

# 基于多源遥感 NDVI 时序曲线特征的田区尺度冬小麦物候期提取

张晓春，况梦柯，史良胜，钟立傲，易 鸣

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室，武汉 430072)

**摘 要：**冬小麦是中国北方地区主要的粮食作物。物候是随季节变化的特定生命周期事件，准确获取区域冬小麦物候期对指导粮食作物生产具有重要意义。传统的物候期监测方法主要基于野外实地观测，在时间和空间范围上存在局限性。遥感技术的发展使得长时间、大范围的冬小麦物候监测成为可能。目前遥感物候监测结果是以像元为单位空间分辨率较低的栅格影像，而以田区地块为单元的物候期图更符合实际作物生长状况。为了提高物候期分布图的空间分辨率和精度，并获取田区尺度冬小麦物候期图，该研究首先基于多源高时空分辨率遥感数据建立时间上非均匀的 NDVI 影像数据集（2017 年 9 月—2023 年 7 月），然后基于插值法获取均匀的每日 NDVI 数据集，并通过 SG 滤波重构获取能够反映冬小麦真实生长状态的 NDVI 时序曲线。最后基于冬小麦 NDVI 时序曲线特征与物候特征对应关系，采用极值法和动态阈值法提取了生长季开始期（播种）、峰值期（抽穗）、成熟期和结束期 4 种物候期的栅格影像，并将像元尺度的物候期结果转为田区尺度。结果显示：2017—2018 年度冬小麦播种期晚于其他 5 年；2019—2020 年度和 2020—2021 年度抽穗期明显早于其他 4 年；2019—2020 年度冬小麦成熟时间早于其他 5 年，同时该年度生长季结束期也早于其他 5 年。通过验证对比发现遥感物候期结果与田间数据和其他物候研究结果一致，满足物候期县域田区尺度提取的需求。进一步讨论冬小麦遥感抽穗期结果与气候变化响应，发现抽穗期与当年气温、降水量和日照时数关系密切。研究综合运用高分一号、环境二号、Landsat-8 和哨兵二号多源光学遥感影像，准确提取了 6 年冬小麦田区尺度物候期的空间分布图，可为监测冬小麦生长发育状态提供科学依据。

**关键词：**归一化植被指数；遥感；物候期；冬小麦；多源遥感影像；田区尺度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407066

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-01-0181-11

张晓春，况梦柯，史良胜，等. 基于多源遥感 NDVI 时序曲线特征的田区尺度冬小麦物候期提取[J]. 农业工程学报, 2025, 41(1): 181-191. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407066 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Xiaochun, KUANG Mengke, SHI Liangsheng, et al. Extracting the phenological periods of winter wheat at field scale based on the characteristics of NDVI time series curves from multisource remote sensing images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(1): 181-191. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407066 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

及时准确地获取农作物物候期信息，对于作物产量估测、指导区域农业生产具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。传统物候观测方法虽然可以更加准确地记录特定地点、特殊时期的物候事件<sup>[3]</sup>，但其受限于观测技术、覆盖面积及人力物力成本等多方面因素，难以应用到大尺度上<sup>[4]</sup>。近年来，已有多种技术手段对水稻、玉米和冬小麦等作物进行了物候监测。例如有学者融合多种水稻物候监测模型预测了水稻的抽穗期<sup>[5]</sup>，有研究基于改进的最大值合成法遥感监测夏玉米物候期<sup>[6]</sup>，还有研究基于无人机时间序列数据监测了小麦物候期<sup>[7]</sup>。冬小麦是华北平原主要粮食作物，同时小麦也是中国三大粮食作物，因此冬小麦物候监测研究对于稳步提高生产能力和保障粮食安全意义重大<sup>[8]</sup>。

遥感技术具备广阔的地理范围覆盖和较强的重复观测能力的特点，比野外实地观测更适合大范围长时间物

候监测<sup>[9]</sup>。但遥感数据的时空分辨率不可兼得，时间尺度上，有研究通过分析物候遥感监测的敏感性发现，物候遥感监测的精度与影像的时间分辨率密切相关，但连续长时间序列的高质量遥感影像获取较为困难<sup>[10]</sup>；空间尺度上，有研究通过分析地表物候数据的空间分辨率，发现在地表非常复杂的区域，高空间分辨时间序列遥感数据能够提供更多具有生理意义的信息，提取的物候特征更加准确<sup>[11]</sup>。因此区域冬小麦物候期精确提取需要高时间高空间的遥感影像。

遥感指数时序数据能有效地反映作物冠层的季节变化特征，被广泛应用于提取陆表作物的播种期、抽穗期和成熟期等重要生长节点<sup>[12]</sup>。通过分析归一化植被指数（normalized difference vegetation index, NDVI）随时间变化的关键特征节点提取物候期，是目前遥感提取作物物候期的主要方法<sup>[13]</sup>。其中遥感监测的生长季起始期（start of season, SOS）、生长季峰值（peak of season, POS）和生长季结束期（end of season, EOS）是现今大部分作物物候研究中最常用的关键物候指标<sup>[14]</sup>。卫星数据采集过程中会遭受大气状况、观测条件和遥感平台性能差异的干扰，导致获取的时序数据中不可避免出现数

收稿日期: 2024-07-08 修订日期: 2024-08-22

基金项目: 国家重点研发计划项目（2021YFC3201203）

作者简介: 张晓春，博士，副教授，研究方向为遥感在农业水利工程中的应用。Email: xc Zhang@whu.edu.cn

据噪声,因此需要进行时序曲线重构以改善植被指数时序数据的质量<sup>[15]</sup>。目前,植被物候遥感中时序数据的平滑重构方法主要分为拟合和滤波两类<sup>[16]</sup>。拟合重构法常用的目标函数包括非对称高斯函数<sup>[17]</sup>,逻辑斯蒂函数<sup>[9]</sup>,双逻辑斯蒂函数<sup>[18]</sup>,局部三次样条函数<sup>[19]</sup>等。有学者基于多种物候提取方法监测了华北平原冬小麦物候,发现iNDVI-Logistic法在冬小麦物候提取研究可以获取更好的精度,但该研究采用的是1 km低空间分辨率的NDVI时间序列数据<sup>[20]</sup>。常用的滤波重构方法有SG滤波器<sup>[21]</sup>,惠泰克滤波器<sup>[22]</sup>,滑动均值滤波器<sup>[23]</sup>等,目前的重构方法需要时间间隔均匀的原始时序数据。MODIS NDVI时间序列产品在遥感提取物候期领域得到广泛应用,但MODIS空间分辨率低,多源高空间分辨率影像数据更适合田区尺度物候期提取的研究<sup>[24]</sup>。有学者基于哨兵2号数据采用一种动态时间规整方法监测了玉米物候期<sup>[25]</sup>,也有研究基于哨兵2号时间序列数据近实时地监测和预测了田间冬小麦和玉米的物候<sup>[26]</sup>。有学者通过优化形状模型从植被指数时间序列数据中提取了中国华北平原的冬小麦物候特征<sup>[27]</sup>。因此需要进一步研究如何基于多源遥感影像构成的NDVI时序数据提取具有真实生理意义的冬小麦物候特征。

基于NDVI时序特征进行物候期提取的方法中,常用的有阈值法和极值捕捉法<sup>[28]</sup>。早期植被遥感方法常用绝对阈值法,但不同年度作物生长情况各异,采用植被指数的绝对数值具有一定主观性<sup>[29]</sup>;动态阈值法基于当年植被指数的振幅设置固定的百分比阈值,一定程度上避免了绝对阈值法的局限<sup>[30]</sup>。极值捕捉法适合于植被指数极值点处的物候期提取,其优势是避免人为设置,提取的时间节点也具有相应的作物生长发育特征<sup>[31]</sup>。在传统像元尺度上,基于单一遥感数据提取的物候结果是以像元为最小单元的栅格遥感影像,并且往往是基于中低空间分辨率构建NDVI时间序列影像,在冬小麦田区边缘的跨地块混合像元导致物候期值不准确。田区即耕作田区,就是在设定的土地边界范围内可以进行各项田间作业的基本耕作单位<sup>[32]</sup>。同一田区具有同样的土壤、肥料和水分,因此同一耕作田区作物生长状况是一致的。因此对物候期栅格影像进行矢量化并获取田区的边缘,将以像元为单元的物候数据转为田区尺度物候空间分布结果,对于农业生产活动更加具有实际意义<sup>[33-34]</sup>。

鉴于目前遥感物候监测结果空间分辨率低,本文综合利用多源高时空遥感数据提取NDVI时序数据,并重构获取高时空NDVI时序曲线,使其能够反映冬小麦真实生长状态,在此基础上,采用极值捕捉法和动态阈值法准确提取冬小麦的物候期。而混合像元问题常导致一般的物候栅格影像结果值不准确,该研究将像元单位的栅格物候期结果矢量化,以期为准准确提取地块单元的田区尺度冬小麦物候期分布图提供参考。

## 1 研究区域和数据处理

### 1.1 研究区域

研究区域为安徽省亳州市利辛县(115°54'E~116°31'E,

32°51'N~33°27'N),位于华北平原,如图1所示。其地势西北略高,东南略低,自然坡降很小。气候类型为暖温带半湿润季风气候,日照充足、气候温和、雨量适中、四季分明。利辛县占地面积为2 005 km<sup>2</sup>,其中耕地面积134 800 hm<sup>2</sup>,是典型的农业大县。夏收作物主要为冬小麦,其播种面积占总耕地面积的80%左右。利辛县冬小麦在秋天播种,之后出苗分叶,冬季气温降低冬小麦越冬,生长迟缓,来年春天气温回升冬小麦返青,之后抽穗成熟,全生长周期从10月至次年6月,为240 d左右。

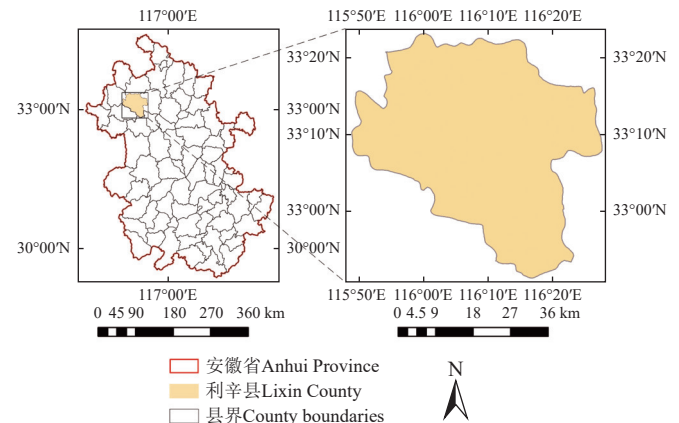


图1 研究区域地理位置

Fig.1 Location of study area

### 1.2 数据介绍

#### 1.2.1 光学卫星遥感数据源及处理方法

本文基于高分一号(GF-1)、环境二号(HJ-2)、Landsat-8和哨兵二号(Sentinel-2)4种光学卫星遥感数据计算NDVI指数,各卫星遥感数据参数情况见表1。挑选了2017年9月至2023年7月期间研究区域内无云覆盖的影像,数据筛选结果见图2。

表1 光学卫星遥感数据的参数

Table 1 The parameters of optical satellite data

光学卫星 Optical satellite	波段 Band	波长 Wave length/ $\mu\text{m}$	空间分辨率 Spatial resolution/m	回访期 Revisiting period/d
高分一号(GF-1)	蓝	0.45~0.52	16	4
	绿	0.52~0.59		
	红	0.63~0.69		
	近红外	0.77~0.89		
环境二号(HJ-2)	蓝	0.485	16	2
	绿	0.555		
	红	0.660		
	近红外	0.830		
Landsat-8	蓝	0.433~0.453	30	16
	绿	0.525~0.600		
	红	0.630~0.800		
	近红外	0.845~0.885		
哨兵二号 Sentinel-2	蓝	0.490	10	10
	绿	0.560		
	红	0.665		
	近红外	0.842		

图2中横纵坐标分别表示影像的获取日序数和年份。GF-1和HJ-2卫星影像数据来自陆地观测卫星数据服务网站(<https://data.cre-sda.cn/>)。这2种数据为Level-1A产品,需要基于ENVI软件对下载的影像进行预处理,

包括辐射定标、大气校正、正射校正, 得到实际的地表反射率影像。Landsat-8 卫星影像数据为美国地质勘探局 (USGS) 提供的 Landsat Collection 2 Level-2 产品, 该产品相较 Level-1 产品, 已使用 Land Surface Reflectance Code (LaSRC) 算法完成大气校正 (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>)。Sentinel-2 卫星影像数据为欧洲空间局提供的 Sentinel-2 MSI Level-2 产品, 已完成大气校正 (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2>)。

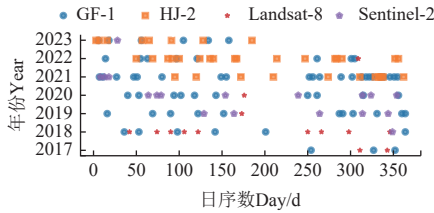


图 2 GF-1、HJ-2、Landsat-8、Sentinel-2 无云影像筛选

Fig.2 Cloud-free image selection for GF-1, HJ-2, Landsat-8, and Sentinel-2 imagery

本文使用的 Landsat-8 和 Sentinel-2 影像数据均为 Level-2 级别产品, 已完成大气校正步骤, 但 Landsat-8 为 Collection 2 产品, 其数据存储方式相比 Sentinel-2 有所不同, 需要将原数据中数字数值 ( $DN$ ) 进行相关转化才能得到地表反射率, 两者地表反射率计算式如下:

$$SR_{\text{Sentinel-2}} = 0.0001 DN_{\text{Sentinel-2}} \quad (1)$$

$$SR_{\text{Landsat-8}} = 0.0000275 DN_{\text{Landsat-8}} - 0.2 \quad (2)$$

式中  $SR$  为地表反射率,  $DN$  为原数据中的数字数值。

所有的地表反射率影像均经过几何配准处理, 并进行空间重采样至 16 m 空间分辨率。最后计算得到 NDVI 影像数据。计算式为

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (3)$$

式中  $NIR$  为近红外波段的反射值,  $R$  为红光波段的反射值。

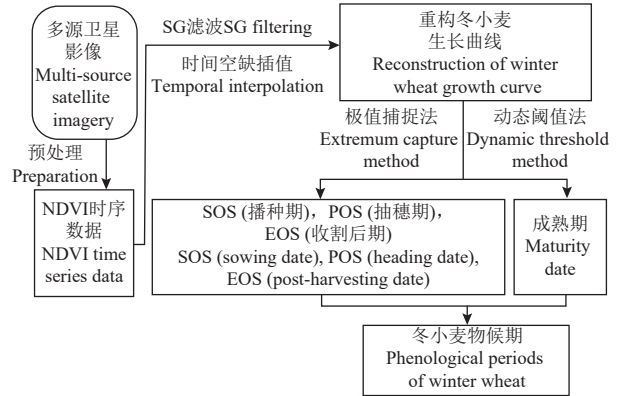
### 1.2.2 其他数据

本文使用数字高程模型 (DEM) 数据对 GF-1 和 HJ-2 遥感影像进行了正射校正, DEM 数据来自于 Terra 卫星搭载的高级空间辐射测量仪全球的数字高程模型第三版数据集 (ASTER Global Digital Elevation Model V003), 空间分辨率为 30 m, 下载自 NASA 的在线数据搜索平台 (<https://search.earthdata.nasa.gov>)。研究用到了中国气象局地面观测站提供的阜阳站 (站号 58203) 2017-2023 年逐日降雨量和气温数据, 以及安徽省亳州市统计局公布的历年冬小麦播种面积数据。同时, 为了目视解译农田区域, 还用到了高分辨率的谷歌地球 (Google Earth) 影像。

## 2 研究方法

本文以冬小麦为研究对象, 基于多源光学遥感影像

生成冬小麦生育阶段 NDVI 影像。为减少多云天气对 NDVI 时序曲线的影响, 采用三次样条和线性插值的方式补齐云覆盖时期的影像数据, 再结合 SG 滤波重构冬小麦生长过程中的 NDVI 时序曲线。最后通过极值捕捉法和动态阈值法提取冬小麦的成熟期, 并对 4 种物候期进行矢量化。技术路线如图 3 所示。



注: SOS, 生长季开始期; POS, 生长季峰值; EOS, 生长季结束期。  
Note: SOS, start of season; POS, peak of season; EOS, end of season.

图 3 遥感提取冬小麦物候期技术路线

Fig.3 The technical route for extracting the phenological periods of winter wheat

### 2.1 NDVI 时间序列曲线重构

遥感数据采集过程中常受大气状况、观测条件和平台性能差异等因素干扰, 导致 NDVI 时序数据中出现噪声和影像缺失现象, 需进行曲线重构并抑制噪声和改善数据质量, 进而通过曲线展示出作物生育期真实的生长过程。本文首先通过三次样条和线性插值的方式进行时间空缺插值, 再结合 SG 滤波重构出冬小麦的生长曲线。

#### 2.1.1 时间空缺插值

插值的方法主要有线性插值、多项式插值和三次样条插值等<sup>[35]</sup>, 其中线性插值适用于数据点之间变化较为平缓的情况, 多项式插值通过拟合一个低阶多项式曲线来估算缺失值, 但存在过拟合风险。而三次样条插值通过定义特定的光滑约束条件保证插值结果连续且平滑, 在保持数据整体平滑性的同时, 能较好地反映复杂变化趋势。CHEN 等<sup>[19]</sup>在 2006 年提出局部调整三次样条插值法重构叶面积指数数据, 该方法通过不断调整局部平滑参数, 逐步用插值替换异常低值。本文采用局部三次样条插值法填补原始 NDVI 时间序列中的不均匀间隔数据。理想情况下, 局部三次样条插值能够填补时间序列中的空缺, 使得时间间隔统一为 1 d。然而当两个时相间隔较短时, 这两个时相的 NDVI 值差异会被放大, 导致三次样条插值出现异常波峰或波谷。因此, 当局部三次样条函数出现摆动时, 为了使得曲线更加符合植被真实生长形态, 改用线性插值以填补时间空缺。如图 4 椭圆形中的插值曲线所示。



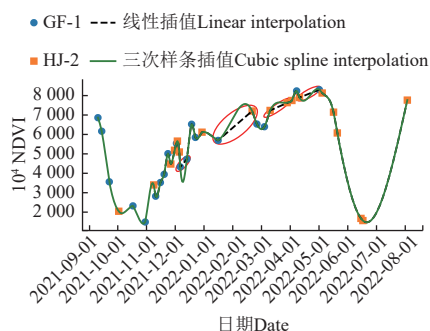


图4 NDVI 时空缺插值

Fig.4 The temporal interpolation of NDVI time series data

### 2.1.2 SG 滤波平滑处理

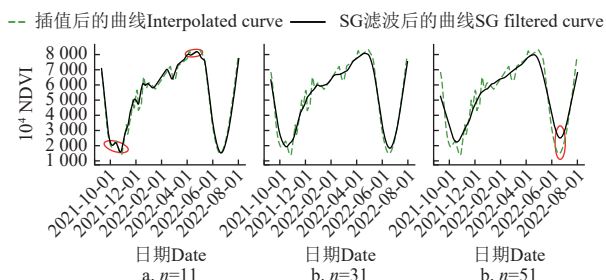
SG 滤波器是一种简化的最小二乘拟合卷积<sup>[36]</sup>。研究表明, SG 滤波有较好的平滑作用<sup>[37-39]</sup>。SG 滤波器由输入的滤波窗口宽度和多项式次数生成, 通过对滤波数据进行卷积计算来平滑数据。计算式如下:

$$NDVI_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} c_i NDVI_{j+i}}{n} \quad (4)$$

式中  $NDVI_j^*$  为 SG 滤波后得到的 NDVI 值;  $NDVI_{j+i}$  为时间窗口内第  $i$  个遥感影像 NDVI 观测值;  $c_i$  为  $NDVI_{j+i}$  对应的权重;  $m$  为滤波窗口前后宽度;  $n$  为滤波窗口大小即  $2m+1$ 。

如图 5 是窗口  $n$  大小分别为 11、31、51 时 SG 滤波后的效果比较。

当设置的 SG 滤波窗口较小时, 平滑效果不明显, 局部可能出现多个极值点, 不利于冬小麦关键物候期监测。如图 5a 滤波窗口大小为 11, 图中椭圆内出现多个波谷和波峰极值点。当 SG 滤波窗口较大时, 滤波结果与原数据结果差异较大, 无法反映实际情况。如图 5c 中椭圆中的两个波谷, 滤波后的波谷比原始结果高很多。因此本文设置滤波窗口大小为 31, 对插值后的 NDVI 数据进行滤波。如图 5b 所示, 通过比较发现平滑效果比另外两种窗口大小好。

图5 不同窗口大小 ( $n$ ) SG 滤波效果比较Fig.5 Comparison of SG filter effects with different window sizes ( $n$ )

## 2.2 基于重构后的 NDVI 时序曲线特征的冬小麦关键物候期监测

整个冬小麦生育期可分为营养生长阶段和生殖生长阶段。营养阶段从冬小麦播种到抽穗前, 生殖生长阶段是从抽穗到成熟, 最后收割。根据冬小麦的生长特性, 播种期、抽穗期和收割后期处于 NDVI 极值点处, 成熟

期则不是极值点。因此本文基于重构后的冬小麦 NDVI 时序曲线, 采用极值捕捉法提取冬小麦 3 个物候期即起始期、峰值期和结束期, 采用动态阈值法提取冬小麦的成熟期。

### 2.2.1 极值捕捉法提取冬小麦生长季起始期、峰值期和结束期

冬小麦于 11 月前后播种, 之后小麦出苗分叶, 期间冬小麦田地 NDVI 值开始逐渐上升。来年 4 月中旬即抽穗扬花, 冬小麦由生长阶段转为生殖阶段, 冬小麦田地 NDVI 值此时达到峰值。之后开始下降, 6 月后成熟、收割, 冬小麦田地 NDVI 回到低值。整个生育期内冬小麦生长曲线大致呈先上升后下降的趋势。极值捕捉法是通过提取重构后 NDVI 时序曲线中的极值点, 并根据冬小麦生长特性得到相应的物候期。

冬小麦耕作周期内 NDVI 时序曲线先上升后下降, 分别对应营养生长阶段和生殖生长阶段。通过判断冬小麦生长曲线上升和下降趋势的变化可以确定冬小麦的物候期。当曲线从下降趋势转为上升趋势, 或从上升趋势转为下降趋势时, 曲线会出现极值点。本文通过极值捕捉法监测冬小麦的生长季起始期 SOS (start of season)、峰值 POS (peak of season) 和生长季结束期 EOS (end of season)。如图 6 所示, 重构后 NDVI 时序曲线上第一次上升处为第一个极小值点, 是冬小麦生长季开始时间点 SOS 即播种期。

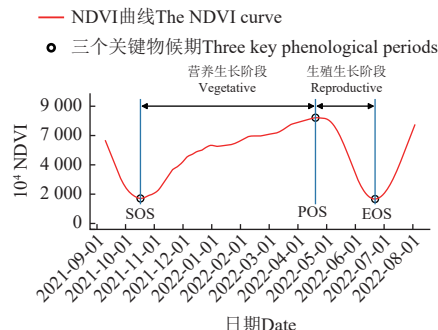


图6 极值捕捉法提取冬小麦物候期

Fig.6 Extracting phenological periods of winter wheat using the extremum capture method

极大值点 POS 出现在 NDVI 时序曲线从上升转为下降的时间点, 是从营养生长阶段转为生殖生长阶段, 即抽穗期。第二个极小值点出现在 NDVI 时序曲线不再下降处, 是冬小麦生长季结束的时间点即结束期 EOS, 是冬小麦收割后期。

### 2.2.2 动态阈值法提取冬小麦成熟期

WHITE 等提出的动态阈值法是基于 NDVI 指数定义了植被生育期的开始和结束时间点<sup>[40]</sup>。本文在植被生长曲线下下降阶段, 将曲线上距离 NDVI 最小值增幅 50% 的位置定义为大部分叶片开始变黄, 仅仅保留若干绿叶时间点 (即 NDVI 最小值与 NDVI 最大值差值的 50%)。在持续 20 d 左右的灌浆后, 冬小麦进入成熟期, 茎秆、麦粒也由绿变黄, 此时 NDVI 曲线下降至振幅 50% 处。如图 7 所示, 在 NDVI 时序曲线下下降阶段即冬小麦生殖

生长阶段,选择动态阈值为 50% 振幅点作为冬小麦物候特征的成熟期。

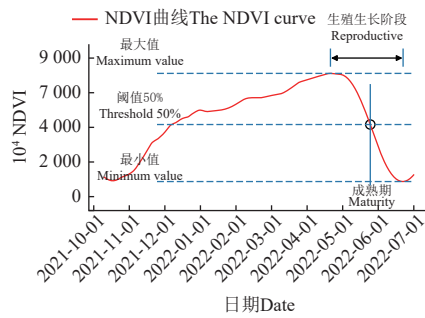


图 7 动态阈值法提取冬小麦物候期

Fig.7 Extracting phenological periods of winter wheat using the dynamic threshold method

在同一田区或地块冬小麦的生长发育过程基本呈现同样的物候期特征,以田区为最小单元获取的物候特征对于农业生产活动更加具有实际意义。基于 NDVI 时序曲线特征提取的冬小麦 4 种物候期空间分布,是基于像元获取的栅格影像,影像中在冬小麦地块边缘的跨地块混合像元导致物候期值不准确。因此本文基于计算机视觉库对物候期栅格影像结果进行矢量化<sup>[41]</sup>,将栅格的物候期结果转为地块尺度结果,降低混合像元的影响。

### 3 结果与分析

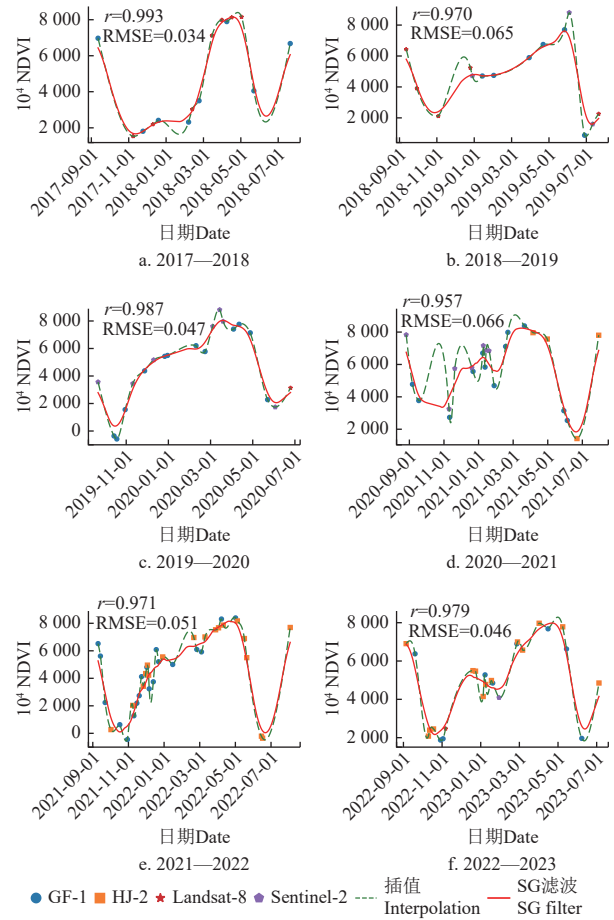
本文基于重构的 NDVI 时序曲线,提取了安徽省亳州市利辛县 2017~2023 年 6 个年度的物候期空间分布。以下是 NDVI 时序曲线重构结果和以地块为单元的田区尺度冬小麦物候期结果展示。最后将遥感提取的物候期结果与田间数据进行比较。

#### 3.1 NDVI 时序曲线重构结果

本文以利辛县某一点 (33°4'36.40"N, 116°16'55.71"E) 6 个年度 NDVI 曲线重构结果为例进行展示。如图 8 所示。

6 个年度冬小麦 NDVI 重构结果相关系数平均值为 0.979, 均方根误差平均值为 0.049。其中相关系数最小值为 0.957, 出现在 2020—2021 年。2018—2019 年均方根误差最大, 值为 0.066。从图 8 中各个年度 NDVI 重构值和原始值之间的相关系数和均方根误差可看出, NDVI 曲线重构结果满足平滑连续的要求。并且 NDVI 重构时序曲线保留了原时序数据中走向趋势和动态变化情况。2017—2018 和 2018—2019 两个年度利辛县可用的高质量无云影像数量较少, 之后几年随着 HJ-2 和 Sentinel-2 卫星影像的加入, 可用的高质量无云影像越来越多, 原始时序数据的时间分辨率也越来越高。2020 年 1 月中旬, 2021 年 12 月初和 2023 年 1 月这 3 个时间段均在短期内能够获得多幅高质量无云影像, NDVI 值在短期内呈现一定波动, 但波动程度不大, 并且经 SG 滤波后的 NDVI 时序曲线准确反映了冬小麦的生长状态。2022—2023 年度冬小麦 NDVI 曲线在 1 月末出现下降趋势, 原因可能是 2023 年 1 月份气温过低, 冬小麦出现越冬现象<sup>[42]</sup>, 生长停滞, 导致 NDVI 时序曲线呈现双峰曲

线结构。从 NDVI 时序曲线重构结果可以看出, 重构后的 NDVI 曲线满足平滑连续的要求, 同时也保留了原始数据中更多的局部动态信息。



注:  $r$  为相关系数; RMSE 为均方根误差。

Note:  $r$  is correlation coefficient; RMSE is root mean square error.

图 8 6 个年度 NDVI 曲线重构结果

Fig.8 Reconstruction results of NDVI curves over six periods of duration

#### 3.2 6 个年度的田区尺度物候期提取结果

图 9 为各年度田区尺度物候期结果的箱线图, 4 幅子图分别为利辛县冬小麦 6 个年度的 SOS 播种期、POS 抽穗期、成熟期和 EOS 结束期数据分布箱线图。从图中可以看出, 2017—2018 年度冬小麦播种明显晚于其他 5 年, 基本在 11 月后才开始播种, 其余 5 年内冬小麦平均播种时间为 10 月中旬; 2019—2020 年度和 2020—2021 年度抽穗期明显早于其他 4 年; 2019—2020 年度小麦成熟时间为 6 年内最早, 5 月上旬即成熟, 同时该年度冬小麦收割时间也最早, 6 月上旬即完成收割。

空间分布上, 图 10 以 2020—2021 年度为例展示了冬小麦物候期田区尺度结果, 4 幅子图分别代表该年度播种期、抽穗期、成熟期和收割后期空间分布情况。该年度成熟期和收割后期在空间分布上比较均衡, 而播种期在空间分布上差异较大, 其他年度的物候期空间分布情况大致相同。此外还可发现, 2020—2021 年度利辛县北部冬小麦成熟相比南部较晚, 该年度利辛县北部冬小麦收割后期相比南部也有滞后。

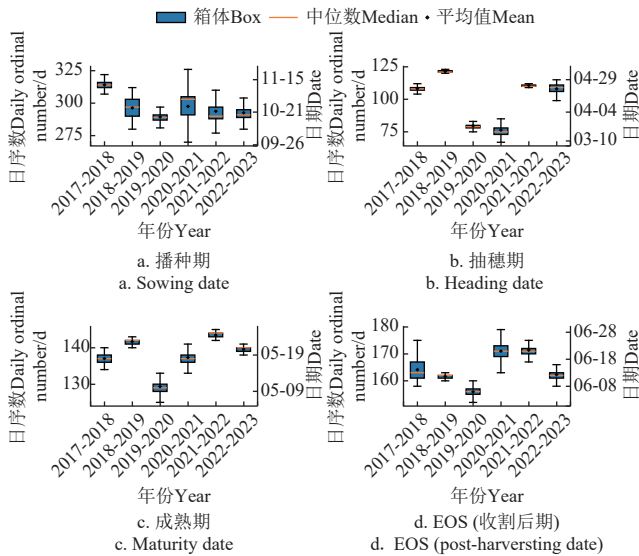


图9 各年度冬小麦物候期数据分布箱线图

Fig.9 The data distribution boxplot of winter wheat phenological periods over six years

### 3.3 遥感物候结果与田间数据对比

本研究在利辛县进行了实地田间调查,收集整理了冬小麦的播种、抽穗和收割期的地块物候数据。如表2所示,本文将物候期遥感提取结果的平均值与田间调查数据进行了对比验证和分析。

遥感提取生长季起始期 SOS 基本处于 10 月中旬至

11 月初范围内,其中 2019—2020 年度、2021—2022 年度和 2022—2023 年度的遥感起始期和田间播种期相差不超过 10 d。遥感提取抽穗期基本在 4 月左右,遥感结果和田间数据也同时显示出 2019—2020 年度抽穗期略早于其他 4 年的情况。2020—2021 年度的遥感抽穗期也早于其他 4 年,尽管缺少 2020—2021 年度抽穗期田间数据,但该年度利辛县农业气象站发布了抽穗期提前的预警信息。因此遥感提取的冬小麦生长季起始期 SOS 和峰值期 POS 与田间播种期和抽穗期数据基本一致。

遥感提取成熟期基本在 5 月中下旬,遥感提取生长季结束期 EOS 基本在 6 月中旬,田间调查得到的收割期基本在 5 月底 6 月初。遥感成熟期采用的是冬小麦生殖阶段 NDVI 曲线 50% 振幅点,而冬小麦进入成熟初期时,穗颈首先转黄,大部分叶片开始变黄,植株顶部保留 1~2 片绿叶,此时 NDVI 下降至振幅的 50%,所以遥感提取的成熟期是成熟早期。成熟早期收割会干扰植株茎叶中可溶性物质向籽粒的有效转移,阻碍籽粒充分灌浆,最终导致籽粒发育不良及产量下降,所以田间收割期会晚于成熟早期。遥感结束期的判定标准是 NDVI 值达到最低点的时间,NDVI 最小值的记录反映的是秸秆被打捆离田后的田间状态,因此从表2中可以看出遥感结束期是在田间收割期之后。综上所述,根据田间调查所得的收割时期介于遥感提取的成熟期与生长季结束期 EOS 之间。

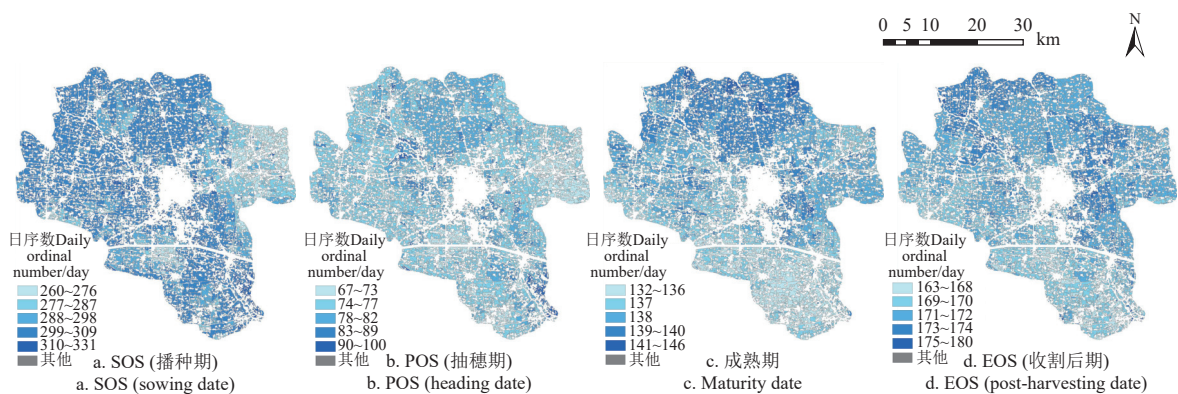


图10 利辛县 2020—2021 年度冬小麦物候期结果

Fig.10 Winter wheat phenological periods in Lixin county from 2020 to 2021

表2 遥感提取结果与田间冬小麦物候期数据对比

Table 2 Comparison of extraction results by remote sensing and field data for winter wheat phenology

年份 Year	遥感起始期与田间播种期 SOS-RS and field sowing date		遥感峰值与田间抽穗期 POS-RS and field heading date		遥感成熟期和结束期与田间数据 Maturity-RS, EOS-RS and field harvesting date		
	SOS-RS	田间播种期 Field sowing date	POS-RS	田间抽穗期 Field heading date	Maturity-RS	田间收割期 Field harvesting date	EOS-RS
2017-2018	11.11	无	4.19	4.13 后	5.17	6.1-6.7	6.13
2018-2019	10.24	无	5.2	4.18	5.21	6.1-6.11	6.10
2019-2020	10.17	10.15 左右	3.20	3.20 后	5.8	5.25 后	6.3
2020-2021	10.24	无	3.18	无	5.17	6.1 后	6.20
2021-2022	10.21	11.2 基本结束	4.21	4.13-4.21	5.23	6.2 后	6.20
2022-2023	10.20	10.27 接近尾声	4.19	4.18	5.19	6.1-6.9	6.11

注: SOS-RS, 遥感提取的生长季开始期; POS-RS, 遥感提取的生长季峰值; EOS-RS, 遥感提取的生长季结束期; Maturity-RS, 遥感提取的成熟期。

Note: SOS-RS, start of season by remote sensing; POS-RS, peak of season by remote sensing; EOS-RS, end of season by remote sensing; Maturity-RS, Maturity date by remote sensing.



4 讨 论

遥感提取物候期中大多采用单一类型传感器，其中，MODIS 卫星传感器时间分辨率高但空间分辨率低，通常适用于大范围区域的研究<sup>[43-44]</sup>。Landsat 系列卫星影像数据在物候期提取研究中也得到了广泛应用<sup>[45-46]</sup>。但其时间分辨率相对较低，受云雨天气制约大。当在作物成熟阶段，NDVI 短时间内急剧下降，而该特定物候阶段无法获得无云图像时，难以准确捕捉 NDVI 动态变化，进而影响物候期提取精度。本文基于高分一号、环境二号、Landsat-8 和哨兵二号 4 种高空间分辨率数据，获取高时空 NDVI 时间系列数据，并对此非均匀时间序列数据进行了重构。有研究通过双逻辑函数拟合重构 NDVI 时序曲线来确定作物 SOS 和 EOS 两个物候特征<sup>[47]</sup>；也有研究基于 SG 滤波法重构 NDVI 时间序列曲线，提取了漳州市水稻的物候参数<sup>[48]</sup>；本文对高时空 NDVI 时序数据进行时空空缺插值后，采用 SG 滤波法进行重构。以下将采用单逻辑函数和双逻辑函数拟合法以及 SG 滤波法，对冬小麦 NDVI 时序数据的重构进行讨论。

部分学者进行了作物或农田物候动态对气候的响应研究，有研究发现春小麦对降水的敏感度小于冬小麦，但对日照时数的敏感度大于冬小麦<sup>[49]</sup>；有学者基于双因子相关分析，发现温度是影响不同区域冬小麦关键生育期变化的主要原因<sup>[50]</sup>；有研究通过分析东北地区农田物候动态发现，农田物候受气温与降水量的影响较为明显，受日照时数影响不大<sup>[4]</sup>。本文基于 LUO 等<sup>[51]</sup>的研究结果，对利辛县 2017—2019 两个年度的冬小麦物候期遥感提取结果进行了进一步的分析。本文田区尺度物候期结果显示，冬小麦生长期、成熟期和结束期年际变化较小，但是峰期即抽穗期年度变化很大，2019—2020 年度和 2020—2021 年度冬小麦抽穗期相比其他 4 个年度早了近 30 d，因此本文进一步讨论了冬小麦抽穗期年度差异和气候变化响应。

4.1 SG 滤波法、单逻辑函数和双逻辑函数拟合法重构 NDVI 时序数据的比较分析

本文以利辛县某一点（33°4'36.40"N，116°16'55.71"E）2022-2023 年度冬小麦 NDVI 时序数据为例，采用 SG 滤波法，双逻辑函数拟合法和单逻辑函数分段拟合法 3 种方法分别对此时序数据进行重构，如图 11 所示。图中，

实线为 SG 滤波法重构结果，虚线 1 为双逻辑函数拟合法重构结果，虚线 2 为单逻辑函数拟合重构 NDVI 上升和下降分阶段的结果。从图中可以看出，SG 滤波法较好地还原了冬小麦总体先上升后下降的生长趋势，其中在 1 月份越冬期，冬小麦生长停滞，SG 滤波法也还原了冬小麦越冬期 NDVI 小幅下降趋势。双逻辑函数拟合法同样反映了冬小麦总体先上升后下降的生长趋势，但掩盖了冬小麦越冬期的动态变化。分段单逻辑函数拟合法在冬小麦生长周期的始末拟合效果较好，但无法反映冬小麦越冬返青期间的生长状态，同时由于单逻辑函数分段拟合法得到的前后两段曲线未结合在一起，因此无法捕捉 NDVI 最大值（抽穗）出现的时间。本文采用 SG 滤波法重构 NDVI 时序数据，更加能够真实地反映冬小麦的生长生理状态。

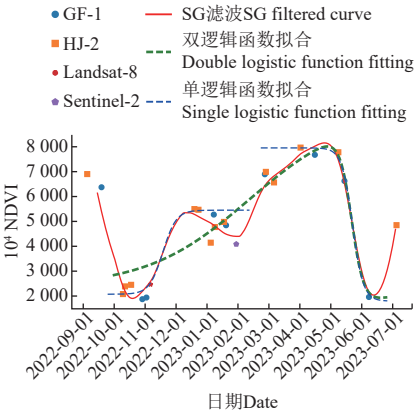


图 11 SG 滤波法、双逻辑函数和单逻辑函数拟合法重构 NDVI 时序数据的比较分析

Fig.11 The comparison about reconstruction results of NDVI data by SG filtering, double logistic function and single logistic function fitting

4.2 与其他物候研究结果的比较分析

LUO 等<sup>[51]</sup>基于全球地面卫星叶面积指数（GLASS LAI）数据，构建了中国 2000—2019 年中国三大粮食作物（小麦、玉米和水稻）的物候数据集，其空间分辨率为 1 km。该数据集以生长周期内作物叶面积指数变化反映其物候变化特征。如表 3 所示，本文用此数据集与 2017—2018 和 2018—2019 两个年度的冬小麦抽穗期和成熟期遥感提取结果进行对比，进行了最大值、最小值和平均值 3 个特征的对比分析。

表 3 遥感提取冬小麦物候期结果与文献数据对比

Table 3 The comparison between the extraction results by remote sensing and literature data of winter wheat phenological periods							
年度 Year	物候期 Phenology	DOY 最大值 Maximum value/d		DOY 最小值 Minimum value/d		DOY 平均值 Average value/d	
		提取结果 Extraction results	文献数据 Literature data	提取结果 Extraction results	文献数据 Literature data	提取结果 Extraction results	文献数据 Literature data
2017—2018	成熟期	140	153	134	129	137	141
	抽穗期	112	121	101	105	108	106
2018—2019	成熟期	144	161	139	129	142	142
	抽穗期	125	121	118	89	121	106

从结果的范围上看，本文遥感提取结果更加集中；从平均值的对比上看，本文遥感提取结果和 LUO 等的文

献数据差异不大,基本都在 5 d 之内。

### 4.3 冬小麦抽穗期年度差异与气候变化响应

本文将气温、降水和日照时数与冬小麦抽穗期进行对比,来分析其年度差异对气候变化的响应。气候数据包括 6 个年度 1 月 10 日~3 月 1 日冬小麦越冬返青期内的气温、1 月~4 月的降水和月内日均日照时数的变化情况。从图 12、13 中可以看出,2020 和 2021 年在抽穗前气温高于 6 年平均水平,2 月下旬日平均气温即达到 15℃,且这两年 1 月~4 月降水量和日均光照时长充足,因此 2020 和 2021 年抽穗期提前至 3 月,早于其他 4 年。而 2018 和 2019 年在抽穗前气温低于 6 年平均水平,日平均气温最高也只有 10℃左右,所以 2018 和 2019 年抽穗期也相对滞后。

尤其是 2019 年在 2 月 8 日后日均气温一直偏低,加上 2019 年 1 月~4 月降水匮乏,在抽穗的关键时期(4 月)降雨量为 65 mm,同时 2019 年 1 月~4 月日均日照时数也为 6 年最低。因此低温和水分匮乏加之光照不足延缓了冬小麦的发育进程,2019 年抽穗期推迟到 4 月底,为 6 年内最晚。另外从冬小麦耗水规律可知,冬小麦返青前植株较小,耗水量低,拔节抽穗时冬小麦生长迅速,耗水量急剧增加。所以气温若提前升高,在冬小麦结束越冬期开始返青时,如果有充足的水分和光照保障,就会导致抽穗提前;若返青拔节时气温偏低,降水却匮乏,加上光照不足,就会延缓冬小麦的发育进程,导致抽穗期延后。因此年际气温、降水和日照时数的变化会导致冬小麦抽穗年际之间的差异。

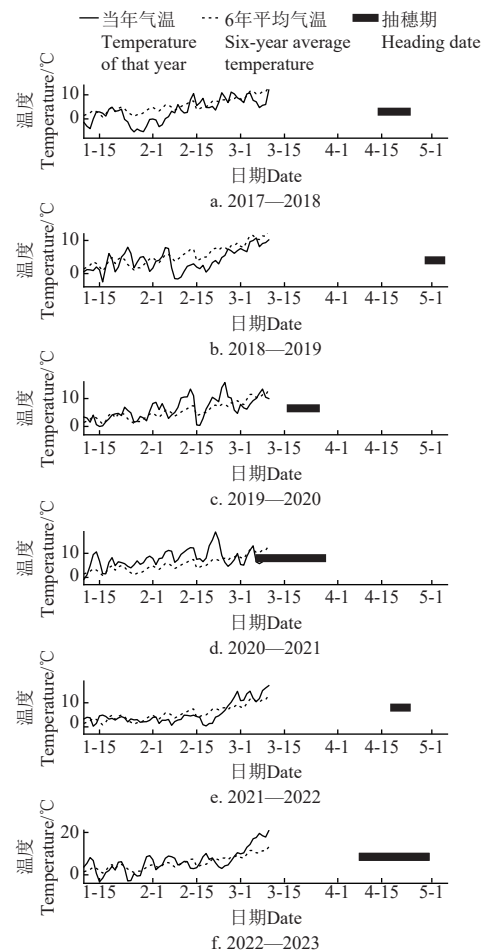


图 12 气温变化情况与冬小麦抽穗期差异对比  
Fig.12 The interannual difference comparison between temperature and winter wheat heading period

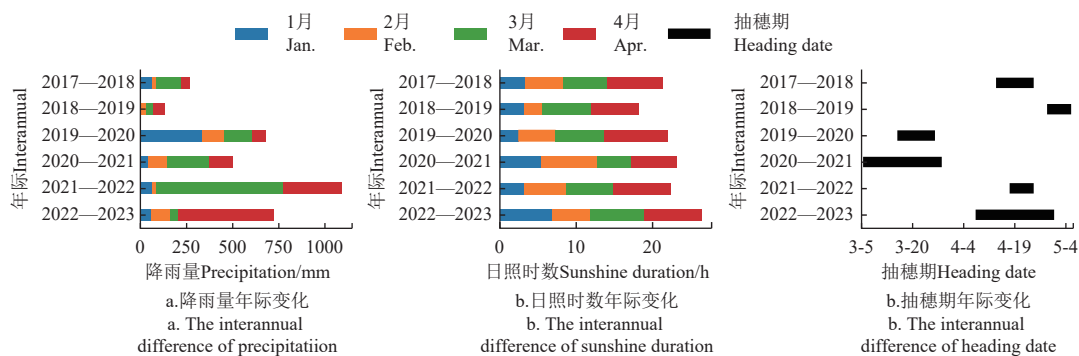


图 13 降雨量和日照时数年际变化情况与冬小麦抽穗期差异对比

Fig.13 The interannual difference comparison between precipitation and sunshine duration of winter wheat heading period

## 5 结 论

本文针对遥感数据时空分辨率不可兼得的矛盾,综合利用 GF-1、HJ-2、Landsat-8、Sentinel-2 多种高空间分辨率卫星影像,构建了高时空冬小麦 NDVI 时间序列数据集。为了解决多源遥感影像导致的时间不均匀问题,采用三次样条和线性插值的方式填补时序上的空缺,使其时间间隔均匀。然后基于 SG 滤波法重构时序数据,获取能够真实地反映冬小麦生长状态的 NDVI 时序曲线。最后通过极值捕捉法提取了 NDVI 时序曲线上的冬小麦

生长季开始期(播种期)、峰期(抽穗期)和结束期三种物候特征,使用动态阈值法提取了 NDVI 时序曲线上的冬小麦成熟期物候特征,并将物候期结果影像矢量化获取田区尺度冬小麦物候期空间分布。与田间物候期数据对比发现,遥感提取的冬小麦生长季起始期 SOS 和峰值期 POS 与田间播种期和抽穗期一致;田间调查所得的收割时期介于遥感提取的成熟期与生长季结束期之间。本文田区尺度的提取方法考虑了农田内部田块之间的差异性,实现了冬小麦物候信息的准确提取,为精准农业作物信息提取提供研究思路。最后分析利辛县 2017—



20236 个年度内冬小麦物候期结果, 发现抽穗期年度变化最大, 2019—2020 年度和 2020—2021 年度冬小麦抽穗期相比其他 4 个年度早了近 30 d。因此本文进一步讨论了冬小麦抽穗期年度差异与气候变化响应, 发现年际气温、降水和日照时数的变化会导致冬小麦抽穗期年际之间的差异。

总的来说, 本文基于冬小麦生育期内多源无云遥感影像, 采用插值和滤波法生成了能够反映冬小麦生长信息的 NDVI 时序平滑曲线, 并基于 NDVI 曲线变化特征节点提取了冬小麦物候期。进一步将遥感提取结果与田间数据和其他物候研究结果进行了对比分析和讨论, 结果显示基于多源遥感数据重构得到的 NDVI 曲线可以较为准确地提取冬小麦物候期。但从目前研究进展来看, 作物物候遥感中仍然没有普遍采用的时序数据重构方法, 滤波重构方法或多或少会引入一定的主观性。未来需要进一步研究通用性更好的方法, 以增加不同研究成果之间的可比性。

#### [参 考 文 献]

- [1] PIAO S, LIU Q, CHEN A, et al. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 1922-1940.
- [2] 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 Yujie, GE Quansheng, DAI Junhu. Research progress in crop phenology under global climate change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 14-24. (in Chinese with English abstract)
- [3] 丁大伟, 雍蓓蓓, 任文, 等. 2008—2022 年黄河故道冲积平原区冬小麦和夏玉米物候期观测数据集[J/OL]. *农业大数据学报*, [2024-07-30]. <https://doi.org/10.19788/j.issn.2096-6369.100029>.  
DING Dawei, YONG Beibei, REN Wen, et al. The dataset for crop phenology of winter wheat and summer maize in the alluvium plain of the old Yellow River from 2008 to 2022[J/OL]. *Journal of Agricultural Big Data*, [2024-07-30]. <https://doi.org/10.19788/j.issn.2096-6369.100029>. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张骞月, 张继真, 郝欣瑶, 等. 21 世纪初期东北地区农田物候动态及其对气候的响应[J]. *遥感技术与应用*, 2024, 39(2): 350-361.  
ZHANG Qian Yue, ZHANG Jizhen, HAO Xinyao, et al. Monitoring farmland phenology changes of Northeast China and their response to climate in early 21st Century[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2024, 39(2): 350-361. (in Chinese with English abstract)
- [5] SATOSHI K, MASANORI Y, RYO T, et al. Dual ensemble approach to predict rice heading date by integrating multiple rice phenology models and machine learning-based genetic parameter regression models[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 344: 109821.
- [6] 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 Yan, ZHANG Chengcai, LUO Weiran, 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 (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(14): 159-165. (in Chinese with English abstract)
- [7] ZHOU M, ZHENG H, HE C, et al. Wheat phenology detection with the methodology of classification based on the time-series UAV images[J]. *Field Crops Research*, 2023, 292: 108798.
- [8] 邢梦媛, 唐书玥, 张建军, 等. 基于节气时间尺度的华北冬小麦物候期时空分布变化研究及启示[J]. *古今农业*, 2023, 8(3): 121-132.  
XING Mengyuan, TANG Shuyue, ZHANG Jianjun, et al. Study on the applicability of the 24 solar terms agricultural proverbs under the background of climate change: Taking winter wheat in North China plain as an example[J]. *Ancient and Modern Agriculture*, 2023, 8(3): 121-132. (in Chinese with English abstract)
- [9] 协子昂, 张超, 冯绍元, 等. 植被物候遥感监测研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2023, 38(1): 1-14.  
XIE Ziang, ZHANG Chao, FENG Shaoyuan, et al. Reviews of methods for vegetation phenology monitoring from remote sensing data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2023, 38(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [10] ZHANG X, FRIEDL M A, SCHAAF C B. Sensitivity of vegetation phenology detection to the temporal resolution of satellite data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(8): 2061-2074.
- [11] ZHANG X, WANG J, GAO F, et al. Exploration of scaling effects on coarse resolution land surface phenology[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 318-330.
- [12] 孙莉昕, 朱文泉, 谢志英, 等. 陆表物候监测的遥感指数多维度评估[J]. *遥感学报*, 2023, 27(11): 2653-2669.  
SUN Lixin, ZHU Wenquan, XIE Zhiying, et al. Multi-dimension evaluation of remote sensing indices for land surface phenology monitoring[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(11): 2653-2669. (in Chinese with English abstract)
- [13] ZHENG H, CHENG T, YAO X, et al. Detection of rice phenology through time series analysis of ground-based spectral index data[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198: 131-139.
- [14] 郑一力, 田真, 关鹏, 等. 草原植被盖度与物候智能监测系统研制[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(18): 162-171.  
ZHENG Yili, TIAN Zhen, GUAN Peng, et al. Development of an intelligent monitoring system for vegetation coverage and phenology in grassland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(18): 162-171. (in Chinese with English abstract)
- [15] 谢宜嘉, 杨倍倍, 张镇, 等. 2000—2022 年北京市植被春季物候期变化特征分析[J/OL]. *自然资源遥感*, [2024-03-05]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1759.P.20240301.0907.004>.  
XIE Yijia, YANG Beibei, ZHANG Zhen, et al. Characterization of spring phenological period changes of vegetation in Beijing from 2000 to 2022[J/OL]. *Remote Sensing for Natural Resources*, [2024-03-05]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1759.P.20240301.0907.004>. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王敏钰, 罗毅, 张正阳, 等. 植被物候参数遥感提取与验证方法研究进展[J]. *遥感学报*, 2022, 26(3): 431-455.  
WANG Minyu, LUO Yi, ZHANG Zhengyang, et al. Recent advances in remote sensing of vegetation phenology: Retrieval algorithm and validation strategy[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(3): 431-455. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李佳, 唐志光, 邓刚, 等. 2001-2020 年青藏高原草地物候

- 变化遥感监测[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 265-274.
- LI Jia, TANG Zhiguang, DENG Gang, et al. Remote sensing monitoring of grassland phenological changes in the Qinghai-Tibetan plateau during 2001—2020[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4): 265-274. (in Chinese with English abstract)
- [18] ZHANG J, XIAO J, TONG X, et al. NIRv and SIF better estimate phenology than NDVI and EVI: Effects of spring and autumn phenology on ecosystem production of planted forests[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 315: 108819.
- [19] CHEN J M, DENG F, CHEN M. Locally adjusted cubic-spline capping for reconstructing seasonal trajectories of a satellite-derived surface parameter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(8): 2230-2238.
- [20] 侯学会, 隋学艳, 梁守真, 等. 几种物候提取方法的小麦物候提取[J]. 遥感信息, 2017, 32(6): 65-70.
- HOU Xuehui, SUI Xueyan, LIANG Shouzheng, et al. Comparison of five methods for phenology extraction of winter wheat[J]. *Remote Sensing Information*, 2017, 32(6): 65-70. (in Chinese with English abstract)
- [21] 范惠芳, 吕沛诚, 王品, 等. 基于遥感数据的杭嘉湖平原水稻物候变化特征研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2019, 18(6): 636-641.
- FAN Huifang, LYU Peicheng, WANG Ping, et al. Rice phenological variation characteristics in Hangjiahu plain based on remote sensing data[J]. *Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition)*, 2019, 18(6): 636-641. (in Chinese with English abstract)
- [22] EILERS P H C. A perfect smoother[J]. *Analytical Chemistry*, 2003, 75(14): 3631-3636.
- [23] MA M, VEROUSTRAETE F. Reconstructing pathfinder AVHRR land NDVI time-series data for the Northwest of China[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(4): 835-840.
- [24] ROSE M B, NAGLE N N. Characterizing forest dynamics with landsat-derived phenology curves[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(2): 267.
- [25] YE J, BAO W, LIAO C, et al. Corn phenology detection using the derivative dynamic time warping method and Sentinel-2 time series[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15: 3456.
- [26] LIAO C, WANG J, SHAN B, et al. Near real-time detection and forecasting of within-field phenology of winter wheat and corn using Sentinel-2 time-series data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 196: 105-119.
- [27] LIU L, CAO R, CHEN J, et al. Detecting crop phenology from vegetation index time-series data by improved shape model fitting in each phenological stage[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 277: 113060.
- [28] WANG M, LUO Y, ZHANG Z, et al. Recent advances in remote sensing of vegetation phenology: Retrieval algorithm and validation strategy[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(3): 431-455.
- [29] SHEN M, TANG Y, CHEN J, et al. Specification of thermal growing season in temperate China from 1960 to 2009[J]. *Climatic Change*, 2012, 114(3): 783-798.
- [30] 倪璐, 吴静, 李纯斌, 等. 近 30 年中国天然草地物候时空变化特征分析[J]. 草业学报, 2020, 29(1): 1-12.
- NI Lu, WU Jing, LI Chunbin, et al. Temporal and spatial variations in natural grassland phenology in China over the last 30 years[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(1): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [31] ZENG L, WARDLOW B D, XIANG D, et al. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237: 111511.
- [32] 于光远. 经济大辞典(上、下册)[M]. 上海: 上海辞书出版社, 1992: 466.
- [33] 谷鹤, 尚坤, 秦爱玲, 等. 地块尺度下基于多源卫星遥感数据的粮食作物识别[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 33-41.
- GU He, SHANG Kun, QIN Ailing, et al. Identification of grain crop using multi-source satellite remote sensing data at field parcel scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(16): 33-41. (in Chinese with English abstract)
- [34] 周楠, 杨鹏, 魏春山, 等. 地块尺度的山区耕地精准提取方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 260-266.
- ZHOU Nan, YANG Peng, WEI Chunshan, et al. Accurate extraction method for cropland in mountainous areas based on field parcel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(19): 260-266. (in Chinese with English abstract)
- [35] 武艳强, 黄立人. 时间序列处理的新插值方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(4): 43-47.
- WU Yanqiang, HUANG Liren. A new interpolation method in time series analyzing[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2004, 24(4): 43-47. (in Chinese with English abstract)
- [36] SAVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8): 1627-1639.
- [37] WANG X, ZHANG S, FENG L, et al. Mapping maize cultivated area combining MODIS EVI time series and the spatial variations of phenology over Huanghuaihai Plain[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(8): 2667.
- [38] LI S, XIAO J, NI P, et al. Monitoring paddy rice phenology using time series MODIS data over Jiangxi Province, China[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2014, 7(6): 28-36.
- [39] 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): 332-344.
- [40] WHITE M A, THORNTON P E, RUNNING S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(2): 217-234.
- [41] 徐江华, 许文帅. 基于 OpenCV 和 GDAL 的影像自动解译结果矢量化方法[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(7): 100-102.
- XU Jianghua, XU Wenshuai. Vectorization of automatic image interpretation results based on OpenCV and Gdal[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2022, 45(7): 100-102. (in Chinese with English abstract)
- [42] 刘晓英, 郝国松. 气候变化对三河地区冬小麦生产适应性研究[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(2): 226-228, 232.
- LIU Xiaoying, HAO Guosong. Adaptation of climate change to winter wheat production in the Sanhe Region[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(2): 226-228, 232. (in Chinese with English abstract)
- [43] ZHANG M, FAN J, ZHU X, et al. Monitoring winter-wheat phenology in North China using time-series MODIS EVI[C]// *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XI*. Berlin, Germany: SPIE, 2009: 440-445.
- [44] CHU L, LIU G, HUANG C, et al. Phenology detection of winter wheat in the Yellow River delta using MODIS NDVI

- time-series data[C]// 2014 The Third International Conference on Agro-Geoinformatics. Beijing, China: IEEE, 2014: 1–5.
- [45] 蔡彩. 基于 Landsat 数据及光谱混合分析的城市扩展及物候变化提取与分析[J]. 北京测绘, 2019, 33(8): 993.  
CAI Cai. Extraction and analysis of urban expansion and phenological change using Landsat image time series and spectral mixture analysis[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2019, 33(8): 993. (in Chinese with English abstract)
- [46] 薛朝辉, 钱思羽. 融合 Landsat 8 与 Sentinel-2 数据的红树林物候信息提取与分类[J]. 遥感学报, 2022, 26(6): 1121–1142.  
XUE Zhaohui, QIAN Siyu. Fusion of Landsat 8 and Sentinel-2 data for mangrove phenology information extraction and classification[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(6): 1121–1142. (in Chinese with English abstract)
- [47] 杨悦, 杨贵军, 龙慧灵, 等. 基于遥感时序物候特征的耕地非粮化多模式监测方法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 283–294.  
YANG Yue, YANG Guijun, LONG Huiling, et al. Multi-modal recognition method for non-grain cropland using remote sensing time series[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(2): 283–294. (in Chinese with English abstract)
- [48] 姚园, 毋亭, 李一凡, 等. 基于水稻物候参数及面向对象算法的稻田识别[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 150–158.  
YAO Yuan, WU Ting, LI Yifan, et al. Paddy field identification using rice phenological parameters and object-oriented algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(11): 150–158. (in Chinese with English abstract)
- [49] 刘玉洁, 陈巧敏, 葛全胜, 等. 气候变化背景下 1981~2010 中国小麦物候变化时空分异[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(7): 888–898.  
LIU Yujie, CHEN Qiaomin, GE Quansheng, et al. Spatiotemporal differentiation of changes in wheat phenology in China under climate change from 1981 to 2010[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 48(7): 888–898. (in Chinese with English abstract)
- [50] 侯学会, 隋学艳, 姚慧敏, 等. 中国北方麦区冬小麦物候期对气候变化的响应[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(2): 202–209.  
HOU Xuehui, SUI Xueyan, YAO Huimin, et al. Response of winter wheat phenology to climate change in northern china[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(2): 202–209. (in Chinese with English abstract)
- [51] LUO Y, 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.

## Extracting the phenological periods of winter wheat at field scale based on the characteristics of NDVI time series curves from multisource remote sensing images

ZHANG Xiaochun, KUANG Mengke, SHI Liangsheng, ZHONG Li'ao, YI Ming

(State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Winter wheat has been one of the main food crops in the North China Plain. Crop phenology refers to the specific events of the crop life cycle that change with the seasons. It is of great significance to accurately obtain the regional phenological periods of winter wheat in agricultural production. Traditional monitoring phenological periods can rely primarily on laborious field observations, indicating the limited time and space. Remote sensing technology can be expected to monitor long-term and large-scale phenology. However, there are single data sources of traditional phenology monitoring technologies by remote sensing, leading to medium and low spatial resolution. The low accuracy of extraction cannot fully meet the demands of agricultural production. Normalized *Difference Vegetation Index* (NDVI) time series data is currently the main data source to extract the phenological periods through remote sensing. In this study, the multi-source remote sensing images were utilized to calculate and reconstruct the long-time series NDVI data. The optical remote sensing images were taken from GF-1, HJ-2, Landsat-8 and Sentinel-2. The spatial distribution maps of winter wheat were extracted in the phenological periods at field scale over six years. The smooth curves were then selected to truly reflect the wheat growing state in the natural state. The extraction model was also established for the phenology periods of winter wheat. Firstly, a temporally uneven NDVI image dataset was constructed using multi-source optical remote sensing data. Then a uniform daily NDVI dataset was obtained using interpolation methods. The NDVI time series curves were reconstructed through *Savitzky-Golay* (SG) filtering, in order to eliminate the noises of time series data. According to the relationship between the characteristics of winter wheat NDVI curves and phenological features, the raster images were finally extracted for three phenological stages: start of season (sowing), peak of season (heading), and end of season (post-harvesting) using the extremum method. The raster images for the maturity stage were extracted using the dynamic threshold. The pixel-scale phenological data was converted to the field scale using computer vision vectorization. Compared with the field survey data, the dates of the start of the season and the peak of the season by remote sensing were consistent with the sowing and heading dates from field data, respectively. The field harvesting dates were between the maturity and the end dates of the season by remote season. The results show that the sowing date for winter wheat in the 2017–2018 season was later than in the other five years; The heading date in the 2019–2020 and 2020–2021 seasons was significantly earlier than in the other four years; The maturity date in the 2019–2020 season was earlier than in the other five years, and the end date in this season was also earlier than in the other five years. Compared with the multi-year climate data and phenological extraction, if the temperature was higher, precipitation was sufficient and sunshine duration was longer in the period of overwintering and regreening, while the heading date was advanced accordingly. Therefore, the interannual difference in temperature, precipitation, and sunshine duration can lead to the interannual variation in the winter wheat heading date. The findings can provide scientific evidence to monitor the growth and development of winter wheat.

**Keywords:** NDVI; remote sensing; phenological periods; winter wheat; multisource remote sensing images; field scale