

DOI: 10.20103/j.stxb.202304070698

缪丽娟, 余志巍, 何昱, 张宇阳. 中国城市植被物候变化及其对地表温度的响应. 生态学报, 2024, 44(6): 2479-2494.

Miao L J, Yu Z W, He Y, Zhang Y Y. Spatiotemporal variations in vegetation phenology across Chinese major cities and its response to surface temperature. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6): 2479-2494.

中国城市植被物候变化及其对地表温度的响应

缪丽娟*, 余志巍, 何昱, 张宇阳

南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044

摘要: 量化植被物候与城市化进程之间的关系对探索人类活动对城市生态系统的影响至关重要。以中国 35 个城市及周边区域为研究对象, 基于中分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 提供的归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 采用 Savitzky-Golay 滤波和动态阈值法提取 2000—2020 年研究区植被返青期 (Start of Growing Season, SOS) 和枯黄期 (End of Growing Season, EOS)。并分析不同城市规模、不同距离城市的植被物候变化对陆地地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 与不透水面 (Impervious Surface Area, ISA) 的响应差异。研究发现: (1) 2000—2020 年, 中国城市城区植被 SOS 和 EOS 分别以 0.17d/a 和 0.15d/a 的速率推迟。根据城市规模的不同, 大城市和中等城市物候期呈推迟趋势, 而超大城市、特大城市和小城市呈提前趋势。51% 的城市植被 SOS 提前, 主要分布在中国华北、西北及南部地区, 其他地区城市植被 SOS 推迟 (49%), 80% 的城市植被 EOS 推迟。空间上看, 东部和南部平原地区城市植被 SOS 比西北部地区早 (早于第 91 天), 而 EOS 则比较晚 (晚于第 314 天), 而西部和北部城市植被 SOS (晚于第 91 天) 和 EOS (早于第 314 天) 呈相反态势; (2) 距离城区越近, 63% 的城市表现为植被 SOS 提前 (0.6—4.3 d/km), 60% 的城市表现为植被 EOS 推迟 (0.2—1.9 d/km); (3) 所有城市春季 LST 均呈现增长趋势, 春季 Δ LST 每增长 1℃, SOS 提前 6.8 d。秋季 Δ LST 每增长 1℃, EOS 推迟 1.5 d。城市植被 SOS 与 ISA 占比显著负相关, ISA 占比增长 1%, 植被 SOS 提前 0.253 d, 植被 EOS 与 ISA 占比显著正相关, ISA 占比每增长 1%, 植被 EOS 推迟 0.106 d。此外, 不同人口规模的城市植被物候对 LST 和 ISA 响应存在差异, 大城市和超大城市植被物候对 LST 和 ISA 占比的响应比其他城市更为敏感, 表明特大城市和大城市在城郊梯度上植被物候期对 LST 与 ISA 占比响应更为明显。

关键词: MODIS NDVI; 物候变化; 地表温度; 不透水面; 城市化; 中国城市

Spatiotemporal variations in vegetation phenology across Chinese major cities and its response to surface temperature

MIAO Lijuan*, YU Zhiwei, HE Yu, ZHANG Yuyang

School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Quantifying the relationship between vegetation phenology and urbanization level is crucial for exploring the impact of human activities on urban ecosystems. Here, we focused on the vegetation phenology of China's 35 typical cities and their surrounding areas. Based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) provided by the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), the Start of Growing Season (SOS), and the End of Growing Season (EOS) were extracted from the study area from 2000 to 2020 by Savitzky-Golay filter and dynamic thresholding method. The spatiotemporal variations of vegetation phenology in China's cities were analyzed in their urban-rural gradients, and the responses of phenology to Land Surface Temperature (LST) and Impervious Surface Area (ISA) in cities with different population sizes were compared as well. Results found that: (1) between 2000 and 2020, the SOS and EOS of urban

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (42101295); 江苏省科技计划项目 (BK20210657); 江苏省高校面上项目 (21KJB170003)

收稿日期: 2023-04-07; **网络出版日期:** 2023-12-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: miaolijuan1111@gmail.com

vegetation generally exhibited a delaying trend with rates of 0.17 d/a and 0.15 d/a, while the SOS of megacities, megapolis, and small cities advanced particularly. The SOS of most southern cities and some cities in North China showed an advanced trend, and over 80% of the cities' EOS delayed. Overall, the SOS in the eastern and southern plains appeared earlier (average at DOY 91), while EOS appeared later (average at DOY 314), and SOS and EOS in the western and northern urban regions expressed an opposite trend. (2) In 63% of the analyzed cities, SOS advanced as the distance from the urban area shortened (0.6—4.3 d/km), while in 60% of these cities, EOS delayed (0.2—1.9 d/km) as the distance to the urban area decreased. (3) The spring LST of all cities presented a consistent increasing trend. For every 1°C increase of Δ LST in spring, the SOS advanced 6.8 days. For every 1°C increase in autumn Δ LST, EOS delayed 1.5 days. There was a significantly negative correlation between urban vegetation SOS and ISA proportion, with a 1% increase in ISA proportion causing a 0.253-day advance in SOS. Additionally, there was a significantly positive correlation between the vegetation EOS and ISA proportion, and when the proportion of ISA increased by 1%, EOS delayed by 0.106 days. Furthermore, there were differences in the response of vegetation phenology to LST and ISA in cities with different population sizes. The influence of LST and ISA in the megapolis and big cities was higher than that in the other three size cities, indicating that the vegetation phenology in the megapolis and big cities was more sensitive to LST and ISA in the urban-rural gradient.

Key Words: MODIS NDVI; phenology; surface temperature; impervious surface area; urbanization; Chinese cities

植被物候是植物长期适应环境季节性变化形成的生长发育节律^[1]。它不仅在陆地生态系统水碳循环中发挥着关键作用,并且是植物自身生长周期及其对气候变化响应的重要指标与植被生长环境的指示器^[2-3]。城市植被物候变化对净初级生产力^[4]、花期变化^[5]等生态过程至关重要。传统物候观测主要基于地面物候观测站点来记录植物生长发育过程中的阶段,包括发芽、展叶、开花、结实、叶黄和落叶等^[6]。传统物候观测方法具有操作简单、直观精准记录植物生长过程信息的优点^[7]。但观测过程需耗费大量人力物力,且存在空间分布不均匀、周期短和覆盖范围小的不足,难以获取大尺度长时间的数据进行植被物候监测^[6]。相较传统物候观测,基于遥感的物候观测具有多时相、时空连续性强、覆盖范围广等优势,这使得物候观测对象能够实现由植株个体到区域甚至全球的研究尺度转换^[8-9]。因此,遥感手段被广泛应用于植被物候监测及其时空变化特征研究^[10-11]。

大量研究表明气候因子是影响植被物候变化的主导因素^[12-13],尤其是温度和降水对物候年际动态变化影响显著^[14],它们影响着陆地地表过程,如陆地碳循环^[15-16]、植被动态^[17]以及公共卫生^[18]。此前植被物候相关研究多数关注典型生态区^[10, 19],而对中国城市及其周边区域植被物候规律和影响因素研究较少。相较于自然生态系统,城市生态系统内部的植被同时受全球气候变暖和城市热岛的双重影响^[20]。随着近年来城市化进程的推进和人类活动的加剧^[21],城市热岛、城市用地扩张、夜间灯光污染等现象重塑局地水热环境,引起城市局地气候发生改变^[22-23]。这不仅对生态系统格局、过程及功能影响加剧^[24-25],也影响着城市及其周边区域植被物候期^[5]。加快的城市化进程将带来城区植被返青期(Start of the season, SOS)提前、枯黄期(End of the season, EOS)推迟^[13]。未来全球变暖将持续加剧,目前由于人们对影响植被物候的潜在机制的认识有限,因此对未来植被物候变化的定论仍不确定^[26-27]。由于城市气候与全球气候变化存在相似性,前人将城市环境作为全球气候变化实验室,预测未来植被物候对气候变化的响应,能为未来气候变化对物候影响研究提供早期预警与研究方法参考^[17, 24, 28]。此外,城市植被物候变化关系公众健康问题如对花粉过敏人群的健康^[29],以及到城市鸟类的居住与迁徙^[30]。因此,研究城市植被物候对城市化的响应过程与机制对保护生态与人文环境至关重要。

前期研究关注植被物候影响要素的研究主要集中在探讨其与气候要素之间的关系,并且多数研究针对典型生态区进行^[31],而对于城市物候的研究相对较少,只有少量研究聚焦于单一城市或发展水平较高的长三角、京津冀城市群植被物候。不同发展水平城市植被对城市化的响应是否一致,缺少关注不同规模城市植被

物候在城郊梯度上的差异以及对城市化响应是否存在差异的研究。因此,研究选取中国 35 个城市及其周边区域为研究对象,利用 MODIS NDVI 资料提取 2000—2020 年植被物候参数,包括 SOS 和 EOS,以城市常住人口数为统计口径将城市划分为五类,定量分析不同规模城市植被物候时空变化特征及其对城市化的响应。研究中国 35 个城市植被物候变化及不同规模城市植被物候差异及对城市化的响应,我们可以更加全面地认识人类活动对生态环境的影响,对深入理解城市化进程中的生态环境问题具有重要的意义。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

中国地处东亚季风区,气温随纬度增加呈现梯度性降低,降水从东南沿海向西北内陆呈现梯度性减少,受地形的特殊影响,其气候类型复杂多样。过去几十年中国经历了快速的城市化进程,伴随人口从农村向城镇转移,城市人口高度集中以及城市建设用地扩张,城市热岛效应显著增强,城市地表温度显著高于周边郊区^[32—33]。本项研究选取中国 35 个城市及其周边区域,35 个城市包括 26 个省会城市、4 个直辖市、4 个地级市和 1 个城市群(珠三角城市群涵盖广州、深圳、东莞和中山),常住人口达 3 亿人,占全国常住人口的 22%,并创造了 33395 亿元 GDP,占全国 GDP 总量的 33%^[34]。据国务院 2014 年发布的《国务院关于调整城市规模划分标准的通知》^[35],以研究期间中间年份 2010 年的城区常住人口为统计口径,将城市划分为五类,分别为超大城市、特大城市、大城市、中等城市和小城市(如表 1)。

表 1 城市类型划分标准与 35 个城市划分结果
Table 1 Classification criteria of urban categories for 35 cities

城市类型 City type	城区常住人口数/万人 Number of permanent residents in urban areas	城市数量/个 Number of cities	分类结果 Classification results
超大城市 Megacities	>1000	3	北京、上海、珠三角
特大城市 Megalopolis	500—1000	14	成都、南京、武汉、天津、重庆、沈阳、西安、杭州、郑州、济南、长春、太原、昆明、合肥
大城市 Metropolis	100—500	13	哈尔滨、福州、呼和浩特、长沙、乌鲁木齐、石家庄、贵阳、南宁、兰州、南昌、海口、西宁、银川
中等城市 Medium cities	50—100	2	宜昌、桂林
小城市 Small cities	<50	3	大理、沧州、拉萨

1.2 数据来源

1.2.1 MODIS NDVI

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI 产品 MOD13A2(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v006/>)由美国国家和海洋大气局(NOAA,National Oceanic and Atmospheric Administration)提供,其空间和时间分辨率分别为 1 km 和 16 d,时间跨度为 2000—2020 年。该数据集具有时间上连续、空间分辨率较高等优点,且被广泛应用于植被长势监测方面的研究^[36—37]。

1.2.2 地表温度资料

2000—2020 年陆地地表温度(Land Surface Temperature, LST)资料来自 NASA' s Terra 卫星的 MODIS 产品 MOD11A2(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a2v006/>)。该数据集提供了空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 8 d 的晴朗天气条件下的陆地地表温度平均值。研究提取了春季(3—5 月)和秋季(9—11 月)的平均气温。其中 2000 年 MOD13A2 产品起始于 2000 年 2 月 19 日,存在三幅影像缺失,在物候计算滤波前使用线性插值方法填补在时间上缺失的数据。

1.2.3 城市边界资料

城市边界资料来源于宫鹏教授研究组 2020 年发布的全球城市边界数据集(GUB:Global Urban Boundary)(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>)。GUB 是从全球高分辨率的人造不透水面(ISA:Impervious Surface Area)制

图产品中提取的城市边界矢量数据。GUB 数据基于全球一致的边界定义和绘制方法,通过算法能自动地根据不透水面的分布进行边界划定。相较于人工解译,GUB 能较好地捕获城乡边缘地区的轮廓^[38]。

此前研究表明,城市化对城市植被影响的足迹在距离城市外围 20 km 以内^[39],为便于分析城市及其周边区域植被物候变化,研究范围将城区边界向外延伸 20 km 构建缓冲区,以便分析植被物候在城郊梯度上的差异。

1.2.4 土地利用资料

研究使用高分辨率的土地利用数据集(China Land Cover Dataset, CLCD)(<https://www.zenodo.org/>),该数据集发布于 Earth System Science Data,空间分辨率为 30 m,时间跨度为 2000—2020 年,是当前时间、空间分辨率高且时间跨度连续的土地利用数据^[40]。CLCD 提供的土地利用类型包含了农田、森林、灌木、草原、水体、雪和冰、瘠地、不透水面和湿地。城市不透水面占比是通过计算城市内不透水面像元面积与像元总面积的比值获得。

2 研究方法

2.1 植被物候参数的提取

最大值合成法得到的 MOD13A2 NDVI 产品能有效削减云、大气和太阳高度角等带来的噪音,但无法完全消除传感器本身以及其他外界因素的影响,导致此时植被指数与地表真实植被生长规律出现偏差^[7]。因此,在像元尺度上,使用 Savitzky-Golay(S-G)滤波法对 NDVI 时序数据进行平滑处理,通过包络滤波迭代过程消除序列中偏离正常生长趋势的噪声,从而得到能更好描述植被生长情况的拟合曲线。S-G 滤波计算公式如下:

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-n}^n C_j Y_{j+i}}{N} \quad (1)$$

式中, Y_{j+i} 为滑动窗口的第 j 个原始 NDVI 数据, Y_j^* 为重建后的 NDVI 时序数据, C_j 为第 i 个 NDVI 滤波系数, N 为拟合阶次与滑动窗口的大小($2n+1$)相等。

基于重建的 NDVI 时间序列,借助季节振幅的动态阈值法提取 SOS 和 EOS。根据植被生理特征,动态阈值法将植被生长阶段达到振幅一定比例的时间确定为植被生长季的物候期 SOS 和 EOS,该方法被广泛应用于植被物候参数的提取^[7, 41—42]。据前人关注中国城市的研究,多将振幅 20% 作为提取物候参数的阈值^[13, 43—46]。如图 1,将 NDVI 左右两个最小值($NDVI_{minl}$ 和 $NDVI_{minr}$)和最大值($NDVI_{max}$)之差定义为振幅,在 NDVI 上升阶段时,当 NDVI 达到当年最大值左边拟合曲线的最小值加振幅的 20% 时,将该点所对应的时间定义为 SOS,在 NDVI 下降阶段,当 NDVI 达到当年最大值右边拟合曲线的最小值加振幅的 20% 时,将该点对应的时间定义为 EOS。由于城市地表条件复杂加之受到自身及外界影像导致的遥感影像质量问题,在经平滑降噪后得到的物候期仍存在一些异常值,为了减少异常值带来的不确定性,参考前人研究,剔除 SOS 早于第 50 天与晚于第 180 天的像元及 SOS 早于第 240 天与晚于第 330 天的像元^[47—48]。

2.2 T-sen 和 M-K 趋势分析

Theil-Sen 斜率(T-sen)是一种非参数估计方法,用来计算长时间序列数据的变化趋势^[49]。Mann-Kendall 趋势检验法(M-K)是一种非参数统计方法,由于具有对数据序列无特定分布要求且受异常值干扰影响较小^[50]的优势,被广泛应用于时间序列趋势显著性检验^[10, 45]。T-sen 计算公式如下:

$$B = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (2)$$

式中, x_j 和 x_i 为时序数据, $\beta > 0$ 表示物候期呈推迟趋势, $\beta < 0$ 表示物候期呈提前趋势。

Mann-Kendall 趋势检验计算公式如下:

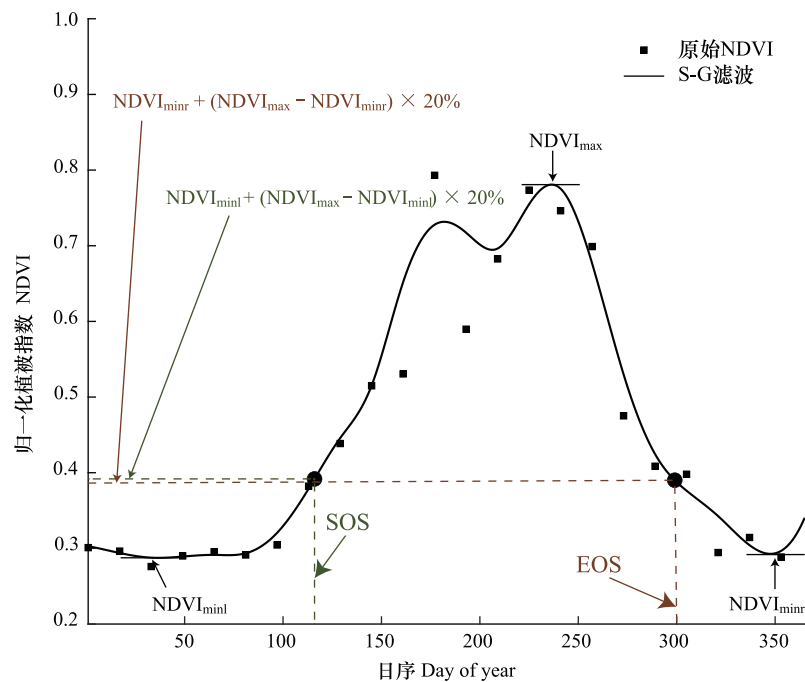


图 1 基于 S-G 滤波重构归一化植被指数时间序列的物候提取示意图

Fig.1 Schematic diagram illustrating the extractions of phenology from NDVI time series using SG filtering

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index;SOS:返青期 Start of growing season;EOS:枯黄期 End of growing season;NDVI_{minl}:归一化植被指数左侧最小值 Left minimum value of normalized difference vegetation index;NDVI_{minr}:归一化植被指数右侧最小值 Right minimum value of normalized difference vegetation index;NDVI_{max}:归一化植被指数最大值 Maximum value of normalized difference vegetation index

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中, n 为时间序列长度, $\text{sgn}(x_j - x_i)$ 为符号函数。取显著性水平 $\alpha = 0.05$, 当 $|Z_c| > |Z_{(1-\alpha)/2}|$ 时, 拒绝原假设, 时间序列存在显著变化趋势。结合 T-sen 斜率和 M-K 检验结果, 将全国物候期的年际变化趋势分为两种类型: 显著提前 ($T\text{-sen} < 0, P < 0.05$) 和显著推迟 ($T\text{-sen} > 0, P < 0.05$)。

2.3 城市化对城市植被物候的影响

为分析城市及其周边区域植被物候变化, 在每个城市边界外构建 0—1 km、1—2 km、2—5 km、5—10 km、10—15 km、15—20 km 和 20—25 km 这七个缓冲区, 城区为城市边界内部区域, 缓冲区包括郊区 (0—1 km、1—2 km、2—5 km、5—10 km、10—15 km、15—20 km) 和农村 (20—25 km) [47,51]。通过对比城区、缓冲区和农村间的物候差异, 来反映物候参数对城市化的响应, 公式如下:

$$\Delta P = P_i - P_r \quad (7)$$

式中, P_i 表示城区和郊区内各缓冲区的物候参数, P_r 为农村的物候参数, ΔP 即为城区、郊区与农村间的物候差异。当 P 表征 SOS 时, P_i 为城区和郊区植被 SOS, P_r 为农村植被 SOS, 若 $\Delta P < 0$, 即城区和郊区植被 SOS 早于农村植被 SOS, 在城郊梯度上城区和郊区植被 SOS 发生时间早于农村。

为探讨 LST 对植被物候的影响, 类比上述方法, 计算城区、郊区与农村间的 LST 差异, 公式如下:

$$\Delta LST = LST_i - LST_r \quad (8)$$

式中, LST_i 表示城区和郊区内各缓冲区的 LST, LST_r 为农村的 LST, ΔLST 是城区、郊区与农村之间的 LST 差异。

使用一元线性回归分析表示植被物候对地表气温的响应, 其表达式为:

$$y = k \times x + b \quad (9)$$

式中, 自变量 x 为地表温度; 因变量 y 为植被物候参数; k 为系数, 当 $k > 0$, 即物候期受地表温度影响推迟, 当 $k < 0$, 即物候期受地表温度影响提前。

3 结果与分析

3.1 城市植被关键物候指标的时空变化

3.1.1 2000—2020 年城市植被关键物候指标的时间变化

图 2 展示了 2000—2020 年 35 个城市与不同人口规模城市在城区、郊区与农村植被 SOS 和 EOS 的年际变化趋势。35 个城市植被 SOS 和 EOS 总体上呈推迟趋势, 城区、郊区和农村植被 SOS 分别以 0.17 d/a、0.23 d/a 和 0.09 d/a 的趋势推迟 ($P < 0.01$), EOS 分别以 0.15 d/a、0.13 d/a 和 0.09 d/a 的趋势推迟 ($P < 0.01$)。此外, 35 个城市植被 SOS 的提前幅度为 0.17 d/a, 植被 EOS 的推迟幅度为 0.15 d/a, 植被 SOS 提前幅度高于推迟幅度, 且对比不同人口规模城市结果发现, 各人口规模的城市植被 SOS 变化幅度均高于植被 EOS 变化幅度。

3.1.2 2000—2020 年城市植被关键物候指标的空间变化

图 3 展示了 2000—2020 年 35 个城市植被 SOS 和 EOS 平均值的空间分布。全国植被 SOS 平均发生在 104 d, 35 个城市植被 SOS 平均发生在第 96 天, 较全国植被 SOS 平均提前了 8 d。相较研究范围内城市 SOS 发生时间 (标准差为 23 d), 城市 EOS 发生时间较为集中 (EOS 标准差为 10 d)。全国植被 EOS 平均发生于第 308 天, 35 个城市植被 EOS 平均发生在第 312 天, 较全国植被 EOS 推迟了 4 d。相较城市植被 EOS 推迟的平均天数 (4 d), 城市植被 SOS 提前的平均天数 (8 d) 是其两倍。就空间分布而言, 全国 35 个城市植被生长季长度呈现“南长北短”的空间格局。位于纬度和地势较低的东南部平原地区城市呈现出 SOS 较早、EOS 略晚的现象, SOS 发生在第 91 天前 (珠三角除外), EOS 均发生在第 314 天之后。位于纬度和地势较高的北方高原地区的城市则呈现 SOS 略晚、EOS 较早的现象, SOS 均晚于第 91 天, 而 EOS 均早于第 320 天。

图 4 展示了像元尺度的 2000—2020 年中国植被 SOS 和 EOS 的空间变化。全国范围内 55% 的地区植被 SOS 在提前, 其中显著提前的区域面积占 54% ($P < 0.05$), 提前范围在 0—1 d/a 的区域面积占 42%。植被 EOS 显著推迟区域面积占 53% ($P < 0.05$), 推迟范围在 0—1 d/a 的区域面积占 40%。部分南方城市 (成都、重庆、南宁、桂林、长沙、南昌、南京、杭州、上海、福州)、部分华北城市 (北京、天津、太原、沈阳) 以及部分西北城市 (银川、西宁、乌鲁木齐) 均呈现植被 SOS 提前的趋势。其中, 提前速率高于 1 d/a 的城市均分布在南方地区。80% 城市植被 EOS 呈现推迟的特征, 仅在少部分城市呈现提前势态 (哈尔滨、沈阳、石家庄、沧州、太原、呼和浩特和兰州)。

3.2 城郊梯度植被物候差异及其与地表气温的关系

3.2.1 城郊梯度物候差异的空间分布

2000—2020 年 35 个城市植被城郊梯度上的物候差异 (Δ SOS 和 Δ EOS) 呈现明显的空间异质性特征 (图 5)。城区和郊区植被 SOS 相较于农村植被 SOS 较为提前, 而城区和郊区植被 EOS 相较于农村植被 EOS

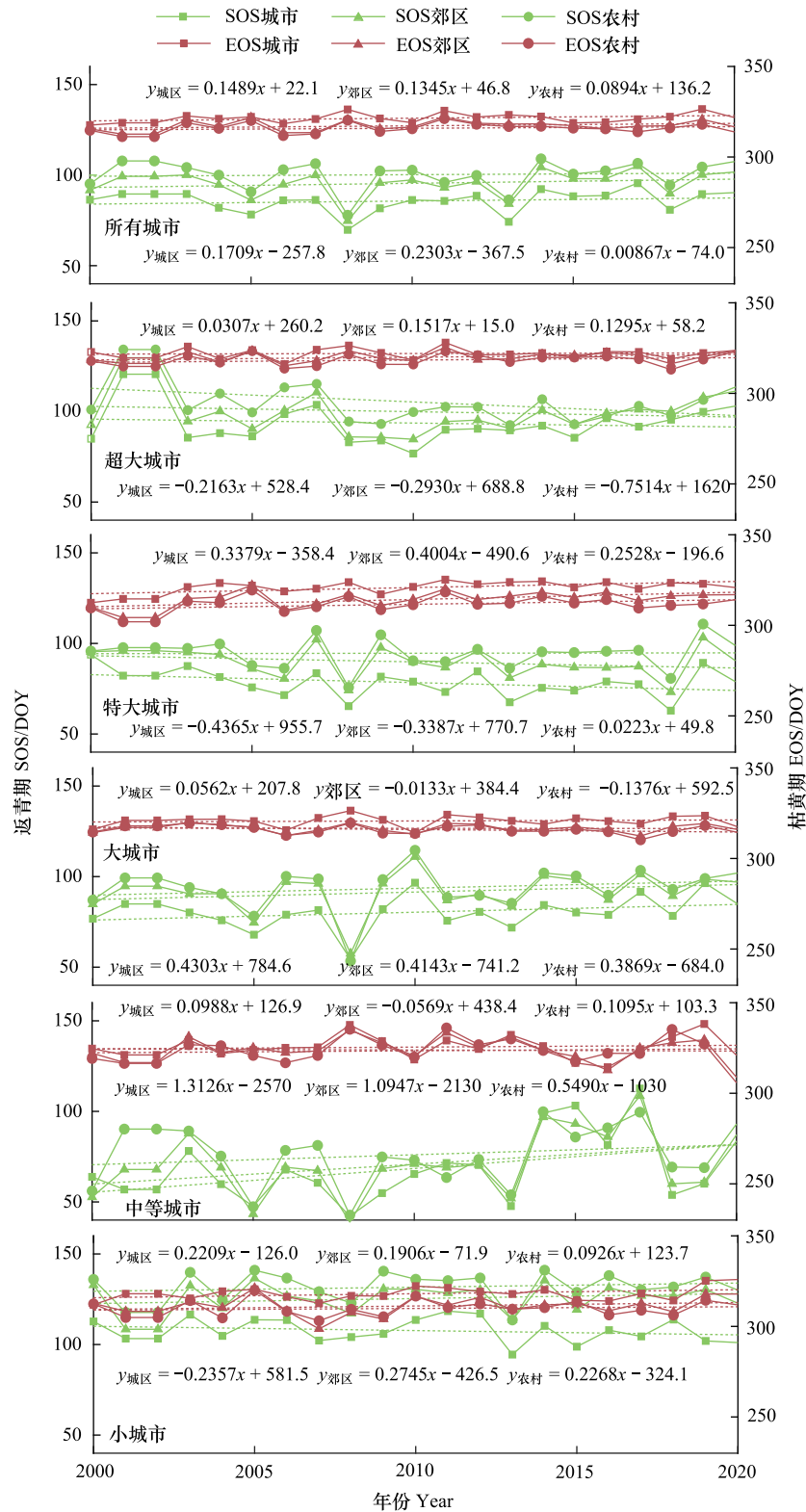


图2 2000年至2020年所有城市与五类城市SOS和EOS的年际变化

Fig.2 Annual variations of SOS and EOS in all cities and its five categories during 2000 to 2020

SOS: 生长季开始期 Start of season; EOS: 生长季结束期 End of season; DOY: 日序 Day of year

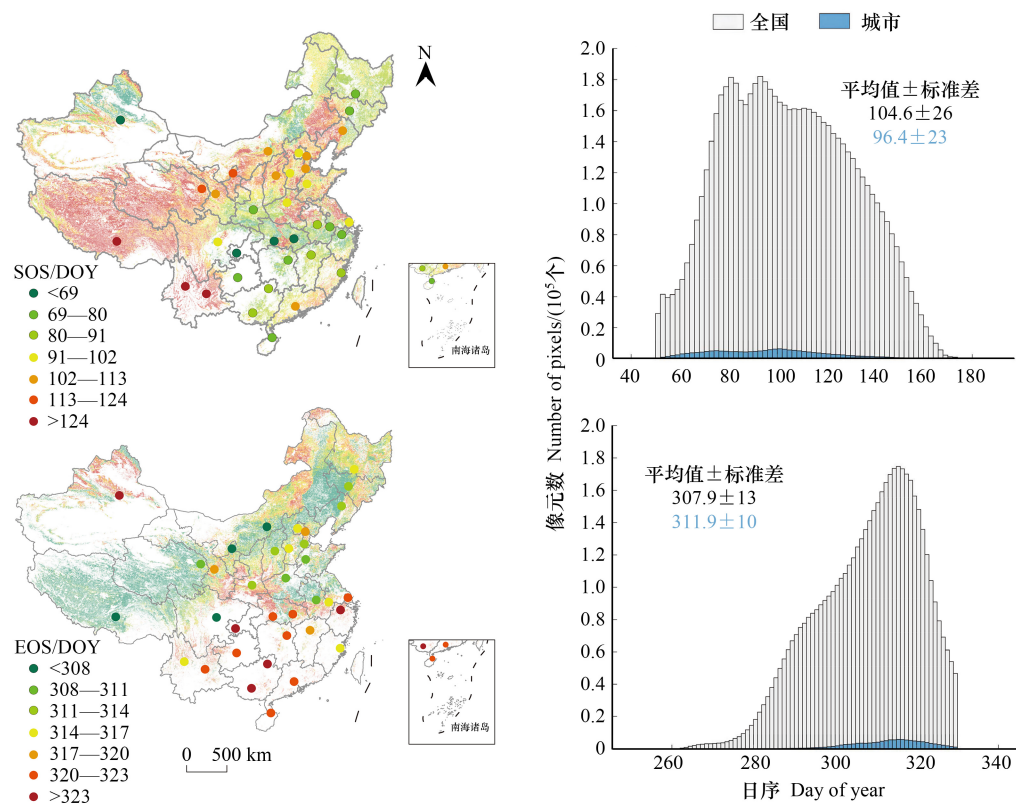


图3 2000年至2020年城市植被SOS和EOS年均值分布和像元统计分布直方图

Fig.3 The spatial distributions of the mean value and pixel statistical distribution histogram of mean value for SOS and EOS from 2000 to 2020

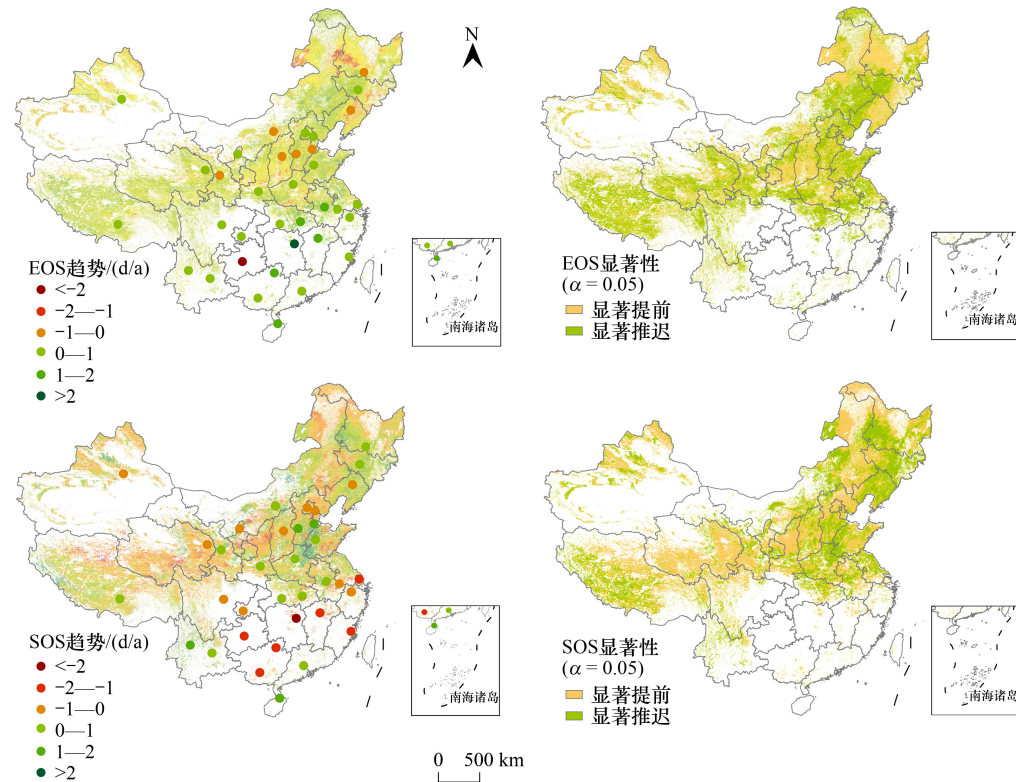


图4 2000年至2020年中国城市植被SOS和EOS年际变化空间分布

Fig.4 The spatial trends of SOS and EOS from 2000 to 2020 in China

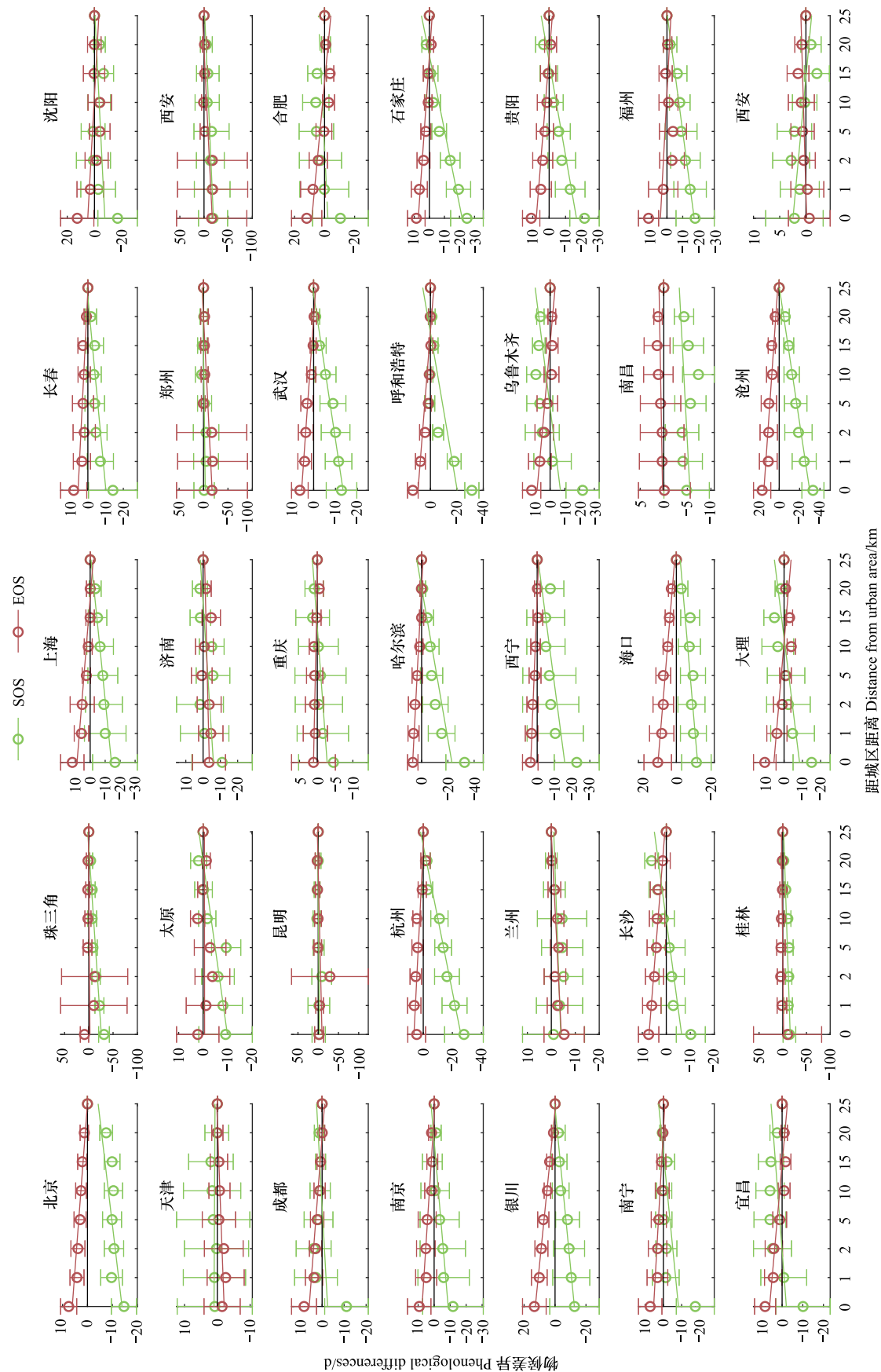


图5 城郊梯度上35个城市植被SOS和EOS变化趋势
Fig. 5 Variation trends of vegetation SOS and EOS along the urban-rural gradient in 35 cities

有所推迟。城区植被 SOS 相较于农村植被 SOS 提前天数为 1—33 天(兰州城区 SOS 相较农村提前 1 d, 沧州城区 SOS 相较农村提前 33 d)。66%的城市植被 SOS 随着距城区距离减少而提前, 提前幅度为 0.6—4.3 d/km, 3%的城市植被 SOS 随着距城区距离减少以 0.5 d/km 的速率推迟。城市植被 EOS 在城区相较于农村 EOS 推迟天数范围为 1—17 d(重庆城区相较农村推迟 1 d, 沧州城区相较农村推迟 17 d)。60%的城市植被 EOS 随距城区距离减少而推迟, 推迟幅度为 0.2—1.9 d/km, 11%的城市植被 EOS 随着距城区距离减少提前, 提前幅度为 0.3—2.9 d/km。17 个城市随着与城区距离的缩短表现为植被 SOS 提前 EOS 推迟, 即距城区越近植被生长季长度越长。

为对比不同人口规模城市植被物候的差异, 针对不同城市规模, 将城区、郊区与农村植被 SOS 和 EOS 进行比较。图 6 表明城区植被 SOS 平均发生在第 68—107 天。35 个城市植被 SOS 在城区、郊区和农村分别发生在 82 d、93 d 和 97 d, 城区相较农村提前 15 d, 植被 EOS 在城区、郊区和农村分别发生于第 321 天、316 天与 314 天, 城区相较农村推迟 7 d。对比不同规模城市发现, 超大城市植被 SOS 在城区、郊区和农村分别发生在第 94 天、100 天和 105 天, 城区相较农村提前 11 d, 植被 SOS 在特大城市、大城市、中等城市和小城市城区相较农村分别提前 17 d、14 d、8 d 和 24 d; 植被 EOS 在城区、郊区和农村分别发生于第 322 天、320 天与 318 天, 城区相较农村推迟 4 d, 植被 EOS 在特大城市、大城市、中等城市和小城市城区相较农村分别推迟 9 d、5 d、2 d 和 8 d。不同规模城市 SOS 和 EOS 的变化存在显著差异, 但 SOS 城区相较农村提前的天数均高于 EOS 城区相较农村推迟的天数。

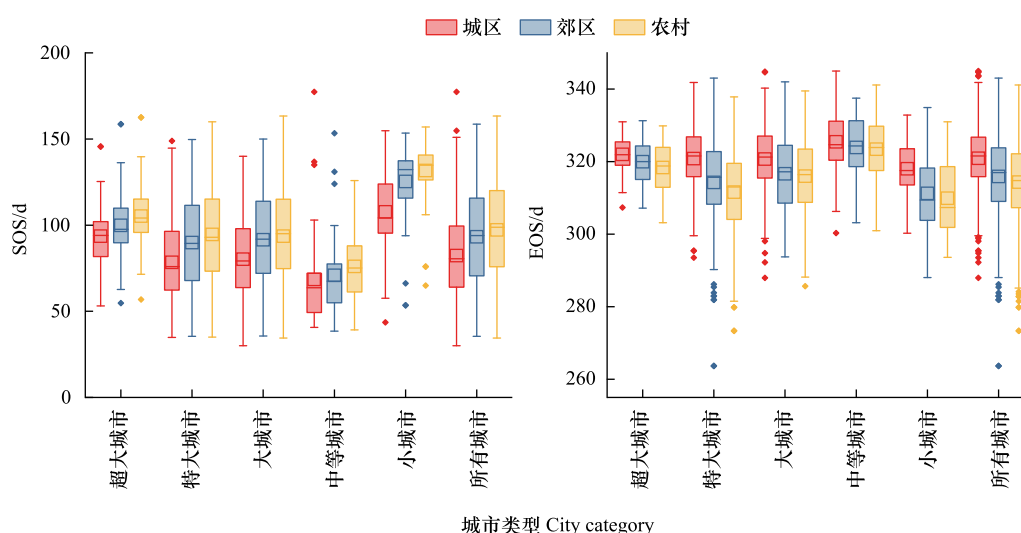


图 6 所有城市与五类城市在城区、郊区和农村植被 SOS 和 EOS 箱线图

Fig.6 Boxplot of the average values of SOS and EOS across urban, suburban, and rural area in all 35 cites and their five categories

3.2.2 城郊梯度下地表气温对植被 SOS 与 EOS 的影响

如图 7 所示, 所有城市的春季地表温度和秋季地表温度均呈增长趋势。其中, 超大城市 ($0.099^{\circ}\text{C}/\text{a}$) 和特大城市 ($0.107^{\circ}\text{C}/\text{a}$) 城区春季 LST 增长速度高于所有城市平均水平 ($0.065^{\circ}\text{C}/\text{a}$)。超大城市 ($0.050^{\circ}\text{C}/\text{a}$)、特大城市 ($0.043^{\circ}\text{C}/\text{a}$) 和小城市 ($0.047^{\circ}\text{C}/\text{a}$) 城区秋季 LST 增长速度高于所有城市平均水平 ($0.041^{\circ}\text{C}/\text{a}$)。小城市城区除外, 其他四类城市城区春季 LST 增长速率均高于秋季 LST 增长速率。城郊梯度上, 五类城市春秋 LST 均呈现出城区最高, 郊区次之, 农村最低的特征 (除小城市秋季 LST 外)。这表明随着离城区距离增加, 春秋季 LST 增长趋势慢慢减弱。

通过研究不同人口规模城市植被物候参数对地表温度响应的差异, 在城郊梯度上探究所有城市和五类城市地表温度差异 ΔLST 与物候差异 ΔSOS 和 ΔEOS 的关系 (图 8)。就所有城市而言, 城郊梯度下春季 ΔLST 与 ΔSOS 呈负相关关系, 城郊温度差每升高 1°C , SOS 提前 6.8 d ($P < 0.01$), 而秋季 ΔLST 与 ΔEOS 呈正相关, 城郊

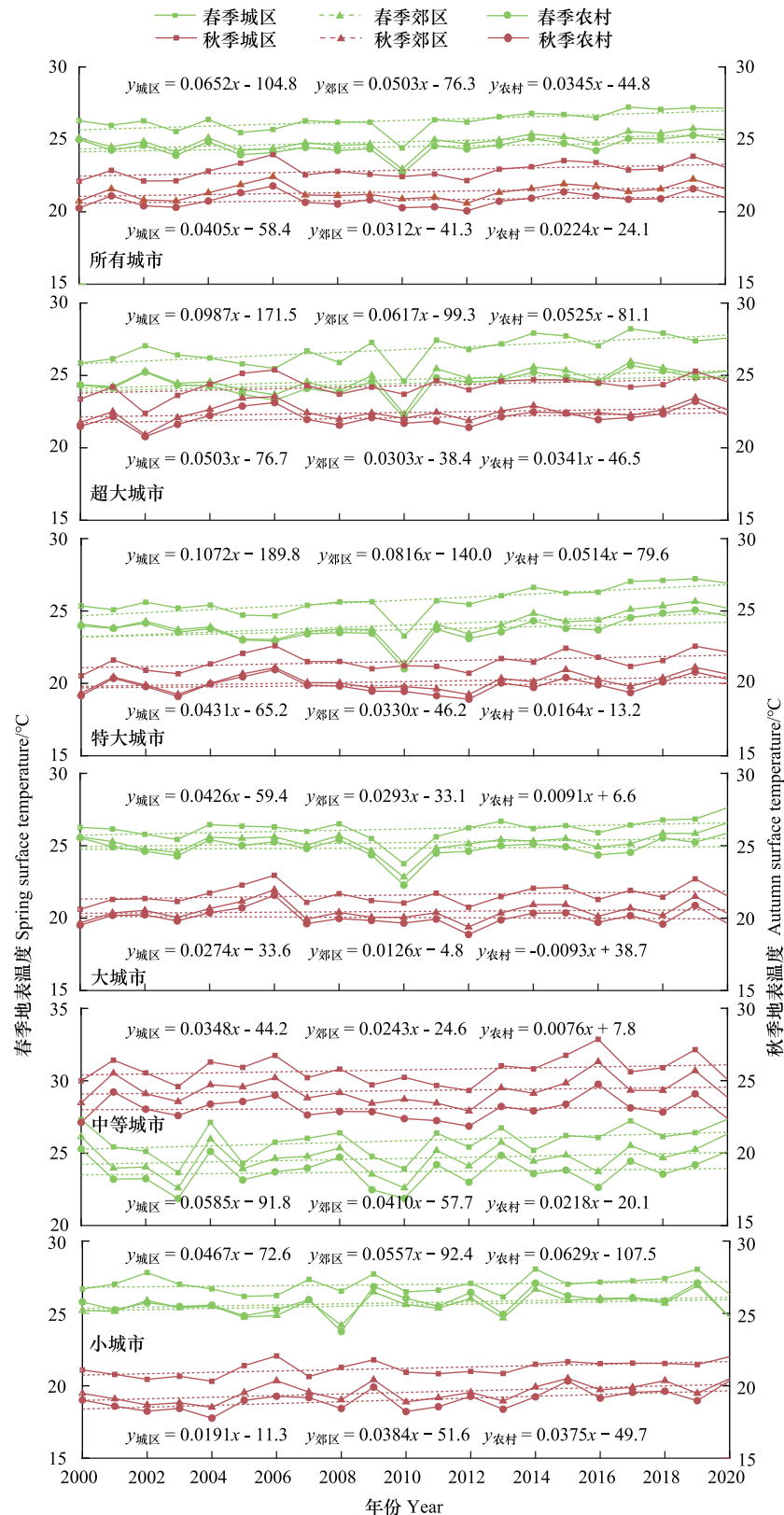


图 7 2000 年至 2020 年所有城市与五类城市春季 LST 及秋季 LST 的年际变化

Fig.7 Annual variations of spring LST and autumn LST in all 35 cities and their five categories during 2000–2020

秋季温度差每升高 1℃,EOS 推迟 1.5 d ($P<0.01$)。不同规模城市 SOS 和 EOS 对地表温度响应存在差异,特大城市和大城市春季温度差每升高 1℃,SOS 分别提前 8.3 d ($P<0.01$) 和 11.0 d ($P<0.01$),高于所有城市 SOS 提前的平均天数 6.8 d ($P<0.01$)。特大城市和大城市秋季温度差每升高 1℃,其 EOS 分别推迟 6.0 d ($P<0.01$) 和 3.5 d ($P<0.01$),也高于所有城市 EOS 平均推迟天数 1.5 d ($P<0.01$),表明特大城市和大城市植被物候受地表温度的影响比其他三类城市所受影响更大。对于 35 个城市,春季 Δ LST 差值每升高 1℃,SOS 提前 6.8 d,而秋季 Δ LST 差值每升高 1℃,EOS 仅推迟 1.5 d。不同规模城市均呈现一致的趋势,即春季 Δ LST 差值升高,SOS 提前,秋季 Δ LST 差值升高,EOS 推迟,这表明春季物候对温度的敏感性高于秋季物候对温度的敏感性。

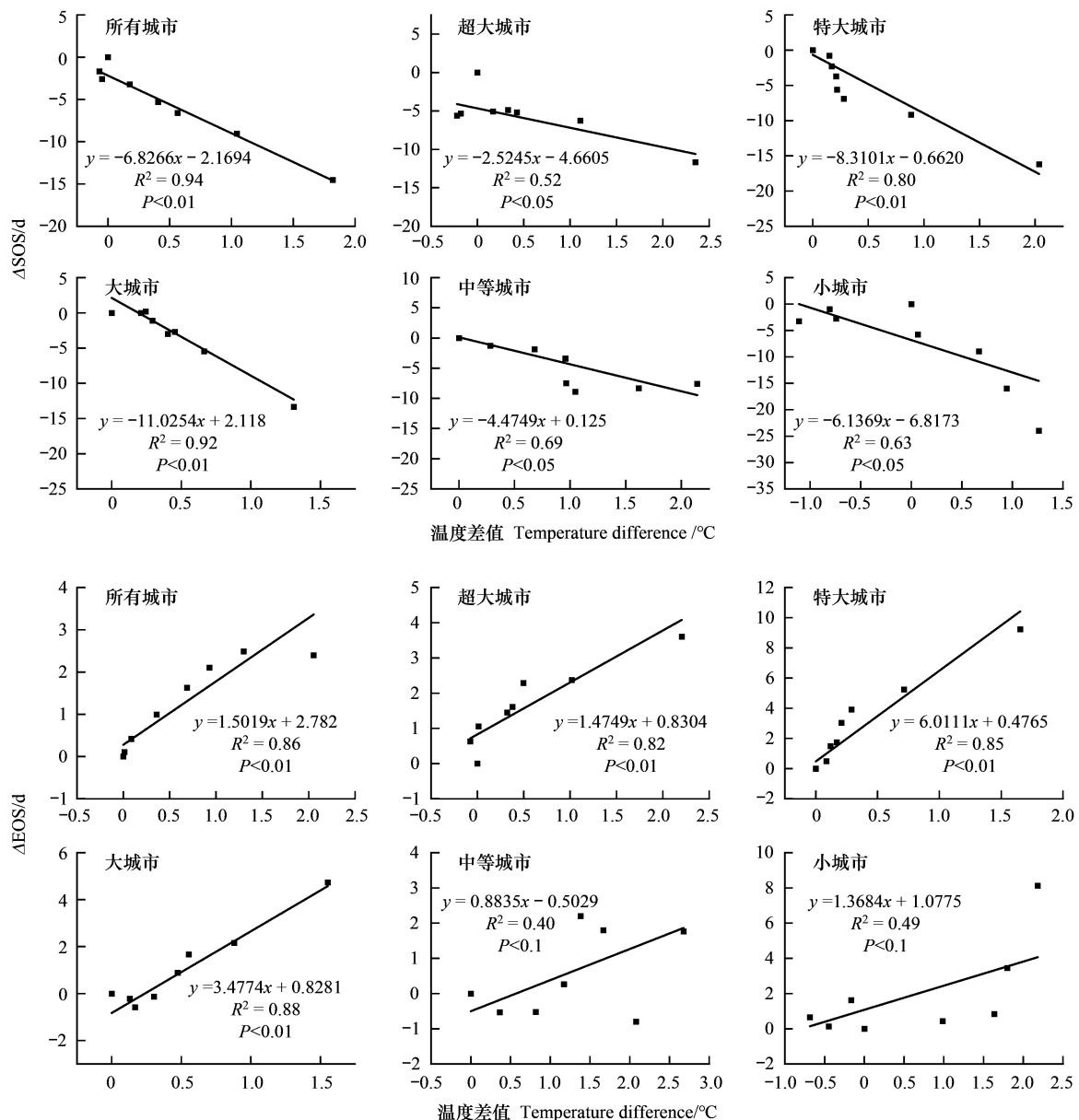


图8 所有城市、超大城市、特大城市、大城市、中等城市和小城市植被物候与地表温度在城郊梯度上的回归关系

Fig.8 Linear regression relationships between phenology and LST along urban-rural gradients in all 35 cities, megacity, megapolis, big city, medium city and small city

Δ LST: 生长季开始期差异 Differences in the start of the growing season; Δ EST: 生长季结束期差异 SOS: Differences in end of season

图9 研究探讨了城郊梯度上不同规模城市植被物候参数对不透水面占比的响应。结果表明,城市植被

SOS 与 ISA 占比显著负相关 ($P < 0.01$), 不透水面占比每增长 1%, 植被 SOS 提前 0.253 d, 植被 EOS 与 ISA 占比显著正相关 ($P < 0.01$), 不透水面占比每增长 1%, 植被 EOS 推迟 0.106 d。在不同人口规模城市中, 特大城市和大城市植被 SOS 随 ISA 占比增大提前的速度越快, 不透水面占比每增长 1%, 植被 SOS 分别提前 0.252 d 与 0.247 d。此外, 小城市植被物候期随 ISA 的变化速度远高于其他规模城市。这主要是因为小城市城区 ISA 占比 (<25%) 远低于其他规模城市 (55%—70%), 尽管小城市 ISA 占比低, 但小城市植被物候期在城郊梯度上仍存在显著的梯度变化。因此, 在城郊梯度上, 小城市 SOS 随不透水面占比增长提前的速度最快。对于 EOS, 特大城市和大城市在城郊梯度上 EOS 随 ISA 占比增长推迟幅度最大, 不透水面占比每增长 1% 植被 EOS 分别推迟 0.144 d 和 0.091 d。综上所述, 特大城市和大城市物候期随 ISA 占比增长的变化幅度均高于其他人口规模城市, 表明在城郊梯度上特大城市和大城市植被物候期对 ISA 占比响应更为敏感。

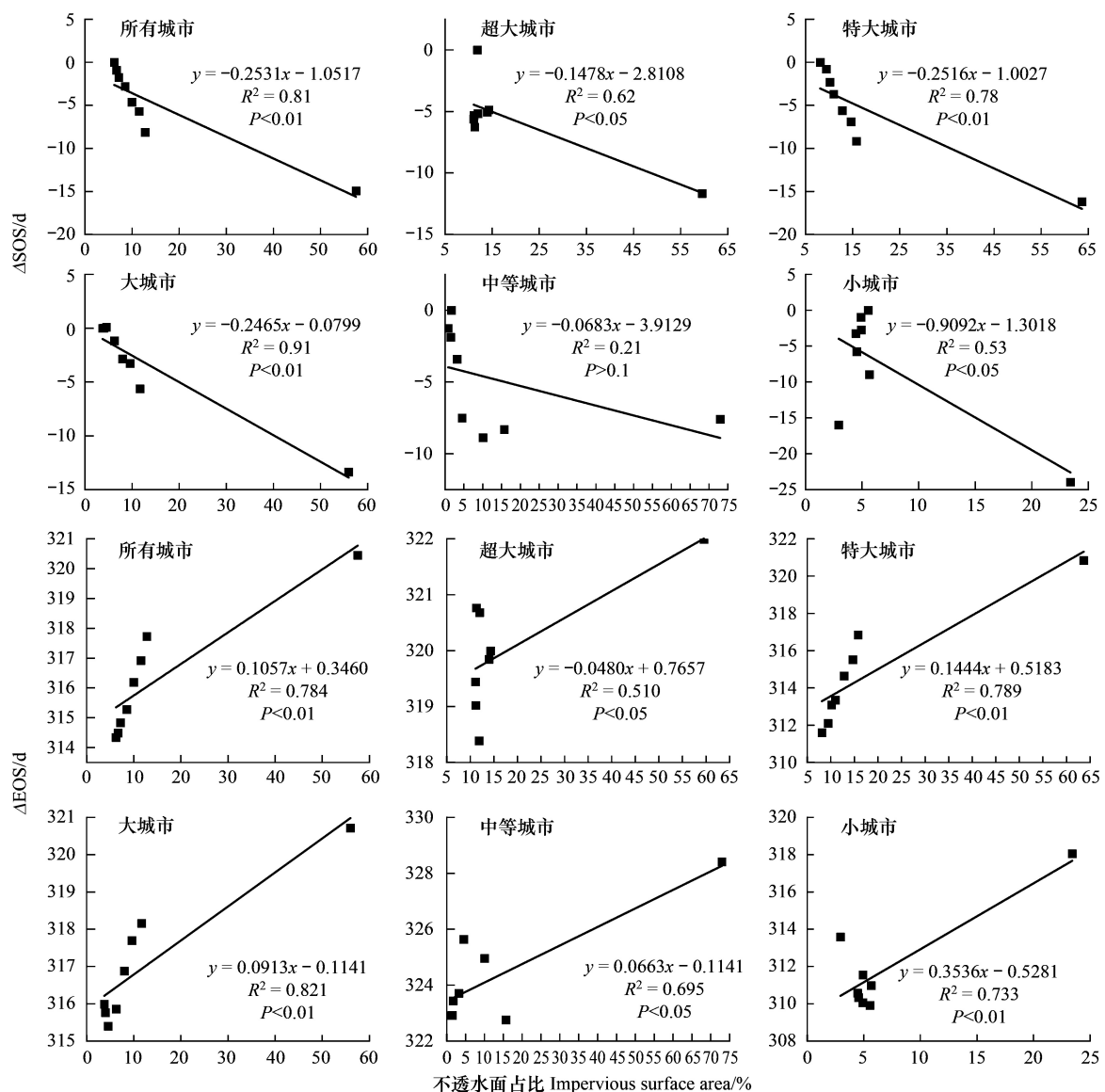


图9 所有城市、超大城市、特大城市、大城市、中等城市和小城市植被物候与不透水面占比在城郊梯度上的回归关系

Fig.9 Linear regression relationships between phenology and ISA along urban-rural gradients in all 35 cities, megacity, megapolis, big city, medium city and small city

4 讨论

2000—2020 年,35 个中国城市 SOS 与 EOS 在城郊梯度上表现出明显的空间异质性特征。研究表明,离城区越近,SOS 越早、EOS 越晚,生长季越长。这一结果与此前聚焦中国特定城市包括京津冀、东北地区三大城市、长三角城市、天山北坡经济带主要城市群与呼和浩特的研究结果均一致^[11, 13, 45–46, 52]。城市城区及其周边范围气候背景条件相近,城市化过程使得城区植被物候相较缓冲圈物候期均呈现 SOS 提前,EOS 推迟的特征,城市在城区和周边郊区间的物候差异主要受人类活动影响,这与此前张聪聪等人研究一致^[11, 45]。城区内频繁的人类活动会引起热岛效应和地表覆盖类型的改变,从而影响城市植被物候期。城市发展过程中改变地表覆盖,进而影响城区温度,此外,不透水层代替植被覆盖以及人工绿化种植等都会可能影响植被物候期。同时,郊区是城市化的辐射影响范围,植被物候也会受到影响,不过其受影响程度弱于城区植被。具体来说,郊区植被 SOS 提前天数和 EOS 推迟天数要少于城区植被,且距离城区越远,影响程度越小。此前 Ding 等人发现^[42],在城郊梯度上距城区 0—2 km 内,城市化对植被长势的响应尤为明显,即在距城区 0—2 km 范围内植被 NDVI 远低于其他缓冲区。本研究发现植被 SOS 也一致反映出在 0—2 km 缓冲区内植被受城市化的影响更为显著,主要原因是在靠近城区的 0—2 km 缓冲区内,城市化过程导致的不透水面覆盖度、城市热岛强度远大于外围农村区域。此外,不同人口规模的城市植被 SOS 在城郊梯度也存在较大差异,而 EOS 基本保持一致。因此,城市化的发展主要通过提前植被 SOS 来延长植被生长季,从而对植被的物候期造成影响。

在中国的 35 个城市中,春季地表温度与城市植被 SOS 呈现负相关,而秋季地表温度与植被 EOS 呈现正相关,这与 Ding 和 Zhou 等人的研究结果一致^[42, 48]。此外,不同人口规模的城市植被物候期在城郊梯度上对城市化响应存在显著差异。特大城市和大城市植被 Δ SOS 和 Δ EOS 对 Δ LST 的响应更为显著,值得注意的是,规模更大的超大城市植被物候对 LST 的响应程度却低于特大城市和大城市。此前有研究表明,特大城市如纽约^[53],城市发展过程中注重城市绿色基础设施,如自然河道灌溉、有机肥料和堆肥施肥,以及包括人工池塘和野生动物走廊在内的城市绿地建设,一定程度上缓解了城市发展带来的负面影响。研究中发现城郊梯度上超大城市物候对 LST 的响应程度低于特大城市和大城市的原因可能与超大城市注重城市绿地设施建设相关,对城市城区植被生长产生积极影响,因此相较超大城市和大城市的从较小。城市植被 SOS 和 EOS 与地表温度密切相关,这主要是由于地表覆盖从非城市用地转变为城市用地所导致。此前研究多使用城区不透水面占比的变化表征城市扩张^[20, 51, 54]。因此,不同人口规模城市植被物候对地表温度的响应存在的差异可能与不透水面占比相关,进一步研究发现,SOS 与不透水面占比负相关,EOS 与不透水面占比正相关,这与元志辉等人在研究呼和浩特以及 Zhang 等人研究北京植被物候影响因素时发现随不透水层比率增长城市 SOS 提前、EOS 推迟的结论一致^[20, 52],且特大城市和大城市物候期差异对不透水面占比的响应更为敏感。

本研究以中国 35 个城市为研究对象,主要研究不同人口规模城市植被 SOS 和 EOS 对城市化响应的差异。研究使用的植被指数来源于遥感影像获取的中尺度空间分辨率数据,无法反映出高精度的城市植被生长细节信息。同时,研究基于遥感数据选择 20% 阈值使用动态阈值法提取植被物候信息,由于国内城市地面物候观测数据的缺乏,难以对基于遥感数据得到的物候参数进行精度验证,这也可能导致结果存在一定误差。此外,研究表明植被受 LST 影响在城市规模上存在一定规律,考虑到研究区域 35 个城市广布中国各地,气候背景条件存在显著差异,规模较大城市多分布于沿海地区,其规律受地理差异影响,未来研究可以基于同一纬度范围,探讨不同规模城市植被物候对城市化的响应。研究以城郊温差表征城市影响,并未定量分析城市化要素如常驻人口数、人均 GDP、工业占比等要素的影响,未来研究中可以进一步细化城市化要素分析城市植被物候对城市化的响应。本研究总结分析了不同人口规模城市植被物候对城市化响应的差异。植被物候变化是自然要素和人文要素综合作用的结果,需要进一步量化研究不同气候因子,例如光照、降水、地形地貌等对城市及其周边区域植被物候的影响。

5 结论

本文利用 MODIS NDVI 数据,使用 S-G 滤波和动态阈值法,提取了 2000—2020 年中国 35 个城市城区及其周边区域 SOS 和 EOS,计算不同规模的城市物候参数的时空变化及其对城市化的响应,主要结论如下:

(1) 中国 35 个城市的 SOS 和 EOS 整体呈现推迟趋势。其中,超大城市、特大城市和小城市城区的 SOS 呈现提前趋势,超大城市和特大城市郊区 SOS 也呈提前趋势。纬度较低、海拔较低的西部和南部平原地区城市 SOS 以提前为主,80%的城市 EOS 在推迟。东部和南部地区城市 SOS 较早,EOS 发生较晚,西部和北部城市植被物候呈相反趋势。

(2) 随着与城区距离的缩短,63%的城市呈现 SOS 提前的趋势。随着与城市距离缩短,60%的城市植被呈现 EOS 推迟。35 个城市 SOS 在城区相较农村提前 15 d,EOS 在城区相较农村推迟 7 d。不同规模城市呈现出一致特征,SOS 在超大城市、特大城市、大城市、中等城市和小城市城区相较农村分别提前 11 d、17 d、14 d、8 d 和 24 d;EOS 在超大城市、特大城市、大城市、中等城市和小城市城区相较农村分别推迟 4 d、9 d、5 d、2 d 和 8 d,SOS 在城区相较农村提前的天数均高于 EOS 城区相较农村推迟的天数。

(3) 春季地表温度与城市 SOS 呈负相关关系,城郊地表温度差值每升高 1℃,SOS 提前 6.8 d,而秋季地表温度和 EOS 呈正相关,城郊秋季地表温度差值每升高 1℃,EOS 推迟 1.5 d。城市植被 SOS 与 ISA 占比显著负相关,不透水面占比每增长 1%,SOS 提前 0.253 d,植被 EOS 与 ISA 占比显著正相关,不透水面占比每增长 1%,EOS 推迟 0.106 d。特大城市和大城市物候期随 ISA 占比增长的变化幅度均高于其他人口规模城市,表明在城郊梯度上特大城市和大城市植被物候期对 ISA 占比响应更为敏感。

参考文献 (References):

- [1] 竺可桢,宛敏渭. 物候学:增订本. 北京:科学出版社,1980.
- [2] 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.
- [3] Liu Q A, Fu Y H, Zeng Z Z, Huang M T, Li X R, Piao S L. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 644-655.
- [4] Imhoff M L, Bounoua L, DeFries R, Lawrence W T, Stutzer D, Tucker C J, Ricketts T. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 434-443.
- [5] 王静,常青,柳冬良. 早春草本植物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.
- [6] 武永峰,李茂松,宋吉青. 植物物候遥感监测研究进展. *气象与环境学报*, 2008, 24(3): 51-58.
- [7] 项铭涛,卫伟,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.
- [8] 陈效迷,王林海. 遥感物候学研究进展. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 33-40.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 古丽拜合热姆·艾合麦提,咎梅. 新疆天山北坡经济带主要城市群热岛效应对植被物候的影响. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(7): 872-881.
- [12] Li X X, Fu Y H, Chen S Z, Xiao J F, Yin G D, Li X, Zhang X, Geng X J, Wu Z F, Zhou X C, Tang J, Hao F H. Increasing importance of precipitation in spring phenology with decreasing latitudes in subtropical forest area in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 304/305: 108427.
- [13] 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.
- [14] Shen M G, Tang Y H, Chen J, Zhu X L, Zheng Y H. Influences of temperature and precipitation before the growing season on spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1711-1722.
- [15] Chmielewski F M, Rötter T. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(2): 101-112.
- [16] Richardson A D, Hollinger D Y, Dail D B, Lee J T, Munger J W, O'keefe J. Influence of spring phenology on seasonal and annual carbon balance in two contrasting New England forests. *Tree Physiology*, 2009, 29(3): 321-331.
- [17] Zhao S Q, Liu S G, Zhou D C. Prevalent vegetation growth enhancement in urban environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(22): 6313-6318.
- [18] Li X C, Zhou Y Y, Meng L, Asrar G, Sapkota A, Coates F. Characterizing the relationship between satellite phenology and pollen season: a case study of birch. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 222: 267-274.
- [19] 肖芳,桑婧,王海梅. 气候变化对内蒙古鄂温克旗典型草原植物物候的影响. *生态学报*, 2020, 40(8): 2784-2792.
- [20] Zhang Y H, Yin P Y, Li X C, Niu Q D, Wang Y X, Cao W T, Huang J X, Chen H, Yao X C, Yu L, Li B G. The divergent response of

- vegetation phenology to urbanization: a case study of Beijing city, China. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: 150079.
- [21] Zhou D C, Zhao S Q, Liu S G, Zhang L X. Spatiotemporal trends of terrestrial vegetation activity along the urban development intensity gradient in China's 32 major cities. *Science of the Total Environment*, 2014, 488/489: 136-145.
- [22] Sun J Y, Wang X H, Chen A P, Ma Y C, Cui M D, Piao S L. NDVI indicated characteristics of vegetation cover change in China's metropolises over the last three decades. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 179(1): 1-14.
- [23] Han G F, Xu J H. Land surface phenology and land surface temperature changes along an urban-rural gradient in Yangtze River Delta, China. *Environmental Management*, 2013, 52(1): 234-249.
- [24] 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.
- [25] 韩贵锋, 徐建华, 袁兴中. 城市化对长三角地区主要城市植被物候的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1803-1809.
- [26] Fu Y H, Zhao H F, Piao S L, Peaucelle M, Peng S S, Zhou G Y, Ciais P, Huang M T, Menzel A, Peñuelas J, Song Y, Vitis Y, Zeng Z Z, Janssens I A. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 2015, 526(7571): 104-107.
- [27] Wang H J, Rutishauser T, Tao Z X, Zhong S Y, Ge Q S, Dai J H. Impacts of global warming on phenology of spring leaf unfolding remain stable in the long Run. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(2): 287-292.
- [28] Ziska L H, Gebhard D E, Frenz D A, Faulkner S, Singer B D, Straka J G. Cities as harbingers of climate change: common ragweed, urbanization, and public health. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2003, 111(2): 290-295.
- [29] Cecchi L, D'Amato G, Ayres J G, Galan C, Forastiere F, Forsberg B, Gerritsen J, Nunes C, Behrendt H, Akdis C, Dahl R, Annesi-Maesano I. Projections of the effects of climate change on allergic asthma: the contribution of aerobiology. *Allergy*, 2010, 65(9): 1073-1081.
- [30] Neil K, Wu J G. Effects of urbanization on plant flowering phenology: a review. *Urban Ecosystems*, 2006, 9(3): 243-257.
- [31] 邵亚婷, 王卷乐, 严欣荣. 蒙古国植被物候特征及其对地理要素的响应. *地理研究*, 2021, 40(11): 3029-3045.
- [32] Peng J, Ma J, Liu Q Y, Liu Y X, Hu Y N, Li Y R, Yue Y M. Spatial-temporal change of land surface temperature across 285 cities in China: an urban-rural contrast perspective. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 487-497.
- [33] Luber G, McGeheh M. Climate change and extreme heat events. *American Journal of Preventive Medicine*, 2008, 35(5): 429-435.
- [34] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴—2019, 2019. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [35] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于调整城市规模划分标准的通知. 国务院, 2014.
- [36] Zheng K Y, Tan L S, Sun Y W, Wu Y J, Duan Z, Xu Y, Gao C. Impacts of climate change and anthropogenic activities on vegetation change: evidence from typical areas in China. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107648.
- [37] Gu J, Li X, Huang C L, Okin G S. A simplified data assimilation method for reconstructing time-series MODIS NDVI data. *Advances in Space Research*, 2009, 44(4): 501-509.
- [38] Li X C, Gong P, Zhou Y Y, Wang J E, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Xiao Y X, Xu B, Yang J, Liu X P, Cai W J, Huang H B, Wu T H, Wang X, Lin P, Li X, Chen J, He C Y, Li X A, Yu L, Clinton N, Zhu Z L. Mapping global urban boundaries from the global artificial impervious area (GAIA) data. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(9): 094044.
- [39] Zhou D C, Zhao S Q, Zhang L X, Sun G, Liu Y Q. The footprint of urban heat island effect in China. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11160.
- [40] Yang J E, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [41] 赵心睿, 刘冀, 杨少康, 张茜, 高放, 刘艳丽. 北方地区典型林草地物候时空变化特征及其对气象因子的响应. *生态学报*, 2023, 43(9): 3744-3755.
- [42] Ding H, Xu L M, Elmore A, Shi Y L. Vegetation phenology influenced by rapid urbanization of the Yangtze delta region. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1783.
- [43] Buyantuyev A, Wu J G. Urbanization diversifies land surface phenology in arid environments: interactions among vegetation, climatic variation, and land use pattern in the Phoenix metropolitan region, USA. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105(1/2): 149-159.
- [44] Brown M E, de Beurs K, Vrieling A. The response of African land surface phenology to large scale climate oscillations. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(10): 2286-2296.
- [45] 张聪聪, 孟丹, 李小娟. 京津冀地区植被物候时空变化及其对城市化的响应. *生态学报*, 2023, 43(1): 249-262.
- [46] 丁海勇, 卜亚勤, 徐路明. 长三角地区植被物候时空变化及其对城市化的响应. *安全与环境学报*, 2021, 21(3): 1352-1360.
- [47] Yang J, Luo X, Jin C, Xiao X M, Xia J H. Spatiotemporal patterns of vegetation phenology along the urban-rural gradient in Coastal Dalian, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 54: 126784.
- [48] Zhou D C, Zhao S Q, Zhang L X, Liu S G. Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 176: 272-281.
- [49] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [50] Forthofer R N, Lehen R G. Rank Correlation Methods//Forthofer R N, Lehen R G eds. *Public Program Analysis: A New Categorical Data Approach*. Boston, MA: Springer US, 1981. 146-163
- [51] Qiu T, Song C H, Zhang Y L, Liu H S, Vose J M. Urbanization and climate change jointly shift land surface phenology in the northern mid-latitude large cities. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111477.
- [52] 元志辉, 银山, 萨楚拉, 池勇峰. 近 20 年呼和浩特城市对植被物候的影响. *干旱区地理*, 2022, 45(6): 1890-1898.
- [53] Gregg J W, Jones C G, Dawson T E. Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature*, 2003, 424(6945): 183-187.
- [54] Zhang L, Yang L, Zohner C M, Crowther T W, Li M C, Shen F X, Guo M, Qin J, Yao L, Zhou C H. Direct and indirect impacts of urbanization on vegetation growth across the world's cities. *Science Advances*, 2022, 8(27): eabo0095.