

黄土高原南部人工林林冠对降雨特征的影响分析

吴光艳, 成 婧, 祝振华, 吴发启, 于小玲

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 林冠降雨特征是森林水文作用的重要机制, 同时也是植被在水土保持作用中的重要内容。以黄土高原南部常见乔木刺槐、元宝枫、桉树为研究对象, 以滤纸色斑法为基本实验原理, 观测了该地区天然降雨 15 场, 分别取得 3 种乔木冠下雨滴谱 200 份。通过对比分析林冠内外降雨特征, 得到以下结论: 林冠降雨特征与林外降雨特征有显著区别; 林下雨滴分布呈现近似的正态分布, 大雨滴数量较林外明显增多; 林冠下雨滴中数直径(D_{50})受降雨强度的影响很小, 且在降雨强度小于 0.1 mm/min 时, 林冠下 D_{50} 大于林冠外, 当雨强大于 0.1 mm/min , 林外 D_{50} 有大于林内的趋势; 降雨动能与雨滴中数直径有着相似的变化趋势。

关键词: 人工林; 林冠降雨; 降雨特征; 雨滴中数直径; 降雨动能

中图分类号: S718.51+2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)04-0032-04

Rainfall Characteristics under Canopy of Plantation Forest in the Southern Loess Plateau

WU Guang-yan, CHENG Jing, ZHU Zhen-hua, WU Fa-qi, YU Xiao-ling

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Rainfall characteristic under canopy is an important mechanism for forest hydrological, and it is an important aspect in soil and water conservation. In this study, *Robinia pseudoacacia*, *Eucalyptus exserta* Linn and *Acer truncatum* Bunge are selected as objects of study, and the rainfall is observed by filter-color stain method. Two hundred raindrops were obtained under each canopy of plantation. The rainfall characteristics were analyzed inside and outside the canopy, and the conclusions are as follows: there is a significant difference between inside and outside the canopy of rainfall. The raindrop distribution showed a normal distribution under the canopy, and it had more large raindrops; the relationship is not obvious between the median raindrop and rainfall intensity, and when the rainfall intensity is less than 0.1 mm/min , the median raindrop inside the canopy is less than outside the canopy, when the rainfall intensity is more than 0.1 mm/min , the result is just the opposite. The kinetic energy of rainfall had the same discipline with the median raindrop.

Key words: plantation forest; rainfall of canopy; rainfall characteristic; median raindrop; kinetic energy

降雨能量的大小直接影响土壤侵蚀的强弱, 是水力侵蚀研究中的重点问题, 也是水土保持研究中的热点问题。早在 20 世纪 50 年代, 自从 Best^[1] 研究了天然降雨雨滴分布特征, 提出了著名的 Best 雨滴大小分布式开始, 天然降雨雨滴特性的研究进入了一个新的阶段, 受到国内外广大学者的关注。近年来, 植被与土壤侵蚀的研究也越来越受到重视。天然降雨通过林冠层时, 林冠对其阻挡、滞留和削能, 以穿透降雨、二次降雨和干流的形式到达地表^[2-4], 使得其降雨特征和林外降雨显著不同。因此, 了解植被冠层对降雨特征的影响, 是深入研究森林水文作用机制的重要

环节, 也是研究植被水土保持作用的重要内容之一。目前, 国内对于林冠降雨特征的研究并不多^[5-7], 且观测降雨的次数少。笔者以色斑法为基础, 观测了黄土高原南部的杨凌地区天然降雨 15 场, 采集了不同树种林下降雨雨滴谱各 200 份, 较为深入地研究了林冠降雨特征。

1 研究区概况

杨凌地处黄土高原南部, 陕西省关中平原中西部, 渭河以北, 三面环水, 东以漆水河与武功县交界,

收稿日期: 2011-01-10

修回日期: 2011-03-12

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(40871133); 国家重点基础研究发展“973”计划(2007CB407201)

作者简介: 吴光艳(1987-), 男, 硕士研究生, 从事土壤侵蚀研究工作。E-mail: meilidewushan@163.com

通信作者: 吴发启(1957-), 男, 陕西黄陵人, 教授, 博导, 主要从事土壤侵蚀与流域管理方面的研究。E-mail: wufaqi@263.net

南依渭河同周至相望, 北有沛水和武功, 西与扶风接壤。位于东经 $107^{\circ}59' - 108^{\circ}09'$, 北纬 $34^{\circ}14' - 34^{\circ}24'$, 海拔 $418.0 \sim 540.1$ m, 地势北高南低, 由南向北依次形成一、二、三级阶地, 整体分为 5 种地貌, 即渭河滩地、一级阶地、二级阶地、三级阶地以及沟坡地。气候类型属暖温带半湿润气候区, 四季分明, 年平均气温 12.9°C , 极端最高气温 42°C , 最低气温 -19.4°C , 全年无霜期 221 d。年均降水量 637.6 mm, 多集中在 7–10 月, 占多年平均降水量的 60%, 年平均蒸发量 884 mm。植被多为落叶阔叶林树种。

2 试验设计

本实验选取黄土地区主要造林树种刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn)、桉树(*Eucalyptus exserta*)、元宝枫(*Acer truncatum* Bunge) 单株为研究对象, 3 种乔木特征见表 1。场降雨的观测时间主要集中于降水集中的 6–9 月, 降雨强度分布范围选定为 $0.6 \sim 60$ mm/h 之间。在充分观测天然降雨的基础上, 利用色斑法进行雨滴的采集和测定, 应用 Image-J、Excel 和 SPSS 软件进行数据处理, 对各树种林冠下降雨特征进行对比分析。

表 1 三种乔木测树指标

树种	树龄/a	郁闭度/%	叶面积指数	林冠高度/m	树高/m
刺槐	15	90	3.5	2	10
元宝枫	15	85	3.2	2	8
桉树	15	85	3.0	2	12

3 研究方法

3.1 降雨观测

本试验采用上海仪器厂生产的 SJ 型虹吸式自记雨量计记录降雨全过程。雨量计主要包括承水器、记录笔和自记钟筒, 自记钟筒上有记录纸。此雨量计可以较完整地记录降雨随时间的变化、次降雨量、降雨历时, 雨量计 24 h 时间误差为 5 min。

将雨量计布设在开阔无遮挡物区域, 避免降雨受建筑物和高大树木的影响。当降雨开始时, 在记录纸上记下降雨开始的具体时间, 在降雨的过程中, 只需要检查记录笔是否正常即可, 待降雨结束后取下记录纸, 进行降雨强度的计算。

3.2 雨滴取样及测量

我国目前研究雨滴大小所采用较普遍的方法是滤纸色斑法^[8], 本研究同样采用此方法观测雨滴直径。滤纸使用新华造纸厂出品的直径为 15 cm 的定性中速滤纸; 涂料用天津登峰化学试剂厂生产的曙红和滑石粉的混合粉末, 按其重量比为 1:10 混合均

匀, 用刷子将曙红和滑石粉混合粉末均匀地涂抹在滤纸上备用。在干燥的情况下, 滤纸不显色, 当雨滴降落在滤纸上时, 每个雨滴就产生近似圆形的色斑。

降雨开始后, 对应自记纸上的时间取雨滴样, 取样高度距地面 20 cm, 并记下对应的时间, 取样间隔 10 min 一次, 同一时间取样重复 3 次。取样结束后, 将雨滴谱放置实验室自然风干。

将采集雨滴的滤纸按 1:1 进行计算机扫描, 然后用 Image-J 软件进行处理, 具体步骤如下:

(1) 进入 Image-J 界面系统, 将扫描文件导入编辑窗口中。

(2) 将图片放大到合适大小, 用直尺功能测出色斑直径, 每个色斑按垂直方向测两次。测量精度为 0.001 mm。

(3) 将测量结果导入 Excel 中, 计算色斑平均直径, 进而推求雨滴实际直径。

利用 Image-J 软件克服了以往用色斑法量测雨滴直径精度低的缺陷, 使测量精度提高了一个数量级, 使得林冠降雨雨谱的精确测量成为可能。

3.3 色斑直径和雨滴直径关系率定

用普通医用注射器针管和不同型号的针头充当雨滴发生器, 先向针管内注入一定量的水, 装上针头, 然后将针管内的水通过针头滴在涂有混合粉末的滤纸上, 同一针头取 10 个点, 滴时保持水滴滴在滤纸上的距离, 距离太近水滴在滤纸上浸润相互间有影响, 误差大。用万分之一天平称 100 滴水重, 每种型号的针头各称取一次, 并一一对应, 计算出每一滴水的质量 m_i ^[9]。假定水滴是球体状的, 算出水滴直径 d (mm), 即:

$$d = (\frac{6m_i}{\pi\rho})^{\frac{1}{3}} \times 10$$

式中: ρ ——水的密度(g/cm^3)。计算出色斑直径 D_i , 这样水滴实际直径和色斑直径形成一一对应关系, 用 Excel 进行回归分析, 并得到色斑直径 D 与水滴直径 d 的关系式:

$$d = 0.37D^{0.74}, R^2 = 0.9443$$

运用上述公式可以求得实际雨滴的直径 d , 进而进行以下分析。

4 结果与分析

天然降雨经过林冠层, 林冠截留改变了其雨滴特性, 使得林下降雨雨滴直径、雨滴大小分布、雨滴速度和雨滴动能均有所改变^[10]。

4.1 雨滴大小分布

雨滴大小和分布是降雨的基本特征。从两次林下降雨 2010 年 7 月 15 日、9 月 6 日和一次林外降雨 2009 年 8 月 3 日的降雨资料中(图 1), 可以看出雨滴

大小分布呈近似正态分布,雨滴直径主要集中于 0.5 ~ 2 mm 之间,且大于 5 mm 的雨滴很少。同时,林下雨滴较林外雨滴偏大,且大雨滴数有明显增加的趋势,这说明林冠降雨中,林冠对雨滴的分配和汇集十分明显。从实际取样中,可以观察到林冠下大雨滴数有明显增加的趋势,尤其是在有风的作用下,大雨滴数量明显增加。

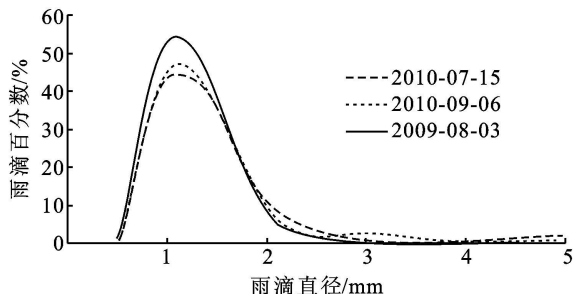


图 1 三次降雨的雨滴大小分布情况

通过大量的雨滴谱观测和统计,发现林外降雨过程中,雨滴中数直径随着降雨强度的增加而增加,且增加的趋势是减弱的。在林冠降雨过程中,这一现象就显得很微小(图 2~4)。从图中可以看出,与林外降雨不同。(1)当降雨强度小于 0.1 mm/min 时,林冠降雨的雨滴中数直径较林外降雨雨滴中数直径大;而当降雨强度增大时,这种趋势却相反,即林外降雨雨滴中数直径大于林冠下雨滴中数直径。在图 1 中,取样的降雨强度介于 0.02~0.07 mm/min 之间,林冠雨滴中数直径明显较林外大,但这种差别随着雨强增大而减少。(2)3 种林冠下雨滴中数直径在一个值附近上下波动。例如:图 2 中元宝枫林冠下雨滴中数直径介于 2~6 mm 之间;图 3 中桉树林冠下雨滴中数直径介于 1~4.5 mm 之间;图 4 中刺槐林冠下雨滴中数直径介于 1~6 mm 之间。说明林下降雨中,由于受林冠的作用,尤其是相对林冠郁闭度较大的林分,雨滴中数直径受降雨强度的影响很小,这与林外降雨有显著区别。

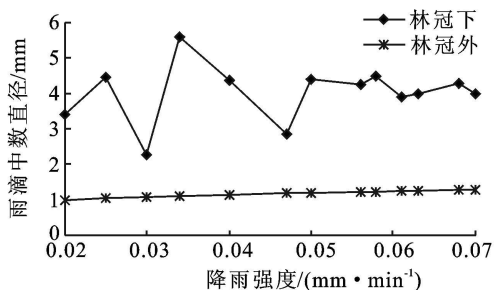


图 2 元宝枫林冠下雨滴中数直径与降雨强度关系

4.2 降雨动能特征

雨滴动能是根据雨滴大小及其组成计算求得。雨滴的降落速度,根据雨滴大小的不同,分别用不同

的公式进行计算^[11-12]。

当雨滴直径 $d < 1.9$ mm 时,用修正的沙玉清公式计算:

$$V = 0.496 \times 10^x$$

$$\text{其中: } x = [28.32 + 6.524 \lg(0.1d) - (\lg 0.1d)^2]^{0.5} - 3.665$$

当 $d \geq 1.9$ mm 时,用修正的牛顿公式:

$$V = (17.2 - 0.844d)(0.1d)^{0.5}$$

式中: V ——雨滴终点速度(m/s); d ——雨滴直径(mm)。

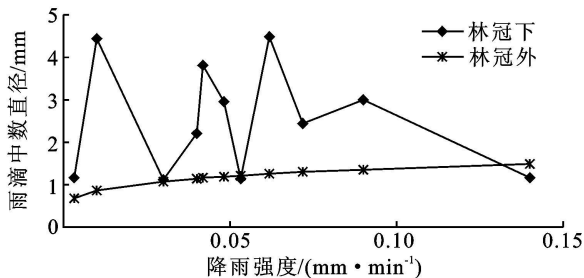


图 3 桉树林冠下雨滴中数直径与降雨强度关系

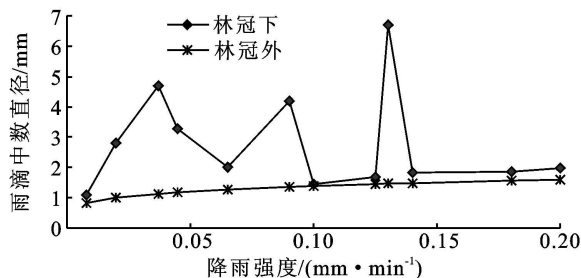


图 4 刺槐林冠下雨滴中数直径与降雨强度关系

由于林冠降雨高度有限,雨滴难以达到充分降落条件下的雨滴终点速度。忽略雨滴在空气中下落过程中的变形,采用徐锐^[13]给出的雨滴降落速度与降落高度的关系式:

$$V_m = V \sqrt{1 - e^{(-\frac{2g}{V^2}H)}}$$

式中: V_m ——雨滴降落速度(m/s); H ——雨滴下落高度(m); g ——重力加速度(m/s²)。

对于单个雨滴,其动能可表示为:

$$e = \frac{1}{12} \pi d^3 V_m^2$$

将雨滴谱上每个雨滴的动能累加,得到滤纸上全部雨滴的总动能 E ;再将滤纸上每个雨滴质量累加,除以水的密度和滤纸面积,得降雨深;雨滴的总动能除以降雨深和滤纸面积,即得到该次降雨在单位面积上单位降雨深所具有的能量。这样可以得到降雨动能的计算公式:

$$E = \frac{1}{2} \frac{\sum (d^3 V_m^2)}{\sum d^3}$$

其中: E ——降雨动能[J/(m²·mm)]

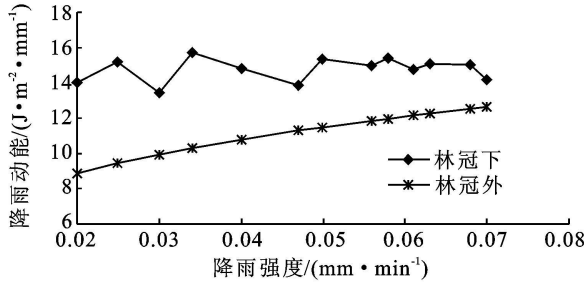


图 5 元宝枫林冠下降雨动能与降雨强度关系

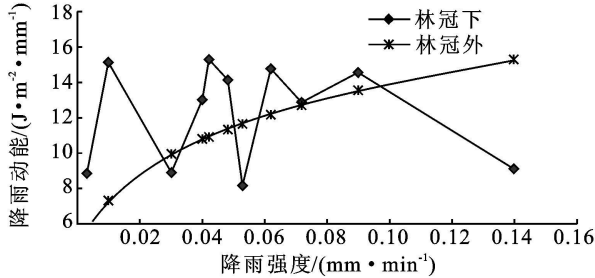


图 6 桉树林冠下降雨动能与降雨强度关系

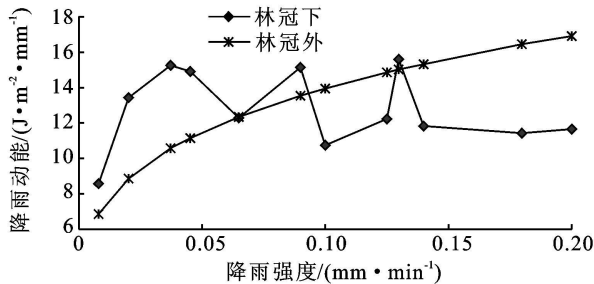


图 7 刺槐林冠下降雨动能与降雨强度关系

从大量的雨滴谱资料可以得到每个降雨时刻的降雨动能, 降雨强度与降雨动能见图 5-7。从直观上看, 林冠降雨动能与林冠雨滴中数直径类似, 在某一个值附近波动, 没有明显的相关关系; 而林外降雨动能有着较显著的相关关系。从本质来说, 这一现象是正常的, 通过前面的分析, 林冠雨滴中数直径在一定区间波动, 而降雨动能最主要的因子就是雨滴直径, 虽然有雨滴速度的影响, 但是, 雨滴速度又直接受到雨滴直径的影响, 所以说, 雨滴直径的大小与降雨动能有很大的联系, 即二者的变化趋势是一致的。

同时, 从图 5-7 中可以看到, 3 种乔木冠下降雨有一个共同过特点, 即在小雨强下, 林冠下降雨动能较林外大, 这个雨强在 0.1 mm/min 左右; 而当雨强大于 0.1 mm/min 时, 林外雨滴动能有大于林冠降雨的趋势。这说明在小雨强时, 林冠有增大降雨动能的作用, 而在大雨强时, 林冠有削减降雨动能的作用, 这对于植被减少土壤侵蚀有着重要意义。元宝枫林冠下降雨动能介于 $15 \sim 16 \text{ J/(m}^2 \cdot \text{mm)}$ 之间; 桉树则介于 $8 \sim 16 \text{ J/(m}^2 \cdot \text{mm)}$, 变化相对前者较大; 刺槐介于 $10 \sim 15 \text{ J/(m}^2 \cdot \text{mm)}$ 。这种差异的原因是 3 种乔木的叶面积指数不同, 叶面积越大汇集雨滴的能

力就强, 雨滴直径就相对较大, 降雨动能就大。对于降雨动能上下波动, 而不是跟天然降雨一样, 随着降雨强度的增大而增大。在取样的过程中, 林冠降雨和林外降雨不同, 林冠降雨有更大的随机性, 即林冠降雨不均匀。在雨滴谱上, 出现的大雨滴数会直接影响着降雨动能的大小, 这里大雨滴直径在 5 mm 以上。如果雨谱上只有一个大雨滴, 那么这个大雨滴的体积可以占到总体积的 50% 或者更多。在取样时, 大雨滴数是随机出现的, 这就导致了降雨能量时大时小, 而不是一个稳定值。

5 结论

天然降雨经过林冠层以后, 雨滴特性发生了改变, 与林外降雨有明显的区别。林冠下雨谱分布呈近似的正态分布, 其中大雨滴数明显多于林外降雨。林冠下雨滴中数直径受降雨强度的影响很小, 主要取决于林冠的郁闭度和叶面积指数。林冠下降雨动能与雨滴中数直径有着同样的趋势, 其值在一个范围内波动, 与降雨强度没有明显的相关关系。

林冠降雨与林外降雨不同, 即在小雨强时(小于 0.1 mm/min), 林冠有增大降雨动能的作用; 而当雨强大于 0.1 mm/min 时, 林冠降雨动能有减小的趋势。同时, 从降雨动能计算公式可以看出林冠的高度也是影响林冠降雨动能的一个重要因子。林冠低, 雨滴速度降低, 降雨动能减少。这就为实际水土保持林建设中, 要坚持林、灌、草相结合的方针相吻合。通过林灌草的综合作用, 来消除雨滴对地面的击溅侵蚀。

参考文献:

- [1] Best A C. The size distribution of raindrops [J]. Quarterly Journal of the Royal meteorological Society, 1950, 76: 16-36.
- [2] 罗德, 余新晓, 董磊. 密云山区林冠层对天然降雨能量影响的初步研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 60-63.
- [3] 李维, 余新晓, 岳永杰. 黄土地区主要树种的林冠降雨特征分析[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 42-47.
- [4] 张颖, 谢宝元, 余新晓, 等. 黄土高原典型树种幼树林冠层对降雨雨滴特性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(4): 70-76.
- [5] 殷晖, 关文彬, 薛肖肖, 等. 贡嘎山暗针叶林林冠对降雨能量在分配的影响研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 1-5.
- [6] 李振新, 欧阳志云, 郑华, 等. 卧龙地区针叶林及亚高山灌丛对降雨的雨滴谱及能量的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 125-133.

(下转第 42 页)

3.3.2 种间关系分析 雾灵山林场和百花山自然保护区华北落叶松人工林主要种群之间的关系分析结果见图 14、图 15。雾灵山林场华北落叶松林内, 华北落叶松种群和白桦种群在 1~28 m 尺度上相关性很小, 当尺度 $r > 28$ m 时, 二者呈显著性负相关。说明雾灵

山林场华北落叶松种群在小尺度上竞争很小, 随着尺度的增加, 竞争增强。百花山保护区华北落叶松林内, 华北落叶松、白杆和蒙古栎种群之间的关系随尺度的变化表现为在所研究的尺度上, 均呈显著性负相关, 这说明该林分内主要种群的生长势相当, 竞争较激烈。

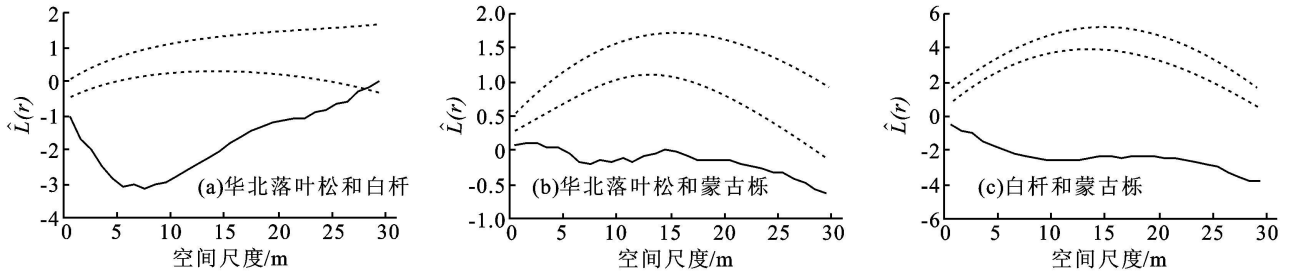


图 15 百花山保护区华北落叶松林主要种群之间的关系

4 结论与讨论

北京山区优势针叶树种群落内主要种群的分布格局随尺度的变化规律明显, 主要以集群分布为主要特征, 但不同优势树种群落的主要种群的最大聚集程度和最大聚集尺度随林分类型的不同差异较大。

密云不老屯油松和槲树种群在整个尺度上呈显著性聚集分布, 密云水源站油松种群在小尺度上油松种群的分布格局呈随机分布, 在中大尺度上呈聚集分布。两侧柏林主要种群的分布格局随尺度的变化规律基本一致, 呈显著性聚集分布, 十三陵林场侧柏种群的聚集程度明显高于锥峰山林场侧柏种群。华北落叶松种群的分布格局随尺度的变化规律为在小尺度上呈均匀分布, 在中尺度上呈显著性集群分布, 在大尺度上呈随机分布, 样地内的伴生种群的分布格局随尺度的变化均呈显著性聚集分布。

北京山区针叶林不同优势树种群落内, 主要种群之间的关系以显著性负相关关系为主, 部分种群之间随着尺度的增加, 种间负联结性减弱, 无种群关系为正相关的针叶林群落。

参考文献:

- [1] Dale M R T. Spatial pattern analysis in plant ecology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 207-276.
- [2] Greig Smith P. Quantitative plant ecology [J]. Blackwell, 1983, 6(1): 21-36.
- [3] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析 [J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 344-349.
- [4] 张金屯, 孟东平. 芦芽山华北落叶松林不同龄级立木的点格局分析 [J]. 生态学报, 2004, 24(1): 35-40.
- [5] Moer M. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data [J]. For. Sci., 1993, 39: 756-775.
- [6] Batista J, Maguire D. Modeling the spatial structure of tropical forest [J]. Forest Ecology, 1998, 110: 293-314.
- [7] Reyes Tirado. Shrub spatial aggregation and consequences for reproductive success [J]. Oecologic, 2003, 136: 296-301.
- [8] Szwagrzyk J. Small-scale pattern of trees in a mixed *Pinus sylvestris*-*Fagus sylvatica* forest [J]. Forest Ecology and Management, 1992, 51(4): 301-315.
- [9] Besag J. Contribution to the discussion of Dr Ripley's paper [J]. Journal of the Royal Statistical Society: series B, 1977, 39: 193-195.
- [10] Diggle P. Statistical Analysis of Spatial Point Patterns [M]. New York: Academic Press, 1983: 53-67.
- [11] Haase P. Spatial pattern analysis in ecology based on Ripley's K-Function: introduction and methods of edge correction [J]. Journal of Vegetation Science, 1995, 6(4): 575-582.
- [12] Ripley B D. Modeling spatial pattern [J]. Journal of the Royal statistical Society: Series B, 1977, 39: 172-212.

(上接第 35 页)

- [7] 周国逸. 几种常用造林树种冠层对降水动能分配及其生态效益分析 [J]. 植物生态学报, 1997, 21(3): 251-259.
- [8] 江忠善, 宋文经, 李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究 [J]. 中国水土保持, 1983(3): 32-36.
- [9] 舒若杰, 高建恩. 基于计算机绘图软件的雨滴谱测定新方法 [J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(3): 65-69.
- [10] 王彦辉. 几个树种的林冠降雨特征 [J]. 林业科学, 2001, 37(4): 2-9.
- [11] 雷阿林, 张学栋, 唐克丽. 几种计算水滴降落速度方法的比较 [J]. 水土保持通报, 1995, 15(4): 43-47.
- [12] 牟金泽. 雨滴速度计算公式 [J]. 中国水土保持, 1983(3): 40-41.
- [13] 徐锐. 关于天然降雨和人工降雨的动能计算方法 [J]. 中国水土保持, 1983(3): 37-39, 21.