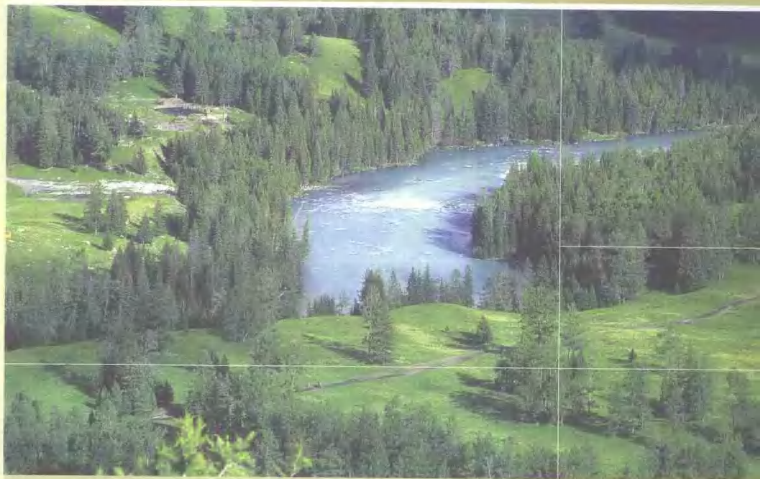


水源涵养林研究与示范

■ 余新晓 甘 敬 等/著

RESEARCH AND DEMONSTRATION ON
WATER CONSERVATION FOREST



中国林业出版社

S727.21

Y773.1

973.1

水源涵养林研究与示范

RESEARCH AND DEMONSTRATION ON
WATER CONSERVATION FOREST

■ 余新晓 甘 敬 等/著

中国林业出版社

主 要 著 者

(以姓氏笔画为序)

牛健植 王小平 王铁明 王海龙
冯仲科 甘 敬 石 青 刘 松
余新晓 张志强 张振明 张晓明
李金海 陈丽华 周彩贤 武 军
秦永胜 秦富仓 高甲荣 谢宝元
鲁绍伟 高成德 吴东国 李文宇
宁金魁 栾慎强

图书在版编目(CIP)数据

水源涵养林研究与示范/余新晓等著. —北京:中国林业出版社, 2007. 4

ISBN 978 - 7 - 5038 - 4582 - 6

I. 水… II. 余… III. 水源涵养林-研究 IV. S727. 21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 061758 号

水源涵养林研究与示范

出 版 中国林业出版社(100009 北京市西城区德内大街刘海胡同7号)

网 址: www.cfph.com.cn

E-mail: cfphz@public.bta.net.cn 电话 (010)66184477

发 行 中国林业出版社

印 刷 北京地质印刷厂

版 次 2007 年 4 月第 1 版

印 次 2007 年 4 月第 1 次

开 本 850mm × 1168mm 1/16

印 张 26

字 数 749 千字

定 价 68.00 元

现代社会的发展，全球水资源需求量的不断增加与水环境的恶化，使得水资源紧缺问题已成为全球关注的焦点。因此，随着人们对以涵养水源为主要目的的水源涵养林的重视，林业在生态环境建设中的主体地位得以巩固，水源涵养林以其特殊的地位显得日趋重要，与此相关的研究工作也逐步兴起。

密云水库集水区水源涵养林体系建设是一项具有战略性意义的重点工程，对保护集水区的蓄水能力、改善水质以及对北京市未来饮用水供给都有十分重要的意义。1987年，北京林业局将潮白河流域的水源涵养林列入三北防护林体系建设重点工程之一，1991年北京市园林绿化局制定了《北京市密云、怀柔水库上游水源涵养林建设总体规划》，水源涵养林建设取得了长足的发展。与此同时，北京市“八五”科技攻关专题“密云水库上游水源涵养林涵养水源与防止土壤侵蚀效益的系统研究”揭示了水源涵养林的保水、保土与改善水质的作用，为水库集水区水源涵养林的营造、森林植被的恢复和经营管理提供了理论依据。但是，目前国内对水源涵养林经营技术研究尚处于探索阶段，并未形成一个完整的体系，《水源涵养林研究与示范》一书的出版正是适应了这种发展的需求。本书作者长期从事水源涵养林研究，特别是近20年来，通过连续主持国家科技攻关项目以及多项国家农业科技成果转化基金项目，取得了诸多研究成果，《水源涵养林研究与示范》是作者在长期研究实践中不断探索凝炼的精华。

本书以水源涵养林耗水规律、水源保护区植被分布与演替规律为基本理论基础，提出了水源涵养林培育和经营技术体系，构建了水源涵养林培育与经营决策系统，分析了水源涵养型植被水文生态功能，构建了一个系统的、完整的水源涵养林技术体系。本书结合密云水库集水区的具体情况，以北京市重要水源区（密云水库集水区）对水源涵养林的技术需要及其自然地理、经济、社会 and 森林资源的状况为

主要目标,进行了综合和单项技术试验示范区的分析和研究,重点研究了水源涵养型植被建设、乔灌树种选择技术、水源涵养林空间配置与结构优化技术、水源涵养林营造技术、水源涵养人工林经营技术及低功能水源涵养林更新改造技术与植被定向恢复技术,总结出一套完整的水源涵养型植被恢复与建设技术体系,为我国都市水源区水源涵养林工程建设提供了全面、先进、可行的森林植被建设的科技支撑体系和试验示范。本书的出版,将对我国水源涵养林建设起到积极的推动作用,同时对我国生态环境建设必将起到一定的技术支持和理论指导作用。

中国工程院院士



2007年1月

在陆地生态系统中,森林植被具有最大的水源保护功能,是一个面积广阔的绿色水库。多年来,北京市在林业发展中取得了可喜的成绩,截至2004年底,北京市林地总面积为105.4万 hm^2 ,有林地面积为61.9万 hm^2 ,森林覆盖率为35.47%。其中山区森林覆盖率为46.55%,平原森林覆盖率为19.10%。但是,作为一个拥有1000多万人口的大都市,北京在工业化过程中出现的土地承载力及环境容量的下降、水资源短缺等问题日趋严重,使人们越来越重视森林在调节气候、涵养水源、保持水土、减洪、滞洪等保护和美化环境方面所具有的独特的巨大效能。

以北京市为代表的华北土石山区也是我国严重缺水的地区,人均占有水资源量不足 300m^3 ,是全国人均占有水资源量的 $1/8$,是世界的 $1/30$ 。降水在年际和年内分布上极不均衡,水资源的储蓄量难以依靠非工程措施加以调剂。入境水量逐年减少,占北京地区地表水可利用量90%的密云水库、官厅水库年平均入水量分别锐减到8亿 m^3 和4亿 m^3 ,而且衰减趋势还在继续。密云水库、怀柔水库是北京城市用水的主要水源,保护好这两盆清水有着重大的战略意义。两库上游分属潮河、白河水系,流域面积1.65万 km^2 ,平均年入库流量10多亿 m^3 。其中在北京市境内5000 km^2 ,入库流量占入库总流量的60%左右。近几年来,水库功能由为工农业用水转变为主要为城市生活用水提供水源,已成为首都城市发展的生命线。

密云水库集水区森林面积小、森林覆盖率和森林效能较低,在现有天然植被中,灌丛植被占有较大的比例,在人工森林植被中,中、幼龄林约占70%。由于立地条件较差,树种单一,森林布局和林分结构不尽合理,导致北京森林的蓄水、涵养水源、防止水土流失、山洪泥石流灾害及改善水质等生态效能较低。森林资源不足、森林植被质量不高以及生态服务功能低下等问题严重地影响了华北地区生态环境的改善,直接导致了北京水资源供求的紧张局面,制约着北京经济和社会的发展。实践已经证明,恢复和合理经营现有的森林植被,充分发挥森林植被的防护功能和水源保护功能是促进首都生态环境建设和社会经济发展的必需,同时,林业的发展水平直接关系到首都经济的发展。

本研究主要解决了以下几个问题:①水源涵养林耗水规律研究。针对北京密云水库上游现有的主要林木树种,选择6个树种(油松、刺槐、杨树、臭椿、荆条、侧柏)及典型林分作为研究对象,通过计算、分析基本了解了单株林木和典型林分的耗水性,采用彭曼公式分析了研究区域的水源涵养林单株耗水量。②水源保护区植被分布与演替规律研究。采用ISODATA模糊聚类分析法对北京市密云水库集水区天然灌丛植被进行分类,采用空间代替时间的方法,提出了天然灌丛植被演替趋势和天然植被演替阶段的水源保护功能。③水源涵养林乔灌木树种选择技术。筛选和提出适合当地土壤和气候等自然环境条件、符合水源涵养功能要求的优良乔灌木树种,在此基础上提出适宜的水源涵养型造林树种,为水源涵养林工程奠定了良好的植物材料基础。④水源涵养林空间配置与结构设计技术。筛选并提出符合净水、节水等多目标要求的优良林分结构特征指标,优化确定小流域内的森林植被合理空间布局,形成林分结构和空间配置的优化模式。⑤水源涵养林营造技术。通过对水源涵养林耗水规律、水源涵养林分布与演替规律等方面的研究,从而确定水源涵养林的立地条件划分、整地技术、造林密度的确立、混交技术、栽植技术、造林模式及其幼林抚育技术。⑥水源涵养林人工林经营技术。确定低功能净水节水型水源涵养植被的判别标准和判别依据,系统提出低质林更新改造技术。⑦低功能水源涵养植被恢复与经营技术。解决都市重要水源区低功能水源涵养林草植被建设的关键技术,提出一套定向恢复植被的技术,以满足水源涵养林工程的需要。⑧水源涵养林培育与经营决策系统。将遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和专家系统(ES)结合起来,借助相关数学分析,建立了融分类、评价和决策于一体的水源涵养林营造与经营决策支持系统,实现了分类、评价和决策的有机结合,并将所建立的决策系统应用于密云水库集水区水源涵养林。⑨水源涵养型植被水文生态功能研究。论述森林植被在径流小区尺度、天然坡面尺度、小流域尺度对土壤侵蚀产沙的影响和森林对土壤侵蚀影响的空间尺度效应,并分析和评价了水源涵养林植被对水质的影响,提出了植被生态用水的定义,建立了生态用水的分类体系和生态用水的理论体系和计算方法,在对北京市进行生态分区的基础上确定出了北京市生态用水定额,并对北京生态用水可持续利用进行了评价;应用分布式水文模型SWAT(Soil and Water Assessment Tool),在遥感和地理信息系统的辅助下,研究了密云水库流域北京密云水库集水区土地利用变化对该区域内的降水—泥沙,降水—径流以及降水—养分转移关系的影响。

全书分为四篇,第一篇为绪论,从水源涵养林植被耗水规律、水源区植被分布与演替规律、水源涵养型植被水文生态功能等方面论述

了国内外研究进展,建立了综合和单项技术试验示范区。第二篇是水源涵养林应用基础理论。对研究区域内人工、天然植被生长状况进行全面细致的调查分析,并进行了水源涵养林耗水与植被分布与演替规律的研究。第三篇是水源涵养林构建技术研究。重点研究水源涵养型乔灌木树种选择技术、水源涵养林空间配置与营造技术、水源涵养林人工林经营技术、低功能水源涵养植被恢复与经营技术和水源涵养林营造与经营决策支持系统,形成了完备的水源涵养林营造和经营技术体系。第四篇是水源涵养林营建技术示范。为我国水源区水源涵养林工程建设提供全面、先进、可行的森林植被建设的科技支撑体系和试验示范。

本书的出版得到了国家林业局科学技术司、北京林业大学和北京市园林绿化局的大力支持,在此表示衷心的感谢!鉴于水源涵养林研究的复杂性及作者知识、能力有限,书中难免有不妥之处,敬请读者不吝赐教。

余新晓

2007年1月于北京

目 录

序 前言

第一篇 绪 论

第一章 水源涵养林研究进展与评述	(2)
第一节 水源涵养林植被耗水规律研究	(2)
第二节 水源区植被分布与演替规律研究	(8)
第三节 水源涵养型植被水文生态功能研究	(19)
第四节 水源涵养林植被空间配置与结构优化技术研究	(30)
第五节 水源涵养林培育技术研究	(33)
第六节 水源涵养林经营技术研究	(35)
第七节 水源涵养林智能决策支持系统与管理技术研究	(36)
第二章 研究地区与试验区基本情况	(40)
第一节 研究区概况	(40)
第二节 试验区概况	(48)
第三节 研究途径	(51)

第二篇 水源涵养林应用基础理论

第三章 水源涵养林耗水规律研究	(78)
第一节 单株林木耗水特性试验研究	(78)
第二节 林分耗水试验研究	(83)
第三节 林分耗水的尺度转换	(90)
第四节 小流域水源涵养林耗水基于“3S”技术的量化分析	(103)
第四章 水源区植被分布与演替规律研究	(108)
第一节 水源区植被现状分析	(108)
第二节 天然灌丛植被群落特征分析	(113)
第三节 灌丛植被演替趋势分析	(121)

第三篇 水源涵养林构建技术研究

第五章 水源涵养林乔灌木树种选择技术	(128)
第一节 落叶栎类抗旱种源筛选	(128)
第二节 低耗水规律树种筛选	(150)
第三节 水源涵养林主要造林树种	(152)
第六章 水源涵养林空间配置与结构设计技术	(157)
第一节 水源涵养林最佳森林覆盖率和最优植被类型结构的确定	(157)
第二节 水源涵养林空间配置	(165)
第三节 稳定的林分结构设计	(174)

第七章 水源涵养林营造技术	(181)
第一节 造林地整地技术	(181)
第二节 栽植密度	(183)
第三节 栽植技术	(185)
第四节 造林模式	(190)
第八章 水源涵养人工林经营技术	(204)
第一节 主要人工林群落生长状况分析	(204)
第二节 人工林结构的理论探讨	(214)
第三节 低功能水源涵养林的更新改造	(225)
第九章 低功能水源涵养型植被恢复技术	(237)
第一节 水源涵养型植被恢复的基本构思	(237)
第二节 天然灌丛植被恢复模式	(238)
第三节 植被恢复与重建过程中目标林相的构建	(243)
第十章 水源涵养林培育与经营决策支持系统	(250)
第一节 立地条件决策分析	(250)
第二节 水源涵养林营造模式设计	(266)
第三节 森林生长模拟与经营管理	(270)
第四节 水源涵养林培育与经营决策支持系统的构建	(275)
第十一章 水源涵养型植被水文生态功能	(277)
第一节 森林植被冠层与地被物层水文功能	(277)
第二节 森林植被对不同尺度径流影响分析	(287)
第三节 森林植被不同尺度的侵蚀产沙及特征分析	(295)
第四节 水源涵养林对水质的影响	(307)
第五节 森林植被生态用水	(322)
第六节 水源保护区森林植被变化水文响应	(342)

第四篇 水源涵养林技术示范

第十二章 水源涵养林培育示范区建设	(372)
第一节 试验示范区建设基本情况	(372)
第二节 水源涵养型植被建设乔灌木树种选择	(372)
第三节 不同类型区水源涵养型植被配置模式	(373)
第四节 水源涵养林人工造林试验示范	(376)
第五节 水源涵养人工林经营试验示范	(383)
第六节 水源涵养型植被恢复技术试验示范	(387)
第七节 水源涵养林试验研究基地	(390)
参考文献	(392)

第一篇 绪 论

本篇重点从水源涵养林植被耗水规律、水源区植被分布与演替规律、水源涵养型植被水文生态功能、水源涵养林建设乔灌木树种选择技术、水源涵养林植被空间配置与结构优化、水源涵养林培育技术、水源涵养林经营技术、水源涵养林智能决策支持系统与管理技术等方面介绍了国内外水源涵养林研究进展与存在的问题，并借鉴国内外水源涵养林的研究，对其每一部分提出了详细的研究途径，为水源涵养林的研究与示范奠定了基础。

第一章 水源涵养林研究进展与评述

第一节 水源涵养林植被耗水规律研究

1 不同尺度森林植被耗水研究

森林植被蒸散耗水通常包括植被蒸腾耗水、植被冠层、地被物的截持耗水和土壤水分蒸发耗水3部分,它也是反映森林植物水分状况的重要指标和影响区域乃至全球气候的重要因素(王安志,2001)。植被蒸散耗水量研究的方法按其种类大体可以分为微气象法、水文学方法、生理学方法、红外遥感法和SPAC水分传输模拟法(张劲松,2001)。

林木耗水问题的研究,一直是林学、农学、气象、水文、土壤以及自然地理等相关学科和领域共同关注的重要课题,树木蒸腾作用测定方法历来是树木水分生理学家、生态学家、林学家共同关心的问题。这一问题既是树木水分生理的核心,又贯穿于整个森林生态。树木的蒸腾耗水量是植树造林设计与环境水分研究的重要水分参数,国内外由于这个问题考虑不周而导致的环境恶化事例已屡见不鲜。因此,准确地测算树木蒸腾耗水量就成为环境水分定量研究的急需技术。从20世纪60年代起,国外陆续提出过大棚法、蒸渗仪法、热脉冲法、热平衡法、离体称重法及微气象法等,各种方法的技术原理不同,测值大小各异,在使用上都有一定的适用性与局限性,数据的使用价值与测定经费差别也很大。

国内外对于森林植被蒸散耗水的研究多集中在4个层次上,即叶片水平、单株水平、林分水平和区域以及更高的水平(孙鹏森,2000)。对于不同的研究尺度,其所要回答和能够回答的问题就迥然各异。研究叶片尺度的蒸腾耗水时,其主要目的在于了解不同树种蒸腾作用的生理过程及其对环境条件的适应特性;个体尺度的研究是局部各个生理过程的整体反映,同时还可以用来进行个体间的差异比较;群落水平的研究可以回答某一林分的实际耗水量问题,有助于生产中的水分管理;而区域水平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。与此同时,每一个植物耗水研究尺度所应用的方法也不尽相同。

1.1 叶片尺度(Leaf scale)耗水研究

叶片尺度上的耗水研究开始较早,主要是利用植物生理学方法在树木叶片或小枝的水平上测定其蒸腾参数。所采用的方法有气孔计法、空室法、快速称重法。由于在这个层次上的研究大多需要从植物个体采样,而使得所研究的对象与原来的个体分离,因而对测定结果会有影响。在实际测定中需要进行校正。如刘奉觉等人在杨树耗水的研究中对快速称重法的离体偏差进行了订正(刘奉觉,1991)。近年来随着英、美等国对于相关研究仪器和设备的研制生产以及推广使用,不但克服了上述的测定误差,还可以与光合作用的测定结合起来,同时观测植物的水分生理参数,如植物的水分利用效率等等。由于离体层次的研究可以刻画出树木生理特性对短时间内环境变化的响应,因此,此方法目前常常被用来进行环境因子胁迫下植物的适应性反应和不同树种之间的生理特性的比较研究。

1.2 单木尺度 (Whole Tree) 耗水研究

目前对于单株水平蒸腾耗水量的研究方法最多、手段也最为成熟,其方法主要包括称重式蒸渗仪法 (Fritschen et al., 1973; Edwards, 1986)、大树容器法 (Roberts, 1977; Knight et al., 1981)、空调室法 (Greenwood et al., 1979; Dunin et al., 1986)、放射性/稳定性同位素法 (Waring et al., 1979; Dye et al., 1992) 以及热脉冲/热扩散 (Swanson, 1994; Smith et al., 1996) 等等。

单木尺度 (Whole Tree) 是迄今为止发展成熟、技术手段最多的研究尺度。单木研究领域处于基础生物学、树木生理学和水文学的边缘,多学科的交叉使得这个层次的研究日臻完善。利用单木水平获得的林木耗水的数据,可以通过一定的理论方法进行合理的尺度放大,从而达到推算林分或区域水平耗水的目前研究热点,但作为林分水平研究常用的微气象法不一定适合于任意地形,在很多情况下并不适用,此时利用单木进行推导也是现实可行的方法 (Thomas J hatton, 1994)。

1.3 林分尺度 (Stand scale) 的耗水研究

林分尺度这个尺度的测定主要有水文学方法、微气象法和生理学测定方法。其中水文学方法中有水量平衡法和水分运动通量法。微气象法中主要包括波文比—能量平衡法 (BREB), 空气动力学阻力—能量平衡综合法 (AREB) 和空气动力学方法。前两种方法在农业和林业上使用较多,波文比法发展历史较早,其最大的优点是能够分析蒸散与太阳辐射之间的关系,提示不同地带蒸散特点的主要影响因子的变化对蒸散的作用。AREB 法经过几个阶段已经日趋成熟,现已广泛应用。这种技术起源于 Penman 公式,主要用于计算水面蒸发,但经过改进可以计算植被的可能蒸散, Monteith 在 Penman 公式的基础上,引入了冠层阻力 (R_c) 的概念,这就是 Penman - Monteith 方程。1970 年以后随着红外测温技术的发展, Bowen 和 Rosenberg 改进 Monteith 提出的公式,这就是 AREB 法,并提出了中性层结下的空气动力学阻力 (R_a)。在非中性层结下,必须对 R_a 进行稳定层结订正 (谢贤群, 1997)。该方法的优点是利用作物表面的温度进行计算,而不必标定冠层导度。空气动力学方法由于对下垫面及气体的稳定度要求很严格,因而使用范围受到了限制。

植物生理学方法主要是通过测定典型天气条件下叶片日蒸腾强度、蒸腾时间、林分叶量来推算出整个林分某一时段的蒸腾量。其优点在于可操作性强、准确,但是都存在着由一棵或几棵样本外推到整个林分所遇到的统计学的问题。

从近年来的文献可以发现,随着用生理方法 (如热脉冲技术) 测定单木蒸腾耗水研究的日益完善以及与生态学尺度转换方法的有机结合,直接测定林分蒸腾耗水量成为了可能,这样就克服了森林蒸腾耗水研究常与林地土壤水分蒸发紧密联结在一起而很难分开的缺陷,同时该方法还克服了微气象方法对下垫面和气体稳定度要求严格的限制以及传统森林水文法具有较大不确定性的缺点,可以在坡度较大的山区使用。因此,该方法已在国际上广为应用,如 Hatton 等 (1995) 和 Vertessy 等 (1997) 的研究。

1.4 区域尺度 (Region scale) 的耗水研究

区域尺度的树木耗水研究则是在更大的空间尺度上来预测蒸腾耗水量,它有助于区域水资源水环境管理和植被生态用水限额的制订,目前常用的方法有气候学方法和红外遥感法。

气候学方法可用于大面积估算某地区蒸散量,将气象资料与年蒸散、月蒸散量之间建立起的经验统计模型用于耗水预测中。现在已经有很多相关的著名方程,如彭曼公式、布得科公式、Thornthwaite 等,此方法最大的优点在于利用现有的气象资料来计算某一地区的蒸散量和植被的生态需水量,缺点是诸多的方程都是特定条件研究时段内的产物,其研究对象多是均匀的草地和农田作物等,将它用于其他地域时有可能产生较大的偏差,因此它对于森林估算的蒸散只具有参考价值 (魏天兴, 1999)。

红外遥感法是20世纪70年代以来,随着遥感技术的不断发展所形成的测定植被蒸散量的一种新方法。区域尺度的遥感技术应用能够获得能量界面的净辐射量和表面温度并以相关植被光谱取得生态参数,进行区域蒸散的计算模拟(左大康,谢贤群,1991)。此外,它的优点在于应用多时相、多光谱的观测资料,既克服气象方法因下垫面几何结构和物理属性的非均匀性所受到的限制,又克服了水分平衡法在时间分辨率上的缺陷(张劲松,2001)。Fuqin(1999)评价该方法是大面积研究蒸散最经济、最有效的估算方法,发展很快。而它的缺点是遥感技术受天气条件的影响很大,如阴雨天所得的数据无效,同时由于卫星遥感受卫星围绕地球旋转周期的限制、航空遥感受飞机空中续航能力的限制而无法实现连续的,全天候的观测(王安志,2001)。

2 林木耗水与影响因子相互关系的研究

林木耗水过程是一个复杂的地—气系统水分循环过程。受树种、环境、时间、空间等多种因素的控制,树木根部吸收土壤水分,通过树干运输到树冠,从叶表面蒸腾散失,根部吸收的水分有99.8%以上消耗于蒸腾作用(王沙生,1990)。林木耗水过程既是一个物理过程也是一个生理过程。作为一个物理过程,植物蒸腾是遵循水分从湿润表面蒸发定律而进行的,所以说它是受诸如太阳辐射、空气饱和差和温度等环境因子的变化而影响的;同时它又是一个生理过程,这表现在气孔开度等生物机制对于蒸腾的调控作用(翟志习等,1997)。因此说,植物的蒸腾耗水要比植被冠层和枯落物的截留耗水等物理过程复杂的多。

2.1 环境因子的影响

从本质上看,环境因子对植物蒸腾作用的影响主要是通过改变蒸腾的扩散阻力和扩散梯度两个途径实现的。结合本研究,为方便叙述,分别划类从以下几个方面加以概括。

(1) 气象因子。众多的研究表明,太阳辐射、大气相对湿度和温度是影响植物蒸腾的最主要的微气象因子。根据王孟本(1999)对于河北杨、小叶杨等4个树种蒸腾作用与气象因子之间的关系研究,认为各气象因子与蒸腾速率的相关性大小依次为:太阳辐射、气温、大气相对湿度和大气水势,以太阳辐射最为突出。

(2) 土壤因子。土壤含水量一直被认为是影响植物蒸腾的最主要因素之一,一般认为当土壤中有足够的水分供应时,植物的耗水率大,反之则小(徐德应,1993)。尽管有的学者(Rutter, A. J., 1967; Irvine et al., 1998)已经建立了土壤含水量与树木蒸腾的经验公式,遗憾的是,很难从本质上建立起两者之间的固定关系模式,这可能一方面与土壤性质和含水量本身存在着较大的空间变异有关;另一方面,可能与有些植物的蒸腾主要受其他天气变量影响(Lagergren and Lindroth, 2002)有关。土壤含水量对于植物蒸腾的影响还表现在土壤水分胁迫时对于气孔关闭的调控,目前有两种机理解释:一种认为是由于大气湿度的下降而引起的气孔关闭,称之为“前馈式反映”(Schulze, 1986);另一种认为由于随着叶水势的下降,ABA的增加诱导了气孔的关闭,称之为“反馈式反映”(Farquhar, 1978)。

另外,土壤质地也能通过影响土壤的孔隙结构和供水性能,从而对土壤中的水运动特性以及水分的有效性,最终影响植物的蒸腾(刘世荣,1996)。

2.2 生物因子的影响

(1) 气孔调节。近年来,国外的学者对于气孔开闭与其影响因子之间的关系做了大量的研究,如脱落酸(Gowing et al., 1993)、水力导度(Sperry et al., 1993)、植物水势(Dewar, 1995)、土壤水分(Jackson et al., 1995)、微气象条件(Hogg et al., 2000)和边界层导度(Meinzer and Grantz, 1991)等因子对于气孔开度的影响,然而对于如何结合这些不同角度的研究结论来从本质上阐述气孔开闭的机理还没有达成共识(Zweifel et al., 2002)。

在这种背景下,许多学者提出了很多经验或半经验模型来定量描述气孔导度对于环境因



子的响应,其中应用较为广泛的有Jarvis(1976)提出的因子阶乘模型和Leuning(1995)提出的组合因子模型。在植物蒸腾耗水的研究中,由于树木的气孔特征具有遗传特性,所以不同树种的气孔特性是不同的,因此可以将树种的气孔特性作为反映和评价树木耗水性的一个重要生物学指标(王华田,2002)。

(2)非气孔调控。植物对于角质层蒸腾等非气孔蒸腾作用也具有一定的调节能力。一方面,在单叶水平,由于叶片的大小形状、叶片的结构特征以及表面覆盖物等形态差异,致使叶片表面的温度和饱和差发生改变从而最终实现对于叶片蒸腾作用的调控;另一方面,在单株或群落水平,植物通过冠层总叶面积数量的大小来控制植物总体的蒸腾耗水量(Kramer et al., 1995)。

另外,尽管植物的蒸腾作用最终表现为水汽从冠层表面的散失过程,然而实际上是一个包括植物根系吸水、木质部边材水分传输、叶片水汽扩散等为一体的SPAC系统流动过程。因此,除了上述的生物调节机制以外,不同植物本身还具有各自的根系吸水调节(Kramer et al., 1995)、木质部水力结构以及传输过程调节(Zimmermann和Brown, 1974)和水容调节(Powell和Thrope, 1977)等多种调节方式,这些生物学调节机制通过改变植物蒸腾的驱动力和阻力,最终达到调节水分散失的目的。

2.3 边界层导度

植物散失水汽的过程其实是受气孔导度和边界层导度共同调节的,而通常对于后者作用的认识显然不如前者。边界层导度大小取决于气孔水汽向大气扩散时所通过叶片表面的空气层厚度,常常受植物叶片的大小、形态和风速变化的调控(Monteith和Unsworth, 1990; Nobel, 1991; Schuepp, 1993)。由于认为气孔导度和边界层导度对于植物蒸腾的调控作用类似于决定电流大小的两个并联电阻,因此它们之间的相对大小决定了哪一种方式是控制植物蒸腾的主要因素。当气孔导度远低于边界层导度时,则认为气孔是植物蒸腾的主要调节者,因此植物的蒸腾量随着气孔导度的下降而呈比例递减;相反,当边界层导度远低于气孔导度时,则认为气孔调节的作用不大,边界层导度发挥着至关重要的作用。通常,由于针叶树种具有较小的叶面积而被认为有较大的边界层导度(Martin et al., 1999)。Jarvis和McNaughton(1986)提出了系数的概念表示叶或冠层蒸腾对气孔导度调节的敏感性,Wullschlegel(1998)在此基础上总结了气孔导度与边界层导度之间的关系以及对植物蒸腾的影响。

3 森林植被耗水研究存在的主要问题和的发展趋势

目前有关森林耗水研究存在的主要问题有:

(1)不同蒸散研究方法都不可避免地存在各自的缺点,对于同一问题的研究仍需采用两种或更多的方法,需要把不同研究结果进行比较,以避免单一方法的局限性和片面性,来增加结果的精确性和可靠性(张劲松,2001)。

(2)在研究中常常未把蒸散区分为截持蒸发、植物蒸腾、土壤蒸发这三大分量,以及这三大分量之间的比例关系及其受林分结构的影响仍不明确。

(3)很多蒸散研究没有把蒸散及其分量充分地与森林植被的生态系统结构特征联系起来,所得结果多是典型天气和特定森林条件下的间接测量值或计算值(徐文铎,1998),不能准确地反映出真实的蒸散耗水和需水特征,这就大大地降低了它们的理论价值和林业生态环境建设实践的指导作用。在未来的森林蒸散研究中,需要进行多学科联合和应用精密的自动化仪器来深入探讨蒸散的物理机制,并且建立森林蒸散及其分量与森林生态系统结构特征的数量联系。

在树木耗水的研究领域发展趋势有以下几个方面:

(1) 气孔和过界层对于整树耗水的控制研究。通常,气孔在控制蒸腾上的作用是由气孔计在叶水平上测定的气孔导度推断的。在大树树冠测定的气孔导度在很大程度上反映了环境和植物的生理变化。而且,从叶水平的测定并不能直接地估算整树耗水,因为除了气孔阻力外,还要考虑分布在底片树叶及整个冠层周围的边界层阻力对于蒸腾的影响。边界层阻力(boundary layer resistance)促使叶片附近的水蒸气湿度增加,使得叶表面的水汽压产生梯度(Javis 和 McNaughton, 1986),这种微气象反馈作用改变了蒸腾拉力,因而也最终改变了叶片及整树的蒸腾率。这种梯度作用的大小在很大程度上取决于气孔和过界层导度的比率而不是边界层导度的绝对大小。Jarvis 和 McNaughton (1986) 用一个无量纲的分离系数, Ω ($0 < \Omega < 1.0$) (Decoupling Coefficient) 表示气孔导度与过界层导度的比率,从而量化地描述了叶片和树冠蒸腾本身对于气孔导度的微小变化的敏感性。当 Ω 趋向 1.0 时,气孔对于蒸腾的控制作用就会迅速地减弱,原因就是叶表面的水汽压和大气之间梯度越来越大。通常,在边界层导度占绝对优势的情况下, Ω 随着气孔导度的增加而增加,特定树种的分离系数通常变动在某一特定范围内,而不是一个固定不变的值。

(2) 整树水力导度的研究。在估算整树的估算中,常常利用单位边材面积或单位叶面积与叶水势相互关系中来描述水在土壤—根系—叶的路径中总体的水力导度 (Gt, Landsberg et al., 1976)。已经初步搞清了树林的水力结构对于影响水在从根到叶片的运动机制 (Tyree 和 Ewers, 1991)。水力导度的空间变异对于研究森林冠层的蒸发模式和叶水势有着重要意义,同时,我们还可以研究树体蓄水供给树木渡过干旱时期的意义。

估算树木 G_t 的方法大致有以下几种方法:

回归法 (Regression Method): Schulze (1985) 利用测定木质部水流和水势的方法定量计算 72 年生的挪威云杉 (*Picea abies*) 和 33 年生的落叶松混交林的总水力导度。他们利用回归的方法从冠层耗水 (即蒸腾) 与叶水势的反向关系中计算出 G_t 。这种方法在估算幼树和小树时蒸腾与叶水势之间的相关性比较紧密。而在大树树干或者树冠中,由于树体的蓄水作用会给蒸腾和水势之间的关系带来延迟或滞后作用,而且主要蓄水部分应在树冠,所以利用枝水平的液流的测量值更加接近冠层蒸腾。

单点法 (Single Point Method): Meinzer (1995) 根据以下表达式利用单点法来估算 G_t :

$$G_t = \frac{E}{\Delta\psi}$$

式中: E 是当前蒸腾速率的估算值; $\Delta\psi$ (Mpa) 是叶水势的最大值与当前值的差值。 E 值是通过液流技术测定获得。

Cochard (1996) 对于 35 年生无梗花栎 (*Quercus petraea*) 的研究表明,回归技术和单点法取得了相似的结果,但是后一种方法简单易行,值得推荐。

(3) 气孔和水力导度对蒸腾的协同控制研究。根据自然法则,蒸腾在水汽阶段受到气孔导度和边界层阻力的共同控制,如果仅有 G_t 的约束而无气孔阻力的作用,则蒸腾作用很快会导致叶片干燥。因为,在土壤—植物—大气边界体的水分运动中,蒸腾拉力在叶片到大气之间的水分由液态转化为气态过程中的作用是非常巨大的。理论上讲,气孔导度应当与土壤—叶片之间的水力导度保持平衡。这种协调关系有利于维持叶水势保持在使叶片变干燥的最低值以上,同时防止气孔抑制光合作用时对碳的捕获和木质部气穴现象的发生。Cochard (1996) 研究了无梗花栎的叶水势,气孔导度和整树水分传输量之间的这种平衡关系,得出的结论是,气孔导度和 G_t 在控制木质部栓塞方面发挥了重要作用,它主要是通过维持一个水势的下限值 ($-2.5 \sim -2.8$ MPa) 防止发生木质部输水障碍。

许多实验证实了气孔导度、蒸腾与土—根—叶路径上的水力导度成正相关关系。气孔导度、叶蒸腾随着 G_t 的增加而急剧增加,并且因 G_t 的继续增加而变得渐近于某一点。这样一种模式说明,气孔调整以改变 G_t 的方式来协调蒸腾,这种调整的主要原因是水分传输效率 (即水力导度) 而不是随着大量叶片的水分状况。

(4) 边材水分贮存。整树液流的测定可以被用来估算边材区水分的贮存及其对于每天耗水的作用。通过主干的水流量理论上应当等于冠层的蒸腾, 树木的生理消耗部分可以忽略。可是, Schulze (1985)、Loustau (1996)、Philips (1997)、F. C. Meinzer 等在大树测定中发现, 蒸腾水流和在树干基部测得的水流之间有相当大的延迟, 这种延迟从几分钟到几个小时不等。推测可能这是由于蒸腾水流和液流测定位点以上树干蓄水部分的水分交换造成的。

对于液流的测定, 可以同时设在上部枝条、树干基部和冠层中部某点, 因此可以用来研究水分从树体内部日输出量以及蒸腾水流和树干贮存水流水分交换的力学特性。假设用上部冠层的液流来代替蒸腾, 冠层和基部水流差值的矢量变化可以用来描述蒸腾水流和树体蓄水部之间的矢量变化。例如, 早上冠层液流可能比树体基部的液流大, 表明水分从内部蓄水流。午后基部液流要高于冠层液流, 晚间树体内部开始蓄水。根据 Schulze 等人的估测结果, 树干蓄水量达到日蒸腾量的 10% ~ 25%, 目前, 对于树体不同高度的更为密集的研究不多, 所以上述值的代表性还未可知。Schulze 还测定了落叶松 (*Larix spp.*) 和挪威云杉 (*Picea abies*) 两个树种树干两个高度上的液流, 并且估算出冠层与树干相比在水分贮存方面占主要地位 (20 ~ 25m 高的落叶松 24h 中总共 18.3kg 的蓄水, 其中 16.7kg 来自冠层, 而仅有 1.6kg 来自树干)。可是, 像 Schulze 这样的观测, 目前国内还无法实现, 这些研究需要建造铁塔或起重机深入到冠层里面, 并且需要很多贵重的测定液流的仪器才可行。

(5) 耗水尺度扩大的理论与方法研究。对于单木耗水量的研究, 其最终目的往往是要估测一定地面面积上的蒸腾量。研究一个林分的蒸腾大小, 最好的方法是实测样方中的每一棵树, 并且样方要足够大, 以确保不受到边缘效应的影响。但这仅仅是一种理想而已, 我们不可能付出这么多时间和精力。因此, 我们只能依靠有限的标准木的测定结果扩大到林分。通过选择林分水平——一个容易调查的纯量, 然后根据样木调查的结果在贯穿纯量的值域的基础上求得耗水量, 这项工作我们称为空间尺度扩大。树木耗水量和纯量 (通常状况下是一个回归模型) 之间关系可以用来决定整个林分的耗水量。曾经被使用过的纯量有单木占地 (Tree Domain), 树干之间的距离 (Hatton 和 Vertessy, 1990) 或者用树冠投影面积 (Hatton, 1995), 树干基部面积 (Basal Area, Teskey 和 Sheriff, 1996), 胸径 (DBH, Vertessy, 1995, 1997), 叶面积 (LA, Hatton, 1995), 边材面积 (SA, Dunn 和 Connor, 1993) 来表示。任何一种纯量是否适用主要取决于立地条件, 例如在 Vertessy (1995) 的研究中, 树干直径是相当不错的一个纯量, 原因是所研究的林分是同龄纯林, 林龄小, 树干基部断面面积以边材为主。Hatton (1995) 等人在测定按树估算效果, 除了用树干距离外, 还使用单木占地这一纯量, 均表现良好。如果样木是按要求选取而不是随机选取的话, 效果更好。由此可以得出结论, 在估算林分蒸腾过程中误差的主要来源是来自样木耗水的测定, 而不是尺度扩大的过程。

时间尺度的问题。很多研究是针对空间尺度, 很少有针对时间尺度问题的研究报道。水量平衡的研究中, 用相对短的时间研究蒸腾是很普遍的, 通常不超过一年时间, 但随之而来的问题是, 在较长时期内或者在与测定时间不同的条件下, 这些测定结果是否仍然适用。同样的问题, 由短期内测定的数据得到的空间尺度变换规律是否能够令人放心的应用于另一时间阶段。

有些纯量具有短期可靠性, 如叶面积在土壤含水量比较充足的时期内, 单木耗水与叶面积呈线性相关关系, 在水分亏缺的胁迫下, 这种关系就变成非线性了, 而且关系曲线的形状随着土壤水分以及在一年中的时间而有较大的变化。

即使水分条件较好, 不存在水分胁迫的地区也有可能发生长期可靠性的问题。例如, 据 Vertessy (1995) 报道, 15 年生的花楸树 (*Eucalyptus regnans*) 林地日耗水量与树干直径之间存在很强的相关关系。可是, 当对 57 年生的林分进行同样的测定时, 发现二者的关系发