

基于MODIS NDVI时序数据的华北平原双季作物物候特征遥感监测研究

高增琦¹, 刘丹丹², 姬忠圆², 徐诗喆¹

¹大连海洋大学海洋科技与环境学院, 辽宁 大连

²大连海洋大学经济管理学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年6月7日; 录用日期: 2026年7月8日; 发布日期: 2026年7月15日

摘要

在精细化监测大尺度农作物物候节律对于评估区域粮食安全和优化农田管理具有重要意义。本研究基于NASA AppEEARS平台获取了华北平原核心农田区(114°E~120°E, 32°N~40°N)高时空分辨率的MOD13A2 (Version 061)逐16天1 km网格NDVI遥感产品。利用MATLAB对连续两个农业年(共47期)的时序数据进行空间边界严格裁剪、掩膜与区域均值统计重建, 排除了复杂山地与大面积水体的混合像元噪声, 成功提取了高纯净度的区域作物物候长势时序曲线。结果表明: 华北平原核心农田区的NDVI时序曲线呈现出极其典型且规律的“双峰一谷”年内物候特征, 完美映射了该区域“冬小麦-夏玉米”一年两熟制的典型农业轮作景观。在完整的一年轮作周期内, 曲线精准捕捉到了关键的农业物候节点。春季4至5月间(时序第9期与第32期), 冬小麦进入抽穗灌浆盛期, 形成年内第一个NDVI次高峰(均值约为0.56~0.58); 随后在6月份, 随着冬小麦的集中机械化收割, 地表大面积裸露, NDVI曲线发生断崖式下跌, 在第12期与第35期形成显著的麦收“谷底”(均值降至0.35左右)。7月以后, 播种后的夏玉米在高温多雨驱动下快速生长, 于8至9月间(对应时序第16期与第39期)达到全年的绝对波峰(均值超过0.72), 显现出夏玉米盛期的生物量积累与群落冠层茂密程度显著高于春季小麦盛期。两个完整农业年内双峰特征在时间位相与数值量级上表现出高度的年际稳定性和可重复性。本研究建立的数据处理与物候提取方案能够有效剔除外界随机噪声, 获取高纯净度的陆面物候背景场数据, 可为后续开展高级遥感参数反演、作物产量预测以及区域生态数值模拟验证提供规范、坚实的数据支撑。

关键词

华北平原, 物候监测, MODIS NDVI, 一年两熟制, AppEEARS

Remote Sensing Monitoring of Phenological Characteristics of Double-Cropping Crops in the North China Plain Based on MODIS NDVI Time-Series Data

文章引用: 高增琦, 刘丹丹, 姬忠圆, 徐诗喆. 基于 MODIS NDVI 时序数据的华北平原双季作物物候特征遥感监测研究[J]. 农业科学, 2026, 16(7): 1033-1040. DOI: 10.12677/hjas.2026.167125

Zengqi Gao¹, Dandan Liu², Zhongyuan Ji², Shizhe Xu¹

¹School of Marine Science and Environment, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

²School of Economics and Management, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

Received: June 7, 2026; accepted: July 8, 2026; published: July 15, 2026

Abstract

A Detailed monitoring of large-scale crop phenological rhythms is of great significance for assessing regional food security and optimizing farmland management. In this study, high-spatiotemporal-resolution MOD13A2 (Version 061) 16-day 1 km grid NDVI remote sensing products were obtained from the NASA AppEEARS platform for the core agricultural area of the North China Plain (114°E~120°E, 32°N~40°N). Using MATLAB, the time-series data from two consecutive agricultural years (a total of 47 periods) underwent strict spatial boundary cropping, masking, and regional mean statistical reconstruction. This process eliminated mixed-pixel noise from complex mountainous terrain and large water bodies, successfully extracting high-purity regional crop phenological growth time-series curves. The results indicate that the NDVI time series curves in the core farmland areas of the North China Plain exhibit an extremely typical and regular “two peaks and one trough” annual phenological pattern, perfectly reflecting the region’s typical “winter wheat–summer maize” two-crop-per-year agricultural rotation landscape. Throughout the complete annual rotation cycle, the curves accurately captured key agricultural phenological milestones. Between April and May (periods 9 and 32), winter wheat enters the peak stage of heading and grain filling, forming the first annual NDVI sub-peak (with an average of approximately 0.56~0.58); Subsequently, in June, as winter wheat was harvested en masse using mechanized methods, large areas of the ground were exposed, causing the NDVI curve to plummet precipitously, forming a distinct “trough” during the wheat harvest in periods 12 and 35 (with the mean dropping to around 0.35). After July, newly planted summer corn grew rapidly under the influence of high temperatures and abundant rainfall, reaching its annual absolute peak between August and September (corresponding to periods 16 and 39), with an average value exceeding 0.72. This indicates that biomass accumulation and canopy density during the peak growth period of summer corn were significantly higher than those of spring wheat. The bimodal pattern observed over two complete agricultural years exhibited high interannual stability and reproducibility in both temporal phase and magnitude. The data processing and phenological extraction protocol established in this study effectively filters out external random noise to obtain high-purity land surface phenological background data, providing standardized and robust data support for subsequent advanced remote sensing parameter inversion, crop yield forecasting, and validation of regional ecological numerical simulations.

Keywords

North China Plain, Phenological Monitoring, MODIS NDVI, Double-Cropping System, AppEEARS

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景及意义

农业是国民经济的基础，而粮食安全则是国家稳定与发展的重要基石。华北平原(North China Plain,

NCP)作为我国最核心的粮食主产区之一,拥有全国约四分之一的耕地面积,生产了全国近 50%的小麦和 33%的玉米[1]。该区域主要盛行“冬小麦-夏玉米”一年两熟制的集约化农业轮作模式[2],在保障国家粮食安全中发挥着不可替代的作用。植被物候(Vegetation Phenology)是指植被在生长发育过程中,受生物因子及气候、土壤等环境因子周期性变化影响而表现出的动态生命节律[3],如播种、出苗、返青、拔节、抽穗、成熟及收割等阶段。在高度人工干预的农田生态系统中,作物物候不仅是评估作物长势、预测区域粮食产量、监测旱涝灾害的关键地表参数,更是制定精准农田灌溉、科学施肥及精细化农业管理政策的重要依据。当前,在全球气候变暖以及极端气象事件频发的背景下,华北平原的农业物候特征、空间格局以及农业资源分配正经历着深刻的演变。因此,精细化监测并准确掌握华北平原大尺度作物的物候节律与时空演变特征,对于优化区域农业布局、应对气候变化以及提高农业生态系统数值模拟精度具有重大的科学价值和现实意义。

1.2. 遥感物候监测研究进展

传统的作物物候观测主要依赖于各级农业气象站的人工定点观测。这种观测方式虽然在局地尺度上具有极高的精确定量优势,但受限于观测站点的人力成本和空间分布密度,无法有效捕捉大尺度、连续且具有强烈空间异质性的农田物候信息。此外,传统观测在面对农作物种植结构调整或空间转移时,往往存在明显的滞后性。近几十年以来,卫星遥感技术的发展为大尺度、长周期和高频次的陆面物候动态监测提供了前所未有的机遇。遥感物候监测通常利用卫星反演的植被指数(Vegetation Indices, VIs),如归一化植被指数(NDVI)和增强植被指数(EVI)等[3],构建连续的时间序列曲线[4]-[6],进而通过物候特征点提取算法捕获作物生长周期的关键节点[6][7]。在众多遥感数据源中,美国航空航天局(NASA)的 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)传感器因其高时间分辨率(如 8 天或 16 天合成产品)、适中的空间分辨率(250 m 至 1 km)以及长达二十余年的连续观测历史,成为目前开展区域乃至全球尺度农业物候时序重建与长势演变监测的最主流数据源之一[4]。尽管基于 MODIS 的遥感物候研究已取得了丰硕的成果,但在面对华北平原这一复杂地表的空间物候解析时,依然面临诸多噪声干扰与技术瓶颈。华北平原核心区周边地理环境复杂,西侧紧邻高海拔、高植被覆盖度的太行山脉,东侧交错着渤海湾等大面积水体。在进行大尺度区域宏观统计与趋势反演时,若不进行严格的空间边界约束,山地的森林木本植物物候(通常为单峰物候)以及水体边界的混合像元(Mixed Pixels)噪声将会严重污染和拉平平原核心农田的双季作物时序信号(冬小麦与夏玉米的双峰特征)[8],从而导致区域平均物候特征模糊,降低后续陆面过程模型验证或产量预测反演的精度。

1.3. 本文研究方案与主要内容

针对上述科学问题与数据处理局限,本文提出了一种基于严格空间裁剪与区域统计重建的华北平原高纯净度作物物候遥感监测方案。本研究依托 NASA AppEEARS 平台,获取了覆盖华北平原核心农区(114°E~120°E, 32°N~40°N)空间分辨率为 1 km、时间分辨率为 16 天的 MOD13A2 (Version 061)长时序 NDVI 遥感产品,并在 MATLAB 平台下建立了严密的时空逻辑切片算法,彻底剔除了西侧高山植被噪声与东侧海洋水体的混合像元干扰,成功重建出连续两个完整农业年(共 47 期)的超高纯净度区域作物物候长势时间序列曲线。在此基础上,本文旨在定量解析严格限定边界后的平原核心农区夏季长势的空间异质性,精准捕捉并描绘“冬小麦-夏玉米”一年两熟轮作体制下,作物的返青、灌浆高峰、麦收低谷、玉米盛期以及冬季越冬等关键物候节点的发生位相与数值量级,并系统评估其特征曲线的年际稳定性和可重复性。为了全面阐述上述研究,全文结构安排如下:第二部分详细介绍研究所需的数据源、AppEEARS 获取平台以及基于 MATLAB 的数据预处理与空间裁剪方法;第三部分重点展示并定量分析华北平原的

NDVI 空间分布特征和高纯净度区域物候时序变化规律；第四部分则对驱动因素进行深入讨论并总结全文结论，以期为该区域后续的高级遥感参数反演、作物产量预测以及区域生态数值模拟验证提供规范、坚实且无污染的陆面物候背景场基础数据。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

本文研究区域聚焦于我国核心粮食主产区——华北平原的腹地地带。为了确保地表植被信号的纯净性，研究通过精确的空间坐标切片，将研究视角严格约束在东经 $114.0^{\circ}\text{E}\sim 120.0^{\circ}\text{E}$ 、北纬 $32.0^{\circ}\text{N}\sim 40.0^{\circ}\text{N}$ 的矩形网格区域内(如图 1 所示)。该区域行政区划主要涵盖了河南省、河北省、山东省以及山西省的部分平原农区。该区地处我国温带半湿润大陆性季风气候区，四季分明，光热资源丰富，年降水量较为充沛，为大面积集约化农业生产提供了优越的自然条件。区域内的耕地覆盖率极高，作物种植结构表现出高度的空间一致性与连绵性，千百年来形成了极其典型的“冬小麦-夏玉米”一年两熟制大宗农作物轮作体系，是我国遥感作物物候学及农业生态学研究的典型代表区域[9] [10]。

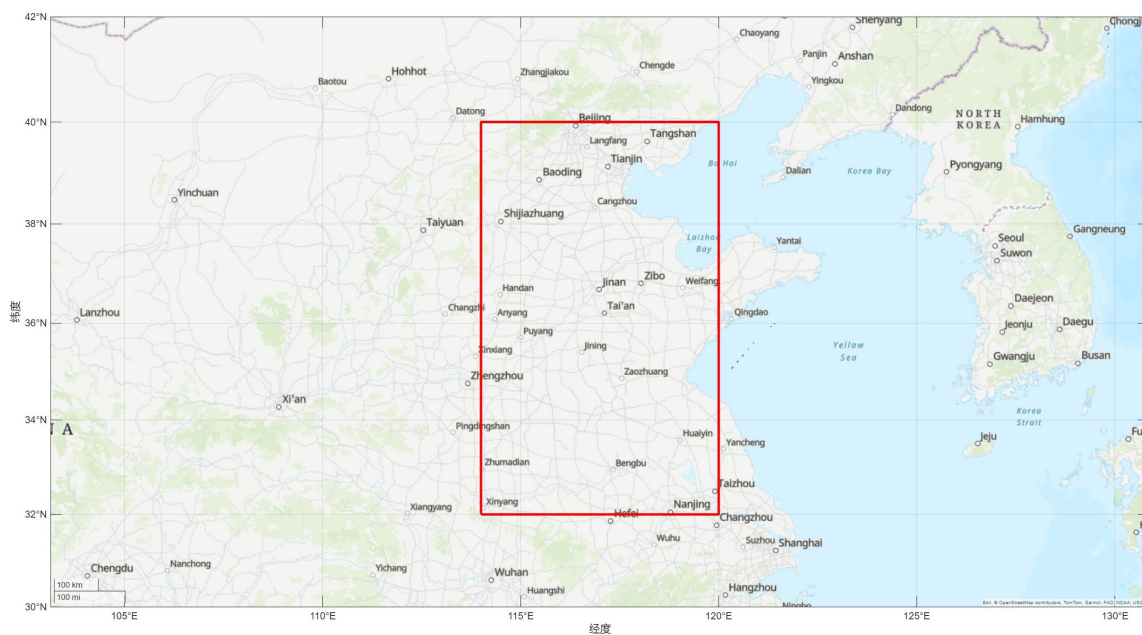


Figure 1. Research area: north China plain

图 1. 华北平原研究区域

2.2. 数据源及网络获取平台

本研究所采用的长时间序列陆面关键长势指标为归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)。卫星遥感数据源自美国航空航天局(NASA)陆地观测分布式活动归档中心(LP DAAC)发布的 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)传感器陆面标准产品 MOD13A2 (Version 061)。该产品的时间分辨率为 16 天(即全年固定划分为 23 期)，空间分辨率为 1 km 网格。该产品在发布前已经过严格的大气自适应校正、双向反射分布函数(BRDF)校正以及最大值合成(MVC)处理，极大地压制了日常日光角度、气溶胶及常规局部碎片云的随机干扰。数据的实际定制与切片获取依托 NASA 官方开发的 AppEEARS (Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples)高性能数据重采样平台。通过

在平台上提交研究所需的精细空间边界矩形及连续两个农业年(共计 47 期时间步)的时间跨度申请, 直接获取了针对研究区定制的高级数据准备就绪(Analysis Ready Data, ARD)的 NetCDF (.nc)格式科学数据集, 避免了传统大范围 HDF 影像拼接与投影转换带来的几何形变误差。

2.3. 数据预处理与空间裁剪算法

本研究的全流程数据清洗与提取均在 MATLAB 软件中完成。为避免研究区边缘复杂地物带来的混合像元干扰(如西侧太行山脉林木的单峰物候特征与东侧渤海湾大面积水体), 本研究基于经纬度向量构建了严格的逻辑掩膜, 将数据硬性裁剪并约束在 $114^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 、 $32^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 的平原核心农田网格内。最后, 对裁剪获取的纯净三维时空数据立方体执行区域均值统计, 并在计算过程中引入 omitnan 算子动态剔除由厚云或冰冻造成的局部无效值, 从而将大尺度空间影像成功降维并重建为一条连续、平滑且能够准确反映全区双季作物长势特征的一维物候时间序列曲线。

3. 结果与分析

精细刻画华北平原农田植被的时空分布特征, 本研究基于 MOD13A2.061 遥感数据, 对研究区域进行了严格的地理边界限定与异常值剔除(如图 2 所示)。从空间分布来看, 该区域 NDVI 呈现出显著的非均匀性特征。其中, 高植被覆盖区($\text{NDVI} > 0.7$, 图示红色区域)在平原腹地呈斑块状集聚, 表明该地区在夏季生长旺季具有极高的农作物覆盖度; 相比之下, 低植被覆盖区($\text{NDVI} < 0.4$, 图示蓝色区域)主要分布在研究区的边缘地带及水域周边, 表明本研究成功有效地通过经纬度掩膜, 规避了太行山脉、城市建设用地及大型水体对农作物物候监测造成的背景噪声干扰。该分布格局客观反映了华北平原农业生产活动的集约化与空间异质性, 为后续的物候时序特征解析提供了高精度的样本支撑。

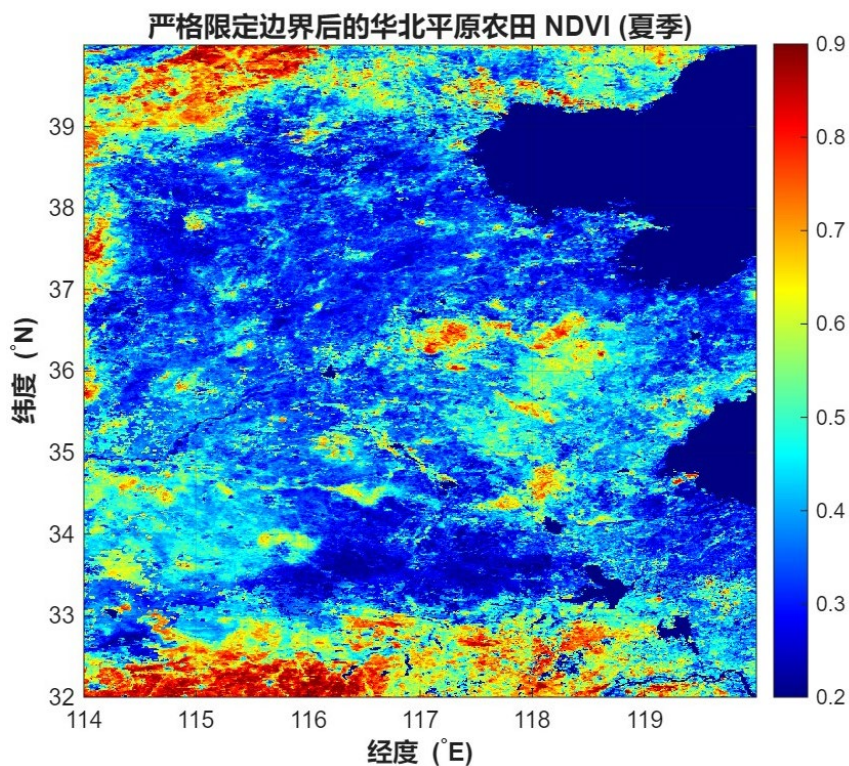


Figure 2. Summer NDVI for the north China plain

图 2. 华北平原夏季 NDVI

3.1. 基于物候特征的时空动态监测

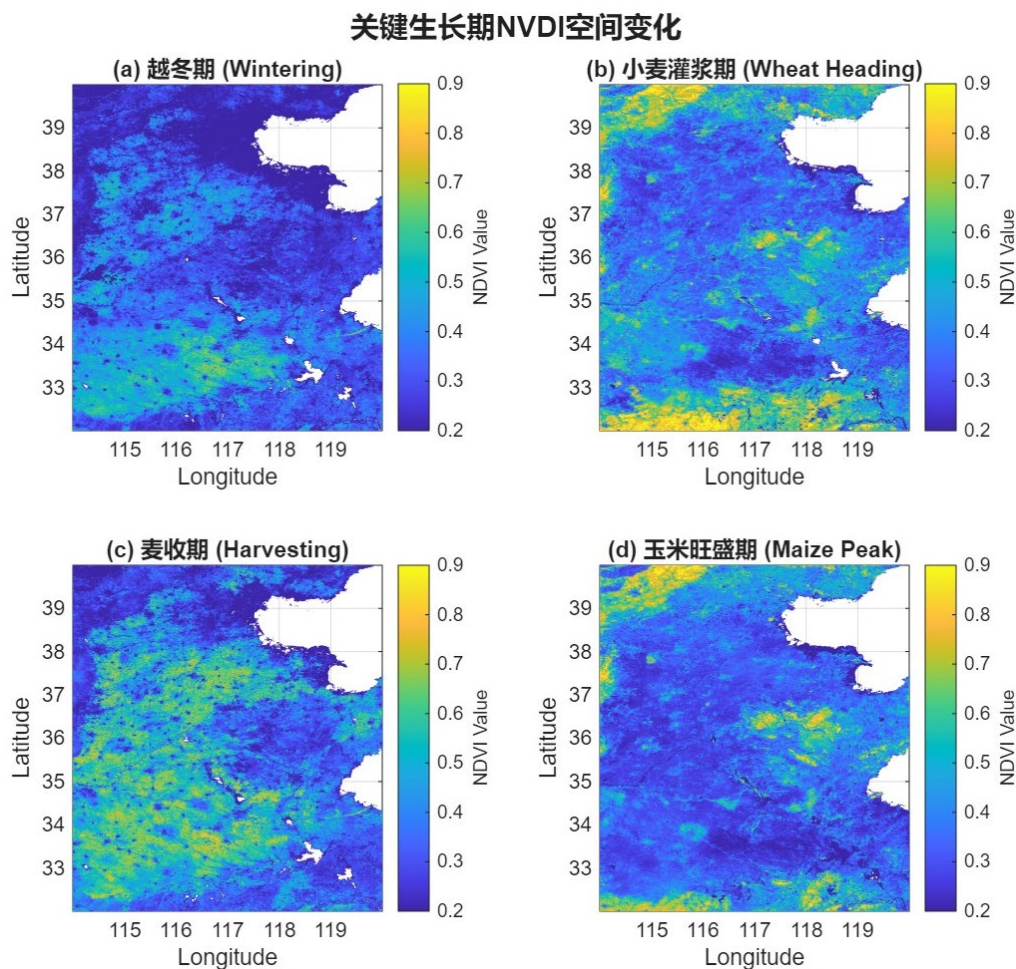


Figure 3. Spatial variations in NDVI during key growth stages
图 3. 关键生长期 NDVI 空间变化

本研究通过提取关键生长期的 NDVI 空间分布图,直观展现了华北平原双季轮作体系的时空动态(图 3)。在小麦灌浆期(图 3(b)),研究区呈现大面积高植被覆盖状态;而进入麦收期(图 3(c)),NDVI 出现显著的空间断崖式下降,这与该区域集约化机械收割导致的植被覆盖瞬间缺失高度吻合。这种空间上的剧烈转折,不仅证实了所用数据集对人类农业活动的高敏感度,也凸显了该区域农业生态系统的强时空异质性。

3.2. 纯净农田区域的物候时序特征

图 4 展示了经过严格空间裁剪后的华北平原核心农田区区域平均 NDVI 时间序列变化特征。整体来看,连续两个农业年的 NDVI 曲线均呈现出典型的“双峰一谷”结构,充分反映了华北平原“冬小麦-夏玉米”一年两熟制农作物轮作体系的物候规律。在每个农业年度开始阶段(10 月至次年 2 月),研究区 NDVI 维持在 0.35~0.45 之间,反映冬小麦播种后进入越冬阶段,植被覆盖度相对较低。随着春季气温逐渐升高,冬小麦进入返青、拔节及抽穗灌浆期,NDVI 持续上升,并于 4 月至 5 月达到第一个生长高峰,其平均值约为 0.56~0.58。进入 6 月份后,随着冬小麦集中收获,研究区植被覆盖度快速下降,大面积农田短时间内转变为裸露地表,导致 NDVI 出现明显下降,并形成全年最低值区间,平均值降至 0.35 左右。

该阶段对应典型的“麦收低谷”现象，是华北平原双季轮作农业的重要物候标志。7月份以后，夏玉米进入快速生长期。在高温和充足降水条件下，玉米冠层迅速发育，区域NDVI再次快速上升，并于8月至9月达到全年最高峰值，平均NDVI超过0.72。相比冬小麦生长期，夏玉米峰值更高，表明其生物量积累和叶面积指数均明显高于小麦生长期。两个完整农业年的时间序列曲线在峰值出现时间、谷值位置及整体变化趋势方面均表现出较高一致性。双峰出现时间差异不足一个时间步长(16天)，峰值差异小于0.03，说明该区域农业种植制度具有较强稳定性和可重复性。同时也验证了本文建立的数据处理流程能够有效抑制噪声干扰，准确提取区域尺度作物物候信号。

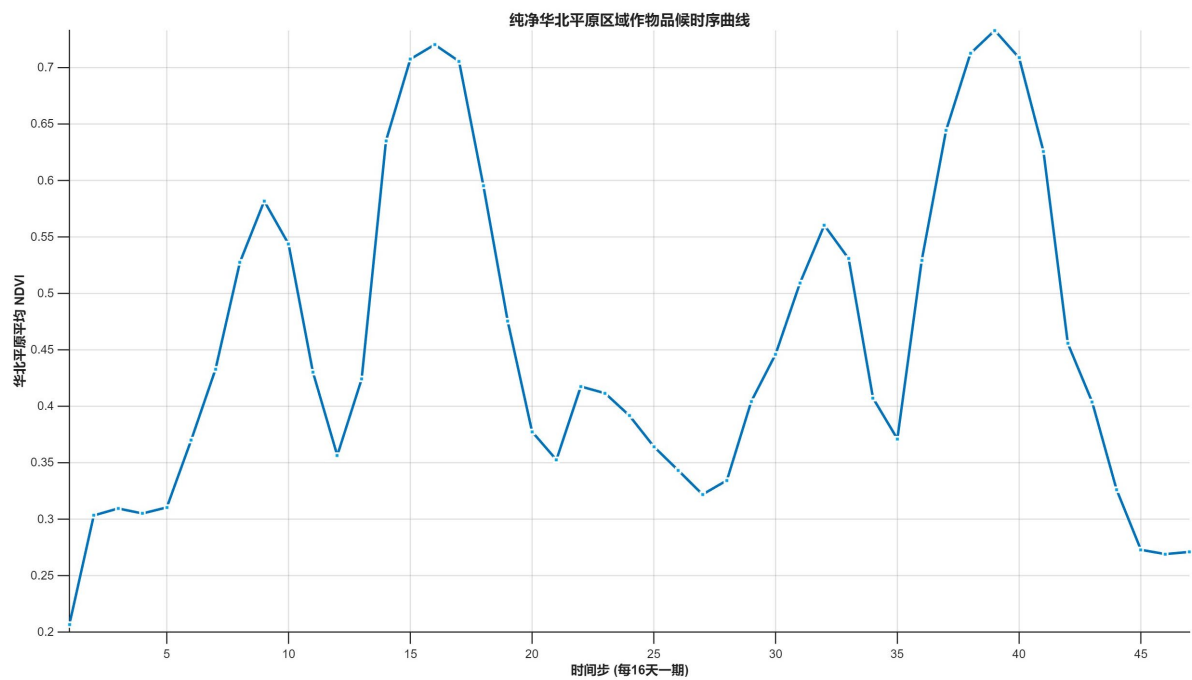


Figure 4. Phenological characteristics of uncontaminated farmland areas
图 4. 纯净农田区域物候时序特征

4. 讨论

本文基于 NASA AppEEARS 平台获取的 MOD13A2 Version 061 NDVI 产品，对华北平原核心农田区 (114°E~120°E, 32°N~40°N) 连续两个农业年的植被物候变化特征进行了遥感监测与分析。通过严格的空
间裁剪、逻辑掩膜及区域统计重建方法，有效剔除了山地森林和大型水体混合像元的干扰，获得了高纯净
度区域平均 NDVI 时间序列。主要结论如下：

- (1) 研究区 NDVI 空间分布呈现显著的空间异质性，高值区主要集中于平原腹地农业种植区，低值区
则分布于边缘区域及水体附近，表明空间裁剪方法能够有效提高农田物候信号提取精度。
- (2) 区域平均 NDVI 时间序列表现出典型的“双峰一谷”结构，与华北平原冬小麦 - 夏玉米一年两熟
轮作制度高度吻合。其中，春季冬小麦生长形成第一个峰值，夏季麦收阶段形成显著谷值，而夏玉米旺
盛生长期形成全年最高峰值。
- (3) 连续两个农业年的 NDVI 曲线具有良好的年际一致性和重复性，峰值和谷值出现时间基本保持
稳定，表明华北平原核心农区农业种植制度和物候节律具有较强稳定性。
- (4) 本文构建的数据预处理与物候提取流程能够有效获取区域尺度高质量农田物候背景场数据，为

后续开展农作物长势监测、产量预测、生态模型验证及农业资源管理研究提供了可靠的数据基础。

参考文献

- [1] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 基于 NDVI 数据的华北地区耕地物候空间格局[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 552-560.
- [2] 赵彦茜, 肖登攀, 柏会子, 等. 华北平原冬小麦和夏玉米气候适宜性[J]. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2251-2262.
- [3] 王红说, 黄敬峰. 基于 MODIS NDVI 时间序列的植被覆盖变化特征研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2009, 35(1): 105-110.
- [4] Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.C.F., Gao, F., *et al.* (2003) Monitoring Vegetation Phenology Using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, **84**, 471-475.
[https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00135-9)
- [5] 江东, 王乃斌, 杨小唤, 等. NDVI 曲线与农作物长势的时序互动规律[J]. 生态学报, 2002(2): 247-252.
- [6] Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N. and Ohno, H. (2005) A Crop Phenology Detection Method Using Time-Series MODIS Data. *Remote Sensing of Environment*, **96**, 366-374.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.008>
- [7] 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.
- [8] 高应波, 柳钦火, 李静, 等. 基于时序植被指数特征时相识别的多熟制耕地提取新方法[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(3): 431-438
- [9] 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.
- [10] 肖登攀, 陶福祿. 过去 30 年气候变化对华北平原冬小麦物候的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1539-1545.