

分类号:
学号: 20232110034

密级:
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于探地雷达全波形反演的绿洲棉田土壤水盐 监测技术研究

学位申请人	陈强
指导教师	张金珠 教授 王恒 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	水利工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

分类号:
学号: 20232110034

密级:
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于探地雷达全波形反演的绿洲棉田土壤水盐 监测技术研究

学位申请人	陈强
指导教师	张金珠 教授 王恒 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	水利工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2026年5月

**Research on Monitoring Technology of Soil Water and Salt in Oasis
Cotton Fields Based on Full-Waveform Inversion of
Ground-Penetrating Radar**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Chen Qiang

(Civil and Hydraulic Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Zhang Jinzhu

May, 2026

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：陈强

时间：2026年5月20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：陈强

时间：2026年5月20日

导师签名：张金珠

时间：2026年5月20日

摘要

目的：绿洲膜下滴灌棉田存在土壤盐渍化问题，传统水盐检测方法效率低，破坏性大，很难达到中等尺度高分辨率动态检测的需求，本研究想要探寻探地雷达全波形反演方法是否适合盐渍棉田环境，创建起一套可用于土壤水盐快速，无损，高精度检测的综合方法体系，从而给干旱区农田水盐调控及其可持续利用给予技术支持。

方法：本研究采用理论分析，数值模拟和田间试验关联的技术路线，第一，依靠 Hilbert 变换获取探地雷达的瞬时属性，形成层界融合指数，以此做到对不同滴灌年限棉田土壤剖面的高精度分层识别。第二，把盐渍土的电特性同棉田的典型结构联系起来，创建二维数值模型，给出一种包含差分进化，协方差矩阵自适应进化策略以及有限内存拟牛顿法的多阶段混合改良全波形反演框架，全面考量该框架在高电导，高噪声环境下的合适性和稳定性，第三，在新疆具有代表性的膜下滴灌棉田执行野外探地雷达扫测，并且同步钻孔取样，按照分层信息塑造结构限定的初始模型，反演出土壤介电常数和电导率，再经由实验室标定创建它们与土壤含水率，含盐量之间的转换关系，结合实际测量的数据展开精度验证。

结果：依靠瞬时属性融合的层界识别方法，在 0~60cm 深度范围内的绝对误差均值为 2.09cm，相对误差处于 1.78%~16.60%区间，有效地改善了盐渍化土壤分层识别的精准度和连贯性，多阶段混合改良全波形反演方法在数值模拟过程中表现出较好的收敛性和稳定性，电导率反演的结构相似性指数为 0.68~0.71，相对介电常数为 0.76~0.80；即便是在 25dB 噪声环境下，结构重建性能的下滑幅度仍然被控制在 15%以内，大幅缩减了对初始模型的依赖程度，田间试验显示，灌溉 16 年的棉田存在水分斑块现象，盐分集中在湿润锋处；而灌溉 26 年的棉田水分分布更为均衡，盐分经由淋洗作用沉降至深层，根区营造出以脱盐为主较为稳定的环境，反演成果同钻孔实际测量数据的决定系数 R^2 在含水率上为 0.70~0.76，在电导率上为 0.69~0.73，这证实了该方法具有可靠性。

结论：本研究创建起一种依靠结构限定和多阶段混合改良的探地雷达全波形反演方法，此方法可有效达成对盐渍棉田土壤水盐的快速，无损且高分辨率检测，在土壤结构较为明晰，盐渍化程度属中等的改良棉田中其表现良好，显示出长期受膜下滴灌影响时水盐移动所具有的良好趋向规律，给干旱地区农田水盐精确调节以及盐渍化风险防范供应了新的技术途径和科学依据。

关键词：探地雷达；全波形反演；土壤水盐；膜下滴灌；盐渍化棉田

Abstract

Objective: In light of the major issue of soil salinization in oasis cotton fields using mulched drip irrigation and the inadequacies of traditional monitoring methods, which are inefficient, highly interfering, and unable to meet the demands of medium-scale, high-resolution dynamic monitoring, this study aims to explore the possibility of utilizing Ground Penetrating Radar full waveform inversion in saline cotton fields. Objective is to establish a complete set of methods that can allow for fast, non-invasive, and highly accurate measurement of soil moisture and salt content so as to provide technical support for controlling water-salt balance and sustainable use in arid farmlands.

Methods: The research adopts a technical method encompassing theoretical analysis, numerical simulation, and field experiments. First, using the Hilbert transform, we get the instantaneous attributes of the GPR data to form a Layer Boundary Fusion Index, so as to accurately identify the soil profiles in cotton fields with different drip irrigation periods. Second, a 2D numerical model has been established by considering the electromagnetic characteristics of saline soil and ordinary cotton field layout. A multi-stage hybrid optimization FWI framework containing DE, CMA-ES and L-BFGS algorithms was proposed and systematically examined for its suitability and stability under high-conductivity and high-noise circumstances. Finally, GPR surveys and soil samples were collected from typical mulched drip-irrigated cotton fields in Xinjiang. Stratification information was used to make structurally limited first models for turning dielectric constant and electrical conductivity. In the lab calibration was done to establish relationship among soil moisture content, salinity and conversion values and then inversion accuracy was compared with actual measurement.

Results: Layer boundary recognition method using instantaneous attribute fusion has achieved an average absolute error of 2.09cm in the 0-60cm depth range, and the relative error is between 1.78% and 16.60%, which greatly improves the accuracy and continuity of the layered recognition in saline soil. Multi-stage hybrid optimization FWI method shows good convergence and robustness in the numerical simulation process, and it can achieve the SSIM value of 0.68-0.71 for electrical conductivity and 0.76-0.80 for relative permittivity. Even when there was 25dB of noise, the performance of reconstructing the structure dropped by no more than 15%, greatly reducing its reliance on the original model. From the field application, it was observed that in the 16-year drip irrigated cotton field, the soil moisture was distributed

unevenly, and salts were accumulating at the wetting front. On the contrary, the 26-year-old field had a more even moisture distribution, salt was washed away into lower layers, creating a desalinated stable environment around the roots. The coefficient of determination R^2 between inversion result and borehole measurement is 0.70~0.76 for water content, 0.69~0.73 for electrical conductivity, which proves the reliability of this method.

Conclusion: The GPR full waveform inversion method based on structural constraints and multi-stage hybrid optimization that has been developed in this research can successfully perform fast, non-destructive, and high-resolution monitoring of soil water and salt in saline cotton fields. It does well in better cotton fields where the soil isn't too damaged and there's not much salt around, it shows how water and salt move over time when farmers use mulched drip irrigation for a long time. It gives new technical ways and scientific reasons to control water and salt accurately and stop the danger of becoming salty in dry farming land.

Key words: Ground Penetrating Radar; Full Waveform Inversion; Soil Water and Salt; Mulched Drip Irrigation; Salinized Cotton Field

目录

第 1 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 研究意义	4
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 基于传统方法的农田土壤水盐运移研究	4
1.2.2 基于探地雷达的土壤结构与水盐监测研究	7
1.3 研究内容与目标	9
1.3.1 研究目标	9
1.3.2 研究内容	9
1.3.3 技术路线	10
第 2 章 探地雷达全波形反演与土壤水盐监测基础理论	12
2.1 探地雷达探测原理	12
2.2 盐渍土介电模型	13
2.3 探地雷达瞬时属性与层界融合指数	14
2.3.1 瞬时属性基本概念	14
2.3.2 层界融合指数原理	15
2.4 探地雷达全波形反演基本理论	17
2.4.1 正演方程与目标函数构建	17
2.4.2 反演优化策略概述	18
2.5 本章小结	22
第 3 章 绿洲棉田土壤分层识别与结构演变特征	23
3.1 试验设计	23
3.1.1 研究区概况	23
3.1.2 数据采集	24
3.2 基于瞬时属性的棉田土壤分层识别	25
3.2.1 数据预处理与瞬时属性提取	25
3.2.2 层界融合指数分层结果	28
3.3 不同滴灌年限棉田土壤结构演变特征	29
3.4 讨论	31

3.5 本章小结	32
第 4 章 盐渍棉田环境下探地雷达全波形反演数值模拟研究	33
4.1 数值模型构建与参数设定	33
4.1.1 土壤数值模型构建	33
4.1.2 模型参数设定	35
4.2 多阶段混合优化全波形反演方法	37
4.3 数值模拟方案设计	39
4.3.1 不同初始模型条件试验	39
4.3.2 噪声条件与敏感性分析	42
4.4 数值模拟反演结果及精度分析	44
4.5 讨论	47
4.6 本章小结	48
第 5 章 基于结构约束全波形反演的绿洲棉田水盐监测	50
5.1 试验设计	50
5.1.1 研究区概况与测线布设	50
5.1.2 钻孔与雷达数据联合验证方案	51
5.2 数据预处理与初始模型构建	51
5.2.1 雷达数据标准化预处理	51
5.2.2 基于结构约束的初始模型构建	52
5.3 绿洲棉田水盐全波形反演结果与精度评价	53
5.3.1 膜下滴灌 16 年样地水盐分布及反演精度	53
5.3.2 膜下滴灌 26 年样地水盐分布及反演精度	54
5.4 不同滴灌年限土壤水盐运移特征与反演适用性分析	55
5.5 本章小结	56
第 6 章 结论与展望	57
6.1 主要结论	57
6.2 研究展望	58
参考文献	59
致谢	67
作者简介	68

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

土壤盐渍化是全球干旱与半干旱地区面临的最为严重的土地退化问题之一，其直接影响土地生产力、威胁粮食安全、制约区域农业可持续发展和生态环境稳定^[1]。全球盐渍土总面积约 $1.1 \times 10^9 \text{ hm}^2$ ，广泛分布于 100 多个国家和地区，且以每年 $1.0 \times 10^6 \text{ hm}^2 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的速度持续扩张，尤其在中亚、西亚、北非及中国西北等干旱区表现最为突出^[2,3]。我国作为受盐渍化影响较为严重的国家之一，盐渍土面积约为 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，约占国土可利用面积的 4.88%，其中耕地盐渍化面积达 $9.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，占全国耕地面积的 6.62%^[4]。在我国，盐渍土主要集中分布于西北内陆、华北平原、东北松嫩平原及东部沿海四大区域，呈现出类型多样、成因复杂、动态变化明显等特点^[5,6]。尤其值得注意的是，西北干旱区盐渍化问题与水资源短缺、生态脆弱性交织，形成了制约区域可持续发展的重大资源环境瓶颈^[7]。

新疆地处我国西北干旱区腹地，是典型的盐渍土广泛分布区^[8,9]。北疆平原区年平均蒸发量可达 700~1200 mm，是年降水量的 3~6 倍；南疆的年平均蒸发量为 1000~2000 mm，是年降水量的 7~20 倍^[10,11]。区域内含盐地层广泛分布，盐类物质在风化壳和地下水中的含量普遍较高^[9,12]。在大规模灌溉农业发展之前，这些盐分主要以天然盐渍土或盐壳的形式存在^[13]。随着引水灌溉工程和绿洲农业的快速发展，人为改变了区域水盐平衡格局，导致土壤盐分在耕作层及其下部不断重新分配和累积，许多地区出现了不同程度的次生盐渍化现象^[14,15]。据相关统计，新疆盐碱荒地和盐碱农田面积达 $2.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，在 $4.1 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 耕地面积中，受不同程度盐化危害的面积为 $1.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，占耕地的 30.12%，占低产田面积的 60%^[16,17]。

近年来，膜下滴灌技术进行了大规模的推广，并且表现出良好的节水与增产效果，尤其在盐碱地开发利用初期成效明显^[18]。但是该技术长期应用也引发了新的问题，许多地区为了提升土地利用效率，填平了原有的排碱渠系，导致土壤盐分无法有效排出，仅在土层内部重新分布^[19]。加上灌溉水本身含盐以及高矿化度地下水的持续补给，土壤盐分总量并未减少，甚至在局部出现累积^[20]。膜下滴灌的小定额供水模式虽能在根区形成临时脱盐层，有利于作物短期生长，但却难以将盐分淋洗至深层或排出土体，在强烈蒸发

与蒸腾作用下，盐分表聚趋势依然存在^[21,22]。长期来看，滴灌农田土壤处于“脱盐—积盐”的动态矛盾中，次生盐渍化风险持续存在。

长期运行的膜下滴灌棉田中，水盐运移过程表现出明显的时空非均匀性与结构依赖性，这是由滴灌自身的水分输入方式、土壤介质的空间变异以及人为管理活动共同塑造的复杂动态结果^[23,24]。一方面，滴灌系统以点源形式供水，滴头下方形成局部高湿度区域，水分在重力驱动下向周围及深层土壤扩散，由于土壤质地、孔隙结构及初始含水率在空间上的不均匀性，湿润锋往往呈现不对称扩展，形成非同心圆状的湿润体^[25]。盐分随水分迁移，在湿润锋边缘及滴头间干燥区域逐渐积累，尤其在蒸发强烈条件下，盐分表聚趋势显著，形成“盐随水来、水去盐留”的空间分异格局^[26]。因此，同一田块内不同位置的水盐状态差异显著，表现出强烈的空间异质性^[27]。另一方面，长期耕作、灌溉与施肥等农业管理措施持续改变土壤剖面结构，逐年耕作易形成犁底层，灌溉则促进土壤颗粒重新排列与孔隙结构演化，最终在垂直方向上形成具有层次性的结构界面^[28,29]。这些界面在物理性质（如容重、孔隙度、导水能力）上存在突变，影响水盐的垂向运移^[30]。犁底层往往成为水分下渗的暂时阻隔层，导致其上部土壤易滞水积盐，而在某些条件下，界面也可成为优先流路径，加速水盐向深层迁移^[31]。所以土壤结构不仅是水盐运移的背景，更是随管理活动动态演变的调控层，而不同滴灌年限与管理模式进一步加剧了水盐分布的差异^[32]。新垦棉田土壤结构相对均质，水盐运移以入渗为主导，长期滴灌棉田则因结构演化与盐分累积，逐渐形成具有记忆效应的水盐运移路径^[33]。同时，不同灌溉制度、耕作深度、覆盖方式等措施，均会通过改变土壤水力特性与结构稳定性，间接调控水盐再分布过程，使得棉田水盐状态呈现多样化的剖面格局^[34]。综上，膜下滴灌棉田的水盐运移是一个多因素耦合、时空变异显著的过程，为实现盐分长效控制与棉田可持续生产，需开展结构感知的水盐精准监测与管理。

农田水盐调控实践的前提是准确掌握棉田土壤水盐的时空分布特征及其演变规律，制定合理灌溉制度、实施洗盐和排盐措施。但是这些物理性质在时空尺度上往往存在较大的变异性，导致快速准确地获取大面积区域的土壤信息变得极为困难^[35]。传统的土壤水盐监测方法主要依靠钻孔取样和实验室理化分析，尽管结果精度较高，但存在工作量大、破坏性强、代表性有限和难以满足高时空分辨率需求等问题^[36]。随着农田管理精细化程度不断提高，对具有高空间连续性、非破坏性、可重复的水盐监测技术需求变得日益迫切。

探地雷达（Ground Penetrating Radar, GPR）属于高频电磁波探测技术，它经由向地下发射纳秒级脉冲电磁波，然后接收来自不同介质界面的反射信号，以此来达成对近地表介质结构及其电磁特性的高分辨率成像^[37,38]。相比于传统的钻探或者电测方法，探地雷达这种方法存在很多优势，比如分辨率高，效率高，对地表的干扰小，而且能够快速得到连续的剖面信息等，所以被全面应用到工程检测，地下管线探测，地下水研究以及