

程维新 胡朝炳 张兴权 著

农田蒸发与 作物耗水量研究

气象出版社

65.231
645-

农田蒸发与作物耗水量研究

程维新 胡朝炳 张兴权 著

气象出版社

00566

(京)新登字 046 号

内 容 简 介

本书以实验研究资料为依据,是作者 30 年从事农田蒸发与作物耗水量研究成果的总结。主要内容包
括,我国农田蒸发研究进展、决定农田蒸发的因素、农田蒸发的测定方法、黄淮海平原主要作物耗水量和农
业节水与水分利用效率等。这是一部实用技术和应用基础研究相结合的专著。

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

农田蒸发与作物耗水量研究

程维新 胡朝炳 张兴权 著

责任编辑 潘根娣 终审 徐 昭

封面设计 严瑜仲 责任技编 吕红梅 责任校对 毛 健

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路 46 号)

中国科学技术信息研究所印刷厂印刷

新华书店北京科技发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:787×1092 毫米 16 开本 印张:9.5 字数:231 千字

1994 年 8 月第一版 1994 年 8 月第一次印刷

印数:1—1000 定价:10.00 元

ISBN 7-5029-1691-1/S·0252

前 言

当前,淡水资源的匮乏已成为全球急待解决的问题。随着农业及整个国民经济的发展,蒸发问题的重要性与紧迫性愈来愈受到人们的重视。

农田蒸发是发生在土壤-作物-大气系统中的一个连续体。水分除直接从土壤表面蒸发到大气中外,还通过植物蒸腾输送到空气中。农田蒸发与土壤水分运动、作物水分传递、蒸发面与大气间的水汽交换以及与此同时进行的能量转换都有密切的联系。

就农业而言,合理的灌溉制度、灌溉方式和灌溉时间的确定,减少土壤表面的水分消耗,实行节水农业与旱作农业,都需要农田蒸发与作物耗水量方面的资料。农田蒸发、作物耗水量及其耗水特性、水分利用效率及其农田水分抑制的实验研究,是作者重点研究领域,有关这方面的实验数据,无疑将为农业合理用水提供重要科学依据。

本书是作者 30 年来从事农田蒸发、作物耗水研究成果的总结。60 年代,作者在中国科学院地理研究所德州水平衡试验站工作,开始从事农田蒸发与作物耗水规律研究。德州站所进行的农田蒸发、作物耗水、水面蒸发、潜水蒸发、土壤水分运动和热量平衡等方面的研究,在当时是我国蒸发研究人员较集中、学科较全、研究内容较广泛、实验方法较多、仪器设备较先进、观测资料较系统的兴盛时期,为我国农田蒸发研究奠定了良好基础。70 年代,作者主要从事抑制蒸发研究工作,并参与主持了土面增温剂及其在农林业上的应用研究。从 1979 年起,作者一直在中国科学院禹城综合试验站工作。该站是开放试验站,研究方向是水平衡水循环,研究农田生态系统中的水分交换。在农田水分循环和水量平衡的研究中,重点进行了农田蒸发的研究。作者主要采用器测法对农田蒸发和作物耗水规律进行了研究,在作物生物学特性对耗水的影响、黄淮海平原主要作物的耗水规律及其区域分布特征、主要作物的夜间蒸发与凝结水等方面都取得了新的进展。对器测法测定农田蒸发的准确性、代表性及仪器调控方面应注意的关键问题,也进行了较为深入的研究。

作者参加了“六五”、“七五”、“八五”的国家科技攻关课题,主要从事农田蒸发与作物耗水量研究、农田节水与提高水分利用效率研究及高产农田水分条件研究等,同时,还参加了国家自然科学基金委员会资助项目“农田蒸发测量方法和蒸发规律研究”及“黄淮海平原区域蒸散特征研究”。

在本书出版之际,作者衷心感谢中国科学院地理研究所德州水平衡试验站和中国科学院禹城综合试验站的同事们给予的各方面支持、合作与关照。这里,作者特别要感谢唐登银、凌美华研究员和赵家义、洪嘉珏高级工程师等的长期合作,书中许多章节也包含着他们付出的辛勤劳动。

由于作者水平有限,错误与疏漏之处敬请读者批评指正。

作 者

1993 年 12 月

目 录

前言

第一章 概论	(1)
第二章 决定农田蒸发量的若干因素	(4)
第一节 气象条件是影响农田蒸发的基本因素	(4)
第二节 土壤水分状况是农田蒸发的限制因素	(11)
第三节 作物生物学特性对农田蒸发的影响	(35)
第三章 农田蒸发的测定方法	(42)
第一节 蒸发测量方法	(42)
第二节 蒸发器测定法	(45)
第三节 蒸发器测定陆面蒸发的经验	(73)
第四章 黄淮海平原主要作物耗水量	(82)
第一节 关于灌溉农田作物耗水量问题	(82)
第二节 黄淮海平原蒸发力与农田耗水量	(86)
第三节 黄淮海平原冬小麦耗水量	(91)
第四节 黄淮海平原玉米耗水量	(111)
第五节 黄淮海平原棉花耗水量	(127)
第五章 农田节水与水分利用效率	(135)

第一章 概 论

在一个地区所拥有的自然资源中,只有少数几种是缺少不得的,水便是最突出的一种。我国农业发展的主要问题是缺水。在干旱、半干旱或半湿润地区,任何限制因素也没有像缺乏水资源所引起的限制作用那样大。即使在水资源条件比较好的地区,也不是所有年份的降水量都能满足作物一年四季的需水要求。所谓“风调雨顺,人寿年丰”,只不过是人们的一种祈望,实际上常常为缺水而苦恼。

水资源的缺乏现已成为全球性的一个急待解决的问题。在我国华北、西北地区,水源不足是影响农业发展的重要因素。有的地区,水的问题已达到相当严重的地步。这种状况固然与水在季节上与地域上的分配不均匀有关,也和一个地区的作物布局 and 农业结构密切相关。

所谓缺水,是相对于作物的需水要求而言的。当土壤水分的供应满足不了作物正常生长所需的水量时,农田便出现旱象。也即农田水分支出大于收入,水分供需不平衡。

农田水分的供需问题,主要取决于一个地区的总降水量、降水量的季节分配、农田水分贮存能力和作物需水量。

农业生产效率在一定意义上取决于人们对水的有效利用程度。这就不得不促使人们对作物需水量的关注和作物耗水规律的研究。我们研究农田蒸发的出发点及其归宿,无不与合理利用现有的水资源与节约用水相联系。

农田蒸发使土壤水分消耗是相当可观的。在华北平原地区,冬小麦全生长期的耗水量,相当于同期降水量 2 倍(非灌溉地)至 3 倍(灌溉地);夏玉米大约要消耗同期降水量的 70%;而有灌溉保证的大豆地,耗水量要超出水面蒸发量的 50%。过去,人们对于农田耗水如此之多多是估计不足的。

作为水循环中的一个因子来讲,蒸发在量级和重要性方面,应该说同降水是不相上下的。蒸发作为水量平衡中的一项基本要素,它的数量及其变化,将会引起其它要素的变化,而农业的发展,对水量平衡带来的首要问题便是需水量的增加。因此,蒸发问题无疑是研究水分循环和水量平衡的一个中心环节。

水分蒸发与热量消耗是紧密地联系着的。蒸发要消耗热量。因此,农田蒸发及其变化,对于到达农田的能量将如何分配或将如何利用有着决定性的影响。作为农田水分与热量的主要消耗者的蒸发过程,综合地反映了农田水分与能量的同时供应状况。从另一方面来讲,作物与环境的关系,在很大程度上又决定于地表的热量和水分状况以及它们的对比关系。上述问题的核心是蒸发问题。

人们对蒸发问题的关注首先还是实践的需要。随着工农业生产的发展和人民生活水平的提高,水的需求量也相应增加。农田耗水在水资源中所占的比重很大,如何减少农田水分无益消耗,达到合理、经济用水,都有赖于长期而深入的农田蒸发研究。在确定灌溉定额、制订用水计划、规划大型水利工程时都需要蒸发资料,而且往往把它作为一种基本参数来考虑。世界广大地区由于蒸发而返回大气的水分约占 90%,甚至更多。人们提出了很多改变水分循环的方案,然而用控制水分循环的方法来增加水分供应难度极大,而通过控制蒸散过程就可以非常容易而有效地实现。仅从这点出发,就必须更好地了解蒸散过程。

蒸发是气候区划的重要依据。它与降水量的比较,是决定一个地区干湿程度的指标。作物需水量资料,是农业区划和作物合理布局的依据之一。

土壤水分蒸发不仅关系到土壤水分的损失,在高矿化度地区,它还涉及到土壤盐渍化的危害。利用蒸发规律来预测预报土壤盐渍化趋势,是蒸发在应用方面值得注意的一个新的发展动向。

蒸发问题无论在理论上或实践上的重要性是十分明确的。随着水资源供需矛盾的发展,关心蒸发问题的人将会越来越多。其重要性将越来越为人们所认识。

农田蒸发是一个范围相当广泛和十分复杂的课题。它发生于土壤-作物-大气系统中,受到土壤水分、土壤理化性质、作物种类、作物生育状况、气候条件和农业技术措施等影响。国际上蒸发研究虽已有 200 余年的历史,但由于影响的因素太复杂,许多问题尚未得到满意的结果。

近几十年间,蒸发研究有了较快的发展,主要表现在两个方面:一是对蒸发的物理机制有了较深刻的理解;二是确定蒸发的仪器和方法有了显著的进步。对于前者,以往人们把蒸发现象仅仅作作为水汽现象来处理,这就给蒸发过程带来许多悬而未定的问题。随着热量平衡研究的进展,从能量平衡的角度来考虑蒸发问题,这样,既考虑到水汽的输送,又考虑到蒸发的能量消耗,把两者统一起来,才能对蒸发的物理机制有较深刻的认识。对于后者,主要是研制成功了灵敏度很高的、适用田间应用的大型蒸发器,如蒸渗仪(Lysimeter)和水力称重式土壤蒸发器等。这些仪器的测量精度一般可达 0.01~0.03 毫米,可以测出蒸发日变化过程,蒸发、凝结和降水的开始与终了时刻,以及它们的量值和最大强度出现的时刻,这就给蒸发的深入研究提供了方便,并且可以对已有的蒸发计算公式的有效性和可靠性问题进行检验和校正。与此同时,蒸发计算有了新的突破,主要是提出了比较完整的关于“蒸发力”的概念和计算“蒸发力”的方法。这两个方面是近期蒸发研究进展较快的重要标志。

随着遥感技术的发展,采用遥感方法来研究蒸发和土壤水正引起人们的重视。红外技术不仅已用于蒸发研究,有的已用它来作为农田灌溉预报的一种手段。

以土壤-作物-大气系统为基础是当今研究农田蒸发的主要趋向。在这个系统中,包括水分由土壤进入根系,传导到茎叶,最后与大气进行水汽交换。这一系统在物理上是统一的,在性质上是动态的。虽然不少学者以这个系统为基础,建立了相应的模式,但到目前为止,对这一系统的物理分析还处于开始阶段,定量去说明这一过程还需作很大的努力。应该说,上述系统有坚实的物理基础,它考虑到了影响蒸发的主要因素。在这个系统中,各部分不是孤立的、毫不相干的过程,而是在相互影响和相互制约下,共同支配着农田水分消耗过程,不仅在理论上具有重要意义,而且对于解决农业生产上的实际问题也相当重要。因此,这一系统应作为我国农田蒸发研究的重要方面。

我国蒸发研究起步较晚,蒸发实验研究大约始于 50 年代。当时由于水利建设的需要,全国建立了 11 个水面蒸发试验站,开展了对大水体水面蒸发的研究。与此同时,少数研究部门开展了土壤蒸发的实验。

50 年代末和 60 年代初,国家为了解决我国西北和华北地区的干旱缺水问题,迫切需要农田蒸发方面的资料,当时虽然有 200 多个农田灌溉试验站,对作物需水量作过实验,积累了一定数量的观测资料,但由于侧重于灌溉制度的研究,对于作物需水的测试仪器、研究方法以及作物需水与环境因子的关系等缺乏深入研究,观测资料给使用带来相当大的困难。

基于此,人们才感到蒸发资料的可贵,才引起有关部门的重视。此后,相继建立了一批以研究农田蒸发为主的试验站。其中比较全面、系统地进行农田蒸发研究的是中国科学院地理研究所。在黄秉维教授领导下,自1960年起,中国科学院地理研究所先后在我国的西北地区和华北地区,建立了民勤水平衡试验站、黄龙径流实验站、德州水热平衡试验站、石家庄水热平衡试验站以及在延安、北京等地设立了农田蒸发观测场等,进行了农田蒸发、土壤水分运动、热量平衡等项目的观测。在研究方法方面包括热量平衡法、水量平衡法、空气动力学方法和蒸发器测定法等。研究人员包括水文、气象、自然地理等专业。这是我国当时从事蒸发研究人员较集中、学科较全、研究内容较广、实验方法较多、仪器设备较先进、观测资料较系统的兴盛时期。这个时期历时6年,为我国蒸发研究奠定了良好的基础。

70年代后期,在左大康教授的领导下,我们又在山东省禹城县建立了中国科学院禹城综合试验站,它的主要研究课题是水平衡与水循环,其核心是蒸发研究。为此,建立了蒸发观测场,包括农田蒸发观测场、水面蒸发观测场、土壤水分观测场、气象观测场和太阳辐射观测场等。从1979年起,农田蒸发等项目已累积了大量的观测资料,并发表了一批论文和专著,为深入研究农田蒸发的基本规律提供了依据。

与此同时,我国很多研究单位和高等院校也相继开展了农田蒸发的实验研究,大部分集中在华北平原地区,这将有利于华北平原区域农田蒸发的深入研究。

所谓农田蒸发量,系指作物蒸腾量和裸间土壤蒸发量之总和。有的也称之为农田耗水量或作物耗水量,水利部门一般称农田需水量或作物需水量。目前,在大多数著作及文章中,则把农田蒸发量称作蒸散量。这些术语虽然有所区别,但通常被相互交替使用。

就其实质而言,作物耗水量和作物需水量是有区别的。作物耗水量(或农田耗水量)一般应理解为作物或农田实际所消耗的水量。作物耗水量在颇大程度上决定于土壤水分供应状况。而作物需水量(或农田需水量)应当定义为土壤水分条件适宜于作物正常生长发育、具有较高的土壤肥力、获得高额而稳定的产量条件下的作物耗水量。因此,作物耗水量通常小于作物需水量。在充分湿润或过湿条件下,作物耗水量有可能大于作物需水量。

农田蒸发的研究内容相当广泛。作为农田,条件是十分复杂的。农田的地面覆盖物千差万别,有水田、有旱地;有裸地,有作物地。而作物的种类又多种多样。对于论述一个区域或相当范围的农田水分消耗状况,采用农田蒸发量是可以的。当我们以某种特定作物为对象,来研究这种作物水分消耗的时空变化规律时,必须采用作物需水量或耗水量。这是由于各种作物具有不同的耗水特性所决定的。我们之所以采用《农田蒸发与作物耗水量》这一题名的原因也在于此。

第二章 决定农田蒸发量的若干因素

农田蒸发量的大小及其变化规律,基本上取决于到达农田的能量状况和可供蒸发的水分条件。同时,土壤条件、作物种类、作物不同发育阶段、农业栽培技术和耕作保墒措施等,都对农田蒸发有很大影响。

从理论上讲,一个地区的农田蒸发量,不可能超过可供蒸发的水源的数量,也不会超过可供蒸发消耗的热能的数量,最终决定于两者的同时供应状况。要使农田蒸发持续进行,必须具备的外部条件是:(1)热量来源能满足蒸发所需的汽化热的要求;(2)蒸发面与大气间存在水汽梯度,使蒸发的水汽能不断地输送到大气中去;(3)有充分的土壤水分供应,以满足蒸发对水分的要求。前两项条件属于气象因素,它们受太阳辐射、空气温度、空气湿度和风等影响,综合起来决定于大气的蒸发能力。第三项条件则有赖于土壤的含水量和水势,它们共同决定了土壤向蒸发面传导水分的速率。

作物生物学特性,是导致农田蒸发量差异的重要内因。各种作物的耗水特性差异很大。关于作物生物学特性对农田蒸发的影响问题,至今尚未引起人们的足够重视。

归纳起来,气象条件、土壤水分状况和作物生物学特性是决定农田蒸发的主要因素:(1)气象条件是影响农田蒸发的基本因素;(2)土壤水分状况是农田蒸发的限制因素;(3)作物生物学特性是农田蒸发差异的内在因素。

第一节 气象条件是影响农田蒸发的基本因素

蒸发是一种水分消耗过程,也是一种热量消耗过程。农田的水分消耗与热量消耗是紧密相连的。在水分不受限制条件下,农田蒸发量与耗热量成正比例,这一特征已为许多学者所证明。

蒸发过程本身是增热与冷却的结果。增热愈多,蒸发量愈大,冷却也愈多。冷却的结果又抑制了蒸发。

农田水分的消耗量,一般不可能超出作为基本因子的热量所规定的最高限度。也就是说,面积广阔而下垫面均一的农田,最大可能蒸发量应当受热量平衡数值的制约。

从农田蒸发出来的水汽,需借助于水汽梯度和风的涡动输送到大气中去,使近地层的水汽压经常保持低于蒸发面的水汽压,才能使蒸发持续地进行。

上述两方面的因素,综合起来决定了大气的蒸发能力。

所谓蒸发能力(或称潜在蒸发、蒸发力)通常定义为在一定气候条件下,供给蒸发面的水分不受限制,以使土壤水分经常保持在不低于田间持水量,在此条件下的农田总蒸发量。它是表征一个地区气候特征的综合指标。国内外许多学者在论述气象条件对蒸发的影响时,都普遍采用“蒸发力”这一概念。

蒸发力的概念一般认为是由彭曼(H. L. Penman)或桑斯威特(Thorn thwaita. C. W)首先提出的。实际上,早在彭曼或桑斯威特于1948年提出蒸发力概念的前一年,赖斯里.R.

赫尔里吉(Leslie, R. Holdrige)就提出了比较完整的关于蒸发力的概念。他将蒸发力定义为土壤湿度和植物覆盖度一贯适宜的条件下蒸发水分的总和,也即当土壤水分处于田间持水量并被充分发育的植物所覆盖时的蒸发量之总和。赫氏还认为:蒸发力是一个假想的数字,只是用它来与其它湿度值相比较,用以表明干湿程度的一种尺度。当然,彭曼和桑斯威特等学者在蒸发力的计算方法和对蒸发力概念的阐述等方面都作出了巨大的贡献。

自从提出蒸发力概念以来,表示蒸发力的方法多种多样,大致可分为两类:即水面蒸发力和陆面蒸发力。陆面蒸发力又可分为农田蒸发力和土面蒸发力。在农田蒸发力中,也有按作物划分的,比如小麦蒸发力、水稻蒸发力、牧草蒸发力等。

基于蒸发力的研究对象主要是陆面,外国一些学者在论述蒸发力时大多指的是陆面蒸发力。陆面蒸发力至少应包含下面两个内容:植物覆盖下的陆地表面(对象);具有充分的水分保证(条件)。具有上述对象和条件的自然条件下的下垫面蒸发量才能称之为陆面蒸发力。

彭曼在研究水面蒸发力的基础上,根据水面蒸发与充分供水条件下的草地和裸地蒸发量的比例关系,推导出草地蒸发力和裸地蒸发力。他认为:在土壤充分供水条件下,草地和裸地的蒸发,与土类、作物种类及根系范围关系不大,而与同一气候条件下的自由水面蒸发有简单的比例关系。

布德科认为:在陆面充分湿润的条件下,陆面蒸发力可用确定水面蒸发力类似的方法来计算,即水面或潮湿表面的蒸发与按计算出来的空气饱和差成正比。布德科还赞同阿尔巴捷夫这样的观点:在有作物的农田上,当土壤含水量不低于田间持水量的 70~80% 时,农田蒸发量接近于蒸发力。

在我国裸地蒸发力研究的现实意义不大。因为在自然条件下的下垫面,裸地是很少的,但也有少数单位用来估算流域的水分平衡。土面蒸发虽然不如栽培有作物的农田那样复杂,然而由于土壤的地带性分布,耕作土壤与非耕地的区别,加之土壤的机械组成,土壤结构和粗糙度等差别,土面蒸发的研究也有一定的难度。

彭曼根据在英国罗萨姆斯特的试验,充分供水条件下的土面蒸发量与水面蒸发量的比值,一年四季均为 0.9。在我国华北试验的结果是干燥少雨的春秋季节,其比值为 0.9,多雨的 7、8 两月比值略大于 1.0。根据东北等地的实验也同样表现出比值随季节而变化。这可能是由于两国气候条件的差异。英国的降水量和我国德州地区差不多,但降水日数在 200 天以上,而德州只有 80 天左右。因此,若采用彭曼方法来估算我国的土面蒸发力,雨季月份的计算值将会偏小。

至于农田蒸发力,把土壤含水量不低于田间持水量的 70~80% 时的农田蒸发量作为农田蒸发力,我们认为,缺乏令人信服的实验数据。

1963 年和 1965 年,我们曾对不同土壤含水量的冬小麦蒸发量进行过测定,从所获得的资料来看,占田间持水量 70~80% 的蒸发量为充分供水条件下的 81% (1963 年) 和 60% (1965 年)。

应当指出:当土壤含水量为田间持水量的 70~80% 时,对作物生长发育和产量无疑是有益的,但并非是获得农田最大蒸发量的土壤水分条件。

直接测定农田蒸发力是相当困难的。按照彭曼关于蒸发力的四项条件:(1)土壤有充分的水分供应,作物耗水量不因供水不足而减少;(2)地面有致密的植物覆盖,作物高度均一,高度不超过 1 米;(3)作物生长旺盛,叶片尚未衰老;(4)周围广大面积条件相似。上述四项条

件在我国一般都很难具备。

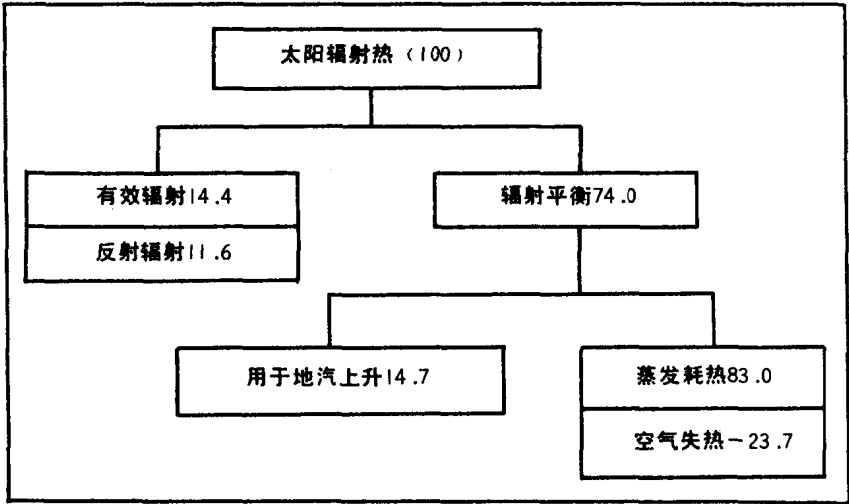


图 2-1 湿润秧田太阳辐射热

蒸发力的实际测定大多是在小面积上采用仪器进行的。对于湿润不足地区来讲,具有最充分湿润条件下的小型蒸发器的热状况与周围地区不发生热量交换是不可能的。

根据中国科学院地理研究所在北京郊区的测定(1971~1973年),湿润秧田的蒸发耗热量要超过辐射平衡值的 12.2%,大气水平输送的热量约占秧田辐射平衡值的 32.0%(图 2-1、2-2)。即使在大面积条件相似的灌溉麦田,这种情况也会同样发生(表 2-1),只不过是数值大小有所差别而已。这也许是一些学者对蒸发力概念持有不同看法的原因之一。

由表 2-1 看出,随着小麦的生长发育,热量平衡各分量也随之变化。麦田所获得的辐射平衡值主要消耗于农田蒸发。在小麦拔节至开花期间,麦田蒸发耗热量约占辐射平衡值的 95%左右。从开花至乳熟期,蒸发耗热量均超过辐射平衡值,达到 107~110%。大约从孕穗以后,麦田的乱流热交换的方向发生了改变,即由大气层指向作用面,麦田从空气中获得热量补充。童庆禧等也得到类似的结果,他们在石家庄地区进行的灌溉地与非灌溉地小麦田热量平衡的测定结果表明:在小麦生长盛期,灌溉麦田的蒸发耗热量可超过辐射平衡值,就平均状况而言,前者约为后者的 105%。此时的蒸发耗热决定于辐射平衡值和空气流向地面的热量收入量。由于蒸发耗热大于辐射平衡值,这就导致植物附近气温降低,而使逆温分布形成。灌溉麦田逆温形成的日期在拔节以后。小麦生长最旺盛时期,逆温分布也最明显。

农田蒸发力由于作物的存在变得十分复杂。首先是选择什么作物定为指示植物,这是确定农田蒸发力的前提。国外选择苜蓿或矮草作为指示作物,以它作为标准来推求农田蒸发量。而我国又以什么植物作为标准?如何确定具有我国特点的农田蒸发力?这些问题都值得深入探讨。不仅如此,问题还在于:即使确定了某种作物作为蒸发力的指标,那么计算出来的蒸发力值是否能代表整个农田蒸发力状况?这又是有待深入探讨的重要问题。

虽然蒸发力存在这样那样的一些问题,但作为衡量一个地区气象要素的综合指标,还是可以找到一个象征性的适宜的数值。即是说,我们应该把蒸发力作为一个假想的数字,这样,

蒸发力的问题就没有那么复杂了。

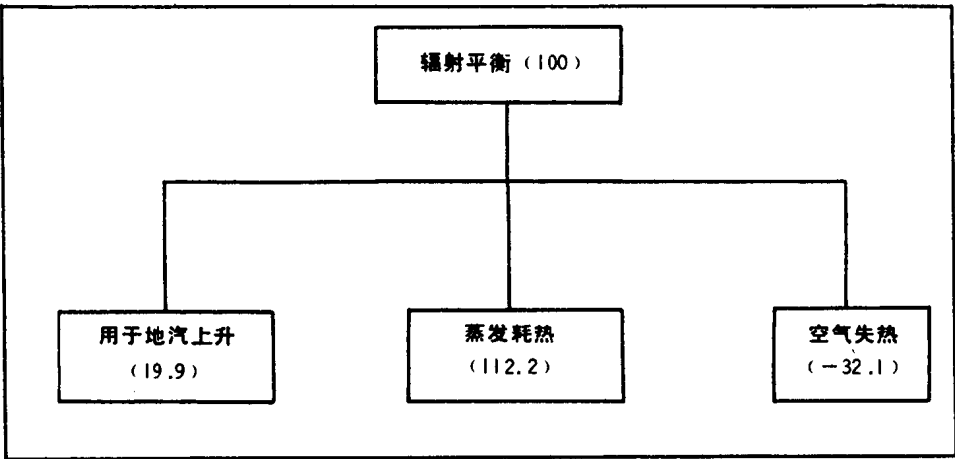


图 2-2 秧田辐射平衡

表 2-1 麦田热平衡分量平均日总和(焦/厘米²·日)

生育期 分 量	拔节-孕穗	孕穗-开花	开花-灌浆	灌浆-乳熟	乳熟-腊熟	腊熟-收割	拔节-腊熟
辐射平衡	1221.06	1388.08	1623.75	1458.40	1723.79	1214.78	1438.31
蒸发耗热	1151.57	1329.47	1739.28	1604.91	1845.19	1206.82	1479.75
乱流热交换	24.70	- 47.72	- 162.42	- 236.09	- 221.02	- 73.67	- 119.72
地中热交换	44.79	106.32	46.88	89.58	99.63	81.63	78.28
蒸发耗热	0.943	0.958	1.071	1.100	1.070	0.993	1.023
辐射平衡							

* 洪嘉璣,1980 年(山东禹城)

由于水面蒸发比较单纯,不像农田受到多种因子的影响,因此,许多学者都以水面蒸发量作为蒸发力的指标,这样就避开了农田的复杂性。

实际上,著名的彭曼公式也是以水面蒸发作为基础,首先导出水面蒸发力的计算公式,然后再根据草地蒸发量求出一系数而获得的。

根据我国自然地理条件的特点,我国湿润不足区面积广阔,作物布局十分复杂,土壤水分状况差异较大,在我国,采用水面蒸发量作为蒸发力的指标我们认为是适宜的。

我国通过长期水面蒸发实验研究,推导出一批适用于我国不同自然条件下的蒸发力计算公式。这些公式的主要形式是以道尔顿蒸发定律为基础,即

$$E_0=(e_0-e_{200})f(u)$$

许多实验都证实了 E_0 与 (e_0-e_{200}) 呈线性关系(图 2-3), E_0 与风速(u)呈函数关系。风的函数关系有各种不同形式,主要有:

$$f(u)=A+Bu$$

$$f(u) = A + Bu^n$$

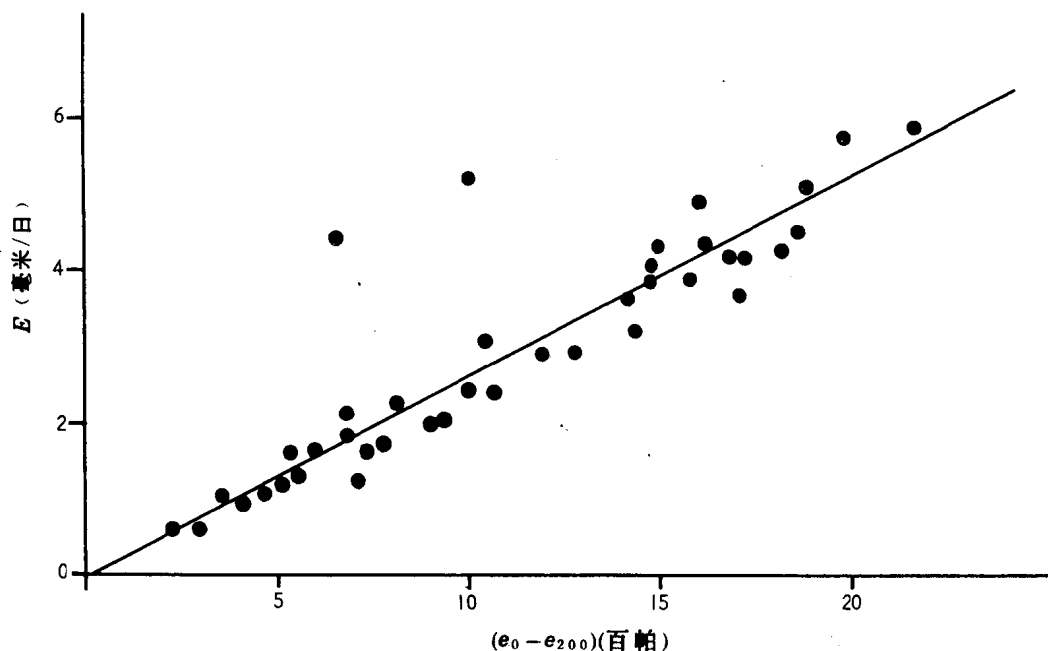


图 2-3 $E \sim (e_0 - e_{200})$ 相关图

表 2-2 根据水汽压力差和风速建立的水面蒸发公式

作 者	公 式 形 式
施 成 熙	$E_0 = 0.22(e_0 - e_{200}) + 0.31u_{200}^2$
广州水文总站	$E_0 = (e_0 - e_{200})(0.18 + 0.04u_{200}^{1.4})$
重庆水文总站	$E_{100} = 0.14n(e_0 - e_{200})(1 + 0.58u_{200})$
	$E_{20} = 0.18n(e_0 - e_{200})(1 + 0.43u_{200})$
	$E_{\text{全国}} = 0.20n(e_0 - e_{200})(1 + 0.32u_{200})$
江苏水文总站	$E_0 = 3.90(e_0 - e_{200})(u_{200} + 12.7)$
毛 锐	$E_{20} = 0.14(e_0 - e_{150})(1 + 0.78u_{150})$
	$E_{20} = 0.16(e_0 - e_{150})(1 + 0.61u_{150})$
营盘蒸发站	$E_0 = (e_0 - e_{150})(0.239 + 0.056u_{150})$
华东水利学院	$E_0 = 0.24(e_0 - e_{200})(1 + 0.14u_{200}^{1.4})$

根据图 2-3 和各地水面蒸发站的实验资料得知,水面蒸发量 E_0 和水汽压力差 $(e_0 - e_{200})$ 有较好的线性关系。基于此,施成熙(1964),广州水文总站(1968),重庆水文总站(1972),江苏水文总站(1976),毛锐(1981),孙芹芳(1981)和洪嘉珪(1982)等都相继确立了以道尔顿蒸发定律为基础的水面蒸发计算公式(表 2-2)。

应用上述公式时,必须解决在没有水汽压力差 $(e_0 - e_{200})$ 和 2 米高处的风速 (u_{200}) 观测资

料情况下,如何运用气象观测台站的资料进行间接计算的问题。因为计算水汽压力差所需的水面温度的资料相当少,2米高处风速资料也非常缺乏。因此,上述公式虽然有它的理论依据和实验基础,但应用于大面积蒸发力的计算还有待进一步完善。

在我国,以空气湿度饱和差(d)为主要指标,建立了一批比较简便适用的蒸发力计算公式,主要形式为:

$$E_0 = ad + b$$

众所周知,空气中的饱和水汽压与实际水汽压之差,是反映空气干湿程度的重要指标。空气愈干燥,饱和差愈大,蒸发速率也愈大。实验资料表明,水面蒸发与空气饱和差的关系极好。根据重庆水面蒸发站的测定,100米²蒸发池的蒸发量和饱和差(d)建立起来的 $E_0 \sim d$ 关系是一良好的线性关系(图2-4),这与我们在山东德州在实验结果是一致的。由于水面蒸发与空气湿度饱和差有着这样密切的关系,仅仅考虑这样一个气象因素来建立蒸发力计算公式是完全可能的。

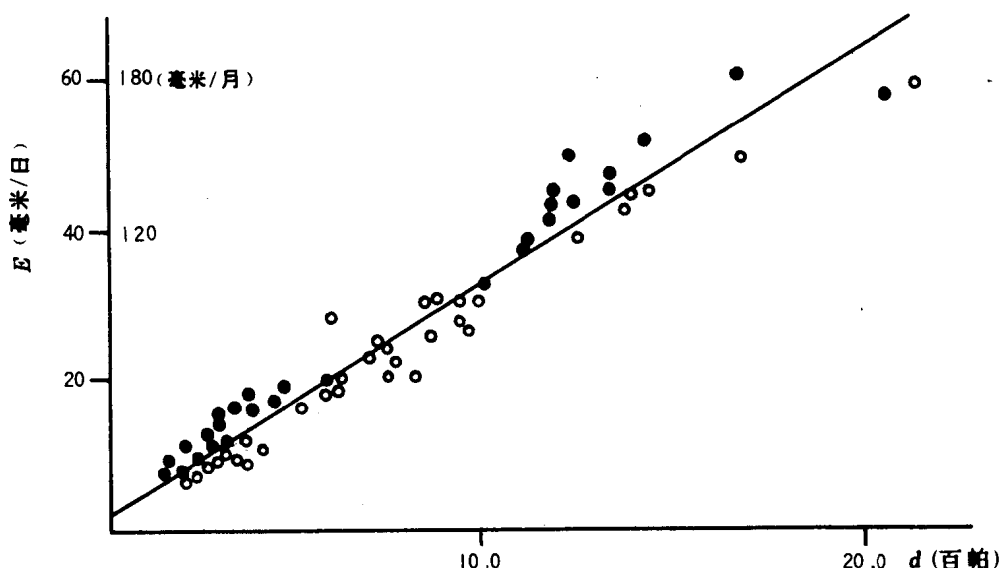


图 2-4 $E_0 \sim d$ 关系图

空气湿度饱和差公式系为经验公式。由于受到当地气候条件的制约,有一定地域局限性。以德州和重庆两地为例,水面蒸发量和空气湿度饱和差的相关系数都相当好,分别为0.99和0.98,计算值与实测值比较,平均误差为分别5.2%和5.7%,均优于其它计算方法,但两地处于不同的气候类型区,经验系数不相同。由此可见,任何一种经验公式都有一定的局限性,在选用时必须认真审查,选择适宜于本地区的计算方法。

我国学者建立的上述水面蒸发计算公式,由于有牢固的实验资料为依据,用于计算我国的蒸发力时,计算误差一般要小于外来公式。根据洪嘉璈对有关公式的计算值和我国广州、东湖、太湖、宜兴、官厅和营盘等地20米²蒸发池的实测蒸发资料比较(表2-3),国内公式平均误差和最大误差都优于外来公式。

根据德州试验站实验资料推导的五种水面蒸发计算公式和国外普遍采用的几个公式的比较结果来看(表 2-4),外来公式的计算误差同样较大。在我们的公式中,以空气饱和差公式最佳,其次是气温-相对湿度差公式,月蒸发计算相对误差分别为 5.4% 和 7.8%。

由表 2-3 和表 2-4 可知,外来的几个关于估算蒸发力公式,其计算结果与实际水面蒸发值相比较,无论是平均误差或是相对误差,都比我国确立的计算蒸发力的公式大,故在引用未经检验的外来公式时应当慎重。

我们认为,到目前为止,无论是国内或是国外,还没有一个公式计算出的数据能够全面地反映各种自然地理条件下的蒸发特征,每个公式都有其长处和不完善的地方。由此看来,蒸发力的计算问题尚未得到根本解决。

对于某一特定地区来说,在众多的计算蒸发力的公式中,选用那个公式计算出来的数值才能代表该地区的蒸发特征,这是大家所关心的。对于我国半干旱或半湿润地区而言,我们认为根据德州实验资料而建立的饱和差公式和气温-相对湿度差公式是适用的。这两个公式的计算值比较接近大型蒸发池的蒸发量(表 2-5)。我们将饱和差公式和彭曼公式计算的结果与官厅和三门峡两处 20 米² 蒸发池的蒸发资料作了比较,饱和差公式的计算值更能代表该地区的水面蒸发情况。从 4 月至 10 月的 7 个月中,官厅蒸发站 20 米² 蒸发池的总蒸发量为 911.0 毫米,饱和差法为 885.8 毫米,相差 25.2 毫米,而彭曼法为 1015.7 毫米,相差 104.7 毫米,相当于实际水面蒸发量的 97.2% 和 114.9%。同样,在三门峡蒸发站两公式的计算结果分别为实测值的 97.3% 和 120.2%。也就是说,采用饱和差公式,其计算值比实测值平均偏小 2.5~3.0% 左右,而彭曼公式则要偏大 15~20%,况且,从两地各月的偏差情况来看,饱和差公式比彭曼公式稳定。

蒸发力应用相当广泛。在实践上应用的一个重要方面是确定作物的需水量。由于作物需水量受气候条件的制约,因此,年际变化较大,一般不采用实际需水量,最常用的是相对蒸发量,即用作物需水与开阔水面蒸发量(蒸发力)的比值来表示,以此来推求作物的需水量。关于确定作物需水量的方法,我们在以后将作详细介绍。

表 2-3 不同方法计算值与 20 米² 蒸发池实测资料误差比较 单位:毫米/日

相 对 误 差 (%) 站 名 公 式 形 式	广 州		东 湖		太 湖		宜 兴		官 厅		营 盘	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
彭 曼 法	21.5	49.3	37.2	93.4	—	—	19.7	40.2	15.0	24.1	23.4	44.2
勃拉斯拉夫斯基法	6.6	25.8	10.6	37.0	12.9	43.6	16.0	33.6	10.4	30.9	11.3	43.4
施 威 照 法	9.0	30.4	9.3	34.2	11.1	39.9	13.0	31.0	7.6	21.3	10.3	41.3
洪 嘉 璉 法	8.9	22.2	9.8	29.2	9.3	25.9	8.5	22.8	7.3	20.0	9.5	25.6
资 料 年 代	1960 - 1965		1966 - 1979		1957 - 1966		1964 - 1968		1964 - 1970		1965 - 1977	
备 注	I —— 平均误差; II —— 最大误差											

* 洪嘉璉:有限水域表面蒸发的计算,1982 年。

表 2-4 不同方法计算误差比较

公 式 名 称	平均相对误差(%)	最大相对误差(%)
饱和差法 $E_0 = 11d + 20$	5.4	18.8
气温-相对湿度差法 $E_0 = 0.19(20+t)^2(1-r)$	7.8	18.1
风速-水汽压力差法 $E_0 = 0.203(1+0.52u_{200})(e_0 - e_{200})$	7.9	21.0
布迪科法律 $e_0 = \rho D(qs - q)$	9.8	23.2
积 温 法 $e_0 = 0.147 \sum t + 1$	11.1	26.4
饱和差 风速法 $E_0 = 0.33d^{1.1} - (1 + 0.1u_{200})$	12.7	29.4
彭 曼 法 $E_0 = \triangle R + rEa / (r + \triangle)$	20.3	50.3
桑斯威特法 $E_0 = 1.6(10t/i)^a$	31.7	68.2

表 2-5 蒸发力计算与实测值比较(毫米)

月 份	4	5	6	7	8	9	10	总 和
官 厅 实 测 值	116.1	161.3	158.0	138.9	127.6	121.0	88.1	911.0
饱 和 差 法	104.7	169.6	170.7	127.8	112.4	114.6	86.0	885.8
彭 曼 法	129.3	182.6	192.9	172.9	147.2	114.7	76.1	1015.7
实测—饱和差法	+11.4	-8.3	-12.7	+11.0	+15.2	+6.4	+2.1	+25.2
实测—彭曼法	-13.2	-21.3	-34.9	-34.0	-19.0	+6.3	+2.0	-104.7

月 份	4	5	6	7	8	9	10	总 和
三 门 峡 实 测 值	98.7	120.0	172.1	132.0	149.9	109.8	78.6	861.1
饱 和 差 法	88.2	125.6	197.1	124.5	134.4	91.5	76.1	837.4
彭 曼 法	120.4	159.2	205.2	179.6	180.4	111.6	78.5	1034.9
实测—饱和差法	10.5	-5.6	-25.0	7.5	15.5	18.3	2.5	23.7
实测—彭曼法	-21.7	-39.2	-33.1	-47.6	-30.5	-1.8	+0.1	-173.8

第二节 土壤水分状况是农田蒸发的限制因素

土壤水分状况是农田蒸发量大小及其变化的一个限制因素,因此,土壤水分的物理性质及其运动规律引起许多学者的极大关注。

任何时期的土壤水分状况取决于下列三个方面:土壤水分的补给来源、土壤水分的消耗途径和土壤水分的保蓄能力。前两项主要视气象条件和作物因素而定,后者取决于土壤性质。气象条件和作物因素在任何地区皆随季节而不同。土壤水分状况实质上是土壤水量平

衡的结果。本节着重讨论土壤水分的补给来源和土壤水分的变化特征。

一、土壤水分补给来源

土壤水分的收入项主要包括降水、地下水、凝结水、地表径流汇入和灌溉水等。通常降水是主要的。地势低洼地区,地表径流汇集也占有一定比重。在有灌溉条件的地区,灌溉水也是重要的土壤水分来源。地下水补给只有当潜水位较高,地下水能借助于土壤毛细管作用上升到作物根系层才有意义。水汽在土壤中的凝结,可以来自土壤底层的水汽,也可以来自大气,需要在一定的气象条件下才能发生。因此,一个地区的土壤水分补给状况必须综合评价各种补给条件及补给程度。

(一)降水对土壤水的补给

一个地区的降水量,既规定了对土壤水分补给程度,又规定了旱作农业可利用水分的上限。降水对土壤水分补给的有效性取决于降水量、降水强度、降水频率和降水季节分配。还取决于植被冠层的截留量、径流损失量和渗漏损失量。扣除上述损失而滞留在土壤中的水分,才是影响土壤水分状况的量。对农田土壤水分状况影响最大的当然是降水本身。如果降水量稍有变化,就会给土壤水分补给产生非常大的影响。降水量的波动对于农业来说是异常敏感的。

1. 关于降水测量误差问题

关于降水量的测量误差,国外一般采用大型集水器或蒸渗仪的测量结果进行校正。日本采用水量平衡法进行校正,校正后的降水量比实测值要大 10% 左右。苏联学者发现在山区和高纬度地区,由雨量计测得的雨量偏低,以致不少山区河流出现年径流量超过年降水量的不合理现象。

我国现有的降水资料,乃是根据 20 厘米口径雨量计测定的。许多学者研究证明,用这种雨量计测得的降水量,普遍存在偏小的倾向。造成测量误差的原因主要表现在下列几个方面:

(1) 用于湿润降水器的水量。湿润雨量器的水量,每次降水过程约损失 0.24 毫米。假若某地区有 100 次降水的话,那么这种损失量可达 24 毫米。

(2) 雨滴溅泼引起的损失。

(3) 降雨期间的蒸发损失。

(4) 翻斗式或虹吸式雨量计在翻斗或虹吸时引起的误差。据研究,每翻斗一次需 0.3 秒,在降雨量为 125~150 毫米/小时的情况下,每 6~7 秒就要翻斗一次,记录值要比实际偏低 5%。

(5) 风引起的误差。

在所有误差中,风是重要影响因素。由于雨量计上空气被迫向上运动,使降水有一个向上的加速度,影响雨滴进入筒内,雨点越小误差越大,微雨尤甚。当风速为 4~5 米/秒时,误差可达 3%;在 9 米/秒时,误差可达 5%。在大风时,降雨量误差最大可达 20%,风对降雪影响更大,最大误差可达 70%。

由此可知,目前的测雨仪器所导致的测量误差相当大。

国外学者不仅研究了造成测量误差的原因,而且还分析了这种误差在地域上的分布特征。表 2-6 是全球及亚洲各纬度实测降水量与订正后的降水量情况。