



西北农林科技大学

# 硕士 学位 论文

灌区实时灌溉预报和用水计划的研究

专业学位类型                   工程硕士  
领域名称                       水利工程  
论文作者                       丰尔蔓  
指导教师                       李援农 教授  
论文提交时间                   2020 年 5 月

Thesis Submitted to Northwest A & F University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Professional Degree of  
Master of Engineering

## Research on Real-time Irrigation Forecast and Water Use Plan in Irrigation Area

Degree Type: Master of Engineering

Field: Hydraulic Engineering

Candidate:Feng Erman

Supervisor:Prof. Li Yuannong

Date of submission: May 2020

College of Water Resources and Architectural Engineering

Northwest A & F University

分类号：S274.3

UDC：626

密级：公开

学校代码：10712

研究生学号：2017051934

## 西北农林科技大学硕士学位论文

# 灌区实时灌溉预报和用水计划的研究

论文作者：丰尔蔓

指导教师：李援农教授

答辩委员会：

西北农林科技大学水土保持研究所范兴科研究员(主席)

西安理工大学水利水电学院费良军教授

西北农林科技大学水利与建筑工程学院王文娥教授

西北农林科技大学水利与建筑工程学院王增红副教授

西北农林科技大学水利与建筑工程学院张智韬副教授

答辩日期：2020.05.28

本研究得到国家自然基金（编号：51979235）、陕西省农业科技  
创新集成推广项目（NYKJ-2019-YL58）资助。

## 研究生学位论文的独创性声明

本人声明：所呈交的学位论文是我个人在导师指导下独立进行的研究工作及取得的研究结果；论文中的研究数据及结果的获得完全符合学校《关于规范西北农林科技大学研究生学术道德的暂行规定》，如果违反此规定，一切后果与法律责任均由本人承担。

尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究结果，也不包含其他人和自己本人已获得西北农林科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同事对本研究所做的任何贡献均已在论文的致谢中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 丰尔蔓

时间：2020 年 05 月 28 日

## 导师指导研究生学位论文的承诺

本人承诺：我的研究生 丰尔蔓 所呈交的学位论文是在我指导下独立开展研究工作及取得的研究结果，属于我现岗职务工作的结果，并严格按照学校《关于规范西北农林科技大学研究生学术道德的暂行规定》而获得的研究结果。如果违反学校《关于规范西北农林科技大学研究生学术道德的暂行规定》，我愿接受按学校有关规定的处罚处理并承担相应导师连带责任。

导师签名： 高振农

时间：2020 年 05 月 28 日

## 关于研究生学位论文使用授权的说明

本学位论文的知识产权归属西北农林科技大学。本人同意西北农林科技大学保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅；同意西北农林科技大学将本学位论文的全部或部分内容授权汇编录入《中国博士/硕士学位论文全文数据库》和《中国学位论文全文数据库》进行出版，并享受相关权益。

本人保证，在毕业离开（或者工作调离）西北农林科技大学后，发表或者使用本学位论文及其相关的工作成果时，将以西北农林科技大学为第一署名单位，否则，愿意按《中华人民共和国著作权法》等有关规定接受处理并承担法律责任。

任何收存和保管本论文各种版本的其他单位和个人（包括研究生本人）未经本论文作者的导师同意，不得有对本论文进行复制、修改、发行、出租、改编等侵犯著作权的行为，否则，按违背《中华人民共和国著作权法》等有关规定处理并追究法律责任。

（保密的学位论文在保密期限内，不得以任何方式发表、借阅、复印、缩印或扫描复制手段保存、汇编论文）

研究生签名： 丰尔豪 时间： 2020 年 05 月 28 日

导师签名： 李振农 时间： 2020 年 05 月 28 日

## 摘要

在我国，灌区的管理水平和用水效率普遍偏低，水资源浪费和匮乏同时存在，多数灌区设备不够先进，全自动化的管理方式在国内难以实现。针对以上现状，开展对灌区实时灌溉预报和用水计划的研究，可以精准的指导灌水时间以及灌溉定额，合理安排渠系输配水，对提升灌区的管理水平、水资源的利用效率和灌区总效益具有重要意义。

研究以理论分析、模型构建及程序的编写和仿真模拟相结合，在对国内灌区实时灌溉预报和用水计划的研究方法进行理论分析的基础上，采用水量平衡法，对旱作物和水稻适用的水量平衡方程中各参数的预测和计算修正方法进行深入的研究分析，归纳总结国内灌区常用的渠系配水模型，建立通用型实时灌溉预报模型和渠系配水优化模型及修正思路，并以冯家山水库灌区的典型渠系进行了模拟应用，初步编制了该渠系的灌溉用水计划。

主要成果及应用结果如下：

1、鉴于实测土壤含水量每日获取的难度较大且对灌区设备要求较高，缺乏对无实测含水量值情况下土壤含水量计算修正的相关研究，本研究根据理论分析总结了普遍灌区适用的方法，按预报和计算修正两种不同的用途建立了作物基于水量平衡方程的实时灌溉预报模型，编写运行了实时灌溉预报计算程序，可以做到在无实测含水量值时的短期实时灌溉预报与及时修正。

2、考虑到模型的灵活性和精确度，基于国内灌区普遍渠系现状建立了基于灌区灌溉渠系分布的以总配水时间最短和各轮灌组间的配水时间差最小为目标的通用化两级渠道配水模型，提出了以满足用水户需求和集中灌溉为原则，利用计划灌水日与需水日的时间差和实时灌溉预报相结合以及统一灌水时长的思路进行修正，更便于灌区管理。

3、对典型灌区的秋作物进行了实时灌溉预报和用水计划初步编制的模拟应用，实践模拟表明本研究所建立的灌溉预报模型和用水计划初步编制结果在实际应用中较为合理，配水次序安排合理，需水量精确，且便于统一调控。理论基本可行。

关键词：实时灌溉预报；渠系配水；灌区管理；动态用水计划；土壤水分平衡法

## ABSTRACT

In China, the management level and water use efficiency of irrigation area are generally low, water resources waste and lack exist at the same time, most irrigation equipment is not advanced enough, and the full-automatic management mode is difficult to achieve in China. In view of the above situation, the research on the real-time irrigation forecast and water use plan of the irrigation area can accurately guide the irrigation time and irrigation quota, and reasonably arrange the water distribution of the canal system, which is of great significance to improve the management level of the irrigation area, the utilization efficiency of water resources and the overall benefit of the irrigation area.

The research combined theoretical analysis, model construction, programming and simulation. On the basis of theoretical analysis of the research methods of real-time irrigation forecast and water use plan in domestic irrigation areas, the prediction and calculation correction methods of each parameter in the water balance equation applicable to dry crops and paddy were studied and analyzed, and the common methods in domestic irrigation districts were summarized. The general real-time irrigation prediction model, the optimization model of canal system water distribution and the modification idea were established. The typical canal system of Fengjiashan irrigation area was simulated and applied, and the irrigation water plan of the canal system was preliminarily worked out.

The main results and application results are as follows:

1、In view of the fact that the daily soil moisture content is difficult to obtain, the requirements for irrigation equipment are high, and there is no study on the correction of no measured moisture content. According to the theoretical analysis, this study summarized the methods applicable to general irrigation areas, established the real-time irrigation prediction model based on the water balance equation according to the two different purposes of prediction and calculation correction, compiled and run the real-time irrigation prediction calculation program, which can achieve the short-term real-time irrigation prediction and timely correction when there is no measured water content.

2、Considering the flexibility and accuracy of the model, a general two-stage channel water distribution model was established based on the current situation of the general channel system in the domestic irrigation area, which aims at the shortest total water distribution time and the smallest water distribution time difference between irrigation

groups in each round. Based on the principle of meeting the needs of water users and centralized irrigation, the time difference between planned irrigation day and water demand day is combined with the real-time irrigation forecast and the irrigation time is unified for correction, which is more convenient for irrigation area management.

3、The simulation application of real-time irrigation forecast and preliminary preparation of water use plan for autumn crops in typical irrigation area was carried out. The practice simulation shows that the irrigation forecast model and preliminary preparation of water use plan established in this study are more reasonable in practical application, the arrangement of water distribution sequence is reasonable, the water demand is accurate, and it is convenient for unified control. The theory is basically feasible.

**KEY WORDS:** Real-time irrigation forecast ; Canal system optimized water distribution; Irrigation District Management; Dynamic water plan; Soil moisture balance

# 目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究的意义.....	2
1.2 灌溉预报国内外研究进展.....	3
1.2.1 灌溉预报的国外研究进展.....	3
1.2.2 灌溉预报的国内研究进展.....	5
1.3 远程技术在灌溉预报中的应用研究进展.....	7
1.4 现阶段研究存在的问题.....	8
1.5 研究内容与技术路线.....	9
1.5.1 研究内容.....	9
1.5.2 技术路线.....	9
第二章 灌区实时灌溉预报研究方法.....	11
2.1 研究区概况.....	11
2.2 基于水量平衡法的实时灌溉预报.....	12
2.3 灌区实时灌溉预报.....	14
2.4 灌溉预报方案.....	14
2.4.1 灌水日期与灌水定额的预报.....	14
2.4.2 灌溉预报的修正.....	15
2.5 本章小结.....	16
第三章 实时灌溉预报的预测模型研究.....	17
3.1 田间土壤水量平衡方程预报参数确定.....	17
3.1.1 时段初的土壤含水量预报.....	17
3.1.2 有效降水量的预报.....	17
3.1.3 作物腾发量的预测.....	17
3.1.4 地下水补给量的预测.....	21
3.1.5 计划湿润层深度增加而增加的水量.....	22
3.1.6 渗漏量与排水量的确定.....	22
3.2 实时灌溉预报的预测模型.....	23
3.3 扶风地区夏玉米实时灌溉预报的土壤含水量预测.....	28

3.4 本章小结.....	29
<b>第四章 实时灌溉预报的计算修正模型研究.....</b>	<b>30</b>
4.1 田间土壤水量平衡方程计算参数确定.....	30
4.1.1 时段初的土壤含水量测定.....	30
4.1.2 有效降水量的计算.....	32
4.1.3 作物腾发量的计算.....	34
4.1.4 渗漏量与排水量.....	35
4.1.5 其他参数.....	35
4.2 实时灌溉预报的计算修正模型.....	35
4.3 扶风地区夏玉米实时灌溉预报的土壤含水量计算.....	37
4.4 本章小结.....	38
<b>第五章 动态用水计划的编制.....</b>	<b>39</b>
5.1 配水流量与配水时间确定.....	39
5.2 灌溉渠系优化配水.....	40
5.2.1 常见的渠系优化配水模型介绍与分析.....	40
5.2.2 渠系优化配水建模思路.....	42
5.2.3 渠系优化配水的修正.....	43
5.3 典型渠系实时用水计划的实现.....	44
5.3.1 冯家山水库灌区夏玉米的实时灌溉预报应用.....	44
5.3.2 冯家山灌区渠系配水优化.....	46
5.3.3 渠系配水优化结果修正.....	46
5.4 本章小结.....	48
<b>第六章 结论与展望.....</b>	<b>49</b>
6.1 主要结论.....	49
6.2 创新点.....	50
6.3 存在问题及展望.....	50
<b>参考文献.....</b>	<b>51</b>
<b>致谢.....</b>	<b>57</b>
<b>个人简历.....</b>	<b>58</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

#### 1.1.1 研究背景

水资源在保持地区的生态系统的平衡问题上一直占据着重要的位置，水资源的重要性以及不可替代性受到广泛的关注，水资源问题是当今国内外最受瞩目的问题之一。水资源是一个国家经济与社会发展的保障，同时可以体现出国家的综合国力。我国总体耕地面积列世界第二，但同时也是较为缺水的国家之一，明显存在水资源供需的不平衡。我国现有总耕作用地面积约为1.2亿公顷，有效灌溉面积大约只占其1/2，在这片土地上产出了全国75%的粮食作物以及90%的经济作物（齐学斌等 2015）。由于水资源有限，时空分布不甚均匀：东、南较充沛，西、北较干旱；夏秋两季多雨，冬春少雨，沿海多而内地少，我国长江以北地区的耕地面积占全国六成以上，但水资源占有量只占两成左右，三成国土面积的年降雨量低于250 mm，农业生产力和现有水土资源并不匹配，存在严峻的供需矛盾。

这些年来，随着人口不断增长，经济迅猛发展，工业产业及生活需求逐渐进步，水资源供需不平衡的问题也日益突出，水资源问题已然在我国经济发展和生态环境保护中占据重要一席。按照目前我国用水数据来看，中等干旱年的缺水量约达360亿m<sup>3</sup>，仅农业方面的缺水就有300亿m<sup>3</sup>。上世纪九十年代以来，每年平均会有2000万公顷以上的地区发生干旱，多城市存在水危机，河流断流现象层出不穷，缺水范围甚至已扩展至我国南方局部。由于地表水的缺乏从而造成的地下水过度开发，使得全国地下水漏斗面积在本世纪初已达15万平方公里。

根据中华人民共和国水利部2018年全国水利发展统计公报（2019）的数据，我国水资源总量减少至27462.5亿m<sup>3</sup>，比2017年减少4.5%；全国年平均降水量682.5毫米，比多年平均偏多6.2%。根据全国大中型水库的数据统计，年末蓄水量为4104.3亿立方米，较年初蓄水量降低了38.0亿立方米。全国用水总量超六千亿立方米，其中，生活用水约占14.3%，农业用水占61.4%，工业用水占21.0%，人工生态环境补水占3.3%。与2017年相比，用水总量减少近30亿立方米，其中，农业方面减少73.3亿立方米。2018年，人均用水量432m<sup>3</sup>，耕地实际灌溉亩均用水量365m<sup>3</sup>，农田灌溉水有效利用系数0.554。

全国已建成22873处设计灌溉面积在2000亩以上的灌区，所涉耕地灌溉面积达37752千公顷。其中：有175处灌区规模在50万亩以上，灌溉面积12399千公顷；286处灌区规模在30万~50万亩，灌溉面积5400千公顷。截至2018年年底，全国灌溉总面积

74542千公顷，其中耕地灌溉面积68272千公顷，占全国耕地面积的50.7%。节水灌溉工程面积36135千公顷，微喷灌面积11338千公顷，低压管灌面积10566千公顷。

世界上发达国家的农业耗水占比普遍约为总量的一半。我国已从八十年代的近九成低至到如今的六成。农业的缺水局面难以逆转，一方面北方大多数地区的水资源已很难继续开发，潜力不大（黄永基等 2000）。另一方面我国的农业灌溉耗水量大却伴随着水资源的浪费，灌溉效率不高。因此如何合理高效地利用匮乏的水资源是今后农业生产中的重点解决的问题之一（康绍忠等 2000；易艳 2017），而对灌区进行高效的管理则是合理利用水资源的一种有效模式（党力 2000；吕宏兴等 2003；冯保清和姜海波 2002；陆孝平 2002；齐学斌等 2015；易银莲等 2018）。

灌区用水治理的关键举措之一就是实行计划用水，所谓计划用水就是结合灌区的引水情况与渠道运行的工程状况，按照水源的供水情况和作物生长的需水要求，进行有计划的引配水。它可以提高灌区的用水管理水平、提高田间水利设施的效益（汪志农和冯浩 2001）。同时国内农业的发展也对用水治理提出了现代化、高标准的新要求。现代化农业不单要强调产量，在农作物品质、外观以及收获时期等方面也愈加重视，这就要求对灌溉计划作出准确的预判，即灌水时间、灌水量、微量元素等。

灌溉的自动化管理是当今世界上农业发达的国家都在追求的目标，以色列、日本、美国等世界一流农业国家水资源利用率高达70%~80%，水分生产率(粮食)能达到 $2\text{kg}/\text{m}^3$ 左右。水资源的高效利用对现代化农业的进程至关重要，灌溉趋势也在由传统的充分灌溉向非充分转型，必须将水源引水、输配水、气象、蒸发、农作物需水规律等方面统一度量，对灌区用水进行计划和监测，在灌溉农田中大力推广节水灌溉技术，按需计划，对灌溉用水开展合理的预报，采取动态化治理，实现灌溉过程的自动化。并且为了适应各灌区不同的管理需求与目标，很多灌区在追求探索信息化建设，重点完善田间信息的采集，建立数据库、开发田间水分监测系统、灌区用水管理系统等，用以提高灌区农田用水的利用效率（韩振中 2016）。

### 1.1.2 研究的意义

以上现状表明我国水资源总量依旧短缺，大中型灌区的灌溉用水量在我国用水总量上占比较大，灌区农业生产在我国农业生产中占据重要地位（罗琳 2016；阎存立 2015）。国内外多项研究表明，灌区管理水平的提升能够激发灌区节水灌溉的潜力，科学的高水平的用水管理甚至能够节水20%（曹永梅 2017）。因此探讨如何做到灌区水资源的高效利用与加强节水灌溉是符合现实发展且迫在眉睫的事情，其中灌区实施灌溉预报和编制动态用水计划是加强灌区管理的重要举措之一。

灌区编制年度用水计划用以指导该年的灌区农业灌溉是一种常态，通常是以完成灌区年度生产、灌溉等任务为目标，以典型水文年为参照，依照灌区的水源可供水情

况，农作物的种植和需水情况，再加上灌区渠系工程状况，预测灌溉定额和灌溉时间，做到有计划的取水和灌水。但是这种常规的用水计划缺乏灵活性，在种植制度调整、气象条件变化、管理措施变化等因素的综合影响下，无法以实际情况做出调整。若我们通过对作物需水量进行平衡分析，充分应用灌区的监测与预报系统，在获得作物生长发育的实时数据及土壤墒情情况下进行旱情预报，用以预报作物的需水量和时间，即作出实时灌溉预报，同时及时依据实时数据计算修正结果，再根据其结果进一步进行渠系的输配水规划，得到动态预报的用水计划，才可以做到“精细化”灌溉。依据动态用水计划的实时编制方案来确定田间的灌溉方案，能够有效地提升灌区水资源利用效率和实现灌区农作物的高效生产，动态计划用水的探索与编制意义重大。

## 1.2 灌溉预报国内外研究进展

### 1.2.1 灌溉预报的国外研究进展

灌溉预报通常运用在灌区管理中，根据不同作物的需水量需求和适宜含水量上下限，确定一定时段内的需水量，进而算得下次的灌溉方案。在这个过程中，如何及时精确地确定田间土壤墒情是进行灌溉预报的重点，所以对田间土壤墒情进行及时的动态预报是灌溉预报的出发点和关键所在。

田间水分信息的采集目前主要有两种：田间测量和遥感测量。田间测量的措施又可分为取样法和定位法。取样测定法主要包含烘干法、比重法、实容法、称重仪法、离心机法、蒸汽压法、超声波法、压力板法、冰点下降法和一些化学方法（王大龙和舒英格 2017），其中测量土壤含水量的最常规、最传统的方法当属烘干法，精确度也较高。定位测定法主要包括基于土壤介电特性的测量方法（时域反射法、频域反射法、探地雷达法、驻波率法）、电容法、微波法、电阻法、极化法、电位差法、张力计法、热电偶法、热传导法和射线测定法（中子仪法、 $\gamma$ —射线法、 $x$ —射线法）（何武全等 2002），中子仪、张力计也是其中使用较为广泛的仪器。遥感监测法有热惯量法、植被指数法、地表温度法、反射率法、温度-植被指数法、微波技术遥感法、作物水分胁迫指数法和高光谱法等（郭焘和于红博 2018；Seokhyeon et al. 2019；田源等 2017；吴黎等 2014）。

土壤含水量的预报研究在国外开始于七十年代，国外一些发达国家的学者就已经对土壤水分的测定和预报开展了相关的试验研究：Davis等人（1975）描述了土壤含水量监测传感器，Lewin（1974），Hillel（1976），Neibling（1977），Gear（1977），Jong（1979）等人开始进行土壤含水量的测定、监测，分析其动态变化，在此研究基础上一些学者对土壤墒情预报模型的建立进行了初步的探索，提出了相关思路，运用试验数据统计、土壤水量平衡以及水动力学原理等建立简易模型，但并未投入生产。值得

一提的是，Schmer (1974) 在农田土壤水分监测上使用了遥感技术，一定程度上推动了遥感在农业生产上的发展，为现代农业中运行的遥感监测技术奠定了根底。

八十年代，国外迎来了土壤含水量预报的全面发展，中子仪等设备已在美国开始应用于灌区的土壤含水量的监测，资料表明采用仪器进行预测的结果与实际灌水契合比较高，墒情预报的相关理论也在这阶段应运而生。这期间对土壤墒情的预报模型研讨覆盖十分广泛，实用性增强，遥感技术在大面积监测水分含量应用中也发展迅速。1982年，Dejong (1982) 对不同深度土壤的含水量进行分析，并且分别建立了相应的预报模型；Maidment、Huchinson (1983)，借助地区多年的气象数据，根据作物、土壤、气象等建立计算灌区内各田块水分预报的模型，借助水量平衡原理对作物需水量进行预报；Jain (1985) 采用随机方法研究作物、土壤和气象信息对需水量的影响建立灌区土壤含水量的预报模型；Smith (1985) 提出了借助模拟多年的灌溉制度变化来制定所求年灌溉制度的思路，经过了大量的灌溉试验；1986年，Aboitiz等人通过多年试验数据建立了土壤水分的随机预报模型；1988年，Feddes对当时的预报模型进行了总结，表示当时土壤水分研究的范围尚集中于某一区域，模型也多为集中参数模型，以借助水量平衡方程以及土壤水动力学方程为主。

上世纪90年代以来，土壤水分模拟技术受到广泛关注，发展迅速，国际权威的组织针对其召开多次学术会议进行研究，从而奠定了土壤含水量预测的学术研究基础。这一时期研究的方法大多以土壤水分平衡模型为基础：Robinson等人 (1990) 探讨了通过土壤水分平衡来预测土壤水分的模型，并在美国高原地区对玉米、小麦等作物进行研究；Foroud等人 (1992) 基于作物根部的日水量平衡提出了LRSIMM模型，由该模型做出灌溉决策；1993年，Zelt等借助土壤水平衡方程，模拟了美国中部大平原近三十年的土壤水分情况，得到了作物需水量的年均估算值等；Hess (1996) 将实时灌溉方案分成四个模型（参考与实际作物蒸腾量，土壤水量平衡，以及灌溉预报），提出了农田灌溉系统指导用水；Mahmood, Hubbard (2004) 采用土壤水量平衡法，对不同水文气象下不同作物的土壤水分进行预报。这些方法大多依托于水量平衡模型，依靠历史气象、土壤等资料，做不到实时预报。

土壤墒情监测理论研究用以指导实践，更进一步的推动了土壤含水量监测设备的研制，传统监测技术与新兴技术共同发展，中子仪、时域反射仪等监测仪器层出不穷，多样化与专业化提升：1998年，Weimann采用遥感技术获取的数据，由土壤含水量和后向散射系数的关系建立土壤水分计算模型；Wolfgang等人 (1999) 提出了利用散射仪数据来监测土壤湿度的模型；Kamai等人 (2009) 提出了热脉冲探测的改进方法，土壤含水量测量精度更高；Mccartney等人 (2006) 针对水分反射仪在雷电情况下误差较大的情况开发了修正模型；Scott等人 (2003) 利用遥感技术绘制土壤水分图等等。

如今，计算机技术、遥感（RS）、地理信息系统技术（GIS）的发展促进了灌溉预报系统的研究，国外将田间信息的采集、传输、分析集于一体，结合土壤水分运动的理论本质对土壤含水量进行预报，建立灌溉决策支持系统。这需要渠系设施、监测设备、通讯信号、高效的田间管理等的高度配合，现阶段暂不适合我国国情。

### 1.2.2 灌溉预报的国内研究进展

我国对灌溉预报开展的研究自80年代初开始，略晚于国外，国内学者以土壤水分作为预报参数，研究多种灌溉预报措施并应用于实际农业生产，效果显著。这些措施主要可以按确定性和随机性划分，确定性方法意味着将土壤水分的变化视为确定性的变化，土壤水分受几个确切的因素（土壤类型、作物类型与生长状况、气象条件等等）影响，根据它们之间的关系建模求解，随机性方法意味着将土壤水分消耗过程的随机性纳入考虑，普遍不考虑各参数与土壤水分运动是否存在物理关系，所需参数较少，但通用性较低，当年气象变化大时结果易不稳定。

确定性灌溉预报措施主要可按消退系数法、经验公式法、土壤水动力学法、水量平衡法四类划分。

经验公式法与消退系数法的共同之处是都具备参数少、操作简单、时域地域限制的特点，差异在于经验公式法依靠平均气温、降雨量、饱和差等与土壤含水量相关的因子来预测土壤水分，精准度不高，而消退系数法则是依据历年田间土壤水分的数据来进行水分预报，所需观测资料较多，试验结果推广有难度。

早在1994年，康绍忠等开始利用经验公式法对土壤水分进行了预测，试验在干旱地区灌溉条件下进行，在干旱地区该方法的适应性良好，有降雨情况下水分消退也可适用；2000年，尚松浩等利用土壤水分的变化率和贮水量的正比关系，对冬小麦的生育期进行土壤水分预报，建立经验递推模型；马孝义等（2002）研究了0.6—1.5m深的消退指数与作物生长时间的关系和冬小麦生育期的土壤墒情预报方法；粟容前等（2005）将经验模型与消退指数模型同时应用于汾河灌区，根据多年实测土壤水分与气象资料建立墒情预报，结果表示消退指数模型精度略高。

水量平衡法预测土壤水分，其理论基础是借助水量平衡方程估算计划湿润层内的田间含水量。田间土壤水分处于一种动态平衡中，它的量与地下水的交换、地表径流、灌水量、降雨量、蒸发蒸腾量等等息息相关。应用水量平衡方程，根据作物实际生长状况、土壤类别以及气象预报等输入方程中所需参数，求得土壤含水量的预测值即水量平衡法的基本思路。

李保国（1991）对分布式的土壤水平衡方程作出研究，并结合GIS技术，进行区域的土壤水贮量预测；肖俊夫等（1997）针对不方便根据平衡方程推算含水量的情况提出了反推法，即假设该田块正处于适宜水分的下限，反推出上一次灌水时间来预报

灌水情况；申双和、李胜利（1998）对J.T.Ritchie等提出的土壤水分平衡模型进行了改进，对原模型中的蒸发蒸腾量等进行修正；1994年李远华依托水量平衡方程，输入作物生长参数、降雨量等，提出不同条件下适合的模型，1997年根据多年的历史资料分析和预测作物蒸腾量，以水稻为例做出了需水量的预测，对实时灌溉预报建模；顾世祥等（1998a b）在霍泉灌区采用修正的彭曼公式对小麦、玉米进行需水量的预报分析，运用计算机系统进行作物需水量预测和模拟渠系配水；茆智等（2002）对土壤水分的预报提出修正，提出用一些易得的数据替代原模型的气象、作物因素；马建琴等（2011）考虑到当时的灌溉预报对降雨资源无有效利用，提出了将降雨等短期实时气象结合在灌溉制度模型中的思路，并且以冬小麦为例，基于作物生长情况模拟与土壤水量平衡的原理编制软件；张振伟和马建琴（2014）建立了解决作物日需水量的灌溉预报模型，并在模型中模拟了作物系数，计划湿层深度，土壤湿度校正等参数；魏子涵等（2015）在计算典型灌区的灌溉水利用效率时运用了水量平衡法；倪深海等（2018）在计算净灌溉用水量时采用了水量平衡法。

土壤水动力学法基于SPAC理论，将田间地块垂直分层作为研究对象来探究水分传输过程，土壤水分运动结合地表水、地下水情况，根据作物全生育期内的各项参数（根系深度、气象情况等等）分层预报土壤水分（基质势）的动态变化过程。相较于水量平衡法，它在较小的时域尺度上具备更高的精度要求，这也得益于它对水分运移过程更精准的分析。土壤水动力学法预测土壤含水量的不足在于它所涉及的土壤、作物参数测定困难，并且需要根据特定地区、作物情况才能得出，不同地区的参数不能混用，难以在实际田间大范围应用。

李陆泗等(1990)采用此方法对禹城试验站的果树进行了灌溉预报，将作物、土壤以及气象等影响因素统一把握，准确度高；邵明安（1987）康绍忠等（1992）均对根系吸水提出了相应的模型，邵明安提出了可以借助增加根的长度和数量提高水分利用效率，模型应用上需要根系分布、阻力、根水势等难以测定的资料，康绍忠的模型在此基础上改良，使用的参数更加简便易得，在1997年，康绍忠等又进一步提出了利用实测资料对全生育期的玉米建立土壤水分的动态预报模型；李熙春、尚松浩（2003）根据华北地区独特的地域特点，建立了两种情况下的土壤水分模型：作物生长下的水分运移模型以及冻融下的水热运移模型，并且应用于华北地区常见的冬小麦-夏玉米种植模式中；李艳芳（2009）在研究西安地区苹果林地土壤含水量时应用了土壤水动力学法；朱忠礼等（2012）根据土壤水动力学在海河流域的三个观测站建立了非饱和的土壤水分运动模型；吴姗等人（2014）从土壤水动力学的经典模型入手，介绍了溶质运移模型、根系吸水模型等的研究进展。

随机模型一般分为时间序列模型、回归模型以及神经网络模型等等，顾名思义，随机性方法意味着将土壤水分动态消耗过程的随机性纳入考虑，所涉参数少于确定性

方法，但是稳定性有待考究，特别是气候年际变化大时。康绍忠等于1990年采用时间序列的通用加法模型对武功、永济、扶风的试验站进行土壤水分的动态预测；2000年，李靖等采用时间序列的预测手段对灌区进行需水量的预测；罗长寿等（2002）针对重庆市丘陵旱坡地使用季节性时序模型来预测20~30 cm, 0~30 cm土层内的土壤水分；王立坤等(2004)采用了富锦试验区15年的实测资料，对实验区的水稻需水量利用时间序列法建立了预测模型；刘振忠等(1997)选取土壤介电常数，电介质和环境温度，采用回归分析法成立了它们与土壤水分的回归模型；郭富兴等（2019）对陕西不同区域的苹果林采用回归模型计算土壤含水量动态变化；2002年尚松浩等人采用了冬小麦的土壤水分资料，建立BP网络模型用以预测土壤含水量，在不同灌水处理情况下实施预测，效果较好；程殿龙等人（2002）也利用神经网络模型实施土壤水分的预报，同时通过与观测数据的分析比对，表明神经网络模型在预报土壤含水量方面有很大的应用前景；陈红卫等人（2005）基于人工神经网络建立了针对水稻作物的非充分灌溉条件下的土壤水分模型，并在试验区实施了模拟预测，预测结果与实测资料对比得出模型精确度较高的结论。

目前国内外对于灌溉预报已经有了比较完善的计算体系，但在实际灌区的操作中，如何采用简便的方式对实时的作物生长数据、气象数据等加以利用，制定即时的灌溉方案以指导用水是灌区实时用水计划制定的重点和难点。

### 1.3 远程技术在灌溉预报中的应用研究进展

卫星遥感技术在水资源、地形地质、国土资源、植被资源、测绘等等方面得到了普遍的运用。由于运用遥感技术监测自然环境相对于常规的监测方法更为精确和全面，同时可获得大量图像数据显示其动态变化过程，对于研究水文水循环过程、水量平衡等方面具有很大的优势。遥感技术可以为旱情监测、降雨监测、洪水监测等情况进行动态监测，利用长期的动态的数据方便对洪水涉及区域、受灾程度和受灾面积等进行初步估计。以3S技术（RS、GIS、GPS）为辅助的新型农业已经成为现代化农田信息监测领域发展的重要发展趋势之一，具备多样的应用可能。

上世纪六十年代末，国外开始探讨如何应用遥感技术来测定土壤水分，探究光谱反射率与土壤含水量的关系，土壤水分微波的反演方法也开始萌芽。往后十年，土壤水分遥感反演监测技术飞速发展，波段涉及可见光、微波、热红外、红外线（Schmugge et al. 1974）等等，应用面十分广泛。进入八十年代后，运用遥感技术来监测土壤墒情的举措更为广泛，有热惯量法（Price J C. 1985; Cécile et al. 2008）、微波遥感（Hong S and Shin I. 2011）、能量平衡法、土壤水分光谱法等等。

在灌区的灌溉管理中，针对农作物需水量的预测模型研究应用较多，主要可以总结为两个方向：一是根据参考作物蒸散量去求解实际腾发量，也就是农作物需水量，

方法主要是根据作物的参数以及地表反射率、温度等 (Bandara 2006)；二是利用地表能量平衡原理推求蒸散量 (Folhes et al. 2009)。

国内对土壤水分的遥感反演技术的研究略晚，国内学者从土壤水分对反射光谱的影响开始展开研究，分别建立了地表温度、热惯量、后向散射系数等为指示因素的模型。杨树聪等 (2011) 通过对不同植物覆盖下的表观热惯量和土壤含水量进行分析，得出表观热惯量法在覆盖率低的情况下表现较好；施建成等 (2011) 讲述了微波遥感建模的理论研究，详细介绍了以微波遥感积雪参数、土壤水分、地表温度和植被参数为支持的反演技术；米素娟等 (2019) 针对较深土层缺乏研究的情况对热惯量的计算进行了简化。

按应用范围来分，遥感技术在灌溉管理中主要用作旱情监测 (李小涛等 2013；孙丽等 2010；孟成真 2018；孙灏等 2012)，提取土地、渠系、地表水等利用分布情况及作物种植结构、种植面积、作物长势等 (黄涛和严瑾 2012；徐美等 2007；黄青等 2010)，灌区灌溉面积的监测 (王啸天等 2016；李明等 2018)，灌区土壤水分反演及土壤水分监测 (路京选等 2009；张智韬等 2018；杨曦光 2017)，遥感蒸散发模型 (尚松浩等 2015；宋立生等 2018) 等方面。

随着众多学者对遥感技术不断的探索，遥感数据源也不断拓展，灌区的管理与遥感技术结合越来越紧密，遥感技术将在灌区现代化的科学管理中扮演着更加重要的位置。

## 1.4 现阶段研究存在的问题

(1) 实时灌溉预报的修正问题。现阶段对于灌溉预报的研究尚浅，大多只注重于利用有关数据开展灌溉预报，没有重视对不合理的预报结果的及时修正，缺乏对灌溉预报的实时修正展开深入的研究，采用什么样的数据可以对灌溉预报进行及时的修正，如何将修正与预报紧密结合，是实时灌溉预报的一个缺失。

(2) 灌区作物种植结构变化问题。大中型灌区每年的作物种植结构会存在一定变动，有差异时无法直接以往年用水计划作为参考实现计划用水，所以需要充分考虑各种作物的实际种植情况、生长情况和需水规律，这也是目前大中型灌区确定灌溉制度的一个难点。

(3) 监测难度问题。一方面，需要测量的田间数据较多，如灌区种植结构、田间水分消耗状况、土壤水分常数、作物生长状况和生长发育变化、气象条件、有效降雨量等。二是许多灌区的多年土壤水分数据不足，或者现有的实测数据时段较短，不足以满足精度需求。另外许多灌区的监测设备不够先进，实时监测难度较大。

## 1.5 研究内容与技术路线

### 1.5.1 研究内容

基于目前在灌区用水计划研究中的不足，寻求更灵活的编制方法是十分必要的。本论文在对国内大中型灌区的用水计划的编制方式和配水现状进行充分研究学习的基础上，针对我国大中型灌区的管理现状和实际灌溉操作情况，提出动态用水计划编制与修正的流程。本研究将动态用水计划的编制方案划分为实时灌溉预报和渠系优化配水来展开：利用短期天气预报信息、灌区气象站实时数据，深入钻研了实时灌溉预报开展的方法，建立普遍灌区通用的作物实时灌溉预报模型；对现阶段国内灌区常用的一些配水模型进行归纳，提出可以普遍通用的优化配水模型，为大中型灌区动态用水计划方案的制定提供相应参考。本文将主要研究：

(1) 实时灌溉预报方法研究。将作物分为旱作物和水稻两类进行阐述，在充分利用天气预报数据的原则上，对采用水量平衡法预报土壤含水量的过程进行研究，明确本文建立的实时灌溉预报运行流程和灌溉方案制定的原则。

(2) 实时灌溉预报及修正。探讨基于水量平衡法开展的实时灌溉预报中各参数预报和计算的可用方法，分析各方法的优缺点和适用灌区类型，总结普遍灌区的作物水量平衡方程式中各参数的预报和修正方法。根据可获取的实时气象数据和田间测定，提出灌溉预报修正的思路。基于以上的预测和修正原则开发通用的实时灌溉预报模型计算程序，并针对典型灌区秋作物进行实践。

(3) 渠系用水计划编制及修正。深入分析常见的优化配水模型的建模思路和不足，探究通用化优化模型。考虑流量、配水时间等约束条件，针对下级流量等同的渠系，建立优化配水模型，并且探求利用实时灌溉预报模型的修正思路，完成对渠系用水计划的初步编制，并对典型渠道进行优化应用。

### 1.5.2 技术路线

论文以理论分析、模型构建及程序的编写和仿真模拟相结合的学习研究思路，对灌区实时灌溉预报和动态用水计划的方法和编制等做出研究。技术路线见技术路线框图。

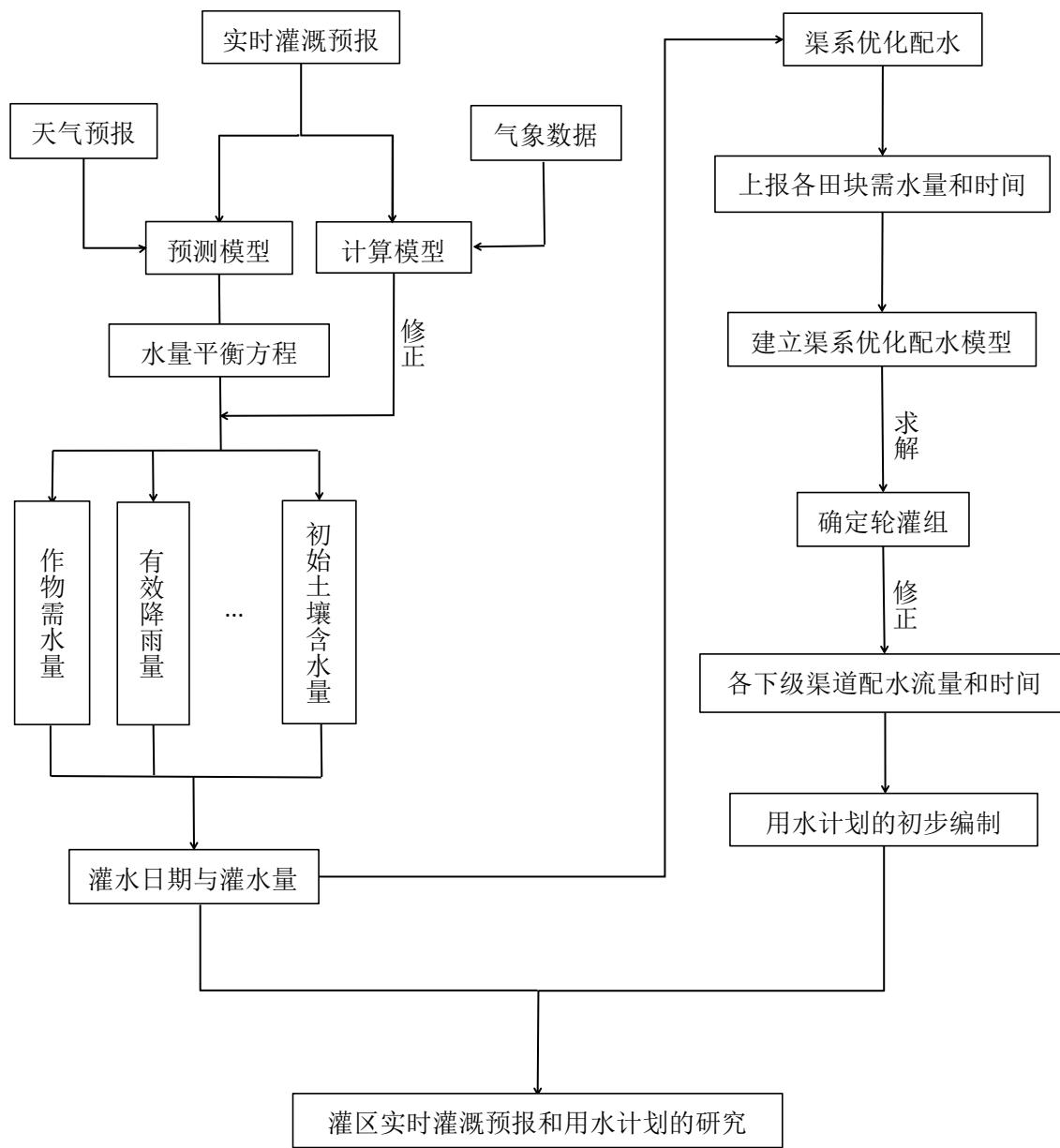


图 1-1 技术路线图

Fig. 1-1 Technical route

## 第二章 灌区实时灌溉预报研究方法

灌区实时灌溉预报就是通过对土壤墒情进行模拟，预测未来一段时间的田间耕层土壤水分供应状况，这是编制动态用水计划中不能缺少的一个部分，其中对于土壤墒情的测定与预报又是灌溉预报系统的重点所在。因此准确、及时的掌握土壤含水量变化和作物未来时间段内的需水状况，对作物的灌水时间和灌水量做出最合适的预测是实时灌溉预报的核心问题。

### 2.1 研究区概况

冯家山水库灌区位于渭北的黄土塬区，位于金陵河以东，漆水河以西，南至宝鸡峡引渭总干渠，北至乔山，东至西达 80 公里，南至北约 18 公里。灌溉覆盖宝鸡市的 6 县(区)、咸阳市的 2 县(区)的 136.38 万亩农田，灌区以千河分为东西两灌区，分别覆盖农田面积 121.18、15.2 万亩。按照引水方式的不同，包括 65.85 万亩的自流灌区和 70.53 万亩的抽水灌区，有效灌溉面积约 125 万亩。

灌区由千河引水，据统计其总控制流域面积达  $3232 \text{ km}^2$ ，多年平均的径流量在 4 亿  $\text{m}^3$  以上，最大洪峰流量实测值  $1180 \text{ m}^3/\text{s}$ ，年均输沙量 439 万吨，多年平均渠首引水量 1.36 亿  $\text{m}^3$ 。灌区内还有韦水河、横水河、七星河、美阳河等河流，径流量主要由降水形成，由于干旱少雨，多为季节河，自产地表径流量合计为 0.94 亿  $\text{m}^3$ ，可利用地表径流量 0.22 亿  $\text{m}^3$ ，实际利用 0.14 亿  $\text{m}^3$ 。

灌区地下水主要为潜水，西部埋深 40~80m，东部埋深 10~40m，凹地埋深 10~20m，局部有明水。含水层多为黄土状土及钙质结核层，底部为砂砾石层。区内地下水主要靠降雨及灌溉的入渗和北部山区侧渗补给，消耗在人工开采、蒸发和沟谷排泄。灌区地下水为弱碱性重碳酸盐水，作为灌溉水源是适宜的。灌区地下水可开采量 8890 万  $\text{m}^3$ ，已开采量 4534 万  $\text{m}^3$ 。

冯家山水库灌区地属暖温带大陆性季风气候，日照时数约为 2140 小时，全年太阳总辐射量为  $47.1 \times 10^8 \text{ J/m}^2$ ，年平均气温  $12^\circ\text{C}$ ，极端最高气温  $41.4^\circ\text{C}$ ，极端最低气温  $-20.6^\circ\text{C}$ ，年均水面蒸发量 1394 mm，年均降水量 629 mm，年内分布不均，年际变化大，丰、枯年相差 1 到 2 倍，50% 典型年干早期为 148 天，75% 典型年干早期为 209 天。

本灌区主要农作物为冬小麦和夏玉米，其余还有谷物、豆类等，经济作物以油菜、辣椒、西瓜为主，经济林果有苹果、梨、桃等。据统计，灌区作物复种指数 166%，粮经比例为 80:20，粮食亩产 820 kg，粮食总产 77.8 万吨。

研究应用于冯家山水库灌区的扶风地区，扶风县地属大陆性半湿润季风气候区，

多年平均气温 12.4℃，7 月平均气温 26.8℃，1 月平均气温 -2.1℃，极端最高、最低温度为 42.7℃，-21.7℃。年均无霜期 209 天（北部 190 天，南部 220 天，南北相差 30 天左右）。年均日照时数 2134.3 h，日照率 48%。降水

分布不均，年均降水量 690.7mm，7、8、9 三月降雨量可占全年的 50.73%，多年平均 300.86mm，植被蒸腾量 892.1mm。境内年径流量 2272 m<sup>3</sup>，年均径流深 29.1mm。

冯家山水库灌区扶风气象站所在地的海拔高度  $Z=586.5\text{m}$ ，纬度  $\phi=34.22$ ，短波辐射比例系数  $a_s=0.12$ ， $b_s=0.6$ ，土壤干容重取  $1.42\text{g/cm}^3$ ，田间持水量为 24%（占干土重的百分比计），地下水埋深大于 5 米。

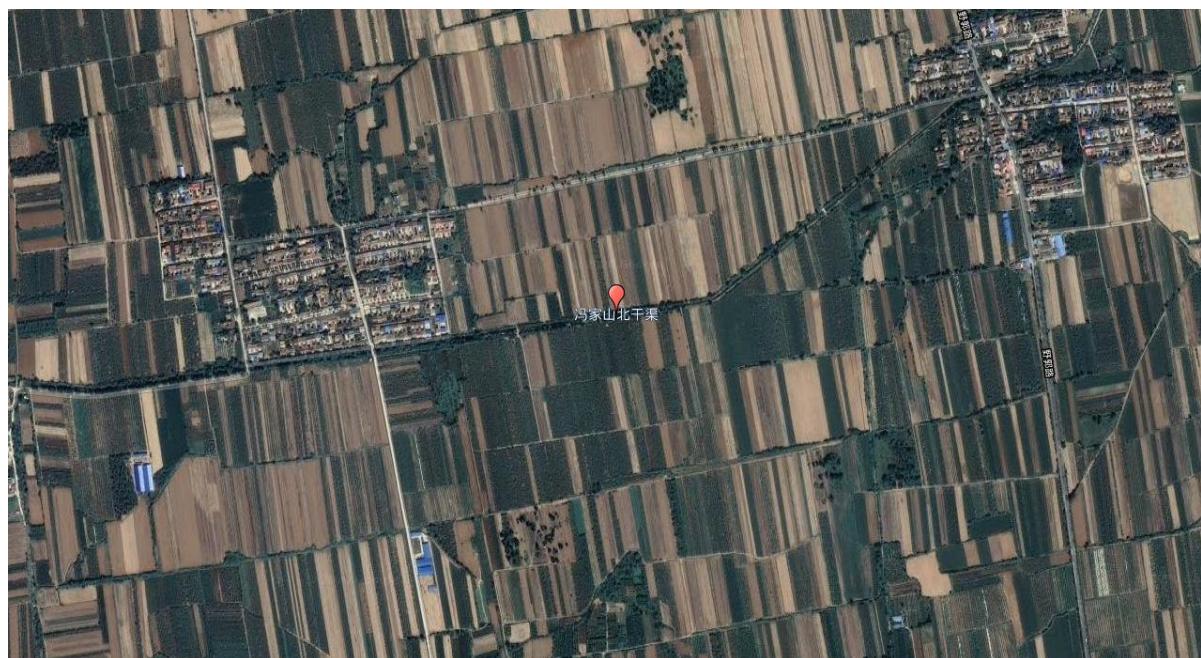


图 2-1 冯家山北干渠-扶风县

Fig. 2-1 Fengjiaoshan North Trunk Canal - Fufeng

## 2. 2 基于水量平衡法的实时灌溉预报

国内外学者常用的田间土壤含水量预报方法大概可按照经验公式、水量平衡法、土壤水动力学法和时间序列法等这几类划分。许多灌区未配备墒情监测仪，未建立相应的管理系统，墒情监测数据空缺或不足，无法满足墒情实时监测的要求。水量平衡法建立模型由于原理简单、要素选择合理，可操作性强，可适于大多数灌区。基于以上现状，本文将基于水量平衡法对灌区的墒情预报模型进行研究，对各参数预报中可运用的方法及其适用范围做出分析对比，总结一般灌区普遍适用的方法，达到预报灌水时间和灌水量来进行灌区的实时灌溉预报的目的。

本文所建立的基于水量平衡法的实时灌溉预报是以水量平衡方程为基础，调动灌区内可获取的水文、土壤、作物等信息，以天气预报和气象站实时数据为输入信息，

循环运算相应的水量平衡方程，预报水分状况  $W_t$  何时达到灌水下限  $W_{min}$ ，并上报需水时间和需水量。

灌区内的作物大致分为旱作物和水稻两大类，旱作物的水量平衡是指在计划湿润层内的土壤水量损耗与补给保持动态平衡，下式为旱作物需水情况适用的水量平衡方程：

$$W_i = W_{i-1} + P_{0i} + I_i - ET_{ci} + Ge_i + W_{Ti} \quad (2-1)$$

式中： $W_{i-1}$ 、 $W_i$ ——时段初与时段末的土壤含水量，mm；

$P_{0i}$ ——第  $i$  天的计划湿润层内保存的有效降雨量，mm；

$I_i$ ——第  $i$  天的灌溉水量，mm；

$ET_{ci}$ ——第  $i$  天的作物需水量，mm；

$Ge_i$ ——第  $i$  天的地下水补给量，mm；

$W_{Ti}$ ——第  $i$  天因计划湿润层增加而增加的土壤含水量，mm。

对于水稻来说，田间渗漏量是影响水稻需水量的重要因素，不可忽略，稻田有水层时的需水情况适用的水量平衡方程表示为：

$$H_i = H_{i-1} + P_{0i} + I_i - ET_{ci} - D_i - S_i \quad (2-2)$$

式中： $H_i$ ——第  $i$  天的稻田水面高度，mm；

$H_{i-1}$ ——第  $i-1$  天的稻田水面高度，mm；

$D_i$ ——第  $i$  天的排水量，mm；

$S_i$ ——第  $i$  天的渗漏量，mm；

其他参数含义与公式（2-1）相同。

当稻田无水层时，如果稻田内的土壤水分饱和，则  $H_i=0$ ；如果稻田土壤水分为非饱和状态，则  $H_i<0$ ，按下式计算：

$$H_i = (\theta_{wi} - \theta_s) \rho_b H \quad (2-3)$$

式中： $\theta_{wi}$ ——计划湿润层的重量含水率；

$\theta_s$ ——饱和含水率，按重量计；

$\rho_b$ ——土壤干容重，g/cm<sup>3</sup>；

$H$ ——计划湿润层深度，mm。

在实时灌溉预报模型中各参数是否精确预报是结果准确与否的决定性因素。模型中包含预测值与实际值，预测值用于时段初始时估算灌水时间和灌水量，实际值为实测值或者根据实时数据得到的计算值，以天为尺度修正作物实际的需水情况，预测值与实际值可使用不同方法进行计算。

## 2.3 灌区实时灌溉预报

本文建立灌溉预报模型采用天气预报的数据进行预测，利用灌区所在地的气象站点的实测数据和非定期的田间实测资料进行计算修正，分别建立预报和计算模型，利用 WPF、c#对通用实时灌溉预报模型编程，制作成.exe 计算程序。

数据来源为中国天气网（<http://www.weather.com.cn/>），中国气象数据网（<http://data.cma.cn/>）。另外需要采集灌区所在地的海拔高度  $Z$ ，纬度  $\phi$ ，和短波辐射比例系数  $a_s$ ， $b_s$ 。

实时灌溉预报流程如下图：

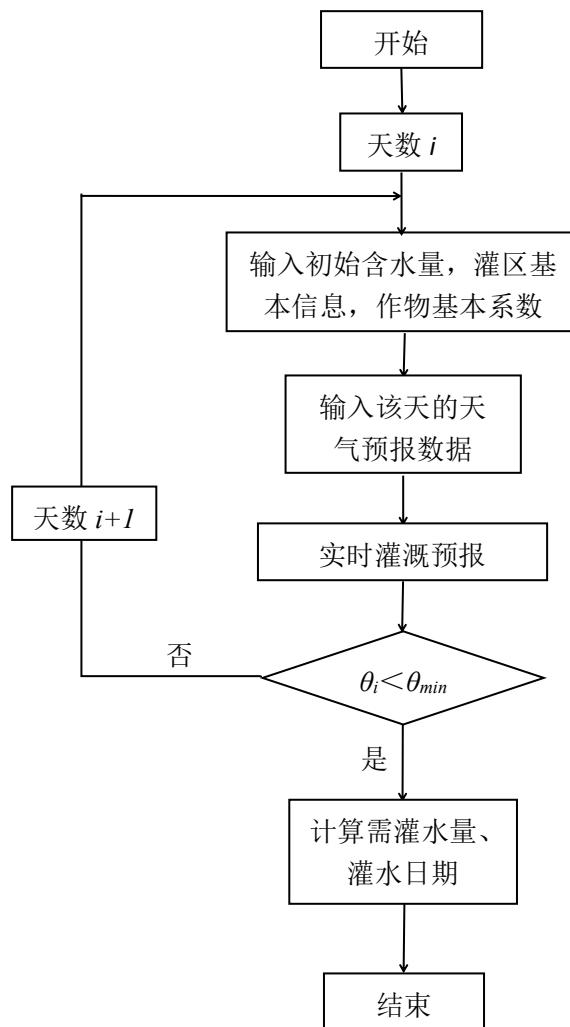


图 2-2 实时灌溉预报流程图

Fig. 2-2 Flow chart of real-time irrigation forecast

## 2.4 灌溉预报方案

### 2.4.1 灌水日期与灌水定额的预报

在测得初始土壤含水量后，结合短期气象预报以及灌区土壤特性等各项参数，按照灌区设施、数据采集情况选取水量平衡方程中各项参数预测的方法，一般以七天为预测时长，有特殊需求的田块可根据自身情况确定预测时长进行逐日的水量平衡计算，估测未来每日土壤含水量，实现实时的灌溉预报，进而可以做到灌溉制度的预报制定。灌水日期按照计划湿润层含水量降低到适宜土壤水分下限的时间确定，土壤含水量的上下限根据具体的作物及生长时期确定，一般来说，灌水上限为田间持水量（对于水稻为稻田水层上限），下限取该作物所处生育期适宜含水量的最小值，其值在实行充分和非充分灌溉时的取值不同。灌水定额根据下式计算：

$$m=667 \times \rho_b \times (\theta_{fc} - \theta_t) \times H \quad (2-4)$$

式中：  $m$ ——灌水定额，  $\text{m}^3/\text{亩}$ ；

$\theta_{fc}$ ——田间持水率；

$\theta_t$ ——灌水日的土壤含水率，取重量含水率；

$\rho_b$ ——土壤干容重，  $\text{t}/\text{m}^3$ ；

$H$ ——土壤计划湿润层深度，  $\text{m}$ ；

其他参数同前。

## 2.4.2 灌溉预报的修正

灌水日期与灌水定额的修正是实时灌溉预报的重点之一，充分利用灌区内可以采集到的实时数据，才能作出最精确、最适宜的预报。针对灌区的灌溉预报笔者提出以下修正思路：

### (1) 建立实时灌溉预报计算模型予以修正

建立采用实时气象数据计算土壤含水量的实时灌溉预报计算模型，定期调取灌区气象站的实时气象数据计算土壤含水量；

### (2) 土壤含水量修正

根据各田块实际需求选定预报周期，一般以 7 天为预报周期，在无实测的土壤水分补充资料时，由计算模型的第 7 日末的土壤含水量作为第 8 日预测模型的初始含水量；根据作物生长情况，各生育期内选择适宜时间采用烘干法对土壤含水量进行测定，用实测得到的土壤含水量直接代替原本的预报结果进行下一个循环计算。

### (3) 当实际气象与预报气象有较大误差

在天气预报信息与实际气象相差不大，且不影响土壤含水量达含水量下限的日期时，可不予调整；在天气预报信息与实际气象相差较大且无实测的土壤含水量数据时，以实时计算模型得到的土壤含水量为准重新计算，对天气预报作出的原灌溉预报进行修正或替换。

### (4) 降雨前的灌溉预报

逐日循环计算得到的灌水预报往往存在降雨前灌水这种不合理的情况，若在应灌水日期附近预报有降雨，则尽可能地利用降雨，减少灌区用水：将土壤水分的下限调整为凋萎含水量进行灌水日期的二次预测，若降雨在二次预测的灌水日期前发生，可考虑暂不灌水；否则按原日期灌水，根据降雨预报情况对灌水量进行调整。

#### (5) 灌水日期修正

因考虑到灌区的管理要求、需水的紧迫性等要求，对各田块上报的灌水时间进行统一，可选择灌水中间日集中引配水，更加便于渠系的控制管理。

#### (6) 灌水定额修正

在灌水时间修正后，实际灌水日的土壤含水量大多与适宜含水量下限有所差别，这时的灌水定额也要进行修正，以原上限扣除当日的实际土壤含水量。

## 2.5 本章小结

本章主要对灌区单次实时灌溉预报部分展开方法流程的研究。综合各类灌溉预报方法的优劣处，水量平衡法具备易操作、适应性强等优点，采用水量平衡法建立通用型实时灌溉预报是准确可行的。

本章首先是对基于水量平衡法建立的灌区实时灌溉预报的理论知识进行展开，重点介绍了旱作物、水稻这两类我国灌区主要农作物类型适用的水量平衡方程，为后面建立通用的实时灌溉预报模型提供理论基础。

其次是对本研究建立的实时灌溉预报模型的所需数据来源、实现流程等进行详细阐述，介绍了由实时灌溉预报结果制定灌溉方案的方法与原理，最后提出了对灌溉方案的修正思路，提出要加强对灌区内可获取的实时气象、土壤等实测数据的利用，建立以实际测量值为输入的计算模型加以修正，维持实时灌溉预报模型的精确度，同时要尽可能地利用未来时段降雨的水分补给，减少可避免的水资源浪费。

## 第三章 实时灌溉预报的预测模型研究

本文将实时灌溉预报的研究分为预测模型和计算修正模型两部分进行，程序的编制同样也分预测和计算修正两个界面进行设计。灌溉预测模型采用天气预报的数据进行预测，本章将对预测模型的各参数预报方法进行汇总、选择的研究，选取原则考虑到普遍性、准确性和易操作性，将通用方法汇总组成普遍适用的土壤含水量预测流程，利用 WPF、c#对通用实时灌溉预报模型中的预测模型界面进行设计和使用。

### 3.1 田间土壤水量平衡方程预报参数确定

#### 3.1.1 时段初的土壤含水量预报

首次灌溉预报时段初的土壤含水量均由实测给出，同计算模型中的获取方式；某次灌溉预报时段内除第一日外，在没有实测含水量补充的情况下，每日初始土壤含水量的数值直接采用水量平衡方程递推得到的前一日末的数值。

#### 3.1.2 有效降水量的预报

有效降水量指在旱作物种植中发生降水，其降水量中可以渗入作物的根系层，并且能够被用于植株蒸腾和株间蒸发的水量，不含地面径流和渗漏量。影响有效降水量的因素很多：降雨（降雪）总量与类型、降雨（降雪）强度、土壤类型、作物生长阶段、降水前土壤初始含水量等等。本文选用有效利用系数法来预测有效降水量，这种虽然方法精度和地区适应性不算高，但参数少，简便易得，便于在大多数灌区中广泛使用，计算公式如下：

$$P_{0i} = \alpha Pre_i \quad (3-1)$$

式中： $P_{0i}$ ——第  $i$  天的有效降水量(mm)；

$Pre_i$ ——第  $i$  天的降水量(mm)；

$\alpha$ ——降水有效利用系数，其值与该次降水量、降水强度、作物生长特性、土壤性质、计划湿润层深度及地形等因素有关。一般认为一次降水量小于 5mm 时， $\alpha$  为 0，当一次降水量在 5~50mm 时， $\alpha$  约为 1.0~0.8，取 0.9；当次降水量大于 50mm 时， $\alpha$  为 0.7~0.8，取 0.75。

#### 3.1.3 作物腾发量的预测

作物蒸发蒸腾量（简称作物腾发量），是指作物在适宜的外部条件下，正常生长发育情况下能够获得最高产时需要消耗的水量。能够影响到作物腾发量的主要有以下因素：作物因素（品种、生理特性、生育期、生长状况等）、气象因素（气温、日照时长、辐射、降雨、风速等）、土壤因素（土壤类型、性质、地下水补给等）和田间

农事管理及施肥措施等。 $ET_c$ 的实时预测与修正是灌区灌溉管理和实时灌溉预报的基础与重点，精确的作物腾发量预报可以有效的提高灌区水利用效率，减少灌溉水浪费，实现高效农业和精细农业的目标。直接测定作物腾发量的仪器目前有蒸渗仪（周浩勇 2016），但价格昂贵，应用不广，作物腾发量估算方法可以分三大类：统计学方法计算、参考作物腾发量法和建立数学模型法。

统计学方法归纳为选取合适的参数，根据多年实测数据分析所选参数与作物腾发量之间的关系，建立经验公式估算作物腾发量的一种方式，国内外常用的参数有水面蒸发量（简称 $\alpha$ 值法或蒸发皿法）、产量（产量法或 $K$ 值法）和气温（ $T$ 值法）等，这类方法优点在于较为简便，掌握大量数据便可建立相关方程，缺点是各自有适宜与不适宜使用的区域： $\alpha$ 值法多适用于我国稻田区，水面蒸发量同时还会受到其他因素（人为操作误差，蒸发皿规格等）影响； $K$ 值法多适用于非充分灌溉中，在水分充足的情况下，产量和需水量的关系不甚清楚，使用 $K$ 值法精确度不够高； $T$ 值法在南方湿润地区使用较多，对于较为干旱的地区，因其空气湿度相对较小所以误差较大。

在多年资料的分析之上建立模型计算作物腾发量，主要的方法是时间序列分析法（李靖 2000；王立坤等 2004）和人工神经网络法（邱林等 2006；刘倩等 2007），时间序列法是指对历年腾发量数据进行有序的处理从而最终确定灌区内各月份或者作物各生长时期的腾发量，在种植结构稳定的灌区中效果较好，由于历年的气象、种植结构等不同，每年的作物腾发量不能完全重合，需要寻找周期性考虑随机性，该种方法的长处主要在预测结果的精确性高且计算简单。人工神经网络法以各影响因素（平均温度、湿度、风速、日照时数、降雨量等）为输入值进行分析研究，作物腾发量为输出值，神经网络函数的大量训练和学习，使得结果误差较小，运行简单，并且可探索其他算法进行运算速度与准确度的改进。

参考作物腾发量法是目前国内外研究最为深入、实践最为广泛的方法，它将作物需水量（腾发量）与环境中各项指标联系在一起，由能量平衡原理计算得作物蒸发蒸腾所消耗掉的能量，再将其转化为水量，得到作物腾发量。该方法分成以作物种类等为主要因素影响的作物系数 $K_c$ 和以环境天气等为主要因素影响的参考作物需水量 $ET_0$ 两部分分析。公式如下：

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (3-2)$$

式中： $K_c$ ——作物系数；

$ET_0$ ——参考作物腾发量，mm。

参考作物腾发量的估算方法大致有蒸发皿法和一些数学方法（温度法、辐射法、综合法）（陶国通等 2014；魏光辉和马亮 2014；赵琪等 2014；张倩等 2015a；张倩等 2015b；Kushan et al. 2016；侯晓丽等 2016；崔伟敏等 2018；金昕 2018），下

面将对计算参考作物腾发量  $ET_0$  的公式方法进行总结分析:

(1) FAO -56 Penman-Monteith 公式

国际上公认的最标准的公式是 FAO-56 Penman-Monteith 公式(简称 P-M 公式), P-M 公式有着可靠的物理学理论基础, 不仅充分考虑到了作物生理特性变化, 还囊括了空气动力学所涉参数的变化, 运用本式计算  $ET_0$  需大量的气象数据, 它也是其他各种方法精确度的检验标准, 被广泛应用在世界各地。公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3-3)$$

$$R_n = 0.77R_a \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) - \sigma \left( \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) \left( 0.34 - 0.14\sqrt{e_a} \right) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (3-4)$$

式中:  $ET_0$ —参考作物腾发量, mm/d;

$\Delta$ —饱和水汽压与温度曲线的斜率, kPa/ $^{\circ}$ C;

$R_n$ —作物表面净辐射, MJ/(m $^2$ ·d);

$G$ —土壤热通量密度, MJ/(m $^2$ ·d);

$\gamma$ —温度计常数, k Pa/ $^{\circ}$ C;

$T$ —2m 处平均气温,  $^{\circ}$ C;

$u_2$ —2m 高处的风速, m/s;

$e_s$ 、 $e_a$ —分别为饱和水汽压、实际水汽压, kPa;

$R_a$ 、 $R_s$ 、 $R_{so}$ —分别为碧空太阳总辐射、短波辐射、晴空太阳辐射, MJ/(m $^2$ ·d);

$a_s$ 、 $b_s$ 为根据日照时数估算太阳总辐射的系数, 根据地点、季节不同而取值不

同;

$n$  为月实际平均日照时数, h;

$N$  为不同纬度各月可能的理论日照时数, hr/d;

$\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数, 为  $4.903 \times 10^{-9}$  MJ/K $^4$ ·m $^2$ ·d;

$T_{max,k}$ 、 $T_{min,k}$  分别为最大、最小绝对温度 ( $K=^{\circ}$ C+273.16)。

(2) 国内 Penman 修正式

本式考虑了气压不同对  $ET_0$  的计算带来的影响,  $\Delta/P$  表示标准气压下的温度函数,  $P_0/P$  表示气压修正项。

$$ET_0 = \frac{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{r} R_n + E_2}{\frac{P_c}{P} \frac{\Delta}{r} + 1} \quad (3-5)$$

$$P_0/P = 10^{H/10400 \left( 1 + \frac{t}{273} \right)} \quad (3-6)$$

$$\Delta = \frac{4683.11}{(273+t)^2} e_a \quad (3-7)$$

$$e_a = 6.1 \times 10^{7.45t/(273+t)} \quad (3-8)$$

$$R_n = 0.75 R_a \left( a + b \frac{n}{N} \right) - \sigma T_k^4 \left( 0.56 - 0.079 \sqrt{e_d} \left( 0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \right) \quad (3-9)$$

$$E_a = 0.26 (1 + B \mu^2) (e_a - e_d) \quad (3-10)$$

(3) 基于气温的 *Penman-Monteith* 修正式 (*PMT*)

当缺乏气象数据时可以采用基于气温的修正式，仅需引用每日平均最高、最低气温，风速取多年平均风速参与运算。其中净辐射采用如下计算式：

$$R_s = K_{Rs} \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} R_a \quad (3-11)$$

式中： $K_{Rs}$ ——调节系数，通常内陆取 0.17；

$T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ ——最高、最低气温， $^{\circ}\text{C}$ 。

当没有平均相对湿度时， $e_a$  可由下式计算：

$$e_a = 0.611 \exp \left( \frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 23.73} \right) \quad (3-12)$$

(4) *Hargreaves-Samani* 公式 (*HS* 公式)

利用 *HS* 公式计算参考作物腾发量所需要的信息有气温（最高、最低），外空辐射可由当地纬度信息得到，各参数均易获得，因此 *HS* 公式是最常用的基于气温的  $ET_0$  计算公式，计算式为：

$$ET_{0, HS} = 0.408 CR_a (T_{\max} - T_{\min})^E \cdot \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + T_{off} \right) \quad (3-13)$$

式中： $R_a$ ——大气项太阳辐射

$C$ 、 $E$ 、 $T_{off}$ ——相关参数，可借助历史气象资料对公式进行率定得到，一般情况下分别取 0.0023、0.5、17.8。

(5) *McCloud* 公式

$$ET_{0,M} = K \cdot W^{1.87} \quad (3-14)$$

式中： $T$ ——日平均气温， $^{\circ}\text{C}$ ；

$K=1.243$ ， $W=1.03$ 。

作物系数  $K_c$  是作物实际腾发量和参考作物腾发量的比值，其值受作物类型、品种、生育期、土壤特性、叶面积等众多因素的综合影响，目前国内外常用的计算方法

有单作物系数法、双作物系数法、逐日修正法(樊引琴和蔡焕杰 2002; 何军等 2013)。

### (1) 单作物系数法

单作物系数法根据作物的生育期概化成四类作物系数: 作物生长初期  $K_{cini}$ ; 快速生长发育期  $K_{cini} \sim K_{cmid}$ ; 生长发育中期  $K_{cmid}$ ; 成熟期该值从  $K_{cmid}$  降低到  $K_{cend}$ 。FAO56 提供了主要作物的推荐  $K_c$  值及修正式(温忠辉等 2015), 修正式如下:

$$K_c = K_{ctab} + 0.04 \times (U_2 - 2 - RH_{min} + 45)(h/3)^{0.3} \quad (3-15)$$

式中:  $K_{ctab}$ —不同生长发育阶段下的作物系数;

$RH_{min}$ —当前生育期的日最低相对湿度的平均值, %;

$h$ —该生育期内作物的平均高度, m;

由于客观条件不尽相同, 在实际应用时还是有一定的差异, 在当地灌区有多年的作物系数经验值时尽量采取经验值, 在有较为全面的实测资料的地区, 推荐采用多年的各生育阶段实际测得腾发量与参考作物腾发量比值的均值计算。

### (2) 双作物系数法

双作物系数法更全面的考虑了作物的蒸腾作用  $K_{cb}$  和农田土壤蒸发作用  $K_e$ , 当作物生长到能够覆盖地面时, 蒸腾作用占主要因素, 作物稀疏或有降雨、灌溉过程则以土壤蒸发为主, 该法相较于单作物系数法来说准确度上更高。可表示为:

$$K_c = K_{cb} \cdot K_s + K_e \quad (3-16)$$

式中:  $K_{cb}$ —基本作物系数, 反映了作物蒸腾作用;

$K_e$ —土壤蒸发系数, 反映裸间土壤蒸发;

$K_s$ —土壤水分胁迫系数, 当供水充足时,  $K_s$  取 1。

一般情况下, 采用 FAO 56 P-M 公式预测  $ET_0$  是最直接有效的, 利用天气预报数据时需要将相关数据解析为所需参数(采用最高、最低气温来预测太阳辐射, 利用最低温度替代相对湿度来预测水汽压, 将风力等级概化为所需的 2m 处风速)(张倩等 2015; 李迎 2012), 在有作物腾发量试验的一些灌区, 也可以根据自身试验数据选取参数较少的公式例如 HS 公式等进行计算预测(罗玉峰等 2013)。在作物系数的确定上, 为简化运算, 在灌区有多年的作物系数经验值时选择采用多年试验的经验值, 在历史资料缺乏的灌区, 可以采用 FAO 56 推荐的  $K_c$  值及修正式进行估算。

## 3.1.4 地下水补给量的预测

在地下水埋深较浅的情况下, 地下水的补给在作物的耗水过程中占据重要的作用, 甚至可以自给自足, 补给量可观; 当地下水埋深不断增加, 地下水的补给量在作物根系吸水中作用越来越小, 当地下水埋深大于 5m 时, 统一认定为无地下水补给。地下水补给量在作物生育期内会由于外界条件变化而发生变化, 其值不稳定, 每日测

量的计算难度大且不经济，有多年地下水补给数据的灌区直接利用历史数据，对于无此项数据的灌区，笔者建议将各地区的地下水补给量视为固定值，埋深小于5米时该值按照如下经验公式计算：

$$Ge = Q \cdot ET_c \quad (3-17)$$

$$Q = B - 0.15GWD \quad (3-18)$$

式中： $GWD$ ——地下水埋深，m。

$B$ ——地下水补给系数，与土壤类型、作物种类、地下水埋深有关，可查下表；

表 3-1 地下水补给系数 B 值表

Table 3-1 the groundwater recharge coefficient

作物种类	砂壤土	中壤土	粘壤土
冬小麦	0.4	0.5	0.6
夏玉米	0.3	0.4	0.5
棉花	0.3	0.4	0.5

### 3.1.5 计划湿润层深度增加而增加的水量

作物的计划湿润层深度伴着根系的不断生长而增加，于作物根系停止生长时结束。我们普遍假设在作物的各生育期内计划湿润层深度呈线性增长的， $W_{Ti}$ 由下式计算：

$$W_{Ti} = \rho_b \times \theta_{wi} \times \left( \frac{H_n - H_{n-1}}{t} \right) \quad (3-19)$$

式中： $\theta_{wi}$ ——第  $i$  天土层的质量含水率，%；

$H_{n-1}$ ——第  $n$  个生育阶段初的计划湿润层深度，mm；

$H_n$ ——第  $n$  个生育阶段末的计划湿润层深度，mm；

$t$ ——第  $n$  个生育阶段的天数，d。

### 3.1.6 渗漏量与排水量的确定

对于水稻来讲，除了以上要素之外，还需要额外考虑渗漏量  $S_i$  与排水量  $D_i$ 。稻田的渗透量和田块土壤性质、水稻生育阶段、是否降雨和灌溉、稻田水层深度甚至地下水埋深等都有关联，若所在灌区有稻田多年各生育期的渗漏量经验值时尽量采用经验值，当没有可直接利用的数值时，可以采用公式计算法。

利用公式计算渗漏量将情况分成有水层和无水层两种，公式如下：

$$S_i = \begin{cases} aH_i + b & \text{有水层} \\ 1000K_0 / (1 + K_0 \alpha T_i / H_{\text{根层}}) & \text{无水层} \end{cases} \quad (3-20)$$

式中:  $S_i$ ——第  $i$  天稻田的渗漏量, mm;

$a, b$ ——拟合参数;

$H_i$ ——第  $i$  天的水层深度, mm;

$K_0$ ——饱和水力传导度, 一般取 0.1~1.0m/d;

$a$ ——经验常数, 取 50~250;

$T_i$ ——土壤含水率饱和状态达到第  $i$  天水平所经历的时间, d;

$H_{\text{根层}}$ ——水稻主根层的深度, m

在精确度要求不高时, 无水层的渗漏量可按 0 计算。

当稻田水层高于水稻该时段适宜生长的最大值时需要采取稻田的排水措施, 公式如下:

$$D_i = W_i - h_{\max i} \quad (3-21)$$

式中:  $h_{\max i}$ ——第  $i$  天所处的阶段适宜的含水量上限, mm。

### 3.2 实时灌溉预报的预测模型

源于中国天气网的天气预报有以下信息: 最高气温  $T_{\max}$ , 最低气温  $T_{\min}$ , 天气类别, 雨型, 风力等级。利用逐日的天气预报数据, 输入以下信息: 初始含水量  $W_{i-1}$ , mm; 灌溉量  $I_i$ , mm; 地下补给量  $Ge_i$ , mm; 计划湿润层增加而增加的水量  $W_n$ , mm; 作物系数  $K_c$ ; 气温  $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ , 前一天气温  $T'_{\max}$ 、 $T'_{\min}$ , °C; 日序数  $J$ 。选取: 风力等级 (0-12 级); 天气类别 (晴; 晴转多云; 多云; 阴; 雨); 降雨类型。

根据 3.1 的理论分析, 基于该地区天气预报信息构建作物通用的实时灌溉预报的预测模型:

(1) 预测时段初的土壤含水量  $W_{i-1}$  在首次预报时段初中采用实测含水量值, 在预测时段内直接采用上一日方程推算出的含水量。

(2) 有效降水量值  $P_{0i}$  按有效利用系数法进行推断, 天气预报中有关降水的信息仅有降水类型, 故建立有效降水量与天气预报中雨型的对应关系, 方便预报模型运算, 对应关系见下表:

表 3-2 天气预报雨型对应  $P_{0i}$  值表  
Table 3-2 Correspondence between rainfall forecast and  $\alpha$  and  $P_i$  values

天气预报雨型	$P_i$ 取值 (mm)	$\alpha$ 取值	$P_{0i}$ 取值 (mm)
小雨	5	0	0
小到中雨	11	0.9	9.9
中雨	17.5	0.9	15.75
中到大雨	27.5	0.9	24.75
大雨	37.5	0.9	33.75
大到暴雨	56.5	0.75	42.38
暴雨	75	0.75	56.25
暴雨到大暴雨	125	0.75	93.75
大暴雨	175	0.75	131.25
大暴雨到特大暴雨	237.5	0.75	178.13
特大暴雨	250	0.75	187.5
小雪	1.25	0	0
中雪	3.75	0	0
大雪	7.5	0.9	6.75
暴雪	15	0.9	13.5
大暴雪	25	0.9	22.5
特大暴雪	30	0.9	27

(3) 作物腾发量的预测是灌溉预报最重要的一环，需要综合考量预测方法的简便性与准确性，综合以上方法，作物腾发量  $ET_c$  选择采用参考作物法公式(3-2)计算， $K_c$  采取当地经验值， $ET_0$  采用 FAO 56 P-M 公式(3-3)预测，当天气预报数据有限导致式中参数值不全，则将天气预报中的相关数据解析为所需参数（采用最高、最低气温来预测太阳辐射，利用最低温度替代相对湿度来预测水汽压，将风力等级概化为所需的 2m 处风速），按以下方式转换参与预测：

$$T_i = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (3-22)$$

$$T_{i-1} = \frac{T'_{\max} + T'_{\min}}{2} \quad (3-23)$$

$$R_s = (a_s + a \times b_s) R_a \quad (3-24)$$

$$e_a = e^0(T_{\min}) \quad (3-25)$$

$$e^0(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \quad (3-26)$$

其中,  $T_i$ ——第  $i$  天的平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{i-1}$ ——第  $i-1$  天平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$a$  为日照时数与最大可能日照时数的比值  $n/N$ , 取值见表 3-3:

表 3-3  $a$  与天气类别的对应值

Table 3-3 Weather category corresponding to  $a$  value

天气类别	晴	晴转多云	多云	阴	雨
$a$ 取值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1

风力等级与风速的转换如下表:

表 3-4 风速  $u_2$  与风力等级的对应值

Table 3-4 Wind level corresponding to  $u_2$

风力等级	2m 处风速 (m/s)	风力等级	2m 处风速 (m/s)	风力等级	2m 处风速 (m/s)
1 级	0.7	5 级	6.7	9 级	17.2
2 级	1.5	6 级	9.0	10 级	19.4
3 级	3.0	7 级	12.0	11 级	23.2
4 级	5.2	8 级	14.2	12 级	26.2

(4) 地下水补给  $Ge_i$  采用固定值参与计算, 按经验公式 3-17 计算。

(5) 计划湿润层增加所造成的水量增加采取各生育阶段固定值, 按经验公式 3-19 计算。

预报模型构建编程基础汇总如下:

$$W_i = W_{i-1} + P_{0i} + I_i - ET_{ci} + Ge_i + W_{Ti} \quad (3-27)$$

$$ET_c = k_c ET_0 \quad (3-28)$$

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_i + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3-29)$$

$$\gamma = 0.665 \times 101.3 \times 10^{-3} \left( \frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26} \quad (3-30)$$

$$T_i = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (3-31)$$

$$T_{i-1} = \frac{T'_{\max} + T'_{\min}}{2} \quad (3-32)$$

$$R_s = (a_s + a \times b_s) R_a \quad (3-33)$$

$$e_a = e^0(T_{\min}) \quad (3-34)$$

$$e^0(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \quad (3-35)$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \quad (3-36)$$

$$R_n = 0.77R_s - 4.903 \times 10^{-9} \left( \frac{(T_{\max} + 273.16)^4 + (T_{\min} + 273.16)^4}{2} \right) \left( 0.34 - 0.14\sqrt{e_a} \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35 \right) \right) \quad (3-37)$$

$$R_{s0} = (a_s + b_s)R_a \quad (3-38)$$

$$R_a = \frac{118.08}{\pi} \left( 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \right) \left( \omega_s \sin\frac{\varphi\pi}{180} \sin\delta + \cos\frac{\varphi\pi}{180} \cos\delta \sin\omega_s \right) \quad (3-39)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad (3-40)$$

$$\omega_s = \arccos\left(-\tan\frac{\varphi\pi}{180} \tan\delta\right) \quad (3-41)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (3-42)$$

$$G = 0.38(T_i - T_{i-1}) \quad (3-43)$$

$$u_2 = 0.748u \quad (3-44)$$

$$\Delta = \frac{4098 \left( 0.6108 \exp\frac{17.27T_i}{T_i+237.3} \right)}{(T_i+237.3)^2} \quad (3-45)$$

$P_{oi}$  的取值见与雨型的关系表 3-2;  $a$  的取值见天气类型与之的对应关系表 3-3; 风速  $u_2$  的取值见风力等级与之的对应关系表 3-4。

按照以上运算基础对实时灌溉预报计算程序中的预测界面进行编程, 实时灌溉预报程序中的预测模型界面设计如下图:

图 3-1 实时灌溉预报程序中预报模型界面

Fig. 3-1 Forecast model interface in real-time irrigation forecast program

图 3-2 天气类别为“雨”时的程序界面

Fig. 3-2 Program interface when the weather category is "rain"

如图 3-1 所示，预测模型界面分为输入、输出和操作三个部分，输入界面相关内容有灌区基本信息（海拔、纬度、短波辐射比例系数）、田块基本灌溉情况（初始含

水量、灌溉量、地下水补给)、作物相关数据(作物系数、计划湿润层增加的增水量)、天气预报信息和日序数,其中天气类别下拉栏中包括天气预报中常见的类别选项,当天气类别为“雨”时,增加降雨类型下拉选项,界面设计如图3-2。输入以上信息后,点击“开始计算”按钮,即可得到时段末的土壤含水量,完成基于水量平衡法的日灌溉预报;点击“下一日”后,前一日中的相同数据会进行自动赋值,免除重复输入;点击“清空数据”按钮,可将“预测模型界面”所包含的输入数据清空。

### 3.3 扶风地区夏玉米实时灌溉预报的土壤含水量预测

研究应用于冯家山水库灌区扶风地区,初始实测含水量为19.7% (167.844mm),数据来源为中国天气网 (<http://www.weather.com.cn/>) ,中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 。将2019.7.24-2019.8.01扶风地区夏玉米的各项数据输入程序试运行,7.24运行结果如下图:

The screenshot shows the 'Real-time Irrigation Forecast' application window. At the top, it says '实时灌溉预报'. Below that, there are three main sections: '灌区基本信息' (Basin Information), '模型选择界面' (Model Selection Interface), and '结果输出界面' (Result Output Interface). In the '灌区基本信息' section, the elevation is 586.5m, latitude is 34.22, as is 0.12, and bs is 0.6. In the '模型选择界面', the prediction model is selected. In the '结果输出界面', the calculated result is 166.182908954327. The bottom section, '预测模型界面', contains various input fields: initial water content (Wi-1/mm) is 167.844, maximum temperature (Tmax/°C) is 34, weather type is阴 (Cloudy), irrigation amount (li/mm) is 0, minimum temperature (Tmin/°C) is 21, groundwater supply (Gei/mm) is 0, previous day's maximum temperature (T'max/°C) is 34, wind force level is 1, planned moisture layer increase (WTi) is 1.5, previous day's minimum temperature (T'min/°C) is 21, crop coefficient (Kc) is 1, and day number (J) is 196. A 'Next Day' button is also present.

图 3-3 实时灌溉预报的预报运行界面 (2019.7.24 扶风地区夏玉米)

Fig. 3-3 Operation of real-time irrigation forecast interface (2019.7.24 Summer corn in Fufeng)

2019.7.24-2019.8.01 扶风地区夏玉米实时灌溉预报的土壤含水量预测结果见下表:

表 3-5 扶风地区夏玉米土壤含水量预测结果（2019.7.24-2019.8.01）

Table 3-5 Prediction results of soil moisture content of Summer Maize in Fufeng area  
 (2019.7.24-2019.8.01)

日期	7.24	7.25	7.26	7.27	7.28
土壤含水量 (mm) (预测模型)	166.183	163.770	159.285	155.025	151.953
日期	7.29	7.30	7.31	8.01	
土壤含水量 (mm) (预测模型)	150.713	148.877	144.994	142.337	

### 3.4 本章小结

根据第二章关于实时灌溉预报研究的流程设计，灌区的实时灌溉预报中应建立以天气预报资料为输入的实时灌溉预报的预测模型，本章针对作物实时灌溉预报模型的预测部分进行了研究。

本章首先对作物和水稻水量平衡方程中各项参数的预测方法展开研究，将能够利用天气预报中有限的数据进行运算的方法进行了汇总及总结，主要成果有：对水量平衡方程中初始含水量值的选取作出规定；建立了有效降水量和天气预报中雨型的对应关系；对作物腾发量的参考作物需水量法进行了深入的学习和总结；提出了将地下水补给按地区统一固定值的简化思路；提出将计划湿润层增加而增加的水量按作物生长阶段划分，将各发育阶段内的每日水分增量取固定值的简化思路；探究了渗漏量与排水量的估算方法。以上研究可以为各灌区根据自身设备配备及实际操作情况选取合适的预报方法提供参考。

其次通过以上的分析研究，将简便化、精准度较高的预报方法结合，建立了旱作物通用型实时灌溉预报预测方法，即“水量平衡方程+时段初实测含水量/上一日方程推算含水量+天气预报对应有效降水量+天气预报数据解析计算的P-M公式法+其他参数经验或公式固定值”，并以此理论基础编程，研发了通用型作物实时灌溉预报计算程序中的预测界面，程序所需参数简单且操作界面可视性强，可普遍应用于作物的灌溉预报中。

## 第四章 实时灌溉预报的计算修正模型研究

本文将实时灌溉预报的研究分为预报模型和计算修正模型两部分进行，计算修正模型利用灌区所在地的气象站点的实测数据和非定期的田间实测资料对预报模型结果进行修正，本章将对计算修正模型的各参数计算方法进行汇总、选择的研究，选取原则考虑到普遍性、准确性和易操作性，将通用方法汇总组成普遍适用的土壤含水量计算修正流程，利用 WPF、c#对通用实时灌溉预报模型的计算修正界面进行设计和使用。

### 4.1 田间土壤水量平衡方程计算参数确定

#### 4.1.1 时段初的土壤含水量测定

目前常用的土壤水分测定技术与方法大抵能够按照取样测定法、定位测定法和遥感监测法这三大类进行划分。

##### (1) 取样测定法

取样测定法主要包含烘干法、比重法、实容法、称重仪法、离心机法、蒸汽压法、超声波法、压力板法、冰点下降法和一些化学方法（碳酸钙法、浓硫酸法、水浸法等）（王大龙和舒英格 2017；Binru 2019）。在需要取样测定的方法中最经典的为烘干法（电热烘箱法），设备和操作简单，成本低，测量结果相对精准，常作为标准方法用于验证其他测量方法的精确度。但烘干法在取土时间和地点有限制，无法定点连续测量，且耗时久，大面积测定困难。为了简化烘干时间和步骤，也出现了利用微波（Miller et al. 1974）和红外线加热的烘干法。

##### (2) 定位测定法

定位测定法主要包括基于土壤介电特性的测量方法（时域反射法、频域反射法、驻波率法、电容法）、探地雷达法、电阻法（主要适用于砂土）、张力计法、热电偶法、热传导法和射线测定法（中子仪法、 $\gamma$ 射线法、 $\chi$ 射线法）（马涛 2008；孙满利等 2019）。

张力计法可应用在自动测量中，且设备简单，但土壤本身的性质及土壤中有机质等的存在会干扰结果，导致误差较大。

中子仪法测定土壤含水量的优点是方便快捷，不会破坏作物与土壤结构，受深度限制小，可以满足连续定点测量，并且适用于实时动态测量；缺点是辐射大，测量结果易受土中其他物质影响。

根据测定电磁脉冲在土壤中传导的速度和频率分别建立了时域反射法（TDR）和

频域反射法（FDR），共同优点是操作速度快，精度高于中子仪法，且没有辐射，适用于长期测定，但是频域反射法对不同土壤需要进行标定，且设备较为昂贵。驻波率法同是依靠土壤水分介电常数进一步确定田间土壤含水量的，利用驻波比原理研制出的仪器成本低于时域反射仪（冯磊 2005），但精度仍有所欠缺（董泽君等 2017）。根据土壤介电常数的不同造成电容变化，形成了电容法。以上四种方法在本质上均属于介电特性法。

探地雷达法（GPR）测定土壤含水量主要包含反射波法（单偏移距法和多偏移距法）、地面波法、地表反射系数法和钻孔雷达法（郭焘和于红博 2018）。此方法能测量同一地点的分层土壤含水量且不破坏土壤，结果精度较高，可运用于大中尺度范围的测量，但对所测地区的土壤类型有所限制（Seokhyeon et al. 2019），不适用于所有土壤，信息的获取需要专业软件硬件支持。

### （3）遥感监测法

目前遥感监测在农作物方向的研究可以按以下原则划分：一是通过光谱特征、时相特征、空间特征等区分各种作物及植被，获取农田种植结构；二是基于热惯量模型、能量指数等进行农田土壤水分监测，得到农田水量过程，推演植物生长状况的农田旱情监测研究。现阶段土壤水分遥感监测的主要方法有热惯量法与表观热惯量法、植被指数法、地表温度法、微波技术遥感法、温度-植被指数法、反射率法、高光谱法等（田源等 2017；吴黎等 2014），主要的探测波段分为可见光、近远红外线、热红外线以及微波等。

利用遥感技术测定土壤含水量是现阶段发展的方向，有着广阔的发展前景，尤其是微波遥感，凭借着仪器质量轻、结构简单，测量精度高，可全天候监测等特点可以很好的运用在大范围区域土壤含水量的实时监控上（乔平林 2006）。

通过以上任一方法均可得到田块实际的土壤含水量，其中，烘干测定是最符合土壤含水量定义的一种测定手段，但耗时耗力，在大中型灌区中广泛应用是不现实的，主要应用于测定每次灌溉预报的初始含水量，另外依据作物实时的生长情况，不定期的对土壤含水量进行实际测定校核，在设施完善的大中尺度范围内可采用探地雷达法、遥感监测法测定，一般的灌区采用烘干法测定校核。

试验测得的含水率多取为质量含水率，为了方便运算，将其单位转化为 mm。初始土壤含水量由下式计算：

$$W_0 = \rho_b \times \theta_w \times H_0 \quad (4-1)$$

式中： $\rho_b$ ——土壤干容重， $\text{g}/\text{cm}^3$ ；

$\theta_w$ ——计划湿润层的质量含水率；

$H_0$ ——初始计划湿润层深度，mm。

#### 4.1.2 有效降水量的计算

计算与预测有效降水量的方法主要分成三大类：实地仪器测定法、经验公式法和土壤水量平衡法。

##### (1) 实地仪器测定法

田间测量仪器如渗漏计、水稻筒测法等，可以直接测定有效降雨量，但测量难度大；蒸渗仪测定是通过测定深层渗漏和地表径流来确定有效降雨量的方法，结果准确度高，但只能定点监测，不适用于大面积实时监控（刘战东等 2007）。

##### (2) 经验公式法

经验公式法是根据 Hershfield 诺模图、美国土壤保持局（USDA Soil Conservation Service）推荐方法（Qichen Zhang et al. 2020）、或采用 FAO 推荐的降水量与参照蒸散量值大小比较的方法（曹永强等 2018）来确定有效降水量，经验公式法需足够的数据资料进行建模，精确度高但复杂度亦高，并且适用地区范围小且固定，结果可移植性低。

首先是降水有效利用系数法，方法同 3.1.2，除此之外，还可以采用总量扣除法（胡玲 2004），对于旱作物来说：

$$P_{0i} = \text{Pre}_i - R_i - D_i \quad (4-2)$$

式中： $R_i$  为地面径流量，mm；

$D_i$  为深层渗漏量，mm。

各参数参照以下公式计算：

$$R_i = \begin{cases} 0 & t \leq t_0 \\ (I - A) \cdot t_r - S t_r^{\frac{1}{2}} & t > t_0 \end{cases} \quad (4-3)$$

$$t_0 = \frac{S^2}{4(I - A)^2} \quad (4-4)$$

$$P_0^* = 10H\rho_b(\theta_{FC} - \theta_0) + t(ET_c - Ge) \quad (4-5)$$

$$V = \begin{cases} I \cdot t_r & t_r \leq t_0 \\ A \cdot t_r + S t_r^{\frac{1}{2}} & t_r > t_0 \end{cases} \quad (4-6)$$

式中： $R_i$ ——第  $i$  天的降雨的地表面径流量，mm；

$I_i$ ——第  $i$  天的降雨量，mm；

$t_r$ ——降雨历时，h；

$S$ ——土壤吸渗率，为常数；

$A$ ——土壤稳定入渗率， $S$ 、 $A$  均可由现场入渗试验求出；

$P_0^*$ ——作物根系层中能够贮存的最大有效降雨量，mm；

$H$ ——作物根系活动层深度, mm;

$\rho_b$ ——土壤干容重, g/cm<sup>3</sup>;

$\theta_{FC}$ 、 $\theta_0$ ——田间持水率与初始含水率, %;

$t$ ——未来降雨的间隔天数, d;

$ET_c$ ——作物蒸发蒸腾量, mm;

$Ge$ ——预报的地下水有效补给量, mm/d;

$V$ ——降雨土壤入渗量, mm; 。

当  $V$  大于  $P_0^*$  时,  $P_0$  取  $P_0^*$  值,  $D$  为  $V$  与  $P_0^*$  之差; 当  $V$  不大于  $P_0^*$  时,  $P_{0i}$  取  $V$  值,  $D_i$  为零。

对于水稻 (李绅东等 2018) 而言, 常利用下式计算:

$$P_0 = P_i - D_i \quad (4-7)$$

$$D_i = \max[0, W_{i-1} + P_i + I_i - ET_i - S_i - h_{si}] \quad (4-8)$$

式中:  $h_{si}$ ——降雨后稻田内允许的储雨深度, mm;

### (3) 土壤水量平衡法

土壤水量平衡法以水量平衡方程为的理论基础, 测定和计算方程中相关参数关系及数值从而可以反推出有效降雨量。查询文献发现常用的方法有土壤湿度变换法、实时估算法和以天为时段的作物根系湿润层水量平衡计算。

土壤湿度变换法是指在降雨前后分别取根区土样, 测定作物根系土壤含水量增加值 ( $W_2 - W_1$ ), 再加上这期间作物蒸散量 ( $K_p \cdot E_0$ , 其中  $K_p$  为蒸发皿的蒸发系数, 其值与作物性质有关,  $E_0$  为由蒸发皿测得的蒸发量), 即为此次降雨的有效降雨量。实时估算法是测得降雨前后田间土壤含水量差 ( $W_2 - W_1$ ), 加上这期间田间蒸发蒸腾量  $ET_t$  (可采用彭曼公式计算), 扣除掉由降雨引起的深层渗漏量  $D$ , 即可算得有效降雨量。这两种方法都结合了作物生长性质, 需要测得降雨前后的田间含水量, 不便应用在模型中计算有效降雨量, 在精确度上实时估算法要高于土壤湿度变换法, 两者在测算土壤含水量上有一定难度, 结果会有误差。

前人对土壤日水量平衡分析方法的研究相对较多, 马建琴<sup>[20]</sup>等在计算冬小麦的有效降雨量时详细的应用了这种方法。以旱作物为例, 计算如下:

$$W_i = W_{i-1} + W_{Ti} - ET_i + I_i + P_{0i} \quad (4-9)$$

式中各参数含义参照以上公式, 参数计算方法如下:

$$W_{i-1} = 1000 \cdot n \cdot H_{i-1} \cdot \theta_{i-1} \quad (4-10)$$

$$W_i = 1000 \cdot n \cdot H_i \cdot \theta_i \quad (4-11)$$

$$ET_i = K_{ci} \cdot K_{wi} \cdot ET_{0i} \quad (4-12)$$

$$I_i = 1000 \cdot n \cdot H_i \cdot (\theta_{ci} - \theta_i) \quad (4-13)$$

$$W_{Ti} = 1000 \cdot n \cdot (H_i - H_{i-1}) \theta_{deep} \quad (4-14)$$

式中： $H_{i-1}$ 、 $H_i$ ——分别为第  $i$  天初始、结束时计划湿润层深，mm；

$\theta_{i-1}$ 、 $\theta_i$ ——分别为第  $i$  天初始、结束时土壤含水率，%；

$n$ ——土壤孔隙率，%；

$K_{ci}$ ——第  $i$  天作物系数；

$K_{wi}$ ——第  $i$  天土壤水分修正系数；

$ET_{0i}$ ——第  $i$  天参考作物蒸发蒸腾量，mm；

$\theta_{cl}$ ——灌溉后所要达到的土壤含水率，%；

$\theta_{deep}$ ——深层含水率，%。

这种以天为单位模拟土壤水分平衡状态的计算方法，能够更加准确的获取降雨日日的有效降雨量。其中计划湿润层深度和种植作物的种类、生长阶段与根系活动层深度等有关，与地区、土壤类型等也有关系，实际操作中难以实现每日测取各田块计划湿润层深度，在应用中该值通常根据地区多年经验，于各作物各生长阶段取固定值进行计算。

实地测量法以及基于土壤水量平衡所涉及的三种方法，均需要在降雨结束后对有效降雨量进行反推，可以测量或推算出实际降雨引起的有效降雨量，不适合作为预测方法使用在灌溉预报中，可以在降雨后对实时灌溉预报中的预测结果做出修正或替换，应用在计算模型中，使得整个实时灌溉系统维持在较高精度的下运行。

#### 4.1.3 作物腾发量的计算

因气象站可提供的数据较为完整，所以计算模型中应用最精确的 FAO -56 P-M 公式进行求解，公式同 3-3。

作物系数的计算方法还可以使用逐日修正法(张振伟和马建琴 2014; 何胜 2016)计算。按照常规方法得到的作物系数与实际值总会有一些差异，若该灌区或者田块的种植制度较为稳定，可采用逐日估算法进行调试：将实测得到的第  $i$  天末的土壤含水量  $\theta_i$  与借助作物系数经验值得出的值  $\theta'_i$  对比，若误差小于要求精度，那么当日作物系数直接取经验值，若误差过大，依据实测的  $\theta_i$  采用方程进行作物系数  $K_c$  的反推；将修正的作物系数用作下一日的计算中，在全生育期内循环运算即可得到全生育期内的修正作物系数。第二年在种植制度不变的情况下，进行逐年的循环计算，继续调试，直至数值稳定。

#### 4.1.4 渗漏量与排水量

除了 3.1.6 中介绍的公式法，渗漏量可以采用仪器测量法实测。可测量稻田渗漏量的仪器目前有田间蒸渗仪、水田渗漏仪、测筒法等。蒸渗仪依托精准的称重仪器获取土壤水分数据，当需要计算短时渗漏量时可以于田间蒸渗仪中内置张力计和时域反射仪进行土壤水分和吸力的测定，但这种方法在降雨量大的地区误差较大。水田渗漏仪可以忽略水分的水平渗漏，将无底的圆筒置于有水层的土层中，根据测定管的水位变化确定渗漏量，这种方法需要设置尽量多的观测点并且多次测定。测筒法是准备有底无底两个圆筒，测量两筒水位差即为渗漏量，若测筒存在破损导致产生了水平渗漏，结果会比实际值偏小。

#### 4.1.5 其他参数

其他参数，如地下水补给量、计划湿润层深度增加而增加的水量等，实时数据获取难度大，且对土壤含水量预报整体影响不大，本文采用与预报模型中相同的取值。

### 4.2 实时灌溉预报的计算修正模型

气象站点的实测数据有：第  $i$  日平均气温  $T_i$ ，第  $i-1$  日平均气温  $T_{i-1}$ , °C；最高气温  $T_{max}$ , °C；最低气温  $T_{min}$ , °C；相对湿度  $RH_{min}$ 、 $RH_{max}$ , %；气压  $Prs$ , kpa；日照时数  $n$ , h；日序数  $J$ ；10m 处风速  $u$ , m/s；降雨量  $Pre$ , mm；田间实测数据和根据灌区经验可得：初始含水量  $W_{i-1}$ , mm；灌溉量  $I_i$ , mm；地下水补给量  $Ge_i$ , mm；不同时间段的计划湿润层增加而增加的水量  $W_{Ti}$ , mm；作物系数  $K_c$ 。

根据 4.1 的理论分析，基于灌区内气象站资料构建旱作物通用的实时灌溉预报的计算修正模型：

(1) 预测时段初的土壤含水量  $W_{i-1}$  在首次预报时段初中采用实测含水量值，预测时段内在没有实测值校验的情况下直接采用上一日方程推算出的含水量。

(2) 有效降雨量  $P_{0i}$  由有效利用系数法公式 (3-1) 计算。

(3) 作物腾发量  $ET_c$  选择采用参考作物法公式 (3-2) 计算， $K_c$  取当地经验值， $ET_0$  采用 FAO 56 P-M 公式 (3-3)。

(4) 地下水补给  $Ge_i$  采用固定值参与计算，按经验公式 (3-17) 计算。

(5) 计划湿润层增加所造成的水量增加采取各生育阶段固定值，按经验公式 (3-19) 计算。

计算修正模型构建的基础公式汇总如下：

$$P_{0i} = \alpha Pre \quad \begin{cases} pre \leq 5, \alpha = 0 \\ 5 < pre \leq 50, \alpha = 0.9 \\ pre > 50, \alpha = 0.75 \end{cases} \quad (4-15)$$

$$e_a = \frac{e^0(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100} + e^0(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100}}{2} \quad (4-16)$$

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} \text{ Pr s} \quad (4-17)$$

$$R_s = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (4-18)$$

其余公式同预测模型中运用的公式：（3-27）、（3-28）、（3-29）、（3-35）、（3-36）、（3-37）、（3-38）、（3-39）、（3-40）、（3-41）、（3-42）、（3-43）、（3-44）、（3-45）。

按照以上运算基础对实时灌溉预报的计算修正界面进行编程，实时灌溉预报程序中计算修正模型界面设计如下图：

图 4-1 实时灌溉预报程序中计算模型界面

Fig. 4-1 Calculation model interface in real-time irrigation forecast program

如图 4-1 所示，计算模型界面同样分为输入和输出部分，输入界面相关内容有灌区基本信息（海拔、纬度、短波辐射比例系数）、田块基本灌溉情况（初始含水量、灌溉量、地下水补给）、作物相关数据（作物系数、计划湿润层增加的增水量）、气象站可提供数据（气温、相对湿度、气压、风速、日照时数）和日序数。输入以上信息后，点击“开始计算”按钮，即可得到有实际数据计算得到的时段末土壤含水量，完成基于水量平衡法的日灌溉预报修正；点击“下一日”后，前一日中的相同数据会进行自动赋值，免除重复输入；点击“清空数据”按钮，可将“计算模型界面”所包

含的输入数据清空。

### 4.3 扶风地区夏玉米实时灌溉预报的土壤含水量计算

将 2019.7.24-2019.8.1 扶风地区夏玉米实测和气象站数据输入计算模型试运行，7.24 运行结果如下图：

The screenshot shows the software interface for real-time irrigation forecasting. At the top, there's a header bar with a '实时灌溉预报' (Real-time Irrigation Forecast) icon, a close button (X), and a minimize button (-). Below the header, there are three main sections: '灌区基本信息' (Irrigation Area Basic Information), '模型选择界面' (Model Selection Interface), and '计算模型界面' (Calculation Model Interface).

- 灌区基本信息:** Includes fields for '海拔高度(m)' (Elevation) set to 586.5, '纬度' (Latitude) set to 34.22, 'as' (likely air saturation) set to 0.12, and 'bs' (likely base saturation) set to 0.6.
- 模型选择界面:** Contains a dropdown menu labeled '计算模型' (Calculation Model) and two buttons: '清空数据' (Clear Data) and '开始计算' (Start Calculation).
- 计算模型界面:** This is the largest section containing various parameters:
  - Initial soil moisture (Wi-1/mm): 167.844
  - Average temperature (Ti-1/°C): 27.6
  - Atmospheric pressure (Prs/KPa): 94
  - Rainfall (Pre/mm): 0
  - Average temperature (Ti/°C): 28.3
  - Solar radiation (n/h): 1.8
  - Irrigation amount (li/mm): 0
  - Highest temperature (Tmax/°C): 34.2
  - Day number (J): 196
  - Groundwater infiltration (Gei/mm): 0
  - Lowest temperature (Tmin/°C): 22.7
  - 10m wind speed (u/ms-1): 1.9
  - Planned moisture increase (WTi/mm): 1.5
  - Relative humidity (RHmax/%): 81
  - Crop coefficient (Kc): 1
  - Relative humidity (RHmin/%): 41
  - A 'Next Day' button is also present.

图 4-2 实时灌溉预报的计算运行界面（2019.7.24 扶风地区夏玉米）

Fig. 4-2 Operation of real-time irrigation forecast interface (2019.7.24 Summer corn in Fufeng)

2019.7.24-2019.8.01 扶风地区夏玉米实时灌溉预报的土壤含水量计算修正结果见下表：

表 4-1 扶风地区夏玉米土壤含水量计算结果（2019.7.24-2019.8.01）

Table 4-1 Calculation results of soil moisture content of Summer Maize in Fufeng area

(2019.7.24-2019.8.01)

日期	7.24	7.25	7.26	7.27	7.28
土壤含水量 (mm) (预测模型)	166.112	164.486	159.967	154.906	151.203
日期	7.29	7.30	7.31	8.01	
土壤含水量 (mm) (预测模型)	149.443	147.158	143.606	140.696	

#### 4.4 本章小结

根据第二章关于实时灌溉预报修正的研究，灌区的实时灌溉预报中应建立以实际气象数据为输入的实时灌溉预报的计算修正模型，本章针对作物的实时灌溉预报模型的修正计算部分进行了研究。

本章首先对作物和水稻水量平衡方程中各项参数的实际值获取方法展开研究，将能够利用灌区实测数据进行运算的方法进行了汇总及总结，主要成果有：对时段初土壤含水量的实测方法进行了深入学习，总结各方法、设备的优缺点和适用范围；介绍和分析了有效降水量的实测和推算方法；考虑到灌区气象站提供的数据较全面，作物腾发量推荐优先采用 FAO -56 P-M 公式法；对渗漏量的实测仪器和应用方法进行介绍，明析优缺点。以上研究可以为各灌区根据自身设备配备及实际操作情况选取合适的测量或推算方法提供参考。

其次通过以上的分析研究，将简便化、精准度较高的预报方法结合，建立了旱作物通用型实时灌溉计算方法，即“水量平衡方程+烘干法实测含水量/上一日方程推算含水量+降水有效利用系数法+P-M 公式法+其他参数经验或公式固定值”，并以此理论基础编程，研发了通用型作物实时灌溉预报程序中的计算修正界面，程序所需参数易得且操作界面可视性强，可普遍应用于作物的灌溉预报即时修正中。

## 第五章 动态用水计划的编制

在执行实时灌溉预报后得到各田块适宜的灌水时间和灌水定额，对该支渠各田块需水情况进行汇总，根据渠道设施情况及用户需求进行优化配水，保证灌区各作物能够得到及时有效的灌溉。主要内容是确定各渠道需水量、配水量、配水时间（启闭闸门时间）以及轮灌组的划分，通过对渠系输配水进行合理的规划调度，以满足作物生长所需水量，这样得到的用水计划即为动态用水计划。

### 5.1 配水流量与配水时间确定

对于某一区域来说，根据实时灌溉预报得到的灌水定额，各渠系应配水量的计算见下式：

$$M_{\text{净}} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot S_i \quad (5-1)$$

$$M_{\text{毛}} = \frac{M_{\text{净}}}{\eta_{\text{水}}} \quad (5-2)$$

$$T = \frac{M_{\text{毛}}}{q} \quad (5-3)$$

式中： $M_{\text{净}}$ ——该区域的净灌溉需水量， $\text{m}^3$ ；

$m_i$ ——第*i*种作物的灌水定额， $\text{m}^3/\text{亩}$ ；

$S_i$ ——第*i*种作物的种植面积，亩；

$M_{\text{毛}}$ ——该区域的毛灌溉需水量， $\text{m}^3$ ；

$\eta_{\text{水}}$ ——灌溉水利用系数；

$T$ ——被配水渠道引水时间，h；

$q$ ——该渠道的设计引水流量， $\text{m}^3/\text{h}$ 。

两级渠道情况下流量的计算满足下式：

$$Q_{\text{上级}} = \sum_{k=1}^K Q_{\text{下级}k} / \eta_{\text{上级}} \quad (5-4)$$

式中， $Q_{\text{上级}}$ 为上级渠道的计算流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )； $Q_{\text{下级}k}$ 为第*k*条下级渠道的计算流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )； $\eta_{\text{上级}}$ 为上级渠道水利用系数。

以两级渠道计算式5-4，可以依次计算出每一级渠道的配水流量。

## 5.2 灌溉渠系优化配水

大中型灌区在渠系配水过程中大多为人工调控，多级的渠道采用的是“配水斗渠—灌溉管理站—管理局”层层上报灌溉需求的模式，由管理人员根据年度、灌季用水计划自上而下的进行水量的调度分配，依据经验控制闸门开度，完成灌水。这一过程存在很多问题，首先斗渠负责人上报的需水信息多为经验数据，缺乏考虑作物实际生长发育情况和实时的土壤含水量等，存在盲目追求多灌的现象，造成灌区内水资源浪费和缺水共存的现象。另外在水资源供给不足时，调控配水侧重点的不同也会影响到灌区整体的水费收入和农民收入，也会造成不同程度的用水损失，配水效率低。渠系配水的优化将对我国灌区管理水平的提高具有非常重要的现实实践意义。

渠系配水的优化体现在当上、下级渠道过水流量一定的情况下，为了满足各田块上报的灌水需求，按需选取适当的目标函数建立起合适的渠系模型，对灌水过程进行优化。在实际的灌区灌水过程中，为保证各田块均能得到合理灌溉，灌水方式的选择上，干、支渠采取续灌，斗、农渠及下级渠道采取轮灌，合理调整各渠道的灌水流量和次序，缩短配水时间，减少水量损失，提高整体的灌溉效率。

各灌区依据自身不同的灌概要求建立相应的优化模型，求解可得到渠系的优化配水方案。前人对渠系配水的优化研究主要分两类，一种是根据不同的灌水目标对各下级渠道进行轮灌组的划分，按组内轮灌，组间续灌的方式进行灌水；第二种方法是直接对下级渠道的灌水需求进行建模研究，不涉及轮灌组，直接根据各下级渠道的需水量、流量进行优化，确定各下级渠道的灌水具体时间和实际分配流量等。

### 5.2.1 常见的渠系优化配水模型介绍与分析

渠道的优化配水主要体现在对下级渠道的实配流量、配水时间的优化上，以支渠为例，在该支渠下一级的斗渠所需配水量已知、渠道参数确定的情况下，为了满足所涉及田块的灌溉需求，调整各斗渠应配水量和配水时间，使支渠与斗渠、斗渠与斗渠的水流衔接稳定，配水时间控制在轮期之内，做到短历时，较大流量输配水，减少闸门开闭次数，降低各级渠道间的输水损失。国内外常见的优化配水目标有：灌溉产生的水量损失最小（何英等 2011），配水渠道总的输水时间最短（吕宏兴等 2000），各轮灌组合间的配水时间之差最小（宋松柏和吕宏兴 2004），某次灌水的灌区效益（净灌溉增产效益、水费收入以及灌区总的经济效益等）最高（汪志农和熊运章 1993），被配水渠道进口闸调节次数最少，轮灌组最少（骆莉和袁宏源 2000）。

目前我国内灌区的灌溉水费普遍是在斗口进行计量收费的，要想在田块需水量一定的情况下灌区的水费收入最大化，意味着要保证输送到斗口的水量最大化，这就需要减少干支渠在输配水时产生的的水量损失，将干支渠的渠道水利用系数和水费浮动纳入考虑，被配水渠道总灌溉水量和流量不大于上级渠道供应量，灌溉面积要不大于

各作物总体所需灌溉面积，并且不小于最小灌溉面积约束等等。对于缺水地区的灌水，需要充分灌溉、非充分灌溉甚至不灌等形式相结合，灌溉目标多设为作物增产效益和全灌区的总经济效益（数值为增产带来的作物效益扣除水费支出和实施灌水应付的工资）最大，目标函数建立时一般需要借助 JENSEN 相乘模型分别推算出灌区各作物在不同的生育阶段的充分灌溉和非充分灌溉所带来的增产量，对此次灌水被配水渠道的流量、灌溉面积、水量等进行约束。以净增产效益或全灌区经济效益最大为目标函数的优化模型理论上较为完整，但在实际应用上涉及参数较多，许多灌区各作物的非充分灌溉试验数据不足，很多作物缺乏相应的水分生产函数，水分敏感指数在灌溉制度改变等因素的影响下取值不同，在我国灌区农户田块面积小但作物多元化的特点下参数确定困难，不便于广泛应用。

以上级、下级配水渠道水量损失最小为目标是默认一个取水口对应一个导管，将目标函数设为各输水导管沿程水头损失之和，配水要满足轮期、流量、出水口放水一次性等约束。上级配水渠道配水时间最短为目标的优化模型是按照“定流量，变历时”的原则进行优化调控，应用在下级渠道流量相同的渠系中，需满足轮期、出水口放水一次性等约束。

目标函数多样化，各灌区可根据实际需求选择相应的单目标、双目标函数甚至多目标函数（张成才等 2013）参与计算，双目标函数、多目标函数可以利用层次分析法研究目标函数的权重，以此求解模型。

渠系优化配水中根据所选目标函数参考约束：

（1）轮期约束：各轮灌组的总引水时间均不超过轮期  $T$ ：

$$\sum_{j=1}^N t_j x_{ij} \leq T \quad (5-5)$$

其中， $x_{ij}=1$  时，代表第  $j$  支渠划分在第  $i$  组轮灌组， $x_{ij}=0$  时，代表第  $j$  支渠未被划分在第  $i$  组轮灌组。

（2）出水一次性约束：任一出水口在该轮期内只开启一次：

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} = 0,1 \quad i = 1,2,\dots,M; j = 1,2,\dots,N \quad (5-6)$$

（3）整数 0-1 约束：

$$x_{ij} = \{0,1\} \quad i = 1,2,\dots,M; j = 1,2,\dots,N \quad (5-7)$$

（4）水量约束：渠道配水流量与时间之积应是该渠所需水量：

$$W_j = q_j \cdot t_j \quad (5-8)$$

（5）渠道流量约束：流量大小会影响下一级渠道的正常供水和水流的平稳度，

为避免出现引水过少、沿程损失过大和流速过大等对渠道造成损坏，渠道实配流量与设计流量的关系选择满足下式：

$$J_d Q \leq q_j \leq J_u Q \quad (5-9)$$

其中， $J_d$  为渠道的流量折减系数， $J_u$  为渠道的加大流量系数，数值不唯一，需要根据实际情况进行调节； $Q$  为设计流量； $q_j$  为实配流量。

### 5.2.2 渠系优化配水建模思路

动态配水方案修订和下达既要达到灌区的目标效益，又要充分采纳用户的申请，对渠系配水进行动态优化，较大程度上实现大流量、短历时灌水，缓解渠道间水流衔接的问题，保持渠道内水流的平稳度，减少渗水损失与闸门启闭次数，提高灌区水利利用率。渠系配水中下级渠道应满足以下要求：

- (1) 在来水量充足的情况下尽量满足各田块上报的灌溉水量和灌溉时间；
- (2) 灌水一般先下游渠道再上游渠道，尽量集中成片，避免不必要的水量损失；
- (3) 满足上下级渠道水量守恒，上级渠道配水量等于下级各渠道配水量之和；
- (4) 下级各渠道的实际配水流量越贴近其设计流量值，该渠道水量的损失就会越小；
- (5) 灌水持续时间控制在轮期之内。

本文考虑到渠系优化配水的通用性，对两级渠道配水情况开展研究，在多级渠道的灌区轮灌配水可按两级逐级上推，优化轮灌组的划分。下级渠道划分轮灌组依据是上级渠道的设计引水流量和下级渠道的设计流量。设上级渠道的引水流量为  $Q$ ，渠道水利用系数为  $\eta_u$ ，下有  $N$  条下级渠道， $j$  为下级渠道编号， $j=1,2,\dots,N$ ，且各渠的设计流量相等， $q_1=q_2=\dots=q_N=q$ 。 $N$  条渠道划分为  $M$  个轮灌组， $i$  为轮灌组编号， $i=1,2,\dots,M$ ，且  $M$  不超过  $N$ 。

各下级渠道灌水所需时间按下式计算：

$$t_j = \frac{W_j}{3600\eta_j q'} \quad (5-10)$$

式中： $t_j$ ——第  $j$  条渠道灌水所需时间， $h$ ；

$W_j$ ——第  $j$  条渠道申报的用水量， $m^3$ ；

$\eta_j$ ——渠道水利用系数；

$q'$ ——各下级渠道的实配流量， $m^3/s$ 。

第  $i$  个轮灌组的配水时长：

$$T_i = \sum_{j=1}^N x_{ij} t_j \quad (5-11)$$

其中,  $x_{ij}$  表示第  $j$  条渠道的编组状态。

各轮灌组按以下规则灌水: 同一轮灌组内下级配水渠道在任一时间最多只能有一个渠道参与配水, 出水口开启, 同组其它渠道的出水口关闭。当此渠道灌至引至所需水量后, 出水口关闭, 继续给组内其他渠道依次灌水, 直至轮灌组内的所有渠道均已满足灌水需求。当下级所有渠道达到灌水需求, 此次的灌溉任务完成。

由于各轮灌组实际配水时间不同, 导致出水口闸门调节频繁, 水流不平稳, 易对渠道产生破坏且人为操作麻烦。综合现有配水模型的优缺点, 考虑多数灌区的通用性, 本文建立总配水时间最短和各轮灌组间的配水时间差最小的双优化目标函数的优化配水模型, 函数如下:

$$\min Z = \max T_i \quad (5-12)$$

$$\min \Delta T = \max(T_a - T_b) \quad (5-13)$$

式中:  $\Delta T$ ——轮灌组间配水时长差, h;

$T_a$ 、 $T_b$ ——第  $a$  个、第  $b$  个轮灌组配水时长, h, 其中,  $1 \leq a \leq M$ ,  $1 \leq b \leq M$ ,  $a \neq b$  考虑以下约束:

(1) 每个轮灌组的总配水时间  $T_i$  均小于轮期  $T$ :

$$T_i \leq T \quad (5-14)$$

(2) 任一个下级渠道在此次灌水中只能灌水一次:

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N \quad (5-15)$$

$x_{ij}=1$  时, 代表第  $j$  支渠划分在第  $i$  组轮灌组,  $x_{ij}=0$  时, 代表第  $j$  支渠不在第  $i$  组轮灌组。

(3) 整数 0-1 约束:

$$x_{ij} = \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N \quad (5-16)$$

(4) 下级渠道的实配流量  $q'$  首先应满足下式, 同时选择最接近设计流量  $q$  的值:

$$q' = \frac{\eta_u Q}{M} \quad (5-17)$$

另外, 笔者建议各灌区根据具体情况灵活增加约束。例如盐渍地区增加水盐约束, 借助灌水的淋盐作用调控土壤含盐量, 施肥时期考虑水肥约束, 综合调控形成水肥一体化模式。

实际应用中为方便灌区管理, 在确定轮灌组后, 再根据时间、距离等因素进行微调整, 调整的结果可能会影响到本次及下次的预报, 需要及时更新反馈。

### 5.2.3 渠系优化配水的修正

在求解以上模型后，可以得到下级渠道的轮灌组划分和配水流量，对以上结果采取下述修正思路：

(1) 确定次序。轮灌组内按照各下级渠道上报的应灌水时间对渠系灌水进行排序，先急用，后缓用。若该区域内由于种植结构相同且作物的生长状况类似等原因导致上报的需水时间相同，则按照自上而下，先远后近的基本原则确定灌水次序。在所有轮灌组基本确定后，根据优先集中灌水的原则统一做进一步的调整，确定各轮灌组内最终的灌水次序。

(2) 需水量修正。根据(1)确定的各渠道灌水次序和灌水时长，可知各渠道初步的应配水起始时间，借助第三章实时灌溉预报的相应研究和软件，对上报灌水起始时间和应配水起始时间差所造成的需水量差值 $\Delta W_j$ 进行计算，按天计。

(3) 配水时间和流量修正。综合 $\Delta W_j$ 对渠道配水计划的影响，在各轮灌组在流量符合约束条件的情况下尽量统一引水时间，使得渠首闸门可以在同一时间启闭，简化渠道配水的实际操作。

各渠配水起始时间根据轮灌组内渠道配水时间的变化相应增减，最终可得此次灌水的优化结果。

## 5.3 典型渠系实时用水计划的实现

### 5.3.1 冯家山水库灌区夏玉米的实时灌溉预报应用

冯家山水库灌区扶风气象站所在地的海拔高度  $Z=586.5\text{m}$ ，纬度  $\phi=34.22$ ，短波辐射比例系数  $a_s=0.12$ ， $b_s=0.6$ ，土壤干容重取  $1.42\text{g/cm}^3$ ，田间持水量为 24%（占干土重的百分比计），地下水埋深大于 5 米，故不考虑地下水对作物生长的补给。

对该地的夏玉米灌溉进行实时预报，对于夏玉米的种植，该地普遍的灌水方式是根据灌区年度用水计划灌至适宜土壤含水量上限。

为了方便研究的进行，本文按照本地区夏玉米各生育期的生长情况、灌溉习惯，结合第三章相关值的推算研究，将夏玉米划分为四个生长阶段，通过对冯家山灌区种植作物、气候、土壤、地形、渠系分布等基本情况的调研和了解，计算总结了扶风地区种植夏玉米的各项基础参数值，本地夏玉米各阶段的计划湿润层深度（深层土壤的平均储水量按田间持水量的 65% 计算）、适宜含水量的上下限（占田间持水量的百分比计）（胡燕哲等 2017）、作物系数  $K_c$ （梁文清等 2011）等见下表：

表 5-1 夏玉米各生育阶段相关指标参考值汇总

Table 5-1 Summary of Reference Values of Summer Corn at Different Growth Stages

各项指标 \ 生育阶段	苗期	拔节	抽穗	灌浆成熟
时间	6.15	7.15	8.15	9.05
计划湿润层深度 (cm)	40	60	80	100
日均计划湿润层增水量 (mm)	1.5	1.5	2.2	0
适宜含水量下限 (%)	55	70	70	50
适宜含水量上限 (%)	85	90	90	100
作物系数 Kc	0.85	1.00	1.27	1.07

本文以该灌区夏玉米的拔节期内的实时灌溉预报为例(2019.7.24-8.01)进行模拟,初始实测含水量为 19.7% (167.844mm), 该田块的玉米种植面积为 46.73hm<sup>2</sup>, 根据 2019 年扶风气象站数据和天气预报数据, 数据来源为中国天气网 (<http://www.weather.com.cn/>), 中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)。

将时段内的各项数据输入到本研究制作的实时灌溉预报计算程序中进行短期的土壤含水量预测, 根据灌溉方案制定原理得出需水量和需水时间, 结果见表 5-2。

表 5-2 7.24-8.01 每日实时灌溉预报结果表

Table 5-2 Daily Real-time Irrigation Forecast Results of 7.24 to 8.01

日期	土壤含水量 (mm) (预测模型)	土壤含水量 (mm) (计算模型)	后三天是否有 可利用降雨	需水量 (mm)	灌水方案
7.24	166.183	166.112	无	0	
7.25	163.770	164.486	无	0	
7.26	159.285	159.967	无	0	
7.27	155.025	154.906	无	0	
7.28	151.953	151.203	无	0	
7.29	150.713	149.443	无	0	
7.30	148.877	147.158	无	0	
修正	147.158				
7.31	143.275	143.606	无	0	
					该田块此次需灌水量
8.01	141.558	140.696	无	42.48	$m=0.04248*46.73*10^4$ $=19850.9m^3$

### 5.3.2 冯家山灌区渠系配水优化

灌区共有干渠 4 条，总长约 119.8 km，有干渠建筑物 617 座；支、引渠 90 条，长 632.76 km；斗、分渠 9701 条，长 4182 km。灌区共设 23 处 53 站 5000 亩以上的抽水站，装机 163 台，总装机容量 3.47 万 kw，6 座渠库结合工程，库容 2133.5 万 m<sup>3</sup>，其中有效库容 1308.8 万 m<sup>3</sup>。

应用 5.2 建立的模型对冯家山水库灌区北干十一支法门段上报需水请求的 12 条斗渠进行优化配水模拟，北干十一支渠道的正常引水流量在 2.0~2.8m<sup>3</sup>/s，法门段支渠设计引水流量为 1.2 m<sup>3</sup>/s，各下级斗渠设计流量为 0.3 m<sup>3</sup>/s。根据灌区灌季用水计划，此次灌溉轮期为 12 天，自 7.28 始灌。各斗渠灌溉面积、申报用水量见表 5-3。

表 5-3 冯家山灌区北干十一支法门段斗渠用水情况

Table 5-3 Water usage of a branch canal in Fengjiashan irrigation region

(NO.11 channel of North main channel)

斗渠编号 j	1	2	3	4	5	6
灌溉面积/hm <sup>2</sup>	82.93	33.93	102.33	112.53	34.13	96.67
申报用水量/m <sup>3</sup>	99360	33480	95040	70200	34560	115560
申报开始用水时间/h	96	192	120	72	168	0
斗渠编号 j	7	8	9	10	11	12
灌溉面积/hm <sup>2</sup>	74.27	62.73	28	60.53	52.6	105.33
申报用水量/m <sup>3</sup>	73440	70200	29160	63720	68040	111240
申报开始用水时间/h	96	96	24	24	0	0

对 5.2 建立的通用型渠系优化配水模型进行求解计算，得到轮灌分组情况，各渠流量按设计引水流量初步确定设计灌水时间，初步的灌水计划结果见表 5-4。灌水方式采取组内轮灌，组间续灌。

表 5-4 北干十一支优化轮灌编组及轮灌组引水流量与引水时间

Table 5-4 The Optimal rotation irrigation group and the diversion flow and diversion time

(NO.11 channel of North main channel)

轮灌组序数	斗渠组合	轮灌组引水流量 (m <sup>3</sup> /s)	轮灌组引水时间 (h)
1	1、6	0.3	199
2	5、8、12	0.3	200
3	2、3、9、10	0.3	205
4	4、7、11	0.3	196

### 5.3.3 渠系配水优化结果修正

以 5.3 提出的渠系配水修正思路为指导，根据各斗渠申报的需水时间首先按照先急后缓的配水原则，对各轮灌组内各渠系进行初步的排序，初定各斗渠计划配水开始

时间和配水时长。计划灌水日和需水日往往存在时间差，将时间差和实时灌溉预报相结合按组内灌水次序依次调整各斗渠的需水量和配水时间，修正结果见表 5-5。

表 5-5 北干十一支各斗渠优化配水结果

Table 5-5 Optimized water distribution results (NO.11 channel of North main channel)

斗渠 编号 j	所属轮 灌组	组内灌 水次序	需水量变化值 $\Delta W_j$ (m <sup>3</sup> )	优化引水流量 (m <sup>3</sup> /s)	配水开始时 间 (h)	配水持续时 间 (h)
1	1	2	1103	0.3	107	93
2	3	4	-645	0.3	171.1	30.4
3	3	3	-2046	0.3	85	86.1
4	4	2	-1035	0.3	63	64
5	2	2	-1085	0.3	103	30.5
6	1	1	0	0.3	0	107
7	4	3	1976	0.3	127	69.8
8	2	3	2108	0.3	133.5	67
9	3	1	-1042	0.3	0	26
10	3	2	0	0.3	26	59
11	4	1	0	0.3	0	63
12	2	1	0	0.3	0	103

各斗渠初步配水时间确定后，进一步调整各轮灌组的引水流量，使各轮灌组的总引水时长统一，减少支渠闸门可避免的启闭。各轮灌组优化配水结果见表 5-6。

表 5-6 北干十一支各轮灌组优化配水结果

Table 5-6 Optimized water distribution results of rotation group (NO.11 channel of North main channel)

轮灌组 序数	斗渠组合及排序	轮灌组引水流量 (m <sup>3</sup> /s)	轮灌组引水时间 (h)	统一引水时间 (h)	优化引水流量 (m <sup>3</sup> /s)
1	6、1	0.3	200	200	0.3
2	12、5、8	0.3	200.5	200	0.3
3	9、10、3、2	0.3	201.5	200	0.3
4	11、4、7	0.3	196.8	200	0.29

应用 5.2、5.3 理论得到的冯家山灌区北干十一支的配水优化及修正结果，主要具有以下优势：配水次序安排合理，可以满足按需灌水、集中灌水等原则；需水量精确，降低不必要的水量损失；各级渠道实配流量均匀且与设计流量相近；各轮灌组总配水时长相同或相近，便于上级渠道统一调控。以上说明本章建立的优化配水及修正模型实用效果较好。

## 5.4 本章小结

通过运行实时灌溉预报可得到各田块初步的灌溉方案，本章在初步灌溉方案确定的基础上，展开了对用水计划初步编制的研究与应用。

本章首先建立了实时灌溉预报结果（各田块的需水情况）和灌区各级渠道引水需求的关联，对国内大中型灌区灌水管理现状和存在的问题进行了阐述。渠系配水的优化分组是解决灌区用水矛盾的重要方法之一。

其次是按照灌区灌水目标的不同对常用渠系配水模型进行分类，并就各自存在的问题进行分析，同时总结了常见的配水约束条件。

接着，基于国内灌区灌溉渠系的普遍分布情况，以总配水时间最短和各轮灌组间的配水时间差最小为目标，建立了通用化的两级渠道配水模型，充分考虑轮期、流量的约束，并且提出了根据计划灌水时间与实际需水时间的差异情况来修正灌水方案的思路，具体做法是时差结合实时灌溉预报对该渠的灌水量进行调整，并在各级渠道流量合理范围内统一灌水时长以方便灌区的统一管理。

最后，于冯家山灌区的典型渠系完成了用水计划初步编制的应用，得到了该渠系用水计划的初步编制。最终的渠系优化结果表明，本文确定的用水计划可以实现大流量、短历时的灌溉，且具有配水方案精确合理、可操作性强和易于灌区管理等优点。故本研究对灌区动态用水计划的初步编制是符合实际并且可行的。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 主要结论

灌区的灌溉用水在很大程度上可以通过管理进行优化，动态用水计划的实行可以实现高效化、精细化农业，提高水资源的利用率。本文对目前国内灌区，特别是大中型灌区的灌溉管理不足进行分析，从灌溉需求入手，充分利用实时数据，建立了旱作物在大多数灌区通用的实时灌溉预报模型和渠系优化配水模型，研究成果如下：

(1) 本文采用水量平衡法对实时灌溉预报展开研究，首先对基于水量平衡法建立的灌区实时灌溉预报的方法路线等进行了详细的阐述，给出旱作物、水稻适用的水量平衡方程，明确本文实施的实时灌溉预报流程和灌溉方案的制定原则，并对灌溉预报过程提出相关修正思路。

(2) 将实时灌溉预报的研究和程序的编写分为预测模型和计算模型两部分进行。通过对基于水量平衡法的灌区实时灌溉预报中各参数方法的综合叙述，为参数预测和实际值获取方法的选择提供参考，便于各灌区根据自身设施配备、灌水需求等情况进行自主选择。

(3) 通过对方法的研究分析，本文建立的通用型作物实时灌溉预报中的预测模型以天气预报资料为输入信息，以“水量平衡方程+时段初实测含水量/上一日方程推算含水量+天气预报对应有效降水量+天气预报数据解析计算的P-M公式法+其他参数经验或公式固定值”为基础建模并借助c#编程，完成程序中预测界面的设计，达到了利用简便易得的数据对作物灌溉需求进行准确的短期预测的目的。

(4) 本文建立的通用型作物实时灌溉预报中的计算修正方法以该地气象站的实时观测数据为输入信息，以“水量平衡方程+烘干法实测含水量/上一日方程推算含水量+降水有效利用系数法+P-M公式法+其他参数经验或公式固定值”为基础建模并借助c#编程，完成程序中预报界面的设计，达到了以实际气象数据即时修正原预测结果的目的，在结果差异较大时取代原结果，保证预报模型在短期灌溉预报中的精确度。

(5) 对渠系配水现状进行分析阐述，归纳总结出常见的渠系配水模型，为各灌区进行渠系优化配水分组提供借鉴与参考。根据国内灌区渠系管理现状，以总配水时间最短和各轮灌组间的配水时间差最小为目标，充分考量轮期、流量的约束，以两级渠道为研究对象建立通用化的优化配水模型，提出了轮灌组内按照各下级渠道上报的需水时间确定灌水次序、灌水时间和灌溉定额的修正思路，并且对各轮灌组的灌水时长进行统一化处理。本研究中建立的渠系配水模型可以充分利用实时气象预报数据并且满足用水户需求，实配时长的统一化处理也方便了灌区的管理。

(6) 由实时数据出发建立的的实时灌溉预报和渠系配水优化做到了对灌区用水计划的动态编制,相较灌区惯用的静态用水计划,本研究提出的动态用水计划编制更加突出了对作物实际需水量的把握,做到及时灌溉和减少不必要的水浪费。应用以上理论研究,对典型灌区(冯家山灌区)进行动态用水计划编制的实践模拟,得到的用水计划最终结果具备实配流量稳定、配水搭配合理准确、配水时间缩短且配水集中等优势,可解决渠系配水优化的问题,表明本研究对灌区动态用水计划的初步编制是符合实际并且可行的。

## 6.2 创新点

(1) 目前建立的灌区实时灌溉预报缺乏对修正部分的研究,故本研究提出了以实际气象资料及时修正灌溉预报结果的思路,并建立了实时灌溉预报的计算修正模型,将基于天气预报的灌溉预报预测模型和计算修正模型相结合,开发了作物通用型实时灌溉预报的计算程序,按预测和计算修正两个功能分别创建了运行界面,做到了灌溉预报中修正与预测并重。

(2) 建立了通用型两级渠道配水优化模型,在各渠的灌水计划确定中,提出了以优先满足上报需水时间和集中灌溉为原则,以计划灌水日与需水日的时差参与修正,和各轮灌组灌水时长统一的修正思路。

## 6.3 存在问题及展望

由于时间和资料有限,在灌区用水计划编制的方法和模型方面还存在下列等待学者研究的问题:

(1) 灌溉预报的实时修正问题。如何简便化的利用起作物生长的实时数据和正确预估初始状态是实时灌溉预报所追求的。本文建立的灌溉预报模型中,每一轮的灌溉预测都是以最新获取的实测资料或者修正后的数据为依托,充分采纳短期水文气象资料,对灌水定额和灌水时间作出预测,但是对作物实时生长发育信息的采集和利用研究不足,以后应该补充加强作物生长的实时修正研究。

(2) 灌溉预报应用问题。现阶段灌溉预报的应用并不广泛,预报的信息怎样传达给当地农民,农民又如何依据自家农田和作物的实际情况上报灌溉需求,一旦信息需要调整,该怎么处理。今后需要加强推广探索便捷的形式,例如利用手机等移动端远程操作,申报灌水需求等。

(3) 目前对于渠系配水的研究有大量成熟的模型可以应用,但具有一定的局限性,缺乏将水资源和其他作物生长要素结合的研究,因此在今后的研究中,可以加强对水、盐、肥等多方面的综合调度,形成更全面的配水模型。

## 参考文献

- 曹永梅,李君,李廉俊. 2017. 基于属性层次模型的灌区节水水平研究. 人民黄河 39(09):145-148.
- 曹永强,朱明明,李维佳. 2018. 河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征. 生态学报. 38(02):560-570.
- 陈红卫,周明耀,瞿益民. 2005. 非充分灌溉稻田墒情预报的人工神经网络模型. 扬州大学学报(自然科学版). (01):50-54.
- 程殿龙,马宏志,许晓春.2002. 神经网络方法在土壤墒情预测中的应用. 中国农村水利水电. (07):6-8.
- 崔伟敏,宋妮,申孝军,等. 2018. 不同气候区参考作物需水量计算方法对比研究. 节水灌溉. (08):75-80.
- 党力. 2000. 水利科技信息工作的现状及思考. 中国水利(2): 38-39
- 董泽君,鹿琪,冯晅等. 2017. 探地雷达测量土壤含水量的应用研究. 地球物理学进展. 32(05):2207-2213.
- 樊引琴,蔡焕杰. 2002. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究. 水利学报. (03):50-54.
- 冯保清,姜海波. 2002. 加快信息化建设 推动灌区现代化进程. 中国水利(5): 45-46
- 冯磊. 2005. 基于驻波率原理的土壤水分测量技术的研究[硕士学位论文]. 北京: 中国农业大学.
- 顾世祥,李远华,袁宏源. 1998. 霍泉灌区作物需水量实时预报. 武汉水利电力大学学报. (01):37-41.
- 顾世祥,袁宏源,李远华,郭宗楼,崔远来,李锡贤,郝江. 1998. 决策支持系统及其在灌溉实时调度中的应用. 中国农村水利水电. (08):17-19+45.
- 郭复兴,常天然,林易焱,王延平,穆艳. 2019. 陕西不同区域苹果林土壤水分动态和水分生产力模拟应用生态学报. 30(02):379-390.
- 郭焘,于红博. 2018. 土壤含水量测定方法综述. 内蒙古科技与经济,(03):66-67.
- 韩振中. 2016. 我国灌区发展展望与科技创新驱动. 中国农村水利水电,(8): 1-3
- 何军,李飞,刘增进. 2013. 单、双作物系数法计算夏玉米需水量对比研究. 安徽农业科学. 41(33):12830-12831+12910.
- 何胜. 2016. 冬小麦适应性节水灌溉预报与实时配水技术研究[硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学.
- 何武全,张英普,寇广潮,蔡明科. 2002. 论大型灌区节水改造对策. 西北水资源与水工程 (01):50-52+58
- 何英,景少波,姜卉芳. 2011. 通用化灌区渠系优化配水系统的开发. 节水灌溉,(04):61-63.
- 侯晓丽,冯跃华,吴光辉,等. 2016. 大型灌区作物需水量计算与气象影响因素分析. 节水灌溉 (10):120-122.
- 胡玲. 2004. 灌区实时灌溉预报模型[硕士学位论文]. 南京: 河海大学.
- 胡燕哲,吴明泽,李涛龙,田国明,张亚奇,雷乾震,胡笑涛.2017.玉米生长指标的土壤水分上下限调控机理. 干旱地区农业研究,35(01):165-170.
- 黄青,唐华俊,周清波,吴文斌,王利民,张莉. 2010. 东北地区主要作物种植结构遥感提取及长势监测. 农业工程学报, 26(09):218-223+386
- 黄涛, 严瑾. 2012. 遥感技术在灌区灌溉面积及作物种植结构中的应用. 科技信息(35)

- 黄永基. 2000. 我国水资源需求管理现状及发展趋势分析. 水科学进展, 11(2): 215-220.
- 金昕. 2018. 彭曼公式在作物需水计算中的应用. 江淮水利科技. (01):28-30.
- 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 1994. 土壤—植物—大气连续体水分传输理论及其应用. 北京: 水利电力出版社.
- 康绍忠, 许迪, 李万红, 黎明. 2002. 关于西北旱区农业与生态节水基本理论和关键技术研究领域若干问题的思考. 中国科学基金, 16(5): 20-24
- 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 1992. 冬小麦根系吸水模式的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版). (02):5-12.
- 康绍忠, 张富仓, 梁银丽. 1997. 玉米生长条件下农田土壤水分动态预报方法的研究[J]. 生态学报. (03):245-251.
- 康绍忠. 1990. 土壤水分动态的随机模拟研究. 土壤学报. (01):17-24.
- 李保国. 1991. 区域土壤水贮量及旱情预报. 水科学进展.(04):264-270.
- 李靖, 段青松, 邱勇. 2000. 灌区作物需水量预报的时间序列分析. 云南农业大学学报. (02):102-104.
- 李陆泗, 张增圻. 1990. 果树的灌溉预报模型. 河北农业大学学报. (03):85-90.
- 李明, 黄渝淇, 李绪孟, 彭冬星, 谢景鑫. 2018. 基于无人机遥感影像的水稻种植信息提取. 农业工程学报, 34(04):108-114.
- 李绅东, 熊玉江, 余仲相, 等. 2018, 气候变化对水稻灌溉需水量影响研究. 节水灌溉, 277(09):42-46.
- 李熙春, 尚松浩. 2003. 华北冬小麦-夏玉米农田水分动态模拟研究. 灌溉排水学报. (05):10-16.
- 李小涛, 黄诗峰, 宋小宁, 马建威. 2013. 卫星遥感结合地面观测数据的土壤墒情监测分析系统. 水利学报, 44(S1):116-120.
- 李艳芳. 2009. 西安地区苹果林地与农田土壤水分变化研究[硕士学位论文]. 西安: 陕西师范大学.
- 李迎. 2012. 基于墒情监测的冬小麦灌溉预报研究[硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院.
- 李远华, 崔远来, 杨常武, 林善钿, 陈崇德. 1997. 漳河灌区实时灌溉预报研究. 水科学进展.(01):74-80.
- 李远华. 1994 实时灌溉预报的方法及应用. 水利学报. (02):46-51.
- 梁文清, 蔡换杰, 王健. 2011. 陕西关中地区夏玉米作物系数试验研究. 节水灌溉,(12):1-4.
- 刘倩, 熊丽荣. 2007. 基于人工神经网络算法对水稻需水量的预测. 华中农业大学学报. (06):885-887.
- 刘战东, 段爱旺, 肖俊夫, 等. 2007. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展. 灌溉排水学报. (03):27-30+34.
- 刘振忠, 隋吉东. 1997. 土壤水分测定的数学模型研究. 黑龙江八一农垦大学学报. (03):21-24.
- 陆孝平. 2002. 关于水利现代化问题的思考. 中国水利(10): 154-156
- 路京选, 曲伟, 付俊娥. 2009. 国内外干旱遥感监测技术发展动态综述. 中国水利水电科学研究院学报, 7(2): 105-111
- 罗琳. 2016. 适应现代农业发展的现代化灌区发展对策研究. 中国农村水利水电(08):10-12.
- 罗玉峰, 李思, 彭世彰, 等. 2013. 基于气温预报和 HS 公式的参考作物腾发量预报. 排灌机械工程学报. 31(11):987-992.
- 罗长寿, 魏朝富, 李瑞雪. 2002. 时序模型在四川盆地土壤水分动态预报中的应用. 西南农业大学学报. (05):464-466.
- 骆莉, 袁宏源. 2000. 配水渠道轮灌组合优化模型及其遗传算法. 中国农村水利水电,(10):11-13.
- 吕宏兴, 尚小林, 徐宏伟. 2003. 渠灌区灌溉管理信息化发展模式探讨. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 31(s1): 214-217
- 吕宏兴, 熊运章, 汪志农. 2000. 灌溉渠道支斗渠轮灌配水与引水时间优化模型. 农业工程学报, 16(04):108-114.

- 报,(06):43-46.
- 马建琴,李明. 2011. 作物在线实时灌溉制度研究及其管理软件研制. 节水灌溉. (08):55-57+60.
- 马涛. 2008. 国内外土壤水分快速测量技术浅析. 中国防汛抗旱. 18(01):31-33.
- 马孝义,王君勤,李志军. 2002. 基于土壤消退指数的田间土壤水分预报方法的研究. 水土保持研究.(02):93-96.
- 茆智,李远华,李会昌. 2002. 实时灌溉预报. 中国工程科学. (05):24-33.
- 孟成真. 2018. 遥感技术在农业旱情监测中的应用分析. 农业与技术(11)
- 米素娟,吴青柏,沈兵,杨增顺. 2019. 基于热惯量的土壤湿度估算研究. 测绘与空间地理信息.  
42(10):11-14+18.
- 倪深海,周凌辉,华幸超,徐文元,潘栋飞. 2018. 平原水网地区农田灌溉水有效利用系数测算方法研究. 中国农村水利水电, (02):28-30+36
- 齐学斌,黄仲冬,乔冬梅,张现超,李平,Mathiasn N Andersen.2015.灌区水资源合理配置研究进展.水科学进展, 26(02):287-295.
- 乔平林,张继贤,王翠华.2006. 基于星载被动微波遥感的地表土壤湿度反演. 辽宁工程技术大学学报. (03):342-344.
- 邱林,宋建娜,陈晓楠,等. 2006. 基于神经网络的植被需水量模型. 华北水利水电学院学报.  
(02):4-6+31.
- 尚松浩,蒋磊,杨雨亭. 2015. 基于遥感的农业用水效率评价方法研究进展. 农业机械学报,  
46(10):81-92.
- 尚松浩,雷志栋,杨诗秀. 2000. 冬小麦田间墒情预报的经验模型. 农业工程学报.(05):31-33.
- 尚松浩,毛晓敏,雷志栋,杨诗秀. 2002. 冬小麦田间墒情预报的 BP 神经网络模型. 水利学报.  
(04):60-63+68.
- 邵明安,杨文治,李玉山. 1987. 植物根系吸收土壤水分的数学模型. 土壤学报. (04):295-305.
- 申双和,李胜利. 1998. 一种改进的土壤水分平衡模式. 气象.(06):18-22.
- 施建成,杜阳,杜今阳,蒋玲梅,柴琳娜,毛克彪,徐鹏,倪文俭,熊川,刘强,刘晨洲,郭鹏,崔倩,李云青,陈晶,  
王安琪,罗禾佳,王殷辉. 2012. 微波遥感地表参数反演进展. 中国科学:地球科学.  
42(06):814-842.
- 宋立生,刘绍民,徐同仁,徐自为,马燕飞. 2017.土壤蒸发和植被蒸腾遥感估算与验证. 遥感学报,  
21(6):966-981
- 宋松柏,吕宏兴.2004. 灌溉渠道轮灌配水优化模型与遗传算法求解. 农业工程学报,(02):40-44.
- 粟容前,康绍忠,贾云茂,张宝忠,韦怡冰. 2005. 汾河灌区土壤墒情预报方法研究. 中国农村水利水  
电.(10):92-95.
- 孙灏,陈云浩,孙洪泉. 2012. 典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系. 农业工程学报,  
28(14):147-154
- 孙丽,王飞,吴全. 2010. 干旱遥感监测模型在中国冬小麦区的应用. 农业工程学报,  
26(1):243-249+389.
- 孙满利,付菲,沈云霞. 2019. 土的含水率测定方法综述. 西北大学学报(自然科学版).  
49(02):219-229.
- 陶国通,王景雷,南纪琴,等. 2014. 基于温度的作物需水量估算方法. 应用生态学报.  
25(07):2019-2025.
- 田源,雷钧,吐尔逊·艾山. 2017. 遥感技术在农业中的应用浅析. 新疆农业科技,(01):19-20.
- 汪志农,冯浩. 2001. 节水灌溉管理决策专家系统. 黄河水利出版社: 133

- 汪志农,熊运章.1993. 灌溉渠系配水优化模型的研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版),(02):66-69.
- 王大龙,舒英格. 2017. 土壤含水量测定方法研究进展. 山地农业生物学报. 36(02):61-65.
- 王立坤,刘庆华,付强. 2004. 时间序列分析法在水稻需水量预测中的应用. 东北农业大学学报. (02):176-180.
- 王啸天,路京选, WANGXiaotian, LUJingxuan. 2016. 遥感技术在灌区现代化管理中的应用研究进展. 中国水利水电科学研究院学报, 14(1): 42-47
- 魏光辉,马亮. 2014. 基于日尺度的干旱区 ET<sub>0</sub> 计算模型对比分析. 节水灌溉. (04):19-21+26.
- 魏子涵,魏占民,张健,梁天雨,高红艳,付晨星. 2015. 区域灌溉水利用效率测算分析. 水土保持研究, 22(06):203-207
- 温忠辉,张刚,鲁程鹏,束龙仓,阿依古丽·艾科拜尔,李伟. 2015. 基于作物需水的灌溉用水量核算方法及应用. 南水北调与水利科技. 13(02):370-373.
- 吴黎,张有智,解文欢, 2014.土壤水分的遥感监测方法概述. 国土资源遥感,26(02):19-26.
- 吴姗,莫非,周宏,Asfa Batool,赵鸿,邓浩亮,陈应龙,熊友才,张恒嘉. 2014. 土壤水动力学模型在 SPAC 系统中应用研究进展. 干旱地区农业研究. 32(01):100-109.
- 肖俊夫,陈玉民,孙景生.1997. 利用反推法进行农田灌溉预报的初步研究. 灌溉排水.(01):30-33.
- 徐美,阮本清,黄诗峰,鲍子云. 2007.灌区作物种植结构遥感监测及其应用. 水利学报, (7):879-885
- 阎存立. 2015. 农业综合开发中型灌区节水配套改造回顾与展望. 中国农村水利水电(12):73-74.
- 杨树聪,沈彦俊,郭英,近藤昭彦. 2011. 基于表观热惯量的土壤水分监测. 中国生态农业学报. 19(05):1157-1161.
- 杨曦光,于颖. 2017.基于试验反射光谱数据的土壤含水率遥感反演. 农业工程学报, 33(22):195-199
- 易艳. 2017. 论生态文明视野下的水资源保护及利用. 理论月刊,(2):76-81
- 易银莲,崔宁博,张青雯,冯禹,胡笑涛,龚道枝. 2018.灌区运行水平综合评价研究进展. 中国农村水利水电, (8):45-54
- 张成才,马涛,董洪涛,刘杰.2013.基于遗传算法的灌区渠系优化配水模型研究. 人民黄河,35(03):65-67.
- 张倩,段爱旺,高阳,等. 2015. 基于温度资料估算参考作物腾发量的方法比较. 农业机械学报. 46(02):104-109.
- 张倩,段爱旺,王广帅,等.2015.基于天气预报的参照作物腾发量中短期预报模型研究. 农业机械学报. 46(05):107-114.
- 张振伟,马建琴. 2014. 基于日需水量的作物非充分实时灌溉预报模型及应用. 水电能源科学. 32(04):167-170.
- 张智韬,王海峰,韩文霆,边江,陈硕博,崔婷. 2018. 基于无人机多光谱遥感的土壤含水率反演研究. 农业机械学报,49(2):173-181
- 赵琪,罗玉峰,彭世彰,等. 2014. 基于天气预报和 Penman-Monteith 公式的短期逐日参考作物腾发量预报. 节水灌溉. (01):1-4+8.
- 周浩勇.2016 冬小麦灌溉需水量适宜估算模式的研究[硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院.
- 朱忠礼,林柳莺,徐同仁. 2012. 海河流域不同下垫面土壤水分动态模拟研究. 地球科学进展. 27(07):778-787.
- Aboitiz M , Labadie J W , Heermann D F. 1986. Stochastic Soil Moisture Estimation and Forecasting for Irrigated Fields. Water Resources Research, 22(2):180–190.
- Bandara, K.M.P.S. 2006. Assessing irrigation performance by using remote sensing. Wur Wageningen

- Ur, 19: p. 279-284
- Binru Zhao,Qiang Dai,Dawei Han,et al.2019. Estimation of soil moisture using modified antecedent precipitation index with application in landslide predictions. *Landslides: Journal of the International Consortium on Landslides.* 16(6)
- Cécile Gomez, Rossel R A V, Mcbratney A B. 2008. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma.* 146(3-4):0-411.
- Davis, J. L. and Chudobiak, W. J. 1975. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. Geological Survey of Canada. Energy, Mines, and Resources of Canada.,75(1):75-79.
- Feddes R A , Kabat P , Bakel P J T V , et al. 1988. Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone — State of the art. *Journal of Hydrology,* 100(1-3):0-111.
- Folhes, M.T, C.D. Rennó and J.V. Soares, 2009. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. *Agricultural Water Management,* 96(10): p. 1398-1408
- Foroud N , Hobbs E H , Riewe R , et al. 1992. Field verification of a microcomputer irrigation model. *Agricultural Water Management,* 21(3):215-234.
- Gear, Roy D., Campbell, Melvin D, Dransfield, Arnold S. 1977. irrigation scheduling with neutron probe. *Journal of the Irrigation and Drainage Division,* 103(3):291-298.
- Hayhoe,H.N, De jong,R. 1982. Computer simulation model of soil water movement and uptake by plant roots. *Agrometeorology Section. Canada Ottawa Ont:Land Resource Research Institute,Research Branch,*74.
- Hillel D, Talpaz H, Keulen HV.1976. A Macroscopic-Scale Model of Water Uptake by A Nonuniform Root System and of Water and Salt Movement in the Soil Profile. *Soil Science,* 121(4):242-255.
- Hong S , Shin I. 2011. A physically-based inversion algorithm for retrieving soil moisture in passive microwave remote sensing. *Journal of Hydrology (Amsterdam).* 405(1-2):24-30.
- Jong R D, Cameron D R. 1979. Computer Simulation Model for Predicting Soil Water Content Profiles. *Soil Science,* 128(1):41-48.
- Kamai T , Kluitenberg G J , Hopmans J W. 2009. Design and Numerical Analysis of a Button Heat Pulse Probe for Soil Water Content Measurement. *Vadose Zone Journal,* 8(1).
- Kushan C Perera,Andrew W Western,David E Robertson,Biju George, Bandara Nawarathna. 2016. Ensemble forecasting of short-term system scale irrigation demands using real-time flow data and numerical weather predictions. *Water Resources Research.* 52(6).
- Lewin, J and Lomas. 1974. A Comparison of Statistical and Soil Moisture Modeling Techniques in a Long-Term Study of Wheat Yield Performance Under Semi-Arid Conditions. *Journal of Applied Ecology,* 11(3):1081-1090.
- Mahmood R , Hubbard K G. 2004. An Analysis of Simulated Long-Term Soil Moisture Data for Three Land Uses under Contrasting Hydroclimatic Conditions in the Northern Great Plains. *Journal of Hydrometeorology,* 5(1):160-179.
- Maidment D R, Hutchinson P D. 1983. Modeling Water Demands of Irrigation Projects. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* 109(4):405-418.
- Mccartney J S , Zornberg J G. 2006. Correction of Lightning Effects on Water Content Reflectometer Soil Moisture Data. *Vadose Zone Journal.* 5(2):673-683.
- Miller R J, Smith R B, Biggar J W. 1974. Soil Water Content: Microwave Oven Method1. *Soil Science*

- Society of America Journal. 38(3).
- Neibling,W.H.,Koelliker,J.K.Ohmes,F.E.1977. Continuous water budget model for western kansas,Paper-American Society of Agricultural Engineers, 177-2056,8P.
- Price J C. 1985. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent thermal inertia. *Remote Sensing of Environment*. 18(1):59-73.
- Qichen Zhang,Weihong Dong,Chuanlei Wen,Tong Li. 2020. Study on factors affecting corn yield based on the Cobb-Douglas production function. *Agricultural Water Management*. 228.
- Robinson J M , Hubbard K G. 1990. Soil Water Assessment Model for Several Crops in the High Plains. *Agronomy journal*, 82(6):1141-1148.
- Schmer F A , Werner H D . 1974. Remote Sensing Techniques for Evaluation of Soil Water Conditions. *Transactions of the ASAE*, 17(2):0310-0314.
- Schmugge T, Gloersen P, Wilheit T, et al. 1974. Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers. *Journal of Geophysical Research*. 79(2):317-323.
- Scott C A , Bastiaanssen W G M , Ahmad M U D. 2003, Mapping Root Zone Soil Moisture Using Remotely Sensed Optical Imagery. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129(5):326-335.
- Seokhyeon Kim,Runze Zhang,Hung Pham,Ashish Sharma. 2019,A Review of Satellite-Derived Soil Moisture and Its Usage for Flood Estimation. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*,2(Part B).
- Smith R C G , Steiner J L , Meyer W S , et al. 1985. Influence of season to season variability in weather on irrigation scheduling of wheat: A simulation study. *Irrigation Science*, 6(4):241-251.
- Tim Hess. 1996. A microcomputer scheduling program for supplementary irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*,15(3).
- Weimann A . 2002. Inverting a microwave backscattering model by the use of a neuralnetwork for the estimation of soil moisture// IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE.
- Wolfgang, Wagner and, et al. 1999. A Method for Estimating Soil Moisture from ERS Scatterometer and Soil Data. *Remote Sensing of Environment*.
- Zelt R B , Dugan J T. 1993. Simulation and Mapping of Soil-Water Conditions in the Great Plains1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 29(6):10.

## 致谢

时光荏苒，悄然流逝。2017年的夏季初来校园的憧憬与校长的寄语还历历在目，三年的研究生生涯转眼已悄然接近尾声，回首过往，尽是回忆。在学校的三年间，学校的教学平台和教学资源使我受益颇多，另外在论文写作期间，我收获了非常多的鼓励和指导，才使我拨开迷雾，有条不紊的完成了论文的撰写。

本文得以完成，首先，我要感谢我的导师李援农教授对我的悉心教导。学其成时念吾师，李老师的学识渊博，治学严谨一直深深地影响着我，在校的几年来，在学业上，从论文的选题到总体框架的形成，再到具体研究写作，李老师总是给予我耐心的指导，不厌其烦地答疑解惑，李老师敏捷的思维、渊博的知识架构和实践经验是我始终学习的榜样，激励我前行；在生活上，李老师和师母无私的为我们这群孩子提供无私的帮助与关怀，让我们倍感家庭的温暖。在此，再次向恩师和师母表达衷心的感激和敬意。

其次，感谢我的同门们，感谢谷晓博师兄、杜娅丹师姐、陈朋朋师兄、方恒师兄、王凯瑜师姐、赵祥师兄、杜利师兄、房云杰师兄、黄鹏师兄、余梦师妹、肖钢、杨金宇、闵迪、张舵、李昱鹏、杨靖等同门在试验研究和论文写作期间提供的宝贵意见和启发，愿你们学业有成、工作顺利。

我还要特别感谢我的家人，家人给予我精神上和经济上无私的支持，使我在失意时坚守信念，努力进取；感谢我亲爱的舍友和多年的朋友，使我研究生这三年过的充实且快乐。愿你们健康、快乐。

最后，我由衷地向在百忙之中参与我论文审阅和答辩工作的每一位老师表示衷心的感谢！

丰尔蔓  
2020年5月

## 个人简历

### 1. 基本信息

丰尔蔓，女，汉族，生于 1995 年 11 月，山东曲阜人，硕士期间研究方向：灌区用水管理。

### 2. 教育背景

2013.09-2017.07	山东农业大学	水利水电工程
2017.09 至今	西北农林科技大学	水利工程

### 3. 硕士期间发表论文

丰尔蔓, 李援农, 杨靖, 阎迪. 大中型灌区实时用水计划的编制与修正[J]. 排灌机械工程学报, 已录用, 待刊.

### 4. 参与项目

国家自然基金：西北旱区基于轮作农田尺度上干层土壤发育抑制机理研究  
(51979235)；

陕西省农业科技创新集成推广项目：关中粮食作物节水节药减肥增效综合技术研究 (NYKJ-2019-YL58)