

DOI: 10.5846/stxb201510092039

贾文雄, 赵珍, 俎佳星, 陈京华, 王洁, 丁丹. 祁连山不同植被类型的物候变化及其对气候的响应. 生态学报, 2016, 36(23): 7826-7840.

Jia W X, Zhao Z, Zu J X, Chen J H, Wang J, Ding D. Phenological variation in different vegetation types and their response to climate change in the Qilian Mountains, China, 1982—2014. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7826-7840.

祁连山不同植被类型的物候变化及其对气候的响应

贾文雄^{1,*}, 赵 珍¹, 俎佳星², 陈京华¹, 王 洁¹, 丁 丹¹

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 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

摘要: 基于 1982—2006 年 GIMMS NDVI 和 2000—2014 年 MODIS NDVI 遥感数据, 利用 double logistic 拟合方法提取了 1982—2014 年祁连山区不同植被的生长季始期、生长季末期和生长季长度 3 个重要的物候参数, 分析了不同植被物候期的时间变化趋势、空间分异特征及对气候因子的响应。结果表明: (1) 祁连山区不同植被的生长季始期和生长季末期随年际变化表现出波动提前或推迟, 其中沼泽植被的变化波动最大; 草甸植被、灌丛植被、阔叶林植被和栽培植被生长季长度出现延长趋势; (2) 祁连山区植被生长季始期集中在 5 月初, 其中阔叶林植被生长季开始最早, 荒漠植被生长季开始最晚, 植被生长季末期集中在 9 月, 栽培植被生长季结束较早, 荒漠植被、沼泽植被生长季结束较晚, 植被生长季长度集中在 110—140 d, 其中阔叶林植被、针叶林植被生长季长度较长, 而荒漠植被、高山植被生长季长度较短; (3) 祁连山植被物候期变化趋势的空间分布表明植被生长季始期、生长季末期主要表现为提前不明显和推迟不明显, 生长季长度主要表现为缩短不明显和延长不明显; (4) 物候要素与气候要素相关性表明前期温度的积累有利于植被的开始生长, 但当年 3 月的降水量对植被生长季始期同样有重要作用, 不同植被生长季末期与 8 月、9 月温度相关性较大, 而与 10 月、11 月降水的相关性较大。

关键词: 物候参数; 不同植被类型; 时空变化; 气候响应; 祁连山区

Phenological variation in different vegetation types and their response to climate change in the Qilian Mountains, China, 1982—2014

JIA Wenxiong^{1,*}, ZHAO Zhen¹, ZU Jiaxing², CHEN Jinghua¹, WANG Jie¹, DING Dan¹

1 College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

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

Abstract: Vegetation phenology is used in the study of climate change because of stable distribution, and ease of observation and interpretation. In this study, a 15-day time series of averaged normalized difference vegetation indices (NDVI) derived from the daily Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) NDVI dataset and 16-day averaged NDVI values derived from the daily Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) NDVI dataset were used to analyze trends in vegetation phenology. Firstly, using the ENVI tool to cut remote sensing data, NDVI time series data for the study area from 1982 to 2014 were obtained. Secondly, using a Savitzky-Golay filter, noise contamination caused by random factors was reduced by producing a smooth NDVI curve. Thirdly, using double logistic fitting, three important phenological parameters, including the start of growing season (SOS), the end of growing season (EOS), and the length of growing season (LOS) were extracted for different vegetation types. Temporal change trends, as well as its spatial distribution characteristics, of the nine major vegetation types in the Qilian Mountains were analyzed. These types included meadow, steppe, desert vegetation, shrub vegetation, alpine vegetation, coniferous forest, broad-leaved forest,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41161017)

收稿日期: 2015-10-09; 修订日期: 2016-06-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wxjiaxy@163.com

cultivated vegetation, and swamp vegetation. In addition, the effects of climatic factors on phenology were analyzed by correlation analysis. The results showed that: (1) The annual variation of SOS and EOS of different vegetation types in the Qilian Mountains fluctuated in its advance or or delay; the maximum variation was observed in the swamp vegetation. The LOS of meadow, shrub, coniferous forest, and cultivated vegetation was longer, but the LOS of desert vegetation shortened. (2) The SOS of vegetation was primarily in May; the growing season of the broad-leaved forests began the earliest and desert vegetation began the latest. The EOS of vegetation occurred primarily in September; the growing season of cultivated vegetation ended earlier, whereas the growing season of the desert and swamp vegetation ended later. The LOS of vegetation was from 110 days to 140 days, among which the LOS of broad-leaved and coniferous forests was longer, whereas the LOS of desert and alpine vegetation was shorter. (3) The spatial distribution of variation trends for vegetation phenology indicated that SOS and LOS were advanced or delayed but not substantially, and the LOS was primarily shortened or prolonged, but not substantially. (4) The correlation of phenological metrics and climatic factors indicated that the accumulation of early stage temperature was beneficial to the growth of vegetation, but the amount of precipitation in March was also important to the SOS of vegetation. The EOS of different vegetation types was related with temperature in August and September, and correlated with precipitation in October and November, but the correlation was not significant. At different altitudes, the phenological parameters were different. In particular, the LOS appeared to shorten with increasing elevation, which is consistent with the spatial distribution of phenological parameters. These results explain the relationship between climate change and phenological phases. Climate change has an obvious effect on vegetation phenological parameters, and the phenological period can explicitly indicate the climate change.

Key Words: phenological parameters; vegetation types; spatial-temporal variations; climate change; Qilian Mountains

物候学是研究自然界以年为周期重复出现的各种生物现象与环境因子的周期性变化相互关系的科学^[1-2]。植物是陆地生态系统的主体,植物物候指植物受气候和其他环境因子的影响而出现的以年为周期的自然现象^[3]。植被物候(包括生长季开始时间、结束时间、生长季长度)不仅能指示植被的节律变化,同时反映了植被年际变化对气候变化的响应,是全球变化的“积分仪”和景观生态环境变化的综合“指示器”^[4]。IPCC 第五次评估报告指出,1880—2012 年全球地表平均温度上升约 0.85℃,全球变暖毋庸置疑。随着全球气候变化,植被物候也发生显著的变化,如 Tucker 等^[5]发现随着温度的升高,35°N 以上地区的植被生长季有明显的延长趋势;Sparks 等^[6]提出英国地区因气温升高 2.5℃导致开花时间提前了 5—25 d;郑景云等^[7]提出东北、华北等地春季平均温度升高导致物候期提前,而长江中游、华南等地春季温度下降造成物候期推迟。当前全球变化研究中最活跃 of “全球变化与陆地生态系统(Global Change and Terrestrial Ecosystems, GCTE)”项目^[8]对植被物的研究越来越重视。

传统的物候研究方法以野外观测为基础,需耗费大量人力、物力,而且研究范围面积小,周期短且受时间限制。在计算机、遥感技术的推动下,使得遥感监测不同区域的植被物候并进行长时间、大范围的研究成为可能。Karlsen 等^[9]基于 GIMMS NDVI 数据分析得出北欧地区的植物生长季提前与温度有关;Delbart 等^[10]利用 NOAA AVHRR 和 SPOT NDVI 数据分析了西伯利亚地区的植被物候,得到生长季始期在 1982—1991 年提前了 7.8 d,而在 2000—2004 年却延迟了 7 d,呈现的这种波动状态与温度的波动性保持一致;刘玲玲等^[11]基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据,对欧亚大陆植被物候变化趋势进行监测分析,得出大部分植被类型的生长季开始时间呈提前趋势,其中森林提前幅度最大;余振等^[12]利用 NOAA/AVHRR NDVI 研究了我国东部南北样带不同植被的物候期,指出温带草丛、亚热带热带草丛等植被返青期显著提前,寒温带、温带针叶林等植被休眠期显著推迟,大部分植被的生长季长度均出现延长趋势;王宏等^[13]利用 NOAA/AVHRR NDVI 数据研究了我国北方植被生长季变化,得出大部分纬度的植被生长季始期提前,生长季末期推迟;李明等^[14]利用 SPOT NDVI 数据得出长白山区林地生长季开始时间早于草地、耕地,结束时间却晚于草地、耕地;国志兴等^[15]利用

GIMMS NDVI 数据得到东北地区沼泽、针叶林、阔叶林、草丛、草甸植被生长季延长,而农田、灌丛、草原、针阔混交林生长季缩短。张戈丽和张扬建等^[16]发现利用 1982—2000 年 GIMMS 和 2001—2011 年 SPOT—VGT 合并提取的青藏高原 1982—2011 年植被物候期开始时间出现提前趋势,趋势为 1.04 d/a,甚至有的地区提前时间达到近 1 个月左右,表明青藏高原植被生态系统对全球变化有着明显的正响应。国内利用遥感数据研究植被物候变化主要集中于东北地区,而对于西北地区遥感监测植被物候期的研究却很少。

祁连山区是西北地区重要的生态区,已有学者利用遥感数据对祁连山植被 NDVI 变化、植被覆盖变化及其与气候变化关系等方面作了深入研究^[17-19],但对于遥感监测分析该地区植被物候期的研究极少。本研究基于 GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 数据集,利用 Savitzky—Golay 滤波重构 NDVI 时间序列数据,并用 double logistic 拟合方法提取了不同植被的物候期(生长季开始日期、结束日期和生长季长度),在此基础上分析了祁连山 1982—2014 年不同植被的物候期时间变化趋势、空间分异特征及与气候因子温度、降水的相关性,以期全面认识在气候变化影响下研究区近 33 年来不同植被的物候期变化状况,进而在生产中根据不同植被物候期对气候变化的响应具体安排农、林业生产和生活,从而为农业生产计划、合理轮牧以及生态环境建设提供科学依据,并且有利于进一步理解大尺度区域上气候对不同植被物候期变化的影响。

1 研究区概况

祁连山(93°30′—103°00′E, 35°43′—39°36′N)位于青藏高原的东北部,地跨青海、甘肃两省,由多条西北-东南走向的平行山脉和宽谷组成,是西北地区著名的高大山系之一,其地理位置及祁连山的植被分布如图 1 所示。祁连山是青藏高原、内蒙古高原和黄土高原的分界线,自然条件复杂,水热条件差异大,东部湿度大,降水多,西部干燥,降水少,具有典型的大陆性气候特征,气候还表现出多样性及垂直变化特征,如山前低山-中山下部-中山上部-亚高山及高山地区年降水约为 150、250—300、400—500、800 mm;年均温约为 6、2—5、0—1、-5℃。由于起伏不一的地形和复杂的水热条件,祁连山区植被类型丰富,主要有草甸、草原、荒漠、灌丛、高山植被等植被,分别占祁连山总面积的 30.14%、25.94%、14.61%、9.29%、7.90%,其他植被零星分布。研究祁连山植被物候的变化趋势,能为区域尺度的可持续发展提供一定的指导研究。

2 数据来源

2.1 遥感数据

本研究所采用的遥感数据是 GIMMS AVHRR NDVI 和 MODIS NDVI 数据集。GIMMS AVHRR NDVI 数据集是由美国国家海洋与大气管理局(The National Oceanic and Atmospheric Administration,简称 NOAA)推出的全球植被指数变化数据,可以在中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)免费下载,时间范围为 1982—2006 年。MODIS NDVI 数据集采用 NASA 提供的 MODIS13A2 级植被指数产品,可在网站(<https://wist.echo.nasa.gov/api/>)直接下载,时间范围为 2000—2014 年。应用 MRT(MODIS Reprojection Tools)软件对 MODIS NDVI 数据进行数据格式、投影转换和数据拼接等。

利用 ENVI 4.7 工具和祁连山区边界矢量数据对下载的遥感数据分别进行裁剪,得到研究区的 1982—2014 年 NDVI 时间序列数据。NDVI 值应在 $[-1, 1]$ 之间,区间以外的数值代表其它地物,如水体、裸地等。

由于采用两种数据,根据 2000—2006 年重叠的 7a 数据,对数据进行一致性检验(表 1),由表可知,2000—2006 年 GIMMS NDVI 数据和 MODIS NDVI 数据相关系数均在 0.9 以上,说明两种时间序列数据具有较好的一致性,可以同时用于植被物候的研究中。

2.2 其他数据

气候数据为 1982—2014 年祁连山及其周边地区共 33 个气象站点(图 1)的日平均气温和降水量数据,资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。植被类型图为寒区旱区科学数据中心提供的 1:1000000 矢量图。

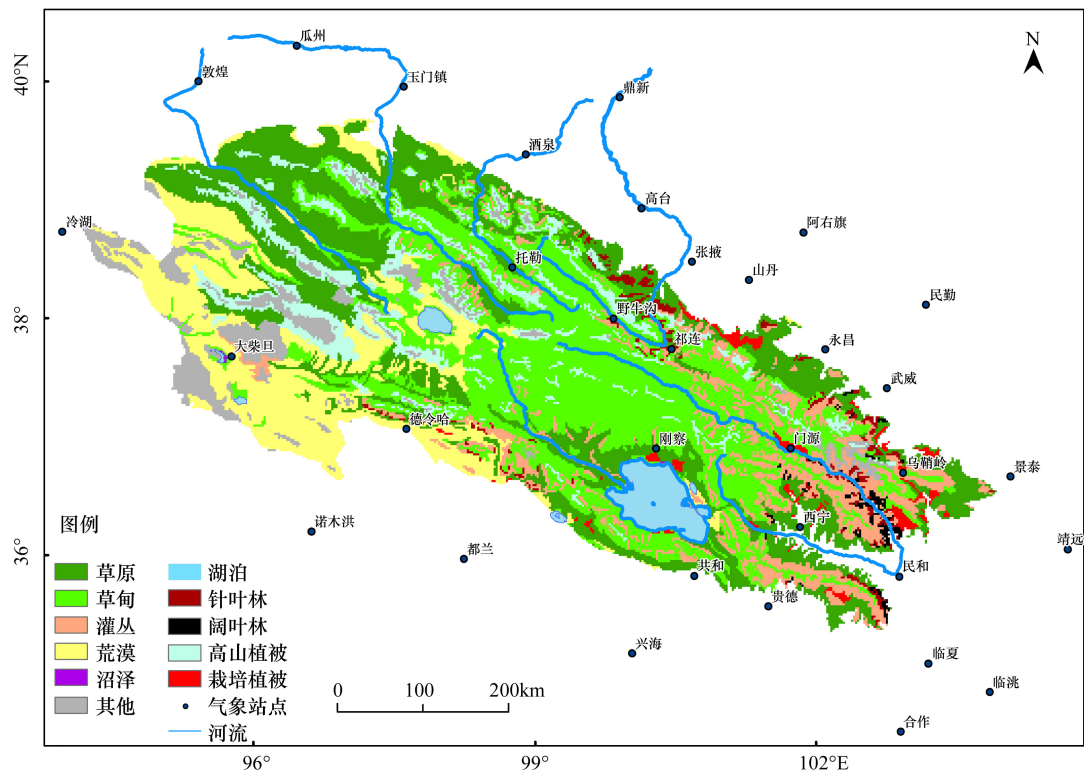


图 1 祁连山植被分布及气象站点图

Fig.1 The distribution of vegetation and meteorological station of Qilian Mountains

表 1 2000—2006 年 GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 数据相关分析

Table 1 Correlation analysis of GIMMS NDVI and NDVI MODIS data in 2000—2006

年份 Year	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年
相关系数 Correlation coefficient	0.979 **	0.965 **	0.980 **	0.981 **	0.947 **	0.971 **	0.970 **

** 表示通过 0.01 的置信度检验

3 研究方法

3.1 Savitzky-Golay 滤波法

为了进一步降低云层、大气等对 NDVI 时间序列的影响,必须对数据进行滤波平滑^[11]。目前滤波平滑的方法有很多,如 Savitzky-Golay 滤波法、时间序列分析法(HANTS)、滑动平均法、中值迭代滤波法(MIF)、最小二乘法等^[20-24],其中 S-G 滤波法对传感器类型、NDVI 尺度等没有严格的要求,且得到的重构数据质量较高^[25],所以本文采用 S-G 滤波法进行 NDVI 数据的滤波平滑。

S-G 滤波法是由 Savitzky 和 Golay 提出的一种最小二乘卷积拟合平滑滤波方法,广泛用于数据的平滑除噪。S-G 滤波法应用在 NDVI 曲线滤波时,公式可表示为:

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

(1)

式中, Y 为原始 NDVI 值, Y^* 为滤波拟合后的 NDVI 值, j 指数据序列的第 j 个点, C_i 为第 i 个数据点的滤波系数。 N 为滑动窗口的宽度即 $2m+1$ ^[26-27]。

运用 S-G 滤波法分别对祁连山 GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 数据集进行了滤波平滑,得到平滑的 NDVI 时间序列,为祁连山不同植被物候要素的提取做好准备。

3.2 物候要素提取

目前,对于遥感图像的物候要素提取,国内外学者已经提出了多种监测方法,如阈值法,导数法,模型拟合法^[9,28-29]等。阈值法操作简单但受人为因素影响较大,影响了结果的准确性;导数法也限制于经验阈值;模型拟合法所拟合的精度直接影响物候参数的确定。本文采用导数和阈值方法结合的拟合方法来进行物候参数的提取,拟合公式 double logistic^[30]为:

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

式中, $NDVI_t$ 表示在 t 时间的NDVI值; $NDVI_{min}$ 表示年NDVI最小值; $NDVI_{diff}$ 表示年NDVI差值; r_i 表示NDVI左侧即上升时拐点的最大变化率; $nSOS$ 为理论上的生长季始期; r_d 表示NDVI在右侧即下降时拐点的最大变化率; $nEOS$ 为理论上的生长季末期。

采用该函数对滤波后的年NDVI时间序列的每个像元进行拟合,然后对函数求二阶导,定义NDVI二阶导数变化率最大的点为生长季始期(SOS);函数在下降的过程中 $NDVI_t$ 值达到年NDVI最大值的80%,即 $0.8 \times (NDVI_{min} + NDVI_{diff})$ 定义为生长季末期(EOS);生长季末期与始期的差值为生长季长度(LOS)。运用该物候要素提取方法,得到GIMMS和MODIS数据集下的祁连山不同植被的物候要素(SOS、EOS、LOS)。

3.3 线性趋势分析

为了研究祁连山区每个栅格的物候要素变化趋势,采用一元线性回归分析法对其进行模拟,计算公式^[31]为:

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

式中, n 表示时间序列的长度; i 表示年序列号; T_i 为植被物候期在第 i 年的生长季始期、末期或生长季长度。 θ_{Slope} 指的是趋势线的斜率,若 $\theta_{Slope} > 0$,说明物候期变化趋势是延迟或延长,反之 $\theta_{Slope} < 0$,则说明物候期变化趋势是提前或缩短。此外,根据 T 检验对计算结果进行分类,将变化趋势分为不明显、明显、显著等类型。

3.4 相关分析法

通过地理要素之间的相关分析可以揭示其相互之间的响应关系,利用SPSS软件得到相关系数,并用此研究不同植被物候期与气温、降水间的关系,相关系数大于零,表示物候期随因子变化呈推迟趋势,相关系数小于零,表示物候期随因子变化呈提前趋势;相关系数的绝对值越大,说明植被物候期的变化与因子变化相关性越高;绝对值越小,则说明两者的相关性越低。

4 结果分析

4.1 不同植被类型的物候期时间变化

将1982—2014年祁连山区不同植被每年的物候期(生长季始期、生长季末期、生长季长度)进行一元线性回归分析,得到33a物候期变化趋势(图2,图3,表2)。

1982—2006年草甸植被、沼泽植被的生长季始期呈推迟趋势,变化速率(斜率)分别为0.023 d/a、0.285 d/a;草甸植被生长季末期呈推迟趋势,斜率为0.03 d/a,相比而言,生长季末期的推迟趋势比生长季始期的推迟趋势稍微明显,因此生长季长度主要因为生长季末期的推迟而呈延长趋势,但趋势不明显,方差为51.14;而沼泽植被生长季末期呈提前趋势,斜率为0.285 d/a,方差为150.79;生长季长度呈缩短趋势,方差为393.14;表明沼泽植被生长季始期、生长季末期、生长季长度的年际波动变化都很大。1982—2006年草原植被、荒漠植被、高山植被的生长季始期、末期均呈提前趋势,但趋势不一,生长季始期的斜率分别为0.031、0.045、0.252 d/a,生长季末期的斜率分别为0.107、0.329、0.272 d/a;3种植被的生长季长度却出现缩短,其中荒漠植被方差

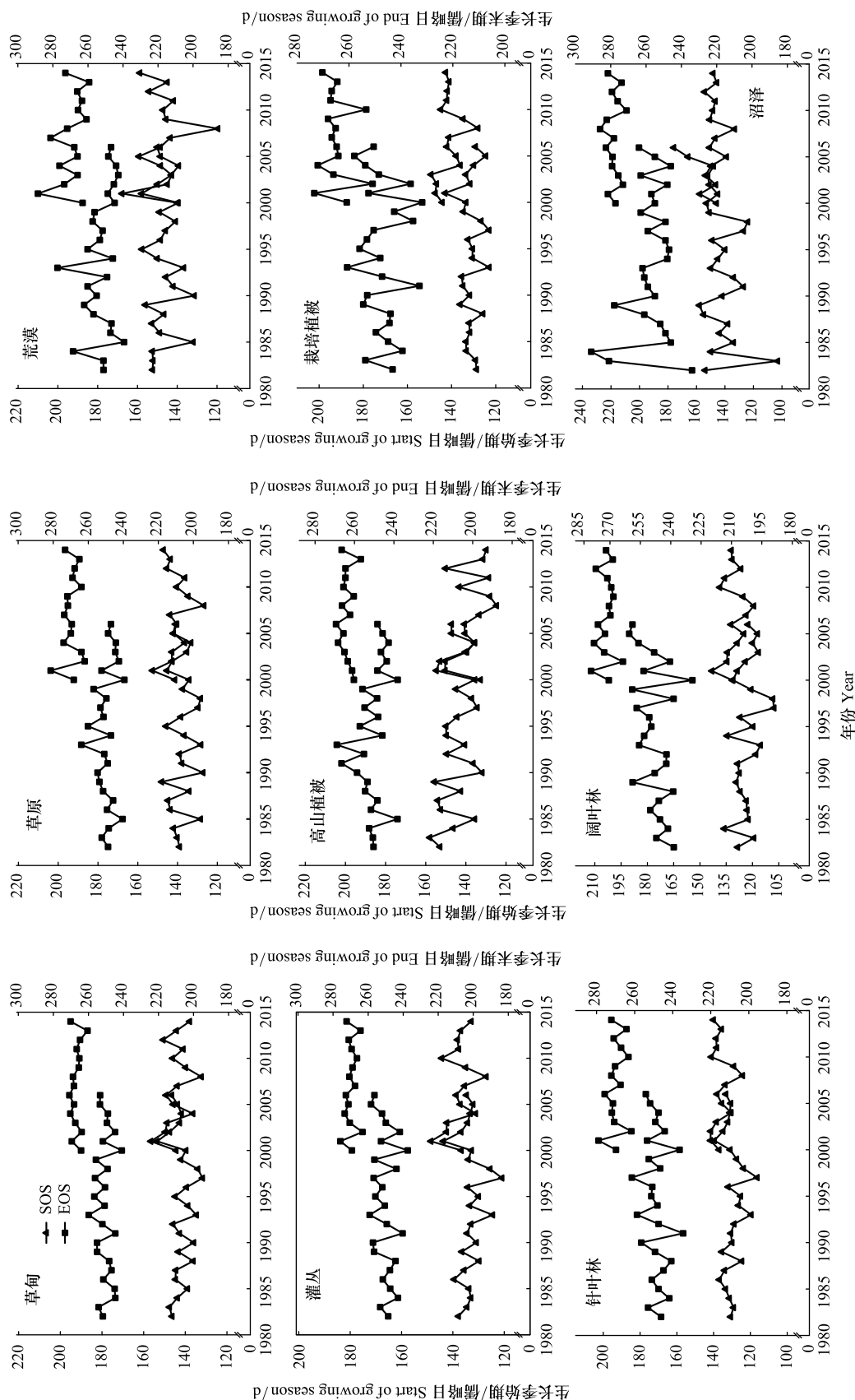


图 2 不同植被生长季始期和末期的年际变化
Fig.2 Annual change trends of the starting and ending dates of different type vegetations in Qilian Mountains

为 118.11, 年际波动极大。1982—2006 年灌丛植被、栽培植被、针叶林、阔叶林的生长季始期均呈提前趋势, 斜率分别为 0.054、0.013、0.002、0.306 d/a, 生长季末期均呈推迟趋势, 斜率分别为 0.137、0.089、0.149、0.385 d/a, 生长季长度呈延长趋势, 年际波动不大。

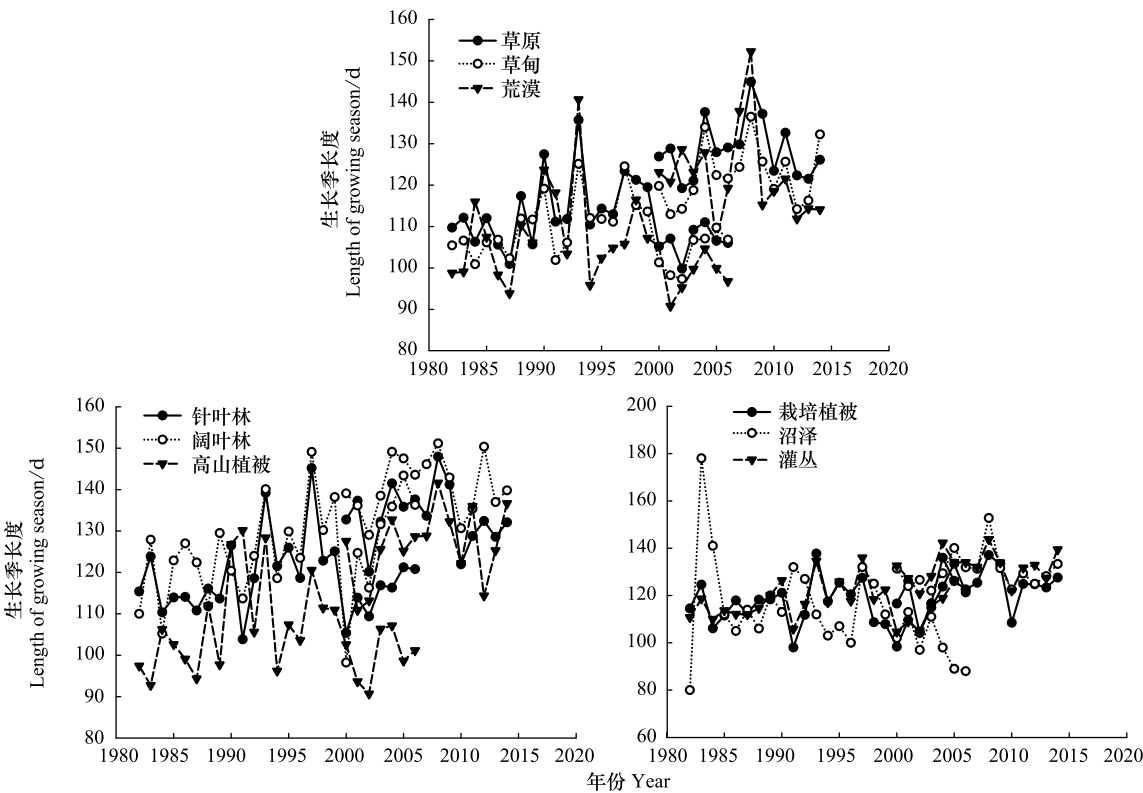


图 3 不同植被生长季长度的年际变化

Fig.3 Annual change trends of the length of growth season of different type vegetations in Qilian Mountains

表 2 不同植被物候期年际变化的线性方程

植被类型 Vegetation types	1982—2006 年 GIMMS 数据集 GIMMS NDVI of 1982—2006			2000—2014 年 MODIS 数据集 MODIS NDVI of 2000—2014		
	生长季始期 Start of growing season	生长季末期 End of growing season	生长季长度 Length of growing season	生长季始期 Start of growing season	生长季末期 End of growing season	生长季长度 Length of growing season
草甸	$y = 0.023x + 141.74$	$y = 0.0295x + 250.44$	$y = 0.0065x + 108.7$	$y = -0.5168x + 148.57$	$y = -0.1194x + 267.91$	$y = 0.3974x + 119.34$
草原	$y = -0.0312x + 138.13$	$y = -0.1065x + 251.22$	$y = -0.0753x + 113.09$	$y = -0.155x + 142.35$	$y = -0.1394x + 270.81$	$y = 0.0156x + 128.46$
荒漠	$y = -0.0446x + 147.36$	$y = -0.3286x + 256.67$	$y = -0.284x + 109.31$	$y = -0.0756x + 147.78$	$y = -0.6837x + 274.99$	$y = -0.6081x + 127.2$
灌丛	$y = -0.0537x + 133.87$	$y = 0.1371x + 248.73$	$y = 0.1908x + 114.86$	$y = -0.4021x + 140.87$	$y = -0.1442x + 270.94$	$y = 0.2579x + 130.07$
高山植被	$y = -0.2524x + 148.48$	$y = -0.2723x + 254.47$	$y = -0.0199x + 105.99$	$y = -0.6941x + 142.85$	$y = -0.0038x + 264.05$	$y = 0.6903x + 121.2$
针叶林	$y = -0.0015x + 130.01$	$y = 0.1485x + 246.83$	$y = 0.15x + 116.82$	$y = -0.0856x + 136.96$	$y = -0.2533x + 271.91$	$y = -0.1677x + 134.95$
阔叶林	$y = -0.3063x + 127.07$	$y = 0.3845x + 243.32$	$y = 0.6908x + 116.25$	$y = -0.2889x + 133.17$	$y = -0.1191x + 272.91$	$y = 0.1698x + 139.74$
栽培植被	$y = -0.013x + 131.31$	$y = 0.0889x + 246.22$	$y = 0.1019x + 114.91$	$y = -0.3426x + 144.11$	$y = 0.1707x + 263.54$	$y = 0.5133x + 119.43$
沼泽植被	$y = 0.85x + 133.59$	$y = -0.2846x + 260.98$	$y = -1.1292x + 127.36$	$y = -0.148x + 149.04$	$y = 0.0061x + 278.42$	$y = 0.1541x + 129.38$

草甸 Meadow, 草原 Steppe, 荒漠 Desert vegetation, 灌丛 Shrub vegetation, 高山植被 Alpine vegetation, 针叶林 Coniferous forest, 阔叶林 Broad-leaved forest, 栽培植被 Cultivated vegetation, 沼泽植被 Swamp vegetation

2000—2014 年草甸植被、草原植被、灌丛植被、高山植被、阔叶林的生长季始期、末期均出现提前; 生长季始期的斜率分别为 0.517、0.155、0.402、0.694、0.289 d/a; 生长季末期的斜率分别为 0.119、0.139、0.144、0.004、

0.119 d/a;生长季长度主要受生长季始期提前趋势的影响而呈延长趋势,其中草甸植被方差为 53.38,年际波动小。2000—2014 年荒漠植被、针叶林植被的生长季始期、末期亦出现提前趋势,但生长季长度却出现缩短;生长季始期的斜率分别为 0.076、0.086 d/a,生长季末期的斜率分别为 0.6837、0.253 d/a,其中荒漠植被生长季长度年际波动大,方差为 126.77。栽培植被、沼泽植被的生长季始期呈提前趋势,斜率分别为 0.343、0.148 d/a;生长季末期呈推迟趋势,斜率分别为 0.171、0.006 d/a;但两种植被的生长季长度呈延长趋势。

总体来看,祁连山区植被生长季长度受生长季开始时间提前(推迟)或生长季结束时间推迟(提前)等的影响,表现出延长或缩短趋势。从图 3、表 2 可以看出草甸植被、灌丛植被、阔叶林植被和栽培植被在 1982—2014 年生长季长度总体上延长,而荒漠植被生长季长度却出现缩短,且植被的年际波动变化较大;1982—2006 年草原植被、高山植被、沼泽植被生长季长度缩短,其中沼泽植被的年际波动较大,而生长季长度在 2000—2014 年却出现延长趋势,表明在近十几年内这些植被生长季长度延长;1982—2006 年针叶林植被生长季长度呈延长趋势,而 2000—2014 年生长季长度呈缩短趋势,且年际波动较小。

4.2 不同植被类型的物候期空间变化

4.2.1 不同植被平均物候期的空间分布

由图 4a 得到 1982—2006 年祁连山阔叶林植被生长季开始最早,主要集中于第 120 天以前,其次是针叶林植被和栽培植被,生长季始期主要集中在第 120—140 天,灌丛植被和草原植被生长季始期主要集中在第 120—150 天,草甸植被生长季始期主要集中在第 130—150 天,沼泽植被生长季始期主要集中在第 140—150 天,高山植被生长季始期主要集中在第 130—160 天,荒漠植被生长季开始时间最晚,主要在第 140 天以后。图 4b 中祁连山 1982—2006 年针叶林植被、阔叶林植被、栽培植被生长季结束时间较早,集中在第 240—250 天内,草甸植被、草原植被、灌丛植被、高山植被生长季末期主要集中在第 240—260 天,沼泽植被的生长季末期主要集中在第 250—260 天,而荒漠植被生长季结束时间较晚,主要集中在第 240—270 天。植被生长季长度取决于生长季的始期和末期,由 1982—2006 年祁连山各植被生长季始期、末期得到图 4c,从图中看出祁连山荒漠植被、高山植被生长季长度较短,集中在 80—120 d,沼泽植被生长季长度分布比较分散,在 80—140 d 之间,草甸植被、草原植被、栽培植被生长季长度主要集中在 100—120 d,灌丛植被、针叶林植被生长季长度则主要集中在 100—140 d,而阔叶林植被生长季长度主要集中在 120—140 d。

图 5a 是祁连山 2000—2014 年不同植被平均生长季始期分布情况,得出阔叶林植被生长季开始时间较早,且主要集中在第 130—140 天,其次是针叶林植被、栽培植被、灌丛植被,生长季始期主要集中在第 130—150 天,草原植被生长季始期集中在第 130—160 天,草甸植被、沼泽植被生长季始期集中在第 140—160 天,荒漠植被、高山植被生长季始期跨度较大,主要在第 130 天以后。图 5b 中 2000—2014 年栽培植被、高山植被、草甸植被、荒漠植被生长季末期主要集中在第 255—275 天,草原植被生长季末期主要集中在第 255—285 天,针叶林植被、灌丛植被生长季末期主要集中在第 265—275 天,阔叶林植被生长季末期主要集中在第 265—285 天,沼泽植被生长季结束较晚,集中于第 275—285 天。图 5c 表示祁连山 2000—2014 年植被的生长季长度,可以得出荒漠植被、高山植被、草甸植被、草原植被、栽培植被生长季长度主要集中在 110—130 d,沼泽植被、灌丛植被、针叶林植被生长季长度主要集中在 120—140 d,阔叶林植被生长季长度主要集中在 130—160 d。

由于 2000—2014 年的遥感数据分辨率高,识别植被绿度的能力增强,从而较之 GIMMS NDVI 数据得到的植被生长季开始时间较早,结束日期较晚,但两种数据得到的不同植被生长季开始先后和生长季结束先后的趋势基本一致。

4.2.2 植被物候期多年变化的空间分布

从图 4d、图 5d 得出,1982—2006 年、2000—2014 年总体祁连山植被生长季始期提前不明显和推迟不明显的区域面积最大,分别为 95.87%、77.22%。不同植被生长季始期的年际变化有所不同,但绝大多数表现为各自的提前不明显区域所占比例大于推迟不明显。1982—2006 年草甸植被、草原植被、高山植被、灌丛植被、阔

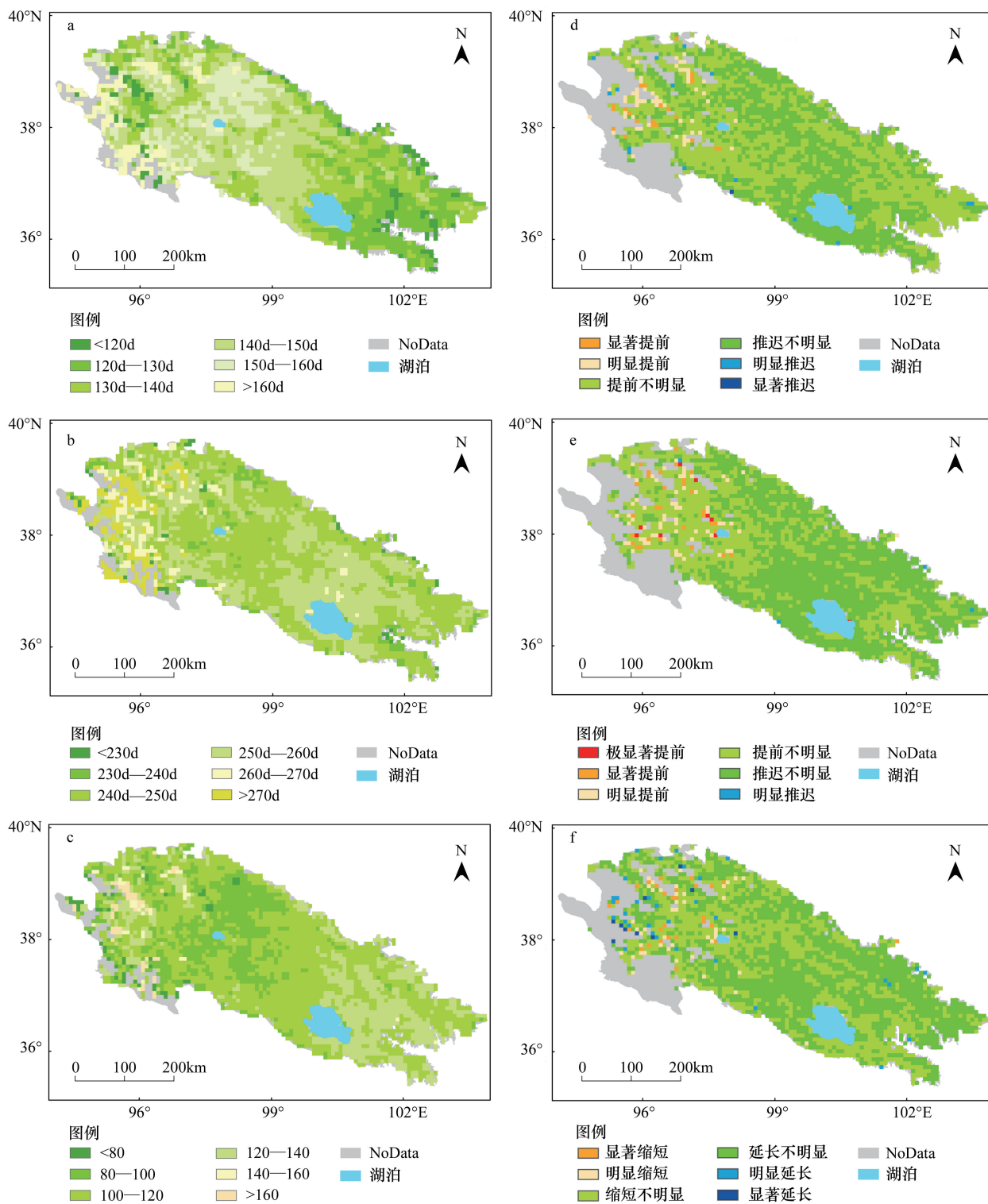


图 4 1982—2006 年祁连山植被平均物候期及变化趋势的显著性分布

Fig.4 The spatial variation trend and its significance of vegetation average phenology in Qilian Mountains from 1982 to 2006

图 4a、4b、4c 分别为平均物候期的始期、末期、生长季长度;图 4d、4e、4f 分别为平均物候期的始期、末期、生长季长度变化的显著性

叶林、栽培植被、针叶林、荒漠植被生长季始期提前不明显的比例分别为 49.59%、47.44%、60.82%、56.89%、64.29%、56.76%、52.27%、50.8%,推迟不明显比例分别为 49.36%、45.12%、31.96%、42.76%、35.71%、43.24%、47.73%、36.9%。2000—2014 年草甸植被、草原植被、高山植被、灌丛植被、阔叶林、栽培植被、针叶林始期提前

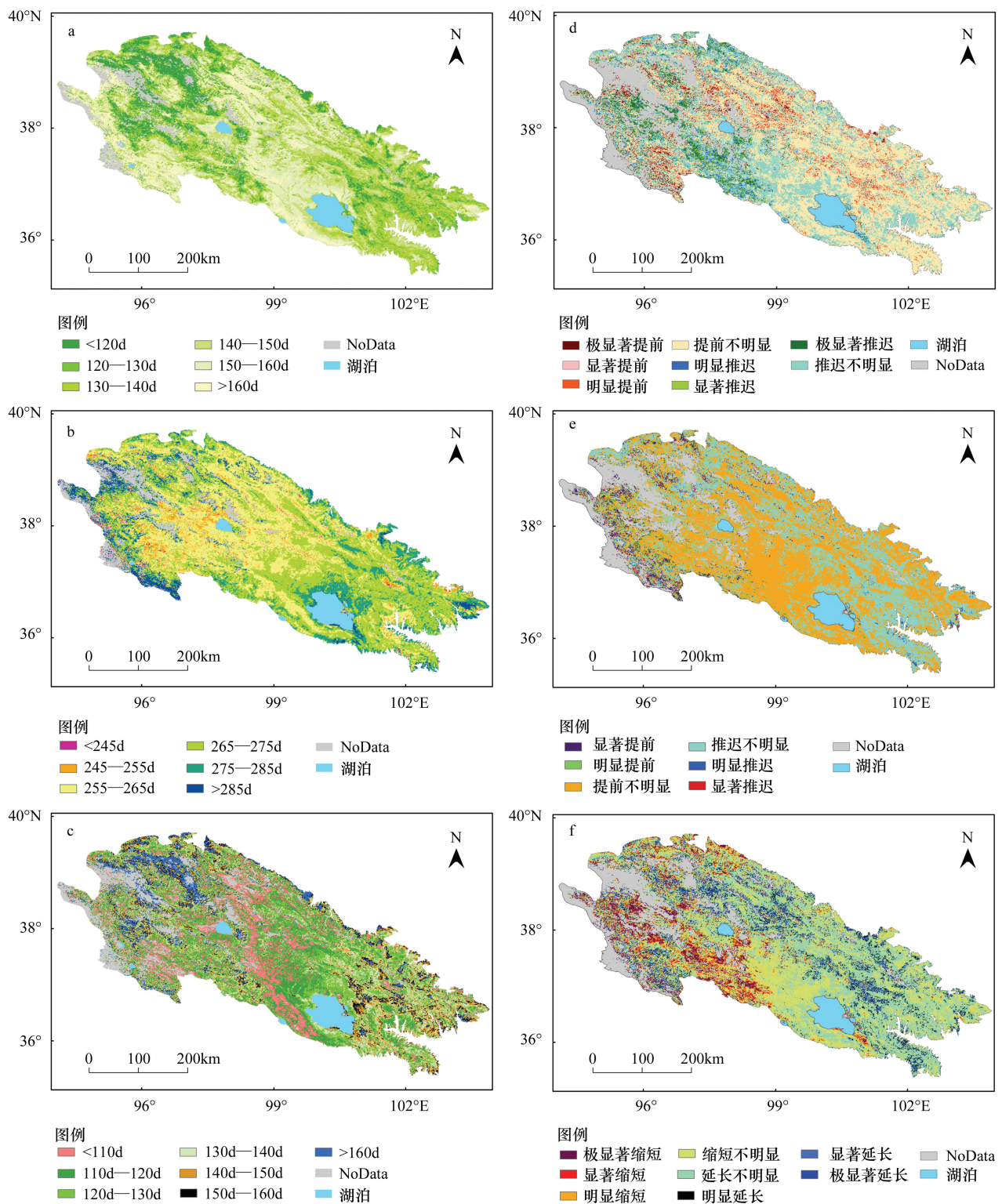


图 5 2000—2014 年祁连山植被平均物候期及变化趋势的显著性分布

Fig.5 The spatial variation trend and its significance of vegetation average phenology in Qilian Mountains from 2000 to 2014

图 5a、5b、5c 分别为平均物候期的始期、末期、生长季长度;图 5d、5e、5f 分别为平均物候期的始期、末期、生长季长度变化的显著性

不明显的比例分别为 55.82%、45.79%、38.01%、67.56%、77.32%、51%、60.17%,推迟不明显比例分别为 25.57%、33.58%、27.76%、22.93%、20.57%、36.11%、29.31%,荒漠植被始期提前不明显比例小于推迟不明显比例,分别为 28.20%、28.89%。

从图 4e、图 5e 得出,1982—2006 年、2000—2014 年总体祁连山植被生长季末期提前不明显和推迟不明显区域所占比例极大,分别为 95.68%、90.87%。1982—2006 年草甸植被、草原植被、灌丛植被、阔叶林、栽培植被、针叶林生长季末期表现为推迟不明显比例大于提前不明显,推迟不明显的比例分别为 63.51%、47.44%、65.02%、78.57%、56.76%、70.45%,提前不明显的比例分别为 35.32%、46.20%、34.28%、21.43%、43.24%、27.27%;高山植被、荒漠植被末期提前不明显的区域占 52.06%、59.89%,明显提前占 5.15%、5.35%,显著提前占 2.58%、2.67%,推迟不明显占 39.18%、31.02%。2000—2014 年草甸植被、草原植被、高山植被、灌丛植被、阔叶林、针叶林、荒漠植被生长季末期表现为提前不明显比例大于推迟不明显,提前不明显的比例分别为 64%、53.86%、51.02%、57.03%、51.20%、65.38%、49.61%,推迟不明显比例分别为 32.99%、37.77%、36.98%、41.34%、48.23%、32.62%、22.28%;而栽培植被末期提前不明显的占 44.49%,推迟不明显占 49%。

从图 4f、5f 得出,1982—2006 年、2000—2014 年总体祁连山植被生长季长度年际变化缩短不明显和延长不明显区域所占比例极大,分别为 95.15%、70.26%。1982—2006 年草甸植被、草原植被、高山植被、灌丛植被、阔叶林、栽培植被、针叶林生长季长度表现为延长不明显比例大于缩短不明显,延长不明显的比例分别为 58.25%、53.02%、48.45%、64.31%、64.29%、54.05%、65.91%,缩短不明显的比例分别为 40%、40.93%、41.75%、35.34%、35.71%、45.95%、31.82%;而荒漠植被缩短不明显占 51.34%,延长不明显仅占 37.43%。2000—2014 年草甸植被、草原植被、高山植被、灌丛植被、阔叶林、栽培植被、针叶林生长季长度表现为延长不明显比例大于缩短不明显,延长不明显的比例分别为 42.11%、37.10%、31.15%、51.82%、60.86%、44.18%、45.25%,缩短不明显比例分别为 34.38%、35.04%、26.50%、31.76%、34.93%、32.68%、38.32%,而荒漠植被生长季长度缩短不明显的为 27.01%,延长不明显仅占 20.05%。

1982—2014 年祁连山植被物候期(始期、末期、长度)年际变化整体变化不明显,主要表现为提前不明显、推迟不明显或缩短不明显、延长不明显。同样不同植被类型的物候期年际变化趋势中的提前(缩短)不明显、推迟(延长)不明显所占面积比例极大。

4.3 物候期要素与气候因子关系

基于祁连山区及其周边 33 个气象站点的气象数据,得到 1982—2014 年祁连山区年均温呈上升趋势,斜率为 $0.0426\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,年平均气温为 $5.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均温最高出现在 1998 年,最低出现在 1984 年,分别为 6.6 、 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;年降水量也呈上升趋势,斜率为 0.8663 mm/a ,平均年降水量为 225 mm ,年降水量最高为 282.5 mm (2007 年),最低为 174.5 mm (1991 年)。利用相关分析方法分析了植被物候期要素与气温、降水的关系,从而探究了不同植被物候对气象因子的响应(表 3,表 4)。

由表 3 得出植被生长季始期与 2—5 月各月气温的相关性均未通过显著检验。其中,沼泽植被的生长季始期与 2—5 月各月气温呈正相关,温度升高,蒸发加快,使土壤表层湿度不够,沼泽植被生长受到限制,所以沼泽植被的生长季始期随温度升高推迟。除沼泽植被外的其他植被生长季始期与 2—4 月各月气温呈负相关,即随温度不断升高,植被提前发芽,生长季始期提前。草原植被、荒漠植被、栽培植被生长季始期与 5 月气温呈正相关,其他植被生长季始期与 5 月气温负相关。植被生长季始期与 2—5 月降水的相关性较高,这与邓少福^[19]研究得到的降水对祁连山草地植被返青影响更大的结果一致。其中沼泽植被的生长季始期与 2 月降水呈显著正相关,且通过了 0.05 置信度检验;各植被生长季始期与 3 月的降水均呈负相关,即降水增多,植被生长季始期提前。其中,高山植被生长季始期与 3 月降水的相关性通过了 0.05 置信度检验,草甸植被、草原植被、荒漠植被、灌丛植被、针叶林植被、栽培植被生长季始期与 3 月降水的相关性通过了 0.01 置信度检验,且相关系数较高;其他植被的生长季始期与各月降水都没有通过显著性检验。

由表 4 得出荒漠植被生长季末期与 8 月气温呈负相关,且通过了 0.01 置信度检验,随温度的升高,蒸发量加大,植被水分减少,导致提前发黄干枯;高山植被生长季末期与 8—11 月气温呈负相关,且与 8 月气温显著负相关并通过了 0.05 的置信度检验,随温度升高,高山植被提前枯黄;其他植被的生长季末期与各月气温相关性都没有通过显著性检验。各植被生长季末期与 8 月降水均呈正相关,即降水量增加,植被枯黄的时间

推迟,其中草甸植被、栽培植被生长季末期与 8 月降水显著正相关,且都通过 0.05 置信度检验;高山植被生长季末期与 9 月降水呈负相关,通过 0.05 置信度检验;植被生长季末期与 10 月、11 月降水相关性均没有通过显著性检验。

表 3 祁连山植被生长季始期与气温、降水的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between SOS with temperature and precipitation in Qilian Mountains

植被类型 Vegetation types	气温 Temperature				降水 Precipitation			
	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May
草甸	-0.051	-0.152	-0.238	-0.082	-0.051	-0.629 **	0.029	-0.083
草原	-0.183	-0.276	-0.310	0.102	0.077	-0.574 **	0.111	-0.266
荒漠	-0.164	-0.267	-0.274	0.150	0.117	-0.510 **	0.075	-0.351
灌丛	-0.034	-0.273	-0.256	-0.058	-0.160	-0.625 **	0.108	-0.068
高山植被	-0.102	-0.367	-0.292	-0.116	0.089	-0.433 *	0.055	-0.104
针叶林	-0.022	-0.219	-0.171	-0.010	-0.206	-0.553 **	0.246	0.016
阔叶林	-0.328	-0.394	-0.363	-0.055	0.027	-0.393	0.007	-0.317
栽培植被	-0.070	-0.199	-0.142	0.032	-0.351	-0.597 **	0.222	-0.281
沼泽植被	0.144	0.107	0.078	0.059	0.473 *	-0.088	-0.255	-0.002

* 表示通过 0.05 的置信度检验, ** 表示通过 0.01 的置信度检验

表 4 祁连山植被生长季末期与气温、降水的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between EOS with temperature and precipitation in Qilian Mountains

植被类型 Vegetation types	气温 Temperature				降水 Precipitation			
	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November
草甸	-0.135	0.224	0.075	0.109	0.469 *	0.035	0.130	0.128
草原	-0.376	0.200	-0.068	0.043	0.374	-0.070	0.068	-0.123
荒漠	-0.544 **	0.028	-0.155	-0.046	0.164	-0.206	-0.106	-0.254
灌丛	0.002	0.230	0.120	0.103	0.353	0.068	0.196	0.177
高山植被	-0.403 *	-0.004	-0.212	-0.122	0.168	-0.396 *	-0.126	-0.146
针叶林	0.031	0.116	0.094	0.170	0.353	-0.002	-0.008	0.185
阔叶林	0.226	0.264	0.104	0.166	0.169	-0.022	0.125	0.076
栽培植被	-0.190	0.085	-0.041	-0.003	0.480 *	0.175	0.185	0.161
沼泽植被	-0.294	0.046	-0.059	0.031	0.136	-0.031	0.090	-0.071

* 表示通过 0.05 的置信度检验, ** 表示通过 0.01 的置信度检验

4.4 物候期要素与海拔的关系

图 6 显示了 2000—2014 年祁连山植被物候参数在不同海拔高程上的变化情况。从图中看出,当海拔在 2700 m 以下时,随着海拔的升高,植被生长季始期有提前的趋势;而当海拔在 2700—3250 m 之间时,随着海拔的升高,生长季始期有较明显的推迟趋势;当海拔大于 3250 m 时,随着海拔的升高,生长季开始时间出现缓慢推迟。总体上,祁连山植被的生长季始期随海拔变化的一元线性方程的斜率为 0.0095,即生长季开始时间随海拔每升高 1000 m 推迟 9.5 d,而生长季始期随海拔的升高呈推迟趋势的情况与物候期的空间分布情况一致,且与徐珂等^[32]关于植被生长季开始时间与海拔关系的研究结果一致。

植被生长季末期随海拔的变化呈现出较大的波动变化,当海拔低于 3250 m 时,随着海拔的升高,植被生长季末期表现出比较明显的推迟趋势;而当海拔在 3250—4100 m 之间时,随着海拔的升高,生长季末期则表现出提前的趋势;而在 4100—4500 m 间,随着海拔的升高植被生长季末期出现推迟;当海拔超过 4500 m 时,生长季末期再次随海拔升高出现提前趋势。

随海拔的升高植被生长季长度整体呈缩短趋势,这与物候期的空间分布情况一致。植被生长季长度受海拔变化的影响较小,其与海拔变化的线性斜率为-0.0096,即海拔每升高 1000 m 植被生长季长度缩短 9.6 d。

研究结果与王力等^[33]研究所得的海拔升高,生长期缩短的结果保持一致。

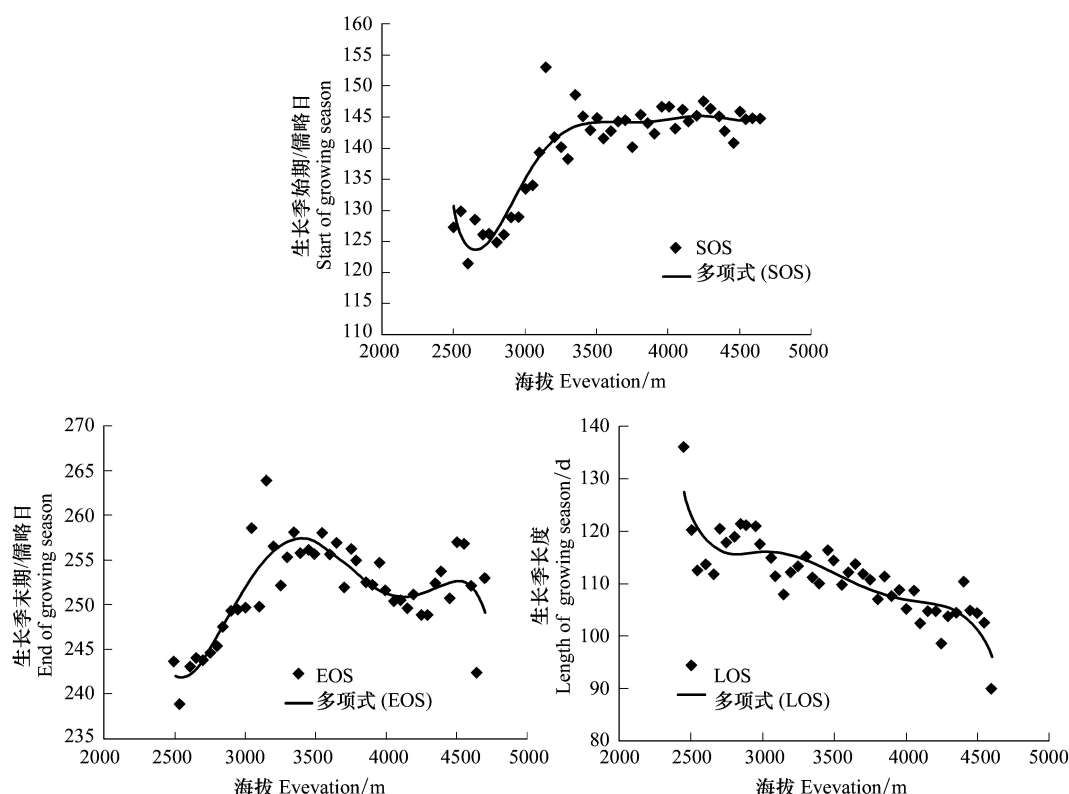


图6 不同海拔上物候参数的变化情况

Fig.6 Variations of phenology parameter in different elevations

5 结果与讨论

本文利用 Double logistic 拟合方法提取并分析了研究区不同植被的物候参数时空分异特征,并结合同期气象数据,探讨了植被物候期对气候因子的响应。结果如下:

(1) 1982—2014 年祁连山草甸植被、灌丛植被、阔叶林植被和栽培植被生长季长度延长,而荒漠植被生长季长度却出现缩短;草原植被、高山植被、沼泽植被在 1982—2006 年生长季长度缩短,而在 2000—2014 年生长季长度却出现延长;针叶林植被在 1982—2006 年生长季长度延长,而在 2000—2014 年生长季长度缩短。

(2) 祁连山各植被生长季始期主要在 5 月初,其中阔叶林植被生长季开始时间最早,荒漠植被生长季始期出现的最晚。各植被生长季末期主要在 9 月,栽培植被生长季结束较早,荒漠植被、沼泽植被生长季结束较晚。各植被生长季长度集中于 110 d—140 d,其中阔叶林植被、针叶林植被生长季长度较长,而荒漠植被、高山植被生长季长度较短。

(3) 各植被物候期在 1982—2014 年年际变化趋势不明显,生长季始期、末期主要表现为提前不明显、推迟不明显,所占面积比例极大,生长季长度主要表现为缩短不明显、延长不明显,所占面积比例极大。

(4) 祁连山植被生长季始期前期温度的积累有利于植被的生长,而当年 3 月的降水也是影响植被生长季始期的重要因子。植被生长季末期与 8—11 月各时段的气温、降水相关性不明显,各植被生长季末期与 8—9 月温度相关性较大,而与 10—11 月降水的相关性较大。

植被物候变化不完全是气候因素造成的,但是实际调查中,气候因素的变化为植被物候变化提供了极大地可能性。植被生长季始期同样受温度影响,由于前期温度的积累,使得植物生长季始期所需的温度达到标准后,而此时对于干旱、半干旱地区降水因子却成了影响植被是否生长的关键因子,这与 Xin 等^[34]得到的水

分对干旱、半干旱地区植被返青影响更大的结果一致。不同高程的植被物候参数对气候变化的响应程度有所不同,海拔较低的阔叶林生长季始期受温度变化影响较大,而其他海拔较高的植被受水分变化的影响较大,这是由于海拔较低地区的阔叶林生长期始期早于海拔较高地区的植被,气温逐步回升或快速升高对其影响较大,而在气温全面回升后高海拔植被开始萌发,降水的多寡对其生长有明显的影响。不同植被类型生长季末期受温度和水分影响的关系较复杂,但高海拔地区的植被受温度影响更明显,这是因为在不同海拔高度上水热条件的不同组合导致不同植被类型生长季结束的时间并不一致,总体上随着气温的快速下降导致高海拔地区的植被进入生长季末期。本文只研究了气温、降水变化对其物候变化的影响,但其它气候因子、地形因子、土壤因子等对植被物候变化也有一定的影响,它们之间的关系有待于进一步研究。

2000—2006 年, GIMMS AVHRR NDVI 和 MODIS NDVI 数据重叠, 这两种数据线性拟合的相关系数均在 0.9 以上, 说明两种时间序列数据具有较好的一致性, 可以同时用于植被物候变化的研究中。根据门源站实测数据植被生长季始期为第 138 天, 结束期为第 247 天, 从两套数据中得到的生长季始期分别为第 131、130 天, 结束日期分别为第 246、250 天, 两者结果基本一致。在已有的研究成果中, 李娜^[35]得出石羊河流域草地平均开始时间为第 124 天, 结束时间为第 266 天, 这与本文研究结果也基本一致。可见, 利用遥感提取数据进行植被物候研究具有一定的准确度。张扬健等^[16]基于 1982—2000 年 GIMMS NDVI 及 2001—2011 年的 SPOT VGT 遥感数据合并提取了 1982—2011 年青藏高原的植被物候, 研究也指出遥感提取及多种数据合并监测植被物候期具有一定的参考价值和可行性。本文采用两种遥感数据分不同时段提取植被的物候参数, 但如何将不同时空分辨率的数据融合, 利用长时间序列数据开展物候变化研究将是未来研究的重要方面。

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: 1-4.
- [2] Lieth H. Phenology and Seasonality Modeling. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1974.
- [3] 陆佩玲, 于强, 贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应. 生态学报, 2006, 26(3): 923-929.
- [4] Li X B, Chen Y H, Fan Y D, Zhang Y X. Detecting inter-annual variations of vegetation growth based on satellite-sensed vegetation index data from 1983 to 1999 // Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, France: IEEE, 2003, 5: 3263-3265.
- [5] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, Los S O, Myneni R B, Taylor M G. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. International Journal of Biometeorology, 2001, 45(4): 184-190.
- [6] Sparks T H, Jeffree E P, Jeffree C E. An Examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. International Journal of Biometeorology, 2000, 44(2): 82-87.
- [7] 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候变暖对我国近 40 年植物物候变化的影响. 科学通报, 2002, 47(20): 1582-1587.
- [8] 周广胜, 张新时, 高素华, 白克智, 延晓东, 郑元润. 中国植被对全球变化反应的研究. 植物学报, 1997, 39(9): 879-888.
- [9] Karlsen S R, Solheim I, Beck P S A, Høgda K A, Wielgolaski F E, Tømmervik H. Variability of the start of the growing season in Fennoscandia, 1982—2002. International Journal of Biometeorology, 2007, 51(6): 513-524.
- [10] Delbart N, Toan T L, Kergoat L, Fedotova V. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: a free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982—2004). Remote Sensing of Environment, 2006, 101(1): 52-62.
- [11] 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.
- [12] 余振, 孙鹏森, 刘世荣. 中国东部南北样带主要植被类型物候期的变化. 植物生态学报, 2010, 34(3): 316-329.
- [13] 王宏, 李晓兵, 李霞, 莺歌, 符娜. 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.
- [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] 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.
- [16] 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.
- [17] 戴声佩, 张勃, 王海军, 王亚敏, 李丹, 王兴梅. 1999—2007 年祁连山区植被指数时空变化. 干旱区研究, 2010, 27(4): 585-591.
- [18] 武正丽. 2000—2012 年祁连山植被覆盖变化及其对气候的响应研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
- [19] 邓少福. 祁连山气候变化对植被的影响研究(2000—2011)[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.

- [20] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8): 1627-1639.
- [21] Roerink G, Menenti M, Verhoef W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(9): 1911-1917.
- [22] Malingreau J P. Global vegetation dynamics: satellite observations over Asia. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(9): 1121-1146.
- [23] Kogan F, Sullivan J. Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research*, 1993, 13(5): 219-222.
- [24] 侯英雨, 王石立. 基于作物植被指数和温度的产量估算模型研究. *地理学与国土研究*, 2002, 18(3): 105-107.
- [25] Bian J H, Li A N, Song M Q, Ma L Q, Jiang J G. Reconstruction of NDVI time-series datasets of MODIS based on Savitzky-Golay filter. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(4): 725-741.
- [26] 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.
- [27] 侯学会, 牛铮, 高帅, 黄妮. 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.
- [28] 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.
- [29] Fisher J I, Mustard J F. Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(3): 261-273.
- [30] Butt B, Turner M D, Singh A, Brottem L. Use of MODIS NDVI to evaluate changing latitudinal gradients of rangeland phenology in Sudano-Saharan West Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3367-3376.
- [31] 宋怡, 马明国. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系. *遥感学报*, 2008, 12(3): 499-505.
- [32] 徐珂. 基于 MODIS 影像的北京地区生长季及其影响因子研究[D]. 北京: 林业大学, 2012.
- [33] 王力, 李凤霞, 周万福, 李晓东. 气候变化对不同海拔高山嵩草物候期的影响. *草业科学*, 2012, 29(8): 1256-1261.
- [34] Xin Q C, Broich M, Zhu P, Gong P. Modeling grassland spring onset across the Western United States using climate variables and MODIS-derived phenology metrics. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 161: 63-77.
- [35] 李娜. 1999—2006 年石羊河流域植被对气候变化的响应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.