

中亚热带红壤区油桐 (*Vernicia fordii*) 林冠水文效应特征

曹 云^{1,2} 欧阳志云^{1,*} 黄志刚^{1,3} 郑 华¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室 北京 100085 ; 2. 中国气象局国家气象中心 北京 100081 ;
3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 生态与农业研究室 甘肃兰州 730000)

摘要 : 于从 2004 年 7 月到 2005 年 9 月 , 对南方红壤区油桐人工林的穿透雨、树干流和林冠截留的水文特征进行了监测 , 并对其影响因素进行初步分析 . 结果表明 : 在整个测定期间 , 油桐林穿透雨占总降雨量 $75.6\% \pm 8.6\%$, 树干流占 $3.6\% \pm 1.1\%$, 而截留量占 $20.8\% \pm 9.1\%$. 油桐林冠对降雨的再分配受到降雨量和降雨强度的影响 , 随着雨量的增加 , 穿透雨、树干流和截留量相应地提高 , 并且树干流和截留量在高的雨量下逐渐趋于稳定 . 随着降雨强度的增加 , 穿透雨率逐渐升高 , 而树干流率和截留率降低 . 在不同雨量级间 , 油桐穿透雨具有显著性的差异 , 但树干流的差异不显著 . 油桐林下水分输入存在明显的空间异质性 , 穿透雨在不同观测点间具有显著性差异 , 靠近树干的林冠内部穿透雨低于林冠边缘 , 而且随着降雨量或降雨强度的增加 , 穿透雨的空间异质性 (穿透雨率的变异系数 CV) 降低 . 树干流对降雨也具有明显的汇集作用 , 在树干周围输入的雨量是林外降雨量 20 ~ 70 倍 , 并且随着降雨量的增加 , 这种汇集效应 (漏斗比率) 先提高后降低 . 同时油桐单株树干流 ($\text{cm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$) 与胸径、树高和冠层面积均呈显著正相关 ($p < 0.05$) , 但是与枝下高的相关性不显著 ($p > 0.05$) .

关键词 : 降雨再分配 ; 穿透雨 ; 树干流 ; 水文效应 ; 漏斗比率 ; 南方红壤区

文章编号 : 1000-0933 (2007) 05-1740-08 中图分类号 : Q948 S715 S718.5 文献标识码 : A

Hydrological characteristics of *Vernicia fordii* canopy in red soil region of mid-subtropics

CAO Yun^{1,2} , OUYANG Zhi-Yun^{1,*} , HUANG Zhi-Gang^{1,3} , ZHENG Hua¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology , Research Center for Eco-Environmental Sciences , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100085 , China

2 National Meteorological Center , China Meteorological Administration , Beijing 100081 , China

3 Department of Ecology and Agriculture , Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (5) 1740 ~ 1747.

Abstract : Rainfall redistribution is an important hydrological process in forest ecosystems. The partitioning of gross rainfall into throughfall , stemflow and interception in the *Vernicia fordii* forest was studied from July 2004 to September 2005 at the Ecological Benefit Monitoring Station of the Yangtze River Protection Forest in Cili County , Hunan Province. During the measurement period , throughfall , stemflow and interception expressed percentage of gross rainfall in the *V. fordii* forest were $75.6\% \pm 8.6\%$, $3.6\% \pm 1.1\%$ and $20.8\% \pm 9.1\%$ respectively. Rainfall redistribution in *V. fordii* was closely related with rainfall depth or rainfall intensity. As rainfall increased , throughfall , stemflow and interception (mm) increased.

基金项目 : 国家自然科学基金委创新群体资助项目 (40321101) ; 国家自然科学基金资助项目 (30230090)

收稿日期 : 2006-09-13 ; 修订日期 : 2007-03-02

作者简介 : 曹云 (1977 ~) , 男 , 内蒙古人 , 博士生 , 主要从事植被生态学及生态系统水文服务功能机制研究 . E-mail : Caoyuncy@sohu.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail : zyouyang@cees.ac.cn

Foundation item : This work was financially supported by Innovation Group Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 40321101) ; National Natural Science Foundation of China (No. 30230090)

Received date 2006-09-13 ; **Accepted date** 2007-03-02

Biography : CAO Yun , Ph. D. candidate , mainly engaged in vegetation ecology and mechanics of ecosystem services. E-mail : Caoyuncy@sohu.com

However, stemflow and interception stabilized at the larger rainfall depth. As rainfall intensity increased, throughfall percentage (%) increased, while stemflow percentage (%) and interception percentage (%) decreased. Differences in throughfall (%) were significant among different rainfall classes. However, no significant difference was found in stemflow between different rainfall classes. Water input below the canopy had clearly spatial heterogeneity. Throughfall differed significantly ($p < 0.05$) among different sampling sites and throughfall percentage close to the tree was significantly lower than those under the peripheral part. The spatial variation in throughfall (i. e., CV of throughfall percentage) decreased with increasing rainfall depth or rainfall intensity. Stemflow in *V. fordii* can obviously concentrate water into a small area around the tree trunk, which was 20–70 times higher than rainfall depth during the same period. With increasing rainfall, the funneling ratio (FR) showed the tendency of a first increase and consequent decrease. Stemflow amount ($\text{cm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$) in *V. fordii* showed significantly positive correlation with structural characteristics of the forest such as diameter at breast height, tree height and crown area. No significant correlation was found between stemflow and height from the base to the first branch.

Key Words: rainfall redistribution; throughfall; stemflow; forest hydrology; funneling ratio; red soil region

在我国南方红壤区, 由于长期的砍伐和开垦, 森林植被遭到严重破坏, 地表大面积裸露, 导致当地水土流失极为严重^[1]。但是在具有森林覆盖的地区, 可通过林冠的水文效应, 截留部分降水, 减小了进入林地的水分, 同时可减弱雨滴的动能, 减小对林地的冲击, 在一定程度上控制水土的流失, 是森林生态系统水文功能具体表现^[2~4]。在森林水文过程中, 林内雨(穿透雨和树干流和), 不仅将降雨扩散输入到林地内, 而且会改变降雨水平分布格局, 具有明显的汇集效应, 特别是引起降雨在树干周围的局部汇集, 这将导致土壤物理化学性质的改变^[5~6]。因此林冠对降雨再分配的过程, 是林冠水文效应体现, 对林地水文平衡和养分循环具有重要意义^[5, 7, 8]。

油桐 (*Vernicia fordii*) 为大戟科油桐属落叶乔木, 以其根系发达, 耐瘠薄能力强的特点, 成为南方退耕还林以及生态恢复建设的常见树种之一, 具有高的经济价值。所以本文对油桐林的穿透雨、树干流和截留量等林冠水文特征进行定位观测, 研究了林冠降雨再分配的变化特征, 探讨了林下降雨的水平空间分布规律, 旨在揭示森林林冠水文效应的机制, 为森林水文过程研究提供基础数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点选在湖南红壤区国家长江防护林生态效益监测站 (29°30'N, 110°10'E), 该站位于湖南省张家界市慈利县, 最低海拔 210m, 最高峰 917.4m。研究区母岩主要为板页岩、石灰岩, 土壤为山地红壤和黄壤, 整个小流域面积为 3.0km²^[9]。研究区处于亚热带湿润季风气候区, 年平均降雨量为 1347.0mm, 7~9 月份降雨量占全年的 47.5%, 年平均气温 16.7℃, 无霜期 269d^[10]。

1.2 研究对象

在油桐人工林(树龄 18 坡向 NE 坡度 25°)中, 选取 30m × 30m 样地, 乔木层盖度 70%, 油桐平均胸径为 (7.3 ± 2.1)cm, 树高为 4.8m (图 1), 林下灌木草本稀疏, 主要有青蒿 (*Artemisia annua*)、牛膝 (*Achyranthes bidentata*)、金银花 (*Flos lonicerae*)、细叶莎草 (*Cyperus compressus*) 等。油桐林周围主要生长着马尾松 (*Pinus massoniana*) 林和樟树 (*Cinnamomum camphora*) 林以及一些杂灌林。

1.3 研究方法

本实验从 2004 年 7 月到 2005 年 9 月测定了油桐林冠降雨再分配情况。

1.3.1 林外雨 (P) 的测定

利用虹吸式自记雨量计测定林外雨。

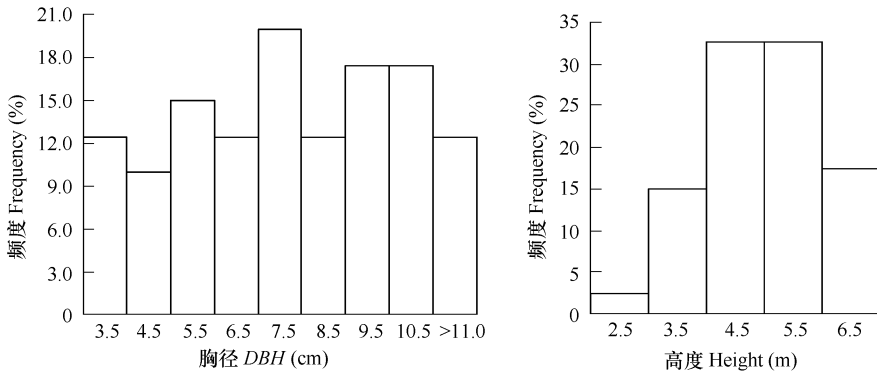


图1 油桐林胸径和树高的分布

Fig. 1 Distribution of diameter at breast height (DBH) and tree height (H) in the *V. fordii* forest

1.3.2 穿透雨 (TF) 的测定

在选定的典型油桐林样地中,根据林冠特点,悬挂 43 个自制雨量桶(形成 43 个观测点,截面积 $808.9\text{cm}^2/\text{桶}$),为了避免林下植物对穿透雨的影响,雨量桶距离地面不低于 1m,雨后测定穿透雨体积 (cm^3),然后换算成雨量深 (mm)。

1.3.3 树干流 (SF) 的测定

按油桐林径级和数目,共选择具有代表性植株 14 株,在树干基部 50 ~ 130cm 间,将剖开的聚乙烯塑料管螺旋状嵌入树干四周,并将其导入下部的容器,雨后收集树干流,计算公式:

$$SF = \sum_{i=1}^n \frac{C_n \times M_n}{S \times 10^3}$$

式中, SF 为树干流 (mm); n 为树干径级数; C_n 为第 n 径级树干流体积 (cm^3); M_n 为第 n 径级的株数; S 为样地面积 (m^2)。

树干流漏斗比率 FR (Funneling ratio)^[2] $FR = 10 \times V / (B \times P)$

式中, V 为树干流体积 (cm^3); B 为树干断面积 (cm^2); P 为降雨量 (mm)。

1.3.4 林冠截留量 (I)

采用水量平衡法,计算截留量

$$I = P - (TF + SF)$$

式中 I 为林冠截留量 (mm); P 为林外降雨量 (mm); TF 为穿透雨 (mm); SF 为树干流 (mm)。

1.3.5 数据分析

使用 SPSS 11.0 统计软件对数据进行了分析。

2 结果与分析

2.1 穿透雨变化规律

在测定期间,油桐林下穿透雨 (mm) 与降雨量 (mm) 具有极显著的正相关性 ($p < 0.01$) (图 2, A)。但是穿透雨率 (%) 与降雨量 (mm) 或降雨强度 (mm/h) 之间存在非线性关系,随着雨量或雨强的增加,穿透雨率迅速的提高,但是在高的雨量 ($> 80.0\text{mm}$) 或雨强 ($> 9.0\text{mm/h}$) 情况下,穿透雨率提高的幅度减小,并趋于稳定 (80%) (图 2, B 和 C)。

林下穿透雨不仅受到降雨量的影响,而且即使是同一场降雨,林下不同位置间穿透雨也存在差异。方差分析表明,在林下不同观测点间,油桐穿透雨率存在显著性的差异 ($p < 0.05$),而且林冠边缘 ($\geq 120\text{cm}$) 的穿透雨要显著大于林冠内部 (0 ~ 60cm) 的穿透雨,但是林冠中部的穿透雨变异程度最小 (表 1)。

2.2 树干流变化规律

油桐树干流变化也明显受到降雨量的影响,随着降雨量的增加而增加,但是在 $> 100.0\text{mm}$ 的降雨量情况

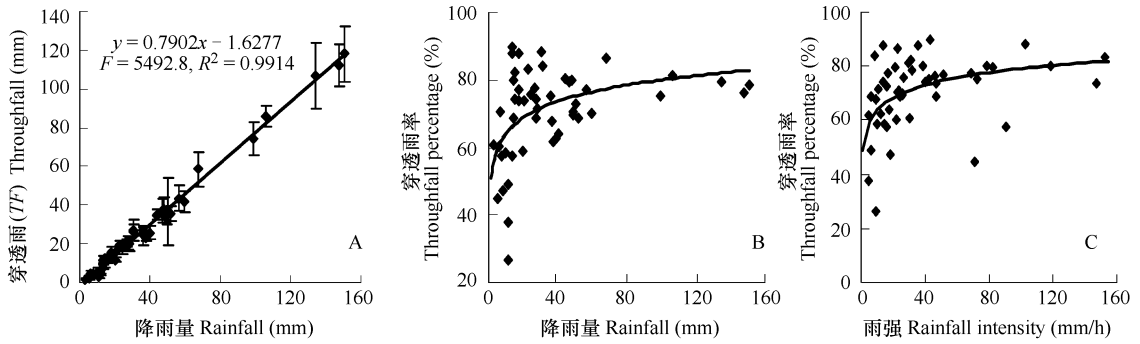


图2 穿透雨和穿透雨率与雨量雨强的关系

Fig. 2 Scatter for throughfall (mm) and throughfall percentage (%) against rainfall depth or rainfall intensity

下, 树干流波动减小, 逐渐趋于稳定 (图 3, A); 但树干流率 (%) 与降雨量呈显著负相关, 即随着降雨量的增加, 树干流率降低 (图 3, B)。同时, 降雨强度与树干流率也具有负的相关性 (图 3, C)。

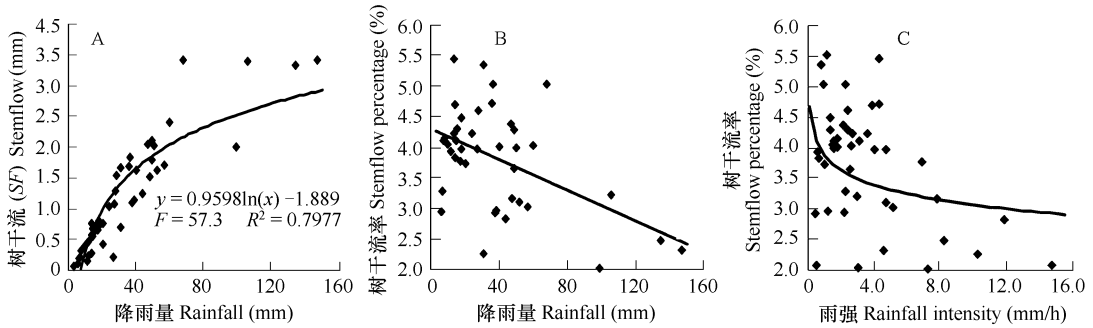


图3 树干流和树干流率与雨量雨强的关系

Fig. 3 Scatter for stemflow (mm) and stemflow percentage (%) against rainfall depth or rainfall intensity

除了降雨特征的影响, 树干流变化还受到自身结构特征的控制。为了消除雨量大小对树干流的影响, 同时分析树干流与树木特征的关系, 将基于单场降雨的单株树干流体积 (cm³) 除以降雨量 (mm), 得到每 mm 降雨的单株树干流 (cm³·mm⁻¹), 与各因子相关分析结果 (表 2) 表明, 单株树干流与胸径、树高和冠层面积呈极显著的正相关 ($p < 0.01$), 但是与枝下高的相关性不显著 ($p > 0.05$)。

2.3 林冠截留变化规律

与穿透雨和树干流变化规律相似, 林冠截留量 (mm) 与降雨量也具有显著的正相关, 而截留率 (%) 与降雨量或降雨强度呈负相关性 ($p < 0.05$)。随着降雨量的增加, 油桐林冠截留量逐渐提高, 在大雨量下, 上升趋势平缓 (图 4, A); 但林冠截留率随着降雨量或降雨强度的增加而急剧降低, 之后在高的雨量或雨强下, 变化幅度降低, 截留率最终恒定在 20.0% 左右 (图 4, B 和 C)。

2.4 林冠降雨的再分配

在整个测定期间, 油桐穿透雨率为 75.6% ± 8.6%, 树干流率为 3.6% ± 1.1%, 而截留率为 20.8% ± 9.1%。在不同雨量级下 (表 3), 穿透雨率随着雨量级的增加而增加, 截留率变化与之相反, 而树干流率先增加后减小, 在 25.0 ~ 50.0mm 雨量级下达到最大。在不同雨量级间, 林下穿透雨率存在显著性的差异 ($F =$

表 1 距树干不同距离下的穿透雨率变化

Table 1 Throughfall percentage (%) at different stem distances in the *V. fordii* forest

距离 Distances (cm)	平均值 Mean (%)	标准偏差 Std	变异系数 CV
0 ~ 60	61.0b	14.1	23.1
60 ~ 120	65.4a	5.5	8.4
≥ 120	68.7a	7.7	11.2

在同一列中有相同字母的无显著性差异 Different letters following means in columns denote significant differences ($p < 0.05$)

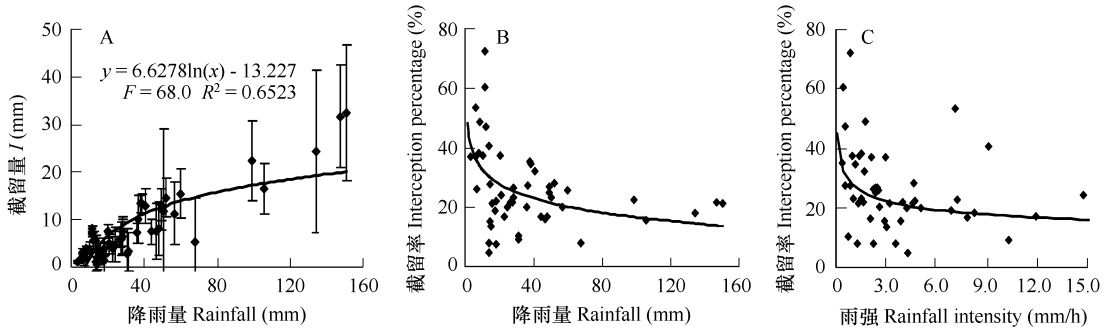


图4 林冠截留量和截留率与雨量雨强的关系

Fig. 4 Scatter for interception (mm) and interception percentage (%) against rainfall depth or rainfall intensity

3.013 $p < 0.05$), 其中 $< 10.0\text{mm}$ 雨量下的穿透雨率, 与其他大多雨量级间均有显著性的差异 ($p < 0.05$), 截留率差异性变化规律与穿透雨的相似, 但是树干流率在不同雨量级间差异不显著 ($F = 0.858$ $p > 0.05$).

3 讨论

3.1 林冠对降雨的再分配规律

林冠对降雨的再分配, 不仅受到树种类型和林地特征等因素影响, 也受雨量和雨强等降雨特征的制约^[3, 11], 但是对于某一特定林分来讲, 主要受到降雨特征的影响^[12]. 本研究也发现, 油桐林下穿透雨、树干流和截留量均与降雨量具有显著相关性, 随着降雨量的增加, 三者均明显升高. 在不同森林类型中, 也存在类似的林冠水文规律^[13~16]. 但是树干流和截留量的增加幅度存在一个限制, 在高雨量下增加缓慢, 最终趋向于稳定, 在 $> 80.0\text{mm}$ 雨量下, 油桐树干流大

致恒定于 3.5mm , 截流量在降雨量 $> 120.0\text{mm}$ 时恒定于 30.0mm 左右 (图 3, A 和图 4, A). 这可能受到冠层面积以及枝条和叶的着生角度等树木结构特征的影响, 使林冠的截留能力和林冠汇集降雨到树干的能力, 存在一个限制, 因此, 有些研究者也发现了林冠截留量和树干流的增加速度会随着降雨量增加而减缓, 逐渐趋向于饱和^[4, 6, 13, 17]. 同时, 本研究也发现降雨量与穿透雨率成正相关性, 与树干流率和截留率成负相关性.

表2 单株树干流 ($\text{cm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$) 与树木特征的相关性

Table 2 Correlation between stemflow volume per mm of rainfall per stem and tree characteristics

项目 Item	胸径 DBH	树高 H	冠层面积 Crown area (m^2)	枝下高 HBB
相关系数 Correlation Coefficient	0.926 **	0.763 **	0.719 **	0.116
显著度 Sig. (2-tailed)	0.001	0.001	0.004	0.707
样本数 N	14	14	14	14

HBB: Height between the base and first branch; ** 表示相关性达到极显著 Correlation is significant at the 0.01 level

表3 不同雨量级下油桐林冠降雨再分配

Table 3 Rainfall redistribution of different rainfall ranges in the *V. fordii* forest

雨量级 Rainfall ranges (mm)	穿透雨 Throughfall		树干流 Stemflow		截留 Interception	
	%	Std	%	Std	%	Std
< 10.0	56.7b	8.8	3.4	1.0	39.9a	8.9
10.0 ~ 25.0	71.5bc	18.1	3.7	1.2	24.8ac	18.8
25.0 ~ 50.0	72.6ac	7.8	5.2	1.0	22.2bc	7.7
50.0 ~ 100.0	75.5ac	6.4	3.5	1.0	21.0bc	7.1
≥ 100.0	78.6ac	2.1	3.0	1.1	18.4bc	2.9

在同一列中有相同字母的无显著性差异 For each bar, means with the same letter are not significantly different at $p < 0.05$

林冠对降雨再分配, 不仅受到降雨量多少的影响, 而且也与降雨强度有关^[3, 18]. 研究结果表明降雨强度与油桐穿透雨率呈正相关性, 与截留率和树干流率呈负相关性, 即随着降雨强度的增加, 穿透雨率逐渐增加, 而截留率和树干流率逐渐减小. 在整个实验期间, 油桐林内雨 (穿透雨和树干流之和) 占总降雨量的 79.2% , 其中穿透雨占林内雨 95.5% , 树干流占 4.5% , 因此油桐林内降雨输入基本以穿透雨为主.

3.2 林冠对降雨空间分布格局的影响

林冠对大气降雨的截留作用是森林发挥其水文作用的第一步,减小了林下径流量,影响穿透雨的历时、强度、雨滴动能以及产流时间^[3],甚至林冠可截留雾水,影响林地水分^[19]。森林林冠,不仅影响林地降雨的输入量,而且还影响降雨在林内水平分布的格局^[2,15]。降雨在林内的水平输入是由穿透雨和树干流 2 部分所构成。尽管穿透雨量要低于林外降雨量,但是油桐林下穿透雨具有明显的水平空间异质性。在林下不同观测点间,油桐穿透雨率具有显著性的差异,而且统计分析显示林冠边缘 ($\geq 120\text{cm}$) 的穿透雨率要显著大于林冠内部 ($0 \sim 60\text{cm}$)。Loescher 等^[20]认为巨大树冠和林冠空隙是产生林下穿透雨差异的主要原因。在不同森林类型水文研究中,也发现了穿透雨水平空间异质性的现象^[15,21,22]。本研究还发现油桐林下穿透雨的空间异质性,即不同观测点间穿透雨率的变异系数 (CV),受到降雨量和降雨强度的影响,基本随着雨量或雨强的增加,穿透雨的空间异质性逐渐降低,也就是说在雨量雨强较低时,林下不同位置间穿透雨率变化大,而在大雨量或高雨强下,穿透雨率波动小,各观测点穿透雨率基本相似 (图 5)。

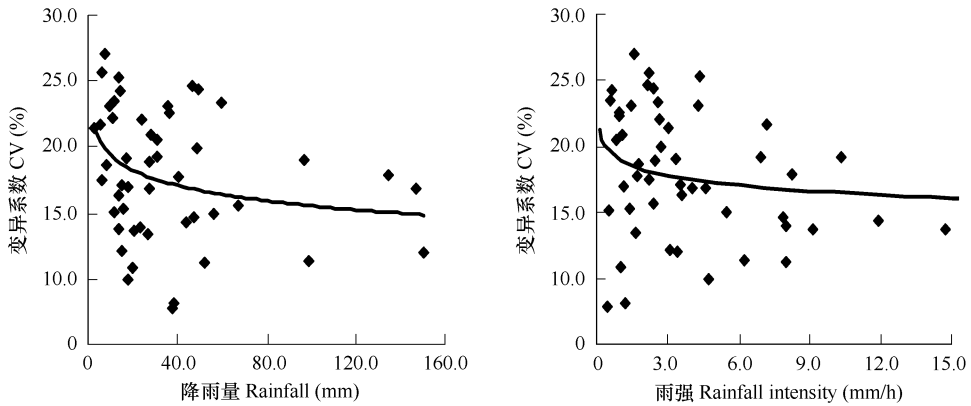


图 5 穿透雨率的变异系数与雨量雨强的关系

Fig. 5 Scatter for CV of throughfall percentage against rainfall depth or rainfall intensity

本研究中油桐单株树干流随着胸径或冠层面积的增加而增加,但是张一平等^[3]研究结果显示热带季节雨林树干流量随着径级及树冠面积的增大而减小,万师强等^[23]也发现有些胸径和冠幅较大的树木树干流量反而较小,这可能是由于热带森林具有较多的附生植物、树干表面粗糙^[3],而且这可能也与测株分枝角度的增加有关^[23],从而导致胸径大的树干流量少。而油桐林为人工林,物种单一,树皮光滑,对水分吸收较少,因此胸径增加,会提高油桐树干流。尽管树干流较少,一般占总降雨量的 3% ~ 10%^[8,23,24],有些研究因此忽略了树干流的水文学重要性^[15,25],但是树干流是降雨沿着树干汇集到根部的水量,是降雨量和溶质在植物树干上的空间输入点,影响树干周围的土壤水分、养分含量及微生物的活动^[3,17,24,26],而且树干流能够显著的汇集降水,提高降雨的有效性,增加土壤水分输入^[23,27]。本研究中,油桐树干流输入的水分较少 (占总降雨量的 3.6%,占林内雨量的 4.5%),但是油桐树干流对降雨也具有明显的汇集作用,在树干周围输入的雨量是同期降雨量 20 ~ 70 倍,而且随着降雨量的增加,这种汇集效应 (漏斗比率) 先升高后降低 (图 6)。在 50.0mm 雨量下,树干流对降雨汇集作用最为明显。

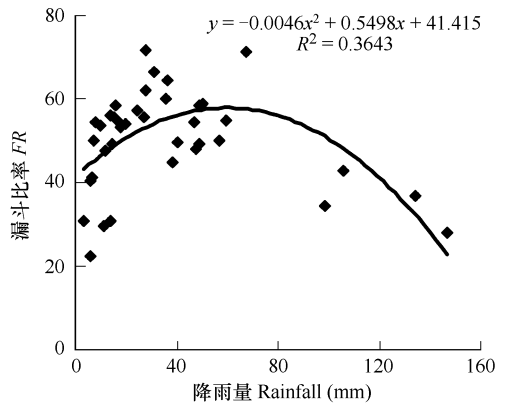


图 6 漏斗比率与降雨量的关系

Fig. 6 Scatter for funneling ratio against rainfall depth

4 结论

(1)在整个测定期间,油桐林穿透雨,树干流和截留量分别占总降雨量的75.6%、3.6%和20.8%,其中穿透雨和树干流与降雨量成正相关性,而截留率与降雨量成负相关性。

(2)油桐林下穿透雨在不同雨量级间具有显著差异,同时穿透雨在不同观测点间也存在差异,林冠边缘的穿透雨比林冠内部高12.6% ($p < 0.05$)。

(3)油桐单株树干流随着胸径、树高或冠层面积的增加而提高,尽管在不同雨量级间,油桐树干流差异不显著,但是在50.0mm雨量下,油桐树干流汇集效应最明显。

References :

- [1] Zhang B, Yang Y S, Zepp H. Effect of vegetation restoration on soil and water erosion and nutrient losses of a severely eroded clayey Plinthudult in southeastern China. *Catena*, 2004, 57 : 77 – 90.
- [2] Gómez J A, Vanderlinden K, Giraldez J V, *et al.* Rainfall concentration under olive trees. *Agricultural Water Management*, 2002, 55 : 53 – 70.
- [3] Zhang Y P, Wang X, Wang Y J, *et al.* Comparison research on hydrological effect of the canopy of the tropical seasonal rainforest and rubber forest in Xishuangbanna, Yunnan. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (12) : 2653 – 2665.
- [4] Wan S Q, Chen L Z. Canopy distribution of precipitation in warm temperate deciduous broad-leaved forests. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23 (6) : 557 – 561.
- [5] Taniguchi M, Tsujimura M, Tanaka T. Significance of stemflow in groundwater recharge 1 : evaluation of the stemflow contribution to recharge using a mass balance approach. *Hydrological Processes*, 1996, 10 : 71 – 80.
- [6] Zheng Y S, Chen Z M, Chen L G, *et al.* Hydrological process and nutrient dynamics in mountainous bamboo-shoot-oriented *Dendrocalamus latiflorus* stand. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (11) : 2402 – 2411.
- [7] Domingo F, Sánchez G, Moro M J, *et al.* Measurement and modelling of rainfall interception by three semi-arid canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91 : 275 – 292.
- [8] Sun G, McNulty S G, Amatya D M, *et al.* A comparison of the watershed hydrology of coastal forested wetlands and the mountainous uplands in the Southern US. *Journal of Hydrology*, 2002, 263 : 92 – 104.
- [9] Li X Q, Tian Y X, Yuan Z K, *et al.* Effects of different vegetative types on soil and water conservation at erosion areas. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10 (2) : 153 – 157.
- [10] Zhang W T, Shao R X, Zhang W, *et al.* The influence of climatic and geographical factors on the growth of *Eucommia ulmoides* in Cili County. *Journal of Northwest Forestry College*, 1994, 9 (4) : 41 – 45.
- [11] Wang X, Zhang Y P, Liu W J. Modeling canopy rainfall interception of a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (3) : 722 – 729.
- [12] Cheng J D, Lin L L, Lu H S. Influences of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan, China. *Forest Ecology and Management*, 2002, 165 : 11 – 28.
- [13] Carlyle-Moses D E. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58 : 181 – 202.
- [14] Koichiro K, Yuri T, Nobuaki T, *et al.* Generation of stemflow volume and chemistry in a mature Japanese cypress forest. *Hydrological Processes*, 2001, 15 : 1967 – 1978.
- [15] 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. *Journal of Hydrology*, 2000, 237 : 40 – 57.
- [16] Price A G, Carlyle-Moses D E. Measurement and modeling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 119 : 69 – 85.
- [17] Gómez J A, Giraldez J V, Fereres E. Rainfall interception by olive trees in relation to leaf area. *Agricultural Water Management*, 2001, 49 : 65 – 76.
- [18] 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 : 2903 – 2920.
- [19] Liu W J, Meng F R, Zhang Y P, *et al.* Water input from fog drip in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China. *Journal of Tropical Ecology*, 2004, 20 (5) : 517 – 524.
- [20] Loescher H W, Powers J S, Oberbauer S F. Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica. *Journal of*

Tropical Ecology, 2002, 18 (3): 397—407.

- [21] Jackson N A. Measured and modeled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100: 323—336.
- [22] Li Z X, Zheng H, Ouyang Z Y, et al. The spatial distribution characteristics of throughfall under *Abies faxoniana* forest in the Wolong Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (5): 1015—1021.
- [23] Wan S Q, Chen L Z. Characteristics of precipitation and forest stemflow of Dongling Mountain area. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20 (1): 61—67.
- [24] Levia D F, Frost E F. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. Journal of Hydrology, 2003, 274: 1—29.
- [25] Price A G, Dunham K, Carleton T, et al. Variability of water fluxes through the black spruce (*Picea mariana*) canopy and feather moss (*Pleurozium schreberi*) carpet in the boreal forest of northern Manitoba. Journal of Hydrology, 1997, 196: 310—323.
- [26] Chang S C, Matzner E. The effect of beech stemflow on spatial patterns of soil solution chemistry and seepage fluxes in a mixed beech/oak stand. Hydrological Processes, 2000, 14: 135—144.
- [27] Nívar J, Charles F, Jurado E. Spatial variations of interception loss components by *Tamaulipan thornscrub* in northeastern Mexico. Forest Ecology and Management, 1999, 124: 231—239.

参考文献:

- [3] 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. 生态学报, 2003, 23 (12): 2653~2665.
- [4] 万师强, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林冠层对降水的分配作用. 植物生态学报, 1999, 23 (6): 557~561.
- [6] 郑郁善, 陈卓梅, 陈礼光, 等. 麻竹山地笋用林水文过程及养分动态. 生态学报, 2004, 24 (11): 2402~2411.
- [9] 李锡泉, 田育新, 袁正科, 等. 湘西山地不同植被类型的水土保持效益研究. 水土保持研究, 2003, 10 (2): 153~157.
- [10] 张维涛, 邵如喜, 张伟, 等. 慈利县气候生态因子对杜仲生长的影响. 西北林学院学报, 1994, 9 (4): 41~45.
- [11] 王馨, 张一平, 刘文杰. Gash 模型在热带季节雨林林冠截留研究中的应用. 生态学报, 2006, 26 (3): 722~729.
- [20] 李振新, 郑华, 欧阳志云, 等. 岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征的研究. 生态学报, 2004, 24 (5): 1015~1021.
- [21] 万师强, 陈灵芝. 东灵山地区大气降水特征及森林树干茎流. 生态学报, 2000, 20 (1): 61~67.