

DOI: 10.5846/stxb202210132905

陈甲豪, 吴凯, 胡中民, 杨涵. 2000—2021 年青藏高原生长季植被敏感性的时空变异. 生态学报, 2023, 43(10): 4054–4065.

Chen J H, Wu K, Hu Z M, Yang H. Spatio-temporal variability of vegetation sensitivity on the Qinghai-Tibet Plateau during the growing season from 2000 to 2021. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4054–4065.

2000—2021 年青藏高原生长季植被敏感性的时空变异

陈甲豪, 吴 凯*, 胡中民, 杨 涵

海南大学生态与环境学院, 海口 570228

摘要:为揭示青藏高原陆地生态系统对气候变化敏感性的时空变异性, 基于植被敏感性指数 (Vegetation Sensitivity Index, VSI), 使用 2000—2021 年青藏高原 6—8 月生长季 MODIS EVI 和 ERA5 再分析资料的温度、降水和太阳辐射数据, 首先探究了 22 年里青藏高原陆地生态系统敏感性的空间变异性及其主要气候驱动因素, 其次探究了青藏高原 VSI 在 P_1 (2000—2006 年)、 P_2 (2007—2013 年) 和 P_3 (2014—2021 年) 时期内 VSI 的时间变异性, 研究表明: (1) 2000—2021 年青藏高原生长季 VSI 的空间异质性较强, 其中东南部灌木和森林的 VSI 较高, 而西北部高山荒漠、高山草原和高山草甸的 VSI 较低; (2) 22 年里温度、降水和太阳辐射分别主导着青藏高原 55.89%、19.24% 和 24.87% 地区的 VSI 变化, 其中温度主导着东南部灌木和森林的 VSI, 降水主导着东北大部分地区高山草甸的 VSI, 而太阳辐射主导着西南大部分地区高山草原的 VSI。时间变异性结果表明: (3) P_1 — P_3 时期内青藏高原 18.39% 像元内的 VSI 持续增加而 10.09% 像元内的 VSI 持续减少。高山荒漠、高山草原和高山草甸的 VSI 在 P_1 — P_2 时期基本不变而在 P_2 — P_3 时期呈现上升态势, 与之相比, 灌木和森林的 VSI 呈先增长后下降的态势; (4) 3 个时期内主导青藏高原 VSI 变化的气候变量具有较强的时空异质性, 其中温度为主导因子的像元数量在 P_1 — P_2 时期基本一致而在 P_3 时期明显减少, 其占比分别为 P_1 (58.15%), P_2 (61.34%) 和 P_3 (49.47%), 降水为主导因子的像元数量在 P_1 (18.57%) 和 P_2 (18.47%) 时期内基本不变但在 P_3 (26.64%) 时期内明显增加, 与温度和降水相比, 以辐射为主导因子的像元数在 3 个时期内基本不变。总体而言, 青藏高原高山草原和高山草甸生态系统对气候变化的响应呈增加态势, 在青藏高原气候多变的背景下, 草地生态系统可能存在退化的风险。研究旨在为全球气候变化背景下青藏高原生态系统敏感性的动态评估提供参考。

关键词: 青藏高原; 生长季植被; 敏感性; 时空变异性

Spatio-temporal variability of vegetation sensitivity on the Qinghai-Tibet Plateau during the growing season from 2000 to 2021

CHEN Jiahao, WU Kai*, HU Zhongmin, YANG Han

College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China

Abstract: To reveal the spatiotemporal variability of terrestrial ecosystem sensitivity on the Qinghai-Tibet Plateau, the spatial distribution of the ecosystem sensitivity and the climate factors to dominate vegetation growth on the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2021 were explored. To this end, Vegetation Sensitivity Index (VSI) was applied to the MODIS EVI and ERA5 reanalysis data including temperature, precipitation, and solar radiation. The timeframe of this study was restricted to the growing season with months from June to August. Moreover, the temporal variability of VSI was investigated for the period of P_1 (2000—2006), P_2 (2007—2013), and P_3 (2014—2021), respectively. Results indicate that: (1) the spatial heterogeneity of VSI in growing season was strong on the QTP from 2000 to 2021. High VSI values were observed in shrubs and forests located in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau. By contrast, low VSI values were found in alpine

基金项目: 海南大学科研启动基金项目 (KYQD(ZR)-22084); 海南省重点研发计划项目 (ZDYF2022SHFZ042); 第二次青藏高原综合科学考察项目 (2019QZKK0405); 海南省自然科学基金资助 (623RC447)

收稿日期: 2022-10-13; **采用日期:** 2022-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kaiwu@hainanu.edu.cn

deserts, alpine grasslands, and alpine meadows grown in the northwestern Qinghai-Tibet Plateau. (2) During the whole investigation period, temperature, precipitation, and solar radiation dominated the VSI variation in 55.89%, 19.24%, and 24.87% of the Qinghai-Tibet Plateau, respectively. Specifically, temperature dominated the VSI of shrubs and forests in the southeast Qinghai-Tibet Plateau and precipitation controlled the VSI in most alpine meadows of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau. Solar radiation regulated the VSI in most of alpine grasslands distributed in the southwestern Qinghai-Tibet Plateau. Temporal variability results show that: (3) During the periods of P_1 , P_2 , and P_3 , the VSI increased and decreased continuously in 18.39% and 10.09% pixels, respectively. The VSI of alpine desert, alpine grassland, and alpine meadow remained unchanged during the P_1 — P_2 period while showed an increasing trend during the P_2 — P_3 period. By contrast, the VSI of shrubs and forests displayed an increasing (P_1 — P_2) and then a decreasing (P_2 — P_3) trend. (4) A strong spatiotemporal heterogeneity of the VSI on the Qinghai-Tibet Plateau was observed in the three periods. The proportion of pixels where temperature dominated the vegetation growth in the three periods had a slight change during P_1 — P_2 but was reduced in P_3 , corresponding proportion values were P_1 (58.15%), P_2 (61.34%), and P_3 (49.47%), respectively. Conversely, the proportion of pixels that precipitation played a dominate role increased from 18.57% (P_1) and 18.47% (P_2) to 26.64% (P_3). For solar radiation, the associated proportion values had a small fluctuation during the three periods. Overall, the responses of alpine grassland and alpine meadow ecosystems to climate change on the Qinghai-Tibet Plateau were increasing. The risk of grassland degradation on the Qinghai-Tibet Plateau might exacerbate due to the climate change with a large variability on the Qinghai-Tibet Plateau. This study aims to provide a reference for the dynamic assessment of ecosystem sensitivity on the Qinghai-Tibet Plateau in the context of global climate change.

Key Words: Qinghai-Tibet Plateau; vegetation in growing season; sensitivity; spatiotemporal variability

青藏高原是全球平均海拔最高、面积最大的高原,素有“世界屋脊”和“地球第三极”之称^[1]。卫星遥感已经观察到自 20 世纪 80 年代以来青藏高原植被有持续绿化的趋势^[2],植被控制着青藏高原生态系统中的能量、水热以及碳循环,对全球气候产生反馈作用^[3-4]。然而,气候的持续变化使得青藏高原植被经受更多的外部扰动,最近研究显示接近临界阈值的系统对外部扰动的反应更敏感,青藏高原作为亚洲乃至北半球气候变化的“放大器”^[5],全球气候变暖可能会对其脆弱生态系统的结构和功能产生深远的影响,因此量化青藏高原生态系统对气候响应的敏感性具有重要意义。

近年来,生态系统敏感性已成为气候变化领域的研究热点,对于如何定量研究植被的气候敏感性,学者们提出了不同的方法,如使用数学模型^[6-10]或通过构建敏感性指标^[11-13]来评估生态系统敏感性,目前相关研究结果显示敏感性在区域尺度以及不同植物群落类型之间具有高度空间异质性。然而以往对植被生态系统敏感性研究多集中在植被对平均气候的变化响应,而不是气候变量的方差^[14],最近有学者提出了一种综合性植被敏感性指数 (Vegetation Sensitivity Index, VSI)^[15],基于遥感植被指数和气候变量数据,可量化植被生产力对 3 个气候变量(气温,水分可利用性和光照)变化的响应,VSI 已成为评估生态系统敏感性的一种有效方法,已被应用在评估中亚^[16]、中国^[8]和内蒙古^[17]等地区陆地生态系统的敏感性。

目前已经有学者基于 VSI 探究了青藏高原生态系统对气候变化的敏感性,研究发现青藏高原的敏感性存在空间异质性^[18-19],且在不同生态系统间也存在差异,高寒草地对温度和辐射的响应更敏感,并且随着海拔梯度的增加而增加^[20]。还有研究显示放牧等人类活动与 VSI 显著相关,指出未来对生态系统敏感性的评估不应忽视人为干扰^[21]。然而,上述关于青藏高原敏感性的研究多集中于 VSI 的空间分布,虽然已经有研究在季节尺度^[22]分析了生态系统敏感性,但目前针对青藏高原 VSI 时间变异性方面的研究仍十分稀少,而 VSI 的动态变化研究可以帮助人们更好地理解在气候变暖背景下植被敏感性的时间变化情况。

因此,本研究基于 VSI 指标,使用 2000—2021 年青藏高原生长季植被和气候变量时间序列数据,首先探究了 22 年里青藏高原生态系统敏感性的空间格局及其气候驱动因素。其次将 2000—2021 年划分为 3 个时

期:2000—2006 年、2007—2013 年以及 2014—2021 年,以此探究青藏高原 VSI 的时间动态变化,并使用地表覆盖数据揭示了青藏高原不同时期内各植被类型的 VSI 差异。本研究有助于理解青藏高原生态系统敏感性的时空变化,并为青藏高原生态系统敏感性的动态评估提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文研究区为青藏高原,地理位置界于北纬 $26^{\circ}00'—39^{\circ}47'$,东经 $73^{\circ}19'—104^{\circ}47'$ 之间,占全国总面积的 23%,平均海拔超过 4000m^[23]。冬季漫长而夏季多雨是青藏高原的气候特点。全球气候变暖使得高原寒带和亚寒带北移、温带区扩大。青藏高原 60% 以上的面积被高山荒漠草原、高山草原和高山草甸覆盖(图 1),其它植被类型包括耕地、灌木、针叶林和阔叶林。近些年来青藏高原生态系统总体趋向于变好,而局部变差。

1.2 数据来源及预处理

植被指数是反映地表植被生长和覆盖、生物量大小和植被种类的间接指标,为了评估青藏高原植被对气候变化的响应,我们使用了 MOD13C1 植被指数产品(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/>)。该数据集提供全球增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)数据,空间分辨率为 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$,时间分辨率为 15 d。本文对 2000—2021 年青藏高原 EVI 逐半月数据采用最大值合成法(Maximum Value Composites, MVC)获取月尺度的 EVI 数据,MVC 可以减少云覆盖、大气、太阳高度角等因素的影响。青藏高原的生长季较短且生长季开始和结束时间不断发生变化^[24],研究中的时间段选择了 6—8 月,同时剔除了 EVI 小于 0.05 或温度小于 0°C 的数据,以此确定青藏高原植被生长季。

ERA5 是第五代欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)大气再分析全球气候数据集,具有时间范围跨度长、时空分辨率高的优点。本文选取 2000—2021 年 2 m 大气温度、降水和太阳短波辐射数据,以青藏高原 EVI 为参照使用最邻近值法将 3 个气候变量重采样至 EVI 空间网格。

地表覆盖类型数据来源于科学数据银行(<https://www.scidb.cn/>),青藏高原高山草原地图^[25]是利用 2010 年 MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer,中分辨率成像光谱仪)影像制作的,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 8 d。该数据集从归一化植被指数时间序列中提取高山草原的物候指标,使用支持向量机和多步骤分类算法对高山草甸、高山草原和高山荒漠进行分类。实验中将其重采样至 EVI 空间网格,过程如下:逐像元统计位于 EVI 网格内地表覆盖类型像元的数量和对应的类型,选取出现频率最大的类型赋值给对应 EVI 网格,得到重采样后研究区的地表覆盖类型(图 1)。实验中仅考虑植被区域,因此下面分析中仅考虑了高山荒漠、高山草原、高山草甸、耕地、灌木丛、针叶林和阔叶林这七种植被类型。

1.3 研究方法

VSI 是 Seddon 等^[15]于 2016 年提出的一种新的综合性指标,用于定量评估生态系统对气候变化的相对响应程度,揭示对气候变化响应敏感的区域分布。VSI 是通过气候权重和气候敏感性进行计算的,在月尺度上探究了植被生产力对 3 个气候变量(气温,水的可用性和太阳辐射)的响应。在去除 EVI 和气候变量的季节性趋势并标准化(Z 分数)后,敏感性是由 EVI 与 3 个气候变量方差的比值确定的,而权重是通过多元线性回归系数量化的,同时回归分析中考虑了植被的记忆效应,将一个月滞后的 EVI 时序数据作为第四个变量。由于 3 个气候要素间存在互相关关系,使用主成分分析法筛选

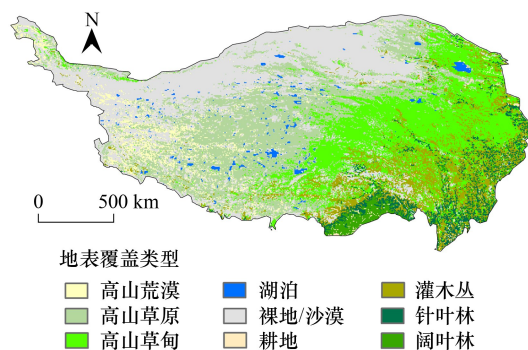


图 1 青藏高原地表覆盖类型

Fig.1 Land cover types of the Qinghai-Tibet Plateau

了累计贡献度>95%的主成分,将其作为自变量与 EVI 数据放入多元线性回归模型中进行分析,其中仅考虑了显著的回归系数($P < 0.05$),以此消除气候变量间的共线性问题,最后根据得分系数矩阵将各主成分返回到原 3 个气候变量。关键公式如下:

$$EVI_t = \alpha \times TEM_t + \beta \times PRE_t + \gamma \times SSD_t + \delta \times EVI_{t-1} + \varepsilon \quad (1)$$

式中, EVI_t 、 TEM_t 、 PRE_t 和 SSD_t 是去趋势并标准化后的 EVI、温度、降水和太阳辐射时间序列, EVI_{t-1} 是滞后一个月的 EVI 时间序列, α 、 β 、 γ 和 δ 分别是 TEM_t 、 PRE_t 、 SSD_t 和 EVI_{t-1} 的回归系数, ε 是残差。根据 α 、 β 、 γ 的绝对值占三者总和的比例得到计算 VSI 时各气候变量的权重大小。

气候敏感性定义为去趋势后的 EVI 方差与每个气候变量方差比值,并进一步通过对数函数处理得到的,将 3 个气候敏感性乘以对应权重并求和得到 VSI,并将其数值归一化至 1—100, VSI 数值越大,表示植被对气候变化的响应越敏感。公式如下:

$$VSI = TEM_{\alpha} \times TEM_{sens} + PRE_{\beta} \times PRE_{sens} + SSD_{\gamma} \times SSD_{sens} \quad (2)$$

式中, TEM_{α} 、 PRE_{β} 和 SSD_{γ} 分别为温度、降水和太阳辐射的气候权重,来自公式(1), TEM_{sens} 、 PRE_{sens} 和 SSD_{sens} 是 EVI 对每个气候变量的敏感性,即方差比值。

为了探究青藏高原 EVI 对气温、降雨和太阳辐射敏感性的年内变化,基于以往关于青藏高原物候的相关研究,建立了 3 个时间段:2000—2006 年、2007—2013 年以及 2014—2021 年,分别记作 P_1 、 P_2 和 P_3 。时间断点选择原因如下:有研究发现青藏高原植被返青期在 2000—2006 年间呈推迟趋势^[26],而植被返青期被视为青藏高原陆地生态系统对全球气候变化的敏感指标之一^[27],由此确定 2006 年作为断点之一。其次我们对 2007—2021 时间段进行二等分以确保 3 个研究时段的可比性。

因为 VSI 指标可能对选择的时间序列长度存在敏感性,为了确保论文实验结果的稳健性,我们对原分段的时间序列前后各缩短和延长了 1 年进行 VSI 计算,并与原 VSI 结果进行对比。结果显示时间序列长度缩短与延长一年的 VSI 结果与原 VSI 结果间空间分布一致性高(本文未添加显示),且相关性较高(表 1),因此 VSI 对时间序列长度的敏感性相对较低,确保了实验结果的稳健性。

表 1 时间序列长度缩短/延长一年的 VSI 结果与原分段 VSI 结果的皮尔森相关系数

Table 1 Pearson's correlation coefficients between VSI values estimated from original segmented time-series and those derived from periods that were shortened or extended by one year

时间段 Periods	第一段时间序列(P_1) The first period(P_1)	第二段时间序列(P_2) The second period(P_2)	第三段时间序列(P_3) The third period(P_3)
时间序列长度延长一年 The time-series length is extended by one year	0.95 **	0.92 **	0.96 **
时间序列长度缩短一年 The time-series length is shortened by one yea	0.92 **	0.87 **	0.96 **

VSI: 植被敏感性指数 Vegetation sensitivity index; “**”表示 0.01 水平上的显著性

2 结果

2.1 2000—2021 年青藏高原植被敏感性及其气候驱动因素

2000—2021 年青藏高原生长季 VSI 的空间分布如图 2 所示, VSI 表现出较高的空间异质性,表明青藏高原生长季植被对气候变化的响应有明显的区域差异。对气候变化响应高度敏感的区域(VSI 较高)主要出现在青藏高原南部、东北部和中部的部分地区。相比之下,西北部地区的 VSI 较低,表明在当前气候多变的背景下西北部的植被对气候变化相对不敏感。

2000—2021 年 3 个气候变量权重的空间分布展示了温度作为决定青藏高原大部分地区 VSI 的气候因素,占研究区总面积的 55.89%,主要集中在中部和南部区域。降水和太阳辐射共同影响青藏高原东北和西南地区的 VSI,其中降水和太阳辐射起主导作用的区域分别占青藏高原总面积的 19.24%和 24.87%。

植被对 3 个气候变量(温度、降水和太阳辐射)敏感性在青藏高原存在明显的空间格局,其中青藏高原西部的植被对太阳辐射变化较敏感,而东部地区植被主要对温度和降水变化敏感。相比之下,青藏高原南部的森林对温度和太阳辐射变化的响应更敏感。

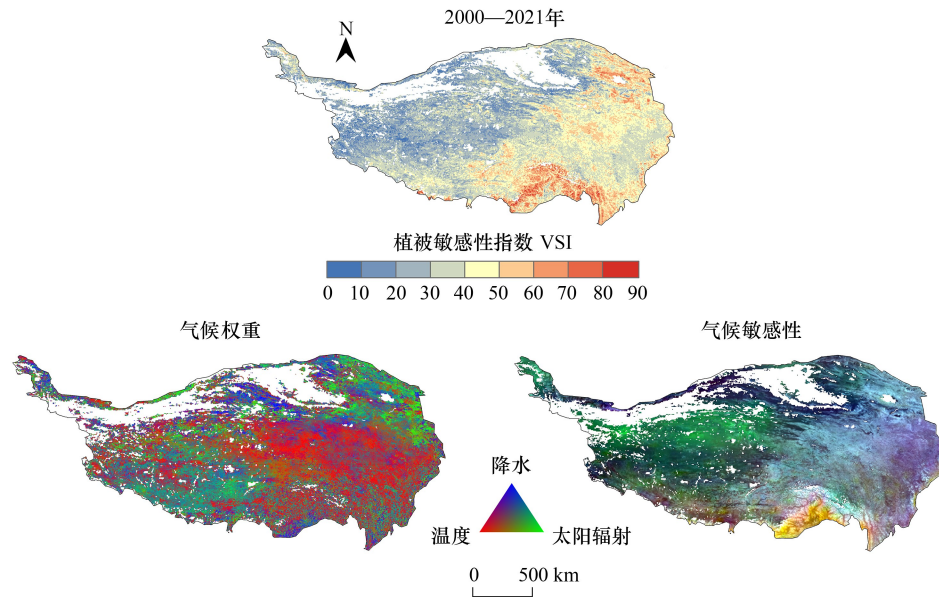


图 2 2000—2021 年青藏高原生长季 VSI、气候权重及气候敏感性的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of VSI, weights, and sensitivities over the Qinghai-Tibet Plateau during the growing season from 2000 to 2021

VSI: 植被敏感性指数 Vegetation sensitivity index

为了进一步探讨青藏高原植被对气候变化敏感性的空间格局,根据 2.2 节中选取的七种地表覆盖类型对青藏高原 VSI 以及 VSI 计算中的气候权重和气候敏感性进行分类,如图 3 所示。其中植被敏感性在不同植被类型间存在明显差异。相对于高山荒漠和高山草原,高山草甸、耕地、灌木和森林类型的 VSI 较高,对气候变化的响应更加敏感。温度对每个植被类型 VSI 的影响普遍高于降水和太阳辐射,尤其在高山草甸、灌木丛和针叶林植被类型中,温度权重远高于降水和辐射。而对于高山草原、高山草甸、耕地、灌木丛和阔叶林来说,太阳辐射的权重高于降水。图 3 中展示了各植被类型的气候敏感性(即方差比值),其中高山草原、高山草甸、耕地和灌木丛对温度变化的敏感性较低,而高山草甸、针叶林和阔叶林显示出对温度变化的高敏感性。高山荒漠、高山草原、耕地和灌木丛植被类型对降水和辐射变化的敏感性高于温度。阔叶林对辐射变化的敏感性高于降水,而其他六种植被类型均显示出对降水变化的敏感性高于太阳辐射。

2.2 3 个时期内 VSI 及其驱动力分析

图 4 显示 3 个时期内 VSI 的空间分布格局差异较大,2000—2006 年(P_1 时期)青藏高原南部和东北部地区的 VSI 值较高,在中部地区也存在 VSI 高值区域,但面积相对较小,青藏高原其他地区的 VSI 数值普遍较低。相比较而言,2007—2013 年(P_2 时期)青藏高原中部地区植被的 VSI 数值大幅度下降,但青藏高原南部地区 VSI 仍然相对较高,且数值普遍大于 70。2014—2021 年(P_3 时期) VSI 高值仍然集中分布在青藏高原东南以及中部地区,且呈零散的空间分布格局。在 VSI 低值区间($VSI < 20$)内, P_2 时期的 VSI 数值比 P_1 、 P_3 时期高,而在 $VSI > 25$ 范围内, P_2 时期的 VSI 普遍小于 P_1 和 P_3 时期。相较 P_1 和 P_2 时期, P_3 时期在 VSI 低值区($VSI < 25$)数量较少,而在 VSI 高值区($VSI > 25$)数量较多,这说明与 P_1 和 P_2 时期的 VSI 相比,VSI 在 P_3 时期数值明显升高。

为了探究不同区域内哪个气候因素对青藏高原 VSI 影响最大,对每个实验像元内的 3 个气候权重进行排序比较大小,在像元中标记出对应权重绝对值最大的气候因子,得到图 5。实验结果显示青藏高原生长季植

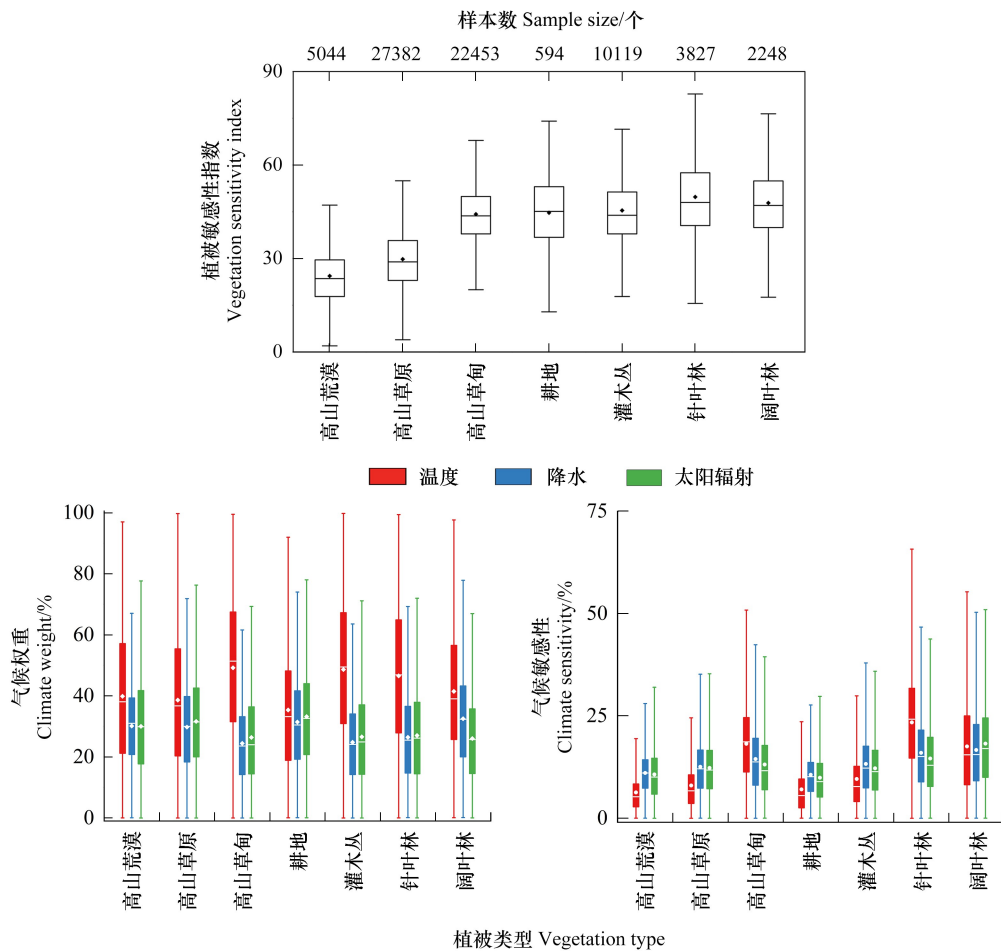


图3 青藏高原不同植被类型的 VSI, 气候权重及气候敏感性

Fig.3 VSI, weights, and sensitivities of different vegetation types on the Qinghai-Tibet Plateau

被对气候响应的权重在 P_1 — P_3 时期存在显著差异, 其中气温是主导 3 个时期 VSI 变化最重要的气候变量, 3 个时期内占总像元数量的百分比均在 40% 以上, 降雨和辐射在 P_1 和 P_3 时期内对 VSI 的影响差异不大。值得注意的是, P_2 时期温度为最大权重的像元数量占比为 61.34%, 对 VSI 的影响超过了 P_1 (58.15%) 和 P_3 (40.47%) 时期。

空间分布上, 在 P_1 时期内, 降水对青藏高原北部地区 (占总面积 18.57%) VSI 的影响较大, 太阳辐射对青藏高原东北和南部地区 (占总面积 23.28%) 的 VSI 有较大影响, 气温则主导着青藏高原中部和西部大部分区域 (占总面积 58.15%) 的 VSI 变化。 P_2 时期内, 气温在青藏高原大部分地区 (占总面积 61.34%) 对 VSI 的影响比降雨和太阳辐射大, 而以太阳辐射和降水为主导因素的区域在青藏高原呈零散分布的空间格局。 P_3 时期内, 太阳辐射主要控制着青藏高原西部和东部地区 (占总面积 23.89%) 的 VSI 变化, 降水则主要控制着北部地区 (占总面积 26.46%) 的 VSI 变化, 以气温为主要气候要素的像元零散分布在青藏高原各地, 相较而言, 在中部和南部地区有相对集中的空间分布。

图 5 展示了 3 个时期内青藏高原生长季植被对温度、降水和太阳辐射响应的敏感性 (即方差比), 总的来说, 在 P_1 和 P_3 时期内, 青藏高原西部地区植被对太阳辐射的响应敏感, 而在 P_2 时期内, 仅在西北部小范围地区植被对太阳辐射的变化敏感。

2.3 青藏高原 VSI 时间变异性

图 6 展示了青藏高原 VSI 的时间变化情况, 为了确保 3 个时期 VSI 数值的可比性, 对 3 个时期 VSI 整体

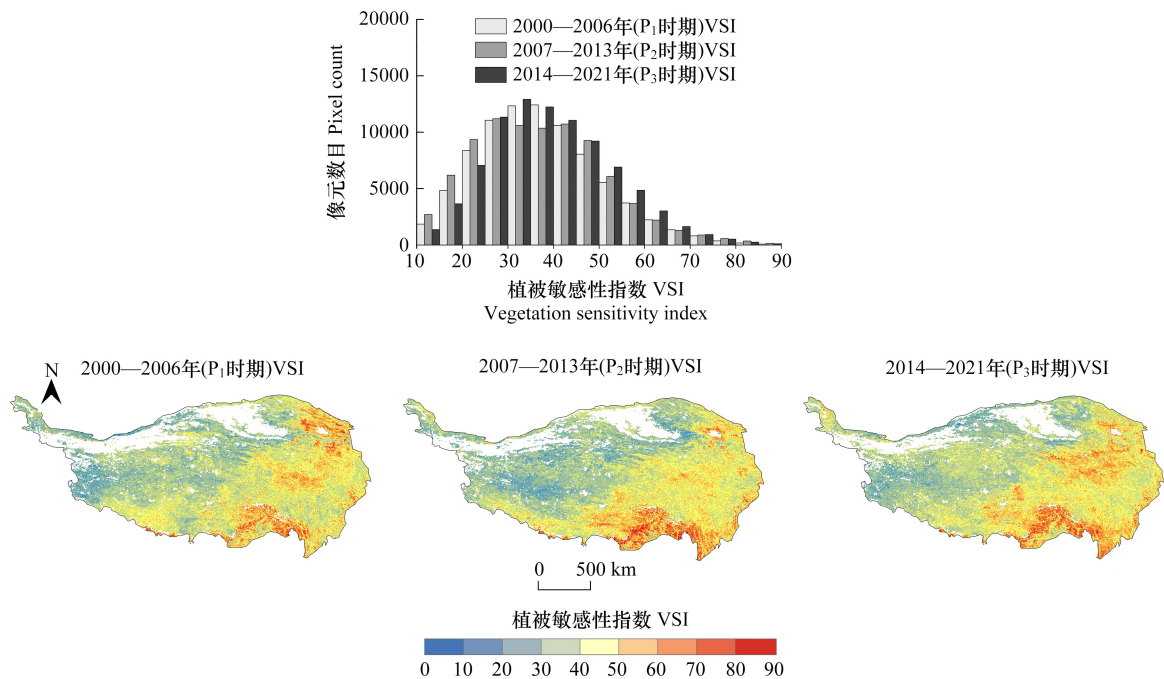


图 4 青藏高原 3 个时期生长季内 VSI 的空间分布及对应直方图

Fig.4 Spatial distribution of VSI over the Qinghai-Tibet Plateau in the three periods and it's corresponding histograms

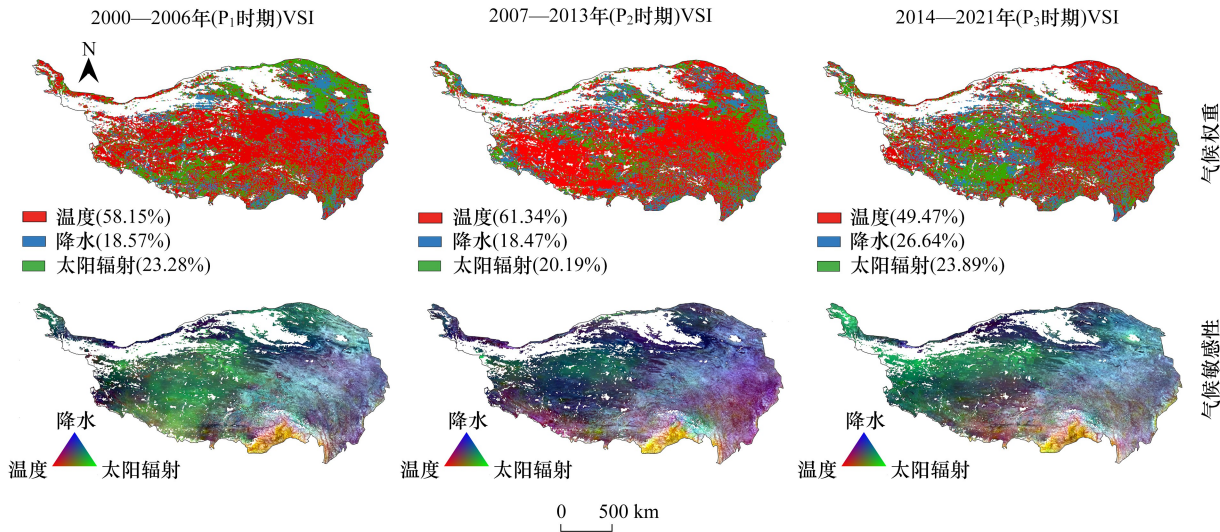


图 5 青藏高原 3 个时期内最大气候权重的空间分布及气候敏感性的 RGB 合成图

Fig.5 Spatial distribution of the most important climate factor to dominate the vegetation growth over the Qinghai-Tibet Plateau in the three periods, and Red, Green, and Bule (RGB) composite of the vegetation sensitivity in response to variability of the three climate factors

拉伸至 0—100,最后 P_2 减 P_1 时期 VSI, P_3 减 P_2 时期 VSI 作差得到图 6。其中 P_1 到 P_2 时期,VSI 增加和减少的区域分别占青藏高原总面积的 50.54%和 49.46%,南部地区 VSI 明显增加而北部和中部地区的 VSI 呈下降态势。相较于 P_2 时期, P_3 时期青藏高原 VSI 增加和减少的区域分别占青藏高原总面积的 59.43%和 40.57%,其中西南地区的 VSI 呈下降态势,而中部和北部地区 VSI 呈现明显增加的态势。

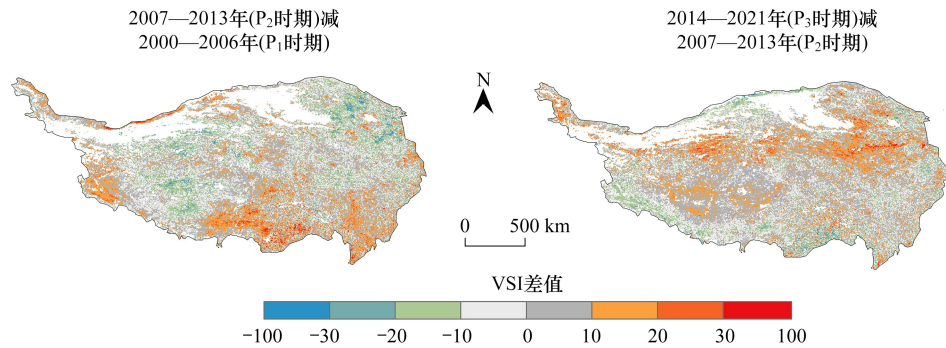


图6 青藏高原3个时期 VSI 差值的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of the differences for VSI in the three periods over the Qinghai-Tibet Plateau

为进一步探究 VSI 在 P_1 — P_3 3 个时期内持续增加和减少的变化情况,研究中根据 VSI 差值图(图 6),判断差值的正负号标记出增加与减少的区域,得到每个网格上 VSI 在 3 个时期内的动态变化,并根据 2.2 节中选取的七种植被覆盖类型对该动态变化划分得到图 7 和表 2。结果显示青藏高原不同植被类型在 3 个时期内的 VSI 有明显变化,总体来看,青藏高原 VSI 持续增加的区域占总面积的 18.39%而持续减少的区域占总面积的 10.09%。青藏高原 54.52%地区的 VSI 在 P_1 — P_3 时期有先增后减或先减后增的差异变化。

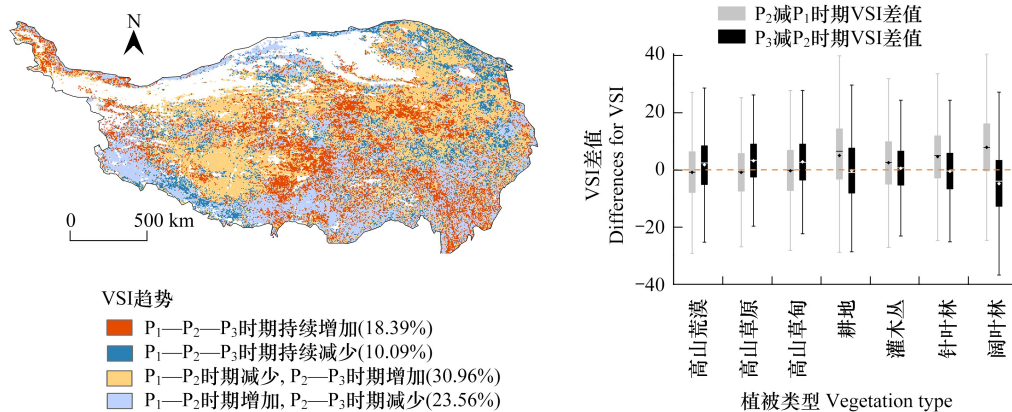
图7 P_1 — P_3 时期青藏高原 VSI 变化情况

Fig.7 Variation of VSI over the Qinghai-Tibet Plateau in three periods

表 2 不同植被类型下 3 个时期内 VSI 差值的像元数量占比情况

Table 2 The proportion of differences between VSI values in the three periods for each land cover type

植被类型 Vegetation type	P ₂ 减 P ₁ 时期 VSI 差值 Differences for VSI in P ₁ —P ₂ period			P ₃ 减 P ₂ 时期 VSI 差值 Differences for VSI in P ₂ —P ₃ period		
	VSI 增加/%	VSI 减少/%	变化情况	VSI 增加/%	VSI 减少/%	变化情况
高山荒漠 Alpine deserts	2.61	2.99	基本不变	3.26	2.28	增加
高山草原 Alpine grasslands	15.19	17.12	减少	20.78	10.90	增加
高山草甸 Alpine meadows	13.19	13.45	基本不变	16.05	10.03	增加
耕地 Crop	0.46	0.22	增加	0.32	0.35	基本不变
灌木丛 Shrubs	7.11	4.78	增加	6.22	5.45	增加
针叶林 Needleleaf forest	3.06	1.46	增加	2.14	2.29	减少
阔叶林 Broadleaf forest	1.98	0.69	增加	0.93	1.68	减少

P_1 — P_2 时期高山荒漠和高山草甸 VSI 差值的均值和中值接近 0,表 2 显示高山荒漠和高山草甸的 VSI 在 P_1 — P_2 时期减少的像元数量与增加的像元数相持平,这表明 P_1 — P_2 时期这些植被类型的 VSI 呈基本稳定不变的态势。其中耕地、灌木丛、针叶林和阔叶林 VSI 差值的均值和中值均大于 0,结合表 2 可以看到,VSI 增加的像元数明显多于减少的像元数,这表明对应像元的 VSI 一般呈增加态势。在 P_2 — P_3 时期内,可以看到高山草原和高山草甸对应箱线图 VSI 差值的均值与中值明显大于 0,同时表 2 显示了高山荒漠、高山草原、高山草甸和灌木丛 VSI 增加像元数多于减少像元数,尤其是高山草原和高山草甸,VSI 增加像元数分别占总像元数的 20.78%和 16.05%,远高于对应 VSI 减少像元的数量占比(分别为 10.90%和 10.03%),这表明相应 VSI 值在 P_2 — P_3 时期呈现明显上升的态势。与之相反,耕地、灌木丛、针叶林和阔叶林 VSI 差值的均值和中值小于 0,且由表 2 可知对应 VSI 减少像元数多于增加的像元数,表明了 P_2 — P_3 时期这些植被类型的 VSI 呈减小态势。

3 讨论

本研究表明 2000—2021 年青藏高原生长季 VSI 存在明显的空间变异性,青藏高原东南部 VSI 较高而西北部较低,青藏高原植被受到高海拔和复杂环境因素的影响,对温度、降水和太阳辐射等多种气候驱动力响应敏感^[28—29],同时我们发现 VSI 的空间分布与植被类型密切相关,这与现有研究结果相符合^[18]。与高山荒漠、高山草原和高山草甸相比,本文结果显示青藏高原东南部地区灌木和森林对气候变化的响应更敏感,温度是该地区 VSI 变化主要的气候驱动因素。降水控制着东北部草原和草甸等低矮植被对 VSI 变化,而在西北部地区,太阳辐射是对 VSI 影响最大的气候变量,以上结论也已在相关文献中得到证实^[8]。在全球气候变化背景下,青藏高原整体变得更加温暖湿润^[30],温度是在水分充足的条件下驱动植被生长的重要因素^[31—33],因此对青藏高原生长季 VSI 的影响最大。然而在相对干旱的区域,升温加速地表水分蒸发,对植被生长产生负面影响,而降水通过提高水分供应促进了生长季植被生长^[31],使得草原和草甸生态系统对降水显示出较强的敏感性。

另外,我们发现青藏高原生长季 VSI 及其气候驱动力的时间变异性较高,之前研究显示植被对气候变化的响应是动态、非线性的^[28],在青藏高原温度升高且蒸散增加的环境下,水分对植被生长的影响愈发明显,其在调节植被敏感性和维持生态系统稳定性方面逐渐发挥更大的作用^[34],这也导致 2000—2021 年降水在青藏高原北部高山荒漠、高山草原和高山草甸的 VSI 呈现出上升的趋势。而对于青藏高原南部地区,有研究^[35]指出温度的升高加速了植被蒸腾从而影响其光合作用,导致该地区 P_1 — P_2 时期内植被对太阳辐射变化的响应变强(图 5),VSI 呈现升高态势。降水的持续增加促进了土壤水分和养分的运转,在一定程度上缓解了温度升高给植被带来的负面影响,这可能是青藏高原南部地区 VSI 呈现下降态势的原因之一。值得注意的是,本文数据选择 6—8 月作为植被生长季,近 20 年里青藏高原生长季开始时间提前而结束时间逐渐推迟^[24],生长季中植被的光合作用增强,对光照条件的需求增多,这可能是导致 P_2 — P_3 时期青藏高原西部植被对太阳辐射变化敏感性逐渐增高的原因。

2000—2021 年青藏高原 VSI 呈现西北部升高而东南部下降的态势,我们将 VSI 在 P_2 — P_3 时间段内升高区域的像元按数值由小到大排序,选出后 50%的像元,以此划分出 VSI 升高幅度较大的区域,以此探明目前青藏高原需要重点关注的植被敏感性升高区域,如图 8 所示,可以看到目前需要重点关注青藏高原北方部分地区。此外,我们发现高山草原和高山草甸占青藏高原全部升高区域面积的 70%,说明相比于森林等其他陆地生态系统,青藏高原草地生态系统对气候变化的响应呈增加态势。考虑到青藏高原气候多变,植被敏感性的持续增加可能会加剧青藏高原草地退化的风险^[19],这也是目前相关学者和研究需要重点关注的问题。本文研究结果基于青藏高原生态系统敏感性的历史与现状,探究了青藏高原陆地生态系统对气候变化敏感性的时间变异性,旨在为青藏高原生态系统敏感区域的动态监测提供参考。

本文有两个不足之处,一是我们研究中并未考虑人类活动。人类活动对青藏高原植被的影响已经得到证实,有研究使用残差分析量化了气候变化以外的因素(人类活动、二氧化碳以及氮沉降等)对植被变化的相应

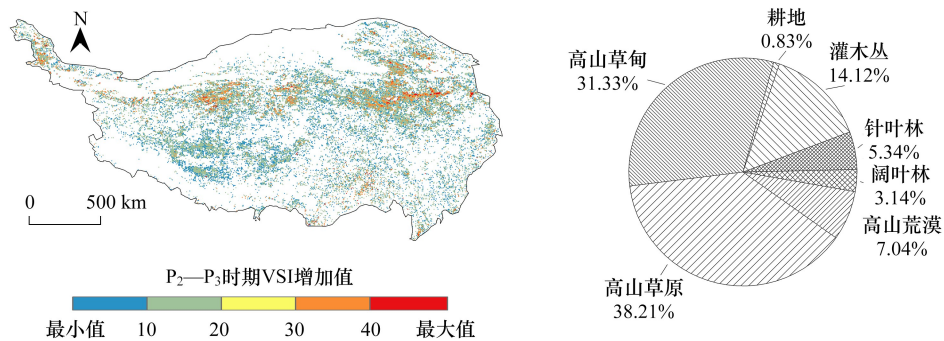


图 8 基于 VSI 探究青藏高原目前需要重点关注的敏感区域

Fig.8 Sensitive areas of the Qinghai-Tibet Plateau that are needed to be paid attention in recent years based on the VSI metric

贡献^[36]。本文研究将植被的变化均归因于气候变化,这可能无法有效解释青藏高原部分地区,例如中部三江源自然保护区、东北部以及南部地区植被对气候变化的异常响应,围封、放牧及保护区建立等人类活动会造成植被状态的变化甚至土地利用类型的改变。二是研究中将 2000—2021 年分为 3 个时期研究青藏高原生长季 VSI 的时间变异性。由于研究中只考虑了青藏高原生长季,可用样本量相对较少,为了确保每个时间段内用于多元线性回归的样本量足够多且数量相近,文中将 22 年近似三等分为 7 年、7 年和 8 年(样本量一般>20)。如果分段过多,会造成样本量相对较少,可能导致多元线性回归结果不准确。此外,表 1 中缩短和延长时间序列长度情况下 P₁ 和 P₂ 时期 VSI 结果之间存在一定的变化,尤其是青藏高原西部 VSI 的空间分布存在相对较大的差异,这表明以 2006 年为断点可以较好的体现 VSI 在前后两个时间段的变化态势,与本文研究 VSI 时间变异性的目标相符合。虽然已经有研究使用 15 年滑动窗口探讨了 VSI 的时间变化趋势^[8],然而 15 年滑动窗口时间跨度过大,难以准确量化 VSI 的时间变异性,且青藏高原地区因其地势高和生长季短的特点,可用的时间序列样本较少,滑动窗口的应用会受到样本量的限制导致 VSI 估算结果不准确,进而影响最终的结论。如何选择合适的滑动窗口大小,解决时间窗口内样本量过少的问题,是下一步研究的方向。

4 结论

(1) 2000—2021 年青藏高原陆地生态系统在生长季内 VSI 存在较高的空间异质性,东南部灌木和森林 VSI 数值较高,而西北部高山荒漠、高山草原和高山草甸的 VSI 较低。

(2) 温度主导着青藏高原 55.89% 地区的 VSI 变化,主要集中在东南部的灌木和森林地区。降水起主导作用的区域占总面积的 19.24%,主要集中在东北高山草甸地区,而太阳辐射则主导青藏高原 24.87% 西南地区大部分高山草原的 VSI 变化。

(3) P₁(2000—2006 年)、P₂(2007—2013 年)和 P₃(2014—2021 年)时期内青藏高原 VSI 的时间变异性较高,青藏高原 18.39% 像元内 VSI 呈持续增加而 10.09% 像元内 VSI 呈持续减少态势。高山荒漠、高山草原和高山草甸的 VSI 在 P₁—P₂ 时期基本不变而在 P₂—P₃ 时期呈现上升态势,与之相比,灌木和森林的 VSI 呈先增长后下降的态势。

(4) 3 个时期内主导青藏高原 VSI 变化的气候变量具有较强的时空异质性,其中温度为主导因子的像元数量在 P₁—P₂ 时期基本一致而在 P₃ 时期明显减少,其占比分别为 P₁(58.15%), P₂(61.34%) 和 P₃(49.47%),降水为主导因子的像元数量在 P₁(18.57%) 和 P₂(18.47%) 时期内基本不变但在 P₃(26.64%) 时期内明显增加,与温度和降水相比,以辐射为主导气候要素的像元数量占比在 3 个时期内基本不变。

总体而言,青藏高原高山草原和高山草甸生态系统对气候变化的响应呈增加态势,在青藏高原气候多变的背景下,VSI 的持续增加可能会加剧青藏高原草地退化的风险,未来应给予更多关注。

参考文献 (References):

- [1] 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 郭正堂, 崔鹏, 陈发虎, 张人禾, 张宪洲, 张懿铨, 樊杰, 侯增谦, 张天华. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60(32): 3025-3035, 1.
- [2] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Armeth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Peñuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791-795.
- [3] 方精云, 宋永昌, 刘鸿雁, 朴世龙. 植被气候关系与我国的植被分区. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(9): 1105-1122.
- [4] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 2003, 421(6918): 37-42.
- [5] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张懿铨. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- [6] You N S, Meng J J, Zhu L K. Sensitivity and resilience of ecosystems to climate variability in the semi-arid to hyper-arid areas of Northern China: a case study in the Heihe River Basin. *Ecological Research*, 2018, 33(1): 161-174.
- [7] Cui L Z, Pang B, Zhao G, Ban C G, Ren M F, Peng D Z, Zuo D P, Zhu Z F. Assessing the sensitivity of vegetation cover to climate change in the Yarlung Zangbo River Basin using machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1556.
- [8] Jiang P, Ding W G, Yuan Y, Ye W F, Mu Y J. Interannual variability of vegetation sensitivity to climate in China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113768.
- [9] Li W T, Migliavacca M, Forkel M, Denissen J M C, Reichstein M, Yang H, Duveiller G, Weber U, Orth R. Widespread increasing vegetation sensitivity to soil moisture. *Nature Communications*, 2022, 13: 3959.
- [10] Liu B Y, Tang Q L, Zhou Y K, Zeng T, Zhou T. The sensitivity of vegetation dynamics to climate change across the Tibetan Plateau. *Atmosphere*, 2022, 13(7): 1112.
- [11] Xu Y, Shen Z H, Ying L X, Ciais P, Liu H Y, Piao S L, Wen C, Jiang Y X. The exposure, sensitivity and vulnerability of natural vegetation in China to climate thermal variability (1901-2013): an indicator-based approach. *Ecological Indicators*, 2016, 63: 258-272.
- [12] Smith A M S, Kolden C A, Tinkham W T, Talhelm A F, Marshall J D, Hudak A T, Boschetti L, Falkowski M J, Greenberg J A, Anderson J W, Kliskey A, Alessa L, Keefe R F, Gosz J R. Remote sensing the vulnerability of vegetation in natural terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 154: 322-337.
- [13] Xia M, Jia K, Zhao W, Liu S L, Wei X Q, Wang B. Spatio-temporal changes of ecological vulnerability across the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 2021, 123: 107274.
- [14] Huete A. Vegetation's responses to climate variability. *Nature*, 2016, 531(7593): 181-182.
- [15] Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R, Benz D, Willis K J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature*, 2016, 531(7593): 229-232.
- [16] Yuan Y, Bao A, Liu T, Zheng G X, Jiang L L, Jiang P, Yu T, Maeyer P D. Assessing vegetation stability to climate variability in Central Asia. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113330.
- [17] Feng S Y, Liu X, Zhao W W, Yao Y, Zhou A, Liu X X, Pereira P. Key areas of ecological restoration in Inner Mongolia based on ecosystem vulnerability and ecosystem service. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2729.
- [18] Li M, Wu J, He Y, Wu L, Niu B, Song M H, Zhang X Z. Dimensionality of grassland stability shifts along with altitudes on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 291: 108080.
- [19] Li L, Zhang Y, Wu J, Li S, Zhang B, Zu J, Zhang H, Ding M, Paudel B. Increasing sensitivity of alpine grasslands to climate variability along an elevational gradient on the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 2019, 678: 21-29.
- [20] Zhang Q, Yuan R, Singh V P, Xu C Y, Fan K, Sheng Z, Wang G, Zhao J. Dynamic vulnerability of ecological systems to climate changes across the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108483.
- [21] Li M, Zhang X Z, He Y T, Niu B, Wu J S. Assessment of the vulnerability of alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau. *PeerJ*, 2020, 8: e8513.
- [22] Jiang L L, Liu B, Yuan Y. Quantifying vegetation vulnerability to climate variability in China. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3491.
- [23] Yao T D, Wu F Y, Ding L, Sun J M, Zhu L P, Piao S L, Deng T, Ni X J, Zheng H B, Ouyang H. Multispherical interactions and their effects on the Tibetan Plateau's earth system: a review of the recent researches. *National Science Review*, 2015, 2(4): 468-488.
- [24] Shen M G, Wang S, Jiang N, Sun J P, Cao R Y, Ling X F, Fang B, Zhang L, Zhang L H, Xu X Y, Lv W W, Li B L, Sun Q L, Meng F D, Jiang Y H, Dorji T, Fu Y S, Iler A, Vitasse Y, Steltzer H, Ji Z M, Zhao W W, Piao S L, Fu B J. Plant phenology changes and drivers on the Qinghai-Tibetan

Plateau. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022; 1-19.

- [25] 王翠珍, 郭华东, 张丽. Alpine grassland map. *Science Data Bank*, 2010, doi: 10.11922/sciencedb.398.
- [26] Wang T, Ottlé C, Peng S S, Janssens I A, Lin X, Poulter B, Yue C, Ciais P. The influence of local spring temperature variance on temperature sensitivity of spring phenology. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1473-1480.
- [27] Shen M G, Piao S L, Chen X Q, An S, Fu Y H, Wang S P, Cong N, Janssens I A. Strong impacts of daily minimum temperature on the green-up date and summer greenness of the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2016, 22(9): 3057-3066.
- [28] 李红英, 张存桂, 汪生珍, 马伟东, 刘峰贵, 陈琼, 周强, 夏兴生, 牛百成. 近 40 年青藏高原植被动态变化对水热条件的响应. *生态学报*, 2022, 42(12): 4770-4783.
- [29] 刘杰, 汲玉河, 周广胜, 周莉, 吕晓敏, 周梦子. 2000—2020 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及其气候驱动作用. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1533-1538.
- [30] 张江, 袁旻舒, 张婧, 李函微, 王洁仪, 张贤, 鞠佩君, 蒋海波, 陈槐, 朱求安. 近 30 年来青藏高原高寒草地 NDVI 动态变化对自然及人为因子的响应. *生态学报*, 2020, 40(18): 6269-6281.
- [31] 韩炳宏, 周秉荣, 颜玉倩, 石明明, 苏淑兰, 赵恒和, 牛得草, 傅华. 2000—2018 年间青藏高原植被覆盖变化及其与气候因素的关系分析. *草地学报*, 2019, 27(6): 1651-1658.
- [32] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 韩保民, 范业稳, 杨潇, 何田莉, 刘悦, 杨雯娜. 2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2511-2527.
- [33] 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.
- [34] Shen M G, Piao S L, Cong N, Zhang G X, Janssens I A. Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2015, 21(10): 3647-3656.
- [35] 卓嘎, 陈思蓉, 周兵. 青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2018, 38(9): 3208-3218.
- [36] Huang K, Zhang Y J, Zhu J T, Liu Y J, Zu J X, Zhang J. The influences of climate change and human activities on vegetation dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 876.