

DOI: 10.5846/stxb202011132937

赵一静, 王晓利, 侯西勇, 张安定. 2003—2019 年山东省冬小麦关键物候期时空特征研究. 生态学报.

Zhao Y J, Wang X L, Hou X Y, Zhang A D. Spatio-temporal characteristics of key phenology of winter wheat in Shandong Province from 2003 to 2019. Acta Ecologica Sinica.

2003—2019 年山东省冬小麦关键物候期时空特征研究

赵一静^{1,2,3,4}, 王晓利^{2,3,4,*}, 侯西勇^{2,3,4}, 张安定¹

1 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025

2 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003

3 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 烟台 264003

4 山东省海岸带环境过程重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003

摘要: 农作物物候的变化会直接影响农作物的生长过程, 进而影响其质量和产量。本研究基于 MODIS EVI 遥感数据, 提取 2003—2019 年山东省冬小麦种植区以及主要物候期 (返青期、拔节期、抽穗期、成熟期) 信息, 并分析各物候期的时空变化特征。结果表明: 2003—2019 年山东省冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、成熟期分别集中在一年中的第 45—70 天、第 75—100 天、第 103—125 天、第 135—155 天; 4 个物候期的空间分布均呈鲁南早于鲁北、内陆早于沿海的格局特征。区域尺度上, 返青期、拔节期、抽穗期、成熟期年际变化率分别为 1.56 d/10a、0.65 d/10a、-0.54 d/10a、2.51 d/10a, 变化趋势均不显著。像元尺度上, 返青期与拔节期变化以推迟趋势为主, 呈显著推迟趋势的区域分别占总面积的 1.65%、3.05%, 这些区域主要分布于鲁东沿海地区和鲁南内陆地区; 抽穗期变化以提前趋势为主, 呈显著提前趋势的区域占总面积的 6.56%, 集中分布于菏泽东北部地区; 成熟期变化以推迟趋势为主, 呈显著推迟趋势的区域占总面积的 10.23%, 多出现在滨州、德州以及济宁等地区。研究结果可为山东省农田和冬小麦管理以及农业生态保护等提供数据支持和科学参考。

关键词: 物候期; 冬小麦; MODIS EVI; 时空特征; 山东省

Spatio-temporal characteristics of key phenology of winter wheat in Shandong Province from 2003 to 2019

ZHAO Yijing^{1,2,3,4}, WANG Xiaoli^{2,3,4,*}, HOU Xiyong^{2,3,4}, ZHANG Anding¹

1 School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

2 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

3 Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

4 Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

Abstract: Crop phenology is a widespread natural phenomenon with annual cycle due to the influence of environmental factors including climate change, surface cover, hydrological status, soil physicochemical properties and field management. It's well known that the phenology not only responds to climate change significantly but also plays an important role in regulating the change of ecosystem structure and functions. For example, the crop phenological changes will directly influence a variety of biophysical and physiological processes of the crops and thus influence the quality and yield of the crops. Therefore, more and more scientists in worldwide focused on the topic of crop phenology. In this study, based on the MODIS EVI multi-temporal remote sensing data, the field samples as well as the high-spatial-resolution Google Earth

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41901133); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA19060205); 山东省海岸带环境过程重点实验室开放基金项目 (2019SDHADKFJ04)

收稿日期: 2020-11-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlwang@yic.ac.cn

images, the winter wheat planting area and key phenological stages (green-up date, jointing date, heading date and maturity date) in Shandong Province from 2003 to 2019 were extracted, and the spatial and temporal characteristics of each phenological stage mentioned above were analyzed. The results showed that the green-up date, jointing date, heading date and maturity date of winter wheat in Shandong Province from 2003 to 2019 were concentrated in the 45th—70th day of year, 75th—100th day of year, 103th—125th day of year and 135th—155th day of year, respectively, and showed a spatial pattern of the south earlier than the north, as well as inland earlier than the coastal regions. At the whole regional scale, the decade trend rates of green-up date, jointing date, heading date and maturity date were 1.56 d/10a, 0.65 d/10a, -0.54 d/10a and 2.51 d/10a, respectively, and the change trend of the key phenological stages all presented an insignificant feature. At the pixel scale, the green-up date and jointing date were mainly delayed, and the areas with the significant delay tendency accounted for 1.65% and 3.05% of the total area, which were mainly distributed in the eastern coastal regions and the southern areas of Shandong Province. Nearly 6.56% of the total area showed a significant advance trend of the heading date, which was mainly located in the northeast of Heze. What's more, the area with a significant delay trend of maturity date was accounted for 10.23% of the total area, which was generally found in Binzhou, Dezhou and Jining. It is expected that the results will provide data support and scientific reference for farmland and winter wheat management, as well as agricultural ecological protection in Shandong Province.

Key Words: phenology; winter wheat; MODIS EVI; spatio-temporal characteristics; Shandong Province

植被物候是植被长期适应周围环境(气候、水文、土壤)而形成的以年为周期的生长发育节律^[1-4]。对农作物而言,各个物候期代表着农作物不同的生长节点,例如展叶、拔节、灌浆、成熟等^[5-6]。农作物物候易受到气候变化的影响,是对气候变化响应最显著的指标之一^[7-8]。农作物物候期的变化会直接影响农作物在营养或生殖阶段的生长发育,进而影响作物的质量和产量^[9]。已有研究表明,随着全球变暖,各地农作物的物候期呈提前发生的趋势^[10-11]。因此,及时、准确地监测作物物候期的动态变化,对农业田间管理、农业生态系统维护以及国家粮食安全保障等具有重要的指导意义^[12-14]。

目前,农作物物候研究主要涉及农作物物候提取、作物熟制变化分析、物候期时空变化特征分析、物候期对气候变化的响应分析等方面^[12,15-17]。这些研究主要基于传统物候观测资料和遥感提取物候参数等方法而展开。其中,基于传统物候观测资料的农作物物候研究多利用当地农业气象站点的物候观测数据进行农作物物候空间差异分析^[18-19]。然而,由于农业气象观测站点数量有限且实际观测值受人为因素影响较大,不易实现对物候空间像元尺度以及更大范围的区域尺度研究。遥感技术具有时间分辨率高、空间连续性强等特点,能够在较大范围连续空间上进行物候的动态监测^[20]。目前,国内学者基于遥感技术已在全国、华北、华南、省域等不同空间尺度提取并分析了不同农作物物候期的时空动态变化特征^[12,21-22]。如 Luo 等^[22]利用 GLASS LAI 遥感数据提取了全国三种主要农作物(小麦、水稻、玉米)的物候期,指出三种农作物生育期均以推迟趋势为主,但不同地区生育期年际变化率差异显著。Guo 等^[12]借助 MOD09A1 EVI 遥感数据分析华北平原冬小麦返青期物候变化,发现多年平均返青期空间分布与纬度呈显著正相关,且 15 年间返青期以 0.14 d/a 的速率提前。茹皮亚·西拉尔等^[21]利用 MODIS NDVI 数据探究新疆棉花物候空间格局特征,发现生长始期由北向南渐早,而生长末期由北向南渐晚。上述研究提高了人们对不同区域、不同时期农作物物候时空变化特征及其差异的认识,然而,这些研究多针对一至两个典型物候期进行时空分析,鲜少对同一农作物的多个关键物候期进行提取与比较研究。

小麦作为我国第二大粮食作物,物候的变化会直接或间接地影响冬小麦的光合、蒸腾等生物过程,最终导致长势、产量的变化^[9]。因此,及时有效地检测与分析小麦各物候期的时空动态变化特征,对保障国家粮食安全具有重要的意义^[16]。近年来,有不少学者在全国、华北平原、黄土高原等不同空间范围尺度上,基于农业物候观测数据以及通过遥感技术获取的植被 NDVI、EVI、LAI 等数据对冬小麦返青期、成熟期等典型物候期的

提取和多年动态变化开展了相关研究^[6,12,16-17]。然而,冬小麦不同物候期的时空动态特征具有差异性,各关键物候期在冬小麦的整个生长周期中起着不同的作用,但针对冬小麦不同生长发育阶段中的多个关键物候期的提取与多年动态分析的研究尚不多见。同时,已有研究多利用一年的冬小麦种植区图鉴来提取与分析冬小麦多年物候变化,未考虑作物耕种受土地利用/土地覆盖变化以及休耕养肥等田间管理制度变更引起的播种范围变化等因素的影响^[14]。此外,山东省是我国冬小麦的主产区,该地区冬小麦生产状况对全国粮食安全具有重要影响。鉴于此,本研究基于 MODIS EVI 遥感数据,结合山东省冬小麦生长特征,首先提取 2003—2019 年历年山东省冬小麦种植区,以消除非冬小麦像元的干扰影响,在此基础上进一步提取冬小麦主要物候期(返青期、拔节期、抽穗期、成熟期)信息,并分析各物候期的时空变化特征,以为山东省农田和冬小麦管理以及农业生态保护等提供数据支持和决策参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

山东省介于 34°22.9'N—38°24.01'N、114°47.5'E—122°42.3'E 之间(图 1),地处我国北方沿海地区。地形以山地丘陵和平原为主,平原面积辽阔,约占全省面积的 65%,适宜粮食作物的大范围耕种,是我国重要的粮食主产区^[23],例如,山东省冬小麦年产量 2472 万 t,约占全国总产量的 19%^[24]。气候属于暖温带季风气候,雨热同期,降水集中,年均气温介于 11—14 °C 之间,年总降水量介于 550—950 mm 之间。山东省冬季平均气温介于 -1—4 °C 之间,春季日照适宜、气温回升快,季节性积雪融水下渗为土壤提供了稳定的水分,冬、春季的水热气候条件为冬小麦的越冬和返青生长提供了适宜的气候环境,有利于冬小麦的生长发育^[20]。

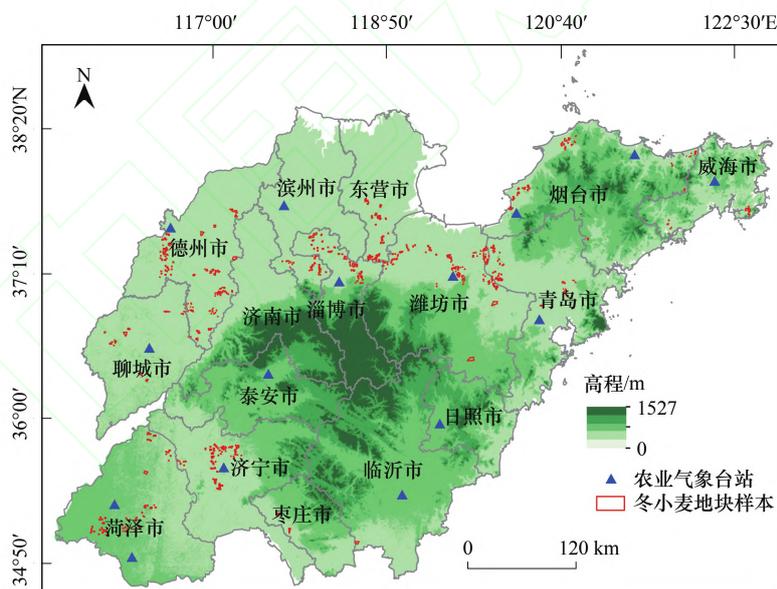


图 1 山东省高程分异、冬小麦地块样本以及农业气象观测站分布

Fig.1 Elevation differentiation, sample distribution of winter wheat plots and agricultural stations of Shandong Province

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 增强型植被指数(EVI)

增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)是反映植被生长状况的重要指标,克服了 NDVI 易出现绿度饱和、受土壤水分干扰大的缺点,可以更准确地表征冬小麦生长发育的季节规律^[25-26]。EVI 遥感数据来自美国宇航局(NASA)陆地过程分布式数据档案(<https://lpdaac.usgs.gov/>)提供的 Terra MOD13Q1 和 Aqua MYD13Q1 双星数据产品组合,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 8 d。基于 Python 对数据进行格式变

换、投影转换以及掩膜裁剪等预处理,最终得到 2003—2019 年山东省 EVI 时序数据集。

1.2.2 遥感解译的精度验证数据

本文分别利用野外测量获得的冬小麦地块样本数据和地面物候观测数据对遥感解译数据进行精度验证。其中,野外测量地块样本数据主要应用于冬小麦种植区提取规则的建立和种植区提取精度的验证。2019 年 12 月至 2020 年 5 月在东营、潍坊、烟台等地开展实地测量,获取了 200 个冬小麦野外地块样本数据(面积大于 250 m×250 m 的多边形),此外,在 2013—2019 年 11 月—次年 5 月(冬小麦生长关键期)Google Earth 历史影像中再次选取了 360 个冬小麦地块样本,共计 560 个冬小麦地块样本,样本总体上较均匀地分布于山东省的主要冬小麦种植区(图 1)。利用冬小麦地面物候观测数据对遥感提取的物候期进行精度验证,本文从中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)的“山东农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集”中筛选、整理了有较完整物候实测记录的 15 个农业气象观测站(图 1)的返青期、拔节期、抽穗期、成熟期的地面物候观测数据作为物候期遥感解译的精度验证数据。

1.3 研究方法

1.3.1 Savitzky-Golay(S-G)滤波

MODIS EVI 数据已经过最大值合成处理,但云、雪等外部大气环境仍会影响数据质量^[26-27]。因此,需要对 EVI 时序数据进行平滑去噪,使其能更好地表征作物生长发育的季节变化规律。Savitzky-Golay(S-G)滤波采用迭代加权移动平均滤波器进行窗口滑动的卷积运算^[28-29],该方法既可以有效平滑去噪,又能最大程度地保持原始数据的局部特征,其计算公式如下:

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

式中, Y_j^* 为 S-G 滤波值; Y_{j+i} 为原始值; m 为滤波窗口半径; N 为滤波窗口的大小; C_i 为第 i 个点的权重值。基于 TIMESAT 软件对时序数据进行 S-G 滤波平滑处理。经过反复试验,最终设置迭代次数为 3 次,滤波窗口半径为 4-4-2,同时利用 MODIS 质量控制数据图层(Pixel Reliability)对不同质量像元赋予相应的权重,具体如下:

$$C_i = \begin{cases} 1, & \text{可信度} = 0 \\ 0.7, & \text{可信度} = 1 \\ 0.3, & \text{可信度} = 2, 3 \end{cases} \quad (2)$$

1.3.2 冬小麦播种面积提取

结合野外调查和 Google Earth 影像资料,生成了山东省各典型地物(森林、草地、冬小麦、果园)多年平均年内 EVI 滤波时序曲线(图 2)。由图可见,冬小麦在 4 月中下旬到达生长峰值,之后 EVI 快速下降,这与其他植被正处于发育上升期这一情况有显著差异。因此,本研究根据 EVI 下降时段的曲线形态特征值,采用阈值法,并结合 ArcGIS 空间叠加分析法,实现山东省 2003—2019 年冬小麦种植区的提取。

基于 TIMESAT 软件提取滤波 EVI 时序曲线下降时段的形态特征参数,包括 EVI 峰值(EVI_{\max})、峰值对应的时间(Peak Time)、下降时段的长度(Length)、下降时段的斜率(Slope)以及下降时段的积分(Small Integral)等。结合训练样本点数据,利用试错法,最终确定各分类参数阈值。根据样本数据的 EVI 年内变化曲线发现不同地区的冬小麦生长特征有所差异,因此将山东省划分为西南、东北两个区域,不同区域分别设定阈值,分类规则如下:西南区域 { $EVI_{\max} > 0.5$; $Length > 44$; $104 < Peak\ Time < 136$; $Slope > 0.04$; $Small\ Integral > 1.2$ }; 东北区域 { $EVI_{\max} > 0.38$; $Length > 39$; $104 < Peak\ Time < 136$; $Slope > 0.02$; $Small\ Integral > 0.8$ }。

1.3.3 冬小麦关键物候期提取

不同物候期代表冬小麦不同生长节点。本研究将返青期定义为 EVI 曲线上升幅度达到其最大值的 9% 时所对应的日期,该时期为小麦越冬之后重新恢复生长的阶段。拔节期定义为 EVI 求导曲线峰值对应的日

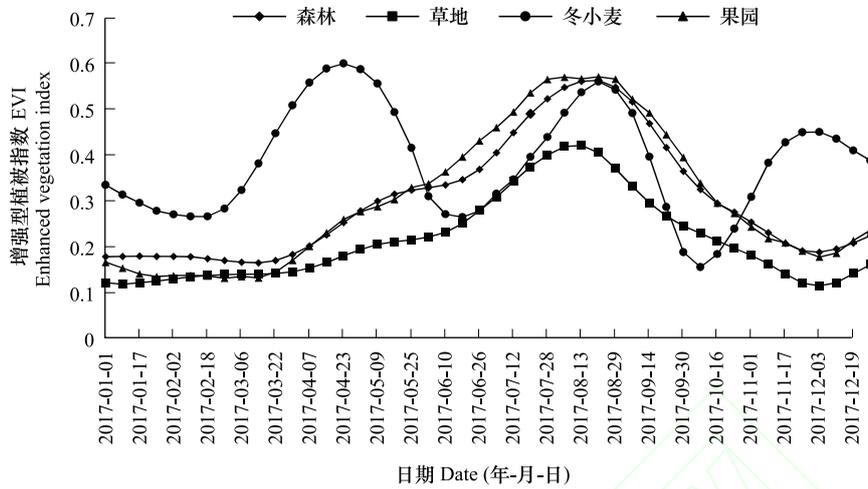


图 2 山东省主要植被 EVI 年内变化

Fig.2 Annual variation of EVI of main vegetation in Shandong Province

期,该时期为冬小麦快速生长的阶段。抽穗期定义为 EVI 曲线峰值对应的日期,该时期为冬小麦生长的高峰期。成熟期定义为峰值之后 EVI 求导曲线谷值对应的日期,该时期为冬小麦快速衰落的阶段。所获得的各物候期开始时间均统一采用年序日 (Day of Year, DOY) 计数法表示,即将当年的 1 月 1 日记为第 1 天,物候期开始的日期定义为该日自 1 月 1 日以来的第几天^[2,30]。

1.3.4 趋势系数

基于一元线性回归法计算 2003—2019 年山东省冬小麦各物候期的多年变化趋势。物候期与时间的回归斜率计算公式为:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times y_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (3)$$

式中, i 为年序号; n 为总年数 ($n = 17$); y_i 是第 i 年的物候值。当 $\theta_{\text{slope}} > 0$ 时,代表物候期多年变化呈上升趋势;当 $\theta_{\text{slope}} < 0$ 时,代表物候期多年变化呈下降趋势。

2 结果与分析

2.1 山东省冬小麦遥感信息提取的精度检验

2.1.1 冬小麦种植区提取的精度检验

采用野外样本数据和各地级市冬小麦面积统计年鉴值对冬小麦种植区提取精度进行检验。野外样本数据被正确提取的个数为 191 个,样本数据的匹配精度为 90.95%。进一步将遥感提取的各地级市冬小麦种植面积与各地级市统计年鉴数据进行相关性分析(图 3),结果表明,提取值与统计值之间有良好的相关性(相关系数 $R = 0.960, P < 0.01$)。此外,平均绝对误差 $MAE = 42.14 \times 10^3 \text{ hm}^2$,该精度优于前人研究的精度水平^[25]。

2.1.2 冬小麦各物候期提取的精度检验

计算以各农业气象站点所在像元为中心的周边区

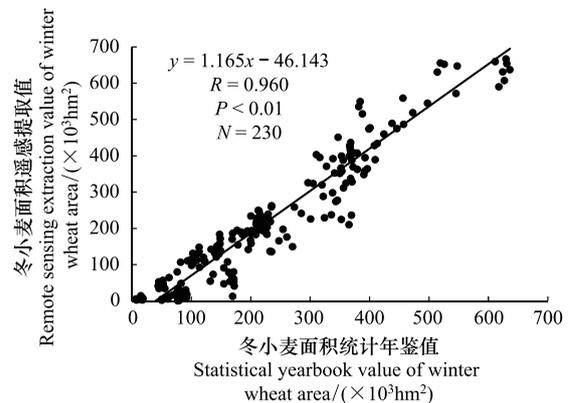


图 3 山东省各地级市冬小麦种植面积遥感提取值与统计年鉴数据的比较

Fig.3 Comparison between extracted winter wheat areas based on remote sensing and statistical winter wheat areas on the city scale in Shandong Province

域(10×10,共 100 个像元)范围内遥感提取的冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、成熟期的平均值,并与其对应的地面实测数据进行对比,结果发现,遥感提取值与实测值之间具有良好的一致性(图 4)。其中,返青期的提取精度最高($R=0.830$; $P<0.01$; $MAE=4.11$ d);抽穗期与观测值相关性最好($R=0.836$; $P<0.01$; $MAE=7.12$ d);拔节期($R=0.664$; $P<0.01$; $MAE=9.50$ d)与成熟期($R=0.644$; $P<0.01$; $MAE=11.20$ d)的相关性和精度均相对略低。

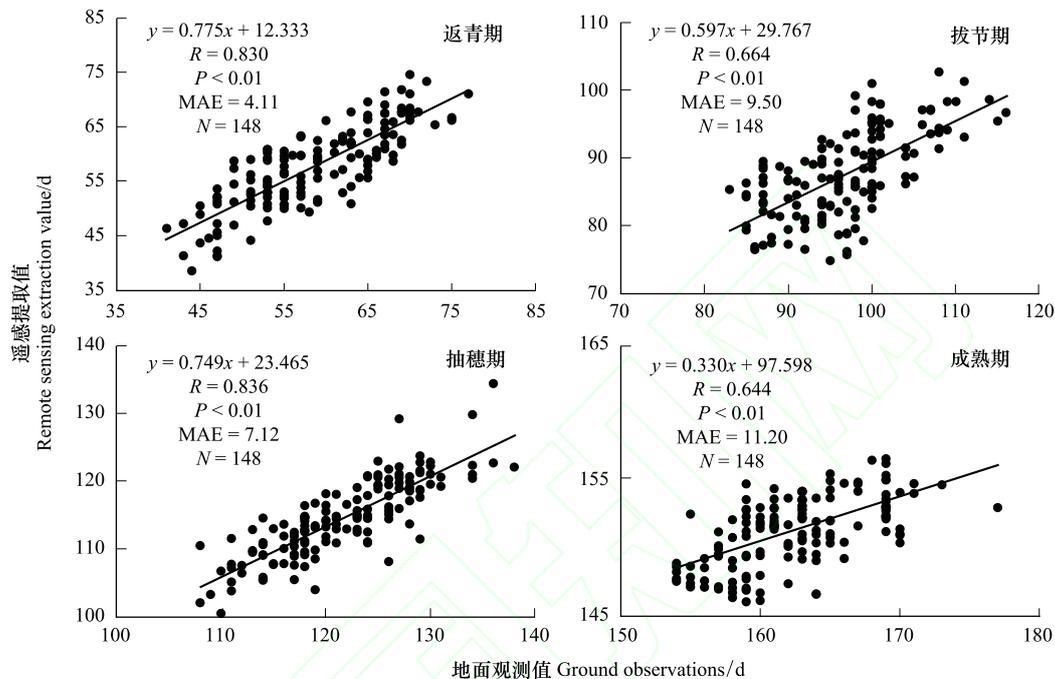


图 4 山东省各物候期遥感提取值与地面观测值的比较

Fig.4 Comparison between remote sensing phenological data and ground observations in Shandong Province

2.2 山东省冬小麦各物候期的空间分布特征

2003—2019 年山东省冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、成熟期主要集中在第 45—70 天、第 75—100 天、第 103—125 天、第 135—155 天,各物候期的空间分布均呈现鲁南早于鲁北、内陆早于沿海的格局特征(图 5),不同地区各物候期发生的最早与最晚相差范围在 20—25 天之间。其中,鲁西南地区(聊城、菏泽、济宁、枣庄等)的物候期发生相对较早,返青期、拔节期、抽穗期、成熟期分别集中在第 45—55 天、第 75—84 天、第 103—112 天、第 135—142 天;而鲁东和鲁西北的部分地区(威海、烟台、青岛、东营、滨州等沿海城市)的物候期发生得相对较迟,返青期、拔节期、抽穗期、成熟期分别集中在第 59—70 天、第 88—100 天、第 115—125 天、第 145—155 天。

2.3 山东省冬小麦各物候期的时空变化特征

2.3.1 山东省冬小麦各物候期的时间变化特征

就区域平均而言,2003—2019 年山东省冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、成熟期的多年平均值分别为(56.00±8.00) d、(85.00±8.00) d、(112.00±8.00) d 和(143.00±8.00) d。各物候期均呈现波动变化但趋势不显著的特征(图 6),其中,返青期、拔节期、成熟期年际变化率分别为 1.56 d/10a、0.65 d/10a、2.51 d/10a,呈不显著推迟趋势,而抽穗期的年际变化率为-0.54 d/10a,呈不显著提前趋势。就距平值而言,4 个物候期的年际距平值在-13.00—9.00 d 之间,其中,返青期、拔节期、抽穗期、成熟期的平均距平值分别为 4.18 d、3.35 d、3.27 d、2.77 d。此外,返青期和拔节期在 2012 年达到峰值,抽穗期和成熟期在 2010 年达到峰值,即这些年份的冬小麦物候发生得最晚。

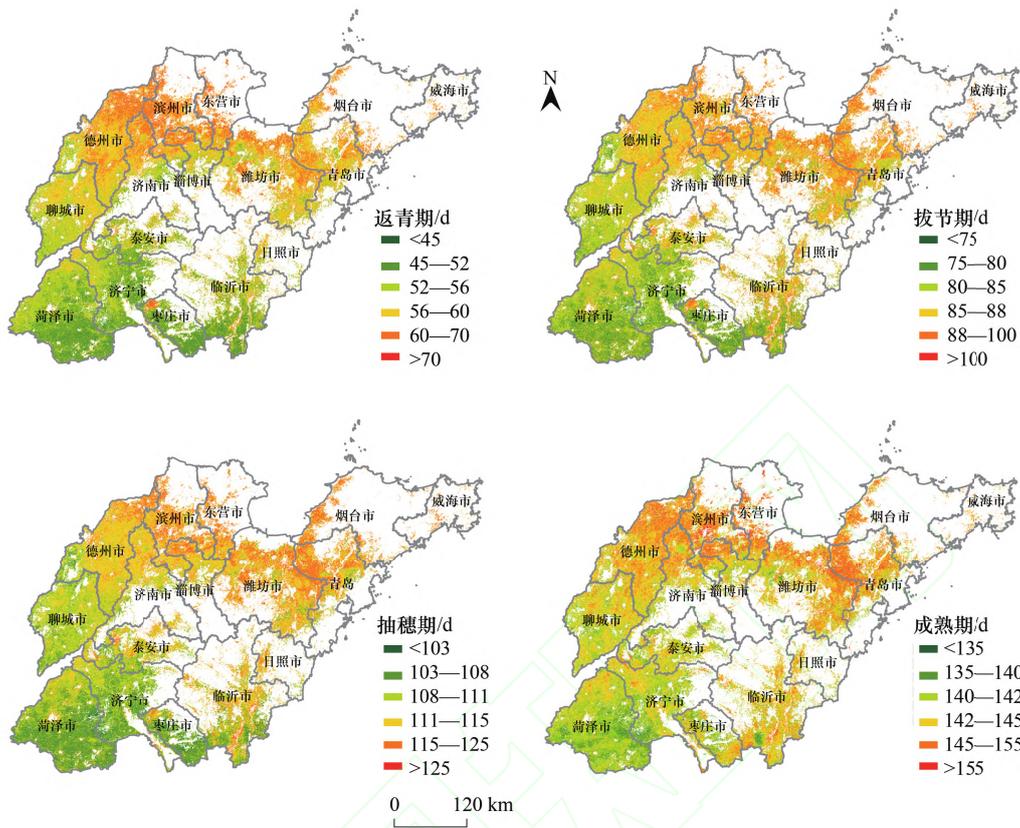


图 5 山东省冬小麦多年平均返青期、拔节期、抽穗期、成熟期的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of average green-up date, jointing date, heading date and maturity date of winter wheat in Shandong Province

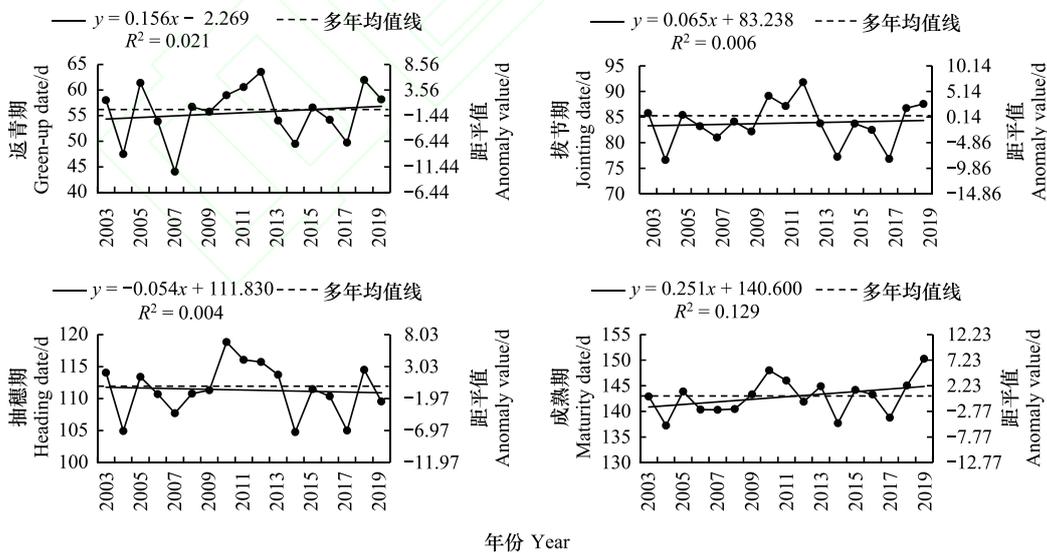


图 6 2003—2019 年山东省冬小麦各物候期时间变化趋势及距平值

Fig.6 Temporal variation trend and anomaly value of winter wheat phenology in Shandong Province during 2003—2019

2.3.2 山东省冬小麦各物候期的空间变化特征

2003—2019 年山东省冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、成熟期年际变化趋势如图 7 所示。具体而言,冬小麦返青期以推迟趋势为主,呈推迟趋势的区域占种植区总面积的 56.16%,推迟趋势变化率主要集中于 0—

8.00 d/10a(51.31%),但通过 0.05 显著性检验的区域仅占种植区总面积的 1.65%,零星分布于潍坊、东营等沿海地区以及济宁、枣庄、临沂等鲁南内陆地区;返青期呈提前趋势的区域占种植区总面积的 43.84%,提前趋势变化率主要集中于-4.00—0 d/10a(30.55%),通过 0.05 显著性检验的区域仅占种植区总面积的 0.82%,主要零星分布于德州、济南、菏泽等地区。

冬小麦拔节期与返青期的变化趋势特征相近,呈推迟趋势的区域占种植区总面积的 51.01%,推迟趋势变化率主要集中于 0—8.00 d/10a(43.75%),而通过 0.05 显著性检验的区域仅占种植区总面积的 3.05%,主要分布于青岛、潍坊、东营等沿海地区,以及枣庄、临沂等地区;拔节期呈提前趋势的区域占种植区总面积的 48.99%,年际变化率主要集中于-8.00—0 d/10a(45.95%),通过 0.05 显著性检验的区域占种植区总面积的 1.88%,主要位于德州、济南、菏泽等地区。

冬小麦抽穗期年际变化趋势以提前趋势为主,呈提前趋势的区域占种植区总面积的 62.04%,提前趋势变化率主要集中于 0—8.00 d/10a(55.86%),通过 0.05 显著性检验的区域占种植区总面积的 6.56%,集中分布于菏泽东北部地区;抽穗期呈推迟趋势的区域占种植区总面积的 37.96%,推迟趋势变化率主要集中于-4.00—0 d/10a(29.12%),通过 0.05 显著性检验的区域仅占种植区总面积的 1.86%,主要分布于烟台、青岛、潍坊、东营等沿海地区。

冬小麦成熟期年际变化以推迟趋势为主,呈推迟趋势的区域占种植区总面积的 72.70%,推迟趋势变化率主要集中于 0—8.00 d/10a(68.70%),通过 0.05 显著性检验的区域占总面积的 10.23%,集中分布于滨州、德州以及济宁等地区;成熟期呈提前趋势的区域占种植区总面积的 27.30%,年际变化率主要集中于-4.00—0 d/10a(22.18%),通过 0.05 显著性检验的面积仅占总面积的 0.62%,零星分布于菏泽、聊城等地区。

3 讨论

本文利用 MODIS EVI 遥感数据,提取了 2003—2019 年山东省冬小麦种植区以及冬小麦主要物候期。基于遥感数据提取的冬小麦 4 个物候期的误差值均在 4—12 d 之间。其中,成熟期的提取精度相对较低,究其原因,山东省冬小麦成熟期主要在 6 月初,该时期森林、草地等其他植被基本处于生长旺盛期,对于冬小麦遥感反演的植被指数计算结果可能会产生一定程度的干扰^[28]。

从物候期的空间分布特征来看,2003—2019 年山东省冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、成熟期呈鲁南早于鲁北、内陆早于沿海的空间格局特征,这与 Guo 等^[12]利用 MOD09A1 数据研究的华北平原冬小麦返青期的空间分布特征相一致。山东省冬小麦各物候期空间分布的差异一定程度上反映了区域内气候的空间异质性^[18,31-33]。鲁南地区冬后气温回升较快,有利于冬小麦较早进入发育期,此后的 3—5 月气温也高于鲁北地区,可促进冬小麦进一步生长发育;而鲁东、鲁西北地区,特别是渤海沿岸地区,受海洋气候等的影响,其同期气温相较于内陆低,不利于冬小麦的生长发育,导致沿海地区的冬小麦物候期均晚于内陆地区。

从物候期的时空变化特征来看,区域尺度上,2003—2019 年山东省冬小麦 4 个物候期的变化趋势均不显著。与其他自然植被物候变化相比,冬小麦的生长发育阶段受灌溉技术、小麦品种改良等田间管理方式的干预,导致农作物物候的年际变化趋势被减弱^[1]。多年变化趋势上,2010 年、2012 年分别为山东省冬小麦抽穗期与成熟期、返青期与拔节期的峰值期。通过查阅气象资料发现,2010 年山东省春季持续低温,春夏之交风雹灾害频发,而 4、5 月份为冬小麦累积营养、充实籽粒的关键期,低温干燥不利于冬小麦的进一步发育,致使抽穗期、成熟期等生殖关键期延后;2012 年 1 月下旬至 3 月中旬持续低温,气温均较常年偏低 2.4℃,阻碍了 2 月中旬冬小麦的返青生长,致使返青期、拔节期等营养关键期延后。像元尺度上,冬小麦各物候期的年际变化趋势集中于-8.00—8.00 d/10a,这与已有研究结果的年际变化率相近,但变化率的空间分布略有差异^[31]。原因在于所用遥感数据和遥感提取物候期的方法有所差异。侯学会等^[34]针对同一物候期对比不同提取方法所得结果的差异,发现不同方法提取的物候期在数值上差异显著。后期将继续针对不同物候提取方法对物候期时空变化特征结果的影响进行深入探究。

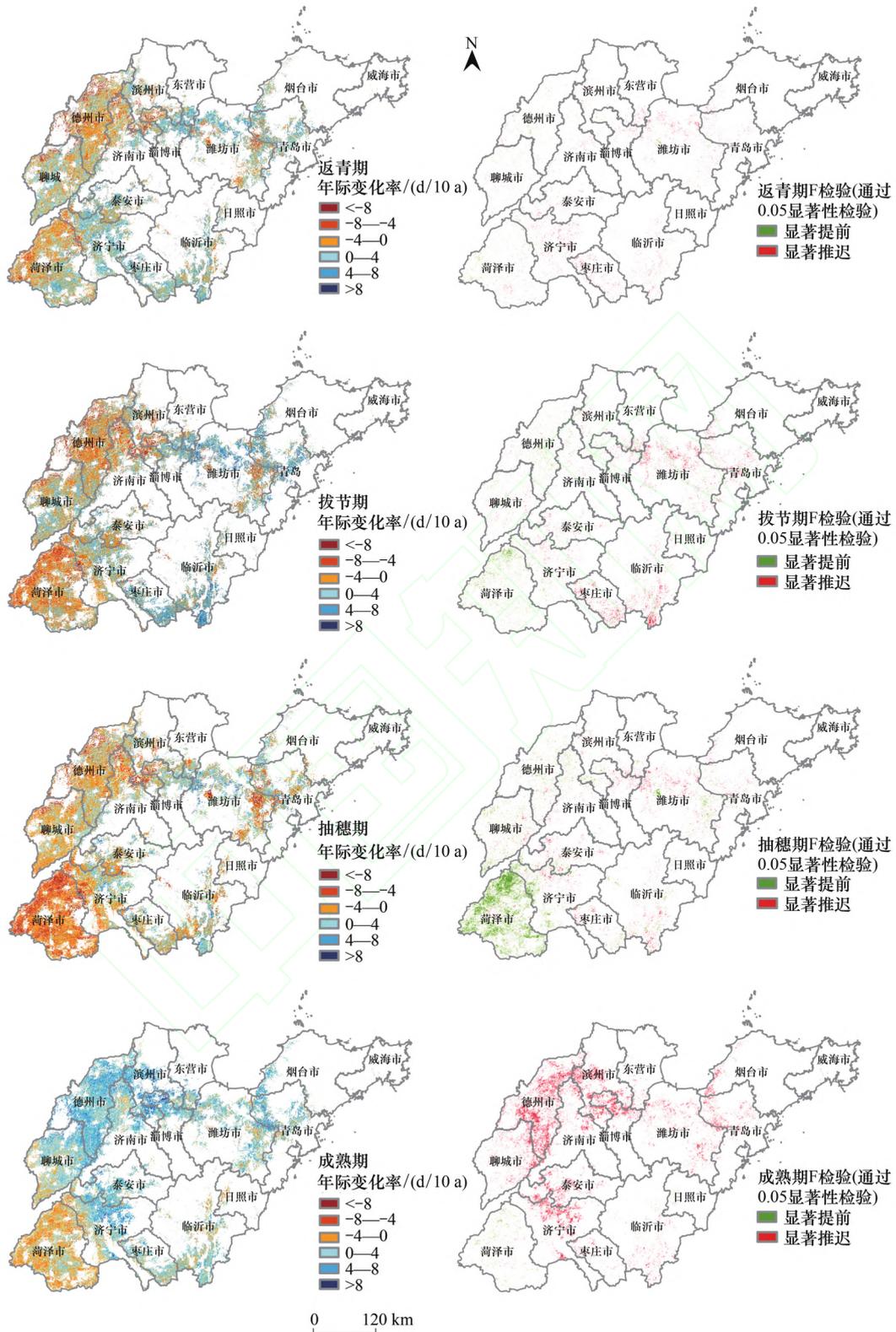


图7 2003—2019 年山东省冬小麦各物候期年际变化趋势和通过 0.05 显著性检验的空间分布特征

Fig.7 Spatial distribution of interannual variation trends and significances for the key phenological stages of winter wheat in Shandong Province from 2003 to 2019

MODIS 数据具有较高的时间分辨率,但受云、雪等大气环境影响较大。本文利用 MODIS 质量控制数据图层对 EVI 时序数据进行了滤波处理,但仍不能完全消除数据噪声对物候期提取结果的影响。利用高空间分辨率数据与 MODIS 多时相数据结合来提高物候信息提取精度是未来研究的重点。其次,本文仅分析了冬小麦 4 个物候期的时空变化特征,未探究物候与气候变化的确切关系。下一步将基于气象数据开展冬小麦物候期对气候变化的响应研究,定量分析气候变化对农作物物候的影响。

4 结论

基于 2003—2019 年 MODIS EVI 遥感数据,根据冬小麦的 EVI 时序变化特征,提取山东省冬小麦种植区以及冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、成熟期 4 个关键物候期,并分析各物候期时空变化特征。主要结论如下:

(1) 山东省冬小麦返青期、拔节期、抽穗期、成熟期分别集中在第 45—70 天、第 75—100 天、第 103—125 天、第 135—155 天。4 个物候期均呈现鲁南早于鲁北、内陆早于沿海的格局特征,不同地区各物候期的最早与最晚相差范围在 20—25 天之间。

(2) 从区域尺度上看,2003—2019 年山东省返青期、拔节期、抽穗期、成熟期多年平均值分别为 $(56.00 \pm 8.00) \text{d}$ 、 $(85.00 \pm 8.00) \text{d}$ 、 $(112.00 \pm 8.00) \text{d}$ 和 $(143.00 \pm 8.00) \text{d}$, 年际变化率分别为 $1.56 \text{d}/10\text{a}$ 、 $0.65 \text{d}/10\text{a}$ 、 $-0.54 \text{d}/10\text{a}$ 、 $2.51 \text{d}/10\text{a}$, 均呈现波动变化但趋势不显著的特征。

(3) 从像元尺度上看,2003—2019 年山东省冬小麦的返青期、拔节期均以推迟趋势为主,呈显著推迟趋势的区域分别占种植区总面积的 1.65%、3.05%, 主要分布于鲁东沿海地区和鲁南内陆部分地区;抽穗期以提前趋势为主,呈显著提前趋势的区域占种植区总面积的 6.56%, 集中分布于菏泽东北部地区;成熟期以推迟趋势为主,呈显著推迟趋势的区域占种植区总面积的 10.23%, 多出现在滨州、德州以及济宁等地区。

致谢:感谢中国科学院烟台海岸带研究所的李东老师以及刘玉斌、张玉新和徐鹤同学协助完成了山东省冬小麦样本数据的野外测量工作。

参考文献 (References):

- [1] 赵彦茜, 肖登攀, 柏会子, 陶福祿. 中国作物物候对气候变化的响应与适应研究进展. 地理科学进展, 2019, 38(2): 224-235.
- [2] 黄文琳, 张强, 孔冬冬, 顾西辉, 孙鹏, 胡畔. 1982-2013 年内蒙古地区植被物候对干旱变化的响应. 生态学报, 2019, 39(13): 4953-4965.
- [3] 白孟鑫, 郑景云, 郝志新, 张学珍. 20 世纪以来美国树木生长响应气候变化敏感度的时空差异. 地理研究, 2019, 38(4): 822-830.
- [4] Jiao F S, Liu H Y, Xu X J, Gong H B, Lin Z S. Trend evolution of vegetation phenology in China during the period of 1981 - 2016. Remote Sensing, 2020, 12(3): 572.
- [5] Dong Q, Chen X H, Chen J, Zhang C S, Liu L C, Cao X, Zang Y Z, Zhu X F, Cui X H. Mapping winter wheat in North China using sentinel 2A/B data: a method based on phenology-time weighted dynamic time warping. Remote Sensing, 2020, 12(8): 1274.
- [6] Xiao D P, Moiwu J P, Tao F L, Yang Y H, Shen Y J, Xu Q H, Liu J F, Zhang H, Liu F S. Spatiotemporal variability of winter wheat phenology in response to weather and climate variability in China. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2015, 20(7): 1191-1202.
- [7] Adole T, Dash J, Rodriguez-Galiano V, Atkinson P M. Photoperiod controls vegetation phenology across Africa. Communications Biology, 2019, 2: 391.
- [8] Fu Y H, Zhao H F, Piao S L, Peaucelle M, Peng S S, Zhou G Y, Ciais P, Huang M T, Menzel A, Peñuelas J, Song Y, Vitisse Y, Zeng Z Z, Janssens I A. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. Nature, 2015, 526(7571): 104-107.
- [9] Guo L H, Gao J B, Ma S C, Chang Q, Zhang L L, Wang S X, Zou Y F, Wu S H, Xiao X M. Impact of spring phenology variation on GPP and its lag feedback for winter wheat over the North China Plain. Science of the Total Environment, 2020, 725: 138342.
- [10] 秦雅, 刘玉洁, 葛全胜. 气候变化背景下 1981—2010 年中国玉米物候变化时空分异. 地理学报, 2018, 73(5): 906-916.
- [11] Sacks W J, Kucharik C J. Crop management and phenology trends in the U.S. Corn Belt: impacts on yields, evapotranspiration and energy balance. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(7): 882-894.
- [12] Guo L H, Gao J B, Hao C Y, Zhang L L, Wu S H, Xiao X M. Winter wheat green-up date variation and its diverse response on the hydrothermal

- conditions over the North China plain, using MODIS time-series data. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1593.
- [13] Chen X H, Wang W Q, Chen J, Zhu X L, Shen M G, Gan L Q, Cao X. Does any phenological event defined by remote sensing deserve particular attention? An examination of spring phenology of winter wheat in Northern China. *Ecological Indicators*, 2020, 116: 106456.
- [14] 王学, 李秀彬, 谈明洪, 辛良杰. 华北平原 2001—2011 年冬小麦播种面积变化遥感监测. *农业工程学报*, 2015, 31(8): 190-199.
- [15] 闫慧敏, 肖向明, 黄河清. 黄淮海多熟种植农业区作物历遥感检测与时空特征. *生态学报*, 2010, 30(9): 2416-2423.
- [16] Gan L Q, Cao X, Chen X H, Dong Q, Cui X H, Chen J. Comparison of MODIS-based vegetation indices and methods for winter wheat green-up date detection in Huanghuai region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 288-289: 108019.
- [17] He L, Asseng S, Zhao G, Wu D R, Yang X Y, Zhuang W, Jin N, Yu Q. Impacts of recent climate warming, cultivar changes, and crop management on winter wheat phenology across the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200: 135-143.
- [18] 刘玉洁, 陈巧敏, 葛全胜, 戴君虎. 气候变化背景下 1981—2010 中国小麦物候变化时空分异. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(7): 888-898.
- [19] 肖登攀, 齐永青, 王仁德, 刘剑锋, 栗志强. 1981—2009 年新疆小麦和玉米物候期与气候条件变化研究. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(6): 189-194, 202-202.
- [20] 侯学会, 隋学艳, 姚慧敏, 梁守真, 王猛. 基于物候信息的山东省冬小麦长势遥感监测. *国土资源遥感*, 2018, 30(2): 171-177.
- [21] 茹皮亚·西拉尔, 杨辽. 新疆棉花物候时空变化遥感监测及气温影响分析. *遥感技术与应用*, 2018, 33(5): 923-931.
- [22] Luo Y C, Zhang Z, Chen Y, Li Z Y, Tao F L. ChinaCropPhen1km: a high-resolution crop phenological dataset for three staple crops in China during 2000 - 2015 based on leaf area index (LAI) products. *Earth System Science Data*, 2020, 12(1): 197-214.
- [23] 郭昱杉, 刘庆生, 刘高焕, 黄翀. 基于 MODIS 时序 NDVI 主要农作物种植信息提取研究. *自然资源学报*, 2017, 32(10): 1808-1818.
- [24] 山东省统计局. 山东省统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2019. <http://tjj.shandong.gov.cn/col/col6279/index.html>.
- [25] 张莎, 张佳华, 白雲, 姚凤梅. 基于 MODIS-EVI 及物候差异免阈值提取黄淮海平原冬小麦面积. *农业工程学报*, 2018, 34(11): 150-158.
- [26] Nguyen H T T, Nguyen L V, de Bie C A J M, Ciampitti I A, Nguyen D A, Nguyen M V, Nieto L, Schwalbert R, Nguyen L V. Mapping maize cropping patterns in dak lak, vietnam through MODIS EVI time series. *Agronomy*, 2020, 10(4): 478.
- [27] 范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 郑周涛. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 304-319.
- [28] 边金虎, 李爱农, 宋孟强, 马利群, 蒋锦刚. MODIS 植被指数时间序列 Savitzky-Golay 滤波算法重构. *遥感学报*, 2010, 14(4): 725-741.
- [29] 胡顺石, 黄春晓, 杨斌, 谭子芳. 自适应加权 Savitzky-Golay 滤波重构 MODIS 植被指数时间序列. *测绘科学*, 2020, 45(4): 105-116.
- [30] 邓晨晖, 白红英, 马新萍, 黄晓月, 赵婷. 2000—2017 年秦岭山地植被物候变化特征及其南北差异. *生态学报*, 2021, 41(3): 1068-1080.
- [31] Wang S S, Mo X G, Liu Z J, Baig M H A, Chi W F. Understanding long-term (1982—2013) patterns and trends in winter wheat spring green-up date over the North China Plain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 57: 235-244.
- [32] 胡明新, 周广胜. 拔节期干旱和复水对春玉米物候的影响及其生理生态机制. *生态学报*, 2020, 40(1): 274-283.
- [33] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 气候变化对海河流域主要作物物候和产量影响. *地理研究*, 2014, 33(1): 3-12.
- [34] 侯学会, 隋学艳, 梁守真, 王猛, 董敏. 几种物候提取方法的小麦物候提取. *遥感信息*, 2017, 32(6): 65-70.