

引文格式:张源,张素梅,李慧娟. 基于LAI时间序列的华北平原农作物物候期时空格局研究[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(3): 670-682.

ZHANG Yuan, ZHANG Sumei, LI Huijuan. Spatiotemporal patterns of crop phenology based on lai time series in the North China Plain[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(3): 670-682.

基于LAI时间序列的华北平原农作物 物候期时空格局研究

张 源, 张素梅, 李慧娟

(太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原)

摘 要:【目的】农作物物候是农作物为适应周围变化而形成的一种生长发育规律,利用遥感手段对其进行长时间序列的监测,获取华北平原耕地农作物种植制度和关键物候期的空间分布情况及变化特征,对于更好地理解模拟农业生态系统的变化特征具有重要意义。【方法】基于2001—2021年的Global LAnd Surface Satellite(GLASS)叶面指数(LAI)时间序列产品数据,首先采用Savitzky-Golay(S-G)滤波法对LAI数据进行重构,依据重构的LAI数据采用二次差分法对耕种制度进行判别,然后将提取的物候数据掩膜,分别得到一年一熟制和一年两熟制地区农作物物候参数,最后对其时空分布特征进行分析。【结果】结果表明,2001—2021年研究区以一年两熟制耕种制度为主,具有纬度越低种植制度越复杂的空间分布特征。研究区北部农作物以一年一熟制为主,南部以一年两熟制为主,中部为一年一熟制和一年两熟制的混合区。从时间维度来看,21年间北部地区农作物关键物候期变化不大,中部和南部以一年两熟制为主的地区变化较大。从空间分布特征来看,一年一熟制地区农作物出苗期从北向南逐渐推迟,抽穗期呈现出中部地区较迟、北部和南部地区较早的趋势,成熟期呈现从北向南逐渐提前趋势,差异约在10~30天。一年两熟制地区农作物关键物候期空间分布特征大都呈现出南部早、北部迟,西南部早、东南部迟的趋势,差异约在10~40天。研究区内农作物关键物候期时空分布变化特征受到纬度、气候、种植制度及自然资源等因素的共同影响。

关键词:华北平原;农作物物候期;种植制度;Global LAnd Surface Satellite Leaf area index (GLASS LAI)数据

中图分类号:P37;X87 文献标识码:A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240412

文章编号:1007-9432(2026)03-0670-13

Spatiotemporal Patterns of Crop Phenology Based on LAI Time Series in the North China Plain

ZHANG Yuan, ZHANG Sumei, LI Huijuan

(College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract: 【Purposes】Crop phenology is a kind of growth and development law formed by crops to adapt to changes around them. With remote sensing methods to monitor crop phenology for a long time series, the spatial distribution and variation characteristics of crop planting system and key phenological periods in cultivated land in the North China Plain can be obtained, which is of great signifi-

收稿日期:2024-05-25;修回日期:2024-06-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42101414)

第一作者:张源,硕士研究生, (E-mail)m18234125942@163.com

通信作者:张素梅,讲师,主要从事资源环境遥感研究, (E-mail)zsm_2004@126.com

cance for better understanding and simulating the variation characteristics of agricultural ecosystems.

【Methods】 This research was carried out on the basis of the 8-day time series data of Leaf area index (LAI) of Global LAnd Surface Satellite (GLASS) from 2001 to 2021. First, the Savitzky-Golay (S-G) filtering method was used to reconstruct LAI data, and the farming system was distinguished by the quadratic difference method according to the reconstructed LAI data. Then, the extracted phenological data mask was used to obtain crop phenological parameters in regions with one cropping system and two cropping system. Finally, the spatiotemporal distribution characteristics were analyzed. **【Results】** The results show that from 2001 to 2021, the research area was dominated by two cropping systems a year, and the lower the latitude, the more complex the cropping system was. The crops in the northern part of the study area were mainly one cropping a year, those in the southern part were mainly two cropping a year, and those in the central part were a mix of one cropping a year and two cropping a year. From the perspective of time, the key phenological periods of crops in northern China have not changed much in the past 21 years, while those in central and southern China with two crops a year have changed a lot. From the perspective of spatial and temporal distribution characteristics, the seedling stage of crops in the one-ripening area is gradually delayed from north to south, the heading stage is later in the central area, and that of the northern and southern areas are earlier, and the maturity stage is gradually advanced from north to south, with a difference of about 10 to 30 days. The spatial distribution characteristics of the key phenological stages of crop in the two-cropping area showed the trend of early in the south, late in the north, early in the southwest, and late in the southeast, and the difference was about 10~40 days. The temporal and spatial distribution characteristics of key phenological periods of crops in the study area are influenced by latitude, climate, planting system, and natural resources.

Keywords: North China Plain; crop phenology; planting system; Global LAnd Surface Satellite Leaf area index (GLASS LAI) data

农作物物候是作物不断适应周围环境的周期性变化而形成的一种生长发育规律,比植被物候变化更为复杂,对其进行长时间序列的监测可以更好地理解和模拟农业生态系统的变化特征^[1-3]。华北平原作为我国第二大平原,耕地面积广阔,耕种制度复杂,对该地区耕地农作物物候期进行长期、大范围的监测具有重要的意义。

农作物物候监测主要是监测作物在形态上发生显著变化所对应的日期^[4],通常认为作物生长的出苗期(冬小麦为返青期)、抽穗期、成熟期是关键物候期^[5]。获取这些关键物候期的方式包括实验观测、遥感监测以及模型模拟等^[1],其中,卫星遥感监测具有覆盖范围广、监测频率高、高效便捷等优点,逐渐成为物候数据获取的重要途径^[6]。近年来,随着遥感技术的发展,很多长时间序列植被指数产品被发展,使得遥感监测植被及作物物候信息更加准确和丰富^[6],通过对这些产品进行光谱曲线重构,可以获取作物的关键物候期^[7,8]。一些学者主要采用归一化植被指数(NDVI)和增强型植被指数

(EVI)^[9-12]作为监测农作物物候期的主要来源,可见利用这两种数据获取农作物物候期的研究已经非常成熟。叶面指数数据(LAI)也可以表征绿色植被的物候特征^[13-15],却很少有学者利用该数据进行研究。以往的研究在利用NDVI和EVI数据对华北平原物候期进行统计时,将一年一熟制和一年两熟制第一季农作物的物候期合并作为第一季农作物物候期^[6],但随着气候的变化,农作物关键物候期会产生相应变化,该方式不能从空间尺度上准确反映物候期分布。为此,本文以华北平原为研究区,将统计尺度划分为一年一熟制、一年两熟制第一季和一年两熟制第二季,利用LAI时间序列数据提取华北平原耕地农作物关键物候期,并分析其时空变化特征,以更好地理解和模拟该地区农业生态系统的变化特征,为相关部门进行农业规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

华北平原区域边界的定义方式有很多^[16,17],本

文采用文献[16]的研究区边界,主要包括北京市、天津市、河北省、山东省、河南省、安徽省和江苏省,如图1所示。华北平原作为我国粮食主产区之一,主要农作物包括冬小麦、玉米、棉花和大豆。该区大部分区域属于暖温带大陆性季风气候,气候条件良好,年平均温度13.0℃,年均总辐射量5 100~5 300 MJ/m²,大于0℃年积温4 200~5 500℃,无霜期为170~220 d,热量条件可以满足一年一熟和一年两熟农作需要。大部分地区海拔低于50 m^[7]。年降水量为500~900 mm,主要集中在夏季的7~9月份,季节分配不均。

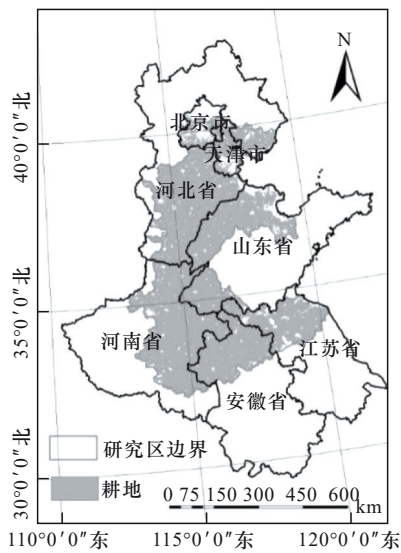


图1 研究区及耕地分布

Fig.1 Study area and cultivated land distribution

1.2 数据源

本文使用2001—2021年Global LAnd Surface Satellite (GLASS) (<http://www.glass.umd.edu/Download.html>)叶面指数(LAI)产品提取耕地、耕地种植制度和耕地农作物物候期。利用2001—2019年冬小麦和夏玉米的农作物物候数据^[18]对农作物物候提取结果进行验证。

1.3 研究方法

本文基于Savitzky-Golay (S-G)滤波法^[19]对LAI时间序列产品进行去噪和光谱曲线数据的重构,采用二次差分法^[6]提取研究区作物种植制度,利用阈值法提取耕地并进行精度验证,最后基于作物种植制度利用斜率最大值法提取华北平原农作物关键物候期,详细技术流程见图2。

1.3.1 LAI时序数据平滑方法

采用S-G滤波法重构华北平原地区农作物生长LAI曲线,计算公式如下。

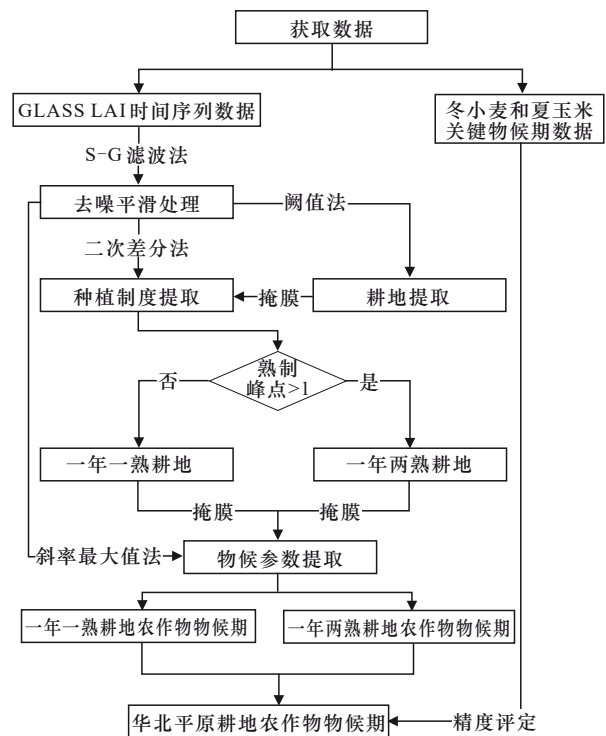


图2 技术流程图

Fig.2 Technical flow

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^m C_i Y_{j+1}}{N} \quad (1)$$

式中, Y_j^* 为滤波后的值, Y_{j+1} 为原始值, m 为滤波窗口半径, N 为滤波的大小, C_i 为第 i 个点的权重值。

1.3.2 耕地提取方法

依据重构后的光谱曲线图结合土地利用数据图,分别选取林地、湿地、人造地表、水体、草地、裸地,以及一年一熟耕地和一年两熟耕地样点绘制典型地物光谱曲线图(见图3)。

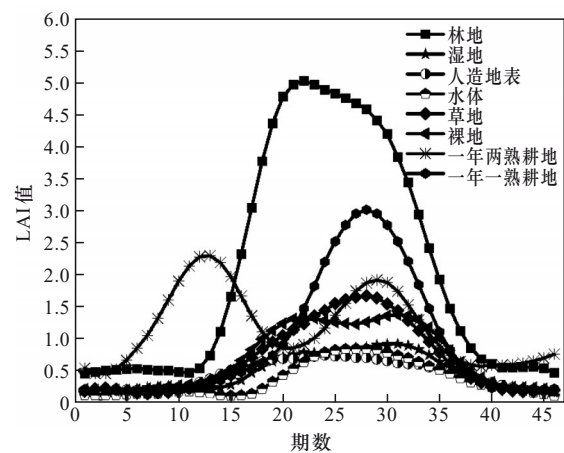


图3 典型地物光谱曲线图

Fig.3 Ground object spectral curves of typical features

本文根据典型地物光谱曲线(图3)设定阈值提取耕地,设定阈值为:LAI值全年小于2.0的地物有

裸地、草地、人造地表、湿地、水体,在4月份到8月份之间(15期到30期)峰值大于4.5是林地,峰值在2.0~4.0之间可判定为耕地。

1.3.3 耕地种植制度判别方法及复种指数的计算

采用二次差分法提取华北平原种植制度,包括如下3个步骤:首先,将LAI时间序列视为 n 个离散的点序列,通过公式(2)的计算,得到 $n-1$ 个新值序列 $S_i^{(1)}$;其次,由公式(3)对新值序列进行判断和重新赋值,正数赋值为1,负数赋值为-1,得到由1或-1构成的序列 $S_i^{(2)}$;最后,由公式(4)对 $S_i^{(1)}$ 和 $S_i^{(2)}$ 得到的序列再进行差分运算,进而得到由-2、0、2组成的有 $n-2$ 个元素的序列 $S_i^{(3)}$ 。

$$S_i^{(1)} = N_{LAI_i} - N_{LAI_{i-1}} \quad (2)$$

$$S_i^{(2)} = \begin{cases} 1 & S_i^{(1)} \geq 0 \\ -1 & S_i^{(1)} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$S_i^{(3)} = S_i^{(2)} - S_i^{(1)} \quad (4)$$

式中, i 指LAI曲线时间序列中的第 i 个元素; N_{LAI_i} 为第 i 个元素的LAI值; $S_i^{(1)}$ 、 $S_i^{(2)}$ 和 $S_i^{(3)}$ 分别对应每一步的参数。

复种指数是指耕地全年内农作物的总播种面积与耕地面积之比,反应耕地的利用程度。依据二次差分法获得耕种制度,分别统计出一年一熟制耕地面积和一年两熟制耕地面积,并根据公式(5)计算复种指数。

$$A = \frac{B}{C} \times 100\% \quad (5)$$

式中, A 表示复种指数, B 表示全年播种作物的总面积, C 表示耕地总面积。

1.3.4 耕地物候监测方法

本文采用斜率最大值法对华北平原作物关键物候期进行识别,公式如下:

$$k_i = \frac{N_{LAI_i} - N_{LAI_{i-1}}}{N_{LAI_{i-1}}} \quad (6)$$

式中, i 指LAI曲线时间序列中的第 i 个元素; N_{LAI_i} 为第 i 个元素LAI的值; k_i 为第 i 个元素所在的变化速率。

2 结果与分析

2.1 二次差分法和斜率最大值法结果图

2.1.1 二次差分计算前后光谱曲线

选取光谱曲线重构后的一年两熟耕地样点,并绘制该样点利用二次差分法计算前后的光谱曲线的结果图如图4所示。

从二次差分结果(图4b)可知波峰和波谷分别

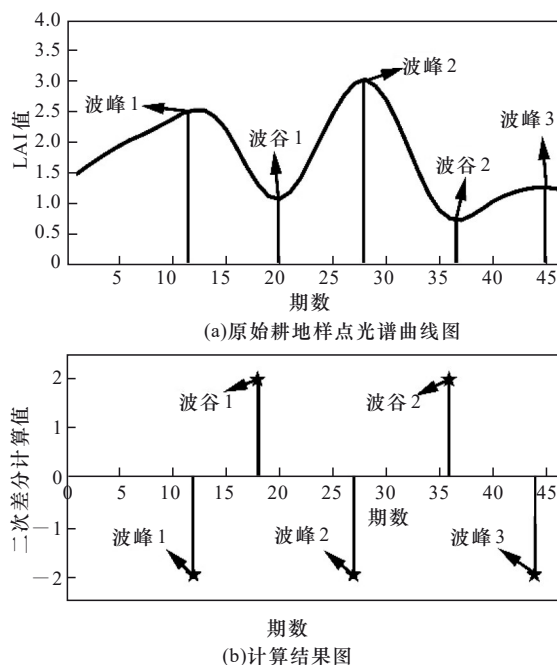


图4 二次差分前后耕地样点光谱曲线结果图

Fig. 4 Spectral curves of cropland samples before and after second-order difference algorithm treatment: (a) Spectral curve of original cultivated land sample points and (b) Calculation results of spectral curve of cultivated land sample

被赋值为-2和2,也存在伪峰值,通过设定阈值的方式将其剔除。依据前人设置阈值并根据本文样点的结果^[6],设置限定条件如下:(1)LAI时间序列峰值点位于90~280 d之间;(2)单峰曲线峰值点LAI值的绝对值不能小于2;(3)多峰曲线峰值点之间的天数不能小于40 d,且较小峰值不能小于较大峰值的40%。

2.1.2 斜率最大值法计算前后光谱曲线结果图

选取光谱曲线重构后的一年两熟耕地样点,绘制该样点利用斜率最大值法计算前后的光谱曲线结果如图5所示。

由图5可知,一年两熟耕地对应的LAI时间序列曲线分别有两个出苗期、抽穗期和成熟期,出苗期和成熟期之间的长度为生长季长度。LAI时间序列曲线斜率首次开始上升的最大值、下降为0的值以及下降至最低点的值分别对应第一季农作物的出苗期、抽穗期和成熟期。第二次斜率变化对应第二季农作物的物候期。

2.2 华北平原耕种制度空间分布特征

基于GLASS LAI数据,采用二次差分法获得华北平原种植制度分布图(图6)。

由图6可以看出,华北平原南部地区主要以一年两熟制为主,少部分北部地区以一年一熟制为主,小部分地区为一年一熟制和一年两熟制的混合

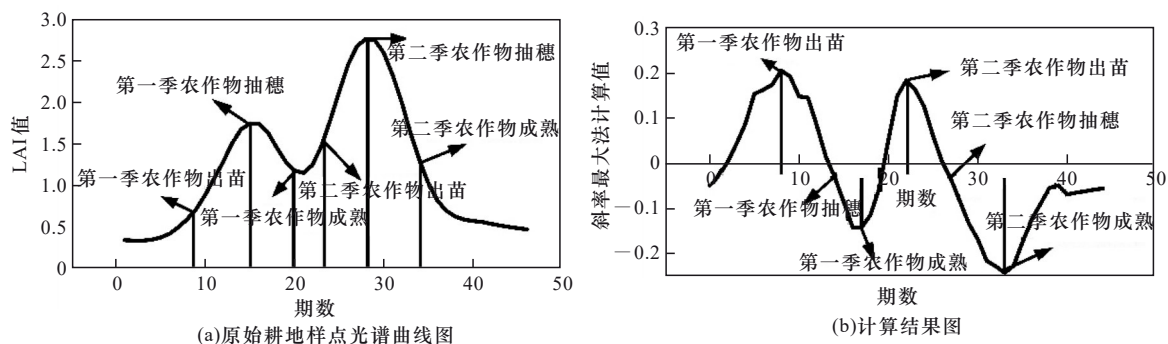


图 5 斜率最大值法计算前后耕地样点光谱曲线结果图

Fig.5 Spectral curves of cultivated land samples pre and post the calculation with slope maximum method

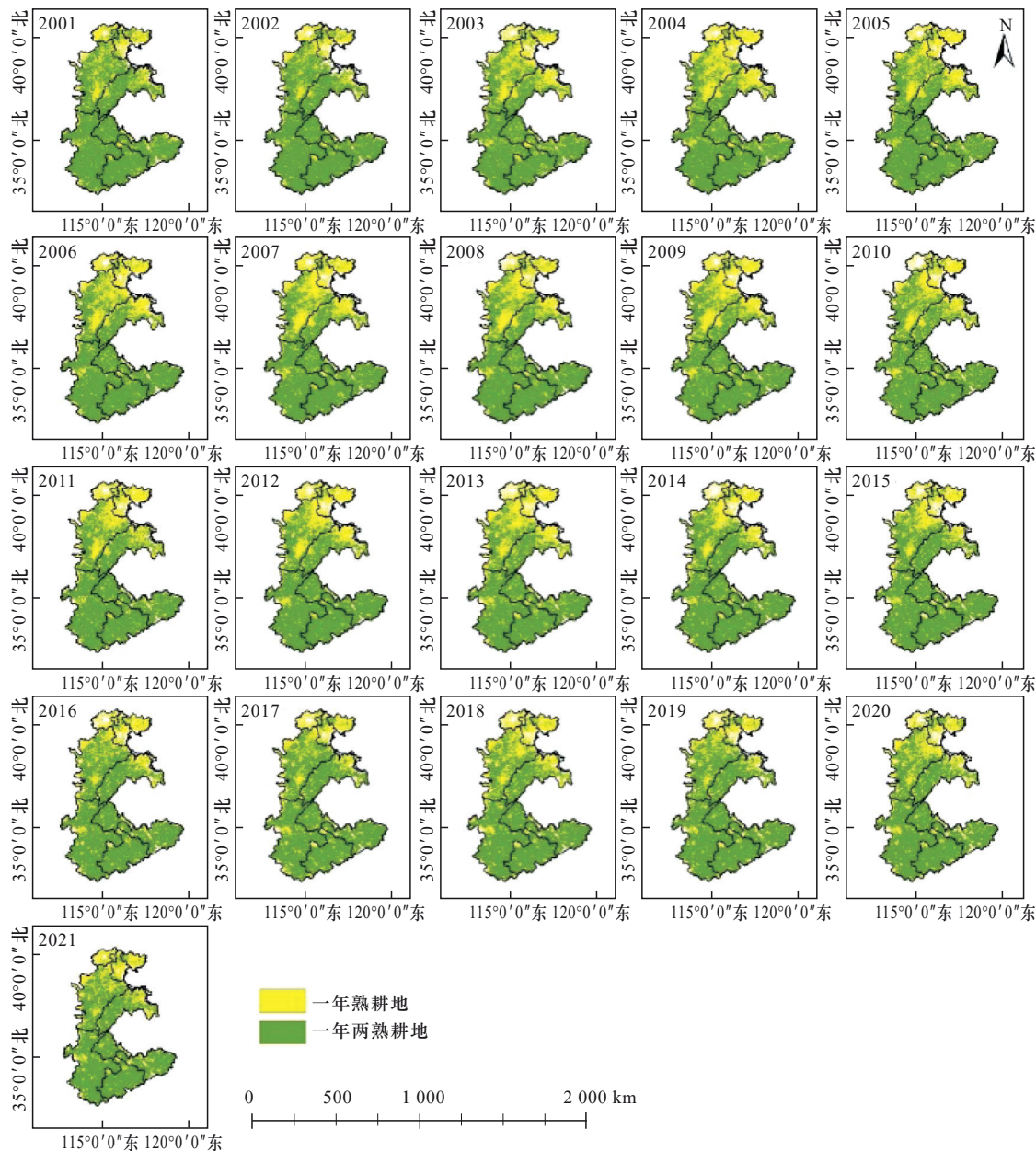


图 6 华北平原耕地种植制度空间分布图

Fig.6 Spatial distribution maps of cultivated land planting system in the North China Plain

区,具有纬度越低种植制度越复杂的空间分布特征。2001—2004 年中部地区一年两熟制明显减少, 2004—2021 年中部地区一年两熟制在缓慢增加,且整个区域一年两熟制地区边界在北移。从不同省

份来看,北京市和天津市由于纬度高,受到光热、降水等条件的限制,21年来种植制度较为稳定,以一年一熟制为主;河北省东南部、山东省西部等地,光照和降水量充足,以一年两熟制为主;河北省与山东省接壤的部分地区也存在一年一熟制耕地,且逐渐向一年两熟制耕地转变;河南省、安徽省和江苏省纬度低、气温高,主要以一年两熟制耕地为主。耕地种植制度很大程度上受到光、热、水等自然资源的影响,其分布特征与该地区的自然地理分布特征一致。

利用图6的种植制度分布提取结果,根据公式(5)计算复种指数,并进行统计得到图7。从整体结

果来看,一年两熟制耕地面积明显大于一年一熟制耕地面积,研究区一年两熟制平均耕地面积是一年一熟制平均耕地面积的3.58倍。具体来看,复种指数呈现出先减少后增加的趋势,2001—2004年复种指数从1.82减少至1.72,2004—2021年复种指数从1.72增加恢复至1.82,与ZHAO et al^[13]文章中相同年份计算结果整体趋势一致,但本文的计算结果均高于其计算结果。分析发现,虽采用相同的数据源,但计算复种指数的方法和研究区稍有不同,造成结果的差异。

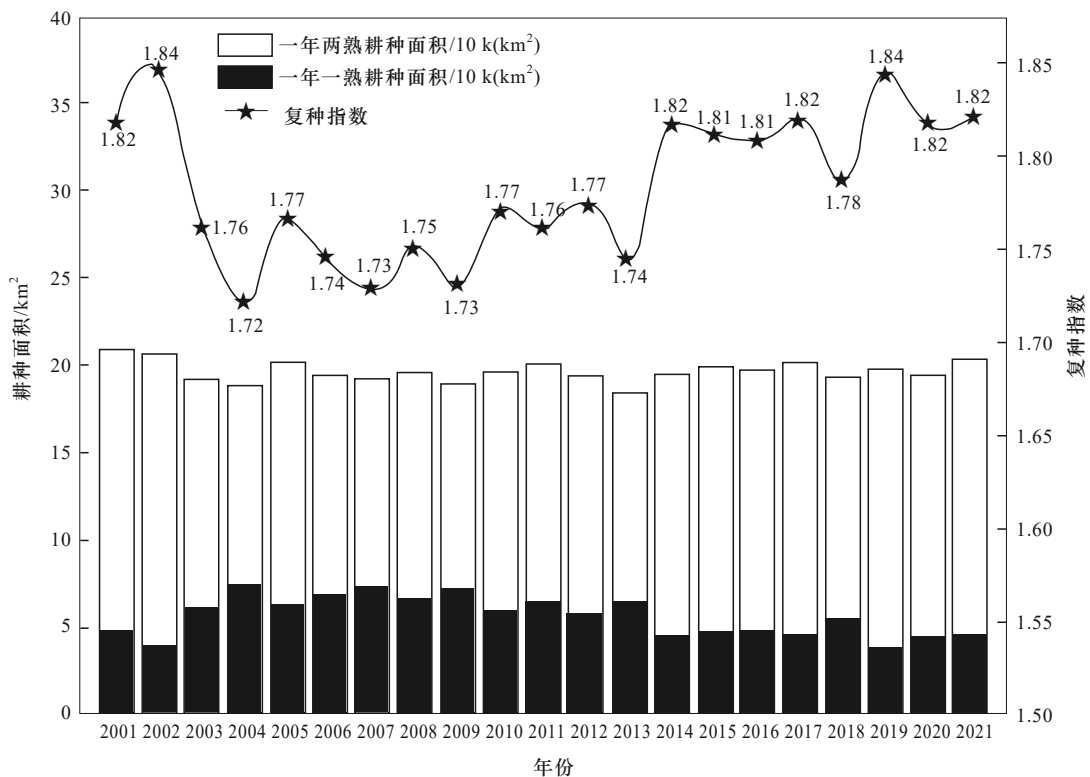


图7 华北平原耕地种植制度统计图

Fig.7 Statistical graph of cultivated land planting system in the North China Plain

2.3 精度评定

一年两熟制地区主要以冬小麦-夏玉米轮作为主,将获取的一年两熟制地区农作物逐年关键物候期的天数与现有的冬小麦和夏玉米的关键物候期进行比较(图8)。从整体结果来看, p 值都小于0.005,整体相关系数 r 都在0.6~0.8之间,属于强相关,说明本文提取结果与实际情况较为符合,可以用来分析农作物物候期的时空变化特征。

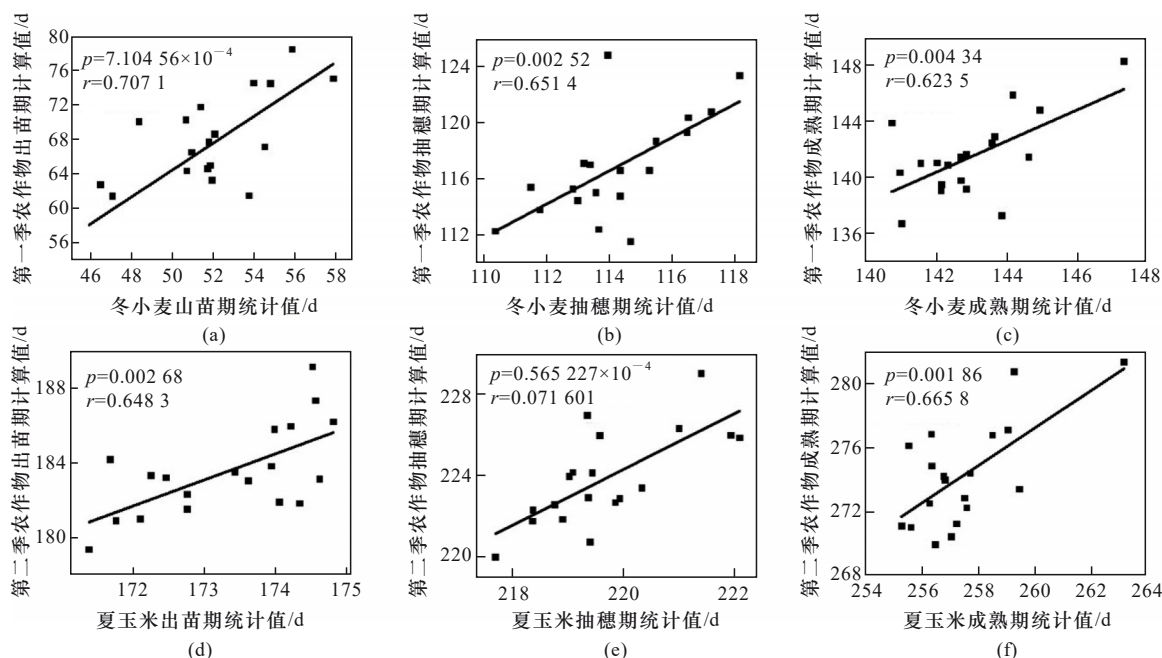
精度验证结果表明,利用连续性好、伪峰值少的250 m空间分辨率和8d时间分辨率的GLASS LAI数据,可以获得覆盖时间长、范围广的农作物关键物候期的数据,但低时空分辨率的遥感数据在一

定程度上会降低提取结果的准确性。农作物物候变化较快,低时间分辨率的数据不能很好地记录该变化,而低空间分辨率的数据受到混合像元的影响,会遗漏或误判像元的信息。因此,本文更多强调的是研究区内耕地种植制度和关键物候参数整体的时空分布特征。

2.4 华北平原耕地物候空间分布特征

2.4.1 一年一熟作物物候时空分布

基于GLASS LAI数据,利用2.1得到的一年一熟制耕地数据对采用斜率最大值法计算华北平原一年一熟农作物物候期掩膜,得到一年一熟农作物物候期时空分布如图9所示。



(a-c)第一季农作物关键物候期和冬小麦关键物候期对比;(d-f)第二季农作物关键物候期和夏玉米关键物候期对比

图8 一年两熟制农作物关键物候期与现有冬小麦和夏玉米物候期对比

Fig.8 Comparison of key phenological periods of double cropping crops with existing winter wheat and summer maize phenological periods

由图9可以看出,一年一熟农作物出苗期呈从北向南逐渐推迟的趋势,抽穗期呈现出中部地区较迟,北部和南部地区较早的趋势,成熟期呈现从北向南逐渐提前的趋势。这是因为该地区农作物类型复杂,包括春玉米、水稻、林果、棉花和单季玉米等,作物类型的不同导致关键物候期的不同^[20-21]。具体来看,出苗期由南部地区(河南省、安徽省和江苏省)151~192 d过渡到中部地区(河北省、山东省)141~180 d再到北部地区(北京市、天津市)120~170 d,抽穗期由北部和南部地区192~230 d过渡到中部地区221~240 d,成熟期由南部地区248~280 d过渡到中部和北部地区261~300 d,出苗期南北差异近一个月,抽穗期相差10 d左右,成熟期差异近20 d。

2.4.2 一年两熟第一季作物物候时空分布

基于GLASS LAI数据,利用2.1得到的一年两熟制耕地数据对采用斜率最大值法计算华北平原一年两熟第一季农作物物候期掩膜,得到一年两熟制第一季作物物候期时空分布如图10所示。

冬小麦是研究区内一年两熟制区域主要的第一季作物,作物类型较为单一,从图10可以看出,一年两熟制地区第一季作物关键物候期大都呈现出南部早、北部迟,西南部早、东南部迟的趋势。有学者指出生长期内平均气候条件主导华北平原作物生长变化^[22],其中平均气温影响最大,该地区气温由北向南逐渐升高、由沿海向内陆逐渐升高、由内

陆向山区逐渐降低^[23],从而导致了研究区内一年两熟制区域关键物候期的时空分布特点。但也有部分年份不符合这一特点,如河北省和山东省2002年的出苗期比河南省南部早10~15 d,2005年和2012年安徽省、江苏省北部地区出苗期比河北省和山东省迟15~20 d。具体来看,出苗期从西南部地区(河南省)40~70 d逐渐过渡到中部地区(河北省、山东省)和东南部地区(安徽省、江苏省)56~85 d再过渡到北部地区(北京市、天津市)71~105 d,从西南部地区到北部和东南部地区梯度相差近一个月的时间,抽穗期和成熟期与出苗期类似,抽穗期由96~120 d过渡到121~152 d,成熟期由120~140 d过渡到150~180 d,这表明一年两熟第一季农作物物候期与纬度有联系,纬度越低农作物物候期发生时间越早,反之则越迟^[24]。

2.4.3 一年两熟第二季作物物候时空分布

基于GLASS LAI数据,利用2.1得到的一年两熟制耕地数据对采用斜率最大值法计算华北平原一年两熟第二季农作物物候期掩膜,得到一年两熟制第二季农作物物候期时空分布如图11所示。

夏玉米是研究区内一年两熟制区域主要的第二季作物,作物类型较为单一。从图11可以看出,一年两熟制地区第二季农作物关键物候期和第一季农作物关键物候期时空分布特征与第一季农作物一致。具体来看,出苗期由西南部地区(河南省)

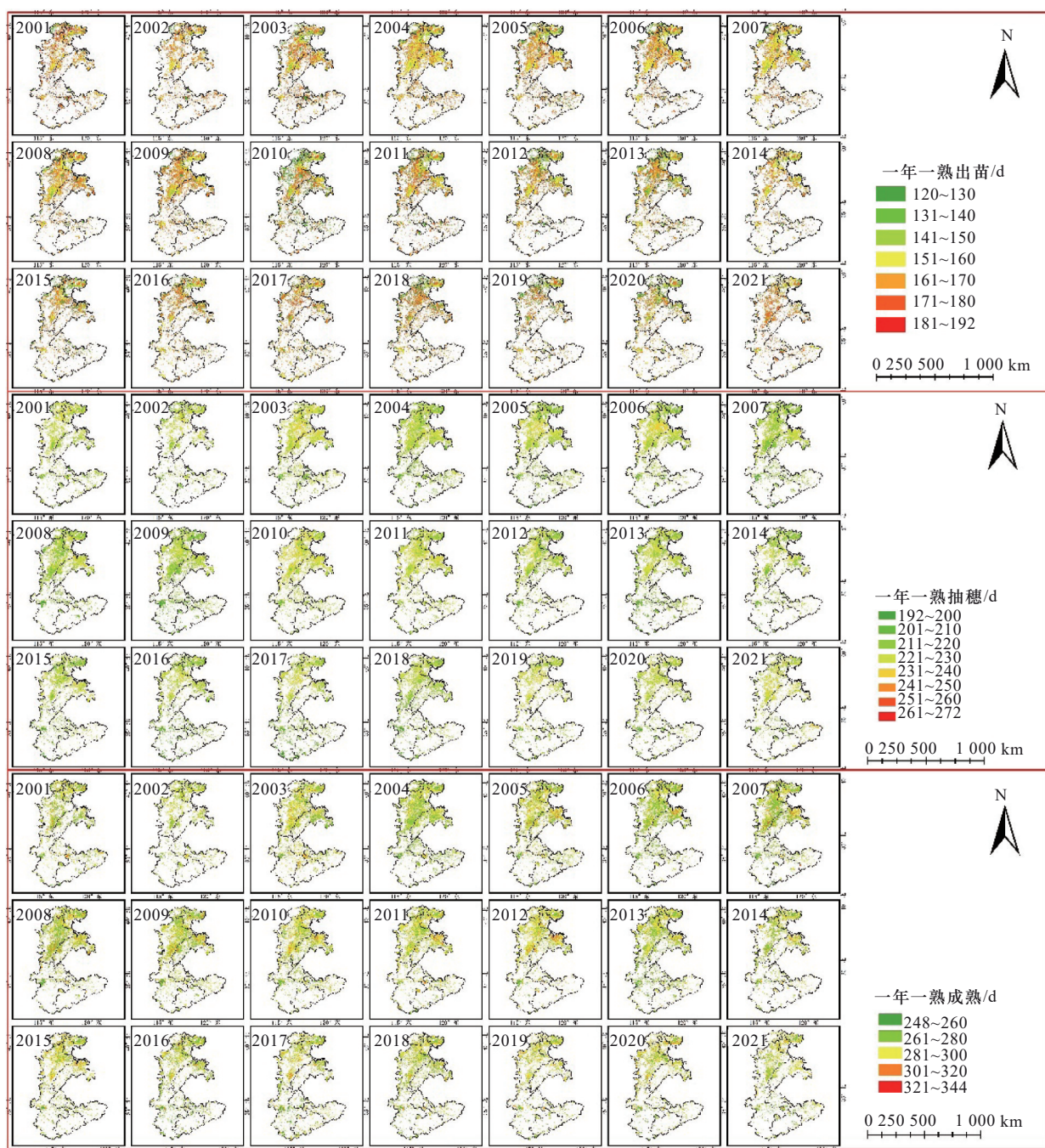


图9 一年一熟农作物物候期时空分布图

Fig.9 Temporal and spatial distribution maps of crop phenology of single cropping

176~190 d 过渡到北部(北京市、天津市)、中部(河北省、山东省)和东南部地区(安徽省、江苏省)181~216 d,差异在10~20 d。抽穗期和成熟期与出苗期分布情况一致,抽穗期由208~230 d过渡到221~248 d,差异在13~18 d,成熟期由248~270 d过渡到271~310 d,差异在23~40 d,可见第二季农作物关键物候期时空分布特征与纬度也有联系。

整体来看,21年间北部地区,也就是以一年一熟制为主的地区农作物关键物候期变化不大,中部和南部以一年两熟制为主的地区变化较大。其中,江

苏省第二季农作物关键物候期变化最明显,2001—2012年间出苗期由176~190 d推迟到191~216 d,抽穗期由208~230 d推迟到230~250 d,成熟期由248~290 d推迟到271~320 d,明显推迟一个月左右。2012—2021年间出苗期、抽穗期和成熟期分别提前至181~200 d、221~240 d和271~310 d,逐渐提前10~20 d。

2.4.4 华北平原关键物候期分析

获取华北平原2001—2021年逐年关键物候期天数均值,并计算作物生长期的天数如图12所示。

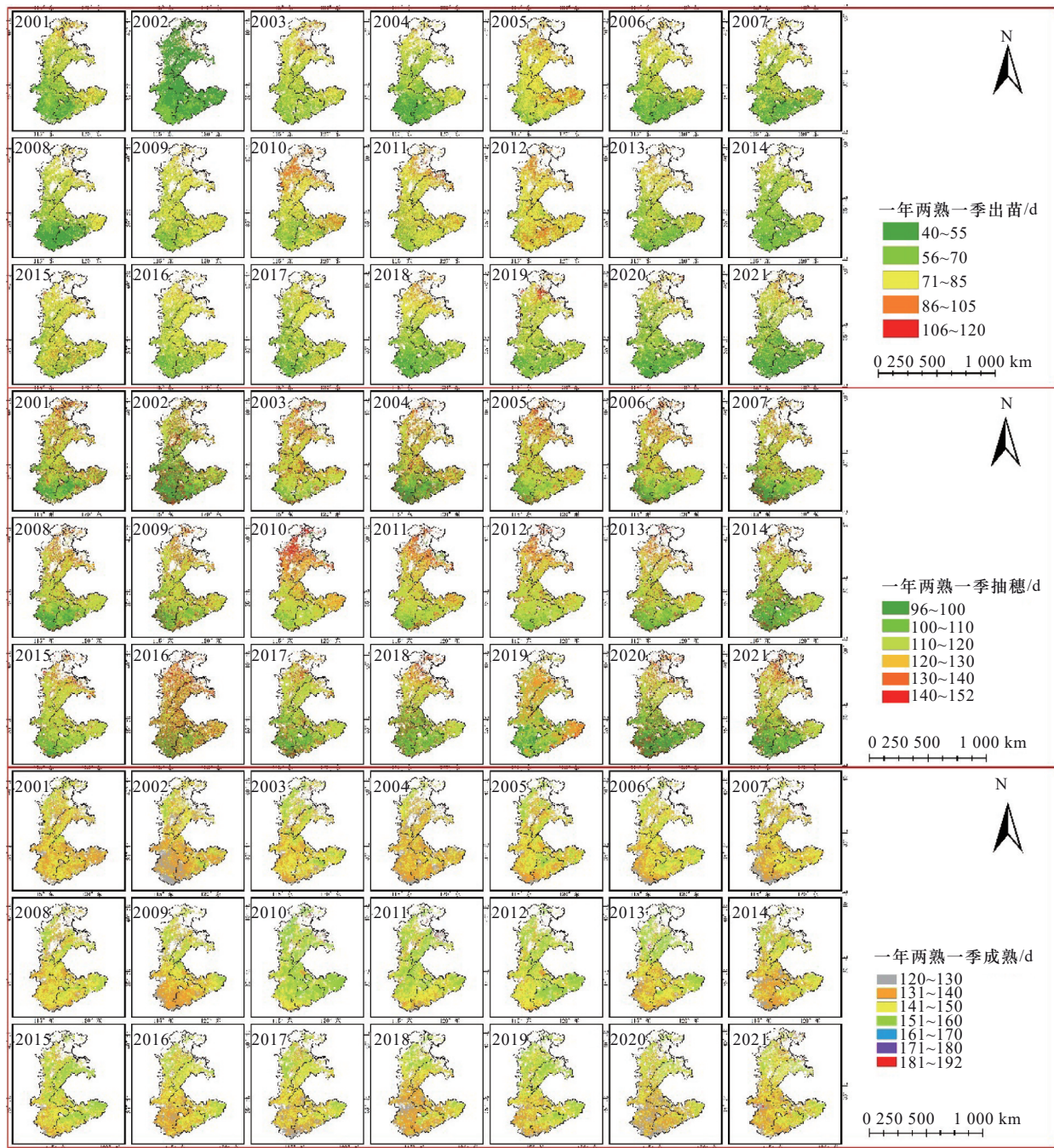


图 10 一年两熟制第一季农作物物候期时空分布图

Fig.10 Temporal and spatial distribution maps of crop phenology in the first season of annual double cropping

从图 12(a-i)可知,21年间,华北平原农作物物候期呈现显著的波动趋势。具体来看,一年一熟制地区农作物出苗期、抽穗期和成熟期大都发生在 150~164 d、218~223 d 和 283~289 d,出苗期提前 0.24 d/a,抽穗期和成熟期趋势不明显;一年两熟制地区第一季农作物出苗期、抽穗期和成熟期大都发生在 47~78 d、112~125 d 和 137~148 d,分别推迟 0.1 d/a、提前 0.09 d/a 和推迟 0.06 d/a,第二季农作物出苗期、抽穗期和成熟期大都发生在 179~189 d、

220~229 d 和 270~281 d,分别推迟 0.09 d/a、推迟 0.08 d/a 和提前 0.06 d/a。部分年份不符合这一趋势,如一年两熟制第一季农作物 2002 年出苗期显著提前至 44 d,2016 年的抽穗期显著推迟至 128 d;也有年份符合这一趋势但发生了显著变化,如第二季农作物 2012 年的出苗期、抽穗期推迟 5~15 d,2003 年的成熟期显著推迟至 280 d 之后。还有 2010 年全年物候期除一年一熟出苗期显著提前至 152 d,其余物候期显著推迟 5~20 d。

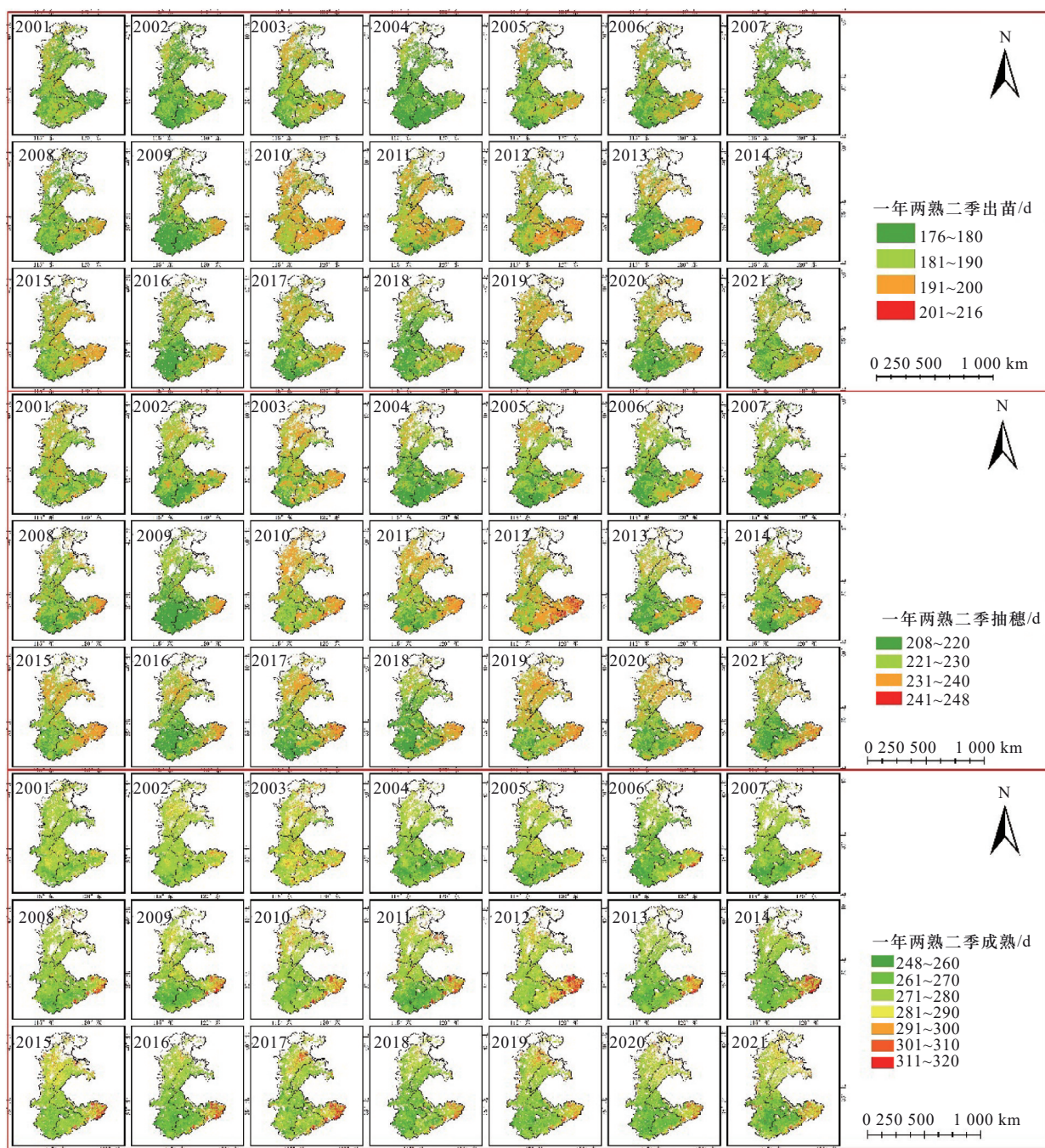


图11 一年两熟制第二季农作物物候期时空分布图

Fig.11 Temporal and spatial distribution maps of crop phenology in the second season of annual double cropping

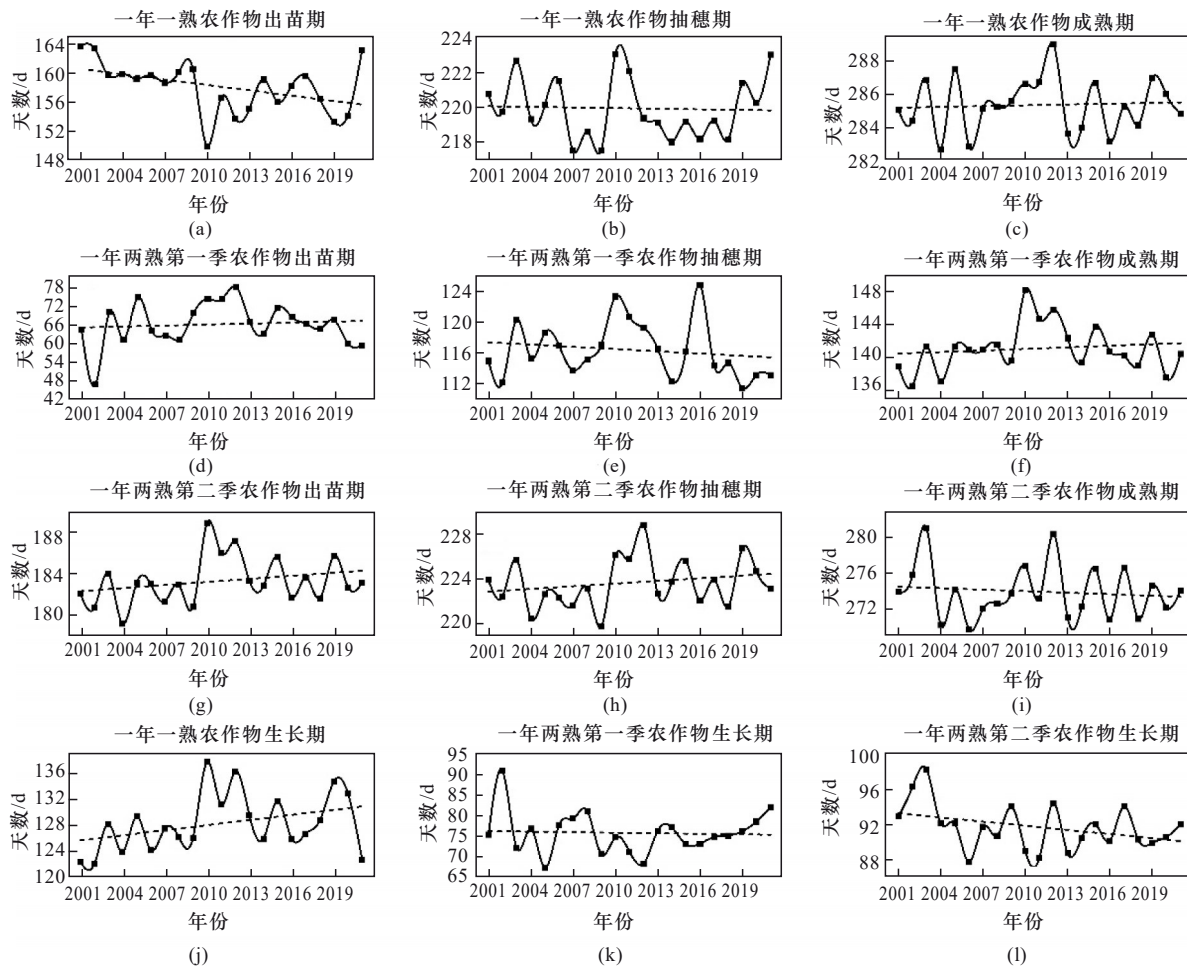
从图 12(j-l)可知,一年一熟作物生长期在 122~138 天,延长了 0.26 d/a;一年两熟制地区第一季和第二季农作物生长期在 67~91 d 和 88~98 d,第一季农作物生长期没有明显趋势,第二季农作物生长期缩短了 0.16 d/a。

3 讨论

研究区内种植制度复杂,许多地区存在间作和套种的耕种方式,而这些耕种方式会对农作物生长

曲线造成影响,使得耕地种植制度和关键物候参数的提取结果面临许多不确定性。耕地的种植制度与不同地区的耕种政策及自然地理环境紧密相关,因此,结合不同地区耕种政策及自然地理环境,选择合适的方法分区域提取农作物关键物候参数是进一步研究的方向。

一年两熟第一季农作物 2002 年和 2005 年的出苗期、2016 年的抽穗期与其他年份空间分布格局有显著差异;第二季农作物 2012 年出苗期和成熟期,



(a-i)农作物关键物候期天数统计;(j-l)农作物生长期

图 12 农作物物候期天数统计

Fig.12 Statistics of crop phenological days

2003年的成熟期与其他年份在时间序列统计结果有显著差异;2010年全年降水偏多、年平均气温偏高,其中春季气温较低、冬夏秋均偏高,季节转换总体偏晚^[25],造成该年份物候期时空分布特征与其他年份有显著差异。之前的一些研究结果表明,冬小麦关键物候期的差异是由于生长期内平均气候条件(主要包括平均气温、水汽压亏缺和太阳辐射)引起的,夏玉米还包括极端潮湿事件等的影响^[22]。但将气候变量综合考虑,单独变量的影响可能会减弱或增强^[26],使得一些农作物关键物候期的时空分布特征有变化。之后可以结合多种气候变量综合考虑对农作物关键物候期发生时间的影响,使本文研究内容更丰富。

4 结论

基于GLASS叶面指数LAI时间序列数据对华北平原耕地种植制度及该种植制度下的物候时空分布格局进行了研究。研究结果如下。

1)2001—2021年研究区以一年两熟制耕种制度为主,一年两熟制耕地面积是一年一熟制耕地面积的3.85倍,具有纬度越低种植制度越复杂的时空分布特征。

2)研究区北部农作物以一年一熟制为主,南部以一年两熟制为主,中部为一年一熟制和一年两熟制的混合区。从时间维度来看,21年间北部地区农作物关键物候期变化不大,中部和南部以一年两熟制为主的地区变化较大。从空间分布特征来看,一年一熟制地区农作物出苗期从北向南逐渐推迟,抽穗期呈现出中部地区较迟,北部和南部地区较早的趋势,成熟期呈现从北向南逐渐提前的趋势,差异约在10~30 d。一年两熟制地区农作物关键物候期空间分布特征大都呈现出南部早、北部迟,西南部早、东南部迟的趋势,差异约在10~40 d。

3)研究区内农作物关键物候期时空分布变化特征受到纬度、气候、种植制度及自然资源等因素的共同影响。

总体来说,本文的研究可以为华北平原相关部门进行农业规划提供依据,更好地理解 and 模拟华北平原地区农业生态系统的变化特征。

参考文献:

- [1] 刘玉洁,葛全胜,戴君虎. 全球变化下作物物候研究进展[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 14-24.
LIU Y J, GE Q S, DAI J H. Research progress in crop phenology under global climate change[J]. ACTA Geographica Sinica, 2020, 75(1): 14-24.
- [2] 陶建斌,郭洋,孔祥兵,等. 近20年我国县域耕地物候变化空间格局研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(6): 7-14.
Tao J B, Guo Y, Kong X B, et al. Spatial patterns of cropland phenology at country level of China since 2000[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(6): 7-14.
- [3] 李正国,杨鹏,周清波,等. 基于时序植被指数的华北地区作物物候期/种植制度的时空格局特征[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6216-6226.
LI Z G, YANG P, ZHOU Q B, et al. Research on spatiotemporal pattern of crop phenological characteristics and cropping system in North China based on NDVI time series data[J]. ACTA Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6216-6226.
- [4] 夏传福,李静,柳钦火. 植被物候遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 2013, 17(1): 1-16.
XIA C F, LI J, LIU Q H. Review of advances in vegetation phenology monitoring by remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(1): 1-16.
- [5] 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[J]. 农业工程学报, 2004(1): 155-159.
ZHANG F, WU B F, LIU C L, et al. Methods of monitoring crop phenological stages using time series of vegetation indicator[J]. Transactions of the CSAE, 2004(1): 155-159.
- [6] 赵燕. 基于多源遥感数据的华北平原主要农作物复种制度和关键物候期空间格局研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [7] 杨佳凡. 基于 Sentinel-2 单年际时序数据的农田利用与作物物候信息提取[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [8] 崔凯. 基于遥感技术的作物物候监测方法及动态变化分析研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [9] 赵一静,王晓利,侯西勇,等. 2003—2019年山东省冬小麦关键物候期时空特征[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7785-7795.
ZHAO Y J, WANG X L, HOU X Y, et al. Spatio-temporal characteristics of key phenology of winter wheat in Shandong from province 2003 to 2019[J]. ACTA Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7785-7795.
- [10] 李艳,张成才,罗蔚然,等. 基于改进最大值法合成 NDVI 的夏玉米物候期遥感监测[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 159-165.
LI Y, ZHANG C C, LUO W R, et al. Summer maize phenology monitoring based on normalized difference vegetation index reconstructed with improved maximum value composite[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(14): 159-165.
- [11] 阎建忠,张敏,张思颖. 基于 GEE 和 MODIS NDVI 时序的青藏高原农作物信息提取[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 55-64.
YAN J Z, ZHANG M, ZHANG S Y. Information extraction of main crops in eastern Qinghai province based on GEE platform and MODIS NDVI time series[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2023, 45(4): 55-64.
- [12] 李胜林,李大成,韩启金,等. 基于时空融合的 NDVI 时序生成技术在冬小麦监测中的应用[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(1): 69-75.
LI S L, LI D C, HAN Q J, et al. Application of NDVI time-series generation technique based on spatio-temporal fusion in winter wheat monitoring[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(1): 69-75.
- [13] ZHAO Y, FENG J, LUO L, et al. Monitoring cropping intensity dynamics across the North China Plain from 1982 to 2018 using GLASS LAI products[J]. Journal of Remote Sensing, 2021(13): 1-21.
- [14] XIANG Y, XIAO Z Q, LIANG S L, et al. Validation of Global Land Surface Satellite (GLASS) leaf area index product[J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(3): 573-596.
- [15] ZHAO X, LIANG S, LIU S, et al. The global land surface satellite (GLASS) remote sensing data processing system and products[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 5(5): 2436-2450.
- [16] ZHANG Y, DORE A, MA L, et al. Agricultural ammonia emissions inventory and spatial distribution in the North China Plain[J]. Environmental Pollution, 2009, 158(2): 490-501.
- [17] GUO R, LIN Z, MO X, et al. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1185-1194.
- [18] LUO Y C, ZHANG Z, CHEN Y, et al. ChinaCropPhen1km: a high-resolution crop phenological dataset for three staple crops in China during 2000—2015 based on leaf area index (LAI) products[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(1): 197-214.

- [19] 胡顺石,黄春晓,杨斌,等.自适应加权 Savitzky-Golay 滤波重构 MODIS 植被指数时间序列[J].测绘科学,2020,45(4):105-116.
HU S S, HUANG C X, YANG B, et al. Reconstruction of MODIS vegetation index time series by adaptive weighted Savitzky-Golay filter[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(4): 105-116.
- [20] 王红营,潘学鹏,罗建美,等.基于遥感的华北平原农作物时空分布变化特征分析[J].中国生态农业学报,2015,23(9):1199-1209.
WANG H Y, PAN X P, LUO J M, et al. Using remote sensing to analyze spatiotemporal variations in crop planting in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(9): 1199-1209.
- [21] 王鹏新,荷兰,李俐,等.基于时间序列叶面积指数傅里叶变换的作物种植区域提取[J].农业工程学报,2017,33(21):207-215.
WANG P X, XUN L, LI L, et al. Extraction of planting areas of main crops based on fourier transformed characteristics of time series leaf area index products[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 207-215.
- [22] LI Y, GUAN K Y, SCHNITKEY G D, et al. Excessive rainfall leads to maize yield loss of a comparable magnitude to extreme drought in the United States[J]. Global change biology, 2019, 25(7): 2325-2337.
- [23] 陈永金,马胜兰,许婕,等.华北地区近 65 a 气候变化及其与相关因子关系分析[J].河北师范大学学报(自然科学版),2021,45(3):314-324.
CHEN Y J, MA S L, XU J, et al. Analysis on climate change and related factors in North China in recent 65 years[J]. Journal of Hebei Normal University(Natural Science), 2021, 45(3): 314-324.
- [24] 燕雄飞,钟江平.20 世纪末华北地区冬小麦物候期监测及时空格局分析[J].测绘与空间地理信息,2021,44(1):52-55,61.
YAN X F, ZHONG J P. Analysis of winter wheat phenological phase monitoring and spatio-temporal pattern in North China at the end of the 20th century[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(1): 52-55, 61.
- [25] 贾小龙,陈丽娟,龚振淞,等.2010 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响[J].气象,2011,37(4):446-453.
JIA X L, CHEN L J, GONG Z S, et al. Anomalies of ocean and atmospheric circulation in 2010 and their impacts on climate in China[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(4): 446-453.
- [26] HAQIQI I, GROGAN D S, HERTEL T W, et al. Quantifying the impacts of compound extremes on agriculture[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(2): 551-564.

(编辑:赵树庆)