

张亚红,张王菲,姬永杰,等. 油菜简缩极化参数响应及其长势参数反演[J]. 江苏农业科学,2018,46(15):170-175.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.15.046

油菜简缩极化参数响应及其长势参数反演

张亚红¹, 张王菲, 姬永杰¹, 舒清志¹, 杨浩²

(1. 西南林业大学林学院, 云南昆明 650224; 2. 北京农业信息技术研究所/北京市农林科学院农业科技信息研究所, 北京 100097)

摘要:简缩极化技术是为简化全极化 SAR 提出的一种新技术,它较全面地保持了全极化 SAR 信息,同时有效降低了对 SAR 系统复杂度及数据下传速率的要求。研究以全极化 Radarsat-2 数据为基础,模拟了简缩极化数据。利用覆盖整个油菜生长期的 5 景时间序列简缩极化数据,分别对每期数据提取 21 个简缩极化参数,在对比分析这 21 个极化参数与油菜生物量、株高和叶面积指数 3 个主要长势参数随油菜生长期动态变化规律的基础上,采用单因子经验回归模型法对油菜的 3 个长势参数进行了反演。研究发现,简缩极化体散射分量、圆极化度、圆极化比、2 个简缩极化后向散射系数及 Stokes 参数的 g_0 分量对油菜长势参数敏感,在长势参数反演中具有极大的潜力。同时对比了线性、二次多项式、乘幂、指数和对 5 种常见的回归反演模型,结果表明,二次多项式模型在 3 个油菜长势参数反演中具有更高的相关性及估测精度。在生物量单因子反演模型中, g_3 模型拟合效果最好, r^2 为 0.765, 而 g_0 具有最高的估测精度,其估测结果 RMSE 为 52.95 g/m²。在株高单因子反演模型中,圆极化比和圆极化度呈现出最高的相关性, r^2 为 0.923, 而体散射分量反演结果的 RMSE 最小,为 13.52 cm。叶面积指数反演中,圆极化比和圆极化度同样呈现出高相关性, r^2 为 0.857, 而体散射呈现低 RMSE 值,为 0.52。研究结果表明,简缩极化参数在油菜长势监测中具有很大潜力,而单因子经验回归模型为高精度的油菜长势参数反演提供了一种简单、快速、有效的手段。

关键词:简缩极化;油菜;长势参数;生物量;株高;叶面积指数

中图分类号: S127;TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)15-0170-06

油菜是世界重要的油料作物,也是我国具有传统优势的重要油料作物。我国油菜种植面积和产量均占全世界 30%

收稿日期:2017-02-09

基金项目:国家重点基础研究发展计划(编号:2013CB733404);国家自然科学基金(编号:31460194);云南省林学一流学科建设经费(编号:51600625)。

作者简介:张亚红(1990—),女,甘肃白银人,硕士研究生,研究方向为资源环境遥感。E-mail:1247870676@qq.com。

通信作者:张王菲,博士,副教授,现从事农林业遥感应用研究。E-mail:mewhff@163.com。

左右^[1]。此外,菜籽是生物柴油的主要原料之一,而生物柴油是替代石化柴油的理想“绿色能源”之一^[2],因此,促进油菜生产发展对保障我国国家粮食安全、促进国家减排节能并在国际上争取更多的碳排放量话语权具有重要意义。作物的株高是反映其生物量的主要参数,而生物量是构成其经济产量的基础,在较高的生物量基础上,通过合理的光合产物,作物即能获得高产^[3-4]。叶面积指数是衡量作物群体是否合理的重要栽培生理参数,一定时期内可反映群体光合势的大小,直接影响生物产量和经济产量^[5]。近年来采用多种手段进行生物量、株高和叶面积指数等作物长势参数反演已经成为作

pigs in a pen using image pattern recognition[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2013,93(2):111-120.

[2]朱伟兴,浦雪峰,李新城,等. 基于行为监测的疑似病猪自动化识别系统[J]. 农业工程学报,2010,26(1):188-192.

[3]马丽,纪滨. 基于机器视觉的单侧视猪腹式呼吸表达[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版),2012,25(4):67-71.

[4]袁登厅,朱伟兴,李新城. 基于 Zemike 矩及支持向量机的猪的姿态识别[J]. 信息技术,2015(1):93-96,100.

[5]谢微,田建艳,王芳,等. 基于几何参数特征与决策树支持向量机的猪只姿态分类[J]. 黑龙江畜牧兽医,2015(19):21-25.

[6]陆明洲,沈明霞,丁永前,等. 群养母猪饮水行为自动监测系统设计[J]. 南京农业大学学报,2013,36(5):133-138.

[7]刘健庄,栗文青. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割法[J]. 自动化学报,1993,19(1):101-105.

[8]Douglas D H, Peucker T K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature

[J]. Cartographica the International Journal for Geographic Information and Geovisualization,1973,10(2):112-122.

[9]邢家省,王拥军. 曲面上法曲率的最值和最值切方向的性质[J]. 吉首大学学报(自然科学版),2013,34(1):6-10,20.

[10]赵海勇,贾保先. 基于轮廓特征的人体行为识别[J]. 计算机科学,2013,40(2):312-315.

[11]Premachandran V, Kakarala R. Perceptually motivated shape context which uses shape interiors[J]. Pattern Recognition,2013,46(8):2092-2102.

[12]Schindler K, Suter D. Object detection by global contour shape[J]. Pattern Recognition,2008,41(12):3736-3748.

[13]Burkard R E, Çela E. Linear assignment problems and extensions [M]//Handbook of Combinatorial Optimization. New York: Springer US,1999:75-149.

[14]Munkres J. Algorithms for the assignment and transportation problems[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics,1957,5(1):32-38.

物产量估测的重要有效手段之一。

合成孔径雷达 (SAR) 已被证明是作物制图、作物长势参数反演的重要有效方法之一。多时相和多极化 SAR 后向散射系数在玉米、水稻制图及参数反演中已有大量成功的例子^[6-9]。全极化、干涉极化 SAR 技术的发展,使得采用 SAR 技术进行作物制图和参数反演的 SAR 信息从单一的后向散射系数拓展到极化参数、相干系数和相位。2014 年 Lopez - Sanchez 等通过 RADARSAT - 2 全极化数据探索了全极化信息水稻物候期反演中的有效性,研究结果表明,全极化数据在水稻监测中具有良好的应用前景^[10]。Rossi 等采用 TanDEM - X 数据进行水稻监测,发现极化干涉数据在水稻高度制图中具有较高的准确性^[11]。

尽管全极化、极化干涉 SAR 数据在作物长势监测中具有很大优势,但其仍然存在数据下载速度、测绘带宽、能量消耗和天线技术等限制因素。为了克服这些因素的限制,一个新的雷达极化技术——简缩极化 (CP) 被提出^[12-13]。Lopez - Sanchez 等和 Yang 等将简缩极化 SAR 参数用于水稻物候期的反演,发现简缩极化参数在水稻物候期估测中的精度在一定条件下相当于全极化参数估测水平。简缩极化参数在作物制图、物候期估测中的研究近年来逐渐开展,但其在油菜长势参数反演中的研究还鲜有报道^[10,14]。2015 年杨浩探讨了简缩极化参数生物量估测的可行性,指出简缩极化参数在油菜生物量估测中具有与全极化参数相当的潜力,但其提取的简缩极化参数仅仅包括后向散射系数和部分简缩极化分解参数^[15]。

本研究拟全面探讨简缩极化参数在油菜主要长势参数——生物量、株高和叶面积指数反演中的潜力。首先探讨了简缩极化数据获取的途径,并结合 Stokes 参数特征提取 17 个简缩极化参数,然后基于 2 种主流的简缩极化分解方法提取了基于简缩极化的 6 个具有物理意义的散射机制参数;接着根据油菜整个生长期 3 个主要长势参数的动态变化规律分析了 23 个简缩极化参数对油菜长势参数的敏感性;最后采用经典的经验回归模型对油菜长势参数进行了反演,进而探讨简缩极化参数在油菜长势参数反演中的有效性。

1 简缩极化数据模拟及参数提取

目前研究中采用较大的简缩极化方式为 CTRL 模式 (Circular Transmit and Dual Orthogonal Linear Receive, 圆极化发射线极化接收),因此本研究仅针对该模式展开研究。由于简缩极化的相关研究尚处于论证阶段,其数据源仍然以全极化 SAR 数据生成的模拟数据为主^[16]。

简缩极化可以通过全极化散射矩阵 [S] 与发射矢量、接收矢量相乘得到,本研究以右圆发射,水平和垂直线性接收为例,介绍由全极化数据模拟简缩极化数据的过程^[17]。

首先通过全极化散射矩阵 [S] 模拟由右圆极化发射的电磁波矢量,即:

$$E_R = [S]R_o \quad (1)$$

式中:[S] = $\begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$, 为全极化散射矩阵, $R = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$ 。

然后计算采用水平和垂直线极化接收的电磁波矢量,即:

$$E_H = [1 \quad 0] E_R = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_{HH} - jS_{HV}); E_V = [0 \quad 1] E_R =$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (S_{HV} - jS_{VV}) \quad (2)$$

式中: E_H 和 E_V 分别表示接收到的水平和垂直分量。

根据接收到的散射分量,可计算简缩极化的协方差矩阵 [J], 即:

$$[J] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: $J_{11} = 1/2 [(|S_{HH}|^2) + (|S_{HV}|^2) + j(S_{HH}S_{HV}^* - j(S_{HV}S_{HH}^*))]$; $J_{12} = 1/2 [(S_{HH}S_{HV}^* - S_{HV}S_{HH}^*) - j(|S_{HV}|^2) - j(S_{HH}S_{VV}^*)]$; $J_{21} = J_{12}^*$; $J_{22} = 1/2 [(|S_{VV}|^2) + (|S_{HV}|^2) + j(S_{HV}S_{VV}^* - j(S_{VV}S_{HV}^*))]$ 。

根据协方差矩阵,计算简缩极化的 Stokes 矢量,即:

$$\begin{aligned} g_0 &= J_{11} + J_{22}; \\ g_1 &= J_{11} - J_{22}; \\ g_2 &= \text{Re}\{(S_{HH}S_{HV}^*) + (S_{HV}S_{VV}^*)\} - \text{Im}(S_{HH}S_{VV}^*); \\ g_3 &= -\text{Im}\{(S_{HH}S_{HV}^*) - (S_{HV}S_{VV}^*)\} - \text{Re}(S_{HH}S_{VV}^*) + (|S_{HV}|^2). \end{aligned} \quad (4)$$

建立 Stokes 矢量与全极化协方差矩阵 [C] 的链接,即:

$$\begin{aligned} g_0 &= 1/2C_{11} + 1/2C_{32} + 1/2C_{33} + (1/\sqrt{2})\text{Im}C_{12} - (1/\sqrt{2})\text{Im}C_{23}; \\ g_1 &= 1/2C_{11} - 1/2C_{33} + (1/\sqrt{2})\text{Im}C_{12} - (1/\sqrt{2})\text{Im}C_{23}; \\ g_2 &= (1/\sqrt{2})\text{Re}C_{12} + (1/\sqrt{2})\text{Re}C_{23} + \text{Im}C_{13}; \\ g_3 &= (1 - \sqrt{2})\text{Im}C_{12} - (1/\sqrt{2})\text{Im}C_{23} + \text{Re}C_{13} - \text{Im}C_{22}. \end{aligned} \quad (5)$$

建立简缩极化 Stokes 矢量与全极化 [C] 矩阵的联系后,可以采用 [C] 矩阵计算简缩极化的 Stokes 参数,进而提取基于简缩极化的各参数。通过简缩极化的 Stokes 参数,提取了极化度、去极化度、标准极化度、线极化度、圆极化度、线极化比、圆极化比、散射角和相位差。另外,根据简缩极化常用的 2 种分解方法—— $m - \delta$ 和 $m - \chi$ 分解,我们同时提取了对应的 6 个散射机制,具体参数及计算方法见表 1。

表 1 简缩极化参数及其计算方法

简缩极化参数	计算方法
极化度 (m)	$\sqrt{(g_1^2 + g_2^2 + g_3^2)}/g_0$
去极化度 (\bar{m})	$1 - m$
标准极化度 (P_u)	$\sqrt{(g_1^2 + g_2^2 + g_3^2)}$
线极化度 (P_l)	$\sqrt{(g_1^2 + g_2^2)}/g_0$
圆极化度 (P_c)	g_3/g_0
线极化比 (U_l)	$(g_0 - g_1)/(g_0 + g_1)$
圆极化比 (U_c)	$(g_0 - g_3)/(g_0 + g_3)$
相位差 (δ)	$\text{Arctan}(g_3/g_2)$
圆度角 (χ)	$\frac{1}{2} \arcsin(g_3/mg_0)$
$m - \delta$ 分解二次分量 ($m - \delta - d$)	$mg_0 \frac{1 - \sin\delta}{2}$
$m - \delta$ 分解单次分量 ($m - \delta - s$)	$mg_0 \frac{1 + \sin\delta}{2}$
$m - \delta$ 分解体分量 ($m - \delta - v$)	$g_0(1 - m) \frac{1}{2}$
$m - \chi$ 分解二次分量 ($m - \chi - d$)	$mg_0 \frac{1 + \sin 2\chi}{2}$
$m - \chi$ 分解单次分量 ($m - \chi - s$)	$mg_0 \frac{1 - \sin 2\chi}{2}$
$m - \chi$ 分解体分量 ($m - \chi - v$)	$g_0(1 - m) \frac{1}{2}$

2 材料与方法

2.1 试验区域

研究区位于中国东北部,大兴安岭西北麓,呼伦贝尔草原北段,额尔古纳河右岸,地形以丘陵为主。研究区属于寒带大

陆性气候。平均气温 $-2.0^{\circ}\text{C}\sim 3.0^{\circ}\text{C}$ 之间。四季气候特征:春季温度回升快,降水少;夏季短暂,温暖潮湿;秋季降温快,初霜早;冬季漫长,寒冷干燥,农作物一年生长一季。研究区的试验样地位于内蒙古自治区额尔古纳市上库力农场($50^{\circ}17'\sim 50^{\circ}23'\text{N}$ 、 $120^{\circ}46'\sim 120^{\circ}53'\text{E}$),具体位置如图1所示。

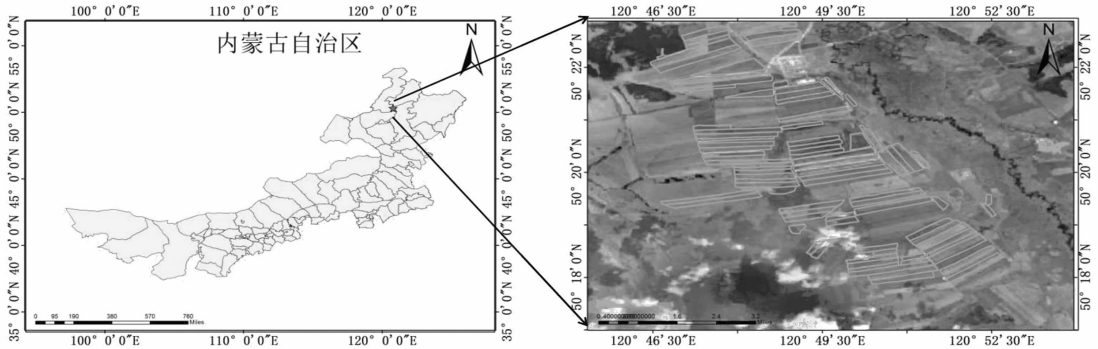


图1 研究区位置示意

2.2 试验数据

研究获取了试验区油菜生长周期内5景时间序列 Radarsat-2 数据及卫星过境时同步的5期地面调查数据。数据获取的时间为2013年5月油菜播种到2013年8月底油菜收割。

2.2.1 SAR数据 本研究获取的5景 Radarsat-2 精细全极化C波段SAR数据,该数据距离向和方位向分辨率分别为4.96、4.73 m,重复周期为24 d,获取日期分别为2013年5月23日、2013年6月16日、2013年7月10日、2013年8月3日和2013年8月27日。为避免不同传感器观测配置对观测结果造成的影响,研究获取的5景 Radarsat-2 影像的成像模式、成像入射角等参数完全一致,其影像具体参数见表2。

表2 Radarsat-2 图像参数

参数	数值
获取类型	全极化
雷达频率	5.405
入射角	$37.4^{\circ}\sim 38.8^{\circ}$
分辨率	8
轨道方向	升轨
波束模式	FQ18

2.2.2 地面实测数据 SAR数据覆盖了研究区油菜生长过程的关键生育期。地面调查在每次 Radarsat-2 卫星过境时同步展开(图2)。调查中每个地块选取 $0.5\text{ m}\times 2$ 行范围割取1个植被样本(油菜行距30 cm),并通过GPS记录样本点

的经纬度,便于将实测数据与雷达影像一一对应。每次调查获取15~20块代表性油菜地块长势参数,包括叶面积指数、植株高度、地上生物量等。地面调查同时获取了地块样本的播期、品种、垄向和管理措施等基础数据,并收集了气象、地形、土壤条件等资料。此外,还获取了研究区30 m分辨率的数字高程模型(DEM)数据对SAR数据进行地形校正,然后采用野外采集的高精度地面控制点对影像进行高精度的几何校正。

2.3 试验方法

叶面积指数是衡量油菜群体是否合理的重要栽培生理参数,一定时期内可反映群体光合势的大小,直接影响生物产量和经济产量,图2-a描述了油菜各个生长期叶面积指数的变化情况。生物量是构成经济产量的基础,在较高的生物量基础上,合理的光合产物分配利用,即有较高的经济系数,油菜就能获得高产。同时株高和生物量与油菜长势密切相关,实时了解油菜株高和生物量信息对油菜估产具有重要意义。图2-b、图2-c分别描述了油菜株高、生物量随其生长周期的变化情况。研究通过模拟的简缩极化SAR数据,提取了13个Stokes参数、6个简缩极化分解参数和2个后向散射参数,通过分析各简缩极化参数随油菜生长期的动态变化规律、简缩极化参数与3个油菜生长参数的相关性,确定了这些参数对油菜叶面积指数、株高和生物量的敏感性。在敏感性分析的基础上采用线性经验回归分析模型对油菜生物量、株高和叶面积指数进行了反演。

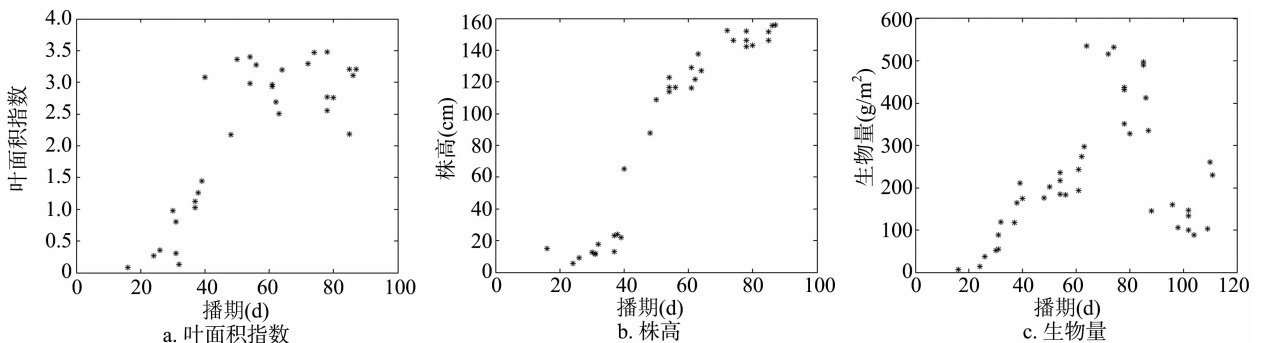


图2 油菜长势参数随播期动态变化

3 结果与分析

3.1 油菜简缩极化信息响应结果与分析

研究首先对5期全极化SAR单视复数据进行斜地距转换,然后生成C3矩阵;并对C3矩阵以30 m分辨率的DEM为基础进行地形校正;接下来将校正后C3矩阵以7.7的滤波窗口进行滤波降噪。简缩极化数据以降噪后的C3为基础获取,针对每期C3数据本研究总共获取了21个简缩极化参数。参与计算的油菜地块共计101块,其中每次SAR卫星过境时随机调查10块左右样地,获取生物量、株高和叶面积指数参数,剔除异常值后,整个油菜生长期用于简缩极化参数提取、生物量估测的样地共计44块,用于叶面积指数和株高计算的样地共计33块。表3描述了各简缩极化参数与各油菜长势参数之间的相关性,由于 $m-\delta-v$ 和 $m-\chi-v$ 两分量相同,表里仅列出了 $m-\chi-v$ 。表3中 g_0 、 g_1 、 g_2 和 g_3 分别代表4个Stokes参数。其中 g_0 表示电磁波的总功率; g_1 表示水平与垂直极化功率值的大小; g_2 表示倾斜角为 45° ($g_2 > 0$)或 135° ($g_2 < 0$)时的线极化分量; g_3 表示左旋圆极化($g_3 > 0$)和右旋圆极化($g_3 < 0$)分量的功率。 m 为极化度, \bar{m} 为去极化度,两者的和为1,用来表征地物散射电磁波的极化程度和去极化程度。 $m-\delta-d$ 、 $m-\delta-s$ 和 $m-\delta-v$ 分别为 $m-\delta$ 分解中的二次散射分量、单次散射分量和体散射分量。 $m-\chi-v$ 、 $m-\chi-d$ 和 $m-\chi-s$ 分别为 $m-\chi$ 分解中的体散射分量、二次散射分量和单次散射分量。这两种分解中体散射分量是相同的,而二次散射分量与单次散射分量则有所区别。 $m-\delta$ 分解中这2个分量包含了地物极化散射方向角的影响,而 $m-\chi$ 分解中剔除了地物极化散射方向角的影响。 δ 为水平与垂直

极化的相位差,可以用来区分单次散射和二次散射。 P_u 为标准极化度,反映散射波电磁波中极化波的能量,可反映地物的极化信息。 P_l 和 P_c 分别为线极化度和圆极化度,分别代表线极化和圆极化能量占总能量的比重。RH和RV分别代表右圆反射水平接收和右圆发射垂直接收的电磁波能量。 U_c 为圆极化比,能够表征特殊体散射类型。 U_l 为线极化比。 χ 为Stokes矢量在庞加莱球中的圆度角,表征散射电磁波极化椭圆的圆度。

表3中各简缩极化参数与油菜的生物量、叶面积指数和株高相关性的决定系数 r^2 的值范围在0.11~0.96之间变化,反映出不同极化参数与油菜生长参数之间的不同相关性。其中, m 和 \bar{m} 与长势参数——生物量、株高和叶面积指数的相关性参数完全一致,分别为0.525、0.932和0.907;“-”表示负相关。 $m-\delta-v$ 和 $m-\chi-v$ 由于提取算法相同,因此两者与油菜长势参数的相关性也完全一致,分别为0.868、0.852和0.707。 $m-\chi$ 分解的单次散射和二次散射与油菜长势参数的相关性较 $m-\delta$ 分解明显提高。4个Stokes参数中, g_0 与油菜长势参数的相关性较其他3个参数高,与生物量、株高和叶面积指数的 r^2 分别为0.865、0.749和0.579。RH和RV与长势参数的相关性均较高。几个极化度参数中,圆极化度与长势参数的相关性高。2个极化比参数中,圆极化比参数表现出与长势参数明显的相关性, r^2 分别为0.775、0.954和0.852。相比极化度,圆度角与长势参数的相关性与其相反,极化度相关性高的参数,圆度角相关性较低。纵观所有简缩极化参数,大部分与生物量和株高的相关性明显高于与叶面积指数的相关性,仅有极化度、去极化度、相位差、圆极化度和圆极化比5个参数例外。

表3 油菜长势参数与极化参数的相关性

极化参数	生物量	高度	叶面积指数	极化参数	生物量	高度	叶面积指数
g_0	0.865	0.749	0.579	δ	0.664	0.883	0.835
g_1	-0.625	-0.37	-0.204	$m-\chi-v$	0.868	0.852	0.707
g_2	0.695	0.496	0.312	P_l	0.524	0.769	0.728
g_3	-0.83	-0.885	-0.746	P_c	-0.718	-0.96	-0.88
m	-0.525	-0.932	-0.907	P_u	0.772	0.525	0.338
\bar{m}	0.525	0.932	0.907	RH	0.876	0.787	0.62
$m-\delta-d$	0.495	0.067	-0.11	RV	0.853	0.716	0.545
$m-\delta-s$	0.762	0.544	0.362	U_c	0.775	0.954	0.852
$m-\chi-d$	0.77	0.521	0.333	U_l	0.522	0.364	0.191
$m-\chi-s$	0.739	0.48	0.292	χ	0.844	0.666	0.472

3.2 油菜长势参数反演模型比较分析

采用经验回归分析方法进行油菜生物量、株高和叶面积指数的反演过程中,卫星5次过境时同步调查了44个样点数据,这44个样点数据全部参与生物量建模,在生物量建模中采用30个样本进行建模,14个样本进行精度验证;另外部分样点数据由于叶片较少,未计算叶面积指数;而在2013年8月23日卫星过境时,部分样点油菜已收割,未获得株高记录,因此叶面积指数和株高均用22个样本建模,11个样本数据进行精度验证。研究分别分析了一次线性模型、二次多项式模型、对数模型、乘幂模型及指数模型的建模结果,表4整理了21个简缩极化参数反演油菜生物量、株高和叶面积指数的最高精度及对应的模型信息。综合考察各模型建模参数,发

现二次多项式模型在各个参数建模中占有优势。在叶面积指数模型反演中,21个极化参数的二次多项式建模均优于或相当于其他模型。在生物量反演模型中,19个简缩极化参数采用二次多项式建模的RMSE低于其他模型, r^2 高于其他模型。在株高反演模型中,有16个简缩极化参数的二次多项式建模优于其他模型,并且3个长势参数反演的最优模型均为二次模型。图3描述了生物量、株高和叶面积指数单参数反演的最佳模型。生物量反演模型中, r^2 取得最高值的简缩极化参数为 g_3 , r^2 为0.765, RMSE为73.20; RMSE取得最低值的简缩极化参数为 g_0 , r^2 为0.707, RMSE为52.95,这说明 g_3 可以更高响应生物量的变化规律,而 g_0 则在生物量估测中具有更高的估测精度。次之的2个最近参数分别为圆极化比 U_c 和

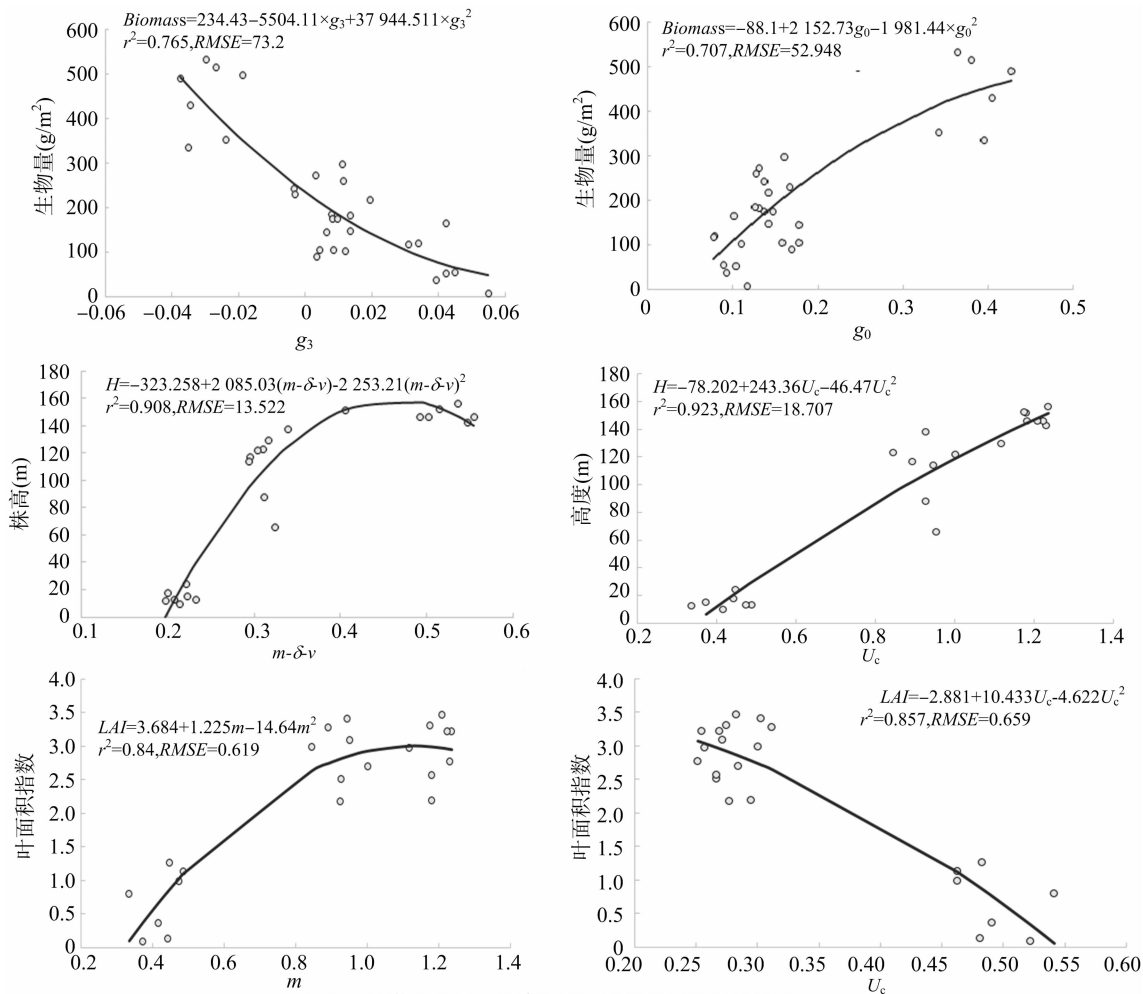


图3 油菜生物量、株高和叶面积指数反演最佳模型

表4 油菜长势参数单变量反演模型精度对比

简缩极化参数	生物量			株高			叶面积指数		
	r^2	RMSE	模型	r^2	RMSE	模型	r^2	RMSE	模型
g_3	0.765	73.20	二次	0.808	30.97	一次	0.773	1.08	二次
U_c	0.763	66.32	二次	0.923	18.71	二次	0.857	0.66	二次
P_1	0.402	157.33	二次	0.664	29.09	一次	0.694	0.88	二次
$m-\delta-v$	0.714	56.92	二次	0.908	13.52	二次	0.758	0.59	二次
$m-\chi-v$	0.714	56.71	二次	0.909	16.14	二次	0.757	0.58	二次
δ	0.625	102.94	二次	0.844	25.29	指数	0.755	0.81	二次
\bar{m}	0.479	132.05	乘幂	0.857	19.68	一次	0.84	0.62	二次
m	0.448	132.30	乘幂	0.857	19.68	一次	0.84	0.62	二次
RH	0.728	53.36	二次	0.845	25.76	二次	0.62	0.79	二次
P_c	0.433	155.95	乘幂	0.923	29.09	二次	0.853	0.66	二次
g_0	0.707	52.95	二次	0.784	29.80	二次	0.517	0.88	二次
RV	0.679	54.44	二次	0.698	33.47	二次	0.409	0.97	二次
χ	0.69	72.18	二次	0.543	42.47	二次	0.273	1.16	二次
$m-\delta-s$	0.594	88.24	二次	0.338	49.57	二次	0.215	1.24	二次
g_2	0.477	100.80	一次	0.224	48.96	一次	0.142	1.25	二次
$m-\chi-d$	0.602	80.00	二次	0.356	49.32	二次	0.215	1.24	二次
P_u	0.394	80.39	二次	0.344	49.34	二次	0.315	1.27	二次
$m-\chi-s$	0.598	84.42	二次	0.365	50.19	二次	0.348	1.26	二次
g_1	0.531	92.85	二次	0.386	52.86	二次	0.504	1.19	二次
U_1	0.734	66.41	二次	0.423	50.33	二次	0.542	1.20	二次
$m-\delta-d$	0.47	124.56	二次	0.472	75.62	二次	0.319	1.32	二次

圆极化度 P_v 。这 2 个参数能够表征强体散射分量,而生物量反演中简化极化体散射分量的高 r^2 ($r^2 = 0.714$) 也验证了这一点。另外,由于线极化和圆极化是线性组合关系,所以这还说明了油菜散射中的圆极化分量占优势,此外,RR 和 RL 也表现出较高的 r^2 。在株高反演模型中, U_v 和 P_v 表现出与株高变化趋势更高的响应性, r^2 为 0.923, $RMSE$ 分别为 18.71 和 17.62。体散射分量 $m - \delta - v$ 和 $m - \chi - v$ 与株高的 r^2 略低,但 $RMSE$ 较小,特别是 $m - \delta - v$,其 $RMSE$ 为 13.52,这是由于油菜整个生长期中,体散射较二次散射和表面散射与长势参数更相关,根据其散射特性可知,二次散射仅在株高达到一定程度时占优,而 $m - \delta - d$ 在生物量、株高反演中的低 r^2 、高 $RMSE$ 值也验证了这一点。叶面积指数反演中, U_v 和 P_v 同样表现出高相关性和低 $RMSE$,此外极化度、去极化度、体散射分量也表现出较高 r^2 和较低的 $RMSE$ 。这是由于叶面积指数可以表征单位面积内植被体散射的程度,因此与体散射相关的简缩极化参数均表现出与叶面积指数的强相关性和高估测精度。

4 讨论与结论

通过 21 个简缩极化参数于油菜生物量、株高和叶面积指数的相关性分析,可以发现多数的简缩极化参数对油菜长势参数敏感。多数参数与生物量、株高和叶面积指数随生长周期的动态变化规律相似或一致。通过经验回归模型采用单一简缩极化参数对油菜长势参数反演建模发现,较其他 2 种散射机制,体散射与油菜长势呈现明显的相关性,且与体散射相关的简缩极化分量,如圆极化度、圆极化比等也表现出反演长势参数的优越性及高精度。而在生物量反演中,由于生物量不直接与作物的极化特征相关,因此,相比受植被形状、方向影响较高的极化参数,反而表征后向散射能量的 Stokes 参数 g_0 和 g_3 呈现出对生物量更高的估测精度。

尽管采用简缩极化参数进行油菜长势参数反演的例子开展较少,但也有一些初步的研究结果:杨浩等提取了简缩极化分解的 6 个分量,并采用 $m - \chi - d$ 分量,使用二次回归模型对成熟期前油菜生物量进行了反演,均方根误差为 56.5,略高于本研究结果;该研究同时采用 $m - \chi - v$ 和 $m - \chi - d$ 比值,使用二次回归模型反演了油菜生物量, r^2 为 0.68, $RMSE$ 为 112.8。由于该研究仅提取了部分简缩极化参数,因此无法全面探讨简缩极化其他参数在生物量估测中的潜力^[15]。张远采用微波散射模型反演了水稻的生物量与株高,其中水稻生物量估测 $RMSE$ 为 100 g/m²,株高的 $RMSE$ 为 2 ~ 6 cm^[4]。该方法在株高反演中表现出更高的精度,但该方法在具体实现过程,须要开展大量的野外调研工作,工作量远远大于本研究采用的方法。

通过对 21 个简缩极化参数及油菜长势随油菜生长周期的动态变化分析,可以说明简缩极化参数在油菜长势监测中具有很大的潜力。通过不同方法对基于简缩极化参数油菜长势参数反演建模表明:二次多项式建模相比其他回归模型更适用于简缩极化单参数油菜长势参数反演建模;在整个油菜生长周期中,相比其他散射类型,体散射更能表征油菜的长势

特征,与体散射相关的简缩极化参数如简缩极化分解中的体散射分量、圆极化度、圆极化比等更适合油菜叶面积指数、株高的反演,而总散射能量 g_0 和线性散射能量 g_3 在生物估测中更具优势。另外,由于本研究并未对极化参数比值,如单次散射、体散射比等参数在长势参数中的反演进行分析,其潜力需要进一步分析;另外,植被的品种通常导致植被极化散射特征略有变化,因此,针对不同的油菜品种,须要结合其品种极化散射特征进一步分析。

参考文献:

- [1] 王汉中. 我国油菜产需形势分析及产业发展对策[J]. 中国油料作物学报,2007,29(1):101-105.
- [2] 刘春明. 我国油菜生产与生物柴油发展研究[D]. 武汉:华中农业大学,2008.
- [3] 张文宇,张伟欣,葛道阔,等. 基于生物量的油菜主茎叶片形态参数模拟研究[J]. 作物学报,2015,41(9):1435-1444.
- [4] 张 远. 微波遥感水稻种植面积提取、生物量反演与稻田甲烷排放模拟[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [5] 孙金英. 基于冠层反射光谱的油菜生长与氮素营养监测研究[D]. 重庆:西南大学,2009.
- [6] 杜鹤娟,柳钦火,李 静,等. 光学与微波植被指数协同反演农作物叶面积指数的可行性分析[J]. 遥感学报,2013,17(6):1587-1611.
- [7] Dong J W, Xiao X M. Evolution of regional to global paddy rice mapping methods: A review[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,2016,119:214-227.
- [8] Kurosu T, Fujita M, Chiba K. Monitoring of rice crop growth from space using the ERS-1 C-band SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,1995,33(4):1092-1096.
- [9] Suga Y, Konishi T. Rice crop monitoring using X, C and L band SAR data[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering,2008,7104(6):710410-710420.
- [10] 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 & Remote Sensing,2014,52(5):2977-2993.
- [11] Rossi C, Erten E. Paddy-rice monitoring using TanDEM-X[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,2014,53(2):900-910.
- [12] 刘 萌,张 红,王 超. 基于简缩极化数据的三分量分解模型[J]. 电波科学学报,2012,27(2):159-165.
- [13] 张 红,谢 镭,王 超,等. 简缩极化 SAR 数据信息提取与应用[J]. 中国图象图形学报,2013,18(9):1065-1073.
- [14] Yang Z, Li K, Liu L, et al. Rice growth monitoring using simulated compact polarimetric C band SAR[J]. Radio Science,2014,49(12):1300-1315.
- [15] 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]. 北京:中国林业科学研究院,2015.
- [16] Charbonneau F J, Brisco B, Raney R K, et al. Compact polarimetry overview and applications assessment[J]. Canadian Journal of Remote Sensing,2014,36(S2):298-315.
- [17] Raney R K. Hybrid-polarity SAR architecture[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,2007,45(11):3397-3404.