

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): 901—906. [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): 901—906.]. doi:10. 7522/j. issn. 1000-694X. 2014. 00073.

# 基于 Whittaker 滤波的陕西省植被物候特征

张 晗, 任志远

(陕西师范大学 旅游与环境学院/西北国土资源研究中心/西北历史环境与经济社会发展研究院, 陕西 西安 710062)

摘要: 运用 Whittaker 滤波重构 MODIS NDVI 时序数列, 利用地理探测器对比滤波前后影像信噪比, 采用动态阈值法获取 2000—2012 年陕西省植被的 3 个关键物候参数(返青期、枯黄期和生长周期), 在此基础上分析了该区植被物候参数空间分布特征。结果表明: (1) Whittaker 滤波能够平滑原始 NDVI 曲线, 有效减少原始影像的噪声, 提高影像辨识度, 并且参数设置简单; (2) 陕西省植被物候地区分异明显, 不同气候区划类植被物候表现出中温带半干旱区—暖温带半干旱区—暖温带半湿润区—北亚热带湿润区的递变规律: 返青期逐步提前, 枯黄期逐步推迟; (3) 植被物候受高程和纬度影响, 并且纬度影响更显著。海拔每升高 200 m, 返青期推迟 1.3 d, 枯黄期提前 0.6 d; 纬度每升高 0.5°, 返青期推迟 3.6 d, 枯黄期提前 1.2 d。

关键词: Whittaker 滤波; 地理探测器; 动态阈值法; 物候参数; 陕西

文章编号: 1000-694X(2015)04-0901-06

doi: 10. 7522/j. issn. 1000-694X. 2014. 00073

中图分类号: Q948.112

文献标志码: A

## 1 引言

植被物候是植被受气候和其他环境因子的影响而出现的以年为周期的自然现象<sup>[1]</sup>。农业方面, 早在西汉,《汜胜之书》就以物候指标来确定耕种时期, 预报农事, 指导农牧业生产, 当代物候指标可以为复种指数提取提供参考<sup>[2]</sup>。植被物候是陆面过程模型及全球植被模型的重要参数<sup>[3]</sup>, 与气候等环境因素息息相关<sup>[4]</sup>。目前, 利用遥感监测植物物候已经成为最常用的方法, 一般流程为利用 NDVI、EVI 等遥感数据<sup>[5-7]</sup>, 通过 Double logistic 函数、Hants、Whittaker 滤波等方法重构时序数列<sup>[8-11]</sup>, 进而运用动态阈值法、滑动平均法、拟合法、最大斜率法等方法提取物候参数<sup>[11]</sup>。

Whittaker 滤波基于补偿最小二乘原理, 通过平衡保真度和粗糙度平滑时间序列。Atzberger 等<sup>[10]</sup>对南美洲的植被覆盖和物候进行了研究。Peter 等<sup>[12]</sup>对比 4 种时序数列重建方法, 认为 Whittaker 滤波比傅里叶算法、非对称高斯函数、Double logistic 函数精确度更高。Vilela 等<sup>[13]</sup>利用 Whittaker 滤波提取核磁共振中所需的信号, 认为比 Savitzky-Golay 滤波精确度更高。目前国内的研究

较少, 梁嘉如等<sup>[14]</sup>应用于土壤有机质和总氮的定量检测, 还没有应用于植被物候的研究。

陕西省可分为陕北高原、关中平原和秦巴山地三大地貌区。陕北黄土高原生态环境脆弱, 获取植被物候的空间格局对于描述该地区气候和植被的耦合有着重要的意义。关中平原是陕西省重要的粮食生产区, 种植冬小麦、棉区、苹果等, 研究物候与气候变化对农作物种植和病虫害预防有着积极的作用。秦巴山区生态环境复杂, 孕育了丰富多样的植物生态群落类型和植物资源, 但是受自然条件限制, 传统物候观测耗时费力, 难以大规模观测<sup>[15]</sup>。目前, 陕西省物候的研究多利用传统观测数据, 利用遥感长期观测的研究较少。

基于此, 利用 MODIS NDVI 结合 Whittaker 滤波获取陕西省 2000—2012 年植被物候空间格局, 为进一步研究该区气候变化、生态环境变化提供基础, 同时也为 NDVI 时序数列重建提供参考。

## 2 数据及方法

### 2.1 数据

选择 MODIS NDVI 数据, 空间分辨率为 250

收稿日期: 2014-04-01; 改回日期: 2014-06-03

资助项目: 教育部人文社会科学重点研究基地项目(14JJD840004); 国家自然科学基金项目(41371523)

作者简介: 张晗(1990—), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要从事国土资源与 GIS 研究。Email: zhhan1990@126.com

通讯作者: 任志远 (Email: renzhiy@snnu.edu.cn)

m, 时间分辨率为 16 d, 共有 12 个波段, 第 1 波段为 NDVI 波段, 第 12 波段为像元可信度波段<sup>[16]</sup>。利用 MRT 工具, 提取 NDVI 和像元可信度 2 个波段, 并进行拼接、重投影和格式转换。通过像元可信度定位云层或雨雪像元, 对产生的 NDVI 影像进行去云处理。植被数据来源于 2000 年陕西省 1:10 万土地利用数据, 重投影后, 将其转换为 250 m×250 m 的栅格图像。气候分区数据来自郑景云等<sup>[17]</sup>提出的中国气候区划新方案, 经过配准数字化获得。

## 2.2 方法

### 2.2.1 Whittaker 滤波

Whittaker 滤波具有快速便捷、参数简单的特点<sup>[18]</sup>, 其原理是假设数列  $z$  拟合数列  $y$ , 拟合效果取决于保真度(拟合产生的误差)和粗糙度。保真度越高, 且粗糙度越低, 拟合效果越好。设  $Q$  表示拟合效果, 保真度为  $S$ , 粗糙度为  $R$ , 则  $Q$  可以用式 1 表示。 $\lambda$  为权重, 可以通过交叉验证获得, 这里选择  $\lambda = 2^{[12]}$ 。

$$Q = S + \lambda R \quad (1)$$

$$S = \sum_i (y_i - z_i)^2 \quad (2)$$

$$R = \sum_i (z_i - 3z_{i-1} + 3z_{i-2} - z_{i-3})^2 \quad (3)$$

### 2.2.2 基于地理探测器的影像测评

地理事物空间分布的差异性, 受到经济社会或自然要素影响, 地理探测器研究方法首先应用于地方性疾病形成原因的探测<sup>[19-20]</sup>。类型相同的地物具有相似的波谱特征, 其影像上的遥感影像像元亮度值(Digital Number, DN)值就越接近, 但是受到云、气溶胶、水汽及探测器状态等因素影响, DN 值存在一定偏差(噪声), 滤波算法能够平滑时间序列, 降低这种偏差<sup>[21-22]</sup>。对比滤波前后影像地理探测器的结果可以判断滤波的去噪效果, 模型如下:

$$P_{D,U} = 1 - \frac{1}{n\sigma_U^2} \sum_{i=1}^m n_{D,i} \sigma_{U,D,i}^2 \quad (4)$$

式中:  $P_{D,U}$  为测评指标;  $n_{D,i}$  为次一级区域样本数;  $n$  为整个区域样本数;  $m$  为次级区域个数; 整个区域  $\sigma_U^2$  为整幅影像的方差;  $\sigma_{U,D,i}^2$  为次一级区域的方差。假设  $\sigma_{U,D,i}^2 \neq 0$ , 模型成立,  $P_{D,U}$  的取值区间为  $[0, 1]$ ,  $P_{D,U}$  值越大, 说明图像各个地物类型间的区分性越大, 图像的噪声信息越少。本文以 2000 年土地利用数据对 2000 年 20 幅影像进行了处理, 次级区域为各类林地和农田共 14 类。

### 2.2.3 物候提取

动态阈值法能够消除背景值的影响, 在不同像元和不同年份之间具有更加稳定的物理意义, 能够反映不同时空条件下的同种植物生长阶段<sup>[23]</sup>。因此选择动态阈值法, 参照 Jönsson 等<sup>[24]</sup>方法, 将 NDVI 增长达到当年振幅 20% 的时刻定义为返青期的时间, 而 NDVI 降低到当年振幅 20% 的时刻定义为枯黄期的时间。

## 3 结果与分析

### 3.1 滤波前后对比

图 1 是运用地理探测器获取遥感影像滤波前后  $P$  值的情况。4、5 期影像原始  $P$  值大于处理后, 9~12、14、17 期影像处理前后  $P$  值差异不大, 其他期影像处理后  $P$  值大于原始  $P$  值。7~19 期影像的  $P$  值较高, 原因在于期间林地和耕地差异较大, 引起  $P$  值增加。分别在陕北、关中、陕南选取林地和耕地采样点, 获取滤波前后 NDVI 序列图(图 2), 发现 Whittaker 滤波能够较好地平滑 NDVI 曲线。陕南-关中-陕北的 NDVI 呈递减趋势, 林地和耕地的曲线都表现为波峰减小, 波长减小, 返青期推迟, 枯黄期提前, 生长周期减小。

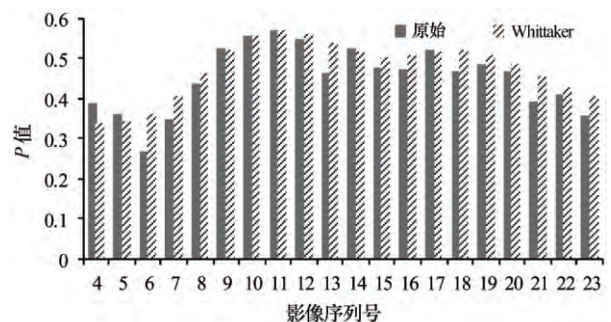


图 1 基于地理探测器的滤波前后影像的  $P$  值  
Fig. 1  $P$  value of images between before and after filtering using geographical detection method

### 3.2 全区植被物候空间分布特征

陕西省植被物候多年均值的空间分布特征见图 3。由南向北, 返青期(SOS)逐渐推迟, 枯黄期(EOS)逐渐提前, 因此生长周期(LOS)逐渐增加, 地区分异明显。陕北风沙缓坡丘陵陵区植被破坏严重, 草原日益退化, 风沙侵蚀严重, 3 月起气温逐步回升, 降水集中在 7—9 月<sup>[25]</sup>, 植被生长周期小于 6 个月, 返青期出现在 5、6 月, 枯黄期在 10 月下半月。黄土高原丘陵沟壑区表现平稳, 植被返青期开始于

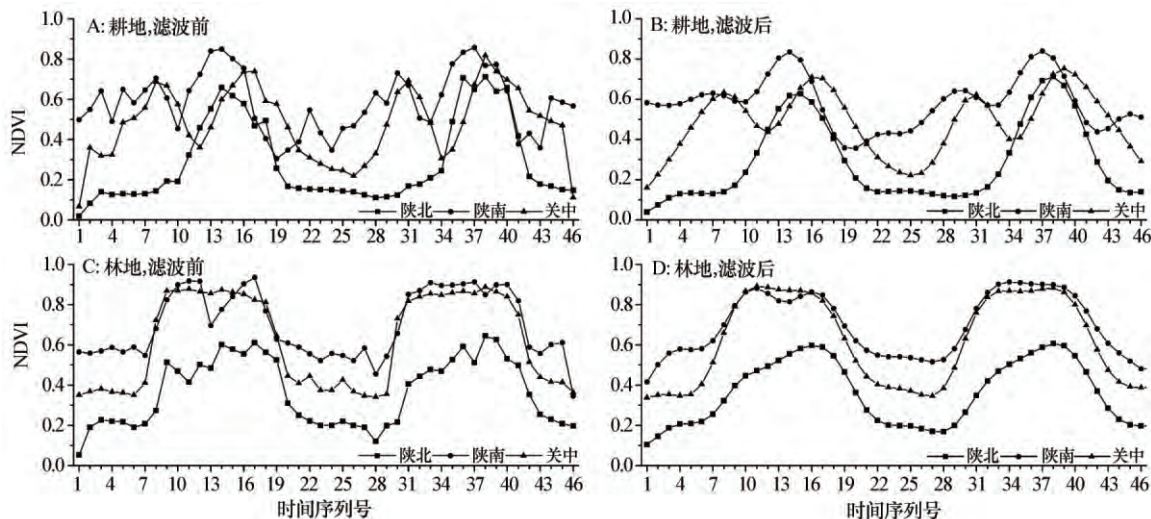


图 2 滤波前后效果比较

Fig. 2 Comparison of NDVI time-series data between before and after filtering

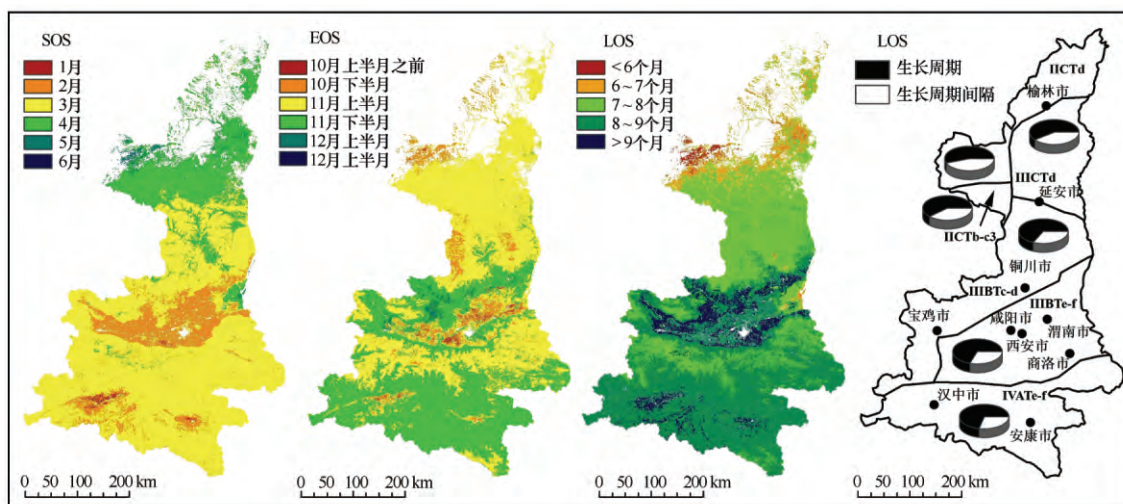


图 3 陕西省物候参数多年平均值空间分布格局及气候分区生长周期

Fig. 3 Spatial pattern of average phenology in Shaanxi Province and LOS in different climate zones

3、4 月, 枯黄期在 11 月, 历时 7~8 个月。关中平原和汉中原的返青期出现在 2、3 月, 枯黄期在 10、11 月, 生长周期在 8~9 个月, 该区主要种植冬小麦、玉米, 实行复种制度, 2 月下旬冬小麦返青, 10—11 月上旬收获玉米<sup>[25]</sup>。秦巴山区大部生长时间从 3—11 月, 历时 8~9 个月, 在高海拔地区生长周期明显减少, 为 7~8 个月。

### 3.3 不同气候区划植被物候特征分析

根据郑景云等<sup>[17]</sup>对中国气候区进行重新划分, 陕西省(图 3)可划分为中温带半干旱地区(鄂尔多斯与东河套地区 II CTd 和黄土高原西部地区 II CTb-c3)、暖温带半干旱地区(黄土高原东部太行山地区 III CTd)、暖温带半湿润地区(汾渭平原山地区

III BTe-f 和黄土高原南部地区 III BTc-d) 和北亚热带湿润地区(秦巴山地区 IV Ate-f)。返青期, IV 区植被返青最早, 为  $65 \pm 9$  d; III BT 区平均在  $65 \sim 75$  d, 标准差明显偏大, 主要是该区农业发达, 农作物和林木的生长存在较大差异; III CT 和 II CTb-c3 区较为接近, 在 100 d 左右; II CTd 区最晚为  $107 \pm 12$  d。枯黄期, II CTd 区最早为  $306 \pm 7$  d; III CT 和 II CTb-c3 区较为接近, 为  $312 \pm 3$  d; III BT 区标准差明显偏大, 为  $315 \pm 9$  d; IV 区最晚为  $321 \pm 6$  d。

### 3.4 高程对植被物候的影响

将陕西省按高程间隔 200 m 等分为 18 个高程带, 分析高程对植被物候的影响规律。总体来看物候随高度变化较小, 每升高 200 m, 返青期推迟 1.3 d,

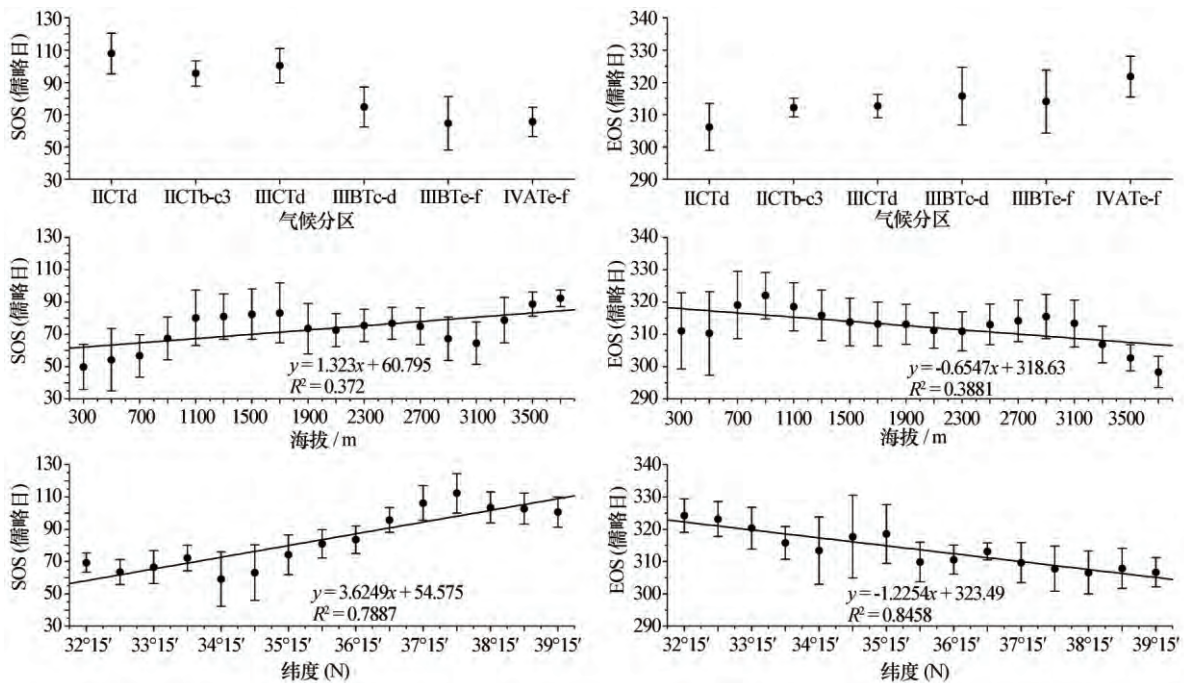


图 4 不同气候区、高程带、纬度带植被物候参数分布

Fig. 4 SOS and EOS in different climate zones, different levels of altitude and different latitude

枯黄期提前 0.6 d。0~1 100 m 为平原盆地地区,返青期在 3 月中旬之前,枯黄期在 11 月中下旬。1 100~1 900 m 为秦巴山区及黄土高原地区,返青期在 3 月下旬,枯黄期在 11 月中旬。>1 900 m 主要分布在秦巴山区,1 900~2 900 m 物候平稳,返青期在 70 d,枯黄期在 315 d,2 900 m 之后变化剧烈,返青期明显推迟,枯黄期明显提前。

### 3.5 纬度对植被物候的影响

将陕西省按纬度间隔 0.5° 等分为 15 个纬度带,发现物候参数受纬度影响显著,其  $R^2$  大于高程影响的  $R^2$ ,说明受纬度影响大于高程,纬度每升高 0.5°,返青期推迟 3.6 d,枯黄期提前 1.2 d,生长周期缩短近 5 d。32°—34°N 带植被生长返青期为 3 月中旬之前,枯黄期为 11 月中下旬。34°—38°N 带植被生长返青期直线推迟,从 3—4 月,枯黄期在 11 月中上旬。>38°N 带植被生长返青期在 4 月中旬,枯黄期为 11 月上旬。34°—35°N 植被物候标准差最大,该地区为关中平原和部分秦岭地区,农作物和林木的生长存在较大差异。

## 4 结论

利用 Whittaker 滤波重构 MODIS NDVI 时间序列,采用动态阈值法提取陕西省植被物候参数,并结合不同气候分区、不同高程带、不同纬度带,研究

植被物候的空间分布规律,得到以下结论:

陕西省植被物候地区分异明显,不同气候区划类植被物候表现出中温带半干旱区-暖温带半干旱区-暖温带半湿润区-北亚热带湿润区的递变规律,返青期逐步提前,枯黄期逐步推迟,同时也说明植被物候受到气温、降水共同影响。

陕西省植被物候受高程和纬度共同影响,并且纬度影响更显著。纬度或高程升高,返青期逐步推迟,枯黄期逐步提前,与霍普金斯定律在趋势上相同,但是天数上有所差异,原因可能在于植被类型以及种植方式存在差异。

Whittaker 滤波能够平滑原始 NDVI 曲线,有效减少原始影像的噪声,提高影像辨识度,并且参数设置简单。由于缺乏野外实测数据,将结果与前人的结果进行了对比,发现使用该方法监测陕西省物候期可行。

### 参考文献:

- [1] 赵艳芬,师玮,潘伯荣,等.沙拐枣属(*Calligonum* L.)植物物候对长期气温变化的响应[J].中国沙漠,2014,34(3):732-739.
- [2] 徐昔保,杨桂山.太湖流域 1995-2010 年耕地复种指数时空变化遥感分析[J].农业工程学报,2013,29(3):148-155,297.
- [3] 丁明军,张镜铨,孙晓敏,等.近 10 年青藏高原高寒草地物候时空变化特征分析[J].科学通报,2012,57(33):3185-3194.

- [4] 方修琦,余卫红. 物候对全球变暖响应的研究综述[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 714—719.
- [5] White M A, Hoffman F, Hargrove W W, et al. A global framework for monitoring phenological responses to climate change[J]. Geophysical Research, 2005, 32: L04705.
- [6] Jeong S J, Ho C H, Gim H J, 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.
- [7] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 471—475.
- [8] Beck P S A, Atzberger C, Hogda K A, et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(3): 321—334.
- [9] 包刚, 覃志豪, 包玉海, 等. 1982—2006年蒙古高原植被覆盖时空变化分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3): 918—927.
- [10] Atzberger C, Eilers P H C. A time series for monitoring vegetation activity and phenology at 10-daily time steps covering large parts of South America[J]. International Journal of Digital Earth, 2011, 4(5): 365—386.
- [11] 夏传福, 李静, 柳钦火. 植被物候遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 2013, 17(1): 1—16.
- [12] Peter A M, Jeganathan C, et al. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 123: 400—417.
- [13] Vilela M, Borges C C H, Vinga S, et al. Automated smoother for the numerical decoupling of dynamics models[J]. BMC Bioinformatics, 2007, 8: 305.
- [14] 梁嘉如, 陈华舟, 秦强. FT-NIR 光谱法与 Whittaker 平滑应用于土壤有机质和总氮的定量检测[J]. 分析实验室, 2013, 32(9): 11—15.
- [15] 贺映娜. 秦岭植被物候期及遥感生长季的变化研究[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- [16] 何磊, 王超, 别强, 等. 利用 MOD13Q1 产品监测肯尼亚 2001—2010 年荒漠化动态[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 46—52.
- [17] 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 3—12.
- [18] Atzberger C, Rembold F. Estimation of inter-annual winter crop area variation and spatial distribution with low resolution NDVI data by using neural nets trained on high resolution images[C]. Proceedings of SPIE7472, 2009.
- [19] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the He shun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107—127.
- [20] 刘彦随, 杨忍. 中国县域城镇化的空间特征与形成机理[J]. 地理学报, 2012, 67(8): 1011—1020.
- [21] 梁守真, 施平, 邢前国. MODIS NDVI 时间序列数据的去云算法比较[J]. 国土资源遥感, 2011(1): 33—36.
- [22] 朱博, 王新鸿, 唐伶俐, 等. 光学遥感图像信噪比评估方法研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(2): 303—309.
- [23] 夏传福, 李静, 柳钦火. 植被物候遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 2013, 17(1): 1—16.
- [24] Jönsson 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—1932.
- [25] 李登科, 郭锐. 陕西 MODIS/NDVI 的区域分布和季节变化[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 108—112, 196.

## Remote Sensing Analysis of Vegetation Phenology Characteristics in Shaanxi Province Based on Whittaker Smoother Method

Zhang Han, Ren Zhiyuan

*(College of tourism and environment sciences/Center for Land Resources Research in Northwest China/Center for Historical Environment and Socio-Economic Development in Northwest China, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)*

**Abstract:** This paper used Whittaker smoother to reconstruct MODIS NDVI time series and geographical detection method to compare the recognizable of images before and after filtering. Using dynamic threshold to get three phenological parameters (the start of season—SOS, end of season—EOS, and length of season—LOS) from 2000 to 2012, and then analyzed the spatial distribution characteristics of vegetation phenology in Shaanxi Province. The result shows that: (1) the Whittaker smoother with simple parameter setting can smooth the NDVI time series, reduce the noise of the original image effectively, and enhance the recognizable of images; (2) the vegetation phenology of Shaanxi Province has significant regional differentiation, and considering for different climate zones, three phenological parameters all performed the order of temperate semiarid region, warm temperate semiarid region, warm temperate semi-humid zones, north subtropical zone; SOS gradually advanced and EOS gradually postponed; (3) vegetation phenology is affected by the altitude and latitude, and the latter was more significant. SOS postponed 1.3 d and EOS advanced 0.6 d for every 200 m higher in elevation. SOS postponed 3.6 d and EOS advanced 1.2 d for every 0.5 of latitude northward.

**Key words:** Whittaker smoother; geographical detection method; dynamic threshold; phenological parameters; Shaanxi Province