

杨琳,高苹,居为民. 基于 MODIS NDVI 数据的江苏省冬小麦物候期提取[J]. 江苏农业科学,2016,44(1):315-320.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.01.093

基于 MODIS NDVI 数据的江苏省冬小麦物候期提取

杨琳¹,高苹²,居为民¹

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所,江苏南京 210023;2. 江苏省气象服务中心,江苏南京 210008)

摘要:农作物物候期是作物对气候变化响应的重要指标,也是提高区域农业管理水平的重要参数;遥感技术的发展为大面积提取农作物物候期提供了有效的技术途径。利用 2010 年 MODIS NDVI 序列提取江苏省冬小麦关键物候期的方法,首先采用非对称高斯函数、双 Logistic 函数对 NDVI 时序曲线进行拟合,进而采用动态阈值法确定冬小麦物候期,并利用观测数据对提取结果进行验证。结果表明,就冬小麦返青期、抽穗期、成熟期的提取而言,双 Logistic 函数拟合方法略优于非对称高斯函数拟合方法,利用前一种拟合方法提取的返青期、抽穗期、成熟期与观测数据比较的均方根误差分别为 5.5、9.4、7.5 d,而利用后一种拟合方法提取的返青期、抽穗期、成熟期均方根误差分别为 6.1、9.5、7.8 d;2010 年全省的冬小麦普遍于第 49 天之前开始返青,抽穗期普遍开始于第 105 天至第 113 天,成熟期普遍开始于第 145 天至第 161 天,抽穗期、成熟期大体上表现出从南到北逐渐延迟的趋势,但是返青期的空间差异并不明显。

关键词:江苏省;冬小麦;物候期;生育期;MODIS NDVI;时间序列

中图分类号:S127 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2016)01-0315-06

物候是指自然界中的生物受气候和其他环境因素的影响而出现的以年为准周期的自然现象^[1],农作物的物候期则是指农作物达到关键生育期所对应的日期^[2]。农作物物候的变化反映了气候变化对农作物生长发育的影响,是气候变化对农业生态系统影响的指标之一^[3-8],因此成为全球气候变化研究的热点问题之一^[9]。

作物物候信息可以通过田间观测、积温预测和遥感监测

等多种途径获得。但是田间观测方法不仅费时费力,而且代表的面积有限^[10];积温预测方法需要播种日期、逐日气温以及某一生育期所需积温等信息^[10]。因此,这 2 种方法的大面积应用受到一定的限制。遥感技术的发展为大面积监测作物物候提供了崭新的手段^[11],基于遥感信息计算的植被指数能够在较大范围内较精确地反映植被绿度、光合作用和生长的季节和年际变化,因而被广泛应用于植被监测、分类和物候分析中^[12]。目前常用于物候监测的植被指数有归一化植被指数(normalized vegetation index, NDVI)、增强植被指数(enhanced vegetation index, EVI)等。有研究认为,NDVI 作为指示地面生长季节开始和结束的遥感指标具有比较稳定的特点^[13],因此国内外很多学者利用 NDVI 时序数据对作物物候及其时空变化进行了研究。如 Sehgal 等利用 1981—2001 年 NOAA—

收稿日期:2015-01-26

基金项目:国家农业科技成果转化资金(编号:2013GB24160634)。

作者简介:杨琳(1990—),女,山东招远人,硕士研究生,主要从事资源环境遥感研究。E-mail: liny_nju@163.com。

通信作者:居为民,博士,教授,主要从事全球变化和生态遥感研究。

Tel: (025)89685670; E-mail: juweimin@nju.edu.cn。

[5] 张宝. 解淀粉芽孢杆菌抗菌脂肽 *Bacillomycin* L 的纯化鉴定及抑菌机理研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.

[6] 赵东洋. 解淀粉芽孢杆菌 SWB16 脂肽类代谢产物对球孢白僵菌的拮抗作用及发酵条件的初步优化[D]. 重庆:西南大学,2014.

[7] 安俊莹,刘颖,朱雯娟,等. 响应面法优化 *Bacillus amyloliquefaciens* ZJHD-06 产类细菌素发酵培养基[J]. 食品工业科技, 2014,35(1):191-195.

[8] 陈召亮,张辉,张娜娜,等. 拮抗菌 RY3 抗菌粗蛋白理化性质及其对柑橘绿霉病菌的抑菌活性[J]. 食品与机械,2013,29(6):187-190.

[9] 蔡文韬,夏波,夏延斌,等. 解淀粉芽孢杆菌发酵液处理提高辣椒采后品质[J]. 农业工程学报,2013,29(23):253-261.

[10] 彭研,陈蕾蕾,裴纪莹,等. 产广谱抗菌物质芽孢杆菌的筛选与鉴定[J]. 中国农学通报,2013,29(36):372-377.

[11] 裴纪莹,黄玲玲,陈蕾蕾,等. 解淀粉芽孢杆菌 NCPSJ7 抑制青霉病病原菌及防治梨采后青霉病的效果[J]. 中国农学通报, 2014,30(21):311-315.

[12] 黄玲玲,裴纪莹,唐琳,等. 解淀粉芽孢杆菌 NCPSJ7 对采后苹果轮纹病的生物防治作用[J]. 中国食物与营养, 2015

(2):20-24.

[13] 杨革. 微生物学实验教程[M]. 北京:科学出版社,2004: 143-150.

[14] 梁漫. 生防芽孢杆菌的筛选及其抗菌物质的研究[D]. 雅安:四川农业大学,2011.

[15] Shah S R, Parikh R H, Chavda J R, et al. Application of plackett-burman screening design for preparing glibenclamide nanoparticles for dissolution enhancement[J]. Powder Technology, 2013,235:405-411.

[16] Jegathanan P M, Venkatachalam S, Karichappan T, et al. Model development and process optimization for solvent extraction of polyphenols from red grapes using Box-Behnken design[J]. Preparative Biochemistry & Biotechnology,2014,44(1):56-67.

[17] Hamedpour V, Amjadi M. Application of box-behnken design in the optimization of in situ surfactant-based solid phase extraction method for spectrophotometric determination of quinoline yellow in food and water samples[J]. Food Analytical Methods,2014,7(5): 1123-1129.

AVHRR NDVI 数据集对印度恒河平原的农作物物候信息进行提取并分析了其时空变化特征^[14]。常守志等基于 MODIS NDVI 时序数据采用动态阈值法提取了三江平原 2003 年的农田物候信息^[15]。

冬小麦是江苏省主要的夏熟作物之一,其生长发育经常受到低温冻害、连续阴雨和病虫害的影响^[16]。这些灾害所造成的损失与灾害的强度、持续时间以及冬小麦所处的生育期有关,准确的冬小麦物候期分布数据有助于提高农业管理水平、减轻灾害的影响。但是目前利用遥感数据提取江苏省冬小麦物候期的研究还有待开展。因此,本研究分别利用非对称高斯函数、双 Logistic 函数方法对 MODIS NDVI 数据进行拟合,采用动态阈值法提取江苏省 2010 年冬小麦的关键物候期,比较利用 2 种拟合方法提取的冬小麦物候期差异,以期利用遥感技术监测冬小麦的生长和发育进程提供参考。

1 研究区概况

江苏省(30°45′~35°20′N,116°18′~121°57′E)位于长江、淮河南下游,总面积 10.26 万 km²,地形以平原为主^[17-18]。江苏省属东亚季风气候区,处在亚热带和暖温带气候过渡地带,全省年均降水量 700~1 200 mm,年均气温 13~16℃,年

日照时间 2 000~2 600 h,平均无霜期 200~240 d。大多数地区实行一年两熟制,粮食作物以水稻、麦类为主,经济作物有棉花、花生、油菜、黄麻、蚕桑等^[19]。其中,冬小麦是主要的夏熟作物之一,一般 10 月份播种,翌年 5 月份成熟。

2 材料与方法

2.1 数据来源与预处理

2.1.1 数据来源 研究采用的覆盖江苏省的 MODIS MOD09Q1 反射率数据产品来源于 NASA(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/index.html>),空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 8 d,时间范围覆盖了 2010 年 1—12 月,共 46 期数据。研究使用的辅助数据有江苏省行政边界数据、土地利用数据,以及用于结果验证的 6 个农业气象观测站的 2009—2010 年的冬小麦生育期数据(图 1)。其中,土地利用数据由中国科学院南京地理与湖泊研究所通过融合 2006—2007 年 SPOT 2/4 卫星遥感影像(全色,10 m 空间分辨率)和 Landsat TM 卫星遥感影像(多光谱,30 m 空间分辨率)生成,比例尺为 1:50 000,土地利用类型共有 32 类,研究使用的是种植农业空间数据层。

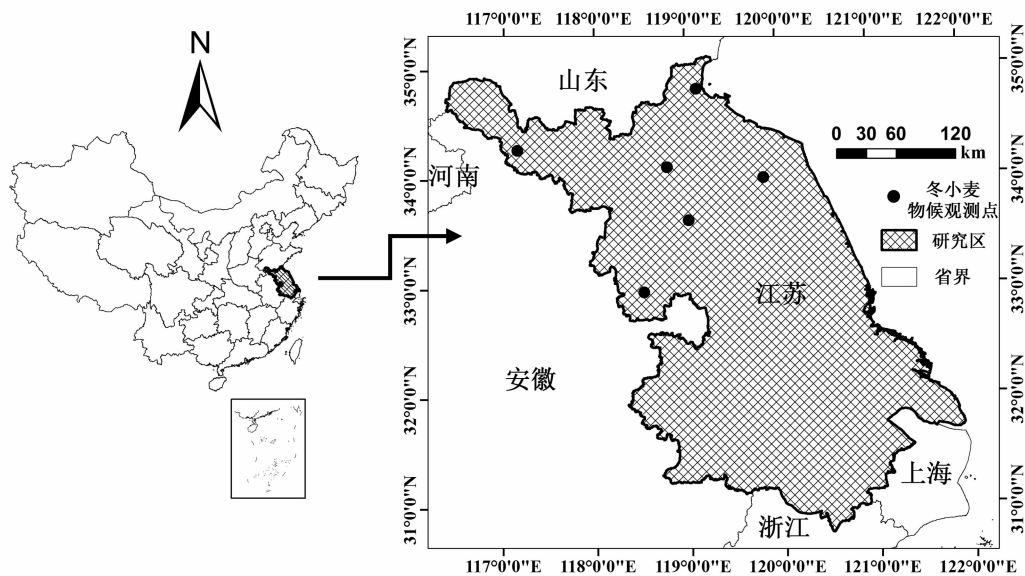


图1 研究区位置及冬小麦物候期观测点分布

2.1.2 数据预处理 首先使用 NASA 提供的 MRT(MODIS Reprojection Tools)软件对下载的 MODIS 反射率数据进行拼接、投影转换和格式转换。然后利用江苏省行政边界数据对转换后的影像进行裁剪处理,使用土地利用数据中的种植农业空间数据层进行掩膜处理。最终得到覆盖江苏省农作物种植区的反射率数据,生成研究区的 NDVI 序列数据:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

式中: ρ_{NIR} 、 ρ_R 分别代表近红外波段、红光波段的反射率。

农田的 NDVI 值应大于 0,然而个别农田像元的 NDVI 值由于冬季或早春时积雪或其他噪声的影响出现了负值,将这些不合理的值用 0 代替。为了提高数据存储效率,将浮点型

的 NDVI 数据扩大 100 倍,保存为无符号的短整型二进制文件。

每 8 d 的 MOD09Q1 反射率数据是基于每天的反射率数据、采用最大值合成法(MVC)以消除云和气溶胶影响而生成的影像,但是传感器观测角度、太阳高度角、水蒸气等引起的噪声仍然存在^[20],会导致计算的 NDVI 出现不合理的波动。为此采用 Savitzky-Golay(简称 S-G)滤波法^[21]对计算的 NDVI 序列数据进行 3 次平滑处理。参照梁守真等的成功经验^[22],本研究选取的滤波窗口大小为 7,平滑多项式的阶数为 2。

2.2 非对称性高斯函数和双 Logistic 函数拟合

为了重建冬小麦 NDVI 的变化动态,分别利用非对称性

高斯函数^[23-24]和双 Logistic 函数^[25]对经过平滑处理的 NDVI 时序数据进行拟合。拟合时首先寻找冬小麦 NDVI 时序曲线上的极大值、极小值,然后用局部模型函数拟合极大值、极小值之间的数据。局部模型函数的通用表达式为:

$$f(t) = f(t; c, x) = c_1 + c_2 g(t; x) \quad (2)$$

其中线性参数 $c = (c_1, c_2)$ 决定时序曲线的基线和振幅;非线性参数 $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ 决定基函数 $g(t; x)$ 的形状。这 2 个参数可使用 Levenberg-Marquardt 算法^[26-27]进行多次迭代求得。

对于非对称高斯函数,其基函数形式为:

$$g(t; x_1, \dots, x_5) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{t-x_1}{x_2}\right)^{x_3}\right] & t > x_1 \\ \exp\left[-\left(\frac{x_1-t}{x_4}\right)^{x_5}\right] & t < x_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_1 为极大值或极小值所对应的变量 t 的位置参数; x_2 、 x_3 决定极大值右半部函数的宽度、平整度; x_4 、 x_5 决定极大值左半部函数的宽度、平整度。

对于双 Logistic 函数来说,其基函数形式为:

$$g(t; x_1, \dots, x_4) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{x_1 - t}{x_2}\right)} - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{x_3 - t}{x_4}\right)} \quad (4)$$

式中: x_1 决定左边拐点的位置, x_2 为该拐点的变化率; x_3 决定右边拐点的位置, x_4 为该点的变化率。

2.3 物候期提取

在分别利用非对称高斯函数和双 Logistic 函数对 NDVI 数据进行拟合后,采用动态阈值法提取冬小麦的返青期、抽穗期、成熟期(时间范围覆盖 33 ~ 169 d)。根据司文才等的研究^[28],本试验选择 20% 的阈值确定返青期、成熟期,即在 NDVI 的上升阶段,当 NDVI 值达到最大值的 20% 时对应的时间为冬小麦的返青期开始时间;在 NDVI 的下降阶段,当 NDVI 值减小到最大值的 20% 时对应的时间为冬小麦的成熟期开始时间。根据鹿琳琳等对抽穗期开始的定义^[2],确定 NDVI 达到最大的时间点为抽穗期开始时间。

2.4 物候期监测结果的验证

基于遥感数据的区域物候期监测结果的实地验证是目前物候研究的关键问题^[29]。本研究利用江苏省冬小麦主产区内的淮安市盱眙县、淮安市淮安区、盐城市滨海县、沭阳县、徐州市铜山区、连云港市赣榆区 6 个农业气象站的 2009—2010 年冬小麦生育期观测数据对冬小麦物候期的遥感提取结果进行验证。假设农业气象站的观测数据为真值,分别采用最大误差、最小误差、平均误差及均方根误差(root mean squared error, RMSE)为指标表征物候期提取的精度。其中均方根误差(RMSE)的计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - d'_i)^2} \quad (5)$$

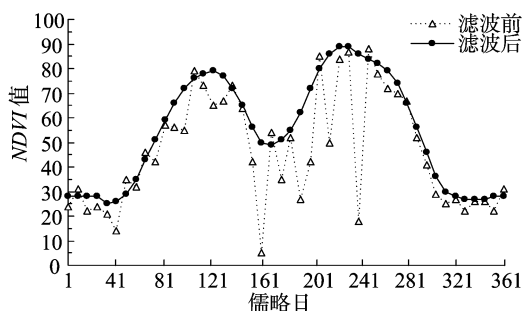
式中: d_i 为利用 MODIS NDVI 数据提取的物候期; d'_i 为观测的物候期; n 为样本数。

3 结果与分析

3.1 S-G 滤波结果

随机选取盐城市射阳县境内的 1 个耕地像元(行列号分

别为 593、1372)以查看 S-G 滤波的效果(图 2)。可以看出,滤波前 NDVI 时序曲线存在明显的短期锯齿状波动,经 S-G 滤波后的 NDVI 时序曲线基本上保持了原有曲线的形态,并且变得较为平滑,极低的离异值得到很好的纠正。据调查,该像元的农作物为一年两熟制,夏熟为冬小麦,秋熟为水稻。滤波后的 NDVI 时序曲线呈明显的双峰形态,2 个波峰分别对应于冬小麦、水稻的抽穗开花期。在冬小麦生长过程中,返青期之后随着气温的升高,冬小麦生长加速,叶片的叶绿素含量上升,对红光的吸收和近红外光的反射增强,NDVI 值随之相应上升,到抽穗期达到峰值;抽穗期过后,随着冬小麦逐渐成熟,叶片开始变黄,叶绿素含量降低,对红光波段的反射率开始回升,近红外波段的反射率逐渐降低,NDVI 值随之相应减少,直到冬小麦成熟收获^[30]。



图中 1 对应 1 月 1 日, 依此类推。图 3 同

图 2 NDVI 时序曲线平滑前后对比

但 S-G 滤波也具有局限性:滤波窗口的大小和平滑多项式阶数的选择均需要根据不同的条件人为进行设定,主观性影响较大。边金虎等研究表明,如果滤波窗口大小设置得偏小,容易产生大量的冗余数据,不易获取数据集的长期趋势^[31];相反则容易遗漏一些细节所描述的正确信息。梁守真等研究表明,在一般情况下,平滑多项式阶数越小,处理后曲线越平滑,但拟合效果差^[22]。阶数越高,拟合效果越好,但有可能出现过拟合现象,而且在个别数据点会有振荡。因此,在进行 S-G 滤波处理时,滤波窗口的大小及平滑多项式的阶数是保证 NDVI 数据拟合准确性的关键。

图 3 是分别采用非对称性高斯函数、双 Logistic 函数拟合后的上述耕地像元 NDVI 时序曲线的对比效果,可以看出:2 条拟合曲线均与滤波后 NDVI 值保持了相同的季节趋势;除到达波谷和第 2 个波峰阶段外,2 条曲线上的 NDVI 值基本保持一致;在波谷和第 2 个波峰周围,利用双 Logistic 函数拟合的曲线斜率变化要比非对称高斯函数大,并且用前者拟合的 NDVI 值在波峰处比后者大,在波谷处比后者小。

3.2 冬小麦关键物候期的空间分布

图 4、图 5、图 6 分别为采用非对称高斯函数(图 4-a、图 5-a、图 6-a)和双 Logistic 函数(图 4-b、图 5-b、图 6-b)拟合并利用动态阈值法得到的 2010 年江苏省冬小麦返青期开始时间、抽穗期开始时间、成熟期开始时间的空间分布。总体来看,基于 2 种拟合方法提取的物候期结果相似:返青期普遍开始于第 49 日之前,即 2 月 18 日之前;抽穗期普遍开始于第 105 天至第 113 天,即 4 月 15—23 日;成熟期普遍开始于第 145 天至第 161 天,即 5 月 25 日至 6 月 10 日。在空间分布上,研究区冬小麦返青期开始时间并没有随着纬度的变化

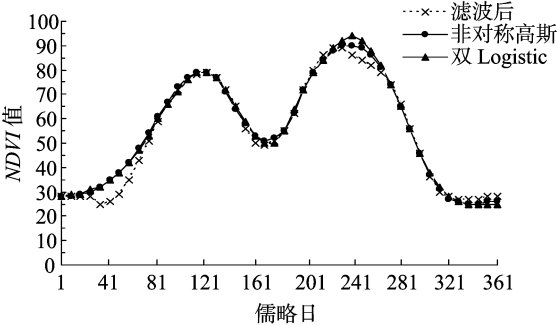


图3 非对称高斯函数、双Logistic函数分别拟合的NDVI时序曲线比较

而发生规律性的改变,大部分地区冬小麦开始返青的时间较集中,但在阜宁县、建湖县的大部分地区以及滨海县西南部、海门市东部地区返青期开始的时间较其他冬小麦区晚。抽穗期开始时间和成熟期开始时间的空间分布总体上表现出从南到北逐渐延迟的趋势:苏南地区抽穗期普遍开始于第 105 天之前,成熟期普遍开始于第 153 天之前;苏中地区抽穗期普遍开始于第 113 天之前,成熟期普遍开始于第 145 天至第 161 天;苏北地区抽穗期普遍开始于第 113 天之后,成熟期普遍开始于第 153 天之后。但是抽穗期、成熟期开始最晚的地区却没有集中在研究区的北部,在响水县、滨海县的大部分地区以及阜宁县北部、海门市东部和启东市北部地区,冬小麦抽穗

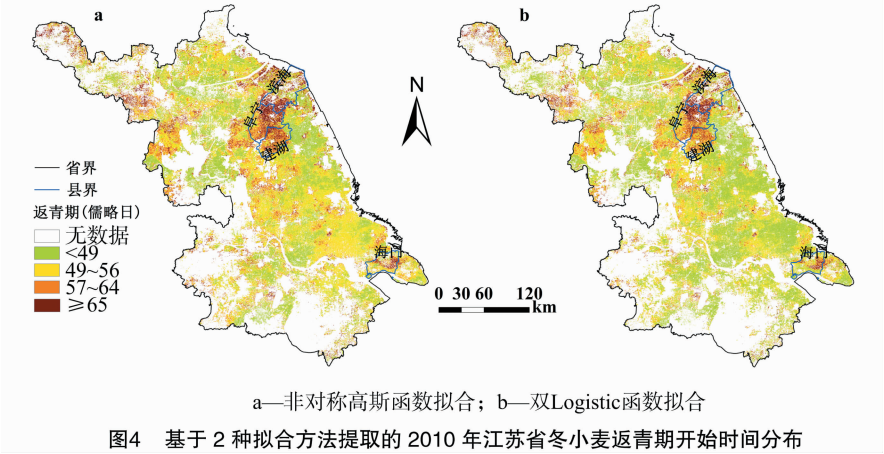


图4 基于 2 种拟合方法提取的 2010 年江苏省冬小麦返青期开始时间分布

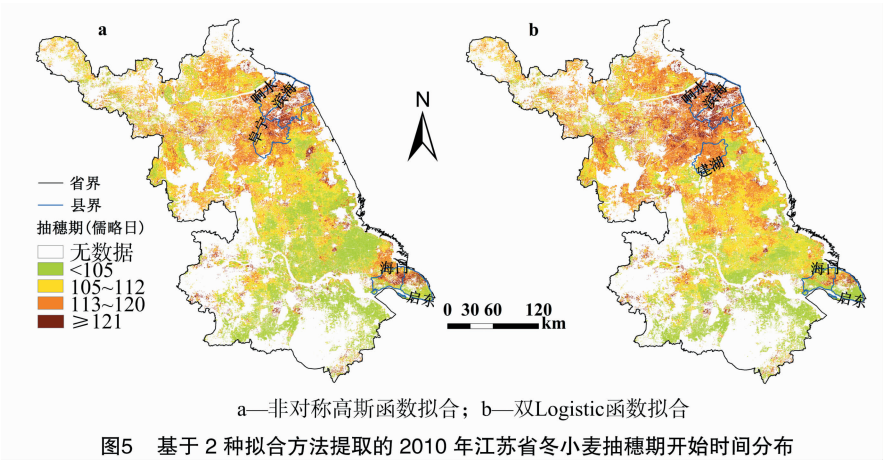


图5 基于 2 种拟合方法提取的 2010 年江苏省冬小麦抽穗期开始时间分布

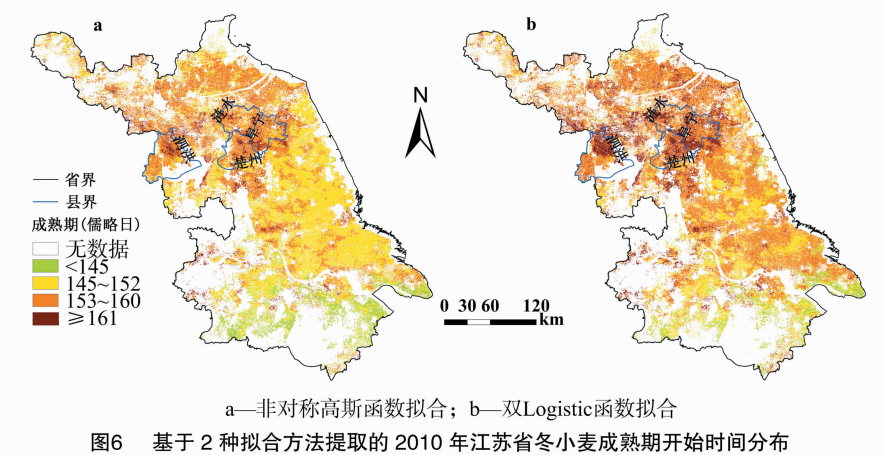


图6 基于 2 种拟合方法提取的 2010 年江苏省冬小麦成熟期开始时间分布

期较其他地区晚;在泗洪县北部、阜宁县西南部、楚州区东部以及涟水县西北部地区,冬小麦成熟期开始得比其他地区晚。

3.3 冬小麦关键物候期结果验证

表 1、图 7 是采用非对称高斯函数、双 Logistic 函数分别拟合 NDVI 数据进而采用动态阈值法提取的不同站点物候期与观测数据的比较,可以看出遥感提取的物候期与观测的差

普遍小于 8 d。基于非对称高斯函数拟合提取的物候期误差超过 8 d 的样本数为:返青期 1 个(16.7%),抽穗期 2 个(33.3%),成熟期 1 个(16.7%);基于双 Logistic 函数拟合提取的物候期误差超过 8 d 的样本数为:返青期 1 个(16.7%),抽穗期为 1 个(16.7%),成熟期为 1 个(16.7%)。结果表明,利用 MODIS NDVI 数据提取江苏省冬小麦物候期是可行的。

表 1 基于 MODIS NDVI 数据提取的冬小麦物候期与观测数据的对比

样点	返青期			抽穗期			成熟期		
	观测时间(d)	非对称高斯	双 Logistic	观测时间(d)	非对称高斯	双 Logistic	观测时间(d)	非对称高斯	双 Logistic
淮安市盱眙县	55	52	51	120	115	118	150	156	158
淮安市淮安区	55	51	49	111	116	118	157	160	163
盐城市滨海县	53	65	63	106	123	125	165	159	162
沐阳县	55	51	50	125	115	119	161	158	161
徐州市铜山区	49	53	49	121	114	114	163	159	162
连云港市赣榆区	53	58	55	123	116	117	167	151	152

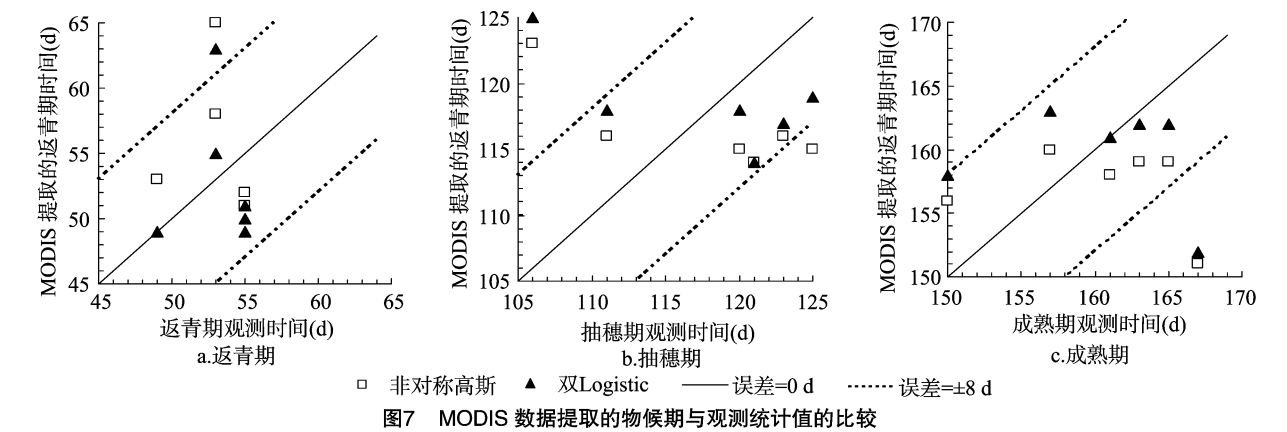


表 2 是基于 MODIS NDVI 数据提取的冬小麦生育期与观测数据比较的统计。可以看出,基于双 Logistic 函数拟合提取的冬小麦生育期精度稍好于基于非对称高斯函数拟合提取的结果,抽穗期的误差大于返青期、成熟期。利用双 Logistic 函数拟合方法提取的返青期、抽穗期、成熟期与观测数据比较的均方根误差分别为 5.5、9.4、7.5 d,平均误差分别为 4.5、7.8、5.5 d;利用另一种拟合方法提取的返青期、抽穗期、成熟期均方根误差分别为 6.1、9.5、7.8 d,平均误差分别为 5.3、8.5、6.3 d。

表 2 物候期提取结果精度评价

评价指标	返青期(d)		抽穗期(d)		成熟期(d)	
	非对称高斯	双 Logistic	非对称高斯	双 Logistic	非对称高斯	双 Logistic
最大误差	12	10	17	19	16	15
最小误差	3	0	5	2	3	0
平均误差	5.3	4.5	8.5	7.8	6.3	5.5
RMSE	6.1	5.5	9.5	9.4	7.8	7.5

综上所述,利用非对称高斯函数、双 Logistic 函数拟合 NDVI 时序数据并采用动态阈值法进行判别可以有效提取研究区的冬小麦生育期,但提取的农作物物候期与站点观测数据尚存在一定的差异。主要原因有以下几个方面:本研究采用的是 MODIS 反射率的 8 d 合成产品,合成数据虽然在一定程度上保证了数据的质量,但明显降低了数据的时间分辨率,

会导致物候提取的一定误差;此外,本研究使用的 MODIS 数据空间分辨率为 250 m,遥感提取的物候期是像元内的平均值,而观测数据代表的是站点附近的物候,遥感数据与观测数据空间尺度差异也会影响遥感提取的物候与观测数据的一致性。当然,观测数据的误差也会影响遥感提取的物候的验证结果,将实地观测的和遥感提取的物候信息相结合是一种有效的物候提取途径^[32-33]。

4 结论

快速、准确获得区域冬小麦物候信息,对于实施田间精细化管理以及产量预测等具有重要意义。本研究基于 MODIS NDVI 时间序列数据,分别利用非对称高斯函数、双 Logistic 函数进行拟合,并采用动态阈值法提取了江苏省 2010 年冬小麦物候信息。主要得出以下结论:

- (1) S-G 滤波处理可以有效地纠正时序数据中的奇异值,使 NDVI 时序曲线在保持原有形状的基础上变得较为平滑。
- (2) 非对称高斯函数、双 Logistic 函数 2 种拟合方法都可以使 NDVI 时序曲线更符合作物的生长过程。验证结果表明,就江苏省的冬小麦物候提取而言,双 Logistic 函数拟合方法略优于非对称高斯函数拟合方法。
- (3) 基于 MODIS NDVI 提取的 2010 年江苏省冬小麦返青期普遍开始于第 49 天之前,抽穗期普遍开始于第 105 天至

第113天,成熟期普遍开始于第145天至第161天。抽穗期和成熟期的空间分布总体上表现出从南到北逐渐延迟的趋势,但返青期的空间分布特征不明显。同时也存在着一些不足,研究中采用动态阈值法提取物候期需要人为设定阈值,并且没有考虑阈值的空间变化,会影响物候提取的精度;由于观测数据的限制,仅使用了淮北地区6个点的数据对物候提取结果进行了验证,在其他地区,物候提取的误差尚不清楚;影响冬小麦物候的因素有很多,比如气候、地形、冬小麦品种、耕作制度差异等,它们的综合作用使其存在明显的空间变化。因此在今后的研究中,要综合考虑这些因素的影响,实现物候期提取的更细致化。

参考文献:

- [1] 宛敏渭,刘秀珍. 中国物候观测方法[M]. 北京:科学出版社,1979.
- [2] 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):174-179,317.
- [3] International Panel on Climate Change. Climate change 2007: impacts, adaption and vulnerability [R]. New York: Cambridge University Press,2007.
- [4] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981—1991[J]. Nature,1997,386:698-702.
- [5] Yang L, Wylie B K, Tieszen L L, et al. An analysis of relationships among climate forcing and time integrated NDVI of grasslands over the US northern and central plains[J]. Remote Sensing of Environment, 1998,65(1):25-37.
- [6] Yu F, Price K P, Ellis J, et al. Response of seasonal vegetation development to climate variations in eastern central Asia[J]. Remote Sensing of Environment,2003,87(3):42-54.
- [7] Zhou L, Kaufmann R K, Tian Y, et al. Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999[J]. Journal of Geophysical Research, 2003,108(D1):20069-20083.
- [8] Sadras V O, Monzon J P. Modelled wheat phenology captures rising temperature trends; Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina[J]. Field Crops Research,2006,99(2/3):136-146.
- [9] 张峰,吴炳方,刘成林,等. 利用时序植被指数监测作物物候的方法研究[J]. 农业工程学报,2004,20(1):155-159.
- [10] 辛景峰,宇振荣, Driessen P M. 利用 NOAA NDVI 数据集监测冬小麦生育期的研究[J]. 遥感学报,2001,5(6):442-447,483.
- [11] 吴文斌,杨鹏,唐华俊,等. 基于 NDVI 数据的华北地区耕地物候空间格局[J]. 中国农业科学,2009,42(2):552-560.
- [12] 吴炳方. 全国农情监测与估产的运行化遥感方法[J]. 地理学报,2000,55(1):25-35.
- [13] Schwartz M D, Chen Z Q. Examining the onset of spring in China [J]. Climate Research,2002,21(2):157-164.
- [14] Sehgal V K, Jain S, Aggarwal P K, et al. Deriving crop phenology metrics and their trends using times series NOAA - AVHRR NDVI data[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing,2011,39(3):373-381.
- [15] 常守志,王宗明,宋开山,等. 基于 NDVI 数据的三江平原农田物候监测[J]. 遥感技术与应用,2011(1):82-88.
- [16] 黄青,吴文斌,邓辉,等. 2009年江苏省冬小麦和水稻种植面积信息遥感提取及长势监测[J]. 江苏农业科学,2010(6):508-511.
- [17] 李旭杰. 基于遥感信息与作物模型结合的江苏省水稻估产研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.
- [18] 王鹏翮. 基于遥感的江苏省植被净初级生产力时空分布研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.
- [19] 苗翠琴,江南,彭世揆,等. 基于 NDVI 时序数据的水稻种植面积遥感监测分析——以江苏省为例[J]. 地球信息科学学报,2011(2):273-280.
- [20] Hou X H, Gao S, Niu Z, et al. Extracting grassland vegetation phenology in North China based on cumulative SPOT - VEGETATION NDVI data[J]. International Journal of Remote Sensing,2014,35(9):3316-3330.
- [21] Savitzky A, Golay M J E, Chem A. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. Analytical Chemistry,2002,36(8):1627-1639.
- [22] 梁守真,施平,邢前国. MODIS NDVI 时间序列数据的去云算法比较[J]. 国土资源遥感,2011(1):33-36.
- [23] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time - series of satellite sensor data[J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on,2002,40(8):1824-1832.
- [24] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT - a program for analyzing time - series of satellite sensor data[J]. Computers & Geosciences,2004,30(8):833-845.
- [25] Ratkowsky D. Nonlinear regression modeling: a unified practical approach[J]. Technometrics,1983,26(2):61-91.
- [26] Levenberg K. A method for the solution of certain non - linear problems in least squares[J]. Quarterly of Applied Mathematic,1944,2(1):164-168.
- [27] Marquardt D W. An algorithm for least - squares estimation of non-linear parameters[J]. Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics,2006,11(2):431-441.
- [28] 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.
- [29] Liang L, Schwartz M D. Landscape phenology: an integrative approach to seasonal vegetation dynamics[J]. Landscape Ecology, 2009,24(4):465-472.
- [30] 刘珺. 黄淮海夏玉米种植面积和空间分布变化检测遥感研究[D]. 南京:南京大学,2012.
- [31] 边金虎,李爱农,宋孟强,等. MODIS 植被指数时间序列 Savitzky - Golay 滤波算法重构[J]. 遥感学报,2010,14(4):725-741.
- [32] Schwartz M D, Reed B C. Surface phenology and satellite sensor - derived onset of greenness: an initial comparison [J]. International Journal of Remote Sensing,1999,20(17):3451-3457.
- [33] 陈效述,王林海. 遥感物候学研究进展[J]. 地理科学进展,2009,28(1):33-40.