

雷达遥感农业应用综述

张王菲^① 陈尔学*^② 李增元^② 杨浩^③ 赵磊^②

^①(西南林业大学林学院 昆明 650224)

^②(中国林业科学研究院资源信息研究所 北京 100091)

^③(北京市农林科学院北京农业信息技术研究中心 北京 100097)

摘要: 雷达遥感具有全天时、全天候监测的能力,对植被具有一定的穿透能力,对植被散射体形状、结构、介电常数敏感;这些特性使得其在农业应用中极具潜力。该文首先介绍了雷达遥感在农业中的应用领域,概略总结了目前在农作物识别与分类、农田土壤水分反演、农作物长势监测等多个领域研究的综述文献;然后分别阐述了雷达散射计和各类SAR特征(包括:SAR后向散射特征、极化特征、干涉特征、层析特征)在农业各领域中应用的现状和取得的研究成果,最后结合农业应用需求和SAR技术发展总结了目前研究中存在的问题和原因,并对未来的发展进行了展望。

关键词: 雷达遥感;农业;后向散射特征;极化特征;干涉特征;层析特征

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)03-0444-18

DOI: 10.12000/JR20051

引用格式: 张王菲,陈尔学,李增元,等. 雷达遥感农业应用综述[J]. 雷达学报, 2020, 9(3): 444-461. doi: 10.12000/JR20051.

Reference format: ZHANG Wangfei, CHEN Erxue, LI Zengyuan, *et al.* Review of applications of radar remote sensing in agriculture[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(3): 444-461. doi: 10.12000/JR20051.

Review of Applications of Radar Remote Sensing in Agriculture

ZHANG Wangfei^① CHEN Erxue*^② LI Zengyuan^② YANG Hao^③ ZHAO Lei^②

^①(College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

^②(Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

^③(Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Active radar remote sensing technology, with its capability of acquiring all-weather data, has great potential for agricultural monitoring. This technology can penetrate vegetation cover more deeply than optical sensors and has sensitivity to the shapes, structures, and dielectric constants of vegetation scatterers. In this paper, we discuss the applications of radar remote sensing in crop identification, cropland soil moisture inversion, crop growth parameter inversion, crop phenology retrieval, agricultural disaster monitoring, and crop yield estimation. We review several specific papers focusing these fields, and then describe the results obtained using information extracted from radar scatterometers and Synthetic Aperture Radar (SAR). Extracted SAR data include characterizations of backscattering, polarimetry, interferometry, and tomography. Lastly, we summarize the problems faced by radar applications in agriculture and consider the future trend of these applications.

Key words: Radar remote sensing; Agriculture; Backscattering characterizations; Polarimetric characterizations; Interferometric characterizations; Tomography characterizations

收稿日期: 2020-04-30; 改回日期: 2020-06-15; 网络出版: 2020-06-28

*通信作者: 陈尔学 chenerx@caf.ac.cn *Corresponding Author: CHEN Erxue, chenerx@caf.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(31860240), 国家重点研发计划(2017YFB0502700)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (31860240), The National Key R & D Program of China (2017YFB0502700)

责任编辑: 廖明生 Corresponding Editor: LIAO Mingsheng

1 引言

1.1 研究背景

雷达是微波遥感应用中的主要传感器。微波遥感的优势主要包括3个方面：(1) 微波具有穿透云层甚至穿透雨区的能力；(2) 微波比光波能更深地穿透植被；(3) 微波与光学遥感得到的信息是不同的，它可以得到研究对象面或体的几何特性和介电特性^[1]。由于雷达遥感全天时、全天候监测的能力，在对植被散射体形状、结构、介电常数敏感的同时具有一定的穿透能力，因此在农业监测中极具潜力。

雷达遥感目前在农业中的应用主要包括农作物分类与识别、农田参数(含水量和地表粗糙度)反演、农作物长势参数反演(生物量，叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)和高度)、农作物物候期划分、农作物灾害监测和农作物估产等。

农作物分类与识别是农情监测技术体系的初始和关键环节。精准识别各种农作物类型可实现对农作物种植面积、结构及空间分布的准确估计，并为农作物估产模型提供关键输入参数^[2]。各种农作物具有不同的冠层结构、几何特性和介电常数等，从而导致在不同频率和极化的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像中表现为不同的特征，这是采用雷达遥感进行农作物分类和识别的理论基础。

农田参数反演中利用雷达数据进行土壤含水量反演是雷达遥感最经典的应用之一。但是在农田土壤含水量反演中，特别是在裸土含水量反演中，受到地表粗糙度的影响较大，另外，地表粗糙度也是农学、土壤学、地质学和气候学中的重要参数，因此地表粗糙度的反演也逐渐发展为一个独立的分支^[3]。此外，在有农作物覆盖的地区，农田土壤含水量反演中还要考虑农作物植被层的影响。将植被冠层、土壤粗糙度的影响从雷达信号中分离后，雷达后向散射系数和土壤含水量之间具有较好的相关性，通常通过建立雷达后向散射系数与土壤体积含水量之间的关系模型就可实现农田土壤含水量的估测^[2-4]。

农作物长势即农作物生长状况和趋势，直接影响农作物的产量和品质^[5]。农作物长势参数主要包括生物量、LAI高度和密度等。长势参数通常是农作物生长状况的有效表征，因此农作物的长势监测通常通过长势参数的反演来实现。雷达的后向散射参数、极化特征参数和干涉特征参数常被用于农作物生物量、LAI和高度的反演。

农作物物候信息是农业生态系统的重要特征之

一，是农业生产、田间管理、计划决策等的重要依据。农作物物候期划分主要是区分农作物形态发生显著变化所对应的时间段，即从出苗到收获所经历的生长时间周期^[6-8]。由于极化SAR特征对农作物结构、形态变化敏感，近年来被广泛应用于农作物物候期的划分。

农作物灾害类型较多，包括洪涝、干旱、病虫害、倒伏等。雷达遥感在农作物灾害中的应用目前开展较少，多集中在倒伏的监测，特别是对垂直结构明显的农作物倒伏的监测具有较大潜力，这主要是利用了极化特征对农作物结构变化敏感的特点^[9]。

农作物精确估产是农业遥感监测的最终目标。目前农作物估产可通过农作物生长模型和遥感估测两种手段进行。前者通过数学建模方法在单点尺度模拟农作物生长，可以实现高精度的农作物单点估产；后者可获取农作物区域尺度上的面状特征，两者优势互补，集成应用于农作物估产可以提高估产的准确性和机理化^[8,9]。雷达遥感目前应用于农作物估产也是通过遥感数据与农作物生长模型的同化来实现，但是相关的研究也仅在近期展开^[3,8]。

1.2 现有研究综述概况

随着雷达遥感技术在农业应用研究中的深入，目前不少研究者从多个应用领域对其研究情况进行了文献综述。王迪等人^[2]综述了SAR技术在农作物分类与识别中的研究进展，总结得出：目前用于农作物识别与分类的SAR特征包括单波段、单极化特征、多极化特征和多波段特征；分类方法包括非机理性的基于像元统计特征的分类方法、利用极化分解理论分析和农作物散射特征发展的机理性分类算法。他们同时指出目前的识别分类精度还较低，多数识别精度不足85%，其可能原因是分类算法的机理性研究不足。施建成等人^[4]综述了土壤水分反演中用到的雷达数据源、各数据源的局限、目前采用的算法及不足等；刘健等人^[10]则综述了土壤水分反演中粗糙度、植被覆盖等的影响及相应的解决措施，并指出现有反演方法的准确性和普适性有待进一步提高，融合不同观测模式(多波段、多极化、多角度)的SAR数据是未来的发展趋势。Liu等人^[3]和McNairn等人^[11]综述了基于SAR技术的农作物长势监测，指出目前用于农作物长势监测的长势参数包括生物量、LAI和高度，使用的SAR特征包括后向散射特征、极化特征和干涉特征。李平湘等人^[9]对基于SAR技术的农作物物候期监测进行了简单的综述，指出目前主要的方法包括两大类，即利用分类和时序动态跟踪两种方法。他们还总结得出目前SAR技术在农业灾害监测中的研究还开展较少，已

有研究主要集中在“农作物倒伏”方面。黄健熙等人^[12,13]综述了遥感数据与农作物生长模型同化在农作物估产中的应用,指出SAR 遥感数据与农作物生长模型同化在农作物估产中的潜力,但目前应用较少,是未来农作物估产主要的发展方向之一。

现有的研究综述从多个方面说明了雷达遥感在农业应用中的优势和不足,对推动雷达遥感技术在农业中的应用有积极的意义。然而,随着SAR技术的发展及应用需求的推动,SAR数据获取方式由单频率、单极化、单角度等发展到多频率、多极化、多角度和多时相等综合获取方式。原有的针对单一观测和几个观测的简单组合已经不适用于描述观测对象的复杂散射特征和提高定量遥感的精度,SAR观测方式的改变使得农作物的散射机理及其在SAR图像中的表征呈现出复杂性,不仅影响了采用SAR技术对农作物的认知和理解,也影响了传统估测方法在联合观测维度下SAR技术在农业应用中的适用性。为了适应SAR多维度观测技术的需求,需要从不同SAR数据获取方式出发,系统地梳理农业应用中SAR参数的提取方式及其对农作物各相关参数的响应情况^[14]。已有的研究中,初期用于农业相关监测的传感器主要是雷达散射计,近期使用的传感器则多为SAR,目前的综述研究多集中于SAR应用的研究。然而初期基于雷达散射计的研究是后续SAR技术应用的实验基础,其研究结果对微波遥感理论的验证也是SAR技术进一步发展的理论保障,因此有必要对其研究结果进行全面的梳理和总结。此外,已有的综述文献中部分发表较早,近年来新的研究成果并未加入,特别是对干涉、极化干涉SAR技术、层析SAR技术在农业中应用的文献未作深入总结。鉴于此本文首先对雷达散射计在农业应用中的现状进行综述、总结;然后以不同的SAR观测技术为基础,综述各类SAR技术在农业各领域中的应用现状;以期能够较全面的梳理目前SAR技术在整个农业系统应用中的优势和不足,并为将来更深入的应用提出可能的方向和思路。

2 雷达散射计农业应用

雷达散射计在农业应用中的研究多集中在农田土壤水分的反演。初期的研究也探索了其在植被冠层结构、农作物制图、农作物长势监测和农作物识别分类中的应用,但相比土壤水分的研究,这些方面的研究成果较少。采用雷达散射计的研究成果按照遥感平台,可以分为地基散射计、机载散射计和星载散射计,下面我们将以遥感平台为基础,总结目前的研究进展。

2.1 地基雷达散射计

雷达散射计能够获取目标的散射截面观测量,可以用于深入理解微波和自然目标相互作用的机理。散射计通过发射系列脉冲并测量其回波,然后将回波特性定量化来获得目标的散射截面测量结果。散射计的荷载平台包括星载、机载和地面平台,其中地面平台主要搭载在高塔上或者卡车上,又称为地基散射计。散射计量测的目标散射截面除了受到目标自身特性的影响外,散射计的频率、入射角、极化方式均会影响其测量结果^[15]。

表1总结了使用地基雷达散射计开展的研究,同时整理了其研究结论。由表1可知,基于地基散射计进行土壤水分反演方面的研究最早开始于60年代末70年代初,前期的研究目的主要是为星载散射计、星载SAR在相关研究中的优选参数设置提供理论和实验支撑。堪萨斯大学使用主被动辐射计(Microwave Active and Passive Spectrometer, MAPS)或主动散射计(Microwave Active Spectrometer, MAS)研究了频率范围为1~18 GHz之间,入射角范围在0°~80°之间各种极化组合下,后向散射系数对土壤水分变化的反映情况。研究结果表明:采用后向散射系数反演土壤水分受到频率、极化、入射角、土壤粗糙度和地表覆盖植被的影响;土壤粗糙度的影响可以通过选择合适的频率、入射角来剔除或降低;低频低入射角更适合土壤水分反演。极化特征对农作物结构变化敏感,各极化与高频、大入射角特征组合更容易区分不同的作物类型^[16-23]。荷兰的微波植被观察项目(Radar Observation of VEgetation, ROVE)主要研究了X-波段各极化后向散射在不同入射角变化下对农作物参数的响应情况,研究表明:农作物的地表覆盖率达到一定程度时,后向散射系数会出现饱和现象;多频率观测可以提高农作物生长参数的估测精度,研究结果同时肯定了大入射角更适合植被监测^[24-27]。日本学者Inoue等人^[28]基于Ka-, Ku-, X-, C-和L-波段地基散射计数据对农作物长势监测的研究则指出C-波段适合LAI反演,而L-波段则适合生物量估测。加拿大遥感中心的相关研究指出HV极化对农作物类型识别、农作物残茬识别有较好的识别效果;同时指出后向散射对农田区每日含水量动态变化响应明显,但其相关性受到频率、田间农作物生长阶段的影响^[29-33]。我国研究者主要探索了土壤水分在X-, C-波段不同极化、不同入射角的后向散射变化及其影响因子,研究表明垄向对与其平行的极化方式的后向散射有显著影响;土壤含水量反演中,粗糙度的影响可以通过选择特定入射角的数据来剔除^[34-37]。

表 1 地基雷达散射计研究现状总结
Tab. 1 Summary of studies using ground-based scatterometers

| 研究团队 | 散射计相关参数描述 | | 应用类型(对象) | 研究结论 | 参考 文献 |
|---------------------|---------------------|---|---|---|------------|
| | 名称 | 参数描述 | | | |
| MAPS | | 双极化(HH+VV); 入射角可在0°~70° 之间变化, 频率4~ 8 GHz | 土壤水分 | 后向散射对于土壤水分的敏感性: HH>VV; 后向散射对土壤水分的敏感性受到土壤表面粗糙度的影响明显, 土壤表面的粗糙度可以通过频率和入射角的变化来表征, 因此土壤水分反演受到频率和入射角的影响明显; 当频率在4~8 GHz, 入射角在5°~15°时, HH极化的后向散射几乎不受地表植被的影响, 仅反映土壤水分的变化。 | [16-18] |
| | | 全极化(HH+VV+HV+ VH); 入射角可在 0°~80°之间变化, 频 率4~8GHz | 农作物分类制图 (农作物包括: 玉米、高粱、 大豆和苜蓿) | 极化特征对农作物结构变化敏感; 农田的垄向对极化散射特征影响明显, 其影响具有农作物类型依赖性; 对于农作物结构变化的敏感性: VV>HH; 农作物密度和入射角变化均会影响不同频率微波的后向散射强度; 大入射角(30°~65°)和高频段组合可以最有效的区分不同农作物类型。 | [18] |
| 堪萨斯大学Ulaby 等团队 | | 双极化(HH+VV); 入射角可在7°~15°之 间变化, 频率2~ 8 GHz | 裸土覆盖区土 壤水分 | 土壤粗糙度会影响裸土覆盖区土壤水分的反演; 通过优化散射计的系统参数可以降低土壤粗糙度的影响, 推荐的组合是频率为4 GHz, 入射角在7°~15°, 极化方式为HH或VV。该参数在频率4~8 GHz之间的植被覆盖区的土壤水分反演中也适用, 后向散射与土壤水分的最高相关性获得时频率为4.7GHz, 入射角为10°。 | [18,20] |
| | MAS | 三极化(HH+VV+ HV); 入射角可在0°~ 80°之间变化, 频率 1~8 GHz | 土壤水分、地 表粗糙度、土 壤结构 | 对于裸土覆盖区的土壤水分, 结论与文献[20]相似, 地表粗糙度的影响在频率为5 GHz, 入射角在7°~17°时影响最小; 在有农作物覆盖区的土壤水分反演中, 后向散射与土壤水分的相关性在频率4.25 GHz, 入射角为10°, 极化为HH时最高, r=0.92; 后向散射系数对土壤水分的估测力依赖于土壤水分在田间含水量中所占的比例, 当其比例低于50%时, 估测力低, 在50%~150%之间时, 估测力高。 | [21-23] |
| 荷兰 ROVE 项目 | FM/CW | X-(10 GHz)、Q(35 GHz); 角度15°~ 80°, 极化: VV, HH, VH, HV | 农作物观测、 土壤水分 | 除了与文献[18]相似的结论, 还得出: 采用VV的多频数据可以获得最好的农作物识别效果; 入射角在30°~65°时可以将土壤水分在农作物识别中的影响降低到最小; 低频小入射角数据可以获得更好的土壤水分反演结果。 | [19] |
| | | | | 农作物的后向散射系数受到极化方式、观测角度等影响明显; 这种成像几何的影响具有农作物类型依赖性: 例如入射角变化对甜菜影响不明显, 但是对马铃薯的影响可达到-5 dB; 此外当地表农作物冠层的覆盖率达到80%时, 后向散射系数变化呈现饱和; X-波段可用于农作物的分类识别; 多频数据联合观测有助于提高农作物冠层生物量、冠层含水量、覆盖度和农作物高度估测的精度; 增大观测入射角可以提高冠层含水量的估测精度。 | [24-28] |
| 加拿大 CCRS相 关项目 | FM/CW | L-, C-, Ku(1.5, 5.2, 12.8 GHz); 全极 化; 角度0°~85° | 农作物识别与 分类、土壤水分、 农作物冠层水 分、农作物残余 | 通过方差系数分析得出Ku-波段、HV极化、入射角范围在30°~60°, 农作物生长29~30周时, 可以得到最优的农作物识别效果; 在农作物快速生长阶段, 后向散射与每日冠层含水量变化相关性较高, 农作物凋谢时, 后向散射与每日土壤水分变化相关性较高, 相关性同时受到频率的影响; HV对农田农作物残余变化敏感, 并且不易受到观测方向或垄向的影响。 | [29-33] |
| | 地基微波散射计 (FM /CW) | C-; HH和VV | 土壤水分土壤 粗糙度 | 垄向使得与其平行的极化方式的后向散射系数增强; 反演测得的粗糙度不同于光学方法得到的粗糙度。 | [34,35] |
| 中国 | 微波散射计 (FM /CW) | X-(9.375 GHz), 角 度为0°~48°, 步进间 隔为6°; 全极化 | 土壤水分 | X-波段HH极化在6°时对裸土含水量灵敏度最高, 有植被覆盖的土壤水分反演中, X-波段比C-波段差; 含水量一定时, 后向散射系数随入射角增大而减小, 变化率随粗糙度增加而减小; 随着频率的增加, 与粗糙度无关的入射角增大, 频率为1.1 GHz时, 入射角为7°, 7.5 GHz时为10°。 | [34,36,37] |
| 其他 | ComRAD | 双极化, 1.4 GHz辐 射计; 全极化 1.25 GHz | 农作物含水量 (VWC) | 在L-波段采用HH、VV、极化差系数(MPDI)、雷达植被指数(RVI)进行VWC反演中, HV效果最好。 | [38-40] |
| | UF-LARS | L-(1.25 GHz), 全极 化, 入射角40° | 土壤水分, 农 作物长势 | 采样时间间隔降低可以显著提高反演的土壤水分的精度, VV极化后向散射对农作物的垂直结构变化更敏感; 在植被体散射为主导机制的土壤水分反演中, 表面较光滑、土壤较干燥时, 线性关系反演结果不确定较大。 | [41,42] |

另外一些其它的实验也取得了与以上研究类似的结论^[38-42]。

2.2 机载和星载雷达散射计

尽管地基散射计操作方便、成本较低,但是由于平台较低,观测结果受到几何关系影响较大,并且观测范围受到很大限制,因此采用机载平台可以扩大观测范围,提高观测效率。机载平台主要作为地面平台的补充,为星载雷达传感器参数的设置提供理论和实验支持。在荷兰ROVE项目中即包括侧视机载雷达数据,Kurl等人^[42]使用该数据研究了农作物整个生长期X-波段后向散射系数的变化,发现动态变化范围为3~15 dB。大量的研究成果基于欧洲的1~18 GHz DUTSCAT和C-/X-波段的ERASME机载散射计^[43,44]。Bouman等人^[45]和Ferrazzoli等人^[46]采用DUTSCAT的多频数据肯定了文献^[27]的研究结果,同时指出X-,Ku-波段适合农作物分类,而L-波段更适合土壤水分反演;Benallegue等人^[47]使用ERASME的多频、多角度数据分析了土壤水分反演的可行性,得出的结论与文献^[16-23]相近。

根据地基和机载的实验结果,星载散射计主要的工作波段在C-(5.3 GHz)和Ku-(13.5 GHz)波段。C-波段波长较长,受云雨因素影响较小;Ku-波段频率高,对目标特征变化更敏感。表2列举了到目前为止主要的星载散射计的主要信息^[48-51]。星载散射计数据在农业中主要应用于土壤水分反演和农作物参数反演。WoodHouse等人^[52,53]采用ERS-1 AMI散射计数据反演了植被覆盖度、植被覆盖下的土壤水分、植被的季节变化等,研究结果表明土壤水分反演结果受到植被覆盖的影响,因此具有地域依赖性。Frison等人^[54]则发现植被的季节变化观测

结果会受到空气和地表温度的影响。Frolking等人^[55]采用QuickSCAT SeaWinds在美国27个地点监测了多种植被的物候期,并与MODIS LAI数据进行了对比,发现两者的结果基本一致,但是采用后向散射特征监测的各物候期总早于MODIS LAI的结果。Lu等人^[56]在中国22个地点采用相同数据的研究结果与该研究的结论一致。Wen等人^[57]也采用ERS-1 AMI数据反演了西藏地区的土壤水分,散射计估测结果与地面调查的0~4 cm表层土壤水分的相关性达到0.78。多个学者基于星载散射计的数据,完成了全球范围土壤水分制图^[58,59],也有学者指出全球性土壤水分制图应该考虑地表植被动态变化的影响^[60]。Kim等人^[61,62]采用蒙特卡洛模拟的方法,研究了适用于16种植被和裸土表面的前向散射模型,并将其用于土壤介电常数、粗糙度、植被含水量等参数的模拟,以期为NASA的SMAP数据提供分析方法。Naemi等人^[63]和Wagner等人^[64]则基于这些数据进行了反演算法、模型的优化。

早期围绕地基和机载散射计数据开展的研究阐述了采用后向散射特征进行土壤水分反演和农作物分类的可行性,星载散射计的应用进一步优化了早期的反演方法,更推动了星载散射计在土壤水分和植被参数反演方面的应用。随着成像雷达、特别是SAR技术发展,SAR技术被广泛应用到农业各领域的应用中,由于散射计观测的灵活性、低成本、快速重复观测能力等使得其在农业应用中仍然是SAR数据应用的一个重要补充。

3 SAR农业应用

相比散射计,SAR可以提供图像特征和除后向散射特征以外的其它观测量,近些年来被广泛应用

表 2 星载散射计信息

Tab. 2 Major space-borne radar scatterometry and their basic information

| 卫星 | 传感器 | 波段 | 入射角 | 极化 | 服役时间 | 国家 |
|------------|----------|----|----------|--------|----------------|-----|
| Seasat | SASS | Ku | 25°~55° | HH, VV | 1978-6—1978-10 | 美国 |
| ERS-1 | AMI | C | 18°~59° | VV | 1991-6—2000-3 | 欧空局 |
| ERS-2 | AMI | C | 18°~59° | VV | 1995-4— | 欧空局 |
| ADEOS-1 | NSCAT | Ku | 18°~63° | HH, VV | 1996-8—1997-6 | 美国 |
| QuickSCAT | SeaWinds | Ku | 46°, 54° | HH, VV | 1999-7— | 美国 |
| ADEOS-2 | NSCAT | Ku | 46°, 54° | HH, VV | 2002-12—2003-8 | 美国 |
| SZ-4 | CN/SCAT | Ku | 37° | HH, VV | 2002-12— | 中国 |
| MetOp-1 | ASCAT | C | 25°~65° | VV | 2006-10— | 欧空局 |
| OceanSat-1 | OSCAT-1 | Ku | 50°, 57° | HH, VV | 2009— | 印度 |
| HY-2A | HY-2A | Ku | | HH, VV | 2010-8— | 中国 |
| OceanSat-2 | OSCAT-2 | Ku | 50°, 57° | HH, VV | 2016— | 印度 |
| | SMAP | L- | | | 2015-1—2015-7 | 美国 |

于农业各类监测中。综合目前SAR技术可以提供的特征,应用于农业中的特征可划分为四类:后向散射特征、极化特征、干涉特征和层析特征,其中层析特征是干涉或极化干涉特征在垂直空间中的进一步拓展。

3.1 SAR后向散射特征

由于初期(20世纪80年代末—2002年)的SAR数据仅可获得单频率、单极化的影像,因此其可应用的特征仅为后向散射特征。SAR后向散射特征在农业中的应用基本上是基于散射计获得的后向散射特征在农业应用中的进一步验证和深入,因此初期的研究多是对基于散射计数据研究结果的验证,使用的方法也多基于散射计研究的方法和模型^[65-70]。在采用单波段、单极化后向散射特征进行农作物的识别时,由于水稻下垫面(水面)独特的散射机制,使得与其它农作物的区别明显,因此基于后向散射系数的农作物识别多以水稻为研究对象。为了提高识别的精度,基于后向散射的时相特征被用于农作物识别、长势监测及估产中。利用这些特征进行水稻识别时,分类精度可以达到80%, 91%和98%^[65]。然而,这些研究的区域多位于空间异质性比较低的地区,对于地块破碎、种植结构比较复杂的区域,分类识别的效果明显降低^[65,66]。土壤水分和农作物长势参数反演中多通过建立后向散射与反演参数之间的模型来实现,这些模型包括经验模型、半经验模型和机理模型。经验模型通常通过实验观察数据来建立,因此对实验数据获取的条件敏感,例如气象条件、成像几何、农作物情况、农作物类型、物候特征、土壤水分状态等。这些敏感特征会造成反演结果的不确定性,同时降低模型的适用性。由于经验模型的这些局限,一些研究开始发展半经验模型和机理模型。在基于后向散射的裸土水分反演中,采用较多的模型为积分方程模型(Integral Equation Model, IEM)、高级积分方程模型(Advanced Integral Equation Model, AIEM)以及基于这两者改进的相关模型。常用的算法包括变化检测法、回归分析法、基于模型的人工神经网络法等^[67]。用于植被参数反演的具有代表性的半经验模型为水云模型(Water Cloud Model, WCM)^[68],机理模型为密歇根植被散射模型(MIchigan MIcrowave Canopy Scattering, MIMICS)^[69]。这两类模型也常被用于植被覆盖区土壤水分反演时降低植被的影响。为了更精确的提高这两类模型在生长参数反演中的精度,不少学者通过引入更多的特征对其进行了改进^[70-75],文献^[3]综述了这两个模型在农业中的详细应用现状。目前采用雷达数据进行农作物估产中使

用的特征多为后向散射系数。农作物估产方式通过两类方法实现:一是直接采用后向散射系数进行农作物估产;二是通过基于后向散射的生长参数估测结果与农作物生长模型同化进行农作物估产。直接采用后向散射系数进行产量估测通常是建立后向散射系数与产量的关系模型,然后反演产量,属于经验模型,尽管在特定区域可以获得较好的估测精度,但是受到经验估测模型自身缺陷的影响,无法大面积推广^[76,77]。基于SAR遥感信息与农作物生长模型同化的研究于近年来才刚刚展开,目前用于同化的信息主要包括基于SAR后向散射特征反演的生物量和LAI^[78,79]。

3.2 SAR极化特征

全极化SAR数据起源于20世纪90年代初,记录了地物HH, HV, VH和VV, 4种极化状态的散射振幅和相位特征,极化特征的提取通常包括极化合成和极化分解技术。采用极化合成技术可以计算任意一种极化状态的后向散射回波,进而提取地物更多的特征;而通过极化分解技术也可以将地物的特征进一步细化,以此增强地物的探测能力。由于极化特征不仅具有后向散射对农作物生理特征敏感的特征,同时具有对农作物散射方向、形状敏感的极化特征,在农业的各项研究领域均具有极大的潜力,也是目前农业应用中使用最广泛、研究最深入的SAR特征。表3列出了目前极化特征在农业主要领域中的应用现状。

从表3可知,极化特征已应用到农业中的诸多方面。农作物识别和分类是极化特征在农业中应用最早的领域。初期的研究多通过增加不同极化的后向散射特征来提高农作物的分类精度,研究发现随着极化特征的加入,可以将仅采用单一极化特征的农作物分类精度有效提高,部分地区某些农作物的分类精度可提高37%^[91,92]。随着多种极化分解方法的提出,不同学者的研究表明:引入不同的极化分解参数,可以有效提高分类的精度,这些分类结果的精度范围在70%~96%之间变化。分类的对象包括农作物中的玉米、大豆、小麦、水稻等;也包括农作物与森林、裸土、建筑物等^[93-95]。文献^[65]也详细总结了使用这些特征进行分类的方法。

在农田土壤水分反演中,极化特征的加入有效降低了基于后向散射特征反演土壤水分中的不确定性^[96,97]。不少学者提出了多极化数据反演算法来提高土壤水分的反演精度^[98-100],加入极化特征后土壤体积分含水量的反演均方根误差可以低于4%^[98]。极化特征对土壤粗糙度的敏感性最早也通过极化合成参数对其的响应得到证实,研究表明圆极化相关

表 3 极化特征在农业中的应用现状

Tab. 3 Summary of studies using polarimetric characterization

| 应用类型 | SAR参数描述 | 结果 | 参考文献 |
|--------------------|---|---|-----------|
| 农作物分类与识别 | Pauli分解参数, Stokes参数, 基于特征值、特征向量分解参数, Freeman-Durden, Yamaguchi分解参数, Span-Pauli分解参数, $H-A-\alpha$ 分解参数, Cloude分解参数 | (1)加入极化特征, 可以有效提高分类精度; (2)对于不同农作物的可区分性差异明显; (3)在极化特征中加入时相特征可以有效提高农作物分类精度; (4)加入极化分解特征比仅采用简单的线性极化组合的分类精度高; (5)简缩极化特征的分类结果几乎可以达到全极化特征分类的精度水平。 | [3,65,66] |
| 农田参数反演(土壤水分/地表粗糙度) | (1)引入去极化率、同极化相关系数、相干性参数、散射熵和散射角等参数分析土壤水分和后向散射系数的变化关系; (2)采用极化分解的参数, 主要包括Freeman-Durden和特征值分解的参数。 | (1)利用多极化特征可降低采用单极化特征反演土壤水分中的不确定性, 提高反演精度; (2)利用极化分解的参数替代后向散射系数可以提高反演精度; (3)引入极化参数后, 反演结果受到农作物物候期和农作物类型的影响。 | [3,67] |
| 农作物长势参数反演 | 极化合成和极化分解参数; 基于极化合成及分解参数发展的参数; 如各种雷达植被指数、基准高度参数等。 | (1)生长参数包括LAI、生物量和农作物高度; (2)X-、C-波段对LAI变化敏感, (3)反演结果受到农作物物候期和农作物类型的影响; (4)多种极化合成及分解的参数可以获得更高的农作物生长参数反演精度(目前已经用于农作物长势参数反演的参数约为30个)。 | [80-83] |
| 农作物物候期划分 | Cloude-Pottier分解参数、极化比、极化差值比、极化合成参数(极化度)、简缩极化后向散射系数及极化分解参数、Stokes参数 | (1)主要采用时间序列数据进行物候期的划分或监测; (2)方法包括利用分类和时相动态跟踪两类方法; (3)用于监测的数据包括X-和C-波段。 | [9,84-88] |
| 农作物灾害监测 | 极化指数(HH/VV, HH/HV, 表面散射/Span, 二次散射/Span) | (1)不同极化特征对倒伏现象响应差异明显; (2)极化熵、极化指数均可以反映倒伏现象; (3)倒伏发生伴随着散射机制的明显变化, 因此可以通过极化特征表征。 | [89,90] |

参数对土壤粗糙度最为敏感^[101]。随后, 极化分解参数被应用于土壤水分反演中土壤粗糙度影响的剔除, 并在此基础上提出了X-Bragg模型来改进传统土壤水分反演模型——小扰动模型(Small Perturbation Method, SPM)无法表征交叉极化、去极化特征的弊端^[102,103]。随着全极化数据的丰富, 一些研究开始探索更多可以表征土壤粗糙度的特征参数^[104,105]。

极化参数在农作物长势参数中的反演也是目前研究的热点之一, 近年来涌现出不少研究成果。加拿大农业与食品学会的研究团队针对多种农作物, 以Radarsat数据为主要数据源, 开展了多个长势参数的反演及农作物估产研究^[106-108]。国内中科院邵芸团队^[109,110]也采用全极化和简缩极化数据, 以水稻为主要研究对象, 研究了极化特征在农作物长势监测及估产中的应用。Jiao等人^[106]和McNairn等人^[107]采用极化参数(HV强度、基准高度、极化分解的体散射分量等)证实了SAR极化特征对LAI的敏感性, 并通过改进传统的水云模型, 克服了采用后向散射反演LAI的低饱和点的局限, 同时也论证了LAI可以作为农作物估产有效指标。Wiseman等人^[108]则全面分析了C-波段极化参数对玉米、大豆、油菜、春小麦的干生物量的响应情况, 指明各极化参数对农作物的敏感性受到农作物类型和生长物候期的影响, 也表明极化特征在农作物物候期监测中的潜力。Zhang等人^[111]通过提取27个简缩极化参数表明了不同极化参数在农作物生物量、LAI和株高中

反演的潜力。然而, 以上研究多采用极化参数与农作物长势参数直接建立关系来实现反演, 地域依赖性强, 一些研究利用了半经验模型折衷的优势, 将极化特征用于WCM模型来提高反演结果的精度和适用性^[112,113]。SAR技术应用于物候期的识别多数采用了极化特征对农作物生长期结构变化敏感的优势, 首先通过覆盖物候期的SAR极化影像提取极化特征; 然后分析农作物在整个生长过程中各极化参数的变化特征, 进而选取合适的极化参数进行各个物候期的划分, 初期物候期划分的方法多采用影像分类的方法^[84,85]。为了克服该方法中经验阈值鲁棒性低的问题, 一些研究者发展了动态建模的方法, 如Kalman滤波和粒子滤波等方法^[114,115]。考虑到监测物候期中时间序列影像缺失对物候期反演结果的影响问题, 一些研究通过采用替代参数和滤波方法相结合来弥补^[86-88]。

杨浩等人^[90]率先将极化特征用于小麦倒伏灾害的识别, 研究发现小麦倒伏前后, HH和VV极化的散射能量对比会发生明显的反转现象, 并且多个极化组合参数在小麦倒伏前后特征变化显著, 因此这些极化特征可以用于倒伏现象的监测。

极化SAR特征的应用, 使得SAR信息在农业中的应用得到了进一步的深入, 已有这些研究结果均证明极化特征在农业应用中, 特别是在农作物识别、农作物长势参数反演及估产中的巨大潜力, 在未来可能成为精准农业实施重要手段之一。

3.3 SAR干涉特征

干涉技术最初发展的目的是利用简单的相位-高程关系($\varphi = k_z h$)获得对地形高程的测量。传统的干涉测量合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)一般采用单波段、单极化方式进行,不考虑散射体的极化特征,用到的特征包括单极化的干涉相位和干涉幅度特征。极化干涉测量合成孔径雷达(Polarimetric Interferometric Synthetic Aperture Radar, PolInSAR)极化干涉特征在原有干涉幅度和相位特征的基础上又增加了极化特征,其利用全极化观测进行干涉处理,结合了干涉特征对空间分布敏感以及极化特征对散射体物理性质敏感的特性,可以同时把目标的精细结构特征与空间分布特征结合起来,提高干涉应用性能,并区分分辨单元内不同散射机制的垂直分布特征^[116]。

InSAR特征在植被中的应用主要基于干涉获得的相位特征中包含了“植被偏差”引起的相位特征。“植被偏差”引起的相位变化同时受到植被结构和SAR成像参数的影响,为了分析植被结构的影响,PolInSAR被用于“植被偏差”的监测。这些特征最早被用于森林高度的估测,根据可获取的特征、植被散射的特征发展了基于几何关系和基于物理模型的森林高度估测方法^[117]。InSAR和PolInSAR特征在农业中的应用目前主要集中在农作物高度的估测。重轨InSAR数据的时间失相干严重影响着其在植被覆盖区的应用:例如即使仅有24小时时间差的TanDEM数据也会受到时间失相干的影响,尽管如此,该数据的相干性与多种农作物的高度还是具有明显的相关性,在农作物高度估测中极具潜力^[118]。随着PolInSAR数据的丰富,一些研究者提出了适用于极化干涉SAR数据的植被散射模型,用于植被参数的反演。随机体地表散射模型(Random Vegetation over Ground, RVoG)和有向体地表散射模型(Orientation Vegetation over Ground, OVoG)为目前应用最广泛和最有代表性的两类植被散射模型。前者中的RV表示随机体,即电磁波在其中传播时衰减系数与极化状态无关,后者中的OV代表有向体,即电磁波在其中传播时衰减系数是极化的函数^[119,120]。RVoG和OVoG模型经常被用于森林高度的反演,Lopez-Sanchez^[121]率先分析了这两类模型在农作物高度反演中的可行性和局限性,表明OVoG模型更能描述农作物的散射特征,并且基于实验数据证实了其在玉米和水稻高度反演中的可行性。随后基于机载PolInSAR数据的农作物高度反演研究逐渐开展,基于RVoG模型的相位-幅度联合反演法被用于油菜、玉米、小

麦、大麦和甜菜的高度反演,研究结果表明该模型具有农作物类型依赖性,获得的油菜、玉米和甜菜的反演高度较好,标准差在0.20~0.31 m之间,而大麦和燕麦则较差,标准差在0.33~0.61 m之间。随着覆盖全球范围的无时间失相干的TerraSAR/TanDEM星载干涉、极化干涉SAR数据的丰富,基于该数据展开的农作物高度反演的研究近些年开始涌现。Erten等人^[122]和Rossi等人^[123]研究了覆盖水稻整个生长期的相位差变化,并用该信息分析了干涉相位和水稻冠层高度的关系,证实了HH和VV极化的选择会明显影响水稻高度估测结果;Lee等人^[124]基于TerraSAR/TanDEM干涉SAR数据,提出了水稻生长区地相位的估计方法,采用RVoG模型和对照表法反演了研究区水稻的高度,反演结果的RMSE为0.10 m;国贤玉等人^[125]采用双极化TerraSAR/TanDEM干涉SAR数据发展了RVoG模型,并用于水稻高度的反演,研究表明当水稻株高高于0.4 m时,可以取得较好的估测结果,反演值与真值的 R^2 为0.86,均方根误差为6.79 cm。

已有针对不同农作物高度反演的结果充分表明了干涉、极化干涉特征在农作物垂直结构变化相关监测中的潜力。然而由于农作物覆盖区体散射受时间失相干影响严重,使得重轨干涉影像噪声较大,影响反演结果,因此其广泛应用受到了较大的限制。随着无时间失相干数据的出现,使得采用干涉、极化干涉SAR特征进行农作物垂直结构监测成为可能,目前尽管已经展开了一些研究,但是干涉特征在农业应用中的潜力还有待进一步挖掘。

3.4 SAR层析特征

层析SAR技术(SAR Tomography, TomoSAR)的提出是为了实现地物垂直方向上的观测,目前SAR应用中,主要有两种层析技术:一种是多基线SAR层析技术,即在垂直于视线方向上增加多幅干涉天线来对观测场景实现重复观测,相当于在垂直于视线方向上合成一个较大的孔径来获得高度维的特征,通常通过谱分析方法来获得场景沿垂直方向的散射值^[126-128];一种是利用不同极化状态下的干涉相干系数反演植被垂直结构分布的极化相干层析技术,即利用不同极化的干涉相干变化来重建观测场景后向散射随高度变化的方程,然后利用观测的相干数据获得植被高度和地形相位,将获得的植被高度和地形相位特征带入以傅里叶-勒让德级数展开的垂直结构方程,求解各系数获得场景沿垂直方向的散射值^[126,128,129]。多基线SAR层析技术的成像算法包括三大类:非参数谱估计方法、参数谱估计方法、稀疏谱估计方法。稀疏谱估计方法可以有效

的解决SAR层析成像中由于基线非均匀分布采用插值计算方法中计算量大、耗时费力的弊端,提高了层析SAR数据处理的效率,近年来基于此发展了大量相关的成像算法^[130,131]。已有研究发现:单基线极化相干层析技术仅能提高混合表面/体散射的体散射层深度和地表相位特征,无法真正得到目标的垂直向结构信息。双基线比单基线的分辨率高,但当基线数量超过3时,该方法的稳定性下降;此外该方法需要输入先验知识,如地相位和植被高度,这些信息通过PolInSAR技术获得,因此一方面存在对植被高度的低估,另一方面很大程度上依赖PolInSAR技术的发展^[129,131]。

SAR层析技术的应用目前仍然处在应用研究的初期,其在农业中的应用也刚刚展开。SAR层析技术目前被广泛用于森林生物量的反演^[131],但是由于农作物生长变化的快速性及其复杂环境场景的影响,目前的研究多集中在农作物高度参数反演、各个频段农作物整个生长期垂直方向的后向散射变化、农作物覆盖区的地表、体散射的区分中^[3,132-139]。初期研究者们采用室内和室外地基雷达实验数据对X-, C-和L-波段小麦、玉米的三维散射剖面进行了研究,探索了其受到极化方式、入射角和频率的影响^[133-135]。随着机载TomoSAR数据的出现, Pichierrri等人^[139]采用机载TomoSAR数据研究了层析特征在农田场景的应用可行性。他们以OV_oG模型为基础,采用双基线极化相干层析的方法分析了X-, C-和L-波段在小麦、燕麦、玉米和油菜高度反演中的可行性。研究结果指出了基线长度、频率对不同农作物高度反演的影响:基线较小时,极化干涉相干性与农作物高度的敏感性降低;L-波段用于油菜、玉米高度反演时,均方根误差约为10%,而X-波段用于大麦和小麦等谷物的高度反演时,均方根误差低于24%。Joerg等人^[132]采用Capon非参数谱滤波方法获得了玉米、大麦和小麦在X-, C-和L-波段不同生长期的垂直方向后向散射剖面图。从获取的垂直剖面图中可以看出,玉米覆盖区具有明显的二次散射机制;小麦冠层具有明显的表面散射机制,并且田垄散射的影响明显;大麦的HH散射特征几乎不可见。基于这些农作物覆盖区的散射剖面,这些研究者们进一步分析了采用其进行体散射和地表散射机制分离的可行性及有效的方法。由于农作物在整个生长周期中变化的快速性,时间序列TomoSAR数据的获取对其在农业中的深入应用也有着显著的影响,这些研究同时也说明了时间失相干对极化干涉相干层析特征在农作物监测中的影响^[132,140]。

SAR层析特征在提高农作物分类精度、农作物

高度和生物量反演精度中具有重要的潜在应用价值。然而目前该特征在农业中的应用还较少,反演的方法、应用的农作物对象等还存在较多的探索空间,随着多基站SAR观测技术的实现,新体制SAR卫星计划的实施,层析SAR特征在农业中的应用需要未来进一步深入研究。

4 总结与展望

4.1 总结

目前雷达技术在农业中的多个方面均展开了应用研究,也取得了丰硕的研究成果。然而,在农业应用中,不同的利益相关组织或个人关注和需求的农情信息不同,对雷达技术在农业各领域中的应用的需求也不尽相同。尽管目前在各个领域都有一些研究结论,但是针对具体的需求和深入的应用都需要进一步的探索 and 开发。例如在农作物识别和分类方面,尽管也出现了全球尺度的分类产品,但是这些产品偏重于用地表覆盖类型的划分,而精细的农作物类型的划分则存在不少问题;此外农作物识别和分类的研究成果多集中在成片的同质性区域,对于斑块破碎、种植类型复杂的区域,则很难达到需求的精度。以精准农业为例,在具体的需求中更需要了解在农业中这些田地是如何使用的,在整个农作物生长过程中田间操作是如何实施的。农业灾害类型较多,多种灾害对农作物产量影响严重,特别是洪涝灾害监测是雷达监测的优势,然而目前相关的研究也开展较少。粮食产量的预估是目前各国政府和相关利益人或组织均关注的问题,目前基于雷达技术的估产研究较少,方法多集中在利用后向散射系数与农作物产量做简单的经验统计,尽管可以得到粗略的产量结果,但是估计结果的质量如何,相关的研究则展开较少,已有的研究也多集中在农田同质性较强的国家和地区。尽管目前也采用同化的方法展开了部分估产的研究,但是目前还集中在理论的研究,并且其在大区域、异质性强的地区的研究也相对较少。

雷达技术的发展过程本质上也是对微波电磁波资源不断发掘和利用的过程。通过对各类雷达特征在农业中应用可知:雷达各类特征在农业中的应用差异较大,目前应用最广泛的特征是后向散射特征和极化特征,而SAR影像中的干涉、极化干涉和层析特征在农业应用中的相关研究则刚刚展开。后向散射系数应用较多的领域是农作物长势参数和土壤水分的反演。在长势参数反演中多基于经验和半经验模型,研究对象主要为水稻,而不同的农作物、相同农作物在不同生长期的散射机制变化明显,直

接影响后向散射特征,这使得这些经验和半经验模型的广泛应用受到极大的限制;另外目前的半经验模型和机理模型多为非相干散射模型,无法利用SAR数据的相位特征。土壤水分反演的模型多基于特定的土壤观测数据建立,在大面积的土壤水分反演时不确定性较大,另外对相位特征也没有有效的利用。极化特征应用较成熟的领域是农作物识别、分类和农作物长势参数反演。目前基于极化特征的农作物分类局限在同质性区域,散射机制较简单的几类农作物的分类中,对于一些散射机制复杂的作物,其极化散射机理仍然不明确,其相应的分类方法也还在研究中。在采用极化分解参数进行的农作物长势参数反演中,由于多数分解方法假设农作物冠层由匀质散射体构成,这样构建的模型无法描述农作物冠层复杂的散射情况,从而使得反演结果不确定性增大、适用性降低。此外,长势参数反演和农作物估产的研究中,目前对于农作物生长的水文、气象、环境等影响因子考虑较少,无法全面揭示农作物生长及产量形成的机制。

4.2 展望

雷达遥感的独特优势使得其在农业遥感监测中可以发挥重要的作用,经过几十年的发展,雷达在农业中的应用由初期的地面观测,逐步发展到机载和星载观测。传感器从最初的散射计发展到现在的多频、多极化、多角度、多时相等多维SAR观测。目前雷达遥感在农作物识别和分类、农田参数反演、农作物长势参数反演、农作物物候期划分等方面均取得了诸多的进展,但在农作物灾害监测和农作物估产中的研究则还处在实验阶段,并且目前在农业领域应用相关的技术和方法多数仍处在研究阶段,在实际应用中还未进行大范围推广和实施。造成该现状的原因一方面是由于发展的方法、模型等还具有一定的局限性,需要进一步改进和发展;另一方面是由于目前支撑农业实时监测的SAR数据资源还相对匮乏,像极化干涉SAR数据、层析SAR数据等目前多依赖国外的机载和部分星载实验数据,使得深入分析和研究稳健的算法和模型受到限制。在灾害监测中,由于对多种灾害的微波散射机制还未完全明确,因此目前应用的还较少;而作物的准确估产又依赖于作物生长状态,而作物生长状态信息与SAR信息融合的研究还处于研究的初级阶段。在目前农业应用中,被动微波遥感数据由于获取方便、时间分辨率较高且数据处理简单,可以成为雷达遥感在农业中应用的有效补充。尽管如此,雷达技术在农业中的应用已经展现出极大的优势和潜力,正成为推动精准农业、智慧农业有效实施、

高效快速发展的有力手段。随着SAR数据类型、成像模式丰富,基于多频、多极化、多角度、多时相等多维SAR观测将成为可能,未来农业领域的应用不仅要细化各维度SAR特征在农业各领域的方法和模型,还要结合农业行业各相关利益人的需求,从而推动雷达技术在农业领域的深入、有效利用。

参考文献

- [1] FAWWAZ T U, R K M, ADRIAN K F and FENG J, *et al.* 侯世昌, 马锡冠等, 译. 微波遥感[M]. 科学出版社, 1988, 1-10.
FAWWAZ T U, R K M, ADRIAN K F, *et al.* HOU Shichang, MA Xiguan, *et al.* Translation. Microwave Remote Sensing[M]. Science Press, 1988, 1-10.
- [2] 王迪, 周清波, 陈仲新, 等. 基于合成孔径雷达的农作物识别研究进展[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 203-212. doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.16.027.
WANG Di, ZHOU Qingbo, CHEN Zhongxin, *et al.* Research advances on crop identification using synthetic aperture radar[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(16): 203-212. doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.16.027.
- [3] LIU Chang'an, CHEN Zhongxin, SHAO Yun, *et al.* Research advances of SAR remote sensing for agriculture applications: A review[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(3): 506-525. doi: 10.1016/S2095-3119(18)62016-7.
- [4] 施建成, 杜阳, 杜今阳, 等. 微波遥感地表参数反演进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 55(7): 1052-1078. doi: 10.1007/s11430-012-4444-x.
SHI Jiancheng, DU Yang, DU Jinyang, *et al.* Progresses on microwave remote sensing of land surface parameters[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(7): 1052-1078. doi: 10.1007/s11430-012-4444-x.
- [5] 张亚红, 吴娇娇, 胥喆, 等. 合成孔径雷达在农作物长势监测中的应用[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(27): 220-222, 244. doi: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2016.27.074.
ZHANG Yahong, WU Jiaojiao, XU Zhe, *et al.* Application of synthetic aperture radar in crop growth monitoring[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(27): 220-222, 244. doi: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2016.27.074.
- [6] 李正国, 杨鹏, 周清波, 等. 基于时序植被指数的华北地区作物物候期/种植制度的时空格局特征[J]. 生态学报, 2008, 29(11): 6216-6226. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.11.057.
LI Zhengguo, YANG Peng, ZHOU Qingbo, *et al.* Research on spatiotemporal pattern of crop phenological characteristics and cropping system in North China based on NDVI time series data[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 29(11): 6216-6226. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.

- 2009.11.057.
- [7] 李正国, 唐华俊, 杨鹏, 等. 植被物候特征的遥感提取与农业应用综述[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(5): 20–28. doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20120504.
LI Zhengguo, TANG Huajun, YANG Peng, *et al.* Progress in remote sensing of vegetation phenology and its application in agriculture[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2012, 33(5): 20–28. doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20120504.
- [8] 卢必慧, 于堃. 遥感信息与作物生长模型同化应用的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(10): 9–13. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2018.10.003.
LU Bihui and YU Kun. Research progress on assimilation of remote sensing information and crop growth model[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(10): 9–13. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2018.10.003.
- [9] 李平湘, 赵伶俐, 任焯仙. 合成孔径雷达在农业监测中的应用和展望[J]. 地理空间信息, 2017, 15(3): 1–4. doi: 10.3969/j.issn.1672-4623.2017.03.001.
LI Pingxiang, ZHAO Lingli, and REN Yexian. Outlook and application of the synthetic aperture radar in agriculture monitoring[J]. *Geospatial Information*, 2017, 15(3): 1–4. doi: 10.3969/j.issn.1672-4623.2017.03.001.
- [10] 刘健, 郭交, 韩文霆. 基于合成孔径雷达的土壤水分反演研究进展[J]. 三峡生态环境监测, 2020, in press. doi: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1214.X.20200312.1142.002.html>.
LIU jian, GUO jiao, and HAN wenting. Advance in research on soil moisture retrieval using synthetic aperture radar[J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2020, in press. doi: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1214.X.20200312.1142.002.html>.
- [11] MCNAIRN H and SHANG Jiali. A review of multitemporal Synthetic Aperture Radar (SAR) for crop monitoring[J]. *Multitemporal Remote Sensing*, 2018, 20: 317–340. doi: 10.1007/978-3-319-47037-5_15.
- [12] 黄健熙, 黄海, 马鸿元, 等. 遥感与作物生长模型数据同化应用综述[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 144–156. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.21.018.
HUANG Jianxi, HUANG Hai, MA Hongyuan, *et al.* Review on data assimilation of remote sensing and crop growth models[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(21): 144–156. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.21.018.
- [13] HUANG Jianxi, GÓMEZ-DANS J L, HUANG Hai, *et al.* Assimilation of remote sensing into crop growth models: Current status and perspectives[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 276/277: 107609. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.06.008.
- [14] 吴一戎. 多维度合成孔径雷达成像概念[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 135–142. doi: 10.3724/SP.J.1300.2013.13047.
WU Yirong. Concept of multidimensional space joint-observation SAR[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 135–142. doi: 10.3724/SP.J.1300.2013.13047.
- [15] WOODHOUSE I H. Introduction to Microwave Remote Sensing[M], New York, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006, 221–257. doi: 10.1111/j.1477-9730.2009.00531_1.x
- [16] ULABY F and MOORE R. Radar sensing of soil moisture[C]. 1973 Antennas and Propagation Society International Symposium, Boulder, USA, 1973: 362–365. doi: 10.1109/APS.1973.1147125.
- [17] ULABY F. Radar measurement of soil moisture content[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1974, 22(2): 257–265. doi: 10.1109/TAP.1974.1140761.
- [18] ULABY F. Radar response to vegetation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1975, 23(1): 36–45. doi: 10.1109/TAP.1975.1140999.
- [19] ULABY F, BUSH T, and BATLIVALA P P. Radar response to vegetation II: 8–18 GHz band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1975, 23(5): 608–618. doi: 10.1109/tap.1975.1141133.
- [20] ULABY F T and BATLIVALA P P. Optimum radar parameters for mapping soil moisture[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1976, 14(2): 81–93. doi: 10.1109/TGE.1976.294414.
- [21] ULABY F T, BATLIVALA P P, and DOBSON M C. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part I-bare soil[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1978, 16(4): 286–295. doi: 10.1109/TGE.1978.294586.
- [22] ULABY F T, BRADLEY G A, and DOBSON M C. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part II-vegetation-covered soil[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1979, 17(2): 33–40. doi: 10.1109/TGE.1979.294626.
- [23] ULABY F T, ASLAM A, and DOBSON M C. Effects of vegetation cover on the radar sensitivity to soil moisture[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1982, GE-20(4): 476–481. doi: 10.1109/TGRS.1982.350413.
- [24] DE LOOR G P, JURRIENS A A, and GRAVESTELJN H. The radar backscatter from selected agricultural crops[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1974, 12(2): 70–77. doi: 10.1109/tge.1974.294337.
- [25] BOUMAN B A M and VAN KASTEREN H W J. Ground-based X-band (3-cm wave) radar backscattering of agricultural crops. I. Sugar beet and potato; backscattering and crop growth[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990,

- 34(2): 93–105. doi: [10.1016/0034-4257\(90\)90101-q](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90101-q).
- [26] BOUMAN B A M and VAN KASTEREN H W J. Ground-based X-band (3-cm wave) radar backscattering of agricultural crops. II. Wheat, barley, and oats; the impact of canopy structure[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 34(2): 107–119. doi: [10.1016/0034-4257\(90\)90102-R](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90102-R).
- [27] BOUMAN B A M. Crop parameter estimation from ground-based X-band (3-cm wave) radar backscattering data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 37(3): 193–205. doi: [10.1016/0034-4257\(91\)90081-g](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90081-g).
- [28] INOUE Y, KUROSU T, MAENO H, *et al.* Season-long daily measurements of multifrequency (Ka, Ku, X, C, and L) and full-polarization backscatter signatures over paddy rice field and their relationship with biological variables[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 194–204. doi: [10.1016/S0034-4257\(01\)00343-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00343-1).
- [29] BRISCO B, BROWN R J, GAIRNS J G, *et al.* Temporal ground-based scatterometer observations of crops in Western Canada[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1992, 18(1): 14–21. doi: [10.1080/07038992.1992.10855138](https://doi.org/10.1080/07038992.1992.10855138).
- [30] BRISCO B, BROWN R J, KOEHLER J A, *et al.* The diurnal pattern of microwave backscattering by wheat[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 34(1): 37–47. doi: [10.1016/0034-4257\(90\)90082-w](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90082-w).
- [31] MCNAIRN H, DUGUAY C, BOISVERT J, *et al.* Defining the sensitivity of multi-frequency and multi-polarized radar backscatter to post-harvest crop residue[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2001, 27(3): 247–263. doi: [10.1080/07038992.2001.10854941](https://doi.org/10.1080/07038992.2001.10854941).
- [32] SMITH A M and MAJOR D J. Radar backscatter and crop residues[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1996, 22(3): 243–247. doi: [10.1080/07038992.1996.10855179](https://doi.org/10.1080/07038992.1996.10855179).
- [33] BRISCO B, BROWN R J, SNIDER B, *et al.* Tillage effects on the radar backscattering coefficient of grain stubble fields[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(11): 2283–2298. doi: [10.1080/01431169108955258](https://doi.org/10.1080/01431169108955258).
- [34] SONG Dongsheng, ZHAO Kai, and GUAN Zhi. Advances in research on soil moisture by microwave remote sensing in China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2007, 17(2): 186–191. doi: [10.1007/s11769-007-0186-7](https://doi.org/10.1007/s11769-007-0186-7).
- [35] 王丽巍, 吴季, 张玮, 等. FM-CW制式陆基微波散射计与 IEM模型联合反演地表土壤湿度研究[J]. *电子学报*, 2002, 30(3): 404–406. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2002.03.025](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2002.03.025).
WANG Liwei, WU Ji, ZHANG Wei, *et al.* Study on soil moisture with ground-based scatterometer and IEM model[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(3): 404–406. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2002.03.025](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2002.03.025).
- [36] 赵昌龄, 郝卫星, 李生平, 等. 微波遥感裸露土壤和植被覆盖土壤含水量的研究[J]. *土壤学报*, 1992, 29(3): 310–317. doi: [10.3321/j.issn:0564-3929.1992.03.004](https://doi.org/10.3321/j.issn:0564-3929.1992.03.004).
- ZHAO Changling, HAO Weixing, LI Shengping, *et al.* Study on microwave remote sensing for bare and vegetation-covered soil moisture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(3): 310–317. doi: [10.3321/j.issn:0564-3929.1992.03.004](https://doi.org/10.3321/j.issn:0564-3929.1992.03.004).
- [37] O'NEILL P E, LANG R H, KURUM M, *et al.* Multi-sensor microwave soil moisture remote sensing: NASA's Combined Radar/Radiometer (ComRAD) System[C]. 2006 IEEE MicroRad, Puerto Rico, USA, 2006: 50–54. doi: [10.1109/MICRAD.2006.1677061](https://doi.org/10.1109/MICRAD.2006.1677061).
- [38] JACKSON T J, COSH M, BINDLISH R, *et al.* Soil Moisture Active Passive (SMAP) Calibration and validation plan and current activities[C]. 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, USA, 2010: 25–30.
- [39] SRIVASTAVA P K, O'NEILL P, COSH M, *et al.* Evaluation of radar vegetation indices for vegetation water content estimation using data from a ground-based SMAP simulator[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Milan, Italy, 2015: 1296–1299. doi: [10.1109/IGARSS.2015.7326012](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326012).
- [40] NAGARAJAN K, LIU P W, DEROO R, *et al.* Automated L-band radar system for sensing soil moisture at high temporal resolution[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(2): 504–508. doi: [10.1109/LGRS.2013.2270453](https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2270453).
- [41] LIU Pangwei, JUDGE J, DEROO R D, *et al.* Dominant backscattering mechanisms at L-band during dynamic soil moisture conditions for sandy soils[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 178: 104–112. doi: [10.1016/j.rse.2016.02.062](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.062).
- [42] KRUL L. Some results of microwave remote sensing research in the Netherlands with a view to land applications in the 1990s[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9(10/11): 1553–1563. doi: [10.1080/01431168808954960](https://doi.org/10.1080/01431168808954960).
- [43] SNOEIJ P and SWART P J F. The DUT airborne scatterometer[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, 8(11): 1709–1716. doi: [10.1080/01431168708954810](https://doi.org/10.1080/01431168708954810).
- [44] BERNARD R, VIDAL-MADJAR D, BAUDIN F, *et al.* Data processing and calibration for an airborne scatterometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, GE-24(5): 709–716. doi: [10.1109/TGRS.1986.289618](https://doi.org/10.1109/TGRS.1986.289618).
- [45] BOUMAN B A M and HOEKMAN D H. Multi-temporal, multi-frequency radar measurements of agricultural crops during the Agriscatt-88 campaign in The Netherlands[J].

- International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(8): 1595–1614. doi: [10.1080/01431169308953988](https://doi.org/10.1080/01431169308953988).
- [46] FERRAZZOLI P, PALOSCIA S, PAMPALONI P, *et al.* Sensitivity of microwave measurements to vegetation biomass and soil moisture content: A case study[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(4): 750–756. doi: [10.1109/36.158869](https://doi.org/10.1109/36.158869).
- [47] BENALLEGUE M, NORMAND M, GALLE S, *et al.* Soil moisture assessment at a basin scale using active microwave remote sensing: The Agriscatt '88 Airborne Campaign on the Orgeval watershed[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(3): 645–656. doi: [10.1080/01431169408954102](https://doi.org/10.1080/01431169408954102).
- [48] 张毅, 蒋兴伟, 林明森, 等. 星载微波散射计的研究现状及发展趋势[J]. 遥感信息, 2009, (6): 87–94. doi: [10.3969/j.issn.1000-3177.2009.06.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3177.2009.06.019).
- ZHANG Yi, JIANG Xingwei, LIN Mingsen, *et al.* The present research status and development trend of spaceborne microwave scatterometer[J]. *Remote Sensing Information*, 2009(6): 87–94. doi: [10.3969/j.issn.1000-3177.2009.06.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3177.2009.06.019).
- [49] KEYDEL W. Microwave sensors for remote sensing of land and sea surfaces[J]. *Geojournal*, 1991, 24(1): 7–25. doi: [10.1007/BF00213053](https://doi.org/10.1007/BF00213053).
- [50] LONG D. Radar, Scatterometers[M]. NJOKU E G. Encyclopedia of Remote Sensing. New York, USA: Springer, 2014: 529. doi: [10.1007/978-0-387-36699-9_136](https://doi.org/10.1007/978-0-387-36699-9_136).
- [51] 彭海龙, 穆博, 林明森, 等. 基于亚马逊热带雨林的HY-2卫星微波散射计在轨测量性能分析[J]. 中国工程科学, 2014, 16(6): 33–38. doi: [10.3969/j.issn.1009-1742.2014.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1742.2014.06.005).
- PENG Hailong, MU Bo, LIN Mingsen, *et al.* Performance analysis of the HY-2 satellite microwave scatterometer measurements based on tropical rainforests[J]. *Engineering Science*, 2014, 16(6): 33–38. doi: [10.3969/j.issn.1009-1742.2014.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1742.2014.06.005).
- [52] WOODHOUSE I H and HOEKMAN D H. Determining land-surface parameters from the ERS wind scatterometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 126–140. doi: [10.1109/36.823907](https://doi.org/10.1109/36.823907).
- [53] WOODHOUSE I H and HOEKMAN D H. A model-based determination of soil moisture trends in Spain with the ERS-scatterometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(4): 1783–1793. doi: [10.1109/36.851762](https://doi.org/10.1109/36.851762).
- [54] FRISON P L, MOUGIN E, JARLAN L, *et al.* Comparison of ERS wind-scatterometer and SSM/I data for Sahelian vegetation monitoring[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(4): 1794–1803. doi: [10.1109/36.851763](https://doi.org/10.1109/36.851763).
- [55] FROLKING S, MILLIMAN T, MCDONALD K, *et al.* Evaluation of the SeaWinds scatterometer for regional monitoring of vegetation phenology[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D17): D17302. doi: [10.1029/2005jd006588](https://doi.org/10.1029/2005jd006588).
- [56] LU Linlin, GUO Huadong, WANG Cuizhen, *et al.* Assessment of the SeaWinds scatterometer for vegetation phenology monitoring across China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(15): 5551–5568. doi: [10.1080/01431161.2013.794986](https://doi.org/10.1080/01431161.2013.794986).
- [57] WEN Jun and SU Zhongbo. The estimation of soil moisture from ERS wind scatterometer data over the Tibetan plateau[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2003, 28(1/3): 53–61. doi: [10.1016/S1474-7065\(03\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(03)00007-X).
- [58] WAGNER W, SCIPAL K, PATHE C, *et al.* Evaluation of the agreement between the first global remotely sensed soil moisture data with model and precipitation data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D19): 4611. doi: [10.1029/2003jd003663](https://doi.org/10.1029/2003jd003663).
- [59] BARTALIS Z, WAGNER W, NAEIMI V, *et al.* Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced SCATterometer (ASCAT)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 34(20): L20401. doi: [10.1029/2007gl031088](https://doi.org/10.1029/2007gl031088).
- [60] DORIGO W A, GRUBER A, DE JEU R A M, *et al.* Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 380–395. doi: [10.1016/j.rse.2014.07.023](https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.023).
- [61] KIM S B, TSANG L, JOHNSON J T, *et al.* Soil moisture retrieval using time-series radar observations over bare surfaces[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(5): 1853–1863. doi: [10.1109/TGRS.2011.2169454](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2169454).
- [62] KIM S B, MOGHADDAM M, TSANG L, *et al.* Models of L-band radar backscattering coefficients over global terrain for soil moisture retrieval[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 1381–1396. doi: [10.1109/TGRS.2013.2250980](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2250980).
- [63] NAEIMI V, SCIPAL K, BARTALIS Z, *et al.* An improved soil moisture retrieval algorithm for ERS and METOP scatterometer observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 1999–2013. doi: [10.1109/tgrs.2008.2011617](https://doi.org/10.1109/tgrs.2008.2011617).
- [64] WAGNER W, LEMOINE G, and ROTT H. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(2): 191–207. doi: [10.1016/S0034-4257\(99\)00036-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00036-X).

- [65] 孙政, 周清波, 杨鹏, 等. 基于星载极化SAR数据的农作物分类识别进展评述[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11): 63–71.
SUN Zheng, ZHOU Qingbo, YANG Peng, *et al.* Review of crop classification and recognition based on spaceborne polarimetric SAR data[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(11): 63–71.
- [66] 徐昆鹏. 基于极化散射特征与SVM的极化SAR影像分类方法研究[D]. [硕士学位论文], 内蒙古农业大学, 2018: 40–44.
XU Kunpeng. Study on polarimetric SAR image classification method based on polarization scattering characteristics and SVM[D]. [Master dissertation], Inner Mongolia Agricultural University, 2018: 40–44.
- [67] 李俐, 王荻, 王鹏新, 等. 合成孔径雷达土壤水分反演研究进展[J]. 资源科学, 2015, 37(10): 1929–1940.
LI Li, WANG Di, WANG Pengxin, *et al.* Progress on monitoring soil moisture using SAR data[J]. *Resources Science*, 2015, 37(10): 1929–1940.
- [68] ATTEMA E P W and ULABY F T. Vegetation modeled as a water cloud[J]. *Radio Science*, 1978, 13(2): 357–364. doi: [10.1029/RS013i002p00357](https://doi.org/10.1029/RS013i002p00357).
- [69] ULABY F T, MCDONALD K, SARABANDI K, *et al.* Michigan microwave canopy scattering models (MIMICS)[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 'Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century', Edinburgh, UK, 1988: 1009. doi: [10.1109/IGARSS.1988.570506](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1988.570506).
- [70] TOURE A, THOMSON K P B, EDWARDS G, *et al.* Adaptation of the MIMICS backscattering model to the agricultural context-wheat and canola at L and C bands[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(1): 47–61. doi: [10.1109/36.285188](https://doi.org/10.1109/36.285188).
- [71] LIN Hui, CHEN Jinsong, PEI Zhiyuan, *et al.* Monitoring sugarcane growth using ENVISAT ASAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2572–2580. doi: [10.1109/TGRS.2009.2015769](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2015769).
- [72] 李成钢. 冬小麦微波散射特性及参数反演研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2013: 47–51.
LI Chenggang. Research on the inversion of parameters and microwave scattering characteristics of winter wheat[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 47–51.
- [73] 吴学睿, 李颖, 李传龙. 基于Bi-Mimics模型的GNSS-R农作物生物量监测理论研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(2): 220–230. doi: [10.11873/j.issn.1004-0323.2012.2.220](https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2012.2.220).
WU Xuerui, LI Ying, and LI Chuanlong. Research on crop biomass monitoring using GNSS-R technique based on bi-mimics model[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(2): 220–230. doi: [10.11873/j.issn.1004-0323.2012.2.220](https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2012.2.220).
- [74] 贾明权. 水稻微波散射特性研究及参数反演[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2013: 95–114.
JIA Mingquan. Research on rice microwave scattering mechanism and parameter inversion[D]. [Ph. D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 95–114.
- [75] 陶亮亮, 李京, 蒋金豹, 等. 利用RADARSAT-2雷达数据与改进的水云模型反演冬小麦叶面积指数[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(2): 236–242. doi: [10.7606/j.issn.1009-1041.2016.02.15](https://doi.org/10.7606/j.issn.1009-1041.2016.02.15).
TAO Liangliang, LI Jing, JIANG Jimbao, *et al.* Leaf area index inversion of winter wheat using Radarsat-2 data and modified water-cloud model[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(2): 236–242. doi: [10.7606/j.issn.1009-1041.2016.02.15](https://doi.org/10.7606/j.issn.1009-1041.2016.02.15).
- [76] 陈磊, 范伟, 陈娟, 等. 基于星载SAR的冬小麦估产模型比较分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(10): 256–260. doi: [10.11924/j.issn.1000-6850.casb14110161](https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb14110161).
CHEN Lei, FAN Wei, CHEN Juan, *et al.* Comparative analysis of winter wheat yield estimation model based on SAR[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(10): 256–260. doi: [10.11924/j.issn.1000-6850.casb14110161](https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb14110161).
- [77] 范伟, 陈磊, 荀尚培, 等. 基于双极化双时相RADARSAT-2的冬小麦估产模型研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(20): 284–289. doi: [10.11924/j.issn.1000-6850.2013-2242](https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.2013-2242).
FAN Wei, CHEN Lei, XUN Shangpei, *et al.* Model for estimating winter wheat yield based on RADARSAT-2 of double-polarization and double-time phase[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(20): 284–289. doi: [10.11924/j.issn.1000-6850.2013-2242](https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.2013-2242).
- [78] 谭正. 基于SAR数据和作物生长模型同化的水稻长势监测与估产研究[D]. [硕士学位论文], 中国地质大学(北京), 2012: 19–25.
TAN Zheng. Study on rice growth monitoring and yield prediction based on assimilation of SAR data and crop growth model[D]. [Master dissertation], China University of Geosciences, 2012: 19–25.
- [79] RINALDI M, SATALINO G, MATTIA F, *et al.* Assimilation of COSMO-SkyMed-derived LAI maps into the AQUATER crop growth simulation model. Capitanata (Southern Italy) case study[J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2013, 46(1): 891–908. doi: [10.5721/EuJRS.20134653](https://doi.org/10.5721/EuJRS.20134653).
- [80] YANG Hao, YANG Guijun, *et al.* In-season biomass estimation of oilseed rape (*Brassica napus* L.) using fully polarimetric SAR imagery[J]. *Precision Agriculture*, 2019, 20: 630–648. doi: [10.1007/s11119-018-9587-0](https://doi.org/10.1007/s11119-018-9587-0).
- [81] MCNAIRN H and BRISCO B, *et al.* The Application of C-

- band Polarimetric SAR for Agriculture: A Review[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, 30(3): 525–542. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2322311](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2322311).
- [82] ZHANG W, CHEN E, LI Z, *et al.* Using compact polarimetric parameters for rape (*Brassica napus* L.) LAI inversion[C]. The IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Texas, USA, 2017: 5846–5849. doi: [10.1109/IGARSS.2017.8128338](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8128338).
- [83] ZHANG Wangfei, CHEN Erxue, LI Zengyuan, *et al.* Rape (*Brassica napus* L.) growth monitoring and mapping based on radarsat-2 time-series data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 206. doi: [10.3390/rs10020206](https://doi.org/10.3390/rs10020206).
- [84] LOPEZ-SANCHEZ J M, CLOUDE S R, and BALLESTER-BERMAN J D. Rice phenology monitoring by means of SAR polarimetry at X-Band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(7): 2695–2709. doi: [10.1109/TGRS.2011.2176740](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2176740).
- [85] LOPEZ-SANCHEZ J M, VICENTE-GUIJALBA F, BALLESTER-BERMAN J D, *et al.* Polarimetric response of rice fields at C-Band: Analysis and phenology retrieval[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2977–2993. doi: [10.1109/TGRS.2013.2268319](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2268319).
- [86] WANG Hongquan, MAGAGI R, GOÏTA K, *et al.* Crop phenology retrieval via polarimetric SAR decomposition and Random Forest algorithm[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111234. doi: [10.1016/j.rse.2019.111234](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111234).
- [87] CANISIUS F, SHANG Jiali, LIU Jiangui, *et al.* Tracking crop phenological development using multi-temporal polarimetric Radarsat-2 data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 210: 508–518. doi: [10.1016/j.rse.2017.07.031](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.031).
- [88] MCNAIRN H, JIAO Xianfeng, PACHECO A, *et al.* Estimating canola phenology using synthetic aperture radar[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 219: 196–205. doi: [10.1016/j.rse.2018.10.012](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.012).
- [89] YANG Hao, CHEN Erxue, LI Zengyuan, *et al.* Wheat lodging monitoring using polarimetric index from RADARSAT-2 data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 34: 157–166. doi: [10.1016/j.jag.2014.08.010](https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.010).
- [90] 杨浩. 基于时间序列全极化与简缩极化SAR的作物定量监测研究[D]. [博士学位], 中国林业科学研究院, 2015: 45–58.
YANG Hao. Study on quantitative crop monitoring by time series of fully polarimetric and compact polarimetric SAR imagery[D]. [Ph. D. dissertation], Chinese Academy of Forestry, 2015: 45–58.
- [91] MCNAIRN H, VAN DER SANDEN J J, BROWN R J, *et al.* The potential of RADARSAT-2 for crop mapping and assessing crop condition[C]. The 2nd International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Florida, USA, 2000: 81–88. doi: [10.4095/219589](https://doi.org/10.4095/219589).
- [92] 东朝霞, 王迪, 周清波, 等. 基于SAR遥感的北方旱地秋收作物识别研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2016, 37(8): 27–36. doi: [10.7621/cjarrp.1005-9121.20160804](https://doi.org/10.7621/cjarrp.1005-9121.20160804).
- DONG Zhaoxia, WANG Di, ZHOU Qingbo, *et al.* Dryland crop identification based on synthetic aperture radar in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(8): 27–36. doi: [10.7621/cjarrp.1005-9121.20160804](https://doi.org/10.7621/cjarrp.1005-9121.20160804).
- [93] 化国强, 王晶晶, 黄晓军, 等. 基于全极化SAR数据散射机理的农作物分类[J]. *江苏农业学报*, 2011, 27(5): 978–982. doi: [10.3969/j.issn.1000-4440.2011.05.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-4440.2011.05.011).
- HUA Guoqiang, WANG Jingjing, HUANG Xiaojun, *et al.* Crop classification based on scattering model using full-polarization SAR data[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 27(5): 978–982. doi: [10.3969/j.issn.1000-4440.2011.05.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-4440.2011.05.011).
- [94] 李坤, 邵芸, 张凤丽. 基于RadarSat-2全极化数据的水稻识别[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(1): 86–93. doi: [10.11873/j.issn.1004-0323.2012.1.86](https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2012.1.86).
- LI Kun, SHAO Yun, and ZHANG Fengli. Extraction of rice based on quad-polarization RadarSat-2 Data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(1): 86–93. doi: [10.11873/j.issn.1004-0323.2012.1.86](https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2012.1.86).
- [95] MCNAIRN H, SHANG Jiali, JIAO Xianfeng, *et al.* The contribution of ALOS PALSAR multipolarization and polarimetric data to crop classification[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12): 3981–3992. doi: [10.1109/TGRS.2009.2026052](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2026052).
- [96] DUBOIS P C, VAN ZYL J, and ENGMAN T. Measuring soil moisture with imaging radars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(4): 915–926. doi: [10.1109/36.406677](https://doi.org/10.1109/36.406677).
- [97] SHI Jiancheng, WANG J R, HSU A Y, *et al.* Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1254–1266. doi: [10.1109/36.628792](https://doi.org/10.1109/36.628792).
- [98] SHI Jiancheng and CHEN K S. Estimation of bare surface soil moisture with L-band multi-polarization radar measurements[C]. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005: 2194. doi: [10.1109/IGARSS.2005.1526454](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2005.1526454).
- [99] HAJNSEK I, PAPPATHANASSIOU K P, REIGBER A, *et al.* Soil-moisture estimation using polarimetric SAR data[C]. IEEE 1999 International Geoscience and Remote

- Sensing Symposium, Hamburg, Germany, 1999: 2440–2442. doi: [10.1109/IGARSS.1999.771536](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.771536).
- [100] PIERDICCA N, CASTRACANE P, and PULVIRENTI L. Inversion of electromagnetic models for bare soil parameter estimation from multifrequency polarimetric SAR data[J]. *Sensors*, 2008, 8(12): 8181–8200. doi: [10.3390/s8128181](https://doi.org/10.3390/s8128181).
- [101] MATTIA F, LE TOAN T, SOUYRIS J C, *et al.* The effect of surface roughness on multifrequency polarimetric SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(4): 954–966. doi: [10.1109/36.602537](https://doi.org/10.1109/36.602537).
- [102] CLOUDE S R. Eigenvalue parameters for surface roughness studies[C]. SPIE 3754, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing II, Denver, USA, 1999. doi: [10.1117/12.366317](https://doi.org/10.1117/12.366317).
- [103] HAJNSEK I, POTTIER E, and CLOUDE S R. Inversion of surface parameters from polarimetric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(4): 727–744. doi: [10.1109/TGRS.2003.810702](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.810702).
- [104] MARZAHN P and LUDWIG R. On the derivation of soil surface roughness from multi parametric PolSAR data and its potential for hydrological modeling[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(3): 381–394. doi: [10.5194/hess-13-381-2009](https://doi.org/10.5194/hess-13-381-2009).
- [105] ZRIBI M, GORRAB A, and BAGHDADI N. A new soil roughness parameter for the modelling of radar backscattering over bare soil[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 62–73. doi: [10.1016/j.rse.2014.05.009](https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.009).
- [106] JIAO Xianfeng, MCNAIRN H, SHANG Jiali, *et al.* The sensitivity of RADARSAT-2 polarimetric SAR data to corn and soybean leaf area index[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2011, 37(1): 69–81. doi: [10.5589/m11-023](https://doi.org/10.5589/m11-023).
- [107] MCNAIRN H, SHANG J, JIAO X, *et al.* Establishing crop productivity using RADARSAT-2[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, XXXIX-B8: 283–287. doi: [10.5194/isprsarchives-XXXIX-B8-283-2012](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B8-283-2012).
- [108] WISEMAN G, MCNAIRN H, HOMAYOUNI S, *et al.* RADARSAT-2 polarimetric SAR response to crop biomass for agricultural production monitoring[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(11): 4461–4471. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2322311](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2322311).
- [109] YANG Zhi, LI Kun, LIU Long, *et al.* Rice growth monitoring using simulated compact polarimetric C band SAR[J]. *Radio Science*, 2014, 49(12): 1300–1315. doi: [10.1002/2014RS005498](https://doi.org/10.1002/2014RS005498).
- [110] YANG Zhi, LI Kun, SAHO Yun, *et al.* Estimation of paddy rice variables with a modified water cloud model and improved polarimetric decomposition using multi-temporal RADARSAT-2 images[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 878. doi: [10.3390/rs8100878](https://doi.org/10.3390/rs8100878).
- [111] ZHANG Wangfei, LI Zengyuan, CHEN Erxue, *et al.* Compact polarimetric response of rape (*Brassica napus* L.) at C-Band: Analysis and growth parameters inversion[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 591. doi: [10.3390/rs9060591](https://doi.org/10.3390/rs9060591).
- [112] 杨知. 基于极化SAR的水稻物候期监测与参数反演研究[D]. [博士学位论文]. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 2017: 83–106.
- YANG Zhi. Rice phenology estimation and parameter retrieval based on polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR)[D]. [Ph. D. dissertation], Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, 2017: 83–106.
- [113] HOSSEINI M, MCNAIRN H, MERZOUKI A, *et al.* Estimation of Leaf Area Index (LAI) in corn and soybeans using multi-polarization C- and L-band radar data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 170: 77–89. doi: [10.1016/j.rse.2015.09.002](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.002).
- [114] VICENTE-GUIJALBA F, MARTINEZ-MARIN T, and LOPEZ-SANCHEZ J M. Crop phenology estimation using a multitemporal model and a kalman filtering strategy[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(6): 1081–1085. doi: [10.1109/LGRS.2013.2286214](https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2286214).
- [115] DE BERNARDIS C G, VICENTE-GUIJALBA F, MARTINEZ-MARIN T, *et al.* Estimation of key dates and stages in rice crops using dual-polarization SAR time series and a particle filtering approach[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(3): 1008–1018. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2372898](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2372898).
- [116] 张王菲, 姬永杰. 极化与干涉SAR植被参数反演[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019: 4–6.
- ZHANG Wangfei and JI Yongjie. Vegetation Parameter Inversion using Polarimetric and Interferometric SAR Technique[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019: 4–6.
- [117] 张王菲, 陈尔学, 李增元, 等. 干涉、极化干涉SAR技术森林高度估测算法研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(6): 983–997. doi: [10.11873/j.issn.1004-0323.2017.6.0983](https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2017.6.0983).
- ZHANG Wangfei, CHEN Erxue, LI Zengyuan, *et al.* Development of forest height estimation using InSAR/PolInSAR technology[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(6): 983–997. doi: [10.11873/j.issn.1004-0323.2017.6.0983](https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2017.6.0983).
- [118] ENGDAHL M E, BORGEAUD M, and RAST M. The use of ERS-1/2 Tandem interferometric coherence in the estimation of agricultural crop heights[J]. *IEEE*

- Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1799–1806. doi: [10.1109/36.942558](https://doi.org/10.1109/36.942558).
- [119] TREUHAFT R N and SIQUEIRA P R. Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar[J]. *Radio Science*, 2000, 35(1): 141–177. doi: [10.1029/1999rs900108](https://doi.org/10.1029/1999rs900108).
- [120] 胡楚锋, 周洲, 李南京, 等. 基于有向体模型的植被参数反演及室内宽带实验研究[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(2): 255–260. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.00553](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00553).
HU Chufeng, ZHOU Zhou, LI Nanjing, *et al.* Investigation on vegetation parameters inversion algorithm based on oriented volume model and indoor wide-band measurements[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 255–260. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.00553](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00553).
- [121] LOPEZ-SANCHEZ J M, BALLESTER-BERMAN J D, and MARQUEZ-MORENO Y. Model limitations and parameter-estimation methods for agricultural applications of polarimetric SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3481–3493. doi: [10.1109/TGRS.2007.900690](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.900690).
- [122] ERTEN E, ROSSI C, and YUZUGULLU O. Polarization impact in TanDEM-X data over vertical-oriented vegetation: The paddy-rice case study[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(7): 1501–1505. doi: [10.1109/LGRS.2015.2410339](https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2410339).
- [123] ROSSI C and ERTEN E. Paddy-rice monitoring using TanDEM-X[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(2): 900–910. doi: [10.1109/TGRS.2014.2330377](https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2330377).
- [124] LEE S K, YOON S Y, and WON J S. Vegetation height estimate in rice fields using single polarization TanDEM-X science phase data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1702. doi: [10.3390/rs10111702](https://doi.org/10.3390/rs10111702).
- [125] 国贤玉, 李坤, 邵芸, 等. 基于多时相TanDEM-X极化干涉 SAR数据的水稻株高反演[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(3): 878–884.
GUO xianyu, LI Kun, SHAO Yun, *et al.* Inversion of rice height using multitemporal TanDEM-X polarimetric interferometry SAR data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(3): 878–884.
- [126] REIGBER A and MOREIRA A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2142–2152. doi: [10.1109/36.868873](https://doi.org/10.1109/36.868873).
- [127] 林琿, 马培峰, 陈旻, 等. SAR层析成像的基本原理、关键技术和应用领域[J]. *测绘地理信息*, 2015, 40(3): 1–5. doi: [10.14188/j.2095-6045.2015.03.001](https://doi.org/10.14188/j.2095-6045.2015.03.001).
LIN Hui, MA Peifeng, CHEN Min, *et al.* Basic principles, key techniques and applications of tomographic SAR imaging[J]. *Journal of Geomatics*, 2015, 40(3): 1–5. doi: [10.14188/j.2095-6045.2015.03.001](https://doi.org/10.14188/j.2095-6045.2015.03.001).
- [128] 张红, 江凯, 王超, 等. SAR层析技术的研究与应用[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(2): 282–287. doi: [10.11873/j.issn.1004-0323.2010.2.282](https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2010.2.282).
ZHANG Hong, JIANG Kai, WANG Chao, *et al.* The current status of SAR tomography[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(2): 282–287. doi: [10.11873/j.issn.1004-0323.2010.2.282](https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2010.2.282).
- [129] CLOUDE S R. Polarization coherence tomography[J]. *Radio Science*, 2006, 41(4): RS4017. doi: [10.1029/2005RS003436](https://doi.org/10.1029/2005RS003436).
- [130] 李新武, 郭华东, 彭星, 等. SAR对地观测技术及应用新进展[J]. *南京信息工程大学学报: 自然科学版*, 2020, 12(2): 170–180. doi: [10.13878/j.cnki.jnuist.2020.02.004](https://doi.org/10.13878/j.cnki.jnuist.2020.02.004).
LI Xinwu, GUO Huadong, PENG Xing, *et al.* New advances of SAR and its application in earth observation[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition*, 2020, 12(2): 170–180. doi: [10.13878/j.cnki.jnuist.2020.02.004](https://doi.org/10.13878/j.cnki.jnuist.2020.02.004).
- [131] 李文梅. 极化干涉SAR层析估测森林垂直结构参数方法研究[D]. [博士学位论文], 中国林业科学研究院, 2013: 3–12.
LI Wenmei. Forest vertical structure parameters estimation using polarimetric interferometric tomography SAR[D]. [Ph. D. dissertation], Chinese Academy of Forestry, 2013: 3–12.
- [132] JOERG H, PARDINI M, HAJNSEK I, *et al.* Sensitivity of SAR tomography to the phenological cycle of agricultural crops at X-, C-, and L-band[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(9): 3014–3029. doi: [10.1109/JSTARS.2018.2845127](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2845127).
- [133] BROWN S C M, QUEGAN S, MORRISON K, *et al.* High-resolution measurements of scattering in wheat canopies-implications for crop parameter retrieval[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(7): 1602–1610. doi: [10.1109/tgrs.2003.814132](https://doi.org/10.1109/tgrs.2003.814132).
- [134] LOPEZ-SANCHEZ J M, FORTUNY-GUASCH J, CLOUDE S R, *et al.* Indoor polarimetric radar measurements on vegetation samples At L, S, C and X band[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2000, 14(2): 205–231. doi: [10.1163/156939300X00734](https://doi.org/10.1163/156939300X00734).
- [135] LOPEZ-SANCHEZ J M, BALLESTER-BERMAN J D, and FORTUNY-GUASCH J. Indoor wide-band polarimetric measurements on maize plants: A study of the differential extinction coefficient[J]. *IEEE Transactions on*

- Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(4): 758–767. doi: [10.1109/tgrs.2005.862522](https://doi.org/10.1109/tgrs.2005.862522).
- [136] JOERG H, PARDINI M, HAJNSEK I, *et al.* On the separation of ground and volume scattering using multibaseline SAR data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(9): 1570–1574. doi: [10.1109/LGRS.2017.2723980](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2723980).
- [137] JOERG H, PARDINI M, HAJNSEK I, *et al.* 3-D scattering characterization of agricultural crops at C-Band using SAR tomography[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(7): 3976–3989. doi: [10.1109/TGRS.2018.2818440](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2818440).
- [138] JOERG H, PARDINI M, HAJNSEK I, *et al.* First multi-frequency investigation of SAR tomography for vertical structure of agricultural crops[C]. The 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Berlin, Germany, 2014.
- [139] PICHIERRI M, HAJNSEK I, and PAPATHANASSIOU K P. A multibaseline Pol-InSAR inversion scheme for crop parameter estimation at different frequencies[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(8): 4952–4970. doi: [10.1109/TGRS.2016.2553739](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2553739).
- [140] LOPEZ - SANCHEZ J M, BALLESTER - BERMAN J D. Potentials of polarimetric SAR interferometry for agriculture monitoring[J]. *Radio Science*, 2009, 44(2): RS2010. doi: [10.1029/2008RS004078](https://doi.org/10.1029/2008RS004078).

作者简介



张王菲，女，山西阳城人，博士，西南林业大学林学院，副教授，硕士生导师，主要研究方向为农林业微波遥感应用研究。



陈尔学，男，山东菏泽人，博士，中国林业科学研究院资源信息研究所研究员，博士生导师，主要研究方向为微波遥感机理及应用。

李增元，男，内蒙古呼和浩特人，博士，研究员，中国林业科学研究院资源信息研究所研究员，博士生导师，主要研究方向为微波遥感机理及应用。