

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

何常清^{1,2}, 薛建辉^{2,*}, 吴永波², 张雷燕³

(1. 江苏省城市规划设计研究院, 南京 210036; 2. 南京林业大学江苏省林业生态工程重点实验室, 南京 210037;
3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏南京 210008)

摘要:修正的 Gash 解析模型具有较好的物理基础,是目前估算和预测林冠截留的有效工具。基于 2007 年 6 月到 9 月的降雨数据、气象和林分结构资料,采用修正的 Gash 解析模型对岷江上游川滇高山栎林冠截留进行了模拟。结果表明,林冠持水能力为 0.23mm,树干持水能力为 0.041mm,树干茎流系数为 0.013,使林冠饱和的降雨为 0.3mm;研究期间实测的林冠截留量为 80.2 mm,占总降雨量的 16.5%,应用模型模拟的林冠截留总量为 81.8 mm,高于实测值 1.6 mm (高于实测值 2.0%),林冠截留和树干茎流周累积量模拟值均与实测值有很好的 consistency,敏感性分析结果显示,应用修正的 Gash 解析模型进行岷江上游川滇高山栎林冠截留模拟研究中,模型最易受林冠持水能力影响,其次为郁闭度、树干持水能力,影响最小的林分参数为树干茎流系数。

关键词:修正的 Gash 解析模型;川滇高山栎林;林冠截留

Application of a revised Gash analytical model to simulate subalpine *Quercus aquifolioides* forest canopy interception in the upper reaches of Minjiang River

HE Changqing^{1,2}, XUE Jianhui^{2,*}, WU Yongbo², ZHANG Leiyan³

1 Jiangsu Institute of Urban Planning and Design, Nanjing 210036, China

2 Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: Based on rainfall data, weather information and forest structure from June to September in 2007, we applied the revised Gash analytical model to simulate subalpine *Quercus aquifolioides* forest canopy interception in the upper reaches of Minjiang River. The results showed that the canopy storage capacity was 0.23 mm, the stem storage capacity was 0.041 mm, the stemflow partitioning coefficient was 0.013, and the amount of rainfall needed to saturate the canopy was 0.3 mm. The canopy interception was 80.2 mm during the study period, which was 16.5% of total rainfall, whereas the total interception by applying model was 81.8 mm which was higher over 1.6 mm of measured value. There was a good consistency between the simulated and measured value in the weekly cumulative amount of canopy interception and stemflow. The sensitivity analysis indicated that the revised Gash analytical model was the most vulnerable to be influenced by the canopy water storage capacity, followed by canopy coverage, stem water storage capacity, and stemflow coefficient as well during the study period in the subalpine *Q. aquifolioides* canopy interception in the upper reaches of Minjiang River. Our result suggested that the revised Gash analytical model with a physical basis was an effective tool in estimating and budget the canopy interception in a subalpine *Q. aquifolioides* forest.

Key Words: revised Gash analytical model; *Quercus aquifolioides* forest; canopy interception

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2002CB111501)

收稿日期:2009-01-06; 修订日期:2009-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jhxue@njfu.edu.cn

林冠截留作为对输入森林生态系统水分的调节起点,历来是森林水文学研究的重要内容。林冠对降水的截留受多种因素综合影响,主要有降雨强度、持续时间、雨滴大小分布、方向、角度等降雨特性因素^[1,2]及森林类型、林冠结构、林龄、叶面积、郁闭度^[3-6]等林分自身特征。林冠截留模型是估算和预测林冠截留的有效工具,目前国内外学者根据影响林冠截留的各种因子和林冠截留量的关系推导出了许多经验、半经验理论模型和理论模型^[7-10]。早期的降雨截留模型如 Horton、Leonard 及 Helvey 等模型因没有考虑降雨强度、林分特征等因素对截留的影响,不能推广到试验地以外的其他林分^[11]。随后,以 Rutter^[12]为代表的概念模型在一定程度上考虑了气象因子和林分结构对降雨的影响,能够估计截留的不同组分如降雨期间和降雨停止后的截留损失。Rutte 模型的突出特点是用蒸发理论来处理附加截留问题,克服了用经验公式求算附加截留的弊端,但气象要素的测定和计算比较繁琐,给实际应用带来不便^[13]。Gash^[14]在 Rutter 模型基础上进行简化推导,建立了林冠截留的解析模型。之后,Gash 等^[15]又对其进行修正,使之适用于稀疏林地。Gash 模型结合了雨湿特征、林冠特征及空气动力学特征,并从截留机理出发,能够在获得林冠截留总量的基础上对截留各个组成部分有所了解^[16]。

目前,Gash 模型和修正的 Gash 解析模型广泛应用于不同森林类型、不同气候条件下的林冠截留研究中^[16-22]。与 Gash 模型相比,修正的 Gash 模型具有更好的物理基础,因此被推荐为更加适应于不同的森林类型林冠截留模拟研究中^[15,23],但国内还鲜有研究者利用修正的 Gash 模型对林冠截留进行模拟。为此,本研究应用修正的 Gash 模型对岷江上游川滇高山栎林林冠截留模拟,并量化该森林类型在应用修正的 Gash 模型时的参数值,为进一步探讨岷江上游森林生态水文过程及影响机理提供理论依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究地点(30°51'42.2"N,102°58'25.7"E)为位于卧龙自然保护区的卧龙亚高山暗针叶林生态系统研究站,海拔 2 805 m。该区年均气温 4.3 °C,12 月气温最低(-5.2 °C)、7 月份最高(12.4 °C),年均降水量 861.8 mm,5—9 月份降水量占全年的 68.1%,年均相对湿度约 80%,年均蒸发量 772.5 mm,日照时数 1185.4 h,风向以北风及东北风为主。研究区内主要灌木植被有川滇高山栎、高山柳(*Salix dissa*)和红花蔷薇(*Rosa moyesii*),林下草本不发达,主要有光柄野青茅(*Deyeuxia henryi*)、三角叶蟹甲草(*Cacalia eltophylla*)及少量苔草(*Carex tristachya*)等。

1.2 研究方法

距离邓生亚高山暗针叶林定位站约 200 m 的高山栎灌丛设置一块大小为 10 m × 10 m 固定样地,样地坡度 38°、西北坡向、下坡。样地郁闭度 0.8,样地内灌木的算术平均高度 4.8 m、密度约 29 400 株·hm⁻²,川滇高山栎的算术平均高度为 4.3 m、平均地径 3.8 cm、密度约 17 900 株·hm⁻²。具体实验方法参见文献^[24]。

2 模型介绍

Gash 解析模型将林冠对降雨的截留分为 3 个阶段:加湿期,林外降雨量(P_c)小于林冠达到饱和所必需的降雨量(P'_c);饱和期,当 $P_c > P'_c$ 后,林冠达到并维持饱和状态,平均降雨强度($\bar{R}$)大于饱和林冠的平均蒸发速率($\bar{E}$);干燥期,降雨停止后到林冠和树干干燥的阶段。修正的 Gash 模型在此基础上将林地划分为无植被覆盖区域和有植被覆盖区域两个截然不同的部分,并且假设无植被覆盖区域没有蒸发^[25]。该模型认为每次降雨事件之前要有足够的时间使林冠干燥,为此,保证每两场降雨之间有至少 8 个小时没有降雨发生^[21,25]。

利用修正的 Gash 模型计算林冠截留量的计算式如下:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = c \sum_{j=1}^m P_{Gj} + \sum_{j=1}^n (c \bar{E}_{Gj} / \bar{R}_j) (P_c - P'_c) + c \sum_{j=1}^n P'_c + qcS_{tc} + cpt_c \sum_{j=1}^{n-q} (1 - (\bar{E}_{Gj} / \bar{R}_j)) (P_c - P'_c) \quad (1)$$

模型的建立有几个基本假设,即林冠饱和之前没有水滴从林冠滴落;树干茎流发生在林冠饱和之后;树干蒸发发生在降雨结束之后;蒸发只发生在一维空间上,没有水平交互作用及对流发生^[15-16]。在这些假设基础之上还需要气象参数和林分(主要是林冠和树干)参数等两组主要参数。

林冠达到饱和所必需的降雨量 P'_G 由下式来计算:

$$P'_G = -(\bar{R}/\bar{E}_c) S_c \ln(1 - (\bar{E}_c - \bar{R})) \quad (2)$$

饱和林冠平均蒸发速率 $\bar{E}$ 根据 Penman-Monteith 公式计算:

$$\lambda \bar{E} = (\Delta R_n + \rho c_p D/r_a) (\Delta + \gamma)^{-1} \quad (3)$$

空气动力学阻力(r_a)由下式计算^[15]:

$$r_a = 1/0.056u \quad (4)$$

由于风速是根据空旷地气象站所得,风速测定点高度为地上 2 m,样地海拔高于空旷地海拔 15 m,样地灌木平均高为 4.8 m,因此,根据 Allen 等^[26]的方法计算冠层上方 2 m 处风速, $u = (u_0 \ln(67.8 \times 21.8 - 5.42))/4.87$ 。

树干达到饱和所必需的降雨量 P''_G 根据下式来计算^[25]:

$$P''_G = (\bar{R}/(\bar{R} - \bar{E}_c)) (S_{tc}/p_{tc}) + P'_G \quad (5)$$

林分参数主要包括林冠参数和树干参数。其中林冠参数有 S_c ; 树干参数有 S_t 和 p_t 。

根据 Gash 修正模型还可以计算树干茎流量和穿透雨量^[23,25]。

$$\sum_{j=1}^q SF_j = cp_{tc} \sum_{j=1}^q (1 - (\bar{E}_q/\bar{R}_j)) (P_G - P'_G) - qcS_{tc} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{n+m} TF_j = \sum_{j=1}^{n+m} P_G - \sum_{j=1}^{n+m} I_j - \sum_{j=1}^q SF_j \quad (7)$$

以上公式中各符号及意义见附表。

3 结果与分析

3.1 穿透雨量与树干茎流量

研究期间(2007 年 6 月—9 月)林外总降雨量为 486.7 mm,林内穿透雨量、树干茎流量和林冠截留量分别为 402.0、4.5 mm 和 80.2 mm,分别占总降雨量的 82.6%、0.9% 和 16.5%。穿透雨量和树干茎流量与降雨量的关系分别可以用式(8)、(9)所示。

$$TF = 0.895 P_G - 0.722 \quad (R^2 = 0.983, P < 0.01) \quad (8)$$

$$SF = 0.013 P_G - 0.041 \quad (R^2 = 0.943, P < 0.01) \quad (9)$$

3.2 林分参数的确定

将林冠持水能力(S)定义为当穿透雨停止后,树冠上方无蒸发发生时林冠的实际贮水量^[14],这部分水量最终将以蒸发方式散失。本研究采用 Leyton 方法^[27]确定 S ,根据树干茎流量与降雨量的关系式确定 S_t 及 p_t 。

首先根据式(8)求得穿透雨量残差,并确定日降雨量与该残差的关系(图 1)。然后求得二者关系拐点的降雨量值,大于该值且残差大于零的降雨量值与对应的穿透雨量值的回归线在 x 轴截距的负值即为 S ^[25,28]。

由图 1 可以看出,降雨量与穿透雨量残差关系的拐点为 4.4 mm,拐点右方降雨量与穿透雨量($P_G > 4.4$ mm 且残差大于 0)关系为:

$$TF = 0.899 P_G + 0.230 \quad (R^2 = 0.996, P < 0.01) \quad (10)$$

$P_G > 4.4$ mm 降雨量与对应的穿透雨量关系分别如图 2 所示,根据该结果得出川滇高山栎林 S 值为 0.23 mm。

S_t 为树干茎流量与降雨量关系式在 y 轴截距的负值, p_t 为斜率^[25]。根据式(9),本研究中 S_t 为 0.041 mm, p_t 为 0.013。

3.3 林冠截留模拟

在本研究中,两场降雨之间的间隔时间大于 8h,基于 2007 年 6 月到 9 月份降雨数据,根据式(1)、(6)、(7)计算的林冠截留量、树干茎流量和穿透雨量分别为 81.8、3.0 mm 和 401.9 mm。模拟的林冠截留量高于实测值 1.6 mm,高出实测值 2.0%。而模拟的树干茎流量和穿透雨量分别低于实测值 1.5 mm 和 0.1 mm,模

拟值和实测值见表 1。从表 1 可以看出,降雨停止前饱和林冠的蒸发量是川滇高山栎林冠截留的主要组分,占总截留量的 69.7%,其次为降雨停止后的林冠蒸发量,为 18.7 mm,占林冠截留的 22.9%,分析原因为该地区降雨强度小,历时长,观测期间平均降雨强度仅为 $1.78\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,平均蒸发速率为 $0.16\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,而且本研究采用的区分降雨的时间间隔为 8h,较长的降雨时间和间隔时间造成降雨停止前的林冠蒸发量最大。

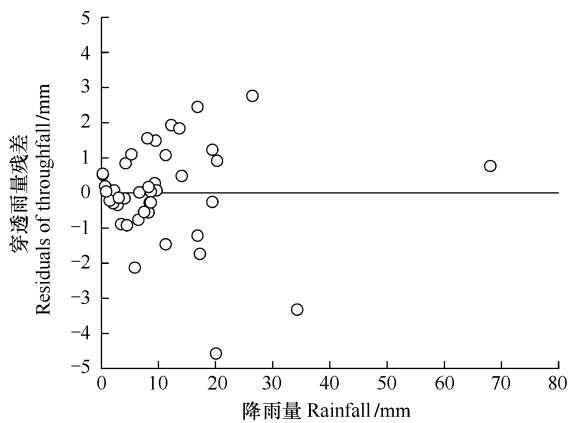


图 1 穿透雨量残差与降雨量的关系
Fig. 1 Relationship between the residuals of throughfall and rainfall in *Q. aquifolioides* forest

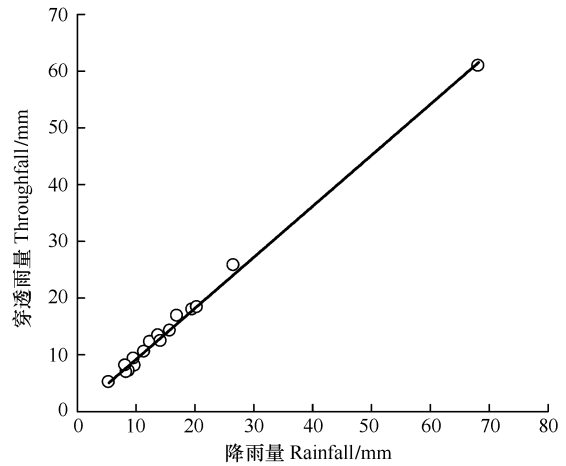


图 2 穿透雨量与降雨量 ($P_G > 4.4\text{ mm}$) 的关系
Fig. 2 Relationship between the throughfall and rainfall ($P_G > 4.4\text{ mm}$) in *Q. aquifolioides* forest

表 1 应用修正的 Gash 模型的预测值和实测值比较

Table 1 Comparison of the values of measured and simulated in applying the revised Gash analytical model (2007—06—2007—09)

项目 Item	表达式 Analytical form	模拟值 Simulated value/mm	实测值 Measured value/mm
林冠未达到饱和的 m 次降雨的截留量 Small rainfalls when $P_G < P'_G$	$c \sum_{j=1}^m P_{Gj}$	1.6	—
林冠达到饱和的 n 次降雨的林冠加湿过程 Wetting-up the canopy, when $P_G \geq P'_G$	$c \sum_{j=1}^n P'_G - nS$	2.4	—
降雨停止前饱和和林冠的蒸发量 Evaporation from saturation until rainfall ceases	$\sum_{j=1}^n (c \overline{E_{qj}} / \overline{R_j}) (P_G - P'_G)$	57.0	—
降雨停止后的林冠蒸发量 Evaporation after rainfall ceases	nS	18.7	—
q 次树干茎流树干蒸发量 Evaporation from trunks, when $P_G \geq P''_G$	qcS_{tc}	1.6	—
$m+n-q$ 次树干茎流树干未达到饱和蒸发量 Evaporation from trunks, when $P_G < P''_G$	$cp_{tc} \sum_{j=1}^{n-1} (1 - (\overline{E_{qj}} / \overline{R_j})) (P_G - P'_G)$	0.5	—
林冠截留总量 Total interception loss	I	81.8	80.2
树干茎流量 Total stemflow	SF	3.0	4.5
穿透雨量 Total throughfall	TF	401.9	402.0

修正的 Gash 模型最初应用于模拟林冠截留的一周累积量^[15],根据本研究资料,林冠截留量一周累积实测值和模拟值的关系如图 4 所示。模拟值和实测值的均方根误差为 5.02 mm,相对均方根误差为 6.3%,应用修正的 Gash 模型的模拟值与实测值具有较好的一致性。

修正的 Gash 模型中各个参数的物理意义明确,有比较严谨的推理过程,具有较强的实用性。但由于不能保证次降雨的计算精度,不能反映一场降雨事件的截留过程^[16],因而在模拟单场降雨事件的林冠截留中具有一定的局限性。应用本研究资料,单场降雨(结合实测时间和修正的 Gash 模型的划分降雨间隔时间来确定)

的林冠截留模拟值与实测值对比结果如图 4 所示,由图 4 可以看出,该模型能较好的预测出大部分单场降雨事件林冠截留量,但是,个别场次的降雨截留还存在较大差异。模拟值和实测值差值的最大值为 11.9 mm,最小值为 0.04 mm。

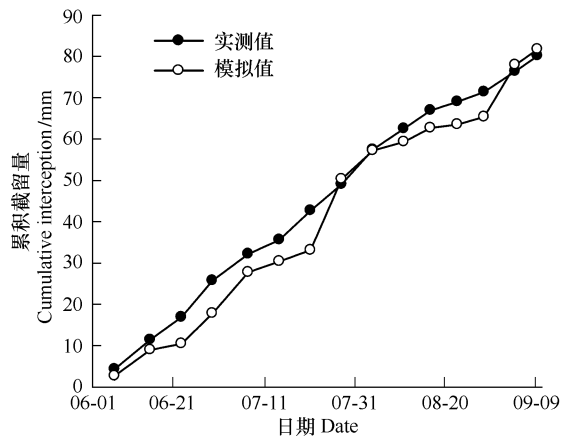


图 3 林冠截留周累积量的实测值与模拟值比较

Fig. 3 Comparison of measured and simulated in the weekly cumulative canopy interception during the study period (2007-06—2007-09)

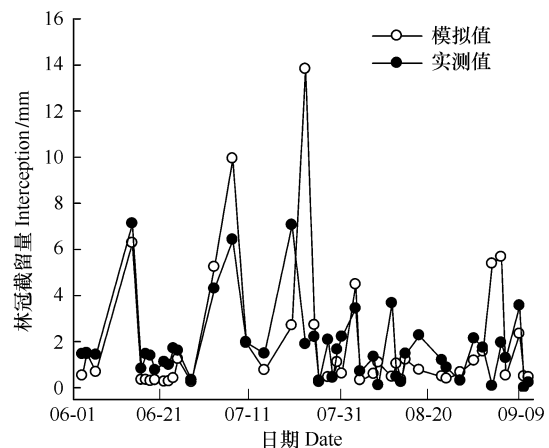


图 4 单场降雨林冠截留量的实测值与模拟值比较

Fig. 4 Comparison of measured and simulated in the canopy interception of one single rainfall event during the study period (2007-06—2007-09)

3.4 树干茎流模拟

应用式(6)所得的树干茎流累积模拟值与实测值的对比结果如图 5 所示。从图中可以看出,模拟值能较好的模拟出树干茎流累积量的变化动态,均方根误差为 0.92 mm,相对均方根误差为 20.7%。

4 讨论

川滇高山栎林冠截留量在研究期内为 80.2 mm,占总降雨量的 16.5%,应用修正的 Gash 解析模型模拟的研究期内林冠截留量为 81.8 mm,占总降雨量的 16.8%。模拟值高于实测值 1.6 mm,截留率高出 0.3%,对比结果显示,修正的 Gash 模型能对降雨截留周累积量进行较好的模拟。

不同的研究者认为参数变化引起林冠截留量的变化率存在差异,其中 $\bar{E}/\bar{R}$ 是影响最大的参数^[19,28-29]。但是,Limousin 等^[25]认为影响最大的参数是 c 值。对

本研究的林分参数对林冠截留量模拟值影响的敏感性分析结果显示,模型最易受 S 值影响,其次为 c 。 S 值、 c 值和 S_i 值增加 10% 引起林冠截留总量模拟值分别增加 2.06%、0.51% 和 0.20%;影响最小的是 p_i 值, p_i 值增加 10% 只引起林冠截留总量模拟值增加 0.08%,如图 6 所示。也就是说,当样地林分郁闭时($c=1$),模拟的林冠截留总量能达到 82.69 mm,比目前郁闭度(0.8)条件下的截留总量增加 1.16%。在本研究中,整个降雨期间饱和林冠的蒸发强度与降雨强度的比值($\bar{E}/\bar{R}$)不是定值,与王馨等^[16]研究结果一致,因此未作敏感性分析。为保证模型的应用,在单场降雨过程中将其视为定值,以满足模型的假设条件。

准确估计或测定 S 是保证应用修正的 Gash 模型估计林冠截留量精度的一个重要条件^[25], S 值大小取决于林冠本身结构特征,但是受气象因素和降雨特征影响^[29-31]。Deguchi 等^[19]总结了多种乔木森林类型的 S 值

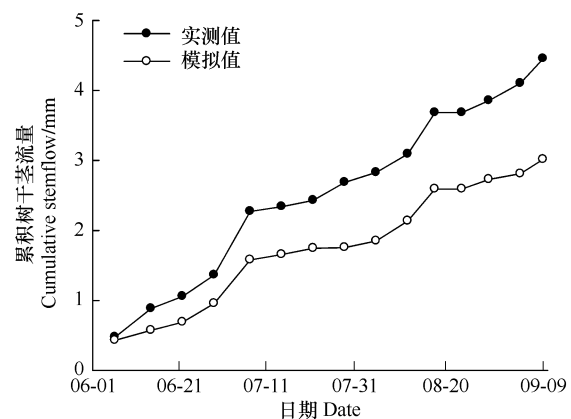


图 5 树干茎流周累积量的实测值与模拟值比较

Fig. 5 Comparison of measured and simulated in the weekly cumulative stemflow amount during the study period (2007-06—2007-09)

在 0.25—1.55 mm 之间, Llorens 等^[32] 总结不同密度针叶林的 S 值在 0.1—3.0 mm 之间。本研究估计的 S 值为 0.23 mm, 与 David 等^[33] 测定的地中海气候条件下单株 *Quercus ilex* (树高 (6.60 ± 0.70) m) 的 S 值 (0.26 mm) 相近, 因此可以认为本研究计算的 S 值具有合理性。

划分两场降雨之间的时间间隔不同对模型的精度也有一定影响^[30]。目前, 不同的研究人员划分两场降雨的间隔时间标准不同, 一般将时间间隔设为 6h^[29] 或者 8h^[21,25]。本研究对比两种划分标准发现, 当划分降雨时间间隔由 8h 变为 6h 时, 应用修正的 Gash 模型模拟的林冠截留量为 77.0 mm, 比用 8h 的标准划分减少 4.8 mm, 比实测值低 3.2 mm, 低于实测值 4.0%。由于降雨具有间隙性的特点, 如果划分两场降雨之间的时间间隔长, 就会减小平均降雨强度, 因此, 会增加林冠截留; 相反, 如果划分时间间隔较短, 降雨强度增加, 林冠截留减小, 但是, 在相同的时间段内就会包括更多的林冠饱和次数, 增加降雨停止后的林冠截留, 从而也会增加林冠截留^[25]。从本研究结果来看, 降雨停止后的林冠截留量所占比例较少 (占总截留量的 22.9%), 因此, 其增加截留的效果不是很大, 造成 8h 时间间隔的模拟值要高于 6h 时间间隔的模拟值。如果两场降雨之间的时间间隔短, 不足以使林冠干燥, 不能满足该模型的基本条件; 而间隔时间长, 又会增加平均蒸发速率的误差, 因此, 降雨的时间间隔标准要根据当地气候条件及降雨特点选择。Wallace 等^[22] 认为在澳大利亚北部 Daintree 国家公园低地雨林的降雨间隔时间为 5h 时, 应用 Gash 模型的模拟值和实测值相当。但本研究区内气温较低, 空气湿度较大, 与 Daintree 国家公园的平均蒸发速率 ($0.24 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 相比, 本研究区平均蒸发速率 ($0.16 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 较小, 因此, 两场降雨之间时间间隔较长比较适宜。

由于修正的 Gash 模型涉及参数较多, 尽可能准确地获得模型参数是保证模型精度的前提条件。湿润林冠蒸发显著影响林冠截留损失^[34]。本研究结果表明, 在该研究区内, 降雨停止前饱和和林冠的蒸发量是川滇高山栎林冠截留的主要组分, 因此, 确定湿润林冠截留蒸发速率在应用修正的 Gash 模型时尤为重要, 但准确测定湿润林冠截留的蒸发速率比较困难^[20,34], 目前常用 Penman-Monteith 公式估算。随着涡动协方差技术成为水汽通量观测的标准, 将为更加准确计算湿润林冠截留蒸发提供一种新的测定方法。

References:

- [1] Schellekens J, Scatena F N, Bruijnzeel L A, Wickel A J. Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *Journal of Hydrology*, 1999, 225: 168-184.
- [2] Crockford R H and Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow, and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 2000, 14: 2903-2920.
- [3] Nadkarni N M and Sumera M M. Old-growth forest canopy structure and its relationship to throughfall interception. *Forest Science*, 2004, 50(3): 290-298.
- [4] Iida S, Tanaka T, Sugita M. Change of interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Journal of Hydrology*, 2005, 315: 154-166.
- [5] Dang H Z, Zhou Z F, Zhao Y S. Study on forest Interception of *Picea crassifolia*. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4): 60-64.
- [6] Dietz J, Hölscher D, Leuschner C, Hendrayanto. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 2006, 237: 170-178.
- [7] Liu J. Theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modelling*, 1988, 42: 111-123.

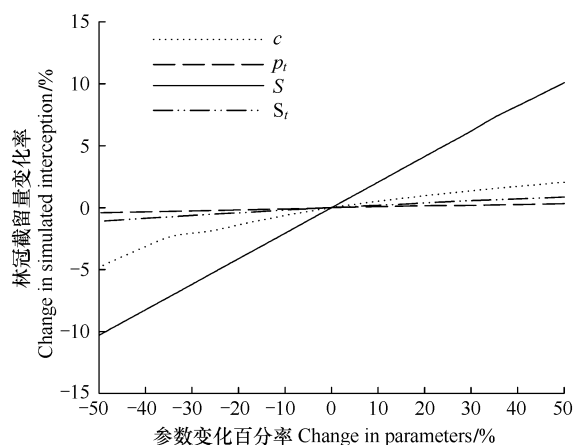


图6 修正的 Gash 解析模型参数变化的敏感性分析

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

c 为覆盖度; p_t 为树干茎流系数; S 为林冠持水能力; S_t 为树干持水能力

- [8] Wang Y H, Yu P T, Xu D Y, Zhao M S. A preliminary study on transformation of rainfall interception models and parameter's variation. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20 (6): 25-30.
- [9] Liu J G, Wan G L, Zhang X P, Wang B N. Semi-theoretical model of rainfall interception of forest canopy. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36 (2): 2-5.
- [10] Zhang G C, Liu X, Zhao M. On rainfall interception models. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2000, 24 (1): 64-68.
- [11] Guo M C, Yu P T, Wang Y H, Shen Z X, Shi Z J, Du A P, He C Q. Rainfall interception model of forest canopy: A preliminary study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (9): 1633-1637.
- [12] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, Morton A J. A predictive model of rainfall interception in forests. Derivation of the model from observations in forests. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 1971, 9: 367-384.
- [13] Diao Y W, Pei T F. Research advances in dynamic mechanism and its simulation of eco-hydrological process in forest catchment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (12): 2369-2376.
- [14] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception in forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1979, 105: 43-55.
- [15] Gash J H C, Lloyd C R, Lachaud G. Estimation sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 1995, 170: 78-86.
- [16] Wang X, Zhang Y P, Liu W J. Modeling canopy rainfall interception of a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (3): 722-729.
- [17] Dykes A P. Rainfall interception from a lowland tropical rainforest in Brunei. *Journal of Hydrology*, 1997, 200: 260-279.
- [18] N  var J, Carlyle-Moses D E, Martinez M A. Interception loss from the Tamaulipan matorral thornscrub of north-eastern Mexico: an application of the Gash analytical interception loss model. *Journal of Arid Environments*, 1999, 41: 1-10.
- [19] Deguchi A, Hattori S, Park H. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *Journal of Hydrology*, 2006, 318: 80-102.
- [20] Herbst M, Roberts J M, Rosier P T W, Gowing D J. Measuring and modelling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141: 244-256.
- [21] Herbst M, Rosier P T W, McNeil D D, Harding R J, Gowing D J. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 1655-1667.
- [22] Wallace J, McJannet D. On interception modelling of a lowland coastal rainforest in northern Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*, 2006, 329: 477-488.
- [23] Carlyle-Moses D E, Price A G. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal of Hydrology*, 1999, 214: 103-110.
- [24] He C Q, Xue J H, Wu Y B, Zhang L Y, Liu C, Liu X L. Rainfall redistribution in subalpine *Quercus aquifolioides* forest in upper reaches of Minjiang River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (9): 1871-1876.
- [25] Limousin J M, Rambal S, Ourcival J M, Joffre R. Modelling rainfall interception in a mediterranean *Quercus ilex* ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment. *Journal of Hydrology*, 2008, 357: 57-66.
- [26] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56, Rome: FAO, 1998.
- [27] Lu X Y, Tang K J. Study on rainfall interception characteristics of natural hardwood forest in central Taiwan. *Bulletin of Taiwan Forestry Research Institute*, 1995, 10 (4): 447-457.
- [28] Šraj M, Brilly M, Mikoš M. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 121-134.
- [29] Link T E, Unsworth M, Marks D. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 124: 171-191.
- [30] Klaassen W, Bosveld F, de Water E. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 1998, 212-213: 36-50.
- [31] Fan S X, Pei T F, Jiang D M, Cao C Y, Alamusa. Rainfall interception capacity of forest canopy between two different stands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11 (5): 671-674.
- [32] Llorens P and Gallart F. A simplified method for forest water storage capacity measurement. *Journal of Hydrology*, 2000, 240: 131-144.
- [33] David T S, Gash J H C, Valente F, Pereira J S, Ferreira M I, David J S. Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah. *Hydrological Processes*, 2006, 20: 2713-2726.
- [34] Gash J H C, Valente F, David J S. Estimates and measurements of evaporation from wet, sparse pine forest in Portugal. *Agricultural and Forest*

Meteorology, 1999, 94: 149-158.

参考文献:

- [5] 党宏忠, 周择福, 赵雨森. 青海云杉林冠截留特征研究. 水土保持学报, 2005, 19 (4): 60-64.
- [8] 王彦辉, 于澎涛, 徐德应, 赵茂盛. 林冠截留降雨模型转化和参数规律的初步研究. 北京林业大学学报, 1998, 20 (6): 25-30.
- [9] 刘家冈, 万国良, 张学培, 王本楠. 林冠对降雨截留的半理论模型. 林业科学, 2000, 36 (2): 2-5.
- [10] 张光灿, 刘霞, 赵玫. 树冠截留降雨模型研究进展及其述评. 南京林业大学学报, 2000, 24 (1): 64-68.
- [11] 郭明春, 于澎涛, 王彦辉, 沈振西, 时忠杰, 杜阿朋, 何常清. 林冠截持降雨模型的初步研究. 应用生态学报, 2005, 16 (9): 1633-1637.
- [13] 刁一伟, 裴铁藩. 森林流域生态水文过程动力学机制与模拟研究进展. 应用生态学报, 2004, 15 (12): 2369-2376.
- [16] 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. 生态学报, 2006, 26 (3): 722-729.
- [24] 何常清, 薛建辉, 吴永波, 张雷燕, 刘冲, 刘兴良. 岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配. 应用生态学报, 2008, 19 (9): 1871-1876.
- [27] 陆象豫, 唐凯军. 台湾中部地区天然阔叶林降雨截留量之探讨. 林业试验所研究报告季刊, 1995, 10 (4): 447-457.
- [31] 范世香, 裴铁藩, 蒋德明, 曹成有, 阿拉木萨. 两种不同林分截留能力的比较研究. 应用生态学报, 2000, 11 (5): 671-674.

附表: 文中各参数的含义和单位

降雨参数			
P_G	林外总降雨量/mm	TF	穿透雨量/mm
SF	树干茎流量/mm	I	林冠截留量/mm
P'_G	林冠达到饱和和所必需的降雨量/mm	P''_G	树干达到饱和和所必需的降雨量/mm
$\bar{R}$	降雨期间平均降雨强度/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	$\bar{E}$	饱和和林冠平均蒸发速率/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
$\bar{E}_c$	单位覆盖面积的平均蒸发速率 (Mean evaporation rate per cover/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)), $\bar{E}_c = \bar{E}/c$	S_c	单位覆盖面积的林冠持水能力 (Canopy storage capacity per cover unit/mm), $S_c = S/c$
m	林冠未达到饱和的降雨次数	n	林冠达到饱和的降雨次数
q	产生树干茎流的降雨次数		
气象参数:			
λ	水的汽化潜热/($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$), $\lambda = 2.51 - 0.002361T$	T	空气温度/°C
Δ	饱和水汽压梯度/($\text{hPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), $\Delta = 40980e_s/(237.3 + T)^2$	e_s	饱和水汽压/hPa
R_n	大气净辐射/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	ρ	空气密度/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),
P	大气压强/hPa	c_p	空气在常压下的比热/($1.0048 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
D	饱和水汽压差/hPa,	RH	空气相对湿度/%
r_a	空气动力学阻力/($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	γ	空气湿度常数/($\text{hPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), $\gamma = 0.016286P/\lambda$
u	冠层上方 2m 处风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	u_0	测定点风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
林分参数			
S_{tc}	单位覆盖面积树干持水能力 (Trunks storage capacity per cover unit/mm), $S_{tc} = S_t/c$	S_t	树干持水能力/mm
c	郁闭度	S	林冠持水能力 (Canopy storage capacity/mm)
p_t	树干茎流系数		