

蒸发和蒸散的测定与计算方法 的现状与发展

裴步祥

(气科院农气所)

一、前言

水面、陆面蒸发和作物地段的蒸散,不仅涉及气象学和气候学,而且与地球物理学的其它学科,如陆地水文、海洋和地质等密切相关。这些学科都从不同角度对蒸发、蒸散问题进行研究,并取得了显著的进展。

蒸发是水分平衡、热量平衡方程中的主要项,同时蒸发过程的机制,又联系到空气近地面层中乱流交换的特征及规律,因而蒸发研究有重要的学术意义。但更重要的是蒸发与蒸散对农业生产关系密切,作物的需水与灌溉,土壤水分短缺及干旱等问题,都需要通过对蒸发、蒸散的试验研究来解决。

近三、四十年来国外对蒸发、蒸散,其中包括其测定和计算方法的研究,不仅理论上有所进展,而且逐步应用到业务工作中去。解放后,我国在蒸发的观测方法和仪器方面,做了大量工作,水文气象站广泛开展了蒸发观测业务,在探索和改进蒸发、蒸散仪器和计算方法的工作上,也取得了初步的成果。

二、蒸发、蒸散的测定方法和仪器

虽然利用蒸发器来测定蒸发量已有较久的历史,但一些气象学家认为用蒸发皿和蒸发表,要想得到蒸发量的较一致的数据,在技术上还有困难,而萨顿^[1]提出用蒸发皿和蒸发表观测蒸发量的方法对气象学是否有用的问题。这说明蒸发的测定方法和仪器还有不少问题需要研究解决。

对蒸发、蒸散的测定仪器一般称为水面蒸发器和土壤蒸发器等。由于气象学把作物

地段土壤蒸发和作物蒸腾之和的总量称为蒸散,下面我们将把蒸发、蒸散的测定方法和仪器大体上分为两类,即水面蒸发器和蒸散器来说明当前蒸发和蒸散测定仪器的发展情况,蒸散器有时也用来测定土壤蒸发。

1. 水面蒸发器

目前世界各国使用多种类型的蒸发器^[2],对蒸发器的尺寸、材料、颜色、暴露情况等,以及各种蒸发器的性能比较,做了大量的试验工作^[2-4]。蒸发量已成为各国水文气象站网观测的一个主要的气象要素。

我国多年来较普遍地采用20厘米口径的小型蒸发器,近年来水文站,随后气象台站逐步使用E 601型蒸发器^[6],取得了较多的观测资料。

① 蒸发表

蒸发表在国内很少见到和使用,但国外有一些国家在气象站网中作为观测仪器使用,并将其结果与其它方法做过比较。

蒸发表是一种测定湿润多孔表面水分损失的仪器。湿润表面可以是多孔陶瓷球,或者是充满水的裸露的滤纸盘。这些湿润表面与连续供水的水管相连接,并用量管等来测定在给定时间内的水分损失量。这种仪器常用的有皮切(Piche)和利文斯顿(Livingstone)蒸发表。

蒸发表的优点是结构简单,成本较低,便于观测。虽然其观测结果不能代表自然界的蒸发,但可用它来得出可能蒸发。一些研究结果表明其月值与测定的蒸散量为线性关系,所以也可用来得出蒸散量。

② 几种蒸发器的国际比较

如前所述,世界各国使用多种类型的蒸发器,其性能也有差异,这给蒸发资料的国际交换带来了困难。为此,WMO选择几种普遍采用的蒸发器进行了比较。

这项试验是由WMO的仪器和观测方法委员会(CIMO)来组织的。经过近十年对三种蒸发器(美国的A级蒸发器和苏联的20平方米蒸发池、ГГН-3000蒸发器)的比较,同时观测了有关的气象要素。比较结束后收到了18个国家824个月的数据,利用其中较好的13个站的484个月的数据进行分析,得出了比较结果^[3]。

对三种蒸发器的比较是以20平方米蒸发池为标准仪器。其结论是:A级蒸发器的标准误差在少雨时为10%,多雨时为17%;ГГН-3000蒸发器则分别为12%和13%。另外也给出了以彭曼(Penman)公式的综合法所得计算结果为标准时两种蒸发器的标准误差。根据比较结果,WMO向各会员国推荐A级蒸发器和ГГН-3000蒸发器为站网蒸发观测仪器,20平方米蒸发池可作为水面蒸发测定的国际标准。

③ 玻璃钢蒸发器及其比较

现用的水面蒸发器多为金属的。近年来美国研制出的X-3型蒸发器是用玻璃纤维材料制成的。玻璃纤维强度高,其热传导系数小,可改善蒸发器的性能。经过试验效果较好,其折算系数接近于1,在印度的比较试验也证实了这一点^[9]。

近年来,我们用玻璃钢加工了E601型和口径20厘米蒸发器等,在有20平方米蒸发池的广州和营盘(辽宁)蒸发实验站进行了对比观测。试验结果表明:无论在我国南方和北方,不同类型的玻璃钢蒸发器与同类型的金属蒸发器比较,都可提高其折算系数,也就是玻璃钢蒸发器比同类型金属蒸发器的蒸发量更接近于标准蒸发器的蒸发量,这对口径20厘米的蒸发器更为明显。

E601型蒸发器是在苏联ГГН-3000蒸发器的基础上,结合我国气候等方面实际条

件改进的一种蒸发器。它的折算系数较大,准确性也较高,一些试验结果表明E601型蒸发器是较适合我国台站使用的一种蒸发器。

口径20厘米的蒸发器是我国长期以来使用的蒸发器。和其它类型的蒸发器比较,其折算系数较小,且为得出它的折算系数的试验研究工作做得较少,这就妨碍了蒸发资料的使用。但据我们和其它一些试验结果证明这种蒸发器折算系数的离差系数较小,也即是得出蒸发量的准确性还是比较高的。如采用口径20厘米的玻璃钢蒸发器,折算系数将提高,其准确性与E601蒸发器接近,观测较简便,把它做为气象站用仪器,可取得较好的效果。

2. 蒸散器

蒸散器大多是截取尽可能与周围环境保持相同自然条件的土柱,在土柱的表面种植作物,所以可用来测得蒸散量;在土柱的表面没有作物时,又可测定土壤蒸发量,所以也称为土壤蒸发器。

① 称重蒸散器

这是较普遍使用的一种蒸散器。如ГГН-500型土壤蒸发器就是小型称重蒸散器。它是将装有蒸发面积为500平方厘米、深50或100厘米的土柱的容器装进蒸发器的外筒中。整个仪器埋入土中,观测时将装土柱的容器取出称重,以得出观测时段的土壤蒸发或蒸散量^[10]。

为了使截取的土柱尽可能保持田间的自然条件,隔一定时间后要更换土柱。虽然如此,由于蒸发器中的土柱与周围自然界的土壤是隔绝的,所以它们之间总是存在着差别而产生误差。在文献[11]中给出了这种蒸散器的误差分析结果。设计出各种大型蒸散器^[2],提高测定的精确性,在一些科研单位做为标准使用。

② 水力式蒸散器

为了减轻蒸散观测的劳动强度和提高观测精确性,研制出水力式蒸散器。它是以静

以水浮力称重原理为基础的。它将装有土柱的容器安装漂浮在水池中的浮船上,组成漂浮系统。当土柱中的水分增减而引起重量变化时,装有土柱的容器在水池中的沉没深度也将发生变化,而沉没深度与土柱的含水量为线性关系,故测出土柱容器的沉没值,便可计算土柱的蒸散量。

国外已设计和研制出一些不同类型的水力式蒸散器。国内,在中国科学院地理研究所等单位使用的水力式蒸散器,其土柱蒸发面积为 0.20 平方米,土柱高 1.5 米。观测时用测微器进行测定,故可得出较准确的结果^[12]。

3. 自动遥测的蒸发器和蒸散器

国外对遥测蒸发和蒸散做了大量试验研究工作,研制出各种遥测仪器。下面仅介绍其中的两种:

① 蒸发和蒸散的自动测定装置

这种装置的测定原理是由热量平衡方程利用波恩比而得出的蒸发和蒸散的计算公式:

$$E = \frac{R-B}{H} \left[1 - \frac{r}{\Delta + r} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1' - T_2'} \right) \right] \quad (1)$$

式中 R ——辐射平衡; B ——地中热流量; H ——蒸发潜热; Δ ——在平均湿球温度时饱和水汽压曲线的斜率; r ——干湿表常数; T_1 、 T_2 及 T_1' 、 T_2' 为两个高度上的干湿球温度。

为测定各气象要素,这个装置有辐射平衡表、地中热流量表、干湿球温度表等。按预定的时间和程序,将气象仪器的测定结果取样,输给计算机进行处理后,把结果打印出来,其中有蒸散量计算值,以及其它气象要素的平均值、累计值和最多值等。

除将结果打印外,还可将它们录在磁带上。此外,这个装置有显示器,可将计算和测定结果显示出来。还有电子记录仪,可记录各气象要素的瞬时值。

这种装置是由日本设计和加工的。我国广州农气站购进经调试后开始使用。

② 自动传输的大型称重蒸散器

为提高蒸散的测定精确性和代表性,已设计多种类型的蒸散器。由 T. A. 豪厄尔 (Howell) 等人设计的可自动传输多种参数的大型蒸散器^[13],能将观测资料传输给距离 80 公里的使用单位。这种大型蒸散器的测定结果是用来检验和改进可能蒸发的计算方法,还可用来测定作物的水分利用和小气候研究。

这个仪器包括内筒、外筒、传感器、资料传输系统和排水系统等。土柱容器为 2×2 米的方形和深 2.26 米的金属筒。在土柱中安装各种传感器,其中有 4 个中子土壤湿度仪、15 个测量土壤水分电导率和 15 个测量土壤水基膜势 (soil water matric potential) 的传感器和 4 个地中热流量表,它们都分别安装在土柱的不同深度,来测定对蒸散和土壤水分有用的参数。

在大型蒸散器中有 Hewlett-Packard 3497 A 资料收集和控制系统。这个系统由 Hewlett-Packard 85 微处理机来控制,收集的资料用电话线路传输给使用单位。

三、蒸发和蒸散的计算方法

虽然利用蒸发器和蒸散器可以测定各种不同下垫面的蒸发量或蒸散量,但这些资料毕竟是有限的,不能满足实际工作的需要。为此,提出了应用于各种目的和不同情况下的蒸发和蒸散量的计算方法。其中有些方法和模式已在业务工作中得到了广泛的应用。

在一些文献中^{[5], [14], [15]},对蒸发和蒸散量的计算方法和模式给出了详细的介绍和评述,其中有些方法和模式,如蒙蒂思 (Monteith) 等人提出的阻力模式、还有空气动力模式、旋涡相关法,以及能量平衡模式等,它们虽然有时能给出较好的结果,但由于它们所需要的资料,有的还需要一些特殊的观测设备,因而限制了这些方法和模式的广泛使用。本文下面仅给出在国内较广泛使用的一些方法和模式。

1. 物质传输模式

最早的模式是多尔顿(Dalton)提出的。他把蒸发量与水汽压力差和风速联系起来,可表示为:

$$E = f(u)(e_s - e_a) \quad (2)$$

式中 E ——蒸发量; e_s ——蒸发表面的饱和水汽压; e_a ——蒸发表面上的空气水汽压, $f(u)$ ——风速的函数。

这个模式可用来计算水面蒸发量。在有蒸发量、水汽压差和风速资料的水文气象台站,根据式(2)可得出适用于本地区的经验公式。通过实测资料 and 实际使用的检验证明,所得结果较好,因而在业务和科研工作中得到了广泛的使用。

在得出用于计算裸地蒸发和作物地段的蒸散量的物质传输模式时,则产生缺少蒸发表面饱和水汽压资料的困难。在气象台站虽然都测定土壤表面的温度,但由于方法和仪器都存在着问题,其测定精度是不高的。红外和遥感技术用来测定地表面温度尚未广泛使用。因此,利用物质传输模式来计算裸地蒸发和作物地段的蒸散量还需要进一步的试验研究。

2. 以气温为基础的桑斯维特(Thornthwaite)模式

桑斯维特研制出一个利用月平均气温和白天长度来计算可能蒸发(E_0)的公式^[16],它是:

$$E_0 = 1.6 \frac{L}{12} \frac{N}{30} \frac{10}{I} t a \quad (3)$$

式中 L ——以小时为单位的白天长度; N ——月的天数; t ——月平均气温($^{\circ}\text{C}$); a 被定义为:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49$$

式中 I ——热指数,是从12个月的指数值 i 之和得出的,即

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad (4)$$

已制成一些图表,使计算工作简化。桑斯维特模式的优点是只需要月平均气温和白

天长度,方法较简单,因而在美国和其它国家曾得到了应用。但在干湿季节明显的季风地区,由于蒸发受到除温度以外的其它气象要素的影响较大,所以在这些地区不适用^[16]。另外,这个模式用在小于月的时段计算蒸发量时,会给出一些错误的结果。因此,除了计算生长季节的蒸散量年值外,已不再广泛使用。

3. 苏联布德科(Будыко)模式

在文献[17]中给出可能蒸发的计算公式。布德科认为在充分湿润条件下的陆面蒸发量,可以用确定水面蒸发量同样的方法来计算,即湿润表面的蒸发量和饱和差成比例,饱和差是根据蒸发面的湿度来确定的。这个公式可表示为

$$E_0 = \rho D (q_s - q) \quad (5)$$

式中 E_0 ——可能蒸发量; ρ ——空气密度; D ——外扩散的积分系数; q_s ——蒸发表面温度下的空气饱和比湿; q ——空气比湿。

在足够湿润情况下,蒸发表面的温度由热量平衡方程得出。

利用上述模式,布德科计算过年、月的可能蒸发量,做出了地球陆面年和各月的可能蒸发图。在后来的计算中,由于饱和水汽压和温度的非线性关系,加了一个订正值,以提高用月平均温度和湿度得出饱和差值的精度。我国利用上述方法在中国物理气候图集^[17]中计算了可能蒸发量。

4. 彭曼模式的综合法及其改进

彭曼利用热量平衡和物质传输公式综合推导得出可能蒸发的公式^[19]。它可写成:

$$E_0 = \frac{\Delta R + r E_a}{\Delta + r} \quad (6)$$

式中 Δ ——当温度为空气温度(T_a)时饱和水汽压曲线的斜率; E_a ——表面温度为 T_a 时用物质传输法计算得出的蒸发量,其它符号同前。

彭曼利用这个模式来计算开阔的水面蒸发量。为得出陆面的可能蒸散,他是利用从水面蒸发到可能蒸散的转换系数 f 来得到。

根据彭曼的试验结果,英国南部 11~12 月的转换系数 f 为 0.6;5~8 月为 0.8;其它月份为 0.7。后来,彭曼认为可以直接而不用转换系数来得到可能蒸散量^[20]。

在没有辐射平衡 R 的测定结果时,可用计算方法得出。彭曼给出了 R 和 E_a 的计算式。

利用彭曼模式来计算可能蒸发和可能蒸散时,只需要空气温度、湿度、日照时数和风速四个气象要素,而这些要素都是常规观测中能得到的;彭曼模式有较完整的物理基础,其计算结果较接近实测值。所以,近 30 多年来,彭曼模式在世界很多国家中得到了广泛的应用。在 WMO 的几种水面蒸发器的比较中,把彭曼模式的计算结果做为一种标准来进行检验^[3]。

人们在利用彭曼模式进行可能蒸发、蒸散的计算中,做了大量的工作,如把式中的 R 和 E_a 得出适合本地区的经验计算公式;为简化计算手续,已做成了图表用来查算,或编好程序,用微处理机进行计算等,以便得到较好的结果。

彭曼模式用来计算可能蒸发的结果,正象可能蒸散的定义一样,它是广阔地段上 8—15 厘米高生长旺盛、并完全覆盖地面的短草在有充分水分供给时的蒸散量。因此彭曼模式在一些较湿润的地区可得到较好的结果,但对于半干旱、半湿润地区或干旱地区,由于水分不足,地表面常常呈现干旱状况,故其实际蒸散量比可能蒸散量要小得多;当地段上不是短草,而是各种农作物(如小麦、棉花等),它们对实际蒸散量也都有显著的影响。试验证明处于主要发育期的水稻,其实际蒸散量可以比可能蒸散量大得多。为了得出不充分湿润的不同农作物地段的实际蒸散^{[8],[21]},给出了在利用彭曼模式计算可能蒸散的基础上,进一步计算实际蒸散的一系列方法。

在对彭曼模式的改进中,蒙蒂思把阻力项引入彭曼模式^[14]。在水分不是充分供给

条件的表面的蒸发量可表示为:

$$HE = - \frac{\Delta R + \rho_a c_p (e_{sa} - e_a) / r_a}{\Delta + r(r_a + r_c) / r_a} \quad (7)$$

式中 ρ_a ——空气密度; r_a ——空气阻力; r_c ——表面阻力; e_{sa} 、 e_a ——空气的饱和水汽压和空气的水汽压。

这个模式已用来计算作物和森林的蒸散量。由于模式中所需的 r_a 和 r_c 不易得到,所以它还仅限于科研方面使用。

四、当前蒸发、蒸散测定和计算方法的发展趋势

如前所述,近三、四十年来,蒸发、蒸散的试验研究在气象、水文、农业等方面专家的努力下,已做了很多工作,并研制出各种测定仪器和计算方法,其中有的已在国民经济有关部门中得到了比较广泛的运用,取得了较好的效果。

作为气象要素,蒸发和蒸散确定方法的一个特点是它沿着两个途径——测定和计算不断地进行探索和发展。一方面改进测定方法,研制新型的蒸发器和蒸散器,使测定结果有更高的代表性和准确性;另一方面是改进和探索新的计算方法,得到更准确的结果。这两个方面各有所长,相互补充,使蒸发、蒸散资料更好地满足国民经济各部门的需要。

蒸发观测已普遍地在水文、气象站网中进行了多年,经过不断改进,已积累了较多的资料。为解决各种类型蒸发器的标准化问题,WMO 进行了国际比较,推荐了标准仪器和适合台站使用的蒸发器。在完成这项比较后一些专家认为:推荐的标准蒸发器和台站用的蒸发器,在当前阶段已基本能满足业务和科研的需要,可得出较好的结果。希望会员国采用推荐的仪器,统一型号和实现标准化,以利于蒸发测定方法和仪器的国际交流和资料交换。另一些专家考虑到当前蒸发和蒸散测定方法和仪器存在的问题较多,认为仍需要继续大力开展科学研究来得到改进。

蒸散器的问题比较复杂些。为了使其测定结果更有代表性,需要截取尽可能大一些的土柱,这就给测定带来较大的困难,如国内一些单位使用的水力式蒸散器,其土柱表面积为 0.20 平方米,上面种植一些作物,则感到土柱的表面积和深度都有些不够,如把土柱的表面积扩大,深度加深一些,则可能取得更好的效果。这也是蒸散器近年来的发展趋势。

蒸发和蒸散的计算方法和模式众多,要求的参数不同,模式的复杂程度也有差异。随着国民经济各部门对蒸发、蒸散资料要求的不断提高,蒸发、蒸散的计算方法有向着含有多种参数的综合法发展的趋势。就目前情况来说,大多数学者认为彭曼模式是现有较好的计算可能蒸发(散)的方法,因而得到了越来越广泛的使用。国内不少人对彭曼模式做了一些改进和探索,这对今后蒸发、蒸散的计算工作是有益的。

无论是蒸发、蒸散的测定,还是计算模式都在引进和采用如自动遥测和计算机等新技术,这也是当前发展中的一个特点,也是今后的趋势。在蒸发、蒸散测定中,采用遥测技术后,可大大节省人力和提高工作质量。本文介绍了几种遥测蒸发、蒸散的装置,预计今后几年内将会有更大的发展。在蒸发、蒸散的计算方法中,采用了计算技术后,已编制了模式的程序,使计算工作较为复杂的综合法大大地简化了,新的计算技术为采用复杂的计算模式创造了条件,因而它将促进各种模式的进一步发展。

和国外先进水平比,我国的蒸发、蒸散测定技术还有相当大的差距,可以说还是比较落后的,同时,它也不能满足我国国民经济发展的需要。例如:象我们这样一个大国竟还没有一台精度高和技术先进的大型标准蒸散

器;我国几千个气象台站积累了多年的蒸发资料,但由于缺少比较准确的折算系数因而不能充分发挥作用等,这些问题不能不引起有关领导和专家们的重视,今后迫切需要加强这方面的科研和业务工作,使它能在不久的将来赶上或超过世界先进水平。

参 考 文 献

- [1] O. G. 萨顿著,微气象学,徐尔源等译,高等教育出版社,1959。
- [2] WMO, No. 83.
- [3] WMO, No. 449.
- [4] Chang Jen-hu, Climate and agriculture, Admi Publishing Company, 1968.
- [5] WMO, No. 285.
- [6] 中央气象局编,地面气象观测规范,气象出版社,1979。
- [7] 林家栋、鹿洁中,蒸发测定和计算方法在我国的研究概况(油印本),1982。
- [8] 市来福译编,作物产量对水分反应(油印本),1981。
- [9] T. Raman Rao and K. Subba Rao, The characteristic of F. G. P. evaporation pan, Indian J. Met Hydrol: Geophys. (1978) 29. No. 4.
- [10] B. H. Кедрованский, М. С. Стернзат, Метеорологические приборы Гидрометиздат, 1953.
- [11] 信乃谄,土壤蒸发观测的方法的研究,土壤学报,1962年10卷第4期。
- [12] 赵家义、程维新,水力蒸发器的原理、安装及其应用,禹城实验站技术报告第1号,中国科学院地理研究所,1983.5。
- [13] T. A. Howell, R. L. McCormick, C. J. Phene, Design and installation of large weighing lysimeters, 1983.
- [14] I. D. Teare and M. M. Peet. Crop-water relations, A Wiley-interscience Publication, 1983.
- [15] J. R. Mather, Climatology: Fundamentals and applications. McGraw-hill book comp, 1974.
- [16] M. И. 布德科主编,地球热量平衡,沈钟译,气象出版社,1980。
- [17] 高国栋等,中国物理气候图集,农业出版社,1981。
- [18] H. L. Penman, Nature evaporation from open water, bare soil and grass, Proc. of Roy. Soc. of London. A. 193. 1948.
- [19] H. L. Penman, Vegetation and Hydrology, 1953.
- [20] 陶祖文、裴步祥,农田蒸散和土壤水分变化的计算方法,气象学报, Vol. 37, No. 4, 1979。