

文章编号: 1008-2786-(2019)5-639-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000455

# 青藏地区高寒草地春季物候时空变化 及其对气候变化的响应

管琪卉<sup>1</sup>, 丁明军<sup>1,2\*</sup>, 张华敏<sup>1</sup>

(1. 江西师范大学 地理与环境学院, 南昌 330022; 2. 鄱阳湖湿地与流域教育部重点实验室, 南昌 330022)

**摘 要:** 植被物候是评估全球气候变化的重要指标, 掌握其时空变化有利于理解陆地植被生态系统与气候变化间的关系。然而, 当前关于青藏高原高寒草地春季物候(生长季始期, Start of Growth Season, SOG)变化趋势及驱动机制方面仍然存在诸多争议。本文基于 MODIS-NDVI 数据采用动态阈值法和偏相关分析等方法提取并分析青藏地区 2000—2015 年高寒草地 SOG 时空变化趋势和空间分异特征, 结合同时期气象数据基于像元尺度直观量化其对气候变化响应的空间分布特征。结论如下: (1) 2000—2015 年青藏地区高寒草地 SOG 整体上由东南向西北逐渐推迟, 同时呈现河谷地区早、高山地区晚的特征; (2) 2000 年以来青藏地区高寒草地 SOG 呈明显提前趋势, 提前幅度约为 0.33 d/a, 但在不同的草地类型上存在差异。空间分布上, 呈提前趋势的区域主要分布于青海东部、三江源地区, 呈推迟趋势的区域主要集中分布于西藏阿里南部等区域; (3) 研究时段内青藏地区高寒草地 SOG 与温度、太阳辐射量及降水量相关性均较明显, 但相对于太阳辐射与降水量而言, SOG 对气温的响应更为敏感。本研究结论对全球变化背景下植被—气候关系的理解及高原的生态安全建设具有一定的参考意义。

**关键词:** 高寒草地; 春季物候; 气候变化; 响应; 青藏地区

**中图分类号:** Q948.11, P461

**文献标志码:** A

植被物候是植被长期适应环境变化而出现周期性叶片发育和衰老的生长季相<sup>[1]</sup>, 其与气候变化关系密切, 研究植被物候变化特征对理解和完善植被—气候关系, 提高陆面过程、植被生产力模型的模拟精度等方面具有十分重要的参考价值<sup>[2]</sup>。20 世纪 80 年代以来, 在全球气候变暖的背景下, 越来越多的研究开始关注植被物候动态变化及其对气候变化的响应<sup>[3]</sup>。

现阶段, 遥感技术的发展弥补了传统植被物候观测手段的不足<sup>[4]</sup>, 来自卫星遥感的时间序列数据已被广泛应用于区域、全球尺度上关于植被物候动

态监测及其对气候变化的生态响应研究中<sup>[5-6]</sup>。大量基于遥感数据的研究表明: 在过去的几十年里, 北半球如亚洲和欧洲等地区大部分植被春季物候(生长季始期, Start of Growth Season, SOG)随温度升高呈提前趋势<sup>[7-9]</sup>。基于地面物候观测及模型模拟的研究也表明, 北半球大部分植被 SOG 随温度升高呈提前趋势<sup>[10]</sup>。然而, 也有研究表明北半球部分植被 SOG 在 20 世纪 90 年代末出现拐点, 即植被 SOG 未随着温度升高而呈现明显提前趋势, 反而出现提前趋势渐弱的现象, 甚至在一些地区出现逆转态势, 如 Jeong 等<sup>[11]</sup>基于 AVHRR-NDVI 数据的研究发现北半

收稿日期(Received date): 2019-01-16; 改回日期(Accepted date): 2019-08-23

基金项目(Foundation item): 中国科学院战略性先导科技专项资助(XDA20040201); 国家自然科学基金项目(41761144081)。[Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA20040201); National Natural Science Foundation of China (41761144081)]

作者简介(Biography): 管琪卉(1995-), 女, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土地利用/覆被变化研究。[Guan Qihui (1995-), female, born in Ganzhou, Jiangxi province, M.Sc. candidate, research on land use/cover change] E-mail: 937245892@qq.com

\* 通讯作者(Corresponding author): 丁明军(1979-), 男, 湖北谷城人, 教授, 主要研究方向: 土地利用/覆被变化研究。[Ding Mingjun (1979-), male, born in Gucheng, Hubei province, Ph.D., professor, specialized in land use/cover change research] E-mail: dingmingjun1128@163.com

球温带地区植被 SOG 提前趋势从早期(1982—1999)的 5.2 d/a 削弱至后期(2000—2008)的 0.2 d/a。

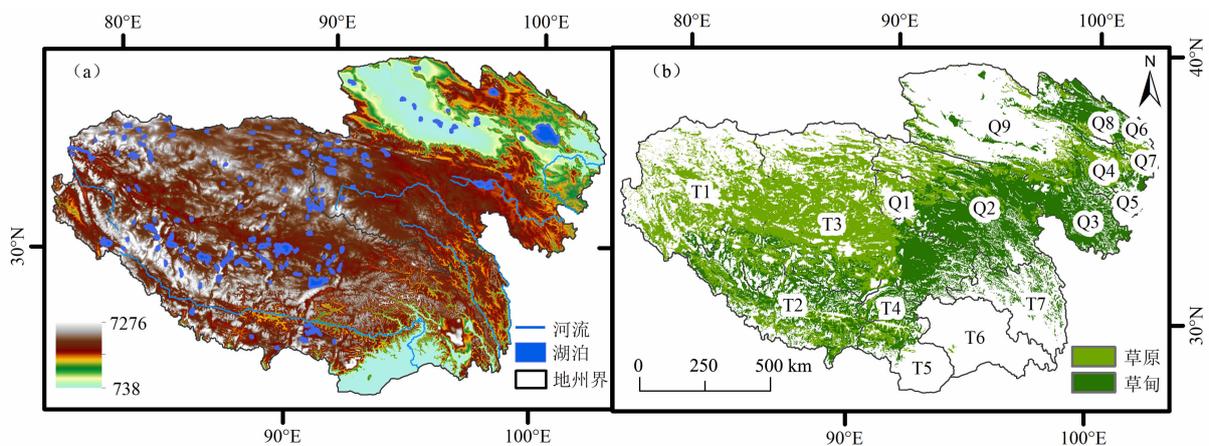
高海拔地区是全球气候变暖信号的放大器,其升温速率及幅度远大于低海拔地区,青藏高原作为世界第三极,是目前全球气候变化显著地区<sup>[12]</sup>,尤其进入 21 世纪后增温极为显著<sup>[13]</sup>。高寒草地作为高原植被重要的组成部分,对气候变化较为敏感<sup>[14]</sup>,适时了解该地区高寒草地物候时空动态变化及其与气候变化的关系,对该区生态安全保障和牧业的可持续发展具有十分重要的意义。当前,已有众多研究关注青藏高原植被物候的变化特征,如 Piao 等<sup>[15]</sup>基于 GIMSS NDVI 数据的研究发现 1982—2006 年青藏高原高寒草地 SOG 在上世纪 90 年代中期之前呈提前态势,之后呈现推迟趋势;Shen<sup>[16]</sup>基于 SPOT-VGT NDVI 数据的研究发现青藏高原高寒草地 SOG 1998—2003 年呈现延迟趋势,2003—2009 年呈现提前趋势;马晓芳等<sup>[17]</sup>基于 GIMSS NDVI 数据的研究表明 1982—2005 年青藏高原高寒草地 SOG 呈提前趋势,在上世纪 90 年代末没有明显拐点;李强等<sup>[18]</sup>基于 SPOT NDVI 数据的研究发现 1999—2010 年三江源地区植被 SOG 呈推迟趋势。总的来说,当前对于青藏高原高寒草地 SOG 的趋势研究并未形成统一的认识,尚存在诸多争议。

以往关于青藏高原高寒草地物候的研究大多利用 SPOT-VGT 和 GIMSS NDVI 卫星影像数据,对其

与气候变化的关系研究多集中在区域尺度且主要关注温度和降水因素,对其他气候因素变化的响应研究较少。本文基于 MODIS-NDVI 数据运用动态阈值法提取青藏地区 2000—2015 年高寒草地 SOG,利用 Theil-Sen 斜率和 Mann-Kendall 统计检验系统分析其年际变化趋势与显著程度,综合考虑温度、太阳辐射量及降水量因素,将偏相关分析方法引入该区高寒草地 SOG 对气候变化的响应研究中,且强调在像元尺度水平上直观量化地分析青藏地区高寒草地 SOG 对气候变化响应的空间分布特征。本研究试图回答以下问题:(1)21 世纪以来青藏地区高寒草地 SOG 时空变化特征;(2)高寒草地 SOG 对气候变化的响应规律。以期推进该地区 21 世纪以来高寒草地 SOG 动态变化及其对气候变化的响应研究,完善植被—气候关系研究,增强气候变化对陆地植被生态系统影响的认识;同时为青藏高原农牧业生产及生态安全屏障建设提供科学参考。

## 1 研究区域

本文以中国境内青藏高原为研究主体,在行政区划上选择了西藏与青海省,该地区幅员辽阔,南北纵跨 13 个纬度带(26°49'45"~38°40'57"N),东西横越 24 个经度带(78°45'44"~101°47'10"E),面积约占整个高原的 78%。青藏地区平均海拔约 4000 m,内部地形复杂多样且地势落差大(图 1a)。独特的地



注:图中 T1、T2、T3、T4、T5、T6 和 T7 分别是西藏自治区的阿里地区、日喀则市、那曲地区、拉萨市、山南市、林芝市和昌都市; Q1、Q2、Q3、Q4、Q5、Q6、Q7、Q8 和 Q9 分别是青海省格尔木市、玉树藏族自治州、果洛藏族自治州、海南藏族自治州、黄南藏族自治州、西宁市、海东市、海北藏族自治州和海西蒙古族藏族自治州。

图 1 (a) 研究区地形及 (b) 高寒草地的分布特征

Fig. 1 (a) Topography of study area and (b) distribution of alpine grassland, China

形造就了显著的高原大陆性气候,主要表现为寒冷干燥、气温较低且日变化显著,年太阳辐射量较高;年降水量少,降水趋势整体呈现出由东向西,由南向北递减的特征。特殊的自然地理环境,造就了独特的植被生态系统,其中高寒草地(图 1b)占青藏高原总面积一半以上,该区域不仅是我国重要的生态屏障,也是全球生态环境十分敏感脆弱的地区之一<sup>[19]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据

遥感数据采用由美国国家航空航天局 NASA 数据网 (<https://lpdaac.usgs.gov/>) 发布的 MODIS (MOD13A2) NDVI 数据产品,时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 1 km,数据时段覆盖 2000—2015 年。

气象数据来源于中国科学院青藏高原研究所青藏高原多圈层模拟与数据同化中心 (<http://dam.itpcas.ac.cn/>) 提供的一套近地面气象与环境要素再分析数据集,在探讨高寒草地 SOG 对气候变化的响应方面,本研究主要考虑 2000—2015 年 4 月—6 月的均温、太阳辐射以及降水量对高寒草地 SOG 的影响。

基础地理信息数据包括研究区行政边界、地州界(来自中国 1:400 万全要素基础数据集)与青藏高原地区 1:100 万植被分类图 (<http://www.geodata.cn/>),高原矢量范围引自文献<sup>[20]</sup>数据,提取青藏地区高寒草地 NDVI 数据作为研究的分析基础。

为了确保数据准确性,在评价分析之前已经对所有采用的数据进行几何配准、格式与投影转换与裁剪,统一重采样为 1 km 分辨率的栅格影像。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 Savitzky-Golay 滤波算法

MODIS NDVI 数据虽然经过 16 d 最大值合成法 (MVC) 的处理,但仍存在一定的噪音<sup>[21]</sup>。因此,为了减少产品数据带来的影响及不确定性,本研究在使用此数据前对其进行平滑处理<sup>[22-23]</sup>。国内外学者已提出众多有关时间序列数据拟合重建的方法,主要分为阈值法、滤波法、函数拟合法、综合方法及其他方法<sup>[24-25]</sup>。其中,Savitzky-Golay (S-G) 滤波算法对传感器类型、时间序列数据尺度等没有严格的

要求,且得到的重构数据质量较高,在拟合重建过程中排除偏离拟合曲线的异常值,有效的去除偏离正常生长轨迹的噪音<sup>[26]</sup>,较真实的反映植被生长情况。因此本文基于 TIMESAT 平台运用 S-G 滤波重建 NDVI 时序数据,拟合公式<sup>[1]</sup>为:

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

式中, $Y_j$  是拟合重建的时序数据; $Y_{j+i}$  是原始的时序数据; $C_i$  是 Savitzky-Golay 滤波系数; $N$  是算法滑动窗口大小; $m$  是滤波窗口长度的一半。

#### 2.2.2 高寒草地春季物候的遥感提取

目前,阈值法、最大变化斜率法及曲线拟合法是植被物候遥感提取的典型算法。周玉科等<sup>[27]</sup>通过对比多种方法指出阈值法在植被物候遥感提取中具有更多的优点;常清等<sup>[28]</sup>研究指出动态阈值法是青藏高原地区典型植被物候的最佳遥感提取方法;丁明军等<sup>[29]</sup>基于高原 19 个农业气象站的物候观测资料验证了最大相对变化阈值法、最小相对变化阈值法、动态阈值法及最大比率法物候遥感提取方法的精度,得出动态阈值法提取的高寒草地 SOG 与实地观测数据具有较高的一致性。因此,结合青藏地区草地植被覆盖范围广阔且生长曲线较对称的特点,本文选用动态阈值法提取高寒草地 SOG,根据相关学者<sup>[29]</sup>的研究成果并经过多次测试,最终将该区高寒草地 SOG 的阈值设为 0.2。

#### 2.2.3 春季物候变化趋势及其对气候变化的响应分析

本研究结合 Theil-Sen 斜率和 Mann-Kendall 统计检验,系统分析青藏地区高寒草地 SOG 年际变化趋势与显著程度。基于 Theil-Sen 斜率对青藏地区高寒草地 SOG 的变化进行判断,研究期内高寒草地 SOG 推迟 (Theil-Sen > 0),反之 SOG 提前 (Theil-Sen < 0)。同时,运用 Mann-Kendall 统计检验 (显著程度  $P$  value < 0.1) 分析青藏地区高寒草地 SOG 年际变化的显著程度。在探讨高寒草地 SOG 对气候的生态响应时,为了获得单个因变量与自变量的相关性,利用 R 语言程序对青藏地区草地 SOG 与气温、太阳辐射及降水量进行偏相关分析, $r$  的绝对值越接近于 1 表示气候要素与植被物候关系越密切,反之则表示关系越不密切。

### 3 结果分析

#### 3.1 青藏地区高寒草地 SOG 多年均值空间分布特征

图2和图3分别为青藏地区高寒草地 SOG 多年均值空间分布及统计特征。整体上,由东南向西北,青藏地区高寒草地 SOG 逐渐推迟,同时呈现出河谷地区早、高山地区晚的特征,这种空间格局较明显地反映并契合了该区气候(水热条件)空间分异规律。在时间上,青藏地区高寒草地 SOG 主要分布在第110~150 d,占整个区域的89.90%。其中,分布在第120~150 d(4月)的像元面积占整个区域的77.10%。在青海省东缘、东南缘地势较低的河谷区域(主要在海东市,黄南藏族自治州,海北、海南藏族自治州及西宁市的环青海湖区域、湟水谷地,果洛藏族自治州南部)以及西藏小部分地区(阿里地区

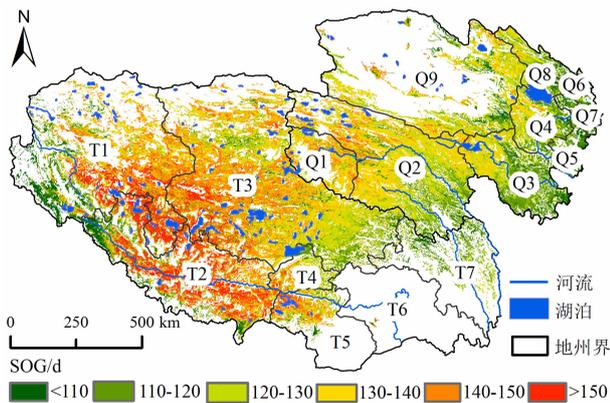


图2 青藏地区高寒草地 SOG 多年均值空间分布

Fig.2 The spatial distribution of the annual average of SOG in alpine grassland on Qinghai-Tibet, China

西南角和日喀则市西北角)高寒草地 SOG 早于第110 d,像元面积占该区域的4.68%;而在西藏以西的部分区域(如阿里地区南部和日喀则雅鲁藏布江源头地区)高寒草地 SOG 晚于第150 d,像元面积占该区域的5.42%。不同区域海拔高度及水热条件差异是各个区域高寒草地 SOG 不同的主要原因。

#### 3.2 青藏地区高寒草地 SOG 年际变化特征

##### 3.2.1 SOG 多年均值在区域尺度上的年际变化

2000—2015年青藏地区高寒草地 SOG 的年际变化如图4所示。由(图4a)可见,研究时段内青藏地区高寒草地 SOG 呈现明显提前趋势( $P=0.08$ ),提前幅度约为0.33 d/a。从不同的草地类型(图4b)来看,草原与草甸区 SOG 均呈提前趋势,但草甸区 SOG 较草原区提前的幅度更大,且显著性水平存在一定差异,二者变化斜率分别为 $-0.29$  d/a( $P=0.16$ )和 $-0.35$  d/a( $P=0.04$ )。

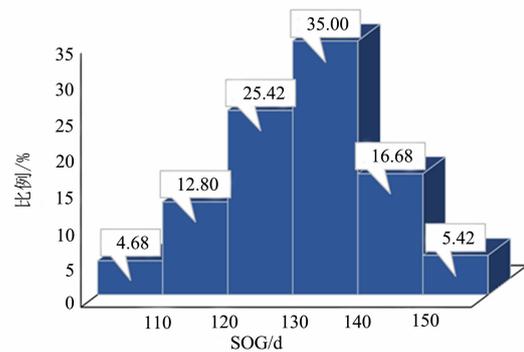


图3 青藏地区高寒草地 SOG 多年均值各区间所占比例

Fig.3 Proportion of the annual average of SOG in alpine grassland on Qinghai-Tibet, China

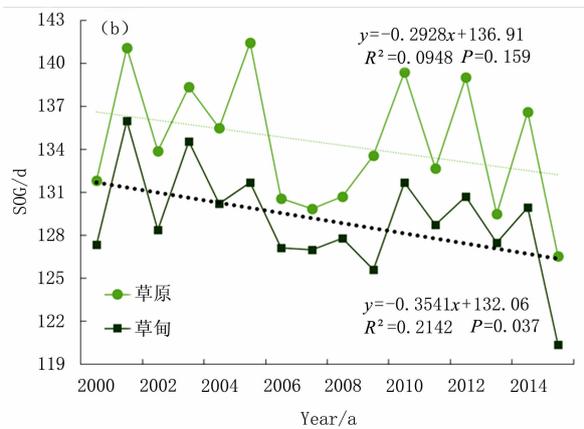
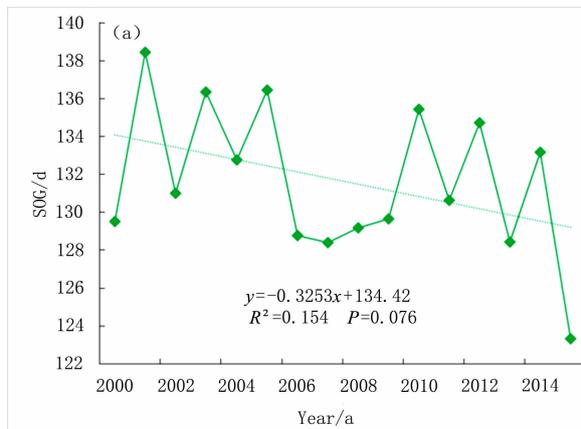


图4 青藏地区 (a) 高寒草地和 (b) 不同草地类型 SOG 多年均值区域尺度上年际变化

Fig.4 Interannual variation of SOG in (a) alpine grassland and (b) different grass types on Qinghai-Tibet, China

同时,研究时段内,草甸区 SOG 一直早于草原区 SOG。进一步分析发现青藏地区高寒草地(草甸、草原)SOG 在短期内会发生明显波动,如 2006—2009 年间的显著提前,推测是同一时段内气温显著升高造成的。

### 3.2.2 高寒草地 SOG 年际变化的空间分异

从变化趋势(图 5)和显著水平(图 6)的空间分布来看,青藏地区高寒草地 SOG 年际变化空间分异明显。空间变化上,呈提前趋势的区域约占研究区总面积的 68.10%,主要分布于青海省以东的海北藏族自治州(环青海湖地区),玉树藏族自治州中部(三江源地区)以及西藏那曲地区的大部分区域,其中呈显著提前趋势( $P < 0.1$ )的区域主要分布于三江源地区;呈推迟趋势的区域约占研究区总面积的 31.90%,主要集中分布于西藏阿里地区南部、日喀则东部以及山南市北部,其中呈显著提前趋势( $P < 0.1$ )的区域集中在西藏阿里地区南部。

从变化的幅度来看,青藏地区高寒草地 SOG 提前 0~1 d/a 的区域较多,约占该区 53.97%,提前 1~2 d/a 的区域占比居中,而超过 2 d/a 的区域较少,仅占该区面积的 2.42%;推迟 0~1 d/a 的区域也相对较多,占该区面积的 28.24%,推迟 1~2 d/a 的区域次之,而大于 2 d/a 的区域最少,仅占该区 0.33%。研究时段内,高寒草地 SOG 变化幅度主要集中在 0~2 d/a。

### 3.3 高寒草地 SOG 对气温、太阳辐射及降水的响应

青藏地区 SOG 与其同时段气温、太阳辐射及降水量偏相关系数空间分布特征如图 7 所示。由图 7a 可见高寒草地 SOG 与气温偏相关系数在空间分布上有较强的异质性,呈显著相关( $P < 0.1$ )的像元占

研究区总面积的 14%。其中,SOG 与气温呈正相关的区域主要集中分布于青海东部、东南部(海北、海南藏族自治州,海东市、果洛藏族自治州大部分区域)以及西藏那曲地区东部;那曲地区西部以及日喀则东南部等滨湖地带 SOG 与气温呈负相关。图 7b 显示的是 SOG 与太阳辐射偏相关系数的空间分布特征,呈显著相关( $P < 0.1$ )的像元占研究区总面积的 10.33%。其中,青海东南部(黄南藏族自治州、海东市)地势较低的区域以及三江源地区 SOG 与太阳辐射呈正相关,而西藏那曲地区东南部、阿里地区湖滨地带 SOG 与太阳辐射呈负相关且相关程度较显著。图 7c 显示的是青藏地区高寒草地 SOG 与降水量偏相关系数的空间分布特征,SOG 与降水量呈明显相关( $P < 0.1$ )的像元占研究区总面积的 9.82%。其中,降水对 SOG 为正向影响的区域分布于三江源地区以及那曲地区西部、西南角,这和 SOG 与气温呈负相关的区域重合,说明这些区域对降水的依赖性较强,气温单方面的上升不利于草地植被的生长发育导致 SOG 推迟;而降水量对 SOG 呈负向影响的区域分布于西藏那曲地区东部和日喀则市部分区域。

## 4 讨论

### 4.1 研究数据及方法的选用

目前,已有许多研究基于遥感数据从区域尺度探讨青藏高原高寒草地 SOG 的时空变化特征,但数据源和方法的不同导致研究结果也不尽相同,使得青藏高原高寒草地 SOG 变化趋势和驱动机制一直存在着一些争议。在数据源上,目前基于遥感数据

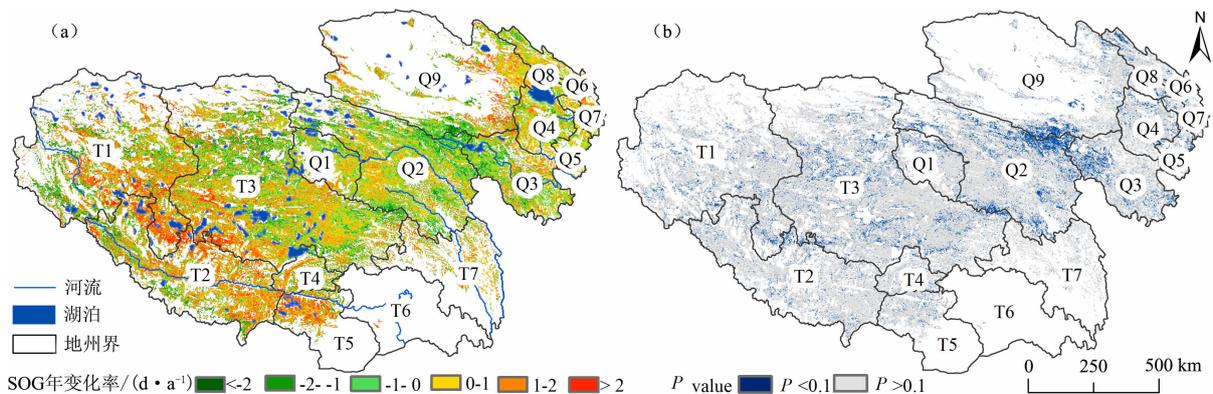


图 5 青藏地区高寒草地 (a) SOG 变化趋势与 (b) 显著程度空间分异

Fig. 5 (a) Spatial variation and (b) significant of SOG trends in alpine grassland on Qinghai-Tibet, China

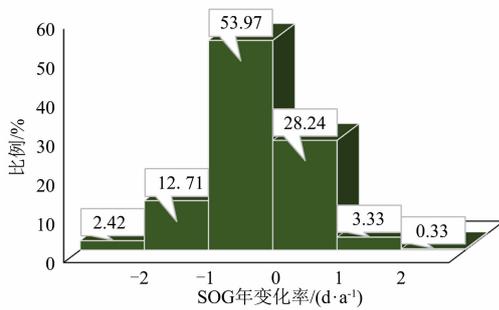


图 6 青藏地区高寒草地 SOG 变化率各区间所占比例

Fig. 6 Proportion of SOG change rates in alpine grassland on Qinghai-Tibet, China

的物候研究主要采用 AVHRR、SPOT 和 MODIS 数据。Zhang 等<sup>[30]</sup>对比了 AVHRR、SPOT 和 MODIS 3 个时序数据集,指出 2001—2006 年青藏高原西部大部分地区的 GIMMS-NDVI 数据集数据质量较低,严重影响了高寒草地 SOG 的估计;朱艺璇等<sup>[31]</sup>研究认为在青藏地区 MODIS 数据优于 AVHRR 和 SPOT 数据。在物候遥感提取方法上,周玉科等<sup>[27]</sup>综合多种方法提取青藏高原地区典型植被物候特征,认为不同方法在植被物候参数遥感提取中差异较大,而阈值法相较于导数法有更多的优点;常清等<sup>[28]</sup>对比分析了动态阈值法、最大变化斜率法、logistic 曲线拟合法 3 种模型提取青藏高原高寒草地 SOG 的差异,认为动态阈值法是青藏高原地区植被物候提取的最优遥感提取算法;丁明军等<sup>[29]</sup>基于高原 19 个农业气象站的物候观测资料验证了最大相对变化阈值法、最小相对变化阈值法、动态阈值法及最大比率法物候遥感提取方法的精度,得出动态阈值法提取的 SOG 与实地观测数据具有较高的一致性。因此,本文选择了 MODIS-NDVI 遥感数据基于动态阈值法提取 2000—2015 年青藏地区高寒草地 SOG,为了降低因数据质量在物候研究中产生的不确定性,采用 Savitzky-Golay 滤波算法对数据进一步平滑处理,尽量确保数据的准确性。

#### 4.2 青藏地区高寒草地 SOG 时空变化

本研究得出青藏地区高寒草地 SOG 整体上由东南向西北逐渐推迟,同时呈现出河谷地区早、高山地区晚的空间分布规律,这种空间分布格局与先前大部分研究<sup>[32-33]</sup>保持了较好的一致性。在变化趋势及空间分布上,本研究结论也与先前的大部分研究<sup>[32]</sup>结论一致,但变化幅度(0.33 d/a)存在一定的差异,低于丁明军等人<sup>[33]</sup>的 0.6 d/a,高于马晓芳等

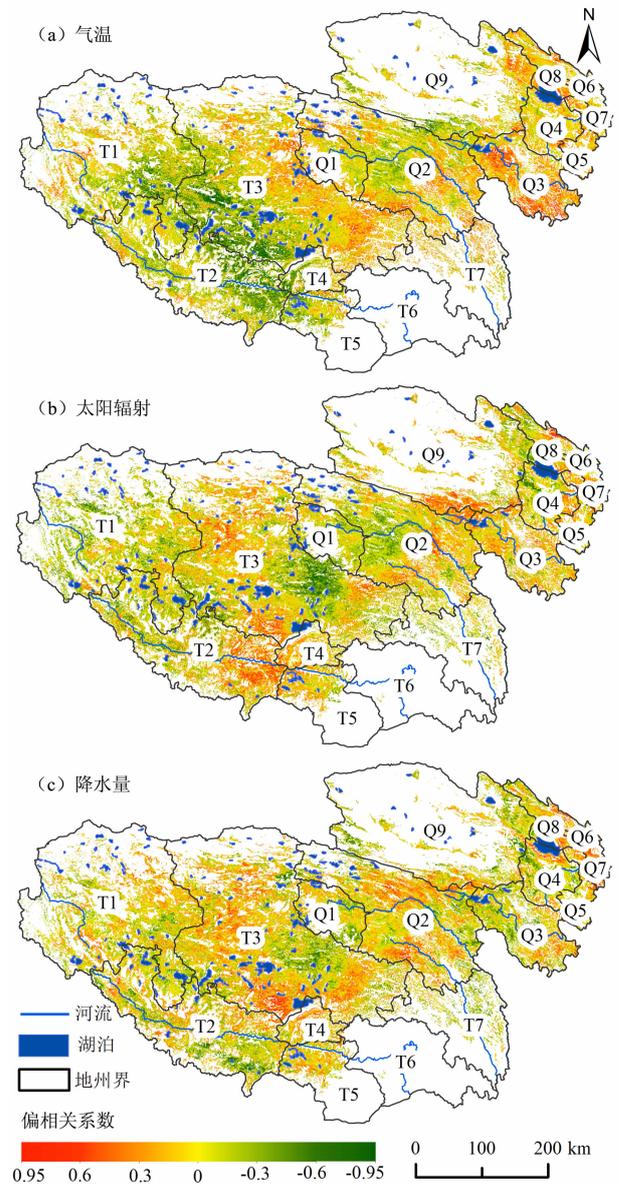


图 7 青藏地区高寒草地 SOG 与 (a) 气温、(b) 太阳辐射及 (c) 降水量的偏相关空间特征

Fig. 7 Spatial characteristics of partial correlation between SOG and (a) temperature, (b) solar radiation, (c) precipitation in alpine grassland on Qinghai-Tibet, China

人<sup>[17]</sup>的 0.16 d/a,与常清等人<sup>[28]</sup>的 0.25 d/a 较接近,差异产生的原因可能与数据源(波段宽度、时空分辨率以及校正精度等不一致)、时间尺度及物候提取方法的不同有关。如丁明军等人<sup>[33]</sup>采用 SPOT VGT 归一化植被指数(NDVI)数据基于 HANTS、最大比率法和阈值法相结合的方法提取了青藏高原 1999—2009 年间高寒草地 SOG,与本文采用的数据及方法均不同;马晓芳等人<sup>[17]</sup>采用 1981—2006 年的 GIMMS-NDVI 数据,利用 Savitzky-Golay 滤波算法

与动态阈值法分析青藏高原高寒草地 SOG, 虽然采用了相同的方法但选择研究的数据源不同以及时间尺度相差较大; 常清等人<sup>[28]</sup>采用 2003—2012 年 MODIS 陆地 2 级标准数据 NDVI 产品数据集 (MOD13Q1), 基于 Savitzky-Golay 滤波算法与动态阈值法分析青藏高原高寒草地 SOG, 时间尺度相近, 方法相同, 但在选用 MODIS 产品数据集不同, 以上这些均可能导致研究结果中变化幅度的不同。研究对高寒草地 SOG 多年均值区域尺度年际变化的进一步分析发现青藏地区高寒草地(草甸、草原) SOG 在短期内会发生明显波动, 如高寒草地在 2006—2009 年间的显著提前, 推测是同一时段内气温显著升高造成的, 此时段波动幅度与李兰晖<sup>[4]</sup>基于 GIMMS 和 SPOT-VGT NDVI 遥感数据分析 1982—2012 年青藏高原植被物候的变化一致, 常清等<sup>[28]</sup>研究表明青藏高原高寒草地 SOG 对春季气温变化响应显著(负相关), 即某一时段的 SOG 的波动变化与同时段的气温变化密切相关。

#### 4.3 青藏地区高寒草地 SOG 对气候变化的响应

植被物候与气候变化之间的关系十分复杂<sup>[34]</sup>。青藏地区气候寒冷干旱, 高寒草地植被生命活动不仅受制于气温, 而且与太阳辐射、降水量也密切相关, 且不同区域植被对气候变化的响应程度存在差异。如高原东南部降水丰富, 水分条件相对全区而言较好<sup>[35]</sup>, 植物对温度的变化较为敏感; 高原北部相对干旱, 植物对水分的变化较敏感<sup>[36]</sup>。王力等人<sup>[37]</sup>研究指出地处西风和印度季风交汇区的青藏高原东北部植被物候变化具有较大的复杂性和不确定性。但目前青藏地区高寒草地物候对气候变化的响应研究集中在区域尺度上且主要关注于气温和降水量因素。

本文基于近地面气象与环境要素再分析数据集探讨植被物候—气候相关关系, 综合考虑温度、太阳辐射及降水量因素, 将偏相关分析方法引入高寒草地 SOG 对气候变化的响应研究中, 强调在像元尺度水平上直观且量化地分析青藏地区高寒草地 SOG 对气候变化响应的空间分布特征。结果表明青藏地区高寒草地 SOG 与温度、太阳辐射及降水量均有较明显的相关关系, 温度影响该地区更多区域高寒草地的 SOG, 太阳辐射次之, 降水量的影响最小, 这可能与青藏高原地区气温的上升速率较快有关<sup>[38]</sup>。此外, 高寒草地 SOG 对气温、太阳辐射及降水量变

化的响应区域差异明显, 通过对比发现高寒草地 SOG 与气温、太阳辐射及降水量呈正负向相关的区域近似互补, 在低海拔湖滨地带的相对湿润区随气温升高和太阳辐射增强高寒草地 SOG 提前, 对降水量响应不明显, 这些区域多湖泊径流补给, 气温的升高有利于增加冰川融水量, 使高寒草地 SOG 提前; 在西藏阿里、日喀则大部分地区高寒草地随气温升高和太阳辐射增强高寒草地 SOG 推迟, 随降水的增多高寒草地 SOG 提前, 这些地区气候干旱, 仅仅是气温的单方面升高不利于草地的生长发育, 从而导致高寒草地 SOG 推迟。

植被物候的动态变化受多因素综合影响, 本文在探讨青藏地区高寒草地物候对气候变化的响应关系中, 仅分析了温度、太阳辐射量及降水量对高寒草地 SOG 的影响, 后续还将在其他相关影响因子对高寒草地 SOG 的影响方面展开进一步工作。

## 5 结论

本文基于 MODIS-NDVI 时序数据, 提取并分析了 2000—2015 青藏地区高寒草地 SOG 的时空变化特征, 并结合气温、太阳辐射及降水数据, 深入探讨了高寒草地 SOG 与温度、太阳辐射和降水量的关系。结论如下:

(1) 2000—2015 年青藏地区高寒草地 SOG 整体上由东南向西北逐渐推迟, 同时呈现出河谷地区早、高山地区晚的特征, 较明显地反映并契合了该区气候(水热条件)和地形的地域分异规律。

(2) 青藏地区高寒草地 SOG 在 2000 年以后存在着明显提前趋势( $P = 0.08$ ), 提前幅度约为  $0.33 \text{ d/a}$ 。但在不同的草地类型上存在着差异, 草甸区 SOG 不论在变化幅度还是显著水平上, 均高于草原地区。空间分布上, 高寒草地 SOG 年际变化空间分异较明显, 呈提前趋势的区域主要分布于青海东部地区、三江源地区以及西藏那曲地区; 呈推迟趋势的区域主要集中分布于西藏阿里地区南部、日喀则东部以及山南市北部。

(3) 研究时段内青藏地区高寒草地 SOG 与温度、太阳辐射量及降水量相关性均较明显, 但相对于太阳辐射与降水量而言, SOG 对气温的响应更为敏感, 在空间上存在着一定分异。

## 参考文献 (References)

- [1] 何宝忠,丁建丽,李焕,等.新疆植被物候时空变化特征[J].生态学报,2018,38(6):2139-2155. [HE Baozhong, DING Jianli, LI Huan, et al. Spatiotemporal variation of vegetation phenology in Xinjiang from 2001 to 2016[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2139-2155]
- [2] REES M, CONDIT R, CRAWLEY M, et al. Long-term studies of vegetation dynamics[J]. Science, 2001, 293(5530): 650-655.
- [3] 李晓婷,陈骥,郭伟.不同气候类型下植物物候的影响因素综述[J].地球环境学报,2018,9(1):16-27. [LI Xiaoting, CHEN Ji, GUO Wei. A review of the influence factors of plant phenology under different climate types[J]. Journal of Earth Environment, 2018, 9(1): 16-27]
- [4] 李兰晖.青藏高原气候变化及其对植被物候的影响[D].南昌:江西师范大学,2015:1-73. [LI Lanhui. Climate change and its effect on vegetation phenology over the Tibetan Plateau[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2015: 1-73]
- [5] 张晓克,杜心栋,鲁旭阳,等.青藏高原高寒草地物候的研究进展[J].遥感技术与应用,2019,34(2):337-344. [ZHANG Xiaoke, DU Xindong, LU Xuyang, et al. A review on alpine grassland phenology on the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(2): 337-344]
- [6] ZHANG Xiaoyang, FRIEDL M A, SCHAAF C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 471-475.
- [7] 常清.北半球及典型区遥感植被物候提取验证及动态研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所),2017:1-96. [CHANG Qing. Validation for phenology metrics from satellite datasets and monitoring phenology dynamics in the Northern hemisphere and typical regions[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth), 2017: 1-96]
- [8] 吕新苗,康世昌,朱立平,等.西藏纳木错植物物候及其对气候的响应[J].山地学报,2009,27(6):648-654. [LV Xinmiao, KANG Shichang, ZHU Liping, et al. Phenology characters of dominant plants in the Nam Co basin and its response to climate, Tibet[J]. Mountain Research, 2009, 27(6): 648-654]
- [9] CHMIELEWSKI F M, R? TZER T. Response of tree phenology to climate change across Europe[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108(2): 101-112.
- [10] MA Ting, ZHOU Chenghu. Climate-associated changes in spring plant phenology in China[J]. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(2): 269-275.
- [11] JEONG S J, HO C H, GIM H J, et al. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982 - 2008[J]. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2385-2399.
- [12] 侯小丽,张丽,张炳华,等.青藏高原植被对气候变化响应的研究进展[J].安徽农业科学,2016,44(17):230-235. [HOU Xiaoli, ZHANG Li, ZHANG Binghua, et al. Research progress in responses of vegetation ecosystem to the climate change in Qinghai-Tibetan plateau[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(17): 230-235]
- [13] 刘正佳,邵全琴,王丝丝.21世纪以来青藏高寒草地的变化特征及其对气候的响应[J].干旱区地理,2015,38(2):275-282. [LIU Zhengjia, SHAO Quanqin, WANG Sisi. Variation of alpine grasslands and its response to climate warming in the Tibetan Plateau since the 21st Century[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(2): 275-282]
- [14] 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. [KONG Dongdong, ZHANG Qiang, HUANG Wenlin, et al. Vegetation phenology change in Tibetan Plateau from 1982 to 2013 and its related meteorological factors[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 39-52]
- [15] PIAO Shilong, WANG Xuhui, CIAIS P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. Global Change Biology, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [16] SHEN Miaogen. Spring phenology was not consistently related to winter warming on the Tibetan Plateau[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(19): E91-E92.
- [17] 马晓芳,陈思宇,邓婕,等.青藏高原植被物候监测及其对气候变化的响应[J].草业学报,2016,25(1):13-21. [MA Xiaofang, CHEN Siyu, DENG Jie, et al. Vegetation phenology dynamics and its response to climate change on the Tibetan Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(1): 13-21]
- [18] 李强.近12a三江源地区植被物候对水热的响应[J].干旱区研究,2016,33(1):150-158. [LI Qiang. Phenology response of vegetation to hydrothermal condition in three-river source region for the last 12 years[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(1): 150-158]
- [19] 鲁春霞,王菱,谢高地,等.青藏高原降水的梯度效应及其空间分布模拟[J].山地学报,2007,25(6):655-663. [LU Chunxia, WANG Ling, XIE Gaodi, et al. Altitude effect of precipitation and spatial distribution of Qinghai-Tibetan plateau[J]. Mountain Research, 2007, 25(6): 655-663]
- [20] 张德铨,李炳元,郑度.论青藏高原范围与面积[J].地理研究,2002,21(1):1-8. [ZHANG Yili, LI Bingyuan, ZHENG Du. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China[J]. Geographical Research, 2002, 21(1): 1-8]
- [21] 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[J].地理科学进展,2016,35(3):304-319. [FAN Deqin, ZHAO Xuesheng, ZHU Wenquan, et al. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data[J]. Progress in Geography, 2016, 35(3): 304-319]

- [22] 杨琳,高苹,居为民. 基于 MODIS NDVI 数据的江苏省冬小麦物候期提取[J]. 江苏农业科学, 2016, **44**(1): 315 - 320. [YANG Lin, GAO Ping, JU Weimin. Extraction of winter wheat phenological period in Jiangsu based on MODIS NDVI data[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, **44**(1): 315 - 320]
- [23] HOU Xuehui, GAO Shuai, NIU Zheng, 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.
- [24] 耿丽英,马明国. 长时间序列 NDVI 数据重建方法比较研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2014, **29**(2): 362 - 368. [GENG Liying, MA Mingguo. Advance in method comparison of reconstructing remote sensing time series data sets[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, **29**(2): 362 - 368]
- [25] 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[J]. 遥感技术与应用, 2011, **26**(2): 147 - 155. [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[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, **26**(2): 147 - 155]
- [26] BIAN Jinhu, LI Ainong, SONG Mengqiang, et al. Reconstruction of NDVI time-series datasets of MODIS based on Savitzky-Golay filter[J]. Journal of RemoteSensing, 2010, **14**(4): 725 - 741.
- [27] 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[J]. 遥感技术与应用, 2018, **33**(3): 486 - 498. [ZHOU Yuke, LIU Jianwen. Spatio-temporal analysis of vegetation phenology with multiple methods over the Tibetan Plateau based on MODIS NDVI data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, **33**(3): 486 - 498]
- [28] 常清,王思远,孙云晓,等. 青藏高原典型植被生长季遥感模型提取分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, **16**(5): 815 - 823. [CHANG Qing, WANG Siyuan, SUN Yunxiao, et al. The remote sensing monitoring model of the typical vegetation phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, **16**(5): 815 - 823]
- [29] DING Mingjun, LI Lanhui, ZAHNG Yili, et al. Start of vegetation green season on the Tibetan Plateau inferred from multiple methods based on GIMMS and SPOT NDVI data[J]. Science Press, 2015, **25**(2): 131 - 148.
- [30] ZHANG Geli, ZHANG Yangjian, DONG Jinwei, et al. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, **110**(11): 4309 - 4314.
- [31] 朱艺旋,张扬建,俎佳星,等. 基于 MODIS NDVI, SPOT NDVI 数的 GIMMS NDVI 性能评价[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(2): 536 - 544. [ZHU Yixuan, ZHANG Yangjian, ZU Jiaying, et al. Performance evaluation of GIMMS NDVI based on MODIS NDVI and SPOT NDVI data[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(2): 536 - 544]
- [32] 刘双俞,张丽,王翠珍,等. 基于 MODIS 数据的青藏高原植被物候变化趋势研究(2000—2010 年)[J]. 遥感信息, 2014, **29**(6): 25 - 30. [LIU Shuangyu, ZHANG Li, WANG Cuizhen, et al. Vegetation phenology in the Tibetan Plateau using MODIS data from 2000 to 2010[J]. Remote Sensing Information, 2014, **29**(6): 25 - 30]
- [33] 丁明军,张德铨,孙晓敏,等. 近 10 年青藏高原高寒草地物候时空变化特征分析[J]. 科学通报, 2012, **57**(33): 3185 - 3194. [DING Mingjun, ZHANG Yili, SUN Xiaomin, et al. Spatiotemporal variation in alpine grassland phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1999 to 2009[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, **57**(33): 3185 - 3194]
- [34] 孟凡栋,斯确多吉,崔树娟,等. 青藏高原植物物候的变化及其影响[J]. 自然杂志, 2017, **39**(3): 184 - 190. [MENG Fandong, TSECHOE Dorji, CUI Shujuan, et al. Changes of plant phenophases and their effects on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Nature, 2017, **39**(3): 184 - 190]
- [35] 韩熠哲,马伟强,王炳赟,等. 青藏高原近 30 年降水变化特征分析[J]. 高原气象, 2017, **36**(6): 1477 - 1486. [HAN Yizhe, MA Weiqiang, WANG Bingyun, et al. Climatic characteristics of rainfall change over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1980 to 2013 [J]. Plateau Meteorology, 2017, **36**(6): 1477 - 1486]
- [36] 王青霞,吕世华,鲍艳,等. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析[J]. 高原气象, 2014, **33**(2): 301 - 312. [WANG Qingxia, LV Shihua, BAO Yan, et al. Characteristics of vegetation change and its relationship with climate factors in different Time-Scales on Qinghai-Xizang plateau [J]. Plateau Meteorology, 2014, **33**(2): 301 - 312]
- [37] 王力,张强. 近 20 年青藏高原典型高寒草甸化草原植物物候变化特征[J]. 高原气象, 2018, **37**(6): 1528 - 1534. [WANG Li, ZHANG Qiang. Analysis of phytogeographic characteristics of typical alpine grassland steppe in Qinghai-Tibetan Plateau recently 20 years[J]. Plateau Meteorology, 2018, **37**(6): 1528 - 1534]
- [38] 付阳阳. 柴达木盆地植被物候时空变化及其对气候变化的响应[D]. 石家庄:河北师范大学, 2017: 1 - 40. [FU Yangyang. The spatial and temporal variations of vegetation phenology and its response to climate change in qaidam basin [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2017: 1 - 40]

# Spatiotemporal Variation of Spring Phenology in Alpine Grassland and Response to Climate Changes on the Qinghai-Tibet, China

GUAN Qihui<sup>1</sup>, DING Mingjun<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Huamin<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research Ministry of Education, Nanchang 330022, China)

**Abstract:** Vegetation phenology is an important indicator of global climate change. And exploring its temporal and spatial dynamics is of great significance in the understanding of the response of terrestrial vegetation ecosystem to climate change. However, there are still controversies about the trend and driving of spring phenology in the alpine grassland of the Qinghai-Tibet, China. Based on MODIS-NDVI data, in this study, it used dynamic threshold method and partial correlation analysis to extract spring phenology (Start of Growth Season, SOG) of alpine grassland in Qinghai-Tibet from 2000 to 2015 and analyzed its temporal and spatial variation. The response characteristics of the SOG for the alpine grassland to climate change were discussed at pixel level combined with meteorological data of the same period. Conclusions were as follows: (1) During the study period, the SOG of the alpine grassland in the Qinghai-Tibet was gradually delayed from southeast to northwest, with a spatial pattern of late in the high mountain areas and early in the valley areas, which clearly reflected the regional differentiation of the climate (e. g. , hydrothermal conditions) and topography of the study area; (2) There was a significant advanced trend ( $P = 0.08$ ) in the SOG of alpine grassland in the Qinghai-Tibet (about 0.33 d/a), but there were differences among grassland types. The areas with advanced trend were mainly distributed in the eastern Qinghai and Sanjiangyuan area, China, whereas areas with delayed trend were mainly concentrated in the south of Tibet's Ali area, China; (3) There were significant correlations between the SOG of alpine grassland and temperature, solar radiation and precipitation in the Qinghai-Tibet, China. Temperature was a main factor driving the growth and development of alpine grassland, while the effects of solar radiation and precipitation were relatively weak. This study aims to promote the researches on dynamic change of alpine grassland vegetation and its response to global climate change in the Qinghai-Tibet region since the 21 century, and it also provides a theoretical basis for rational use of grassland resources in the context of climate change. The conclusions of this paper are of great significance in the understanding of vegetation-climate relationship and ecological security construction of the plateau in the context of global change.

**Key words:** alpine grassland; spring phenology; climate change; response; Qinghai-Tibet