

分类号：
学号：20222010044

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



库尔勒香梨节水灌溉技术优化及节水潜力分析

学位申请人	王宏鑫
指导教师	王春霞 教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	农业工程
研究方向	农业水土工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

分类号：
学号：20222010044

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



库尔勒香梨节水灌溉技术优化及节水潜力分析

学位申请人	王宏鑫
指导教师	王春霞 教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	农业工程
研究方向	农业水土工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

**Optimization of water-saving irrigation technology and analysis of
water-saving potential for Korla fragrant pear**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master of Engineering

By

Wang Hong-xin

(Agricultural Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Wang Chun-xia

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

本人所提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：王宏鑫

时间：2025年5月16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：王宏鑫

时间：2025年5月16日

导师签名：王春霞

时间：2025年5月16日

摘要

目的: 香梨园节水灌溉技术应用是香梨生产的必然趋势, 通过香梨滴灌技术参数优化, 明确不同树龄、土质下香梨灌水制度; 以 29 团 10 连为例, 结合工程、管理及灌溉技术措施, 探究研究区农业节水潜力, 为提升库尔勒香梨主产区农业用水效率提供理论指导及技术实践。

方法: 香梨试验区以矮化密植型 7 年生香梨为主要研究对象, 开展 2 种灌水量 ($6750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、 $5250 \text{ m}^3/\text{hm}^2$) 与 3 种滴灌管布置方式 (一行两管、一行三管、一行四管) 组合田间试验, 探究不同处理对香梨土壤水盐、生长指标及产量品质等的规律, 利用 HYDRUS-2D 软件进行香梨灌溉制度优化; 以 29 团 10 连为例, 通过数学模型计算渠道防渗、农业水价调整、作物灌溉制度与种植结构产生的节水量, 分析农业节水潜力。

结果: (1) 当灌水量一定时, 0~100 cm 土层的平均土壤含水率随滴灌管数量增加而增大, 增幅为 1.40%~1.70%, 平均土壤含盐量则相反, 降幅为 5.66%~12.08%; 当滴灌管布置方式一定时, 0~100 cm 土层的平均土壤含水率随灌水量增加而增大, 平均土壤含盐量随灌水量增加而降低, 降幅为 4.29%~23.60%; 在香梨生育初期与末期各处理的土壤水分分布均匀度均在 0.90 以上, T3 处理的土壤水分分布均匀度的变化最稳定。

(2) 当灌溉量一定时, 香梨耗水量与滴灌管布置方式间无明显规律, 当滴灌管布置方式一定时, 香梨耗水量随灌水量增加而增大; 各处理新梢与叶面积生长速度随着时间的推移呈先增加后降低的趋势; 各处理的可溶性固形物含量与果肉硬度无显著性差异 ($P>0.05$); 各处理的水分利用效率在 $1.7\sim 3.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 之间, 其中 T5 处理水分利用效率和产量最高。

(3) 结合 HYDRUS-2D 模型对不同土质、不同树龄香梨灌溉制度进行优化, 以砂壤土为例, 在灌水周期 14 天, 灌水次数 9 次的条件下: 4~10 年香梨建议灌水量 $4500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 滴灌管布置方式为一行两管方案; 11~20 年香梨建议灌水量 $6000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 滴灌管布置方式为一行三管方案; 21~30 年香梨建议灌水量 $6000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 滴灌管布置方式为一行四管方案。

(4) 29 团 10 连总的农业节水潜力为 202.68 万 m^3 , 其中通过增加渠道衬砌率的工程节水潜力为 7.48 万 m^3 , 占总节水潜力的 3.69%; 通过对连队作物的农业水价调整的管理节水潜力为 20.14 万 m^3 , 占总节水潜力的 9.94%; 通过优化连队作物灌溉制度与种植结构调整的技术节水潜力为 175.06 万 m^3 , 占总节水潜力的 86.37%。

结论: 基于田间试验发现幼龄香梨灌水量 $5250 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、滴灌管布置方式一行三管处理表现最优; 模拟结果显示对于不同土质 4~10 年树龄香梨, 灌水量选取 $4500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 11~30 年树龄香梨, 灌水量选取范围为 $4500\sim 6000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 且砂土均为一行三管布置形式, 砂质黏壤土均为一行两管布置形式; 通过作物灌溉制度优化与农业水价调整是缓解 10 连农业用水紧缺与不足问题的主要解决途径。

关键词: 滴灌管布置方式; 灌溉制度优化; 农业节水潜力; HYDRUS-2D; 香梨

Abstract

Objective: The application of water-saving irrigation technology in fragrant pear orchards is an inevitable trend in fragrant pear production. Through the optimization of fragrant pear drip irrigation technology parameters, the irrigation system for fragrant pears under different tree ages and soil conditions is clarified; Taking the 10th company of the 29th regiment as an example, combined with engineering, management, and irrigation technology measures, this study explores the potential for agricultural water conservation in the research area, providing theoretical guidance and technical practice for improving the agricultural water use efficiency in the main production area of Korla fragrant pear.

Methods: The main research object of the Fragrant Pear experimental area is the 7-year-old Fragrant Pear with dwarfing dense planting types, and conduct field experiments combining two types of irrigation volume ($6750 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, $5250 \text{ m}^3/\text{hm}^2$) and three types of drip irrigation pipe layout (one row of two pipes, one row of three pipes, and one row of four pipes) to explore the effects of different treatments on soil water and salt, growth indicators, yield and quality of fragrant pears; Optimize the irrigation system for fragrant pears using the HYDRUS-2D software; Taking the 29th Regiment and 10th Company as the research area, calculating the water-saving potential in agricultural through mathematical models for channel anti-seepage prevention, agricultural water price adjustment, crop irrigation system and planting structure, analyze the potential for agricultural water-saving.

Results: (1) When the irrigation amount is constant, the average soil moisture content of the 0-100 cm soil layer increases with the increase of the number of drip irrigation pipes, with a growth rate of 1.40%~1.70%. The average soil salt content decreases with the increase of the number of drip irrigation pipes, with a decrease rate of 5.66%~12.08%. When the arrangement of drip irrigation pipes is constant, the average soil moisture content of the 0-100 cm soil layer increases with the increase of irrigation amount, and the average soil salt content decreases with the increase of irrigation amount, with a decrease rate of 4.29%~23.60%; The soil moisture distribution uniformity of each treatment in the early and late stages of pear growth was above 0.90, and the change in soil moisture distribution uniformity of T3 treatment was the most stable.

(2) When the irrigation amount is constant, there is no obvious pattern between the water consumption of fragrant pears and the arrangement of drip irrigation pipes. When the arrangement of drip irrigation pipes is constant, the water consumption of fragrant pears increases with the increase of irrigation amount. The growth rate of new shoots and leaf area increased first and then decreased with the passage of time; There was no significant difference in the soluble solids content and fruit flesh hardness among the

treatments ($P<0.05$); The water use efficiency of each treatment ranges from 1.7 to 3.0 kg/m³, with T5 treatment having the highest water use efficiency and yield.

(3) Using the HYDRUS-2D model to simulate and optimize the irrigation regime for fragrant pears of different soil types and tree age, taking sandy loam soil as an example, under the condition of a 14 day irrigation cycle and 9 irrigation cycles, the recommended solution for 4-10-year-old fragrant pears with a irrigation amount of 4500 m³/hm² and a drip irrigation pipe layout with one row with two pipes; For 11-20-year-old fragrant pears with a irrigation amount of 6000 m³/hm² and a drip irrigation pipe layout with one row with three pipes; For 21-30-year-old fragrant pears with a irrigation amount of 6000 m³/hm² and a drip irrigation pipe layout with one row with four pipes;

(4) The total agricultural water-saving potential of the 10th company of the 29th regiment was 2.0268 million cubic meters, the water-saving potential of the project by increasing the channel lining rate was 74800 m³, accounting for 3.69% of the total water-saving potential; The water-saving potential through the management of agricultural water price adjustments for crops in the company was 201400 m³, accounting for 9.94% of the total water-saving potential; The water-saving potential of optimizing crop irrigation regime and adjusting planting structures in the platoon was 1.7506 million cubic meters, accounting for 86.37% of the total water-saving potential.

Conclusion: Based on field experiments, it was found that the optimal irrigation amount for young fragrant pears was 5250 m³/hm², and the best performance was achieved with a row of three drip irrigation pipes; The simulation results show that for different soil types of 4-10-year-old fragrant pears, the selected irrigation amount was 4500 m³/hm². For 11-30-year-old fragrant pears, the selected irrigation amount ranges from 4500 to 6000 m³/hm², and the sand soil was arranged in a row of three pipes, while the sandy clay soil was arranged in a row of two pipes; Optimizing crop irrigation systems and adjusting agricultural water prices are the main methods to alleviate the shortage and insufficiency of agricultural water in regions.

Key words: Drip irrigation pipe layout method; Optimization of irrigation regime; Agricultural water saving potential; HYDRUS-2D; Fragrant pear

目录

摘要	I
Abstract	II
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 研究进展	2
1.2.1 节水灌溉技术发展现状	2
1.2.2 节水灌溉技术参数优化	3
1.2.3 土壤水分运移及模拟现状	4
1.2.4 农业节水潜力研究现状	5
1.3 研究目标	6
1.4 研究内容与技术路线	7
1.4.1 研究内容	7
1.4.2 技术路线	7
1.5 特色及创新之处	8
1.5.1 本课题特色	8
1.5.2 本课题创新之处	8
第 2 章 试验设计与方法	9
2.1 滴灌香梨灌溉试验	9
2.1.1 试验区概况	9
2.1.2 试验设计	10
2.1.3 监测指标	12
2.1.4 计算方法	16
2.1.5 数据分析	17
2.2 农业节水潜力研究	17
2.2.1 研究区概况	17
2.2.2 节水潜力计算	17
2.2.3 数据分析	18
第 3 章 滴灌条件下香梨园灌水技术参数优化	19
3.1 香梨园土壤水盐时空分布特征	19
3.1.1 土壤湿润锋运移变化	19
3.1.2 土壤水盐随香梨生育期的变化	21

3.1.3 土壤水盐随土层空间的变化	24
3.2 香梨园灌水均匀性描述	26
3.2.1 土壤水分分布均匀度表征	26
3.2.2 土壤水分分布均匀度变化率	27
3.3 香梨耗水及生长变化特征	28
3.3.1 香梨耗水规律	28
3.3.2 香梨生长特征	31
3.3.3 香梨果实品质	33
3.3.4 香梨产量和水分利用效率	35
3.4 不同处理对香梨经济效益的影响	37
3.5 基于灰色关联度滴灌技术方案优选	38
3.6 讨论	40
3.7 本章小结	41
第4章 滴灌条件下香梨灌溉制度优化	43
4.1 HYDRUS-2D 模拟软件介绍	43
4.1.1 HYDRUS-2D 基本模块	43
4.1.2 土壤水分运移基本方程	43
4.1.3 土壤蒸散发基本方程	44
4.1.4 模型定解条件	44
4.1.5 模型结果评价	45
4.2 HYDRUS-2D 模型率定与验证	46
4.2.1 模型主要参数	46
4.2.2 模型参数率定与验证	46
4.3 多情景香梨滴灌制度优化	50
4.3.1 不同树龄香梨灌溉制度模拟	50
4.3.2 不同土质香梨灌溉制度模拟	52
4.3.3 不同树龄和土质香梨灌溉制度优选	55
4.4 讨论	59
4.5 本章小结	59
第5章 农业节水潜力计算与分析	61
5.1 工程节水潜力计算	61
5.2 管理节水潜力计算	62
5.2.1 管理节水模式构建	62
5.2.2 管理节水潜力计算	69

5.3 灌溉技术节水潜力计算	70
5.3.1 基于作物灌溉制度变化的节水潜力	70
5.3.2 基于作物种植结构调整的节水潜力	72
5.4 研究区农业节水潜力分析	76
5.5 本章小结	77
第 6 章 结论与展望	79
6.1 结论	79
6.2 展望	80
参考文献	81
致谢	87
作者简介	88

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

水是地球上的所有生命形式、生态系统、经济活动和社会发展的基础^[1]，随着全球气候变化与人口增长，水资源短缺已成为世界性问题。在当前淡水资源有限的情况下，由于人类的过度开采、浪费以及环境污染等问题又进一步加重了淡水资源的危机^[2]。中国水资源十分匮乏，我国虽然淡水资源总量丰富，但人均水资源占有量不足，根据《水资源公报》2023年数据显示，我国人均水资源占有量只有1756.6 m³，不足世界平均水平的四分之一。在工农业和饮用水中，农业成为用水最多的行业，全国每年农业灌溉所需要的水量达到了3.8×10³亿 m³，占用水总量的70%，但我国农业灌溉的水资源利用效率不高，其利用系数只有0.57^[3]，这造成了水资源的大量浪费。因此发展节水农业，提高农业灌溉用水利用率是我国农业长久发展的必要举措。

新疆作为我国的农业大省，是棉花、小麦和果蔬的重要产区之一，由于独特的气候条件与资源优势，新疆林果产业一直是农民增收致富的主要渠道，林果收入占农民人均收入的30%以上^[4]。库尔勒香梨作为中欧相互认可的具有地区标志的商品之一，属于地域性很强的品种，现已成为了新疆重要的经济支柱产业之一^[5]。根据《库尔勒市2023年国民经济和社会发展统计公报》显示，2023年香梨种植面积为40.02万亩，总产量34.40万吨。随着新疆特色林果产业的持续发展，库尔勒香梨的种植面积也在增加，然而目前的香梨灌溉方式仍以大水漫灌为主，全年至少用水800 m³/亩，且化肥的施用还是以开沟施肥为主，这不仅增加了农户的经济成本，而且也不利于提高香梨的品质。此外，香梨多采用株行距为(2~4) m×(3~6) m的乔化密植栽培模式，存在树体分级多、光照不良、产期长、土地利用率低等诸多问题，自2013年开始引进株行距为(1.0~1.5) m×4 m的密植省力化栽培技术，起到了较好的推广效果^[5]，为滴灌技术从作物灌溉借鉴至密植型香梨灌溉提供了条件，因此发展节水灌溉技术对于库尔勒香梨产业的可持续发展具有重要意义。

常用的节水灌溉技术有微灌、喷灌、低压管道灌水技术等^[6]。自1996年膜下滴灌技术在新疆棉花种植中成功应用，滴灌成为新疆绿洲农业发展较适宜的节水灌溉技术。滴灌技术与传统漫灌相比，首先，滴灌技术通过直接输水到作物根际附近的土壤，有效减少了水分的渗漏和蒸发损失，而漫灌方式中大量的水会渗透到土壤深层或形成地表径流流失，造成水资源的严重浪费^[7]；其次，滴灌技术能够均匀地将水分和养分输送到作物根部，避免了漫灌方式中土壤表层过度浸湿而深层土壤未被灌溉到的问题，这有助于作物更好地吸收水分和养分，提高生长效率^[7]；最后，由于滴灌能够更精确地控制水分和

养分的供应,使得作物在生长过程中获得更均衡的养分,从而改善产品品质并增加其产量^[8]。滴灌技术的原理主要是基于作物生长需求和土壤水分状况,通过科学合理的设计和控制,将有限的水资源以最有效的方式输送到作物根部:这包括使用特定的灌溉设备(如滴灌管、喷头等)和控制系统(如自动化灌溉系统),以实现水分和养分的精确调控^[9]。要发展节水灌溉技术,灌溉系统的设计与灌水参数的选取是首要任务,而在许多田间灌水技术或灌水系统设计中都将灌水均匀度作为设计依据,它是衡量灌溉质量的重要指标之一^[10]。灌溉水量分布越均匀,作物对灌溉水(肥)的吸收利用越充分、增产效果越好。因此本研究依据香梨现行种植模式,探究滴灌技术参数(滴灌管布置形式、灌水量)下土壤水分运移情况,通过灌水均匀度量化土体剖面灌水的均匀性,并结合数学模型进行灌水技术参数优化,对于传统库尔勒香梨园转型、提高水分利用效率等具有重要意义。与此同时,部分研究还表明^[11,12,13]当前库尔勒香梨种植区在水土资源开发利用方面还存在地下水超采严重水资源供需紧张、用水结构不协调、种植结构不合理等问题。因此为了能够更加科学合理地制定区域水资源配置方案,本研究以铁门关市29团10连为例,通过用水管理控制,作物种植结构调整,节水灌溉技术实施等方式缓解区域水量供需矛盾,进行节水潜力分析,对研究区规划节水灌溉面积、提高农业水资源利用率、指导农民生产实践等具有重要的意义。

1.2 研究进展

1.2.1 节水灌溉技术发展现状

数千载以来,人类始终意识到水资源在农业灌溉中的不可或缺性,人类历史的发展实则亦是对水资源利用的不断探索。在20世纪之前,人们主要通过构建水利工程项目、发展灌溉技术等手段来实现农田的灌溉,然而,这些努力多数仅限于满足粮食作物的灌溉需求,致使水的利用效率相对低下^[14]。然而,近现代以来,随着人类对水资源有限性的日益认识,节水灌溉技术在农业生产中逐渐崭露头角,并得到了持续的发展与完善^[15]。

在20世纪40年代末,以色列人开创性发明了滴灌技术,并率先在温室中实施应用。由于滴灌技术具有显著的优点,包括无输水过程中的损失、无深层土壤渗漏以及无地面径流浪费,能够确保水直接渗入作物的根区,进而极大减少了作物间的蒸发损失^[16]。因此,这种灌溉方式的用水效率极为出色,高达90%以上^[17]。自20世纪60年代起,滴灌技术在以色列、欧美等地区得到了广泛应用,尤其在水果和蔬菜的灌溉领域表现出色。此外,滴灌技术还特别适合水肥一体化的灌溉模式,这种模式能够确保作物在最佳的水肥环境中生长,从而在节约水资源的同时显著提升作物的品质。近年来滴灌技术因其显著优势在全球范围内得到了迅猛的发展^[18]。

我国从 1950 年左右开始进行节水灌溉农业研究,在 1990 年以后随着国民经济的发展,节水灌溉技术也随之高速发展,国家逐渐加大研究、示范和推广力度^[19]。根据 2012 年国家发布的《全国农业节水纲要 2012-2020》的内容,全国范围内计划新增节水灌溉工程面积达到 3 亿亩,其中高效节水灌溉工程面积更是计划新增 1.5 亿亩以上,主要应用喷灌和微(滴)灌技术。节水灌溉技术根据其应用方式的不同,可细分为滴灌、喷灌、低压管灌等多种类型^[20]。在众多的节水灌溉技术中,微灌技术以其独特的优势脱颖而出,尤其是以滴灌系统为代表的灌溉方式,因其成本低廉、节水效果显著,同时兼具节肥与增产的优势,而受到广泛关注和应用^[21]。滴灌系统对产品质量的要求极为严格,因此,以滴灌技术为核心的微灌技术已经成为全球灌溉节水技术发展的主导和趋势,展现出蓬勃的发展势头。值得一提的是,滴灌系统不仅能够有效支持作物的栽培,还广泛适用于葡萄、棉花等经济效益较高的作物灌溉,为农业生产提供了有力的技术支持^[22]。

随着节水灌溉技术日益受到重视,众多学者开始对其在梨树上的应用进行深入探究。邓永辉等人^[23]对幼龄期库尔勒香梨根系分布进行研究,结果表明水平方向上梨树根系均匀分布,垂直深度 20~60 cm 土层内根系集中分布。张景瑞等人^[24]对滴灌库尔勒香梨进行不同水量处理,发现滴灌香梨全生育期耗水量在 444.83~695.27 mm 之间,推荐香梨生育期内的灌溉定额不低于 6750 m³/hm²。Wang 等人^[25]通过对比漫灌、地下滴灌、地表滴灌对香梨水分、品质和产量的影响,发现地下滴灌可以显著降低香梨的耗水量,提高产量,推荐使用埋深 30cm、灌水量为 6750 m³/hm² 的处理。郭凯璐等人^[26]对主干形香梨进行滴灌、沟灌和漫灌处理,发现在盛花期和果实膨大期采用滴灌有利于降低香梨粗果皮的发生量。杨晓科等人^[27]对黄冠梨进行了沟灌与漫灌处理,发现沟灌处理对梨产量与单果重无明显影响,且能够提高果实可溶性固形物含量。赵智等人^[28]以 24 年成龄香梨树为研究对象,结果表明微喷灌处理的果实 VC 含量、作物产量和根系密度显著高于其他处理。Yang 等人^[29]在对幼龄梨树进行交替滴灌的研究中发现,此方法不仅可以提高根区灌水均匀度和水分利用效率,而且滴灌带的铺设间距及埋设深度也会对作物的生长产生一定影响。

1.2.2 节水灌溉技术参数优化

为了提升灌水均匀度,进而有效减少耗水量并提高作物的水分利用效率,研究者们通过结合田间试验与模型模拟的方法,对灌水技术参数进行了精细调整。这些参数包括滴灌带条数^[30]、滴灌带间距、滴头流量^[31]以及滴灌带埋深等。通过优化这些参数,旨在实现更高效的节水灌溉,为农业生产提供有力支持。

李艳茹^[32]在大田实验中应用 HYDRUS-1D 模型,深入探讨了单点水分运移规律,并据此分析灌溉过程中的耗水情况,提出了针对性的优化灌溉策略。黄兴法等人^[33]通过试验得出结论:在固定滴灌带间距条件下,提高灌水频率会使湿润带宽度减小;而在保持