

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

谢宝妮, 秦占飞, 王 洋, 常庆瑞^{*}

(西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘 要: 为了分析黄土高原地区植被物候特征, 该文基于 AVHRR 传感器获取的陆地长期数据记录 (land long term data record, LTDR) V4 NDVI 数据, 对黄土高原 1982—2011 年间植被物候的时空变化进行分析, 并借助偏相关分析方法对物候与气温和降雨的关系进行量化分析。结果表明: 黄土高原近 30 a 间春季物候提前显著 (0.54 d/a, $P<0.001$), 主要集中在北部草地和灌木植被; 秋季物候推迟显著 (0.74 d/a, $P<0.001$), 主要分布在甘肃、陕北、内蒙古和山西北部等地。不同植被的春秋物候稍有差异, 稀疏灌木林春季物候提前趋势最多 (1.31 d/a), 常绿针叶林最小 (0.19 d/a); 秋季物候推迟最多的为乔木林地 (1.18 d/a), 最少的是水田 (0.17 d/a)。黄土高原植被物候主要受气温影响, 降雨的变化也会对物候产生一定影响。冬季和前年秋季气温上升是春季物候提前的主要驱动因子; 夏季和秋季降雨则对秋季物候休眠期延迟起着重要作用。该研究可为黄土高原生态环境评价及气候变化预测模型提供一定依据。

关键词: 植被; 遥感; 气候变化; 物候; 陆地长期数据记录; 黄土高原

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.021

中图分类号: TP79; S127; S161

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0153-08

谢宝妮, 秦占飞, 王 洋, 常庆瑞. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.021 http://www.tcsae.org

Xie Baoni, Qin Zhanfei, Wang Yang, Chang Qingrui. 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 (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 153—160. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.021 http://www.tcsae.org

0 引 言

国际生物学计划 (International Biological Program, IBP) 物候学委员会将物候学定义为: “物候学是研究重复出现的生物现象的时间性和其时间性在生物与非生物因素方面的原因, 以及同种或不同种各个阶段中的相互关系”^[1]。植被物候及其对全球变化的响应研究对理解气候变化对土地管理、陆地生态系统以及人类生活的影响有着重要意义^[2]。因此, 物候研究目前已成为全球变化的研究热点。

传统物候观测受限于观测样点、覆盖面积和观测物种等, 很少应用在生物群落及更大尺度上^[3]。遥感技术的发展, 为生物群落乃至区域及全球的物候信息监测提供了条件^[4-6]。AVHRR (advanced very high resolution radiometer) 遥感影像由于时间跨度长和分辨率较高, 许多学者应用其植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 数据对大尺度植被物候变化及其与气候的

关系进行了研究^[5,7-14]。这些研究表明北半球中高纬度地区近几十年春季物候呈现提前趋势, 并指出春季物候的提前主要受到冬温和春温的影响。但植被物候变化区域性差异较大^[2,10,15], 因此精确研究区域尺度物候变化及其对气候变化的响应对于理解陆地生态系统内部碳循环和气候—生物圈的相互作用有着深远意义。

黄土高原生态环境脆弱, 对气候变化敏感, 因此研究黄土高原物候变化及其对气候变化的响应具有十分重要的生态学意义。目前, 已有学者对黄土高原植被物候进行了研究, 郭海英等^[16-19]使用传统物候资料分析了甘肃黄土高原气候变暖对农作物物候的影响, 结果表明春季气温对农作物发育有着重要影响, 春季温度上升导致农作物发育期提前。韦振锋等^[20]对 1999—2010 年陕甘宁物候研究表明, 陕甘宁多年物候同时与纬度和降水有关。张晗等^[21]对 2000—2012 年陕西省物候特征研究表明, 随着纬度的升高植被返青期逐步推迟, 枯黄期逐步提前。上述研究或局限于黄土高原单一植被、或研究时限较短, 而对黄土高原区域和生物群落尺度长时间序列的物候变化及其对气候变化的响应鲜有涉及。因此, 本文利用 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 最新的 AVHRR 数据集 “陆地长期数据记录 (land long term data record, LTDR) V4 版本 1982—2011 年 NDVI 数据, 分析黄土高原植被物候时空变化并定量分析气温和降雨对物候的影响, 以期探讨植被物候变化对气候变化的响应机制。

收稿日期: 2015-04-26 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 863 计划 (2013AA102401-2); 博士点基金 (20120204110013); 国家自然科学基金 (30872073)

作者简介: 谢宝妮, 女, 陕西蓝田人, 博士生, 主要从事地理信息系统与遥感应用研究。杨凌 西北农林科技大学资源环境学院, 712100。

Email: chenshu0305@163.com

※通信作者: 常庆瑞, 男, 陕西子洲人, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境与 3S 技术应用研究。杨凌 西北农林科技大学资源环境学院, 712100。Email: changqr@nwsuaf.edu.cn

1 研究区概况

黄土高原位于 101°~114°33'E, 34°~45°5'N 之间, 是世界上最大的黄土沉积区。东西长约 1 300 km, 南北宽约 700 km, 总面积约 64 万 km²。黄土高原具有典型的暖温带大陆性季风气候特征, 冬季寒冷干燥, 夏季暖热多雨。气候受经纬度和地形的双重制约, 年均温 3.6~14.3℃, 年降雨量 300~800 mm。植被受气候的影响呈东南—西北走向水平地带性分布, 依次为暖温带夏绿阔叶林、暖温带森林草原、暖温带干草原及温带荒漠草原^[22]。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

2.1.1 遥感影像数据

NDVI 数据来自 NASA 最新的 AVHRR 数据集 LTDR (land long term data record) V4 版本 (http://ltdr.nascom.nasa.gov)。LTDR 项目利用不同传感器平台 (如 AVHRR、MODIS 和 VIIRS (visible infrared imaging radiometer suite)) 的遥感影像数据, 开发、验证和分享用于气候变化和陆地生态系统反馈的全球范围内低分辨率 (0.05°) 的长期数据集。LTDR 数据使用和 MODIS 类似的数据处理方法^[23], 为用户提供每天的地表反射率和 NDVI 数据。

本研究中 NDVI 数据的时间覆盖为 1982 年 1 月到 2011 年 12 月的天数据, 从下载的全球影像中裁剪出黄土高原的影像, 将其投影为 Albers 投影。由于 LTDR NDVI 原始影像存在数据缺失及云噪声的问题, 因此使用最大值合成法 (maximum value composite, MVC)^[24]将天 NDVI 数据合成为 10 d NDVI 数据, 共 1080 期影像。

2.1.2 气候和土地利用数据

月气温和降雨数据来自中国气象科学数据共享网 (http://cdc.cma.gov.cn/), 覆盖黄土高原及周围区域共 149 个气象站点, 时间跨度为 1981 年 1 月到 2011 年 12 月。使用薄盘样条函数插值法 (thin plate spline, TPS), 引入高程作为协变量将气温和降雨数据插值为分辨率和投影与 NDVI 数据一致的栅格数据。

2000 年和 2010 年土地利用/覆被数据由 Landsat TM 遥感影像通过人机交互解译得到, 从结果中提取出植被数据, 根据生态系统分类体系共分为 13 类: 落叶阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林、稀疏林、落叶阔叶灌木林、稀疏灌木林、草甸、草原、草丛、稀疏草地、水田、旱地和乔木园地。因为 TM 分辨率为 30 m×30 m, 因此使用面积占优法^[25]将占比例较多的一类土地利用类型赋值到 NDVI 5 km×5 km 的栅格上, 只提取从 2000 年到 2010 年土地利用覆被类型未发生改变的区域进行分析。

2.2 数据处理方法

2.2.1 物候提取

由于使用 MVC 合成后的 NDVI 影像, 可能还会有栅格受到云和雪的污染, 导致栅格值低于临近值。因此,

本研究首先使用时间序列谐波分析 (harmonic analysis of time series, HANTS)^[26]重建黄土高原物候序列, 然后使用最大比值法提取物候参数: 生长季开始日、生长季结束日和生长季长度。HANTS 是对快速傅里叶变换的改进, 不仅可以去除云污染, 且在影像频率和时间长度上较为灵活 (影像可以是不等时间间隔)。

首先, 使用公式 (1) 对 10 d NDVI 数据进行去噪重建:

$$\text{NDVI}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t - \phi_i) \quad (1)$$

式中: t 为时间; $\text{NDVI}(t)$ 为在时间 t 的拟合值; a_0 为谐波的余项, 等于序列的平均值; a_i 为各谐波的振幅; n 为谐波的个数; ϕ_i 为谐波的初相位; ω_i 为各谐波的频率, $\omega_i = 2\pi/L$, L 为序列的长度。

HANTS 算法执行时, 主要由 5 个参数来控制拟合精度, 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, 低值曲线光滑但细节较少, 高值细节丰富, 但曲线不光滑, 本文取值为 3, 则得到 5 个傅立叶分量: 3 个幅值 (NDVI 均值、全年 NDVI 和半年 NDVI) 和 2 个相位值 (全年和半年)。受云影响的栅格值一般低于临近值, 本文选择低值作为抑制标志, NDVI 有效数据范围设置为 -1 000~10 000。若曲线拟合阈值设置偏大, 只有少许异常值去除, 无法达到去云目的, 设置偏小又会导致插值剩余点太少, 拟合结果不准确, 一般设置为 0.05 NDVI 单位。剩余点个数表示用于拟合曲线的点的最少个数, 低于该值, 会导致剩余点数太少而无法重构曲线, 该参数最小值一般为 2 倍频率个数+1, 本文通过反复试验, 取值 13。

其次, 使用公式 (2) 提取物候信息:

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

式中: $\text{NDVI}_{\text{ratio}}(t)$ 为 NDVI 在时间 t 上计算的相对变化率。在第 1~180 天之间的 $\text{NDVI}_{\text{ratio}}$ 最大值对应的天数即为物候开始日期, 在第 180~365 天之间的 $\text{NDVI}_{\text{ratio}}$ 最小值对应的天数即为物候结束日期^[10]。

2.2.2 物候趋势计算

本研究使用一元线性回归方法分析黄土高原 30 a 间植被物候的变化趋势。公式如下:

$$G_{\text{slope}} = \frac{j \cdot \sum_{k=1}^j (k \cdot G_k) - \sum_{k=1}^j k \cdot \sum_{k=1}^j G_k}{j \cdot \sum_{k=1}^j k^2 - \left(\sum_{k=1}^j k \right)^2} \quad (3)$$

式中: G_{slope} 为物候的趋势; G_k 为第 k 年的物候开始 (物候结束) 日期; k 为年变量; j 为研究时段 ($j=30$)。当 $G_{\text{slope}} < 0$ 时, 物候提前; 当 $G_{\text{slope}} > 0$ 时, 物候推迟。使用 t 检验进行显著性检验, 当 $P < 0.05$ 时, 趋势显著。为了去除异常值对统计的影响, 在回归分析前对物候曲线进行 3 a 平均平滑处理。

2.2.3 物候与气温和降雨的关系计算

为了消除变量之间的相互影响, 本研究采用偏相关

方法^[12]分析物候与月平均气温和月累计降雨量的关系，以期描述黄土高原不同植被物候对气候的响应。在物候与气候的关系中，许多研究认为前季气候对物候存在影响^[10,12,27]，因此本研究分析了黄土高原不同植被物候与当季和前季气候的关系。以落叶阔叶林为例，30 a 平均生长季开始日大约在 3 月中旬；30 a 平均生长季结束日大约在 10 月中旬。因此选择从当年 3 月到前一年 10 月来分析生长季开始日与气候的关系，共 6 个时段，选择当年 10 月到同年 3 月这一时段来分析生长季结束日与气候的关系，共 8 个时段。使用 *t* 检验进行相关性检验，当 $P<0.05$ 时，相关性显著。

3 结果与分析

3.1 植被物候数据验证

由于缺少黄土高原同期植被物候观测信息，本文采用文献中的研究结果与本研究进行比较。由表 1 可看出，本文提取的物候信息与其他文献反映的结果较为一致，基本是在 3 月中旬到 5 月中旬进入返青期，10 月上旬进入休眠期，从而说明将 AVHRR LTDR V4 NDVI 数据提取的黄土高原植被物候信息应用到黄土高原物候研究中是可靠的。但不同文献研究结果稍有差异，这与研究区域、数据来源、研究方法、研究时段及植被类型等有关。

表 1 本文物候结果与其他研究结果的比较
Table 1 Comparison of phenology results in this study and previous studies

文献来源 References	研究区域 Study area	生长季开始日 Beginning of growing season/d	生长季结束日 End of growing season/d	生长季长度 Length of growing season/d	研究时段 Study period	NDVI 数据 Data resources	分辨率 Spatial resolution/km
本文	黄土高原（自然植被） Chinese Loess Plateau (natural vegetation)	96~150	283~305	133~209	1982—2011 年	AVHRR LTDR V4	5
	黄土高原（农田植被） Chinese Loess Plateau (artificial vegetation)	72~112	291~323	184~250	1982—2011 年		
韦振锋等 ^[20]	陕甘宁 Shaanxi-Gansu-Ningxia	80~160	290~330	130~250	1999—2010 年	SPOT-VGT	1
王静璞等 ^[28]	毛乌素沙漠 Mu Us sandy land	90~156	245~323	118~200	2001—2013 年	MODIS	0.25
安佑志 ^[29]	中国北方 Northern China	90~150	290~300	120~210	1982—2006 年	AVHRR GIMMS, MODIS	8

3.2 1982—2011 年黄土高原植被物候变化

3.2.1 植被物候空间变化

黄土高原近 30 a 间生长季开始日期自东南向西北逐渐推迟，而生长季结束日则相反，表明物候开始和结束的日期和经纬度关系密切^[20]（图 1）。自然植被平均生长季开始日期在第 96~150 天之间，即 4 月上

旬到 5 月上旬。大约到第 283~305 天，即 10 月上旬植被生长逐渐进入休眠期，整个生长周期约持续 133~209 d 左右。而农田植被（包括乔木园地）受人为影响，一般在 3 月中旬到 4 月中旬进入生长季，在 10 月下旬到 11 月中旬生长季结束，作物生长周期在 184~250 d 左右。

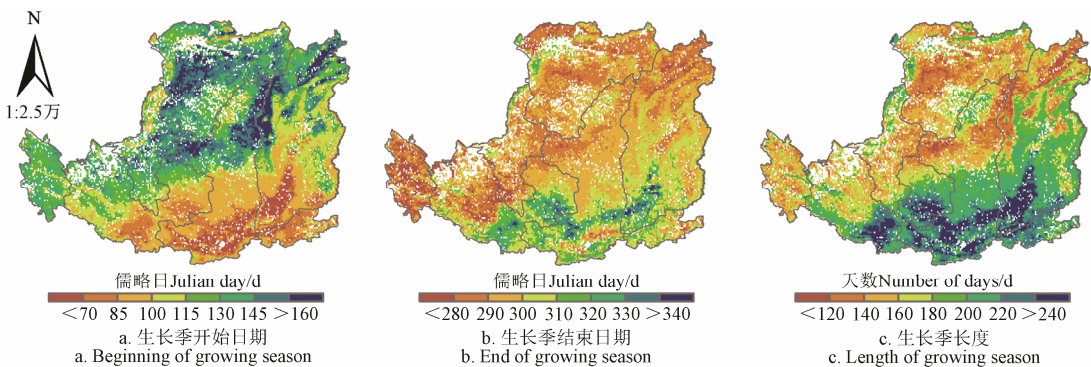


图 1 1982—2011 年黄土高原平均物候空间分布
Fig.1 Spatial distribution of phenology on Chinese Loess Plateau from 1982 to 2011

黄土高原生长季开始日 30 a 间整体处于提前趋势(图 2)，约 66%的区域春季物候提前，其中 39%的区域提前显著，主要集中在北部草地和灌木植被。约 11%的区域生长季开始日推迟显著，主要集中在河套平原、陕西关中地区以及山西和河南的耕地。秋季物候总体推迟（图 2），约 62%的区域秋季物候推迟显著，主要分布在黄土高原甘肃、陕北、内蒙古和山西北部等地。秋季物候显

著提前的区域极少，仅占总区域 3%。
3.2.2 植被物候的年际变化
黄土高原生长季开始日 30 a 来显著提前（图 3），从 1982 年的第 128 天（5 月上旬）提前到 2011 年的第 107 天（4 月中旬），平均每年提前 0.54 d ($R^2=0.63$, $P<0.001$)，约提前 16 d。生长季结束日从 1982 年的第 292 天（10 月中旬）推迟到 2011 年的第 316 天（11 月中旬），平均以

每年 0.74 d 的速率推迟 ($R^2=0.62$, $P<0.001$), 约推迟 22 d。黄土高原植被生长季长度延长约 39 d。

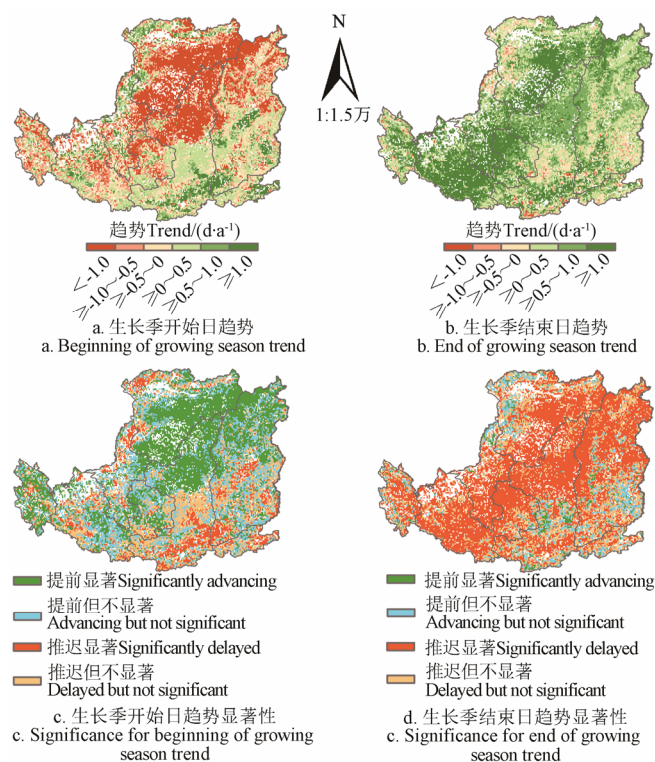


图 2 1982—2011 年黄土高原物候期动态变化

Fig.2 Spatial distribution of phenological trend on Chinese Loess Plateau from 1982 to 2011

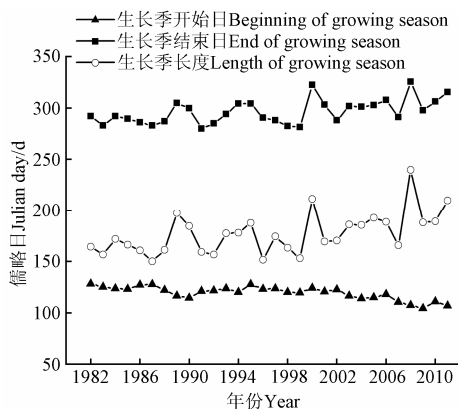


图 3 1982—2011 年黄土高原植被物候年际变化

Fig. 3 Inter-annual variations of phenology on Chinese Loess Plateau from 1982 to 2011

图 4 表示不同植被类型物候开始和结束的日期及生长季长度。由于图幅所限, 文中只列出了林地、灌木林、草地和农田每一大类下的一种代表性植被, 分别为针阔混交林、落叶阔叶灌木林、草甸和水田(下同)。除针阔混交林、水田和乔木园地, 其余植被都表现出春季物候提前。而所有植被秋季物候都表现出推迟的特征。春季物候提前最多的植被是稀疏灌木林 (1.31 d/a), 最小的是常绿针叶林 (0.19 d/a)。秋季物候推迟最多的是乔木园地 (1.18 d/a), 最小的是水田 (0.17 d/a)。生长季

最长的为乔木园地 (220~280 d), 最短的为稀疏林 (113~155 d)。

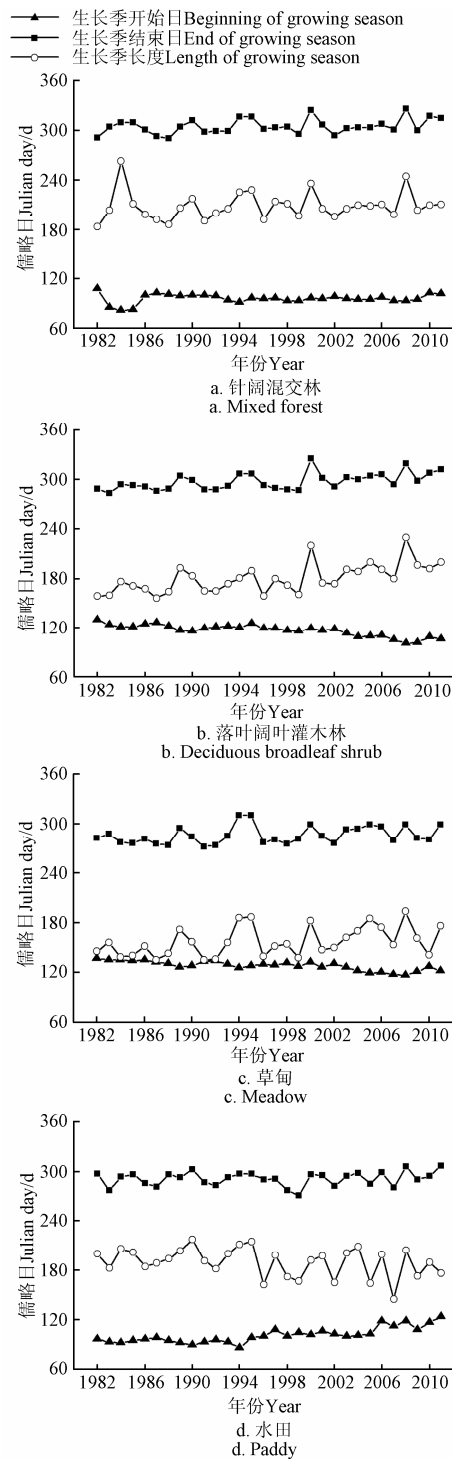


图 4 1982—2011 年黄土高原不同植被类型物候年际变化

Fig.4 Inter-annual variations of phenology for different vegetation types on Chinese Loess Plateau from 1982 to 2011

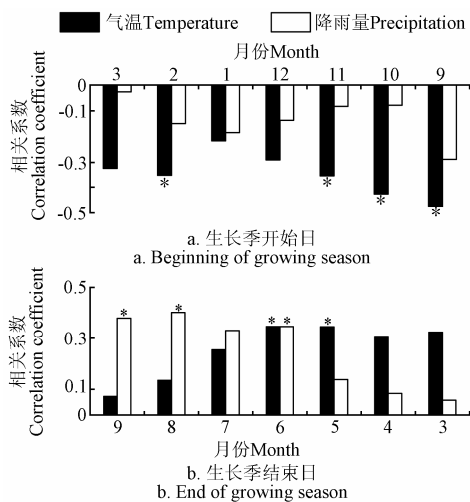
由于关注的地理位置、时间跨度、物种以及物候事件不同, 不同的研究者得出的物候趋势相差较大^[30]。本研究生长季开始日提前趋势与全国同期 (HANTS 方法提取) 春季物候 (-0.19 d/a) 相比提前较多^[7], 与 1982—1999 年全国的 0.79 d/a 相比提前较少^[10], 明显高出 1999—2010 年陕甘宁春季物候趋势 (-0.02 d/a)^[31]。本文生长季结束

日推迟趋势是生长季开始日提前趋势的 1.3 倍, 与 Piao 等的结果相比较^[10, 30, 32], 比近 12 a 陕甘宁地区的物候结束趋势相比高出许多 (0.003 d/a)^[31]。以上结果表明黄土高原近 30 a 物候变化可能并非呈线性趋势提前或推迟, 这也是今后有待研究的问题。

3.3 1982—2011 年黄土高原物候变化与气候的关系

3.3.1 区域植被物候与气候的关系

黄土高原生长季开始日总体和温度的相关性强于降水, 且均为负相关 (图 5)。说明温度升高和降雨增加会导致春季物候的提前。生长季开始日与温度的强相关出现在当季 2 月 ($r=-0.35, P<0.05$) 以及前一年 11 月 ($r=-0.36$)、10 月 ($r=-0.43$) 和 9 月 ($r=-0.47$), 表明冬季温度和上年秋季温度对于黄土高原植被春季物候开始影响较大。生长季开始日与降雨在各时期相关均不显著。本文研究结果与马鹏里等^[18-19]一致, 黄土高原处于中国暖温带, 因此气温是春季物候的主要驱动因子^[10, 33-35]。



注: *表示植被物候与气候关系显著 ($P<0.05$)。

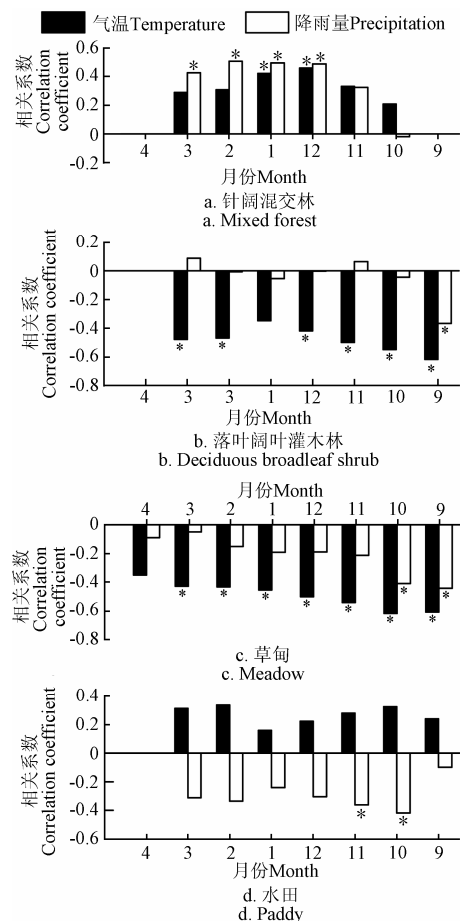
Note: * is stand for the relationship between vegetation phenology and climate is significant ($P<0.05$).

图 5 1982—2011 年黄土高原植被物候与气温和降雨相关系数
Fig. 5 Correlation coefficients between phenology, temperature and precipitation on Chinese Loess Plateau in from 1982 to 2011

黄土高原生长季开始日与温度和降雨均表现出正相关 (图 5), 表明生长季温度升高、降雨增加会导致秋季物候推迟, 使植被生长季延长。秋季物候与温度的强相关出现在前季 5 月 ($r=0.35$) 和 6 月 ($r=0.35$), 表明春末和夏初气温是秋季物候延迟的主导因素。对于降雨来说, 和生长季开始日强相关则在当季 9 月 ($r=0.38$)、8 月 ($r=0.40$) 和 6 月 ($r=0.35$), 表明夏秋季降雨量对秋季物候的延迟做出了相当的贡献。这一结果与 Piao 等^[10]相似。一般来说, 气温上升会导致地温升高, 会加速植物内部的化学反应过程, 为植物发育提供有利条件, 使得植被春季物候提前、秋季物候推迟^[36]。降雨量的增加, 会缓解降雨稀少地区的旱情, 使植被生长季延长。但 Wu 等^[12]指出, 冬季降雨增加伴随着云增多, 导致太阳辐射和温度减少, 会使降雨充沛、温度较低的区域春季物候推迟。

3.3.2 不同植被类型物候与气候的关系

不同植被类型生长季开始日对气候的响应各有差异, 但总体与温度的关系强于降水 (图 6)。其中稀疏林、落叶阔叶灌木林、草甸、草原和草丛的生长季开始日和气温相关较强, 而与降雨的相关性则较弱, 表明温度上升对这些植被春季物候提前有较大贡献。针阔混交林春季物候与温度在 1 月 ($r=-0.42$) 和前年 12 月 ($r=-0.46$) 显著正相关, 与降雨除 11 月和 10 月份外, 均呈显著正相关, 表明冬温和降雨是影响该植被春季物候推迟的主要因素。针阔混交林生长季开始日与气温的关系说明暖冬也有可能导致植被春季物候发育推迟, 因为在冬季多数植物都需要一段时间的休眠期, 温度过高会延长这一时间, 从而推迟植物返青开始日期^[37]。水田春季物候与降雨在前季 11 月 ($r=-0.36$) 和 10 月 ($r=-0.42$) 显著负相关, 与气温正相关但关系较弱, 表明近 30 a 间秋季降雨减少是引起水田春季物候推迟的主要因素。



注: *表示植被生长季开始日与气候关系显著 ($P<0.05$)。

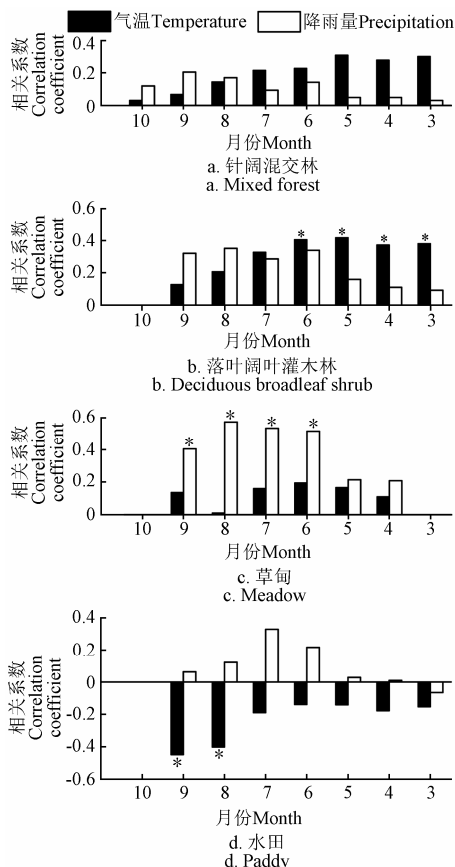
Note: * is stand for the relationship between beginning of growing season and climate is significant ($P<0.05$).

图 6 1982—2011 年黄土高原不同植被类型生长季开始日期与气温和降雨相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients between beginning of growing season, temperature and precipitation for different vegetation types on Chinese Loess Plateau from 1982 to 2011

黄土高原气温和降雨与植被生长季结束日在多数情况下呈正相关, 且相关性低于春季物候 (图 7)。落叶阔

叶灌木林和草丛与气温在 3—6 月相关性显著, 表明春季和早夏的气温升高均对这两种植被被秋季物候推迟起着推动作用。这一结果与 Delpierre 等^[38-39]结果一致。水田秋季物候与 8—9 月气温显著负相关, 表明夏末初秋温度的升高会使得水田提前结束生长季。草甸、稀疏草地和旱地与降雨在 6—9 月显著正相关, 表明夏季和秋季降雨对这些植被的生长有着重要的影响作用, 降水量增加会延长植被生长季, 增加植被有机物累计和提高生物量。



注: *表示植被生长季结束日与气候关系显著 ($P < 0.05$)。

Note: * is stand for the relationship between end of growing season and climate is significant ($P < 0.05$).

图 7 1982—2011 年黄土高原不同植被类型生长季结束日期与气温和降雨相关系数

Fig.7 Correlation coefficients between end of growing season, temperature and precipitation for different vegetation types on Chinese Loess Plateau from 1982 to 2011

黄土高原落叶阔叶林和常绿针叶林的春、秋季物候与降雨和气温的相关性较弱, 表明这两种植被类型的稳定性较强, 对气候变化的敏感性相对较低, 适应性较强。Shutova 等^[40]也指出降雨对北方林物候的影响很小, 可能因为森林一般位于降雨比较充沛的地方, 且森林比其他植被含蓄水分的能力要强。

4 结 论

本文基于 AVHRR 传感器的 LTDR V4 NDVI 数据探讨了 1982—2011 年黄土高原间物候的时空变化特征及其与气温和降雨的关系。1982—2011 年黄土高原植被春季物候提前约 16 d、秋季物候推迟约 22 d, 生长季延长约

39 d。稀疏灌木林春季物候提前趋势最大 (1.31 d/a), 常绿针叶林最小 (0.19 d/a)。秋季物候推迟最多的为乔木园地 (1.18 d/a), 最少的是水田 (0.17 d/a)。

黄土高原气温相比降雨对物候的影响较大, 暖冬和暖秋使得黄土高原春季物候提前, 夏季和秋季降雨则对秋季物候推迟影响较大。灌木林和草地植被的物候对于温度变化较敏感, 针阔混交林和水田对降雨变化较敏感, 而落叶阔叶林和常绿针叶林对气候变化敏感性较低, 适应性较强。春季植被返青期提前可减少黄土高原风力侵蚀, 秋季植被枯黄期推迟可减少水力侵蚀, 对黄土高原生态系统发展具有重要意义。

由于 AVHRR LTDR 数据空间分辨率为 5 km, 空间分辨率较低, 在一定程度上影响了物候参数提取的准确性。借助更高时空分辨率和多源遥感影像融合数据对物候提取方法进行完善和改进, 从而提高物候提取精度, 是今后需要深入研究的科学问题。

[参 考 文 献]

- [1] Lieth H. Phenology and Seasonality Modeling[M]. Berlin: Springer Verlag, 1974.
- [2] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 169(2): 156—173.
- [3] 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 Qingyun, Yang Guijun, Long Huiling, et al. Crop information identification based on MODIS NDVI time-series data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(11): 134—144. (in Chinese with English abstract)
- [4] Badeck F, Bondeau A, Böttcher K, et al. Responses of spring phenology to climate change[J]. New Phytologist, 2004, 162(2): 295—309.
- [5] 康峻, 侯学会, 牛铮, 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 Jun, Hou Xuehui, Niu Zheng, et al. Decision tree classification based on fitted phenology parameters from remotely sensed vegetation data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 148—156. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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 Junming, Li Manman, Wang Pengxin, et al. Monitoring of phenology by reconstructing LAI time series data for winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 120—129. (in Chinese with English abstract)
- [7] Cong Nan, Wang Tao, Nan Huijuan, et al. Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: A multimethod analysis[J]. Global Change Biology, 2013, 19(3): 881—891.
- [8] Doktor D, Bondeau A, Koslowski D, et al. Influence of heterogeneous landscapes on computed green-up dates based on daily AVHRR NDVI observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(12): 2618—2632.
- [9] Piao Shilong, Cui Mengdi, Chen Anping, 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.
- [10] Piao Shilong, Fang Jingyun, Zhu Liming. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(4): 672—685.
- [11] Wang Cong, Cao Ruyin, Chen Jin, et al. Temperature sensitivity of spring vegetation phenology correlates to within-spring warming speed over the Northern Hemisphere[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 50(3): 62—68.
- [12] Wu Xiuchen, Liu Hongyan. Consistent shifts in spring vegetation green-up date across temperate biomes in China, 1982-2006[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 870—880.
- [13] Xin Qinchuan, Broich M, Zhu Peng, et al. Modeling grassland spring onset across the Western United States using climate variables and MODIS-derived phenology metrics[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 161(5): 63—77.
- [14] Zhang Geli, Zhang Yangjian, Dong Jinwei, et al. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 2013, 110(11): 4309—4314.
- [15] 侯学会, 牛铮, 高帅, 等. 基于 SPOT-VGT NDVI 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 Xuehui, Niu Zheng, Gao Shuai, et al. Monitoring vegetation phenology in farming-pastoral zone using SPOT-VGT NDVI data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(1): 142—150. (in Chinese with English abstract)
- [16] 郭海英, 赵建萍, 索安宁, 等. 陇东黄土高原农业物候对全球气候变化的响应[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(4): 608—614.
Guo Haiying, Zhao Jianping, Suo Anning, et al. Response of agricultural phenospectrum to global climate change in Loess Plateau of east Gansu province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(4): 608—614. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郭江勇, 林纾. 气候变化对西峰黄土高原地温与物候期的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(2): 235—239.
Guo Jiangyong, Lin Li. Study on the accumulative temperature and the precipitation in the period of the accumulative temperature in Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(2): 235—239. (in Chinese with English abstract)
- [18] 马鹏里, 郭江勇. 气候变暖对西峰黄土高原物候期的影响[J]. *干旱区研究*, 2007, 24(5): 675—678.
Ma Pengli, Guo Jiangyong. Effect of climate warming on phenophase in Xifeng in the Loess Plateau[J]. *Arid Zone Research*, 2007, 24(5): 675—678. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张洪芬, 韩涛, 黄斌. 甘肃黄土高原春季气温变化对物候的影响[J]. *资源科学*, 2007, 29(6): 10—15.
Zhang Hongfen, Han Tao, Huang Bin. Influence of air temperature change on phenology spectrum in spring season in the Loess Plateau of Gansu[J]. *Resources Science*, 2007, 29(6): 10—15. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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 Zhenfeng, Ren Zhiyuan, Zhang Chong, et al. Impact of climate on vegetation phenology on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region during 1999-2010[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(5): 232—236. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张晗, 任志远. 基于 Whittaker 滤波的陕西省植被物候特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 1—6.
Zhang Han, Ren Zhiyuan. Remote sensing analysis of vegetation phenology characteristics in Shaanxi Province based on Whittaker smoother method[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(4): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [22] 贾小旭. 典型黄土区土壤水分布及其对草地生态系统碳过程的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
Jia Xiaoxu. Distribution of Soil Water and Its Effect on Carbon Process in Grassland Ecosystems on the Typical Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest N&F University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [23] Pedelty J, Devadiga S, Masuoka E, et al. Generating a long-term land data record from the AVHRR and MODIS Instruments[C]. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS Denver, Barcelona, Spain, 2007: 1021—1025.*
- [24] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417—1434.
- [25] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 地理信息系统教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [26] Jakubauskas M E, Legates D R, Kastens J H. Harmonic analysis of Time-Series AVHRR NDVI data[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(4): 461—470.
- [27] Braswell B H, Schimel D S, Linder E, et al. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability[J]. *Science*, 1997, 278(5339): 870—873.
- [28] 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): 1—7.
Wang Jingpu, Liu Lianyou, Jia Kai, et al. Spatiotemporal variation of vegetation phenology and its affecting factors in Mu Us sandy land[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(3): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [29] 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 Youzhi. Vegetation NDVI and Phenology Change in Northern China Based on Remote Sensing[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [30] Walther G, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature*, 2002, 416(6879): 389—395.
- [31] 韦振锋, 王德光, 张翀, 等. 近 12 年陕甘宁黄土高原区植被物候时空变化特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(4): 423—429.
Wei Zhenfeng, Wang Deiguo, Zhang Chong, et al. Spatio-temporal variation of vegetation phenology on Loess Plateau in Shaanxi-Gansu-Ningxia region in recent 12 years[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(4): 423—429. (in Chinese with English abstract)
- [32] Chmielewski F, Rötter T. Response of tree phenology to climate change across Europe[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(2): 101—112.
- [33] Ahas R, Jaagus J, Aasa A. The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(4): 159—166.
- [34] Fitter A H, Fitter R S R. Rapid changes in flowering time in british plants[J]. *Science*, 2002, 296(5573): 1689—1691.
- [35] Jeong S, Ho C, Gim H, et al. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982—2008[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(7): 2385—2399.

- [36] Saxe H, Cannell M G R, Johnsen Ø, et al. Tree and forest functioning in response to global warming[J]. *New Phytologist*, 2001, 149(3): 369–399.
- [37] Yu Haiying, Luedeling E, Xu Jianchu. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 2010, 107(51): 22151–22156.
- [38] Delpierre N, Dufrêne E, Soudani K, et al. Modelling interannual and spatial variability of leaf senescence for three deciduous tree species in France[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(6): 938–948.
- [39] Estrella N, Menzel A. Responses of leaf colouring in four deciduous tree species to climate and weather in Germany[J]. *Climate Research*, 2006, 32(3): 253–267.
- [40] Shutova E, Wielgolaski F E, Karlén S R, et al. Growing seasons of Nordic mountain birch in northernmost Europe as indicated by long-term field studies and analyses of satellite images[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2006, 51(2): 155–166.

Monitoring vegetation phenology and their response to climate change on Chinese Loess Plateau based on remote sensing

Xie Baoni, Qin Zhanfei, Wang Yang, Chang Qingrui*

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: It is crucial to understand vegetation phenology changes and their relationship with climate change at biome-level when projecting regional ecosystem carbon exchange and climate-biosphere interactions. To further understand the relationship between vegetation growth and climatic factors, in this study, we investigated the variation in vegetation phenology and its linkage with climate change on the Chinese Loess Plateau through analyzing the Land Long Term Data Record (LTDR) NOAA/AVHRR Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and concurrent temperature and precipitation during 1982-2011. Firstly, the maximum value composite (MVC) method was used to composite the 10 d LTDR NDVI dataset in order to reduce effects of atmospheric and cloud noise. The Harmonic Analysis of Time Series (HANTS) method of HANTS software was used to filter points which were still affected by cloud noise after the MVC was used composite and reconstruct the NDVI time series datasets. Secondly, the 30-year average seasonal NDVI curves for the whole study area and each vegetation type were calculated. Pixels with yearly mean values below 0.1 were excluded from the analysis to ensure the inclusion of sparsely vegetated areas in the analysis. The relative change ratio of NDVI was then calculated from the 30-year average NDVI seasonal curves. We then used the maximum and minimum values for relative change ratio of NDVI as the threshold for the onset dates of vegetation green-up (the beginning of growing season, BGS) and dormancy (the end of growing season, EGS). Finally, linear least square regression was employed to estimate the trends of phenology. Partial correlation analysis was performed between the EGS/ BGS and mean monthly temperature and total monthly precipitation. The results showed that vegetation phenology in the study area generally commenced on Julian day 96-150 for natural vegetation and 72-112 for artificial vegetation. The vegetation dormancy usually began on Julian day 283-305 for natural vegetation and 291-323 for artificially planted vegetation. Over the study period, the growing season was increased by 39 days across the Chinese Loess Plateau. In spring, sixty six percent of the study area showed an advance in the vegetation green-up while only 39% of the study area experienced an apparent advance. These areas were mainly covered by grass and shrub. In autumn, areas subject to a significant delayed vegetation dormancy occupied 62% of the study region, being located in Gansu, Northern Shaanxi, Inner Mongolia and Northern Shanxi. The BGS and EGS varied with vegetation types. The highest and lowest advances in the advances in the BGS occurred in open shrub land (1.31 d/a) and evergreen needle-leaf forest (0.19 d/a), respectively. The EGS was delayed to a highest degree in Orchard (1.18 d/a) and to a lowest degree in paddy land (0.17 d/a). Across the whole Loess Plateau, changing temperature was the dominating factor driving the vegetation phenology. A warming winter (February) and pre-autumn (September-November) could trigger an earlier onset of spring green-up and a warming in late spring and early summer (May-June) could result in a delayed onset of autumn dormancy. Results also suggested that summer and autumn precipitation played an important role in autumn vegetation dormancy. At biome level, the climate warming may be responsible for the earlier onset spring green-up for open forest, deciduous broadleaf shrub (DBS), meadow, steppe and herbosa. Decreased precipitation may be the major reason for delayed onset green-up in paddy land. In mixed forestry land, a warming winter (December and January) could lead to a delayed spring green-up. The delay of EGS in DBS and herbosa could also be partly explained by the climate warming in spring and early summer. The precipitation in summer and autumn may be responsible for the delay of EGS for meadow, sparse grassland and dry land. The correlations between deciduous broadleaf forest, evergreen needle-leaf forest and climate were not statistically significant either for BGS or EGS, indicating that these two vegetation types may be not sensitive to climate change. This study provided a useful reference for evaluation and protection of ecological environment and establishment of climate models.

Key words: vegetation; remote sensing; climate change; phenology; LTDR(land long term data record); Chinese Loess Plateau