

植物蒸发蒸腾量测定方法述评

屈艳萍¹, 康绍忠², 张晓涛¹, 张宝忠², 李思恩²

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要:评述了水文学方法、微气象学法、植物生理学方法、红外遥感法等 4 类植物蒸发蒸腾量测定方法的基本原理、计算方法、优缺点及误差来源等;给出了合理选择测定方法的参考标准;指出目前研究和实践中存在的一些问题,并对未来发展趋势进行了展望。
关键词:植物蒸发蒸腾量;水文学方法;微气象学法;植物生理学方法;红外遥感法
中图分类号:P332.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7647(2006)03-0072-06

A review of methods for measurement of evapotranspiration from plants//QU Yan-ping¹, KANG Shao-zhong², ZHANG Xiao-tao¹, ZHANG Bao-zhong², LI Si-en²(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)
Abstract: A summary was made on the basic principle, calculation method, advantages and disadvantages, and errors of four methods for evapotranspiration measurement, including the hydrological method, the microclimate method, the plant physiological method, and the remote sensing method. The reference criterion for reasonable determination of the measuring method was given, and some problems existing in current research and practices were put forward. Finally, a prospect for the further development of the measuring methods was presented.
Key words: evapotranspiration from plant; hydrological method; microclimate method; plant physiological method; remote sensing method

植物蒸发蒸腾量通常主要包括植物蒸腾量和裸间土壤蒸发量^[1]。它涉及到地球表层中能量循环和物质转化最为强烈的活动层——土壤-植物-大气系统 (SPAC),常受下垫面条件(如地形、土壤质地、土壤水分状况等)、植物生理特性(如植物种类、生长过程等)和气象因素(如太阳辐射、温度、湿度、风速等)等诸多因素的影响。因此,长期以来,植物蒸发蒸腾问题受到了水文学、气象学、自然地理、土壤学、农学、林学等多个学科领域的共同关注。

植物蒸发蒸腾量既是水量平衡中的重要分量,又是水文循环不可或缺的环节和水管理的有效依据,因此,选择合适的方法测定植物蒸发蒸腾量具有非常重要的意义。

1 植物蒸发蒸腾量测定方法的评述

目前,植物蒸发蒸腾量的测定方法按其种类大体可以分为水文学方法(包括水量平衡法和蒸渗仪法等)、微气象学法(包括波文比-能量平衡法、涡度

相关法和空气动力学法等)、植物生理学方法(包括茎流法、气孔计法等)和红外遥感法等 4 类方法。

1.1 水文学方法

1.1.1 水量平衡法

水量平衡法的基本原理是根据计算区域内水量的收入和支出的差额来推算植物蒸发蒸腾量,属于一种间接的测定方法。水量平衡方程式如下:

$$P_e + I + W - ET - D = \Delta W \tag{1}$$
$$P_e = P - R = \alpha P \tag{2}$$

式中: P_e 为有效降雨量; I 为灌溉水量; W 是地下水补给量; ET 为植物蒸发蒸腾量; D 为深层渗漏量; ΔW 为阶段内土壤含水量的变化; P 为实际降雨量; R 为地表径流损失量; α 为降雨入渗系数,其值与一次降雨量、降雨强度、降雨历时、土壤性质、地面覆盖及地形等因素有关^[1]。

水量平衡方程式中涉及的分量较多,而且有的分量准确测定较困难,譬如,地下水补给量、深层渗

漏量,因此,可以根据各地具体情况对上述表达式进行不同程度的简化。地下水补给量与地下水埋藏深度、土壤质地、土壤深度、植物种类、计划湿润层含水量等有关,它可以根据地下水观测资料来确定^[1],但当地下水埋深非常深时,通常予以忽略^[2]。深层渗漏量能否忽略,要考虑土壤的深度、坡度、渗透性、浅层储水量以及气候等因素^[3],在干旱或半干旱地区,深层渗漏量常可以忽略^[4]。

水量平衡法中,土壤含水量的测定影响较大。目前,常用的土壤水分测定方法主要有3种:取土烘干法、中子仪测定法、时域反射仪测定法^[5]。取土烘干法在其他土壤水分测定方法的基础和依据,方法简单,精度高,但不能连续定位观测;中子仪测定法多用于科研,且测定深度小于20 cm的表层土壤含水率时,测值的重复性和稳定性较差^[6];时域反射仪测定法比较先进,能够连续、快速地对土壤水分进行定位观测,且无辐射,对土壤结构不会起破坏作用^[7],所测表层土壤含水率比中子仪测定法精度要高得多^[8]。

水量平衡法是测定植物蒸发蒸腾量最基本的方法,常用来对其他测定或估算方法进行检验或校核。它可以适用于非均匀下垫面条件和各种天气条件,不受微气象学法中许多条件的制约^[9]。该法的另一个优点是充分考虑了水量平衡各个要素间的相互关系,遵循物质不灭原则,可以宏观地控制各要素的计算,计算误差较小^[10]。这种方法也存在一些不足之处,它要求水量平衡方程中各分量的测定值足够精确,且要弄清计算区域边界范围内外的水分交换量,而这些又往往难以做到很精确。这种方法用于测定一小块地或一个小流域时精度较高;但当流域较大时,计算的区域边界很难确定,流域内雨量站分布不均等容易导致计算精度降低。另外,这种方法得到的只是一个时段内(通常一周以上)流域总的蒸发蒸腾量,因而不能反映蒸发蒸腾量的动态变化过程。

1.1.2 蒸渗仪法

蒸渗仪法是一种基于水量平衡原理发展起来的植物蒸发蒸腾量测定方法。所谓蒸渗仪法,就是将蒸渗仪(装有土壤和植物的容器)埋设于土壤中,并对土壤水分进行调控,有效地反映实际的蒸发蒸腾过程;再通过对蒸渗仪的称量,就可以得到蒸发蒸腾量^[11]。目前,常用的蒸渗仪主要有称重型和渗漏型两种^[12]。

蒸渗仪法是一种直接测定的方法,其误差来源较多^[2]。蒸渗仪内外土壤的空间变异性、植物种类及其密度分布差异直接影响蒸渗仪法的精度。譬如,当蒸渗仪被干旱植被或裸土包围时,通常会产生

“绿洲效应”。当蒸渗仪内外的植物冠层部分相互越过蒸渗仪边界时,如果蒸渗仪面积仍然以蒸渗仪的实际尺寸计算,则蒸渗仪面积并不是实际的蒸发蒸腾面积,这样造成的误差较大。另外,蒸渗仪的制作(包括材质、尺寸)也对精度有影响。

与水量平衡法相比,蒸渗仪法的一个显著优点就在于它能直接测定蒸发蒸腾耗水量。同时,它也有一些缺点:蒸渗仪测得的数据常缺乏代表性,仅能代表整个田间某一点处的蒸发蒸腾量^[13];可能会限制植物的根系生长;不宜用于高大植物;不适宜于裂隙大的土壤^[2]。此外,仪器维修比较困难。

1.2 微气象学方法

随着计算机科学和气象科学的迅速发展,数据的自动采集与处理系统日益先进,在此基础上,微气象学方法已发展成为常见的蒸发蒸腾测量测定方法。微气象学方法主要包括波文比-能量平衡法、涡度相关法、空气动力学法等。

1.2.1 波文比-能量平衡法

波文比-能量平衡法的两大理论支柱是能量平衡原理和边界层扩散理论。假定植物和土壤是一个蒸发界面,水分子可以从此界面逸出而进入大气,那么,对于这个面的垂直方向上的能量收支平衡可用下式描述^[14]:

$$R_n - G = H + \lambda \cdot ET \tag{3}$$

式中: R_n 为太阳净辐射; G 为土壤热通量; H 为感热通量; $\lambda \cdot ET$ 为潜热通量,其中 λ 是水汽化潜热, ET 是植物蒸发蒸腾量。

波文比定义为

$$\beta = \frac{H}{\lambda \cdot ET} \tag{4}$$

综合式(3)和式(4)可得

$$\lambda \cdot ET = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \tag{5}$$

式(5)即为用波文比-能量平衡法估算植物蒸发蒸腾量的公式,其关键在于波文比 β 的确定。

根据经验关系,感热通量、潜热通量可表示为

$$H = - \rho_a C_p k_h \frac{\partial T}{\partial z} \tag{6}$$

$$\lambda \cdot ET = - \frac{\rho_a C_p}{\gamma} k_v \frac{\partial e}{\partial z} \tag{7}$$

式中: ρ_a 为空气密度; C_p 为空气定压比热; k_h 为感热交换系数; k_v 为潜热交换系数; γ 为湿度计常数。

根据雷诺相似原理,假定感热和潜热的交换系数相等,即 $k_h = k_v$,合并式(4)、式(6)和式(7)可得

$$\beta = \gamma \frac{\partial T / \partial z}{\partial e / \partial z} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \tag{8}$$

利用波文比系统测得 R_n , G , ΔT 和 Δe 后,就能够

计算出该区域的潜热通量和相应的植物蒸发蒸腾量。

波文比-能量平衡法素以物理概念明确、计算方法简单而著称,且对大气层没有特别的要求和限制^[15]。该法只需要两个高度的要素观测值,不用求湍流交换系数,而且精度较高,可作为其他蒸发蒸腾量测定方法的准判别标准^[16-17]。但是,使用波文比系统观测的区域要具有开阔、均一的下垫面,且天气平稳少变,辐射和风速都没有过于剧烈的变化。

在实际应用中,波文比-能量平衡法还存在许多值得注意的问题:①在干旱地区,植物常常遭受水分胁迫, ΔT 值很大,而 Δe 值非常小,如果 Δe 测定精度较差,则会产生较大误差^[18];为了保证数据的可靠性,仪器安装区要有足够的风浪区长度,最好为 100~200 倍以上的仪器安装高度,但可根据实际情况作适当调整,一般不能小于 20 倍的仪器安装高度,最低也不能低于 12 倍的仪器安装高度^[19-20],否则可能会因不满足基本假设而产生较大偏差,甚至错误。②在连续观测过程中,可以通过定时交换上下两个传感器,保持干湿表球体湿润、干净来提高测量精度^[2]。③通常在早晨和黄昏时段,由于感热通量要改变其方向,因而所测数据会出现不稳定,甚至矛盾的现象;当有降雨或田间灌溉时,土壤的热通量会发生较大变化,感热和潜热可能会产生较大的水平梯度,从而使计算结果不能很好地与实际情况相吻合,且此时两个高度的水汽差很小,可能会因小于仪器的分辨率而产生较大的误差。因此,在处理试验数据时,应根据实际情况对数据进行分析 and 取舍。

1.2.2 涡度相关法

涡度相关法建立在澳大利亚微气象学家 Swinbank 在 1951 年提出的涡度相关理论的基础之上,是一种通过直接测定和计算下垫面感热和潜热的湍流脉动值而求得植物蒸发蒸腾量的方法。计算公式如下^[21]:

$$H = \rho_a C_p \overline{w' T'} \quad (9)$$

$$\lambda \cdot ET = \lambda \rho_a \overline{w' q'} \quad (10)$$

式中: λ 为水汽化潜热; H 、 $\lambda \cdot ET$ 分别为感热、潜热通量; ρ_a 为空气密度; C_p 为空气的定压比热; T' 、 w' 、 q' 分别为垂直温度、风速和湿度的脉动值。

涡度相关法的误差可能来源于理论假设与客观实际的偏差,也可能由仪器设备本身或使用不当造成。由于感应头、记录仪的频率响应特性限制及有限的观测时间,不可能观测到对垂直通量起作用的整个湍流频率范围,主要表现在对高频部分的截断,其高频损失程度还与仪器架设高度、大气稳定度有关^[17]。另外,测量垂直风速脉动量时,仪器安装倾斜也可能导致误差^[17]。

与其他方法相比,涡度相关法不是建立在经验关系基础之上的,而是严格依据空气动力学理论推导而来^[22],其物理学基础最为完备。它通过直接测量各种物理属性的湍流脉动值来确定交换量,不受平流限制,具有较高的精度和良好的稳定性。它只需要在一个高度上进行观测,作业非常灵活,而且仪器的可移动性强,在森林等高杆植物或高粗糙度地表安装很方便,使其应用更加广泛^[23]。但是,由于是一种直接测定技术,所以不能解释植物蒸发蒸腾的物理过程和影响机制^[15]。另外,对于干旱缺水地区,因空气中水汽含量较少,测出的植物蒸发蒸腾量往往误差较大。

1.2.3 空气动力学法

空气动力学法又称为紊流扩散法或质量迁移法。这种方法基于地面边界层梯度扩散理论,由 Holzman 和 Thornthwaite 于 1939 年首次提出。它认为:近地面层温度、水气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。

空气动力学法需要能够正确地测定植物上方不同高度处的气压。另外,空气动力学法与其他微气象方法一样,对下垫面及空气稳定度要求严格,否则误差较大^[24];在测定范围上受到极大的限制,不适宜大面积的应用。

1.3 植物生理学方法

顾名思义,植物生理学方法就是指在植物生理学基础之上发展而成的蒸发蒸腾量测定方法。包括茎流法、气孔计法、称重法、风调室法等。下面仅介绍茎流法和气孔计法两种。

1.3.1 茎流法

所谓茎流法,即通过注射和测定可检测的示踪物来计算树液流速,并由此推断水分利用^[25]。示踪物可以是热源、染料或放射性同位素等。其中,又以热量法茎流测定技术最为常用,主要包括:

a. 热脉冲法 (Heat Pulse Method): 曾被 Zimmerman 誉为“最美妙的测量液流速度的方法”^[26]的热脉冲法是由德国科学家 Huber 于 1932 年首次用于测量树木木质部液流速率^[27],开辟了植物水分生理研究的新途径。Marshall 和 Closs 在理论上有了新的突破,Swanson 研究讨论了安装探头的损伤效应,并与 Whitfield 找到了一个较好的二维数值校正方法。Edwards 又将 Huber 的热脉冲补偿系统、Marshall 的流速流量转换分析及 Swanson 的损伤分析综合起来,提出了较为完整的理论与技术^[28]。热脉冲法的基本原理是在树干定点部位以热脉冲间断地加热树液,在上下位点用电桥测定热平衡时间,换

算出树干液流速度和树干液流量,即树冠蒸腾耗水量。由于木质部边材各个位点液流速率的异质性,因而需要测定不同方向、不同深度处的液流速率,然后根据统计方法将点上的速率整合到整个边材面积上。与此方法配套的仪器为热脉冲茎流测定仪,包括探测器、数据采集器、电源等,其中,探测器又由上、下游感应探针和热探针组成。此法的准确性已经在很多树木上得到检验,但是当树干液流较小时,热脉冲法不准确。

b. 热平衡法(Heat Balance Method):即 Sakuratani 法及源于此法的一些方法。此法又包括茎部热平衡法(Stem Heat Balance Method)和树干热平衡法(Tissue Heat Balance Method)两种。其中,茎部热平衡法是指将一个加热套裹在茎或枝条外面,连续加热树皮、木材和树液,茎表面的温度通过安装在周围的温度传感器来感应^[25],依据热量平衡原理求出被液流带走的热量来计算茎秆内液体的流量^[29];树干热平衡法与茎部热平衡法原理相同,而不同的是,树干热平衡法是通过插入树干的探针来测定树干液流。另外,这两种热平衡方法均可分为恒定功率加热和变化功率加热,而变化功率加热的方法耗电低,且避免了液流较低时对树干的过分加热。

c. 热扩散探针法(Thermal Dissipation Probe method)^[30]:此法首先是由法国科学家 Granier 于 1985 年提出来。它是将 2 根长为 2 cm、直径为 1.2 mm 的探针插入边材中,上部探针含有加热器和热电偶,下部探针只有热电偶,恒定加热,通过测定两探针的温差值来计算液流速度^[31]。与其他几种热量法相比,此法安装简单方便,计算简便,且费用相对较低。

长期以来,上述 3 种热量法茎流测定技术因操作简单、可连续监测、环境破坏性小等优点而深受树木生理学家和森林水文学家的青睐。然而,在具体使用这些方法测定液流或分析处理数据时,还是存在着以下一些值得注意的问题:①热脉冲法只是在树干某个部位整个横截面上某一个或几个点上进行液流速率测定,然后用加权平均或算术平均的方法整合得到整树的液流量^[32]。这样,误差就产生于单个点的测定以及整合过程^[33]。②与连续测定的热平衡法和热扩散探针法相比,热脉冲法是一种半连续的测定方法。实际的液流是在发出热脉冲后很短时间内测定的,而在所设定测定间隔的剩余时间里只是散发多余的热量来达到平衡状态。如此一来,液流与气象因素的相关关系仅仅是针对测定时间间隔的前一段时间而言^[34-35]。③热脉冲法和热扩散探针法都必须在树干上用钻头打孔以便安装探针,

这样就破坏了木质部正常的液流^[36],因此,需要进行较为合理的伤流校正^[37]。而茎部热平衡法因其是将加热套裹在树干外面,所以不存在伤流校正的问题。④这 3 种方法都是采用热技术,因此可能会因升高了形成层温度而对表皮组织造成伤害^[36]。⑤这 3 种方法测得的均仅仅是蒸发蒸腾量的一个部分,土壤水面蒸发需另外测定。⑥由单木耗水外推至整个林地耗水时需要进行尺度耦合,当林地的树种和树龄组成不太均一时,这种尺度耦合更为复杂^[38]。

1.3.2 气孔计法

气孔计法,就是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夹入叶室,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,重复多次,用平均蒸腾速率与树冠叶面积换算得到树冠蒸腾耗水量^[39]。

气孔计法难以保证准确得到树木在自然状态下的蒸腾指标,以及很难避免将单个树叶或树条耗水量外推至整个林冠所带来的统计误差。

1.4 红外遥感法

20 世纪 70 年代以来,随着遥感技术的不断发展,利用遥感遥测技术计算植被蒸发蒸腾量 ET 的红外遥感法应运而生。所谓红外遥感法,主要是利用多光谱卫星的可见光——近红外及热红外波段的数据,反演得到地表反照率、植被指数等地表参数及地表温度与比辐射率后,建立模型进行求取。

目前所发表的模型主要归为统计模型和物理模型两大类。各模型的共同点在于都需要首先反演地表反照率和地表温度,再求得地表可利用能量,然后或者利用简单的参考蒸发蒸腾量计算公式计算,或者进一步推算感热通量,再利用能量平衡方程(式(3))求得植被蒸发蒸腾量^[40]。

随着遥感技术的发展及遥感信息定量化研究的不断深入,遥感技术在计算植被蒸发蒸腾量,特别是大、中尺度范围的 ET 时空分布中,其优越性已日益彰显。首先,由于遥感技术可以不断地提供不同时空尺度的地表特征信息,因而利用这些信息可以将 ET 计算模型外推扩展到缺乏详尽气象资料的区域尺度,反映出区域同一时刻的 ET 分布。其次,由于它是通过植被的光谱特性、红外信息结合微气象参数来计算蒸发蒸腾量,从而摆脱了微气象学法因下垫面条件的非均一性而带来的以“点”代“面”的局限性,进而为区域蒸发蒸腾计算开辟了新途径。再次,相对于在地面布设一些稀疏点来进行观测而言,应用遥感技术进行区域尺度植被蒸发蒸腾量的监测计算较为经济和高。因此,遥感方法计算植被蒸发蒸腾量为区域水资源合理配置提供了一种更加有效的途径。

表 1 各种测定方法的区别与适用范围

测定方法		测定类型	测定水平	测定结果		适用范围
水文学方法	水量平衡法	间接测定	群体水平	$T_r + E_s$	均匀或非均匀下垫面条件;各种天气条件;中小流域	
	蒸渗仪法	直接测定	群体水平	$T_r + E_s$	裂隙小的土壤;非高大植物	
微气象学方法	波文比-能量平衡法	间接测定	群体水平	$T_r + E_s$	下垫面开阔均一;足够风浪区长度	
	涡度相关法	直接测定	群体水平	$T_r + E_s$	下垫面开阔均一;空气稳定度好;高秆植物	
	空气动力学法	间接测定	群体水平	$T_r + E_s$	下垫面均匀、空气稳定度好;小面积测定	
植物生理学方法	茎流法	直接测定	单株水平	T_r	各种地形条件;具体植物种类的蒸腾耗水特性研究	
	气孔计法	直接测定	叶片水平	T_r	同一叶片的上、下两个表面蒸腾的比较	
红外遥感法		间接测定	群体水平	$T_r + E_s$	大、中尺度范围	

注: T_r , E_s 分别表示植株蒸腾量和裸间土壤蒸发量。

2 选择植物蒸发蒸腾量测定方法的参考标准

测定植物蒸发蒸腾量的方法多种多样,但是没有一种方法是完美的,每种方法都有自己的优势,同时,也存在各自的不足。因此,在测定植物的蒸发蒸腾量时,可以根据客观实际,结合上文中所指出的各种方法的特点及适用范围,并参考表 1,选择最优的方法。譬如,当需要测定的是一个区域的植被蒸发蒸腾量,且所在地的下垫面条件和天气变化比较复杂多变时,可以考虑采用水量平衡法或者红外遥感法;当研究目的是探讨或挖掘某种具体植物种类的蒸腾耗水特性,且研究对象所在地地形比较复杂、空间变异性较大时,茎流法可以作为一个较合理的选择。

3 存在的问题

近几十年来,随着科学技术的迅猛发展和各个学科的相互渗透,有关植物蒸发蒸腾量测定方法的研究工作也在不断地向前推进,为科学研究和实践应用提供了很多便利的手段和方法。各种新的蒸发蒸腾量测定方法不断涌现并显现出其独特的优越性,与此同时,一些历史较久远的经典测定方法不断地得到改进并日趋完善;一大批先进的仪器设备在科研和实践中孕育并诞生,从而使高精度、自动化成为可能,在大大提高结果的可靠性和工作效率的同时,大量节约了人力物力。然而,也存在着一些不容忽视的问题。可从以下几个方面进行阐述:

首先,纵观文中所述的几种蒸发蒸腾测定方法,各自都有其独特的学科背景、理论基础、假设条件以及适用范围,因而各种方法之间的相关性、可比性和可检验性比较复杂,从而为各种方法之间的同步比较研究和准确标定带来了困难。譬如,植物生理学方法测定植物蒸腾是在叶片或单株水平上进行的,要将其与涡度相关等微气象学方法进行对比,只有通过尺度转化模型将其外推至群体水平,然而,这两种方法得到的结果是否具有可比性还值得探讨。

其次,尽管科学技术的发展带动了蒸发蒸腾测

定方法的研究,促使了一大批高新仪器设备的研究和开发,但是,由于有的测定方法不够简便实用,仪器设备通常比较昂贵且难于维修,从而在很大程度上影响了新方法、新技术的推广及其应用。

再次,在文中提及的几种蒸发蒸腾测定方法中,有的是在均匀单一下垫面条件这一假设下才适用,而事实上,绝大多数情况是下垫面条件比较复杂,从而导致理论与实际脱节。

4 研究展望

纵观文中所评述的几种植物蒸发蒸腾测定方法,相对而言,热量法茎流测定技术和红外遥感法具有更为广阔的发展前景。一方面,热量法茎流测定技术具有操作简单、可连续监测、环境破坏性小、适用范围广等显著优势;可用来确定树木的水分输送格局及其具体的数量,从而深入挖掘植物的蒸腾耗水特性;结合有关树木生理指标和外界环境因素,可以更加深入揭示树木水分利用与气孔导度、叶水势、叶面积、气象因子等的关系,进而揭示植物蒸腾耗水的内在调节机制及外在影响因素。另一方面,红外遥感法可以将植物蒸发蒸腾计算模型外推扩展到缺乏详尽气象资料的区域尺度,摆脱了微气象学法因下垫面条件的非均一性而带来的以“点”代“面”的局限性,进而为区域蒸发蒸腾计算提供了新的手段和方法,为区域水资源合理配置开辟了一种更加有效的途径。

参考文献:

[1] 康绍忠,刘晓明,熊运章,等.土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M].北京:水利电力出版社,1994.

[2] RANA G, KATERJI N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13(2/3): 125-153.

[3] JENNEN M E, BURMAN R D, ALLEN R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 1990, NO. 70[R]. New York: ASCE,

1990: 123.

[4] HOLMES J W. Measuring evapotranspiration by hydrological methods[J]. *Agric Water Management*, 1984, 8: 29-40.

[5] 王笑影. 农田蒸发蒸腾实测方法研究进展[J]. *农业系统与综合研究*, 2004, 20(1): 27-30.

[6] 李宝庆, 刘昌明, 杨克定. 用零通量面法测定农田蒸发量[G]//左大康, 谢贤群. *农田蒸发研究*. 北京: 气象出版社, 1991: 29-38.

[7] 龚元石, 李子忠, 李春有. 应用时域反射仪测定的土壤水分估算农田蒸散量[J]. *应用气象学报*, 1998, 9(1): 72-78.

[8] 逢春浩. 土壤水分测定方法的新进展[J]. *干旱区资源与环境*, 1994, 8(2): 69-76.

[9] 左大康. 我国农田蒸发测定方法和蒸发规律研究的近期进展[G]//左大康, 谢贤群. *农田蒸发研究*. 北京: 气象出版社, 1991: 1-4.

[10] 张永忠, 李宝庆. 用水量平衡法计算农田实际蒸发量[G]//左大康, 谢贤群. *农田蒸发研究*. 北京: 气象出版社, 1991: 15-28.

[11] 王安志, 裴铁璠. 森林蒸发蒸腾测算方法研究进展与展望[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 933-937.

[12] BAUSCH W C, BERNARD T M. Spatial averaging Bowen-ratio comparisons with lysimeter evapotranspiration[J]. *Agron J*, 1997, 89: 730-766.

[13] GREBET P, CUENCA R H. History of lysimeter design and effects of environmental disturbances[C]//ALLEN R G, HOWELL T A, PRUITT W O, et al. *Proceeding of the International Symposium on Lysimetry*, July 23-25, Honolulu, Hawaiian Islands, USA. New York: ASCE, 1991: 10-18.

[14] 朱治林. 用波文比-能量平衡法估算农田蒸发量与 Lysimeter 的比较[G]//左大康, 谢贤群. *农田蒸发研究*. 北京: 气象出版社, 1991: 71-79.

[15] 张劲松, 孟平, 尹昌君. 植物蒸发蒸腾耗水量计算方法综述[J]. *世界林业研究*, 2001, 14(2): 23-28.

[16] 吴擎龙. 田间腾发条件下水热运移数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 1993.

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

[18] ANGUS D E, WATTS P J. Evapotranspiration-how good is the Bowen ratio method? [J]. *Agric Water Manag*, 1984, 8: 133-150.

[19] YUNUSAA I M A, WALKERA R R, LU Ping. Evapotranspiration components from energy balance, sapflow and microlysimetry techniques for an irrigated vineyard in inland Australia[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2004, 127(1/2): 93-107.

[20] HERBST M. Stomatal behaviour in beech canopy: an analysis of Bowen ratio measurements compared with porometer data [J]. *Plant Cell Environ*, 1995, 18: 1010-1018.

[21] DIAWARA A, LOUSTAU D, BERBIGIER P. Comparison of two methods for estimating the evaporation of a pinus pinaster stand: sap flow and energy balance with sensible heat flux measurements by an eddy covariance method[J]. *Agric for Meteorol*, 1991, 54: 49-66.

[22] 黄妙芬. 地表通量研究进展[J]. *干旱区地理*, 2003, 26(2): 159-165.

[23] 郭家选, 梅旭荣, 卢志光, 等. 测定农田蒸散的涡度相关技术[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(8): 1172-1176.

[24] 谢贤群, 左大康, 唐登银. 农田蒸发——测定与计算[M]. 北京: 气象出版社, 1991.

[25] 申卫军, 彭少麟. 热脉冲(Heat Pulse)法原理及其应用[J]. *资源生态环境网络研究动态*, 2000, 11(2): 22-27.

[26] 李海涛, 陈灵芝. 用于测定树干木质部蒸腾液流的热脉冲技术研究概况[J]. *植物学通报*, 1997, 14(4): 24-29.

[27] EDWARDS W R N, BECKER P. A unified nomenclature for sap flow measurements[J]. *Tree Physiology*, 1996, 17(1): 65-67.

[28] 刘奉觉, 郑世锴, 巨关升. 用热脉冲速度记录仪(HPVR)测定树干液流[J]. *植物生理学通讯*, 1993, 29(2): 110-115.

[29] 罗中岭. 热量法茎流测定技术的发展及应用[J]. *中国农业气象*, 1997, 18(3): 52-57.

[30] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.

[31] 孙慧珍, 周晓峰, 康绍忠. 应用热技术研究树干液流进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 1074-1078.

[32] HATTON T J, CATCHPOLE E A, VERTESSY R A. Integration of sap flow velocity to estimate plant water use[J]. *Tree Physiology*, 1990, 6(2): 201-209.

[33] LU Ping, URBAN L, ZHAO Ping. Granier's thermal dissipation probe(TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(6): 631-646.

[34] BRAUN P, SCHMID J. Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.) 1. Stem morphology and use of the heat balance method[J]. *Plant and Soil*, 1999, 215: 39-45.

[35] BRAUN P, SCHMID J. Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.) 2. Granier measurements[J]. *Plant and Soil*, 1999, 215: 47-55.

[36] WILLIAM L, BAUERLE W L, WHITLOW T H, et. al. A laser-diode-based system for measuring sap flow by the heat-pulse method[J]. *Agric for Meteorol*, 2002, 110(4): 275-284.

[37] SWANSON R H, WHITFIELD W A. A numerical analysis of heat-pulse velocity theory and practice[J]. *Exp Bot*, 1981, 32(126): 221-239.

[38] WILSON K B, HANSON P J, MULHOLLAND P J, et al. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance[J]. *Agric for Meteorol*, 2001, 106(2): 153-168.

[39] 巨关升, 刘奉觉, 郑世锴, 等. 稳态气孔计与其它 3 种方法蒸腾测值的比较研究[J]. *林业科学研究*, 2000, 13(4): 360-365.

[40] 王介民, 高峰, 刘绍民. 流域尺度 ET 的遥感反演[J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(5): 332-338.

(收稿日期: 2005-04-12 编辑: 熊水斌)