

# 近 10 年青藏高原高寒草地物候时空变化特征分析

丁明军<sup>①②</sup>, 张懿铨<sup>②\*</sup>, 孙晓敏<sup>②</sup>, 刘林山<sup>②</sup>, 王兆锋<sup>②</sup>

① 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022;

② 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

\* 联系人, E-mail: zhangyl@igsnr.ac.cn

2012-05-09 收稿, 2012-07-02 接受, 2012-09-11 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2010CB951704)和国家自然科学基金(41171080, 40901057)资助

**摘要** 植物物候是陆地生态系统对气候变化响应的最佳指示器, 其变化研究对于深入地理解和预测陆地生态系统的动态变化具有重要的意义. 本文利用 SPOT VGT 归一化植被指数(NDVI)对青藏高原 1999~2009 年间高寒草地物候的时空变化进行了研究, 结论如下: ① 青藏高原高寒草地物候多年均值的空间分布与水热条件关系密切. 由东南向西北, 随着水热条件的恶化, 生长季始期(SOG)逐渐推迟, 生长季末期(EOG)逐渐提前, 生长季长度(LOG)逐渐缩短. 海拔在物候的地域分异中扮演着重要作用, 但存在 3500 m 分界线. 其下, 物候随海拔变化波动较大, 其上物候与海拔关系密切; ② 1999~2009 年间, 青藏高原高寒草地 SOG 整体上呈提前趋势, 变化幅度为 6 d/10 a ( $R^2=0.281$ ,  $P=0.093$ ); EOG 呈推迟趋势, 变化幅度为 2 d/10 a ( $R^2=0.031$ ,  $P=0.605$ ); LOG 呈延长趋势, 变化幅度为 8 d/10 a ( $R^2=0.479$ ,  $P=0.018$ ). SOG 提前、EOG 推迟和 LOG 增长的区域主要分布在高原的东部. SOG 推迟、EOG 提前和 LOG 缩短的区域主要分布在高原的中、西部, 其中高原绝大部分区域的 SOG 呈显著提前趋势, 尤其是高原的东部地区; ③ 青藏高原高寒草地物候年际变化在不同的海拔和自然带上分异显著. 高海拔地区的年际变化趋势要比低海拔复杂; 青东祁连山地草原带的变化幅度和显著水平最高, 而藏南山地灌丛草原带最低.

## 关键词

青藏高原  
高寒草地  
物候  
时空变化

植物物候是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<sup>[1]</sup>, 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<sup>[2]</sup>. 植物物候不仅在预报农事、指导农牧业生产、指示病虫害、引种和选种等方面具有重要的理论和现实意义, 而且还是陆面过程模型及全球植被模型的重要参数<sup>[3-6]</sup>, 对增进植被对气候变化响应的理解以及提高大气-植被之间物质与能量交换的模拟精度具有重要意义<sup>[7]</sup>.

作为监测气候对植被影响的最佳指示器, 植物物候已成为全球变化研究重点关注的对象<sup>[8]</sup>. 基于遥感数据的植物物候分析表明: 在过去的几十年, 北半球植物生长季呈逐渐延长趋势<sup>[9-12]</sup>. 这些结论得到了地面观测结果的支持, 在欧洲和北美过去的几十年里, 大部分植物春季物候呈提前态势<sup>[8,13,14]</sup>; 在我国,

基于地面物候观测资料也表明, 20 世纪 80 年代以后华北地区的春季物候呈提前趋势<sup>[15,16]</sup>. 然而也有研究得出北半球许多地区植物春季物候在 20 世纪 90 年代出现转折, 即随着温度的升高, 物候出现推迟<sup>[17-19]</sup>. Yu 等人<sup>[18]</sup>认为这与冬季的升温密切相关, 在温带、寒带及高海拔地区, 许多植物春季物候开始时间与冬、春季气温密切相关, 冬季气温偏高不利于打破冬季芽的休眠, 反而使春季物候推迟.

青藏高原作为世界的第三极, 高寒草地约  $152.15 \times 10^4 \text{ km}^2$  (占青藏高原总面积  $257.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[20]</sup>的 59.15%), 是中国乃至亚洲的重要牧区之一, 其上的生态过程对保障我国乃至东亚生态安全具有独特的屏障作用<sup>[21,22]</sup>. 同时, 处于生物极限水平的水热条件也使得草地生态系统对气候变化的扰动极为敏感.

当前,青藏高原正处于剧烈升温阶段<sup>[23]</sup>,李林等人<sup>[24]</sup>研究表明 1961~2007 年青藏高原年均温变率为 0.37 /10 a,明显高于近 50 年全国的增温水平 (0.16 /10 a),高原不同区域呈现出一致的升温态势,且冬、春季增温明显高于其他季节<sup>[25]</sup>.急剧的升温必将对青藏高原高寒草地物候产生影响,已有的研究也证明青藏高原的物候正发生显著变化,但在 20 世纪 90 年代末期后是否发生转折存在差异<sup>[17,18,26]</sup>.

本文主要聚焦于近 10 年青藏高原高寒草地物候的时间变化及空间特征,试图回答:① 近 10 年青藏高原高寒草地物候多年均值的空间分布特征;② 近 10 年青藏高原高寒草地物候的变化趋势及其空间分布特征;③ 20 世纪 90 年代末期之前及之后物候的变化差异等问题.

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

文中使用的是 SPOT VGT 10 天最大值合成 (MVC) 的 NDVI 数据集,时间为 1999~2009 年,空间分辨率为 1 km×1 km,源自比利时佛莱芒技术研究所 (<http://free.vgt.vito.be/>).所有数据均进行了几何校正、大气纠正、去云处理及传感器退化性能的订正.数据最后经投影变换处理,选取投影方式为 GCS-WGS-1984 投影.青藏高原草地矢量数据来自张玮博士论文数据(比例尺 1:100000)<sup>[27]</sup>.

### 1.2 方法

(i) 时间序列数据的预处理. 时间序列植被指数 (NDVI) 能够反映地表植被的生长动态过程,但是由于数据的采集和处理过程中受各种因素干扰,严重影响数据的质量.虽然本研究中的数据使用了最大值合成法 (MVC),但它不能去除亚像元内残余云、长时间云霾或其他负面影响,同时由于这些因素在时间上出现的随机性,造成曲线季节变化趋势不明显,需要对其进行进一步平滑处理.

传统的平滑方法<sup>[28-30]</sup>只是描述了曲线的一般特征,而没有描述出曲线内部蕴涵的周期性.时间序列谐波分析法 (harmonic analysis of time series, 简称 HANTS) 是一种新的植物物候分析的手段,该方法充分考虑了植物生长的周期性和数据本身的双重特点,利用该方法重新构建的时间序列数据,能够真实反

映曲线的周期性变化规律<sup>[31]</sup>.本研究应用 HANTS 方法,对青藏高原 10 d 合成的 NDVI 数据进行平滑处理.具体步骤如下:首先对原始的 10 d 合成的 NDVI 时间序列数据进行处理(图 1),获取两种类型数据,一种是时间分辨率为 10 d 的 NDVI 数据,另一种是时间分辨率为 1 d 的 NDVI 数据.处理过程中,有效值域范围为 0~256,周期为 365 d,频率数为 2(365, 182).

为了消除裸土、稀疏植被和常绿林的影响,本研究中像元需满足以下条件:① 4~9 月份 NDVI 均值要大于 0.10;② 年 NDVI 最大值要大于 0.15;③ 年最大值应出现在 7~9 月份之间;④ 冬季的 NDVI 均值 < 0.4<sup>[32]</sup>.

(ii) 物候期的确定. 当前,已有许多学者提出了不同的遥感物候提取方法,概括如下:① 阈值法<sup>[33,34]</sup>;② 最大比率法<sup>[18,35]</sup>;③ 是方法①和②的整合,即先根据比率最大值来确定某一物候阈值,然后根据阈值确定每年该物候出现的日期<sup>[36,37]</sup>;④ 利用 Logistic 函数或谐波分解函数来确定 NDVI 时间序列的拐点,从而估计某一物候特征<sup>[38,39]</sup>.但目前并没有一种方法被普遍接受<sup>[40]</sup>.本研究采用最大比率法和阈值法相结合的方法进行物候(生长季始期 (start of growth season, SOG)、生长季末期 (end of growth season, EOG) 和生长季长度 (long of growth season,

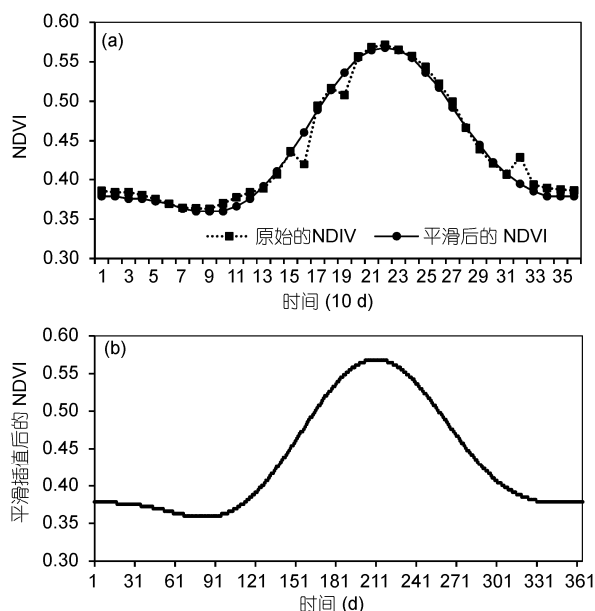


图1 HANTS 处理后的 NDVI 时间序列数据 (a) 原始数据与处理数据的比较; (b) 处理后获取的时间分辨率为 1 d 的 NDVI 数据

LOG))提取,具体步骤如下:首先,计算平滑后旬 NDVI 时间序列多年的年均值,这样就可以获取每个像元上多年平均的年内变化曲线;计算每个像元两相邻时间点上的 NDVI 差值,即相对变化值,利用相对变化绝对值最大值来确定 SOG 和 EOG 的 NDVI 阈值(图 2)。利用 HANTS 处理获取的第二种数据,即时间分辨率为天的 NDVI 时间序列数据来确定 SOG 和 EOG 出现的天数,在规定的时段内,当某个像元的 NDVI 值大于 SOG 阈值时,就把该天作为 SOG,当 NDVI 小于 EOG 阈值时候,就把该天作为 EOG。EOG 和 SOG 的差值即为 LOG。

(iii) 分析方法. 研究中采用普通最小二乘法分析 SOG, EOG 和 LOG 的年际变化趋势. 由于受到各种环境因素的影响,有些像元的 SOG 和 EOG 在某些年份无效,研究中仅考虑那些在 1999~2009 年间 SOG 和 EOG 均有效的像元. 为了分析 SOG, EOG 和 LOG 变化在空间上的差异,研究中计算了青藏高原不同高程带及不同自然带上的 SOG, EOG 和 LOG 的均值,然后分析物候变化在不同的高程和自然带上的差异。

## 2 结果分析

### 2.1 物候多年平均值的空间分布特征

青藏高原高寒草地物候多年均值的空间分布特征见图 3。由东南向西北, SOG 逐渐推迟, EOG 逐渐提前,其结果是 LOG 由东南向西北逐渐缩短,很好地反映出气候和地形的地域分异规律. SOG 主要出现在第 120~170 天之间,但在高原东南部一些地势较低的河谷地区, SOG 早于第 120 天,而在一些海拔或纬度较高的区域,如长江、黄河以及雅鲁藏布江源头

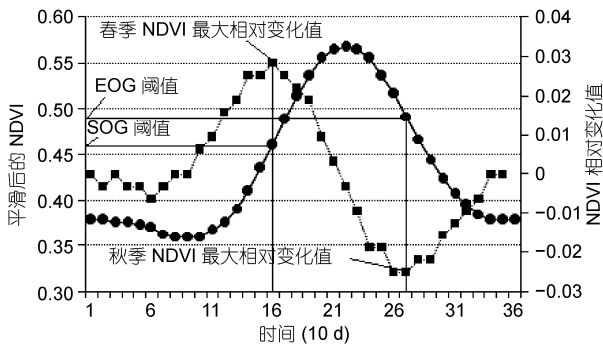


图 2 根据平滑后的旬 NDVI 数据多年均值的最大相对变化值来确定 SOG 和 EOG 的 NDVI 阈值

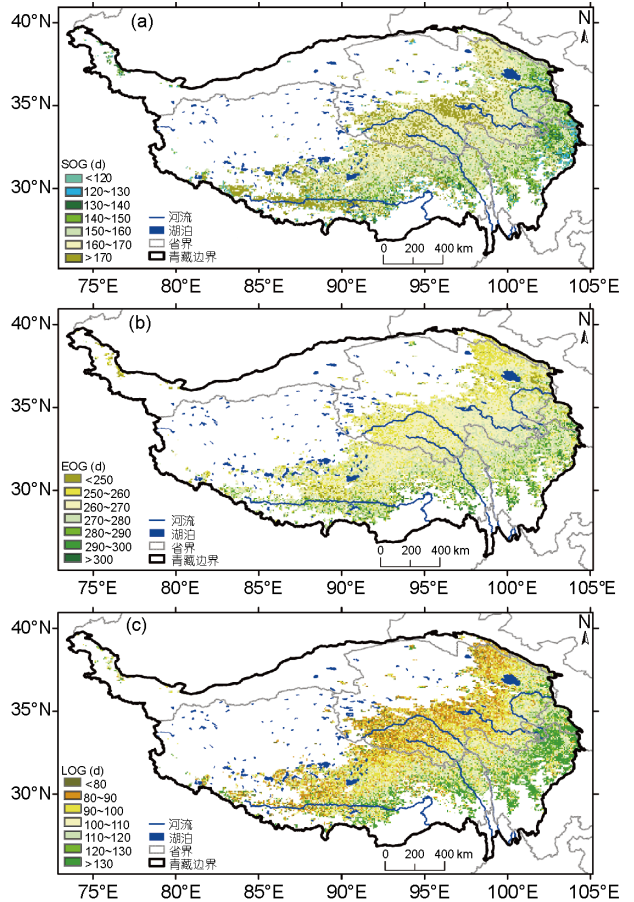


图 3 青藏高原高寒草地物候多年均值的空间分布 (1999~2009 年)

(a)~(c)分别为 SOG, EOG 和 LOG

地区, SOG 晚于第 170 天; EOG 主要出现在第 250~300 天之间,也表现出海拔和纬度上的差异; LOG 主要分布在 90~130 d 之间,但在东部和南部一些区域, LOG 要长于 130 d。

青藏高原高寒草地物候与海拔关系密切(图 4)。在 2500~5500 m 之间,海拔每升高 1000 m, SOG 推迟 9 d, EOG 提前 1 d, LOG 缩短 9 d;从图中可以看出在海拔 3500 m 以下地区,物候随海拔变化的规律不明显,波动比较大,尤其是 EOG,随着海拔升高,还表现出推迟的态势;而在海拔 3500 m 以上地区,物候随海拔升高变化明显. 3500 m 以下的物候与海拔的关系可能与人类活动有关,如土地管理、土地利用的不同,从而导致物候与海拔的关系不明显。

### 2.2 物候的年际变化特征分析

(i) 物候区域尺度上的年际变化. 图 5 显示了

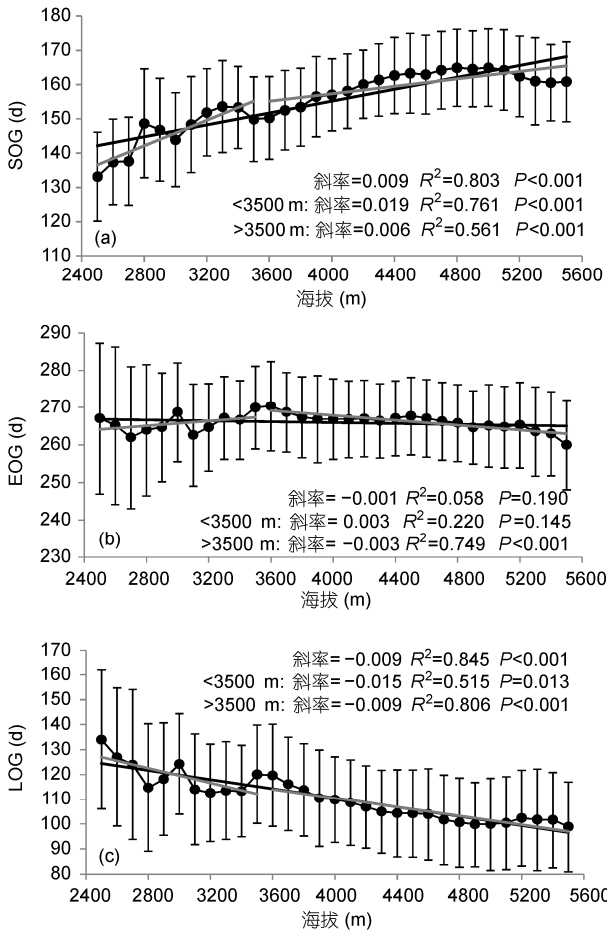


图4 1999~2009年间青藏高原高寒草地物候多年均值与海拔之间的关系  
(a)~(c)分别为 SOG, EOG 和 LOG

1999~2009年青藏高原高寒草地物候年际变化特征。SOG显著提前,每10年的变化幅度为6 d ( $R^2=0.281$ ,  $P=0.093$ )。相对于20世纪80和90年代其他区域SOG变化而言,本文结果要明显高于全球的3 d/10 a<sup>[41]</sup>,欧亚大陆的3.3 d/10 a<sup>[34]</sup>,北半球的3.1 d/10 a<sup>[42]</sup>,低于中国的7.9 d/10 a<sup>[37]</sup>,与Jeong等人<sup>[42]</sup>利用AVHRR数据得出2000~2008年北半球提前幅度为0.2 d/10 a相比,本文的结论明显要大。

EOG的年际变化趋势较弱,每10年的变化幅度约为2 d ( $R^2=0.031$ ,  $P=0.605$ ),整体上呈推迟趋势,相对于20世纪80和90年代其他区域的EOG变化而言,要高于全球尺度的0.5 d/10 a<sup>[41]</sup>,低于欧亚大陆的6.1 d/10 a<sup>[34]</sup>、北半球的2.3 d/10 a<sup>[42]</sup>和中国的3.7 d/10 a<sup>[35]</sup>。也低于时间尺度大致相同的北半球的2.5 d/10 a (2000~2008年)<sup>[42]</sup>。

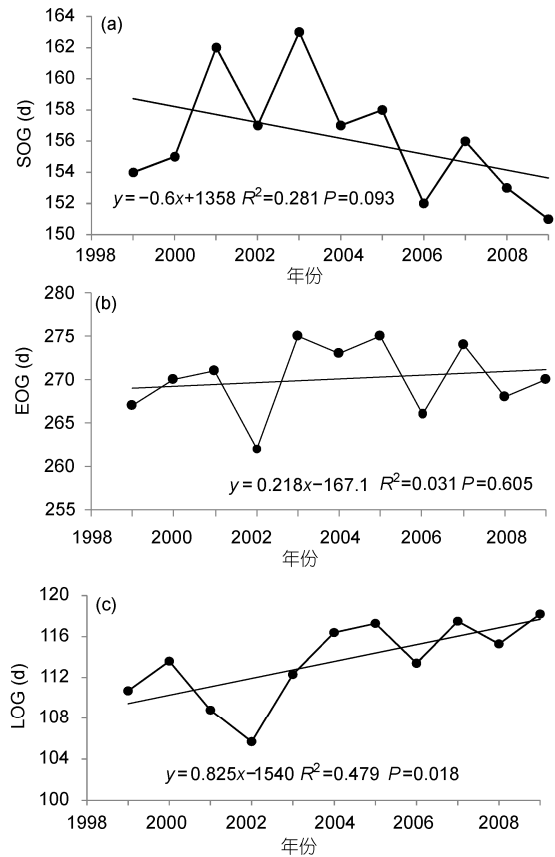


图5 1999~2009年间青藏高原高寒草地物候总的变化特征  
(a)~(c)分别为 SOG, EOG 和 LOG

LOG变化趋势较强,整体上呈增长趋势,每10年的变化幅度为8 d ( $R^2=0.479$ ,  $P=0.018$ ),相对于20世纪80和90年代其他区域LOG变化而言,要高于全球的3.8 d/10 a<sup>[41]</sup>,北半球的5.6 d/10 a,低于欧亚大陆的13.3 d/10 a<sup>[34]</sup>和中国的11.6 d/10 a<sup>[37]</sup>,但高于时间尺度大致相同的北半球的2.8 d/10 a(2000~2008年)<sup>[42]</sup>。

总的来说,青藏高原高寒草地LOG变化趋势最为显著,其次为SOG,而EOG变化趋势显著性最弱。

(ii) 物候年际变化的空间分布特征。1999~2009年间,青藏高原高寒草地物候年际变化趋势空间差异显著(图6)。91.73%的区域SOG呈提前趋势,仅有8.27%的区域有推迟趋势,其中显著提前的区域占41.26% ( $P<0.2$ ),变化幅度从西向东逐渐变大,尤其是东、南部一些河谷地区变化幅度最大;76.92%的区域EOG具有提前趋势,23.08%的区域具有推迟趋势,其中显著提前的区域约为13.27%,显著推迟的区域约为23.02% ( $P<0.2$ )。从图6(b)和(e)可以看出,

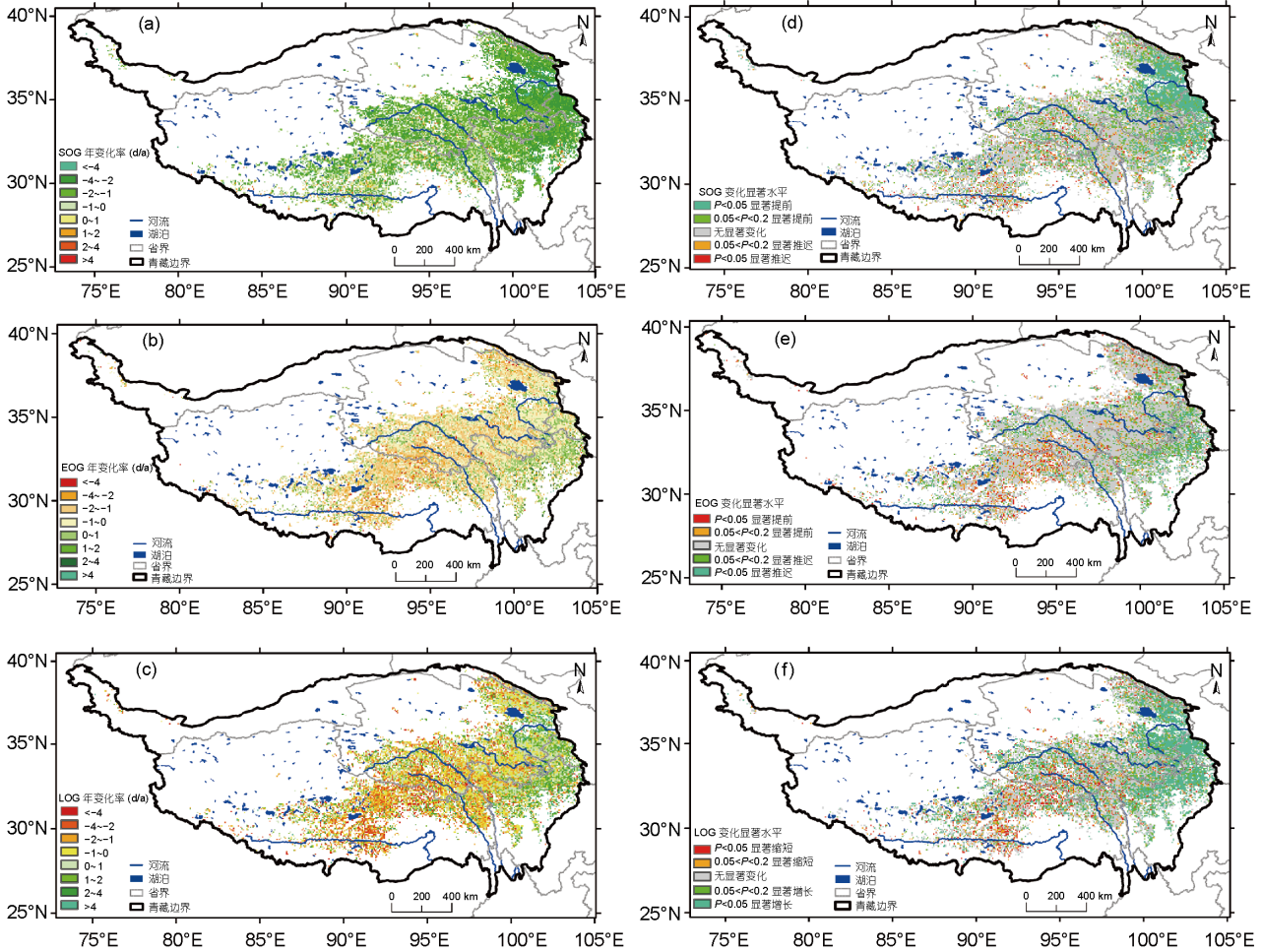


图 6 青藏高原高寒草地物候变化趋势的空间分布特征

(a)~(c)分别为 SOG, EOG 和 LOG 年际变化斜率; (d)~(f)分别为 SOG, EOG 和 LOG 年际变化的显著性检验

虽然大部分地区 EOG 呈提前趋势, 且变化幅度较大, 但显著水平较低; 推迟趋势面积虽然少, 但几乎都达到了显著的水平, 这些区域主要分布在高原的东部地区; 从 LOG 变化来看, 约 46.25% 的区域具有增长趋势, 53.75% 的区域具有缩短趋势, 其中显著增长的区域约为 45.56%, 显著缩短的区域约为 14.59% ( $P<0.2$ ), 呈增长趋势的区域主要分布在高原的东部, 而西部地区呈缩短趋势. 青藏高原高寒草地物候的年际变化趋势在高原的东部要显著高于高原的西部地区.

(iii) 生长季物候年际变化的海拔分异特征. 青藏高原高寒草地物候年际变化在海拔梯度上分异明显. 图 7 显示的是 1999~2009 年每 100 米高度带上物候均值年际变化趋势与海拔梯度之间的关系. 从 SOG 来看, 不同海拔带上均呈提前趋势, 但在 2003

年之前主要呈推迟趋势, 之后又呈提前趋势; 从变化幅度和显著水平上来看, 随着海拔升高, 提前的幅度逐渐减少, 由 24 d/10 a 减少到 3 d/10 a, 显著水平也逐渐降低. 从 EOG 来看, 年际变化波动较大, 在 2002 年之前主要呈提前趋势, 而后呈推迟趋势, 绝大部分海拔高度上总的表现为推迟趋势, 仅在 5000 m 左右表现为提前趋势; 从变化幅度和显著水平来看, 推迟幅度随海拔升高逐渐减少, 由 13 d/10 a 减少到 0, 显著水平也逐渐降低. LOG 在 2002 年之前也呈缩短趋势, 而后呈增长趋势; 从变化幅度和显著水平来看, 增长幅度随海拔升高逐渐减少, 由 34 d/10 a 减少到 2 d/10 a, 显著水平也逐渐降低. Piao 等人<sup>[17]</sup>基于 1982~2006 年的 AVHRR-NDVI 数据分析得出: 青藏高原 SOG 在 1999 年前后呈反向变化, 且在高海拔地区尤为显著. 在本文分析时段内(1999~2009 年), 青

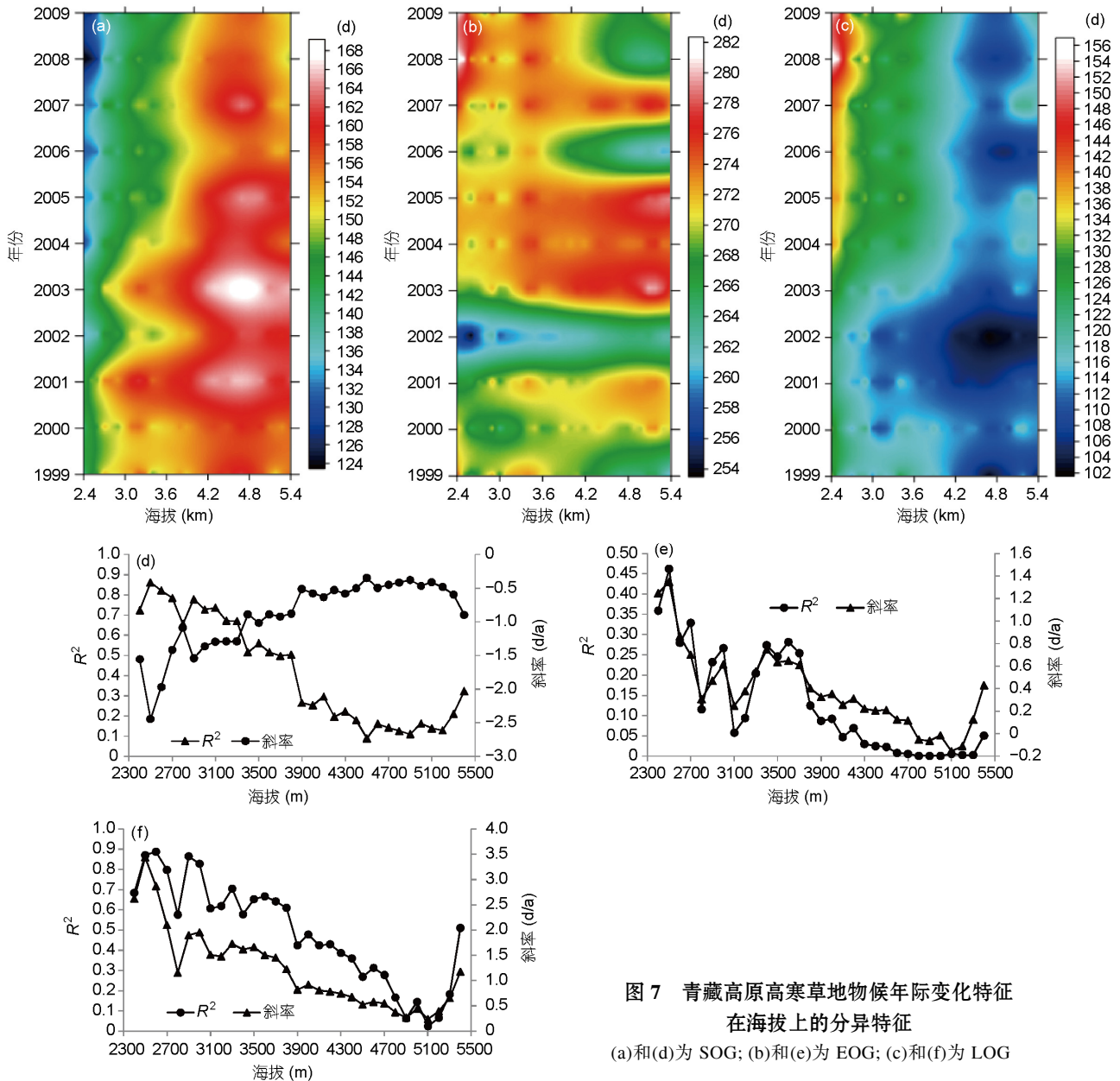


图7 青藏高原高寒草地物候年际变化特征在海拔上的分异特征  
(a)和(d)为 SOG; (b)和(e)为 EOG; (c)和(f)为 LOG

藏高原低海拔地区的物候年际变化无论在变化幅度上,还是在显著水平上均大于高海拔地区.二者之间并无矛盾,本文中的高海拔地区 SOG 在 2003 年前后也呈反向变化趋势,低海拔的变化幅度虽然小,但整个阶段趋势一致(图 7(a)),从而导致低海拔的变化趋势及幅度明显大于高海拔地区.可见,青藏高原高海拔地区的生长季物候年际变化要比低海拔复杂.

(iv) 物候年际变化在自然带上的分异特征. 青藏高原高寒草地物候年际变化在不同的自然带上分异明显. 图 8 显示的是 1999~2009 年青藏高原不同自

然带上物候年际变化斜率及显著水平. 从图中可以看出: 各自然带上, SOG 均呈提前趋势,但提前幅度和显著性存在差别,其中青东祁连山地草原带提前幅度最大,显著水平也最高,藏南山地灌丛草原地带提前幅度最小,显著水平最低;各自然带上 EOG 虽然总体上呈推迟趋势,但波动较大,显著水平均较低; LOG 均表现出延长趋势,其中,青东祁连山地草原带生长季延长幅度最大,显著性最高,而藏南山地灌丛草原带延长幅度最小,显著水平最低. 总的来说,由东向西,生长季物候年际变化趋势水平逐渐减弱.

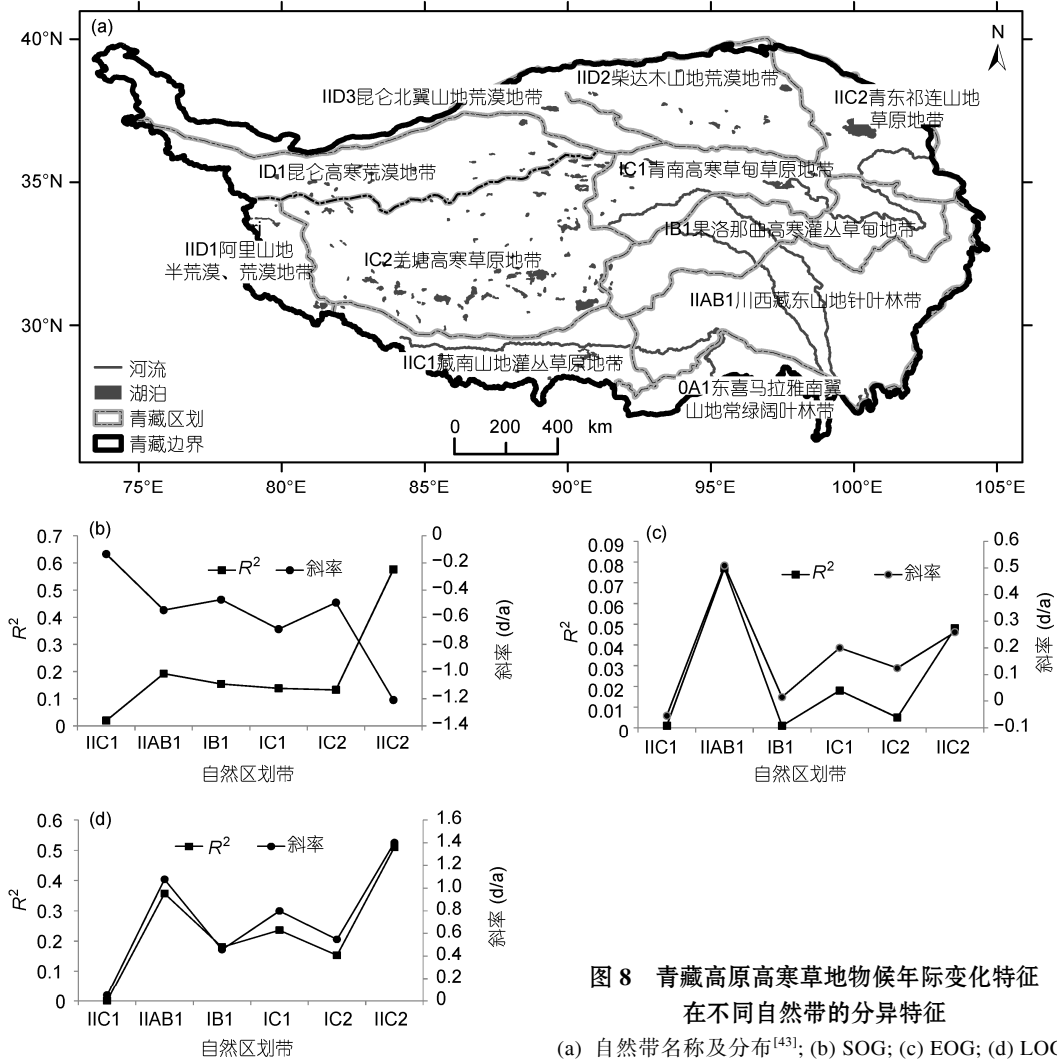


图 8 青藏高原高寒草地物候年际变化特征在不同自然带的分异特征 (a) 自然带名称及分布<sup>[43]</sup>; (b) SOG; (c) EOG; (d) LOG

### 3 讨论

当前已有许多研究利用不同的遥感数据对北半球的植物物候进行了分析. 基于 AVHRR 数据分析表明, 北半球 SOG 在 20 世纪 80 和 90 年代呈提前趋势, 但随后出现推迟趋势<sup>[17-19,44]</sup>. 然而, MODIS 数据分析显示, 2000~2010 年间, SOG 仍然保持提前的趋势. 对于秋季物候而言, 2000~2010 年间, AVHRR 和 MODIS 数据分析均显示 EOG 呈推迟趋势, 但在 1999 年之前, 基于 AVHRR 数据分析显示 EOG 没有明显变化趋势<sup>[44]</sup>. Shen<sup>[45]</sup>利用 MODIS 数据分析了青藏高原 1998~2008 年青藏高原草甸、草原 SOG 的变化特征, 得出青藏高原草地 1998~2003 年 SOG 呈推迟趋势, 2003~2008 年又呈提前趋势, 但总的表现为提前趋势,

这与本文的趋势研究保持了较好的一致性. 就变化幅度而言, 先前的研究得出 SOG 提前幅度在 0.2~8 d/10 a, EOG 推迟幅度在 0.5~6.1 d/10 a, LOG 增长幅度在 0.6~14 d/10 a<sup>[41]</sup>, 而本文得出 SOG 提前幅度为 6 d/10 a, EOG 推迟幅度为 2 d/10 a, LOG 增长幅度为 8 d/10 a, 基本落在先前研究的变化幅度之内. 不同的研究得出的物候变化之所以存在着一定的差异, 可能与数据源和时间尺度的不同有关<sup>[46]</sup>.

在数据源上, 当前物候研究主要采用的是 AVHRR, MODIS 和 SPOT 数据, 数据的不同可能导致结果存在一定差异, 这是因为: (1) 三种数据在计算 NDVI 的红外和近红外波段宽度上存在差异, MODIS 的宽度分别为(620~670 nm)和(841~876 nm), SPOT 的宽度分别为(610~680 nm)和(780~890 nm),

AVHRR 的宽度分别为(585~680 nm)和(730~980 nm), 相对于 AVHRR 来说, MODIS 和 SPOT 的波段更窄; (2) AVHRR 数据系列共使用了 4 种传感器(NOAA-14, NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18)<sup>[47]</sup>, 虽然不同传感器间经过了相互校正, 但仍然会导致数据间存在一定的误差; (3) 相对于 AVHRR, MODIS 和 SPOT 传感器进行了许多改进, 如几何和辐射定标; (4) 在空间分辨上, MODIS(250, 500 和 1 km)和 SPOT(1 km)的空间分辨率要比 AVHRR(8 km)更高; (5) 在大气校正方面: AVHRR 数据对亚像元的云污染及水汽影响进行了处理, 同时也考虑了火山气溶胶的影响, MODIS 和 SPOT 数据不仅对大气中分子及气溶胶散射进行纠正, 同时也考虑了气体的吸收(MODIS 主要考虑了臭氧吸收, SPOT 不仅考虑了臭氧吸收, 也考虑了水蒸气和其他气体的吸收); 在最大值合成上, AVHRR 和 SPOT 采用了最大值合成(MVC), 而 MODIS 数据采用了有限视角内的最大值合成(CV-MVC). Fontana 等人<sup>[48]</sup>利用 AVHRR, SPOT, MODIS 分别分析了高寒草地物候, 认为 MODIS 和 SPOT 数据要优于 AVHRR 数据. 但遥感物候仍然存在着许多不确定因素, 因为它高度依赖卫星数据的质量, 而且在确定物候开始的方法上, 由于地面观测数据的缺乏, 无法明确二者之间的差异. 因此, 遥感物候的地面实证在今后的植物物候研究中亟需得到加强.

在时间尺度上, 先前大多数研究的时间只到 2006 年, 图 9 对比分析了 AVHRR 和 SPOT 数据提取的 SOG 和 EOG, 从图中可以看出, AVHRR 数据提取的 SOG 要低于 SPOT, 但在 EOG 上, 保持了较好的一致性. 从趋势上看 1998 之前 SOG 显示出明显的提前趋势, 但 1998~2003 年显示出推迟趋势, 而后又表现出提前趋势, 如果仅考虑 2006 年之前的数据, AVHRR 和 SPOT 在变化趋势上保持了较好一致性, 但时间尺度延长后, 出现了结果上的差异. 两种数据源分析的 EOG 数据均出现推迟趋势, 但变化趋势较弱. 对于先前研究得出 1999 年后 SOG 出现推迟这一结论<sup>[17,18]</sup>, 目前争议较大, 其焦点主要集中在导致这种推迟的原因分析上. Yu 等人<sup>[18]</sup>认为是冬季气温升高导致植物休眠低温无法满足从而使得青藏高原春季物候推迟; Chen 等人<sup>[49]</sup>认为是草地退化、冻土融化以及气候变化等因素共同导致了春季物候推迟; Yi 等人<sup>[50]</sup>认为是大气中的气溶胶浓度增加影响到遥感数据质量从而导致春季物候推迟. 本文认为这种推

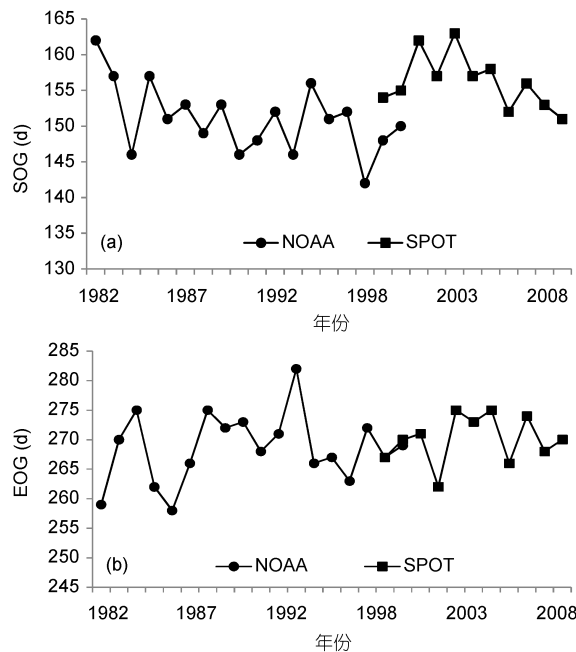


图 9 1982~2009 年间青藏高原高寒草地物候总的变化特征 (a) SOG; (b) EOG

迟与分析的时间尺度不同有着密切的关系, 因为得出这种结果的时间序列为 1999~2006 年, 而基于 SPOT(1999~2009 年)和 MODIS(2000~2010 年)的数据分析发现, 1999 年后的 SOG 出现先推迟而后提前的变化特征, 但总的变化趋势并没有推迟, 而是在波动中出现提前趋势, 但造成这种波动因素还有待于进一步分析. 由此可见, 虽然 AVHRR 数据被认为是 1981 年至今物候变化评价的一个重要数据源, 但 SPOT VGT 和 MODIS 数据却是最近 10 年物候变化研究的一个重要补充.

生长季的延长, 尤其是春季物候的提前, 被认为是 1980~2000 年北半球中、高纬度碳汇功能增强的主要贡献之一<sup>[9,51]</sup>. 青藏高原高寒草地生长季增长可以增强碳汇功能, 减少大气中 CO<sub>2</sub> 的累积, 降低气候增暖的速率, 但生长季长度变化对碳平衡的影响机制目前还不清晰, 仍需要深入研究. 同时生长季长度变化, 无论是 SOG 提前, 还是 EOG 推迟, 都必将对青藏高原牧业生产产生重要影响. 生长季延长, 必将导致放牧活动延长, 从而给高寒草地生态系统造成各种影响, 这种影响的效应有待进一步研究.

#### 4 结论

青藏高原高寒草地物候多年均值的空间分布与



水热条件关系密切。由东南向西北,随着水热条件的恶化及地形的抬升, SOG 逐渐推迟, EOG 逐渐提前, LOG 逐渐缩短。海拔在物候的地域分异中扮演着重要作用,但在青藏高原地区存在着 3500 m 分界线,此线下二者关系不明显,此线上二者关系显著。

1999~2009 年间,青藏高原高寒草地 SOG 整体上呈提前趋势,变化幅度为 6 d/10 a( $R^2=0.281$ ,  $P=0.093$ ); EOG 呈推迟趋势,变化幅度为 2 d/10 a( $R^2=0.031$ ,  $P=0.605$ ); LOG 呈延长趋势,变化幅度为 8 d/10 a( $R^2=0.479$ ,  $P=0.018$ )。但在空间上差异较大,

SOG 提前、EOG 推迟, LOG 延长的区域主要分布在高原的东部,反之, SOG 推迟、EOG 提前、LOG 缩短的区域主要分布在高原的中、西部,其中高原绝大部分区域 SOG 呈显著提前,尤其是高原的东部最为显著。

青藏高原高寒草地物候年际变化在不同的海拔和不同自然带上分异显著。在海拔上,高海拔地区的生长季物候年际变化要比低海拔复杂;在自然带上,青东祁连山地草原带变化幅度和显著水平最高,而藏南山地灌丛草原带变化幅度和显著水平最低。

## 参考文献

- 1 张学霞,葛全胜,郑景云. 北京地区气候变化和植被的关系——基于遥感数据和物候资料的分析. 植物生态学报, 2004, 28: 499–506
- 2 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: 923–929
- 3 Schwartz M D. Green wave phenology. *Nature*, 1998, 394: 839–840
- 4 Van Vliet A J H, de Groot R S, Bellens Y, et al. The European Phenology network. *Int J Biometeor*, 2003, 47: 202–212
- 5 White M A, Thornton P E, Running S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to inter-annual climatic variability. *Glob Biogeochem Cycles*, 1997, 11: 217–234
- 6 Chuine I. A unified model for budburst of trees. *J Theor Biol*, 2000, 207: 337–347
- 7 王连喜,陈怀亮,李琪,等. 植物物候与气候研究进展. 生态学报, 2010, 30: 447–454
- 8 Menzel A. Phenology: It's importance to the global change community. *Clim Change*, 2002, 54: 379–385
- 9 Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981–1991. *Nature*, 1997, 386: 698–701
- 10 朴世龙,方精云. 1982~1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异. 地理学报, 2003, 58: 119–125
- 11 陈效述,喻蓉. 1982~1999 年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化. 地理学报, 2007, 62: 41–51
- 12 国志兴,张晓宁,王宗明,等. 东北地区植物物候对气候变化的响应. 生态学杂志, 2010, 29: 578–585
- 13 Menzel A. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob Change Biol*, 2006, 12: 1969–1976
- 14 Parmesan C. Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Glob Change Biol*, 2007, 13: 1860–1872
- 15 郑景云,葛全胜,郝志新. 气候增暖对我国近 40 年植物物候变化的影响. 科学通报, 2002, 47: 1582–1587
- 16 李荣平,周广胜. 1980~2005 年中国东北木本植物物候特征及其对气候的响应. 生态学杂志, 2010, 29: 2317–2326
- 17 Piao S L, Cui M D, Chen A P, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau. *Agri Forest Meteorol*, 2011, 151: 1599–1608
- 18 Yu H Y, Luedeling E, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 22151–22156
- 19 Delbart N, Le Toan T, Kergoat L, et al. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: A free of snow-effect method using NO-<sub>2</sub>-AA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982–2004). *Remote Sens Environ*, 2006, 101: 52–62
- 20 张懿铨,李炳元,郑度. 论青藏高原范围与面积. 地理研究, 2002, 21: 1–8
- 21 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67: 3–12
- 22 钟祥浩,刘淑珍,王小丹,等. 西藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 山地学报, 2006, 24: 129–136
- 23 段安民,吴国雄,张琼,等. 青藏高原气候变暖是温室气体排放加剧结果的新证据. 科学通报, 2006, 51: 989–992
- 24 李林,陈晓光,王振宇,等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究. 气候变化研究进展, 2010, 6: 181–186
- 25 丁一汇,任国玉,石广玉. 气候变化国家评价报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2006, 3: 3–8
- 26 丁明军,张懿铨,刘林山,等. 青藏高原植物返青期变化及其对气候变化的响应. 气候变化研究进展, 2011, 7: 317–323
- 27 张玮. 土地利用/覆被分类与碳储量研究——以青藏高原为例. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2007. 110–112
- 28 Malingreau J R. Global vegetation dynamics: Satellite observations over Asia. *Int J Remote Sens*, 1986, 7: 1121–1146

- 29 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: 105–107
- 30 辛景峰, 宇振荣, Driessen P M. 利用 NOAA-NDVI 数据集监测冬小麦生育期的研究. 遥感学报, 2001, 6: 442–447
- 31 Roerink G J, Menenti M, Verhoef W. Reconstructing cloud free NDVI composites using Fourier analysis of time series. Int J Remote Sens, 2000, 21: 1911–1917
- 32 Shen M G, Tang Y H, Chen J, et al. Influences of temperature and precipitation before the growing season spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau. Agri Forest Meteorol, 2011, 151: 1711–1722
- 33 Lloyd D A. Phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery. Int J Remote Sens, 1990, 11: 2269–2279
- 34 Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variation in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. J Geophys Res, 2001, 106: 20069–20083
- 35 Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS. Remote Sens Environ, 2003, 84: 471–475
- 36 Kafaki, S B, Asadollah M, Seyed A H. Monitoring growing season length of deciduous broad leaf forest derived from satellite data in Iran. Am J Environ Sci, 2009, 5: 647–652
- 37 Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. Glob Change Biol, 2006, 12: 672–685
- 38 Stöckli R, Vidale P L. European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. Int J Remote Sens, 2004, 25: 3303–3330
- 39 Kaduk J, Heimann M A. Prognostic phenology scheme for global terrestrial carbon cycle models. Clim Res, 1996, 6: 1–19
- 40 White M A, de Beurs K M, Didan K, et al. Inter-comparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. Glob Change Biol, 2009, 15: 2335–2359
- 41 Julien Y, Sobrino J A. Global land surface phenology trends from GIMMS database. Int J Remote Sens, 2009, 30: 3495–3513
- 42 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. Glob Change Biol, 2001, 17: 2385–2399
- 43 郑度. 青藏高原自然地域系统研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26: 336–341
- 44 Zeng H Q, Jia G S, Epstein H. Recent changes in phenology over the northern high latitudes detected from multi-satellite data. Environ Res Lett, 2011, 6, doi: 10.1088/1748-9326/6/4/045508
- 45 Shen M G. Spring phenology was not consistently related to winter warming on the Tibetan Plateau. Proc Natl Acad Sci USA, 2011, 108: 91–92
- 46 Walther G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change. Nature, 2002, 416: 389–396
- 47 Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An extended AVHRR 8 km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. Int J Remote Sens, 2005, 26: 4485–4498
- 48 Fontana F, Rixen C, Jonas T, et al. Alpine grassland phenology as seen in AVHRR, VEGETATION, and MODIS NDVI time series—A comparison with *in situ* measurements. Sensors, 2008, 4: 2833–2853
- 49 Chen H, Zhu Q A, Wu N, et al. Delayed spring phenology on the Tibetan Plateau may also be attributable to other factors than winter and spring warming. Proc Natl Acad Sci USA, 2011, 108: 93
- 50 Yi S H, Zhou Z Y. Increasing contamination might have delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. Proc Natl Acad Sci USA, 2011, 108: 94
- 51 Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. Nature, 2008, 451: 49–52