

基于遥感和积温的冬小麦生育期提取方法

黄健熙^{1,2} 赵剑桥³ 汪雪淼³ 解智琨³ 卓文¹ 黄然¹

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 2. 农业农村部农业灾害遥感重点实验室, 北京 100083;
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了给监测作物长势和产量预测提供重要的基础数据,以河北、河南、山东三省冬小麦为研究对象,利用中等分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)的叶面积指数(Leaf area index, LAI)产品,采用 Savitzky-Golay 上包络线滤波重构 2015 年 MODIS LAI 时间序列,提取抽穗期;基于 Logistic 函数拟合 LAI 时间序列提取返青期;根据提取的 2015 年返青期和抽穗期,基于多年历史积温法分别提取当年拔节期和开花期。利用研究区域内 64 个农业气象站点(简称农气站点)的生育期观测值对提取值进行验证,结果表明,采用农气站点观测值验证,提取的生育期精度较高,返青期、拔节期、抽穗期和开花期的平均误差分别为 7.4、4.5、4.4、3.8 d。二阶导数的方法对混合像元及 Logistic 函数拟合准确度敏感,对拔节期、抽穗期、开花期的提取精度较高。研究表明,基于时间序列 MODIS LAI 数据,采用 Logistic 函数拟合提取大面积冬小麦生育期具有很好的可行性。

关键词: 冬小麦; 生育期; 中分辨率成像光谱仪; 积温; 叶面积指数

中图分类号: S512.1⁺1; S127 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)02-0169-08

Extraction Method of Growth Stages of Winter Wheat Based on Accumulated Temperature and Remote Sensing Data

HUANG Jianxi^{1,2} ZHAO Jianqiao³ WANG Xuemiao³ XIE Zhikun³ ZHUO Wen¹ HUANG Ran¹

(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 and Rural Affairs, Beijing 100083, China

3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Phenological information is vital for dynamic monitoring of crop growth and precision field management. Accurate extraction of phenology benefits a rational analysis of crop's inter-annual changes in time and space and provides the fundamental data for monitoring of crop growth and crop yield forecasting. Winter wheat planting areas in Hebei, Henan, and Shandong Provinces were taken as study locations. Firstly, the LAI time series in 2015 was smoothed with Savitzky-Golay filtering algorithm, and the day of the maximum value from time series of LAI was taken as heading period. The Savitzky-Golay filtered MODIS LAI was fitted by using the double Logistic function. The day corresponding to the largest second derivative of Logistic LAI curve was considered as the green-up period. Jointing and flowering periods of winter wheat were extracted based on effective accumulated temperature from the existing green-up and heading stages from 2012 to 2014. The method was validated by the observations of phenology at agrometeorological stations in 2015 and the results showed that the phenology agreed well with the observational data of winter wheat. The second derivative method was quite sensitive to mixed pixel and accuracy of Logistic function's fitting of MODIS LAI. Generally, the extracted green-up stage was delayed, while the extraction of the jointing, heading and flowering stages achieved a high accuracy.

Key words: winter wheat; growth stages; MODIS; accumulated temperature; leaf area index

0 引言

生育期对农作物生长发育的动态监测、田间精

细管理具有重要意义。生育期的准确提取有利于对作物的时空年际变化作出合理分析,为有效监测作物生长提供有力依据,进而反映气候变化对作物生

长的影响^[1-2],并有利于估产模型的改进^[3-8]。冬小麦是中国主要的粮食作物之一,研究冬小麦生育期的提取方法,精确监测冬小麦的关键生长阶段,对其产量预测具有重要意义^[9]。遥感技术具有时效高、范围宽、成本低和时间序列连续等优点,能反映地面植被季节性生长发育的过程及其年际变化等特点,可为监测农作物生育期提供新的技术手段^[10]。

已有较多学者利用 Savitzky - Golay 滤波(S - G 滤波)平滑时间序列遥感数据,提取农作物生育期^[11-12]。但在上述研究中,平滑 NDVI 时间序列时直接用了 S - G 滤波,使 NDVI 的值总是处于周围极大值和极小值之间。然而云雾和气溶胶的影响导致 NDVI 值偏低,因此时间序列上突降的点都应该作为噪声滤除,使用改进的 S - G 上包络线滤波能获得更高质量的时间序列^[13]。

利用平滑模型函数拟合时间序列遥感数据及其产品,进而提取生育期,是近几年发展较快的一种方法,平滑模型函数包括 Logistic 函数法、非对称高斯函数法和谐波函数法^[14]。SAKAMOTO 等^[15]利用 MODIS/Terra 数据,使用小波变换、傅里叶变换两种方法重构增强植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)时序曲线。李铮等^[16]以东北三省为研究区域,使用非对称性高斯函数拟合法平滑 MODIS、CYCLOPES 和 GLASS 叶面积指数时间序列,利用动态阈值法提取水稻的主要生育期。JONSSON 等^[17]提出基于非线性最小二乘拟合的非对称性高斯函数拟合 AVHRR NDVI 时序数据的方法,用于描绘地面植被的季节性生长和衰退曲线,并确定生育期参数。侯学会等^[18]基于 SPOT VGT NDVI 数据,用 5 种方法提取冬小麦返青期,分析遥感监测结果与实测数据的均方根误差,iNDVI - Logistic 提取误差为 12.91 d, Logistic 函数法提取误差为 13.04 d, 阈值法提取误差为 17.48 d, 导数法和 DNA 法提取误差大于 35 d。

目前,很多研究综合使用上述两种时间序列遥感数据的处理方法,获得了较好效果^[19-21]。但是前人成果主要集中于冬小麦一个或两个显著生育期(返青期和抽穗期)提取的研究,对于拔节期和开花期的研究很少,这是因为拔节期和开花期在 LAI 时间序列曲线上没有明显特征,因而,需要引入辅助数据。有效积温是作物基点温度之上日平均气温的积累^[22],有效积温与植物的生长速度和生育阶段有直接联系,是衡量作物生长发育过程热量条件的重要指示因子^[23]。CHU 等^[11]利用 MODIS 数据提取了冬小麦返青期和抽穗期,发现积温每降低 $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$, 返青期延后 4 ~ 5 d ($R^2 = 0.816, p < 0.001$), 抽穗期延后 1 ~ 2 d ($R^2 = 0.401, p < 0.001$)。说明冬小麦生

育期与积温具有显著的相关关系。胡乔玲等^[24]在 Logistic 曲线拟合 NDVI 并提取返青期的基础上,结合积温进行拔节期推算研究,监测的冬小麦拔节期开始时间与观测值平均误差为 4.3 d, 最大误差为 8 d。

MODIS LAI 数据具有覆盖范围广、高时间分辨率的特征,在气候变化监测^[25]、净初级生产力评估^[25]、作物生育期监测^[10]、作物产量预测^[26-27]等方面有很广泛的应用。本文综合运用 S - G 上包络线滤波、Logistic 曲线拟合、有效积温等,结合 MODIS LAI 数据和地面观测数据,提取并验证大范围冬小麦关键生育期,以实现大区域上冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、开花期 4 个关键生育期的提取,并采用地面观测生育期数据定量评价提取精度。

1 研究区域与数据获取

1.1 研究区域

为了得到普适性的研究结果,选取河北、河南、山东三省为研究区域(图 1),进行冬小麦的生育期预测研究。该区域位于 $31^{\circ}23' \sim 42^{\circ}40' \text{N}$, $110^{\circ}21' \sim 122^{\circ}42' \text{E}$,地处黄淮海平原,温带季风气候,夏季降水集中,雨热同期,冬春干旱少雨。年降水量 500 ~ 900 mm,年均温 $11 \sim 14^{\circ}\text{C}$ 。

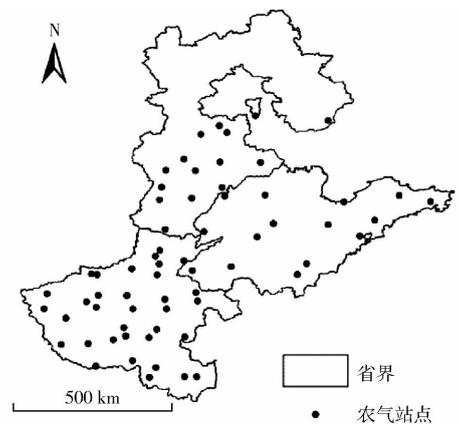


图 1 研究区及农气站点

Fig. 1 Study area and agrometeorological stations

1.2 数据获取

1.2.1 遥感数据

遥感数据使用 MODIS LAI 标准产品中的 MCD15A3H 陆地 4 级数据产品,该产品的时间分辨率为 4 d,空间分辨率为 500 m (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)。本文使用的 MODIS LAI 产品时间为 2015 年 1—7 月,轨道号为 H26V4、H26V5、H27V4、H27V5。该数据已经进行了几何校正和辐射校正,本文根据研究区域对该数据进行了拼接、裁剪。

1.2.2 气象数据

气象驱动数据来源为中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据^[28-29] (<http://westdc.westgis.ac.cn/data/7a35329c-c53f-4267-aa07-e0037d913a21>), 其时间分辨率为 3 h, 水平空间分辨率 0.1°。本文使用的时间范围为 2012—2015 年, 经过数据预处理, 将其转换为 366 或 365 个波段的栅格文件, 一个波段代表一天的日平均气温。

1.2.3 观测数据

地面观测数据来自河北、河南、山东三省 2012—2015 年的农气站点观测记录, 包含作物生育状况观测记录和土壤水分观测记录。其中作物生育状况观测记录包括台站编号、作物品种、栽培方式、冬小麦各生育阶段日期、生长状况、生长高度、生长密度、产量、产量因素和产量构成, 以及主要田间管理措施等, 在农气站点上还有关键生育期叶面积指数和生物量等观测值。本文使用了该系列数据中来自研究区域的 64 个农气站点的生育期数据。其中, 2012—2014 年的观测数据用于计算返青-拔节、抽穗-开花 2 个阶段冬小麦所需的平均积温, 2015 年的观测数据用于检验各生育期的提取精度。

由于本研究的空间跨度较大, 返青期、拔节期、抽穗期、开花期几个关键生育期在不同地面观测站点呈现明显的南北差异, 时间差别较大。如表 1 所示, 从南到北各生育期的日期大致呈现逐渐推迟的规律, 该现象符合从南到北辐射和降雨的空间分布规律。

表 1 2015 年冬小麦生育期观测数据

Tab.1 Observed data of winter wheat growth stages in 2015

研究区	DOY				
	返青期	拔节期	抽穗期	开花期	
河南省	最小值	39	69	98	104
	最大值	65	104	120	126
山东省	最小值	43	85	112	119
	最大值	57	100	126	131
河北省	最小值	48	87	116	120
	最大值	69	108	127	131

表 1 是对冬小麦生育期观测数据的统计, 单位为一年中的天数顺序 (Day of year, DOY)。4 个关键生育期观测数据最小值均出现在河南省, 最大值均出现在河北省。河南省整体生育期靠前, 山东省居中, 河北省普遍较后。拔节期的南北差异较返青期明显, 河北省拔节期基本都在第 100 天之后, 只有最南端的一个站点拔节期在第 100 天之前, 为第 87 天; 河南省主要在第 90 天之前, 只有最北边的两个站点拔节期在第 90 天之后, 分别为第 94 天和第

104 天; 山东省拔节期分布在第 85 ~ 100 天, 其中最南边的站点对应第 85 天, 最北边的站点对应第 100 天。

抽穗期和开花期对温度的响应更加敏感, 因此这 2 个生育期的南北差异更明显。河北省抽穗期主要在第 120 天之后, 只有离河南省最近的站点在第 120 天之前, 为第 116 天; 河南省则均匀分布在第 98 ~ 120 天; 山东省抽穗期分布在第 112 ~ 126 天。河北省开花期均匀分布在第 120 ~ 131 天, 最北边的站点对应第 131 天, 最南边对应第 120 天; 河南省的开花期均匀分布在第 104 ~ 126 天; 山东省分布在第 119 ~ 131 天, 最北边的站点对应第 131 天, 最南边对应第 119 天。

2 研究方法

2.1 技术路线

本研究利用 MODIS 数据重构 LAI 时间序列, 根据时间序列的特征提取返青期和抽穗期。在此基础上利用气象数据, 计算积温阈值并提取冬小麦的开花期、拔节期。通过 LAI 时间序列得到抽穗期日期后, 从抽穗期开始计算有效积温, 有效积温一旦达到近三年抽穗期到开花期有效积温的平均值, 则当天为开花期。同理, 在返青期的基础上得到拔节期。技术路线见图 2。

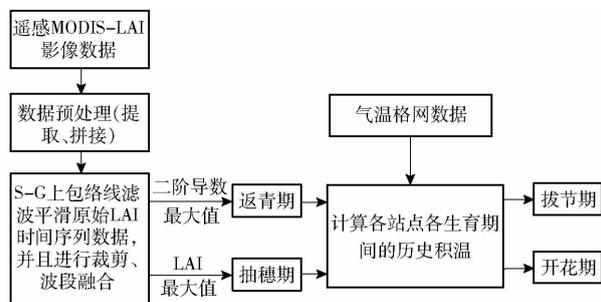


图 2 冬小麦生育期提取技术路线图

Fig.2 Flow chart of winter wheat growth stages extraction

2.2 LAI 时间序列重构

2.2.1 S-G 上包络线滤波

S-G 滤波最早于 1964 年由 SAVITZKY 和 GOLAY^[30] 提出。它可以理解为一种权重滑动平均滤波, 其权重取决于在一个滤波窗口范围内做多项式最小二乘拟合的多项式次数^[31]。S-G 滤波过程为

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^m C_i Y_{j+i}}{N} \quad (1)$$

其中 $N = 2m + 1$
式中 Y_j^* ——时间 j 处滤波后的 LAI 值
 i ——时间索引

C_i ——第 i 个 LAI 值的滤波系数

Y_{j+i} ——时间 j 处第 i 个 LAI 的原始值

m ——窗口半径

如果只使用 S-G 滤波,滤波后时间序列上每一点的值是窗口内各点值的均值,不能将窗口内的极大值包含在内,存在部分突降无法消除的问题。因此,使用了 CHEN 等^[13]提出的 S-G 上包络线滤波法来重构冬小麦 LAI 时间序列。该方法的处理步骤为:

(1)对原始 LAI 时间序列进行 S-G 滤波,分别存储滤波后和滤波前的时间序列。

(2)对比步骤(1)中存储的 2 个时间序列,得到新的时间序列,并将其作为原始序列。

$$L_i^T = \begin{cases} O_i & (O_i^{T-1} \geq L_i^{T-1}) \\ L_i^{T-1} & (O_i^{T-1} < L_i^{T-1}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 O ——原始的 LAI 值

L ——滤波后的 LAI 值

T ——迭代次数

(3)重复步骤(1)、(2),直到整个时间序列的 $\sum (L_i^T - O_i^T)$ 小于指定阈值 0.05。

采用 S-G 上包络线滤波算法对遥感数据进行去噪处理。由于云污染和水汽等的影响,遥感图像存在数据质量偏低甚至缺失的情况,因此滤波前的 LAI 时间序列曲线噪声较多,存在尖锐拐点,不够平滑,难以直接用于提取冬小麦的生育期;由图 3 可以看出,滤波后得到了外包络原始序列的平滑曲线,消除了原始数据的云污染和缺失数据造成的误差,更准确地反映了冬小麦的生长变化规律,便于之后的 Logistic 曲线拟合。

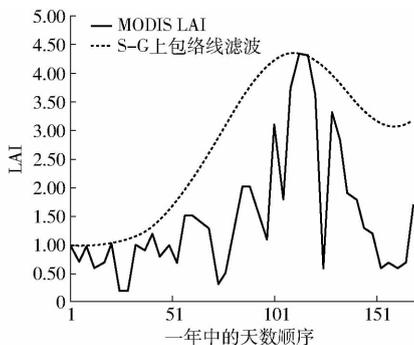


图 3 2015 年原始 MODIS LAI 时序曲线与 S-G 上包络线滤波结果对比

Fig. 3 Comparison of MODIS LAI and S-G upper-envelope LAI in 2015

2.2.2 Logistic 曲线

Logistic 模型是由比利时数学兼生物学家 VERHULST 于 1838 年首先提出的。其特点是一开

始缓慢增长,而在以后的某一范围内迅速增长,到达一定限度后,增长再度缓慢下来^[32],公式为

$$y(t) = \frac{1}{ab^t + c} + d \quad (3)$$

式中 t ——LAI 时间序列中的时间

$y(t)$ —— t 时间的 LAI 值

a, b, c, d ——拟合参数

对拟合后的 Logistic 曲线方程求二阶导数,得到

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} = \frac{ab^t (\ln b)^2 (ab^t - c)}{(ab^t + c)^3} \quad (4)$$

原始 MODIS LAI 时序曲线、S-G 上包络线滤波结果、Logistic 曲线拟合结果及曲线二阶导数的对比见图 4。

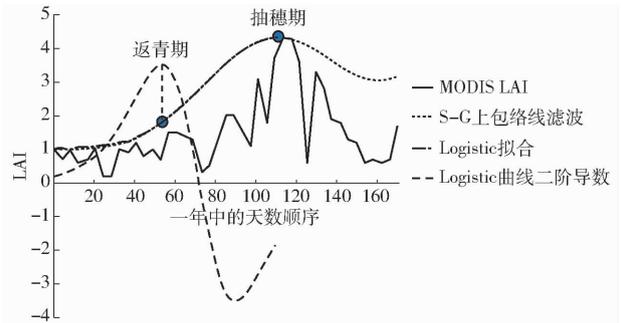


图 4 2015 年 MODIS LAI、S-G 上包络线滤波 LAI、Logistic 拟合 LAI、Logistic 曲线二阶导数对比

Fig. 4 Comparison of MODIS LAI, S-G upper-envelope LAI, fitting Logistic LAI and second derivative of fitting Logistic LAI in 2015

2.3 冬小麦种植区域提取

在研究区域内提取 2015 年 LAI 时间序列曲线受冬小麦控制的像元,根据冬小麦生长期 LAI 时间序列的特征,给出提取较纯像素的条件:由于冬小麦在抽穗期生长旺盛, LAI 值较高,因此要求第 31 波段(121 DOY)的 LAI 值大于 1。由于冬小麦 LAI 于抽穗期达到峰值后持续下降,且本研究的空域跨度较大,各区域抽穗期 DOY 差异大,因此要求在第 22~36 波段(85~141 DOY)内, LAI 有一个极大值,且该极大值大于第 36 波段(141 DOY)的 LAI 值。以上 2 个限制条件,能滤除 MODIS LAI 时序曲线不符合冬小麦发育情况的像素。最后得到的研究区域内 2015 年冬小麦分布如图 5 所示。用地面采样的方法验证得到冬小麦种植区域提取总体精度为 90.75%, Kappa 系数为 0.86。

在研究区域内,具有有效地面观测数据的农气站点共 64 个。但有些站点附近(3×3 的栅格)混合像元问题严重,以农气站点周围 3×3 栅格中至少有 5 个像元种植冬小麦为筛选条件,最后保留了 35 个站点,可用于冬小麦生育期提取后的验证。

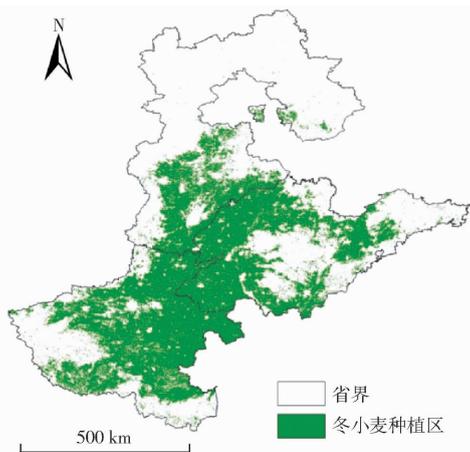


图5 2015年研究区冬小麦分布图

Fig. 5 Winter wheat distribution map in study area in 2015

2.4 冬小麦关键生育期提取

返青期是指早春麦田半数以上的麦苗心叶长度达到1~2 cm的时期。冬季麦苗停止生长,在该时期突然开始生长,LAI时间序列曲线表现为突然上升。抽穗是禾谷类作物发育完全的穗,随着茎秆的伸长而伸出顶部叶的现象。全田50%植株抽穗为抽穗期,抽穗期处于冬小麦营养生长和生殖生长并进阶段,且LAI在该时期前后达到最大值。

在冬小麦生育期内,其LAI变化曲线近似于抛物线。进入抽穗期时,冬小麦的长势较好,叶片的生长状况在整个生育期中属于最好时期,冬小麦LAI在整个生育期中处于峰值^[33]。因此,从滤波后的LAI时间序列中提取LAI最大值所对应的天数顺序,即为当年冬小麦的抽穗期。

从返青期到抽穗期,冬小麦的LAI呈单调递增,在抽穗期达到极大值后,从抽穗期到开花期,处于下降状态。返青期到抽穗期这一增长过程,由Logistic曲线较为准确地拟合出来。从拟合的曲线中提取出二阶导数的最大值,最大值所对应的天数顺序即为2015年冬小麦的返青期。

根据2012—2014年的气温格网数据以及农气站点记录的返青期、拔节期,计算出返青期-拔节期的平均积温。将此平均积温作为阈值,结合2015年提取的返青期、气温格网数据,提取2015年的拔节期。同理,根据2015年提取的抽穗期,基于3年平均积温,提取2015年的开花期。

2.5 验证方法

根据各农气站点的经纬度,提取遥感影像中对应的像元,以该像元为中心,扩展至3×3像元区域,即1.5 km×1.5 km的区域。取该9个像元中的冬小麦区域生育期的平均值作为提取值,与对应的农气站点观测的生育期对比。假设农气站点的观测值为真值,分别采用最大误差、最小误差、平均误差及

均方根误差(Root mean square error, RMSE)作为冬小麦生育期提取精度的评价指标。

MODIS LAI的时间分辨率为4 d,再考虑到混合像元等因素的影响,当生育期RMSE小于6 d时,认为该生育期提取精度较高。

3 结果分析

3.1 冬小麦关键生育期提取结果与分析

获得2015年研究区冬小麦生育期提取结果如图6所示。提取结果具有显著的空间变异性,与观测数据的时空变异规律基本吻合。分析具有地面观测数据的提取值与观测值,可得:返青期提取值的范围是29~91 DOY,观测值的范围是39~69 DOY。如图7a所示,剔除2个异常样本,返青期误差在0~5 d内的样本数为17个(51.5%),误差在6~10 d内的样本数为6个(18.2%),误差超过10 d的样本数为10个(30.3%)。

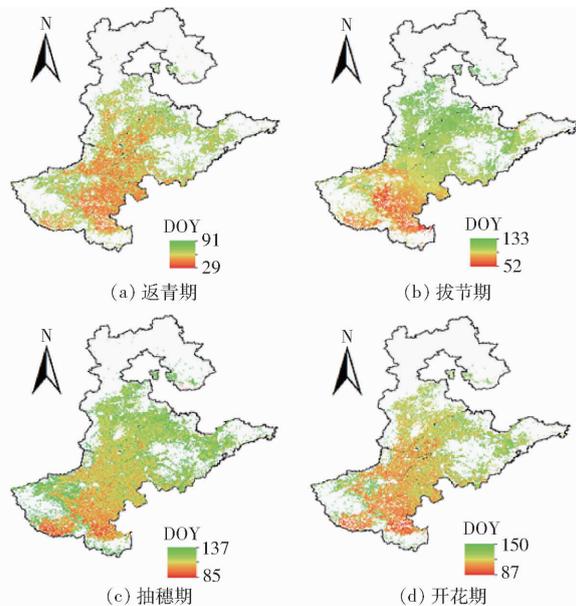


图6 2015年冬小麦生育期提取结果

Fig. 6 Results of extracted winter wheat growth stages in 2015

LAI数据源的空间分辨率为500 m,因此混合像元是引起各生育期误差的主要原因之一。由图7a可看出,混合像元的效应造成提取的返青期日期偏后,即提取日期大于观测日期。各生育期中,返青期的提取对混合像元非常敏感。由于夏季作物LAI快速增长的时期晚于冬小麦,LAI时序曲线二阶导数最大的天数顺序在像元内夏季作物的影响下产生延迟。此外,MODIS LAI能够较好地反映自然植被与林地的LAI,然而对于农作物而言,往往低于其实测LAI^[34]。MODIS LAI的这一特性,降低了对返青期的提取精度。

另一影响返青期提取的因素是Logistic曲线拟合的精度。返青期在LAI上体现的特征非常细微,

本文采用求二阶导数的方法提取返青期。因此,如果 Logistic 曲线不能准确刻画 LAI 快速增长长期变化趋势的特性,就会导致提取的返青期产生一定误差。

根据提取的 2015 年返青期,利用 2012—2014 年 3 年历史积温平均值作为积温阈值,提取出当年拔节期。拔节期提取值的范围是 52 ~ 133 DOY,观测值的范围是 69 ~ 108 DOY。如图 7b 所示,剔除 2 个异常样本,拔节期误差在 0 ~ 4 d 内的样本数为 20 个(60.6%),误差在 5 ~ 8 d 内的样本数为 9 个(27.3%),误差超过 8 d 的样本数为 4 个(12.1%)。

与站点观测值相比,返青期提取日期以延迟居多,导致开始计算积温的日期也产生延迟。研究区域内冬小麦返青期一般处于 2 月中下旬,在返青期实测日期—返青期推测日期这段时间内,各天的日平均气温多数都小于基点温度 0℃,即这段时间的有效积温接近于 0℃·d。因此,返青期提取值的延迟对积温计算的影响较小,不会使拔节期的提取产生较大误差。

抽穗期提取值的范围是 85 ~ 137 DOY,观测值的范围是 98 ~ 127 DOY。如图 7c 所示,抽穗期误差在 0 ~ 4 d 内的样本数为 20 个(57.14%),误差在 5 ~ 8 d 内的样本数为 11 个(31.43%),误差超过 8 d 的样本数为 4 个(11.43%)。

抽穗期提取受混合像元的影响较小。混合像元对冬小麦生育期提取的影响主要来自于各种不同生长周期的夏季作物,其中树木的 LAI 远高于冬小麦,使冬小麦 LAI 的峰值显著升高;大棚、园艺作物、蔬

菜作物等使冬小麦 LAI 峰值下降,曲线在达到峰值之后的下降趋势不明显。

但是混合像元仅对 LAI 的数值产生影响,对 LAI 峰值出现的时间影响较小,即峰值出现的时间主要由冬小麦决定。因此,抽穗期提取结果与地面观测结果基本一致。

根据提取的 2015 年抽穗期,利用 2012—2014 年 3 年历史积温平均值作为积温阈值,提取出当年开花期。开花期提取值的范围是 87 ~ 150 DOY,观测值的范围是 104 ~ 134 DOY。如图 7d 所示,开花期误差在 0 ~ 4 d 内的样本数为 21 个(60.0%),误差在 5 ~ 8 d 内的样本数为 11 个(31.4%),误差超过 8 d 的样本数为 3 个(8.6%)。经过对比,开花期提取值与站点观测值吻合情况良好。

此外,提取的生育期还受到以下因素的影响:原始数据存在误差,提取的生育期需要精确到 1 d,而 MCD15A3H 的时间分辨率为 4 d。对空间尺度的差异而言,农气站点的观测数据是点上数据,而通过遥感数据提取的生育期是 3 × 3 栅格内的平均值。农气站点人工观测生育期数据存在误差。

3.2 精度评价

由图 7 可知,提取的冬小麦生育期时间与观测值之间的误差有提前和延迟的现象,也存在基本一致的情况,其中多数返青期提取值存在延迟情况,其他生育期误差正负分布较为均衡。表 2 为与农气站点观测数据对比后,基于遥感与气象数据提取的冬小麦生育期的精度评价。由表 2 可知,提取的返青

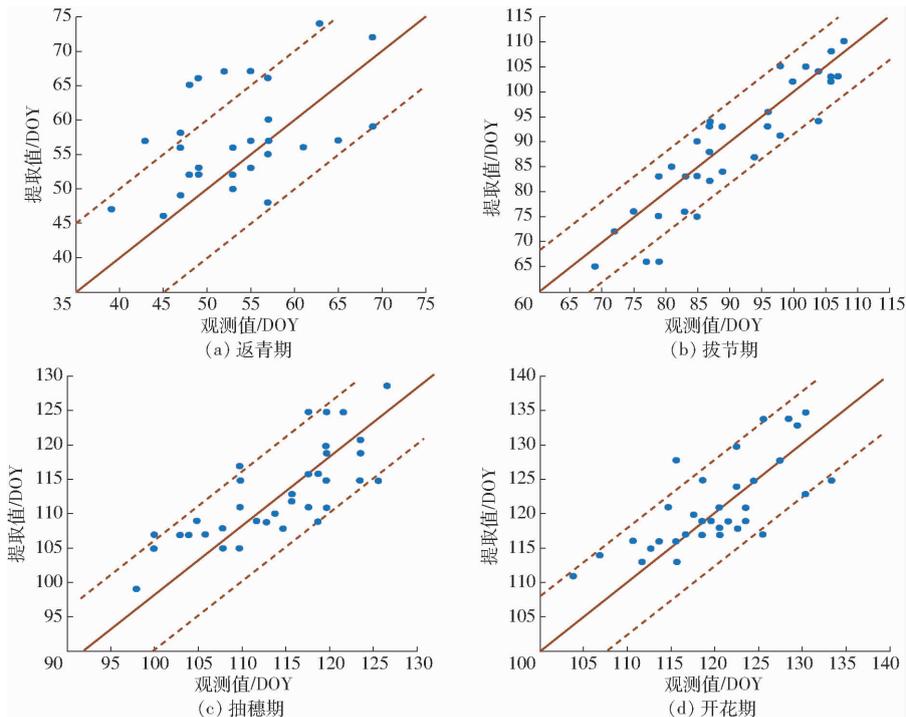


图 7 2015 年生育期提取值与观测值的对比

Fig. 7 Comparison of extracted and observed growth stages in 2015

期、拔节期、抽穗期、开花期与农气站点观测数据比较,其平均误差分别为7.4、4.5、4.4、3.8 d,均方根误差分别为9.5、5.5、5.2、4.9 d。

表2 2015年冬小麦生育期提取精度评价

评价指标	返青期	拔节期	抽穗期	开花期
最大误差	21	13	11	12
最小误差	0	0	0	0
平均误差	7.4	4.5	4.4	3.8
均方根误差	9.5	5.5	5.2	4.9

与已有研究相比,本研究中返青期平均误差与均方根误差显著小于WANG等^[21]的研究结果,均方根误差显著小于侯学会等^[18]用5种方法研究得出的均方根误差;拔节期平均误差与胡乔玲等^[24]研究结论比较一致;而目前关于冬小麦开花期时间的研究尚无数据加以对比验证。总体来看,本研究对冬小麦生育期的提取精度较高,达到了较以往的生育期提取方法更符合实际的提取结果。

4 结论

(1)以河北、河南、山东三省为研究区域,MCD15A3H产品的空间分辨率为500 m、时间分辨

率为4 d,通过S-G上包络线滤波重构的LAI时间序列,结合时序曲线特征和积温方法,提取出较为准确的冬小麦关键生育期。

(2)S-G上包络线滤波方法可以将滤波窗口内的极大值包含在内,解决了直接使用S-G滤波时部分突降无法消除的问题,更准确地反映了冬小麦的生长变化情况。结果分析表明,各生育期开始时间由南到北逐渐推迟,空间变异性符合实际的辐射和降雨的空间分布规律。提取的生育期与农气站点观测日期较为吻合,返青期的平均误差在8 d之内,拔节期、抽穗期、开花期的平均误差都在5 d之内。这是由于求二阶导数的方法对混合像元及Logistic函数拟合准确度敏感,返青期的提取结果出现延后现象,而拔节期、抽穗期、开花期的提取精度较高。

(3)由于冬小麦种植区提取存在误差,研究中MODIS LAI时序曲线可能包含非作物信息,且积温模型所使用的气象插值产品精度有待验证,对生育期提取精度有一定影响。其次,农气站点在研究区内分布不均,疏密程度和代表性不同,可能影响结果验证的准确性。此外,拔节期、开花期的积温计算采用历史年份积温均值,其建模精度受年际间气候和作物品种差异程度影响。

参 考 文 献

- [1] WHITE M A, THORNTON P E, RUNNING S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(2):217-234.
- [2] FENSHOLT R, PROUD S R. Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends — comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119:131-147.
- [3] LOBELL D B, BURKE M B, TEBALDI C, et al. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030[J]. *Science*, 2008, 319(5863):607-610.
- [4] BOLTON D K, FRIEDL M A. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2013, 173:74-84.
- [5] 马鸿元,黄健熙,黄海,等.基于历史气象资料和WFOST模型的区域产量集合预报[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(9):257-266.
MA Hongyuan, HUANG Jianxi, HUANG Hai, et al. Ensemble forecasting of regional yield of winter wheat based on WFOST model using historical metrological dataset[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9):257-266. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180930&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.030. (in Chinese)
- [6] 黄健熙,黄海,马鸿元,等.基于MCMC方法的WFOST模型参数标定与不确定性分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(16):113-119.
HUANG Jianxi, HUANG Hai, MA Hongyuan, et al. Markov chain monte carlo based WFOST model parameters calibration and uncertainty analysis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(16):113-119. (in Chinese)
- [7] 黄健熙,马鸿元,田丽燕,等.基于时间序列LAI和ET同化的冬小麦遥感估产方法比较[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4):197-203.
HUANG Jianxi, MA Hongyuan, TIAN Liyan, et al. Comparison of remote sensing yield estimation methods for winter wheat based on assimilating time-sequence LAI and ET[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(4):197-203. (in Chinese)
- [8] 黄健熙,李昕璐,刘帝佑,等.顺序同化不同时空分辨率LAI的冬小麦估产对比研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(1):240-248.
HUANG Jianxi, LI Xinlu, LIU Diyou, et al. Comparison of winter wheat yield estimation by sequential assimilation of different spatio temporal resolution remotely sensed LAI datasets[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1):240-248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150134&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.034. (in Chinese)
- [9] PALOSUO T, KERSEBAUM K C, ANGULO C, et al. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of

- Europe: a comparison of eight crop growth models[J]. *European Journal of Agronomy*, 2011, 35(3):103–114.
- [10] 刘峻明,李曼曼,王鹏新,等. 基于 LAI 时间序列重构数据的冬小麦物候监测[J]. *农业工程学报*,2013,29(19):120–129.
LIU Junming, LI Manman, WANG Pengxin, et al. Monitoring of phenology by reconstructing LAI time series data for winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*,2013, 29(19): 120–129. (in Chinese)
- [11] CHU L, HUANG C, LIU Q, et al. Estimation of winter wheat phenology under the influence of cumulative temperature and soil salinity in the Yellow River Delta, China, using MODIS time-series data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(10):2039–2060.
- [12] 司文才,刘峻明. 冬小麦关键物候空间分布遥感监测方法研究[J]. *中国农业科技导报*,2011,13(6):82–89.
SI Wencai, LIU Junming. Studies on remote sensing monitoring method for spatial distribution of winter wheat critical phenology [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*,2011,13(6): 82–89. (in Chinese)
- [13] CHEN J, JÖNSSON P, TAMURA M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3):332–344.
- [14] 夏传福,李静,柳钦火. 植被物候遥感监测研究进展[J]. *遥感学报*,2013,17(1):1–16.
XIA Chuanfu, LI Jing, LIU Qinhuo. Review of advances in vegetation phenology monitoring by remotesensing[J]. *Journal of Remote Sensing*,2013, 17(1): 1–16. (in Chinese)
- [15] SAKAMOTO T, YOKOZAWA M, TORITANI H, et al. A crop phenology detection method using time-series MODIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96(3):366–374.
- [16] 李铮,柏延臣,何亚倩. 遥感叶面积指数产品提取自然植被物候期对比[J]. *遥感技术与应用*,2015,30(6):1103–1112.
LI Zheng, BO Yanchen, HE Yaqian. Comparison of natural vegetation phenology metrics from remote sensing LAI products [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(6): 1103–1112. (in Chinese)
- [17] JONSSON P, EKLUNDH L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002, 40(8):1824–1832.
- [18] 侯学会,隋学艳,梁守真,等. 几种物候提取方法的冬小麦物候提取[J]. *遥感信息*,2017,32(6):65–70.
HOU Xuehui, SUI Xueyan, LIANG Shouzhen, et al. Comparison of five methods for phenology extraction of winter wheat [J]. *Remote Sensing Information*, 2017,32(6):65–70. (in Chinese)
- [19] HUANG J, TIAN L, LIANG S, et al. Improving winter wheat yield estimation by assimilation of the leaf area index from Landsat TM and MODIS data into the WOFOST model[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2015, 204:106–121.
- [20] 鹿琳琳,郭华东. 基于 SPOT/VEGETATION 时间序列的冬小麦物候提取方法[J]. *农业工程学报*,2009,25(6):174–179.
LU Linlin, GUO Huadong. Extraction method of winter wheat phenology from time series of SPOT/VEGETATION data[J]. *Transactions of the CSAE*,2009,25(6):174–179. (in Chinese)
- [21] WANG S, MO X, LIU Z, et al. Understanding long-term (1982–2013) patterns and trends in winter wheat spring green-up date over the North China Plain[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2017, 57:235–244.
- [22] DUVEILLER G, BARET F, DEFOURNY P. Using thermal time and pixel purity for enhancing biophysical variable time series: an interproduct comparison[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2013, 51(4):2119–2127.
- [23] 黄健熙,牛文豪,马鸿元,等. 卫星遥感和积温—辐射模型预测区域冬小麦成熟期[J]. *农业工程学报*,2016,32(7):152–157.
HUANG Jianxi, NIU Wenhao, MA Hongyuan, et al. Predicting maturity period for winter wheat using remote sensing and effective accumulated temperature-solar radiation model [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(7): 152–157. (in Chinese)
- [24] 胡乔玲,刘峻明,王春艳,等. 冬小麦拔节期遥感监测方法研究[J]. *中国农业科技导报*,2013,15(6):152–157.
HU Qiaoling, LIU Junming, WANG Chunyan, et al. Studies on remote sensing monitoring method for jointing stage of winter wheat[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013,15(6):152–157. (in Chinese)
- [25] FENSHOLT R, SANDHOLT I, RASMUSSEN M S. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3–4):490–507.
- [26] MA G, HUANG J, WU W, et al. Assimilation of MODIS–LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield[J]. *Mathematical & Computer Modelling*, 2013, 58(3–4):634–643.
- [27] FANG Hongliang, LIANG Shunlin, HOOGENBOOM G. Integration of MODIS LAI and vegetation index products with the CSM–CERES–Maize model for corn yield estimation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(4):1039–1065.
- [28] CHEN Y, YANG K, HE J, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D20): D20104.
- [29] 何杰,阳坤. 中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集[Z]. 中国科学院寒区旱区科学数据中心,2011, DOI: 10.3972/westdc.3002.2014.db.
- [30] SAVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8):1627–1639.
- [31] STEINIER J, TERMONIA Y, DELTOUR J, et al. Smoothing and differentiation of data by simplified least square procedure [J]. *Analytical Chemistry*, 1972, 44(11):1906–1909.
- [32] ZHANG X, FRIEDL M A, SCHAAF C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(3):471–475.
- [33] 夏天,吴文斌,周清波,等. 冬小麦叶面积指数高光谱遥感反演方法对比[J]. *农业工程学报*,2013,29(3):139–147.
XIA Tian, WU Wenbin, ZHOU Qingbo, et al. Comparison of two inversion methods for winter wheat leaf area index based on hyperspectral remote sensing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(3):139–147. (in Chinese)
- [34] 杨飞,孙九林,张柏,等. 基于 PROSAIL 模型及 TM 与实测数据的 MODIS LAI 精度评价[J]. *农业工程学报*,2010, 26(4): 192–197.
YANG Fei, SUN Jiulin, ZHANG Bo, et al. Assessment of MODIS LAI product accuracy based on the PROSAIL model, TM and field measurements[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(4):192–197. (in Chinese)