

王瑞峥, 江 洪, 金佳鑫, 等. 黄淮海地区冬小麦物候对气候变化的响应及对产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(22): 71–75.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.22.015

黄淮海地区冬小麦物候对气候变化的响应及对产量的影响

王瑞峥, 江 洪, 金佳鑫, 程 敏

(南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏南京 210023)

摘要:我国是农业大国, 冬小麦是我国主要的粮食作物之一, 研究其物候对于气候变化的响应以及对其产量的影响是研究气候变化对于农业生产影响的重要内容。以黄淮海地区 5 个省(市)为研究区域, 利用 1999—2015 年 SPOT VGT/NDVI 数据提取出冬小麦主要生育物候期(返青期、抽穗期和成熟期)时空分布信息, 分析气候变化对于冬小麦物候的影响以及物候变化与冬小麦产量之间的关系。结果表明, 冬小麦返青期与气候数据之间并无明显相关性, 而抽穗期和成熟期与 3 月份气温存在显著相关性, 同时冬小麦产量与这 2 个物候期关系密切, 抽穗期至成熟期时间段的长短与冬小麦产量极显著相关。

关键词:冬小麦; 气候变化; NDVI; 物候; 产量

中图分类号: S512.1⁺10.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)22-0071-05

物候是指受环境(包括气候、水文、土壤等因素)影响而出现的以年为准周期的自然现象^[1], 包括植物的发芽、展叶、开花、叶变色、落叶等现象, 是植物通过长期地适应季节性变化的生存环境而形成的一种生长发育节律^[2]。农作物物候期则是指农作物生长到达关键生育期所对应的日期, 它是非常重要的农业信息, 是与农业生产、管理以及计划决策等息息相关的依据, 更是用来模拟农作物模型的关键参数。农作物物候的变化可以反映气候变化对于农作物生长发育的影响, 可以作为气候变化对农业生态系统影响的指标之一^[3-8]。

早期人们通过野外观测方式来记录植被个体或群落的发芽、展叶、枯黄和落叶等物候日期, 研究物候的特征与功能在时间以及物种水平上的分异。但因观测能力与范围的限制, 无法实现区域或更大尺度的物候监测。随着遥感技术的发展, 遥感数据能较准确地反映地表植被绿度和结构信息, 定量反映区域乃至全球尺度的植被生态特征, 因此遥感被迅速应用于物候研究^[9]。对于农作物而言, 物候信息可以通过田间观测、积温预测和遥感监测等多种途径获得, 但前 2 种方法在大面积应用中各有其限制^[10], 因此遥感监测手段相较于前 2 种方法更为适用。与传统物候不同, 遥感方法用于描述整个地表景观的物候变化, 侧重表征生态系统结构或功能状态的转换, 因此又称为遥感地表物候^[11](land surface phenology, 简称 LSP)。遥感植被指数(vegetation index, 简称 VI)可指示植被冠层的生理活性, 植被指数的周期变化可表征落叶植被冠

层叶片从发芽、展叶到枯黄、落叶的过程, 也可表征常绿植物冠层叶片从休眠、复苏、活跃到衰落、再次休眠的过程。研究人员根据需求, 在植被时序曲线上设定阈值或选取具有物理意义的节点, 用以指示植被的关键物候事件或状态转折的时间^[12]。在遥感地表物候研究中, 增强型植被指数(enhanced vegetation index, 简称 EVI)能够较好地反映高覆盖区植被季节性特征, 且噪声较小, 在森林物候的季节性变化监测中具有优势^[13]。而基于遥感数据生成的归一化差值植被指数(the normalized difference vegetation index, 简称 NDVI)则能够在较大范围内较为精确地反映植被生长的季节和年际变化, 因而被广泛地应用于植被监测和物候分析中^[14]。目前, 国内外诸多学者利用 NDVI 时序数据对植被物候进行了相关研究, 例如, 于信芳等对中国东北森林物候期进行监测^[15]; Duchemin 等对温带落叶森林生态系统萌动期和落叶期进行研究^[16]。

全球气候变化已经成为当今社会所面对的一个重大环境问题, 是各个国家政府、科学研究人员及人民群众关注的焦点。而物候作为一种重要的指示气候变化的因素, 研究其对于气候变化的响应具有十分重要的意义。与此同时, 气候变化尤其是气温、降水量的变化, 对于农作物生长及其最终产量的影响也是一个意义重大的实际问题。农作物物候变化与其产量之间存在的关系是需要研究的一个重点方向。

小麦是我国主要的粮食作物之一, 黄淮海地区是我国主要的小麦生产基地, 以种植冬小麦为主^[17]。本研究利用 SPOT NDVI 时序数据对黄淮海地区 5 个主要省、市(北京、天津、河南、河北、山东)的冬小麦物候期进行监测, 分析其物候与气温、降水量等气候因子变化的相关性及其对产量的影响, 从而可以更加客观地理解气候变化对该地区冬小麦生产的影响, 为冬小麦的安全生产和科学管理提供依据。

1 研究区概况

以黄淮海平原地区为研究区, 空间范围为 113°~120°E

收稿日期: 2017-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 46014421); 江苏省自然科学基金(编号: BK20150579)。

作者简介: 王瑞峥(1992—), 男, 河北香河人, 硕士, 主要研究方向为遥感监测气候变化与物候之间关系。E-mail: 15251895132@163.com。

通信作者: 江 洪, 博士, 教授, 主要从事全球变化、生态学方面的研究。E-mail: jianghong_china@hotmail.com。

和 $32^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{N}$, 包括北京、天津、河南、河北和山东 5 个省、市, 是我国重要的粮食产区。黄淮海平原属半干旱、半湿润地区, 年均温 $8 \sim 15^{\circ}\text{C}$, 热量资源可以满足喜凉、喜温作物一年两熟的要求, 年降水量 $500 \sim 900 \text{ mm}$, 季节分配不均, 主要集中在夏季。该地区农作物主要栽种方式为冬小麦—夏玉米, 其播种面积和产量在 1995 年分别占全国总量的 39.7% 和 52.7%, 由 1998 年相关农业统计资料可知, 黄淮海平原冬小麦播种面积占耕地面积的 63%, 有些县(市) 高达 90% 以上^[18]。冬小麦一般在上一年 10 月份播种, 在当年 6 月份收获。研究区域以及冬小麦播种范围分布见图 1。

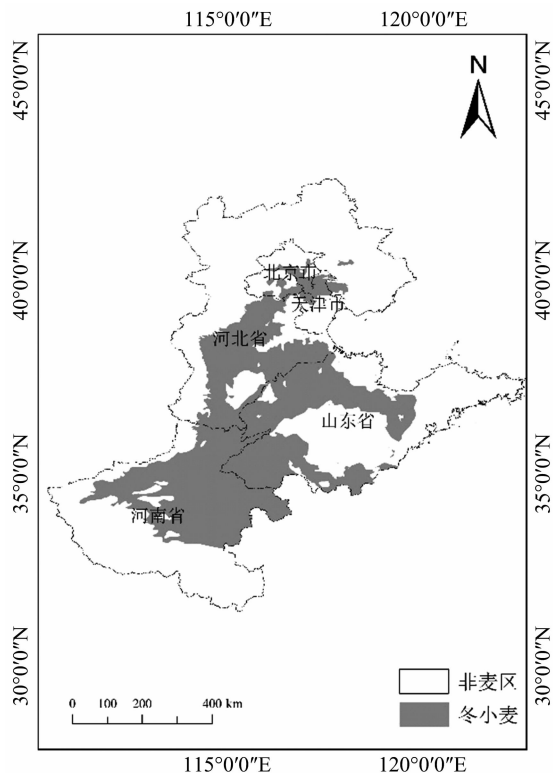


图1 研究区位置及冬小麦种植区分布

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究采用的遥感数据为 SPOT/VGT 逐旬 NDVI 最大值合成数据, 时间范围为 1998 年 6 月至 2015 年 6 月, 空间分辨率为 1 km 。VGT 传感器专门用于区域和全球尺度植被覆盖动态的观测研究, 为大、中尺度的环境监测提供了一种新型的、高质量的遥感数据源^[19], 数据来自于 VITO Earth Observation (<http://www.vito-eodata.be>) 的 SPOT Vegetation 数据集。该数据已完成了几何校正、辐射校正、地图投影、状态标志以及大气校正等处理过程, 其 NDVI 真实值需由图像灰度值(DN)计算得到, 其公式为

$$\text{NDVI} = \text{DN} \times 0.004 - 0.1. \quad (1)$$

气象数据使用的是中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集 (China Meteorological Forcing Dataset), 空间分辨率为 0.1° , 数据来自寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>)。本研究使用的是 1:400 万中国植被分布图, 利用该分布图的农业植被层中的冬小麦作物区域范围提

取出黄淮海地区 5 省(市) 的冬小麦分布区域在 1998 至 2015 年的 NDVI 数据进行分析。冬小麦产量数据来自国家数据网站(由国家统计局提供)。

2.2 NDVI 时间序列平滑

利用 NDVI 时序数据提取冬小麦物候期特征的重要基础是对其时序数据进行平滑处理, 这是由于传感器在获取地面信息时, 云和大气等自然因素所产生的信号噪声对于数据的质量具有一定的影响, 这些信号噪声使得 NDVI 时序数据呈现出一定的锯齿状的不规则波动, 不适合直接用于分析各种趋势变化以及提取物候信息。对时序数据进行平滑重构可以最大程度地减小噪声影响, 同时也可以减少数据的空值点, 更好地描述变化过程。

本研究所使用的平滑方法为改进的 Savitzky-Golay 滤波器对 NDVI 时间序列进行滤波处理^[20]。SG 滤波器是由 Savitzky 和 Golay 于 1964 年提出的最小二乘法滤波器, 又称为数据平滑多项式滤波器。其设计思想是不使用固定的常数窗口对基础数据进行近似拟合, 而是使用高阶多项式实现滑动窗口内的最小二乘拟合。其基本原理是通过在取值点 x_i 附近固定数量的点来拟合 1 个多项式, 多项式在 x_i 处的值, 就是经过 SG 滤波平滑处理后的数值。对于 NDVI 时序数据的 SG 滤波过程可以由下式描述:

$$Y'_j = \sum_{i=-m}^{i=m} \frac{C_i Y_{j+1}}{N}. \quad (2)$$

式中: Y' 为合成之后的序列; Y 为未平滑之前的原始数据; C_i 为滤波系数; N 为滑动窗口包括的数据点数^[21]。利用 SG 滤波器进行平滑时, 需要对 2 个参数进行选择修改。第 1 个是平滑窗口的大小, 一般用 m 表示, 其值越大, 结果越平滑, 被平滑的峰谷值越多; 第 2 个参数是平滑多项式的阶数, 较低的阶数可以得到更加平滑的结果, 但是会保留一些异常值, 而较高的阶数可以去除异常值, 但结果可能存在更多噪声。Chen 等在上述的 S-G 滤波基础之上, 考虑到云层和大气质量的影响产生的噪声污染, 提出了一种新的方法, 基于 S-G 滤波进行改进进而实现精度的进一步提高^[20]。本研究利用改进后的 S-G 滤波方法, 其中 2 种主要参数是选取窗口大小为 5、阶数为 2, 对 1998 年 6 月至 2015 年 6 月的 NDVI 时序数据进行平滑处理, 图 2 为 1999 年的平滑结果。

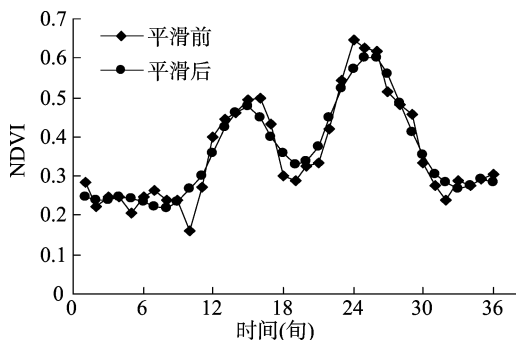


图2 1999 年 NDVI 时间序列数据平滑处理前后的结果

由图 2 可以看出, 经过改进的 SG 滤波处理平滑后, 可以有效地去除一些异常值。对于本研究区, 冬小麦大部分为一年两熟制, 夏熟作物为冬小麦, 由图 2 还可以看出, NDVI 时序曲线呈现明显的双峰形态, 夏季波峰对应的即为冬小麦的抽穗期。

2.3 冬小麦物候期提取

黄淮海地区冬小麦一般在 9 月下旬到 10 月上旬播种, 经历 1 个完整的生长周期: 播种、出苗、分蘖、越冬、返青、起身、拔节、挑旗、抽穗、开花、灌浆、成熟 12 个生育期。本研究主要提取冬小麦 3 个主要生育期, 即返青、抽穗和成熟期来进行分析。冬小麦返青期大概在 2 月末至 3 月期间开始, NDVI 呈上升趋势; 在 4 月末至 5 月, NDVI 达到峰值, 即为冬小麦抽穗期; 随着 NDVI 逐渐降低, 在 6 月到达成熟期, 冬小麦整个生长周期结束。

冬小麦生育期主要是从当年的 11 月至次年的 7 月, 而本研究所要提取的 3 个主要物候期皆处于 1 月至 6 月这个时间段中, 因此选取各年冬小麦生育期内(11 月至次年 6 月)平滑后的 NDVI 序列进行物候期提取。

用双高斯模型^[22]对冬小麦生育期内 NDVI 序列进行拟合, 利用拟合后获得的冬小麦物候模型曲线, 提取 3 个主要物候期。双高斯模型, 即使用 2 个高斯模型组合来描述冬小麦物候, 具体公式可以用下式表达:

$$y = a_1 \times e^{[-(\frac{x-b_1}{c_1})^2]} + a_2 \times e^{[-(\frac{x-b_2}{c_2})^2]}. \quad (3)$$

式中: y 表示植被指数 NDVI 值; x 表示观测值对应的时间; a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 为通过拟合所得到的参数。图 3 是 1999 年 11 月—2000 年 6 月冬小麦物候模型模拟结果, 拟合结果 r^2 为 0.982 4, 各年份冬小麦物候模型拟合结果 r^2 均在 0.9 以上, 拟合结果较为准确。

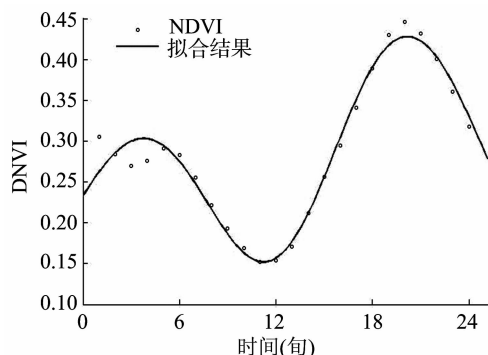


图3 1999—2000 年冬小麦物候模型拟合结果

对拟合后的曲线, 采用比例阈值法^[23]来提取冬小麦的返青期、抽穗期和成熟期。将 NDVI 增加和减小达到 NDVI 振幅一定比例时所对应的时间分别定义为返青期和成熟期, 定义 NDVI 达到最大值的时间点为抽穗期。卫伟等参考我国北方地区的作物物候历将生长季开始和结束的比例阈值分别设置为 10% 和 50%^[24]。因此, 选取 NDVI 时间序列曲线达到上升阶段振幅 10% 的时刻为冬小麦生长季开始, 即为返青期; 选取 NDVI 时间序列曲线达到下降阶段振幅 50% 的时刻为生长季结束, 即为成熟期; NDVI 达到最大值时刻即为抽穗期。

$$NDVI_{lim} = (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \times C. \quad (4)$$

式中: $NDVI_{lim}$ 为达到指定阈值时的 NDVI 值; $NDVI_{max}$ 为 NDVI 最大值; $NDVI_{min}$ 为上升或下降阶段 NDVI 的最小值; C 为设定的阈值。

3 结果与分析

3.1 冬小麦关键物候期的空间分布

根据“2.3”节中介绍的冬小麦物候模型拟合以及物候期

提取方法, 提取出 1999—2015 年研究区内冬小麦返青期、抽穗期和成熟期, 计算多年平均值以及标准差, 得到图 4、图 5、图 6。

冬小麦于返青期快速生长, NDVI 增长明显。根据计算结果, 研究区内冬小麦返青期平均值分布, 由南向北呈现逐渐推迟的趋势, 符合春季绿波由南向北推移规律^[25], 河南省东部地区返青期出现日期最早, 多处于 2 月中旬, 京津地区较晚, 返青期大多出现在 3 月中下旬, 其平均出现日期为 2 月 24 日; 经过返青期拔节之后, 冬小麦叶面积指数增加, 抽穗期时达到最大值, 其 NDVI 值也达到最大值。由图 5 可以看出, 冬小麦抽穗期空间分布同样表现为南部较早, 向北逐渐延迟, 其平均出现日期为 5 月 8 日; 成熟期空间变化幅度较小, 但同样表现出由南向北推迟的现象, 其平均出现日期为 6 月 5 日。

由图 4 可以看出, 京津地区以及河北南部偏东、山东北部地区返青期标准差偏高, 说明该地区返青期变化较为明显, 波动较大; 图 5 显示, 抽穗期变化较为平稳, 其标准差均较低, 波动起伏不明显; 成熟期波动与返青期一致。

3.2 冬小麦物候与气候因子的关系

对提取出的冬小麦各年物候期分别求平均值, 研究其变化趋势, 进而研究其与气候因子相关性。

由表 1 可以看出, 1999 年至 2015 年研究区内冬小麦返青期在 2 月中下旬及 3 月上旬, 大致呈现提前趋势; 抽穗期为 5 月上旬和 5 月中旬; 成熟期大多在 6 月上旬以及中旬。

根据 1999 年至 2015 年冬小麦生育期与月平均温度、月降水量相关分析, 冬小麦抽穗期与 3 月份气温相关系数为 -0.592 , $P=0.012$, 相关性达到 0.05 显著水平; 成熟期与 3 月份气温相关系数为 -0.610 , $P=0.009$, 相关性达到 0.01 显著水平。其他物候期与温度、降水量的相关性均未达到显著水平。可以看出, 冬小麦物候期主要受到气温变化影响, 对于降水量的响应并不明显。对 1999—2015 年各物候期与气温、降水月数据进行线性回归分析, 同样发现返青期与气温、降水变化并无显著线性关系, 而抽穗期与 3 月气候数据存在较为显著的线性关系:

$$Y = -0.106T - 0.004P + 23.771. \quad (6)$$

式中: Y 表示抽穗期出现的旬数(以上一年 11 月上旬为 1); T 表示月均温, $^{\circ}\text{C}$; P 表示月均降水量, mm 。此回归模型 $R=0.629$, $P=0.03$, 达到 0.05 显著性水平。由公式(6)可以看出, 影响抽穗期的主导因素为 3 月份气温数据。

结果表明, 冬小麦返青期与气温、降水并无明显相关关系, 这可能是由于冬小麦种植时间受人为主观因素影响较大, 进而导致返青期的无规律性; 而抽穗期由于受人为主观因素影响较小, 与 3 月气温表现出较高的相关性, 则体现出冬小麦物候对于气候变化的响应。

3.3 冬小麦物候对其产量的影响

利用 1999—2015 年黄淮海地区 5 省(市)的冬小麦产量数据, 与冬小麦生育期内 1—6 月 NDVI 均值进行相关性分析, 研究其关系。结果表明, 产量与 3、4、5 月 NDVI 显著相关, R 分别为 0.778、0.814、0.880, 均到达 0.01 显著性水平。3—5 月为返青后的 3 个月, 涉及抽穗期与成熟期, 说明冬小麦产量主要与抽穗期、成熟期有关。

利用 1999—2015 年黄淮海地区 5 省(市)的冬小麦产量数据, 与冬小麦物候进行相关性分析, 研究其关系。分别分析

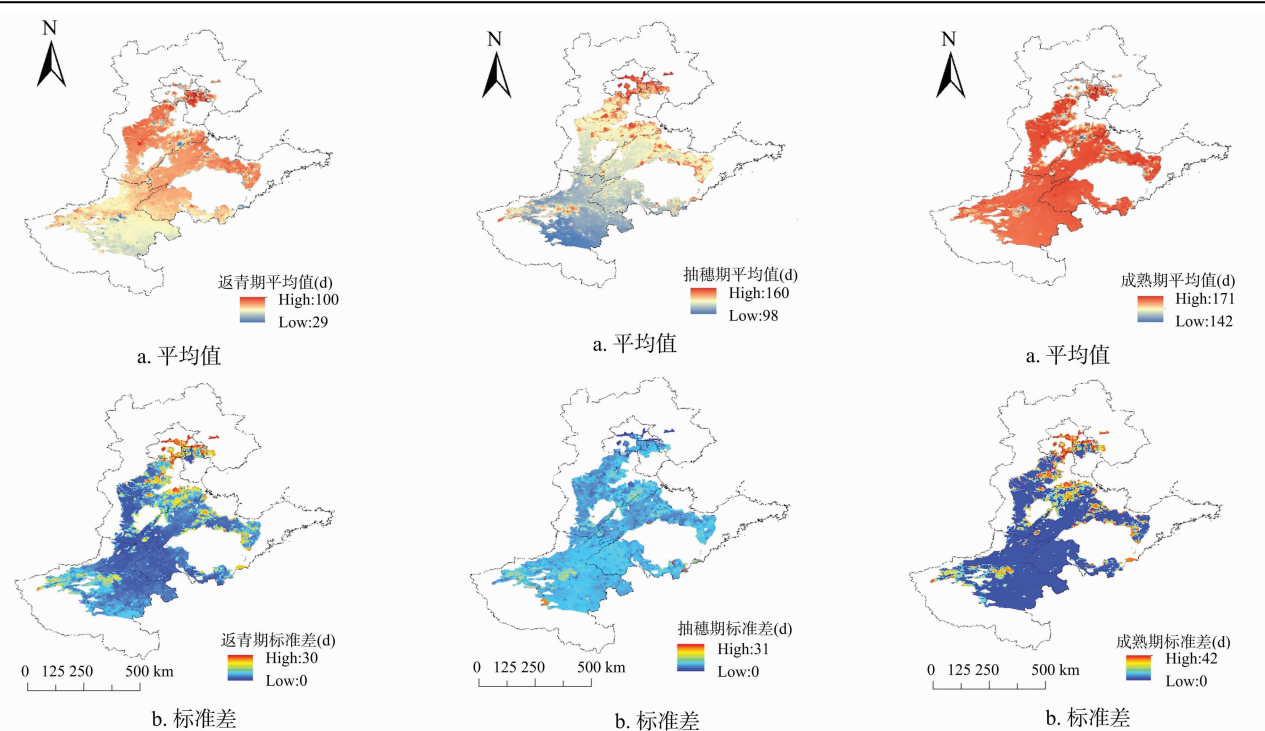


图4 冬小麦返青期多年平均值及标准差 图5 冬小麦抽穗期多年平均值及标准差 图6 冬小麦成熟期多年平均值及标准差

表 1 冬小麦物候提取结果

年份	返青期	抽穗期	成熟期
1999	03-06	05-21	06-11
2000	03-07	05-14	06-09
2001	02-28	05-15	06-10
2002	02-27	05-10	06-08
2003	03-02	05-23	06-13
2004	03-05	05-18	06-11
2005	03-11	05-22	06-12
2006	03-07	05-22	06-12
2007	03-12	05-15	06-10
2008	02-13	05-06	06-07
2009	02-19	05-08	06-08
2010	02-23	05-16	06-10
2011	02-22	05-13	06-09
2012	02-26	05-10	06-08
2013	02-13	05-13	06-09
2014	02-21	04-30	06-03
2015	02-22	05-03	06-05

返青期、抽穗期以及成熟期与冬小麦产量多年变化的关系,结果如表 2 所示。

表 2 冬小麦物候期与其产量的相关性

类别	返青期-产量	抽穗期-产量	成熟期-产量
R	-0.467	-0.611	-0.640
P 值	0.058	0.009	0.006

由表 3 可以看出,相对于返青期,1999—2015 年冬小麦产量与抽穗期、成熟期具有更高的相关性,且均达到 0.01 显著性水平,这进一步说明冬小麦产量主要与抽穗期和成熟期有关。由于冬小麦在返青期的生长主要是生根、长叶和分蘖,对于产量的影响并不能直接显示出来,因此返青期与冬小麦

产量之间相关性并不显著;而冬小麦抽穗期至成熟期这段时间,冬小麦由叶鞘中长出穗,发育完全的穗,随着茎秆的伸长而伸出顶部叶,经过开花期,直至胚乳呈蜡状,籽粒开始变硬成熟,这段时期是小麦作物量增加的重要时段,与其产量直接相关,因此抽穗期、成熟期与小麦产量显著相关。

为了进一步研究冬小麦产量与其物候之间的关系,分析其产量与生长季长度(返青期至成熟期)之间的关系,得到二者相关系数为 0.413, $P=0.099$,未达到显著相关;同时分析产量与冬小麦抽穗期至成熟期长度之间的关系,得到二者相关系数为 0.582, $P=0.014$,达到 0.05 显著性水平。结果进一步表明,冬小麦产量主要与抽穗期至成熟期这段时间更为相关。

4 结论

本研究通过对黄淮海地区 5 个主要省(市)的冬小麦 NDVI 进行分析,进而提取冬小麦主要物候期,结合气象数据进行相关分析,并分析其物候与产量之间存在的联系。结果表明:(1)研究区内冬小麦物候期在空间分布上均呈现出由南向北逐渐推迟的规律。(2)对冬小麦物候期的提取,返青期在 2 月中下旬及 3 月上旬,大致呈现提前趋势;抽穗期为 5 月上旬和 5 月中旬;成熟期大多在 6 月上旬以及中旬。结合气象数据进行相关分析发现,冬小麦抽穗期与 3 月平均气温密切相关,3 月份温度越高,返青期越早,反之亦然,相关性达到 0.05 显著水平;成熟期与 3 月气温相关性也达到 0.01 显著水平。其他物候期与温度、降水量的相关性均未达到显著水平,可以看出,冬小麦物候期主要受到气温影响。(3)分析冬小麦物候对其产量的影响,发现冬小麦产量与其抽穗期、成熟期具有显著相关性,与返青期并无明显相关性;冬小麦产量与其生长季长度相关性未达到显著水平,但是与抽穗期至成

熟期时间段长度相关性达到 0.05 显著水平,与实际情况较为相符,这是由于粮食的累积主要是在抽穗期开始,与返青期无明显关系。

通过对冬小麦物候期的模拟提取以及分析其物候与产量、物候与气候变化之间的关系,进一步确定了物候提取方法的精确性,为冬小麦物候的提取提供了参考;同时由分析结果得出的产量与物候之间的关系,可以为冬小麦的安全生产和科学管理提供依据,对农业生产发挥一定的指导作用。但影响冬小麦物候的因素还有诸如地形、冬小麦品种等,其综合作用可能会使冬小麦物候存在一些差异,在今后的研究中应考虑这些因素的综合影响,使得物候提取更加精确。

参考文献:

- [1] 宛敏渭,刘秀珍. 中国物候观测方法[M]. 北京:科学出版社,1979.
- [2] 王连喜,陈怀亮,李 琪,等. 植物物候与气候研究进展[J]. 生态学报,2010,20(2):447-454.
- [3] Parry M, Canzaiani O, Palutikof J, et al. Climate change 2007: impacts, adaption and vulnerability [J]. Journal of Environmental Quality, 2007,37(6):2407.
- [4] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981—1991 [J]. Nature, 1997, 386:698-702.
- [5] Yang L, Wylie B K, Tieszen L L, et al. An analysis of relationships among climate forcing and time integrated NDVI of grasslands over the US northern and central plains[J]. Remote Sensing of Environment, 1998,65(1):25-37.
- [6] Yu F, Price K P, Ellis J, et al. Response of seasonal vegetation development to climate variations in eastern central Asia[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,87(3):42-54.
- [7] Zhou L, Kaufmann R K, Tian Y, et al. Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999 [J]. Journal of Geophysical Research, 2003,108(D1):20069-20083.
- [8] Sadras V O, Monzon J P. Modelled wheat phenology captures rising temperature trends: shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina[J]. Field Crops Research, 2006,99(2/3):136-146.
- [9] 陈效述,王林海. 遥感物候学研究进展[J]. 地理科学进展, 2009,28(1):33-40.
- [10] 辛景峰,宇振荣, Driessen P M. 利用 NOAA NDVI 数据集监测冬小麦生育期的研究[J]. 遥感学报,2001,5(6):442-447.
- [11] 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.
- [12] 刘玲玲,刘良云,胡 勇. 1982—2006 年欧亚大陆植被生长季开始时间遥感监测分析[J]. 地理科学进展,2012,31(11):1433-1442.
- [13] 李文梅,覃志豪,李文娟,等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 的比较分析[J]. 遥感信息,2010(6):73-78.
- [14] 吴炳方. 全国农情监测与估产的运行化遥感方法[J]. 地理学报,2000,55(1):25-35.
- [15] 于信芳,庄大方. 基于 MODIS NDVI 数据的东北森林物候期监测[J]. 资源科学,2006,28(4):112-117.
- [16] Duchemin B, Goubier J, Courrier G. Monitoring phenological key stages and cycle duration of temperate deciduous forest ecosystems with NOAA/AVHRR data[J]. Remote Sens Environ, 1999,67(1):68-82.
- [17] 杨晓琳,宋振伟,王 宏,等. 黄淮海农作区冬小麦需水量时空变化特征及气候影响因素分析[J]. 中国生态农业学报,2012, 20(3):356-362.
- [18] Xu Y X, Chen Y J. Analysis on crop production and increase potential in HHH plain[J]. Journal of Crop, 1998(4):1-5.
- [19] Xu W T, Wu B F, Yan C Z, et al. Chian land cover 2000 using SPOT VGT S10 dats[J]. Journal of Remote Sensing, 2005,9(2):204-214.
- [20] Chen J, Jonsson P, Tamura M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter [J]. Remote Sensing of Environment, 2004,91(3/4):332-344.
- [21] 边金虎,李爱农,宋猛强,等. MODIS 植被指数时间序列 Savitzky-Golay 滤波算法重构[J]. 遥感学报,2010,14(4):733-741.
- [22] 鹿琳琳,郭东华. 基于 SPOT/VEGETATION 时间序列的冬小麦物候提取方法[J]. 农业工程学报,2009,2(6):174-179.
- [23] Jnsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002,40(8):1824-1832.
- [24] 卫 伟,吴文斌,李正国,等. 基于 SPOT/VGT 数据的中国北方耕地物候提取研究[J]. 中国农业资源与区划,2016,37(4):77-86.
- [25] 刘忠阳,陈怀亮,杜子璇,等. 黄淮海地区植被绿波、褐波的推移及其对气候变化的响应[C]//中国气象学会 2008 年年会卫星遥感应用技术与处理方法分会论文集,2008:435-438.