DOI: 10.5846/stxb201412152499

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. Sheng H C, Cai T J, Yu Z X. Characteristics of the spatial distribution of throughfall in a Larix gmelinii forest in the northern Greater Khingan Range, northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19):6266-6273.

大兴安岭北部兴安落叶松(Larix gmelinii)林下穿透雨 空间分布特征

盛后财,蔡体久*,俞正祥

东北林业大学林学院,哈尔滨 150040

摘要:森林冠层对降雨的水量和水质再分配是生态水文学研究的热点问题之一。为了研究兴安落叶松林下穿透雨的空间分布 规律,探究森林冠层结构对穿透雨影响的生态机制,利用在兴安落叶松林下布设 38 个雨量筒,测定 19 场不同降雨事件的穿透 雨数据(2013 年 7—8 月),通过统计学方法分析冠层结构各因子与穿透雨的空间变异性规律,结果表明:观测期间,兴安落叶松 林穿透雨量为 148.3 mm,占同期大气降雨量的 80.62%,穿透雨率随着降雨量的增加呈增加趋势;兴安落叶松林下穿透雨具有较 大空间异质性,其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(P<0.01);距树干距离、冠层厚度、叶面积指数等因素均可影响穿透雨的空间 分布,以距树干距离影响最大,其与穿透雨率呈正相关关系(P<0.01),而冠层厚度、叶面积指数则均与穿透雨率呈负相关关系 (P<0.01),但拟合效果不佳;从影响穿透雨的生态学机制来考虑,在冠层结构特征因子中,冠层厚度是决定穿透雨空间分布的 最主要因素。

关键词:冠层结构;大兴安岭;兴安落叶松;穿透雨;空间分布;变异系数

Characteristics of the spatial distribution of throughfall in a *Larix gmelinii* forest in the northern Greater Khingan Range, northeast China

SHENG Houcai, CAI Tijiu^{*}, YU Zhengxiang

College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: In forested ecosystems, complex forest canopies may redistribute and chemically modify the composition of rain water; this field within the study of ecological hydrology has recently attracted a considerable amount of attention. Throughfall is a major part of the rainfall penetrating the forest canopy and redistributes rainfall, and throughfall patterns can affect the distribution of soil water as well as the cycling and use of nutrients. Furthermore, spatial variability in the amount of throughfall can affect the concentration and deposition of solutes and the spatial distribution of nutrients in a forested landscape. Therefore, changes in throughfall beneath the canopy have very important effects on water balance, hydrological processes, and nutrient cycling within forest ecosystems. Many studies have analyzed the effects of the forest canopy on the interception and redistribution of rainfall, and the regularity of throughfall in different forest types; these studies provide a clearer understanding of the hydrological processes involved in rainfall interception and redistribution. However, few studies have addressed the horizontal spatial distribution of throughfall under a forest canopy. An examination of the spatial distribution of throughfall would provide important data to aid comprehension of the eco-hydrological processes and nutrient cycling within a forest. The goal of the present study was to determine the spatial heterogeneity of throughfall

基金项目:林业公益性行业科研专项(201404303);中央高校科研专项(DL12BA10);东北林业大学学术名师支持计划(PFT-1213-21)

收稿日期:2014-12-15; 网络出版日期:2016-01-15

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: caitijiu1963@163.com

under a forest canopy and to explore the ecological mechanisms of the effects of canopy structure in a Larix gmelinii forest on throughfall. Several factors, such as distance (of the sampling site to the trunk), canopy thickness, and leaf area index (LAI), can all influence the spatial distribution of throughfall. Throughfall was measured under a Larix gmelinii forest canopy at three locations—beneath the canopy itself, beneath the canopy edge, and in canopy gaps—during 19 rainfall events, using 38 rain gauges during the period of development of a stable canopy (Jul.-Aug. 2013). The spatial heterogeneity of both forest canopy structure (LAI and canopy thickness) and throughfall were analyzed using statistical methods. The spatial variability of throughfall in the Larix gmelinii forest analyzed here was estimated for different rainfall events. The results indicate that throughfall under a Larix gmelinii forest canopy was 148.33 mm during the observation period, and accounts for 80.62% of the rainfall in an open field. The throughfall ratio increased with increasing amounts of rainfall, and the relationship between these could be described with a power function (P < 0.01). The coefficient of variance of throughfall decreased with increasing rainfall amounts, and the relationship between these could be described with a logarithmic function (P < 0.01). Structural characteristics of the canopy were found to be the most important factors controlling the spatial variability of throughfall, and the throughfall amount was significantly negatively correlated with the degree of complexity within the canopy structure (P < 0.01). The influence of distance was most important, and was significantly positively correlated with the throughfall ratio ($r^2 = 0.580$, P < 0.01). Canopy thickness and LAI were significantly negatively correlated with the throughfall ratio (P < 0.01), but exhibited poor fitting results. When considering the ecological mechanism of throughfall, canopy thickness was the most important canopy structure/factor that affects the spatial redistribution of throughfall in a Larix gmelinii forest.

Key Words: canopy structure; Greater Khingan Range; Larix gmelinii; throughfall; spatial distribution; variation coefficient

森林与水的关系是生态水文学研究的核心问题之一。森林冠层对降雨的再分配不仅改变了大气降雨的 特性和空间分布格局,而且其能够影响到水文、生物地球化学过程的许多环节,是森林生态水文学的基本过程 之一。林下穿透雨是林冠对降雨再分配后形成的主要部分,是林地土壤水分的重要来源^[1],也是养分物质到 达森林地表的重要途径^[2],穿透雨不仅改变了林下水分输入的空间分布格局,影响了林地土壤水分分布和养 分的循环利用,而且穿透雨量的空间变异还影响了穿透雨中溶质浓度、溶质沉积和林地养分输入的空间分布 格局。因此,林下穿透雨的变化在森林生态系统水量平衡、水文过程和养分循环中占有极其重要的地位^[3]。 国内外关于森林冠层对降雨的再分配已进行了大量研究^[45],且多集中在量化穿透雨方面,也有对不同森林 冠层下穿透雨空间分布特征的研究^[67],但对大兴安岭北部的兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林穿透雨的空间变 异性和时间稳定性的格局却知之甚少。

Lloyd^[8]对亚马逊热带雨林研究发现,29%观测点的穿透雨水大于当时林外降水量;Sinun^[9]在马来西亚的 热带雨林中也发现,101个测点收集的穿透雨量比林外降水多10%,22个点比林外降水少40%,林窗下的穿 透降水占当次雨量的88%—102%不等。一些学者还报道了热带山地森林穿透雨具有很大的空间变异性,并 将其归因于复杂的森林结构和降雨特征^[10];还有学者研究发现,热带山地雨林中单个穿透雨收集器得到穿透 雨变异范围在0—107%,甚至0—1000%^[11]。Nanko对单株日本扁柏进行降雨模拟实验发现,日本扁柏树冠 层内树枝的形状、位置对其穿透雨空间分布的形成占主导地位,因此,穿透雨量的空间分布与距离树干的径向 距离有关;并且研究还表明,位于树干和树冠边缘中间位置的观测点,穿透雨量和穿透雨率较低^[12]。李振新 等^[7]对岷江流域冷杉(Abies faxoniana)针叶林穿透雨研究发现,林下不同观测点的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的影响。时忠杰等^[13]利用地统计方法分 析了单株上华北落叶松(Larix principis-rupprechtii)叶面积指数和穿透雨的空间变异性规率发现,冠层结构是 引起穿透雨率空间变异的主要因素;其对华山松(Pinus armandii)林研究发现^[6],冠层对穿透雨具有一定的聚 集效应,且不同冠层特征中,叶面积指数对穿透雨的空间分布影响最大,得出冠层结构特征是决定大气降雨再 分配和空间变异的重要生态因素之一。这些研究都表明,林冠影响了降雨空间分布格局,但从生态学机制入 手对穿透雨空间变异影响的研究还较少。

大兴安岭是我国唯一的寒温带针叶林分布区,也是全球气候变化的敏感区,是松嫩、辽河平原的生态屏障。研究区域内优势群落兴安落叶松林的水循环过程,对于进一步量化并揭示其涵养水源的机理和生态服务功能具有重要意义。本文以大兴安岭北部的兴安落叶松林为研究对象,从森林对降雨再分配的影响过程入手,详细探讨了兴安落叶松林下穿透雨空间变异及其影响因素,以求更深入的理解森林水文过程、认知森林与水的相互作用机制,进一步明确兴安落叶松林生态系统水分传输过程的生态学机制,为应对全球变化,制定有效的大兴安岭森林流域水资源管理措施提供科学依据。

1 研究地概况及研究方法

1.1 研究地描述

研究区位于黑龙江漠河森林生态系统国家定位研究站内,属于寒温带大陆性季风气候。年平均气温为 -4.3 ℃。年降水量 430—550 mm,降雨主要集中在每年的 7—8 月。太阳辐射总量年平均 401.93—447.99 kJ/ cm²,日照时数为 2377—2625 h,≥10 ℃积温为 1436—2062 ℃。土壤以棕色针叶林土为主,枯枝落叶和苔藓 层较厚。本区植被属欧亚寒温带针叶林南延部分,地带性植被是以兴安落叶松为优势树种的明亮针叶林,其 他主要树种有白桦(Betula platyphylla)、樟子松(Pinus sylvestris var. mongolica)和山杨(Populus davidiana),常 见植物有杜香(Ledum palustre var. dilatatum)、兴安杜鹃(Rhododendron dauricum)、笃斯越橘(Vaccinium uliginosum)、越橘(Vaccinium vitis-idaea)、红花鹿蹄草(Pyrola incarnate)等。

本实验选择紧邻 2010 年漠河生态站设置的兴安落叶松固定观测样地(面积 1 hm²)处设置一块 20 m×20 m 面积的落叶松中龄林作为观测样地,并在进行每木检尺后布设观测仪器,观测样地具体信息详见表 1 和 图 1。

Table 1 Characters in the plot										
样地 Plot	林龄 Stand age/m	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	郁闭度 Canopy cover	密度 Density of trees/ (株/hm ²)	平均 枝下高 Mean height under branch/m	平均 枝下高 Mean height under branch/m	冠层厚度 Canopy thickness/ m	下木盖度 Shrub cover/%	草本盖度 Herba ceous cover/%
兴安落叶松林 <i>Larix gmelinii</i> forest	45—65	13.5±2.8	11.4±4.7	0.75	1800	6.8±2.5	6.8±2.5	5.7±2.0	35—45	50—70

表1 观测样地主要林分特征

1.2 降雨及穿透雨观测方法

(1)林外降雨的测定 利用安置在距观测样地 150 m 远处开阔地上的翻斗式雨量计来测量林外降雨量 (P)和降雨强度,采集数据时间间隔为 5 min。

(2)穿透雨及其空间分布观测 为了更好的测定兴安落叶林下的穿透雨量(TF)及其空间分布特征,2013 年8月在样地内设置 38 个直径 20 cm 的自制雨量筒(截面积为 314.16 cm²/筒),测定林木冠幅后,按照林冠下(雨量筒与树干距离≤3/4 冠幅,BC)、林冠边缘(3/4 冠幅<雨量筒与树干距离≤5/4 冠幅,BCE)、林隙下(雨量筒与树干距离>5/4 冠幅,BC)3 种情景进行布设(图 1),并记录雨量筒距树干距离,为了避免灌木及草本植物对穿透雨的影响,雨量筒距离地面的高度不低于 50 cm,每次降雨结束后立即测定各降雨筒内穿透雨的体积(cm³),然后换算成雨量深(mm)。

1.3 叶面积指数及冠层厚度观测

利用冠层分析仪(LAI-2200)测定叶面积指数;同时将带有刻度的15m标杆树立在雨量筒位置处,通过望

远镜读取冠层上下刻度值的差值获得冠层厚度。

2 结果与分析

2.1 研究期间的降雨特征

按降雨间隔时间超过 4 h 的降雨事件划分为两场 不同降雨的原则^[7],在进行观测研究的时间段内(2013 年 7 月至 8 月期间),安置在开阔地的翻斗式雨量计共 记录到 19 场降雨的数据,累计降雨量 184.0 mm,占 2013 年生长季(5—9 月)总降雨量(398.2 mm)的 46.21%,其降雨特征如图 2。研究期间大部分为低雨 强、长历时的降雨,平均降雨强度为 2.13 mm/h,变异系 数为 99.53%,最小雨强为 0.33 mm/h,最大雨强为 7.23 mm/h。其中,42.11%降雨的雨强小于 1 mm/h,在 2 mm/h 以下的降雨约占 68.42%,没有观测到大于 10 mm/h 的降雨。从次降雨量看,平均降雨量为 9.7 mm, 变异系数为 78.64%,次最小降雨量为 0.2 mm,最大为





24.1 mm, 且各雨量级降雨分布场次较均匀。从降雨历时看, 平均次降雨历时为 8.33 h, 变异系数为 114.39%, 最短的仅 30 min, 最长的为 31 h, 雨量仅有 20.7 mm, 降雨历时小于 2 h 的降雨次数最多, 占 42.11%, 0—10 h 之间的占 68.42%。







2.2 兴安落叶松林下穿透雨及其变异性

根据 2013 年 38 个观测点的穿透雨数据分析,兴安落叶松林内观测到的穿透雨量为 148.3 mm,占同期降雨量的 80.62%,与同区域内其他森林类型相比较,介于樟子松林(73.58%)^[14]和白桦林(84.27%)^[15]之间,与大兴安岭南坡测定的结果(81.39%)^[16]基本吻合。受不同降雨特征的影响,兴安落叶松林下平均穿透雨率为71.68%,且当降雨量小于 14 mm 时,穿透雨率表现为增加趋势;而降雨量超过 14 mm 时,穿透雨率不再明显增加,且具有一定减小趋势。这是因为当降雨量超过兴安落叶松林冠层的最大截留能力时,林冠趋于饱和,之后的降雨几乎全部以穿透雨的形式输入林地,并且由于重力、阻力和分子力不平衡,后续的降雨还可能携带部分已被林冠截持的降雨进入林地,从而增加穿透雨率,降低林冠截留能力。但总体上看,随着降雨量的增加穿透雨率有增加的趋势(图 3),一般以对数方程进行模拟,也有用 S 形曲线^[6]和逻辑斯谛方程^[7]进行模拟。本研究以幂函数模拟的效果较好,拟合方程为:

TF (%) = 46.299
$$P^{0.223}$$
, $r^2 = 0.761$, $P < 0.01$, $n = 19$

式中,TF为穿透雨率(%),P为降雨量(mm)。

不同场次的林外降雨特征与对应兴安落叶松林下穿透雨的变异系数 *CV*(*n*=38)绘制散点图可知,穿透雨的变异系数与降雨强度没有相关关系(*P*>0.05),但随降雨量的增加有减小的趋势(图3),二者呈显著的负相关关系。在以往的研究中用倒数方程^[6]、对数方程^[3]、幂函数^[17]均可以进行较好的拟合,本研究中则以对数方程对兴安落叶松林穿透雨变异系数和林外降雨量进行拟合效果最好,其拟合方程为:

CV(*TF*)=-15.893Ln(*P*)+60.741,*r*²=0.775, *P*<0.01,*n*=19 式中,*CV*为同场降雨不同测点间穿透雨率的变异系数(%),*TF*为穿透雨率(%),*P*为降雨量(mm)。







2.3 兴安落叶松林下穿透雨的空间分布特征

本研究中根据降雨筒到树干距离与冠幅的关系,将38个观测点划分为林冠下(雨量筒与树干距离<3/4 冠幅,BC)、林冠边缘(3/4 冠幅<雨量筒与树干距离<5/4 冠幅,BCE)和林隙下(雨量筒与树干距离>5/4 冠

幅,BG)3种情景,并且不同观测点上的降雨量、温湿度 等气象因子可以认为是一致的,因此影响3种情景间穿 透雨差异的因素主要就是冠层结构特征。

根据 19 场降雨数据分析可知,兴安落叶松林冠下 平均穿透雨率为 60.27%,标准差为 28.49%,变异系数 高达 47.27%;林冠边缘平均穿透雨率为 78.53%,标准 差为 16.86%,变异系数为 21.47%;林隙下平均穿透雨 率为 89.27%,标准差为 20.60%,变异系数为 23.07%。 分析发现,有些观测点有明显的降雨聚集效应,该处的 穿透雨量高于林外降雨量。在本研究中,林隙下平均穿 透雨率超过 100% 的次数占所有降雨事件总数的 26.32%;且除第 7 场降雨外,林隙下穿透雨率均最大。 由林冠下、林冠边缘、林隙下的线性回归线与代表降雨 量(穿透降雨率为 100%)的 1:1 线的位置关系(图 4)可 知,相比于林冠下和林冠边缘,林隙下穿透雨更接近





1:1线,即林隙下穿透雨量很接近林外降雨量,这与林隙下穿透雨率的结论相同。在降雨量为14.3 mm时,林隙下穿透雨率达到最高值113.62%(标准差=3.05%),林冠边缘穿透雨率为96.90%(标准差=19.10%),林冠下穿透雨率仅为89.83%(标准差=15.81%)。

由图 5 可知,林冠下、林冠边缘、林隙下 3 种情景下穿透雨率变异系数情况有:林冠下>林冠边缘>林隙下,且随着穿透降雨量的增加,林冠下和林隙下穿透降雨率的变异系数有下降的趋势,而林冠边缘处穿透降雨率的变异系数变化趋势不明显(图 5)。将林冠下、林冠边缘和林隙下 3 种情景的穿透雨变异系数随降雨量的变化进行拟合,拟合方程依次为:

$$CV(TF_{BC}) = 56.838 \ P^{-0.483}, \ r^2 = 0.707, \ P < 0.01, n = 19$$

 $CV(TF_{BCE}) = 16.634 + 12.874/P, \ r^2 = 0.612, \ P < 0.01, n = 19$
 $CV(TF_{BCE}) = 4.727 + 6.746/P, \ r^2 = 0.678, \ P < 0.01, n = 19$

式中,CV为穿透雨率的变异系数(%), TF_{BC} 为林冠下穿透雨率(%), TF_{BCE} 为林冠边缘穿透雨率(%), TF_{BC} 为 林隙下穿透雨率(%),P为降雨量(mm)。





Fig.5 Relationship between rainfall and throughfall with variability of throughfall in the beneath canopy (BC), beneath canopy edge (BCE) and beneath gap (BG) positions

2.4 穿透雨空间分布的影响因素分析

为了进一步深入研究林冠层对穿透雨空间分布的影响,对 38 个观测点的平均穿透率与其对应冠层结构 特征(叶面积指数 LAI、冠层厚度、平均叶倾角等)和距树干的距离进行相关分析。其中,观测点距树干的距离 与穿透雨率拟合的效果最好,二者呈极显著的正相关关系(图 6,r²=0.580,P<0.01)。虽然拟合曲线表现出来 的趋势是距树干距离越远,穿透雨率越高,但从影响穿透雨的生态机制来看,实际上是由于不同观测点上方的 冠层厚度和叶面积指数等因素不同而导致的结果,而并非是由距树干的距离所决定的,其只能在一定程度上 反映穿透雨的空间变异。冠层厚度和叶面积指数与穿透雨率的相关性也达到了极显著水平(P<0.01),且穿 透雨率随着冠层厚度和叶面积指数的增加而呈下降趋势(图 6),二者均与穿透雨率呈极显著的负相关关系 (P<0.01),但拟合效果不佳(r²依次为 0.500 和 0.396);平均叶倾角与穿透雨率则没有相关性(P>0.05)。因 此,在冠层结构特征中,冠层厚度是决定穿透雨空间分布的最主要因素。穿透雨率与冠层结构特征中相关因 子进行回归分析,其相关性也达到了极显著水平(P<0.01),回归方程为:

TF=96.718 - 3.130*CT* - 5.219LAI,*r*²=0.569, *P*< 0.01,*n*=38 式中,*TF* 为穿透雨率(%),*CT* 为冠层厚度(m),LAI 为叶面积指数。

3 讨论

根据 2013 年 38 个观测点的穿透雨数据分析,兴安落叶松林的穿透雨占降雨量的 80.62%,且穿透雨率随





Fig.6 Relationship of the average throughfall, distance between sampling site and main stem, canopy thickness, leaf area index

着降雨量的增加有增加的趋势。兴安落叶松林下的穿透雨具有较大的空间异质性,排除冠层结构特征的影响,穿透雨变异程度随降雨量的增加有减小趋势,并以对数方程拟合效果最好;而与降雨强度没有相关关系(P>0.05)。国内外许多学者研究了林冠下穿透降雨的空间分布,但结论不一致。时忠杰等^[6]认为六盘山华山松林下穿透雨变异程度随降雨量的增加而呈反函数关系减弱;战伟庆等^[17]认为华北油松人工林下穿透雨变异系数随降雨量的增加而减小,可以用幂函数进行拟合;曹云等^[3]认为杜仲林下穿透雨变异程度随着降雨量或降雨强度的增加逐渐降低,可以用对数方程拟合;沈会涛等^[18]对常绿阔叶林次生演替不同阶段研究发现,其穿透雨变异系数均随降雨量的增加而降低。本研究穿透雨变异规律与其他学者的研究基本一致,但拟合方程略有不同。分析差异认为,不同研究的地点(宁夏、北京、湖南、浙江)、树种(阔叶、针叶)、降水大小与穿透雨的空间分布有极大关系。本研究观测到的林外降雨量较小(<25 mm),且对于较大降雨量时穿透雨情况数据缺失,但在建立模型时,个别的极值往往能够影响拟合效果甚至曲线类型,而时忠杰^[6]、战伟庆^[17]的研究,林外降雨量最大值比本研究高很多,因此导致本研究的结果(穿透雨与降雨量以幂函数模拟,而穿透雨变异系数与降雨以对数方程进行拟合)与已有研究结果的差异。

研究结果表明,冠层结构是影响穿透雨空间变异的重要因素。排除降雨特征的影响,穿透雨量随冠层结构复杂程度的增加(林隙下→林冠边缘→林冠下)而降低,二者成负相关关系,即靠树干越近穿透雨越小。与已有研究结果相比,Staelens等发现靠近树干穿透雨量较小^[19];而 Anderson则发现靠近树干的穿透雨量较大, 且有较大变异性^[20];Keim 等发现幼龄针叶林中距树干近处有较高的穿透雨,老龄针叶林中恰好相反,而落叶林中穿透雨量与距树干距离则没有关系^[21];Go'mez等^[1]发现穿透雨的聚集效应较容易发生在林冠边缘,有时也会发生在树冠投影边缘线以内;时忠杰等^[13]也发现穿透雨的聚集区域多发生在树冠半径的中部,有时也 会移到树冠的外边缘线。本研究认为,兴安落叶松林下的穿透雨是具有一定的变化规律的,而不是完全随机的,本研究中距树干的距离对穿透雨率影响最大,二者呈极显著的正相关关系,文中则表现为林隙下的穿透雨 具有明显的聚集效应。

本研究发现,兴安落叶松林的冠层厚度和叶面积指数都会影响穿透降雨的空间分布,二者均与穿透雨率 呈极显著的负相关关系(P<0.01),且冠层厚度是决定穿透雨空间分布的最主要因素。这与李振新等^[7]研究 结果一致,与时忠杰等^[6]认为叶面积指数的影响最大的结果不同。分析差异认为,虽然叶面积指数是反映冠 层结构的一个重要指标,但不同树种的分枝角度、叶片形态有很大差异,且本研究中冠层厚度与叶面积指数呈 极显著的正相关关系(P<0.01),进而导致了研究结果的差异。

影响森林冠层下穿透雨空间分布的因素非常复杂,本研究是利用自制的雨量筒(截面积为314.16 cm²/筒)观测得到的结论。虽然不同面积穿透雨收集器得到的穿透雨在统计学上具有相同的意义,但是最新研究发现^[22],即使小面积的穿透雨收集器数量少,但其标准差和变异系数却明显高于大面积穿透雨收集器的数据;而在林窗下,大面积和小面积的穿透雨收集器收集的穿透雨率范围依次为25%—178%和13%—379%,即

小面积的穿透雨收集器导致穿透雨的空间变异更剧烈;并且小雨量降雨事件,小面积穿透雨收集器比大面积 穿透雨收集器得到数据具有更大的变异性。因此,利用不同面积的穿透雨收集器对穿透雨空间分布的测定结 果有何影响?降雨量大于 24 mm 后,兴安落叶松林下穿透雨有怎样的变化规律?森林冠层发育的不同时期, 其穿透雨的空间分布的影响情况是否相同?这些问题都还有待今后的进一步研究。

4 结论

根据兴安落叶松林下穿透雨空间分布特征的研究结果得到如下结论:(1)随着降雨量的增加兴安落叶松林下穿透雨率具有增加并趋于稳定的趋势,且变异程度减小;(2)通过比较变异系数,在降雨筒距树干距离与林木冠幅关系的不同情景中,兴安落叶松林冠下穿透雨变异性最大,林隙下穿透雨变异最小,且随降雨量的增加,穿透雨的变异性呈下降趋势;(3)冠层结构特征是影响穿透雨空间变异的重要因素,且随着冠层结构复杂程度的增加穿透雨量降低,二者成负相关关系;(4)不同观测点距树干的距离,上方冠层厚度、叶面积指数等因素的差异均影响穿透降雨的空间分布,其中以距树干的距离影响最大。

参考文献(References):

- Go' mez J A, Vanderlinden K, Giráldez J V, Fereres E. Rainfall concentration under olive trees. Agricultural Water Management, 2002, 55(1): 53-70.
- [2] Parker G G. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. Advances in Ecological Research, 1983, 13: 57-133.
- [3] 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(自然科学版),2008, 28(6):19-24.
- [4] 温远光,刘世荣.我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析.林业科学,1995,31(4):289-298.
- 5] Wei X H, Liu S R, Zhou G Y, Wang C K. Hydrological processes in major types of Chinese forest. Hydrological Processes, 2005, 19(1): 63-75.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Lloyd C R, Marques A D O. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. Agricultural and Forest Meteorology, 1988, 42(1): 63-73.
- [9] 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.
- [10] Holwerda F, Scatena F N, Bruijnzeel L A. Throughfall in a Puerto Rican lower montane rain forest: A comparison of sampling strategies. Journal of Hydrology, 2006, 327(3/7): 592-602.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [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] 李奕, 蔡体久, 满秀玲, 田野宏. 大兴安岭地区天然樟子松林降雨截留再分配特征. 水土保持学报, 2014, 28(2): 40-44.
- [15] 田野宏,满秀玲,刘茜,李奕.大兴安岭北部白桦次生林降雨再分配特征研究.水土保持学报,2014,28(3):109-113.
- [16] 吴旭东,周梅,张慧东.兴安落叶松林冠截留与降雨量及降雨强度的关系.内蒙古农业大学学报,2006,27(4):83-86.
- [17] 战伟庆, 张志强, 武军, 肖金强. 华北油松人工林冠层穿透雨空间变异性研究. 中国水土保持科学, 2006, 4(3): 26-30.
- [18] Shen H T, Wang X X, Jiang Y, You W H. Spatial variations of throughfall through secondary succession of evergreen broad-leaved forests in eastern China. Hydrological Processes, 2012, 26(11): 1739-1747.
- [19] Staelens J, De Schrijver A, Verheyen K, Verhoest N E C. Spatial variability and temporal stability of throughfall deposition under beech (*Fagus sylvatica* L.) in relationship to canopy structure. Environmental Pollution, 2006, 142(2): 254-263.
- [20] Sato A M, de Souza Avelar A, Netto A L C. Spatial variability and temporal stability of throughfall in a eucalyptus plantation in the hilly lowlands of southeastern Brazil. Hydrological Processes, 2011, 25(12): 1910-1923.
- [21] Keim R F, Skaugset A E, Weiler M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. Journal of Hydrology, 2005, 314(1/4): 263-274.
- [22] Zuecco G, Oliviero O, Penna D, van Meerveld I, Hopp L, Dalla Fontana G, Borga M. Spatial and temporal variability of throughfall at the plot scale in the Italian pre-Alps. EGU General Assembly 2014, held 27 April-2 May, 2014 in Vienna, Austria, 2014, 16: 12563.