

生态水文学研究系列专著

森林植被-土壤-大气 连续体水分传输过程与机制

余新晓 朱建刚 李轶涛 等/著
贾国栋 贾剑波 王建文



科学出版社

生态水文学研究系列专著

森林植被-土壤-大气连续体水分 传输过程与机制

余新晓 朱建刚 李轶涛 等 著
贾国栋 贾剑波 王建文

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书立足于森林生态学最新理论研究和学科前沿,分别介绍了 SPAC 的基本理论、大气-植被-土壤水分传输过程、植被体内水分传输过程、植物水分利用特征、林木的光合、蒸腾和耗水过程、植被-土壤-大气连续体热量传输转换与力能分析等方面的内容,系统地阐述了当今森林生态学的新方法、新技术,为今后森林生态学的学科发展起到了推动作用。

本书可供生态水文学、水土保持学、林学、环境科学、地理科学等专业研究、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

森林植被-土壤-大气连续体水分传输过程与机制/余新晓等著. —北京:科学出版社,2016.2

(生态水文学研究系列专著)

ISBN 978-7-03-047246-5

I. ①森… II. ①余… III. ①森林植被-土壤含水量-研究
IV. ①S718.5②S152.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 019054 号

责任编辑:朱 丽 杨新政 / 责任校对:胡小洁

责任印制:肖 兴 / 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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 2 月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:350 000

定价:98.00 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,是现代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

森林生态系统是陆地生态系统的主体,承载着生态、经济、社会 and 美学等诸多服务功能,同时森林生态系统通过与大气、土壤之间物质与能量交换,深刻影响和塑造着陆地生态系统。近 20 年来,水资源短缺问题从区域到次大陆尺度上,在各类生态系统、气候区中都日益突出。森林对水分循环起着巨大的调节作用,影响着水量平衡的各个环节。森林与水的关系是生态水文学和水土保持学研究的核心方向。水分由土壤进入森林植物体内,通过茎秆到达叶片,再从气孔以水汽的形式扩散到空气边际层,最后参与大气的湍流交换,形成相互作用且动态统一的连续系统,即土壤-植被-大气连续体(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)。

由于研究方法和观测手段的不足,过去这一研究一直以农田生态系统为主,对于高大、复杂多样的森林生态系统研究较少。近年来,随着波文比、大型蒸渗仪、三维超声风速仪以及稳定同位素等技术的发展和相关仪器的研发,为水分在森林 SPAC 系统中的运动的研究提供了良好的发展契机。我国森林主要分布于山丘区,研究山丘区典型森林生态系统 SPAC 水分运动机制有助于理解生态系统水循环规律和机制,以及森林生态系统的服务功能及其价值。

本书立足于研究北京山区典型森林生态系统 SPAC 水分运动机制,是国家自然科学基金重点项目“基于稳定同位素的典型森林生态系统水、碳过程及其耦合机制研究(41430747)”、国家自然科学基金面上项目“基于氢氧稳定同位素技术的植被-土壤系统水分运动机制研究(41171028)”、国家科技支撑计划项目“华北土石山区防护林体系结构定向调控技术研究与示范”的成果之一,系统地阐述了当今森林植被-土壤-大气连续体水分传输过程与机制最新的理论、方法和技术。本书共 9 章,内容包括引言,大气-植被水分传输过程,植被体内水分传输过程,林木的光合、蒸腾和耗水过程,典型树种水分利用模式,土壤水分传输过程,植被-土壤-大气连续体热量传输转换与力能分析,植被-土壤-大气连续体水分传输过程模型与模拟和植被-土壤-大气连续体中 SVAT 水分动态非线性系统仿真,详细阐述与分析了水分在 SPAC 系统中的传输过程与作用机制。

目前,对森林生态系统 SPAC 水分运动理论的研究刚刚起步,有许多重要理论和实践问题的研究尚在探索之中,例如针对森林生态系统中水分运动要素的测量较为困难、SPAC 水分运动中很多过程仍然无法定量描述、对森林生态系统的蒸散和潜热通量的研究等。随着研究的不断深入,其结果必将对森林生态系统 SPAC 水分运动理论体系的发展和应用起到积极推动作用。作者殷切期望本书的出版能引起有关人士对该研究领域的更大关注和支持,并希望能对从事森林生态系统 SPAC 相关学科的专家学者有所裨益,共同将森林生态系统 SPAC 领域推向新的发展阶段。

本书研究资料的积累过程实际上就是作者从事森林生态系统 SPAC 科研和研究教学的过程,在此期间,得到了王浩院士、尹伟伦院士、崔鹏院士和李文华院士等的指导,朱

建刚、李铁涛、贾国栋、聂立水、陈慧新、张艺、刘自强、贾剑波、王建文和刘文娜等提供了大量分析资料,并帮助整理,在此一并表示衷心的感谢!

鉴于森林生态系统 SPAC 研究的复杂性及作者的知识 and 能力有限,书中难免有不妥之处,敬请读者不吝赐教。

余新晓

2015 年 10 月于北京

目 录

丛书序

前言

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景及其意义	1
1.2 SPAC 理论研究进展	2
1.2.1 SPAC 基本理论研究	2
1.2.2 森林植被-土壤-大气水热平衡研究	3
1.3 土壤与水分运动	8
1.3.1 土壤水的一些基本概念	8
1.3.2 SPAC 系统中土壤水有效性新概念	9
1.4 植物与水分运动	10
1.4.1 树木光合与蒸腾研究进展	10
1.4.2 植物水分传输机理与研究现状	15
1.4.3 森林土壤水量平衡研究进展	16
1.5 存在问题与发展趋势	17
1.5.1 存在问题	17
1.5.2 发展趋势	17
第 2 章 大气-植被水分传输过程	19
2.1 大气降水变化	19
2.1.1 日数变化特征	19
2.1.2 月变化特征	19
2.1.3 季节变化特征	20
2.1.4 年变化特征	21
2.2 场降雨变化	22
2.2.1 降雨雨量量级分布特征	22
2.2.2 降雨强度分布特征	23
2.2.3 降雨雨滴特征	23
2.2.4 降雨历时特征	24
2.3 林分结构因子对降雨过程的影响	24
2.3.1 叶面积指数对林冠截留的影响	25
2.3.2 郁闭度对林冠截留的影响	28
2.3.3 生物量对林冠截留的影响	28
2.3.4 不同影响因子对降雨截留过程的贡献率	31

2.4 森林植被不同层次对降雨输入过程的影响	32
2.4.1 乔木层截留特征	32
2.4.2 灌木层截留特征	49
2.4.3 草本层截留特征	51
2.4.4 枯落物层截留特征	53
2.4.5 森林植被垂直层次对降水输入过程的影响	55
第3章 植被体内水分传输过程	60
3.1 植物根系吸水	60
3.1.1 根系密度分布	60
3.1.2 根系吸水模型	62
3.1.3 基于土壤水分动态求解根系吸水模型	63
3.2 单木液流特征	63
3.2.1 树干液流日变化规律及种间差异	63
3.2.2 不同气候条件对树干液流的影响	64
3.2.3 树干液流的月变化特征	65
3.3 林分液流特征	66
3.3.1 单株到林分尺度转化方法	66
3.3.2 林木胸径-边材面积模型	67
3.3.3 林分生长季蒸腾量月变化特征	67
3.3.4 林木蒸腾特征与环境因子的关系	68
第4章 林木的光合、蒸腾和耗水过程	69
4.1 林木的光合过程	69
4.1.1 针叶林的光合特性	70
4.1.2 阔叶林的光合特性	72
4.1.3 灌木林的光合特性	72
4.1.4 乔灌木林光合特性比较	75
4.2 林木的蒸腾过程	75
4.2.1 针叶林的蒸腾特性	75
4.2.2 阔叶林的蒸腾特性	78
4.2.3 灌木林的蒸腾特性	81
4.2.4 乔灌木林蒸腾特性比较	83
4.3 林木耗水特性研究	84
4.3.1 针叶乔木树种耗水特性	84
4.3.2 阔叶乔木树种耗水特性	84
4.3.3 灌木树种耗水特性	85
4.3.4 乔灌木树种林木耗水特性比较	85
第5章 典型树种水分利用模式	87
5.1 植物茎干水与不同水源的稳定同位素年内不同生长期的变化	87

5.1.1 干旱前期植物茎干水氧稳定同位素与土壤水氧同位素的关系	88
5.1.2 干旱中期植物茎干水氧稳定同位素与土壤水氧同位素的关系	90
5.1.3 干旱末期植物茎干水氧稳定同位素与土壤水氧同位素的关系	91
5.1.4 雨季植物茎干水氧稳定同位素与土壤水氧同位素的关系	93
5.2 植物对不同层次土壤水分的利用特征	95
5.2.1 利用 Iso-source 模型确定植物对不同层次土壤水分利用率	95
5.2.2 结合树干液流计(TDP)确定植物对不同层次土壤水分的利用量	97
5.3 旱雨季时期两树种对降水的响应	98
5.3.1 雨季降雨前后侧柏和栓皮栎对水分的利用特征	98
5.3.2 旱季降雨前后侧柏和栓皮栎对水分的利用特征	101
5.4 植物对地下水的利用特征	106
5.5 侧柏和栓皮栎水分利用来源总结与对比分析	108
5.6 典型树种水分利用模式的生理生态特征响应	110
5.6.1 典型树种水分利用模式与平均树干液流速率之间的关系	111
5.6.2 典型树种水分利用模式与叶片水势之间的关系	115
5.6.3 典型树种水分利用模式与根系分布、土壤水分含量之间的关系	117
第 6 章 土壤水分传输过程	122
6.1 土壤物理及水文性质	122
6.1.1 土壤物理性质	122
6.1.2 土壤持水特征	123
6.1.3 土壤入渗特征	125
6.1.4 土壤非饱和导水率	128
6.1.5 土壤入渗影响因子分析	129
6.2 土壤水分动态	129
6.2.1 土壤含水率季节变化特征	129
6.2.2 土壤垂直剖面含水率变化特征	130
6.3 土壤水分运动规律	133
6.3.1 土壤水分运动基本方程	133
6.3.2 土壤水分一维非饱和流运动方程的求解	133
6.3.3 土壤蒸发	137
6.3.4 土壤入渗	139
6.4 土壤水分与土壤热通量的关系	140
6.4.1 土壤含水率与热通量的季节变化	140
6.4.2 土壤蒸发量的时间动态	141
6.5 土壤水分与土壤力能的关系	142
6.5.1 典型林分土壤水势的季节变化	142
6.5.2 典型林分土壤水分与土壤水势的关系	142
6.6 土壤水分传输影响因素排序分析	144

第 7 章 植被-土壤-大气连续体热量传输转换与力能分析	146
7.1 辐射特征分析	146
7.1.1 总辐射变化规律	146
7.1.2 净辐射变化规律	147
7.1.3 地面有效辐射变化规律	148
7.1.4 地表反射率变化规律	150
7.1.5 辐射模型	151
7.2 土壤热动态	153
7.2.1 土壤热通量月变化	153
7.2.2 土壤热通量日变化	153
7.2.3 土壤热通量与净辐射的关系	154
7.3 热量平衡分析	155
7.3.1 热量平衡各分量日变化分析	156
7.3.2 热量平衡各分量季节变化分析	157
7.4 SPAC 中各部分水势组成	158
7.4.1 植物细胞水势	158
7.4.2 土壤水势	158
7.4.3 大气水势	159
7.5 SPAC 中水势分布规律	159
7.5.1 植被水势日变化规律	159
7.5.2 植物水势季节变化规律	160
7.5.3 水势在冠层的垂直变化	161
7.5.4 土壤水势的动态变化特征	161
第 8 章 植被-土壤-大气连续体水分传输过程模型与模拟	163
8.1 Coup Model 简介	163
8.1.1 模型结构	163
8.1.2 模型主要参数与方程	164
8.2 模型参数调整	165
8.2.1 主要参数	165
8.2.2 参数不确定性分析	166
8.3 模型结果与验证	166
8.3.1 土壤水分过程	167
8.3.2 林分水分过程	167
8.4 模型模拟分析	168
8.4.1 侧柏林模拟分析	168
8.4.2 油松林模拟分析	169
8.4.3 刺槐林模拟分析	169
8.4.4 栓皮栎林模拟分析	170

第 9 章 植被-土壤-大气连续体中 SVAT 水分动态非线性系统仿真	172
9.1 森林生态系统水分过程模拟与仿真研究	172
9.1.1 微观 SPAC 水分过程模拟与仿真	172
9.1.2 中观 SVAT 水分过程模拟与仿真	173
9.1.3 植被动态与水分过程的耦合模拟	173
9.1.4 森林生态系统水分过程非线性特征	174
9.2 森林生态系统水分关联变量动态过程系统分析	178
9.2.1 大气库林外降水	178
9.2.2 大气库温湿度	180
9.2.3 土壤库土壤水势	182
9.2.4 植被库树干径向变化	184
9.2.5 植被库液流速度	186
9.3 植被库瞬态液流非线性耦合仿真	193
9.3.1 模型的理论架构	193
9.3.2 模型构建	194
9.3.3 模型结果与检验	196
9.4 土壤库对降雨的非线性响应仿真	198
9.4.1 仿真模型原理	199
9.4.2 模型参数取值范围确定	201
9.4.3 控制参量取值范围初定	201
9.4.4 模型参数率定	205
9.4.5 模型输入运行及拟合优度评价	210
9.4.6 模型模拟检验	211
9.4.7 模型参数敏感性分析	212
9.5 植被库对降雨的非线性响应仿真	215
9.5.1 仿真对象的特殊性及模型结构调整	215
9.5.2 模型参数取值范围确定	216
9.5.3 模型参数率定	219
9.5.4 模型输入运行及拟合优度评价	222
9.5.5 模型模拟检验	224
9.5.6 模型参数敏感性分析	225
参考文献	228

第 1 章 引 言

1.1 研究背景及其意义

森林生态系统(forest ecosystem)是陆地生态系统(terrestrial ecosystem)的主体,约 30%的陆地面积由森林覆盖。森林生态系统承载着生态、经济、社会和美学等诸多服务功能,同时森林生态系统通过与大气、土壤之间能量与物质的交换,深刻影响和塑造着陆地生态系统。在当今全球变暖的背景下,森林具有的固碳释氧、维持水循环、保护水土等功能使森林在全球生态系统中的关键地位得到增强。20 世纪 90 年代以来,干旱、厄尔尼诺等极端气候发生概率明显增加。中亚、西南亚(1998~2003 年)、美洲西南部(1999~2007 年)、澳大利亚(2002~2003 年)以及欧洲(2003 年)都出现了不同程度的干旱气候(Van der Molen et al., 2011)。水资源已成为制约干旱和半干旱地区经济和社会发展的瓶颈之一,尤其近 20 年来,水资源短缺问题从区域到次大陆尺度上,在各类生态系统、气候区中都日益突出。森林对水分循环起着巨大的调节作用,影响着水量平衡的各个环节。水在森林生态系统中的运转起着环境和成分的双重作用,它既是物质循环的载体也是物质的一分子(周国逸, 1997)。森林与水的关系是森林生态学和水土保持学研究的核心方向(Van der Molen et al., 2011)。水分由土壤进入森林植物体内,通过茎秆到达叶片,再从气孔以水汽的形式扩散到空气边际层,最后参与大气的湍流交换,形成相互作用且动态统一的连续系统,即土壤-植被-大气连续体(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)。自 1966 年澳大利亚著名水文与土壤物理学家 Philip 较完整提出 SPAC 理论以来(Philip, 1966),水分在 SPAC 系统中的运动就成为研究的热点(康绍忠等, 2004)。由于研究方法和观测手段的不足,过去这一研究一直以农田生态系统为主,对于高大、复杂多样的森林生态系统研究较少。近年来,随着波文比、大型蒸渗仪、三维超声风速仪以及稳定同位素等技术的发展和相关仪器的研发,为水分在森林 SPAC 系统中的运动的研究提供了良好的发展契机。我国森林主要分布于山区,而山区具有能量梯度变化和地表形态破碎多样等特点,加之林冠层组成复杂、结构离散,导致山区森林生态系统明显异于平缓地区的森林生态系统。北京山区是华北土石山区的重要组成部分,也是北京市区的重要生态屏障(余新晓等, 2002)。由于受到人为因素的强烈干扰,北京山区天然次生林已经所剩较少,主要分布在海拔 800 m 以上的深山区。森林植被基本以 20 世纪 50 年代以后在浅山和平原地区营造的人工林为主,属暖温带亚湿润区落叶阔叶林及常绿针叶林区。根据“九五”时期的北京市森林资源二类调查结果,北京山区森林面积占全市林地面积的 79.2%(余新晓等, 2002)。因此,研究北京山区典型森林生态系统 SPAC 水分运动机理有助于理解本区域生态系统水循环规律和机制,以及本地区森林生态系统的服务功能及其价值。

1.2 SPAC 理论研究进展

1.2.1 SPAC 基本理论研究

生态系统模型常常是为了研究某个生态系统中主要的汇(pool)和通量(flux)及影响通量的因素(Chapin III et al., 2012)。当水分这一通量在土壤、植物、大气三者之间运动时,三者互为源(source)-汇关系。生态学家很早就认识到水分在三者之间的循环,并开始分别在三者的交互界面上开展水通量的定量研究。随着理论和实践的积累,水势的概念在 20 世纪时逐渐成形(Slatyer and Taylor, 1960)。在总结前人研究的基础上,1966 年澳大利亚著名水文与土壤物理学家 Philip 较完整提出了 SPAC 理论(Philip, 1966)。他指出尽管土壤-植被-大气系统的界面、介质均不同,但从物理角度看却可认为是一个连续体,水分在 SPAC 系统中流动的过程,可以用水势这一统一的单位来表述水分在系统内各环节运动的能量。统一的能量关系,使研究 SPAC 系统中水分运动和能量转化过程更加明晰、方便。20 世纪 60 年代以来,应用 SPAC 理论展开了大量而深入的研究(刘昌明和孙睿, 1999)。90 年代开展的国际间研究合作计划:国际地圈-生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)、联合国环境计划(UNEP)等都以 SPAC 理论为基础,重点研究 SPAC 传输问题、SPAC 界面的交互作用。因此,在当今全球变暖的背景下,国际学术界研究的热点之一就是 SPAC 系统中的水分运动。

国外发达国家美国、澳大利亚等对于 SPAC 水分运动的研究起步较早也较为深入。在假定 SPAC 水流是连续稳定流(steady state)的情况下, Van den Honert(1948)应用电学中的欧姆定律(Ohm's Law)来模拟水分通量:

$$q = \frac{\Psi_s - \Psi_r}{R_{sr}} = \frac{\Psi_r - \Psi_L}{R_{rL}} = \frac{\Psi_L - \Psi_a}{R_{La}} \quad (1-1)$$

式中, q 为水分通量。分子部分为各部分水势: Ψ_s 为土壤水势; Ψ_r 为根水势; Ψ_L 为叶水势; Ψ_a 为大气水势。分母部分为各部分的水流阻力: R_{sr} 为穿越根土界面阻力; R_{rL} 为从根部经过木质部到达叶气孔的阻力; R_{La} 为穿越气孔扩散至大气中的阻力。

尽管该模型将水流类比为电流,提供了一个简明有效的思路来研究水分传输。但后来大量的研究实践表明, SPAC 中水流不是稳定流,而是瞬时(transient state)的非稳态流(Steppe et al., 2002)。其次,该模型假定在水分传输途径过程中各部分的阻力是恒定的,而实验表明阻力是随着流速等因素变化的。再次,水分以液态形式在土壤和植物中运动,但是从植物气孔扩散至大气是以水汽的形式进行的,水汽扩散与水汽压差和水汽浓度差相关,不能简单用水势描述。

学者在此模型基础上引入了水容(capacitance of water storage)的概念(Waring and Running, 1978)。研究者将细胞组织存储水分的功能类比为电容器,植物在夜间将水分存储于薄壁细胞等细胞组织中,晴天时释放水分用于补充蒸腾丧失的部分。研究表明在晴热天气条件下,植物有时会流失 25%~30% 的含水量(康绍忠等, 2004)。该方法被称为阻-容网络(resistance-capacitance circuits, RC circuits),也称 RC 电路模型(刘文兆,

2005)。其中, R 为水分在植物体内传输的阻力; C 为水容, 被定义为单位水势变化导致的细胞组织内含水量的变化; RC 为时间常数。虽然 RC 电路模型更接近 SPAC 系统的现实水分动态过程, 是对稳态电路模型的重要改进, 但依然有一些问题。首先, 不能解释气孔振荡引起的蒸腾波动(王根轩和赵松岭, 1993)。其次, RC 时间常数, 即阻力与水容的乘积, 其意义尚不明晰(Steppe et al., 2006)。再次, RC 电路模型的数学模型为常微分方程, 无法描述 SPAC 水分传输的时空动态特征(Chuang et al., 2006)。

虽然稳态电路模型和 RC 电路模型为研究 SPAC 中水分运动提供了有效的思路并取得了很多成果, 但始终是以机械论来解释生命现象, 忽略了生物和非生物的差别(刘文兆, 2005)。因此, 面对 SPAC 中水分传输的动态过程及与其影响因素之间复杂的关系, 需要利用日新月异的观测技术, 应用日趋成熟的非线性理论进行更深入的研究。

1.2.2 森林植被-土壤-大气水热平衡研究

典型陆地生态系统中, 水分的传输通常伴随着热能的消耗与迁移, 水热运动是相互耦合进行的, 水分和热量之间相互联系、相互影响(王兵等, 2002)。森林生态系统 SPAC 热量交换研究是对水分传输研究的重要补充, 只有对系统内各个交换面的水热交换过程进行分析研究, 才能对整个系统的水热运动规律有较全面、清楚的认识(刘树华等, 1996)。水量平衡和热量平衡规律是研究水热运动规律最为重要的切入点, 也是维持森林生态系统平衡稳定的重点。

1.2.2.1 水量平衡规律

森林生态系统水量平衡主要分为降雨、截留、蒸散发、土壤水分及径流等水文过程。根据质量守恒定律, 在某一时期内森林生态系统水量平衡方程可以表示为

$$P \approx R_s + ET + T + I_c + I_l \pm \Delta W \quad (1-2)$$

式中, P 为大气降雨量, mm; R_s 为地表径流量, mm; ET 为林分蒸散量, mm; T 为林下蒸发散量, mm; I_c 为林冠截留量, mm; I_l 为枯落物层截留量, mm; ΔW 为土壤蓄水量变化量, mm。

森林水量平衡研究最初应用于森林变化对流域产水量的影响。1902 年, 瑞士学者 Engle 在 Emmmental 通过长期对比观测一个森林覆盖率达 99% 的流域和一个以草本为主的流域, 认为森林流域年径流量比草本流域小, 洪峰流量也较草本流域低(McCulloch and Robinson, 1993)。此后, 通过将植被清除的对比流域研究日益增多。全世界范围内的研究表明, 森林减少可以增加流域净流量而造林会减少流域产水量。为了更深入认识森林植被在水文循环中的作用, 20 世纪 60 年代以来, 对森林生态系统水量平衡的研究更加重视森林生态水文过程, 并取得了很大进展(余新晓等, 2004)。特别是伴随着技术的进步, 各类精准仪器的出现使长期定位观测成为可能。目前, 我国已经建立森林生态系统定位研究网络(Chinese Forest Ecosystem Research Network, CFERN) 70 余站, 覆盖全国九大植被气候区(东北温带针叶林及针阔叶混交林地区、华北暖温带落叶阔叶林及油松侧柏林地区、华东中南亚热带常绿阔叶林及马尾松杉木竹林地区、云贵高原亚热带常绿阔叶林

及云南松林地区、华南热带季雨林地区、西南高山峡谷针叶林地区、内蒙古东部森林草原及草原地区、蒙新荒漠半荒漠及山地针叶林地区和青藏高原草原草甸及寒漠地区),通过野外观测站长期定位定时观测,从格局-过程-尺度有机结合的角度,研究森林生态系统的物质转换和能量流动规律。经过长期的积累,改变了原先将水量平衡过程当作黑箱处理的方法。

(1) 林冠截留量 I_c : 降水是大多数陆地生态系统水分的主要来源。林冠截留和林冠截持雨量的蒸发在森林生态系统水量平衡中有极为重要的地位,森林对水文过程的调节首先就是通过截留、蒸散等途径来实现的。森林冠层由于具有较大的截留容量和较大的空气动力学阻力,较之其他植被类型林冠截留损失要大。林冠截留的过程包括林冠湿润、冠层截留、林冠蒸发等多个过程,主要影响因素是叶面积指数(leaf area index, LAI)和降水前林冠的干燥程度(程根伟等, 2004)。一般认为,湿润地区的林冠截留量一般占大气降雨量的 10%~30%,干旱半干旱地区的林冠截留量一般占大气降雨量的 40%~50%。不同森林类型拥有不同的截留功能,我国学者对不同气候带及森林植被类型林冠截留率变动范围和变异系数分别在 11.4%~34.3% 和 6.68%~55.05% 之间(刘世荣等, 1996; 温远光和刘世荣, 1995)。同时,研究表明林冠截留量与林外降雨量一般呈非线性幂指数关系,在低雨量级时,林冠截留量随降水量增大而增大并趋向饱和截留量,当降雨量达到某一特定值后,林冠截留量会降低并趋于最小截留率。一般针叶林会截留更多的雨量(余新晓等, 2004)。林冠截留是森林生态系统对输入水分调节的起点,研究人员根据影响林冠截留的各种因子和林冠截留量的数量关系,建立了不同的林冠截留模型(王彦辉等, 1998)。根据模型的结构组成可分为经验模型、概念模型和解析模型。其中应用最为广泛的就是 Gash 模型及其修正模型[式(1-3)]。

$$\sum_{j=1}^{m+n} I_j = n(1-p-p_t)P'_G + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G) \quad (1-3)$$

$$+ (1-p-p_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj} + qS_t + p_t + \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{Gj}$$

式中, I_j 为林冠截留量; p 为自由渗流系数; p_t 为到达树干径流系数; P_G 为单次降雨量; P'_G 为达到冠层饱和降雨量; $\bar{E}$ 为平均蒸发率; $\bar{R}$ 为平均降雨强度; S_t 为林冠储水容量; m 、 n 、 q 分别表示达到饱和冠层、未饱和冠层和能够产生树干径流的降雨次数。

(2) 枯落物层截留量 I_l : 森林生态系统的垂直结构中,枯落物层是重要的功能层。其生态作用主要有:截持降雨、拦蓄地表径流、抑制土壤水分蒸发和增加地表降水入渗量。枯落物层持水对森林生态系统水量平衡的作用在于对林冠下大气与土壤之间水分和能量传输的影响,同时直接影响产流机制。枯落物层持水能力可以用最大持水率来表示,最大持水率与枯落物的厚度和本身的特性有密切关联,一般来讲枯落物的持水率是其自身干重的 2~3 倍,部分阔叶树种则可以达到 4 倍以上。一般认为天然次生林枯落物层最大持水率较之人工林枯落物层略大,针叶林比阔叶林最大持水率低。我国西南高山地区原始云杉林、冷杉林枯落物层的最大持水率达 350%~450%,而黄土高原地区人工防护林枯落物层最大持水率则小于 191%。目前研究枯落物截留能力方法主要有:浸泡法和人工

模拟降雨法。浸泡法可以反映枯落物层调蓄降雨的性能,但在充分供水的条件下测定结果并不能完全体现枯落物的截留特征和截留过程。而利用人工模拟降雨实验也由于缺乏天然降雨时空的变异性,结果并不能完全反映自然降雨条件下枯落物截留的情况(樊登星等,2008)。

(3) 土壤水分 ΔW : 土壤是森林生态系统中重要的水分储蓄库,土壤水是森林植被生长发育重要的因素。土壤水分状况也决定了森林植被布局与配置(Jhorar and Van Dam, 2004)。影响土壤水分状况的因子主要有:降雨、气象因子、地形因子、土壤自身特性、地被及土地利用状况等(Qiu et al., 2003)。森林土壤水分状况随季节变化,与森林植被生长发育周期变化是相互对应的。通过土壤水分定位观测,北京山区林地土壤水分变化可以分为稳定期(11~4月)、消耗期(5~6月)、积累期(7~8月)和消退期(9~10月)四个阶段(王贺年等,2011)。森林土壤水分状况年际变化主要受降雨量大小和分布特点的影响。降雨量大且年内分布不均匀时,土壤水分变化明显;降雨量少且年内分布均匀时,土壤水分季节变化不明显(聂立水等,2005)。林地土壤由于具有较大的孔隙度,特别是非毛管孔隙度大,林地土壤比其他土地利用类型土壤的土壤持水能力强。我国亚热带地区年降雨量通常为1000~1500 mm,该地区森林土壤的最大持水量可高达降水量的25%~34%,每公顷可蓄水641~678 t(何东宁等,1991)。由于只有滞留在非毛管孔隙中的降雨才能在重力及压力梯度作用下下渗,形成壤中流及地下径流,因此常用非毛管孔隙度表示森林土壤的储水能力。但也有研究指出,在我国干旱半干旱地区,土壤储水往往以吸持水为主,毛管储水量是非毛管储水量的好几倍,应该用毛管和非毛管储水的总量来反映土壤层的储水能力(周择福和李昌哲,1995)。

(4) 地表径流 R_s : 径流是水量平衡的重要输出项,依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。径流形成机制的研究最初源于1935年Horton提出的超渗产流假说,他认为地表径流产生的原因是降水量大于同期植物截留量、蒸发量及入渗量的总和,超出的水量产生了地表径流。后来研究表明,超渗产流一般发生在植被稀少、土壤发育不良、入渗能力差的地区,而植被盖度高、土壤发育较好的湿润地区易形成饱和地表径流。影响产流的因素有降水特征、土壤特性、森林植被、枯落物层及地形等因素。随着研究的深入,目前研究地表径流的方法主要有同位素水文学法、动力水文学计算法及水文测验法。特别是同位素示踪研究可以深入分析径流的来源。研究表明,森林流域的暴雨径流过程主要由“旧水”(old water, pre-event water)组成,在小到中等降雨条件下,“新水”(new water, event water)贡献较少。目前,产流模型主要有基于物理意义的分布式模型和反映某些因素空间变化的概率分布模型。

(5) 蒸散量 ET: 森林生态系统蒸散具体来说包含树冠截留蒸发、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。目前森林植被蒸散主要分为四个尺度:单叶尺度、单木尺度、林分尺度以及区域或者更大尺度。单叶尺度的研究主要是测定叶片的蒸腾速率、气孔导度等参数,主要方法有:快速称重法、稳态气孔计法和叶室法。便携式光合仪(Portable photosynthesis system, LI-6400)的出现克服了离体测量误差,并能够同时测定叶片的蒸腾速率、碳同化速率、气孔导度以及其他环境因子(陈慧新等,2010)。单木尺度研究蒸散的手段最为成熟,主要方法有:大树容器法、蒸渗仪法、风调室法、示踪同位素法

以及热技术方法等。其中热技术方法对林木破坏小,能够实现连续自动观测,较为准确(孙鹏飞等,2010)。林分尺度的蒸散测定方法主要有微气象法和水文学方法。微气象法包括波文比-能量平衡法(BREB)、涡度相关(EC)法和空气动力学方法。微气象法的优点是可以反映蒸散与太阳辐射的关系,能反映蒸散对主要环境因子的响应机制,但一般要求下垫面均一、风浪场足够长(孙鹏森,2000)。区域尺度的蒸散主要通过遥感法进行测定。遥感法利用植被的光谱特性,结合微气象参数推算下垫面的蒸散量,但其局限性在于受遥感影像质量和气候条件的影响较大,并且无法连续、全天候的观测。目前常用的计算蒸散的公式有 Thomthwaite 公式、Priestley-Taylor 公式和 Penman-Monteith 公式等,其中应用最广泛的是 Penman-Monteith 模型[式(1-4)](焦醒等,2010)。

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (1-4)$$

1.2.2.2 热量平衡规律

太阳辐射是地球表面主要的能量来源,是森林生态系统中各种物理过程和生命活动的主要驱动力(周国逸,1997)。热量平衡是森林水热条件形成的物理基础,也是森林生态系统 SPAC 水分运动机制的重要研究内容。自 1911 年 Burns(1923)首次定量测定了太阳辐射在森林、草地等不同植物群落中的分布以来,针对森林生态系统的热能分配和热量平衡进行了大量的研究。特别是 20 世纪 60 年代,Gates(1962)提出“能量交换”和“能量环境”理论后,关于生态系统能量流动和能量交换的研究日益增多。我国对热量平衡的研究起步于 20 世纪 80 年代,贺庆棠等(1980)在黑龙江小兴安岭林区分析了森林热量平衡各分量的特点与变化规律。朱劲伟等(1986)初步研究了林冠层直射光的分布规律,并分析了林冠吸收的直射和散射光强的数学模式。孙雪峰(1995)对暖温带阔叶落叶林各层次的总辐射、净辐射、反射辐射、光合有效辐射及吸收辐射等能量环境进行了系统的分析。国家林业局在全国不同气候带先后设置了 11 个森林生态系统定位站,开始对森林热量平衡进行定量化研究。随着技术和相关仪器的发展,森林热量平衡研究更加广泛,研究手段也更加多样化。关德新等(2002)应用涡度相关(eddy covariance, EC)技术对长白山阔叶红松林热量平衡的变化特征、计算方法和影响因子做了系统研究。刘晨峰(2007)在北京大兴区沙地杨树人工林生态系统运用涡度相关法、树干液流法和土壤水分平衡法对不同的空间和时间尺度上的能量平衡和水量平衡及其影响因子进行了综合研究。

森林系统热量平衡方程可以表示为

$$R_n = \lambda E + H + G + P \quad (1-5)$$

式中, R_n 为净辐射通量, W/m^2 ; λE 为潜热通量, W/m^2 ; H 为显热通量, W/m^2 ; G 为土壤热通量, W/m^2 ; P 为森林植被光合作用消耗的能量, W/m^2 , 一般只占太阳总辐射的 1% 左右, 通常在计算中忽略不计。