

基于积温-辐射与 LAI 积分面积模型的玉米成熟期预测

黄健熙^{1,2} 王佳丽¹ 黄然¹ 黄海¹ 苏伟^{1,2} 朱德海^{1,2}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 2. 农业农村部农业灾害遥感重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为预测区域尺度的玉米成熟期,以4 d的MODIS叶面积指数产品(LAI)为数据源,选择黑龙江省、吉林省和辽宁省3省玉米为研究对象,结合农业气象资料 and 全球多模式集合预报资料(THOPREX interactive grand global ensemble, TIGGE),采用积温-辐射和LAI曲线积分面积两种模型,提前10 d对东北地区玉米成熟期进行逐日动态预测。结果表明,LAI曲线积分面积模型的预测结果在时效和精度上均为最优,该模型决定系数 R^2 达到0.87,均方根误差(RMSE)为2.5 d,并且有效地克服了当前成熟期预测方法空间分辨率低和预测时效性差等局限性。LAI曲线积分面积模型适用于大面积农作物成熟期预测。

关键词: 玉米; 积温-辐射模型; LAI曲线积分面积模型; 成熟期预测; 全球多模式集合预报

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0133-11

Forecasting of Regional Maize Maturity Using Accumulated Temperature – Solar Radiation Model and Leaf Area Index Integral Area Model

HUANG Jianxi^{1,2} WANG Jiali¹ HUANG Ran¹ HUANG Hai¹ SU Wei^{1,2} ZHU Dehai^{1,2}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Disaster Remote Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: Accurate prediction of maize maturity is of great significance for efficient harvesting and agricultural machinery dispatch management. In order to predict the maturity of maize at the regional scale in advance, the 4-day MODIS leaf area index (LAI) product was used as the data source, selecting the corn in Heilongjiang, Jilin and Liaoning Provinces as the research object, combined with agricultural meteorological data and global multi-model ensemble forecast data. The dynamic prediction of maize maturity in Northeast China was carried out ten days in advance by using the accumulated temperature – solar radiation model and the LAI curve integral area model. The research showed that the prediction results of the integral area model of LAI curve were optimal in terms of time efficiency and precision. The coefficient of determination (R^2) of the LAI curve integral area model was 0.87, the root mean square error (RMSE) was 2.5 d, and it was effectively better than that of the accumulated temperature – solar radiation model. The current maturity prediction method had limitations such as low spatial resolution and poor prediction timeliness. It showed that the LAI curve integral area model method had applicability in the prediction of large-area crop maturity.

Key words: maize; accumulated temperature – solar radiation model; LAI curve integral area model; maturity prediction; THOPREX interactive grand global ensemble

0 引言

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^[1],即通过地面定点观测作物的生长状况来预判成熟,但由于区域局限性强,需要消耗大量的时间、人力和物力,难以进行大尺度作物成熟情况

的时空分析^[2]。UMBER等^[3]从气温等作物成熟期影响因素出发,对香蕉的成熟期进行预测,研究证实了有效积温在作物成熟期预测中的决定性作用,文中还提出进行香蕉成熟期预测的有效总积温的计算方法。PERRY等^[4]通过分析苹果生育期内热量累积与对应成熟期的相关关系,建立成熟期预测模型,

收稿日期: 2019-04-23 修回日期: 2019-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671418, 41471342, 41371326)

作者简介: 黄健熙(1976—),男,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

并将该预测模型运用到当前年份该地区香蕉成熟期预测中,该模型的平均误差在 8.25 d 以内,精度可达 1 d。FRIS 等^[5]选取气温与土壤温度为预测变量,分阶段进行回归分析,最终构建豌豆的成熟期预测模型,实现了对豌豆的成熟期预测。近年来,国内外学者研究出一些作物成熟期预测的方法与模型:如应用气象统计模型研究温度、光周期、降水等因子对作物的影响,实现作物成熟期的预测,该模型虽简单易用、驱动参数少,但代表性不强,区域推广较难^[6-8];基于作物生长模型可以从作物生长机理出发,描述作物生长发育与产量形成的过程,并以作物产量或品质(或两者综合)为目标构建代价函数,反向求解优化作物的收获时间,实现作物成熟期的预测,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^[6-7];基于遥感获取作物成熟期的信息,是遥感在精准农业中的一个重要应用,但单纯的遥感方法对遥感数据的时间和空间分辨率都有严格要求,受到云和卫星轨道的影响,获取大区域作物关键生育期所需的中等分辨率遥感数据难以在数据质量上满足要求^[7]。

虽然气象统计模型^[6-9]、作物生长模型^[10]与遥感监测^[11-16]这 3 种方式都存在一定弊端,但是如果进行有机结合,利用遥感获取的物候判定值^[17]和作物生长模型的驱动方法,基于现实状况与作物生长趋势实现成熟期预测,这样既能够在空间区域上进行推广^[18],又能简化驱动模型,将集合预报数据引入玉米成熟期预报,能够有效地解决目前时效性差、缺乏空间分布以及缺少定量描述等瓶颈问题^[19]。

本研究选择东北地区玉米主产区,综合运用遥感数据、气象数据和气象集合预报数据,设计出两种不同的驱动模型,第 1 种为积温-辐射模型,主要选择有效积温和太阳辐射作为玉米成熟期预报的主要判别因素,在预报起始点之后逐日更新各像元气象数据和气象预报数据,提前 10 d 对研究区玉米成熟期进行动态预测,当各像元内玉米从抽雄期开始,有效积温和太阳辐射满足积温-辐射模型要求时,则判定玉米达到了成熟条件^[6-7];第 2 种为 LAI 积分面积模型,主要选择乳熟期至当前预测日期生育阶段内 LAI 积分面积占抽雄至当前日期 LAI 积分总面积百分比作为玉米成熟期预报的主要判别因素,并引进改进的冠层结构动力学模型(CSDM)来模拟预测年份 LAI 的时间轨迹,该模型融合了一些作物生长发育的生长与衰老因子,并通过计算积分面积百分比的方式消除部分地区之间温度、水分、光照、土壤条件和矿质营养之间的差距,是一种基于作物生长

和衰老规律建立的关于积分面积比值的动态预测模型。本研究采用上述两种模型对区域玉米成熟期进行预测,并进行对比分析。

1 研究区域概况与数据

1.1 研究区域概况

本文选取黑龙江省、吉林省、辽宁省为研究区,地理范围为 38°17'~53°23'N,118°44'~135°10'E。研究区玉米种植区域与农业气象站点分布如图 1 所示。其中玉米种植区采用本课题组已有分类结果^[20]。

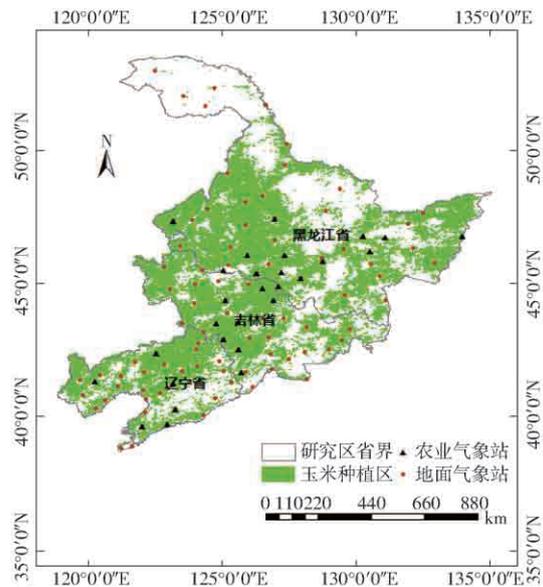


图 1 研究区玉米种植区域和农业气象站分布

Fig. 1 Distribution of corn planting area and agricultural meteorological stations in study area

研究区玉米播种时间在 4 月 20 日—5 月 10 日之间,成熟期在 9 月 10 日—10 月 15 日之间。研究区玉米播种期与当年气象情况相关性极高,由于辽宁省在 3 省中热量条件相对充足,4 月中上旬即可播种,之后逐渐向北,吉林省和黑龙江省于 5 月 1 日左右进入播种高峰期,个别低洼地块 5 月 15—20 日播种。

1.2 数据源及预处理

1.2.1 MODIS 数据

农作物长势和物候的监测需要较高的时间和空间分辨率,因此本文选择时间分辨率为 4 d、空间分辨率为 500 m 的 MCD15A3H 产品,该产品包括 LAI 和光合有效辐射(Fraction of photosynthetically active radiation, FPAR)数据,本文主要使用该产品中的 LAI 数据。由于搭载 MODIS 的 TERRA 和 AQUA 卫星每天过境两次,能提供逐日的 LAI 数据,为了提高 LAI/FPAR 数据精度,MCD15A3H 产品数据在每 4 d 内选择一次“最佳”像素合成,使用 Sinusoidal 投影,

文件格式为 HDF - EOS。

获取研究区域 2012—2015 年的 MCD15A3H 产品 (轨道号分别为 h25v03、h26v03、h26v04、h27v04、h27v05), 每年共 48 个时相的 LAI 影像。利用 MRT (MODIS Reprojection Tool) 对 MODIS LAI 影像进行镶嵌、投影转换等预处理, 统一输出为 Albers 等积投影的 LAI 数据, 其中, 第 1、2 纬线和中央经线分别采用 27、45、105 等参数。利用研究区域矢量边界对投影后的 LAI 数据进行裁剪, 构建研究区域 2012—2015 年每一像素的 LAI 时间序列。

1.2.2 农业气象资料和地面气象数据

农业气象资料主要记录研究区内各个站点的经纬度和高度信息、区站号、作物名、生育期名称及其具体日期。本研究统计分析 2012—2014 年的玉米生育期数据, 获取玉米在抽雄期、乳熟期和成熟期的具体日期, 并将其转换为年积日, 为接下来的玉米成熟期预测提供数据基础。

地面气象数据中主要记录站点信息和气象要素信息, 本研究中主要使用日平均气温和日照时数两个气象要素。地面气象数据从中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/site/index.html>) 下载, 由于本研究使用的地面气象数据和农业气象资料中的地面气象站点与农业气象站点之间空间坐标不重合, 造成两套数据之间不匹配, 需要将地面气象数据中的气象要素经过空间插值得到农业气象站点尺度上相应的平均气温和太阳辐射数据, 本研究中采用的空间插值方法为 ArcGIS 中的反距离权重插值法 (IDW)。利用空间插值法所得到的地面气象栅格数据, 可计算预测年份中各玉米像元对应的逐日积温和太阳总辐射。

1.2.3 数值天气预报

数值天气预报 (Numerical weather prediction) 又被称为天气数值预测或数值预报, 是利用当前天气状况作为输入数据从而得到未来几天内天气状况的手段^[21-22]。集合天气预报结合改进的平均值预报方法, 协调集合预报离散度与控制预报方法, 可方便地确定天气事件发生概率, 并提高对极端天气事件的预报能力。现阶段世界各国均已广泛开展, 逐渐集成包含多国数值天气预报在内的 TIGGE 资料, 其中数据来源主要包括欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)、加拿大气象中心 (CMC)、中国气象局 (CMA) 等提供的集合预报数据^[23-25]。

为构建卫星遥感与数值天气预报结合的玉米成熟期预测模型, 本研究使用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的气象预报数据, 获得研究区数值天气预报的 GRIB 格式的初始数据, 将其重采样为空间

分辨率为 500 m 的栅格数据, 使之与 MODIS LAI 数据及空间插值后的地面气象要素数据在空间分辨率上相匹配, 以便建立有效积温和太阳总辐射的逐日成熟期预测模型。目前该数据预报时效最长为 16 d, 经验证预报数据日平均气温误差小于 3℃, 日照时数误差在 0.8 h 以内, 满足精度要求。该数据均可从欧洲中期天气预报中心网站 (<https://apps.ecmwf.int>) 下载。

2 研究方法

2.1 积温-辐射模型

积温-辐射模型以农业气象资料为基础数据, 分别获得 2012—2014 年 3 年的抽雄期到成熟期平均积温分布和太阳总辐射分布, 并以其结果作为判别研究区内玉米成熟的阈值^[9], 最后, 在预测年份采用农业气象资料和基于 TIGGE 的气象集合预报数据进行玉米成熟期的动态预测^[9-10]。

2.1.1 有效积温模型的构建

有效积温 (T) 是对作物生长发育起作用的部分温度 (本研究区玉米发育温度阈值为 10℃) 的总和, 表示作物生长发育过程中累积的热量, 它直接决定了作物的生长速度和物候期形成, 是衡量热量条件对作物生长发育影响的重要标尺。具体计算公式如下

$$T = \sum_{i=1}^m (T_i - T_0) \quad (1)$$

式中 T_i ——日平均温度, ℃

T_0 ——玉米生长发育的基础温度, 本文取 10℃

m ——抽雄到成熟期的时间, d

有效积温模型的要求为当抽雄期至当前预测日期的有效积温达到过去 3 年的平均有效积温时, 则判定该像元玉米达到成熟期所需的积温条件。

从遥感提取的抽雄期开始, 将每个像元气象数据中的有效日平均气温 (高于玉米生长发育温度阈值部分) 进行累加, 计算各像元有效积温; 预测点之后的有效日平均气温用气象集合预报数据中的气温预报值代替, 得到抽雄期至当前预测日期内研究区内各像元有效积温分布, 然后用有效积温模型对其进行逐像元判定。

2.1.2 太阳辐射模型的构建

太阳辐射总量指太阳辐射到达地面的有效总量, 本研究采用联合国粮农组织 (FAO) 给出的计算公式将地面气象站点观测的日照时数转换为太阳辐射总量。具体计算公式为

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (2)$$

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin f \sin \delta + \cos f \cos \delta \sin \omega_s) \quad (3)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan f \tan \delta) \quad (4)$$

式中 R_s ——太阳辐射总量, MJ/($m^2 \cdot d$)
 n ——实际日照时数, h
 N ——最大天文日照时数, h
 a_s 、 b_s ——经验常数, 分别取 0.25 和 0.5
 R_a ——碧空太阳总辐射, MJ/($m^2 \cdot d$)
 G_{sc} ——太阳常数, 0.082 0 MJ/($m^2 \cdot min$)
 d_r ——日-地相对距离
 f ——纬度, rad
 ω_s ——太阳时角, rad
 δ ——太阳赤纬, rad

太阳辐射模型的要求为当抽雄期至当前预测日期的太阳辐射总量达到过去 3 年的平均太阳辐射量时, 则判定该像元玉米达到成熟期所需的辐射条件。

每个像元从遥感提取的抽雄期日期开始, 将该像元气象数据中的日照时数转换为获得的太阳辐射, 并进行累加, 计算各像元太阳辐射总量; 预测点之后的太阳辐射用气象集合预报数据中的日照时数转换值代替, 得到抽雄期至当前预测日期内研究区内各像元太阳辐射分布, 然后用太阳辐射模型对其进行逐像元判定^[9-10]。

综上所述, 积温-辐射模型就是以农业气象资料为基础数据, 分别获得 2012—2014 年抽雄期到成熟期平均积温分布和太阳总辐射分布, 并以其结果作为判别研究区内玉米成熟的阈值, 最后, 在预测年份采用农业气象资料和基于 TIGGE 的气象集合预报数据进行玉米成熟期的动态预测, 当有效积温和太阳总辐射二者均满足积温-辐射模型的要求时则判定该像元玉米达到成熟条件, 按照以上方法可得到研究区内所有像元的成熟期预测值。积温-辐射模型构建流程图如图 2 所示。

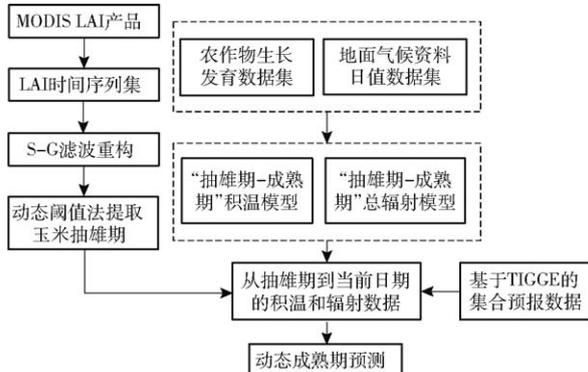


图 2 积温-辐射模型构建流程图

Fig. 2 Flow chart of construction of accumulated temperature - radiation model

2.2 LAI 曲线积分面积模型

以 S-G 滤波后的 MODIS LAI 时间序列曲线为基础, 结合农业气象资料获得 2012—2014 年研究区玉米生育期数据, 计算乳熟期至成熟期的积分面积占抽雄期至成熟期的积分总面积的百分比均值 R_{ave} 作为研究区玉米的成熟阈值, 计算公式如下

$$R_{ave} = \frac{\int_{S_a}^{S_b} LAI}{\int_{S_0}^{S_b} LAI} \times 100\% \quad (5)$$

式中 S_0 ——玉米抽雄期日期
 S_a ——玉米乳熟期日期
 S_b ——玉米成熟期日期
 LAI ——叶面积指数

预测年份 R_{pre} 的计算公式如下

$$R_{pre} = \frac{\int_{S_a}^{S_c} LAI}{\int_{S_0}^{S_c} LAI} \times 100\% \quad (6)$$

式中 R_{pre} ——当前年份研究区玉米乳熟期至当前预测日期生育阶段内积分面积占抽雄期至当前日期积分总面积百分比
 S_c ——当前预测日期

在预报区内逐日以 LAI 曲线计算 R_{pre} , 当 $R_{pre} \geq R_{ave}$ 时, 即认为该像元玉米达到成熟条件, 对应的日期即为玉米成熟期。

在计算预测年份 R_{pre} 之前, 需要对预测年份 LAI 曲线进行模拟, 本研究在提取研究区玉米抽雄期之后, 结合气象观测数据和气象集合预报数据得到各生育期内有效积温, 通过拟合改进的冠层结构动力学模型(CSDM)来模拟 LAI 的时间轨迹, 并以此曲线作为预测年份的 LAI 曲线, 进而计算预测年份 R_{pre} 。LAI 曲线拟合模型为

$$LAI(T) = \frac{A}{1 + \exp(-k(T - J))} \quad (7)$$

式中 A ——LAI 的最大值
 J ——LAI 曲线下部分拐点位置的有效积温
 k ——相对衰老率

综上所述, LAI 曲线积分面积模型就是以 S-G 滤波后的 MODIS LAI 时间序列曲线和农业气象资料为基础数据, 获得 2012—2014 年 3 年平均的 R_{ave} , 并以其结果作为判别研究区内玉米成熟的阈值。最后, 在预测年份采用 CSDM 模型拟合的 LAI 曲线、农业气象资料, 并结合基于 TIGGE 的气象集合预报数据进行玉米成熟期的动态预测, LAI 曲线积分面积模型构建流程图如图 3 所示。

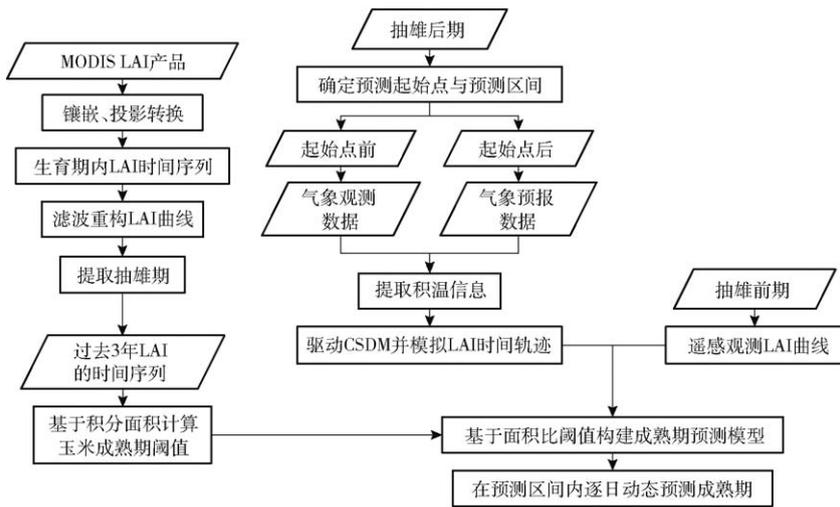


图 3 LAI 曲线积分面积模型构建流程图

Fig. 3 Flow chart of construction of LAI curve integral area model

3 结果与分析

3.1 积温-辐射模型对玉米成熟期的预测

采用积温-辐射模型,以农业气象资料和 S-G 滤波后的 MODIS LAI 时间序列曲线为数据源,分别获得研究区内 2012—2014 年 3 年的抽雄期到成熟期平均积温分布和太阳总辐射分布,并以其结果作为判别研究区内玉米成熟的阈值,最后,在预测年份采用农业气象资料和基于 TIGGE 的气象集合预报数据进行玉米成熟期的动态预测。从整体区域上来看(图 4),随着纬度的升高玉米成熟期逐渐推迟,一般最先抽雄的区域对应着最先成熟的区域,如辽宁省灯塔、朝阳、岫岩、瓦房店等地,在 9 月上旬左右开始成熟,最晚的地区包括黑龙江省和吉林省的海伦、桦南、双阳、辽源等地,在 10 月中旬成熟,因纬度及当地特定的自然条件,可使最早成熟区域与最晚成熟区域成熟日期相差一个月左右。

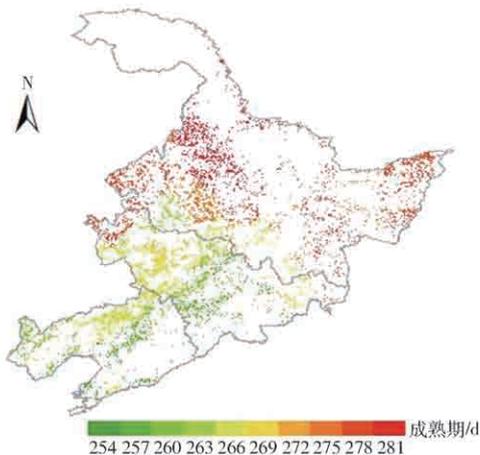


图 4 积温-辐射模型预测的玉米成熟期分布图

Fig. 4 Distribution map of maize maturity stage predicted by accumulated temperature - radiation model

3.2 LAI 曲线积分面积模型对玉米成熟期的预测

在构建 CSDM 模型时, LAI 最大值 A 已由动态阈值法提取出, J 和 k 由过去 3 年 S-G 滤波后的 MODIS LAI 时间序列曲线求平均值得出, 预测年份内的逐日有效积温 T 由两部分构成, 在预测点之前使用预测年份的农业气象资料所记录的日平均气温, 在预测点之后使用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的逐日集合预报资料, 二者结合用以计算预测年份 R_{pre} , 用 2012—2014 年 3 年平均的 R_{ave} 对 R_{pre} 进行判定, 得到成熟期预测结果如图 5 所示。

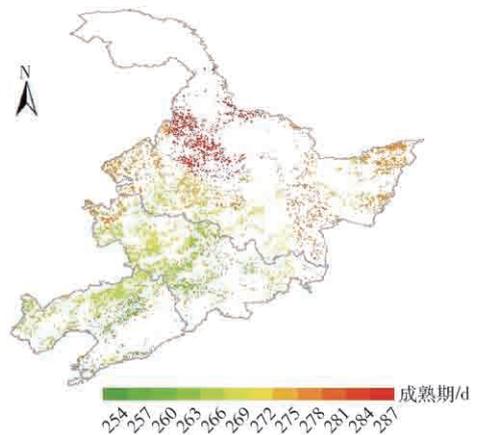


图 5 LAI 曲线积分面积模型预测的玉米成熟期分布图

Fig. 5 Distribution map of maize maturity stage predicted by LAI curve integral area model

本方法结合气象观测数据和气象集合预报数据得到各生育期内有效积温, 通过拟合改进的冠层结构动力学模型 (CSDM) 来模拟预测年份 LAI 的时间轨迹, 并以此曲线作为预测年份的 LAI 曲线, 进而计算预测年份 R_{pre} , 为成熟期预测工作提供了基础。

选择龙江、海伦、农安、辽源、朝阳、庄河 6 个农业气象站点, 提取其通过改进的冠层结构动力学模型 (CSDM) 所拟合的预测年份 LAI 的时间轨迹, 结

合 LAI 曲线积分模型预测玉米成熟期日期,对比 S-G 滤波后的 MODIS LAI 曲线和模拟的 LAI 曲线,结果如图 6 所示。图中龙江、海伦两个站点的模拟 LAI 曲线与 S-G 滤波后的 MODIS LAI 曲线在下降部分拐点位置相交,相交点之前模拟 LAI 值大于 S-G 滤波后的 MODIS LAI 值,相交点之后模拟 LAI 值小于 S-G 滤波后的 MODIS LAI 值,此规律在一定程度上造成相对衰老率 k 偏高,导致龙江、海伦两个站点的成熟期预测值提前。如图 7 中,农安和辽源两个站点出现抽雄-成熟期全阶段性的模拟 LAI 值大于 S-G 滤波后的 MODIS LAI 值或模拟 LAI 值小于 S-G 滤波后的 MODIS LAI 值的现象,在一定程度上修正了 S-G 滤波后的 MODIS LAI 曲线拐点位置不明确造成的成熟期预测误差,农安和辽源两个站点的成熟期预测值与农业气象资料记录的观测值偏差较小,均在 1 d 之内。如图 8 中,朝阳、庄河两个站点自抽雄期开始模拟 LAI 值大于 S-G 滤波后的 MODIS LAI 值,趋势稳定,曲线斜率变化相对缓慢,此规律在一定程度上造成相对衰老率 k 偏低,导致朝阳、庄河两个站点的成熟期预测值滞后。

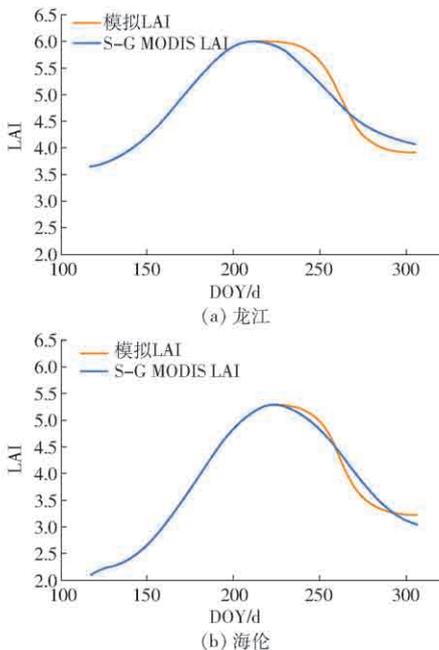


图 6 成熟期预测值提前示例

Fig. 6 Ahead-of-time example of maturity stage forecast

3.3 结果分析

本文所采用的积温-辐射模型对区域玉米成熟期预测的方法和基于时间序列 LAI 曲线积分面积的区域玉米成熟期预测方法,均考虑遥感和农业气象资料两种数据分别在时间和空间上的优势,同时充分利用气象集合预报数据的预测性能,利用遥感获取的作物生育期时间序列曲线与物候判定值,参考农业气象站点记录的物候信息,再结合气象集合预

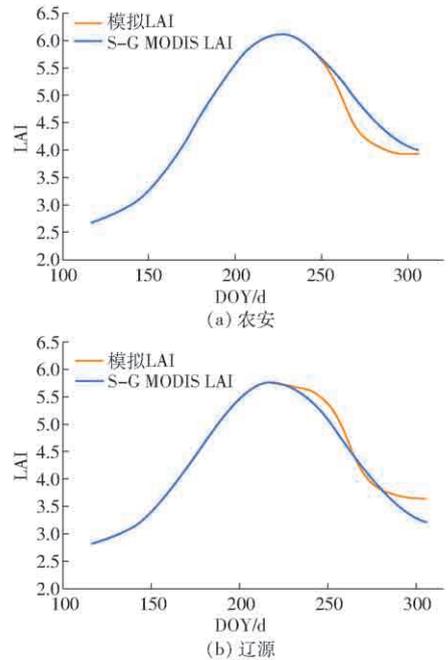


图 7 成熟期预测值准确示例

Fig. 7 On-time example of maturity stage forecast

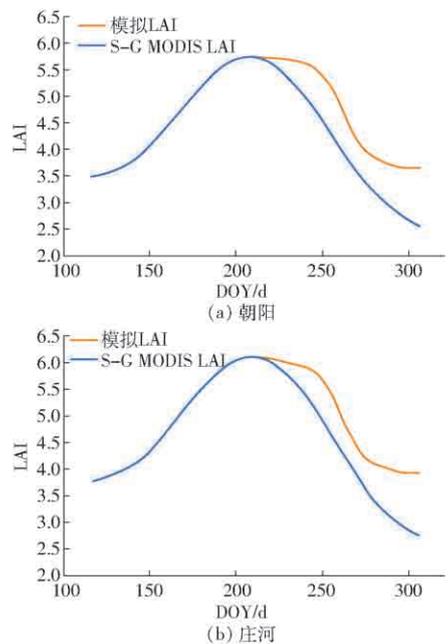


图 8 成熟期预测值滞后示例

Fig. 8 Behind-of-time example of maturity stage forecast

报数据将其温度信息融入遥感生成的时间序列曲线中,最终通过两种不同的预测模型来预测同一年份同一地区的玉米成熟期。

积温-辐射模型主要选择有效积温和太阳辐射作为玉米成熟期预报的主要判别因素,尚未充分考虑品种、水分、养分等条件的差异。预测结果决定系数 R^2 为 0.77,均方根误差 (RMSE) 为 3.3 d。

LAI 曲线积分面积模型主要选择乳熟期至当前预测日期生育阶段内 LAI 积分面积占抽雄期至当前日期 LAI 积分总面积百分比作为玉米成熟期预报的

主要判别因素,并引进改进的冠层结构动力学模型(CSDM)来模拟预测年份 LAI 的时间轨迹,该模型融合了一些作物生长发育的生长与衰老因子,并通过计算积分面积百分比的方式消除部分地区之间温度、水分、光照、土壤条件和矿质营养之间的差距,是一种基于作物生长和衰老规律建立的关于积分面积比值的动态预测模型。预测结果决定系数 R^2 为 0.87,均方根误差(RMSE)为 2.5 d。

两种模型均存在一定的预测误差的原因在于,MODIS LAI 空间分辨率较低,受混合像元影响较大,加之实验中采用步长为 4 d 的 MODIS LAI 产品数据,会出现 2 d 的误差,即使通过 S-G 滤波和气象集合预报数据将成熟期确定到以天为单位的尺度上,仍会导致成熟期预测出现偏差的现象;其次,虽然农业气象站对作物物候期观测严格按照有关标准规范进行,但因受环境等客观条件的影响,记录的物候资料也会有一定的误差,会对验证结果产生影响。

3.4 精度验证

将两种模型的预测结果作为成熟期预测值,与农业气象站点记录的成熟期观测值进行比较。研究区内共有 28 个农业气象站点,分别为龙江、海伦、肇东、巴彦、佳木斯、桦南、集贤、饶河、肇源、双城、宾县、方正、尚志、五常、农安、榆树、舒兰、公主岭、双阳、辽源、梅河口、通化县、彰武、朝阳、灯塔、岫岩、瓦房店、庄河。两种模型预测的玉米成熟期日期预测值与观测值对比结果如表 1 所示。

为验证两种成熟期预测模型的预测精度并对这两个模型进行对比,本研究选择决定系数 R^2 和均方根误差(RMSE)作为评价指标。其中决定系数 R^2 用来评价成熟期预测值与观测值之间的线性相关程度, RMSE 用来衡量本研究中所构建的模型对研究区内玉米成熟期预测值与相应实地观测值之间的偏差,决定系数 R^2 越高, RMSE 越低,说明模型的成熟期预测值与农业气象资料记录的成熟期观测值之间偏差越小,模型的预测精度越高;反之,模型的预测精度越低。

两种模型的预测结果表明,积温-辐射模型和 LAI 曲线积分面积模型预测研究区玉米成熟期都是可行的。将两种模型的成熟期预测结果分别进行回归分析,积温-辐射模型预测研究区玉米成熟期的回归方程为 $y = 0.8857x + 30.251$, 决定系数 R^2 为 0.77, RMSE 为 3.3 d; LAI 曲线积分面积模型预测研究区玉米成熟期的回归方程为 $y = 0.9562x + 11.635$, 决定系数 R^2 为 0.87, RMSE 为 2.5 d。LAI 曲线积分面积模型整体预测精度高于积温-辐射模型预测精度。

表 1 两种模型对玉米成熟期日期预测值与观测值对比

Tab.1 Comparison of corn maturity date from two prediction models and observational date d

农业气象站名称	成熟期观测值	积温-辐射模型	LAI 曲线模型
		预测成熟期 年积日	预测成熟期 年积日
龙江	267	270	264
海伦	279	275	275
肇东	271	275	270
巴彦	261	258	263
佳木斯	271	275	273
桦南	275	270	273
集贤	272	270	275
饶河	263	267	261
肇源	261	265	264
双城	263	259	262
宾县	263	262	265
方正	257	255	254
尚志	263	265	266
五常	261	265	259
农安	269	265	268
榆树	267	269	268
舒兰	263	261	265
公主岭	265	264	260
双阳	271	275	275
辽源	285	281	285
梅河口	262	260	260
通化县	261	264	264
彰武	266	265	263
朝阳	265	262	267
灯塔	254	257	255
岫岩	256	251	257
瓦房店	261	266	258
庄河	262	260	265
RMSE/d		3.3	2.5
R^2		0.77	0.87

4 讨论

4.1 成熟期影响因素

温度、光照、水分、空气、养分和土壤 6 个因素是影响玉米生长发育的主要环境因素,具有各自独特作用且不可替代,同时它们之间相互作用、互为补偿,具有可调剂性,密不可分,共同影响玉米生育进程。了解并掌握这些环境因素与玉米生育的关系,通过改变环境因素来调控玉米生育进程,从而实现高产、优质和高效的目的。

4.2 模型误差

通过对比本研究所选择的决定系数 R^2 和 RMSE 两个精度验证指标,可计算出 LAI 曲线积分面积模

型的相关系数 R^2 比积温-辐射模型高 0.1, RMSE 比积温-辐射模型低 0.8 d, 在时效和精度上最优。为分析其中原因, 本研究选取 3 km 和 5 km 的验证窗口, 对研究区内各个农业气象站点分别建立半径为 3 km 和 5 km 的缓冲区并统计玉米像元占总像元的百分比 R_m 。综合考虑农业气象站点周围玉米种植区分布以及验证窗口半径等影响成熟期预测的因素, 对两种模型的误差进行进一步的分析。

研究区内 28 个农业气象站点的地理位置及不同验证窗口对应的玉米种植区分布如图 9 所示, 其中每个农业气象站点地理位置图下方左、右两图分别为 3 km 和 5 km 验证窗口内的玉米像元分布。统计结果表明:

(1) 3 km 验证窗口内, $R_m \leq 20\%$ 的农业气象站点为龙江、肇东、佳木斯、集贤、肇源、宾县、五常、农安、公主岭、辽源、通化县、彰武、朝阳、岫岩、瓦房店、庄河 16 个农业气象站点; $20\% < R_m \leq 40\%$ 的农业气象站点为海伦、巴彦、饶河、双城、方正、尚志、灯塔 7 个农气站点; $R_m \geq 40\%$ 的农气站点为桦南、榆树、舒兰、双阳、梅河口 5 个农业气象站点。

(2) 5 km 验证窗口内, $R_m \leq 20\%$ 的农气站点为龙江、佳木斯、集贤、肇源、宾县、辽源、通化县、彰武、朝阳、岫岩、瓦房店 11 个农气站点; $20\% < R_m \leq 40\%$ 的农业气象站点为肇东、五常、农安、公主岭、庄河、海伦、巴彦、饶河、双城、方正、尚志 11 个农业气象站点; $R_m \geq 40\%$ 的农业气象站点为灯塔、桦南、榆树、舒兰、双阳、梅河口 6 个农业气象站点。

如图 9 所示, 桦南、榆树、舒兰、双阳、梅河口、灯塔农业气象站点距离农田较近, 半径为 5 km 的验证窗口内玉米像元占总像元的百分比普遍高于 40%, 在一定程度上减小了混合像元的影响。佳木斯、集贤、肇源、宾县、彰武、瓦房店农业气象站点周围的建筑、其他植被类型比较多, 半径为 5 km 的验证窗口内玉米像元占总像元的百分比普遍低于 20%, 均易产生混合像元的影响, 致使模型预测的成熟期日期与实测成熟期偏差较大。肇东、五常、农安、公主岭、庄河农业气象站点在半径为 3 km 的验证窗口内玉米像元占总像元的百分比低于 20%, 然而在半径为 5 km 的验证窗口内玉米像元占总像元的百分比高于 20%, 说明成熟期预测结果受验证窗口半径的影响, 采用半径为 5 km 的验证窗口更容易获得准确的成熟期预测值。

两种模型对 2015 年研究区玉米成熟期预测值与农业气象资料记录的玉米成熟期观测值之间的误差如表 2 所示, 经统计研究区内 28 个农业气象站点的玉米成熟期误差可得, 积温-辐射模型的误差普遍

大于 LAI 曲线积分面积模型的误差。LAI 曲线积分面积模型比积温-辐射模型在成熟期预报上取得了更高的精度, 该研究表明 LAI 曲线积分面积模型在预测玉米成熟期方面具有较大的应用潜力。本研究使用分辨率 500 m 的 MODIS-LAI 产品空间分辨率较低, 容易受到遥感数据的混合像元效应影响, 现阶段仍然无法消除地块之间的差异, 而且本研究使用的 LAI 时间序列是由步长为 4 d 的 MODIS 数据合成, 即使通过 S-G 滤波和气象集合预报数据将成熟期确定到以天为单位的尺度上, 仍会导致成熟期预测出现偏差的现象。另外, 虽然农业气象站对作物物候期观测严格按照有关标准规范进行, 但因受环境等客观条件的影响, 记录的物候资料也会有一定的误差, 会对验证结果产生影响。

4.3 研究展望

本文提出了基于 LAI 曲线积分面积模型的区域玉米成熟期预测方法, 经验证该模型预测精度优良, 在大区域作物成熟期预测方面具有较高的适用性, 但本研究仍存在一些可进一步改善的地方, 今后将在后续的研究工作中加以完善。

4.3.1 预测模型的选择

本研究介绍的两种模型中, 积温-辐射模型主要选择有效积温和太阳辐射两个判别因素来判定玉米是否达到模型中已设定成熟期的要求, 以气象条件为主, 尚未充分考虑玉米品种分布、水分和土壤养分等条件存在的区域性差异; LAI 曲线积分面积模型中, 选择乳熟期至当前预测日期生育阶段内 LAI 积分面积占抽雄至当前日期 LAI 积分总面积百分比作为玉米成熟期预报的主要判别因素, 并引进改进的冠层结构动力学模型 (CSDM) 来模拟预测年份 LAI 的时间轨迹, 该模型融合了一些作物生长发育的生长与衰老因子, 并通过计算积分面积百分比的方式消除部分地区之间温度、水分、光照、土壤条件和矿物质营养之间的差距, 最终达到了良好的预测精度, 有效地克服了当前成熟期预测在空间分辨率和预测时效性差尚无法满足精准农业要求的局限性, 并引入气象集合预报数据, 充分考虑作物种植区气候变化, 为指导区域作物农机的调度以及防止突发情况做准备, 经验证该方法适合于区域范围作物成熟期预测。但该方法还存在一些缺点, 比如复杂数据来源导致模型输入数据之间尺度难以统一且容易造成误差, 作物生长和衰老规律与成熟期预测模型融合度不够等。今后的研究工作中可以增加成熟期预测模型的复杂度, 引入多重因子对成熟期预测值进行综合判定, 或者参考运用作物生长模型来进行成熟期的预测。

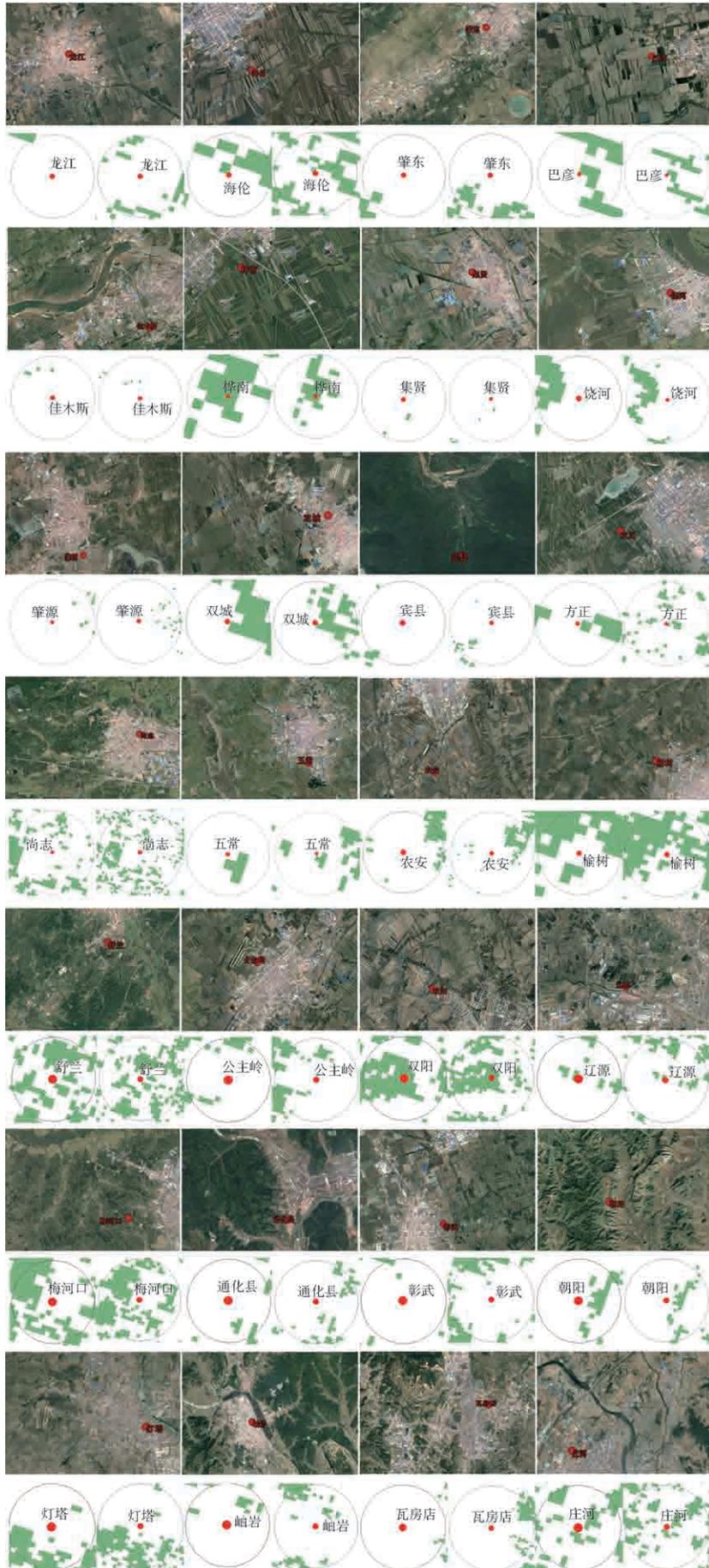


图 9 农业气象站点地理位置与玉米种植区分布

Fig. 9 Distribution map of agro-meteorological stations and corn growing area

表2 成熟期预测误差对比

Tab.2 Comparison of prediction error of maturity date

误差范围/ d	积温-辐射模型		LAI 积分面积模型	
	站点数	站点比例/%	站点数	站点比例/%
0~2	10	36	16	57
2~5	15	54	11	40
≥5	3	10	1	3

4.3.2 遥感数据的选择

MODIS 遥感数据的优势在于能够获取大面积且时间上呈连续分布的影像序列,相比传统预测方法能够实现大区域玉米的成熟期预测;但限于该产品有限的空间分辨率,现阶段仍然无法消除地块间差异。目前,中等空间分辨率数据的日益丰富,特别是 Sentinel-2、Landsat 8 OLI、GF1、GF6,有望实现 10~30 m 空间分辨率的成熟期预测。

4.3.3 气象数据精度有待提高

由于本研究使用的地面气象数据和农业气象资料中的地面气象站点与农业气象站点的空间坐标不重合,造成两套数据之间不相匹配;经过空间插值得到的农业气象站点尺度的平均气温和太阳辐射数据与对应的真实值存在一定的偏差;另外,本研究使用的数值天气预报数据的空间分辨率较低,而且受预报时效影响,气象预报数据与真实值之间也存在一定的偏差,这将导致成熟期预测误差进一步增大,对最终的成熟期动态预测结果造成影响。为此,提高

农业气象资料与气象预报数据的精度是准确预测成熟期的另一个改进方向。

5 结论

(1) 积温-辐射模型和 LAI 曲线积分面积模型均可用于预测玉米成熟期。2 个模型均以研究区内玉米抽雄期初始日期为起始日期,逐日逐像元更新气象数据和气象集合预报数据。积温-辐射模型通过各像元内抽雄期开始的有效积温和太阳总辐射是否满足玉米抽雄-成熟期的有效积温和太阳总辐射模型的要求来判断玉米是否达到成熟条件。LAI 曲线积分面积模型通过拟合改进的冠层结构动力学模型(CSDM)来模拟 LAI 的时间轨迹,并以此曲线作为预测年份的 LAI 曲线。当各像元内玉米乳熟期至当前预测日期 LAI 积分面积占抽雄期至当前预测日期积分总面积百分比达到模型的要求时,则判断玉米达到了成熟条件。以上两个模型均可对研究区玉米成熟期进行逐日动态预测,且预测精度较高。

(2) 利用 LAI 曲线积分面积模型预测玉米成熟期的精度优于积温-辐射模型。将 LAI 曲线积分面积模型和积温-辐射模型的玉米成熟期预测结果分别与农业气象资料记录的成熟期观测值进行回归分析,其 R^2 分别为 0.87 和 0.77, RMSE 分别为 2.5 d 和 3.3 d。

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] UMBER M, PAGET B, HUBERT O. Application of thermal sums concept to estimate the time to harvest new banana hybrids for export[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 129(1): 52-57.
- [4] PERRY K B, BLANKENSHIP S M, UNRATH C R. Predicting harvest date of 'Delicious' and 'Golden Delicious' apples predicting harvest date of 'Delicious' and 'Golden Delicious' apples using heat unit accumulations[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1987, 39(1): 81-88.
- [5] FRIIS E, JENSEN J, MIKKELSEN S A. Predicting the date of harvest of vining peas by means of air and soil temperature sums and node countings[J]. Field Crops Research, 1987, 16(1): 33-42.
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 295-301. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160239&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.039. (in Chinese)

- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 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 Xiaohuo, 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)
- [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] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS[R]. Nasa Special Publication, 1974:351-309.
- [19] 黄健熙,牛文豪,马鸿元,等. 基于时间序列 HJ-1 A/B 卫星数据的冬小麦成熟期预测[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):278-284.
HUANG Jianxi, NIU Wenhao, MA Hongyuan, et al. Prediction of maturity data for winter wheat based on time series of HJ-1 A/B CCD images[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):278-284. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161138&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.038. (in Chinese)
- [20] 黄健熙,侯喬焯,苏伟,等. 基于 GF-1 WFV 数据的玉米与大豆种植面积提取方法[J]. 农业工程学报,2017,33(7):164-170.
HUANG Jianxi, HOU Yuzhuo, SU Wei, et al. Mapping corn and soybean cropped area with GF-1 WFV data[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7):164-170. (in Chinese)
- [21] 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/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):240-248.
HUANG Jianxi, LI Xinlu, LIU Diyou, et al. Comparison of winter wheat yield estimation by sequential assimilation of different spatio-temporal resolution remotely sensed LAI datasets [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):240-248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150134&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.034. (in Chinese)
- [22] 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.
- [23] 毕潇潇. 基于 TIGGE 资料的集合预报应用研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2013.
- [24] 金荣花,马杰,宝宝贵. 10~30 d 延伸期预报研究进展和业务现状[J]. 沙漠与绿洲气象,2010,4(2):1-5.
- [25] 麻巨慧,朱跃建,王盘兴,等. NCEP/ECMWF 及 CMC 全球集合预报业务系统发展综述[J]. 大气科学学报,2011,34(3):370-380.