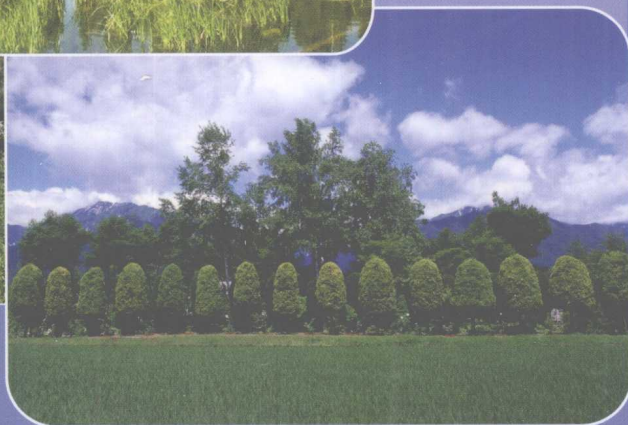




华北土石山区典型人工林 耗水规律研究

Study on the water consumption of dominant plantations in mountain
and stony area of northern China

<< 鲁绍伟 杨新兵 陈丽华 余新晓 著

5.7

中国林业出版社

华北土石山区典型人工林

耗水规律研究

Study on the water consumption of dominant plantations in mountain
and stony area of northern China

<< 鲁绍伟 杨新兵 陈丽华 余新晓 著

图书在版编目(CIP)数据

华北土石山区典型人工林耗水规律研究/鲁绍伟等著. —北京:中国林业出版社,2008.3

ISBN 978 - 7 - 5038 - 5193 - 3

I. 华… II. 鲁… III. 人工林 - 植物散发 - 研究 - 华北地区 IV. S718.54

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 028820 号

出 版:中国林业出版社(100009 北京市西城区刘海胡同7号)

网 址:www.cfph.com.cn

E - mail: cfphz@public.bta.net.cn 电话:66183789

发 行:中国林业出版社

印 刷:北京地质印刷厂

版 次:2008年3月第1版

印 次:2008年3月第1次

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:10.25

字 数:253千字

定 价:38.00元

水作为一种基础性自然资源,是人类赖以生存的生命之源。随着人口和经济的增长,世界水资源需求量不断增加,水质不断破坏,水环境不断恶化,水资源短缺已成为世人共同关注的全球性问题,并将成为经济和社会发展的桎梏。我国多年平均水资源总量为 28 124 亿 m^3 ,居世界第 6 位,但人均占有量不足 2 200 m^3 ,仅为世界人均水资源占有量的 1/4。目前,我国已被联合国列为 13 个贫水国之一;据预测,我国人口将在 2 030 年左右达到峰值 16 亿,届时人均水资源量只有 1 750 m^3 ,将列入严重缺水的国家。在充分考虑节水的情况下,届时用水总量约为 7 000 亿 ~ 8 000 亿 m^3 ,预计用水量已经接近可利用水量的上限。而且,我国水资源在地区分布上的不均匀性、污染加剧、生态环境恶化以及严重的水浪费现象等因素使水资源的供需失衡问题更加严重,对水资源的可持续利用造成了极大的威胁,不得不引起人们的高度重视。

华北地区也是一个水资源相对匮乏的地区,水是该地区生态恢复、作物增产的主要限制性因子。北京市人均水资源量只有 300 m^3 ,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,属重度缺水地区,北京市已成为世界上最缺水的城市之一。目前,北京市水资源开发利用已达到可供水资源的自然极限,缺水问题十分突出。水资源短缺,已成为影响和制约首都社会和经济发展的主要因素。降水年内分配不均,冬春少雨、夏秋多雨,汛期雨量过于集中,而且常以暴雨形式出现;降水量年际变化较大,丰水年与枯水年相差悬殊,使水旱灾害频频发生,甚至同一地区有时旱涝接踵而至,交替成灾。

2008 年奥运会即将在北京召开,为北京提供优质的水源,并保证人民饮用水的健康,已成为关系首都社会经济发展和生态安全的当务之急。

本书以长期和大量的第一手观测资料和实验数据为基础,系统论述了华北土石山区典型人工林的苗木—林木—林分不同尺度的耗水规律,用定量化数据进行了比较研究,资料丰富,论述系统、全面,对指导当地的生态环境建设具有重要意义。

关君辉

2007 年 7 月

在陆地生态系统中,森林生态系统具有巨大的经济效益、生态效益和社会效益,是生命的源泉。在森林植被与生态环境相互作用和相互影响中,水文过程是较为重要的方面之一。在水源保护方面,森林通过拦截降水、涵养水源、减洪增枯、减少地表水土流失与泥沙输出量、提高降水利用率等生态作用的发挥,起到保护水资源、调节水量、控制土壤侵蚀和改善水质的目的。然而,森林的巨大生态效益与其生长所需水资源的短缺已成为突出的环境矛盾。由于树木耗水过程本身与气候、地形、土壤以及植被组成及结构等影响因素相关,具有复杂性和时空异质性,因此,如何在可利用水资源极为有限的条件下来合理地构建森林植被,最大程度地发挥其多种功能,已经成为林业界和生态界关心的热点问题。实践中,由于植被建设的需水量具有区域性,典型植被耗水特征又是确定生态用水的前提和基础,是目前决定干旱半干旱地区森林植被建设与水资源合理配置的关键。

从20世纪90年代开始,由北京林业大学、北京市林业局和河北农业大学共同合作,对密云水库上游水源保护林的土壤侵蚀、植被营建、流域保护和经营管理等多方面进行了大量探索。本书在此基础上主要研究华北土石山区密云水库流域典型林分林木耗水规律,同时,为“十一五”国家科技支撑“防护林体系空间配置与结构优化技术研究”课题的建设提供理论支撑。

在本书的撰写过程中,课题组成员通力合作,进行了大量的资料整理和分析工作。作者殷切希望本书的出版能够引起有关人士对于该领域的更大的关注和支持,并希望对从事该领域研究的学者有所裨益,共同将这一领域推向新的发展阶段,为建设美好首都和2008年北京的绿色奥运作出自己的贡献。

本书在北京市科技计划重大项目“生态涵养带农业节水技术模式研究(D0706007040191-07)”、“‘十一五’国家科技攻关华北土石山区植被恢复与重建技术试验示范(2006BAD-03A11-4)”与“十一五”国家科技支撑“防护林体系空间配置与结构优化技术研究(2006BAD-03A02)”基础上整理而成。本书构思新颖,资料丰富,论述系统、全面,观点鲜明,有前瞻性,是一本颇有参考价值的专业书籍,可供农业、林业、草业、水保、生态、环境等方面科研、生产、管理人员及有关大专院校师生参考使用。

中国林业出版社为本书的出版给予了大力的支持,编辑人员为此付出了辛勤的劳动,中国工程院资深院士——北京林业大学关君蔚教授为本书作序。在此一并表示诚挚的感谢。对书中可能出现的问题与不足,恳切希望同仁批评指正。

著者

2007年8月

序

前言

1 引言	(1)
1.1 问题的提出及其背景	(1)
1.2 研究目的和意义	(2)
1.3 国内外研究现状与发展趋势	(2)
1.3.1 林木耗水含义的界定	(3)
1.3.2 林木耗水研究方法	(5)
1.3.3 森林植被耗水机理研究	(8)
1.3.4 存在的问题与发展趋势	(13)
2 研究地区和试验区概况	(16)
2.1 研究地区自然概况	(16)
2.1.1 地形地貌	(16)
2.1.2 地质土壤	(16)
2.1.3 气候条件	(17)
2.1.4 水文条件	(18)
2.1.5 植被类型	(18)
2.2 试验区基本概况	(19)
3 研究内容与方法	(23)
3.1 研究的主要内容	(23)
3.1.1 人工控制条件下苗木耗水特征研究	(23)
3.1.2 典型人工林优势树种林木耗水研究	(24)
3.1.3 典型人工林优势树种林分耗水尺度转换比较研究	(24)
3.1.4 林分耗水尺度转换模型	(24)
3.2 技术路线	(25)
3.3 研究方法	(26)
3.3.1 人工控制条件下苗木耗水试验	(26)
3.3.2 典型林分树木耗水试验	(27)
4 人工控制条件下苗木耗水特征分析	(30)
4.1 针叶乔木树种耗水特征分析	(30)

4.1.1	针叶乔木树种光合蒸腾耗水规律	(31)
4.1.2	针叶乔木树种水分利用率	(32)
4.1.3	针叶乔木树种整株耗水	(33)
4.2	阔叶乔木耗水特征分析	(37)
4.2.1	阔叶乔木树种光合蒸腾耗水规律	(37)
4.2.2	阔叶乔木树种水分利用率	(39)
4.2.3	阔叶乔木树种整株耗水	(40)
4.3	灌木树种耗水特征分析	(48)
4.3.1	灌木树种光合蒸腾耗水规律	(48)
4.3.2	灌木树种水分利用率	(53)
4.3.3	灌木树种整株耗水	(53)
4.4	草本植物耗水特征分析	(63)
4.4.1	草本植物光合蒸腾耗水规律	(63)
4.4.2	草本植物水分利用率	(63)
4.4.3	草本植物整株耗水	(64)
4.5	乔灌草耗水比较分析	(66)
4.5.1	蒸腾耗水和光合速率比较	(66)
4.5.2	蒸腾速率与环境影响因子的相关分析	(67)
4.5.3	不同树种整株平均耗水比较	(69)
4.5.4	不同树种整株月耗水比较	(71)
4.6	控水条件下苗木耗水规律	(73)
4.6.1	控水条件下针叶乔木树种耗水	(74)
4.6.2	控水条件下阔叶乔木树种耗水	(74)
4.6.3	控水条件下灌木树种耗水	(75)
4.6.4	控水条件下草本植物耗水	(78)
4.6.5	控水条件下乔灌草耗水比较	(78)
4.7	小结	(79)
4.7.1	蒸腾速率是说明树木耗水性能的重要指标之一	(79)
4.7.2	植物蒸腾耗水是受环境的综合影响	(80)
4.7.3	不同树种耗水量差异明显	(80)
4.7.4	各树种苗木的蒸腾速率随控水时间的延续而下降	(81)
5	典型人工林优势树种林木蒸腾耗水特征研究	(82)
5.1	针叶乔木树种蒸腾耗水规律	(82)
5.1.1	针叶乔木树种光合与蒸腾耗水	(83)
5.1.2	针叶乔木树种水分利用率日变化	(84)
5.1.3	针叶乔木蒸腾耗水与环境因素的相关关系	(85)
5.2	阔叶乔木树种蒸腾耗水规律	(86)
5.2.1	阔叶乔木光合与蒸腾耗水	(86)
5.2.2	阔叶乔木水分利用率日变化	(86)
5.2.3	阔叶乔木蒸腾耗水与环境因素的相关关系	(87)

5.3	灌木树种蒸腾耗水规律	(89)
5.3.1	灌木树种光合与蒸腾耗水	(89)
5.3.2	灌木树种水分利用率日变化	(91)
5.3.3	灌木树种蒸腾耗水与环境因素的相关关系	(92)
5.4	乔灌木树种耗水比较分析	(94)
5.4.1	树种的光合蒸腾耗水比较	(94)
5.4.2	主要树种耗水量比较	(95)
5.5	小结	(98)
6	典型人工林优势树种林分耗水特征研究	(101)
6.1	林冠截留试验分析	(101)
6.1.1	林冠截留与降雨特征分析	(102)
6.1.2	林内穿透降雨特征	(110)
6.1.3	枯落物截留分析	(111)
6.2	林地土壤水分蒸发特征分析	(112)
6.2.1	林地土壤含水量比较	(113)
6.2.2	林地土壤水分物理蒸发	(115)
6.2.3	典型天气的土壤蒸发比较	(117)
6.2.4	影响土壤蒸发的环境因素分析	(118)
6.3	林分总耗水量比较分析	(121)
6.3.1	林地土壤耗水量动力学计算	(121)
6.3.2	水量平衡法计算	(122)
6.3.3	林分总耗水量结果比较	(123)
6.4	小结	(126)
7	林分耗水模型	(128)
7.1	林地水分传输的理论	(128)
7.1.1	森林系统水分传输	(128)
7.1.2	根系区土壤水分运动的规律	(129)
7.2	林木(林分)耗水模型	(131)
7.2.1	林分无竞争耗水模型	(131)
7.2.2	林分竞争耗水模型	(135)
7.2.3	林木耗水关系分析	(138)
7.3	模型求解	(139)
7.4	模型验证分析	(140)
7.4.1	无竞争林木耗水模型验证	(140)
7.4.2	林分竞争耗水模型验证	(141)
7.5	小结	(141)
7.5.1	林分无竞争耗水模型	(145)
7.5.2	林分竞争耗水模型	(146)
	参考文献	(147)

1 引言

1.1 问题的提出及其背景

水是生命之源，土是生存之本，水和土是人类生存和发展最基本的物质条件。随着人类生产力水平的提高和科学技术的不断进步，现代社会经济发展与生态过程日益密切地联系在一起，自然资源—生态环境—经济发展之间的矛盾已经成为制约各国经济持续发展的焦点，成为世人共同关注的全球性问题。当我们步入知识经济和经济全球化的 21 世纪，水资源危机、环境污染、生态平衡失调已经成为当今世界的普遍问题，其中由于人口增加、工农业发展所造成的水资源不足，则是制约我国国民经济发展的的重要因素。1992 年联合国环境与发展大会就提出，水资源短缺已成为当今人类面临的最严峻的挑战之一。

中国是一个严重缺水的国家，人均水资源量为 $2\,200\text{m}^3$ ，只相当于世界人均的 $1/4$ ，被列为世界上最贫水的 13 个国家之一(沈国舫，王礼先，2001)。北京市人均水资源量只有 300m^3 ，仅相当于全国人均水平的 $1/8$ ，世界人均水平的 $1/30$ ，远远低于国际公认的人均 $1\,000\text{m}^3$ 的下限，属重度缺水地区，北京市已成为世界上最缺水的城市之一。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。目前北京市水资源开发利用已达到可供水资源的自然极限，缺水问题十分突出。水资源短缺，已成为影响和制约首都社会和经济发展的主要因素。

截至 2004 年底，北京市“十五”森林资源二类清查结果表明(北京市林业局资料)：北京市林地总面积为 105.4 万公顷，有林地面积为 61.9 万公顷，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%。作为一个拥有 1 000 多万人口的大城市，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。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、幼龄林占有约 70% 的面积。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，导致北京山区森林生态效能降低。

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 J M 等，2000)。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。自 20 世纪 50 年代以来，世界各国研究工作者从多方面对森林水文作用进行了富有成就的探索，并且取得了许多重要研究成果(Buttle J M 等，2000；高甲荣等，2001；李文华等，2001；石培礼等，2001)。由于树木耗水过程本身与气候、地形、土壤以及植被组成及结构等影响因素相关，具有复杂性和时空异质性，再

加上过去试验条件和仪器设备的限制,增加了相关研究的难度。资料表明,迄今为止,对于植被的耗水研究主要集中在叶片、单木和林分等三个尺度(孙鹏森,2002)。然而,由于各研究的试验对象、所用方法、测定时间长短以及空间位置的差异很大,其数据的连续性、可比性和系统性都很差,不能从不同的角度系统地阐述林木耗水过程及其约束机制,其研究的结果也很难为水源涵养林用水定额的合理确定提供理论依据。

本研究是在以下研究工作与科研基础上展开的:北京市林业局和北京林业大学合作,完成了北京市“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研究”、“九五”科技攻关专题“华北土石山区水源保护林综合配套技术与示范”、“十五”科技攻关专题“都市水源保护区水源保护型植被营建理论与技术体系研究”、“北京山区荒溪分类、山洪泥石流危险区制图及灾害实时预报系统的建立研究”等多项研究课题,这些研究为集水区水源保护林的经营管理提供了理论和技术依据。1998年启动的“中德技术合作项目——密云水库流域保护和经营”,更为水库流域防护林的可持续发展奠定了基础。本研究的内容可以为“十一五”“防护林体系空间配置与结构优化技术研究”课题的建设提供理论支撑。

1.2 研究目的和意义

北京市水资源短缺和生态环境问题已成为全市乃至全国人民关注的焦点。北京是中国的首都,是政治、文化和国际交往的中心,代表着国家的形象,城市的性质决定了作为首都,北京必须具有良好的生态环境质量。但实际上目前北京的生态环境相当脆弱,环境污染比较严重,与国际性大都市的称谓相比有很大差距。面对上述问题,我们如何来认识和解决这些同时并存的问题?如何合理利用水资源,促进北京社会、经济、环境的可持续发展?这是值得深入探讨和研究的。因此,密云水库流域人工林体系建设就成为一项战略性的重点工程,对提高集水区的蓄水能力、改善水质以及保障首都供水安全具有重要意义。

因此,深入研究森林生态系统对水文功能的调节和影响机理及林木的耗水规律,以提高密云水库流域水源保护林经营管理水平,确保水源保护区现有植被的稳定、高效和持续发展。本文正是在试验研究的基础上,通过对北京山区几个典型人工林优势树种及群落不同尺度的耗水和需水规律的研究,试图揭示水源保护林不同树种组成的林分的时空尺度的耗水变化规律,为密云水库集水区水源保护林的高效空间配置和稳定林分结构设计提供理论基础,也为相邻相近或同类地区的林业工程建设提供技术支撑。

1.3 国内外研究现状与发展趋势

水是地球上一切生命的源泉,没有水就没有地球生物,也就没有人类和人类文明。水资源是人类社会乃至整个生物圈生态系统的重要自然资源。森林耗水研究涉及到水文学、生态学、生理学、气象学、土壤物理学、生物物理学、森林培育学等诸多学科。不同尺度的研究所解决和说明的问题不同,应用的方法也有很大区别。

研究森林的耗水规律首先要准确定义森林耗水的概念,在此基础上选择适当的试验研究方法。国内外有关学者对树木的耗水特性做了大量的研究工作,取得了很多成果。林木耗水研究的主要内容包括耗水测定技术的研究、树木水分传输机理与耗水调控机制的研究、树木耗水性的研究和耗水尺度扩展理论与方法的研究四个方面(王华田, 2002)。树木耗水调控机理的研究是林木耗水问题研究的基础,耗水测定技术作为必要的研究手段,需在树木耗水调控机理的研究和林木耗水问题研究的基础上,才能深入研究不同树种耗水性的差异,进而实现林木单株和群体耗水性的评价和耗水尺度的转换。依据林木个体和群体耗水研究成果对水源保护林进行造林规划、对林种与林分结构进行调整,实现高效(生态效益和水文效益)、低耗(水)、多产(径流)的水源保护林建设目标具有重要意义。

1.3.1 林木耗水涵义的界定

林木耗水性(Water consumption)根据研究尺度的不同分为树木个体耗水性(Tree Water consumption)和林分群体耗水性(Forest water consumption)。广义地说,树木个体耗水性指的是树木根系吸收土壤中的水分并通过叶片蒸腾耗散的能力(王华田, 2002)。树木个体耗水性指的是单位时间、单位树冠叶面积(或单位树冠投影面积、或单位树干边材面积)的蒸腾耗水量。以往研究结果表明,树冠叶片面积、树冠体积、树冠投影面积、树干边材横断面积等生长指标是以树冠叶片面积为核心的、彼此相关性非常密切的一类指标(孙晓梅, 1998; 林成来等, 2000)。林分群体耗水性指的是单位时间、单位面积林地的蒸散耗水量。林分群体耗水量包括林木蒸腾耗水量和林地地表蒸发耗水量两部分,因此受林分结构、组成和立地条件的影响,其中林木蒸腾耗水通常占林地蒸散耗水的绝大部分(生长正常的成龄郁闭林分,林地树木蒸腾耗水量占林地蒸散耗水量的80%以上)。实际研究工作中,常根据研究的需要,选择一定的研究方法单项研究林木的蒸腾耗水性,或同时研究林木蒸腾耗水性和林地蒸发耗水性,也可以简单地用林木蒸腾耗水量代表林地蒸散耗水量。林木个体和群体现实条件下耗水量的测定结果受林木耗水性和耗水环境的共同影响,不同环境条件下林木耗水量的测定结果是不同的。

潜在耗水性(Potential Water Consumption)的概念是在水面最大蒸发(潜在蒸发)的基础上提出的。刘昌明(1997)根据Penman潜在蒸发公式计算了农田潜在蒸散率 ET_{max} ,并将其定义为农田表层充分供水、植物叶片气孔畅通无阻时的农田蒸散量(包括潜在蒸发、作物最大蒸腾和降水截留量)。孙鹏森(2000)在此基础上提出潜在耗水量的概念,将其定义为林地土壤水分充足条件下树木的蒸腾耗水量,认为在此前提下进行的树种之间单位边材面积耗水量的比较是对耗水纯量的比较,具有可比性。实际上,树木的潜在耗水性或潜在耗水量并不是一个定值,而是因树木所处的生长发育阶段和大气环境而异。土壤水分条件为充足含水量时(含水量足够高以至于不影响蒸腾作用带动的根系吸水过程),林木耗水性是当时大气环境下潜在蒸腾耗水。从水量平衡角度对水源保护林树种和林分进行耗水评价和比较时,选用潜在耗水性指标是恰当的。现实耗水性可以用于评价和比较任意土壤水分条件下林木的耗水性。在干旱和半干旱地区的非降雨季节,可以利用林木现实耗水性研究林地水分环境承载力,或者依据林地水分环境容量进行造林规划和林分管理。

蒸腾耗水是树木的一个与环境条件紧密相联的最基本的生理活动,大量研究表明,在一定的环境条件下,林木耗水量仅仅与树冠叶片面积和叶片蒸腾强度有关,是一个与树种遗传性状密切相关的指标,因此可以用于评价和比较树种之间的蒸腾耗水性(Becker, 1996)。但如果环境条件不同,就失去了评价和比较的基础。影响树木蒸腾耗水的环境条件有土壤环境条件(主要是土壤水分)和大气环境条件(太阳辐射、空气温度、相对湿度、风速等)。

孙鹏森(2002)提出了潜在耗水量(Potential water consumption)的概念,认为在土壤水分充足情况下测得的树木耗水量为潜在耗水量,在任意土壤水分条件下测得的耗水量为现实耗水量,但实际上,树木的潜在耗水量并不是一个定值,而是因树木所处的生长发育阶段和大气环境而异。因此,要实现对林木耗水性的评价和比较,必须设置相同的环境平台。林木耗水评价和比较的环境平台包括2个层次:第1个层次是土壤水分条件,当限定土壤水分条件为充足含水量时,对林木耗水性的比较是当时大气环境下潜在蒸腾耗水的比较;当不限定土壤水分条件时,对林木耗水性的比较实际上是当时土壤和大气环境条件下现实耗水性的比较;而同时限定土壤条件和大气条件,即在土壤水分条件充足、大气环境条件一致的前提下,对树木潜在耗水性的比较才有意义,比较结果能够真正地体现树木耗水性的遗传特征,反映树种之间耗水性的差异。

基于上述分析,对于生长在野外不同生境下的树木,要评价和比较它们之间的耗水性大小是很困难的,因为无法创造一个相同的环境平台,但如果对立地条件比较一致的地段上的不同树木的耗水量进行同时测定,其结果还是具有可比性的,问题是相似立地条件地段上的树木种类不可能很多。要比较多种树木的耗水特性,通常的做法是进行盆栽苗木试验。盆栽试验的优点是易于控制土壤环境和大气环境,缺点是盆栽试验使用的是苗木,苗木的耗水性能在多大程度代表大树的耗水性还有待检验,但对于灌木树种这个问题就不那么突出了,好在城市绿化中灌木被大量采用,因此,盆栽试验是比较灌木树种耗水性的理想方法。另外,盆栽试验时树木的根系被限制在花盆里,如果水分供应充足,这种限制对蒸腾耗水的影响不大,但当土壤水分不足时,则可能比自然生长的树木更容易受到干旱胁迫的影响,克服这一缺陷的办法是尽量使用大一点的花盆。

植物的蒸腾作用包括皮孔蒸腾、角质层蒸腾和气孔蒸腾三种形式,其中皮孔蒸腾非常微弱,约占总蒸腾量的0.1%,可忽略不计,成熟叶片的角质层蒸腾也很少,仅占总蒸腾量的3%~5%,因此,气孔蒸腾是植物蒸腾的主要形式,占总蒸腾量的95%以上(王沙生, 1991)。气孔蒸腾的过程大致可分为两步,第一步是浸润在叶肉细胞壁上的水分蒸发到细胞间隙中,第二步是细胞间隙中的水汽经过气孔扩散到大气中去。植物可通过气孔运动(张开或关闭)调节水汽的扩散,气孔张开程度可用“气孔导度”表示,单位是 $\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,表示单位时间单位叶面积气孔通过 CO_2 的体积。气孔运动又受许多环境因子的影响,其中影响气孔运动的主要环境因子有:①光照:光照是引起气孔运动的主要环境因素,多数植物的气孔在光照下张开,在黑暗中关闭,气孔在清晨张开的过程大约需要1h,而关闭的过程则延续整个下午,逐渐地进行。②空气温度:在0~30℃范围内,气孔张开的速率和张开度均随温度的增高而加大,高温(30~35℃)会导致气孔关闭。③空气湿度:气孔对空气湿度反应比较复杂,它往往通

过与温度的协调作用对蒸腾产生影响,在同一温度下,蒸腾强度随大气相对湿度的提高而下降,当湿度相同时,随温度的升高蒸腾加强,当空气湿度过低时无论其他环境因子如何变化都会引起气孔的关闭。④土壤含水量:土壤含水量降低至植物吸水困难时,气孔开张度减小,含水量进一步下降时,引起气孔关闭,在土壤供水过多时,叶细胞的膨胀度普遍增大,保卫细胞受到周围表皮细胞的挤压而使气孔缩小甚至关闭。⑤风速:风能带走气孔附近聚集的水汽,增大叶内外水气压梯度,从而加速蒸腾,但当风速过大时,植物为了避免水分过度散失而关闭气孔(汤章城,1986;Saliendra,1995;王伟,1998;周小阳,1999;王忠,2000;张岁岐,2001)。

1.3.2 林木耗水研究方法

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三部分,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)。林木耗水性测定和研究方法很多,但各有优缺点。不同阶段由于受科学技术发展水平的限制,林木蒸腾耗水测定所采用的主要方法不尽相同。作为林木蒸腾耗水研究的重要内容之一的林木蒸腾耗水测定方法,同样经历了一个发展和完善的过程。国内许多人结合自己长期蒸腾研究工作对林木蒸腾耗水的测定方法进行过专门研究和综述。刘发民(1996)、罗中岭(1997)、李海涛和陈灵芝(1997)、孙鹏森和马履一(2001)、高岩(2001)利用热脉冲式茎流计、王华田和马履一(2002)利用热扩散式茎流计、严昌荣(1999)利用热平衡式茎流计研究了树木边材液流速率和蒸腾耗水性,刘奉觉(1997)、巨关升等(1998,2000)、石膏(2004)对蒸腾作用不同测定方法专门作过比较研究,根据水量平衡原理,龚元石等(1998)和黄兴法等(2001)利用时域反射技术研究了农田和果园的蒸散量,吕厚荃和于贵瑞(2001)、孙卫国和申双和(2000)比较了几种实际蒸散测定方法在农田土壤水分模拟中的应用,陈建耀(1999)对大型蒸渗仪在研究土壤—植物—大气连续体蒸散作用的应用做了试验研究。毛飞等(2000)、温季(1999)对参考作物蒸散量不同计算方法进行了比较研究。张劲松等(2001)总结了植物蒸腾耗散的计算方法,分析了不同方法的应用条件和优缺点。

从观测尺度看,不同方法测定单元的尺度大小差异很大。基于器官水平的测定方法主要有叶室法和小枝快速称重法,其测定单元为小枝或叶片;基于单木整株水平蒸腾耗水的测定方法有整株容器称重法、茎流计法、同位素示踪法、染色法、大型蒸渗仪法等;基于林分群体水平的有水量平衡法、微气象法等;基于流域水平的有水量平衡法;基于区域水平的有遥感法、能量平衡法等。有人将森林植被耗水的研究分为四个层次,即单叶水平(器官水平)、单株水平、林分水平和区域以及更高的水平(孙鹏森,2000)。

从研究的内容上看,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不同。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。

根据检测原理,上述测定方法可以分为物理学方法、生理学方法、能量平衡法、水量平衡法、红外遥感和数字分析技术等(姚凤梅,2000;张劲松,2001)。物理学方法是最为常用的方法,如基于质量守恒原理的小枝快速称重法和大型蒸渗仪法、基于热量守恒原理设计的茎流计法(包括热脉冲式茎流计、热扩散式茎流计和热平衡式茎流计)、基于光学分析原理的染色法、基于放射性自显影原理的同位素示踪法等方法。物理学方法测定原理简单,测定结果较为准确可靠,但方法之间在具体操作技能要求上、仪器价格和稳定性上有很大差别,研究工作中应根据具体条件和要求灵活选用。生理学方法主要是基于红外分析原理设计的各类叶室法,经常采用的有各种型号的气孔计和光合作用分析系统。

基于热量守恒原理设计的各类茎流计测定边材液流的方法,利用埋设在树干边材内的点状热源和热电偶,通过测定边材液流传输过程中引起的热损耗,求得液流运移速率,设计原理简单科学,测定结果准确可靠,是研究单木蒸腾耗水量的先进方法。这类方法的第一代仪器是由 Huber(1932,1937)设计应用的热脉冲液流检测仪(Heat Pulse Recorder, HPVR),该仪器利用插入树干边材中的热电偶检测出埋设在其下部电阻丝所发出的热脉冲,利用“补偿原理”和“脉冲滞后效应”测定树干中液流运动产生的热传导现象,经过 Marshall(1958)、Swanson 和 Whitfield(1981)和 Edwards(1996)等人的系统工作,形成了第一代完备的树木边材液流检测系统。该系统考虑到边材液流传输的径向差异和液流探针对于边材损伤所产生的误差,构建了适宜的模型,并编制了相应的拟合软件,利用数据采集器采集、存储脉冲信号,组成了配套的自动检测装置。由于该方法测定结果基于热电偶间距和探针深度,导致实际测量的操作误差对测量精度产生较大影响,而且操作困难,使用不便。刘奉觉(1997)、李海涛和陈灵芝(1997)、孙鹏森(2000)、高岩(2001)利用这种方法对部分树种的蒸腾耗水性的研究,取得了较好的效果。Granier(1987,1996)对茎流计的测定原理作了大胆改进,将上述利用脉冲滞后效应为原理的热脉冲液流检测仪改进为利用双热电偶检测热耗散为原理的热扩散液流探针。该仪器的测量原理是,将同时内置有热电偶的一对探针(下部或上、下两个探针内置有线形丝热源)插入边材中,通过检测热电偶之间的温差,计算液流热耗散(液流携带的热量),建立温差与液流速率的关系,进而确定液流速率的大小。与热脉冲方法相比较,热扩散探针的一个突出特点是能够连续放热,实现连续或任意时间间隔液流速率的自动化测定(王华田和马履一,2002;马履一和王华田,2002)。与热扩散检测设计原理相同的还有一种热平衡式茎流计,这种仪器将探头设计成包裹式,通常用于测定直径较小的植物或器官,如小枝、苗木和作物等。

热扩散边材液流探针(Thermal dissipation sap flow velocity probe, TDP)测定树干边材液流速率的方法是在热脉冲液流检测仪的基础上发展起来的。该仪器的测量原理是,将同时内置有热电偶的一对探针(下部或上、下两个探针内置有线形电阻丝热源)插入具有水分传输功能的树干边材中,通过检测热电偶之间的温差,计算液流热耗散(液流携带的热量),建立温差与液流速率的关系,进而确定液流速率的大小。与热脉冲方法相比较,热扩散探针的一个突出特点是能够连续放热,实现连续或任意时间间隔液流速率的测定。另外,应用这种方法时,探针之间的距离和时间因素不会严重影响测量结果和精度,而且脉冲信号和数据读取同时进行,消除了热脉冲方法在脉冲信号和读

数之间需要一个等待间隔期的不足。同样,热扩散液流探针可以与其他生态或气象因子传感器一起与数据采集器连接,利用专有的软件,可以实现树干边材液流的连续不间断测定,并绘制边材液流和环境因子波动曲线和相应的表格。Granier 等(1996)定义了一个无量纲参数 K 用于消除液流速率为零时的温差,并建立了 K 与实际液流速率 V ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 的关系,进而利用被测木的边材面积 A (cm^2) 计算被测木的边材液流通量 F_s ($\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$)。边材面积 A 可以在试验结束后将被测木伐倒测定或利用生长锥测定。

基于水量平衡原理的方法是根据一定区域面积和土体深度在某一时段内的水量变化,间接测定一定尺度水平上水量平衡各因子的内在规律和消长动态,测量的空间尺度可以从林分水平到流域水平,是流域尺度蒸散动态和水量消长最为常用的检测方法。测定过程中要求水量平衡各分量都要达到一定的测量精度,否则降低最终结果的精度,测定过程的时间尺度过长、不能反映任意时间间隔的动态变化、不能反映测定区域范围内植被的生理生态特性等方面的缺陷,限制了这一方法的广泛应用。利用能量平衡原理通过对气象资料的分析计算植被蒸散耗水量的方法称为微气象法。应用过程中又根据选用变量不同分为多种计算方法:波文比—能量平衡法(BRER)是在空气动力扩散系数、热量扩散系数和水汽湍流扩散系数相等的假设前提下计算下垫面的热量和水汽湍流交换,因此要求下垫面均一、风浪场足够大,在地形起伏、平流逆温严重的情况下计算的误差会很大(左大康,1991;刘昌明,1997;谢贤群,1997;孙鹏森,2001)。空气动力学方法根据近地层温度、湿度和风速的梯度及廓线方程求解出潜热和热通量,但在应用时,对下垫面的粗糙度和大气的稳定度要求极为严格,从而限制了该方法的应用。能量平衡—空气动力学阻抗联合法(Penman—Monteith法)是在 Penman 公式的基础上,经过 Covey(1959)、Monteith(1965)等人的共同努力建立和完善起来的,该模式涉及的变量充分体现蒸散的大气物理属性和植被的生理特性,具有坚实的物理依据,能够较好地体现植被的蒸散过程及其影响机制,是非饱和下垫面蒸散研究的有效方法。涡度相关法通过直接测算下垫面显热和潜热的湍流脉动值得植被蒸散量,与其他微气象方法相比,涡度相关法物理理论最为完善可靠,且精度很高,但仪器昂贵、测定结果不能解释蒸散的物理过程和影响机制等方面的不足限制了这一方法的广泛应用。红外遥感法是利用红外原理和遥感遥测技术计算植被蒸散的方法,通过植被的光谱特性、红外信息,结合微气象参数来计算下垫面蒸散量,具有多时相、多光谱观测的特点,克服了微气象学法因下垫面几何结构和物理属性非均匀性的限制和水量平衡法在时间分辨率上的缺陷,是流域和区域水平蒸散耗水研究的有效方法。

上面介绍的测定方法各有优缺点,每种方法都是根据一定的对象和条件发展起来的,在使用上都有一定的适用性和局限性。对于这些方法,国内外的有关学者多有所研究比较(巨关升等,1998;魏天兴,1999;wullschleger,1998)。严格地说,不同方法之间几乎难以比较,目前还没有一种方法可以应用于任何条件和要求。因此必须强调要根据研究问题的特点和要求,根据测定的目的、测定的时间和空间尺度以及经费和设备条件,选择合适的某种和某几种合适的测算方法。

1.3.3 森林植被耗水机理研究

1.3.3.1 人工控制条件下树种耗水规律研究

植物蒸腾作用在植物水分代谢中起着很重要的调节支配作用,而蒸腾速率是衡量植物水分平衡的一个重要生理指标,可以反映树种调节自身水分损耗能力及适应干旱环境能力,早已被广大学者研究出了很多成果(Levitt, 1972; Kramer, 1983; 陈杰等, 1990; Liu et al., 1997; 雷泽湘等, 1998; Han et al., 1999; 贾志清等, 1999; 于强等, 1999; 王孟本等, 1999; 刘淑明等, 1999; 巨关升等, 2000; 李吉跃等, 2002; 卜崇峰等, 2005)。蒸腾作用是一个复杂的植物生理过程和水分运动的物理过程,它与环境因子之间存在着密切的关系,其关系可应用相关、回归等统计方法进行分析(郭连生等, 1992; 刘淑明等, 1999; 卢桂宾, 2001; 岳春雷等, 2003; 于界芬, 2003; 张锦春等, 2005; 周平等, 2002; 王海珍等, 2005; 田晶会, 2004; 张卫强, 2006)。

由于树木蒸腾耗水受多种环境条件的影响,而环境因子中光照强度、空气湿度、空气温度、风速、土壤湿度等又随季节、日周期和立地条件而变化,因此树木耗水性和蒸腾耗水量必然因时、因地而变化。因此,要比较野外不同生境下树木的耗水性往往是很困难的。为了找到一个相同的环境平台,许多学者使用盆栽试验方法(张建国, 1993; 康绍忠, 1994; 李吉跃, 2002; 刘昌明, 1997; 郭连生, 1999; 郭庆荣, 1999; 翟洪波, 2000、2002、2003; 孙鹏森, 2002; 周平, 2002; 王华田, 2002; 王得祥, 2004; 王继强, 2005; 康博文, 2005; 孟凡荣, 2005; 王瑞辉, 2006)。用盆栽法研究植物的耗水特性已被认为简单可行(李银芳等, 1994; 张卫强, 2006)。尽管盆栽试验无法模拟真实野外生境条件,但是,由于盆栽试验能较方便地人为控制水分条件等环境因子,这是野外自然环境下所难以调控的。利用这种人为的控制优势,能够比较相同环境条件或不同环境因子条件下不同树种苗木的水分生理生态特性。在盆栽的测定中,没有破坏苗木,而是在苗木上直接测定,因而比真正的离体测定更为准确(Loustau, 1993; 张劲松, 2001)。盆栽试验通常分为充分供水和控水两种处理,主要观测内容有苗木的蒸腾耗水规律及与气象因子和 SPAC (Soil-Plant-Atmosphere Continuum) 水势的关系,用以评价树木的耗水量和耐旱性(David, 1993)。虽然各个学者研究的侧重点有所不同,但得出的结论大同小异。

假设苗木的蒸腾作用同时受树种生物学特性、微气象条件和土壤水分状况的共同影响,微气象条件和土壤水分状况是外在因素,而树种的生物学特性是其内在因素。在微气象条件相对稳定和充分供水条件下,苗木的蒸腾作用主要取决于各树种的生物学特性(贺康宁, 2000; 张卫强, 2006)。因此,可以比较不同树种在相同条件下蒸腾作用的变化情况及其对环境因子的响应规律。

1.3.3.2 土壤—植物—大气连续体水分传输研究

20 世纪 60 年代以前,在土壤物理学、植物生理学及气象学领域对同一个“水势”概念却用了不同的名称(如:张力、扩散压差、水汽压等)来表示,用了不同的量纲来衡量它,把水分在不同介质中的运动人为地割裂开来,使得在这些相互有关领域中工作的人不能便利的相互交谈讨论。Hanks 和 Bowers (1960)利用由一系列代表剖面中不同层

的含水率和导水率变化的容阻单元组成的电子模拟器,描述了土壤剖面中水、热、气的瞬态传输。Gardner(1960)提出了土壤—植物—大气的水分运移系统, Cowan(1965)对该系统作了描述,他认为尽管系统中各部分的介质不同、界面不一,但在物理上可以看作一个连续的统一体系,水分在该系统中运动的各种过程就像链环一样,互相衔接,其水流通量取决于水势梯度和水流阻力。1966年,澳大利亚水文与土壤物理学家菲利普(Philip)在总结和分析前人成果的基础上,提出了较完整的关于SPAC的概念,用统一的能量指标(水势)将土壤—植物—大气连接成一个整体,使土壤和作物与生态环境协调研究成为可能。这一概念的提出极大地推动了土壤—植物—大气系统中水分关系等方面的研究工作。他在把水文过程纳入SPAC系统理论框架的同时,能量运移转化过程和盐分运移转化过程也被纳入其内。这一系统概念是指把生物圈内水分循环及水分能量平衡微观分解为在土壤—植物—大气连续体各个界面上和过程中的传输(Famigliette, J. S., 1994; Lhomme, J. P., 2000; Milly, P. C., 1984)。很多SPAC领域研究者在忽略植物体内细胞含水量微小变化的基础上,提出了基于欧姆定律式的SPAC系统中水分运移公式(Van den Honert, 1948; Brooks, R. H., 1964; Campbell, G. S., 1974; Deardoff, J. W., 1978; Rony Avissar, 1998)。

SPAC系统的提出指明了全球水问题的微观研究方向,对国际学术界关于水循环及水分能量平衡研究产生了巨大的影响。90年代初期,大型国际计划——国际地圈生物圈计划(IGBP)开展以来,将水文循环生物圈(BAHC)作为其四大核心课题之一,更加促进了国际上对SPAC系统的深入研究,其焦点之一就是土壤—植被—大气中水分的传输问题(Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer, SVAT)。世界气候研究计划(WCRP)在90年代开展的全球能量与水循环实验,设置了通量测量(Flux Measurement)项目,研究了地表(植被)—大气间水热的相互作用和交换传输机理。国外学者对土壤—植物—大气连续体(SPAC)系统中水热迁移问题进行了大量的研究工作(Camillo等, 1983; Seller, 1986; Van de Griend, 1989)。这一系统概念不仅指明了微观研究方向,而且加强了水文学跨学科的研究。

在SPAC系统中,土壤的水热状况、植被的蒸发散及所处的小气候件三者是互相影响、互相制约的(吴肇龙等, 1996)。地表与大气能量、水分的交换也代表了大气物理气候系统的下边界条件,准确地确定地表的水热通量并清楚地认识水汽和量在边界层内的输送过程,对于理解气候及水分循环非常重要。Choudhury等人在SPAC系统水热传输研究中,一般将SPAC系统分成三个层面:土壤层、植物冠层和一定参考高度的大气层。其中对冠层的简化有将其作为整体处理而把植物假设成位于动量汇处的一片大叶子的大叶模式(Brud, L. A. 1995; Dickinson, R. E., 1984; Dragutin, 1993; Liu Shuhua, 2004)。Taylor和Klepper(1978)描述了欧姆定律类比在土—根相互作用与根系吸水中的应用, Campbell(1982)提出了将蒸腾作为电流的电类比。Griend等人将SPAC系统分为多层模式,对SPAC系统中能量由太阳净辐射提供,其接收到的净辐射分别消耗于植物叶面和土壤的潜热、显热及进入地表的热通量。而水热在SPAC系统中的运移可分为土壤中的水热运移、土壤表面和植物冠层大气间的水热交换、植物冠层中水热运移、冠层大气与参考高度大气间水热交换等几个相互耦合的子系统(Hahne, E., 1998; I. N. Nassar, 1997; Matthew J., 1999; Guerrini, 1998; Martin J Canny, 1997)。