

DOI: 10.5846/stxb201301240146

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

Sun Z L, Wang C K, Wang X C, Zhang Q Z. Rainfall redistribution patterns and their influencing factors of two temperate deciduous forests. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 3978-3986.

两种温带落叶阔叶林降雨再分配格局及其影响因子

孙忠林^{1,2}, 王传宽^{1,*}, 王兴昌¹, 张全智¹

(1. 东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040; 2. 通化师范学院, 通化 134002)

摘要: 林冠对降雨的再分配是森林生态系统的重要生态水文过程, 影响着生态系统生物地球化学循环。于 2012 年 5—10 月连续测定帽儿山森林生态站的两种温带天然次生林型——蒙古栎林和杂木林的林外降雨、穿透雨及树干径流, 旨在量化其降雨再分配过程及其影响因素。结果表明: 蒙古栎林的平均穿透雨、树干径流、林冠截留分别占同期林外降雨的 76%、7% 和 17%; 杂木林分别占 85%、5% 和 10%。根据模型估算, 当降雨量分别超过 1.0mm 和 0.7mm 时蒙古栎和杂木林开始出现穿透雨; 当降雨量超过 3.0mm 开始出现树干径流。当降雨量超过 5.6mm, 树干径流体积会随着树木胸径的增加而显著增加; 而当降雨量低于 5.6mm 则出现相反趋势。穿透雨、树干径流及林冠截留的绝对量均随降雨量的增大而显著增加, 但其占降雨量的比例却表现出不同的变化趋势。穿透雨量的空间变异随降雨量和降雨强度的增大显著减小。两种林型的降雨再分配格局因受降雨量、降雨强度等降雨特征和林冠结构的影响而产生差异。

关键词: 蒙古栎林; 杂木林; 穿透雨; 树干径流; 截留

Rainfall redistribution patterns and their influencing factors of two temperate deciduous forests

SUN Zhonglin^{1,2}, WANG Chuankuan^{1,*}, WANG Xingchang¹, ZHANG Quanzhi¹

1 Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Tonghua Normal University, Tonghua 134002, China

Abstract: Rainfall redistribution in a forest is an important ecohydrological process that influences the biogeochemical cycling of the ecosystem. The purpose of this study was to investigate rainfall redistribution patterns and its influencing factors in two temperate deciduous forests in northeastern China. The forest types were Mongolian oak (*Quercus mongolica* Fisch.) forest and mixed deciduous forest (i.e., no dominant tree species). We continuously measured the rainfall, throughfall and stemflow of the two stands from May to October of 2012. The mean ratios of throughfall, stemflow and interception to rainfall for Mongolian oak forest were 76%, 7% and 17%, respectively; while those for the mixed deciduous forest were 85%, 5% and 10%, respectively. Throughfall occurred when the rainfall exceeded 1.0 mm and 0.7 mm for the Mongolian oak and mixed deciduous stands, respectively. Stemflow occurred when the rainfall exceeded 3.0 mm for both stands. The stemflow amount increased significantly with diameter at breast height (DBH) increasing when the rainfall exceeded 5.6 mm, but an opposite trend occurred when the rainfall was below this threshold. The amount of throughfall, stemflow and interception all increased significantly with rainfall increasing, while their ratios to rainfall showed different trends. The spatial variability in throughfall decreased significantly with the amount and intensity of rainfall increasing. We concluded that the rainfall redistribution patterns of these two stands varied as a result of the differences in their canopy

基金项目: 国家“十二五”科技支撑项目(2011BAD37B01); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1054)

收稿日期: 2013-01-24; **修订日期:** 2014-03-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangck-cf@nefu.edu.cn

structure and responses to various rainfall characteristics (i.e., rainfall amount, rainfall intensity).

Key Words: Mongolian oak forest; mixed deciduous forest; throughfall; stemflow; interception

森林植被对于大气降水的再分配具有重要的生态水文意义。降雨通过森林植被冠层而重新分配为穿透雨、树干径流和林冠截留等组分。穿透雨是森林生态系统水分输入的主要形式,同时将林冠淋溶物质及大气湿沉降物质同步输入系统,因而对森林生态系统的水分输入及物质循环产生重大影响^[1]。树干径流的水分及淋溶物质沿着树干直接输入树木根部土壤中,对森林植物根周围水分及营养物质的供应具有重要作用,是某些干旱生境中森林植物的重要适应及竞争策略之一^[2]。林冠截留几乎全部蒸发回至大气,是森林生态系统蒸发散的重要组成部分,是森林生态系统水分利用效率的关键指标之一。因此,林冠对降水的再分配在森林生态系统水文循环中具有重要作用,影响着森林群落演替的过程和生物物理化学循环^[3]。

森林生态系统的降雨再分配过程受气象因子及生物因子的综合影响^[4-5]。气象因子主要包括降雨量、降雨强度、蒸发速率、风速及相邻两场降雨的时间间隔;生物因子主要是指森林的冠层结构(例如林分密度、物种组成等)^[6],当然叶片的特征、分布及密度、枝条的空间结构及树皮的结构均会影响林冠的降雨截留,进而影响森林生态系统的降雨再分配过程。

由于研究对象的复杂性,以往的研究往往以人工纯林、天然纯林或者单株树木为主^[1,7-8],对针叶林的研究较多,阔叶林的研究相对欠缺。天然次生阔叶林的树种组成及树种的径级分布远较人工林复杂,更与单株树木具有本质的区别,因此对于大气降雨的再分配功能也很可能与纯林和单株树木具有一

定的区别。此外,局域尺度上不同林型的同步研究相对较少,但更能检验不同森林生态系统对降水再分配过程的影响。

本研究通过同步量化两种温带次生阔叶林生态系统降水再分配的组分,探索影响森林降水再分配各组分的环境因子及各因子对降雨再分配过程的作用方式,为大尺度上森林生态系统水循环过程的描述及量化提供基础数据和理论依据。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

研究地位于黑龙江帽儿山森林生态系统国家野外科学观测研究站(45°20'N, 127°30'E),平均海拔400m,平均坡度10°—15°,地带性土壤为暗棕色森林土。该地区气候属大陆性季风气候,平均年降水量629 mm,降水主要集中在7—8月,平均年蒸发量约864mm,年均气温3.1℃^[9]。

蒙古栎林(MGL)及杂木林(ZM)是东北东部山区两个典型的天然次生林类型^[10]。其中,蒙古栎林优势种为蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch.),伴生种有春榆(*Ulmus japonica* Rehc.)、色木槭(*Acer mono* Maxim.)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)和暴马丁香(*Syringa reticulate* Blume);杂木林优势种为白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、胡桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim.),伴生种有色木槭、春榆、紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)、暴马丁香和榛(*Corylus heterophylla* Fisch.)。具体的林分特征和立地状况详见表1。

表 1 两种林型的立地状况和乔木层特征
Table 1 Site conditions and overstory characteristics for the two forest types

林型 Forest type	密度 Density/ (株/hm ²)	平均胸径 Mean DBH/ cm	胸高断面面积 Basal area/ (m ² /hm ²)	平均树高 Mean tree height/m	平均冠幅 Mean crown diameter/m	平均盖度 Mean coverage /%	平均叶 面积指数 Mean LAI	树种组成 Species composition (1/10)
蒙古栎林 Mongolian oak forest	2416	8.82(0.63)	26.13	7.25(0.33)	3.36(0.28)	79.6(4.6)	3.79(0.32)	7MGL1SMQ 1CY1SQL
杂木林 Mixed deciduous forest	2848	7.67(0.59)	26.79	7.92(0.51)	2.80(0.16)	74.4(5.7)	3.35(0.39)	4BH3HTQ 1SMQ1CY1ZD

括号内数字表示标准误差;MGL, SMQ, CY, SQL, BH, HTQ, ZD 分别表示蒙古栎、色木槭、春榆、水曲柳、白桦、胡桃楸、紫椴;胸高断面面积低于5%的树种未显示

1.2 研究方法

1.2.1 林外雨测定

林外雨(P , mm)采用自动和人工测定相结合的方法测定。在距离样地约 500m 处的气象观测塔(高 25m)上采用 HOBO 自动雨量筒(RG3-M, Onset Computer, USA)连续测定每场降雨过程(包括降雨量、降雨开始与结束时间)及林冠层气温等,并用距离样地 2 km 处的帽儿山生态站长期气象站的自动和人工观测相结合的降雨数据作校正,以获取林外雨的准确数据。林外雨观测结果表明,气象观测塔数据低估降雨量约 12%,因此林外雨量采用长期气象站数据,而降雨间隔时间及林冠温度则以自动雨量筒数据为准。由于夜间的雾露较大,对降雨再分配有较大的影响,因此,夜间降雨均按一场降雨处理,而白天则以间隔期 ≥ 4 h 作为两场降雨分割标准^[11]。

1.2.2 穿透雨和叶面积指数测定

穿透雨(TF , mm)采用自制 TF 收集器测定。 TF 收集器为 3 块 PVC 板焊接而成的面积为 0.43m^2 倒三棱锥形收集器;其顶部为边长 100cm 的等边三角形,底部开口处直接连接 25L 塑料桶,每场降雨称重后再换算成体积(假设雨水密度均为 1 kg/L)。为了防止凋落物堵塞出水孔,在收集器中安放边长为 20cm 的三角形尼龙网架,并定期清理凋落物。在每个林型内随机安置 5 个 TF 收集器,利用铁架使其保持水平状态,距离地面高度 0.7m。

叶面积指数(LAI)采用冠层分析仪(WinSCANOPY 2006a, Canada)测定。从生长季初期至生长季末期,每 10—15d 获取穿透雨收集器正上方林冠图像 1 次,共观测 12 次。为避免光照条件对测定结果产生影响,通常在晴朗天气的傍晚日落时段取像。利用该仪器自带软件分析林冠层图像,估测每个位置的 LAI 和盖度。

1.2.3 树干径流测定

采用自制 SF 收集器测定树干径流(SF , mm)。将不透水的聚氨酯材料(厚度为 5cm,宽度 30cm)固定在树干基部约 50cm 处,并在上部切一楔形剖面收集树干径流,在接口处利用塑料管将树干径流导入 25L 塑料桶内,称重后换算成体积。为了防止水分泄漏,采用玻璃胶密封树皮与树干径流装置之间的

缝隙。根据树种组成及其胸径(DBH)分布格局选取树干径流测定样木。两种林型共选取样木 48 株,其中:蒙古栎 13 株、白桦 14 株、胡桃楸 10 株、色木槭 6 株、春榆 5 株。

1.2.4 数据分析

利用树干径流体积(SV , L)与胸径(DBH, cm)之间的回归方程估算林分水平的全年 SF 总量。

林冠截留(I , mm)由公式 $I = P - (TF + SF)$ 获得^[12]。

采用配对数据 t -检验比较林型间降雨再分配的相关变量。利用一元回归建立变量之间的关系,通过 F -检验确定方程拟合效果。穿透雨量、树干径流体积与林外降雨量之间的关系以及穿透雨量、穿透雨率(TR)与叶面积指数和盖度的关系利用一元线性关系拟合;穿透雨率与林外降雨量之间的关系用对数函数关系拟合;穿透雨量、穿透雨率与降雨强度(P_i , mm/h)的关系,穿透雨量和穿透雨率的变异系数与林外降雨量和降雨强度之间的关系,林冠截留量与降雨间隔时间的关系,林冠截留量、林冠截留率与林外降雨量之间的关系利用幂函数关系拟合,通过协方差分析(ANCOVA)检验不同树干径流体积与林外降雨量回归方程是否存在显著的差异。统计分析利用 IBM SPSS Statistics 19.0 软件完成,绘图利用 Microsoft Excel 2003 完成。

2 结果

2.1 降雨再分配格局

整个生长季(2012 年 5—10 月,从能够收集到穿透雨至无法收集穿透雨)共观测到产生穿透雨的有效降雨为 52 场,林外降雨总量为 567.1mm,占历年全年平均降水的 90.2%。降雨主要集中在 6—8 月,降雨总量为 423.7mm,占全年降雨量的 74.7%(图 1)。单场降雨量在 0.4—81.4mm 范围内,平均单场降雨量 10.9mm。

以 2mm 为雨量级单位,将林外降雨量进行分级。结果显示降雨量 8mm 以内的降雨频次较多,占总降雨次数的 66.7%;20mm 以上降雨频率为 11.1%,其降雨总量占林外降雨总量的 31.3%。研究期间林外雨降雨强度变异较大,从 0.02 mm/h 到 6.8 mm/h,均值 1.3mm/h,变异系数 116.52%。

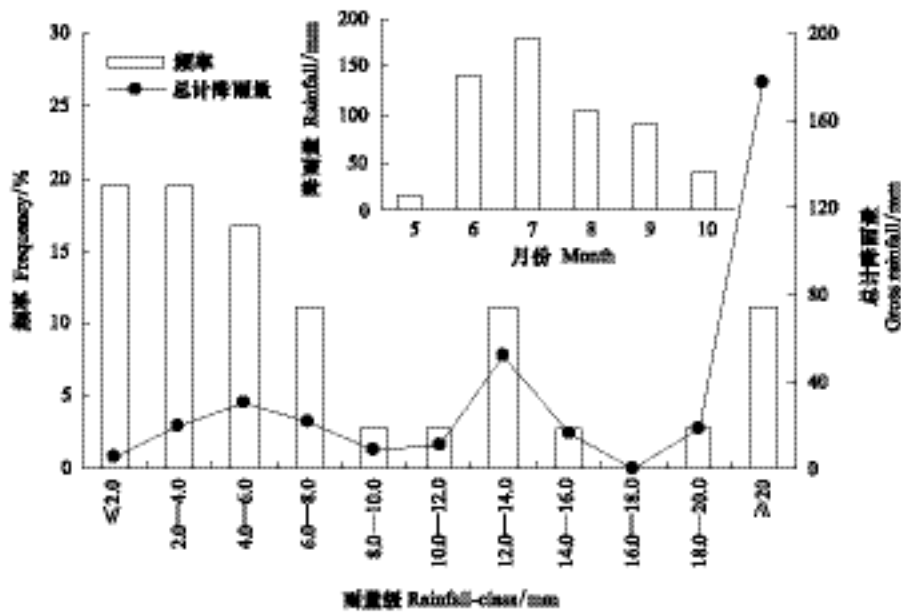


图 1 不同雨量级的林外降雨频数和雨量分布

Fig.1 The rainfall frequency and distribution of different rainfall classes

测定期间,杂木林和蒙古栎林的穿透雨总量分别为 482.4mm 和 434.0mm,分别占同期林外降雨总量的 85%和 76%,平均单场穿透雨量分别为 9.3mm

和 8.4mm(表 2)。杂木林的穿透雨量显著高于蒙古栎林($t = 4.33, n = 52, P < 0.01$),但树干径流量和林冠截留量均低于蒙古栎林。

表 2 两种林型降雨再分配*

Table 2 The rainfall redistribution of the two stands

林型 Forest type	林外雨 Rainfall/mm	穿透雨 Throughfall/mm	树干径流 Stemflow/mm	林冠截留 Interception/mm
蒙古栎林 Mongolian oak forest	567.1	434.0(76%)	37.1(7%)	96.0(17%)
杂木林 Mixed deciduous forest		482.4(85%)	29.6(5%)	55.1(10%)

* 括号内数字表示占林外雨的比例

2.2 穿透雨

两个林型穿透雨量和穿透雨率与林外降雨量关系的拟合方程分别为 $TF = aP - b$ 和 $TR = \ln(P) + d$ (图 2)。方程中参数 a 表示随林外降雨量的增加,穿透雨增加的速率; b/a 表示产生穿透雨的最小林外降雨量。根据方程可以推测,杂木林和蒙古栎林产生穿透雨的最小林外降雨量分别为 0.7mm 和 1.0mm。穿透雨率的变幅较大,其中蒙古栎林为 15%—89%,杂木林为 26%—95%。降雨量 20mm 以内,穿透雨率随降雨量变化而变化的趋势明显,超过 20mm,穿透雨率变化不大。相同的降雨量,杂木林的穿透雨量与穿透雨率均高于蒙古栎林。

利用两个林型穿透雨的实测数据,检验降雨量和降雨强度对穿透雨量空间变异的影响。杂木林和

蒙古栎林穿透雨量的变异系数相当,分别为 $(15.9 \pm 4.0)\%$ 与 $(16.0 \pm 4.2)\%$ (95%置信区间)。一元回归的结果显示:随降雨量和降雨强度的增加,穿透雨的变异均显著减小(图 3)。两个林型的穿透雨量和穿透雨率与林外降雨强度之间均呈现较好的幂函数关系,拟合方程分别为 $TF = e P_i^f$ 和 $TR = g P_i^h$,方程中的参数 f 和 h 值表示随降雨强度变化,穿透雨量和穿透雨率变化的速率,而 e/f 和 g/h 与产生穿透雨的最小降雨强度有关,参数及拟合情况详见表 3。降雨强度 2mm/h 以内,穿透雨量和穿透雨率的变化较为敏感,超过 2mm/h 则变化不敏感。忽略林型效应,检验叶面积指数(LAI)和盖度对穿透雨量和穿透雨率的影响。结果显示随 LAI 和盖度的增加,穿透雨量和穿透雨率均有减小的趋势($P > 0.05$)。

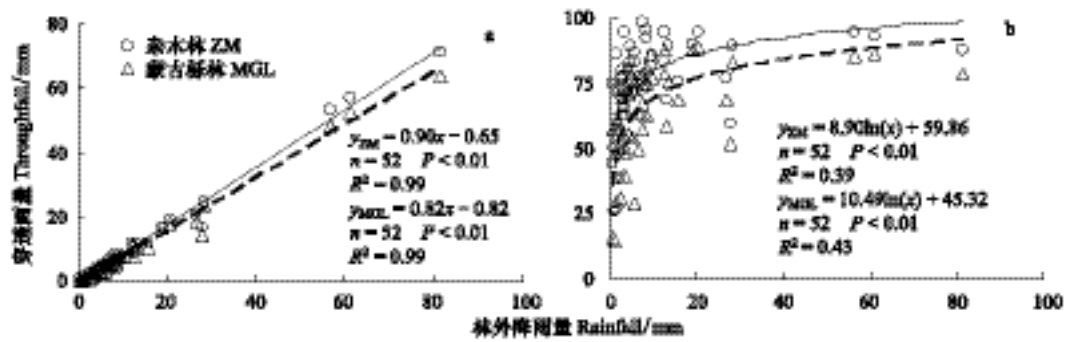


图2 穿透雨量及穿透雨率与降雨量之间的关系
Fig.2 Relationships between rainfall and throughfall and throughfall rate

表3 降雨强度与穿透雨量和穿透雨率回归模型*

Table 3 Regression models of amount and rate of throughfall against rainfall intensity						
林型 Forest type	变量 Variable	<i>e/g</i>	<i>f/h</i>	<i>R</i> ²	<i>F</i>	<i>P</i>
蒙古栎林 Mongolian oak forest	雨强-穿透雨量 Rainfall intensity-throughfall	5.22	0.68	0.36	26.67	< 0.01
杂木林 Mixed deciduous forest		4.30	0.71	0.34	24.43	< 0.01
蒙古栎林 Mongolian oak forest	雨强-穿透雨率 Rainfall intensity-throughfall rate	0.73	0.14	0.33	26.73	< 0.01
杂木林 Mixed deciduous forest		0.58	0.18	0.24	17.3	< 0.01

* 回归模型分别为 $TF = e P_i^f$ 和 $TR = g P_i^h$, $P < 0.01$ 表示回归极显著

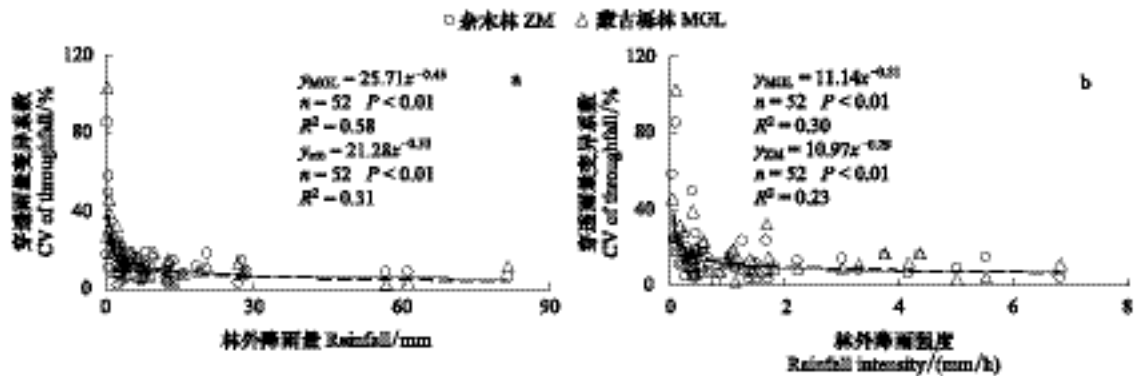


图3 穿透雨量变异系数与林外降雨量和林外降雨强度的关系
Fig.3 Relationships between coefficient of variation (CV) of throughfall and rainfall and rainfall intensity

2.3 树干径流

2.3.1 年树干径流总量的估算

研究期间产生树干径流的降雨共 46 次,杂木林与蒙古林树干径流总量分别为 29.6 和 37.1mm。生态系统水平上,树干径流总量的估算忽略树种组成的影响,利用取样树木的平均树干径流体积与树木 DBH 建立关系,再反推至样地水平。研究结果表明树干径流体积(SV)与树木 DBH 之间呈现幂函数关系(图 4)。

2.3.2 树干径流与不同树种之间的关系

以林外降雨量为自变量,每个树种的每场降雨的平均树干径流体积为因变量,分析不同树种树干径流量与林外降雨量之间的关系。结果表明,两个林型中的 5 个树种的树干径流体积均随林外降雨量的增加而线性增加,拟合方程 $SV = iP - j$, 式中 i, j 为方程的参数, i 表示树干径流随林外降雨增加而增加的幅度, j/i 表示产生树干径流的最小林外降雨量。从方程的参数情况可以推断:随林外降雨量的

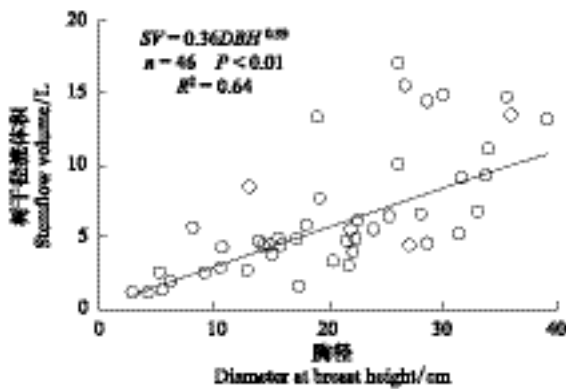


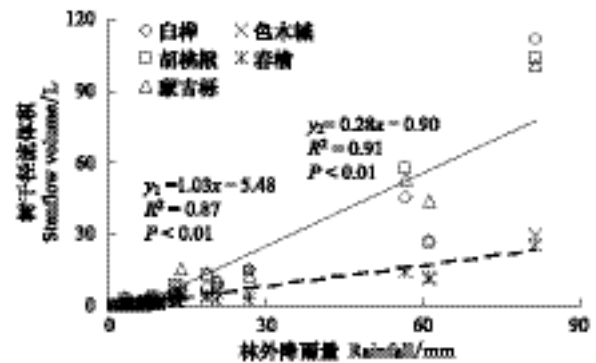
图4 树干径流体积与胸径之间的关系

Fig.4 The relationship between stemflow volume and diameter at breast height

增加,蒙古栎树干径流增加的幅度最快,白桦和胡桃楸次之,色木槭和春榆最小;白桦、胡桃楸、蒙古栎、色木槭和春榆产生树干径流的最小林外降雨量分别为 5.0、5.7、5.2、3.0 和 3.6mm。经检验,优势树种——白桦、胡桃楸与蒙古栎之间及伴生种——色木槭和春榆之间树干径流体积与降雨量关系方程差异不显著($P > 0.05$),将方程整合(图 5)。根据方程可以推算,优势树种和伴生种产生树干径流的最小林外降雨量分别为 5.3mm 和 3.2mm。

2.3.3 树干径流与林外降雨之间的关系

以单场降雨为单位($> 3.2\text{mm}$),建立树干径流

图5 优势树种和伴生树种树干径流体积(y_1, y_2)与降雨量之间的关系Fig.5 Relationships between stemflow volume of dominant (y_1) and associated (y_2) tree species and rainfall

体积与树木 DBH 之间的幂函数方程 $SV = mDBH^n$, 再将方程的决定系数 R^2 、参数 n 与降雨量进行回归分析。结果显示,方程的 R^2 的 95% 的置信区间为 0.21 ± 0.09 , 变异系数 107%, m 及 n 值的变异系数分别为 103% 及 253%, n 值随林外降雨量的变化变异较大。此外, R^2 具有统计学意义的降雨 15 场, 总降雨量 331.1mm, 占期间降雨总量的 79%, R^2 不具有统计学意义的降雨 12 场, 总降雨量 88.4mm, 占期间降雨总量的 21%。 R^2 与林外降雨量之间为对数函数关系, 与林外降雨强度之间为幂函数关系, 参数 n 与林外降雨量为对数关系(图 6)。随林外雨量的增加,

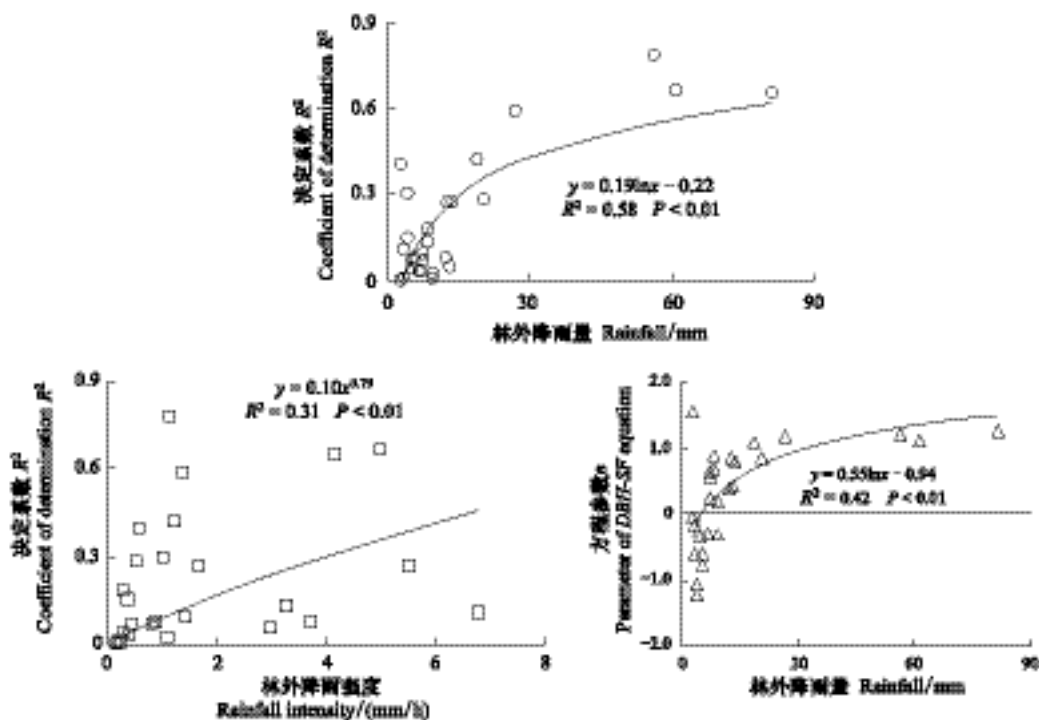


图6 降雨量与树干径流体积和胸径回归模型的统计参数之间的关系

Fig.6 Relationships between rainfall and statistical parameters of the regression models of stemflow volume against diameter at breast height

R^2 增大,根据方程可以推算,林外降雨量高于 5.1mm 时,树干径流体积与树木 DBH 的关系方程回归显著,可以用单场降雨的树干径流数据进行生态系统水平上树干径流总量的估算。另外,当降雨量小于 5.6mm 时,树干径流与树木 DBH 是负相关关系,大于该值时,二者为正相关关系。

2.4 林冠截留

研究期间,蒙古栎林和杂木林的林冠截留量分别为 (3.1 ± 2.5) 、 (1.6 ± 1.4) mm,单次降雨最大截留量

分别为 8.9 mm 和 5.2mm。以单场降雨为基本单位,分析林冠截留与林外降雨之间的关系。研究结果表明,二者之间为幂函数关系(图 7)。相同林外降雨量的条件下,蒙古栎林的截留量要高于杂木林,两个林型的截留量随降雨量的增加差距逐渐增大。林冠截留率与林外降雨量幂函数关系(图 7);随降雨间隔时间的延长,林冠截留量呈现上升的趋势($P > 0.05$),这种上升的趋势在降雨间隔 24h 以内比较明显,超过 24h 则上升的幅度较小。

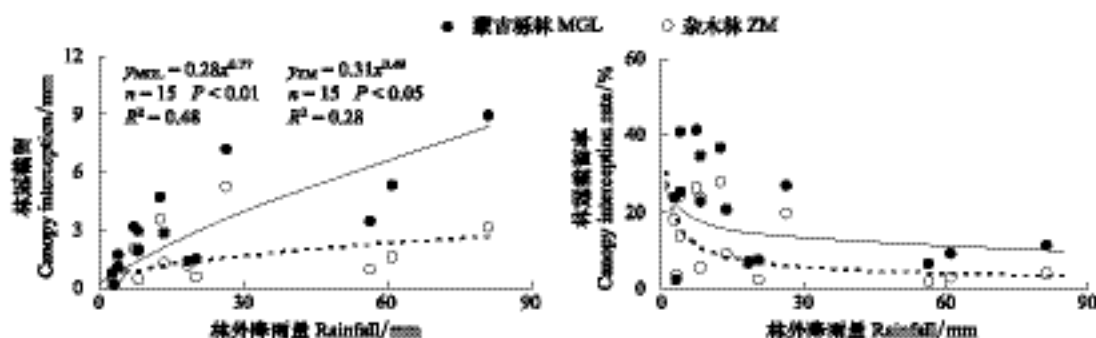


图 7 两种林型林冠截留量和截留率与降雨量之间的关系

Fig.7 Relationships between the amount and rate of interception and rainfall for the two forest types

3 讨论

3.1 降雨再分配的总体情况

两个林型的穿透雨率、树干径流率和林冠截留率分别为 76%与 85%、7%与 5%、17%与 10%,该结果在相关研究的范围内^[13-15]。与 Staelens^[11]等对欧洲山毛榉林研究结果相比,穿透雨率偏高,树干径流率和林冠截留率偏低,这很可能是林冠层郁闭度和林外降水特征的差异导致的。与降雨量大小相当的高山栎林^[16]相比较,本研究中蒙古栎的穿透雨率偏低,树干径流率偏高,林冠截留率大小相当,这种差别可能源于林分立地条件的差异。与针叶林相比,阔叶林通常具有较低的叶面积指数,往往林冠截留率相对较低,而穿透雨率相对较高^[17]。

3.2 穿透雨的影响因素

穿透雨量和穿透雨率的主要受林外降雨量、林外降雨强度、林型、冠层结构等因素影响^[11,17]。通常穿透雨量与林外降雨量之间为线性关系^[14,16],当林外降雨量超过一定阈值时才会出现穿透雨,森林的郁闭度越高,此阈值越大。本研究中,穿透雨率随林外降雨量的增加而增大,二者之间为对数函数关系,当林外降雨量在一定范围内(0—20mm),穿透雨率

上升较快(0—75%),当超过此范围,穿透雨率则趋于平稳(75%—90%)。林冠情况、林型效应会对穿透雨量和穿透雨率产生深刻的影响,在相同林外降雨量的情况下,杂木林的穿透雨量和穿透雨率均高于蒙古栎林,这是两个林型冠层结构差异的结果。当然,即使在同一林型的不同季节,相同林外降雨量的穿透雨量和穿透雨率也会存在差别,但这种差别会被林外降雨量和降雨强度等因素所掩盖。穿透雨的空间异质性是普遍存在的^[18-19],通常情况下林型效应和森林的季相变化是导致穿透雨出现空间异质性的主要原因^[8]。林冠在空间和时间尺度上的组成越复杂,这种异质性越大,穿透雨的空间变异也会随林外降雨量和降雨强度的增加而减小(图 3),增加取样面积和取样数量以和随机设置穿透雨测量装置能够克服穿透雨的空间异质性影响,从而实现对穿透雨量客观准确的估算^[20]。

3.3 树干径流的影响因素

对于单株树木来说,树冠的水平覆盖面积、树冠厚度、树干与水平方向的夹角、树枝与树干的夹角以及林冠和树皮的吸水能力等因素均会对树干径流量产生影响^[21]。将树冠假设成为一个半透水的收集装置,则通常情况下其覆盖面积越大,取样面积也会

增大,树干径流量也就越大。通常树冠的覆盖面积与树干的相关参数存在较好的相关关系,因此树干径流量也很可能与树木树干的相关变量存在一定的内在联系。本研究中,取样树木的 DBH 与其年平均树干径流呈现较好的幂函数关系,利用树木的 DBH 可以解释年平均树干径流体积的 64%,基本上可以用于生态系统水平上树干径流总量估算。树木的 DBH 与年平均树干径流体积之间的关系类似于圆的半径与面积之间的关系,这说明对于树冠的假设(半透水的收集装置)是可行的。树冠的透水性在树木的种内种间存在差别,这导致了树干径流量的种内种间变异。在相同的林外降雨量(> 5.1mm)的条件下,5 种树木的树干径流体积中蒙古栎最大,白桦及胡桃楸次之,春榆最小,这说明蒙古栎的林冠的透水性最弱,在相同的林外降雨量的情况下有更多的水分沿着叶片、枝条流向树干,产生更多的树干径流。叶片的革质化程度、树冠的厚度及树冠层与树皮的吸水能力会影响树冠的透水能力,导致不同树种 DBH 与树干径流体积关系方程的参数的差异^[22]。

对于两个林型来说,白桦、核桃楸和蒙古栎位于林冠层的上部分,分别是各自优势树种,而色木槭与春榆位于优势树种林冠层以下。生态位的分化导致了优势树种与伴生树种对于水分的利用策略的差异。下层的伴生树种通常生长于优势树种形成的林隙位置,这种空间位置的分配一方面能够最大限度的利用太阳辐射光能,另外一方面也提高了水分的利用效率。虽然色木槭和春榆的树冠位于优势树种林冠层以下,但其树干径流出现的最小林外降雨量却比两个林型的 3 种优势树种低,这导致在较小降雨量的情况下也有水分直接输入树木的根部土壤中,提高了伴生树种应对干旱胁迫的竞争能力。

全年尺度上,随着树木 DBH 的增大平均树干径流体积呈现显著增加的趋势,但是以每场降雨为单位进行分析的时候发现,在林外降雨量不同的时候此规律并不是一成不变的,甚至在降雨量较小的时候出现了负相关的结果(图 6),这可能是由于不同 DBH 的树木林冠的透水和吸水能力差异导致的。利用拟合方程推算这种正负相关转变的林外降雨量的阈值为 5.6mm,这与两个林型 3 种优势树种产生树干径流的林外降雨量的阈值(5.3mm)是接近的。林外降雨量低于 5.6mm,小树树冠的高渗透性很有可

能导致其出现较多的树干径流;当林外降雨量超过 5.6mm,由于大树较大的树冠取样面积可能导致了大树出现了更多的树干净流量。从全年来看,5.6mm 以上的林外降雨量占降雨总量的 88%,这也导致全年水平上树木 DBH 与平均树干径流体积之间为正相关关系(负相关的关系被掩盖)。

3.4 林冠截留的影响因素

森林生态系统中,林冠截留主要受林冠郁闭度、林冠叶面积指数、林冠的干燥程度、叶片及树皮表面的吸水能力等因素影响。高的林冠层 LAI 及小的降雨量很可能导致较大的林冠截留量^[6]。本研究中林冠截留量受林外降雨特征的影响较大,此外杂木林及蒙古栎林的直线距离较小,但全年林冠截留量相差超过 40mm,林冠截留率相差近 7%。这说明在小的局域尺度上,林型效应对降雨再分配过程的影响很大。蒙古栎林的平均树冠厚度和冠幅均高于杂木林,叶面积指数及盖度的差异很可能导致林冠截留产生差别^[23]。

4 结论

根据蒙古栎林和杂木林的降雨再分配的研究结果能够得到以下结论:(1)穿透雨、树干径流和林冠截留会随林外降雨量和林外降雨强度的变化而变化,随着降雨量的增加,穿透雨的空间变异降低,林冠截留量逐渐趋于稳定;(2)树种组成和树木的立地条件会影响到降雨再分配过程,杂木林和蒙古栎林的林外降雨量分别超过 0.7mm 和 1.0mm 时会产生穿透雨。降雨量超过 3.1mm,开始出现树干径流,当降雨量超过 5.6mm,树干径流量会随着树木 DBH 的增加而显著增加,低于 5.6mm 则结论相反;(3)蒙古栎林及杂木林两个林型降雨再分配过程存在一定的差异,这主要是由于林冠截留的差异导致的。

致谢:感谢东北林业大学生态研究中心白海峰、焦振、许飞等在野外实验中提供的帮助,感谢王兆国对写作的帮助,感谢黑龙江帽儿山森林生态系统国家野外科学观测研究站提供的野外基础支持。

References:

- [1] Nanko K, Onda Y, Ito A, Moriwaki H. Spatial variability of throughfall under a single tree: Experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(9): 1173-1182.

- [2] Li X Y, Liu L Y, Gao S Y, Ma Y J, Yang Z P. Stemflow in three shrubs and its effect on soil water enhancement in semiarid loess region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148 (10): 1501-1507.
- [3] Wang M C, Liu C P, Sheu B H. Characterization of organic matter in rainfall, throughfall, stemflow, and streamwater from three subtropical forest ecosystems. *Journal of Hydrology*, 2004, 289 (1/4): 275-285.
- [4] Zimmermann A, Wilcke W, Elsenbeer H. Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Hydrology*, 2007, 343 (1/2): 80-96.
- [5] André F, Jonard M, Ponette Q. Effects of biological and meteorological factors on stemflow chemistry within a temperate mixed oak-beech stand. *Science of the Total Environment*, 2008, 393(1): 72-83.
- [6] Brauman K A, Freyberg D L, Daily G C. Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud interception: A comparison of native forest sites in Kona, Hawai'i. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(2): 265-275.
- [7] Shi Z J, Wang Y H, Xing W, Yu P T, Guo H, Zhang L Y, Dong X H. The spatial heterogeneity of throughfall under the *Larix principis-rupprechtii* single tree's canopy. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2877-2886.
- [8] Hopp L, McDonnell J J. Examining the role of throughfall patterns on subsurface stormflow generation. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(1/2): 460-471.
- [9] Sang Y R, Wang C K, Huo H. Inter-specific and seasonal variations in photosynthetic capacity and water use efficiency of five temperate tree species in Northeastern China. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2011, 26(1): 21-29.
- [10] Zhang Q Z, Wang C K. Carbon density and distribution of six Chinese temperate forests. *Science China Life Sciences*, 2010, 53 (7): 831-840.
- [11] Staelens J, De Schrijver A, Verheyen K, Verhoest N E C. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes*, 2008, 22(1): 33-45.
- [12] Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, Xiong W, Yu P T, Guo J. Rainfall redistribution and its spatial variation in the stand of *Pinus armandii* in the Liupan Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 76-85.
- [13] Berger T W, Untersteiner H, Schume H, Jost G. Throughfall fluxes in a secondary spruce (*Picea abies*), a beech (*Fagus sylvatica*) and a mixed spruce-beech stand. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3/4): 605-618.
- [14] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 2000, 14(16/17): 2903-2920.
- [15] Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(1/2): 37-54.
- [16] He C Q, Xue J H, Wu Y B, Zhang L Y, Liu C, Liu X L. Rainfall redistribution in subalpine *Quercus aquifolioides* forest in upper reaches of Minjiang River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 1871-1876.
- [17] McJannet D, Wallace J, Reddell P. Precipitation interception in Australian tropical rainforests: II. Altitudinal gradients of cloud interception, stemflow, throughfall and interception. *Hydrological Processes*, 2007, 21(13): 1703-1718.
- [18] Shachnovich Y, Berliner P R, Bar P. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(1/2): 168-177.
- [19] Johnson R C. The interception, throughfall and stemflow in a forest in Highland Scotland and the comparison with other upland forests in the U. K. *Journal of Hydrology*, 1990, 118(1/4): 281-287.
- [20] Lloyd C R, de Marques Ò A O. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1988, 42(1): 63-73.
- [21] Siles P, Vaast P, Dreyer E, Harmand J M. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss in a coffee (*Coffea arabica* L.) monoculture compared to an agroforestry system with *Inga densiflora*. *Journal of Hydrology*, 2010, 395(1/2): 39-48.
- [22] Levia D F, Van Stan J T II, Mage S M, Kelley-Hauske P W. Temporal variability of stemflow volume in a beech-yellow poplar forest in relation to tree species and size. *Journal of Hydrology*, 2010, 380(1/2): 112-120.
- [23] Liu S G. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecological Modelling*, 1997, 99(2/3): 151-159.

参考文献:

- [7] 时忠杰, 王彦辉, 熊伟, 于澎涛, 郭浩, 张雷燕, 董晓红. 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.
- [12] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 熊伟, 于澎涛, 郭浩. 六盘山华山松 (*Pinus armandii*) 林降雨再分配及其空间变异特征. *生态学报*, 2009, 29(1): 76-85.
- [16] 何常清, 薛建辉, 吴永波, 张雷燕, 刘冲, 刘兴良. 岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配. *应用生态学报*, 2008, 19 (9): 1871-1876.