

马履一 王瑞辉 徐军亮 奚如春 王华田 著

北京市主要园林绿化植物 耗水性及节水灌溉制度研究

制度研究

中国林业出版社

北京市主要园林绿化植物 耗水性及节水灌溉制度研究

马履一 王瑞辉 著
徐军亮 奚如春 王华田

中国林业出版社

图书在版编目(CIP)数据

北京市主要园林绿化植物耗水性及节水灌溉制度研究/马履一等著. - 北京:中国林业出版社,2009.5

ISBN 978 - 7 - 5038 - 5589 - 4

I. 北… II. 马… III. 园林植物 - 节约用水 - 灌溉 - 研究 - 北京市 IV. S680.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 062573 号

出版 中国林业出版社(100009 北京西城区刘海胡同 7 号)

网址 www.cfph.com.cn

E-mail cfphz@public.bta.net.cn 电话 010-83228353

发行 中国林业出版社

印刷 北京地质印刷厂

版次 2009 年 5 月第 1 版

印次 2009 年 5 月第 1 次

开本 787 mm × 1092 mm, 1/16

印张 13

字数 325 千字

印数 1 ~ 1 000 册

定价 35.00 元

本专著是多个项目和课题的研究成果总结,其出版受到了以下课题和项目的共同资助,在此一并表示感谢!

1. 国家“十一五”科技支撑课题(2006BAD24B01):“十一五”速生丰产林良种壮苗规模化生产技术与示范
2. 部省共建重点实验室项目(JD100220535):北京城市绿地水分经济生态的研究

著者简介

马履一	教授	北京林业大学
王瑞辉	教授	中南林业科技大学
		北京林业大学博士后
徐军亮	博士	河南科技大学
奚如春	教授	华南农业大学
王华田	教授	山东农业大学

前 言

园林绿地是维持城市生态系统良性循环的重要保证，但绿地维持自身的生存和更新需要消耗大量水资源，这对水资源短缺的北京是一个巨大的挑战。从1998年开始，北京林业大学对北京市主要园林绿化植物的耗水特性和绿地节水管理进行系统研究，该研究是国家“十一五”科技支撑课题(2006BAD24B01)——“十一五”速生丰产林良种壮苗规模化生产技术与示范、国家自然科学基金项目(30371147)——北京水源保护林主要造林树种耗水特性与耗水调控机制、北京市自然科学基金项目(6052016)——北京市城市绿化树种耗水特性及其评价指标体系研究、教育部博士点基金项目(20033002009)——北京市主要造林树种耗水调控机理研究、部省共建森林培育与保护教育部重点实验室项目(JD100220535)——北京城市绿地水分经济生态的研究的成果总结。

本研究以北京园林绿地主要园林绿化植物为对象，研究了它们的耗水特性和需水规律，筛选出节水型园林绿化植物和绿地配置模式，构建植物的耗水模型；根据北京气候特点，计算和预测各种植物和绿地的需水时间和需水量。同时，根据城市绿地重要性的不同对绿地水分实行分级管理，建立一套按植物需水时间和需水量精准供水的绿地灌溉制度，为节水型绿地构建和管理提供理论和技术支撑。目前，国内外对林木耗水性的研究虽然取得了很大进展，但也存在许多明显的不足。以往的研究基本上都是针对大面积的森林和林木，对城市环境下园林植物的蒸腾耗水研究很少，基于植物水分生理需求的节水植物选择和节水型绿地结构配置的研究未见报道。随着我国城市化的飞速发展，生态城市建设步伐的加快，城市绿化覆盖率快速提高，园林植物的耗水问题受到越来越多的关注，相比于大面积森林，城市绿地处在高度集约管理条件下，有利于将耗水研究的成果应用于植物材料选择、结构配置和养护管理之中。

本研究历经10年之久，期间得到了北京市园林绿化局、北京市植物园、北京林业大学森林培育学科等单位的大力支持和帮助，北京林业大学硕士毕业生樊敏、李丽萍、孔俊杰、车文瑞、李广德、郝小飞等参加了部分外业调查工作，在此一并致谢！

著者

2009年4月

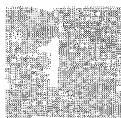
目 录

前 言

1 概论	(1)
1.1 国内外植物耗水和节水灌溉制度研究进展	(1)
1.1.1 国内外植物耗水研究进展	(1)
1.1.2 国内外节水灌溉研究进展	(5)
1.2 本研究的目的是和意义	(7)
1.2.1 城市园林绿地对改善城市生态环境的作用	(7)
1.2.2 北京城市园林绿地的用水量	(8)
1.2.3 北京市自然条件及水资源现状	(9)
1.2.4 北京市园林绿化现状及发展目标	(10)
1.2.5 植物耗水性及节水灌溉制度研究的意义	(10)
1.3 应用前景	(11)
2 植物耗水研究及绿地节水灌溉的理论基础	(12)
2.1 植物耗水研究的理论基础	(12)
2.1.1 植物耗水的概念	(12)
2.1.2 植物耗水性的评价和比较	(12)
2.1.3 植物耗水的环境影响因素	(13)
2.1.4 植物耗水的测定方法	(13)
2.1.5 植物耗水尺度扩展理论	(14)
2.2 园林绿地节水灌溉的理论基础	(16)
2.2.1 实现绿地节水的几个途径	(16)
2.2.2 园林绿地节水灌溉制度的内涵	(20)
2.3 技术路线	(20)
3 试验点概况与试验设计	(22)
3.1 试验地点概况	(22)
3.2 试验材料的选择	(22)
3.3 试验设计和试验方法	(24)
3.3.1 树干边材液流测定	(24)
3.3.2 盆栽试验	(25)
3.3.3 草坪蒸散量和林下土壤蒸发量的测定	(26)

3.3.4 土壤水分特征曲线	(26)
4 主要园林植物苗木耗水特性研究	(28)
4.1 水分充足条件下盆栽植物的耗水规律	(28)
4.1.1 植物蒸腾的日变化规律	(28)
4.1.2 植物光合作用的日变化规律	(28)
4.1.3 植物水分利用效率的日变化规律	(29)
4.1.4 植物不同季节和全年的耗水量	(31)
4.1.5 植物耗水的影响因子	(33)
4.1.6 蒸腾速率与环境因子的相关性分析	(39)
4.1.7 蒸腾速率与环境因子的优化模型	(43)
4.1.8 天气状况对植物蒸腾的影响	(46)
4.1.9 遮荫对灌木蒸腾的影响	(48)
4.2 控水条件下灌木和草坪草的耗水规律	(50)
4.2.1 控水后蒸腾量日变化	(50)
4.2.2 控水后植物的日耗水率	(52)
4.2.3 土壤干旱胁迫对植物蒸腾和光合的影响	(54)
4.2.4 园林绿地土壤水分等级的划分	(56)
4.2.5 控水后植物的水分利用效率	(57)
4.2.6 不同水分梯度下植物的蒸腾耗水量	(60)
4.2.7 不同水分梯度下植物耗水量排序	(62)
4.2.8 不同水分梯度下植物年耗水量的聚类分析	(65)
4.2.9 土壤水分亏缺时耗水量的下降比例	(68)
4.2.10 不同水分梯度下植物的日耗水进程	(70)
4.2.11 光照强度对控水植物蒸腾的影响	(77)
4.2.12 复水试验	(84)
5 主要园林树种树干液流特性研究	(87)
5.1 树干边材液流的时空变异规律	(87)
5.1.1 边材液流的日变化和季节变化	(87)
5.1.2 树干不同高度边材液流的变化规律	(90)
5.1.3 树干不同方位边材液流的变化规律	(93)
5.1.4 不同直径树木边材液流的变化规律	(96)
5.2 树木耗水的影响因素	(99)
5.2.1 蒸腾、气孔导度、气象因子、SPAC 水势对边材液流速率的影响	(99)
5.2.2 主要环境因子与边材液流速率的相关性分析	(102)
5.2.3 季节和天气对树干液流的影响	(103)
5.3 主要树种单木耗水模型的建立	(110)
5.4 耗水模型检验	(116)

6 园林植物耗水的尺度扩展	(120)
6.1 植物耗水的尺度扩展方法	(120)
6.1.1 灌木和草坪草耗水的尺度扩展	(120)
6.1.2 树干边材液流耗水量的尺度扩展	(122)
6.1.3 时间尺度扩展	(123)
6.2 耗水量的计算	(124)
6.2.1 灌木耗水量的计算	(124)
6.2.2 草坪耗水量的计算	(126)
6.2.3 乔木大树耗水量的计算	(127)
7 园林绿地节水灌溉制度的建立	(130)
7.1 园林绿地养护等级的划分	(130)
7.2 绿地水量平衡各收支项的观测和计算	(130)
7.3 园林绿地典型配置模式	(131)
7.4 节水型灌溉制度的制定	(132)
7.4.1 灌溉时间的确定	(132)
7.4.2 灌溉量(灌溉强度)确定	(132)
7.4.3 典型配置绿地耗水量和灌溉次数的计算	(133)
参考文献	(189)



概 论

1.1 国内外植物耗水和节水灌溉制度研究进展

1.1.1 国内外植物耗水研究进展

1.1.1.1 树木耗水研究的三个阶段

(1) 早期研究阶段 树木耗水研究始于 20 世纪 30 年代中期,一直到 60 年代,可将这一时期归为早期研究阶段。早期推算树冠耗水的方法主要是从离体叶片和枝条中收集数据,或者利用盆栽苗木来定量估算耗水,多数没有取得满意的效果(Parker, 1957)。因为这些早期研究是在无法人为控制气候以及至关重要的林分结构的条件下进行的,对限制林分冠层蒸腾的边界层的影响也难以量化。

(2) 飞速发展阶段 20 世纪 60 ~ 80 年代末,以一些新方法的兴起为标志,树木耗水研究取得了长足进步,这些方法有蒸渗仪法(Fristchen 等, 1973; Edwards, 1986)、大树容器法(Roberts, 1977; Knight 等, 1981)、封闭大棚法或空调室法(Dunin & Greenwood, 1986)、放射性同位素如氚(Waring & Roberts, 1979)、稳定性同位素如氘(Dye 等, 1992)以及能量平衡和热脉冲技术(Swanson, 1972、1981、1994; Smith & Allen, 1996)等。每一种技术都有其优点和缺点,蒸渗仪法对于土壤水分的很小变化都很敏感,但是由于根被局限在一个有限的容器中,土壤水分的运动受到限制;另外,蒸渗仪的建造和维护都很昂贵。在大树容器法中,树木伐倒后容易造成叶水势和气孔导度的变化(Roberts, 1977; Knight, 1981)。空调室法提供了一种能够同时测定水气压和 CO_2 交换量的方法(Denmead 等, 1984),但有争议说这种方法在估测水分利用效率时受饱和水气压的影响(Lindroth & Cienciala, 1995)。放射性示踪物法如氚(Tritium)在使用上由于受到校正的限制,从而使得这种方法无法获得耗水的季节性模型;氘(Deuterium)的使用克服了上述限制,以示踪物为基础的技术方面,稳定性示踪物氘在定量研究耗水速度上基本上替代了氚。源于能量平衡、热脉冲技术耗水的估算方法受到经验校正方法、热量递减、液流随边材深度的变异等不确定性问题的困扰(Granier 等, 1987、1996),但这些方法成本较低,便于采用,能够连接数据采集器进行远程控制,因此开始在树木耗水研究领域崭露头角(Kucera, 1977; Cohen, 1981)。

(3) 技术成熟阶段 20 世纪 90 年代以后,Granier 等人对茎流计的测定原理作了大胆改进,将先前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。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,并实现了数据采集、转储、计算、分析、制图自动化(Granier, 1996; Smith, 1996)。与此同时,基于红外分析原理设计的各类叶室法逐步兴起和不断完善,型号上从 Li-1600 到 Li-6200 再到 Li-6400。Li-6400 是自动化和智能化程度较高的光合分析系统,在利用红外检测原理实现对水气浓度和 CO_2 浓度检测的同时,还能够实现对多种环境因子的同步检测以及对叶片蒸腾的多种特征和机理指标进行分析,所得测定结果能够全面反映叶片蒸腾的生理学和生态学意义,因而常用于对蒸腾特性本身的研究(谢东锋, 2004)。由于叶室法测定过程必须引入一定流量的气流,导致叶室(包括闭路式和开放式叶室)内叶片局部测定环境的显著变化,所得蒸腾测定结果通常高于叶片实际蒸腾速率(Sperry, 1988、1993; Souza, 2004)。同时,价格昂贵和较高的操作技能要求也在一定程度上限制了这类仪器的应用。热扩散液流探针和光合分析系统的出现,标志着树木耗水性研究测定技术日趋完善。

1.1.1.2 盆栽苗木蒸腾耗水研究进展

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,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, 1993、1994; 李吉跃, 1993、1995、1997、2000、2002; 滕文元, 1993; 李银芳, 1994; 关义新, 1995; 刘昌明, 1997; 郭连生, 1999; 郭庆荣, 1999; 翟洪波, 2000、2002、2003; 孙鹏森, 2001; 周平, 2002; 王华田, 2002; 刘晓燕, 2003、2004; 招礼军, 2003; 蔡志全, 2004; 王得祥, 2004; 王继强, 2005; 康博文, 2005; 孟凡荣, 2005)。在盆栽过程中,可人为地调控环境因子,如浇水、光照等,盆栽试验究竟在多大程度上反映树木的耗水特性没有人研究过,但通过盆栽试验对比不同树种之间的水分生理特征应该是有意义的,因为在盆栽的测定中,并没有破坏苗木,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)。在城市园林树木的耗水研究中,盆栽试验意义更大,因为在城市园林绿地中灌木和小乔木占相当大的比例。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,其中在北京的环境条件完成的比较有代表性的试验如下:

孙鹏森(2001)对北京水源保护林的主要树种苗木进行了盆栽控水试验。结果发现:在水分充足条件下,日平均蒸腾速率的大小排序为刺槐、火炬树、黄栌、白皮松、侧柏、元宝枫、油松、樟子松。多数树种蒸腾最高值在 7~8 月份出现,不同月份各树种蒸腾速率的排序变化很大。因此对树种之间耗水的比较,应当按月份进行。在干旱胁迫条件下,土壤含水量是影响蒸腾水平的重要因子,在一定的临界含水量以上,蒸腾速率之间的变化不大,而在临界含水量至植物永久凋萎含水量之间,蒸腾速率有较大幅度的降低。孙鹏森利用快速称重的方法测定苗木的实际耗水量,结果表明,正常水分状况下,晴朗天气元宝枫、侧柏、油松、白皮松、刺槐的耗水能力较大,黄栌、樟子松、火炬树、栓皮栎等耗水相对较小。环境因子与蒸腾作用的相关性方面,阔叶树种大于针叶树种,说明阔叶树种的蒸腾作用对环境因

子的响应快,变化明显。

王华田(2002)等通过苗木的盆栽控水研究,试图找出不同树种蒸腾耗水性的差异,将北京市水源保护林主要树种分为耗水类和节水类,并进一步分为高水湿耗水、高水湿节水、低水湿耗水、低水湿节水4个亚类,有的树种同时具有不同的耗水特征。盆栽条件下12个树种中,毛樱桃、扁担杆子、荆条和构树兼具高水湿耗水和低水湿耗水的特性,元宝枫、刺槐、山桃和栾树同时兼具高水湿节水和低水湿节水特性,辽东栎、火炬树、白蜡和臭椿耗水特性介于上述两类树种之间。

周平等(2002)研究了北方9个野外造林树种苗木的蒸腾特性,结果表明油松和侧柏是耗水较少树种,枸杞和毛白杨是耗水较多的树种,其他树种的耗水居中。9个树种中针叶树的蒸腾速率小于阔叶树种,针叶树中油松的蒸腾速率略小于侧柏的蒸腾速率,阔叶树种毛白杨和枸杞的蒸腾速率较大,其他的树种次之。在土壤供水充分的条件下,影响蒸腾强弱的环境因子主要是气象因子,蒸腾速率日变化主要受光照强度的影响,但各树种的最适光强并不相同,因而并非都在光强达到最大时,蒸腾速率也最大。日耗水量在不同的天气情况下差异较大,不同树种蒸腾耗水量在晴天最大,阴雨天最小,阴天耗水量为晴天的64%~86%,阴雨天的耗水量仅为晴天的46%~73%。

盆栽试验创造了一种理想状态下的蒸发模式,蒸腾速率是作为树种苗木一部分器官的特性,在说明树种耗水特性方面尚嫌不足。该结果应用到野外条件,进行耗水量评估还存在很大差距。但毫无疑问,盆栽试验对于低耗水树种的选择有着重要的指导意义,蒸腾速率和快速称重法测定的耗水率排序是树种选择的重要依据。通过研究苗木的耗水特性和蒸腾耗水量,为在水量有限的情况下,选择蒸腾耗水量较低的树种并进行结构优化配置提供了依据。

1.1.1.3 树干液流动态和蒸腾耗水研究进展

刘奉觉等(1993)利用热脉冲技术研究了杨树树干液流的动态变化,李海涛和陈灵芝(1997)最早引进茎流计测定树干边材液流传输速率,孙鹏森和马履一等人(2000)利用这一技术研究了北京水源保护林主要树种树干边材液流传输的时空变化规律,之后,马履一和王华田(2001)利用热扩散式茎流计研究了树木边材液流速率和蒸腾耗水性。到目前为止,国内研究涉及的树种主要有:油松和侧柏(马履一,2000;王华田,2001~2004;徐军亮,2003;翟洪波,2002、2004)、油松和刺槐(孙鹏森,2000~2002)、辽东栎(曹文强,2004)、小美旱杨(高岩,2001)、元宝枫(顾振瑜,1999;翟洪波,2002、2003;王瑞辉,2006)、棘皮桦和五角枫(李海涛,1998)、马尾松、栓皮栎(鲁小珍,2001)、山杨(马长明,2005)、油松、刺槐(马李一,2001)、马占相思(马玲和肖以华,2005)、苹果树(孟平,2005)、白桦、樟子松和落叶松(孙慧珍,2002、2004、2005;吴丽萍,2003)、紫叶李和悬铃木(王瑞辉,2006)、核桃楸(严昌荣,1999)、桉树(尹光彩,2003)、火炬松(虞沐奎,2003)、梭梭(张小由,2004)、胡杨(张小由,2004)、尾叶桉(张宁南,2003)等。国外的研究主要集中在热带雨林(Meinzer, 1993、1995、1997; Granier, 1996; Goldstein, 1998; Hiromi & Sarawak, 1999),涉及的树种主要有:栎树 *Quercus* spp. (Granier, 1994; Bréda and Raschi, 1995; Cochard, 1996; Tognetti, 1996)、白蜡 *Ash* spp. (Dunin, 1993; Vertessy, 1997)、桉树 *Eucalyptus* spp. (Calder, 1986; Dye, 1992、1993; Barrett & Hatton, 1995; Kallarackal, 1997; Kalma, 1998)、云杉 *Picea abies* (Cermak, 1987)、蒿柳 *Salix viminalis*

(Cienciala & Lindroth, 1995; Stan, 2001)、辐射松 *Pinus radiata* (Hatton, 1990; Dewar, 1997; Miller&Morris, 1998;)、冷杉 *Douglas - fir* (Fristchen, 1973; Granier, 1987; Barbara, 2001)、杂交杨 *Populus hybridum* (Hinckley, 1994)、银荆树 *Acacia dealbata* (Hunt, 1998)、海岸松 *Pinus pinaster* (Loustau, 1996)、落羽杉 *Taxodium distichum* (Oren, 1999)、山核桃 *Carya cathayensis* (Steinberg, 1990)等。研究的内容多数是树干液流的时空变异规律及与环境因子的相互关系,树干液流与叶片蒸腾、SPAC 水势、边材面积、叶面积的关系等。上述试验中,在北京的环境条件下完成的比较有代表性的研究成果有:

孙鹏森(2001)、王华田(2002)对油松、侧柏、栓皮栎的树木边材液流进行了观测,发现液流波动节律滞后于太阳辐射和空气温湿度,但周期相同。边材液流启动时间早晚、液流峰上升的陡度和高度、边材液流下降的进程和进入低谷的时间因树种、树干径阶和高度、天气状况和季节等的变化而异。

马履一等(2002)研究了油松边材液流时空变异规律及影响因素,认为油松边材液流速率与环境因子密切相关。春季,边材液流速率随着土壤与大气干旱胁迫的加剧而日渐降低,严重缺水时边材液流速率的日变化由正常状态的“早晨启动-中午前后出现峰值-峰值后下降-夜间进入低谷”转变为“傍晚启动-凌晨出现峰值-峰值后下降-下午进入低谷”,也就是说,随着干旱胁迫程度的加剧,边材液流峰值逐渐提前,而同时峰值越来越小,单株日液流通量(日耗水量)逐日降低。说明在此期间树体已处于严重的水分胁迫之下,土壤的严重缺水导致根系不但在白天吸水满足不了叶片蒸腾的需要,甚至夜间所吸收储备的水分,在日出后很快被蒸腾消耗掉。空气温、湿度和土壤温、湿度是决定油松边材液流速率的关键因子,以此为变量建立多元回归模型,能够较好地预测边材液流速率,进而预测单木乃至群体的蒸腾耗水量。马履一(2003)利用 TDP 对北京西山地区主要绿化树种的蒸腾耗水量进行了对比试验,结果显示:油松的液流通量显著大于侧柏、刺槐、栾树、臭椿、君迁子 4 个树种中栾树单木耗水速率最高,其次是臭椿,侧柏和君迁子最低。

1.1.1.4 国内外研究的不足

目前,国内外对林木耗水性的研究虽然取得了很大成绩,但也存在许多明显的不足。一是系统性不够,测定时间短,缺乏从同一树种的苗木、单木大树到林分的足够时间跨度的系统研究。二是对城市环境下园林树木的耗水研究还是空白。以往的耗水研究基本上都是针对大面积的森林和林木,对城市树木的研究很少,而城市树木在树种类型、配置方式、环境条件和养护管理等方面与大面积森林存在很大差异。随着我国城市化的飞速发展,生态城市建设步伐的加快,城市树木的耗水问题受到越来越多的关注。相比于大面积森林,城市绿地处在高度集约管理条件下,有利于将耗水研究的成果应用于树种选择、结构配置和养护管理之中,但城市树木种类繁多,环境复杂多变,将给研究工作带来一定的困难。三是以往的研究侧重于不同树种耗水性的比较,主要是为低耗水树种选择服务,而对树种在一定时空的实际耗水量和潜在耗水量的研究不足。四是在应用研究方面很欠缺,例如如何根据树木的耗水规律和实际耗水量制定合理的水分管理制度等。

1.1.2 国内外节水灌溉研究进展

1.1.2.1 节水灌溉在农业上的研究进展

节水灌溉是农业可持续发展的一个世界性问题，目前，我国的节水灌溉技术主要应用于农业领域，特别是粮食生产领域。它从 20 世纪五六十年代开始萌芽，真正被人们所重视并大面积推广则是 80 年代以后的事。因此，我国节水灌溉技术与世界先进水平比较还有一定差距。突出表现为：目前灌溉水的利用率只有 40% ~ 50%，而某些发达国家的灌溉水利用率可达到 80% ~ 90%，我国每立方米水的生产效率也很低，平均每立方米水生产粮食约 1kg，而一些发达国家一般都在 2kg 以上。因此，与国外先进技术相比，我国无论是在节水技术基础理论与应用技术理论研究方面还是在灌溉设备方面都有较大的差距。

建立节水灌溉制度是节水农业建设的重要任务，“节水灌溉制度”一词出现于正式文件的时间不长，目前还没有给出一个确切的定义，但一般认为“节水灌溉制度”比公认的、已经纳入国家标准的“灌溉制度”更节水。灌溉制度是根据植物需水量和需水规律，在充分利用有效降水的条件下，经过分阶段水量平衡计算，并经大田试验验证确定的灌水定额、灌水时间和灌溉定额。植物的需水量是植物在一定气候、土壤和栽培技术条件下正常生长发育所必须消耗的水量。

在我国的传统农业中，灌溉制度建立在保证农田充分供水的基础上，以获得作物高产为目标，保证“及时足量”提供作物水分，作物需水量的分析、灌溉制度的制定和灌溉技术等都是按照这一供水准则建立的，可以将传统灌溉称作充分灌溉或全面灌溉。在水资源紧缺的条件下，为了最大限度地发挥水资源的经济效益，获得单产最高的供水准则被以获得单位水的生产效益最高的供水准则所取代。在这一供水准则的指导下，近年来，国内外已经开展了非充分灌溉条件下灌溉理论的研究和实践。根据当今世界和我国的水资源形势和持续发展农业要求看，可以预计，在水资源不足的国家或地区将把非充分灌溉或局部灌溉作为一种正常的灌溉行为替代。

非充分灌溉(NO - Full Irrigation)是在供水能力不能充分满足一定条件下的作物需水量时，按低于正常水平的供水量进行灌溉的方法。具体做法主要两种，一是将有限的灌溉用水安排在作物相对更敏感的时期，把有限水量用在“刀刃”上，20 世纪 80 年代初期从我国北方许多地区开始的关键水试验就属于此；二是着眼于一个地区总体增产，舍弃部分单产量，追求总产量，我国北方广泛开展的限额灌溉试验(Limited Irrigation)就属于此。

20 世纪 70 年代中期，国际上提出了一种新的灌溉方式，称为调亏灌溉(Regulated Deficit Irrigation, 即 RDI)，其基本原理是舍弃生物产量总量，追求经济产量(籽粒或果实)最高。它主要是根据作物的遗传和生态生理特性，在其生育期内的某些阶段(时期)人为地施加一定程度的水分胁迫(亏缺)，调节其光合产物向不同组织器官的分配，调控地上和地下生长动态，促进生殖生长，控制营养生长，从而提高经济产量，舍弃有机合成物总量，达到节水高效，高产优质和增加灌溉面积的目的。调亏灌溉开辟了一条最佳调控水 - 土 - 植物 - 环境关系的有效途径，不失为一种更科学、更有效的新的灌水策略。这是目前国际上灌溉及其有关领域研究的一个热点，但国内尚属起步阶段，报告资料较少。

近年来，作物蒸腾的化学调控受到许多学者的关注，植物吸收的水分中有 90% 以上是

由植株表面蒸腾作用消耗的,通过光合作用直接用于生长发育的水分还不到1%;无论是理论上的推论还是在实践中的探索,人们形成的共识是蒸腾过程不一定要消耗那么多水分,即作物存在奢侈蒸腾。因而降低蒸腾耗水是节水、防旱、抗旱的重要环节。作物蒸腾的化学控制的目的是:保持供应作物的水分不过度耗竭;改善作物的水分状况,不致使作物受水分胁迫的危害;不影响光合作用的物质积累;提高产量和水分利用效率。在抗蒸腾剂的研究上,我国河南生物研究所研制的“FA抗旱剂1号”(即黄腐酸)对多种植物具有抑制蒸腾和节水抗旱效果显著。其他的抗蒸腾剂多数尚处于试验研究阶段。

1.1.2.2 节水灌溉在林业上的研究进展

节水林业主要包括节水灌溉造林和不灌溉节水造林,节水灌溉造林是在天然降水不能满足树木需要时,采用灌溉技术措施,从灌溉制度、造林地灌溉技术和灌溉管理等方面,力求尽可能地减少灌溉水量投入,以获得尽可能大的林业高产、优质和高效的产出;不灌溉节水造林是在无灌溉条件下,一方面根据土壤水量用补平衡原则进行造林,另一方面立足于开源节流,通过工程措施或栽培技术措施增加种植点的水分收入,减少支出。

在节水林业的技术体系方面,节水灌溉造林技术应包括节水灌溉制度制定(灌溉时间、灌溉次数和灌溉强度等)和节水灌溉方法(喷灌、滴灌等)的选择与应用等;不灌溉节水造林技术应包括适水选种造林技术(选择耗水量少、耐旱的树种)、简易工程技术(汇集径流水和露水、减少水土流失)、节水保墒技术(如林地覆盖等)、水肥耦合化学物质应用技术(保水剂、抗蒸腾剂等)等。但目前这些技术多数尚处于研究试验阶段,在生产上普遍应用的还不多。

与农业的节水灌溉相比,林业的节水灌溉显得相当落后,还没有构建起完整的节水灌溉的技术体系。目前,节水灌溉在短周期工业用材林、速生丰产林和经济林上有一定程度的应用,涉及的树种集中少数几种,如杨树、柳树、水杉、柳杉等。总体上讲,林业的节水灌溉大多属试验和示范性的,还没有得到大面积的普遍应用。

1.1.2.3 节水灌溉在园林上的研究进展

我国的园林节水灌溉是伴随着农业节水灌溉发展起来的,但是,几十年来主要是先进灌溉方法和集水技术的采用,如引进灌溉设备进行喷灌、滴灌和收集雨水、中水用于灌溉等。有的城市不惜花费巨资引进先进的灌溉设备,而在节水植物材料选择、结构配置和灌溉制度的优化上则长期被忽视,因而并未从根本上解决水资源浪费和绿地水分利用效率低下的问题。伴随着城市绿化建设的迅速发展,绿地面积的日益增加,园林用水量也逐年提高,城市有限的水资源更加紧缺,在一定程度上也阻碍了城市经济的发展。

目前,我国城市园林灌溉存在的主要问题如下:①城市园林用水体系不完善,水资源利用率低,我国城市园林绿地很多设有一定面积的水景,如喷泉、瀑布、人工湖等,这些人工造的水景,一般都独立于城市的天然水系,依靠城市自来水系统维持,每年需消耗大量的水资源。利用后的水也多直接排于下水道,而没有用于绿地浇灌或是补充到城市水系;②园林植物配置不合理,植物选择随意性强,林分结构单一,过分推崇草坪在园林中的应用。近年来,“草坪热”使城市绿地中草坪的比重逐年上升,乔、灌木的比重逐年下降,有的地方甚至出现挖树种草的现象,这不仅降低了绿地系统的生态效益,而且加大了城市园林的用水

量。③灌溉设施简陋,方式落后,管理水平低下。目前,我国城市园林绿化大多以自来水为水源,灌溉大多以人工水管式灌溉为主,如用胶皮管和洒水车漫灌,而诸如喷灌、滴灌乃至地下滴灌等节水型灌溉方式,应用甚少。④节水灌溉制度建设落后,灌溉时间、灌溉强度和灌溉次数等事关节水和灌溉效果的一些至关重要的指标不是依据植物生理需求确定,而是凭经验判断,随意性很强。

以上诸多原因,造成了园林绿化中水资源的极大浪费,也加剧了城市水资源的匮乏。城市园林绿地作为城市生态系统中最积极的建设者,它的发展不应以水资源的高消耗为代价。因此,我国的园林绿化事业要更好地发展,就必须改变水的利用模式,使之从“耗水型园林”向“节水型园林”过渡,走持续、健康的发展道路。

西方发达国家的水资源拥有量远大于我国,但他们早就开始注意水资源的节约利用。从生产到生活各个方面,都体现了强烈的节水意识,在城市园林中尤其如此。美国城市园林绿地的发展,非常重视水资源的节约利用。他们通过各种宣传展览活动,来提高市民的节水意识,如达拉斯城市水资源利用协会每年举行的节水公园旅游、洛杉矶水电局支持的节水公园旅游等。同时,管理部门还向公众展示各种先进的节水技术和设备,并提供各种适宜当地的耐旱植物资料,主要园林植物各生长发育阶段的耗水量指标都可以在管理部门的网站上查询,以帮助人们建立节水型景观、制定节水方案,以节约灌溉用水。另外,美国在许多州的社区绿化中,都广泛推行“耐旱风景”。一片耐旱的园林绿地,一般可节水 30% ~ 80%,还可相应地减少化肥和农药的用量。因此,他们积极支持以这种方法作为节水和改进城区环境的措施,从根本上减少城市园林对水资源的消耗。

1.2 本研究的目的和意义

1.2.1 城市园林绿地对改善城市生态环境的作用

以树木为主体的城市园林绿地是维持和改善城市生态环境重要的生物屏障,具有调节气候、减缓温室效应、提高空气湿度、降低噪音、吸附粉尘和其他有害大气成分等广泛的生态功能,同时还在改善城市景观、提供游憩空间和体现城市文化内涵等方面发挥着不可替代的作用(刘常富等,2003;冷平生,2004)。城市树木具有很好的吸热、遮荫和蒸腾水分的作用,可以有效地减轻城市的“热岛效应”。树木通过其叶片大量蒸腾水分,带走城市中大量的辐射热,降低城市表面的温度,同时提高城市大气的相对湿度(陈有民,1990)。据测定,夏季 14:00 树冠外比林荫下的温度高 3 ~ 5℃;小片林地的地表温度比空旷地降低 28%;树木覆盖率达 30% 时市区气温可降低 8%,达 40% 时气温可降低 10%,达 50% 时可降低气温 13%。可见城市的绿化程度对城市气温有明显的影响。当城市的绿化覆盖率达 50% 时,夏季可降低气温 4 ~ 6℃,基本上不会出现热岛效应。在空气相对湿度方面,林地上空的相对湿度比无林地高 38%,公园的相对湿度比城市其他地方高 27%。这也是炎热的夏天,人们漫步在城市的森林、公园或行道树下会感觉到凉爽的缘故。

以树木为主的绿地具有良好的地表覆盖、发达的植物根系及良好的土壤渗透体系。具有很好的涵养水源和保持水土的功能。首先,树木尤其是乔木的树冠浓密、宽广,能有效地吸纳大气中的降水;其次,树冠下的灌木、草本及枯落物层进一步截持林冠水,减轻了降水对

地面的直接冲蚀，减少了地表径流；第三，绿地植被具有发达的根系，根系的更新在土壤中形成大量有利于水分渗透的非毛管孔隙，加之地上枯落物的分解使土壤结构改良，土壤的持水、透水性增强。大量的试验表明，结构良好的城市绿地，降水时很少或不产生地表径流，无林地则降水稍多就形成地表径流，易造成水土的流失(刘世荣等，1996)。

树木在拦蓄降水、涵蓄水源、减少地表水土流失、提高土壤蓄水和降水利用率等方面具有巨大的水文效益。但是，正如任何事物都具有正反两方面的作用一样，树木作为城市生态系统的生物有机体，在发挥自身巨大生态功能的同时，为了维持其正常的生存和更新，需要一定的水量以支持生态系统物质和能量的正常循环(马履一，1995；陈灵芝，1997)。Wullschlegel(1998)综合了以往30年中有关树木单株耗水量的测定结果，发现单株日耗水量从法国东部栎林的10kg，到亚马孙雨林林冠上层木的1180kg，35个属65个树种中的90%(平均树高21m)日耗水量在10~200kg。树木耗水在整个绿地水量平衡系统中占有相当大的比重，植物蒸腾耗水在水量平衡中所占的比例随着干燥系数的增大和单位面积绿量的增大而提高，有时甚至超过当年降水量(Pataki & Calder，1998)。

北京降水量少，水量平衡方程中地表径流和土壤入渗相对减少，植物蒸腾成为绿地主要的水分支出项。虽然未见到有关城市绿地水量平衡的研究报告，但从森林生态系统水量平衡的研究中可以看出植物耗水所占的份量(魏天兴，1999；吴文强，2002)。据杨海军(1993)研究，不同植被生态系统的蒸散耗水量，裸地地表蒸发占降水量的48.44%，草地蒸散量占降水量的66.22%，灌丛占88%~89%，油松和刺槐林分别占97.21%和100.96%，刺槐林的蒸散耗水已经超过了当年降水量(王孟本，1996；魏天兴，1998)。

1.2.2 北京城市园林绿地的用水量

要准确计算北京城市绿地的用水量是十分困难的，2003年魏彦昌测算，北京城区绿地年灌溉用水量为2.19亿m³。2005年，北京开展了全市园林普查，从各地汇总的数据显示(表1-1)，至2005年底止，北京建成区(指城八区)园林绿地总面积为30611.05hm²，年灌溉用水量为1.92亿m³，2005年北京全年总用水量约为35亿m³，绿地灌溉用水量占总用水量的5.5%。这些数字不一定很准确，实际的灌溉用水量可能更大，但从中可以看出北京城市绿地的灌溉用水总量是非常巨大的。

表1-1 北京市建成区(城八区)单位面积不同类型绿地年灌溉水量

绿地类型	建成区绿地面积(hm ²)	单位面积灌溉量(m ³ /hm ²)	年灌溉水量(m ³)
公共绿地	7 803.46	7 401	57 753 408
单位附属绿地	6 832.84	10 404	71 088 867
居住区绿地	3 648.34	6 391.5	23 318 365
道路绿地	3 184.18	12 355.5	39 342 136
防护绿地	8 771.36	5 000	43 856 800
生产绿地	370.87	10 000	3 708 700
合计	30 611.05		191 502 776