

DOI: 10.5846/stxb201409231884

俎佳星, 杨健. 东北地区植被物候时序变化. 生态学报, 2016, 36(7): - .

Zu J X, Yang J. Temporal variation of vegetation phenology in northeastern China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): - .

东北地区植被物候时序变化

俎佳星^{1,2}, 杨 健^{1,*}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110016

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 植被与气候的关系非常密切, 植被物候可作为气候变化的指示器。东北地区位于我国最北部, 是气候变化的敏感区域, 研究该区植被物候对气候变化的响应对阐明陆地生态体碳循环具有重要意义。本文利用 GIMMS AVHRR 遥感数据集得到了东北地区阔叶林、针叶林、草原和草甸 4 种植被 25 年 (1982—2006) 的物候时序变化, 得出 4 种植被春季物候都表现出先提前后推迟的现象, 秋季物候的变化则比较复杂, 阔叶林和针叶林整体上呈现出秋季物候推迟的趋势, 草原和草甸则表现为提前—推迟—提前的趋势。应用偏最小二乘 (Partial Least Squares) 回归分析了该区域植被物候与气候因子之间的关系, 结果表明: 春季温度与阔叶林、针叶林和草甸春季物候负相关, 前一年冬季温度与草原春季物候正相关, 降水与植被春季物候的关系有点复杂; 4 种植被秋季物候与夏季温度均呈正相关, 除草原外, 其余 3 种植被秋季物候均与夏季降水负相关。植被春季物候可能主要受温度影响, 而秋季物候很可能主要受降水控制。

关键词: 气候变化; 遥感; 物候; 偏最小二乘回归

Temporal variation of vegetation phenology in northeastern China

ZU Jiaying^{1,2}, YANG Jian^{1,*}

1 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Climate change is a very important issue in the natural sciences, and has received much attention in various research fields. Vegetation phenology may be a good indicator of climate change at the regional or global scale, because of the close relationship between vegetation and climate. In this study, we analyzed the trend of vegetation phenology from 1982 to 2006 and its driving climatic factors in northeastern China, which has experienced a rapid climate change in the past three decades partially due to its high latitude. We used a time series of 15-day averaged NDVI derived from the daily GIMMS AVHRR dataset to analyze the trend of vegetation phenology. We first used a Savitzky—Golay filter to reduce the noise in the NDVI curve to account for data contamination by random factors, then conducted a double logistic fitting to extract phenological parameters. To account for varied phenology responses to climate change among different vegetation types, we analyzed time series of those phenological parameters for the four major vegetation types in northeastern China, including broad-leaved forest, coniferous forest, steppe, and meadow. In addition, we performed a Partial Least Squares (PLS) regression to examine the relationship between vegetation phenology and climatic variables. Results showed that spring phenology exhibited an advancing trend followed by a delay for all four vegetation types, but different vegetation types had different turning points. In contrast, the autumn phenology was somewhat complicated with inconsistent patterns across the four vegetation types. Broad-leaved forest and coniferous forest had an overall delayed trend, but the other two types

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目 (41222004); 中国科学院“百人计划”项目 (09YBR211SS); 国家“十二五”长白山森林景观恢复项目 (Y2KJB631G2)

收稿日期: 2014-09-23; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangjian@iae.ac.cn

showed a delay-advancing-delay trend. During the study period of 25 years, the spring phenology advanced 11 days for meadow, 7 days for coniferous forest, 5 days for broad-leaved forest, and 3 days for steppe. Autumn phenology was delayed 6 days for broad-leaved forest, 4 days for coniferous forest, and 1 day for meadow, while the steppe showed an advance of 8 days. Partial Least Squares (PLS) regressions indicated that spring temperature was negatively correlated with the spring phenology of broad-leaved forest, coniferous forest and meadow, while previous year winter temperature was positively correlated with the spring phenology of steppe. The relationship between precipitation and spring phenology was complex without any evident patterns. Except for steppe, the autumn phenology of all vegetation types had a negative correlation with summer precipitation. Spring phenology maybe mainly driven by temperature, while autumn phenology was mainly controlled by precipitation. Our study demonstrated strong effects of rapid climate warming on vegetation phenology in northeastern China, which may exert cascading influences on ecosystem processes and functions such as carbon sequestration and ecosystem productivity.

Key Words: climate change; remote sensing; phenology; partial least squares regression

物候学主要是研究自然界的植物(包括农作物)、动物和环境条件(气象、水文、土壤条件)的周期变化之间相互关系的科学^[1]。植被物候对于气候的波动性非常敏感,而且还是陆面过程模型及全球碳循环的重要参数,物候的变化可以作为全球环境变化的强有力证据^[2-4]。植被物候的研究不仅有助于增进植被对气候变化响应的理解,而且对提高气候-植被之间物质与能量交换模型的模拟精度、准确评估植被生产力与全球碳收支具有重要意义^[5]。

目前常用的物候观测方法以地面定点观测和遥感观测为主。传统的地面定点观测虽然客观准确但不能形成大尺度面状观测数据^[6,7],但可以作为遥感观测的验证。遥感卫星主要有 NOAA, SPOT, MODIS, Landsat 等传感器,这些卫星不仅能够获取连续的面状数据,有的还具有很高的时间分辨率,能够为地面定点观测提供补充和支持。国内外学者针对不同数据源对植被物候变化做了大量研究,如朴世龙用遥感数据分析了中国温带植被 1982—1999 年物候变化,结果表明春季物候提前,秋季物候推迟,生长时间延长;张戈丽等用 3 种遥感数据分析了青藏高原植被物候,发现该区植被春季物候近三十年来持续提前;在欧洲和北美,植被的春季物候在过去几十年内也呈现提前趋势^[8-10]。这些都得到了地面观测结果的支持,如在我国,葛全胜等对于我国许多地区的近半个世纪的物候数据研究表明,春季温度升高使得这些地区的植被春季物候不断提前,且不同地区增速也不一样,存在显著区域差异^[11-12]。

东北地区位于我国中高纬度,是全球变化的敏感区域^[13]。已有学者对该区开展了物候研究,但大部分研究的时间序列较短,且没有考虑植被受气候因子影响所表现出的非线性^[5,14-15],因此,使用非线性的分段线性回归方法研究植被的长时间序列年际变化很有必要。此外,植被生长季开始或结束前几个月的温度与降水对于植被物候有着不同的贡献,研究二者之间的关系有助于深入认识陆地生态系统对气候变化的响应^[16]。本研究的目的是在气候变化背景下,分析东北地区植被物候的时序变化,并探索该区植被物候与气候因子(气温、降水)之间的关系。

1 研究区概况

东北地区地处亚欧大陆东缘,地理坐标 38°40′—53°34′N, 115°05′—135°02′E, 自南向北跨越暖温带、中温带和寒温带,属温带季风性气候。包括辽宁省、吉林省、黑龙江省以及内蒙古自治区东四盟市(呼伦贝尔市、通辽市、赤峰市、兴安盟),自然资源丰富。该区是中国最大的林区,也是中国林木的重要生产基地^[17]。森林主要分布于北部的大小兴安岭以及东南部的长白山。主要森林类型包括以落叶松、红松、樟子松、云杉等为主的针叶林和以白桦、水曲柳、蒙古栎、山杨等为主的阔叶林。草原主要分布在内蒙古所属区域,耕地则位于东北部和中部的平原地带(三江平原和东北平原)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据获取及预处理

本研究采用的遥感数据来源于寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn/>) 的 GIMMS 数据集, 时间分辨率是 15 d, 空间分辨率是 8 km。虽然该数据集经过最大值合成 (Maximum Value Composite) 之后在一定程度上降低了云的影响, 但太阳高度角、观测角度、臭氧、气溶胶等一些随机性因素, 使得时间序列数据的变化呈不规则状态, 造成时间序列数据波动很大, 曲线季节变化趋势不明显, 因此有必要对这些 NDVI 曲线进行平滑处理, 即对曲线进行重构^[10,18-19]。本文采用公式 (1) 所示的 Savitzky—Golay 滤波^[20-22]对 NDVI 进行平滑, 最终得到趋于真值的 NDVI 时序曲线。式中 Y 是原始的 NDVI 值, Y_j^* 是平滑后的 NDVI 值, C_i 是第 i 个 NDVI 值的系数, N 是平滑窗口的大小, m 是平滑窗口的半波宽度。

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

其他辅助数据有: 来源于中国气象科学数据共享服务网的 104 个气象站点的月均温和月降水量数据; 以及中国科学院中国植被图编辑委员会主编的 1:1000000 植被类型图矢量数据, 如图 1 所示。对每一种植被类型, 选取离它最近的气象站点, 将气象站点的月均温和月降水量分别合成逐年的月均温和月降水量。

2.2 物候参数提取

当前, 国内外学者已提出多种遥感物候提取方法, 常见的有阈值法, 移动平均法, 导数法, logistic 函数拟合法以及多种方法的综合等等^[23-26], 但目前没有一种方法被普遍接受。本文采用导数加阈值的方法来进行物候参数的提取, 具体做法如下: 用公式 (2) 所示的 double logistic 函数^[27-29]对每一个像元的年 NDVI 时间序列进行拟合并做 Savitzky-Golay 滤波, 然后对该函数求导, 将 NDVI 变化率最大的点定义为生长季始期 (start of growing season, SOS); 对于生长季末期 (end of growing season, EOS) 则将其定义为 double logistic 函数在下降的过程中 NDVI 值达到年 NDVI 整体增幅的 80%, 即 $0.8 * (NDVI_{\min} + NDVI_{\text{diff}})$; 生长季长度 (length of growing season, LOS) 则是前二者的差值, 如图 2 所示。式中: $NDVI_{\min}$ 和 $NDVI_{\text{diff}}$ 分别为年 NDVI 的最小值和年 NDVI 差值; r_i 和 r_d 分别为 NDVI 在左右两拐点的最大变化率; SOG 和 EOG 各为理论上的 SOS 和 EOS。以上所有数据处理均在 R 软件中进行。

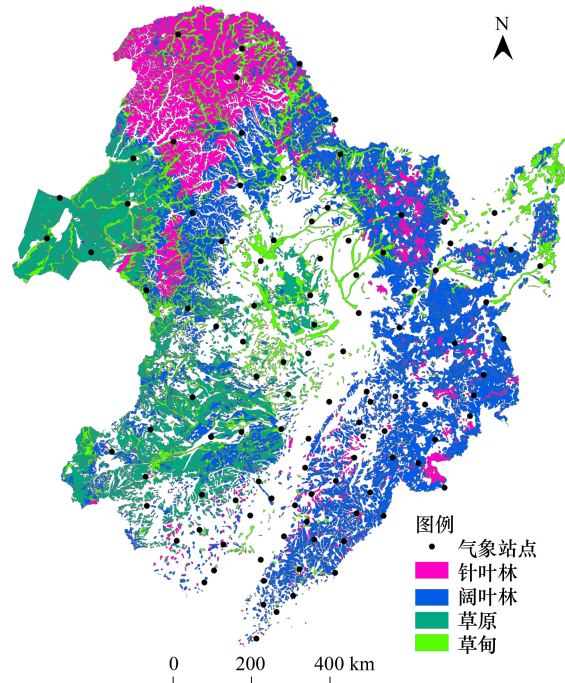


图 1 研究区四种植被类型及气象站点空间分布

Fig. 1 Location of four vegetation types and weather stations

$$NDVI_t = NDVI_{\min} + NDVI_{\text{diff}} \cdot \left(\left(\frac{1}{1 + \exp(r_i(SOG - t))} \right) + \left(\frac{1}{1 + \exp(r_d(EOG - t))} \right) - 1 \right) \quad (2)$$

2.3 分段线性回归

国内外已有很多学者在不同尺度上对于物候开展了研究^[30-31], 发现北半球中高纬度 1980s 到 1990s 之间, 春季物候明显提前, 之后春季物候则出现推迟现象。因此, 本文也采用分段线性回归 (公式 (3)) 来分析过去 25 年物候年际变化趋势^[9]。首先用 1:1000000 的植被类型图掩膜提取东北地区 4 种植被类型 (阔叶林、针叶林、草原、草甸) 逐年的物候参数, 对每一种植被类型求取其年均 SOS 和 EOS 值。其次, 对 4 种植被 25 年的

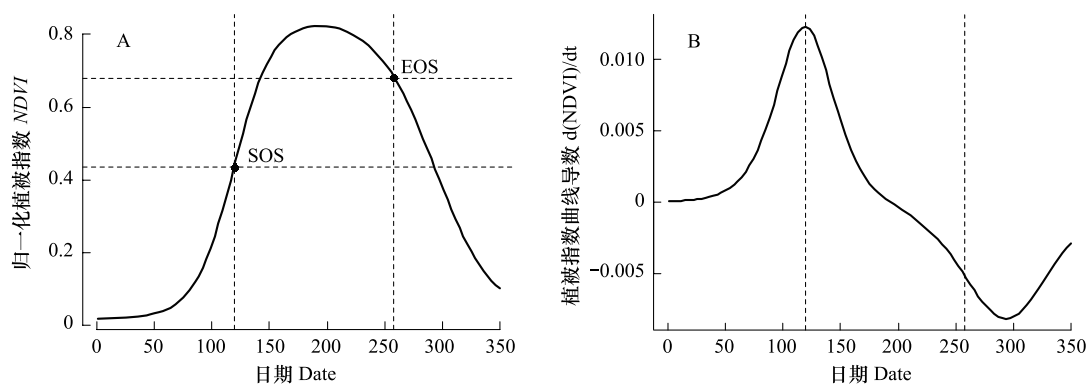


图2 物候参数提取

Fig. 2 Extraction of phenological parameters

年均 SOS 和 EOS 值均采用滑动窗口为 3 的滑动平均方法来消除统计上的不确定性。最后进行分段线性回归。

$$y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon, & x \leq \alpha \\ \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2(x - \alpha) + \varepsilon, & x > \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 表示时间序列的年份, y 是年均物候参数值 (SOS 或 EOS), α 是时间序列趋势转折点, β_1 和 $\beta_1 + \beta_2$ 分别表示转折点前后的变化率, ε 代表残差项。用 F 检验来检验分段线性回归的显著性, P 值 < 0.05 认为具有显著性。

2.4 偏最小二乘回归

简单的相关分析在分析自变量与因变量的关系时, 没有考虑自变量之间的相关性, 得到的相关系数具有一定的偏差。偏最小二乘 (PLS) 回归能很好的解决这一问题^[32]。偏最小二乘回归分析有两个主要的输出结果: 变量重要性值 (VIP) 和标准化的相关系数, VIP 阈值一般采用 0.8, 小于该阈值的相关系数认为不显著。由于研究区植被的生长季始期平均出现在 5 月份 (第 140 天), 生长季末期平均出现在 9 月份 (第 253 天)。因此我们选取 4 种植被生长季始期和末期前 8 个月的温度和降水, 应用偏最小二乘回归来分析其与物候参数之间的关系^[33-34]。

3 结果与分析

3.1 物候年际变化特征

根据图 3 可以看出, 阔叶林和针叶林的平均 SOS 开始最早, 大约出现在第 130 天, 草甸的 SOS 次之, 约为 140 天, 最晚的则是草原, 平均出现在第 155 天。在 1982–2006 年间, 4 种植被的 SOS 变化趋势均表现出先提前后推迟的现象。不同植被在转折点前后的变化率也不一样。阔叶林和针叶林的变化趋势相对一致, 转折点大约出现在 1997 年, 但二者在该转折点之前的变化率有很大差别, 阔叶林的变化率为 -0.028 d/a , 针叶林的变化率为 -0.26 d/a 。草原和草甸的变化趋势也相对一致, 转折点大约出现在 1993 年, 但二者 SOS 均值相差近 15 d, 转折点之前的变化率也相差很大, 草原的变化率为 -1.15 d/a , 草甸的变化率仅为 -0.5 d/a 。4 种植被在转折点之后变化率最大的是针叶林, 约为 1.2 d/a 。对于 EOS 而言, 4 种植被类型均表现出分段形式。其中, 阔叶林和针叶林 EOS 整体上表现出推迟趋势, 分为先提前后推迟两段; 草原和草甸则表现为提前-推迟-提前, 整体上也可以分为两段。阔叶林先经历了短暂的提前, 而后一直呈推迟态势。针叶林、草原和草甸 3 种植被类型在 1997 年之前的变化趋势大体一致, 但在 1997 年之后表现出截然不同的变化: 针叶林秋季物候缓慢推迟, 变化率为 0.13 d/a ; 草原秋季物候急剧提前, 变化率达到了 -1.24 d/a ; 草甸虽然也有提前趋势, 但变化率仅为 -0.18 d/a 。4 种植被的秋季物候均值差异不大, 都集中在第 250 天前后。

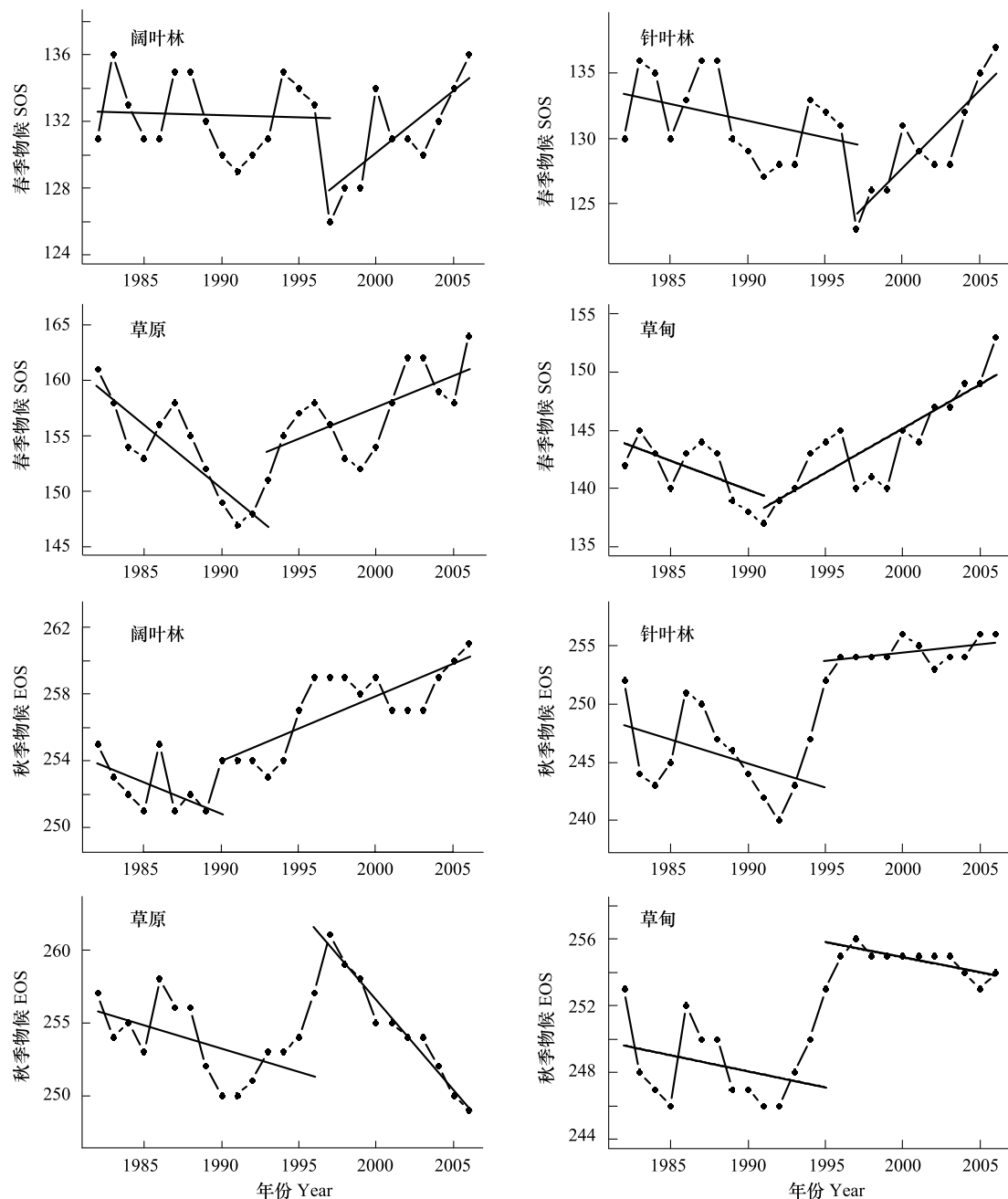


图3 物候年际变化趋势

Fig. 3 Inter-annual trend variation of phenology

图中:A-D 分别代表阔叶林、针叶林、草原、草甸四种植被的 SOS 年际变化;E-H 分别代表这四种植被 EOS 的年际变化;分段线性 P 值均小于 0.05,都具有显著性

3.2 物候与气候因子关系

由偏最小二乘回归所得图 4 可知,阔叶林、针叶林和草甸的春季物候与春季(2—5 月份)温度呈负相关,这说明春季温度上升会使得 SOS 出现提前趋势,反之亦然。草原前一年 10—11 月份的温度也与来年春季物候负相关,但 12 月份的温度却与之表现出正相关,相关系数明显高于其他月份,表明上年冬季温度上升会导致下年春季物候推迟,这和 Yu 等人研究结果一致:即对于温带区域而言,冬季温度升高会减缓植被的低温需求的累积,从而推迟了这些植被的春季物候^[35]。降水对于春季物候的影响规律性不强。阔叶林和草原春季物候主要受前一年 12 月份的降水影响,与之表现出很强的负相关,这也验证了前人的结论:在半湿润半干旱

区域,冬季降水的增加可能会使来年春季物候提前^[31]。对于针叶林和草甸而言,春季(3—4月份)降水的变化也会作用于春季物候,降水增加会使春季物候推迟,反之则会使物候提前。

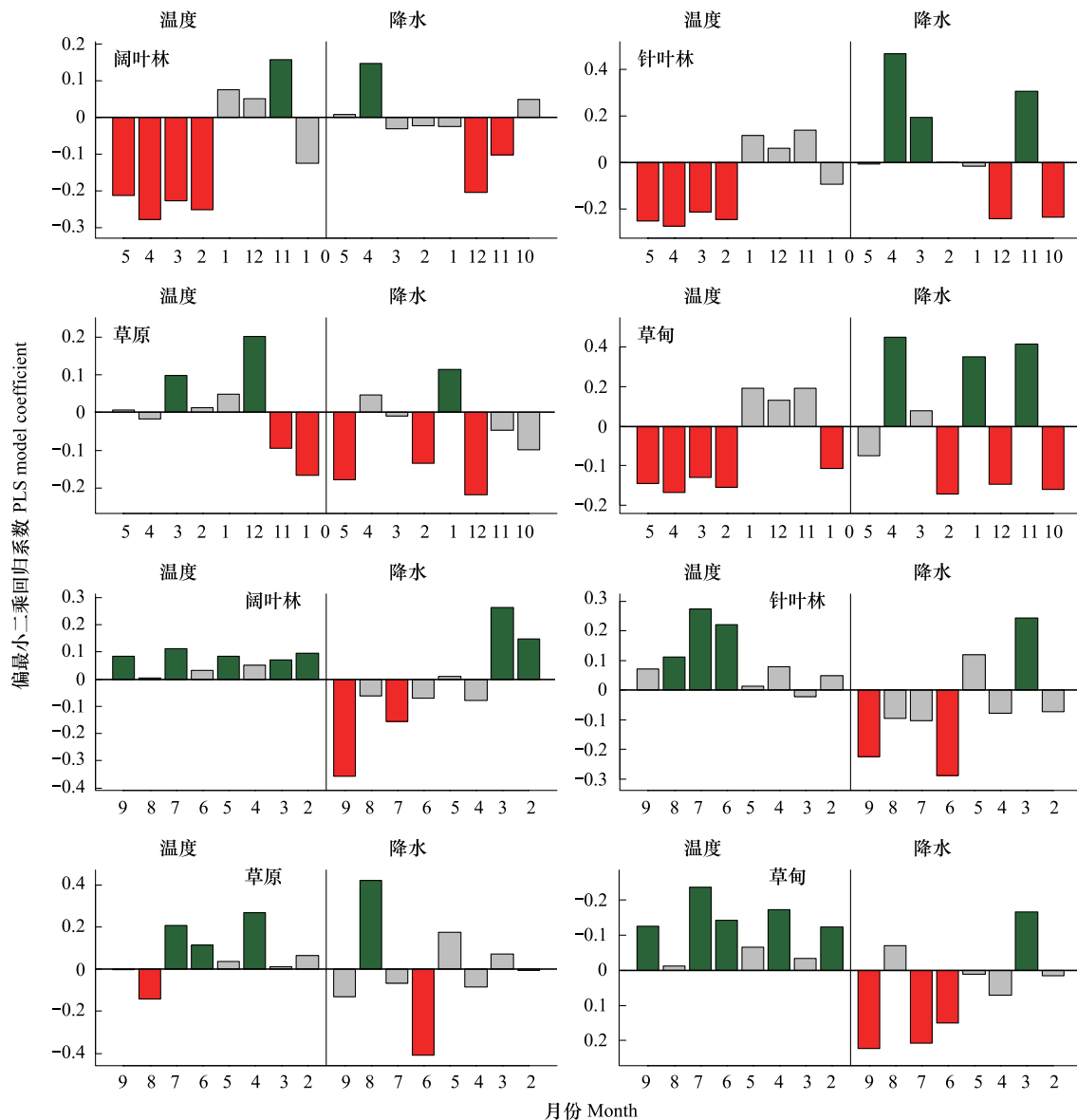


图4 物候参数与物候前8个月的温度和降水的偏最小二乘回归系数

Fig. 4 The coefficients of Partial Least Squares between phenology and 8 months climate factors before phenology

图中:A-D 分别代表阔叶林、针叶林、草原、草甸四种植被的生长季始期与温度和降水的相关系数,E-G 对应阔叶林、针叶林、草原、草甸四种植被的生长季末期与温度和降水的相关系数;深绿色代表正相关,红色代表负相关,灰色代表相关性不显著

相比于春季物候,温度对于秋季物候的影响基本上都为正相关,但不同植被间也有差异。具体来看,阔叶林的秋季物候与各月温度的偏相关系数大体一致,均为正相关;针叶林和草甸秋季物候主要受6—7月份的温度影响,呈正相关,表明夏季温度升高会使这两种植被的秋季物候推迟;草原除了受4月份与7月份温度正相关的影响外,还与8月份的温度负相关。3种植被(阔叶林、针叶林和草甸)中,3月份的降水均与秋季物候正相关,表明该月降水的增加可使植被秋季物候推迟。而该3种植被的春夏季降水却与秋季物候负相关,说明夏季降水的减少会推迟秋季物候。分析原因可能是因为:研究区域雨热同期降水充沛,春夏季降水量的增多会使土壤湿度迅速增加,进而通过影响植被羟化作用来增强植被的光合作用,植被就会加速生长提前完成其整个生长季,反之就会推迟植被的秋季物候^[36-37]。而对于降水偏少的半湿润半干旱地区,8月份降水与秋季

物候正相关,可能是由于该区植被易受到水分胁迫的影响,降水的增加会延长其生长,否则会因缺水而提早进入衰落期。

由图 5 中 ABCD 四图可知,植被类型不同,物候对于温度与降水的敏感性也不同。草原的春季物候随着上年 12 月份温度的降低而提前。对于阔叶林、针叶林和草甸而言,春季物候随着春季 2—5 月均温的降低而推迟,3 种植被春季物候随温度降低而推迟的幅度草甸最大,阔叶林次之,针叶林最小。降水方面,虽然阔叶林和草原随冬季降水量的降低都有推迟趋势,但草原随降水量降低而推迟的幅度要远大于阔叶林推迟的幅

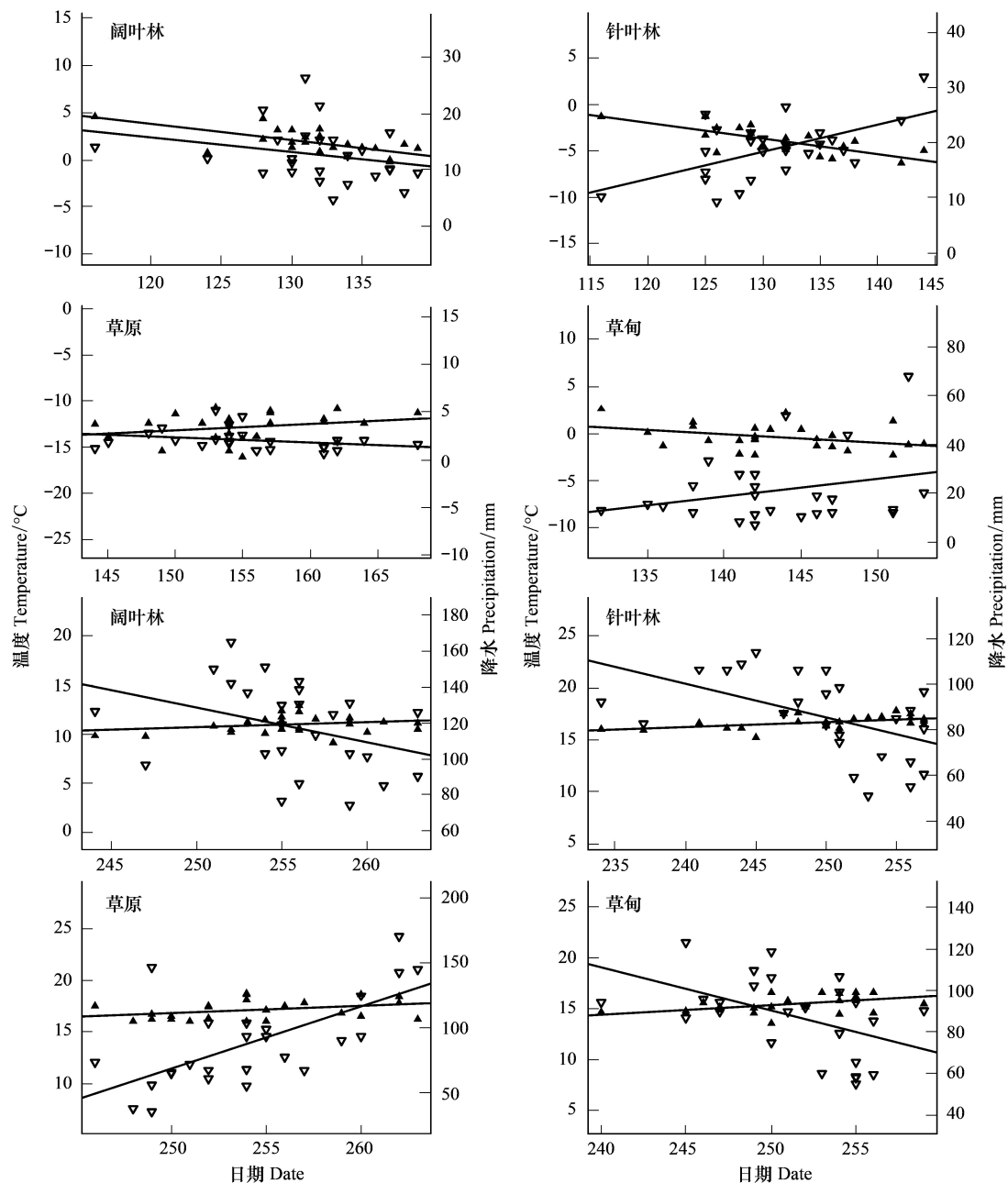


图 5 物候时序与气候因子(温度与降水)的关系

Fig. 5 Relation of phenological series and climatic factors (temperature and precipitation)

图中:A-D 分别代表阔叶林、针叶林、草原、草甸四种植被生长季始期时序与温度和降水的关系,E-G 是这四种植被的生长季末期时序与温度和降水的关系,图中温度与降水都是对应时间段的均值;ABD 图中温度均对应 2—5 各月份,A 中降水对应为 11—12 月份,B 中降水对应 3—4 月份,C 中温度对应 12 月份,C 中降水则对应 12 月和 2 月,D 中降水对应 4 月份;E 中温度对应 3、5、7 月,降水对应 7 月和 9 月;F 中温度对应 6—8 月份,降水对应 6 月和 9 月;G 中温度对应 4、6、7 月,降水对应 8 月;H 中温度对应 4、6、7 月,降水对应 6、7、9 月

度。针叶林和草甸的春季物候随春季降水量的增加而推迟,针叶林推迟的幅度大于草甸推迟的幅度。由图 5 中 EFGH 四图可知,4 种植被秋季物候随夏季温度的升高而逐渐推迟,针叶林推迟的幅度最大,阔叶林次之,最后是草原和草甸。除草原外,其余 3 种植被的秋季物候均随夏季降水的增加而推迟,草原秋季物候的推迟主要受 8 月份降水增加的影响。将各个图中数据归一化并分析其斜率发现,植被春季物候可能主要受气温影响,而秋季物候很可能主要受降水控制。

4 结论与讨论

本文利用 GIMMS AVHRR 数据集,模拟得到了东北地区 1982—2006 年 4 种植被类型的物候参数,结合温度降水数据利用偏最小二乘(PLS)回归分析了物候参数与二者之间的关系,得到如下结论:

(1)4 种植被的春季物候在研究时间段内均表现为先提前后推迟的变化趋势,秋季物候的变化则比较复杂,阔叶林和针叶林整体上呈现出秋季物候推迟的趋势,草原和草甸则表现为提前-推迟-提前的趋势。

(2)除草原外,春季物候前几个月的温度对阔叶林、针叶林和草甸的生长季始期有显著的负相关性。前一年 12 月份的温度与草原的春季物候正相关。降水对于四种植被春季物候的影响较复杂。对于秋季物候,生长季末期前几个月的温度对 4 种植被秋季物候均有较强的正相关性。除草原外,秋季物候前几个月的降水对阔叶林、针叶林和草甸的生长季末期有显著的负相关性。虽然,6 月份的降水也对草原秋季物候有负相关性,但 8 月份降水的正相关性似乎更明显一些。

(3)温度和降水对于植物物候具有时滞效应,不同植被对于这种时滞效应的响应也不一样。例如,本文的研究结果表明草原春季物候不仅受冬季温度影响外,还受冬季降水的控制。

(4)植被的春季物候可能主要受温度控制,而秋季物候则主要受降水的影响。

由于本研究时间序列从 1982 至 2006 年,而文中所用植被类型图虽然编制时间跨度也很大,但基本上反应了 20 世纪 80—90 年代中期的植被分布状况。20 世纪 80 年代末—2000 年,东北地区土地类型转变主要是大小兴安岭林草地向耕地转变,东北东部林草地向耕地转变以及农牧交错带草地向耕地转变;2000 年至 2006 年期间,东北地区土地利用类型也有转变,但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区,其他区域变化不大,研究时段内的土地利用类型转变势必给本文结果带来了一定误差和不确定性^[38]。除此之外,文中的针叶林仅考虑了常绿针叶林和落叶针叶林,针阔混交林不属于此列。虽然常绿针叶林和落叶针叶林在季相上有一定差别,但是由于常绿针叶林的比重非常小,故本文认为对最终结果的影响不大。

参考文献(References):

- [1] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 长沙: 湖南教育出版社, 1999: 1-131.
- [2] Cleland E E, Chuine I, Menzel A, Mooney H A, Schwartz M D. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(7): 357-365.
- [3] Wu C Y, Gonsamo A, Gough C M, Chen J M, Xu S G. Modeling growing season phenology in North American forests using seasonal mean vegetation indices from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147: 79-88.
- [4] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, Ryu Y, Sonnentag O, Toomey M. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169: 156-173.
- [5] 国志兴, 张晓宁, 王宗明, 方伟华. 东北地区植被物候期遥感模拟与变化规律. *生态学杂志*, 2010, 29(1): 165-172.
- [6] 陈效逯, 王林海. 遥感物候学研究进展. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 33-40.
- [7] 宛敏渭, 刘秀珍. 中国物候观测方法. 北京: 科学出版社, 1979: 1-136.
- [8] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Ciais P, Zhu B. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 2006, 12(4): 672-685.
- [9] Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, Xiao X M. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(11): 4309-4314.

- [10] 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.
- [11] 郑景云, 葛全胜, 赵会霞. 近 40 年中国植物物候对气候变化的响应研究. 中国农业气象, 2003, 24(1): 28-32.
- [12] 戴君虎, 王焕炯, 葛全胜. 近 50 年中国温带季风区植物花期春季霜冻风险变化. 地理学报, 2013, 68(5): 593-601.
- [13] 李洁, 张远东, 顾峰雪, 黄玫, 郭瑞, 郝卫平, 夏旭. 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态. 生态学报, 2014, 34(6): 1940-1502.
- [14] 李明, 吴正方, 杜海波, 宗盛伟, 孟祥君, 张莲芝. 基于遥感方法的长白山地区植被物候期变化趋势研究. 地理科学, 2011, 31(10): 1242-1248.
- [15] 侯学会, 牛铮, 高帅. 近十年中国东北森林植被物候遥感监测. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 515-519.
- [16] 孙风华, 杨素英, 陈鹏狮. 东北地区近 44 年的气候暖干化趋势分析及可能影响. 生态学杂志, 2005, 24(7): 751-755.
- [17] 张清, 任茹, 赵亮. 东北地区森林的空间分布格局及影响因素. 东北林业大学学报, 2013, 41(2): 25-28.
- [18] Cong N, Piao S L, Chen A P, Wang X H, Lin X, Chen S P, Han S J, Zhou G S, Zhang X P. Spring vegetation green-up date in China inferred from SPOT NDVI data: A multiple model analysis. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 165: 104-113.
- [19] 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.
- [20] Chen J, Jönsson P, Tamura M, Gu Z H, Matsushita B, Eklundh L. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky—Golay filter. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3/4): 332-344.
- [21] 边金虎, 李爱农, 宋孟强, 马利群, 蒋锦刚. MODIS 植被指数时间序列 Savitzky-Golay 滤波算法重构. 遥感学报, 2010, 14(4): 725-741.
- [22] 宫攀, 陈仲新. 基于 MODIS 数据的东北地区植被物候参数提取. 土壤通报, 2009, 40(2): 213-217.
- [23] Justice C O, Townshend J R G, Holben B N, Tucker C J. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. International Journal of Remote Sensing, 1985, 6(8): 1271-1318.
- [24] 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.
- [25] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H, Hodges J C F, Gao F, Reed B C, Huete A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 471-475.
- [26] Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8): 1824-1832.
- [27] Beck P S A, Atzberger C, Høgda K A, Johansen B, Skidmore A K. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(3): 321-334.
- [28] Butt B, Turner M D, Singh A, Brottem L. Use of MODIS NDVI to evaluate changing latitudinal gradients of rangeland phenology in Sudano-Sahelian West Africa. Remote Sensing of Environment, 2001, 115(12): 3367-3376.
- [29] Busetto L, Colombo R, Migliavacca M, Cremonese E, Meroni M, Galvagno M, Rossini M, Siniscalco C, Di Cella U M, Pari E. Remote sensing of larch phenological cycle and analysis of relationships with climate in the Alpine region. Global Change Biology, 2010, 16(9): 2504-2517.
- [30] Wang X H, Piao S L, Ciais P, Li J S, Friedlingstein P, Koven C, Chen A P. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(4): 1240-1245.
- [31] Wu X C, Liu H Y. Consistent shifts in spring vegetation green-up date across temperate biomes in China, 1982—2006. Global Change Biology, 2013, 19(3): 870-880.
- [32] Guo L, Dai J H, Ranjekar S, Xu J C, Luedeling E. Response of chestnut phenology in China to climate variation and change. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 180: 164-172.
- [33] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 章超斌, 穆少杰, 孙政国. 1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应. 地理学报, 2014, 69(1): 15-30.
- [34] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 蒋卫国, 侯鹏, 李营. 2001—2010 年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2811-2818.
- [35] Yu H Y, Luedeling E, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(51): 22151-22156.
- [36] 季劲钧, 黄玫, 刘青. 气候变化对中国中纬度半干旱草原生产力影响机理的模拟研究. 气象学报, 2005, 63(3): 257-266.
- [37] 华维, 范广洲, 陈权亮, 董一平, 周定文. 改则地区气候变化对植被生理过程的影响及反馈效应的模拟研究. 高原气象, 2010, 29(4): 875-883.
- [38] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 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.