

分类号：
学号：20222110019

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



南疆滴灌骏枣土壤墒情预测与灌溉管理研究

学位申请人	杨轶航
指导教师	吕德生 教授 王亚月 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	农田水土工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025年05月

分类号：
学号：20222110019

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



南疆滴灌骏枣土壤墒情预测与灌溉管理研究

学位申请人	杨轶航
指导教师	吕德生 教授
	王亚月 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	农田水土工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025年05月

**Research on soil moisture prediction and irrigation management of
Junjube drip irrigation in southern Xinjiang**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Civil and Hydraulic Engineering

By

Yang Yi-hang

(Farmland Water and Soil Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Lv De-sheng

Senior Engineering. Wang Ya-yue

May,2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：

杨铁航

时间：

2025年5月18日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：

杨铁航

时间：

2025年5月18日

导师签名：

高仕生

时间：

2025年5月18日

摘要

目的：为实现新疆农业数据化与智能化灌溉管理，试验选取南疆滴灌骏枣为研究对象。在骏枣的种植过程中，水资源高效利用对枣树生长和农业可持续发展至关重要，由于骏枣生长地区降雨稀少、蒸发旺盛，当地水资源供需矛盾突出，科学合理的灌溉管理成为提高枣树种植效率的关键。传统灌溉方式存在用水浪费和墒情监测不足等问题。研究需搭建农田感知层，实现对田间数据的实时监测。根据试验区枣田历史数据构建高精度的土壤墒情预测模型，提高对枣树墒情的预测精度，并结合 Web 管理系统使其达到数字化管理与智能化灌溉的目的。

方法：本研究基于物联网与无线通信技术，构建了覆盖枣树土壤墒情、气象环境和灌溉水量的实时监测系统，并采用 RS485+4G 的通信方式搭建起了低功耗传输网络，实现田间数据的远程采集与分析。为提高骏枣土壤墒情预测的准确性，研究基于 2021、2022 年枣树土壤墒情数据、气象数据和灌溉水量等小时级数据集，利用长短期记忆神经网络（LSTM）模型对各土层土壤墒情进行多步预测，并采用麻雀搜索算法（SSA）优化模型超参数，建立高效的预测框架。研究设计了多头 LSTM 模型来捕捉不同时间跨度下土壤水分的动态变化，并采用加权平均法融合多个预测结果从而提升模型的稳定性和泛化能力。利用 Vue.js+ Spring Boot 等技术框架搭建了骏枣灌溉管理系统，并整合感知层数据与算法模型。

结果：（1）南疆骏枣土壤墒情的变化主要受到人为灌溉量的制约，其受环境因素影响程度从大到小依次为空气温度、光照强度、风速和降雨量。（2）研究将 4 土层墒情均值数据集进行 4 个时间维度划分，该划分方法可让模型充分的挖掘数据的隐含特征，为提升模型预测精度和扩展预测范围提供了一种新的思路。（3）相比于仅使用每小时数据训练的 LSTM-1 模型，多头 LSTM 模型对未来 12、24、48h 的预测中， R^2 分别提高了 2.42%、5.71%、12.26%；该模型能够更稳定且准确地预测南疆骏枣根系各土层墒情情况。（4）基于 B/S 架构设计 Web 系统，构建农业信息化管理平台，实现感知层数据的实时接收与存储，并完成气象监测、土壤墒情分析、灌溉管理及系统管理等核心功能模块。

结论：本研究构建的农田感知层监测系统，实现了对枣田墒情、气象、灌溉量等数据的远程、连续、稳定、准确监测。研究提出的多头 LSTM，显著提高了枣树土壤墒情预测准确性。Web 灌溉管理系统通过整合感知层数据与算法模型，实现了数字化管理与智能化灌溉。研究成果可为农业水资源管理、智慧农业系统优化以及节水型灌溉模式推广提供参考，为南疆地区及类似干旱半干旱地区的农业可持续发展提供理论和技术支撑。

关键词：农田环境监测；土壤墒情预测；多头 LSTM 模型；灌溉管理；南疆滴灌骏枣

Abstract

Objective: To achieve the digitalization and intelligent irrigation management of agriculture in Xinjiang, this experiment selected the drip-irrigated Junzao (a type of jujube) in southern Xinjiang as the research object. During the cultivation of Junzao, the efficient utilization of water resources is crucial for the growth of jujube trees and the sustainable development of agriculture. Due to the scarce rainfall and intense evaporation in the region where Junzao grows, the contradiction between water supply and demand is prominent. Therefore, scientific and reasonable irrigation management becomes the key to improving the efficiency of jujube tree cultivation. Traditional irrigation methods have problems such as water waste and insufficient monitoring of soil moisture. The research needs to build a farm perception layer to achieve real-time monitoring of field data. Based on the historical data of soil moisture conditions in the test area, a high-precision soil moisture prediction model is constructed to improve the accuracy of predicting soil moisture for jujube trees. This is integrated with a web management system to achieve the goals of digital management and intelligent irrigation.

Methods: This research, based on Internet of Things (IoT) and wireless communication technologies, has established a real-time monitoring system covering soil moisture conditions, meteorological environment and irrigation water volume of jujube trees. A low-power transmission network was set up by adopting the RS485 + 4G communication mode to achieve remote collection and analysis of field data. To improve the accuracy of soil moisture prediction for Junzao jujube trees, this study uses hourly datasets of soil moisture, meteorological data, and irrigation volume from 2021 and 2022. A Long Short-Term Memory (LSTM) neural network model is employed to perform multi-step predictions of soil moisture at different soil depths. Additionally, the Sparrow Search Algorithm (SSA) is used to optimize the model's hyperparameters, establishing an efficient prediction framework. A multi-head LSTM model was designed to capture the dynamic changes of soil moisture at different time spans, and the weighted average method was used to integrate multiple prediction results to improve the stability and generalization ability of the model. The Junzao jujube irrigation management system was developed using technologies such as Vue.js and Spring Boot, integrating sensor layer data with algorithmic models.

Results: (1) The variation in soil moisture conditions of Junzao jujube trees in southern Xinjiang is mainly constrained by human irrigation volume. The degree of influence of environmental factors, from highest to lowest, is as follows: air temperature, light intensity, wind speed, and rainfall. (2) The research divides the mean data set of soil moisture conditions in 4 soil layers into 4 time dimensions. This division method enables the model to fully explore the hidden features of the data, providing a new idea for improving the prediction accuracy of the model and expanding the prediction range. (3) Compared with the LSTM-1 model trained only with hourly data, the multi-head LSTM model has increased the R^2 by 2.42%, 5.71%, and 12.26% respectively for the predictions of 12, 24, and 48 hours ahead. This model can predict the soil moisture

conditions in each soil layer of the Junczao root system in southern Xinjiang more stably and accurately. (4) A Web system is designed based on the B/S architecture to build an agricultural information management platform. The system enables real-time reception and storage of sensor layer data and completes core functional modules such as meteorological monitoring, soil moisture analysis, irrigation management, and system management.

Conclusion: The farmland perception layer monitoring system constructed in this study has achieved remote, continuous, stable and accurate monitoring of soil moisture, meteorological conditions and irrigation volume in jujube orchards. The multi-head LSTM proposed in the study has significantly improved the accuracy of soil moisture prediction for jujube trees. The Web irrigation management system, by integrating perception layer data and algorithm models, has realized digital management and intelligent irrigation. The research results can provide references for agricultural water resource management, optimization of smart agricultural systems and promotion of water-saving irrigation models, and offer theoretical and technical support for the sustainable development of agriculture in southern Xinjiang and similar arid and semi-arid regions.

Key words: Farmland environmental monitoring; Prediction of soil moisture; Multi-head LSTM; Irrigation management; Southern Xinjiang drip irrigation jujube

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 农田感知层研究现状.....	2
1.2.2 土壤墒情预测方法研究现状.....	4
1.2.3 智慧灌溉管理系统研究现状.....	5
1.3 拟解决的关键问题.....	6
1.4 研究内容与技术路线.....	6
1.4.1 研究内容.....	6
1.4.2 技术路线.....	7
第 2 章 试验材料与方法.....	9
2.1 研究区概况.....	9
2.2 作物介绍.....	10
2.3 长短期记忆神经网络.....	11
2.4 土壤水量平衡模型.....	12
2.5 模型精度评价.....	13
第 3 章 南疆骏枣田间感知层搭建.....	14
3.1 枣田监测系统的功能目标.....	14
3.2 监测系统的通信方式.....	15
3.3 监测系统的架构及组成.....	15
3.4 监测系统硬件选型及设计.....	16
3.4.1 硬件结构设计.....	16
3.4.2 硬件选型与布设.....	18
3.5 数据采集结果与分析.....	24
3.6 本章小结.....	27
第 4 章 南疆骏枣根系土层墒情预测模型.....	28
4.1 试验数据与方法.....	28
4.1.1 数据预处理.....	28
4.1.2 特征变量选择.....	29
4.2 模型构建.....	30
4.2.1 多头的 LSTM 模型.....	30

4.2.2	训练数据结构与超参数调优	30
4.2.3	加权平均法	32
4.3	结果与分析	33
4.3.1	单一 LSTM 模型的性能分析	33
4.3.2	不同时间跨度下 LSTM 模型的性能分析与多头模型融合	35
4.3.3	不同深度土层验证与分析	37
4.4	讨论	38
4.5	本章小结	39
第 5 章	南疆骏枣灌溉管理系统的设计与实现	40
5.1	系统需求分析	40
5.2	系统总体结构设计与开发环境	41
5.2.1	系统总体设计	41
5.2.2	Web 系统开发环境与实现	42
5.3	骏枣灌溉管理系统实时性能分析	44
5.3.1	数据传输系统结构	44
5.3.2	数据传输实时性瓶颈分析	45
5.4	骏枣灌溉管理系统数据实时推送设计	47
5.4.1	观察者模式	47
5.4.2	数据层与逻辑层之间的数据推送设计	48
5.4.3	逻辑层与表现层之间的数据推送设计	49
5.5	系统智能算法库搭建	50
5.6	灌溉管理系统的操作界面	51
5.7	本章小结	53
第 6 章	结论与展望	54
6.1	结论	54
6.2	展望	55
参考文献	56
致谢	61
作者简介	62

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

我国属于全球水资源严重短缺国家之一，其人均水资源占世界人均水平的 27.8%^[1]。农业用水需求持续增加，但水资源有限，社会各界对合理有效利用水资源已达成共识^[2]。在此背景下，我国可以通过技术创新来提升农业水资源利用效率来突破水资源短缺的瓶颈。重点发展方向在于将现代节水理论与传统灌溉实践有机融合，构建涵盖数据化管理、智能调配、精准灌溉等要素的高效节水灌溉体系，以此来减少农业灌溉用水量并提高灌溉水利用效率。

2023 年度《中国水资源公报》显示，我国水资源总量为 25782.5 亿 m^3 ，全国总用水量为 5906.5 亿 m^3 ，农业用水量为 3672.4 亿 m^3 ，占总用水量的 62.2%，耕地实际灌溉亩均用水量为 347 m^3 。农田灌溉水有效利用系数仅为 0.576，与世界先进水平差距很大^[3]。新疆地处我国西北，干旱少雨、蒸发大，水资源十分短缺，属于典型的内陆干旱区，“荒漠绿洲、灌溉农业”是其显著特点。据 2022 年新疆统计年鉴统计，新疆水资源总量为 914.1 亿 m^3 ，总用水量为 562.2 m^3 。2022 年新疆各业耗水 382.0 亿 m^3 ，其中农田灌溉耗水量 268.52 亿 m^3 ，占总耗水量的 70.29%。新疆水资源短缺与农业高耗水矛盾极为突出，亟需发展现代化节水农业以提升用水效率和可持续发展能力。

红枣作为中国特有原生树种，种植历史悠久，最早可追溯至三千年前^[4]。我国红枣总产量在 2017 年位居世界首位，种植省份多达 22 个，横跨西北至华北地区，主产区包括新疆、甘肃、陕西、山西、河北、山东等省市，种植面积逐年扩增，产量不断提高，其中新疆作为我国红枣种植面积最大的省份，占据产业的主导地位，以和田玉枣、喀什大枣等四大主栽品种为主导，2017-2023 年全疆枣园面积扩至 480 万亩，年均增长 4.7%，产量突破 326.66 万吨，年均增长 5.2%，但其高耗水性导致用水压力加剧，农业用水占比突破区域红线^[5]。

和田地区作为全国优质红枣生产基地，其中昆玉市 224 团骏枣在国内外享有盛誉。224 团位于塔克拉玛干沙漠南缘，因其特殊地理位置导致年均降水不足，农业、工业及生活用水长期处于紧平衡状态；还因其独特的荒漠性气候造使土地荒漠化，保水能力变差，水资源浪费与农业用水浪费问题突出。根据《和田地区实行最严格水资源管理制度“三条红线”控制指标》要求，2020 年全地区用水总量控制在 39.85 亿 m^3 （农业用水占比 93.3%），至 2030 年总指标虽增至 41.04 亿 m^3 ，但农业用水指标却减至 36.73 亿 m^3 。作为主产区的十四师昆玉市 224 团，其 2020-2030 年用水指标维持在 1.37 亿 m^3 不

变。在新时代生态文明建设背景下，刚性用水需求增长与零增长的用水指标形成矛盾，区域水资源配置面临巨大压力。因此，探索干旱绿洲区节水高效性农业已迫在眉睫。

智能化灌溉是现代农业中实现节水、配水及自动化控制中的重要组成部分，也是未来灌溉农业发展的必然趋势。基于多技术集成的智能灌溉系统通常包含智能配水单元、灌溉执行模块及数字化管理平台三大核心组件^[6-7]。系统通过实时采集作物生长信息、土壤含水率及气象因子等多元数据，结合远程指令调控水泵机组与电磁阀的运行状态，基于计算机网络、现代通信、自动控制及传感器技术构建数据采集、传输和分析闭环，形成监测、控制和管理全流程集成体系。从而提高水资源高效管理，减少灌溉劳动依赖。在发达国家如以色列、美国及加拿大，经过长期技术迭代的智能灌溉装备已形成成熟的商业化应用体系，其系统智能化水平与灌溉精度指标均处于行业领先地位。

农业物联网技术的进步，不断推进现代农业的发展。通过构建集环境感知、数据传输和智能决策于一体的农业物联网系统，传统农业正朝着精准化、集约化的方向转变，农业生产从依赖人工管理向数据驱动的智能管理方向变革^[8]。在此背景下，土壤墒情监测作为智慧农业的核心环节，将土壤信息经可视化处理，转化为可操作的数据指标，为灌溉决策提供数据支撑。土壤墒情是表征土地水分的关键参数，土壤水分平衡受自然降雨、灌溉管理、作物蒸腾以及深层渗漏等多重因素影响，人为灌溉对于土壤水分循环具有显著调控作用。墒情预测通过分析土壤水分时空演变规律，建立动态灌溉模型，进而实现对田块墒情的动态感知与趋势判断，预测未来一段时间内土壤湿度的变化，协调作物需水与水资源供给矛盾，对干旱区分析土壤墒情变化趋势，制定合理的灌溉方案具有指导意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 农田感知层研究现状

在当今的农业生产实践中，传统农业很难针对不同的自然地理环境进行实时的调整，实时获取农作物生长环境数据已经成为提高农业生产效率的关键。随着农业信息技术的发展，物联网技术与农业生产深度的结合，使得作物种植和管理效率得到了大幅提升。回顾农业信息化的发展历程，早期农业物联网通信方式主要采用有线连接。对于田间生产作业的实际情况，传统物联网有线布设方式存在布设复杂、维护困难等问题。近年来无线通信技术的迅猛发展，为农业物联网提供了新的发展方向。针对田间环境监测的特殊需求，无线传感器技术具有显著优势^[9]。该技术采用分布式传感器节点协同工作的方式，通过无线通信实时传输大范围作物环境信息至管理终端。其具有低功耗运行、高精度监测、传输稳定和部署灵活等特点，为构建全天候农业环境监测系统提供了可靠解决

方案。在地形复杂的种植区域，该技术有效解决了传统有线网络布线困难的问题，成为推动农业数字化转型的重要技术支撑^[10]。

2002年，美国英特尔公司创新性地将无线传感网络（WSN）技术引入农业环境监测中。通过在葡萄园内大规模部署传感器节点，该技术方案有效实现了对空气及土壤温湿度等关键指标的实时监控，并为精准调控葡萄生长环境提供了科学的数据支持^[11]。在此之后 WSN 技术在农业监测方面获得了迅速推广与应用。Gupta 等^[12]基于 Zigbee 无线通信技术开发了自动化监测系统，该系统通过在田间布设传感器，并通过无线技术将传感器与通信站进行连接。该系统实现了对空气温湿度、光照强度、土壤墒情等多个参数的实时监控与存储，大幅提升了农业生产的智能化水平。Tagarakis 等^[13]设计了一种适用于中小型农田的低成本农业环境无线监测系统。该系统采用 896 MHz 无线射频技术，实现了网关节点与终端节点间的数据传输。经过实地测试验证，该系统的通信距离达到 250 m 以上，能够覆盖高达 36 hm² 的土地。系统采集的数据包括土壤温度湿度、降雨量、空气温度湿度、风速、风向和大气压力等果园环境参数。针对固定监测设备局限性问题，Zhang 等^[14]创造性研发了一套基于 STM32 微控制器的高度便携式农田信息采集系统。该系统采用 CDMA 技术进行远距离无线通信，能现场快速、灵活地采集作物关键生理参数（如叶绿素含量、环境气候因子、空气温度湿度及光照强度）。Deng 等^[15]提出了一种流动式土壤环境监测体系，通过装备有嵌入式无线射频传感器的移动巡逻车进行数据采集，并使用 LoRa 通信技术完成与监控中心的远程数据传输。这一系统具备高达 10 km² 的监测覆盖能力，其出色的机动性大幅提升了农田环境监测的灵活性和采集效率。

在无线通信技术选型过程中，农田特殊的地理环境导致通信设备难以获得稳定供电，因此环境监测系统的设备能耗成为首要考量因素。Feng 等^[16]进行试验研究对比了 NB-IoT、LoRa 和 Zigbee 三种无线传感网络的功耗表现。结果表明，在设施农业中，Zigbee 技术具备低功耗特性更加符合监测需求。LoRa 和 NB-IoT 技术功耗低且传输距离较长更加符合露天农田环境监测。Sadowski 等^[17]对 WiFi、Zigbee、LoRa 和 RS485 四种通信技术的性能进行了深入的比较分析。该研究重点考虑了不同环境条件对通信性能的影响。研究表明，当系统特别注重能耗和网络稳定性时，LoRa 和 RS485 技术明显优于 Zigbee 和 WiFi。相关的研究表明，LoRa、Zigbee 技术由于具备低能耗、微型化、低时延以及长距离传输能力等特性，特别适合应用于农业监测环境^[18]。

综上所述，在现代农业生产中，传感技术的广泛应用为作物生长监控带来了划时代的革新。作为物联网技术核心的无线传感网络（WSN），它不仅极大地促进了农业信息化进程，更为精准农业的实践奠定了坚实基础。我国拥有复杂多变的地理气候条件，尤其对于偏远地区的农田其对监测设备的稳定性提出了严苛的考验。虽然我国在农业信息化领域已取得显著进展，特别是在环境参数监测和通信技术研发方面成效突出，但田间数据感知与农业决策之间仍存在明显脱节，决策实施与精准执行之间的衔接也不够紧密

[19]。在推进智能农业发展的过程中,需要根据不同作物的生长特性精准选用合适的传感器。同时,应结合种植区域的地理环境和气候条件,科学规划监测网络节点的布局,以确保农业环境监测数据的准确性和系统运行的稳定性。

1.2.2 土壤墒情预测方法研究现状

当前土壤水分预测研究主要采用确定性方法和随机性方法两大技术路线。确定性方法是基于土壤-植物-大气系统 (SPAC) 的水分传输机制,建立机理模型模拟水分动态演变过程,其方法理论体系包含:经验公式模型、水量平衡模型、消退指数模型和土壤水动力模型。Lewin 等^[20]根据土壤含水率与贮水量的线性关系构建的土壤水分预测的经验模型,实现简化复杂水文过程实现快速估算,但其线性假设难以捕捉水分变化的非线性特征,导致模型泛化能力受限;基于系统边界内输入输出平衡原理的水量平衡模型,如陈军武等^[21]通过量化灌溉、降水、蒸散发等因素构建质量守恒方程,用于区域尺度的水分通量分析,但需精确测量各通量项,难以表示土壤水分的空间异质性;还有以达西定律和 Richards 方程为核心的土壤水动力学模型,如杨德军等^[22]通过结合地面蒸发、植被蒸腾、根系吸水等生物物理过程,建立偏微分方程组刻画水分时空分布特征,虽能解析水分运移机制,但该模型需要高精度土壤水力参数,计算复杂度高,严重制约了田间尺度的实际应用。

随机性方法是通过建立不同类型的随机性土壤墒情预测模型,来模拟农田土壤水分的随机性变化。主要包括统计回归模型、机器学习模型和随机水量平衡模型等。国内外研究表明,机器学习方法通过学习和积累过去的时间序列数据,并利用数据驱动模型进行土壤水分预测是可行的,且相较于其它方法其准确性和可靠性更高^[23-24]。目前已有多种机器学习算法被用于土壤墒情预测^[25],包括支持向量机^[26]、随机森林^[27]、高斯过程回归^[28]、整合 Boruta 随机森林^[29]、偏最小二乘回归^[31]等。然而,传统机器学习模型在处理复杂的时间序列数据时存在明显局限性,通常无法自动捕捉时间依赖关系和非线性特征,导致需要大量手动数据预处理和特征提取工作,且泛化能力较弱,难以适应不同环境或数据集的变化^[32-33]。为解决这些问题,研究人员引入了多层感知器(Multi-Layer Perceptron, MLP)、前馈人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)^[34]、循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)^[35]等深度学习模型。例如, Adeyemi 等^[35]开发了一种基于长短期记忆神经网络(long short-term memory, LSTM)的动态土壤湿度预测模型,该模型提前 1 d 预测土壤含水量,在测试集上取得了较高的预测精度 ($R^2 > 0.94$),但未进一步拓展预测范围。Filipović 等^[36]将最高和最低气温、降水量和蒸汽压差作为特征输入 LSTM 模型,成功实现了土壤体积含水率提前 3 d 的预测,但未讨论不同土层的土壤体积含水率。ElSaadani 等^[37]提出的结合卷积神经网络 (Convolutional Neural Network,

CNN)和LSTM的ConvoLSTM模型在预测1d后的土壤湿度变化时表现出色($R^2=0.9$),但不适用于农业领域。范嘉智等^[38]利用单一LSTM模型对6、12、24、48h后的土壤体积含水率进行了多步预测,测试集上的 R^2 分别为0.968、0.943、0.888、0.769,揭示了LSTM模型具有较好的多步预测能力,但其泛化性未得到充分验证。

综上所述,土壤墒情预测研究虽已取得显著进展,但理论探索与农业生产实践应用之间仍存在不小差距。现阶段,神经网络技术在土壤墒情预测领域广泛应用,并且也部分落地于农业生产应用中,但这些模型的预测精度和泛化能力仍有提升空间。因此,现阶段研究应当聚焦于深入挖掘和优化神经网络模型,来提高土壤墒情预测精度和泛化能力,并为农业生产提供更加坚实的技术支撑。

1.2.3 智慧灌溉管理系统研究现状

智慧灌溉管理系统国外已经取得了显著的研究进展。以色列、澳大利亚、美国等农业科技强国依托其在电子信息技术、智能控制等领域的优势,已成功开发出具备高稳定性、精准调控能力与人性化操作界面的智能灌溉系统。这些技术突破既体现了当前农业科技的发展趋势,也为全球灌溉技术的升级改造提供了可借鉴的实践范本^[40]。在应对干旱气候挑战方面,以色列始终保持着节水灌溉技术的全球领先地位。2023年该国耐特菲姆公司推出的GrowSphere灌溉系统,系统集成了公司多年积累的数字农业技术,推出MAX系列智能主控设备和低成本FLEX物联控制器。该技术创新既推动了以色列智能灌溉技术的快速转化应用,又为精准农业发展开辟了新途径。德国将智能灌溉技术应用用于城市绿化景观及精细农业领域,其行业领军企业研发的“Smart System”智能管理系统,标志着该技术进入规模化应用阶段^[41]。

国际学者的研究成果同样具有借鉴与参考。Goap等^[42]将先进的控制算法应用于物联网设备与节水灌溉中,大幅提高了灌溉系统的运行效率。另外,Perez等^[43]构建了一种分布式控制系统,通过集中智能监控,实现了各分布式灌溉控制节点的协同作业,有效增强了整个灌溉系统的灵活性和响应能力。Admsab等^[44]成功研发了一套既经济又高效的智能灌溉系统。该系统基于Arduino技术,融合了传感器、发射器及接收器等无线模块,通过物联网平台实现对农作物生长关键参数的实时监控。Jimenez等^[45]对物联网背景下的多智能体精准灌溉技术进行了深入研究,采用MQTT通信协议,使得众多灌溉智能体能够将用水及作物生长状态信息反馈给中心主智能体。研究团队进一步绘制了区域性灌溉地图,为智能灌溉系统的可视化应用提供了创新解决方案。这些研究成果既奠定了智能灌溉技术的理论基础,又通过实践验证了技术转化的可行性。理论与实践的有机结合,正在推动农业节水技术实现新的突破。

近年来,我国在农业灌溉技术方面同样取得了显著进展。谢家兴等^[46]构建了定量决

策模型和灌溉制度预报模型，为荔枝灌溉提供了一种既定量又定时的节水方案。此外，赵燕东等^[47]通过实时监测营养液成分的 EC 和 pH 值传感器，在无土栽培技术中成功实现了自动快速配置目标营养液的配液系统。李光林等^[48]针对柑橘作物研发了以太阳能为能源的节水节能灌溉系统，该系统通过 CAN 总线和 GSM 网络技术，实现了农田信息的远程监控与灌溉执行模块的集成。同时，鲁旭涛等^[49]研究者基于智慧农业技术，设计了一套网络化水田作物精准灌溉系统，该系统融合了通讯最优部署模型、作物耗水模型和降水预测模型为一体的决策系统，为精准灌溉提供了科学依据。

综合现有研究成果，智慧灌溉技术已在全球范围内取得重大突破。以色列、德国等国家的创新性研究在该领域形成示范效应，其技术路径对行业发展具有指导意义。我国在智能农业推进过程中，既注重系统引进国际前沿技术，又着力开展本土化技术创新，成功开发出适配我国农业特征的智能灌溉体系。实践表明，这些技术革新显著提升了灌溉作业管理水平，为农业可持续发展构建了技术保障体系。随着物联网、大数据等新兴技术的持续发展，智慧灌溉系统的研发将向多维感知与智能决策方向发展。

1.3 拟解决的关键问题

现阶段的农田环境监测系统，尽管无线传感网络已实现环境参数的实时采集，但监测数据与农业决策系统仍存在显著割裂，大量田间数据未能有效转化为可执行的农事操作指令，形成“数据孤岛”现象。当前土壤墒情预测面临两大难题：一方面，确定性模型需要精确的土壤参数且计算复杂，难以满足田间实时需求；另一方面，数据驱动模型中传统机器学习方法依赖人工特征提取，对时序数据处理能力有限，而深度学习模型虽预测精度较高，但随着预测时长增加准确率明显下降，且在不同地区的适用性仍有待验证。目前国内外研发的灌溉管理系统鲜有专门针对新疆骏枣种植需求设计的解决方案，亟需开发适配该地区特点的智能灌溉系统。

1.4 研究内容与技术路线

1.4.1 研究内容

(1) 农田感知层搭建与数据预处理

根据南疆地区枣田的自然环境，针对性地选择合适的传感器设备与通信技术，并在田间进行部署和组装测试。监测设备主要采集土壤墒情、气象环境和灌溉水量等数据，采用 RS485+4G 等通信技术将数据传输至云平台存储。将收集到的多源数据进行融合处理，并通过 Pearson 相关性分析，对各土层墒情数据、气象数据和灌溉水量等数据进行

相关性分析，以支持后续的决策应用。

(2) 南疆骏枣根系土层墒情预测模型研究

利用感知层采集的气象环境、土壤墒情和灌溉水量等数据，根据其相关性强弱选择出合适的特征因子，为训练模型做准备。基于时序神经网络，将相应的特征因子作为模型输入，建立混合模型来预测土壤墒情。通过仿真试验与单一 LSTM 模型进行对比，利用绝对误差和决定系数等指标对模型进行评估，验证模型的预测精度。

(3) 基于土壤墒情的灌溉管理系统的设计与实现

本研究基于 Java 和 Web 技术，设计开发具有数据汇总、数据分析、墒情预测、灌溉管理等功能的骏枣智能灌溉管理系统。系统集成了数据感知层、平台服务层、业务应用层、用户交互层等四大核心层。整个系统采用模块化设计方式，保证整个子系统既有联系，又可独立运行，这种设计方式保证了整个灌溉管理系统的可扩展性。整个系统的设计与实现可为南疆骏枣灌溉管理提供智能化解决方案。

1.4.2 技术路线

本课题的研究将从农田感知层搭建与数据预处理、土壤墒情预测模型研究以及灌溉管理系统的设计与实现三个方面展开。首先，根据南疆特殊的自然环境进行硬件选型，确保其满足长期户外监测的需求。选定的硬件将进行安装，并根据不同设备的数据传输需求，搭建适当的网络结构，使田间传感器采集的数据能够实时传输到云端数据库进行存储。流程打通后，将对所有设备进行连接测试。基于感知层长期监测所获得的数据，进行数据预处理与相关性分析，并将处理后的数据输入土壤墒情预测模型进行算法选型、优化、重构、模型训练和对比分析等过程，最终构建出精度最高、泛化性能最优的模型。灌溉管理系统的设计与实现主要包括四个模块：需求分析、功能模块设计、数据库设计和需水模型构建。最终，将智能算法模型与灌溉管理系统结合，实现精准化、自动化灌溉，从而提高水资源利用效率并降低灌区管理成本。技术路线如图 1-1 所示。