

岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征

李振新^{1,2}, 郑 华¹, 欧阳志云^{1*}, 王效科¹, 刘兴良³, 宿以明³

(1. 中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085; 2. 东北师范大学环境科学系, 长春 130024;

3. 四川省林业科学院森林生态与环境资源研究所, 成都 610081)

摘要:森林对降水的截留作用、林下穿透雨的水文学及生态学意义一直是生态水文学研究中的热点,但是关于林下穿透雨空间分布特征的研究还比较少。在四川西部的卧龙自然保护区研究了岷江冷杉林下穿透雨的空间分布特征。在岷江冷杉针叶林下布设了 8 个雨量筒用以测量林下穿透雨,对两年共 35 次降雨的穿透雨研究结果表明,林下各观测点的穿透雨率同林外降雨量之间的关系都可以用逻辑斯蒂曲线方程较好地模拟,与传统的对数方程模拟相比,前者的相关程度显著高于后者,而且用逻辑斯蒂方程进行模拟时,方程中的各参数具有一定的生态学意义。此外,研究发现林下各点的穿透雨率具有显著的差异,位点 4 下的穿透雨存在着明显的聚集效应,此处的平均穿透雨率达到了 103.2%。对林下 8 个点穿透雨进行聚类分析表明,林下位点 4 和位点 8 的穿透雨特征与其余 6 个点的穿透雨特征有显著的差异。对影响岷江冷杉林下穿透雨空间分布的因素分析表明,观测点上方的冠层覆盖度、枝叶层厚度与降雨量之间均有一定的负相关关系,但其影响未达到显著水平;观测点到树干的距离与林下的穿透雨之间的关系可以较好地用二次多项式方程模拟,方程的相关程度很高($R=0.9491$);各观测点正上方的冠层以及枝叶性质也对穿透雨的空间分布特征有一定的影响,但其影响规律还有待进一步的研究。

关键词:降雨;穿透雨;空间分布;岷江冷杉;森林

The spatial distribution characteristics of throughfall under *Abies faxoniana* forest in the Wolong Nature Reserve

LI Zhen-Xin^{1,2}, ZHENG Hua¹, OUYANG Zhi-Yun^{1*}, WANG Xiao-Ke¹, LIU Xing-Liang³, SU Yi-Ming³

(1. Key Laboratory of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Beijing 100085, China; 2. Department of Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 3. Institute of Forest Ecology and Environmental Resources, Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 1015~1021.

Abstract: Rainfall redistribution by forest canopy has been a study hotspot of ecological hydrology all the while, but studies on the horizontal spatial distribution of the throughfall under the forest canopy have so far been neglected. Examination of the spatial distribution of the throughfall is important to comprehend the eco-hydrological processes and the nutrient cycling in the forest. This study has been conducted in an *Abies faxoniana* forest in the Wolong nature reserve in the western part of the Sichuan province of China to determine the spatial distribution characteristics of the throughfall and to analyze the factors influencing the differences in spatial distribution. Eight rain gauges for throughfall collection were settled under the forest canopy at fixed positions, and the throughfall was recorded for 35 occasions of rain from July to September in 2001 and from June to August in 2002. The rainfall in this area is mainly comprised of light and moderate rains with a total rainfall of less

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(G2000046807);国家自然科学基金资助项目(30230090);中国科学院知识创新工程方向性资助项目(KZCX2-405)

收稿日期:2003-09-28; **修订日期:**2004-03-15

作者简介:李振新(1973~),男,吉林抚松县人,博士生,主要从事生态系统服务功能机制及生物多样性保护研究。E-mail: lizhenxin@hotmail.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: zyouyang@mail.rcees.ac.cn

致谢:感谢四川省卧龙自然保护区杨健和谭迎春老师对本研究野外工作的帮助。

Foundation item: the National Key Projects for Basic Research in China (No. G2000046807), the National Natural Science Foundation of China (No. 30230090), and the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-405)

Received date: 2003-09-28; **Accepted date:** 2004-03-15

Biography: LI Zhen-Xin, Ph. D. candidate, mainly engaged in mechanics of ecosystem services and biodiversity conservation.

than 31 mm, with rainfall intensities in most of the cases (about 98.2%) of less than 5 mm/h. The results showed that: the relationship between the throughfall percentage and total rainfall at each sampling site can be modeled more accurately by the Logistic equation than by the often used logarithmic equation, which employs ecologically less relevant parameters than the Logistic equation. The Logistic equation model is also fit for the whole forest. The throughfall percentages at the eight sites under the forest canopy were significantly different. The throughfall percentage at the fourth as well as the eighth sampling site showed different characteristics with the other six sites according to Q-clustering analysis. The throughfall under the fourth site had evident rainfall concentration (average throughfall 103.2%), which might be caused by the lower canopy coverage. The throughfall under the eighth site had a bigger variability than at the other seven sites, which might be caused by a more simple canopy form increasing the possible impact of wind. To assess the impact factors of the spatial distribution characteristics of the throughfall, canopy coverage, canopy depth, texture of leaves and branches above the sampling sites and the distance from the sampling site to the nearest tree trunk were analyzed. The results showed that: the throughfall percentage and the canopy coverage at each site seem to be negatively correlated, but the correlation is not significant ($R=0.6996$); throughfall percentage and canopy depth seem to be negatively correlated as well, the correlation is however not significant ($R=0.4523$). The relationship between the throughfall and the distance from the sampling site to the nearest tree trunk could be fitted with a polynomial equation with a high correlation coefficient ($R=0.9491$). The texture of the leaves and the branches above the sampling sites seemed to have influence on the throughfall percentages, but the influence of this factor is complex and needs to be examined further.

Key words: rainfall; throughfall; spatial distribution; *Abies faxoniana*; forest

文章编号:1000-0933(2004)05-1015-07 中图分类号:Q948.5718.5 文献标识码:A

森林与水的关系问题是当今生态学与水文学研究的中心议题之一^[1~4],森林的水土保持功能又是森林生态系统服务功能的重要方面^[5~6],因此研究其生态学机制是水文学研究的一个重要内容,并且对理解生态系统服务功能的形成机制有重要意义。森林对降雨产生影响的第一个作用层为林冠,大气降水经过林冠后,林冠对其进行了第一次分配,分为树干茎流、穿透雨及树冠截留,这一过程中林冠不仅削减了降雨的动能,截留了部分降雨,同时还有一个重要方面就是改变了降雨的空间分布格局,而降雨空间分布格局的变化不仅对林下土壤的水分的分配有影响^[7],而且也与降雨相关的营养物质的循环和分配有重要影响^[8]。对于森林树冠层削减动能和截留降雨两个方面,前人已经进行了大量研究,但对于森林改变穿透雨空间分布格局的研究还较少^[9],而国内关于这方面的研究更少。

长江上游在我国生物多样性保护及生态环境保护中都占有重要的地位^[10],因此对这一地区的生态系统服务功能研究也具有重要的意义。本文从生态系统服务功能的形成机制入手,探讨穿透雨空间分布的特征及影响因素,以求更深入地理解森林水文的过程及作用机制。本研究以长江上游岷江流域分布较广的岷江冷杉林为研究对象,深入探讨了该林型下穿透雨的空间分布特征,旨在进一步明确岷江冷杉林生态系统的水分运转过程和岷江冷杉林水土保持这一生态功能的生态学机制,也为基于生态过程的森林水文模型的发展与参数化提供基础资料。

1 研究地点与方法

1.1 研究地点描述

本研究在四川省卧龙自然保护区内进行,选择四川省林业科学研究院邓生亚高山暗针叶林定位站(东经 102°58'21",北纬 30°51'41",海拔 2805m)附近的岷江冷杉暗针叶林研究降雨在岷江冷杉天然林的降雨分配作用。

卧龙自然保护区是我国面积最大的大熊猫自然保护区之一,也是我国大熊猫数量最多的保护区。保存了大量的各类原始森林及珍贵动植物,为世界上极难得的广谱基因库,是我国的重点自然保护区之一。该区地处横断山脉东部的邛崃山系南坡,为四川盆地与川西高原过渡的地带。区内山高谷深,相对高差悬殊,相对高差达 5100m。本区域属青藏高原气候区,西风急流南支和东南季风控制着本区的主要天气过程。邓生定位站位于卧龙自然保护区的西南部,邓生的气温以 12 月份最低,平均气温为 -5.2℃,以 7 月份为最高,平均为 12.4℃,年平均气温为 4.3℃,年平均相对湿度约为 79%。年均降水约 848.9mm,主要集中于 6~9 月份,占全年降水的 64.25% (约 545.4 mm)。风向以北风及东北风为主。年蒸发量为 772.5 mm,日照时数为 1185.4h。

研究中选择岷江冷杉林是卧龙地区中部及西北侧分布最广,蓄积量最大的针叶型森林。林下土壤主要为发育于灰岩、千枚岩、玄武岩、砾状灰岩等基质的山地棕色暗针叶林土。在研究样地的调查中(面积 1012.3m²),岷江冷杉(*Abies faxoniana*)组成了针叶林乔木层的主要树种,此外乔木层还有红桦(*Betula albo-sinensis*)、糙皮桦(*B. utilis*)和川滇长尾槭(*Acer caudatum* var. *prattii*)等树种,林下植物主要有山光杜鹃(*Rhododendron oreodoxa*)、大叶金顶杜鹃(*R. faberi* subsp. *prattii*)、高山柳

(*Salix dissa*)、桦叶荚蒾(*Viburnum betulifolium*)和红毛花楸(*Sorbus rufopilosa*)等,草本层主要有华西箭竹(*Fargesia nitida*)。林冠层总覆盖度约为 70%,群落总盖度约为 75%。胸径大于 5cm 的树木密度为 839 株/hm²,样方内树木(胸径大于 5cm)的平均胸径为 20.02cm,平均树高为 12.37m,平均枝下高为 4.36m。地表有较为发达的苔藓层(3~5cm),枯枝落叶层平均厚约 3cm。

1.2 降雨及穿透雨观测方法

(1)降雨观测 在针叶林研究样地附近的开阔地设置了一个自计雨量计(DSJ2 型,天津气象仪器厂)用以测量天然降水(P),并与约 500m 外的邓生定位站的 SM1 型标准雨量计做比较。

(2)穿透雨的观测 在岷江冷杉林样地中(面积为 1012.3 m²),在林下设置了 8 个直径为 30cm 的自制雨量筒(镀锌铁皮制做,圆锥形,上直径×下直径×高为 30cm×25cm×40cm)用来测定亚高山暗针叶林林下的穿透雨。雨量筒直接安放在林地地面,因为林地表面有较好的苔藓层和枯枝落叶层覆盖,因此不会有雨滴从外部溅入雨量筒内。自制雨量筒的设置主要考虑距主干的距离、不同的冠层郁闭度等因素,并尽量减少对天然生态系统的干扰(表 1)。每天 8:00、14:00 和 20:00 三个时间记录林下的各个点的穿透雨量,并计算出相应的穿透雨率。降雨的划分按自计雨量计的记录,将间隔时间超过 4h 的降雨事件划分为两次不同的降雨事件。

表 1 岷江冷杉林下雨量筒放置样点描述

Table 1 The description for the sampling plot of rain gauges under *Abies faxoniana* forest

编号 No.	盖度 Canopy cover	树高(m) Height of tree	枝叶层厚度(m) Thickness of branches and leaves	样点距树干距离(m) Distance between site and stem	雨量筒上方的主要植物种类 Plant species above the rain gauges
1	0.7	25	9	1.8	岷江冷杉 ^①
2	0.75	20	8	1.2	岷江冷杉
3	0.85	18	13	2.1	岷江冷杉、大叶金顶杜鹃 ^②
4	0.55	9	4	5.5	川滇长尾槭 ^③ 、大叶金顶杜鹃、鞘柄拔楔 ^④
5	0.9	25	18.5	1.25	岷江冷杉、狗枣猕猴桃 ^⑤
6	0.95	26	13.3	2.5	岷江冷杉、红毛花楸 ^⑥ 、华西箭竹 ^⑦
7	0.8	10	10	3.2	岷江冷杉、牛头柳 ^⑧ 、桦叶荚蒾 ^⑨ 、华西箭竹、鞘柄拔楔
8	0.65	20	2	4	岷江冷杉

①*Abies faxoniana*; ②*Rhododendron faberi* subsp. *prattii*; ③*Acer caudatum* var. *prattii*; ④*Smilax stans*; ⑤*Actinidia kolomikta*; ⑥*Sorbus rufopilosa*; ⑦*Fargesia nitida*; ⑧*Salix dissa*; ⑨*Viburnum betulifolium*

1.3 数据分析

本文的数据采用 SPSS(Version 10.0)软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 研究期间的降雨特征

在进行观测研究的时间段内(2001 年 7 月至 9 月,2002 年 6 月至 8 月),通过自计雨量计共记录降雨 56 次,其中可用于林下穿透雨研究的降雨为 35 次。对该区域的降雨实时记录表明,该区域的降雨主要以中到小雨为主,雨强普遍较小(图 1),雨强小于 1mm/h 的小雨占记录降雨的 71.4%,而雨强大于 5mm/h 的降雨则只占观测降雨的 1.8%,其余为 1~5mm/h 的中级强度的降雨。从雨量分级来看(图 2),研究期间的降雨也基本以小雨和中雨为主,其中次降雨量小于 5mm 的降雨出现的频率为 55.4%,次降雨量为 5~15mm 的降雨出现频率为 33.9%,次降雨量大于 15mm 的降雨占 10.7%。综上,此地区的降雨在 6~9 月期间较为频繁,但降雨的强度及降雨量均较小,降雨的侵蚀性也较小。

表 2 2001 年 7~9 月份及 2002 年 6~8 月份邓生降雨特征

Table 2 The rainfall characteristics in Dengsheng in July to Sep., 2001 and June to Aug., 2002

雨强分级 Classification of rainfall intensity(mm/h)	0~0.2	0.2~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0	>5.0
次数 Frequency	10	18	12	10	5	1
降雨量范围 Rainfall range(mm)	0.30~3.60	0.70~9.00	1.90~17.40	0.60~25.50	3.50~30.60	6.10
平均降雨量 Average rainfall(mm)	1.20	3.99	8.57	10.84	13.32	6.10

2.2 针叶林穿透雨的空间分布特征

根据对 8 个观测点的穿透雨量数据分析,林下平均穿透雨率随着降雨量的增加有增高的趋势,但存在一定的波动,而且在降雨量较低时,不同测量点之间的穿透雨率变化较大,降雨量较高时,其变化幅度减小。为了比较分析林下各个点穿透雨率与降雨量的关系,研究中采用了对数函数以及逻辑斯谛方程对二者进行拟合,结果逻辑斯谛方程在 8 个点下的拟合的相关程度结果

均高于用对数方程进行的拟合。这主要是基于这样一个假设,对林下的每个点来说,其穿透雨率存在着一个最大值,不可能随降雨量的增大而无限增大。具体的拟合方程如下:

$$TR = \frac{C}{1 + e^{-a(R-b)}} \quad (1)$$

式中, TR 为穿透雨率(以百分比表示), R 为降雨量(mm), C 为林下相应点的最大穿透雨率, a 为穿透雨率随降雨量增加而变化的程度, b 为穿透雨率为 $C/2$ 时的降雨量。

对林下 8 个点穿透雨率与降雨量之间关系的拟合如图 3, 另外将各点拟合方程(1)中各参数的值以及其相关系数的平方(R^2)进行对比分析, 结果如表 3。

由图 3 及表 3 的结果可以看出, 针叶林下点 4 及点 8 的穿透雨率与降雨量的模拟关系较差, 模型的相关系数也较低。其余 6 个点相比, 林下 5 号样点的穿透雨率变化特征与其余 5 个点明显不同, 其穿透雨率随降雨量的增加其增长幅度最大(表 3 中的 a 值), 而且其“最大穿透雨率”(C 值)也较高。对于整个岷江冷杉林来说, 其林下平均的穿透雨率与降雨量之间的关系也可以用逻辑斯谛方程较好地模拟(表 3 最后一列), 因此在目前的降雨范围内可以应用此模型进行岷江冷杉林下穿透雨率的预测。

以上分析了针叶林下 8 个点穿透雨率与降雨量之间关系的差异, 但由于每次降雨发生时的温度、湿度及前次降雨间隔等条件的不同, 因此对穿透雨率都产生了一定的影响。为了比较同次降雨在 8 个点下穿透雨率的异同, 研究中采取了 Q 型聚类对 8 个点的穿透雨率进行了分析。结果表明(图 4): 对于同一次降雨的反映, 位点 2、5、7 的穿透雨率相似性最高, 位点 6、1、3 与上述类比较接近, 而位点 8 和 4 与前 6 个点相似性相差较大, 尤以位点 4 差异最大。由此可以将这 8 个点分为 3 个大的类型, 即 1、2、3、5、6、7 为一类, 4 和 8 各自为一种类型。

对 8 个点的林下穿透雨率的数据分析表明, 8 个点的穿透雨率存在极显著差异(F 检验, $p < 0.001$)。不同观测点穿透雨率的相关系数有一定的差异, 但位点 4 与其余各点的相关系数普遍较低; 位点 8 与其余各点的相关系数也较低。

表 3 8 个点穿透雨率与降雨量关系逻辑斯谛方程拟合参数

Table 3 The fitting parameter of Logistic equation for throughfall percent and rainfall

位点 Site	1	2	3	4	5	6	7	8	合计 Sum
a	0.4526	0.4375	0.4432	0.8799	0.7324	0.4902	0.4515	0.6855	0.4245
b	4.1830	4.4302	4.3364	0.0049	3.4332	3.3652	2.6975	1.5433	2.6674
C	62.9123	78.0708	81.5902	108.3396	80.2830	48.0211	75.9555	68.3895	76.0739
R^2	0.6075	0.8101	0.7547	0.2455	0.7395	0.6591	0.6994	0.2944	0.7523
TR	40.1±23.3	48.4±25.1	51.6±26.0	103.2±17.9	56.8±27.6	33.5±15.6	56.1±20.9	58.3±22.5	56.0±19.6

* TR 代表林下 8 个点的平均穿透雨率(%) TR represents average proportion of throughfall, %

3.3 影响针叶林下穿透雨率空间分布的因素分析

因为 8 个观测点的穿透雨测量其降雨量(包括降雨特征), 以及气温、相对湿度等其他气象条件均可以认为是一致的。因此, 影响不同点穿透雨率差异的因素主要与观测点的群落特征等(见表 1)有关。实验中考虑了观测点正上方冠层覆盖度、正上方枝叶层厚度、测点距主树干(乔木)的水平距离以及观测点上方枝叶的组成等 4 个因素。

(1)冠层覆盖度的影响 冠层覆盖度与平均穿透雨率有一定的负相关趋势, 穿透雨率随冠层覆盖度的增加而下降, 但对二者关系的线性模拟的相关指数较低(图 5)。

(2)枝叶层厚度的影响 枝叶层厚度的增加伴随着穿透雨率一定的下降, 二者之间呈一定的负相关, 二者线性模拟的相关

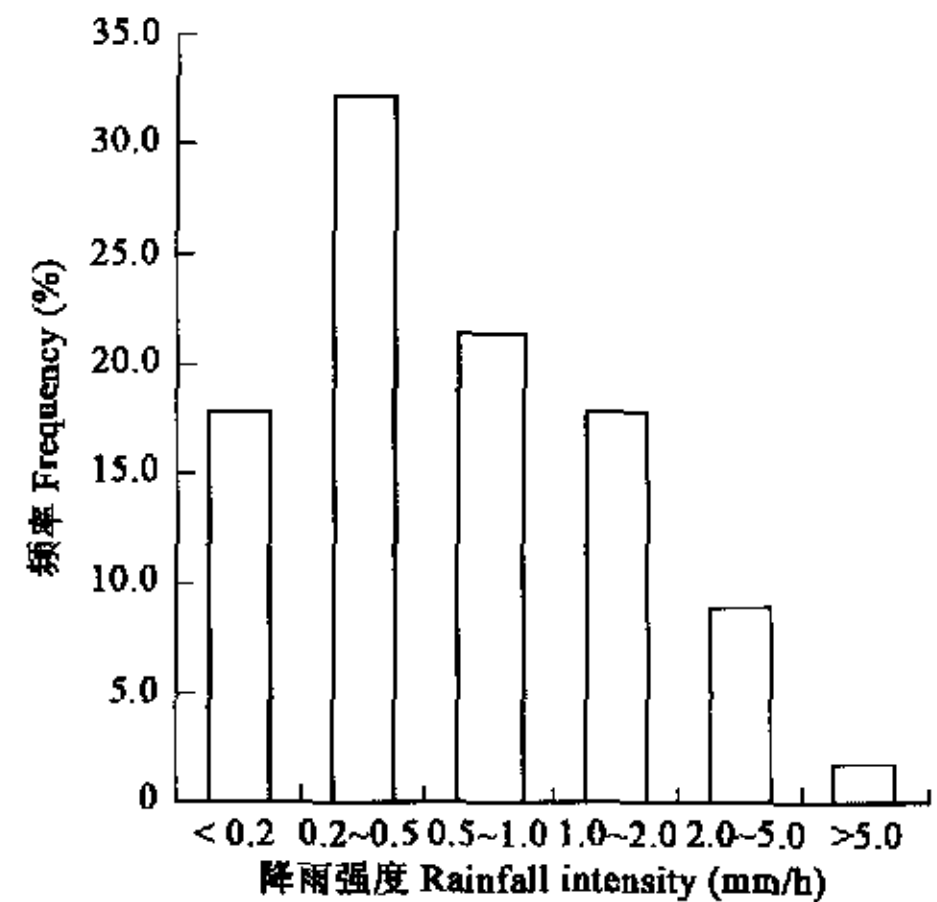


图 1 邓生实验点的降雨雨强分级

Fig. 1 Classification of rainfall intensity in Dengsheng

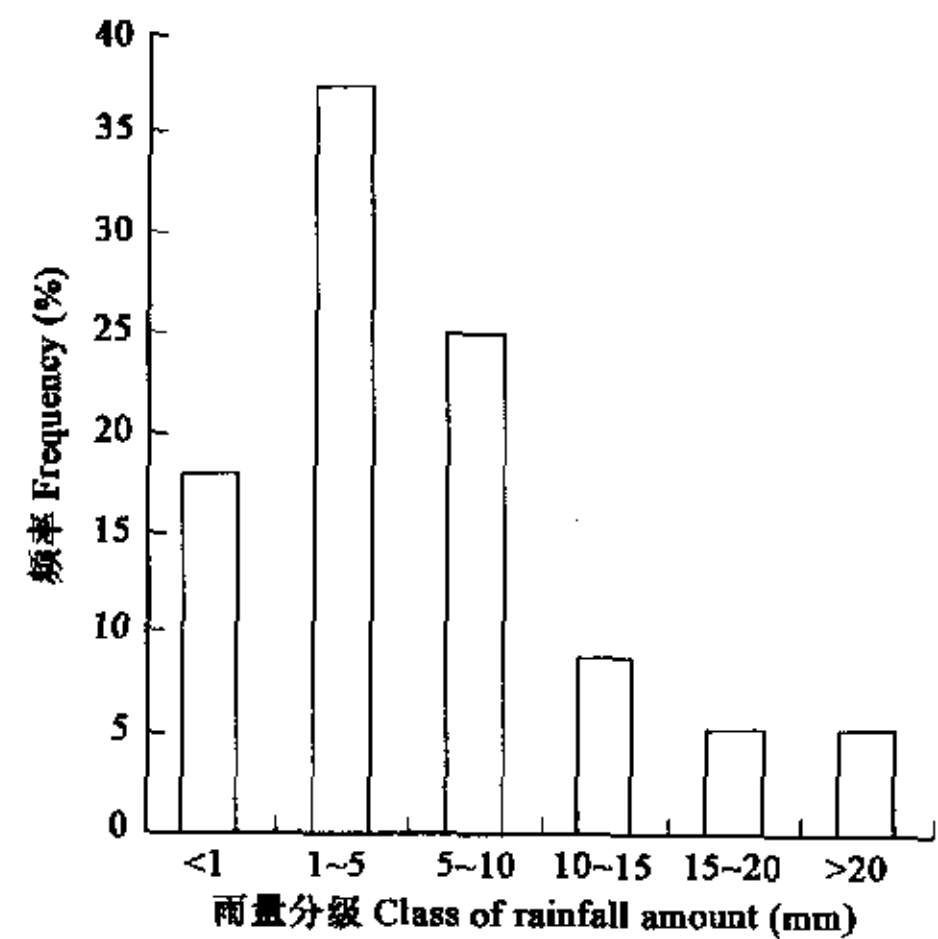


图 2 邓生实验点的次降雨量分级

Fig. 2 Classification of rainfall amount in Dengsheng

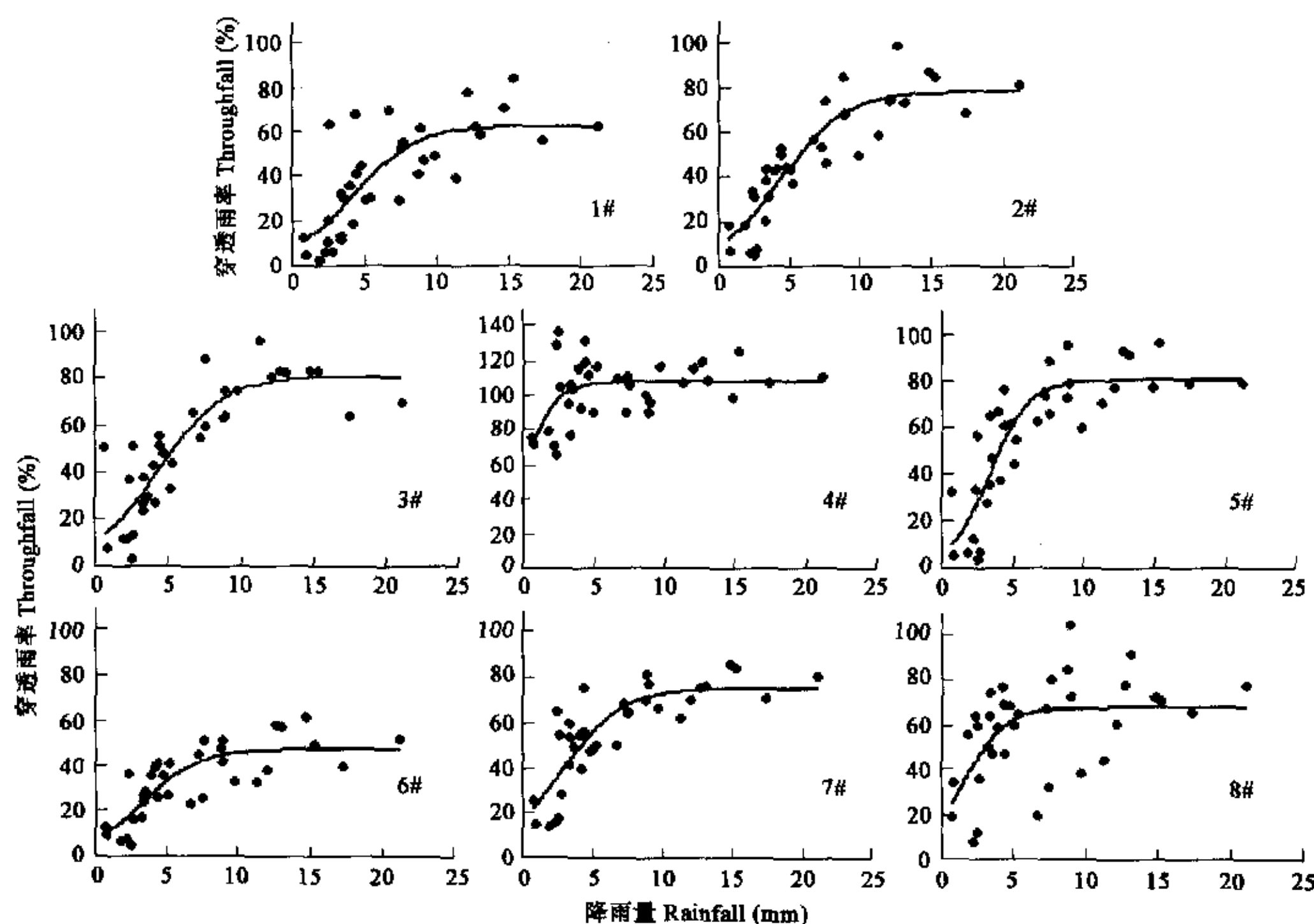


图3 针叶林下8个点穿透雨率与降雨量关系的曲线拟合

Fig. 3 Scatterplot for throughfall against rainfall under *Abies faxoniana* at 8 sampling site and logistic fit

指数较低(图6)。

(3)距主树干距离的影响 比较8个点的平均穿透雨率与其距主树干之间距离的关系可以发现(图7):在距离主树干最近的点下,其穿透雨率并不是最小的,穿透雨率的最小值出现于距主树干2~3m之间。二者之间的关系可以用一个二次多项式较好地模拟,其模拟曲线的相关指数也较高。

(4)枝叶性质的影响 位点4的穿透雨率在研究期间表现出了比较特殊的特征,其穿透雨率在观测的35次降雨中有很多次均超过100%,其平均穿透雨率也达到了103.2%(表3)。观测点4的上方枝叶的性质与其它点相比也有很大差异,其正上方的枝叶组成都为阔叶树种,而且大叶金顶杜鹃的叶片其向上的一面为光滑的革质,川滇长尾槭的叶片较软而薄,鞘柄拔楔的叶小而光滑。距其正上方约1m处有岷江冷杉的侧枝。位点6的穿透雨率在8个点中为最小,其上方的枝叶有岷江冷杉的针叶,还有红毛花楸的羽状复叶,以及冷箭竹的近革质细长叶。其余各点上方均有岷江冷杉,其穿透雨率差异也不大。

3 讨论

3.1 林下穿透雨率的逻辑斯谛曲线模拟

林下穿透雨随降雨量的增加而增加,二者关系可以用直线较好地模拟^[11,12]。对于林下穿透雨率与降雨量的关系,一般的研究均以对数方程进行模拟^[9,13]。本研究中对二者的关系以逻辑斯谛方程进行模拟,也得到了比较好的结果,对林下8

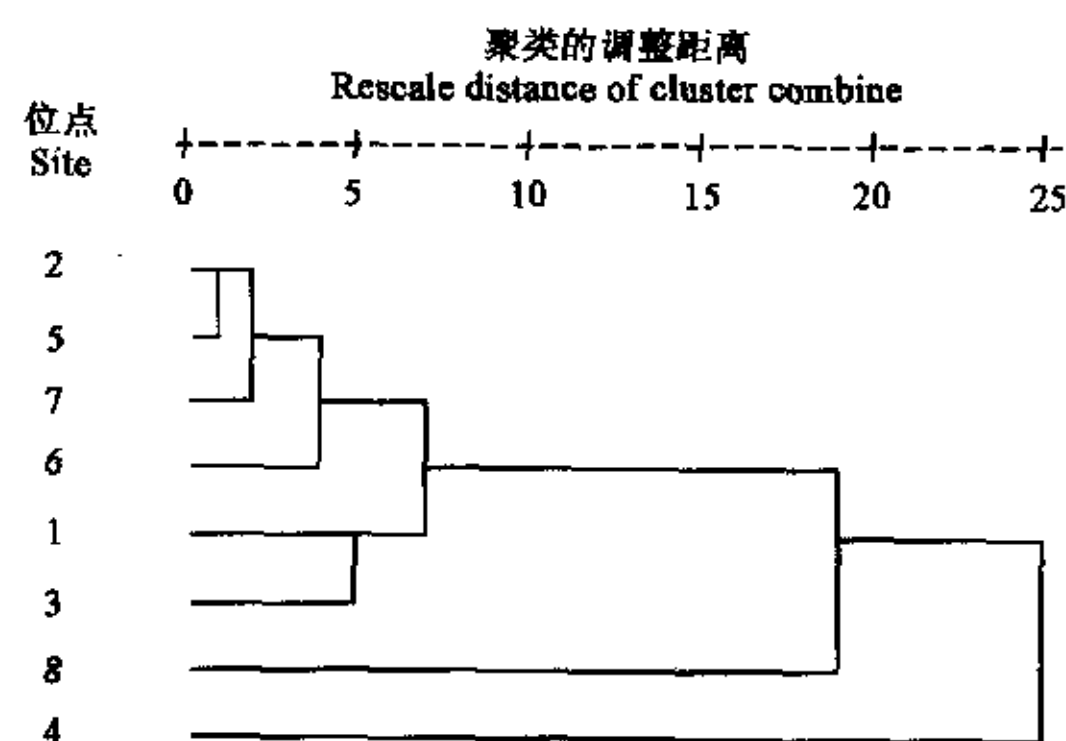


图4 在不同观测点穿透雨率的聚类分析

Fig. 4 Clustering analysis for throughfall in different sampling site

表4 林下不同观测点穿透雨率的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of throughfall between different sampling site

样点 Plot	1	2	3	4	5	6	7
2	0.839						
3	0.847	0.882					
4	0.659	0.443	0.527				
5	0.857	0.927	0.898	0.559			
6	0.664	0.902	0.767	0.443	0.861		
7	0.817	0.896	0.823	0.594	0.894	0.849	
8	0.420	0.697	0.465	0.328	0.670	0.797	0.665

个点来说,其模拟效果均好于对数方程的模拟(R^2 值较大)。另外,逻辑斯蒂方程中的 3 个参数均有可解释的生态学意义。方程(1)中的 C 指各个林下穿透雨观测位点处的最大穿透雨率, a 及 b 的意义在结果部分已有介绍。下面将详细讨论两种模拟方法的优缺点。

逻辑斯蒂方程模拟的前提是林下一定的点处其穿透雨率存在一个最大值,方程中所涉及到的 3 个参数均有明确的生态学意义;而对数方程的两个参数的生态学意义不明确。对最小穿透雨率来讲,其模拟结果比对数方程更为符合实际结果,因为实际的冠层不可能是完全密闭的,其覆盖度不可能是 100%,因此即使只有很小的降雨,也有一定比例的降雨可以不被冠层截留而到达地面。但如果应用对数方程来模拟,则在降雨量小于 1mm 时其穿透雨率则会下降很快,甚至可能出现负值,这显然是不可能的。最后,关于逻辑斯蒂方程的假设,即对一定的林下雨观测点存在一个最大的穿透雨率,这个可能是模型的一个缺点,但也是可以解释的;因为本研究所所在的地区,其降雨量一般均不大,而且如果有更多的大降雨量的观测值,还可以不断完善此模型的精度。而应用对数模型在较大降雨量处的模拟效果应稍好一些,但此模型也有一定的局限性,因为此模型中如果降雨量不断增大,则穿透雨率也不断增加,而且没有一个上限。因此综合来考虑,在四川西部的亚高山岷江冷杉林中此模型具有较好的应用价值,但也应注意不论是哪种模型均是经验模型,都有一定的适应条件和局限性。

研究中还对群落水平的穿透雨率进行了方程模拟(表 3),结果发现岷江冷杉林下的穿透雨率与降雨量的关系应用逻辑斯蒂方程模拟也强于对数方程的模拟效果。本文由于篇幅所限在此不做详细介绍。

3.2 针叶林下穿透雨空间分配的差异。

穿透雨空间分配具有很大的变异性,主要受降雨特征及森林冠层特征的影响。影响穿透雨分配的冠层特征包括:树木的形状及大小,冠层的粗糙度及冠层厚度,枝条的格局,树叶的叶倾角及叶面积指数(LAI)等^[14,15]。

本研究中,针叶林下各位点的穿透雨率的变异系数也与降雨特征有密切的关系,其变异程度随降雨量的增加而降低,二者呈一定的负相关。如在降雨量小于 5mm 的降雨事件中,林下 8 个点的平均穿透雨率为 42.01%,其平均变异系数高达 75.0%;当 $5\text{mm} \leq \text{降雨量} < 10\text{mm}$ 时,林下 8 个点的平均穿透雨率为 63.2%,平均变异系数为 36.2%;当降雨量 $\geq 10\text{mm}$ 时,平均穿透雨率为 76.6%,平均变异系数为 25.7%。已有的研究也表明林下穿透雨的变异与降雨量呈一定的负相关^[13,16,17]。

针叶林下位点 4 的穿透雨率平均高于林外降雨量,此处有明显的“降雨增强”效应,这种效应有随降雨量的增加而增加的趋势。如在降雨量小于 5mm 的降雨事件中,有 52.9% 的观测中穿透雨率大于 100%,其平均穿透雨率为 99.4%;当 $5\text{mm} \leq \text{降雨量} < 10\text{mm}$ 的降雨事件中,有 60.0% 的观测其穿透雨率大于 100%,其平均穿透雨率为 102.8%;而降雨量 $\geq 10\text{mm}$ 的降雨事件中,有 87.5% 的观测其穿透雨超过 100%,平均穿透雨率为 111.7%。Gómez 等^[9]研究了橄榄树下的降雨集聚现象,结果表明树下的不同位点处的穿透雨率均有超过 100%,这主要是因为降雨在冠层的影响下发生了聚集效应,而且即使在降雨量很小的情况下也会出现这种现象,但在较高降雨强度时这种聚集效应更加明显,这与本研究所得结果比较相似。Gómez 的研究还发现这种聚集效应比较容易发生于树冠的边缘,但也不总是如此,有时也发生于树冠投影边缘线(dripline)之内。

针叶林下位点 8 的穿透雨率的变异程度明显高于其余各点(图 3),而且它与其他各点的相关系数也较低(表 4),这个点的

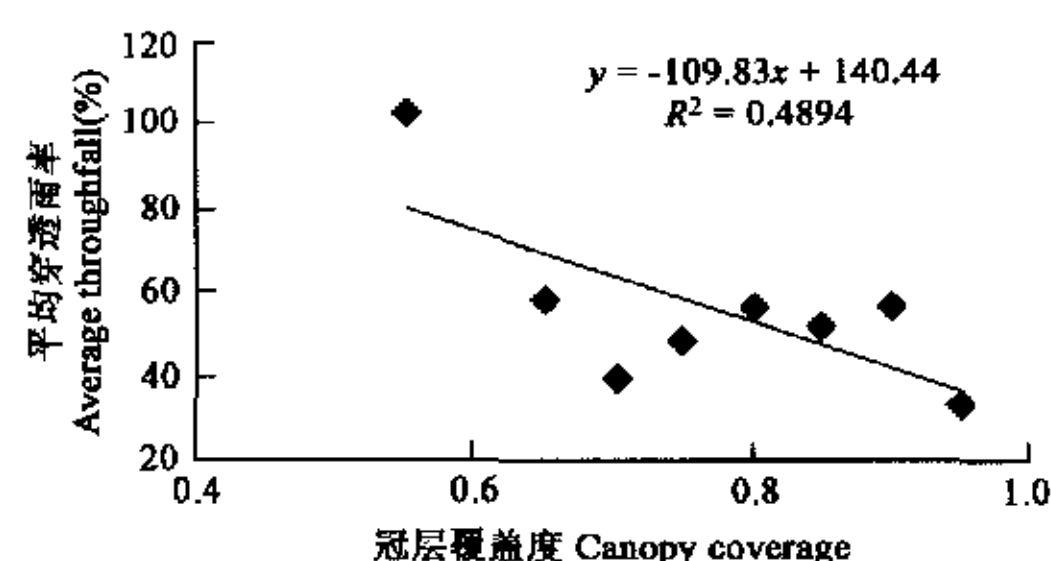


图 5 林下 8 个点的平均穿透雨率与冠层覆盖度

Fig. 5 Scatterplot for average throughfall against canopy coverage and line fit

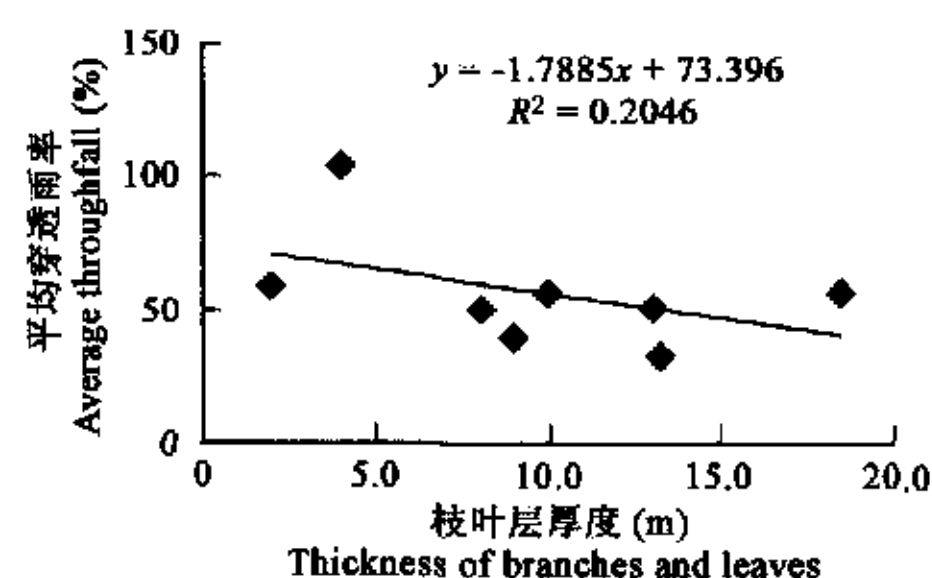


图 6 林下 8 个点的平均穿透雨率与枝叶层厚度

Fig. 6 Scatterplot for average throughfall against the thickness of branches and leaves and line fit

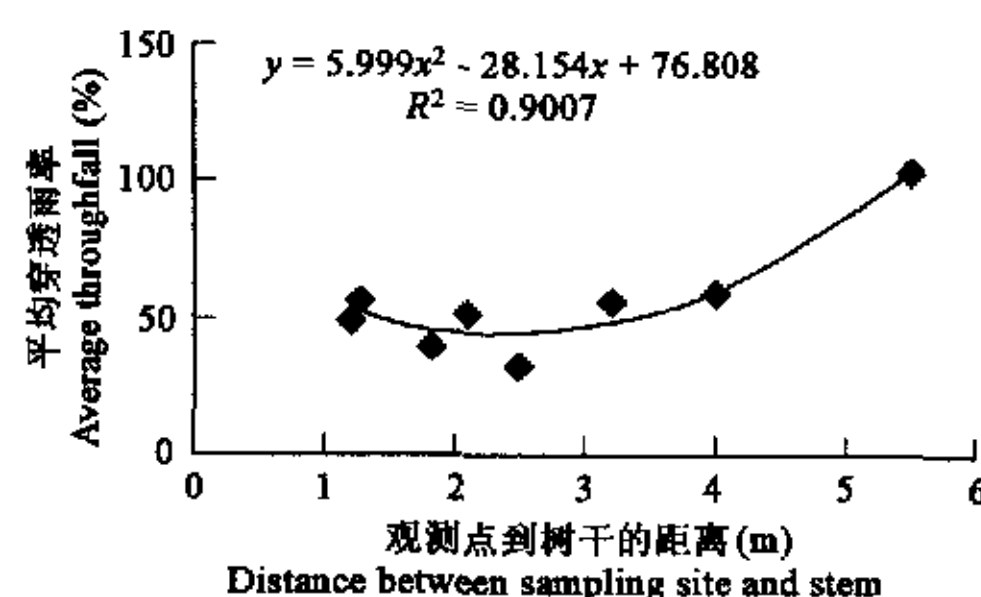


图 7 平均穿透雨率与观测点到主树干距离的关系

Fig. 7 Scatterplot for average throughfall against distance between sampling site and stem, and polynomial fit

穿透雨率表现如此“奇异”的原因可能是因为此点上方仅有一棵岷江冷杉林,边缘为一个比较大的林窗(直径约为 5m),因此此点较其余各点受降雨时风向影响的可能性更大,其变异也更大,但由于此次研究中未记录降雨时的风向,因此风向的影响还要在以后的实验中进一步研究。

研究中发现冠层覆盖度、枝叶层厚度与林下的穿透雨率之间有一定的负相关关系,但这种影响均没有达到显著水平,说明影响林下的穿透雨率的因素十分复杂。而研究中发现林下穿透雨的观测点距主树干的距离对穿透雨率的影响比较大,并不是离树干越近则穿透雨率越小,而是在距离主树干 2~3m 间的穿透雨率最小,这可能是因为此距离处的枝叶密度最大。Mariscal 等^[18]研究橄榄树的枝叶密度时发现,枝叶密度在树干与冠层投影线中间的位置附近达到最大值,因此对于岷江冷杉林来说,也可能有这种现象。

岷江冷杉林下穿透雨空间分布的差异对林地土壤的水分分布及养分的循环和利用必然会产生重要的影响,有待于进一步研究。

References:

- [1] Bonell M. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *J. Hydrol.*, 1993, **150**: 217~275.
- [2] Bonell M. Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale. *J. Amer. Water Resour. Assoc.*, 1998, **34**(4): 765~785.
- [3] McCulloch J G, Robinson M. History of forest hydrology. *J. Hydrol.*, 1993, **150**: 189~216.
- [4] Whitehead P G, Robinson M. Experimental basin studies-An international and historical perspective of forest impacts. *J. Hydrol.*, 1993, **145**: 217~230.
- [5] Daily G C. What are ecosystem services? In: Daily G. C. ed. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997. 1~10.
- [6] Ouyang Z Y, Wang R S, Zhao J Z. Ecosystem services and their economic valuation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(5): 635~640.
- [7] Alva A K, Prakash O, Hornsby A G. Distribution of rainfall and soil moisture content in the soil profile under citrus tree canopy and at the dripline. *Irrig. Sci.*, 1999, **18**: 109~115.
- [8] Parker G G. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Adv. Ecol. Res.*, 1983, **13**: 57~133.
- [9] Gómez J A, Vanderlinden K, Giráldez J V, et al. Rainfall concentration under olive trees. *Agricultural Water Management*, 2002, **55**: 53~70.
- [10] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, **403**: 853~858.
- [11] Zhou G Y, Zeng Q B, Huang Q, et al. Influence of canopy upon rainfall in a regenerative tropical mountain rain forest at Jianfengling of Hainan Island. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, **19**: 201~207.
- [12] 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.
- [13] Rodrigo A, Ávila A. Influence of sampling size in the estimation of mean throughfall in two Mediterranean holm oak forests. *Journal of Hydrology*, 2001, **243**: 216~227.
- [14] Ford E D, Deans J D. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young Sitka Spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*, 1978, **15**: 905~917.
- [15] Johnson R C. The interception, throughfall and stemflow in a forest in Highland Scotland and the comparison with other upland forests in the UK. *Journal of Hydrology*, 1990, **118**: 281~287.
- [16] Loustau D, Berbigier P, Grainier A, et al. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *Journal of Hydrology*, 1992, **138**: 449~467.
- [17] Viville D, Biron P, Granier A, et al. Interception in a mountains declining spruce stand in Strengbach catchment (Vosges, France). *Journal of Hydrology*, 1993, **144**: 273~282.
- [18] Mariscal M J, Orgaz F, Villalobos F J. Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. *Agr. For. Meteorol.*, 2000, **100**: 183~197.

参考文献:

- [6] 欧阳志云,王如松,赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 应用生态学报, 1999, **10**(5): 635~640.
- [11] 周光益,曾庆波,黄全,等. 热带山地雨林林冠对降雨的影响分析. 植物生态学报, 1995, **19**: 201~207.