

## 森林植被对降水的截留效应研究

鲍文<sup>1,2</sup>, 何丙辉<sup>2</sup>, 包维楷<sup>1</sup>, 丁德蓉<sup>2</sup>

(1. 中国科学院成都生物研究所, 成都 610041; 2. 西南农业大学资源环境学院, 重庆 北碚 400716)

**摘要:** 简单介绍了森林植被对降水截留作用, 从林冠截留、树干截留和枯落物截留概述了研究现状及部分成果。迄今对森林截留效应的研究规模多集中在小尺度, 要把一个地区的小尺度的研究成果可靠地应用于大尺度的其它地区, 还必须加强对截留过程的机理研究。

**关键词:** 植被; 林冠截留; 截留效应

**中图分类号:** S157.1; S715.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2004)01-0193-05

## Review on Rainfall Interception Researches of Forest Vegetation

BAO Wen<sup>1,2</sup>; HE Bing-hui<sup>2</sup>; BAO Wei-kai<sup>1</sup>; DING De-rong<sup>2</sup>

(1. Chengdu Institute of Biology, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Department of Resources and Environment, Southwest Agricultural University, Beibei 400716, Chongqing, China)

**Abstract:** A brief introduction to the rainfall interception of the forest vegetation is given. The present situation and some achievements of the research on the crown interception, the tree trunk interception and litter interception are summarized. In order to extrapolate confidently the results from one area to another, more researches are needed to elucidate the mechanism of interception procedure.

**Key words:** forest vegetation; canopy interception; effect of interception

世界范围内面临的一系列生态环境问题, 诸如洪涝灾害频繁发生、水土流失日趋严重、水资源危机、土地荒漠化不断扩大、生物多样性下降等都与森林植被的严重破坏密切相关。随着人类自身生存来自环境的压力的认识逐渐加深, 森林植被作为工业社会的主要材料来源之一的生态学后果的突现, 人们对森林与林业对人类生存与发展显示的重要作用产生了新的认识, 使得林业经营与发展进入更为重要的生态和社会效益的利用观。自 20 世纪 50 年代以来对森林植被的作用进行了富有成就的探索, 对于森林水文学的研究, 奥地利、瑞士、德国、美国、日本和前苏联等国家起步较早, 他们对森林植被和水之间的关系给予了很大的关注。我国关于森林水文方面的研究起步较晚, 但发展很快。近几年, 我国各流域森林水文各要素功能规律的研究取得了一定的成果(王彦辉, 1986; 董世仁等, 1987; 魏小华等, 1989; 周国逸等, 1995; 等), 森林水文学模型等研究也有所进展(沈小东等, 1995; 周国逸等, 1997)。本文对森林植被水文作用的截留效应方面做一简单介绍。

### 1 林冠截留

降雨落到植被的表面受到截留, 于是产生降雨的第一次分配。在降雨继续期间某时段时间内林冠上空的雨量即林外雨量, 从中减去林内雨量和树干茎流雨量, 剩下部分即该段降雨时间内从树体表面通过蒸发返回到大气中的雨量和降雨终止时树体表面还保留的雨量, 这部分雨量即称为该段时间内的林冠截留雨量(crown interception)(中野秀章, 1993)。林冠的截留以及截持雨量的蒸发在森林植被生态系统水文循环和水量平衡中占有极其重要的地位。第一, 林冠使雨水在向林地下落过程中, 在数量上、空间上重新进行分配, 一部分雨水被暂时容纳, 并通过蒸发返回到大气中; 第二, 林冠在这个过程中使雨水下落时所具有的动能发生重新分配, 改变和调节了降雨动能(周国逸, 1997), 从而对林地起着各方面的作用; 第三, 这个分配过程增加了雨水下落所需要的时间, 使得有很大一部分降水变成了水蒸气, 增加了林冠层的大气湿度, 而这将引起一系列的生态效应。

Prebble (1980 年)、Stokes (1982 年)、William (1996 年)

收稿日期: 2003-08-21

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KSCX1-07-01); 国家科技攻关项(2001BA606A-05-03); 中国科学院茂县山地生态系统定位研究站共同资助。

作者简介: 鲍文(1977-), 男, 安徽望江人, 硕士研究生, 主要从事森林水文、水土保持、生态恢复重建等方面的研究。

等的研究表明, 银叶铁皮树、阔叶混交林、辐射松和桉树的截留损失在 11% ~ 48.9% 之间, 最大为辐射松, 铁皮树最小, 说明不同树种的截留率差异很大; 马雪华等(1993 年)在亚热带地区研究与国外的研究结果一致, 郁闭度为 0.65 的马尾松人工林和杉木人工林平均林冠截留率分别为 10.26%、15.77%。印度的 R. P. Singh 等人(1983 年)发现, 35 年生雪松的截留损失为降水的 25.2%, 在降水量最大的 7 月份为 18.7%, 在雨量最小的 2 月份为 6.9.1%, 表明旱季的截留率大于雨季; 澳大利亚的 Schofield(1984 年)对桉树的测定表明, 截留损失占总降水的 9% ~ 16%, 而在澳大利亚的 Lidsdale 国家森林公园对桉树的研究结果是, 其林冠截留率分别为 47.75% (William, 1996), 在同一国家的不同地区林冠截留率也有很大的差异。Plamondon(1984 年)、Teklehaimanot(1991)、Hornbeck(1992)等研究发现, 热带、亚热带林冠截留率为 11.4% ~ 34.34%, 较温带及寒带树木小。在佛罗里达的低洼地区研究表明(Shuguang Liu, 1997), 当地建立林冠截留模型的参数包括林冠贮水能力、林冠干湿度、林冠郁闭度、林冠蒸散率, 则能很好的预测其截留效应。可以看出, 林冠截留损失占总降水量的 10% ~ 50%, 旱季的截留损失大于雨季, 截留量随着降雨量的增多而增加, 截留率减小, 而且林冠截留有着区域性的差异, 并且受到降水性质、林冠郁闭度、林冠干燥度等因素的影响。

国内的研究进一步说明林冠截留损失受多种因素的影响(何汉杏等, 1991; 张玲等, 2001; 赵鸿雁等, 2002; 孟广涛, 2001; 陈祥伟等, 1994; 黄承标等, 1993), 其中包括降水量、降雨强度、降雨形态、树种、林龄、林冠郁闭度诸多方面。林冠截留率随郁闭度的增加而增加, 赵鸿雁(1993 年)研究表明, 油松人工林郁闭度从 75% 增加到 85% 时, 截留量和截留率增加显著, 分别增加 5.6 mm 和 7.7 个百分点。陕西北部的富曲营林区的研究报道(吴钦孝等, 1991), 25 年生的人工油松林(郁闭度 0.7 ~ 0.8)林冠年截留量 95.2 mm, 占年降水量的 19.6%, 按照降水的形态分, 对降雨的截留量为 78 mm, 占降雨总量的 17.4%, 对降雪截留量为 17.2 mm, 占降雪总量的 45.1%; 山杨林(郁闭度 0.7)林冠年截留量 73.4 mm, 占年降水量的 14.7%, 对降雨的截留量为 71.1 mm, 占降雨总量的 15.5%, 对降雪截留量为 2.3 mm, 占降雪总量的 5.6%。北京九龙山的研究表明(刘创民等, 1994), 郁闭度为 0.8 的油松林 1986~ 1989 平均截留率是 31%, 郁闭度为 0.75 的侧柏林平均截留率是 23.69%, 并且得出林冠对降水的截留率, 与降水的特点密切联系, 降水量大截留量大, 但截持率却小, 此外, 与其它地区相比较, 油松林截持率低于海南岛山地雨林(36.5%)。

总之林冠截留量主要受降水和林木林冠 2 个因素的影响, 目前已有多个林冠截留模型(Ruffer, 1971; Curall, 1984; 王彦辉, 1986; 刘家岗, 1987; 温远光等, 1988; 崔启武等, 1980; ), 其中以 Ruller 模型和 Gash 解析模型较为完善和广泛使用。P. L. Janssens, F. Gallart 等(2000 年)在西班牙卡塔卢

尼亚对五辐针的研究认为, 影响林冠截留的一个关键因素是林冠贮水能力。很多学者在研究林冠截留时, 认为影响林冠截留的因素是降水和林冠郁闭度, 尤其在建立截留量与其影响因素的关系时。在云南牟定(张玲, 王震洪, 2001), 1998 年对黑荆、直干桉、云南松三种人工林的林冠截留数据分析得出降雨量和林冠截留有很好的直线相关性, 回归方程分别表示为:  $y = 0.543287x + 0.324357$ ;  $y = 0.4876037x + 0.16026$ ;  $y = 0.4288928x + 0.0323$ (式中:  $y$  为截留量;  $x$  为林外降水量)。大量的研究也表明(唐臻, 1992; 李树人等, 1995; 常学问等, 2002; 等), 林冠截留量与降水量呈正相关关系, 一般可供选择的有幂函数、指数函数、对数函数等, 林冠截留率与降水量呈紧密的负相关, 其线性多为幂函数, 在研究的过程中, 澳大利亚的 F. X. Dunin 等(1982 年)发现, 针叶林平均截留损失普遍大于阔叶林, 是因为针叶树叶面积大, 生长期长, 不受季节变化所致。

对林冠截留的研究已经很多, 但笔者认为还存在一个重要问题, 在分析截留的影响因素时, 只考虑单因素的影响, 没有把诸多影响因子综合起来分析, 各个因子对截留效应的影响程度没有得到量化。因此, 这个方面还有待于进一步加强研究。

## 2 树干截留

降雨首先落在树木的叶、枝、干等树体表面, 在表面张力与重力均衡时, 水被吸附并积蓄在枝叶分杈处及其表面, 达到一定数量后, 表面张力与重力失去平衡, 一部分从叶转移到枝, 再转移到树干而流到林地表面, 称为树干截留, 即我们通常所说的树干茎流, 1975 年 Gash 建立的截留模型中也将树干茎流称树干截留。在森林水文学的各个分量中, 树干茎流作用只是一个非常微小的部分, 在定量研究里常常被忽视, 但这个微小的部分在生态系统中的作用却是很大的, 能够引起局部地段产生蓄满径流的源, 尤其是对森林生态系统的养分、矿质元素的输入影响更大(田大伦等, 1999; 刘世海等, 2002), 所以对树干截留的研究不容忽视。在东北红松人工林的研究(陈祥伟等, 1990)发现, 其树干茎流率为 5.3%, 茎流量随林外降水量的增大呈现增大的趋势, 产生茎流的最小林外降雨量是 2 mm, 把林外降水按不同雨量级进行回归分析, 树干径流量与林外降水存在着显著的线性关系。但是 1995~ 2000 年对山杨林的观测数据表明(赵鸿雁等, 2002), 树干茎流总为 76 mm, 平均茎流率为 3.3%, 变幅在 2.0% ~ 4.5% 之间, 认为影响树干茎流的因素较多, 茎流量和大气降水、树冠截留量的关系不确定; 在陕西宜川的 6 年观测得出(赵鸿雁等, 2002), 山杨林树干茎流的年变化幅度在 2.0% ~ 4.5% 之间, 平均茎流率为 3.3%。在杉木林的观测发现(周国逸, 1989), 其树干茎流量很小, 对于 10 mm 以下的一次性降水将不会发生树干茎流, 15~ 20 mm 的一次性降水茎流率也只有 0.2%, 达 40 mm 降水量的一次性降水的茎流率为 0.6%; 而南亚热带的马占相思人工林的树干茎流率却

比较大,只有在降水量小于 0.6 mm 时,才观测不到树干茎流的发生,产生茎流时茎流量与林外降水有明显的线性关系。马祥庆等(1993)在福建的研究认为,杉木幼林(6年生,3600株/hm<sup>2</sup>)在降水量小于4mm时,茎流量为0雨量级在4~6mm时,树干截留率为1.15%,其后树干截留率随雨量增加而增加,不同雨量级平均截留率为1.75%,并且茎流首先在较小径级杉木上产生,与潘维伟(1989年)研究的杉木中龄林相比,杉木幼林的树干截留率远大于中龄林。1998~1994年陈步峰等人(1998年)的观测认为,热带山地雨林树干茎流受降水显著影响,季节特征明显,平均茎流占降水量的6.8%,月茎流量最大的7月可达月降水量的12.4%。旱季降雨不多,树枝、树干、树叶较为干燥,降至树上的水分几乎全被吸着,故茎流量小;雨季则反之。在鼎湖山季风常绿阔叶林中,年树干茎流量变幅仅占年降水量的1.8%~3.1%,黄忠良等(2000年)还认为,就树干茎流的水文功能而言,其作用微不足道。

我国对树干茎流的研究已经不少(马雪华等,1993;马祥庆等,1994;李树人等,1995;郭景唐等,1994;董世仁等,1987;等),得出茎流量与林外降水量之间有着紧密的关系,可以看出,森林树干茎流量占林外降水的比例较小,一般变动于1%~5%间,由于影响茎流的因素多且复杂,在不同区域测定所得的结果差异较大,在同一地区不同树种间的差别也很明显。

### 3 枯落物截留

经过林冠,下草截留之后漏下的雨水到达林地,其中一部分被枯枝落叶吸附,随后即蒸发到大气中,这部分雨量叫做林地枯枝落叶截留雨量(litter interception);对这部分雨量进行测定的实例还不多,在现场测定这部分“截留”非常困难,通常是选取样品在实验室用实验方法进行测定和推算(中野秀章,1993;周国逸,1997)。

枯落物层在蓄留降雨,阻滞和过滤地表径流及减少林地蒸发,改善土壤结构和防止击溅侵蚀等方面有重要的水文作用。植被枯枝落叶层吸持水量的动态变化对林冠下大气和土壤之间水分和能量传输有重要的影响。植被枯枝落叶层具有较大的水分截持能力,从而影响到穿透降雨对土壤水分的补充和植物的水分供应(Willian, 1996)。此外,枯枝落叶截留使产生水土流失的径流量减少,具有减少径流速度,延长地表径流时间,枯枝落叶层具有比土壤更大的孔隙,因此其水分也就更易蒸发,可抑制土壤蒸发(赵鸿雁等,1994)。

一般认为,不同类型植被枯枝落叶层吸持水分蒸发占林地总蒸发散的3%~21%,森林植被枯枝落叶层吸持水的能力大小与森林流域产流机制密切相关,并受枯落物组成、林分类型、林龄、枯落物分解状况、林地水分状况、降雨特点等的影响(马雪华,1981;王礼先等,1998)。研究结果认为(刘创民,1994;刘永宏等,2000;张光灿等,1999),枯枝落叶吸持水量可达到自身干重的2~4倍左右,其饱和含水量在1.22~

5.88mm之间,各种森林的枯枝落叶的最大持水量平均为309.54%(刘世荣等,1994),汪有科等(1993年)的研究基本一致,认为枯落物的最大截持量是自身重量的1.7~3.5倍;孙立达等(1995)在黄土高原人工防护林枯枝落叶截留量的研究表明,其持水容量小于191%,而且还建立了计算枯落层截持水量的经验模型。由于枯枝落叶层的氮化和矿化速率随着含水量的增加而提高,同时枯枝落叶层含水量具有明显的时空变异性,从而加大了研究的难度。

赵鸿雁等(1994年)对山杨枯枝落叶的截留研究表明,其自身持水率可达256.9%;在两年的观测中,降水总量为477.4mm,枯枝落叶的截留量为90.0mm,平均截流率为18.9%。并且对25次降雨进行分析,得出枯枝落叶截留量( $I_l$ )与林外降水量( $p$ )单因子的关系,其方程式是: $I_l = 0.661p^{0.483}$  ( $n = 25, r = 0.84$ )。吴钦孝等人在陕西宜川对山杨林的6年研究发现,枯枝落叶截留总量为176.3mm,占林外降水的7.7%。

总结大量地研究可得出枯落物截留地三条规律:(1)其截留量与枯枝落叶的种类、厚度、持水性、降雨特点、湿度及分解程度有密切关系;(2)随着降雨强度的增加,其截留量的百分比相应减少;(3)其截留量是有一定限度的。

### 4 研究存在的问题

(1)在研究林冠截留的过程中,把影响因子考虑的不够多,只是单纯考虑林外降雨和林冠郁闭度的作用,即使有人考虑到了影响林冠截留率因素诸多,但是在建立林内降雨和林外降雨的关系时,很少进行多因子的相关分析,诸如林龄、林种、林冠结构、雨前林冠的湿润度等。

(2)林冠截留如生态系统、水文过程一样,具有时间和空间异质性,因此如何建立描述林冠截留的理论或经验模型,并将其整合到流域水文模型中是林冠截留研究的目标。

(3)在研究方向上,需要进一步探明人工林截留的内在机理,才能可靠预测不同林地、不同区域的林冠截留效应。同时,要深入地开展单项要素研究,也要加强多因素综合性的研究,使点的定位观测研究与较大范围的区域截留资料分析研究相结合。

(4)由于截留效应有很大的区域性,所以,在研究的尺度上,从点的研究要逐渐向面转换,同时还要与集水区、流域的研究结合,以免导致片面的甚至错误的结论。

### 5 结 语

林木截留对降水的再分配具有重要的水文生态意义,由于林冠层对雨水的截持和缓冲,减少了进入林地的水量,减少了降雨的动能和势能,从而起到了消弱洪峰流量,防止土壤侵蚀和涵养水源的生态功能;另一方面,经过林地的降水,其水化学特征也发生了很大的变化,因此有必要进一步加强对林木截留效应,尤其是影响因素的综合研究。

## 参考文献:

- [1] 曹群根 毛竹林冠层对降水的截留作用[J] 福建林学院学报, 1991, 11(3): 37- 43
- [2] 常学问, 赵爱芬, 王金叶, 等 祁连山林区大气降水特征与森林降水的截留作用[J] 高原气象, 2002, 21(3): 274- 280
- [3] 陈步峰, 周光益, 曾庆波, 等 热带山地雨林生态系统水文动态特征的研究[J] 植物生态学报, 1998, 22(1): 68- 75
- [4] 陈乾, 陈添宇 用 NOAA 卫星气象资料计算复杂地形下的流域蒸散[J] 地理学报, 1992, 48(1): 61- 69
- [5] 陈祥伟, 王庆成, 刘强 红松人工林水文效应的初步研究[J] 东北林业大学学报, 1994, 22(1): 24- 30
- [6] 陈祖明, 任守贤 岷江上游森林水文效应研究[J] 地理学报, 1992, 47(1): 49- 57
- [7] 董世仁, 郭景唐 华北油松人工林的透留、干流和林冠截留[J] 北京林业大学学报, 1987, 9(1): 58- 68
- [8] 樊后保 杉木人工林对降水的截留作用[J] 福建林学院学报, 1998, 18(1): 92- 95
- [9] 高成德, 余新晓 水源涵养林研究综述[J] 北京林业大学学报, 2000, 22(5): 78- 82
- [10] 郭景唐, 刘曙光 华北油松人工林树枝特征函数对干流量影响的研究[A] 周晓峰 中国森林生态系统定位研究[M] 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994 268- 273
- [11] 何汉杏, 韦炳斌 广西龙桥林区不同植被类型水文效益的研究[J] 中南林学院报, 1991, 11(1): 25- 34
- [12] 黄承标, 文受春 里骆林区常绿阔叶林和人工杉木林气候水文效应[J] 生态学杂志, 1993, 12(3): 1- 7
- [13] 黄礼隆, 陈祖铭, 任守贤 森林水文研究方法[J] 四川林业科技, 1994, 15(1): 14- 33
- [14] 黄忠良, 孔国辉, 余清发, 等 亚热带季风常绿阔叶林水文功能及其养分动态的研究[J] 植物生态学报, 2000, 24(2): 157- 161
- [15] 姜志林, 王冬米, 叶镜中 苏南丘陵主要森林类型对降水分配格局的影响[A] 周晓峰 中国森林生态系统定位研究[M] 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994 327- 335
- [16] 孔繁智, 宋波, 裴铁 林冠截留量与大气降水关系的数学模型[J] 应用生态学报, 1990, 1(3): 201- 208
- [17] 李飞, 王英芳, 陈永瑞 马尾松林水文特征及其矿质元素迁移研究[J] 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 78- 82
- [18] 李树人, 刘正芳, 刘炳文 泡桐林物质流研究: (II) 泡桐林冠对降水的再分配[J] 河南林学院学报, 1984, (3): 25- 32
- [19] 李树人, 赵勇, 齐宗俭, 等 日本落叶松林冠对大气降水的调节作用[J] 河南农业大学学报, 1995, 29(4): 319- 323
- [20] 刘创民, 李昌哲, 陈军华, 等 北京九龙山主要植被类型水文作用的研究[J] 林业科技通讯, 1994, (7): 10- 12
- [21] 刘世海, 余新晓, 胡春宏, 等 密云水库北京集水区人工水源保护林降水化学性质研究[J] 水土保持学报, 2002, 16(1): 100- 103
- [22] 刘世海, 余新晓, 于志民 北京密云水库集水区板栗林水化学元素性质研究[J] 北京林业大学学报, 2001, 23(3): 12- 15
- [23] 刘世荣, 温远光, 王兵 等 中国森林生态系统水文功能规律[M] 北京: 中国林业出版社, 1996 3- 7
- [24] 刘曙光 林冠截留模型[J] 林业科学, 1992, 28(5): 445- 449
- [25] 刘向东, 吴钦孝, 赵鸿雁 森林植被垂直截留作用与水土保持[J] 水土保持研究, 1994, 1(3): 8- 13
- [26] 刘向东, 吴钦孝, 赵鸿雁 黄土丘陵区人工油松林和山杨林林冠截留作用的研究[J] 水土保持通报, 1991, 11(2): 4- 7
- [27] 刘永宏, 梁海荣, 张文才 森林水文研究综述[J] 内蒙古林业科技, 2000, (增刊): 67- 73
- [28] 马雪华 四川米亚罗地区高山冷杉林水文作用研究[J] 林业科学, 1987, 23(3): 356- 369
- [29] 马祥庆, 何智英, 俞新妥, 等 杉木幼林生态系统水文效应研究[J] 福建林学院学报, 1994, 14(1): 35- 39
- [30] 马雪华, 杨茂瑞, 胡星弼 亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究[J] 林业科学, 1993, 29(3): 199- 206
- [31] 孟广涛, 郎南军, 方向京, 等 滇中华山松人工林的水文特征及水量平衡[J] 林业科学研究 2001, 14(1): 78- 84
- [32] 潘维伟 亚热带人工林生态系统的水文过程和养分动态[J] 中南林学院学报, 1989, (增刊): 1- 23
- [33] 潘维伟 全国森林水文学学术讨论会文集[C] 北京: 测绘出版社, 1989 126- 133, 43- 52
- [34] 沈小东, 王腊春, 等 基于栅格数据的流域降雨径流模型[J] 地理学报, 1995, 50(3): 264- 269
- [35] 孙立达, 朱金兆 水土保持林体系综合效益研究与评价[M] 北京: 中国科学技术出版社, 1995
- [36] 唐臻 锐齿栎林林冠截留与大气降水关系[J] 西北林学院学报, 1992, 7(4): 8- 13
- [37] 覃志刚, 王鹏 盆北山地严重侵蚀坡面几种人工林水文效应研究[J] 四川林业科技, 1997, 18(2): 17- 23
- [38] 田大伦, 杨晚华, 方海波 第二代杉木幼林中降雨对养分的淋溶作用[J] 湖北民族学院学报(自然科学版), 1999, 17(1): 1- 5
- [39] 王礼先, 张志强 森林植被变化的水文生态效应研究进展[J] 世界林业研究, 1998, (6): 14- 23
- [40] 王鸣远, 王礼先 三峡库区马尾松林分对降水截留效应的研究[J] 北京林业大学学报, 1995, 17(4): 74- 81
- [41] 王彦辉 刺槐对降雨的截持作用[J] 生态学报, 1987, 7(2): 43- 49

- [42] 王彦辉 陇东黄土地区刺槐林水土保持效益的定量研究[J]. 北京林业大学学报, 1986, 8(1): 35- 52
- [43] 汪有科, 吴钦孝, 赵鸿雁, 等. 林地枯落物抗冲机理研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(1): 75- 80
- [44] 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
- [45] 魏小华, 周小峰 三种阔叶次生林的径流研究[J]. 生态学报, 1989, (4): 325- 329
- [46] 肖金喜, 宋永昌 天童山森林公园常绿阔叶林水文作用的初步研究[J]. 山西师大学报(自然科学版), 1993, (增刊): 84- 89
- [47] 徐万仁, 张永庆, 杜和平, 等. 贺兰山主要森林水文作用的初步研究[J]. 生态学杂志, 1994, 13(4): 55- 60
- [48] 徐孝庆, 胡沐钦 森林综合效益计算评价[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992
- [49] 阎顺国 桥山林区油松林水源涵养功能的探讨[J]. 水土保持学报, 1989, 3(2): 57- 64
- [50] 杨茂生, 陈海滨, 高甲荣 秦岭辛家山林区锐齿栎林水源涵养功能的若干特点[J]. 西北林学院学报, 1991, 6(1): 1- 7
- [51] 杨学军, 姜志林 苏南丘陵区主要森林类型地被层水源涵养功能研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 28- 31
- [52] 袁嘉祖, 张汉雄 黄土高原地区森林植被建设的优化模型[M]. 北京: 科学出版社, 1991
- [53] 曾杰, 郭景唐 太岳山油松人工林生态系统降雨的第一次分配[J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(3): 21- 27
- [54] 张光灿, 刘霞, 赵玖 泰山几种林分枯落物和土壤水文效应研究[J]. 林业科技通讯, 1999, (6): 28- 29
- [55] 张虎, 马力, 温娅丽 祁连山青海云杉林降水及其再分配[J]. 甘肃林业科技, 2000, 25(4): 27- 30
- [56] 张建军, 贺康宁, 朱金兆 晋西黄土区水土保持林林冠截留的研究[J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(2): 27- 31
- [57] 张玲, 王震洪 云南牟定三种人工林森林水文生态效应的研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(2): 69- 73
- [58] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬 山杨林的水文水生态效应研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(4): 497- 500
- [59] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘向东 山杨枯枝落叶的水文水保作用研究[J]. 林业科学, 1994, 30(2): 176—180
- [60] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘向东 山杨林的水文水保作用研究[J]. 人民黄河, 1994, (4): 27- 30
- [61] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘向东 油松人工林林冠层的水文作用[J]. 中国水土保持, 1993, (2): 40- 43
- [62] 中野秀章 森林水文学[M]. 李云森译 北京: 中国林业出版社, 1993
- [63] 周光益 杉木人工林生态系统林地径流模式的研究[J]. 中南林学院学报, 1989, 9(增刊): 32- 39
- [64] 周国逸 几种常用造林树种冠层对降水动能分配及其生态效应分析[J]. 植物生态学报, 1997, 21(3): 250- 259
- [65] 周国逸 生态系统水热原理及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 1997
- [66] 周国逸, 余作岳 广东小良试验站降雨径流关系的一个黑箱模型[J]. 生态学杂志, 1995, 14(4): 67- 72
- [67] 周国逸, 余作岳 小良试验站三种植被类型地表径流效应的对比研究[J]. 热带地理, 1995, 15(4): 306- 312
- [68] 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
- [69] Frank P E. Research issues in forest hydrology[J]. Water Resource, 1998, 34(4): 98- 115
- [70] Hornbeck J W, Swank W T. Watershed ecosystem analysis as a basis for multiple use management of eastern forest[J]. Ecol Appl, 1992, 2: 238- 247
- [71] Liu Shuguang A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies[J]. Ecological Modelling, 1997, 99: 151- 159
- [72] Lorens P, Gallart F. A simplified method for forest water storage capacity measurement[J]. Journal of Hydrology, 2000, 240: 131- 144
- [73] Meinzer F C, Jose L A, Guillermo G, et al Partitioning of soil water among canopy trees in a seasonally dry tropical forest[J]. Oecologia, 1999, 121(3/22): 293- 301
- [74] Putuhen W M, Cordery I Estimation of interception capacity of the forest floor[J]. Journal of Hydrology, 1996, 180: 283- 299
- [75] Stednick J D. Monitoring the effects of timber harvests on annual water yield[J]. Journal of Hydrology, 1996, 176: 79- 95
- [76] Teklehaimanot Z, et al Rainfall interception and boundary conductance in relation to tree spacing[J]. Journal of Hydrology, 1991, 123: 261- 278
- [77] Tietema A. Abiotic factors regulating nitrogen transformation in the organic layer of acid forest soil: moisture and pH[J]. Plant Soil, 1992, 147: 69- 78
- [78] Viville D, et al Interception on a mountainous declining spruce stand in the Strengbach catchment (Voges, France)[J]. Journal of Hydrology, 1993, 144: 273- 282