井冈山国家级自然保护区杉木林冠层的截留模型

白 雲[1,2,4], 李新通[2], 苏 德[1,3,4], 杨 巍[1,4], 曾以平[3], 万 春[3]

(1. 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100010; 2. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007; 3. 江西井冈山国家级自然保护区管理局, 江西 井冈山 343699; 4. 井冈山生态环境综合观测研究站, 江西 井冈山 343699)

摘 要: [目的] 研究和改进井冈山国家级然保护区杉木林冠层截留模型,为研究区森林资源生态价值评价、水资源保护和管理、生态环境保护等相关研究提供理论基础。[方法] 以仪垂祥等提出的冠层截留模型为基础,对其进行改进,并以实测杉木林截留数据对模型进行率定和验证。[结果] 经实测数据率定,降雨过程中的附加截留量与"截留剩余雨量"(降雨量与叶面截留量的差值)呈幂函数关系。率定之后的模型在次降雨截留模拟的自检验分析中模型有效系数为 0.90,比经验模型模拟的精度更高,在其他样地的累计截留模拟中的相对偏差平均为 6.49%,模拟精度与同类研究中 Gash 模型的模拟精度相当。[结论] 经率定的改进模型可以应用于研究区杉木林的冠层截留模拟。

关键词: 井冈山国家级自然保护区; 杉木林; 冠层截留模型; 附加截留

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2016)02-0216-06 **中图分类号**: S715.2

文献参数:白雲, 李新通, 苏德, 等. 井冈山国家级自然保护区杉木林冠层的截留模型[J]. 水土保持通报, 2016,36(2):216-221. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.041

Model Refinement of Canopy Interception of Rainfall by Chinese Fir Forests at Jinggangshan National Nature Reserve

BAI Yun[1,2,4], LI Xintong[2], SU De[1,3,4], YANG Wei[1,4], ZENG Yiping[3], WAN Chun[3]

(1. *State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, National State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Regional Processes and Functions Assessment, CRAES, Beijing* 100010, *China*; 2. *College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian* 350007, *China*; 3. *Administration of Jingangshan National Nature Reserve, Jingangshan, Jiangxi* 343699, *China*; 4. *Integrated Ecological Observation and Research Station of Jinggangshan, Jinggangshan, Jiangxi* 343699, *China*)

Abstract: [Objective] Rainfall interception by forest canopy is an important eco-hydrological process of forest. We aimed to model the canopy interception process by chinese fir forest in Jinggangshan nature reserve in order to provide some bases for relevant researches with respect to eco-value evaluation of forest, protection and management of water resources, and environment protection of this region, et al. [Methods] A model developed by Yi Chuixiang et al was refined. And it was calibrated and validated by observed interception data in a chinese fir forest. [Results] The model calibration showed that extra interception as a dependent variable is a power function of remained-rainfall, defined as the result of atmosphere rainfall minus the value intercepted by plant leaves. The calibrated model performed better than those empirical models and is comparable to Gash model in similar researches. The effective coefficient and relative bias in predicting single rainfall event were 0.9 and 6.49%, respectively. [Conclusion] After calibration, the improved model in our study can be used for simulating canopy interception by chinese fir forest in the research region.

Keywords: **Jinggangshan National Nature Reserve; chinese fir forest; model of canopy interception; extra interception**

收稿日期:2015-01-27 **修回日期**:2015-04-19

资助项目:国家科技支撑计划项目"井冈山生态旅游资源监测预警技术研究与示范"(2012BAC11B03); 改革专项启动经费项目(2011GQ-12)

第一作者:白雲(1990—),男(汉族),四川省乐山市人,硕士研究生,研究方向为地理信息系统与区域发展。E-mail:byron506@126.com。

通信作者:苏德(1972—),男(蒙古族),内蒙古自治区赤峰市人,博士,研究员,主要从事区域生态学方面的研究。E-mail: sude@craes.org.cn。

森林冠层截留是森林生态系统的水源涵养的重要组成部分。雨水到达森林生态系统所经过的第一个层次便是冠层,冠层主要的水文特性之一便是对降雨的截留作用。通过截留作用,树冠一方面可以防止雨水直接冲刷地表,减缓雨水达到地表的时间,使得林下枯落物层和土壤层能够充分吸收雨水,减少水土流失;另一方面冠层可以减少到达地面的雨水,这部分雨水通过叶面蒸发重新进入森林的局部水循环过程,起到涵养水源的作用。对于冠层截留模型的研究,国外的工作更加详细清晰[1]。其中 Gash 模型[2-3]是目前应用最为广泛的模型之一。Gash 模型将截留过程分割成不同的阶段,并将这些阶段的截留量相加得到最后的截留量,模型的估计效果与实测效果接近[2,4]。国内有众多学者利用 Gash 模型针对不同研究对象进行了率定研究,率定的模型均取得了较好的模拟结果[5-8]。不过 Gash 模型是一种解析模型,率定后的模型隐含了试验条件下的降雨特征和林冠结构等信息,因此模型多应用于较小空间尺度、林冠差异较小的区域和时间尺度在月和季节尺度上的模拟。在次降雨尺度的研究中,Horton[9] 建立单次暴雨截留模型,该模型将次降雨截留量分为林冠吸附水量和蒸发量,模型适用于降雨量大于截留量,林冠是郁闭的条件下的模拟。Merriam[10] 和 Aston[11] 先后对该模型进行了改进,Aston 引入了降雨拦截系数 c,c 与林冠郁闭条件相关,这使模型能够应用于非郁闭条件下冠层截留估算。国内对冠层截留模型的研究早起多集中在经验模型上[12],经验模型的局限性与 Gash 模型类似。仪垂祥等[13]在 20 世纪 90 年代提出基于叶面持水能力的冠层截留模型,该模型与 Horton 模型类似,模型也存在一些缺陷。仪等的模型没有考虑树体蒸发产生的附加截留量。当然对于是否将叶面蒸发算作冠层截留的一部分在国内学术界也存在争论,孔繁智等[14]认为林冠截留过程中由于蒸发的存在,林冠的截留量在达到饱和后还会缓慢上升。因此对于较长时间的降雨过程树体的蒸发不能忽略,而且在 Gash 模型和 Aston 改进的截留模型中都考虑了蒸发对冠层截留的影响。随着研究尺度的增大,冠层截留模型的研究正在逐步从经验性质的研究向原理性转变,目前国内研究中对原理模型的研究仍然较少。本研究采用仪垂祥等[13]提出原理模型对研究区杉木林的冠层截留过程进行模拟,研究过程中将对模型模型中的缺陷进行改进,并利用野外观测试验对其中的待定参数进行率定,使其可以应用于研究对象的冠层截留模拟,以便为区域尺度的森林生态水文研究提供支撑。

1　研究区概况

井冈山国家级自然保护区处于江西境内第一大河流,同时也是鄱阳湖的第一大支流,赣江的中上游,行政区域位于我国江西省西南部吉安地区,并与湖南省境内炎陵县接壤。保护区经度范围 114°04′—114°16′E,纬度范围 26°28′—26°40′N,总面积越 290 km^2。主要地貌类型为山地、河谷、构造盆地和岩溶地貌,地势为西南高,东北低,地势起伏较大。区内四季分明,雨热同期,且夏季多暴雨,年均降水量约 1 400 mm,无霜期 247 d。保护区地处亚热带,自然条件优越,事宜植被生长,具有代表性的植被类型为亚热带常绿阔叶林,发育良好。区内具有多种植被类型,包括常绿阔叶林、落叶阔叶林、暖性针叶林、温性针叶林、杉木与常绿阔叶混交林、常绿和落叶阔叶混交林、福建柏、常绿灌木、落叶灌木等。其中以杉木林为主的针叶林是区内主要森林类型,总面积约 87 km^2,占保护区总面积约 30%。

2　研究方法

2.1　冠层次降雨截留模型改进和率定

仪垂祥等[13] 建立的冠层截留原理模型原理明确,结构简单,考虑到了植被郁闭度与叶面积指数对截留的影响。由于模型存在固有缺陷,在应用之前研究对其进行了改进。改进过程中研究对冠层截留的定义进行了扩充,降雨树木枝干产生的截留也看做是冠层截留的一部分。

2.1.1　*原始截留模型*　模型假设存在一个饱和降雨量 P^*(mm),当降雨量 $P>P^*$ 时,林冠达到饱和,此时林冠截留量 I_{max} 可由公式(1)算得到。至此以后,随降雨增加截留量增加林冠截留量不再增加。

$$I_{max}=\alpha \cdot c \cdot \mathrm{LAI} \tag{1}$$

式中:I_{max}——林冠最大截留量(mm);α——叶面最大持水深度(mm);c——林冠郁闭度;LAI——叶面积指数。

当降雨未达到饱和雨量的时候,截留量 I 利用公式(2)确定。

$$I=\frac{P}{P^*} \cdot I_{max} \tag{2}$$

$$P^*=\alpha \cdot \mathrm{LAI} \tag{3}$$

式中:I——林冠实际截留量(mm);P——大气降雨量(mm);P^*——饱和降雨量(mm)。

2.1.2　*改进截留模型*　原始模型具有的一些不足之处:(1) 未考虑树干产生的附加截留;(2) 未考虑叶面蒸;(3) 计算饱和雨量时没有将植被盖度的影响纳

入考虑，理论上相同叶面积指数的条件下，林冠郁闭度越低，所需的降雨量就越大。针对上述不足，研究将模型进行改进。林冠实际截留量 I 计算如公式(4)所示。

$$I=I_c+S_c \tag{4}$$

式中：I_c——降雨停止时叶面持水量(mm)；S_c——除蒸发以外的附加截留量(mm)，这一部分截留量主要由林冠枝干截留产生，需要通过试验进行率定。

林冠饱持水量只与LAI与叶最大持水深度 α 和林冠干湿程度有关，当降雨量 $P\geqslant P^*$ 时，截留量包括叶面持水量的增加量和蒸发量；而当降雨小于饱和雨量 $P<P^*$，林冠郁闭区降雨被全部截留，此时截留量仅与降雨量和林冠郁闭度有关；叶面截留采用公式(5)计算。

$$I_c=\begin{cases}\alpha\cdot \mathrm{LAI}-L_w+e & (P>P^*)\\ P\cdot c & (P\leqslant P^*)\end{cases} \tag{5}$$

式中：e——湿润叶面蒸发量(mm)；L_w——降雨之前叶面持水量(mm)。

饱和雨量 P^* 由郁闭度 c 和LAI共同决定，由于考虑了蒸散的贡献，P^* 还与降雨强度有关。参考已模型中的方法[15]，并将其简化，得到饱和雨量的计算公式(6)。

$$P^*=\frac{e+(\alpha\cdot \mathrm{LAI}-L_w)}{c} \tag{6}$$

式中：$(\alpha\cdot \mathrm{LAI}-L_w)$——树叶持水饱和时吸附的雨量(mm)；$e$——次降雨林冠蒸发的雨量(mm)；$e+(\alpha\cdot \mathrm{LAI}-L_w)$——落到林冠的总雨量(mm)；$c$——降雨落到林冠的概率(用林冠郁闭度代替)；$P^*$——饱和降雨量(mm)，当降雨时长为 T 时林冠达到饱和所需的最小雨量。

模型中的各参数中，叶面积指数LAI和郁闭度 c 通过试验实地测量，湿润叶面的蒸发强度采用2.2节的方法，叶面最大持水深度参考已有研究[16]，取值0.107 mm，附加截留 S_c 采用实地观测数据进行率定。

2.2 叶面蒸发模型

叶面蒸发指植被叶片表明的吸附水的蒸发强度，蒸发强度与森林结构、林冠接收辐射强度、空气的水汽温度等因子有关。目前，已有的研究中有彭曼(Penman)模型、道尔顿(Dalton)模型等[17-18]。研究采用彭曼模型计算降雨过程中叶面的蒸发强度，其考虑的太阳辐射对水面蒸发强度的影响。采用公式(7)[19]计算。

$$\lambda e=\frac{\delta R_n+\rho c_p P_{vd}/r_c}{\delta+\gamma} \tag{7}$$

式中：λ——一定大气压强下水分汽化潜热(MJ/kg)；e——蒸发量(mm)；δ——饱和水汽压曲线斜率(kPa/℃)；R_n——冠层截获净辐射能量(MJ/m^2)，通过植被冠层截获太阳辐射量进行估计[20-21]；γ——干湿球常数(0.665×10^{-3} kPa/℃)；ρ——空气密度(1.28 kg/m^3)；c_p——定压比热〔取标准大气压下的空气比热1.013×10^{-3} MJ/(kg·℃)〕；P_{vd}——饱和水汽压与实际水汽压的差值(kPa)；r_c——冠层空气动力学阻抗(m/s)，采用公式(9)[22-23]计算。

$$Q_c=Q\cdot(1-\exp(-0.281\,3\mathrm{LAI})) \tag{8}$$

$$r_c=\frac{4.27}{1+0.54u}\ln\left(\frac{z-d}{z_{om}}\right) \tag{9}$$

式中：u——风速(m/s)；d——0平面位移量(m)，取冠层底部平均距地高度(10 m)；z_{om}——冠层动力粗糙度(m/s)，取平均树高(15 m)的1/10；z——冠层顶端2 m处距地高度(22 m)[24]。

2.3 附加截留量的率定

附加截留量 S_c 利用模拟与实测相结合的方式进行率定。步骤为：(1) 野外测量冠层生态参数：叶面积指数LAI、郁闭度 c。(2) 进行冠层截留野外试验，测量观测样地的每一次降雨的林下降雨量、大气降雨量、降雨时长，第 i 场降雨的截留量是大气降雨量与林下降雨量的差值，用 I_{obi} 来表示。(3) 利用公式(5)模拟叶面截留量，用 I_{smi} 表示第 i 场降雨的模拟截留量。(4) 计算 I_{obi} 与 I_{smi} 的差值 S_c(附加截留量)：$I_{obi}-I_{smi}$；第 i 场降雨的降雨量 P_i 与 I_{smi} 的差值(剩余雨量)：$P_l=P_i-I_{ami}$。(5) 分析 S_c 与 P_l 之间的关系，得到如下关系：$S_c=f(P_l)$。

2.4 林冠降雨截留野外观测

在研究区的3个不同地点的杉木林内和林外进行了雨量采集，森林类型均为杉木林，3各样地依次编号为1,2,3；3个样地的名称、用途和坐标信息详见表1。1号样地进行次降雨林下穿透雨量和次降雨树干干流量的观测，其他两个样地采用自制雨量计测量累计穿透雨量和累计树干干流量，实验最长时间为2014年7月4日至9月21日。

表1 杉木林冠层截留观测样地信息

样地编号	样地名称	用途	经度/(°)	纬度/(°)
1	新公路杉木林	模型率定	114.196	26.552
2	保护区杉木林	模型验证	114.161	26.547
3	八面山杉木林	模型验证	114.109	26.578

2.4.1 林下穿透雨量采集 雨量的采集采用HOBO自动记录雨量计与自制雨量计相结合的方式，两种仪器接收雨量的开口均为圆形，直径18 cm，安放

时保持圆形边缘与水平面平行。HOBO 雨量计的采集精度为 0.2 mm。根据样地区森林冠层的变化幅度随机在林内布设 5～8 个自制雨量计和 1 个自记式雨量计。自制雨量计的雨量收集时采用容量为 500 ml,精度 5 ml 的量筒进行测量。取所有雨量计所测降雨的平均值作为该样地的林下降雨量雨量,一块样地的自制雨量计测得的雨量 p 采用公式(10)计算。将降雨时间间隔小于 8 h 的降雨事件视为同一场降雨[6]。

$$p=\frac{10\times\sum_{i=1}^{N}w_i}{N\cdot S_i} \tag{10}$$

式中:w_i——第 i 个雨量计所收集到的雨量(ml);S_i——第 i 个雨量计的漏在水平面的投影面积(cm^2);N——雨量计的数量。

2.4.2　*树干径流观测*　树干径流采用自制的收集装置进行测量,自制装置测量树干径流的安装方法为:(1) 将一根足够长的皮管一侧用剪刀剪开;(2) 将树干接近地面的地方用刀把树皮刮至光滑,并将皮管的开口处缠绕在该处,用胶水和马丁将皮管固定于树干并使开口于树干贴合;(3) 皮管另外一侧接入一个细口瓶胶瓶中,隔一段时间对胶瓶中的水量进行测量,以此作为一根树干的树干的干流量。每块样地在不同的树干上安装 3 个树干径流装置。取 3 个装置测得的径流均值作为该样地的树干径流量 P_t(mm),具体计算方法如公式(12)。实际测量过程中还需要测量样地的树干密度(即单位面积的树干数量),测量方法为:(1) 在样地中任意选取 10 m×10 m 的样方;(2) 人工数测样方中的树干数量 T;(3) 依据公式(11)计算树干密度 T_d。

$$ST_d=\frac{ST}{100} \tag{11}$$

$$P_t=\frac{ST_d\cdot\sum_{i=1}^{N_{st}}\mathrm{STW}_i}{N_{st}\times10^4}\times100 \tag{12}$$

式中:STW_i——第 i 个树干径流装置所收集的雨量(ml);N_{st}——树干径流装置的数量。

2.5　冠层参数测量

2.5.1　*叶面积指数测量*　叶面积指数的测量采用美国 Decagon 公司生产的 AccuPAR LP-80 叶面积指数仪,测量工作选择在晴天,上午 10:00 与下午 3:00 之间。测量时保证冠层以上太阳辐射强度在 600 μmol/(s·m^2)以上。(1) 布设样地。在林内划定 30 m 边长的正方形样地,用界桩固定样地的四个角点,并用 GPS 记录下样地中心坐标值;(2) 条形探头校准。测量之前需要利用微型探头对条形探头进行校准。首先选择一个开阔地,让将微型探头固定在仪器上,并与仪器保持联通状态,将两个探头至于水平,使用校准命令,等待 10 秒后,完成校准;(3) 采集林外太阳辐射。将仪器拿到林外能受到太阳直射的开阔地,打开仪器,将条形探头置于水平,等待仪器屏幕上太阳辐射值稳定后记录数值,间隔 5 秒连续记录 5 次,此时仪器将计算出这 5 次记录的太阳辐射的太阳辐射值;(4) 将仪器拿到样地,探头置于水平,在样地中任意走动,并记录 5 次以上林内太阳辐射值,仪器将对林内记录的所有数值求得算数平均值,将该值作为林内太阳辐射强度,此时,仪器将根据测量的林内和林外的太阳辐射强度、测量的时间、地点等参数计算出样地 LAI 值。

2.5.2　*郁闭度测量*　森林郁闭度的测量方法较为简便,以拍摄观测样地冠层照片进行分析得出。对于某一观测样地的郁闭度测量步骤为:(1) 在样地中随机走动,不同位置以垂直地表水平面的方向拍摄 5 张以上的冠层的照片。照片拍摄选取阴天进行,以避免太阳直射造成照片曝光过度,所有相片采用同一相机的相同像素模式进行拍摄。(2) 应用 PS 软件将拍摄的照片进行二值化处理,二值化过程中设置恰当的阈值,保留有枝叶覆盖的部分值为 1,其他区域为 0。(3) 计算某一样地的郁闭度 c:利用相片计算冠层郁闭度的计算公式为

$$c=\frac{\sum\left(\frac{\sum V_p}{N_p}\right)}{n} \tag{13}$$

式中:N——单一相片的象元总个数;V_p——相片二值化后像素的值;n——在该样地拍摄的照片数量。

3　冠层截留模型率定与精度分析

3.1　次降雨截留经验模型

试验期间总共观测到 65 场降雨,每场降雨的时间间隔不低于 8 h。观测时间从 2014 年 7 月 16 日至 9 月 20 日。按照传统的分析方法,将次降雨截留观测试验中的林下量、截留量和树干径流量分别于降雨量之间进行分析。将林下雨量和树干干流拟进行加和,统称为穿透雨量,穿透雨量与大气降雨量之间的关系可用线性函数进行拟合($R^2=0.997$)。截留量与降雨量之间的关系可用幂函数进行拟合($R^2=0.789$)。可见,在立地条件固定的情况下,穿透雨量和截留量均为大气降雨量的函数。

3.2　附加截留量率定

3.2.1　*模拟截留量与实测截留量关系*　利用冠层截留(样方)模型对样地在试验期间的截留进行模拟,模

拟过程设定附加截留量 $S_c=0$。结果表明,模拟的截留量 I_{sn} 与实测的截留量 I_{ob} 具有良好的线性关系。实际观测的截留量由大气降雨量减去穿透雨量和树干干流量得到。由模拟结果可知,由于模拟过程中设定附加截留量为0,模拟结果 I_{sn} 总体小于实测的截留量。降雨通过树冠缝隙滴落到树干上或者当树冠持水量达到饱和时,部分降雨会从树叶流向树木枝干,这一部分没有被树冠层截留的雨量研究将其定义为树冠截留剩余雨量,用符号 P_l 来表示,该值由大气降雨量 I_{ob} 减去模拟截留量 I_{sn} 得到。

3.2.2 *附加截留量与"冠层截留剩余雨量"P_l* 研究用实测截留量 I_{ob}、实测降雨量 P 与模拟截留量 I_{sn} 计算附加截留量 S_c 和剩余降雨量 P_l,计算公式为:

$$S_c=I_{ob}-I_{sn} \tag{14}$$

$$P_l=P-I_{sn}$$

式中:P——次降雨量。

利用公式(14)计算得到的 S_c 值范围在-0.23~5.10 mm之间,个别场次的降雨中计算得到的附加截留量出现了负值,这可能是由模拟过程中的模型误差和实地观测造成的,研究将出现负值的降雨场次的树干截留为0。在SPSS软件中,通过幂函数模型对计算得到的 S_c 与 P_l 进行拟合,得到公式(15)。

$$S_c=0.213P_l^{0.644} \qquad (R^2=0.802) \tag{15}$$

3.3 冠层截留模型的精度分析

截留模型精度比较采用模型有效系数 e_f 和相对偏差进行此次降雨截留精度评价,该系数由Nush等[25]提出,有效系数采用公式(16)计算。累计截留精度评价采用相对偏差 e_r 进行评价,计算公式为:

$$e_f=1-\frac{\sum(v_s-v_o)^2}{\sum(v_s-\overline{v_o})^2} \tag{15}$$

$$e_r=\frac{|a_s-a_o|}{a_o} \tag{16}$$

式中:v_s 为——次降雨截留量的模拟值;v_o——次降雨截留量观测值;a_s——模拟累计截留量;a_o——累计截留观测值。

使用上述方法对率定的改进模型与3.1节中的穿透雨量和截留量经验模型进行次降雨截留模拟的精度比较,为了方便说明,3个模型分别定义为模型1,模型2和模型3。次降雨截留精度比较以观测样地1的数据为基准,累计截留量的模拟精度评价仅对率定的原理模型进行,以观测样地2,3的累计截留观测数据为基准。

3.3.1 *不同模型在次降雨截留模拟中的精度比较* 通过对3种模型模拟的次降雨截留量与实测截留量进行了比较,3种模型的模拟精度评价结果详见表2。从有效系数来看,本研究率定的改进模型的模型有效系数最高为0.90,其余2个经验模型的有效系数均小于0.80。说明在次降雨截留模拟方面,本研究率定的模型具有更高的精度。

表2 截留模型精度比较

模型	模型1	模型2	模型3
有效系数	0.90	0.72	0.74

3.3.2 *冠层截留原理模型的累计截留模拟精度* 为了充分验证率定后的改进模型的适用性,研究利用改进模型分别对观测样地2和观测样地3在试验期间的冠层截留量进行了模拟,其中观测样地2试验期间测量的叶面积指数和林冠郁闭度分别为3.89,0.73,观测样地3的叶面积指数和林冠郁闭度为4.17,0.78。模型对两个观测样地试验期间模拟的累计截留量的模拟精度分析结果详见表3。模型模拟2个样地的相对偏差为0.72%和15.06%,两个样地模拟的平均相对偏差为6.49%,说明模型在累计截留量方面模拟的相对偏差较低,可以达到应用需求。

表3 冠层截留原理模型的累计截留模拟精度 mm

样地编号	时间段	实测截留量	模拟截留量	相对偏差/%
2	20140706—20140920	96.83	111.41	15.06
3	20140706—20140915	115.04	114.21	0.72
均值	—	105.94	112.81	6.49

4 讨论与结论

次降雨截留过程中,杉木林内的穿透雨量与大气降雨量呈幂函数关系,两者拟合的决定系数达到0.99。而冠层截留雨量与大气降雨量之间的关系采用幂函数模拟,决定系数为0.75。

改进截留模型中的附加截留量 S_c 为本文研究自定义的变量 P_l 的幂函数。改进后的模型在次降雨截留模拟中的有效系数达到了0.90,模拟精度优于经验模型。改进模型进行累计截留量模拟的相对偏差平均为6.49%,这以结果与与王艳萍等[26]和王馨等[4]应用Gash模型模拟的结果误差相当。分析结果表明,通过率定附加截留,模型能够应用于研究区杉木林的冠层截留模拟过程。

原理模型考虑了冠层生态参数对截留过程影响,可以应用到区域尺度的冠层截留模拟,而经验模型只能在特定的立地条件下应用。在区域尺度截留受冠层空间差异的影响,因此,区域尺度的截留模拟需要生态参数的遥感模型的支持。经验模型中穿透雨量通过降雨量估计的模型的决定系数高于冠层截留量

的直接估算的经验模型,但是由于穿透雨量占降雨总量的比例较大,而冠层截留量的比例多在 30%以下,因此通过穿透雨量间接估计截留量的方法的误差比直接估计冠层截留量的方法误差更大。

[参 考 文 献]

[1] 王鹏程. 三峡库区森林植被水源涵养功能研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2007.

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

[3] 刘曙光. 林冠截留模型[J]. 林业科学,1992,28(5):445-449.

[4] 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[J]. 生态学报,2006,26(3):722-729.

[5] 王冉,王玉杰,王云琦,等. 三峡库区典型常绿阔叶林冠层降雨截留模拟研究[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(2):281-286.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 孙向阳,王根绪,吴勇,等. 贡嘎山亚高山演替林林冠截留特征与模拟[J]. 水科学进展,2011,22(1):23-29.

[9] 王爱娟,章文波. 林冠截留降雨研究综述[J]. 水土保持研究,2002,16(4):55-59.

[10] Merriam R A. A note on the interception loss equation [J]. Journal of Geophysical Research, 1960, 65(11): 3850-3851.

[11] Aston A R. Rainfall interception by eight small trees [J]. Journal of Hydrology, 1979, 42(3/4): 383-396.

[12] 温远光,刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析[J]. 林业科学,1995,31(4):289-298.

[13] 仪垂祥,刘开瑜,周涛. 植被截留降水量公式的建立[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(2):47-49.

[14] 孔繁智,宋波,裴铁璠. 林冠截留与大气降水关系的数学模型[J]. 应用生态学报,1990,1(3):201-208.

[15] Komatsu H, Shinohara Y, Kume T, et al. Relationship between annual rainfall and interception ratio for forests across Japan[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256(5): 1189-1197.

[16] 孙德泉. 井冈山国家级自然保护区水源涵养能力研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2012.

[17] 闵骞. 短时段水面蒸发量计算方法的选择[J]. 气象,1994,20(10):36-39.

[18] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. FAO Irrigation and Drainage Paper: Food and Agric Organ of the United Nations, Rome, 1998.

[19] Holwerda F, Bruijnzeel L A, Scatena F N, et al. Wet canopy evaporation from a Puerto Rican lower montane rain forest: The importance of realistically estimated aerodynamic conductance[J]. Journal of Hydrology, 2012, 414/415(2): 1-15.

[20] 任海,彭少麟,张祝平,等. 鼎湖山季风常绿阔叶林林冠结构与冠层辐射研究[J]. 生态学报,1996,16(2):174-179.

[21] Wallace J, Macfarlane C, McJannet D, et al. Evaluation of forest interception estimation in the continental scale Australian Water Resources Assessment: Landscape (AWRA-L) model[J]. Journal of Hydrology, 2013, 499: 210-223.

[22] 李孝广,毕华兴,刘胜等. Penman-Monteith 蒸散模型及其在森林下垫面中参数的确定[J]. 水土保持研究,2005,12(6):261-265.

[23] Thom AS, Oliver HR. On Penman's equation for estimating regional evaporation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1977, 103(436): 345-357.

[24] 黄兆祥. 井冈山森林的主要类型[J]. 南昌大学学报:理科版,1985(2):13-26.

[25] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models(part I): A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.

[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应用[J]. 生态学报,2012,32(17):5445-5453.