

黑土地耕地质量天空地立体监测技术体系研究进展

刘焕军¹, 孟令华¹, 李强子², 王昌昆³, 姜明^{1*}

(1.中国科学院东北地理与农业生态研究所,长春130102; 2.中国科学院空天信息创新研究院,北京100094;
3.中国科学院南京土壤研究所,南京210008)

摘要:黑土地耕地质量监测能力不足导致黑土地耕地质量本底不清、变化不明,难以支撑黑土地耕地利用和保护国家战略的实施,亟需建立天空地立体监测技术体系,为黑土地耕地质量常态监测提供技术支撑。系统综述了黑土地耕地质量天空地立体监测的研究进展,提炼了黑土地耕地质量关键要素监测进展和存在问题,并对土壤和生产能力与生态可持续利用关键指标监测研究进展进行总结,展示了天空地立体监测技术体系在黑土地保护中的具体应用案例。结果表明,天空地立体监测技术体系已在北大荒农垦实现地块画像与“海绵农田”治理等示范应用,显著提升了黑土地保护与利用效率。未来研究将进一步强化“机理-数据”双驱动模型,突破多源数据融合与不确定性评估瓶颈,构建从监测预警到精准治理的闭环管理体系,为国家粮食安全和生态安全提供科技支撑。

关键词:黑土地;天空地;关键要素;立体监测

doi:10.13304/j.nykjdb.2025.0805

中图分类号:S151.9

文献标志码:A

文章编号:1008-0864(2025)12-0173-10

Research Progress on Space-air-ground Stereo Monitoring Technology System for Black-soil Farmland Quality

LIU Huanjun¹, MENG Linghua¹, LI Qiangzi², WANG Changkun³, JIANG Ming^{1*}

(1.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;

2.Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Insufficient monitoring and early-warning capacity for black-soil farmland quality has resulted in an unclear baseline and poorly characterized spatiotemporal dynamics, which severely constrains the implementation of national strategies for the sustainable utilization and protection of this critical resource. Therefore, establishing an integrated space-air-ground stereo monitoring system is urgently required to support routine, high-resolution assessment. A systematic review of recent progress in stereo monitoring technologies for black-soil farmland quality was provided, advancements and remaining challenges regarding key indicators of soil properties, production capacity and ecological sustainability were synthesized, and representative application cases were summarized. The results showed that the integrated monitoring framework had been successfully deployed in the Beidahuang group, enabling plot-level digital profiling and the implementation of “sponge-farmland” engineering, significantly improving soil conservation and land-use efficiency. Looking forward, future research should enhance “mechanism-and data” driven hybrid modeling, overcome bottlenecks in multi-source data fusion and uncertainty quantification, and establish a closed-loop management system linking monitoring, early warning and precision intervention. Such efforts would provide strong scientific and technological support for ensuring national food security and ecological security.

Keywords: black-soil farmland; space-air-ground; key factors; integrated monitoring

收稿日期:2025-09-30; 接受日期:2025-11-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1500105,2024YFD1500605)。

联系方式:刘焕军 E-mail:liuhuanjun@iga.ac.cn; *通信作者 姜明 E-mail:jiangm@iga.ac.cn

东北黑土区每年可调出商品粮食占全国的1/3,被誉为国家粮食安全的“压舱石”^[1-2],保护好黑土地这一耕地中的“大熊猫”已成为国家战略^[3]。由于监测能力不足,黑土地耕地质量本底不清、变化不明,难以支撑黑土地耕地安全利用和保护国家战略的精准实施,亟需突破监测关键技术瓶颈,建立天空地立体监测技术体系,为黑土地耕地质量定量监测提供技术支撑。

传统的耕地质量监测方法主要依赖于地面调查和土壤样品分析,存在监测范围有限、时空分辨率低、数据获取不连续、监测指标单一等问题,难以满足耕地质量动态监测和精准管理的需求^[4]。随着科技不断进步,天、空、地不同平台监测技术在耕地质量监测中应用,逐步形成立体监测技术体系。该技术体系融合了遥感技术、地理信息系统、全球定位系统、大数据、人工智能等多学科先进技术,通过卫星遥感、航空遥感、地面传感器等多种监测手段的协同,实现了对黑土地耕地质量的多尺度、动态监测。黑土地耕地质量立体监测技术体系的研究处于不断发展和完善的过程中,面临一些挑战和问题,如监测数据的质量控制和不确定性评估、多源数据融合的深度和精度、监测结果的解读和应用等^[2]。因此,深入研究立体监测技术体系及其发展方向和应用前景对进一步提升监测水平、推动黑土地保护与利用科技创新具有重要意义。

突破耕地质量监测的关键技术瓶颈,需要建立完善的立体监测技术体系,为黑土地耕地质量的常态化监测提供坚实的技术支撑,助力实现黑土地资源的可持续利用。依托黑土地保护与利用科技创新专项国家重点研发计划“黑土地耕地质量多尺度天空地立体监测技术与预警系统”项目(简称黑土地立体监测项目),本文从黑土地耕地质量特点引入,论述耕地质量天空地立体监测技术体系构建进展;并对土壤和生产能力(产能)与生态可持续利用关键要素立体监测进展进行总结,展示了黑土地保护中的具体应用案例。最后,展望了未来黑土地耕地质量天空地立体监测技术体系的应用前景和发展方向,以期推动形成系统全面的耕地质量监测体系,为黑土地的保护和利用提供科学依据和技术支持。

1 黑土地耕地质量立体监测技术体系构建

1.1 耕地质量监测指标体系构建

近年来,全球范围内的黑土区正面临着严峻的退化威胁,其可持续生产能力受到多重土壤要素退化的协同挑战。首先,土壤有机质(soil organic matter, SOM)含量下降是黑土退化的核心表征。由于长期高强度利用、有机肥投入不足以及秸秆还田比例偏低等因素,土壤有机质含量持续降低。研究表明,东北黑土区开垦数十年后,土壤有机质含量下降30%~50%,初始快速下降,目前仍以年均约0.1%的速率下降^[5-6]。其次,在土壤有机质下降的背景下,水土流失导致的黑土层变薄问题进一步加剧了生态危机。据监测,东北黑土区部分坡耕地的年侵蚀模数可达每平方千米数千吨,导致黑土层正以每年0.1~0.5 cm的速度变薄^[7]。更严峻的是,随着肥沃表土层的流失,白浆层等亚表层逐渐出露甚至直接成为耕作层,呈现出坚实、极结等不良物理特性,并常伴随pH偏低、养分贫瘠等问题^[8]。土壤有机质下降、土层变薄与耕层白浆化这三者间并非孤立存在,而是构成了相互关联、彼此加剧的退化循环^[9]。准确、快速地监测这些关键障碍指标可有效诊断黑土退化的程度与阶段,为耕地质量提升提供精准依据。

然而,黑土地耕地质量监测不是只有土壤要素的测定,而是一个系统工程,涉及农田基础设施、利用模式、生态环境及气候资源等多维度因素的协同评估^[10]。当前黑土地监测与保护工作面临诸多挑战,亟需建立更全面、精准的监测体系。基础设施薄弱与利用方式粗放是制约黑土地耕地质量提升的关键因素。农田基础设施(沟、林、路、渠等)的完善程度直接关系到耕地的排灌能力、交通便利性和防风固土效果^[11]。种植制度与轮作方式也影响黑土地可持续利用,合理的轮作制度能够调节土壤养分平衡,减少病虫害发生,改善土壤结构。然而,在实际生产中连作现象仍较普遍,导致土壤养分失衡和土传病害加重^[12]。保护性耕作和秸秆还田能够有效改善土壤结构,提升土壤有机质含量,增强土壤保水保肥能力^[13]。

随着遥感、探地雷达、物联网、三维激光扫描等技术的迭代,黑土地耕地质量监测已具备从“单

点-静态-要素”跃升为“立体-动态-系统”的基础。然而,现有研究仍囿于手段单一、过程缺位、空间异质性识别弱等瓶颈,难以形成对黑土地耕地质量高精度监测。耕地质量监测需要厘清土壤退化、水肥运移、作物响应与生态服务的关键驱动及时空变异特征,考虑耕地系统“多要素-多结构-多过程-多功能”及其多尺度、多周期、多层次的特点,构建与黑土耕地资源特性适配的指示性因子、分区指标体系,综合考虑土壤、产能、利用、生态4类关键要素,构建耕地质量关键要素天空地立体监测指标体系,是耕地质量定量监测的前提。

1.2 黑土地耕地质量关键要素天空地立体监测范式进展

黑土地耕地质量监测已完成从“地面调查-样点监测-空间推测”到天空地一体化立体监测的范式跃迁。近年来,高时空分辨率卫星、无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)低空遥感与地面传感网“三位一体”协同,将二维空间信息扩展为三维乃至四维(时空动态)立体信息,实现对耕地质量“空间格局-演变过程-驱动机制”的多尺度、全要素感知,显著提升了监测精度与时效性,为黑土地质量评估、退化预警和保护利用提供了科学支撑^[14]。Sentinel-2、国产高分系列等多源卫星持续提供10 m级至亚米级影像,光学、合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)与激光测距雷达多模态融合可同步反演地表结构、土壤湿度、作物生物量等关键参数^[15-16];SAR在黑土区阴雨或积雪条件下的穿透能力保障了全年连续观测^[17],高时间分辨率影像序列把监测从静态描述推向动态过程分析,可精准捕捉土壤水分、植被覆盖及地表退化等瞬态特征^[18],结合地面验证样点与机器学习算法,已实现黑土地耕地质量关键要素的高精度时空制图^[19]。新型传感器技术进一步填补了空基和天基观测的尺度缝隙;地面高光谱、便携式近红外(near-infrared, NIR)和土壤电导率(electrical conductivity, EC)传感器可在田间快速测定理化性质,实现野外即时诊断与遥感反演校正^[20-21];无人机搭载多光谱、高光谱、热红外传感器在地块尺度提供厘米级分辨率数据,弥补卫星影像在时空分辨率上的不足^[22],通过布设土壤墒情、温度、养分传感器,并融合5G通信与边缘计算,实现连续监测与智能预警^[23],成为立体监测技术体系的重要支撑^[24]。

面对多源、多时相、多尺度数据的爆炸式增长,大数据分析 with 智能算法也成为关键突破口,机器学习、深度学习和时空数据融合算法可从复杂数据中提取关键特征,完成土壤属性反演与退化识别^[25]。谷歌地球引擎(google earth engine, GEE)、数字黑土地大数据平台等云计算环境显著提升了数据处理效率与可视化能力^[26]。知识驱动与数据驱动模型融合,即融合物理规律与大数据分析,提升监测与决策精度的方法成为新趋势,通过引入土壤发生理论、地统计学与地理加权回归,可深入解释监测结果的空间异质性,实现从数据分析向机理解析的转变,为立体监测技术体系奠定了理论与方法基础^[27]。

1.3 耕地质量天空地立体监测技术体系构建

耕地质量监测除了考虑土壤、气候等自然因素,还要增加产能、利用、生态等关键要素,并考虑利用方式、生态过程、退化过程的综合作用,在不同尺度(黑土区、生态区、县域、小流域尺度)构建包含土壤、产能、利用、生态要素的监测指标体系和天空地立体监测网络(图1)。通过在典型黑土区集成卫星、航空飞机、无人机与地面同步观测,开展黑土地航空综合观测试验,构建天空地一体化黑土地立体监测体系,可以实现黑土层厚度、白浆化分布、土壤有机质含量及土壤侵蚀等关键指标米级精准监测,实现耕地退化特征的定量诊断,为黑土地保护规划与技术布局提供科学依据。结合中低分辨率影像的高频重访和高分辨率影像的空间异质信息,建立协同监测技术,从而构建天空地一体化与多尺度融合的黑土地耕地质量关键要素天空地立体监测技术体系。该体系突破传统耕地监测局限,建立了“多要素-多尺度-多平台”协同监测框架,研发天空地数据同化算法实现像素级、对象级融合,突破黑土层厚度等立体监测技术,形成了“空间协同-要素耦合-尺度嵌套”,为黑土地保护工程提供监测技术支撑。

2 黑土地耕地质量土壤要素监测进展

2.1 土壤有机质监测进展

土壤有机质是黑土地耕地质量的核心指标之一。随着遥感、地面采样等多平台数据与人工智能模型的融合,土壤有机质的监测正逐步实现从点位测定到区域制图、从静态评估到动态模拟的

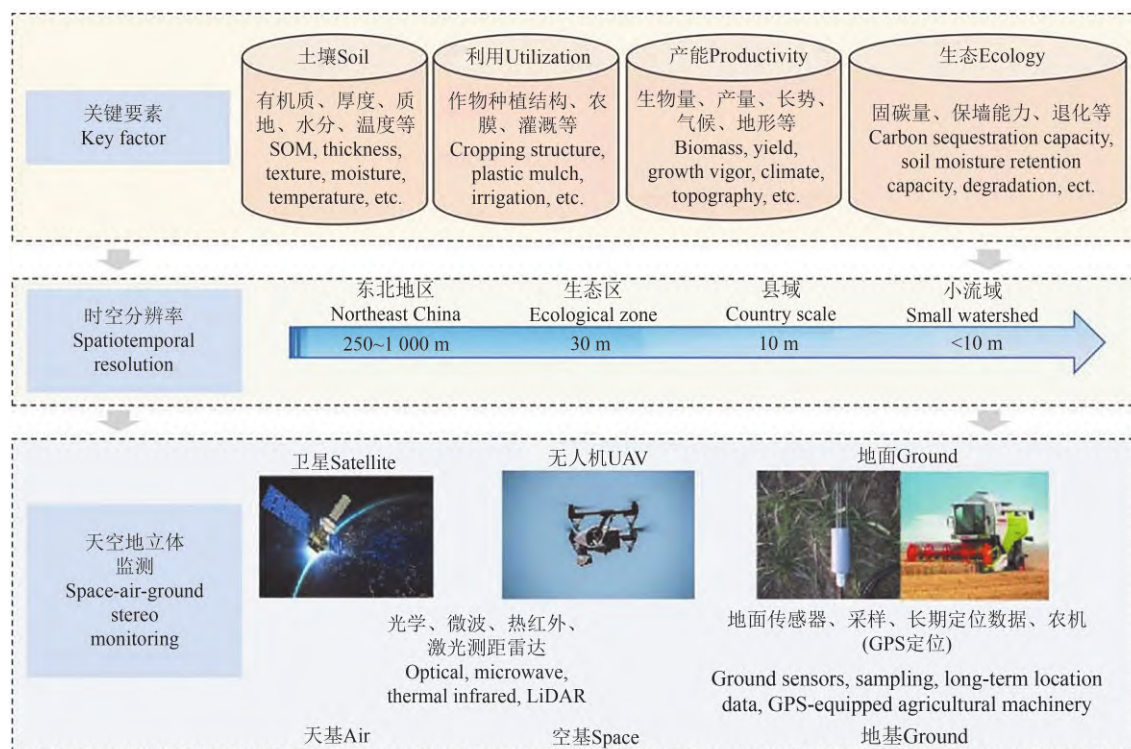


图1 黑土地耕地质量关键要素天空地立体监测网络

Fig. 1 Space-air-ground integrated monitoring network of key factors for black soil farmland quality

跨越,为黑土地保护与可持续管理提供了关键数据支撑。在机理研究与模型构建阶段,室内高光谱分析作为地基平台的重要手段,为揭示有机质光谱响应机制与模型开发奠定了基础^[28]。进一步拓展至区域尺度,天基与空基多源遥感数据在有机质空间制图中展现出广泛适用性。Luo等^[29]通过融合多时相多光谱影像与地形数据,成功绘制了空间分辨率为10 m的黑土区土壤有机质含量图。在时序分析方面,已整合了1984年以来多个时期的Landsat-5/8多光谱数据、气候与地形因子,构建了融合注意力机制、图神经网络与长短期记忆网络的预测模型,增强了深度学习模型在土壤过程模拟中的物理可解释性^[30]。在世界4大黑土区尺度上,研究者收集了超过19万景Landsat TM/OLI影像及高程数据,提取了反映土壤形成过程的光谱指数,构建了元学习卷积神经网络模型,有效提升小样本条件下的预测性能,并据此生成了全球黑土区土壤有机碳含量数据集^[31]。

2.2 黑土层厚度监测进展

黑土层厚度是黑土地耕地质量的关键指标,传统测定方法虽然精度高,但覆盖范围有限、时效

性差^[32]。随着遥感、地理信息系统(geographic information system, GIS)和地统计方法的发展,尝试利用地形因子、遥感信息、土地利用信息等进行黑土层厚度反演^[33],一定程度上提高了大范围估算的效率^[34]。Zhang等^[35]通过141个剖面样点、无人机获取的地形数据以及Landsat植被指数,结合随机森林机器学习模型,建立了黑土层厚度的空间估算框架。在巴西的3个地区,Sousa等^[36]采集了292个土壤厚度数据,结合Landsat 8影像、地表温度、归一化植被指数、干湿季反射率以及地形指数,通过随机森林和支持向量机进行建模,准确描绘了土层厚度的空间分布,其中,地形指数在区分土层厚度中起着关键作用。进一步融合天空地立体监测数据,如卫星遥感的大范围覆盖优势、无人机高分辨率地形信息以及地面实测数据的精准标定,有助于构建更精细和动态的土壤厚度监测体系,提升对黑土资源时空变化过程的监测能力。

2.3 耕层白浆化监测进展

耕层白浆化是黑土区白浆土障碍与翻耕共同作用的结果,以耕层白浆化为例,介绍黑土地耕地障碍的立体监测。针对典型白浆土的识别研究从

剖面调查逐步发展到多源遥感+机器学习的区域监测模式。利用 Sentinel-2 多时相裸土影像结合地形与作物物候特征,可实现耕层白浆化区域的高精度识别。藏德强等^[37]的研究实现了耕层白浆化的精确提取,总体精度达 97.66%。Bao 等^[38]提出了结合遥感驱动的土壤过程模型与深度学习的数字土壤制图框架。此外,基于近地物探的剖面级监测逐渐成为重要补充。探地雷达技术能够识别白浆土障碍层与淋溶层边界,实现地下层位的非破坏性检测^[39]。这些方法共同推动了从平面识别向立体诊断的转变。但耕层白浆化监测仍面临挑战,藏德强等^[37]指出,白浆层上翻与耕作扰动会改变其反射光谱特征,导致识别精度下降。Abdulraheem 等^[39]认为,未来应强化光学、SAR、GPR 及传感器网络等多源数据融合,构建“地表-剖面-过程”一体化的耕层白浆化监测体系,从而实现耕地退化识别、评估与治理的全链条支撑。

3 耕地生产能力与生态可持续利用要素监测进展

3.1 耕地生产能力与生态可持续利用关键要素立体监测解析

耕地生产能力是指黑土地在特定自然条件与人为管理措施共同作用下呈现出的农产品产出水平与持续供给潜力,是涵盖现实生产能力、潜在生产能力、可持续生产能力 3 个核心维度,并由农田基础设施、土壤理化性质、生态环境状况及气候资源条件共同决定的综合能力,是黑土地耕地质量最直接的功能体现。其监测需综合植被指数、覆盖度、生物量、水分等农情参数,以及作物分布、面积和产量等生产参量,同时还需评估单产、水分等使用效率指标。这些指标共同构成了产能监测的多维信息体系。植被指数是监测作物长势的基础参数。卫星遥感可提供大范围、周期性的植被指数数据,无人机和地面观测可用于验证和校准,形成多尺度监测网络。近年来,结合遥感数据和生态过程模型的方法日益成熟,能够动态模拟作物的生物量积累过程^[11]。遥感也可提供区域地表蒸散量的估算,结合产量数据,可实现区域尺度的水分利用效率评估^[40]。通过协同卫星遥感的大范围覆盖、无人机的高分辨率观测和地面测量的精确

验证,形成了多尺度、多分辨率的监测能力,显著提高了耕地产能参数监测的准确性和可靠性^[12]。

耕地利用指标主要涉及沟林路渠基础设施和地块形状等利用特征,直接反映了人类活动对黑土地的影响程度和利用方式。沟林路渠基础设施监测主要依靠高分辨率遥感影像和多尺度智能分割技术。结合数字地形分析和模式识别算法,能够提取这些基础设施的空间分布信息,并评估其完整性和功能状态^[40]。地块形状监测包括规整度、紧致度、连片度等指标,通过地理信息模型计算获得,反映了黑土地的土地整治程度和利用模式,对耕地质量和机械作业效率有重要影响^[11]。监测这些指标的变化可以评估土地整治项目的实施效果,指导高标准农田建设。对于生态指标,固碳量监测主要基于遥感定量模型和地面验证相结合的方法,通过遥感反演的植被指数和生物量数据,结合生态系统过程模型,估算植被碳吸收和土壤碳储存^[41]。此外,保墒能力作为另一个重要生态指标,主要通过土壤含水量多年平均水平或变化率来表征。基于主、被动微波遥感和热红外遥感的土壤水分反演算法可以获取区域尺度的土壤水分分布,结合地面传感器数据,实现黑土地保墒能力的动态评估^[10]。生态指标的监测不仅依赖于先进的遥感技术,还需结合地面长期定位观测和试验分析,通过天空地一体化监测网络,形成对黑土地生态系统功能的全面评估,为黑土地可持续管理提供科学依据。

3.2 耕地生产能力与生态可持续利用关键要素监测进展

随着遥感技术和数据分析方法的发展,黑土地耕地生产能力与生态可持续利用要素监测研究取得了显著进展,主要体现在耕地生产规模、农田基础设施、利用模式、气候资源和生产能力以及农田生态系统结构和功能指标等方面^[11-14]。在耕地生产规模与农田基础设施监测方面,研究重点已从单纯的空间分布提取转向质量综合评价与空间格局优化^[10]。在耕地利用模式研究方面,保护性耕作和秸秆还田等可持续利用模式的监测与效益评估取得显著进展。在气候资源及生产能力评估方面,多源数据融合与模型模拟技术的结合,大幅提升了农业气候生产潜力和气象灾害风险的评估精度。通过综合运用趋势分析、波动提取等技术,

实现了对耕地质量时空变化规律及驱动因素的深入解析^[41]。在农田生态系统监测方面,研究视角从单一生态要素评估转向生态系统多功能性综合评价,遥感技术与生态模型的深度结合使得对黑土地固碳、保墒等生态功能的定量评估成为可能^[41]。然而,当前研究仍面临一些共性挑战,多源数据的整合与协同分析能力有待加强,不同尺度监测结果的衔接与转换尚存技术瓶颈,长期连续监测数据积累不足以及监测成果向实际应用的转化效率仍需提升。需要在耕地生产能力与生态可持续利用要素监测方面进行关键技术创新与系统集成,突破高分辨率遥感反演技术,构建天基卫星、空基无人机、地基物联网协同的天空地一体化立体监测体系,融合机器学习与深度学习创新智能建模方法,揭示耕地质量要素关联机制,形成多尺度监测能力,实现农田设施与耕地利用精准感知。

4 黑土地耕地质量多要素立体监测成果应用

4.1 黑土地耕地质量立体监测结果的综合分析

在多源立体监测成果不断丰富的背景下,如何对黑土地耕地质量监测结果进行系统整合与应用成为推动科学管理与政策实施的关键环节。在综合分析方面,各类耕地质量指标不再孤立评价,而是通过多要素关联分析揭示其相互作用机制。例如,将土壤有机质与黑土层厚度结果耦合,识别土壤肥力与退化程度的空间差异^[6, 42];结合地块形态和林网格局数据,分析地块分布对土壤侵蚀与水分保持的影响^[43];进一步将耕地利用产能指标

与土壤理化特征联系,量化对产能稳定性的贡献。通过多维数据综合分析可实现从“单指标监测”向“系统性诊断”的转变,识别耕地退化的主控要素与关键制约环节。在应用层面,综合监测结果已在多尺度实践中发挥显著作用。在地块尺度,基于土壤有机质与养分空间分布图指导变量施肥、精准耕作与土壤改良;在县域或流域尺度,用于分区管理、退化分级与动态演变评估;在区域至黑土区尺度,成为黑土地质量宏观评估、政策成效检验及碳汇核算的重要基础。

4.2 黑土地耕地质量多尺度立体监测成果

基于多源遥感观测、地面监测与综合分析,构建覆盖多尺度的黑土地耕地质量监测体系,可以实现从宏观格局认知到精细过程诊断的全链条支撑。黑土地立体监测项目成果涵盖黑土区、县域尺度及小流域尺度,形成了较完善的多尺度、多要素数据体系:在黑土区尺度,构建覆盖49项监测指标,形成了由基础数据集、土壤数据集和产能、生态可持续利用数据集组成的多源综合信息库^[44];在县域尺度,建立了包含20项关键指标,覆盖1980s—2020s时间序列,重点整合土壤属性、产能水平与生态可持续性要素^[45];在小流域尺度,建立了5个典型示范区,构建了10项核心指标的高分辨率监测数据集^[46],反映土壤有机质、黑土层厚度及耕层白浆化程度等地块尺度信息。黑土地耕地质量多尺度立体监测技术体系形成了关键要素多尺度天空地立体监测数据集(表1),服务区域、县域、小流域尺度规划、管理、分区、保护利用、改良等黑土地保护利用技术的精准实施。

表1 黑土地耕地质量关键要素多尺度天空地立体监测数据集

Table 1 Multi-scale space-air-ground integrated monitoring dataset of key factors for black soil farmland quality

尺度 Scale	指标数量 Number of indicators	空间分辨率 Spatial resolution	时间分辨率 Temporal resolution	数据集 Dataset
黑土区 Black soil region	49	10~1 000 m	1980 s—2020 s	有机质、pH、砂粒含量、地块边界、防护林网、作物分布、单产等 SOM, pH, sand content, field boundaries, shelterbelt network, crop distribution and yield, etc.
县域 County	20	10~30 m	1980 s—2020 s	有机质、作物产量、地块边界、防护林网、秸秆覆盖度等 SOM, crop yield, field boundaries, shelterbelt network, straw mulching coverage, etc.
小流域 Watershed	10	2~5 m	2020 s	有机质、黑土层厚度、秸秆覆盖度、盐碱化程度等 SOM, thickness of black soil layer, straw coverage and degree of salinization, etc.

4.3 典型应用案例

4.3.1 北大荒农垦地块画像应用场景 北大荒农垦地块画像技术是天空地立体监测技术体系在黑土地保护中的重要实践形式,是实现耕地质量数字化与智能化管理的重要手段^[47]。地块画像以耕地单元为核心,将多源监测成果统一至地块空间框架内,构建了集“土壤质量-产能利用-退化过程-生态功能-管理对策”于一体的综合分析模型。通过对土壤有机质、水分、厚度、地形及林网等要素的协同评估,实现了地块级的数字化表征与差异化管理。该成果已在多个北大荒农垦集团典型农场推广应用,为精准施肥、耕作制度调整及障碍区改良提供了决策支撑。

4.3.2 黑土地“海绵农田”综合治理模式 在北大荒农垦集团友谊农场典型小流域,结合土壤水分、地形起伏、侵蚀强度与白浆化分布天空地立体监测成果,构建了黑土地“海绵农田”综合治理技术体系^[48]。该技术体系通过“滞、蓄、用”一体化设计,集成了可耕作地埂、暗管排水、等高耕作、条带耕作及草水道等多种措施,实现了降雨径流的有效调控与养分再利用,显著提升了农田的保水保肥与抗蚀能力,可有效减少地表径流与侵蚀损失,并促进作物稳产与耕层结构改善。该治理模式集成多种工程、农艺、生物措施,且和北大荒农垦集团高度建制化、规模化、机械化农业生产相适应,便于技术推广与实施。

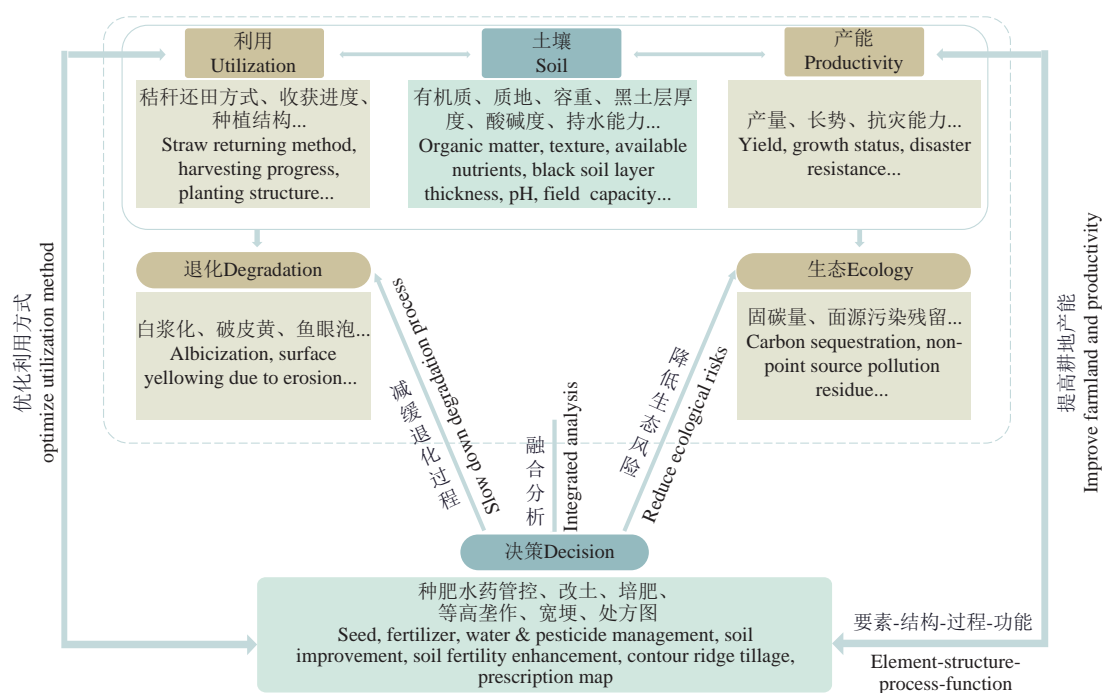


图2 基于立体监测成果的北大荒农垦集团地块画像案例

Fig. 2 Case study of field profiling for Beidahuang group based on integrated monitoring results

5 黑土地监测技术体系发展建议

未来黑土地耕地质量监测与保护研究将在要素量化、过程动态化与系统集成化方向持续深化。首先,应进一步攻克黑土地耕地质量关键要素的定量监测技术难题,在土壤有机质、黑土层厚度等方面形成高精度、多尺度的天空地立体监测与地面验证体系,为黑土地耕地质量精细化评估提供技术基础。其次,应加强典型退化过程的动

态监测与定量表征,包括水蚀、风蚀、沙化、盐碱化及白浆化等多类型退化过程,建立过程驱动的监测模型和预警机制,实现从静态识别向动态模拟的转变。同时,应深入研究黑土地耕地质量各关键要素、不同过程、格局与功能的耦合关系,揭示其时空分布特征、相互作用机制及长期演变规律,为理解黑土地系统的形成、演化与稳定性提供科学依据。在此基础上,基于天空地立体监测成果,应从系统科学视角强化“要素-结构-过程-功能-

尺度”的整体研究框架,构建从微观(地块)到宏观(区域)多层次、多尺度的耕地质量监测与评价体系。最后,应构建“基础理论、监测技术体系、大数据分析综合评价、示范推广”的全链条研究与应用体系。通过人工智能、物联网、时空智能等前沿技术赋能,推动黑土地耕地质量监测由“数据驱动”向“机理-数据双驱动”转变,实现监测、评估、预警、治理与决策的闭环管理,为黑土地保护与国家粮食安全战略提供科技支撑和理论引领。

6 结语

黑土地作为保障国家粮食安全的“压舱石”,其质量监测与保护技术的创新发展具有重要战略意义。本文系统阐述了天空地立体监测技术体系在黑土地耕地质量监测方面的研究进展与应用实践,通过深度融合卫星遥感、无人机监测、物联网传感与人工智能等技术手段,构建了覆盖天空地的多尺度、多要素、全过程立体监测网络;通过多源数据融合与智能算法创新,建立了涵盖土壤、产能、生态等多维度的立体监测技术体系;并在北大荒农垦地块画像场景应用、“海绵农田”建设等精准管理实践中成效显著。黑土地耕地质量监测向更高精度、更智能、全要素的方向发展,需进一步突破多源数据融合与不确定性评估等关键技术瓶颈,深化“机理-数据”双驱动模型研究,构建从监测预警到精准治理的完整技术链条,通过持续创新天空地立体监测技术体系,必将为实现黑土地资源的科学保护、智慧管理和可持续利用提供坚实保障,为我国粮食安全与农业现代化发展奠定坚实基础。

参 考 文 献

- [1] 廖晓勇,姚启星,万小铭,等. 黑土粮仓全域定制模式的理论基础与技术路径[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1634-1649.
LIAO X Y, YAO Q X, WAN X M, *et al.*. Theoretical basis and technical path of global customization mode for black soil granary [J]. *Acta Geogr. Sin.*, 2022, 77(7): 1634-1649.
- [2] 邓祥征,梁立,廖晓勇,等. 国际粮食贸易影响下东北黑土地生产压力变化与保护策略[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2209-2217.
DENG X Z, LIANG L, LIAO X Y, *et al.*. Research on changes in grain production pressure and protection strategies in the black soil region of Northeast China under the influence of international grain trade [J]. *J. Nat. Resour.*, 2022, 37(9): 2209-2217.
- [3] 郑皓洋,李婷婷,黄颖利. 中国黑土区耕地利用效益评价及问题诊断——基于粮食安全与黑土保护双重背景[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(11): 29-41.
ZHENG H Y, LI T T, HUANG Y L. Evaluation of cultivated land utilization benefit and diagnosis of problem in black soil area of China: based on the dual background of food security and black soil conservation [J]. *J. China Agric. Univ.*, 2023, 28(11): 29-41.
- [4] 张娜,杜国明,张瑞. 面向现代农业发展的黑土地质量理论解析[J]. 资源科学, 2023, 45(5): 926-938.
ZHANG N, DU G M, ZHANG R. Theoretical analysis of black land quality oriented to modern agricultural development [J]. *Resour. Sci.*, 2023, 45(5): 926-938.
- [5] XU X Z, XU Y, CHEN S C, *et al.*. Soil loss and conservation in the black soil region of Northeast China: a retrospective study [J]. *Environ. Sci. Policy*, 2010, 13(8): 793-800.
- [6] LIU K, SONG Y, DU S, *et al.*. Spatiotemporal patterns and drivers of soil organic carbon in black soil landscapes of Northeast China [J/OL]. *PLoS One*, 2025, 20(6): e0320784 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0320784>.
- [7] YANG B, DUAN Y, ZHAO Q. The effect of land fragmentation on farmers' rotation behavior in rural China [J/OL]. *Front. Environ. Sci.*, 2022, 10: 1042755 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1042755>.
- [8] 朱宝国,张春峰,贾会彬,等. 白浆土心土间隔改良对土壤理化性状及作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 704-710.
ZHU B G, ZHANG C F, JIA H B, *et al.*. Effect of improving the interval between the white soil core and soil on soil physical and chemical properties and crop yield [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2014, 45(3): 704-710.
- [9] 韩晓增,邹文秀,杨帆. 东北黑土地保护利用取得的主要成绩、面临挑战与对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1194-1202.
HAN X Z, ZOU W X, YANG F. Main achievements, challenges, and recommendations of black soil conservation and utilization in China [J]. *Bull. Chin. Acad. Sci.*, 2021, 36(10): 1194-1202.
- [10] SUI J, DAI Y. Analysis of conservation practices for black soil based on organic matter and nitrogen contents in the black soil region of Northeast China [J/OL]. *Sci. Rep.*, 2025, 15(1): 9426 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09426-9>.
- [11] GAO M, YANG Z, LI X, *et al.*. Research on cultivated land quality assessment at the farm scale for black soil region in Northeast China based on typical period remote sensing images from landsat 9 [J/OL]. *Remote. Sens.*, 2025, 17(13): 2199 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.3390/rs17132199>.
- [12] LIANG C A, DU G, FAYE B. The influence of cultivated land transfer and Internet use on crop rotation [J/OL]. *Front. Sustain. Food Syst.*, 2023, 7: 1172405 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1172405>.
- [13] JIAO F, ZHANG D, CHEN Y, *et al.*. Effects of long-term straw returning and nitrogen fertilizer reduction on soil microbial diversity in black soil in Northeast China [J/OL]. *Agronomy*, 2023, 13(8): 2036 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.3390/>

- agronomy13082036.
- [14] 张飞扬, 胡月明, 陈联诚, 等. 耕地质量低空遥感-地面传感双重采集系统研究[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(3): 117-125.
ZHANG F Y, HU Y M, CHEN L C, *et al.*. Study on dual acquisition system of low-altitude remote sensing and ground sensing for cultivated land quality [J]. *J. South China Agric. Univ.*, 2020, 41(3): 117-125.
- [15] LI Y, XIAO X. Deep learning-based fusion of optical, radar, and LiDAR data for advancing land monitoring [J/OL]. *Sensors*, 2025, 25(16): 4991 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.3390/s25164991>.
- [16] AHMAD U, NASIRAHMADI A, HENSEL O, *et al.*. Technology and data fusion methods to enhance site-specific crop monitoring [J/OL]. *Agronomy*, 2022, 12(3): 555 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030555>.
- [17] 郭华东, 吴文瑾, 张珂, 等. 新型SAR对地环境观测[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 862-872.
GUO H D, WU W J, ZHANG K, *et al.*. New generation SAR for Earth environment observation [J]. *Acta Geod. Cartogr. Sin.*, 2022, 51(6): 862-872.
- [18] 董金玮, 吴文斌, 黄健熙, 等. 农业土地利用遥感信息提取的研究进展与展望[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 772-783.
DONG J W, WU W B, HUANG J X, *et al.*. Research progress and prospects of agricultural land use information extraction from remote sensing [J]. *J. Geo-Inf. Sci.*, 2020, 22(4): 772-783.
- [19] WEI Z, GU X, SUN Q, *et al.*. Analysis of the spatial and temporal pattern of changes in abandoned farmland based on long time series of remote sensing data [J/OL]. *Remote Sens.*, 2021, 13(13): 2549 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.3390/rs13132549>.
- [20] 史舟, 徐冬云, 滕洪芬, 等. 土壤星地传感技术现状与发展趋势[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 79-92.
SHI Z, XU D Y, TENG H F, *et al.*. Current status and development trends of space-ground sensing technology for soil [J]. *Prog. Geogr.*, 2018, 37(1): 79-92.
- [21] BARNES E M, SUDDUTH K A, HUMMEL J W, *et al.*. Remote- and ground-based sensor techniques to map soil properties [J]. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 2003, 69(6): 619-630.
- [22] GUEBSI R, MAMI S, CHOKMANI K. Drones in precision agriculture: a comprehensive review of applications, technologies, and challenges [J/OL]. *Drones*, 2024, 8(11): 686 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.3390/drones8110686>.
- [23] AKHTAR M N, SHAIKH A J, KHAN A, *et al.*. Smart sensing with edge computing in precision agriculture for soil assessment and heavy metal monitoring: a review [J/OL]. *Agriculture*, 2021, 11(6): 475 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060475>.
- [24] 高宁, 张安琪, 梅鹤波, 等. 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 N, ZHANG A Q, MEI H B, *et al.*. Research status and development trends of soil moisture monitoring technology [J]. *J. Intell. Agric. Mech.*, 2024, 5(3): 51-62.
- [25] 张超, 张海峰, 张宇, 等. 深度学习在土壤监测中的应用及展望[J]. 农业展望, 2023, 19(12): 81-86.
ZHANG C, ZHANG H F, ZHANG Y, *et al.*. Application and prospect of deep learning in soil monitoring [J]. *Agric. Outlook*, 2023, 19(12): 81-86.
- [26] 黄仲良, 何敬, 刘刚, 等. 面向GEE平台的遥感影像分析与应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(3): 527-534.
HUANG Z L, HE J, LIU G, *et al.*. Research progress of remote sensing image analysis and application oriented to GEE platform [J]. *Remote Sens. Technol. Appl.*, 2023, 38(3): 527-534.
- [27] DE CAIRES S A, MARTIN CST, ATWELL M A, *et al.*. Advancing soil mapping and management using geostatistics and integrated machine learning and remote sensing techniques: a synoptic review [J/OL]. *Discov. Soil*, 2025, 2(1): 53 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00082-z>.
- [28] DONG C, MENG X, RUAN W, *et al.*. An innova hyperspectral prediction model for soil organic matter in croplands of the Northeast China Mollisols Region [J/OL]. *Soil Till. Res.*, 2025, 253: 106666 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106666>.
- [29] LUO C, ZHANG W, ZHANG X, *et al.*. Mapping of soil organic matter in a typical black soil area using Landsat-8 synthetic images at different time periods [J/OL]. *Catena*, 2023, 231: 107336 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107336>.
- [30] MENG X, BAO Y, LUO C, *et al.*. A new methodology for establishing an SOC content prediction model that is spatiotemporally transferable at multidecadal and intercontinental scales [J]. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2024, 218: 531-550.
- [31] MENG X, BAO Y, LUO C, *et al.*. SOC content of global Mollisols at a 30 m spatial resolution from 1984 to 2021 generated by the novel ML-CNN prediction model [J/OL]. *Remote Sens. Environ.*, 2024, 300: 113911 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113911>.
- [32] KURIAKOSE S L, DEVKOTA S, ROSSITER D G, *et al.*. Prediction of soil depth using environmental variables in an anthropogenic landscape, a case study in the Western Ghats of Kerala, India [J]. *Catena*, 2009, 79(1): 27-38.
- [33] RUAN W, LIU H, SUI Y, *et al.*. Quantitative prediction of black soil horizon thickness at the watershed scale in Northeast China's black soil region [J/OL]. *Soil Till. Res.*, 2026, 256: 106886 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106886>.
- [34] LACOSTE M, MULDER V L, RICHER-DE-FORGES A C, *et al.*. Evaluating large-extent spatial modeling approaches: a case study for soil depth for France [J]. *Geoderma Reg.*, 2016, 7(2): 137-152.
- [35] ZHANG S, LIU G, CHEN S, *et al.*. Assessing soil thickness in a black soil watershed in Northeast China using random forest and field observations [J]. *Int. Soil Water Conserv. Res.*, 2021, 9(1): 49-57.
- [36] SOUSA G P B D, TAYEBI M, RABELO CAMPOS L, *et al.*. Improvement of spatial prediction of soil depth via earth observation [J/OL]. *Catena*, 2023, 223: 106915 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106915>.
- [37] 藏德强, 罗冲, 赵映慧, 等. 基于双时相遥感影像与地形参

- 数的地块尺度耕层白浆化土壤空间分布制图[J]. 土壤通报, 2025, 56(3): 621-633.
- ZANG D Q, LUO C, ZHAO Y H, *et al.*. Mapping the spatial distribution of albic bleached soil in cultivated layer at the plot scale using dual temporal remote sensing imagery and terrain parameters[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2025, 56(3): 621-633.
- [38] BAO Y, YAO F, MENG X, *et al.*. A fine digital soil mapping by integrating remote sensing-based process model and deep learning method in Northeast China [J/OL]. *Soil Till. Res.*, 2024, 238: 106010 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106010>.
- [39] ABDULRAHEEM M I, ZHANG W, LI S, *et al.*. Advancement of remote sensing for soil measurements and applications: a comprehensive review [J/OL]. *Sustainability*, 2023, 15(21): 15444 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.3390/su152115444>.
- [40] FOSTER T, MIENO T, BROZOVIĆ N. Satellite-based monitoring of irrigation water use: assessing measurement errors and their implications for agricultural water management policy [J/OL]. *Water Resour. Res.*, 2020, 56(11): 028378 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.1029/2020WR028378>.
- [41] YU Q, HU Q, WU H, *et al.*. View from above: Farmland infrastructure and its impacts on agricultural landscapes [J/OL]. *Innov. Geosci.*, 2025, 3(1): 100107 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.59717/j.xinn-geo.2024.100107>.
- [42] 刘凯, 魏明辉, 戴慧敏, 等. 东北黑土区黑土层厚度的时空变化[J]. *地质与资源*, 2022, 31(3): 434-442, 394.
- LIU K, WEI M H, DAI H M, *et al.*. Spatiotemporal variation of balck soil layer thickness in black soil region of Northeast China [J]. *Geol. Resour.*, 2022, 31(3): 434-442, 394.
- [43] 左忠, 潘占兵, 张安东, 等. 干旱风沙区农田防护林网空间风速与地表风蚀特征[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(2): 135-141.
- ZUO Z, PAN Z B, ZHANG A D, *et al.*. Spatial wind speed and surface wind erosion characteristics of farm-shelter forest network in arid sandy area [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2018, 34(2): 135-141.
- [44] LUO C, ZHANG W, ZHANG X, *et al.*. Mapping soil organic matter content using Sentinel-2 synthetic images at different time intervals in Northeast China [J]. *Int. J. Digit. Earth*, 2023, 16(1): 1094-1107.
- [45] ZANG D, ZHAO Y, LUO C, *et al.*. Improving the accuracy of soil organic matter mapping in typical Planosol areas based on prior knowledge and probability hybrid model [J/OL]. *Soil Till. Res.*, 2025, 246: 106358 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106358>.
- [46] LUO C, ZHANG W, ZHANG X, *et al.*. Mapping the soil organic matter content in a typical black-soil area using optical data, radar data and environmental covariates [J/OL]. *Soil Till. Res.*, 2024, 235: 105912 [2025-09-08]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105912>.
- [47] 吴树江. 鹤岗市兴安区“数字画像”助力精准施肥[N]. *黑龙江日报*, 2025-03-28.
- [48] 倪思洁. 他们把黑土区坡耕地变成“海绵农田”[N]. *中国科学报*, 2024-10-14(3).