

## 云杉截留降雨实验与模型

王安志<sup>1</sup> 刘建梅<sup>1,2</sup> 裴铁<sup>1</sup> 金昌杰<sup>1</sup>

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所 2 中国科学院研究生院)

**摘要:** 该文通过实验室模拟实验,得到了不同雨强和不同叶面积指数组合下的云杉截留降雨过程,同时考虑了树冠湿润度的影响.依据实验资料,建立了单位叶面积最大截留量随雨强增大而减小和枝叶截留速率随树冠湿润度变化的定量关系,进而构建了云杉截留降雨随雨强和叶面积指数变化的模型.最后,通过对模型模拟验证,得到模型对截留过程的模拟精度为 91.5%.

**关键词:** 截留,分配降雨,模型,雨强,叶面积指数

中图分类号: S791.18 文献标识码: A 文章编号: 1000-1522(2005)02-0038-05

WANG An-zhi<sup>1</sup>; LIU Jian-mei<sup>1,2</sup>; PEI Tie-fan<sup>1</sup>; JIN Chang-jie<sup>1</sup>. **An experiment and model construction of rainfall interception by *Picea koraiensis*.** *Journal of Beijing Forestry University* (2005) 27(2) 38-42 [Ch, 9 ref.]

<sup>1</sup> Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, P. R. China;

<sup>2</sup> Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100093, P. R. China.

The interception process of rainfall in a forest canopy is very important in water resource cycles of forest watershed. Most studies have considered the relationship between the interception in one or several rainfall events and precipitation without thorough consideration of the characteristics of rainfall density and vegetation, and therefore little of the study results can be used in a distributed rainstorm-runoff model. After carrying out some simulation experiments in the lab, the authors obtained data of interception process in unattached events with different rainfall densities and leaf area indexes. Based on the data, the relationship between rainfall density and the maximum interception per unit leaf area index is quantified. The change of the interception ratio with the canopy humidity is also identified. Hence, an interception model, in which interception is calculated using rainfall density and leaf area index, is constructed with the consideration of canopy humidity. Finally, with the simulation experiment, it is concluded that the precision of the model is 91.5%.

**Key words** interception, rainfall distribution, model, rainfall density, leaf area index

对于森林流域,降雨要经过林冠截留,以穿透降雨、树干径流形式到达地面,即林下降雨.林冠分配降雨过程,影响着森林流域产、汇流过程,是森林水文学研究的热点之一<sup>[1]</sup>.多年来国内外许多专家、学者对此做了大量研究<sup>[2]</sup>,研究成果比较丰富,但具有一定理论基础和实用价值的模型出现只有 30~40 年的历史<sup>[2]</sup>.以往的研究多以定位观测为主要手段,定量分析 1 次降雨或几次降雨的截留、穿透和树干径流<sup>[3]</sup>.由于定位观测对应固定的林分组成,而

且面对的是自然降雨过程,从而使得对这些过程随雨强、植被特征变化的深入研究较少<sup>[4]</sup>.而在实验室进行林冠分配降雨实验,可以人为准确地控制降雨强度、改变植被叶面指数(LAI)以及准确测量穿透降雨和树干径流,从而为模型的确定提供了技术支撑.

目前,在水文模型对坡面、流域、区域乃至全球尺度上水分循环过程模拟中,经常采用净雨量(穿透降雨和树干径流的总和)或林冠截留作为模型参

收稿日期: 2004-01-11

http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目: 国家重点基础发展计划研究项目(2002CB111503)、中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-425).

第一作者: 王安志, 助理研究员. 主要研究方向: 生态水文. 电话: 024-83970331 Email: anzhiwang@163.net 地址: 110016 沈阳 中国科学院沈阳应用生态研究所.

责任作者: 裴铁, 研究员. 主要研究方向: 生态水文. 电话: 024-83970337 传真: 024-83970300 Email: tfpei@iae.ac.cn 地址: 同上.

数<sup>[5]</sup>. 因此, 本文基于建立和完善森林流域分布式暴雨-径流模型的需要, 在实验室对林冠截留量及其动态过程进行研究, 探讨其与雨强和叶面积指数之间的定量关系, 建立模型, 为流域分布式暴雨-径流模型的改进提供理论依据.

## 1 研究地概况及研究方法

实验在中国科学院长白山野外定位开放站森林水文模拟实验室<sup>[6]</sup>进行, 选取1株红皮云杉(*Picea koraiensis*)为实验用树, 树高4.1 m, 树冠投影面积为4.21 m<sup>2</sup>. 将选中的实验用树从野外移栽到实验室模型槽中, 使其正常生长. 在树高50 cm处按树冠投影用木板制作承雨盘, 承雨盘设有出流口, 用V型槽测流仪自动测量出口断面的流量过程, 采样频率为0.5 Hz. 在计算机控制下进行人工降雨, 通过人工剪枝改变树木叶面积指数, 同时用LAI-2000冠层分析仪(Plant Canopy Analyzer)测量其叶面积指数. 实验过程中, 关闭所有门窗, 以减少蒸发损失. 实验结束后, 敞开门窗, 通过实验室南北两侧的6个通风风扇吹4 h, 使树冠截留水分完全蒸发, 再进行下1次实验.

首先, 为了研究雨强对林冠截留的影响, 在固定的叶面积指数4.53下进行了10场不同雨强的实验(实验编号分别为:A、B、C、D、E、F、G、H、I和J), 历次降雨的雨强分别为:0.79、1.32、1.40、1.63、1.67、1.87、2.10、2.19、2.35和2.46 mm/min. 其次, 在固定的雨强2.10 mm/min下又作了7个不同叶面积指数变化的实验(实验编号分别为:K、L、M、N、O、P和Q), 叶面积指数分别为:4.11、3.84、3.51、3.14、2.79、2.07和1.35. 为了验证模型, 接着进行了3场实验(实验编号分别为:R、S、T), 各场实验对应的雨强分别为2.46、1.40和1.85 mm/min, 叶面积指数为:3.14、2.79和2.07. 最后, 为了确定系统的水量损失及承雨系统汇流造成的时间延迟, 对去掉树木覆盖的承雨系统进行了3个雨强的降雨实验(实验编号分别为:U、V、W), 雨强分别为1.14、1.76和1.95 mm/min.

## 2 模型的提出

根据以往研究, 影响林冠截留过程的主要因素包括: 植被特征、降雨特征、气象因子等<sup>[7]</sup>. 其中, 气象因子主要影响着附加截留, 即在降雨过程中截留水分蒸发损失的水量. 由于实验过程中对实验室的通风进行了控制, 将蒸发损失降到了最低, 因此忽略附加截留过程, 则需要考虑的因素只剩下植被特征和降雨特征. 对于植被特征来说, 以往主要考虑的是叶面积指数, 本文主要针对的是单株树木, 所采用

的叶面积指数定义为: 叶面积与树木投影面积的比值. 至于降雨特征, 用降雨强度作为模型参数.

假定垂直向下为 $z$ 轴方向, 林冠顶部为坐标原点, 树高为 $h$ , 如图1所示. 到达冠层顶部的雨强, 用 $R(t)$ 表示(mm/min). 经过林冠和树干截留损失的雨强为 $\Delta P(t)$ (mm/min), 以穿透降雨与树干径流形式到达地表的雨强(净雨)为 $I(t)$ (mm/min), 则根据水量平衡方程可得到:

$$\int_0^T R(t)dt = \int_0^{T_1} \Delta P(t)dt + \int_0^{T+\tau} I(t)dt \quad (1)$$

式中,  $T$ 为降雨历时;  $T_1$ 有效降雨历时(林冠截留历时), 一般来说,  $T_1 \leq T$ ;  $\tau$ 为净雨的时间延迟;  $R$ 、 $\Delta P$ 和 $I$ 是时间的函数.

假设在林冠以下任意位置 $z$ 处的平面 $a$ (见图1), 其总叶面积是 $z$ 的函数, 用 $S_a(z)$ 表示(mm<sup>2</sup>), 而单位叶面积对应的最大截留量为 $k$ (mm), 则平面 $a$ 处所能截留的最大雨量 $G_a$ (mm<sup>3</sup>)可表示为:

$$G_a = S_a(z)k \quad (2)$$

对于给定的雨强 $R$ 来说, 它影响着树木枝叶的振幅大小, 从而对单位叶面积对应的最大截留量产生影响, 因此对于 $k$ 来说, 它是雨强的函数. 对于雨强为 $R$ 的常雨强降雨来说, 当 $\Delta z$ 取很小时, 可以忽略在林冠中雨强随高度变化, 从而将单位叶面积对应的最大截留量表示为 $k(R)$ . 如果整株树木所有枝叶都达到最大截留量, 此时所截留的水量 $G$ 可表示为:

$$G = \frac{\int_0^h S_a(z)k(R)dz}{S} = \frac{k(R) \int_0^h S_a(z)dz}{S} = k(R)LAI \quad (3)$$

式中,  $LAI$ 为叶面积指数,  $S$ 为林冠的垂直投影面积. 同时, 根据式(1),  $G$ 还可以表示为:

$$G = \int_0^{T_1} \Delta P dt \quad (4)$$

式(3)给出了截留总量的计算模型, 在 $k(R)$ 确定后, 我们可通过叶面积指数来计算 $G$ . 但实际的截留过程是时间的函数, 即 $\Delta P$ 是时间的函数, 可表示为: $\Delta P(t)$ ,  $t$ 的取值范围为 $[0, T_1]$ .

考虑平面 $a$ 处枝叶截留水分的速率 $\Delta P_a(t)$ 和雨强、叶面积与该处枝叶的湿润程度有关<sup>[8,9]</sup>, 得到:

$$\Delta P_a(t) = \frac{\alpha R S_a(z)}{S} \quad (5)$$

式中,  $\alpha$ 为随冠层湿润程度变化的截留系数, 是无量纲数, 取值范围为 $[0, 1]$ . 由于降雨从林冠顶到地面的历时与整个降雨过程相比量值较小, 因此假设林

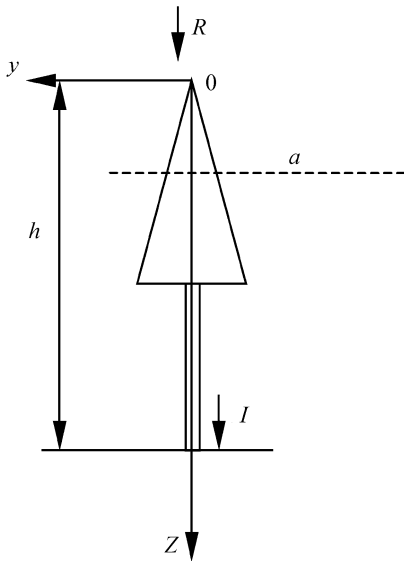


图 1 计算简图

FIGURE 1 Diagram for calculation

冠各层接受降雨无时滞,且各高度的截留速率相等,则整个林冠截留速率为:

$$\Delta P(t) = \alpha RLAI \quad (6)$$

引入表征林冠湿润程度的无量纲数  $\beta$  (林冠截留水量与其最大截留量的比),即:

$$\beta = \frac{P(t)}{G} = \frac{\int_0^t \Delta P(y) dy}{k(R) LAI} \quad (7)$$

式中,  $P(t)$  为截留量随时间变化函数(mm),  $t$  的取值范围为  $[0, T_1]$ ,  $\beta$  的取值范围为  $[0, 1]$ . 则  $\alpha$  可以表示为  $\beta$  的函数,即  $\alpha=f(\beta)$ ,从而可将式(6)改写为:

$$\Delta P(t) = f(\beta) RLAI \quad (8)$$

而  $P(t)$  就可表示为:

$$P(t) = \int_0^t \Delta P(t) dt = RLAI \int_0^t f(\beta) dt \quad (9)$$

根据式(7)、(8)看出,对于常雨强降雨来说,林冠的截留量与叶面积指数成正比,且只要确定函数  $f(\beta)$  和  $k(R)$ ,林冠的截留过程就可以通过计算得到.

### 3 参数的确定

#### 3.1 数据处理

实验过程中,实际测量了出口断面的流量过程线.但是,承雨盘本身要吸附一定数量的水,且盘中汇流需要一定时间,因此对出口断面出流产生一定的滞后,从而不能将实测的流量过程直接作为净雨过程.为了得到降雨对应的净雨过程,首先要对承雨系统的水量损失及承雨系统对汇流过程造成的时间延迟进行计算.用  $L$  表示承雨系统的单位面积上的水量损失,  $h$  代表承雨系统内的平均水深,  $Q$  是实测出口断面流量.其中,  $L$  主要用来湿润承雨盘的

平均水深.假设大部分水量损失发生在出口断面出现水流以前,从而对于常雨强降雨,可根据式(1)将截留量随时间的变化表示为:

$$\begin{cases} P(T_s) = RT_s - LS & t = T_s \\ P(t) = Rt - h - L - \frac{\int_{T_s}^t Q dt}{S} & T_s < t \leq T \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $T_s$  为出口断面出现水流的时间,可实测得到;流量  $Q$  也可以实测得到;  $h$  和  $L$  可根据无覆盖承雨系统降雨实验来推求,此时可将式(10)改写为:

$$\begin{cases} L = \frac{RT_s}{S} & t \leq T_s \\ h = Rt - L - \frac{\int_{T_s}^t Q dt}{S} & T_s < t \leq T \end{cases} \quad (11)$$

从而,根据实验 U、V 和 W 的结果(见图 2),得到 3 场降雨对应的水量损失分别为:0.591、0.587 和 0.594 mm,将三者的平均值作为承雨系统的水量损失,则  $L=0.590$  mm. 以往的研究表明,  $Q$  与  $h$  之间存在一定的函数关系,根据实验结果利用式(11)得到了二者之间的对应关系,如图 3 中的散点.

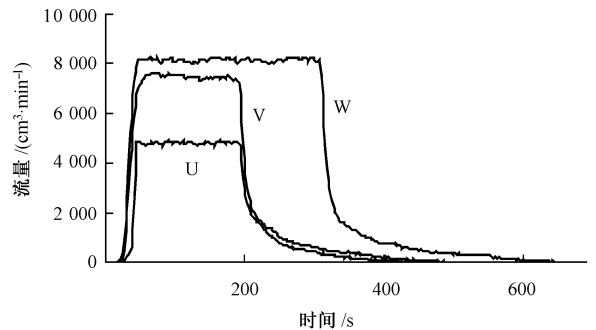


图 2 实验 U、V 和 W 的结果

FIGURE 2 Results of experiment U, V and W

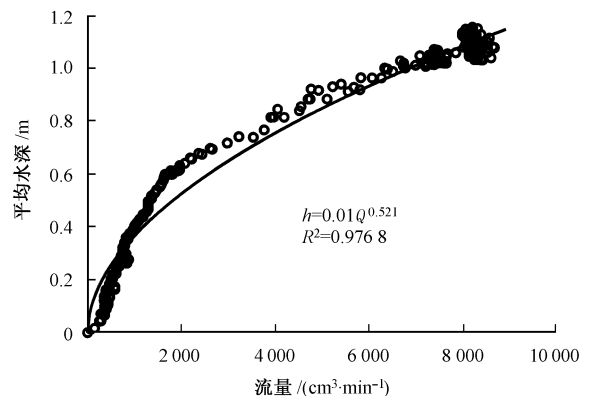


图 3  $Q$  与  $h$  之间的关系

FIGURE 3 Relationship between  $Q$  and  $h$

从图中的散点分布来看,  $h$  与  $Q$  的关系近似为幂函数关系,因此,根据最小二乘法,按幂函数拟合,得到  $Q$  与  $h$  的关系式为:

$$h = 0.01 Q^{0.521} \quad (12)$$

其中,该函数表示的曲线见图 3 中的实线.

在得到式(12)后,就可以将实测得到流量过程线、历次降雨的雨强和历时代入式(10),得到各次降雨实验对应的截留量在  $t \geq T_s$  时的变化过程,见图 4.

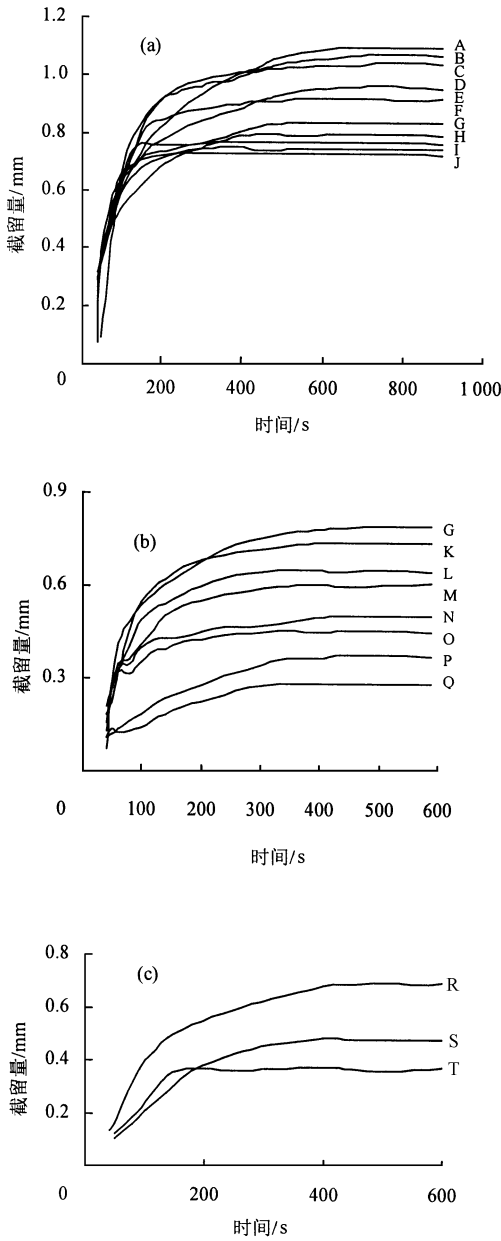


图 4 计算得到的各次降雨实验的截留过程

FIGURE 4 Calculated results of interception process on each experiment

### 3.2 $k(R)$ 的确定

从图 4 的(a)、(b)中可以看出,各条曲线代表的截留过程都达到了最大截留量.从而对应每次降雨一截留过程就会得到一个  $G$ . 因此,根据式(3)得到一组  $k(R)$  值,将  $k(R)$  与相应的雨强  $R$  绘制成图(见图 5 中的散点).

从而,可得到  $k(R)$  与  $R$  之间的经验关系为:

$$k(R) = -0.0096 R^2 - 0.0287 R + 0.2786 \quad (13)$$

该方程代表的曲线见图 5 中的实线,得到的相关指数为 0.904 9.

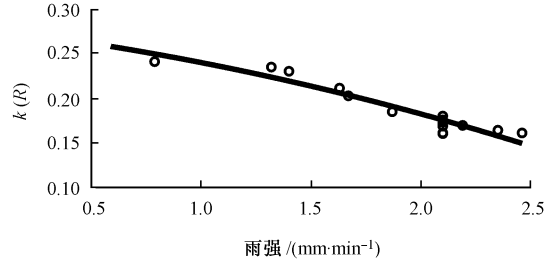


图 5  $k(R)$  与  $R$  之间的关系

FIGURE 5 Relationship between  $k(R)$  and  $R$

### 3.3 $f(\beta)$ 的确定

对于图 4 (a)、(b) 中的历次截留过程来说,我们可分别得到  $G$  和  $P(t)$ ,从而可获得各采样时刻对应的  $\beta$  值.同时,根据式(8)就可以得到不同  $\beta$  值对应的  $f(\beta)$ ,见图 6.

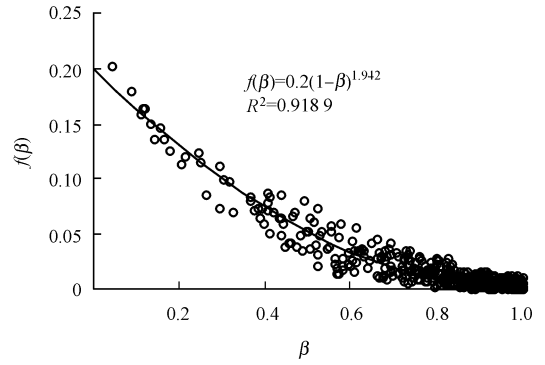


图 6  $f(\beta)$  与  $\beta$  之间的关系

FIGURE 6 Relationship between  $f(\beta)$  and  $\beta$

考虑当  $\beta=1$  时,  $f(\beta)=0$ . 因此,按幂函数拟合,得到经验关系为:

$$f(\beta) = 0.2(1-\beta)^{1.942} \quad (14)$$

该方程所代表的曲线在图 6 中用实线表示.

## 4 模型验证

从上述的推导可以看出,林冠截留过程可用式(7)、(9)、(13)和(14)来完整描述,可得:

$$\frac{dp(t)}{dt} = RLAIf \left[ \frac{p(t)}{G} \right] \quad (15)$$

从式(14)可见,该微分方程很难甚至无法获得解析解,但可以很容易获得数值解.根据实验 R、S、T 的雨强和叶面积指数资料,利用本文模型可以得到 3 条林冠截留过程曲线(见图 7).

将图 7 中的曲线与图 4(c)中的曲线进行比较发现,前者的线型与后者的相近.三场降雨得到模拟结果的精度分别为 92.5%、91.3%和 90.7%.可见,所建模型可以用来模拟林冠截留过程.

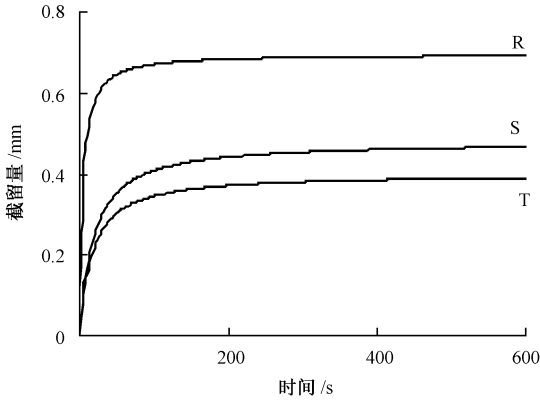


图7 降雨实验 R,S 和 T 截留过程的模拟结果

FIGURE 7 Simulation of interception process on R, S and T

## 5 结果与讨论

本文通过实验室模拟实验,分别得到了不同雨强和不同叶面积指数组合下的云杉截留降雨过程.依据实验资料,通过引入枝叶湿润度  $\beta$ ,建立了以雨强和叶面积指数为自变量的描述林冠截留降雨过程的微分方程,即:

$$\frac{dp(t)}{dt} = RLAI f(\beta) \quad (16)$$

同时,确定了雨强与单位叶面积最大截留量之间的定量关系,即:单位叶面积最大截留量随雨强的增加而递减,可以用雨强的多项式形式表示为:

$$k(R) = -0.0096 R^2 - 0.0287 R + 0.2786 \quad (17)$$

以及湿润度  $\beta$  影响下的枝叶截留系数的经验关系,表示为  $\beta$  的幂函数形式:

$$f(\beta) = 0.2(1 - \beta)^{1.942} \quad (18)$$

其中,  $\beta$  可以表示为:

$$\beta = \frac{P(t)}{k(R) LAI} \quad (19)$$

经过对三场降雨的模拟,表明本文建立起来的林冠截留模型可以有效模拟截留过程,模拟得到的过程线与实测结果相近,平均模拟精度为 91.5%。

实验室实验得到的降雨一截留过程与野外情况存在一定差异,但只要将本模型适当修正,还是可以用来模拟实际的截留过程.实际应用过程需要改进的地方为:①实验结果是在常雨强下得到的,应该扩充到变雨强情况.②由于实验过程中几乎没有蒸发,因此,模型在野外应用中应考虑附加截留量的分项.③森林存在林窗,引入郁闭度  $\xi$  来完善截留模型.

首先,林地的叶面积指数是总的叶面积与林地面积的比,与上述模型的定义不同,因此将式(16)改写为:

$$\frac{dp(t)}{dt} = \xi^{-1} RLAI f(\beta) \quad (20)$$

其次考虑式中的截留量代表树冠投影面积上的水深,

应扩展为整个林地,因此应再乘上郁闭度  $\xi$ ,得到:

$$\frac{dp(t)}{dt} = RLAI f(\beta) \quad (21)$$

最后考虑附加截留量,并将常雨强扩展为变雨强,得到:

$$\frac{dp(t)}{dt} = RLAI f(\beta) + \frac{dE(t)}{dt} \quad (22)$$

上述(20)~(22)式中,  $\xi$  为郁闭度;  $E(t)$  附加截留量,可根据蒸散模型估计;其他符号同前.

对于  $\beta$  来说需要将实验定义的 LAI 变为林地叶面积指数,同时考虑附加蒸散量不会改变枝叶的湿润程度,因此将  $\beta$  表示为:

$$\beta = \frac{\xi [P(t) - E(t)]}{k[R(t)] LAI} \quad (23)$$

从而可将一个林分的截留过程表述为:

$$\begin{cases} \frac{dp(t)}{dt} = \xi^{-1} R(t) LAI f(\beta) + \frac{dE(t)}{dt} \\ \beta = \frac{\xi [P(t) - E(t)]}{k[R(t)] LAI} \end{cases} \quad (24)$$

该式即为森林截留模型,通过引入式(13)、(14)就可以根据降雨特征和植被特征推求林分的降雨一截留过程.

## 参考文献

- [1] PIKE R G, SCHERER R. Overview of the potential effects of forest management on low flows in snowmelt-dominated hydrologic regimes [J]. *BC Journal of Ecosystems and Management*, 2003, 3(1): 1-17.
- [2] 张光灿, 刘霞, 赵玫. 林冠截留降雨模型研究进展及其述评 [J]. *南京林业大学学报*, 2000, 24(1): 64-68.  
ZHANG G C, LIU X, ZHAO M. On rainfall interception models [J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2000, 24(1): 64-68.
- [3] 裴铁, 范世香, 韩绍文, 等. 林冠分配降雨过程的模拟实验分析 [J]. *应用生态学报*, 1993, 4(3): 250-255.  
PEI T F, FAN S X, HAN S W, et al. Simulation experiment analysis on rainfall distribution process in forest canopy [J]. *Chinese J Appl Ecol*, 1993, 4(3): 250-255.
- [4] ASDAK C, JARVIS P G, GARDINGER P V. Modelling rainfall interception in unlogged and logged forest areas of central Kalimantan, Indonesia [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1998, 2(2-3): 211-220.
- [5] RAMREZ J A, SENARATH S U S. A statistical-dynamical parameterization of interception and land surface atmosphere interactions [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13: 4 050-4 063.
- [6] PEI T F, CHI Z W, FAN S X, et al. An experimental system of forest hydrology modeling laboratory [J]. *ITE Symposium*, 1988, 20: 178-186.
- [7] 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): 2-5.  
LIU J G, WAN G L, ZHANG X P, et al. Semi-theoretical model of rainfall interception of forest canopy [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(2): 2-5.
- [8] 刘家冈. 林冠对降雨的截留过程 [J]. *北京林业大学学报*, 1987, 9(2): 140-144.  
LIU J G. Intercepted process of rainfall in forest canopy [J]. *Journal Beijing Forestry University*, 1987, 9(2): 140-144.
- [9] LIU J G. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy [J]. *Ecological Modelling*, 1988, 42: 111-123.