

基于遥感方法的长白山地区植被物候期 变化趋势研究

李 明^{1,2}, 吴正方^{2*}, 杜海波², 宗盛伟², 孟祥君², 张莲芝¹

(1 山西师范大学城市与环境科学学院, 山西 临汾 041000; 2 东北师范大学城市与环境科学学院, 吉林 长春 130024)

摘要: 目前,越来越多的遥感数据被用来监测大面积植物物候的动态变化。利用长时间序列的 SPOT/NDVI 旬合成数据,通过 double logistic 模型获取了 1999~2008 年长白山地区植被的 3 个关键物候参数: 生长季始期、生长季末期和生长季长度的多年平均值,并绘制了它们的变化趋势空间格局图。结果表明,林地的生长季开始日期为第 100~120 天,草地和耕地相对较晚,分别为第 130~140 天和第 140~150 天;林地和草地生长季的结束日期为第 275~285 天,耕地的相对较早,为第 265~275 天;林地、草地和耕地的生长季长度范围分别为 160~180 d、140~160 d 和 110~130 d。植被物候期的变化趋势表现为一定的空间差异性,生长季长度延长区域主要分布在长白山地区的中东部,平均每年延长约 0.7 d;缩短的区域在西北地区,平均每年缩短 1.1 d。最后通过部分物候观测数据及前人在相同研究区的结果验证了利用 double logistic 模型提取预测长白山植被物候期的可行性。

关 键 词: 长白山地区; 物候参数; SPOT/NDVI; double logistic 模型

中图分类号: Q948.112

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2011)10-1242-07

物候学是研究自然界以年为周期重复出现的各种生物现象的发生时间,及其与环境条件(气候、水文和土壤等)周期性变化相互关系的科学^[1,2]。传统的物候学研究方法是以野外观测为基础的,简单易行,但需耗费大量人力和物力,而且受时间所限,周期短,覆盖面小。近年来,遥感技术的应用,使得观测对象从植株个体转变为植被生态系统层面,实现了植物物候观测由点到面的空间转换。由于 NDVI(归一化植被指数)能够在大范围覆盖区域内精确地反映植被绿度和光合作用强度、植被代谢强度及其季节性和年际间变化,因而基于 NDVI 时序数据对植物物候进行监测成为目前最常用的手段^[3]。另外,越来越多的方法用于确定来自遥感数据的植物物候期,主要的监测方法可分为 4 类: 阈值法^[4,5]、导数法^[6,7]、函数平滑法^[8,9]和模型拟合法^[10]。

在北半球,大部分的物候记录都表明在春季提前,较少一部分在秋季提前^[11]。但是,有些地区的

植物物候期也显示出延迟的趋势,比如在东欧和巴尔干^[12]。已经有部分学者应用遥感数据对植被物候期的空间分布格局和变化趋势进行了研究,结果表明,北美春季物候期提前的区域较少,而秋季物候期延迟的区域较多^[13];芬诺斯坎底亚的南部植被生长季长度约延长 1d/a,而北部的植被则没有明显的趋势^[14]。

长白山地区是气候敏感区和生态环境脆弱带,并且植被季相变化明显。有关此地区专门的物候研究还未见报道,只有部分学者^[15,16]对整个东北地区的植被物候期进行了研究。本文的主要目的就是要把 logistic 模型和一个全局函数^[17]的优势结合起来构建一个新的模型,并应用遥感数据对长白山地区的植被物候的空间格局及其变化趋势进行定量研究,这对于描述该地区气候和植被的耦合有着重要的意义,并且有利于进一步理解在大尺度上气候对植被物候期变化的影响。

收稿日期: 2010-12-26; 修订日期: 2011-04-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB426305)、国家自然科学基金项目(41171038)、东北师范大学“十一五”科技创新平台培育项目(106111065202)和吉林省自然科学基金项目(20101561)资助。

作者简介: 李 明(1982-),男,河南商丘人,博士,讲师,主要从事区域气候变化研究。E-mail:lim489@163.com

通讯作者: 吴正方,教授,博士生导师。E-mail:wuzf@nenu.edu.cn

1 研究区域和数据

1.1 研究区

本研究的区域包括张广才岭、吉林哈达岭、威虎岭、龙岗山脉, 千山, 老爷岭、以及长白山主脉, 山地海拔大都在500~1 000 m之间(图1)。长白山地区是中国东北地区年降水量最多之地, 一般年降水量500~800 mm, 山地南部(千山山脉)属暖温带, 以夏绿阔叶林为主, 中北部则为典型的温带针阔混交林, 其代表性植被针叶树种以红松(*Pinus koraiensis*)、沙冷杉(*Abies holophylla*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)占优势, 阔叶树以白桦(*Betula platyphylla*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、色木槭(*Acer mono*)、山杨(*Populus davidiana*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)和紫椴(*Tilia amurensis*)为主。

1.2 数据源

本文所用的SPOT-VEGETATION(VGT) NDVI数据为旬最大值合成数据^[18, 19], 来源于<http://free.vgt.vito.be/>, 其中每月的1~10日为上旬, 11~20日为中甸, 剩余天数为下旬, 空间分辨率为1 km, 投影方式为plate-carree, 时间范围为1998年5月下旬至2009年5月中旬, 共396幅影像。一般情况下在 n 年的时期内往往只有 $n-1$ 个完整的季节和时间序列两端一个季节的两个部分。因而, 利用SPOT-VEGETATION逐旬NDVI数据能够保证提取1999~2008年10 a完整的植被物候期参数。

土地利用数据为中国WESTDC 1.0数据集中的1 km分辨率的土地利用数据集, 来源于<http://westdc.westgis.ac.cn>。数字高程数据是从<http://srtm.csi.cgiar.org>

免费获取的SRTM 90m分辨率的数据。

1.3 数据预处理

由于各种数据的空间投影方式不同, 故在进行物候期参数提取之前, 所有的数据都被转换成统一的Albers-1940投影。虽然NDVI最大值合成法(MVC)能够减少云的污染, 但传感器观测角、太阳高度角、气溶胶和水汽的变化仍然会引起一定的噪声, 因此首先须对NDVI数据的异常值处理, 如果经过中值滤波处理后的NDVI相邻两值的大小差别大于NDVI原始时间序列1.5倍的方差, 则把该值去除。此外, 中高纬度地区由于冰雪覆盖影响, 致使冬春季的NDVI数据值有可能为负值, 将NDVI低于零的值赋为0。

2 研究方法

2.1 Double logistic模型的构建

Logistic模型能够有效地解释植被冠层物候相在生长季内随时间的变化。假定一个区域从没有植被覆盖到被植被完全覆盖, 绿叶面积覆盖率的增加在理论上就可以看作是一个累积分布函数, 其值由0到1。但是, 阔叶林和针叶林之间的差异是一个尺度函数, 它决定着绿叶期的平均最大和最小值^[20]。因此本文在原来的logistic模型的基础上乘以了一个幅度参数 c_2 , 加上了一个最小值参数 c_1 (由于针叶树在冬季仍然保持较高的叶绿素, 使其具有一定的背景值), 而植被落叶期符合反向logistic生长模型, 在这以负的logistic曲线表示, 则整个用来拟合植被绿度期的公式为:

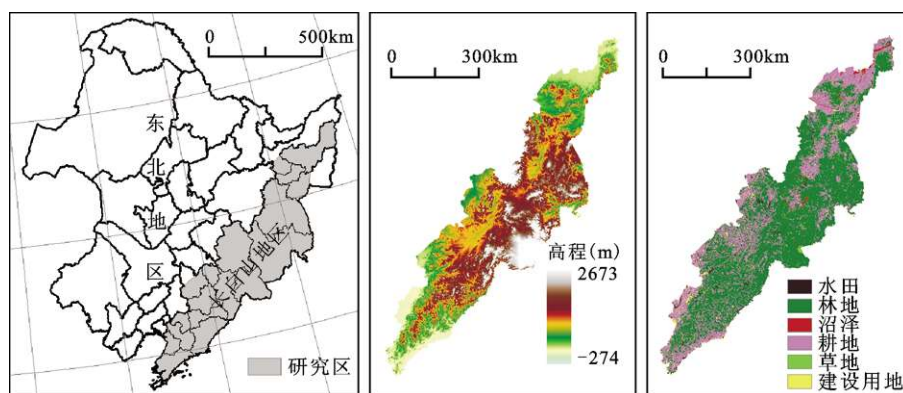


图1 研究区域范围、数字高程和土地利用情况

Fig.1 The location of the study area, the digital elevation and the landcover of the study area

$$y(t) = c_1 + c_2 \times \left(\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{x_1 - t}{x_2}\right)} - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{x_3 - t}{x_4}\right)} \right) \quad (1)$$

式(1)中,线性参数 c_1 和 c_2 分别控制着背景值和幅度值,非线性参数 x_1, x_2, x_3, x_4 决定着函数 $y(t)$ 的曲线形状, x_1 和 x_2 分别控制拟合曲线左侧的拐点和拐点处的变化率,同样地 x_3 和 x_4 对应着右侧的拐点和拐点处的变化率。利用 Levenberg-Marquardt 算法最小化公式(2)来确定公式(1)的所有参数,以保证形成一条较平滑的拟合曲线。

$$\chi^2 = \sum_{n_1}^{n_2} (y(t_i) - y_i)^2 \quad i \in [n_1, n_2] \quad (2)$$

其中, (t_i, y_i) 为在最大值和最小值范围内取的点。

在最大值或最小值周围的拟合效果较好,但在拟合曲线的远端欠佳,因此用该公式分别拟合左侧最小值 $y_L(t)$ (图 2a)、中间最大值 $y_C(t)$ (图 2b)和右侧最小值 $y_R(t)$ (图 2c),通过公式(3)将它们灵活的结合起来,来拟合时间序列的整个区间 $[y_L, y_R]$ (图 2d),从而增强了公式(1)拟合曲线的复杂度,我们把公式(1)和(3)的结合称为 double logistic 模型。

$$Y(t) = \begin{cases} \alpha(t)y_L(t) + [1 - \alpha(t)]y_C(t), & t_L < t < t_C \\ \beta(t)y_C(t) + [1 - \beta(t)]y_R(t), & t_C < t < t_R \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 分别是 t 距离中间最大值和右边最小值的标准化距离因子,范围介于 0~1 之间。

2.2 线性倾向估计

一元线性回归分析可以模拟每个栅格的变化趋势, Stow 等就用该方法来模拟植被的绿色变化率^[21]。此处同样用该方法来模拟长白山地区植被物候期的爆发或结束日期及生长季长度的变化趋势,计算公式为:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times P_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n P_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式(4)中: n 表示年数,本文中该值为 10; $i=1$ 代表 1999 年, $i=2$ 代表 2000 年,依此类推; P_i 为植被物候期在第 i 年的爆发、结束日期或生长季长度。某象元的趋势线是这个象元 10 a 的平均值用一元线性回归模拟出来的一个总的变化趋势, $Slope$ 即这条趋势线的斜率。

2.3 物候参数的提取

尽管有多种方法通过拟合曲线来定义植物生长季的开始和结束日期,但本文把 NDVI 值达到最大值的一半定义为植被生长季的开始和结束时间,因为 1/2 最大值处有几个适合研究植物物候随时间变化的特性。首先它在 logistic 曲线上是最陡的点,同时也是该曲线一阶导数的最大值点;其次,在 0 到 ∞ 变动的渐近线绝对值之间,该点在时间上是最稳定的,因此即使是不同的森林类型,其物候期的开始和结束日期也能进行比较。另外,

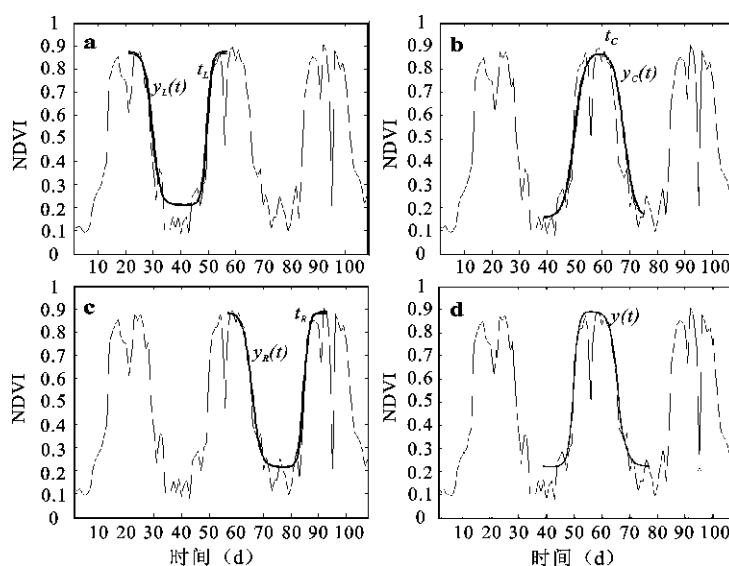


图 2 Double logistic 模型和全局函数对原始 NDVI 的拟合曲线

Fig.2 Fitted original NDVI curve by double logistic model and global function

该点是受物候期变化曲线的整个形状影响的,曲线远端较小的变动对物候期开始和结束的日期影响很小^[20]。

本研究利用 matlab 编程实现以上步骤的模拟计算,以一个像元作为一个计算单位,每个像元时间序列上的 396 个数值作为曲线模拟的离散点原始数据,因此,计算采用的 double logistic 模型是参数随着像元的变化而变化的,是动态的,可避免由于采用相同参数带来的模拟误差。

3 结果与分析

3.1 长白山植被 10 年平均物候期的空间格局

利用 double logistic 拟合方法,逐个像元运算得到长白山地区植被生长季始期、生长季末期和生长季长度,图 3 直观显示了中国长白山地区植被物候期的空间分布格局。

根据图 3a,长白山地区林地生长季开始于第 100~120 天,这与林地在 4 月底 5 月初开始展叶、生长是一致的;草地和耕地的开始日期相对较晚,分别集中在第 130~140 天和第 140~150 天。图 3b 表明长白山植被停止生长期发生在第 260~290 天,其中集中在第 275~285 天的区域所占面积较大,这对应于秋季林地落叶和草地枯萎的日期,耕地的生长季结束日期相对较早,为第 265~275 天,即

9 月初农作物停止生长。林地的生长季长度约为 160~180 d,草地约为 140~160 d,耕地最短,约为 110~130 d(图 3c)。

为了比较不同纬度地区各植被类型物候期的差异,作者沿纬度方向把研究区等分成三部分,分别为北部、中部、南部。它们的平均物候期列于表 1,结果表明长白山地区植被生长季的开始日期和结束日期的变化符合霍普金斯定律(在较高的纬度地区,植被表现出生长季开始日期延迟和结束日期提前)。

3.2 物候期变化趋势的空间格局

图 4 显示了长白山地区植被物候期在 1999~2008 年的变化趋势的空间格局。对于关键的物候期参数(生长季始期、生长季末期和生长季长度)来说,正的趋势意味着物候期延迟,负的趋势则表示物候期提前。

图 4a 是植被生长季开始日期变化趋势的空间分布图,从总体上看,开始日期提前区域面积较小,只占研究区面积的 32.46%,平均提前速率为 0.7 d/a,主要分布在中部地区。开始日期延迟的区域却占 67.54%,平均延迟速率为 0.3 d/a,其中农作物区域生长季开始日期延迟比较明显,约为 1.5 d/a。南部和北部森林的生长季开始日期的变化趋势相对不明显。图 4b 显示了植被生长季结束日期变化

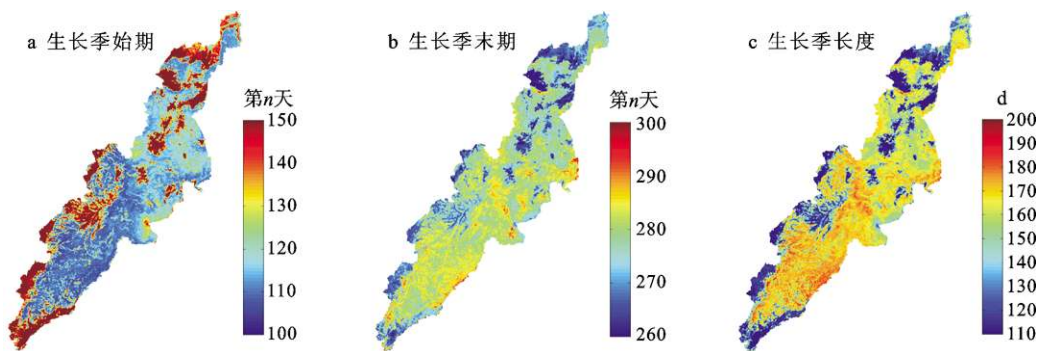


图3 长白山植被平均物候期的空间分布格局

Fig.3 Spatial pattern of average phenology in Changbai mountains

表1 生长季平均开始日期和结束日期 (第n天)

Table 1 Average start and end of growing season of vegetations

	开始日期				结束日期			
	北	中	南	整体	北	中	南	整体
林地	122.0	119.1	115.8	118.7	276.6	279.7	281.5	279.7
耕地	150.4	142.3	141.8	144.7	269.1	274.6	276.7	273.4
草地	135.5	132.6	129.7	133.1	275.3	278.9	280.1	277.8

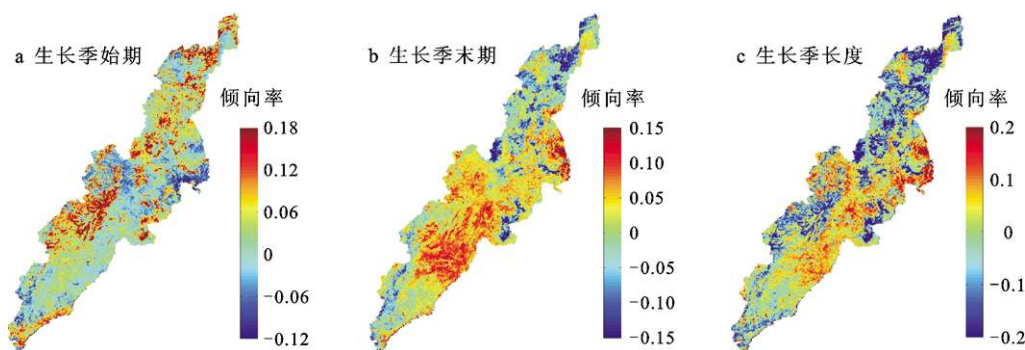


图4 长白山地区物候期在过去10 a的变化趋势

Fig.4 Trend of phenology change simulated for the past 10 years in Changbai Mountains

趋势的空间分布形式,其中延迟区域占有较大比例,约65.30%,平均延迟速率为0.5 d/a,它们主要集中在中南部的森林区域。生长季结束日期提前区域则主要分布在西北部的张广才岭和南部的农田区域,共占34.70%,平均提前速率为0.6 d/a。图4c则是植被生长季长度的空间分布格局,其表现为东南-西北向的空间分异。生长季长度延长的区域在中东部地区,平均延长率为0.7 d/a;缩短的区域在西北地区,平均缩短率为1.1 d/a。延长和缩短的区域面积分别占研究区总面积的49.69%和50.31%。这些研究结果可能受到不同植被类型的分布影响更大些。

3.3 模型验证

由于长白山地区植被物候期的实测数据较少,且遥感数据与地面验证的实测数据存在尺度不统一等问题,对物候信息提取的结果进行验证有待进一步研究。本文采用文献中的研究成果以及部分气象局的物候观测资料与本研究结果作粗略比较。根据通化县气象局2006年植物物候的观测资料,加拿大杨(*Populus canadensis*)展叶日期为4月25日,9月29日落叶,旱柳(*Salix matsudana*)展叶时间为4月28日,落叶时间为10月8日。根据本溪县气象局物候的观测资料:1980~1998年加拿大杨多年平均展叶期为第118天,每年约提前0.5 d,平均落叶期为第271天,每年约延迟1.1 d;杏(*Prunus armeniaca*)1980~2004年多年平均展叶期为第123天,每年约提前0.4 d,平均落叶期为第281天,每年约延迟0.6 d。在已有的研究成果中,宫攀和陈仲新得出东北地区所有植被的绿叶始期在第100~150天^[15],于信芳和庄大方得出长白山地区在4月中下旬树木开始展叶,在第280~290天之

间树木逐渐停止生长,生长季长度170~190 d^[16]。这与本文得出的长白山地区植被的生长开始日期主要在4月底和5月初,生长季结束日期集中在第275~285天的结果是一致的。

4 讨论

于信芳和宫攀等学者的研究结果与本文结果是一致的,但是他们所用的动态阈值法以及分段logistic模型每次仅可以提取1a内的植物物候期。Double logistic模型不仅可以同时提取多年的植物物候期,而且可以消除时间序列的边界效应,它能更灵活地拟合复杂的曲线。同时double logistic模型也具有一定的局限性,当拟合NDVI的曲线时,有6个参数需要计算,但是目前对于这些参数到底受到数据分辨率的影响有多大还不是十分清楚。

因为植被开始生长和结束生长是两个不同的生物物理过程,对于拟合曲线的两侧采用对称的比例还有些欠妥,在以后的工作需要进一步分别地判定生长季开始和结束的比例阈值。无论是植被生长季的开始日期,还是植被生长季的结束日期都受到气象条件的显著影响,因此对区域植物物候与气候关系的研究也将是我们下一步工作的重点。

在利用遥感数据研究大面积的植物物候中,地面验证是一个关键问题。虽然现在已经建立了很多的地面物候观测点,但是这些站点所提供的物候数据只是单个物种的、局部的,跟粗分辨率影像获得的物候期不具有科学的可比性。在1 km分辨率的影像中,单个像元反映的是涵盖很多物种的景观的整体状况。我们只是利用一些同一区域的地面物候数据和部分的前人的研究成果进行了

粗略的验证,这种工作还需要更深入的了解和进行。

遥感技术的应用,为实现植物物候观测由点到面的空间转换提供了可能,在此基础上,可进一步研究物候变化与全球碳循环的关系,及其与全球气候变化的关系。但是,由于受像元分辨率的限制,遥感反演的物候特征,其目标不是单个物种的物候信息,而是整个景观生态系统的物候变化,从而植被物候的细节特征(如发芽、开花等)被忽略了。

5 结 论

本文利用 double logistic 模型动态监测了长白山地区植被的物候期,模拟结果表明,基于 SPOT/NDVI 获取的植被生长季开始日期、结束日期以及生长季长度具有明显的空间分布格局,这也与长白山植被的土地覆盖类型分不开。因为不同的土地覆盖类型,其生长季的开始日期和结束日期在影像上体现是时间是有差异的,例如:林地的生长季开始日期最早,平均为第 118.7 天;其次为草地(第 133.1 天),最后为耕地(第 144.7 天),但是它们的结束日期却是相反的顺序,即:耕地(第 273.4 天)、草地(第 277.8 天)和林地(第 279.7 天)。在较高纬度地区,植被的物候期表现为生长季开始日期较晚和结束日期较早的规律。

本文中所利用的模型是在没有设置预定的阈值或者经验参数前提下而逐个像元运算的,所以它能够更加稳定地表征不同像元之间物理意义,具有更好的通用性。野外观测数据和先前学者的研究结果都证明了利用 double logistic 模型动态监测长白山地区植被物候期是一种可行的方法。

参考文献:

- [1] 陈效述,曹志萍. 植物物候期的频率分布型及其在季节划分中的应用[J]. 地理科学, 1999, 19(1):21~27.
- [2] 竺可桢,宛敏渭. 物候学(第二版)[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 1999:1~3.
- [3] 武永峰,李茂松,李 京. 中国植被绿度期遥感监测方法研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(1):92~103.
- [4] Karlsen S, Solheim I, Beck P, et al. Variability of the start of the growing season in Fennoscandia, 1982-2002[J]. International Journal of Biometeorology, 2007, 51(6):513-524.
- [5] Piao S, Fang J, Zhou L, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J]. Global Change Biology, 2006, 12(4):672-685.
- [6] Moulin S, Kergoat L, Viovy N, et al. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR Satellite measurements[J]. Journal of Climate, 1997, 10(6):1154-1170.
- [7] 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.
- [8] Archibald S, Scholes R J. Leaf green-up in a semi-arid African savanna separating tree and grass responses to environmental cues[J]. Journal of Vegetation Science, 2007, 18(4):583-594.
- [9] Hermance J F. Stabilizing high-order, non-classical harmonic analysis of NDVI data for average annual models by damping model roughness[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(12):2801-2819.
- [10] Fisher J I, Mustard J F. Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 109(3):261-273.
- [11] Schaber J, Badeck F W. Plant phenology in Germany over the 20th century[J]. Regional Environmental Change, 2005, 5(1):37-46.
- [12] Ahas R, Aasa A, Menzel A, et al. Changes in European spring phenology[J]. International Journal of Climatology, 2002, 22(14):1727-1738.
- [13] Reed B. Trend Analysis of Time-series phenology of north America derived from satellite data[J]. GIScience & Remote Sensing, 2006, 43(1):24-38.
- [14] Karlsen S, Hogda K, Wielgolaski F, et al. Growing-season trends in Fennoscandia 1982-2006, determined from satellite and phenology data[J]. Climate Research, 2009, 39(3):275-286.
- [15] 宫 攀, 陈仲新. 基于 MODIS 数据的东北地区植被物候参数提取[J]. 土壤通报, 2009, 40(2):213~217.
- [16] 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):111~117.
- [17] Per J, 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.
- [18] 李惠敏, 刘洪斌, 武 伟. 近 10 年重庆市归一化植被指数变化分析[J]. 地理科学, 2010, 30(1):119~123.
- [19] 侯西勇, 应兰兰, 高 猛, 等. 1998~2008 年中国东部沿海植被覆盖变化特征[J]. 地理科学, 2010, 30(5):735~741.
- [20] Fisher J I, Mustard J F, Vadeboncoeur M A. Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(2):265-279.
- [21] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(5):1111-1117.

Growing-season Trends Determined from SPOT NDVI in Changbai Mountains, China, 1999-2008

LI Ming^{1,2}, WU Zheng-fang², DU Hai-bo², ZONG Sheng-wei², MENG Xiang-jun², ZHANG Lian-zhi¹

(1. *College of Urban and Environmental Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China*; 2. *College of Urban and Environmental Science, Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130024, China*)

Abstract: A wealth of remotely sensed image time series is now available to monitor vegetation dynamics over large areas. In this paper, the spatial pattern of three key vegetation phenological metrics, the start of growing season(SOS), the end of growing season(EOS), and the length of growing season(LOS) were inferred from the time series SPOT/NDVI data based on double logistic model in Changbai mountains, and the trends of them are assessed. The results show that the SOS of forests focus on dekad 10–12, that of grasslands and croplands start relatively late, they are in dekad 13–14 and dekad 14–15, respectively. The EOS of forests and grasslands range from 275th to 285th day, that of croplands are early relatively, which are between 265th and 275th day. Therefore, the LOS of forests, grasslands and croplands are 160–180 days, 140–160 days and 110–130 days, respectively. The trends of phenophases have certain spatial discrepancy, which express that the LOS prolong in middle-eastern areas and shorten in northwestern areas. Then the derived phenological metrics were validated by a few field observed data and some previous research achievements in the same area.

Key words: Changbai Mountains; phenological metrics; SPOT/NDVI; double logistic model