

DOI: 10.5846/stxb202201050028

郝爱华, 薛 娴, 段翰晨, 彭 飞, 尤全刚. 青藏高原典型草地 NDVI 时空演变季节差异及其气候驱动. 生态学报, 2023, 43(1): 352-363.

Hao A H, Xue X, Duan H C, Peng F, You Q G. Different spatiotemporal variations in seasonal NDVI and their climatic driving forces of a typical grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 352-363.

青藏高原典型草地 NDVI 时空演变季节差异及其气候驱动

郝爱华¹, 薛 娴^{2,*}, 段翰晨², 彭 飞², 尤全刚²

¹ 忻州师范学院地理系, 忻州 034000

² 中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000

摘要: 基于全球库存建模和制图研究 (GIMMS) 第三代归一化植被指数 (NDVI3g) 产品和气象数据, 利用一元线性回归模型、偏相关分析和显著性 T 检验, 分析了 1982—2015 年青藏高原高寒草甸和高寒草原春、夏、秋季 NDVI 时空演变的差异特征及其与气候因子的关系。研究表明: (1) 高寒草甸春、夏、秋季 NDVI 整体均无明显变化趋势, 高寒草原春季和夏季 NDVI 均显著增加, 变化速率均为 $0.0002/a$ ($P < 0.05$), 而秋季 NDVI 变化趋势不明显。(2) 空间上, 高寒草甸春季 NDVI 显著增加面积占比 31.95%, 集中分布在祁连山区和三江源区, 夏季 NDVI 显著增加的面积占比 32.12%, 主要分布在祁连山区、三江源地区和一江两河流域; 秋季 NDVI 显著增加的比例为 24.59%, 集中分布于祁连山区和一江两河流域。高寒草原春、夏、秋季 NDVI 显著增加的区域均集中分布于西藏自治区北部和柴达木盆地南缘地区, 分别占比 44.20%、43.09% 和 37.99%。(3) 高寒草甸春季和秋季 NDVI 均与气温显著正相关, 偏相关系数达 0.41 ($P < 0.05$) 和 0.23 ($P < 0.05$), 夏季 NDVI 与气温、降水量和太阳辐射均呈显著相关性, 偏相关系数分别为 0.35 ($P < 0.01$)、0.56 ($P < 0.01$) 和 -0.57 ($P < 0.01$); 高寒草原春季 NDVI 与气温和降水量均呈显著正相关, 且与降水量偏相关系数较高, 为 0.31 ($P < 0.05$), 夏季 NDVI 与气温、降水量和太阳辐射均呈显著相关性, 与降水量偏相关系数最高, 为 0.46 ($P < 0.01$), 秋季 NDVI 与太阳辐射显著正相关。(4) 空间上高寒草甸春季和秋季 NDVI 与气温呈正相关的像元分别占比 76.50% 和 67.86%, 集中于祁连山区和三江源区, 夏季 NDVI 与降水量呈正相关的像元占比 58.42%, 与太阳辐射呈负相关的像元占比 53.69%, 均集中分布于祁连山区、三江源区和一江两河流域。高寒草原春季和夏季 NDVI 与降水量呈正相关的像元分别占比 63.02% 和 67.62%, 集中分布在西藏自治区西部和柴达木盆地南缘。研究可为保护青藏高原草地资源、管理高寒生态系统植被碳库以及推动青藏高原长效生态增汇提供科学依据。

关键词: 归一化植被指数; 季节性; 高寒草地; 变化趋势; 青藏高原

Different spatiotemporal variations in seasonal NDVI and their climatic driving forces of a typical grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau

HAO Aihua¹, XUE Xian^{2,*}, DUAN Hanchen², PENG Fei², YOU Quangang²

¹ Department of Geography, Xinzhou Teachers University, Xinzhou 034000, China

² Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: Based on the third-generation normalized difference vegetation index (NDVI3g) of GIMMS and meteorological datasets, this study analyzed different spatiotemporal variations in NDVI and corresponding relationships to climate factors during spring, summer, and autumn in alpine meadow and alpine steppe biomes on the Qinghai-Tibetan Plateau in 1982—2015, combining a unary linear regression model with partial correlation analysis and a significance t -test. Results are as

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0305); 国家自然科学基金项目 (41771233)

收稿日期: 2022-01-05; **网络出版日期:** 2022-08-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xianxue@lzb.ac.cn

follows: (1) Generally, the NDVI of the alpine meadow biome exhibited no significant changing trends during spring, summer, and autumn; however, the NDVI of the alpine steppe biome increased significantly during spring and summer at a rate of $0.0002/a$ ($P < 0.05$), while no obvious trends were observed during autumn. (2) Spatially, 31.95% of NDVI in the alpine meadow biome exhibited significant increasing trends during spring, mainly in areas distributed throughout the Qilian Mountains and the Three River Nature Reserve, and 32.12% during summer, mainly in areas distributed throughout the Qilian Mountains, the Three River Nature Reserve, and the Yarlung Zangbo River as well as the basins of its two tributaries, and 24.59% during autumn, mainly in areas distributed throughout the Qilian Mountains and the Yarlung Zangbo River as well as the basins of its two tributaries. The alpine steppe biome exhibited significantly increasing NDVI trends during spring (44.20%), summer (43.09%), and autumn (37.99%), mainly in areas distributed throughout the northern Tibet Autonomous Region and southern margin of the Qaidam Basin. (3) For the alpine meadow biome, the area-averaged NDVI exhibited a significantly positive correlation to temperature during spring and autumn, with partial correlation coefficients of 0.41 ($P < 0.05$) and 0.23 ($P < 0.05$), respectively. During summer, the NDVI of alpine meadow areas significantly correlated to temperature, precipitation, and solar radiation, for which partial correlation coefficients were 0.35 ($P < 0.01$), 0.56 ($P < 0.01$), and -0.57 ($P < 0.01$), respectively. For the alpine steppe biome, we observed a significantly positive correlation between NDVI and temperature and precipitation during spring, with a higher partial correlation coefficient of 0.31 with precipitation ($P < 0.05$). Significant correlations were also observed between the NDVI and temperature, precipitation, and solar radiation during summer, with a higher partial correlation coefficient of 0.46 with precipitation ($P < 0.01$). Moreover, a significantly positive correlation between NDVI and solar radiation was observed during autumn. (4) Spatially, proportions of positive correlations between NDVI and temperature during spring and autumn in the alpine meadow biome were 76.50% and 67.86%, respectively, mainly distributed in areas within the Qilian Mountains and the Three Rivers Nature Reserve. Although 58.42% of alpine meadow areas exhibited positive correlations between NDVI and precipitation during summer, only 53.69% exhibited negative correlations between NDVI and solar radiation during autumn, both situated within the Qilian Mountains, headwaters of the Three Rivers Nature Reserve, and the Yarlung Zangbo River as well as the basins of its two tributaries. For the alpine steppe biome, proportions of positive correlations between NDVI and precipitation during spring and summer were 63.02% and 67.62%, respectively, primarily distributed within the western Tibet Autonomous Region and southern margin of the Qaidam Basin. This study provides a scientific basis for the protection of grassland resources and the management of plant-based carbon pools in alpine ecosystems, while also promoting a long-term increase in ecologically-based carbon sinks on the Qinghai-Tibetan Plateau.

Key Words: normalized difference vegetation index (NDVI); seasonality; alpine grassland; change trend; Qinghai-Tibetan Plateau

青藏高原平均海拔超过 4000m 以上,是全球海拔最高的独特自然地理单元,在我国以及亚洲地区水资源供应、气候稳定、生物多样性保护和碳平衡等方面发挥重要的生态安全屏障作用^[1-2]。20 世纪 80 年代以来,青藏高原气候显著变暖,其升温速率显著高于同期全球、北半球、北半球中纬度地区及中国平均升温速率,是全球变暖的“放大镜”^[3-4]。气候变暖导致青藏高原植被返青期整体提前,植被生产力增加,生态系统碳汇功能增强^[7-8]。青藏高原植被类型复杂多样,空间分布格局具有异质性,不同生态系统对全球变化的响应也具有高度空间异质性^[5]。因此,研究植被年际变化的季节差异,有利于阐明区域生态系统对全球变化响应的具体表现形式,对科学管理青藏高原草地资源具有重要意义。

青藏高原超过 70% 的区域覆盖草地,高寒草甸和高寒草原是其中分布最广、最典型的两种植被类型。目前,利用遥感手段监测两种草地植被变化及其气候驱动已取得一系列研究成果^[9-14],为我们深入理解区域生态系统响应全球变化奠定了基础。然而,现有成果多监测两种草地植被平均生长状况,对二者植被年际变化

的季节差异关注较少,涉及的研究也缺乏一致认识。例如,Duan 等^[11]证明高寒草甸春季归一化植被指数(NDVI)显著增加,夏季和秋季 NDVI 变化不明显,高寒草原春季 NDVI 变化不明显,而夏季和秋季 NDVI 显著增加;Zheng 等^[15]认为高寒草甸春季植被净初级生产力(NPP)显著增加,而夏季和秋季 NPP 无明显变化,高寒草原春、夏、秋季 NPP 均无明显变化;Pang 等^[16]发现高寒草甸春季和夏季 NDVI 变化不明显,而秋季 NDVI 则显著增加,高寒草原春季 NDVI 变化不明显,夏季和秋季 NDVI 显著增加。可见,高寒草甸和高寒草原植被演化的季节差异仍然不清楚,这将不利于青藏高原草地植被碳库的管理和调控^[17]。为此,本文利用全球库存建模和制图研究(GIMMS)第三代归一化植被指数(NDVI3g)遥感产品和气象数据,对比分析了 1982—2015 年青藏高原高寒草甸和高寒草原春、夏、秋季 NDVI 及气温、降水量和太阳辐射的时空变化差异特征,阐明了两种草地春、夏、秋季 NDVI 与气候因子的关系,揭示了两种草地 NDVI 时空演化季节间差异的气候驱动机制,以期为保护青藏高原草地资源、调节高寒生态系统碳平衡以及推动青藏高原长效生态增汇提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

高寒草甸和高寒草原属于典型的“高原地带性”植被^[18]。如图 1 所示,高寒草甸主体位于青藏高原东南部,面积约 $6.08 \times 10^5 \text{ km}^2$,而高寒草原主体位于青藏高原西北部,面积约 $5.86 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[13]。高寒草甸属于高寒半湿润半干旱气候,年平均气温低于 0°C ,年降水量平均在 450mm 左右。高寒草原是在严寒、干旱、多风及强烈太阳辐射气候条件下形成的,年均气温 $0\text{—}4.4^\circ\text{C}$,年均降水量 100—300mm^[20]。高寒草甸的土壤类型为高山草甸土(寒毡土),基本特征是表层为厚约 8—10cm 的死根和活根密集纠结而成的草皮层(Ac 层),其下为腐殖质层(A1),B 层发育不明显,C 层受基岩影响较大;高寒草原的土壤类型属高山草原土,成土母质为洪积物、湖积物、残坡积物和风积物等^[21]。高寒草甸以莎草科嵩草类为优势种,如高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、矮生嵩草(*Kobresia humilis*),伴生种为菊科风毛菊属(*Saussurea*)、蓼科蓼属(*Polygonum*)等。高寒草原优势种为禾本科针茅属(*Stipa*)和莎草科苔草属(*Carex*)等,伴生种有菊科蒿属(*Artemisia*)、豆科棘豆属(*Oxytropis*)等^[22]。

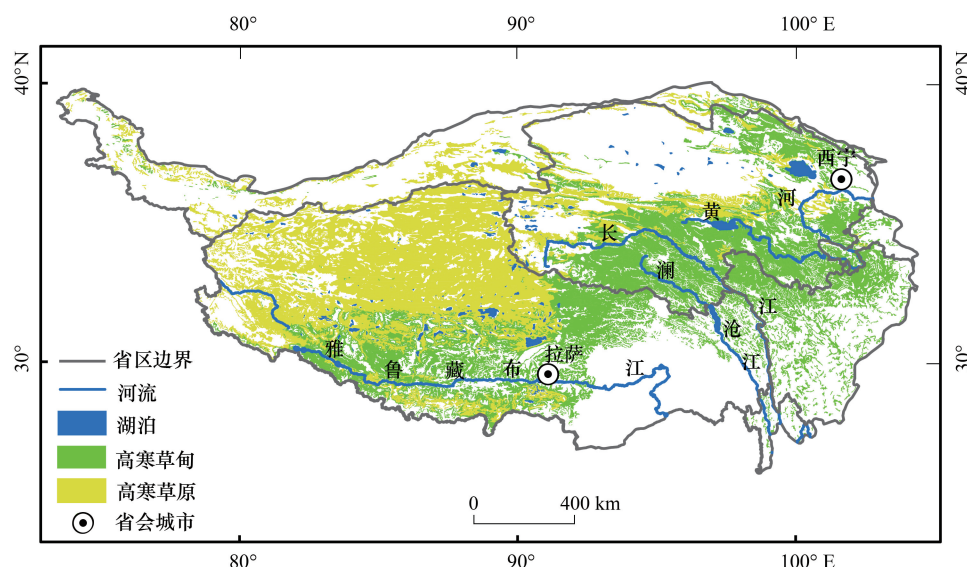


图 1 青藏高原高寒草甸和高寒草原空间分布^[19]

Fig.1 Spatial distribution of alpine meadow and alpine steppe in the Qinghai-Tibetan Plateau

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源及预处理

本研究采用的植被指标为 GIMMS NDVI3g 遥感产品,是由美国国家海洋和大气管理局系列气象卫星上的先进甚高分辨率辐射仪生成的。数据时间序列为 1982—2015 年,时间分辨率为 15d,空间分辨率为 $1/12^\circ \times 1/12^\circ$ ^[23]。该数据集已进行过各种处理,以达到减少噪音影响的目的,具体包括校准、轨道漂移、观察几何、火山爆发等^[24]。本产品旨在提高中高纬度地区图像质量,其反映的植被变化趋势更为平稳,更适合北半球植被活动研究^[16, 25]。为了进一步消除云、积雪和其他大气污染物对图像质量的影响,首先利用 ArcMap 10.5 对所有影像进行最大值合成,获取月尺度最大 NDVI 值^[26],然后通过矩阵实验室 (MATLAB) 中的时间序列滤波波 (TIMESAT) 软件包进行平滑滤波器 (Savitzky-Golay) 滤波处理^[27],对数据进行重构,提高数据质量。本研究中高寒草甸和高寒草原的春季均定义为 5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9 月^[16]。冬季为前一年 10 月至下一年 4 月,植被多处于休眠期,因此本研究未予考虑。

本文采用的气候数据为中国区域地面气象驱动数据集,来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/>)。该数据集提供了 1979—2018 年的气温、地表压力、比湿、风速、向下短波辐射、向下长波辐射和降水率 7 个近地表气象要素^[28],时间和空间分辨率为 3 小时和 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,本文仅采用 1982—2015 年的气温、降水和太阳辐射数据序列。

1.2.2 线性趋势分析

NDVI 时空变化趋势采用一元线性回归的方法分析。回归方程的变化速率代表年际变化的趋势,用普通最小二乘法求解,如下所示:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{SNDVI}_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n \text{SNDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中,变化速率 (Slope) 为季节 NDVI 的年际变化趋势, n 为模拟年数, SNDVI_i 为第 i 年的季节 NDVI 值。变化速率大于 0、小于 0 和等于 0 分别表示植被指数增加、下降和无变化^[29]。此步骤通过 MATLAB 软件完成。

1.2.3 偏相关分析

气候变化对不同季节植被生长的影响采用偏相关分析衡量。偏相关的计算采取主导因子与环境因子逐个分析^[30-31]。因子数量 3 个及 3 个以上。在分析 x 与 y 之间的净相关时,当控制了剩余变量集 z 的影响, x 和 y 之间的一阶偏相关系数定义为:

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} r_{yz}}{\sqrt{1 - r_{xz}^2} \sqrt{1 - r_{yz}^2}} \quad (2)$$

此步骤通过 MATLAB 完成。

1.2.4 显著性 T 检验

对不同季节 NDVI 与气候要素显著性偏向关检验,采用 t 统计量,定义为:

$$t = \frac{r_{xy \cdot z} \sqrt{n - q - 2}}{\sqrt{1 - r^2}} \quad (3)$$

式中, r 为相关系数, n 为样本数, q 为阶数,统计量 t 服从 $n - q - 2$ 个自由度的 t 分布。通过 t 值,计算出其所对应的概率 P 值。此步骤通过 MATLAB 完成。

2 结果与分析

2.1 NDVI 时空演变季节差异

由图 2 可知,整体上高寒草甸春、夏、秋三季 NDVI 均无明显变化,变化速率分别为 $0.0003/\text{a}$ ($P > 0.05$)、

$0.0002/a$ ($P>0.05$) 和 $-0.00002/a$ ($P>0.05$)。高寒草原春季和夏季的 NDVI 均显著增加,变化速率均为 $0.0002/a$ ($P<0.05$),而秋季 NDVI 变化趋势不明显,且变化速率为 $0.0001/a$ ($P>0.05$)。

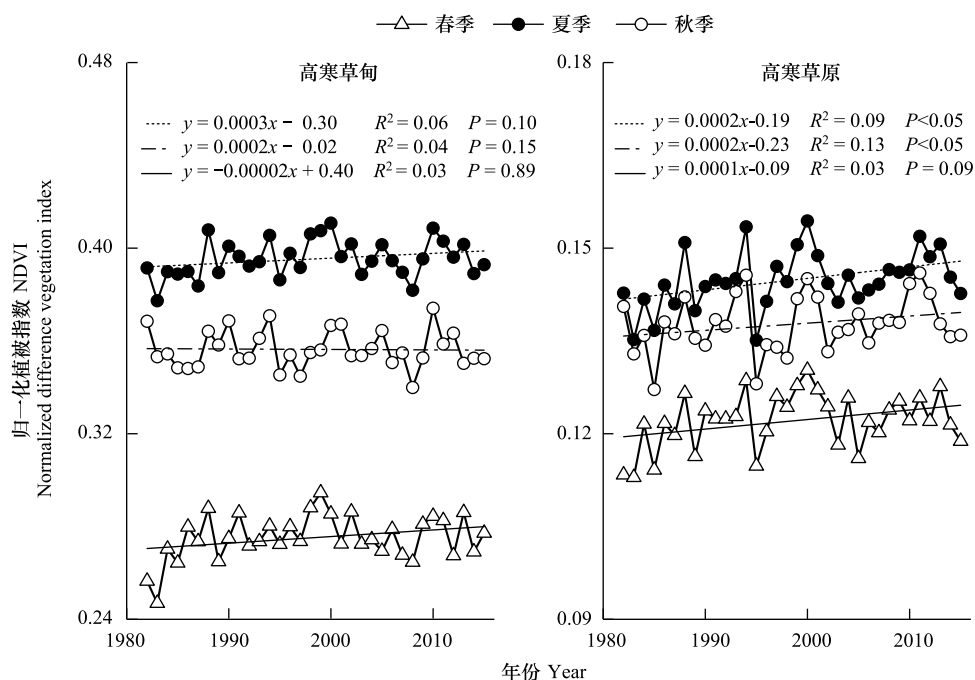


图2 1982—2015年青藏高原高寒草地春、夏、秋季归一化植被指数(NDVI)年际变化趋势

Fig.2 Interannual variations of NDVI in spring, summer, and autumn for alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan Plateau during 1982—2015

就高寒草甸而言,空间上 1982—2015 年春季 31.95% 的区域 NDVI 显著增加,主要分布在祁连山区和三江源地区,NDVI 显著下降的比例仅占 7.12%,集中分布于一江两河流域(图 3 和表 1);夏季 NDVI 显著增加的面积占比 32.12%,主要分布在祁连山区、三江源地区和一江两河流域;秋季 NDVI 显著增加的比例为 24.59%,集中分布于祁连山区和一江两河流域。就高寒草原而言,空间上春、夏、秋季 NDVI 显著增加的区域均集中分布于西藏自治区北部和柴达木盆地南缘地区,面积比例分别为 44.20%、43.09% 和 37.99%;春、夏、秋三季 NDVI 显著下降的面积占比均较少,集中分布在羌塘高原。

2.2 气候因子时空演变季节差异

从整体来看,高寒草甸春、夏、秋三季平均气温均显著增加 ($P<0.001$),且秋季平均气温增长速率最快,为 $0.07^{\circ}\text{C}/a$,其次为春季,变化速率为 $0.06^{\circ}\text{C}/a$,夏季平均气温增长速率最慢,为 $0.05^{\circ}\text{C}/a$ (表 2)。高寒草原春、夏、秋三季平均气温均无明显变化。两种草地地区春、夏、秋季平均降水量均显著增加,高寒草甸春季平均降水量增长速率为 $0.79\text{mm}/a$,是同期高寒草原地区平均降水量增加速率的两倍之多。平均太阳辐射在高寒草甸地区春季和夏季及高寒草原地区夏季均呈现显著下降趋势 ($P<0.01$),且夏季平均太阳辐射下降速率在高寒草原地区 ($-0.09\times 10^3\text{W m}^{-2}\text{a}^{-1}$, $P<0.01$) 大于高寒草甸地区 ($-0.08\times 10^3\text{W m}^{-2}\text{a}^{-1}$, $P<0.01$)。

由图 4 和表 1 可知,1982—2015 年空间上高寒草甸地区春、夏、秋季气温显著增加的面积分别占高寒草甸总面积的 79.76%、86.03% 和 92.53%,集中分布在祁连山区、三江源区和一江两河流域。高寒草甸地区春季和夏季降水量显著增加的面积占比分别为 41.45% 和 62.00%,主体区域位于三江源区和一江两河流域,秋季降水量显著增加的面积较少,仅占 19.76%。高寒草甸地区春季和夏季太阳辐射显著下降的区域亦集中于三江源区和一江两河流域,分别占 42.81% 和 55.74%。

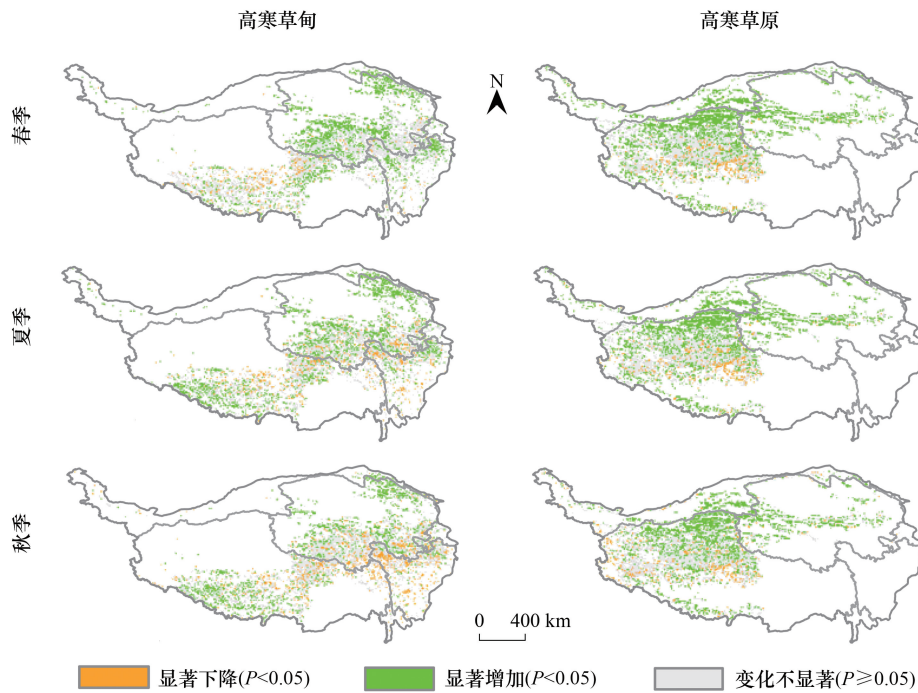


图 3 1982—2015 年青藏高原高寒草地春、夏、秋季 NDVI 显著变化空间格局

Fig.3 Spatial patterns of significantly change on NDVI in spring, summer, and autumn for alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan Plateau during 1982—2015

表 1 1982—2015 年青藏高原高寒草地春、夏、秋季 NDVI 和气候因子显著变化面积占比 ($P < 0.05$)

Table 1 Frequency of significant change of NDVI and climatic factors in spring, summer, and autumn for alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan Plateau during 1982—2015 ($P < 0.05$)

植被类型 Vegetation type	季相 Seasonal aspect	NDVI		气温 Temperature		降水量 Precipitation		太阳辐射 Solar radiation	
		显著 增加/%	显著 下降/%	显著 增加/%	显著 下降/%	显著 增加/%	显著 下降/%	显著 增加/%	显著 下降/%
高寒草甸 Alpine meadow	春季	31.95	7.12	79.76	0.71	41.45	1.64	3.98	42.81
	夏季	32.12	11.60	86.03	1.25	62.00	0.17	0.50	55.74
	秋季	24.59	16.26	92.53	0.77	19.76	5.97	16.12	13.36
高寒草原 Alpine steppe	春季	44.20	7.78	41.05	16.30	89.92	0.02	38.84	15.91
	夏季	43.09	7.67	52.89	21.10	90.17	0.44	1.72	48.43
	秋季	37.99	8.91	56.68	14.61	63.15	1.27	1.45	17.62

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

表 2 1982—2015 年青藏高原高寒草地春、夏、秋季气候因子年际变化速率

Table 2 Interannual change rate of climatic factors in spring, summer, and autumn for alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan Plateau during 1982—2015

植被类型 Vegetation type	季相 Seasonal aspect	气温 Temperature	降水量 Precipitation	太阳辐射 Solar radiation
		变化速率/($^{\circ}\text{C}/\text{a}$)	变化速率/(mm/a)	变化速率/($10^3 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)
高寒草甸 Alpine meadow	春季	0.06 ***	0.79 ***	-0.04 **
	夏季	0.05 ***	1.53 ***	-0.08 **
	秋季	0.07 ***	0.88 *	-0.01
高寒草原 Alpine steppe	春季	0.01	0.39 ***	0.03
	夏季	0.01	2.82 ***	-0.09 **
	秋季	0.01	1.46 ***	-0.02

“*”、“**”和“***”分别表示 0.05、0.01 和 0.001 水平上的显著性

空间上 1982—2015 年青藏高原高寒草原春、夏、秋季气温显著增加的区域主要位于羌塘高原(图 5 和表 1),分别占高寒草原总面积的 41.05%、52.89%和 56.68%,而春、夏、秋季高寒草原气温显著下降的面积占比

16.30%、21.10%和 14.61%,集中于青藏高原西北地区。89.92%和 90.17%的高寒草原地区春季和夏季降水量显著增加,主要发生于西藏自治区中部、北部和西北地区。研究时段内高寒草原夏季太阳辐射显著下降的面积比例为 48.43%,集中于阿里地区。

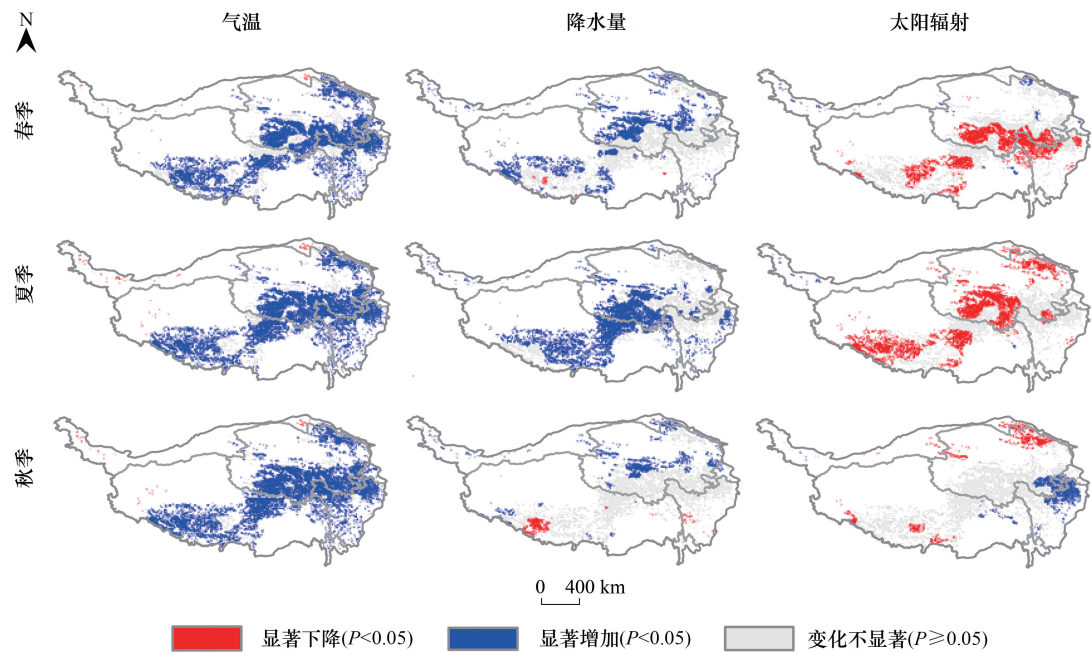


图 4 1982—2015 年青藏高原高寒草甸春、夏、秋季气候因子显著变化空间分布

Fig.4 Spatial distribution of significant change on climatic factors in spring, summer, and autumn for alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau during 1982—2015

2.3 不同季节 NDVI 与气候因子关系

1982—2015 年高寒草甸和高寒草原春、夏、秋三季气候因子对 NDVI 的影响呈现差异。由表 3 可知,就高寒草甸而言,春季和秋季 NDVI 均与气温显著正相关,偏相关系数达 0.41 ($P<0.05$) 和 0.23 ($P<0.05$);夏季 NDVI 与气温、降水量和太阳辐射均呈显著相关性,与降水量和太阳辐射偏相关系数绝对值更高,分别为 0.56 ($P<0.01$) 和 -0.57 ($P<0.01$)。就高寒草原而言,春季 NDVI 与气温和降水量均呈显著正相关,与降水量偏相关系数更高,为 0.31 ($P<0.05$);夏季 NDVI 与气温、降水量和太阳辐射均呈显著相关性,与降水量偏相关系数最高,为 0.46 ($P<0.01$),秋季 NDVI 与太阳辐射显著正相关,偏相关系数为 0.11 ($P<0.05$)。

表 3 1982—2015 年青藏高原高寒草地春、夏、秋季 NDVI 和气候因子偏相关

Table 3 The partial correlation coefficient between NDVI and climatic factors in spring, summer, and autumn for alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan Plateau during 1982—2015

植被类型 Vegetation type	季相 Seasonal aspect	NDVI-气温 NDVI-Temperature	NDVI-降水量 NDVI-Precipitation	NDVI-太阳辐射 NDVI-Solar radiation
高寒草甸 Alpine meadow	春季	0.41 *	0.24	-0.05
	夏季	0.35 **	0.56 **	-0.57 **
	秋季	0.23 *	0.03	-0.06
高寒草原 Alpine steppe	春季	0.18 *	0.31 *	0.09
	夏季	0.27 **	0.46 **	-0.31 *
	秋季	0.07	0.09	0.11 *

“*”和“**”分别表示 0.05 和 0.01 水平上的显著性

由图 6 和表 4 可以看出,空间上高寒草甸春、夏、秋季 NDVI 与气温呈正相关的像元分别占比为 76.50%、68.54%和 67.86%,绝大部分偏相关系数在 0—0.5 之间,集中于祁连山区和三江源区,且大部分区域呈现

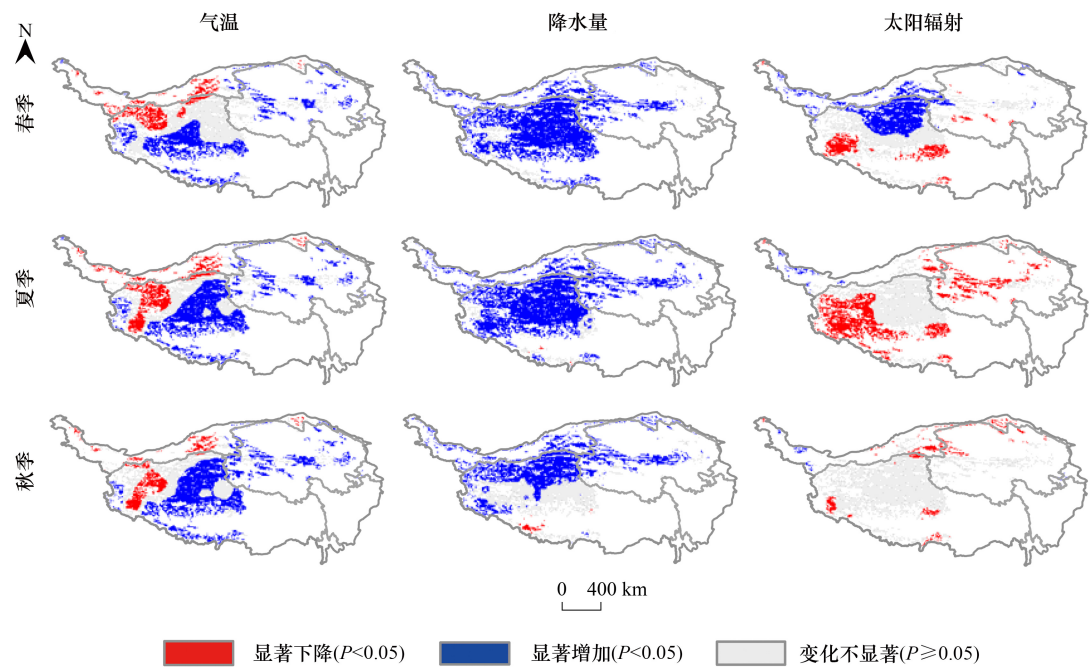


图 5 1982—2015 年青藏高原高寒草原春、夏、秋季气候因子显著变化空间分布

Fig.5 Spatial distribution of significant change on climatic factors in spring, summer, and autumn for alpine steppe in the Qinghai-Tibetan Plateau during 1982—2015

显著偏相关 ($P<0.05$)。高寒草甸夏季 NDVI 与降水量呈正相关的像元占比为 58.42%,与太阳辐射呈负相关的像元占比 53.69%,均集中分布于祁连山区、三江源区和一江两河流域,而青藏高原中东部、东部及东南地区夏季 NDVI 则与降水量呈负相关,与太阳辐射呈正相关;秋季 44.61%的高寒草甸区域 NDVI 与降水量呈负相关,与太阳辐射呈正相关面积占比 61.22%,主要分布于三江源区,但绝大部分相关性系数不显著。

表 4 1982—2015 年青藏高原高寒草地春、夏、秋季 NDVI 和气候因子偏相关系数等级占比

Table 4 Class frequency of partial correlation coefficient between NDVI and climatic factors in spring, summer, and autumn for alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan Plateau during 1982—2015

	季相 Seasonal aspect	高寒草甸 Alpine meadow				高寒草原 Alpine steppe			
		偏相关系数/%				偏相关系数/%			
		<-0.5	-0.5—0	0—0.5	>0.5	<-0.5	-0.5—0	0—0.5	>0.5
NDVI-气温	春季	0.05	23.45	70.32	6.18	0.13	40.11	58.24	1.52
NDVI-Temperature	夏季	1.12	30.35	61.62	6.92	0.60	36.33	61.06	2.01
	秋季	0.41	31.73	64.63	3.23	0.49	42.12	55.49	1.90
NDVI-降水量	春季	0.07	36.27	61.62	2.04	0.26	36.72	61.18	1.84
NDVI-Precipitation	夏季	0.17	41.41	56.63	1.79	0.14	32.24	64.74	2.88
	秋季	0.17	55.22	44.40	0.21	0.27	54.64	44.47	0.62
NDVI-太阳辐射	春季	0.12	53.40	46.23	0.25	0.05	39.00	59.58	1.37
NDVI-Solar radiation	夏季	1.24	52.45	46.12	0.19	0.96	68.30	30.64	0.10
	秋季	0.09	38.69	60.68	0.54	0.03	27.34	71.86	0.77

空间上 1982—2015 年 59.76%的高寒草原区域春季 NDVI 与气温呈正相关,主要分布在西藏自治区中北部、阿里地区及柴达木盆地外缘,偏相关系数在 -0.5—0 之间的像元占比 40.11%,集中于羌塘高原(图 7 和表 4);春季 NDVI 与降水量呈正相关的像元占比 63.02%,主要分布在西藏自治区北部和柴达木盆地南缘,且绝大部分像元偏相关系数呈现显著性特征,显著负相关的区域则集中于羌塘高原。夏季高寒草原 NDVI 与气

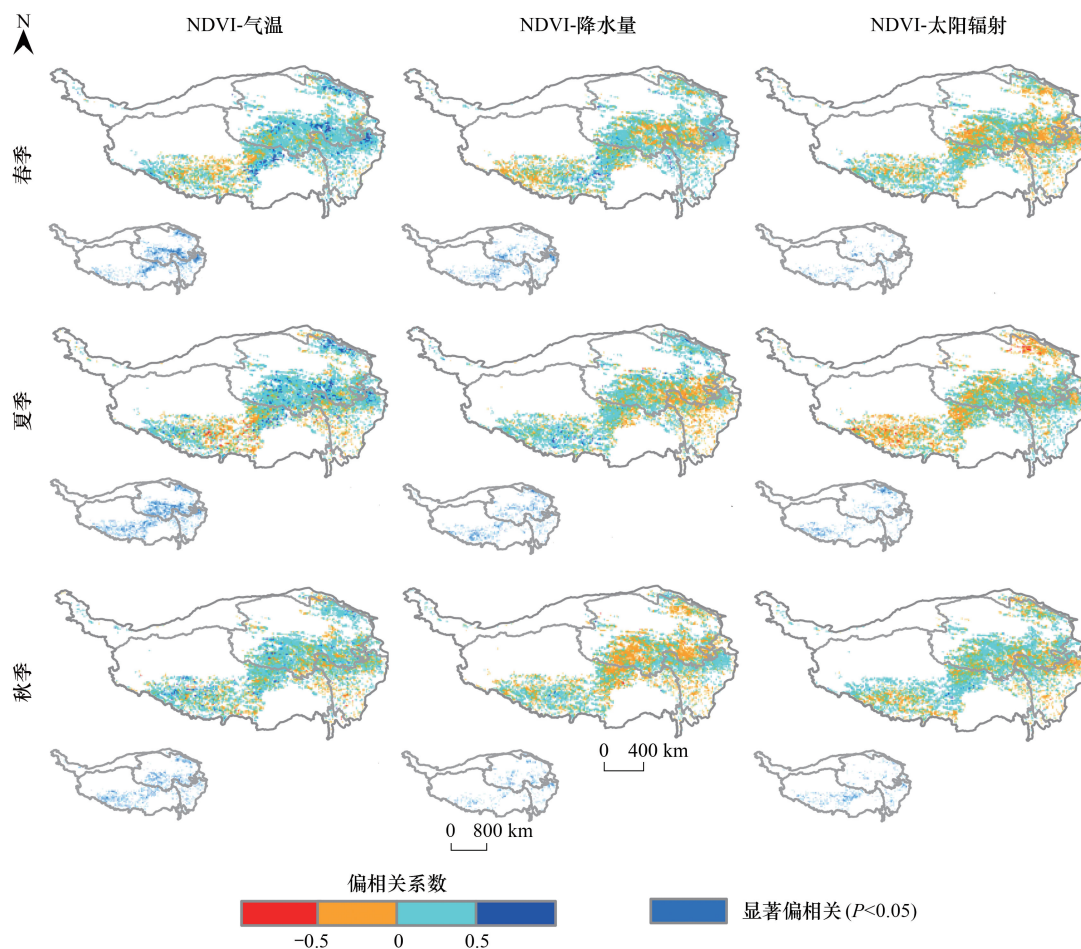


图 6 1982—2015 年青藏高原高寒草甸春、夏、秋季 NDVI 与气候因子空间偏相关

Fig.6 Spatial patterns of partial correlation coefficient between NDVI and climatic factors in spring, summer, and autumn for alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau during 1982—2015

图中左下角小图为显著性偏相关系数空间分布 ($P < 0.05$)

温和降水量呈正相关的像元分别占比 63.07% 和 67.62%, 主要分布在西藏自治区北部和柴达木盆地南缘, 与太阳辐射呈负相关的像元占比 69.26%, 主要分布于西藏自治区。秋季 72.63% 的高寒草原 NDVI 与太阳辐射呈正相关, 绝大部分偏相关系数在 0—0.5 之间, 显著正相关的区域集中分布于羌塘高原和阿里地区。

3 讨论

本研究证明 1982—2015 年青藏高原高寒草甸春、夏、秋季 NDVI 均无显著变化趋势, 而高寒草原春季和夏季 NDVI 显著增加, 这一结果与 Duan 等^[11] 和 Zheng 等^[15] 基于 MODIS 的研究结果存在分歧, 主要是由于数据源、研究期及对季节的定义不同所致^[32]。该结果与 Pang 等^[16] 基于相同数据源结论也不一致, 究其原因: 一是数据处理过程不同。Pang 等^[16] 去除了稀疏植被区域 NDVI 小于 0.1 的值, 而本研究并没有去掉这些值。小于 0.1 的 NDVI 值在高寒草甸区分布较少, 但在高寒草原区占比将近 30%, 大部分位于西藏自治区北部干旱区^[33], 研究期内这些地区降水显著增加(图 5), 缓解了干旱对生态系统的胁迫, 促进了植被生长, 其植被生长状况势必影响高寒草原植被整体变化趋势。二是研究时段差异。Pang 等^[16] 研究期为 1982—2012 年, 本研究期为 1982—2015 年。2012 年以后高寒草甸和高寒草原气候发生极大的变化, 生态系统面临严重的干旱胁迫^[13], 尤其是 2015 年生长季降水量大幅下降, 达 2000 年以来最低值^[11], 从而影响植被生长。其中的理论基础是: 一方面, 气温上升引发地表蒸散发增强, 土壤水分亏缺, 另一方面青藏高原高寒草甸和草原地区下伏大

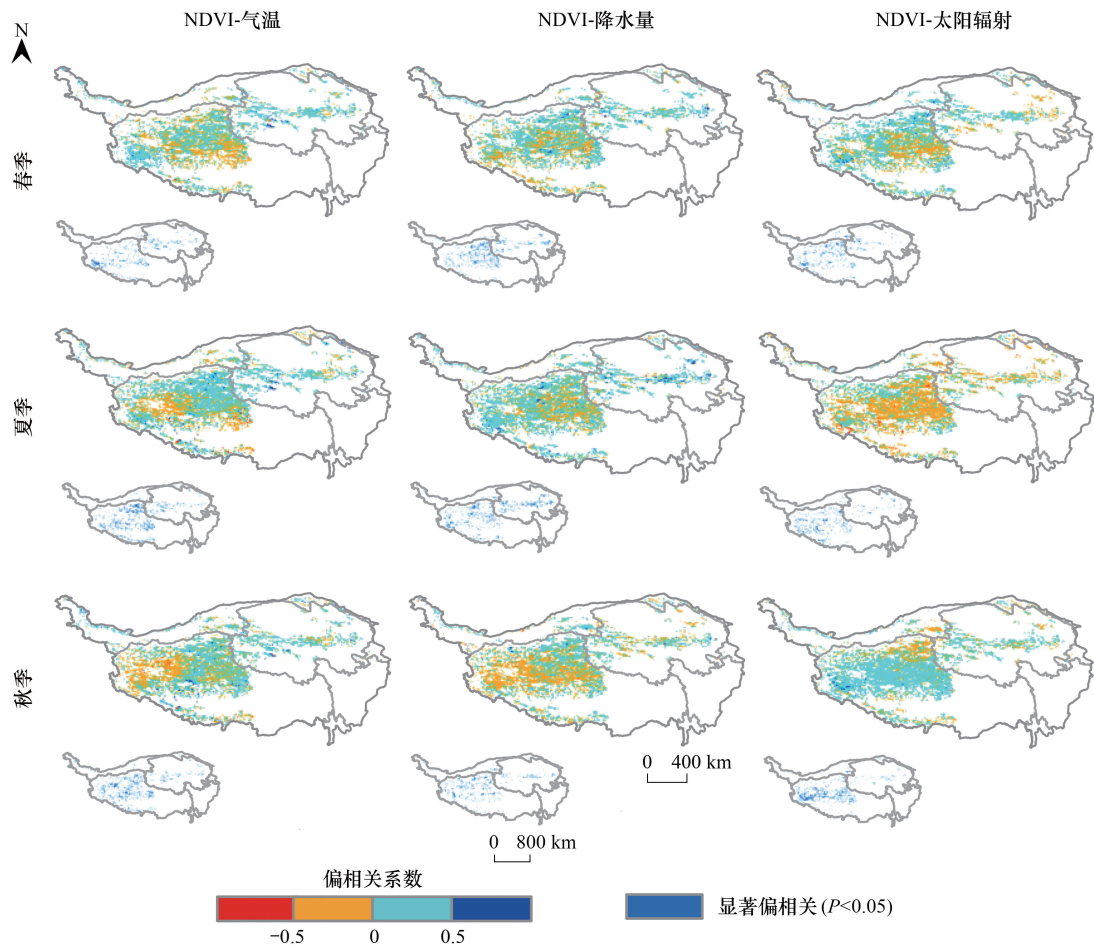


图 7 1982—2015 年青藏高原高寒草原春、夏、秋季 NDVI 与气候因子空间偏相关

Fig.7 Spatial patterns of partial correlation coefficient between NDVI and climatic factors in spring, summer, and autumn for alpine steppe in the Qinghai-Tibetan Plateau during 1982—2015

图中左下角小图为显著性偏相关系数空间分布 ($P < 0.05$)

面积多年冻土^[13],气候变暖导致多年冻土温度上升^[34],冻土活动层增厚,多年冻土退化^[35],土壤表层水分向深层迁移,造成表层土壤干旱,严重影响短根系植被生长^[36]。类似现象前人也曾报道,例如,同样基于 MODIS 数据源,2001—2011 年与 2001—2013 年青藏高原高寒草原地区 NPP 变化趋势不一致^[37—38]。

本研究证明高寒草甸和高寒草原植被生长主控气候因子随季节发生转变。针对高寒草甸而言,春季植被活动主要受到温度控制,春季气温升高通过影响养分有效性及吸收,刺激了冬季寒冷环境下的光合酶活性,从而促进了植被的生长^[39—40];夏季降水和太阳辐射成为植被生长的主控因子,这是由于夏季随着气温升高,植物蒸腾和地表蒸散发作用增强,极易造成表层土壤干旱,这将不利于高寒草甸建群种嵩草类植物生长。嵩草类植物多为横向根系,分布浅,约 57.31%集中于 0—10cm 土层^[21],且根系构建盘根错节、纠结缠绕并形成草毡层,对表层土壤水分响应极为敏感^[33]。夏季降水增加和太阳辐射减少缓解了表层土壤干旱,促进了高寒草甸植被生长^[13, 32];秋季植被生长的气候主控因子转变为温度,这是因为秋季叶片衰老主要受累积温度的低温阈值调节^[41],气温变化改变了高寒草甸秋季物候^[42]。针对高寒草原而言,春夏两季植被生长的主控气候因子主要是降水,因为在干旱和半干旱生境,水分是植被生长的主要限制性因子^[43],降水增加导致土壤环境更加湿润,反过来又会增强养分的有效性^[44];而秋季植被生长主要受太阳辐射影响,这是因为更多的光照可以促进植物的光合作用。

4 结论

(1) 高寒草甸春、夏、秋季 NDVI 整体均无明显变化趋势,高寒草原春季和夏季 NDVI 均显著增加,变化速率均为 $0.0002/a$ ($P < 0.05$),而秋季 NDVI 变化趋势不明显。

(2) 空间上高寒草甸春季 NDVI 显著增加面积占比 31.95%,集中分布在祁连山区和三江源区,夏季 NDVI 显著增加的面积占比 32.12%,主要分布在祁连山区、三江源地区和一江两河流域;秋季 NDVI 显著增加的比例为 24.59%,集中分布于祁连山区和一江两河流域。高寒草原春、夏、秋季 NDVI 显著增加的区域均集中分布于西藏自治区北部和柴达木盆地南缘地区,分别占比 44.20%、43.09% 和 37.99%。

(3) 高寒草甸春秋两季植被生长主要受气温控制,夏季植被主要受降水量和太阳辐射影响;高寒草原春夏两季植被生长主要受降水量影响,秋季植被生长主要受太阳辐射控制。

(4) 高寒草甸春季 NDVI 与气温呈正相关的像元占比为 76.50%,集中于祁连山区和三江源区,夏季 NDVI 与降水量呈正相关的像元占比为 58.42%,与太阳辐射呈负相关的像元占比 53.69%,集中分布于祁连山区、三江源区和一江两河流域。高寒草原春季和夏季 NDVI 与降水量呈正相关的像元分别占比 63.02% 和 67.62%,主要分布在西藏自治区西部和柴达木盆地南缘。

参考文献 (References):

- [1] 徐祥德,董李丽,赵阳,王寅钧. 青藏高原“亚洲水塔”效应和大气水分循环特征. 科学通报, 2019, 64(27): 2830-2841.
- [2] Yao T D. Tackling on environmental changes in Tibetan Plateau with focus on water, ecosystem and adaptation. Science Bulletin, 2019, 64(7): 417.
- [3] Yan Y P, You Q L, Wu F Y, Pepin N, Kang S C. Surface mean temperature from the observational stations and multiple reanalyses over the Tibetan Plateau. Climate Dynamics, 2020, 55(9/10): 2405-2419.
- [4] 游庆龙,康世昌,李剑东,陈德亮,翟盘茂,吉振明. 青藏高原气候变化若干前沿科学问题. 冰川冻土, 2021, 43(3): 885-901.
- [5] 朴世龙,张宪洲,汪涛,梁尔源,汪诗平,朱军涛,牛犇. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈. 科学通报, 2019, 64(27): 2842-2855.
- [6] Cai W X, He N P, Li M X, Xu L, Wang L Z, Zhu J H, Zeng N, Yan P, Si G X, Zhang X Q, Cen X Y, Yu G R, Sun O J. Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060: spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies. Science Bulletin, 2021
- [7] Piao S L, Liu Q, Chen A P, Janssens I A, Fu Y S, Dai J H, Liu L L, Lian X, Shen M G, Zhu X L. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. Global Change Biology, 2019, 25(6): 1922-1940.
- [8] Bai H M, Li L, Wu Y P, Feng G L, Gong Z Q, Sun G Q. Identifying critical meteorological elements for vegetation coverage change in China. Frontiers in Physics, 2022, 10: 834094.
- [9] Shen Z X, Fu G, Yu C Q, Sun W, Zhang X Z. Relationship between the growing season maximum enhanced vegetation index and climatic factors on the Tibetan Plateau. Remote Sensing, 2014, 6(8): 6765-6789.
- [10] Wang S H, Sun W, Li S W, Shen Z X, Fu G. Interannual variation of the growing season maximum normalized difference vegetation index, MNDVI, and its relationship with climatic factors on the Tibetan Plateau. Polish Journal of Ecology, 2015, 63(3): 424-439.
- [11] Duan H C, Xue X, Wang T, Kang W P, Liao J, Liu S L. Spatial and temporal differences in alpine meadow, alpine steppe and all vegetation of the Qinghai-Tibetan Plateau and their responses to climate change. Remote Sensing, 2021, 13(4): 669.
- [12] Sun J, Qin X J, Yang J. The response of vegetation dynamics of the different alpine grassland types to temperature and precipitation on the Tibetan Plateau. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 188(1): 1-11.
- [13] Hao A H, Duan H C, Wang X F, Zhao G H, You Q G, Peng F, Du H Q, Liu F Y, Li C Y, Lai C M, Xue X. Different response of alpine meadow and alpine steppe to climatic and anthropogenic disturbance on the Qinghai-Tibetan Plateau. Global Ecology and Conservation, 2021, 27: e01512.
- [14] 梁大林,唐海萍. 青藏高原两种高寒草地植被变化及其水温驱动因素分析. 生态学报, 2022, 42(1): 287-300.
- [15] Zheng Z T, Zhu W Q, Zhang Y J. Seasonally and spatially varied controls of climatic factors on net primary productivity in alpine grasslands on the Tibetan Plateau. Global Ecology and Conservation, 2020, 21: e00814.
- [16] Pang G J, Wang X J, Yang M X. Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibetan Plateau from 1982 to 2012. Quaternary International, 2017, 444: 87-96.
- [17] 刘凤,曾永年. 2000—2015 年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化. 生态学报, 2021, 41(14): 5792-5803.
- [18] 张新时. 西藏植被的高原地带性. Journal of Integrative Plant Biology, 1978, 20(2): 140-149.

- [19] 侯学煜主编 中国科学院中国植被图编辑委员会编纂. 1: 1000000 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001.
- [20] 周兴民. 青藏高原高寒草原的概述及其与欧亚草原区的关系. 中国草原, 1980, 2(4): 1-6.
- [21] 郑度, 赵东升. 青藏高原的自然环境特征. 科技导报, 2017, 35(6): 13-22.
- [22] 郝爱华, 薛炯, 彭飞, 尤全刚, 廖杰, 段翰晨, 黄翠华, 董斯扬. 青藏高原典型草地植被退化与土壤退化研究. 生态学报, 2020, 40(3): 964-975.
- [23] Pinzon J, Tucker C. A non-stationary 1981-2012 AVHRR NDVI_{3g} time series. Remote Sensing, 2014, 6(8): 6929-6960.
- [24] Wang S Y, Zhang B, Yang Q C, Chen G S, Yang B J, Lu L L, Shen M, Peng Y Y. Responses of net primary productivity to phenological dynamics in the Tibetan Plateau, China. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232: 235-246.
- [25] Zhu Z C, Bi J, Pan Y Z, Ganguly S, Anav A, Xu L, Samanta A, Piao S L, Nemani R, Myneni R. Global data sets of vegetation leaf area index (LAI)_{3g} and fraction of photosynthetically active radiation (FPAR)_{3g} derived from global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) normalized difference vegetation index (NDVI_{3g}) for the period 1981 to 2011. Remote Sensing, 2013, 5(2): 927-948.
- [26] HOLBEN B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [27] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. Computers & Geosciences, 2004, 30(8): 833-845.
- [28] 阳坤, 何杰. 中国区域地面气象要素驱动数据集(1979-2018). 国家青藏高原科学数据中心, 2019.
- [29] Zhang L X, Fan J W, Zhou D C, Zhang H Y. Ecological protection and restoration program reduced grazing pressure in the three-river headwaters region, China. Rangeland Ecology & Management, 2017, 70(5): 540-548.
- [30] Lauritzen S L, Whittaker J. Graphical models in applied multivariate statistics. Journal of the American Statistical Association, 1992, 87(417): 251.
- [31] Marrelec G, Krainik A, Duffau H, Péligrini-Issac M, Lehericy S, Doyon J, Benali H. Partial correlation for functional brain interactivity investigation in functional MRI. NeuroImage, 2006, 32(1): 228-237.
- [32] Li L H, Zhang Y L, Liu L S, Wu J S, Li S C, Zhang H Y, Zhang B H, Ding M J, Wang Z F, Paudel B. Current challenges in distinguishing climatic and anthropogenic contributions to alpine grassland variation on the Tibetan Plateau. Ecology and Evolution, 2018, 8(11): 5949-5963.
- [33] 郝爱华. 青藏高原典型草地对气候变化的差异响应及其机理[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [34] Wu Q B, Zhang T J. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, 113(D13): D13108.
- [35] Wu Q B, Hou Y D, Yun H B, Liu Y Z. Changes in active-layer thickness and near-surface permafrost between 2002 and 2012 in alpine ecosystems, Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China. Global and Planetary Change, 2015, 124: 149-155.
- [36] Xue X, Xu M H, You Q G, Peng F. Influence of experimental warming on heat and water fluxes of alpine meadows in the Qinghai-Tibet plateau. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2014, 46(2): 441-458.
- [37] Chen B X, Zhang X Z, Tao J, Wu J S, Wang J S, Shi P L, Zhang Y J, Yu C Q. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189/190: 11-18.
- [38] Wang Z Q, Zhang Y Z, Yang Y, Zhou W, Gang C C, Zhang Y, Li J L, An R, Wang K, Odeh I, Qi J G. Quantitative assess the driving forces on the grassland degradation in the Qinghai-Tibet Plateau, in China. Ecological Informatics, 2016, 33: 32-44.
- [39] Shen X J, Xue Z S, Jiang M, Lu X G. Spatiotemporal change of vegetation coverage and its relationship with climate change in freshwater marshes of northeast China. Wetlands, 2019, 39(3): 429-439.
- [40] Cristiano P, Madanes N, Campanello P, di Francescantonio D, Rodríguez S, Zhang Y J, Carrasco L, Goldstein G. High NDVI and potential canopy photosynthesis of south American subtropical forests despite seasonal changes in leaf area index and air temperature. Forests, 2014, 5(2): 287-308.
- [41] Jeong S J, Ho C H, Gim H J, Brown M E. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2385-2399.
- [42] Che M L, Chen B Z, Innes J L, Wang G Y, Dou X M, Zhou T M, Zhang H F, Yan J W, Xu G, Zhao H W. Spatial and temporal variations in the end date of the vegetation growing season throughout the Qinghai-Tibetan Plateau from 1982 to 2011. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189/190: 81-90.
- [43] Jiang L L, Guli · Jiapaer, Bao A M, Guo H, Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. Science of the Total Environment, 2017, 599/600: 967-980.
- [44] Guo W C, Liu H Y, Wu X C. Vegetation greening despite weakening coupling between vegetation growth and temperature over the boreal region. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(8): 2376-2387.