

黄淮海多熟种植农业区作物历遥感检测与时空特征

闫慧敏^{1,*}, 肖向明², 黄河清¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. Center for Spatial Analysis,

College of Atmospheric and Geographic Sciences, University of Oklahoma, 101 David L. Boren Blvd., Norman, Oklahoma 73019-5300, USA)

摘要: 多熟种植是高强度农业土地利用的重要特征, 但由于缺乏在空间和时间上清晰描述农业多熟种植和作物种植历时空分布的数据, 使得区域尺度农田生态系统碳动态估计、农田生产力监测与模拟等有很大的不确定性。黄淮海农业区是以冬小麦-夏玉米二熟制为主的我国粮食主产区, 冬小麦和夏玉米分别为光合作用途径为 C3 和 C4 的作物, 已有研究证明如果在估算生态系统生产力时不考虑一年两季作物及其光能利用率的差异则会导致生产力估算结果过低。研究结合农业气象站点地面作物物候观测数据和空间分辨率 500m、8d 合成的 MODIS 时间序列数据, 分析研究区二熟制作物的生长过程、物候特征和作物历的空间差异, 发展基于 *EVI* 和 *LSWI* 时间序列曲线检测多熟区各季作物种植历的方法, 获取黄淮海农业区空间表述清晰的熟制和各季作物的生长开始与结束时间数据, 并应用农业气象站点数据对方法和所获取的作物历数据进行了比较验证。论述的方法和提取的各季作物的作物历时空数据将能够应用于区域尺度农田生产力估算、生物地球化学循环模拟和农业生态系统监测。

关键词: 黄淮海; 遥感; 多熟种植; 作物历; MODIS; *EVI*; *LSWI*

Satellite observed crop calendar and its spatio-temporal characteristics in multiple cropping area of Huang-Huai-Hai Plain

YAN Huimin^{1,*}, XIAO Xiangming², HUANG Heqing¹

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Center for Spatial Analysis, College of Atmospheric and Geographic Sciences, University of Oklahoma, 101 David L. Boren Blvd., Norman, Oklahoma 73019-5300, USA

Abstract: Multiple cropping is one of the most influenced intensified agricultural land use activity in China because of the increased pressure on water, ecosystems and environment. However, due to the lack of spatial and temporal explicitly data of multiple cropping and crop calendar, there were significant uncertainty in agricultural productivity and Carbon dynamic monitoring, modeling and evaluation on regional to larger scale. In Huang-Huai-Hai Plain, an important agricultural region in China, more than 70% of total cropland land area was planted with winter-wheat and maize double cropping system. It has been proved that identifying multiple cropping and crop calendar and assigning appropriate light use efficiency to C3 and C4 crops could substantially improve our ability to model and evaluate the seasonal dynamics of carbon flux in such winter-wheat and maize rotation system. In this study, we analyze spatial and temporal patterns of crop growth process and crop calendar in the winter-wheat and maize double cropping system using multi-temporal satellite images from the Moderate Resolution Imaging Spectral radiometer (MODIS) and in-situ observation of key crop phenological transition dates, and explore a method to examine and extract crop calendar of each crop season in Huang-Huai-Hai plain from MODIS Enhanced Vegetation Index (*EVI*) and MODIS Land Surface Water Index (*LSWI*) time series curves by combining agro-meteorological observation data and MODIS data with a resolution of 500m at 8-day intervals. Multiple cropping distribution, temporal transition characteristics and heterogeneity of the start and the end time of each crop season were examined and analyzed,

基金项目: 国家科技支撑资助项目 (2006BAC08B03); 国家自然科学基金资助项目 (40601064 和 40788001); 中国科学院百人计划资助项目

收稿日期: 2009-03-02; **修订日期:** 2009-07-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanhm@igsrr.ac.cn

and the method also was validated by comparing with in-situ observed start date and end date records of winter-wheat and maize. The method and crop calendar products discussed in this paper could be applied in agricultural productivity estimation, biogeochemical cycle modeling and agricultural ecosystem monitoring.

Key Words: Huang-Huai-Hai Plain; remote sensing; multiple cropping; crop calendar; MODIS; *EVI*; *LSWI*

农业高强度利用是 20 世纪以来导致全球环境变化的主要原因之一,农业活动对全球碳、水、营养元素循环以及地表能量平衡有深刻的影响。多熟种植是高强度土地利用的重要特征之一,土地管理的作用(灌溉、施肥、秸秆处理、翻耕等)使得作物在物候期和生物地球化学循环过程都与自然植被有很大的不同,这些活动会改变地表的物质循环和生物地球化学循环,进而对土壤生产力和环境可持续性产生影响^[1-3]。然而在大尺度的生态系统模拟研究中,通常因为缺乏实际的多熟种植和作物历的准确时空信息没有考虑多熟种植对农业生态系统过程的作用^[4-5],使得在评估气候及土地利用变化对农业生态系统和粮食安全的影响的估计结果有很大的不确定性^[6]。遥感植被指数已经应用在植被生长动态时间序列剖面构建、物候特征提取、植被分类、土地覆被变化监测等诸多方面,应用遥感数据监测并认识农业多熟种植制度也逐渐发展^[7-9]。2000 年开始向全球免费发布数据的空间分辨率 250—1000m 的 MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) 数据已经成为当前植被监测的有利工具,也正在应用于越来越多的领域,植被物候检测是其中的一个重要方面^[10-12]。结合多时相 MODIS 影像表达的作物生长规律和农业物候观测记录在种植制度复杂的鄱阳湖农业区的研究结果证明空间分辨率 500m、8d 合成的 MODIS/*EVI* (Enhanced Vegetation Index) 时间序列数据能够表达农业种植的多熟制特征,可以应用于区域农业多熟种植制度时空分析^[13]。

黄淮海农业区是全国平原面积最广的农业区,区内耕地约占整个土地面积的四分之三,多数地区可以一年两熟,该区域以冬小麦-夏玉米二熟制为主。由于冬小麦和夏玉米分别为光合作用途径为 C3 和 C4 的作物,在估算生态系统生产力如果不考虑一年两季作物及其光能利用率的差异,会导致生态系统生产力的大大低估^[6,14]。因此在该区域识别多熟种植的分布及获取各季作物历数据是准确估算农田生态系统生产力从而评价区域的粮食安全与生态系统碳动态的迫切需要。本研究以空间分辨率 500m、8d 合成的 MODIS 数据为主要数据,结合农业气象站点地面作物物候观测资料,检测作物多熟种植格局、识别农业种植历(作物生长的始末期),该数据将应用于区域到国家尺度农田生产力估算、生物地球化学循环模拟和农业生态系统监测。

1 数据与方法

1.1 研究区概述

黄淮海平原东临黄渤海,西至太行山,北以长城为界,南至淮河,包括京、津、冀、鲁、豫、苏、皖 5 省 2 市的全部或部分地区。研究区自西向东地貌可分为 3 种类型:一是燕山、太行山、伏牛山山前冲积平原,水资源条件好,是平原中的主要高产稳产区;二是处于中位的由沿黄河、海河、淮河流域组成的冲积平原,是本区平原的主体,地下水位较浅。其中北部海河多碟形洼地,盐碱普遍;中部受黄河泛滥影响风沙土较多;南部淮河平原,多砂姜土,土质粘重;三是东部沿渤海、黄海的滨海平原,海拔在 5—10m 以下,地面径流不畅,是生产条件最差的地方。黄淮海平原属暖温带半湿润、湿润季风气候,从北到南年平均降水量从 500mm 到 800mm。区域内除山东丘陵外,76% 的土地属平原,主要为黄河、海河、淮河三大河流的冲积平原,土层深厚,土质适宜耕作。研究区总面积 44 万 km²,其中耕地面积近 70%,大部分地区可以一年两熟。

1.2 MODIS 遥感时间序列数据

多时相 MODIS 遥感观测影像是生态环境监测、全球环境与气候变化研究重要的数据。美国 NASA 的 EOS 数据中心自 2000 年开始(<http://daac.gsfc.nasa.gov>)免费提供全球 MODIS 标准数据产品,本研究使用其中 8d 合成的空间分辨率 500m 的表面反射率数据产品(MOD09A1)。很多研究已经证实 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 对大气,土壤背景(如土壤湿度)的敏感性,加之 NDVI 值在多层且郁闭度高的冠层

通常会饱和,使得在 NDVI 的使用上有一些限制^[15]。EVI(Enhanced Vegetation Index)和 LSWI(Land Surface Water Index)已被用于植被生长动态的识别^[16-17]。EVI 和 LSWI 不同于广泛使用的归一化植被指数 NDVI, EVI 在红和近红外波段的基础上还考虑了蓝波段,进一步抑制了噪音的影响并减小了 NDVI 存在的绿度饱和现象^[18]:

$$EVI = G \times (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + (C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue}) + L) \quad (1)$$

式中, $G = 2.5$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, $L = 1$, ρ_{nir} , ρ_{red} 和 ρ_{blue} 分别是近红外、红和蓝波段的反射系数。

短波红外 (SWIR) 波段对植被水分含量和土壤水分含量敏感,近红外和短波红外波段已经被用来获取对水分敏感的植被指数^[15,19-21], LSWI 是描述植被水分含量的一项指标^[22]:

$$LSWI = (\rho_{nir} - \rho_{swir}) / (\rho_{nir} + \rho_{swir}) \quad (2)$$

式中, ρ_{nir} 和 ρ_{swir} 分别是近红外和短波红外波段的反射率。

在研究区的分析也表明基于 MODIS 数据计算的 EVI 和 LSWI 对作物冠层变化更敏感^[14], 本研究应用 EVI 和 LSWI 时间序列数据提取作物的种植制度信息。每年 46 个时相的 MODIS/EVI 和 LSWI 影像构成描述植被生长过程的时间序列数据, 以此作为提取作物的种植制度信息的基础数据。

1.3 时间序列曲线平滑与熟制识别

作物从播种到收割 EVI 经历一个升高-峰值点-降低的动态过程, 实行两熟制的区域会在一年之内完成两个这样的循环, 同样, 三熟制将完成 3 个生长周期。但植被指数时间序列曲线通常会由于受到云、大气扰动等的干扰使其有锯齿状波动, 而事实上作物的生长是连续渐变过程, 除收获或灾害外的任何突变都是由于云、大气扰动、汽溶胶、水蒸气、土壤背景等导致的噪音的影响引起的。本研究采用结合曲线拟合和傅立叶变换技术的时间序列谐波分析法 (HANTS, Harmonic Analysis of Time Series) 方法去除上述噪音, 该方法的优势是能够描述出多熟种植制度作物生长曲线内部蕴涵的周期性^[23-24]。本研究用 HANTS 方法提取原始 EVI 曲线中

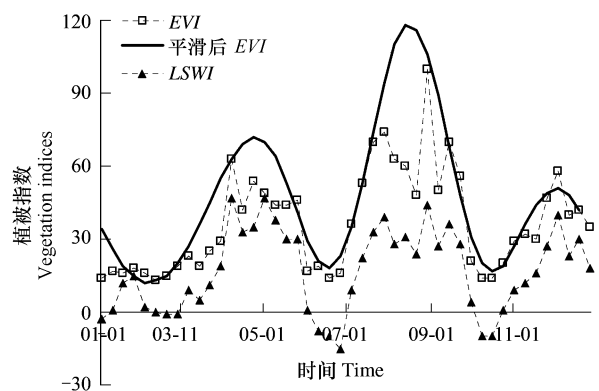


图1 植被指数(EVI, LSWI)时间序列与平滑处理后的 EVI 时间序列曲线

Fig.1 Smoothed EVI curve and original EVI and LSWI time series

前 4 个谐波的信号构建平滑的曲线(图 1), 经过 HANTS 平滑处理的 EVI 时间序列曲线即可应用曲线峰值检测方法提取农业种植熟制信息。峰值检测方法是根据 3 个连续时段时间窗的 EVI 序列曲线的斜率, 判断斜率由正值转变为负值(波峰)的次数, 并记录峰值出现的时间。需要根据作物的生长周期特点建立判别规则进一步精确描述多熟制特征。结合站点观测资料根据峰值出现的最早可能时间(PEAK_E)、峰值出现的最晚可能时间(PEAK_L)、峰值的 EVI 最低值(PEAK_VI)、两季作物 EVI 峰值(抽穗期)的最小时间间隔(PEAK_DIS)、EVI 最大值和最小值的差值等(RANGE)设定了熟制判断规则。具体的农业多熟种植检测方法及验证已经在前期的研究中^[8-9,13]中有详细的论述。

1.4 作物历识别方法

在各季作物出苗前和收获后耕地土壤通常呈裸露状态或有作物秸秆覆盖, 这时 LSWI 值会非常低(图 1), 对研究区多个像元点的检查以及其他的检查结果^[25-26]都表明在没有植被生长的季节, LSWI 值几乎都小于 0。在由 EVI 时间序列数据确定农业熟制的过程中, 检测作物生长曲线峰值的同时还记录了各个生长季峰值出现的时间, 因此, 本研究由 LSWI 时间序列曲线所表现的季节性特征并结合由 EVI 时间序列曲线提取的作物熟制信息来识别作物播种时间和收获时间。在提取作物历信息过程中, 首先以第 1 季作物的 EVI 最大值出现的时间为时间起点, 在 LSWI 时间序列数据上逐记录(时间间隔为 8 日)向前搜索 LSWI 小于 0 的点, 并记录最早搜索到的 LSWI < 0 的发生时间 T1(DOY), 定义第一季作物的生长始期(CI_{start})为 LSWI 时间序列中 T1 的后一时

间,即 $T1 + 8$;如果没有 $LSWI < 0$ 的点,则定义 $LSWI$ 最小值出现时间为 $C1_{start}$;然后继续以 EVI 最大值出现的时间为时间起点向后搜索 $LSWI$ 小于 0 的点,记录最早搜索到的 $LSWI < 0$ 的发生时间 $T2$ (DOY),定义第一季作物的生长末期($C1_{end}$)为 $LSWI$ 时间序列中 $T2$ 的前一时间,即 $T2 - 8$;如果没有 $LSWI < 0$ 的点,则定义 $LSWI$ 最小值出现时间为 $C1_{end}$;同样以第二季作物的 EVI 最大值出现的时间为时间起点,分别向前和向后搜索确定第二季作物的生长始期($C2_{start}$)和生长末期($C2_{end}$)。

2 结果与讨论

2.1 黄淮海农业区作物生长特征

在研究区内 2002 年有 26 个国家气象局农业气象监测站逐旬观测并记录了冬小麦返青期和成熟期,10 个站点有夏玉米的播种期和成熟期(图 2)。研究区站点记录的冬小麦返青时间相差近 1 个月,从位于研究区南部地区的沭阳、商丘、宿县等站点 2 月初逐渐延迟至北部地区霸县、宝坻、定县等站点的 2 月底返青。夏玉米出苗期的时间从 6 月初至 6 月末,也有近 20d 的时差。这些观测站点作物的生长期长度各不相同,冬小麦的生长期长度在 98—123d 之间,成熟期时间差距不如返青期那样显著,26 个站点中成熟最早的驻马店站点与最晚的宝坻点相距 18d;15 个夏玉米站点中,生长期长度为 80—106d,济宁与宝坻的成熟期相距 33d。

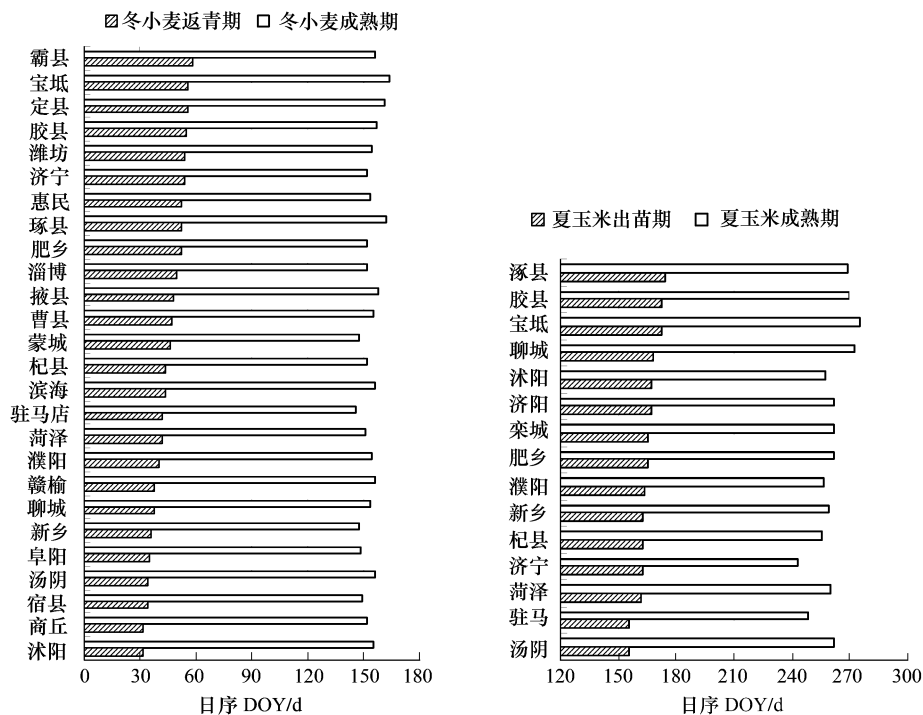


图2 冬小麦及玉米观测站点作物生长期

Fig. 2 Agro-meteorological observed start and end period of Maize and Winter wheat

为了更充分掌握多时相遥感时间序列数据所表达的作物的生长发育动态的规律与异同,本研究在位于研究区中部的聊城站(37.883N,114.633E)周围二熟区分别采集了 100 个点 EVI 和 $LSWI$ 时间序列数据,这些数据值的上下轮廓线构成站点周围约 25km^2 范围内植被指数的动态区间(图 3 中灰色阴影部分),平均值(图 3 中带方框点的实线)则反映了该地区植被生长的综合态势, EVI 和 $LSWI$ 均清晰呈现为两个作物生长季循环。从 100 个点的平均值来看,两个生长季的 $LSWI$ 峰值几乎相当,而第 2 生长季的 EVI 峰值高于第 1 生长季近 40%。 EVI 的上下轮廓线植被指数值相差最大的时期低值点仅为高值点的 50%,在作物生长最旺盛的时期所收集地点的表征植被叶绿素光吸收状况的植被指数 EVI 的最大值与最小值差异明显高于作物生长初期和末期,作物生长期结束时几乎所有曲线 EVI 值都降低至同一低水平;而反映陆地表层水分状况的植被指数 $LSWI$ 虽然也呈现类似特征,但是各个生长阶段 $LSWI$ 值的动态区间差异相对 EVI 较弱,在差异最大的时间 $LSWI$ 值

低值点约相当于高值点的 60%。*LSWI* 时间序列中各生长季时间序列曲线的峰值相近的特征有助于与 *EVI* 植被指数时间序列相互配合以更准确识别农业的多熟种植结构,这样可以避免在噪声影响严重的情况下由于第一季 *EVI* 值低于第二季加之噪声干扰导致无法判断生长季循环的时间过程。

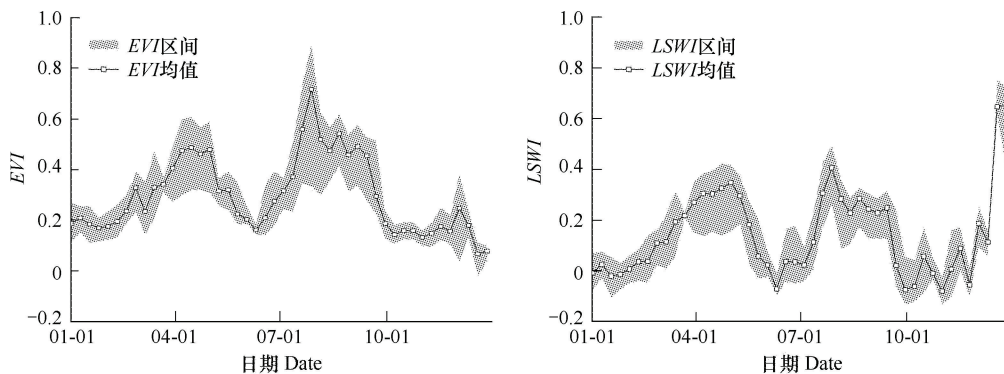


图3 聊城站周边 *EVI* 与 *LSWI* 的动态过程

Fig. 3 Annual dynamic of *EVI* and *LSWI* around Liaocheng station

曲线为选取像元 *EVI* 的平均值,灰色区域为选取像元 *EVI* 最大值与最小值区间

2.2 多熟种植与作物历空间分布特征

2002 年黄淮海农业区该区域有 52.8% 的耕地实施两熟制,两熟区主要分布在区域的西南部,二熟制主要分布在其中平原耕地,丘陵地区基本实行一熟制。根据农业种植区划中划分的黄淮海农业区 5 个亚区(图 4),其中水热条件居黄淮海农业区之首的黄淮平原南阳盆地多熟种植面积比例最高,其中有 85.9% 的耕地一年两熟;其次是灌溉条件充分的鲁西北豫北低平原区(包括鲁西北的惠民、德州、聊城地区和豫北),二熟制耕地占 67.7%;燕山太行山山前平原区(包括石家庄、唐山、安阳、新乡等地区)和山东丘陵区(包括山东半岛大部,水热条件利于多熟种植)二熟制分别占耕地面积的 43.2% 和 32.5%;复种面积最少的是黑龙港缺水低平原(河北省的沧州地区,衡水地区大部,邢台与邯郸的一部分,以及天津大部地区),二熟制耕地面积占所有耕地面积的 24.7%。

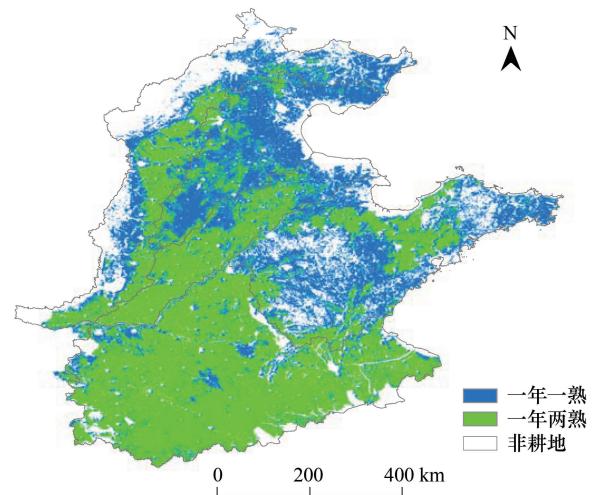


图4 黄淮海农业区多熟种植分布图

Fig. 4 Multiple cropping distribution map of HHH plain

由空间分辨率 500m 的遥感资料得到的作物种植历(各季作物的生长始末期)清晰地表达了各季作物种植历的时空差异(图 5),尤其是冬小麦返青期自北向南呈较明显的过渡,即自北向南二熟区第一季作物生长始期(认为是冬小麦的返青时间)逐渐提前(图 5C)。这样的地带性规律主要是温度条件所决定,黄淮海农业区南北纬度相差 8.5°,年均温从最北部以及丘陵山区的 4—6℃ 逐渐升高到南部的 14—16.5℃,尽管区域内除部分丘陵耕地外的大部分耕地都能满足二熟制的热量需求,但是气温逐渐升高满足作物生长温度需求的时间差异使得第一季作物的起始时间呈现北方迟于南方的格局(图 5A)。在该研究区,冬小麦主要分布在年均温 12—16.5℃ 的区域(图 6),随着年均温升高,作物生长始期(冬小麦返青)由 DOY = 64 前后提前至 DOY = 16 前后(图 6),也就是说黄淮海农业区二熟制作物中第一季作物开始生长时间南北最长相差 48d。第一季作物的生长末期(收获期)和第二季作物的生长始末期随年均温度变化过渡规律则没有第一季作物生长始期那样显而易见,但总体上第一季作物生长末期和第二季作物生长始期的最早和最迟出现时间相差约 56d(7 × 8),

位于研究区西北部的燕山太行山前平原区第一季作物生长末期和第二季作物生长始期都相对较迟(图 5D, E),研究区南部的第二季作物生长末期也明显早于北部地区(图 5F)。实行一熟制的耕地上作物生长的起始和结束时间都显著迟于实行两熟制耕地的第一季作物的作物生长起止时间,图 5A 所示的像元包括实行一熟制和二熟制的所有耕地,二熟制第一季作物主要以冬小麦为主,但一熟区的作物品种相对较多,如种植面积较大的棉花出苗期在 4 月末—5 月初,10 月下旬停止生长(根据德州和济宁 2002 年的观测资料)。

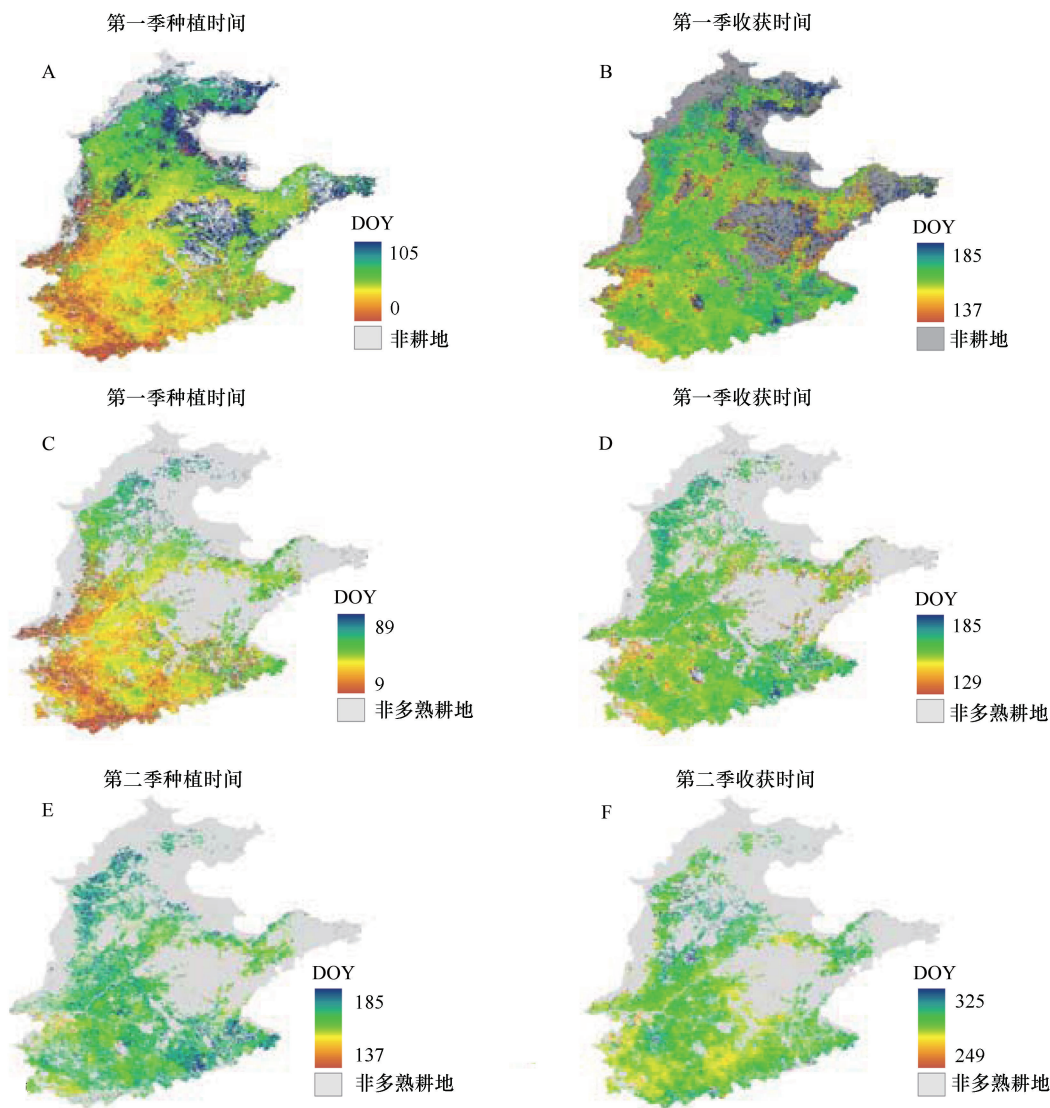


图5 黄淮海农业区各生长季作物生长始末期遥感检测结果(2002年,500m MODIS)

Fig. 5 Crop calendar of each growth cycle in HHH plain from MODIS time series

2.3 遥感检测作物种植历与农业物候观测记录对比

按照站点经纬度位置,提取距离站点位置最近的遥感检测结果为二熟制的像元的作物生长始期和生长末期信息,并将观测的 22 个站点的冬小麦返青和成熟期与遥感检测得到的作物生长季始期和末期,15 个站点的玉米出苗期和成熟期与遥感检测得到的作物生长季始期和作物生长末期进行对比。

由 MODIS 时间序列数据提取的作物历与观测站点记录对比表明总体上两个生长季的始末期遥感检测结果与作物出苗(冬小麦返青)和成熟期观测值一致(图 7)。第二季(夏玉米)生长末期遥感值均迟于夏玉米成熟期观测值,这是因为观测值记录的是作物的成熟时间,而在本研究中所定义的生长末期是植被绿度降至最低的前一时刻,这个时间基本相对于收获时间,因此要迟于成熟时间。而对于第一季作物的生长末期提取,由

于从第一季作物成熟到收割再到下一季作物播种时间很短,往往小于所用遥感资料 8d 的时间间隔,因此不会出现生长末期与成熟期观测值有明显时间间隔的情况。图 7 中第二季始期(夏玉米播种)与第一季末期(冬小麦成熟)遥感值与观测值吻合最好,基本均匀靠近 1:1 线。冬小麦返青期多数站点遥感值早于观测值,其中肥乡、宝坻、淄博遥感值与观测值差值高于 24d,其原因是由于遥感信号中没有完全消除的噪声导致的作物生长曲线误差。

3 结论

本研究以空间分辨率 500m、8d 合成的 MODIS 时间序列数据为主要数据,结合农业气象站点地面作物物候观测数据,探索检测作物多熟种植格局、提取作物种植历的方法,以实现在区域或全国尺度实时或近实时监测农业熟制和作物种植历信息。研究获取了空间表述清晰的农业种植制度(包括熟制和作物种植历)的时间序列数据,并对中国二熟制的重点农作区(黄淮海农业区)种植制度的时空格局进行深入的分析。由遥感时间序列曲线提取的多熟种植与作物历结果与农业气象观测作物历资料对比结果表明该方法和所得数据能够应用于区域农田生产力估算和生物地球化学循环模拟,将对改善以往由于没有将多熟种植作为单独的土地覆被类型、缺乏区域上实际的作物生长起止时间数据导致的多熟制地区生态系统生产力估算存在的明显低估现象有重要作用。尽管所采用的时间间隔 8d、空间分辨率 500m 的 MODIS 数据因其较高的时空分辨率和性价比在当前区域植被动态监测中具有很高的应用价值,但值得注意的是耕地分布的不规则性和我国以农户为基本管理单元的农业生产模式使得空间分辨率 500m 的 MODIS 影像中很多像元会是不同作物或者是作物与裸地或者其他植被的混和像元,因此在应用研究中需要考虑到其中的不确定性。MODIS 遥感资料自 2000 年至今已经有 8a 多的历史,随着今后研究中地面实际观测、农户调查以及统计数据的逐步获取与积累,将多源、多尺度、长时间序列的数据源与当前的农业种植制度遥感反演算法融合,将会进一步提高种植制度遥感产品的精度,也将对农业种植制度时空动态格局的形成机制有更为深刻的理解。

References:

- [1] Boucher O, Myhre G, Myhre A, Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate. *Climate Dynamics*, 2004, 22: 597-603.
- [2] Lal R, World crop residues production and implications of its use as a biofuel. *Environment International*, 2005, 31: 575-584.
- [3] Ogle S M, Paustian K, Breidt F J, Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*, 2005, 72: 87-121.
- [4] Brovkin V, Sitch S, von Bloh W, Claussen M, Bauer E, Cramer W. Role of land cover changes for atmospheric CO₂ increase and climate change during the last 150 years. *Global Change Biology*, 2004, 10: 1-14.

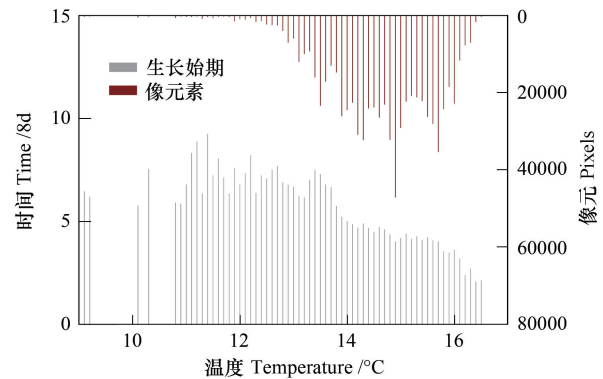


图 6 黄淮海农业区第一季作物生长始期时间随温度变化

Fig. 6 Start time of the first crop growth cycle and its variation with temperature change

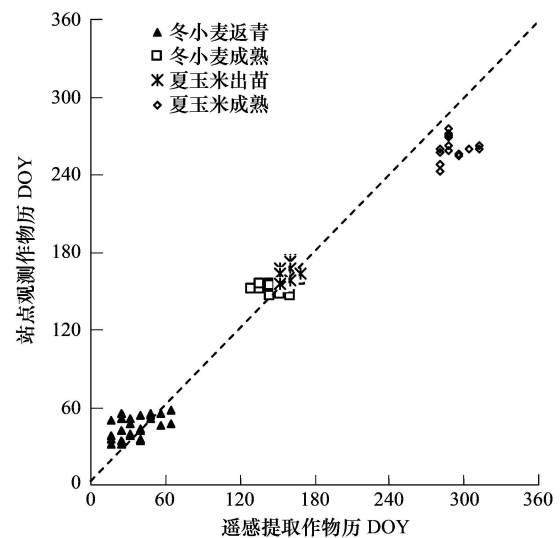


图 7 黄淮海农业区作物种植历观测值与遥感检测结果对比

Fig. 7 Crop calendar compare between agro- meteorological observation and MODIS derived

- [5] Levy P E, Friend A D, White A, Cannell MGR. The influence of land use change on global-scale fluxes of carbon from terrestrial ecosystems. *Climatic Change*, 2004, 67: 185-209.
- [6] Zhang Y, Yu Q, Jiang J I E, Tang Y. Calibration of Terra/MODIS gross primary production over an irrigated cropland on the North China Plain and an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2008, 14, 757-767.
- [7] Fan J L, Wu B F. A Methodology for Retrieving Cropping Index from NDVI Profile, *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(6): 628-636.
- [8] Yan H M, Cao M K, Liu J Y, Zhuang D F, Guo J K, Liu M L. Detecting Spatial Patterns of Crop Rotation System from Multi-temporal Remote Sensing Images. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21 (4): 85-90.
- [9] Yan H M, Liu J Y, Cao M K. Remotely Sensed Multiple Cropping Index Variations in China During 1981-2000. *Acta Geographic Sinica*, 2005, 60 (4): 559-566.
- [10] 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.
- [11] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2006, 111, G04017, doi: 10.1029/2006JG000217.
- [12] Sakamoto T, Nguyen N V, Ohno H, Ishitsuka N, Yokozawa M. 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): 1-16.
- [13] Yan H M, Huang H Q, Xiao X M, Jiang L G. Spatio-temporal distribution of multiple cropping systems in Poyang Lake agricultural area from satellite observation. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4517-4523.
- [14] Yan H M, Fu Y L, Xiao X M, Huang H Q, He H L, Ediger L. Modeling Gross Primary Productivity for winter wheat-maize double cropping system using MODIS time series and CO₂ eddy flux tower data. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129: 391-400.
- [15] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, Goltz M, Davidson E A, Zhang Q Y, Moore B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sens. Environ.*, 2004, 89, 519-534.
- [16] Boles S, Xiao X, Liu J, Zhang Q, Munkhtuya S, Chen S, Ojima D. Land cover characterization of Temperate East Asia using multi-temporal VEGETATION sensor data. *Remote Sens. Environ.*, 2004, 90, 477-489.
- [17] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H, Hodges J C F, Gao F, Reed B C, Huete A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84, 471-475.
- [18] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [19] Ceccato P, Flasse S, Gregoire J M. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data-Part 2. Validation and applications. *Remote Sens. Environ.*, 2002, 82, 198-207.
- [20] Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, Jacquemoud S, Gregoire J M. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sens. Environ.*, 2001, 77, 22-33.
- [21] Ceccato P, Gobron N, Flasse S, Pinty B, Tarantola S. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1-Theoretical approach. *Remote Sens. Environ.*, 2002, 82, 188-197.
- [22] Xiao X, Boles S, Frolking S, Salas W, Moore B, Li C, He L, Zhao R. Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data. *Int. J. Remote Sens.*, 2002, 23, 3009-3022.
- [23] Azzali S, Menenti M. Mapping Vegetation-soil-climate Complexes in Southern Africa Using Temporal Fourier Analysis of NOAA-AVHRR NDVI Data. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(5): 973-996.
- [24] Roerink G J, Menenti M. Reconstructing Cloudfree NDVI Composites Using Fourier Analysis of Time Series. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(9): 1911-1917.
- [25] Xiao X M, Boles S, Liu J Y, Zhuang D F, Frolking S, Li C S, Salas W, Moore B. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(4): 480-492.
- [26] Xiao X, Hagen S, Zhang Q, Keller M, Moore III B. Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multitemporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103: 465-473.

参考文献:

- [7] 范锦龙, 吴炳方. 复种指数遥感监测方法. *遥感学报*, 2004, 8(6): 628-636.
- [8] 闫慧敏, 曹明奎, 刘纪远, 庄大方, 郭建坤, 刘明亮. 基于多时相遥感信息的中国作物种植制度空间格局研究. *农业工程学报*, 2005, 21(4): 85-90.
- [9] 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.
- [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. *遥感学报*, 2001, 5(6): 442-447.
- [13] 闫慧敏, 黄河清, 肖向明, 姜鲁光. 鄱阳湖农业区多熟种植时空格局特征遥感分析. *生态学报*, 2008, 28(9): 4517-4523.