

Gash 模型在热带季节雨林林冠截留研究中的应用

王 馨^{1,2}, 张一平^{1*}, 刘文杰¹

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:为了验证 Gash 林冠截留解析模型在西双版纳热带季节雨林中的适用性, 基于 2003 年的热带季节雨林气候及林冠特征观测数据, 采用 Gash 模型对林冠截留进行了模拟。结果显示, 西双版纳热带季节雨林样地年降雨量为 1244.4mm, 穿透降雨为 867.3mm, 树干径流为 114.4mm, 树冠截留量为 262.7mm, 林内穿透降雨量和林外降雨量之间存在显著的正相关关系; 降雨过程中饱和林冠的蒸发强度为 0.12mm/h, 使林冠饱和的降雨为 0.6mm, 林冠枝叶部分持水能力为 0.41mm, 树干持水能力为 0.18mm; 模型模拟的年林冠截留量为 274.9mm, 干季为 71.7 mm, 雨季为 203.1 mm; 模拟的相对误差年值为 4.3%, 干季为 0.1%, 雨季为 6.9%, 模拟与实测有很好的—致性, 显示了 Gash 模型适用于西双版纳地区热带季节雨林林冠截留计算。

关键词: Gash 模型; 林冠截留; 热带季节雨林

文章编号: 1000-0933(2006)03-0722-08 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Modeling canopy rainfall interception of a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, Southwest China

WANG Xin^{1,2}, ZHANG Yi-Ping^{1*}, LIU Wen-Jie¹ (1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Kunming 650223, China; 2. The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 722 ~ 729.

Abstract: Gash analytical model has been widely used for estimating rainfall interception of forest canopy. In order to verify its applicability, we compared the modeling results of the Gash model with those of field data collected from a tropical seasonal rainforest of Xishuangbanna in 2003. Field measurements showed that annual rainfall was 1244.4 mm in the rainforest with throughfall, stemflow, and canopy interception amounted to 867.3, 114.4, and 262.7 mm, respectively. Throughfall correlated positively with the weekly rainfall. Using the Gash analytic model, the estimated canopy interception was 274.9 mm with canopy water storage capacity reaching 0.59 mm (0.41 mm for leaves and branches and 0.19 mm for tree trunks). With an average evaporation rate of 0.12 mm h⁻¹ from the saturated canopy and a rainfall intensity of 3.37 mm h⁻¹, the amount of rainfall needed to saturate the canopy was 0.6 mm. Evaporation after rainfall ceasing was the greatest within 5 components in Gash model and it accounted for 46.2% of total interception, and evaporation from trunks accounted for about 15% so it was another component that could not be neglected. Relative differences between the Gash modeling results and field measurements were 4.3% with dry season as 0.1% and rainy season as 6.9%. We conclude that the Gash analytic model can be used for estimating canopy water interception in the tropical seasonal rainforest.

Key words: gash analytic model; rainfall interception; tropical seasonal rainforest

模型研究是林冠水文研究的必要手段, 半理论模型为探求不同类型森林林冠截留特性、以及寻求其共性

基金项目:国家重点基础研究发展计划(国家 973 项目)资助项目(2003CB415101); 云南省自然科学基金资助项目(2003C0002Z)

收稿日期: 2005-01-30; **修订日期:** 2005-10-08

作者简介: 王馨(1979~), 女, 甘肃人, 硕士生, 主要从事生态水文学研究. E-mail: wx@xtbg.ac.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

致谢: 本文得到了 Xiaomin Zou 教授(美国 Puerto Rico 大学)指正, 谨此致谢

Foundation item: The project was supported by the National Key Project for Basic Research on Ecosystem Changes in Longitudinal Range-Gorge Region and Transboundary Eco-security of Southwest China (No. 2003CB415101) and the Natural Science Foundation of Yunnan Province (No. 2003C0002Z)

Received date: 2005-01-30; **Accepted date:** 2005-10-08

Biography: WANG Xin, Master candidate, mainly engaged in ecological hydrology. E-mail: wx@xtbg.ac.cn

提供了一个实用而有力的工具。考虑到在热带雨林中开展林冠水文研究存在的困难,如样树的代表性较差、穿透降雨空间变率较大、树干径流测量的精度难以保证等,观测方法的选择和量器布设方式以及数据分析方法对最后的结果影响很大^[1-5],因此对热带雨林林冠截留进行模型化研究尤为重要。

林冠截留模型是估算和预测林冠截留量的有效工具,主要包括经验、半理论和理论模型^[6-10];经验模型是基于野外实测数据,通过数理统计等方法建立起来的统计或回归模型;半理论模型是在截留机制理论分析的基础上建立模型的基本形式,利用实测数据确定其中的经验参数;理论模型则是基于林冠截留动态过程的物理描述、严谨的推理过程和坚实的数量基础所建立的模型。三者各有利弊:经验模型简单明了地反应了特定林分林冠截留量与降雨量之间的数量关系,有很大的局限性,不能反映截留过程;理论模型可以在较大程度上反应截留的动态过程,不受地区和树种的限制,但形式复杂,求解困难,较难运用于实际^[11]。相比较而言,结合理论推导和经验参数的半理论模型更具实用性。其中,Calder 的随机模型^[12-14]、Rutter 的微气象模型^[15-17]以及 Gash 的解析模型^[18,19]运用广泛,热带很多地区都在各种森林类型实验的基础上对这些模型进行了检验,Gash 模型及其改进模型与实际观测的结果拟合的较好^[2,20-24]。

本文的研究目的在于:对西双版纳热带季节雨林林冠截留进行模型化研究;探讨 Gash 模型在西双版纳热带季节雨林中的适用程度;给出西双版纳热带季节雨林中运用 Gash 模型的参数值,以期对热带森林中植物——大气间水分传输研究提供支持。

1 模型介绍

Gash^[18]模型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让林冠完全恢复到降雨前的干燥程度。Gash 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。Gash 模型的基本形式为:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = n(1-p-p_i)P'_c + (\bar{E}/\bar{R}) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_c) + (1-p-p_i) \sum_{j=1}^m P_{Gj} + qS_i + p_i \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{Gj} \quad (1)$$

式(1)中使林冠达到饱和所必需的降雨量 P'_c 由下式来确定:

$$P'_c = (-\bar{R}S/\bar{E}) \ln[1 - (\bar{E}/\bar{R})(1-p-p_i)^{-1}] \quad (2)$$

饱和林冠的平均蒸发速率 $\bar{E}$ 由 Penman-Monteith 公式来计算:

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

式中空气动力学阻力(r_a)由下式计算:

$$r_a = \frac{\{\ln[(z-d)/z_0]\}^2}{k^2 U} \quad (4)$$

公式中各符号意义见附录。

由以上公式可以看出,Gash 模型所描述的林冠截留过程与降雨特征、林冠结构、林地空气温湿状况以及流动情况有关,这与实际的降雨截留过程相符。模型的应用以一系列的降雨事件为基础,最主要的标准就是这些降雨事件彼此被足够长的干燥过程分开,因此并不完全等同于气象学上的次降雨;其次,需要每次降雨的总雨量、穿透降雨量和干流量;第三,需要降雨过程中的平均蒸发速率和平均降雨强度,且在降雨过程中两者的比例近似相等。同时,模型的建立有两个基本的假设,即假设在林冠饱和之前没有冠滴水,以及树干蒸发只有在降雨结束后才开始发生。

模型中各个参量的物理意义明确,有比较严谨的推理过程,涵盖面广,不需要复杂的数学计算,有较强的实用性。同时,模型也有它的不足之处,主要是不能保证次降雨的计算精度,也不能反映一次降雨事件中具体的截留过程。

2 实验方法

研究样地选取的热带季节雨林位于西双版纳勐仑自然保护区内(21°57'N,101°12'E,海拔 756 m),样地

内建有的 CREN 的森林水文观测系统,基本情况见文献^[25]中的详细介绍。研究地林分特征见表 1。

表 1 西双版纳热带季节雨林林分特征

Table 1 Some characteristics of tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna

径级 [*] (cm) DBH	平均高度 [*] (m) Mean height	平均胸径 [*] (cm) DBH	株数密度 [*] (株/hm ²) Density of trees	叶面积指数 LAI	可见天空率 DIFN
5~10	7.32	6.87	503	5.00 ± 0.85	0.091 ± 0.047
10~20	11.76	13.90	226		
20~30	17.05	24.12	68		
30~40	20.49	34.32	41		
40~50	23.79	44.41	18		
≥50	30.81	71.72	34		

* 由中国科学院西双版纳热带雨林生态系统定位研究站提供 Provided by Xishuangbanna Tropical Rain Forest Ecosystem Station, XTBG, CAS

2.1 野外观测

2.1.1 穿透降水的测定 热带季节雨林内,植被繁多,林冠疏密程度不均,且层次较多,样点选择具有一定难度。为使观测更具代表性,采用自制的 2.0m × 0.3m V 型集水槽来收集穿透降水,通过增大集水面积来弥补林冠的不均匀性。具体操作时将集水槽固定在林冠下,10 个为一组,用塑料汽油桶收集,每日称其总量,换算为水深。

2.1.2 树干径流的测定 采用塑料管环状收集槽,环绕树干,用塑料汽油桶收集树干径流,每日称其总量。热带雨林共设 4 组,第 1 组取不同径级的树干 6 棵,第 2 组取径级 16cm < d ≤ 32cm 的树干 1 棵,第 3 组取径级 10cm < d ≤ 16cm 的树干 4 棵,第 4 组选取径级 d ≤ 10cm 的树干 4 棵。取得总量后,用树冠投影面积计算单位面积林冠的树干径流量。

2.1.3 其他要素的测量 样地内 70m 高的正三角形铁塔上架设了常规气象观测系统(RMET),与本研究相关观测有降雨量(RM YOUNG, 52203)、空气温湿度(VAISALA, HMP45C)、风速(VECTOR INSTRUMENTS, A100R)、净辐射(KIPP&ZONEN, CNR-1)等。

2.2 林冠持水能力估算

根据生物量、植株的显著程度^[26]以及取样可行程度,在样地中选取 7 种(属)共 36 棵树作为样树,每种(属)3~6 棵。每棵样树取一定量的树皮(3 片,约 10 × 20cm²/片)、枝条(直径 ≤ 2cm)和叶称其鲜重,用清漆封住枝条和树皮除外表面的各个切面,使得只有外表面吸水。漆干后浸水 24h,根据材料吸水的特性,分别采用 5min、10min、20min、30min 的时间间隔各进行一个小时的浸水称重,4h 后每 1h 称重 1 次。随后,将浸水 24h 后的样品悬挂风干 24h,其间同样采用先密后疏的时间间隔称重。根据预实验,叶片浸水 5min 后重量就不再有明显的变化,且浸水时间过长后风干叶片易萎蔫,因此叶片浸水风干都是 3h。具体情况见文献^①。

获得样品最大稳定持水量后,运用尺度上推法,依据样地生物量、叶面积指数等估算出热带季节雨林的林冠持水能力。

3 实验结果

本研究使用数据为 2003 年的观测数据,雨季为 5~10 月,其余月份为干季。

3.1 降雨特征

2003 年年降雨量为 1244.4mm,其中雨季(5~10 月)降雨量 926.7mm,占 74.5%,干季(11~4 月)降雨量 317.7mm,占 25.5%。与近 12a 的平均状况相比^[27],2003 年的年降雨量相对较少,降雨季节分配有较大变化:雨季降雨减少,干季降雨增加,尤其是干季降雨明显增加,其中 1 月降雨量在近 12a 首次超过 100mm,而 11、12 月份几乎没有降雨(图 1a)。按照《实用气象手册》^[28]的划分,全年以 ≤ 2.5mm/h 的小型降雨为主, > 8mm/h 的大雨及特大降雨占全年总雨时的 4.8%。

① 王馨,等.西双版纳热带季节雨林与橡胶林林冠持水能力的研究,待发表。

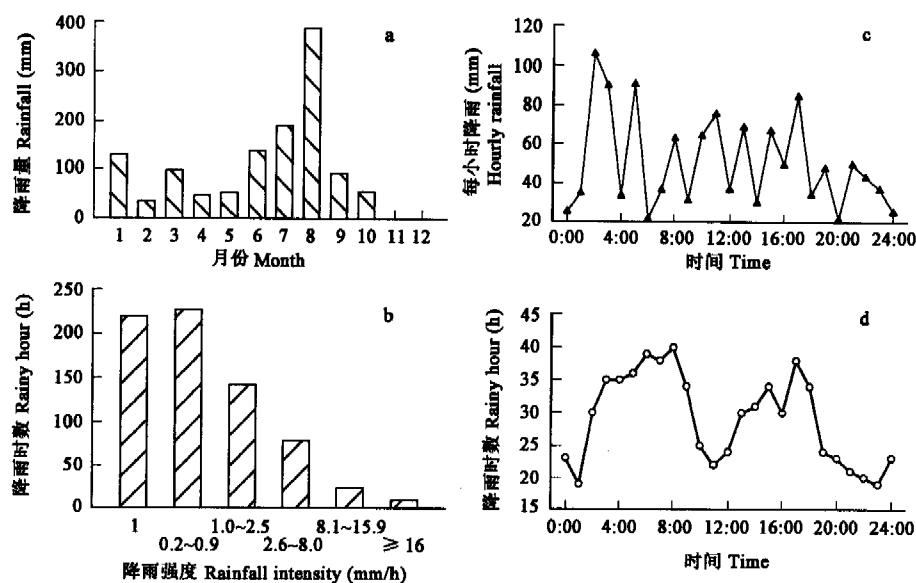


图1 降雨特征

Fig.1 Some characteristics of rainfall:monthly rainfall(a),distribution of rainfall intensity (b) and distribution of rainfall (c) and rainy hour(d) in a day
a 降雨量年变化,b 降雨强度分布, c 降雨量日变化,d 雨时日变化

从降雨日分配来看(图 1c、d),降雨主要发生在日出前和午后两个时段,正午和凌晨前后发生降雨较少;雨量主要集中在每日 2:00 ~ 5:00 和 17:00; 18:00 ~ 24:00雨量相对较少。

3.2 林内雨量

穿透降雨和树干径流的和为林内雨量。2003 年实测穿透降雨总量为 867.3mm,树干径流总量为 114.4mm,分别占年降雨总量的 69.7%、9.2%。各月穿透降雨占月降雨总量的 $57.4\% \pm 18.5\%$,树干径流占月降雨总量的 $11.2\% \pm 7.5\%$ 。将林内穿透降水的周总量与林外降雨周总量进行回归(图 2),可见林内穿透降雨与林外降雨具有显著的正相关关系。

3.3 林冠截留

林冠层存在如下的水量平衡:

$$I = P - (T_f + S_t) \quad (5)$$

式中, I 为林冠截留量, P 为林外降雨, T_f 为穿透降雨, S_t 为树干径流。

3.3.1 参数 林冠持水能力是林冠截留降水的主要影响因子之一,由林冠结构、树种组成、枝叶表面积指数,以及叶、枝、树干的表面持水能力决定。研究中一般采用回归法、尺度上推法和遥感法来进行测定或估算^[29]。在穿透降雨空间变率较高的热带地区^[5,22],基于实测穿透降雨和树干径流的回归法也难以应用^[29];而遥感法由于实施起来较为昂贵而很少采用。因此本研究采用尺度上推法进行林冠持水能力的估算,得出林冠枝叶部分的持水能力 S 为 0.35 ~ 0.51mm,树干部分的持水能力 S_t 为 0.13 ~ 0.26mm。自由穿透降雨系数 p 为每月中测得的可见天空率(表 1),树干径流系数 p_t 为各月多年平均树干径流率^[25]。其他参数值见表 2,其中根据模型的要求, R 为 $\geq 0.5\text{mm/h}$ 的月平均降雨强度,2003 年 11 月、12 月观测样地处没有 $\geq 0.5\text{mm/h}$ 的降雨出现,其值空缺。饱和林冠的平均蒸发强度为 0.12mm/h,低于年平均降雨强度。林冠层的空气动力学参数根据

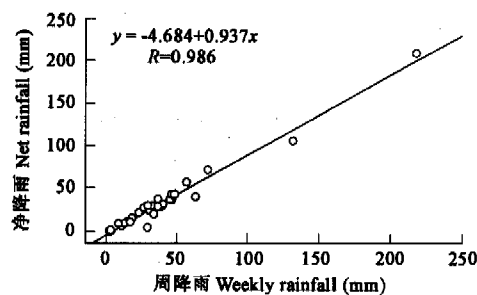


图2 降雨与穿透降雨

Fig.2 The relation of throughfall to rainfall,for weekly value

RMET 观测数据计算得到^①。

3.3.2 截留模拟 基于现有数据,根据每小时的降雨数据对 2003 年的热带季节雨林林冠截留进行模拟,对于 $<0.5\text{mm/h}$ 的降雨直接计入林冠未饱和的部分,对 $\geq 0.5\text{mm/h}$ 的降雨代入模型进行计算。全年林冠各部分截留值见表 3,其中 $m = 363\text{h}$, $n = 341\text{h}$, $q = 220\text{h}$, $<0.5\text{mm/h}$ 的降雨量为 57.8mm 。

表 2 Gash 模型参数

Table 2 Some parameters needed in Gash model

月份 Month	$R(\text{mm/h})$	$d(\text{m})$	$z_0(\text{m})$	$u(\text{m/s})$	$r_a(\text{s/m})$	$E(\text{mm/h})$	$P'_G(\text{mm})$	$S_i/p_i(\text{mm})$
1 月 Jan.	3.96	30.9	3.11	0.26	39.22	0.09	0.76	1.09
2 月 Feb.	2.21	30.8	3.28	0.33	49.13	0.14	0.53	2.54
3 月 Mar.	5.59	30.3	3.00	0.38	30.79	0.18	0.60	2.39
4 月 Apr.	4.23	27.3	4.96	0.33	22.36	0.24	0.56	3.50
5 月 May	2.79	30.9	2.88	0.37	30.50	0.22	0.43	4.87
6 月 Jun.	2.39	28.0	5.59	0.28	18.95	0.20	0.40	2.75
7 月 Jul.	3.19	31.0	2.99	0.33	32.63	0.16	0.40	1.57
8 月 Aug.	3.98	29.4	5.02	0.22	24.39	0.15	0.50	0.81
9 月 Sep.	3.02	29.8	4.02	0.24	32.07	0.14	0.53	0.50
10 月 Oct.	2.31	27.8	6.50	0.19	20.19	0.15	0.44	1.27
11 月 Nov.	—	32.4	1.57	0.25	81.96	0.10	—	—
12 月 Dec.	—	31.6	2.17	0.25	60.43	0.11	—	—
干季 Dry season	4.00	30.55	3.02	0.30	47.32	0.14	0.61	2.38
雨季 Rainy season	2.95	29.48	4.50	0.27	26.46	0.17	0.45	1.96
年 Year	3.37	30.02	3.76	0.29	36.89	0.16	0.52	2.13

表 3 Gash 模型的组成部分

Table 3 The components of the total interception loss accounting to Gash model, based on hourly rainfall

林冠截留损失的组成部分 Component of interception loss	表达式 Analytical form	截留量 Value (mm)
林冠未饱和的 m 次降雨 Small rainfalls when $P_G < P'_G$	$(1 - p - p_i) \sum_{j=1}^m P_{Gj}$	51.5
林冠达到饱和的 n 次降雨的林冠加湿过程 Wetting-up the canopy, when $P_G > P'_G$	$(1 - p - p_i) P'_G - nS$	4.1
降雨停止前饱和林冠的蒸发 Evaporation from saturation until rainfall ceases	$(\bar{E}/\bar{R}) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G)$	50.8
降雨停止后的林冠蒸发 Evaporation after rainfall ceases	nS	127.0
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 Evaporation from trunks	$qS_i + P_i \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{Gj}$	41.5
截留总量 Total interception loss	I	274.9

不难看出,降雨停止后的林冠蒸发是林冠截留的主要组成部分,占截留总量的 46.2%;树干截留占林冠截留的 15.1%,是林冠截留中不可忽视的组成部分。对于雨量较小的降雨($P_G < P'_G$)而言,对截留起主要作用的是林冠郁闭度;对于雨量较大的降雨而言,截留受到诸如林冠蒸发强度、林冠饱和程度及林冠郁闭度等较多因素的影响。

3.3.3 林冠截留量比较 由实测的 P 、 T_f 与 S_i 值,用公式 5 计算得到年截留总量为 262.7mm ,占全年降雨量的 21.1%。运用 Gash 解析模型对 2003 年的林冠降雨截留过程进行模拟,得到年截留总量为 274.9mm ,占全年降雨量的 22.1%,截留量比实测值高 12.2mm ;截留率(年截留量占降水量的百分比)高 1.0%。对 2003 年实测截留累计量和模拟截留累计量进行对比(图 3),显示出 Gash 模型对降雨截留(周总量累计)做了较好的模拟。

4 结论与讨论

由于资料的限制,本研究没有采用次降雨的资料,而是基于每小时的降雨数据对林冠截留进行模拟。一方面,模型无法及时反映林冠的湿润程度,在连续性降雨或阵性降雨发生时高估了林冠截留量;同时,实际的

① 张一平,等.西双版纳热带季节雨林时空变化特征初步分析.投植物生态学报,完成修改。

截留过程中,林冠可能是随着穿透降雨或树干径流的产生而逐渐达到饱和的,而模型的假设条件认为只要 $P_c \geq P'_c$ 林冠就达到饱和,因此也会造成模型对截留量的高估。另一方面,模型对截留量的估算是以林冠截留能力 S 为基础的,根据对 S 的一般性理解,持水量实验测得的 S 并不包括叶表面暂时附着、叶腋处存留以及附生物截留的水分,因此模型中不包括这部分截留水量,造成对截留总量的低估。在热带季节雨林样地中,常有大型附生植物着生在树干或枝的分支处,一些叶片的叶面上也着生有附生植物,Liu等^[30]在亚热带中山湿性常绿阔叶林的研究显示,有附生植物的林木比没有附生植物的林木干流量高40%,相应的截留量也不可忽视。

模型模拟值与实测的截留量相比较(表4),可见,干季的相对误差较小,雨季略大,这可能是由于干季的气候条件下,降雨多满足模型假设条件,而雨季的降雨类型多样、大强度降雨较多,使得降雨截留情况比较复杂,准确模拟较困难。以8月下旬为例,雨日5d,雨时50h,其中最短的降雨也连续降雨5h,其中有2日的连续降雨均达12h,在此条件下模拟的林冠截留量与实测值的误差较大,在使用过程中应予以注意;但由于误差相互抵消,季节总量的模拟值与实测值的相对误差较小,干季为0.2%,雨季为6.2%,年为4.6%(表4),周截留总量模拟值与实测值相关图(图4)同样显示了模拟值与实测值具有很好的一致性,因此可以认为Gash模型在西双版纳热带季节雨林有很好的适用性。

由于Gash模型涉及到较多的参数,影响模型模拟精度的因素相应较多,因此需要通过适当的方法来获得尽可能准确的参数。但是对我国热带森林而言,诸多参数的获得并非易事,找到一些较为稳定的参数值是下一步的目标。Gash认为树高 h 和式(4)中的各个参数有数量关系: $d = 0.75h$, $z_0 = 0.10h$, $z = h + 2$ 。本研究中林分高度约为36.5m,年平均 d 、 z_0 和 z 值基本吻合Gash给出的关系,可以认为在热带季节雨林中也存在这样的数量关系,可以运用在今后的模型模拟中。本研究中饱和和林冠的蒸发强度与降雨强度不存在线性关系,因此它们的比值不是定值,与模型假设不符,在今后使用Gash模型时应予以注意。

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。运用Gash模型对林冠截留进行模拟可以避免繁琐的人工观测、以及由于较大的穿透降雨空间变异带来的观测误差,在热带雨林中尤为如此。本研究仅使用了2003年1a的数据进行模拟,其代表性还有所欠缺,需要利用其他年份或其他热带森林的观测资料来进一步检验Gash模型在我国热带雨林的适用性,这将是下一步需要深入开展的工作。

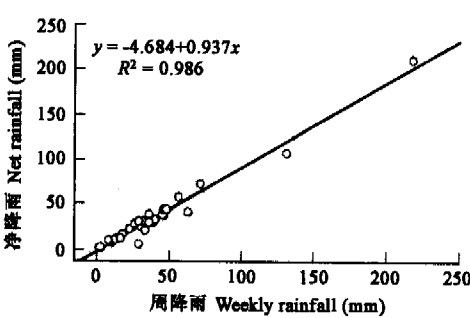


图3 实测与模拟截留累计值

Fig.3 Cumulative interception loss, for measured and estimated value

表4 不同季节模拟与实测的林冠截留值比较

Table 4 Comparison of interception loss between estimated and measured value in two seasons

	年 Year	干季 Dry season	雨季 Rainy season
模拟值 Estimated value (mm)	274.9	71.7	203.1
实测值 Measured value (mm)	262.7	71.6	191.1
模拟-实测 Difference (mm)	12.2	0.1	12.0
相对误差 Relative error (%)	4.6	0.2	6.2

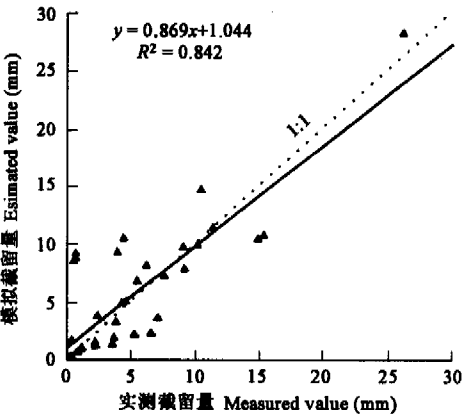


图4 实测截留量与模拟截留量(8月份除外)

Fig.4 Relation between measured and estimated interception loss (except for Aug.), for weekly value

References:

- [1] Chen J F, Li X B. The impact of forest change on watershed hydrology-discussing some controversies on forest hydrology. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5):474 ~ 480.
- [2] Bruijnzeel L A, Wiersum K F. Rainfall interception by a young *Acacia Auriculiformis* (A. Cunn) plantation forest in west Java, Indonesia: Application of Gash's analytical model. *Hydrogeology Processes*, 1987, 1: 309 ~ 319.
- [3] Jackson I J. Problems of throughfall and interception assessment under tropical forest. *Journal of Hydrology*, 1971, 12: 234 ~ 254.
- [4] Lloyd C R, Gash J H C, Shuttleworth W J. The measurement and modeling of rainfall interception by Amazonian rain forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1988, 43: 277 ~ 294.
- [5] Loescher H W, Powers J S, Oberbauer S F. Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 2002, 18: 397 ~ 407.
- [6] Liu J. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modeling*, 1988, 42: 111 ~ 123.
- [7] Liu J G, Wang G L, Zhang X P, *et al.* Semi-theoretical model of rainfall interception of forest canopy. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(2):2 ~ 5.
- [8] Wang Y M. A summary on the study of redistribution of precipitation by canopies in China I. *Journal of Northwest Forestry University*, 2000, 15(3): 1 ~ 7.
- [9] Wang Y M. A summary on the study of redistribution of precipitation by canopies in China II. *Journal of Northwest Forestry University*, 2000, 15(4): 1 ~ 5.
- [10] Yin Y, Zhou Y B, Cui J G, *et al.* The model for crown interception. *Journal of Liaoning Science & Technology*, 2001, (5):10 ~ 12.
- [11] Zhang G C, Liu X, Zhao M. On rainfall interception models. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2000, 24(1): 64 ~ 68.
- [12] Calder I R. A stochastic model of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 1986, 89: 65 ~ 71.
- [13] Calder I R. Dependence of rainfall interception on drop size: 1. Development of the two-layer stochastic model. *Journal of Hydrology*, 1996, 185: 363 ~ 378.
- [14] Calder I R, Hall R L, Rosier P T W, *et al.* Dependence of rainfall interception on drop size: 2 Experimental determination of the wetting functions and two-layer stochastic model parameters for five tropical tree species. *Journal of Hydrology*, 1996, 185: 379 ~ 388.
- [15] Rutter A J, Morton A J. A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. *J. appl. Ecol.*, 1977, 14: 567 ~ 588.
- [16] Rutter A J, Morton A J, Robins P C. A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *J. appl. Ecol.*, 1975, 12: 367 ~ 380.
- [17] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, *et al.* A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 1971, 9: 367 ~ 384.
- [18] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 1979, 105: 43 ~ 55.
- [19] Gash J H C, Lloyd C R, Lachaud G. Estimation sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 1995, 170, 79 ~ 86.
- [20] Dykes A P. Rainfall interception from a lowland tropical rainforest in Brunei. *Journal of Hydrology*, 1997, 200: 260 ~ 279.
- [21] Hutjes R W A., Wierda A, Veen A W L. Rainfall interception in the Tai Forest, Ivory Coast: Application of two simulation models to a humid tropical system. *Journal of Hydrology*, 1990, 114: 259 ~ 275.
- [22] Lloyd C R, Marques A D O. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1988, 42: 63 ~ 73.
- [23] Rao A S. Interception losses of rainfall from Cashew trees. *Journal of Hydrology*, 1987, 90: 293 ~ 301.
- [24] Schellekens J, Scatena F N, Bruijnzeel L A, *et al.* Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *Journal of Hydrology*, 1999, 225: 168 ~ 184.
- [25] Zhang Y P, Wang X, Wang Y J, *et al.* Comparison research on hydrological effect of canopy of the tropical seasonal rainforest and rubber forest in Xishuangbanna, Yunnan. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2653 ~ 2665.
- [26] Zheng Z, Liu H M, Liu L H, *et al.* A study of biomass of the primary tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna. *Guibaia*, 1999, 19(4): 309 ~ 314.
- [27] Wang X, Zhang Y P. An analysis of the characteristics of rainfall and linear trend in the Menglun area of Xishuanbanna, SW China. *Journal of Tropical Meteorology*, 2005, 21(6):658 ~ 664.
- [28] Lu Z H, Lu C R, Wang W X, *et al.* Applied meteorological manual. Shanghai: Shanghai Dictionary Press, 1984. 108.
- [29] Liu S. Estimation of rainfall storage capacity in the canopies of cypress wetlands and slash pine uplands in North-Central Florida. *Journal of Hydrology*, 1998, 207: 32 ~ 41.

[30] Liu W, Fox J E D, Xu Z. Nutrient fluxes in bulk precipitation, throughfall and stemflow in montane subtropical moist forest on Ailao Mountains in Yunnan, south-west China. *Journal of Tropical Ecology*, 2002, 18:527 ~ 548.

参考文献:

[1] 陈军锋,李秀彬.森林植被变化对流域水文影响的争论. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 474 ~ 480.

[7] 刘家冈,万国良,张学培,等.林冠对降雨截留的半理论模型. *林业科学*, 2000, 36 (2): 2 ~ 5.

[8] 王佑民.我国林冠降水再分配研究综述 I. *西北林学院学报*, 2000, 15 (3), 1 ~ 7.

[9] 王佑民.我国林冠降水再分配研究综述 II. *西北林学院学报*, 2000, 15 (4): 1 ~ 5.

[10] 殷有,周永斌,崔建国,等.林冠截留模型. *辽宁林业科技*, 2001, (2): 10 ~ 12.

[11] 张光灿,刘霞,赵玫.树冠截留降雨模型研究进展及其评述. *南京林业大学学报*, 2000, 24(1): 64 ~ 68.

[25] 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. *生态学报*, 2003, 23 (12): 2653 ~ 2665.

[26] 郑征,刘宏茂,刘伦辉,等.西双版纳原始热带季节雨林生物量研究. *广西植物*, 1999, 19(4): 309 ~ 312

[27] 王馨,张一平.西双版纳勐仑地区降雨特征及变化趋势分析. *热带气象学报*, 2005, 21(6): 658 ~ 664.

[28] 陆忠汉,陆长荣,王婉蓉,等著. *实用气象手册*. 上海:上海辞书出版社, 1984. 108.

附录:文中各参数的含义和单位

降雨参数:			
I	林冠截留量(mm)	m	林冠未达到饱和的降雨次数
P _c	单次降雨事件的降雨量(mm)	P' _G	使林冠达到饱和的降雨量(mm)
$\bar{E}$	平均林冠蒸发速率(mm·h ⁻¹)	$\bar{R}$	平均降雨强度(mm·h ⁻¹)
n	林冠达到饱和的降雨次数	q	树干达到其持水能力而产生树干径流的降雨次数
林冠参数:			
S	林冠枝叶部分的持水能力(mm)	S _t	树干持水能力(mm)
P	自由穿透降雨系数,即不接触林冠直接落到林地的降雨的比率	P _t	树干径流系数
温湿参数:			
ρ	空气密度(20℃时,1204g·m ⁻³)	c _p	空气在常压下的比热(1.0048J·g ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
λ	水的汽化潜热(20℃时,2454J·g ⁻¹)	γ	干湿计常数(0.66hPa·℃ ⁻¹)
Δ	饱和水汽压曲线(随气温变化)的斜率(hPa·℃ ⁻¹)	D	饱和水汽压差(hPa),即气温(T)对应的饱和水汽压(E _T)与同温度对应的水汽压(e _T)之差(D = E _T - e _T)
空气动力学参数:			
r _a	空气动力学阻力(s·m ⁻¹)	z	风速观测高度(m)
d	零位移高度(m)	z ₀	粗糙长度(m)
k	von Karman 常数(k = 0.4)	U	z 高度的风速(m·s ⁻¹)
其他:			
R _n	大气净辐射(W·m ⁻²)		