

刘轩,赵珮杉,高广磊,等.沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)物候特征及其对气候的响应[J].中国沙漠,2022,42(2): 25-35.

沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 物候特征及其对气候的响应

刘 轩^{1abc}, 赵珮杉^{1abc}, 高广磊^{1abcd}, 赵媛媛^{1abcd}, 丁国栋^{1abcd}, 糜万林²

(1.北京林业大学 a.水土保持学院, b.林业生态工程教育部工程研究中心, c.宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, d.水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 2.巴彦淖尔市封育飞播管理站, 内蒙古巴彦淖尔 015000)

摘要: 物候反映植被对环境变化的响应。沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)被广泛引种栽植于中国北方风沙区,但引种区气候条件差异对沙地樟子松物候的影响仍然尚不明确。基于2001—2020年MOD13Q1数据和气象数据,分别采用最大斜率法和趋势分析方法提取沙地樟子松植被遥感物候信息并比较物候时空动态特征差异,以偏最小二乘回归方法分析沙地樟子松遥感物候对气象因子变化的响应。结果表明:(1)呼伦贝尔、科尔沁、毛乌素沙地樟子松生长季分别始于第100—150、120—140、100—140天;生长季分别止于第300—340、270—315、260—310天;生长季长度分别为170—220、140—180、150—200 d。(2)呼伦贝尔、科尔沁、毛乌素沙地樟子松生长季始期显著提前($P<0.05$),变化率分别为-15.7、-5.7、-13.9 d/10a;科尔沁、毛乌素沙地樟子松生长季末期显著提前($P<0.05$),变化率分别为-11.7、-16.8 d/10a;呼伦贝尔沙地樟子松生长季长度显著延长($P<0.05$),变化率为9.8 d/10a。(3)呼伦贝尔沙地樟子松生长季始期提前主要受上年8月气温降低和3月降水减少影响,生长季末期提前主要受1月降水减少影响;科尔沁沙地樟子松生长季始期和末期提前分别受上年7月降水减少和5月降水增加影响;毛乌素沙地生长季始期提前主要受3月气温升高和上年12月降水减少影响,生长季末期提前主要受9月气温上升和上年12月降水减少影响。研究结果可为深入理解沙地樟子松物候特征和人工林经营管理提供理论依据。

关键词: 植被物候; 生长季; 沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*); 气候因子; 偏最小二乘回归

文章编号: 1000-694X(2022)02-025-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00112

中图分类号: Q945

文献标志码: A

0 引言

植被物候是植被群落受气候变化和其他环境因素影响,以年为周期重复出现的生物学现象,是植物长期适应环境的季节性变化而形成的生长发育节律^[1],也是反映植被动态和气候变化变化的重要指标^[2]。在陆地生态系统中,气候特征存在时空尺度的强烈差异,是导致植被物候周期性变化的关键因素^[3]。同时,植被物候的变化也会引起生态系统生产力的变化,并通过直接改变陆地碳氧动态平衡和生物多样性格局向气候系统做出反馈^[4-5]。因

此,随着气候环境的变化,植被物候也出现动态波动,以参与调节生态系统的稳定性。

遥感植被物候是基于卫星遥感植被指数时间序列的曲线变化而得到的植被物候,与传统植被物候(如出苗、展叶、抽穗和开花)相比,能在宏观上反映植被生长季的关键信息,判断该区域的植被是否进入生长季、生长季的长短等,能够更有效地反映区域植被生长季变化过程及其年际变化等^[6-7]。随着卫星遥感技术的发展,MODIS数据因具有相对较高的光谱和时空分辨率,决定了其在大范围植被变化研究中的优势,被广泛应用于区域与全球尺度植

收稿日期:2021-07-09; 改回日期:2021-09-01

资助项目:中央高校基本科研业务费项目(2021ZY47);国家自然科学基金项目(41971130);国家重点研发计划项目(2018YFC0507102);内蒙古自治区中央引导地方科技项目“浑善达克沙地生态文化产业关键技术与示范”

作者简介:刘轩(1998—),女,黑龙江巴彦人,硕士研究生,主要研究方向为荒漠化防治。E-mail: liuxuan@bjfu.edu.cn

通信作者:高广磊(E-mail: gaoguanglei@bjfu.edu.cn)

被物候变化和生态环境监测^[8]。近年来,许多学者基于长时间序列 MODIS 数据,从不同时空尺度对植被物候变化开展了深入研究。李丹等^[9]重建了 2001—2016 年 MODIS NDVI 时间序列影像并利用最大斜率法提取了西南喀斯特植被物候信息,发现研究区植被生长季始期和末期均呈延长趋势,且水分是制约植被生长的主要因素。郭少壮等^[10]重建了 2000—2015 年 MODIS EVI 时间序列影像并提取太白红杉林关键物候参数,发现秦岭太白红杉林生长季始期整体呈提前趋势、生长季末期整体呈推迟趋势,其中气温是太白红杉林生长季始期提前的主要影响因素。因此,运用 MODIS 遥感数据对多种生态系统的物候的监测,对获得单一生态系统甚至区域尺度上植被生长季过程,以及全面综合地分析气候环境对植被物候生长的影响具有重要意义。

沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是欧洲赤松(*P. sylvestris*)在东亚的地理变种,原产于呼伦贝尔红花草基地区,具有适应性强、耐低温干旱和生长迅速等特点。20 世纪 50 年代以来,沙地樟子松被广泛引种栽植在中国北方风沙区^[11]。由于引种范围覆盖较大空间范围,引种后不同地理位置的气候条件可能导致樟子松物候存在很大差异,但不同引种地樟子松物候特征相关研究还未见报道。鉴于此,基于 MODIS NDVI 时间序列数据,结合气温、降水资料,通过最大斜率法提取了沙地樟子松植被生长季始期、生长季末期和生长季长度 3 个反映植被生长季变化特点的典型植被遥感物候参数,采用趋势分析、偏最小二乘法回归等方法分析 2001—2020 年呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地和毛乌素沙地樟子松林植被物候动态的时空差异及其对气候因子变化的响应,以期对沙地樟子松林的抚育和经营提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区分别位于红石峡沙地植物园、章古台沙地森林公园和海拉尔区樟子松国家森林公园,引种栽植了大面积的沙地樟子松人工林,林龄为 20—50 a。

红石峡沙生植物园(38°19′49″—38°20′12″N, 109°42′08″—109°42′55″E)地处毛乌素沙地东南部,海拔 1 080 m。属暖温带半干旱大陆性季风气候,

光照充足,昼夜温差大。年均气温 6.0—8.5 °C,多年平均降水量 385 mm,降雨分配不均,多年平均蒸发量 2 914 mm,多年平均日照时间为 2 914 h。主要灌草植物包括油蒿(*Artemisia ordosica*)、铁杆蒿(*A. gmelinii*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)和蒺藜(*Tribulus terrestris*)等^[11]。

章古台沙地森林公园(42°23′—42°51′N, 121°53′—122°22′E)地处科尔沁沙地东南部,海拔 226.5 m。属温带亚湿润大陆性季风气候,光照充足,昼夜温差大。年均气温 8 °C,多年平均降水量 526.5 mm,多年平均蒸发量 1 932.7 mm。多年平均日照时间 2 615.2 h。主要灌草植物包括胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和羊草(*Leymus chinensis*)等^[11]。

海拉尔区国家森林公园(47°07′—49°13′N, 119°21′—119°44′E)地处呼伦贝尔沙地东北部,海拔 606 m。属于中温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。年均气温 -3—0 °C,年降水量 280—359 mm,年蒸发量 1 400—1 900 mm,多年平均日照时间 2 558.6 h。主要灌草植物包括羊草、针茅(*Stipa capillata*)、小叶锦鸡儿和黄柳(*Salix gordejewii*)等^[12]。

1.2 数据来源与处理

归一化植被指数(NDVI)来自美国航天局的 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid 产品(简称 MOD13Q1),数据源从 2001 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日,时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 250 m。对获取的植被指数产品进行投影变换、重采样、格式转化,结合野外踏勘调查按照沙地樟子松人工林位置进行裁切,为消除 NDVI 时间序列的云、大气气溶胶和冰雪噪声影响,采用 TIMESAT 软件的 S-G 滤波法对数据进行降噪处理^[13]。

气象数据源于中国气象数据共享网站(<http://data.cma.cn>)的 2001—2020 年毛乌素沙地、科尔沁沙地、呼伦贝尔沙地樟子松林区域的气象站点的月平均气温和降水数据。

1.3 研究方法

1.3.1 植被物候提取方法

采用高阶曲线拟合方法拟合 NDVI 的时间序列

曲线^[7]。

$$NDVI_t = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \cdots + \alpha_n x_n \quad (1)$$

式中: x 为每年的第多少天; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n$ 是高阶曲线拟合参数。

采用最大斜率法测定植被物候期^[14]。

$$NDVI_{radio(t)} = \frac{NDVI_{t+1} - NDVI_t}{NDVI_t} \quad (2)$$

式中: $NDVI_{radio(t)}$ 为NDVI在时间 t 上的斜率,当 $NDVI_{radio}$ 达到最大时对应的日期即为生长季始期,当 $NDVI_{radio}$ 达到最小时对应的日期即为生长季末期,生长季末期减去生长季末期即为生长季长度。

1.3.2 趋势分析方法

采用一元线性回归方法分析2001—2020年物候变化趋势,对变化趋势进行显著性检验^[15]。

$$SLOPE = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times T_i - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n T_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (3)$$

式中: n 为累积年数,本研究为20;变量为年序号; T 为第 i 年的物候参数数据值; $SLOPE$ 为一元线性回归方程的斜率,斜率值的正或负表示研究期间物候数据的延迟或推进趋势。斜率值为0表示研究期间

物候数据无明显变化。

1.3.3 偏最小二乘回归

采用偏最小二乘回归(PLS)分析沙地樟子松生长季始期对前年5月至次年4月月降水量和气温的响应和生长季末期对前年11月至次年10月月降水量和气温的响应。在分析气候变化对植被物候影响时,气候因子的变化对植被物候的影响可能不连续,偏最小二乘回归可以识别出是哪段时间气象因子对植被物候造成的影响^[16]。选取输出结果中的标准化回归系数(MC)以及变量重要值(VIP)进行分析讨论,其中MC的正负表示自变量对因变量是正面影响还是负面影响,VIP值代表变量对因变量的解释重要性,一般认为大于0.8才有决定意义^[17-18]。

2 结果与分析

2.1 物候的变化趋势

2001—2020年,呼伦贝尔、科尔沁、毛乌素沙地樟子松生长季始期分别在第100—150、120—140、100—140天,平均值分别为第120、130、125天(图1)。呼伦贝尔、科尔沁、毛乌素沙地樟子松生长季

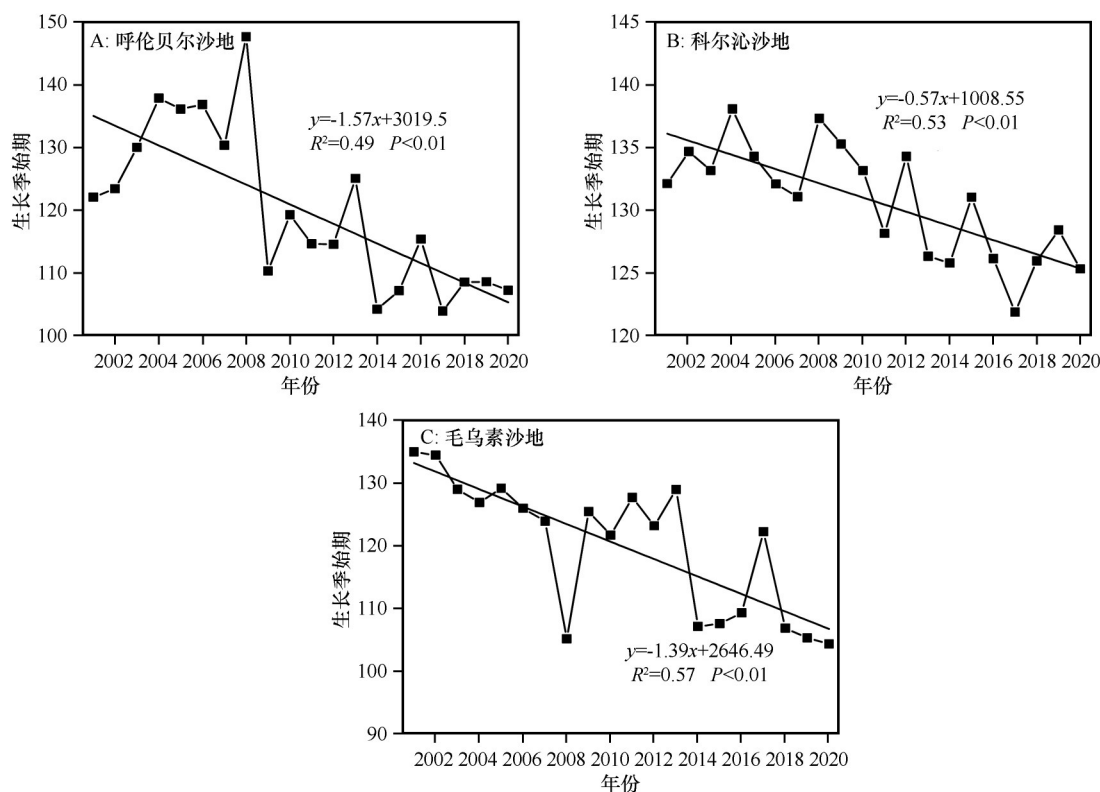


图1 2001—2020年沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长季始期变化

Fig.1 Temporal variations in the beginning of growing season of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* from 2001 to 2020

始期均显著提前($P<0.05$),变化速率分别为-15.7、-5.7、-13.9 d/10a。

呼伦贝尔、科尔沁、毛乌素沙地樟子松生长季末期分别在第300—340、270—315、260—310天,平均值分别为第320、298、294天(图2)。呼伦贝尔、科尔沁沙地和毛乌素沙地樟子松生长季末期均提前。其中,科尔沁沙地和毛乌素沙地显著提前($P<0.05$),变化速率分别为-11.7 d/10a和-16.8 d/10a,呼伦贝

尔沙地变化不显著($P>0.05$)。

呼伦贝尔、科尔沁、毛乌素沙地樟子松生长季长度分别为170—220、140—180、150—200 d,平均值分别为210、164、169 d(图3)。呼伦贝尔沙地樟子松生长季长度延长,科尔沁沙地和毛乌素沙地樟子松生长季长度均缩短。其中,呼伦贝尔沙地显著延长($P<0.05$),变化速率为9.8 d/10a,科尔沁沙地和毛乌素沙地变化不显著($P>0.05$)。

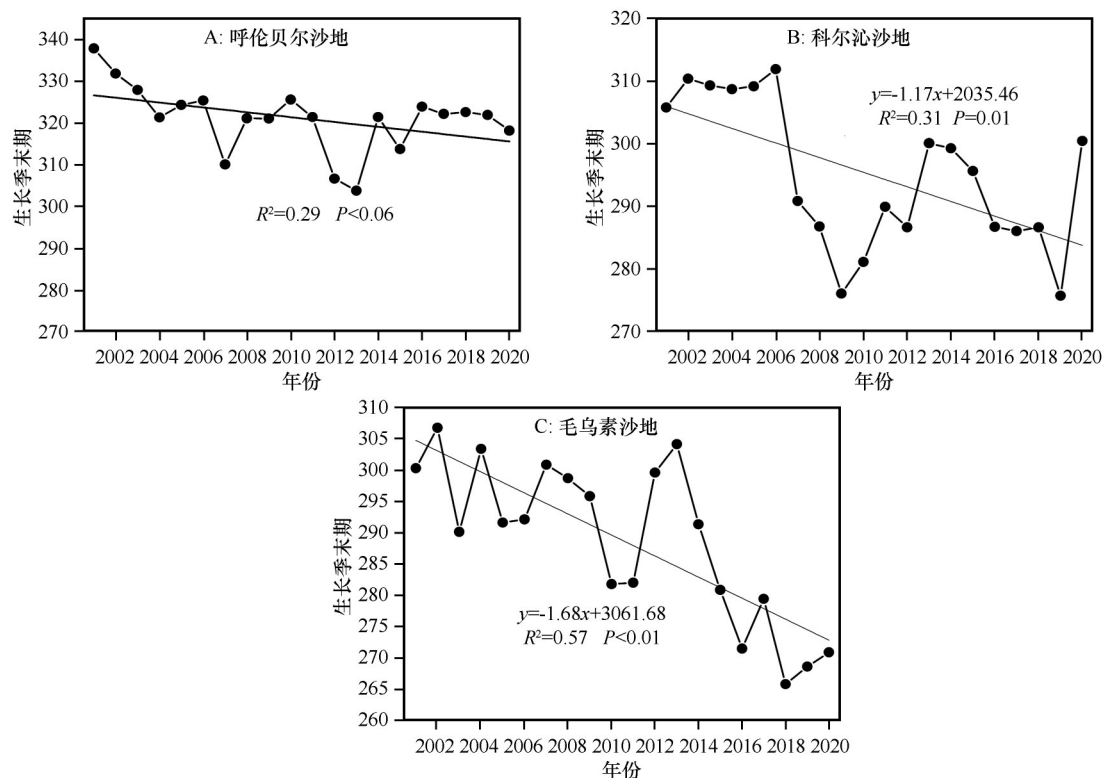


图2 2001—2020年沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长季末期变化

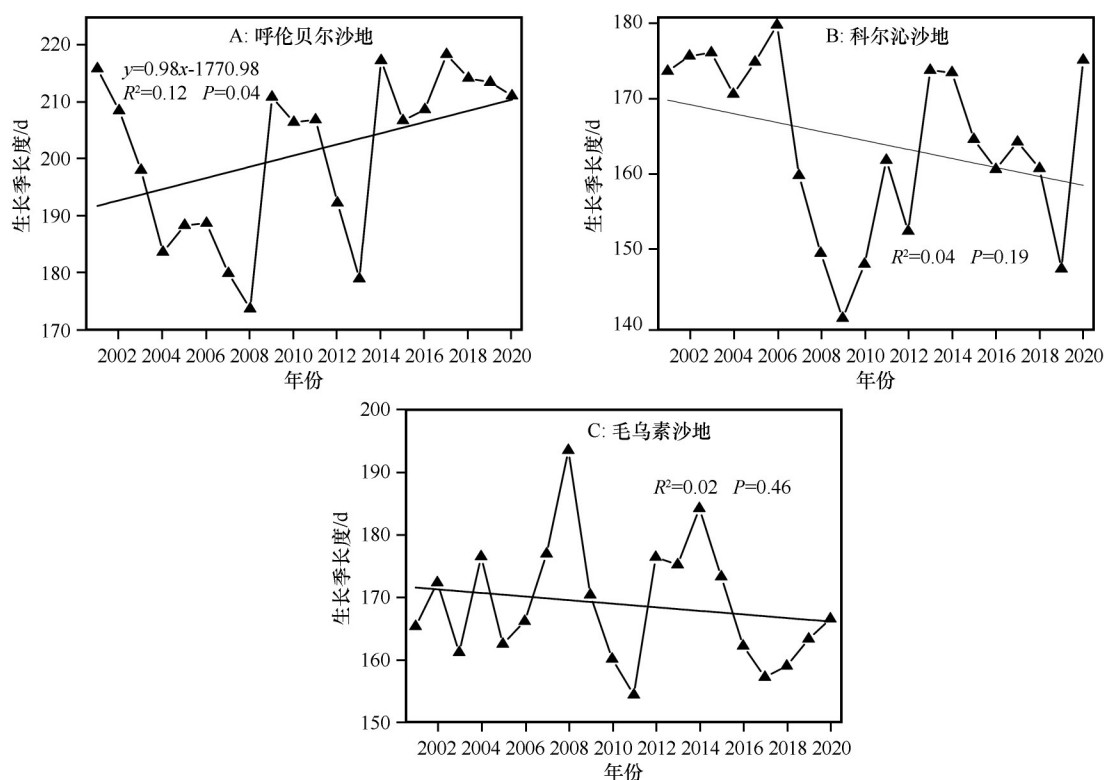
Fig.2 Temporal variations in the end of growing season of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* from 2001 to 2020

2.2 物候与气温的相关性

由图4所示,呼伦贝尔沙地樟子松生长季始期与上年5月和当年4月气温显著负相关,且与上年6、8—12月气温显著正相关,说明上年5月和当年4月气温上升会提前生长季始期(表1),上年8—11月气温上升会推迟生长季始期。其中,上年8月气温与樟子松生长季始期VIP值最大,说明呼伦贝尔沙地樟子松生长季始期主要受上年8月气温影响。科尔沁沙地樟子松生长季始期与上年10月气温存在显著正相关关系,说明上年10月气温上升对生长季始期有推迟作用,其中上年7月气温与生长季始期VIP值最大,说明生长季始期主要受上年7月气温影响。毛乌素沙地樟子松生长季始期与上年11—

12月和当年3—4月气温存在显著负相关关系,说明上年11—12月和当年3—4月气温上升会加快樟子松生长季始期,其中3月气温与生长季始期的VIP值最大,说明毛乌素沙地樟子松生长季始期主要受3月气温影响。

由图5所示,呼伦贝尔沙地樟子松生长季末期与1、3—4、6、8月气温显著正相关,其中3月VIP值最大,说明呼伦贝尔沙地樟子松生长季末期主要受3月气温影响。科尔沁沙地樟子松生长季末期与1、5、7月存在显著负相关,与上年11月和当年10月存在显著正相关,其中7月VIP值最大,说明科尔沁沙地樟子松生长季末期主要受7月气温影响。毛乌素沙地樟子松生长季末期与上年11—12月和当年8—

图3 2001—2020年沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长季长度变化Fig.3 Temporal variations in the length of growing season of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* from 2001 to 2020

9月气温上升存在显著负相关,与5、10月存在显著正相关,其中9月VIP值最大,说明毛乌素沙地樟子松生长季末期主要受9月气温影响。

2.3 物候与降水量的相关性

由图6所示,呼伦贝尔沙地樟子松生长季始期与上年6、8月降水量显著负相关,且除上年7、9月和当年2月外,其余月份均与其存在显著相关,说明上年6、8月降水量的增加会加快生长季始期(表2),且3月降水量与生长季始期VIP值最大,说明呼伦贝尔沙地樟子松生长季始期主要受3月降水量影响。科尔沁沙地生长季始期与当年8月降水量显著负相关,与上年6—7、11月和当年4月降水量显著正相关,说明上年8月降水量增加会加快生长季始期,且上年7月降水量与樟子松生长季始期VIP值最大,说明科尔沁沙地生长季始期主要受上年7月降水量影响。毛乌素沙地樟子松生长季始期与上年12月存在显著正相关,与上年9月和当年1、4月存在显著负相关,说明上年12月降水量减少会加速生长季始期,且上年12月降水量与樟子松生长季始期VIP值最大,说明毛乌素沙地生长季始期主要受上年12月降水量影响。

由图7所示,呼伦贝尔沙地樟子松生长季末期

与1、4月降水量存在显著正相关,与3、5—8月降水量存在显著负相关,其中1月VIP值最大,樟子松生长季末期主要受1月降水量影响。科尔沁沙地樟子松生长季始期与1、6月降水量存在显著正相关,与上年12月和当年3—5月存在显著负相关,其中5月VIP值最大,生长季末期主要受5月降水量影响。毛乌素沙地樟子松生长季末期与上年12月和当年6、9月降水量存在显著正相关,与上年11月和当年3—4、7—8、10月存在显著负相关,其中上年12月VIP值最大,生长季末期主要受上年12月降水量影响。

3 讨论

3.1 沙地樟子松植被物候的时空动态特征

沙地樟子松植被物候期具有明显的空间异质性。呼伦贝尔沙地生长季开始时间最早,其次是毛乌素沙地,科尔沁沙地最晚。由于高纬度和海拔,呼伦贝尔沙地植被春季物候更易受温度影响。研究发现,冬季寒冷地区植被需要一定的累积温度阈值来促发生长^[19]。较冷地区对温度需求较低,因此呼伦贝尔沙地植被春季开始生长所需累积温度阈值可能小于其他两个沙地,这可能是呼伦贝尔沙地

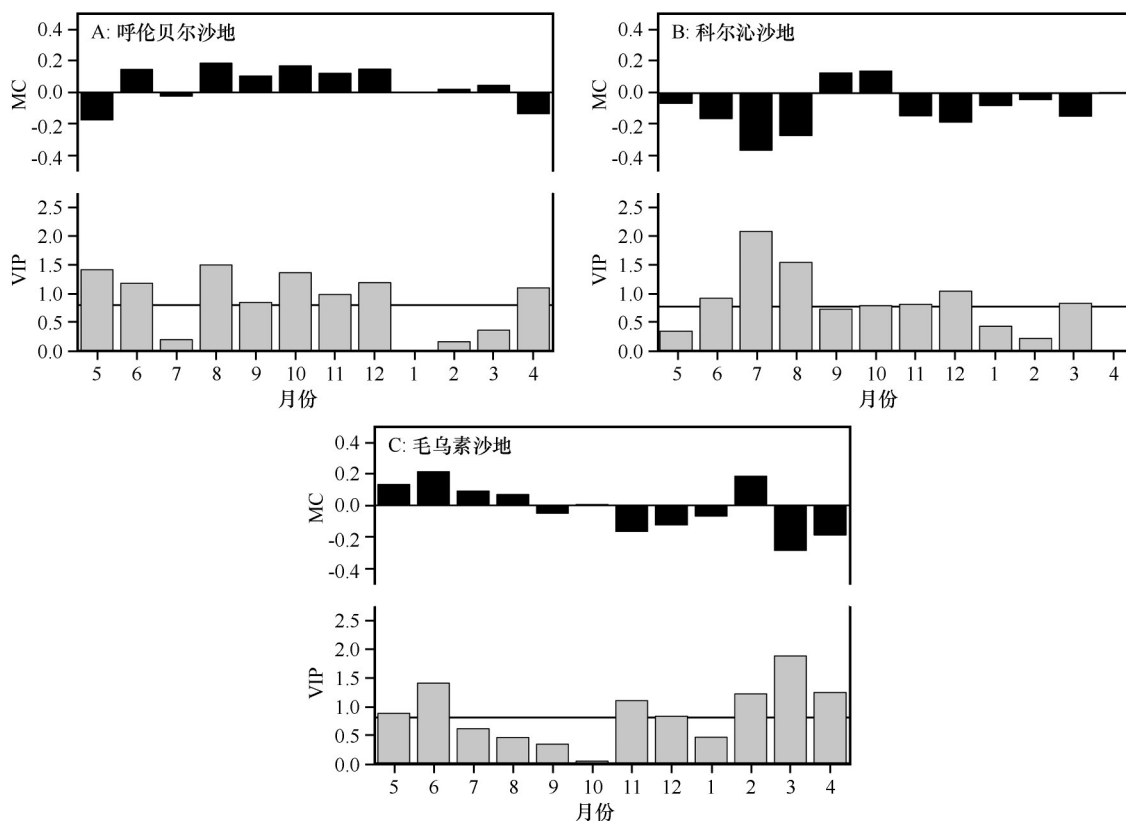


图4 沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长季始期与气温偏最小二乘回归系数(MC)及重要值(VIP)

Fig.4 Partial least squares regression coefficient (MC) and significance value (VIP) between the beginning of growing season of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and temperature

表1 2001—2020年沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)种植区月平均气温变化率(单位: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$)

Table 1 Change rate of monthly mean temperature of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* planting areas from 2001 to 2020 (unit: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$)

种植区	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
呼伦贝尔沙地	-0.01	-0.04	0.02	0.02	0.02	0.08	0.03	-0.08	-0.02	-0.06	-0.05	0.03
科尔沁沙地	0.12	0.02	0.10	0.01	0.01	0.02	-0.07	0.04	-0.01	0.04	0.05	0.06
毛乌素沙地	0.08	0.03	0.11	0.07	0.02	0.03	0.04	-0.01	0.01	-0.01	0.05	0.06

植被开始生长时间最早的原因^[20]。在干旱或半干旱地区,光合活动受温度限制较小,水分状况是影响植被春季生长的限制因素^[21]。研究表明,中国温带地区需要适宜量的降水来触发春季绿化^[22]。长期累积降水可能是科尔沁沙地樟子松生长季始期最晚的原因。

毛乌素沙地生长季结束时间最早,其次是科尔沁沙地,呼伦贝尔沙地最晚。有研究表明,高海拔地区增温对植被呼吸促进远大于光合促进^[23-24]。在植物的生长季,植物叶片净光合速率并没有受到生长季低温环境影响而显著下降^[25],这可能是高海拔

的呼伦贝尔沙地樟子松生长季结束最晚的原因之一。

3.2 沙地樟子松植被物候对气象因子的响应

沙地樟子松生长季开始和结束均呈提前趋势,生长季始期、末期受到了多个月份温度和降水变化的共同影响。呼伦贝尔沙地樟子松生长季始期受上年8月气温和3月降水影响最大,上年8月气温降低和3月降水减少导致了呼伦贝尔沙地樟子松生长季始期提前。这与前人研究一致,干旱区生长季始期受温度和降水双重调控^[26]。科尔沁沙地樟子松

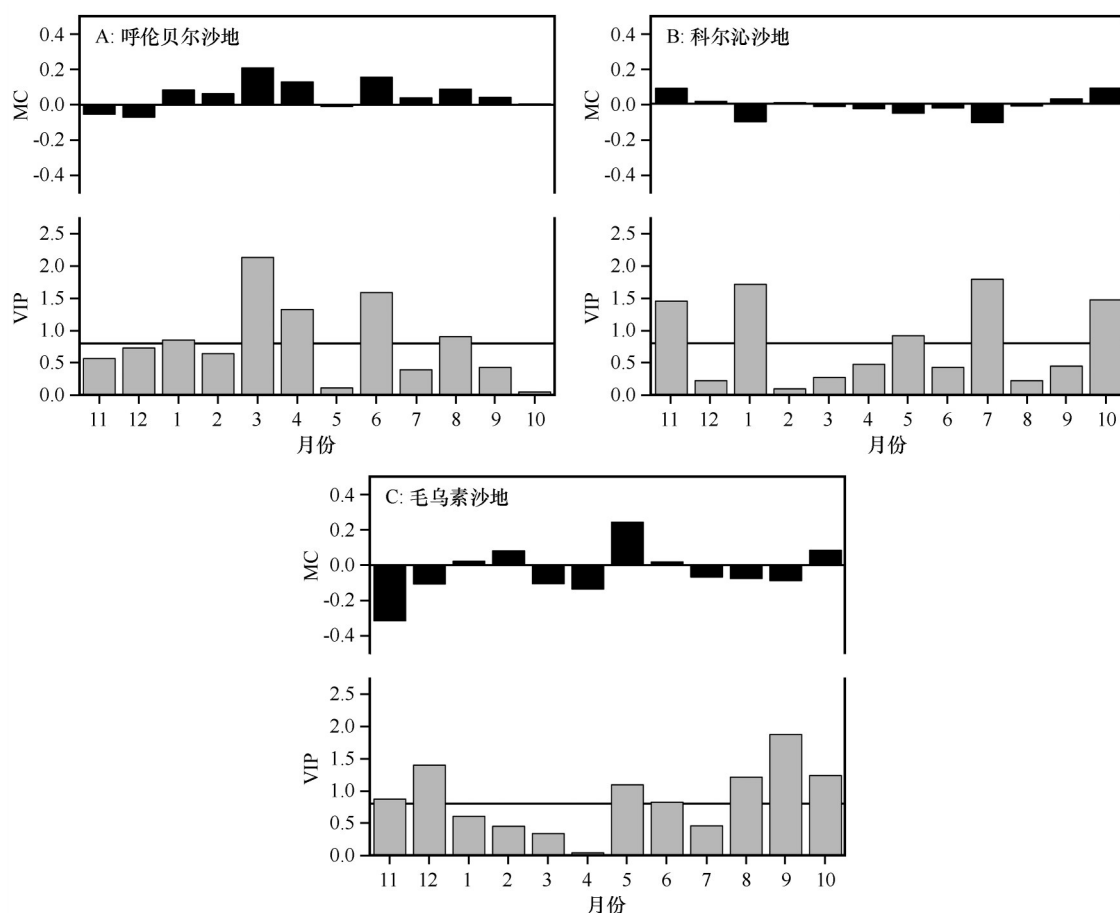


图5 沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长季末期与气温偏最小二乘回归系数(MC)及重要值(VIP)

Fig.5 Partial least squares regression coefficient (MC) and significance value (VIP) between the end of growing season of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and temperature

生长季始期受上年7月降水影响最大,上年7月降水增加导致生长季始期提前。科尔沁沙地处于典型的半湿润半干旱地区,水分条件限制了植被的生长,当地水分供给主要来源于降水,因此降水量增加能够使植被获取充足水分,提高其生长速率,物候期提前^[27]。毛乌素沙地生长季始期受3月气温和上年12月降水影响最大,上年12月降水减少和3月气温升高可导致沙地樟子松生长季始期提前。这符合春季温度和降水促进种子萌发、植被光合作用的规律^[17]。

呼伦贝尔沙地樟子松生长季末期受1月降水影响最大,1月降水增加导致了生长季末期提前。可能原因是降水增多加大了土壤湿度,进而影响植被羧化作用和光合作用速率,使植被加速完成生长,最终导致呼伦贝尔沙地樟子松生长季末期提前^[28]。科尔沁沙地樟子松生长季末期受5月降水影响最大,5月降水增加导致了生长季末期提前,这与前人研究一致,降水量是制约科尔沁沙地生长季的主要

因子^[29]。毛乌素沙地生长季末期主要受9月气温和上年12月降水的影响,9月温度升高和上年12月降水减少导致了生长季末期提前,秋季气温升高,蒸发旺盛,植被呼吸作用增强、光合作用减弱,进而在一定程度上抑制植被生长,导致植被生长季末期提前^[30]。根据沙地樟子松物候期对气象因子变化的响应,可以预测未来沙地樟子松生长季始期和生长季末期均会提前。

研究区沙地樟子松林龄均为20—50 a。赵志平等^[31]对江西省中部山区不同龄组林地NDVI进行对比分析,发现不同林龄之间NDVI均值差异不显著,进一步推断林龄对区域植被物候影响不显著。此外,本研究区为沙地,沙地樟子松是常见的常绿针叶林,终年常绿和季相变化不明显是该植被类型的特征,也是该区域利用遥感技术研究其物候变化的疑难点之一。本研究选取NDVI最大斜率法提取物候指标,最大化彰显了该区域植被生长变化趋势,宏观尺度上加深了对沙地樟子松植被物候指标变

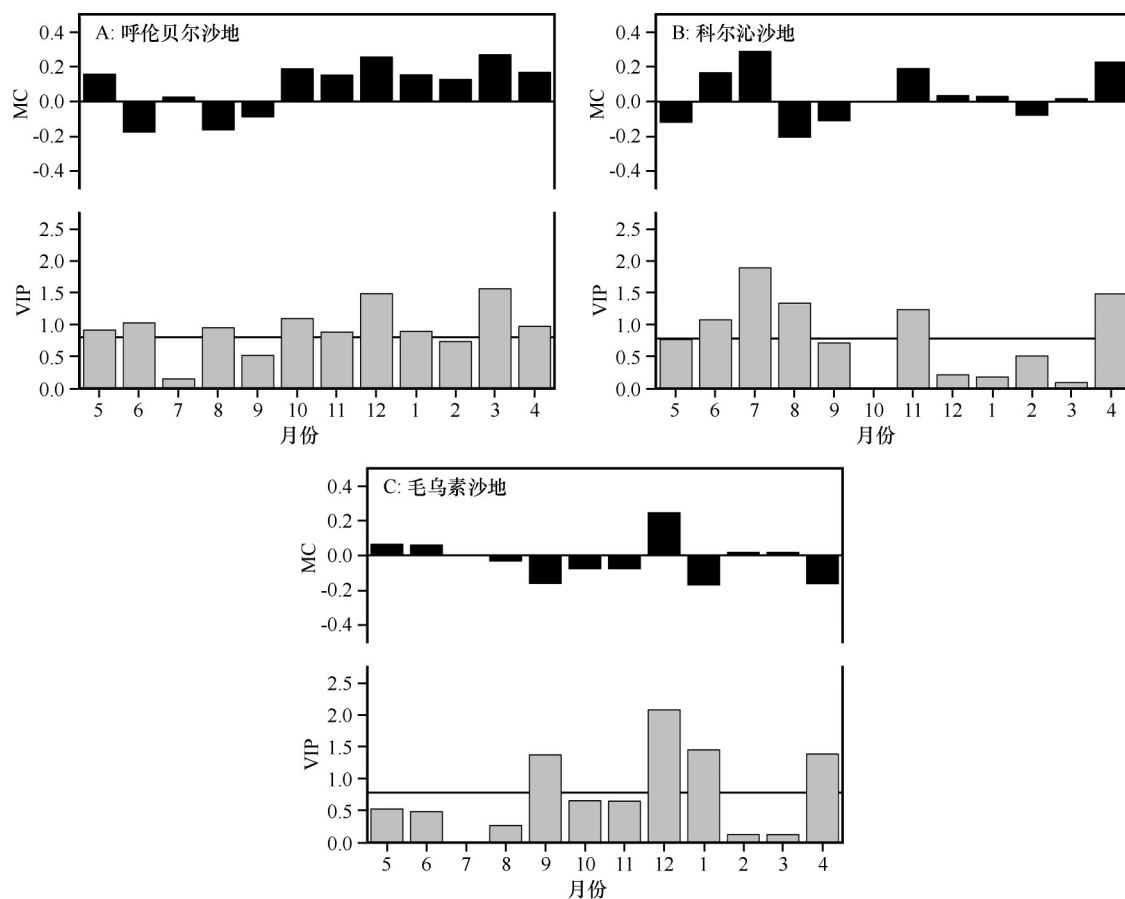


图6 沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长季始期与降水量偏最小二乘回归系数(MC)及重要值(VIP)

Fig.6 Partial least squares regression coefficient (MC) and significance value (VIP) between the beginning of growing season of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and precipitation

表2 2001—2020年沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)种植区月平均降水量变化率(单位: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 2 Change rate of monthly mean precipitation of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* planting areas from 2001 to 2020 (unit: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)

种植区	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
呼伦贝尔沙地	-0.46	-0.08	-0.32	-0.85	0.25	0.99	0.46	2.48	1.78	0.02	-0.23	-0.38
科尔沁沙地	-0.13	0.17	0.20	-0.06	2.42	-2.05	-3.68	5.89	1.87	0.24	0.16	0.08
毛乌素沙地	0.06	0.07	0.04	0.59	-0.23	-0.68	5.11	1.39	-0.27	1.01	0.57	-0.22

化的规律性认知^[9]。方法上,PLS兼具主成分分析和多元回归的优点,克服了预测变量相关导致的多元共线性,其得到了广泛的认可,并应用于诸多自然科学领域^[16]。值得注意的是,本研究采用的16 d时间分辨率的MODIS数据遥感监测结果可能较地面观测结果有所滞后。Kross等^[32]利用时间分辨率为16 d的MODIS NDVI时间序列,与加拿大落叶阔叶林生态站实测的完全展叶日数据进行了对比分析,发现使用16 d合成期遥感影像,绝对误差为

13—20 d。但尽管存在一些限制,基于大范围、长时序的MODIS遥感数据仍可从宏观上把控研究区的植被物候的空间分布和时间变化情况,提供关于植被物候的有价值的空间连续信息^[33]。

4 结论

沙地樟子松植被物候期具有明显的时空异质性。2001—2020年,呼伦贝尔沙地樟子松生长季开始时间最早,结束时间最晚,生长季持续时间最长;

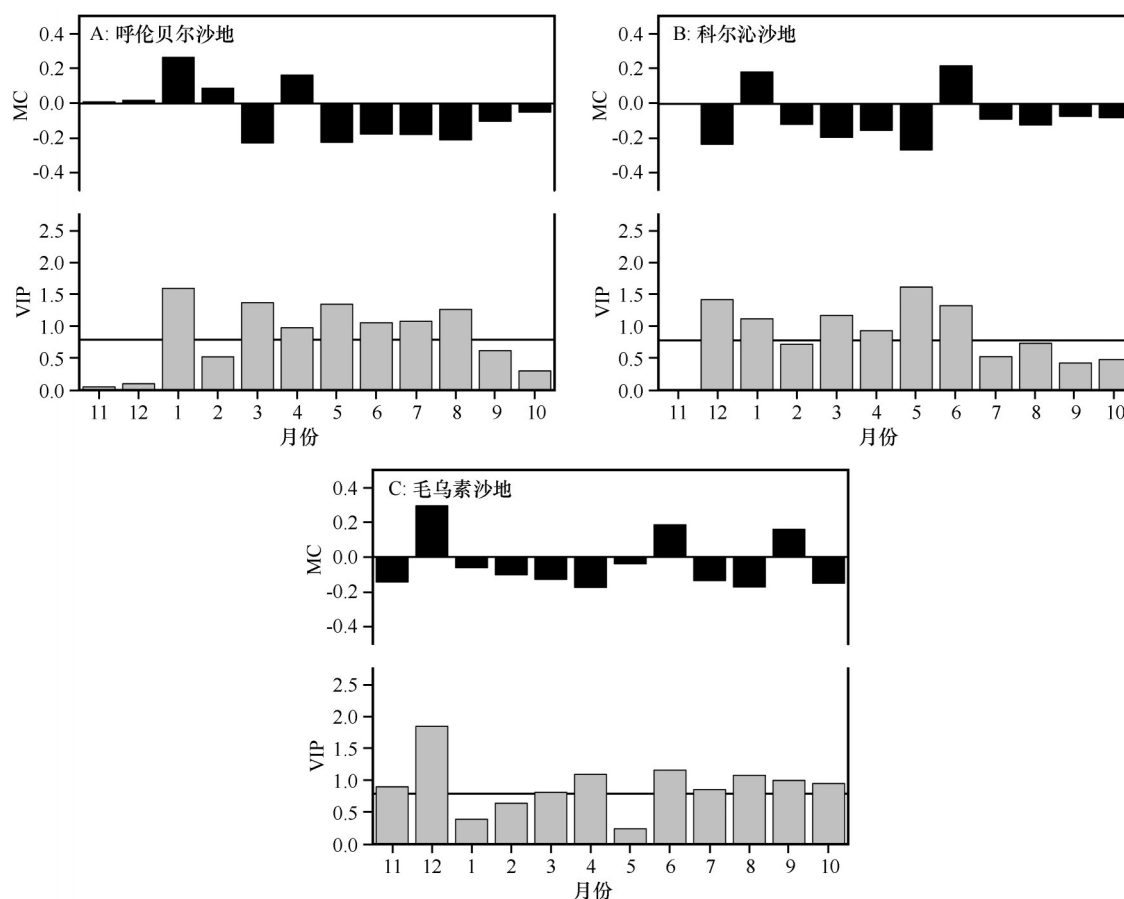


图7 沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长季末期与降水量偏最小二乘回归系数(MC)及重要值(VIP)

Fig.7 Partial least squares regression coefficient (MC) and significance value (VIP) between the end of growing season of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and precipitation

科尔沁沙地樟子松生长季开始时间最晚,持续时间最短;毛乌素沙地生长季结束时间最早。沙地樟子松生长季始期在呼伦贝尔、科尔沁沙地和毛乌素沙地均表现出显著提前($P<0.05$),生长季末期在科尔沁沙地和毛乌素沙地均表现出显著提前($P<0.05$),生长季长度仅在呼伦贝尔沙地显著延长($P<0.05$)。

气候条件对沙地樟子松植被物候的影响具有地域差异。呼伦贝尔沙地樟子松生长季始期和生长季末期提前均与降水减少有关,气温降低也会导致生长季始期提前;科尔沁沙地樟子松生长季始期和季末期提前主要与降水增加有关;毛乌素沙地樟子松生长季始期和生长季末期提前主要与气温升高和降水增加有关。

参考文献:

- [1] 翟佳,袁凤辉,吴家兵.植物物候变化研究进展[J].生态学报,2015,34(11):3237-3243.
- [2] 胡召玲,戴慧,侯飞,等.中国东北城乡植被物候时空变化及其对地表温度的响应[J].生态学报,2020,40(12):4137-4145.
- [3] 邓晨晖,白红英,马新萍,等.2000-2017年秦岭山地植被物候变化特征及其南北差异[J].生态学报,2021,41(3):1068-1080.
- [4] 邵周玲,周文佐,李凤,等.2003-2018年米仓山地区植被物候时空变化及对气候的响应[J].生态学报,2021,41(9):3701-3712.
- [5] 付阳,陈辉,张斯琦,等.基于群落类型的寒区旱区物候特征及其对气候因子的响应:以2000-2019年柴达木盆地为例[J].地理研究,2021,40(1):52-66.
- [6] Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G, et al. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1): 106-115.
- [7] 朱娅坤,秦树高,张宇清,等.毛乌素沙地植被物候动态及其对气象因子变化的响应[J].北京林业大学学报,2018,40(9):98-106.
- [8] 王小霞,刘志华,焦珂伟.2000-2017年东北森林NDVI时空动态及其驱动因子[J].生态学杂志,2020,39(9):2878-2886.
- [9] 李丹,吴秀芹,张靖宙,等.西南喀斯特断陷盆地植被物候动态变化及其与气候因子的响应[J].水土保持研究,2020,27(6):168-173.
- [10] 郭少壮,白红英,黄晓月,等.秦岭太白红杉林遥感物候提取

- 及对气候变化的响应[J].生态学杂志,2019,38(4):1123-1132.
- [11] 任悦,高广磊,丁国栋,等.沙地樟子松人工林叶片-枯落物-土壤有机碳含量特征[J].北京林业大学学报,2018,40(7):36-44.
- [12] 郭米山,高广磊,丁国栋,等.呼伦贝尔沙地樟子松外生菌根真菌多样性[J].菌物学报,2018,37(9):1133-1142.
- [13] 边金虎,李爱农,宋孟强,等.MODIS植被指数时间序列 Savitzky-Golay 滤波算法重构[J].遥感学报,2010,14(4):725-741.
- [14] Wang X, Wang T, Liu D, et al. Moisture-induced greening of the South Asia over the past three decades [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(11):4995-5005.
- [15] 胡召玲,戴慧,侯飞,等.中国东北城乡植被物候时空变化及其对地表温度的响应[J].生态学报,2020,40(12):4137-4145.
- [16] 孔冬冬,张强,黄文琳,等.1982-2013年青藏高原植被物候变化及气象因素影响[J].地理学报,2017,72(1):39-52.
- [17] 张文奇,李丹,师庆东,等.克里雅河流域植被物候时空变化及影响因素[J].水土保持通报,2020,40(5):291-298,309.
- [18] Guo L, Dai J, Wang M, et al. Responses of spring phenology in temperate zone trees to climate warming: a case study of apricot flowering in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 201:1-7.
- [19] Liu L, Liu L, Liang L, et al. Effects of elevation on spring phenological sensitivity to temperature in Tibetan Plateau grasslands [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(34):4856-4863.
- [20] Wang Y, Shen X, Jiang M, et al. Vegetation change and its response to climate change between 2000 and 2016 in marshes of the Songnen Plain, northeast China [J]. *Sustainability*, 2020, 12:35699.
- [21] Shen X, Liu B, Xue Z, et al. Spatiotemporal variation in vegetation spring phenology and its response to climate change in freshwater marshes of northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666:1169-1177.
- [22] 李耀斌,张远东,顾峰雪,等.中国温带草原和荒漠区域春季物候的变化及其敏感性分析[J].林业科学研究,2019,32(4):1-10.
- [23] 孙宝玉,韩广轩.模拟增温对土壤呼吸影响机制的研究进展与展望[J].应用生态学报,2016,27(10):3394-3402.
- [24] 邓伟,袁兴中,刘红,等.区域性气候变化对长江中下游流域植被覆盖的影响[J].环境科学研究,2014,27(9):1032-1042.
- [25] 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[J].气象学报,2005(3):257-266.
- [26] 张玉静,杨秀春,郭剑,等.呼伦贝尔草原物候变化及其与气象因子的关系[J].干旱区地理,2019,42(1):144-153.
- [27] 张晓东,朱文博,张静静,等.伏牛山地森林植被物候及其对气候变化的响应[J].地理学报,2018,73(1):41-53.
- [28] 俎佳星,杨健.东北地区植被物候时序变化[J].生态学报,2016,36(7):2015-2023.
- [29] 于静,高亚敏,付铭.科尔沁草原NDVI时空变化特征及其对气候的响应[J].中国草地学报,2020,42(6):82-90.
- [30] 桑国庆,唐志光,邓刚,等.基于MODIS NDVI时序数据的湖南省植被变化研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(5):1100-1109.
- [31] 赵志平,邵全琴,黄麟.2008年南方特大冰雪冻害对森林损毁的NDVI响应分析:以江西省中部山区林地为例[J].地球信息科学学报,2009,11(4):535-540.
- [32] Kross A, Fernandes R, Seaquist J, et al. The effect of the temporal resolution of NDVI data on season onset dates and trends across Canadian broadleaf forests [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115:1564-1575.
- [33] 张艳可,王金亮,农兰萍,等.基于MODIS时序数据北回归线(云南段)地区植被物候时空变化及其对气候响应分析[J].生态环境学报,2021,30(2):274-287.

Variations in phenology of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and the response to climate factors

Liu Xuan^{1abc}, Zhao Peishan^{1abc}, Gao Guanglei^{1abcd}, Zhao Yuanyuan^{1abcd}, Ding Guodong^{1abcd}, Mi Wanlin²

(1. a.School of Soil and Water Conservation / b.Ministry of Education Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering / c.Yanchi Ecology Research Station of the Mu Us Desert / d.Key Laboratory of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Management Station for Enclosure and Aerial Seedling of Bayannur City, Bayannur 015000, Inner Mongolia, China)

Abstract: Vegetation phenology reflects the direct response of vegetation to environmental change. Although *Pinus sylvestris* var. *mongolica* were widely introduced in the desertified northern China, the effects of climate conditions of introduction area on the phenology still remain unclear. Based on the MOD13Q1 products, and meteorological data (2001–2020), the phenology information and the temporal and spatial dynamic of *P. sylvestris* were explored using the maximum slope and trend analysis method, respectively. Moreover, the relations between phenology and climate factors were identified using the partial least squares regression. The results showed that: (1) The growing season of *P. sylvestris* started at the 100–150, 120–140, 100–140 DOY (day of year) and ended in 300–340, 270–315, 260–315 DOY in the Hulunbuir, Horqin and Mu Us Sandy Land respectively. The growing season was 170–220, 140–180, 150–200 days, respectively. (2) The initial growing season was significant earlier in the Hulunbuir, Horqin and Mu Us Sandy Land ($P < 0.05$) with the change rates of -15.7, -5.7, -13.9 days every decade, respectively. The end of growing season was significant earlier in the Horqin and Mu Us Sandy Land ($P < 0.05$) with the change rates of -11.7 and -16.8 days every decade, respectively. The growing season increased significantly in the Hulunbuir Sandy Land ($P < 0.05$) with the change rate of 9.8 days every decade. (3) In the Hulunbuir Sandy Land, the early beginning of growing season was affected by the temperature reduction in August last year and the precipitation decrease in March. The late end of growing season was affected by the precipitation decrease in January. In the Horqin Sandy Land, the early beginning and late end of growing season were affected by the precipitation reduction in July last year and precipitation increase in May, respectively. In the Mu Us Sandy Land, the early beginning of growing season was affected by the temperature rise in March and the precipitation decrease in December last year, and the early end of growing season was affected by the temperature rise in September and the precipitation decrease in December last year. This improved information not only provides a better understanding of the phenology of *P. sylvestris*, but also contributes to the forest management towards a changing world.

Key words: vegetation phenology; growing season; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; climate factor; partial least squares regression