

文章编号: 2095-4980(2023)02-0242-07

星载双极化 SAR 冬小麦物候期识别方法

赵建辉^{1,2,3}, 徐东亚^{1,2,3}, 李 宁^{*1,2,3}

(1. 河南大学 计算机与信息工程学院, 河南 开封 475004; 2. 河南省智能技术与应用工程技术研究中心, 河南 开封 475004;
3. 河南省大数据分析处理重点实验室, 河南 开封 475004)

摘 要: 冬小麦是中国主要的粮食作物之一, 准确及时地获取冬小麦物候信息是冬小麦长势监测和产量预估的必要条件。星载合成孔径雷达(SAR)是一种微波遥感设备, 具有全天时、全天候的优势, 可实现对周期性农作物物候期大范围监测。基于时间序列 Sentinel-1A SAR 数据, 提出一种星载双极化 SAR 冬小麦物候期识别方法。该方法基于特征值分解和极化散射分析技术, 提取不同物候期冬小麦的后向散射系数、极化熵、主导散射角等参数, 实现冬小麦物候期识别。实验结果表明, 物候期识别总体精确度达到 79%。该方法在冬小麦生长监测方面具有实用推广价值。

关键词: 星载 SAR 图像; 冬小麦; 极化分解; 物候期; 时间序列

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020643

Phenological period identification of winter wheat based on spaceborne dual-polarization SAR

ZHAO Jianhui^{1,2,3}, XU Dongya^{1,2,3}, LI Ning^{*1,2,3}

(1.College of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng Henan 475004, China;
2.Henan Engineering Research Center of Intelligent Technology and Application, Kaifeng Henan 475004, China;
3.Key Laboratory of Analysis and Processing on Big Data of Henan Province, Kaifeng Henan 475004, China)

Abstract: Accurate and timely acquisition of the phenological information of winter wheat which is one of the main crops in China, is a prerequisite for its growth monitoring and yield estimation. Spaceborne Synthetic Aperture Radar(SAR) is an all-time and all-weather microwave remote sensing device, which can realize large-scale monitoring of periodic crop phenology. According to the time series Sentinel-1A SAR data, a phenological period identification method of winter wheat is proposed based on spaceborne dual-polarization SAR. This method uses eigenvalue decomposition and polarization scattering analysis to extract the backscattering coefficient, polarization entropy, scattering angle, etc., in different phenological stages to realize winter wheat phenology identification. The experimental results show that the overall accuracy of phenological phase identification reaches 79%. This method has practical value in winter wheat growth monitoring.

Keywords: spaceborne SAR images; winter wheat; polarization decomposition; phenological period; time series

冬小麦是中国主要的粮食作物之一, 种植面积约占全国耕地总面积的 25%, 冬小麦生产对于保障我国粮食安全、维护社会稳定和促进经济发展具有重大意义。传统的冬小麦物候期监测主要通过实地观察或采样获取, 虽然结果比较准确, 但观测周期长, 耗时耗力, 覆盖面积小, 难以获得大范围的冬小麦物候信息。遥感技术具有

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2021-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61871175); 河南省高等学校重点科研资助项目(19A420005, 21A520004); 河南省科技攻关计划资助项目(1921022100822; 212102210093; 212102210101); 河南省青年人才托举工程资助项目(2019HYTP006)

*通信作者: 李 宁 email:hedalining@henu.edu.cn

获取大区域地物信息的能力，应用在农业领域，很大程度上克服了传统方法的诸多弊端^[1]。星载合成孔径雷达 (SAR) 是一种微波遥感设备，具有全天时、全天候的对地观测能力，可以有效弥补光学遥感的不足^[2]。F Vicente-Guijalba 等基于双极化 TerraSAR-X 数据，利用动态系统框架和粒子滤波方法对水稻物候期进行分析，实现了水稻关键物候期识别^[3]。O Yuzugullu 等将农作物生长状态表引入研究，提出一种特征聚类方法进行农作物物候期识别^[4]。L Mascolo 等基于 RADARSAT-2 数据，提出一种利用复杂 Wishart 分类器进行水稻物候识别的新方法，总体精确率为 54%~86%^[5]。LI S 等提出了一种基于动态阈值的改进方法，实现了华北平原冬小麦物候期的初步识别^[6]。WANG H 等基于极化分解和随机森林算法，进行了物候期识别。结果表明，随机森林算法在油菜物候识别方面具有较高的精确度^[7]。

实际应用中，国内外利用 SAR 图像对水稻物候期的研究较为丰富，已初步形成较为实用的技术体系。但同样作为世界最重要的粮食作物之一的小麦，其物候期识别方面的研究工作，仍处于探索阶段，尚未形成成熟的技术方法。针对上述问题，本文基于双极化 Sentinel-1A SAR 图像，提出了一种星载双极化 SAR 冬小麦物候期识别方法，实现了冬小麦主要物候期的识别，总体精确度达到 79%。该研究对于冬小麦长势监测，具有重要的实用价值。

1 基础理论介绍

1.1 冬小麦物候期

物候期是指植物受环境因子和人类活动影响而出现的周期性的自然现象，包括植物的发芽、开花、成熟、衰落等现象。一般认为，冬小麦的物候期可分为播种期、出苗期、分蘖期、冬眠期、返青期、起身期、拔节期、孕穗期、抽穗期、扬花期、灌浆期、成熟期，共 12 个阶段，如图 1 所示。在农业遥感应用中，由于相邻物候期植株生长状态近似，导致极化 SAR 的响应相近，因此把冬小麦物候期归类为几个主要物候期阶段，既能保证对冬小麦生长状态的总体掌握，也能降低信息冗余和监测成本。尤其是 SAR 数据时间分辨率不高的情况下，卫星在整个冬小麦生长周期不能对研究区域进行足够数量的采样，无法实现对上述全阶段物候期的精细识别。综合考虑各物候阶段的重要特性和分割可行性，研究中将冬小麦的物候期重整为 5 个阶段：营养期、冬眠期、生长期、生殖期、成熟期。标准物候期对照表如表 1 所示。

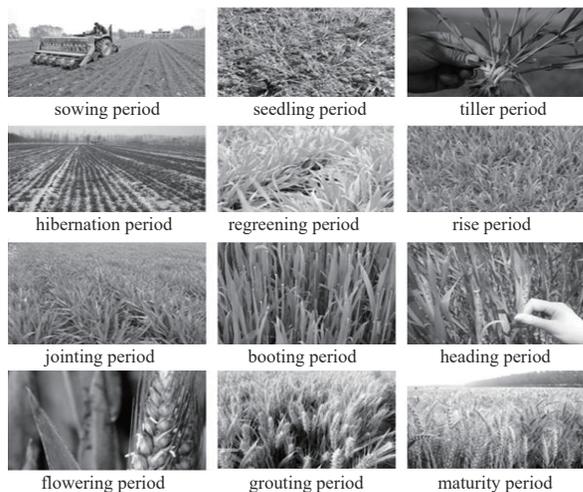


Fig.1 The growth state of winter wheat at each phenological stage
图 1 冬小麦每个物候期生长状态

表 1 冬小麦关键物候期阶段划分对照表

Table1 Classification of key phenological stages of winter wheat

key phenological periods	phenological phase description
nutrient period	sowing
	seedling
	tiller
hibernation period	hibernation
growing period	regreening
	rise
	jointing
reproductive period	booting
	heading
	flowering
maturity period	grouting
	maturity

1.2 SAR 图像预处理

SAR 图像的预处理包括辐射定标、多视处理、图像配准、相干斑滤波、地理编码 5 个阶段，其处理流程如图 2 所示。辐射定标是实现遥感信息量化应用的基本前提，可以将像素的数字号码(Digital Number, DN)值转换为具有真实物理含义的雷达后向散射系数；多视处理用于抑制 SAR 图像的斑点噪声；图像配准将多个图像中的同名点对应起来，达到变化检测或信息融合的目的；滤波阶段使用 Refined Lee 滤波降低图像噪声；地理编码基于距离多普勒方程将雷达坐标系转换为给定的地理参考坐标系。

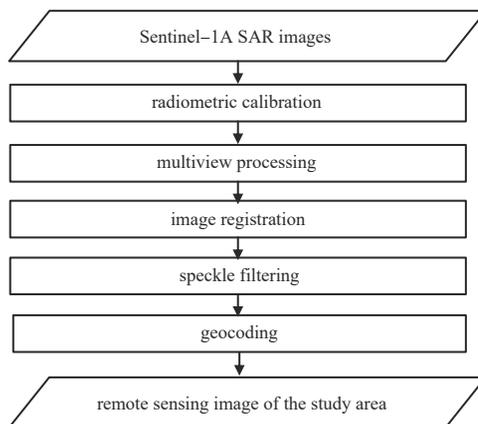


Fig.2 SAR image pre-processing
图2 SAR图像预处理流程

1.3 目标极化分解方法

极化分解理论最早由Huynen提出，能够更好地解译极化目标体的属性。极化分解分为相干目标分解算法和非相干目标分解算法。 $H/A/\alpha$ 分解是一种非相干分解方法，具有极化基不变的特点，其中分解参数包括极化熵(entropy, H)、散射角(α)和各向异性反熵(anisotropy, A)，能够覆盖整个散射机制的范围，是目前应用最为广泛的目标分解方法。

极化熵 H 表示散射随机性，取值在0~1之间， H 越大，散射物体的去极化效应就越强。 $H=0$ 时，表示只存在1种散射机制； $H=1$ 时，表示物体是完全随机散射体。在双极化条件下，极化熵的计算为：

$$H = \sum_{i=1}^2 -P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

式中 P_i 表示每种散射机制出现的概率， $P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2}$ ， λ_1, λ_2 为目标分解的2个特征值。

散射角 α 与目标散射特性密切相关，系数与随机过程有关，采用平均值对参数进行描述。 $\alpha=0^\circ$ ，代表奇次散射； $\alpha=45^\circ$ ，代表体散射； $\alpha=90^\circ$ ，代表二面角散射。 α 的计算公式为：

$$\alpha = \sum_{i=1}^2 P_i \alpha_i \quad (2)$$

式中 α_i 为处于散射机制下的散射角度。

各向异性反熵 A 可表示除了最强的散射机制外，剩余的2个相对较弱的散射分量之间的强弱关系，是极化熵 H 的一个补充参数。 A 的取值范围为0~1， $A=0$ ，代表第二和第三散射机制的强度相当； $A=1$ ，代表第二散射机制强度占绝对优势。从实用的角度出发，只有当 $H>0.7$ 时，反熵 A 才能作为进一步识别的来源。主要是因为当 H 较低时，容易受噪音的影响。 A 的计算公式为：

$$A = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (3)$$

极化熵和散射角的不同取值区间组成 $H-\alpha$ 特征空间，可分为8个有效区域和1个未定义区域。8个有效区域对应不同的物理散射机制，用于分析农作物物候期。

2 冬小麦物候期识别方法

基于星载双极化SAR图像的冬小麦物候期识别方法，其整体处理流程如图3(a)所示。首先对SAR图像进行预处理；然后针对预处理后的SAR图像，采用散射强度统计、特征值极化分解等技术手段，对时间序列SAR图像提取冬小麦在不同物候期双极化后向散射系数(σ_{VV}, σ_{VH})、极化熵(H)、散射角(α)、各向异性反熵(A)等极化参数，分析上述参数对冬小麦物候期的敏感性，确定冬小麦物候期识别的最优参数组合；最后利用决策树实现冬小麦的物候识别。决策树模型如图3(b)所示，图中 a, b, c, d, e 为根据物候期阶段识别策略确定的最佳阈值。

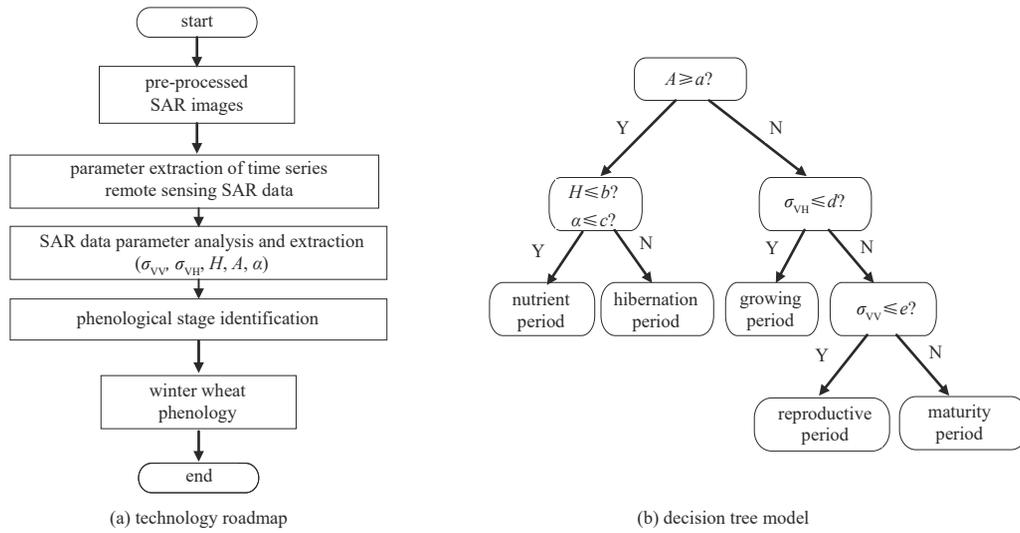


Fig.3 Flow chart of phenological period identification of winter wheat
图 3 冬小麦物候期识别流程图

3 实验与分析

3.1 研究区域与数据

开封市地处中原腹地，地势平坦，土壤肥沃，多为黏土、壤土和沙土，适宜种植冬小麦。本文选取河南省开封市作为研究区域，具体位置及其 SAR 图像如图 4 所示。以欧洲航天局 Sentinel-1A 卫星干涉宽幅模式的单视复数(Single Look Complex, SLC)产品为数据源，极化方式为 VV,VH，重访周期为 12 天。数据获取时间为 2019 年 10 月 18 日~2020 年 5 月 21 日，取其中 19 天数据。

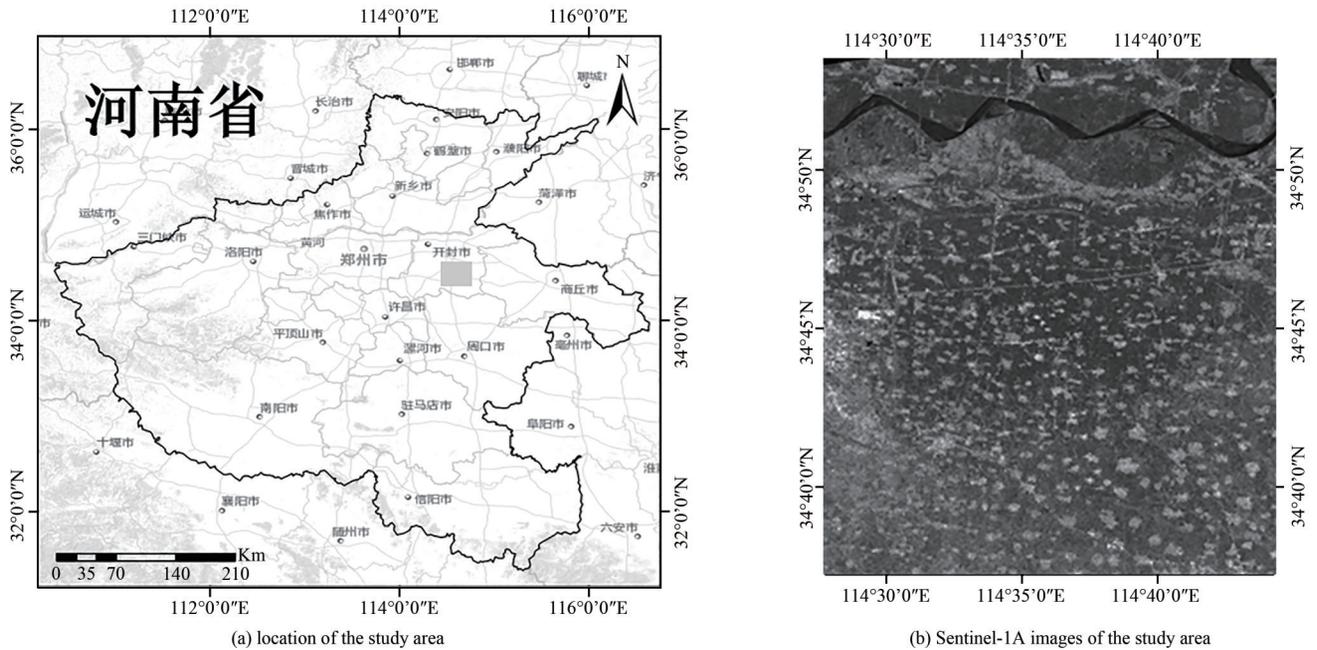


Fig.4 Location of the study area and its SAR image
图 4 研究区域位置及其 SAR 图像

3.2 参数提取

基于研究区域时间序列数据，提取双极化 Sentinel-1A 图像的后向散射系数 σ_{VV}, σ_{VH} 和极化分解参数 H, A, α ，如图 5 和图 6 所示。在提取过程中，结合实地考察选取的样地和图像的地理坐标信息，确定 30 个样本点，在时间序列 SAR 图像中统计上述样本点的后向散射系数和极化分解参数值。

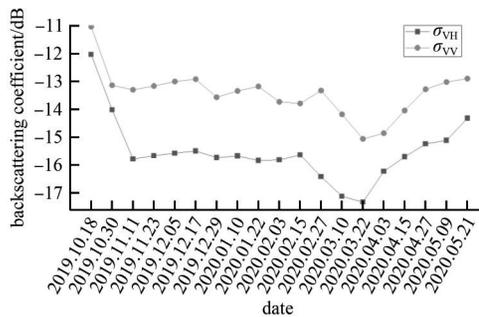


Fig.5 Variation trend of backscattering coefficient of winter wheat

图5 冬小麦后向散射系数变化趋势

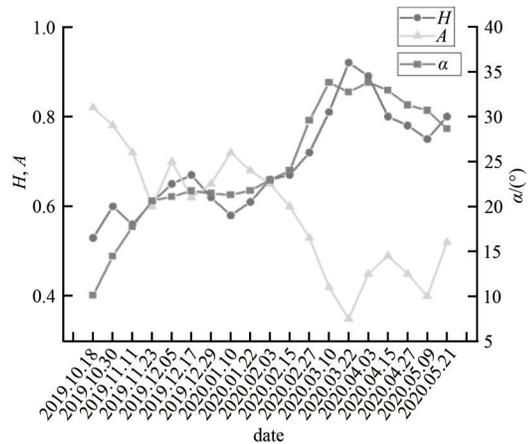


Fig.6 Variation trend of polarization decomposition parameter of winter wheat

图6 极化分解参数变化趋势图

3.3 冬小麦物候期物理散射机制分析

营养期阶段：包含冬小麦播种期、出苗期和分蘖期，时间大致为10月中旬至12月下旬。此阶段的地表覆盖状态为完全裸土状态或冬小麦幼苗植株较小而无法完全覆盖地表的半裸土状态。该时期的主要散射贡献来源于土壤表面，主导散射类型为表面散射， σ_{VV} 约为 -12.6 dB， σ_{VH} 约为 -15.6 dB。随着冬小麦植株的生长和散射类型的转换， σ_{VV} 与 σ_{VH} 都呈现下降趋势，但幅度变化不大。由于 σ_{VH} 对植株生长导致的体散射更加敏感， σ_{VH} 变化略大于 σ_{VV} 。由于冬小麦幼苗子叶的生长，导致散射具有随机性，同时植株与地面形成不同程度的角度，极化熵与散射角在此阶段都呈现上升趋势， H 约为 0.53 ，散射角 α 约为 17° 。

冬眠期阶段：由于气温降低，冬小麦停止生长，进入冬眠期。在此阶段，后向散射系数 σ_{VV} 和 σ_{VH} 变化幅度较小，几乎保持不变，维持在 $-13.8\sim-15.9$ dB左右。冬眠期作物高度不再生长，极化熵 H 维持在 0.65 左右，散射角 α 维持在 23° 左右。

生长期阶段：冬小麦处于返青期、起身期和拔节期。植株的理化特性和结构特征发生了显著变化，株高平均增长到约 30 cm，最高可达 60 cm。小麦植株大部分结构(如茎秆和叶片)由匍匐方向转为近乎垂直取向，从而影响雷达波信号强度。同时密度过大的冬小麦冠层，会导致微波穿透的能量降低，从而导致雷达的回波能量略有降低，后向散射系数会更低。在此阶段， σ_{VV} 与 σ_{VH} 呈现下降趋势，整体上， σ_{VV} 约为 -14.1 dB， σ_{VH} 约为 -16.7 dB。极化熵与散射角在此阶段呈现持续上升趋势， H 约为 0.81 ，达到整个生长周期的峰值，散射角 α 约为 32° 。

生殖期阶段：冬小麦营养器官(茎秆、叶片等)经历了一轮发育，生长速度开始放缓，到中后期甚至停止生长，新生长出来的麦穗等成为新的散射源，导致冬小麦植株的体散射增大，后向散射系数也增大。植被完全覆盖地表，表面散射几乎减少为零，此时体散射的贡献占主导地位， σ_{VV} 约为 -14.4 dB， σ_{VH} 约为 -15.9 dB。在冬小麦麦穗孕育后，作物高度达到峰值，麦穗粗壮，导致散射随机性更大，极化熵 H 约为 0.8 ；同时麦穗与植株的夹角更大，散射角 α 约为 34° ，达到整个生长周期的峰值。

成熟期阶段：冬小麦的胚乳呈蜡状，籽粒开始变硬，此时为最适收获期。在小麦成熟期，稻穗的数量增多，尺寸变大，因而植株体散射增强， σ_{VH} 上升，约为 -14.5 dB。同时植株结构也从随机转为了垂直朝向，导致 σ_{VV} 上升，约为 -13.0 dB。在成熟期植株含水量和叶面积指数都会减少，极化熵 H 约为 0.78 ，散射角 α 约为 30° 。

3.4 结果分析

本文基于时间序列C波段的双极化Sentinel-1A SAR图像，结合卫星同步地面观测数据，开展冬小麦物候期识别实验。使用箱式图进行分析，能够明确表示后向散射系数和极化分解参数的动态分布，有利于确定物候期识别过程中具体阈值，更好地实现冬小麦物候期的识别。由分析可得，把阈值分别设定为 $a=0.45$ ， $b=0.62$ ， $c=21^\circ$ ， $d=-16.2$ dB， $e=-13.8$ dB，决策树模型可以用于识别冬小麦的营养期、冬眠期、生长期、生殖期、成熟期5个关键期。图7箱式图分析结果表明，不同极化后向散射系数及分解参数，在不同时期对冬小麦物候变化有不同的响应，可用于物候期的识别。利用实地采样点的数据对每个物候期的识别结果进行精确度评估，结果如表2所示。在冬小麦5个关键物候期阶段，成熟期的识别精确度最高，可达 87% ，此阶段冬小麦植株高度达到峰值，植被含水量最低，易与其他阶段区分。生殖期的识别精确度最低，为 67% ，此阶段麦穗成为主要的散射体，更具有随

机性，同时各个地块的品种、土壤湿度不同，易与生殖后期和成熟期的早期混淆，导致识别精确度低。物候期的总体精确度为 79%，在冬小麦生长监测领域可达到较好的效果。

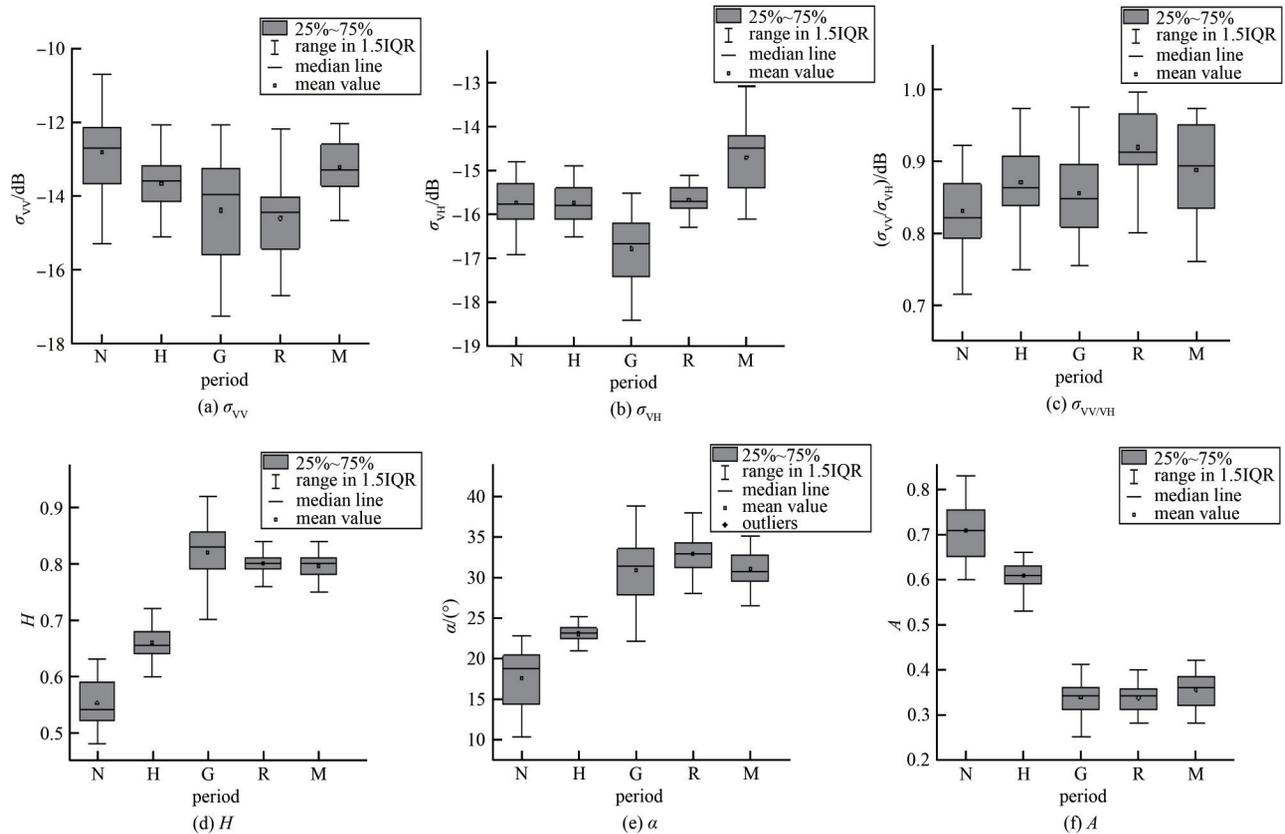


Fig.7 Box diagram of SAR image extraction parameters (N=nutrient, H=hibernation, G=growing, R=reproductive, M=maturity)
图 7 SAR 图像提取参数箱式图

表 2 物候期识别结果精确度

Table 2 Accuracy of phenological period identification results

number of test points	nutrient period	hibernation period	growing period	reproductive period	maturity period	accuracy/%	overall accuracy/%
25(nutrient period)	21	4	0	0	0	84	79
25(hibernation period)	2	20	3	0	0	80	
15(growing period)	0	2	11	2	0	73	
15(reproductive period)	0	0	3	10	2	67	
15(maturity period)	0	0	0	2	13	87	

4 结 论

本文基于时间序列 Sentinel-1A SAR 图像数据获取的多参数信息，提出了一种星载双极化 SAR 图像冬小麦物候期识别方法。该方法通过获取双极化后向散射系数(σ_{vv}, σ_{vh})和目标极化分解参数(H, α, A)，对冬小麦物候期的敏感性进行分析，确定冬小麦物候期识别的最优参数组合，构建识别模型。实验结果表明，所提方法的总体精确度达到 79%。后续拟开展基于星载全极化 SAR 数据的冬小麦物候期识别研究，进一步提升识别精确度。

参考文献：

[1] 朱少龙,张晋玉,晁毛妮,等. 农业遥感技术研究进展[J]. 种业导刊, 2019(8):3-9. (ZHU Shaolong,ZHANG Jinyu,CHAO Maoni, et al. Research progress and prospect of agricultural remote sensing technology[J]. Journal of Seed Industry Guide, 2019(8):3-9.)

[2] 张国飞,岳彩荣,章皖秋,等. 基于 Sentinel 数据的滇池湖滨湿地地上生物量反演[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(1): 142-149. (ZHANG Guofei,YUE Cairong,ZHANG Wanqiu, et al. Above-ground biomass estimation in Kunming Dianchi lake wetland using Sentinel imagery[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(1):142-149.)

[3] VICENTE-GUIJALBA F, MARTINEZ-MARIN T, 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.

- [4] YUZUGULLU O,ERTEN E,HAJNSEK I. Rice growth monitoring by means of X-band co-polar SAR: feature clustering and BBCH scale[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015,12(6):1218-1222.
- [5] MASCOLO L,LOPEZ-SANCHEZ J M,VICENTE-GUIJALBA F,et al. A complete procedure for crop phenology estimation with PolSAR data based on the complex Wishart classifier[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016,54(11): 6505-6515.
- [6] LI S,SUN Z,ZHANG X,et al. An improved threshold method to detect the phenology of winter wheat[C]// 2018 7th International Conference on Agro-Geoinformatics. Hangzhou,China:IEEE, 2018:1-5.
- [7] WANG H,MAGAGI R,GOITA K,et al. Crop phenology retrieval via polarimetric SAR decomposition and random forest algorithm[J]. Remote Sensing of Environment:An Interdisciplinary Journal, 2019(231):111234.

作者简介:

赵建辉(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为 SAR 图像信息处理和生态环境 SAR 遥感应用.
email: jhzhao@henu.edu.cn.

李 宁(1987-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为多模式合成孔径雷达成像及其应用技术.

徐东亚(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 SAR 图像信息处理和 SAR 遥感应用.