基于修正的 Gash 模型模拟缙云山毛竹林降雨截留*

赵洋毅[1,2] 王玉杰[2] 王云琦[2] 刘 楠[2] 刘 敏[2] 吴 云[3] 陈 林[3]

(1. 西南林业大学环境科学与工程学院 昆明 650224; 2. 北京林业大学水土保持学院 北京 100083;
3. 重庆缙云山国家级自然保护区管理局 重庆 400700)

摘 要: 为了验证修正的 Gash 模型对缙云山毛竹林林冠截留模拟的适用性,基于 2009 年 4—7 月的气象和林分特征资料以及实测的穿透雨和树干茎流等资料,分析缙云山毛竹林林外降雨、穿透雨和树干茎流特征,并应用修正的 Gash 模型对林冠截留量进行模拟,对比分析周降雨累计截留量和单次降雨截留量的模拟值和实测值,采用敏感性分析法分析模型参数对截留量的影响程度。结果表明:研究期间共 29 次降雨,总降雨量为531.1 mm,平均降雨强度为2.11 mm·h^{-1},大部分为低雨强、低雨量级、长历时的降雨;穿透雨量、茎流量和林冠截留量的实测值分别为 463.2 ,6.5 和61.4 mm,模拟值分别为 461.1,6.1 和63.9 mm,模拟的截留量约高出实测值 4.07%,模型计算的周累积截留量和单次降雨截留量与实测值相比的相对标准差分别为 5.02% 和 7.13%,模拟效果较好,模型适用于缙云山毛竹林;以林冠郁闭度(c)对模拟结果影响最大,其次为平均降雨强度($\bar{R}$)、林冠持水能力(S)和林冠平均蒸发速率($\bar{E}$),树干茎流系数(P_t)和树干持水能力(S_t)这 2 个参数对林冠截留总量影响很小。

关键词: 修正的 Gash 模型;毛竹林;林冠截留;缙云山

中图分类号: S715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 - 7488(2011)09 - 0015 - 06

Simulation of Canopy Rainfall Interception of the *Phyllostachys edulis* Forest with the Revised Gash Model in the Jinyun Mountains of Chongqing

Zhao Yangyi[1,2] Wang Yujie[2] Wang Yunqi[2] Liu Nan[2] Liu Min[2] Wu Yun[3] Chen Lin[3]

(1. *College of Environment Science and Engineering, Southwest Forestry University Kunming* 650224; 2. *College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University Beijing* 100083; 3. *Chongqing Jinyunshan National Nature Protection Region Management Bureau Chongqing* 400700)

Abstract: In order to verify applicability of the revised Gash analytical model in simulating canopy interception of the *Phyllostachys edulis* forest in the Jinyun Mountains, the rainfall, throughfall and stemflow characteristics and their heterogeneity was measured, and the canopy interception was simulated with the revised Gash analytical model. A comparison in week cumulative rainfall and a rainfall event interception was conducted between the simulated and actual values basing on meteorological data, forest survey data during April ~ July of 2009. In addition, effects of the model parameter on interception was analyzed with a sensitivity analysis method. The results indicated that the cumulative gross rainfall of 29 sampled events was 531.1 mm and the mean rainfall intensity was 2.11 mm·h^{-1}. The measured throughfall, stemflow and canopy interception were 463.2, 6.5, and 61.4 mm, respectively. Most of the rainfalls had a low rainfall intensity, low rainfall levels, and long duration. Throughfall, stemflow and canopy interception simulated by the revise Gash model were 461.1, 6.1, and 63.9 mm, respectively. The revised Gash analytical model of rainfall interception was employed and the simulated interception values were close to the measured ones with an underestimation of 4.07%. The comparison between the simulated and the measured canopy interception per week and per rain event during the study period showed that the relative standard error in the two interceptions between the simulated and the measured ones was 5.02% and 7.13%, respectively, indicating that the Gash analytic model could be used for estimating canopy interception in the *P. edulis* forest in Jinyun Mountains. The simulation with the revised Gash model was impacted most by canopy cover (c), followed by mean rainfall intensity ($\bar{R}$), canopy storage capacity (S), mean evaporation rate during rainfall ($\bar{E}$). But the simulation was not sensitive to trunk storage capacity (S_t) and proportion of rain diverted to

收稿日期: 2010 - 06 - 03; 修回日期: 2011 - 08 - 07。

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201104009-03,201104005-01); 中央高校基本科研业务费专项(YX2011-26); 长江三峡库区(重庆)森林生态站。

* 王玉杰为通讯作者。

stemflow (p_t) since these two parameters only had a small effect on total interception.

Key words: revised Gash analytical model; *Phyllostachys edulis* forest; canopy intercepaion; Jinyun Mountains

林冠截留作为水文循环的一个重要环节,影响地表-大气能量循环过程和水量平衡(Zeng *et al.*, 2000)。目前,用模型理解和预测林冠截留备受关注。Gash 模型是 Gash 等(1979)以 Rutter 微气象模型(Rutter *et al.*, 1971)为基础,采用基本的物理推理方法建立的林冠截留解析模型,针对模型在最初的应用中所出现的缺点(Price *et al.*, 2003; Gash *et al.*, 1995),Gash 等(1995)和 Valente 等(1997)又对其进行了修正,使之能适用于稀疏林地。由于结合了经验模型和理论模型的长处,Gash 解析模型模拟计算林冠截留量更实用和简单。目前,该模型被广泛应用到世界各地各种林分类型的林冠截留研究中(Gash, 1979; Deguchi *et al.*, 2006; Herbst *et al.*, 2006; Carlyle-Moses *et al.*, 1999; Wallace *et al.*, 2008; 王馨等, 2006; 何常青等, 2010; Návar *et al.*, 1999; Llorens *et al.*, 1997; Šraj *et al.*, 2008; Gómez *et al.*, 2002; Shi *et al.*, 2010; 季冬, 2007),但在中国森林的应用还较少,特别是中国亚热带毛竹(*Phyllostachys edulis*)林。本研究为了验证修正的 Gash 模型对重庆缙云山毛竹林林冠截留模拟的适用性,利用当地的相关气象和林分特征资料,在分析毛竹林对降雨的再分配规律基础上,应用修正的 Gash 模型对林冠截留量进行模拟,对比分析模拟值和实测值,并进一步确定模型中影响林冠截留量的敏感参数,为准确评价修正的 Gash 模型在亚热带毛竹林应用的适宜性及毛竹林的林冠截留作用提供参考。

1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区境内嘉陵江小三峡之温塘峡西岸的缙云山自然保护区(106°22′E, 9°49′N),海拔 350 ~ 951.5 m,具有亚热带季风湿润性气候,年均气温13.6 ℃,年均降水量1 611.8 mm,年均蒸发量777.1 mm,年均日照1 293.9 h。土壤以酸性黄壤土为主。

缙云山的毛竹林广泛分布,占地466.67 km^2。所设毛竹林标准地位于缙云山的狮子峰,面积 20 m × 20 m,海拔800 m,坡度 11°,西北坡向,林龄 13 年,郁闭度 0.79,平均树高12.9 m,平均胸径 10.3 cm,密度3 795 株·hm^{-2}。林下主要灌木有地瓜藤(*Fieus tikoua*)和杜茎山(*Maesa subrotunda*)等。地被物有蕨类(*Antenoron neofi*)和莽草(*Illicium lanceolatum*)等。

2 研究方法

修正的 Gash 模型(Gash *et al.*, 1995; Carlyle-Moses *et al.*, 1999)描述的是一系列彼此分离的降雨事件,每个降雨事件都包含林冠加湿、林冠饱和、以及降雨停止后林冠干燥的过程,且假定每次降雨事件之间有足够的时间让林冠完全恢复到降雨前的干燥程度。模型采用分项求和的形式,将整个林冠在降雨过程中各个阶段的截留损失相加得到总的林冠截留量。该模型计算林冠截留量的基本公式为:

$$\sum_{j=1}^{m+n} I_j = c\sum_{j=1}^{m} P_{Gj} + \sum_{j=1}^{n}(c\overline{E}_c/\overline{R})(P_G - P'_G) + c\sum_{j=1}^{n} P'_G + qcS_t + cP_t(1 - \overline{E}_c/\overline{R})\sum_{j=1}^{n-q}(P_{Gj} - P'_G)$$

式中: I_j 为林冠截留量(mm); n 为林冠达到饱和的降雨次数; m 为林冠未达到饱和的降雨次数; j 为总的降雨次数; c 为林分郁闭度; P_t 为树干径流系数; $\overline{R}$ 为平均降雨强度(mm·h^{-1}); $\overline{E}_c$ 为单位覆盖面积平均林冠蒸发速率(mm·h^{-1}); $\overline{E}_c = \overline{E}/c$, $\overline{E}$ 为饱和林冠的平均蒸发速率(mm·h^{-1}); P_{Gj} 为总的降雨量; P_G 为单次降雨的降雨量(mm); P'_G 为使林冠达到饱和的降雨量(mm); q 为树干达到饱和产生树干径流的降雨次数; S_t 为树干持水能力(mm)。$c\sum_{j=1}^{m} P_{Gj}$ 为 m 次未能饱和冠层的降雨量($P_G < P'_G$); $\sum_{j=1}^{n}(c\overline{E}_c/\overline{R})(P_G - P'_G)$ 为降雨过程中的蒸发量; $c\sum_{j=1}^{n} P'_a$ 为 n 次使林冠达到饱和降雨事件的降雨量; qcS_t 为降雨后的的蒸发量; $cP_t(1 - \overline{E}_c/\overline{R})\sum_{j=1}^{n-q}(P_{Gj} - P'_G)$ 为 $n - q$ 次未能饱和树干的降雨量($P_G < S_t/p_t$)。

2009 年 4—7 月毛竹林标准地内随机布置 20 个标准雨量筒,于每场降雨后及时测定林内穿透降雨量 TF(mm)。根据径级分布,在标准地共选择 6 株标准木观测树干茎流,采用塑料管环状收集槽,环绕树干 2 ~ 3 圈,用玻璃胶密封,下部接入塑料桶收集干流,每次降雨后人工测量塑料桶内水的体积,再

换算成树干茎流量 SF，其计算公式为

$$SF = \sum_{i=1}^{n} \frac{S_n \cdot N}{A \cdot 10^4}。$$

式中：S_n 为每株标准木的树干茎流量(mL)；N 为单位面积上标准木的株数 $N=6$；A 为标准地的面积(m^2)。

根据实测值计算冠层截留量 I：$I = P_G - TF - SF$。

国家林业局长江三峡库区(重庆)森林生态定位监测站位于试验样地附近，与本研究相关的林外降雨量、空气温湿度、风速、净辐射等指标由监测站内固定的全自动气象观测系统直接测定得出，林外降雨量由 TE525MM 雨量计测定，空气温湿度由 HMP45C 空气温度湿度探头测定，风速由高度15 m 的 30510 型风速和风向探头测定，净辐射由 Q7-1 净辐射探头测定，净辐射测定高度与平均林冠高度一致，气象站采用 PC208W3.2 编程自动观测，由 CR10X 数据采集器自动采集数据，每10 min记录 1 次，精度满足模型的基本要求。

3　结果与分析

3.1　研究期间林外降雨、林内穿透雨和树干茎流特征

研究表明：2009 年 4—7 月共 29 次降雨，大部分为低雨强、低雨量级、长历时的降雨，其林外降雨总量为531.1 mm，平均每次降雨18.3 mm，单次雨量 1.1 ~ 88.4 mm；单次降雨雨强为 0.1 ~ 13.1 $mm \cdot h^{-1}$，平均雨强2.11 $mm \cdot h^{-1}$，变异系数为 139.74%。雨强小于 1 和2 $mm \cdot h^{-1}$的频度分别达到了 55.17% 和 72.41%，雨强大于5 $mm \cdot h^{-1}$的频度为 13.78%(图 1)。单次降雨历时 1.5 ~ 40.83 h，平均每次降雨历时12.09 h，变异系数为 79.62%，由图 1 可见，降雨历时 10.1 ~ 15 h的频数最大。

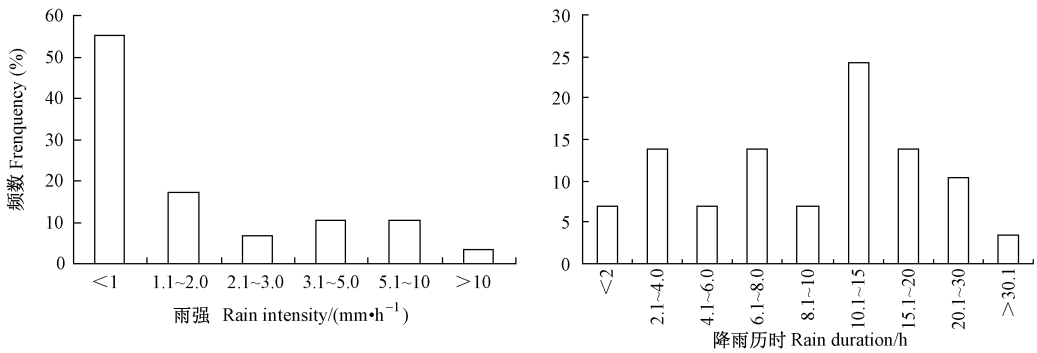

图 1　降雨特征

Fig. 1　Rainfall characteristics

研究期间林内穿透雨量为463.2 mm，占研究期间总降雨量的 87.22%，每次降雨穿透雨率 65.06% ~ 95.13%，平均每次降雨的穿透雨率达 83.35%，降雨量小于10 mm的降雨 13 次(图 2)，最小降雨量仅为1.1 mm，平均穿透雨率为 78.66%。穿透雨率与林外降雨量的关系 R_{TF} 为

$R_{TF} = 5.283 \ln(P_G) + 71.911$，$R^2 = 0.584$，$n = 29$。

研究表明，29 次降雨的穿透雨率变异系数变化范围为 9.63% ~ 56.43%。在降雨量 $P_G < 10$ mm 时，穿透雨率为 15.78% ~ 56.43%，变异系数较大，且随着降雨量增大其减幅很大；在降雨量 $P_G > 10$ mm时，穿透雨率为 9.63% ~ 18.53%，变异系数较小，随着降雨量增大其减幅变小。林内穿透雨率变异系数随着降雨量的增大呈逐渐减小的趋势。

研究期间，树干茎流总量为6.5 mm，占研究期间总降雨量的 1.23%，单次降雨的平均树干茎流量为0.24 m。观测发现，毛竹林在每次降水开始至林

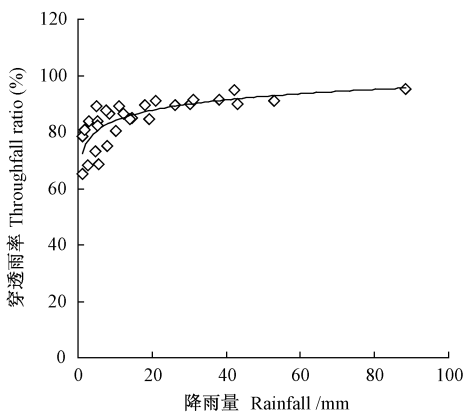

图 2　穿透雨率与降雨量的关系

Fig. 2　Relationship between throughfall ratio and rainfall

冠蓄水饱和之前，一般不产生茎流，但在连续降雨过程中，因为毛竹秆枝部表面光滑，且被有透水性能很差的坚硬硅化蜡质层，秆枝蓄水容量相对很小，因而林冠达到饱和所要求的降水量相对较小。在降雨量很小，如 $P_G > 2$ mm时，便会产生树干茎流。平均树

干茎流量在降雨量 P_G < 5 mm 时仅 0.07 mm，5 mm < P_G < 10 mm时0.11 mm，10 mm < P_G < 20 mm时0.19 mm，20 mm < P_G < 40 mm时0.41 mm，P_G > 40 mm时1.17 mm。树干茎流量与林外降雨量存在如下线性关系：SF = 0.016P_G − 0.052，R^2 = 0.907，n = 21（图 3）。

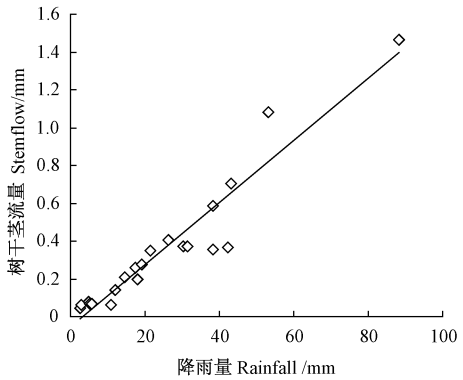

图 3 树干茎流量与降雨量的关系

Fig. 3 Relationship between stemflow and rainfall

对不同观测样树的树干茎流分析表明，树干茎流存在较大变异，树干茎流率为 44.26% ~ 153.52%，平均变异系数为 87.98%。平均变异系数在降雨量 2 mm < P_G < 5 mm 时达 137.93%，5 mm < P_G < 10 mm 时达 96.51%，10 mm < P_G < 20 mm 时达 95.74%，20 mm < P_G < 40 mm 时达 67.49%；P_G > 40 mm时为 60.53%。树干茎流率变异系数随着降雨量的增大呈逐渐减小趋势。

3.2 修正的 Gash 模型参数值

林冠持水能力是林冠截留降水的主要影响因子之一，一般采用回归法、尺度上推法和遥感法来估算（Liu, 2000）。本研究采用 Wallace 等（2006）和 Limousin 等（2008）的回归法确定林冠持水能力（S），即根据林内穿透雨量与林外降雨量关系方程，求得穿透雨量的残差 TF(δ)，推出穿透雨量残差 TF(δ)与林外降雨量的关系，得出方程拐点的降雨量值，用大于此值且残差 TF(δ) > 0 的降雨量(TF_δ)与对应的林内穿透雨量做回归方程：TF_δ = 0.015P_G + 0.277，R^2 = 0.961，即 S = 0.277。

单位面积的林冠持水能力 $S_c = S/c$，从林分调查结果可知，林分平均郁闭度 c = 0.79，从而得到 S_c = 0.351。S_t 和 P_t 则根据树干茎流量与林外降雨量的关系方程确定，其中，S_t 为树干茎流量与降雨量关系方程在 y 轴截距的负值，P_t 为斜率（Limousin *et al.*, 2008）。根据前文已求方程可知，S_t = 0.052，P_t = 0.016。使树干达到饱和所必需的降雨量 $P_t' = S_t/p_t$（Shi *et al.*, 2010），则 P_t' = 3.25 mm。p 为自由穿透降雨系数，即不接触林冠直接降落到林地的降雨的比率，计算公式为 $p = 1 - c$，由平均林冠郁闭度（c）可知 p = 0.21。饱和林冠的平均蒸发速率 $\overline{E}$ 根据 Penman-Monteith 公式（王馨等, 2006; Shi *et al.*, 2010）计算，$\overline{E}$ = 0.027 mm·h^{-1}。根据平均郁闭度 c 和 $\overline{E}_c = \overline{E}/c$ 可知单位面积平均林冠蒸发速率 $\overline{E}_c$ 为 0.034 mm·h^{-1}。P'_G 的计算公式为

$$P'_G = (-\overline{R}/\overline{E}_c) S_c \ln(1 - \overline{E}_c/\overline{R}),$$

根据降雨特征分析可知研究期间的平均降雨强度 $\overline{R}$ 为2.11 mm·h^{-1}，根据以上参数值即可计算出 P'_G = 2.26 mm。

3.3 林冠截留量实测值和模型模拟值对比分析

基于 2009 年 4—7 月林外降雨、穿透雨和树干茎流数据，计算出缙云山毛竹林穿透雨量、树干茎流量和林冠截留总量的实测值分别为 463.2，6.5 和61.4 mm；将已获取的相关参数值代入模型公式，可得到模型各组成部分的数值及对应的模拟值，穿透雨量、树干茎流量和林冠截留总量模拟值分别为 461.1，6.1 和63.9 mm（表 1）。可见，林冠截留总量的模拟值比实测值高2.6 mm，相对误差为 4.07%，穿透雨和树干茎流量的模拟值与实测值相比分别低 2.1 和0.4 mm，相对误差分别为 0.45% 和 6.15%。从模型模拟的各组成部分数值来看（表 1），用于饱和冠层的降雨量占模拟林冠截留总量的百分比达到 65.41%，是林冠截留的主要组成部分；降雨过程中的蒸发量和降雨后的蒸发量占模拟林冠截留总量的百分比分别为 7.36% 和 7.20%，这与研究期间该区低雨强、低雨量级、长历时的降雨特征和较低蒸发速率（如饱和林冠的平均蒸发速率仅为0.017 mm·h^{-1}）有关；未能饱和冠层的降雨量为3.2 mm，仅占模拟林冠截留总量的 5.01%，这是因为在雨量较小时对截留起主要作用的是林冠郁闭度，而对于雨量较大的降雨，影响林冠截留的因素较多，如林冠郁闭度、林冠蒸发强度和树干茎流等。

Gash 等（1995）最初对模型进行修正后，主要是应用于对林冠截留的周累积量的估算。通过修正的 Gash 模型对林冠截留周累积量的模拟和实测值的比较（图 4）可知，2 者的相对标准误差为 5.02%，说明应用修正的 Gash 模型对缙云山毛竹林林冠截留的周累积量的模拟效果较好。通过研究期间模型模拟单次降雨的林冠截留量与实测值比较（图 5）可知，2 者同样具有较好的一致性，相对标准误差为 7.13%。在雨量较小时，模型对单场降雨林冠截留的预测准确性更高，预测的准确性随着雨量增大呈

表 1　应用修正的 Gash 模型的模拟值与实测值

Tab. 1　Observed values and simulated values by the revised Gash model

模型组成部分 Components of interception	模拟值 Simulated value /mm	实测值 Observed value /mm
对于 m 次未能饱和冠层的降雨量 m small rainfalls when $P_G < P'_G$/mm	3.2	—
对于 n 次饱和冠层的降雨量 n rainfalls for wetting-up the canopy when $P_G \geqslant P'_G$/mm	41.8	—
降雨过程中的蒸发量 Evaporation from saturation until rainfall ceases/mm	4.7	—
降雨后的蒸发量 Evaporation after rain cases/mm	4.6	—
$n-q$ 次未能饱和树干的降雨量 $n-q$ rainfalls, when $P_G < S_t/p_t$/mm	9.6	—
林冠截留总量 Total interception loss/mm	63.9	61.4
树干茎流量 Total stewflow/mm	6.1	6.5
总穿透雨量 Total throughfall/mm	461.1	463.2

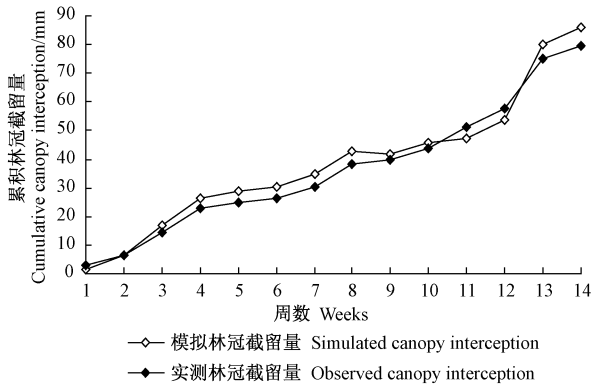

图 4　林冠截留周累积量实测值和模拟值

Fig. 4　Observed and simulated weekly cumulative canopy interception

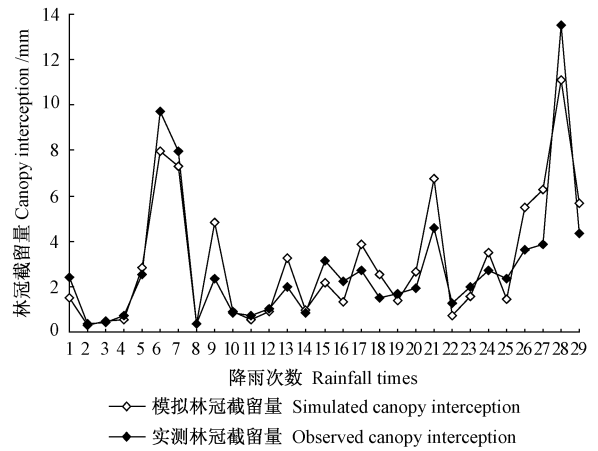

图 5　单次降雨林冠截留量的实测值和模拟值

Fig. 5　Observed and simulated canopy interception of single rainfall event

下降趋势。因此，可以看出运用修正的 Gash 模型来模拟缙云山毛竹林林冠截留具有较好的适用性，模拟的准确性较高。

3.4　模型参数对林冠截留影响的敏感性分析

为确定修正的 Gash 模型中的参数对林冠截留总量的影响程度，对 $\overline{R}$、$\overline{E}$、S、S_t、P_t 和 c 进行参数敏感性检验。由图 6 可知，6 个参数中林冠郁闭度 c 对林冠截留量的影响最大，其余依次为平均降雨强度 $\overline{R}$、林冠持水能力 S 和林冠平均蒸发速率 $\overline{E}$，树干茎流系数 P_t 和树干持水能力 S_t 的影响最小。c、S、$\overline{E}$ 和 P_t 值每增加 10%，林冠截留总量分别增加 14.89%，1.39%，0.77% 和 0.19%；$\overline{R}$ 值每增加 10%，林冠截留总量减少 2.29%；S_t 值每增加 10%，林冠截留总量仅增加 0.06%。林分完全郁闭 $c = 1$ 时，林冠截留总量的预测值将比实测值高 29.62%。

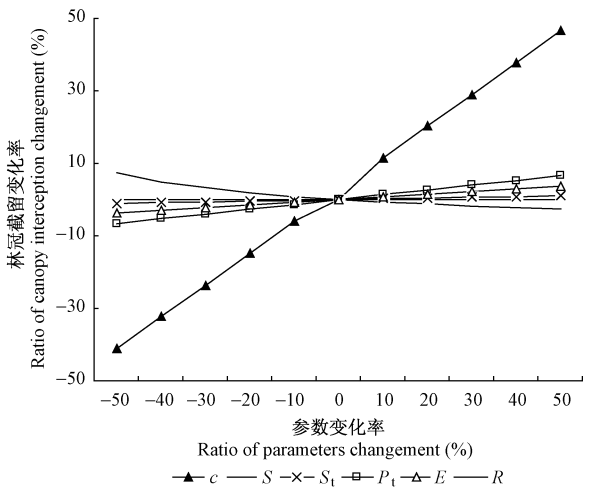

图 6　修正的 Gash 模型参数变化的敏感性分析

Fig. 6　Sensitivity analysis of parameters of the revised Gash analytical model

4　结论与讨论

研究期间，缙云山毛竹林的穿透雨率和树干茎流率的变异系数与降雨量呈显著负相关（$P < 0.01$），这与多数研究结果相似（Price *et al.*, 2003; Deguchi *et al.*, 2006; Wallace *et al.*, 2008; 时忠杰等, 2009）。这与毛竹林穿透雨及干流受降水强度、林冠潮湿状况、大气温度及湿度、林木个体大小、叶面积指数、立竹度等多方面因素有关。

应用修正的 Gash 模型模拟缙云山毛竹林林冠截留周累积量和单次降雨截留量，并分别与实测值进行比较，周积累量的相对标准误差更小，模拟效果更好；模型对单次降雨林冠截留量的预测在雨量较小时准确性更高，预测的准确性随着雨量增大呈下降趋势。总体来看，模型能够很好地模拟缙云山毛

竹林林冠截留过程。

模型参数($\overline{R}$,$\overline{E}$,S,S_t,P_t 和 c)对林冠截留量的影响以冠层郁闭度 c 最大,其次是平均降雨强度 $\overline{R}$、林冠持水能力 S 和林冠平均蒸发速率 $\overline{E}$,以树干茎流系数 P_t 和树干持水能力 S_t 最小。limousin 等(2008)和 Shi 等(2010)认为影响最大的参数是林冠郁闭度 c,而 Deguchi 等(2006)认为 $\overline{E}$ 的影响最大,何常清等(2010)研究得出林冠持水能力 S 的影响最大。

修正的 Gash 模型是目前比较常用和有效的降雨截留模型,该模型综合了林分、降雨和空气动力学 3 方面特征,具有较好的物理学基础,把林冠截留总量划分成几个组成部分,这样对林冠截留的过程能够有充分的理解。国内外一些研究已证明即使是在不同的气候、地理位置或是林分类型条件下,修正的 Gash 模型在模拟林冠截留时效果仍然较好。通过本研究可知,修正的 Gash 解析模型适用于西南亚热带的缙云山毛竹林。

参 考 文 献

何常清,薛建辉,吴永波,等. 2010. 应用 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. 生态学报,30(5):1125 – 1132.

季 冬. 2007. 贡嘎山暗针叶林林冠截留的 Gash 模型. 北京林业大学水土保持学院硕士学位论文.

时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等. 2009. 六盘山华山松(*Pinus armandii*)林降雨再分配及其空间变异特征. 生态学报,29(1):76 – 85.

王 馨,张一平,刘文杰. 2006. Gash 模型在热带季节雨林林冠截留研究中的应用. 生态学报,26(3):722 – 720.

Carlyle-Moses D E, Price A G. 1999. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. Journal of Hydrology,214(3):103 – 110.

Deguchi A, Hattori S, Park H T. 2006. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: application of the revised Gash model. Journal of Hydrology,318(1):80 – 102.

Gash J H C. 1979. An analytical model of rainfall interception by forests. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 105(443):43 – 55.

Gash J H C, Lloyd C R, Lachaud G. 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. Journal of Hydrology, 170(1):79 – 86.

Gómez J A, Vanderlinden K, Giráldez J V, *et al*. 2002. Rainfall concentration under olive trees. Agricultural and Forest Meteorology, 55(1):53 – 70.

Herbst M, Roberts J M, Rosier P T W, *et al*. 2006. Measuring and modeling the rainfall interception loss by hedgerows in Southern England. Agricultural and Forest Meteorology,141(4):244 – 256.

Llorens P, Poch R, Latron J, *et al*. 1997. Rainfall interception by a *Pinus sylventris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. I. Monitoring design and results down to the event scale. Journal of Hydrology,199(4):331 – 345.

Limousin L M, Rambal S, Ourciva J M, *et al*. 2008. Modelling rainfall interception in a Mediterranean *Quercus ilex* ecosystem: lesson from a throughfall exclusion experiment. Journal of Hydrology,357(2):57 – 66.

Liu S. 2000. Estimation of rainfall storage capacity in the canopies of cypress wetlands and slash pine uplands in North-Central Florida. Journal of Hydrology,207(1):32 – 41.

Návar J, Charles F, Jurado E. 1999. Spatial variations of interception loss components by tamaulipan thornscrub in northeastern Mexico. Forest Ecology and Management,124(3):231 – 239.

Price A G, Carlyle-Moses D E. 2003. Measurement and modeling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, south Ontario, Canada. Agricultural Forest Meteorology, 119(1):69 – 85.

Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C. 1971. A predictive model of rainfall interception in forests. Agricultural Meteorology, 72(9):367 – 384.

Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, *et al*. 2010. Fraction of incident rainfall within the canopy of a pure stand of *Pinus armandiiith* revised Gash model in the Liupan Mountains of China. Journal of Hydrology, 2(3):1 – 7.

Šraj M, Brilly M, Mikoš M. 2008. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. Agricultural and Forest Meteorology,148(1):121 – 134.

Valente F, David J S, Gash J H C. 1997. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. Journal of Hydrology,190(2):141 – 162.

Wallace J, McJannet D. 2006. On interception modeling of a lowland coastal rainforest in northern Queensland, Australia. Journal of Hydrology,329(3):477 – 488.

Wallace J, McJannet D. 2008. Modeling interception in coastal and montane rainforests in northern Queensland, Australia. Journal of hydrology,348(4):480 – 495.

Zeng N, Shuttleworth J W, Gash J H C. 2000. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part I. Point analysis. Journal of Hydrology,228(4):228 – 241.

(责任编辑 于静娴)