

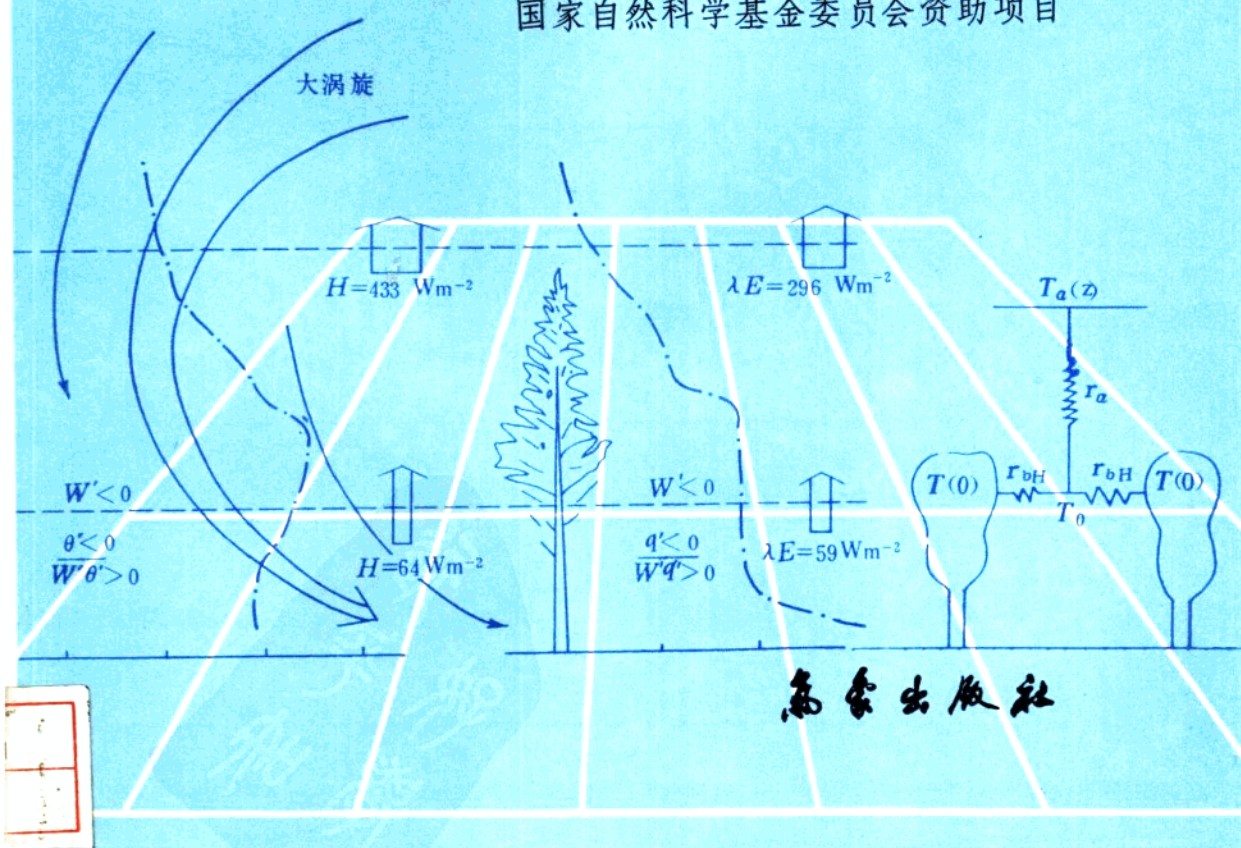
农田蒸发

—测定与计算

中国科学院禹城综合试验站

谢贤群 左大康 唐登银 主编

国家自然科学基金委员会资助项目



国家自然科学基金委员会资助项目
中国科学院禹城综合试验站

农田蒸发

——测定与计算

气象出版社

内 容 简 介

本书是中国科学院禹城综合试验站承担国家自然科学基金资助项目：“农田蒸发测定方法和蒸发规律研究”的研究成果之一。主要包括五方面：1. 对国内外现有蒸发测算方法的特点、精度和存在的困难与问题进行了介绍和综合评述。2. 介绍了禹城综合试验站的农田蒸发联合试验，比较和评述了微气象学方法、水量平衡法和遥感方法等的测算结果。3. 根据 20m^2 蒸发池的观测资料与气象要素特征值之间的关系建立了京津唐地区的水面蒸发计算模式以及有限水域表面蒸发的计算公式。4. 蒸发的实验遥感研究。5. 介绍中国科学院禹城综合试验站自行设计和安装的新型蒸渗仪的结构特点、工作原理和可扩展的主要功能。

本书可供水文学、气象学、生态学、农学以及地理学等方面的科技人员及大专院校师生参考。

农田蒸发 ——测定与计算

谢贤群 左大康 唐登银 主编

责任编辑 潘根娣

高等教育出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷

新华书店北京科技发行所发行 全国各地新华书店经销

787×1092 16开本 15.5印张 393千字

1991年7月第一版 1991年7月第一次印刷

印数：1—1000 定价：11.00元

ISBN 7—5029—0506—5/P·0285

前 言

中国科学院禹城综合试验站自1979年建站以来,就确定了站的主要研究方向是农田生态系统中的水分平衡与水分循环。考虑到蒸发既是农田水分平衡中的重要组成部分,又是水分循环中的重要环节。它与水资源的合理利用以及水资源的管理都有着密切的关系。因此,在国家自然科学基金委员会的支持下,中国科学院禹城综合试验站从1986年到1989年,连续进行了不同作物的农田蒸发实验研究,取得了大量的观测数据,比较了农田蒸发的各类测定方法,探讨了农田蒸发规律和建立了一些计算模式。出版了《农田水分与能量试验研究》以及《农田蒸发研究》文集,本文集是上述两本文集的继续。和前述两本文集不同之处是,本文集收录的28篇论文,是在各类学术刊物上发表过的文章,其目的是便于读者集中审阅我们的成果。

本文集包括五方面内容。一是对国内外现有蒸发测算方法的特点、精度和存在的困难与问题进行了介绍和综合评述。指出了梯度扩散理论的问题和局限性,认为只有当湍流涡旋尺度远小于梯度变化的空间尺度时,梯度扩散理论才能正确使用,并建议根据不同时间尺度和空间尺度的要求选取不同的蒸发测算方法。此外,还指出了蒸发研究工作今后需要努力解决的前沿问题:例如,非均匀植被群体的蒸发,平流作用对蒸发的影响,利用遥感技术测定和计算任意时空范围内的蒸发量等。二是介绍了禹城综合试验站的农田蒸发联合试验,比较和评述了微气象学方法、水量平衡法和遥感方法等的测算结果。提出了改进的空气动力学阻抗和能量平衡联立法的改进模式。指出了应用土壤水分零通量面法估算蒸发量存在的问题和今后研究的主要方向。三是根据 20m^2 蒸发池的观测资料与气象要素特征值之间的关系建立了京津唐地区的水面蒸发计算模式以及可供实际应用的有限水域表面蒸发的计算公式。此外,还建立了不同浓度卤水的蒸发模式,计算了我国北方四个海盐产区的卤水蒸发。由于农田蒸发直接测量的困难,还提出了一个考虑能量因子和土壤水分条件的蒸发计算模式。四是在蒸发的实验遥感研究方面,建立了植物剩余阻抗的蒸发计算模式,解决了国外普遍采用的Rosenberg Brown公式中系统偏高的问题。在利用遥感技术研究土壤水分方面,提出了一个考虑地表显热通量和潜热通量的热惯量模式。由于该模式采用了地面定标和热图象的空间分布信息,因而提高了估算土壤含水量的精度。五是介绍了中国科学院禹城综合试验站自行设计和安装的新型蒸渗仪的结构特点、工作原理和可扩展的主要功能。它是在地下水埋藏较浅情况下测量农田蒸发和水分渗入的多功能设备。

我们的农田蒸发研究刚起步不久,困难和问题不少,敬祈读者多予赐教。

编 者

目 录

前言

一、农田蒸发研究进展综述

我国蒸发研究的概况与展望	唐登银 程维新 洪嘉琰	(1)
国外蒸发研究的进展	左大康 覃文汉	(14)
蒸发测定方法	陈发祖	(22)
测定农田蒸发和显热通量的微气象技术	谢贤群	(32)
梯度扩散理论在能量和物质输送计算中的若干问题	陈发祖	(46)
植物与大气间的湍流交换——新方法介绍研究状况综述	陈镜明	(54)

二、农田蒸发测量装置

原状土自动称重蒸发渗漏器	唐登银 杨立福 程维新	(67)
新型蒸渗仪的结构、功能和工作原理	李宝庆 周延辉 赵家义	(75)
土壤水势的遥测装置	逢春浩 陈秀琴	(85)

三、农田蒸发测定试验

测定农田蒸发的试验研究	谢贤群	(90)
一个改进的计算麦田总蒸发量的能量平衡-空气动力学阻抗模式	谢贤群	(98)
土壤水分零通量面的确定和土壤蒸发量的推算	逢春浩	(104)
零通量面方法的应用研究	李宝庆 刘昌明 杨克定	(109)
用实测土壤水势值推求土壤蒸发量	李宝庆 杨克定 张道帅	(119)
非均匀下垫面气象场结构的研究及其应用	覃文汉	(126)

四、农田蒸发计算及分析及应用模式

农田蒸散量计算	刘昌明 洪嘉琰 金 淮	(134)
裸地发蒸过程的数值模拟	杨邦杰 曾德超 唐登银 谢贤群	(143)
有限水域表面蒸发的计算	洪嘉琰	(154)
一种以能量平衡为基础的干旱指数	唐登银	(161)
华北平原水面蒸发的计算与分布	洪嘉琰 陈德亮	(171)
京津唐地区水面蒸发估算及其分布特征	洪嘉琰 王淑清	(182)
作物生物学特性对耗水量的影响	程维新	(190)
我国北方四大海盐区卤水蒸发计算及其分布	洪嘉琰 卢瑞芝	(197)

五、农田蒸发测定的遥感技术及应用模式

现用遥感蒸散模式中的一个重要缺点及改进	陈镜明	(206)
遥感方法和蒸散计方法估算农田蒸散量的比较	陈镜明 唐登银	(211)
改进的热惯量模式及遥感土壤水分	张仁华	(215)
作物覆盖下土壤含水量的热红外遥感方法及试验	张仁华	(226)
一种热红外扫描图像的地面温度定标方法	张仁华 覃文汉	(232)

EVAPOTRANSPIRATION OF THE FIELD —MEASUREMENT AND CALCULATION

CONTENTS

Preface

1. Review of the evapotranspiration study

A review: Evaporation study in China.....	
.....Tang Dengyin, Cheng Weixin, Hong Jialian (1)	
A review of evaporation study in the world.....	Zuo Dakang, Qin Wenhan (14)
On methods for determining evapotranspiration.....	Chen Fazu (22)
Micrometeorological techniques for determining evapotranspiration and sensible heat flux in the field	Xie Xianqun (32)
Problems of the gradient-diffusion theory in its application to the deter- mination of mass and energy fluxes.....	Chen Fazu (46)
Turbulent exchange between plants and the atmosphere—An introduction to new methods and a summary of the current research situations...	
.....	Chen Jingming (54)

2. Equipment for measuring evapotranspiration

Large weighing lysimeter for measuring evapotranspiration.....	
.....Tana Dengyin, Yang Lifu, Cheng Weixin (67)	
The structure, functions and working principle of the new type lysimeter	Li Baoqing, Zhou Yanhui, Zhao Jiayi (75)
Telemetering equipment on soil moisture potential	
.....	Pang Chunhao, Chen Xiuqin (85)

3. Experiment study for determining evapotranspiration

Experimental study for determining evapotranspiration of the field.....	
.....	Xie Xianqun (90)
An improved energy balance-aerodynamic resistance model used estimation of evapotranspiration on the wheat field.....	Xie Xianqun (98)
Determination of the zero-flux plane and computation of evapotranspiration from field.....	Pang Chunhao(104)
An application study on the zero flux plane method	
.....	Li Baoqing, Liu Changming, Yang Keding(109)
Using experimental value of total soil-water potential to estimate soil evaporation.....	Li Baoqing, Yang Keding, Zhang Daoshuai(119)

Structures of the atmospheric surface layer-over inhomogeneous ground surface.....Qin Wenhan(126)

4. Calculation and analysis of evapotranspiration

- Calculation of field evapotranspiration
.....Liu Changming, Hong Jialian, Jin Huai(134)
- The numerical simulation of evaporation process of the bare soil
.....Yang Banghe, Zeng Dechao, Tang Dengyin, Xie Xianqun(143)
- Calculation of water surface evaporation in limited water area.....
.....Hong Jialian(154)
- An aridity index based on energy balance.....Tang Dengyin(161)
- Estimation and distribution of water surface evaporation in the North China Plain.....Hong Jialian, Chen Deliang(171)
- Estimation and distribution characteristics of evaporation from water surfaces in Beijing, Tianjin, and Tangshan areas
..... Hong Jialian, Wang Shuqing(182)
- Effect of crop biological character on water consumption.....Chen weixin(190)
- The estimation and the distribution features of the evaporation of brine in the four big sea-salt areas in the northern China.....
..... Hong Jialian, Lu Ruizhi(197)

5. Remote sensing technique and application models for determining evapotranspiration

- A chief defect of modern remote sensing evapotranspiration model and its improvement.....Chen Jingming(206)
- Comparison of the evapotranspiration values estimated by remotely sensed model and by lysimetrically measured.....
.....Chen Jingming, Tang Dengyin, (211)
- Improved thermal inertia model and remote sensing of soil moisture.....
..... Zhang Renhua(215)
- Remote sensing of soil moisture under vegetation cover and simulation experiments in different geographical regions.....Zhang Renhua(226)
- A calibration method of ground surface temperature for thermal scanning imagery Zhang Renhua, Qin Wenhan(232)

我国蒸发研究的概况与展望*

唐登银 程维新 洪嘉璜

蒸发既是地球表面热量平衡的组成部分,又是水量平衡的组成部分,而地表热量、水分收支状况在很大程度上决定着地理环境的形成和演变,因此蒸发的研究是地理环境研究中的一个内容。蒸发与许多国民经济中的实际问题有关,那是显而易见的,水的问题已成为目前全世界所共同关注的问题之一,而几乎所有水的实际问题的解决,都离不开蒸发的研究。

蒸发是一个范围相当广泛的课题,它发生于土壤-植物-大气系统内,需要水分供给和能量来源,是一个发生在相当复杂体系内的连续过程。为此,必须对土壤水分运动、植物水分传送、蒸发面与大气间的水汽交换和热量交换等各个环节进行研究,才能对蒸发过程有全面的认识。显然这牵涉到诸如地理学、水文学、气象学、土壤学、植物学等学科,是一个难度较大的问题。

我国的蒸发研究工作始于本世纪50年代,迄今不到30年的历史,其间还有一段时间的停顿,目前这项工作又变得活跃起来,许多地方和部门根据生产实际的需要把四水(大气降水、地表水、土壤水和地下水)转换列为重要研究课题,而在四水转换中,蒸发是其中的关键性项目之一。简略回顾我国蒸发研究的过去,同时展望未来的工作,或许对于推动这项工作的开展有所裨益。

一、蒸发的测定

在水分平衡诸要素中,蒸发的测定大概是最困难的;在热量平衡各要素中,显热流和潜热流(蒸发)的精密分割是相当困难的,因此蒸发的测定方法的研究就成为蒸发研究的主要内容之一。

自然蒸发过程是发生在地气界面上的液汽转换过程,因此它的测定既可以在液相里进

表 1



* 地理研究, V01.3, No.3, 1984年。

行,即测定液态水分损耗的速率;又可以在汽相里进行,即测定大气净得水汽速率。前一类型的测定是假定或创造一个下垫面的封闭系统,进而测定该封闭系统的水分蒸发耗损,这称为液态水分消耗测量;而后一类型的测定则是假定所测地域的近地大气为一开放系统,进而测定通过乱流边界层进入开放系统的水汽流速率(蒸发),这称为水汽传送测量。为简明起见,把通常所见的上述两类测定蒸发的方法归纳为表1。

现按上列分类来谈我国的蒸发测定工作。50年代中期以来,除了水文、气象台站有20cm口径的小型水面蒸发器测定以外,没有其他方法测定的蒸发数据。50年代后半期和60年代前半期,采用了多种方法进行蒸发测定,这主要包括:

(1)水利部门所属近200个灌溉试验站结合作物耗水量的研究,在农田上采用水分平衡法测定蒸发,测定结果成为许多作者分析作物需水量和耗水量的基础^[1-8]。这一测定方法所得结果的精度取决于水量平衡方程式各分量的测定精度。其蒸发测定误差可能是各分量测量误差的累积值,而且蒸发往往是几个大项(如降水、灌溉、土壤水分储量等)的代数和,所以不易得到精确的测定结果。在某些实验站,降雨和灌溉有精确的计量,土壤水分测定有足够的重覆次数并且达到足够的深度,计算土层内外的垂直水分交换量的确可以忽略,通过这一方法可以得到相当好的时段(一周以上的)农田蒸发数据。但多数实验站,由于上述条件得不到满足,并且测点的自然条件不理想(例如许多试验站的测坑和测筒建立在不开闢的地段),因此得不到精度较高的有代表性的数据。

(2)水利部门在三门峡、上铨、丰满、桓仁、大浦、芦桐埠、重庆、古田、哈地坡、广州、营盘、官厅、武昌等地建立了水面蒸发站,各站设置了大型蒸发池(100m²,20m²,或10m²)、小型蒸发器(E₆₀₁蒸发器、80cm口径蒸发器等)以及飘浮蒸发器等。中国科学院南京地理研究所在太湖(宜兴)设立了水面蒸发站。有些水面蒸发站,还同时进行了热量平衡和乱流扩散测定方法的研究。这些蒸发站积累了长期连续的蒸发数据,在水平蒸发测定方法方面积累了丰富的经验,并在蒸发规律方面得到了有用的结果^{[9-12] 1-3}。通过分析对比,水利部门推荐E₆₀₁蒸发器作为全国水文站测量水面蒸发的仪器。

(3)水文地质和水利部门建立了若干均衡场(一种蒸发渗漏仪)。设置这些场地的主要目的是为了研究地下水对非饱和带土壤水分的补给以及降雨入渗关系,多数试验在裸地进行,场地的平坦和开阔程度没有高度重视,因此比较难于得到有重大实际价值的蒸发测定。

(4)某些研究单位进行了多种蒸发测定方法的比较研究。例如中国科学院地理研究所在德州、石家庄、延安、民勤采用除涡度相关法以外的所有方法对蒸发进行了测定^[13-18],北京大学地球物理系对水汽传送测定方法进行了研究,中国科学院沈阳森林土壤研究所对森林的蒸发进行了测定^[19-20],中国农业科学院对土壤蒸发器进行了研究^[21]。

近年来,中国科学院禹城水平衡水循环综合试验站,关于蒸发研究的主要设施有:①20m²蒸发池为主体的水面发场,②多台水力蒸发器及其他蒸发器组成的陆面蒸发场,③供农田近地层热量水分状况和蒸发研究用的60m高的铁塔及有关资料采集处理系统,④包括测定水量平衡诸要素的平原小流域试验区,⑤土壤水分观测场(利用中子探测土壤水分仪、负

1)广东省水文总站,水面蒸发实验资料(广州蒸发实验站),油印本,1968年。

2)官厅蒸发实验站,水面蒸发实验资料,油印本,1972年。

3)重庆水文总站,水面蒸发实验资料,油印本,1968年。

压计、烘干法和其他方法进行测定)，⑥遥感技术测定土壤水分和蒸发观测场，⑦气象辐射观测场。同时中国科学院在北京大屯建立了农业生态系统试验站，也把蒸发研究作为一项重要内容。

我国的蒸发测定工作已取得了以上所述的一些成绩，同时还存在着许多不足，需要进行新的努力，简要归纳于下。

(1) 液态水分消耗类型的测量做了不少工作，需大力巩固和发展。水面蒸发皿(池)、土壤蒸发器在我国已有一定经验，惟测定点不够多，且土壤蒸发器的观测还没有规范化。世界气象组织编辑的指南^[22]所包括的各类型的蒸发皿(池)、器，我国都已使用过，惟面积更大的、精度较高的大型蒸发渗透仪则没有，应参照澳大利亚^[23]、荷兰^[24]和美国^[25]的经验，作出我们所需的设计。水分平衡法测量蒸发应用相当普遍，但在测量精度上尤其是土壤水分的测量精度不够。除了严格操作规范，注意资料质量之外，要引进和研制例如中子探测土壤水水分测定仪^[26-28]等好的测定仪器，同时加强对土壤水分和地下水运动的研究，使水分平衡法逐步臻于完善。

(2) 水汽传送类型的测量比较薄弱。涡度相关法是空白，此法国际上已有30年的工作^[29-33]。该方法的理论假定最少，被认为是水汽传送测量方法中最优方法之一——一种直接测定蒸发的方法。涡度相关法的基础在于：近自然表面的大气边界层的空气处于乱流之中，在任一位置，向上和向下的瞬时能量流交替发生着，净能量流就是这瞬时能量流的总和。假定能同时地测定垂直于下垫面的风的波动以及空气湿度含量的波动，蒸发就可以被测定出来。这一方法理论上没有限制，但实际上面临着两个技术问题，一个是需要有良好的感应元件，能足够快地对风速和湿度(或温度)作出测量，以便把参与乱流交换的高频部分包括进去，同时要求足够稳定，以便对乱流交换的低频部分作出可靠的测量。另一个是需要有一个良好的分析系统，其采样时间间隔很短，随着对感应输出进行分析。随着现代技术的发展，这些困难正在被克服，最终涡度相关法有可能成为一常规方法。另外三种水汽传送测量方法的研究工作也很不够，需要加强。这三种方法都假定：蒸发面是相当广泛而均质的，水汽扩散是垂直的一维扩散形式；水汽、显热和动量的乱流交换系数是相等的，或者至少3个交换系数之间的关系只受乱流边界层本身性质的影响，而不受蒸发面性质的影响，概括地说，空气动力学方法是根据水汽流对动量的比率推演蒸发，要求有不同高度的风速和水汽压力测定值；热量平衡法是根据水汽流对显热的比率(即引入波文比)来推算蒸发，要求对不同高度的温度、湿度以及净辐射作出测定；联立法则是利用空气动力学方法得到显热交换，利用观测资料或计算公式求出净辐射，然后求出热量平衡方程式的余项——潜热交换(蒸发)。这三种方法我国只由少数单位作过工作，上述的理论假定及实际测定中的问题都有待于继续工作。

为简明起见，把各种测定蒸发的方法的适用性、优点、问题及前景列表2。

此外，应用遥感技术测定蒸发的方法也在发展，国外试图把地面反射率、地面温度、土壤水分、地面覆盖状况、地面糙率和风速等遥感资料运用于确定蒸发，中国科学院地理研究所也在做这方面的工作。英国水文研究所对这一技术做了相当详尽的评述^[34]、总的来说，遥感技术可能对蒸发测定，尤其是大面积的蒸发测定作出贡献，但要得到大面积较接近实际的蒸发测定，只有把遥感技术与地面观测结合起来才是可能的。

表2 蒸发测定方法一览表

测定方法	适用性	优点	问题	前景
水量平衡法	获得较长时段(如1周或双周值)的资料。	简便,相当精确可靠。	水平衡各分量的测定必须有足够精度;封闭系统内外的水分交换必须清楚。	广泛运用
蒸发皿	适用于水文、气象台站,获取一日有限水体的蒸发量。	简便,精确,成本低。	皿的大小及深度对蒸发值有影响;皿与周围环境热量交换对观测值有影响。	广泛运用
蒸发池	获取水体蒸发日过程资料。	精确,易于测定,成本高。	同蒸发皿,但其影响规模较小。	有限使用
小型蒸发渗漏仪	1日蒸发值。	简便,一定精度,成本低廉。	器内植株的代表性对蒸发测定有影响,器内水分热量调节有困难。	广泛使用
大型蒸发渗漏仪	作为标准仪器获取总蒸发数据。	精确,代表性好。	设计复杂,成本高昂,也在某种程度上会遇到如小型蒸发渗漏仪一样的困难	有限使用
植物生理测定技术	获得蒸腾数据。	准确,易于测定。	样本的代表性可能有问题,测定样本的生理状况可能有改变。	有限使用
空气动力学法、热量平衡法、联立法	瞬时蒸发,连续观测可积分成时段蒸发值。	不破坏下垫面,开阔面的平均蒸发值。	下垫面不均匀,不易观测,大气中不同实体的交换系数难于测定,要有较好的仪器。	有限使用,逐步完善后扩大使用
涡度相关法	瞬时蒸发,连续观测可积分成时段蒸发值。	理论基础简单,可靠,不破坏下垫面。	成本高,技术复杂。	探索

二、蒸发的计算

蒸发数据广泛运用于许多领域,蒸发计算历来为学者们所关注。现将30多年来我国蒸发计算方面的主要工作列表3。

表3 我国主要蒸发计算工作一览表

作者	年份	应用公式	简要情况
中国科学院地球物理研究所中国科学院地理研究所[35]	1959	$E = 0.16 \sum t$ (E ——蒸发, $\sum t$ ——日温 $\geq 10^{\circ}$ 的稳定期积温)	利用该公式计算中国蒸发力,供中国气候区划之用。所得结果为年值,其法出自谢梁尼诺夫法(参阅文献[36])但运用时对系数作了修改

作 者	年 份	应 用 公 式	简 要 情 况
卢其尧等[37]	1965	$D = \frac{\Sigma d}{r}$ (Σd ——月饱和差总量, r ——月降水量)	公式中的 Σd 不直接等于蒸发力,但是用来表征蒸发力。利用饱和差计算蒸发力的可行性及问题,参阅文献[36]。该文计算了中国310个站点(1951—1960的月值)
朱岗昆 杨勿章[38]	1955	彭曼公式[42]	计算了中国东部125个站点的月蒸发值
钱纪良 林之光[40]	1965	彭曼公式[42]	计算了全国400个站点的蒸发值
陈 力[41]	1982	彭曼公式[39]	计算了宁夏地区的最大蒸发量,并以此为基础探讨了有关作物耗水规律
贺多芬[42]	1979	彭曼公式[39]	计算了晋、冀、鲁、豫、陕五省78个气象站(1951—1960)的水面蒸发量,以此为根据与冬小麦的实验资料进行分析,得到了农田蒸发力
邓根云[43]	1979	彭曼公式[39]	用北京日射站和官厅蒸发站的实测资料,对彭曼公式中的净辐射项和干燥力项进行了修订
高国栋[44]	1978	布德科综合法[36]	计算了全国300个台站的月蒸发力值
刘振兴[45]	1956	$x = \int_0^s \frac{dz}{\left(1 - \frac{Z}{Z_0}\right)^{1/n}}$ (降水、蒸发和蒸发力之间的一种函数形式,参数 n 是表征地理条件而采用的。)	对巴格罗夫[4b]提出的函数形式进行改正。原式为 $x = \int_0^s \frac{dz}{1 - \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^n}$
黄润本等[47]	1980	丘尔克公式[48]	证明了在研究情况下去掉影响蒸发的植物因子利用丘尔克公式的可行性,论述了蒸发力的计算方法
傅抱璞[49]	1981	$\frac{E}{E_0} \approx \frac{W - W_f}{W_{c1} - W_f} - \frac{1}{n(W_{c1} - W_f)} \left(\frac{W^n}{W_{c1}^n} - \frac{W_{c2}^n}{W^n} \right)$ (E —土壤实际蒸发量 E_0 —蒸发力 W —土壤湿度 W_f —凋萎湿度 W_{c1}, W_{c2} 和 n 是有物理意义并可从实验中得到。)	根据函数式 $\frac{\partial E}{\partial E_0} = F(Q, E_0, E) \text{ 和 } \frac{\partial E}{\partial Q} = \phi(Q, E_0, E)$ (其中: Q —土壤供水力,其他符号同公式采用蒸发过程有两个转折点和三个阶段的理论,进行量纲分析,得出了计算公式

作 者	年 份	应 用 公 式	简 要 情 况
刘昌明[50]	1982	$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{M_t - M_k}{M_{sat} - M_k} \right)^m$ (E—蒸发 E_0—蒸发力 M_k—凋萎含水量 M_{sat}—饱和含水量 M_t—实际含水量 m—取决于土壤环境条件, 而由实验确定。)	为估算南水北调按 $\frac{E}{E_0} = f \left(\frac{M}{M_{sat}} \right)$ 函数式而提出的计算公式。
吴厚水[51]	1981	$E = E_0 \text{ (充分湿润条件下)}$ $\frac{W - W_0}{W_H - W_0} = e^{-b \sum E_0}$ (不充分湿润条件) E和E_0分别为蒸发和蒸发力, W_0—凋萎湿度 W和W_H—分别为某时和初始土壤湿度 b—系数)	按布达戈夫斯基方法[52], 用实验资料定了系数 b 值。
竺士林[2]	1963	$E = \beta \phi = \beta \sum_{i=1}^4 \phi_i$ $= \beta \sum_{i=1}^4 (t_i + 50) \sqrt{e_i}$ E—水稻生长期田间总蒸发 β—水稻生长期耗水系数 ϕ—各发育阶段消耗于田间蒸腾的太阳能累积总和的指标 $\phi = \sum_{n=1}^n \phi_i = \sum_{i=1}^4 (t_i + 50) \sqrt{e_i}$ t_i—一个发育阶段的平均气温 e_i—一个发育阶段的水面蒸发量	以灌溉实验为基础建立的水稻总蒸发公式
王铁生[8]	1980	$(1) E = a_1 y + b$ $(2) E = a_2 p + b_2$ $(3) E = a_3 T + b_3$ $(4) E = a_4 E_0 + b_4$ $(E$ —水稻需水量, $Y, P, T,$ E_0 —分别为产量, 日照、积温 和水面蒸发, a 和 b —系数)。	以实验资料建立的需水量公式

续表 8

作 者	年 份	应 用 公 式	简 要 情 况
程天文 程维新[13]	1980	(一) 水面蒸发力公式 (1) $E=11d+20$ (2) $E=0.19(20+E)(1-r)$ (3) $E=0.203(1+0.52U_{200})(e_0-e)$ (4) $E=0.147\sum t+1$ (5) $E=0.33d^{1.01}(1+0.1V_2)$ (6) $E=\rho D(q_s-q)$ (7) $E=\frac{(rE+\Delta R)}{(r+\Delta)}$ (8) $E=1.6(10t/1)^a$ (二) 农田蒸发力公式 (1) $E=0.48\sum d$ (2) $E=0.57\bar{t}-3.72$ (3) $E=\sum Q(0.045\bar{t}-0.101)$ (4) $E=0.31d_{14}$ (5) 彭曼公式	以 E601 水面蒸发器蒸发量为水面蒸发力, 计算公式适于月值。式 (1) 为饱和差公式, 式 (2) 为气温、相对湿度公式, 式 (3) 为风速水汽张力公式, 式 (4) 为积温公式, 式 (5) 为饱和差风速公式, 式 (6) 为布德科公式[36], 式 (7) 为彭曼公式[39], 式 (8) 为桑斯威特公式[35], 分别说明了各公式的误差情况 式 (1) 为累积日平均饱和差公式, 计算时段 5 天 式 (2) 为累积日平均气温公式, 计算时段 5 天 式 (3) 为总辐射气温公式计算时段五天 式 (4) 14 时饱和差公式, 计算时段一天 式 (5) 计算时段一天农田蒸发力是用蒸发器测定小麦充分湿润条件下的蒸发量
凌美华[15]	1980	$\frac{E}{aE_0} = 0.0396W + 0.23$ E 为小麦总蒸发量, E_0 为 E_{601} , 水面蒸发器蒸发量, a 与作物发育阶段有关的系数, W 为 50 厘米土层有效水分	实验资料得出的计算公式
施成熙 ¹⁾	1964	$E=(e_0-e)f(u)$ $(E$ ——蒸发量 e_0 ——饱和水汽压 e ——空气水汽压 $f(u)$ 风速函数)	根据我国水面蒸发池 (皿) 实测资料, 确立 $f(u)$ 的各种形式
洪嘉琏 ²⁾	1983		
孙芹芳[10]	1981		
毛 锐[12]	1978		
广东省水文总站 ³⁾	1968		
官厅蒸发站 ⁴⁾	1972		
重庆水文总站 ⁵⁾	1972		

- 1) 施成熙, 确定水面蒸发方法初步研究 (油印本), 1964 年。
- 2) 洪嘉琏, 有限水域表面蒸发的计算, 中国地理学会水文专业学术会议文件, 1983 年。
- 3) 广东省水文总站, 水面蒸发实验资料 (油印本), 1968 年。
- 4) 官厅蒸发实验站, 水面蒸发实验资料 (油印本), 1972 年。
- 5) 重庆水文总站, 水面蒸发实验资料 (油印本), 1968 年。

上列计算公式,按应用对象分成三类,一是供陆面蒸发计算,二是供水面蒸发计算,三是推导或修正某些公式。所有这些公式,除个别外,都是考虑水分没有限制条件下的蒸发。由表可知,我国学者所用的公式基本上包括了国外普遍流行的一些主要公式,例如彭曼公式、布德科公式、桑斯威特公式、别梁尼诺夫公式、空气饱和差公式以及空气动力学为基础的经验公式。这些公式引入中国,对我国蒸发研究起了推动作用。运用这些公式进行计算,对中国蒸发的时空分布规律有了大概的认识,并在解决生产实际中的蒸发计算方面起到了作用。

无疑,我国学者所采用的绝大部分公式在理论上是健全的,这在布德科的著作^[36]中已有相当详尽的说明。个别公式的理论基础还值得怀疑,例如在蒸发与产量联系起来的公式,就是一种纯经验关系,要普遍运用可能是有困难的。理论基础健全的那些公式,所得结果之精度是不相同的,例如以大量水面蒸发测量或以农田实测资料为基础的那些计算公式,其计算结果的精度当然会好一些,而其他一些外国计算公式直接运用于中国,其计算结果的误差还是很不确定。当然评论一个公式的优劣,不是只有一个标准,除了考虑计算结果的误差以外,还必须考虑资料的情况,计算工作的方便以及计算结果的运用目标等。

我国蒸发计算工作有明显的不足之处,其一是大多数蒸发计算结果没有经受实际的充分检验,而且客观上也往往缺乏供检验的实测数据。特别当考虑到计算公式和参数都来自外国时,这些计算结果的不确定性就变得更加明显。其二绝大多数计算公式都是为计算长时段、大范围的平均蒸发值而设计的,不能得到各种下垫面、各种水分能量供应情况的计算结果。鉴于这些不足,有时所得结果可能对于如在大的尺度上进行区域分异的研究具有重要的参考价值,而对于如农田灌溉、作物干旱机理以及光合产量形成等的研究用处不大,因为或者由于这些计算公式包括的因子太简单,满足不了实际要求;或者由于这些计算公式运用于局地条件而产生重大误差。

我国蒸发测定工作目前还相当薄弱,这主要是由于实际测定资料的缺乏,限制了蒸发计算的发展。所以有必要强调加强蒸发测定工作,尤其是陆面蒸发的测定,以期改善蒸发计算方法。但实际上,近年我国蒸发的实验研究工作没有得到足够的重视,而投入计算蒸发的力量则相对较强,这固然反映了各方面对蒸发数据的急需,同时也说明我国的蒸发实验工作和蒸发计算工作之间不协调。这种不协调如不改变,蒸发研究工作不可能顺利发展。因为卓越的理论和良好的计算方法既需要有坚实的实验观测做基础,也需要用各种实际资料来检验,国际上知名的研究蒸发的学者,如彭曼、布德科、桑斯威特等,无一不是沿着理论和实践相结合的道路前进的。

三、关于潜在蒸发和实际蒸发

这里着重谈陆面蒸发的问题。陆面蒸发比水面蒸发更加复杂。陆面蒸发的速率,是一个大气、土壤和植被的诸多因子的函数,几乎随时随地都处在变化之中,大概它随地面坡度、坡向、土壤物理性质、植物覆被等的变化而在小距离之内发生的变异,比之水文、气象其他要素都要大,以致有人怀疑能对蒸发作出测量和对其规律进行概括。潜在蒸发(或蒸发力)的概念正是为了克服蒸发易变在研究中造成的困难和便于蒸发结果运用于实际而提出来的。人们提出潜在蒸发是试图找出一种理想情况下的蒸发,作为一个“标准”速率,去比较各种实际情况下的蒸发和降水。自从潜在蒸发的概念被提出后,蒸发的理论研究及其实际

应用都广泛采用了这一概念。

问题是,如何定义潜在蒸发,或者说如何来定那个“标准”速率,一直存在着不同的看法。这就是说,存在着多种潜在蒸发的概念,需要我们作出选择,采取何种概念,以适合我们现有的蒸发观测资料以及我国的自然条件。兹举几种比较流行的潜在蒸发的概念。

桑斯威特认为^[54],潜在蒸发是在对于植物利用水分而言不存在土壤水分亏缺条件下所发生的水分耗损。彭曼^[39]先将潜在蒸发定义为一个理想的广泛的自由水面存在的大气条件下单位面积上单位时间里的水分蒸发,其后又指出^[55],潜在总蒸发是蓬勃生长的、完全覆盖地面的、高度均一的、水分不缺的短矮绿色植物的连续表面蒸发量。范·维克^[56]认为潜在蒸发是与所考虑的作物在形状、颜色和大小相似的湿润表面的最大蒸发速率。范·巴维尔^[57]根据适当的气象变量及植被的辐射和热力学特性定义出任一植被的潜在蒸发,当该表面湿润并对水汽不流产生障碍,则潜在值就达到。布德科在《地表面热量平衡》^[36]一书中,列出了一些学者关于蒸发力的概念,总的意思是蒸发力等于湿润表面全部净辐射值用于蒸发的数字,并详细说明了利用饱和差法、积温法和净辐射值三种方法确定蒸发力的可行性,而对于用水面蒸发皿数据代表蒸发力表示了怀疑。布达戈夫斯基^[58]认为蒸发力就是在现有气象条件下足够湿润(而不限制蒸发)的表面的最大可能的蒸发。

这些定义有共同之处,即潜在蒸发都被定义为水分充分或水分条件没有限制的蒸发。但也有差异,即各学者对下垫面种类,下垫面的空气动力学、热力学和生物学特性,所论潜在蒸发发生的场合与周围环境条件是否均一三个问题上作了不同的限定。其不同限定可概括如下:

下垫面种类:(1)水面;(2)特指陆面;(3)任一陆面

下垫面性质(如高度、颜色):(1)严格限定;(2)不加限定

下垫面的均一性:(1)严格要求;(2)不加限定

潜在蒸发概念的不一导致了(1)以自由水面蒸发作为潜在蒸发;(2)在一地的理想条件下(例如满足彭曼所限定的各个条件)实地测得一地的潜在蒸发;(3)在特定场合下实地测出水分充分供应条件下的蒸发量,作为这特定场合的潜在蒸发值。第一种方法在我国广泛采用,以自由水面(包括蒸发皿和蒸发池)蒸发资料为基础,建立了一些潜在蒸发的经验公式。第三种方式在我国被一些人采用,特别在农田,建立了一些诸如小麦、玉米等的潜在蒸发计算公式。第二种方式在我国很少人做过。

我国学者在蒸发力(即潜在蒸发)方面的工作,归纳起来有三个方面:(1)改善和简化了原有的蒸发力计算公式,如黄润本^[47]、邓根云^[43]等对现有公式的某些项和参数进行了检验、改善;(2)估算了我国蒸发力,并做了蒸发力分布图,如朱岗昆和扬幼章^[38]、钱纪良和林之光^[40]、卢其尧^[37]、高国栋^[44];(3)对农田蒸发力的测定和规律进行了探讨。例如程天文、程维新^[16]进行了农田蒸发力的测定,以此为基础对国外一些蒸发力公式进行了检验,并初步提出了一些适合于我国一定范围的蒸发力计算公式。

但是,我们对于众多的潜在蒸发的定义在中国的适用性,对于国外和我们自己提出的潜在蒸发计算公式运用于中国各种自然条件可能产生的偏差,从本质上研究不够,这应该成为我国学者今后研究蒸发力的一个主要内容。

就实践目的而言,人们更加关心实际蒸发,例如农业水分运用、水资源估算、植物光合效率以及地气间的水汽交换等,都把实际蒸发的情况看成一项基础资料。但要得到实际蒸发量相当困难,而把点上的测量概括到面上更加困难。潜在蒸发的概念是认识实际蒸发的有用

工具,有了潜在蒸发这个“标准”速率,然后扣除与土壤和植被有关联的因子的影响(这些影响在潜在蒸发概念中一般是假定被排除掉了的),就能计算出实际蒸发。换句话说,为了得到实际蒸发,除了知道潜在蒸发值以外,还必须着重考虑土壤水分和植物因子。

我国实际蒸发的测定工作在灌溉农田上得到了某些结果。明确了作物生育阶段对农田蒸发的影响^[1],探讨了土壤有效水分含量在总蒸发过程中的作用^[15],尝试了对作物蒸腾和裸间土壤蒸发进行分割^[15],此外在蒸腾方面做过一些测定^[18、19]。考虑到我国国土辽阔,下垫面十分复杂,则我们对于陆地蒸发的认识是太少了。对山地蒸发、森林蒸发、草原蒸发以及裸地蒸发等研究很少,对其基本上没有了解。

对实际蒸发的测定,两件工作是十分重要的。一件是进行有代表性的小流域的蒸发实验工作,以期得到小流域的直接测定结果,为在更大面积上充分了解实际蒸发的时空分布规律打下基础。麦斯通内^[59]指出,把点上测量的办法运用到流域大小的面积上,一直没做什么工作。而瓦特^[60]则明确认为,这是我们现在研究工作的主要缺陷,假如在最近的将来能满意地克服这一缺陷的话,就有理由认为,在稍长于一个世纪的时间里我们在蒸发测定方面从极端悲观的阶段转到了一个一定程度的乐观阶段。另一件是加强对与蒸发有关的土壤、植物因子的研究,建立适宜于计算实际蒸发的新的模式。蒙太司^[61]在彭曼公式的基础上,引入阻抗的概念,导出了彭曼——蒙太司公式。同时,蒙太司^[62]还在气孔阻抗测定方面进行了研究。布朗和洛森别格^[63]也沿着这条路线建立了阻抗模式。近年来,出现了一些更加复杂的模式,对植被—大气间的交换进行数学模拟,把植被分成多个垂直层次,计算每一层的截留辐射,把显热、潜热和生物化学能量进行分割,还建立了植物对环境反应的子模式。森克雷^[64]描述的模式就是一个例子。

以上是对我国蒸发研究的回顾和展望,概括起来就是:

(1) 我国蒸发测定方法方面的主要工作是在50年代后半期和60年代前半期,水面蒸发发的测定工作比陆面蒸发工作做的较多较好。测定方法上主要采用了液态水分耗损的测量方法,汽态传送测量则做的较少。今后要特别加强陆面蒸发的测定工作,并有必要对多种测定方法进行研究。

(2) 我国蒸发计算方面取得了不小的成绩,但多数结果没有进行充分的检验,今后应当在加强蒸发实验工作的基础上,逐步改善我国的蒸发计算工作。

(3) 我们对于蒸发力只限于用一些公式进行计算,而对其本质缺乏深入的研究。我们对于陆面实际蒸发研究很少,对各种自然条件下的蒸发的规律很少了解。我们应当进行有代表性的小流域的蒸发实验工作以及开展能建立包括诸多因子的计算模式的研究工作。

参 考 文 献

- [1] 黄荣翰,小麦的灌溉需水量,水利学报,(2),1959年。
- [2] 竺士林,水稻田间蒸发蒸腾量的研究,水利学报,(3),1963年。
- [3] 王铁生,水稻需水量的初步分析,水利学报,(6),1980年。
- [4] 吴化南,水稻需水量的预报,农田水利与小水电,(7),1981年。
- [5] 弗 智,水稻需水量的计算,农田水利与小水电,(7),1981年。
- [6] 杜景川,冬小麦生育期灌水时间的预测方法,水利学报,(3),1963年。
- [7] 张之丽,安徽省丘陵地区水稻灌溉定额的确定,水利学报,(6),1963年。
- [8] 马允吉,关于田间耗水量的几点认识,灌溉排水,(2),1982年。

1) 程维新,华北平原蒸发力与作物需水量,远距离调水论文集,科学出版社,待出版。