DOI: 10.5846/stxb201906211312

邓文平,郭锦荣,邹芹,陈琦,黄家辉,卢妍洁,刘苑秋.庐山日本柳杉林下穿透雨时空分布特征.生态学报,2021,41(6):2428-2438. Deng W P, Guo J R, Zou Q, Chen Q, Huang J H, Lu Y J, Liu Y Q. Characteristics of the temporal and spatial distribution of the throughfall in *Cryptomeria japonica* forest in mount Lu.Acta Ecologica Sinica,2021,41(6):2428-2438.

庐山日本柳杉林下穿透雨时空分布特征

邓文平1,4,郭锦荣1,2,邹 芹3,*,陈 琦1,4,黄家辉1,4,卢妍洁1,4,刘苑秋1,4

1 江西农业大学林学院, 南昌 330045

2 珠海市自然资源局, 珠海 519015

3 江西庐山国家级自然保护区管理局,九江 332000

4 鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 南昌 330045

摘要:林冠是降水到达地面前的第一个作用层,其对降水的再分配作用,导致穿透雨的数量和空间分布具有很大的变异性,这既 阻碍了对其的精确评估,也常常被认为是水文模型中蒸发量化的不确定来源之一。在庐山自然保护区日本柳杉(Cryptomeria japonica)人工林内设置了面积 30 m×30 m 的样地,机械布置了 37 个截面面积为 314.15 cm²穿透雨收集器,于 2017 年生长季 (4—9月)共监测 21 次降雨事件下穿透雨量。分析林冠下穿透雨率及其时空分布特征和影响因素。日本柳杉林下穿透雨率变 化范围为 2%—222%,平均穿透雨率为 80%,穿透雨率随着林外次降雨量的增加而逐渐增大,降雨量达到 28 mm 时穿透雨率趋 于最大值,之后变化规律复杂未见稳定,二者之间最优拟合关系为二次多项式;与叶面积指数呈显著负相关,叶面积指数小于 4.5时对穿透雨率的影响显著。不同叶面积指数下,穿透雨率达到最大时的林外降雨量不同。穿透雨率的空间变异系数的变化 范围为 15%—114%,随林外降雨量的增加而减小,并在林外次降雨量大于 20 mm 以后,逐渐趋于稳定,二者之间以对数函数关 系式拟合。观测点位的时间变异系数随着叶面积指数的增加而增大。叶面积指数小于 5,降雨量小于 20 mm 时,降雨量是影响 穿透雨空间变异性的关键因素。

关键词:日本柳杉;穿透雨;空间分布;时空变异系数

Characteristics of the temporal and spatial distribution of the throughfall in *Cryptomeria japonica* forest in mount Lu

DENG Wenping^{1,4}, GUO Jinrong^{1,2}, ZOU Qin^{3,*}, CHEN Qi^{1,4}, HUANG Jiahui^{1,4}, LU Yanjie^{1,4}, LIU Yuanqiu^{1,4}

1 Forestry College of Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2 Zhuhai Municipal Bureau of Natural Resources, Zhuhai 519015, China

3 Jiangxi Lushan National Nature Reserve Administration, Jiujiang 332000, China

4 Key Laboratory of the State Forestry and Grassland Administration for the Protection and Restoration of Forest Ecosystems in Poyang Lake Basin, Nanchang 330045, China

Abstract: Precipitation redistribution is one of the most important effect of canopy interception, which caused the large variations of the quantity and spatial distribution of throughfall rain. This hinders both the accurate assessment of interception and is often considered to be one of the uncertain sources of evaporation quantification in hydrological models. A total of 37 gauges (cross-sectional area of 314.15 cm²) were mechanically arranged within a 30 m×30 m sample plot of *Cryptomeria japonica* stands in Mount Lu national natural reserve. During the 2017 growing season (April—September), a total of 21 rainfall events were monitored for rainfall. The results showed that the range of throughfall percentage varied

收稿日期:2019-06-21; 修订日期:2020-08-25

基金项目:国家自然科学基金项目(31860236);江西省林业厅科技创新专项(201808);江西省教育厅项目(GJ60396)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: 496141285@ qq.com

between 2% and 222%, and the mean value was 80%. When the rainfall reaches 28 mm, the penetration rain rate tends to the maximum, and then the change law is complicated and not stable. The best fitting relationship between rainfall and throughfall could be described with a quadratic polynomial. Penetrating rain rate was significantly negatively correlated with the leaf area index. When the leaf area index was less than 4.5, the impact on the penetration rain rate was significant. Under different leaf area indexes, the rainfall outside the forest is different when the penetration rain rate reaches the maximum. The spatial variation coefficient of the penetration rain rate varies from 15% to 114%, which decreases with the increase of the rainfall outside the forest, and gradually stabilizes after the secondary rainfall outside the forest is greater than 20 mm. Logarithmic function relationship fitting. The coefficient of time variation of the observation points increases with the increase of the leaf area index.

Key Words: Cryptomeria japonica; throughfall; spatial distribution; spatio-temporal coefficient of variation

森林与水的关系一直以来都是生态水文学的重要问题之一。森林冠层作为降水到达地面过程中的第一 作用层,对降水进行第一次再分配,具有重要的水文功能和生态水文意义。而穿透雨作为降水再分配中最主 要的组成部分,林冠层的作用将会对其时空分布格局产生重要影响,并进而影响林地土壤水分分布、养分循环 利用、以及穿透雨中元素浓度和沉积、根系生长和径流形成等^[1]。因此其在样地尺度水文、生物地球化学和 生态过程中占有极其重要的地位^[2]。

穿透雨的形成及空间分布受到降雨特性(降雨量和降雨强度)和林分结构(林分分布和叶面积指数(Leaf area index, LAI)的影响^[3]。大量的研究认为降雨量是林内穿透雨量的决定因素,随着林外降雨量的增加林 内穿透雨量也逐渐增加,两者呈线性关系^[4]。对林内穿透雨率来说,其随着林外降雨量的增加前期迅速增加 而后达到稳定,大部分研究经统计后认为二者之间呈对数函数关系^[47]。林分结构因素中对叶面积指数的分 析较多,穿透雨率与叶面积指数之间呈负相关关系,且随降雨量增大相关性减弱。因此在穿透雨量及其主要 影响因素间的关系是有一定结论的。

但是,穿透雨的输入随着空间和时间具有很高的变化,即随着降雨的进行,从林冠到林下,形成穿透雨和 溶质输入的"热点"和"热时刻"^[8-10]。目前,关于穿透雨时空异质性及其影响因素的研究也在逐渐增多,但无 论是从林分尺度[11-12]还是在单株尺度的分析[13-15],并未形成统一的结论。尤其是在林分尺度的分析,不同树 种结论各异。李振新等[16] 对岷江流域冷杉针叶林穿透雨研究发现,林下不同观测点穿透雨率具有显著的差 异,且各观测点正上方的冠层及枝叶性质对穿透雨的空间分布也有一定影响。盛后财等^[17]研究发现兴安落 叶松林下穿透雨空间异质性变异程度随降雨量的增加而减小,以对数方程拟合较好(P<0.01);冠层结构特征 是影响穿透雨空间变异的重要因素,冠层复杂程度与穿透雨量呈负相关关系;在冠层结构因子中,冠层厚度是 决定穿透雨空间分布的最主要因素。曹云等^[18]对中亚热带杜仲(Eucommia ulmoides)人工林水文特征研究发 现,距树干距离和降雨量能够影响穿透雨的空间异质性,即穿透雨率随着与树主干距离的增加而提高,但随着 降雨量的增加,穿透雨的空间变化减少,异质性降低。Sinun 等^[19]在热带雨林中的研究认为林冠密度和树种 差异与穿透降水的空间分布没明显关系,起主导作用的可能是叶尖滴水。时忠杰等^[20]分析六盘山华山松林 下穿透雨空间变异影响因素发现,冠层对穿透雨具有一定的聚集效应,且叶面积指数对穿透雨的空间分布影 响最大。Pérez-Suárez 等^[21]研究也表明,随着 LAI 增大穿透雨量降低。曹光秀等^[22]基于 Kriging 插值法分析 磨盘山常绿阔叶林穿透雨的空间分布发现,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。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。但是也有研究认为叶片对降雨有聚集效应,叶面积指 数大的地方,穿透雨率也大;而 Teale 等^[23]认为降雨分配模式与 LAI 无显著关系。不同地区无论是从树种还 是单一林分结构指标分析穿透雨的时空变异性得到不同的结论。

日本柳杉(Cryptomoria japonica)在庐山主要分布在 700 m 海拔以上的地区,是该地的主要造林树种,发挥

着重要的水源涵养、净化大气环境、森林游憩等生态功能。目前对该树种的研究主要集中于水分生理生态^[24-26]、毛竹入侵及其水分关系^[27]的影响方面,因此,有必要对日本柳杉林的水循环过程进行研究,从而为其 水源涵养服务功能效益评价提供一定的数据基础。本研究将对日本柳杉林降雨再分配的时空异质性及其主 要影响因素进行初步的分析和探索,以期能促进对日本柳杉林冠层水分传输的理解,并为其水文调节功能评 价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西庐山国家级自然保护区内(庐山森林生态系统定位观测研究站),地理位置为 115°52′38″—116°05′25″ E,29°25′18″—29°39′57″ N。处于北亚热带向中亚热带过渡的季风湿润气候区。多 年平均温度 11.6℃,最低月平均温度为一月-4.1℃,最高月平均温度为七月 22.3℃,年平均降水量为 2068.1 mm,年日照时数 1715 h。特殊的气候特征和复杂地形,形成了多样的生境,具有丰富的生物多样性,植被沿海 拔梯度呈明显的垂直分布规律,自下而上分布有常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林、针阔混交林、 针叶林、山顶矮林、人工柳杉林、毛竹林等,其中天然常绿落叶阔叶混交林森林生态系统具有典型性和代表性, 而人工林以针叶林为主,其中最具代表性的树种为 20 世纪中叶营造的日本柳杉林,面积约为 330 hm²,平均蓄 积 297.3 m³/hm²,主要分布海拔在 500—1300 m。

本实验在海拔 960 m 处选择长势良好、林相整齐且胸径大小变化丰富的日本柳杉林分,设置一块 30 m× 30 m 面积的长期固定观测样地,通过每木检尺确定样地内林木的基本特征。利用机械布点的方法,布设穿透 雨和树干径流观测设施。观测样地的具体信息详见表1 和图1。

				Table 1	Characters i	in the plot					
样地 Plot	坡向 Slope direction	林龄 Stand Grad age/a	坡度 Gradient/(°)	坡度 郁闭度 Gradient/(°) Canopy cover	林分密度 Density of trees/ (株/hm ²)	平均胸径 Mean diameter of breast height (DBH)/cm	树高 Mean hight/m	枝下高 Mean height - under branch/m	冠幅/m Crown		
									东西	南北	
									East	South	
									West	North	
日本柳杉										2.2	
Cryptomoria	北坡	64—81	26	0.8	1110	28.1	14.1	6.8	3.4	3.2	
japonica											

表 1 观测样地主要林分特征

1.2 降雨、穿透雨、树干径流观测方法

1.2.1 大气降雨的观测

在所选样地的林分边缘 200 m 处的林外开阔地上布设自计式翻斗雨量计(由美国 Onset HOBO 公司生产,型号为 RG3-M),对林外降雨量和降雨强度进行实时的观测,观测频度为 5 min,降雨量观测精度为 0.2 mm。

1.2.2 林内穿透雨的收集及观测方法

林内穿透雨的收集采用自制的雨量筒,它是由内径为 20 cm 的漏斗(截面积为 314.16 cm²/筒)通过塑料 管与 2.5 L 的收集瓶连接组成的,漏斗放置在同样直径大小的硬质 PVC 管(打入土壤 20 cm)上以保持收集面 水平和稳定。在 30 m×30 m 的日本柳杉林样地内依据机械布点的方式(遇到布设点位处有树木和岩石时,略 微进行了垂向偏移),布点时先利用 50 m 皮卷尺将样地划分为 6 行 6 列的方格,再取第一行中间位置处放点, 由于布点位置可能与样地内的乔木位置重叠,或者布点位置不便于放置收集桶,采取根据现场情况进行平移 或上下移动,最终布设完成时纵坐标均值分别为 3.5、9.5、14.5、18.5、23.5、27.5,行方向上按照 5 m 的点位间 隔,不同行交叉排列,最后 4 个雨量筒随机插入第一行和第二行之间。共布设自制收集桶 37 处。在样地中心 以及四角(10 m×10 m)中心点处布设自计式雨量计5 处,对穿透雨量及其变化过程进行观测(图 1)。 1.2.3 叶面积指数观测与分析

自 2017 年 4—9月,利用 Li-Cor 公司(USA)生产的 LAI-2200 植物冠层分析仪,在穿透雨采集点正上方测 定其叶面积指数。观测频度约为每月观测一次,共观测 6次,具体时间点分别为 2017-04-16,2017-05-12,2017-06-06,2017-07-04,2017-08-18,2017-09-13;各月叶面积 指数平均值为 4.14,3.86,3.87,4.27,4.08,4.22,不同月 份之间差异不显著,因此在进行叶面积指数的处理时选 择不同月份的平均值。采用 FV2200 软件分析确定在 不同天顶角度下(53°、38°、23°、7°)采集点处的叶面积 指数,分析了不同天顶角度下叶面积指数与穿透雨率的 相关性发现,天顶角度 7°时的叶面积指数与穿透雨率 关系显著的场次最多为 6场,其余天顶角度 23°、38°、 53°分别为 2场、0场、0场。因此选择天顶角度 7°时的 叶面积指数进行分析。

1.2.4 穿透雨时空变异系数计算

穿透雨的空间变异系数表示为单次降雨事件下不 同观测点穿透雨率的空间变异性,而时间变异系数指示 为某一固定监测点在不同场次降雨事件中穿透雨率的 时间变异系数,其计算方法参考裴成敏等^[28]。



图1 林木及雨量筒空间分布



2 结果与分析

2.1 研究期间降雨特征

依据距离样地 1 km 处的林外空地气象站记录的降雨信息,将时间间隔超过 4 h 的降雨事件划分为不同 两场场次降雨^[17]。研究区降雨集中分布在 4—9 月,该时段内多年平均降水量占降水总量的 76.4%。研究期 间(2017 年 4 月—2017 年 9 月)共记录 61 场有效降雨事件,总累计降雨量 1356.8 mm,最大降雨量为 147.66 mm,最小降雨量为 0.6 mm。

将场次降雨按照降雨量范围 0—10、10—25、25—50、>50 mm 进行等级划分(图 2),不同等级场次降雨发 生频数分别为 33 次、12 次、7 次、9 次。观测期内降雨量主要集中在 0—10 mm 范围内,随着次降雨量的增大, 林外降雨事件发生频数下降。

从降雨强度分析(图2),观测期间内平均降雨强度为4.5 mm/h,最大降雨强度为27.2 mm/h,最小降雨强 度为0.1 mm/h,不同降雨强度范围(<2、2—5、5—10、10—20、>20 mm/h)下的降雨事件数占比分别为44.26%、 22.95%、21.31%、9.84%、1.64%。说明观测期内降雨强度集中在低强度<2 mm/h,且随降雨强度增加林外降雨 事件发生越少。

从降雨历时来看(图 2),观测期间内平均降雨历时 10.38 h,最长降雨历时 43.18 h,不同降雨历时(<1、 2—6、6—12、12—24、>24 h)对应的降雨事件发生频数分别为 8 次、18 次、15 次、13 次、7 次。60%以上的降雨 在 12 h 以内结束,还有 11.5%的降雨历时超过 24 h。

2.2 林下穿透雨特征及其空间变异性

对样地内 37 个穿透雨采样点在 21 次降雨事件后的穿透雨量进行分析后,发现林下穿透雨率最大为 222%,最小仅为 2%,平均穿透雨率为 80%,林下穿透雨率具有很大的空间变异性,不同次降雨事件下,穿透雨

2431



Fig.2 Characteristics of gross rainfall during the study period

率空间变异系数最大为114%,最小仅为15%,因此林下穿透雨率及穿透雨的空间变异性与林外降雨特征关系密切。

通过对降雨量、降雨强度与穿透雨率、穿透雨空间 变异系数的 Person 相关性分析发现,日本柳杉林内穿 透雨率、标准偏差及其空间变异系数与林外降雨强度的 相关性不显著,而与降雨量的相关性极显著(相关系数 分别为 r=0.699、-0.593、-0.693, P<0.01),即穿透雨率 随林外降雨量的增加呈增加的趋势,空间变异系数和穿 透雨率的标准偏差随林外降雨量的增加而减小。通过 回归分析发现,穿透雨率、空间变异系数与降雨量之间 用对数函数、二次多项式、幂函数以及逻辑斯蒂方程进 行模拟,回归方程和回归系数都能通过显著性检验,但 根据决定系数 R²大小,本研究中穿透雨率与降雨量之 间以二次多项式模拟效果最好(图3),拟合方程为: TF(%)=-0.0006P²+0.033P+0.520, R²=0.673, P<0.01, n=21 (1)





式中,TF 为穿透雨率(%),P 为降雨量(mm)。

这与之前研究中普遍采用的幂函数^[17,29]和对数函数^[18,28]有不同之处。根据穿透雨的形成规律,从降雨

http://www.ecologica.cn

开始至林冠层趋于饱和前,随降雨量的增加穿透雨率逐渐增加,由于水分在冠层的运动过程中,其截留的部分 雨水也会与后续的降雨混合后进入林地内,因此,会出现穿透雨率的后续一段时间的波动起伏。同时由于本 研究观测的林外降雨量最大为44 mm,未能呈现出降雨量继续增大后的波动稳定状态。由此以二次多项式拟 合方程效果最佳,由方程可知,日本柳杉林的林下穿透雨率趋于渐进值时的最小降雨量约为28mm。

穿透雨的空间变异系数与林外降雨量之间以幂函数模拟效果最好,拟合方程为:

$$CV(TF) = 0.739 P^{-0.368}, R^2 = 0.795, P < 0.01, n = 21$$
 (2)

式中, CV 为单次降水事件下林下穿透雨率的空间变异系数, TF 为穿透雨率(%), P 为降雨量(mm)。许多前 人对不同树种的研究中也得出相同的结果^[28]。由拟合曲线分析可知, 在降雨量逐渐接近 20 mm 时, 林内穿透 雨率的空间变异系数变化范围为 20%—114%, 平均值为 46%; 降水量大于 20 mm 后其变化范围 15%—26%, 平均穿透雨率为 22%。此时, 可推测当降雨量大于 20 mm 时林冠层对穿透雨的空间变异性影响减弱。

因此,综合穿透雨率、空间变异系数与林外降雨的关系,我们推测日本柳杉林样地冠层达到饱和时的林外 降水量在 20—28 mm 之间。

2.3 穿透雨时空分布特征及其与叶面积指数的关系

穿透雨的空间差异与许多因素有关,但主要影响因素为冠层结构特征和气象因子。本研究中我们将观测 期内不同位置处观测点上的降雨量、风速、风向、温度等气象因子处理为一致的,主要探讨冠层结构特征的差 异引起的空间变化。采用天顶角度为 7°时,不同观测点处的叶面指数平均值变化范围在 1.99—6.34,将 37 个 观测点依据叶面积指数划分为 1.99—3(3 个), 3—4(13 个), 4—5(10 个), 5—6(7 个), 6—7(4 个)共 5 种 情景,进一步分析不同观测点位的空间差异。

对观测期内 21 次次降雨事件穿透雨的观测,分析 可知,在 5 种叶面积指数条件下,通过配对样本 T 检验 发现,除 LAI(1.99—3)与 LAI(3—4)以及 LAI(4—5)与 LAI(6—7)配对之间差异不显著外,其他配对之间差异 均显著,说明这种叶面积指数划分是有意义的。叶面积 指数处于 1.99—3 时,平均穿透雨率最大,平均值为 94.6%,标准差为 24.5%,变异系数为 25.9%;而叶面积 指数处于 5—6 时,平均穿透雨率最小,平均值为 62.2%,标准差为 28.7%,变异系数为 46.1%。在 21 次 次降雨事件下,叶面积指数(1.99—3)的观测点平均穿 透雨率≥100%的降雨事件数达到 9 次,占到所有降雨 事件数的 42.9%,说明在叶面积指数(1.99—3)的观测 点位处更易发生降雨聚集效应。

对 5 种叶面积指数条件下,观测点平均穿透雨率与 林外降雨量进行回归分析和显著性检验(图 4),发现 LAI(1.99—3)条件下,穿透雨率与林外降雨量的关系不 明显,而其他叶面积指数条件下均呈现了显著的相关



图 4 不同叶面积指数下观测点平均穿透雨率与降雨量关系 Fig.4 Relationship of mean throughfall rate and gross rainfall at

different LAI

LAI: 叶面积指数 Leaf area index

性,且回归方程以二次多项式拟合效果最好(表 2),随着林外降雨量的增加,穿透雨率均呈现增加的趋势,且 叶面积指数>4 的观测点,穿透雨率均在林外降雨量为 30 mm 时达到最大,而 LAI(3—4)的观测点在林外降雨 量为 24.3 mm 时达到最大,进一步说明了冠层结构对降水拦蓄截留作用的重要性。

对 5 种叶面积指数条件下,观测点穿透雨率变异系数与林外降雨量进行回归分析和显著性检验(图 5), 在 LAI(1.99—3)条件下,穿透雨率变异系数与林外降雨量的关系不明显,而其他叶面积指数条件下,观测点 空间变异系数均呈现出极显著的相关性,回归方程都以对数函数的拟合效果为最好(表 3)。叶面积指数在 4-5时, 拟合方程的决定系数最大, 叶面积指数为 6-7之间时, 决定系数最小, 而叶面积指数在 1.99-3之间 时不呈现相关性。可知,随冠层叶面积指数的增加,林外降雨量对空间异质性变化的解释度降低。

Table 2	Regression	n fitting and	significance	test between	n mean thro	ughfall rate and gross rainfall at diffe	erent leaf area inde	ex		
叶面积指数 Leaf area index		Fi	拟合函数 ting function/A	R^2		拟合方程 Fitting equation	回归方程显 Test of signi regression	回归方程显著性检验 Test of significance of regression equation		
	对数 Logarithmic	二次 Quadratic	幂 Power	指数 Index	Logistic	二次多项式方程 Quadratic polynomial equation	P	n		
LAI (3-4)	0.258	0.349	0.264	0.204	0.204	$y = -0.0005x^2 + 0.0243x + 0.7358$	< 0.01	21		
LAI (4-5)	0.686	0.754	0.643	0.49	0.49	$y = -0.0007x^2 + 0.042x + 0.3716$	< 0.01	21		
LAI (5-6)	0.637	0.668	0.612	0.439	0.468	$y = -0.0007x^2 + 0.0431x + 0.246$	< 0.01	21		
LAI (6-7)	0.691	0.74	0.628	0.449	0.449	$y = -0.0008x^2 + 0.0488x + 0.3427$	< 0.01	21		

表 2 不同叶面积指数(LAI)下观测点平均穿透雨率与降雨量回归拟合及显著性

	M						1 10 11				11		1100	1 0		
aroccion	titting .	ond	cigniticoneo	toct	hotwoon	moon	throughtoll	roto	and	arocc	rointoll	ot	dittoront	LOOT	aroa	indov
21 CAMUUL	IIIIII III I	anu	SIGNITICATION	LCAL	DELWEEH	псан	иноиушан	I ALC	anu	21055	Tannan	aı	unicient	ICAI.	arca	IIIUCA
8										8						

表 3 不同叶面积指数下观测点空间变异系数与降雨量回归拟合及显著性 Table 3 Regression fitting and significance test between CV of throughfall and gross rainfall at different LAI

叶面积指数 Leaf area index		Fit	拟合函数 ting function/A	R^2	拟合方程 Fitting equation	回归方程显著性检验 Test of significance of regression equation		
	对数 Logarithmic	二次 Quadratic	幂 Power	指数 Index	Logistic	方程 Equation	Р	n
LAI (3-4)	0.62	0.51	0.639	0.397	0.397	$y = 0.544x^{-0.307}$	< 0.01	21
LAI (4-5)	0.839	0.748	0.817	0.585	0.585	y = -0.155 ln(x) + 0.671	< 0.01	21
LAI (5-6)	0.654	0.645	0.572	0.568	0.568	y = -0.085 ln(x) + 0.513	< 0.01	21
LAI (6-7)	0.43	0.256	0.38	0.223	0.223	y = -0.096 ln(x) + 0.556	< 0.01	21

基于上述分析结果,我们进一步对21场降雨下不 同观测点处的平均穿透雨率和时间变异系数与冠层结 构特征(叶面积指数 LAI)进行相关和回归分析(图 6 和 图 7)。发现不同观测点叶面积指数与平均穿透雨率呈 极显著负相关性(r=-0.605),而与时间变异系数呈极 显著的正相关(r=0.639);而回归拟合效果皆以三次多 项式的效果为最好;说明空间结构特征对穿透雨分布影 响的复杂性。森林冠层叶面积指数只有在某一范围时, 才能发挥最优的截持和分配降雨能力。因此,我们根据 穿透雨率的变化进行了分段拟合,发现叶面积指数以4. 5 为分界点,在 LAI 3—4.5 之间变化时,随着叶面积指 数的增加穿透雨率近似呈线性减小,而当叶面积指数在 4.5—7之间时,它们之间以二次多项式拟合为最优。而 依据降雨量等级 0—10 mm(小雨), 10—25 mm(中雨) 和25—50 mm(大雨),将穿透雨率按照叶面积指数进



图 5 不同叶面积指数下观测点空间变异系数与降雨量关系 Fig.5 Relationship between CV of throughfall and gross rainfall at different LAI

行多重比较(Tukey)也发现,降雨量级为0-10 mm时,不同叶面积指数等级之间差异显著,而降雨量级大于 10 mm 后,叶面积指数大于4的观测点穿透雨率差异不显著。因此不考虑降雨量影响条件下以4.5 作为叶面 积指数影响的分界点是合理。随着叶面积指数的增加穿透雨观测点位的时间变异系数在逐渐增加。





Fig.7 Relationship between time coefficient of variation and LAI

3 讨论

对 2017 年生长季 4—9 月 21 场降雨下日本柳杉林内 37 个穿透雨观测点数据分析,日本柳杉林下平均穿透雨率为 80%,与许多前人对针叶树种穿透雨研究结果相比处于中间值,如祁连山青海云杉林(75.04%)^[6]、侧柏林(60%—78.8%)^[30]、亚热带马尾松林(72.51%—76.45%)^[31]、六盘山华北落叶松林(74.94%—85.3%)^[3,32]、兴安落叶松林(80.62—81.39%)^[29]、六盘山华山松林(84.34%)^[20],不同树种的这种差异是由许多生物和非生物因素共同作用导致的,如林分密度^[13,32]、林龄^[33]、郁闭度^[34]、冠层厚度^[30]、叶面积指数^[3]等生物因素。本文对降雨量和叶面积指数的分析发现,降雨量大于 28 mm 时,穿透雨率趋于稳定;而降雨量级在中雨和大雨时,穿透雨率差异不显著;将观测点处的叶面积指数分为五种情形分析降雨量与穿透雨率关系时发现,叶面积指数在 1.9—3 之间时,穿透雨率与林外降雨量没有相关性,而在其他四种情形下,降雨量和穿透雨率海部以二次多项式拟合最优,当 LAI 在 4—5、5—6、6—7 这几种情景时,拟合函数的决定系数 $R^2 \ge 0.70$,而 LAI 处在 3—4 之间时,降雨量对穿透雨的解释程度 R^2 只有 0.41。由此可以推论,林分冠层结构参数 LAI 在 3—4.5 时,对穿透雨率的影响最大,降雨量此时的解释程度低,而当LAI 继续增加,冠层结构特征对穿透雨率的影响稳定。对不同降雨量级下,不同水平叶面积指数下穿透雨率的多重比较结果,也证明不考虑降雨量影响,叶面积指数超过 4 以后穿透雨率变化不显著,因此可以将叶面积指数 4.5 作为该地区今后日本柳杉水源 涵养林最优结构的参考指标。

几乎所有的研究都认为林外降雨量(非生物因素)才是林内穿透雨量的决定性因素,穿透雨率随着林外降雨量的增加先显著增大后缓慢增大并渐趋稳定,穿透雨率很大程度上取决于林外降雨量的大小^[17];目前大多数研究是以对数函数来对穿透雨率和降雨量进行模拟^[4,6-7,35],也有一些研究选择用指数函数^[3,36]、幂函数^[17,29]和逻辑斯蒂函数^[20],这些拟合结果的整体趋势也基本符合穿透雨率的变化规律。本研究中的穿透雨率与林外降雨量的回归拟合表明,二次多项式的拟合效果最好(*R*² = 0.67),显示林外降雨超过 28 mm 后穿透雨率会有波动下降的趋势。这结果与盛后财等^[17]所得出的 20 mm 后穿透雨率渐趋稳定有一定的差异,主要原因有以下几个方面,第一,本研究中所观测的林外降雨事件中最大降雨量为 44 mm,没有更大次降雨事件的观测,可能影响了整体曲线的拟合;第二,综合分析前人有关针叶林的研究发现,多数研究所观测的最大次降雨量小于 25 mm^[16-17,29,36-37,],因此,导致拟合曲线末端趋稳的结果,第三,对部分观测到 30—45 mm 降雨事件的研究进行分析,发现他们的研究结果与本研究结果相似,即在林外降雨大于 28 mm 后穿透雨率有向下波动的趋势^[3,7]。可见,大降雨量时段其穿透雨率变化是复杂的。但在更大降雨事件下(>50 mm),其穿透雨率更

趋于临界阈值,其变化规律更难于预测。由此我们认为本研究的拟合曲线是可以接受的,并推论,在林冠层达 到饱和后,随着降雨量的继续增加,穿透雨率会呈现一种分段波动趋稳的状态,即先增加(约在 20—30 mm) 后下降(约在 30—45 mm)而后再上升至稳定期(>45 mm)。

本研究对日本柳杉林内穿透雨空间变异系数的分析发现,其与林外降雨强度没有相关性,与降雨量和叶 面积指数显著相关。随着降雨量的增加变异系数减小,在降雨量大于 20 mm 后,趋于稳定(15%—26%),与 林外降雨量的拟合关系以幂函数效果最佳。这与其他针叶树种的研究结果一致,如六盘山华北落叶松林空间 变异系数最终稳定在15%^[3],杂交松(16.5%)^[12],油松、兴安落叶松、青海云杉基本稳定在18%—22%之间, 这主要是由于随着降雨量的增加,冠层结构特征对穿透雨的影响减弱,穿透雨趋向于空间均匀化,变异系数的 大小取决于随机因素^[3,15,29]。从不同叶面积指数区间内观测点平均空间变异系数与降雨量的关系也可以发 现,在观测点处 LAI >6 以后,用降雨量对空间变异性的解释度降低(*R*²),降雨量的解释度最高时叶面积指数 处在 4—5 这个区间内。各观测点处叶面积指数及其时间变异系数的关系可知,随着叶面积指数的增加,观测 点位处的时间变异系数也增加。这与之前空间变异系数的分析相符,即在叶面积指数 >5 后,降雨量对穿透 雨率的空间变异系数的解释度降低,因为此时观测点本身的时间变异系数较大。



图 8 Monte Carlo 模拟的穿透雨率平均值和置信区间随雨量收集器数量的变化

Fig.8 Variation of the average and confidence intervals of throughfall rate with collector number based on the Monte Carlo resampling 5%、10%误差水平指占 37 个收集器测穿透雨量平均值的 5%、10%

空间变异性影响穿透雨的精确评估,及其收集过程中雨量器的布设方式和数量,刘泽彬等^[3]在对六盘山 华北落叶松穿透雨空间变异性的研究中,得出在 30 m×30 m 的样地内,雨量筒收集口面积为 230.58 cm²时,降 雨量级为 0—10 mm,在 95%的置信区间下,华北落叶松林内布设 13 和 26 个以上的穿透雨收集器;当降雨量 级在 10—20 mm 时,则需布设 6 和 15 个以上的收集器时,当降雨量级大于 20 mm 时,则需设 5 和 15 个以上 收集器时,能满足测穿透雨量误差能控制在 10%和 5%内。与之对比可以发现,本研究林分平均叶面积指数 更大,空间变异系数也更大,在采用相同布局方式和雨量筒规格时,需要布设更多数量的采集器才能满足穿透 雨量误差的需求,通过 Monte Carlo 模拟重抽样的方法(图 8),发现在降雨量级 0—10 mm 时,95%置信区间 下,收集器数量需 25 和 32 个以上,在降雨量级 10—20 mm 时,收集器数量需 10 和 22 个以上,在降雨量级 20—40 mm 时,95%置信区间下,收集器数量 7 和 18 个以上。尽管有研究显示穿透雨变异系数随着穿透雨收 集器面积增大而减小,本研究使用的穿透雨收集器面积(314.16 cm²)更大,因此,相对于穿透雨收集器面积, 叶面积指数可能是导致本研究穿透雨变异系数较大的主要原因。

4 结论

根据本文对庐山日本柳杉林下穿透雨与叶面积指数的时空关系研究,发现:

(1)穿透雨率受降雨量和叶面积指数的影响。其随着降雨量的增加而增加,降雨量达到 28 mm 时穿透 雨率趋于最大值,之后变化规律复杂未见稳定,二者之间关系以二次多项式拟合最优(降雨量 0—44mm)。与 叶面积指数呈显著负相关,叶面积指数小于 4.5 时对穿透雨率的影响显著。不同叶面积指数下,穿透雨率达 到最大时的林外降雨量不同。

(2)林下穿透雨率的空间分布受降雨量和叶面积指数的影响。随着降雨量的增加先减小,降雨量超过 20 mm 后逐渐稳定,二者之间以对数函数关系式拟合。观测点位的时间变异系数随着叶面积指数的增加而增大。叶面积指数小于 5,降雨量小于 20 mm 时,降雨量是影响穿透雨空间变异性的关键因素。

参考文献(References):

- [1] Keim R F, Skaugset A E, Weiler M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. Journal of Hydrology, 2005, 314(1/4): 263-274.
- [2] Allen S T, Keim R F, Barnard H R, McDonnell J J, Renée Brooks J. The role of stable isotopes in understanding rainfall interception processes: a review. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2017, 4(1): 1-17.
- [3] 刘泽彬,王彦辉,邓秀秀,刘宇,张桐,左海军,王亚蕊,熊伟,于澎涛,徐丽宏.六盘山华北落叶松林下穿透雨空间变异特征.生态学报,2017,37(10):3471-3481.
- [4] 周佳宁, 王彬, 王云琦, 刘春霞, 吕超, 杜文姬, 马良. 三峡库区典型森林植被对降雨再分配的影响. 中国水土保持科学, 2014, 12(4): 28-36.
- [5] 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.
- [6] 万艳芳,刘贤德,王顺利,于澎涛,李广,敬文茂,李晓青.祁连山青海云杉林冠降雨再分配特征及影响因素.水土保持学报,2016,30 (5):224-229.
- [7] 董玲玲,康峰峰,韩海荣,程小琴,赵金龙,宋小帅.辽河源3种林分降雨再分配特征及其影响因素.水土保持学报,2018,32(4): 145-150.
- [8] Stout B B, McMahon R J. Throughfall variation under tree crowns. Journal of Geophysical Research, 1961, 66(6): 1839-1843.
- [9] Levia D F Jr, Frost E E. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. Journal of Hydrology, 2003, 274(1/4): 1-29.
- [10] 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.
- [11] 次仁曲西,毕华兴,潘迪,高路博,许华森,鲍彪.晋西黄土区单株油松树下穿透雨空间分布特征研究.水土保持通报,2013,33(5): 161-164.
- [12] Fan J L, Oestergaard K T, Guyot A, Jensen D G, Lockington D A. Spatial variability of throughfall and stemflow in an exotic pine plantation of subtropical coastal Australia. Hydrological Processes, 2015, 29(5): 793-804.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 王云霓, 王晓江, 高孝威. 单株华北落叶松树冠穿透雨的空间异质性. 内蒙古林业科技, 2018, 44(1): 33-36.
- [16] 李振新,郑华,欧阳志云,王效科,刘兴良,宿以明.岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征.生态学报,2004,24(5):1015-1021.
- [17] 盛后财,蔡体久,俞正祥.大兴安岭北部兴安落叶松(Larix gmelinii)林下穿透雨空间分布特征.生态学报, 2016, 36(19): 6266-6273.
- [18] 曹云,黄志刚,郑华,欧阳志云,李锡泉,田育新.杜仲林下穿透雨时间及空间分布特征.中南林业科技大学学报,2008,28(6):19-24.
- [19] Sinun W, Meng W W, Douglas I, Spencer T. Throughfall, stemflow, overland flow and throughflow in the Ulu Segama rain forest, Sabah, Malaysia. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1992, 335(1275): 389-395.
- [20] 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.
- [21] Pérez-Suárez M, Arredondo-Moreno J T, Huber-Sannwald E, Serna-Pérez A. Forest structure, species traits and rain characteristics influences on horizontal and vertical rainfall partitioning in a semiarid pine-oak forest from Central Mexico. Ecohydrology, 2014, 7(2): 532-543.
- [22] 曹光秀,赵洋毅,段旭,薛杨.基于修正的 Gash 模型模拟中亚热带常绿阔叶林降雨截留过程.水土保持学报,2018,32(2):364-371.
- [23] Teale N G, Mahan H, Bleakney S, Berger A, Shibley N, Frauenfeld O W, Quiring S M, Rapp A D, Roark E B, Washington-Allen R. Impacts of vegetation and precipitation on Throughfall heterogeneity in a tropical Pre-Montane transitional cloud forest. Biotropica, 2014, 46(6): 667-676.
- [24] Nagakura J, Kaneko S, Takahashi M, Tange T. Nitrogen promotes water consumption in seedlings of Cryptomeria japonica but not in Chamaecyparis obtusa. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2533-2541.
- [25] Azuma W, Ishii H R, Kuroda K, Kuroda K. Erratum to: function and structure of leaves contributing to increasing water storage with height in the tallest *Cryptomeria japonica* trees of Japan. Trees, 2016, 30(3): 1019.
- [26] Himeno S, Azuma W, Gyokusen K, Ishii H R. Leaf water maintains daytime transpiration in young *Cryptomeria japonica* trees. Tree Physiology, 2017, 37(10): 1394-1403.
- [27] 今治安弥,上田正文,和口美明,田中正臣,上松明日香,糟谷信彦,池田武文.モウソウチク・マダケの侵入がスギ・ヒノキ人工林の水分生理状態に及ぼす影響.日林誌,2013,95(3):141-146.
- [28] 裴承敏, 王云琦, 张守红, 王玉杰. 重庆缙云山毛竹林次降雨再分配特征及穿透雨的空间异质性. 水土保持学报, 2018, 32(5): 202-207.
- [29] 石磊,盛后财,满秀玲,蔡体久.兴安落叶松林降雨再分配及其穿透雨的空间异质性.南京林业大学学报:自然科学版,2017,41(2): 90-96.
- [30] 王磊,孙长忠,周彬. 北京九龙山不同结构侧柏人工纯林降水的再分配. 林业科学研究, 2016, 29(5): 752-758.
- [31] 曹云,黄志刚,欧阳志云,郑华,王效科,苗鸿.湖南省张家界马尾松林冠生态水文效应及其影响因素分析.林业科学,2006,42(12): 13-20.
- [32] 刘建立,王彦辉,于澎涛,程丽莉,熊伟,徐丽宏,张淑兰,杜阿朋.六盘山叠叠沟小流域华北落叶松人工林的冠层降水再分配特征.水 土保持学报,2009,23(4):76-81.
- [33] Barbier S, Balandier P, Gosselin F. Influence of several tree traits on rainfall partitioning in temperate and boreal forests: a review. Annals of Forest Science, 2009, 66(6): 602.
- [34] 周彬,韩海荣,康峰峰,程小琴,宋娅丽,刘可,李勇.太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征.生态学报,2013,33(5): 1645-1653.
- [35] 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.
- [36] 刘亚, 阿拉木萨, 曹静. 科尔沁沙地樟子松林降雨再分配特征. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2046-2055.
- [37] 周秋文,颜红,马龙生,蔡明勇,戴丽. 喀斯特地区典型针叶林的降雨截留分配效应. 生态科学, 2016, 35(06): 140-145.