

南方水土流失区马尾松林降雨截留再分配特征与修正的 Gash 模型模拟

陈妍^{1,2}, 余坤勇^{1,2}, 姚雄^{1,2}, 邓洋波^{1,2}, 林灵辰^{1,2}, 吴南锟^{1,2}, 刘健^{1,2*}

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 3S 技术与资源优化利用福建省高校重点实验室, 福建 福州 350002)

摘要:以我国南方典型水土流失区福建省长汀县河田镇马尾松林为研究对象,观测 2018 年 5—11 月降雨情况,分析马尾松林降雨截留再分配特征,以修正的 Gash 模型模拟林冠截留、树干茎流、穿透雨。结果表明,观测期间研究区共发生 90 次降雨,累计林外降雨量 1 191.0 mm、穿透雨 1 017.7 mm、树干茎流 15.4 mm、林冠截留 156.9 mm,且以低强度、小雨级降雨事件为主。林外降雨量与穿透雨、树干茎流呈线性正相关,与林冠截留呈对数关系。以修正的 Gash 模型模拟林冠截留量、树干茎流量、穿透雨量的均方根误差(RMSE)分别为 1.38、0.15、1.34 mm,估测精度(RM)分别为 84.53%、78.46%、98.04%。在-50%~50%变化范围内分析修正的 Gash 模型参数敏感性,模型参数敏感性顺序为平均降雨强度(\bar{R})>郁闭度(c)>林冠饱和下平均蒸发速率(\bar{E})>树干持水能力(S_t)>树干茎流系数(P_t)>林冠持水能力(S)。

关键词:南方水土流失区;马尾松;降雨再分配;修正的 Gash 模型;林冠截留

中图分类号:S715.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2022)04-0050-07

Redistribution Characteristics of Rainfall Interception and the Modified Gash Model Based Simulation of *Pinus massoniana* in Southern Soil Erosion Area

CHEN Yan^{1,2}, YU Kun-yong^{1,2}, YAO Xiong^{1,2}, DENG Yang-bo^{1,2}, LIN Ling-chen^{1,2},
WU Nan-kun^{1,2}, LIU Jian^{1,2*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;

2. University Key Lab for Geomatics Technology and Optimize Resources Utilization in Fujian Province, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: Taking *Pinus massoniana* forest occurring in Hetian Township, Changting County, Fujian Province, where is a typical soil erosion area as the study object, we observed the rainfall events from May to November 2018 and analyzed the rainfall redistribution characteristics of *P. massoniana*, then the modified Gash model was used to simulate canopy interception, stemflow, and throughfall. The results showed that there were 90 times of rainfall in the study area during the observation period, including 1 191.0 mm of accumulated rainfall outside the forest, 1 017.7 mm of accumulated throughfall, 15.4 mm of accumulated stemflow, 156.9 mm of accumulated canopy interception. The rainfall events were mainly low-intensity and light rain events. The rainfall outside the forest had a linear positive relationship with throughfall and stemflow, and a logarithmic relationship with forest canopy interception. The root mean square error (RMSE) of canopy interception, stemflow, and rainfall derived from the modified Gash model were 1.38, 0.15, and 1.34 mm, respectively with the values of estimation accuracy (RM) of 84.53%, 78.46% and 98.04%, respectively. The parameter sensitivity of the modified Gash model was analyzed in the range of -50%—50%. The order of the sensitivity of the model parameters was average rainfall intensity (\bar{R})>

收稿日期:2021-04-17 修回日期:2021-05-08

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31770760)。

作者简介:陈妍,研究方向:林业 3S 技术应用。E-mail:13696869593@163.com

*通信作者:刘健,博士,教授。研究方向:林业 3S 技术应用。E-mail:fjlujian@126.com

canopy closure (c) > average evaporation rate under canopy saturation (\bar{E}) > tree trunk water holding capacity (S_t) > stemflow coefficient (P_t) > canopy water holding capacity (S).

Key words: Southern China soil erosion area; *Pinus massoniana*; rain redistribution; modified Gash model; canopy interception

降雨是森林水文过程中水分输入的主要方式^[1-3],冠层将降雨分为穿透雨、树干茎流和林冠截留3部分^[4]。其中林冠截留不仅改变降雨空间分布格局^[5],还减缓雨水对土壤体表的侵蚀作用,能够有效改善水土流失现象^[6]。研究降雨再分配特征,探讨林冠截留规律,能够为森林涵养水源、改善水土流失提供理论依据。

林冠截留模型主要分为经验模型、理论模型及半经验半理论模型^[7]。经验模型忽略了林冠截留过程,且模型适用性及推广性较差^[8-9];理论模型计算困难,缺少实际数据支撑等问题,不适用于实际情况;半经验半理论模型结合了经验模型和理论模型的优势^[8],能够描述影响林冠截留的各种因子和截留量的关系^[9],代表为 Gash 模型^[10]。Valente 等^[11]引入郁闭度修正 Gash 模型,修正后的 Gash 模型适用于模拟天然林降雨截留过程^[12-13]。我国学者分析了修正的 Gash 模型对麻栎人工林^[14]、白栎林^[15]、云冷杉针叶混交林^[15]、元宝槭林^[16]、亚热带常绿阔叶林^[17]和南亚热带季风常绿阔叶林^[18]等林分的适用性,并模拟其林冠截留,且结果较好。目前

该模型应用于马尾松林的研究较少,而马尾松作为我国南方水土流失区的主要树种^[21],其林冠减轻了雨水对土壤的直接冲蚀。且水土流失地区土壤肥力低下,导致马尾松植株矮小、枝叶稀疏,与其他地区生长的马尾松存在形态上的差异。因此本研究以南方典型水土流失区长汀县河田镇的马尾松为研究对象,探讨降雨再分配特征,并以修正的 Gash 模型模拟,为治理水土流失提供理论基础及经验。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省长汀县河田镇(25°35′—25°46′ N, 116°16′—116°30′ E),是我国南方典型水土流失区,东邻南山,南与涂坊、濯田接壤,北与新桥相连,西与策武交界(图1)。研究区为亚热带季风性湿润气候,气候温和,年均气温 18.3℃,降雨集中于夏季,雨量充沛,年均降雨量为 1 730.4 mm。地形破碎,岭谷相间,土壤抵抗侵蚀能力低,林地多被马尾松(*Pinus massoniana*)及芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)覆盖,生态环境十分脆弱。

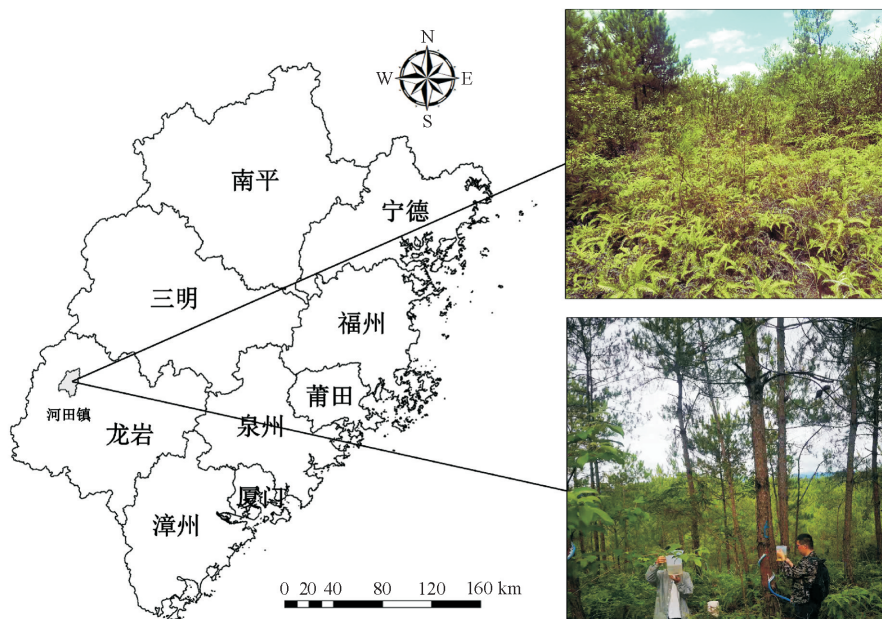


图1 河田镇地理位置

Fig. 1 Geographical location of Hetian Township

1.2 数据获取

于2018年4月在河田镇选取研究区,研究区马尾松平均胸径为 12.00 cm,平均冠幅为 10.34 m,以 LAI-2200 型冠层分析仪(LI-COR)测量得到研

究区郁闭度为 0.32。

在研究区外无冠层覆盖的空地处设置路格 L99-YLWS 翻斗式雨量记录仪,其精度为 0.4 mm,获取降雨时间、降雨量及温湿度因子,设置记录间隔

为 15 min。降雨事件的划分依据为前后 6 h 无降雨,且降雨量 >0.2 mm。为获取林内降雨数据,选取 36 棵标准树,测量树干茎流量。

1.2.1 树干茎流 在距离地面 1.3~1.5 m 处,将纵向切开的软性聚乙烯管以螺旋方式缠绕在标准木树干上,并用硅胶密封聚乙烯管与树干间的空隙,聚乙烯管另一端与树下雨量收集桶相连接,并密封进水口,每次降雨后 24 h 内进行人工收集测量。为避枯落的枝叶堵塞聚乙烯管,影响树干茎流的测定,定期清理掉落在聚乙烯管上的枝叶并检查聚乙烯管与树干间是否存在孔隙,若存在孔隙则用硅胶及时补充。

1.2.2 穿透雨 在研究区内随机布设 72 个自制雨量筒,每次降雨后 24 h 内进行人工收集测量。其中,为满足次降雨量的完全收集,自制雨量筒高度为 0.8 m,口径为 20 cm。

1.3 数据处理

1.3.1 降雨强度 通过加权平均每小时降雨强度计算平均雨强,其公式为

$$R_1 = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{G} \times R_{ti} \quad (1)$$

式中: R_1 为每次降雨事件的平均雨强 (mm/h); n 为降雨中雨量计记录的时间 (h); R_i 为第 i 时内降雨量 (mm); G 为总降雨量 (mm); R_{ti} 为第 i 时雨强 (mm/h)。

1.3.2 穿透雨和树干茎流 将每次降雨事件后 24 h 内测量得到的穿透雨量、树干茎流量分别除以容器的水平横截面积、对应标准树的树冠投影面积,将其转换为等效深度。计算公式为

$$T_F = \frac{V_{TF}}{\pi r^2} \quad (2)$$

$$S_F = \frac{V_{SF}}{10\,000 \times A} \quad (3)$$

式中: T_F 为林内穿透雨量 (mm); V_{TF} 为穿透雨体积 (mL); r 为自制雨量收集桶半径; S_F 为树干茎流量 (mm); V_{SF} 为树干茎流体积 (mL); A 为研究区面积 (m^2)。

穿透雨率与树干茎流率的计算公式为

$$T_{FR} = \frac{T_F}{P} \times 100\% \quad (4)$$

$$S_{FR} = \frac{S_F}{P} \times 100\% \quad (5)$$

式中: T_{FR} 为穿透雨率 (%); T_F 为林内穿透雨量 (mm); S_{FR} 为树干茎流率 (%); S_F 为树干茎流量 (mm); P 为林外降雨量 (mm)。

1.3.3 林冠截留 根据水量平衡公式,可计算得到林冠截留量,其计算公式为

$$I = P - T_F - S_F \quad (6)$$

式中: I 为林冠截留量 (mm); P 为林外降雨量 (mm); T_F 为林内穿透雨量 (mm); S_F 为树干茎流量 (mm)。

冠层截留率计算公式为

$$I_R = \frac{I}{P} \times 100\% \quad (7)$$

1.4 修正的 Gash 模型

修正的 Gash 模型计算林冠截留基本公式为

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = c \sum_{j=1}^m P_{Gj} + \sum_{j=1}^n (c \bar{E}_c / \bar{R}_j) (P_{Gj} - P_G') + c \sum_{j=1}^n P_{Gj}' + qc S_{tc} + c P_{tc} \sum_{j=1}^{n-q} (1 - (\bar{E}_c / \bar{R}_j)) (P_{Gj} - P_G') \quad (8)$$

修正的 Gash 模型计算树干茎流基本公式为

$$\sum_{j=1}^q S_{Fj} = c P_t \sum_{j=1}^q (1 - (\bar{E}_c / \bar{R}_j)) (P_{Gj} - P_G') - qc S_t \quad (9)$$

修正的 Gash 模型计算穿透雨基本公式为

$$\sum_{j=1}^{n+m} T_{Fj} = \sum_{j=1}^m P_{Gj} - \sum_{j=1}^{n+m} I_j - \sum_{j=1}^q S_{Fj} \quad (10)$$

式中: I_j 为第 j 次林冠截留量 (mm); S_{Fj} 为第 j 次树干茎流量 (mm); T_{Fj} 为第 j 次穿透雨量 (mm); m 是观测期间未达到林冠饱和状态降雨事件的次数; n 为观测期间林冠达到饱和状态的降雨事件次数; q 为观测期间树干达到饱和状态,产生树干茎流的降雨事件次数; \bar{R}_j 为第 j 次降雨事件的降雨强度 (mm/h); P_{Gj} 为第 j 次降雨事件的降雨量 (mm); c 为林分郁闭度; \bar{E}_c 为单位面积林冠在饱和状态下的蒸发速率 (mm/h),由林冠饱和状态下平均蒸发速率 (\bar{E}) 除以 c 得到; S_{tc} 是单位面积上树干持水能力 (mm),由树干持水能力 (S_t) 除以 c 得到; P_{tc} 由树干茎流系数 (P_t) 除以 c 得到; P_G' 为林冠达到饱和状态的林外降雨量 (mm)。

林冠达到饱和状态的林外降雨量计算公式为

$$P_G' = -\frac{S_c \bar{R}}{\bar{E}_c} \ln(1 - \frac{\bar{E}_c}{\bar{R}}) \quad (11)$$

式中: S_c 为单位面积林冠持水能力 (mm),由林冠持水能力 (S) 除以 c 得到; \bar{R} 为观测期间平均降雨强度 (mm/h)。

2 结果与分析

2.1 林外降雨特征

2018 年 5—11 月研究区累计降雨事件为 90 次 (图 2),累计降雨量 1 191.0 mm。研究区观测期间以降雨量 0~10 mm 的降雨事件为主,25~50 mm 的降雨事件在累计降雨量上占主导地位 (表 1)。

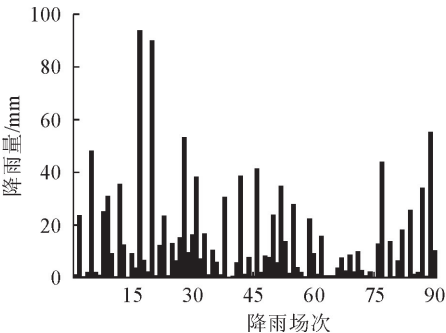


图 2 研究区观测期间降雨量

Fig. 2 Rainfall events during observation in the study area

表 1 降雨等级统计

Table 1 Rainfall level statistics

等级/mm	次数	次数比(%)	累计 降雨量/mm	占总 降雨量比(%)
0~10	56	62.22	175.7	14.75
10~25	18	20.00	296.5	24.90
25~50	12	13.33	427.2	35.87
50~100	4	4.44	291.6	24.48

观测期间降雨强度的变化为 0.4~46.92 mm/h,平均降雨强度为 4.21 mm/h(图 3)。由表 2 可见,将降雨强度按 0~2、2~5、5~10、 ≥ 10 mm/h 进行划分,分别占降雨事件 65.56%、12.22%、8.89%、13.33%;占总降雨量的 24.53%、11.07%、23.61%、40.79%。

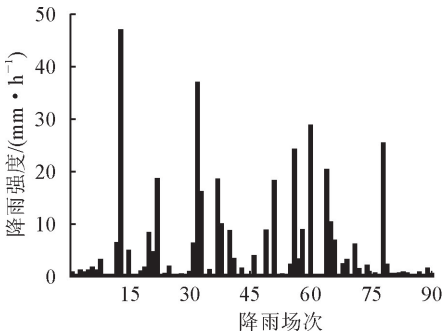


图 3 研究区观测期间降雨强度

Fig. 3 Rainfall intensity during observation period in the study area

表 2 降雨强度统计

Table 2 Statistical table of rainfall intensity

强度 /(mm·h ⁻¹)	次数	次数比(%)	累计 降雨量/mm	占总 降雨量比(%)
≤ 2	59	65.56	292.2	24.53
2~5	11	12.22	131.8	11.07
5~10	8	8.89	281.2	23.61
≥ 10	12	13.33	485.8	40.79

2.2 林内降雨特征

2.2.1 穿透雨 观测期间累计观测穿透雨量为 1 018.7 mm,穿透雨率为 85.53%。绘制观测期间林外降雨量与穿透雨量散点图(图 4)发现,穿透雨

随降雨量的增加,降雨量与穿透雨量呈线性相关($R^2=0.98, P<0.01$)。由线性方程可知,研究区马尾松出现穿透雨的场降雨阈值为 1.53 mm。由图 5 可见,穿透雨率与降雨量呈对数关系,穿透雨率随降雨量的增加而增加,逐渐趋于稳定。

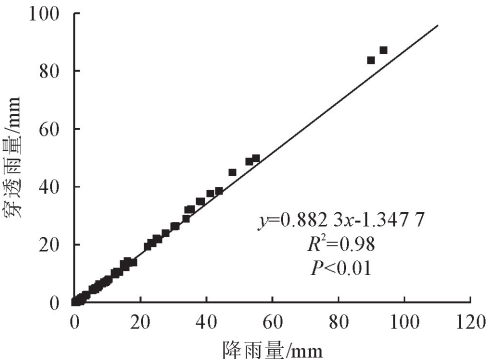


图 4 林外降雨量与林内穿透雨量关系

Fig. 4 Relationship between rainfall and throughfall

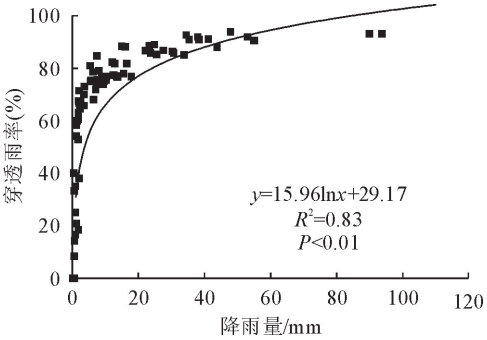


图 5 林外降雨量与林内穿透雨率关系

Fig. 5 Relationship between rainfall and throughfall rate

2.2.2 树干茎流 研究区观测期间累计树干茎流量为 15.4 mm,树干茎流率为 1.29%。树干茎流量与林外降雨量呈线性正相关($R^2=0.94, P<0.01$)(图 6),由拟合的线性方程可知,产生树干茎流的林外降雨阈值为 2.82 mm。林外降雨量与树干茎流率呈对数关系($R^2=0.48, P<0.01$),树干茎流率随着降雨量的增加而增加,在降雨量超过 20 mm 后趋于稳定。

2.2.3 林冠截留 观测期间累计冠层截留量为 156.9 mm,林冠截留率为 13.17%。林冠截留量、林冠截留率与林外降雨量的关系如图 8、图 9 所示,分别呈对数关系和幂函数关系,其中,林冠截留率在降雨量超过 40 mm 时逐渐稳定在 13%。

2.3 修正的 Gash 模型参数

林冠持水能力(S)以 Leyton 回归法计算。林冠饱和和下平均蒸发速率(\bar{E})以 Gash 提出的方法计算,假设研究区观测期间所有降雨事件中 \bar{E} 、平均降雨强度(\bar{R})均为常数,可通过 \bar{R} 及林冠截留与林外降雨量的斜率计算得到 \bar{E} 。降雨量与树干茎流回归方程截距为树干持水能力(S_t),斜率为树干茎流系数(P_t)。

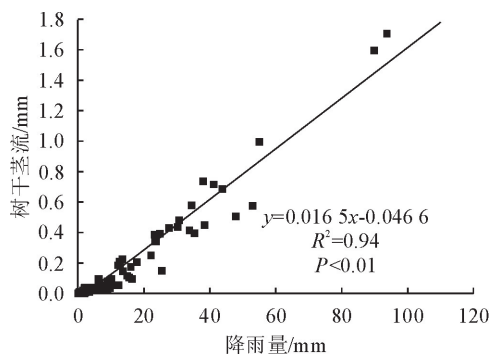


图6 林外降雨量与树干茎流量关系

Fig. 6 Relationship between rainfall and stemflow

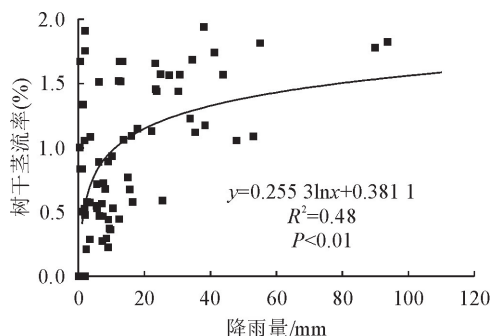


图7 林外降雨量与树干茎流率关系

Fig. 7 Relationship between rainfall and stemflow rate

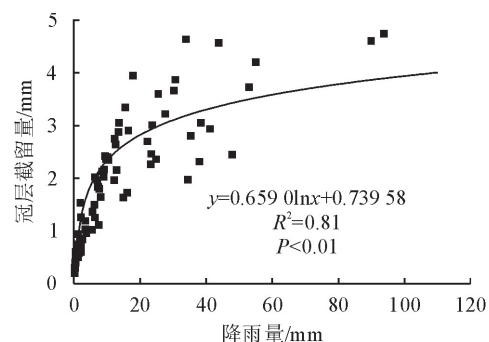


图8 林外降雨量与林冠截留量关系

Fig. 8 Relationship between rainfall and canopy interception

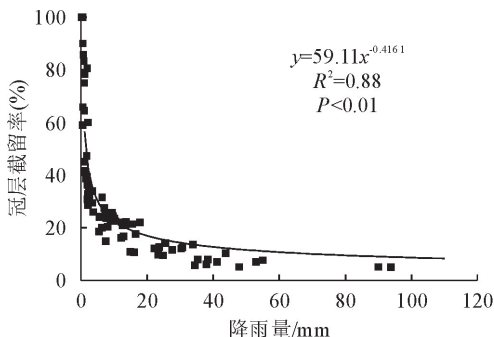


图9 林外降雨量与林冠截留率关系

Fig. 9 Relationship between rainfall and canopy interception rate

根据冠层参数及气候参数(表3),计算面积上林冠持水能力(S_c)、单位面积林冠在饱和状态下的蒸发速率(\bar{E}_c)、林冠达到饱和状态下的林外降雨量($P_{G'}$),分别为2.97、0.75、3.27 mm。

2.4 修正的 Gash 模型模拟分析

以修正的 Gash 模型模拟研究区观测期间林冠截留量、树干茎流量、穿透雨量,结果如表4所示。

表3 修正的 Gash 模型中气候参数及冠层参数

Table 3 Climate and canopy parameters in modified Gash model

参数	数值
$\bar{E}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	0.24
S/mm	0.95
c	0.32
$\bar{R}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	4.21
S_t/mm	0.0466
P_t	0.0165

表4 修正的 Gash 模型模拟结果与实测值对比

Table 4 Comparison of the modified Gash model simulation results with the measured values

林冠截留	表达式	估算值/mm	实测值/mm
林冠未达到饱和状态的 m 次降雨事件($P_{Gj} < P_{G'}$)	$c \sum_{j=1}^m P_{Gj}$	7.02	—
林冠达到饱和状态 n 次降雨事件下林冠湿润过程($P_{Gj} \geq P_{G'}$)	$ncP_{G'} - ncS_c$	1.41	—
降雨及穿透雨停止前林冠蒸发	$c \frac{\bar{E}_c}{\bar{R}} \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P_{G'})$	139.02	—
降雨及穿透雨停止后林冠蒸发	ncS_c	31.06	—
树干蒸发,其中 q 次降雨事件使树干达到饱和状态, $m+n-q$ 次降雨事件中树干未达到饱和状态	$qS_t + P_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{Gj}$	2.17	—
总林冠截留量	I	181.21	156.9
总树干茎流量	S_F	12.08	15.4
总穿透雨量	T_F	997.71	1017.7

研究以均方根误差(RMSE)、均值估测精度(RM)验证修正的 Gash 模型模拟精度。观测期间总林冠截留量为156.9 mm,模拟值相较实测值高出24.31 mm, RMSE为1.38 mm, RM为84.53%;观测期间总树干茎流量高于模拟值3.32 mm, RMSE为0.15 mm, RM为78.46%;由于基于修正的 Gash 模型模拟的总穿透雨量通过水平衡原理计算得到,相较实测值低估了19.99 mm, RMSE为1.34 mm, RM为98.04%。

2.5 模型敏感性分析

为探究修正的 Gash 模型中参数对估算林冠截留量的影响,对 c 、 S 、 \bar{R} 、 \bar{E} 、 S_t 和 P_t 6项参数在-50%~50%内进行敏感性分析。结果如图10所示,各个参数敏感性顺序为 $\bar{R} > c > \bar{E} > S_t > P_t >$

S, 且 \bar{R} 变化范围为 $-76.3\% \sim 25.61\%$, c 变化范围为 $-81.55 \sim 12.58\%$ 。

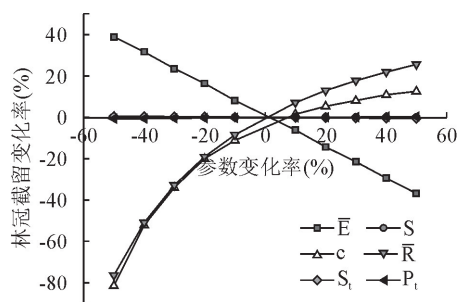


图 10 修正的 Gash 模型参数敏感性分析

Fig. 10 Parameter sensitivity analysis of modified Gash model

3 结论与讨论

研究区观测期间观测降雨事件 90 次, 累计林外降雨量 1 191.0 mm。降雨事件以小雨为主, 且低强度降雨事件的发生频率远高于高强度降雨事件。观测期间, 穿透雨、树干茎流、林冠截留分别为 1 017.7、15.4、156.9 mm, 穿透雨率、树干茎流率、林冠截留率分别为 85.53%、1.29%、13.17%。其中, 降雨量与穿透雨呈极显著线性相关, 方程斜率为 0.882 3, 其他学者研究中方程斜率为 0.675^[22]、0.7471^[23]、0.841 5^[24], 均小于本研究结果。本研究观测期间树干茎流率高于其他学者研究结果^[24-26], 林冠截留率远小于其他学者研究结果^[27-29]。究其原因, 研究区马尾松冠层稀疏、长势欠佳, 被称为“小老头松”, 因此林冠截留能力较差, 穿透雨量较大。且研究观测时间为 5—11 月, 包含降雨较多的夏季, 平均降雨水量较高, 观测期间虽以低强度降雨事件为主, 但高强度降雨在降雨量上占优势, 因此树干茎流偏高。由于穿透雨与林外降雨在时间上存在不同步现象^[30], 导致连续降雨期间测量得到的穿透雨量接近或大于林外降雨量, 因此存在部分穿透雨率 $\geq 100\%$ 。

以修正的 Gash 模型模拟研究区观测期间总林冠截留量相较实测值高出 24.31 mm, RMSE 为 1.38 mm, RM 为 84.53%; 总树干茎流量高于模拟值 3.32 mm, RMSE 为 0.15 mm, RM 为 78.46%; 模拟的总穿透雨量相较实测值低估了 19.99 mm, RMSE 为 1.34 mm, RM 为 98.04%, 模拟结果较好。研究中林冠饱和状态下平均蒸发速率并未采用常用的 Penman-Monteith 方程计算, 而采用 Gash 等学者提出的方法计算。Penman-Monteith 方程需要饱和水气压梯度、温度、大气净辐射、空气密度、常压下空气比热值、饱和水气压差、相对空气湿度、空气动力学阻力、饱和林冠持水能力、干湿计常数及林分冠层上方 2 m 处风速, 需要参数较多, 且该方法

是基于复杂地形上采用 Thom 动能传递方法推导得到的, 适用于复杂地形, 在平坦地区使用可能存在不稳定性^[31]。Gash 等假设观测期间所有降雨事件中林冠饱和状态下平均蒸发速率、平均降雨强度均为常数的前提下, 通过林冠截留与林外降雨量的斜率计算得到林冠饱和状态下平均蒸发速率适用于地形平坦的地区。本研究研究区地势平坦, 地形简单, 以 Penman-Monteith 方程计算得到的林冠饱和状态下平均蒸发速率不适用于本研究, 因此本研究以 Gash 等提出计算林冠饱和状态下平均蒸发速率, 且模拟结果较好。

参考文献:

- [1] 熊壮, 叶文, 张树斌, 等. 元江稀树灌丛降雨再分配及其与气象因子的关系[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(1): 47-53.
XIONG Z, YE W, ZHANG S B, et al. Rainfall redistribution and its relationship with meteorological factors in Yuanjiang valley-type savanna, Southwest China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1): 47-53. (in Chinese)
- [2] DECIO O C F, JOSE M R, ROSANE B L C, et al. Rainfall partitioning in young clonal plantations *Eucalyptus* species in a subtropical environment, and implications for water and forest management[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021(9): 474-484.
- [3] 黄团冲, 贺康宁, 王先棒. 青海大通白桦林冠层降雨再分配与冠层结构关系研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 1-6.
HUANG T C, HE K N, WANG X B, et al. Relationship between rainfall redistribution and canopy structure of *Betula platyphylla* canopy in Datong, Qinghai[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(3): 1-6. (in Chinese)
- [4] ZHANG Y, WANG X, HU R, et al. Rainfall partition into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, Northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 1084-1095.
- [5] GRUNICKE S, QUECK R, BERNHOFER C. Long-term investigation of forest canopy rainfall interception for a spruce stand[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020: 292-293.
- [6] 韩春, 陈宁, 孙杉, 等. 森林生态系统水文调节功能及机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2191-2199.
- [7] SHI Z J, WANG Y H, XU L H, et al. Fraction of incident rainfall within the canopy of a pure stand of *Pinus armandii* with revised Gash model in the Liupan Mountains of China[J]. Journal of Hydrology, 2010, 385(1-4): 44-50.
- [8] 李亦然, 马睿, 张永涛, 等. 基于 Gash 修正模型模拟侧柏及其混交林的林冠截留过程[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 67-74.
- [9] 刘春延, 李良, 赵秀海, 等. 塞罕坝地区华北落叶松人工林对降雨的截留分配效应[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(3): 1-5.
LIU C Y, LI L, ZHAO X M, et al. Redistribution effects of tree canopy of *Larix principis-rupprechtii* plantation on precipitation in the upper stream of Saihanba area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(3): 1-5. (in Chinese)
- [10] PRICE A G, CARLYLE-MOSES D E. Measurement and model-

- ling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, Southern Ontario, Canada[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2003, 119(1-2): 69-85.
- [11] VALENTE F, DAVID J S, GASH J H C. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 190(1/2): 141-162.
- [12] DEGUCHI A, HATTORI S, PARK H T. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: application of the revised Gash model[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 318(1-4): 80-102.
- [13] LOUSTAU D, BERBIGIER P, GRANIER A. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. II. an application of Gash's analytical model of interception[J]. *Journal of Hydrology*, 1992, 138: 469-485.
- [14] 李成, 高鹏, 董学德, 等. 泰山麻栎人工林降雨截留特征及修正的 Gash 模型模拟[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(3): 31-38.
- [15] 徐丽娜, 管清成, 赵忠林, 等. 长白山两种林型的降雨截留再分配特征与修正的 Gash 模型模拟[J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(3): 46-50.
- XU L N, GUAN Q C, ZHAO Z L, *et al.* Canopy rainfall interception characteristics of two typical forest types in Changbai Mountains and its revised Gash model simulation[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(3): 46-50. (in Chinese)
- [16] 李亦然, 张荣华, 李泽东, 等. 基于 Gash 修正模型的元宝槭林分结构对降雨分配的影响[J]. *山东大学学报: 理学版*, 2019, 54(1): 30-39.
- LI Y R, ZHANG R H, LI Z D, *et al.* Influence of stand structure of *Acer truncatum* forest on rainfall redistribution based on modified Gash model[J]. *Journal of Shandong University: Natural Science*, 2019, 54(1): 30-39. (in Chinese)
- [17] 曹光秀, 赵洋毅, 段旭, 等. 基于修正的 Gash 模型模拟中亚热带常绿阔叶林降雨截留过程[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 367-374.
- [18] 刘效东, 龙凤玲, 陈修治, 等. 基于修正的 Gash 模型对南亚热带季风常绿阔叶林林冠截留的模拟[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 3118-3125.
- [19] 程分生, 尤龙辉, 叶功富, 等. 亚热带红壤侵蚀区马尾松不同套种模式林分生态系统碳平衡[J]. *应用生态学报*, 2021, 34(4): 1163-1174.
- CHENG F S, YOU L H, YE G F, *et al.* Carbon balance in an interplanting *Pinus massoniana* stand in subtropical eroded red soil region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 34(4): 1163-1174. (in Chinese)
- [20] 张巧颖, 陈志强, 陈志彪, 等. 长汀县红壤侵蚀区土壤生态化学计量学特征[J]. *四川师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 40(5): 699-702.
- ZHANG Q Y, CHEN Z Q, CHEN Z B, *et al.* Characteristics of soil ecological stoichiometry in red soil erosion area in Changting county[J]. *Journal of Sichuan Normal University: Natural Science*, 2017, 40(5): 699-702. (in Chinese)
- [21] 鄢新余, 陈志强, 陈志彪, 等. 南方红壤侵蚀区植被恢复过程植物群落多样性[J]. *福建师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 31(2): 90-95.
- YAN X Y, CHEN Z Q, CHEN Z B, *et al.* Plant diversity during recovery process of vegetation in eroded red soil region, South China[J]. *Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition*, 2015, 31(2): 90-95. (in Chinese)
- [22] 莫江明, 方运霆, 冯肇年, 等. 鼎湖山人为干扰下马尾松林水文生态功能[J]. *热带亚热带植物学报*, 2002, 10(2): 99-104.
- [23] 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.* Ecohydrological effect of *Pinus massoniana* canopy and its influence factors in Zhangjiajie of Hunan Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(12): 13-20. (in Chinese)
- [24] 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 Y, SUN Y T, LI Z C, *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. (in Chinese)
- [25] 崔鸿侠, 张卓文, 陈玉生, 等. 三峡库区莲峡河小流域马尾松水文生态效应[J]. *中南林学院学报*, 2005, 25(2): 46-49.
- [26] 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. (in Chinese)
- [27] 刘旻霞. 青海云杉林林冠截留与大气降水的关系[J]. *甘肃农业大学学报*, 2004, 39(3): 341-344.
- LIU M X. The relationship between rainfall and interception by canopy of *Picea crassifolia* forest[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2004, 39(3): 341-344. (in Chinese)
- [28] 李奕, 蔡体久, 满秀玲, 等. 大兴安岭地区天然樟子松林降雨截留再分配特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 43-47.
- [29] 徐丽娜, 管清成, 赵忠林, 等. 长白山两种林型的降雨截留再分配特征与修正的 Gash 模型模拟[J]. *东北林业大学学报*, 2019, 47(3): 46-50.
- XU L N, GUAN Q C, ZHAO Z L, *et al.* Canopy rainfall interception characteristics of two typical forest types in Changbai Mountains and its revised Gash model simulation[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, 47(3): 46-50. (in Chinese)
- [30] 陈书军, 陈存根, 邹伯才, 等. 秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应[J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 138-146.
- CHEN S J, CHEN C G, ZOU B C, *et al.* Time lag effects and rainfall redistribution traits of the canopy of natural secondary *Pinus tabulaeformis* on precipitation in the Qinling Mountains, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 138-146. (in Chinese)
- [31] HASSAN S M T, GHIMIRE C P, LUBCZYNSKI M W. Remote sensing upscaling of interception loss from isolated oaks: sardon catchment case study, Spain[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 555: 489-505.