

●“985”优势学科创新平台项目 —『脆弱生态系统退化机制与恢复重建』●

【水土保持与荒漠化防治系列专著】



三峡库区森林 对水文过程的影响效应及洪水过程模拟

齐 实 朱金兆 王云琦 等/著



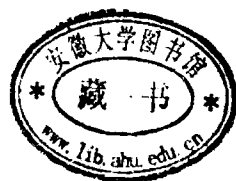
科学出版社

“985”优势学科创新平台项目——“脆弱生态系统退化机制与恢复重建”

水土保持与荒漠化防治系列专著

三峡库区森林对水文过程的影响效应及洪水过程模拟

齐 实 朱金兆 王云琦 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书通过调查、定位试验观测等方法研究了三峡库区主要森林植被群落对水文过程的影响效应,并对不同森林植被群落理水调洪功能进行了评价;以此为基础,应用美国地质调查局的模块模型系统(MMS)平台,构建了分布式暴雨水文模型,验证和模拟三峡库区森林小流域的暴雨水文过程以及不同暴雨情况下森林对洪水的影响,同时提出了三峡库区模型的主要土壤水文参数阈值,提出基于理水调洪的小流域森林植被的空间配置模式,并模拟了森林植被不同空间配置对洪水的影响。

本书可供从事水土保持学、地理学、环境科学、水文学等专业的研究、管理人员及高等学校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

三峡库区森林对水文过程的影响效应及洪水过程模拟/齐实等著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-032312-5

I. ①三… II. ①齐… III. ①三峡水利工程-森林水文效应-研究
IV. ①TV632.71②S715.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 184689 号

责任编辑:朱 丽 孙 青 / 责任校对:鲁 素

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达版艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 9 月第一次印刷 印张:10 1/4

印数:1—1 200 字数:227 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛书序

水土流失与荒漠化直接关系到国家生态安全。严重的水土流失与荒漠化,是生态恶化的集中反映,已成为我国生态环境最突出的问题之一。水土流失与荒漠化不仅导致土地退化、毁坏耕地,制约山区社会经济发展,使人们失去赖以生存的基础,而且加剧江河湖库淤积和洪涝灾害,加剧贫困,威胁国家粮食安全和生态安全;这不仅影响当代发展,而且影响子孙后代的生存。因此,加强水土保持与荒漠化防治基础理论研究,找出科学合理的防治方法与措施,开展生态环境建设、资源与社会可持续发展的理论研究与实践,已成为关系国家生态安全和经济社会可持续发展的当务之急。

《水土保持与荒漠化防治系列专著》是在北京林业大学“985”优势学科创新平台“脆弱生态系统退化机制与恢复重建”和“211”工程(三期)的资助下编写出版的,分册相对独立,以水土保持与荒漠化防治基础理论与水土流失和荒漠化综合防治实践为基础,从不同角度、综合反映了研究团队新的科研成果。该系列专著以土壤侵蚀动力学过程及其机制、生态水文过程与调控、植被力学过程与调控、土壤风蚀过程与防控、水土流失区林草植被快速恢复与生态修复关键技术、开发与建设城市化损毁土地生态系统快速恢复与重建技术等为主要研究内容,系统反映了在长期水土保持荒漠化防治实践中积累的丰富防治经验,有针对性地提出了我国水土保持荒漠化防治生态建设面临的主要问题的防治对策,为今后进一步加强水土保持荒漠化防治研究奠定了坚实的基础。

该系列著作的内容均为水土保持与荒漠化防治研究领域的热点问题,引领了该学科的发展方向,在理论框架、新方法和新技术方面做了很多开创性的工作,在推动水土流失与荒漠化防治综合防治关键技术研究方面进行了有益的探索,对我国进行水土保持与荒漠化防治综合管理研究起到了积极的推动作用。

该系列著作不仅为地学、生态学、环境学、土壤学等学科的科研和教学工作提供有益的参考,也是我国水土保持与荒漠化防治生态建设相关技术人员、行政管理人员的一部好的参考书。该系列著作的出版,无疑将对我国水土保持与荒漠化防治生态建设的深入开展起到积极的推动作用。

中国工程院院士 李文华

2011年5月

前 言

三峡库区地处长江流域的上游,雨量充沛,山高坡陡,地形破碎。气候因素和下垫面因素的相互作用使得这一地区洪涝灾害十分严重。在洪涝灾害中,尤其是特大洪涝灾害情况下,森林植被作为下垫面的主体,只有发挥最佳的理水调洪功能,才能够最大限度地涵养水源、保持水土和拦蓄洪水。随着三峡工程建设,长江中上游生态环境建设工程(“长治”工程、天然林保护工程、退耕还林工程)的实施,森林植被群落究竟在多大程度上影响洪水是一个亟须解决的科学问题,它不仅对三峡工程调节洪水的宏观管理和决策,而且对求取相邻森林流域的水文生态效益,进行区域森林水文生态效益评价、区域生态环境规划、流域管理及科学分配水资源均有重要意义。

随着森林水文学、流域水文学、景观生态学和地理信息系统(GIS)技术的发展,20世纪开始了分布式水文模型的研究。分布式水文模型充分反映了流域内自然地理要素的时空分异对水文过程的影响,可以更真实地反映流域水文过程和帮助我们更准确地评估流域内森林的水文生态效益。本书结合国家“十五”科技攻关课题“退耕还林工程区水源涵养型植被建设技术与示范”和国家自然科学基金“三峡库区以流域为单元森林植被对洪水影响研究”,从主要森林植物群落对降水、径流、入渗等水文环节的影响作用研究着手,构建、拟合和验证适合三峡库区森林流域的分布式暴雨水文模型,通过模型模拟,评估森林植被对洪水的影响作用,为进一步揭示三峡库区流域森林植被的水文生态过程提供研究基础和技术平台。

本书是作者在系统总结以上研究成果的基础上完成的,全书共分9章,主要内容及编写人员如下:第1章引言,由齐实、王云琦执笔;第2章研究地区概况,由朱金兆、王玉杰执笔;第3章典型森林群落对水文过程的影响,由王云琦、朱金兆执笔;第4章典型森林群落理水调洪功能评价,由王云琦、王玉杰、杨海龙执笔;第5章森林流域分布式暴雨水文模型构建和参数,由齐实执笔;第6章分布式暴雨水文模型的拟合与验证,由齐实、王云琦、胡晓静执笔;第7章流域森林植被影响洪水过程的情景模拟分析,由齐实、王云琦、胡晓静执笔;第8章三峡库区分布式暴雨水文模型主要参数阈值,由齐实、胡晓静执笔;第9章三峡库区森林植被空间配置格局,由齐实、饶良懿、胡晓静执笔。全书由齐实、朱金兆、王云琦审定统稿。本书研究成果是由多位同事经过多年的共同努力完成的。参加本书研究的工作人员有齐实、朱金兆、王玉杰、王云琦、饶良懿、胡晓静、杨海龙、张洪江、张金柱、刘益军、肖玉宝、胡会亮等。衷心感谢参与本书研究工作的所有研究人员;感谢北京林业大学

“985”优势学科创新平台项目——“脆弱生态系统退化机制与恢复重建”的支持,同时感谢重庆市林业局、重庆市水务局对本书研究工作提供的支持和帮助。此外,还要感激国家留学基金、美国林务局南方全球气候变化项目的孙阁博士、S. G. McNulty 博士、J. A. Moore Myers 女士,以及美国地质调查局的 G. H. Leavesley 博士、S. L. Markstrom 博士的热情帮助。

著 者

2011 年 3 月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 问题提出	1
1.1.2 研究目的和意义	2
1.2 森林生态系统水文过程研究进展	2
1.2.1 森林植被及其变化对洪水的影响	2
1.2.2 森林流域水文过程研究	5
1.3 水文模型的研究进展	8
1.3.1 国内外研究现状及发展趋势	9
1.3.2 水文模型的分类及优缺点比较	10
1.3.3 分布式水文模型研究进展	11
第 2 章 研究地区概况	15
2.1 三峡库区	15
2.1.1 地貌与地质特征	15
2.1.2 气候	16
2.1.3 土壤	17
2.1.4 植被	17
2.1.5 水文	18
2.2 研究流域及试验地概况	19
2.2.1 地貌与地质特征	19
2.2.2 气候	19
2.2.3 土壤	21
2.2.4 植被	22
2.2.5 水文	22
2.3 试验和研究方法	22
2.3.1 样地及流域调查	22
2.3.2 坡面定位观测	23
2.3.3 水文控制站	24

第 3 章 典型森林群落对水文过程的影响	25
3.1 森林群落特征	25
3.1.1 优势植物群落的建群种组成	25
3.1.2 植被群落的海拔梯度	30
3.2 林冠层水文功能研究	32
3.3 枯落物层水文功能研究	33
3.3.1 枯落物储量和持水深	33
3.3.2 枯落物持水特征	35
3.4 土壤层水文功能研究	36
3.4.1 土壤持水特征	36
3.4.2 土壤入渗特征	37
第 4 章 典型森林群落理水调洪功能评价	39
4.1 静态评价	39
4.1.1 森林群落理水调洪功能评价指标体系	39
4.1.2 评价方法	42
4.1.3 典型森林群落评价	43
4.2 动态评价	44
第 5 章 森林流域分布式暴雨水文模型构建和参数	46
5.1 模型构建	46
5.1.1 技术平台	46
5.1.2 模块选择	47
5.1.3 PRMS 模型系统	47
5.1.4 主要模块	49
5.1.5 分布式暴雨水文模型 PRMS_Storm 构建	52
5.2 模型主要参数阈值获取	57
5.2.1 样地植被特征参数	57
5.2.2 样地土壤特征参数	58
5.2.3 林冠截留特征参数	63
5.2.4 枯落物截留特征参数	64
5.2.5 地表糙率特征参数	65
5.2.6 地理信息空间数据参数	67
第 6 章 分布式暴雨水文模型的拟合与验证	71
6.1 试验区暴雨与洪水特征分析	71
6.1.1 暴雨与洪水特征	71

6.1.2 洪水特征值对暴雨响应分析	73
6.2 PRMS_Storm 拟合与验证	75
6.2.1 PRMS_Storm 拟合检验方法	75
6.2.2 数据文件获取与整理	75
6.2.3 参数文件生成	76
6.2.4 模型拟合	77
6.2.5 参数率定	78
6.2.6 PRMS_Storm 验证	80
6.2.7 模拟效果分析	85
第7章 流域森林植被影响洪水过程的情景模拟分析	89
7.1 植被覆盖率变化对洪水过程的影响	89
7.1.1 植被覆盖率对洪水过程的变化分析	89
7.1.2 植被覆盖率对径流组成的变化分析	92
7.2 森林植被群落配置对洪水过程的影响	95
7.2.1 森林群落优化配置格局的情景选择	95
7.2.2 不同森林群落影响洪峰流量的变化分析	96
7.2.3 不同森林群落影响径流组成、径流量的变化分析	99
7.2.4 不同情景配置下模拟结果综合分析	100
第8章 三峡库区分布式暴雨水文模型主要参数阈值	101
8.1 库区土壤基本特征	101
8.1.1 土壤类型	102
8.1.2 土壤形成特征	103
8.1.3 土壤分布特征	104
8.1.4 土壤理化性质	105
8.2 库区土壤水文参数	108
8.2.1 土壤贮水特征	108
8.2.2 土壤水分入渗特征	110
8.3 库区林冠截留参数	113
8.4 库区枯落物截留参数	114
8.4.1 枯落物持水率、持水量	114
8.4.2 枯落物持水过程	115
8.5 地表糙率特征参数	121
第9章 三峡库区森林植被空间配置格局	124
9.1 三峡库区区域理水调洪森林覆盖率	124
9.1.1 考虑拦蓄特大暴雨的区域尺度森林覆盖率	125
9.1.2 考虑减轻土壤侵蚀的区域尺度森林覆盖率	127
9.2 基于理水调洪的植被空间配置	128
9.2.1 空间配置的整体思路	128

9.2.2	配置原则和方法	129
9.2.3	典型地貌小流域空间配置	130
9.3	森林植被空间配置格局对洪水过程影响模拟分析	136
9.3.1	植被空间格局的配置情景选择	136
9.3.2	森林植被空间格局配置情景下降雨产流过程模拟分析	136
9.3.3	不同配置情景下模拟结果综合分析	141
9.3.4	不同暴雨类型下森林植被格局影响洪水过程对比分析	142
9.3.5	森林植被类型搭配对洪峰流量的影响	143
9.3.6	森林植被类型搭配对径流组成的影响	145
参考文献		147

第 1 章 引 言

1.1 研究背景

在森林植被与生态环境相互作用和相互影响中,水文过程是最为重要的方面之一(Buttle et al., 2000; Hornbeck and Swank, 1992)。然而,由于森林与水的关系问题十分复杂,它不仅受森林生态系统发展本身的影响,而且还受地形、地质、土壤类型、植被等的空间变异性及气象通量,如降雨、入渗和蒸发等的时空变化性的影响,后者进一步增加了定量描述森林流域径流形成机理和水文响应模式的难度(Stednick, 1996)。因此,森林与水的关系问题仍是当今生态学与水文学研究的中心议题之一(Bonell, 1993, 1998; McCulloch and Robinson, 1993; Whitehead and Robinson, 1993)。近几十年来,这一研究领域也从传统的对比流域试验发展到从森林生态系统变化、森林对坡面到流域尺度影响径流形成机理、森林影响流域生物地球化学动态机理、建立基于过程的森林水文模拟、水流路径的示踪研究等方面的综合研究。

1.1.1 问题提出

1998 年长江流域特大洪水发生后,森林植被影响洪水过程的水文问题受到广泛关注(邓慧平等, 2003)。有关学者认为大江大河源头及上游森林植被的破坏是造成水灾的根本原因,国家也实施了停止毁林开荒,实施退耕还林还草措施用于恢复长江上游流域森林生态系统。但另外相反的观点认为,森林破坏并不是产生 1998 年特大洪水的主要原因。因此,深入了解森林植被对流域水文过程的影响不仅具有重要的学术意义,同时可为国家制定有关重大决策提供重要的科学依据,具有实际意义。

流域水文是一个复杂的过程,其动态变化不仅受气候条件、土壤因子等的影响,植被在其中也起着非常重要的作用。以往森林生态系统水文功能的研究主要集中在水文循环的局部过程,如截留、蒸散发、入渗等(Delphis et al., 2003; Paulo et al., 1995; Kell et al., 2001; Wilcox et al., 2003; 鲍文等, 2004),或者是简单的输入输出模式,对森林的降雨—径流整个水文过程的研究还不够深入(刘丽娟等, 2004)。

在森林水文过程研究中,其中探讨森林影响径流形成机制的研究方法包括水文测验、同位素水文学以及动力水文学计算等方法。这些方法不仅可以用于坡面尺度的径流形成机制研究,也可以用于流域尺度的径流形成机制研究(张志强等, 2003)。但随着森林水文学的不断发展,以地理信息系统为平台,建立和校核基于物理过程分布式参数的流域水文过程耦合模型成为定量准确描述森林生态水文过程的更有效方法。

森林流域水文过程的核心内容是如何将水文系统、生态系统和陆面过程三者有机地结合成一个整体,研究各系统之间的相互关系,进而分析区域变化对水文、生态和水资源

的影响,以及植被对这些变化的响应。分布式水文模型可为这个问题的解决提供工具。

1.1.2 研究目的和意义

三峡库区地处长江流域的上游,雨量充沛,山高坡陡,地形破碎。气候因素和下垫面因素的相互作用使得这一地区洪涝灾害十分严重。在洪涝灾害中,尤其是特大洪涝灾害情况下,森林植被作为下垫面的主体,只有发挥最佳的理水调洪功能,才能够最大限度地涵养水源、保持水土和拦蓄洪水。随着三峡工程建设,长江中上游生态环境建设工程(“长治”工程、天然林保护工程、退耕还林工程)的实施,森林植被群落究竟在多大程度上影响洪水是一个亟待解决的科学问题,它不仅对三峡工程调节洪水的宏观管理和决策,而且对求取相邻森林流域的水文生态效益,进行区域森林水文生态效益评价、区域生态环境规划、流域管理及科学分配水资源均有重要意义。

随着森林水文学、流域水文学、景观生态学和地理信息系统(GIS)技术的发展,20世纪开始了分布式水文模型的研究。分布式水文模型充分反映了流域内自然地理要素的时空分异对水文过程的影响,可以更真实地反映流域水文过程和帮助我们更准确地评估流域内森林的水文生态效益。本书结合国家“十五”科技攻关课题“退耕还林工程区水源涵养型植被建设技术与示范”和国家自然科学基金“三峡库区以流域为单元森林植被对洪水影响研究”,从主要森林植物群落对降水、径流、入渗等水文环节的影响作用研究着手,构建、拟合和验证适合三峡库区森林流域的分布式暴雨水文模型,通过模型模拟,评估森林植被对洪水的影响作用,为进一步揭示三峡库区流域森林植被的水文生态过程提供研究基础和技术平台。

1.2 森林生态系统水文过程研究进展

森林生态系统水文过程的研究始于20世纪初,在世界各地不同的森林群落建立了大量的试验站和观测点。森林水文学的研究通常采用定位观测,对不同的森林群落或试验流域进行对比观测,分析群落内各森林水文要素的数量关系,以及不同群落和流域间森林水文要素的差别。在此基础上世界各国对森林水文作用(包括年径流量、水化学过程、林冠截留、枯落物持水、林地土壤水分动态、林地蒸发散、保持水土、森林水文模拟等方面)的研究取得了大量的研究成果,并建立了大量的森林水文要素模型。但是由于所处区域地理要素的空间差异性,以及外界输入气象因子(如降水的时变性)的差异,都增加了定量描述森林流域水量转换、揭示径流机制及建立相应水文模型的难度。

1.2.1 森林植被及其变化对洪水的影响

森林植被对洪水的影响,长期以来一直是人们争论的话题(钟祥浩和程根伟,2001;史玉虎和袁克侃,1998;王鸣远和王礼先,1995;王清华等,2004)。影响洪水的因素主要有暴雨特性(暴雨强度、时间和空间分布等)、流域特性(包括流域面积、形状、坡度、河网、土壤、植被和地质条件等)、河槽特点(河槽断面、坡度、糙率等)及人为活动(修建蓄水工程、植树造林和水土保持措施等)。森林能够影响流域的水量平衡以及径流量的时空分布,并主要

反映在水资源的总量和径流量及其季节变化频率和洪峰径流量等要素上。

美国从1930年以来,在不同区域开展试验流域研究,到1960年,试验流域达150个。Lull和Reinhart(1972)系统总结了美国东部森林对洪水的影响,并指出:森林对洪水的影响随外界条件的变化而变化,即随暴雨增加而减弱,对小流域的作用大于大流域,其作用小于地形的影响,无法与水库的作用比较,不能用来预测洪水。Ziemer(1981)研究发现森林采伐和未采伐流域对于大的洪峰流量的影响无明显差别,对于小的洪水过程影响差异显著。Hewlett(1982)研究了世界主要森林区域来回答森林是否对洪水有足够影响作用的问题,指出:与降雨和流域的蓄存作用相比,对于大的洪水,森林植被的作用是次要的。Hewlett等(1984)通过流域对比试验得出:森林皆伐后,土壤干燥时,小暴雨径流会增加50%以上,而土壤湿润时,较大洪水流量仅增加10%~15%。Chang和Watters(1984)研究了美国得克萨斯州东部流域不同森林植被覆盖对产水量和洪水的影响,得出:随着暴雨时间和强度的增加,森林对洪水的影响减弱。其后的大部分研究都集中在森林植被变化(采伐、造林、火烧、森林道路、放牧、化学处理等)对流域产水量和洪峰流量的影响方面。Vertessy和Dye(王兵和崔相慧,2001)认为“森林植被与径流的季节分布及频度变化有直接关系”。目前几乎所有的流域水文研究都已经注意到无论径流水位从低到中和从中到高,都会随造林而减少,随森林的砍伐而增加。然而,低水位和高水位径流的变化量却不尽相同,不同的流域受影响程度也不同,这主要由立地因子决定,如土层深度、土壤特性以及林型等。西欧的研究也表明(李文华等,2001),在一些小的洪水中,森林区域洪峰流量低于草地区域,但大的洪水时,两者差异不明显。1966~1972年,日本林业厅在木曾川、北上川、沼田川、酒匂川4个流域中设立了86处观测点进行水文观测,结果表明:森林覆盖率大小与洪峰流量成反比,与枯水期流量成正比。近年来,日本的森林水文研究主要集中在两个方面:通过一系列集水区试验对采伐或造林对流域径流量造成的影响进行综合研究;对降雨截留、蒸发散、下渗容量、地层中的重力水动态、地表径流等个别水文现象进行分项研究。国外的研究表明:森林采伐、修筑森林道路和基础设施会增加洪峰流量(Bruijnzeel,1990;Jones and Grant,1996),当然也存在一些相反的结论(Thomas and Megahan,1998)。对于大的洪水,其增加的幅度小,而小的洪水,增加的幅度相对大,随降雨增加,土壤和植被的作用减弱。Doty研究了森林衰败过程中,洪水单位过程线的变化,指出森林衰败前后,洪水单位过程线的形状发生了巨大变化,洪峰流量、洪水历时变化差异显著(陈丽华等,1989)。美国北卡罗来纳州山区科韦达地方实验室的一项试验(陈丽华等,1989)说明,采伐茂密的阔叶林集水区(9.308km^2)并改为农田,伐后雨强 $1.693\text{mm}/\text{min}$,降雨为 $41.9\text{mm}/\text{h}$,产生了 $11.271\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{s})$ 的洪峰,而在同样的雨强下采伐前仅产生 $1.529\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{s})$ 的洪峰,且洪峰频率增加,洪峰产生的时间由原先的35min缩短到15min。Pearce(陈丽华等,1989)研究得出:森林采伐会使引起洪峰的径流量增加55%~65%;洪峰的径流历时无显著变化。将流域内森林采伐并烧除采伐剩余物时,净雨量的增值在暴雨径流中起了极为重要的作用。从空间尺度来看,随着流域面积的增大,补偿效应影响使森林的水文作用减弱(Ives and Messerli,1989;Hofer,1998)。Chang(2002)系统总结了森林对洪水的影响,其主要结论是:森林的减少会增加流域产水量和洪峰流量,尤其对小流域($5\sim 10\text{km}^2$)而言,其洪水过程主要由坡面过程控制;对大流域($>1000\text{km}^2$)而

言,主要由地形因素和河网控制;但总体来说,森林植被对洪水的作用不大,研究者的主要观点是:在大暴雨时,森林对降雨的截留、入渗及森林土壤的储水量影响有限(肖玉保,2004)。David(2003)指出,虽然我们过去一直认为森林植被对洪水的影响很小,但是在全球范围内,中国、印度、巴基斯坦近年来由于上游森林的破坏导致洪水以及对全球气候变化的影响,使我们需要重新认识这一问题。

国内的森林流域研究开始于20世纪60年代,研究的内容主要集中在探讨森林植被覆盖率变化与流域径流量变化的关系上,其中包括植被覆盖率变化对年径流量及其季节分配、洪水量、洪水过程、径流组合变化等方面的内容(赵鸿雁等,2001)。陈传友研究横断山不同森林覆被率下的洪水特征值后得出,森林覆被率不同,洪水量和径流系数差异显著。刘昌明等研究森林拦蓄洪水的作用后认为:黄土高原森林的拦蓄作用突出地表现在使洪水量的大量减少,对洪峰的削减作用更为明显(潘维伟,1989)。吴钦孝等(1994)在宜川森林集水区和荒坡灌草集水区进行的研究证明森林的削减作用更为明显:经多年观测研究认为,在洪峰量、洪水量、洪水历时、单位面积产水量、径流系数、泥沙含量等水文特征方面差异较大,森林集水区洪峰起伏程度小,曲线长而平稳;荒坡灌草集水区洪峰起伏程度大,曲线陡峭,泥沙含量高,洪水历时短,径流系数高几倍到几十倍。

刘世荣等(1996)对我国有关森林水文生态效应的集水区研究做了比较全面细致的总结和对比,从地跨我国寒温带、温带、亚热带、热带的小集水区实验以及黄河流域、长江流域等较大集水区的研究结果来看,多数结论认为森林覆盖率的减少会不同程度地增加河川年径流量。但也有一些相反的结论。许炯心(2000)分析了长江上游干支流的水沙变化与森林破坏的关系,指出:森林对洪水的削减作用是有条件的,受众多因素影响,不能一概而论,其主要作用在于:林冠截留、枯枝落叶层和土壤的容蓄以及森林空间分布与暴雨空间分布的关系等。

总的来看,国内与国外的结论基本相同:森林削减洪峰的作用是有条件的,受多种因素影响,如土壤前期含水、枯落物层饱和度、暴雨的强度与历时、森林分布与暴雨中心分布的相对位置、土层厚度、基岩透水性、流域尺度的大小等。一般而言,森林能削减小尺度流域次降雨过程的洪峰流量,并推迟洪峰到来的时间,南方地区 $<10\text{km}^2$ 的小流域,森林削减洪峰作用可达50%以上;但对大流域或持续时间较长、重现期较大的大暴雨,其削减率逐步减弱(马雪华,1993;王礼先和解明曙,1997;王礼先和张志强,2001;李文华等,2001;刘昌明,2001;刘昌明和曾燕,2002;王礼先等,1998;刘世荣等,1996)。

从森林对洪水的削减过程来看,森林植被和土壤主要调节地表径流和地下径流形成的数量和速度,包括:①森林对降雨的截持。根据对四川省长江防护林体系建设工程的林冠截留研究成果,林冠一次截留降水量为1.2~13.9mm,占降水的2.3%~50%。②枯枝落叶层的截持。枯枝落叶层的吸水能力很强,持水率一般在300%以上。我国亚热带气候带内部分森林的枯枝落叶层持水量范围为1.63~6.29mm。③森林土壤层蓄水。森林土壤的孔隙度,特别是非毛管孔隙大,从而使森林土壤具有较大的人渗率、入渗量和渗蓄能力。森林土壤涵养水源能力的大小与土壤团粒结构、渗透性和非毛管孔隙有关。我国亚热带森林土壤的初渗速率为0.65~62.27mm/min,稳渗速率为0.13~44.38mm/min,非毛管孔隙度为9.0%~16.3%。土壤因素,主要是非毛管孔隙的蓄水能力起着至关重

要的作用。④林地表面糙率对流速的影响。⑤减少土壤侵蚀从而减少侵蚀使河道淤积,从而影响洪水水位,减轻灾害。同时,森林在流域分布的不同对洪水的影响也不同。

但是,由于问题的复杂性和综合性,森林植被究竟在多大程度上影响洪水依然没有相应的答案。而通过建立分布式森林水文模型,采用计算机模拟手段是解决和回答这一问题的最有效途径。

1.2.2 森林流域水文过程研究

对森林水文而言,仅仅采用流域研究的方法是没法将实验结果可靠地外推到其他流域的,因此从20世纪六七十年代起,科学家更加注重森林水文过程研究(张志强等,2002)。森林对水文过程的调节作用是通过截留、蒸散、入渗及储水等水文过程实现的,对这些水文过程的研究至今已取得了丰硕的成果(郑远长和裴铁璠,1996;汪有科,1993;阎俊华,1999;于志民和王礼先,1999)。

1.2.2.1 林冠截留

多年来国内外许多学者对植被冠层截留降水做了大量的研究(Hoermann, 1996; Watanabe, 1996; 王彦辉等, 1998),获取了大量有关林冠截留量和截留率的实测数据。研究表明:冠层截留量随植物种类、冠层结构与盖度及气象条件的变化而变化。林冠截留损失比灌木和草本截留损失大的原因有两个:一个是林冠具有较大的截留容量;另一个是林冠具有较大的空气动力学阻力进而增加截留雨量的蒸发。

对我国不同气候带的森林植被类型林冠截留分析表明:截留率变动范围和变异系数分别为11.4%~34.3%和6.68%~55.05%,其中以亚热带西部高山常绿针叶林最大,亚热带山地常绿落叶阔叶混交林最小(温远光和刘世荣,1995;刘世荣等,1996)。根据影响林冠截留的各种因子和截留量的关系建立的模型主要有统计模型和概念模型两类。

1) 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,建立起线性或非线性的统计模型。

2) 概念模型

概念模型认为林冠截留由林冠吸附水量和附加林冠截持量两部分组成,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,叶子持水能力越强,林冠吸附水量越大。附加林冠截持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,温度比较高,蒸发比较旺盛时,附加林冠截持量较大。

Gash模型(Gash et al., 1980; Gash, 1979)是典型的概念性模型,它把林冠截持降雨进一步区分为林冠吸附水量、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事件分类,通过对各个分项求和来估计总的林冠截持量,所以该模型又称为林冠截持解析模型(Lloyd et al., 1988; Navar and Bryan, 1994)。Gash模型得到广泛的应用,Gash模型及其改进模型与实测观测结果拟合得较好(Rao, 1987; Bruijnzeel and Wiersum, 1987; Hutjes et al., 1990; Dykes, 1997; Lloyd et al., 1988;

Schellekens et al., 1999)。

现在,有许多基于此基础上的改进模型,如 Mass man、Mulder、Liu 模型等(Mass-man, 1980, 1983; Liu, 1992, 1997; 刁一伟和裴铁璠, 2004)。

1.2.2.2 林地蒸发散

蒸发散作用是森林生态系统水分循环的一个重要环节。森林的蒸散是森林生态系统内植物的蒸腾以及从土壤表面和植物表面(截留降水)的蒸发向大气输送水分形成的,它在森林生态系统的水量平衡中占据重要地位。森林变化引起流域产水量的变化与森林蒸发散密切相关,一般认为森林具有比其他植被更大的蒸腾量,加之森林冠层与枯落物截持损失是森林减少引起流域产水量增加最为主要的原因。因此,准确测定或计算林地蒸发散的时空变化对于评价森林水文循环机理和流域水文模型开发具有十分重要的意义。

目前国内外已有的研究方法包括以下几种。①水文学法:基于系统的水量平衡方程通过测定降雨量、深层渗漏项、地表径流项以及土壤水分储存动态变化项来计算系统的蒸发量。②气象学方法:包括热量平衡法、空气动力学方法、综合法和涡流相关法(Prueger et al., 1997)。③土壤水动力学方法:包括零通量面法、表面通量法和定位通量法。土壤水动力学方法是通过直接采用描述土壤水分垂直方向运动的达西 Darcy 定律和质量守恒方程来计算蒸发蒸散量的。④植物生理学方法:主要是测定植物蒸腾量,包括热脉冲法、同位素示踪法、气孔计法和通风室法。

影响森林流域蒸发散的主要因素是降雨截持、净辐射、发射、紊流传输、枯落物覆盖、叶面积和植物的水容量。蒸发散速率与天气状况以及植物的种类组成和生长状况关系密切,起主导作用的是环境条件的变化。预测森林流域(区域)蒸发散的方法包括以下几种。①流域水量平衡法:被广泛用于估计长期的年蒸发散,同时也用来评价预测蒸发散的方法和模型的精度,需要有长期的观测数据。②基于行星边界层理论的方法:此方法应用较少,Brutsaert 和 Mawdsely(1976)利用此方法进行区域蒸发散的计算,与月的气象数据有较好的相关度。③基于遥感的方法。

我国在 20 世纪 60 年代初开始了森林蒸发散的研究工作,大多数研究表明,包括截流损失在内森林生态系统的蒸发散量占降水量输入的 40%~80%。相关研究表明(刘昌明等, 1978; 田大伦, 1993; 雷瑞德和张仰渠, 1996; 石培礼和李文华, 2001):森林植被破坏引起森林覆盖度降低一般会导致径流量增加,蒸发散降低。这主要是由于森林砍伐后,降低了林冠层的蒸腾,使收入的水分增大,增加了产流量,河川径流增加,蒸发散降低。而在长江流域则出现相反的现象,森林砍伐导致流域产流量降低,蒸发散增加,蒸发散占降水量的比例增加。对于长江流域与其他流域得出的相反结论,有的学者给予了这样的解释:森林对径流的影响是通过影响降水与蒸发来进行的,在长江上游地区,山高谷深,气候湿润,蒸发力与实际蒸发量接近,在这种气候条件下,森林生长并不一定引起实际蒸发量的显著增加。程根伟等(2003)对贡嘎山林区的蒸发实验观测,利用修正的 Penman-Monteith 公式对地面和冷杉林蒸散进行模拟,并与水面实际观测资料进行对比。结果显示:控制该区蒸散的主导因子是太阳有效辐射、大气温度和植被类型。

1.2.2.3 枯落物持水

地被物层是森林对降雨的第二个拦截层(杨立文等和石清峰,1997)。森林枯落物层可以缓冲雨滴动能,减少雨滴击溅造成的土壤表层结构破坏和土壤侵蚀。同时,枯落物层具有较土壤更多更大的孔隙,能够吸持水分,促进下渗,迟滞径流产生时间,减少表层径流量,减轻径流侵蚀程度,并对土壤水分的补充和植物水分的供应产生影响(Putuhena and Cordery,1996)。研究表明,地被物层的水源涵养作用大于林冠层。在郁闭林分下,死地被物是地被物层作用的主体,活地被物不多,其对水分循环的影响处于次要地位。森林的枯落物有很强的持水能力,一般吸持的水量可达其自重的2~4倍(刘世荣等,1996)。枯落物层的最大持水能力在不同的森林生态系统中也有很大的不同,其最大持水量平均为4.18mm。林地枯枝落叶层的截留量与枯枝落叶的种类(随树种而异)、厚度、干重、湿度及分解程度有密切关系。

1.2.2.4 土壤入渗和土壤水分运动

森林植被和土壤调节地表和地下径流形成的数量和速度,其中土壤入渗速率和土壤持水能力是决定森林生态系统涵养水源能力的关键因素,它们随土壤的理化性质、含水量、降雨强度的差异而变化。

土壤入渗包括两部分:一是从地表到土壤的下渗;二是从表层土壤到土壤孔隙系统的渗漏。当前研究的热点和难点包括土壤水分渗透原理和渗透速率,在观测试验的基础上建立了大量的入渗模型。其中,著名的达西定律(Darcy,1856)描述饱和均一土壤水分运动速率与土壤水量、水势、土壤的孔隙度及土壤垂直透水能力的关系。霍尔顿公式(Horton,1940)把土壤入渗速率表示为时间的函数。菲利普(Philip,1957)入渗公式把入渗速率表示成稳定渗透速率和土壤含水量的函数,可计算土壤含水量增加后土壤入渗速率潜在值的变化。Green-Ampt模型是根据土壤水动力学和达西定律推导建立的简化概念性模型,它把土壤含水量、土壤水的表面动能和入渗速率结合,根据水在土壤里运动过程中形成的土壤干湿界面上下两侧的水势差与土壤含水量、土壤物理性质的关系,以及水在该势差作用下的运动过程而建立模型。

目前有关土壤入渗研究的工作主要是根据观测数据计算上述入渗公式的系数。土壤入渗速率随降雨过程的变化,一方面是由于土壤含水量的增加而引起的,另一方面还与雨滴对地表的击溅作用改变了土壤表层的结构有关。Bajracharya和Lal(1999)研究了不同土地利用方式下的土壤表面结皮和由于雨滴击溅形成的土壤表面结皮对土壤入渗作用的影响。

有关土壤水分研究的另一个重要方面是土壤水分的运动和时空分布。Jacques等(2001)发现,微变异即使在小尺度土壤水分变异中也起重要作用,地形、土壤、植被等诸因子的相对贡献主要依赖于前期平均含水量的状况;许多研究认为土壤水分的变异随土壤平均含水量的降低而减小(Famiglietti et al.,1998;Fitzjohn et al.,1998;Western et al.,1998);张继光等(2006)在桂西北研究了旱季初期湿润和干旱条件下表层土壤水分的空间结构及其分布特征。结果表明,表层土壤水分存在明显的空间异质性和各向异性,呈现差