(mm)。

3 结果与分析

3.1 林外降雨特征

基于2013年和2014年两年生长季(5—9月)观测的数据,共观测64次降雨,分别为2013年30次,2014年34次(图1)。林外总降雨量为857.4 mm,最大降雨量为58.8 mm,两年降雨总量分别为2013年380.2 mm,2014年477.2 mm,平均降雨量分别为12.7,14.0 mm。单场降雨事件中2013年6月28日最大降雨量为58.8 mm,2014年6月5日最大降雨量值为42.6 mm。根据中国气象局“降水强度等级划分标准(内陆部分)”为分类依据,将观测期内的降

雨划分为4种等级: $0.2 \text{ mm} \leq P < 10 \text{ mm}$ (小雨)、 $10 \text{ mm} \leq P < 25 \text{ mm}$ (中雨)、 $25 \text{ mm} \leq P < 50 \text{ mm}$ (大雨)、 $50 \text{ mm} \leq P < 100 \text{ mm}$ (暴雨),研究区域降雨事件以 $< 10 \text{ mm}$ 的小雨发生最多,共40次,降雨量为194.4 mm,占总降雨量的22.7%。

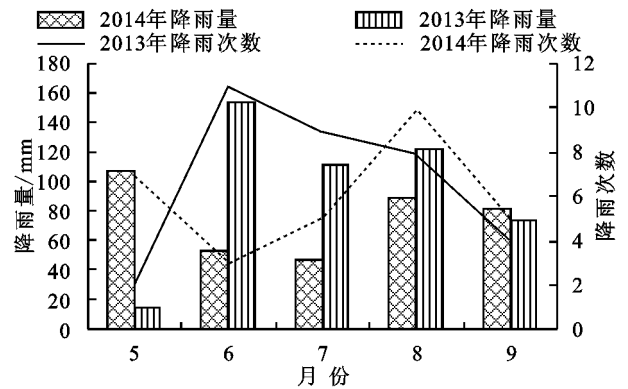


图1 2013年和2014年月降雨量和月降雨次数

3.2 3种林分冠层降雨再分配特征

3.2.1 3种林分冠层降雨再分配的总体情况 油松林的总穿透雨量为675.6 mm(78.8%),树干茎流量为6.5 mm(0.8%),均低于山杨林和华北落叶松林,林冠截留量和林冠截留率分别为175.3 mm和20.4%,均高于山杨林和华北落叶松林(表2)。方差分析结果显示,油松林和华北落叶松林的穿透雨率、树干茎流量、树干茎流率显著低于山杨林,林冠截留量、林冠截留率显著高于山杨林,油松林和华北落叶松林之间则所有指标均都无显著性差异,3种林分的林冠截留能力从高到低依次为油松林、华北落叶松林和山杨林。

表2 3种林分类型的降雨再分配特征

样地编号	森林类型	林外降雨/mm	穿透雨/mm	穿透雨率/%	树干茎流/mm	树干茎流率/%	林冠截留/mm	林冠截留率/%
I	油松林	857.4	675.6a	78.8b	6.5b	0.8b	175.3a	20.4a
II	华北落叶松林		695.2a	81.1b	8.5b	1.0b	153.7a	17.9a
III	山杨林		719.0a	83.8a	31.8a	3.7a	106.6b	12.4b

注:不同小写字母表示各森林类型间差异显著($p < 0.05$)。

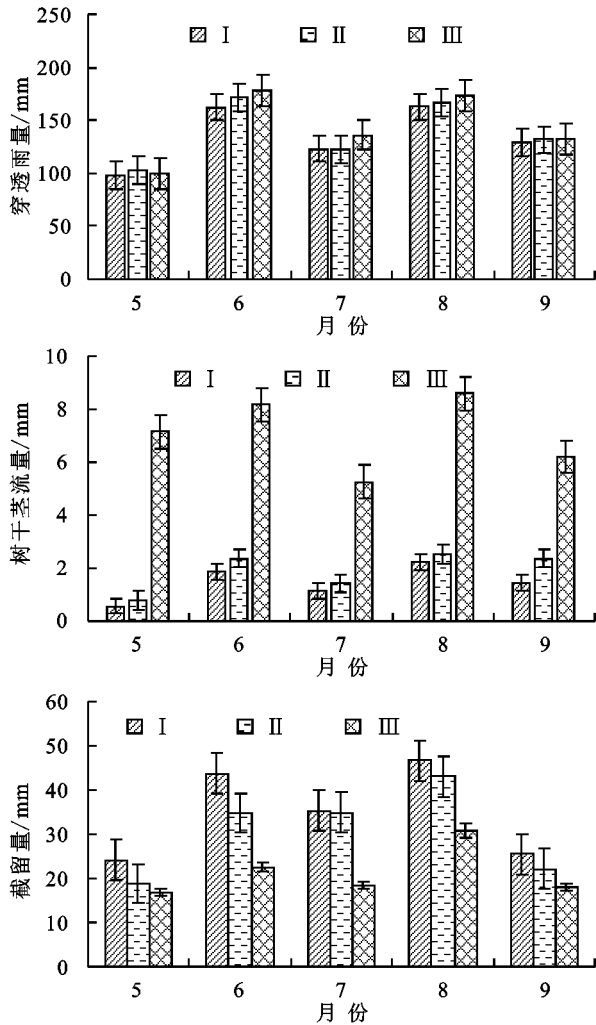
3.2.2 3种林分穿透雨特征 油松林、华北落叶松林、山杨林的总穿透雨量分别为675.6,695.2,719.0 mm,分别占林外降雨的78.8%,81.1%,83.8%。单次降雨事件中,3种林分的最大穿透雨量发生在2013年6月,此次林外降雨量为58.8 mm,穿透雨量分别为山杨林53.0 mm,华北落叶松林52.7 mm,油松林52.4 mm。3种林分的穿透雨量月份变化趋势与林外降雨量趋势一致,除5月份外,其余月份的同一月份下3种林分的穿透雨量趋势为山杨林最大,油松林最小(图2)。

3.2.3 3种林分树干茎流特征 树干茎流占比最小,山杨林的树干茎流量和树干茎流率显著高于油松林和华北落叶松林,油松林、山杨林、华北落叶松林的

总树干茎流量分别为6.5,31.8,8.5 mm,分别占总降雨量的0.8%,3.7%,1.0%。3种林分类型中山杨林的平均漏斗比最大显著高于油松林和华北落叶松林,山杨林为13.2,华北落叶松林为2.8,油松为1.5,随着雨量的增大经过冠层表面顺着树干下流的流量也越大,树干茎流量6月和8月高于其他几个月份,山杨林树干茎流量明显高于其他两个林分。

3.2.4 3种林分林冠截留特征 研究期间,油松林、华北落叶松林和山杨林的林冠截留量分别占同期林外降雨量的20.4%,17.9%和12.4%,单次降雨平均林冠截留率分别为34.3%,28.9%,20.3%。不同年份的截留量也表现为不同,2013年3种林分的林冠截留量分别为71.9,69.2,54.7 mm,林冠截留率为18.9%,18.2%,

14.4%，2014 年 3 种林分的林冠截留量分别为 103.4, 84.5, 51.9 mm, 林冠截留率为 21.7%, 17.7% 和 10.9%。林冠截留的月份变化趋势与林外降雨量表现一致, 以 6 月和 8 月较多。



注: I 为油松林; II 为华北落叶松林; III 为山杨林。下同。

图 2 3 种林分类型穿透雨量、树干茎流量和林冠截留量的月变化

3.3 3 种林分降雨再分配影响因子分析

3.3.1 降雨强度对冠层降雨再分配的影响 不同降雨强度下 3 种林分的冠层降雨再分配特征也表现出

一定的差异(表 3)。3 种林分穿透雨率、树干茎流率都表现出随着降雨强度的增加而增加, 而林冠截留率则随着降雨强度增加而降低。3 种林分的穿透雨率、树干茎流率和林冠截留率在小雨条件下与其他降雨量级达到显著差异, 小雨条件下林冠层对降雨的截留作用较显著, 油松林的林冠截留率达到 38.6%, 而随着雨强的增加则降低, 中雨为 19.4%, 大雨为 13.2%, 暴雨为 11.4%。

3.3.2 降雨量对冠层降雨再分配的影响 将降雨量与穿透雨、树干径流、林冠截留和树干茎流漏斗比进行拟合(图 3), 分析结果显示, 降雨量与穿透雨量呈正相关。利用回归分析对 3 种林分生长季林外降雨量与林内降雨量的关系进行了解释, 结果表明, 两者间呈显著正线性关系 ($p < 0.05$), 决定系数均在 0.99 以上, 林内降雨量随着林外降雨量的增加而增加, 根据拟合方程得出油松在降雨量 > 1.5 mm 产生穿透雨, 山杨林和华北落叶松林在降雨量分别为 0.9, 1.2 mm 时产生穿透雨, 与实际观测结果基本一致。穿透雨率与林外降雨量为对数函数关系, 即穿透雨率随着降雨量的增加而增加, 当降雨量增加到一定程度时, 穿透雨率稳定在一定范围内不再继续增加。降雨量与树干茎流量为线性相关, 树干茎流量随着降雨量的增加而增加, 油松林产生树干茎流的临界降雨量为 4.9 mm, 山杨林为 0.8 mm, 华北落叶松林为 4.1 mm。平均树干茎流漏斗比率表现为随着降雨量的增加先增大后降低。

林冠截留量和林冠截留率与林外降雨量均为幂函数关系, 不同林分林冠截留趋势表现一致, 即在开始阶段随着降雨量的增加, 林冠截留量大幅增长, 随后增加缓慢, 当林外降雨量增大到一定程度林冠截留趋于饱和, 林冠截留量和林冠截留率也趋于稳定。3 种林分的林冠截留率均随着降雨量的增加而降低, 在小雨等级上林冠截留率最大, 林冠层对小雨量级的截留作用较强。

表 3 不同降雨强度下 3 种林分冠层降雨再分配特征

单位: %

降雨强度/mm	I			II			III		
	穿透雨率	树干茎流率	林冠截留率	穿透雨率	树干茎流率	林冠截留率	穿透雨率	树干茎流率	林冠截留率
$0.2 \leq P < 10$	61.2b	0.2b	38.6a	68.6b	0.5b	30.9a	73.7b	2.8b	23.5a
$10 \leq P < 25$	79.8a	0.8a	19.4b	80.2a	1.0a	18.7b	84.1a	4.1a	11.8b
$25 \leq P < 50$	85.9a	0.9a	13.2b	86.7a	1.1a	12.2b	87.8a	4.2a	8.0b
$50 \leq P < 100$	87.3a	1.3a	11.4b	88.6a	1.6a	9.8b	89.8a	3.3a	6.9b

3.3.3 冠层结构对冠层降雨再分配的影响 3 个林分之间的降雨再分配特征差异也受林分冠层结构的影响, 3 种林分的林隙分数、开度和平均冠层厚度的排序为油松林 $>$ 华北落叶松林 $>$ 山杨林, 叶面积

指数则相反, 为山杨林 $>$ 华北落叶松林 $>$ 油松林。油松林隙分数和开度较大, 叶面积指数较低, 冠层厚度大(表 1), 油松林的林冠截留能力高于华北落叶松林和山杨林, 与油松林的冠层厚度有关, 林隙分数

和开度越小、叶面积指数越大以及冠层厚度越大则

截留能力越强。

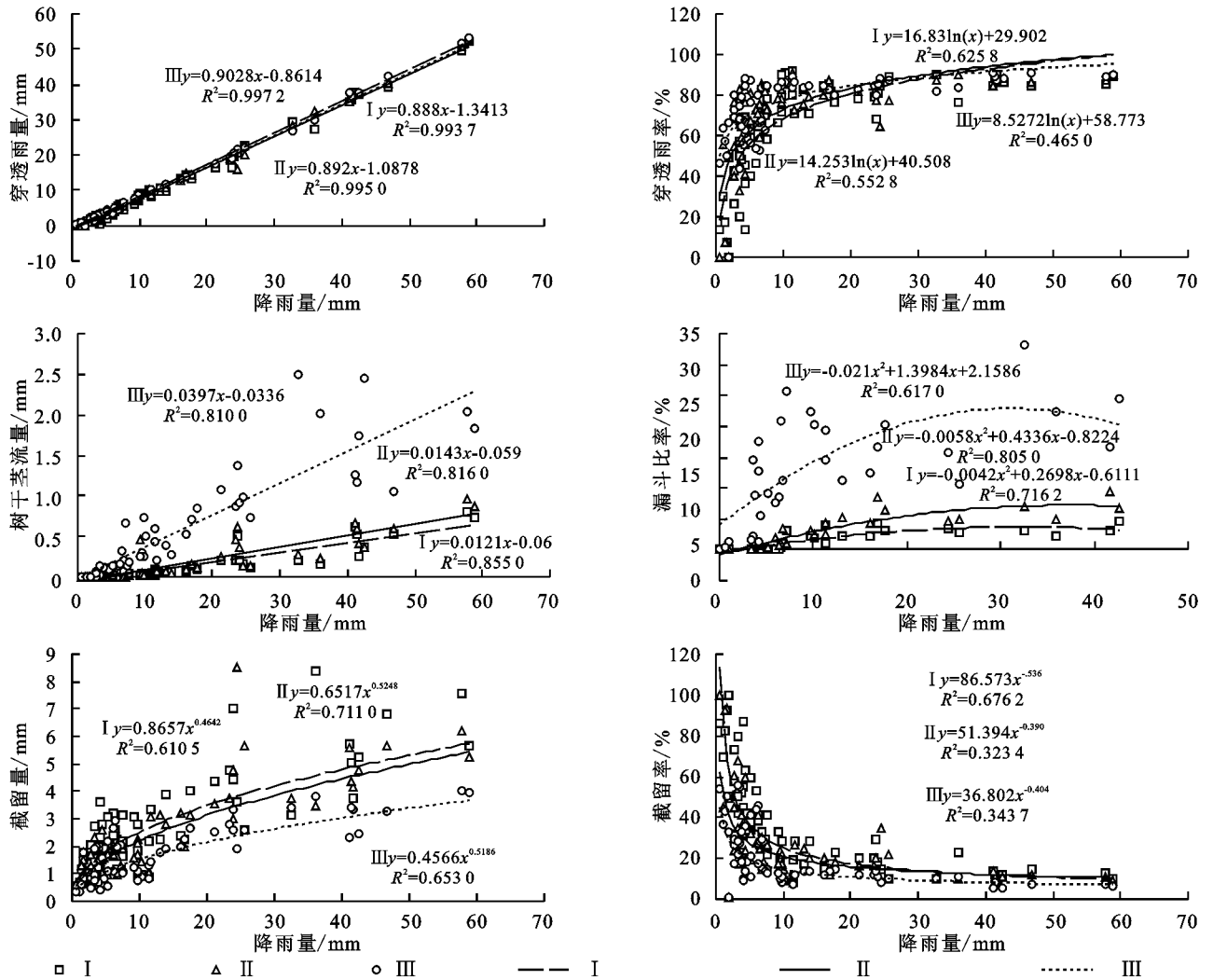


图3 降雨量对穿透雨、树干茎流和林冠截留的影响

4 讨论与结论

通过对河北省辽河源地区油松林、华北落叶松林和山杨林的穿透雨、树干茎流的定位观测,结果显示山杨林的穿透雨率、树干茎流量、树干茎流率显著高于油松林和华北落叶松林,山杨林林冠截留能力显著小于油松林和华北落叶松林,油松林的穿透雨和树干茎流低于华北落叶松林,林冠截留稍高于华北落叶松林,但两种林分之间所有指标均无显著性差异。回归分析得出,3种林分穿透雨量和树干茎流量与降雨量成线性正相关,林冠截留量和林冠截留率与降雨量成幂函数关系,并分析了降雨量、降雨强度和冠层结构对林冠截留的影响。本研究结果表明了辽河源地区主要针叶林和阔叶林分冠层降雨再分配的特征和影响因素,为辽河源地区的水源涵养林建设提供参考。

油松林树干茎流量和树干茎流率最小,试验结果与肖洋等^[5]对北京密云的油松林的研究结果相当,以往研究中树干茎流率主要集中在1%~4%,如Ahmadi等^[9]对伊朗地区的东方水青冈树干茎流率为2.7%,

陈书军等^[10]对秦岭的油松林研究结果为4.4%,河北易县油松林为1.07%^[11],本研究结果在此范围之内。树干茎流与树体的形态、树皮的粗糙程度等非常相关^[12],Schooling等^[13]2015年对落叶树种进行树干茎流的测定得出较大的分枝角度、较小的胸径以及光滑树皮会导致较高的径流量。油松树冠开展侧枝与主枝之间夹角较大,并且树皮粗糙,对于雨水的吸收和阻碍作用较大,因而树干茎流也相对小;而山杨树皮光滑,对于雨水的吸收与阻碍作用小于油松和华北落叶松,因而树干茎流相对较大。

油松林林冠截留能力大于山杨林,与前人^[2]的研究结论针叶林林冠截留能力大于阔叶林这一规律一致,与其他研究^[14-19]结果相比,本研究区域的3种林分林冠截留率为中等水平。林冠截留能力受降雨特征和树种特性等多种因素的影响,小雨条件下,林冠层对降水的截留能力较强,本研究地区的降水主要以小雨为主,雨水被林冠截留后,到达地面的雨水减小;冠层结构也对降雨分配产生影响,本研究中油松林和华北落叶松林的叶面积指数较山杨林低,但是林冠截留却较山杨

高,分析其原因本研究中林冠截留的差异受冠层厚度、枝叶粗糙度等树种特征影响较大。

小雨事件对林冠的截留能力影响较大,对油松林的影响尤为明显,油松的冠层厚度较大,树干粗糙,叶片长而密,小枝油脂较多,这些都会导致林冠吸滞留大量的水分,这些水分通过植物叶片或干皮吸收或者经过蒸散返回至大气中,而不能到达地面,对土壤的水分和养分循环产生影响,进而影响到林木自身生长更新和林下植被的种类和数量,通过样地调查结果显示油松林下的植被种类和数量均低于山杨林和华北落叶松林,油松林在华北分布广泛,在研究区覆盖面积达 70%,林冠截留对林下土壤水分和营养的循环以及对植被的影响有必要进一步开展试验。由于油松、山杨和华北落叶松是华北广泛分布的优势树种,为深入了解不同树种林冠对降雨再分配的影响,应增加先进的水文观测设备对降雨过程及其延滞效应分析^[20];为深入分析冠层结构和树种特征对降水的影响,应增加树木个体数量分析林分冠层结构、胸径、分枝角度等因子对降雨再分配的影响^[21-22],并开展大气降水通过林冠层前后的营养物质含量变化等方面进行研究^[23]。后期对 3 种林分的水源涵养功能评价分析还需进行地表径流、枯落物持水和土壤蓄水等方面的综合对比分析^[24]。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 莎仁图雅, 田有亮, 郭连生. 大青山区油松人工林降雨分配特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(6): 157-160.
- [4] 周彬, 韩海荣, 康峰峰, 等. 太岳山不同郁闭度油松人工林降雨分配特征[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1645-1653.
- [5] 肖洋, 陈丽华, 余新晓, 等. 北京密云水库油松人工林对降雨分配的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 154-157.
- [6] 段旭, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山分水岭沟典型森林植被对大气降雨的再分配规律及其影响因子[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 120-125.
- [7] 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.
- [8] Chen Y Y, Li M H. Quantifying rainfall interception loss of a subtropical broadleaved forest in central Taiwan[J]. Water, 2016, 8(1): 1-19.
- [9] Ahmadi M T, Attarod P, Bayramzadeh V. Rainfall redistribution by an oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forest canopy in the Caspian forest, north of Iran[J]. Journal of Agriculture Science and Technology, 2011, 13(4): 1105-1120.

- [10] 陈书军, 陈存根, 曹田健, 等. 降雨特征及小气候对秦岭油松林降雨再分配的影响[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 513-521.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Schooling J T, Carlyle-Moses D E. The influence of rainfall depth class and deciduous tree traits on stemflow production in an urban park[J]. Urban Ecosystem, 2015, 18(4): 1261-1284.
- [14] Fan J, Oestergaard K T, Guyot A, et al. Spatial variability of throughfall and stemflow in an exotic pine plantation of subtropical coastal Australia[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(5): 793-804.
- [15] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山华山松(*Pinus armandii*)林降雨再分配及其空间变异特征[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 76-85.
- [16] 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): 40-57.
- [17] 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.
- [18] Sun X, Onda Y, Chiara S, et al. The effect of strip thinning on spatial and temporal variability of throughfall in a Japanese cypress plantation[J]. Hydrological Processes, 2016, 29(24): 5058-5070.
- [19] Yi L, Cai T, Man X, et al. Canopy interception loss in a *Pinus sylvestris*, var. *mongolica*, forest of Northeast China[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(6): 831-840.
- [20] 陈书军, 陈存根, 邹伯才, 等. 秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 138-146.
- [21] 宝虎, 刘殿国, 赵鹏武, 等. 大兴安岭南段白桦林降雨再分配特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 82-87.
- [22] Germer S, Elsenbeer H, Moraes J M. Throughfall and temporal trends of rainfall redistribution in an open tropical rainforest, south-western Amazonia (Rondonia, Brazil) [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2005, 10(3): 383-393.
- [23] Stan II J T V, Pypker T G. A review and evaluation of forest canopy epiphyte roles in the partitioning and chemical alteration of precipitation[J]. Science of the Total Environment, 2015, 536: 813-824.
- [24] 王甜, 康峰峰, 韩海荣, 等. 山西太岳山油松人工幼龄林水源涵养能力对密度调控的响应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 133-138.