

林冠截留降雨研究综述^{*}

王爱娟, 章文波

(北京师范大学 地理与遥感科学学院, 北京 100875)

摘 要: 林冠截留降水是植被对降水到达地面的第一次阻截, 也是对降雨的第一次再分配, 减少了林地的有效降雨量, 是水文循环过程的重要环节。从林冠截留量及影响因素、林冠截留模型和与之相关的林冠覆盖度、叶面积指数的确定方法等方面论述了目前国内外的研究现状, 分析当前植被截留研究的发展趋势。

关键词: 林冠截留; 气象模型; 解析模型; 林冠覆盖度; 叶面积指数

中图分类号: S714. 7; S715. 2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2009) 04-0005-05

Reviews of Vegetation Interception of Rainfall

WANG A₂juan, ZHANG Wen₂bo

(School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Rainfall interception by vegetation is the first loss and the first redistribution of rainfall. It reduces the rainfall effectively and so is one of the important processes of water cycling. Current knowledge concerning the influencing factors to interception, models for prediction the interception which had been sorted as empirical models, stochastic models and physical models, and methods for estimating vegetation coverage and leaf area index were reviewed in this paper. Further research for vegetation interception is also discussed in this paper.

Key words: rainfall interception; meteorological model; analytical model; vegetation coverage; leaf area index

林冠截留是雨水在植物叶面吸着力、承托力、重力和水分子内聚力作用下的叶面水分储存现象^[1]。降雨初期, 雨滴降落在植物枝叶上被枝叶表面截留。在降雨过程中截留不断增加, 直至达到最大截留量。植物枝叶截留的水分, 当水滴重量超过表面张力时, 便落至地面。截留过程延续整个降雨过程, 雨止后截留水量最终耗于蒸发^[2]。林冠截留作为水文循环的一个重要环节, 影响地表- 大气能量循环过程和水量平衡^[3]。林冠截留是一个重要的水文过程, 改变了流域输入输出水的数量、时间和空间分布, 进而对流域土壤侵蚀产生影响。它一方面减少了到达地面的实际雨量, 从而减轻侵蚀; 另一方面减弱了雨滴的溅蚀和雨滴对坡面薄层水流的扰动, 而这种扰动是坡面径流侵蚀的重要动力, 人工模拟降雨表明, 当覆盖度达到 50% 时的溅蚀率与裸地相比, 可减少 70% 以上。林冠截留是评价森林保持水土效益的关键指标之一, 随着分布式流域水文模型及土壤侵蚀模型的发展, 林冠截留量计算受到越来越多的重视。

1 林冠截留量及其影响因素

林冠截留研究已经有 100 多年的历史^[4], 国内外许多学者对林冠截留降水做了大量研究, 获取了大量有关林冠截留量和截留率的实测数据。据研究, 在茂密的森林中, 林冠对次降雨的截留量可达 10~ 20 mm, 而林冠层的年截留量与年降雨量以及年内降雨的次数有关, 其量可以达到年降水量的 15%~ 45%^[56]。美国的森林植被截留研究显示, 森林的截留量占到年降雨量的 10%~ 35%^[7]。由于植被种类、密度、结构和气象条件的不同, 截留量存在很大差异。一些地方的植被截留量可能占到降雨量的 50%^[8]。研究表明: 林冠截留降雨是一个复杂的过程, 截留雨量受到植物本身特性和气象因素的影响^[12]。

(1) 植物本身的特性, 如树种、树龄、林冠厚度、茂密度等。对不同的树种, 枝叶的茂密度是不同的。

^{*} 收稿日期: 2008-12-11
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD09B05)
作者简介: 王爱娟(1981-), 女, 宁夏人, 在读博士生, 研究方向: 土壤侵蚀。E2mail: wang2a2juan@163.com

茂密度大的植物截留量也大。林冠的截留量随着叶面积指数的增大而增加^[9,10]。对于一个流域而言,还有植被的分布和林冠覆盖度。对同一树种,茂密度与树龄有关。树木自幼年至壮年的生长过程中,枝叶越来越密。而由壮年至老年期又出现自然的稀疏过程,有的观测结果表明,树龄在 30~ 40 a 的植物,林冠截留量最大^[12]。

(2) 气象、气候因素,如降雨量、降雨强度、雨滴直径、气温、风和前期枝叶湿度等。降雨量及降雨强度对林冠截留也有显著影响。降雨初期,雨水全部截留于枝叶表面,截留量与降雨强度无关。对于给定的稳定降雨强度,有一个与之对应的最大稳定截留量。随着降雨强度的增加,截留量增加,最后趋于一个常数,即林冠最大截留量。对一次降雨而言,截留量随降雨量呈非直线关系增加^[11]。当有蒸发存在时,截留量随降雨量变化是一种非饱和的缓慢上升关系^[12]。林冠截留量具有随雨滴直径减小而增大的特性。风也是影响林冠截留的重要因素。但风的影响产生两种截然不同的效果,因风吹摇动枝叶减少截留量和风吹增加蒸发量而增加了截留量。截留量的增加或者减小要按不同情况具体分析。

2 林冠截留模型

林冠截留降雨受到多种因素的影响和制约,给建模带来极大的不便。总结国内外林冠截留模型的发展过程和已有的模型,可以将其分为 3 种。

2.1 经验性的统计模型

大多数林冠截留模型属于统计模型,不考虑生物因素和气候条件与截留的关系,只根据次降雨量和次截留量的数量关系,建立线性或非线性统计模型^[13]。温远光等对国内截留统计模型做了汇总^[14]。由于缺乏林冠特征和截留机制约束,雨量较大时线性模型的误差很大,非线性模型的精度高于线性模型,因截留过程本身是非线性过程^[15]。

经验性的统计模型是通过回归分析截留量与降雨量的关系得到的回归方程,它具有一定的适用性,其优点是不需要复杂的理论推导和数学计算,形式简单。但是模型参数有很大的局限性,对于林冠结构和气候特征相似的林冠系统才可以移用,不能外延实验,不易推广。林冠统计模型的主要形式为

$$I = aP^b + c$$

式中: I))) 截留量; P))) 降雨量; a, b, c))) 参数,通过实验获得。

2.2 概念模型

许多学者认为林冠截留由林冠吸附水量和附加

截留量两部分组成,其中,林冠吸附水量即为林冠表面湿润所需的水量,它与冠层表面积和叶表面的持水能力成正比,也就是说叶面积越大,叶面持水能力越强,林冠吸附量越大;附加林冠截留量指的是在降雨过程中林冠的蒸发量,它与叶面积大小和当地的气候条件、降雨历时等有关。当空气比较干燥,风速比较大,温度较高,蒸发比较旺盛时,附加截留量较大^[13,19]。概念模型的基本形式是理论的,其中一些参数是经验性的,虽然没有完全摆脱经验模型的缺陷但是模型具有较强的实用性。

Horton(1919) 首先根据林冠截留量由林冠最大截留量和降雨期间的蒸发量两部分组成为基础,把林冠吸附水量简化为常数,建立了一个林冠截留模型,该模型只适用于一场暴雨的情况,而且降雨量大于林冠截留量与蒸发量之和^[13]。

$$I_c = I_{cm}^* + e r T \tag{1}$$

Merrian(1960) 建议将最大林冠截留量表示为累积降雨的指数函数^[16]。

$$I_c = I_{cm}^* [1 - \exp(-\frac{P}{I_{cm}^*})] + e r T \tag{2}$$

Merriam 模型是在林分郁闭的森林系统建立起来的,Aston 对该模型进行了修正和补充,用于林分不郁闭的情况得到下(3)^[17]。

$$I_c = I_{cm}^* [1 - \exp(-(1 - c)\frac{P}{I_{cm}^*})] + e r T \tag{3}$$

式中: I_c))) 一次降雨事件中林冠截留 (mm); I_{cm}^*))) 降雨停止时树体保持的水量(用林冠投影面积上的水层厚度表示 (mm); 亦即林冠吸附降雨容量; P))) 降雨量 (mm); e))) 湿润树体表面的蒸发强度 (mm/h); r))) 叶面积指数; T))) 降雨历时 (h); c))) 降雨拦截系数,近似等于 $(1 \sim 0.046r)$; I_{cm}^*))) 自由渗透系数。

基于次降雨建立的概念性指数模型由于具有一定的物理基础且参数通过常规观测资料即可确定,在流域水文模型中被广泛采用。

2.3 物理模型

根据机理和理想化条件并运用数学物理方法或系统方法建立的理论性模型,描述林冠截留要素随时间的变化过程^[20,26]。物理模型反映了截留在时间和空间上的动态变化过程,推理过程严谨,不受地区限制可以推广应用。但是模型所需参数较多,求解困难,给实际应用带来困难,目前用的较多的有气象模型和解析模型。

2.3.1 气象模型 经验的统计模型没有考虑雨强、降雨持续时间和降雨期间的间隔,另外,这些模型是

经验性的只能推广应用到与模型建立林分有相似植被类型和气候的林分,模型的适用性受到一定限制。考虑湿润植被的动态水量平衡, Rutter^[20] 在 1971 年建立了基于小时降雨和气象数据的次降雨截留模型,并用经验关系计算了植被的耗水,这是第一个基于物理机制的截留模型,结构如式(4)。

$$I_c = E E ? \$ C \tag{4}$$

$$E = E_p (C / S), C [S \tag{5}$$

$$E = E_p, C > S \tag{6}$$

式中: I_c))) 截留量; C))) 林冠蓄水量; S))) 使树体表面湿润的最小林冠需水量; E))) 林冠蒸发量; E_p))) Penman- Monteith 公式计算出的可能蒸发量; C_T, C_0))) t 时刻和 t_0 时刻的林冠蓄水量。

2.3.2 解析模型 Rutter 模型的缺点是对数据要求很高。Gash 建立了一个林冠截留的解析模型力图对其进行改进^[23]。Gash 模型沿用 Rutter 模型的物理机制但也保留了部分经验方法,把林冠截留降雨进一步区分为林冠吸附量、树干吸附量和蒸发引起的附加截留量,并按降雨量能否使林冠和树干持水容量达到饱和将降雨分类,通过各个分项求和后计算总的树冠截留量,所以该模型称为林冠截留解析模型。Gash 模型得到广泛应用,包括针叶林和阔叶林,许多研究都力求确定该模型中的参数。由于该模型是在林分郁闭的情况下建立的,并且认为植被截留蒸发与植被截留量没有关系,对于林分不郁闭的情况就会过高估计林冠截留量,所以 Gash 通过改进边界条件,改进稀疏森林的蒸发计算对其进行了进一步的修正^[27]。修正后的 Gash 模型引入了林冠覆盖度这一参数,并且认为林冠截留量和截留蒸发量都与林冠覆盖度成线性关系,不再是计算单位面积陆地的蒸发量而是单位面积植被的蒸发量,用 Penman- Monteith 公式计算。修正的 Gash 模型被成功应用于计算不同的植被类型的截留量,包括树茎间套种农作物的农林系统^[2831]。

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = ncP_{\infty} + (c\overline{E_c}/R) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P_{\infty}) + \sum_{j=1}^m c\overline{E_j} P_{Gj} + qS_c + p_1 \sum_{j=1}^n \overline{E_j} P_{Gj} \tag{7}$$

$$P_{\infty} = (-RS_c/\overline{E_c}) \ln[1 - (\overline{E_c}/R)] \tag{8}$$

式中: I_j))) 截留量; S))) 最大截留量; $S_c = S/c$ 是单位覆盖面积的截留量, R))) 平均雨强; P_1))) 截留系数; P_{Gj}))) 林冠达到饱和时的雨量; P_{Gj}))) 第 j 场的降雨总雨量; n, m, q))) 降雨次数; j))) 序号; c))) 面积; $\overline{E_c}$))) 饱和林冠的平均蒸发速率,用 Penman- Monteith 公式计算。

此外, Liu 从冠层的水量平衡出发,研究树冠表面的干燥度,蒸发强度和降雨截留 3 者关系,建立模型计算林冠截留随时间的变化。该模型中没有经验参数,截留量,干燥度指数,植被密度和蒸发速率等参数都具有明确的物理意义,且可以以小时、日或者次降雨为步长进行模拟^[26]。

3 林冠截留关键参数的测量方法

总结林冠截留的影响因素和计算模型发现,除了气象因素外,林冠覆盖度和叶面积指数是确定林冠截留量的关键因素,这两个因素的准确度直接影响着林冠截留量的精度。

植被覆盖度定义为观测区域内植被垂直投影面积占研究统计区总面积的百分比^[3234]。林冠覆盖度则是指乔、灌木的植被覆盖度。林冠覆盖度测算的方法总结起来有简单目测估算、概率计算法、仪器测量法和遥感解译分析等^[33]。

目估测算法采用肉眼并凭借经验直接判别来估计植被覆盖度^[34]。如对角线测量法,即在样地内量取对角线上植被的高度、盖度,按算术平均计算出样地的乔灌木盖度^[41]。目估法简单易行,我国过去许多历时资料中的植被覆盖度均是用该方法获得的。但是目测估算主观随意性大,目估精度与测量人的经验关系密切。概率计算法如样带长度测算法,在研究区内选定两个垂直交叉的矩形样带,将植株接触样带的长度占样带总长的百分比作为样带所在区域的植被盖度。仪器测量法如美国 Decagon 公司研制开发了植被覆盖度分析仪专门用于冠层覆盖度研究^[33]。

遥感测量法即利用遥感技术提取研究区的植被光谱信息,再将其与植被覆盖度建立相关关系,进而获得植被覆盖度的方法。由于遥感影像能够提供反映不同空间尺度上的植被覆盖信息及其变化趋势,快捷方便,已经成为估算区域植被覆盖度的主要技术手段。目前,植被覆盖度遥感测量的分类方法很多,依据对植被光谱信息与植被覆盖度所建立的关系不同,遥感测量法可大致分为统计模型法和物理模型法。文献^[33, 35]中已做了详细的叙述,在此不再赘叙。

叶面指数(leaf area index, LAI)是影响林冠截留量的重要参数。最初 Watson 将其定义为单位土地面积上植被叶片单面面积总和,是一个无量纲量。该定义对于阔叶林是适用的,因为叶面两边的面积相等,而对于针叶林和其它树种叶子为卷曲或褶皱的,该定义不能解释单面面积。之后其他学者又将其定义为单位土地面积上叶子的投影面积(Smith),单位土地面积上叶子的最大投影面积(Myneni)以

及单位土地面积上叶子总截留面积的一半(Chen)。这些定义的不同依赖于测量叶面积指数方法的不同。目前,叶面积指数被定义为单位土地面积上叶子总面积的一半(Fassnacht)^[36]。叶面积指数是一个动态的参数,随着生长期的变化而变化,总结叶面积指数的确定方法主要有叶面积法、称重法和仪器法^[36,37]。叶面积法是直接测量叶面面积,称重法是采样称量干叶子的重量,根据其与绿叶叶面积的关系得到叶面积指数,这两种方法耗时耗力,测量速度太慢,很难推广应用。仪器法包括冠层分析仪和遥感法,仪器法测量速度快,精度高,容易推广应用。目前遥感法作为仪器法的一种,利用红光和近红外两个波段的反射率所组成的光谱植被指数来估计叶面指数被广泛应用^[38,40]。

4 讨论

随着分布式水文模型的快速发展,对于水文循环各个环节的精确模拟要求较高,林冠截留量的计算作为影响流域水量平衡的重要因素受到越来越多的重视。基于物理机制的林冠截留模型是目前以及今后研究建立和推广应用的重点。今后的研究不仅是森林植被和灌木截留雨量,林下植被及其残余覆盖由于形态、种类和质量等不确定因素较多,截留量难以确定,研究和建立截留模型是一个难点。对于草本层、农作物及其残余物覆盖对于降雨的截留也将受到重视,有研究表明农作物截留占到总降雨量的22%~58%,而作物残余物截留占到降雨量的29%。植被覆盖度和叶面积指数作为植被截留的重要影响因素,其传统的测量方法已不能满足时空尺度和精度的需要,遥感法作为植被覆盖度测量的主要方法将成为今后研究的热点,高光谱分辨率和高空间分辨率的遥感数据,提高模型及反演结果的精度将是今后研究的一个重点。

参考文献:

[1] 于维忠. 水文学原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.

[2] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

[3] N. Zeng J W, Shuttlesworth J H C. Gash. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part I. Point analysis[J]. Journal of Hydrology 2000, 228: 228-241.

[4] Hoppe E. Precipitation measurements under tree crowns [M]. Krappe A H. Division of Silvics., U. S. Forest Serv., Trans., 1896: 50.

[5] 范世香, 高雁, 程银才, 等. 林冠对降雨截留能力的研究[J]. 地理科学, 2007 27(2): 200-204.

[6] Jackson I J. Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest[J]. Journal of Hydrology, 1975, 24: 215-238.

[7] Zinke. Forest interception studies in the United States [M]// Sopper W E, Lull H W. International symposium on Forest Hydrology. Oxford: Pergamon Press, 1967: 132-161.

[8] Calder I R. Evaporation in the Uplands[M]. Chichester UD: John Wiley and Sons LTD, 1990: 148.

[9] Gomez J A, Giraldez J V, Fereres E. Rainfall interception by olive trees in relation to leaf area[J]. Agricultural Water Management, 2001, 49: 65-76.

[10] Park H, Hattori S, Kang H O. Seasonal and inter-plot variations of stemflow, throughfall, and interception loss in two deciduous broadleaved forests [J]. Journal of the Japan Society of Hydrology Water Resources, 2000, 13: 172-30.

[11] 杨立文, 李昌哲, 张理宏. 林冠对降雨截留过程的研究[J]. 河北林学院学报, 1995, 10(1): 72-12.

[12] 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, 1999, 1(3): 202-208.

[13] Horton R E. Rainfall interception [J]. Monthly Weather Rev, 1919, 47: 603-623.

[14] 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.

[15] 王彦辉, 于澎涛, 徐德应, 等. 林冠截留降雨模型转化和参数规律的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 252-30.

[16] Aston A R. Rainfall interception by eight small trees [J]. J. Hydrol., 1979, 42: 383-396.

[17] Merriam R A. A note on interception loss equation [J]. Journal of Geophysical Research, 1960, 65: 3850-3851.

[18] Massman W J, Water storage on forest foliage: a general model [J]. Water Resour. Res., 1980, 16: 2102-216.

[19] Calder L R. A stochastic model of rainfall interception [J]. J. Hydrol., 1986, 89: 652-71.

[20] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, et al. A predictive model of rainfall interception in forests. 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine [J]. Agric. Meteorol., 1971, 9: 367-384.

[21] Rutter A J, Morton A J. A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological varia-

bles[J]. J. Appl. Ecol., 1977, 14: 567-588.

[22] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forests [J]. Quart. J. Roy. Met. Soc., 1979, 105: 435-55.

[23] Massman W J. The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forests [J]. Agric. Meteorol., 1983, 28: 262-286.

[24] Mulder J P M. Simulating interception loss using standard meteorological data [M] // Huchison B A, Hicks B B. The Forest-Atmosphere Interaction, Reidel: Dordrecht, 1985: 177-196.

[25] Liu J A. theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy [J]. Ecol. Model, 1988, 42: 111-123.

[26] Liu S G. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies [J]. Ecological Modelling, 1997, 99: 151-159.

[27] Gash J H C, Lloyd C R, Lachaud G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model [J]. Journal of Hydrology, 1995, 170: 72-86.

[28] Valente F, David J S, Gash J H C. Modeling 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: 141-162.

[29] Carlyle-Moses D E, Price A G. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand [J]. Journal of Hydrology, 1999, 214: 103-110.

[30] Dykes A P. Rainfall interception from a lowland tropical rainforest in Brunei [J]. Journal of Hydrology, 1997, 200: 262-279.

[31] Jackson N A. Measured and modeled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya [J]. Agricultural and Forest Meteorology 2000, 100: 323-336.

[32] 胡良军, 邵明安. 论水土流失研究中的植被覆盖度量指标 [J]. 西北林学院学报, 2001, 16(1): 42-43.

[33] 秦伟, 朱清科, 张学霞, 等. 植被覆盖度及其测算方法研究进展 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(9): 163-170.

[34] 章文波, 刘宝元, 吴敬东. 小区植被覆盖度动态快速测量方法研究 [J]. 水土保持通报, 2001, 21(6): 62-63.

[35] 程红芳, 章文波, 陈锋. 植被覆盖度遥感估算方法研究进展 [J]. 国土资源遥感, 2008(1): 13-18.

[36] Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, et al. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 121: 19-35.

[37] 张青春, 刘宝元, 翟刚. 植被与水土流失研究综述 [J]. 水土保持研究, 2002, 9(4): 96-101.

[38] 张仁华, 孙晓敏, 朱治林. 叶面积指数的快速测定方法: 植被定量遥感的地面标定技术 [J]. 国土资源遥感, 1998(1): 54-60.

[39] 金仲辉, 张宏名, 王家圣. 关于光谱反射率和小麦叶面指数之间关系的研究 [J]. 北京农业大学学报, 1992, 18(2): 189-196.

[40] 顾祝军, 曾志远, 史学正, 等. 基于 ETM+ 图像的植被覆盖度遥感估算模型 [J]. 生态环境, 2008, 17(2): 771-776.

[41] 赵春玲, 李志刚, 吕海军, 等. 中德合作宁夏贺兰山封山育林育草项目区植被覆盖度监测 [J]. 宁夏农林科技, 2000(S): 214.

(上接第 54 页)

参考文献:

[1] 赵其国. 红壤物质循环及其调控 [M]. 科学出版社, 2002: 27.

[2] 5 中国农业土壤概论编委会. 中国农业土壤概论 [M]. 北京: 农业出版社, 1982.

[3] 赵其国. 我国红壤的退化问题 [J]. 土壤, 1995, 27(6): 281-286.

[4] 史德明, 周伏健, 徐朋. 我国南方土壤侵蚀动态与水土保持发展趋势 [J]. 福建水土保持, 1993(3): 213.

[5] 刘青泉, 陈力, 李家春. 坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析 [J]. 应用数学和力学, 2001, 22(5): 449-457.

[6] 靳长兴. 坡度在坡面侵蚀中的作用 [J]. 地理研究, 1996, 15(3): 57-63.

[7] Musgrave G W. Quantitative Evaluation of Factors in Water Erosion: A First Approximation [J]. Soil and Water Conser., 1947, 2: 133-138.

[8] Zingg A W. Degree and Length of Land Slope as It Affects Soil Loss in Runoff [J]. Agri. Engi., 1940, 21: 592-64.

[9] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度 [J]. 地理学报, 1995, 50(3): 234-239.

[10] 郑粉莉. 发生细沟侵蚀的临界坡长与坡度 [J]. 中国水土保持, 1989(8): 23-24.