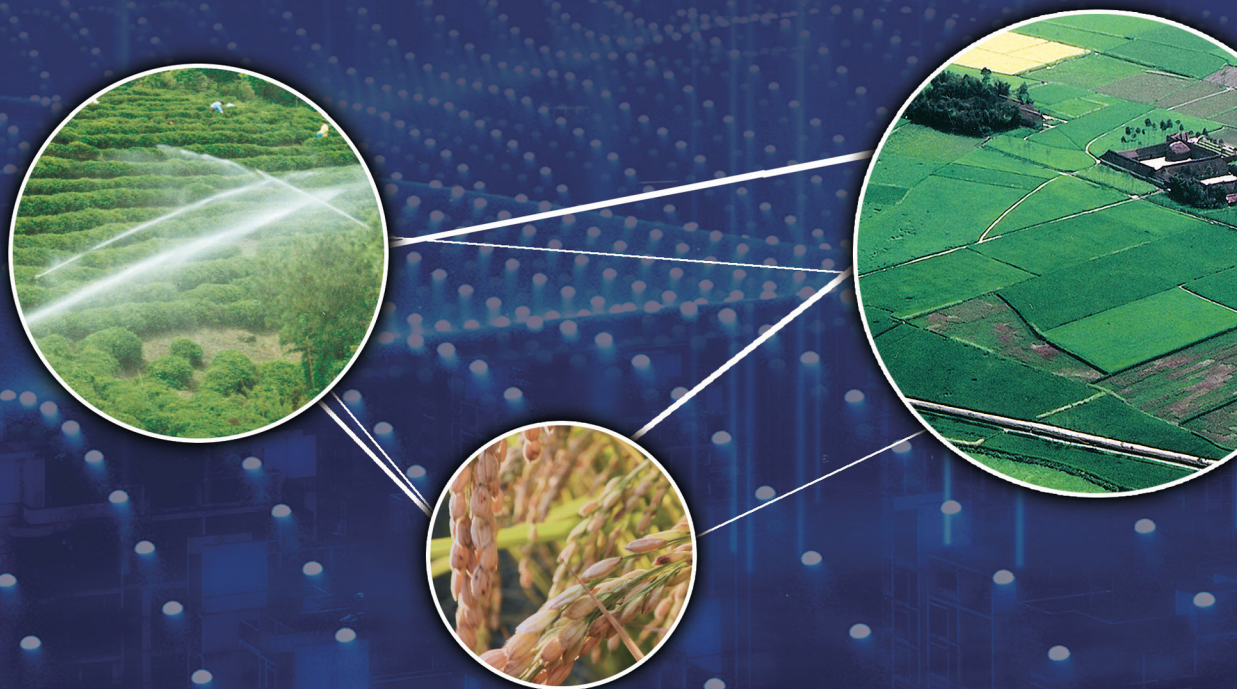


DUANQI ZUOWU XUSHUILIANG YUBAO
FANGFA YU YINGYONG

短期作物需水量预报 方法与应用

罗玉峰 陈梦婷 沈莹莹 李丹 杨洋 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

短期作物需水量预报 方法与应用

罗玉峰 陈梦婷 沈莹莹 李丹 杨洋 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 摘 要

较为精确的作物需水量预报是进行灌溉预报、灌溉决策、灌溉制度制定的重要支撑数据,是进行灌溉用水管理信息化智能化的关键要素之一。本书系统总结了课题组近10年来关于作物需水量预报的研究成果,主要内容包括基于气温预报的 ET_0 预报、基于公共天气预报和PM模型的 ET_0 预报、基于人工智能技术和公共天气预报的 ET_0 预报、基于数值天气预报的 ET_0 预报、基于天气预报的 ET 预报以及 ET 预报发布系统开发。

本书可供从事节水灌溉、灌区水管理的技术人员和管理人员阅读使用,也可作为高等院校相关专业的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

短期作物需水量预报方法与应用 / 罗玉峰等编著
— 北京:中国水利水电出版社,2020.12
ISBN 978-7-5170-9220-9

I. ①短… II. ①罗… III. ①作物需水量—预报
IV. ①S311

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第242005号

审图号:GS(2020)6989号

书 名	短期作物需水量预报方法与应用 DUANQI ZUOWU XUSHUIJIANG YUBAO FANGFA YU YINGYONG
作 者	罗玉峰 陈梦婷 沈莹莹 李丹 杨洋 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12印张 292千字
版 次	2020年12月第1版 2020年12月第1次印刷
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

水资源在社会经济发展中具有不可替代的作用，作为世界上人口最多的农业大国，我国农业用水量巨大，且灌溉水利用系数偏低，缺水问题不仅制约着我国经济、社会的发展，更直接关系到我国的粮食安全，因此提高灌溉用水管理水平对节约用水、保障灌区农业产量，充分发挥灌溉工程效益具有重要的意义。

提高灌溉用水管理水平的核心是制定并落实先进的动态用水计划，而实时灌溉预报是编制与执行灌区动态用水计划的必要条件。实行作物需水量的预报是灌溉预报的关键，为了较准确地预报灌水日期或估算非充分灌溉引起的减产率，必须预报未来一段时间内的作物需水量及其变化过程。因此，提出较可靠和准确的短期作物需水量预报方法，对减少作物生育期的水分消耗，实现实时灌溉管理和高效利用灌溉水资源是十分重要的。

我本人于 20 世纪 50 年代开始水稻需水量试验与计算方法研究，并于 20 世纪 90 年代开创灌溉预报研究，提出了作物需水量预报的逐日均值修正法。《短期作物需水量预报方法与应用》一书作者在作物需水量预报这一领域进行了拓展和丰富，取得了较为系统的研究成果。该书系统总结了作者在国家自然科学基金、国家重点研发计划课题等项目中的研究内容，展示了短期作物需水量预报的基本理论、基本方法、评价指标和应用效果等方面的最新研究成果。

该书在介绍作物需水量预报的基本概念、相关研究发展趋势与前沿的基础上，提出了基于天气预报的参考作物腾发量和作物需水量预报方法，探究了采用不同预报数据来源和不同计算模型之间预报精度和适用性评价，并将该方法应用于作物需水量预报发布系统开发，丰富和发展了作物需水量预报的方法和应用，推动了节水灌溉技术的发展。该书既突出了作者的研究成果，又比较全面地反映了国内外学科前沿的热点问题，在理论上有一定深度，所提的方法和指标也具有实用价值，体现了机理研究与技术创新的有机结合。本书对我国节水灌溉理论与技术领域的研究具有重要的参考价值，将推动我国灌溉信息化乃至高效节水农业的深入发展。

我非常高兴看到这样的专著出版，也很欣慰看到二十多年前我开创的研究方向在课题组延续并取得长足进展，衷心希望年轻一代科技工作者不断进步，为推动我国农业水利的科技发展做出贡献。在该书出版之际，特向从事农田水利、节水农业、灌溉预报、农业水土资源规划与管理等专业领域的科技工作者推荐，以期促进节水灌溉理论与技术研究，推动我国现代化高效节水农业的发展。

Handwritten signature in black ink, consisting of the characters '赫智' (He Zhi) in a cursive style.

2020年11月于珞珈山

前言

水是生命之源、生产之要、生态之基，水资源在社会经济发展中具有不可替代的作用，也是制约我国社会经济发展的重要因素。2019年《中国水资源公报》显示，农业用水量为3682.3亿 m^3 ，占当年用水总量的61.2%，其中灌溉用水约占91%。我国农田灌溉水有效利用系数为0.559，远低于发达国家的0.7~0.8，因此，高效利用农业水资源、发展节水灌溉势在必行。

节水灌溉的核心是实行计划用水，而计划用水的关键在于灌水预报。目前我国的灌溉预报方法尚停留在“静态”预报阶段，以历史资料为依据，编制几种典型水文年的用水计划，再依据当前的气象和水文作出预报调整。但是这种方法作出的灌溉预报往往不能满足实际灌溉需求，进而影响灌溉预报的准确性。近几年，“实时预报”作为一种“动态预报”得到很多学者的重视，以最新的实测资料和最近的预测成果为依据，以当前作物生长状况和土壤水分状况为基础，根据短期天气预报，对各灌区内作物的灌水日期及灌水定额作出预报。实时信息包含了很多的不确定因素，如预测时段内的气象条件和作物生长发育变化以及田间水分消耗等，而这些信息只有通过预测才能得到。因此，对灌区内作物短期甚至逐日的水分变化作出准确预报是实现实时灌溉预报的基本条件，也就是要求准确估算短期逐日的作物需水量，逐日作物需水量则被认为是确定与农业实践有关的水资源管理能量相互作用中最重要过程。因此，提出较可靠和准确的短期作物需水量预报方法，对减少作物生育期的水分消耗，实现实时灌溉管理和高效利用灌溉水资源是十分重要的。

本书系统总结了课题组近10年来在作物需水量预报的研究方法和主要成果，将公共天气预报和数值天气预报应用到参考作物需水量及作物需水量预报中，并开发作物需水量的网络发布系统，为我国节水灌溉事业提供新的理论基础和技术支撑。

本书共分8章：第1章介绍研究背景及意义，并系统总结了相关的研究进展；第2章提出了基于气温预报的参考作物腾发量预报方法，分析各种预报方法的误差，揭示预报误差产生机理；第3章提出了基于公共天气预报和PM

模型的参考作物腾发量预报方法，并与第2章提出的温度法模型进行对比评价，分析该方法在我国的适用性；第4章提出了基于人工智能技术和公共天气预报的参考作物腾发量预报方法，引入了基因表达式编程和人工神经网络技术对参考作物腾发量进行预报；第5章提出了基于数值天气预报的参考作物腾发量预报方法，探讨数值天气预报与公共天气预报在我国各地区以及季节上的适用性；第6章提出了基于天气预报的作物需水量预报，采用单作物系数法结合基于气温的参考作物需水预报方法进行作物需水量预报并对模型进行精度评价和优选；第7章结合上述章节的作物需水量预报方法，开发了基于Web的水稻作物需水量预报系统；第8章对本书进行总结，并对后续的研究进行了展望。

本书共8章，撰写分工如下：第1章由罗玉峰、陈梦婷撰写；第2章由罗玉峰、陈梦婷、李丹撰写；第3章由杨洋、罗玉峰、沈莹莹撰写；第4章由罗玉峰、魏广飞、胡旭铨撰写；第5章由陈梦婷、李丹、罗玉峰撰写；第6章由沈莹莹、李丹、钱坤撰写；第7章由罗童元、罗玉峰撰写；第8章由罗玉峰、李丹、陈梦婷撰写。全书由罗玉峰、沈莹莹统稿。

相关研究成果除在多次国际、国内会议上进行交流外，还分别以学术论文的形式在 *Agricultural Water Management*, *Journal of Hydrology*, *Water Resources Management*, *Irrigation and Drainage*, 《农业工程学报》、《中国农村水利水电》等国内外多家主要刊物进行发表，主要成果也在江西等省进行推广应用，本书系统总结近十年研究成果。

本书涉及的主要科研项目如下：

(1) 国家自然科学基金面上项目“南方湿润区水稻灌溉风险调控理论研究”(51179048)，2012—2015年。

(2) 国家重点研发计划项目“现代灌区用水调控技术与应用”(2017YFC0403200)子课题“南方提水灌区用水调控技术集成与应用”，2017—2020年。

(3) 江西省水利厅科技成果重点推广计划项目“江西省水稻需水量预报和网络发布系统推广应用”，2020—2022年。

(4) 浙江省水利河口研究院技术咨询项目“安地水库灌区实时灌溉预报模型创建指导”，2019年。

(5) 湖北省技术创新专项(重大项目)“基于物联网的智能水肥一体化精准控制关键技术与集成示范”课题“基于短期气象预报的智能灌溉决策模型研究”(2018ABA079-02)，2018—2020年。

(6) 中国灌溉排水发展中心委托项目“基于公共天气预报的作物蒸发蒸腾量实时预报研究”，2018年。

(7) 江西省重点研发计划项目“江西省水稻需水量预报与网络发布系统开发”(20171ACH80018), 2017—2019年。

(8) 西藏大学农牧学院柔性引进人才项目“高原主要作物需水量特征与灌区用水管理”, 2016—2018年。

(9) 国家重点研发专项计划项目“东北粮食主产区高效节水灌溉技术与集成应用”课题“多尺度作物高效耗水理论及灌溉制度优化”(2016YFC0400101), 2016—2020年。

上述项目的研究成果为撰写本书奠定了坚实的基础, 因此作者首先要真诚感谢在有关项目实施过程中先后合作过的各位同事和朋友, 感谢项目区所在单位的领导和科技人员对项目的完成给予了大力支持; 作者要特别感谢茆智院士对研究的指导、关心和支持; 此外, 参加研究和管理工作的人员还有吕辛未、Seydou Traore、白凯华、Yves Christian Bugingo、聂倩文、刘梦、刘博、晏成明、靳三宝, 在此一并表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中, 参考和引用了相关资料和许多国内外文献, 在此一并对有关专家、教授及同仁表示衷心的感谢。

由于作者水平有限, 书中难免存在不足之处, 敬请读者和有关专家予以批评指正, 以利于本书的修正完善和作者研究水平的提高。

作 者

2020年11月

目录

序
前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 作物需水量预报研究动态	2
1.2.1 作物需水量估算方法	2
1.2.2 作物需水量预报方法	3
1.3 研究方法	5
1.3.1 参考作物需水量预报方法	5
1.3.2 作物需水量预报方法	8
1.3.3 统计分析指标	8
1.4 主要研究内容	9
参考文献	10
第 2 章 基于气温预报的 ET_0 预报	13
2.1 数据	13
2.2 模型参数率定	14
2.2.1 率定方法	14
2.2.2 率定结果	14
2.3 预报精度评价	18
2.3.1 气温预报精度结果	18
2.3.2 ET_0 预报精度结果	19
2.3.3 HS 法 ET_0 预报敏感性分析	23
2.4 小结	26
第 3 章 基于公共天气预报和 PM 模型的 ET_0 预报	27
3.1 研究站点	28
3.2 数据获取	32
3.3 公共天气预报精度分析	32

3.3.1	温度	32
3.3.2	日照时数	38
3.3.3	风速	41
3.4	基于公共天气预报的 ET_0 预报方法比较	43
3.4.1	率定结果及分析	43
3.4.2	ET_0 预报精度评价	46
3.4.3	模型空间分析及适用性评价	72
3.5	小结	79
3.5.1	公共天气预报精度评价	79
3.5.2	基于公共天气预报的 ET_0 预报方法比较	80
	参考文献	82
第4章	基于人工智能技术和公共天气预报的 ET_0 预报	84
4.1	基于基因表达式编程和公共天气预报数据的短期参照作物需水量预报	86
4.1.1	材料与amp;方法	86
4.1.2	结果与amp;讨论	89
4.2	基于人工神经网络和公共天气预报的中期 ET_0 预报	95
4.2.1	材料和方法	95
4.2.2	结果与amp;讨论	97
4.3	小结	104
	参考文献	104
第5章	基于数值天气预报的 ET_0 预报	107
5.1	研究区域和数据	107
5.1.1	研究站点	107
5.1.2	数据来源与amp;处理	107
5.2	气象要素预报精度分析比较	110
5.2.1	最低气温	110
5.2.2	最高气温	114
5.2.3	净辐射	118
5.2.4	风速	122
5.2.5	水汽压差	126
5.3	ET_0 预报精度分析比较	130
5.3.1	基于数值天气预报的 ET_0 预报精度分析	130
5.3.2	基于公共天气预报的 ET_0 预报精度分析	134
5.3.3	空间分析与amp;适用性评价	138
5.3.4	季节分析与amp;适用性评价	140
5.4	小结	142
	参考文献	142

第 6 章 基于天气预报的 ET_0 预报	144
6.1 研究区概况及研究方法	144
6.1.1 研究区概况及数据	144
6.1.2 基于气温的 ET_0 计算方法模型率定	145
6.1.3 江西省气象站点分区及作物系数曲线推求	146
6.2 参考作物蒸腾量预报精度评价	147
6.2.1 气温预报精度评价	147
6.2.2 参数率定结果	149
6.2.3 率定后模型精度评价	151
6.2.4 ET_0 计算模型预报精度评价及模型优选	153
6.3 作物系数曲线 (K_c) 推求	156
6.3.1 南昌站点早晚水稻作物系数曲线推求	156
6.3.2 江西省气象站点分区和不同气候区作物系数推求	157
6.4 ET_0 预报精度评价及模型优选	158
6.4.1 江西省早晚水稻作物需水量预报精度评价	158
6.4.2 误差分析	160
6.5 小结	163
参考文献	163
第 7 章 ET 预报发布系统开发	164
7.1 水稻生育期简介及江西省早晚稻生长阶段划分	164
7.2 水稻需水量预报系统结构设计	166
7.3 水稻需水量预报系统功能设计	167
7.4 水稻需水量预报系统开发及工作原理	167
7.4.1 数据库子系统	168
7.4.2 水稻需水量预报模型子系统	168
7.4.3 水稻需水量预报网页发布子系统	169
7.5 系统界面展示及功能简介	170
7.6 小结	172
第 8 章 结论与展望	173
8.1 主要结论	173
8.1.1 公共天气预报精度评价	173
8.1.2 数值天气预报精度比较	174
8.1.3 基于公共天气预报的 ET_0 预报方法比较	175
8.1.4 基于人工智能技术和公共天气预报的 ET_0 预报	177
8.1.5 基于数值天气预报的 ET_0 预报精度比较	177
8.1.6 水稻需水量预报网络发布系统开发	178
8.2 展望	179

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

水资源在社会经济发展中具有不可替代的作用。随着我国人口的增加和经济速度的发展,我国水资源短缺现象日益严重。到 2050 年,全国供水量需增加至约 8000 亿 m^3 ,才能满足社会经济持续发展的需要,在 2030 年以前,我国水资源的供需矛盾仍将继续存在。农业用水是我国用水第一大户,2019 年《中国水资源公报》数据显示,农业用水量为 3682.3 亿 m^3 ,占我国总用水量的 61.2% (中华人民共和国水利部,2019),而农业灌溉用水占农业用水总量的 90% 以上 (冯保清,2013;陈瑶,2017)。2012 年中央一号文件指出:“必须把发展节水灌溉作为一项革命性措施和发展现代农业的基础条件,切实抓好。”2017 年,指导“三农”工作的中央一号文件突出强调“要把农业节水作为方向性、战略性大事来抓,加快完善国家支持农业节水政策体系,增强农业可持续发展的能力”。党中央、国务院多个文件的出台标志着大力发展节水灌溉事业迎来新的机遇,我国节水灌溉产业进入高速发展快车道。

节水灌溉的核心是制定灌溉用水计划,而灌溉用水计划的关键在于灌溉预报。科学合理的灌溉预报是实现有效管理灌溉用水、节约农业水资源的有效途径,也是编制动态用水计划、实现灌溉综合节水战略目标的主要内容。它不仅能够节约用水,而且能够提高灌区的农业产量,有利于推动节水灌溉的可持续发展。传统的用水管理主要依据历史时期不同水文年的配水方案预先制定灌溉预报进而定时定量进行灌溉或单纯依靠实时土壤水分状况进行土壤墒情预报指导灌溉决策,这些都不能较好地适应瞬息万变的天气条件。在目前水资源紧缺、水资源供需矛盾日益严峻,灌溉管理水平低下,农业用水浪费严重的情况下,将传统的农业灌溉理念转变为利用先进的节水灌溉技术制定更为符合实际的灌溉制度实时指导农民灌溉在实际应用中具有重要意义。

作物需水量预报是灌溉预报的核心内容之一,提出较为准确、可靠又便于应用的作物需水量预报方法,是灌溉预报的重点和难点内容。作物需水量预报的本质其实是对土壤水分状况的预报,依据土壤水分状况判断土壤水分亏缺从而制定灌溉制度,它不仅和土壤种类、作物种植情况以及气象条件有关,同时它受未来天气的影响很大,在灌溉预报中应将未来天气预报的因素考虑在内制定更为符合实际的灌溉制度。

基于此,2011 年起,课题组在国家自然科学基金、国家重点研发计划课题等项目资



助下,采用公众易于获取的公共天气预报数据,完成了基于气温预报的参考作物腾发量预报、基于公共天气预报和 PM 方法的参考作物腾发量预报、基于人工智能技术和公共天气预报的参考作物腾发量预报、基于数值天气预报的参考作物腾发量预报、基于天气预报的作物需水量预报以及作物需水量预报网络发布系统开发等研究,旨在提供一种准确、可靠的作物需水量预报方法,为灌区灌溉制度的制定提供理论支撑。

1.2 作物需水量预报研究动态

1.2.1 作物需水量估算方法

科学准确地估算作物需水量 (ET) 是确定灌溉制度和农业用水管理的基础,也是进行农田水利工程规划和设计的依据。估算 ET 的方法大致可分为直接计算法和间接计算法。直接计算法又可称为经验公式法,以实测数据为基础,分析其与影响作物需水量诸因素(如水面蒸发、气温、日照、辐射等)间的统计关系,归纳成相应的经验公式。这类方法只考虑了影响作物需水量的某一主导因素,且费时费力,耗资较多,并在推广应用上有一定的局限。间接计算法是指通过参考作物腾发量 (ET_0) 与此类作物相应的作物系数 (K_c) 的乘积得到充分灌溉条件下作物的蒸发蒸腾量,这种方法依据能量平衡原理,充分考虑了气象因素的影响,且计算结果具有较高的精度与较好的普适性,所以已有大量研究利用此类方法估算 ET 。

按照联合国粮食及农业组织 (Food and Agriculture Organization, FAO) 对参照作物腾发量的最新定义,其值为一种假想参照作物冠层的腾发速率,假想作物的高度为 0.12m,固定的叶面阻力为 70s/m,反射率为 0.23,非常类似于表面开阔、高度一致、生长旺盛、完全遮盖地面而不缺水的绿色草地的蒸发蒸腾量。目前计算 ET_0 的方法大致可分为蒸发皿估测、蒸渗仪测定及通过气象观测数据和数学模型进行估算。蒸渗仪安装维护等耗资较多,且受下垫面情况和田间土壤分布的时空变异性影响,其单点测量值所能代表的区域范围有限。蒸发皿在日常管理和维护上较为繁琐,且精度有限。利用气象数据通过数学模型估算 ET_0 可有效克服前两类方法的缺陷,目前已有大量采用气象数据和数学模型估算 ET_0 的方法,如 Thornthwaite (TH) 法、Reduced-set Penman-Monteith (RPM) 法、McCloud (MC) 法、Blaney-Criddle (BC) 法、Hargreaves-Samani (HS) 法和 FAO56 Penman-Monteith (FAO56-PM) 法等,其中,FAO56-PM 法因在全球范围内有较高的普适性且计算出的 ET_0 精度较高,被 FAO 推荐为计算 ET_0 和验证其他方法准确性的标准方法。

由于参考作物腾发量受气候地形影响比较大,目前有大量关于不同地区、不同气候条件下的 ET_0 估算的研究,如尚松浩 (2010) 利用山西潇河灌区实测温度资料和率定后的 HS 法模型计算出的参考作物腾发量与 FAO56-PM 法所得结果较为一致。王旭明等 (2014) 在辐射数据缺测的河套灌区,建立了基于饱和水气压差、温度和风速简单准确的 ET_0 估算公式。李志 (2012) 针对黄土高原地区以 FAO56-PM 法为标准对比分析了六种 ET_0 简易估算方法 (FAO-24Rad、FAO-24BC、Hargreaves、Priestley-Taylor、Makkink 和 Turc) 的适用性,并选出了最优方法。吴萍等 (2015) 以 FAO56-PM 法计算值为标准

探讨了 HS 法、MC 法和 Priestley-Taylor 法在青海省东部高原农业区气象资料缺测条件下的适用性。高瑞忠等 (2006) 用以随机样本建立的 BP 神经网络模型估算 ET_0 ，取得了较好的估算效果且很好地反映了气象因子和 ET_0 间的非线性映射关系。史晓楠等 (2006) 利用新疆四个典型气候区的气象资料比对了 ET_0 不同估算方法在该地区的适用性。Khoob (2008) 运用人工神经网络 (ANN) 的方法利用蒸发皿数据来估算 ET_0 。Ladlani 等 (2012) 针对阿尔及利亚北部地区的研究发现，逐日气象数据训练的广义回归神经网络 (GRNN) 计算 ET_0 的结果表现优于其他模型。Kisi 和 Cengiz (2013) 运用模糊遗传算法，利用逐日气象数据估算 ET_0 等。

作物需水量的估算是制定中长期灌溉用水计划的一个重要环节。在制定中长期灌溉用水计划时，根据气象预报所确定的水文年份和估算的作物需水量，可按水量平衡原理确定灌溉制度，得出灌水时间、灌水次数、灌水定额及灌溉定额，从而编制好用水计划，用于灌溉系统的规划设计和灌溉管理。

按照上述方法所制定的用水计划实际上是一套“静态用水计划”，这对于灌区在编制中期 (月) 和长期 (年或季) 的灌溉用水计划时是合理的。但在实际灌溉的过程中，由于任何季节，实际的气象因素、土壤因素及作物因素不可能与历史上的某一时期完全相同，也不可能与长期预测趋势完全吻合，因此使得提前编制的用水计划往往与实际灌溉要求不符，影响了灌溉计划的可靠性和灌溉水利用率。近年来随着农业现代化进程加快，灌溉系统也面临着升级改造的迫切要求。因此，应利用实时信息编制“动态用水计划”，即以实时灌溉预报为依据的动态取水、配水与灌水计划，它是充分利用实时信息和最新预测信息为基础的短期计划，因而对灌溉用水管理有较高的参考价值。

实时灌溉预报需要对各种最新的实际信息 (如田间水分状况、实际气象资料等) 进行分析处理，以此为依据，再对最近的预测信息 (如天气预报、作物生长预测等) 进行模拟分析，逐次预测作物所需的灌水日期和灌水定额。而作物需水量的实时预报就是实时灌溉预报的基础，因此研究与应用短期作物需水量预报有着重要的理论意义。

1.2.2 作物需水量预报方法

在灌溉预报研究中，作物需水量是农业用水的主要组成部分，它的准确计算与预报是灌溉预报的核心内容之一，直接影响着灌溉预报的结果。作物需水量的计算和预报主要有两种方法，实测法是获取作物需水量最可靠有效的途径，若当地具有比较齐备的试验统计资料，利用经验公式对作物需水量进行预测预报比较方便可取，但在大多数情况下实测资料的地区分布和时间序列比较有限，这给作物需水量的计算与预报带来很大影响。因此采用参考作物腾发量法进行作物需水量的计算与预报在实际中变得十分必要，它是计算作物需水量和进行灌溉管理的主要依据。作为作物需水量计算的主要参数之一，参考作物腾发量 ET_0 预报的准确性直接影响灌溉预报的精度，对区域水资源的优化配置有着重要影响，同时它也是灌溉预报和灌溉决策的基础，将直接影响着整个灌溉计划的进行。

参考作物腾发量反映了各气象条件对作物需水量的影响，根据参考作物腾发量计算实际作物腾发量，是实时灌溉预报和农田水分管理的一个重要步骤。在 2012 年以前，国



内外对参考作物腾发量预报的研究较少。

ET_0 预报旨在为灌溉预报提供数据基础,根据分析方法和输入数据的不同可将 ET_0 预报方法分为两类,即直接法和间接法。直接法以历史 ET_0 数据为输入,采用时间序列分析方法进行预报,国内外均有过相关研究。Tracy和Marino(1993)各自提出一种时间序列分析模型;Mao et al.(1994;1995)通过对多个站点参考作物腾发量序列在年内的变化过程的分析、比较,归纳出一种预报参考作物腾发量的模型,即逐日均值修正模型;蔡学良等(2003)和吕成长等(2012)对均值修正法中的参数进行了具体分析,给出了更合理的取值方法,以便提供更为精确的 ET_0 预报;罗玉峰等(2005)根据傅里叶级数和表示多年日平均参考作物腾发量在年内的变化过程改进了均值修正法模型,即傅里叶级数模型。随着人工神经网络的普及,越来越多的学者尝试将其应用于 ET_0 预报中,用以建立更加智能的预报模型。Trajkovic et al.(2003)利用神经网络模型对塞尔维亚七个研究站点的 ET_0 进行了预报,并且取得了较高的精度;霍再林等(2004)以河套灌区历史 ET_0 数据为样本,建立了该地区 ET_0 的人工神经网络计算预报模型,结果表明该预报模型精度较高;崔远来等(2005)将遗传算法与神经网络相结合,分别建立了进化神经网络模型与遗传-神经网络模型,提高了传统人工神经网络模型的预报精度;Chauhan et al.(2009)将拟牛顿算法与神经网络结合,取得了较高的 ET_0 预报精度。以上模型均基于历史时间序列分析,即依据历史 ET_0 变化过程预测未来的 ET_0 。当进行逐旬或者逐月预报时,由于 ET_0 变化的周期性,这类方法的预报效果较好。我国气候变化趋势与全球气候变暖趋势一致,极端天气发生概率增大,农业受气候变化的影响较为敏感。当进行逐日预报时, ET_0 受短期天气变化的影响更大,因此直接方法一般并不适用短期逐日 ET_0 预报。

间接法则将天气预报数据输入各种 ET_0 估算模型来进行 ET_0 预报,天气预报分为公共天气预报与数值天气预报。由于公共天气预报容易获取,因此目前的 ET_0 预报研究大多基于公共天气预报。Guo等(2011)将天气预报数据输入最小二乘决策支持向量机,Ballesteros et al.(2012)将天气预报数据输入训练好的人工神经网络模型,Xu et al.(2013)利用基于天气预报的多元回归方法预报 ET_0 ,蔡甲冰等(2005)将解析后的北京大兴试区日常天气预报信息输入FAO56-PM法,预测逐日参考作物腾发量。

公共天气预报容易获取,但是也有比较明显的缺点:预报气象要素少,进行 ET_0 预报时,需要将FAO56-PM法简化,或者利用较为简单的半经验公式;预报站点少,不适用于面上推广。而数值天气预报则正好相反,预报气象要素多,可以直接满足FAO56-PM法的要求;预报数据网格化,便于面上的计算。基于此,有国外学者利用数值天气预报进行了 ET_0 预报研究,如Duce et al.(1999)、Snyder et al.(2009)、Tian et al.(2012)、Palmer et al.(2012)采用数值天气预报数据来进行 ET_0 预报,其结果比统计模型更为精确。

上述研究结果反映,利用天气预报信息进行 ET_0 预报具有精度高、适用性强的特点。基于公共天气预报数据的 ET_0 预报方法有多种,但目前也只探索了有限的几个模型,而且目前研究选取的站点数较少,由于模型参数有较强的地域差异性,故上述 ET_0 预报方法推广存在困难。另外,基于数值天气预报的 ET_0 预报精度较高,但数值天气预报产品

具有很强的专业性，国内数值天气预报普及程度不够，目前基本未见相关研究报道。

因此，需要在不同地区比较多个基于公共天气预报和数值天气预报的 ET_0 方法，分析各种 ET_0 预报方法的误差及其原因，揭示 ET_0 预报误差产生的机理，提高 ET_0 预报精度，并探究不同地区最优的预报方法，发现各方法在空间上的优劣，为不同地区的灌溉管理者直接选取 ET_0 预报的最优方法提供理论支撑。

1.3 研究方法

本书涉及的主要研究方法包括参考作物需水量预报方法、作物需水量计算方法以及统计指标的计算。

1.3.1 参考作物需水量预报方法

六种参考作物需水量预报方法可分为两类：①基于气温数据和天气类型的综合法，即 Penman-Monteith Forecast (PMF) 法；②基于气温数据的温度法，包括 Hargreaves-Samani (HS) 法、Blaney-Criddle (BC) 法、McCloud (MC) 法、Thorntwaite (TH) 法、Reduced-set Penman-Monteith (RPM) 法共 5 种。

FAO56-PM 法被 FAO 推荐，且在众多地区均有很好的计算精度，被公认为 ET_0 计算的唯一标准方法，因而选取 FAO56-PM 法稍加改进得到 PMF 法用于预报。该方法需要的气象要素较多，天气预报无法提供该方法所需的所有参数。天气预报中的气温预报是各气象因子中预报准确率最高的，基于气温预报的温度法已被多项研究证实具有可靠的 ET_0 估算精度，且计算简便、所需参数少，因此本书采用了多个温度方法。

1.3.1.1 Penman-Monteith Forecast (PMF) 法

FAO 推荐 FAO56 Penman-Monteith (FAO56-PM) 法为逐日 ET_0 计算的唯一标准方法，因此，考虑到缺少 ET 试验测算数据，公式率定和验证通过 FAO56-PM 法实现 (Allen et al., 1998)。FAO56-PM 法计算所需气象要素较多，包括温度、太阳辐射、风速、土壤热通量和水汽压等。FAO56-PM 法计算公式如下 (Allen et al., 1998)：

$$ET_{0,PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1.1)$$

式中： $ET_{0,PM}$ 为 FAO56-PM 法计算的参考作物腾发量，mm/d； e_s 、 e_a 分别为饱和与实际水汽压，kPa； U_2 为距地面 2m 处风速，m/s； T 为距地面高度 2m 处日平均气温， $^{\circ}\text{C}$ ； Δ 为饱和水汽压与气温关系曲线的斜率，kPa/ $^{\circ}\text{C}$ ； γ 为湿度计常数，kPa/ $^{\circ}\text{C}$ ； G 为土壤热通量，取值为 0； R_n 为作物表面上的净辐射，MJ/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)。

FAO56-PM 法基于物理原理和能量平衡原理提出，在多个地区均具有较好的适用性。但如式 (1.1) 所示，该方法需要较多的气象要素，而公共天气预报仅提供气温、天气类型和风力等级三种气象要素，无法完成 ET_0 预报，因此，方法需要进行调整使其可用于 ET_0 预报。以下将基于 FAO56-PM 法调整后的方法称为 PMF 法。

(1) 太阳辐射。过往研究表明，在各个气象因子中太阳辐射对 ET_0 的计算和预报影



响最大，因而需要准确推算太阳辐射。蔡甲冰等（2005）提出了一种基于公共天气预报估算太阳辐射的方法，即通过天气类型预报估算日照时数，再通过日照时数推求太阳辐射。

天气类型为定性预报，包括晴、阴、雨（暴雨、大雨、小雨和雷阵雨等）、雪（暴雪、大雪和小雪等）、扬尘和霾等，然而定性预报无法直接代入式（1.1）中计算。因此，蔡甲冰等（2005）参考了FAO于1998年发布的报告并提出了一种解析法：不同的天气类型均有对应的日照时数系数（ a ），将日照时数系数与理论日照时数 N 相乘得到日照时数，再将日照时数通过式（1.3）和式（1.4）换算成太阳短波辐射量。因此，在整个太阳辐射的估算中，天气类型和日照时数系数之间建立的定性与定量转换关系，是太阳辐射能否准确估算的关键。根据北京市大兴区典型年（2004年）各类辐射之间的关系，建立了天气类型与日照时数系数之间的关系，并作了改进，见表1.1。

表 1.1 天气类型与日照时数系数的关系

天气类型	晴	晴转多云	多云	阴	雨	雪	扬尘	霾
日照时数系数	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.2	0.2

通过日照时数系数 a 估算太阳辐射的具体公式如下（Allen et al., 1998; Cai et al., 2007）：

$$n = aN \quad (1.2)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (1.3)$$

$$R_s = \left[(a_s + b_s) \frac{n}{N} \right] R_a \quad (1.4)$$

式中： n 为预测的日照时数，h； a 为日照时数系数，根据表1.1取值； N 为理论日照时数，h； R_s 为太阳短波辐射，MJ/（m²·d）； R_a 为地球外辐射，MJ/（m²·d）； a_s 为宇宙总辐射在阴天时到达地球的系数； $a_s + b_s$ 为宇宙总辐射在晴天时到达地球的系数；若缺少多年实测的太阳辐射数据率定参数，则推荐取值为 $a_s = 0.25$ ， $b_s = 0.50$ （Allen et al., 1998; 蔡甲冰等，2005）。

（2）饱和水汽压。根据FAO56文件，当露点温度缺测时，假设夜间温度降到最低时的空气湿度接近饱和状态，即认为露点温度与最低温度近似相等，则饱和水汽压可用最低温度 T_{\min} 做近似估算，具体计算方法如下（Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998）：

$$e^{\circ}(T_{\min}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 237.3} \right] \quad (1.5)$$

式中： $e^{\circ}(T_{\min})$ 为通过最低气温估算的饱和水汽压，kPa； T_{\min} 为最低气温，°C。

（3）风速。天气预报中的风力等级预报同样为定性预报，中国气象局发布的文件（CMA, 2003; CMA, 2005）提供了风力等级对应于距离地面10m处的风速值，故可对定性预报做定量转换。但用于PMF法计算的风速应为距离地面2m高处的值，说明10m处风速值还需要转换为2m高处风速值方可代入模型计算，故两次转换很可能引入较大误差。

张倩等（2015）在新乡站对公共天气预报开展了精度评价，通过对比风力预报转换