

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

曹光秀^{1,2}, 赵洋毅^{1,2}, 段旭^{1,2}, 薛杨^{1,2}

(1. 西南林业大学生态与水土保持学院, 昆明 650224; 2. 国家林业局云南玉溪森林生态系统定位观测研究站, 昆明 650224)

摘要: 于 2016 年和 2017 年的 5—9 月期间收集研究区磨盘山国家森林公园常绿阔叶林的 26 场降雨数据, 并对其林冠截留和降雨分配过程进行分析, 结合研究期间的气象数据和林地调查资料, 运用修正的 Gash 模型对其降雨截留过程进行模拟。结果表明: 研究期间大部分为低雨强、低历时、中雨级的降雨; 大气降雨量、穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量分别为 994.07, 562.90, 16.90, 406.40 mm。根据修正的 Gash 模型得出穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量相对应的模拟值为 548.63, 21.75, 403.28 mm, 与实测值相比, 三者的相对误差分别为 2.60%, 22.29%, 3.34%。总体来说, 修正的 Gash 模型适用于拟合中亚热带地区常绿阔叶林降雨截留过程。对模型中出现的相关参数(c 、 P_t 、 S 、 S_t 、 $\bar{E}$ 、 $\bar{R}$)进行敏感性分析, 得出 6 个参数对林冠截留量模拟结果的影响顺序为 $c > \bar{R} > S > \bar{E} > S_t > P_t$ 。

关键词: 修正的 Gash 模型; 常绿阔叶林; 降雨截留; 敏感性分析; 中亚热带

中图分类号: S715.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0364-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.053

Simulation of Canopy Rainfall Interception of the Evergreen Broad-leaved Forest in Mid Subtropical Zone Using the Modified Gash Model

CAO Guangxiu^{1,2}, ZHAO Yangyi^{1,2}, DUAN Xu^{1,2}, XUE Yang^{1,2}

(1. College of Ecology and Soil & Water Conservation, Southwest Forestry University,

Kunming 650224; 2. Yuxi Forest Ecosystem Research Station, China's State Forestry Administration, Kunming 650224)

Abstract: Evergreen broad-leaved forest is well-preserved, and is playing an irreplaceable role in water conservation and ecological regulation in forest areas in Mid subtropical zone. In order to investigate the canopy interception and allocation and evaluate forest hydrological function and benefit of the evergreen broad-leaved forest in mid subtropical area quantitatively, positioning experiments were implemented during two rainy seasons of from 2016 to 2017 in Mopan Mountain national nature reserve. The amount of throughfall, stemflow and precipitation were measured and interception loss was subsequently calculated. Based on the observations of 26 rainfall events, canopy interception process of evergreen broad-leaved forest was simulated using the modified Gash model. The results showed that most of the observed rainfall had the low intensity, low duration and moderate rain. The amount of rainfall, throughfall, trunk flow and canopy interception were 994.07 mm, 562.90 mm, 16.90 mm and 406.40 mm, respectively, during the study period. According to the modified Gash model, the simulated amounts of throughfall, stemflow and canopy interception were 548.63 mm, 21.75 mm, 403.28 mm, respectively, and their relative error were 2.60%, 22.29% and 3.34% respectively compared to the measured. The results of sensitivity analysis showed that the sequence of simulated results of canopy interception from large to small was c , $\bar{R}$, S , $\bar{E}$, S_t , P_t .

Keywords: Gash model; evergreen broad-leaved forest; canopy interception; sensitivity analysis; mid subtropical zone

森林林冠具有复杂而茂盛的枝干和树叶, 降雨落到地面之前林冠是其接触的第二个下垫面, 枝叶能对大气降水进行重新分配和调节, 发挥其森林生态系统强大的生态水文功能^[1]。国内关于森林对大气降水

再分配作用的研究始于 20 世纪 80 年代后期, 研究的对象主要以常绿阔叶林为主^[2]; 到 20 世纪 90 年代后, 全国各地相继有关于林冠截留的研究进展, 研究对象不再是单一的树种, 已经涉及到各种森林类

型^[3-5]。不同研究区的气象、地理及植被条件等都比较复杂,研究结果存在较多的差异性。

国内外相关学者根据林冠截留的影响因子确立的模型研究主要分为经验和半经验理论模型^[6],但截留过程有较强的复杂性,不同条件下测定的截留值无可比性。不同学者由于其研究方法及其研究环境不同,导致对林冠截留的处理方式不同,最终形成了多样的 Rutter 模型和 Gash 解析模型^[7-9]。Rutter 模型主要通过分析林冠和树干之间的水量平衡关系来计算林冠截留量,而 Gash 解析模型是对 Rutter 模型进行简单的线性回归模型,从而简化 Rutter 模型^[7,10];Horton、Leonard 及 Helvey 等早期使用的降雨截持经验模型,其分析过程中没有降雨强度、林分特征等影响因素,因此不适用于试验地以外的其他林分降雨截留研究^[11]。后期 Valente 等对 Gash 解析模型进行修正,修正后的 Gash 模型能适用于多种野外天然林降雨截留过程的模拟^[12]。

常绿阔叶林是亚热带地区比较常见的树种,林地表面丰富的凋落物能有效的保持地表水分和抑制土壤蒸发,对林地的降雨存储及动能缓冲具有重要作用,特别是对原生林地区的水源涵养起着不可替代的作用^[13]。近年来,国内外学者运用 Gash 模型对不同地区不同森林类型的林冠截留进行拟合研究,均取得了相应的研究成果,例如国外学者 Sadeghi 等^[14](干旱半干旱地区)、Link 等^[15](季节性温带地区)、Cuartas 等^[16](热带地区原始森林)、Sun 等^[17](海洋性季风气候区)、Limousin 等^[18](地中海气候区),国内学者赵洋毅等^[19](缙云山毛竹林)、王艳萍等^[20](黄土区人工刺槐林)、刘效东等^[21](南亚热带常绿阔叶林)、柴汝杉等^[22](小兴安岭原始红松林)、高婵婵等^[23](青海云杉林)对典型林分类型进行探讨并取得相应研究成果,但目前对于中亚热带地区常绿阔叶林运用模型拟合研究未见报道。因此,本研究选取中亚热带地区磨盘山国家森林公园内保存较完整的半湿性常绿阔叶林为研究对象,依托国家森林生态定位站长期定位监测的气象资料与降雨数据,运用修正的 Gash 模型对其降雨截留过程进行模拟,为研究区森林生态水文过程提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

磨盘山其山体形如磨盘,位于云南省玉溪市新平县磨盘山国家森林公园内,海拔约 1 260~2 614 m,相对高差 1 354.4 m,地理坐标 101°55'13"—102°04'00"E, 23°54'00"—24°02'30"N。磨盘山地处北回归线以北,具有典型的亚热带高原季风气候类型。年均气温 17~20℃,极端最低温-8.6℃,磨盘山顶≥10℃积温 4 800

℃,年降雨量均在 1 000 mm 以上。土壤岩基以砂岩类岩石为主,种类较多,有砂岩、砂页岩、紫色砂岩、红色砂岩等,风化较强烈。据不完全统计,共有种子植物 324 种,分属 98 科 227 属,其中有国家二级保护植物野茶树(*Eurya alata* Kobuski)、楠木(*Phoebe nanmu*)等。研究区常绿阔叶林主要树种有光叶柯(*Lithocarpus mairei*)、糙皮桦(*Betula utilis*)、牛筋条(*Dichotomanthus tristaniaecarpa*)、高山栎(*Quercus semicarpifolia*)、木荷(*Schima superba* Gardn)、长叶栎(*Lithocarpus confinis*)、野樱桃(*Cerasus pseudocerasus*)等。随着海拔的升高,气温降低,植被分布呈现垂直地带性,海拔由低到高植被叶形呈现由大到小的规律。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选取与调查 依托国家林业局玉溪新平生态定位站在研究区内设立 100 m×100 m 的大样地内选取 20 m×20 m 的小样地作为研究区域。在距离样地 500 m 的空旷地带布设德国 Envidata-thies 全自动野外固定气象站,观测场四周无高层建筑物和屏风障碍物,上空无遮挡物,主要用于实时定位监测气象要素,如降雨、风速、辐射、蒸发等数据。样地调查的指标主要包括有样地海拔 2 363 m,坡向和坡位为东北向中坡位,植被平均胸径 22.05 cm,平均树高 15.25 m,平均林龄 75 年,平均冠幅直径 7 m,平均冠层厚度 8.80 m,郁闭度的测定于 2016 年 4 月在标准样地内采用 LAI-2200C 冠层分析仪测定不同位置的叶面积指数及冠层下可见天空比例,计算出郁闭度 0.91,植株密度 78 株/hm²。

1.2.2 穿透雨收集 在样地内随坡度变化分别在上、中、下等距离布设 9 个雨量筒,8 个为标准雨量筒,需人工测量读数,1 个为 XWS-YLZ 自记雨量筒,自动记录降雨时间和降雨量数据。雨量筒布设情况见表 1。

1.2.3 树干茎流收集 在选取的样地内对每株乔木进行林分调查,测定其林木的胸径。根据调查结果每隔 5 cm 对林木划分一个径级,每个径级下的乔木各选 3~4 株,共选取 10 株标准木进行树干茎流的观测。在树干基部 60~130 cm 间将剖开的 PVC 管螺旋状嵌入树干四周,用钉子及玻璃胶粘牢,并将其导入树干基部的塑料桶内,雨后收集树干茎流,与穿透雨量同时测定。

将收集的树干茎流量按公式(1)计算得到研究区样地的树干茎流量:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \cdot M_i}{S \cdot 10^4} \quad (1)$$

式中: C 为树干茎流量(mm); n 为树干径级数; C_i 为

第 i 径级单株树干茎流体积(mL); M_i 为第 i 径级的 树木株数; S 为样地面积(m^2)。

表 1 2016—2017 年 5—9 月常绿阔叶林林下雨量筒放置位点及对应的上方林冠特征

雨量桶号	经纬度	坡位	离干距离/m	冠层厚度/m	盖度	树高/m
1	23°56′28.29″N,101°58′50.41″E	上	0.96	8.5	0.83	14.5
2	23°56′28.05″N,101°58′50.13″E	上	1.20	9.1	0.89	12.0
3	23°56′28.22″N,101°58′49.83″E	上	0.85	10.8	0.76	14.8
4	23°56′28.53″N,101°58′50.11″E	中	1.45	7.4	0.80	15.8
5	23°56′28.42″N,101°58′50.41″E	中	2.15	8.3	0.82	16.7
6	23°56′28.20″N,101°58′50.23″E	中	3.00	6.9	0.78	14.4
7	23°56′28.57″N,101°58′50.46″E	下	1.52	9.7	0.85	16.5
8	23°56′28.63″N,101°58′50.32″E	下	1.32	10.5	0.72	17.0
9	23°56′28.27″N,101°58′50.10″E	下	0.78	8.0	0.96	15.5

1.2.4 修正的 Gash 模型 原始的 Gash 解析模型描述了一系列彼此分离的降雨事件,包含每次降雨事件中的林冠加湿、林冠饱和、降雨停止后林冠干燥的 3 个阶段。确定这 3 个阶段的重要参数要求为:

(1)林冠加湿期: P_G (林外降雨量) $<P'_G$ (林冠饱和状态下的降雨量);

(2)林冠饱和期: $P_G>P'_G$,且满足 $\bar{R}$ (平均雨强) $>\bar{E}$ (饱和状态下林冠的平均蒸发速率);

(3)干燥期:降雨停止一段时间后,林冠层和树干干燥的阶段。

各参数的计算公式为:

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

$\bar{E}$ 根据 Penman-Monteith 公式计算:

$$\bar{E} = (\Delta R_n + \rho c_p D/r_a)(\Delta + \gamma)^{-1} \quad (2)$$

$$\text{空气动力学阻力}^{[24]} r_a = 1/0.56u \quad (3)$$

式中: P_G 为林外降雨量(mm); P'_G 林冠饱和状态下的降雨量(mm); R 为降雨强度(mm/h); $\bar{E}$ 为饱和状态下林冠的平均蒸发速率(mm/h); $\bar{E}_c$ 为单位覆盖面积的平均蒸发速率(mm/h); S 为林冠持水能力(mm); c 为郁闭度; ρ 为空气密度(g/m^3); c_p 为空气在常压下的比热值,为 $1.0048 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; R_n 为大气净辐射(w/m^2); D 为饱和水汽压差(hPa); r_a 为空气动力阻力(m/s); u 为冠层上方 2 m 处风速(m/s)。

由于计算所用的风速是根据野外固定气象站所测出,风速采样器距离地面 2 m,样地海拔低于空旷地 8 m,因此根据 Allen 等^[25]的方法计算冠层上方 2 m 处风速:

$$u = (u_0 \ln(67.8 \times 6 - 5.42))/4.87 \quad (4)$$

$$P''_G = (\bar{R}/(\bar{R} - \bar{E}_c))(S_k/p_k) + P'_G \quad (5)$$

式中: u_0 为测定点风速(m/s); S_k 为单位覆盖面积树干持水能力(mm); p_k 为单位覆盖面积树干茎流量(mm)。

修正的 Gash 模型是对原始模型进行修正,其中引入了林冠盖度指标,分别对林冠层的截持能力和饱和状态下林冠层蒸发强度进行改进,还对树干茎流产生条件进行修正;并在原模型的基础上将林地划分为有植被覆盖区和无植被覆盖区,并且假设在无植被覆

盖区域内林冠层没有产生蒸发量^[26]。修正后的模型还补充了降雨停止后林冠达到干燥期的必要条件是每两次降雨事件之间的时间间隔必须达到 8 h^[26-27]。

利用修正的 Gash 模型计算林冠截留量:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = c \sum_{j=1}^m P_{Gj} + \sum_{j=1}^n (c \bar{E}_{Gj}/\bar{R}_j)(P_G - P'_G) + c \sum_{j=1}^n P'_G + qcS_k + cpt_c \sum_{j=1}^{n-q} (1 - (\bar{E}_{Gj}/\bar{R}_j))(P_G - P'_G) \quad (6)$$

根据修正的 Gash 修正模型模拟计算树干茎流量和穿透雨量^[27]:

$$\sum_{j=1}^q SF_j = cp_k \sum_{j=1}^q (1 - (\bar{E}_{Gj}/\bar{R}_j))(P_G - P'_G) - qcS_k \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{n+m} TF_j = \sum_{j=1}^{n+m} P_G - \sum_{j=1}^{n+m} I_j - \sum_{j=1}^q SF_j \quad (8)$$

式中: I_j 为林冠截留量(mm); n 为林冠达到饱和的降雨次数; j 为总降雨次数; m 为林冠未达到饱和的降雨次数; S_k 为树干持水能力(mm); q 为产生树干茎流的降雨次数; $c \sum_{j=1}^m P_{Gj}$ 为未能达到饱和的冠层降雨量(mm); SF 为树干茎流量(mm); TF 为穿透雨量(mm)。

2 结果与分析

2.1 大气降雨、穿透雨及树干茎流特征

2.1.1 大气降雨特征 统计了 2016—2017 年 5—9 月份磨盘山 26 场降雨特征,表明研究期间的降雨总量为 994.07 mm。研究期间降雨天气大部分呈现出雨强小、历时短、降雨量级小的特征。有相关研究表明雨强的大小与林冠截留存在一定的负相关性^[6],这 26 场降雨中最大雨强为 10.41 mm/h,最小雨强为 0.20 mm/h,平均降雨强度为 2.70 mm/h(图 1)。雨强较大、历时较短、雨量较大的降雨天气多集中在 6—8 月。研究期间平均降雨历时为 6.42 h,变异系数为 94.3%,最短的仅为 32 min,最长为 23 h(2017 年 8 月 24—25 日),雨量达 63 mm,降雨历时 $<2 \text{ h}$ 的降雨次数为 34.00%,2~10 h 的占 37.73%,0~10 h 的占 71.70%。

研究区降雨量与季节变化存在相应的关系(图 2),研究期间研究区日最大降雨量峰值多发生在 6 月份,最大日降雨量为 53.2 mm(2016 年 6 月 23 日),但 7 月份的

降雨频率最高,6 月次之,9 月份进入到研究区的雨季尾期,无论是降雨量还是降雨频率均为最低。从自计雨量计和气象观测场采集到的大气温度数据可以看出,降雨

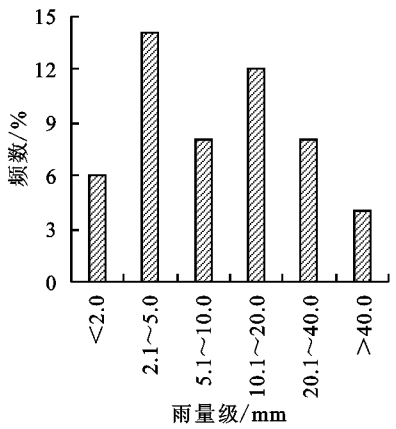
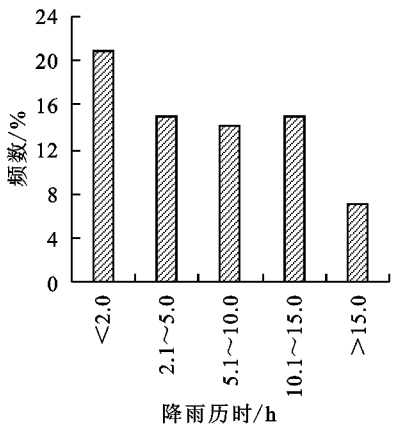
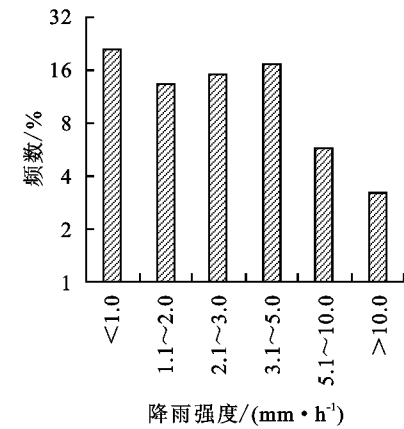


图 1 研究期间降水特征频率分布

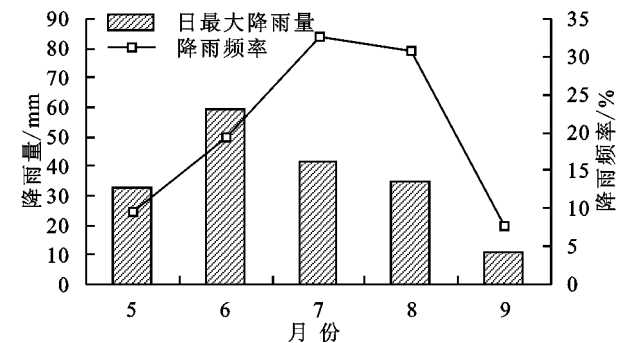


图 2 2016 年和 2017 年降雨量、降雨频率的月变化

2.1.2 穿透雨特征 于 2016 年和 2017 年雨季分别用研究区 9 个雨量筒收集的林内总降雨量和雨量筒布设离树干的距离数据制图(图 3),从图 3 可以看出,雨量筒的离干距离和收集到的降雨量大小并无明显规律,可能是收集到的穿透雨量大小还受雨量筒所处位置上方的叶面积、林分郁闭度、冠层厚度等因素的影响。因此研究穿透降雨特征时需在样地布设 9 个雨量筒,用于收集穿透降雨量数据,最后用其平均值来反映整个研究区的穿透雨特征,其结果才更加真实可靠。

研究期间常绿阔叶林总穿透降雨量为 562.9 mm,变异系数为 75.54%,占降雨量的 56.62%,平均

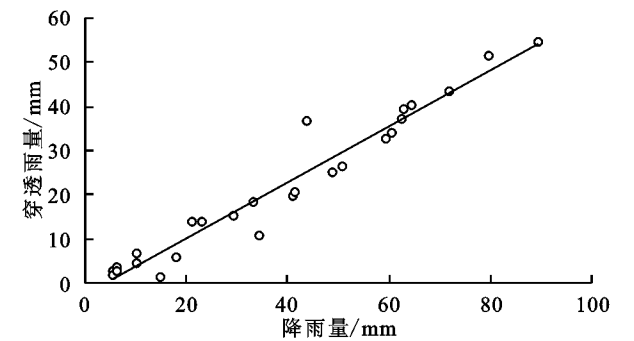


图 4 穿透雨量、穿透雨率与大气降雨的关系

2.1.3 树干茎流特征 树干茎流是由枝叶拦截的降

量和温度之间的规律并不明显,原因是研究区在强降雨天气下有时是高温高压的天气(每年的 6—7 月),气温并不会因降雨量的增加而下降。

穿透雨率为 52.68%。将研究期间的穿透雨数据与大气降雨量进行线性回归(图 4),可以看出研究区林内穿透雨量与降雨量间呈现出比较明显的线性关系($p<0.01$),林内穿透雨量(TF)随降雨量(P_G)的增加而增加,二者的关系方程为: $TF=0.6342(P_G)-1.059$, $R^2=0.9496$ 。该林分内的穿透雨率与降水量之间皆属对数函数关系,关系方程为: $TF=8.2036\ln(P_G)+23.678$, $R^2=0.6719$ 。从图 2 可知此饱和值为降雨量达到 62 mm 时出现,因此当降雨量 <50 mm 时,穿透雨率随降雨量的增加而增大,但在降雨量超过 62 mm 后,这种增加的趋势逐渐变缓并最后稳定在 63%。

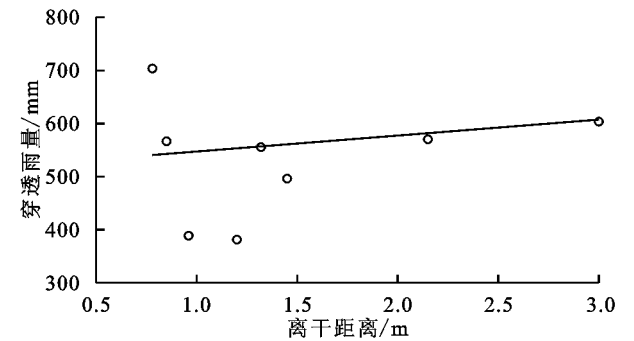
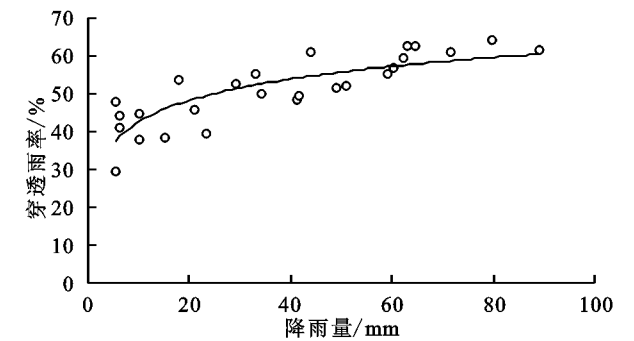


图 3 林内穿透雨量与雨量筒离干距离的关系



雨汇集到树干和雨滴直接滴落到树干上加湿树干而产

生的。研究期间,常绿阔叶林树干茎流总量为 16.9 mm,占总降雨量的 1.7%,树干茎流率的变异系数为 76.64%。从图 5 可知,研究期间林分的茎流率变化幅度比较明显。树干茎流量(SF)和降雨量(P_G)间呈极显著的线性关系,关系方程分别为: $SF=0.0185(P_G)-0.0556, R^2=0.9933 (p<0.01)$,随着降雨量的增加,树干茎流量呈增大趋势。根据树干茎流量和降雨量的线性回归方程在 X 轴的截距经计算得出为 6.31 mm,表明当降雨量>6.31 mm 时,常绿阔叶林才会产生树干茎流。研究期间的树干茎流量较少,可能原因为常绿阔叶林冠层厚度大,冠幅较宽,当雨滴经过林冠层时直径汇集成大雨滴降落,只有较少的穿透雨流经树干到达地面形成树干茎流;另外还可能由于常绿阔叶林胸径较大,冠层下树高较高,形成的少量树干茎流还未到达地面由于风和空气湿度低等气象原因就蒸散到空气中。

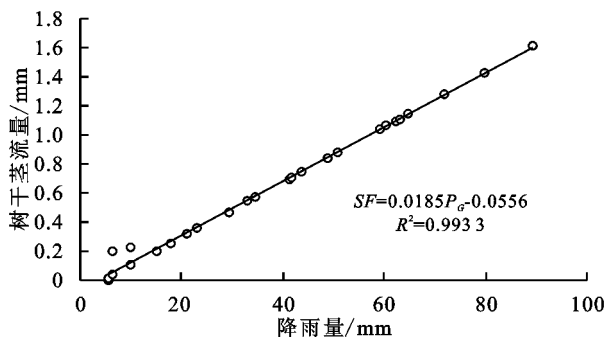
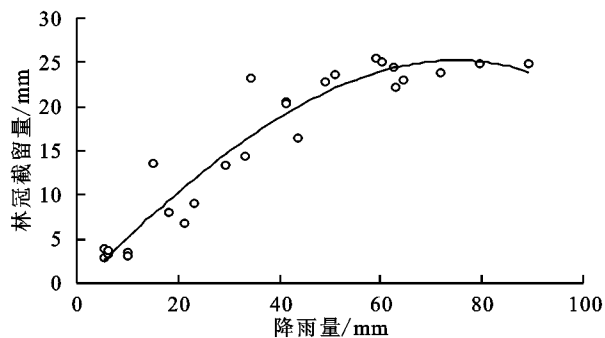


图 5 树干茎流量与降雨量特征

2.2 常绿阔叶林林冠截留分配特征

研究期间,常绿阔叶林的林冠截留总量为 406.4 mm,占同期降雨总量的 40.88%。林冠截留量随着林



外降雨量的增加而逐渐增大,在降雨量>65 mm 后,增大的幅度逐渐变缓,林冠所截持的容量达到饱和。饱和后林冠截留量随林外降雨量的增加有微弱下降的趋势,可能与研究区降雨特征有关,如遇上降雨强度较大、降雨历时较短、降雨量较大的降雨天气时林冠和树干对降雨的截留效果不如降雨强度小、降雨历时长时的降雨天气,降雨历时长、降雨量小时,被截持在枝叶及树干上的雨滴未进入到收集装置(雨量筒和树干茎流收集筒)内就被蒸发,造成截留量的一部分损耗,导致最终截留总量有所下降;还可能与当时降雨气象特征有关,如遇上风速较大的暴雨天气时,林冠层对大气降雨的截留效果会明显下降,一部分降雨未经冠层,在通过林窗的地方直接刮落到布设好的雨量筒内,导致收集到的林内穿透雨总量增多,被林冠截持的雨滴数量减少,因此,即使饱和后随着降雨量的增大,林冠截留量会产生微弱的下降趋势。从图 6 可以看出,降雨量和截留量进行曲线拟合时的三次多项式拟合效果最佳($p<0.01$),此结果与柴汝彬等^[22]对小兴安岭原始红松林的拟合结果相似。常绿阔叶林的林冠截留量(I)与降雨量(P_G)的关系方程为 $I=-2E-05(P_G)^3-0.0018(P_G)^2+0.5833(P_G)-0.5203, R^2=0.9221$;而林冠截留率与降雨量的关系方程用指数函数拟合效果最佳,即 $y=64.164e^{-0.009x}, R^2=0.73$,即随着林外降雨的增加呈指数形式减小。在研究期间,林冠截留率变化为 27.85%~72.01%,当降雨量为 5.42 mm 时,林冠截留率达到最大值 72.01%,之后随着降雨量的增大,截留率减小,降雨量为 89.28 mm 时截留率最小为 27.85%。

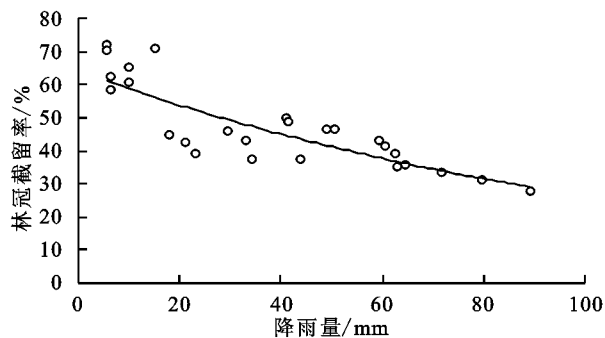


图 6 林冠截留量与降雨量特征

2.3 修正的 Gash 模型参数确定

本研究中林冠枝叶部分持水能力(S)值由 Leyton 等^[28]的方法来确定,即依据穿透雨量与降雨量的回归方程,在 $TF=0$ 时, P_G 为 S ,由图 2 拟合得到的方程式得出: $S=1.67$ 。单位面积林冠的持水能力值 $S_c=S/c$,而研究区林分郁闭度的均值 $c=0.91$,因此 $S_c=1.83$ 。 P_i 和 S_i 由树干茎流量和降雨量的函数关系确定(图 3), P_i 为两者函数关系中的斜率 $P_i=$

0.0185, S_i 为截距负值 $S_i=-0.0556$ 。根据研究期间的气象数据得出 $\bar{E}=0.29$ mm/h,根据研究期间的降雨数据求出平均降雨强度 $\bar{R}=2.7$ mm/h,根据公式可求出 $P'_G=3.97$ mm。

2.4 林冠截留模拟分析

磨盘山常绿阔叶林穿透雨量为 562.9 mm,树干茎流量为 16.9 mm,林冠截留总量为 406.4 mm。根据修正的 Gash 模型得出三者相对应的模拟值分别

为 548.63,21.75,403.28 mm(表 2)。模拟的林冠饱和期产生的树干茎流量比实测值高 4.85 mm,相对误差为 22.29%。可能与研究区常绿阔叶林林冠层厚度大,胸径大,降雨期间气温高林内蒸发量大有关,所以实测值低于模拟值。此外,可能还与研究区内数目径级不同、产生树干茎流的时间不同,个别单株样树在树干持水量达到林地平均蓄水量时并没产生树干茎流量^[29]。总穿透降雨量基于模型得到的模拟值比实测值小 14.27,相对误差为 2.6%。林冠截留总量实测值比模拟值高 13.12,相对误差为 3.34%。总体来看运用修正的 Gash 模型得到的模拟值和实测值相差不大。基于模型模拟得到的降雨过程中的蒸发量比降雨结束后的蒸发量高 43.09,占总模拟蒸发量的 45.5%,可能原因与降雨期间的林内湿度和气温有关,还与计算该值时模型采用的 2 场降雨间隔时间大于 8 h 有关,较长的降雨场次间隔时间和较长的降雨历时导致降雨过程蒸发时间长,并且降雨过程中林地湿度较大,遇到暴雨天气,研究区多会伴随风速较大的气象环境,基于这些气象原因最终导致模型计算得出的降雨过程中蒸发量比降雨结束后的蒸发量高出近 1 倍左右。

表 2 应用修正的 Gash 模型计算的模拟值与 实测值对比			单位:mm	
指标	实测值	模拟值		
林冠加湿期 $P_G < P'_G$	—	2.97		
林冠饱和期 $P_G > P'_G$	—	46.71		
降雨过程中蒸发量	—	68.90		
降雨结束后蒸发量	—	25.81		
林冠加湿期树干茎流量	—	8.03		
林冠饱和期树干茎流量	16.9	21.75		
总穿透雨量	562.9	548.63		
林冠截留总量	406.4	393.28		

通过模型计算得出的模拟值和研究期间得到的林冠截留量实测值作对比图(图 7),实测值与模拟值的最大差值为 6.33 mm,最小差值为 0.95 mm,标准偏差为 4.18 mm,相对标准误差为 1.53%。可以推测出修正的 Gash 模型对中亚热带地区常绿阔叶林单场次降雨截留模拟效果较好,该模型适用于本研究区。

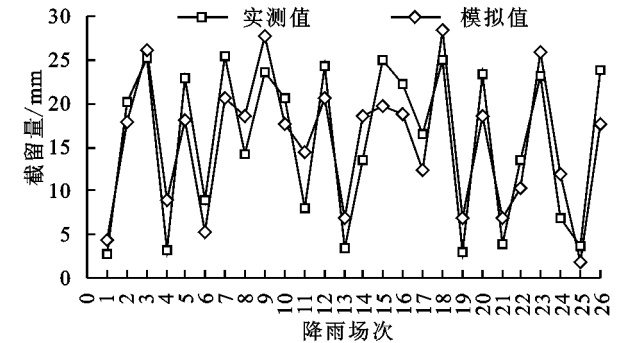


图 7 观测期间 26 场降雨林冠截留量实测值与模拟值对比

2.5 模型参数变化敏感性分析

通过以往学者对修正的 Gash 模型运用研究的相关报道,模型中相关参数的变化会引起林冠截留量大小的变化^[15,19,23]。为了提高模型模拟结果的精度,对参数变化进行敏感性分析。本文选取 6 个参数 $c, \bar{R}, S, \bar{E}, S_i, P_i$ 进行敏感性分析(图 8),经分析得出参数在 $-50\% \sim 50\%$ 的变化过程中对林冠截留率的影响排序为: $c > \bar{R} > S > \bar{E} > S_i > P_i$ 。林冠截留率对参数林冠郁闭度 c 的变化最为敏感,参数 c 每增加 10%,林冠截留量模拟值增大 6.28%,参数 $\bar{R}$ 每增加 10%,模拟截留值减小 1.81%,其余参数 $S, \bar{E}, S_i, P_i$ 每增加 10%,模拟值分别增大 1.09%,0.54%,0.12%,0.05%。因此,对修正的 Gash 模型各参数进行敏感性分析得出,除了平均降雨强度 $\bar{R}$ 这一参数与林冠截留量模拟值产生负相关性的影响外,其余 5 个参数产生的影响均呈正相关性。

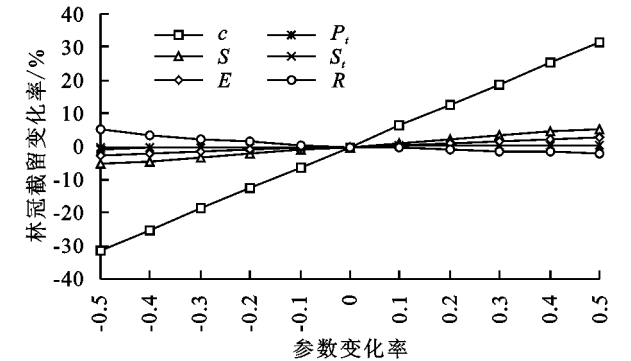


图 8 修正的 Gash 模型相关参数敏感性分析

3 讨论

研究期间常绿阔叶林林冠截留量达降雨总量的 40.88%,比已报道的其他林型(11.4%~36.5%)^[22]略高,这与研究期间该区域的降雨强度及降雨量、蒸发量等气象因子和林木的冠层厚度、郁闭度等有关。不同林分类型及树种产生穿透雨的降雨要求不同,本研究中当降雨量为 1.7 mm 时产生穿透雨,与柴汝杉等^[22]研究的小兴安岭原始红松降雨量为 3.8 mm 时产生穿透雨的降雨量值小,而比李淑春等^[30]研究的油松蒙古栎混交林 1.34 mm 降雨量值略大。本研究当降雨量 > 6.31 mm 时产生树干茎流,与同位于磨盘山国家森林公园内的云南松林(6.7 mm)^[31]结论相似,比刘效东等^[21]研究的南亚热带季风常绿阔叶林产生树干茎流的降雨临界值 4.15 mm 较高。穿透雨和树干茎流量随着降雨量的增加有逐渐增大的趋势与诸多学者研究结果相似^[19-23,31-32]。

运用修正的 Gash 模型研究林冠截留量涉及较多的气象参数,要得到较好的模拟结果首先需要尽可能最大程度的获取准确的模型参数。蒸发量大小和降雨时间间隔长短能明显影响模拟结果,如果时间间隔过长,林内平均蒸发速率 $\bar{E}$ 误差增大,若间隔时间

过短,林冠未达到足够干燥,不满足模型的使用要求,因此降雨时间间隔应根据研究区的具体气象条件来确定。不同学者针对不同研究区划分降雨场次的时间间隔不同,何常清等^[32]对川滇高山栎林进行研究,根据蒸发量(0.16 mm/h)将降雨时间间隔分别划分为 6 h 和 8 h 进行研究,得出 8 h 时间间隔得到的模拟数据较精确;Wallance 等^[33]将降雨时间以 5 h 为间隔研究 Daintree 国家公园(平均蒸发速率 0.24 mm/h)得出的模拟值更理想。本研究区雨季期间处于多雾天气,空气相对湿度较大,为 91%,平均蒸发速率为 0.14 mm/h,比上述研究更小。因此,本研究采用 8 h 作为 2 场降雨的时间间隔,得出的拟合效果更精确。

本研究利用修正的 Gash 模型得到的模拟值和实测值之间存在一定的差值,针对单场降雨的林冠截留量模拟值与实测值也存在相对误差,不同学者针对不同地区得出的模拟值与实测值差异也各有高低。本研究中实测值与模拟值两者的最大差值为 6.33 mm,最小差值为 0.95 mm,相对于小兴安岭原始红松林^[22](最大差值 4.84 mm,最小差值 0.7 mm)的研究结果来说差值范围更大。何常清等^[32]和赵洋毅等^[19]得出修正的 Gash 模型更适合拟合小雨条件下的林冠截留量,而本研究中小雨和个别大雨的模拟值和实测值都较接近,与柴汝杉等^[22]的结论相似,而高婵婵等^[23]对于青海云杉林研究,得出不管在何种时间尺度下模拟值都偏小的结论,说明不同林分类型和降雨强度都会影响单场降雨林冠截留模拟值的大小。

对模型中相关参数 c 、 P_t 、 S 、 S_i 、 $\bar{E}$ 、 $\bar{R}$ 进行敏感性分析,林冠郁闭度 c 对林冠截留量的模拟值影响最大,除了平均降雨强度 $\bar{R}$ 这一参数与林冠截留量模拟值产生负相关性,其余 5 个参数产生的影响均呈正相关性,这与赵洋毅等^[19]的研究结果相似,而何常清等^[32]得出的模型模拟结果受林冠持水能力 S 的影响最大,高婵婵等^[23]将蒸发速率与降雨强度的比值作为参数进行分析,得出此比值对模拟值的影响效果最为明显。

4 结论

(1)研究期间磨盘山 2016 年和 2017 年 5—9 月大气降雨量、穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量分别为 994.07, 56.29, 16.90, 406.40 mm。

(2)根据修正的 Gash 模型计算公式得出穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量相对应的模拟值为 548.63, 21.75, 403.28 mm。修正的 Gash 模型适用于中亚热带地区常绿阔叶林单次降雨林冠截留量的模拟计算。

(3)对模型中出现的相关参数(c 、 P_t 、 S 、 S_i 、 $\bar{E}$ 、 $\bar{R}$)进行敏感性分析,得出 6 个参数对林冠截留量模拟结果的影响由大到小依次为 $c > \bar{R} > S > \bar{E} > S_i > P_t$ 。

参考文献:

- [1] 徐丽宏,时忠杰,王彦辉,等.六盘山主要植被类型冠层截留特征[J].应用生态学报,2010,21(10):2487-2493.
- [2] 刘世荣.中国森林生态系统水文生态功能规律[M].北京:中国林业出版社,1996:157-158.
- [3] 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.
- [4] 王艳红,宋维峰,李财金.不同森林类型林冠截留效应研究[J].亚热带水土保持,2008,20(3):5-10.
- [5] 王丽红,周秉瑞,李良.林冠降水截留效应国内研究进展[J].内蒙古林业,2013(6):22-23.
- [6] 鲜靖苹,张家洋,胡海波.森林冠层水文研究进展[J].西北林学院学报,2014,29(3):96-104.
- [7] 杨中文,陈野,肖玲,等.森林截留降雨研究进展[J].安徽农业科学,2010,38(20):10762-10764.
- [8] 张光灿,刘霞,赵玫.树冠截留降雨模型研究进展及其述评[J].南京林业大学学报(自然科学版),2000,24(1):64-68.
- [9] 刘曙光.林冠截留模型[J].林业科学,1992,28(5):445-449.
- [10] 张志强,王礼先,余新晓,等.森林植被影响径流形成机制研究进展[J].自然资源学报,2001,16(1):79-84.
- [11] 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]. Journal of Applied Ecology, 1977, 14(2):567-588.
- [12] 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.
- [13] 纪金华,章永江,张一平,等.哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用[J].生态学报,2012,32(6):1692-1702.
- [14] Sadeghi S M M, Attarod P, John I I, et al. Efficiency of the reformulated Gash's interception model in semi-arid afforestations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 201(2):76-85.
- [15] Link T E, Unsworth M, Marks D. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 124(3/4):171-191.
- [16] Cuartas L A, Tomasella J, Nobre A D, et al. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: Marked differences between normal and dry years[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 145(1/2):69-83.
- [17] Sun X, Onda Y, Kato H. Incident rainfall partitioning and canopy interception modeling for an abandoned Japanese cypress stand[J]. Journal of Forest Research,

- 2014,19(3):317-328.
- [18] Limousin J M, Rambal S, Ourcival J M, et al. Modelling rainfall interception in a mediterranean *Quercus ilex*, ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment[J]. Journal of Hydrology, 2008, 357(1/2): 57-66.
- [19] 赵洋毅,王玉杰,王云琦,等. 基于修正的 Gash 模型模拟缙云山毛竹林降雨截留[J]. 林业科学, 2011, 47(9): 15-20.
- [20] 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.
- [21] 刘效东,龙凤玲,陈修治,等. 基于修正的 Gash 模型对亚热带季风常绿阔叶林林冠截留的模拟[J]. 生态学报, 2016, 35(11): 3118-3125.
- [22] 柴汝杉,蔡体久,满秀玲,等. 基于修正的 Gash 模型模拟小兴安岭原始红松林降雨截留过程[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1276-1284.
- [23] 高婵婵,彭焕华,赵传燕,等. 基于 Gash 模型的青海云杉林降水截留模拟[J]. 生态学报, 2015, 34(1): 288-294.
- [24] Gash J H C, Lloyd C R, Lachaud G. Estimation sparse forest rainfall interception with an analytical model[J]. Journal of Hydrology, 1995, 170(1/4): 78-86.
- [25] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapo transpiration guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [26] Herbst M, Rosier P T W, McNeil D D, et al. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(11): 1655-1667.
- [27] Limousin J M, Rambal S, Ourcival J M, et al. Modelling rainfall interception in a mediterranean *Quercus ilex* ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment[J]. Journal of Hydrology, 2008, 357(1/2): 57-66.
- [28] Leyton L, Reynolds E R C, Thompson F B. Rainfall interception in forest and moorland[C]// Sopper W E, Lull H W. International Symposium on Forest Hydrology. Toronto: Pergamon Press, 1967: 163-178.
- [29] 郭明春,于澎涛,王彦辉,等. 林冠截持降雨模型的初步研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1633-1637.
- [30] 李淑春,张伟,姚卫星,等. 冀北山地不同林分类型林冠层降水分配研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 124-127.
- [31] Cao G X, Duan X, Zhao Y Y, et al. Rainfall redistribution and its influencing factors of *Pinus Yunnanensis* Forest, Mopan Mountain[R] New York, USA: International Conference on New Energy and Sustainable Development, 2017.
- [32] 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.
- [33] Wallace J, Mcjannet D. Modelling interception in coastal and montane rainforests in northern Queensland, Australia [J]. Journal of Hydrology, 2008, 348(3/4): 480-495.
- (上接第 363 页)
- [14] 冯秋红,刘兴良,卢昌泰,等. 不同经营模式对川西亚高山天然次生林林地水文效应的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5432-5439.
- [15] 李晨. 榆林市绿地生态系统土壤水文调控过程及土壤微生物群落特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 80-85.
- [16] 梁晓娇,王树力. 阿什河源头不同类型红松人工林枯落物及其土壤水文特性[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 140-145.
- [17] 胡晓聪,黄乾亮,金亮. 西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 55-63.
- [18] 杨振奇,秦富仓,李晓琴,等. 砭砂岩区主要造林树种枯落物及林下土壤持水特性[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 118-122.
- [19] 张君玉,程金花,张洪江,等. 晋西黄土丘陵区 3 个树种人工林枯落物的持水特性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 69-74.
- [20] 武鹏艳,张玉珍. 3 种人工林枯落物持水性能及土壤水文效应的研究[J]. 西南农业学报, 2016, 29(12): 2930-2934.
- [21] 冯秋红,吴晓龙,徐峥静茹,等. 密度调控对川西山地亚杉人工林地被物、土壤水文效应的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 42(1): 98-104.
- [22] 谈正鑫,万福绪,张涛,等. 盱眙人工林枯落物及土壤水文效应研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 184-188.
- [23] 侯贵荣,余新晓,刘自强,等. 不同降雨强度下北京山区典型林地土壤水分时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 209-215.
- [24] 张建军,张岩,张波,等. 晋西黄土区水土保持林地的土壤水分[J]. 林业科学, 2009, 45(11): 63-69.
- [25] 石媛,鲁绍伟,陈波,等. 河北雾灵山不同密度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 92-97.
- [26] 王会京,王红霞,谢宇光,等. 太行山不同林型枯落物持水性及生态水文效应研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 135-139, 144.