

基于时间序列 HJ-1 A/B 卫星数据的冬小麦成熟期预测

黄健熙 牛文豪 马鸿元 黄 然 朱德海

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 准确、及时地掌握大区域尺度的冬小麦成熟期信息能够为农业机械调度、优化农作物收割顺序提供重要的参考依据。以华北平原中部冬小麦为研究对象,首先使用2013年研究区冬小麦生育期内HJ-1 A/B CCD时间序列影像,通过线性插值构建像元尺度上逐日的时间序列NDVI,随后采用上包络线S-G滤波方法重构时间序列NDVI,通过动态阈值法逐像元提取冬小麦抽穗期;然后以抽穗至成熟期的有效积温模型为判别依据,利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的日平均气温预报数据,实现未来10 d冬小麦成熟期的动态预测;最后采用农业气象站点的成熟期观测值对预测结果进行验证,重点对比分析了从不同成熟期预报起始时间点获得的冬小麦成熟期精度,以确定最优的预报起始时间点。结果表明:当预报时效小于等于10 d时,成熟期预测精度趋于稳定,因此,综合考虑确定提前10天对预测冬小麦成熟期在时效和精度上最优,平均误差为3 d。该方法为地块尺度的区域农作物成熟期预测提供了可参考的技术途径。

关键词: 抽穗期; 成熟期; 预报数据; 地块尺度; HJ-1 A/B CCD; 气象数据

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0278-07

Prediction of Maturity Data for Winter Wheat Based on Time Series of HJ-1 A/B CCD Images

Huang Jianxi Niu Wenhao Ma Hongyuan Huang Ran Zhu Dehai

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Accurately and timely regional maturity date of winter wheat provides an important information and reference for commanding farm machinery and optimizing the crop harvesting order. This study took main winter wheat planting area of the North China Plain as a case study. Firstly, the daily NDVI time series have been obtained through linear interpolation using time series of HJ-1 A/B CCD images from the winter wheat's booting to filling stages, the upper envelope Savitzky-Golay (S-G) filtered method was used to reconstruct the time series of NDVI, and then the heading stage was extracted from the NDVI profile using dynamic threshold method. Then, the resulting heading date and the effective accumulated temperature model of heading-maturity stage, combining with the average daily temperature forecast data from European Centre for medium range weather forecasts (ECMWF) was used to conduct real-time dynamic prediction maturity date of winter wheat. Finally, the prediction results were validated by observed maturity date in agricultural meteorological stations, and we test the optimal starting time for maturity date through comparing four schemes with different prediction starting date. The results showed the high accuracy of prediction maturity date when we conducted the prediction ahead of 10 d. The RMSE of predicted maturity date was about 3 d. These results also showed that predicting winter wheat maturity date at the 30 m resolution was promising and can be used for operational crop maturity monitoring and forecasting in the near future.

Key words: heading stage; maturity stage; forecast data; plot scale; HJ-1 A/B CCD; meteorological data

收稿日期: 2016-03-15 修回日期: 2016-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371326)

作者简介: 黄健熙(1976—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业定量遥感研究,E-mail: jxhuang@cau.edu.cn

引言

农作物的物候变化情况不仅可为农业管理者调整种植方式提供科学依据,而且可以指导农业机械进行合理的调度安排,对规模化作物种植区域的机械化收获有实用价值和重要意义^[1]。目前国内外学者已开发了一些作物成熟期预测的方法并建立了相应模型^[2]。传统的成熟期预测方法是以野外观测为基础的目视观察法,即直接在地面定点观测作物的生长状况来预判是否成熟,但由于覆盖范围小,难以进行大尺度作物成熟情况的时空分析;也有学者应用气象统计模型^[3-5],研究温度、光周期、降水等气象因子对作物的影响,实现作物成熟期的预测,但该方法局地性明显,代表性不强,区域推广较难;此外,利用作物生长模型也是获取作物成熟期的一种重要方法^[6-8],但大区域范围的作物生长模型标定与校准困难使其存在一定的局限性。遥感观测具有覆盖范围广、空间连续、多时相等特点,能较好地反映作物生长状况的差异及连续变化等特征,一些学者使用时间序列遥感数据跟踪作物生长过程,通过作物生育末期作物生长过程的特征变化确定作物成熟期^[9-12]。SAKAMOTO 等^[13]通过小波变换对 MODIS EVI 数据进行拟合,反演水稻生育期的差异从而实现水稻成熟情况的预测。也有一些学者利用遥感数据量化作物成熟过程中的生理、生化指示因子,通过遥感指数与实测成熟期构建统计模型的方法实现成熟期的监测与预测^[14]。黄健熙等^[15]提出了一种遥感反演抽穗期与农学积温-辐射模型结合的大区域冬小麦成熟期预测办法,但采用的 1 km MODIS LAI 遥感产品,由于受到混合像元的影响,难以反映地块间或地块内部的差异,较难满足田块尺度的精细化管理应用需求。随着国内中等分辨率卫星的长足发展,特别是 2008 年发射的 HJ-1 卫星,空间分辨率为 30 m, A/B 星座协同,重访周期缩短为 2 d,较大程度上减少了像元的异质性,此空间和时间分辨率为实现地块尺度的成熟期预报提供了可行的数据源^[16]。蒙继华等^[17]基于 HJ-1 A/1B 数据同时考虑了冬小麦水分、叶绿素在成熟过程中的变化,并对冬小麦成熟期进行预测,但是因为难以获得大区域尺度的实测成熟期,使得这种方法的推广应用受到了一定限制。本文基于时间序列 HJ-1 CCD 数据和气象数据研究冬小麦成熟期的预测方法,为地块尺度的作物收获机械调度提供理论与技术支撑。

1 研究区和数据

1.1 研究区概况

选取华北平原中部冬小麦主产区为研究区域,如图 1 所示,该区域包括保定、衡水、德州、邯郸、聊城、安阳、濮阳、菏泽等 13 个地级市,覆盖范围为 114°13'E ~ 116°49'E, 35°12'N ~ 39°47'N,面积为 60 760 km²。该研究区属暖温带半湿润季风气候,四季分明,雨量适中,光照充足,多年平均气温为 9 ~ 13.7℃,平均年降水量 400 ~ 600 mm。冬小麦作为该地区的主要粮食作物之一,一般于 10 月份播种,4 月下旬至 5 月上旬抽穗,6 月上中旬成熟,生长期为 230 ~ 270 d。由于光热条件的差异,研究区内的冬小麦成熟期差异较大,是研究区域尺度冬小麦成熟期预报的理想区域。本文冬小麦种植分区采用多时相 Landsat8 OLI 影像,运用人工神经网络的监督分类方法进行土地覆盖分类,冬小麦的总体分类精度为 89.3%, Kappa 系数为 0.85。

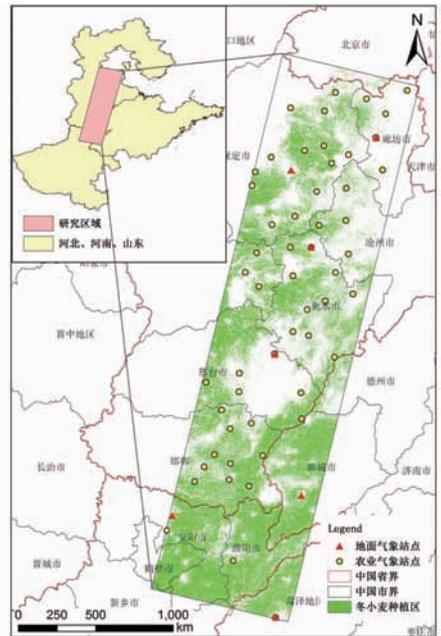


图 1 研究区冬小麦种植区、农业气象站、地面基准气象站

Fig. 1 Winter wheat planting areas, agrometeorological stations and meteorological stations in study area

1.2 研究数据

1.2.1 遥感数据

获取研究区 2013 年冬小麦生育期内 HJ-1 A/B CCD 遥感影像为遥感数据源, HJ-1 A/B CCD 数据来源于中国资源卫星应用中心 (<http://www.cresda.com/site1/>), 数据见表 1, 表中传感器 A-1、A-2、B-1、B-2 表示 HJ-1 A CCD1、CCD2 及 HJ-1 B CCD1、CCD2。该卫星重访周期为 4 d (HJ-1 A 和 HJ-1 B 组网后为 2 d), 空间分辨率为 30 m, 共有

蓝、绿、红和近红外4个波段。为提取区域冬小麦抽穗期,经过筛选共挑选4—5月份抽穗期前后19景CCD影像。

表1 2013年抽穗期前后HJ-1 A/B CCD影像

Tab.1 HJ-1 A/B CCD images before and after heading stage in 2013

| 序号 | 传感器 | 时相 | 序号 | 传感器 | 时相 |
|----|-----|------------|----|-----|------------|
| 1 | A-1 | 2013-04-02 | 11 | A-2 | 2013-04-28 |
| 2 | B-2 | 2013-04-07 | 12 | B-2 | 2013-04-30 |
| 3 | A-2 | 2013-04-09 | 13 | A-1 | 2013-05-02 |
| 4 | B-2 | 2013-04-11 | | A-2 | |
| | B-1 | | | B-1 | |
| 5 | B-2 | 2013-04-15 | 14 | B-2 | 2013-05-04 |
| 6 | A-1 | 2013-04-21 | 15 | A-1 | 2013-05-10 |
| 7 | A-2 | 2013-04-24 | 16 | B-1 | 2013-05-12 |
| 8 | A-1 | 2013-04-25 | 17 | B-2 | 2013-05-15 |
| 9 | B-2 | 2013-04-26 | 18 | B-1 | 2013-05-16 |
| 10 | B-1 | 2013-04-27 | 19 | B-2 | 2013-05-19 |

首先采用遥感图像处理软件ENVI 5.2对HJ-1 A/B CCD影像进行了预处理,包括辐射定标、大气校正以及几何精校正等,目的是去除传感器响应、大气传输等影响,将影像各波段的DN值转换为地物反射率,并保证所有影像对应像元间具有统一的地理坐标。

1.2.2 气象数据

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)提供的2008—2013年农业气象数据和地面基准气象数据。农业气象数据包括区站号、站名、经纬度、作物名称、发育期名称、发育期日期、发育程度、发育期距平、植株高度和生长状况等;地面基准气象数据包括区站号、站名、经纬度和平均气温。由于下载的数据是站点尺度的测量数据,将其应用到大区域成熟期预测的研究中时需要将其区域化,因此采用反距离权重插值法(IDW)将原始数据插值为1 km的栅格地面气象数据,计算每个农业气象站点逐日的平均气温。为统一格网分辨率,构建了30 m HJ-1 CCD数据和1 km气象数据之间的空间索引,以减小训练所需的气象数据量,提高后续计算效率。

1.2.3 ECMWF 预报数据

为提前预测冬小麦成熟期日期,选取欧洲中期天气预报中心(European centre for medium-range weather forecasts, ECMWF)的逐日集合预报资料(<http://apps.ecmwf.int/datasets/>),获取包含逐日平均气温的气象格点数据(经纬度格网单元为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$)。因数据集格式均为GRIB格式,在MeteoInfo软件中进行解译,与气象数据的处理方法类似,构建

30 m HJ-1 CCD数据和 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 预报数据之间的空间索引。

2 研究方法

首先基于HJ-1时间序列反射率构建时间序列NDVI,并采用上包络线S-G滤波对时间序列集去噪重构,获得反映冬小麦生长变化的NDVI时间序列曲线,进而通过曲线特征提取冬小麦抽穗期日期。大量研究表明,在冬小麦的生长周期中,抽穗期营养生长达到顶峰,随后转入生殖生长阶段,最大NDVI值通常出现在抽穗期,故可将NDVI达到最大值时的日期视为冬小麦抽穗期日期;然后以该抽穗期为起始点,以抽穗-成熟期有效积温模型为判别依据,当预测年份各像元冬小麦从抽穗期开始有效积温满足抽穗-成熟期有效积温模型要求时,则判定该像元内冬小麦成熟。在成熟期动态预测的过程中,每天对数据进行预报和气象数据更新,以保证数据的实时性,准确反映当前气象条件和最新预报。

2.1 基于时间序列HJ-1 A/B CCD影像的抽穗期提取

2.1.1 NDVI生成

NDVI是反映农作物长势的重要指标。NDVI由ROUSE等^[18]1973年提出,其利用绿色植物叶片在红色和近红外波段的光谱反差组合设计,是目前应用最广泛的遥感植被指数。NDVI的计算公式为

$$V_{NDVI} = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

式中 ρ_{nir} ——近红外波段地表反射率

ρ_{red} ——红波段地表反射率

2.1.2 基于时间序列NDVI的抽穗期提取

将上述NDVI图像按时间顺序进行叠加,生成各像元的NDVI时间序列集。传统时间序列分析算法主要面向等时间间隔数据集,由于获取的HJ-1 A/B卫星的反射率数据是非等时间间隔的,因此通过线性插值进行时间维的初始扩展,得到以天为单位等间隔的初始NDVI时间序列集。对初始的时间序列NDVI进行上包络线S-G(Savitzky-Golay)滤波,获得平滑后的NDVI时间序列集。

S-G滤波^[19]是一种移动窗口的加权平均算法,通过在滑动窗口内,对给定高阶多项式实现最小二乘拟合得出,计算式为

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^m C_i Y_{i+j}}{L} \quad (2)$$

式中 Y_{i+j} ——NDVI的原始值

Y^* ——滤波后的NDVI值

C_i ——第 i 个 NDVI 值的滤波系数

m ——窗口的半径

L ——滑动窗口所包括的数据点(即滤波器的长度),等于窗口的宽度($2m + 1$)

如果单独使用 S-G 滤波算法,时间序列曲线将变得比较平滑,但会造成序列上每一点的滤波结果总是位于周围极大值或极小值之间。然而由于作物不断生长引起的 NDVI 变化是十分平滑而连续的,而由于云、气溶胶等因素的影响造成的 NDVI 值变化则总是降低。因此,NDVI 与作物生长连续变化过程中的不一致突降点都应该作为噪声消除。为达到这个目的,采用 CHEN 等^[20]提出的基于上包络线 S-G 滤波来改进单纯使用 S-G 滤波后的冬小麦 NDVI 时间序列数据(图 2),步骤如下:

(1)对初始的 NDVI 时间序列根据式(2)进行 S-G 滤波,得到平滑后的结果。并分别保存平滑前和平滑后的序列。

(2)对比上一步的两个序列,生成新的序列作为初始序列,计算式为

$$N_i^t = \begin{cases} O_i & (O_i^{t-1} \geq N_i^{t-1}) \\ N_i^{t-1} & (O_i^{t-1} < N_i^{t-1}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 O ——初始 NDVI 值

N ——滤波后的 NDVI 值

t ——迭代次数

i ——NDVI 时间序列索引

(3)重复步骤(1)和步骤(2),直到整个序列小于指定的阈值 0.02。

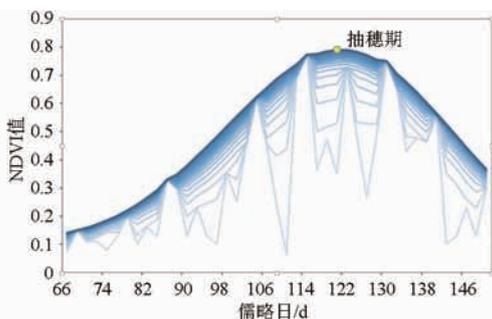


图 2 典型像元 S-G 上包络线滤波 NDVI 时间序列过程

Fig. 2 S-G envelope filtering NDVI time series process of typical pixel

利用上包络线 S-G 滤波后的 HJ-1 A/B 卫星 NDVI 时间序列曲线通过动态阈值法提取研究区冬小麦抽穗期具体日期,即 NDVI 达到最大值的日期。

2.2 抽穗-成熟期有效积温模型的构建

选取研究区冬小麦生育期内 2008—2012 年农作物生长发育数据集和中国地面气候资料日值数据集进行建模。首先对每年第 90 天~第 190 天的地面基准气象数据进行插值,具体到各农业气象站

上;然后结合农业气象站点提供的抽穗、成熟普遍期日期计算各农业气象站点抽穗-成熟期的有效积温,并按照时间序列进行平均,获得各农气站点 5 a 平均的有效积温;最后对各农业气象站点利用泰森多边形得到研究区抽穗-成熟期有效积温分布,假设同一个泰森多边形内具有均一的冬小麦特性,及抽穗-成熟期内均一的年平均积温^[15]。

根据抽穗-成熟期有效积温分布,构建抽穗-成熟期有效积温模型为

$$V_{\text{GDDP}} \geq y \quad (4)$$

式中 y ——2008—2012 年抽穗-成熟期年平均有效积温

GDDP 指预测年份抽穗期到成熟期的有效积温,有效积温计算式为

$$V_{\text{GDD}} = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b) \quad (5)$$

式中 T_i ——一天中平均温度,℃

T_b ——冬小麦的基点温度,取 0℃

n ——抽穗-成熟期的天数,d

通过式(4)可得当预测年份从抽穗期开始有效积温满足抽穗-成熟期有效积温模型阈值时,即认定像元内冬小麦成熟。

2.3 成熟期预报方法

基于 HJ-1 A/B CCD 遥感数据提取的抽穗期,逐日更新气象数据和预报数据,以反映当前气象条件和最新预报,当预测年份冬小麦从抽穗期开始有效积温满足抽穗-成熟期有效积温模型要求时,判断冬小麦成熟。

3 结果与分析

3.1 抽穗期提取分析

从图 3 可以看出研究区冬小麦抽穗期从南到北逐渐推迟,最早抽穗的区域位于研究区南部,在 4 月中下旬,即河南省北部和山东省南部,包括鹤壁市、安阳市、濮阳市、菏泽市;研究区北部最晚抽穗,在 5 月中旬,包括保定市和廊坊市。从图中小尺度结果来看,由于该研究区种植破碎,相邻农田由于灌溉、施肥等农田管理措施不同导致抽穗期日期差异明显。部分农田地边由于树木遮挡等原因导致冬小麦抽穗期较晚。

将基于 HJ-1 A/B 卫星时间序列 NDVI 数据提取的 2013 年冬小麦抽穗期日期与农业气象站点观测的抽穗期日期进行对比,其中抽穗期日期用年内的日序数表示,结果如表 2 所示。从表 2 可知,遥感提取的抽穗期日期与农业气象站点观测的抽穗期日期较为一致,均方根误差为 2.6 d。其中菏泽市、濮

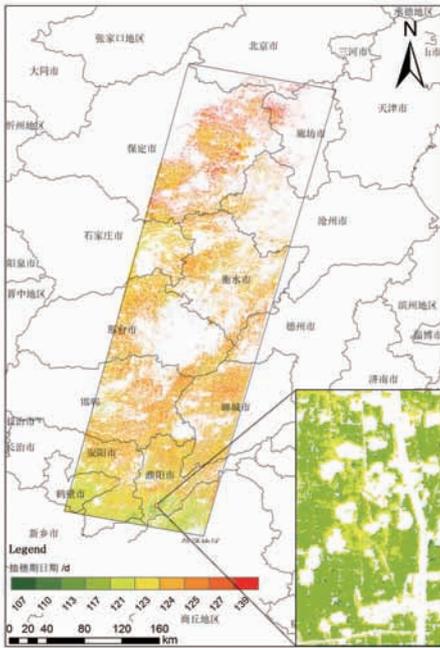


图3 遥感提取的冬小麦抽穗期空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of winter wheat heading stage retrieved from remote sensing

表2 研究区冬小麦抽穗期和成熟期具体日期观测值与提取值、预测值的对比

Tab. 2 Comparison of winter wheat observed and experimental values of heading and maturity stages in study area

| 农业气象站 | 抽穗期 | | | 成熟期 | | |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 观测值 | 提取值 | 误差 | 观测值 | 预测值 | 误差 |
| 涿州市 | 134 | 130 | -4 | 171 | 166 | -5 |
| 容城县 | 131 | 128 | -3 | 170 | 167 | -3 |
| 河间市 | 129 | 130 | 1 | 161 | 166 | 5 |
| 深州市 | 128 | 126 | -2 | 163 | 164 | 1 |
| 阜城县 | 124 | 124 | 0 | 165 | 162 | -3 |
| 南宫市 | 121 | 124 | 3 | 161 | 160 | -1 |
| 肥乡县 | 118 | 123 | 5 | 158 | 161 | 3 |
| 汤阴县 | 118 | 120 | 2 | 157 | 160 | 3 |
| 濮阳市 | 120 | 121 | 1 | 158 | 161 | 3 |
| 菏泽市 | 114 | 115 | 1 | 155 | 157 | 2 |
| 均方根误差 | | | 2.6 | | | 3.2 |

阳市、阜城县和河间市抽穗日期精度最高,误差在1 d之内。

3.2 成熟期动态预测

以5月25日、6月1日、6月5日、6月15日为起始预报日期,预测10 d之后研究区冬小麦的成熟情况,如图4所示。研究表明研究区冬小麦,在6月25日全部成熟,从整体来看最早成熟的区域对应着最先抽穗的区域,即河南省北部和山东省南部,在6月上旬,研究区北部抽穗最迟,包括保定市和廊坊市,在6月中下旬。在成熟期动态预测的过程中,每天对数据进行预报和气象数据更新,以保证数据的

实时性,并准确反映当前气象条件和最新的预报。

6月15日预测到研究区冬小麦全部成熟,此时将冬小麦成熟期日期预测值与2013年农业气象站点的成熟期日期观测值进行对比,其中成熟期日期用年内的日序数表示,结果如表2所示。从表2可知,成熟期日期预测值与观测值较为一致,前后天数平均相差3 d左右。其中深州市、南宫市成熟期日期误差在1 d之内。

3.3 精度评价

随着气象预报数据预报时效的延长,其精度也会相应降低,因此需探索最优的成熟期预报起始时间点,既满足成熟期预测精度又能保证农业机械的合理调度。由3.2节可知从6月4日开始,研究区冬小麦逐渐大面积成熟,预报数据最长预报时效为16 d,因此以6月20日为截止日期,对比从不同的成熟期预报起始时间点获取的6月20日研究区冬小麦成熟期情况,确定最优的成熟期预报起始时间点。

如表3所示,预报数据预报时效越长,成熟期预测值的误差越大,但是当预报时效小于等于10 d时,成熟期预测精度趋于稳定(均方根误差为3.18),因此,综合考虑后确定提前10 d对研究区冬小麦进行预测在时效和精度两方面可达到最优。

表3 不同成熟期日期预报起始时间点的精度验证

Tab. 3 Accuracy verification of different forecasting start time for maturity date

| 成熟期预报起始时间点 | 预报时效/d | 均方根误差 |
|------------|--------|-------|
| 2013-06-03 | 16 | 3.64 |
| 2013-06-05 | 14 | 3.32 |
| 2013-06-07 | 12 | 3.24 |
| 2013-06-09 | 10 | 3.18 |
| 2013-06-11 | 8 | 3.18 |
| 2013-06-20 | 0(当天) | 3.18 |

4 结论

(1) 华北平原以灌溉冬小麦区为主,由于灌溉等田间措施差异,相邻地块之间的成熟期差异可达到7 d,采用30 m HJ-1 A/B中的NDVI时间序列数据提取抽穗期日期,总体误差为2.6 d。研究表明针对我国耕地破碎的特定条件,采用HJ-1 A/B数据提取抽穗期减小了由混合像元和周边地块带来的误差和影响,在区域农作物关键物候期识别中具有较强的应用潜力。

(2) 在HJ-1 A/B NDVI时间序列数据集提取抽穗期日期的基础上结合积温模型预报提前10 d预测成熟期,预报误差在3 d左右,同时30 m尺度能

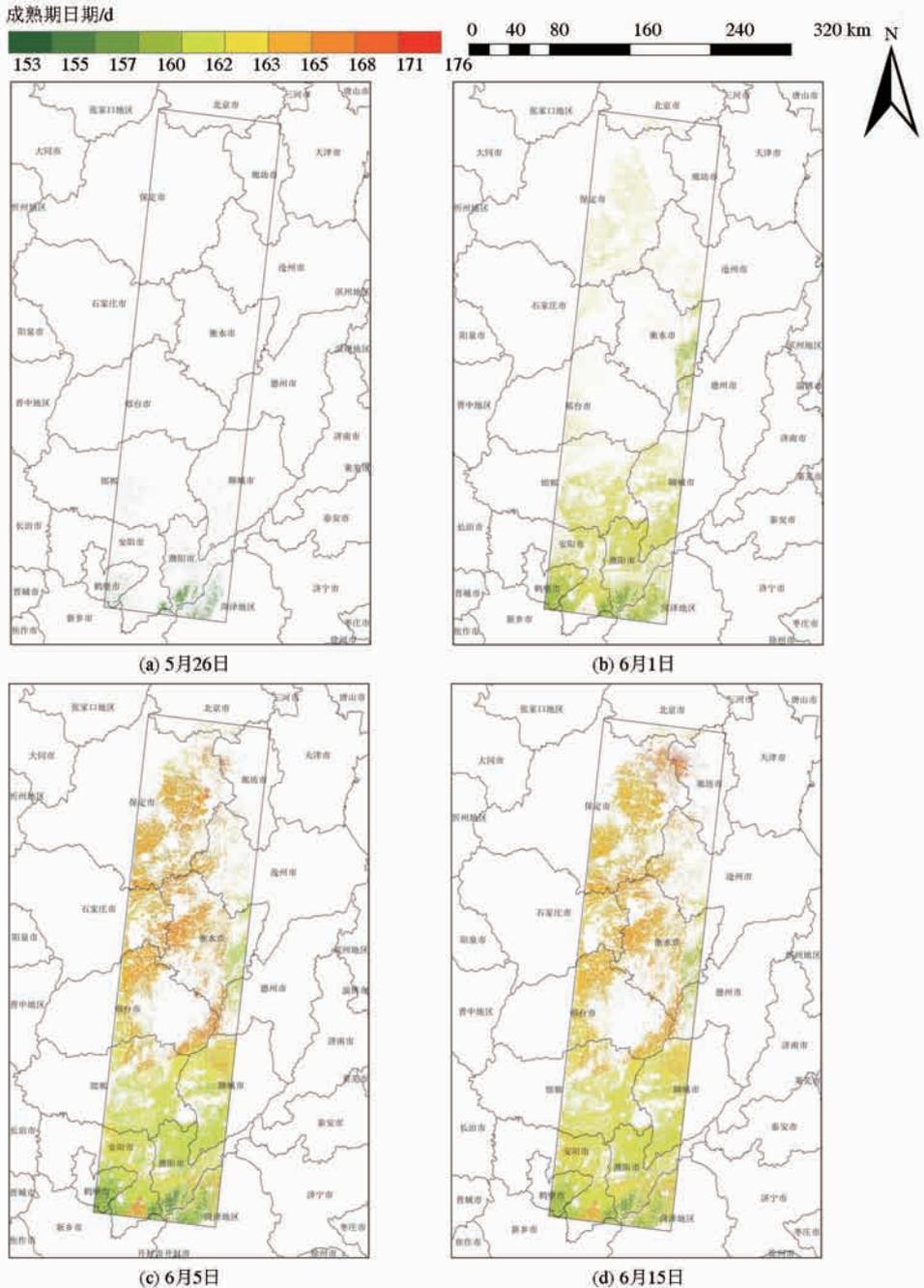


图 4 冬小麦成熟期动态预测结果

Fig. 4 Dynamic prediction results of maturity date of winter wheat

充分体现不同地块之间的成熟期差异,为区域的成熟期预报提供了有效的技术途径。同时,在 30 m 分辨率的成熟期预报结果上,叠加农机分布和道路、居民地等基础地理信息,可为农机调度和收割顺序优化提供基础数据。

(3)以有效积温作为冬小麦成熟期预报判别的主要因素,未充分考虑品种和养分条件的差异,因此

今后应引入多因子对冬小麦成熟期的影响。此外预报数据的预报时效越长,离当前日期越远的气温数据预报值与真实值的偏差越大,在该研究区气温预测值通常偏低,导致成熟期预测误差加大;其次预报数据的纬度网格单元大小为 0.5° ,空间分辨率较低,因此,随着数值天气预报数据空间分辨率的提高,有望进一步提高区域农作物成熟期的预报精度。

参 考 文 献

- 1 张明伟. 基于 MODIS 数据的作物物候期监测及作物类型识别模式研究[D]. 武汉:华中农业大学,2006.
ZHANG Mingwei. Study on the method of crop phenology detection and crop types discrimination based on MODIS data[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 2 蒙继华,吴炳方. 基于卫星遥感预测作物成熟期的可行性分析[J]. 遥感技术与应用,2013,28(2):165-173.

- MENG Jihua, WU Bingfang. The feasibility analysis on satellite data based crop mature date prediction [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(2): 165–173. (in Chinese)
- 3 徐晶晶,黎泉,李刚华,等. 江苏水稻安全成熟期的时空演变研究[J]. *南京农业大学学报*, 2013, 36(4): 1–6.
XU Jingjing, LI Quan, LI Ganghua, et al. The study of spatial and temporal characteristics of safe maturity dates of rice in Jiangsu Province [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, 36(4): 1–6. (in Chinese)
- 4 龚金龙,邢志鹏,胡雅杰,等. 江淮下游籼粳超级稻生育期与温光资源利用特征的差异研究[J]. *中国水稻科学*, 2014, 28(3): 267–276.
GONG Jinlong, XING Zhipeng, HU Yajie, et al. Difference in growth duration and utilization of temperature and solar radiation between indica and japonica super rice in the lower Yangtze and Huaihe River valley [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(3): 267–276. (in Chinese)
- 5 吉奇. 利用模糊数学方法预测秋白菜适宜收获期[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(18): 9387–9388.
JI Qi. Prediction of suitable harvest period of autumn cabbage using fuzzy mathematic method [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(18): 9387–9388. (in Chinese)
- 6 黄健熙,李昕璐,刘帝佑,等. 顺序同化不同时空分辨率 LAI 的冬小麦估产对比研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 240–248.
HUANG Jianxi, LI Xilu, LIU Diyou, et al. Comparison of winter wheat yield estimation by sequential assimilation of different spatio-temporal resolution remotely sensed LAI datasets [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1): 240–248. (in Chinese)
- 7 HUANG Jianxi, TIAN Liyan, LIANG Shunlin, et al. Improving winter wheat yield estimation by assimilation of the leaf area index from Landsat TM and MODIS data into the WOFOST model [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 204: 106–121.
- 8 马玉平,王石立,张黎,等. 基于遥感信息的作物模型重新初始化/参数化方法研究初探[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 918–926.
MA Yuping, WANG Shili, ZHANG Li, et al. A preliminary study on the re-initialization/re-parameterization of a crop model based on remote sensing data [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(6): 918–926. (in Chinese)
- 9 黄健熙,罗倩,刘晓暄,等. 基于时间序列 MODIS NDVI 的冬小麦产量预测方法[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 295–301.
HUANG Jianxi, LUO Qian, LIU Xiaoxuan, et al. Winter wheat yield forecasting based on time series of MODIS NDVI [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 295–301. (in Chinese)
- 10 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.
SI Wencai, LIU Junming. Studies on remote sensing monitoring method for spatial distribution of winter wheat critical phenology [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(6): 82–89. (in Chinese)
- 11 杨浩,黄文江,王纪华,等. 基于 HJ-1 A/1B CCD 时间序列影像的水稻生育期监测[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 219–224.
YANG Hao, HUANG Wenjiang, WANG Jihua, et al. Monitoring rice growth stages based on time series HJ-1 A/1B CCD images [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(4): 219–224. (in Chinese)
- 12 王堃,顾晓鹤,程耀东,等. 基于变化向量分析的玉米收获期遥感监测[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 180–186.
WANG Kun, GU Xiaohu, CHENG Yaodong, et al. Remote sensor monitoring for harvest time of summer maize based on change vector analysis [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 180–186. (in Chinese)
- 13 SAKAMOTO T, YOKOZAWA M, TORITANI H, et al. A crop phenology detection method using time-series MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96(3–4): 366–374.
- 14 陈维君. 水稻成熟度和收获时期的高光谱监测[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
CHEN Weijun. Rice maturation and harvest time monitoring by hyperspectral reflectance [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- 15 黄健熙,牛文豪,马鸿元,等. 卫星遥感和积温-辐射模型预测区域冬小麦成熟期[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7): 152–157.
HUANG Jianxi, NIU Wenhao, MA Hongyuan, et al. Prediction of maturity stage for winter wheat using remote sensing and effective accumulated temperature-solar radiation model [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(7): 152–157. (in Chinese)
- 16 WANG J, HUANG J F, WANG X Z, et al. Estimation of rice phenology date using integrated HJ-1 CCD and Landsat-8 OLI vegetation indices time-series images [J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2015, 16(10): 832–844.
- 17 蒙继华,吴炳方,杜鑫,等. 基于 HJ-1 A/1B 数据的冬小麦成熟期遥感预测[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 225–230.
MENG Jihua, WU Bingfang, DU Xin, et al. Predicting mature date of winter wheat with HJ-1 A/1B data [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 225–230. (in Chinese)
- 18 ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts [J]. *Nasa Special Publication*, 1974, 351: 309.
- 19 SAVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures [J]. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8): 1627–1639.
- 20 CHEN J, JÖNSSON P, TAMURA M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3–4): 332–344.