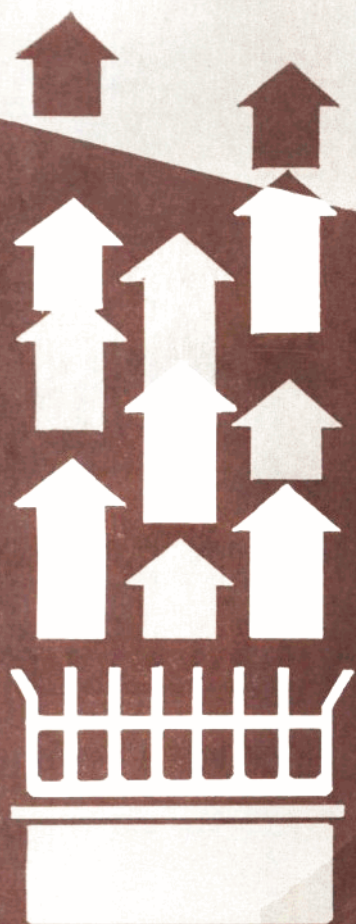


蒸发和蒸散的 测定 与计算



裴步祥

气象出版社

蒸发和蒸散的测定与计算

裴步祥 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书是在国内多年试验结果的基础上,结合国外最新研究成果来写的。

全书系统地介绍了蒸发、蒸散和土壤水分的测定与计算方法。内容包括基础理论,仪器的原理及使用,公式计算法,简明查表法,适用于 PC-1500 的程序计算法,应用举例等。该书反映了我国多年来的研究成果,既有一定的深度,又便于实际应用,对科研、数学、业务和服务性工作都有指导作用。可供从事农业气象、水文、地理、农业方面的人员及气象台站开展业务服务的人员阅读。

蒸发和蒸散的测定与计算

刘少洋 编著

责任编辑 黄健

气象出版社 出版

(北京西郊白石桥路46号)

常熟文化印刷厂排版 顺义兴华印刷厂印刷

气象出版社发行 全国各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32 印张: 7.875 字数: 200 千字

1989年5月第一版

1989年5月第一次印刷

印数: 1—1500

定价: 3.40 元

ISBN 7-5029-0218-X/P·0133

前 言

1962年,在程纯枢总工程师的热情支持和指导下,由陶祖文副研究员主持,我们开始了蒸发、蒸散的测定与计算方法的研究工作。经过一年多的努力,我们对这个课题进行了初步的有益探索,取得了一些有价值的资料。

70年代末,为了配合气象部门开展农业气候区划工作和气象台站开展土壤水分情报、预报工作,正式确定了“农田蒸散和土壤水分的计算方法”的课题,由中央气象局业务管理司农业气象处负责组织工作。1980—1982年,在锦州市气象科学研究所、山东泰安农业气象试验站、山西万荣气象站等单位的共同协作下,我们进行了广泛的试验研究,进一步完善了蒸发、蒸散的计算方法,并检验了计算结果的精确性,同时将上述计算方法在土壤水分情报、预报等工作中进行试用,取得了较好的结果。本书就是以这些试验资料为基础编写的。

本书在编写中还利用了目前仍在进行的“土壤水分胁迫和干旱”课题的试验资料。它是由国家气象局气象科学研究所,河南省郑州和山东泰安两个农业气象试验站协作进行的。此外,本书还利用了在广州和营盘(辽宁)蒸发实验站进行的几种水面蒸发量对比试验的结果。在此,对参加上述试验的单位和同志们表示衷心的感谢。

许多专家和同志们对本书初稿提出了宝贵意见。陆振和同志对第二章中有关辐射仪器的部分提供了宝贵资料,并审阅了那部分初稿;王筱棠同志对本书第十章提出了宝贵意见;第八章中有关可能蒸发和实际蒸散的计算程序是由邹耀芳、毛飞和殷建国同志编制的。邹耀芳同志还修改和充实了第八章的初稿,其余章节她也提出了部分修改意见。此外,王学文、王春乙等同志审阅了部分

AAH15-105

书，提出了宝贵意见。作者对在编写中给予帮助的同志表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中难免出现缺点和错误，敬希读者批评指正。

作者
一九八七年

绪 论

水分从液态变为气态的过程称为蒸发。水从海洋、江河、湖泊、土壤表面蒸发或植物表面蒸腾成为水汽，而后随气流输送到各处。据计算，全年内整个地球上蒸发和蒸腾的水量约为 5×10^{14} 吨。因此，蒸发是地-气体系内水分循环的重要组成部分。

蒸发是水分平衡、热量平衡的主要项，同时，蒸发过程的机制，又联系到空气近地面层乱流交换的特征及规律，因而，对蒸发进行研究有着重要的学术意义。对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的其它学科，如陆地水文学、海洋学等有密切关系。因此，很多学科都对蒸发问题进行了研究，并取得了显著的进展。

虽然在一般的蒸发概念中包括水面、陆面蒸发和植物蒸腾，并把植被地段的蒸发和蒸腾统称为蒸散，但实际上植物蒸腾与水面、陆面蒸发有较大的差别，它是比水面、陆面蒸发更复杂的过程。植物蒸腾是靠植物叶片上的气孔来实现作物-大气间的水分交换的，同时把空气中的 CO_2 吸进植物体内，通过光合作用制造碳水化合物，是植物生长和生命的基础。

植物蒸腾的水分是从土壤吸收到植物体内，传输到叶片后，又从叶面扩散到大气中去，因而它是涉及“土壤-植物-大气”系统的过程。植物蒸腾不仅与气象条件有关，还与土壤性质、含水量，以及植物本身密切相关。所以，植物蒸腾不仅是微气象学，也是植物生理学、生态学和土壤学等学科共同探讨研究的课题。

为揭示植物蒸腾的内在规律性，目前进行了大量的试验研究工作，已经从过去单纯了解近地面气象环境逐步转移到以“土壤-植物-大气”系统为对象的植被气象环境——群落微气象环境。为了深刻了解植被与大气的相互关系，不能把植被看成是近地面

层的一个简单的水平面，而是必须考虑热量、物质和动量在植被群丛中的分布，进而研究它们的分配过程。此外，植被蒸腾还受它内在的生理因子的支配，与土壤供给的水分量也密切相关。因此，只有对“土壤-植物-大气”系统进行全面的分析研究，才能对植物蒸腾有正确的理解，研制出植物蒸腾的较好模拟模式。

为了全面表达蒸发和蒸散这样一个复杂的过程，我们对“土壤-植物-大气”系统中的各个部分分别建立模式，进行计算和得出结果。本书第5—7章从可能蒸发到实际蒸散的计算就是在这个指导思想下完成的。第5章给出的可能蒸发的计算方法和公式，是应用了我国的有关试验结果，对彭曼 (Penman) 的综合法进行修正而得到的；第6章在分析研究土壤性质和水分的基础上，得出了在土壤湿润不足情况下蒸发量的计算方法和公式；第7章在考虑和估算了作物种类、发育期的影响后，通过蒸散系数，一般也称为作物系数来得到作物地段的实际蒸散量。第8章则为了简化计算工作给出了蒸发和蒸散的查算方法和程序计算方法。从而得出一套表征“土壤-植物-大气”系统的蒸发和蒸散的计算方法。为计算可能蒸发、实际蒸散和解决“土壤-植物-大气”系统中的水分交换问题提供了便利条件。

蒸发、蒸散和土壤水分的测定方法和仪器，尤其是台站用的土壤湿度仪器，目前还存在很多问题，而且据许多专家分析认为，要解决台站用土壤湿度测定方法和仪器问题，还需要长时期的研究。但是目前国外蒸发、蒸散和土壤水分的计算方法却得到了广泛的应用。在英、美等一些发达国家，利用现代技术和电子工程，以及组成的通讯网络，迅速而有效地把蒸发、蒸散和土壤水分的计算结果提供给用户，农民可及时得到灌溉量及灌溉日期等信息。这充分说明目前的现代科学技术，能够使蒸发、蒸散和土壤水分的计算方法成为现实的业务手段。

水分问题是世界上干旱和半干旱地区和国家，特别是非洲国家面临的一个严重问题。由于水分不足，造成土地沙漠化，农业

严重减产,人民生活非常困难。世界粮农组织等正在采取措施,克服干旱带来的不利影响,使生产得到恢复和发展,改善人民的生活条件。

在我国,由于水土资源的组合很不平衡。虽然水资源总量不少,但水资源从沿海到内地,从南方到北方,以及随时间的分布,其差别都十分悬殊。南方降水量较多。但年内各月分布不均匀,所以有时仍出现季节性干旱;北方土地多,降水量较少,一些水库中的储水量和地下水位逐年下降,工业和农业用水比较紧张,每年有大量农田得不到充分灌溉或无水灌溉,影响了国民经济的发展。

我们研究蒸发、蒸散的计算方法的目的,是为广大气象台站提供土壤水分业务和服务工作的方法,所以在多年试验中,我们把蒸发、蒸散的计算方法,土壤水分的情报和预报,作物产量的计算和预报等工作联系起来进行试用,在第9—11章中给出了结果。这些试验虽然仅是初步的,我们的工作也仅在华北平原地区的一些气象台站做过试用研究,但其结果说明这些方法是有前途的,所以迫切希望经过台站同志广泛试用,不断修改补充,使它成为完善的土壤水分情报,预报方法,使气象台站的蒸发、蒸散和土壤水分业务和服务工作能得到提高。

目 录

绪论

第一章 蒸发和蒸散的测定方法和仪器 (1)

§ 1.1 水面蒸发器 (1)

§ 1.2 蒸散器 (17)

§ 1.3 自动遥测的蒸发、蒸散测定装置 (22)

参考文献 (27)

第二章 辐射和辐射平衡 (29)

§ 2.1 大气中的辐射能 (29)

§ 2.2 辐射测定仪器 (33)

§ 2.3 辐射计算方法 (39)

参考文献 (43)

第三章 热量平衡 (44)

§ 3.1 热量平衡公式 (44)

§ 3.2 土壤热通量 (46)

§ 3.3 乱流热通量 (50)

§ 3.4 蒸发耗热 (53)

参考文献 (63)

第四章 土壤湿度和农田水分平衡 (65)

§ 4.1 土壤湿度的表示方法及其观测 (65)

§ 4.2 土壤湿度的测定方法和仪器 (68)

§ 4.3 土壤水分常数 (75)

§ 4.4 农田水分平衡 (78)

参考文献 (80)

第五章 可能蒸发的计算方法	(82)
§ 5.1 关于可能蒸发的定义	(82)
§ 5.2 计算可能蒸发的彭曼公式	(84)
§ 5.3 对计算可能蒸发的彭曼公式的试验研究	(87)
§ 5.4 可能蒸发计算公式的误差分析和实际检验	(91)
§ 5.5 几种可能蒸发计算公式的比较	(94)
参考文献	(97)
第六章 在土壤湿润不足情况下蒸发的计算方法	(99)
§ 6.1 在土壤湿润不足情况下蒸发的计算方法	(99)
§ 6.2 关于临界含水量的确定	(103)
§ 6.3 在土壤湿润不足情况下蒸发量的计算误差及其检验	(110)
参考文献	(113)
第七章 作物地段实际蒸散的计算方法	(114)
§ 7.1 关于蒸散系数	(114)
§ 7.2 稻、麦、棉、玉米各发育期的蒸散系数	(115)
§ 7.3 关于蒸散系数的讨论	(120)
§ 7.4 蒸散系数和蒸散计算方法的实例检验 (稻、麦、棉需水量)	(125)
参考文献	(129)
第八章 可能蒸发和实际蒸散的查算及程序计算方法	(130)
§ 8.1 查算方法	(130)
§ 8.2 程序计算方法	(134)
参考文献	(145)
第九章 蒸发和蒸散的计算结果在土壤水分计算和情报中的应用	(146)
§ 9.1 土壤水分情报是农业气象情报的重要内容	(146)
§ 9.2 土壤水分的计算方法	(147)
§ 9.3 我国北方平原地区旱季降水渗透深度和“透雨”的农业气象估算方法	(156)

参考文献	(165)
第十章 蒸发和蒸散的计算结果在计算作物产量和产量预报中的应用	(166)
§ 10.1 作物产量预报是农业气象预报的重要组成部分	(166)
§ 10.2 土壤水分与作物生长和产量的关系	(169)
§ 10.3 计算作物产量的模式	(173)
§ 10.4 作物最高产量的计算	(175)
§ 10.5 计算作物实际产量和产量预报	(178)
参考文献	(183)
第十一章 蒸发和蒸散的计算结果在干旱、土壤水分预报和农田灌溉中的应用	(184)
§ 11.1 干旱——严重影响农业生产的自然灾害	(184)
§ 11.2 干旱指标	(187)
§ 11.3 旬土壤水分的预报方法	(194)
§ 11.4 较长时段干旱的预报方法	(198)
§ 11.5 农田灌溉	(199)
参考文献	(204)
符号表	(205)
附表 1—10	(205)

第一章 蒸发和蒸散的 测定方法和仪器

虽然用计算方法可得出蒸发和蒸散的结果,但使用各种蒸发器和蒸散器仍然是取得蒸发和蒸散资料的重要手段。本章将给出各种蒸发和蒸散的测定仪器,以及它们间相互比较的结果,并介绍采用新技术研制成的自动遥测蒸发、蒸散测定装置。

§ 1.1 水面蒸发器

在水文气象站网中,较普遍地进行水面蒸发的观测,而且已有较久的历史。但在水面蒸发的测定仪器和方法方面,还存在着一一些问题。萨顿 (Sutton)^[1] 曾提出用蒸发皿和蒸发表来观测蒸发量,对气象学是否有用的问题,这说明蒸发的观测仪器和方法还有许多问题需要研究解决。

1. 蒸发表

蒸发表是最早被采用的一种蒸发观测仪器,有些国家一直延续使用到现在。蒸发表是一种测定湿润多孔表面水分损失量的仪器。湿润表面可以是多孔的陶瓷球,或者充满水的裸露滤纸盘。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。常用的这种仪器有皮切 (Piche) 和利文斯顿 (Livingston) 蒸发表。在气象站网使用时一般是把蒸发表安装在百叶箱中,按规定的时间和方法进行观测。

蒸发表的优点是结构简单,成本低,便于观测,但它的观测结果不能真正代表自然界的蒸发,只能近似地得出可能蒸发量。

2. 蒸发器及其国际比较

除上述蒸发表外,不同的国家和地区还使用着各种型号的蒸发器。由于材料、尺寸、颜色及安装方法的不同,其性能也有差异。为此,世界气象组织仪器和观测方法委员会对其中三种使用较普遍的蒸发器进行了比较^[2]。

1) 美国A级蒸发器

它是一个直径为121厘米、深25.5厘米的圆柱状容器,安放在高出地面的木支架上。蒸发器用马口铁或蒙乃尔高强度耐腐蚀合金制成。蒸发器内的水面高度距蒸发器口缘5厘米(见图1.1)。

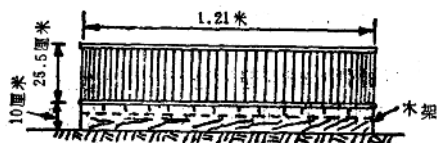


图 1.1 美国A级蒸发器

蒸发器中的水面高度有两种测定方法。一种是用钩形水位尺,另一种是用固定接点水尺。钩形水位尺由一个可移动的标尺和游标组成。在蒸发器中有水位观测井,它的直径为10厘米,深30厘米,底部有孔,使井内和蒸发器内的水面高度相同。固定接点水尺由一个固定在水位观测井中的有刻度的铜标尺构成,其上缘比蒸发器口缘低6—7厘米,在每次观测时用量杯加水或减水,使水面到固定接点后测定。

除测定水面高度的装置外,蒸发器中还装有测定水面温度的温度表,有的还安放最高或最低温度表。温度表通常放在一个水平漂浮架上,温度表的球部与水面接触,并没有防太阳辐射对温度表球部影响的装置。

日本在使用A级蒸发器时,用蒸发器内的水面温度资料对测定的蒸发量进行订正。订正的方法如下:

在不考虑蒸发器和水位测定器膨胀的情况下,设 4°C 时水的密度为1,则温度为 $T^{\circ}\text{C}$ 时水的体积为 $1 + \Delta V_T$ 。当水的深度为 Z 、水温为 $T^{\circ}\text{C}$ 时,温度订正值 C_T 为:

$$C_T = Z \cdot \Delta V_T \quad (1.1)$$

对于不同水深和水温的订正值编有查算表^[3]。

美国A级蒸发器在较多的国家使用,世界气象组织和国际水文科学协会曾把它作为国际地球物理年的标准仪器。利用A级蒸发器所得到的蒸发资料,不仅广泛应用于水文和气象,而且还应用于农业,如农田水分平衡的计算中。

2) 苏联 ГГИ-3000 蒸发器^[4]

ГГИ-3000 蒸发器是一个具有锥形底的圆柱形蒸发器。圆柱体的直径为61.8厘米,高60厘米,中心深度为68.5厘米,蒸发表面为3000平方厘米(见图1.2)。蒸发器埋入地下,其口缘高出地面7.5厘米。蒸发器中央有一个有刻度的金属管,在金属管上方安装着量管,量管有一个阀门。打开阀门时便可使其水面及蒸发器内水面的高度相同,然后把阀门关上,量出管内水面的高度。金属管上还装有指针,指示蒸发器内的水面高度。蒸发器内的水面应调到指针指示的高度,最低不低于针尖下5毫米,最高不得高于针尖上10毫米。

在 ГГИ-3000 蒸发器附近通常还装有 ГГИ-3000 雨量器。

3) 苏联 20 平方米蒸发池

蒸发表面为20平方米的圆柱形平底蒸发池,深2米,用4—5毫米厚的锅炉钢板制成(见图1.3)。蒸发池安装在土壤中,池缘高出地面7.5厘米。蒸发池内部和露出的外部表面涂白。仪器有测定装置,用来测定水面蒸发量。池内静止井中有一水位指示针,水面应调到针尖的高度,不低于针尖下5毫米,不高于针尖上10毫米。

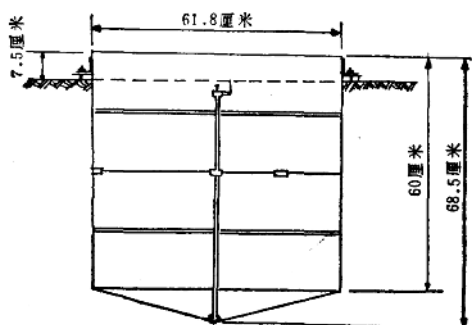


图 1.2 苏联 ГГИ-3000 蒸发器

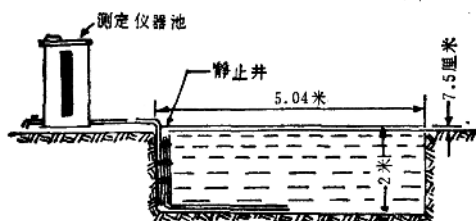


图 1.3 20 平方米蒸发池

4) 三种蒸发器的国际比较

对前述三种蒸发器的对比试验工作是由世界气象组织仪器和观测方法委员会主持进行的。它组织了一些会员国于 1964 年开始工作。参加对比试验的国家除对上述三种蒸发器的蒸发量定时观

测外,还观测了降水量、水面温度,风速,总辐射和空气温度等。从得到的资料中挑选了13个站484个月满足试验要求的资料,分析后得出了结果。

由于降水对水面蒸发观测的精确性有影响,因而在统计分析中,以月降水量是否小于所计算月水面蒸发量的 $1/10$ 为标准,将全部蒸发资料分为多雨和少雨(包括无雨)两类进行分析。比较中除以20平方米蒸发池为标准外,还以由彭曼公式得出的水面蒸发计算结果为标准进行了比较。

统计关系的计算包括:ГГН-3000和A级蒸发器对20平方米蒸发池观测值的线性回归方程,用回归方程得出水面蒸发量计算值的标准误差(以计算值的平均值的百分数来表示)和相关系数。在文献[2]中给出了计算结果和比较结论。

利用ГГН-3000、A级蒸发器与20平方米蒸发池观测值的回归方程式,根据ГГН-3000或A级蒸发器水面蒸发量的观测值,在无20平方米蒸发池的情况下,可得出20平方米蒸发池蒸发量的计算值。这个计算值比较准确,但也存在误差。根据用参加比较的13个站的资料得出的结果,以A级蒸发器月蒸发量观测值来计算20平方米蒸发池的月蒸发量,少雨和多雨情况时的相对标准误差分别为10%和17%;以ГГН-3000蒸发器月蒸发量的观测值来计算,则其相应的相对标准误差分别为12%和13%。文献[2]还给出了以彭曼公式计算的水面蒸发量为标准时上述两种站网蒸发器的相对标准误差。

根据试验结果,世界气象组织仪器和观测方法委员会提出以20平方米蒸发池作为水面蒸发的临时国际标准,推荐ГГН-3000和A级蒸发器为站网用蒸发器。世界气象组织已通过了这个建议。

根据上面所述,20平方米蒸发池是目前已有的蒸发器中性能最好的蒸发器,可用它来得出小水域开阔水面的蒸发量。我国水文部门在不同地区设置了20平方米蒸发池,并在试验中得出了类

似的结果,即当蒸发池面积达到 20 平方米时,用它观测的年蒸发量,可以近似地代表自然水体的蒸发量。世界气象组织要求各会员国在主要气候区安装 20 平方米蒸发池,以作为标准仪器和科学研究目的使用。

由于 20 平方米蒸发池的成本较高,使用起来较复杂,因此这种标准仪器只能在少数台站使用。我国幅员辽阔,气候条件复杂,为得出不同气候区站网蒸发器的折算系数,以及进行蒸发器的试验研究,气象部门根据需要与可能,安装和使用 20 平方米蒸发池是十分必要的。

世界气象组织推荐了 ГГИ-3000 和 A 级两种站网蒸发器,也给出了这两种蒸发器的比较结果。但它们之中哪一种蒸发器性能更好些,在详细分析比较了试验资料后未能得出结果。这是因为比较试验虽然在美国、苏联、保加利亚、印度等国进行了多年,但比较观测资料序列仍是不够的,因而分析结果是不完全的,同时对观测到的两种蒸发器间的差别,以及它们之间关系的原因,也还不能进行完整的分析和给出准确的结果。

利用站网蒸发器的观测值推算出相应条件下标准蒸发器的蒸发量有各种方法,其中最简单的方法是折算系数法,即利用站网蒸发器与标准蒸发器的比较试验资料,计算得出站网蒸发器的折算系数,然后将每个站网蒸发器的观测值乘以折算系数得出相应条件下标准蒸发器的蒸发量。世界气象组织利用多年比较试验资料,得出两种站网蒸发器的全球折算系数如下: A 级蒸发器为 0.70, ГГИ-3000 为 0.90。由于各种蒸发器的折算系数是随气候条件而变化的,故各个国家和地区应该通过比较试验,得出适用于本国和地区的蒸发器的折算系数,以便得到较高质量的水面蒸发结果。

虽然 1973 年世界气象组织向各会员国推荐了标准蒸发器和站网蒸发器,但它认为仍应大力开展新型蒸发器的研制工作。新型蒸发器的折算系数应具有较小的时间、空间变化,即有较好的物理性能,以得到更好的蒸发观测结果。当时美国已开始研制的绝热