

# 单株华北落叶松树冠穿透降雨的空间异质性

时忠杰<sup>1</sup>, 王彦辉<sup>2,\*</sup>, 熊伟<sup>2</sup>, 于澎涛<sup>2</sup>, 郭浩<sup>2</sup>, 张雷燕<sup>3</sup>, 董晓红<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091;  
3. 沈阳农业大学林学院, 沈阳 110161)

**摘要:** 森林与水的关系是生态学和水文学研究的核心问题之一, 为了研究降雨通过华北落叶松树木冠层后的空间分异规律, 并合理确定准确测定穿透降雨所需的雨量筒数量及位置, 2005 年生长季在一株样树冠层下按离开树干的位置机械布置了 32 个雨量筒, 测定了 11 场不同降雨事件的穿透降雨量, 并利用传统统计学与地统计学方法分析了叶面积指数和穿透降雨的空间变异性规律。结果表明, 树冠的叶面积指数在不同方向上具有空间变异性, 随离开树干的距离增大而减小; 穿透降雨率与叶面积指数呈负相关性, 且随降雨量增大相关性减弱; 穿透降雨率半方差函数分析结果表明, 基台值  $C + C_0$  随降雨量增大而减小,  $C_0 / (C + C_0)$  随降雨量的增大而增大, 分维数  $D$  随降雨量的增大而增大, 随降雨强度的增大而先增大后减小, 这说明较小降雨量时, 冠层结构是引起穿透降雨率空间变异的主要因素; 降雨量较大时, 冠层结构的影响减弱, 其空间分布差异主要受随机因素影响; 通过 Kriging 插值法绘制的树冠下穿透降雨空间分布图表明, 树冠下存在着穿透降雨的最小区域和有汇集降雨作用的“漏斗”区域, 最小区域一般在树干偏东南或南方向, 而降雨汇集区域多不固定。在比较了不同雨量筒布设方案的穿透降雨变化后发现, 在距离树干  $1/2$  冠幅半径的同心环上至少布设内径不小于 9cm 的 5 个雨量筒时, 测定的穿透降雨量可基本接近整个树冠下的穿透降雨量平均值。

**关键词:** 华北落叶松; 穿透降雨; 空间异质性; 半方差函数; Kriging 插值

**文章编号:** 1000-0933(2006)09-2877-10 **中图分类号:** S715.2, S718.5 **文献标识码:** A

## The spatial heterogeneity of throughfall under the *Larix principis-rupprechtii* single tree's canopy

SHI Zhong-Jie<sup>1</sup>, WANG Yan-Hui<sup>2,\*</sup>, XIONG Wei<sup>2</sup>, YU Peng-Tao<sup>2</sup>, GUO Hao<sup>2</sup>, ZHANG Lei-Yan<sup>3</sup>, DONG Xiao-Hong<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 2. Research Institute of Forestry Ecology and Environment, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2877 ~ 2886.

**Abstract:** The relation of forests and water resource is one of the key scientific issues in ecology and hydrology. To understand the spatial heterogeneity of throughfall under forest canopy and determine the suitable number and location of rain gauges for measuring throughfall exactly under the canopy, throughfall was measured under *Larix principis-rupprechtii* single tree's canopy during 11 rainfall events, using 32 rain gauges in the growing season (Jun. ~ Sep.) of 2005. The spatial heterogeneity of leaf area index

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2002CB111501); 国家自然科学基金重点资助项目 (30230290); 国家林业局引进国际先进技术资助项目 (2003-4-43); 国家科技部社会公益研究专项资助项目 (2004DIB3J102); 国家林业局森林生态环境重点实验室联合资助项目

**收稿日期:** 2005-12-29; **修订日期:** 2006-07-15

**作者简介:** 时忠杰 (1975 ~), 男, 山东临沂人, 博士, 主要从事森林生态及水文与水资源研究。E-mail: shijie1204 @163.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyh @caf. ac. cn

**致谢:** 感谢张小全研究员在本文写作过程中给予的帮助

**Foundation item:** The project was supported by the National Key Basic Research program of China (No. 2002CB111501), Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 30230290), Introducing International Advanced Technology Project of State Forestry Administration, China (No. 2003-4-43), Special Project of Social Commonweal Research of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2004DIB3J102) and the Forestry Ecological and Environmental Key Laboratory of the State Forestry Administration

**Received date:** 2005-12-29; **Accepted date:** 2006-07-15

**Biography:** SHI Zhong-Jie, Ph. D., mainly engaged in the forest ecology, hydrology and water resource. E-mail: shijie1204 @163.com

(LAI) and throughfall ratio was analyzed by statistical and geostatistical method (Semivariance and Kriging interpolation). It indicates that leaf area index (LAI) of canopy has strong spatial heterogeneity at different direction and the LAI reduces with increasing distance from trunk. A negative relation exists between the throughfall ratio and LAI, and the correlative coefficient diminishes with the increase of rainfall. The analysis of semivariance of throughfall shows that the sill  $C + C_0$  reduces with increasing rainfall, and the  $C_0/(C + C_0)$  and the fractural  $D$  increase with increasing rainfall, and  $D$  increases firstly and then diminishes with increasing rainfall intensity. These infer that canopy structure is a key factor influencing spatial variation of throughfall ratio when the rainfall is lower; the influence of canopy weakens with increase of rainfall and the distribution of throughfall is random when rainfall is higher. The distribution map of throughfall in different rainfall events produced by Kriging interpolation shows that the lowest region and the highest "funnel" region of throughfall exist, the lowest region of throughfall is situated in the South or southeast direction of canopy, while and the "funnel" region alters frequently in different rainfall events. The comparison of different rain gauge arrangements indicates that the throughfall measured from at least 5 rain gauges (diameter at least 9 cm) at the 1/2 canopy radius can reasonably represent the average throughfall ratio under the *Larix principis-rupprechtii* canopy.

**Key words:** *Larix principis-rupprechtii*; throughfall; spatial heterogeneity; semivariance; Kriging interpolation

森林与水的关系是生态水文学研究的核心问题之一。大气降水经过林冠层后进行第 1 次分配,形成树干茎流、穿透降雨和树冠截留,这一过程中林冠不仅削减了降雨的动能,截留了部分降雨,还改变了降雨的空间分布格局。国内外对冷杉林<sup>[1]</sup>、热带雨林<sup>[2]</sup>、针叶林<sup>[3]</sup>等冠层影响下的降水空间分布做过不少的研究,表明穿透降雨的分布格局变化对土壤水分的分配、营养物质的循环等方面起着重要影响<sup>[4]</sup>。但对林冠下穿透降雨的空间分布格局问题,不同的学者研究结论并不一致:一种观点认为林冠下穿透降水空间分布为系统性变化<sup>[5,6]</sup>;另一种认为林冠下穿透降水的空间分布是随机变化的,与空间无关<sup>[7]</sup>。并认为这种结论的差异可能与研究的地点、树种、降水特性等有极大关系<sup>[4]</sup>。传统的森林水文学研究多在样地水平上进行,而单株树木冠层对降雨的再分配作用是森林冠层水文作用研究的基础,在此尺度上研究树冠结构对穿透降雨的影响,可以加深对树冠影响水量转化的生态学机制认识,同时也有利于研究尺度变化对穿透降雨空间分布的影响,为尺度转换提供条件。目前在单株尺度研究冠层对穿透降雨影响还较少。

地统计学是近年来发展起来的一门新的空间分析方法,适合描述区域化变量的空间分布特征,并且提供了一种最优的空间插值方法,成为充分认识空间结构特征的一种基础方法,目前广泛应用于土壤、生态、气象等因子分布图的绘制<sup>[8]</sup>。本文尝试将地统计学的理论与方法应用到林内穿透降雨研究中。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)广泛分布于我国华北、西北等地区,是主要的人工林树种,有非常重要的水土保持、涵养水源等作用。本文首先以单株华北落叶松为基本研究单元,分析生长季穿透降雨在单株树冠下小尺度内的空间分异规律,以便深化认识森林冠层结构特征与穿透降水的关系,为进一步系统研究冠层截持作用和生态水文过程提供有关理论基础,也为森林生态水文模型的发展与参数化提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究样地概况

研究地区位于宁夏六盘山自然保护区香水河小流域(N 35°30'49.9", E 106°13'30.7"),为暖温带半湿润半干旱气候,年平均气温 5.9℃,年均降水 591.6mm,降水多集中在 6~9 月份。研究样地的坡向为东南坡,坡位为下坡,坡度 45°,乔木层为华北落叶松纯林,平均胸径 14.0cm,平均树高 12.5m,平均枝下高 2.9m,平均冠幅半径 2.1m,2005 年生长季(6~9 月份)的平均叶面积指数为 2.11,林下植被主要为草本,主要种有东方草莓(*Fragaria orientalis* Lozinsk)、苔草(*Carex* spp.)、铁杆蒿(*Artemisa vestita*)等。

### 1.2 试验布设与数据采集

在试验地内选择 1 株优势度和生长情况属中等偏上的样树为试验树,其冠形为锥形,胸径 16.7cm,树高 13.8m,枝下高 3.3m,平均冠幅半径 2.1m。样树的西北侧为林隙,东南、西南及南侧与其它样树的冠层紧密重

叠,而在其它方向与周围样树相邻但无重叠。

以样树为中心,分 8 个方向在林冠下机械布设内径为 9cm 的雨量筒,每个方向上分别布设 4 个,其相互间隔为各方向林冠半径的 1/4,即共布设了 32 个雨量筒(图 1)。在每次降雨后及时测定各雨量筒内的穿透降雨。林外降雨及风向等气象数据通过林外自动气象站获取,设定读数时间间隔为 5min;本文研究降雨为在 2005 年 6~9 月份测定的 11 场降雨。为了获得样树的叶面积指数,考虑 6 月份以后叶面积指数已基本稳定,仅在生长季中期(2005 年 7 月 16 日)应用 LAF2000 于样树林冠下的每个雨量筒位置分别测定其上方的叶面积指数,并通过 LAI 计算程序按 7 光圈范围进行计算。样树的叶面积指数空间变化较大(表 1,图 2),变异系数达到 72.79%。

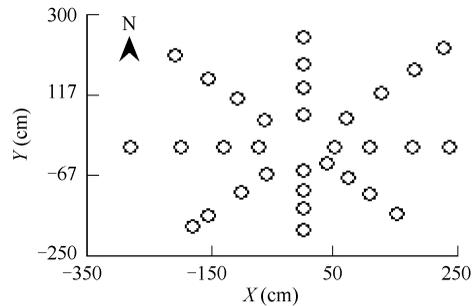


图 1 树冠下雨量筒位置示意图

Fig. 1 Schematic figure of the sampling spots

表 1 样树 2005 年 7 月份的叶面积指数空间变异描述性统计

Table 1 Descriptive statistic of leaf area index (LAI) of the sample tree in July, 2005

平均值 Mean	标准差 S. D.	变异系数 C. V. (%)	最小值 Min. value	最大值 Max. value	峰度 Skewness	偏度 Kurtosis
2.043	1.487	72.79	0.28	5.04	0.58	- 1.08

### 1.3 数据分析

为了便于对各降雨事件的穿透降水进行比较,本文计算了穿透降雨率。然后进行下面两步的数据分析:

(1) 先利用 STATISTICA 6.0 进行单样本的 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 正态分布检验及基本的统计分析,表明穿透降雨率基本都符合正态分布,因此不进行数据转换。

(2) 半方差函数分析,关于地统计学的基本原理与方法,在许多文献中已经有大量描述<sup>[9]</sup>,这里只简要介绍一下基本参数。用于半方差分析的公式为:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i) - z(x_{i+h})]^2$$

式中, $\hat{\gamma}$  为半方差函数值, $z(x_i)$  代表样点  $Z$  在  $x_i$  处的穿透降雨率; $z(x_{i+h})$  代表与  $x_i$  相隔距离为  $h$  处样点的穿透降雨率; $n(h)$  为距离等于  $h$  时的穿透雨观测点对的数目, $h$  为样本间距,又称位差(lag)。在本研究中,对应的参数值为穿透降雨测定雨量筒间的距离,值得注意的是,半方差函数只在其最大间距的 1/2 以内才有效<sup>[10]</sup>。在本研究中,能较好地拟合穿透降水的半方差函数的适用模型有高斯模型、指数模型、球形模型。

半方差函数有 3 个重要参数:(1) 块金值( $C_0$ ),为当  $h=0$  时的半方差函数  $\hat{\gamma}(h)$  值,即  $C_0$ ,它表示的是当区域化变量在小于抽样尺度时呈非连续的变异,由区域化变量的属性或测定误差决定<sup>[11]</sup>;(2) 基台值( $C_0 + C$ ),为当  $\hat{\gamma}(h)$  随着间隔距离  $h$  的增大,从非零值(即  $C_0$ ) 达到一个相对稳定的常数,该常数称为基台值( $C_0 + C$ ),它是系统属性中的最大变异。一般情况下,( $C_0 + C$ ) 越大表示总的空间异质性程度越高,反之越小;(3) 变程  $a$ ,当变异函数  $\hat{\gamma}(h)$  达到基台值时的间隔距离称为变程  $a$ ,它表示当  $h > a$  以后,区域化变量  $z(x_i)$  的空间相关性消失<sup>[11]</sup>。此外,块金方差与基台值之比  $C_0/(C_0 + C)$  反映的是随机因素引起的空间异质性占总空间异质性的百分比,即反映的是空间异质性中随机部分的重要程度。

分维数( $D$ )表示的是变异曲线的曲率,表示空间自相似性,它是由  $\hat{\gamma}(h)$  -  $h$  之间的关系确定的:

$$2\hat{\gamma}(h) = h(4 - 2D)$$

对它们取双对数后直线回归的斜率为  $m$ ,分维数  $D$  可以通过  $m$  来估算,计算公式如下:

$$D = \frac{1}{2}(4 - m)$$

通过不同穿透降雨率的  $D$  值之间的比较,可以确定其空间异质性的程度<sup>[12]</sup>,  $D$  值越小,表明降雨穿透率的空间变异性越大,反之则表明穿透率空间变异性越小,即空间均一性较好。

用地统计软件包 GS+ 7.0 for windows 进行穿透降雨率及叶面积指数的半方差函数的参数计算。在此基础上,利用 Arcgis8.3 的地统计分析模块中的简单 Kriging 插值方法将穿透降雨率的图片转化为矢量文件,并经切割后再转化为 Grid 输出,绘制出穿透降雨率的空间插值图。

### 1.4 合理的穿透降雨雨量筒数量及位置确定方法

首先分析雨量筒在各环上的平均穿透降雨量及冠下平均穿透雨量,然后对比分析各环穿透雨量与平均穿透雨量,找到最小相对误差环,即为布设雨量筒最适位置。

在找到雨量筒合适位置后,按照最适位置环平均雨量计算合理的穿透降雨雨量筒数量。原理如下:如果取样是独立的,且取样数目足够多,则中心极限定律成立,即随机变量  $Z = (\bar{x}_n - \mu) / \sqrt{\sigma^2/N}$  为标准正态分布,置信水平一般取 90% ~ 95%。根据正态分布的特点,可知:

$$P = \{ | (\bar{x}_n - \mu) / \sqrt{\sigma^2/N} | \leq 1.960 \} = 95\%$$

$$P = \{ | (\bar{x}_n - \mu) / \sqrt{\sigma^2/N} | \leq 1.645 \} = 90\%$$
(1)

或  
则:

$$N = 1.9602 \left( \frac{\sigma}{\Delta} \right)^2 \text{ 或 } N = 1.6452 \left( \frac{\sigma}{\Delta} \right)^2$$

若取精度要求  $\Delta = \mu \cdot k$  (可取 5%、10%), 上式改写为:

$$N = 3.84 \left( \frac{C_v}{k} \right)^2 \quad (p_t = 0.95)$$

或

$$N = 2.71 \left( \frac{C_v}{k} \right)^2 \quad (p_t = 0.90)$$
(2)

式中,  $C_v$  为变异系数。由于实际应用中总体方差未知,只能用样本方差代替,此时由概率统计原理可知随机变量服从  $t$  分布,因此合理的穿透降雨雨量筒数量按下式计算:

$$N = \frac{2}{a \cdot t} \left( \frac{\sigma}{\Delta} \right)^2$$
(3)

式中,  $a, t$  为  $t$  分布的特征值,由显著水平  $\alpha = 1 - P_t$  和自由度  $f = N - 1$  查  $t$  分布表求得。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨事件的特性

表 2 为本研究应用的 2005 年生长季 11 场降雨的基本特征,其中既有历时较短的对流雨,也有历时长、雨量大的暴雨。就平均雨强而言,6、7 月份的降水强度较大,8、9 月份的降水强度相对较小;降水时段内的风向以东南风居多。

表 2 研究时段(2005 年生长季)不同降雨事件的特征

Table 2 Characteristic of the different rainfall events in the growing season (month 6 ~ 9) of 2005

降雨场次 No. rainfall	降雨量 Rainfall (mm)	降雨时间 Rainfall duration (min)	平均雨强 Mean intensity (mm/min)	风向 Wind direction (deg)
2005-06-25	31.2	745	0.04	145.0
2005-06-29	14.2	290	0.05	95.0
2005-07-03	179.2	3170	0.06	116.1
2005-07-15	7.0	45	0.16	196.9
2005-07-28	15.8	500	0.03	122.1
2005-07-31	34.8	305	0.11	151.2
2005-08-13	53.2	1105	0.05	127.7
2005-08-27	14.6	1545	0.01	144.8
2005-08-31	2.8	230	0.01	99.3
2005-09-15	9.2	735	0.01	78.1
2005-09-19	38.8	2130	0.02	131.7

\* 风向以正北向为 0 度,顺时针旋转角度增加 The north wind direction as zero degree and rises deasil

### 2.2 树冠下穿透降雨率的统计性描述

表 3 为多场降雨事件的树冠下穿透降雨率平均值,分析表明穿透降雨率呈现随降雨量增加而增大的趋势,但其标准差随降雨量增大而呈幂函数递减,说明降雨量增大使穿透降雨的随机差异性变小。变异系数反映的是随机变量的离散程度,变异系数与标准差有相似的变化规律。这些统计值仅能在一定程度上反映穿透降雨率总体变化的情况,不能定量反映它们在空间上的随机性、独立性与相关性。

### 2.3 样树叶面积指数的空间变异分析

**2.3.1 LAI 与离开树干距离的关系** 根据每个雨量筒离开树干的距离(图 1),做出雨量筒上方叶面积指数的空间变化图。总体上看,从树干所在的冠幅中心向外,LAI 基本上以幂函数关系递减,但不同方向的关系有差异。在东侧及东南侧,冠层 LAI 随离开树干距离的增大呈现为线性减小;但在其它几个方向上,则为幂函数关系递减。基本关系见图 2。

表 3 2005 年 6~9 月份 11 场降雨的穿透降雨率空间变异的描述性统计

Table 3 Descriptive statistic of throughfall ratio during different rainfall events in Jun. ~ Sep. 2005

降雨场次 No. rainfall	降雨量 Rainfall (mm)	穿透降雨率 Throughfall ratio						
		平均值 Mean	标准差 S. D.	变异系数 C. V (%)	最小值 Min. value	最大值 Max. value	峰度 Skewness	偏度 Kurtosis
2005-06-25	31.2	0.79	0.15	18.99	0.41	1.03	- 0.29	- 0.55
2005-06-29	14.2	0.78	0.18	23.08	0.31	1.01	- 0.53	- 0.34
2005-07-03	179.2	0.89	0.08	8.99	0.65	0.95	- 1.52	1.03
2005-07-15	7.0	0.67	0.23	34.33	0.28	1.2	0.40	- 0.08
2005-07-28	15.8	0.73	0.24	32.88	0.22	1.25	- 0.18	- 0.15
2005-07-31	34.8	0.78	0.17	21.79	0.38	1.14	- 0.16	0.26
2005-08-13	53.2	0.84	0.16	19.05	0.45	1.21	0.33	0.27
2005-08-27	14.6	0.86	0.30	34.88	0.27	1.56	0.44	0.07
2005-08-31	2.8	0.50	0.31	62.00	0.00	1.23	0.30	- 0.57
2005-09-15	9.2	0.74	0.29	39.19	0.19	1.29	- 0.35	- 0.57
2005-09-19	38.8	0.90	0.22	24.44	0.41	1.34	- 0.34	0.17

**2.3.2 样树叶面积指数的半方差函数分析** LAI 观测值的半方差函数分析(表 4)表明,在各向异性条件下,样树 LAI 的半方差函数与步长  $h$  的关系符合球形模型, LAI 差异随着步长  $h$  的增大而逐渐增大,当超过变程  $a$  时 LAI 的空间相关性为零;样树 LAI 在不同方向上存在较大的空间异质性,不同的分维数  $D$  可以反映空间异质性程度,本研究中样树的 LAI 在不同方向上的分维数  $D$  为东北-西南方向 < 西北-东南方向 < 东-西方向 < 南北方向,表明在东北-西南方向的空间异质性程度最大,而南北方向的空间异质性程度最小。

**2.4 叶面积指数对穿透降雨率的影响**

叶面积指数的空间分布在一定程度上影响穿透降雨率的空间分布,但降水穿透率同时还受多个其他因素影响,因此利用叶面积指数分布解释穿透降雨变化的能力是有限的。

对不同降雨量时的降水穿透率的分析(图 3)表明,降雨量较小时林冠枝叶的降雨截持作用较明显,从而使穿透降雨空间差异较大;降雨量较大时,林冠截持作用相对变小,从而使穿透降雨空间差异减小。

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 Theoretical model	$C_0$	$C_0 + C$	$C_0 / (C_0 + C)$	变程 Range		$R^2$	RSS	$D$			
				$a_1$	$a_2$			东-西 E-W	东北-西南 NE-SW	南-北 S-N	西北-东南 NW-SE
球形模型 Spherical model	0.001	3.265	0.031	444.9	288.6	0.761	4.38	1.618	1.127	1.775	1.395

**2.5 穿透降雨率空间异质性分析**

叶面积指数具有空间异质性,而且不同方向的变异程度不同,是影响穿透降雨率的重要因子。因此本文

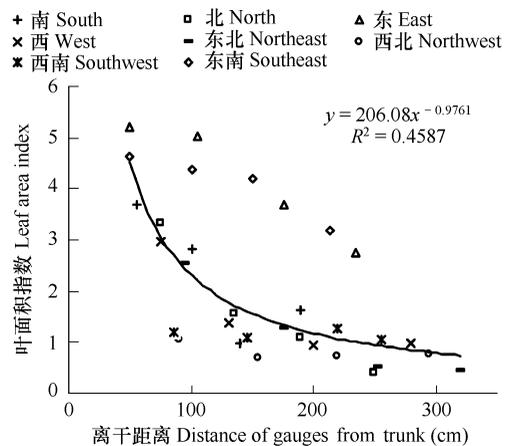


图 2 叶面积指数随离开树干距离的变化

Fig. 2 Changes of Leaf area index with the distance of rain gauges from trunk

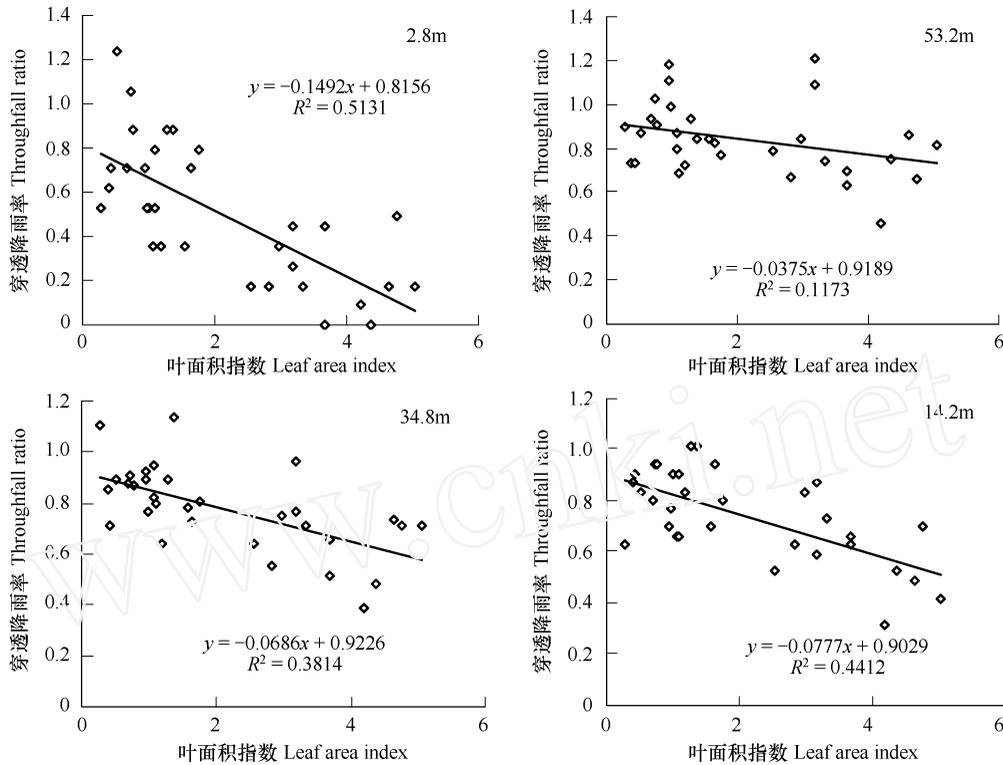


图3 不同降雨量时穿透降雨率与LAI的关系

Fig. 3 The relation of throughfall ratio and LAI in different rainfall events

按 GS + 软件的各项异性条件来分析不同降雨量时穿透降雨率的半方差函数理论模型的参数值及其空间异质性,结果见表 5。

基台值 ( $C_0 + C$ ) 表示系统属性或区域化变量中的最大变异。图 4 表明, ( $C_0 + C$ ) 值随降雨量增大呈幂函数减小,说明降雨量增大使得降雨穿透率在空间上趋向于均匀化。

图 5 表明穿透降雨率的  $C_0/(C_0 + C)$  值随降雨量的增大而增大,这说明,降雨量较大时随机因素引起的空间异质性起主要作用;降雨量较小时,空间异质性主要由结构性的空间因素引起,即与树冠结构有很大相关性。

变程 a 给出了随机变量在空间上自相关性的尺度。表 5 表明,随降雨量增大,变程 a 值呈增大趋势;同时还发现,在一些较大降雨量及暴雨事件时,穿透降雨率的变程 a 的范围超出了树冠的冠幅范围,这说明树冠截留而引起的穿透降雨率的空间变异影响作用较小。

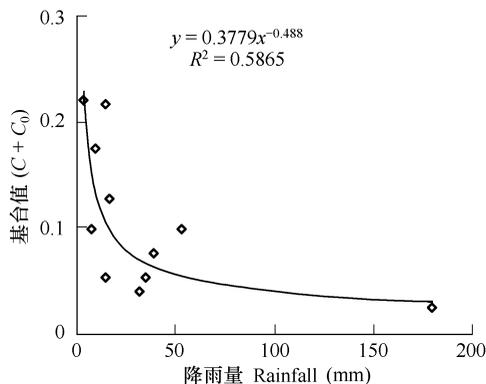


图4 穿透降雨率的基台值 ( $C + C_0$ ) 随降雨量的变化

Fig. 4 Change of the sill ( $C + C_0$ ) of throughfall ratio with the Rainfall

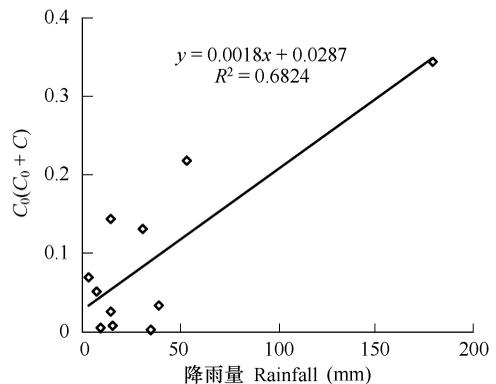


图5 穿透降雨率的  $C_0/(C_0 + C)$  随降雨量的变化

Fig. 5 Change of the  $C_0/(C_0 + C)$  of throughfall ratio with the Rainfall

在利用 GS + 软件计算反映空间异质性程度的分维数  $D$  时,把方位分为 4 个方向:东-西、东北-西南、南-北及西北-东南。图 6 表明,穿透降雨率的分维数  $D$  在每个方向均随着降雨量的增大而增大,说明雨量增大使穿透降雨率空间异质性程度减弱。图 7 分析了树冠不同方向上分维数  $D$  随降雨强度的变化,表明分维数  $D$  随降雨强度增加,先是增加,但在到达一个峰值后开始下降,说明穿透降雨率空间变异还受降雨强度影响。

表 5 表明,穿透降雨率的分维数  $D$  在树冠不同方向的变化较大,这主要是因为穿透降雨同时受风速、风向、降水强度等多个因素综合影响。目前还很难在空间异质性研究中考虑这些因素,更无法定量描述其影响。

决定系数  $R^2$  说明穿透降雨率半方差模型的解释效率,表 5 表明在降雨量较小时模拟精度较高,在降雨量较大时,精度较低。

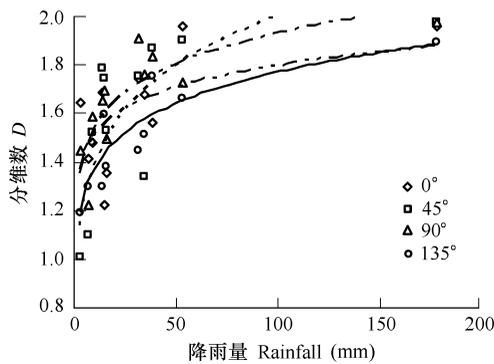


图 6 不同方向穿透降雨率的分维数  $D$  随降雨量的变化  
Fig. 6 Change of fractural  $D$  of throughfall ratio with the Rainfall

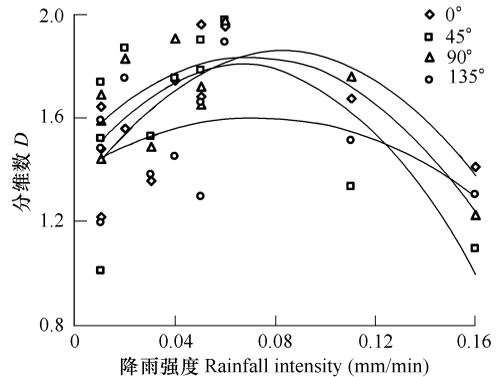


图 7 不同方向穿透降雨率的分维数  $D$  随降雨强度的变化  
Fig. 7 Change of fractural  $D$  of throughfall ratio with the rainfall intensity

表 5 不同降雨量时穿透降雨率的半方差理论模型及参数

Table 5 Theoretical semivariance model and the parameters of throughfall ratio on the different rainfall events

降水场次 No. Rainfall	降雨量 Rainfall (mm)	理论模型 Theoretical model	$C_0$	$C_0 + C$	$\frac{C_0}{(C_0 + C)}$	变程 Range		$R^2$	分维数 $D$ Fractal $D$			
						$a_1$	$a_2$		E-W	NE-SW	S-N	NW-SE
2005-06-25	31.2	S	0.005	0.041	0.130	738.0	414.1	0.62	1.743	1.749	1.908	1.449
2005-06-29	14.2	E	0.001	0.054	0.026	176.4	168.6	0.66	1.682	1.783	1.652	1.294
2005-07-03	179.2	G	0.008	0.024	0.344	3046.0	936.0	0.13	1.955	1.976	1.973	1.891
2005-07-15	7.0	G	0.005	0.099	0.052	227.7	225.2	0.91	1.409	1.098	1.223	1.300
2005-07-28	15.8	E	0.001	0.127	0.008	215.1	215.0	0.82	1.354	1.525	1.492	1.377
2005-07-31	34.8	G	0.000	0.054	0.002	169.0	165.8	0.51	1.678	1.334	1.759	1.513
2005-08-13	53.2	G	0.022	0.099	0.218	610.5	610.5	0.18	1.962	1.901	1.724	1.662
2005-08-27	14.6	G	0.031	0.216	0.144	317.3	299.4	0.42	1.221	1.740	1.691	1.593
2005-08-31	2.8	G	0.015	0.220	0.068	251.6	251.6	0.86	1.641	1.008	1.442	1.192
2005-09-15	9.2	E	0.001	0.174	0.006	210.1	210.0	0.78	1.479	1.52	1.587	1.479
2005-09-19	38.8	E	0.003	0.076	0.034	132.3	132.2	0.42	1.562	1.865	1.832	1.755

\* G代表高斯模型, E代表指数模型, S代表球形模型; E-W代表东-西, NE-SW代表东北-西南, S-N代表南-北, NW-SE代表西北-东南  
G refers to Gaussian model; E refers to Exponential model and S refers to Spherical model; E-W refers to East-West, NE-SW refers to Northeast-Southwest, S-N refers to South-North and NW-SE refers to Northwest-Southeast

### 2.6 不同降雨量时的穿透降水空间分布

林冠下穿透降雨的空间异质性受多个因素综合影响,包括叶面积指数、冠层厚度、降雨量大小、离树干距离、冠层郁闭度、冠形、风速、风向、与周围样树的关系等。图 8 为利用 Kriging 插值法绘制的不同降雨量时样树树冠下穿透降雨的空间分布,可以发现,树冠下的穿透降雨有一个最小中心,中心位置不是严格地位于树冠中心,而是基本上位于树干偏东南或偏南方向,这可能主要因为此方位存在着样树与毗邻树木的冠层重叠。但由于受风向、雨量等影响,穿透降雨的最小中心并不固定,而是经常变化。

一般认为,穿透降雨量应小于林外降雨量,但本研究中样树冠下穿透降雨量在某些特定位置大于林外降

雨量,即存在穿透降雨汇集的“漏斗效应”,其原因可能是林冠结构和降雨期间的气象条件。“漏斗区”多数在树冠半径的中部,但有时也移动到树冠的外缘。

## 2.7 合理的穿透降雨雨量筒数量及位置确定

表 6 为各降雨事件中华北落叶松树冠下的各个同心环上雨量筒的平均穿透降雨量及相对误差,分析表明,在 1/2 冠幅半径处的 8 个雨量筒的穿透降雨量平均值与整个树冠下的穿透降雨量平均值最相近,相对误差仅为 1.18%,说明基本上可通过在 1/2 冠幅半径布设雨量筒而准确地测得树冠下的穿透降雨量。虽然各同心环的穿透降水的相对误差都是在雨量较小时较大,但 1/2 冠幅半径同心环的相对误差基本都在 10% 的范围内。

要布设多少雨量筒才能较为准确地代表总体穿透降水是冠层水分传输研究中很关心的问题。本文对 1/2 冠幅半径同心环上 8 个雨量筒的穿透雨量进行了式(3)的统计分析,如果取 95% 的置信水平,至少要布设 10 个内径不少于 9cm 的雨量筒,或者取 90% 的置信水平,至少要布设 5 个内径不少于 9cm 的雨量筒才能获得代表树冠下总穿透降雨量的测定值。然而,随着置信水平的提高,雨量筒的数量迅速增加,考虑到精度要求,本文认为,取 90% 的置信水平已经足够代表林冠下的穿透降雨量的平均值。

表 6 华北落叶松穿透降雨量在树冠下不同环上的分布

Table 6 Distribution of throughfall under the canopy of *Larix principis-rupprechtii* at different loops

降雨场次 No. rainfall	降雨量 Rainfall (mm)	平均穿透 降雨量 Average throughfall (mm)	1/4 冠幅半径(A 环)		2/4 冠幅半径(B 环)		3/4 冠幅半径(C 环)		4/4 冠幅半径(D 环)	
			1/4 Canopy radius		2/4 Canopy rRadius		3/4 Canopy radius		4/4 Canopy radius	
			平均 Mean (mm)	相对误差 Relative error( %)						
2005-06-25	31.2	24.5	21.4	- 12.96	22.5	- 8.43	26.7	8.68	27.7	12.70
2005-06-29	14.2	10.5	9.0	- 14.83	9.4	- 10.13	11.6	10.43	12.0	14.54
2005-07-03	179.2	159.8	152.9	- 4.34	162.8	1.88	166.5	4.20	157.0	- 1.75
2005-07-15	7.0	4.7	3.4	- 27.15	4.6	- 0.66	5.2	10.60	5.5	17.22
2005-07-28	15.8	11.5	9.3	- 19.06	11.9	3.80	12.7	11.06	12.0	4.80
2005-07-31	34.8	27.1	22.0	- 18.68	29.1	7.52	28.8	6.38	28.4	4.78
2005-08-13	53.2	44.5	36.9	- 17.09	43.6	- 1.98	51.7	16.05	45.9	3.02
2005-08-27	14.6	12.6	12.1	- 3.69	13.7	9.09	13.3	5.65	11.2	- 11.06
2005-08-31	2.8	1.4	0.5	- 62.76	1.2	- 12.38	2.1	46.77	1.8	28.37
2005-09-15	9.2	6.8	5.3	- 22.71	7.2	5.76	7.8	13.90	7.0	3.05
2005-09-19	38.8	34.9	30.4	- 13.00	36.1	3.45	39.0	11.58	34.2	- 2.03
总计 Total	381.0	338.3	303.1	- 10.41	342.3	1.18	365.3	7.96	342.7	1.29

## 3 结论

利用统计学与地统计学方法研究了华北落叶松树冠的叶面积指数和穿透降雨率的空间分布,结果表明:

(1) 叶面积指数在空间分布上表现明显的空间自相关性,说明在单树尺度上叶面积指数的冠层空间内的分布不是完全随机的,而是具有结构性的空间变量,且叶面积指数在不同方向的变化是不同的;叶面积指数随离开树干距离的增大而减小。叶面积指数的大小在一定程度上影响着冠下穿透降雨率的大小,具有一定的负相关性。

(2) 穿透降雨率的半方差函数分析表明,冠下穿透降雨率的空间异质性随降雨量增大而减弱,趋向于空间均匀化,即随机因素对穿透率的影响随着降雨量增大而越来越重要,而冠层结构对穿透降雨率产生的结构性影响变小。同时由于冠层的结构性作用,穿透降雨率在不同方向上的空间异质性不同,但由于受多因素影响,难以明显看出不同方向的空间异质性规律。

(3) 在树冠下的穿透降雨的空间分布上存在最小中心区和穿透降雨汇集的“漏斗区”,这与华北落叶松的

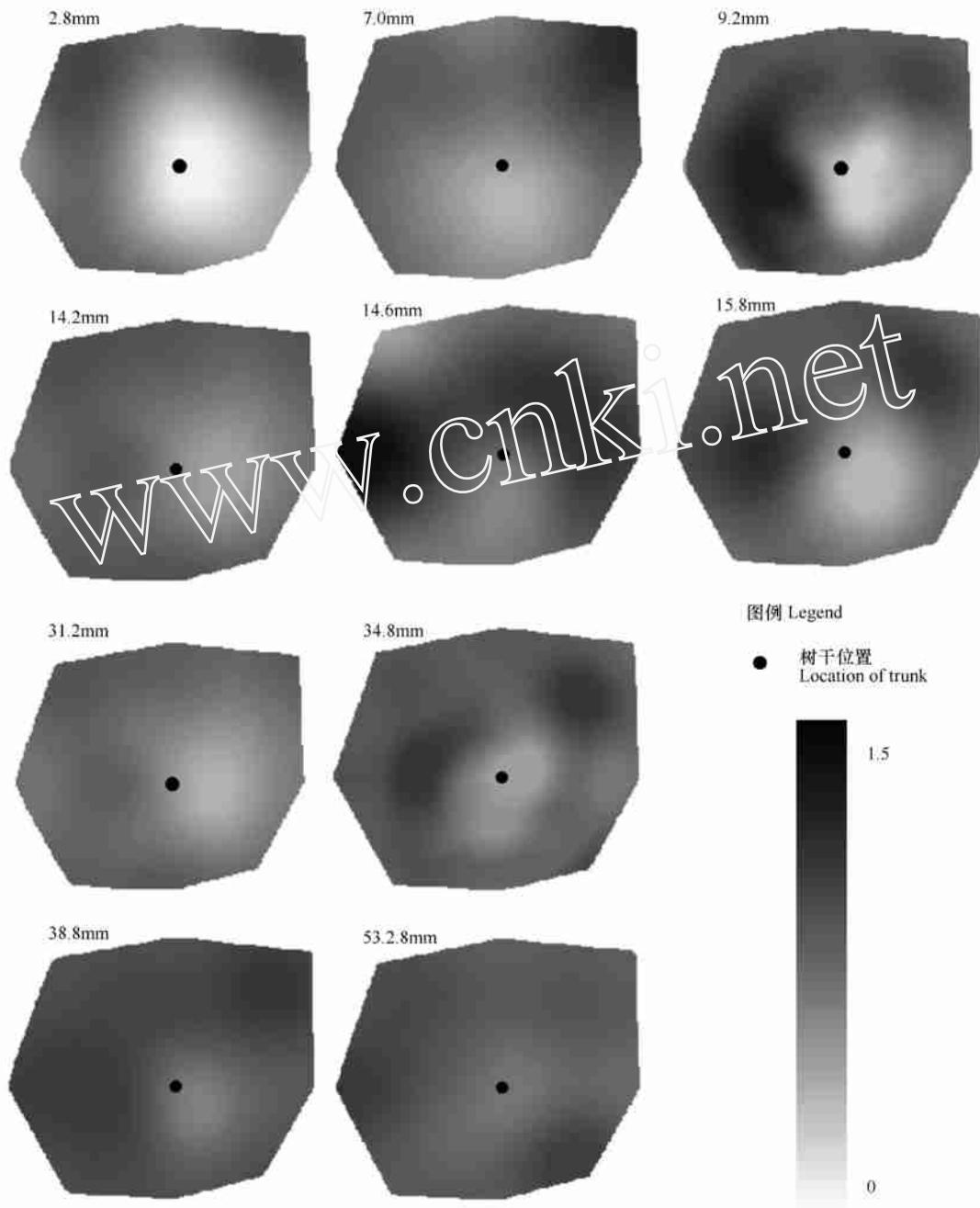


图 8 不同降水量时华北落叶松样树树冠下的穿透降雨率的空间分布格局

Fig. 8 Spatial distribution pattern of the throughfall ratio under the canopy of *Larix principis-rupprechtii* on different rainfall events

冠形结构有关,锥形树冠的中心区冠层厚度大、枝叶密集、具有向树冠外缘汇集降雨的作用。

(4) 在距离树干 1/2 冠幅半径的同心环上至少布设 5 个雨量筒(90%的置信水平),所测定的穿透降雨量平均值才能较准确地代表整个树冠下的穿透降雨量平均值。

References :

[ 1 ] 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. *Acta Ecologica Sinica* ,2004 ,24(5) :1015 ~ 1021.

[ 2 ] Schroth G, da Silva L F, Wolf M, et al. Distribution of throughfall and stemflow in multi-strata agroforestry , perennial monoculture , fallow and primary forest in centra Amazonia ,Brazil. *Hydrological Process* ,1999 , 13:1423 ~ 1436.

- [ 3 ] Taniguchi M, Tsujimura M, Tanaka T. Significance of stemflow in groundwater recharge 1. Evaluation of the stemflow contribution to recharge using a mass balance approach. *Hydrological Process*, 1996, 10:71 ~ 80.
- [ 4 ] G6nlez J A, Vanderlinden K, Gr6dez J V, *et al.* Rainfall concentration under olive trees. *Agricultural Water Management*, 2002, 55:53 ~ 70.
- [ 5 ] Whelan M J, Anderson J M. Modeling spatial patterns of throughfall and interception loss in a Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale. *Journal of Hydrology*, 1996, 186:335 ~ 354.
- [ 6 ] Robson A J, Neal C, Ryland G P, *et al.* Spatial variations in throughfall chemistry at the small plot scale. *Journal of Hydrology*, 1994, 158:107 ~ 122.
- [ 7 ] Loustau D, Berbigier P, Granier A, *et al.* Interception loss, throughfall and stemflow in maritime pine stand. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *Journal of Hydrology*, 1992, 138:449 ~ 467.
- [ 8 ] Zhang C S, Zhang S, He J B. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjiang River system: Geostatistics method. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(2):181 ~ 192.
- [ 9 ] Qing Y D. *Soil physics*. Beijing: Higher Education Press, 2003. 210 ~ 215.
- [ 10 ] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advance in Soil Science*, 1985, 3:1 ~ 70.
- [ 11 ] Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification. *Chines Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6):651 ~ 657.
- [ 12 ] Gong Y S, Liao C Z, Li B G. Spatial variability and fractal dimension for soil water content and bulk density. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1):10 ~ 15.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 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. *生态学报*, 2004, 24(5):1015 ~ 1021.
- [ 8 ] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积重金属含量空间分布特征研究——地统计方法. *地理学报*, 1997, 52(2):181 ~ 192.
- [ 9 ] 秦耀东. *土壤物理学*. 北京: 高等教育出版社, 2003. 210 ~ 215.
- [ 11 ] 李哈滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. *应用生态学报*, 1998, 9(6):651 ~ 657.
- [ 12 ] 龚元石, 廖超子, 李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征. *土壤学报*, 1998, 35(1):10 ~ 15.