

DOI: 10.5846/stxb201803130491

赵赫, 文志, 刘艳秋, 郑华, 欧阳志云. 槟榔林冠穿透雨空间格局的时间稳定性. 生态学报, 2020, 40(6): 1967-1976.

Zhao H, Wen Z, Liu Y Q, Zheng H, Ouyang Z Y. Temporal stability of throughfall pattern in areca plantation. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1967-1976.

## 槟榔林冠穿透雨空间格局的时间稳定性

赵 赫<sup>1,2</sup>, 文 志<sup>1,2</sup>, 刘艳秋<sup>3</sup>, 郑 华<sup>1,2,\*</sup>, 欧阳志云<sup>1,2</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 北京大学环境科学与工程学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871

**摘要:** 槟榔林是热带地区广泛种植典型经济林, 独特的树冠结构改变了穿透雨的空间格局, 但针对穿透雨空间格局的时间稳定性研究很少, 影响对穿透雨生态效应的认识与调控。以海南岛槟榔林为研究对象, 基于 33 场降雨数据, 研究了穿透雨的空间格局及时间特性, 结果显示: (1) 槟榔树冠内不同位置穿透雨差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 穿透雨率分别为: 树干附近 (85.6%)、冠幅中央 (48.3%)、冠幅边缘 (59.8%), 穿透雨空间格局表现为向树干附近汇集的特点; 不同方位的穿透雨率仅东面显著高于南面 ( $P < 0.1$ ), 表明风向对穿透雨空间格局具有一定影响。(2) 槟榔树冠下各位点穿透雨时间变异程度大 (65.7%), 但槟榔树冠幅中央穿透雨时间稳定性较好 (55.6%), 而树干旁边和冠幅边缘穿透雨时间稳定性较差 (25%、19.4%), 各方位穿透雨的时间稳定性相差不大 (约 1/3)。(3) 距树干距离和降雨量影响穿透雨的时间稳定性, 距树干不同距离平均叶片倾斜角度的差异是造成穿透雨在时间上不稳定的关键因素, 平均叶片倾斜角度与穿透雨时间不稳定程度呈现显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ); 穿透雨时间稳定性在中等降雨条件下最差, 随着降雨量增加, 冠层对穿透雨的“屏蔽效应”减弱, “滴水效应”增加。揭示槟榔植株个体穿透雨的空间格局及时间稳定性, 可为认识乔木个体尺度穿透雨时空特征提供参考, 也可解释林地小尺度土壤水分和土壤侵蚀的空间格局及时间动态提供依据。

**关键词:** 穿透雨; 空间格局; 空间异质性; 时间稳定性; 槟榔

## Temporal stability of throughfall pattern in areca plantation

ZHAO He<sup>1,2</sup>, WEN Zhi<sup>1,2</sup>, LIU Yanqiu<sup>3</sup>, ZHENG Hua<sup>1,2,\*</sup>, OUYANG Zhiyun<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract:** Areca plantation, as a typical economic forest, is widely distributed in the tropical areas. Its unique canopy structure alters the spatial pattern of throughfall, which further influences the hydrogeological processes and results to different ecological effects, such as soil erosion. However, available information is limited on how the areca plantation changes the spatial pattern and the temporal stability of throughfall. Here the spatio-temporal variation of throughfall was observed under 33 rainfall events in areca plantation in Hainan Island. We found that throughfall changed significantly with locations under canopy of areca plantation ( $P < 0.01$ ). The throughfall rate was different near the trunk (85.6%), in the center of canopy (48.3%), and at the edge of canopy (59.8%). The location near the trunk had the highest throughfall. The throughfall rate in the east of the trunk was significantly higher than that in the south ( $P < 0.1$ ), indicating that wind also impacted the spatial pattern of throughfall. In addition, The throughfall of different locations under the canopy of areca plantation presented high variability over time (65.7%). However, the throughfall in the center of canopy was relatively stable over time (55.6%), while it had poor temporal stability near the trunk (25%) and at the edge of canopy (19.4%).

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0503401)

收稿日期: 2018-03-13; 修订日期: 2019-02-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenghua@rcees.ac.cn

Small differences (about 1/3) of temporal stability in throughfall among different directions were observed. The distance from the trunk and the rainfall were the main factors affecting the temporal stability of throughfall. Furthermore, the former influenced the temporal stability of throughfall mainly through leaf angle. The mean angles of leaves were negatively correlated with the temporal stability of throughfall ( $P < 0.05$ ). The temporal stability of throughfall was the weakest under moderate rainfall. With the increase of rainfall, the “wetting effect” of the canopy decreased, and the “drying effect” increased. The above results improved our understanding how tree species impact the temporal and spatial patterns of throughfall, which could also help to explain the spatio-temporal dynamics of soil moisture and soil erosion at small scale in plantation ecosystems.

**Key Words:** throughfall; spatial pattern; spatial variability; temporal stability; areca

降雨经过林冠被分配为穿透雨、树干流和冠层截留三部分<sup>[1]</sup>,其中穿透雨是降雨通过冠层间隙或经过冠层复杂结构滴落到地面的部分<sup>[2]</sup>,是林下降雨的重要组成部分。穿透雨既影响土壤水分和土壤侵蚀的空间格局,也通过淋洗冠层元素<sup>[3]</sup>,改变了林下土壤营养盐的含量及其空间格局,进而影响地表径流的流量和水质,是森林水文研究中的一个重要参数<sup>[4]</sup>;树干流占降雨量很少一部分,通常被忽略<sup>[5]</sup>;冠层截留是降雨暂时储存在冠层中并在降雨事件中和之后蒸发掉的部分<sup>[6]</sup>,是森林生态系统水土保持功能的一项重要指标,评估冠层截留量需要精确计算穿透雨<sup>[7]</sup>,然而穿透雨的空间异质性给评估工作带来困难,因此,穿透雨空间格局和空间变异性是森林水文研究中的关键<sup>[8]</sup>。

大量研究表明穿透雨的空间特性是由冠层厚度、叶面积指数、树高、叶片角度和形状以及降雨量和风向共同决定的,例如 Siegert 发现温带落叶林穿透雨的空间异质性是冠层厚度和叶面积指数造成的,随着冠层厚度和叶面积指数的增加,穿透雨逐渐降低<sup>[9]</sup>;Seyed 发现植株高度较高时,冠层粗糙度大,使冠层截留的水更容易蒸发损失掉,导致穿透雨减少<sup>[10]</sup>;Philippe 发现香蕉叶片角度较大时,会使穿透雨转化为树干流,大而水平的叶片会暂时储存雨水,增加穿透雨的空间异质性<sup>[11]</sup>;Patrick 发现在冠层迎风面由于风吹落冠层储水而穿透雨较多,在背风面形成穿透雨影区<sup>[12]</sup>。然而这些结论都假设穿透雨空间格局在每场降雨事件中总是固定的,忽视了冠层结构的时间动态和各观测位点穿透雨在每场降雨事件中的差异<sup>[13]</sup>。如果穿透雨的空间格局是时间稳定的,那么将会对土壤水分、元素含量和土壤侵蚀的空间格局及时间动态产生深远影响,然而这方面的研究还较少。

槟榔林是热带雨林地区主要的经济林木,近年来随着南药的开发和人们对槟榔果的喜爱<sup>[14]</sup>,其种植面积不断扩张,大量热带雨林或次生林逐渐被槟榔林取代<sup>[15]</sup>。槟榔林由于群落组成简单,冠层结构单一,使林下穿透雨及其空间格局发生重大变化,对土壤水分和元素含量、土壤侵蚀和地表径流产生深远影响<sup>[16]</sup>,尤其在上游水源地地区,穿透雨空间格局的变化将影响河流水质和水量,对下游水源供给服务和生态安全等产生深远影响<sup>[17]</sup>,然而针对槟榔林穿透雨及其时空特性的研究目前还很薄弱。为此,本文以海南岛中部山区水源地地区的槟榔林为研究对象,采用长期定位监测方法,基于次降雨数据,探讨槟榔个体植株穿透雨的空间分布规律,并分析这种空间格局是否具有时间稳定性,为认识槟榔个体尺度水文特征及相关水文模型的开发提供参考,也为解释槟榔林地小尺度土壤水分和土壤侵蚀的空间格局及时间动态提供依据。

## 1 研究地概况与研究方法

### 1.1 研究地概况

研究地位于海南岛中部山区的白沙彝族自治县、鹦哥岭国家级自然保护区的实验区内(109°31'E; 19°04'N),该区域是海南岛第一大河流南渡江和第二大河流昌化江的主要发源地,其水文功能地位十分重要。气候类型为热带海岛季风气候,年平均气温 21.5—28.5℃,年平均相对湿度 83%。一年分为干季和湿季,干季为 11 月到次年 4 月,湿季为 5—10 月,降水主要集中在 7—9 月,多年平均降雨量 1607 mm,次平均降雨量为 15.5 mm,降雨事件中的主导风向为东南风,降雨量以 0—20 mm 范围为主(图 1)。

## 1.2 穿透雨观测方法

在研究区内选取一块具有代表性的槟榔林样地,在样地内随机选取 9 棵树作为研究对象(表 1)。由于槟榔林内植株间距较大,彼此间冠幅相互独立不重叠,为精细地刻画槟榔林个体尺度穿透雨的时空特征,分别在每棵树的 4 个方位角上(东、南、西、北),根据每棵树的冠幅大小,在树干旁边(1/3 冠幅)、冠幅中央(2/3 冠幅)和冠幅边缘(3/3 冠幅)放置自制雨量筒,分别测量树干不同方向树干旁边、冠幅中央和冠幅边缘的穿透雨,整个样地共放置了 108 个雨量筒。每次降雨事件结束后,用量筒量取雨量筒内的穿透雨体积。雨量筒桶高 35 cm,开口直径 20 cm,为避免蒸发损失,在桶上加盖直径为 21 cm 漏斗,在每次测量后保持漏斗水平放置。为避免雨滴激溅的影响,桶口距地面高度为 50 cm。从 2016 年 8 月 6 日到 2017 年 8 月 7 日,共记录了 33 场降雨事件,降雨量信息如图 2。

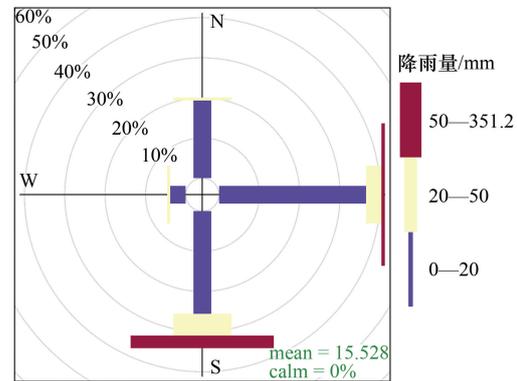


图 1 研究区降雨-风向关系图

Fig. 1 Relationship between rainfall and wind direction in the study area

表 1 槟榔植株个体特征

Table 1 Betel nut plants individual characteristics

植株编号 Tree ID	林龄 Forest age/a	树高 Tree height/m	胸径 Breast diameter/cm	冠幅 Crown width/cm	林分密度 Stand density/ (株/hm <sup>2</sup> )	冠层郁闭度 Canopy closure
1	12	5.91	12.92	175.6	1900	52.12
2	12	4.64	10.81	173.6	1900	83.11
3	12	5.81	10.84	178.6	1900	72.21
4	12	5.93	12.93	172.8	1900	72.73
5	12	5.42	10.86	173.0	1900	55.94
6	12	5.91	10.89	177.6	1900	65.92
7	12	5.03	12.24	179.6	1900	68.44
8	12	5.23	10.87	185.5	1900	69.61
9	12	6.02	13.41	187.5	1900	54.16

## 1.3 冠层结构数据获取

利用植物冠层仪(LAI-2000)测量每个观测点正上方的叶面积指数、叶片倾斜角度,具体方法如下:为精确测量每个观测点正上方的叶面积指数和叶片倾斜角度,选择 15° 镜盖在林外空旷地记下 X 值,进入林内在观测点处记下 Y 值,利用植物冠层仪计算并读取该观测点的叶面积指数(LAI)和叶片倾斜角度(MTA),并平行观测 3 次,取其平均值作为该观测点的观测值。利用激光/超声波树木测高测距仪(Haglof Vertex Laser 5)测量每个观测点正上方的冠层厚度。利用鱼眼相机拍摄每个观测点正上方的冠层图片,经过图像处理软件计算冠层郁闭度。每个观测点平行观测 3 次,其平均值作为该观测点的观测值(表 2)。

## 1.4 穿透雨时间稳定性

Keim 首次利用时间稳定性图(Time stability plots)对穿透雨空间格局的时间稳定性进行分析<sup>[18]</sup>。假定数据是正态分布的,对数据进行标准化处理后,计算各观测点标准化处理后穿透雨的均值和标准差,然后将标准化穿透雨的均值按照从小到大的顺序绘制时间稳定性图,误差棒为±标准差。数据标准化的公式如下:

$$TFS_{ij} = \frac{TF_{ij} - \text{Mean}_j}{Sd_j} \quad (2)$$

式中,TFS<sub>ij</sub>为标准化后观测点*i*在降雨事件*j*中的穿透雨,TF<sub>ij</sub>为观测点*i*在降雨事件*j*的穿透雨;Mean<sub>j</sub>为降雨事件*j*中穿透雨的均值;Sd<sub>j</sub>为降雨事件*j*下穿透雨的标准差。

时间稳定性图反映了两种时间稳定性:第一种为极端稳定性(“extreme persistence”):标准化穿透雨的均值位于样本四分位以外,位于上四分位的点意味着非常干的状态(“屏蔽效应”),位于下四分位的点意味着非常湿的状态(“滴水效应”);第二种为一般稳定性(“general persistence”):标准化穿透雨的均值位于样本四分位以内,表明这些观测点只比总体平均状态干或湿。误差棒的长短反映了时间不稳定程度,误差棒越长,表示该点的时间稳定性较差,反之亦然;但是如果误差棒与零轴相交,则此位点的穿透雨在时间上是不稳定的<sup>[19]</sup>。

Zimmermann 等发现穿透雨的数据往往不是正态分布的,在数据标准化时应当利用更加稳健的统计量中位数(Median)和绝对中位差(Median absolute deviation, MAD)<sup>[20]</sup>。数据标准化的公式如下:

$$TFS_{ij} = \frac{TF_i - Median_j}{MAD_j} \quad (3)$$

式中,  $TFS_{ij}$  为标准化后观测点  $i$  在降雨事件  $j$  下的穿透雨,  $TF_{ij}$  为观测点  $i$  在降雨事件  $j$  的穿透雨;  $Median_j$  为降雨事件  $j$  下穿透雨的中位数;  $MAD_j$  为降雨事件  $j$  下穿透雨的绝对中位差。

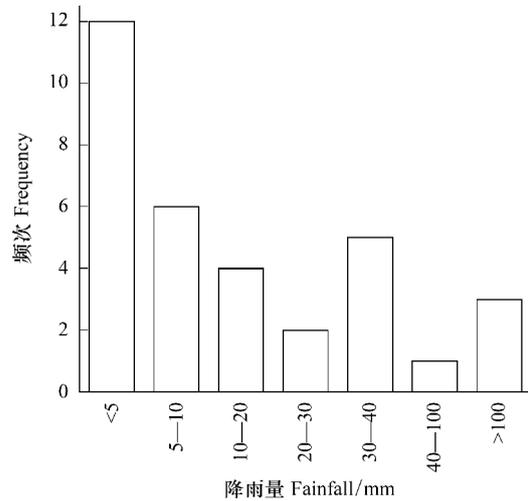


图2 研究期间降雨量分布特征

Fig.2 Characteristics of rainfall distribution during the study

表2 槟榔冠层空间特征

Table 2 Spatial characteristics of areca canopy

位置 Position	冠层厚度 Canopy thickness/m	郁闭度 Canopy density/%	叶面积指数 Leaf area index	平均叶片倾斜角度 Mean leaf tilt angle/(°)
树干附近 Near the trunk	1.73±0.39	65.5±9.35	3.48±0.76	45.7±3.53
冠幅中央 Crown center	1.72±0.31	65.3±9.55	4.40±0.59	38.4±3.23
冠幅边缘 Crown edge	1.70±0.36	65.2±9.98	3.11±0.62	49.6±3.80
树干东侧 East of the trunk	1.73±0.33	66.0±10.20	3.60±0.80	43.3±3.14
树干南侧 South of the trunk	1.73±0.35	64.2±8.11	3.22±0.82	44.6±2.54
树干西侧 West of the trunk	1.72±0.34	66.7±9.29	3.18±0.76	44.5±3.62
树干北侧 North of the trunk	1.73±0.40	65.0±11.5	3.22±0.78	43.7±3.54

Q-Q 图(Normal Q-Q Plot),也称分位数-分位数图,可以判别数据是否服从正态分布,如果样本服从正态分布,则其数据点会落在直线上,否则,不服从正态分布。本文在进行数据标准化前利用 Q-Q 图判别出数据不服从正态分布(图3),因此采用公式3进行数据标准化。

### 1.5 统计分析

利用 R 语言(3.4.2)的“dplyr”包对数据进行规整和统计分析,利用“ggplot2”、“ggpubr”和“openair”包进行可视化。

## 2 结果

### 2.1 穿透雨空间格局

槟榔树冠内不同位置穿透雨差异显著( $P < 0.01$ ),穿透雨率分别为:树干附近(85.6%)、冠层中央(48.3%)、冠层边缘(59.8%),穿透雨空间格局表现为向树干

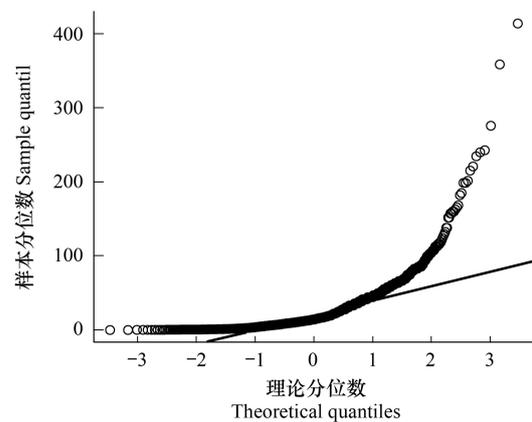


图3 Q-Q 图

Fig.3 Q-Q diagram

汇集的特点(图 4);不同方位的穿透雨彼此间差异不显著,穿透雨率分别为:东(80.5%)、南(56.3%)、西(60.9%)、北(68.1%),穿透雨在东面最多,表明风对穿透雨空间格局具有一定影响(图 4)。

### 2.2 穿透雨时间稳定性特征

根据 108 个位点的时间稳定性图(图 5),标准化穿透雨上、下四分位数分别为 0.92、-0.14,共有 32 个位点具有极端稳定性,只有 5 个位点具有一般稳定性。表明槟榔树冠下大多数位点穿透雨时间变异程度大(65.7%)。

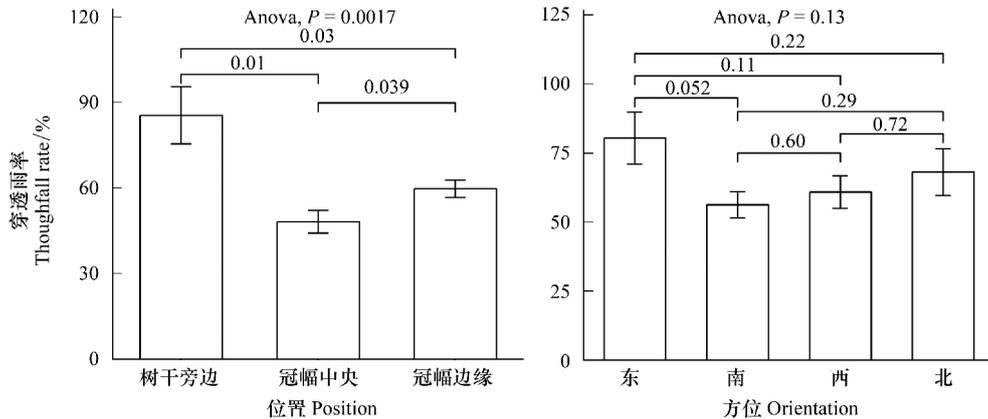


图 4 槟榔植株穿透雨空间格局  
Fig.4 Spatial pattern of throughfall under areca plant

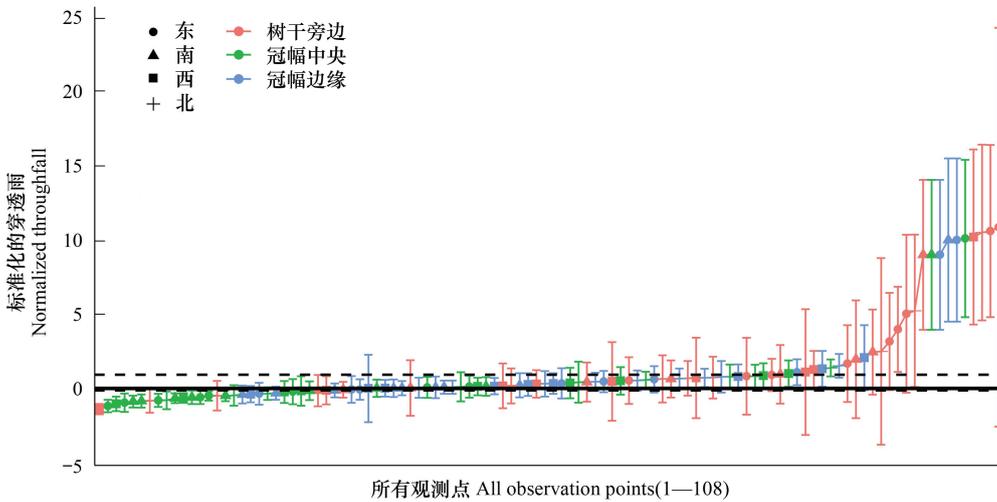


图 5 基于所有位点的时间稳定性图  
Fig.5 The time stability plots based on all sites  
注:虚线为上、下四分位线

在观测到的 108 个位点中,树干旁边、冠幅中央、冠幅边缘各有 36 个位点,其中,树干旁边具有时间稳定性的位点仅占四分之一(25%),冠幅中央有超过一半的位点具有时间稳定性(55.6%),冠幅边缘具有时间稳定性的位点只占 19.4%,表明槟榔树冠幅中央穿透雨时间稳定性较好,而树干旁边和冠幅边缘穿透雨时间稳定性较差。

在观测到的 108 个位点中,四个方位角上各有 27 个位点,具有时间稳定性的位点分别只占约 1/3:东(40.7%)、南(29.6%)、西(29.6%)、北(33.3%),表明各方位穿透雨的时间稳定性相差不大。

### 2.3 穿透雨时间稳定性影响因素

#### 2.3.1 距树干距离对穿透雨时间稳定性的影响

树干旁边一共有 36 个点,只有 9 个位点是时间稳定的(25%),其中具有“滴水效应”的占 77.8%,具有

“屏蔽效应”的占 22.2%,表明槟榔树树干旁边对穿透雨是不稳定的“滴水效应”。冠幅中央一共有 36 个点,有 20 个位点是时间稳定的(66.7%),其中具有“滴水效应”的占 35%,具有“屏蔽效应”的占 65%,表明槟榔树冠幅中央对穿透雨是稳定的“屏蔽效应”。冠幅边缘一共有 36 个点,只有 7 个位点是时间稳定的(19.4%),且全部为“滴水效应”,表明槟榔树冠幅边缘对穿透雨是不稳定的“滴水效应”(图 6)。

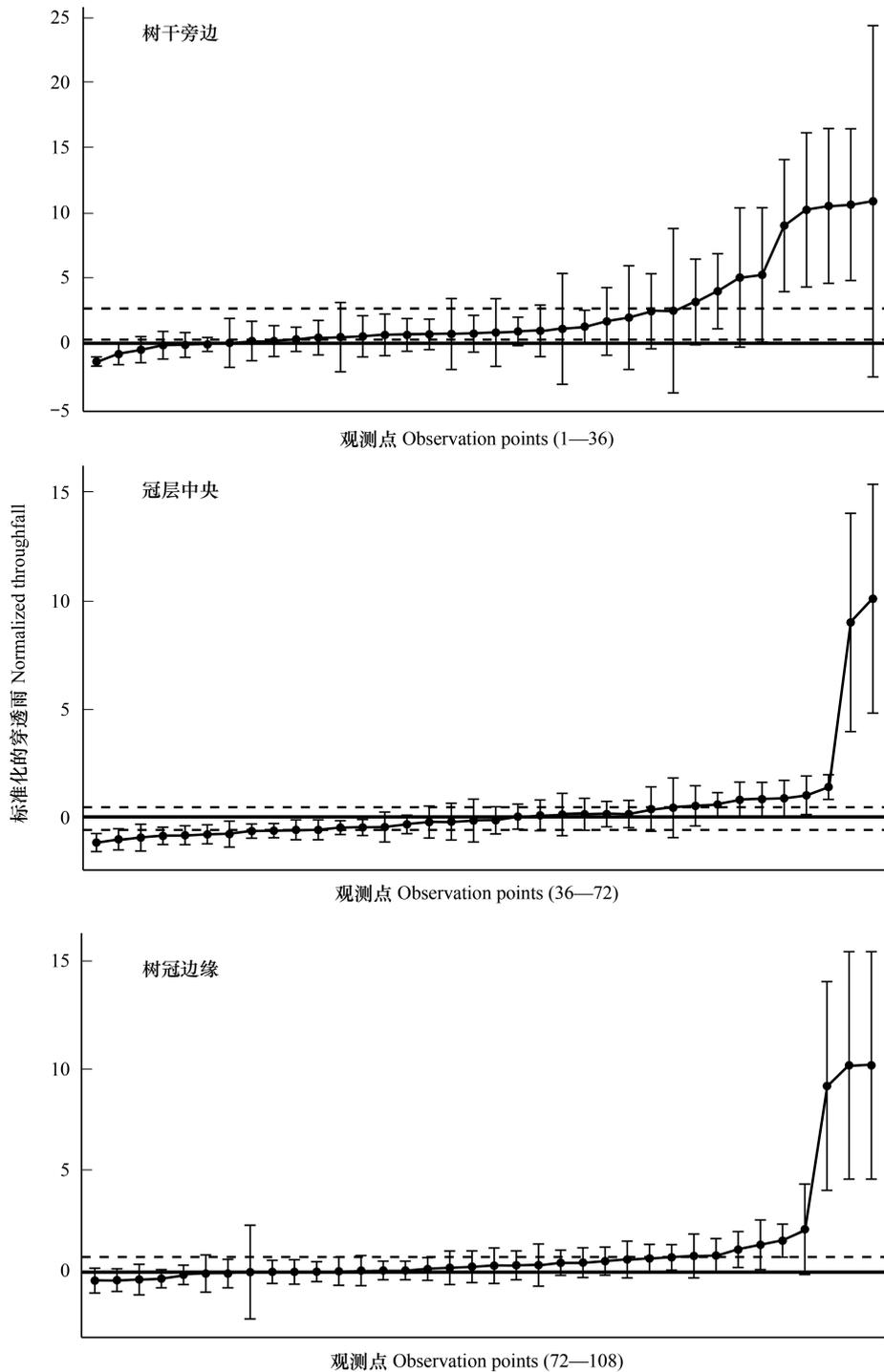


图 6 基于不同冠幅位置的时间稳定性图

Fig.6 The time stability plots based on different canopy positions

注:虚线为上、下四分位线

由上可知,距树干距离影响穿透雨的时间稳定性,冠幅不同位置表现出对穿透雨不同的干湿效应,并最终形成特定的空间格局(图4),这与冠层厚度、叶面积指数、叶片角度和形状等冠层结构特征有关。经过回归分析发现,槟榔树冠穿透雨时间不稳定程度与平均叶片倾斜角度呈现显著正相关关系( $P < 0.05$ )(图7),而根据表2发现,平均叶片倾斜角度:树干附近(45.7)、冠幅边缘(49.6) > 冠幅中央(38.4),这说明冠幅中央穿透雨时间稳定性强于树干附近和冠幅边缘是由于叶片角度导致的,冠幅边缘较大的叶片角度更容易受到风的影响,造成穿透雨空间格局在时间上不稳定。

### 2.3.2 降雨量对穿透雨时间稳定性的影响

降雨量在0—20 mm范围内,具有时间稳定性的点共有35个(32.4%),其中“滴水效应”点有14个(40%),“屏蔽效应”点有21个(60%);降雨量在20—50 mm范围内,具有时间稳定性的点共有13个(12%),其中“滴水效应”点有3个(23.1%),“屏蔽效应”点有10个(76.9%);降雨量在>50 mm范围内,具有时间稳定性的点共有35个(32.4%),其中“滴水效应”点有21个(60%),“屏蔽效应”点有14(40%)个(图8)。

由上可知,在中等降雨量条件下穿透雨空间格局的时间稳定性最小,通过对比小雨和大雨发现,随着降雨量增加,冠层内部分“屏蔽效应”的点消失,冠层内“滴水效应”的点增加。

## 3 讨论

冠层中的一些特殊结构往往会改变雨水在冠层的运动轨迹,不仅改变了降雨分配比例,而且使穿透雨的空间格局发生变化。例如 Philippe 发现由于香蕉树果丛的存在,使树干流被引流为穿透雨,增加了树干附近的穿透雨<sup>[11]</sup>。本文所研究的槟榔树属于棕榈科,茎干直立,羽状分裂的大叶簇生于茎顶,叶片角度在38°—50°之间(表2),为典型的漏斗形树冠,穿透雨空间格局在冠幅范围内表现出树干附近和冠幅边缘多,冠幅中央少,结合槟榔树冠构型,槟榔大叶片对降雨有引流作用,槟榔果丛的存在也会使树干流转化为穿透雨,从而使树干附近的穿透雨大大增加。

穿透雨空间格局的时间稳定性反映了冠层结构的稳定,然而冠层结构在生长周期内是逐渐变化的,使穿透雨的时空特性也会随之改变。Nobuaki 在泰国发现随着柚木树叶的生长,冠层遮阴效果逐渐增强,气温对冠层截留的影响逐渐减弱,导致穿透雨的空间异质性增加,时间稳定性降低<sup>[21]</sup>。Yoshinori 发现叶面积指数在生长季的变化是穿透雨空间异质性改变的主要原因,使穿透雨时间稳定性随时间而改变<sup>[22]</sup> Zimmermann 发现在生长季初期,冠层结构变化最快,穿透雨时间稳定性较差<sup>[20]</sup>。本文发现槟榔树干附近和冠幅边缘虽然表现为对穿透雨的“滴水效应”,但却是不稳定的,而冠幅中央表现出对穿透雨极端稳定的“屏蔽效应”,这与距树干不同距离的平均叶片倾斜角度有关,树干附近和冠幅边缘较大的叶片角度,更容易受到风的影响,造成穿透雨在时间上的不稳定。Park 和 Leakameron 发现叶片和树枝的引流作用影响了冠层的降雨分配模式,使树干流和穿透雨相互转化,改变穿透雨的空间格局<sup>[23]</sup>。因此,叶片角度及其生长周期内的变化可能是影响穿透雨时间稳定性的关键因素。此外,通过对比各方向穿透雨的空间格局和时间稳定性发现,风向只能部分改变穿透雨的空间格局,但对时间稳定性的影响较小,冠层结构才是穿透雨时空特性时间稳定性的决定因素。

降雨量也会影响穿透雨的时间稳定性,例如, Omid 发现在小雨条件下,由于冠层储水能力没有饱和,冠层截留大,造成的空间差异也大;在大雨条件下,冠层充分饱和,穿透雨的空间差异减少<sup>[24]</sup>。Anderson 发现在由于桉树冠层结构是稳定的,在降雨初期,冠层储水能力未饱和,穿透雨只在有些为点出现,大多数位点没有穿

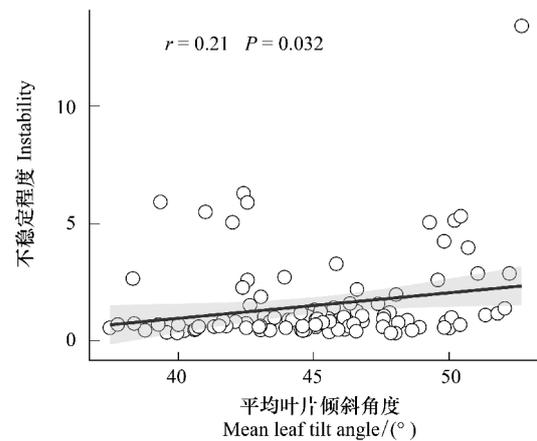


图7 平均叶片倾斜角度与穿透雨时间不稳定性的关系

Fig.7 The relationship between MTA and throughfall time instability

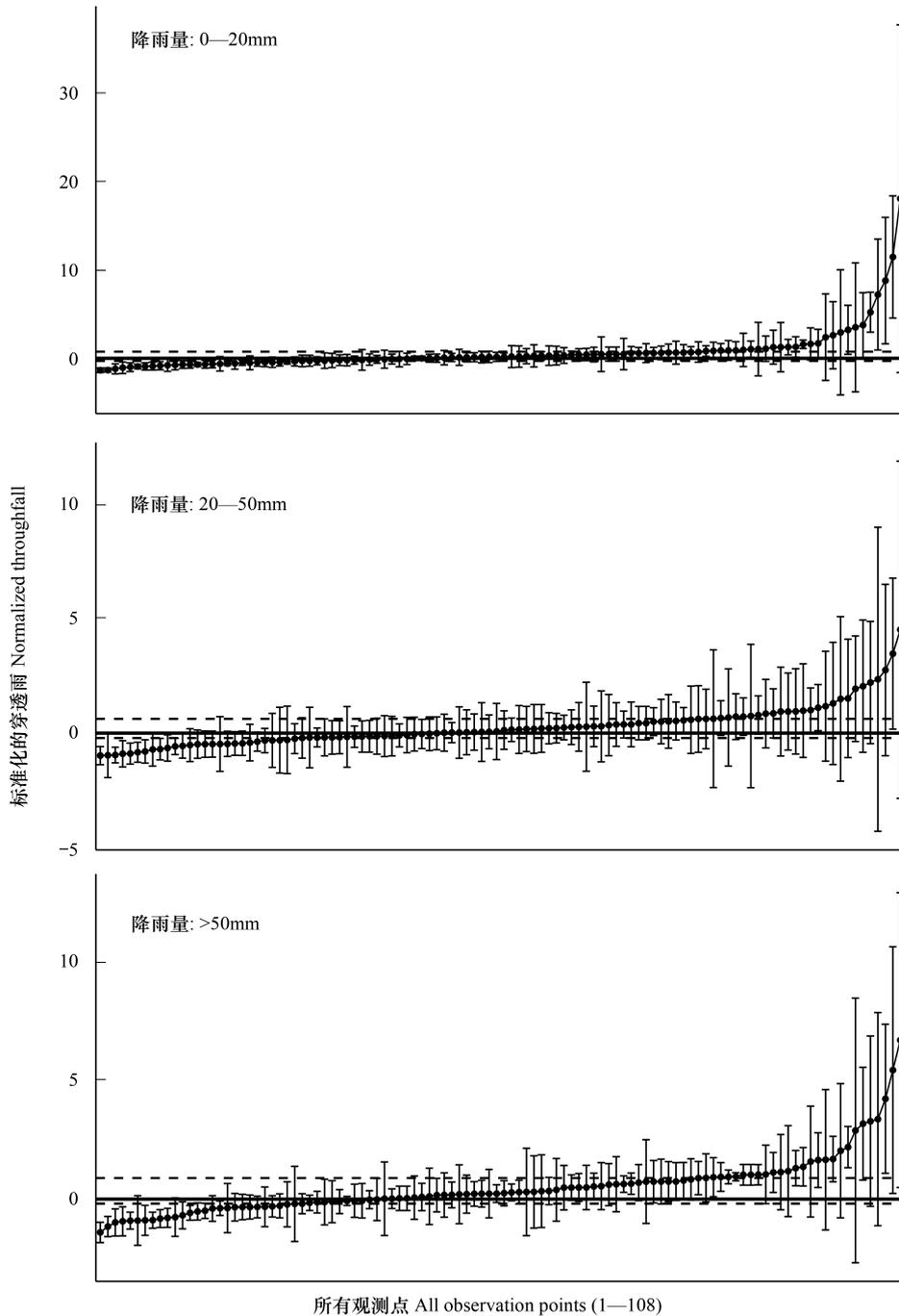


图 8 基于不同降雨量的时间稳定性图  
 Fig.8 The time stability plots based on different rainfall

虚线为上、下四分位线

透雨,“屏蔽效应”的位点是时间稳定的,当冠层充分饱和后,穿透雨的空间格局变得匀质化,“滴水效应”的点是时间稳定的<sup>[25]</sup>。本文发现在中等降雨条件下,穿透雨的时间稳定性较差,而在小雨和大雨中,穿透雨时间稳定性相同(32.4%)。在小雨条件下,冠层储水能力没有饱和,穿透雨只在特定位点如冠层间隙和特殊的滴水结构处出现,冠层对雨水主要以“屏蔽效应”为主;随着降雨量的增加,冠层逐渐湿润,储水能力由不饱和到饱和,一些位点逐渐开始出现穿透雨,此时穿透雨时间稳定性最差;在大雨条件下,冠层充分湿润,对雨水以“滴水效应”为主。

## 4 结论

1) 槟榔树冠内不同位置穿透雨差异显著 ( $P < 0.01$ ), 穿透雨率分别为: 树干附近 (85.6%)、冠层中央 (48.3%)、冠层边缘 (59.8%), 穿透雨空间格局表现为向树干附近汇集的特点; 不同方位的穿透雨彼此间差异不显著, 但穿透雨在东南面最多, 表明风对穿透雨空间格局具有一定影响。

2) 槟榔树冠下大多数位点穿透雨时间变异程度大 (65.7%), 但槟榔树冠幅中央穿透雨时间稳定性较好 (55.6%), 而树干旁边和冠幅边缘穿透雨时间稳定性较差 (25%、19.4%), 各方位穿透雨的时间稳定性相差不大 (约 1/3)。

3) 距树干距离和降雨量影响穿透雨的时间稳定性, 距树干不同距离平均叶片倾斜角度的差异是造成穿透雨在时间上不稳定的关键因素, 平均叶片倾斜角度与穿透雨时间不稳定程度呈现显著正相关关系 ( $P < 0.05$ )。在中等降雨量条件下穿透雨空间格局的时间稳定性最差, 随着降雨量增加, 冠层内部分“屏蔽效应”的点消失, 冠层内“滴水效应”的点增加。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Zou C B, Caterina G L, Will R E, Stebler E, Turton D. Canopy interception for a tallgrass prairie under juniper encroachment. *PLoS One*, 2015, 10(11): e0141422.
- [ 2 ] Nanko K, Hudson S A, Levia D F. Differences in throughfall drop size distributions in the presence and absence of foliage. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, 61(3): 620-627.
- [ 3 ] Kowalska A, Boczoń A, Hildebrand R, Polkowska Ż. Spatial variability of throughfall in a stand of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) with deciduous admixture as influenced by canopy cover and stem distance. *Journal of Hydrology*, 2016, 538: 231-242.
- [ 4 ] Frischbier N, Wagner S. Detection, quantification and modelling of small-scale lateral translocation of throughfall in tree crowns of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 228-238.
- [ 5 ] Reid L M, Lewis J. Rates, timing, and mechanisms of rainfall interception loss in a coastal redwood forest. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(3/4): 459-470.
- [ 6 ] Krämer I, Hölscher D. Rainfall partitioning along a tree diversity gradient in a deciduous old-growth forest in Central Germany. *Ecohydrology*, 2009, 2(1): 102-114.
- [ 7 ] Brauman K A, Freyberg D L, Daily G C. Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud interception: A comparison of native forest sites in Kona, Hawaii'. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(2): 265-275.
- [ 8 ] Yi L, Cai T J, Man X L, Sheng H C, Ju C Y. Canopy interception loss in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest of Northeast China. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(6): 831-840.
- [ 9 ] Siegert C M, Levia D F. Seasonal and meteorological effects on differential stemflow funneling ratios for two deciduous tree species. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 446-454.
- [ 10 ] Sadeghi S M M, Attarod P, Pypker T G, Dunkerley D. Is canopy interception increased in semiarid tree plantations? Evidence from a field investigation in Tehran, Iran. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2014, 38: 792-806.
- [ 11 ] Cattani P, Bussièrè F, Nouvellon A. Evidence of large rainfall partitioning patterns by banana and impact on surface runoff generation. *Hydrological Processes*, 2007, 21(16): 2196-2205.
- [ 12 ] Poppenborg P, Hölscher D. The influence of emergent trees on rainfall distribution in a cacao agroforest (Sulawesi, Indonesia). *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2009, 204(10): 730-736.
- [ 13 ] Geißler C, Nadrowski K, Kühn P, Baruffol M, Bruehlheide H, Schmid B, Scholten T. Kinetic energy of throughfall in subtropical forests of se china-effects of tree canopy structure, functional traits, and biodiversity. *PLoS One*, 2013, 8(2): e49618.
- [ 14 ] 陈峰, 刘涛, 李建军, 陈井鑫. 槟榔的药用价值. *中国热带医学*, 2014, 14(2): 243-245.
- [ 15 ] 文伟, 李光范, 胡伟, 项文, 刘惠江. 海南热带雨林原生植被与槟榔树种植的固坡阻滑效果对比研究. *海南大学学报: 自然科学版*, 2014, 32(4): 378-382.
- [ 16 ] 张建国, 闫杰杰, 杜盛. 连续降雨条件下黄土丘陵区两典型林分降雨分配特征研究. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 158-163, 168-168.
- [ 17 ] Lu S Y, Hwang L S, Fu H C. Studies on hydrological characteristics of an areca palm plantations. *Taiwan Journal of Forest Science*, 1999, 14(2): 211-221.

- [18] Keim R F, Skaugset A E, Weiler M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. *Journal of Hydrology*, 2005, 314(1/4): 263-274.
- [19] Zimmermann A, Zimmermann B, Elsenbeer H. Rainfall redistribution in a tropical forest: Spatial and temporal patterns. *Water Resources Research*, 2009, 45(11): W11413.
- [20] Zimmermann A, Germer S, Neill C, Krusche A V, Elsenbeer H. Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rain forest. *Journal of Hydrology*, 2008, 360(1/4): 87-102.
- [21] Tanaka N, Levia D, Igarashi Y, Nanko K, Yoshifuji N, Tanaka K, Tantasirin C, Suzuki M, Kumagai T. Throughfall under a teak plantation in Thailand: a multifactorial analysis on the effects of canopy phenology and meteorological conditions. *International Journal of Biometeorology*, 2015, 59(9): 1145-1156.
- [22] Shinohara Y, Onozawa Y, Chiwa M, Kume T, Komatsu H, Otsuki K. Spatial variations in throughfall in a Moso bamboo forest: sampling design for the estimates of stand-scale throughfall. *Hydrological Processes*, 2010, 24(3): 253-259.
- [23] Park A, Lee Cameron J. The influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5/6): 1915-1925.
- [24] Fathizadeh O, Attarod P, Keim R F, Stein A, Amiri G Z, Darvishsefat A A. Spatial heterogeneity and temporal stability of throughfall under individual *Quercus brantii* trees. *Hydrological Processes*, 2014, 28(3): 1124-1136.
- [25] 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.