

生态水文学研究系列专著

森林生态系统 水文过程与功能

余新晓 史 宇 王贺年 等/著



科学出版社

生态水文学研究系列专著

森林生态系统水文过程与功能

余新晓 史 宇 王贺年 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以北京山区典型林分为研究对象,基于野外实验观测并结合模型模拟,对不同优势树种森林生态系统中的林冠层、枯落物层及土壤层等各层次的水文过程及水量平衡的各个部分进行研究,并通过生态水文模型模拟森林植被变化引起的森林生态系统内部水文过程的变化,揭示该区域主要优势树种森林生态系统的生态水文特征和规律。

本书可供从事水文生态学、森林水文学、水土保持学、地理学、环境科学、景观生态学等专业的研究、管理人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

森林生态系统水文过程与功能/余新晓等著. —北京:科学出版社,2013.6
(生态水文学研究系列专著)

ISBN 978-7-03-037948-1

I. ①森… II. ①余… III. ①森林生态系统-陆面过程-研究-北京市
IV. ①S718.55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 135470 号

责任编辑:朱 丽 刘志巧 / 责任校对:郭瑞芝

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013年6月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:300 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛 书 序

水是生命之源、生产之要、生态之基。随着人口增长和社会经济的迅速发展,人类对水资源的需求越来越大,水资源危机成为困扰世界的三大危机之一,水资源短缺以及由此引发的水生态安全问题严重威胁着社会经济的可持续发展,成为任何一个国家在政策、经济和技术上所面临的复杂问题和社会经济发展的主要制约因素。随着水资源问题的日益严重,研究者们越来越意识到水文过程对生态系统功能的重要影响,因此在 20 世纪 80 年代,国外学者提出了生态水文学的概念。生态水文学是一门逐步发展起来的新兴学科,是现在水文科学与生态科学交叉发展中的一个亮点,它研究的目的是解释生态过程与水文循环之间的联系,明确水文交互作用如何影响物质的循环和能量交换,其观点对于理解生态系统的水文过程具有十分重要的意义,已经成为当代生态学、地理科学、环境科学和资源科学等相关研究的主题内容。

生态水文学研究系列专著是余新晓教授及其科研团队多年研究成果的总结,是在国家林业局林业公益性行业科研专项项目、“十二五”国家科技支撑计划项目和国家自然科学基金资助项目等支撑下完成的。该系列著作研究成果依托国家林业局首都圈森林生态系统定位观测研究站(CFERN)这一主要研究平台,编写内容充实、观点新颖鲜明,解决了当前生态水文学研究中的一些重要科学问题,填补了目前该领域研究中的一些空白。余新晓教授始终坚持生态水文领域的研究,以一丝不苟的工作态度和坚持不懈的科研精神,在这一领域不断前进,取得了显著的成果,此系列著作可略见一斑。

该系列专著基于我国水资源短缺的背景,从不同的尺度深入探讨了森林生态系统的水文过程与功能、结构与水文生态功能及土壤-森林植被-大气连续体水分传输与循环等问题,以华北土石山区典型流域为研究对象,对人类活动与气候变化的流域生态水文响应进行分析和模拟,并对水源涵养林体系构建技术进行了研究与示范。该系列著作的内容均为生态水文领域的热点问题,引领了该学科的发展方向,其不仅在理论框架、知识集成方面做了很多开创性的工作,而且吸收了国内外先进的研究方法,在推动生态水文学的关键技术研究方面进行了有益的探索,为我国的生态环境建设提供了重要的理论指导和技术支持。

书是我们的良师益友。该系列著作的出版不仅为生态学、环境学、地理学、资源科学等学科的科研和教学工作者提供有益的参考,而且是我国水土保持、林业等生态环境建设工作者可参考的系列好书。望此系列著作可以为相关科研人员和工作者提供帮助,通过大家的工作实践,令祖国的青山绿水重现。是为序。

中国工程院院士 王浩

2013 年 6 月

前 言

森林植被是陆地生态系统的主体,在地球生物化学循环过程中,通过与土壤、大气和水在多界面、多层次和多尺度上进行物质与能量交换,改变和影响水资源分布,起到保护与涵养水源、净化水质、保持水土和抵御各种自然灾害的作用。在我国的生态环境建设过程中,恢复和重建森林植被是涵养水源、防治水土流失的根本措施,对保障我国生态文明建设和社会经济可持续发展具有不可替代的重要作用。

北京是一个严重缺水的城市,其人均水资源量仅为 248m^3 ,远低于国际公认的人均 1000m^3 的缺水标准下限。气候变化、人口激增、植被破坏和水资源过度开发利用等因素共同作用,使得水资源短缺问题成为制约首都可持续发展的关键性因素。北京山区的生态环境建设工作历来受到高度重视,植被恢复和重建工作取得了巨大的成就,目前林木绿化率已达到 67.85%。但该区域营造的人工林普遍存在着以中幼龄林为主、树种结构单一、林分质量较差等问题。科学合理地建设和调控森林植被,实现植被建设与水资源管理的协调发展是北京生态环境建设工作的重点和难点。森林生态水文学研究旨在了解森林生态系统与水资源之间相互影响的特征和机理,并在此基础上对水资源进行有效管理,它是解决北京山区植被建设与水资源短缺之间矛盾的一把钥匙。

本书以北京山区的典型林分作为研究对象,主要进行了以下几个方面的研究:①林冠层水文过程与功能。研究和探讨了不同树种和不同林分结构对于降雨分配、降雨时间、雨滴动能特征等的影响规律和机理。②枯落物层水文过程与功能。从不同树种林分枯落物层的现存量、持水能力、持水过程、蒸发过程、调节径流能力等方面进行了定量分析研究,揭示了北京山区典型树种林分枯落物层生态水文功能特征。③土壤层水文过程与功能。基于林下土壤的水文物理特性,分析土壤水分的动态变化和消退规律,并对土壤水分的有效性进行划分。④植被蒸腾与土壤蒸发。对单木、乔木林分、灌木、草本的蒸腾以及林下土壤的水分蒸发进行分析,揭示林地蒸散发特征。⑤生态系统水分循环与水量平衡。对整个生态系统的水分输入过程和输出过程分别进行分析,揭示不同林分类型的水量平衡特征以及不同林分结构对水量平衡的影响。⑥生态系统生态水文过程模拟。基于 Brook90 模型对降水输入、蒸散耗水和林地坡面径流等水文过程进行模拟,揭示不同植被类型对水文过程的影响。⑦生态需水量为导向的植被承载力研究。借助参数率定后的 Brook90 模型对不同树种林分的生态需水量进行了模拟和结果分析,设置不同林分结构和坡向进行情景模拟,分析不同林分结构和坡向对生态需水量的影响,提出以满足不同程度的生态需水量为目标的不同树种林分在不同坡向的合理林分结构。

本书是在国家林业局林业公益性行业科研专项项目(201104005)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD38B05)和国家自然科学基金资助项目(41171028)等的基础上整理而成的。在本书的写作过程中,课题组成员通力合作,从野外调查到数据整理,进行了

大量的资料分析工作。考虑到全书的系统性,书中参阅了大量文献,借此机会著者向这些文献的作者表示衷心的感谢!科学出版社对本书的出版给予了大力支持,编辑为此付出了辛勤的劳动,在此表示诚挚的感谢!

限于作者知识水平和能力,书中难免有不妥之处,敬请读者不吝赐教!

余新晓

2013年5月于北京

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 国内外研究进展与发展趋势	1
1.1.1 森林生态系统生态水文过程发展概况	1
1.1.2 森林生态系统生态水文过程研究进展	2
1.1.3 存在问题及发展趋势	8
1.2 研究区概况	9
1.2.1 北京山区概况	9
1.2.2 妙峰山林场概况	14
1.3 研究方法.....	15
1.3.1 技术路线.....	15
1.3.2 试验地设置	16
1.3.3 典型森林生态系统样地特征	18
1.3.4 监测项目与方法	22
第 2 章 林冠层水文过程与功能	30
2.1 林冠截留特征.....	30
2.1.1 林冠层分配降雨特征	30
2.1.2 林内降雨特征	36
2.1.3 树干流特征	40
2.1.4 林冠截留模拟	43
2.2 林冠延滞降雨特征.....	47
2.2.1 典型场降雨林冠延滞特征.....	47
2.2.2 林冠延滞降雨时间与降水特征关系	49
2.3 林冠层调控雨滴动能特征.....	51
2.3.1 林冠对雨滴大小分布的影响	51
2.3.2 林冠对雨滴终点速度的影响	58
2.3.3 林冠对雨滴动能的影响	61
第 3 章 枯落物层水文过程与功能	65
3.1 枯落物储量.....	65
3.2 枯落物持水特征.....	66
3.2.1 枯落物持水过程	66
3.2.2 枯落物有效拦截量	69

3.3	枯落物层调节径流特征	70
3.3.1	枯落物阻滞径流速率	70
3.3.2	枯落物蓄水减沙特征	70
3.4	自然状态下枯落物水分动态特征	71
3.4.1	枯落物持水量动态变化过程	71
3.4.2	枯落物截持降雨特征	72
3.4.3	枯落物水分蒸发特征	77
第4章	土壤层水文过程与功能	85
4.1	土壤层水文物理特征	85
4.1.1	土壤机械组成	85
4.1.2	土壤持水特性	85
4.1.3	土壤入渗特征	89
4.1.4	土壤水分特征曲线	92
4.2	土壤水分动态变化	94
4.2.1	土壤水分时间动态变化	95
4.2.2	土壤水分垂直动态变化	97
4.2.3	土壤水分消退规律	99
4.3	土壤水分有效性	101
4.3.1	土壤水分有效性划分	101
4.3.2	生长季土壤水分有效性变化	102
第5章	植被蒸腾与土壤蒸发	103
5.1	单木蒸腾	103
5.1.1	不同天气条件下的单木蒸腾特征	103
5.1.2	不同月份的单木蒸腾特征	105
5.1.3	单木蒸腾与环境因子之间的关系	108
5.2	乔木林分蒸腾	112
5.2.1	单木到林分的蒸腾尺度转换	112
5.2.2	林分生长季蒸腾量变化特征	116
5.3	林下灌木蒸腾	117
5.3.1	灌木树种光合蒸腾耗水规律	117
5.3.2	灌木树种水分利用率	122
5.3.3	灌木树种整株耗水	123
5.3.4	典型灌木树种荆条蒸腾特征	133
5.3.5	灌木生长季蒸腾量变化特征	134
5.4	林下草本蒸腾	135
5.4.1	草本植物光合蒸腾耗水规律	135
5.4.2	草本植物水分利用率	136
5.4.3	草本植物整株耗水	136

5.5 土壤水分蒸发	138
5.5.1 不同林分土壤蒸发特征	138
5.5.2 土壤蒸发量时间动态变化	140
5.5.3 土壤蒸发的影响因子	141
第6章 生态系统水分循环与水量平衡	143
6.1 水分输入过程	143
6.1.1 大气降水	143
6.1.2 穿透雨	144
6.1.3 树干茎流	146
6.1.4 林冠截留	148
6.1.5 枯落物截持	151
6.2 水分输出过程	153
6.2.1 林木蒸腾	153
6.2.2 土壤蒸发	155
6.2.3 地表径流	158
6.2.4 土壤蓄水量变化	160
6.3 生态系统水量平衡	162
6.3.1 不同林分类型水量平衡	162
6.3.2 林分结构对水量平衡的影响	169
第7章 生态系统生态水文过程模拟	172
7.1 模型简介	172
7.2 模型率定与检验	175
7.2.1 参数率定	175
7.2.2 率定效果	178
7.2.3 模型检验	183
7.3 生态水文过程模拟	188
7.3.1 降水输入分配	188
7.3.2 蒸散耗水分配	191
7.3.3 林地坡面径流	193
7.4 不同植被类型水文过程模拟效果	195
第8章 生态需水量为导向的植被承载力研究	198
8.1 森林生态系统生态需水量模拟	198
8.2 林分结构对生态需水量的影响	199
8.2.1 林分郁闭度与叶面积指数的关系	199
8.2.2 不同林分结构的生态需水量模拟	200
8.2.3 不同林分结构的生态需水量变化	204
8.3 坡向对生态需水量的影响	205
8.4 最优植被承载力的确定	207
参考文献	210

第 1 章 绪 论

1.1 国内外研究进展与发展趋势

1.1.1 森林生态系统生态水文过程发展概况

随着水资源短缺问题的日益严重,科学家们越来越意识到水文过程对生态系统功能的重要影响。但以往的水文学研究中对水文过程与生态系统植物群落变化与相互制约的规律和机理缺少研究。因此在 20 世纪 80 年代,国外学者提出了生态水文学的概念,1992 年在都柏林召开的国际水环境大会上,首次把 Ingram 提出的科学术语 eco-hydrology 提升为一门独立的学科,即生态水文学。生态水文学是逐步发展起来的一门新兴学科,是现代水文科学与生态科学交叉中发展的一个亮点,它以生态过程和生态格局的水文学机制为研究核心,以植物与水分关系为基础理论,将尺度问题贯穿于整个研究之中,研究对象涉及旱地、湿地、森林、草地、山地、湖泊、河流等,力求通过这一新的理论和方法实现水资源的合理与可持续利用(夏军等,2003;余新晓等,2004;王金叶等,2008)。

早期的生态水文学源于湿地生态系统的研究,Wassen 等将生态水文学定义为:旨在帮助更好地理解湿地生态系统自然发育以及帮助评价湿地生态系统价值、保护和恢复湿地生态系统的一门应用学科(Wassen and Grootjans,1996)。而 Baird 和 Willby 在《生态水文学》一书中指出,生态水文学是生态学的水文方面,它是研究植物如何影响水文过程及水文过程如何影响植物分布和生长的水文学和生态学之间的交叉学科,还指出生态水文学不仅局限于湿地生态系统,还应涵盖其他的生态系统(Baird and Willby,1998);Zalewski 等认为生态水文学是指对地表环境中水文学和生态学相互关系的研究,认为其是实现水资源可持续管理的一种新的方法(Zalewski,2000);Rodriguez-Iturbe 给出生态水文学一个简单而且高度概括的定义,即生态水文学是描述生态格局和生态过程水文学机制的学科(Rodriguez-Iturbe,2000)。对于生态水文学,国内外还有学者有一些其他的定义(王根绪等,2001)。总之,生态水文学是介于生态学与水文学之间的一门边缘学科,生态水文学和传统水文学最大的区别在于它吸收了许多生态学中的理论,特别是生态系统方法论。

生态水文研究的目的是解释植被的生态过程与水文循环之间的联系,明确植被的水分交互作用如何影响物质的循环和能量交换(朱建刚,2010)。生态水文学的观点对于理解干旱、半干旱区生态系统和景观有着十分重要的意义(Williams,2005;赵文智和程国栋,2008)。生态水文学包括水生生态系统和陆生生态系统生态水文学的研究,目前来说后者是今后研究的重点方向。对于陆生生态系统而言,生态水文学主要关注的是径流和侵蚀等地表过程的水平通量和蒸发、入渗、渗漏、补给和蒸腾等水文过程的垂直通量变化及其影响机制,以及由这些通量变化引起的生态和水文过程的变化。

森林植被是陆生生态系统水文循环的各个重要过程的参与者,其自身的生态过程和水文过程相互联系、相互影响(刘世荣等,2007)。森林生态水文研究已经成为水循环与生物圈相互作用的一个重要领域(于贵瑞和王秋凤,2003)。目前森林生态水文过程研究可分为森林生态系统和流域两个尺度,即森林生态系统生态水文过程和森林流域水文过程。森林流域水文过程多以分布式水文模型建立和模拟为基础,以探究宏观尺度的径流等下垫面过程机理(张志强等,2003;刁一伟和裴铁,2004;孙阁等,2007);森林生态系统生态水文过程多借助实验样地尺度上的土壤-植被-大气传输(soil-vegetation-atmosphere transfer, SVAT)模型(包括更为微观的土壤-植物-大气连续体模型),探究垂直梯度的水文传输和植被生理生态过程机制(朱建刚,2010)。应该说,森林生态系统生态水文过程研究是实现流域或区域森林水文过程研究的基础和关键,有着重要的研究价值。

1.1.2 森林生态系统生态水文过程研究进展

森林生态系统一般从上到下可分为3个层次,即林冠层、枯落物层和土壤层,各个层次在生态水文过程中发挥了不同的作用,体现了重要的水文生态效益。森林生态水文过程是指在森林生态系统各个功能层次之间的水分分配和运动过程,包括林内降雨、降雨截持、树干流、枯落物截留、林地蒸散、土壤入渗、地表径流等。这类研究是传统森林水文学的主要内容,研究开展较早,成果较为充足,其目标在于揭示森林水文特征、为探讨水分运动过程机制提供基础资料,也是当前森林水文学研究中的一个重要方面。近些年来由于对了解水文过程机制和理解森林水文过程影响的迫切需求,对森林生态系统生态水文过程的研究越来越受到其他相关学科的关注(王礼先和张志强,1998)。下面介绍森林生态系统各主要功能层次生态水文过程的研究进展情况。

1. 林冠层生态水文特征

林冠层是森林生态系统对水分传输有着重要作用的第一层,是调节降水分配和水分输入林内的重要过程,使林内的降雨量、降雨强度、降雨分布等发生显著变化,直接影响水分在森林生态系统中的整个循环过程(余新晓等,2004;王金叶等,2008)。降雨下落到植被层表面产生了第一次分配,分配为林内降雨量、树干流量和林冠截留量3个分量。

林冠截留降雨的研究已经有100多年的历史(Hoppe,1896;范世香等,2007),国内外学者在此方面做了大量的研究工作,积累了宝贵的资料。研究表明在茂密的森林中,林冠对次降雨的截留量可达10~20mm,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%(范世香等,2007)。国外研究表明林冠截留率为10%~30%,有的地方甚至达到50%。我国各主要森林生态系统类型林冠截留率平均值在11.40%~34.34%之间变动,变动系数为6.68%~55.05%,各种森林生态系统的林冠截留功能波动性大,稳定性小,其中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)。林冠截留量和截留率在不同季节之间有较大的差异,印度学者发现,35年生雪松的截留损失为降水量的25.2%,在降水量最大的7月份为18.7%,而在雨量最小的2月份为69.1%,表明了旱季的截留率大于雨季。林冠截留量主要受林木特征和气象两个因素的影响(鲍文等,2004)。

林木特征因素中森林生态系统类型、树种组成、冠层厚度、林龄、叶面积指数、林分密度、郁闭度等对林冠截留都有很大影响(范世香等,2007;王金叶等,2008)。研究表明林分的降水截持量取决于冠层容量,而林冠枝叶空间分布越均匀,林冠枝叶量越多,其饱和截留容量越大(曾德慧等,1996;范世香等,2000;Samba et al.,2001)。气象因子中降雨量、降雨强度和大气蒸发力等对林冠截持量有很大的影响(Ghuman and Lal,1987;马雪华,1993;Viville et al.,1993;袁正科和欧阳惠,1996)。降水强度对截留的影响一般是线性的,在同一降水量的情况下,截留量、截留率都随着降水强度增大而减小。林冠截留量与降水量之间呈显著的正相关关系,不同森林类型有的更接近于直线相关,有的则呈幂函数关系;而林冠截留率则与降水量呈紧密的负相关关系,其线型多为幂函数形式(温远光和刘世荣,1995;石培礼和李文华,2001)。林冠截留的降水最终都会被蒸发到大气中,可将林冠截留降水的蒸发分成降水期间的蒸发和降水之后的蒸发两部分。二者都与植被的截蓄容量和降水期间的蒸发能力密切相关。

树干流也称为树干截留,是森林冠层平衡中的重要组成部分,加剧了林内水分分配和养分分配的差异(魏晓华和周晓峰,1989;田大伦等,2002)。树干流量一般只占降雨总量的0.3%~3.8%,在森林生态系统水分平衡的各个分量中只是一个非常微小的部分,在定量研究中常常被忽视,但其有着重要的生态学意义(周择福等,2004)。树干流主要在树木根部下渗分布,其中的水分和淋洗树冠得到的养分易于被树根吸收(刘世海等,2002),因而对树木生长起着相当重要的作用,特别在干旱、半干旱条件下,树干流对造林树种的成活至关重要(董世仁等,1987;万师强和陈灵芝,2000),树干流甚至成为某些树种适应干旱瘠薄立地条件的重要决定因素之一(周晓峰,1994;周择福等,2004)。研究表明树种之间的树干流差异十分显著,阔叶树的树干流量要大于针叶树。树干流量随林外降水量增大而增大,此外树木胸径、树皮厚度、树皮粗糙程度及树枝分支特征等因素也影响着树干流量的大小。

林内降雨由两部分组成:一部分被称为自由穿透雨,是未经林冠拦截直接从林隙到达林地地表的降水;另一部分被称为滴落水,是雨滴打击林冠表面后溅落以及被叶片及枝条截留后滴落的雨水。林内与林外降雨量呈现比较好的线性正相关关系(余新晓等,2004)。但是实际观测中发现,同一林分所测定的林内降雨值呈现了较大的波动性和空间异质性,有些观测点在某一时间甚至出现了林内降雨大于林外降雨的情况(张家洋,2007;李振新等,2004;Lloyd and Marques,1988;Sinun et al.,1992)。研究认为,影响林内降雨的空间差异的原因包括降雨量、雨强、树种、林窗位置、林冠结构等因素(Sinun et al.,1992;Loesch et al.,2002)。

由于林冠截留影响因子的复杂性和重复测定的难度,研究者非常关注通过已有的测定结果建立预测模型。张光灿等(2000)将林冠截留模型分为经验模型、半经验半理论模型和理论模型。最早的统计模型是由Horton提出的,后来很多模型都是在此基础上改进的。Leonard及Helvey等(Leonard,1961;Helvey and Patric,1965)也提出了相关的经验模型。经验模型具有形式简单、参数少而易测的优点,吸引了大量学者的注意,特别是非线性统计模型的应用大大提高了模型的精度。但经验模型的建立受观测地区复杂环境条件的影响,而模型考虑的影响因子都较为简单,往往在推广到其他林分或其他地区时模

拟精度较低。Rutter 等在冠层水量平衡的基础上提出了截留降雨的概念模型,该模型的原理是通过林冠层的水量平衡和树干水量平衡动态方程的计算来获得林冠截留量。Gash 解析模型是基于 Rutter 模型概念结构的进一步简化,适用于相对密闭林分的林冠截留模拟,并考虑了气象因子。Gash 解析模型是介于静态与动态之间的一种模型,模型把一次降雨的截留损失分成林冠吸附、树干吸附和附加截留三部分,通过分项计算并求和可以对某时段内林冠截留量进行估算(Gash et al., 1995)。但是该模型更适用于次降雨量较大的情况,而对 10mm 以下的降雨模型估计的误差较大。Rutter 模型和 Gash 解析模型是目前存在的林冠截留模型中较为完善且应用范围最为广泛的(Carlyle-Moses and Price, 1999; 张志强等, 2003)。Valente(1997)对 Rutter 模型和 Gash 模型进行了修正,使其能够较好地模拟稀疏林冠的降雨截留过程。在国内的研究中,王彦辉等根据我国实际情况,在分析总结前人林冠截留模型研究成果的基础上,将 Horton 模型进行了必要的简化,建立了半理论半经验的林冠截留模型,该模型通过参数调整可适用于我国不同林分的次降雨截留模拟,取得了良好的模拟效果(王彦辉等, 1998; 王金叶等, 2008)。

2. 枯落物层生态水文特征

枯落物层是指覆盖在土壤表面的、由枯枝落叶和动物粪便及其残体组成的生态功能层(刘春江等, 2003),是森林生态系统中继林冠层、含根土壤层之后的另一个重要的垂直结构上的功能层。枯落物层在水文过程中的重要作用体现在:截留降雨、拦蓄地表径流、防止土壤水分蒸发和增加地表入渗量(程积民和李香兰, 1992; Tamai et al., 1998; 薛立等, 2005)。枯落物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。在降雨开始时,随着穿透雨的输入和周围环境水分含量的增加,枯落物层的含水率快速增加;当水分充满枯落物层空隙,开始向细胞内部渗透时,吸水速率降低,吸水量增加变得缓慢(赵鸿雁等, 2001);枯落物吸水量达到其最大潜力值后,枯落物层变为一层连续的水流通道,含水量不再增加(赵玉涛等, 2002; 陈丽华等, 2002)。枯落物的持水能力通常用干物质的最大持水率(%),即枯落物所持有水的质量与不含水枯落物的质量的比值来表示。综合之前的研究结果认为,枯落物吸持水量可达到自身干重的 1~4 倍(刘创民等, 1994),其饱和含水量为 1.21~5.88mm,各种森林的枯落物的最大持水量平均为 309.54% (刘世荣等, 1996)。枯落物层的氮化和矿化速率随着含水量的增加而提高,同时枯落物层含水量具有明显的时空变异性,从而加大了研究的难度。枯落物的最大持水率与林分类型、林龄、枯落物的组成、分解状况、积累状况等有关(臧廷亮和张金池, 1999)。枯落物层的分解程度越高,其持水率越大;反之,则越小。枯落物储量越大(枯落物层厚度越大)、初始含水量越低,其最大持水率越大。此外,降雨强度和降雨历时也会对枯落物的水分吸持过程产生影响(赵鸿雁等, 2003)。枯落物截留具有削减地面径流量、降低径流速度、延长地表径流时间、减少径流泥沙量等功能,对减轻林地水土流失有着非常明显的效果。枯落物层具有比土壤更大的孔隙,因此其水分也就更易蒸发,并且枯落物层的覆盖可抑制土壤水分的蒸发(赵鸿雁等, 1994)。

3. 土壤层生态水文特征

土壤层通过入渗、蓄纳等作用,对降水资源分配格局产生的影响最为明显,成为联系地表水与地下水的纽带,也是森林生态系统水分的主要储蓄库(马雪华,1987)。土壤入渗是指水分进入土壤形成土壤水的过程,是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化过程中的一个重要环节。土壤渗透性是十分重要的土壤物理学特征参数之一,土壤渗透直接影响着地表径流过程和土壤贮水过程,对水土流失、植物生长以及其他水文过程都有很强的调节作用(党宏忠,2004;王金叶等,2008)。林地土壤入渗包括两个过程:一是经过林冠和枯落物截持后的到达地面的净降水通过表层土壤的孔隙进入土壤中的过程;二是水分从表层土壤沿土壤孔隙向深层渗透和扩散的过程。测定土壤入渗方法较多,如双环法、环刀法、渗透仪法、模拟降雨法、土柱法、钻孔法、圆盘入渗仪法等(Silburn and Connolly, 1995;吴发启等,2003)。不同的测定方法的研究结果都表明,森林土壤由于受树木根系以及土壤内的动物影响而拥有相对疏松的结构,其孔隙度特别是非毛管孔隙度要明显高于其他土地类型,因此森林比其他利用类型的土地拥有更高的土壤水分入渗能力(Dunne et al., 1991;Robichaud,2000; Harden and Scruggs,2003;程根伟等,2004)。

影响土壤入渗的因素众多,目前国内外在此方面有着大量的研究成果。土壤入渗能力与土壤水分物理性质关系紧密,相关研究表明土壤质地越粗、土壤有效孔隙率越大、土壤水稳性大团粒含量越多、土壤容重越小则土壤的入渗能力越强,反之则入渗能力越弱(Helalia,1993;秦耀东,2003)。降雨作为土壤入渗的输入过程有着重要的影响,其中雨型、雨滴直径和降雨强度是主要的表现因子,目前研究普遍认为降雨因子对土壤的初渗速率和稳渗速率都有一定影响,而对土壤初渗速率的影响更为显著(Aken and Yen,1984)。不同的下垫面类型也影响着土壤入渗特征,基本规律为:阔叶林土壤入渗能力>针叶林土壤入渗能力>荒地土壤入渗能力,如潘紫文等研究得出了东北部林区这种排序为蒙古栎天然林、白桦天然林、水曲柳天然林、樟子松人工林和落叶松人工林。土壤入渗速率随着地形因子中的坡度、坡向、坡位的不同存在着较大的差异(康绍忠等,1996;袁建平等,2001)。此外,土壤地表结皮、土壤初始含水率、地表枯落物特征等因子都对土壤入渗有着一定的影响(秦耀东,2003)。

土壤水分入渗是一个非常复杂的过程,涉及水分、空气及水汽在土壤饱和带和非饱和带的动态运动,因此使用合理的土壤入渗模型对入渗过程进行模拟成为水文循环研究中的热点(党宏忠,2004)。目前描述土壤入渗的模型有经验模型和土壤物理模型:经验模型著名的有 Kostiaikov 指数方程(1932年)、Horton 指数方程(1940年)和 Holtan 土壤贮水函数方程(1961年)等;而具有物理意义的模型有 Green-Ampt 的指数衰减模型和 Philip 的二项式入渗模型等(秦耀东,2003)。国内学者对土壤入渗模型也有很多的研究,建立了一些土壤入渗模型,常用的有方正三公式和蒋定生公式等(方正三,1958;蒋定生等,1984)。这些模型都在一定程度上反映了土壤入渗的规律,但往往都建立在不同的前提条件下,其适用性各不相同,而且所有模型都没有考虑土壤的时空异质性,不能完整地反映土壤入渗过程(Bergkamp,1998;Souchere et al.,1998;Jhorar et al.,2004)。具有物理意义的入渗模型是将来土壤入渗模型的主要发展方向,同时空间变异性问题、非均质入渗问

题以及从点到流域的尺度扩展问题都需要进行完善(郭明春,2005)。

土壤贮水量是评价植被水源涵养功能的重要指标和水文参数,我国的林学和水保领域常常以土壤的非毛管孔隙贮水量来代表森林土壤贮水量,但周择福等(1995)指出在我国半干旱地区土壤的毛管贮水量常常是非毛管贮水量的几倍,土壤蓄水往往以吸持水为主,因此用非毛管贮水量并不全面和准确,应该用非毛管和毛管贮水量之和来代表土壤贮水性能。土壤贮水能力与土壤非毛管孔隙度、毛管孔隙度和土壤厚度直接相关,植被状况造成的土壤孔隙度的差异也间接影响了土壤贮水能力。刘世荣等(1996)的研究表明,在我国温带山地落叶阔叶林、温带山地针叶林和寒温带山地针叶林,非毛管孔隙贮水量较低,多在 100mm 以下;而我国热带、亚热带森林,特别是阔叶林生态系统,林地贮水能力强,非毛管贮水量在 100mm 以上。林地枯落物量对土壤表层的孔隙度有着较大的影响,也会影响土壤的贮水能力,随着地表枯落物的增加,土壤孔隙度也随之增加,而且随着时间的延长枯落物层对土壤结构影响也会向下延伸。

4. 林地坡面产流特征

径流是水文循环和水量平衡的基本要素之一,根据径流发生在土壤剖面的位置可分为地表径流、壤中流和地下径流(郭明春,2005)。传统水文学径流形成机制源于 1935 年霍顿提出的 Horton 产流理论,阐明了自然界超渗地面径流和地下水径流的产生机制(Horton,1935),这一理论在水文学领域的统治地位持续了 30 年左右。20 世纪 60 年代末开始,一批水文学家提出的变动产流面积概念对超渗地表产流机制提出了挑战,这种理论被称为“山坡水文学产流理论”,主要包括壤中径流和饱和地面径流的形成机制及回归流概念,解释了饱和地面径流的产生(张志强,2002;马雪华,1993)。“山坡水文学产流理论”是 Horton 产流理论的新发展。一般来讲,植被稀少、土壤发育不良、入渗能力差的地区主要发生超渗产流,而植被盖度高、土壤发育较好的湿润地区易形成饱和和地表径流(张志强,2002;余新晓等,2004)。

随着径流形成的机制研究越来越成熟,出现了各种新的测流手段(Kirkby,1988;Bonell,1993;顾慰祖,1995),特别是同位素技术的广泛应用使得各种径流成分的形成过程有了实验依据(顾慰祖,1995;Beiling et al.,1995;Newman et al.,1997;Yager and Kappel,1998)。在研究尺度上,将坡面尺度与流域尺度相结合,以流域尺度的研究验证坡面尺度的研究结果,以坡面尺度的研究从更深层次上揭示水分运动和传输机制是未来的发展方向(Singh,1995;Yue and Hashino,2000;McGlynn et al.,2002)。

5. 林地蒸散特征

蒸散是植被及地面整体向大气输送的水汽总通量,包括蒸发和蒸腾两个部分,对于森林生态系统的蒸散来说具体包含树冠截留蒸发、枯落物层截留蒸发、土壤蒸发和上层乔木与下层灌木的蒸腾(Greenwood and Beresford,1982;Bren and Papworth,1991)。森林生态系统蒸散过程是一个极其重要的水文过程,相关研究表明陆地上年降水量的 66%是通过蒸散返回大气层的,是森林生态系统水分平衡的主要分量。

蒸散是一个复杂的连续过程,受到多种环境因子的影响,这些因子包括地形因子如海

拔、坡度、坡向等,土壤因子如渗透、可利用水分等,大气因子如太阳辐射、温度、湿度、风速、降雨等,植被因子如物种组成、植被结构、叶面积指数、植被之间的竞争等(杜阿鹏,2009)。一般情况下森林蒸散具有随着降水量的增加而增加的趋势,但土壤蒸发则随着降水量的增加而减少。人为活动对森林的干扰可以导致森林蒸散的变化,刘焯章和康文星(1993)对杉木林的研究表明森林皆伐使蒸散形式的水分所占比例减少了7%,蒸腾作用减少了近一半,而土壤蒸发作用有明显加强;间伐则增加了森林的蒸散,大大提高了蒸散的比值。

目前蒸散的测定和估算方法较多,原理也各不相同。蒸散的实际测定法主要包括水文学法、微气象法、植物生理法和红外遥感法等。其中,水文学法包括:水量平衡法、水分运动通量法、蒸渗仪法等,水文学法一般原理是通过相关各水文过程分量的测定通过水量平衡关系来计算实际蒸散量,这种方法简便可靠,但具有观测时间较长的缺陷。微气象法包括:包文比能量平衡法(BREB法)、梯度法(扩散法)、空气动力学法、涡度相关法(EC法)等,这类方法根据实测的微气象因子结合模型模拟对实际蒸散进行测定,具有不破坏植被下垫面和可测定连续时间动态变化的优点,但其测定对大气界面的稳定性要求较高,技术较为复杂,仪器成本较高。植物生理法主要包括:称重法、气孔计法、风调室法、示踪同位素法、热脉冲法等,该方法适用于在叶片和植株尺度上测定植物蒸腾量,具有准确、易操作的优点,可适用于较为复杂的地形条件,但是生理学方法测定林分蒸腾时都是从单株外推到整个林分,样本的代表性和推算的准确性可能有问题。红外遥感法是通过卫星或飞机在高空遥测地表温度和地表光谱及反射率等参数,结合地面气象、植被和土壤要素的观测来计算蒸散的方法,是目前唯一的有效测定区域和全球范围蒸散的技术,但由于技术尚未成熟,目前测定精度不够(魏天兴等,1999;张劲松等,2001;胡继超等,2004;司建华等,2005)。对比各种实测蒸散的方法,司建华等(2005)认为水量平衡法、包文比能量平衡法、空气动力学法及红外遥感法具有较为广阔的应用前景。

建立和使用模型对实际蒸散进行估算是该领域研究的热点问题,模型估算也可分为用单一模型计算和SPAC综合模拟法。用单一模型计算的一个主要思路是计算潜在蒸散量,然后根据植被系数和土壤水分因子进行订正即可计算出实际蒸散。常用的计算潜在蒸散的公式有Blancy-Criddle公式、Thornthwaite公式、布迪科公式、Priestley-Taylor公式、Penman公式、Penman-Monteith公式等(肖文发和徐德应,1999)。而另一个思路是应用实际蒸散模型计算,目前最常用的实际蒸散模型是Penman-Monteith(P-M)公式和Shuttleworth-Wallance(S-W)模型,其中前者更适用于下垫面植被密集情况下,而后者更适用于稀疏植被情况。这类模型理论思想较为完善,能够模拟某一时段的蒸散值,但需要的参数很多,不便于推广使用(巨关升等,1998;魏天兴等,1999;胡继超等,2004)。SPAC综合模拟法充分考虑了水分在土壤、植物和大气相互联系的系统内转移交换的物理和生理过程,利用数学模型对水分、养分和能量在系统内的传输过程进行模拟,能够反映蒸散与土壤水分、植被生长、气象状况之间复杂的耦合作用。目前国外的Flerchinger等(1996)、Gusev(1997)与Kim(1998)等对应用SPAC模型进行蒸散模拟方面的研究取得了较为满意的成果,国内蔡焕杰(1992)、刘昌明和窦清晨(1992)、康绍忠等(1995)、吴擎龙等(1996)、罗毅等(2001)也提出了多个SPAC模型,并对SPAC系统传输理论进行了

研究和解释。SPAC 系统模拟综合了微气象学、土壤水动力学和植物生理学等学科的理论和方法,能够更加准确和系统地描述 SPAC 系统内水分传输过程,具有牢固的物理基础,但 SPAC 模型参数非常复杂和繁多,并且对植被层考虑往往过于单一,尚需要进一步完善(Corinna,1999;张劲松等,2001;司建华等,2005)。

1.1.3 存在问题及发展趋势

1. 存在问题

(1) 森林生态水文过程研究不系统。目前森林生态水文学理论框架仍不够完善,研究方法仍不够成熟,使得对森林生态水文过程研究不够系统,不能很好地满足生态环境建设的需要。目前国内对于森林生态水文过程的研究多集中在单个功能层次的过程上,对各层次之间水分传输过程的综合研究较少;已有的综合性研究多偏重于水文效益的计算,对水文过程的机理研究很少;对水文生态功能的相关研究多集中在单一的树种和林分,缺少多个树种的对比分析研究以及不同土地利用方式下水文功能的对照研究;对森林生态系统的生态水文研究缺少对不同林分结构特征对水文循环中不同水文过程的影响研究;在研究中缺少森林生态系统在不同时间和空间尺度上对水文过程的影响研究。

(2) 缺乏水文过程对植被生态过程的影响研究。目前研究大都集中在植被对水文过程的影响中,而生态水文学的核心研究对象是植物,生态水文恢复是生态水文过程研究的一个重要的方向,但现阶段此类研究非常缺乏。目前我国干旱和半干旱地区在进行植被建设时最常面对的问题就是很难对不同自然条件的区域进行规划建设和对不同种类、不同结构的植被进行生态恢复,造成这个问题的原因在于无法了解当地可利用水资源量与植被生态需水量的关系以及不能得知不同植被类型和结构对水文过程的影响机理。对植被生态需水量以及土壤植被水分承载力的研究能够为用植被进行生态水文恢复提供理论依据,对我国干旱半干旱地区的生态环境建设工作具有重要的现实意义。

(3) 生态水文模型的研究仍不完善。目前的水文模型存在问题,在集总模型方面,大部分停留在地块尺度上的一维模型,二维和三维模型的发展较为缓慢。而应用较为广泛的分布式水文模型虽然考虑了空间异质性但对异质性本身规律缺乏研究,在实际应用中不能避免出现机械性和主观性的问题。另外,在水文单元划分方法上不够科学,在模型的尺度转化问题上仍存在很多问题。生态水文模型和遥感图像与地理信息系统的空间耦合只处在初级阶段,模型的计算方法研究上也还需要进一步深入。

2. 发展趋势

(1) 加强多学科综合研究。森林生态水文学涉及生态学、水文学、土壤学、气象学等多门学科,在研究中需要对大气-植物-土壤系统内各个层次和界面的物质和能量交换过程进行分析,需要多个学科知识体系的融合才能够实现。目前水文学家、生态学家、气象学家、土壤学家都各自分别进行相关数据采集和研究工作,缺乏跨学科的融合和交流。在今后的研究中,增强学科之间横向的交流,实现数据和知识的共享是重要的发展方向。

(2) 加强生态系统水文过程和机理研究。森林生态系统水文过程和机理研究是现代