

1 概论

1.1 水源保护林的含义

在陆地植被中 森林具有最大的水源保护功能 是一个面积广阔的绿色水库。据统计,截止 1999 年底,北京地区的林木覆盖率达到 40%,城市的绿化覆盖率达到 34.7%,郊区有林地面积达到 68.7 万 hm^2 。这固然是可喜的成绩,但是作为一个拥有 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,因此,林业的环境地位逐渐得以确立,林业的发展水平直接关系到首都经济的发展。水源保护林以其特殊的地位而日趋重要,与此相关的研究工作也开始兴起。

世界范围内在城市水源保护林建设与研究上做得比较好的是德国巴伐利亚州首府慕尼黑市。自 1880 年始,慕尼黑市就制定了长远考虑的地产政策 划定城市以南 40km 处为取水区。从此,分布在阿尔卑斯山前部山地的曼格法尔山谷集水区能够长期确保城市供水。慕尼黑市林业工作者根据“适应自然林业协会”(ANW)的原则,经营水源保护林长达数十年。其水源保护林的发展道路有计划地分为三步:第一,在集水区的农用林地进行混交造林,尽量选用适地的阔叶树种,并保持其较高的比例;第二,把 19~20 世纪之交营造的云杉纯林,改造为自然的森林群

落，包括云杉、冷杉、山毛榉和其他珍贵树种；第三，在保持现有天然混交林的前提下，通过单株个体利用，达到树冠垂直分布不均匀结构(Hatzfeldt. H. 1997)。自本世纪 70 年代以来，发达国家早已开始了水源保护林可持续发展经营的系统研究。日本森林综合研究所森林环境部分别在宝川、岗山、筑波、太田等地建立了示范流域和试验地，探讨不同配置的防护林水源涵养和水土保持功能。1990年日本国土厅水资源部发表《水资源白皮书》，就日本水资源的供需现状、开发现状和今后亟待解决的有关水资源的各项课题进行了综合整理。日本 1990 年各类防护林占国土面积的 20%，其中水源保护林即占防护林的 68.77%。可见，水源保护日渐受到人们的重视。

在国内，关于水源涵养与水土保持林的营造技术的研究早已开始。在“七五”“八五”期间太行山生态林业工程项目已建成多处实验示范基地，营造示范试验林数万亩。由北京市林业局和北京林业大学共同承担的北京市科委科研项目《密云水库上游水源保护林工程综合效益及荒漠治理研究》建立了密云水库水源保护林土门西沟实验示范区，对多树种水源保护林建设模式进行了探讨。国内进行水源保护系统研究比较典型的城市还有山西省太原市，在太原市科学技术委员会、太原市环境保护局、太原市水资源管理委员会的共同主持下，由太原市水利科学研究所牵头，组织太原地区高等院校、科研单位，进行了太原西山水源保护研究。该项研究主要针对城市大型水源地的开发利用和保护问题，从“三水”的转化规律入手进行了系统性、综合性多学科的研究；1992 年袁家庚，在《乌江流域水源林、水保林营造技术成果简介》中介绍了乌江流域水源林水保林营造技术研究的九个专题研究成果的主要内容，研究成果的整体水平及配套性，以及推广应用的可行性及前景。1991 年路建国在《浅谈三江流域水源林水保林体系及营造特点》中，讨论了建立三江流域水源林水保林体系的原则和依据，提出以护坡林、脊顶防护林、侵蚀沟防

护林等共 9 个林种组及所属 31 个林种构成的水源水保林体系，以及树种选择、合理密度、整地方式、乔灌草结合、多林种多层次的复层混交等经营特点；1994 年高鹏、王礼先等对密云水库上游水源涵养林效益进行了研究；1991 年李昌哲在《太行山水土保持林营造技术及效益研究》一书中全面论述了太行山石质山区水土保持林的营造技术，提出采用“疏林结构”和采用“大苗”重建“人工—天然复合植被类型”等学术观点。

目前尚无水源保护林的确切定义，但是，水源保护应当包括水源涵养、水土保持、水质改善三部分内容。水源保护林应当是一种以水源涵养、水土保持为核心的，兼顾经济、薪炭、用材林的综合防护林体系。因此，如何配置这一体系中的林种和树种以及相应的培育技术，是建立完善的水源保护林体系的关键，目前国内明确而系统地对于水源保护林培育技术的研究不多。总之，国内在水源保护林的研究上，同其他发达国家相比，还存在不小的差距，无论从水源保护林规划及相应的政策法规上，还是从水源保护林的培育技术或现有林分结构的调整改造上，都缺乏系统的研究。

作为我国的首都北京市，水源短缺的问题已经相当严重。水资源人均占有量仅为 400m^3 ，是全国平均值的 15%，世界平均的 4%。据预测 2000 年北京市平均年将缺水 2 亿 m^3 ，逢枯水年将缺水 12 亿 m^3 。密云水库是北京市重要的饮用水源，为了保护首都这盆清水，1987 年 11 月北京市人大通过“关于营造密云水库水源涵养林”的决议；市政府将密云水库水源保护林的营造列入绿化治理重点工程；林业部也将潮白河流域的水源保护林工程列入“三北”防护林建设重点工程之一：北京市政府于 1985 年颁布了《密云水库、怀柔水库和京密引水渠的水源保护管理暂行办法》于同年 8 月 1 日起执行。1998 年，由北京市林业局引进的德援项目正式启动，并和北京林业大学共同承担北京地区水源保护林工程开发与建设；1999 年，北京市林业局提出了 21 世纪

北京林业发展的具体目标和行动方案，重点是以密云、怀柔水库为中心建立与经营大规模的水源保护林，本着适地适树的原则，将抗旱低耗水树种的选择、林分结构的优化及树种搭配作为水源保护林建设的首要问题。在水库的一、二级保护区内形成一个重点水源保护区，建立一系列生物措施和工程措施相结合的精华工程，力争成为我国水源保护林的建立、经营及水资源保护的样板。

在“九五”国家攻关课题“华北土石山区水源保护林营造技术与示范”的研究中，以京北水源保护林规划区（一、二、三级保护区在内）的森林植被为研究对象，分析该地区水源保护林体系建设战略格局，并结合当地的生产实际，建立以水源涵养效益为主、兼顾经济和社会效益的多林种、多树种水源保护林体系的空间配置模式，使该地区具有稳定、高效的生态环境，并具备发展的可持续性。以满足北京市依靠森林植被、涵养水源、改善水质的总体规划要求。

综上所述，水源保护林的核心问题包括森林植被的水分消耗关系、林种格局的规划、树种格局的调整以及造林树种选择、造林密度的确定等基本问题，而其中的核心又是树木的耗水量问题，尤其应当从不同空间尺度上回答该区主要造林树种的耗水量问题。

1.2 树木耗水测算技术

1.2.1 耗水的研究尺度

对于树木耗水的研究基本可以从以下 4 个尺度进行，即枝叶尺度、单木尺度、林分尺度、区域尺度，不同的层次分别对应不同的研究方法。

（1）枝叶尺度（**Leaf scale**） 这个尺度上的研究开始较

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，例如蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率等因子。所采用的方法有气孔计法、空调室法、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上采样，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)。在盆栽试验中, 尽管所测定的苗木叶片没有和植株脱离(即在原处测定), 但由于所测定的对象仍然为单叶或小枝, 是完整植物个体的一部分, 所以仍然属于这个水平。

(2) 单木尺度 (**Whole Tree**) 是迄今为止发展最为成熟、技术手段最多的研究尺度。单木研究领域位于基础生物学、树木生理学和水文学的边缘, 多学科交叉使得这个层次的研究日臻完善。本文下面还要对此详细阐述。利用单木水平获得的林木耗水的数字, 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的耗水是目前的研究热点, 因为, 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, 在这时, 利用单木进行推导也是现实可行的方法(Thomas J Hatton, 1994)。

(3) 林分尺度 (**Stand scale**) 这个尺度的测定主要应用水文学方法、微气象法和蒸发器测定方法。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** 法), 空气动力学阻力—能量平衡综合法 (**AREB**) 和空气动力学方法。前面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, 揭示不同地带蒸散的特点及主要影响因子的变化对蒸散的作用。**AREB** 法经过几个发展阶段已经日趋成熟, 现在已经广泛应用。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 年代以后随着红外测温技术的发展，**Bowen** 和 **Rosenberg** 提出在能量平衡模式中利用表面温度和近地面湍流运动的关系来改进 **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。

(4) 区域尺度 (**Region scale**) 遥感技术的应用能够获得能量界面的净辐射量和表面温度，并以植被光谱取得生态参数信息、微气象或气候参数，进行区域蒸散的计算模拟 (左大康, 谢贤群, 1991)。此外，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、月蒸散量之间的经验公式用于耗水的预测中。

1.2.2 单木耗水研究

1.2.2.1 问题的提出与多学科交叉

1960 年代以来，人们逐渐获得并采用了一些新技术来测定树木的耗水。1972 年，著名生理学家 **R.H.Swanson** 提出了一个看似非常简单的问题：“我们如何确定一棵树的耗水量？”为找到这个问题的答案，技术的发展到今天，树木生理学的研究领域已经对于树木水分的运移和贮存控制有了深入的了解，并且使用一些新的方法来探索气孔导度、叶水势、叶面积、边材面积、树木水力导度之间的相互关系。树木耗水问题看似简单，但它却是不同研究领域中亟待解决的许多问题的关键。

森林水文学研究中利用树木耗水的信息解决水资源的管理

问题 (Schiller & Cohen 1995, Loustau 等 1996) 评价蒸腾在有林地水文条件中的作用 (Barret 等, 1996), 林分的蒸发散是流域水量平衡中的重要输出项, 以前只将其作为一个残余项来计算, 很难直接测定; 树木生理学研究中利用耗水的规律分析气孔和边界层导度对于冠层蒸腾的控制作用 (Hinckley 等 1994; Meinzer 等, 1995), 以及评价无孔、散孔、环孔材的径向干流模型 Philips 等, 1996); 森林培育学研究中用以定量研究短轮伐期人工林的水分需求 (Cienciala & Lindroth 1995, Lindroth 等, 1995), 国内刘奉觉等人研究了杨树耗水的规律性。本项目将耗水的研究针对干旱半干旱地区造林或大面积营造水源保护林造林树种的筛选; 并依据科学的推导手段, 将单木的耗水信息推算到林分, 从而合理选择造林密度; 对解决干瘠山地造林的成活问题和水源保护区建立高效持续水源保护林具有指导意义。

1.2.2.2 60年代以前的早期研究

树木耗水的研究始于本世纪 30 年代中期, 一直到 60 年代, 我们称这一段时期为 60 年代以前的早期研究, 早期推算冠层耗水率的方法主要是从离体叶片和枝条中收集数据, 以及像诸如利用盆栽苗木来定量估算耗水的方法, 这大部分是不可靠的 (Parker 1957, Rutter, 1966)。失败决非偶然, 因为这些大量的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难以量化, 并且对冠层耗水受叶片年龄成份、辐射强度和湿度的变化缺乏足够的描述。

水文学家 Raber (1937) 在他的一篇文章中首先肯定了野外工作的重要性, 对整树耗水的测定技术提出了要求。

.....问题是树体高大, 难以人为控制....., 增加了难度 (测定树木水分需求) 但这并不是无法克服的 只有大量的野外条件下测定的林木和林分的数据才是真正令人满意的, 室内试验工作只能作为辅助, 并且其工作量的大小要视要解决的问题大小而定。

1.2.2.3 七八十年代的飞速发展

1970、1980 年代以一些新方法的兴起为标志。蒸渗仪法 (Fritschen 等, 1973; Edwards, 1986) 大树容器法 (Roberts, 1977, Knight 等, 1981), 封闭大棚法或空调室法 (Greenwood & Beresford, 1979, Dunin & Greenwood, 1986), 化学示踪法 (Greenidge, 1955), 放射性同位素如氚 (Kline 等, 1970, Waring & Roberts, 1979), 稳定性同位素如氘 (Calder 等, 1986; Dye 等, 1992) 以及能量平衡、热扩散和热脉冲技术 (Swanson, 1994; Smith & Allen, 1996)。

每一种技术都有其优点和缺点。蒸渗仪法对于土-水系统中的很小的变化都很敏感, 但是由于根被局限在一个有限的土壤体积中, 土壤水分的运动情况受到限制; 另外, 蒸渗仪的建造和维护都很昂贵; 在大树容器法中, 对“伐倒木”的干扰容易导致叶水势和气孔导度的变化 (Roberts 1978); 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, 1993), 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) 和 ^{32}P 的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、热扩散技术、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, 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。

1.2.2.4 90 年代以来的日臻完善

以热脉冲、热平衡和热扩散为主的热技术的采用成为这个时期水分研究的主要工具, 稳定性示踪物 (氘) 的采用也得到了

相应的发展。多种技术在同一试验中联用，实现时间密集型、空间密集型的试验布设方法，成为该期水分研究的主要特征。

科技的发展为试验工具的发展提供了便利条件，上述仪器大多都能够连接数据采集器（Logger）进行测定，实现数据采集转储、计算、分析、制图自动化。近来，计算机断层摄影技术（MCT）（A. Raschi & R.Tognetti, 1995）和超声波扩散技术（UAE）（R.Tognetti & A. Raschi, 1996）也被应用到木质部水分传输的研究中，此外，还有一些新兴的研究方法如应用天然同位素的丰度来研究水资源的分配问题（Jackson, G.E & J. Grace 1996），等等。

1.2.3 热点问题

在树木耗水的研究领域，逐渐形成以下几个热点问题：气孔和边界层导度对于控制冠层蒸腾的协同作用；整树水力结构 **Hydraulic Architecture** 模型；气孔和水力导度对气态和液态水传输的协同控制作用；边材区水分蓄变量（**Storage**）；由单木到林分耗水量推导的理论与方法；⑥水分运移受木质部气穴现象（**Cavitation**）的影响。下面分别介绍一下：

1.2.3.1 气孔和边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用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。可是，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，还要考虑分布在每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与大气压产生梯度（**Javis & 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边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 (Decoupling Coefficient) Ω ($0 < \Omega < 1.0$) 表示气孔导度与边界层导度的比率, 从而量化地描述了叶片和树冠蒸腾相对于气孔导度的微小变化的灵敏性。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的梯度越来越大。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。

通过考察天然林分和人工林分树木 Ω 值的估算结果发现, Ω 值在一个较大的范围内变动。针叶树种的 Ω 值最低 (0.05 到 0.08), 原因在于针叶叶片较小, 边界层阻力较大, 气孔导度值较低。对于给定的树种或植被类型, 其 Ω 的期望值也很难取得统

由此, 我们可以得出这样的结论: 随着气孔导度和实际蒸腾速率的上升, 基于气孔计法测定的蒸腾的误差的值也急剧上升。气孔导度和蒸腾值不是正相关关系。这种现象与 Ω 理论所提出的边界层阻力的限制随着气孔导度的提高而提高相一致。大部分的气孔计在测定气孔导度时不会考虑存在边界层阻力的这种影响(但 Delta-T 公司生产的型号为 AP4 气孔计除外, 它有一种保护叶片边界层不受扰动的装置), 例如, 在空调室或叶室中, 风扇实际上已经把边界层破坏了。另外, 在野外的条件下, 由于风速的影响, 破坏了介面层阻力, 所以在林冠上层和林隙测定的结果也没有可比性。

1.2.3.2 整树水力导度的研究

在整树耗水的估算中, 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 (G_p , Landsberg 等, 1976)。已经初步搞清了树木的水力结构对于影响水在从根到叶片的运动机制 (Tyree & 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:

(1) 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_p 。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, 从而可以避免上述问题。

(2) 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 :

$$G_t = E / \Delta \Psi$$

其中 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。

很多研究者利用枝或整树液流的数据估算出 G_t (如 Schulze 1985; Granier, 1989, Bréda 1993, Meinzer, 1995 等), 对于整树 G_t 的估算值, 如果用单位边材面积来表示, 其变动在 3.4 到 $5.5 \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{mPa}^{-1}$ 之间, 而用单位叶面积来表示, 则其变动范围是 0.30 到 $9.9 \text{ mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{mPa}^{-1}$ 。目前还不知道为什么用单位叶面积估计 G_t 值其上限和下限之间会相差 30 多倍, 关于这种差距有

很多解释，比较有说服力的是单位边材横断面积与叶面积存在某种关系，这种关系因不同物种之间有很大差异（即 LA/SA 值）。在给定的水势梯度下，具有低 LA/SA 值的树种或枝条更有利与将水分传导和输送到叶片。没有关于此项内容更深入的研究，但是这样一个假说表明在叶面积和边材面积之间存在一种自我平衡，树干使得叶面积有充足的水分供应，叶面积反过来也影响树干横断面积 (Tyree 和 Ewers 1991)。这种长期的相互牵连的平衡作用导致叶面积和边材面积之间的相互调整与适应，使得二者在树体中能够维持相似的水势梯度，这种关系对同一树种来说相对比较稳定，不随气候和立地条件的变化而变化 (Mencuccini 和 Grace 1995)。也有学者利用水文平衡理论来解释这种现象。

对水力导度的时间与空间变异性研究较多。在适宜的土壤条件下生长的树木， G_i 的季节性变化很小，但在生长季早期由于冠层叶面积增加会引起 G_i 的下降 (Bréda 1993)。Granier (1989) 观测结果认为， G_i 在优势木、亚优势木、中等木、和孤立木之间几乎是一个常量。很多人利用对挪威云杉内部的液流的研究推断 G_i 在土壤到叶片路径上的分布状况。Granier 和 Claustres (1989) 的结论是，几乎一半的 G_i 分布在土壤和树冠基部之间。(Bréda 1993) 观测到在无梗花栎 (*Quercus petraea*) 的细枝和叶柄中 G_i 有很大的损失，可能由于压力诱导木质部气穴现象所致，但观测结果表明，这种损失并没有引起整树耗水量的急剧变化。所以可以这样推断，在土壤—根系—叶片路径上水流的主要阻力分布在土壤与根系的交界面和大枝上，像叶柄和细枝，在 G_i 中占很小一部分，即使变化很大，也几乎对整树耗水量不产生什么影响。

1.2.3.3 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_i 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—大气连续体

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。理想意义上讲，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，同时防止气孔抑止光合碳的捕获和木质部气穴现象的发生。(Cochard 1996)研究了无梗花栎 (*Quercus petra*) 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_i 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~-2.8mPa) 防止发生木质部输水障碍。

许多实验证实了气孔导度和蒸腾与土—根—叶路径上的水力导度成正相关关系。气孔导度和叶蒸腾随着 G_i 的增加而急剧增加，并且因 G_i 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_i 的方式来协调蒸腾，这种调整的主要原因是水分传输效率（换言之：水力导度）而不是随着大量叶片的水分状况。

在气孔导度和蒸腾对最大叶水势（假设能够代替土壤水势）所作的关系图可以看出：在土壤干燥过程的早期阶段，水势的微小变化即引起气孔导度和蒸腾的急剧下降，可能归因于土—叶之间 G_i 的快速下降而不是叶水势。

1.2.3.4 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 等人在大树测定中发现，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。推测可能由于蒸腾水流和液流测定位点上树干蓄水部分的水分交换造成。

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，这样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水流的矢量变化。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出。相反的，在午后，基部液流要高于冠层液流，表明树体内部开始蓄水。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，所以上述值在多大程度上的代表还未可知。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存储方面占主要地位(20~25m 高的落叶松 中总共 的蓄水 其中 16.7kg 来自冠层，而仅有 来自树干)。可是，像 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行。

耗水尺度扩大的理论与方法研究

我们对于单木耗水量研究，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，其实，这样做也就失去了本项研究的意义所在。因此，我们只能依靠将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，这样一步工作，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），用树干之间的距离（Hatton 和 Vertessy, 1990）或者用树冠投影面积来表示（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, Dunm 和 Connor 1993)。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, 原因是他所研究的林分是同龄纯林, 林龄小, 树干基部断面积以边材为主。Hatton 等人 (1995) 在测定桉树 (*Eucalyptus populnea* F.J.Muell) 人工蒸腾时比较了五种纯量的估算效果, 除了用树干距离表示的单木占地这一纯量外, 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, 在较长的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地应用到另一时间阶段。

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的了。而且, 关系曲线的形状随着土壤水分状况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, 当对于 57 年生的林分进行同样的测定时, 发现二者的关系发生了变化。尽管对于这两个龄级的测定是在不同时间进行的, 然而测定的环境是非常相似的, 并且时间较长, 按理说时间可变性是最小的, 但较老林分和较幼林分相比, 耗水量随着树干直径的增加较慢。在花楸树树干直径和叶面积关系的

1990

1993)

1997

10

1997)。

1932

B Huber

(1937)

1958

Marshall

Marshall

R.H.Swanson

Swanson

Whitfield

Edwards.W.R.N

Mashall

Huber

Swanson