

过去 20 年中国耕地生长季起始期的时空变化

吴文斌^{1,2,3}, 杨 鹏^{1,2}, 唐华俊^{1,2}, 周清波^{1,2}, Shibasaki Ryosuke³,
张 莉^{1,2}, 唐鹏钦^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室, 北京 100081;
3. 日本东京大学空间情报科学研究中心, 东京 153-8505)

摘要: 多时相遥感数据能够较好地描述区域尺度的植被物候和生长季节的变化特征。利用 NDVI 时序数据, 采用非对称性高斯函数拟合方法重建平滑曲线, 分别提取了我国 20 世纪 80 年代初、90 年代初和 21 世纪初等 3 个时期为我国耕地第一生长季起始期, 计算 3 个时期平均生长起始期, 并分析了我国耕地第一生长季起始期的区域空间分异规律; 然后, 从区域和省份两个尺度分析了 20 世纪 80 年代初至 90 年代初和 20 世纪 90 年代初至 21 世纪初两个阶段我国耕地生长季起始期动态变化趋势和空间格局。结果表明, 我国不同区域耕地第一生长季起始期存在十分明显的空间差异, 清楚地呈现出一个从南向北逐渐推迟的空间特征; 从不同区域看, 在 20 世纪 80 年代初至 90 年代初和 20 世纪 90 年代初至 21 世纪初两个时期, 我国耕地第一生长季起始期变化都是提前和推迟并存, 不同区域变化程度不一; 从不同省份看, 在过去 20 年间, 我国绝大多数省份耕地第一生长季起始期都表现为总体提前的趋势, 但不同省份的起始期变化具有差异性。影响我国耕地生长季起始期变化的因素很多, 如何区别气候变化等自然因子和人类活动因子对耕地生长季起始期变化的影响是一个值得深入研究的问题。

关键词: NDVI 时序数据; 耕地; 生长起始期; 时空变化

文章编号: 1000-0933 (2009) 04-1777-10 **中图分类号:** K903, Q948, Q988, S127 **文献标识码:** A

Spatio-temporal variations in the starting dates of growing season in China's cropland over the past 20 years

WU Wen-Bin^{1,2,3}, YANG Peng^{1,2}, TANG Hua-Jun^{1,2}, ZHOU Qing-Bo^{1,2}, Shibasaki Ryosuke³, ZHANG Li^{1,2},
TANG Peng-Qin^{1,2}

1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory of Resources Remote Sensing & Digital Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

3 Center for Spatial Information Science, University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1777 ~ 1786.

Abstract: In this study, we used NDVI time-series datasets to investigate the variations in the starting dates of first growing season (SGS) in China's cropland over the past 20 years. To do so, a smoothing algorithm based on an asymmetric Gaussian function was first performed on the NDVI time-series data to minimize the effects of anomalous values caused by atmospheric haze and cloud contamination. The SGS of cropland was then estimated from three smoothed NDVI time-series dataset for early 1980s, 1990s and 2000s, respectively. The resulting three datasets were overlaid together to calculate the SGS variations for the period from early 1980s to early 1990s and for the period from early 1990s to early 2000s. The results show that the SGS in China's cropland becomes progressively later as moving northward from the South of China, in good accordance with the temperature and precipitation gradients in China. The SGS of China's cropland varies considerably with location and investigation period, and its general trend is characterized by a significant advance in these two periods. This

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA120103 和 2006AA120101); 国家科技支撑计划资助项目(2007BAC03A10); 中央级公益性科研院所专项资金资助项目(2008IARRP01)

收稿日期: 2007-11-23; **修订日期:** 2008-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hjtang@mail.caas.net.cn

study supported the conclusions from previous studies that the SGS has advanced over the past two decades at the middle and high latitudes in the northern hemisphere. Several factors can profoundly influence cropland phenological status, such as climate change, soils and human activities. How to discriminate the impacts of biophysical forces and anthropogenic drivers on phenological events of cultivation remains a great challenge for further studies.

Key Words: NDVI time-series; cropland; starting dates of growing season (SGS); spatio-temporal variation

植被物候反映了植被的季节性现象和环境的周期性变化之间的相互关系^[1]。尤其是,物候作为重要感应器,已经发现与全球气候变化有着密切关系,能有效监测与生态系统有关的气候参数,有助于了解气候变化对植物影响以及自然季节变化规律^[2,3]。因此,植被物候研究已经成为生态学研究热点之一,在服务于全球变化监测、生态环境模拟和气候变化等研究中具有重要作用^[4,5]。传统的植被物候研究以地面定点观测为主,分析物候对地球气候、水文和人文等因子的年内和年际变化的响应^[6~10]。这种地面观测的方法多适宜于特定站点或小区域的研究,其结果描述的是某一具体植物或物种的物候期,而不是植物群落尺度的物候^[11]。近年来,星载多光谱传感器的重复观测为群落尺度和区域尺度的物候研究提供了有利条件,其克服了传统定点物候代表区域有限的缺点,可以在大区域尺度上研究整个植被生态系统的物候特征及其时空变化^[12]。利用多时相遥感信息,国内外很多学者对中亚^[13]、东亚中部^[14]、北半球中高纬度^[15,16]、我国的北方^[17,18]、东北部^[19]以及整个温带区域^[20]的草原、灌丛和森林等自然植被物候及其变化进行了研究。但是,这些已有研究多是针对草原、灌丛和森林等自然植被进行。虽然也有部分国内学者利用遥感信息对我国华北地区、黄土高原等区域的农业植被物候进行了研究^[21~23],但是,目前还没有一个全国尺度范围的农业植被物候研究,已有研究也多是围绕特定的作物类型(如冬小麦、水稻)进行,其结果不能描述我国不同区域农田生态系统的总体物候特征。农业物候信息不仅是作物长势监测、田间管理、农作物合理布局 and 农业决策等的重要依据,也是全球气候变化和农田生态系统分析的重要方面^[21,22],在全国尺度层面开展我国农业物候及其变化研究具有重要性和必要性。本文拟利用时序遥感数据,在全国尺度上分析研究过去 20a 我国农业耕地物候的时空变化特征。

1 数据与方法

1.1 数据来源

研究采用的遥感数据为 NOAA/AVHRR NDVI 时间序列数据,数据从美国 GIMMS (Global Inventory Monitoring and Modeling Studies) 工作组网站下载(<http://glcf. umiacs. umd. edu/data/gimms/index. shtml>)。GIMMS 数据系列是利用国际通用的可以有效消除云、大气、太阳高度角等干扰的最大合成法(MVC)生成,时间间隔为 15d,空间分辨率为 8 km × 8 km。方精云等有关 GIMMS NDVI 数据质量的检验结果表明,利用 GIMMS NDVI 时间序列数据在大尺度上分析我国植被活动状况是适宜的^[24]。本研究选取了 3 个时间段 1 月至 12 月份 NDVI 数据,即 1982 ~ 1984 年、1991 ~ 1993 年和 2001 ~ 2003 年,分别代表 20 世纪 80 年代初、90 年代初和 21 世纪初我国耕地物候的总体水平,以此来分析研究过去 20a 我国农业耕地物候变化及其区域差异特征。

研究中使用的 2000 年中国土地利用数据来自中国资源环境数据库 1 km 栅格数据集,该数据是由覆盖全国的分辨率为 30 m 的 Landsat TM/ETM+ 数据,通过采用人工交互式图像解译制作的 1:10 万土地利用图栅格化后得到^[25]。本研究将 1 km 空间分辨率的土地利用栅格数据综合至 8 km,使之与 NDVI 数据空间分辨率相匹配,然后利用其耕地数据层提取全国耕地像元的 NDVI 数据进行分析。为了减小文件大小,利于图像操作运算,将原始的 NDVI 数据类型从浮点型转为无符号的二进制。

1.2 NDVI 时序数据平滑处理方法

从上述数据中获取的一年 24 个时相的 NDVI 数据,以时间为横坐标排列形成的时序数据描述了耕地像

元 NDVI 的年内变化特征。虽然最大值合成法能消除部分云、大气和太阳高度角等的干扰,但云和大气等的噪声影响仍然很大,使得 NDVI 时序数据呈锯齿状的不规则波动变化,曲线季节变化趋势不明显,不适于直接用于各种趋势分析和物候信息提取。因此,必须进一步对 NDVI 时序数据进行噪声去除,重建平滑的时间剖面线,更好地描述我国耕地生长季变化过程。

本研究采用的数据平滑方法是非对称性高斯函数拟合方法^[26,27]。该方法是一个从局部最优化拟合到全局拟合的方法,具有很多灵活性和适宜性,使得重建的 NDVI 曲线可以较好描述 NDVI 时序数据中复杂的和微小的变化。

首先,根据 NDVI 时序数据,利用一个滑动窗口获取时序数据的谷值和峰值;对位于谷值和峰值之间的 NDVI 时序数据进行两次局部拟合,使得最优化拟合函数较好描述 NDVI 时序数据的上包络曲线,局部拟合公式为:

$$f(t) \equiv f(t; c_1, c_2, a_1, \dots, a_5) \equiv c_1 + c_2 g(t; a_1, \dots, a_5) \quad (1)$$

$$g(t; a_1, \dots, a_5) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{t-a_1}{a_2}\right)^{a_3}\right], & t > a_1 \\ \exp\left[-\left(\frac{a_1-t}{a_4}\right)^{a_5}\right], & t < a_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, c_1 和 c_2 为定义基线和振幅的线性参数, $g(t; a_1, \dots, a_5)$ 是高斯函数, 其中, a_1 是对应时间变量 t 的峰值或谷值的位置参数, 参数 a_2 和 a_3 决定函数曲线右半部分的宽度和平度, 相应地, 参数 a_4 和 a_5 决定函数曲线左半部分的宽度和平度。这些参数可以通过优化函数计算得到。

然后, 利用局部拟合函数构建整体拟合函数, 描述每个耕地像元生长季周期的 NDVI 变化过程。简单来说, 整体拟合就是将各局部拟合函数的特征加以综合的过程。整体拟合函数为:

$$F(t) = \begin{cases} \alpha(t)f_L(t) + [1 - \alpha(t)]f_C(t), & t_L < t < t_C \\ \beta(t)f_C(t) + [1 - \beta(t)]f_R(t), & t_C < t < t_R \end{cases} \quad (3)$$

式中, $[t_L, t_R]$ 区间是 NDVI 整个变化区间, $f_L(t)$, $f_C(t)$, $f_R(t)$ 分别代表 $[t_L, t_R]$ 区间内左边谷值、中间峰值及右边谷值所对应的局部函数, $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 为位于 $[0, 1]$ 之间的剪切系数。

1.3 耕地生长季起始期提取及其变化分析方法

通过整体拟合得到的 NDVI 平滑曲线反映了我国耕地 NDVI 的年内变化特征, 即 NDVI 在年内经历一个或数个升高—峰值点—降低的动态过程。这种动态变化曲线体现了耕地作物的生长过程, 即从播种、出苗、抽穗到成熟、收割的周期性态势。因此, 利用构建的 NDVI 年内时序变化曲线可以获取耕地的关键物候期, 如生长季的起始期、成熟期和结束期等。我国地域辽阔, 一年多熟种植制度广泛存在, 使得我国相当区域耕地在一年内完成两个或多个生长季周期。闫慧敏等研究表明, 我国耕地复种指数在过去 20a 发生了显著变化^[28], 多熟种植制度变化会在一定程度上导致我国耕地生长季物候期发生变化。因此, 为了避免这种耕地种植制度变化对耕地物候变化分析结果的影响, 本研究将主要研究分析我国耕地第一生长季起始期的时空变化特征。

基于 NDVI 时序数据提取植被生长季起始期的常用方法是 NDVI 阈值法, 即根据预先定义的 NDVI 值或有关的参考值来确定生长起始期^[13,20]。该方法假设, 当 NDVI 值低于某一阈值时, 植被的生长季不可能开始; NDVI 值高于此阈值时, 可以认为植被生长季的开始^[18]。NDVI 阈值法操作简单, 其适宜于小区域的植被物候研究, 但对于诸如本文的大尺度植被物候研究显然不适宜, 因为我国不同区域和不同植被类型的 NDVI 值不同, 确定一个适合全国尺度物候提取的 NDVI 阈值是十分困难或不可能的。因此, 本研究采用了另一种阈值法—动态阈值法来提取我国耕地生长季起始期, 即在耕地作物生长的 NDVI 曲线上升阶段, 定义距离最小值为最大值与最小值间距离的 20% 的时间点为耕地生长季的起始期。该动态阈值法最初由 Jönsson 等提出, 其改进之处在于阈值确定的动态变化, 与每个研究像元的 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^[26]。目前, 该方法已经应用于全球很多区域, 取得了较好的结果, 如 Jönsson 等^[27] 利

用 10% 的阈值提取了整个非洲大陆的植被物候分布,Heumann 等^[29]利用 20% 的阈值研究了非洲大陆撒哈拉和苏丹区域的植被物候变化特征,Beck 等^[30]则利用 25% 的阈值监测了北半球高纬度的芬诺斯坎底亚半岛的植被物候变化。在国内,吴文斌^[23]选择 20% 的动态阈值提取了我国华北地区(包括北京市、天津市、河北省、河南省和山东省)的耕地物候期,于信芳和庄大方^[19]利用了 20% 的动态阈值监测了我国东北地区(包括黑龙江省、吉林省、辽宁省以及内蒙古自治区的部分区域)森林植被物候并进行了验证,取得了较好的结果。基于这些国内外的已有研究,我们综合选择了 20% 的阈值,尽可能减少由于阈值确定的不合理造成的结果误差。

应用上述方法,分别监测得到 20 世纪 80 年代初、90 年代初和 21 世纪初的我国耕地第一生长季起始期,计算得到 3 个时期耕地的平均生长起始期,并分析其空间分布总体规律;然后,从区域和省份两个层次,进一步分析了 20 世纪 80 年代初至 90 年代初和 20 世纪 90 年代初至 21 世纪初两个阶段的我国耕地第一生长季起始期动态变化趋势和空间格局。

2 结果与分析

2.1 NDVI 时序数据平滑处理效果

应用非对称性高斯函数拟合方法,对代表全国 20 世纪 80 年代初、90 年代初和 21 世纪初等 3 个时期的 NDVI 时序数据进行了平滑处理,得到可用于我国耕地物候期提取的光滑曲线。对比平滑前后的 NDVI 曲线可以看出(图 1):平滑前 NDVI 时间序列曲线有很严重的锯齿状波动,直接用于时间序列分析比较困难;平滑后重构的 NDVI 曲线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。同样从图 1 可以发现,我国一年一熟制区域耕地的 NDVI 曲线在年内完成一个循环的动态过程,一年两熟制区域完成两个循环。经过平滑处理后的 NDVI 时间序列曲线将用于我国耕地物候期的监测。

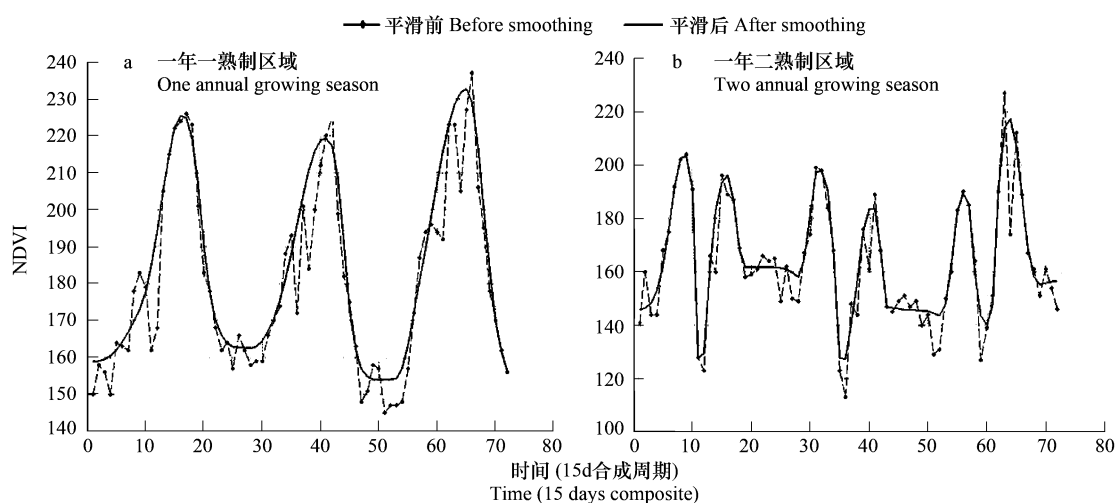


图 1 NDVI 时间序列数据平滑处理前后比较

Fig. 1 Comparison between before and after smoothing of NDVI time-series data

2.2 我国耕地生长季起始期的空间分布特征

利用 NDVI 时序数据提取了 20 世纪 80 年代初、90 年代初和 21 世纪初等 3 个时期我国耕地第一生长季的起始期(图 2a~c)。根据上述 3 个时期的物候信息,计算得到我国耕地多年平均生长起始期(图 2d),反映我国耕地物候的多年平均水平状况。从图 2 可以看出,我国不同区域耕地的第一生长季起始期存在十分明显的空间差异,清楚地呈现出一个从南向北逐渐推迟的空间特征,这种特征在很大程度上和我国的温度和降水空间变化具有一致性。总的来说,我国南方区域耕地的多年平均生长期开始最早,大约在 1 月下旬~2 月下旬;华北平原、四川盆地和长江中下游平原等农业主产区耕地生长起始期大约在 3 月上旬~4 月下旬,华北平原的部分区域也在 5 月初开始生长。东北平原也是我国的农业主产区之一,其生长起始期多数在 5 月初~6 月下旬,也有部分区域生长季开始较早,大约在 4 月份。

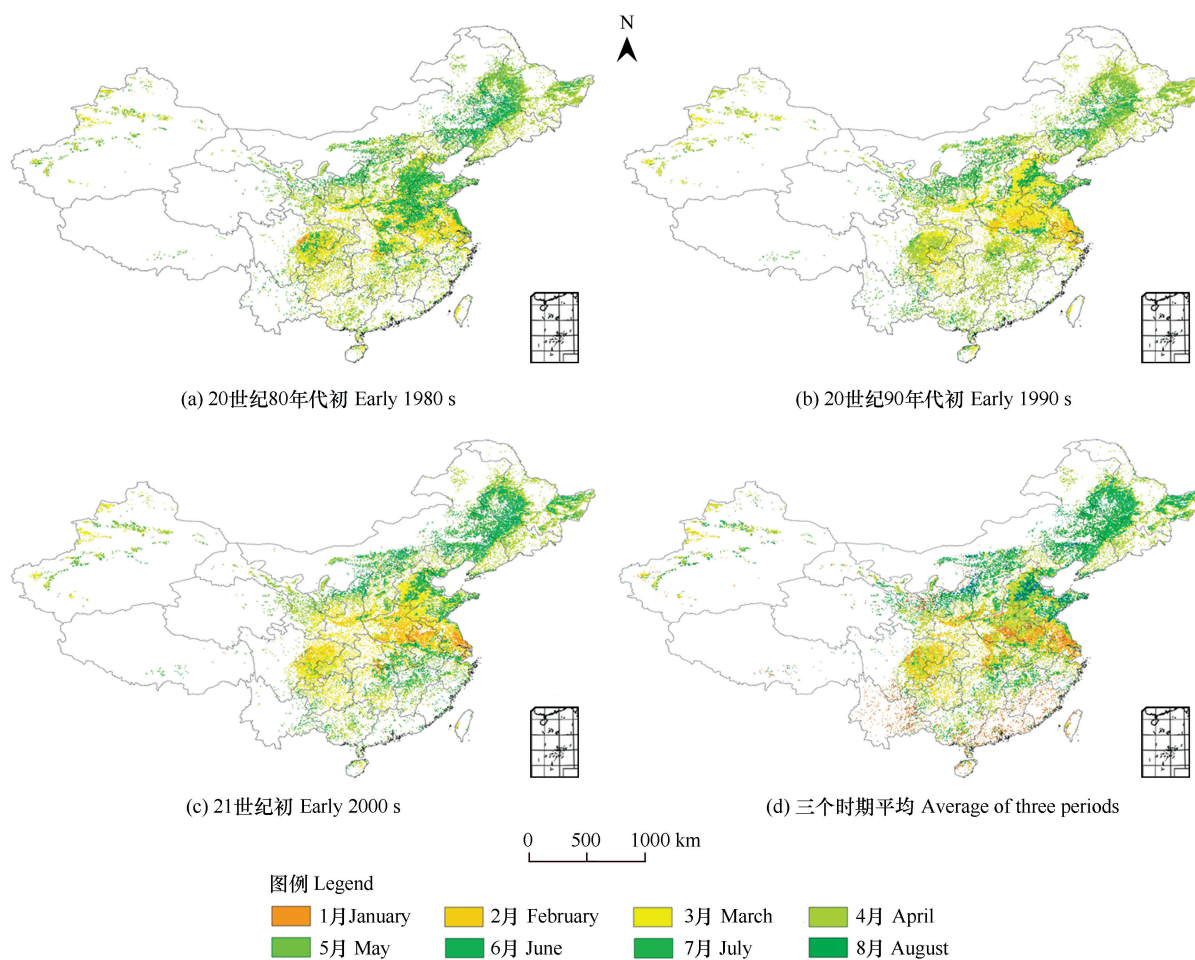


图 2 3 个不同时期的我国耕地第一生长季起始期及 3 个时期的平均生长起始期

Fig. 2 The starting dates of first growing season in China's cropland for three periods and their average

2.3 我国耕地生长季起始期的时空变化特征

从图 2 也可以看出,不同时期的耕地生长季起始期有着明显的时间和空间差异,为此,本研究进一步分析了 20 世纪 80 年代初至 90 年代初和 20 世纪 90 年代初至 21 世纪初两个时期的我国耕地第一生长季起始期时空变化特征。

从不同区域看,在前后两个时期,我国耕地第一生长季起始期变化都是提前和推迟并存,具有区域差异性。在 20 世纪 80 年代初至 90 年代初的第 1 个 10a 间(图 3a),我国东北地区和黄淮海平原区域的耕地生长起始期整体明显提前,内蒙古及长城沿线区和长江中下游平原多数区域的生长季也提前。但是,黄土高原、西南和华南等区域耕地生长起始期总体上推迟,新疆变化趋势不大。该研究结果和郑景云等^[31]利用 26 个站点物候观测数据的研究结果十分一致。在 20 世纪 90 年代初至 21 世纪初的第 2 个 10a 间(图 3b),我国耕地第一生长季起始期变化和第 1 个 10a 间具有差异性,生长起始期变化的空间特征不一样。我国黄淮海平原和长江中下游平原区域的多数耕地生长起始期继第 1 个 10a 后持续提前,黄土高原和四川盆地等地区生长季较早趋势较明显。但是,我国东北区、内蒙古及长城沿线区、新疆和华南区多数区域第一生长季起始期相对推迟,长江中下游平原的部分区域的耕地生长起始期也推迟。

从不同省份看,在过去的 20a 间,我国绝大多数省、市和自治区的耕地第一生长季起始期都表现为总体提前趋势(图 4)。已有基于定点物候观测、遥感数据监测和物候模型模拟等研究植被物候变化的结果表明^[16,32-34],随着全球变暖,过去 20 多年北半球很多区域植被生长起始期已经提前,生长季明显延长,本研究

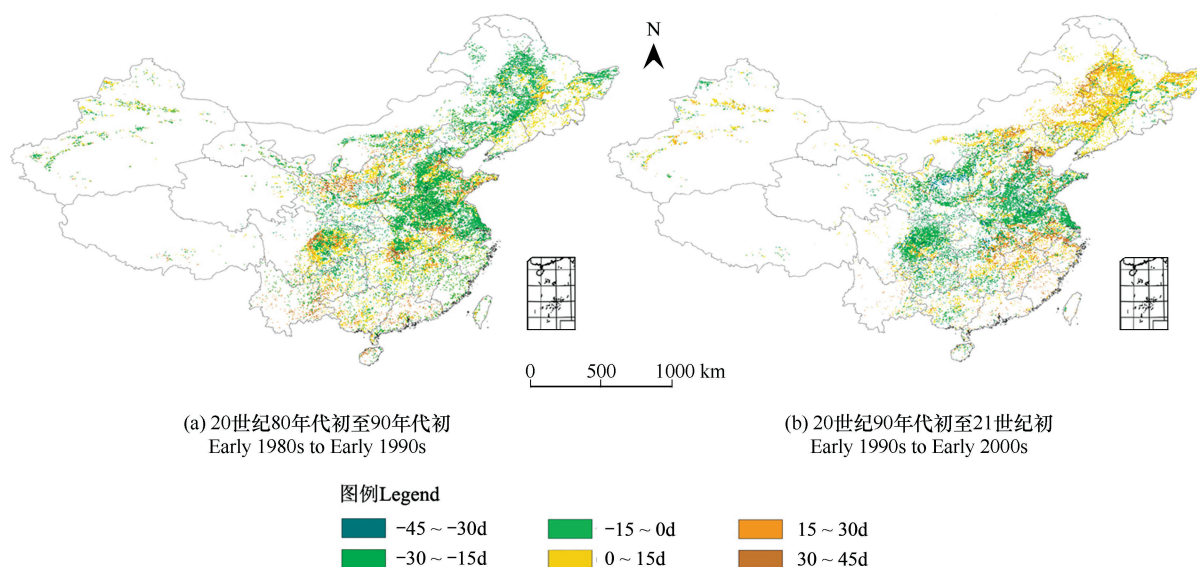


图3 两个时间阶段我国耕地第一生长季起始期变化分布图

Fig. 3 Variations in the starting dates of China's cropland for the periods of 1980s ~ 1990s and 1990s ~ 2000s

再一次验证了这种总体变化趋势。但是,在过去 20a 的不同时期,我国不同省份耕地生长起始期变化具有差异性(图 4)。河南、安徽、湖北、上海、台湾、山东和江苏等省、市的耕地生长起始期在前后两个时期都呈现稳定的前移趋势,20a 间提前大约 15 ~ 30d。云南、广东、四川、河北、福建和广西等省、自治区的耕地生长起始期在过去 20a 提前不到 15d,但这些区域的耕地物候期在两个时间阶段呈现为一个波动变化趋势。不同的是,海南、天津、宁夏和浙江等区域耕地的生长起始期相对推迟,延迟时间不超过 30d。内蒙古、吉林、北京、山西、陕西、青海、湖南、江西、贵州、辽宁、重庆、新疆、黑龙江、甘肃和西藏等省、市和自治区的耕地生长起始期在两个时间阶段表现为波动的趋势,从整个 20a 区间看,这些区域耕地的生长起始期变化(提前或推迟)的综合效应表现为变化不显著或没有变化。

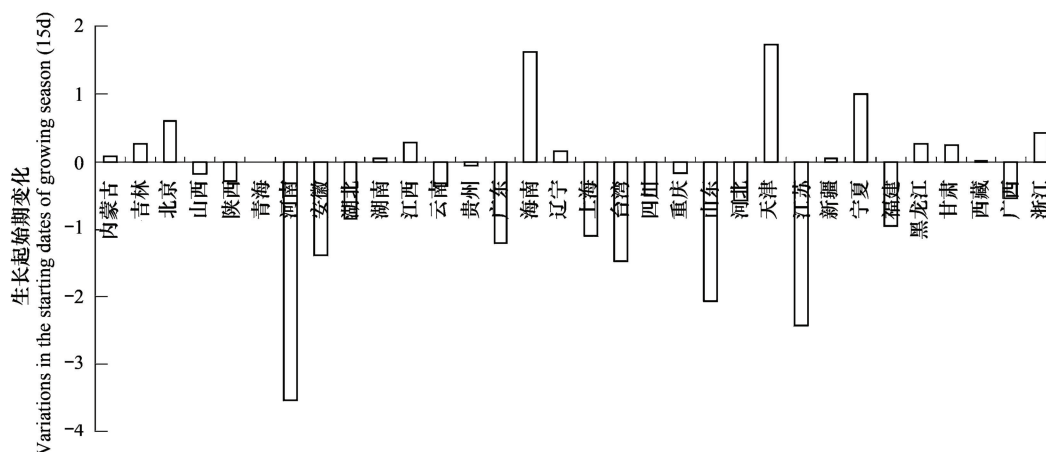


图4 我国不同省份耕地第一生长季起始期变化

Fig. 4 Variations in the starting dates of first growing season in different provinces of China over the past 20 years

2.4 我国耕地生长季起始期变化原因分析

我国耕地物候具有易变性和年际波动性,其影响因素有很多,如气候变化、病虫害、土壤和人类活动影响等。耕地和森林、草地和灌丛等自然植被类型一样,其生长起始期对气候变化具有积极的响应关系。郑景云

等利用物候观测数据和气象数据分析了气候增暖对我国近 40a 植物春季物候变化的影响,其结果认为,我国各站点的春季物候可分为提前、基本不变和推迟 3 种变化类型,分别对应春季平均温度上升、变化不明显和下降 3 种温度变化趋势^[31]。葛全胜等研究了过去 40a 我国植物春季物候变化与生长期气候变化(包括温度和降水)的对应关系,其研究结论为:我国植物物候变化与生长期的温度变化具有较好的对应关系,但与生长期的降水变化不存在可比性,两者基本没有关系^[10]。Xiao 等也利用遥感数据和气候数据分析我国植被活动和气候因子的关系,其结果表明,温度变化对我国植被活动的影响远较降水变化的影响大,尤其春季气候增暖对我国植被生长活动影响最大^[35]。此外,很多研究认为,植被生长活动和气候因子变化之间具有时间尺度上的滞后性,Piao 等因此分析研究了我国温度带植被生长起始期和生长季前气候因子的相关性,其结果认为,我国植被生长起始期和生长季前 2~3 个月的温度具有极显著的负相关,和生长季前 5 个月的降水也有极显著的负相关^[20]。这说明生长季前温度的上升会导致植被生长起始期提前,季前冬期降水的增加对来年植被生长起始期提前具有重要作用。这些研究表明,从全国尺度看,温度变化对我国植被物候变化的重要作用已经成为众多科学家的共识,相对而言,降水变化对我国植被物候变化的影响较小。

但是,作为一种特殊的土地利用类型,农业植被和其它自然植被的显著区别是它受人类活动影响较大,其物候期变化的影响因素远较其它自然植被复杂。除气候变化外,作物品种、耕作水平、灌溉、施肥和农药等种植和管理方式的改变也会造成我国耕地生长起始期的年际推移(提前和推迟)^[15,20,36]。虽然部分学者尝试研究分析人类活动对耕地物候期变化的影响,但由于没有弄清两者的因果关系和具体机理机制,这些研究仍不够深入。因此,如何区别气候变化等自然因子和人类因子对耕地物候变化的影响是今后值得深入研究的问题。

3 讨论与结论

多时相遥感数据可以较好地描述区域尺度耕地物候和生长季节的变化特征,本文利用 NDVI 时序数据,采用非对称性高斯函数拟合方法重建平滑曲线,提取了 20 世纪 80 年代初、90 年代初和 21 世纪初等 3 个时期我国耕地第一生长季起始期并分析其时空变化特征。研究表明,我国耕地的第一生长季起始期存在十分明显的空间差异,清楚地呈现出一个从南向北逐渐推迟的空间特征。从不同区域看,在两个时期,我国耕地的第一生长季起始期变化都是提前和推迟并存,但总体上绝大多数区域生长起始期都表现为提前的总体趋势,而且不同区域的变化具有时间差异性。影响我国耕地生长季起始期变化的因子很多,在全国尺度看,温度变化对我国植被物候期波动的重要作用成为众多科学家的共识,相对而言,降水变化对我国植被物候变化的影响较小。此外,作物品种、耕作水平、灌溉、施肥和农药等农业生产管理方式的改变也会造成耕地物候期的年际推移。

利用时序遥感数据进行物候信息提取的一个关键问题就是数据平滑处理方法。目前,常用的方法主要包括 3 类,即阈值去除法、基于滤波的平滑方法和非线性拟合法。阈值去除法以 Viovy 等提出的最佳坡度系数截取法(BISE)为代表,通过一个滑动周期来判断 NDVI 再增长百分比,去掉云等因素导致的 NDVI 突降值^[37]。由于滑动周期和 NDVI 再增长的百分比阈值主要取决于分析者的经验知识和要求,人为影响因素大,使得大多数阈值去除法无法得到普遍应用,因此,基于滤波的平滑方法(如 Savitzky-Golay 滤波法^[38]、小波变换^[39]和傅里叶变换^[40])和非线性拟合法(如 Logistic 函数拟合法^[41]和非对称性高斯函数拟合法^[26,27])成为 NDVI 时序数据平滑处理的主要方法。Savitzky-Golay 滤波对滑动窗口十分敏感,需要进行部分加权值和阈值调整处理,易受人为因素影响。Sakamoto 等的研究认为小波变化总体上要优于傅里叶变换^[42],Beck 等的研究表明,Logistic 函数拟合法和非对称性高斯函数拟合法处理效果总体相似,两者都优于傅里叶变换^[30]。本研究选择非对称性高斯函数拟合法进行噪声去处和数据平滑处理。虽然该方法具有很多优势,可以清晰地描述时间序列的长期变化趋势以及局部的突变信息,但部分区域的噪声影响仍然存在,造成数据拟合误差和降低物候信息的监测精度。因此,需要进一步开展 NDVI 时序数据平滑处理方法的研究,在努力研制和改进数据处理方法本身的同时,选择我国不同区域比较分析不同数据平滑方法效果也十分必要,有利于弄清不同

方法的优缺点和区域适宜性。

本研究再一次表明,卫星遥感技术可以在大尺度监测我国农田生态系统方面发挥重要作用。但需要说明的是,遥感数据的时空分辨率对区域尺度农田生态系统的遥感观测精度具有重要影响。本研究使用的数据是 15d 最大值合成的 NDVI 数据集,时间分辨率较低,不能很好记录我国不同区域耕地物候的细微变化信息,限制了耕地物候期的时间精度。8 km 的空间分辨率也在一定程度上影响了我国耕地物候信息结果的准确性,因为该空间分辨率 NDVI 数据中的每个像元所记录的几乎都是不同地表覆盖的混合光谱信息^[23]。因此,本研究更多强调的是我国耕地生长季起始期变化的总体趋势和概括性描述,而并不是具体的、微观区域的数量特征。此外,本研究选择了 3 个离散时期的 NDVI 时序数据来分析过去 20a 我国耕地生长起始期的变化特征,年份的代表性和数据的有效性也会在一定程度上造成耕地物候期不同时段的变化趋势和 20a 间的实际总体变化趋势的偏差。因此,进一步利用本文方法提取过去 20a 内各年的耕地物候信息并进行趋势拟合分析,可以更好描述过去 20a 我国耕地物候变化的总体趋势和特征。

References:

- [1] Lu P L, Yu Q, He Q T. Responses of plant phenology to climatic change. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3):923—929.
- [2] Penuelas J, Filella I. Responses to a warming world. *Science*, 2001, 294:793—794.
- [3] Fang X Q, Yu W H. Progress in the studies on the phenological responding to global warming. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(5):714—719.
- [4] Cleland E E, Chuine I, Menzel A, *et al.* Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution*, 2007, 22:357—365.
- [5] Li R P, Zhou G S, Zhang H L. Research advances in plant phenology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3):541—544.
- [6] Menzel A, Estrella N, Fabian P. Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology*, 2001, 7:657—666.
- [7] Estrella N, Sparks T H, Menzel A. Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology*, 2007, 13:1737—1747.
- [8] Chen X Q, Yu R. Spatial and temporal variations of the vegetation growing season in warm-temperate eastern China during 1982 to 1999. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(1):41—51.
- [9] Guo H Y, Zhao J P, Suo A L, *et al.* Response of agricultural phenospectrum to global climate change in Loess Plateau of East Gansu Province. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(4):608—614.
- [10] Ge Q S, Zheng J Y, Zhang X X, *et al.* Changes in climae and phenology in China over past 40 years. *Progress in Natural Sciences*, 2003, 13(10):1048—1053.
- [11] Wu Y F, Li M S, Song J Q. Advance in vegetation phenology monitoring based on remote sensing. *Journal of Meteorology and Environment*, 2008, 24(3):51—58.
- [12] Zhang X X, Ge Q S, Zheng J Y. Overview on the vegetation phenology using the remote sensing. *Advances in Earth Sciences*, 2003, 18(4):534—544.
- [13] Yu F, Price, K P, Ellis J, *et al.* Satellite Observations of the seasonal vegetation growth in central Asia: 1982—1990. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70:461—469.
- [14] Lee R, Yu F, Price K P, *et al.* Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23:2505—2512.
- [15] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, *et al.* Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, 2004, 10:1133—1145.
- [16] Zhou L, Tucker C J, Kaufmann R, *et al.* Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 20069—20083.
- [17] Wang H, Li X B, Yu H J. Monitoring growing season of typical steppe in northern China based on NOAA/AVHRR NDVI data. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30(3):365—374.
- [18] Wang H, Li X B, Li X, *et al.* The variability of vegetation growing season in the northern China based on NOAA NDVI and MSAVI from 1982 to 1999. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2):504—515.

- [19] Yu X F, Zhuang D F. Monitoring forest phenophases of northeast China based on MODIS NDVI data. *Resources Science*, 2006, 28(4):111—117.
- [20] Piao S, Fang J, Zhou L, *et al.* Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 2006, 12:672—685.
- [21] Xin J F, Yu Z R, Driessen P M. Monitoring phenological key stages of winter wheat with NOAA NDVI data. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(6):442—447.
- [22] Zhang F, Wu B F, Liu C L, *et al.* Methods of monitoring crop phenological stages using time series of vegetation indicator. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(1):155—159.
- [23] Wu W B, Yang P, Tang H J, *et al.* Monitoring spatial patterns of cropland phenology in North China based on NOAA NDVI data. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009.
- [24] Fang J Y, Piao S L, He J S, *et al.* Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982—1999. *Science in China Series C*, 2003, 33(6):554—565.
- [25] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, *et al.* Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995—2000. *Science in China Series D*, 2003, 46(4):373—384.
- [26] Jönsson Per, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40:1824—1932.
- [27] Jönsson Per, Eklundh L. TIMESAT — a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 2004, 30:833—845.
- [28] Yan H M, Liu J Y, Cao M K. Remote sensing multiple cropping index variations in China during 1980—2000. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4):559—566.
- [29] Heumann B W, Seaquist J W, Eklundh L, *et al.* AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982 2005. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108:385—392.
- [30] Beck P S A, Atzberger C, Hogda K A, *et al.* Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100:321—334.
- [31] Zheng J Y, Ge Q S, Hao Z X. Impacts of climate warming on plants phenophases in China for the last 40 years. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(20):1582—1587.
- [32] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397:659.
- [33] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, *et al.* Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386:698—702.
- [34] Maignan F, Br on F M, Bacour C, *et al.* Interannual vegetation phenology estimates from global AVHRR measurements: Comparison with *in situ* data and applications. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(2):496—505.
- [35] Xiao J, Moody A. Trends in vegetation activity and their climatic correlates: China 1982 to 1998. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25:5669—5689.
- [36] Young S S, Harris R. Changing patterns of global-scale vegetation photosynthesis, 1982—1999. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26:4537—4563.
- [37] Viovy N, Arino O, Belward A S. The best index slope extraction(BISE): A method for reducing noise in NVDI time-series. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13:1585—1590.
- [38] Chen J, J nsson Per, Tamura M, *et al.* A simple method for reconstructing a high-quality NDVI Time-series data set based on the Savitzky-Golay Filter. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91:332—344.
- [39] Sakamoto T, Van Nguyen N, Ohno H, *et al.* Spatio temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100:1—16.
- [40] Roerink G J, Menenti M. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21:1911—1917.
- [41] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C, *et al.* Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84:471—475.
- [42] Sakamoto T, Yokozawa M, Toritani H, *et al.* A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96:366—374.

参考文献:

- [1] 陆佩玲,于强,贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应. *生态学报*, 2006, 26(3):923~929.

- [3] 方修琦,余卫红. 物候对全球变暖响应的研究综述. 地球科学进展, 2002, 17(5):714~719.
- [5] 李荣平,周广胜,张慧玲. 植物物候研究进展. 应用生态学报, 2006, 17(3):541~544.
- [8] 陈效述,喻蓉. 1982~1999年我国东部暖温带植被生长季的时空变化. 地理学报, 2007, 62(1):41~51.
- [9] 郭海英,赵建萍,索安宁,等. 陇东黄土高原农业物候对全球气候变化的响应. 自然资源学报, 2006, 21(4):608~614.
- [10] 葛全胜,郑景云,张学霞,等. 过去40年中国气候与物候的变化研究. 自然科学进展, 2003, 13(10):1048~1053.
- [11] 武永峰,李茂松,宋吉青. 植物物候遥感监测研究进展. 气象与环境学报, 2008, 24(3):51~58.
- [12] 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. 地球科学进展, 2003, 18(4):534~544.
- [17] 王宏,李晓兵,余弘婧. 基于NOAA/AVHRR NDVI监测中国北方典型草原的生长季及变化. 植物生态学报, 2006, 30(3):365~374.
- [18] 王宏,李晓兵,李霞,等. 基于NOAA NDVI和MSAVI研究中国北方植被生长季变化. 生态学报, 2007, 27(2):504~515.
- [19] 于信芳,庄大方. 基于MODIS NDVI数据的东北森林物候期监测. 资源科学, 2006, 28(4):111~117.
- [21] 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. 遥感学报, 2001, 5(6):442~447.
- [22] 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. 农业工程学报, 2004, 20(1):155~159.
- [23] 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研究. 中国农业科学, 2009.
- [24] 方精云,朴世龙,贺金生,等. 近20年来中国植被活动在增强. 中国科学C辑, 2003, 33(6):554~565.
- [28] 闫慧敏,刘纪远,曹明奎. 近20年中国耕地复种指数的时空变化. 地理学报, 2005, 60(4):559~566.
- [31] 郑景云,葛全胜,郝志新. 气候变暖对我国近40年植物物候变化的影响. 科学通报, 2002, 47(20):1582~1587.