

# 植物蒸腾耗水研究

牛丽丽,张学培,曹奇光

(北京林业大学水土保持学院,北京 100083)

**摘要:**在影响植物生命活动的各种生态因子中,水分是主要限制因子。与植物水分生命表征直接相联系的蒸腾强度、蒸腾量、蒸腾耗水变化规律及其与环境因子的关系。蒸散发既包括从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散。指出目前蒸散耗水量的计算方法大致可以分为:微气象学法、植物生理学法、以及 SPAC 综合模拟法等。并指出植被蒸散是一个复杂的物理过程和生物过程,是未来研究蒸散的主要途径和方向。

**关键词:**蒸腾;蒸发;测定

**中图分类号:**S152.7;Q945.172

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2007)02-0158-03

## Plant Transpiration

NIU Li-li,ZHANG Xue-pei,CAO Qi-guang

(Institute of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:**In each ecology factor of effecting the plants vital movement. The water is the main factor. The direct connection to the plant water's life attribute is the transpiration intensity, the transpiration quantity, the change rule of the transpiration and its relationship with the environment factor. The transpiration includes the water from the ground and the plant surface, also the inside of the plant. It points out that the measurement of the transpiration at present contains micrometeorology, photobiology and SPAC synthesis analogue. And it also points out that plants transpiration is a complex physical process and organism process, and is the main path and the direction of the future study in the transpiration.

**Key words:**transpiration;evaporate;measurement

### 1 前言

土壤-植物-大气系统(SPAC)是地球表层中能量循环和物质转化量最为强烈的活动层。在影响植物生命活动的各种生态因子中,水分是主要限制因子。与植物水分生命表征直接相联系的蒸腾强度、蒸腾量、蒸腾耗水变化规律及其与环境因子的关系<sup>[1]</sup>。而植物蒸腾、土壤蒸发(合称蒸散)在水分运动过程中又占有极为重要的地位。

蒸散发既包括从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散<sup>[2]</sup>。Rosenberg<sup>[3]</sup>等指出降落到地球表面的降水有 70%通过蒸发或蒸散作用回到大气中,在干旱区这个数字达到 90%,可见蒸发和蒸散是水文循环的一个重要组成部分,同时由于水分变成气体需要吸收热量,因此蒸发和蒸散也是热量平衡的主要项。地表热量、水分收支状况在很大程度上决定着地理环境的组成和演变,清楚的认识蒸散发,对了解大范围内能量平衡和水分循环具有重要意义,能使我们更深入认识陆面过程,可以正确评估气候和人类活动对自然和农田生态系统的影响。因此,蒸散的研究是地理环境研究中的一个重要内容,对蒸散和蒸发的研究不仅涉及到气象学和气候学,而且还与地球物理学等其他学科,如陆地水文学等密切相关。近年来随着对地表能量交换和物质迁移研究的深入及水资源合理利用与管理定量

化的迫切要求,蒸发与蒸散越来越受到人们的重视。

### 2 植物蒸腾耗水的测定方法

蒸腾作用是植物以蒸汽的形式散失水分的过程。水分从植物叶子散失是一个包括物理机理的叶子生物学特性的过程。原则上,蒸腾作用是一个简单的过程,但实际上,因为叶子的特性和行为的复杂性,所以,它是一个十分复杂的现象。显然,对水分从叶子蒸腾到环境中去一定要有可利用的水分和使液态水变成水蒸气的某些环境条件。对蒸腾作用有重要影响的环境因子,通常认为有太阳辐射、气温、风速、相对湿度和土壤水供应<sup>[4]</sup>。蒸发和蒸散的决定因素是不同的,蒸发取决于冠幅上的水分分布及干湿部分的能量交换;而蒸散取决于干旱冠幅的表面的抵抗力可用 Jarvis 模型描述<sup>[5]</sup>。

测定蒸腾耗水的方法多种多样,按测定技术分:有测定失水速率的重量法和容重法,还有测定因蒸腾而增加的空气湿度计法;按测定对象分,有测定小面积叶片蒸腾速率的气孔计法和 LI-6200 型便携式气体分析系统,可同步测定活体植物的蒸腾和光合速率以及内外有关参数,其中包括气孔导度( $C_s$ )、叶温( $T_L$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )、光量子通量密度( $PFD$ )、空气  $CO_2$  浓度( $C_a$ )、气温( $T_a$ )、相对湿度( $RH$ )、以及叶片与空气之间的水蒸气压差( $VPD$ )、等参数均从该仪器取得,对分析环境因子对蒸腾-光合过程的影响和植物本

\* 收稿日期:2006-02-28

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)中国西部现代荒漠化防治技术集成研究与示范(编号:2004AA649380)

作者简介:牛丽丽(1981-),女,在读硕士研究生,研究方向:林业生态工程。

身的控制机制非常有用,但因售价昂贵难以推广。以往通常是用摘下来的叶片和枝条,置于灵敏天平(从 0.01 扭力天平到 0.001、0.000 1 的电子天平)上进行快速称重。或用盆栽植物作蒸腾的称量测定,也有一定的用途,但是不能把它外推到计算整株植物和植物群体的蒸腾失水量。现在愈来愈多地采用大型精密的称量式蒸散仪和非称量式蒸渗仪定量测量植物的蒸腾量,为确定植物的实际需水量和灌溉时间提供科学依据。关于蒸散的研究工作,虽然已有 200 多年的历史,也总结了一系列蒸散的计算方法但仍存在一些尚待进一步探讨的问题。目前,蒸散耗水量的计算方法大致可以分为:微气象学、植物生理学法、以及 SPAC 综合模拟法等。

2.1 微气象法

随着电子计算机技术、气象仪器的不断发展,数据的自动化采集与运算系统的日益先进,该方法已成为较为常见的蒸散计算方法,主要包括:能量平衡法、空气动力学法、能量平衡和空气动力学联合公式法、涡流相关法、红外遥感法<sup>[6]</sup>等。

2.1.1 能量平衡法

能量平衡法即波文比 - 能量平衡法(BRER),该法估算潜热能量(即蒸发或凝结)与显热通量的理论基础是地面能量平衡方程与近地层梯度扩散理论。再假设热量和水汽的扩散系数  $K_h$  和  $K_w$  相等的条件下,根据它们推导出用波文比计算蒸发的公式<sup>[7]</sup>:

$$LE = (R_M - G) / (1 + \gamma) = (R_M - G) / (1 + \gamma \cdot t / e)$$
  
式中:  $LE$ ——蒸散量;  $R_M$ ——净辐射;  $G$ ——土壤热流;  $\gamma$ ——波文比,它是显热  $H$  与潜热  $LE$  的比值;  $t$ 、 $e$ ——两个不同高度处的温度和水汽压差,  $\gamma$ ——干湿球常数。

该方法计算方法简单,对大气层没有特别的要求和限制。通常情况下,精度较高。常可以作为检验其它蒸散计算方法的判别标准。BRER 最基本的假设条件是: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,所以,只有在开阔、均一的下垫面情况下,才能保证较高的精度。在平流逆温条件下,由于空气的温湿度铅直廓线的非相似性,导致了热量和水汽湍流交换系数的非等同性,使用 BRER 计算蒸腾的结果会偏低,在非均匀的平流条件下,还会导致极大的误差。观测点附近还不能有垂直方向上的辐合区和辐散区。另外,仪器的安装高度要有足够的风浪区长度,一般认为风浪区长度应是仪器传感器的安装高度 100 倍以上。

2.1.2 空气动力学法

空气动力学法又可称紊流扩散学<sup>[8]</sup>,是由 Thornthwaite 和 Hulzman 于 1939 年急于地面边界层梯度扩散理论首次提出的。认为:近地面层温度、水汽压和风速等各种物理属性的垂直梯度,受大气传导性制约,可根据温度、湿度和风速的梯度及廓线方程,求解出潜热和热通量。据陈发祖研究指出,只有在湍流涡度尺度比梯度差异的空间尺度小得多的条件下,梯度扩散理论才能成立。故在平流逆温的非均匀下垫面、粗糙度很大的植物覆盖以及在植物冠层内部情况下,该理论不适用。也就是说,空气动力学法对下垫面的粗糙度和大气的稳定度的要求极为严格,因此,该方法很难在实际工作中得到推广应用。

2.1.3 能量平衡 - 空气动力学阻抗联合法

Penman 于 1948 年将能量平衡原理和空气动力学原理结合起来,首次提出著名的 Penman 公式,用以计算潜在蒸发量。尔后于 1953 年又提出植物单叶气孔的蒸腾计算模式。Covey 于 1959 年将气孔阻抗的概念推广到整个植被冠层表面。Monteith 于 1965 年在 Penman 和 Covey 工作的基础上,提出了冠层蒸散计算模式,即著名的 Penman -

Monteith 模式(P - M 模式)。该模式全面考虑影响蒸散的大气物理特性和植被的生理特性,具有很好的物理依据,能比较清楚地了解蒸散的变化过程及其影响机制,为非饱和下垫面蒸散的研究开辟了新的途径,现已得到了广泛研究与应用。由于 Penman - Monteith 模式将植被群丛看成位于动量汇源处的一片大叶,将植被冠层和土壤看成一层,故也被称为“大叶”模式或一层模型<sup>[9]</sup>。鉴于这种简单性,一层模型只能在地面完全覆盖、低矮植被条件下才能适用,且很难将植物蒸腾和土壤蒸发分开计算。

利用 Penman - Monteith 模式原理,出现了 WAVES 模型<sup>[10]</sup>。WAVES 模型利用 Penman - Monteith 公式计算上、下冠层蒸散量和土壤蒸发;冠层阻力的计算利用 Ball 模式,Leuning 对该模型进行了修正;作物生长的模拟利用多因子综合速率法(IRM),综合考虑光、水分、养分对作物生长的有效性;土壤水运动的描述利用 Richards 方程,该子模型包括降雨入渗、径流、作物水分吸收、水分再分配、地下水等问题。更完整的 WAVES 模型介绍见文献<sup>[11]</sup>。

2.1.4 涡度相关法

在近地层常通量层内动量通量、感热通量  $H$ 、潜热通量  $E$  可表示为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{aligned} & \rho = \rho_a - \rho_w = \rho_a - \rho_w^2 \\ & H = C_p \cdot W = \rho_a C_p U h \\ & E = q W = \rho_a q U q \end{aligned}$$

式中:  $\rho$ ——空气密度;  $C_p$ ——空气的定压比热,又为蒸发潜热,因此只要准确测得垂直风速脉动量  $w$ ,顺风向风速脉动量  $u$ ,位温脉动量  $\theta'$ ,和比湿脉动量  $q'$ ,便可求得各通量值,这就是所谓的涡度相关法。这是一种可直接测算下垫面显热和潜热的湍流脉动值,而求得植被蒸散量的方法。相比其它微气象法,其物理理论最为完善和可靠,且精度很高。但需昂贵的探头、数据采集及计算机系统,而且还会由于超声脉动仪探头及其支架对气流的扰动引起严重的观测误差。另外,由于是一种直接测定技术,所以不能解释蒸散的物理过程和影响机制。因此,目前,涡度相关法还不能作为蒸散的常规计算方法。在我国采用这种方法测算作物或林木蒸散的研究工作并不很多。

2.2 植物生理学法

植物生理学法,主要用于测定植株的一部分或整体的水分耗损量,可作为一种分析植株与水分关系的辅助方法。主要包括:快速称重法、气孔计法、风室法、同位素示踪法和热脉冲法等。在一些特殊情况下,如地形复杂、孤立小块或单棵植株,惟有用生理学法才能对蒸腾量作出估计。目前,在我国,该方法是一种测定或计算树木蒸腾的常用方法。其主要缺点是:因样本的代表性问题,难以准确地用单棵或数棵植株的蒸腾量推算出大面积植株的总蒸腾量。

2.2.1 快速称重法

该方法的前提是:如果枝叶离体短时间内蒸腾改变不大,则可剪取枝叶在田间进行两次间隔称重,用离体失水量和间隔时间换算蒸腾速率,代表正常生长情况下的蒸腾速率。但如果离体后蒸腾立即发生变化,则会导致较大的偏差。应注意的是天平在田间防风罩内进行,从树冠中部摘叶,称质量后悬挂在 2 m 高处,间隔 2 min 再称质量,以单位鲜叶的失水量表示蒸腾速率,重复 6 次,用平均值与树冠叶鲜质量计算某一时刻的树冠蒸腾耗水量。

该方法适用于蒸腾的比较研究,对不同树种、不同时间、不同时间、不同处理之间的蒸腾比较,都会取得满意的效果。与封闭的叶室相比较,此法的优点是离体叶处在原来的自然环境中,

能较好的反映环境对蒸腾的影响。如经偏差订正,其值可接近自然植物的蒸腾耗水量。但该方法只能间断测定,数据具有不连续性,且取样损失叶片较多,对小植株影响较大。

### 2.2.2 气孔计法

稳态气孔计用通入干燥空气的方法保持叶室相对湿度的稳态,界面阻力恒定为  $0.15 \text{ scm}^{-1}$ ,以干空气水汽密度( $p_a$ )、叶室水汽密度( $p_c$ )、干空气流量( $F$ )和叶面积( $A$ )计算蒸腾量( $Tr$ )。公式为:  $Tr = (p_c - p_a) F / A$

利用美国拉哥公司(LI-COR)制造的开放式气体交换 LI-6400 便携式光合作用测定系统,该系统带有  $\text{CO}_2$  注射器,注射器安装在主机上,采用随意使用的  $\text{CO}_2$  内存,可对叶室提供一稳定可调的  $\text{CO}_2$  气源,提供浓度可达  $2\,000 \mu\text{mol/mol}$ ,在测定  $P_n - \text{CO}_2$  响应曲线时,通过设定浓度,由仪器所备软件自动调节。 $P_n - \text{PFD}$  响应曲线采用不同厚度纱布调节光强的方法得到的<sup>[13]</sup>。

LI-1600 稳态气孔计可进行不离体无损伤测定,适用于室外不同物种、不同处理、不同时空的蒸腾比较的研究,还可用于同一叶的上、下两个表面蒸腾的比较。即将测定时环境相对湿度设定为仪器叶室的平衡湿度,选树冠中层正常生长的叶片加入叶室,分别测定上、下两个表面的蒸腾速率,两者之和即为叶的蒸腾速率,重复 6 次,从而来计算植物的蒸腾量。

现在也有人用动态扩散气孔计测定<sup>[14]</sup>。AP4 动态气孔计能够在野外快速测量叶片的气孔导度和气孔阻力。通过气体循环,将叶夹中相对温度变化数据与特制的标定板测量的数据比较,配合温度变化数据,精确计算出气孔导度或气孔阻力。动态气孔计不依赖于相对湿度测量的绝对精度,加之其独特的标定板技术可实时标定仪器,故野外应用时较稳态气孔计准确。仪器测定叶室条件下的气孔阻抗与蒸腾速率,理论与技术都是正确的,操作也很方便,但由于干空气混入与叶室内扇驱动气流,使叶的界面层阻力变小,蒸腾测值大大提高。因此一定要进行校正。且由于叶室条件与自然条件不同,蒸腾值不能直接用于估计自然条件下的蒸腾耗水量。

### 2.2.3 热脉冲法

植物根部吸收土壤水分,通过茎运输到植株顶部,从叶表面蒸腾散失。干部液流量的大小反映着植株顶部的蒸腾量,因此可以在干部测定植株蒸腾流的数量。该方法以 Huber 的热脉冲补偿系统、Marshall 的流速流量转换分析和 Swanson 的损伤分析为基础,由 Edward 总结成系统的理论技术。对树木而言,该方法用热脉冲加热树液<sup>[15]</sup>,在上下方固定距离(一般是在树干的边材区打三个孔,中间的是热源的位置,上面的热敏探头距中心位置为  $10 \text{ mm}$ ,下面的热敏探头距中心为  $5 \text{ mm}$ )<sup>[16]</sup>测定温度变化,以确定树液流速,断面流速再积分成为断面流量。注意本方法只适用于较大单

### 参考文献:

- [1] 赵明,郭志中,王耀琳,等.不同地下水位植物蒸腾耗水特性研究[J].干旱区研究,2003,20(4):286-291.
- [2] 郭晓寅,程国栋.遥感技术应用于地表面蒸散发的研究进展[J].地球科学进展,2004,19(1):107-114.
- [3] Rosenberg NJ, Blad B L, Uerma S. B. Microclimate the Biological Environment of Plants [M]. New York: Johnwiley & Sons, 1983.
- [4] Huang Z C (黄子琛), Shen W S (沈渭寿) Moisture and drought resistance of plants [M]. Beijing: China's Publishing House of Environmental Science, 2000. 29-39, 45-52.
- [5] Fred C. Bosveld and Willem Bouten. Evaluating a Model of Evaporation and Transpiration with Observations in Partilly Wet Douglas-fir Forest [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2003, 108: 365-396.
- [6] 陈云浩,李晓兵,史培军.中国西北地区蒸发散量计算的遥感研究[J].地理学报,2001,56(3):261-268.
- [7] 黄妙芬.绿洲荒漠交界处波文比能量平衡法适用性的气候学分析[J].干旱区地理,2001,24(3):259-264.

(下转第 163 页)

株树木蒸腾耗水量的系统测定,便于自动取样、记录及程序计算。不适合直径小于  $5 \text{ cm}$  的树干测定。直径小于  $5 \text{ cm}$  的植株可以采用热平衡式茎流计,采用包裹式茎流计将该仪器的探头设计成包裹式,不会对小植株造成伤害。

### 2.3 SPAC 水分传输综合模拟法

无论是微气象学法,或植物生理学法,其理论基础都是侧重于各自的学科,对涉及其它学科的问题往往作简化或近似处理。而蒸散却是一个广泛的生态过程,是土壤、大气和植物生理的综合函数,故这些方法都难免存在学科间的差异性和局限性。直至 Philip 提出较为完整的土壤-植物-大气连续体(SPAC)概念以后,才使 SPAC 水分传输综合研究有了重大的突破。这对蒸散的物理与生物机制的了解,农业水资源的合理支配与节水农业的发展起到了十分重要的作用。近些年来,由于计算机应用技术与计算语言的快速发展,为 SPAC 水分传输动态模拟研究提供了有力的工具。基于 SPAC 水分传输理论,模拟计算植被蒸散耗水量,现已成为蒸散计算研究的重要途径,国外很多人在这一方面的研究均取得了比较满意的结果。在我国,这一方面的研究主要集中在农业领域,而在林业领域,极少有文献报道。总之,现已形成一系列的蒸散计算方法,但每一种方法都是根据一定的对象和条件发展起来的,至今还未形成一种十全十美的方法。基于这种不十分理想的情况,即便在 20 世纪 90 年代中后期,有关蒸散计算方法的众多研究,仍均采用两种或两种以上方法,其目的就是尽量避免单一计算方法的局限性,以增加蒸散计算精度和结果的可靠性。

需特别指出的是,目前植被蒸散模式的研究对象,几乎只局限于单一作物系统或森林系统,而在两种或两种以上植物共存的农林复合系统中,因地下部分盘根错节和地上冠层错落搭配所构成的独特植被结构,增加了各类参数处理的复杂性和研究工作的难度,使得农林复合系统蒸散模型的研究工作进展较慢。

此外,还有许多测定植物蒸腾的方法,在《中德合作山东粮援项目区水平衡研究》中分析计算可能蒸散发量的三种计算方法如:豪德法、净辐射法和彭曼法<sup>[17]</sup>。人们还对蒸发蒸腾量进行了随机模拟与预报,国内外不少研究人员对蒸发蒸腾量的随机模拟与预报进行了大量研究取得了一些成果,但国内当前用于模拟与预报作物蒸发蒸腾量的随机模型可归纳为自回归滑动平均模型、自回归模型、倍加模型、线性分解模型和传递函数噪声模型等<sup>[18]</sup>。

植被蒸散是一个复杂的物理过程和生物过程,现已成为国际水文计划(IHP)、国际地圈-生物圈计划(ICBP)、世界气候研究计划(WCRP)、联合国环境计划(UNEP)、全球水量与能量平衡计划(GEWEX)等国际性项目的重要研究内容之一。是未来研究蒸散的主要途径和方向。

表 3 各项治理措施年保土量计算表					
项目	换算系数	侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	保土系 数/ %	措施保存 面积/ hm <sup>2</sup>	年保土 量/ 万 t
水保林	0.01	4139.6	100	22.5	0.09
水平梯田	0.01	4139.6	100	82	0.34
经济林	0.01	4139.6	100	529.5	2.19
果树台田	0.01		100		
原有梯田	0.01	4139.6	100	22	0.09
原有林	0.01	4139.6	100	411	1.7
谷坊(座)		5		650	0.33
合 计				1067	4.74

注:根据侵蚀程度分级,轻度侵蚀取平均值 1 500 t/(km<sup>2</sup>·a),中度侵蚀取 3 500 t/(km<sup>2</sup>·a),强度侵蚀取 6 000 t/(km<sup>2</sup>·a)。

则保土效率

$$\eta = \frac{V}{V_{\text{总}}} \times 100\% = \frac{4.74}{4.98} \times 100\% = 95.18\%$$

2.2.3 洪峰流量削减效率

(1) 用水文法计算治理前的洪峰流量

$$Q_p = k_p \cdot Q_C \quad Q_C = K_i P_{24} F$$

该流域主沟长  $L = 8.1 \text{ m}$ , 河道比降  $J = 175/8100 = 21.6\%$  固  $L/J = 8.1/21.6 = 1.74$ , 由  $L/J$  查水文手册得  $K_i = 0.173$ , 从水文手册表查得  $P_{24} = 71 \text{ mm}$ , 则

$$Q_C = K_i P_{24} F = 0.173 \times 71 \times 15.66 = 192 \text{ m}^3/\text{s}$$

不同频率的洪峰径流系数  $\rho$  由水文手册  $V_1$  分区 10 年一遇标准查得  $\rho = 0.47$ , 10 年一遇模比系数  $K_p$  值由水文手册查得  $K_p = 1.81$ , 由以上数值得出:

$Q_p = K_p \cdot \rho \cdot Q_C = 1.81 \times 0.47 \times 192 = 163 \text{ m}^3/\text{s}$

(2) 削减洪峰流量

$$Q_{\text{减}} = Q_p \times m = 163 \times 82\% = 134 \text{ m}^3/\text{s}$$

(3) 治理期末的洪峰流量

$$Q_{\text{末}} = Q_p - Q_{\text{减}} = 163 - 134 = 29 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.3 生态效益

石头梁小流域经过 5 年的水土保持综合治理,生态效益有了很大变化。

参考文献:

[1] 宫元娟,李东庆,何勇.技术经济学[M].北京:中国农业大学出版社,2002.44 - 46.

[2] 王礼先.水土保持学(第 2 版)[M].北京:中国林业出版社,1997.144 - 228.

[3] 詹道江,叶守泽.工程水文学[M].北京:中国水利水电出版社,2000.212 - 219.

[4] 张兴昌,卢宗凡.农作物水土保持效益的数值化综合评价[J].水土保持学报,1993,7(2):51 - 56.

[5] 刘震.中国水土保持生态建设模式[M].北京:科学出版社,2003.59 - 60.

(上接第 160 页)

[8] 张劲松,孟平,尹昌君.植物蒸散耗水量计算方法综述[J].世界林业研究,2001,14(2):23 - 28.

[9] 辛晓洲,田国良,柳钦火.地表蒸散定量遥感的研究进展[J].遥感学报,2003,7(3):233 - 240.

[10] 王会肖,刘昌明.农田蒸散、土壤蒸发与水分有效利用[J].地理学报,1997,52(5):447 - 454.

[11] Zhang L, Dawes W R, Hatton T J. Modeling hydrologic processes using a biophysically based model - application of WAVES to FIFE and HAPEX - MOBLHY[J]. Journal of Hydrology, 1996, 185: 147 - 169.

[12] 柯晓新,杨兴国,张旭东.农田蒸散测算的微气象学方法[J].干旱地区农业研究,1995,13(1):31 - 40.

[13] 苏培玺,赵爱芬,张立新,等.荒漠植物梭梭和沙拐枣光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征[J].西北植物学报,2003,23(1):11 - 17.

[14] 段爱旺.一种新型的动态扩散气孔计简介[J].灌溉排水,1995,(4):50 - 53.

[15] 司建华,冯起,张小由.热脉冲技术在确定胡杨幼树干液流中的应用[J].冰川冻土,2004,26(4):503 - 508.

[16] David G Simpson. Water use of interior Douglas - fir[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(4): 534 - 548.

[17] 邹连文,韩洪暖.可能蒸散发量的三种计算方法[J].西北水电,1996,(2):38 - 40.

[18] 温季,高军省,郭冬冬.蒸发蒸腾量的随机模拟与预报研究[J].海河水利,1999,(2):19 - 46.