

青藏高原草地物候时空变异特征分析

郭双双

曲阜师范大学地理与旅游学院, 山东 日照

收稿日期: 2023年5月4日; 录用日期: 2023年6月9日; 发布日期: 2023年6月20日

摘要

气候变暖引起的极端自然灾害频发, 对全球生态系统的结构和功能造成巨大挑战。青藏高原地理条件特殊, 生态环境脆弱, 表现出更优于其他地区的气候敏感性, 而草地作为青藏高原主要的植被类型, 对整个青藏高原生态系统有着不可忽略的影响, 因此研究青藏高原草地物候变化具有重要价值。本文利用GOSIF数据集构建SIF (Sun-Induced Fluorescence)指数, 同时采用Sen斜率估计对青藏高原草地物候时空演变格局进行探究, 所得结论如下: 1) 青藏高原草地返青期主要集中于第110~140天之间, 其空间分布具有明显差异性, 大体呈自东南向西北逐渐推迟的规律; 枯黄期主要集中于第260~280天之间, 其空间分布上并无显著规律; 生长季长度主要集中于第130~189天之间, 空间分布规律也较为明显, 自东南向西北生长季长度逐渐变短。2) 在2001~2020年间, 青藏高原草地返青期年际变化趋势为整体提前, 提前约0.23 d/a左右; 青藏高原草地枯黄期年际变化趋势表现为整体推迟, 推迟约1 d/a左右; 青藏高原草地生长季长度同样表现为整体延长趋势, 延长约1 d/a左右。

关键词

青藏高原, 草地, 物候, 时空变异

Analysis of Spatial and Temporal Variability of Grassland Phenology on the Qinghai-Tibet Plateau

Shuangshuang Guo

College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao Shandong

Received: May 4th, 2023; accepted: Jun. 9th, 2023; published: Jun. 20th, 2023

Abstract

The frequent occurrence of extreme natural disasters caused by climate warming poses great chal-

allenges to the structure and function of global ecosystems. With special geographical conditions and fragile ecological environment, the Qinghai-Tibet Plateau is more sensitive to climate than other regions. As the main vegetation type on the Qinghai-Tibet Plateau, grassland has a significant impact on the entire ecosystem of the Plateau. Therefore, it is of great value to study the phenological changes of grassland on the Plateau. In this paper, the GOSIF data set is used to construct the index of SIF (Sun-Induced Fluorescence), while Sen slope estimation is used to explore the spatial-temporal evolution pattern of grassland phenology over the Tibetan Plateau, and the conclusions are as follows: 1) The greening period of grassland on the Qinghai-Tibet Plateau was mainly concentrated between the 110th and 140th day, and its spatial distribution was significantly different, and it gradually delayed from southeast to northwest. The yellowing stage was mainly concentrated between the 260th and 280th day, and there was no significant pattern in its spatial distribution. The growing season length mainly concentrated in 130~189 days, and the spatial distribution pattern was also obvious. The growing season length gradually decreased from southeast to northwest. 2) From 2001 to 2020, the interannual change trend of grassland greening stage on the Qinghai-Tibet Plateau was advanced by 0.23 d/a. The interannual variation trend of the Tibetan Plateau grassland yellowing stage was delayed as a whole by about 1 d/a. The length of grassland growing season on the Qinghai-Tibet Plateau also showed an overall lengthening trend, extending by about 1 d/a.

Keywords

Qinghai-Tibet Plateau, Grassland, Phenology, Spatial and Temporal Variability

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候变化是当前科学界的热门话题，也是社会界和决策界共同关注的焦点。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 相关报告指出：自 1950 年以来，全球气候系统发生了过去几十年间从未有过的变化；1880~2012 年间，在不同时期，全球绝大多数地区都经历了一定的升温过程，平均升高约 0.85℃；1990~2010 的 30 年间，地表温度以远超前于 1850 年以来任何时期的速率增温，全球气候变暖现已成为不再争论的事实[1]。气候变暖引起海平面上涨、干旱暴雨等极端自然灾害频发，对全球生态系统结构和功能造成巨大挑战。地表植被作为生态系统的初级生产者，是陆地生态系统的重要组成要素，也是联系水文 - 土壤 - 大气和其他生态要素的重要桥梁。因此，植被动态变化在讨论有关气候变化方面发挥着不可或缺的作用，植被物候也作为反映植被动态变化的有效指示因子，成为当下研究的热点之一[2]。物候学是一门以研究动植物的生活周期以及这种周期怎样响应季节和年际环境要素的学科，在诸多领域中都具有非常重要的意义。植被物候是指植物因气候和生活环境等要素的影响而发生的以年为周期的规律性生长变化，不但能反映植物自身特征，也能直接体现植被乃至生态系统对气候变化的响应程度。近几年，伴随全球变暖加剧，植被自身的生长发育过程也出现了一定程度的改变，作为大自然的最佳指示器，植被物候的时空变异特征也逐渐受到相关学者的关注[3]。

青藏高原地处亚洲大陆中南部，海拔平均 4000 m 以上，是世界上最高、最年轻的高原，有着水平和垂直地带性的完美体现，气候、土壤和植被十分丰富，因其自身特殊的地理条件和脆弱的生态环境，成为全球变化的敏感区域。1980s 中期以来，青藏高原表现出的增温速率是同纬度其他地区的两倍，该区域

的平均温度更是每 10 年上升约 0.4℃ [4], 显现出高山地区更优于其他地区的气候敏感性, 被称为北半球甚至是全球气候变化的放大器, 研究其植被物候变化具有重要价值。草地资源作为我国的重要自然资源, 占有国土面积的 40% 以上, 在生态系统的调节和修复等方面发挥着毋庸置疑的作用[5], 且青藏高原天然草地作为青藏高原主要的植被类型, 占地面积在 60% 左右, 对整个青藏高原生态系统有着不可忽略的影响[6], 因此, 研究青藏高原草地物候时空变异, 有利于认识当地植被的空间分布格局, 及时把握当地生态系统的变化情况, 对于青藏高原生态环境保护及农牧业生产发展具有实际指导意义, 是模型模拟和评估全球气候变化下生态系统变化研究的一个前提条件[7]。

2. 研究区概况

2.1. 地理位置

青藏高原南始喜马拉雅山南部, 北达昆仑山、阿尔金山和祁连山北部, 介于 25°~40°N, 68°~105°E 之间[8] [9] [10], 大部分地区位于我国境内, 但也有少数边缘地区在印度、巴基斯坦、尼泊尔等多个国家, 总面积约 $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 大约占我国陆地总面积的三分之一左右[11] [12] [13]。青藏高原海拔范围在 3000~5000 米之间, 发育了多类高山生态系统, 是国内大江大河的主要发源地, 其水资源的丰富储量使其拥有“亚洲水塔”的美誉, 对我国自然生态环境和人类活动产生深刻影响[14] [15] [16]。

2.2. 气候特征

青藏高原巨大的海拔高度决定了当地的太阳辐射十分强烈, 稀薄的空气使其能享受到比同纬度地区更多的太阳光照, 但也正因如此, 当地的气温普遍偏低, 日较差大, 从降雨来看, 季风和暖湿气流由于受山脉阻挡的影响, 其降雨自东南地区向西北地区逐级递减[17], 且以夜雨较多。因此, 青藏高原的总体气候特点可以概括为: 冬季寒冷漫长, 夏季凉爽多雨, 干湿分明, 多大风[18]。

2.3. 植物资源

青藏高原是我国主要放牧区, 天然草地类型众多, 主要可以分为高山草甸、高山灌丛草甸、亚高山疏林灌木草甸、高山草原、高山山地荒漠、高寒沼泽、山地灌丛和高山稀疏及垫状草地八种, 其中高寒草地分布面积最广, 所占面积最大[19]。青藏高原也是我国重要的原始林区, 以乔松、高山松、云南松等树种最为常见, 尽管种类繁多, 但整体覆盖面较小, 所占比例较低[12]。

3. 数据来源与研究方法

3.1. 植被类型数据

本文植被类型数据采用 1:100 万全国植被类型数据, 来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。该数据集由侯学煜院士主编及相关院所、部门及高校的 250 余位专家共同编制, 详细反映了我国多种植被类型的分布情况及水平和垂直地带性分异规律, 是研究生态环境变化和生态环境保护的重要参考依据。该数据的空间分辨率为 1 km, 定义为 Albers 投影, 在 ArcGIS 中利用掩膜、重分类、按栅格属性提取等工具获得青藏高原 4 种草地类型(见图 1)。

3.2. 遥感数据

太阳诱导叶绿素荧光(Sun-Induced Fluorescence, SIF)作为新兴的遥感指数, 是指植被在太阳光的照射下由光合中心直接发出的一种特有的光谱信号, 并在红光波段(690 nm)和近红光波段(740 nm)出现两个峰值[20]。SIF 代表的并非传统意义上的, 类似于 NDVI 等由植被绿度来表征潜在光合作用的植被指数, 其

代表的更多是植被自身生长发育所进行的实际光合作用,更倾向于生理意义[21]。有研究发现,尽管植被类型不同,但 GPP 与 SIF 的相关性依然良好,由此说明, SIF 在表示植被光合活性时仍有一定的代表意义[22] [23] [24] [25] [26]。

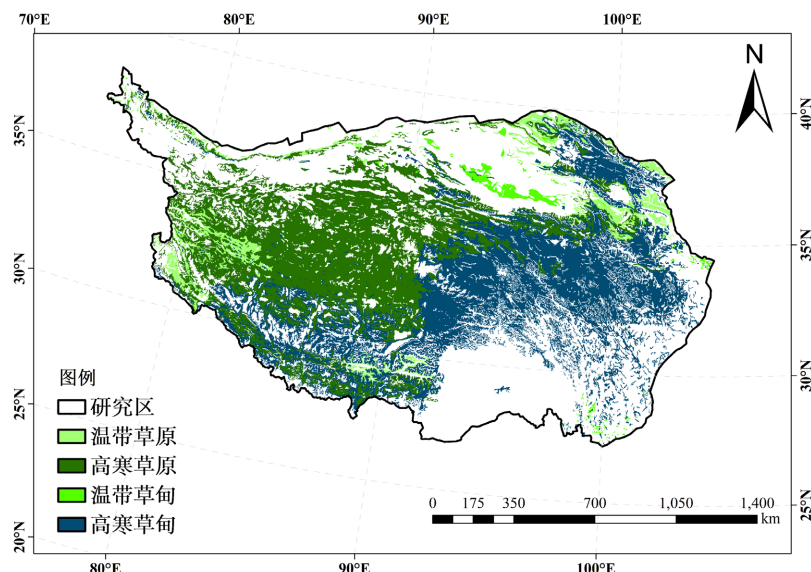


Figure 1. Grassland vegetation types and distribution in the Qinghai-Tibet Plateau
图 1. 青藏高原草地植被类型及分布

本文所用 2001~2020 年 SIF 数据由 Li 等[27]提供,是基于 OCO-2 (Orbital Carbon Observatory 2)卫星的全球高时空分辨率(0.05°, 8 天) SIF 数据集(即 GOSIF)。GOSIF 采用数据驱动方法,利用 OCO-2 离散测深数据、MODIS 遥感数据和气象再分析数据构建预测 SIF 模型[27],与原始 OCO-2 SIF 具有相似且合理的季节周期,但具有较高的时空分辨率、持续的全球覆盖和较长的数据记录,对于理解全球光合作用的长期趋势非常重要。

3.3. 物候参数提取

本文基于 TIMESAT 3.3 软件平台,使用双 logistic 曲线(D-L)拟合法对 SIF 数据的时间序列进行重构,以达到平滑数据的效果,之后选择常用的动态阈值法以 5%和 20%的阈值分别进行返青期(Start of the Growing Season, SOS)和枯黄期(End of the Growing Season, EOS)等各项物候指标的提取,其中生长季长度 (Length of the Growing Season, LOS)通常由 EOS 与 SOS 做差得出[28]。

3.4. 趋势分析

Theil-Sen Median 方法又被称为 Sen 斜率估计,是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,通常与 Mann-Kendall (MK)显著性检验结合来揭示斜率变化的趋势和幅度。该方法计算效率高,受测量误差和离群数据的影响较小,在长时间序列数据的趋势分析应用较广。

Theil-Sen 趋势分析:

$$\text{Slope} = \text{Median} \left[\frac{(x_j - x_i)}{(j - i)} \right], \forall j > i \quad (1)$$

式中, x_i 和 x_j 分别是 i 和 j 时的序列值, $1 \leq i \leq j \leq n$, n 为序列长度, Slope 的正负表示趋势变化的方向, 若 Slope 大于零, 则为正向变化, 若 Slope 小于零, 则为逆向变化。

Mann-Kendall 趋势检验:

对于序列值 $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 统计量 S 计算如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

当 $n \geq 10$ 时, 统计量 S 接近标准正态分布, Z 值可用于趋势检验:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{VAR}(S) = \frac{\left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5) \right]}{18} \quad (5)$$

式中, n 是序列中数据个数, m 是序列中重复出现的数据组的数目, t_i 是第 i 组重复数据组中的重复数据个数。标准化统计量 Z 的正值表示增加或上升的趋势, 而负值则表示序列中的减少或下降趋势。为了检验显著性, 将计算出来的 Z 取绝对值与从标准表获得的标准正态累积值 $Z_{1-p/2}$ 在 $p\%$ 显著性水平上进行比较, 以接受或拒绝零假设。

4. 结果与分析

4.1. 青藏高原草地物候空间分布格局

2001~2020 年青藏高原草地生长季开始日期(a)、结束日期(b)和生长季长度(c)的空间分布如图 2 所示, 可以看出青藏高原草地生长季开始日期主要集中在 110~140 天之间, 即 4 月下旬到 5 月下旬的时间范围内, 且生长季开始日期的分布特征具有较为明显的空间差异性, 从图 2(a)可以看到青藏高原草地返青大体呈现自东南向西北逐渐推迟的规律, 返青期最早出现在东部, 即在第 99 天左右开始返青, 最晚主要出现在草地分布的西北部区域, 在第 146 天左右开始返青。与返青期不同, 青藏高原草地生长季结束日期在空间分布上并不存在一定规律(图 2(b)), 生长季结束日期主要集中在 260~280 天之间, 即 9 月下旬到 10 月上旬的时间范围内, 枯黄期最早出现在东北地区, 即在第 253 天左右开始枯黄, 像元所占比重极低; 枯黄期最晚主要出现在西南区域, 在第 296 天左右开始枯黄, 像元比重也较小。对于生长季长度而言, 青藏高原草地生长季长度也有着和生长季开始日期一样较为明显的空间分布规律(图 2(c)), 自东南向西北生长季长度逐渐变短, 且生长季长度主要集中于 130~189 天之间, 生长季长度最短, 主要位于青藏高原东北角, 在西部和中部地区也有零散分布, 生长季长度仅为 118 天左右; 生长季长度最长主要位于青藏高原东部及西南部, 在偏北及中部地区也有零星分布, 生长季长度长达 189 天左右。

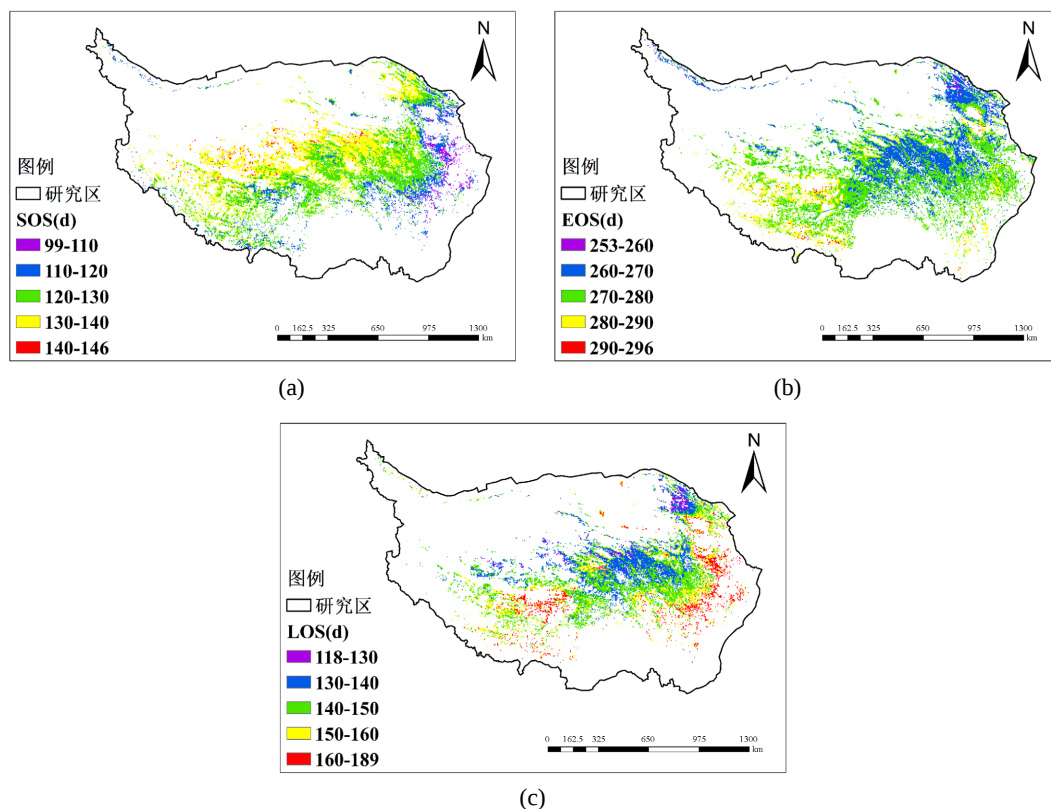


Figure 2. Spatial distribution of SOS (a), EOS (b) and LOS (c) mean values in the Qinghai-Tibet Plateau from 2001 to 2020
图 2. 2001~2020 年青藏高原草地 SOS (a)、EOS (b)、LOS (c) 均值空间分布

4.2. 青藏高原草地物候年际变化特征

2001~2020 年, 青藏高原草地生长季开始日期、结束日期及生长季长度均值的年际变化如图 3 所示。从图 3(a) 的线性拟合结果来看, 青藏高原草地生长季开始日期在 2001~2020 年间整体呈现提前趋势, 但不同年份返青期的表现却各不相同。2004 年之前, 青藏高原草地返青期一直呈现较为稳定的提前趋势, 并在 2005 年出现了第一次返青期推迟, 而后在 2008 年之前再次持续提前, 并在 2009 年又一次发生返青期推迟, 但自 2010 年青藏高原草地返青期出现小幅提前后, 青藏高原草地返青期出现频繁波动, 自 2015 年后才逐步趋于稳定。从图 3(b) 的线性拟合结果来看, 青藏高原草地生长季结束日期在 2001~2020 年间整体呈现推迟趋势。自 2002 年青藏高原草地枯黄期出现大幅提前后, 青藏高原草地枯黄期在 2003~2007 年间频繁波动, 2008 年后才逐步趋于稳定, 并在 2013 年后波动上升。青藏高原草地生长季长度在 2001~2020 年间的整体趋势可以从图 3(c) 的线性拟合结果看出, 主要呈整体延长趋势。在 2008 年前, 青藏高原草地生长季长度大体呈较为一致的延长趋势, 但 2009 年出现大幅下降, 之后上升幅度变小, 2019 年才出现大幅上升。

4.3. 青藏高原草地物候空间趋势分析

本节利用 Theil-Sen Median 方法对 2001~2020 年青藏高原草地 SOS、EOS 和 LOS 的空间变化趋势进行分析, 结果如图 4 所示。各物候指标的 Slope 值表示斜率变化, 若 slope 值为正, 则表示该区域的物候变化为上升趋势, 若 Slope 值为负, 则表示该区域的物候变化为下降趋势。从图 4(a) 中可以看出, 在 2001~2020 年间, 青藏高原草地 SOS 的趋势变化范围大致在 -1.7 d/a ~ 1.4 d/a 之间, 青藏高原草地 SOS 的

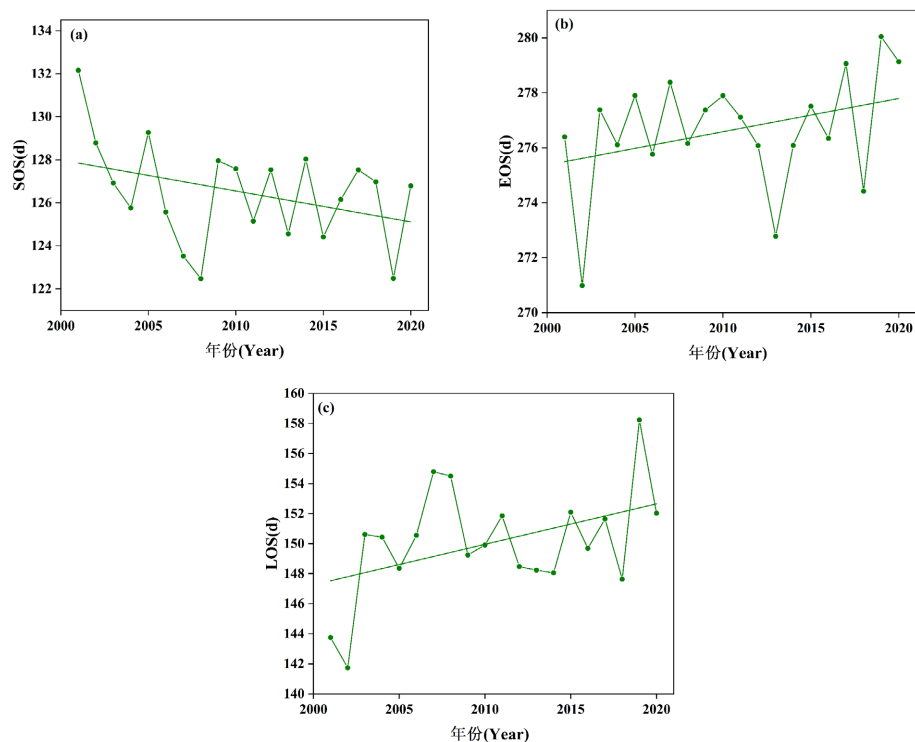


Figure 3. Interannual variation characteristics of SOS (a), EOS (b) and LOS (c) in the Tibetan Plateau from 2001 to 2020
图 3. 2001~2020 年青藏高原草地 SOS (a)、EOS (b)、LOS (c) 年际变化特征

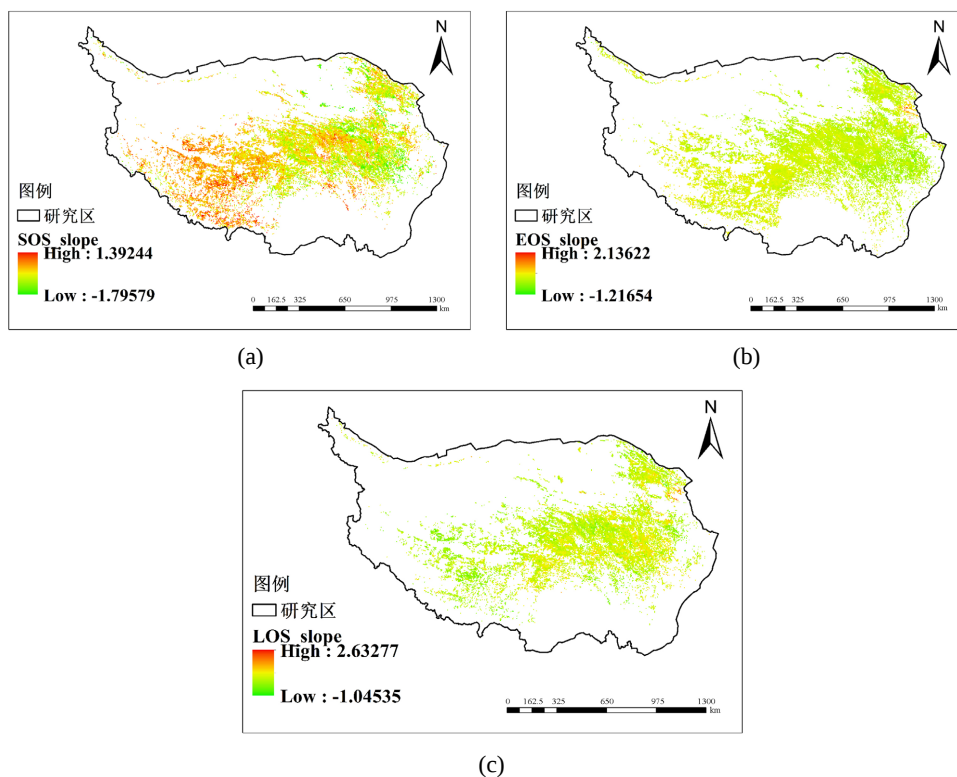


Figure 4. Spatial variation trends of SOS (a), EOS (b) and LOS (c) in the Tibetan Plateau from 2001 to 2020
图 4. 2001~2020 年青藏高原草地 SOS (a)、EOS (b)、LOS (c) 空间变化趋势

整体空间变化趋势以提前为主, 提前约 0.23 d/a 左右, 提前趋势占整个青藏高原草地 SOS 的 76% 左右, 而推迟趋势仅在 24% 左右的地区呈现, 主要集中在西南区域。青藏高原草地 EOS 趋势变化范围在图 4(b) 中体现, 大致范围在 $-1.2 \text{ d/a} \sim 2.2 \text{ d/a}$ 之间, 整体空间变化趋势以推迟为主, 推迟约 1 d/a 左右, 推迟趋势占整个青藏高原草地 EOS 的 69% 左右, 提前趋势只占青藏高原草地 EOS 的 31% 左右, 主要集中在东南部地区。图 4(c) 表示青藏高原草地 LOS 的趋势变化范围, 大致在 $-1 \text{ d/a} \sim 2.7 \text{ d/a}$ 之间, 青藏高原草地 LOS 的整体空间变化趋势以延长为主, 延长约 1 d/a 左右, 延长趋势占整个青藏高原草地 LOS 的 88% 左右, 只有零散的, 占整个青藏高原草地 LOS 12% 左右的地区呈缩短趋势。

同时将 Slope 结果结合 MK 显著性检验, 对青藏高原草地物候指标 SOS、EOS 和 LOS 的空间变化趋势进一步说明, 如图 5 所示。从图 5(a) 中可以看出, 青藏高原草地 SOS 在大部分地区都以提前不显著趋势为主, 占整个青藏高原草地 SOS 的 63% 左右, 显著提前趋势仅占整个青藏高原草地 SOS 的 13% 左右, 主要位于在东南、东北和中部地区, 推迟不显著趋势占整个青藏高原草地 SOS 的 23% 左右, 显著推迟趋势更是占整个青藏高原草地 SOS 的 1% 不到。在图 5(b) 中, 青藏高原草地 EOS 大多以推迟不显著趋势为主, 同样占整个青藏高原草地 EOS 的 63% 左右, 而显著推迟趋势却占整个青藏高原草地 EOS 的 6% 不到, 主要在东北和西南角有零星分布, 体现不显著趋势则占整个青藏高原草地 EOS 的 30% 左右, 显著提前趋势的占比仅接近 1% 左右。由图 5(c) 所见, 青藏高原草地 LOS 以延长不显著趋势为主, 占整个青藏高原草地 LOS 的 74% 左右, 而显著延长趋势仅占整个青藏高原草地 LOS 的 14% 左右, 主要位于东北、东南和中部地区, 与 SOS 的显著提前趋势分布类似, 缩短不显著趋势则占整个青藏高原草地 LOS 的 12% 左右, 分布较为离散, 显著缩短趋势甚至占整个青藏高原草地的 0.1% 不到。

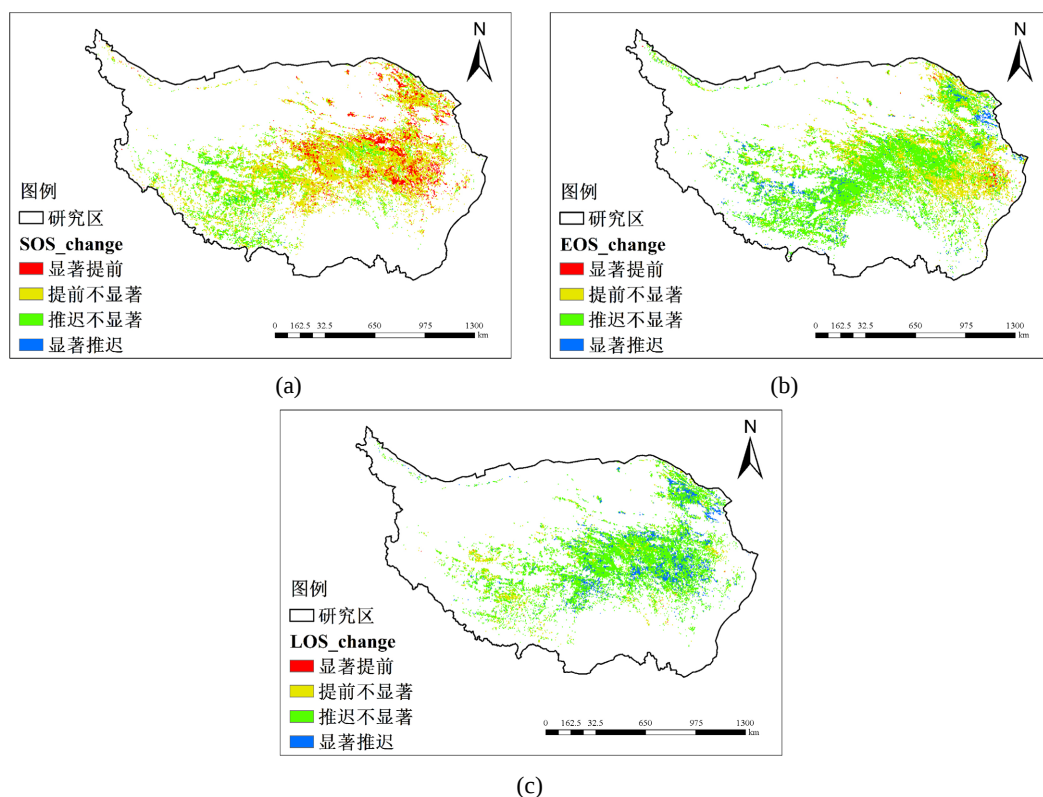


Figure 5. Spatial variation trends and significance of SOS (a), EOS (b) and LOS (c) in grassland of Qinghai-Tibet Plateau from 2001 to 2020 ($P < 0.05$)

图 5. 2001~2020 年青藏高原草地 SOS (a)、EOS (b)、LOS (c) 空间变化趋势及显著性 ($P < 0.05$)

5. 结论

本文主要从青藏高原草地物候空间分布格局、年际变化特征及变化趋势分析三个方面对青藏高原草地物候时空演变特征展开讨论, 主要结论如下:

1) 青藏高原草地生长季开始日期主要集中在第 110~140 天之间, 即 4 月下旬到 5 月下旬的时间范围内, 且生长季开始日期的分布特征具有较为明显的空间差异性, 大体呈现自东南向西北逐渐推迟的规律; 青藏高原草地生长季结束日期在空间分布上并无规律, 生长季结束日期主要集中在第 260~280 天之间, 即 9 月下旬到 10 月上旬的时间范围内; 青藏高原草地生长季长度也有着和生长季开始日期一样较为明显的空间分布规律, 自东南向西北生长季长度逐渐变短, 且生长季长度主要集中于第 130~189 天之间。

2) 青藏高原草地生长季开始日期在 2001~2020 年间整体呈现提前趋势, 但不同年份返青期的表现却各不相同, 2004 年之前, 青藏高原草地返青期一直呈现较为稳定的提前趋势, 但 2010 年后, 青藏高原草地返青期出现频繁波动; 生长季结束日期在 2001~2020 年间整体呈现推迟趋势, 并于 2003~2007 年间频繁波动, 2008 年后才逐步趋于稳定, 且在 2013 年后波动上升; 生长季长度在 2001~2020 年间整体呈延长趋势, 但 2009 年出现大幅下降, 之后上升幅度变小, 2019 年才出现大幅上升。

3) 在 2001~2020 年间, 青藏高原草地 SOS 的趋势变化范围大致在 -1.7 d/a~ 1.4 d/a 之间, 整体空间变化趋势以提前为主, 提前约 0.23 d/a 左右, 提前趋势占整个青藏高原草地 SOS 的 76% 左右; 青藏高原草地 EOS 趋势变化大致范围在 -1.2 d/a~ 2.2 d/a 之间, 整体空间变化趋势以推迟为主, 推迟约 1 d/a 左右, 推迟趋势占整个青藏高原草地 EOS 的 69% 左右; 青藏高原草地 LOS 的趋势变化范围大致在 -1 d/a~ 2.7 d/a 以内, 整体空间变化趋势以延长为主, 延长约 1 d/a 左右, 延长趋势占整个青藏高原草地 LOS 的 88% 左右。

4) 将斜率结果结合 MK 显著性检验, 青藏高原草地 SOS 以提前不显著趋势为主, 占整个青藏高原草地 SOS 的 63% 左右, 显著提前趋势仅占 13% 左右, 推迟不显著趋势占 23% 左右, 显著推迟趋势更是占 1% 不到; 青藏高原草地 EOS 以推迟不显著趋势为主, 同样占整个青藏高原草地 EOS 的 63% 左右, 显著推迟趋势占 6% 不到, 提前不显著趋势则占 30% 左右, 显著提前趋势的占比仅接近 1% 左右; 青藏高原草地 LOS 以延长不显著趋势为主, 占整个青藏高原草地 LOS 的 74% 左右, 而显著延长趋势仅占 14% 左右, 与 SOS 的显著提前趋势分布类似, 缩短不显著趋势则占 12% 左右, 显著缩短趋势甚至占 0.1% 不到。

参考文献

- [1] 祁威, 张镡铨, 高俊刚, 等. 1971-2009 年珠穆朗玛峰地区尼泊尔境内气候变化[J]. 地理学报, 2013, 68(1): 82-94.
- [2] 王连喜, 陈怀亮, 李琪, 余卫东. 植物物候与气候研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 447-454.
- [3] 代武君, 金慧颖, 张玉红, 等. 植物物候学研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(19): 6705-6719.
- [4] Dong, M.Y., Jiang, Y., Zheng, C.T. and Zhang, D. (2012) Trends in the Thermal Growing Season Throughout the Tibetan Plateau during 1960-2009. *Agricultural and Forest Meteorology*, **166-167**, 201-206.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.07.013>
- [5] 黄文洁, 曾桐瑶, 黄晓东. 青藏高原高寒草地植被物候时空变化特征[J]. 草业科学, 2019, 36(4): 1032-1043.
- [6] 布仁巴音, 徐广平, 段吉闯, 等. 青藏高原高寒草甸初级生产力及其主要影响因素[J]. 广西植物, 2010, 30(6): 760-769.
- [7] 袁巧丽, 杨建. 青藏高原草地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 中国草地学报, 2021, 43(9): 32-43.
- [8] 宋辞, 裴韬, 周成虎. 1960 年以来青藏高原气温变化研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1503-1509.
- [9] 张镡铨, 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.
- [10] 张鑫. 基于多源遥感数据的青藏高原内陆湖泊动态变化研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015.

- [11] Ding, M.J., Chen, Q., Li, L.H., *et al.* (2016) Temperature Dependence of Variations in the End of the Growing Season from 1982 to 2012 on the Qinghai-Tibetan Plateau. *GIScience & Remote Sensing*, **53**, 147-163. <https://doi.org/10.1080/15481603.2015.1120371>
- [12] 曾彪. 青藏高原植被对气候变化的响应研究(1982-2003) [D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [13] 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.
- [14] Cong, N., Shen, M.G. and Piao, S.L. (2017) Spatial Variations in Responses of Vegetation Autumn Phenology to Climate Change on the Tibetan Plateau. *Journal of Plant Ecology*, **10**, 744-752. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw084>
- [15] Wang, C.Z., Guo, H.D., Zhang, L., *et al.* (2015) Assessing Phenological Change and Climatic Control of Alpine Grasslands in the Tibetan Plateau with MODIS Time Series. *International Journal of Biometeorology*, **59**, 11-23. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0817-5>
- [16] Zhang, H., Zhang, F., Zhang, G., He, X. and Tian, L. (2016) Evaluation of Cloud Effects on Air Temperature Estimation Using MODIS LST Based on Ground Measurements over the Tibetan Plateau. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16**, 13681-13696. <https://doi.org/10.5194/acp-16-13681-2016>
- [17] 韩海辉. 基于 SRTM-DEM 的青藏高原地貌特征分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [18] 王宁练, 贺建桥, 蒲健辰, 等. 近 50 年来祁连山七一冰川平衡线高度变化研究[J]. 科学通报, 2010, 55(32): 3107-3115.
- [19] 李兰晖. 青藏高原气候变化及其对植被物候的影响[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2015.
- [20] Meng, F.D., Huang, L., Chen, A.P., Zhang, Y. and Piao, S.L. (2021) Spring and Autumn Phenology Across the Tibetan Plateau Inferred from Normalized Difference Vegetation Index and Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence. *Big Earth Data*, **5**, 182-200. <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1920661>
- [21] Ren, P.X., Liu, Z.L., Zhou, X. L., *et al.* (2021) Strong Controls of Daily Minimum Temperature on the Autumn Photosynthetic Phenology of Subtropical Vegetation in China. *Forest Ecosystems*, **8**, Article No. 31. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00309-9>
- [22] Damm, A., Elbers, J., Erler, A., *et al.* (2010) Remote Sensing of Sun-Induced Fluorescence to Improve Modeling of Diurnal Courses of Gross Primary Production (GPP). *Global Change Biology*, **16**, 171-186. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01908.x>
- [23] Damm, A., Guanter, L., Paul-Limoges, E., *et al.* (2015) Far-Red Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence Shows Ecosystem-Specific Relationships to Gross Primary Production: An Assessment Based on Observational and Modeling Approaches. *Remote Sensing of Environment*, **166**, 91-105. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.06.004>
- [24] Guan, K.Y., Berry, J.A., Zhang, Y.G., *et al.* (2016) Improving the Monitoring of Crop Productivity Using Spaceborne Solar-Induced Fluorescence. *Global Change Biology*, **22**, 716-726. <https://doi.org/10.1111/gcb.13136>
- [25] Li, X., Xiao, J.F., He, B.B., *et al.* (2018) Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Is Strongly Correlated with Terrestrial Photosynthesis for a Wide Variety of Biomes: First Global Analysis Based on OCO-2 and Flux Tower Observations. *Global Change Biology*, **24**, 3990-4008. <https://doi.org/10.1111/gcb.14297>
- [26] Yang, H., Yang, X., Zhang, Y., *et al.* (2017) Chlorophyll Fluorescence Tracks Seasonal Variations of Photosynthesis from Leaf to Canopy in a Temperate Forest. *Global Change Biology*, **23**, 2874-2886. <https://doi.org/10.1111/gcb.13590>
- [27] Li, X. and Xiao, J.F. (2019) A Global, 0.05-Degree Product of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Derived from OCO-2, MODIS, and Reanalysis Data. *Remote Sensing*, **11**, Article No. 517. <https://doi.org/10.3390/rs11050517>
- [28] Jönsson, P. and Eklundh, L. (2004) TIMESAT—A Program for Analyzing Time-Series of Satellite Sensor Data. *Computers & Geosciences*, **30**, 833-845. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>