

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220402

六盘山半湿润区华北落叶松林内降雨的空间异质性及合理取样数

晁阳^{1,2}, 于松平^{1,2}, 刘泽彬², 马鑫¹, 郭建斌^{1*}, 王彦辉²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所/国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要: [目的] 林内降雨的空间变异对林地土壤水分、林下植被生长有重要影响, 准确刻画其空间变异特征, 并确定其收集器的合理布设数量, 有助于准确理解森林对水文的影响。[方法] 于2021年6—10月, 在六盘山半湿润区香水河小流域的华北落叶松 (*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (Mayr) Pilg.) 纯林样地, 利用样地内布设的40个林内降雨收集器收集每场降雨事件的林内降雨量, 分析展叶和落叶期林内降雨的空间变异特征, 并量化雨量收集器的合理布设数量。[结果] (1) 整个生长季, 林内总降雨量440.0 mm, 占同期林外降雨量的77.5%, 林内降雨空间变异系数28.23%; 展叶和落叶期, 林内总降雨量分别为153.8和290.2 mm, 占同期林外降雨量的73.0%和80.2%, 林内降雨空间变异系数分别为36.0%和18.5%。总体上, 林内降雨空间变异随次降雨量、雨强和降雨历时的增加先快速下降后逐渐趋于稳定。(2) 整个生长季及展叶和落叶期林内降雨的块基比分别为0.042、0.012和0.275, 变程分别为4.8、4.0和6.5 m。(3) 在95%置信区间内, 若将误差控制在5%内, 至少需在展叶和落叶期分别布设17和14个截面积为235.58 cm²的雨量收集器。[结论] 受降雨量和冠层结构差异影响, 华北落叶松林内降雨空间变异在展叶和落叶期存在差异, 不同时期雨量收集器合理布设数与林内降雨空间变异密切相关, 要确保整个生长季林内降雨评估的准确性, 应重视不同时期雨量收集合理布设数差异的影响。

关键词: 华北落叶松林; 林内降雨量; 空间异质性; 合理取样数

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)04-0020-11

林内降雨(穿透雨和滴下雨)是降雨再分配的主要组分, 约81%的降雨以林内降雨的形式进入林内, 因而林内降雨对土壤有机质累积^[1]、植被根系生长^[2]以及化学微量元素的迁移与转化^[3]等方面有重要影响。受冠层结构^[4]和降雨特征^[5]等影响, 林内降雨在林内有明显的空间异质性, 这将影响森林水文效应的准确评价^[6-8]。探索林内降雨时空格局将有助于理解森林水文过程的时空变化和准确评价森林水文效应^[9]。

森林植被林内降雨的空间变异系数在3%~

54%^[10], 且针叶林林内降雨的空间结构比落叶林的复杂^[11]。林内降雨空间变异主要受降雨量特征(如雨量大小^[12]、雨强^[13]、风速^[14]等)和林分结构(如林分密度^[15]、冠层覆盖度^[16]、距离最近树的距离^[17]等)的影响, 如Liu^[18]等相关研究得到, 橡胶树(*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Muell. Arg.)林内降雨空间异质性受降雨量的影响, 随降雨量的增加, 林内降雨空间异质性先降低后趋于稳定。刘泽彬等^[19]研究表明, 当降雨量<10 mm时, 华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-*

收稿日期: 2022-08-09 修回日期: 2022-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971038、U20A2085、U21A2005、32171559); 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2020QB004、CAFYBB2021ZW002)。

* 通讯作者: 郭建斌, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林生态水文研究。电话: 13693105932 E-mail: jianbinguo@bjfu.edu.cn

rupprechtii (Mayr) Pilg.) 林内降雨空间变异与冠层叶面积指数显著相关。Vaca^[20] 等研究发现, 天然花旗松 (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) 林内降雨的空间自相关范围在春季要明显高于夏季。受林内降雨空间变异影响, 量化林内降雨合理取样数成为研究学者关注的焦点, 如相关研究得到, 冬青栎 (*Quercus ilex* L.) 林内至少布设 22 个以上的林内降雨收集器^[21]; 在 0~10、10~20 和 20~40 mm 雨量级下, 柳杉 (*Cryptomeria japonica* var. *sinensis* Miq.) 林内降雨收集器的布设数量分别为 25、10 和 7 个^[22]。总体上, 目前研究还多集中在整个生长季或某一时期林内降雨空间变异或合理取样数的确定, 在生长季的不同时期 (如展叶和落叶期), 受降雨量和冠层结构差异影响, 林内降雨也可能存在较大差异, 但还缺乏较为系统的研究。

华北落叶松是六盘山区主要造林树种, 对当地的水土保持、水源涵养和生态环境改善有重要作用^[23]。但该区降雨的月份分配不均, 降雨量在华北落叶松林的展叶和落叶期存在较大差异, 加之华北落叶松林冠层结构有较大空间异质性且有季节变化, 势必会导致不同时期林内降雨空间变异的差异, 因而探索华北落叶松林生长季内不同时期林内降雨空间变异将有助于深入理解华北落叶松林的水文效应。本研究以六盘山半湿润区华北落叶松人工纯林为对象, 监测了 2021 年生长季 (6—10 月) 不同时期 (展叶和落叶期) 林内降雨量, 利用经典统计学和地统计学方法分析林内降雨的空间变异特征, 并量化不同时期林内降雨的合理取样数, 为该

区森林生态水文观测设计及林水综合管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区位于宁夏六盘山国家级自然保护区南部东侧的香水河小流域 (106°12'10"~106°16'30" E, 35°27'22"~35°33'29" N), 流域总面积为 43.7 km², 海拔 2 040~2 931 m。属于温暖带半湿润区, 年均气温 5.9 °C, 年均降雨量 618 mm, 主要集中于夏秋季, 约占全年总降雨量的 71.8%。土壤类型以灰褐土为主。次生林和人工林为该区主要植被类型, 分别占流域总面积的 58% 和 24%。次生林主要树种有辽东栎 (*Quercus wutaishanica* Mayr)、白桦 (*Betula platyphylla* Suk.) 和华山松 (*Pinus armandii* Franch.) 等。人工林主要树种为华北落叶松和油松 (*Pinus tabuliformis* Carrière), 其中华北落叶松林约占 90%。

在研究区内选择 1 个 900 m² (30 m × 30 m) 的华北落叶松人工纯样地, 林分密度 622 株·hm⁻¹, 郁闭度 0.80, 其他林分信息详见表 1。林下灌木分布稀疏, 覆盖度约为 5%, 主要有华西箭竹 (*Fargesia nitida* (Mitford) Keng f. ex Yi)、刺五加 (*Eleutherococcus senticosus* (Rupr. et Maxim.) Maxim.)、灰栒子 (*Cotoneaster acutifolius* Turcz.) 等。草本覆盖度为 40%, 以点叶薹草 (*Carex hancockiana* Maxim.) 为主。试验开展于 2021 年 6—10 月。

表 1 华北落叶松样地林分特征

Table 1 Stand characteristics of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (Mayr) Pilg. plot

坡度 Slope/(°)	林龄 Stand age/a	林分密度 Density/(株·hm ⁻¹)	郁闭度 Canopy density	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	枝下高 Height of clear trunk/m	冠幅直径 Crown diameter/m	
							东西	南北
25.3	40	622	0.76	19.8	18.8	5.9	3.89	4.23

1.2 林外、林内降雨量观测

在距样地约 100 m 的林外空旷区放置两个相同规格的林内降雨收集器收集林外降雨量。为研究林内降雨量的空间变异性, 在样地内布设了 40 个雨量收集器, 其中 36 个雨量收集器布设在 36 个等分的网格 (5 m × 5 m) 内, 剩余 4 个雨量收集器随机布设 (图 1)。雨量收集器由聚氯乙烯漏斗和聚氯乙烯瓶两部分组成, 截面积为 235.58 cm²。

每次降雨结束后, 利用量筒测定每个雨量收集器的雨量体积/mL, 然后基于截面积换算得到雨量深/mm。

1.3 林冠叶面积指数

在 2021 年的生长季 (6—10 月), 利用 LAI-2200C 植物冠层分析仪每隔 7~10 天, 测定每个雨量收集器上方的冠层叶面积指数 (LAI)。结合研究区华北落叶松物候特征 (大量落叶一般开始

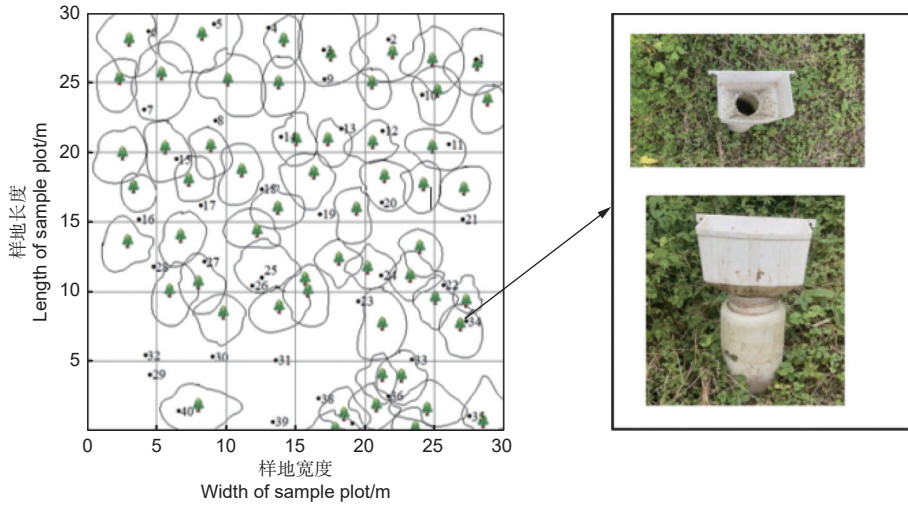


图 1 研究样地雨量收集器的布设 (绿色树形符号代表落叶松; 黑色实线是树冠范围; 黑色圆点代表雨量收集器)

Fig. 1 Distribution of collectors of rainfall inside the forest in the study plot (the green tree represents Larch tree; black solid line represents the crown range; black dot represents the collector of rainfall inside the forest)

于 8 月 25 日—9 月 1 日, 停止于 10 月 24 日—10 月 31 日) 和观测样地叶面积指数的变化动态, 将生长季进一步划分为展叶期 (6 月 1 日至 8 月 31 日) 和落叶期 (9 月 1 日至 10 月 31 日) 2 个时期, 且叶面积指数的空间变异在 2 个时期存有明显差异 (图 2)。

1.4 空间异质性分析

采用经典统计学的变异系数和地统计学的半方差函数描述林内降雨的空间变异特征。

变异系数 (CV) 是经典统计学中衡量数据离散程度的重要参数, $CV \leq 0.1$ 、 $0.1 < CV < 1$ 和 $CV \geq 1$ 分别表示林内降雨呈弱、中等和强变异。

半方差函数是描述变量空间结构的重要工具^[24], 函数形式如下:

$$r(h) = \frac{\sum_{i=1}^{n(h)} [TF(x_i) - TF(x_i + h)]^2}{2nh} \quad (1)$$

式中, $r(h)$ 半方差, $TF(x_i)$ 和 $TF(x_i + h)$ 是位于 i 和 $i + h$ 的林内降雨值, $n(h)$ 是由滞后距离分隔林内降雨的数量。

基于该函数可得到块金值 (C_0)、基台值 ($C_0 + C$) 和变程 (a) 等指示空间结构的重要参数。块金值 (C_0) 是指在最小抽样尺度下变量的变异性及测量误差; 基台值 ($C_0 + C$) 是指区域化变量变化幅度的大小; 块基比 [$C_0/(C_0 + C)$] 判断变量空间自相关的程度, 块基比 $< 25\%$, 表示变量强空间自相关, $25\% \sim 75\%$ 表示变量中等空间自相关, $> 75\%$, 表示变量弱空间自相关。变程 (a)

指示变量空间自相关范围的大小。两点空间距离越大, 表明两点的空间自相关性越弱, 当两点空间距离超过变程, 表明两点的空间自相关性不存在。

1.5 合理取样数的确定

利用 R3.6.1 软件, 进行 Monte Carlo 模拟重抽样, 步骤如下: 将林内 40 个雨量收集器收集的 27 场降雨事件的林内降雨量按整个生长季及展叶和落叶期 3 个时期取平均作为 Monte Carlo 模拟抽样的初始值, 然后分别对各时期 40 个林内降雨量平均值进行 n ($2 \sim 39$) 次不放回抽样, 并重复 1 000 次, 得到不同取样数量 ($n=2 \sim 39$) 下的林内降雨量平均值及其置信区间的变化, 最后确定在 5% 误差下雨量收集器的最少布设数量。

1.6 数据分析

利用 Excel 2019 对生长季及展叶和落叶期林内降雨进行经典统计分析 (最大、最小和平均值, 变异系数等); 利用 Origin2021 拟合林内降雨变异系数与降雨量、雨强和降雨历时的关系; 利用 GS + 9.0 软件对生长季及展叶和落叶期林内降雨进行半方差函数分析并确定最优函数模型; 利用 ArcGIS10.6 软件进行 Kriging 插值, 并绘制不同时期林内降雨空间分布图。

2 结果分析

2.1 研究期降雨特征

研究期间 (2021 年 6 月 1 日—10 月 31 日) 共观测到 27 次降雨事件, 累积降雨量 572.6 mm,

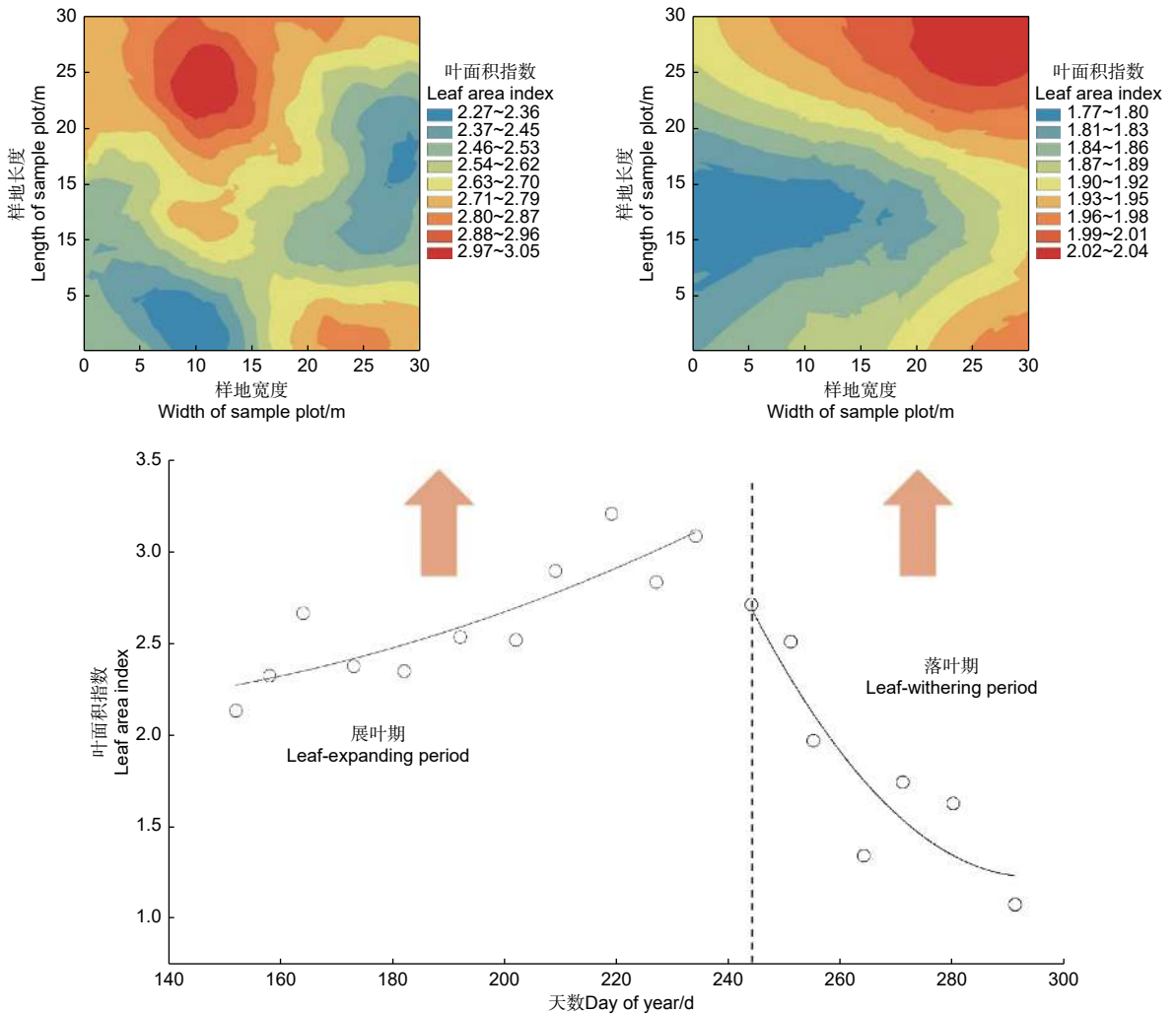


图2 叶面积指数(LAI)的时空变化

Fig. 2 Spatial-temporal variation of leaf area index (LAI)

次降雨量变化范围 0.6~60.7 mm, 平均值 21.2 mm。在展叶期(6—8月), 累积降雨量 210.8 mm, 平均次降雨量 14.1 mm, 次降雨事件以<10 mm 的小雨为主; 在落叶期(9—10月), 累积降雨量 361.8 mm, 平均次降雨量 32.9 mm, 次降雨事件以>20 mm 的中大雨为主(图 3a,b)。

2.2 生长季内不同时期林内降雨特征

研究期间累积观测到林内降雨量 444.0 mm, 占同期林外降雨量的 77.5%。单场降雨事件的林内降雨量平均值(变化范围) 16.4 (0.2~50.0) mm, 在展叶和落叶期, 单场降雨事件的林内降雨量平均值(变化范围)分别为 10.3 (0.2~50.0) 和 24.2 (5.5~48.2) mm(表 2)。林内降雨量占林外降雨量的比重受降雨量影响明显, 随次降雨量增加, 先快速增加, 当次降雨量达到 10 mm 后, 逐渐趋于稳定(图 4a)。林冠叶面积指数对林内

降雨量占林外降雨量的比重的影响受降雨量的影响, 当降雨量级在 0~10 mm 时, 该比重随林冠叶面积指数的增加呈现降低变化; 当降雨量级>10 mm 时, 该比重基本不受林冠叶面积指数的影响(图 5)。

林内降雨量在林内有明显的空间变异, 空间变异系数平均值(变化范围)为 28.23% (11.10%~97.71%), 展叶期平均次降雨事件的林内降雨空间变异系数(36.02%)大于落叶期的(18.45%)。林内降雨量的空间变异受降雨特征的明显影响, 随次降雨量、雨强和降雨历时增加, 均表现为先降低后趋于平稳。其接近平稳的次降雨量、雨强和降雨历时阈值分别为 10 mm、2 mm·h⁻¹ 和 300 min。

2.3 生长季内不同时期林内降雨的空间结构特征

2.3.1 不同时期平均林内降雨量的半方差函数分析

整个生长季及展叶和落叶期林内降雨量平均值

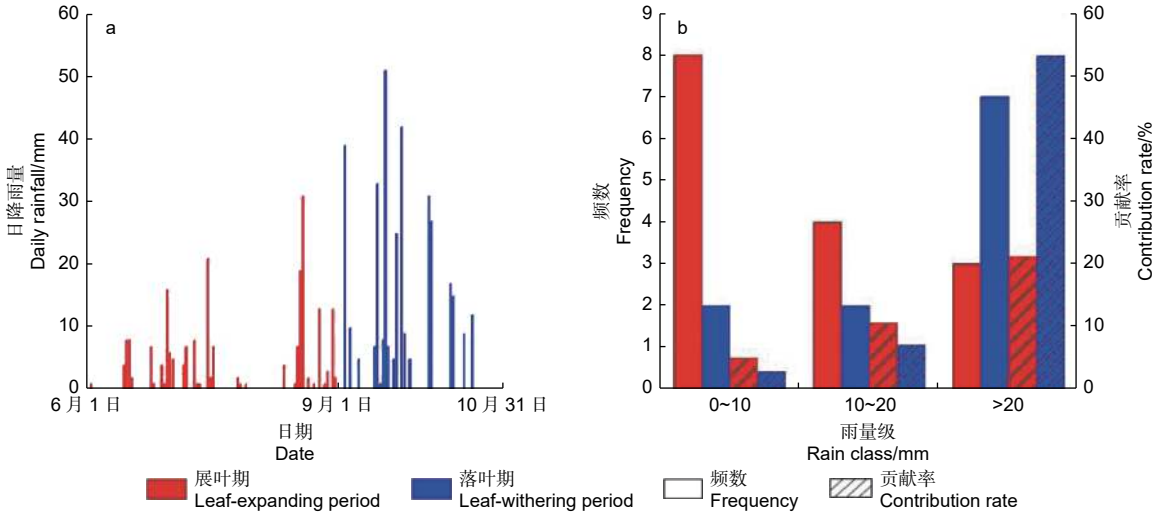


图 3 研究期间的降雨特征

Fig. 3 Characteristics of gross rainfall during the study period

表 2 生长季内不同时期林内降雨特征

Table 2 Characteristics of rainfall depth inside the forest in different periods during the growing season

时期 Period	降雨次数 Rainfall frequency	平均次降雨量 Average rainfall/mm	林内降雨平均值 Average rainfall depth inside the forest/mm	林内降雨最大值 Maximum rainfall depth inside the forest/mm	林内降雨最小值 Minimum rainfall depth inside the forest/mm	林内降雨变异系数 CV of rainfall depth inside the forest/%
展叶期 Leaf-expanding period	15	14.1	10.3	50.0	0.2	36.02
落叶期 Leaf-withering period	12	30.1	24.2	48.2	5.5	18.45
生长季 Growing season	27	21.2	16.4	0.20	50.0	28.23

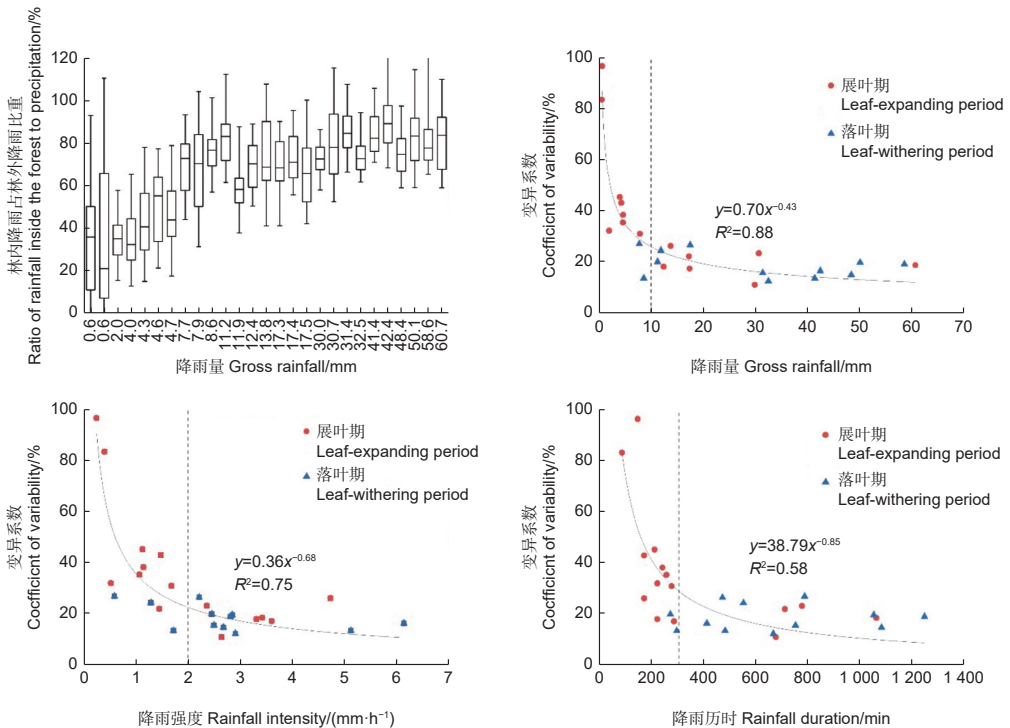


图 4 林内降雨占林外降雨比重的变化及林内降雨变异系数随次降雨量、雨强和降雨历时的变化

Fig. 4 Variation of the ratio of rainfall inside the forest to precipitation and CV variation in rainfall inside the forest with the depth of individual rainfall event, rain intensity and rainfall duration

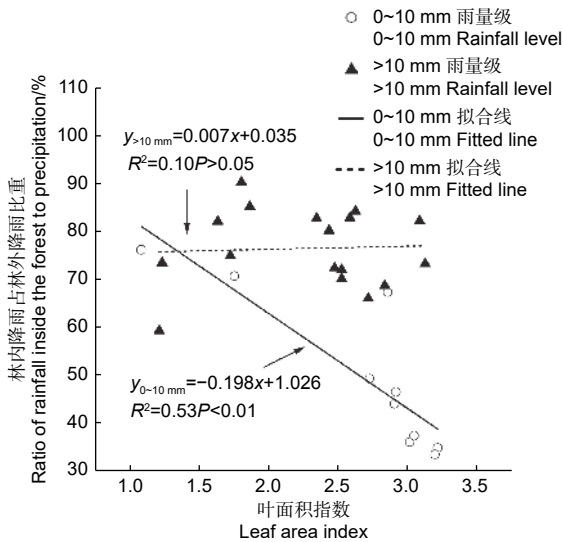


图5 不同雨量级下林内降雨占林外降雨的比重与叶面积指数的关系

Fig. 5 Relationship between the ratio of rainfall inside the forest to precipitation under different rainfall levels

的半方差函数均可用高斯模型表示(表3)。整个生长季林内降雨量的块基比为0.042, 表现为强烈的空间自相关; 展叶和落叶期林内降雨量的块基比为0.012和0.275, 前者表现为强烈空间自相关, 后者为中等强度自相关。从空间自相关范围来看, 整个生长季及展叶和落叶期的变程分别为4.82、3.95和6.53 m, 表明落叶期林内降雨的空间自相关范围较大。

2.3.2 生长季内不同时期平均林内降雨量的空间分布 图6为整个生长季及展叶和落叶期平均林内降雨量的空间分布。整个生长季平均林内降雨量呈点状和带状分布, 但总体表现为上部低、下部高的空间格局。在展叶期, 平均林内降雨量空间分布连续性较差, 点带状分布复杂, 点状区域小而多, 邻近区域差异性明显, 部分点位与周围区域相比较孤立, 样地下部平均林内降雨量明显大于样地上部。在落叶期, 平均林内降雨量空间差异减小, 林内降

雨在样地中部右侧呈明显的聚集效应, 并向样地上下两侧减弱。

2.4 生长季内不同时期林内降雨的合理布设数量

利用 Monte Carlo 模拟抽样法量化在 5% 误差下生长季不同时期所需雨量收集器的合理布设数量(图7)。随雨量收集器数量的增加, 各时期平均林内降雨量的置信区间均逐渐趋于平缓。在 95% 置信区间下, 当雨量收集器数量 ≥ 16 、 ≥ 17 和 ≥ 14 个时, 平均林内降雨量的误差在整个生长季、展叶和落叶期可分别控制在 5% 内。雨量收集器的最少布设数量和林内降雨变异系数在不同时期的变化一致, 表明雨量收集器的最少布设数量与林内降雨空间变异密切相关。

3 讨论

3.1 林内降雨特征及其空间变异

研究期间(2021年6月1日—10月31日)共观测到林内降雨量 444.0 mm, 占同期林外总降雨量的 77.5%, 略低于兴安落叶松(*Larix dahurica* Turcz. ex Trautv.)林的 81.3%^[25]、六盘山华山松林的 84.3%^[26], 高于大兴安岭樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)林的 73.6%^[27]、祁连山青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)林的 75.0%^[28]。除树种特征、植被结构^[22,29]等生物因素的影响外, 非生物因素^[30-31]也对林内降雨占林外降雨的比重有重要影响, 如降雨强度^[31]、雨滴的数量、速度和直径^[32]等。本研究中, 展叶和落叶期林内降雨占林外降雨的比重有差异, 可能与冠层结构和降雨量在两个时期有不同有关, 落叶期冠层叶面积指数小且降雨量大, 因而林内降雨占林外降雨的比重高。

本研究华北落叶松林内降雨变异系数(28.23%)高于温带主要的落叶针叶林(15.9%~22.0%)^[19,33]。除树种组成^[34]、叶片排列方式、冠层结构和厚度^[35]等生物因素影响外, 非生物因素对林内降雨的空间

表3 生长季内不同时期林内降雨的半方差函数模型及其参数

Table 3 Semivariance function models and parameters of rainfall inside the forest in different periods during the growing season

时期 Period	模型类型 Model type	决定系数 R ²	块金值C ₀ Nugget	基台值C ₀ + C Sill	块基比 Nugget/Sill	变程 Range/m
展叶期 Leaf-expanding period	高斯模型 Gaussian model	0.917	0.023	1.951	0.012	3.95
落叶期 Leaf-withering period	高斯模型 Gaussian model	0.923	3.757	13.660	0.275	6.53
生长季 Growing season	高斯模型 Gaussian model	0.896	0.190	4.535	0.042	4.82

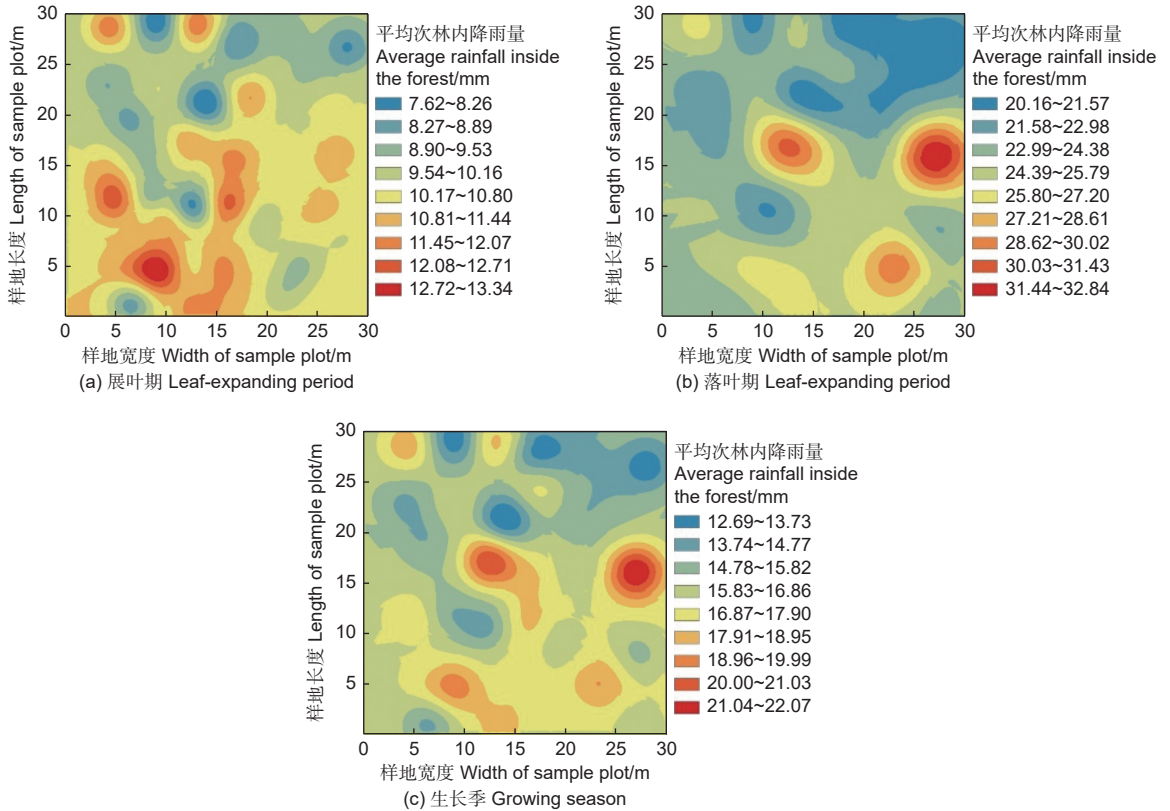


图 6 整个生长季及展叶期和落叶期平均林内降雨量的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of average rainfall inside the forest in the growing season, leaf-expanding and leaf-withering periods

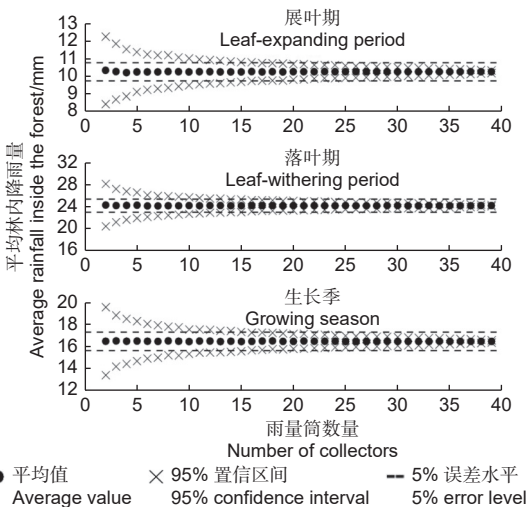


图 7 整个生长季及展叶和落叶期林内降雨平均值和置信区间随雨量收集器数量的变化

Fig. 7 Variation of the mean value and confidence interval of rainfall inside the forest in the growing season, leaf-expanding and leaf-withering periods with the collector sampling size

变异影响也较大, 如林内降雨收集器截面积的大小会影响林内降雨的空间变异^[34], 通常, 林内降雨收集器截面积越大, 林内降雨的空间变异越小^[36], 本

研究使用的林内降雨收集器截面积 (230.58 cm^2) 较小; 另外, 林内降雨空间变异受降雨量、降雨强度和降雨历时等降雨特征的影响^[37], 本研究中也得到, 林内降雨空间变异随降雨量、雨强和降雨历时增加呈幂函数下降的变化。而本研究中平均次降雨量、雨强和降雨历时较小也可能是导致林内降雨变异系数较高的原因。生长季内不同时期林内降雨空间变异也有差异^[20,38], 本研究中, 展叶期林内降雨空间变异大于落叶期。已有研究表明, 在小雨事件下, 冠层叶面积指数显著影响林内降雨量^[39]。冠层叶面积指数的空间变异在展叶期要高于落叶期, 且展叶期以小雨事件为主, 因此, 展叶和落叶期林内降雨空间变异的差异可能是冠层结构和降雨量级共同作用的结果。

多数研究显示, 温带森林林内降雨空间分布的半方差函数可由高斯模型表示^[11,40], 本研究也得到了相似结果。不同气候区和树种林内降雨空间结构有较大差异。如 Bellot^[41] 等发现, 地中海冬青栎林的内降雨无明显的空间结构, 而 Fathizadeh^[42] 等发现, 单株波斯栎 (*Quercus brantii* var. *Persica*) 有叶期林内降雨的空间自相关性距离 ($1 \sim 3 \text{ m}$)

小于无叶期的(5 m)。本研究中, 华北落叶松林内降雨有明显的空间结构, 其空间自相关距离为4.0~6.5 m。空间自相关距离大小主要与林分结构和降雨特征等有关^[11,20]; 另外, 也受林内降雨收集器的布设数量、样地面积等影响^[11,43]。因而, 不同气候区(或树种)林内穿透雨的空间结构相差较大。本研究中, 华北落叶松林内降雨空间分布格局在不同时期也有明显差异, 落叶期林内降雨空间异质性明显低于展叶期, 但总体上均呈点状和带状分布, 这与 Zhang^[30]等的研究结果相近。降雨特征和冠层结构可能是导致展叶和落叶期林内降雨空间变异差异的主要因素。冠层结构空间差异越大, 林内降雨的空间变异越大^[44], 本研究中, 展叶期 LAI 的空间变异高于落叶期(图 2)。但雨量大小也会影响冠层结构对林内降雨的影响, 降雨量大, 冠层结构对林内降雨的影响小, 进而导致林内降雨空间异质性较弱^[45], 如刘泽彬^[19]等研究表明, 当降雨量>20 mm 时, 冠层叶面积指数与林内降雨量不相关。本研究中, 展叶期以<10 mm 的降雨为主, 而落叶期以>20 mm 降雨为主, 表明冠层结构在展叶期对林内降雨空间分布的影响要高于落叶期, 这也是展叶期林内降雨和 LAI 的空间分布格局较为一致的原因。

3.2 林内降雨收集器的合理取样数

林内降雨量具有高度的空间变异性^[46], 因而林内降雨收集器的布设数量将影响林内降雨量的准确评估^[19,41]。Ziegler^[47]等研究发现, 在有限的雨量收集器数量下, 相比固定位置的雨量收集器, 定期改变雨量收集器的位置更能反映林分的林内降雨量。Crockford^[48]等研究发现, 雨量收集器的截面积影响林内降雨量的准确评估, 要达到相同的林内降雨评估精度, 雨量收集器截面积越小, 布设数量要求越多。受植被类型、冠层结构等影响, 不同研究得到的林内降雨收集器合理布设数量有较大差异, 如在 95% 置信区间下, 若要将林内降雨评估误差控制在 10% 内, Fathizadeh^[42]等研究的波斯栎树林需布设 29 个雨量收集器, 而 Rodrigo^[21]等研究的冬青栎林则需布设 9 个雨量收集器。即使同一林分, 不同降雨量级下雨量收集器的合理布设数量也有差异, 如刘泽彬^[19]等得到, 在 95% 置信水平下, 当降雨量级在 0~10 mm 和>10 mm 时, 分别至少布设 26 和 15 个雨量收集器才能够将林内降雨评估误差控制在 5% 以内。雨量收集器的合理

布设数量与林内降雨的空间变异密切相关, 受降雨特征和冠层叶面积指数空间差异等影响, 不同时期华北落叶松林内降雨的空间变异不同, 导致其雨量收集器的合理取样数量不同; 在展叶期(95% 置信水平下), 若要将林内降雨评估误差控制在 5% 以内, 至少需要 17 个雨量收集器; 而在落叶期, 若要将林内降雨评估误差控制在 5% 以内, 至少需要 14 个雨量收集器。因此, 生长季内雨量收集器合理布设数量需考虑不同时期林内降雨的空间变异差异引起的雨量收集器合理布设数量的变化。本研究中, 若要将林内降雨评估误差控制在 5% 以内, 至少需布设 17 个以上的雨量收集器, 而不是基于整个生长季平均林内降雨量得到的 16 个雨量收集器。尽管雨量收集器的合理布设数量也与其截面积大小有关, 但由于林内降雨具有空间自相关性(本研究林内降雨的空间自相关距离在 4.0~6.5 m), 因此, 雨量收集器截面积小范围内的变化不会对林内降雨评估精度产生较大影响^[49], 本研究中量化生长季雨量收集器数量的方法和结果可供本研究区及相似地区林分提供参考。

4 结论

(1) 降雨特征影响华北落叶松林内降雨的空间变异, 随次降雨量、雨强和降雨历时的增加, 林内降雨空间变异呈下降的幂函数变化。

(2) 受降雨特征和冠层结构的影响, 展叶期林内降雨空间变异大于落叶期的, 其中, 在展叶期为强烈空间自相关, 在落叶期为中等强度自相关。

(3) 生长季内不同时期林内降雨空间变异的不同导致雨量收集器合理布设数量有差异, 要确保整个生长季林内降雨评估的准确性, 应考虑雨量收集合理布设数量在不同时期的差异。

参考文献:

- [1] 乔文静. 人工刺槐林降雨再分配特征与土壤养分及结构稳定性的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [2] ZHANG J, LIU S, LIU C, et al. Different mechanisms underlying divergent responses of autotrophic and heterotrophic respiration to long-term throughfall reduction in a warm-temperate oak forest[J]. *Forest Ecosystems*, 2021, 8(1): 1-11.
- [3] 姜 勇. 森林生态系统微量元素循环及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 197-204.
- [4] STAN J T V, HILDEBRANDT A, FRIESEN J, et al. Spatial vari-

- ability and temporal stability of local net precipitation patterns[J]. *Precipitation Partitioning by Vegetation*, 2020: 89-104.
- [5] SU L, ZHAO C, XU W, *et al.* Hydrochemical fluxes in bulk precipitation, throughfall, and stemflow in a mixed evergreen and deciduous broadleaved forest[J]. *Forests*, 2019, 10(6): 507.
- [6] GUSWA A J, SPENCE C M. Effect of throughfall variability on recharge: application to hemlock and deciduous forests in western Massachusetts[J]. *Ecohydrology*, 2012, 5(5): 563-574.
- [7] NANKO K, ONDA Y, ITO A, *et al.* Variability of surface runoff generation and infiltration rate under a tree canopy: indoor rainfall experiment using Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*)[J]. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2010, 24(5): 567-575.
- [8] VEGA J, FERNÁNDEZ C, FONTURBEL T. Throughfall, runoff and soil erosion after prescribed burning in gorse shrubland in Galicia (NW Spain)[J]. *Land Degradation & Development*, 2005, 16(1): 37-51.
- [9] HE Z-B, YANG J-J, DU J, *et al.* Spatial variability of canopy interception in a spruce forest of the semiarid mountain regions of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 188: 58-63.
- [10] ZIMMERMANN A, WILCKE W, ELSENBEEER H. Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador[J]. *Journal of hydrology*, 2007, 343(1-2): 80-96.
- [11] KEIM R F, SKAUGSET A E, WEILER M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 314(1-4): 263-274.
- [12] VRUGT J A, DEKKER S C, BOUTEN W. Identification of rainfall interception model parameters from measurements of throughfall and forest canopy storage[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(9): 1-10.
- [13] TANAKA N, LEVIA D, IGARASHI Y, *et al.* Throughfall under a teak plantation in Thailand: a multifactorial analysis on the effects of canopy phenology and meteorological conditions[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2015, 59(9): 1145-1156.
- [14] WEI X, BI H, LIANG W. Factors controlling throughfall in a *Pinus tabulaeformis* forest in North China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-10.
- [15] RAAT K, DRAAIJERS G, SCHAAP M, *et al.* Spatial variability of throughfall water and chemistry and forest floor water content in a Douglas fir forest stand[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(3): 363-374.
- [16] KOWALSKA A, BOCZOŃ A, HILDEBRAND R, *et al.* Spatial variability of throughfall in a stand of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) with deciduous admixture as influenced by canopy cover and stem distance[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 538: 231-242.
- [17] KATO H, ONDA Y, NANKO K, *et al.* Effect of canopy interception on spatial variability and isotopic composition of throughfall in Japanese cypress plantations[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 504: 1-11.
- [18] LIU J, LIU W, LI W, *et al.* How does a rubber plantation affect the spatial variability and temporal stability of throughfall?[J]. *Hydrology Research*, 2019, 50(1): 60-74.
- [19] 刘泽彬, 王彦辉, 邓秀秀, 等. 六盘山华北落叶松林下穿透雨空间变异特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3471-3481.
- [20] CISNEROS VACA C, GHIMIRE C P, VAN DER TOL C. Spatial patterns and temporal stability of throughfall in a mature douglas-fir forest[J]. *Water*, 2018, 10(3): 317.
- [21] RODRIGO A, AVILA A. Influence of sampling size in the estimation of mean throughfall in two Mediterranean holm oak forests[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 243(3-4): 216-227.
- [22] 邓文平, 郭锦荣, 邹 芹, 等. 庐山日本柳杉林下穿透雨时空分布特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(6): 2428-2438.
- [23] 刘泽彬, 王彦辉, 田 奥, 等. 六盘山半湿润区坡面华北落叶松林冠层截留的时空变化及空间尺度效应[J]. *水土保持学报*, 2017(5): 231-239.
- [24] MATHERON G. *Traité de géostatistique appliquée*[M]. Paris: Editions Technip, 1962.
- [25] SHENG H, CAI T. Spatial variability of throughfall in a larch (*Larix gmelinii*) forest in Great Kingan Mountain, Northeastern China[J]. *Forests*, 2021, 12(4): 393.
- [26] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山华山松(*Pinus armandii*)林降雨再分配及其空间变异特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 76-85.
- [27] 李 奕, 蔡体久, 满秀玲, 等. 大兴安岭地区天然樟子松林降雨截留再分配特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 40-44.
- [28] 万艳芳, 刘贤德, 王顺利, 等. 祁连山青海云杉林冠降雨再分配特征及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 224-229.
- [29] 段文标, 刘少冲, 陈立新. 莲花湖库区水源涵养林水文效应的研究[J]. *水土保持学报*, 2005(5): 28-32.
- [30] ZHANG H-X, WU H-W, LI J, *et al.* Spatial-temporal variability of throughfall in a subtropical deciduous forest from the hilly regions of eastern China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(8): 1788-1801.
- [31] 刘少冲, 段文标, 陈立新. 莲花湖库区几种主要林型水文功能的分析和评价[J]. *水土保持学报*, 2007(1): 79-83.
- [32] ZABRET K, RAKOVEC J, ŠRAJ M. Influence of meteorological variables on rainfall partitioning for deciduous and coniferous tree species in urban area[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 29-41.
- [33] SIEGERT C, LEVIA D, HUDSON S, *et al.* Small-scale topographic variability influences tree species distribution and canopy throughfall partitioning in a temperate deciduous forest[J].

- Forest Ecology and Management, 2016, 359: 109-117.
- [34] LEVIA JR D F, FROST E E. Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems[J]. Progress in Physical Geography, 2006, 30(5): 605-632.
- [35] 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[J]. 林业科学研究, 2016, 29 (5): 752-758.
- [36] ZUECCO G, OLIVIERO O, PENNA D, *et al.* Spatial and temporal variability of throughfall at the plot scale in the Italian pre-Alps[C]. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014: 12563.
- [37] ZHU X, HE Z, DU J, *et al.* Spatial heterogeneity of throughfall and its contributions to the variability in near-surface soil water-content in semiarid mountains of China[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 488: 119008.
- [38] STAELENS J, DE SCHRIJVER A, VERHEYEN K, *et al.* Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover[J]. Journal of hydrology, 2006, 330(3-4): 651-662.
- [39] FANG S, ZHAO C, JIAN S. Spatial variability of throughfall in a *Pinus tabulaeformis* plantation forest in Loess Plateau, China[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2016, 31(5): 467-476.
- [40] LOUSTAU D, BERBIGIER P, GRANIER A, *et al.* Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy[J]. Journal of Hydrology, 1992, 138(3-4): 449-467.
- [41] BELLOT J, ESCARRE A. Stemflow and throughfall determination in a resprouted Mediterranean holm-oak forest[C]. Annales des sciences forestières, 1998: 847-865.
- [42] FATHIZADEH O, SADEGHI S M M, PAZHOUHAN I, *et al.* Spatial variability and optimal number of rain gauges for sampling throughfall under single oak trees during the leafless period[J]. Forests, 2021, 12(5): 585.
- [43] VOSS S, ZIMMERMANN B, ZIMMERMANN A. Detecting spatial structures in throughfall data: The effect of extent, sample size, sampling design, and variogram estimation method[J]. Journal of Hydrology, 2016, 540: 527-537.
- [44] DEGUCHI A, HATTORI S, PARK H-T J J O H. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: application of the revised Gash model[J]. Journal of Hydrology, 2006, 318(1-4): 80-102.
- [45] SHI Z, WANG Y, XIONG W, *et al.* The spatial heterogeneity of throughfall under *Larix principis-rupprechtii* single tree's canopy[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2877-2886.
- [46] KIMMINS J. Some statistical aspects of sampling throughfall precipitation in nutrient cycling studies in British Columbian coastal forests[J]. Ecology, 1973, 54(5): 1008-1019.
- [47] ZIEGLER A D, GIAMBELLUCA T W, NULLET M A, *et al.* Throughfall in an evergreen-dominated forest stand in northern Thailand: Comparison of mobile and stationary methods[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(2): 373-384.
- [48] CROCKFORD R, RICHARDSON D. Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia: I Throughfall measurement in a eucalypt forest: effect of method and species composition[J]. Hydrological Processes, 1990, 4(2): 131-144.
- [49] ZIMMERMANN B, ZIMMERMANN A, LARK R M, *et al.* Sampling procedures for throughfall monitoring: a simulation study[J]. Water Resources Research, 2010, 46(1): W01503.

Spatial Heterogeneity and Reasonable Sampling Sizes of Rainfall In a *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (Mayr) Pilg. Plantation in the Semi-humid Liupan Mountains

CHAO Yang^{1,2}, YU Song-ping^{1,2}, LIU Ze-bin², MA Xin¹, GUO Jian-bin¹, WANG Yan-hu²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Institute of Forest Ecology, Environment and Nature Conservation, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] Spatial heterogeneity of rainfall in the forest has an important impact on soil moisture and growth of understory vegetation. Therefore, accurately describing the spatial variability of rainfall in the forest under the forest canopy and determining the reasonable sampling sizes are helpful to accurately understand the impact of forest on hydrology. [Method] A *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (Mayr) Pilg. plantation in the Xiangshuihe small watershed of the semi-humid Liupan Mountain was set up to collect the rainfall in the forest for each rainfall event based on 40 deployed collectors during the growing season (June-Oct.) of 2021. The spatial variabilities of rainfall in the forest during the leaf-expanding and leaf-withering periods were analyzed, and the reasonable sampling sizes of collectors were quantified. [Result] (1) During the growing season, the total rainfall depth inside the forest was 440.0 mm, accounting for 77.5% of the corresponding gross rainfall, and the coefficient of variation of rainfall in the forest was 28.23%. The total rainfall in the forest was 153.8 and 290.2 mm during the leaf-expanding and leaf-withering periods, accounting for 73.0% and 80.2% of the corresponding gross rainfall, and the coefficient of variation of rainfall in the forest was 36.0% and 18.5%, respectively. In general, the spatial variability of rainfall in the forest first decreased rapidly and then gradually stabilized with the increase of rainfall, rainfall intensity and rainfall duration. (2) The nugget/still (range) of rainfall in the forest was 0.042 (4.8 m) in the growing season, 0.012 (4.0 m) in leaf-expanding period and 0.275 (6.5 m) in leaf-withering period, respectively. (3) Within the 95% confidence interval, if the error is controlled within 5%, at least 17 and 14 collectors with a sectional area of 235.58 cm² should be installed in the leaf-expanding and leaf-withering periods, respectively. [Conclusion] Affected by differences in rainfall and canopy structure, the spatial variability of rainfall in the forest varies between leaf-expanding and leaf-withering periods. The reasonable sampling sizes of collectors in leaf-expanding and leaf-withering periods are closely related to the spatial variability of rainfall in the forest. The impact of the difference in reasonable sampling sizes of collectors in different periods should be paid attention to ensure the accuracy in rainfall in the forest assessment during the whole growing season.

Keywords: *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (Mayr) Pilg. plantation; rainfall in the forest; spatial heterogeneity; reasonable sampling size

(责任编辑: 崔 贝)