

2000—2012 年山西省不同植被类型物候变化及其对气候变化的响应

仝莉棉, 曾彪, 王鑫

(兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 利用非对称高斯函数重建山西省 2000—2012 年 MODIS-NDVI 时间序列影像, 通过动态阈值法提取植被生长季始期(SOG)、生长季末期(EOG)、生长季长度(LOG)信息, 研究不同植被类型物候的时空变化及其与气候因子(气温、降水、日照时数)的相关关系。结果表明: (1) 13 a 来, 山西省不同植被类型物候的年际变化均表现出 SOG 提前、EOG 推迟、LOG 延长的趋势。 (2) 山西植被物候存在明显的空间差异。植被平均物候由南向北表现为 SOG 逐渐推迟, EOG 逐渐提前, LOG 逐渐缩短。从变化趋势看, 研究区大部分地区表现出植被 SOG 提前、EOG 推迟、LOG 延长的趋势。其中, SOG 提前、EOG 推迟、LOG 延长的地区主要分布在昕水河以北的黄河干流、汾河上游、桑干河、滹沱河等地区; 而 SOG 推迟、EOG 提前、LOG 缩短的地区主要分布在管涔山、恒山、五台山、吕梁山、太岳山南部等地区。 (3) 降水和日照时数可能是影响该区植被物候的主要因素, 不同植被类型物候对气候变化的响应不同。春季降水增多和 3 月平均日照时间变短可能是植被(针叶林除外)SOG 提前的主要原因, 9 月降水量增多和平均日照时间变短可能是植被(针叶林和草甸除外)EOG 推迟的主要原因。

关键词: MODIS-NDVI; 物候; 时空特征; 气候变化

中图分类号: Q948.11; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)02-0194-07

Phenological Variation of Different Vegetation Types and Its Response to Climate Changes in Shanxi Province from 2000 to 2012

TONG Limian, ZENG Biao, WANG Xin

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: We reconstructed time-series MODIS-NDVI data of Shanxi Province from 2000 to 2012 by asymmetric Gaussian function and extracted SOG, EOG and LOG of vegetation by dynamic threshold method. We analyzed spatiotemporal variation of different kinds of vegetation phenology and investigated the correlation between vegetation phenology and climate factors (temperature, precipitation and sunshine duration). The result showed that: (1) SOG of vegetation presented the advancing trend, EOG of vegetation showed the delay trend, and LOG of vegetation showed the prolonging trend at various degrees during 13 years in Shanxi Province; (2) the spatial variation of vegetation phenology was obviously different, average phenology of vegetation from south to north in Shanxi Province showed that SOG of vegetation was gradually postponed, EOG of vegetation was gradually advanced and LOG of vegetation was gradually shortened, based on the variation trend, SOG of vegetation showed the advancing trend, EOG of vegetation showed the delayed trend, and LOG of vegetation showed the prolonging trend in most research areas; the region in which SOG of vegetation was advancing, EOG of vegetation was postponing and LOG of vegetation was prolonging mainly distributed in mainstream of Yellow River in the north of Xinshui River, upstream of Fenhe River, Sanggan River and Hutuo River; in contrast, the region in which SOG of vegetation was postponing, EOG of vegetation was advancing and LOG of vegetation was shortening mainly distributed in Guancen Mountain, Hengshan Mountain,

收稿日期: 2015-08-25

修回日期: 2015-09-21

资助项目: 国家基础科学人才培养基金项目(J1210065); 兰州大学地理学基地科研训练及科研能力提高项目

第一作者: 仝莉棉(1992—), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 研究方向为全球变化与区域响应。E-mail: tonglm14@lzu.edu.cn

通信作者: 曾彪(1979—), 男, 湖北京山人, 副教授, 主要从事全球变化与区域响应研究。E-mail: zengb@lzu.edu.cn

Wutai Mountain, Lüliang mountain and the south of Taiyue Mountain; (3) we found that variations of different vegetation phenology events probably were controlled by precipitation and sunshine duration, the response of vegetation phenology to climate change differed among vegetation types; increasing precipitation in spring and shortening sunshine duration in March probably were main reasons for SOG advancing of vegetation besides conifers, and the increasing precipitation and shortening sunshine duration in September probably were main reasons for EOG postponement besides conifers and meadow.

Keywords: MODIS-NDVI; phenology; spatiotemporal features; climate change

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,与大气、土壤等进行着物质循环、能量转换和信息传递,能够反映其所在生态系统的总体环境状况^[1-4]。植被物候是指植被生长、发育、荣枯变化的周期性现象,物候变化影响到植被生产力、陆地生态系统碳储备及碳循环过程^[5-7],受到人们的广泛关注。对植被物候的研究,有利于理解植被生长与环境变化的相互作用过程及其表现形式。目前,许多学者通过利用物候站点观测资料、遥感监测数据、物候模型以及三者相结合的方式研究植被物候变化^[8-9],其中针对不同植被类型物候变化的研究已取得了重要成果^[7,10-11]。Junhu Dai等利用物候观测站点资料研究了中国四类树种的展叶期、叶变色期的变化特征,发现植被平均展叶期提前速率为1.1 d/10 a,而叶变色期平均推迟速率为0.93 d/10 a^[12]。Xuehui Hou等发现10 a间中国北方草地的生长季开始时间提前了3.1 d,而生长季结束时间推迟了1.3 d^[13]。Jun Du等研究中国北方半干旱区针叶林物候与气候变化的关系,发现最低温度是该区针叶林生长季开始与结束的主控因子^[14]。

山西省境内地形条件复杂,水热组合方式多样,植被类型丰富。不同植被类型自身的生理结构和生长所需的环境条件不同,使得不同植被类型物候特征及其对气候变化的响应存在差异。本文将山西省境内7种植被类型(针叶林、阔叶林、灌丛、草原、草丛、草甸、一年一熟作物)作为研究对象,利用MODIS-NDVI数据分析2000—2012年不同植被类型物候的时空变化特征及其与气候变化的关系,为全球变暖背景下,区域尺度上植被对气候变化的响应研究提供依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

山西省位于110°14′—114°33′E,34°34′—40°43′N,属于温带大陆性季风气候,年平均气温为4~14℃,年降水量为400~600 mm,从东南向西北由半湿润区过渡到半干旱区。山西省地处黄土高原的东部,位于我国第二级阶梯,地形复杂,东为太行山,西为吕梁

山,中部有一系列盆地,由北至南分别为大同盆地、太原盆地、临汾盆地、运城盆地。在复杂的地貌特征、水热组合条件下,形成以温带植被为主的丰富多样的植被类型。按植被大类划分,主要有针叶林、阔叶林、灌丛、草原、草丛、草甸、栽培植被。栽培植被包括一年一熟作物和两年三熟作物,由于两年三熟作物分布区实行多种农作物轮作的耕作制度,其农作物的生长周期和一年一熟作物以及自然植被差异较大,因此,本文对栽培植被中的两年三熟作物暂不考虑。

1.2 数据来源及处理

植被类型数据源自中国科学院编制的1:100万中国植被类型图,根据植被大类将山西省植被划分为针叶林、阔叶林、灌丛、草原、草丛、草甸及一年一熟作物7种植被类型。

NDVI数据采用美国国家宇航局(NASA)提供的2000—2012年MOD13植被指数产品,时间和空间分辨率分别为16 d和250 m,该数据经过辐射校正、大气校正、几何精度纠正,并通过最大值合成法有效地减弱了云、大气、太阳高度角等对数据精确度的影响。将遥感数据进行格式转换、重投影、拼接、裁剪,并用非对称高斯拟合算法对时间序列影像进行拟合,对拟合后的时间序列数据提取物候信息。

气象数据来自中国气象科学数据共享服务网,采用山西省1999—2012年气象资料完整的17个气象站点的逐月平均气温、降水量及日照时数资料,并将其计算合成不同开始时间、不同时间间隔的气象数据。考虑到植被物候变化受当时和前期的气候条件影响,将每年前一年12月和当年1—11月的气温、降水及日照时数数据作为一个生长年数据。

1.3 研究方法

采用动态阈值法对拟合后的NDVI时间序列数据提取植被生长季始期(start of growth season, SOG)、生长季末期(end of growth season, EOG)、生长季长度(length of growth season, LOG)信息,该方法有较强的灵活性、适应性,应用非常广泛^[15-17]。Jönsson和Eklundh建议将生长季开始与结束时的

阈值设置为 20%^[18]。因此,本文定义当 NDVI 增长(下降)的幅度与年内最大振幅的比达到 20%时所对应的时刻为 SOG(EOG)。

一元线性回归趋势分析能够模拟出每个栅格的变化趋势,进而反映区域植被物候期变化的空间分布特征^[19],通过 Matlab 计算山西省植被 SOG,EOG,LOG 的变化趋势。公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times D_{\text{phe}}) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n D_{\text{phe}}}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

式中:slope——物候变化的斜率; n ——研究时段的年数; D_{phe} ——植被物候(SOG,EOG,LOG)发生的时间。计算 SOG,EOG 的变化率时,若 $\text{slope} > 0$,表示在研究时段内 SOG,EOG 呈推迟趋势,反之为提前趋势;计算 LOG 的变化率时, $\text{slope} > 0$,表示 LOG 呈延长趋势,反之为缩短趋势。

用相关分析方法来揭示不同植被物候与气候因子(气温、降水、日照时数)之间相互关系的密切程度,通过相关系数的计算与检验来完成。

2 结果与分析

2.1 植被物候的年际变化

通过计算山西省不同植被类型 13 a 平均 SOG 出现的时间,发现针叶林平均 SOG 出现最早,为第(120±6)天(从 1 月 1 日开始计算,下同);一年一熟作物平均 SOG 出现最晚,为第(147±18)天。由此可知山西植被平均 SOG 出现在 4 月下旬至 5 月下旬。

分析 2000—2012 年山西省不同植被类型 SOG 的年际变化情况(图 1),可以发现山西省 7 种植被 SOG 表现出不同程度的提前趋势。其中,一年一熟作物 SOG 显著提前($p=0.016$),其他植被类型 SOG 提前趋势不显著。按提前速率大小,一年一熟作物>草原>草丛>灌丛>草甸>阔叶林>针叶林。

通过计算不同植被类型 13 a 平均 EOG 出现的时间,发现草甸平均 EOG 出现最早,为第(315±6)天;草丛平均 EOG 出现最晚,为第(326±5)天。由此可知山西植被平均 EOG 集中出现在 11 月。

分析 2000—2012 年不同植被类型 EOG 的年际变化情况(图 2),可以发现 13 a 来山西省七种植被类型 EOG 均表现为不显著的推迟趋势。按推迟速率大小,一年一熟作物>草甸>阔叶林>草原>草丛>针叶林>灌丛。

通过计算不同植被类型 13 a 平均 LOG 持续时间,发现一年一熟作物平均 LOG 最短,为 167 d;针叶林平均 LOG 最长,为 204 d。由此可知山西植被平均 LOG 持续时间为 5~7 个月。

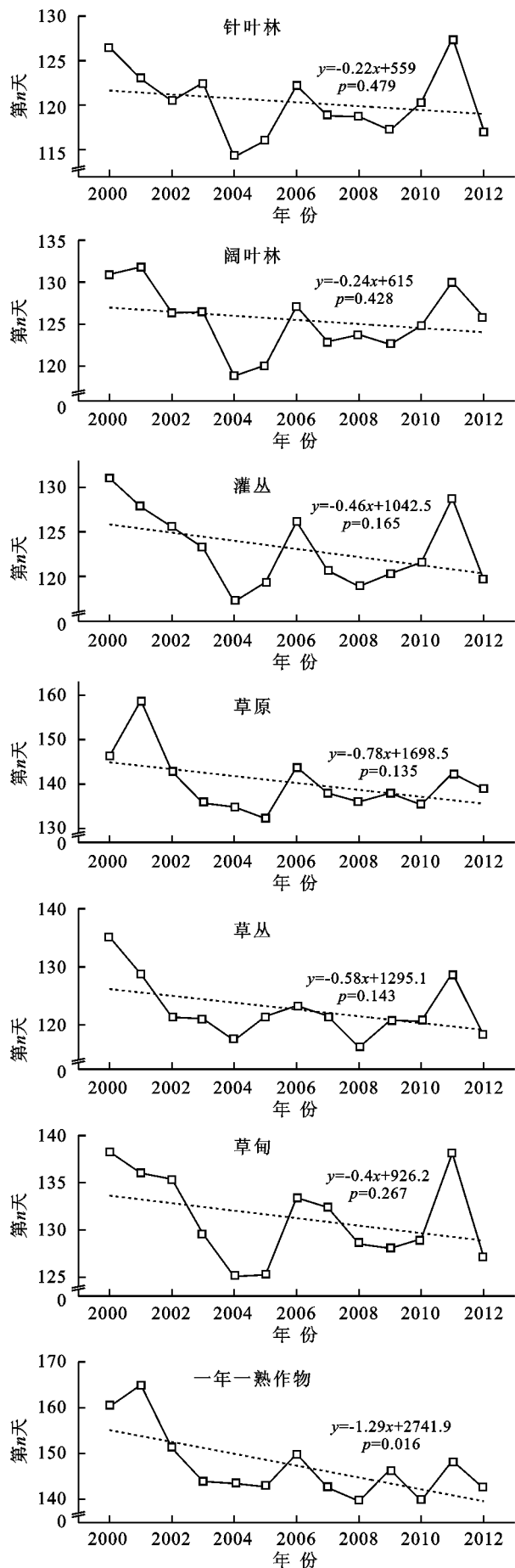


图 1 2000—2012 年不同植被类型 SOG 的年际变化

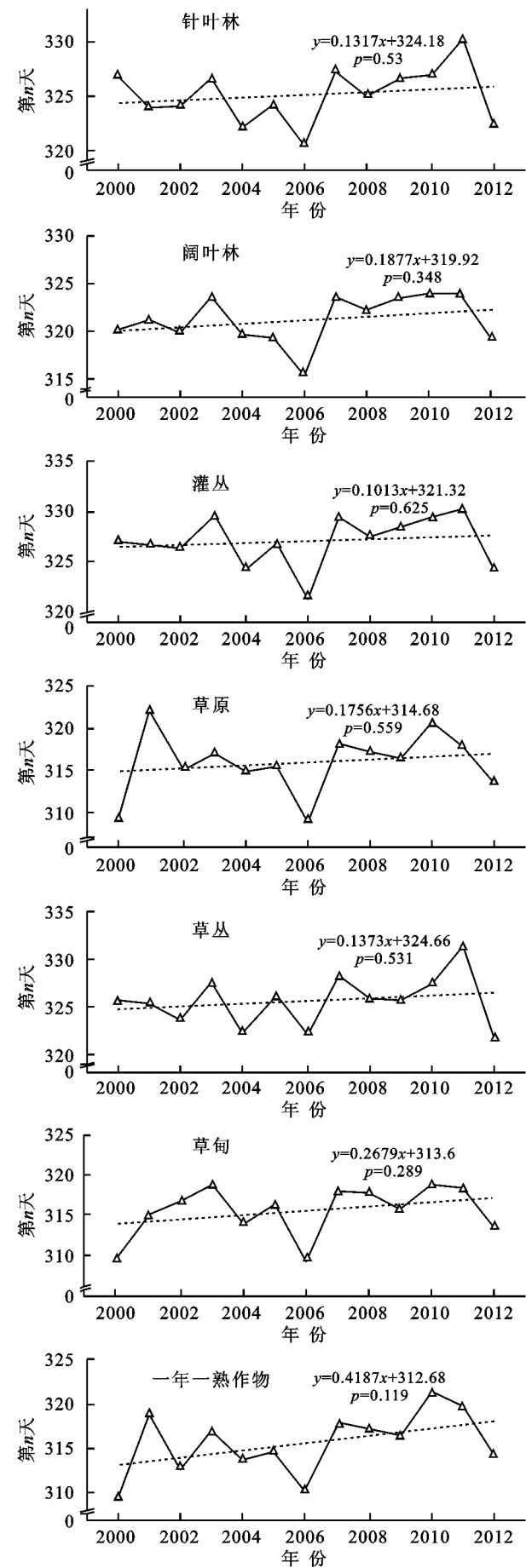


图 2 2000—2012 年不同植被类型 EOG 的年际变化

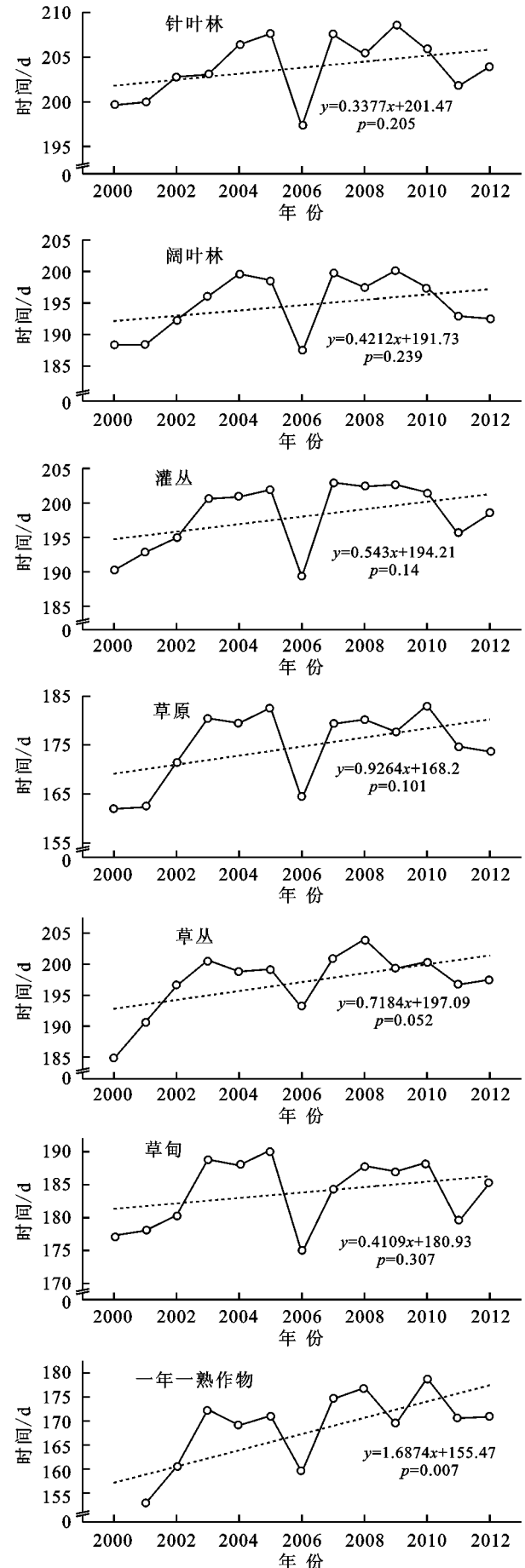


图 3 2000—2012 年不同植被类型 LOG 的年际变化

分析 2000—2012 年不同植被类型 LOG 的年际变化情况(图 3),发现 13 a 来山西省 7 种植被类型 LOG 均呈不同程度的延长趋势。其中,一年一熟作物和草丛 LOG 显著延长($p=0.007$, $p=0.052$),其他植被类型 LOG 延长趋势不显著。按延长速率大小,一年一熟作物>草原>草丛>灌丛>阔叶林>草甸>针叶林。植被 LOG 是 EOG 与 SOG 相减之后的天数,其变化也由 EOG 与 SOG 的变化引起。山西省不同植被类型 LOG 延长是植被 SOG 提前和 EOG 推迟共同作用的结果。

2.2 植被物候的空间变化

2000—2012 年山西省植被平均物候的空间分布状况附图 1 所示,山西省由南向北植被平均物候空间变化表现为:SOG 逐渐推迟,EOG 逐渐提前,LOG 逐渐缩短。在山西南部中条山、吕梁山南端等地区,植被平均 SOG 出现较早,EOG 出现较晚,LOG 较长;而山西北部的大同盆地、忻定盆地等地区植被平均 SOG 出现较晚,EOG 出现较早,LOG 较短。

附图 2 表示 2000—2012 年山西省植被物候变化趋势的空间分布状况。由附图 2 可知,13 a 来山西植被 SOG 变化表现出明显的南北差异。研究区北部植被 SOG 以提前为主,南部以推迟为主。植被 SOG 提前的地区占研究区面积的 72.8%,主要分布在昕水河以北的黄河干流、汾河上游、浊漳河北缘、滹沱河、桑干河等地区。植被 SOG 推迟的地区占研究区面积的 27.2%,主要分布在管涔山、吕梁山南部、太岳山、中条山等地区。

由附图 2 可知,13 a 来山西植被 EOG 提前和推迟的地区在不同纬度分布较为均匀,大部分地区表现出推迟趋势。植被 EOG 推迟的地区占研究区面积的 63.1%,主要分布在昕水河以北的黄河干流、汾河上游、桑干河、滹沱河、沁河等地区。植被 EOG 提前的地区占研究区面积的 36.9%,主要分布在管涔山、恒山、五台山、吕梁山、太岳山南部等地区。

由附图 2 可知,13 a 来山西植被 LOG 变化也表现出明显的南北差异,研究区北部植被 LOG 主要呈延长趋势,南部呈缩短趋势。植被 LOG 延长地区占研究区面积的 71.8%,主要分布在昕水河以北的黄河干流、汾河上游、桑干河、滹沱河等地区。植被 LOG 缩短的地区占研究区面积的 28.2%,主要分布在管涔山、恒山、五台山、吕梁山南部、太岳山、中条山等地区。

2.3 不同植被类型物候对气候变化的响应

分析 2000—2012 年山西省年平均气温、年降水量和年平均日照时数的年际变化情况(图 4)可知,13 a 来,山西省年平均气温呈不显著的下降趋势,下降

速率为 $0.04^{\circ}\text{C}/\text{a}$;年降水量呈不显著的增加趋势,增加速率为 $2.76\text{ mm}/\text{a}$;年平均日照时数呈不显著的减少趋势,减少速率为 $1.19\text{ h}/\text{a}$ 。

过去的研究表明,温度、水分、光照是影响植被物候发生时间的重要因素^[20-21],本文对不同植被类型 SOG 和可能会对其变化产生影响的前一年 12 月至当年 5 月及其不同间隔组合的平均气温、降水量、平均日照时数的相关系数进行计算,并列出了最相关的月份(表 1)。由表 1 可知,针叶林 SOG 和 4 月气温呈显著负相关,可能是由于针叶林生长在寒冷地区,4 月气温较高可以较早达到其生长发育的热量条件要求,有利于针叶林 SOG 提前。阔叶林 SOG 和春季(3—5 月)降水呈显著负相关,可能是由于落叶阔叶林以叶落休眠的方式度过严冬,随着春季气温回升,土壤水分需要达到一定条件才能诱导树木展叶,春季较多的降水使得土壤水分增多,促使植被提前返青。灌丛、草原、草丛、草甸和一年一熟作物 SOG 均和春季降水呈显著负相关,和 3 月日照时数呈显著正相关,说明春季降水增多和 3 月日照时间减少有利于促进植被 SOG 提前。这可能是由于春季降水增多,土壤中的水分含量增加,同时,日照时间减少可以减弱地表蒸发,减少土壤水分的消耗,从而保持较好的土壤水分条件,有利于植被 SOG 提前。这与陈效逯等和张峰等对内蒙古草本植物物候对气候变化的响应研究结果一致^[22-23]。另外,一年一熟作物 SOG 变化除了受气候变化外,还可能受到人类活动的影响,已有研究表明,化肥的施用和城市化等也会引起植被 SOG 提前^[24-25]。

本文对不同植被类型 EOG 和可能会对其变化产生影响的 6—11 月及其不同间隔组合的平均气温、降水量、平均日照时数的相关系数进行计算,并列出了最相关的月份(表 2)。由表 2 可知,针叶林、草原、草丛和一年一熟作物 EOG 与降水均呈显著正相关,与日照时数均呈显著负相关,说明降水越多、日照越短有利于这些植被 EOG 推迟。可能是由于较多的降水为植被后期的生长提供较好的水分条件,使得其生长结束日期推迟;同时,日照时间直接影响着植被光合作用的时间,每种植物长期生活在一定日照格局的环境中,形成了其特定的临界光周期。由于植被经历一个完整生命周期所需要的光照时间基本稳定,日照时间减少使得生长期延长,植被 EOG 推迟。该结果和国志兴等研究东北地区不同植被类型植被和气候变化的关系得出草原、草丛和农田生长季结束日期提前受降水减少影响显著的结果一致^[26]。而草甸 EOG 分别和 9 月降水、10 月日照时数呈显著正相关,可能是由于不同植被类型的生存条件及对周围环境中物质、能量的有效利

用方式不同,使得草甸 EOG 对日照时间的响应和草原、草丛等植被类型存在差异。灌丛 EOG 和 9 月降水呈显著正相关,说明灌丛 EOG 对降水响应敏感,9 月降水增加有利于灌丛 EOG 推迟。同时,阔叶林 EOG 和 8 月气温呈显著负相关,与 8—9 月降水呈显著正相关,说明 8 月气温越低、8—9 月降水越多有利于阔叶林 EOG 推迟,这可能是由于植被从展叶到落叶需要一定的积温^[22],8 月气温相对较低可以使达到植物所需积温的时间相对变长,植被 EOG 推迟;降水增多在一定程度上可以缓减高温对植被的伤害,并为植被生长发育提供充足的水分,较好的水分条件有利于植被 EOG 推迟。

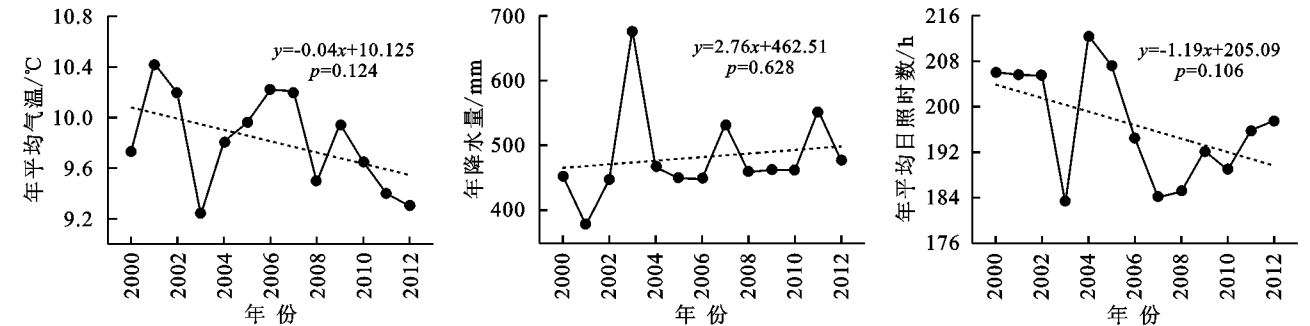


图 4 2000—2012 年山西省气候年际变化

表 1 不同植被类型 SOG 与气候因子的相关性

植被类型	气温		降水		日照时数	
	相关时间段	相关系数	相关时间段	相关系数	相关时间段	相关系数
针叶林	4 月	-0.482*	3—5 月	-0.41	3 月	0.381
阔叶林	4 月	-0.437	3—5 月	-0.57**	3 月	0.377
灌丛	4 月	-0.344	3—5 月	-0.588**	3 月	0.546*
草原	5 月	0.382	3—5 月	-0.736***	3 月	0.524*
草丛	5 月	0.357	3—5 月	-0.756***	3 月	0.561**
草甸	4 月	-0.366	3—5 月	-0.499*	3 月	0.493*
一年一熟作物	5 月	0.381	3—5 月	-0.825***	3 月	0.624**

注: * 代表 0.1 置信度水平, ** 代表 0.05 置信度水平, *** 代表 0.01 置信度水平。下表同。

表 2 不同植被类型 EOG 与气候因子的相关性

植被类型	气温		降水		日照时数	
	相关时间段	相关系数	相关时间段	相关系数	相关时间段	相关系数
针叶林	8 月	-0.327	9—11 月	0.679**	11 月	-0.553**
阔叶林	8 月	-0.513*	8—9 月	0.605**	9 月	-0.423
灌丛	8 月	-0.397	9 月	0.694***	9 月	-0.43
草原	8 月	-0.290	9 月	0.575**	9 月	-0.589**
草丛	11 月	0.278	8—11 月	0.761***	9—11 月	-0.599**
草甸	8 月	-0.318	9 月	0.808***	10 月	0.527*
一年一熟作物	8 月	-0.301	9 月	0.623**	9 月	-0.668**

3 结论

(1) 山西省植被 SOG 呈不同程度的提前趋势,按提前速率大小,一年一熟作物>草原>草丛>灌丛>草甸>阔叶林>针叶林;植被 EOG 均表现为不显著的推迟趋势,按推迟速率大小,草甸>阔叶林>草

由以上分析可知,针叶林 SOG 对气温响应敏感,而 EOG 对降水和日照时数响应敏感;阔叶林 SOG 对降水响应敏感,而 EOG 对气温和降水响应均敏感;灌丛 SOG 对降水和日照时数响应敏感,而 EOG 仅对降水响应敏感;草原、草丛、草甸和一年一熟作物 SOG,EOG 均对降水和日照时数响应敏感。同一植被类型的不同物候期对气候因子的响应不同,不同植被类型物候对同一气候因子的响应时间段和响应程度也不同。春季降水增多和 3 月平均日照时间变短可能是植被(针叶林除外)SOG 提前的主要原因,9 月降水增多和平均日照时间变短可能是植被(针叶林和草甸除外)EOG 推迟的主要原因。

原>草丛>针叶林>灌丛。

(2) 植被 LOG 呈不同程度的延长趋势,显著延长的植被类型有一年一熟作物和草丛,其他植被类型 LOG 延长不显著,从延长速率看,一年一熟作物>草原>草丛>灌丛>草甸>阔叶林>针叶林。

(3) 山西省植被物候存在明显的空间差异。植

被平均物候由南向北表现为: SOG 逐渐推迟, EOG 逐渐提前, LOG 逐渐缩短。其中, SOG 提前、EOG 推迟、LOG 延长的地区主要分布在昕水河以北的黄河干流、汾河上游、桑干河、滹沱河等地区;而 SOG 推迟、EOG 提前、LOG 缩短的地区主要分布在管涔山、恒山、五台山、吕梁山、太岳山南部等山区。

(4) 13 a 来, 降水和日照时数对山西植被物候的影响较大, 而气温的影响较小, 不同植被类型物候对气候变化的响应不同。春季降水增多和 3 月平均日照时间变短可能是植被(针叶林除外)SOG 提前的主要原因, 9 月降水增多和平均日照时间变短可能是植被(针叶林和草甸除外)EOG 推迟的主要原因。

本文研究的时间长度为 13 a, 为提高结论的可靠性, 仍需继续进行长时间的监测分析。同时山西地区植被物候的实测数据较少, 通过遥感数据提取的物候信息结果的精度有待进一步验证。

参考文献:

- [1] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系: 基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报, 1998(3): 204-210.
- [2] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983—1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716-720.
- [3] 侯美亭, 赵海燕, 王笋, 等. 基于卫星遥感的植被 NDVI 对气候变化响应的研究进展[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(3): 353-364.
- [4] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 马文红. 近 20a 来中国植被活动在增强[J]. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2003, 33(6): 554-565.
- [5] Chen X, Hu B, Yu R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(7): 1118-1130.
- [6] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements[J]. *Nature*, 1996, 382: 146-149.
- [7] Carrer M, Motta R, Nola P. Significant mean and extreme climate sensitivity of Norway spruce and silver fir at mid-elevation mesic sites in the Alps[J]. *PLoS One*, 2012, 7(11): 1-9.
- [8] 马勇刚, 张弛, 塔西甫拉提·特依拜. 中亚及中国新疆干旱区植被物候时空变化[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 95-102.
- [9] 宋春桥, 游松财, 柯灵红, 等. 藏北高原植被物候时空动态变化的遥感监测研究[J]. 植物生态学报, 2011, 35(8): 853-863.
- [10] Brown M E, De Beurs K M, Marshall M. Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 years[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 126: 174-183.
- [11] Ahl D E, Gower S T, Burrows S N, et al. Monitoring spring canopy phenology of a deciduous broadleaf forest using MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(1): 88-95.
- [12] Dai J, Wang H, Ge Q. The spatial pattern of leaf phenology and its response to climate change in China[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 58(4): 521-528.
- [13] Hou X, Gao S, Niu Z, et al. Extracting grassland vegetation phenology in North China based on cumulative SPOT-VEGETATION NDVI data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(9): 3316-3330.
- [14] Du J, He Z, Yang J, et al. Detecting the effects of climate change on canopy phenology in coniferous forests in semi-arid mountain regions of China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(17): 6490-6507.
- [15] 于信芳, 庄大方. 基于 MODISNDVI 数据的东北森林物候期监测[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 111-117.
- [16] 宋春桥, 游松财, 柯灵红, 等. 藏北高原植被物候时空动态变化的遥感监测研究[J]. 植物生态学报, 2011, 35(8): 853-863.
- [17] 徐浩杰, 杨太保. 近 13a 来黄河源区高寒草地物候的时空变异性[J]. 干旱区地理, 2013, 36(3): 467-474.
- [18] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2002, 40(8): 1824-1832.
- [19] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(5): 1111-1117.
- [20] 徐雨晴, 陆佩玲, 于强. 气候变化对植物物候影响的研究进展[J]. 资源科学, 2004, 26(1): 129-136.
- [21] 符瑜, 潘学标. 草本植物物候及其物候模拟模型的研究进展[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3): 319-325.
- [22] 陈效述, 李惊. 内蒙古草原羊草物候与气象因子的关系[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5280-5290.
- [23] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 内蒙古克氏针茅草原植物物候及其与气候因子关系[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1312-1322.
- [24] Chau A, Heinz K M, Davies F T. Influences of fertilization on population abundance, distribution, and control of *Frankliniella occidentalis* on *chrysanthemum* [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2005, 117(1): 27-39.
- [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[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1803-1809.
- [26] 国志兴, 张晓宁, 王宗明, 等. 东北地区植被物候对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 578-585.