

中国东北地区植被生产力控制因素分析

周玉科

(中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101)

摘要: 植被生长季长度和生长强度是形态上影响植被生产力变化的重要因子。全球变暖情景下,北半球中高纬度大部分地区植被生长季显著延长并对植被生产力产生正向反馈,而植被生长强度变化情形及对生产力的控制作用并不清晰。中国东北地区属于中纬度温带地区,具有较高的植被覆盖度和丰富的植被类型,探索其植被生长季长度和强度的变化及对生产力的控制作用有利于理解和应对该地区的生态系统变化。以中国东北为研究区,基于1982—2015年长时序遥感植被指数数据(NDVI3g),利用曲率求导法确定植被生长季开始点(SOS)、结束点(EOS)、生长季长度(LOS)和夏季最大生长季强度(GM)等关键物候参数,然后利用相对重要性(RI)方法定量分析了生长季长度和强度对植被生产力长期变化趋势的相对贡献及时空格局。结果表明:① 研究区整体的植被生产力和生长强度呈现增强趋势,而生长季长度呈现缩短趋势,导致生长强度成为控制生产力变化趋势的主要因素(RI = 70%);② 在不同植被覆盖区域,生长季长度和生长强度对生产力的影响程度具有显著的空间差异。西部草原区植被生产力受生长强度控制最为显著(RI = 93%),其次为针叶林(RI = 66%)和阔叶林区(RI = 62%),农作区生产力受生长强度影响最小(RI = 56%)。生长季长度对植被生产力的控制在农作区最为显著(RI = 40%),在其他区域的影响约为27%~35%。各植被覆盖区生长强度与生产力均为正相关,生长季长度与生产力均为负相关;③ 气候因素(降水、温度)和物候变化均对主要贡献因子生长强度产生影响,其中SOS的变化对生长强度的影响程度和空间范围最为显著,主要表现为SOS推迟促进生长强度增强。本研究基于遥感数据发现1982—2015年间中国东北地区植被生长更加旺盛,但是植被生长活动主要受生长强度的影响,该研究可以为植被生产力变化模拟的参数选择提供新的线索。

关键词: 植被物候;植被生产力;生长季长度;生长强度;长期趋势;NDVI

DOI: 10.11821/dlxb202001005

1 引言

近几十年来,受全球变暖影响,植被生长活动呈显著上升趋势,光合作用能力与生长季持续时间等生理特征显著增强,导致陆地生态系统碳吸收不断增加^[1]。另外升温引起的陆地植被物候变化也进一步地改变了植被的固碳能力和周期。目前,植被物候研究多聚焦在气候因子对植被关键物候事件点的影响^[2-5],而物候影响植被生产力的过程和因素

收稿日期: 2019-01-05; 修订日期: 2019-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0500103, 2018YFB0505301); 国家自然科学基金项目(41601478); 南方海洋科学与广东省实验室(广州)人才引进专项(GML2019ZD0301) [Foundation: National Key R&D Program Project of China, No.2016YFC0500103, No.2018YFB0505301; National Natural Science Foundation of China, No.41601478; Key Special Project for Introduced Talents Team of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), No.GML2019ZD0301]

作者简介: 周玉科(1984-),男,山东济宁人,博士,副研究员,主要从事生态遥感与时空大数据分析研究。

E-mail: zhoyuk@igsnrr.ac.cn

仍需深入探索^[6]。另外,全球升温背景下的植被生长强度与生长季长度的长期趋势和年际变异仍不清晰,其对植被生产力的影响机理和过程仍然存在较大的不确定性。因此,本文在分析温带植被关键物候参数的基础上,重点探索生长强度和生长季长度对植被生产力长期变化趋势的影响。

植被物候指植被受气候变化影响表现出来的周期性现象,能直观反映植被生长状况及气候变化^[7]。同时,物候的变化也会对生态系统结构和功能产生重要影响。植被生长持续时间是判断植被固碳能力的一个重要标志,随着全球气温的升高,北半球高纬度地区植被物候呈现春季提前、秋季延后的趋势,从而导致了植被固碳周期的延长,进一步改变了生态系统关键过程^[8-9]。但是由于非生物物理因子的胁迫(如气温、降水、土壤水分等),生长季长度与生产力的关系并不明确,并呈现出复杂的时空格局。北方森林的研究表明,受夏季干旱的影响,该区域的植被生长季并未出现显著变化,但是生产力表现为下降趋势^[10-11]。另外,生长季内植被生长峰值(强度)也是影响陆地生态系统生产力和大气CO₂浓度季节特征的重要因素^[12]。近几十年来全球陆表覆盖持续变绿表明了植被生长呈现增强趋势,但是生长峰值是否表现同步增长的特征并不明确。植被生长季长度和生长强度对生产力的复杂控制作用值得深入探讨。

卫星遥感观测具有频率高、覆盖范围广的优点,使景观尺度和洲际尺度的植被物候监测成为可能,另外基于遥感数据的植被物候期提取分析方法逐渐成熟,进一步推动了植被物候变化的研究^[13]。利用遥感数据提取物候参数的方法主要分为阈值法和导数法^[14],并且需要根据研究区、植被类型选择合适的方法^[15]。固定阈值法将超过特定NDVI阈值的生长时间段定义为生长季^[16-17],该方法不适用于大尺度、多类型植被的物候提取^[18]。导数法通过对生长曲线求导确定生长开始和结束点^[19],研究表明导数法不受植被区域和类型限制,具有较好的适用性^[20]。植被对气候变化的响应具有明显的区域差异,而中高纬度地区植被的响应更为敏感^[21]。中国东北地区位于中纬度地区,植被生长具有明显的季节性、植被覆盖度高、大气状况良好等特点,是基于遥感研究植被生长过程和物候变化的理想区域^[22]。基于NDVI的遥感物候分析表明2000—2013年来东北地区植被物候并未呈现明显的变化趋势,并且各植被类型物候期空间异质性较大^[23-24]。另外,东北地区农作物和草地的植被净生产力与生长季长度为负相关性,而各种植被的植被净生产力与春季物候呈正相关^[24]。目前,鲜有关于东北地区植被生长季长度与强度对生产力影响的报道。

本文选取中国东北为研究区,基于遥感NDVI数据提取植被生长季开始日期(start of season, SOS)、结束日期(end of season, EOS)、生长幅度(PEAK)与生长季长度(length of season, LOS)等物候参数,采用双逻辑斯蒂(Double Logistic, D-L)函数法、Pearson相关系数、相对重要性等统计方法,对1982—2015年植被物候变化趋势,生产力与生长强度、生长季长度的相关性和相对重要性进行了定量分析。

2 数据与方法

2.1 研究区域

中国东北地区主要包括黑龙江、吉林、辽宁省和内蒙古自治区的部分地区(呼伦贝尔盟、赤峰市、兴安盟、通辽市),地理范围位于38°N~56°N、115°E~135°E之间,面积约为144万km²,属于温带湿润、半湿润大陆性季风气候^[25]。由于自然环境良好并且空间分异显著,东北地区植被覆盖类型丰富,主要包括草丛、草甸、灌丛、阔叶林、栽培植被、针阔叶混交林和针叶林(图1a)。根据1:100万中国植被类型图(图1a)^[26],东北地

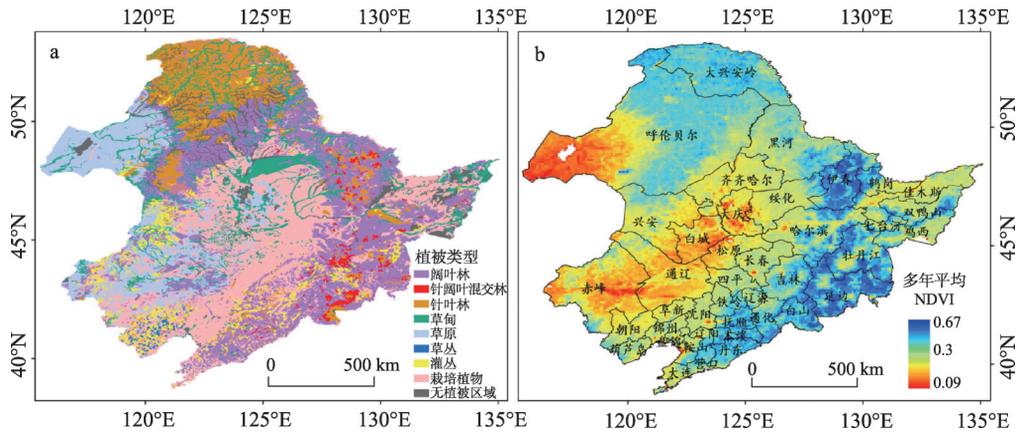


图1 中国东北地区植被覆盖类型分布及生长状况

Fig. 1 Maps of vegetation cover types in Northeast China and growth condition

区的自然植被覆盖主要为落叶阔叶林(占东北区域面积的25.8%)和草原(24.6%),人工栽培植被(农作物)约占26.4%。从多年生长季NDVI平均值(Mean Growing Season Value, MGS)的空间分布(图1b)可以发现,中部至西南地区的农作物区和呼伦贝尔草原区的植被覆盖状况较差,北部大兴安岭和东部长白山森林区域植被覆盖情况良好,表明东北地区植被生长状况存在较大的空间差异。

2.2 数据来源

遥感植被指数数据采用美国航空航天局(NASA)生产的第三代NDVI数据集(GIMMS NDVI3g V1.0, <http://ecocast.arc.nasa.gov>),其空间分辨率为8 km,时间分辨率为15 d,时间跨度为1982—2015年,地理坐标系为WGS_84^[27]。GIMMS NDVI 3g数据由多颗AVHRR卫星数据计算得到,去除了传感器退化和火山爆发等因素的影响,已经被广泛用于区域和全球尺度的植被变化研究^[28-29]。

为深入分析气候变化对植被生产力变化趋势的影响,选取了东北地区1982—2015年间的温度和降水数据与生产力影响因素进行相关性分析。日值温度和降水数据来源于中国气象局国家气象信息中心制作的“中国地面气候资料日值数据集”,对其进行读取、合并、检查、统计、空间插值批处理等处理,最后由ANUSPLINE软件插值生成8 km空间网格栅格数据^[30]。根据NDVI3g数据15 d的时间频率,将日值温度和降水栅格数据采用时间段内取平均的方法生成对应的半月数据,并且空间上配准使其与NDVI3g数据逐像素精确对应。

2.3 研究方法

首先采用D-L曲线拟合方法重构1982—2015年东北地区的NDVI时序数据,并利用Beck等^[31]方法提取植被关键物候参数,然后计算物候参数与生产力之间的相关系数和相对重要性。

2.3.1 原始数据及时序数据处理

NASA分发的NDVI3g原始数据为NetCDF格式,为方便处理分析,首先采用R语言将NetCDF数据转为通用的Geotiff格式并按照时间序列排序,然后利用R语言的Raster包将时序栅格影像组合成栅格堆栈形式(Raster Stack),后续像元尺度的分析均基于该栅格堆栈进行。另外,虽然NDVI3g数据已经具有较好的生产者精度,但是由于云层、大气及其他因素的影响,原始数据会存在不同程度的异常值和噪声,在一定程度上影响了NDVI3g数据的质量^[24]。为了降低噪声的干扰,对每个像元上的NDVI序列采用D-L方法进行拟合平滑。D-L方法是一种半局部函数拟合法,具有较

好的噪声处理与物候参数提取能力,适用于温带植被生长过程的动态模拟^[32]。为减少裸地和稀疏植被的干扰,研究排除了多年平均NDVI值小于0.1的区域^[33]。

2.3.2 相关物候参数提取 为了定量分析植被生长季各参数对生长过程的影响与贡献程度,物候参数主要选取SOS、EOS、LOS、PEAK和MGS 5项,采用Beck等^[31]提出的曲线拟合求导法,根据导数正负变化的点确定SOS和EOS^[13]。物候参数提取公式如下:

$$NDVI_{(t)} = (m_{NDVI} - w_{NDVI}) \left(\frac{1}{1 + e^{-mS(t-S)}} + \frac{1}{1 + e^{-mA(t-A)}} - 1 \right) + w_{NDVI} \quad (1)$$

式中: $NDVI_{(t)}$ 为 t 时刻的NDVI值; t 为年序日; m_{NDVI} 和 w_{NDVI} 分别为最大NDVI值和冬季NDVI值; S 、 A 为曲线上升和下降的拐点; mS 、 mA 为拐点处曲线增长或降低的速率。其中 w_{NDVI} 的计算公式为:

$$w_{NDVI} = \sqrt{\max(NDVI_{10}) \times \max(NDVI_{11})} \quad (2)$$

式中: $NDVI_{10}$ 、 $NDVI_{11}$ 分别为10月、11月的NDVI平均值。除 w_{NDVI} 外,其他参数通过迭代非线性最小二乘法计算得到。基于NDVI拟合曲线求曲率,之后对曲率公式进行求导,当导数为零时,即表示曲线在该点弯曲程度最大,定义该点为植被生长过程中的物候转换期^[19]。

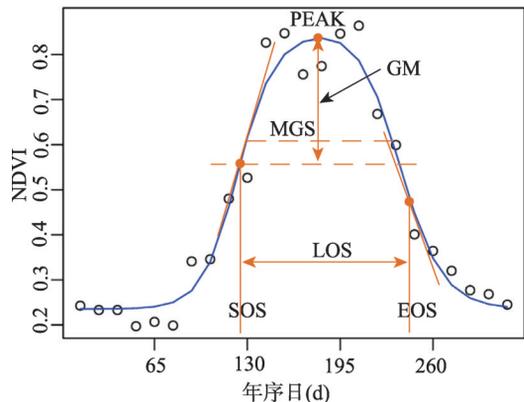
根据以往研究,植被生长过程可以分解为生长季长度和生长强度,并用来反映植被碳循环中的固碳能力^[34]。在植被NDVI生长轨迹曲线中,定义返青期曲率变化为0的时间点为SOS、秋季衰落期曲率变化为0的日期为EOS,LOS即为SOS与EOS之间的时间长度;将生长强度(Growth Magnitude, GM)定义为植被生长季NDVI峰值(PEAK)与SOS点NDVI值之差(图2),GM通过差值定义的作用是排除植被非固碳作用部分^[34]。植被生产力MGS定义为生长季内所有NDVI观测值的平均值。NDVI可以表征植被的光合能力,并与总初级生产力(GPP)等植被生产力指数具有较好的相关性,因此LOS和GM可以理解为植被固碳的周期和幅度。

2.4 相对重要性方法

2.4.1 数据标准化与相关分析 研究涉及的变量包括GM、MGS和LOS,其中GM和MGS为NDVI值,LOS为天数。虽然3种变量均为无量纲值,但是表示的意义和数量级不同,因此采用z-score方法对GM、MGS和LOS变量进行标准化。

基于Pearson相关系数法度量GM、LOS与MGS指标之间的相关性,本文探讨GM和LOS对MGS的影响。Pearson相关系数法采用统计学的理论与方法,度量两个变量之间的相关程度,用来表示变量间的相关性强度,已经被广泛用于生态环境和地球科学等领域^[35]。相关系数用 r 表示,计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$



注: SOS:生长开始点,EOS:生长结束点,LOS:生长季长度,GM:生长强度,MGS:生长季平均NDVI,PEAK:生长峰值。

图2 植被生长曲线拟合与关键物候参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram depicting growth curve and key phenological parameters

式中: r_{xy} 是协方差与 X 、 Y 向量标准差乘积的比值, 代表 GM 与 MGS、LOS 与 MGS 之间的相关系数; Y 变量为单个像素点多年 MGS 指标的数值集合; \bar{Y} 为各像素点多年的平均 NDVI 值; y_i 为各年的 MGS 指标值; X 变量在两种相关性度量关系中分别代表单个像素点多年 GM 或 LOS 指标的数值集合; \bar{X} 为 GM 或 LOS 指标的多年平均值; x_i 为 GM 或 LOS 年值。

2.4.2 相对重要性分析 本文采用相对重要性 (Relative Importance, RI) 确定每个像元上植被生长强度和生长季长度对植被生产力的相对贡献。相对重要性以多元线性回归分析的方式统计自变量 (LOS 和 GM) 对因变量 (MGS) 的贡献百分比^[36], 回归模型表示为:

$$y_i = k_0 + k_1 x_{i1} + k_2 x_{i2} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中: y_i 表示年 MGS 值; $x_{ip, p=1,2}$ 分别为年 GM 和 LOS 值; k_1 和 k_2 为线性回归系数; ε_i 为残差项, 表示其他因素对植被生长力的影响。回归系数 k_1 和 k_2 通过最小化 ε_i 的平方和求得, 以 \hat{k}_1 、 \hat{k}_2 和 \hat{y}_i 表示回归系数和由多元线性回归模型得到的回归结果, \bar{y} 为多年 MGS 指标的平均值, 则回归模型的测定系数 R^2 可表示为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

RI 表示生长强度和生长季长度对植被生产力的相对重要性指数, 计算公式如下:

$$RI(x_p) = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^1 \left(\sum_{\substack{S \subseteq \{x_1, x_2\} / \{x_p\} \\ M \subseteq \{x_1, x_2\} \\ n(S)=j}} \frac{R^2(M) - R^2(S)}{\binom{1}{i}} \right) \quad (6)$$

式中: $x_{p, p=1,2}$ 分别表示变量 MAG 和 LOS; $RI(x_p)$ 为变量 MAG 和 LOS 的相对贡献度; M 表示回归模型中 MAG 和 LOS 的样本全集; S 为回归样本子集; $R^2(M)$ 和 $R^2(S)$ 分别为针对 M 和 S 计算的测定系数^[37]。

3 结果分析

3.1 物候参数年际变化趋势

利用 Mann-Kendall 趋势检验法分析了关键物候参数 SOS 和 EOS 的长期变化趋势 (以 MK tau 值表示), 并检验其多年平均值, 发现其空间分布差异显著 (图 3)。北部针叶林返青期主要集中在第 123 天 (5 月 3 日), 衰落期开始于第 260 天 (9 月 17 日), 衰落期早于其他植被, 返青期呈现微弱提前趋势, 衰落期为推迟趋势 (MK tau = 0.04)。农作物的返青期和衰落期分别开始于第 150 天 (5 月 30 日) 和第 277 天 (10 月 4 日) 左右, 均晚于自然植被, 长期趋势表现为返青期推迟、衰落期提前 (MK tau 分别为 0.02 和 -0.09)。阔叶林返青期和衰落期分别开始于第 110 天 (3 月 21 日) 和第 286 天 (10 月 13 日) 左右, 返青期推迟 (MK tau = 0.03), 衰落期稍微提前 (MK tau = -0.02)。另外, 西部草原、草丛的返青期、衰落期较晚, 但近年来均呈现显著提前趋势。研究范围内 43% 的区域植被春季物候呈现提前趋势, 相应的 57% 区域呈现推迟趋势; 67.5% 的区域秋季物候呈现提前趋势, 相应的 32.5% 区域呈现推迟趋势。

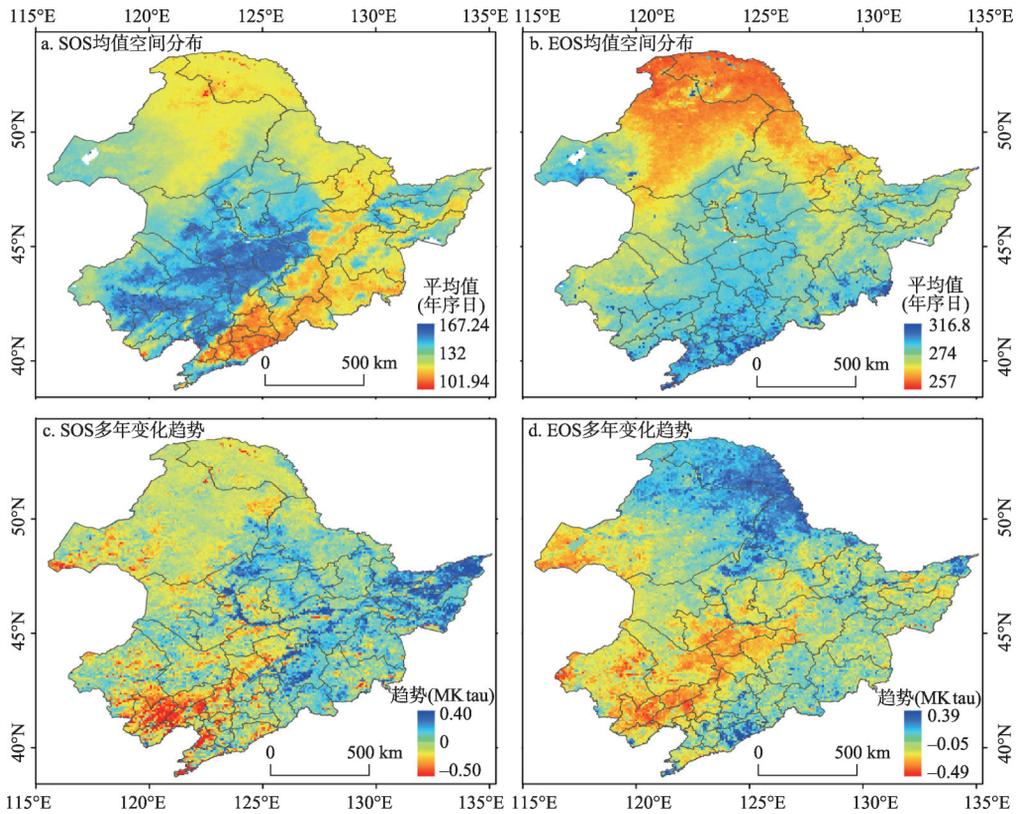
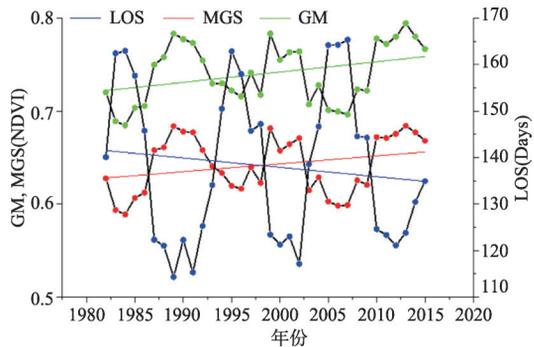


图3 1982—2015年东北地区SOS、EOS的多年平均值与年际变化趋势空间分布
 Fig. 3 Spatial distribution of multi-year mean value and long-term trend for SOS and EOS in Northeast China from 1982 to 2015

研究区整体的植被生产力 (MGS) 和生长强度 (GM) 为增长趋势, 年际波动较小; LOS 年际波动较大, 呈稍微下降趋势 (不显著) (图4)。LOS、MGS 和 GM 的时间序列均存在一个大约 10 年的周期 (如 1985—1995 区间), 但是振幅方向 LOS 与 MGS 和 GM 相反。在像元尺度分析, 研究区有 81% (18%) 区域的 GM 呈现正 (负) 趋势, 71% (28%) 的区域 MGS 呈现正 (负) 趋势, 而 LOS 的变化不显著, 50% (49%) 区域的 LOS 呈现正 (负) 趋势 (图5)。其中, 农作物的 GM 和 MGS 的增长速率最大 (MK tau 分别为 0.17 和 0.11), LOS 显著降低 (MK tau = 0.15); 针叶林的 GM、LOS、MGS 均表现为增长趋势 (MK tau 分别为 0.15、0.28 和 0.09); 草原的 GM、LOS、MGS 均表现为增长的趋势 (MK tau 分别为 0.15、0.06 和 0.10) 增长速率略低于农作物。东部阔叶林多年平均的 GM、MGS、LOS 高于其他植被, 但 GM、MGS 增长速率较低 (MK tau 分别为 0.11 和 0.06), LOS 呈现下降趋势 (MK tau = 0.08)。



注: 直线为线性拟合趋势。
 图4 1982—2015年东北地区整体的GM、LOS和MGS的年际变化趋势
 Fig. 4 Interannual variability of growth magnitude (GM), LOS and MGS in Northeast China from 1982 to 2015

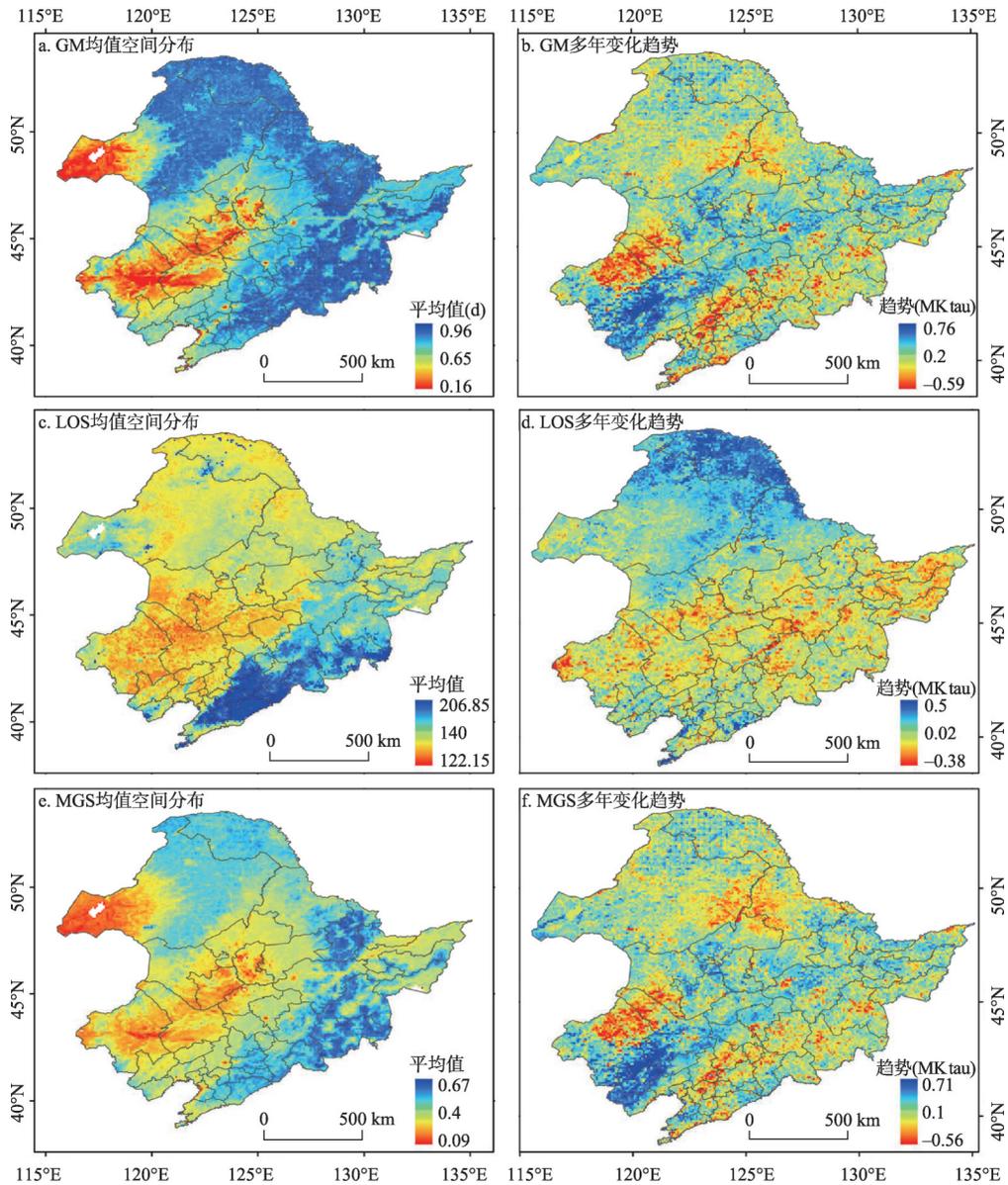


图5 1982—2015年东北地区GM、LOS和MGS的多年平均值和年际变化趋势的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of multi-year mean value and long-term trend for GM, LOS and MGS in Northeast China from 1982 to 2015

3.2 MGS与PEAK、LOS相关性空间特征

从东北区域整体来看, GM与MGS呈现显著的正相关 ($r = 0.99$), LOS与MGS之间显著负相关 ($r = 0.93$), 另外, LOS与GM也呈显著负相关 ($r = 0.89$)。植被物候特征不仅与气候变化紧密联系, 还与地表覆盖的植被类型相关。因此, 在像素级别上对MGS与GM、LOS做相关性分析并探索其空间分布格局。由GM-MGS的相关系数空间分布可知(图6), GM与MGS的相关程度在整个东北地区普遍表现为显著正相关 ($r > 0.7$, r 均值为0.93), 即植被的生产力随着生长强度的增加而增强, 其中自然植被区相关系数接近于1, 其中针叶林、阔叶林区域的相关性分别为0.96和0.95, 表现为较强的正相关; 农

作物地区 r 均值为 0.88, 相关性相对较弱。LOS 与 MGS 的相关系数分布图 (图 6b) 可知, 东北地区的 LOS 对 MGS 产生负反馈, 二者相关系数位于 $[-0.85, -0.5]$ 之间, r 均值为 -0.76 , 统计上分析植被生长活动能力随生长季的延长而减弱。草原 (草丛) 区 LOS 与 MGS 的正相关性较好 ($r = -0.65$), 高于其他植被类型中 LOS 与 MGS 的相关性 (r 均值为 -0.78)。

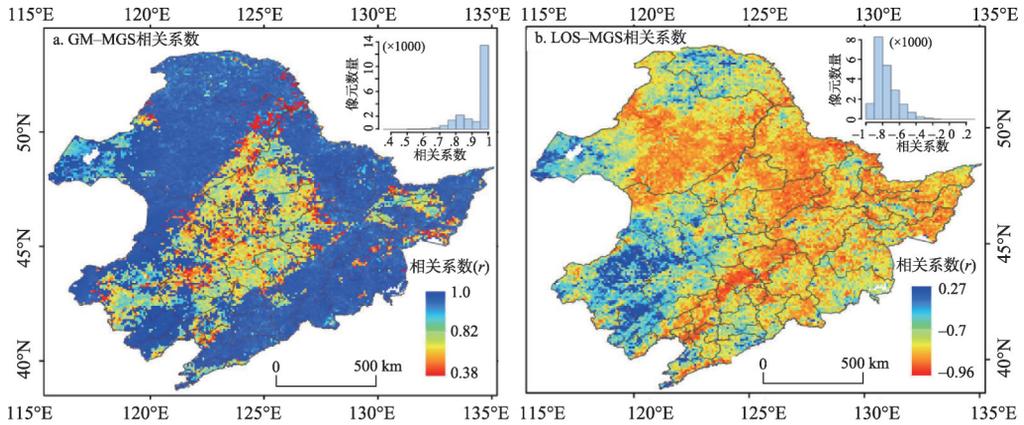


图6 1982—2015年东北地区MGS与GM和LOS的相关系数空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of correlation coefficients for MGS vs. GM and MGS vs. LOS in Northeast China from 1982 to 2015

3.3 GM、LOS对MGS相对重要性空间特征

相对重要性分析表明, 生长强度对生长状况的控制占主要作用。GM对MGS的RI指数的区域平均值为70%, 大部分区域在40%~85%之间。自然植被区域的RI指数较高, 其中草原、草甸区域RI为91%, 针叶林、阔叶林区域的RI值分别为66%和62%, 农作物区的指数值相对较低, RI值为56% (图7a)。相对应地生长季长度对植被生长状况的控制小于生长强度, 研究区LOS对MGS的RI指数均值为35%, 多数地区在15%~60%之间, 明显小于GM对MGS的贡献, 并且其空间分布特征与前者相反。LOS的RI指数在农作物区较高, 均值为40%, 自然植被区较低, 草原、针叶林、阔叶林区域的RI指数分别为27%、32%和35% (图7b)。多元线性回归的测定系数 (R^2) 表明生长季强度和长度可以很好的解释植被的生长状况。从测定系数的空间分布来看, 可能由于东北地区中部的农作物植被受人类管理活动影响较大, GM和LOS对MGS解释能力相对较弱 (70%), 二者在其他区域对MGS的解释能力接近95%。

GM和LOS对MGS的相对重要性在各植被类型区域的统计情况表明 (图8), 各植被类型中GM的相对重要性指数均要高于LOS, 即各中植被类型的夏季生产力受生长强度的控制要大于生长季持续时间。其中, 在农作物区域, 植被生长强度对植被生长过程的影响程度略有下降, 但仍大于生长季长度的影响。

4 讨论

根据本文以上发现, 现就东北地区植被生长强度和长度对生产力趋势的影响、潜在机理和不确定性展开讨论。

4.1 物候变化情况及对生产力的影响

本文发现中国东北大部分区域的植被秋季衰落日期呈现提前趋势, 与北美中高纬度

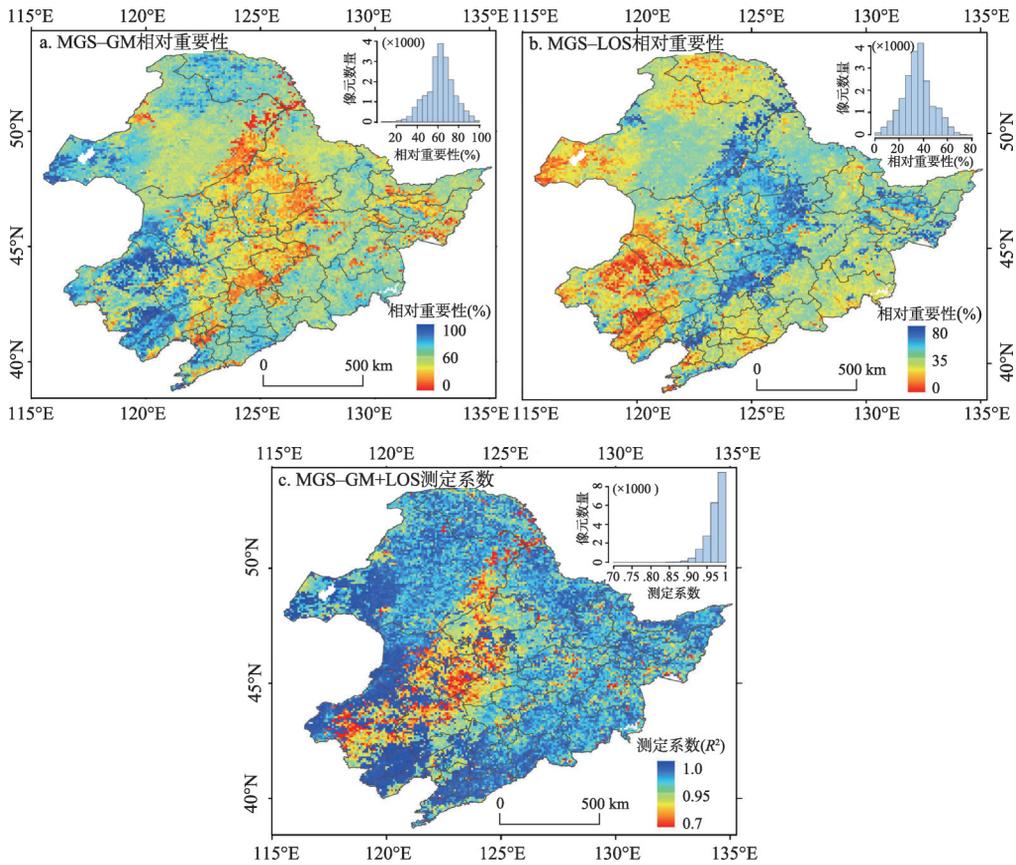


图7 1982—2015年东北地区GM、LOS对MGS的相对重要性和测定系数的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of the relative importance of GM and LOS to MGS and coefficient of determination in Northeast China from 1982 to 2015

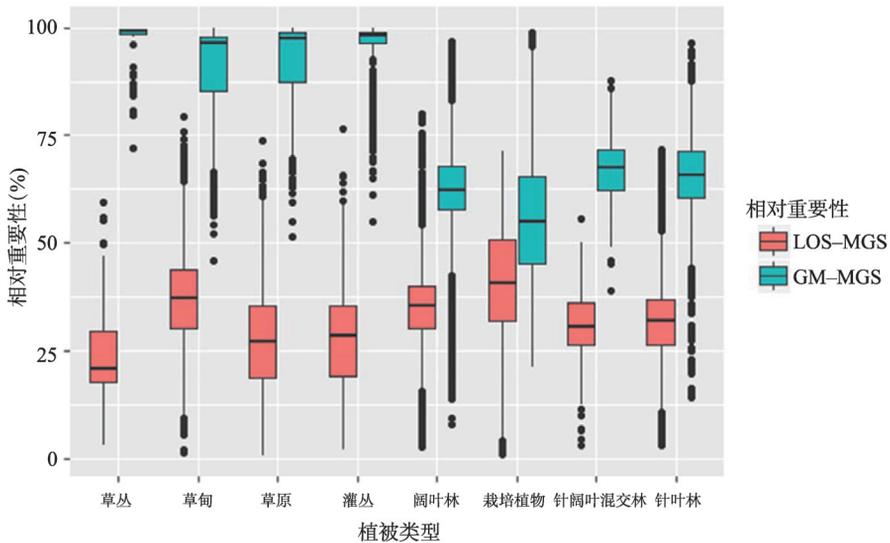


图8 不同植被类型的相对重要性分布箱线图

Fig. 8 Boxplots of the relative importance for different vegetation types

地区的植被秋季物候推迟的发现有所不同^[38],其原因可能是温度引起的干旱压力,导致秋季物候不会持续的呈现推迟趋势^[39]。同时,东北地区植被返青期物候也未呈现大面积的提前状况。因此,春季物候的推迟和秋季物候的提前趋势,综合导致了东北地区约50%的植被区域生长季长度呈现缩短趋势。基于模型NPP的研究也表明东北地区农作物生长季呈缩短趋势^[24]。相反地,生长季峰值在东北大部分植被覆盖区内呈现显著的增强趋势,可能是由于合理阈值范围内的升温导致植被光合作用增强,促进了植被的固碳能力。该发现也印证了植被生长峰值在揭示陆地生态系统生产力潜力方面的重要作用^[37]。农作区植被生长状况受人类耕作管理活动影响较大,因此,生长季长度对植被生长情况的控制更强;自然植被区域的植被生产力长期变化趋势主要受生长强度影响。

根据以往研究,本文将生长强度和生长季长度划归为植被固碳过程的功能属性^[34]。从植被生长轨迹形态上,生长强度和生长季长度可以很好的刻画植被生长季内的生产力状态。从长期变化趋势来看,中国东北植被的生长状况主要受生长强度的控制。东北大部分地区生长季缩短削弱了其对生产力的贡献,进而突出了生长幅度对植被生长状态的控制。从机理上分析,物候变化不仅受到气候条件的影响(如干旱、升温、极端气候),植物内在的基因特征也决定了返青期和衰落期不可能持续提前或推迟,因此决定了生长周期的上限,进一步限制了生长季长度对生产力累积的作用。相反地,温带植被夏季生长旺季一般与良好的水热条件同期^[37],导致植被光合作用增强和短期快速的碳固定^[40-42],因此会对生产力的长期变异产生重要影响。

4.2 生长强度影响因素分析

通过植被生长强度和生长季长度对生产力变化的相对重要性分析,发现生长强度是控制植被生产力长期变化趋势的主要因素,因此有必要进一步讨论影响生长强度的环境因子,以进一步揭示其对生产力变化的控制机理。已有研究表明气候和物候是影响植被生长强度的重要因素^[40],在此以气温、降水和返青期时间点(SOS)与植被生长强度(GM)的相关性表示影响程度。考虑到植被生长对气候因子的响应存在一定的滞后性^[43],因此选取夏季生长峰值前一个月(试验表明其他滞后期不显著,如前2个月和前3个月)的平均气温和总降水做为气候影响因子。根据相关系数的空间分布可以推断,降水和温度对植被生长强度的显著影响主要发生在呼伦贝尔西部草原区和赤峰、通辽的草原区,在农作区和森林区域影响不显著(图9)。植被生长强度与降水、气温关系分别主要表现为正相关性(图9a,显著区的66%)和负相关性(图9b,显著区的57%)。SOS与GM呈现显著正相关并基本覆盖整个东北地区,但是空间异质性明显。在大兴安岭针叶林、呼伦贝尔西部草原和西南部草原,以及辽宁、吉林东部的阔叶林区域SOS与GM相关性较低,在农作区和北部阔叶林区域二者相关性较强。该现象说明降水和气温对植被生长强度的影响较小并主要集中在草原区域,春季返青期对生长强度的影响较大,并且返青期推迟有利于夏季生长强度的提升。基于北方森林的研究表明春季返青期提前会导致土壤水分提前消耗,导致夏季水分利用压力增大进而导致植被生长强度的降低^[12],此研究从相反的视角支持了本文中返青期推迟有利于生长强度增强的现象,其原因可能是返青期推迟并未引起春季植被的水分赤字,保障了夏季植被生长具有较好的水分条件。综上,气候因子和物候返青期均对植被夏季生长强度产生影响,但是返青期影响程度和范围更加显著。

4.3 不确定性分析

在数据分析和物候提取方法方面,本文基于曲线求导的植被关键物候参数提取方法不受植被类型和区域的限制^[15],且无需人工设置阈值参数,保证了基于遥感的植被关键物候节点的准确性。另外,趋势分析采用的非参数趋势检验法(Mann-Kendall趋势法)

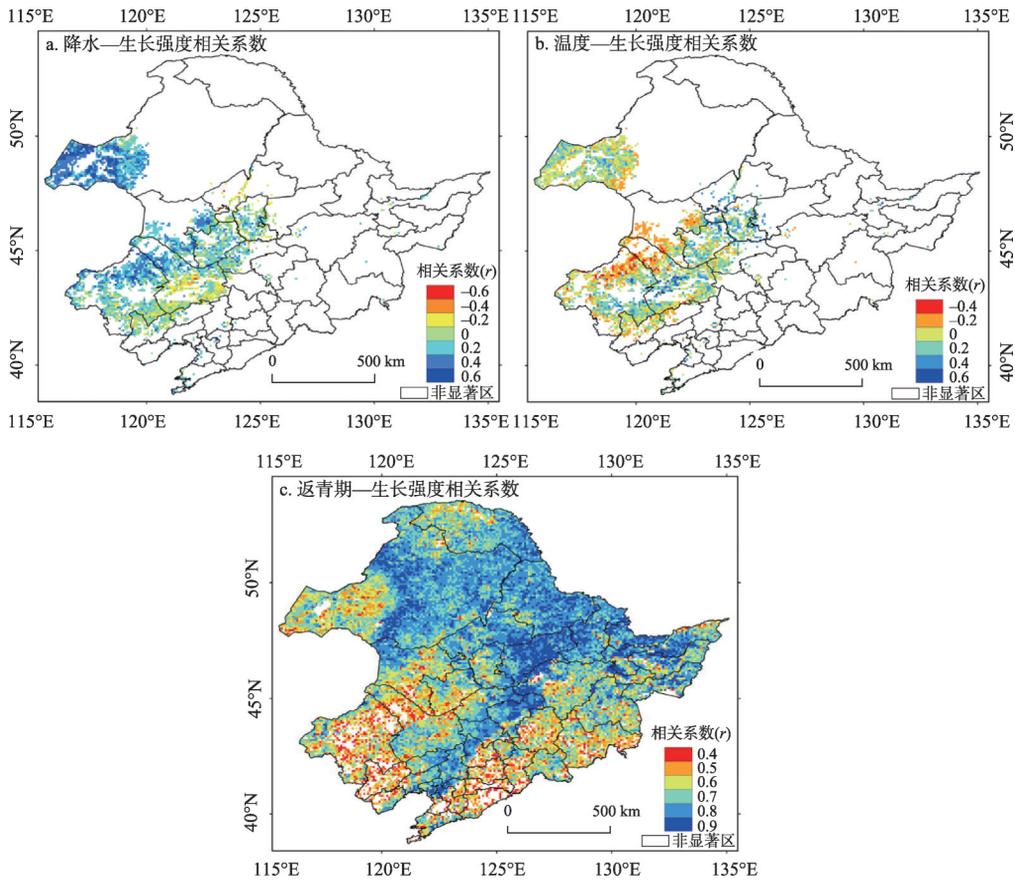


图9 1982—2015年东北地区降水、气温和春季返青期与生长强度的相关系数空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of correlation coefficient between growth magnitude with precipitation, temperature and SOS in Northeast China from 1982 to 2015

能够稳健的提取物候参数的发展趋势,而相对重要性方法可以量化的探索多元变量(植被LOS和MAG)对植被生产力变化的相对贡献^[44],有利于识别植被固碳的关键影响因素。

在数据源方面,目前尚未有大范围、长时序的植被生产力(如GPP)数据,因此本文基于目前最长时序的NDVI数据集探索植被生产力长期变化的控制因素。已有研究表明,NDVI与植被生产力(如GPP)在时间序列上具有较好的相关性^[45],因此采用NDVI代表植被生产力具有可行性。另外,陆地生态系统的固碳是一个复杂的过程,受众多植物生理和化学因素的影响,本文只是从植被生长周期的形态上探索了植被生产力长期变异的控制因素,在未来的研究中,还需要利用地面观测、模型数据或者其他遥感数据进行植被生产力多种控制因素的验证和深入分析。

另外,土地覆盖变化是植被物候趋势分析中重要的不确定性因素,这也将进一步影响生长季长度及其对生产力的控制作用。本文所用NDVI数据空间分辨率为8 km,像元均是包含多种植被类型的混合像元,因此无法直接获取每个像素特定年份物候所代表的植被类型,但是可以通过年际变化分析物候特征。1980—2015年间,东北地区土地利用类型转变主要集中在东北平原旱地向水田交错转换区以及东北中部草地向耕地转化,其他植被区域变化不显著^[46]。土地覆被类型主要为草本类自然植被转向栽培植被或栽培植

被内种类的变化,而森林到农作物的变化面积较小,说明变化的植被类型间物候差异有限(草原和农作物之间物候差异小于森林和农作物差异)^[47];另外,大部分自然植被到栽培植被的变化发生在研究时间段的早期,从趋势分析来看后期时间段的物候样本足够呈现显著趋势并主导整体趋势。同时相对重要性结果也表明,在各植被类型中生长强度对生产力长期变异的控制作用显著强于生长季长度(图8),而且此过程中已经包含土地覆盖变化的信息,因此土地覆盖变化不会导致整体控制因素的反转。以上分析说明在土地覆盖变化的背景下,探索植被生长强度和生长季长度对生产力变化趋势的影响具有可行性。在下一步的工作中,将借助多期东北土地覆盖变化数据深入探讨土地覆被变化对植被物候长期趋势的影响。

5 结论

本文利用长时序NDVI遥感数据探索了植被生长强度和生长季长度对植被生产力长期变化趋势的影响,主要得到以下结论:

(1)从东北地区整体来看,植被生产力呈增强趋势并主要受生长强度的影响(正相关)。在不同的植被覆盖区,生长强度和生长季长度对植被生长过程的影响存在空间差异。相对重要性分析表明,西部草原区生产力受生长强度影响最大,对生长季长度响应较弱;北部针叶林、东部阔叶林区域对生长强度的响应较强;中部至西南部的农作物生产力受生长强度的影响最小,生长季长度的控制最为显著(负相关),生长强度对农作物生产力的影响弱于自然植被。降水、温度和返青期均影响植被生长强度变化,但是返青期作用的程度和地理范围更显著。

(2)从植被关键物候点的年际变化趋势来看,东北地区大部分区域SOS推迟(北部针叶林除外)、EOS提前(主要为农作物和草原),SOS和EOS的共同作用导致LOS缩短。除草原区外,东北地区生长强度和生产力基本均为增强趋势,说明了生长强度对生产力变异的影响显著。

致谢:中国科学院地理科学与资源研究所牛书丽研究员和李仁强博士为本文构思提出了宝贵建议,特此致谢。

参考文献(References)

- [1] Lucht W, Prentice I C, Myneni R B, et al. Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*, 2002, 296(5573): 1687-1689.
- [2] Guo Jian, Chen Shi, Xu Bin, et al. Remote sensing monitoring of grassland vegetation greenup based on SPOT-VGT in XiLingol League. *Geographical Research*, 2017, 36(1): 37-48. [郭剑, 陈实, 徐斌, 等. 基于SPOT-VGT数据的锡林郭勒盟草原返青期遥感监测. *地理研究*, 2017, 36(1): 37-48.]
- [3] Li Zhengguo, Tang Huajun, Yang Peng, et al. Progress in remote sensing of vegetation phenology and its application in agriculture. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2012, 33(5): 20-28. [李正国, 唐华俊, 杨鹏, 等. 植被物候特征的遥感提取与农业应用综述. *中国农业资源与区划*, 2012, 33(5): 20-28.]
- [4] Song Chunqiao, Ke Linghong, You Songcai, et al. Comparison of three NDVI time-series fitting methods based on TIMESAT: Taking the grassland in northern Tibet as case. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(2): 147-155. [宋春桥, 柯灵红, 游松财, 等. 基于TIMESAT的3种时序NDVI拟合方法比较研究:以藏北草地为例. *遥感技术与应用*, 2011, 26(2): 147-155.]
- [5] Xu Yunjia, Dai Junhu, Wang Huanjiong, et al. Variations of main phenophases of natural calendar and analysis of responses to climate change in Harbin in 1985-2012. *Geographical Research*, 2015, 34(9): 1662-1674. [徐韵佳, 戴君虎, 王焕炯, 等. 1985—2012年哈尔滨自然历主要物候期变动特征及对气温变化的响应. *地理研究*, 2015, 34(9): 1662-

- 1674.]
- [6] Keenan T F, Gray J, Friedl M A, et al. Net carbon uptake has increased through warming-induced changes in temperate forest phenology. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 598-604.
- [7] Zhou Yuke. Comparative study of vegetation phenology extraction methods based on digital images. *Progress in Geography*, 2018, 37(8): 1031-1044. [周玉科. 基于数码照片的植被物候提取多方法比较研究. *地理科学进展*, 2018, 37(8): 1031-1044.]
- [8] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [9] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169(3): 156-173.
- [10] Goetz S J, Epstein H E, Bhatt U S, et al. Recent changes in Arctic vegetation: Satellite observations and simulation model predictions//Gutman G, Reissell A. *Eurasian Arctic Land Cover and Land Use in a Changing Climate*. Amsterdam, Netherlands: Springer, 2011: 9-36.
- [11] Zhang K, Kimball J S, Mu Q Z, et al. Satellite based analysis of northern ET trends and associated changes in the regional water balance from 1983 to 2005. *Journal of Hydrology*, 2009, 379(1): 92-110.
- [12] Buermann W, Bikash P R, Jung M, et al. Earlier springs decrease peak summer productivity in North American boreal forests. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 24-27.
- [13] 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.
- [14] Hudson I L, Keatley M R. *Phenological Research: Methods for Environmental and Climate Change Analysis*. Amsterdam, Netherland: Springer, 2010.
- [15] Fan Deqin, Zhao Xuesheng, Zhu Wenquan, et al. Phenology of *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia and its response to climate changes. *Progress in Geography*, 2016, 35(3): 304-319. [范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 等. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 304-319.]
- [16] Dragoni D, Rahman A F. Trends in fall phenology across the deciduous forests of the eastern USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 157: 96-105.
- [17] Hmimina G, Dufrêne E, Pontailier J Y, et al. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 132: 145-158.
- [18] Fisher J I, Richardson A D, Mustard J F. Phenology model from surface meteorology does not capture satellite-based greenup estimations. *Global Change Biology*, 2006, 13(3): 707-721.
- [19] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(3): 471-475.
- [20] Wang Zhi. Study on vegetation dynamic based on vegetation phenology and NOAA/AVHRR NDVI in the North-South Transect of Eastern China [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2008. [王植. 基于物候表征的中国东部南北样带上植被动态变化研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.]
- [21] Pei Shunxiang. Phenological response of typical plants at high latitudes, widely distributed species *Prunus persica* and species *Prunus davidina* to climate change in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011. [裴顺祥. 我国高纬度地区典型植物及全国广布种毛桃、山桃物候对气候变化的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.]
- [22] Yu Xinfang, Zhuang Dafang. Monitoring forest phenophases of Northeast China based on MODIS NDVI data. *Resources Science*, 2006, 28(4): 111-117. [于信芳, 庄大方. 基于MODIS NDVI数据的东北森林物候期监测. *资源科学*, 2006, 28(4): 111-117.]
- [23] Hou Xuehui, Niu Zheng, Gao Shuai, et al. Monitoring vegetation phenology in farming-pastoral zone using SPOT-VGT NDVI data. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1): 142-150. [侯学会, 牛铮, 高帅, 等. 基于SPOT-VGT NDVI时间序列的农牧交错带植被物候监测. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 142-150.]
- [24] Qiu Yue, Fan Deqin, Zhao Xuesheng, et al. Spatio-temporal changes of NPP and its responses to phenology in Northeast China. *Geography and Geo-Information Science*, 2017, 33(5): 21-27. [邱玥, 范德芹, 赵学胜, 等. 中国东北地区植被NPP时空变化及其对物候的响应研究. *地理与地理信息科学*, 2017, 33(5): 21-27.]
- [25] Wang Hong, Li Xiaobing, Li Xia, et al. The variability of vegetation growing season in the northern China based on NOAA NDVI and MSAVI from 1982 to 1999. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 504-515. [王宏, 李晓兵, 李霞, 等. 基于NOAA NDVI和MSAVI研究中国北方植被生长季变化. *生态学报*, 2007, 27(2): 504-515.]

- [26] Editorial Committee for Vegetation Map of China. Vegetation Map of the People's Republic of China (1:1000000). Beijing: Geological Publishing House, 2007. [中国科学院中国植被图编辑委员会. 中华人民共和国植被图(1:1000000). 北京:地质出版社, 2007.]
- [27] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal Remote Sensing*, 2005, 26(20): 4485-4498.
- [28] Beck H E, McVicar T R, van Dijk A I J M, et al. Global evaluation of four AVHRR - NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10): 2547-2563.
- [29] Zhang Wen, Bao Gang, Bao Yuhai. Vegetation SOS dynamic monitoring in Inner Mongolia from 1982 to 2013 and its responses to climatic changes. *China Agricultural Informatics*, 2018, 30(2): 63-75. [张雯, 包刚, 包玉海. 1982—2013年内蒙古植被返青期动态监测及其对气候变化的响应. *中国农业信息*, 2018, 30(2): 63-75.]
- [30] Wang J, Dong J, Yi Y, et al. Decreasing net primary production due to drought and slight decreases in solar radiation in China from 2000 to 2012. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(1): 261-278.
- [31] Beck P S A, Atzberger C, Høgda K A, et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(3): 321-334.
- [32] Zhou Yuke, Liu Jianwen. Spatio-temporal analysis of vegetation phenology with multiple methods over the Tibetan Plateau based on MODIS NDVI data. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(3): 486-498. [周玉科, 刘建文. 基于MODIS NDVI和多方法的青藏高原植被物候时空特征分析. *遥感技术与应用*, 2018, 33(3): 486-498.]
- [33] Piao S L, Yin G D, Tan J G, et al. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1601-1609.
- [34] Fu Z, Dong J W, Zhou Y K, et al. Long term trend and interannual variability of land carbon uptake: The attribution and processes. *Environment Research Letters*, 2017, 12(1): 014018.
- [35] Meng Shan. Estimation and interaction of marine and terrestrial ecosystem services value in coastal provinces and cities of China. *Journal of Green Science and Technology*, 2018, 16: 299-302. [孟珊. 沿海省市海洋/陆地生态服务价值估算及相互作用关系. *绿色科技*, 2018, 16: 299-302.]
- [36] Groemping U. Relative importance for linear regression in R: The Package relaimpo. *Journal of Statistical Software*, 2006, 17(1): 1-27.
- [37] Huang K, Xia J Y, Wang Y P, et al. Enhanced peak growth of global vegetation and its key mechanisms. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(12): 1897-1905.
- [38] Zhu W Q, Tian H Q, Xu X F, et al. Extension of the growing season due to delayed autumn over mid and high latitudes in North America during 1982-2006. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(2): 260-271.
- [39] Wu C Y, Wang X J, Wang H J, et al. Contrasting responses of autumn-leaf senescence to daytime and night-time warming. *Nature Climate Change*, 2018, 8(12): 1092-1096.
- [40] Buermann W, Forkel M, O'Sullivan M, et al. Widespread seasonal compensation effects of spring warming on northern plant productivity. *Nature*, 2018, 562(7725): 110-114.
- [41] Forkel M, Carvalhais N, Rödenbeck C, et al. Enhanced seasonal CO₂ exchange caused by amplified plant productivity in northern ecosystems. *Science*, 2016, 351(6274): 696-699.
- [42] Gonsamo A, Chen J M, Ooi Y W. Peak season plant activity shift towards spring is reflected by increasing carbon uptake by extratropical ecosystems. *Global Change Biology*, 2018, 24(5): 2117-2128.
- [43] Wu D H, Zhao X, Liang S L, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3520-3531.
- [44] Ahlström A, Raupach M R, Schurgers G, et al. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. *Science*, 2015, 348(6237): 895-899.
- [45] Gilmanov T G, Tieszen L L, Wylie B K, et al. Integration of CO₂ flux and remotely-sensed data for primary production and ecosystem respiration analyses in the Northern Great Plains: Potential for quantitative spatial extrapolation. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14(3): 271-292.
- [46] Liu Jiuyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14. [刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [47] Zhang X Y, Liu L L, Henebry G M. Impacts of land cover and land use change on long-term trend of land surface phenology: A case study in agricultural ecosystems. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(4): 044020.

Analysis of controlling factors for vegetation productivity in Northeast China

ZHOU Yuke

(Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The length and magnitude of vegetation growing season are important factors affecting the change of vegetation productivity during the growth process. Under the context of global warming, vegetation growing season at the middle and high latitudes of the Northern Hemisphere has prolonged significantly and caused positive feedback on vegetation productivity. However, the change of vegetation growth magnitude and its impact on vegetation productivity are still unclear. Northeast China is located in the mid-latitude temperate zone with high vegetation coverage and various vegetation types. Exploring the change of vegetation growth season length and magnitude and their influence on productivity is meaningful for understanding and coping with ecosystem changes in the study area. Based on the long-term GIMMS NDVI3g remote sensing data (1982-2015), the curvature derivation method was used to extract the key vegetation phenological parameters such as start of season (SOS), end of season (EOS), growth season length (LOS) and growth magnitude (GM). Then the relative importance (RI) method was employed to detect the relative contribution of LOS and GM to vegetation productivity (expressed as mean NDVI value in growing season, MGS) in growing season. The results showed that: (1) The overall vegetation productivity and growth magnitude in the study area showed an increasing trend, while the LOS showed a decreasing trend, which led to the GM becoming the main factor controlling the change trend of productivity (RI = 70%); (2) In different vegetation coverage areas, the impact of growth season length and magnitude on productivity showed significant spatial discrepancy. Vegetation productivity in the western grassland region was most significantly controlled by GM (RI = 93%), followed by coniferous forest and broad-leaved forest (RI = 66%, 62%) and crop area was least affected by GM (RI = 56%). The impact of LOS on vegetation productivity is most significant in croplands (RI = 40%) and affects about 27%-35% in other areas. GM was positively correlated with productivity in all vegetation cover areas, while LOS was negatively correlated with productivity; (3) Both climate factors (precipitation, temperature) and phenological changes affect the main contributing factor GM. In detail, the change of SOS has the most significant effect on the GM in a large spatial range. The main manifestation is that delayed SOS can promote GM. Based on remote sensing technique, this study found that vegetation in Northeast China is generally growing more vigorously, but vegetation growth activities are mainly affected by growth magnitude. This study can provide direct evidence for the study of vegetation phenological changes and productivity response under the background of global change.

Keywords: vegetation phenology; vegetation productivity; growth season length; growth magnitude; long-term trend; NDVI