

林内穿透雨量模型研究

范世香, 蒋德明, 阿拉木萨, 李雪华, 刘志民

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要: 穿透雨量是林内有效雨量的主要组成部分, 其量能占 90% 以上。由于林冠空间分布的不均匀性, 难以对林内穿透雨量进行精确地测量。从林冠截留降雨的作用机理出发, 在做出几个假设的基础上, 用数学方法建立了林内穿透雨量模型, 即:

当 $P < U$ 时, $R = P - \alpha W [1 - (1 - P/U)^{b+1}]$ ($b > 0, U > 0$)

当 $P \geq U$ 时, $R = P - W$

其中 $U = W(b+1)$,

式中 b, W, U 为模型参数, R 为林内穿透雨量, P 为大气降雨量, α 为林分郁闭度。结合两个有实测资料的针叶树林分, 又进一步介绍了模型参数的确定方法。同时将模型的计算结果与实测数据进行了对比, 两者吻合性很好, 验证效果是比较理想的。模型概念清晰, 参数物理意义明确。在风速和雨强不太大的情况下, 本模型适用于任何林分的穿透雨量的计算。然而, 为了应用于无实测资料地区, 尚须进一步研究模型参数与林分特征的关系。

关键词: 林冠; 截留; 穿透雨量; 模型

Studies on throughfall model in forest area

FAN Shi-Xiang, JIANG De-Ming, Alamusa, LI Xue-Hua, LIU Zhi-Min (Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China), *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7): 1403~1407.

Abstract: Throughfall is an important part of effective rainfall in forest area. It accounts for more than 90% in quantity. The accurate measurements of throughfall is very difficult and also impossible because forest canopy is not well-distributed. This paper was based on some assumptions, a throughfall model in forest area was developed by mathematical way in terms of canopy interception mechanism. That is:

If $P < U$, then $R = P - \alpha W [1 - (1 - P/U)^{b+1}]$ ($b > 0, U > 0, W > 0$)

If $P \geq U$, then $R = P - W$

Where

$U = W(b+1)$. U, W and b are model parameter. α is forest canopy density. R is throughfall. P is rainfall.

Further more, three parameters (U, W and b) of the model were determined according to the observation data of two coniferous tree stands. Comparison between calculation results and observation results shows that the model is perfect. The physical meanings of model parameters are clear and definite. The conceptions of model is reliable and correct. When wind speed and rain density are not very high, this

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49871019)

收稿日期: 2002-06-14; **修订日期:** 2002-10-26

作者简介: 范世香(1958~), 男, 山东省商河县人, 副研究员, 主要从事生态水文学研究。

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 49871019)

Received date: 2002-06-14; **Accepted date:** 2002-10-29

Biography: FAN Shi-Xiang, Associate professor, main research field: ecohydrology.

model would be suitable for calculation of throughfall in forest area everywhere in order to avoid trouble of actual observation. However, it is necessary that some relationships between model parameters and canopy characteristics would be studied for further application.

Key words: forest canopy; interception; throughfall; model

文章编号:1000-0933(2003)07-1403-05 中图分类号:S715.2;P332.1 文献标识码:A

在森林地区,林内有效雨量包括穿透雨量及树干径流量,它是指大气降雨受到林冠层截留作用后的林内实际雨量(简称林内雨量),有时也称为林内地面净雨量。只有这种林内有效雨量才能参与径流的形成,并直接影响着林地土壤水分消长变化。然而,从数量上看,穿透雨量占林内雨量的90%以上,而树干径流量占林内雨量一般不足10%^[1,2],所以本文将着重讨论研究林内穿透雨量的建模问题。由于树冠一般呈伞状形、植株密度不均、树木形态各异以及树种枝叶的不同,所以在一般情况下,林冠层枝叶空间分布非常不均匀,尤其在天然林中这种情况更为明显,因此林内穿透雨量各处差别较大。在实际工作中,往往需要对穿透雨量进行观测,但是到目前为止还没有较理想的测量方法。一般情况下,在观测林内穿透雨量时,通常采用多点法。传统的方法是在林内设置若干个标准雨量筒^[1~3],也有采用若干个集水槽或者集水池的方法^[4,5]。不言而喻,无论采用何种方法,如果测点设置越多,承雨面积越大(或者说控制面积越大),那么实测的林内穿透雨量精度就越高,也就越真实可靠。因而,也就必然增加观测的工作量。因此,从林冠截留降雨的机理入手,探索林内穿透雨量的计算方法,不仅具有重要的理论意义,而且还具有重要的实际意义。只要针对不同林分选取合适的参数,通过模型计算,就可以根据大气降雨量直接获得林内穿透雨量,避免观测的麻烦。

1 模型建立

如前所述,林冠枝叶的空间分布是很不均匀的,有密有疏,甚至还不同程度地存在着林窗或林中空地。一般而言,林冠最厚密处位于树干附近,树冠边缘相对比较稀薄。林分冠层的厚薄与疏密表明了枝叶量的多少,它直接决定着对降雨截留作用的大小。因此,冠层越厚密截留量越大,冠层越稀薄截留量越小。林冠层和土壤包气带极为相似,这样林内穿透雨量的形成过程可以借鉴水文预报中的“蓄满产流”^[6]模型的概念,并由此得到启发:林内穿透雨量相当于产生径流,林冠截留量相当于土壤蓄水量。为此,当发生降雨时做如下几点假设:

- (1) 冠层各处的饱和截留量与该处的冠层厚度成正比;
- (2) 降雨时先满足林冠截留,然后再产生林内穿透雨(即冠层各处首先满足本身的饱和截留量)
- (3) 随着降雨量的增加,冠层截留的饱和面积由稀薄处向厚密处递增;
- (4) 冠层特征变化不大。

根据以上假设,由于林冠各处厚薄不同,所以当发生降雨时林冠各处达到饱和的先后也不同。因此,当雨量较小时,林冠的饱和面积也较小,随着降雨量的增加,林冠的饱和面积也随之增加,直至整个林分全部达到饱和。就是说,当冠层最厚密处也达到饱和时,则表明整个林分全部饱和。

首先考虑完全郁闭的林分,设冠层任意处的饱和截留量为 I ,林分面积为 A ,与 I 相对应的冠层饱和面积为 a ,则冠层的相对饱和面积为 a/A ,冠层最厚密处的饱和截留量为 U 。很显然,冠层各处的饱和截留量 I 应满足关系: $0 \leq I \leq U$,而且在饱和面积 a/A 上,林冠截留量均 $\leq I$ 。除此之外,相对饱和面积 a/A 与饱和截留量 I 之间应存在一种关系,并且这种关系要满足以下3个条件:

- (1) 当 $I=0$ 时, $a/A=0$;
- (2) 当 $I=U$ 时, $a/A=1$;
- (3) 随着 I 的增加, a/A 也增加。

为此,林冠任意处的饱和截留量与其对应的相对饱和面积关系采用如下函数形式,能够满足以上3个条件:

万方数据

$$\frac{a}{A} = 1 - \left(I - \frac{I}{U} \right)^b \quad (b > 0, U > 0) \tag{1}$$

式中, b 是与林分特征有关的综合参数, 反映林分枝叶厚薄均匀程度, 并且与林分种类、林龄有关。

对任意一次小于 U 的降雨, 设雨量为 P , 林内穿透雨量为 R , 则对(1)式进行积分就可获得林内穿透雨量, 即:

$$R = \int_0^P \left(\frac{a}{A} \right) dI = \int_0^P \left[1 - \left(1 - \frac{I}{U} \right)^b \right] dI = P - \frac{U}{b+1} \left[1 - \left(1 - \frac{P}{U} \right)^{b+1} \right] \quad (b > 0, P < U) \quad (2)$$

令:

$$\frac{U}{b+1} = W \quad (3)$$

则:

$$R = P - W \left[1 - \left(1 - \frac{P}{U} \right)^{b+1} \right] \quad (b > 0, U > 0) \quad (4)$$

当大气降雨量 $P \geq U$ 时, 则:

$$R = P - W \quad (5)$$

从上式(5)可以看出, W 实际上就是整个林冠完全达到饱和时的最大截留量。公式(4)与(5)就是当林分完全郁闭时(即 $\alpha=1$)林内穿透雨量模型。

当林分不完全郁闭时, 应考虑其影响。设郁闭度为 α (以小数计), 在不郁闭面积 $(1-\alpha)$ 上, 林内穿透雨量就等于大气降雨量。在郁闭面积上, 林内穿透雨量用(4)式乘以 α 即可。两者相加即可获得林分郁闭度为 α 的林内穿透雨量模型, 即:

$$R = (1 - \alpha)P + \alpha \left(P - W \left[1 - \left(1 - \frac{P}{U} \right)^{b+1} \right] \right) = P - \alpha W \left[1 - \left(1 - \frac{P}{U} \right)^{b+1} \right] \quad (6)$$

当 $P \geq U$ 时, 林内穿透雨量仍然由(5)式获得。公式(5)、(6)分别为降雨量大于 U 和小于 U 时的林内穿透雨量模型。

2 参数确定与模型验证

公式(5)、(6)是对任意一种林分而建立的林内穿透雨量模型的一般形式。公式(3)是 3 个参数之间的相互关系, 只要确定了其中任意两个, 便可获得另一个。现举两例针叶树的林冠截留资料介绍模型参数的确定方法, 同时对模型进行了计算和对比验证。

2.1 杉木林

杉木林位于湖南省会同县广坪乡深冲林场, 东经 $109^{\circ}45'$, 北纬 $26^{\circ}50'$, 海拔高度 320 m, 年均降雨量 1300mm 左右。该林分林龄为 22 年生的人工纯林, 平均树高为 12.8m, 平均胸径为 14.1cm, 立木密度为 2276 株/hm², 郁闭度为 0.8^[5]。

根据文献(5)表 1 中的数据点绘出大气降雨量与林冠截留量的相关图(见图 1), 由图 1 可以发现, 当大气降雨量大约为 45mm 时, 林冠截留量基本上达到最大值并趋于稳定, 它不再随降雨量的增加而增加, 这说明当大气降雨量为 45mm 时, 林冠枝叶最厚密处也已经达到饱和状态, 表明整个冠层全部达到饱和, 也就是说在该值时冠层相对饱和面积为 1。这时的降雨量就应为林冠最厚密处的饱和截留量 U 值, 此时所对应的截留量为整个林冠层完全饱和时的 W 值。由图可见, $W=4.8$ mm。这样就可以再由公式(3)计算得出参数 b 值, 为 8.4。因此, 再根据林分的郁闭度 $\alpha=0.8$, 就可以直接获得杉木林内穿透雨量模型, 即:

当 $P \leq 45$ mm 时:

万方数据 $0.8 \times 4.8 \left[1 - \left(1 - \frac{P}{45} \right)^{8.4+1} \right] = P - 3.84 \left[1 - \left(1 - \frac{P}{45} \right)^{9.4} \right] \quad (7)$

当 $P > 45$ mm 时:

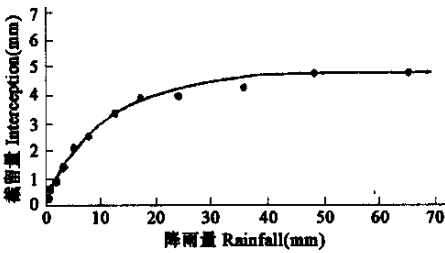


图 1 实测杉木林林冠截留量与降雨量的关系

Fig. 1 Relationship between actual interception and rainfall for Chinese fir canopy

$$R = P - 4.8$$

(8)

根据文献(5)中的林内穿透雨量与大气降雨量数据绘出两者的相关关系,然后再利用公式(7)和(8)计算出两者的函数关系曲线(见图 2),由图 2 的对比结果可以看出两者非常吻合。

2.2 樟子松林

樟子松林位于内蒙古自治区翁牛特旗那什罕乡(苏木)乌兰敖都嘎查(村),东经 119°39',北纬 43°02'。海拔高度为 479 m,年均降水量 340 mm。该林分林龄为 14 年生的纯人工林,平均树高为 6.0m,平均胸径为 11.5cm,造林密度为 4440 株/hm²,株行距为 1.5 m×1.5 m,保存率为 80%,郁闭度为 0.9^[7]。

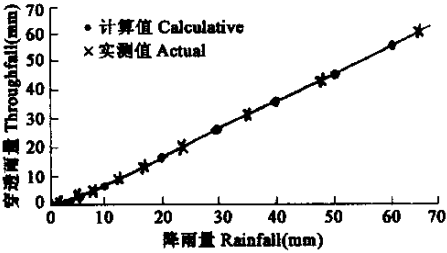


图 2 杉木林林内穿透雨量实测结果与计算结果的比较
Fig. 2 Comparison between actual values and calculation values of throughfall for Chinese fir stand

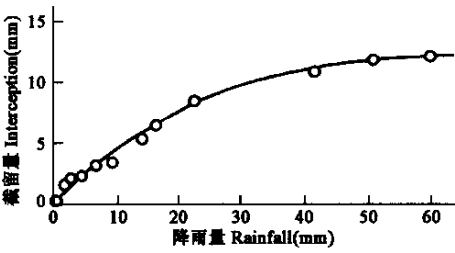


图 3 实测樟子松林林冠截留量与降雨量的关系
Fig. 3 Relationship between actual interception and rainfall for camphorwood canopy

根据文献(7)表 2 中的数据,采用上述杉木林例子中相同的方法,可以获得模型中的各项参数分别为: $U=50\text{mm}$, $W=12\text{mm}$,如图 3 所示。根据公式(3)计算,得出 $b=3.2$ 。再由林分的郁闭度 $\alpha=0.9$,得到樟子松林的林内穿透雨量模型为:

当 $P \leq 50\text{mm}$ 时:

$$R = P - 10.8[1 - (1 - P/50)^{4.2}]$$

(9)

当 $P > 50\text{mm}$ 时:

$$R = P - 12$$

(10)

公式(9)、(10)就是樟子松林的林内穿透雨量模型。与杉木林的例子相同,绘出林内穿透雨量与大气降雨量实测数据的相关关系,再利用公式(9)、(10)计算出两者的函数关系曲线(见图 4)进行对比,也同样能够看到实测点据与模型计算结果比较一致,而且非常接近。

3 讨论

该模型是根据水文预报中“蓄满产流”模型的概念而建立的,建模过程比较简单。从上述两例实测资料与模型计算结果的吻合程度来看,说明模型在推求过程中所做的假设是合理的,参数的确定方法也是可靠的。同时,也表明该模型基本上揭示了林冠截留降雨作用的水文效应和实质,符合其基本规律。本模型是基于场降雨而建立的,即可以应用于场降雨过程的林内穿透雨量的模拟计算。如果结合蒸发资料,也可以对林内穿透雨量进行实时连续计算。另外,从模型的建立过程可以看出,它适用的范围较广,不受林型、林龄、地域等因素的影响。因此,可以适用于任何植被类型冠层下穿透雨量的计算问题。

本模型为野外数据,不仅从机理上揭示了大气降雨量与林内穿透雨量的关系,而且模拟效果也较为理想;其次,模型概念清楚,参数的物理意义明确。另外,林分的郁闭度是反映林分特征的一个非常重要的指

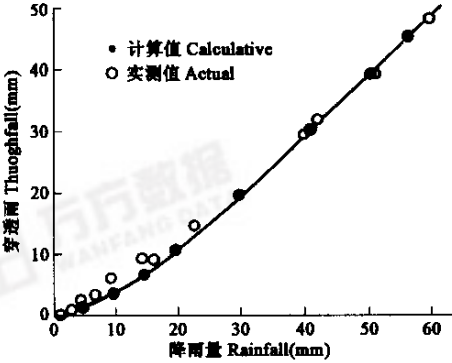


图 4 樟子松林林内穿透雨量实测与计算结果的比较
Fig. 4 Comparison between actual values and calculation values of throughfall for camphorwood stand

标,已经单独将其考虑到模型之中。

模型的主要不足是:除了郁闭度 α 外,模型的另一两个参数 U 和 W (或 b)还是无法根据林分特征直接确定,目前只能利用实测林冠截留资料采取做相关图的方法分析求出。毋庸置疑,它们与林分枝叶面积的多少、空间分布状况、树种、树龄及林相组成等有关。所以,本模型目前还不能直接应用于无实测林冠截留资料的林分。另外,该模型是在理想化的气象条件下建立的,没有考虑风速、雨强等气象因子对穿透雨量的影响。所以,它适用于风速和雨强都相对较小的降雨过程。这是因为在相同的雨量下,伴随着大风或者高强度的降雨往往会削弱林冠的截留能力,增加林内穿透雨量。因此,本模型除了再进一步研究模型参数与林冠特征的关系以外,还尚需考虑风速、雨强等气象因子的影响,所以该模型有待于做深入的探讨以期臻臻完善。

References:

- [1] Nakano H, ed. 1976. Li Y S Trans. *Forest Hydrology*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1983. 58~63.
- [2] Ma X H, ed. *Forest Hydrology*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1993. 80~81.
- [3] Zhao S D, ed. *The Technical Specification on Fixed Studies of Forest Ecosystem*. Beijing: Science Press, 1995. 155~156.
- [4] Zhou X F ed. *Chinese Forest and Ecological Environment*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1999. 87~90.
- [5] Pan W C, Tian D L. Hydrological Process and Nutrient Dynamics of a Subtropical Chinese Fir Plantation Ecosystem. *J. Central South Forestry College*, 1989, **9**(supp.): 1~9.
- [6] Rui X F, ed. *Principle of Runoff Formation*. Nanjing: Hohai University Press, 1991. 83~90.
- [7] Kong F Z, Song B. Mathematical Model on the Relationship between Rainfall and Interception of Forest Canopy. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1990, **1**(3): 201~208.

参考文献:

- [1] 中野秀章(日)著. 李云森译. 森林水文学. 北京:中国林业出版社, 1983. 58~63.
- [2] 马雪华主编. 森林水文学. 北京:中国林业出版社, 1993. 80~81
- [3] 赵士洞主编. 森林生态系统定位研究技术规范. 北京:科学出版社, 1995. 155~156
- [4] 周晓峰主编. 中国森林与生态环境. 北京:中国林业出版社, 1999. 87~90.
- [5] 潘维伟, 田大伦. 亚热带杉木人工林生态系统中的水文学过程和养分动态. 中南林学院学报, 1989, **9**(增刊): 1~9.
- [6] 芮孝芳著. 径流形成原理. 南京:河海大学出版社, 1991. 83~90.
- [7] 孔繁智, 宋波. 林冠截留与大气降水关系的数学模型, 应用生态学报, 1990, **1**(3): 201~208.