

DOI:10.13332/j.1000-1522.20180284

苏南马尾松林分冠层水文过程对降雨的响应特征

杜妍¹ 孙永涛² 李宗春³ 韩诚¹ 葛波¹ 张金池¹ 庄家尧¹

(1. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 国家林业局华东林业调查规划设计院, 浙江 杭州 310019;

3. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210001)

摘要:【目的】探究不同雨量级、雨强下马尾松林冠截留、树干径流、穿透雨变化的特征与联系, 为苏南丘陵区马尾松林的可持续经营管理提供科学依据。【方法】2012年9月到2013年8月, 选取34年生马尾松林, 使用RG3-M翻斗式自记雨量计、自制树干径流收集装置、集水槽收集降雨、树干径流、穿透雨数据, 定位监测马尾松林外降雨、林冠截留量、树干径流、穿透雨, 建立并验证Gash模型的适用性。【结果】(1)降雨主要集中在5—8月, 林冠截留量、树干径流量、穿透雨量对降雨量有良好的响应, 树干径流率和穿透雨率随着降雨强度和降雨等级的增加呈现上升趋势, 截留率呈现下降趋势。(2)马尾松林冠截留率最大值出现在最小雨量(< 1.0 mm)和 < 1.0 mm/h雨强范围内, 树干径流率最大值出现在中等雨量(≥ 50 mm)和 $1.5 \sim 2.0$ mm/h雨强范围内, 穿透雨量最大值出现在最大雨量级(≥ 50.0 mm)和 $1.5 \sim 2.0$ mm/h雨强范围内, 结果显示马尾松林林冠水文过程对降雨有较好的响应, 降雨强度是影响马尾松林内水文过程的关键因子。(3)通过Gash模型定量分析降雨再分配规律, 经过推导和计算相关参数, 得到的模拟值与实测值有较好的一致性。【结论】马尾松林林冠部分和树干的持水能力分别为1.21、0.1 mm, 形成树干径流的最小降雨量为4.86 mm。本研究可以为马尾松林的截留过程提供较明确和科学的参考。

关键词: 马尾松林; 林冠截留; 树干径流; 穿透雨; Gash模型

中图分类号: S715.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522-(2019)06-0120-09

引文格式: 杜妍, 孙永涛, 李宗春, 等. 苏南马尾松林分冠层水文过程对降雨的响应特征[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(6):120-128. Du Yan, Sun Yongtao, Li Zongchun, et al. Response of hydrological processes of *Pinus massoniana* forest to rainfall in southern Jiangsu Province of eastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(6): 120-128.

Response of hydrological processes of *Pinus massoniana* forest to rainfall in southern Jiangsu Province of eastern China

Du Yan¹ Sun Yongtao² Li Zongchun³ Han Cheng¹ Ge Bo¹ Zhang Jinchi¹ Zhuang Jiayao¹

(1. Nanjing Forestry University Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China,

Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. National Forestry and Grassland Bureau East China Survey Planning and Design Institute,

Hangzhou 310019, Zhejiang, China;

3. Non-ferrous Metals in Jiangsu Province in East China Geological Survey Bureau, Nanjing 210001, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] From September 2012 to August 2013, through the monitoring of *Pinus massoniana* forest by rainfall, canopy interception, trunk runoff, and penetrating rain, exploring the different rainfall levels, rain tightness, masson pine canopy interception, trunk runoff, and the characteristics and linkages of the changes in the rain. This paper aims to provide a scientific basis for the sustainable management of the masson pine forest in the hilly area of southern Jiangsu Province of eastern China. [Method] The 34-year-old *Pinus massoniana* forest was selected, and the applicability of the Gash model was established and

收稿日期: 2018-09-08 修回日期: 2018-11-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505506), 江苏省高等学校自然科学基金项目(16KJA220003)。

第一作者: 杜妍。主要研究方向: 森林水文与水土保持。Email: 1807814130@qq.com 地址: 210037 江苏省南京市玄武龙蟠路159号南京林业大学。

责任作者: 庄家尧, 副教授。主要研究方向: 森林水文与水土保持。Email: nlzjiayao@njfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

verified using the RG3-M tipping bucket self-recording rain gauge, self-made trunk runoff collection device, collecting sump to collect rainfall, trunk runoff, and penetrating rain data. [Result] (1) Rainfall is mainly concentrated in May–August, and there was a significant linear correlation between canopy interception, trunk runoff, penetrating rainfall and rainfall, and trunk flow rate and penetration rate with rainfall intensity and rainfall level. The increase was on the rise, but the interception rate was reversed. (2) The maximum interception rate of *Pinus massoniana* forest appeared at the minimum rainfall level (< 1.0 mm), the rain intensity was < 1.0 mm/h, and the maximum trunk runoff rate appeared in moderate rainfall (≥ 50 mm) and rain intensity of 1.5–2.0 mm/h and the maximum rainfall penetration occurred in the maximum rainfall level (≥ 50.0 mm) and the rain intensity range of 1.5–2.0 mm/h. The results showed that the hydrological process of *Pinus massoniana* forest had good response to rainfall and rainfall intensity was a key factor affecting the hydrological process in *Pinus massoniana* forest. (3) Quantitative analysis of rainfall redistribution law by Gash mode by calculating relevant parameters, the obtained simulated values were in good agreement with the measured values. [Conclusion] The water holding capacity of the canopy part and trunk of Masson pine forest was 1.21 and 0.1 mm, respectively, and the minimum rainfall of trunk runoff was 4.86 mm. This study can provide a clear and scientific reference for the interception process of *Pinus massoniana* forest, and provide reliable data and theoretical basis for forest ecological hydrological function in the hilly area of southern Jiangsu Province of eastern China.

Key words: *Pinus massoniana* forest; canopy interception; trunk runoff; penetrating rain; Gash model

森林在维护林分生态系统稳定性、净化大气、涵养水源、蓄水保土等方面占据着重要的地位。生态系统中森林和水相互作用的主要体现方式为森林林冠水文效应^[1], 林冠层对降雨的截留和再分配是大气降水调节作用的首要表现形式^[2], 降雨的时空分配格局被林冠对降雨的再分配所改变, 影响着土壤–植物–大气连续体中的水分流动和养分循环, 对林地土壤水和地下水的补给及循环产生重要影响^[3]。林冠水文效应主要包括林冠截留、树干径流、穿透雨, 国内外学者通过对林冠水文过程研究, 取得了许多重要成果, 孙忠林等^[4]通过对比分析蒙古栎(*Quercus mongolica*)林和杂木林林冠水文过程, 发现降雨再分配过程因降雨特征和林冠特征不同而存在差异。石磊等^[5]通过长期定位监测探究大兴安岭落叶松(*Larix gmelinii*)林对降雨的截留再分配的分布规律, 结果表明降雨再分配的水文分量为穿透雨最多, 林冠截留量次之, 树干径流量最少。赵明杨等^[6]通过“林分自创性”假说和实际观测变量建立了可在黄土高原地区森林水文效应分析中使用的BF神经网络模型, 模拟预测结果较好。

水分是林木生长最主要的因素, 林分的生态功能及林分的生长均被林分涵养水源的功能高低所决定^[7], 不同林分类型涵养水源功能差异明显。马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方主要造林树种, 因其抗风力强、耐干旱、耐烟尘、适应性强的特点, 成为了目前苏南丘陵区主要的防护树种。苏南丘陵区地处长三角地区, 该区经济发达, 人口众多, 导致水资源

消耗巨大。杨丹等^[8]通过定位观测研究了该区毛竹林对小气候影响的效应, 凡国华等^[9]在季节尺度下分析了马尾松林降雨分配格局, 但是在不同雨量级和雨强下林冠水文作用对降雨再分配的影响特征缺少深入探讨。但是关于林冠对降雨再分配在不同雨量级和雨强下的规律缺少深入探讨。本文旨在通过定位观测苏南丘陵区马尾松林1年内林冠水文过程, 建立Gash模型^[10], 评价模拟数值和实测值的差别, 旨在探讨马尾松林林冠在不同降雨等级和降雨强度下对降雨再分配和截留效应, 以及穿透雨的变化特征, 评估马尾松林分水文功能, 为苏南丘陵区生态保护和林分选择提供依据。

1 研究区概况

本试验位于南京市东善桥林场铜山分场(31°35'~31°39'N、118°50'~118°52'E), 属亚热带季风气候, 地形为苏南丘陵, 土壤类型为黄棕壤, 区内气候温暖湿润, 四季分明, 水热资源较丰富, 生长季长, 降水丰沛, 海拔在38~388 m之间, 年平均降水量为1 100 mm, 无霜期为229 d, 年平均气温为15.1℃, 年日照时数为2 199 h。林分类型以马尾松、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、毛竹(*Phyllostachy edulis*)林为主, 均为苏南丘陵区典型林分, 林下灌木、草本主要以山胡椒(*Lindera glauca*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)、苎草(*Arthraxon hispidus*)、草蓼(*Rubus tephrodes*)为主。马尾松林平均林龄为

34 年,郁闭度为 0.49,密度为 725 株/hm²,平均树高为 11.6 m,平均胸径为 213 cm,平均冠幅为 5.3 m,坡度为 21°,坡向西南向,土壤 pH 介于 4.21 ~ 5.12 之间。

2 研究方法

2.1 林冠截留计算

在一次完整的林冠水文过程中,林冠截留量较分散、难以集中收集,本研究根据水量平衡原理计算林冠截留量 $I(\text{mm})$ ^[11-12]:

$$I = P - SF - TF \quad (1)$$

式中: P 为降雨量(mm), SF 为树干径流量(mm), TF 为穿透雨量(mm)。

2.2 林外降雨观测

为避免林冠、林缘对降雨量测定的影响,在样地边缘 20 m 处设置两台 RG3-M 翻斗式自记雨量计,每产生 0.2 mm 降雨记录一次降雨数据,每 5 min 自动采集一次数据,通过两台数据平均进行降雨量数据的校准,按降雨间隔 8 h 划分次降雨的降雨历时。

2.3 树干径流量测定

本研究采用自制装置收集树干径流,树干径流仪呈半圆形容容器,制作材料为喷塑铁皮,将冠层以下、根部以上树干合围,使用塑料水管将树干径流导入双翻斗式雨量计(精度:0.5 mm)中,按照 4 cm 一个径级来划分,选取有代表性的样木(共 6 株)安装仪器进行观测,实验数据剔除误差较大的数据后平均,按林冠投影面积换算成单位面积来计算树干径流。

2.4 林内穿透雨量测定

根据马尾松林林冠分布特征,在 400 m²(20 m × 20 m)的样地内设置 3 个集水槽,通过集水槽来收集穿透雨,为了避免植被过高对穿透雨的影响,需要定期清理。雨后测定集水槽的面积和收集到的穿透雨量,计算出林内穿透雨量。

2.5 Gash 模型

Gash 模型^[8]描述林冠截留包含林冠加湿期、林冠饱和期、林冠干燥期。基本形式为:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = n(1-p-p_t)P'_G + (\bar{E}/\bar{R}) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G) + (1-p-p_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj} + qS_t + p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{Gj} \quad (2)$$

$$P'_G = (-\bar{R}S/\bar{E}) \ln[1 - (\bar{E}/\bar{R})(1-p-p_t)^{-1}] \quad (3)$$

$$\lambda E = (\Delta R_n + \rho C_p D/r_a)(\Delta + \gamma)^{-1} \quad (4)$$

$$\Delta = 40980e_s/(237.3 + T)^2 \quad (5)$$

$$e_s = 6.11 \times 10^{7.5T/(T+237.3)} \quad (6)$$

$$e_T = RH \times e_s \quad (7)$$

$$\rho = 1.276 \times P \times 273/(T + 273) \quad (8)$$

$$r_a = 1/0.056u \quad (9)$$

$$u = (u_0 \times \ln(67.8 \times z - 5.42))/4.87 \quad (10)$$

式中: m 为林冠未达到饱和的降雨次数; n 为林冠达到饱和的降雨次数; I_j 为林冠截留量(mm); p 为自由穿透降雨系数; P'_G 为使林冠达到饱和的降雨量(mm); P_t 为树干径流系数; S_t 为树干持水能力(mm); $\bar{E}$ 为饱和林冠的平均蒸发速率为(mm/h); P_{Gj} 为单次降雨事件的降雨量(mm); $\bar{R}$ 为均降雨强度(mm/h); q 为树干达到饱和产生树干茎流的降雨次数; S 为林冠枝叶部分的持水能力(mm); λ 为水的汽化潜热; R_n 为大气净辐射(W/m²); Δ 为饱和水汽压梯度(hPa/°C);空气密度 ρ (20 °C 时, $1.184 \times 10^3 \text{ g/m}^3$);饱和水汽压差记为 $D(\text{hPa})$,即气温(T)对应的饱和水汽压(E_T)与同温度对应的实际水汽压(e_T)之差($D = E_T - e_T$);空气在常压下的比热为 C_p (1.010 J/(g·°C));空气动力学阻力为 $r_a(\text{s/m})$;大气压强为 P ;干湿计常数 γ (0.066 4 kPa/°C);空气相对湿度为 $RH(\%)$; u 为地面上方 z m 处的风速(m/s); u_0 为地面上方 2 m 处的风速,即测定点的风速(m/s)。

2.6 Gash 模型参数获取方法

因观测降雨为自然降雨,观测样地为天然林地,假定观测降雨期间林冠层蒸发速率和降雨强度比值恒定,即 $\bar{E}/\bar{R}$ 不变,通过降雨强度确定林冠饱和后的平均蒸发速率 $\bar{E}(\text{mm/h})$ 。根据 Dijk 等^[13]采用的方法,绘制穿透雨量与降雨量回归方程,其中降雨量为 X 轴,穿透雨量为 Y 轴,通过 X 轴的截距确定林冠枝叶部分持水能力 $S_t(\text{mm})$ 。绘制穿透雨量与小于 1 mm 的降雨量回归方程,其中回归方程的斜率即为自由穿透降雨系数(p)。绘制树干径流量与降雨量的回归关系方程,其中降雨量为 X 轴,树干径流量为 Y 轴,其中斜率即为树干径流系数(p_t)。

2.7 数据分析方法

使用 EXCEL 软件对试验取得的数据进行整理和分析,并绘制图表。

3 结果与分析

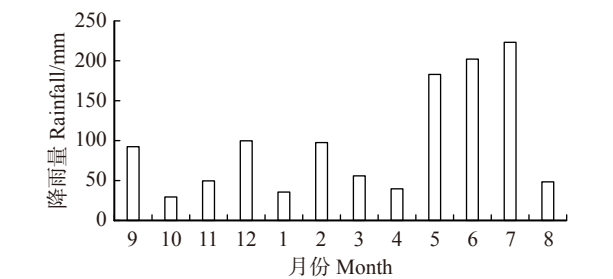
3.1 研究期降雨分配特征

研究期从 2012 年 9 月到 2013 年 8 月累计降雨为 1 156.6 mm,降雨事件共 89 次,该地区降雨量的季节分配不均匀。根据降雨量将 1 年内降雨事件划分为 8 个量级,由表 1 可知,≤ 1 mm、1 ~ 2 mm、2 ~

表 1 不同雨量级降雨分配状况

Tab. 1 Distribution of rainfall in different rainfall levels				
雨量级 Rainfall level/mm	降雨次数 Rainfall time	降雨量 Rainfall/mm	降雨次数频率 Rainfall time frequency/%	占总降雨量的比例 Proportion of total rainfall/%
≤ 1	16	6.8	17.98	0.59
1 ~ 2	14	22.8	15.73	1.97
2 ~ 5	17	68	19.10	5.88
5 ~ 10	11	79.2	12.36	6.85
10 ~ 15	11	138.2	12.36	11.95
15 ~ 25	7	121.6	7.87	10.51
25 ~ 50	8	238.2	8.99	20.59
≥ 50	5	481.8	5.62	41.66

5 mm、5 ~ 10 mm 5 个阶段的小雨事件, 占总降雨量的频率依次为 0.59%、1.97%、5.88% 和 6.85%。≥ 50 mm 的降雨事件占总降雨量的比重最大, 为 41.66%。图 1 为 1 年内各月份降雨分布汇总图, 由图可知, 2012 年 9 月至 2013 年 8 月, 7 月份降雨量最大为 223.2 mm, 10 月份降雨量最小, 仅为 29.4 mm。5—8 月份为苏南地区梅雨季节, 4 个月份的降雨量总和, 占研究期总降雨量的 56.79%。



9 表示 2012 年 9 月; 10 表示 2012 年 10 月; 11 表示 2012 年 11 月; 12 表示 2012 年 12 月; 1 表示 2013 年 1 月; 2 表示 2013 年 2 月; 3 表示 2013 年 3 月; 4 表示 2013 年 4 月; 5 表示 2013 年 5 月; 6 表示 2013 年 6 月; 7 表示 2013 年 7 月; 8 表示 2013 年 8 月。9, September 2012; 10, October 2012; 11, November 2012; 12, December 2012; 1, January 2013; 2, February 2013; 3, March 2013; 4, April 2013; 5, May 2013; 6, June 2013; 7, July 2013; 8, August 2013.

图 1 2012 年 9 月至 2013 年 8 月降雨量汇总

Fig. 1 Summary of rainfall from September 2012 to August 2013

3.2 林冠截留对降雨的响应

图 2 为观测期内 8 个降雨等级下对应的林冠截留量、林冠截留率趋势, 结果显示, 马尾松林冠截留率均随降雨等级增加呈现减小趋势, 林冠截留量呈波动上升趋势, 林冠截留量较大时相应的截留率较低。张学伍等^[14]研究黄土丘陵区油松人工林的水文效应, 得出年降雨量与林冠截留率呈明显的负相关趋势, 均与本文研究结果相似。林冠截留量在 ≤ 1 mm 阶段最小, 最小林冠截留为 5.4 mm, 最大林冠截留率为 81.66%, 表明在雨量较小的情况下, 马尾松林的林冠截留率较高, 林冠截留量在 ≥ 50 mm 阶段最

大, 最大林冠截留量为 400.6 mm, 最小林冠截留率为 15.06%, 表明在雨量较大的情况下, 马尾松林的林冠截留率较低。

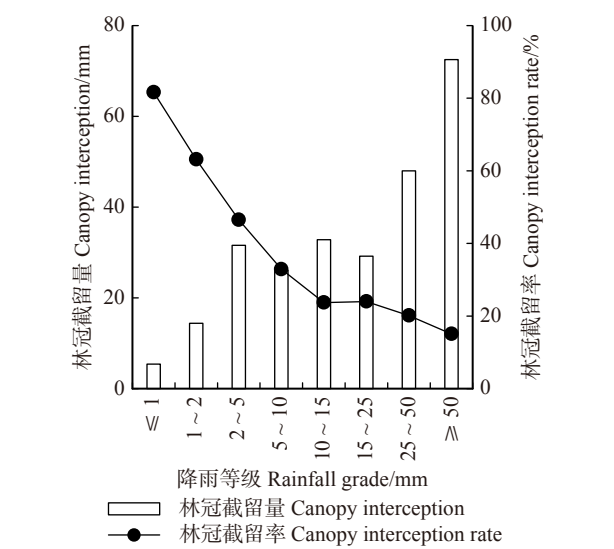


图 2 不同雨量级下林冠截留量和林冠截留率

Fig. 2 Canopy interception and canopy interception rate under different rainfall levels

图 3 为观测期内 6 个降雨强度等级下所对应的林冠截留量和林冠截留率整体变化趋势, 林冠截留率与降雨强度呈现负相关现象, 马尾松林冠截留率随降雨强度的增加而逐渐减小, 林冠截留量呈波动上升趋势, 在雨强为 0.5 ~ 1 mm/h 时林冠截留量最大, 相应的截留率较低。林冠截留量在雨强 ≤ 0.3 mm/h 时最小, 最小林冠截留量为 10.6 mm, 雨强为 0.3 ~ 0.5 mm/h 时林冠截留率最大, 最大林冠截留率为 65.28%, 林冠截留量在雨强 ≥ 2 mm/h 是最大, 最大林冠截留量为 77 mm, 雨强为 1.5 ~ 2 mm/h 时林冠截留率最小, 最小林冠截留率为 14.57%。综合图 2、图 3, 表明林冠截留过程对降雨有较强的响应。

汇总 89 场降雨事件, 将结果拟合成林外降雨量与林冠截留量、林冠截留率的散点图(图 4、图 5), 结

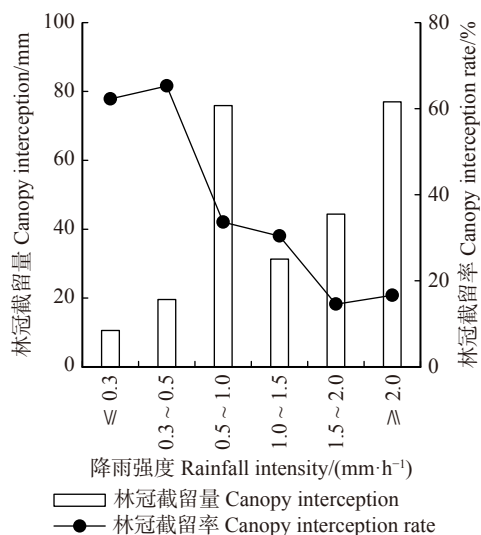


图3 不同降雨强度下林冠截留量和林冠截留率

Fig. 3 Canopy interception and canopy interception rate under different rainfall intensities

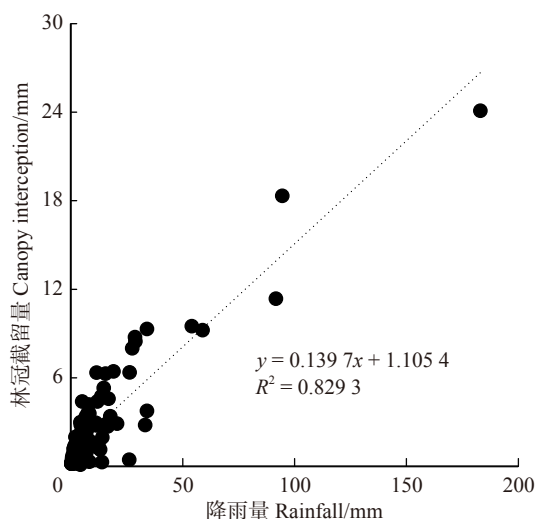


图4 林冠截留量与降雨量的关系

Fig. 4 Relationship between canopy interception and rainfall

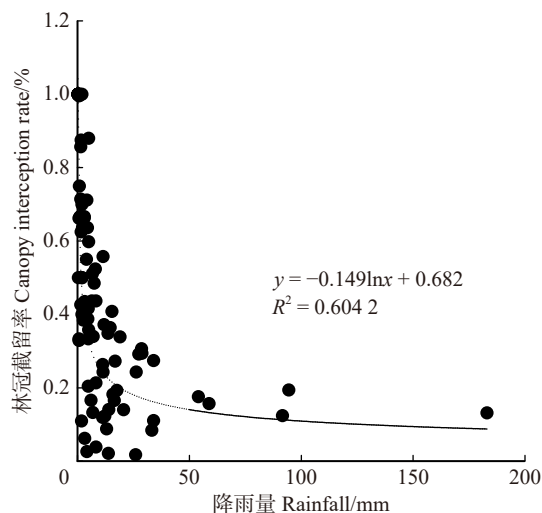


图5 林冠截留率与降雨量的关系

Fig. 5 Relationship between canopy interception rate and rainfall

果表明,林冠截留量与林外降雨量之间存在较好的线性关系,拟合结果为 $y = 0.1397x + 1.1054$, $R^2 = 0.8293$,林冠截留率与林外降雨量之间存在较好的对数关系,拟合结果为 $y = -0.149\ln x + 0.682$, $R^2 = 0.6042$ 。

3.3 树干径流对降雨的响应

图6为观测期内8个降雨等级下对应的树干径流量和树干径流率变化趋势,结果显示,马尾松树干径流量随降雨等级的增加呈现上升趋势,树干径流率呈波动上升趋势,树干径流量较大时树干径流率较大。树干径流量在 ≤ 1 mm 阶段最小,最小树干径流量为 0.01 mm,最小树干径流率为 0.02%,表明雨量较小时,马尾松林的树干径流率较小,树干径流量在 ≥ 50 mm 阶段最大,最大树干径流量为 8.66 mm,最大树干径流率为 1.8%,表明雨量较大时,马尾松林的树干径流率较大。

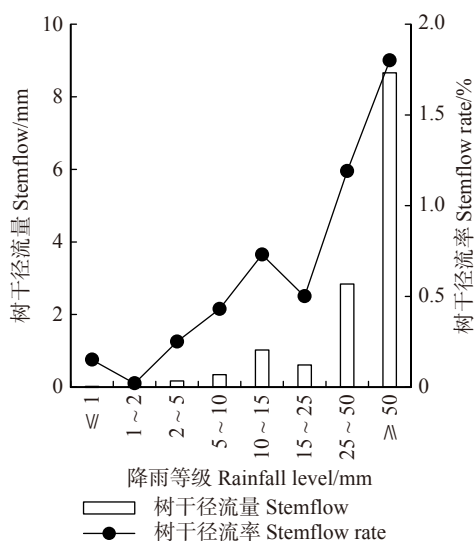


图6 不同雨量级下树干径流量和树干径流率

Fig. 6 Stemflow and stemflow rate under different rainfall levels

图7为观测期内6个降雨强度等级下对应的树干径流量和树干径流率趋势,结果显示,马尾松树干径流率随降雨强度的增加呈现上升趋势,树干径流量呈波动上升趋势,在雨强 $0.3 \sim 0.5$ mm/h 阶段树干径流量最小,最小树干径流量为 0.02 mm,相应的树干径流率最小,最小树干径流率为 0.05%,树干径流量在雨强 ≥ 2 mm/h 阶段最大,最大树干径流量为 6.76 mm,雨强 $1.5 \sim 2$ mm/h 时树干径流率最大为 1.51%,表明降雨强度较大时,马尾松林的树干径流率较高。综合图6、图7,表明树干径流过程对降雨有较强的响应。

观测期间内,马尾松林树干径流量累计为 13.66 mm,树干径流率为 1.18%。汇总 89 场降雨事件,将结果拟合成降雨量和树干径流量的散点图(图8),

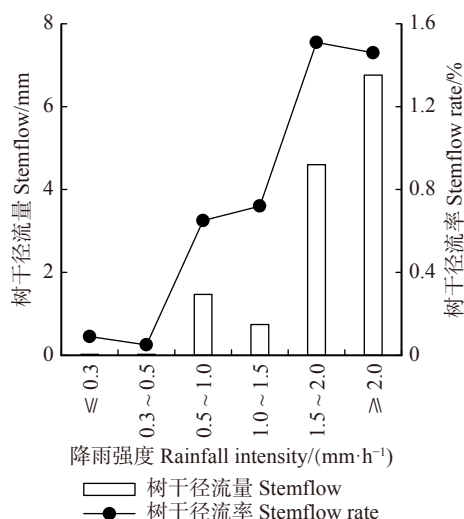


图7 不同降雨强度下树干径流量和树干径流率

Fig. 7 Stemflow and stemflow rate under different rainfall intensities

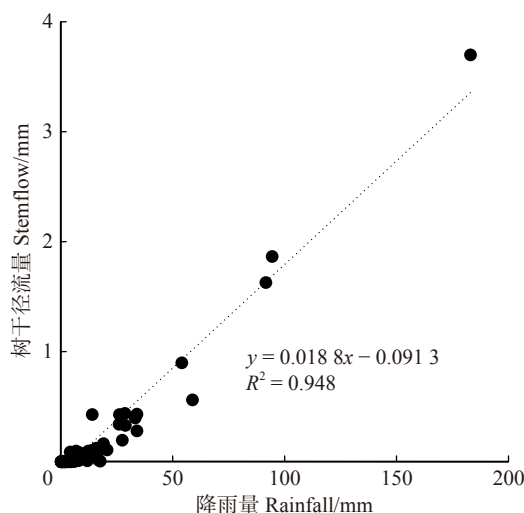


图8 树干径流与降雨量的关系

Fig. 8 Relationship between stemflow and rainfall

结果表明, 树干径流量和降雨量之间存在较好的线性关系, 拟合结果为 $y = 0.0188x - 0.0913$, $R^2 = 0.948$ 。

3.4 穿透雨对降雨的响应

图9为观测期内8个降雨等级下对应的穿透雨量、穿透雨率趋势, 结果显示, 马尾松林穿透雨率随降雨等级增加呈现增加趋势, 穿透雨量呈波动上升趋势, 穿透雨量较大时相应的穿透雨率较大。穿透雨量在 ≤ 1 mm 阶段最小, 最小穿透雨量为 1.4 mm, 相应的最小穿透雨率为 20.59%。在降雨量较大时, 马尾松穿透雨量较大, 当降雨等级大于 50 mm 时, 穿透雨量达到最值, 最大值为 400 mm, 最大穿透雨率为 83.15%。

图10是观测期内6个降雨强度等级下对应的穿透雨量、穿透雨率趋势, 结果显示, 马尾松穿透雨率随降雨强度的增加呈现增加趋势, 穿透雨量呈波动上升趋势, 在雨强 ≤ 0.3 mm/h 阶段穿透雨量最小, 最小穿透雨量为 6.4 mm, 相应的穿透雨率最小,

最小穿透雨率为 20.59%, 穿透雨量在雨强 ≥ 2 mm/h 阶段最大, 最大穿透雨量为 379.4 mm, 在雨强 1.5 ~ 2.0 mm/h 阶段穿透雨率最大为 83.92%, 表明当降雨强度较大时, 马尾松林的穿透雨率较高, 穿透雨对降雨过程有较强的响应。

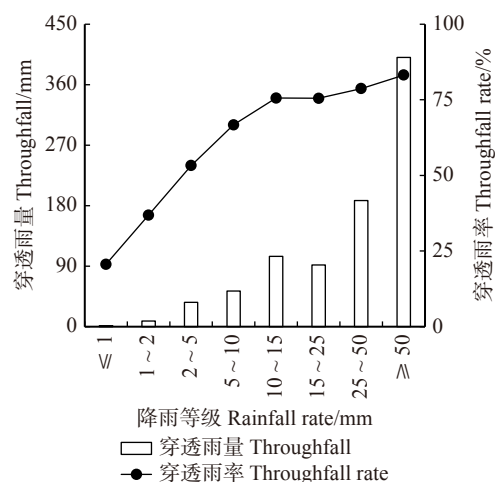


图9 不同雨量级下穿透雨量和穿透雨率

Fig. 9 Throughfall and throughfall rate under different rainfall levels

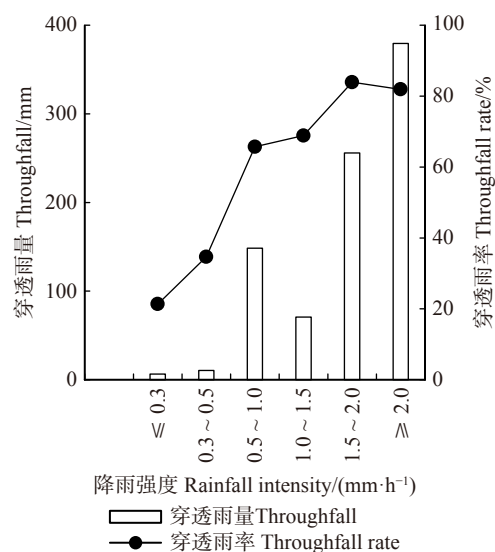


图10 不同降雨强度下穿透雨量和穿透雨率

Fig. 10 Throughfall and throughfall rate under different rainfall intensities

汇总 89 场降雨事件, 将结果绘制成降雨量与穿透雨量、穿透雨率的散点图(图11、图12), 结果表明, 穿透雨量与林外降雨量之间存在较好的线性关系, 拟合结果为 $y = 0.8415x - 1.0141$, $R^2 = 0.9946$, 穿透雨率与林外降雨量之间存在较好的对数关系, 拟合结果为 $y = 0.1468 \ln x + 0.3172$, $R^2 = 0.5978$ 。

3.5 林冠截留模拟结果分析

3.5.1 基础参数

Gash 模型假设在降雨期间降雨量和林冠截留量斜率 $\bar{E}/\bar{R}$ 保持稳定, 马尾松 $\bar{E}/\bar{R}$ 为 0.139, 统计 89 场

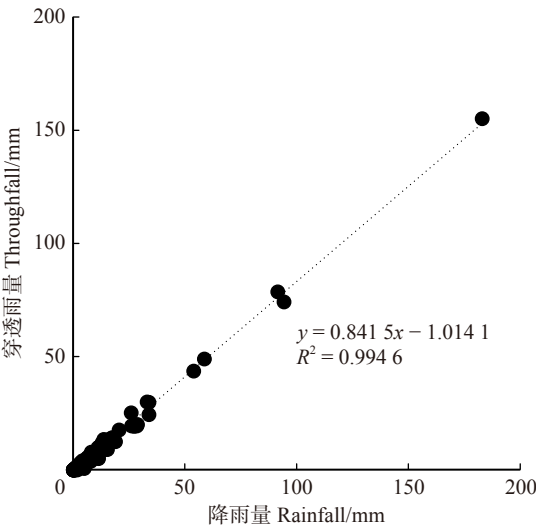


图 11 穿透雨量与降雨量的关系

Fig. 11 Relationship between throughfall and rainfall

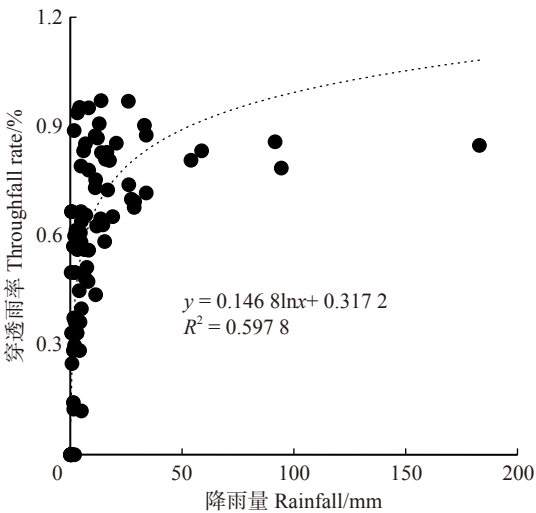


图 12 穿透雨率与降雨量的关系

Fig. 12 Relationship between throughfall rate and rainfall

降雨, 其平均降雨强度 $\bar{R}$ 等于 1.26 mm/h, 推算出马尾松林的饱和林冠平均蒸发速率, $\bar{E}$ 等于 0.18 mm/h。代入 Penman-Monteith 公式求出马尾松的平均蒸发

速率, $\bar{E}$ 等于 0.20 mm/h, 相较于回归关系的估算值差距不大, 表明用 Penman-Monteith 公式算出的实测值相较于用截留量和降雨量回归关系估算出的 $\bar{E}$ 值有较好的统一性, 且误差在可允许的范围内。马尾松林冠枝叶部分的持水能力 S 等于 1.21 mm, Deguchi 等^[15] 探究的大部分乔木林 S 值在 0.25 ~ 1.55 mm 之间波动, 本文马尾松林 S 值符合此范围。综合分析, 小于 1 mm 降雨的降雨次数, 降雨量和穿透雨量回归方程的斜率即为自由穿透雨系数(p)^[16-18], 马尾松自由穿透降雨系数 p 为小于 1 mm 的降雨量和穿透雨量之间的回归关系的斜率, p 等于 0.31。马尾松树干持水能力 S_t 等于 0.091 mm, 马尾松树干径流系数 p_t 为方程的斜率, p_t 为 0.018, 推算出马尾松 P'_G 为 2.02 mm。

3.5.2 模拟结果分析

通过实测计算得到的马尾松林林冠截留量为 1 259.9 mm, 通过 Gash 模型模拟出的马尾松的林冠截留量值为 1 246.2 mm(表 2), 两者差值为 13.7 mm。马尾松的林冠截留率的模拟值较实测值低 1.19%, 其值为 21.29%。王艳萍等^[18] 研究模拟值和实测值相对误差为 8.2%, 王馨等^[19] 研究模拟的相对误差为 4.6%, 本研究通过 Gash 模型模拟出的结果与实测值相差基本不大, 说明 Gash 模型适用于苏南地区马尾松林的截留模拟, 可用于分析马尾松林冠层水文过程。

4 结论与讨论

- (1)研究区以小雨量、低强度的降雨为主要, 多雨期是春夏之交的梅雨和夏季的台风雨, 降雨量是 5 至 8 月份的降雨量之和, 占总降雨量的 56.79%。
- (2)林冠截留率随降雨强度, 降雨等级增加而减小, 林冠截留量波动上升, 对降雨有较强的响应, 但是由于林冠层枝叶的林冠截留能力有限, 吸附和截

表 2 Gash 模型的组成部分

Tab. 2 Components of the Gash model

林冠截留损失的组成部分 Components of the canopy interception loss	截留量表达式 Interception expression/mm	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>
林冠未饱和的 m 次降雨 Canopy unsaturated m -time rainfall	$(1-p-p_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj}$	19.9
林冠达到饱和的 n 次降雨林冠加湿过程 Canopy reaches saturated n -time rainfall canopy humidification process	$n(1-p-p_t)P'_G-nS$	8.7
降雨停止前饱和和林冠的蒸发 Evaporation of saturated canopy before rainfall stops	$(\bar{E}/\bar{R}) \sum_{j=1}^n (P_{Gj}-P'_G)$	140.1
降雨停止后的林冠蒸发 Canopy evaporation after rainfall stops	nS	71.4
树干蒸发, 其中 q 次降雨树干达到饱和, 其余 $(m+n-q)$ 次树干未饱和 The trunk is evaporated, in which the q -time rainfall trunk is saturated, and the remaining $(m+n-q)$ trunks are not saturated	$qS_t+p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{Gj}$	6.1
总截留量 Total interception	I	246.2

留的降雨量存在定量峰值, 林冠降雨再分配不仅与降雨量有关, 也与降雨强度相关^[20]。降雨强度较小时, 降雨到达林冠可有效滋润林冠枝叶, 从而提升了林冠截留率, 贾永正等^[21]在对苏南丘陵区毛竹林的研究中也得到了相同的结论。通过对本文研究年份2012年的分析得出当次降雨强度在0.5~1.0 mm/h时, 降雨强度较小, 林冠截留率相对较大, 有助于马尾松林吸收水分, 对树木的生长有积极的作用。

(3)马尾松树干径流变化主要取决于降雨特征和林分特征^[22], 树干径流随降雨量增加而增加, 线性关系显著。研究发现, 树干光滑的马尾松林树干径流率远远高于树干粗糙的马尾松林, 原因在于粗糙的树干, 更利于吸收水分, 导致树干径流发生的时间较降雨产生时间滞后。

(4)马尾松林穿透雨率随降雨强度、降雨等级增加呈现增加趋势, 穿透雨量波动上升, 对降雨有较强的响应, 研究期间马尾松林的穿透雨率为76.34%, 降雨量较小时, 林冠层枝叶可以截留部分雨水, 吸附和截留的雨水到达林内地表的时间延缓, 导致穿透雨滞后于林外降雨产生, 透过林冠的雨水变少, 使得穿透雨率较低。当降雨量较大时, 穿透雨与林外降雨产生时间基本无差别。此时穿透雨率逐步增加, 但是由于林冠截留能力有限, 冠层饱和后, 穿透雨率基本保持稳定。

(5)通过Gash模型模拟出的结果略低于实测结果, 由于整个模拟过程中, 主要以林冠自身截留能力(S)为基础, 影响着模拟结果的准确性。何常清等^[23]研究得出林冠枝叶部分的持水能力(S)是影响模型准确性的最关键参数。但是在试验过程中 S 值的确定并不包括枝叶表面暂时附着的水分以及其他生物截留的水分, 由于在自然降水过程中, 降雨分布不均匀, 较大降雨强度下降雨历时不同, 往往会忽略较小降雨的截留^[24-26], 从而低估了林冠的截留总量。本文研究降雨过程中林冠再分配受很多因素的影响, 这些偏差都处于合理的范围内, 表明Gash模型可为模拟该地区马尾松林的截留过程提供较明确和科学的参考。

参 考 文 献

- [1] 林海礼. 钱塘江源头不同森林林分的水文功能研究[D]. 临安: 浙江林学院, 2008.
Lin H L. The study on hydrological function of different forest types at the headwaters of QianTang River[D]. Lin'an: Zhejiang Forestry University, 2008.
- [2] 陈书军, 陈存根, 曹田健, 等. 降雨量级和强度对秦岭油松林林冠截留的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1): 41-55.
Chen S J, Chen C G, Cao T J, et al. Effects of rainfall size class and intensity on canopy interception of *Pinus tabulaeformis* forest in the Qinling Mountains, China[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(1): 41-55.
- [3] 李国华, 梁文俊. 森林对降水再分配研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(15): 8568-8569, 8586.
Li G H, Liang W J. Research progress in the redistribution of rainfall by forest[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(15): 8568-8569, 8586.
- [4] 孙忠林, 王传宽, 王兴昌, 等. 两种温带落叶阔叶林降雨再分配格局及其影响因子[J]. 生态学报, 2014, 34(14): 3978-3986.
Sun Z L, Wang C K, Wang X C, et al. Rainfall redistribution patterns and their influencing factors of two temperate deciduous forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 3978-3986.
- [5] 石磊, 盛后财, 满秀玲, 等. 兴安落叶松林降雨再分配及其穿透雨的空间异质性[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 90-96.
Shi L, Sheng H C, Man X L, et al. Rainfall redistribution and the spatial heterogeneity of throughfall in *Larix gmelinii* forest, northeast China[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(2): 90-96.
- [6] 赵明扬, 孙长忠, 康磊. 黄土高原油松人工林水文效应的人工神经网络模型[J]. 西南林业大学学报, 2013, 33(3): 52-55, 86.
Zhao M Y, Sun C Z, Kang L. Artificial neural network model of the hydrological effects of the *Pinus tabulaeformis* plantations in Loess Plateau[J]. Journal of Southwest Forestry College, 2013, 33(3): 52-55, 86.
- [7] 黄修麟. 马尾松细柄阿丁枫异龄复层混交林的水源涵养功能[J]. 福建林业科技, 2011, 38(2): 22-24.
Huang X L. Study on water conservation function of uneven-aged irregular mixed forest of *Pinus massoniana*[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2011, 38(2): 22-24.
- [8] 杨丹, 杨静, 张金池, 等. 南京城郊毛竹林内外气温及土壤温度特征[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(3): 68-73.
Yan D, Yang J, Zhang J C, et al. Regulating air and soil temperature characteristics of inside and outside *Phyllostachys edulis* forest Stands in Nanjing Suburbs[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, 45(3): 68-73.
- [9] 凡国华, 韩城, 孙永涛, 等. 长三角地区马尾松林降雨再分配特征[J]. 西南农业学报, 2019, 32(2): 422-428.
Fan G H, Han C, Sun Y T, et al. Rainfall redistribution in *Pinus massoniana* forest of Yangtze River Delta[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(2): 422-428.
- [10] Gash J C. An analytical model of rainfall interception by forests[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1979, 105: 43-55.
- [11] 曹云, 黄志刚, 欧阳志云, 等. 湖南省张家界马尾松林冠生态水文效应及其影响因素分析[J]. 林业科学, 2006, 42(12): 13-20.
Cao Y, Huang Z G, Ouyang Z Y, et al. Eco-hydrological effect of *Pinus massoniana* canopy and its influence factors in Zhangjiajie of Hunan Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(12): 13-20.
- [12] 裴承敏, 王云琦, 张守红, 等. 重庆缙云山毛竹林次降雨再分配

- 特征及穿透雨的空间异质性[J]. 水土保持学报, 2018, 32(05): 202–207.
- Pei X M, Wang Y Q, Zhang S H, et al. Rainfall redistribution and spatial variability of throughfall of a *Phyllostachys edulis* stand in the Jinyun Mountain national nature reserve at Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(05): 202–207.
- [13] Dijk A I J M V, Gash J H, Gorsel E V, et al. Rainfall interception and the coupled surface water and energy balance[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 214–215: 402–415.
- [14] 张学伍, 陈云明, 王铁梅, 等. 黄土丘陵区中龄至成熟油松人工林的水文效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 93–100.
- Zhang X W, Chen Y M, Wang T M, et al. Trends of hydrological effects of *Pinus tabulaeformis* forest from middle age to mature in the loess hilly region[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2012, 40(1): 93–100.
- [15] Deguchi A, Hattori S, Park H. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: application of the revised Gash model[J]. Journal of Hydrology, 2006, 318: 80–102.
- [16] Hewlett J D, Bosch J M. The dependence of storm flows on rainfall intensity and vegetal cover in South Africa[J]. Journal of Hydrology, 1984, 75: 365–381.
- [17] Llorens P, Poch R, Latron J, et al. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. (I): monitoring design and results down to the event scale[J]. Journal of Hydrology, 1997, 199(3/4): 331–345.
- [18] 王艳萍, 王力, 卫三平. Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5445–5453.
- Wang Y P, Wang L, Wei S P. Modeling canopy rainfall interception of a replanted *Robinia pseudoacacia* forest in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5445–5453.
- [19] 王馨, 张一平, 刘文杰. Gash 模型在热带季节雨林林冠截留研究中的应用[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 722–729.
- Wang X, Zhang Y P, Liu W J. Modeling canopy rainfall interception of a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 722–729.
- [20] 张一平, 王馨, 王玉杰, 等. 西双版纳地区热带季节雨林与橡胶林林冠水文效应比较研究[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2653–2665.
- Zhang Y P, Wang X, Wang Y J, et al. Comparison research on hydrological effect of the canopy of the tropical seasonal rainforest and rubber forest in Xishuangbanna, Yunnan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(12): 2653–2665.
- [21] 贾永正, 胡海波, 张家洋. 苏南丘陵区毛竹林冠截留降雨分布格局[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3537–3542.
- Jia Y Z, Hu H B, Zhang J Y. Canopy interception of rainfall by bamboo plantations growing in the hill areas of southern Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3537–3542.
- [22] 巩合德, 王开运, 杨万勤, 等. 川西亚高山原始云杉林内降雨分配研究[J]. 林业科学, 2005, 41(1): 198–201.
- Gong H D, Wang K Y, Yang W Q, et al. Throughfall and stemflow in a primary spruce forest in the subalpine of western Sichuan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(1): 198–201.
- [23] 何常清, 薛建辉, 吴永波, 等. 应用修正的 Gash 解析模型对岷江上游亚高山川滇高山栎林林冠截留的模拟[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1125–1132.
- He C Q, Xue J H, Wu Y B, et al. Rainfall redistribution in subalpine *Quercus aquifolioides* forest in upper reaches of Minjiang River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 30(5): 1125–1132.
- [24] Schellekens J, Scatena F N. Modelling rainfall interception by a lowland tropical rainforest in northeast Puerto Rico[J]. Journal of Hydrology, 1999, 225: 168–184.
- [25] 盛雪娇, 王曙光, 关德新, 等. 辽宁东部山区落叶松人工林林冠降雨截留观测及模拟[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3021–3028.
- Sheng X J, Wang S G, Guan D X, et al. Canopy interception in larch plantations: measurement and modeling in eastern Liaoning mountainous region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(12): 3021–3028.
- [26] 王欢欢. 空青山次生栎林生态系统水文特征研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- Wang H H. Study on hydrological characteristics of secondary oak forest ecosystem on Kongqing Mountain[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017.

(责任编辑 范娟
责任编委 余新晓)