

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20180020

# 毛乌素沙地植被物候动态及其对气象因子变化的响应

朱娅坤<sup>1</sup> 秦树高<sup>1</sup> 张宇清<sup>1,2</sup> 张举涛<sup>1</sup> 邵艳莹<sup>1</sup> 高 岩<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083;

2. 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**【目的】监测沙区区域植被物候, 并确定植被物候与气候要素的关系, 对理解沙区生态系统对气候变化的动态响应至关重要。【方法】本研究利用1982年1月至2015年12月的归一化差值植被指数(NDVI)时间序列数据, 通过高阶曲线拟合的方法提取毛乌素沙地植被物候, 包括生长季开始日期、结束日期和长度, 分析其时间变化和空间特征, 并利用偏相关性分析法确定其与气象因子(气温和降水量)的关系。【结果】毛乌素沙地植被生长季开始日期集中在第96~144天, 生长季结束日期集中于第280~300天, 生长季长度介于135~195 d。从东到西生长季开始日期逐渐推迟, 生长季长度逐渐缩短, 生长季结束日期没有明显变化。在过去34年中, 毛乌素沙地植被生长季开始日期和长度分别呈现显著提前和延长的趋势, 分别为0.54和0.94 d/a, 生长季结束日期呈现推迟趋势, 但该趋势并不显著。毛乌素沙地植被的生长季开始日期主要受2—4月的平均气温影响, 结束日期主要受8—10月的累计降水量的影响。【结论】毛乌素沙地植被物候特征发生了明显变化, 主要体现在生长季的提前和延长, 这对该区域植被恢复与荒漠化的逆转具有一定的促进作用。

**关键词:**NDVI; 植被物候; 毛乌素沙地; 气象因子; 时空动态

**中图分类号:**S288; S771.8; Q142.2    **文献标志码:**A    **文章编号:**1000-1522(2018)09-0098-09

**引文格式:**朱娅坤, 秦树高, 张宇清, 等. 毛乌素沙地植被物候动态及其对气象因子变化的响应[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(9): 98-106. Zhu Yakun, Qin Shugao, Zhang Yuqing, et al. Vegetation phenology dynamic and its responses to meteorological factor changes in the Mu Us Desert of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(9): 98-106.

## Vegetation phenology dynamic and its responses to meteorological factor changes in the Mu Us Desert of northern China

Zhu Yakun<sup>1</sup> Qin Shugao<sup>1</sup> Zhang Yuqing<sup>1,2</sup> Zhang Jutao<sup>1</sup> Shao Yaning<sup>1</sup> Gao Yan<sup>1</sup>

(1. Yanchi Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] Monitoring regional vegetation phenology in sand area and determining the relations between vegetation phenology and meteorological factors are crucial to understand the dynamic response of sand area ecosystem to climate change. [Method] In this study, through normalized difference vegetation index (NDVI) time series data, we extracted vegetation phenology by Polyfit-Maximum method, and analyzed the trends and relationships between vegetation phenology and climatic factors (air temperature and precipitation) in the Mu Us Desert of northern China over the past three decades (1982–2015). [Result] In the Mu Us Desert, The beginning date of growing season concentrated in the 96th–144th day, the ending date of growing season concentrated in the 280th–

收稿日期: 2018-01-16 修回日期: 2018-03-12

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0500905), 中央高校基本科研业务费专项(2015ZCQ-SB-02)。

第一作者: 朱娅坤。主要研究方向: 荒漠化防治。Email: zhuya94@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 秦树高, 博士, 高级实验师。主要研究方向: 荒漠化防治。Email: qinshugao@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

300th day, and the length of growing season ranged in 135–195 days. From east to west, the beginning date of growing season postponed gradually and growing season length shortened gradually, while there was no obvious change in the ending date of growing season. In the past 34 years, the beginning date and length of growing season for vegetation in the Mu Us Desert showed significantly advanced and prolonged trend, and the changing rates were 0.54 day/year and 0.94 day/year, respectively. While the ending date of growing season showed postponed trend but not delayed obviously. The beginning date of growing season for vegetation in the Mu Us Desert was mainly affected by the mean air temperature from February to April, and its ending date was mainly affected by the accumulated precipitation from August to October. [Conclusion] The vegetation phenology characteristics have changed significantly in Mu Us Desert, which was mainly reflected in the advancement and extension of growing season. This will promote the vegetation restoration and desertification reversion in the study area.

**Key words:** NDVI; vegetation phenology; Mu Us Desert; meteorological factor; spatiotemporal dynamics

植物物候是指植物群落或生态系统受气候要素的影响,以年为周期重复出现的各种生物学现象及其发生时间<sup>[1]</sup>。植物的物候与其光合作用、水养循环和碳循环等息息相关,具有较高的气候敏感性,因此常被用作判别气候变化的指针<sup>[2-3]</sup>。由于植物物候能够反映气候的细微变化,而被称之为全球变化的“积分仪”<sup>[4]</sup>。因此,研究植物物候动态特征,有助于辨析气候变化对生态系统的具体作用,并为预测生态系统未来的变化趋势提供依据。

传统的植物物候信息,多是基于人工观测得到,但是地面观测受到测点数量和物种类型的局限,难以全面反映生态系统对气候变化响应的综合性信息<sup>[5-6]</sup>。20世纪80年代以来,随着遥感技术的发展,遥感数据结合地面数据为研究大尺度的物候变化提供了新的手段<sup>[7-9]</sup>。多时相、长时间序列的遥感图像,通过遥感植被指数的提取,能够很好地反映出生态系统甚至区域尺度上植被季节性生长过程,如:生长季开始日期、结束日期、生长季开始日期到NDVI最大值所用时间、NDVI最大值到生长季结束日期所用的时间等<sup>[10]</sup>。

遥感上监测的植被物候与传统意义上植被物候期(如出苗、展叶、抽穗和开花)不同,它能在宏观上反映植被生长的关键信息,其提取的物候参数是基于传感器获取植被的绿度信息得到,从而判断该区域的植被是否进入生长季、生长季的长短等,能够更为宏观地掌握该地区整体植被的生长活动及过程。因此,许多学者都利用植被指数数据,对大尺度的植被物候动态进行研究<sup>[11-13]</sup>。在北美寒带森林的研究表明,在1982—2008年间,夏季植被生产力的下降主要是由于春季植被物候提前引起的<sup>[14]</sup>。在北欧森林的研究则表明,其生长季出现了明显的变化,生长季开始期提前,生长期延长<sup>[15]</sup>。在国内,青藏高原地区的研究表明,2001—2010年近60%区域的

植被生长季开始日期出现了不同程度的提前<sup>[16]</sup>。而在黄土高原,1982—2011年间其生长季开始日期提前了15 d左右,冬季气温上升则是植物生长季提前的主要原因<sup>[17]</sup>。

毛乌素沙地位于黄土高原与鄂尔多斯台地的过渡地带,属于中国北方农牧交错带,是我国主要的荒漠化影响区域之一,是气候变化敏感带和生态脆弱带<sup>[18-19]</sup>,研究该地区的植被物候动态变化及其与气象因子的关系,对于理解气候变化背景下,区域尺度上沙区植被生长动态特征具有重要意义。目前,沙区植被物候动态研究相对匮乏,已有的研究表明,在2001—2010年间,中国农牧交错地带大部分植被覆盖区域的生长季开始日期呈现提前趋势,提前日期约为10 d左右<sup>[20]</sup>。在中亚及中国新疆干旱区,植被生长季开始期和结束期则在过去25年中没有明显的变化<sup>[21]</sup>。另外王静璞等对毛乌素沙地2001—2013年的植被物候进行了研究,表明生长季开始日期提前了12 d<sup>[22]</sup>。然而在沙区,植被NDVI比较低,而且受早春降水的影响,部分区域植被有时会提前进入生长季,而Logistic模型提取植被物候指数的方法,并不能够准确体现出早春降水对植被的影响。而且,已有的研究多以某一个月的气象因子作为变量来探究植被物候与气象因子的关系<sup>[20-22]</sup>,未考虑到气象因子对植被物候影响的叠加效应<sup>[3]</sup>。

因此,为了更为准确的提取沙区植被物候信息,并找到驱动植被物候变化的主要气象因子,本研究基于陆地长期数据记录(land long term data record, LTDR) V4版本,利用34年(1982—2015年)的NDVI数据,通过高阶曲线拟合的方法<sup>[3]</sup>提取毛乌素沙地植被物候特征,分析其时间变化和空间特征,并利用研究区气象数据,进一步分析其与气象因子(气温和降水量)的关系,旨在了解气候变化对毛乌素沙地植被物候的影响。

## 1 研究区概况

毛乌素沙地位于 $36^{\circ}48' \sim 40^{\circ}12'N$ 、 $106^{\circ}10' \sim 111^{\circ}53'E$ 之间,处于黄土高原与鄂尔多斯台地的过渡地带,行政区划上跨越3省12县(市),包括内蒙古自治区的鄂托克前旗、鄂托克旗、乌审旗、伊金霍洛旗,陕西省的榆林市、横山县、神木县及宁夏回族自治区的灵武市、陶乐县、盐池县(图1)。毛乌素沙地总面积为 $9.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中沙地面积约 $6.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[23]</sup>,海拔在700~2 000 m,整体自西北向东南倾斜,气候兼有干旱和半干旱气候类型,多年平均温度在5.6~10.2℃之间,多年平均降水量在154~450 mm之间,主要降水量季节集中在7—9月,在空间分布上具有自东南向西北递减的特征,主要植被类型为草原和荒漠草原,地下水资源丰富,经济较为发达,是中国重要的能源基地。

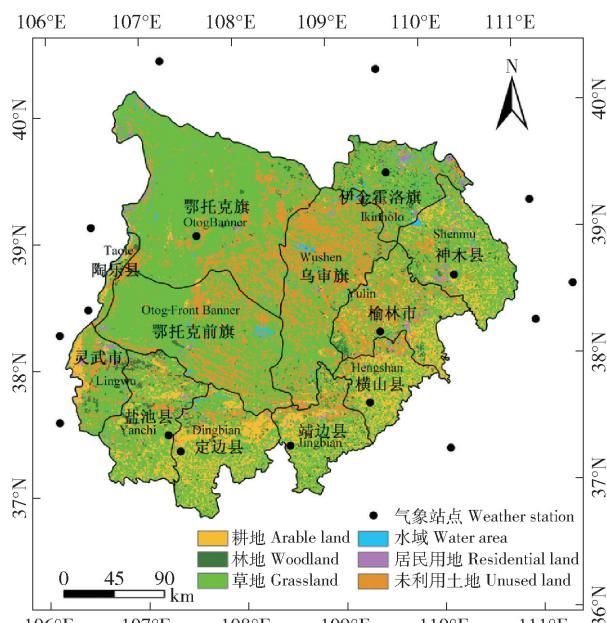


图1 毛乌素沙地行政区划及周围气象台站空间分布

Fig. 1 Administrative division of the Mu Us Desert and spatial distribution of weather stations around it

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

#### 2.1.1 NDVI数据

本文采用的植被数据为LTDR-V4版本<sup>[24]</sup>的NDVI数据,时间分辨率为1 d,时间长度为1982年1月到2015年12月。具体为从中国影像中裁剪出毛乌素沙地的影像,将其投影为WGS1984/Albers conical equal area投影,像元大小为5 km,为了研究需要,将逐日的NDVI数据使用最大值合成法<sup>[25]</sup>合成为时间分辨率为10 d的数据,共1 224期影像。

利用时间序列上的NDVI数据,来提取物候指数,在此过程中,图像处理用到了Python 2.7, ArcGIS 10.2和HDF-EOS to GeoTIFF转换工具,数据处理用到了R语言。

#### 2.1.2 气象数据

利用毛乌素沙地中及周围18个气象站点(图1)来获取月气温和降水量数据,这些气象数据可以从中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn/>)下载,时间长度从1982年到2015年。为了得到与植被数据分辨率一致的栅格数据,使用薄盘样条函数插值法<sup>[17]</sup>对气温和降水量数据进行插值。

## 2.2 数据处理

### 2.2.1 物候特征提取

由于云雪的影响,最大值合成后的NDVI图像,可能还是会存在栅格值较低的情况,为了减小这种影响,我们对NDVI时间序列数据进行了时间序列谐波分析,该方法在充分考虑植被生长周期性和数据本身特点的前提下,重新构建时间序列遥感图像,可定量化模拟植被的生长动态过程,反映出植被的生长状况<sup>[26]</sup>。该算法主要包括5个参数,分别是频率个数、高低值抑制标志、有效数据范围、曲线拟合阈值、剩余点个数。频率个数表示曲线的分解程度,本文通过反复试验,取值为3;抑制标志应选择低值;有效数据范围就是去掉异常值,本文设置有效数据范围为0~1;曲线拟合阈值也就是误差,设置为0.05;剩余点个数表示用于拟合曲线的点的最少个数,本文通过反复试验,9比较合适。重建之后的NDVI时间序列曲线(图2)。

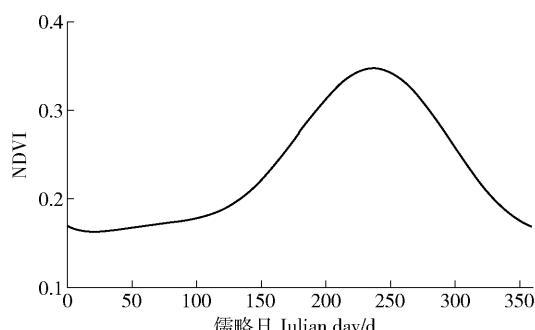


图2 HANTS滤波后NDVI的曲线

Fig. 2 NDVI time series curve after HANTS smoothing

为了能准确的捕捉到沙区植被生长动态,同时能准确地反映出由于冬末春初的融雪对植被的影响,本文用高阶曲线拟合<sup>[3]</sup>的方法拟合NDVI的时间序列曲线,高阶曲线模型参数灵活,阶次越高,拟合的效果越好,一般情况下,6次高阶曲线拟合就能够满足研究的需要,曲线模型计算公式如下:

$$\text{NDVI}(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t^1 + \alpha_2 t^2 + \cdots + \alpha_6 t^6 \quad (1)$$

式中: $t$ 是儒略日,  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_6$ 是用高阶曲线拟合的参数,然后利用最大比值法<sup>[26]</sup>提取基于NDVI时间序列的植被物候信息,包括生长季开始日期、结束日期和长度。如公式(2)所示:

$$\text{NDVI}_{\text{ratio}}(t) = \frac{\text{NDVI}(t+1) - \text{NDVI}(t)}{\text{NDVI}(t)} \quad (2)$$

式中: $\text{NDVI}_{\text{ratio}}(t)$ 为NDVI在时间 $t$ 上的斜率。生长季开始日期为1~180 d中 $\text{NDVI}_{\text{ratio}}$ 最大值所对应的儒略日,结束日期为180~365 d中 $\text{NDVI}_{\text{ratio}}$ 最小值对应的儒略日;生长季结束日期减去生长季开始日期即为生长季长度。

### 2.2.2 线性趋势分析和偏相关性分析

为了分析物候要素的年际变化趋势,我们对每个栅格都进行一元线性回归分析:

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

式中: $n$ 表示时间序列的长度; $i$ 表示年序列; $T_i$ 为在第 $i$ 年的生长季开始日期或结束日期或生长季长度。 $\theta_{\text{slope}}$ 指的是趋势线的斜率。

植被对气候变化的响应有滞后效应,即植被物候日期会受前季气象因子的影响,同时,气象因子对植被的影响还存在叠加效应,所以单独分析月气温和降水量与物候的关系,并不是十分准确<sup>[27~29]</sup>。在本次研究中,选择累月平均气温和降水量作为气象

因子,物候日期的当月以及向前累计1~5个月的累月平均气温和降水量,一共12个气象因子作为变量,来研究植被物候与气象要素之间的关系。由于降水与气温之间会相互影响,采用偏相关性分析的方法来获得单一气象要素与植被生长季开始日期和结束日期的关系<sup>[17]</sup>,并使用T检验进行显著性检验,当 $P < 0.05$ 时,相关性显著。

## 3 结果与分析

### 3.1 结果验证

为了确定本研究方法的可靠性,本文从相关文献中筛选出来相关结果与之进行对比(表1)。由表1可知,本文提取的物候信息与其他文献的结果较为一致,基本都是在3月中旬到5月中旬进入生长季,10月左右结束生长季,说明本文提取的毛乌素沙地植被物候信息较为可靠。

### 3.2 1982—2015年毛乌素沙地植被物候空间分布

毛乌素沙地,除了以人工植被为主的东南部(神木、榆林、横山和靖边的东部)外,生长季开始日期主要集中在第96~144天之间,面积约占研究区域的73.25%,且空间上从东向西推迟(图3)。中东部地区(乌审旗和鄂托克前旗)的开始日期相对较早,多在第80~112天,约占面积的34.41%,考虑该地区的沙地较多(图1),说明植被生长季开始日期不仅仅和经纬度有关,还受植被类型的影响,这与之前的研究结果类似<sup>[30~34]</sup>。

表1 本文物候结果与其他研究结果的比较

Tab. 1 Comparison of phenology results in this study and previous studies

研究区域 Study area	生长季开始日期 (儒略日) Beginning date of growing season (Julian day)/d	生长季结束日期 (儒略日) Ending date of growing season (Julian day)/d	生长季长度 Length of growing season/d	研究时段 Study period	数据及分辨率 Data and resolution ratio	文献来源 Source of literature
毛乌素沙地 Mu Us Desert	80~160	270~325	135~243	1982—2015	AVHRR LTDR-V4 (5 km)	本文 This study
陕甘宁交界* Shaanxi-Gansu-Ningxia junction	80~160	290~330	130~250	1999—2010	SPOT-VGT (1 km)	韦振锋等 <sup>[29]</sup> Wei Z F, etc <sup>[29]</sup>
黄土高原* The Loess Plateau	100~145	283~305	135~205	1982—2011	AVHRR LTDR-V4 (5 km)	谢宝妮等 <sup>[17]</sup> Xie B N, etc <sup>[17]</sup>
毛乌素沙地 Mu Us Desert	90~156	245~323	125~200	2001—2013	MODIS (0.25 km)	王静璞等 <sup>[22]</sup> Wang J P, etc <sup>[22]</sup>
中国北方* North of China	92~142	290~300	125~200	1982—2006	AVHRR GIMMS (8 km)	安佑志等 <sup>[28]</sup> An Y Z, etc <sup>[58]</sup>

注: \* 表示选择文献中的研究区域与本文研究区域重合的区域。Note: \* represents selecting the area in the literature that overlaps the study area in the paper.

研究区的生长季结束日期表现比较一致(图3),与开始日期的格局不同,没有明显的空间变化规律,94.72%的区域结束日期集中在第280~300

天之间,基本上都在10月左右结束生长季。研究区域的生长季长度的空间分布与开始日期相反,生长季开始日期较早的区域其生长季较晚,生长季开始

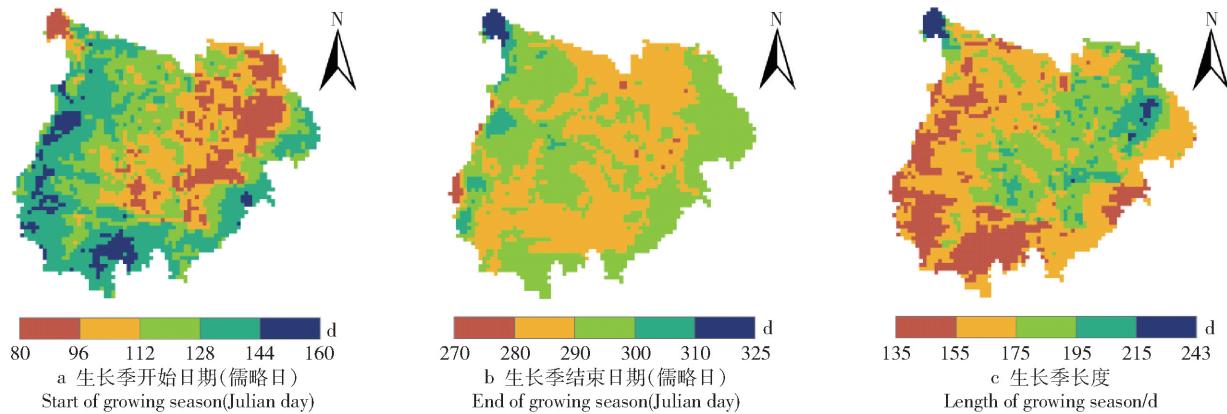


图3 1982—2015年毛乌素沙地植被平均物候的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of mean vegetation phenology in the Mu Us Desert from 1982 to 2015

日期较晚的区域其生长季较长。大部分地区的生长季长度位于 135~195 d 之间,其中 61.55% 的区域生长季长度集中在 150~180 d。

### 3.3 1982—2015年毛乌素沙地植被物候年际变化

从时间上看,毛乌素沙地植被生长季开始日期在过去 34 年中显著提前(图 4),从 1982 年的第 100 天(4 月上旬)提前到 2015 年的第 81 天(3 月下旬),约提前 18 d,平均每年提前 0.54 d ( $R^2 = 0.65$ ,  $P < 0.05$ )。生长季结束日期从 1982 年的第 282 天(10 月中旬)推迟到 2015 年的第 305 天(11 月上旬),约推迟 14 d,平均以每年 0.41 d 的速率推迟 ( $R^2 = 0.36$ ,  $P > 0.05$ )。生长季长度从 1982 年的第 181 天延长到 2015 年的第 223 天,约延长了 32 d,平均每年延长 0.94 d ( $R^2 = 0.55$ ,  $P < 0.05$ )。

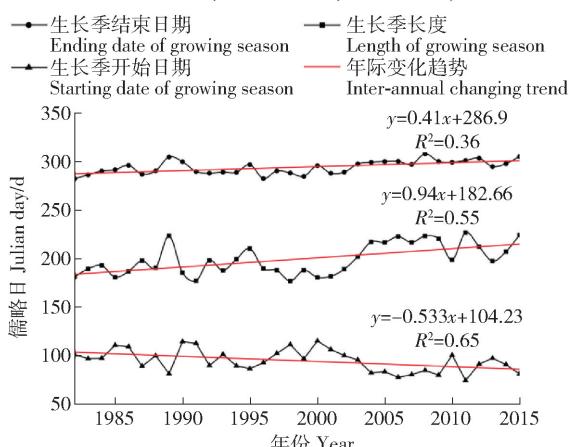


图4 1982—2015年毛乌素沙地物候的年际变化

Fig. 4 Inter-annual variations of phenology in the Mu Us Desert from 1982 to 2015

从空间上看,毛乌素沙地植被生长季开始日期在过去 34 年间整体处于提前趋势(图 5a),约 70.78% 的区域开始日期提前,其中 46.19% 的区域提前幅度在 0.5 d/a 以内,19.09% 的幅度在 0.5 和 1 d/a 之间;29.22% 的区域开始日期出现了推迟,其

中 23.67% 的区域推迟幅度在 0.5 d/a 以内。另外,研究区生长季开始日期显著提前的区域占了 38.13% (图 5d)。显著推迟的区域只占 6.22%。生长季结束日期则比较一致(图 5b),几乎全部的区域(96.52%)都呈现推迟的趋势,其中东部和中部(伊金霍洛旗、乌审旗、神木、榆林、横山、靖边和定边)的趋势比较小,42.98% 的区域推迟幅度在 0.5 d/a 以内,31.07% 的结束日期推迟幅度在 0.5 和 1 d/a 之间,22.48% 的区域大于 1 d/a;但是 91.85% 的结束日期推迟的趋势并没有通过显著性的检验(图 5e),呈现显著推迟的区域仅有 6.24%。研究区的生长季长度呈现整体延长的趋势(图 5c),其中 51.13% 的区域延长幅度在 0~1 d/a 以内,40.76% 的延长幅度在 1 d/a 以上,只有零星的区域(8.15%)其生长季呈现缩短的趋势,但是 73.80% 的生长季延长的趋势并未通过显著性的检验(图 5f),仅 5.78% 的区域生长季延长的趋势通过了显著性的检验。

### 3.4 毛乌素沙地植被物候与气候因子的关系

图 6a 显示,毛乌素沙地生长季开始日期与生长季开始日期的当月及之前的累计 1~5 个月平均气温和降水量均呈负相关关系,开始日期与降水量的相关性低于与同期气温的相关性;开始日期与累月平均气温的相关性先增强后减弱,与向前累计 2 个月的平均气温的相关性最大 ( $R^2 = 0.61$ ),即 2—4 月累计 3 个月的平均气温与生长季开始日期最为相关。结果表明:生长季开始前的累月平均气温升高和降水量增多会导致开始日期的提前,且开始日期与气温的关系密切,2—4 月累计 3 个月的平均气温是影响开始日期提前的主要因素,同时也说明了开始日期的提前是累计气温增加的结果,冬末春初的平均气温的提高会引起生长季开始日期的提前。

毛乌素沙地生长季结束日期与生长季结束日期

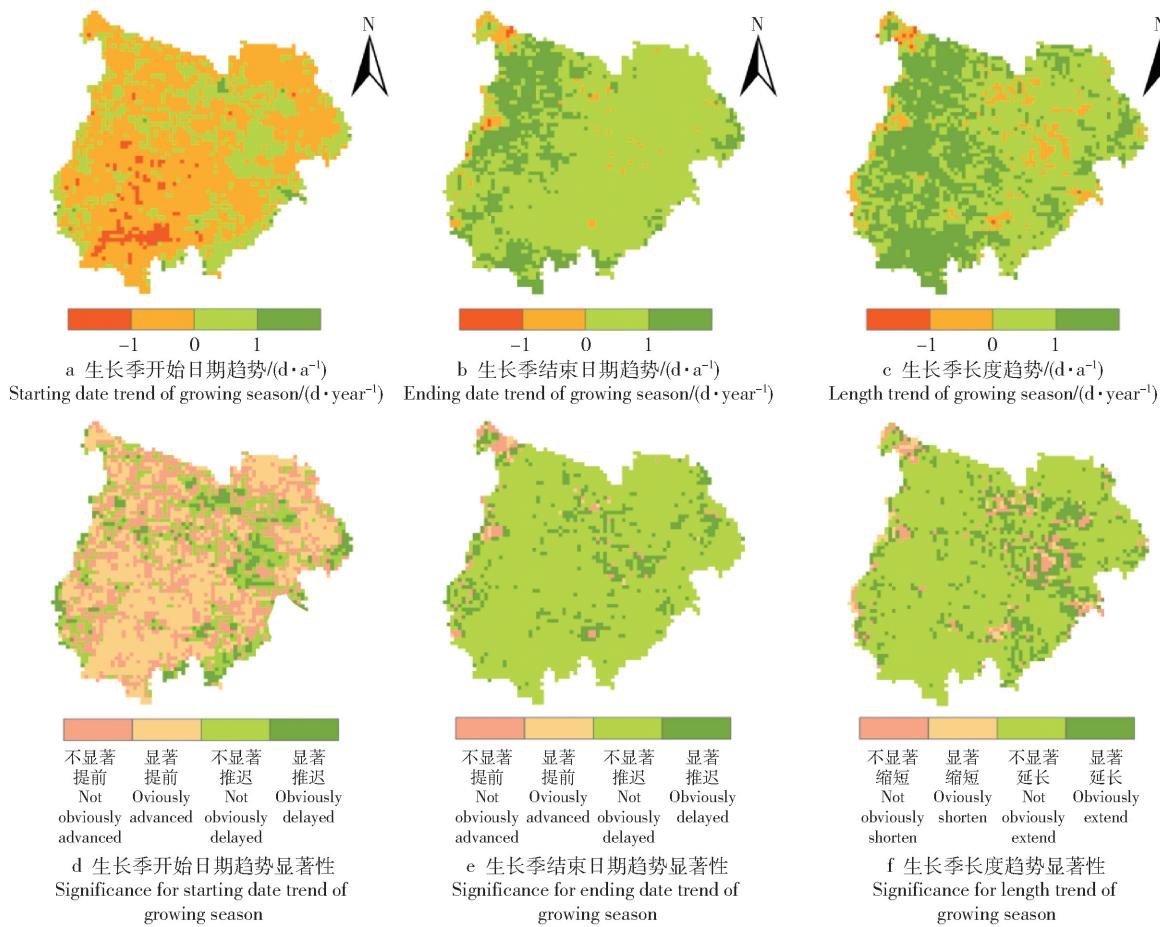


图 5 1982—2015 年毛乌素沙地物候期动态变化

Fig. 5 Dynamic change in phenology in the Mu Us Desert from 1982 to 2015

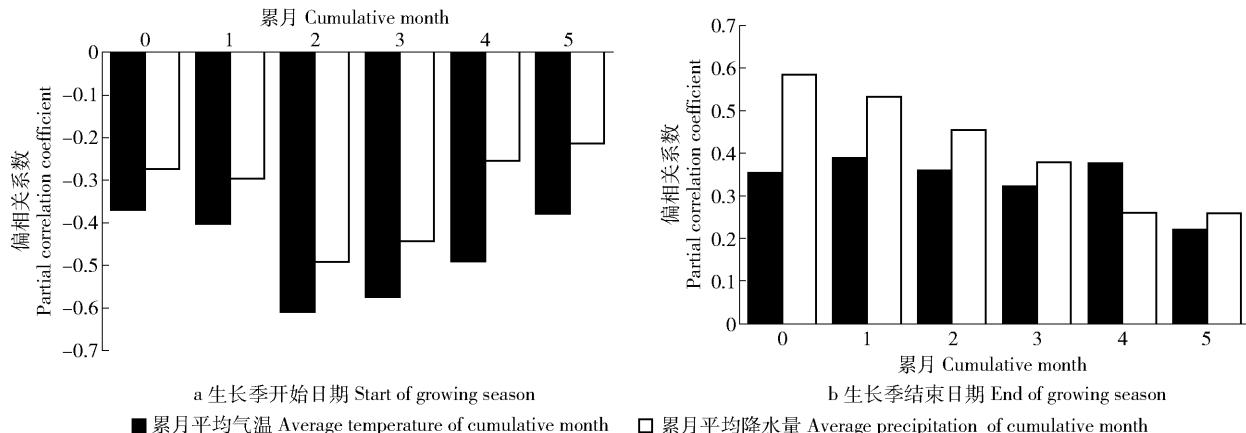


图 6 毛乌素沙地植被物候与气象因子的关系

Fig. 6 Relationship between phenology and meteorological factors in the Mu Us Desert

的当月及之前的累月平均气温和降水量均呈正相关关系;结束日期与降水量的相关性高于与同期气温的相关性(图 6b),结束日期与气温的相关性都在 0.35 左右,而与降水的相关性则随着累计的月份越多而逐渐减弱,强相关(0.5 左右)出现在当月及向前累计两个月的平均降水量中,即 8—10 月的平均降水量与生长季结束日期的关系密切。这就说明气温升高,降水增多可能会引起与结束日期推迟,且降

水量是结束日期推迟的主要气象因子。

由图 7a 可以看出,过去 34 年中,毛乌素沙地的年平均气温呈现增加的趋势,平均每年增加 0.042 °C;而降水量只是存在年际波动,并没有明显的变化趋势(图 7b)。对本次研究的 12 个气象因子而言(表 2、3),与植被生长季开始日期和结束日期有关的气温都有显著增加的趋势( $P < 0.05$ ),而降水量虽然有变化但是并没有通过显著性检验( $P > 0.05$ )。

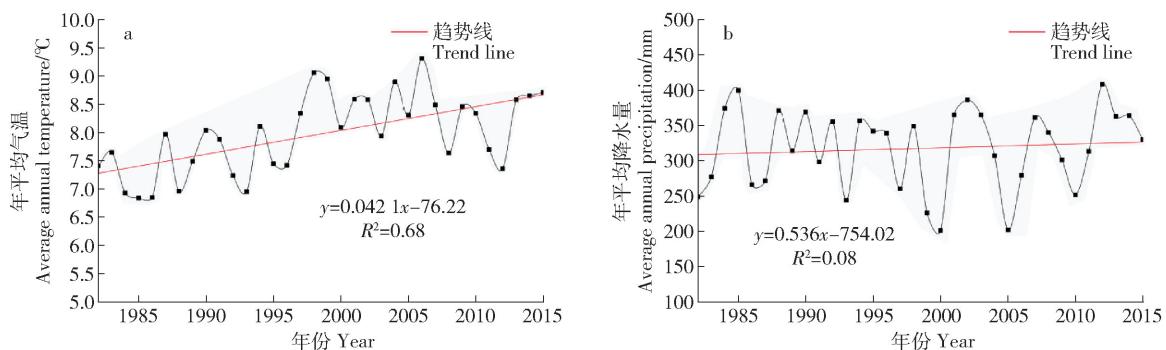


图7 毛乌素沙地年平均气温和降水量的年际变化

Fig. 7 Interannual changes of average annual temperature and precipitation in Mu Us Desert

表2 生长期开始日期向前累计0~5个月的气温和降水量的年际变化

Tab. 2 Interannual changes in cumulative 0~5 months air temperature and precipitation prior to the beginning date of the growing season

月的个数 Number of month	气温的趋势/(°C·a <sup>-1</sup> ) Trend of air temperature/(°C·year <sup>-1</sup> )	降水量的趋势/(mm·a <sup>-1</sup> ) Trend of precipitation/(mm·year <sup>-1</sup> )
0	0.044 *	-0.13
1	0.041 *	0.41
2	0.036 *	0.49
3	0.038 *	0.56
4	0.033 *	0.79
5	0.043 *	0.34

注: \* 表示在 0.05 的水平上通过显著性检验。下同。 Notes: \* stands for passing significant test at the 0.05 level. The same below.

表3 生长期结束日期向前累计0~5个月的气温和降水量的年际变化

Tab. 3 Interannual changes in cumulative 0~5 months air temperature and precipitation prior to the ending date of the growing season

月的个数 Number of month	气温的趋势/(°C·a <sup>-1</sup> ) Trend of air temperature/(°C·year <sup>-1</sup> )	降水量的趋势/(mm·a <sup>-1</sup> ) Trend of precipitation/(mm·year <sup>-1</sup> )
0	0.054 *	0.64
1	0.047 *	0.34
2	0.045 *	0.54
3	0.051 *	0.21
4	0.039 *	-0.19
5	0.045 *	0.52

结合物候的动态变化及偏相关性的结果,可以发现在毛乌素沙地过去的34年中,气温和降水量的变化会对生长期开始日期的提前产生影响,气温是开始日期提前的主要因素;毛乌素沙地的气温虽然不断升高,但秋季降水量是影响生长期结束日期的主要因素,由于秋季降水量的格局并没有明显的改变

(表3),所以毛乌素沙地的生长期结束日期虽然呈现推迟的趋势,但并没有通过显著性的检验( $P > 0.05$ ,图5e)。开始日期和生长期长度的空间分布相同(图5a、c),说明开始日期的提前导致了生长期的延长,因此增温在毛乌素沙地生长期延长中扮演着重要角色。在过去30余年中,毛乌素沙地的生态环境得到了改善,荒漠化得到了有效的遏制<sup>[35]</sup>。一方面是人为因素(政策、生态工程)的结果,另一方面由于全球变暖,不断升高的气温引起毛乌素沙地植被的生长期延长,植被与环境之间的物质和能量交换的时间延长,使得植被活动增强。因此,增温对毛乌素沙地的植被恢复起到了积极作用。

在未来气候变化可预测的情况下,干旱区的气温依然会上升<sup>[36]</sup>,这就表明毛乌素沙区植被在未来仍然会面临着生长期开始日期提前,生长期长度延长的局面。在这样的形式下,会使得该地区生态系统与环境之间的物质交换更加频繁,比如:植被蒸散发的增加,植被的光合作用的增强等,而植被的光合作用会吸收 CO<sub>2</sub>,能减缓温度上升的趋势<sup>[37]</sup>,这就可能会改变区域小气候,这是植被物候改变对气候变化产生的负反应。另外,未来气候持续性变暖可能会使干旱区的蒸发加强,给植被生态用水增加压力,从而对植被造成负面影响,所以在之后的沙区植被重建过程中,要合理利用和分配水资源。

## 4 结 论

1982—2015年间,毛乌素沙地植被物候发生了显著的变化,主要体现在生长期开始日期的提前(0.54 d/a)和生长期的延长(0.94 d/a),其变化与气温增加关系密切。长期的气温升高引起毛乌素沙地植被生长期提前和延长,这对该区域植被恢复与荒漠化的逆转具有一定促进作用,但值得注意的是,毛乌素沙地降水量并无显著变化,生长期延长势必会增加区域生态用水压力,因此未来进行植被建设,要更加重视区域水资源的植被承载能力,避免片面

追求植被盖度,盲目扩大植被规模。

## 参 考 文 献

- [1] Wan M W, Liu X Z. Observation method of the phenology in China [M]. Beijing: Science Press, 1979:1.
- [2] Cong N, Piao S, Chen A, et al. Spring vegetation green-up date in China inferred from SPOT NDVI data: a multiple model analysis [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 165:104–113.
- [3] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation [J]. Global Change Biology, 2010, 12(4):672–685.
- [4] Miao G S, Geng X Z, Nan C, et al. Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189:71–80.
- [5] 许青云, 杨贵军, 龙慧灵, 等. 基于 MODIS NDVI 多年时序数据的农作物种植识别 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(11):134–144.
- Xu Q Y, Yang G J, Long H L, et al. Crop information identification based on MODIS NDVI time-series data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(11):134–144.
- [6] 陈静茹, 杜彦君, 张玉红, 等. 黑龙江木本植物盛花期对气候变暖的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(11):50–56.
- Chen J R, Du Y J, Zhang Y H, et al. Response of woody plant flowering season to climate warming in Heilongjiang [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(11):50–56.
- [7] 康峻, 牛铮, 高帅, 等. 基于拟合物候参数的植被遥感决策树分类 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(9):148–156.
- Kang J, Niu Z, Gao S, et al. Decision tree classification based on fitted phenology parameters from remotely sensed vegetation data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(9):148–156.
- [8] 宋富强, 康慕谊, 杨朋, 等. 陕北地区 GIMMS、SPOT-VGT 和 MODIS 归一化植被指数的差异分析 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(4):72–80.
- Song F Q, Kang M Y, Yang P, et al. Analysis of GIMMS, SPOT-VGT and MODIS normalized difference vegetation index in Northern Shanxi [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(4):72–80.
- [9] 王鸽, 韩琳, 张昱. 东北地区地表 NDVI 的时空变化规律 [J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(6):86–91.
- Wang G, Han L, Zhang Y. Temporal and spatial variation of surface NDVI in Northeast China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(6):86–91.
- [10] Guo L, Dai J, Wang M, et al. Responses of spring phenology in temperate zone trees to climate warming: a case study of apricot flowering in China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 201:1–7.
- [11] 刘峻明, 李曼曼, 王鹏新, 等. 基于 LAI 时间序列重构数据的冬小麦物候监测 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(19):120–129.
- Liu J M, Li M M, Wang P X, et al. Monitoring of phenology by reconstructing LAI time series data for winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(19):120–129.
- [12] Heumann B W, Seaquist J W, Eklundh L, et al. AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982–2005 [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(4):385–392.
- [13] Lee R, Yu F, Price K P, et al. Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(12):2505–2512.
- [14] Kim Y, Kimball J S, Didan K, et al. Response of vegetation growth and productivity to spring climate indicators in the conterminous United States derived from satellite remote sensing data fusion [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 194:132–143.
- [15] Menzel A, Sparks T H, Estrella N, et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern [J]. Global Change Biology, 2006, 12(10):1969–1976.
- [16] 宋春桥, 游松财, 柯灵红, 等. 藏北高原植被物候时空动态变化的遥感监测研究 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(8):853–863.
- Song C Q, You S C, Ke L H, et al. Study on temporal and spatial dynamic changes of vegetation phenology in northern Tibet by remote sensing [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(8):853–863.
- [17] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 等. 基于遥感的黄土高原植被物候监测及其对气候变化的响应 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(15):153–160.
- Xie B N, Qin Z F, Wang Y, et al. Monitoring vegetation phenology and their response to climate change on Chinese Loess Plateau based on remote sensing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(15):153–160.
- [18] 王涛. 中国沙漠化研究的进展 [J]. 中国沙漠, 1999, 19(4):299–311.
- Wang T. Advances in desertification research in China [J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(4):299–311.
- [19] 北京大学地理系. 毛乌素沙区自然条件及其改良利用 [M]. 北京:科学出版社, 1983.
- Department of Geography, Peking University. Mu Us sandy natural conditions and its improved utilization [M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [20] 侯学会, 牛铮, 高帅, 等. 基于 SPOT-VGTNDVI 时间序列的农牧交错带植被物候监测 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(1):142–150.
- Hou X H, Niu Z, Gao S, et al. Monitoring vegetation phenology in farming-pastoral zone using SPOT-VGT NDVI data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1):142–150.
- [21] 马勇刚, 张弛, 塔西甫拉提·特依拜. 中亚及中国新疆干旱区植被物候时空变化 [J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(2):95–102.
- Ma Y G, Zhang C, Tassilati · Teyibai. Spatial and temporal variation of vegetation phenology in arid zones in Xinjiang, central Asia and China [J]. Climate Change Research, 2014, 10(2):95–102.

- [22] 王静璞, 刘连友, 贾凯, 等. 毛乌素沙地植被物候时空变化特征及其影响因素 [J]. 中国沙漠, 2015, 35(3):624-631.  
Wang J P, Liu L Y, Jia K, et al. Spatiotemporal variation of vegetation phenology and its affecting factors in the Mu Us Sandy Land [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3):624-631.
- [23] 王涛. 中国北方沙漠与沙漠化图集 [M]. 北京:科学出版社, 2014.  
Wang T. Atlas of desertification and desertification in northern China [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [24] Pedelty J, Devadiga S, Masuoka E, et al. Generating a long-term land data record from the AVHRR and MODIS instruments [C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IEEE International. Barcelona: IEEE, 2008:1021-1025.
- [25] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11):1417-1434.
- [26] Jakubauskas M E. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(4):461-470.
- [27] Sha Z Y, Zhong J L, Bai Y F, et al. Spatio-temporal patterns of satellite-derived grassland vegetation phenology from 1998 to 2012 in Inner Mongolia, China [J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(3): 462-477.
- [28] 安佑志. 基于遥感的中国北部植被 NDVI 和物候变化研究 [D]. 上海:华东师范大学, 2014.  
An Y Z. Remote sensing based NDVI and phenological changes in northern China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [29] 韦振锋, 任志远, 张翀, 等. 1999—2010 年陕甘宁黄土高原区气候对植被物候的影响 [J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 232-236.  
Wei Z F, Ren Z Y, Zhang J, et al. Impact of climate on vegetation phenology in the Loess Plateau region of Shaanxi, Gansu, and Ningxia in 1999-2010 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(5):232-236.
- [30] Ma T, Zhou C H. Climate-associated changes in spring plant phenology in China [J]. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(2): 269-275.
- [31] Wei H Y, Heilman P, Qi J G, et al. Assessing phenological change in China from 1982 to 2006 using AVHRR imagery [J]. Frontiers of Earth Science, 2012, 6(3): 227-236.
- [32] Wang H, Liu D, Lin H, et al. NDVI and vegetation phenology dynamics under the influence of sunshine duration on the Tibetan Plateau [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(5): 687-698.
- [33] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3):471-475.
- [34] Piao S L, Cui M, Chen A, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12):1599-1608.
- [35] 闫峰, 吴波. 近 40a 毛乌素沙地荒漠化过程研究 [J]. 干旱区地理, 2013, 36(6):987-996.  
Yan F, Wu B. Study on the desertification process in Mu Us Desert in recent 40 years [J]. Arid Land Geography, 2013, 36(6):987-996.
- [36] Schwalm C R, Anderegg W R L, Michalak A M, et al. Global patterns of drought recovery [J]. Nature, 2015, 548:202-205.
- [37] 谢宝妮. 黄土高原近 30 年植被覆盖变化及其对气候变化的响应 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.  
Xie B N. Changes of vegetation coverage and its response to climate change in the Loess Plateau in recent 30 years [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.

(责任编辑 范娟  
责任编辑 杨晓晖)