

# 运用 Gash 修正模型对祁连山北麓中段 青海云杉林降水截留的模拟

武秀荣<sup>1,2,3</sup>, 金铭<sup>1,2,3</sup>, 赵维俊<sup>1,2,3</sup>, 敬文茂<sup>1,2,3</sup>,  
马剑<sup>1,2,3</sup>, 赵晶忠<sup>1,2,3</sup>, 王荣新<sup>1,2,3</sup>, 马雪娥<sup>1,2,3</sup>

(1.甘肃省祁连山水源涵养林研究院,甘肃 张掖 734000;2.甘肃省森林生态与冻土水文水资源重点实验室,  
甘肃 张掖 734000;3.甘肃省祁连山森林生态系统野外科学观测研究站,甘肃 张掖 734000)

**摘要:**选择祁连山北麓中段排露沟流域青海云杉林为研究对象,基于2019年生长季(5—9月)降水截留观测数据、气象数据和林地调查资料,对其降水截留过程进行分析,运用Gash修正模型模拟青海云杉林降水截留过程。结果表明:研究期间林外大气降雨总量为418.7 mm,降雨主要为中、小雨。穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量分别为284.5,6.7,127.5 mm,占大气降雨总量的比例分别为67.94%,1.60%,30.46%。根据Gash修正模型模拟结果,穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量值分别为302.2,3.7,112.8 mm,占大气降雨总量的比例分别为72.18%,0.88%,26.94%,与实测值相比,三者的相对误差分别为6.22%,44.78%,11.53%。通过对Gash修正模型参数敏感性分析,参数在-50%~50%的变化过程中对林冠截留率的影响排序为 $E > c > R > S > S_i > P_i$ 。总体来说,Gash修正模型在祁连山青海云杉林降水截留的模拟运用中表现出很好的拟合效果,研究成果可为开展祁连山青海云杉林水分循环研究提供一定参考。

**关键词:**降水截留; Gash修正模型; 青海云杉林; 敏感性分析

中图分类号:S715.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0216-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.030

## Application of Modified Gash Model to Simulate Rainfall Interception of *Picea Crassifolia* Forest in the Middle of the Northern Slope of Qilian Mountain

WU Xiurong<sup>1,2,3</sup>, JIN Ming<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Weijun<sup>1,2,3</sup>, JING Wenmao<sup>1,2,3</sup>,  
MA Jian<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Jingzhong<sup>1,2,3</sup>, WANG Rongxin<sup>1,2,3</sup>, MA Xuee<sup>1,2,3</sup>

(1.Gansu Province Qilian Water Resource Conservation Forests Research Institute, Zhangye, Gansu 734000;

2.Gansu Key Laboratory of Hydrology and Water Resources of Forest Ecology and Frozen Soil, Zhangye, Gansu 734000;

3.Gansu Qilian Mountain Forest Ecosystem Observation and Research Station, Zhangye, Gansu 734000)

**Abstract:** This study selected *Picea crassifolia* forest which in the Pailugou catchment of the middle of the northern slope of the Qilian Mountains as objects. Based on the observation data of rainfall interception, meteorological data and forestland investigation data in the growing season (May to September) of 2019, the rainfall interception process was analyzed, and the rainfall interception process of *P. crassifolia* forest was simulated by using modified Gash model. The results showed that the total amount of atmospheric rainfall outside the forest during the study period was 418.7 mm, and the rainfall was mainly moderate and light rain. The throughfall, trunk stem flow and canopy interception was 284.5, 6.7 and 127.5 mm, respectively, accounting for 67.94%, 1.60% and 30.46% of the total atmospheric rainfall, respectively. According to the simulation results of modified Gash model, the corresponding simulated value of throughfall, trunk stem flow and canopy interception was 302.2, 3.7 and 112.8 mm, respectively, accounting for 72.18%, 0.88% and 26.94% of the total atmospheric rainfall, respectively. Compared with the measured values, the relative errors of the above parameters were 6.22%, 44.78% and 11.53%. According to the parameters sensitivity

收稿日期:2020-03-13

资助项目:甘肃省自然科学基金重大项目(18JR4RA002);甘肃省自然科学基金项目(17JR5RG351);甘肃祁连山森林生态监测与评估国际科技合作基地建设项目

第一作者:武秀荣(1987—),男,助理研究员,硕士,主要从事森林水文研究。E-mail:xrwu2013@163.com

通信作者:金铭(1972—),男,研究员,博士,主要从事森林生态研究。E-mail:shyjinming@163.com

analysis of the modified Gash model, the influence of the parameters on the canopy interception rate during the change process of  $-50\%$  to  $50\%$  followed the order of  $E > c > R > S > S_i > P_i$ . In conclusion, the modified Gash model showed a good fitting effect in the simulation of rainfall interception of *P. crassifolia* forest in Qilian Mountains. The research results provide references for the research of the water cycle of *P. crassifolia* forest in Qilian Mountains.

**Keywords:** rainfall interception; modified Gash model; *Picea crassifolia* forest; sensitivity analysis

大气降水受林冠层作用而发生的再分配过程是流域水量平衡的重要过程,它深刻影响冠层下降水的分配格局,是土壤—植被—大气水分传输过程中的重要环节<sup>[1]</sup>。定量研究林冠层对降雨再分配的影响,可以为正确认识森林生态水文过程和影响机理提供理论支撑<sup>[2]</sup>。一般而言,受林冠层作用影响,降雨被再分配为林冠截留、穿透雨和树干茎流 3 部分。已有研究<sup>[3]</sup>表明,不同类型森林对降雨的再分配作用存在很大的差异,明确不同类型森林对降水再分配的影响可以为准确的区域水文评价提供支撑。

青海云杉林是祁连山地区的主要森林类型,分布在祁连山北麓的青海云杉林,是河西走廊重要的水源涵养林。对青海云杉林降水再分配已有较多的研究<sup>[4-8]</sup>,但多数是在林分尺度上的观测研究,模型模拟研究不多,观测研究只适用于定点化的研究,很难在区域尺度上运用,而模型可以在区域尺度上担当,因此模型研究成为森林水文研究中的重要内容。目前,国内外学者<sup>[9-11]</sup>根据影响林冠截留的各种参数和林冠截留量建立的模型主要有经验模型、半理论模型和理论模型。经验模型是以实测数据为基础以数理统计为工具建立的回归模型;半理论模型是基于理论推导过程结合实测数据确定截留理论中的经验参数而建立的模型;理论模型是基于坚实的数量基础通过描述林冠截留动态物理变化过程推理而建立的模型。半理论模型既有理论推导过程又结合了经验参数而具有较高实用性,得到广泛的运用<sup>[12]</sup>,半理论模型代表有 Calder 模型、Rutter 模型以及 Gash 模型等。其中,Gash 模型最早由 Gash 于 1979 年提出,是基于 Rutter 模型的基本物理推理方法而建立的半理论模型,在不断实践和应用中经过一系列校准与验证,形成 Gash 修正模型<sup>[13]</sup>,该模型因物理参数明确、计算简便成为目前运用最为广泛的模型之一<sup>[14]</sup>。近年来,国内外学者<sup>[15-17]</sup>运用 Gash 模型对全球不同气候下不同植被类型的林冠截留模拟中均表现出较好的适用性和模拟效果,而具体针对祁连山青海云杉运用 Gash 模型模拟林分降水截留的研究较少,而且采用的方法、研究的区域、时间尺度的不同,造成结论的较大差异。

本研究选择祁连山北麓中段排露沟流域青海云杉林为研究对象,基于 2019 年 5—9 月的野外观测数据,结合研究期间的气象数据和林地调查资料,分析青海云杉

林的降雨再分配过程。在此基础上,运用 Gash 修正模型对降水截留进行模拟,分析 Gash 修正模型在祁连山青海云杉林降水截留过程中的模拟效果。研究结果可以为评价祁连山地区森林水文功能提供一定参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于祁连山北麓中段西水林区的排露沟流域( $100^{\circ}17'E, 38^{\circ}24'N$ ),海拔 2 600~3 800 m,流域总面积 2.84 km<sup>2</sup>。属温带高寒半干旱山地森林草原气候,雨热同期。流域内年均气温  $-0.6^{\circ}C \sim 2.0^{\circ}C$ ,月平均最高气温为  $19.6^{\circ}C$ ,月平均最低气温  $-12.5^{\circ}C$ ,年降水量 435.5 mm,且集中在 5—9 月,年均蒸发量 1 052 mm,日辐射总量 110.28 kW/m<sup>2</sup>,年均相对湿度 60%。流域内建群树种为青海云杉,以块状或斑块状分布在海拔 2 600~3 300 m 的阴坡及半阴坡,是天然次生林,林下灌木优势种有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、银露梅(*Potentilla glabra*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)等,草本植物优势种有披针苔草(*Koeleria crisrata*)、藓生马先蒿(*Pedicularis muscicola*)、珠牙蓼(*Polygonum viviparum*)、黑穗苔(*Carex atrata*)等。流域自然条件复杂,水热条件差异大,植被类型和土壤类型垂直梯度明显,海拔从低到高植被类型主要为山地草原植被、山地森林草原植被、亚高山灌丛草甸植被,而土壤为山地森林灰褐土、山地栗钙土、草甸土、亚高山灌丛草甸土和高山寒漠土<sup>[18-19]</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 在研究区内,海拔 2 750 m 左右设立 20 m×20 m 的样地 2 处,样地间隔 100 m,坡向为阴坡,研究期为 2019 年 5—9 月。2 个样地均为青海云杉纯林(表 1),林下草本植物主要有披针苔草、藓生马先蒿、珠牙蓼、火绒草等,样地内有极少量金露梅和银露梅分布。在样地附近 30 m 的梯度观测塔上安装美国 CAMP-BELL CR-3000X 气象数据采集器,用于采集研究中所需的各项气象因子数据,包括饱和水汽压梯度、温度、大气净辐射、空气密度、相对空气湿度、风速等,数据采集间隔为 10 min,每个月人工下载 1 次气象数据。

1.2.2 大气降雨量( $P_G$ )测定 利用 30 m 的梯度观测塔数据采集器记录每次降雨事件的大气降雨量、降雨历时和降雨强度。

表 1 青海云杉林样地基本情况

样地号	林型	坡度/(°)	海拔/m	郁闭度	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	树高/m	胸径/cm	冠幅/m
1	青海云杉纯林	28	2753	0.68	1725	10.1	14.1	3.6
2	青海云杉纯林	31	2825	0.60	1450	11.0	14.2	3.7

1.2.3 林内穿透降雨量(TF)测定 采用网格机械布点法,在每个样地布设 6 个沟槽式收集器(100 cm×20 cm×20 cm),收集穿透雨。

穿透雨量计算公式为:

$$TF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n TF_i / FA_i \quad (1)$$

式中: $n$  为林内“U”形收集器个数,本研究中  $n=6$ ;  $TF_i$  为每次降雨后第  $i$  个林内收集器穿透雨量(mm);  $FA_i$  为收集器面积(cm<sup>2</sup>)。

1.2.4 树干茎流(SF)测定 采用径阶标准木法,每个样地选取 10 株样树,将直径为 2.0~3.0 cm 的聚乙烯橡胶环开口向上,与水平面成 30°角螺旋形缠绕于测定树干下部,缠绕 2~3 圈固定,用密封胶将接缝处封严,将橡胶环直接与导管连接伸入量水器,并密封进水口。本研究中,1 号样地橡胶环下端接 1 个 10 L 塑料桶收集树干流,每次降雨结束后,人工测量塑料桶内的干流量;2 号样地导管下端接 1 个分辨率为 0.2 mm 虹吸翻斗自记雨量筒,每月用 HOBO 软件提取 1 次数据,树干茎流采集装置见图 1。



图 1 人工与自记雨量筒树干茎流采集装置比较  
树干茎流量计算公式为:

$$SF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SF_i / FA_i \quad (2)$$

式中: $n$  为观测林木的个数,本研究中  $n=10$ ;  $SF_i$  为每次降雨后第  $i$  棵树的树干茎流量(mm);  $FA_i$  为第  $i$  棵树林冠投影面积(cm<sup>2</sup>)。

1.2.5 冠层截留量(I)计算 基于水量平衡原理,冠层截留量的计算公式为:

$$I = P_G - (TF + SF) \quad (3)$$

式中: $I$  为冠层截留量(mm);  $P_G$  为大气降雨量(mm);  $TF$  为穿透雨量(mm);  $SF$  为树干茎流量(mm)。

1.2.6 Gash 修正模型 Gash 修正模型描述的是一

系列相互分离的降雨事件,每个降雨事件都包含 3 个过程:林冠加湿、林冠饱和以及降雨停止后林冠干燥。即模型符合 3 个假设:(1)降雨事件是彼此分离的,每次降雨后有足够的时间使林冠干燥;(2)林冠达到饱和之前不产生冠层滴水;(3)只有在林冠饱和以后才产生树干茎流且只有降雨结束才会发生蒸散。在此基础上,模型计算林冠截留量的表达式为:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = c \sum_{j=1}^m P_{Gj} + \sum_{j=1}^n (cE_{cj}/R_j)(P_{Gj} - P'_G) + c \sum_{j=1}^n P'_G + qcS_{tc} + cP_{tc} \sum_{j=1}^{n-q} (1 - (E_{cj}/R_j))(P_{Gj} - P'_G) \quad (4)$$

式中: $c$  为林分郁闭度; $j$  为次降雨总场次; $n$  为林冠达到饱和的次降雨场次; $m$  为林冠未达到饱和的次降雨场次; $q$  为产生树干茎流的次降雨场次; $R_j$  为第  $j$  次降雨平均降雨强度(mm/h);  $E$  为林冠饱和状态下的平均蒸发速率(mm/h);  $E_c$  为单位覆盖面积下的林冠平均蒸发速率(mm/h),  $E_c = E/c$ ;  $S_t$  为树干持水能力(mm),  $S_{tc} = S_t/c$ ;  $P_t$  为树干茎流系数,  $P_{tc} = P_t/c$ ;  $P_{Gj}$  为单次降雨事件大气降雨量(mm);  $P'_G$  为林冠达到饱和所必需的大气降雨量(mm)。

林冠达到饱和所需大气降雨量的计算公式为:

$$P'_G = (-R/E_c)S_c \ln(1 - E_c/R) \quad (5)$$

式中: $S$  为林冠持水能力(mm),  $S_c = S/c$ 。

饱和林冠蒸发强度根据 Penman-Monteith 公式计算:

$$E = (\Delta R_n + \rho c_p D/r_a) / (\lambda(\Delta + \gamma)) \quad (6)$$

式中: $\Delta$  为饱和水汽压的斜率梯度(hPa/°C),  $\Delta = 40980P_s / (T + 237.7)^2$ ;  $R_n$  为大气净辐射(kW/m<sup>2</sup>);  $\rho$  为空气密度(g/cm<sup>3</sup>);  $c_p$  为常压下的空气比热值,值为 1.010 J/(g·°C);  $D$  为饱和水汽压差(hPa);  $r_a$  为空气动力学阻力(m/s),  $r_a = 1/0.06u$ ,  $u$  为林分冠层上方 2 m 处的风速(m/s);  $\lambda$  为水的汽化潜热,值为 2 454 J/g;  $\gamma$  为干湿计常数,值为 0.066 4 hPa/°C。

使树干达到饱和所需要的大气降雨量( $P''_G$ , mm)计算公式为:

$$P''_G = (R/(R - E))(S_{tc}/P_{tc}) + P'_G \quad (7)$$

树干茎流计算公式为:

$$\sum_{j=1}^q SF_j = P_t \sum_{j=1}^q (1 - (E_{cj}/R_j))(P_G - P'_G) - qS_t \quad (8)$$

穿透大气降雨量(TF)计算公式为:

$$\sum_{j=1}^{n+m} TF_j = \sum_{j=1}^{n+m} P_{Gj} - \sum_{j=1}^{n+m} I_j - \sum_{j=1}^q SF_j \quad (9)$$



## 2 结果与分析

### 2.1 大气降雨特征

本研究按间隔时间超过 8 h 划分为 1 次降雨事件,研究期间(2019 年 5—9 月)青海云杉林共记录 50 场大气降雨,累计量为 418.7 mm,单场最小次降雨量为 0.1 mm,最大次降雨量为 37.8 mm,单场平均次降雨量 8.4 mm,降雨分配不均,变异系数达 122.1%。单场降雨最短历时 0.17 h,最大降雨历时 77.84 h,最小降雨强度 0.04 mm/h,最大降雨强度 5.67 mm/h,平均降雨强度 1.11 mm/h。按大气降雨月分配统计。由表 2 可知,大气降雨量最大月为 6 月,降雨量达到 110.6 mm,占生长季大气降雨量的 26.4%,其他月大气降雨量接近,大气降雨量月变异系数 19.5%,每月降雨天数接近,说明祁连山区 5—9 月的大气降雨分配比较均匀且集中。按雨量级对降雨事件统计(图 2),0~2 mm 的降雨事件发生频率最高(34%),其次是 2~5,5~10 mm 的降雨事件(20%),0~10 mm 的降雨比例达 74%,说明祁连山区的降雨主要以中、小雨为主。按降雨总量统计(图 2),随雨量级的增大降雨总量增大,降雨量>10 mm 的次降雨事件总降雨量是降雨量<10 mm 次降雨事件总降雨量的 2.4 倍。

表 2 生长季大气降雨月分配情况

月份	大气降雨量/mm	降雨天数/d	降雨比例/%
5	68.8	11	16.43
6	110.6	13	26.42
7	78.5	15	18.75
8	74.5	11	17.79
9	86.3	8	20.61
合计	418.7	58	100.00

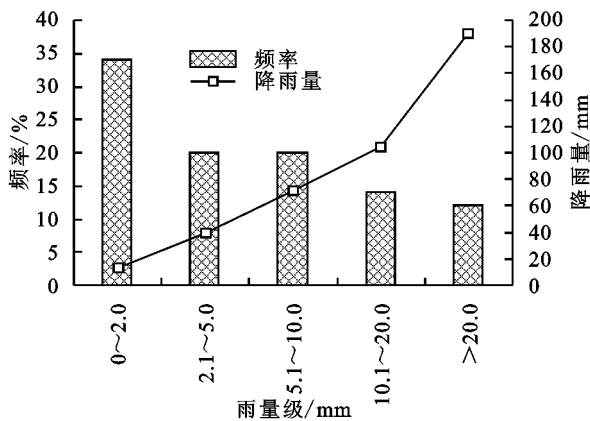


图 2 研究期间大气降雨特征

### 2.2 穿透雨特征

由图 3 可知,研究期间青海云杉总穿透雨量为 284.5 mm,占大气降雨量的 67.94%,最大穿透率达 93.13%,最小为 21.67%,变异系数为 131.6%。以实测数据为基础,对穿透雨和大气降雨量的关系进行拟合,结果表明,穿透雨量与大气降雨量呈极显著的线

性关系( $R^2=0.9735, P<0.01$ )。由回归方程可知,产生穿透雨的临界大气降雨量为 2.3 mm,而实际观测中发现,大气降雨量>0.8 mm 时林内就开始产生穿透雨。对大气降雨量雨与穿透率的关系进行分析,结果(图 3)显示,二者呈对数函数关系( $R^2=0.5178, P<0.01$ ),但随着大气降雨量的增大,穿透率增大到一定值后增大的趋势逐渐变小,穿透率在上升一段后最终有趋于稳定水平的态势。

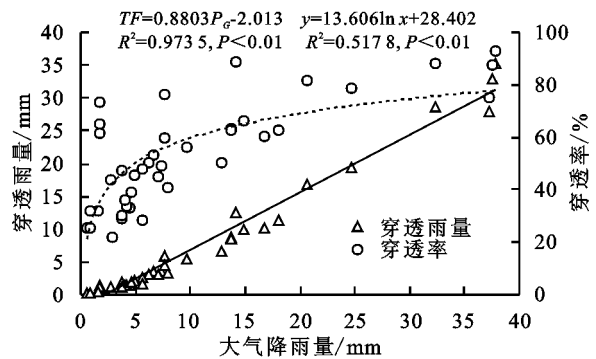


图 3 穿透雨量、穿透率和大气降雨量的关系

### 2.3 树干茎流特征

研究期间,1 号样地树干茎流量达到 21.0 mm,占大气降雨量的 5.01%,2 号样地树干茎流量为 6.7 mm,占大气降雨量的 1.60%,树干茎流系数介于 0.03%~4.76%。树干在干燥情况下,大气降雨量>7.0 mm 后开始产生树干茎流。在连续降雨情况下,大气降雨量在 2.8 mm 以上也会产生树干茎流,这是因为前期的降水使树干已经达到了一定的持水能力,连续的降雨没有充分的时间使树干干燥,造成在降雨量<7.0 mm 下也产生树干茎流。对 2 号样地树干茎流和大气降雨量的关系进行分析,结果(图 4)显示,二者呈现极显著的二次函数关系( $R^2=0.9359, P<0.01$ )。对拟合方程在  $x$  轴上的截距分析发现,当大气降雨量>7.6 mm 产生树干茎流,这与人工观测的数值基本一致。树干茎流系数与大气降雨也呈二次函数拟合关系( $R^2=0.8530, P<0.01$ )。而大多数的研究<sup>[4,8,17,20]</sup>结果表明,树干茎流量与大气降雨量呈现线性关系,本研究区域青海云杉树干茎流量与大气降雨量二次函数的拟合值更高,这可能受研究区域降雨特征、冠型、风速、郁闭度以及在样地边缘测定的树干茎流雨滴透过林窗直接击打在树干上,而没有经过林冠层等多种因素影响造成本研究结果的差异。

### 2.4 林冠截留特征

研究期间,青海云杉林的林冠截留总量为 127.5 mm,占同期降雨总量的 30.46%。由图 5 可知,林冠截留量和大气降雨量具有极显著的幂函数关系( $R^2=0.8303, P<0.01$ ),当大气降雨量>18 mm 时林冠截留量总体在降低,说明大气降雨量在 18 mm 左右林

冠截留达到饱和。当大气降雨量  $< 0.8$  mm 时, 降雨全部被林冠截留, 如果剔除降雨量  $< 0.8$  次降雨事件, 林冠截留率变化为 3.68%~78.14%, 进一步对截留率与降雨量的关系进行分析, 结果显示, 大气降雨量越小截留率越大, 之后随着大气降雨量的增大, 截留率减小。回归分析发现, 林冠截留率与大气降雨量为指数函数关系 ( $R^2 = 0.7421, P < 0.01$ )。

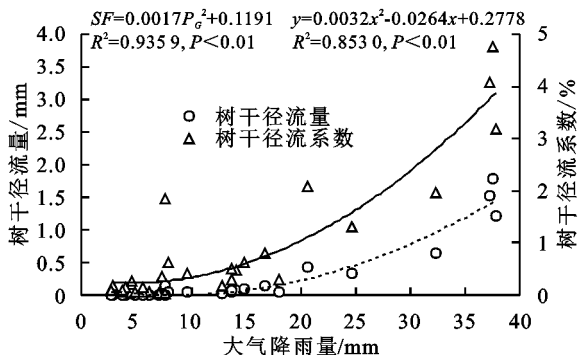


图 4 树干茎流量、树干茎流系数和大气降雨量的关系

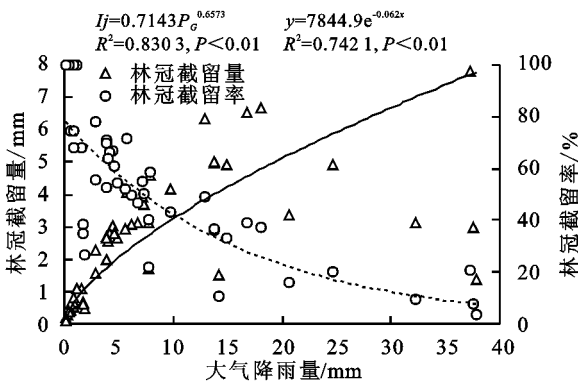


图 5 林冠截留量、林冠截留率和大气降雨量的关系

## 2.5 模型参数的确定

林冠持水能力 ( $S$ ) 是影响模型模拟精度的重要参数, 本研究采用 Leyton 回归法<sup>[20]</sup> 确定祁连山青海云杉林冠持水能力。具体方法为: 点绘穿透雨量残差  $TF_{\zeta}$  与大气降雨量的关系 (图 6), 穿透雨量残差  $TF_{\zeta} = 0$  所对应的大气降雨量为 2.9 mm, 穿透雨量残差  $TF_{\zeta} > 0$  且降雨量  $> 2.9$  mm 的大气降雨量 ( $P_G$ , mm) 与对应的穿透雨量 ( $TF$ , mm) 所建立的回归方程为  $TF = 0.9169P_G - 0.9129$  ( $R^2 = 0.997, P < 0.01$ ), 回归方程的截距即为  $S$  值, 得出青海云杉林的林冠持水能力 ( $S$ ) 为 0.91 mm。树干持水能力 ( $S_t$ ) 由树干茎流量与大气降雨量的关系方程确定, 其中, 该函数在  $y$  轴上的截距为树干持水能力, 树干茎流系数 ( $P_t$ ) 为方程的斜率。分析发现, 树干茎流量 ( $SF$ ) 与大气降雨量 ( $P_G$ ) 的关系为  $SF = 0.0383P_G - 0.2792$  ( $R^2 = 0.7900, P < 0.01$ ), 因此  $S_t$  与  $P_t$  分别为 0.2792 mm 和 0.0383。

Gash 模型的一些研究中利用平均降雨强度来判断林冠是否达到饱和状态, 王馨等<sup>[21]</sup> 以平均降雨强

度  $> 0.5$  mm/h 为标准, 高婵婵等<sup>[22]</sup> 模拟青海云杉的降水截留中采用出现树干茎流的最小降雨强度为标准来划分林冠是否达到饱和。本研究不采用降雨强度划分林冠是否达到饱和, 前面结果表明青海云杉林的林冠持水能力 ( $S$ ) 达到 0.91 mm 所对应的最小大气降雨量为 2.9 mm, 因此, 以大气降雨量  $> 2.9$  mm 为依据来确定林冠是否达到饱和。在此基础上, 通过 Penman-Monteith 公式, 计算得到降雨期间青海云杉林冠层达到饱和后的平均蒸发速率  $E$  为 0.15 mm/h,  $E_c$  为 0.25 mm/h, 根据公式 (6) 和公式 (7), 得出  $P'_G$  和  $P''_G$  数值分别为 1.7, 10.2 mm。

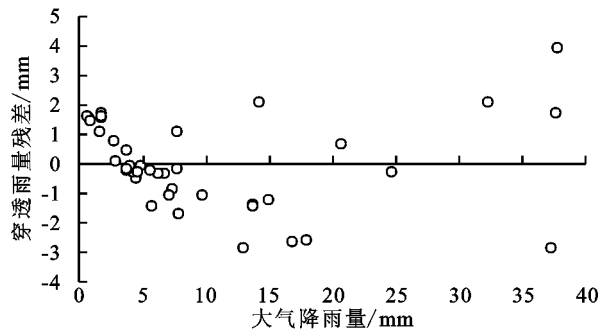


图 6 穿透雨量残差与大气降雨量的关系

## 2.6 林冠截留模拟分析

根据前面结论  $P'_G$  和  $P''_G$  值确定林冠达到饱和的降雨场次 34 场, 产生树干茎流 13 场, 林冠达到饱和而未产生树干茎流 21 场。运用 Gash 修正模型对林冠截留、树干茎流以及穿透降雨进行模拟, 结果如表 3 所示, 模型模拟的林冠截留量小于实测值, 绝对误差为 14.7 mm, 相对误差为 11.53%; 树干茎流量模拟值小于实测值, 绝对误差为 3.0 mm, 相对误差为 44.78%; 而穿透降雨模拟值大于实测值, 绝对误差为 17.7 mm, 相对误差为 6.22%。

## 2.7 模型参数敏感性分析

通过对 Gash 修正模型公式分析一个参数变化会引起一系列数值的变化, 从而导致林冠截留量的变化程度存在差异<sup>[23]</sup>, 敏感参数的精度直接影响 Gash 修正模型模拟的准确性。本研究对  $c$ 、 $R$ 、 $E$ 、 $S$ 、 $S_t$  和  $P_t$  共 6 项主要参数, 在  $-50\% \sim 50\%$  的变化范围内进行敏感性分析 (图 7), 总体而言, 除了平均降雨强度  $R$  与林冠截留量模拟值呈负相关性外, 其余 5 个参数与林冠截留量均呈正相关关系。具体而言, 6 个参数变化对林冠截留量的影响大小排序为  $E > c > R > S > S_t > P_t$ , 即林冠截留率对饱和状态下林冠平均蒸发速率  $E$  最为敏感,  $E$  每增加 10%, 林冠截留量模拟值增大 6.18%, 其次为林冠郁闭度  $c$ ,  $c$  每增加 10%, 林冠截留量模拟值增大 1.11%。同时发现,  $R$  每增加 10%, 林冠截留量模拟值平均减小约 0.35%, 其他 3 个参数的正相关影响均小于 1%。

表 3 运用 Gash 修正模型的模拟值与实测值比较

模型组成部分	表达式	模拟值/mm	实测值/实测拟合值/mm
$P'_G$	公式(6)	1.7	2.9
$P''_G$	公式(7)	10.2	7.6
m 次林冠未达到饱和状态时的大气降雨量 ( $P_G < P'_G$ )	$c \sum_{j=1}^m P_{Gj}$	9.6	/
林冠达到饱和 n 次降雨的林冠加湿过程 ( $P_G \geq P'_G$ )	$c \sum_{j=1}^n P'_G$	33.0	/
降雨停止前饱和和林冠的蒸发	$cE_c/R \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G)$	64.7	/
q 次树干达到饱和时的蒸发散	$qcS_{ic}$	3.6	/
树干蒸发, q 次降雨树干达到饱和, 其余 n-q 次树干未饱和	$cP_t \sum_{j=1}^{n-q} (1 - (E_{cj}/R_j)) (P'_{Gj} - P'_G)$	1.9	/
截留总量	$\sum_{j=1}^{n+m} I_j$	112.8	127.5
树干茎流量	SF	3.7	6.7
穿透雨量	TF	302.2	284.5

注: / 表示没有实测或没有实测拟合值。

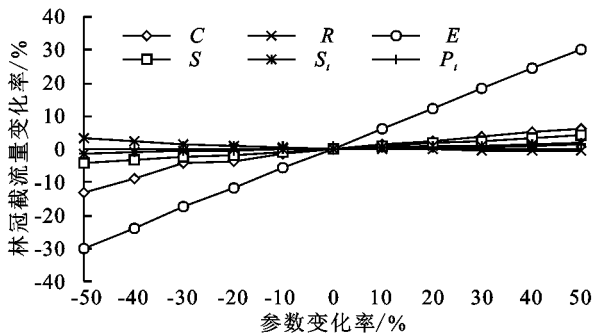


图 7 Gash 修正模型相关参数敏感性分析

### 3 讨论

研究期间青海云杉林的穿透雨、树干茎流、林冠截留总量分别为 284.5, 6.7, 127.5 mm, 占大气降雨量的 67.94%, 1.60%, 30.46%, 穿透率介于 21.67%~93.13%, 树干茎流系数介于 0.03%~4.76%, 林冠截留率变化为 3.68%~78.14%, 林冠截留量达到饱和(大气降雨量为 18 mm)时的穿透率、林冠截留率为 62.56%和 37.15%, 这与我国森林冠层雨水穿透率为 60%~92%, 温带针叶林树冠截留率介于 20%~40%的结论一致。通过相关性分析当大气降雨量 > 7.6 mm 时产生树干茎流与高婵婵等<sup>[22]</sup>对祁连山青海云杉产生树干茎流的大气降雨量 6.7 mm 结论相近, 比张学龙等<sup>[4]</sup>研究的祁连山青海云杉产生树干茎流的降雨临界值 13.6 mm 偏低, 这 2 种结论均未考虑在连续降雨情况下产生树干茎流的降雨量, 而在实测中发现, 在连续降雨下大气降雨量在 2.8 mm 以上也会产生树干茎流, 说明前 1 次降雨量的大小、降雨时间间隔极大的影响着树干茎流过程, 在 Gash 修正模型模拟树干茎流过程中树干茎流实际产流过程并

不符合 Gash 修正模型假设条件(1), 因此造成树干茎流模拟值相对误差较大。

本研究得出, 青海云杉林的林冠持水能力(S)为 0.91 mm, 树干持水能力( $S_t$ )和树干茎流系数( $P_t$ )值分别为 0.279 mm 和 0.038 3, S 值和  $S_t$  值均比彭焕华等<sup>[6]</sup>的 0.69, 0.11 mm 的值略大, S 值与党宏忠等<sup>[24]</sup>的 0.66~0.92 mm 的结论基本一致, 造成结论的差异是不同的研究利用的工具、采用的计算方法不同, 本研究结论是基于实测数据采用回归分析方法得出。

运用 Gash 修正模型研究降水截留过程, 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, 高婵婵等<sup>[22]</sup>对青海云杉林 Gash 修正模型降水截留模拟研究中得出, 不管在何种时间尺度下模拟值都偏小的结论, 且认为降雨事件的区分是提高 Gash 模拟精度的关键, 本研究得到的林冠截留量模拟值也比实测值偏小, 但相对误差更小。通过敏感性分析, 参数变化引起林冠截留量的变化率存在差异, 大部分研究<sup>[20-23]</sup>认为,  $E/R$  是影响最大的参数, 此外 Limousin 等<sup>[13]</sup>认为, 影响最大的参数是 c 值, 何常清等<sup>[25]</sup>和王艳萍等<sup>[26]</sup>认为, S 对模型模拟林冠截留量的影响最大。本研究结果表明, E 是影响青海云杉模拟效果最关键的参数, c 也是影响模拟效果的重要参数, R 与林冠截留模拟值呈负相关外, 其余 5 个参数均呈正相关, 这与曹光秀等<sup>[27]</sup>研究 Gash 修正模型模拟中亚热带常绿阔叶林降雨截留过程参数敏感性分析的结论一致。

本研究运用 Gash 修正模型, 单场降雨的林冠截留量模拟值与实测值也存在相对误差, 这也是 Gash 修正模型在实际运用中不足的地方, 但是人们普遍关心的往往并不是森林冠层对单场降雨的截留大小, 但



在总体林冠截留模拟中均表现出较好的适用性。从总量结果来看,Gash 修正模型在祁连山青海云杉林林冠截留的模拟运用中表现出很好的拟合效果,可为祁连山青海云杉林水分循环研究提供一定参考。

## 4 结论

(1)研究期间青海云杉林外共记录 50 场大气降雨,大气降雨总量为 418.7 mm,穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量分别为 284.5,6.7,127.5 mm,分别占同期大气降雨总量的 67.94%,1.60%,30.46%。Gash 修正模型模拟穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量的值为 302.2,3.7,112.8 mm,占大气降雨总量的比例分别为 72.18%,0.88%,26.94%,与实测值相比,三者的相对误差为 6.22%,44.78%,11.53%。

(2)青海云杉林的林冠持水能力( $S$ )为 0.91 mm,树干持水能力( $S_t$ )与树干茎流系数( $P_t$ )值分别为 0.279 mm 和 0.038 3。林冠达到饱和所必需的大气降雨量( $P'_G$ )和树干达到饱和所需要的大气降雨量( $P''_G$ )实测拟合值为 2.9,7.6 mm,Gash 修正模型模拟值为 1.7,10.2 mm。

(3)通过对 Gash 修正模型参数敏感性分析,参数在-50%~50%的变化过程中对林冠截留率的影响排序为  $E > c > R > S > S_t > P_t$ ,林冠截留率对参数  $E$ (饱和状态下林冠的平均蒸发速率)最为敏感,对其他参数敏感性较弱。

### 参考文献:

[1] Peng H, Zhao C, Feng Z, et al. Canopy interception by a spruce forest in the upper reach of Heihe River basin Northwestern China[J]. Hydrological Processes, 2014, 28:1734-1741.

[2] 张立杰,赵文智,王志斌,等.祁连山典型小流域降水特征及其对茎流的影响[J].冰川冻土,2008,30(5):776-782.

[3] 宗桦.森林乔木冠层雨水再分配特征及机制研究综述[J].世界林业研究,2019,32(1):28-35.

[4] 张学龙,罗龙发,敬文茂,等.祁连山青海云杉林截留对降水的分配效应[J].山地学报,2007,25(6):678-683.

[5] 谭俊磊,马明国,车涛,等.基于不同盖度的青海云杉冠层截留特征研究[J].地球科学进展,2009,24(7):825-833.

[6] 彭焕华,赵传燕,许仲林,等.祁连山青海云杉林冠层持水能力[J].运用生态学报,2011,22(9):2233-2239.

[7] 彭焕华,赵传燕,沈卫华,等.祁连山北坡青海云杉林冠对降雨截留空间模拟:以排露沟流域为例[J].旱区地理,2010,33(4):600-606.

[8] 万艳芳,刘贤德,王顺利,等.祁连山青海云杉林冠降雨再分配特征及影响因素[J].水土保持学报,2016,30(5):224-229.

[9] Liu J G. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy [J]. Ecological Modeling, 1988,42(2):111-123.

[10] 刘家冈,万国良,张学培,等.林冠对降雨截留的半理论

模型[J].林业科学,2000,36(2):5-8.

[11] 张光灿,刘霞,赵玫.树冠截留降雨模型研究进展及其评述[J].南京林业大学学报,2000,24(1):67-71.

[12] 盛雪娇,王曙光,关德新,等.辽宁东部山区落叶松人工林林冠降雨截留观测及模拟[J].运用生态学报,2010,21(12):3021-3028.

[13] Limousin J M, Rambal S, Ourcial 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.

[14] Muzylo A, Llorens P, Valente F, et al. A review of rainfall interception modelling[J].Journal of Hydrology, 2009,370(1/4):191-206.

[15] Sadeghi S M M, Attarod P, Stan J T, et al. Efficiency of the reformulated Gash's interception model in semi-arid afforestations[J].Agricultural and Forest Meteorology,2015,201:76-85.

[16] Sun X, Onda Y, Kato H. Incident rainfall partitioning and canopy interception modeling for an abandoned Japanese cypress stand[J].Journal of Forest Research, 2014,19:317-328.

[17] 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),2019,5(1):26-35.

[18] 刘贤德,赵维俊,张学龙,等.祁连山排露沟流域青海云杉林土壤养分和 pH 变化特征[J].干旱区研究,2013,30(6):1013-1020.

[19] 赵维俊,王顺利,孟好军,等.祁连山排露沟流域青海云杉种群结构与空间分布格局[J].中南林业科技大学学报,2018,38(11):75-80.

[20] 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(11):3118-3125.

[21] 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运用[J].生态学报,2006,26(3):722-729.

[22] 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].生态学杂志,2015,34(1):288-294.

[23] 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.

[24] 党宏忠,周泽福,赵雨森.青海云杉林冠截留特征研究[J].水土保持学报,2005,19(4):60-64.

[25] 何常清,薛建辉,吴永波,等.运用修正的 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.

[26] 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运用[J].生态学报,2012,32(17):5445-5453.

[27] 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):364-371.