

降雨影响下的水稻长势极化特征提取

庾 露¹, 黄艳霞¹, 刘警鉴², 段 炼³

(1. 南宁师范大学 地理科学与规划学院, 广西 南宁 530001; 2. 广西壮族自治区国土测绘院, 广西 南宁 530001; 3. 南宁师范大学 自然资源与测绘学院, 广西 南宁 530001)

摘要: 【目的】直接利用合成孔径雷达 (SAR) 后向散射系数监测水稻 *Oryza sativa* 等南方作物长势的方法易受降雨影响, 在时序曲线上易产生大幅波动。研究降低这一影响的方法, 以期获得更准确反映水稻长势规律的结果。【方法】以广西省桂平市水稻栽植区为研究对象, 采用 2018 年 3–11 月共 23 期 Sentinel-1 双极化 SAR 数据, 以及同期降雨数据, 分析水稻长势在降雨影响下的同向极化 (VV) 和交叉极化 (VH) 后向散射系数时序特征, 在此基础上提出基于 VV 和 VH 后向散射系数组合的改进方法——归一化差分后向散射指数 (NDBI), 并结合光学卫星影像数据对结果加以验证。【结果】NDBI 时序曲线的平均曲率为 0.86, 低于 VV 和 VH 时序曲线的平均曲率 (分别为 2.90 和 2.31), 表明 NDBI 时序曲线的变化趋势更为平稳, 受降雨不规则波动的影响更小。早、晚 2 季水稻的 NDBI 时序曲线具有相似的变化趋势, 能够更准确地反映水稻幼苗期、分蘖拔节期、长穗期和结实期各阶段的极化特征, 即幼苗期主要以二次反射为主, 而从分蘖拔节时期开始到长穗期再到结实期直至收割, 体反射和漫反射不断增强, 二次散射逐渐减小。【结论】利用 NDBI 方法降低了降雨对极化特征时序曲线扰动的影响, 获得更准确的水稻长势规律。图 4 表 1 参 16

关键词: Sentinel-1; 降雨; 水稻; 极化特征

中图分类号: S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2020)05-0992-07

Extraction of polarization characteristics of *Oryza sativa* growth under the rainfall fluctuation

YU Lu¹, HUANG Yanxia¹, LIU Jingjian², DUAN Lian³

(1. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530001, Guangxi, China; 2. Land Surveying and Mapping Institute of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530001, Guangxi, China; 3. School of Natural Resources and Surveying, Nanning Normal University, Nanning 530001, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] The method of directly using synthetic aperture radar (SAR) backscatter coefficient to monitor the growth trend of *Oryza sativa* and other crops in south China is susceptible to rainfall and prone to produce large fluctuations on the time series curve. The objective of this study is to explore methods to reduce this impact and obtain more accurate results reflecting the law of *O. sativa* growth. [Method] Taking the *O. sativa* planting area in Guiping City of Guangxi as sample area, the temporal characteristics of VV and VH-polarized backscattering coefficient of *O. sativa* growth under the influence of rainfall were analyzed using Sentinel-1 dual-polarization SAR data of 23 periods from March to November 2018 and the corresponding rainfall data. On this basis, an improved method named “Normalized Differential Backward Scattering Index (NDBI)” based on the combination of VV and VH-polarized backscatter coefficients was proposed and the results were verified by optical satellite image data. [Result] The mean curvature of the NDBI curve was 0.86,

收稿日期: 2019-10-14; 修回日期: 2020-04-11

基金项目: 广西自然科学基金资助项目 (2018GXNSFBA281133)

作者简介: 庾露, 讲师, 博士, 从事微波遥感地物信息提取研究。E-mail: yulu_enter@163.com。通信作者: 段炼, 副教授, 博士, 从事遥感大数据挖掘研究。E-mail: wtusm@163.com

which was lower than that of VV and VH curves (2.90 and 2.31, respectively), indicating that the NDBI curve was more stable and less affected by irregular rainfall fluctuations. The NDBI curves of *O. sativa* in the early and late seasons had similar trends, which could more accurately reflect the polarization characteristics of *O. sativa* at the seedling stage, tiller jointing stage, long spike stage and fruiting stage. The secondary reflection was the main part in seedling stage, and from tiller jointing stage to long spike stage to fruiting stage to harvest stage, the body reflection and diffuse reflection increased continuously and the secondary scattering decreased gradually. [Conclusion] It is feasible and applicable to use the NDBI method to reduce the influence of rainfall on the disturbance of polarization characteristic time series curve and to obtain more accurate *O. sativa* growth law. [Ch, 4 fig. 1 tab. 16 ref.]

Key words: Sentinel-1; rainfall; *Oryza sativa*; polarization characteristics

水稻 *Oryza sativa* 是中国主要的粮食作物之一, 2017 年水稻的栽植面积为 3 074.7 万 hm^2 , 约占主要粮食作物总面积的 26.1%^[1], 并广泛分布于秦岭淮河以南地区^[2]。水稻栽植所处地区常年多云多雨, 传统光学被动遥感技术难以获取清晰且连续的时间序列影像。合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 是一种微波波段的主动遥感技术, 可以穿透云雨, 不依赖太阳辐射, 全天候全天时成像, 可在一定程度上弥补光学遥感的不足, 利用 SAR 遥感进行农作物监测具有较大的潜力^[3-8]。目前对作物的非全极化 SAR 时序监测研究中, 普遍依赖于后向散射系数这一极化特征, 以及在时间序列上的变化曲线。但是微波对地物含水量的变化十分敏感, 降雨会使 SAR 后向散射系数在时间序列上出现较大波动, 导致在对水稻等南方作物的长势进行判断时容易出现较大偏差, 而现有研究更多关注植株结构变化对后向散射系数的作用, 较少考虑降雨的影响。针对降雨对水稻长势极化特征的影响, 研究相应的消减方法, 及时、有效、准确地获取多云雨地区水稻的长势信息, 对重农粮食生产和粮食安全都具有重要意义。本研究在已有 Sentinel-1 SAR 影像所具备的同向极化 (VV) 和交叉极化 (VH) 后向散射系数基础上, 提出归一化差分后向散射指数 (normalize difference backscattering index, NDBI)。并对 VH、VV、NDBI 分别建立后向散射系数时序特征曲线, 利用同期降雨数据和光学影像作为辅助资料, 探讨水稻在幼苗期、分蘖拔节期、长穗期和结实期 4 个关键生长期中, 植株形态特点, 相应的极化特征变化趋势, 以及降雨对后向散射系数的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西桂平市以东约 6.5 km, 寻旺乡复兴村正南方 (23°24'0"~23°24'40"N, 110°7'40"~110°8'30"E) 的水稻田地。桂平市地处广西东南部, 属亚热带季风气候, 气候温暖, 雨量充沛, 雨热同期, 适合水稻生长。2017 年桂平市水稻产量达 47.9 万 t, 并连续 5 a 居广西各县 (区) 第 1 位^[9], 是广西水稻栽植大县。研究区内所栽植的水稻品种为 ‘百香 139’ ‘Bailixiang 139’, 属于感温型常规水稻, 适宜在桂南、桂中稻作区作早、晚稻栽植。早稻全生育期约 124 d; 晚稻全生育期约 104 d^[10]。本研究将对研究区内 2018 年的早稻和晚稻的长势进行监测。

1.2 数据概况

选用 SAR 影像数据来源于 Sentinel-1 C 波段 SAR 卫星, 该卫星在默认 TOPS (Terrain Observation with Progressive Scan) 成像模式下的重访周期为 12 d, 地理编码后的影像空间分辨率为 10 m, 是具有较高空间和时间分辨率的极轨卫星^[11]。所采用的影像数据产品为单视复数影像 (single look complex, SLC), 具备 VV 和 VH 双极化方式。水稻的生长周期较短, 一般为 3~4 个月, 在此期间该卫星可拍摄 8~12 期影像数据, 相较于常规光学卫星影像数据, 能够形成更为连续且密集的影像序列。本研究使用 2018 年 3~11 月共 23 期 SAR 影像对研究区内早、晚 2 季水稻的长势极化特征进行研究。

选用的辅助验证数据为 Planet 光学卫星在线高分辨率影像数据集, 空间分辨率为 3~5 m, 可清晰分辨研究区内稻田的轮廓和内部作物的长势。Planet 卫星数据由一系列微小卫星群组成, 重访周期可缩短

到1 d^[12]。但是卫星群在过境研究区对其进行拍摄时,多数情况下仍会受云雨遮挡,成像质量较差或无法成像,因此采用1个月合成影像数据对水稻的长势做验证。

降雨数据采用日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)提供的Global Rainfall Watch观测数据。该数据由全球降水测量任务(Global Precipitation Measurement Mission, GPM)中的核心卫星和星座卫星,3 h观测1次全球降水产生。表1记录了Sentinel-1卫星过境当天、前1日、前2日研究区最大降雨量。

1.3 数据处理

对Sentinel-1 SAR影像数据经过一系列的预处理,才能获取时间序列上的水稻长势极化特征。具体处理流程如图1所示,分为SAR影像预处理和长势极化特征提取两部分。

1.3.1 SAR影像预处理 影像预处理主要有2个目的:①对影像进行辐射定标,从而确定影像的灰度与标准雷达散射截面的关系。影像经辐射定标后,每个像素都能表示唯一确定的地物后向散射信息^[13],这也是本研究开展对不同极化方式、不同时相下记录的水稻极化信息进行定量分析和计算的前提。②对SAR影像进行地理编码,赋予地理坐标。SAR影像的X轴和Y轴分别与成像时刻传感器到地物的斜距距离以及传感器运动矢量相关,并按照距离-方位坐标系(也称SAR坐标系)而非真实地理坐标记录地物位置。因此,需要进行地理编码,将SAR坐标系转为地理坐标系,使处理的结果影像能与其他空间数据进行叠加分析。影像预处理后具有地理坐标,并获得经过精确配准后的多时期后向散射系数图集合。在该图集合中,每个坐标点都包含该处地物的后向散射系数随时间变化形成的序列。将基于该图集合开展对水稻长势的分析。

1.3.2 长势极化特征提取 将针对VV和VH2种极化成像方式在水稻不同生长阶段下产生的后向散射系数进行研究,并认为在同一拍摄时间中,同一稻田内部作物的分布和长势是一致的。因此,对于水稻长势极化特征的提取,是对每期影像中的单块稻田内部所有像素的后向散射系数取平均值,并根据时间顺序排列形成序列。

1.4 归一化差分后向散射指数

已有研究成果表明^[5,8]:降雨会对各极化方式下的后向散射系数均产生较大影响,反映在时序曲线上则是形成较大波动,且上升和下降趋势基本相同。根据这一规律,在研究了归一化植被指数(NDVI)和归一化水指数(NDWI)^[14]的基础上,提出归一化差分后向散射指数(NDBI)计算方法,并基于NDBI建立极化特征曲线。

表1 Sentinel-1 卫星成像时刻雨量

成像日期(年-月-日)	降雨量/mm		
	当天	前1日	前2日
2018-05-16	1.34		
2018-05-28	0.08	5.51	
2018-06-21	5.91		
2018-07-15			1.33
2018-07-27	3.76		
2018-08-20	5.87		
2018-09-01	3.02		

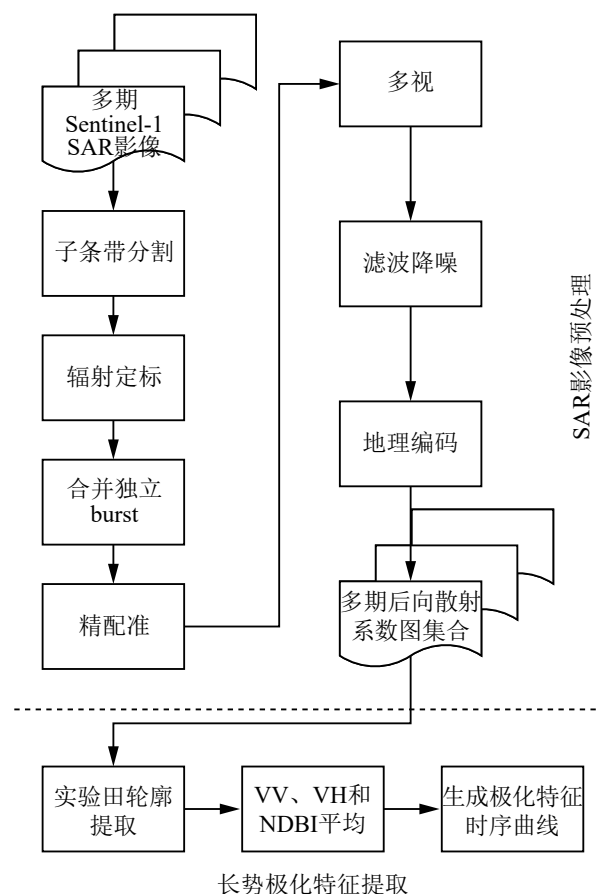


图1 数据处理流程

Figure 1 Data processing flow

$$I_{\text{NDBI}} = \frac{C_{\text{VH}} - C_{\text{VV}}}{C_{\text{VH}} + C_{\text{VV}}} \quad (1)$$

式(1)中： I_{NDBI} 表示归一化差分后向散射指数，为无量纲量， C_{VH} 和 C_{VV} 分别表示 Sentinel-1 影像数据中交叉极化和同化极化方式的后向散射系数。引入 NDBI 在于强化 VH 和 VV 的差异，弱化两者的共有趋势，从而在一定程度上抵消降雨对单一后向散射系数时序曲线产生的波动影响。

1.5 水稻的散射类型

水稻的散射类型一般可分为上部冠层的直接后向散射(图 2A)、漫反射(图 2B)，水面和主茎之间的二次散射(图 2C 和图 2F)，水稻田水面的镜面反射(图 2D)、水稻植株内部的体散射(图 2E)为主^[15-16]。

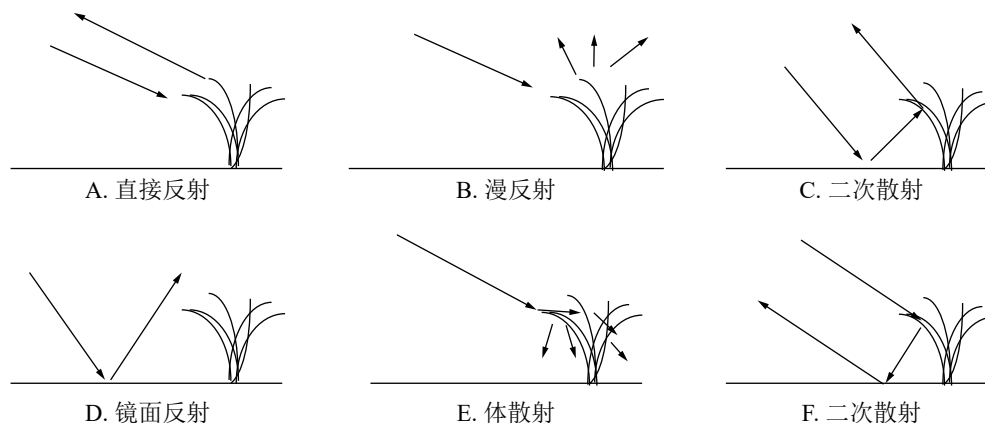


图 2 水稻后向散射类型

Figure 2 Rice backscattering types

2 结果与分析

2.1 降雨影响下的极化时序特征曲线分析

已有研究表明：VV 极化具有更高的穿透性，能够穿透植被层到达下垫土壤并与之发生相互作用；VH 极化对植被更为敏感^[14]；本研究的 NDBI 指数则同时考虑了 VH 和 VV 极化之间的差异性。结合图 3 进行分析发现：VV 后向散射系数值整体高于 VH，说明 VV 极化方式更容易穿透水稻植株，在其后向散射系数中包含了更多的来自稻田表面的回波能量，而 VH 极化的穿透性稍弱，其回波能量主要来自于植株。在幼苗期至分蘖初期 VV 和 VH 曲线都呈上升趋势，其原因在于此阶段水稻叶片细少，植株矮小且分布稀疏，散射类型以二次散射(图 2C 或图 2F)和镜面散射(图 2D)为主，只夹杂了少量的由水稻幼苗至分蘖初期贡献的体散射(图 2E)能量。期间未出现降雨，VV 和 VH 曲线呈单调上升趋势。NDBI 曲线也呈上升趋势，并在幼苗期至分蘖期过程中到达整个生长期的最高值，这是因为 VV 的上升速度较 VH 更快，二者的差异经 NDBI 方法放大形成的。在分蘖中期至长穗期，出现了 2 次降雨，造成了 VV 和 VH 曲线不同程度的波动。其中 5 月 16 日的降雨使 VV 曲线由上升转为下降，5 月 28 日前 1 日出现的 5.5 mm 降雨，使 VV 和 VH 曲线都出现了大幅下降，原因可能由于稻田内部形成较厚积水层，部分微波信号被积水层吸收^[15]。NDBI 曲线在上述降雨时间点上的变化较为平缓，表现为分蘖中后期单调下降后平稳进入长穗期，其原因在于水稻不断分蘖拔节，植株不断伸长，冠层叶片趋于密集，主要由 VH 贡献的漫反射(图 2B)和体散射能量增加，VV 穿透植株经水面反射的回波能量被植株消减降低，二者的差异逐渐缩小，相应的 NDBI 也有所下降。从长穗期到结实期直至收割期间，出现了 3 次降雨，对 VV 和 VH 曲线的趋势产生了或同向或反向的无规律波动影响，影响程度相较于分蘖期略轻微。NDBI 曲线则保持较平稳上升的趋势，几乎不受降雨影响。其原因在于长穗期的叶面积指数和植株高度均达到最大，此时的水稻植株粗壮，冠层茂密，水面二次散射和镜面散射的回波信号受到冠层阻挡，而接收到的回波信号多为植株表面散射，以漫反射和体反射为主，因降雨引起的稻田水面二次散射和镜面散射的回波能量变化受到冠层较多衰减，在曲线的趋势上并不能明显体现。水稻在结实期不断成熟过程中，稻粒体积和质量不断增加，逐渐压弯茎秆，造成植株高度小幅降低，使得 VV 回波能量小幅提升，VH 回波

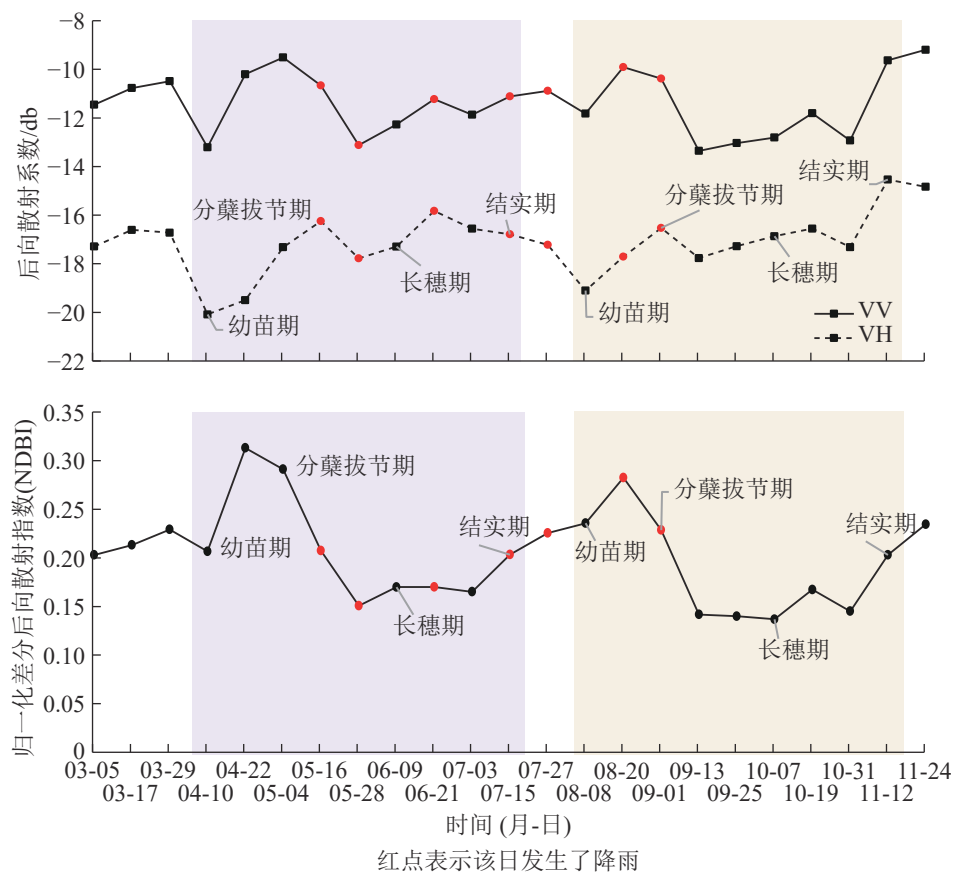


图3 极化特征时序曲线

Figure 3 Time series curves of polarization characteristics

能量则小幅下降,二者在结实期的差异经 NDBI 放大后得到曲线小幅上升的结果。NDBI 曲线在早晚 2 季水稻的生长周期中都体现出相近的变化趋势,即在幼苗期和分蘖期为快速上升至最高值,在分蘖中后期到长穗初期开始下降,在长穗期到结实期为平稳小幅上升。

对时序曲线的波动程度评价,采用二次多项式分段拟合并求平均曲率的方法,平均曲率越低,表明该曲线波动幅度越小,越趋于平稳。

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=2}^{n-1} \frac{|P_i''|}{(1+P_i'^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

式(2)中: $\bar{K}$ 为平均曲率, $n=1, 2, \dots, 23$ 为时间序号, $i \in n$, P_i 是对第*i*-1、*i*、*i*+1 期极化特征值组成的曲线进行二次多项式拟合得到的函数, P_i' 和 P_i'' 分别是 P_i 函数的一阶导数和二阶导数。

经计算,NDBI 曲线的平均曲率为 0.86,VV 和 VH 曲线的平均曲率分别为 2.90 和 2.31。说明 NDBI 曲线的变化趋势更为平稳,受降雨不规则波动的影响更小,能够更清晰地反映水稻的长势变化。

2.2 Planet 光学卫星验证

引入 Planet 光学卫星在线高分辨率影像数据对极化特征时序曲线进行验证,从可见光的角度直观的观测目标实验田的水稻长势情况。通过目视解译并结合已有研究,可大致推断水稻在当月所处的生长阶段。由图 4 可见:3 和 4 月影像(图 4A 和图 4B)的色调以当地黄土壤背景色为主,夹杂少量淡绿色,可判断此时水稻正值幼苗期,植株矮小叶片稀疏;5 月影像(图 4C)的色调为浓绿色,可判断此时水稻为分蘖拔节期,叶片生长旺盛;6 月影像(图 5D)的色调相比 5 月略淡,可判断此时水稻进入长穗期和结实期;7 月影像(图 4E)的色调重新回到土壤背景色,表明水稻经过结实期后已完成收割。晚稻的光学影像(图 4F~I)在色调也具有与早稻相似的变化特征,其共同在时序上反映出的生长阶段,可与 2.1 小节中对 NDBI 时序曲线的分析结果相对应^[12]。

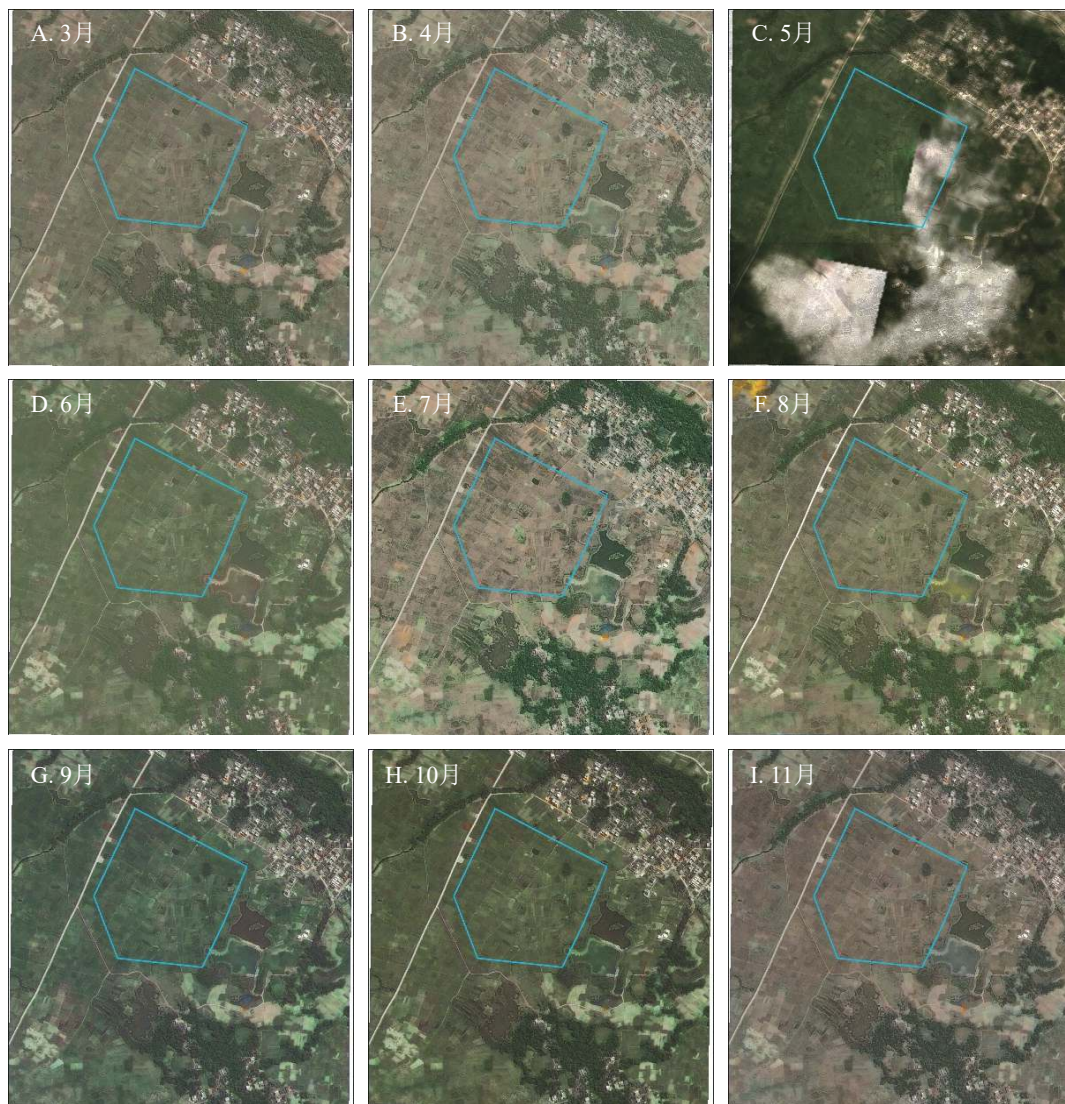


图 4 2018 年 3-11 月的 Planet 卫星影像示意图

Figure 4 Satellite images of Planet from March to November, 2018

3 讨论

降雨对后向散射系数的影响普遍存在，会在水稻种植期间后向散射系数时间序列上造成不同程度的波动。在本研究区中，5-7 月处于早稻的长穗期，该阶段植株结构变化趋于平缓，但由于期间多次降雨，导致 VH 和 VV 时序曲线分别在 4.0 和 3.5 db 的范围内出现了波动，这一观测结果与梁瀚月^[8]研究结果十分接近。后者所处江西省南昌市的水稻研究区，在 5-6 月受当地降雨影响，使得 VH 和 VV 时序曲线分别在 4.7 和 3.3 db 内出现了波动，且曲线形态也呈现与本研究相似的先快速上升后快速下降的趋势。而 NDBI 时序曲线，相较于上述单一极化方式在这一时间段中则更趋于平稳。

在水稻生长的中后期，水稻的体散射特征逐渐显现，散射强度由弱转强，NDBI 方法可较清晰地展现这一特征，并且与韩宇^[5]利用全极化数据获得的水稻生长中后期的体散射变化趋势一致。体散射的强弱通常与植被茎叶密集程度，以及水稻的成熟度密切相关，因此，用 NDBI 方法可以更直观地表现出水稻长势阶段的规律特征。

4 结论

本研究在常规的 VV 和 VH 后向散射系数时序分析的基础上提出了 NDBI 方法，并对比分析了三者在水稻生长期中的极化特征表现，尤其是受降雨影响的程度。研究发现：降雨发生后，短时间内会使

VH 和 VV 的后向散射系数出现较大波动, 从而对水稻当前生长阶段的判断产生干扰; 而同期的 NDBI 曲线则能有效地消减这一影响, 更准确地反映水稻长势规律。通过这一手段, 得到了水稻生长期中极化特征变化规律: 幼苗期主要以二次反射为主, 而从分蘖拔节时期开始到长穗期再到结实期直至收割, 体反射和漫反射不断增强, 二次散射逐渐减小。

5 参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [2] 杨文钰, 屠乃美. 作物栽培学各论: 南方本[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [3] SHUAI G Y, ZHANG J S, BASSO B, *et al.* Multi-temporal RADARSAT-2 polarimetric SAR for maize mapping supported by segmentations from high-resolution optical image [J]. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 2019, **74**: 1 – 15.
- [4] LI M M, BIJKER W. Vegetable classification in Indonesia using Dynamic Time Warping of Sentinel-1A dual polarization SAR time series [J]. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 2019, **78**: 268 – 280.
- [5] 韩宇. 多时相 C 波段全极化 SAR 农作物识别方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2015.
HAN Yu. *Research of Crop Recognition Method Based on Multi-temporal C-Band Quad-Pol SAR*[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2015.
- [6] 张晓倩. 基于全极化 SAR 数据的水稻识别与作物参数估算模型[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
ZHANG Xiaoqian. *Rice Extrsction Reseach and Rice Crop Parameter Estimation Based on Full-polarization SAR Data*[D]. Beijing: China University of Geoscience, 2012.
- [7] LOPEZSANCHEZ J M, Ballesterberman J D, Cloude S R. Monitoring and retrieving rice phenology by means of satellite SAR polarimetry at X-band [J]. *Geosci Remote Sensing Symp IEEE Int*, 2011, **24**(8): 2741 – 2744.
- [8] 梁翰月. 基于 Sentinel-1 数据的江西省南昌县早稻信息提取研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
LIANG Hanyue. *Extraction of Early Paddy Rice Information in Nanchang County of Jiangxi Province Based on Sentinel-1 Data*[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [9] 广西壮族自治区统计局. 广西统计年鉴 2013–2018. [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014–2019.
- [10] 付盛贤, 莫永生. 优质籼稻百香 139 的特征特性及栽培技术[J]. 中国稻米, 2011(3): 76 – 77.
FU Shengxian, MO Yongsheng. Characteristics and cultivation techniques of high quality indica “Bai xiang 139” [J]. *China Rice*, 2011(3): 76 – 77.
- [11] 欧阳伦曦, 李新情, 惠凤鸣, 等. 哨兵卫星 Sentinel-1A 数据特性及应用潜力分析[J]. 极地研究, 2017(2): 286 – 295.
OUYANG Lunxi, LI Xinqing, HUI Fengming, *et al.* Sentinel-1A data products’ characteristics and the potential applications [J]. *Chin J Polar Res*, 2017(2): 286 – 295.
- [12] Planet Labs Inc. Planet imagery product specifications[EB/OL]. 2019. <https://assets.planet.com/docs/combined-imagery-product-spec-final-may-2019.pdf>
- [13] HENRI M. 合成孔径雷达图像处理[M]. 孙洪, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [14] 李新尧. 基于 Sentinel-1 SAR 数据的表层土壤水分遥感反演[D]. 西安: 西北大学, 2019.
LI Xinyao. *Study of Retrieving Surface Soil Moisture Based on Sentinel-1 SAR Data*[D]. Xi’an: Northwest University, 2019.
- [15] 王君毅, 杨彬, 张远. 水稻冠层参数微波雷达反演系统设计与实现[J]. 遥感信息, 2016, **31**(2): 30 – 35.
WANG Junyi, YANG Bin, ZHANG Yuan. Design and implementation of inversion system for rice canopy parameters based on microwave remote sensing technology [J]. *Remote Sensing Inf*, 2016, **31**(2): 30 – 35.
- [16] 邵芸, 廖静娟, 范湘涛, 等. 水稻时域后向散射特性分析: 雷达卫星观测与模型模拟结果对比[J]. 遥感学报, 2002, **6**(6): 440 – 450.
SHAO Yun, LIAO Jingjuan, FAN Xiangtao, *et al.* Analysis of backscattering characteristics of rice in time domain: comparison between radar satellite observation and model simulation [J]. *J Remote Sensing*, 2002, **6**(6): 440 – 450.