

基于 NDVI 数据的三江平原农田物候监测

常守志^{1,2}, 王宗明¹, 宋开山¹, 刘殿伟¹, 张 柏¹, 张春华^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:物候现象被称为气候变化的积分仪, 研究农田物候现象对农业生产有重要的指导意义。多时相遥感影像使区域物候监测成为可能。利用傅里叶级数对 MODIS NDVI 数据进行平滑, 结合地面观测资料, 采用动态阈值法提取物候信息, 并与实际观测结果进行比较分析。研究表明: 三江平原大部分农作物在第 120~130 d 开始生长, 在第 250~260 d 左右停止生长, 2003 年三江平原农作物开始生长和结束的时间较早, 2005 年开始生长日期比 2003 年有所推迟, 2007 年农作物开始生长的日期早于 2005 年, 但生长季结束的日期比 2003 年和 2005 年都晚, 2007 年生长季长度较长。采用 MODIS NDVI 数据获取的物候参数具有一定的可靠性, 在农田大面积分布区域监测结果更为准确。

关键词: NDVI; 时间序列谐波分析; 动态阈值法; 物候监测; 三江平原

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2011)01-0082-07

1 引言

物候现象是指受环境(气候、水文、土壤条件)影响而出现的以年为周期的自然现象。物候现象如树木的开花、展叶、叶变色、落叶、鸟类迁飞、昆虫的活动等, 不仅反映当地、当时的环境变化, 而且反映过去一段时间内环境条件的积累, 是环境条件季节和年际变化最直观、最敏感的综合指示器^[1-2]。研究物候现象已经成为地理学和生态学的研究热点之一, 在服务农业生产、全球变化和生态学应用等方面发挥着重要作用^[3]。传统的物候观测方法是以野外观测为基础的目视观察法, 遥感技术的发展为物候研究提供了新机遇, 源于卫星遥感数据的归一化差值植被指数(NDVI), 能够在较大空间尺度上相当精确地反映植被的活力状态, NDVI 时间序列所具有的季节规律是植被季相变化特征的综合反映^[4-5]。国内外学者对利用 NDVI 数据监测物候变化进行了大量的研究, Karlsen 等^[6]利用 GIMMS-NDVI 数据分析了北欧地区 1982~2002 年的植物物候变化与春季气温之间的关系, Yu 等^[7]研究了中亚地区的

物候变化特征。国内学者如林忠辉^[5]对利用时间序列谐波分析提取物候信息的方法进行了探讨, 于信芳、吴文斌、宫攀等^[2, 10-13]利用 NDVI 数据分别提取了不同地区、不同植被类型的物候信息。

目前, 基于遥感数据划分物候生长季节的方法主要有: 阈值法、时间序列法、物候期频率分布型—遥感综合法、主成分分析法、曲线拟合法等^[3]。这些方法中, 或者受当地研究区经验常数的限制, 区域空间扩展应用困难; 或者虽然一些方法不受区域范围的限制, 能够获取区域尺度甚至全球尺度的物候格局, 但是对特定生态系统的物候格局分析不够^[9]。其中阈值方法应用较为广泛, 充分考虑了研究区 NDVI 多时相曲线特征, 通过设定阈值条件, 可将植被物候相的评估限制在合理的生育期内, 从而提高计算效率与准确性, 但阈值的选择受人为主观因素影响, 其结果直接影响物候评估的准确性^[8]。因此本文结合地面物候观测资料确定动态阈值的估算系数, 从而确定生长期开始和结束的时间, 分析三江平原 3 个时期的物候空间格局变化, 尝试探索适合不同区域的遥感数据监测物候生长季的方法。

收稿日期: 2010-07-05; 修订日期: 2010-12-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助(2009CB421103)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-341)、国家自然科学基金项目(40930527、40871187)。

作者简介: 常守志(1984—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事资源环境遥感与 GIS 应用研究。E-mail: changshouzhi@126.com。

通讯作者: 王宗明(1976—), 男, 内蒙古赤峰人, 研究员, 主要从事生态遥感与全球变化的区域响应研究。E-mail: zongmingwang@gamil.com。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

三江平原位于黑龙江省东北部,地理坐标为 $43^{\circ}49'55''\sim 48^{\circ}27'40''\text{N}$, $129^{\circ}11'20''\sim 135^{\circ}05'26''\text{E}$, 总面积 $10.89\times 10^4\text{ km}^2$ 。该区西南高东北低,除西部和西南部边界的小兴安岭、老爷岭、张广才岭和横亘中部的完达山为森林覆盖的山区外,广阔的冲积低平原和河流形成的阶地、河漫滩上广泛发育着沼泽和沼泽化草甸。本区气候类型为温带湿润、半湿润大陆性季风气候,1 月均温低于 -18°C ,7 月均温为 $21\sim 22^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温为 $2\ 300\sim 2\ 500^{\circ}\text{C}$; 无霜期 $120\sim 140\text{ d}$; 年降水量 $500\sim 650\text{ mm}$, 主要集中在 5~9 月,占全年降水的 80%。河流大多具有平原沼泽性河流的特点,河流的纵比降小,河槽弯曲系数大,一般在 1.5~3.0 之间。植被种类组成属于长白植物区系,以沼泽化草甸和沼泽植被为主。土壤主要有棕壤、黑土、白浆土、草甸土和沼泽土 5 种。区内有 5 个省辖市、18 个市县,总人口 851.97 万^[13]。目前该区已成为国家重要的商品农业基地^[14]。农田植被生长季长度的变化对粮食产量有重要影响,利用 NDVI 监测农田植被生长季的变化对农业生产有现实指导意义。

2.2 数据来源

本研究采用的遥感数据为 NASA 免费提供的覆盖三江平原的 MOD13A2 级产品,空间分辨率和时间分辨率分别为:1 000 m 和 16 d,数据格式为 EOS-HDF (数据下载地址: <https://wist.echo.nasa.gov/api/>)。时间范围分别为 2003 年、2005 年和 2007 年的第 1~353 d。每年共有 23 期数据,地图投影格式为:Sinusoidal(正弦曲线投影)。使用 NASA 提供的 MRT(MODIS Reprojection Tools) 软件将下载的数据进行拼接和地图投影转换,在 ArcMap 中对数据进行裁切处理。

研究中使用的 2005 年三江平原土地利用数据为通过遥感图像解译得到的矢量数据。解译数据源为 20 m 分辨率中巴卫星遥感数据,并附以一景 Landsat ETM+数据。土地利用类型共分为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿用地、未利用地和湿地 7 种类型。对于 2005 年解译结果在 2006 年 7~8 月期间,以 GPS 与数码相机以及量绳对广布于三江平原的 530 个典型地物进行了验证,同时通过咨询当地农户与农场专家,对解译结果进行修正。结果表明,以遥感为数据源建立的空间数据库的总体解译

精度约为 92%,其中耕地、居工地、水域的解译精度在 94%以上,林地、湿地、草地、未利用地解译精度分别为 92.4%、91.2%、89.6%、88.3%。在 ArcMap 软件中,将 2005 年土地利用数据进行栅格转化,使之和 NDVI 数据具有相同的空间分辨率。

地面实测数据来自于中国气象科学数据共享网服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。从中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集下载得到了三江平原 12 个站点的观测数据,包括发育期名称、发育期日期及发育程度 3 个要素。

2.3 NDVI 时序数据平滑处理

数据的采集和处理过程中,受到各种因素干扰如:太阳高度角、观测角度以及云、水汽、气溶胶等,这些因素在时间上出现的随机性,使得时间序列数据的变化呈不规则状态,造成时间序列数据波动很大,曲线季节变化趋势不明显,也无法进行各种趋势分析和信息提取。因此如何有效地去除云噪声的影响,重新构建时间序列影像是运用时间序列数据进行植物物候期遥感监测的关键问题^[9-10]。

傅里叶变换将一个时间信号分解为不同频率的正弦波,每一个频域分量都对应着时域空间中的一个正弦信号,也就是说,时域中的一条曲线可以表示成若干条不同频率的正弦曲线的叠加。实现了信号从时间域到频率域的变换,有效地去除了云噪声的影响,能够真实地反映 NDVI 的周期性变化规律^[9,15]。设有某要素时间序列 $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$, 将这些资料表示成为有限个正弦波(谐波)的迭加形式,称为谐波分析。由这些正弦波叠加构成的数据序列,即傅里叶序列^[4]。其数学表达式为:

$$y_i = A_0 \sum_{j=1}^m A_j \sin(\omega_j i + \theta_j) \quad (1)$$

其中: A_0 为谐波的余项,等于序列的平均值; A_j 为各谐波的振幅; θ_j 为各谐波的初位相, $i = 1, 2, \dots, n$; n 为数据序列点的个数; $\omega = 2j\pi/n$ 为各谐波的频率; m 为谐波个数。傅里叶序列也可表示为正弦函数和余弦函数之和:

$$y_i = a_0 + \sum_{j=1}^m (a_j \cos \omega_j i + b_j \sin \omega_j i) \quad (2)$$

其中: a_0 为谐波的余项; a, b 为傅里叶常数。

傅里叶系列拟合采用最小二乘法:

$$(\mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F}) \cdot \mathbf{C} = \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{Y} \quad (3)$$

其中: \mathbf{C} 为系数矩阵, \mathbf{F} 为傅里叶矩阵, \mathbf{F}^T 为傅里叶矩阵的转置矩阵。傅里叶拟合过程就是求解系数矩阵。

2.4 物候监测方法

三江平原农田分为旱田和水田两大类,为一年一熟制。对于旱田和水田本文统一以生长季开始期、生长季结束期作为物候监测的指标。动态阈值法与传统的固定阈值法相比,明显改进之处在于阈值的确定动态变化,与每个像元的 NDVI 季节变化幅度紧密相关,消除了不同的土壤背景值和植被类型的影响。动态阈值 NDVI_{lim}的计算方法通常为:

$$NDVI_{lim} = (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \cdot C \tag{4}$$

其中:NDVI_{max}为整个生长季的 NDVI 最大值,NDVI_{min}为 NDVI 上升或者下降阶段的最小值,C 为系数。已有的研究成果中 C 常取固定值 20%,具有一定的主观性和区域局限性,本文采用结合地面物候

观测资料的方法确定系数 C,使之更符合该地区农田的实际生长过程。具体流程为:提取物候平滑之后物候观测站点的 NDVI 曲线,查找生长期开始及生长期结束时的 NDVI 值,通过上式分别计算得到生长季开始和生长季结束所对应系数 C₁、C₂。对于不同年份 C₁、C₂ 取根据不同站点观测资料计算得到的均值。三江平原农田 NDVI 曲线仅有一个波峰,农作物生长季开始日期在 7 月份之前,生长季结束日期在 7 月份之后,因此本文分别在第 1~180 d 和 181~365 d 两个时间段内分别监测植被生长季开始和生长季结束的日期。

物候期监测在 Matlab 中实现,以 2003 年农田物候期监测为例具体计算过程为(图 1):

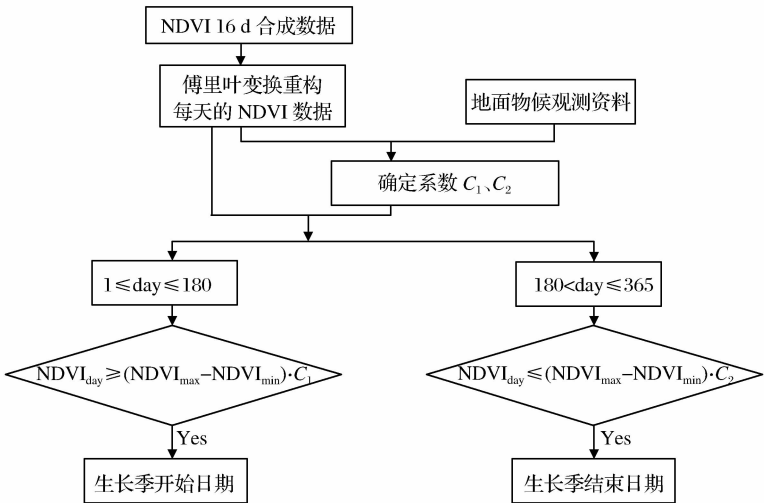


图 1 物候监测流程图

Fig. 1 Flowchart of monitoring cropland phenology

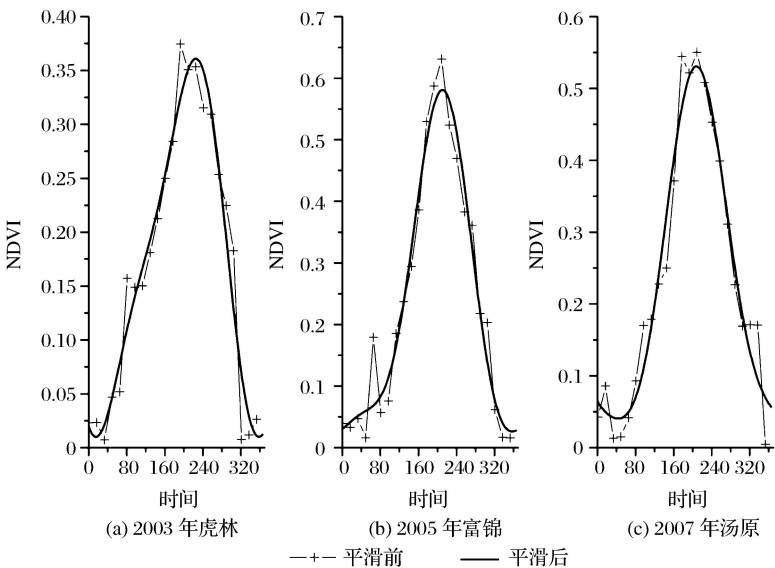


图 2 MODIS NDVI 时间序列数据平滑前后对比

Fig. 2 Comparison of NDVI time series data before and after smoothing

(1) 合成得到 2003 年 NDVI 时间序列数据三维矩阵。

(2) 平滑 NDVI 数据。逐个像元运算,提取该像元 2003 年各个时期 NDVI 数据,采用傅里叶变换得到该点第 1~365 d 的 NDVI 数据。

(3) 确定系数 C_1 、 C_2 。结合地面物候观测资料,提取观测站第 1~365 d 的 NDVI 数据,寻找该站点 2003 年 NDVI 最大值及第 1~180 d 和第 181~365 d

内的 NDVI 最小值,并寻找插秧期和成熟期当天的 NDVI 值,利用最小二乘法得到 C_1 、 C_2 值。

(4) 查找生长季开始、生长季结束日期。对平滑得到的 NDVI 数据逐像元计算生长季开始和生长季结束时的 $NDVI_{lim}$ 值,将第 1~180 d 内 NDVI 值首次达到生长季开始时 $NDVI_{lim}$ 的日期作为生长季开始的时间,将第 181~365 d 内 NDVI 值首次达到生长季结束时 $NDVI_{lim}$ 的日期作为生长季结束的时间。

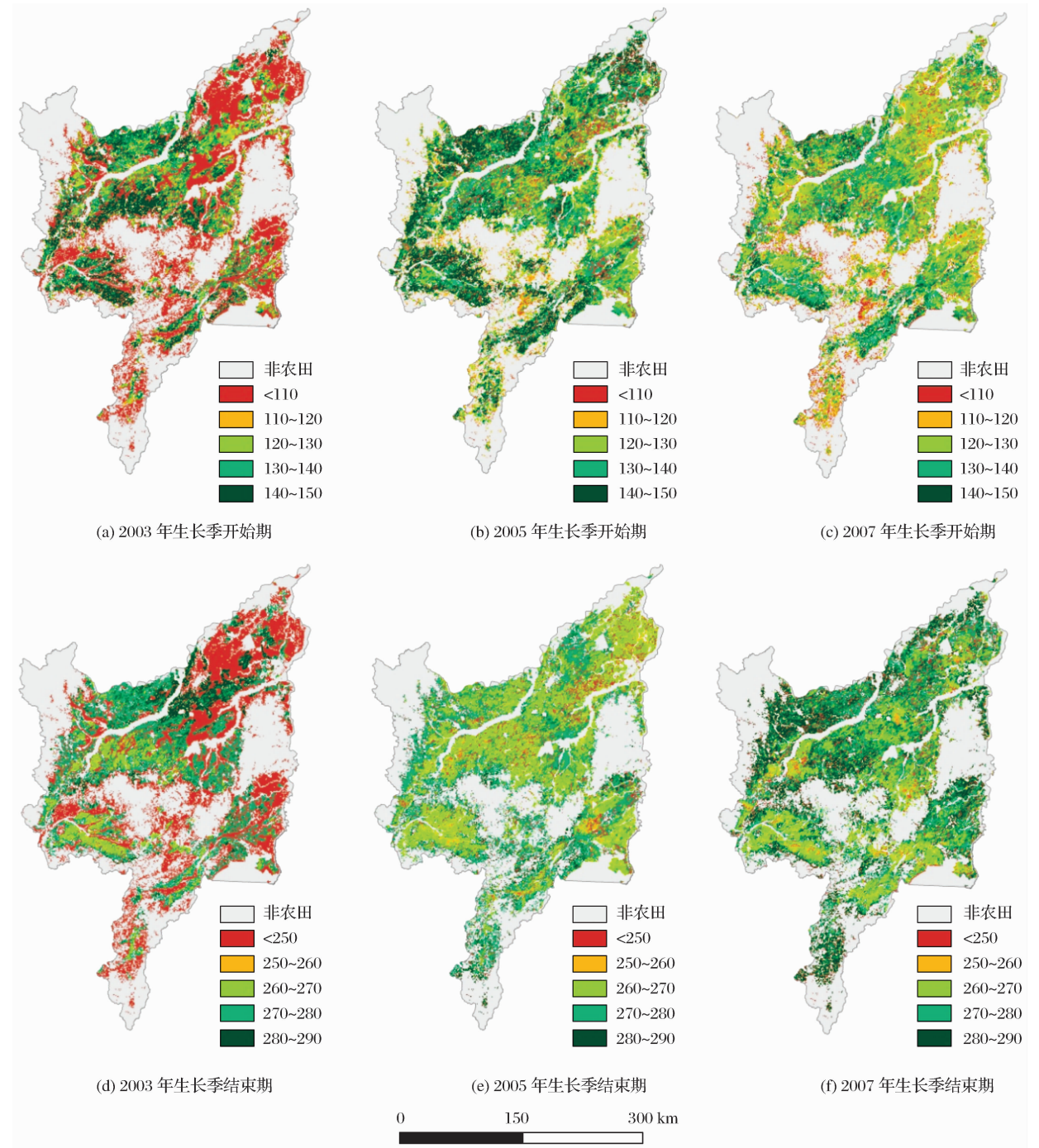


图 3 三江平原农田物候空间格局 (单位: d)

Fig. 3 Spatial pattern of cropland phenological dates in Sanjiang Plain

对于不同像元,其物候开始和结束的 NDVI 阈值是动态变化的,在 Matlab 中计算得到生长季开始和生长季结束矩阵,通过在 ArcMap 中添加坐标信息、裁切得到如图 3 所示结果。

3 结果与分析

3.1 NDVI 时序数据平滑效果

应用傅里叶级数对 2003 年、2005 年和 2007 年 NDVI 数据进行了平滑(图 2)。受提取样点不同植被类型以及不同年份气候条件等的影响,各个年份 NDVI 的峰值有所差别,而各个年份 NDVI 只有一个峰值,反映了三江平原一年一熟的种植制度。从图 2 中可以看出平滑前 NDVI 时间序列存在锯齿状波动,不能真实反映农作物的生长过程;平滑后重构的曲线基本上保持了原有曲线的基本形状,而且去除一些干扰值后,对曲线特征的刻画更为突出。平滑后的 NDVI 数据能够用于三江平原物候监测。

3.2 三江平原物候空间分布

基于动态阈值法的三江平原物候空间格局如图 3 所示,从图中可以直观地看出三江平原 2003 年、2005 年及 2007 年生长季开始和生长季结束时间的空间分布。从图 3(a)可以看出三江平原水稻田大面积分布的东北部 2003 年生长季开始时间较早,发生在第 110 d 之前,但在北部萝北县、绥滨县在 130~140 d 之间农作物才开始生长,桦川县农作物开始生长的时间最晚,集中在第 140~150 d。从图 3(d)可以看出 2003 年三江平原农田生长季结束时间空间分布呈现出与生长季开始相似的空间分布,整体来看,2003 年三江平原生长季结束时间也较早。东北部农作物停止生长的时间较早,这与该区域农作物生长季开始的时间较早有关,依兰县南部农作物成熟较早,结合该区域农作物开始生长时间可以

看出,该地区农作物生长季长度比其他地区短,这与该地区大豆种植面积较大有关。

图 3(b)表明,2005 年三江平原农田开始生长时间总体比 2003 年晚。但各个地区作物开始生长的时间相隔不大,绝大部分地区作物在第 130 d 后开始生长,虎林和密山交界地区农作物在第 120 d 后开始生长。2005 年三江平原中部、东南部及东北部农作物成熟期发生在第 260~270 d,即 9 月下旬,穆棱、鸡西等地成熟期发生在 280 d 之后,只有零星的一些地区农作物在第 260 d 之前成熟。图 3(e)显示 2007 年三江平原农田开始时间总体比 2005 年提前。农作物在第 140 d 之后开始生长的区域较小,农作物在第 120~140 d 开始生长的面积比例较大。相比而言,2007 年三江平原农作物停止生长的时间比 2003 年和 2005 年都有所推迟,大部分在第 260 d 之后进入成熟期,在第 280 d 之后开始成熟的也占了一大部分,总的来看 2007 年三江平原农作物生长时间较长。

3.3 结果验证

为了验证区域性物候监测结果的正确性,对监测结果与地面观测数据进行了对比(表 1),表中的地面数据不包括在确定动态阈值计算系数 C 的过程中,已经使用了的地面物候观测数据。具体过程是:在 ArcMap 中提取以物候观测站点为中心的 3×3 大小栅格的物候监测平均值与实际观测值进行对比。结合三江平原各个县地形图、土地利用数据分析得知,勃利县山地、农田交错分布,监测结果与实测值差别较大,生长季比实测值推迟了 16 d。集贤、富锦地区的农田分布集中,监测结果与实际观测值十分接近,监测结果图像斑块破碎化程度也很小。通过对比可以得出监测结果与实测值具有一定的可比性。

表 1 监测值与实际观测值对比
Table 1 Comparison between detected datas and field observations

年份	地点	实际观测值		监测值	
		生长季开始	生长季结束	生长季开始	生长季结束
2003	勃利	123	261	139	268
2005	集贤	138	271	133	274
2007	富锦	126	271	132	282

4 结 语

本文利用 NDVI 时序数据,并结合地面观测数

据采用动态阈值法提取了不同年份三江平原农作物物候指标,描述了三江平原生长季开始、生长季结束时间的空间分布以及不同年份农田物候空间

分布的差异,验证结果表明,采用结合地面观测资料的动态阈值法监测结果具有一定的可靠性。尽管研究结果表明利用遥感数据可以监测物候特征,提高监测结果的准确性以及更为详尽地描述物候特征仍然受到众多因素制约,如本文中农田大面积分布区域的监测效果要好于高山地带林地、农田交错分布区,高山地带农田面积斑块较小,遥感数据分辨率以及土地利用类型错误划分限制了物候的准确描述。遥感数据的时空分辨率、土地利用数据的准确性,如何去除噪声平滑时间序列遥感数据、适合不同区域不同植被类型的监测方法也是需要深入研究的问题。

参考文献(References):

- [1] Zhang Feng, Wu Bingfang, Liu Chenglin, *et al.* Methods of Monitoring Crop Phenological Stages Using Time Series of Vegetation Indicator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2004, 20(1): 155-159. [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.]
- [2] Wu Wenbin, Yang Peng, Tang Huajun, *et al.* Monitoring Spatial Patterns of Cropland Phenology in North China based on NOAA NDVI Data[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2009, 42(2): 552-560. [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.]
- [3] Chen Xiaoqiu, Wang Linhai. Progress in Remote Sensing Phenological Research[J]. Progress in Geography, 2009, 28(1): 33-40. [陈效述, 王林海. 遥感物候学研究[J]. 地理科学进展, 2009, 28(1): 33-40.]
- [4] Zhang Xuexia, Ge Quansheng, Zheng Jingyun. Overview on the Vegetation Phenology Using Remote Sensing[J]. Advances in Earth Science, 2003, 18(4): 534-544. [张学霞, 葛全胜, 郑景云. 遥感技术在植物物候研究中的应用综述[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 534-544.]
- [5] Lin Zhonghui, Mo Xingguo. Phenologies from Harmonics Analysis of AVHRR NDVI Time Series[J]. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2006, 22(12): 138-144. [林忠辉, 莫兴国. NDVI 时间序列谐波分析与地表物候信息获取[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 138-144.]
- [6] Karlsen S R, Solheim I, Beck P S A, *et al.* Variability of the Start of the Growing Season in Fennoscandia, 1982-2002[J]. International Journal of Biometeorology, 2007, 51(6): 513-524.
- [7] Yu F F, Price K P, Ellis J, *et al.* Satellite Observations of the Seasonal Vegetation Growth in Central Asia, 1982-1990[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70: 461-469.
- [8] Wu Yongfeng, Li Maosong, Song Jiqing. Advance in Vegetation Phenology Monitoring based on Remote Sensing[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2008, 24(3): 51-58. [武永峰, 李茂松, 宋吉青. 植被物候遥感监测研究进展[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(3): 51-58.]
- [9] Wu Wenbin, Yang Peng, Tang Huajun, *et al.* Comparison of Two Fitting Methods of NDVI Time Series Datasets[J]. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2009, 25(11): 183-188. [吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 两种 NDVI 时间序列数据拟合方法比较[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 183-188.]
- [10] Yu Xinfang, Zhuang Dafang. Monitoring Forest Phenophases of Northeast China based on MODIS NDVI Data[J]. Resources Science, 2006, 28(4): 111-117. [于信芳, 庄大方. 基于 MODIS NDVI 数据的东北森林物候期监测[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 111-117.]
- [11] Yu Zhen, Sun Pengsen, Sun Shirong. Phenological Change of Main Vegetation Types along a North-South Transect of Eastern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(3): 316-329. [余振, 孙鹏森, 孙世荣. 中国东部南北样带主要植被类型物候期的变化[J]. 植物生态学报, 2010, 34(3): 316-329.]
- [12] Gong Pan, Chen Zhongxin. Regional Vegetation Phenology Monitoring based on MODIS[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(2): 213-217. [宫攀, 陈仲新. 基于 MODIS 数据的东北地区植被物候参数提取[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 213-217.]
- [13] Song Kaishan, Liu Dianwei, Wang Zongming, *et al.* Land Use Change in Sanjiang Plain and Its Driving Forces Analysis Since 1954[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(1): 93-104. [宋开山, 刘殿伟, 王宗明, 等. 1954 年以来三江平原土地利用变化及驱动力[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 93-104.]
- [14] Liu Xingtuo, Ma Xuehui. Influence of Large-scale Reclamation on Natural Environmental Protection in the Sanjiang Plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(1): 14-19. [刘兴土, 马学慧. 三江平原大面积开荒对自然环境影响及生态环境保护[J]. 地理科学, 2000, 20(1): 14-19.]
- [15] Gu Juan, Li Xin, Huang Chunlin. Research on the Reconstructing of Time-series NDVI Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(4): 391-395. [顾娟, 李新, 黄春林. NDVI 时间序列数据集重建方法述评[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(4): 391-395.]

**Monitoring Cropland Phenology in Sanjiang Plain
based on NDVI Data**

CHANG Shou-zhi^{1,2}, WANG Zong-ming¹, SONG Kai-shan¹, LIU Dian-wei¹,
ZHANG Bai¹, ZHANG Chun-Hua^{1,2}

(1. *Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Phenological records provide an integrative indication of the sensitivity of natural systems to climate changes. A smoothing algorithm based on fourier function was firstly applied to the MODIS NDVI dataset to minimize the effects of anomalous values caused by atmospheric haze and cloud contamination, and daily NDVI data were generated. Together with the field observation data, the cropping system and its related phenology in Sanjiang Plain were then estimated based on the smoothed NVDI time-series dataset. The starting dates and the ending dates of growth season were extracted, and were compared to observation data. The results indicate; the starting dates of growing season in Sanjiang Plain focus on 120th-130th day, and the ending dates of growing season focus on 250th -260th day. The starting and ending dates in 2003 were earlier, while the starting dates in 2005 were delayed. And the starting dates in 2007 were earlier than 2005's, the ending dates in 2007 were the latest. The grow season in 2007 were the longest in the three years. Monitoring spatial patterns of cropland phenology based on MODIS NDVI data is practicable, especially in the large area of crop land.

Key words: NDVI; Harmonic analysis method; Dynamic threshold method; Phenology monitoring; Sanjiang plain