

基于 MODIS-EVI 数据的河北省冬小麦生育期特征

闫 峰¹, 史培军¹, 武建军¹, 王艳姣², 李春强³

(1. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 2 中国气象局国家气候中心, 北京 100081;

3 河北省气象科学研究所, 石家庄 050021)

摘要: 生育期信息对作物生长发育的动态监测、田间精细管理以及产量预测等具有重要意义。采用 NASA 提供的 2005 年 1~7 月 8d 合成的 MYD09 数据产品计算出的 EVI(增强型植被指数)时间序列图像, 对河北省冬小麦的返青期、抽穗期和成熟期等 3 个关键生育期的时空分布特征进行了研究。结果表明: 冬小麦生育期在空间分布上, 由南向北随着纬度的增加, 其返青期、抽穗期和成熟期依次推迟; 不同纬度地区冬小麦的返青期、抽穗期和成熟期时间间隔基本一致, 河北省南部地区冬小麦的 3 个主要生育期比北部地区约提前 8d 以上; 在东西向分布上, 生长条件存在异质性差异的冬小麦, 其返青期相对一致, 但生长条件较好冬小麦的抽穗期和成熟期比普通冬小麦提前 4d 左右。

关键词: 冬小麦; 生育期; MODIS-EVI; 河北

文章编号: 1000-0933(2008)09-4381-07 中图分类号: Q948, S181, S314 文献标识码: A

The phenology character of winter wheat by MODIS-EVI data in Hebei China

YAN Feng¹, SHI Pei-Jun¹, WU Jian-Jun¹, WANG Yan-Jiao², LI Chun-Qiang³

1 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

3 Meteorological Institute of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4381 ~ 4387.

Abstract: As an important factor during crop growing period, phenology is widely used in growing monitoring, field management and output forecasting. Winter wheat is one of the most important crops in Heibei China and its phenology will be affected by not only climate but also farmers' planting habit and so on. In this paper, temporal series MYD09A1, the 8-day reflectivity composite productions provided by NASA, which derived from AQUA-MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) images from January to July in 2005 were used to calculate enhanced vegetation index (EVI). Based on winter wheat's whole growing stages, three key phenologies were defined from temporal series EVI as following: greenup begins with the second continually increasing in EVI, heading stage begins with the maximum of EVI and maturity begins with the second decreasing of EVI before the minimum.

Winter wheat flourishes in the first ten days in May generally, so the 16th 8-day EVI image which is relatively cloud-free was used to density sliced to show different growing conditions. From the south part of winter wheat area to the north in Hebei China, temporal series images of five areas of interesting (AOI) with the same EVI level (0.3—0.4) were analyzed, and greenup, heading stage and maturity were abstracted from the images. Results show that EVI could be used

基金项目: 国家 863 资助项目(2006AA12Z142); 国家博士后科学基金资助项目(20070420308)

收稿日期: 2008-02-28; 修订日期: 2008-06-04

作者简介: 闫峰 (1973~), 男, 江苏连云港人, 博士, 主要从事遥感、地理信息系统和灾害学研究. E-mail: njuyf@163.com

Foundation item: The project was financially supported by China 863 Program (No. 2006AA12Z142) & China Postdoctoral Science Foundation (No. 20070420308)

Received date: 2008-02-28; **Accepted date:** 2008-06-04

Biography: YAN Feng, Ph. D., mainly engaged in remote sensing, geography information science and calamity science. E-mail: njuyf@163.com

to estimate crop phenology successfully. From the south to the north, with the increasing of latitude, greenup, heading stage and maturity of winter wheat in Hebei China became later and later. Winter wheat in the south of Hebei turned green at the 8th 8-day in 2005 (about the first ten days in March), the middle part of winter wheat turned green about in the second ten days in March, which was 8 days later than that in the south, and the north part of winter wheat's greenup was deferred about 8 days than the middle part to the last ten days in March. Periods among the three key phenologies of winter wheat were almost stationary, and phenology of wheat in the south of Hebei could be 8–16 days earlier than that in the north.

From the east to the west in the middle part of winter wheat in Hebei Province, three AOIs with about the same latitude but different *EVI* value (0.3–0.4, 0.4–0.5, 0.5–0.6) were used to analyze phenology spatial character. On the condition that different *EVI* level could instead different growing conditions and managements of crop, we could get conclusions that from the east to the west, winter wheat with different growing conditions turned green at about the same period; heading stage and maturity of winter wheat with the best growing condition came at the 15.5th 8-day and the 20.5th 8-day, respectively, which could be about 4 days earlier than those of wheat with common growing conditions.

Key Words: winter wheat; phenology; MODIS-*EVI*; Hebei Province

生育期作为重要的农业信息,对作物生长发育的动态监测、田间精细管理以及产量预测等具有重要意义。生育期遥感监测具有宏观、动态和经济性等优势,在一定程度上弥补了传统监测方法的不足而日益引起了研究者的密切关注。国外利用遥感技术进行生育期监测的研究开展相对较早,20 世纪 70 年代末,Tucker 等^[1]利用辐射光谱仪监测了玉米、大豆的生长发育状况;80 年代,Badhwar 和 Gallo 等分别采用 Landsat 和 NOAA 卫星数据实现了小麦、大麦和玉米的生育期监测^[2,3];90 年代以来,多遥感数据源、多模型的生育期遥感监测得到了快速发展^[4~9]。Lloyd^[10]和 White 等^[11]通过 NDVI 阈值法实现植被生长始期的遥感提取,Moulin 等^[12]和 Zhang 等^[13]则分别以 NDVI 时间序列曲线中 NDVI 值开始增大的拐点和生长季斜率最大值作为作物生长季开始,均取得了较好的估算效果。我国对于农作物生育期的遥感估算研究开展相对较晚,但近年来也取得了较快的发展。王延颀^[14]和辛景峰等^[15]采用 NOAA-AVHRR 数据分别对江苏省和黄淮海地区水稻和冬小麦的生育期遥感监测进行了研究;江东等^[16]根据日和旬度的 NDVI 数据,分析了华北冬小麦 NDVI 时间曲线的波动与农作物生长发育阶段及农作物长势的响应规律;张峰^[17]和范锦龙等^[18]利用时序植被指数对农作物的物候监测和复种指数的提取方法进行了研究并取得了较好的效果。

已有的研究多是利用 NDVI 数据提取地表植被的物候期,对冬小麦生育期的内部结构的空间展布方面研究相对较少,且采用的 NDVI 较易受到大气气溶胶、背景土壤信息和红光饱和问题的影响,在一定程度上影响了其对于地物信息的指示精度。增强型植被指数(*EVI*)作为 NDVI 的继承和改进,综合处理了土壤、大气和红光饱和问题,具有较好的应用前景^[19]。河北省作为我国的粮食生产大省,是我国冬小麦的最重要的产区之一,近年来其冬小麦产量一直维持在占全省粮食产量的约 45% 的水平,对于稳定和解决全省乃至全国的粮食生产与粮食安全问题具有重要意义。因此,本文拟以河北省为研究区,采用 MODIS 的 *EVI* 时间序列数据集,分析研究河北省冬小麦的关键生育期时空变化特征,为冬小麦田间监测管理提供技术支持。

1 研究区概况

河北省地处我国华北地区,位于 36°03′~42°40′N,113°27′~119°50′E 之间,西以太行山与山西为邻,西北部、北部和东北部同内蒙古自治区和辽宁省接壤,东部濒临渤海,东南部和南部与山东、河南两省交界,中部包括京津两市,总面积 187693 km²。气候类型为北温带大陆性季风气候,年平均气温为 -0.3~14.0℃,多年平均降水量为 522 mm,年内降水量表现为夏季最多,冬季最少,秋季多于春季^[20]。2005 年底全省总人口 6851 万人,耕地面积 5988.9 千 hm²^[21]。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

研究中使用的 *EVI* 数据来源于 EOS-MODIS 传感器。NASA 提供的 MODIS 植被指数产品的时间间隔为 16d,较大的时间尺度使利用植被指数产品序列进行冬小麦生育期识别容易掩盖生育期信息而产生较大的时间误差。因此,本文采用 NASA 提供的 2005 年 1 月 1 日至 7 月 11 日 8d 合成的 MYD09A1 数据产品(编号 001~185)。对订购的 MODIS 数据产品进行拼接和投影转换,采用的投影类型为地理经纬度投影和 WGS-84 坐标系。把 MYD09A1 的近红外、红光和蓝光波段的反射率代入增强型植被指数 *EVI* 计算公式,得到时间尺度为 8d 的 *EVI* 遥感数据集:

$$EVI = G \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + C_1 \times \rho_{Red} - C_2 \times \rho_{Blue} + L} \quad (1)$$

式中, ρ_{NIR} 、 ρ_{Red} 和 ρ_{Blue} 分别为 MODIS 的近红外波段、红光波段和蓝光波段的光谱反射率; L 为背景调整项; C_1 和 C_2 为拟合系数; G 为增益因子;在计算 MODIS-*EVI* 时, $L=1$, $C_1=6$, $C_2=7.5$, $G=2.5$ ^[19]。对合成的 *EVI* 数据叠加 2005 年河北省冬小麦分布图进行掩膜处理,获得冬小麦地区的时间序列 *EVI* 数据集。

此外,通过河北省气象科学研究所获取了 2005 年冬小麦地面生育期统计资料。实测的冬小麦生育期资料表明:2005 年河北省冬小麦一般在 3 月上中旬开始返青,4 月下旬~5 月上旬进入抽穗期,6 月上旬~6 月中旬进入成熟期,但各生育期在空间分布上存在一定的差异。

2.2 研究方法

在冬小麦的生长过程中,形态建成有两个明显的转折。一是幼穗开始花器分化,拔节开始;二是器官包括营养器官和结实器官全部建成,开花受精,植株转入下一代的种子形成。前者以起身为转折点;后者以开花为转折点^[22]。在冬小麦的不同生育期,随着冬小麦植株和叶片形态特征的变化,其光谱特性也相应发生改变,*EVI* 综合了近红外、红光和蓝光波段的光谱信息增强表现了冬小麦生长过程中光谱特征的差异。为了减少云、干旱等噪声对 *EVI* 时间序列变化的影响,根据 *EVI* 散点图具有较明显的倒“S”形变化特征,选用了 3 次多项式最小二乘法进行拟合以突出冬小麦生育期特征。根据

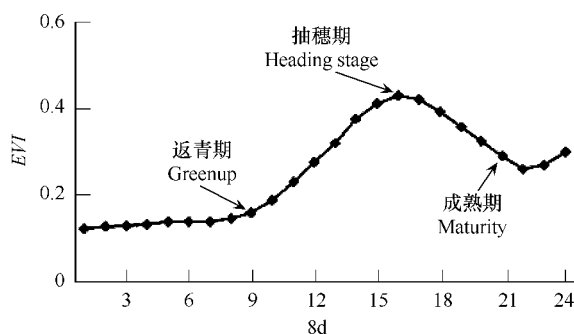


图 1 2005 年 1~7 月河北省冬小麦 *EVI* 变化

Fig. 1 *EVI* change of winter wheat from January to July in 2005 in Hebei Province

2005 年 1~7 月河北省冬小麦平均 *EVI* 时间序列曲线(图 1),参考已有的研究成果^[15],对越冬后返青期到成熟期进行定义。

作物生长期内 *EVI* 序列曲线上升过程中的两个拐点分别对应其生长季开始期和生殖生长转折期;下降过程中的两个拐点表示作物开始进入成熟期和收获期。由于冬小麦返青后迅速生长,对应的叶面积指数迅速增大,因此采用越冬后两个 *EVI* 第 1 次连续增长来确定冬小麦的返青期 t ,即:

$$\begin{cases} f(t-1) < f(t) < f(t+1) \\ f(t-1)' = 0 \end{cases} \quad (t=2, 3, 4, \dots) \quad (2)$$

式中, $f(t)$ 为时间 t 对应的冬小麦 *EVI* 值; t 为 1a 内时间序列。抽穗期冬小麦叶面积指数最大,其 *EVI* 达到冬小麦生育期内的最大值。因此,在冬小麦抽穗期遥感提取中采用 *EVI* 时间序列中最大值对应的时刻 t 定义冬小麦的抽穗期,即

$$f(t) = \max \{f(1), f(2), f(3), \dots, f(t), f(t+1), \dots\} \quad (t=1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

成熟期冬小麦 *EVI* 急剧下降,即使是冬小麦收获后实行夏玉米、花生等高效轮作,在大面积的裸露地背景中,短期内这些作物的播种期、出苗期对应的 *EVI* 也处于较低的水平。因此,定义冬小麦的成熟期 t 为生育期

内最后两个连续的 EVI 降低,且后一个 EVI 处于图像波谷部分,为成熟期后对应的最小值,即:

$$\begin{cases} f(t-1) > f(t) > f(t+1) \\ f(t+1)'' = 0 \end{cases} \quad (t=2, 3, 4, \dots) \quad (4)$$

在实现冬小麦返青、抽穗和成熟期定义后,便可以据此进行生育期的监测提取。河北省冬小麦一般在 4 月下旬~5 月上旬进入抽穗期,此时冬小麦叶面积指数迅速增加,植被指数较高。为了突出冬小麦生长状况的空间差异以及生育期提取研究的简便,选取具有较高植被指数且研究区上空云量较少的编号为 121 的 EVI (约对应于 2005 年 5 月上旬) 图像进行密度分割(图 2)。结果表明该时期 EVI 主要介于 0.3~0.6 之间的麦区在河北省北部、中部和南部均有分布,在不考虑冬小麦品种差异的前提下,造成这种现象的原因可能与冬小麦的田间管理水平具有密切关系,水热条件适宜、肥力充足的冬小麦具有相对较高的 EVI 。在此基础上,分别在南北方向和东西方向的麦区内提取样点建立 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 感兴趣区,分析比较冬小麦生育期的空间变化特征。

3 结果与分析

3.1 生育期南北向差异

为了分析河北省冬小麦生育期在南北方向上的变化规律,在图 2 上选择具有同样 EVI 变化范围(取 0.3~0.4)内南北方向分布的 5 个样点: N1($36^{\circ}05'01''\text{N}$, $114^{\circ}57'38''\text{E}$)、N2($37^{\circ}35'23''\text{N}$, $114^{\circ}42'50''\text{E}$)、N3($38^{\circ}44'22''\text{N}$, $115^{\circ}02'00''\text{E}$)、N4($39^{\circ}24'21''\text{N}$, $115^{\circ}48'00''\text{E}$)、N5($39^{\circ}50'05''\text{N}$, $116^{\circ}58'39''\text{E}$),按 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 建立感兴趣区,得出 2005 年 1 月以来冬小麦各感兴趣区 EVI 时间序列变化曲线(图 3a)。根据利用 EVI 指标进行的冬小麦关键生育期定义,得出南北向样点 N1~N5 的关键生育期分布(表 1)。

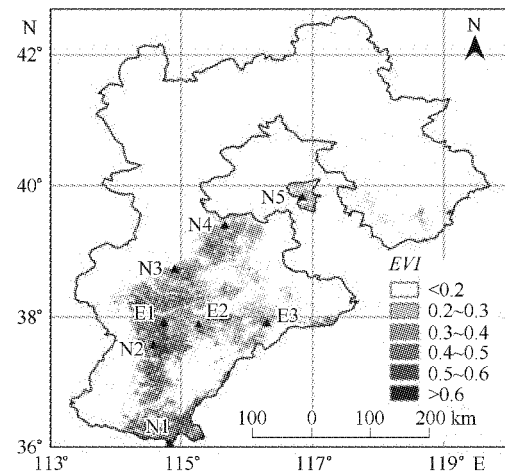


图 2 2005 年 5 月上旬河北省冬小麦 EVI 分级

Fig. 2 EVI of winter wheat in Hebei Province in the first ten days in May, 2005

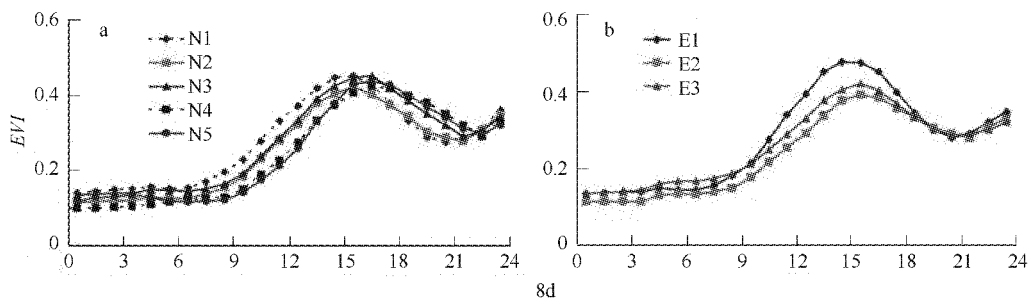


图 3 河北省冬小麦 EVI 时间序列

Fig. 3 EVI temporal series of winter wheat in Hebei

表 1 南北向冬小麦样点生育期

Table 1 Phenology of winter wheat samples from south to north

样点 Sample	返青期 Greenup (8d)	抽穗期 Heading stage(8d)	成熟期 Maturity (8d)
N1	8	15	20
N2	9	16	21
N3	9	16	21
N4	10	17	22
N5	10	17	22

由于冬小麦分布南北纬度不同,其返青期、抽穗期和成熟期存在一定的差异,具体表现为纬度较低的样点 N1 返青期相对最早,大约对应于 3 月上旬开始返青;随着纬度的增高,从邢台 N2—石家庄—保定中部地区 N3 的冬小麦返青期与邯郸市南部地区相比相对推迟约 8d,大约对应于 3 月中旬进入返青期;保定北部 N4—廊坊 N5 的返青期进一步推迟到大约 3 月下旬。分析南北向不同样点冬小麦的返青期—抽穗期—成熟期发现,3 个关键生育期的时间间隔基本稳定,这说明了采用同样的耕作制度和管理方式,在冬小麦品种差异不明显的情况下,相同 EVI 分布范围内的冬小麦从返青期——成熟期的时间间隔变化不大。冬小麦抽穗期和成熟期的变化趋势与返青期类似,仍以纬度较低的 N1 进入最早,抽穗期大约对应于 4 月下旬;成熟期对应于 6 月上旬;N2、N3 的抽穗期和成熟期大致相同,抽穗期对应于 5 月上旬,成熟期对应于 6 月中旬;N4、N5 的抽穗期和成熟期也基本一致,其抽穗期对应于 5 月中旬,成熟期约为 6 月中下旬。冬小麦的 3 个关键生育期表现为由南而北逐渐推迟的规律,纬度不同造成热量的差异应是产生冬小麦生育期不同的最重要原因。考虑到采用 8d 时间间隔可能会造成部分生育期信息的掩盖,可以认为河北省冬小麦返青、抽穗和成熟期在南北方向上推迟至少 8d 以上,这与辛景峰等的研究结果基本一致^[15]。

3.2 生育期东西向差异

不考虑地形、天气的影响,同一纬度的冬小麦获得的太阳辐射能相同,冬小麦的生育期应基本一致。但在实际生产中,由于土地类型(高产田、低产田)、田间管理等存在一定的差异,使相同纬度的冬小麦生育期表现出一定的异质性差异。在冬小麦生长过程中,可以认为这些异质性将最终体现在冬小麦的形态上而表现出具有不同的 EVI。在图 2 上,选择石家庄—衡水—沧州一线约同纬度附近东西向的具有不同 EVI 等级的 3 个样点: E1(37°55′05″N, 114°52′09″E)、E2(37°54′00″N, 115°23′55″E)、E3(37°55′05″N, 116°26′20″E),分别对应的 EVI 等级为 E1(0.5~0.6)、E2(0.3~0.4)和 E3(0.4~0.5)。分析 2005 年 1 月以来 E1、E2 和 E3 建立的感兴趣区的 EVI 时间序列变化曲线(图 3b),得出东西向异质性样点 E1~E3 的关键生育期分布(表 2)。

表 2 东西向冬小麦样点生育期

Table 2 Phenology of winter wheat samples from east to west

样点 Sample	返青期 Greenup (8d)	抽穗期 Heading stage(8d)	成熟期 Maturity (8d)
E1	9	15.5	20.5
E2	9	16	21
E3	9	16	21

分析东西向具有不同 EVI 等级的 3 个异质性样点 E1、E2 和 E3 的关键生育期,可以发现虽然 3 个样点后期 EVI 等级不同,但是返青期相对一致,约对应于 3 月中旬,这说明外界温度(或冬小麦的活动积温)是促使冬小麦进入返青期的关键因素。在抽穗期,具有较高 EVI 等级(0.5~0.6)的 E1 样点进入抽穗期较早,EVI 最大值出现在第 15 个 8d 处(EVI=0.476),但其第 16 个 8d 的 EVI 为 0.474,二者相差不大,分析 E1 样点的时间序列平滑折线图发现其 EVI 峰值介于第 15 个和第 16 个 8d 之间,因此对 E1 的抽穗期定义为第 15~16 个之间,近似为 15.5 个 8d(约 4 月下旬末至 5 月上旬初)。E2 和 E3 的抽穗期相差不大,均在第 16 个 8d 左右(5 月上旬)。生长条件较好的样点 E1 成熟期在第 20.5 个 8d 左右(6 月上旬末至中旬初)。E2 和 E3 的成熟期在第 21 个 8d 左右(6 月中旬)。可见对于纬度相同、生长条件存在异质性的冬小麦,生长条件较好的冬小麦返青期和普通冬小麦差别不大,但是其抽穗期和成熟期却比普通冬小麦提前 4d 左右。

3.3 检验分析

结合收集到的河北省冬小麦分布区内从南部到北部的肥乡、深县、黄骅、定州和廊坊等农业气象站点的生育期统计资料对遥感监测结果进行验证分析(表 3)。结果表明:虽然冬小麦生育期统计的时间尺度(旬)与采用的 EVI 时间尺度(8d)存在一定的差异,但二者的返青、抽穗和成熟期在整体上可以较好地符合。同时,根据冬小麦生育期的统计资料,廊坊地区的冬小麦其返青期(3 月中下旬)和抽穗期(5 月上中旬)分别跨了两旬,在较小的空间尺度范围内即出现了生育期相差 10d 以上,这可能与统计过程中的样区选择造成的误差有

关,但同时也说明了较小范围内(乡镇、村等)冬小麦生长条件差异将使其生育期表现出一定的差距。对生育期统计中出现 10d 差异误差的进行保守估计,认为遥感监测得出的同纬度地区冬小麦由于生长条件差异而导致生育期存在 4d 左右的差距应具有较高的可信度。

表 3 冬小麦统计生育期和监测生育期误差分析

Table 3 Error analysis between statistic date and monitoring date for phenology of winter wheat

样点 Sample	返青期 Greenup		抽穗期 Heading stage		成熟期 Maturity	
	统计日期 Statistic date	监测日期 Monitoring date	统计日期 Statistic date	监测日期 Monitoring date	统计日期 Statistic date	监测日期 Monitoring date
肥乡 Feixiang	03-01 ~ 03-10	02-26 ~ 03-05	04-21 ~ 04-30	04-23 ~ 04-30	06-01 ~ 06-10	06-02 ~ 06-09
深县 Shenxian	03-01 ~ 03-10	03-06 ~ 03-13	04-21 ~ 05-10	05-01 ~ 05-08	06-01 ~ 06-10	06-11 ~ 06-17
黄骅 Huanghua	03-11 ~ 03-20	03-14 ~ 03-21	05-01 ~ 05-10	05-01 ~ 05-08	06-01 ~ 06-10	06-02 ~ 06-09
定州 Dingzhou	03-11 ~ 03-20	03-06 ~ 03-13	04-21 ~ 05-10	05-01 ~ 05-08	06-11 ~ 06-20	06-11 ~ 06-17
廊坊 Langfang	03-11 ~ 03-30	03-14 ~ 03-21	05-01 ~ 05-20	05-09 ~ 05-16	06-20 ~ 06-30	06-18 ~ 06-25

4 结论与讨论

冬小麦生育期作为重要的农业信息,对实施田间精细管理以及产量预测等具有重要意义。采用 2005 年 1 ~ 7 月 MODIS-EVI 的 8d 合成的时间序列图像对河北省冬小麦生育期的时空分布特征进行了研究,主要得出以下结论:

(1) 冬小麦生育期由南向北的空间分布上,随着纬度的增加,其返青期、抽穗期和成熟期依次推迟,2005 年南部邯郸市的冬小麦约于 3 月上旬开始返青,从邢台—石家庄—保定中部地区的冬小麦返青期大约对应于 3 月中旬;保定北部—廊坊的返青期大约对应于 3 月下旬。

(2) 不同纬度地区冬小麦的返青期、抽穗期和成熟期时间间隔基本一致,3 个主要生育期在时空分布表现为河北省南部地区的冬小麦比北部地区约提前 8d 以上。

(3) 冬小麦生育期在东西向的空间分布上,生长条件存在异质性差异的冬小麦,其返青期相对一致。生长条件较好的样点的抽穗期和成熟期却比普通冬小麦提前 4d 左右。

冬小麦在我国分布范围广,气候、地形、冬小麦品种、播期和耕作制度差异等因素的综合影响使其生育期在时空分布上表现出更多的复杂性与不确定性;本文在进行冬小麦生育期的遥感提取中采用的时间尺度为 8d 的 MODIS-EVI 数据集,这虽然比采用旬(10d)为周期和 NASA 提供的 16d 为周期的植被指数序列具有较高的时间精度,但仍存在某生育期的起始较难准确确定的问题。在以后的研究中,要进一步综合考虑以上的诸多因素的影响,采用更合适分辨率的遥感图像和冬小麦生育期识别模型,加强时间序列植被指数数据集在其它地区以及其它年份冬小麦生育期遥感识别方法与识别能力的研究评价工作,实现生育期的更精细提取,为农业生产和管理提供支持。

References:

- [1] Tucker C J, Elgin J H, McMurtrey J E, *et al.* Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8: 237—248.
- [2] Badhwar G D. Crop emergence date determination from spectral data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1980, 46:369—377.
- [3] Gallo KP, Flesh T K. Large-area crop monitoring with NOAA AVHRR: estimating the silking stage of corn development. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 27:73—80.
- [4] Reed B C, Brown J F, VanderZee D, *et al.* Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 1994, 5, 703—714.
- [5] Kaduk J, Heimann M. A prognostic phenology model for global terrestrial carbon cycle models. *Climate Research*, 1996, 6, 1—19.
- [6] Fisher J I, Mustard, J F, Vadeboncoeur M A. Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100: 265—279.

- [7] Bradley B A, Jacob R W, Hermance J F, *et al.* A curve fitting technique to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(2), 137—145.
- [8] Fisher J I, Mustard J F. Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109: 261—273.
- [9] Bradley B A, Mustard J F. Comparison of phenology trends by land cover class: a case study in the Great Basin, USA. *Global Change Biology*, 2008, 14: 334—346.
- [10] Lloyd D. A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11, 2269—2279.
- [11] White M A, Thornton P E, Running S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11, 217—234.
- [12] Moulin S, Kergoat L, Viovy N, *et al.* Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/ AVHRR satellite measurements. *Journal of Climate*, 1997, 10, 1154—1170.
- [13] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, *et al.* Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84 471—475.
- [14] Wang Y Y, Malingreau J P. The possibility for using NOAA-AVHRR to monitor the crops condition in Jiangsu Province. *Remote Sensing of Environment China*, 1990, 5(3): 221—227.
- [15] 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.
- [16] Jiang D, Wang N B, Yang X H, *et al.* Principles of the interaction between NDVI profile and the growing situation of crop. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2): 247—252.
- [17] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 155—159.
- [18] Fan J L, Wu B F. A methodology for retrieving cropping index from NDVI profile. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(6): 628—636.
- [19] Huete A, Didan K, Miura T, *et al.* 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-3): 195—213.
- [20] Hebei Province meteorological administration. *Hebei agricultural climate and its divisions*. Beijing: Meteorological Press, 1988.
- [21] People's government of Hebei Province. *Yearbook of Hebei Province in 2006*. Beijing: China Statistics Press, 2006.
- [22] Jin S B. *Chinese wheat science*. Beijing: China Agriculture Press, 1996.

参考文献:

- [14] 王延颐, Malingreau J P. 应用 NOAA/AVHRR 对江苏省作物进行监测的可行性研究. *环境遥感*, 1990, 5(3): 221~227.
- [15] 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.
- [16] 江东, 王乃斌, 杨小唤, 等. NDVI 曲线与农作物长势的时序互动规律. *生态学报*, 2002, 22(2): 247~252.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [20] 河北省气象局. *河北省农业气候及其区划*. 北京: 气象出版社, 1988.
- [21] 河北省人民政府. *河北经济年鉴 2006*. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [22] 金善宝. *中国小麦学*. 北京: 中国农业出版社, 1996.

内最后两个连续的 EVI 降低,且后一个 EVI 处于图像波谷部分,为成熟期后对应的最小值,即:

$$\begin{cases} f(t-1) > f(t) > f(t+1) \\ f(t+1)'' = 0 \end{cases} \quad (t=2, 3, 4, \dots) \quad (4)$$

在实现冬小麦返青、抽穗和成熟期定义后,便可以据此进行生育期的监测提取。河北省冬小麦一般在4月下旬~5月上旬进入抽穗期,此时冬小麦叶面积指数迅速增加,植被指数较高。为了突出冬小麦生长状况的空间差异以及生育期提取研究的简便,选取具有较高植被指数且研究区上空云量较少的编号为121的 EVI (约对应于2005年5月上旬)图像进行密度分割(图2)。结果表明该时期 EVI 主要介于0.3~0.6之间的麦区在河北省北部、中部和南部均有分布,在不考虑冬小麦品种差异的前提下,造成这种现象的原因可能与冬小麦的田间管理水平具有密切关系,水热条件适宜、肥力充足的冬小麦具有相对较高的 EVI 。在此基础上,分别在南北方向和东西方向的麦区内提取样点建立 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 感兴趣区,分析比较冬小麦生育期的空间变化特征。

3 结果与分析

3.1 生育期南北向差异

为了分析河北省冬小麦生育期在南北方向上的变化规律,在图2上选择具有同样 EVI 变化范围(取0.3~0.4)内南北方向分布的5个样点:N1($36^{\circ}05'01''\text{N}$, $114^{\circ}57'38''\text{E}$)、N2($37^{\circ}35'23''\text{N}$, $114^{\circ}42'50''\text{E}$)、N3($38^{\circ}44'22''\text{N}$, $115^{\circ}02'00''\text{E}$)、N4($39^{\circ}24'21''\text{N}$, $115^{\circ}48'00''\text{E}$)、N5($39^{\circ}50'05''\text{N}$, $116^{\circ}58'39''\text{E}$),按 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 建立感兴趣区,得出2005年1月以来冬小麦各感兴趣区 EVI 时间序列变化曲线(图3a)。根据利用 EVI 指标进行的冬小麦关键生育期定义,得出南北向样点N1~N5的关键生育期分布(表1)。

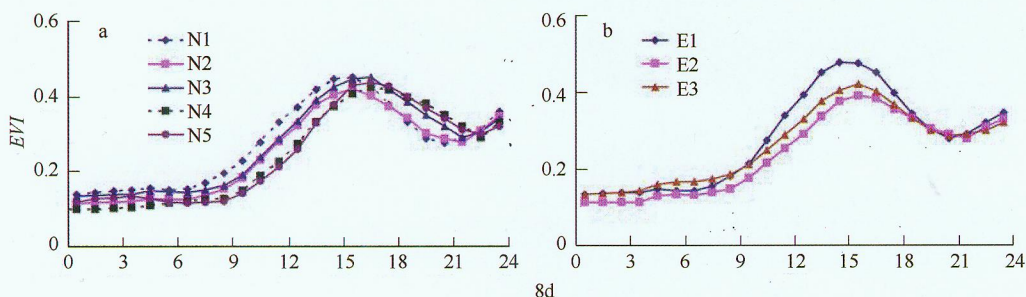


图3 河北省冬小麦 EVI 时间序列

Fig. 3 EVI temporal series of winter wheat in Hebei

表1 南北向冬小麦样点生育期

Table 1 Phenology of winter wheat samples from south to north

样点 Sample	返青期 Greenup (8d)	抽穗期 Heading stage(8d)	成熟期 Maturity (8d)
N1	8	15	20
N2	9	16	21
N3	9	16	21
N4	10	17	22
N5	10	17	22