

引用格式: 苏伟, 朱德海, 苏鸣宇, 等. 基于时序 LAI 的地块尺度玉米长势监测方法[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 601-611. [Su W, Zhu D H, Su M Y, et al. Field-scale corn growth monitoring using time series LAI[J]. *Resources Science*, 2019, 41(3): 601-611.]  
DOI: 10.18402/resci.2019.03.17

# 基于时序 LAI 的地块尺度玉米长势监测方法

苏伟<sup>1,2</sup>, 朱德海<sup>1,2</sup>, 苏鸣宇<sup>3</sup>, 黄健熙<sup>1,2</sup>, 刘哲<sup>1,2</sup>, 郭浩<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083;

2. 农业部农业灾害遥感重点实验室, 北京 100083; 3. 滕州市第一中学, 滕州 277500)

**摘要:** 农作物长势监测可为田间管理措施调整和农作物产量预测提供及时、准确的信息。针对中国地块面积小的情况, 本文采用中高分辨率的多源遥感影像 Landsat-7 ETM+影像、Landsat-8 OLI 影像、高分一号 (GF-1) 影像、HJ-1 A/B 卫星影像为数据源; 针对目前过多依赖 NDVI 等易饱和植被指数的问题, 研究中选择 LAI 为长势监测指标, 并利用 PROSAIL 辐射传输模型反演 LAI, 以保证该指标的准确性; 长势实时监测采用 RPLAI、LVCI、MLVCI 指标, 从多个角度表征长势的实时监测结果。研究结果表明: ①同时相 GF-1 影像和 Landsat-8 OLI 影像具有较高的相关性, 2 种影像在近红外波段、绿波段、红波段的相关性决定系数  $R^2$  分别为 0.9320、0.7339、0.7153。②基于 PROSAIL 模型可以反演得到高精度的 LAI, 基于时序 LAI 的玉米生长过程监测结果表明: 2015 年, 黑龙江农垦总局八五二农场 6 月下旬玉米冠层 LAI 快速增加, 7 月底、8 月初 LAI 达到最大, 并持续一段时间, 进入 8 月下旬后, LAI 开始下降。③利用 RPLAI、LVCI、MLVCI 指标对研究区玉米长势实时监测的结果表明, 与 2011—2014 年相比, 2015 年八五二农场玉米长势一般, 研究区北部长势较好, 南部区域长势较差。从研究结果我们得出如下结论: ①同时相的 Landsat-8 OLI 影像与 GF-1 遥感影像, 经过相对辐射定标后可以结合使用于农作物长势监测中; ②利用 PROSAIL 模型反演时序 LAI, 可用于地块尺度的农作物长势精细监测。

**关键词:** 多源卫星影像; 地块尺度; LAI; PROSAIL 模型; 生长过程监测; 实时监测

DOI: 10.18402/resci.2019.03.17

## 1 引言

农作物长势是指农作物生长的状况与趋势, 可以用个体与群体特征来描述, 叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 是常用的表征群体特征的参数<sup>[1]</sup>。农作物长势监测可为田间管理提供及时的信息, 并且是早期估产的依据<sup>[2]</sup>。传统农作物监测方法是通过调查人员实地观测、测量获取作物的生长发育情况, 其监测精度较高, 但受人力、物力、时间等诸多因素的影响, 难以进行大面积作业。已有的研究表明: 由于受光、热、水和土壤条件等多种因素的影响, 不同农作物或同类农作物生长状况的光谱差异都可以通过遥感影像进行反映<sup>[3]</sup>。因此, 遥感技术被广泛应用于农作物长势监测<sup>[4]</sup>, 并逐渐成为国内

外农业遥感应用领域的重要研究内容之一<sup>[5,6]</sup>, 各国也相继建立农情监测系统<sup>[7]</sup>, 以便及时掌握国家和区域的农情信息, 为国家宏观调控粮食市场和制定国际粮食贸易政策提供科学的依据。

近年来, 国内外学者探索了多种农作物长势遥感监测方法, 包括直接使用遥感获取参数值 (如 NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) 与农作物长势相关分析的直接监测法、影像分类法、同期对比法、农作物生长过程监测法、作物生长模型法、诊断模型法等<sup>[8]</sup>。根据植物在红波段强烈吸收、在绿波段强烈反射的特征, Kogan 等构建植被条件指数 (VCI, Vegetation Condition Index) 和温度条件指数 (TCI, Temperature Condition Index), 对美国堪萨

收稿日期: 2018-01-19; 修订日期: 2018-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671433, 41371327); 十三五国家重点研发计划项目 (2017YFD0300903)。

作者简介: 苏伟, 女, 山东省滕州市人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事农业遥感应用研究。E-mail: suwei@cau.edu.cn

斯州高粱、玉米、进行长势监测<sup>[9]</sup>。蒙继华等采用光合作用累计方法,即将农作物的干物质量表示为生长季内吸收转化的光合有效辐射的累积值,利用遥感影像估算生物量,监测山东、河南两省的冬小麦长势,并针对大范围内农作物存在物候差异的问题进行物候归一化,从而达到在相同物候期水平下开展农作物长势监测的目的<sup>[8]</sup>。邹文涛等以时间序列NDVI为监测指标,通过比较分析时间序列栅格影像中各像元的时间序列曲线,将具有相似特征曲线的像元归为同一类别,同一类别内部采用同样的实时监测方案,利用这种方法对印度各邦的农作物长势连续变化进行定量描述,弥补了实时长势监测结果不能反映作物连续生长变化情况的缺陷<sup>[3]</sup>;Huang等利用四维变分算法将表征区域范围内农作物光谱信息的MODIS、TM遥感影像,同化到点尺度上表征农作物生长过程的WOFOST模型中,监测河北省保定市的冬小麦长势<sup>[10]</sup>。

上述国内外研究中多数使用的是中低分辨率遥感影像,但是中国地块较小,粗分辨率遥感影像无法精细反映农作物的长势;此外,已有研究中过多地依赖于NDVI等植被指数进行作物长势监测,其应用受到大气、土壤、以及NDVI饱和现象影响的限制,尤其是饱和问题对于玉米较为明显,玉米封垄后叶子的增长对叶面积指数的贡献较小,但生长后期的长势对玉米产量的形成影响较大。针对这些问题,本文以玉米长势监测为对象,主要研究目标为:①以中高分辨率遥感影像为数据源。目前多数中高分辨率遥感影像的过境周期较长,约10天,尤其是对针对玉米生长周期较短、且生长季内雨热同季的特点,中高分辨率遥感影像获取困难。针对这一问题,本文充分挖掘国产GF-1卫星影像和HJ-1卫星影像的应用价值,联合使用Landsat-8 OLI影像和MODIS的MOD15 LAI产品数据,生成时序卫星影像数据源。②建立地块尺度的长势监测指标和评估方法。NDVI等植被指数存在容易饱和的问题,鉴于此,本文基于多源影像利用PROSAIL辐射传输模型反演LAI,并构建3种基于LAI的监测指标进行年际间玉米长势监测。③以野外实地调查数据为依据,验证方法的实用性。本文研究区为黑龙江省农垦总局八五二农场。2015年7月份在研究

区范围内进行了LAI等参数的实地测量,用于验证本文方法的有效性。本文的研究意义在于:①评价Landsat-8 OLI影像与GF-1遥感影像结合使用于农作物长势监测的可行性;②探索一套简单、可行的地块尺度的农作物长势监测方法。

## 2 研究区概况和数据源

### 2.1 研究区概况

黑龙江农垦总局是中国主要玉米种植区域之一,其种植面积超过9000万亩,居全国之首。本文研究区为黑龙江省农垦总局红兴隆分局八五二农场,位于双鸭山市宝清县东南部,地处完达山北麓,西至小森别河,南毗完达山林区,北到饶力河,地理范围为132°18'E-132°52'E,46°06'30"N-46°37'30"N,面积为1363 km<sup>2</sup>,其位置如图1所示。研究区内种植制度为一年一熟,以种植玉米、大豆、水稻为主。玉米于5月上旬播种,6月下旬为拔节期,7月下旬为抽穗期,8月上旬进入吐丝期,9月下旬成熟收获。

### 2.2 数据源

#### 2.2.1 遥感影像

本文以Landsat、GF-1、HJ-1 A/B影像反射率和时间序列MODIS LAI产品为数据源。其中,Landsat-7 ETM+、Landsat-8 OLI影像和GF-1影像用于2015年的玉米生长过程监测,HJ-1 A/B影像和MODIS LAI产品用于与2011年、2012年、2013年和2014年的实时监测与分析。玉米的生长季较短,进入拔节期后玉米植株生长变化快,各生育期之间的时间间隔较短,而Landsat系列影像的时间分辨率为16 d,又加上受云、雨的影响,导致中高分辨率影像获取困难。因此,在本研究中加入GF-1影像,以满足玉米不同生育期、尤其是关键生育期的动态变化监测,用于玉米生长过程监测的影像数据源如表1所示。从表1可见:GF-1影像穿插分布在Landsat-7 ETM+和Landsat-8 OLI影像中,为解决不同影像辐射质量标准不同问题,我们以Landsat-8 OLI影像为基准,选择研究区南部的湖泊水体区域,对GF-1影像进行了相对辐射校正;此外,鉴于Landsat-7、Landsat-8、GF-1的中心波长不完全一致的问题,我们利用光谱响应函数进行了归一化处理。

玉米长势的实时监测需基于同一生育期或同

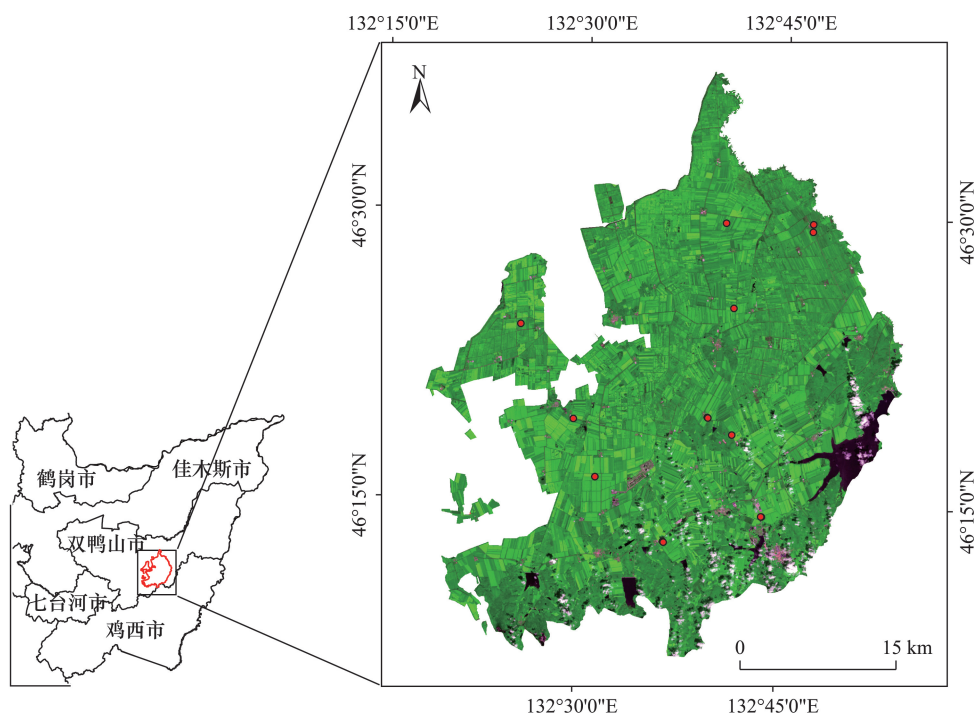


图1 研究区位置及GF-1卫星影像(2015年7月8日获取,R(Band4)G(Band3)B(Band2))

Figure 1 Study area and the GF-1 remote sensing image acquired on 8 July 2015 (R(Band4)G(Band3)B(Band2))

表1 用于2015年玉米生长过程监测的时序卫星影像信息

Table 1 Time series of remote sensing images for corn growth monitoring in 2015

日期	影像类型	传感器	空间分辨率/m
6月20日	Landsat-8	OLI陆地成像仪	30
7月08日	GF-1	WV4	16
7月16日	GF-1	WV4	16
7月22日	Landsat-8	OLI陆地成像仪	30
7月30日	Landsat-7	增强型主题成像仪ETM+	30
8月07日	Landsat-8	OLI陆地成像仪	30
8月15日	Landsat-7	增强型主题成像仪ETM+	30
9月03日	GF-1	WV3	16
9月08日	Landsat-8	OLI陆地成像仪	30
9月13日	GF-1	WV3	16

一时相的遥感影像进行,由于受天气条件的影响,很难收集到2011—2014年所有年份整个生长季的卫星影像,因此在实时监测中本文主要监测分析不同年际间8月上旬吐丝期的长势差异。在2011—2015年玉米生长季内收集到研究区内质量好的HJ-1卫星影像有:2011年8月26日、2012年8月16日、2013年7月14日、2014年8月1日、2015年8月5日,对于该时间跨度来说玉米长势变化很大。因此,我们

联合同时相的MODIS LAI产品(MCD15A3)进行时间差异修正,以实现年际间玉米长势信息在生育期上的统一。用于实时监测的影像获取信息如表2所示。

2.2.2 野外调查数据

2015年7月30日—8月3日,我们在研究区内进行野外调查,测量7个玉米样方上的LAI、叶片叶绿素含量、冠层光谱、叶片光谱、土壤光谱等。玉米冠层LAI的测量使用LAI-2200c植物冠层分析仪,每个样点上测量1次天空光和4次叶下光。其测量方法如下:第1个值取在垄上,第2个值取在两垄之间1/4处,第3个值在两垄中间,第4个值取在距离垄3/4处。叶片叶绿素含量的测定采用SPAD-502 Plus叶绿素含量测定仪,每个样方选择3~4株玉米逐叶片测量叶绿素含量,每株玉米选择6个叶片,每个叶片从叶基到叶尖测量3~5次叶绿素值,样点上所有叶片的平均值作为该样方的冠层叶绿素含量。冠层光谱、叶片光谱和土壤光谱采用美国Spectra Vista生产的SVC HR1024i便携式地物光谱仪测量。实验样地的选择遵循随机、均匀分布的原则,样方的大小为30 m×30 m。



表2 用于年际间玉米长势监测的时序卫星影像信息

Table 2 Time series of remote sensing images for difference monitoring between different years of corn growth

年份	影像类型	日期	传感器	空间分辨率/m
2011	HJ-1 A	8月26日	CCD1	30
	MODIS LAI产品	8月05日	MODIS	500
	MODIS LAI产品	8月29日	MODIS	500
2012	HJ-1 A	8月16日	CCD1	30
	MODIS LAI产品	8月04日	MODIS	500
	MODIS LAI产品	8月20日	MODIS	500
2013	HJ-1 B	7月14日	CCD1	30
	MODIS LAI产品	7月20日	MODIS	500
	MODIS LAI产品	8月05日	MODIS	500
2014	HJ-1 B	8月1日	CCD2	30
2015	HJ-1 A	8月5日	CCD2	30

3 研究方法

本文主要进行2种长势监测,一是2015年生长季内的玉米生长过程监测,二是2011—2014年的实时监测。其中,玉米生长过程监测是通过反演2015年玉米生长季内的时序LAI来实现;实时监测是借鉴 Yang 等<sup>[1]</sup>植被状态指数实时监测方法,构建 RP-LAI (LAI Ratio to Previous Year)、LVCI (Vegetation Condition Index Based on LAI)、MLVCI (Mean Vegetation Condition Index Based on LAI) 监测指标实

现。不同年际间用于实时监测的影像时相差异大的问题,通过利用MODIS LAI产品的时间差异进行修正。本研究的技术路线包括影像预处理、长势参数提取及精度验证、玉米生长过程监测和实时监测,具体的长势监测技术流程图如图2所示。影像预处理包括 Landsat-7、Landsat-8、GF-1、HJ-1 A/B 影像的几何校正和辐射校正、MODIS LAI产品的投影转换、坐标定义等;长势参数提取是利用 PROSAIL 模型定量反演时序 LAI,并以时序 MODIS LAI 产品

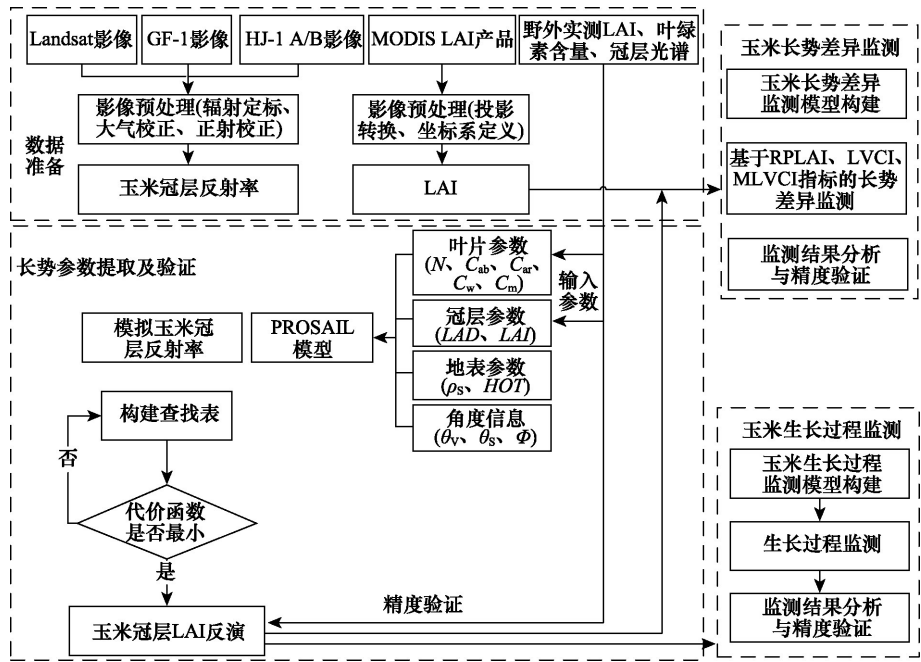


图2 基于时序 LAI 的地块尺度玉米长势监测技术流程图

Figure 2 Workflow of corn growth monitoring using time series LAI from multi-source satellite remote sensing images



2019年3月

的时间变化斜率对时序LAI进行时间修正;构建RPLAI、LVCI、MLVCI指数变化模型,进行玉米长势实时监测。其中,时序LAI归一化辐射处理、实时监测指标的选择和构建、实验设置论述如下。

### 3.1 时序LAI归一化辐射处理

实时监测需基于同一生育期进行,但所获取的2011—2015年的HJ-1影像时相差异较大,需要进行归一化辐射处理。以2011年8月26日HJ-1影像反演LAI的过程及归一化辐射处理为例,具体步骤如下:

(1)利用PROSAIL模型,基于2011年8月26日的HJ-1 A影像反演得到 $LAI_{HJ-1}$ 。

(2)在像元尺度上统计分析2011年8月5日MCD15A3和2011年8月29日MCD15A3的相关性,如果相关性大则逐像素计算2个时相上LAI值的时间变化斜率,记为 $r(i,j)$ :

$$r(i,j) = MCD_{k+1}(i,j) / MCD_k(i,j) \quad (1)$$

式中: $MCD_{k+1}(i,j)$ 为 $k+1$ 时刻的MCD15A3 LAI值(即2011年8月29日LAI值), $MCD_k(i,j)$ 为 $k$ 时刻的MCD15A3 LAI值(即2011年8月5日LAI值)。

(3)将空间分辨率为500 m的时间变化率影像重采样至30 m,得到 $r(i,j)_{30m}$ ,并利用 $r(i,j)_{30m}LAI_{HJ-1}$ 从2011年8月26日修正到2011年8月5日,修正公式如下:

$$LAI_k(i,j) = LAI_{k+1}(i,j) \times r(i,j)_{30m} \quad (2)$$

式中: $LAI_k(i,j)$ 为修正后LAI值, $LAI_{k+1}(i,j)$ 为 $k+1$ 时刻LAI反演结果, $r(i,j)_{30m}$ 为前后2时相的时间变化率。

研究中利用该方法对2011年8月26日、2012年8月16日和2013年7月14日的LAI反演结果进行了归一化辐射处理,使得用于实时监测的LAI值获取时相归一化为2011年8月5日、2012年8月4日、2013年8月5日、2014年8月1日和2015年8月5日。

### 3.2 实时监测指标的选择与构建

本研究通过构建RPLAI、LVCI、MLVCI监测指标,实现对八五二农场2015年的玉米生长过程监测与2011—2015年的实时长势监测,各监测指标构建方法如下。

#### (1)RPLAI指标

RPLAI指标是当年LAI与前一年LAI的变化率,其计算公式为:

$$RPLAI = \frac{LAI_i - LAI_{i-1}}{LAI_{i-1}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $LAI_i$ 为第 $i$ 年的LAI值, $LAI_{i-1}$ 为第 $i-1$ 年的LAI值。通过RPLAI指标可以监测当年长势与前一年长势的空间差异情况。

#### (2)LVCI指标

Kogan<sup>[9]</sup>提出的VCI(Vegetation Condition Index)指标是以NDVI作为参数进行监测。鉴于NDVI存在易饱和的问题,本文以LAI构建实时监测指标LVCI,其构建方式为当前LAI与多年同一生育期历史最小LAI的差值,与多年同一生育期LAI最大值与最小值差异范围的比值,计算公式为:

$$LVCI = \frac{LAI_i - LAI_{\min}}{LAI_{\max} - LAI_{\min}} \quad (4)$$

式中: $LAI_i$ 为第 $i$ 年的LAI值; $LAI_{\max}$ 和 $LAI_{\min}$ 分别为一定时间范围内同一生育期LAI历史最大值和最小值。 $LVCI$ 的取值范围为 $[0,1]$ ,当 $LVCI$ 为0时,表示作物生长活性达到最小,当 $LVCI$ 为1时,表示作物生长活性达到最大。

#### (3)MLVCI指标

MLVCI以作物多年同一生育期的LAI均值为依据,通过量化当年LAI与多年LAI均值的变化率实现实时监测,这种方法受农作物生长状况极好和生长状况极差的极端情况影响较小,其计算公式为:

$$MLVCI = \frac{LAI_i - LAI_{\text{mean}}}{LAI_{\text{mean}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $LAI_i$ 为当年LAI值, $LAI_{\text{mean}}$ 为多年同一生育期LAI的均值。

本研究以玉米吐丝期(8月1—5日)作为实时监测的时间点,获取2011—2015年的相应时间范围内研究区的LAI,并通过RPLAI、LVCI和MLVCI监测指标量化2015年玉米LAI相较于前一年LAI、多年LAI极值以及多年LAI均值的差异,实现对研究区2015年玉米长势的实时监测与分析。

### 3.3 实验设置

本研究以LAI作为玉米长势监测指标,通过对比分析时序LAI的变化,对八五二农场玉米长势进行监测与分析。玉米冠层时序LAI利用PROSAIL辐射传输模型反演取得。PROSAIL模型是由PROSPECT叶片光学模型和SAIL冠层反射率模型

耦合而成的模型<sup>[12-16]</sup>,也是目前在植被冠层参数反演方面应用较为广泛的模型之一。PROSPECT模型是叶片尺度模型,通过描述光线在叶片的反射、散射、透射,模拟得到叶片在400~2500 nm波长范围的反射率和透射率<sup>[12]</sup>;SAIL模型是冠层尺度模型,通过输入叶片透射率和反射率模拟植被冠层内部的多次反射、散射等,从而模拟接近真实场景下的植被冠层在400~2500 nm之间的冠层反射率。将PROSPECT模型模拟的叶片反射率和透射率输入到SAIL模型中,即完成模型的耦合,利用PROSAIL模型正向模拟玉米冠层反射率的公式为:

$$\rho_c = \text{PROSAIL}(N, C_{ab}, C_{ar}, C_w, C_m, LAI, LAD, Hot, \theta_v, \theta_s, \varphi, \rho_s) \quad (6)$$

式中: $\rho_c$ 为冠层反射率; $N$ 为叶片结构参数; $C_{ab}$ 为叶绿素含量; $C_{ar}$ 为类胡萝卜素含量; $C_w$ 为等效水厚度; $C_m$ 为干物质含量; $LAI$ 为叶面积指数; $LAD$ 为叶倾角分布; $Hot$ 为热点参数; $\theta_v$ 和 $\theta_s$ 分别为观测天顶角和太阳天顶角; $\varphi$ 为太阳和观测相对方位角; $\rho_s$ 为土壤反射率。

输入参数的设置和优化是利用PROSAIL模型进行LAI反演的关键<sup>[17]</sup>,在该研究中用于反演的输入参数设置如表3。 $LAI$ 和 $C_{ab}$ 的取值依野外实测而定; $LAD$ 由野外实测时利用地基激光雷达扫描点云计算出的叶倾角函数而定<sup>[17]</sup>; $\rho_s$ 取决于野外测量的干土、湿土的比例系数, $\theta_s$ 、 $\theta_v$ 、 $\varphi$ 由影像头文件获得,其他参数从LOPEX93数据库获取。

表3 PROSAIL模型中的参数设置

Table 3 Setting the input parameters of PROSAIL model for leaf area index (LAI) retrieval

参数	含义	单位	参考值
$LAI$	叶面积指数	$m^2/m^2$	[1-7: 0.1]
$C_{ab}$	叶绿素 a+b 含量	$\mu g/cm^2$	[20-60: 2]
$N$	叶片结构参数	/	1.518
$C_{ar}$	类胡萝卜素	$\mu m/cm^2$	8
$C_w$	等效水厚度	cm	0.01~0.05
$C_m$	干物质含量	$\mu m/cm^2$	0.002~0.016
$LAD$	叶倾角	°	50
$\theta_s$	太阳天顶角	°	32
$\theta_v$	观测天顶角	°	0
$\varphi$	太阳-卫星相对方位角	°	0
$\rho_s$	干土反射比例系数	/	0.6
$HOT$	热点参数	/	0.1

基于PROSAIL模型的LAI反演,在每个影像像素上输入优化后参数运行该模型,从而正向模拟得到该像素位置上的反射率,由此构建输入参数与模拟反射率之间的查找表;基于所构建查找表中不同输入参数(见表3)、输出参数(不同波段的反射率)的组合,通过最小二乘法构建代价函数,通过寻求模型最优解完成LAI的反演<sup>[18]</sup>。本研究采用的代价函数为带权重的平方差和形式,通过最小二乘法构建,计算模拟得到的各波段反射率和影像各波段反射率之间的残差平方和,代价函数如下:

$$\cos t = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_o(\lambda_i)} (\rho_m(\lambda_i) - \rho_o(\lambda_i))^2 \quad (7)$$

式中: $\lambda_i$ 第*i*波段的反射率; $\rho_m(\lambda_i)$ 为PROSAIL模型模拟得到的*i*波段光谱反射率, $\rho_o(\lambda_i)$ 为输入的遥感影像*i*波段的反射率。通过多次迭代,当 $\cos t$ 函数取得最小值时,对应模拟波段的输入参数LAI的取值即为LAI的反演值。

## 4 结果与分析

### 4.1 GF-1影像与Landsat 8影像的相关性分析

在2015年玉米生长过程监测中,结合使用了Landsat-8 OLI、Landsat-7 ETM+和GF-1卫星影像,同一时相或相近时相的GF-1影像和Landsat系列影像相关性是否强是结合使用两种影像进行玉米长势监测的关键。因此,该研究首先以2015年9月7日的GF-1影像与2015年9月8日的Landsat-8 OLI影像的相关性说明两种影像的相似程度。图3(a)、(b)、(c)、(d)分别为GF-1影像与Landsat-8 OLI影像在蓝、绿、红、近红外波段的相关性分析结果,从图中可以看出:2种影像在绿、红、近红外波段的反射率具有较强的相关性,决定系数均在0.7以上,其中在近红外波段相关性最强,决定系数 $R^2$ 为0.9320,表现为强相关性;其次为绿波段,决定系数 $R^2$ 为0.7339,表现为强相关性;再者为红波段,决定系数 $R^2$ 为0.7153,表现为强相关性;在蓝波段波长范围内,两影像反射率相关性较低,决定系数 $R^2$ 为0.1865,表现为弱相关性。因此,在后面的LAI反演时主要使用时序影像的绿、红、近红外波段。

### 4.2 生长过程监测结果与分析

将2015年时间序列的GF-1影像、Landsat-8 OLI影像和Landsat-7 ETM+影像输入到PROSAIL

2019年3月

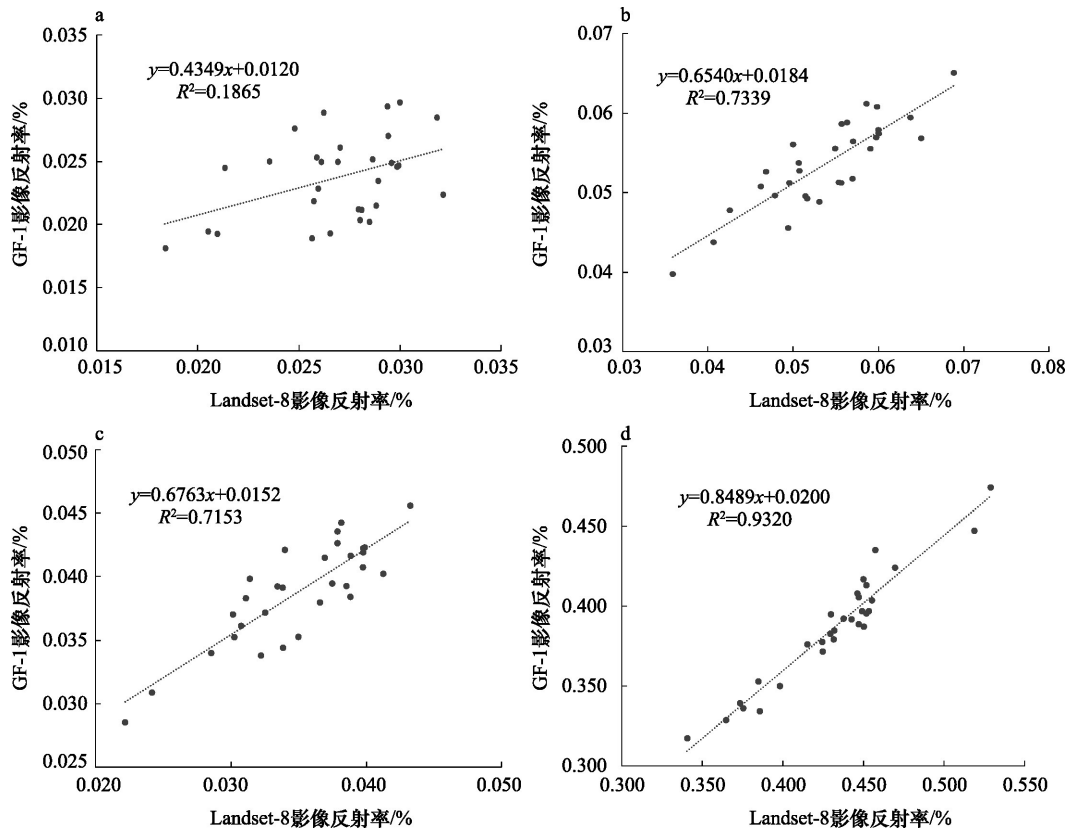


图3 GF-1影像与Landsat-8 OLI影像在蓝(a)、绿(b)、红(c)、近红外(d)波段的相关性

Figure 3 Correlation of the GF-1 image and the Landsat-8 OLI image in blue (a), green (b), red (c), and NIR (d) bands

模型,通过建立查找表利用代价函数反演整个研究区玉米种植区的时间序列LAI,图4(a)-(i)是研究区内的LAI反演结果。以7月30日野外实测LAI为标准,对LAI反演结果进行精度验证,其相关性分析的决定系数 $R^2$ 为0.8030,表现为强相关性,均方根误差 $RMSE=0.7675$ ,这说明利用该研究中利用PRO-SAIL模型反演玉米LAI的精度较高。从图4的LAI反演结果可以看出:从播种后玉米LAI随时间的推移先增加,稳定一段时间后减小。其中,2015年6月20日的LAI最小,此时为玉米拔节期,植株比较低矮,LAI主要集中在0.5~1.5;2015年7月30日LAI最大,此时玉米处于吐丝期,玉米叶片已完全展开,植株雌穗花丝从苞叶中伸出,叶面积指数达到最大值,反演结果主要集中在4.5~7.0之间;随着玉米籽粒的生长,吐丝期以后玉米LAI持平一段时间(如2015年7月30日到2015年8月7日LAI)后逐渐下降,到2015年9月15日,研究区内玉米大部分已成熟待收获,相较于吐丝期LAI大幅度下降,反演结果

主要集中在2.5~3.5。此外,8月7日的遥感影像在农场北部由于有薄云分布,导致相对区域的LAI反演结果偏低。

图5为研究区内2个管理区的玉米生长LAI曲线。以5月5日播种作为玉米生长周期第1天,6月下旬玉米进入拔节期,LAI开始急剧增加;7月底8月初为玉米吐丝期,此时LAI达到最大,并稳定一段时间;进入8月下旬后,LAI开始下降,9月底玉米成熟收获。

#### 4.3 实时监测结果与分析

利用RPLAI、LVCI、MLVCI指标监测研究区范围内2015年玉米吐丝期的长势与2011—2014年平均长势的差异(如图6所示)情况。由图6(a)RPLAI空间分布图可知,相较于前4年的玉米LAI大小,2015年玉米长势各区域分布不一致,北部部分区域长势好于往年,而南部区域长势弱于前4年均值;由LVCI空间分布图可知,相较于2011—2014年的玉米长势,2015年玉米生长活力一般,其中,长势较为旺盛的



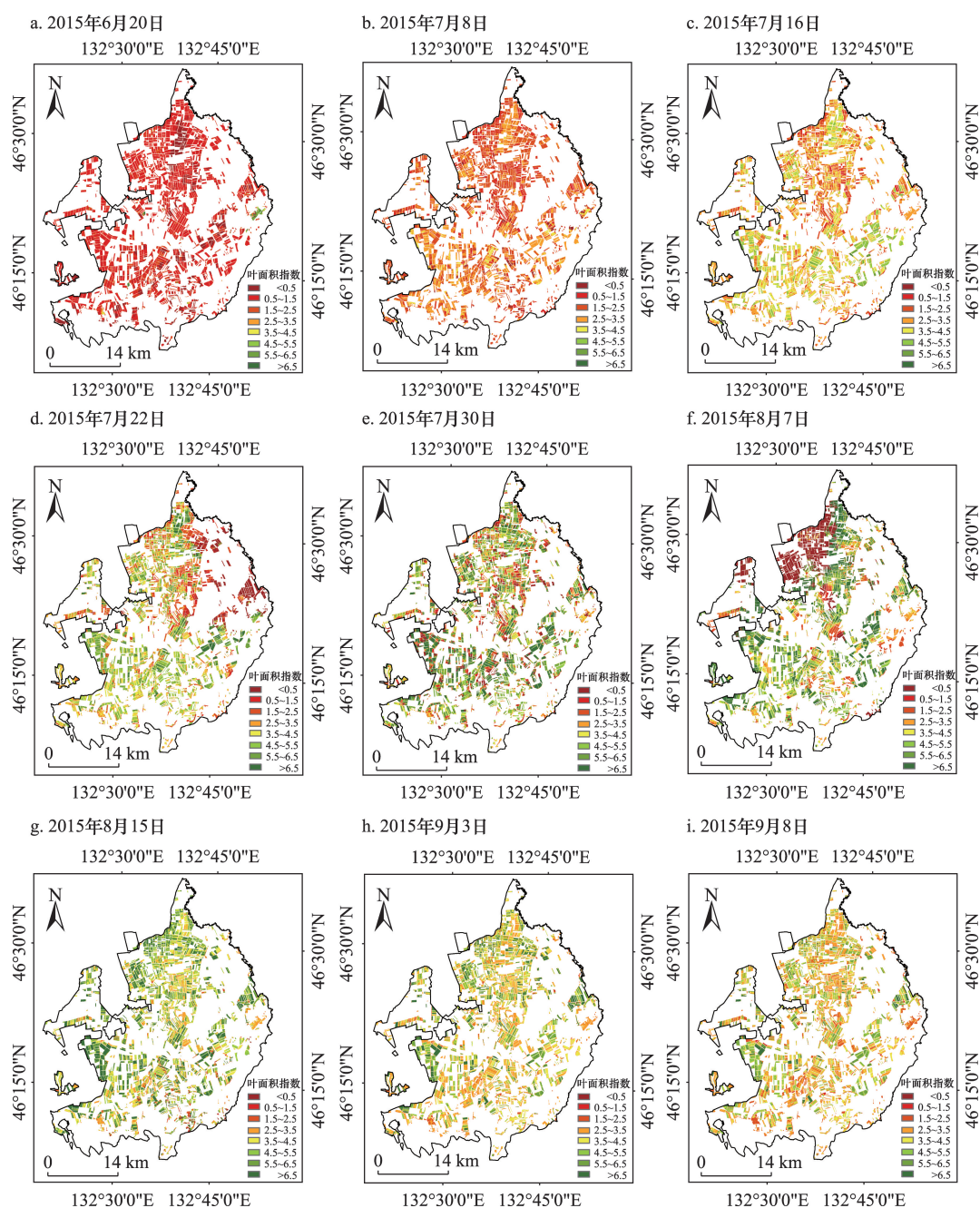


图4 研究区范围内2015年时间序列LAI反演结果

Figure 4 Retrieved leaf area index (LAI) in the study area from 20 June to 8 September 2015

区域多位于农场北部,与RPLAI的分布较为一致;由MLVCI空间分布图可知,相较于近5年的LAI均值,2015年玉米长势一般,农场北部部分区域比往年长势好,这与基于LVCI的监测结果一致。

## 5 结论

农作物长势遥感监测作为农业遥感应用领域的一个重要内容,是对大范围作物长势监测的有效

手段。针对由于玉米生长季雨热同季造成的同一种遥感影像获取难度大的问题,本研究通过结合使用Landsat-7 ETM+影像、Landsat-8 OLI影像、高分一号(GF-1)影像、HJ-1 A/B卫星影像和MODIS LAI产品的方法,构建时序影像用于玉米长势监测,解决数据源不足问题。针对已有研究依赖于NDVI等植被指数进行监测时存在的指数易饱和问题,本研

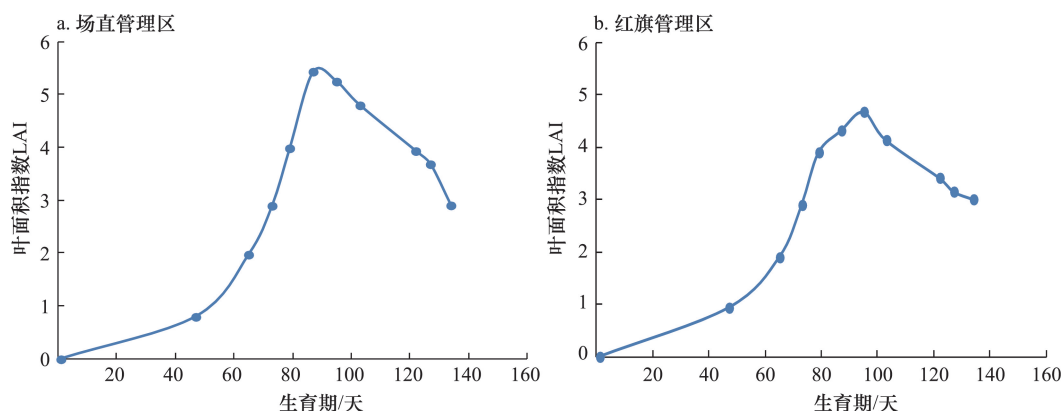


图5 研究区2015年玉米生长LAI曲线

Figure 5 Leaf area index (LAI) changing curve in the study area for corn, 2015

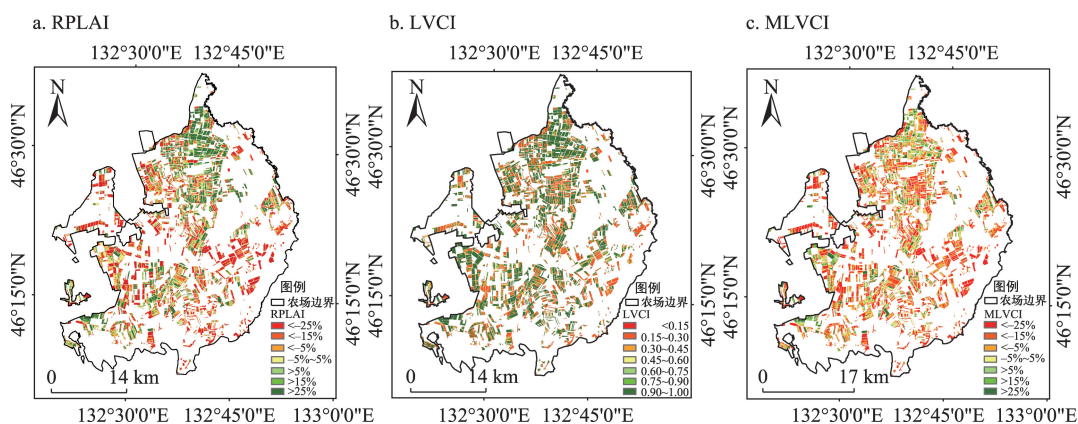


图6 玉米长势差异监测结果

Figure 6 Monitored difference of corn growth

究利用PROSAIL辐射传输模型定量反演时序LAI进行长势监测。通过该研究得到以下结论:

(1)同时相GF-1影像和Landsat-8 OLI影像具有较高的相关性,这是本研究利用多源遥感影像建立时序LAI监测指标的前提条件,也是时序LAI归一化辐射处理的基础。2种影像在绿、红、近红外波段的反射率具有较强的相关性,决定系数均在0.7以上,其中在近红外波段相关性最强,决定系数 $R^2$ 为0.9320;其次为绿波段,决定系数 $R^2$ 为0.7339,表现为强相关性;再者为红波段,决定系数 $R^2$ 为0.7153,表现为强相关性;在蓝波段波长范围内,两影像反射率相关性较低,决定系数 $R^2$ 为0.1865,表现为弱相关性。即在时间序列的遥感监测中,同时相的Landsat-8 OLI影像与GF-1遥感影像可以结合。

(2)基于PROSAIL模型可以反演得到高精度的

LAI,这是本研究将LAI作为玉米生长过程监测和实时监测的理论基础。以野外测量的LAI为标准,LAI反演的精度评价结果表明:实测LAI与反演LAI的相关性较高,决定系数 $R^2$ 为0.8030,均方根误差RMSE为0.7675,模型反演结果的可信度较高。即基于LAI的长势监测,可以解决使用NDVI指标进行长势监测存在的指数易饱和问题。

(3)利用RPLAI、LVCI、MLVCI指标对2015年八五二农场吐丝期玉米长势进行实时监测,是本研究中玉米长势实时监测的实验方案。实时监测结果表明:RPLAI、LVCI、MLVCI指数的空间分布格局较为相似,相对于2011—2014年的平均长势情况,研究区内2015年的玉米长势情况一般。

本研究的不足之处在于:①受遥感影像获取的限制,实时监测只分析了玉米吐丝期的长势差异,

未进行多个年份间的全生长季的差异分析;②在实时监测时未考虑不同年份间的物候差异。此外,受地面调查数据的限制,2011—2014年的玉米长势差异监测未进行野外验证。在今后进一步的工作中会尝试利用基于卡尔曼滤波方法重建高时空分辨率影像,从而尽可能的减少时相误差带来的影响;对物候期偏差的影响则考虑尝试用不同年际间的农作物长势曲线之间的时间偏差进行修正,通过曲线起始位置的不同进行物候期的修正。

## 参考文献(References)

- [1] 杨邦杰,裴志远. 农作物长势的定义与遥感监测[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 214–218. [Yang B J, Pei Z Y. Definition of crop condition and crop monitoring using remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1999, 15 (3): 214–218.]
- [2] 吴炳方,张峰,刘成林,等. 农作物长势综合遥感监测方法[J]. 遥感学报, 2004, 8(6): 498–514. [Wu B F, Zhang F, Liu C L, et al. An integrated method for crop condition monitoring[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(6): 498–514.]
- [3] 邹文涛,吴炳方,张森,等. 农作物长势综合监测:以印度为例[J]. 遥感学报, 2015, 19(4): 539–549. [Zou W T, Wu B F, Zhang M, et al. Synthetic method for crop condition analysis: A case study in India[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(4): 539–549.]
- [4] Doraiswamy P C, Hatfield J L, Jackson T J, et al. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(4): 548–559.
- [5] USDA NASS. History of Remote Sensing for Crop Acreage [EB/OL]. (2009–05–27)[2013–03–01]. [http://www.nass.usda.gov/Surveys/Remotely\\_Sensed\\_Data\\_Crop\\_Acreage](http://www.nass.usda.gov/Surveys/Remotely_Sensed_Data_Crop_Acreage).
- [6] 吴炳方,蒙继华,李强子,等. “全球农情遥感速报系统(Crop Watch)”新进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(10): 1013–1022. [Wu B F, Meng J H, Li Q Z, et al. Latest development of “Crop Watch”: A global crop monitoring system with remote sensing[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(10): 1013–1022.]
- [7] 杨邦杰. 农情遥感监测[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. [Yang B J. *Agricultural Condition Monitoring Using Remote Sensing* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.]
- [8] 蒙继华,杜鑫,张森,等. 物候信息在大范围作物长势遥感监测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 278–285. [Meng J H, Du X, Zhang M, et al. Integrating crop phenophase information in large-area crop condition evaluation with remote sensing[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(2): 278–285.]
- [9] Kogan F, Salazar L, Roytman L. Forecasting crop production using satellite-based vegetation health indices in Kansas, USA[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 30(1–4): 2798–2814.
- [10] Huang J, Sedano F, Huang Y, et al. Assimilating a synthetic Kalman filter leaf area index series into the WOFOST model to improve regional winter wheat yield estimation[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2016, 216: 188–202.
- [11] Yang Z, Di L, Yu G, et al. Vegetation Condition Indices for Crop Vegetation Condition Monitoring[C]. Vancouver: 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011.
- [12] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 34(2): 75–91.
- [13] Baret F, Jacquemoud S, Guyot G, et al. Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(2–3): 133–142.
- [14] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 16(2): 125–141.
- [15] Verhoef W, Jia L, Xiao Q, et al. Unified optical-thermal four-stream radiative transfer theory for homogeneous vegetation canopies[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1808–1822.
- [16] Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, et al. PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(S1): S56–S66.
- [17] 苏伟,郭皓,赵冬玲,等. 基于优化PROSAIL叶倾角分布函数的玉米LAI反演方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 234–241. [Su W, Guo H, Zhao D L, et al. Leaf area index retrieval for maize canopy using optimized leaf angle distribution function of PROSAIL model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 234–241.]
- [18] 苏伟,吴代英,武洪峰,等. 基于最大熵模型的玉米冠层LAI升尺度方法[J]. 农业工程学报, 2016, 34(7): 165–172. [Su W, Wu D Y, Wu H F, et al. Upscaling method for corn canopy LAI using Max Ent model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(7): 165–172.]



## Field-scale corn growth monitoring using time series LAI

SU Wei<sup>1,2</sup>, ZHU Dehai<sup>1,2</sup>, SU Mingyu, HUANG Jianxi<sup>1,2</sup>, LIU Zhe<sup>1,2</sup>, GUO Hao<sup>1,2</sup>

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Remote Sensing for Agri-Hazards, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China;

3. No.1 Middle School of Tengzhou, Tengzhou 277500, China)

**Abstract:** Crop growth monitoring is an important work for crop management and yield prediction. Aimed to solve the problem of mixed spectrum resulting from small agricultural land plots in China, this study used high and medium spatial resolution images including Landsat-7 ETM+, Landsat-8 OLI, GF-1, and HJ-1 A/B images for corn growth monitoring. In order to avoid too much reliance on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) parameters, leaf area index (LAI) was selected as the corn growth monitoring parameter and the PROSAIL radiative transfer model was used to retrieve LAI. Three indices (LAI ratio to previous year (*RPLAI*), vegetation condition index based on LAI (*LVCI*), and mean vegetation condition index based on LAI (*MLVCI*)) were used for real-time monitoring of corn growth. The results of a case study in the 852 Farm of Heilongjiang Farms & Land Reclamation Administration in 2015 indicate that: (1) The simultaneous GF-1 image reflectance and the Landsat-8 OLI image reflectance are highly correlated. The correlation coefficients  $R^2$  of near-infrared bands, green bands, and red bands of the GF-1 image and the Landsat-8 OLI image are 0.9320, 0.7339, and 0.7153, respectively. This is the precondition for establishing the time series LAI for corn growth monitoring using multi-source remote sensing images. (2) The accuracy of retrieving LAI using PROSAIL radiative transfer model is high—the correlation coefficient  $R^2$  is 0.8030 and the root mean squared error (*RMSE*) is 0.7675. The retrieved time series LAI indicate that LAI increased quickly at the end of June, reached the maximum at the end of July or the beginning of August, and started to decrease at the end of August. (3) The *RPLAI*, *LVCI*, and *MLVCI* indices were used for the real-time monitoring of corn growth and the results indicate that the growth in 2015 was at an average level, and corn growth in the northern part of the area was better than in the southern part.

**Key words:** multi-source satellite images; field-scale; LAI; PROSAIL model; growth process monitoring; real-time monitoring