

基于 Kriging 插值法分析磨盘山常绿阔叶林穿透雨的空间分布

曹光秀^{1,2},赵洋毅^{1,2*},段旭^{1,2},曹向文^{1,2}

(1. 西南林业大学 生态与水土保持学院,云南 昆明 650224;2. 国家林业局 云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究所,云南 昆明 650224)

摘要:通过定位监测磨盘山的典型森林植被常绿阔叶林 2016 年 6—9 月的大气降雨、穿透雨、叶面积指数等资料,针对林分内各影响因子对穿透雨的空间异质性进行综合分析。结果表明:1)研究期间,2016 年 6—9 月的降雨总量为 688.9 mm,大部分为低雨强、低历时、中雨级的降雨。通过观测数据显示林内穿透降雨总量为 443.7 mm,占总降雨量的 64.41%,平均穿透雨的变异系数为 44.7%。2)对林下 9 个观测点的穿透雨量及林木结构数据进行综合分析,发现大气降雨量与穿透雨量呈正相关关系,叶面积指数与其呈负相关关系。3)通过 Kriging 插值绘制出空间分布图,图像表明雨量较小时各观测点林内穿透雨的大小分布与观测点上方的林木结构有密切关系,雨量较大时穿透雨的分布更随机,规律性较小,受其他随机因素影响更多。

关键词:Kriging 插值;常绿阔叶林;穿透雨;空间异质性;影响因子

中图分类号:S718.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)01-0019-07

Spatial Distribution of the Throughfall in Evergreen Broad-leaved Forests in Mopan Mountain by Kriging Interpolation Method

CAO Guang-xiu^{1,2}, ZHAO Yang-yi^{1,2*}, DUAN Xu^{1,2}, CAO Xiang-wen^{1,2}

(1. Southwest Forestry University College of Ecology and Soil & Water Conservation, Kunming, Yunnan 650224, China;
2. Yuxi Forest Ecosystem Research Station, China's State Forestry Administration, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: By in situ monitoring, indices, such as atmospheric rainfall, through fall, leaf area of the evergreen broad-leaved forests in Mopan Mountain during June to September 2016 were measured to comprehensively understand the impacts of different factors on the spatial heterogeneity of the through fall. The results showed 1) during the study period, the total rainfall was 688.9mm, with the characteristics of low rainfall intensity, short duration and moderate level. The through fall was 443.7 mm, accounting for 64.41% of the average rainfall, the average coefficient of variation was 44.7%. 2) After the comprehensive analysis on forest structure and the through fall about the nine observation points, it was found that the through fall was positively correlated with rainfall and negatively correlated with leaf area index. 3) The map of spatial distribution that was drawn by using Kriging interpolation indicated that a close relationship existed between the through fall and forest structure when the rainfall was small, when the rainfall was heavy, the distribution of the through fall was irregular, which was affected more by other factors.

Key words: Kriging interpolation; evergreen broad-leaved forest; throughfall; spatial heterogeneity; influence factor

森林覆盖面积占全球土地面积的 30% 以上,森林在对二氧化碳气体的吸收、动植物群落、水文调

收稿日期:2017-03-08 修回日期:2017-05-23
基金项目:国家自然科学基金(31760149;31560233);国家林业局林业科技创新平台运行补助项目(2017-LYPT-DW-158);云南省教育厅重点项目(2015Z141);云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(05000511311);云南省生态学一流学科建设项目。
作者简介:曹光秀,女,硕士研究生,研究方向:森林生态学。E-mail:2207043897@qq.com
*通信作者:赵洋毅,男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向:水土保持和森林生态。E-mail:yyz301@foxmail.com

节、防风固沙和巩固土壤方面都起着不可替代的作用,对于构成地球生态系统来说是一个最重要的因素^[1]。森林与水的关系长期以来都是森林生态系统研究的关键性课题之一,也是研究水文循环的必经问题。森林与水的关系受到诸多自然因素的影响,例如植物群落、土壤类型、地下岩层等空间异质性,以及气象因素如降雨量、蒸发量等时空因素^[2]。植被林冠对降水的再分配作用也体现了森林生态水文其中的功能之一,具有重要的生态水文意义^[3]。在林冠下渗透雨的空间分布模式的研究上,具有诸多研究结论。有的结论为林冠下渗透降雨的空间分布模式是系统性变化的^[4-5];而有的结论认为森林的林分结构是生长过程中的驱动因子,必然会影响到林内降水的再分配。有研究表明,合理的林分密度显著提高了林冠截留的能力^[6]。近年来,关于森林水文问题的研究主要集中在植被林冠层对降水量的分配效应以及影响因素较多^[7-9],而目前单独对林冠下渗透降雨的空间异质性的详细分析研究还不够深入。

目前,地统计学和应用学科两门学科的紧密结合,在探矿等其他应用行业已取得诸多成就。特别是最近几年,它的应用越来越广泛,深入渗透到了诸如土壤、环境、生态、气象、经济和人文等科研领域,随之而来的应用前景越来越开阔^[10]。本研究尝试利用地统计学中的克里金插值法对常绿阔叶林林冠渗透降雨进行空间异质性分析。

在常绿阔叶林内林地表面具有丰富的凋落物,能有效地保持地表水分和抑制土壤蒸发,对林地的水源涵养具有重要作用。因此在常绿阔叶林地区拥有充足的地下水储存刚好能弥补所在地区降雨量少的季节,特别是原生林在地区的水源涵养中起着不可替代的作用^[11]。因此,本研究依托国家林业局云南玉溪森林生态系统定位观测研究站,通过野外定位监测,分析磨盘山常绿阔叶林的林冠渗透雨水文生态效应,揭示森林冠层结构特征及降雨特性对渗透雨的影响规律。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区磨盘山位于云贵高原、横断山地和青藏高原 3 大自然地理区域的结合部,坐落于云南省玉溪市新平县境内。其山体形如磨盘,海拔约 1 260~2 614 m,年平均气温 15℃,年平均雨量 1 050 mm,全年日照时数约 2 380 h,具有典型的山地气候特点,属云南亚热带北部与南部的气候过渡带。区域内土壤发育以山地红壤和玄武岩红壤为主,部分高海拔地区分布有黄棕壤,大部分地区为中厚土壤层,

局部为薄土层。主要树种有云南松(*Pinus yunnanensis*)、华山松(*P. armandii*)、楠木(*Phoebe zhennan*)、油杉(*Keteleeria fortunei*)、木兰科(Magnoliaceae)及樟科(Lauraceae)植物等 98 科 137 属 324 种。森林植被随着海拔的升高,具有垂直地带分布特性,由低到高分布着亚热带常绿阔叶林、亚热带中山针阔混交林、针叶林和高山矮林。

1.2 试验布设与数据采集

1.2.1 试验布设 在磨盘山上选取滇中高原地区典型常绿阔叶林为研究对象,在 20 m×20 m 典型样地内选择不同胸径、树高、冠层厚度及郁闭度的样树下布设 9 个标准雨量筒,用于接林内渗透降雨。样地调查的指标主要包括样地海拔、坡位、坡向、植被胸径、树高、树龄、密度等。样地和植被概况(表 1)。

表 1 磨盘山常绿阔叶林典型林分样地和植被总体概况
Table 1 General situation of vegetation and vegetation in evergreen broad-leaved forest of Mopan Mountain

| 平均 胸径 /cm | 平均 树高 /m | 平均 冠幅 直径/m | 平均 冠层 厚度/m | 海拔 /m | 坡度 /(°) | 叶面积 指数 |
|-----------------|----------------|------------------|------------------|----------|------------|-----------|
| 22.05 | 15.30 | 7 | 10.50 | 2 362 | 22~32 | 3.81±0.32 |

1.2.2 数据的采集

1) 叶面积指数的采集 2016 年 7 月 6 日于植被生长季后期运用 LAI-2000 仪器测定样地每个雨量筒上方的叶面积指数,将测定的数据通过 LAI 计算程按 7°光圈范围进行计算,所得结果见表 2。

2) 林外降雨 在距离常绿阔叶林植被样地 100 m 的林外空旷地设有气象观测场,用于采集每次林外降雨量数据,数据包括每场降雨的开始和结束时间,能计算出降雨历时长短及强度。

3) 林内渗透降雨观测及冠层参数测定 2016 年 6—9 月份在每次大气降雨后到林地内对布设好的 9 个雨量筒进行读数记录,测定其渗透降雨量。对布设好的雨量筒周围样地情况进行数据采集,采集指标包括:经纬度、叶面积指数、盖度、离干距离、冠层厚度(表 2)。

1.3 分析方法

研究中处理数据主要运用的是地统计法:
1) 本研究先将数据利用 SPSS 19.0 软件进行单样本的 Kolomogorov-Smironoy (K-S) 正态分布检验及基本的统计分析,结果表明研究区林内渗透降雨量数据基本属于正态分布,可以直接进行地统计学分析。
2) 半方差函数分析,用于半方差分析的公式为:
$$r(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i) - z(x_{i+h})]^2 \quad (1)$$

式中: $r(h)$ —半方差函数值; $z(x_i)$ —雨量筒 Z 在 x_i

处的穿透雨率; $z(x_{i+h})$ 为与 x_i 相隔距离为 h 处样点的穿透雨率; $n(h)$ —距离为 h 时的穿透雨雨量筒对的数目, h —雨量筒的间距。研究中需要注意的是半方差函数的有效性仅局限在其最大间距的 1/2 内^[12]。本次用于研究的穿透雨数据在进行半方差函数分析时,球形模型是拟合度最高的适用模型。

在地统计半方差函数分析中,块金值是指研究区变量在<抽样尺度时会出现非连续变异的结果

时,该值的大小取决于研究区变量的属性或测定误差,它表示随机变异的大小;基台值(C_0+C)表示系统内总的变异,一般情况下,基台值越大表示总的空间异质性程度越高,反之越小^[13];变程 a 表示变异函数达到基台值时的间隔距离,而区域化变量的空间相关性在样本间距大于或等于变程以后消失^[14]。

本研究绘制空间插值图利用的是 Arcgis10. 2. 2 软件的地统计分析模块中的简单 Kriging 插值方法。

表 2 林下雨量筒放置位点及对应的上方林冠特征

Table 2 Locations of rainfall collecting cylinder and relative forest structure

| 雨量桶号 | 经纬度 | 离干距离/m | 冠层厚度/m | 盖度 | 叶面积指数 |
|------|------------------------------|--------|--------|------|-------|
| 1 | 23°56′28.29″N,101°58′50.41″E | 0.96 | 13.5 | 0.83 | 4.12 |
| 2 | 23°56′28.05″N,101°58′50.13″E | 1.20 | 14.1 | 0.89 | 3.90 |
| 3 | 23°56′28.22″N,101°58′49.83″E | 0.85 | 10.8 | 0.76 | 3.87 |
| 4 | 23°56′28.53″N,101°58′50.11″E | 1.45 | 12.4 | 0.80 | 3.57 |
| 5 | 23°56′28.42″N,101°58′50.41″E | 2.15 | 14.3 | 0.82 | 3.89 |
| 6 | 23°56′28.20″N,101°58′50.23″E | 3.00 | 11.9 | 0.78 | 3.49 |
| 7 | 23°56′28.57″N,101°58′50.46″E | 1.52 | 13.7 | 0.85 | 3.85 |
| 8 | 23°56′28.63″N,101°58′50.32″E | 1.32 | 10.5 | 0.72 | 4.07 |
| 9 | 23°56′28.27″N,101°58′50.10″E | 0.78 | 15.0 | 0.96 | 4.09 |

2 结果与分析

2.1 研究区降雨特征

气象数据表明,2016 年 6—9 月的降雨总量为 688.9 mm。为了研究磨盘山的降雨特征,按无雨时间间隔超过 4 h 就把降雨划分为两场雨^[15],统计了 2016 年 6—9 月份磨盘山 52 场降雨特征,图 1 为磨盘山 2016 年生长季的降水特征频率分布柱状图。研究期间大部分为低雨强、低历时、中雨级的降雨。有相

关研究表明雨强的大小与林冠截留存在一定的负相关性^[16],这 52 场降雨中最大雨强 10.41 mm·h⁻¹,最小雨强 0.2 mm·h⁻¹,平均降雨强度 2.7 mm·h⁻¹。强度较大的降雨历时较短,为局部雷暴雨,但降雨量较大,降雨时间多集中在 6—8 月。平均降雨历时为 6.42 h,变异系数为 94.3%,最短的仅有 32 min,最长的为 24.8 h(2016 年 7 月 29—30 日),雨量达 43.5 mm,降雨历时<2 h 的降雨次数占 34%,2~10 h 的降雨占 37.73%,0~10 h 的降雨占 71.7%。

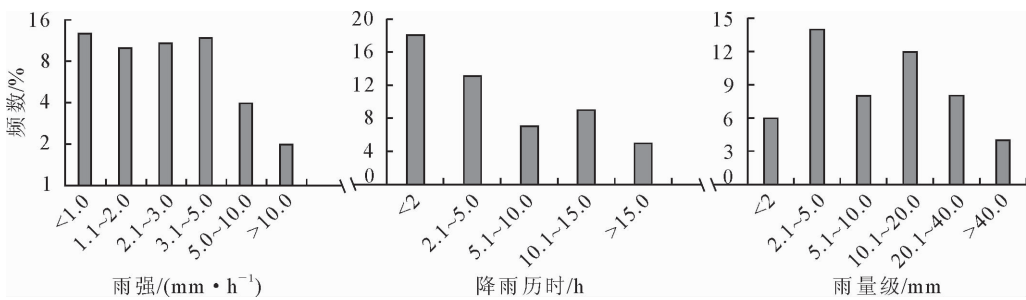


图 1 磨盘山 2016 年生长季的降水特征频率分布

Fig. 1 The characteristics of precipitation frequency distribution histogram in growth season of Mopan Mountain, 2016

2.2 穿透雨特征

2016 年生长季(6—9 月)常绿阔叶林总穿透降雨量为 443.7 mm,占降雨量的 64.41%,平均穿透雨变异系数为 44.7%。将研究期间的穿透雨数据与大气降雨量进行线性回归(图 2)。研究区林内穿透雨量和降雨量呈现出比较明显的线性关系,一者随另一者的增加而增加,林分的穿透雨量(y)与降雨量(x)关系方程为: $y=0.663\ 4x-4.568\ 5(P<$

0.01)。该林分内的穿透雨率(y_1)与降水量(x)之间皆属对数函数关系,关系方程为: $y_1=0.176\ 2\ln(x)-0.140\ 6(P<0.01)$ 。随着降雨量的增加,林冠对降雨截留的容重逐渐增加,最后达到该林分的林冠截留容重饱和值^[17]。从图 2 看出此饱和值为降雨量达到 50 mm 时出现,因此当降雨量<50 mm 时,穿透雨率是随降雨量的增加而增大的,但在降雨量超过 50 mm 后,这种增加的趋势逐渐变缓并最后

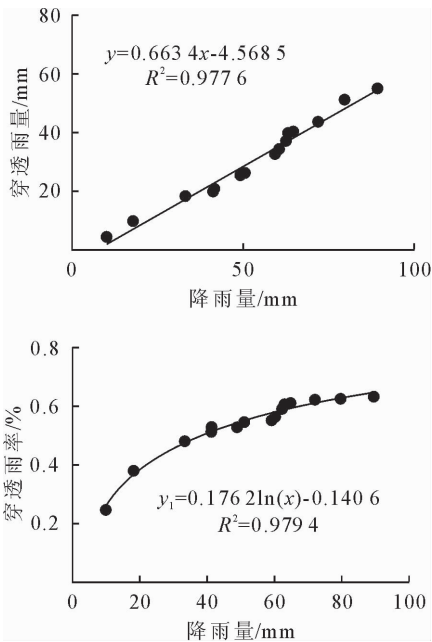


图2 常绿阔叶林植被的穿透雨量和穿透雨率随降雨量的变化特征

Fig. 2 The throughfall and throughfall rate changes with rainfall of broad-leaved evergreen forests

稳定在 68% 左右。

2.3 叶面积指数对穿透雨率的影响

2.3.1 样地叶面积指数的半方差函数分析 通过

表 3 不同观测点叶面积指数空间变异特征

Table 3 Descriptive statistics of spatial variability of leaf area index

| 平均值 | 标准差 SD | 变异系数 CV/% | 最小值 | 最大值 | 峰度 | 偏度 |
|-------|--------|-----------|------|------|-------|--------|
| 3.872 | 0.22 | 5.7 | 3.49 | 4.12 | 0.717 | -0.308 |

表 4 样树 LAI 半方差理论模型及参数

Table 4 Theoretical semivariance model and some parameters of leaf area index on the anisotropy

| 理论模型 | C_0 | $C_0 + C$ | $C_0 / (C_0 + C)$ | 变程 | | R^2 |
|------|-------|-----------|-------------------|-------|-------|-------|
| | | | | a_1 | a_2 | |
| 球形模型 | 0.002 | 4.012 | 0.049 | 473.1 | 296.4 | 0.723 |

2.4 降雨量与穿透雨量空间分布

林冠下的穿透雨量受多方面条件的综合影响，目前研究较多的因素包括降雨量大小、风向、风速、空气湿度、树形结构等^[20-22]。从本研究绘制出的空间分布插值图(图 4)可以看出，林下穿透降雨呈明显的斑块或条带状分布，穿透雨量高值区和低值区差异显著。造成这种分布的可能因素包括风向、林木结构、样树叶面积大小、林分密度、降雨量大小、观测点距主树干(乔木)的水平距离等。当然不同风速、风向、空气相对湿度对测定结果会存在一定的影响，如果不同降雨量时风向或风速差别较大，则林下雨量筒测定结果就不能代表对应的冠层结构特征，会导致分析结果产生偏差。而本研究对象为常绿阔

对表 2 样地叶面积指数进行空间变异描述性统计分析(表 3)，样地叶面积指数空间变化较稳定，变异系数为 5.7%。

叶面积指数观测值的半方差函数分析见表 4，对半方差函数各项指标进行综合分析，得到的结果是样树叶面积指数的半方差函数与变程的关系符合球形模型，叶面积指数的差异和变程为正相关性。

2.3.2 样地叶面积指数与穿透雨率关系分析 林地内穿透雨的空间分布在一定程度上会受到叶面积指数空间分布的影响，许多学者的研究成果也一致表明^[18-19]，林冠层降雨截留和穿透降雨的空间分布受林木的叶面积指数影响，但实际上影响穿透雨率大小的自然因素还有很多。因此，仅仅只是用叶面积指数的空间变异对穿透雨率的变化结果进行分析的可行性是有一定局限性的。本研究利用 Excel 对不同降雨量时的降雨穿透率结合对应的观测点上面的叶面积指数进行综合分析并作图(图 3)表明降雨量较小时叶面积指数与穿透雨率两者之间存在较明显的线性关系，并且两者的相关性较强；枝叶对大气降雨的截留效果较明显，从而使穿透雨的空间差异较小。然而，随着降雨量增大，图中明显看出两者的相关性逐渐减弱，枝叶对降雨的截持作用逐渐减小，使得穿透降雨空间差异变大。

叶林的样地面积只有 20 m×20 m，每场降雨期间林地的风速和风向(主要是西南风)基本是一致的。此外，样地 6 m 外有 4 m 宽的长流水，加之磨盘山在雨季期间基本上都是阴天，林内雾气很重，空气相对湿度基本都处于饱和状态，因此排除了风速和风向及空气相对湿度 3 个气象因子对测定结果的影响，主要从叶面积大小、降雨量及林分郁闭度 3 个方面探讨其空间变异原因。

1)图 4I 的位置明显比其他位置穿透降雨量值高，此位置为样地中 7 号雨量筒的分布位置。结合样地的实际情况来看，此位置上方的林木郁闭度及叶面积指数较其他位置低，并且该观测点距离最近的乔木比其他观测点遥远，大气降雨通过林木上方

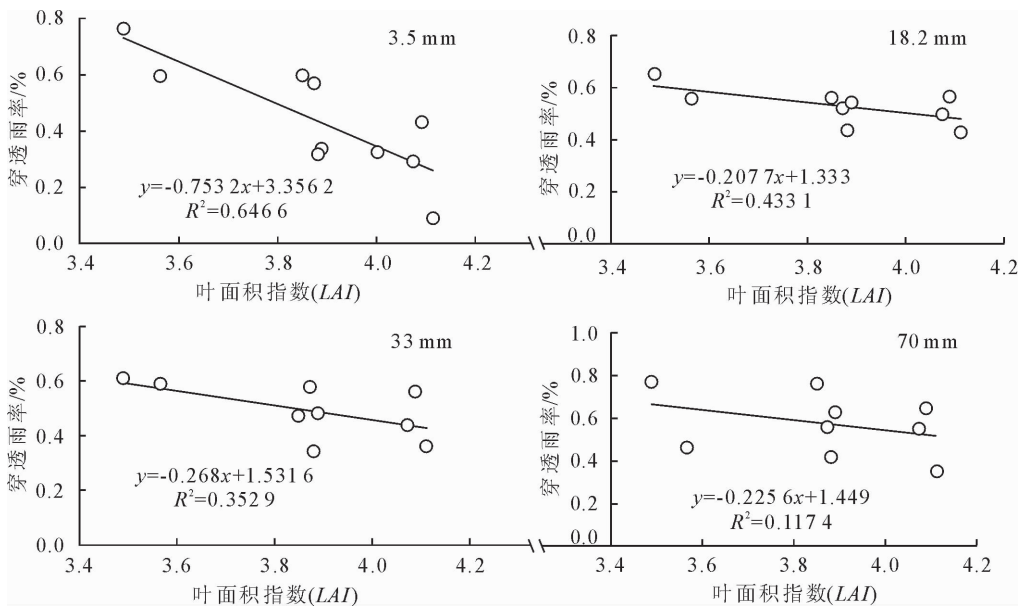


图 3 不同降雨量条件下时穿透雨率和叶面积指数的线性关系

Fig. 3 The relation of through fall ratio and LAI in different rainfalls

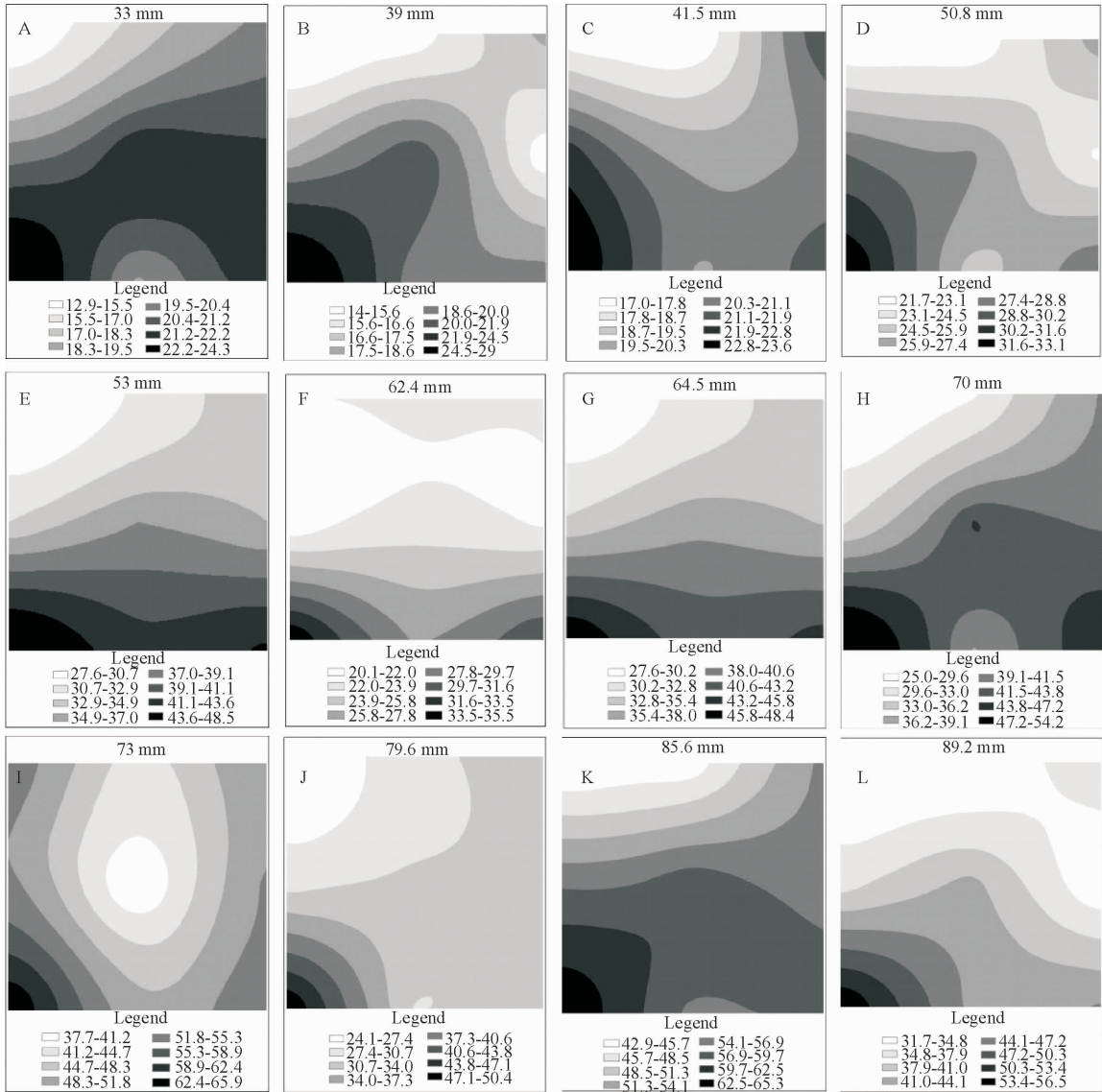


图 4 不同降雨量时常绿阔叶林下穿透雨的空间分布格局

Fig. 4 Spatial distribution pattern of through fall in evergreen broad-leaved forest in different rainfalls

枝干时只能被截留下来少部分就落到观测点中的雨量筒内。因此对大气降雨的截持能力相比其他地方较弱,最后到达林内的穿透降雨量最多。反之位于 A 的 1 号雨量筒所观测到的林内穿透降雨量最小,原因也与 1 号雨量筒上方的林木结构有关。此分析结果与李振新^[23]等对岷江冷杉针叶林下穿透降雨空间分布特征的研究结果是一致的。此外,6 号观测点位于样地的西南方的下坡向,地势较其他观测点低,并且降雨期间磨盘山多吹西南风,这也是 6 号观测点的林内降雨比其他观测点林内降雨量多的原因。

2)研究期间观测 12 场降雨,不同降雨量(33~89.2 mm)对林下穿透雨量存在明显的影响。从样地中的各个观测点来看,随着降雨量的逐渐增大,林木对降雨的截留量先逐渐增大,后逐渐减小,再趋于稳定的趋势。说明当降雨量较小时,各观测点林木对大气降雨的截留量差异较明显;当降雨量逐渐增大到一定值后(50.8 mm),各观测点对大气降雨的截留规律趋于稳定,各观测点的林内穿透雨量差异逐渐减小,最后趋于稳定。此研究结果与时忠杰^[24]等关于单株华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)树冠穿透降雨的空间异质性的研究结果是一致的。

3 结论与讨论

研究中发现林木叶面积指数、冠层厚度、郁闭度、林木结构、降雨量、风速风向、观测点距离树干距离及地势高低等因素都是造成林内穿透降雨量变异的直接与间接原因。其中叶面积指数与穿透雨率存在较明显的线性关系,特别是在低降雨量时两者负相关性较强;但林木的冠层对大气降雨的截留效果是有一定限度的,当降雨量超过了冠层的最大截留能力时,在降雨截留这一事件上林木的冠层因素就不再是其事件的主要因素。

通过半方差函数分析表明:林下穿透雨率的空间异质性与降雨量两者之间存在负相关性,一者随另一者的增大而减小,最后空间差异性逐渐消失。并且随着降雨量增大,其中的一些随机因素也会对穿透雨率的空间分布差异存在一定的贡献率,林内穿透雨也会受林木冠层及枝干结构在不同方向上的影响,因此各方向的空间异质性不同。但由于受影响的因素较多,很难将这些因素都统一结合找出空间异质性规律,只能把相关的 1 个及 2 个以上因素结合(例如统一的气象因素或统一的林分结构因素等),来讨论这些相关因素对林内穿透降雨的影响规律。

通过对常绿阔叶林样地 9 个观测点的林内穿透雨量值结合不同大气降雨量值进行 Kriging 插值,结果表明:雨量较小时各观测点林内穿透雨的大小分布与观测点上方的林木结构有密切关系,雨量较大时穿透降雨的分布更随机,规律性较小,受其他随机因素影响更多。此结论与第 2 条结论一致,两者存在一定的相关性。

参考文献:

[1] 孙晓. 基于 CASI 高光谱遥感数据估测森林叶面积指数研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2012.

[2] 张淑敏. 基于森林作用的流域降雨径流模型研究[D]. 泰安:山东农业大学,2012.

[3] 夏体渊,吴家勇,段昌群,等. 滇中 3 种林冠层对降雨的再分配作用[J]. 云南大学学报:自然科学版,2009,31(1):97-102.

XIA T Y, WU J Y, DUAN C Q, et al. Canopy rainfall redistribution of three forest vegetation types in Mid-Yunnan[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2009, 31(1):97-102. (in Chinese)

[4] MATTAJI A, AKEF M, KAFAKI S B, et al. Throughfall, stemflow and canopy interception loss by oriental beech trees (*Fagus orientalis* Lipsky) in north forests of Iran[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2012, 10(3):1183-1187.

[5] VIVILLE D, BIRON P, GRANIER A, et al. Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strengbach catchment (Vosges, France)[J]. Journal of Hydrology, 2015, 144(1-4):273-282.

[6] 曾伟,熊彩云,肖复明,等. 不同密度退耕雷竹春季林冠截留特性[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5):1178-1182.

ZENG W, XIONG C Y, XIAO F M, et al. Spring canopy interception characteristics of *Phyllostachys praecox* cv. *prevernalis* stand converted from cropland at different densities[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5):1178-1182. (in Chinese)

[7] CARLYLE-MOSES D E. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid sierra Madre oriental matorral community[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58 (2):180-220.

[8] TOBÓN MARIN C, 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):40-57.

[9] ROBIN L H. Interception loss as a function of rain fall and forest types: stochastic modeling for tropical canopies revisited[J]. Journal of Hydrology, 2003(280):1-12.

[10] 瞿明凯. 几种地统计学方法在县域土壤空间信息处理上的应用与研究[D]. 武汉:华中农业大学,2012.

[11] 纪金华,章永江,张一平,等. 哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用[J]. 生态学报, 2012, 32(6):1692-1702.

QI J H, ZHANG Y J, ZHANG Y P, et al. Water-holding capacity of an evergreen broadleaf forest in Ailao mountain and its functions in mitigating the effects of southwest China drought[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6):1692-1702.

(in Chinese)

[12] 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2003.

[13] 陈卫锋,倪进治,杨红玉,等. 闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究[J]. 环境科学,2012,33(5):1687-1692. CHEN W F, NI J Z, YANG H Y, *et al.* Spatial heterogeneity and autocorrelation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediment of Minjiang river in Fuzhou City[J]. Environmental Science, 2012, 33(5): 1687-1692. (in Chinese)

[14] 王晓燕,陈洪松,王克林,等. 不同利用方式下红壤坡地土壤水分时空动态变化规律研究[J]. 水土保持学报,2006,20(2):110-114.

[15] 陈瑾. 水土保持径流小区监测方法探讨——以甘肃省定西市安家沟监测点为例[J]. 水土保持通报,2009,29(2):94-96.

[16] 鲜靖苹,张家洋,胡海波. 森林冠层水文研究进展[J]. 西北林学院学报,2014,29(3):96-104. XIAN J P, ZHANG J Y, HU H B. Forest canopy hydrology: a review[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3): 96-104. (in Chinese)

[17] 刁艳芳,王亚平,范世香,等. 3 种针叶林对降雨截留作用的比较[J]. 西北林学院学报,2016,31(5):74-77. DIAO Y F, WANG Y P, FAN S X. Comparison of rainfall interception by three kinds of coniferous forests[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(6): 74-77. (in Chinese)

[18] DIJK A I J M V, BRUIJNZEEL L A. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2. Model validation for a tropical upland mixed cropping system[J]. Journal of Hydrology, 2001, 247(3-4):239-262.

[19] 余长洪,李就好,陈凯,等. 甘蔗冠层对降雨再分配的影响[J]. 水土保持通报,2015,35(3):85-87. YU C H, LI J H, CHEN K, *et al.* Effects of sugarcane canopy on rainfall redistribution[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(3): 85-87. (in Chinese)

[20] 张焜,张洪江,程金花,等. 重庆四面山暖性针叶林林冠截留及其影响因素[J]. 东北林业大学学报,2011,39(10):32-35. ZHANG K, ZHANG H J, CHENG J H, *et al.* Effect of canopy interception of warm needle-leaved forest in Simian mountain of Chongqing and its influencing factors[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(10): 32-35. (in Chinese)

[21] 王栋,张洪江,程金花,等. 用灰色关联法分析重庆缙云山林冠截留量影响因素[J]. 水土保持研究,2007,14(6):276-279. WANG D, ZHANG H J, CHENG J H, *et al.* Grey correlation analysis on factors influencing canopy interception in Jinyun mountain in Chongqin[J]. Research of Soil & Water Conservation, 2007, 14(6): 276-279. (in Chinese)

[22] 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. DUAN X, WANG Y H, YU P T, *et al.* Rainfall redistribution and its influencing factors of typical forest vegetation in the ditch watershed, Liupan mountains[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2010, 24(5): 120-125. (in Chinese)

[23] 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[J]. 生态学报,2004,24(5):1015-1021. 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[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 1015-1021. (in Chinese)

[24] 时忠杰,王彦辉,熊伟,等. 单株华北落叶松树冠穿透降雨的空间异质性[J]. 生态学报,2006,26(9):2877-2886. SHI Z J, WANG Y H, XIONG W, *et al.* The spatial heterogeneity of through-fall under the *Larix principis-rupprechtii* single tree's canopy[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2877-2886. (in Chinese)