DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.03.006

土壤墒情监测技术研究现状与发展趋势

高宁[1,2]，张安琪[2,3]，梅鹤波[2]，杨兴华[1,2]，甘蕾[2]，孟志军[1,2,3*]

（1. 黑龙江八一农垦大学工程学院，黑龙江大庆，163319；2. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心，北京市，100097；3. 智能农业动力装备全国重点实验室，北京市，100097）

摘要：随着农业生产对田间管理要求的不断提升，传统的农机设备已逐渐难以适应现代智慧农业的生产需求。在这一背景下，土壤墒情监测技术作为现代农田管理中获取土壤含水率信息的关键手段，正扮演着推动农机向自动化、智能化发展的重要角色。为此，深入梳理和分析国内外土壤墒情监测技术研究现状，重点围绕土壤墒情监测的方式及原理、模型构建算法以及信号处理方法这3个方面技术的研究进展进行阐述，通过对比分析，归纳与总结了国内外在监测方式、原理、模型构建算法和信号处理方法上的异同以及实际应用中存在的问题和面临的挑战，并提出了土壤墒情监测技术在这3个方面未来的发展趋势：土壤墒情监测方式方面，构建多源土壤墒情监测信息平台，以实现更全面的数据收集和分析；模型构建算法方面，通过采用机器学习和深度学习算法，为不同土壤环境和作业场景量身定制模型算法模块，提高监测设备准确性和适用性；信号处理方面，加强多源信号融合技术的应用，降低作业环境对监测设备的影响。

关键词：土壤墒情；机载式监测；原位监测；机器学习；深度学习；信号处理

中图分类号：S233 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-7217（2024）03-0051-12

高宁，张安琪，梅鹤波，杨兴华，甘蕾，孟志军. 土壤墒情监测技术研究现状与发展趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2024，5(3)：51－62

GAO Ning, ZHANG Anqi, MEI Hebo, YANG Xinghua, GAN Lei, MENG Zhijun. Current status and development trends of soil moisture monitoring technologies [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(3): 51－62

0 引言

在农业现代化的浪潮中，我国农机正逐步摒弃粗放型作业模式，迈向自动化、智能化的新征程。根据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》文件的指导，我国正积极加强大中型、智能化、复合型农业机械的研发与应用，不断完善农业科技创新体系，以进一步推动智慧农业的建设与发展。其中，土壤墒情监测作为一种精准获取土壤墒情数据的手段，可为农机在田间作业策略调整提供实时依据，是支撑农机自动化、智能化发展和智慧农业建设的关键技术之一，对保障农业生产安全、提升农产品产量和品质具有重要意义[1-3]。

本文重点详细阐述了土壤墒情监测的监测方式及原理、模型构建算法和信号处理方法的研究现状，并分析了我国现有土壤墒情监测技术的研究成果，以及当前存在的问题与面临的挑战，并对未来的研究重点和发展方向进行展望。

1 土壤墒情监测技术分类

国内外常用的土壤墒情监测方法主要有烘干法、电阻法、中子法、介电法、光谱法和遥感法等，按照监测方式，可分为取样测量、原位监测和机载式监测，实际应用中可根据场景不同，选用适合的监测方式[4-6]。然而，在自然环境中，光照、温度和噪声等多种动态因素的变化常常会对土壤墒情的监测结果产生不可忽视的影响，这导致基于传统线性关系的监测方法难以确保结果的精确性和可靠性。近年来，得益于噪声信号处理、多源信号融合与补偿等先进信号处理技术的应用以及机器学习、深度学习等算法模型在农业生产领域的不断融合与发展，使得土壤墒情监测技术正在逐步削弱这些动态因素带来的影响，向更为高效、智能的方向迈进。土壤墒情监测技术分类如图1所示。

收稿日期：2024-03-05 修回日期：2024-07-03

基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFD2000402-2)；山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2022CXGC010608)；云南省陈立平专家工作站(202105AF150030)

第一作者：高宁，男，1997年生，山东菏泽人，硕士研究生；研究方向为农机专用传感器。E-mail：gaoning5998@163.com

*通信作者：孟志军，男，1975年生，河南潢川人，博士，研究员；研究方向为农机智能装备。E-mail：mengzj@nercita.org.cn

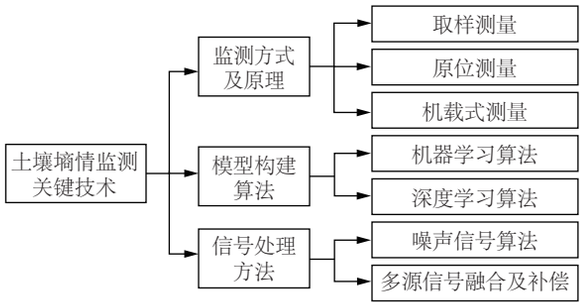


图1 土壤墒情监测技术分类

Figure 1 Classification of soil moisture monitoring techniques

2 国内外土壤墒情监测技术研究现状

2.1 土壤墒情监测技术方式及原理

国内外许多学者对土壤墒情监测技术进行了相关研究,并对取样、原位和机载式这3种主要土壤墒情监测方式所常用的方法、原理及实际应用效果进行了分析。

表1为不同方式采用的监测方法及其优缺点。

表1 不同方式采用的监测方法及其优缺点

Table 1 Monitoring methods and their advantages and disadvantages under different soil moisture monitoring methods

监测方式	监测方法	优点	缺点
取样测量	烘干法	精准度高以及可用于各种土壤类型监测	耗时费力、监测成本较高和无法实时监测
原位监测	电阻法、中子法、介电法	减少对土壤的扰动,准确获取的田间土壤水分分布信息	易受环境因素、地理位置和土壤类型的影响和限制
机载式监测	光谱法、遥感法	高精度测量、灵活性高和可快速获取大范围土壤数据	设备成本高和易受天气条件限制

2.2 土壤墒情取样测量

取样测量作为土壤墒情早期获取的重要技术手段,可以准确获取被测土壤的墒情信息。然而,该方法在获取土壤墒情的过程中,需要频繁地对土壤进行取样和测量,耗时费力且时效性差,不适用于田间实地监测。目前,取样测量常用方法为烘干法,是实验室内测定土壤墒情的标准方法,其原理是将被测土样置于105 ℃的干燥箱中烘干处理(见图2)。



图2 烘干法测量土壤墒情现场

Figure 2 Soil moisture measurement site by drying method

当土壤样本的质量稳定且不再发生变化时,即为测量样本的干质量[7-8]。根据样本烘干前后的质量差与干质量的比值可计算出土壤样本的实际墒情,其理论计算公式如式(1)所示。

$$W=\frac{m-m_0}{m_0}\times 100\% \tag{1}$$

式中:W——土壤墒情,%;

m——土壤鲜质量,g;

m_0——土壤干质量,g。

2.3 土壤墒情原位监测

土壤墒情原位监测是我国目前田间土壤墒情监测的常用手段,其工作原理是通过将传感器设置在田间的特定监测点,以实现对该点周围区域的土壤墒情信息进行实时获取。原位监测主要采用的监测方法为电阻法、中子法和介电法。

1)电阻法。电阻法监测土壤墒情信息主要是利用土壤墒情与电阻率之间存在的特定函数关系进行实现,其原理是当被测土壤的墒情发生变化时,其导电性能会相应改变,通过测量土壤的电阻值,即可间接推算出土壤的墒情。在此基础上,许多国内外学者基于电阻法进行了土壤墒情监测技术方面的研究,例如CALAMITA等[9]深入探讨了电阻法测量技术在土壤墒情估算中的实际应用,并通过试验验证了其在大面积土壤墒情监测中的有效性,其平均均方根误差为4.4%;AN等[10]为研究蒸发对土壤墒情的影响,采用了电阻法的监测原理,开发高空间分辨率的土壤墒情监测装置(见图3)。经小规模蒸发试验表明,该装置可有效地记录土壤水分动态;栗震霄等[11]利用电阻法,研发了一种能够非扰动地连续测量土壤墒情的装置。通过与烘干法进行的对比试验,该装置的测量误差在5%以内。

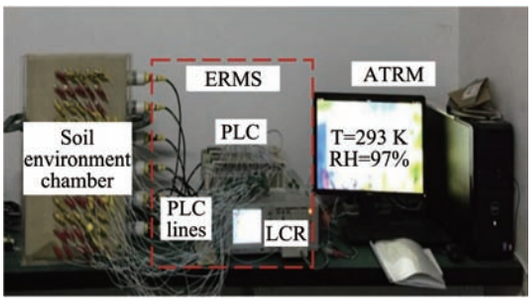


图 3　基于电阻法的高空间分辨率的土壤墒情监测装置

Figure 3　High spatial resolution soil moisture monitoring device based on resistance method

电阻法基于欧姆定律可以实现特定土样的自动连续水分监测。但该方法易受到土壤质地、金属含量和电解质含量等多种因素的影响，且其测量精度相对较低。因此，该类型的传感器主要适用于对精度要求不高的测量场景，比如在小规模栽培浇灌中作为土壤墒情监测的定性工具。

2）中子法。中子法监测土壤墒情的原理是通过中子源发射中子，利用中子与土壤中氢原子的碰撞产生慢中子，进而根据慢中子数量与土壤含水量的关系建立模型，以实现土壤墒情的测定。目前中子法的土壤墒情监测技术发展现状如表 2 所示。

表 2　中子法的土壤墒情监测技术发展现状

Table 2　Development status of soil moisture monitoring technology using neutron method

作者	研究成果
彭士明等[12]	利用中子法和烘干法分别进行土壤墒情测量试验，通过对比分析，证明了中子法在测量过程中表现出更高的精确度和更快的测量速度，适宜进行长期定点观测工作
NGUYEN 等[13]	为实现宇宙射线中子法在茂密季风气候区的适用性，有针对性地对其进行一系列经验模型的校正。经过试验验证，宇宙射线中子法在大型非均质地区土壤墒情监测中具有的可行性
CHRISMAN 等[14]	利用宇宙射线中子法的高时空分辨率及其应用规模尺度范围大的特点，为中小尺度上土壤含水量监测提供了更为精确的数据
王秋铭等[15]	利用宇宙中子土壤墒情监测设备在黄土高原坡面进行土壤水分的连续观测，采集土壤墒情数据，并与通过时域透射率（TDT）获取的土壤墒情数据进行对比分析，证明了宇宙射线土壤水分观测系统的可靠性
HAN 等[16]	利用宇宙射线中子法技术结合数值模拟方法在滴灌灌溉柑橘农田的应用进行了研究，研究表明，宇宙射线中子监测系统能够精确地反映地表作物根系的水分变化，可为农田灌溉调度提供有效的指导
ZHU 等[17]	在青藏高原地层开展点测烘干法与宇宙射线中子法对比试验，并对监测结果进行深入分析。研究结果表明，两者具有高度的拟合度，纳什效率系数高达 0.989
武强等[18]	利用宇宙射线中子法对在复杂下垫面条件下的区域土壤水分进行测量，结果显示宇宙射线中子法与频域反射法在长时间测量条件下结果趋于一致，且宇宙射线中子法对于降雨引起的土壤墒情变化响应更加迅速

中子法与电阻法相比具有探测范围广、高灵敏度的优势。但因高速中子在大气中容易散逸的现象，使得该方法存在难以精确获取到浅层土壤的墒情信息的问题。此外，土壤有机质含量过高也会对中子法的测量结果造成很大的干扰，因此，在采用中子法获取类似于黑土、水稻土这类土壤时，会存在较大误差。

3）介电法。介电法是利用土壤介电特性来估算其土壤墒情的方法。1964 年，苏联学者 Chernyak 在出版的《湿土介电特性研究方法》中为介电法测量土壤墒情奠定了基础。自此以后，土壤的介电特性在土壤墒情的监测技术中得到了广泛应用。其中，相对成熟的土壤墒情介电测量方法主要包括时域反射法、频域反射法和电容法等[19]。当前国内外基于介电法土壤墒情监测发展现状如表 3 所示。

综上所述，土壤墒情原位监测中基于介电法原理开发的设备，其监测精度相对较高，且具有连续获取监测区域土壤墒情变化功能。但该类设备在实际应用中监测范围有限，难以准确表征整个区域的土壤墒情分布情况。此外，原位土壤墒情的监测精度也存在受田间复杂环境影响等问题。

2.4　土壤墒情机载式监测

机载式墒情监测是当前土壤墒情监测领域一个富有挑战且充满潜力的研究方向，该监测方法通过将土壤墒情监测传感器安装至田间作业的机具上，使其动态实时地获取田间不同区域的土壤墒情信息，从而为提高农机的作业效率和质量提供强有力的技术支撑。

1）基于光谱原理。近红外光谱技术应用于土壤墒情监测中的研究开始于 20 世纪 60 年代，其监测原理是利用土壤对近红外光的吸收特性，通过测量土壤反射光谱的波长和强度，推断被测土壤的墒情[19]。MOUAZEN 等[32]采用近红外光谱法的监测原理，设计了一款可见光近红外式土壤墒情测量仪。通过将该光谱仪安装在拖拉机上（见图 4），光纤探头安装在底部磨平的开沟铲上，实现移动式近红外土壤含水率测量传

感器的开发,在工作速度为1.2 km/h时,测得田间预测决定系数为0.75。

表3 基于介电法的土壤墒情监测技术发展现状

Table 3 Development status of soil moisture monitoring technology based on dielectric method

监测方法	作者	研究成果
时域反射法(TDR)	THOMSEN等[20]	利用TDR水分探测仪研究了降雨条件下的土壤墒情变化情况,其结果表明TDR水分探测仪监测效果良好,且其含水量测定误差小于2%
	SKIERUCHA等[21]	利用TDR法原理设计一套土壤墒情和电导率监测系统,并在田间进行了现场应用,证明了该系统的监测精度满足农业生产需求
	李子忠等[22]	利用时域反射仪进行水分测定实验,探究了不同土壤墒情梯度下水分非均匀分布对仪器评估土壤墒情的影响
	杨梅等[23]	采用TDR(时域反射)技术构建了一套土壤墒情监测系统,该系统经测试验证,能够实时且准确地监测土壤的水分状况
频域反射法(FDR)	LIN[24]	通过对频域反射法原理研发的传感器进行研究后,发现增加传感器频带宽度,可显著增强传感器在土壤墒情测量方面的检测精度
	RAO等[25]	证明了当土壤体积含水量低于5%时,基于FDR技术开发的土壤墒情传感器的测量精度会显著提升,能够更准确地反映土壤的水分状况
	郭文川等[26]	基于频域反射法原理开发一种土壤墒情测量仪,并以杨凌地区的鲧土为研究对象开展试验,试验结果表明,在信号源频率为150MHz下,该测量仪测得的土壤墒情与实际土壤墒情的绝对测量误差为-3.44%~4.04%
	钱立鑫[27]	基于频域反射技术(FDR)研究设计了一套土壤墒情监测装置,并通过一系列试验,证明了该设备的测量性能完全符合实际农业生产的需求,其检测误差率控制在3%以内
电容法	蒋国良等[28]	研发了一种用于土壤水分测量的边缘电场平面传感器,并通过一系列试验,证明了该传感器能够敏锐捕捉土壤中含水量的细微变化,尤其是在被测土壤含水量低于25%时性能最佳
	MIZUGUCHI等[29]	对平面电容传感器交叉指状电极的结构参数进行了优化研究,并且将其应用于测量土壤墒情的传感器中,提升了其检测精度
	戴宇培等[30]	采用电容式土壤墒情传感器,在20 MHz至100 MHz的频段内对土壤墒情进行监测,并针对不同土壤墒情区间实施了差异化处理。结果表明,通过调整激励信号的频率以适应不同的土壤墒情状况,可以显著增强土壤墒情与传感器响应信号之间的线性关系
	GOSWAMI等[31]	证明了基于双面电极这一新颖设计的平面电容传感器,在土壤墒情监测的应用场景中,相较于传统的电容传感器,具有较高的灵敏度、信号强度和较快的响应时间

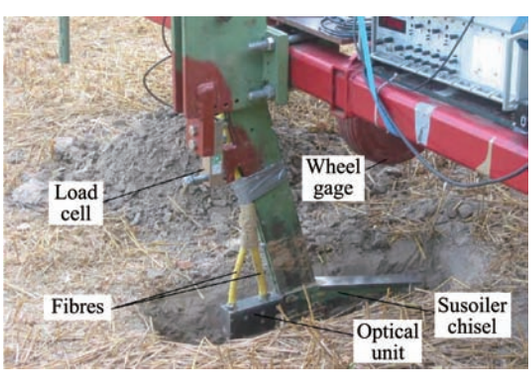


图4 近红外式土壤墒情监测装置

Figure 4 Near infrared soil moisture online monitoring device

KODAIRA等[33]使用具有差分全球定位系统(DGPS)的实时近红外光谱土壤墒情传感器(RTSS)在日本京都大学实验农场的稻田中进行了土壤墒情监测试验。试验结果表明,该传感器监测土壤墒情平均误差在2%以内;张东兴等[34]设计了一种可见光近红外监测仪(见图5)并其开展试验,结果表明:当传感器与被测土壤表面距离d较近时(0~3 mm),测量精度和稳定性最好,其均方根误差均小于2.90%,满足对玉米等作物播种环节土壤水分的测量要求。

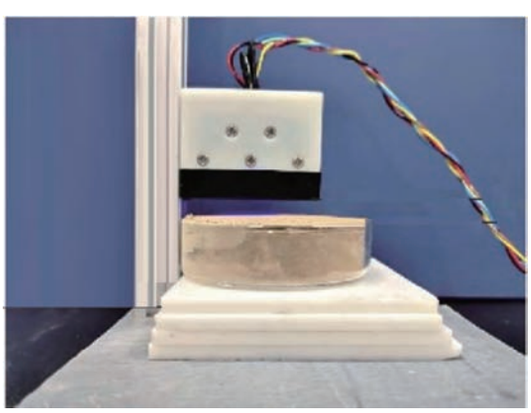


图5 可见光近红外监测仪

Figure 5 Visible near infrared monitor

朱文静等[35]提出一种基于法布里—珀罗干涉近红外传感器的非接触式土壤墒情监测系统。试验结果表明：该系统监测的水分含量预测值与实测值的相对误差范围为0.18%～14.46%，平均相对误差7.77%，获取的表层土壤墒情分布图（见图6）。

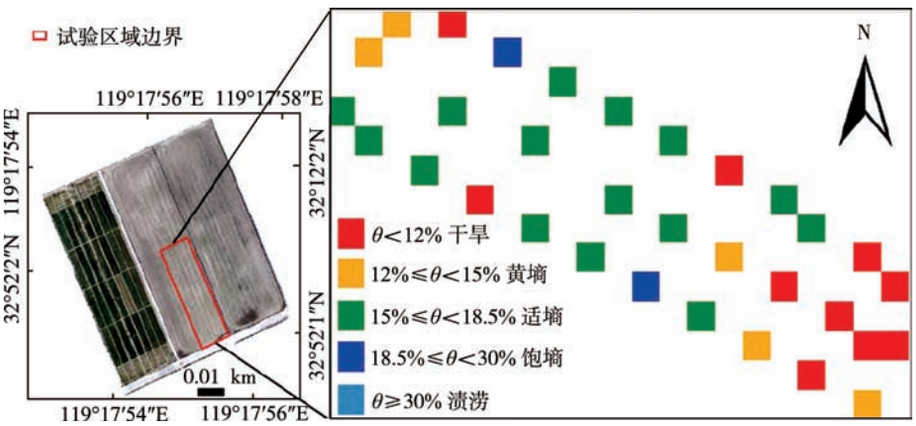


图6　表层土壤墒情分布

Figure 6　Surface soil moisture distribution

综上，光谱法具有测量速度快、自动化程度高、无须对土壤样本进行预处理等优点，并且在土壤墒情监测方面的潜力已得到国内外学者的广泛认可。然而，基于光谱法开发的土壤墒情监测设备在实际应用中也会受到光源的稳定性、光学元件的透射率和环境温度等因素干扰，导致监测精度降低的问题。此外，光谱法的仪器成本较高，也限制了其在一些领域的应用。

2）基于遥感原理。遥感法是一种利用电磁波辐射原理，通过遥感器接收地表物体的反射信号，经过信号处理与图像生成，提取目标特征信息，最终进行信息解译与应用的监测方法。近年来，遥感法因其具有高效便捷、及时、无损、可进行大范围监测等优势，逐渐被认为是估算地表土壤墒情的先进技术，根据监测设备主要分为卫星遥感和无人机遥感。其中，无人机遥感技术是通过无人机搭载的多光谱、高光谱相机以及各类传感器，获取土壤墒情、温度和盐分等关键信息，相较于卫星遥感技术具有高效、灵活的特点。基于遥感法的土壤墒情监测技术的国内外发展现状如表4所示。

表4　基于遥感法的土壤墒情监测技术的国内外发展现状

Table 4　Development status of soil moisture monitoring technology based on remote sensing at home and abroad

监测方法	作者	研究成果
卫星遥感	曾旭婧等[36]	利用S1和Landsat-8（L8）卫星遥感技术联合反演北安—黑河高速沿线区域的表层土壤墒情，其结果表明Vertical-Vertical（VV）极化反演精度优于Vertical-Horizontal（VH）极化
	BAO等[37]	利用Landsat-8（L8）卫星遥感法获取了多种植被指数，并基于改进的水云模型对西班牙典型区域的表层土壤墒情完成了反演
	王龙等[38]	基于Sentinel-1（S1）卫星遥感技术利用水云模型反演了锡林浩特市草原的表层土壤墒情，可为进一步的草原表层土壤干旱监测提供了技术支撑
	LIN等[39]	利用卫星遥感技术基于Vertical-Vertical极化反演得到北京市大兴区和河北省固安县的表层土壤墒情
无人机遥感	ACEVO-HERRERA等[40]	利用无人机遥感技术开发一种基于L波段的机载辐射计，该辐射计可将土壤墒情的反演误差限制在1%～6%之间
	HASSAN-ESFAHANI等[41]	基于机载高光谱相机所获取的遥感数据，通过应用人工神经网络算法，精确反演了土壤表层墒情，其相关系数达到0.88
	张智韬等[42]	利用六旋翼无人机搭载MCA多光谱传感器，实现了对裸土土壤墒情的精确反演，其反演精度较高，决定系数高于0.7
	王敬哲等[43]	利用无人机搭载的高光谱传感器，深入分析了差值指数、比值指数、归一化指数和垂直植被指数与土壤墒情之间的内在联系。在此基础上，构建了适用于干旱区绿洲农田的土壤墒情定量估算模型

基于遥感法的土壤墒情监测技术具有非接触、大范围和实时获取数据的优势，能够快速、准确地反映土壤墒情状况及其变化趋势。然而，该方法也存在一些局限性，存在数据精度不足、受地表覆盖物影响大和动

态变化响应慢等问题。

3)基于介电原理。近年来,随着土壤墒情动态监测技术的迅速兴起,国内外部分学者利用土壤介电特性,开发出适用于实时绘制田间土壤墒情分布的近端传感系统。THOMSEN 等[44]设计了一款移动式 TDR 土壤墒情监测装置(见图 7),该装置作业过程中由拖拉机牵引,并利用液压缸驱动进行监测探头迅速插入和拔出土壤,实现田间土壤墒情的动态监测。

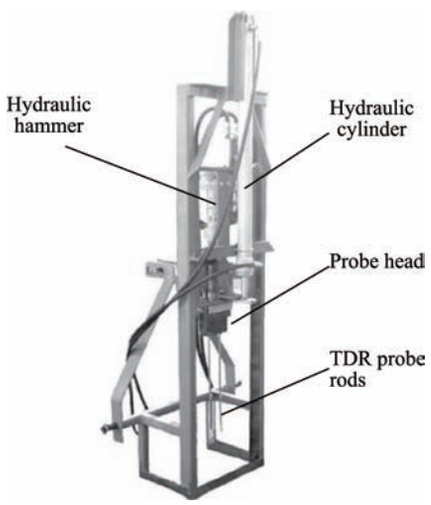


图 7 移动式 TDR 土壤墒情监测装置

Figure 7 Mobile TDR soil moisture monitoring device

NADERI-BOLDAJI 等[45]基于介电法原理设计了一种水平探头式土壤墒情传感器(见图 8),通过将该传感器的探头安装在刀齿上,在土槽中开展了动态测量试验,结果表明测量值与实际的土壤墒情呈较好的线性关系。

杜一童[46]基于时域反射原理开发了一套探针式传感器的土壤墒情监测系统,并开展了土槽试验,结果表明该系统滤波后的结果有一定监测精度。

基于介电法的近端传感器的土壤墒情实时动态监测技术,能快速准确地监测土壤墒情的变化,提供实时的数据反馈,有助于及时调整田间播种和灌溉策略,但也会受到田间土壤类型和机具振动产生噪声的影响,导致监测结果不准确的问题。此外,长时间连续使用可能会影响传感器的性能和寿命,需要定期校准和维护。

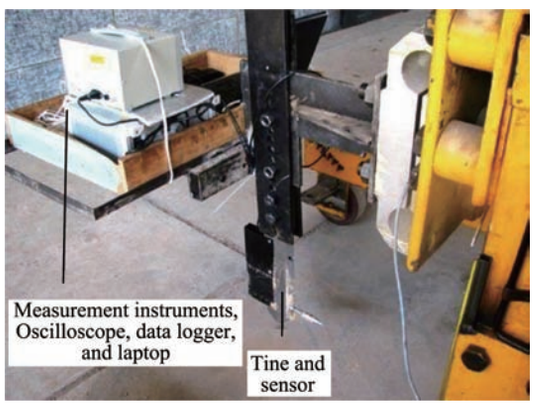


图 8 探头安装在刀齿上的土壤墒情传感器

Figure 8 Soil moisture sensor with probe mounted on knife tines

综上,机载式土壤墒情监测技术不仅可以快速获取土壤环境信息,为后续决策和控制及时提供理论依据,而且相较于原位监测技术不受测量区域的限制,可以实现大面积测量,但监测精度稍低。近些年,国内外在机载式土壤墒情实在线时监测方面取得了很好的效果和研究进展。

3 土壤墒情监测模型构建算法研究

模型构建算法作为土壤墒情监测中的关键技术之一。在土壤墒情监测中,模型构建算法主要用于对采集到的土壤数据进行处理和分析,以实现对土壤墒情的准确评估和预测。然而,现有土壤墒情监测模型多基于常规线性回归方法建立,该方法难以准确表达土壤墒情信息,且泛化能力较差。随着深度学习、机器学习等模型算法在土壤墒情监测领域中越来越受关注,正逐渐成为该领域的技术创新和突破点。

3.1 基于机器学习算法的土壤墒情监测方法

机器学习算法是一种可以赋予计算机自主“学习”的能力的算法,这类算法能够自动从土壤墒情监测装置获取的数据中分析出规律,并利用规律对土壤墒情监测装置的预测性能进行提升,其发展现状如表 5 所示。

表 5 基于机器学习法的土壤墒情监测技术的发展现状

Table 5 Development status of soil moisture monitoring technology based on machine learning method

作者	研究成果
商淑培等[47]	采用多项式回归建模方法,有效解决了深浅层式中子水分仪在高土壤墒情监测中,由于数据非线性问题导致的误差
包青岭等[48]	利用近红外光谱技术开发了一套土壤墒情分析系统,并采用偏最小二乘法建立了土壤墒情检测模型,其结果表明,该系统的预测模型定标的相关系数、交叉验证的标准误差分别为 0.98,0.97,0.92
MU 等[49]	利用随机森林算法对土壤墒情传感器获取的特征参数进行分类预测,相较于之前的预测结果,现均方根误差降低 2.8%

常用的机器学习算法，如多项式回归、偏最小二乘法和随机森林等方法构建的监测模型相较于传统的线性算法构建的监测模型，在数据处理和预测方面具明显优势，适用于快速响应和数据规模相对较小的土壤墒情监测技术，但对于数据处理量较大和计算能力要求较高的土壤墒情监测技术，还存在较大的提升空间。

3.2　基于深度学习算法的土壤墒情监测方法

深度学习是一种模拟人脑神经元连接方式构建的多层计算模型，可以自动提取抽象数据中的有用特征。近年来，深度学习已经成为国内外土壤墒情监测领域的热门技术，基于深度学习的土壤墒情监测技术应用现状如表 6 所示。

表 6　基于深度学习法的土壤墒情监测技术的应用现状

Table 6　Application status of soil moisture monitoring technology based on deep learning method

作者	研究成果
LIOU 等[50]	基于卫星获取的 AMSR-E 多波段和 SMOS 的多角度亮温数据进行了土壤水分反演的神经网络研究
陈昌华等[51]	采用径向基函数神经网络消除了输入层数据冗余的问题，将土壤墒情监测的预测精度提高了 6.06%
SENTI 等[52]	利用人工神经网络进行了基于 AMSR-E/AMSR-2 的 C，X，和 Ka 波段的亮温数据的土壤墒情监测并且能够达到较高的监测精度
HU 等[53]	使用卷积神经网络算法提升了基于卫星遥感技术在土壤墒情监测方面的分辨率

深度学习算法在处理数据和预测能力上比传统的机器学习算法更为强大。通过自动学习数据中的复杂特征，深度学习能够更准确地捕捉数据的内在规律，进而实现高效和精确的预测，适用于需要大规模土壤墒情数据的处理。但该算法也存在着对数据质量和数量的高度依赖、响应速度较慢、算法复杂性和计算资源需求较高以及对异常数据敏感等不足之处。

4　土壤墒情监测信号处理方法研究

在当前的农业领域中，土壤墒情监测设备的应用已经变得尤为普遍，从广袤的平原到起伏的山地，各种类型的田间环境都能见到其身影。然而，随着应用场景的不断拓展，监测设备在运作过程中也不可避免地会受到诸多外部因素的影响，例如温度、噪声和土壤容重等，这些因素在一定程度上影响设备信号的采集。目前，为解决这一问题，通常采用噪声信号处理和多源信号融合及补偿等信号处理技术，对设备监测采集过程中信号进行优化，以确保监测数据的精确度和可靠性。

4.1　噪声信号处理

噪声信号处理是对噪声的信号进行识别、分类、处理和抑制的一种技术，在土壤墒情监测领域主要通过滤波、平滑、增强、变换等多种方法，提取土壤墒情信号中的有用信息，以实现抑制或减弱噪声影响的作用。目前国内外土壤墒情监测系统中噪声信号处理方法应用现状如表 7 所示。

表 7　土壤墒情监测系统中噪声信号处理方法应用现状

Table 7　Application status of noise signal processing methods in soil moisture monitoring systems

作者	研究成果
MOUAZEN 等[32]	基于近红外光谱法的原理开发了一款可见光式土壤墒情监测装置，该装置利用 Savitzky－Golay 滤波法对获取的光谱信号进行平滑处理消除信号边缘噪声，提升了装置的监测精度
殷豪[54]	基于频域反射技术设计了一种高频振荡土壤墒情监测系统，该系统利用低通滤波器滤除分频信号中的高频杂波实现信号的稳定输出，满足水利部对土壤墒情监测精度要求
解振洋[55]	基于电容法原理设计了一种低功耗土壤墒情监测系统，该系统利用带通滤波器和幅相检测等方法解决信号受噪声干扰和高频率信号与低功耗之间矛盾的问题，提升监测精度
李晓斌[56]	基于时域反射法原理开展了土壤剖面分布式墒情传感器监测研究，并利用傅里叶变换法解决了传感器将无法区分相邻土层阻抗变化而造成的噪声干扰，通过该传感器对各层土壤墒情进行试验，其监测的误差均小于 2.5%
WANG 等[57]	基于近红外光谱法的原理设计了一套机载式土壤墒情监测系统，该系统在监测中通过放大正弦波信号并利用三级六阶切比雪夫无源滤波器滤除噪声信号的方式，提升该系统在田间土壤墒情监测的精度

4.2　多源信号融合及补偿

多源信号融合及补偿技术是基于融合多种传感器或数据源信息的基础，通过将该技术应用于土壤墒情监测领域，可显著提升土壤墒情的检测精度，其技术要点在于数据的集成、分析和处理，通过特定的融合方法实现信息的互补和增强，以其修正误差，提高获取信息的准确性。目前土壤墒情监测系统中多源信号融合及补偿方法的应用现状如表 8 所示。

表 8 土壤墒情监测系统的多源信号融合及补偿方法应用现状

Table 8 Application status of multi-source signal fusion and compensation methods in soil moisture monitoring systems

作者	研究成果
SEYFRIED 等[58]	研究了温度变化对时域反射土壤墒情传感器的影响,并建立了温度和土壤介电常数的曲线,提升了传感器的监测精度
张荣标等[59]	通过试验研究了 EC-5 土壤墒情传感器受温度的影响,利用最小二乘法对土壤墒情传感器进行温度影响因素研究,建立了补偿曲线,降低了土壤墒情传感器监测误差
YE 等[60]	探究温度、电导率和 pH 值对 ECH20 传感器土壤墒情传感器的影响规律,并建立了补偿模型,提升了传感器监测精度
陈海波等[61]	通过将半导体测温器件集成至频域反射土壤墒情传感器中,探究了传感器受温度影响的规律,构建了温度修正模型,有效降低该传感器获取数据时受地温变化的影响

在土壤墒情监测过程中,多源信号融合及补偿技术相较于单一的噪声信号处理技术更具有优势。多源信号融合与补偿技术能够集成来自不同传感器的数据,如温度、电导率和 pH 值等,并在此基础上,通过应用先进的算法对融合后的数据进行处理与补偿校正,从而消除潜在的系统误差和偏差,获取到更全面、准确的土壤墒情信息。

相比之下,噪声信号处理技术虽然能有效降低监测数据中的噪声干扰,但往往难以应对复杂多变的土壤环境带来的挑战。尤其是在多因素交互作用下,单一的噪声处理技术可能无法全面消除所有干扰因素,导致监测数据存在误差。因此,未来土壤墒情技术的发展将更加注重信号融合与补偿校正方面的研究,以期获取更加精确和详尽的土壤墒情数据,从而更好地支持农业生产的科学管理与决策。

5 我国土壤墒情监测技术存在问题

通过归纳国内应用较广泛的土壤墒情监测技术,可以发现这些技术和方法在监测方式、原理、模型构建算法及信号处理等方面均表现出显著的多样性和创新性。尽管如此,我国在土壤墒情监测领域仍面临着一些亟待解决的问题。

5.1 田间复杂环境下不同土壤墒情监测方式存在短板

在田间复杂环境下,现有的土壤墒情监测方式存在明显的短板。由于田间环境的多样性和不确定性,单一的监测方法往往难以准确获取土壤墒情信息。例如,某些方法可能受到土壤质地、植被覆盖等因素的影响,导致监测结果存在误差。因此,为了更准确地获取田间土壤墒情信息,需要综合考虑多种监测方法的优缺点,并结合实际情况进行选择和应用。

5.2 土壤墒情监测模型泛化能力不足

当前,土壤墒情监测模型在面临不同土壤类型、气候条件和农田管理措施等复杂因素时,其泛化能力常常显得不足。这是由于常规线性回归方法构建的模型在实际应用中难以准确反映实际土壤墒情状况,从而影响了农田灌溉和管理的决策效果。为了提升土壤墒情监测模型的泛化能力,需要加强模型对多种土壤和环境条件的适应性训练,同时结合先进的机器学习、深度学习算法,不断优化模型结构和参数,以提高其在复杂环境下的预测精度和稳定性。

6 土壤墒情监测技术发展展望

6.1 构建多源土壤墒情监测信息平台

单一的土壤墒情监测方法在实际应用中难免存在局限性,但通过综合运用多种监测方法,并将所采集的数据整合至统一的多源土壤墒情监测信息平台,可以更加精确地获取田间土壤墒情信息,从而为实现精准、高效的田间墒情管理决策提供有力支持。

6.2 土壤墒情模型算法模块化发展

在多样化的土壤墒情监测环境中,采用针对性的模型增强算法能有效提高检测准确性。鉴于我国广阔的种植区域及其地理土壤条件的差异性,模型的选择需要因地制宜。为了实现土壤墒情监测的高效性和灵活性,采用模块化设计理念,利用机器学习与深度学习等模型算法,以构建适配各类情境的土壤墒情模型。通过这种策略,开发的土壤墒情监测设备只需替换相应的算法模块,便能适应多变的土壤环境,从而确保墒情监测的精准度。

6.3 加强多源信号融合及补偿技术在土壤墒情监测设备中的应用

为了进一步优化土壤墒情监测系统的作业精度,应利用多源信息融合技术,将监测土壤温度、盐分含量及土壤容重等关键参数的多种传感器与土壤墒情监测设备紧密集成。通过多层次、多维度、多方法和多角度的数据处理方法,有效关联和组合来自不同信息源的数据,弥补和完善局部信息的不足,进而提升设备在不同作业环境下的适应性和稳定性,从而显著提高土壤

墒情监测设备的准确性和可靠性。

参 考 文 献

[1] 梅多平. 乡村振兴背景下的粮食安全与农户增收策略[J]. 甘肃农业, 2022(4): 9－11.

[2] 袁寿其, 李红, 王新坤. 中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(1): 78－92.
YUAN Shouqi, LI Hong, WANG Xinkun. Status, problems, trends and suggestions for water-saving irrigation equipment in China [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(1): 78－92.

[3] 张亮, 周薇, 李道西. 农业高效节水灌溉模式选择研究进展[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(5): 447－453.
ZHANG Liang, ZHOU Wei, LI Daoxi. Research progress in irrigation mode selection of high-efficiency water-saving agriculture [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(5): 447－453.

[4] 邵长亮, 吴东丽. 土壤水分测量方法适用性综述[J]. 气象科技, 2019, 47(1): 1－9.
SHAO Changliang, WU Dongli. Review of applicability of soil moisture measurement techniques [J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(1): 1－9.

[5] 张晓虎, 李新平. 几种常用土壤含水量测定方法的研究进展[J]. 陕西农业科学, 2008(6): 114－117.

[6] 张文瀚, 杜克明, 孙彦坤, 等. 基于探地雷达的田块尺度下不同深度土壤含水量监测[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(1): 84－96.
ZHANG Wenhan, DU Keming, SUN Yankun, et al. Monitoring specified depth soil moisture in field scale with ground penetrating radar [J]. Smart Agriculture, 2022, 4(1): 84－96.

[7] 常丹, 李旭, 刘建坤, 等. 土体含水率测量方法研究进展及比较[J]. 工程勘察, 2014, 42(9): 17－22, 35.
CHANG Dan, LI Xu, LIU Jiankun, et al. Study progress and comparison of soil moisture content measurement methods [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 42(9): 17－22, 35.

[8] SL 364－2015, 土壤墒情监测规范[S].

[9] CALAMITA G, PERRONE A, BROCCA L, et al. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites [J]. Journal of Hydrology, 2012, 454－455(none): 101－112.

[10] AN N, TANG C S, CHENG Q, et al. An experimental application of electrical resistivity/resistance method (ERM) to characterize the evaporation process of sandy soil [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2020, 117: 102873.

[11] 栗震霄, 高晓阳, 冯全, 等. 电阻式土壤含水率非扰动连续测量装置的研究[J]. 甘肃农业大学学报, 1999(4): 369－373.
LI Zhenxiao, GAO Xiaoyang, FENG Quan, et al. Study on resistance continue non-interference apparatus for soil moisture [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 1999(4): 369－373.

[12] 彭士明, 林家斌. 中子土壤水分仪田间测量与烘干法精度分析比较[J]. 地下水, 2001(2): 67－68.

[13] NGUYEN J G, COHEN S M. Moisture-resistant and superhydrophobic metal-organic frameworks obtained via postsynthetic modification [J]. Journal of the American Chemical Society, 2010, 132(13): 4560－4561.

[14] CHRISMAN B, ZREDA M. Quantifying mesoscale soil moisture with the cosmic-ray rover [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(12): 5097－5108.

[15] 王秋铭, 王胜, 樊军. 宇宙射线快中子法在土壤水分测量中的应用——以陕北六道沟流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5): 125－131.
WANG Qiuming, WANG Sheng, FAN Jun. Application of cosmic-ray fast neutron method to measure soil moisture: A case study of Liudaogou basin in Shaanxi [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(5): 125－131.

[16] HAN X, FRANSSEN H J H, BELLO M Á J, et al. Simultaneous soil moisture and properties estimation for a drip irrigated field by assimilating cosmic-ray neutron intensity [J]. Journal of Hydrology, 2016, 539: 611－624.

[17] ZHU X C, SHAO M A, JIA X X, et al. Application of temporal stability analysis in depth-scaling estimated soil water content by cosmic-ray neutron probe on the northern Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 299－308.

[18] 武强, 贺开利, 罗孳孳, 等. 宇宙射线中子法在复杂下垫面土壤水分测量中的应用[J]. 中国农业气象, 2020, 41(1): 34－42.
WU Qiang, HE Kaili, LUO Zizi, et al. Application of cosmic-ray neutron method in soil moisture measurement on complex underlying surface [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2020, 41(1): 34－42.

[19] 罗红品, 李光林. 土壤含水率的检测研究进展[J]. 农机化研究, 2014, 36(5): 244－247.
LUO Hongpin, LI Guanglin. Research progress in detection of soil moisture content [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(5): 244－247.

[20] THOMSEN A, HANSEN B, SCHALDE K. Application of TDR to water level measurement [J]. Journal of Hydrology, 2000, 236(3): 252－258.

[21] SKIERUCHA W, WILCZEK A, ALOKHINA O. Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2008, 147(2): 544－552.

[22] 李子忠, 郑茹梅, 龚元石, 等. 时域反射仪对水分非均匀分布土壤含水率的测定[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 19－23.
LI Zizhong, ZHENG Rumei, GONG Yuanshi, et al. Measurement of soil water content by time domain reflectometry in non-uniformly wetted soils [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(11): 19－23.

[23] 杨梅, 王琪. 土壤水分测量系统设计与实现[J]. 南方农业, 2018, 12(11): 186－188.

[24] LIN C P. Frequency domain versus travel time analyses of TDR waveforms for soil moisture measurements [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3): 720－729.

[25] RAO B H, SINGH D N. Moisture content determination by TDR and capacitance techniques: A comparative study [J]. International Journal of Earth Sciences, 2011, 4(6): 132－137.

[26] 郭文川, 宋克鑫, 韩文霆. 管针式土壤含水率探头设计与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 115－121.
GUO Wenchuan, SONG Kexin, HAN Wenting. Tube-pin type soil moisture content probe and its influence factors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 115－121.

[27] 钱立鑫. 基于FDR技术的土壤湿度检测装置研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2016.

[28] 蒋国良, 邹彩虹, 胡建东, 等. 边缘电场土壤水分传感技术研究[J]. 河南农业大学学报, 2006, 40(1): 87－90.
JIANG Guoliang, ZOU Caihong, HU Jiandong, et al. Technique studies of a fringing field sensor for measuring water content in a soil sample [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2006, 40(1): 87－90.

[29] MIZUGUCHI J, PIAI J C, DE FRANÇA J A, et al. Fringing field capacitive sensor for measuring soil water content: Design, manufacture, and testing [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 64(1): 212－220.

[30] 戴宇培, 刘云飞, 孙成忠. 电容型土壤含水率传感器的优化设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(7): 11－14, 49.
DAI Yupei, LIU Yunfei, SUN Chengzhong. Capacitance type soil moisture content sensor optimization design [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(7): 11－14, 49.

[31] GOSWAMI M P, MONTAZER B, SARMA U. Design and characterization of a fringing field capacitive soil moisture sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 68(3): 913－922.

[32] MOUAZEN A M, DE BAERDEMAEKER J, RAMON H. Towards development of on-line soil moisture content sensor using a fibre-type NIR spectrophotometer [J]. Soil and Tillage Research, 2005, 80(1－2): 171－183.

[33] KODAIRA M, SHIBUSAWA S. Using a mobile real-time soil visible-near infrared sensor for high resolution soil property mapping [J]. Geoderma, 2013, 199: 64－79.

[34] 张东兴, 刘江, 杨丽, 等. 基于VIS-NIR的播种沟内土壤水分测量传感器研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 218－226.
ZHANG Dongxing, LIU Jiang, YANG Li, et al. Soil moisture measurement sensor research in seeding ditch based on VIS-NIR [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 218－226.

[35] 朱文静, 冯展康, 吴抒航, 等. 机载非接触式近红外土壤墒情检测系统研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 73－80.
ZHU Wenjing, FENG Zhankang, WU Shuhang, et al. Development of an airborne non-contact near-infrared soil moisture detection system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(9): 73－80.

[36] 曾旭婧, 邢艳秋, 单炜, 等. 基于Sentinel-1A与Landsat 8数据的北黑高速沿线地表土壤水分遥感反演方法研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 118－126.
ZENG Xujing, XING Yanqiu, SHAN Wei, et al. Soil water content retrieval based on Sentinel-1A and Landsat 8 image for Bei'an-Heihe expressway [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 118－126.

[37] BAO Y S, LIN L B, WU S Y, et al. Surface soil moisture retrievals over partially vegetated areas from the synergy of Sentinel-1 and Landsat 8 data using a modified water-cloud model [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 72: 76－85.

[38] 王龙, 宫辉力, 潘云, 等. 基于Sentinel-1 SAR数据的锡林浩特市典型草原土壤水分反演[J]. 干旱气象, 2019, 37(6): 979－986.
WANG Long, GONG Huili, PAN Yun, et al. Retrieval of soil moisture in typical steppe of Xilinhot based on Sentinel-1 SAR data [J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(6): 979－986.

[39] LIN R C, CHEN H, WEI Z, et al. Improved surface soil moisture estimation model in semi-arid regions using the vegetation red-edge band sensitive to plant growth [J]. Atmosphere, 2022, 13(6): 930.

[40] ACEVO-HERRERA R, AGUASCA A, BOSCH-LLUIS X, et al. Design and first results of an UAV-borne

L-band radiometer for multiple monitoring purposes [J]. Remote Sensing, 2010, 2(7): 1662－1679.

[41] HASSAN-ESFAHANI L, TORRES-RUA A, JENSEN A, et al. Assessment of surface soil moisture using high-resolution multi-spectral imagery and artificial neural networks [J]. Remote Sensing, 2015, 7(3): 2627－2646.

[42] 张智韬, 王海峰, 韩文霆, 等. 基于无人机多光谱遥感的土壤含水率反演研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 173－181.
ZHANG Zhitao, WANG Haifeng, HAN Wenting, et al. Inversion of soil moisture content based on multispectral remote sensing of UAVs [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (2): 173－181.

[43] 王敬哲, 丁建丽, 马轩凯, 等. 基于光谱指数的绿洲农田土壤含水率无人机高光谱检测[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 164－172.
WANG Jingzhe, DING Jianli, MA Xuankai, et al. Detection of soil moisture content based on UAV-derived hyperspectral imagery and spectral index in oasis cropland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 164－172.

[44] THOMSEN A, SCHELDE K, DROSCHER P, et al. Mobile TDR for geo-referenced measurement of soil water content and electrical conductivity [J]. Precision Agriculture, 2007, 8(4－5): 213－223.

[45] NADERI-BOLDAJI M, SHARIFI A, JAMSHIDI B, et al. A dielectric-based combined horizontal sensor for on-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 171(2): 131－137.

[46] 杜一童. 土壤含水率动态检测装置的设计与试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.

[47] 商淑培, 王亚利, 洪爱俊, 等. 利用近红外光谱技术建立土壤水分含量定标方程[J]. 光谱实验室, 2011, 28(4): 1603－1607.
SHANG Shupei, WANG Yali, HONG Aijun, et al. Establishment of calibration equation for soil moisture content by NIRS [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2011, 28(4): 1603－1607.

[48] 包青岭, 丁建丽, 王敬哲. 利用随机森林方法优选光谱特征预测土壤水分含量[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 470－476.
BAO Qingling, DING Jianli, WANG Jingzhe. Prediction of soil moisture content by selecting spectral characteristics using random forest method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 470－476.

[49] MU T H, LIU G W, YANG X, et al. Soil-moisture estimation based on multiple-source remote-sensing images [J]. Remote Sensing, 2022, 15: 139.

[50] LIOU Y A, LIU S F, WANG W J. Retrieving soil moisture from simulated brightness temperatures by a neural network [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(8): 1662－1672.

[51] 陈昌华, 谭俊, 尹健康, 等. 基于PCA-RBF神经网络的烟田土壤水分预测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 85－90.
CHEN Changhua, TAN Jun, YIN Jiankang, et al. Prediction for soil moisture in tobacco fields based on PCA and RBF neural network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 85－90.

[52] SANTI E, PALOSCIA S, PETTINATO S, et al. Application of artificial neural networks for the soil moisture retrieval from active and passive microwave spaceborne sensors [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 48: 61－73.

[53] HU Z, XU L, YU B. Soil moisture retrieval using convolutional neural networks: Application to passive microwave remote sensing [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, 42: 583－586.

[54] 殷豪. 一种高频振荡土壤含水量测量系统设计与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
YIN Hao. Design and implementation of a high frequency oscillation soil moisture measurement system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.

[55] 解振洋. 低功耗电容式湿度测量系统设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.

[56] 李晓斌. 基于时域反射技术的土壤剖面分布式含水量测量研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.
LI Xiaobin. Research on distributed water content measurement in soil profile based on time domain reflectometry [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2022.

[57] WANG D, YANG W, MENG C, et al. Research on vehicle-mounted soil electrical conductivity and moisture content detection system based on current-voltage six-terminal method and spectroscopy [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 205: 107640.

[58] SEYFRIED M S, MURDOCK M D. Response of a new soil water sensor to variable soil, water content, and temperature [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(1): 28－34.

[59] 张荣标, 刘骏, 张磊, 等. EC-5土壤水分传感器温度影响机理及补偿方法研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 168－172.
ZHANG Rongbiao, LIU Jun, ZHANG Lei, et al. Temperature effect mechanism and compensation method

of EC-5 soil moisture sensor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 168－172.

[60] YE Z, HONG T, JOSEPH M C, et al. Multi-factor evaluation and modeling correction of EC-5 and 5TE soil moisture content sensors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (1): 157－166.

[61] 陈海波, 陈涛, 胡锦涛, 等. FDR型土壤水分仪的温度补偿设计与应用[J]. 节水灌溉, 2022(8): 24－29.
CHEN Haibo, CHEN Tao, HU Jintao, et al. Design and application of temperature compensation of FDR soil moisture monitor [J]. Water Saving Irrigation, 2022(8): 24－29.

Current status and development trends of soil moisture monitoring technologies

GAO Ning[1, 2], ZHANG Anqi[2, 3], MEI Hebo[2], YANG Xinghua[1, 2], GAN Lei[2], MENG Zhijun[1, 2, 3*]

(1. *College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing* 163319, *China*; 2. *Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing* 100097, *China*; 3. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Beijing* 100097, *China*)

Abstract: As agricultural production continues to increase its requirements for field management, traditional agricultural machinery and equipment have gradually become difficult to meet the production needs of modern smart agriculture. In this context, soil moisture monitoring technology, as a key means of obtaining soil moisture information in modern agricultural management, is playing an important role in promoting the development of agricultural machinery towards intelligence and automation. Therefore, this study thoroughly reviews and analyzes the current research status of soil moisture monitoring technology at home and abroad, focusing on the research progress of three aspects of soil moisture monitoring methods and principles, model construction algorithms, and signal processing methods. Through comparative analysis, the differences and similarities in monitoring methods, principles, model construction algorithms, and signal processing methods at home and abroad, as well as the problems and challenges in practical applications, are summarized. The future development trends of soil moisture monitoring technology in these three aspects are proposed: in terms of soil moisture monitoring methods, a multi-source soil moisture monitoring information platform is constructed to achieve more comprehensive data collection and analysis; In terms of model construction algorithms, machine learning and deep learning algorithms are adopted to customize model algorithm modules for different soil environments and working scenarios, improving the accuracy and applicability of monitoring equipment; In terms of signal processing, the application of multi-source signal fusion technology is strengthened to reduce the impact of the working environment on monitoring equipment.

Keywords: soil moisture; airborne monitoring; in situ monitoring; machine learning; deep learning; signal processing