

1982–2006年欧亚大陆植被生长季开始时间 遥感监测分析

刘玲玲^{1,2}, 刘良云¹, 胡 勇^{1,2}

(1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 植被物候是环境条件季节和年际变化最直观、最敏感的生物指示器, 物候变化可以反映陆地生态系统对气候变化的快速响应。论文基于1982–2006年连续25年的GIMMS AVHRR NDVI数据, 采用动态阈值法、延迟滑动平均法, 双Logistic和Savitzky-Golay方法提取欧亚大陆植被的生长季开始时间, 并对不同方法的提取结果进行比较和分析。然后以动态阈值法的物候提取结果, 研究了1982–2006年期间植被物候变化趋势以及物候对温度变化的响应情况。结果表明: 动态阈值法在欧亚大陆地区生长季开始时间提取率高, 在纬度上的变化趋势稳定; 北方森林/针叶林和苔原地区的生长季开始时间提取结果最稳定, 低纬度区域的变率最大。1982–2006年, 大部分植被类型的生长季开始时间表现出提早趋势, 其中森林覆盖区域提早趋势明显, 变化幅度为11.45~15.61 d/25a; 除了郁闭式至开放式(>15%)灌木丛(<5 m)植被类型外, 植被物候和温度表现出负相关关系, 变化幅度为1.32~3.47 d/°C, 这也验证了近几十年气候变暖的趋势。

关 键 词: 气候变化; 物候; 归一化植被指数; 生长季开始时间; 变化趋势; 温度响应; 欧亚大陆

1 引言

近100年来, 尤其是近20多年, 全球平均表面温度出现了显著上升, 气候变暖已成为全球关注的重要问题^[1]。由于植物生长季开始时间变化与气象和气候因素密切相关, 已成为研究全球变化对陆地生态系统影响和反馈机理的一个重要参数^[2]。北半球中高纬度尤其欧亚大陆地区是全球变化的敏感区域^[3–5], 该区域植被生长季开始时间的变化趋势和温度变化响应研究, 对于深入认识陆地生态系统对气候变化的响应具有典型性。研究发现, 遥感反演物候参数和物候实测数据具有高度一致性^[6–9]。但是, 在欧亚大陆大部分地区, 物候实测资料缺乏, 时间序列较短, 空间仅限于站点数据, 这些缺点限制了植被物候在全球变化研究中的应用。因此, 长时间序列和大尺度覆盖的遥感数据对分析洲际尺度植被物候对全球气候变化的响应和适应研究是一个很好的选择。

植被物候的年际变化影响植被和大气之间的碳、水和能量的交换^[10]。Zhou等^[11]采用1981–1999

年的GIMMS AVHRR NDVI分析发现, 40~70°N欧亚大陆地区植被生长季已经延长了9.4 d/10a, 春天提早了3.5 d/10a。Studer等^[12]采用欧洲地区1982–2001年Pathfinder NDVI数据分析发现, 生长季已经延长了9.6 d/10a, 春天提早了5.4 d/10a。Delbart等^[5]利用1982–2004年AVHRR和SPOT-VGT数据分析欧亚大陆北部50~72°N植物生长季节的变化, 结果显示, 1982–1991年的生长季节开始日期平均提前了8天, 1982–2004年生长季节开始日期平均提前3.5天, 而1993–2004年生长季节结束日期则平均推迟了3.6天。由此看来, 不同方法不同数据源提取的同一区域遥感植被生长季开始时间会有所不同。

气候变暖通过引起植物物候生长季节的变化, 改变植物光合作用和呼吸作用期间的长度, 进而影响全球植被—大气间季节性碳循环的格局^[13–14]。Piao等^[15]统计分析了1982–1999年我国温带地区遥感物候变化与气候因素的关系, 指出物候期开始时间与其发生前2~3个月的平均气温密切相关, 春季气温升高1°C, 物候期提前7.5天。Sparks等^[16]通过

收稿日期: 2011-11; 修订日期: 2012-04.

基金项目: 国家973项目(2009CB723902); 国家自然科学基金项目(40971197)。

作者简介: 刘玲玲(1987-), 女, 河南周口人, 博士研究生, 主要从事全球变化与植物物候研究。E-mail: liulingling1002@126.com

通讯作者: 刘良云(1975-), 男, 湖南省邵阳人, 研究员, 博士生导师, 从事光学遥感及应用研究。E-mail: lyliu@ceode.ac.cn

对不列颠群岛 11 种物种 58 年的开花期数据和温度的关系分析,发现不同物种开花期提早 2~10 d/℃。Kramer^[17]和 Rötzer 等^[18]研究发现欧洲地区温度升高 1℃,展叶期提早 3.2~3.6 天。

虽然关于欧亚大陆局部地区物候变化趋势和温度变化响应的研究很多,但是各方法之间的结果还存在较大差异,缺乏方法比较的研究。本文基于 1982-2006 年连续 25 年的 GIMMS AVHRR NDVI,采用了 4 种不同构建原理的植被物候提取算法,提取了欧亚大陆植被生长季开始时间。通过对不同方法的提取结果进行比较分析,选取动态阈值法的提取结果分析不同区域不同植被类型物候变化趋势和温度变化响应情况。

2 数据和方法

2.1 数据和预处理

本研究采用遥感数据是 1982 年 1 月到 2006 年 12 月的 GIMMS AVHRR NDVI 的欧亚大陆区域数据。该数据集由 NOAA 7, 9, 11, 14, 16 和 17 系列卫星的 AVHRR 传感器获得的图像制作生成 15 天最大值合成的数据,已进行定标、几何校正、除坏线、除云等相关处理,是全球植被变化研究的首选数据源并得到广泛应用^[19]。图像的空间分辨率是 8 km,数据投影为 Albers 等面积圆锥投影。由于 1987 年数据不全,所以未采用。

由于最大值合成法并未综合考虑较长周期内遥感图像像元值的变化规律与趋势,合成的 NDVI 时间序列曲线是一种锯齿状的曲线,仍然受到云的负向影响,有时候抖动非常剧烈,有必要首先对这些 NDVI 曲线进行去云处理,即对曲线进行重构^[20]。因此,如何有效去除云的影响,是运用 NDVI 时间序列曲线提取植被生长季物候参数的关键问题。本研究采用时间序列谐波分析法(HANTS)对数据进行滤波处理,该方法优点是既可实现保持原时间序列图像的周期性,又可恢复这些象元值的本来面目^[21-23]。该算法的主要参数包括频率数(NF)、噪声方向以及阈值、曲线匹配阈值(FET)、剩余点的个数(DOD)等。通过对最优参数的设置(NF=2, FET=1000, DOD=8)得到滤波后的图像。

本研究采用的生态分区数据是 Conserveonline 提供的陆地生态边界矢量文件(<http://conserveonline.org/workspaces/ecoregional.shapefile>)。采用生

态分区的目的主要是为了消除复杂程度、简化展示结果,更重要的是为了最小化和纬度、海拔、C3 和 C4 等有关的生态分区内部的影响因素。

本研究采用的土地利用和植被覆盖数据是目前全球分辨率(300 m)最高和精度最高的土地覆盖产品 Globcover v2.2(<http://www.gofc-gold.uni-jena.de/sites/globcover.php>)。为了与遥感数据匹配,土地覆盖分类图按照面积最优原则由 300 m 重新采样为 8 km 的空间分辨率,按 26×26 的窗口统计,选取最多的地物类型作为重采样后的地物类型。

本文所用的气候数据是全球历史气候网络(GHCN-Monthly Version 2)提供的 1982-2006 的月均温数据(<http://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/v2.php>),数据经过严格的质量控制,精度较高。

2.2 生长季开始时间的提取方法

由遥感数据生成的归一化植被指数(NDVI)能在很大覆盖范围内相当精确地反映植被的绿度和光合作用强度,能较好地反映植被的代谢强度及其季节性变化和年际间变化^[24]。近期利用时间序列 NDVI 数据监测植被生长季开始时间、落叶期(生长季节开始、结束)的方法主要包括:阈值法^[10,25]、滑动平均法^[8,26]和数学模型方法^[27-29]。本研究分别采用以下 4 种方法提取植被生长季开始时间。

(1) 阈值法^[10,25,28,30]:这是最早出现的一种方法,它认为 NDVI 大于某个阈值时,植被活动开始。该方法比较简单,与地面实测数据结合,能产生误差较小的结果;但是该方法的缺陷在于对于不同的土地覆盖类型、土壤背景等,需要设定不同的阈值。考虑植被类型和北半球冰雪对 NDVI 的影响^[31],利用动态阈值法提取植被生长季开始时间,阈值设为 0.2 幅度^[28,32],幅度为一年中 NDVI 的最大值减去 NDVI 最小值。首先对数据进行 Hants 滤波处理。在 GIMMS AVHRR NDVI 数据中,内陆水体、沙漠、裸露土壤和冰雪的 NDVI 值在 -0.2~0.1^[10],所以在提取生长季开始时间的过程中,对于 NDVI 最小值小于零的植被像元,NDVI 最小值赋值为 0。

(2) 滑动平均法^[8,26]:这种方法认为 NDVI 突然增加标志着光合活动的开始。滑动平均的计算公式如下:

$$Y_t = (X_t + X_{t-1} + \dots + X_{t-(w-1)})/W \quad (1)$$

式中: Y_t 是时间 t 的滑动平均值; X_t 是时间 t 的平滑的 NDVI 值; W 是滑动平均的时间间隔。该方法对代表植被生长的 NDVI 数据作出预报,表明了生

长季 NDVI 变异性, 可以分析不同植被类型的生长季开始时间和结束日期, 但是滑动平均的时间间隔大小难以确定。本文采用延迟滑动平均方法 (DMA), 滑动平均的时间间隔设置为 15^[10]。提取物候之前需要先对数据进行 Hants 滤波处理。

(3) Savitzky-Golay 滤波法: 该方法最初由 Savitzky 和 Golay 于 1960 年提出^[33], 是一种滑动窗口的加权平均算法, 但其加权系数不是简单的常数窗口, 而是通过在滑动窗口内对给定高阶多项式的最小二乘拟合得出。通过原始数据和拟合后数据比较, 我们把滑动窗口大小设置为 3, 适应性强度设置为 2, 阈值设置为 0.2 幅度^[28,32], 生长季开始时间为提取的结果乘以 15。

(4) 双 Logistic 曲线拟合法: 首先将整个时间序列中时间点对应的值按极大或极小值分成多个区间, 然后, 分别对该区间进行双 Logistic 函数局部拟合^[27,29]。函数如公式(2)所示:

$$g(t, x_1, \dots, x_4) = \frac{1}{1 + \exp(\frac{x_1 - t}{x_2})} - \frac{1}{1 + \exp(\frac{x_3 - t}{x_4})} \quad (2)$$

式中: x_1 是左拐点的位置; x_2 是左拐点的变化速率; x_3 是右拐点的位置; x_4 是右拐点的变化速率。这里, 也设阈值为 0.2 幅度。

3 结果和讨论

3.1 不同方法提取植被的生长季开始时间的比较和分析

利用 4 种不同构建原理的方法提取了欧亚大陆植被生长季开始时间。在生态分区的尺度上, 通过生长季开始时间的平均值、提取率和生长季开始时间提取的稳定性对不同方法进行比较和评估。由于数据质量和具体方法适用条件限制的原因, 生长季开始时间可能在一些区域无法提取, 所以这里的提取率定义为成功提取生长季开始时间的年数。

从 4 种方法在不同生态分区提取 2006 年生长季开始时间的平均值和异常值的空间分布情况来看(图 1), 同一区域不同方法提取生长季开始时间的具体天数是有差别的, 这主要是不同方法的提取机理不同。对于 2006 年的不同方法的平均值, 从中国区域往俄罗斯方向, 生长季开始时间呈现出推迟的趋势, 在最北部苔原区域植被返青最晚。相对于平均值, 不同方法的提取生长季开始时间有系统性提早和推迟趋势。对于大部分生态分区来说, 延迟滑动平均方法系统性偏早, 其余 3 种方法相对较晚, 但是 Savitzky-Golay 和双 Logistic 方法的结果比

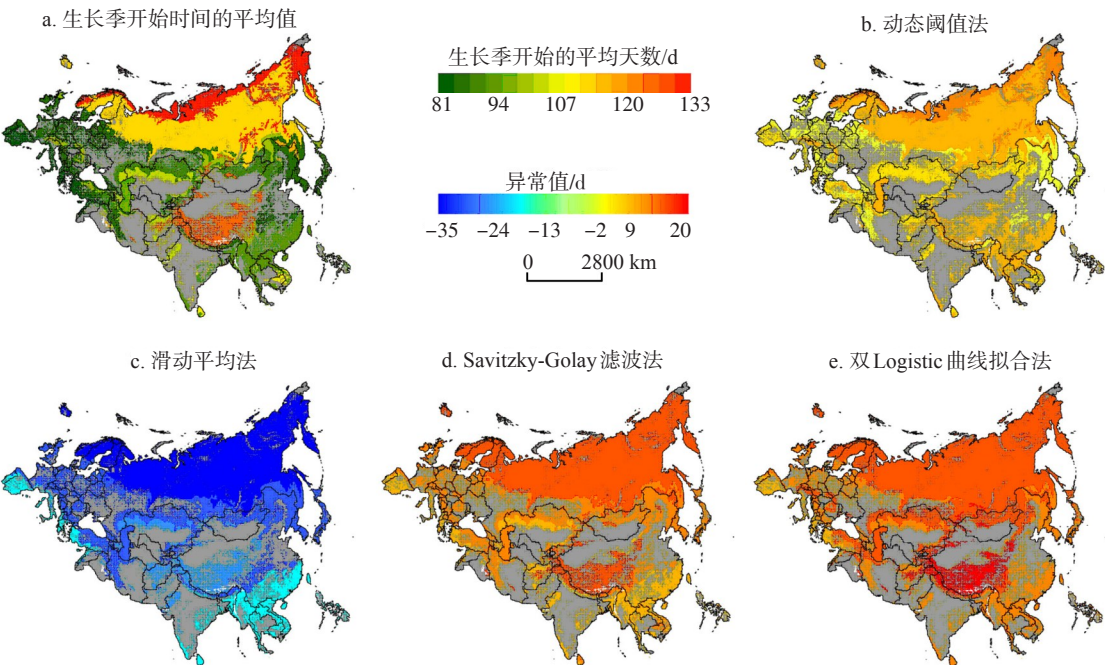


图1 不同生态分区4种方法提取2006年生长季开始时间的平均值及不同方法和平均值之间的差值

Fig.1 Ensemble satellite-derived SOS averaged by ecoregion in 2006

Remaining panels show the SOS anomaly between individual methods and the ensemble

较接近,4种方法平均相差±35天。动态阈值法和平均值的结果最为接近。

在欧亚大陆的中高纬度地区,所有的方法都能成功提取植被生长季开始时间,这也和中高纬度地区主要是自然植被,受人为活动影响较小有关(图2)。北方森林/针叶林区域提取率最高,平均为22年;苔原区域和温带草地、稀树草原和灌丛区域平均提取率一样,都为19年;温带针叶林区域的提取

率为18年,红树林区域的提取率最低。在这4种方法中,动态阈值法提取率最高,这个和 White 等^[10]的研究结果一致。

所有方法提取的植被生长季开始时间随着纬度的升高呈现推迟的趋势(图3)。延迟滑动平均方法在不同纬度持续性偏早,这和图1的结果一致。不过,滑动平均方法在高纬度区域提取生长季开始时间系统性明显偏早,在低纬度区域却表现出偏

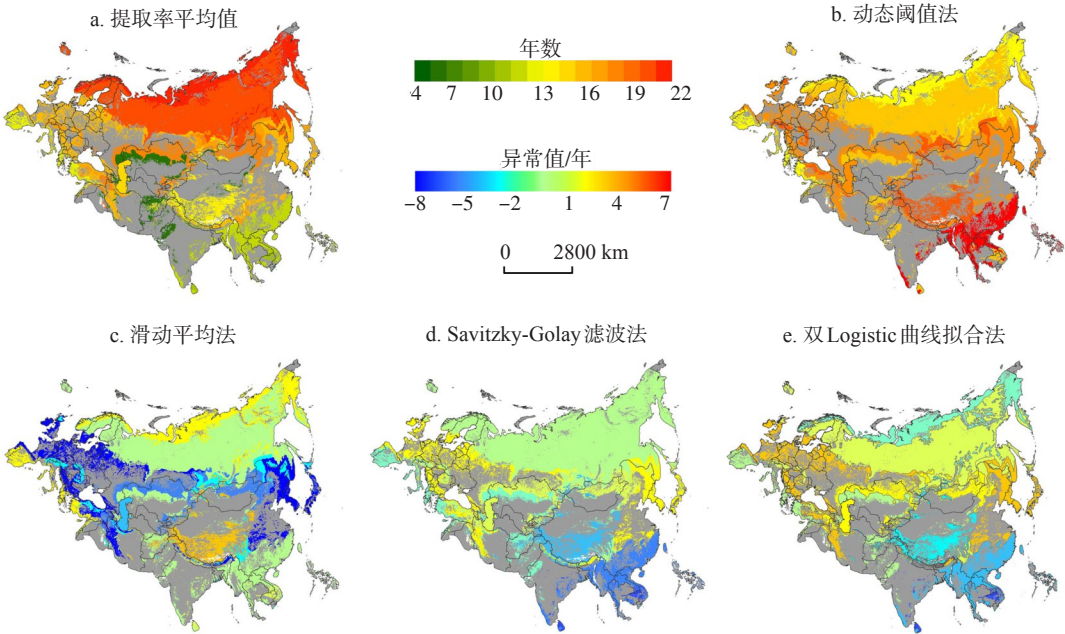


图2 不同生态分区4种方法生长季开始时间提取率的平均值及不同方法提取率和平均值之间的差值

Fig.2 Ensemble SOS retrieval rate (Low values indicate frequent failures to retrieve SOS estimates)
Remaining panels show the retrieval rate anomaly between individual methods and the ensemble

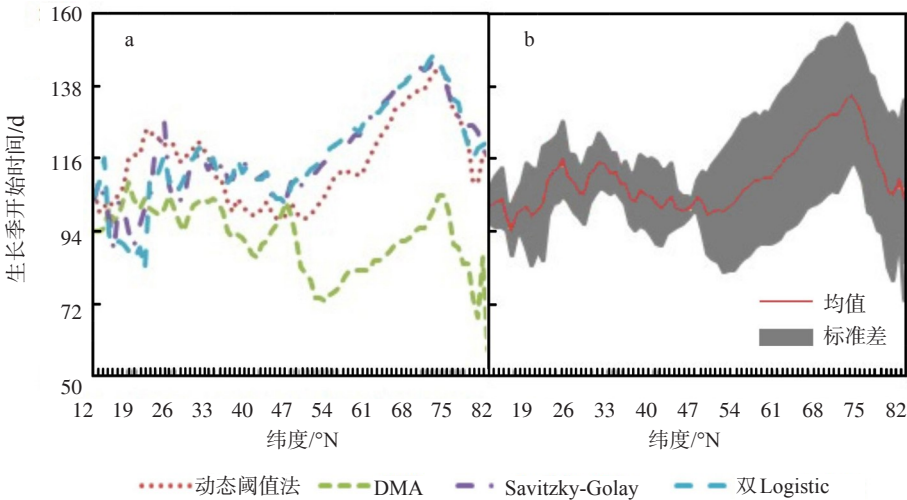


图3 不同方法提取的生长季开始时间随纬度的变化规律(a)和4种方法的平均值和标准差随纬度的变化情况(b)
Fig.3 Average start of season (SOS) calculated by latitude (a) and shown as the ensemble mean and standard deviation (b)

长季开始时间提取不稳定造成的,另一方面可能是热带区域和温带区域物种分布不同所致。热带区域物种年内起始的NDVI值本身比较高,变化0.2幅度的NDVI经过的天数比温度区域多。对于温带区域,生长季开始时间的均值都是依照DMA、动态阈值法、Savitzky-Golay和双Logistic方法从小到大排列,这也说明温带区域提取生长季开始时间更为稳定。对于滑动平均法、动态阈值法和Savitzky-Golay滤波法来说,温带草地、稀树草原和灌丛比温带针叶林的生长季开始时间早,温带混交林区生长季开始时间最早。地中海区域植被生长季开始时间最早,红树林区域生长季开始时间提取变率较大,4种物候提取方法对水淹草地和稀树草原、山区草地和灌丛的适用性是一致的。

通过对不同方法的比较验证发现,动态阈值法在欧亚大陆地区生长季开始时间提取率高,在纬度上的变化趋势稳定,所以基于动态阈值法的提取结果研究欧亚大陆尺度的物候变化趋势和气候变化响应是合适的。

3.2 植被生长季开始时间的变化趋势和温度变化响应分析

通过方法比较可知,动态阈值法更适于分析欧亚大陆区域的变化趋势和温度变化响应分析情况。根据动态阈值法提取植被生长季的开始时间,采用线性回归分析(有效样本数大于15的条件下)和相关系数检验的方法,把物候参数看成一个时间

或者温度的函数,对物候参数和年份或者当前月温度之间进行分析,分别得到物候随年份变化的斜率和物候随温度变化的斜率,并基于Person相关系数在95%的置信度水平下进行显著性检验;最后统计不同植被类型1982-2006年植被生长季开始时间的d/25a和d/℃。本研究分析的植被类型不包括植被信号较弱区域(荒漠等)和农业区域(受人为因素影响较大的区域)。

根据欧亚大陆植被生长季开始时间1982-2006年变化趋势空间分布图(图5),大部分地区生长季开始时间表现出提早趋势,主要分布在中国中部、俄罗斯南部、内蒙古北部、哈萨克斯坦东北部、阿富汗、伊朗、土耳其和欧洲大部分地区,这也验证了全球变暖的趋势。但是,欧亚大陆远东等少数地区呈现推迟趋势,主要是因为这些区域近20多年来植被覆盖类型发生变化所致^[34]。表1的统计数据 and 生长季开始时间的空间格局有很好的的一致性,大部分植被类型物候表现出提早趋势,这个和Zhou等关于植被生长季开始时间的变化趋势的研究结论是一致的。郁闭式至开放式(>15%)灌木丛(<5 m)的变化幅度最大,提早达到15.94 d/25a。除开放式(15%~40%)针叶落叶或常绿森林(>5 m)外,其余森林类型的表现出明显的提早趋势,变化幅度为11.45~15.61 d/25a。

根据欧亚大陆生长季开始时间对温度响应的空间分布图(图6),生长季开始时间与当前月温度

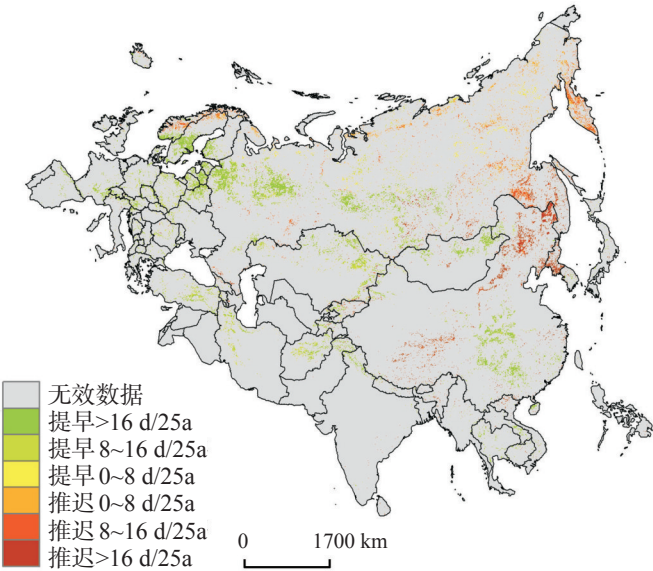


图5 1982-2006年欧亚大陆生长季开始时间变化趋势的空间分布格局

Fig.5 Phenology trends in SOS over the years of 1982-2006 (only significant correlated pixels)

基本成负相关的关系,幅度为在0~6 d/℃。这说明从1982-2006年,随着温度的升高,生长季开始时间表现出提前的趋势。另外,从图上也可以明显看出,和温度相关较强的主要是中高纬度区域,由此也可证明北半球的中高纬度地区对全球变暖较为敏感,这和该区域的主要分布植被类型有关。一些零星区域表现出负相关关系,这可能是当地气温降低所致,也有可能是植被覆盖发生变化导致^[35-36]。从表1可见,除郁闭式至开放式(>15%)灌木丛(<

5 m)类型外,其他的植被类型和当前月温度是负相关关系。物候和温度的强相关性也说明欧亚大陆主控气候因素是温度。全球变暖将对欧亚大陆地区的生物量、碳循环造成较大的影响。

4 结论

本研究利用1982-2006年连续25年的GIMMS AVHRR NDVI数据、植被类型数据、生态分区数据

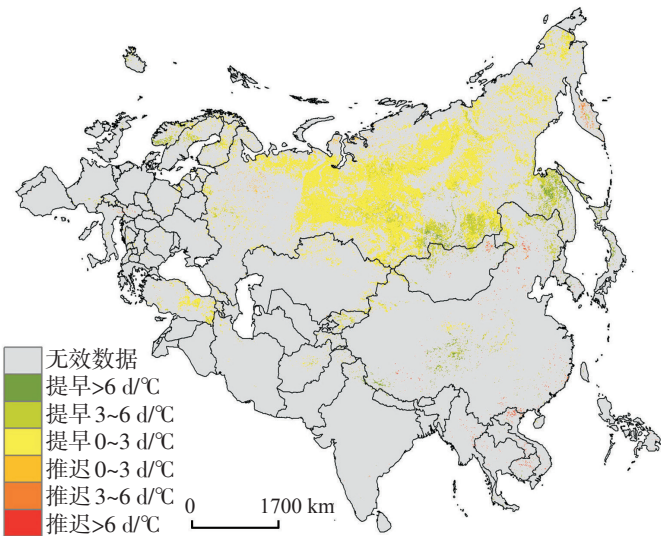


图6 1982-2006年欧亚大陆生长季开始时间对当前月温度变化的响应
Fig.6 The SOS response to climate warming from 1982 to 2006

表1 1982–2006年不同植被类型生长季开始时间变化趋势(d/25a)和对温度的响应(d/℃)
Tab.1 Median change in SOS (d/25a) and the phenological responses to climate warming (d/℃)
by land cover types over the years 1982–2006

植被类型	变化趋势/(d/25a)	对温度的响应/(d/℃)
农田(50%~70%)/植被(草地、灌木林、森林) 镶嵌体(20%~50%)	-9.95	-1.35
植被(草地、灌木林、森林) (50%~70%)/农田镶嵌体(20%~50%)	-8.87	-1.79
郁闭式(>40%) 落叶阔叶林(>5 m)	-11.45	-1.76
郁闭式(>40%) 针叶常绿森林(>5 m)	-15.61	-2.47
开放式(15%~40%) 针叶落叶或常绿森林(>5 m)	1.62	-1.87
郁闭式至开放式(>15%) 针阔混交林(>5 m)	-15.42	-1.63
森林/灌木(50%~70%) / 草地(20%~50%) 镶嵌体	6.72	-2.32
草原(50%~70%) /森林/ 灌木丛镶嵌体(20%~50%)	4.92	-1.32
郁闭式至开放式(>15%) 灌木丛(<5 m)	-15.94	0.49
郁闭式至开放式(>15%) 草地、热带草原、地衣	-5.09	-3.47
稀疏(>15%) 植被(木本植被、灌木、草地)	-1.54	-1.40
郁闭式至开放式(>15%) 草地、灌木、木本植被	-9.86	-1.56

和温度数据,采用了4种不同构建原理的植被物候提取算法,提取了欧亚大陆植被生长季开始时间。通过对不同方法的提取结果进行比较和分析,发现动态阈值法在欧亚大陆地区生长季开始时间提取率高,在纬度上的变化趋势稳定,和4种方法的均值也最为接近;从中国区域往俄罗斯方向,生长季开始时间呈现出推迟的趋势,在最北部苔原区域植被返青最晚;北方森林/针叶林区域提取率最高,平均为22年;北方森林/针叶林和苔原地区提取最为稳定,但是在低纬度地区变率很大。选取动态阈值的提取结果,分析不同植被类型物候变化趋势和温度变化响应情况,发现:从1982-2006年,欧亚大陆大部分地区植被生长季开始时间表现出提早趋势,并且欧洲大部分地区提早趋势明显;生长季开始时间和当前月温度呈现负相关关系,变化幅度为1.32~3.47 d/℃。

本研究中通过多种方法比较验证选取一种较为适合方法研究目标区域。由于遥感时间分辨率的限制(比如MODIS 16天的NDVI),同一种方法同一种数据源提取遥感生长季开始时间相对实际生长季开始时间整体性提早或者推迟,但是这个系统性的提早或者推迟对物候趋势温度响应研究影响很小,因为我们仅仅关注变率。不过对于物候具体日期要求较高的研究,该方法就存在一定的不足之处。

目前,用实测数据验证遥感提取物候数据最大难题是尺度转换,尤其是对于8 km的AVHRR数据。不过,在进一步研究中,可以考虑将通量观测数据引入物候研究中,从通量观测资料中提取总生态系统生产力(GEP)、净生态系统生产力(NEP)曲线中的特征物候参数。

(1) 通量数据是景观尺度的观测资料,通常对应数百米—数公里尺度的景观尺度上植被冠层与大气之间耦合参数,与遥感物候资料的空间验证的空间尺度更为一致。

(2) 通量观测资料对应的物候参数之间与碳循环相关^[37-38],利用通量观测资料验证的遥感物候参数在物候气候变化反馈研究中具有更加明确的物理意义。

参考文献

- [1] 任国玉. 气候变暖成因研究的历史、现状和不确定性. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1084-1091.
- [2] 武永峰, 何春阳, 马瑛, 等. 基于计算机模拟的植物返青期遥感监测方法比较研究. 地球科学进展, 2005, 20(7): 724-731.
- [3] Schwartz M, R. Ahas, Aasa A. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 343-351.
- [4] Myneni R, Keeling C, Tucker C, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [5] Delbart N, Le Toan T, Kergoat L, et al. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982-2004). *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(1): 52-62.
- [6] Zhang X, Friedl M, Schaaf C. Global vegetation phenology from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(G4): G04017.
- [7] Studer S, R St ckli, Appenzeller C, et al. A comparative study of satellite and ground-based phenology. *International Journal of Biometeorology*, 2007, 51(5): 405-414.
- [8] Schwartz M, Reed B, White M. Assessing satellite-derived start-of-season measures in the conterminous USA. *International Journal of Climatology*, 2002, 22(14): 1793-1805.
- [9] Maignan F, Bréon F, Bacour C, et al. Interannual vegetation phenology estimates from global AVHRR measurements: Comparison with in situ data and applications. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(2): 496-505.
- [10] White M, de Beurs K, Didan K, et al. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology*, 2009, 15(10): 2335-2359.
- [11] Zhou L, Kaufmann R K, Shabanov N V, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D17): 20069-20083.
- [12] Studer S, Appenzeller C, Defila C. Inter-annual variability and decadal trends in alpine spring phenology: A multivariate analysis approach. *Climatic Change*, 2005, 73(3): 395-414.
- [13] Piao S, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 2008, 451(7174): 49-52.
- [14] Cleland E, Chiariello N, Loarie S, et al. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem.

- tem. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(37): 13740.
- [15] Piao S, Fang J, Zhou L, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 2006, 12(4): 672-685.
- [16] Sparks T, Jeffree E, Jeffree C. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(2): 82-87.
- [17] Kramer K Phenology. Growth of European trees in relation to climate change[D]. Landbouw-Universität Wageningen, 1996.
- [18] R tzer T, Chmielewski F M. Phenological maps of Europe. *Climate Research*, 2001, 18(3): 249-257.
- [19] 于嵘. 基于遥感时序数据的中国陆地植被覆盖变化分析研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.
- [20] 范锦龙. 复种指数遥感监测方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- [21] Julien Y, Sobrino J. Comparison of cloud-reconstruction methods for time series of composite NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 618-625.
- [22] Menenti M, Azzali S, Verhoef W, et al. Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. *Advances in Space Research*, 1993, 13(5): 233-237.
- [23] Roerink G, Su Z, Menenti M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth: Part B, Oceans and Atmosphere*, 2000, 25(2): 147-157.
- [24] 方修琦, 余卫红. 物候对全球变暖响应的研究综述. *地球科学进展*, 2002, 17(5): 714-719.
- [25] Yu X, Zhuang D. Monitoring forest phenophases of Northeast China based on MODIS NDVI Data. *Resources Science*, 2006, 28(4): 111-117.
- [26] Reed B C, Brown J F, VanderZee D, et al. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 1994, 5(5): 703-714.
- [27] Fisher J, Mustard J, Vadeboncoeur M. Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(2): 265-279.
- [28] J nsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1824-1832.
- [29] Zhang X, Friedl M, Schaaf C, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(3): 471-475.
- [30] Fisher J, Mustard J. Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(3): 261-273.
- [31] Delbart N, Kergoat L, Le Toan T, et al. Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(1): 26-38.
- [32] van Leeuwen W J D. Monitoring the effects of forest restoration treatments on post-fire vegetation recovery with MODIS multitemporal data. *Sensors*, 2008, 8(3): 2017-2042.
- [33] J nsson P, Eklundh L. TIMESAT: A program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(8): 833-845.
- [34] Zeng H, Jia G, Epstein H. Recent changes in phenology over the northern high latitudes detected from multi-satellite data. *Environmental Research Letters*, 2011, 6: 045508.
- [35] Zeng H, Jia G, Epstein H. Recent changes in phenology over the northern high latitudes detected from multi-satellite data. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(4): 045508.
- [36] Reed B. Trend analysis of time-series phenology of North America derived from satellite data. *GIScience & Remote Sensing*, 2006, 43(1): 24-38.
- [37] Baldocchi D, Black T, Curtis P, et al. Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil temperature and climate data: A synthesis of FLUXNET data. *International Journal of Biometeorology*, 2005, 49(6): 377-387.
- [38] Richardson A, T Andy Black, Ciais P, et al. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1555): 3227.

Assessment and Intercomparison of Satellite-derived Start-of-Season (SOS) Measures in Eurasia for 1982–2006

LIU Lingling^{1,2}, LIU Liangyun¹, HU Yong^{1,2}

(1. Center for Earth Observation and Digital Earth, CAS, Beijing 100094, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Vegetation phenology is one of the most direct and sensitive indicators of seasonal and interannual variations of environmental conditions. Phenological changes reflect quick change of terrestrial ecosystems in response to climate change. Satellite remote-sensing techniques capture canopy reflectance and can be used for studies of vegetation phenology. In this study, satellite-derived Start of Season (SOS) dates are obtained from the GIMMS AVHRR NDVI dataset by different methods such as Dynamic Threshold method, Delayed Moving Average methods, Double Logistic analysis and Savitzky-Golay method. The derived SOS data are compared and analyzed for the ecoregions from China to Russia, and the Dynamic Threshold method is decided to be most suitable for Eurasia scale. Based on the analysis of the changes of vegetation phenology and the response of phenology to climate change from 1982 to 2006, it is concluded that the Dynamic Threshold method has high retrieval rate for the SOS dates in Eurasia, and the data show a stable trend along the latitudinal gradient. The retrieved SOS dates for boreal forests and tundra ecosystems are most stable in the long term, while in the vegetation areas of low latitudes the dates show higher variability. It is found that from 1982 to 2006, there is a trend of SOS dates becoming earlier for the majority of vegetation types, and the forest coverage areas show even stronger trend of SOS dates becoming earlier, with a change rate of 11.45-15.61 days/25 years, due to global warming. With the exception of the closed to open (>15%) shrubland (<5 m), for most other types of vegetation, there is a negative correlation between vegetation phenology and the average temperature of the month. In other words, for each one degree increase, there is 1.32-3.47 days decrease to SOS date in spring, which is consistent with global warming in recent years.

Key words: climate change; phenology; NDVI; SOS; phenology trend; temperature response

本文引用格式:

刘玲玲, 刘良云, 胡勇. 1982-2006年欧亚大陆植被生长季开始时间遥感监测分析. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1433-1442.