

生态水文学研究系列专著

生态系统蒸散

余新晓 贾国栋 吴海龙 /著
张学霞 娄源海 刘自强



科学出版社

生态水文学研究系列专著

生态系统蒸散

余新晓 贾国栋 吴海龙 张学霞 娄源海 刘自强 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以大孔径闪烁仪、涡度相关仪、遥感反演法和稳定氢氧同位素技术为基本研究手段,以仪器实测数据、遥感数据以及地形植被本底数据为基础数据,探索了非均一植被及地形下垫面的蒸散特征,量化了常规气象因子在不同季节对蒸散的影响效应,建立了蒸散—植被、蒸散—地形、蒸散—植被—地形模型,并对模型进行了精度分析和改进,并应用 $\delta^{18}\text{O}$ 和液流通量区确定了山区森林生态系统植物蒸腾和土壤蒸发比例。上述研究成果为系统认识区域生态系统能量平衡和水分循环提供了重要的理论指导和技术依据,对区域水资源及水环境管理具有重要意义。

本书可供水科学、生态学、生态水文学、水土保持学、林业生态学等领域的科研人员、研究生、管理人员及生态环境建设工作参考。

图书在版编目(CIP)数据

生态系统蒸散/余新晓等著. —北京:科学出版社, 2018.2

(生态水文学研究系列专著)

ISBN 978-7-03-031609-7

I. ①生… II. ①余… III. ①水蒸发—水文分析 IV. ①P333.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 031862 号

责任编辑:朱 丽 李丽娇/责任校对:韩 杨

责任印制:张 伟/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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 2 月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:300 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

水资源紧缺是我国的基本国情之一，伴随着水资源危机的日益严重，环境和农业生产用水问题已经越来越成为我国面临的重大问题。在干旱和半干旱地区，水成为影响植被生长的重要因素；同时，水资源分布的不同显著影响着干旱、半干旱地区生态系统中森林植被分布和物种多样性。森林在全球水循环中起着很重要的作用，森林蒸散(包括物理蒸发和植物蒸腾)是森林水分输出的重要形式，是森林水量平衡的重要组成部分，是陆地生态系统水循环的重要环节，作为一个区域水平衡和能量平衡的主要成分，不仅在水循环和能量循环过程中有重要作用，也是生态与水文过程联系的重要纽带，典型森林与水资源之间的关系是华北地区森林植被建设的主要问题。开展森林蒸散的研究，研究性质从定性分析转移到定量分析，从专一化分析转变为综合性分析。揭示森林蒸散特征不仅是水文学和生态学关注的基础科学问题，而且对维护和经营该地区脆弱的生态系统具有重要意义。

《生态系统蒸散》研究著作是余新晓教授及其科研团队多年来研究成果的总结，也是在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“基于氢氧同位素技术的植被-土壤系统水分运动机制研究”(41171028)、国家青年科学基金项目“北京山区主要造林树种水分利用机制及其生理生态响应研究”(41401013)等项目的支撑下完成的。该研究结果依托首都圈森林生态系统定位观测研究站，内容充实，观点新颖，逻辑清晰。

森林结构复杂、生物多样性高，导致林内水分运动过程不能定量描述，对于森林中水分的运动过程、运动要素研究不足，现阶段森林生态水文过程研究包括两个尺度，即森林流域水文过程和森林生态系统水文过程。该著作从生态系统蒸散总量(平原区生态系统蒸散及山区生态系统蒸散)及其分量的研究方法出发，对比分析了不同环境条件下蒸散量及其各组分在时间(日、月、季节甚至年际)上的差异，分析影响蒸散量的主要因素，深入探讨了生态系统蒸散过程及机理。引入新技术提供高效精准的解决方案，克服了传统实验的局限性，解决了当前森林生态系统水循环中的一些重点、难点问题，填补了当前该领域研究中的一些空白。对于了解某区域内生态系统中大范围的能量平衡和水分循环具有重要意义。研究成果不仅可以直接为区域水资源水环境管理提供服务，而且为人们今后区域的生长和管理提供参考。

书籍是人类进步的阶梯。该著作的问世，可以为相关科研人员和从业人员提供参考，希望该著作可以解答相关科研工作者和研究人员心中的疑惑，为共建青山绿水提供理论

依据，推动祖国生态文明建设。为此，特向相关水土保持、林业等生态环境领域科研人员及相关领域的从业人员推荐这部著作。

中国工程院院士

李文华

2017年10月

前 言

蒸散活动是生态系统水分循环的重要环节，森林蒸散是森林水热平衡的重要组成部分，对森林生态系统水分状况具有重要的指示作用。个体尺度或林分尺度的蒸散研究已相对成熟，但在实际应用中需要更大的尺度，尤其是中尺度到大尺度的扩展。现阶段大尺度的蒸散研究均以遥感数据为基础，辅助以少量的地面观测数据展开，但这种方法面对生态环境发展需求日益提高，已经不能满足精度需求了。同时，人类活动对自然环境的影响越来越大，对自然下垫面的破坏与重建无时无刻不在进行中，尽管人类活动对下垫面的影响不会一蹴而就，但其累积效应不可忽视，因此，下垫面特征对蒸散耗水的影响是水循环研究中不可或缺的部分。综上所述，将不同尺度的研究结合在一起，并分析蒸散对地形、植被及气象因子的响应已成为迫切需求。

近二十年来，大孔径闪烁仪的出现为区域尺度的蒸散研究提供了一种新思路，但该技术仍处在发展阶段。大孔径闪烁仪以莫宁-奥布霍夫相似理论为基础，其研究尺度为千米尺度，正好与现阶段遥感数据象元尺度相吻合，这就为遥感数据与地面数据验证提供了一种对等空间尺度的平台。

本书立足于研究北京山区生态系统蒸散过程与机制，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“基于氢氧同位素技术的植被-土壤系统水分运动机制研究”(41171028)、国家青年科学基金项目“北京山区主要造林树种水分利用机制及其生理生态响应研究”(41401013)的研究成果。本书共八章，内容包括绪论、生态系统蒸散研究技术、平原区生态系统蒸散、山区生态系统蒸散、生态系统蒸散组分、生态系统通量、森林生态系统蒸散对植被特征的响应、区域蒸散遥感反演，详细阐述和量化了森林生态系统的蒸散通量与过程。

目前，在传统水文学的研究中，由于观测方式的限制，无法对森林生态系统中水分在各组分中的运移情况、分配规律有更深入的研究，这成为困扰水文学和森林生态学量化研究中的一个问题。本书以大孔径闪烁仪、涡度相关仪、遥感反演法和稳定氢氧同位素为基本研究手段，以仪器实测数据、遥感数据及地形植被本底数据为基础数据，分析了非均一植被及地形下垫面的蒸散特征，量化了常规气象因子在不同季节对蒸散的影响效应，建立了植被特征与蒸散关系的模型，并对模型进行了精度分析和改进。此外，运用稳定同位素技术，通过对北京山区侧柏林分样地定位连续原位观测，基于不同时间尺度，同步采集大气、植物、土壤等样品，分析大气水、植物枝条木质部水和土壤水等氧稳定同位素变化，利用氧稳定同位素定量表达生态系统水分通量中各组分比例构成及其时间变化，并通过液流计确定植物蒸腾通量，推算生态系统水分通量。作者殷切希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蒸散相关学科的专家学者有所裨益，共同将森林生态系统

蒸散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生态系统蒸散科研和研究教学的过程。本书的完成融入了很多人的心血，在此期间，得到了李文华院士、王浩院士、尹伟伦院士和崔鹏院士等的指导，作者在书稿形成过程中还得到了很多同行专家的帮助，在此一并感谢！

由于作者的知识水平有限，书中难免出现疏漏或不妥之处，敬请各位读者批评指正并提出宝贵意见，以期本著作内容不断完善，水平逐步提高。

余新晓

2017年9月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 生态系统蒸散的概念	2
1.2.1 植物蒸腾	2
1.2.2 土壤蒸发	3
1.2.3 系统蒸散	4
1.3 生态系统蒸散研究进展	5
1.3.1 不同尺度下的蒸散研究进展	5
1.3.2 不同方法下的蒸散研究进展	10
1.3.3 蒸腾和蒸发的组分拆分研究现状	17
1.3.4 下垫面蒸散影响因素	21
1.4 存在的问题与发展趋势	22
1.4.1 存在的问题	22
1.4.2 发展趋势	23
第 2 章 生态系统蒸散研究技术	25
2.1 大孔径闪烁仪器	25
2.1.1 大孔径闪烁仪工作原理	25
2.1.2 大孔径闪烁仪及辅助仪器的布设	27
2.1.3 大孔径闪烁仪数据质量控制	28
2.2 涡度相关技术	28
2.2.1 涡度相关仪工作原理	28
2.2.2 涡度相关仪的布设	28
2.2.3 涡度相关仪数据质量控制	29
2.3 遥感技术	29
2.3.1 遥感技术工作原理	29
2.3.2 遥感估算方法应用	31
2.4 稳定同位素技术	32
2.4.1 稳定同位素的定义及表达	32
2.4.2 稳定同位素分馏	33
2.4.3 稳定同位素在生态系统蒸散中的应用	34
2.4.4 稳定同位素技术的应用	38
第 3 章 平原区生态系统蒸散	46
3.1 基于 LAS 的下垫面显热通量特征	46
3.1.1 显热通量日变化	46

3.1.2	显热通量季节变化	47
3.1.3	显热通量的精度分析	48
3.2	平原区下垫面蒸散规律分析	51
3.2.1	蒸散典型日变化	51
3.2.2	蒸散月变化	52
3.2.3	蒸散季节变化	52
3.3	平原区下垫面蒸散与气象因子关系	53
3.3.1	蒸散与太阳辐射的关系	54
3.3.2	蒸散与大气温度的关系	55
3.3.3	蒸散与降水的关系	56
3.3.4	气象因子对蒸散的综合效应	57
第 4 章	山区生态系统蒸散	59
4.1	下垫面通量特征分析	59
4.1.1	地表净辐射通量特征	59
4.1.2	土壤热通量特征	62
4.1.3	显热通量特征	63
4.2	山区下垫面蒸散规律分析	66
4.2.1	蒸散典型日变化	66
4.2.2	蒸散季节变化	66
4.2.3	蒸散年际变化	68
4.3	山区下垫面蒸散与气象因子关系	68
4.3.1	蒸散与太阳辐射的关系	69
4.3.2	蒸散与大气温度的关系	73
4.3.3	蒸散与风速的关系	76
4.3.4	蒸散与降水的关系	78
4.3.5	气象因子对蒸散的综合效应	79
第 5 章	生态系统蒸散组分	81
5.1	土壤蒸发水汽稳定同位素组成变化	81
5.1.1	土壤蒸发水汽稳定同位素组成日变化	81
5.1.2	土壤蒸发水汽稳定同位素组成季节变化	82
5.2	土壤蒸发水汽稳定同位素组成影响因素	84
5.2.1	表层土壤相对湿度对土壤蒸发水汽的影响	84
5.2.2	大气水汽浓度与土壤水稳定同位素组成的影响	85
5.2.3	大气相对湿度与土壤水稳定同位素组成的影响	85
5.3	植物蒸腾水汽稳定同位素组成变化及影响因素	86
5.3.1	植物蒸腾水汽稳定同位素组成日变化	86
5.3.2	植物蒸腾水汽稳定同位素组成季节变化	88
5.4	植物蒸腾水汽稳定同位素组成影响因素	89
5.4.1	土壤含水量与植物水稳定同位素组成的关系	89
5.4.2	降水稳定同位素组成与植物水稳定同位素组成的关系	91
5.4.3	土壤水稳定同位素组成与植物水稳定同位素组成的关系	91

第 6 章 生态系统通量	93
6.1 蒸散水汽稳定同位素组成	93
6.1.1 蒸散水汽稳定同位素组成日变化	93
6.1.2 蒸散水汽稳定同位素组成季节变化	95
6.2 大气水汽稳定同位素组成的影响因素	97
6.2.1 降雨与大气稳定同位素组成的关系	97
6.2.2 大气水汽浓度与大气稳定同位素组成的关系	97
6.2.3 大气温度与大气稳定同位素组成的关系	98
6.2.4 水汽压亏缺 VPD 与大气稳定同位素组成的关系	99
6.3 基于 LAS 森林生态系统蒸散通量的计算	101
6.3.1 蒸散组分特征	101
6.3.2 基于 LAS 的平原区蒸散总量及精度分析	104
6.3.3 基于 LAS 的山区蒸散总量及精度分析	106
6.4 基于稳定同位素技术区分森林蒸散通量计算	107
6.4.1 水分通量组分比例构成	107
6.4.2 单株蒸散通量区分	109
6.4.3 林分蒸散通量区分	110
第 7 章 森林生态系统蒸散对植被特征的响应	112
7.1 平原区植被-蒸散模型参数计算	112
7.1.1 源区计算	112
7.1.2 关键参数的计算	114
7.1.3 足迹分布	115
7.2 平原区蒸散对植被特征的响应	117
7.2.1 植被类型及地形指数与蒸散关系复合模型的构建	117
7.2.2 山区非均一下垫面复合模型的验证	119
7.3 山区起伏地形对下垫面蒸散影响的修正	121
7.3.1 山区地形因子的提取	121
7.3.2 山区蒸散-地形模型的构建	123
7.4 山区起伏地形及植被异质性对下垫面蒸散的影响	125
7.4.1 植被类型及地形指数与蒸散关系复合模型的构建	126
7.4.2 山区非均一下垫面复合模型的验证	126
7.4.3 不同时期植被和气象因素对蒸散的贡献率	126
7.5 森林植被对蒸散的影响	127
7.5.1 林分蒸腾特征	127
7.5.2 枯落物的水分蒸发	130
7.5.3 土壤水分蒸发	131
7.5.4 植被结构参数与蒸散的关系	132
第 8 章 区域蒸散遥感反演	138
8.1 地表参数反演	138
8.1.1 归一化植被指数	138
8.1.2 地表反射率	138
8.1.3 地表温度	139

8.1.4 地表发射率	140
8.2 模型各分量反演	140
8.2.1 净辐射量	140
8.2.2 土壤热通量	141
8.2.3 蒸散量	141
8.3 模型验证与地表参数关系研究	143
8.3.1 模型验证	143
8.3.2 蒸散与关键参数关系研究	144
8.3.3 蒸散与土地利用关系研究	147
参考文献	151

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

水资源紧缺是我国的基本国情之一,伴随着水资源危机的日益严重,环境和农业生产用水问题已经逐渐成为我国面临的重大问题,在干旱和半干旱地区,水成为影响植被生长的重要因素(王淑元和林升寿,1995),同时,水资源分布的不同显著影响着干旱、半干旱地区生态系统中森林植被的分布和物种的多样性(余新晓等,2005)。

蒸散既包括地表和植物表面的水分蒸发,也包括通过植物表面和植物体内的水分蒸腾,是一个连续过程。Rosenberg 等(1983)提出降落到地球表面的大气降水有 70%通过蒸发、蒸腾作用回到大气中,在干旱地区则达到 90%,可见蒸发和蒸腾是水分循环的重要组成部分。同时,由于水分在汽化的过程中需要吸收热量(唐琦,2009),因而蒸发和蒸腾也是地表能量平衡的组成部分。蒸散作为一个区域水平衡和能量平衡的主要成分,不仅在水循环和能量循环过程中有着重要作用,也是生态与水文过程联系的重要纽带(陈凤,2004)。因此,地表蒸散研究,对区域内水资源的有效管理具有监督作用,并且对下垫面不同植被或是土地利用类型的蒸散研究具有更重要的意义,对于了解某区域内生态系统中大范围的能量平衡和水分循环具有重要意义(刘苑秋等,2008)。

北京山区是华北土石山区的重要组成部分,同时北京山区的森林生态系统是华北地区社会发展的重要生态屏障,在该地区社会经济发展中起到环境支撑作用。但由于北京山区降水分布不均、生态环境脆弱,随着历史的变迁,北京山区的植被类型和土地利用方式发生了显著的变化,天然林受到显著的人为影响,森林植被基本以 1958 年以后营造的人工林为主,其中侧柏为该地区重要乡土树种,也是主要的造林树种,占北京山区林地面积的 19.1%,分布十分广泛。揭示北京山区森林生态系统水分循环特征不仅是水文学和生态学关注的基础科学问题,而且对维护和经营该地区脆弱的生态系统具有重要意义。

森林生态系统与影响该系统各组分之间的关系是生态学研究热点之一(程云,2007),植被通过与大气等介质在土壤、大气等多界面、多尺度上进行生态系统物质和能量的交换。在传统水文学的研究中,由于观测方式的限制,无法对森林生态系统中水分在各组分中的运移情况、分配规律进行更深入的研究,这成为困扰水文学和森林生态学定量化研究中的一个问题。随着科技进步,20 世纪 50 年代以来,借助稳定同位素技术及其在水文学和生态学等学科中的应用,定量解释森林生态系统水文过程有了一个新的有效的方法(严昌荣等,1998; Ehleringer et al., 2002; 曹燕丽等,2002; Hasselquist and Allen, 2009)。本研究依托国家林业局首都圈森林生态系统定位观测研究站,运用稳定同位素技术,通过对北京山区侧柏林分样地定位连续原位观测,基于不同时间尺度,同步采集大气、植物、土壤等样品,分析大气水、植物枝条木质部水和土壤水等氧稳定同位素变化,利用氧稳定同位素定量表达生态系统水分通量中各组分比例构成及时间变化,

并通过液流计确定植物蒸腾通量,推算生态系统水分通量。

1.2 生态系统蒸散的概念

森林是陆地生态系统中最典型、最多样和最重要的生态系统,其中森林生态系统的蒸散表示水分在植物、大气、土壤之间的动态作用,对森林生态系统有重要作用(于文颖等,2008)。蒸散由蒸腾作用和蒸发作用组成(康博文,2005),蒸腾作用通过植物气孔散发出水分进入大气,蒸发作用通过植物、土壤表面直接散发出水分,两者作用原理不同,反映的植物特征也不同(李薛飞,2011)。

1.2.1 植物蒸腾

蒸腾作用消耗植物根部吸收水分的99.8%以上(徐先英等,2008),在土壤-植被-大气连续体(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)水热传输过程中占有极为重要的地位,同时也可反映森林植被的水分状况,是林分含水量变化的重要指标,是影响整个森林小气候、区域乃至全球气候的重要因子,因此掌握植物的蒸腾规律具有重要的理论价值和现实意义(张迎辉,2006)。

国内外学者研究蒸腾作用始于20世纪60年代,其中准确计算植物蒸腾耗水量更是研究森林组成的生长变化、林相改造、景观规划设计等生态文明建设中的核心问题。特别是进入21世纪之后,由于科学技术的不断发展、电子信息技术的广泛应用,蒸腾耗水测定方法也在不断改革和创新。由开始的枝叶天平称重法一直到现在被广泛运用的热技术法,研究手段不断革新,测定方法也越来越先进,可以更为精确地测定植物蒸腾耗水的变化情况。

在枝叶尺度上,段爱国等(2009)曾用电子天平对金沙江干热河谷植被恢复树种进行蒸腾耗水特性研究。刘奉觉等(1990)用瓶称法和快速称重法对杨树蒸腾速率进行比较研究。枝叶尺度的人为因素和枝叶离体问题对结果影响较大,测量偏差超过10%(张志山等,2007)。后来出现了Li-cor公司的Li-1600稳态气孔计,张志山等(2007)采用稳态气孔计与热平衡技术研究了沙生植物的蒸腾特征;李延成(2009)研究发现,稳态气孔计法测定的杨树蒸腾耗水速率与标准枝浸水法的测定结果具有较好的线性关系。现在应用较多的是Li-cor公司的Li-6400便携式光合系统,王旭军等(2009)用便携式光合作用测定系统,对自然条件下响叶杨不同光合有效辐射强度及不同CO₂浓度处理下叶片光合及水分生理生态参数的变化特征进行了研究。但该法只能从侧面比较不同植物的耗水特性,而不能用于精确推算植株的实际耗水量(马建新等,2010)。

单木尺度是目前应用较广的一种蒸腾作用测定尺度(刘树华等,2007)。一般用蒸渗仪法研究水文循环中的蒸散、地表径流、地下径流及下渗等过程(康文星,1993;温鲁哲等,2012),但该法也有局限性(米娜等,2009)。王安志和裴铁璠(2001)研究发现,蒸渗仪得出的水分散失量由土壤蒸发量和植物耗水量两部分组成,并无法将上述两者准确分离开来;当蒸散损失水量远小于树木与土壤的质量时,观测误差将会增大。整树容器法为机械式物理方法,选取符合相应标准的植株,锯断后迅速转移至容器中,整个过程力求将环境扰动控制至最低(巨关升等,1998)。刘奉觉等(1997)在比较研究整树容器法与

热脉冲法(heat pulse velocity method)时,发现前者得出的蒸腾曲线在时间上存在滞后现象。Hevesy 于 1923 年利用天然放射性元素 ^{212}Pb 研究了铅盐在豆科植物内的分布、转移,此法即为同位素示踪法,灵敏度高(李嘉竹和刘贤赵, 2008; 陈杰和齐亚东, 1990),测定方法简便易行,具有准确定位、定量及符合研究对象生理条件等特点。

在单木尺度中,目前广泛应用的是热技术法,分为热脉冲、热平衡、热扩散三种技术手段。热脉冲法出现在 20 世纪 30 年代,德国学者 Huber(1932)提出热传递的概念来阐述液流速率。Marshall(1958)、Swanson 和 Seasonal(1981)、Edwards(1991)相继对其进行了改进,热脉冲法适用于直径大于 30 mm 的木本植物,国内学者虞沐奎等(2003)、孙鹏森等(2000)也分别利用该技术对火炬松树干液流与油松树干液流进行了研究。热平衡法(heat balance method)分为茎热平衡法和树干热平衡法,热平衡法可测定直径 2~150 mm 的木本植物和禾本植物,在测定小直径茎干液流时具有优势,徐先英等(2008)、严昌荣等(1999)曾利用热平衡式茎流探头研究了典型固沙灌木、生长中期核桃楸的液流动态变化。热扩散法(heat dissipation method, 即 Granier 法)是当前的主流技术(严昌荣等, 1999),对被测植物无直径要求,它可以将太阳能作为能量源;连续或任意时间段进行液流测量,并自动计算、存储数据,国内学者孙慧珍等(2002)、刘海军等(2007)利用热扩散技术分别研究了白桦树干液流动态变化特征,以及香蕉树的蒸腾速率。此外,还有从林分尺度测定蒸腾速率的方法。比较著名的有波文比-能量平衡法(bowen ratio, β) (朱劲伟, 1980),波文比法指水面和空气间的乱流交换热量与水面向空气中蒸发水汽的耗热之比。强小嫚等(2009)研究认为,利用波文比法测得的冬小麦蒸散与蒸渗仪测值的变化趋势基本一致,并且相关性较好。此外,Thomthwaite 在 1939 年根据空气动力学法使用近地边界层中动量、水汽量、热量的垂直扩散方程,以及两高度处的水汽压、气温等资料来计算潜热通量和显热通量。涡度相关(eddy covariance, EC)在计算蒸腾速率中也应用较多(谢华和沈荣开, 2001)、郭家选等(2006)利用涡度相关技术研究了土壤含水量与农田蒸散量及作物冠层温度的关系;刘晨峰等(2006, 2009)利用该法研究了沙地杨树林在不同水分条件下的蒸散日变化特征。

研究叶片尺度的蒸腾耗水量是为了了解蒸腾作用的生理过程及其对环境条件的适应能力;单木尺度的研究主要反映其冠层的蒸腾作用,可以用来进行个体间的差异比较分析,其测定结果可以更准确地反映蒸腾过程;林分尺度的研究有助于林木生产中的水分管理,而区域尺度的研究成果可以直接为区域水资源水环境管理和生态用水定额的制定提供服务。

1.2.2 土壤蒸发

有关森林土壤蒸发的测量方法很多(张劲松等, 2001; 韩磊, 2011; 康磊, 2009),归纳起来可分为两类,即直接法和间接法。

直接测量法是通过仪器直接测量土壤的蒸发量,主要包括以下几种方法。蒸发表是最早被采用的测量仪器,它是一种测定湿润多孔表面水分损失量的仪器。常用的这种仪器有 Piche 蒸发表和 Livingston 蒸发表。蒸发表的优点是结构简单、成本较低、便于观测。但它的观测结果不能真正代表自然条件下的蒸发量,只能近似地得出可能蒸发量(裴步祥, 1989)。多环刀法也可测定蒸发量,张德成等(2007)应用多环刀法测定土壤含水量,应用数学模型计算出总蒸发量。大型蒸渗仪是一种设在田间或温室内(人工模拟自然环

境)装满土壤的大型仪器(樊引琴, 2001), 用来测定裸土蒸发量、作物蒸腾量、潜在蒸发量和深层渗漏量。这种蒸渗仪可以分为称重式和非称重式两种, 非称重式蒸渗仪通过控制地下水位, 测定补偿水量; 称重式可分为液压式、机械式和电子称重式, 可以测定短时段的蒸发值(张宇等, 2012)。微型蒸渗仪也是一种测定土壤蒸发值的有效方法之一, 对微型蒸渗仪的研究也有很多(汪增涛等, 2007)。

间接测量法是以森林水分平衡原理为基础(胡光成, 2010), 通过测定水量平衡公式中的各项求得土壤蒸发量, 水量平衡公式如下

$$P + R_0 + R_1 = E + I + T + R_{c0} + R_{c1} + V_w + S \quad (1-1)$$

式中, P 为大气降雨量; R_0 为从地面流进区内的地表径流量; R_{c0} 为从地面区内流出的地表径流量; R_1 为进入区内的地下径流量; R_{c1} 为流出区内的地下径流量; E 为土壤蒸发量; T 为植物蒸腾量; I 为林冠截留降雨量; V_w 为土壤含水率变化量; S 为深层渗漏量或地下水补给量。间接测量法的主要缺点就是测定公式中其他各项值的准确测定比较困难, 精确度不够高。

另外, 还有应用嵌入型陆地表层能量平衡系统(surface energy balance system, SEBS)模型及遥感技术估测蒸散。胡光成(2010)推算银川平原卫星遥感图像的日蒸发量, 并分析研究了银川平原土壤蒸发量与地下水分、植被之间的关系。

1.2.3 系统蒸散

森林蒸散(evapotranspiration, ET)既是森林生态系统中水量平衡的最大分量(刘世荣等, 1996; 马雪华, 1993), 也是主要的生态水文过程之一, 还是形成地表与大气之间联系与反馈的重要途径(Hutjes, et al., 1998; Savabi et al., 2001)。研究森林蒸散对认识森林生态系统中水分循环过程的规律, 揭示森林植被及其变化对水文过程的调节机制, 以及了解森林植被对气候变化的影响和响应都非常重要(张家洋等, 2012; 吴力立, 2008)。研究蒸散的方法很多, 分为实测法和估测法。应用较多的实测法主要有空气动力学-波文比法、涡动相关法、遥感法、大型蒸渗仪法。相对而言, 实测能够获得较为准确的蒸散, 但影响森林蒸散的因素众多, 实测非常困难, 特别是在较大的空间尺度上(王安志和裴铁璠, 2001)。因此, 在实际应用中, 估算法也十分常见, 目前应用较多的蒸散模型大致可分为三类: 潜在蒸散(potential evapotranspiration, PET)模型、实际蒸散(actual evapotranspiration, AET)模型和互补相关(complementary relationship)模型。PET 计算常用 TH 模型(Thorntwaite et al., 1978)、P-T 模型(Priestley and Taylor, 1972)、彭曼复合模型(Stannard, 1993), 这些模型结构简单, 所需参数较少, 容易获得, 在观测中应用较广(Federer et al., 1996)。Fontenot (2004)在美国 Louisiana 用彭曼模型作为标准, 比较了 FAO 24 Radiation (24RD) (Doorenbos and Pruitt, 1977; Jensen et al., 1990)、FAO24Blaney-Criddle (24BC) (Blaney and Criddle, 1950)、Hargreaves-Samani (H-S) (Hargreaves and Samani, 1985)、P-T、Makkink (Makkink, 1975)、Turc (Turc, 1961)、Linacre (Linacre, 1977) 7 个 PET 模型, 结果表明在内地 24BC 模型最好, 在沿海地区 Turc 模型最好, 在湿润地区 P-T 模型较好。Fisher 等(2005)在美国加利福尼亚东部的 Sierra Nevada 森林生态系统研究站, 比较了 P-T 模型、SB 模型、彭曼

公式(P-M 模型)、S-W 模型,发现基于彭曼公式的 P-M 模型、s-模型和 Mc Naughton-Black(M-B)模型结果相似,S-W 模型结果稍好,P-T 模型经过土壤水分修订后模拟效果很好。在大尺度上,P-T 模型比 P-M 模型更为实用。由于生态系统的复杂性和异质性,目前还没有直接估算实际蒸散的方法,要通过潜在蒸散来转换,目前较常用的有 Zhang 等(2001)方法、Saxton 等(1986)方法及 Rithchie(1972)方法。

综上所述,植物蒸腾作用可以用简单直观的方法、仪器进行观测,是森林水文的热门领域,研究成果较多;植物蒸发作用因生态系统的复杂性、立地条件等条件所限,且直接观测的仪器只有全自动热量分析型气象站和大型蒸渗仪,仪器造价昂贵,而且不易维修,或间接通过森林水分平衡法或卫星遥感、GIS 等技术进行研究,因而研究较少。大尺度内的蒸散对森林植被及气候变化均十分重要,但由于目前技术条件所限,涡动相关和波文比观测系统应用还不是很广泛,主要采用数学模型推导,在今后有很大发展空间。

1.3 生态系统蒸散研究进展

1.3.1 不同尺度下的蒸散研究进展

尺度是一个广泛使用的概念,在不同研究领域内有不同的含义。地球科学中尺度指各类自然现象发生的时间和空间尺度。同一种自然现象在不同时空尺度中发生时具有不同的特征,且从小尺度到大尺度之间的过渡并不能用简单的数量关系表达,时空尺度的扩大往往伴有研究系统内各组分之间的相互作用,这使得各组分原有的功能发生变化。蒸散现象是指植被蒸腾及土壤蒸发过程的总称,当涉及植被叶片和单株尺度时,蒸散即为叶片和植株的蒸腾,但当尺度扩展到林分及区域甚至全球范围时,蒸散过程便涉及植被蒸腾、土壤及水面蒸发过程了。在进行尺度扩展研究时,不仅要考虑到单纯的数量扩展关系,更重要的是要将植被的结构特征、生态系统结构特征、地形地貌特征及相关影响因素的变化情况引入其中。

1. 叶片尺度的耗水研究

国内外对于叶片尺度的耗水研究较早,叶片尺度耗水研究主要集中在测定叶片蒸腾速率、气孔导度等参数。早期的研究方法以离体方式为主,最常采用的方式为快速称重法(刘奉觉,1990)。离体方式由于采集的叶片与整株树木分开,观测一段时间之后,叶片由于水分、养分等的供给不足,其正常生理现象受到影响,使得观测结果存在偏差,测量结果需要校正。随着先进仪器的出现,又出现了稳态气孔计法(刘奉觉等,1997)、叶室法(杨芝歌,2013)等,这一类方法可以在叶片正常生长的情况下进行测量。稳态气孔计法将叶片夹在直径 1~2 cm 的微小气孔室内,然后通入干燥空气,以保证气孔室内湿度稳定,通过干空气流量、干空气水汽密度、叶室水汽含量和叶面积的大小来计算叶片的蒸腾速率和蒸腾量。稳态气孔计法由于气流流动速度与自然状态下差异很大,使得测量结果与正常生长的叶片蒸腾量差异较大,同时,选择不同的叶片其测量结果差异也较大。叶室法借助 Li-6400 光合仪进行测定,一般在测定时均与光合速率一起进行,测

定结果为瞬时蒸腾速率,与树木的真实耗水量差异较大,不宜用于测定树木的实际蒸散耗水量,但可用于比较不同树种之间的耗水特性(刘文国,2007)。

2. 单株尺度的耗水研究

单株尺度耗水观测技术是目前四种尺度中发展最成熟的,主要观测技术包括空调室法(ventilated chamber method)(Greenwood and Beresford, 1979)、大树容器法(Roberts, 1977)、称重式蒸渗仪法(陈建耀等, 1999)、同位素观测法(王鹏等, 2013)及热脉冲/热扩散法(thermal dissipation sap flow velocity probe, TDP)(王华田和马履一, 2002)等。

空调室法将待测的植被置于一个封闭的大气室内,并通入气流,通过测定进出气流湿度及室内气流的变化来测定待测对象的蒸散特征。空调室法因植被类型的不同精度有差异,且由于空调室内各项环境指标与自然状态下有差异,所以其测定值与自然状态下的植被蒸散情况存在差异。

大树容器法又称为整树容器法,是将整株树木从地面锯断,然后原地移入一个盛水容器中,当容器内水位下降时,定期向容器内加水至原来的水位,通过测定加水量来确定树木的蒸腾特征。该方法对树木破坏性大,且对测定树木的个体要求较严,对于个体太大的树木操作性不大。

称重式蒸渗仪法是在高精度天平发展成熟后的一种新型测定蒸散的方法,该方法通过测定置于称量桶内的土体与植株总质量变化来反映植株及土体的蒸散特征,观测精度较高,且可连续观测。

稳定同位素法是近年来发展起来的新兴实验手段,以同位素质量守恒[式(1-2)]为原理,并结合相关的水文监测资料,分析不同时期土壤-大气界面水分的分配状况便可得到相应的蒸散量[式(1-3)~式(1-5)]。

$$\delta X_t = f_1 \delta X_1 + f_2 \delta X_2 + \cdots + f_n \delta X_n \quad (1-2)$$

$$1 = f_1 + f_2 + \cdots + f_n \quad (1-3)$$

$$m_f - m_i = m_p - m_e - m_t - m_z \quad (1-4)$$

$$\delta_f m_f + \delta_e m_e + \delta_t m_t + \delta_z m_z = \delta_p m_p + \delta_i m_i \quad (1-5)$$

$$m_{ET} = m_e + m_t \quad (1-6)$$

式中, $f_1 \sim f_n$ 、 $\delta X_1 \sim \delta X_n$ 分别为不同层次土壤水对根系吸水的贡献和相应的氢氧同位素值; δX_t 为植被茎干中氢氧同位素值; m 为水量; δ 为 $\delta^{18}\text{O}$ 值; f 、 i 分别为末态土壤水含量和初始土壤水含量; e 为蒸发量; t 为蒸腾量(看作农作物根系吸收水量); p 为上层补给输入(降水、灌溉)量; z 为对土壤水的深层入渗量; m_{ET} 为蒸散量。

TDP 法观测单株尺度蒸散是目前为止认可度最高的观测方法,1928 年,由 Rein 首