DOI: 10.5846/stxb201812252806
胡召玲,戴慧,侯飞,李二珠.中国东北城乡植被物候时空变化及其对地表温度的响应.生态学报,2020,40(12):4137-4145.
Hu Z L, Dai H, Hou F, Li E Z.Spatio-temporal change of urban-rural vegetation phenology and its response to land surface temperature in Northeast China. Acta Ecologica Sinica,2020,40(12):4137-4145.

中国东北城乡植被物候时空变化及其对地表温度的响应

胡召玲*,戴 慧,侯 飞,李二珠
江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 徐州 221116

摘要:以中国东北地区的沈阳、长春、哈尔滨 3 个大城市及其周边的乡村为研究单元,在像元尺度上采用小波变换法对长时间序列中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)数据滤除噪声数据后重建平滑的 EVI 曲线,基于 EVI 曲线,采用动态阈值法提取出研究区 2009—2016 年植被关键物候期参数指标,即植被生长季开始时间(Start of Growing Season, SOS)和结束时间(End of Growing Season, EOS),分析各研究单元植被物候时空变化特征及其对地表温度的响应特征。结果表明:各研究单元 SOS 和 EOS 值的空间分布图存在明显的城乡差异。每一个像元所属的实际位置距离城区中心越近,其 SOS 值越小,EOS 值越大,表明植被生长季开始日期早结束日期晚,整个植被生长期时间变长。各研究单元植被物候参数指标的年际变化趋势具有一定的相似性,即 SOS 随时间均呈现出提前趋势,且城区和乡村的 SOS 年际变化趋势保持一致,变化速率各不相同。研究区 2012 年的 SOS 值是研究时段内的最大值,从植被物候期反映来看,该年是一个最冷年,这与当年受寒潮影响,出现暴雪,低温等极端天气的气候现象相吻合。各研究单元年均地表温度(Land Surface Temperature,LST)与对应的植被关键物候期参数均有显著的相关性,SOS 与 LST 呈显著负相关,EOS 与 LST 呈高度正相关。即植被物候同期的平均温度越高,植被生长季的起始时间越早,结束时间越晚。

关键词:中国东北;MODIS EVI;植被物候;时空变化;地表温度

Spatio-temporal change of urban-rural vegetation phenology and its response to land surface temperature in Northeast China

HU Zhaoling*, DAI Hui, HOU Fei, LI Erzhu
School of Geography, Geomatics & Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, *China*

Abstract: Three large cities in Northeast China (Shenyang, Changchun and Harbin) and their surrounding rural areas are taken as the study units. The wavelet transform method is used to reduce the noise data of long time series Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) enhanced vegetation index (EVI) data and reconstructed smooth EVI curves in pixel scale. Based on EVI curves, the key vegetation phenological parameter indexes from 2009 to 2016, namely the start of growing season (SOS) and the end of growing season (EOS) are extracted by using the dynamic threshold method. The spatio-temporal change of vegetation phenology and their responses to surface temperature in each study unit are analyzed. The results show that the differences in the spatial distribution of the SOS and the EOS in each study unit are significant between urban area and rural area. The area where a smaller value of SOS is taken is consistent with the area where a larger value of EOS is taken, and vice versa. The spatial distribution of vegetation phenology indexes and their geographical locations (either urban or rural) are highly consistent. The closer the actual location of each pixel is to its

基金项目:国家自然科学青年基金项目(41801327)
收稿日期:2018-12-25; **网络出版日期**:2020-04-09
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: huzhaoling@jsnu.edu.cn

urban center, the smaller the SOS value is and the larger the EOS value is, which indicates an early start and a late end of the growing season, that is, a longer growing season. From 2009 to 2016, the average annual SOS values in these 3 cities form an early center in the urban areas and show a tendency of gradual delay from the urban area to the rural area, whereas the average annual EOS values form a late center in urban areas and show a tendency of gradual advance from the urban area to the rural area. The SOS is between the 99th and the 112nd day in urban areas, while the SOS is between the 125th day and the 135th day in rural areas. The time difference of urban-rural SOS is about 3 weeks. The EOS is between the 293rd and the 300th day in urban areas, while the EOS is between the 284th and the 286th day in rural areas. The urban EOS is approximately 2 weeks later than that in rural areas. The inter-annual change trend of vegetation phenological parameter indexes in each study unit has some similarities, that is, SOS shows an early trend with time, and the trend of SOS inter-annual change in urban and rural areas is consistent but with different rate. The maximum of the SOS value during the study period occurred in 2012 in the study areas, which was the coldest year in terms of vegetation phonological indexes and this coincided with the climatic phenomena of extreme weather such as blizzard and low temperature, which were affected by the cold wave in the year. The average annual land surface temperature (LST) of each study unit is significantly correlated with the corresponding vegetation phenological indexes. There is a significant negative correlation between SOS and LST, and a high positive correlation between EOS and LST. The higher the average temperature of the same vegetation phenological period, the earlier the start time of vegetation growth season, and the later the end time of vegetation growth season.

Key Words: Northeast China; MODIS EVI; vegetation phenology; spatio-temporal change; land surface temperature

植被物候是指植被受环境因子和人类活动影响出现的以年为周期的自然现象,是植被长期适应环境季节性变化的结果[1-2]。全球气候变化、地域差异及人类活动都会影响植被关键物候期。因此,植被物候是陆地生态系统过程的重要测度指标,它不仅是探索植被生长周期及其与气候变化响应之间的一个重要参数、环境变化的指示器[3-5],也是研究诸如能量交换、动物栖息地、粮食短缺等生态过程的重要指标[6]。

遥感技术使得受自然环境制约无法到达地区可以进行植被物候动态监测,也使得物候观测对象从植被个体转变为植被生态系统,实现由点向面的空间尺度转换[1]。近年来中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)归一化差值植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)和增强植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)数据已经被用于植被物候参数指标的提取[7-9]。已有研究表明:植被的生长发育与温度间的关系密切,物候期持续的时期与活动积温有显著的相关性[10-12]。在某些地区植被物候对气温的敏感程度高于降水,植物的春季物候与春季温度呈显著负相关[13-14]。目前,对植被物候时空变化方面的研究多集中于一些典型生态区域[15-19],而对城区及其周边乡村的植被物候差异研究相对较少。随着城市化进程的加剧,城市热岛所引起的局地小气候改变,不仅会对生态系统格局、过程及功能产生影响,也会对当地的植被物候期产生影响[20-21]。植被物候沿城乡梯度的变化反映城市化过程对局地水热条件的调节作用[22]。此外,在城市环境下,由于关系到公众健康如人们对某些植物花粉的过敏性反应,因此,研究植被物候具有更重要的意义[23]。

中国东北地区自南向北跨中温带与寒温带,是对气候变化最敏感的区域之一[24],该区域植被物候动态变化对全球气候变化的响应具有重要的指示作用。本文选择中国东北地区的沈阳、长春、哈尔滨 3 个省会大城市及其周边的乡村为研究单元,利用 2009—2016 年 MODIS EVI 数据,计算像元尺度上的植被关键物候期参数指标,即生长季开始时间(Start of Growing Season, SOS)和生长季结束时间(End of Growing Season, EOS),研究年均城乡植被物候期的空间分布特征与差异、各研究单元平均植被物候期及城乡植被物候期随时间的变化趋势、年均地表温度(Land Surface Temperature, LST)与 SOS、EOS 的相关关系。本研究对于监测和保护东北地区生态环境、建设生态文明城市、指示农时以及预测气候变化趋势等方面都具有重要意义。

1　数据来源与处理

1.1　数据来源

以 2009—2016 年长时间序列的 MODIS EVI 和 LST 数据为主要数据源。MODIS 数据集来源于 MOD13A1 和 MYD13A1 产品,空间分辨率为 500 m,平均每 8 天扫描一次。数据集中包含 2 种植被指数数据,即 MODIS NDVI 和 MODIS EVI 数据,EVI 作为改进的植被指数数据,已经经过大气校正和土壤背景校正,相对于 NDVI 而言,其动态取值范围较大。该数据集全年共 46 景,研究区域包括编号为 H26V04、H26V05、H27V04 和 H27V05 的四景分幅影像,全部时间段内共计 1472 景数据。

MODIS 的 MOD11A2 地表温度产品是 3 级数据产品,空间分辨率为 1000 m,主要提供每 8 天的 LST 数据,产品包括白天 LST、夜晚 LST、各 LST 的晴天数量、质量评估数据、观测日期、视角、波段 31 与 32 反射率。选用 8 天的平均周期能有效去除由于观测角度差异带来的误差,且缺值情况较日数据少,其反演得到的地表温度精度的绝对误差在±1K 左右,能够满足本研究的需求。本文的 LST 影像数据共计 1472 景。

1.2　数据预处理

首先对 H26V04、H26V05、H27V04 和 H27V05 四景分幅影像进行影像拼接,获得整个研究区的影像。然后,查询谷歌地图获得这 3 个城市的边界,计算出每个城市的城区面积,设置网格尺寸为 1000 m×1000 m。根据各个城市的中心点坐标确定城市中心位置,沿此中心上下左右各自平移相同数目的网格,使得裁剪出的影像中心城区面积与其周边面积大致相等,进而分别对各个研究单元范围进行裁剪。

由于本文所采用的原始影像的时间分辨率为 8 天,采用线性插值的方法补充在时间上缺失的数据。尽管 MODIS 数据产品已经经过前期预处理,但是处理后的影像仍然会受到电子噪声干扰等的影响,导致 EVI 数据曲线局部具有尖锐的信号值,这些噪声数据均属于无效数据,对于植被物候指标的提取会产生严重影响,不利于时间序列分析。为消除这些噪声信号,本文选取 demy 小波作为小波基对 EVI 时序数据进行小波变换,滤除噪声数据后重建平滑的 EVI 时间序列数据。

2　研究方法

2.1　动态阈值法提取植被关键物候期指标

阈值法通过对植被指数设定阈值条件来确定植被生长季的关键物候期指标 SOS 和 EOS,采用儒略日计数方法,将 SOS 和 EOS 出现的日期转化为距 1 月 1 日的儒略日序数。而动态阈值法则是由于植被指数在植被各阶段生长过程中的变化强度不同,从而可以设定不同的阈值来提取植被的关键物候指标,该方法可以根据研究区植被不同的生理特点,在不计地表的覆盖类型和人为活动的影响程度下,形象地描述植被的生长发育过程。由于研究区所包括的 3 个大城市的生态环境存在差异,故选择动态阈值法提取 SOS 和 EOS 值。结合研究区的实际情况,参考相关文献[17,22]及与地面观测数据相比,将提取 SOS 的植被阈值设定在植被生长过程的 25%左右,提取 EOS 的植被阈值设定在植被衰败过程的 25%左右,其计算公式如下:

$$EVI(SOS) = (EVI_{max} - EVI_{min1}) \times 25\% \quad (1)$$

$$EVI(EOS) = (EVI_{max} - EVI_{min2}) \times 25\% \quad (2)$$

式(1)中 EVI(SOS)表示提取 SOS 的植被指数阈值,EVI_{max}表示植被指数最大值,EVI_{min1}表示 EVI 曲线上升阶段植被指数最小值;式(2)中 EVI(EOS)表示提取 EOS 的植被指数阈值,EVI_{min2}表示 EVI 曲线下降阶段植被指数最小值,当动态阈值达到最大与最小 EVI 差值的 25%时,提取出 SOS 和 EOS 值。

2.2　趋势分析法

采用一元线性回归法拟合线性函数用以表示植被物候指标的时序变化趋势,其公式为:

$$y = kx + b \quad (3)$$

其中，

$$k = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} x_i \sum_{i=1}^{n} y_i}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2} \quad (4)$$

式(3)中自变量 x 表示年份，即为 2009—2016 年的计数，因变量 y 表示 SOS 和 EOS，n 表示年份数。k 为研究时段内某一个像元 SOS 和 EOS 的变化趋势，若 $k>0$ 时，表明植被物候期具有上升趋势，即植物物候期时间推迟；若 $k<0$ 时，表明该植被物候期具有下降趋势，即植被物候期具有提前趋势。

3 结果分析

3.1 植被关键物候期的空间分布特征

根据滤波重建后的 EVI 指数时间序列数据，由动态阈值法计算出 2009—2016 年间各个城市植被物候的年均生长日期 SOS 和结束日期 EOS，获得各城市植被关键物候期空间分布图(图 1)。

由图 1 可见，虽然各研究单元的植被关键物候期分布形态有所不同，但 SOS 和 EOS 的空间分布均呈现出相似的分布特征，每个城市 SOS 取较小值所在的区域与 EOS 取较大值所在的区域相一致，而 SOS 较大时，EOS 较小。植被物候指标的空间分布与所处位置属于城区还是乡村具有高度的一致性，距离城区中心越近，其 SOS 越早，EOS 越晚，变化也越明显。2009—2016 年间这 3 个城市的年均 SOS 形成一个以城区为中心的早期中心，并呈现出由城区向乡村 SOS 逐渐延后的变化特征；年均 EOS 形成一个以城区为中心的晚期中心，同时呈现出由城区向乡村逐渐提前的变化特征。这种变化特征表明植被物候的梯度分布和下垫面覆盖类型密切相关。

从图 1 中还可以看出，各大城市的植被关键物候期空间分布存在明显的城乡差异，城区的 SOS 均早于乡村，城区的 EOS 均比乡村晚。对每个城市的植被物候参数指标进行统计分析，得到年均城乡植被物候参数指标(表 1)。从表 1 中可以看出，城区 SOS 大多集中在第 99—112 天左右，乡村的 SOS 主要集中在第 125—135 天左右，城区和乡村大致相差 20 d 的时间；城区 EOS 主要集中在第 293—300 天左右，乡村 EOS 主要集中在第 284—286 天左右，城区的 EOS 大致比乡村推迟 14 d 左右，城区植被生长季长度(Length of Growing Season，LGS)比乡村长 32—44 d。长春市城区的 SOS 值最小，沈阳市乡村的 SOS 值最小，表明其植被生长季开始得最早。

表 1 年均城乡植被物候参数指标

Table 1 Annual average parameter indexes of urban-rural vegetation phenology

研究单元 Study unit	城区 Urban area			乡村 Rural area			城乡差 Urban-rural difference		
	SOS/d	EOS/d	LGS /d	SOS/d	EOS/d	LGS /d	SOS/d	EOS/d	LGS /d
哈尔滨	112	293	181	135	284	149	23	9	32
长春	99	298	199	130	285	155	31	13	44
沈阳	103	300	197	125	286	161	22	14	36

SOS：生长季开始时间 Start of growing season；EOS：生长季结束时间 End of growing season；LGS：生长季长度 Length of growing season

3.2 植被关键物候期的时间变化分析

计算出每一年份各研究单元城区及其周边乡村整体的 SOS 平均值和 EOS 平均值后，以年份为自变量，SOS 平均值、EOS 平均值为因变量分别进行一元线性回归，获得植被物候指标的整体年际变化趋势图(图 2)。从图 2 中可以看出，各个城市的 SOS 均呈提前趋势。2012 年哈尔滨和长春的 SOS 值均是一个峰值，即生长季开始得最晚，通过查阅气象资料，可知受西伯利亚强冷空气影响，这两个城市所在区域出现寒潮、暴雪、低温等极端天气现象，导致植被延迟生长。2012 年是这两个城市 8 年中最冷的一年，SOS 恰好印证了这一气候现象。相比其他年份而言，沈阳 2012 年的 SOS 取值也较大，表明其在一定程度上也受到寒潮的影响。哈尔滨 EOS 呈延迟趋势，而长春和沈阳则表现为提前结束的趋势，哈尔滨和长春的 EOS 在 2011 年达到这 8 年中的

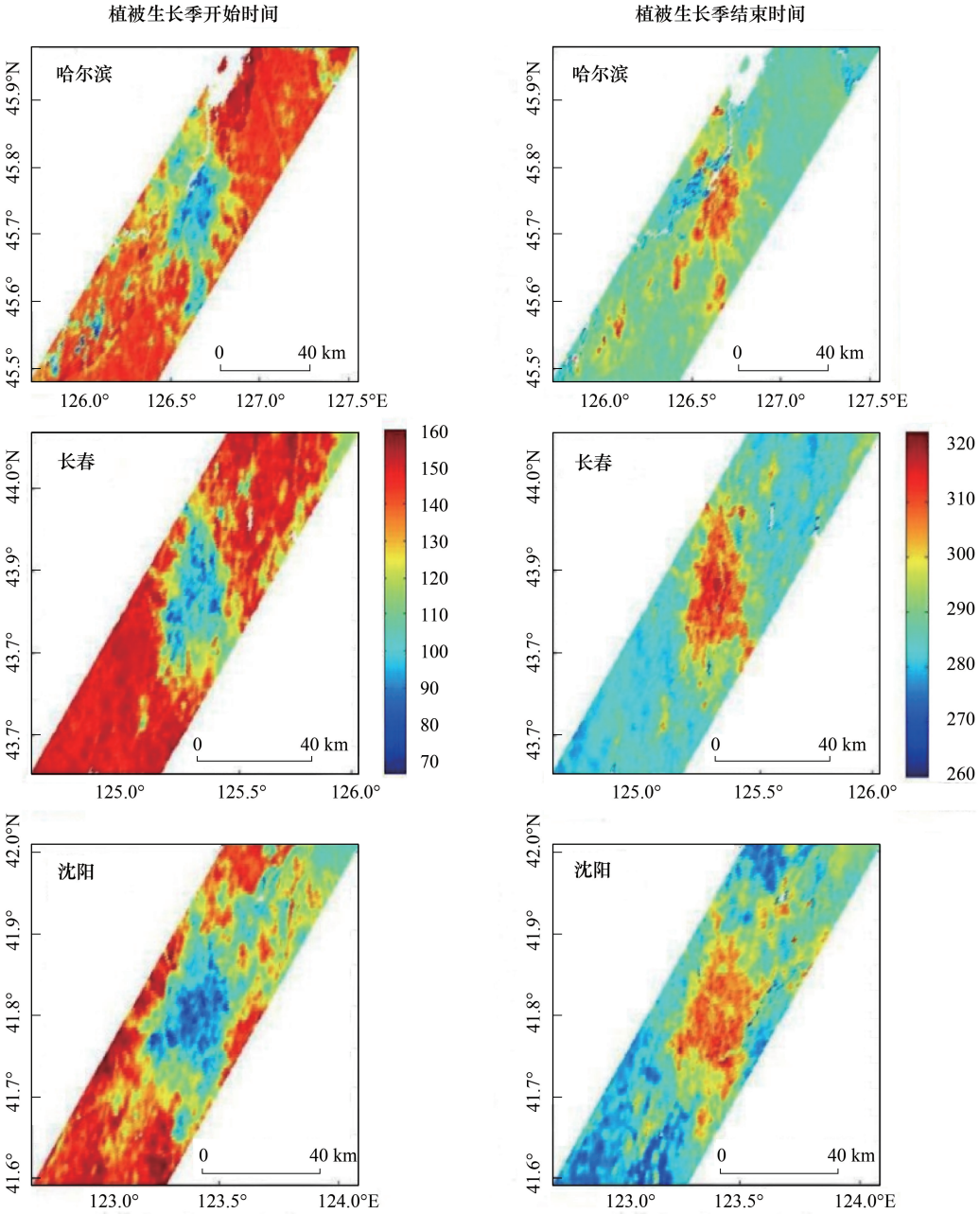

图 1　各城市植被关键物候期空间分布图

Fig.1　Spatial distribution maps of vegetation phenology in major cities

SOS:生长季开始时间 Start of growing season; EOS:生长季结束时间 End of growing season

最低值。这些现象说明了各大城市植被物候年际变化与当地的气候条件密不可分,由于各城市植被物候受区域气候差异的影响,从而表现出不同的变化趋势。

计算出每一年份 3 个研究单元即各城市的城区及其周边乡村植被物候参数 SOS、EOS 平均值,利用趋势分析法获得 2009—2016 年间城乡物候年际变化曲线图(图 3)。

从图 3 中可以看出,所有城市城区的 SOS 值都比乡村的小,表明其植被物候期早,并且城乡的 SOS 年际变化都呈下降趋势,植被物候表现为一致提前。城区 SOS 的年际变化速率均大于乡村的变化速率。这 3 个城市的城区和乡村在 2014 年的 SOS 取值均较小,说明这一年的春天是研究时段内较暖的一年。这是由于 2014 年东北地区受到中强度厄尔尼诺的影响,春天普遍温暖,从而促使植被提早进入生长。尽管所有城市城

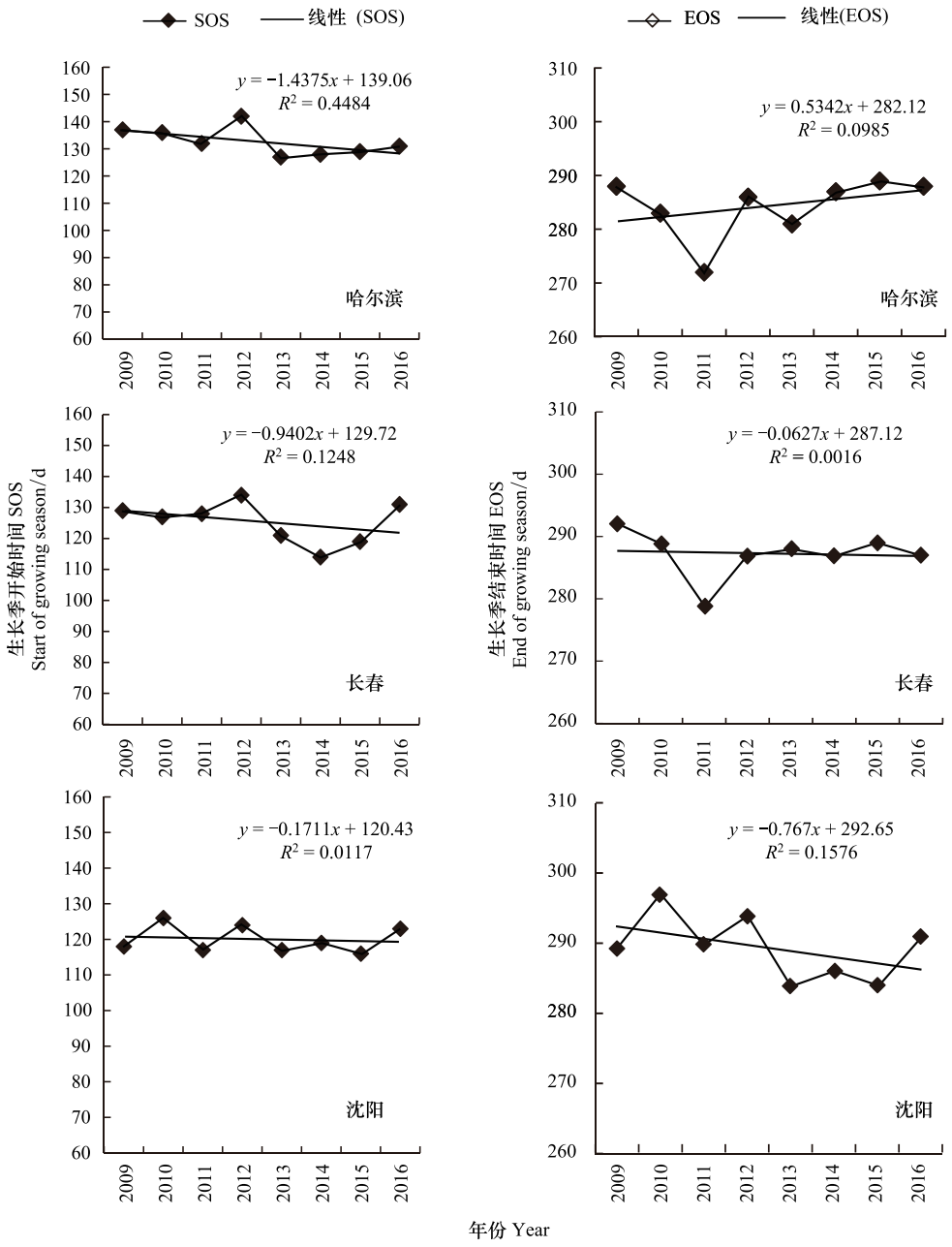

图 2 2009—2016 年整体 SOS 和 EOS 的年际变化图

Fig.2 The annual change of overall SOS and EOS from 2009 to 2016

区的 EOS 都比乡村晚,但是同一城市的城乡 EOS 的年际变化趋势表现并不一致。这一现象说明,城乡 EOS 年际变化不仅与当地气候条件有关,还可能与各城市不同地理位置的植被种类有关,不同的植被种类,其生长结束期也不相同。

3.3 地表温度与植被物候的响应关系

为了研究地表温度与植被物候指标之间的关系,根据各研究单元每个网格的年均 LST、年均 SOS 和 EOS,分别计算出 LST 与 SOS、LST 与 EOS 相关系数 r 如表 2 所示。r 反映了年均地表温度对植被物候指标的响应程度,r 为正值时,表示植被物候期推迟,其值越接近于 1,推迟越显著;r 为负值时,表示植被物候期提前,其绝对值越接近于 1,则表明植被物候期提前愈明显。

从表 2 可以看出,植被的 SOS 与 LST 呈显著负相关,即一个时间段内的城市的平均温度越高,植被物候

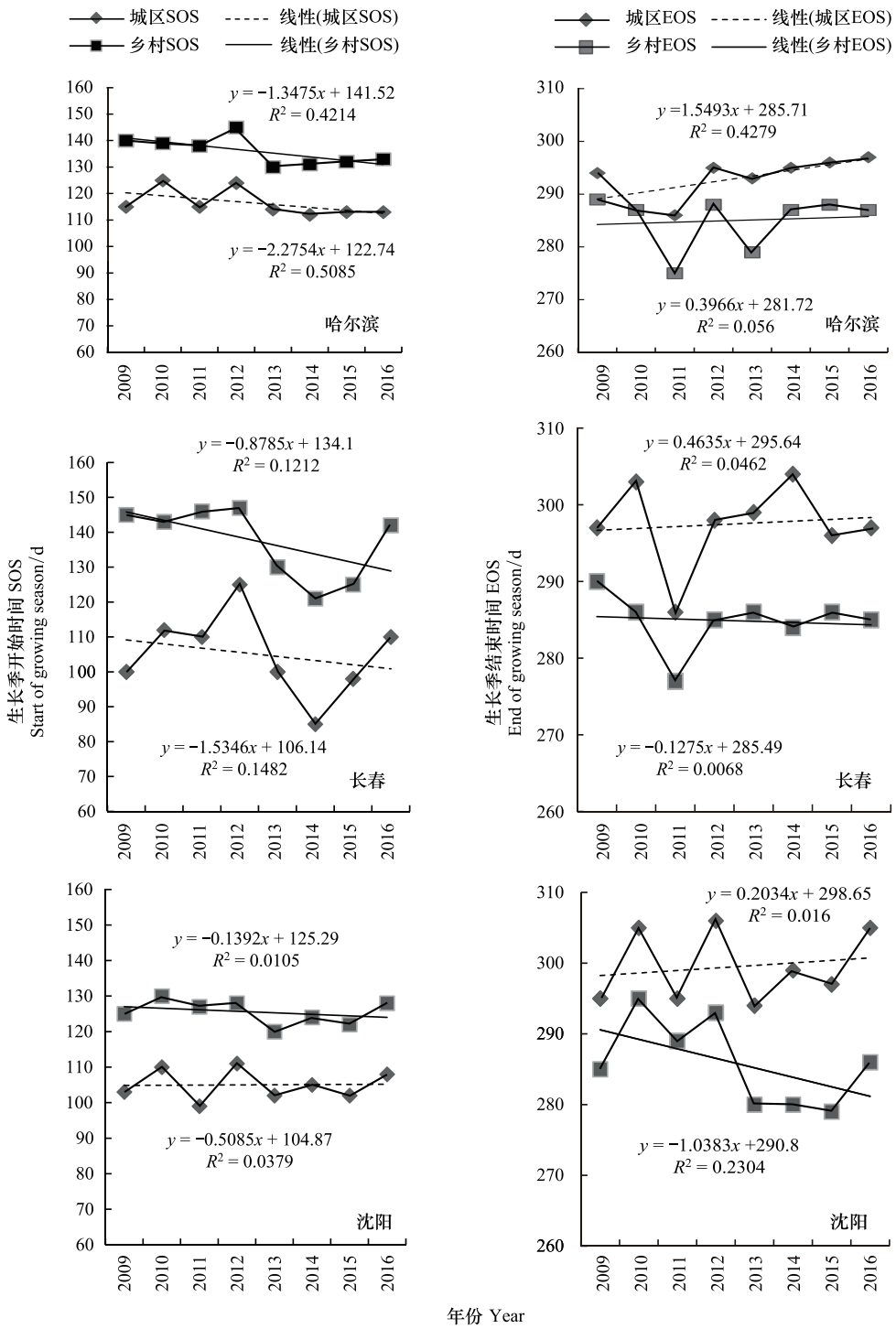

图 3　2009—2016 年城区和乡村 SOS 和 EOS 的年际变化

Fig.3　The annual change of SOS and EOS in urban and rural areas from 2009 to 2016

期的起始时间越早。不同城市年均地表温度与 SOS 的相关系数不同,表明年均地表温度对 SOS 的响应程度不同,由高到低依次为哈尔滨、长春、沈阳。EOS 与 LST 呈高度正相关,即植被物候同期的地表温度越高,植被物候结束时间越晚。年均地表温度对 EOS 的响应程度由高到低依次为长春、哈尔滨、沈阳。不同城市的年均地表温度对 SOS 和 EOS 的响应程度并不相同,这与各城市所在的区域气候有关。

表 2 LST 与 SOS、EOS 的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between LST and SOS、EOS

研究单元 Study unit	物候期指标 Phenology index	相关系数 r Correlation coefficient r	研究单元 Study unit	物候期指标 Phenology index	相关系数 r Correlation coefficient r
哈尔滨	SOS	-0.70	沈阳	SOS	-0.28
	EOS	0.65		EOS	0.39
长春	SOS	-0.69			
	EOS	0.72			

LST:地表温度 Land surface temperature

4 结论

(1)各研究单元 SOS 与 EOS 的空间分布均呈现出相似的分布特征。植被物候空间分布与城区和乡村的分布具有高度的一致性。植被物候参数指标空间分布存在明显的城乡差异,城区的 SOS 均早于乡村,EOS 则晚于乡村。每一个像元所对应的实际位置,距离城区中心越近,其 SOS 值越小,EOS 值越大,表明植被生长季开始日期早结束日期晚,整个植被物候生长期时间变长。各研究单元植被物候指标的年际变化具有一定的相似性,即 SOS 随时间均呈现出提前趋势,且城区和乡村的 SOS 年际变化趋势保持一致,变化速率各不相同。

(2)2012 年哈尔滨和沈阳的 SOS 值均是研究时段内的最大值,从植被物候期反映来看,该年是一个最冷年,这与当年的气候现象相吻合,由于受寒潮影响,出现暴雪,低温等极端天气,导致植被相比较于其他年份延迟生长。

(3)各研究单元年均地表温度与对应的植被关键物候期均有显著的相关性,SOS 与 LST 呈显著负相关,即与植被物候同期的平均温度越高,植被物候期的起始时间越早。EOS 与 LST 呈高度正相关,即与植被物候同期的地表温度越高,植被物候期结束时间晚,因此,东北地区植被物候对温度变化的响应更为显著、更具代表性。不同城市的年均地表温度与植被关键物候期的相关性并不相同,这主要是受到全球气候变化、区域气候变化及城市热岛效应共同影响作用的结果。

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究所张学珍副研究员提供部分研究数据。

参考文献(References):

[1] 项铭涛, 卫炜, 吴文斌. 植被物候参数遥感提取研究进展评述. 中国农业信息,2018,30(1):55-66.

[2] 曹沛雨, 张雷明, 李胜功, 张军辉. 植被物候观测与指标提取方法研究进展. 地球科学进展,2016,31(4):365-376.

[3] Tateishi R, Ebata M. Analysis of phenological change patterns using 1982—2000 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(12): 2287-2300.

[4] 玛地尼亚提·地里夏提, 玉素甫江·如素力, 姜红. 2001—2014 年博斯腾湖流域植被物候时空变化及其驱动因子. 生态学报, 2018,38(19):6921-6931.

[5] 卓莉, 张子彦, 雷小雨, 李秋萍, 陶海燕. 基于蒙特卡洛生存分析探究东北森林物候的影响因素. 地理学报,2019,74(3):490-503.

[6] Adole T, Dash J, Atkinson P M. A systematic review of vegetation phenology in Africa. Ecological Informatics, 2016, 34: 117-128.

[7] 左璐, 王焕炯, 刘荣高, 刘洋, 商荣. 基于不同光谱指数的植被物候期遥感监测差异. 应用生态学报, 2018,29(2):599-606.

[8] Thompson J A, Paull D J. Assessing spatial and temporal patterns in land surface phenology for the Australian Alps (2000-2014). Remote Sensing of Environment, 2017, 199: 1-13.

[9] Liao C H, Wang J F, Dong T F, Shang J L, Liu J G, Song Y. Using spatio-temporal fusion of Landsat-8 and MODIS data to derive phenology, biomass and yield estimates for corn and soybean. Science of the Total Environment, 2019, 650: 1707-1721.

[10] Zheng C, Tang X G, Gu Q, Wang T X, Wei J, Song L S, Ma M G. Climatic anomaly and its impact on vegetation phenology, carbon sequestration and water-use efficiency at a humid temperate forest. Journal of Hydrology, 2018, 565: 150-159.

[11] Seyednasrollah B, Swenson J J, Domec J C, Clark J S. Leaf phenology paradox: why warming matters most where it is already warm. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 446-455.

[12] 王连喜, 陈怀亮, 李琪, 余卫东. 植物物候与气候研究进展. 生态学报,2010,30(2):447-454.

[13] 邓晨晖, 白红英, 高山, 黄晓月, 孟清, 赵婷, 张扬, 苏凯, 郭少壮. 1964-2015 年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应. 地理学报,2018,73(5):917-931.

[14] Workie T G, Debella H J. Climate change and its effects on vegetation phenology across ecoregions of Ethiopia. Global Ecology and Conservation, 2018, 13: e00366.

[15] Jin H X, Jönsson A M, Bolmgren K, Langvall O, Eklundh L. Disentangling remotely-sensed plant phenology andsnow seasonality at northern Europe using MODIS and the plant phenology index. Remote Sensing of Environment, 2017, 198: 203-212.

[16] Zu J X, Zhang Y J, Huang K, Liu Y J, Chen N, Cong N. Biological and climate factors co-regulated spatial-temporal dynamics of vegetation autumn phenology on the Tibetan Plateau. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 69: 198-205.

[17] 张晓东, 朱文博, 张静静, 朱连奇, 赵芳, 崔耀平. 伏牛山地森林植被物候及其对气候变化的响应. 地理学报,2018,73(1):41-53.

[18] Pierre C, Grippa M, Mougin E, Guichard F, Kergoat L. Changes in Sahelian annual vegetation growth and phenology since1960: a modeling approach. Global and Planetary Change, 2016, 143: 162-174.

[19] Li P, Peng C H, Wang M, Luo Y P, Li M X, Zhang K R, Zhang D L, Zhu Q. Dynamics of vegetation autumn phenology and its response to multiple environmental factors from 1982 to 2012 on Qinghai-Tibetan Plateauin China. Science of the Total Environment, 2018, 637-638: 855-864.

[20] 蔡红艳, 杨小唤, 张树文. 植物物候对城市热岛响应的研究进展. 生态学杂志, 2014,33(1):221-228.

[21] 王静, 常青, 柳冬良. 早春草本植被开花物候期对城市化进程的响应——以北京市为例. 生态学报,2014,34(22):6701-6710.

[22] 邱嘉琦, 房磊, 杨健. 基于遥感的东北植被物候沿城乡梯度变化. 生态学杂志,2017,36(6):1699-1707.

[23] Li X C, Zhou Y Y, Asrar G R, Meng L. Characterizing spatiotemporal dynamics in phenology of urban ecosystems based on Landsat data. Science of the Total Environment, 2017, 605-606: 721-734.

[24] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. 基于 SPEI 指数的 1961—2014 年东北地区气象干旱时空特征研究. 生态学报,2017,37(17):5882-5893.