

# 1999—2010 年陕甘宁黄土高原区气候对植被物候的影响

韦振锋<sup>1,2</sup>, 任志远<sup>1</sup>, 张翀<sup>1</sup>, 李小燕<sup>3</sup>, 张嘉琪<sup>1</sup>

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062;

2. 广西财经学院, 广西 南宁 530003; 3. 陕西理工学院 历史文化与旅游学院, 陕西 汉中 723000)

**摘要:** 基于 Spot Vegetation 数据, 采用植被物候分析、Hurst 指数及偏相关系数等方法, 分析了 1999—2010 年陕甘宁黄土高原区植被物候的时空变化特征、未来趋势及其驱动因素。结果表明: (1) 1999—2010 年陕甘宁黄土高原区多年平均物候呈纬度地带性。随着纬度增高, 生长季始期逐渐推迟, 生长季长度缩短, 生长季末期提前, 反之, 生长季始期呈提前, 生长季长度延长, 生长季末期推迟。(2) 近 12 a 陕甘宁黄土高原区多年物候 Hurst 指数变化表现为同向持续性面积大于反持续性面积, 呈较弱的持续性变化, 分布规律大致都呈东西走向。(3) 受降水影响, 陕甘宁黄土高原区多年物候同时与纬度以及河流网有关。低纬度温度高, 可促进植被对水分的吸收, 因此在低纬度或者水资源丰富地区, 植被返青提前, 生长周期延长; 相反, 干旱低温的高纬度地区, 植被生长停滞提前, 生长周期缩短。

**关键词:** 植被物候; 时空特征; Hurst 指数; 陕甘宁黄土高原地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)05-0232-05

中图分类号: Q948.112

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.049

## Impact of Climate on Vegetation Phenology on Loess Plateau in Shaanxi—Gansu—Ningxia Region During 1999—2010

WEI Zhen-feng<sup>1,2</sup>, REN Zhi-yuan<sup>1</sup>, ZHANG Chong<sup>1</sup>, LI Xiao-yan<sup>3</sup>, ZHANG Jia-qi<sup>1</sup>

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi

710062, China; 2. Guangxi University of Finance and Economics, Nanning, Guangxi 530003, China;

3. School of History Culture and Tourism, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723000, China)

**Abstract:** Based on Spot Vegetation data, using the methods of vegetation phenology analysis, Hurst index and partial correlation coefficient, the spatial and temporal variation characteristics of vegetation phenology, developing trends and driving factors on Loess Plateau in Shaanxi—Gansu—Ningxia region during 1999—2010 were analyzed. The results showed that: (1) The average phenology in the region from 1999 to 2000 showed the characteristics of the latitudinal zonality. At the higher latitude area, the start of growth(SOG) was delayed, the long of growth season(LOG) was shorten, and the end of growth season(EOG) was advanced. On the contrary, the SOG was advanced, and the LOG was extended, and EOG was delayed. (2) The Hurst index of the phenology in the region during 12 years was showed that the synthetic sustainability area was greater than the anti-continuity area, with the weaker sustainability changing, and the area was general distributed in east-west orientation. (3) The phenology in the region was affected by rainfall, and related to the latitude and river network. The temperature in the lower latitude was higher, it could promote the vegetation to absorb more moisture, thus, the vegetation turning-green was advanced and the growth cycle was extended in the area of lower latitude or rich in water resource; On the contrary, the temperature in drought and higher latitudes was lower, the stagnation of vegetation growth was advanced, and the growth cycle was shorten.

**Keywords:** vegetation phenology; spatial and temporal characteristics, Hurst index; Loess Plateau in Shaanxi—Gansu—Ningxia Region

收稿日期: 2013-10-16

修回日期: 2013-12-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“我国生态脆弱区能源开发生态效应测评与调控研究”(41371523); 陕西理工学院项目“汉江源景观格局演化与生态效应研究”(2013hzzx-15); 教育部人文社会科学重点研究基地项目资助(14JJD840004)

作者简介: 韦振锋(1983—), 男(汉族), 广西省东兰县人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为 GIS 与国土资源评价。E-mail: weizhenfeng112@163.com。

通信作者: 任志远(1953—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 学士, 博士生导师, 教授, 主要从事土地利用变化与生态环境评价研究。E-mail: renzhy@snnu.edu.cn。

植被物候是植被在生长过程一种周期现象<sup>[1]</sup>,随着季节变化而形成的生长发育节律<sup>[2]</sup>。植被物候是能够真实反映植被变化的参数<sup>[3-4]</sup>,可以进一步解释气候对植被生长的影响,对生态建设和农业生产有着重要意义<sup>[5]</sup>。归一化植被指数(normal difference vegetation index, NDVI)是近年来研究植被覆盖最常用的指标,作为监测气候变化的重要指示器,已成为生态植被重点研究对象。10 a 来,诸多学者研究得出北半球植被生长季呈延长趋势<sup>[6-8]</sup>,欧洲和北美大部分植被春季物候呈提前态势<sup>[9-10]</sup>,这与地面观测数据结果相一致;随着全球温度升高,20 世纪 90 年代北半球大部分植被春季物候出现推迟<sup>[11-12]</sup>。Yu 等<sup>[12]</sup>认为在温带、寒带及高海拔地区,随着温度升高,植被春季物候与冬、春季气温相关,冬季气温偏高会使春季物候推迟。

本文以 1999—2010 年为研究时段,研究陕甘宁黄土高原区植被物候规律,以期为区域可持续发展、生态修复工程规划以及生态环境保护提供一些理论支撑。

## 1 研究区概况

陕甘宁黄土高原区主要位于黄土高原中部的丘陵沟壑区,生态环境较脆弱,是黄河上中游生态环境建设重点地区。地处暖温带大陆性季风气候向温带半干旱气候的过渡带,年降水量大约在 330~570 mm,其中汛期大约占全年降水量的 55%~74%,丰水年与缺水年相差较大。地势自东南—西北走向,海拔大约在 610~2 892 m,地貌类型为山、川、塬。植被稀疏,水土流失极为严重,土壤侵蚀模数大于  $5 \times 10^3 \text{ t/km}^2$ 。土地利用类型自东南向西北呈林地—耕地—草地—沙漠的地类变化。行政区包括陕西 25 县、甘肃 8 县和宁夏 8 县,总面积  $1.38 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

文中所使用的数据是 1999—2010 年 Spot Vegetation 采用最大合成法合成的旬数据集,分辨率为  $1 \text{ km}^2$ ,该数据集经过校正处理,误差较小,精度较高,已被广泛应用于大尺度植被变化的研究中,是目前植被研究主要的数据集,数据来源互联网(<http://free.vgt.vito.be/home.php>)。降水和气温数据为 1999—2010 年年数据,数据来自中国气象科学数据共享服务网。

### 2.2 研究方法

2.2.1 NDVI 预处理 本文用 Spot Vegetation 数据集,虽然该数据采用最大合成法的旬数据集,但是

处理过程中难免受各种因素干扰,如去除亚像元内残余云、长时间云霾等负面影响,会造成数据节律趋势不明显,因此需要对其进行进一步处理。

通常所用处理数据方法只是描述曲线的一般特征,但缺乏曲线内部蕴涵的周期性描述。而时间序列谐波分析法(harmonic analysis of time series, HANTS)是重新构建的时间序列数据的方法,同时能够保存数据的周期性。本文用时间序列谐波分析法对陕甘宁地区 1999—2010 年的 NDVI 数据处理:首先用 Hants 方法对原始 NDVI 数据进行平滑处理,获得平滑后 NDVI 旬数据,再通过傅里叶插值法将旬数据插值成天数据。

2.2.2 物候时间确定 本文物候提取采用阈值法<sup>[13]</sup>和最大比率法<sup>[14]</sup>的整合,根据比率最大值来确定某一物候阈值,再根据阈值确定每年该物候出现的日期<sup>[15]</sup>:(生长季始期(start of growth season, SOG)、生长季末期(end of growth season, EOG)和生长季长度(long of growth season, LOG)提取<sup>[16]</sup>。具体步骤如下:计算每个像元平滑后 NDVI 天数据两相邻时间点上的 NDVI 差值,即相对变化值,利用相对变化值最大值来确定 SOG 和 EOG 的 NDVI 阈值(图 1)。NDVI 相对变化最大值对应的天数为 SOG 出现的天数,NDVI 相对变化最小值对应的天数为 EOG 出现的天数。EOG 和 SOG 的差值即为 LOG,对应天数的差值为 LOG 天数。

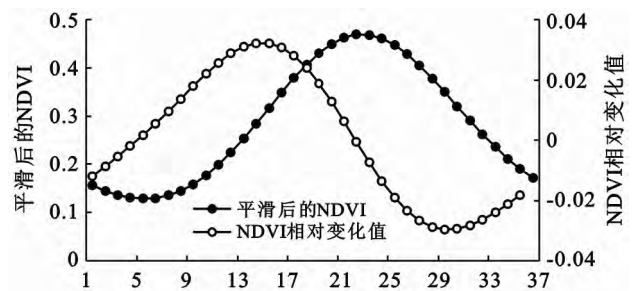


图 1 确定生长季始期和末期的阈值

2.2.3 降水和气温数据处理 气象数据是气象观测站点的实际测量值获得,呈点状分布,要获取整个研究区域面上的气象数据,必须通过已知站点进行插值来实现。本文采用区域薄盘光滑样条函数,对陕甘宁地区及其周边区域气象站点的 1999—2010 年降水数据进行空间插值。该方法是对薄盘光滑样条模型的扩展,除普通的样条自变量外,还引入线性协变量子模型,如降水与海岸线、温度与海拔之间的相关关系<sup>[17]</sup>。其公式为:

$$z_i = f(x_i) + b'y_i + e_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $z_i$ ——位于空间  $i$  点的因变量; $f$ ——需要估算

的关于  $x_i$  的未知光滑函数;  $x_i$ —— $d$  维样条独立变量;  $b$ —— $y_i$  的  $p$  维系数;  $y_i$ —— $p$  维独立协变量;  $e_i$ ——具有期望值为 0 且方差为  $w_i\sigma^2$  的自变量随机误差, 其中  $w_i$  为作为权重的已知局部相对变异系数;  $\sigma^2$ ——误差方差, 在所有数据点上为常数。函数  $f$  和系数  $b$  可通过(2) 式的最小化确定, 即最小二乘法估计确定:

$$\sum_{i=1}^n \left[ \frac{z_i - f(x_i) - b'y_i}{w_i} \right]^2 + \rho J_m(f) \quad (2)$$

式中:  $m$ ——样条次数, 也叫粗糙次数;  $J_m(f)$ ——函数  $f(x_i)$  的粗糙度测度函数, 定义为函数  $f$  的  $m$  阶偏导;  $\rho$ ——正的光滑参数, 在数据保真度与曲面的粗糙度之间起平衡作用, 本文采用广义交叉验证(GCV) 的最小化来确定。

研究方法中还运用到 Hurst 指数<sup>[18]</sup> 和偏相关<sup>[19]</sup> 计算, 相关计算参考文献。

### 3 结果分析

#### 3.1 多年物候空间特征

根据物候时间确定方法计算 1999—2010 年陕甘宁黄土高原区每年的 SOG, LOG, EOG 的时间, 再计算平均物候 SOG, LOG, EOG 的时间。结果表征(附图 7a), SOG 时间变化规律成南北走向, 纬度越高 SOG 越往后推迟。SOG 小于 80 d 的主要分布在研究区的南部, 纬度相对较低, 占研究区面积的 14%。纬度越高, 即研究区北部地区, SOG 逐渐推迟, 其中在 100~140 d, 占研究区的 53% 面积, 其中 100~120 d 的约为 21.16%, 120~140 的约为 31.88%。而 SOG 在 80~100 d 主要分布在小于 80 d 和 100~140 d 的过渡区, 约占研究区的 17.14%; SOG 在 1400~160 d 主要分布在研究区榆林靠近黄河沿岸, 约占研究区的 14.98%; 大于 160 d 相对较少, 约占研究区的 0.78%。从多年陕甘宁黄土高原区植被 SOG 的空间特征来看, 植被主要在 80~140 d 开始返青, 即研究区的 3, 4 月植被开始萌芽, 而且呈纬度变化规律, 纬度越高, SOG 越向后推迟。

研究区多年平均物候 LOG 空间特征如附图 7b 所示, LOG 同样也随纬度变化而变化, 纬度越高, LOG 逐渐缩短, 纬度越低, LOG 逐渐延长。其中 LOG 小于 170 d 的区域约占研究区的 58.12% 面积, 集中分布在研究区北部地榆林地区; 170~210 d 的区域主要分布在小于 170 d 的区域周围, 约占研究区面积的 28.11%; 大于 210 d 的区域主要分布在研究区南部庆阳和延安, 约占研究区面积的 13.77%。从附图 7b 空间分布来看, 整个研究区植被生长周期大

部分在 4, 5 个月之间, LOG 的变化和水热条件有关, 水热条件较好的地方会促进植被的生长周期, 反之, LOG 逐渐缩短。

多年物候 EOG 空间特征见附图 7c, 整个区域 EOG 主要集中在 290~330 d, 约占研究区的 87.9%, 即陕甘宁黄土高原区植被主要在 10 和 11 月就停滞生长了, 同时也存在纬度变化规律, 纬度越低水热条件相对较好, EOG 会出现推迟现象。同时在靠近黄河沿岸, 水资源相对较充足, 会促进植被生长, 植被 EOG 出现推迟。

综合上述植被物候空间特征, SOG, LOG, EOG 都呈明显纬度变化规律, 纬度越低 SOG 逐渐提前, LOG 出现延长, EOG 推迟趋势, 因此可知: 纬度越低, 水热条件越好, 植被返青提前, 越有利于植被生长。同时在东西方向存在较弱的变化规律, 研究区东部属于黄河沿岸, 水热条件相对西部较好, 植被物候东部 SOG 提前比西部明显, LOG 东部延长而西部缩短, EOG 往西部逐渐提前。

#### 3.2 1999—2010 年陕甘宁黄土高原区物候演化趋势预测

根据 Hurst 指数定义得出, 0~0.5 为反持续性, 0.5~1 为持续性。其中反持续性划分为 0~0.1 为高强反持续性, 0.1~0.2 为较强反持续性, 0.2~0.3 为强反持续性, 0.3~0.4 为较弱反持续性, 0.4~0.5 为低弱反持续性; 持续性划分为 0.5~0.6 为低弱持续性, 0.6~0.7 为较弱持续性, 0.7~0.8 为强持续性, 0.8~0.9 为较强持续性, 0.9~1 为高强持续性。结果显示(附图 8a), 陕甘宁黄土高原区植被多年物候 SOG 的 Hurst 指数反持续性主要集中在 0.3~0.5, 约占研究区的 33.92%, 反持续性在 0~0.3 约为 2.71%, 反持续性空间分布主要集中在研究区的西部地区, 尤其在吴忠和庆阳地区相对集中; 而持续性主要分布在 0.5~0.7, 约为研究区的 59.65%, 在 0.7~1 约为 3.74%, 持续性空间分布主要集中在陕甘宁黄土高原区东部地区, 其中在延安和榆林部分地区相对集中。

综合来看, SOG 的 Hurst 指数呈东西走向, 东部呈较弱持续性, 西部呈较弱反持续性, 持续性面积比反持续性面积大, 说明陕甘宁黄土高原区植被物候 SOG 大部分呈持续性, 只有西部地区呈较弱反持续性。

陕甘宁黄土高原区多年物候 LOG 的 Hurst 指数空间特征表明(附图 8b), 反持续性分布主要集中在研究区西部地区, 其他地区分布较零散, 约占研究区的 37.84% 面积, 其中反持续性 Hurst 指数主要集中在 0.3~0.5, 呈较弱反持续性, 约为 35.24%。而

持续性空间分布主要集中在研究区东部地区,所占面积大于反持续性的面积,其中呈持续性 Hurst 指数主要集中在 0.5~0.7,呈较弱持续性,约占研究区面积的 60.09%,在 0.7~1 呈较强持续性约占研究区面积的 2.18%。综合来看,陕甘宁黄土高原区多年植被物候 LOG 的 Hurst 指数呈持续性大于反持续性,其中持续性和反持续都呈较弱的强度,分布规律呈东西走向,东部呈较弱持续性,西部呈较弱反持续性。

研究区多年物候 EOG 的 Hurst 指数空间特征(附图 8c),分布规律主要是呈东南至西北走向,东南地区主要呈反持续性,约占研究区的 43.13%面积,西北地区呈持续性,约为 56.87%,持续性面积大于反持续面积。其中反持续 Hurst 指数主要 0.3~0.5,呈较弱反持续性,约为 40.08%,主要集中在榆林南部、延安北部以及固原市,其他是零散分布;持续 Hurst 指数主要在 0.5~0.7,约占为 54.39%,主要集中在吴忠市和榆林靠近吴忠市地区,以及研究区的东南部分地区。

综合多年物候 Hurst 指数特征,植被物候持续性面积都大于反持续性面积,且都变化趋势强度不明显,分布规律大致都呈东西走向。

### 3.3 物候与气候因子相关性

陕甘宁黄土高原区植被 1999—2010 年物候与降水相关特征(附图 9),其中图附 3a—3c 分别为研究区多年物候 SOG, LOG, EOG 与气温相关系数空间特征,附图 3d—3f 分别为研究区多年物候 SOG, LOG, EOG 与降水偏相关系数空间特征。

3.3.1 物候与气温相关 根据 1999—2010 年陕甘宁黄土高原区植被物候与气温相关空间特征(附图 9a—9c),可以得知 SOG 与气温相关不显著(附图 3a),其中极显著相关约有 2.29% ( $\alpha < 0.01$ ),置信水平在 0.01~0.05 约占 3.20%,而大部分地区的植被物候 SOG 与气温相关不显著,且在空间分布在无明显特征。说明近 12 a 陕甘宁黄土高原区植被物候 SOG 与气候相关较弱。附图 9b 为研究区物候 LOG 与气温偏相关空间图,可以看出相关系数主要集中在无显著区 ( $\alpha > 0.05$ ),其中无显著正负相关分别占研究区的 42.22% 和 49.97%;极显著相关只有 3.61% ( $\alpha < 0.01$ ),显著相关约占 4.3%,空间都是零星分布。研究区物候 EOG 与气温相关特征(附图 9c),得出无显著正相关约占 65%,主要集中在研究区的东部地区,而无显著负相关约占 34%,集中在研究区东南延安市地区,显著和极显著相关约占不到 1%,说明物候 EOG 与气温相关不显著,且以正相关为主。

综上所述,近 12 a 陕甘宁黄土高原区植被物候

与气温成较弱相关性,相关不显著,无明显的空间分布特征。

3.3.2 物候与降水相关 1999—2010 年陕甘宁黄土高原区植被物候 SOG 与降水偏相关空间特征(附图 9d),负相关约占 54.17%,其中表现比较明显的是不显著负相关 ( $\alpha > 0.05$ ),空间分布比较零散,主要分布在研究区四周,尤其在靠近黄河沿岸,以及庆阳市的西南地区,固原的西北地区和吴中的盐池地区,约占 53.18%;正相关主要表明为不显著正相关 ( $\alpha > 0.05$ ),集中分布在研究区的中心地区,以及靠近毛乌素沙地的榆林地区,约占 44.88%,其中显著正相关 ( $\alpha < 0.05$ ) 分布较少,只有 0.95%。从 SOG 与降水相关的空间分布图来看,在河流密布的地区,水资源相对充沛,因而降水补给作用相对较弱,但在河流网稀疏的干旱地区,以及沙漠地区,水资源相对缺乏,降水补给作用较强,因而与降水呈正相关。

研究区多年物候 LOG 与降水偏相关空间特征(附图 9e),研究区中心呈负相关,四周呈正相关,整个区域正相关明显大于负相关。其中负相关约为 40.71%,负相关程度不明显,主要表明为不显著负相关 ( $\alpha > 0.05$ ),约为 39.21%,显著负相关相对较少 ( $\alpha < 0.05$ ),约为 1.71%,零散分布;正相关约为 59.29%,正相关程度不明显,主要表明为不显著正相关 ( $\alpha > 0.05$ ),约为 53.67%,显著正相关相对较少 ( $\alpha < 0.05$ ),约为 5.41% 零散分布。根据研究区的水资源分布来看,在黄河沿岸或者河流密布地区,水资源相对丰富,加上降水的作用,促进植被生长,因而这些地区植被的 LOG 与降水呈正相关,干旱地区呈负相关。

陕甘宁黄土高原区近 12 a 物候 EOG 与降水偏相关空间特征(图 9f),呈一定的纬度地带性,即植被生长停滞随纬度变化,纬度越高相关程度就越小,纬度越低相关性就越高。其中正相关明显大于负相关面积,正相关约占到整个区域的 66.15%,超过了 1/2,但正相关中,主要表象为不显著正相关 ( $\alpha > 0.05$ ),约占 64.57%,主要集中在研究区的庆阳和延安等地;负相关主要表现在不显著负相关 ( $\alpha > 0.05$ ),约占 33.54%,主要集中在研究区的北部榆林和西部的固原等地区,显著负相关 ( $\alpha < 0.05$ ) 分布较少,约为 0.84%,零散分布。综合说明纬度越高温度相对较低,加上降水也会降低气温,从而使得植被停滞生长提早,即 EOG 提前;纬度越低,温度适宜,降水充沛,促进植被生长,EOG 推迟。

综上所述,陕甘宁黄土高原区多年物候与降水有关,同时与纬度以及河流密布有关。河流密集地区,水资源丰富,SOG 和 LOG 与降水呈弱负相关,反之,水

资源缺乏地区, SOG 和 LOG 与降水呈弱的正相关。纬度越高, 气温逐渐降低, 同时降水也使气温降低, 气温降低会抑制植被生长, 使得植被提早停滞生长, 纬度越低, 气温适宜, 降水会促进植被生长, 使得植被停滞生长推迟, 即 EOG 与降水呈纬度地带性相关, 纬度越低呈弱正相关, 纬度越高呈弱负相关。

## 4 结论

(1) 1999—2010 年陕甘宁黄土高原区多年物候平均呈纬度地带性。随纬度升高, SOG 逐渐推迟, LOG 缩短, EOG 提前; 反之, SOG 出现提前, LOG 延长, EOG 推迟。

(2) 近 12 a 来陕甘宁黄土高原区多年物候 Hurst 指数变化, 植被物候持续性面积均大于反持续性面积, 且变化趋势强度不明显, 分布规律大致都呈东西走向。

(3) 陕甘宁黄土高原区多年物候与降水有关, 同时与纬度以及河流密度有关。低纬度, 温度相对较高, 促进植被对水分的吸收, 因此在低纬度或者水资源丰富地区, 植被生长周期延长; 相反, 干旱低温地区, 植被生长停滞提前, 生长周期缩短。

在讨论植被物候变化的影响因子时, 除了气温和降水变化的影响外, 其他因素(如社会经济、政策调控、物种等)也不容忽视。虽然植被物候变化不完全是由于气候因素造成的, 但不排除人们在追求利益最大化的同时, 气候变化为植被结构调整提供了可能性。此外, 本研究还存在一些问题: 数据集由于时间长度的限制(只有 12 a 的数据), 在有限的时间尺度上讨论气候变化对植被物候的影响, 其结果精度可能会受到影响; 本文提取植被物候信息, 虽然改进了不同植被类型采用同一阈值的弊端, 但不等同于植物物候学上出芽、展叶等物候概念, 要提高估测精度, 可以参考以往物候实测记录以及相关实地物候记录来设定阈值<sup>[20]</sup>。目前, 用地面观测数据验证利用遥感数据提取物候信息可靠性的最大难题是尺度转换, 未来可以考虑利用通量观测数据验证遥感物候提取结果。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 北京地区气候变化和植被的关系: 基于遥感数据和物候资料的分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 499-506.
- [2] 陆佩玲, 于强, 贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 923-929.
- [3] Van Vliet A J H, De Groot R S, Bellens Y, et al. The European phenology network[J]. International Journal of Biometeorology, 2003, 47(4): 202-212.
- [4] White M A, Thornton P E, Running S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to inter-annual climatic variability[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1997, 11(2): 217-234.
- [5] 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, 30(2): 447-454.
- [6] 朴世龙, 方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 119-125.
- [7] 陈效速, 喻蓉. 1982—1999 年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化[J]. 地理学报, 2007, 62(1): 41-51.
- [8] 国志兴, 张晓宁, 王宗明, 等. 东北地区植被物候对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 578-585.
- [9] Menzel A. European phenological response to climate change matches the warming pattern[J]. Global Change Biology, 2006, 12(10): 1969-1976.
- [10] Parmesan C. Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming[J]. Global Change Biology, 2007, 13(9): 1860-1872.
- [11] 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.
- [12] Yu Haiying, Luedeling E, Xu Jianchu. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau[J]. Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA, 2010, 107(51): 22151-22156.
- [13] Zhou Liming, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variation in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D17): 20069-20083.
- [14] Zhang Xiaoyang, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 471-475.
- [15] Kafaki S B, Asadollah M, Seyed A H. Monitoring growing season length of deciduous broad leaf forest derived from satellite data in Iran[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2009, 5(5): 647-652.
- [16] Stckli R, Vidale P L. European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(17): 3303-3330.
- [17] 殷贺, 李正国, 王仰麟, 等. 基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 653-661.
- [18] 江田汉, 邓蓬堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题: 以在气候变化研究中的应用为例[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 177-182.
- [19] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版, 2002: 37-41.
- [20] 李小燕, 任志远, 张翀. 汉江流域 NDVI 与水热指数时空变化及相关性分析[J]. 地理研究, 2013, 32(9): 1623-1633.