

doi: 10.3969/j.issn.1002-7351.2013.04.08

季风气候下林冠降雨初次分配特征及其 主效驱动因子分析

陈健果¹, 方秦华^{1,2}, 胡宏友^{1,2}

(1. 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361005;

2. 厦门大学海洋与海岸带发展研究院, 福建 厦门 361005)

摘要: 运用调查统计和偏冗余方法分析中国温带至亚热带季风气候下的针、阔叶林冠层降雨初次分配特征, 并对该生态过程的影响因子进行分析。结果表明: 季风气候下, 林冠降雨初次分配总体呈现平均透雨率 > 截留率 > 茎流率的趋势; 不同林型、气候带的林冠降雨初次分配差异明显, 林冠降雨平均截留率呈现温带 > 亚热带、针叶林 > 阔叶林的趋势。不同林型间(针叶和阔叶林)主效驱动因子相似, 均以森林结构类因子为主, 气候类因子居次; 不同气候带间主效驱动因子不同, 温带为气候类因子, 亚热带为森林结构类因子。说明, 大尺度下总体呈现气候类因子、森林结构类因子 > 地理地形类因子。研究结果可为评估和合理干预森林生态水文过程提供参考。

关键词: 森林冠层; 降雨初次分配; 气候带; 森林类型; 偏冗余分析

中图分类号: S715.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-7351(2013)04-0035-06

Features of Tree Canopy Rainfall Initial Distribution and Analysis of Its Main Driving Factors in Monsoon Climate

CHEN Jian-guo¹, FANG Qin-hua^{1,2}, HU Hong-you^{1,2}

(1. College of Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

2. Coastal and Ocean Management Institute (COMI), Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: This paper applied investigation statistics and partial redundancy analysis to analyze the history data related rainfall partitioning from temperate zone to subtropical zone of China. It analysed the effect factors of the ecological course. Results obtained demonstrated that in monsoon climate, canopy rainfall primary distribution showed that average saturating rain rate > interception flow rate > stem flow rate. the canopy rainfall initial distribution such as interception loss presented a trend that temperate zone > subtropical zone; coniferous forests > broadleaf forests. And the dominated driving factors of coniferous and broadleaf forests were vegetation structures, meteorological conditions took the second place; different temperate and subtropical zones had different main driving factors, meteorological conditions for temperate zone and vegetation structures for subtropical zone respectively. It showed that meteorological conditions and vegetation structures > geographical and topographical characters. The above results could provide reference for evaluating and intervening reasonably the eco-hydrological process of forests.

Key words: forest canopy; rainfall initial distribution; climatic zone; forest type; partial redundancy analysis

通过对降雨的再分配调节区域水分平衡是森林的主要生态服务功能之一。降雨首先通过森林冠层并被部分截留, 从而形成了森林降雨的初次再分配效应。对森林生态系统而言, 林冠对降雨的初次分配具有十分重要的生态作用, 它不仅影响林地水分平衡^[1], 同时也影响林地的养分循环^[2], 历来都是研究的重点。国内外均有大量研究报道森林冠层降雨初次分配数据^[3-6]、测定方法^[7-8]、影响因素^[9-12]以及经验模型^[13-15]等。然而, 研究数据也表明森林冠层降雨初次分配因森林类型和气候不同而差异较大, 且影响因

收稿日期: 2013-01-15; 修回日期: 2013-04-09

基金项目: 福建省重大专项(福建省重点流域水环境综合管理科技支撑项目)

作者简介: 陈健果(1987—), 女, 福建龙岩人, 厦门大学硕士研究生, 从事森林水文研究。E-mail: chenjgyr@sina.com。

通讯作者: 胡宏友(1968—), 男, 湖北洪湖人, 厦门大学助理教授, 博士, 从事生态修复工程研究。E-mail: hongyouhu@xmu.edu.cn。

素众多,涉及到地理因素、气候因素、森林结构因素等。因此,很难通过单次、单站位的监测寻找规律,需要有长期的、动态的观测数据支撑。但进行大尺度范围的研究较困难,现有的定位研究也未有发表类似的统计数据。为此,本文拟采用统计的方法,从大尺度的角度分析比较历史数据,挖掘变化规律及信息,以解决林冠降雨初次分配变化规律及影响因子的实证问题。

1 材料与方法

1.1 数据的获取与处理

本研究主要针对44个观测点(分别位于黑、辽、冀、京、闽、浙、粤、蜀、滇、晋、宁、藏、鄂、湘、苏)针、阔叶林冠层的降雨分配因子及其影响因子(图1)。其中,林冠层降雨分配因子选取截留率(大气降雨被树冠截留的部分/降雨量)、茎流率(大气降雨透过树冠到达地面的部分/降雨量)和透雨率(大气降雨顺树干流入林地的部分/降雨量);其影响因子主要选取地理地形类指标(经度、纬度、坡度)、气候类指标(降雨量、温度、湿度)、森林结构类指标(郁闭度、树龄、树高、胸径)共10项。

各项指标数据来源于1990—2011年《生态学报》、《应用生态学》、《水土保持》、《林业科学》等。有关林冠层降雨初次分配的研究文献,根据气候类数据将观测点分为2个气候带:温带季风气候和亚热带季风气候,且根据林型划分为针叶林和阔叶林。

1.2 偏冗余分析

偏冗余分析是一种约束直接梯度分析法,其最大优势在于能独立保持各个变量对环境的贡献率^[16],能提取最大程度上代表所有影响因子的最小变量组^[17]。本研究以降雨分配因子为响应变量,影响因子为解释变量,利用CANOCO 4.5和Canodraw软件实现偏冗余分析及绘制等值线图,筛选出季风气候下不同气候带、不同林型的林冠降雨初次分配的主效驱动因子。所有原始数据均进行归一化处理,变量显著性经过499次的Monte Carlo检验。

1.3 统计分析

SPSS 13.0 统计分析林冠降雨初次分配规律, Excel 2003 进行降雨分配因子和影响因子的归一化处理。



○为温带针叶林; □为温带阔叶林; ●为亚热带针叶林; ■为亚热带阔叶林

图1 观测点位置分布图

2 结果与分析

2.1 森林冠层降雨初次分配比率

统计结果(表1)表明,森林冠层降雨初次分配总体呈现透雨率 > 截留率 > 茎流率,平均值分别为74.01%、22.99%、2.93%,差异均达极显著水平($P < 0.001$);三者的变异系数分别为10.99%、38.66%、159.24%,表明透雨率和截留率属于弱变异性,茎流率属于强变异性。

2.2 温带与亚热带森林的林冠降雨初次分配差异

森林冠层降雨初次分配受气候带变化的影响见表1。温带森林的平均截留率和茎流率分别是亚热带森林的1.07和1.34倍;温带森林平均截留率、茎流率和透雨率的变异系数分别为36.31%、169.53%、8.47%,除茎流率外,均小于亚热带森林相应值。表明亚热带森林林冠降雨初次分配的变异性较温带森林大。

2.3 针叶林与阔叶林的林冠初次降雨分配差异

由表1可知,森林类型不同也会影响到降雨初次分配。总体上针叶林平均截留率(24.07%)是阔叶

林(21.09%)的1.14倍,但茎流率、透雨率要比阔叶林小2.02%、4.02%。针叶林截留率、茎流率、透雨率的变异系数分别为42.41%、178.41%、12.75%,均大于阔叶林相应值,表明针叶林林冠降雨初次分配的变异性较阔叶林大。此外,各分配指标中,茎流率变异系数均大于120%,说明茎流率属于强变异性指标。

2.4 气候带对主效因子的影响

偏冗余分析结果表明(表2),驱动2个气候带森林冠层降雨初次分配的主效影响因子不同。其中,亚热带森林受森林结构类因子树高($P = 0.016$)和郁闭度($P = 0.04$)的显著影响,而温带森林则主要受气候因子年均温度($P = 0.006$)和年均湿度($P = 0.05$)极显著或显著影响。偏冗余等值线图2a进一步表明,亚热带主效影响因子,郁闭度、树高分别是近似垂直于截留率、茎流率等值线,表明郁闭度主要影响截留率,树高主要影响茎流率。因此,森林结构因子主要通过影响林冠截留和树干径流来调节亚热带森林冠层的降雨

表1 季风气候下不同气候带、不同林型的森林冠层降雨初次分配 %

| 项目 | 分配因子 | 平均值 ± SD | 范围 | 变异系数 |
|-----|------|---------------|---------------|--------|
| 温带 | 截留率 | 23.67 ± 8.59 | 3.10 ~ 39.89 | 36.31 |
| | 茎流率 | 3.47 ± 5.89 | 0.09 ~ 22.50 | 169.53 |
| | 透雨率 | 72.69 ± 6.15 | 59.76 ~ 83.20 | 8.47 |
| 亚热带 | 截留率 | 22.22 ± 9.72 | 11.56 ~ 36.97 | 43.75 |
| | 茎流率 | 2.59 ± 3.35 | 0.01 ~ 13.90 | 129.47 |
| | 透雨率 | 75.20 ± 10.03 | 48.21 ~ 84.50 | 13.34 |
| 针叶林 | 截留率 | 24.07 ± 10.21 | 3.10 ~ 51.60 | 42.41 |
| | 茎流率 | 2.91 ± 5.18 | 0.09 ~ 22.50 | 178.41 |
| | 透雨率 | 72.90 ± 9.30 | 48.21 ~ 87.22 | 12.75 |
| 阔叶林 | 截留率 | 21.09 ± 5.72 | 12.30 ~ 33.24 | 27.13 |
| | 茎流率 | 2.97 ± 3.74 | 0.60 ~ 13.90 | 125.87 |
| | 透雨率 | 75.95 ± 5.27 | 66.05 ~ 83.30 | 6.94 |
| 总计 | 截留率 | 22.99 ± 8.89 | 3.10 ~ 39.89 | 38.66 |
| | 茎流率 | 2.93 ± 4.66 | 0.01 ~ 22.50 | 159.24 |
| | 透雨率 | 74.01 ± 8.13 | 48.21 ~ 87.22 | 10.99 |

初次分配。图2b则表明,温带森林年均温度、年均湿度都近似垂直于截留率等值线,说明气候因子主要是通过影响林冠截留来调节温带森林林冠降雨初次分配。

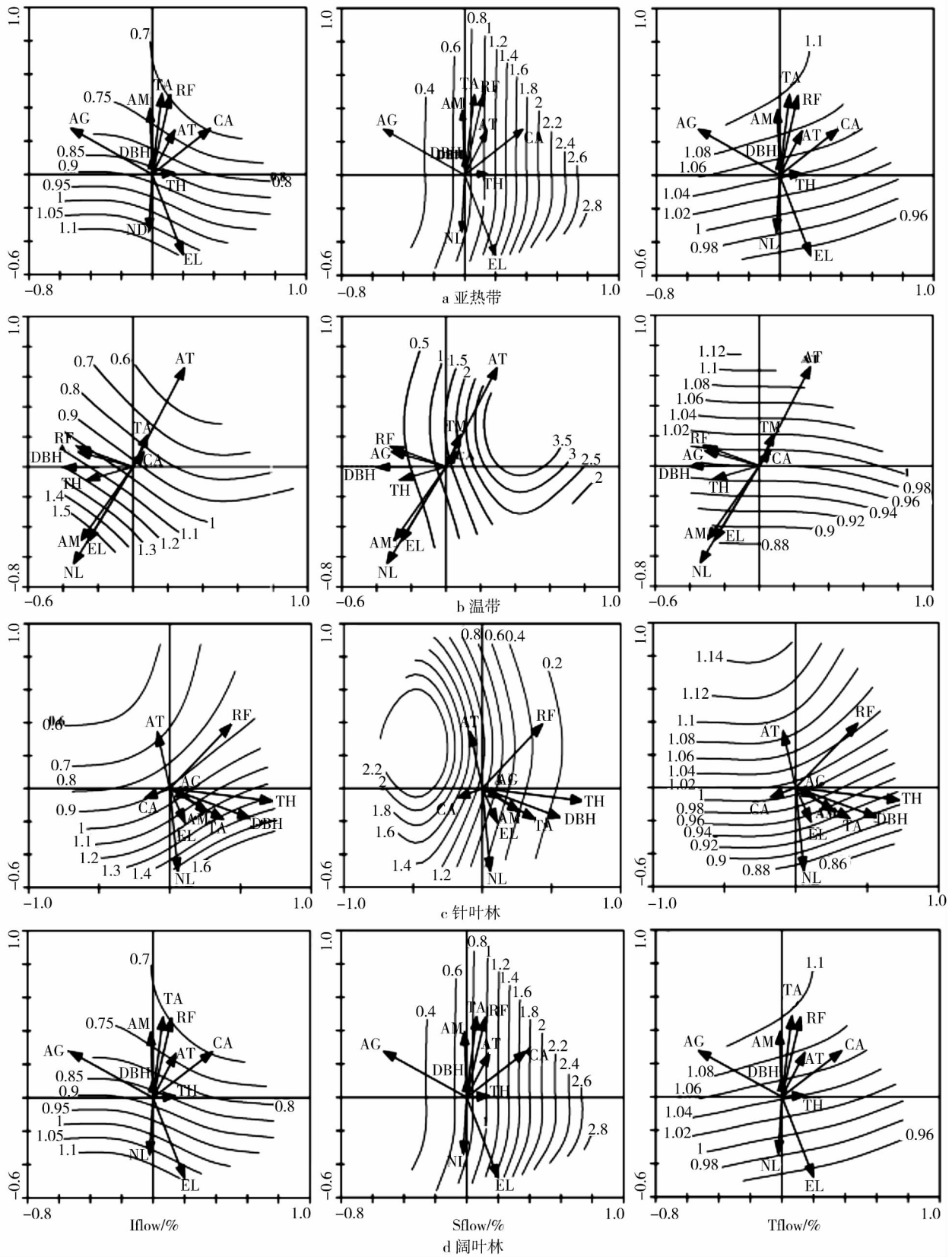
表2 季风气候下不同气候带、不同林型环境变量在偏冗余分析中的前瞻选择特征值

| 变量 | 温带 | | 亚热带 | | 针叶林 | | 阔叶林 | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 特征值 | P | 特征值 | P | 特征值 | P | 特征值 | P |
| 纬度 | 0.11 | 0.120 | 0.02 | 0.538 | 0.03 | 0.262 | 0.06 | 0.154 |
| 经度 | 0.01 | 0.734 | 0.00 | 0.888 | 0.01 | 0.642 | 0.04 | 0.298 |
| 降雨量 | 0.16 | 0.062 | 0.06 | 0.128 | 0.00 | 0.948 | 0.05 | 0.314 |
| 年均温度 | 0.23* | 0.006 | 0.03 | 0.386 | 0.01 | 0.712 | 0.07 | 0.192 |
| 年均湿度 | 0.14* | 0.050 | 0.02 | 0.440 | 0.03 | 0.354 | 0.12* | 0.050 |
| 平均坡度 | 0.05 | 0.100 | 0.07 | 0.138 | 0.04 | 0.304 | 0.21 | 0.052 |
| 树龄 | 0.00 | 0.566 | 0.01 | 0.964 | 0.00 | 0.778 | 0.04 | 0.412 |
| 郁闭度 | 0.04 | 0.208 | 0.19* | 0.034 | 0.02 | 0.452 | 0.21* | 0.040 |
| 胸径 | 0.03 | 0.182 | 0.02 | 0.532 | 0.03 | 0.366 | 0.04 | 0.430 |
| 树高 | 0.00 | 0.872 | 0.15* | 0.020 | 0.22* | 0.012 | 0.02 | 0.668 |

: “”为主效驱动因子(特征值 ≥ 0.05 $P \leq 0.05$)。

2.5 森林类型对主效因子的影响

偏冗余分析还表明(表2),驱动针叶林和阔叶林降雨初次分配的主效影响因子不同。树高($P = 0.012$)是影响针叶林最显著的因子,而郁闭度($P = 0.04$)和年均湿度($P = 0.05$)则是影响阔叶林林冠降雨初次分配的显著因子。偏冗余等值线图2c进一步表明,针叶林主效影响因子树高近似垂直于茎流率等值线,说明树高通过显著减少针叶林的树干径流而影响林冠的初次分配。由图2d可知,年均湿度和郁闭度分别近似垂直于透雨率和截留率等值线,表明年均湿度主要影响阔叶林的林内透雨,而郁闭度则主要影响阔叶林的林冠截留,二者影响降雨在阔叶林冠层的初次分配。



NL 为纬度; EL 为经度; RF 为降雨量; AM 为年均湿度; AT 为年均温度; AG 为平均坡度; CA 为郁闭度; TA 为树龄; TH 为树高; DBH 为胸径; Iflow 为截留率; Sflow 为茎流率; Tflow 为透雨率。

图2 季风气候下不同气候带、不同林型林冠降雨初次分配的偏冗余等值线图

3 结论与讨论

中国季风气候下林冠降雨初次分配总体呈现平均透雨率 > 截留率 > 茎流率的趋势, 两两之间均有显著性差异。而不同气候带、不同林型的初次分配规律存在差异: 林冠平均截留率温带森林 > 亚热带森林, 针叶林 > 阔叶林; 但平均茎流率都具有强变异性。此外, 冗余分析结果表明, 林冠降雨初次分配的主效驱动因子是以气候类和森林结构类因子为主, 地理地形类因子影响较弱。但不同气候带的主效驱动因子不同: 温带主效驱动因子是气候类因子(年均湿度和年均温度), 亚热带则是森林结构类因子(树高和郁闭度); 而不同林型的主效驱动因子均是森林结构类因子, 但阔叶林同时还受到气候类因子(年均湿度) 的显著影响。

温带森林平均截留率是亚热带的 1.07 倍, 这是因为亚热带地区的年均降水量比温带多 1~2 倍, 引起林冠截留饱和及降低了截留率, 巩合德等^[18] 也报道过类似规律。针叶林平均截留率是阔叶林的 1.14 倍, 这表明针叶林的林冠吸附容量要大于阔叶林^[19] 以及针叶间的缝隙更易拦截雨滴^[20], 不过 Toba T 等^[21] 和 Huber A 等^[22] 研究指出阔叶林截留率要大于针叶林。另外, 茎流率属于强变异性, 这是由于影响茎流因素多且复杂, 在不同区域测定所得的结果差异较大, 在同一地区不同树种间的差别也很明显^[23]。

温带森林的主效驱动因子是年均温度和年均湿度, 而亚热带则是郁闭度和树高。之所以产生这种差异, 是由于温带水热同季及多风等气候特征形成较大的降雨雨滴并降低蒸发量, 进而影响冠层降雨的初次分配^[24-25], 以及亚热带森林类型多而复杂造成的树高和郁闭度差异较大。针叶林的主效影响因子是树高, 而阔叶林是郁闭度和年均湿度; 这种差异主要是由于不同林型各自的生态特性所造成的。

本研究还表明, 主效驱动因子主要是作用于林冠截留和树干径流, 进而影响冠层降雨初次分配。其中, 年均温度、年均湿度和郁闭度均主要影响林冠截留, 树高主要影响树干径流。这说明了林冠截留作为冠层降雨初次分配的第 1 层次, 其大小及影响因素对于林冠降雨初次分配的整个生态过程具有举足轻重的作用^[26-28]。

参考文献:

- [1] Jetten VG. Interception of tropical rain forest: performance of a canopy water balance model [J]. *Hydrological Processes*, 1996, 10(5): 671-685.
- [2] Avila A, Rodrigo A, Trace m et al. fluxes in bulk deposition, throughfall and stemflow at two evergreen oak stands in NE Spain subject to different exposure to the industrial environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 171-180.
- [3] Johnson RC. The interception, throughfall and stemflow in a forest in highland Scotland and the comparison with other upland forests in the UK [J]. *Journal of Hydrology*, 1990, 118: 281-287.
- [4] Marin CT, Boutena W, Sevinka J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 237: 40-57.
- [5] Vernimmen RRE, Bruijnzeel LA, Romdoni A et al. Rainfall interception in three contrasting lowland rain forest types in Central Kalimantan, Indonesia [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(3/4): 217-232.
- [6] 胡珊珊, 于静洁, 胡堃, 等. 华北石质山区油松林对降水再分配过程的影响 [J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1751-1757.
- [7] Delphis F, Levia Jr, Ethan E et al. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 274: 1-29.
- [8] 李良, 孙旭, 翟洪波, 等. 我国林冠对降水再分配作用的研究进展 [J]. *辽宁林业科技*, 2010(1): 47-50.
- [9] Herwitz SR. Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stemflow and throughfall generation [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, 12: 425-432.
- [10] Crockford RH, Richardson DP. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate [J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14: 2903-2920.
- [11] Staelens J, Schrijver AD, Verheyen K, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22: 33-45.

- [12] Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe [J]. *Journal of Hydrology* 2007, 335: 37 – 54.
- [13] Jackson NA. Measured and modelled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 2000, 100: 323 – 336.
- [14] Chappell NA, Bidin K, Tych W. Modelling rainfall and canopy controls on net-precipitation beneath selectively-logged tropical forest [J]. *Plant Ecology* 2001, 153: 215 – 229.
- [15] Price AG, Carlyle-Moses DE. Measurement and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 2003, 119(1/2): 69 – 85.
- [16] Ter Braak CJF, Smilauer P. CANOCO Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows (version 4.5) [M]. New York: Centre for Biometry Wageningen 2002, 113 – 180.
- [17] 尹锴, 崔胜辉, 赵千钧, 等. 基于冗余分析的城市森林下层植物多样性预测 [J]. *生态学报* 2009, 29(11): 6085 – 6093.
- [18] 巩合德, 张一平, 刘玉洪, 等. 哀牢山常绿阔叶林林冠的截留特征 [J]. *浙江林学院学报* 2008, 25(4): 469 – 474.
- [19] 党宏忠, 董铁狮, 赵雨森. 水曲柳林冠的降水截留特征 [J]. *林业科学研究* 2008, 21(5): 657 – 661.
- [20] Iida S, Tanaka T, Sugita M. Change of interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak [J]. *Journal of Hydrology* 2005, 315: 154 – 166.
- [21] Toba T, Ohta T. An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests [J]. *Journal of Hydrology* 2005, 313: 208 – 20.
- [22] Huber A, Iroumé A. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile [J]. *Journal of Hydrology* 2001, 248: 78 – 92.
- [23] 鲍文, 包维楷, 何丙辉, 等. 岷江上游油松人工林对降水的截留分配效应 [J]. *北京林业大学学报* 2004, 26(5): 10 – 16.
- [24] Mauchamp A, Janeau JL. Water funnelling by the crown of *Flourensia cernua*, a Chihuahuan Desert shrub [J]. *Journal of Arid Environments*. 1993, 25: 299 – 306.
- [25] Crockford RH, Richardson DP. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate [J]. *Hydrological Processes* 2000, 14: 2903 – 2920.
- [26] Herbst M, Roberts JM, Rosier TW, et al. Measuring and modeling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 2006, 141: 244 – 256.
- [27] Shachnovich Y, Berliner PR, Bar P. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid zone [J]. *Journal of Hydrology* 2008, 349: 168 – 177.
- [28] Sraj M, Brilly M, Mikos M. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 2008, 148: 121 – 134.

《红壤丘陵区严重水土流失综合治理模式及关键技术研究》 获中国水土保持学会科学技术奖一等奖

通过第四届中国水土保持学会科学技术评审委员会评审,经国家科学技术奖励工作办公室批准(国科奖状证字第 0159 号)。由长汀县水土保持事业局组织牵头,福建省水利厅、龙岩市水利局、福建师范大学、福建农林大学、水土保持试验站共同完成的《红壤丘陵区严重水土流失综合治理模式及关键技术研究》获第四届中国水土保持学会科学技术奖一等奖。该项研究包括:(1)“反弹琵琶”理念下的景观格局;(2)“复合型”植被重建模式;(3)退化阈值;(4)环境修复政策可持续;(5)“治坡、降坡、稳坡”三位一体崩岗治理;(6)“草牧沼果”循环种养模式;(7)“老头松”单一林施肥改造;(8)等高草灌带浅沟治理;(9)幼龄果园快速覆盖;(10)测土增肥。