

青海高原生长季 NDVI 对气候暖湿化响应的年代际变化

历正豪¹ 王慧¹ 杨访问² 李栋梁¹ 石玉立² 蒋元春¹

1 南京信息工程大学大气科学学院/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京 210044

摘要 本文利用 1982-2018 年美国国家海洋和大气局 (NOAA) 先进甚高分辨率辐射计 (AVHRR) 观测得到的归一化差值植被指数 (NDVI) 数据集和中国区域高分辨率近地面气温和地面降水率驱动数据集 (CMFD), 采用线性倾向估计、M-K 检验、偏相关和方差分析等方法, 研究了气候暖湿化背景下青海高原生长季 (5-9 月) 地表植被变化特征及其对气候暖湿化响应的年代际变化。结果表明: (1) 1982-2018 年, 青海高原生长季地表植被呈由东南向西北逐渐减小的空间分布特征, 整体呈显著增加趋势 ($P < 0.01$), 气候倾向率达 $0.01/10a$, 但在空间上呈两极化发展, 在青海高原东部和西南部植被显著变好 (面积占 57.3%) 的同时, 青海高原西北部的柴达木盆地地表植被表现为退化态势 (面积占 14.8%)。 (2) 1982-2018 年青海高原气候整体呈暖湿化特征, 但在 1990 年代中后期发生了显著的趋势变化, 不同时段气候暖湿化的区域和强度存在差异, P1 时段 (1982-1998 年) 的增温强于 P2 (1998-2018 年) 时段, 而 P2 时段的变湿强于 P1 时段; 青海高原生长季地表植被在 1998 年之前为波动上升, 趋势不显著, 但从 1998 年开始出现显著增加趋势 ($P < 0.05$), 这与青海高原地面降水率的变化相一致。 (3) 在青海高原气候暖湿化不同阶段, 地表植被对气候变化具有不同的响应, 在 P1 时段, 水分条件相对不足的情况下, 地表植被对热量因子 (气温) 以负反馈为主, 增温不利于地表植被的生长, 特别是在黄河源区北部和青海湖附近; 而在 P2 时段, 在水分条件相对充足的条件下, 地表植被对水分和热量因子均以正反馈为主, 在二者的共同作用下, 青海高原生长季地表植被出现了大范围好转。

关键词 青海高原 植被 NDVI 气候暖湿化 气候响应 年代际变化

文章编号 2023058C

中图分类号 P461

文献标志码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2308.23058

Interdecadal variation of NDVI response to climate warming and humidification in Qinghai Plateau during the growing season

Li Zhenghao¹, Wang Hui¹, Yang Fangwen², Li Dongliang¹, Shi Yuli², and

Jiang Yuanchun

收稿日期 2023-10-13 ; 网络预出版日期

作者简介 历正豪, 男, 1999 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化及影响研究。

E-mail: 13319739026@163.com

通讯作者 王慧, E-mail: wanghui123@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 U20A2098 和第二次青藏高原综合科学考察研究项目 2019QZKK0103

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant U20A2098), Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (STEP) Program (Grant 2019QZKK0103)

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education & Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Remote Sensing & Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) dataset obtained from the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), as well as the high-resolution near-surface air temperature and surface precipitation rate of China meteorological forcing dataset (CMFD) from 1982 to 2018, the variation characteristics of the growing season (May-September) vegetation on the Qinghai Plateau and their responses to the climate change were studied. Statistical methods used in this study include linear tendency estimation, M-K test, partial correlation, and analysis of variance. The results show that: (1) During the growing season of Qinghai Plateau from 1982 to 2018, the vegetation exhibits a spatial distribution feature that decreases gradually from southeast to northwest, and there is a significant increasing trend overall with a climate tendency rate of 0.01/10a. However, the trend of vegetation has a bi-polar development feature in space, that is to say, while the vegetation in the eastern and southwestern parts of the Qinghai Plateau improves significantly (57.3% of the total area), the vegetation of the Qaidam Basin in the northwestern part of the Qinghai Plateau shows a deterioration trend (14.8% of the total area). (2) During 1982-2018, the climate of the Qinghai Plateau is characterized by warming and humidification as a whole, but its trend has changed dramatically around 1998, and there are differences in the regions and intensities of climate warming and humidification in different periods. The warming in P1 period (1982-1998) was stronger than that in P2 period (1998-2018), and the humidification in P2 period was stronger than that in P1 period. The trend of NDVI in the growing season of Qinghai Plateau fluctuates with no obvious trend before 1998, but shows a significant increasing trend after 1998, which is consistent with the trend of surface precipitation rate in the Qinghai Plateau vegetation. (3) There is an interdecadal variation in the response of surface vegetation on the Qinghai Plateau to climate warming and humidification. In the P1 period, when the water is relatively insufficient, the surface vegetation has a negative feedback on the thermal factor (air temperature), and warming is not conducive to the growth of surface vegetation, especially in the northern part of the source area of the Yellow River and near the Qinghai Lake. However, in the P2 period, under the condition of relatively sufficient water conditions, the surface vegetation mainly has a positive feedback on both water and heat factors, which has a crucial contribution to the extensive improvement of surface vegetation on Qinghai Plateau in the growing season.

Keywords Qinghai Plateau; Vegetation; NDVI; climate warming and humidification; interdecadal change; climate response

1 引言

青海高原位于地球第三极“青藏高原”的东北部，平均海拔在 3000m 以上，地形复杂、生物多样性，是长江、黄河和澜沧江的发源地，被誉为“中华水塔”、“江河之源”之称（李生辰等，2009），对我国气候变化和生态环境有重要影响（吴国雄等，2005；朴世龙等，2019）。在全球变暖的进程中，青海高原的气候呈现明显的暖湿化特征（施雅风等，2003；李明等，2021），具体表现为：气温升高、降水总量增大、冻土退化加速、湖泊河流水量加大，青海湖水位上升及面积扩大等（毛飞等，2008；胡芩等，2015；Ran et al., 2018；徐丽娇等，2019；祁苗苗等，2020；杨耀先等，2022）。青海高原草地面积广阔，畜牧业是青海牧区的主要经济来源，气候

的暖湿化势必会对下垫面的植被状况产生重要影响（葛骏等, 2017; 刘振元等, 2017; Diao et al., 2021）。因此, 研究青海高原地表植被对气候暖湿化响应特征, 对青海地区畜牧业发展和生态环境保护具有重要意义。

归一化差值植被指数 (NDVI) 基于遥感技术可对全球植被进行动态监测, 是反映植被生长状况的重要指示因子, 为大尺度和长时期的植被变化特征及气候响应研究提供了技术手段 (刘雅勤等, 2007; 张学珍和朱金峰, 2013; 侯美亭等, 2013; Wang Z Q et al., 2020)。研究显示, 降水和温度是影响植物生长和分布的重要环境因子 (Wang and French, 1994), 气候暖湿化导致植被活动加剧, 是造成 NDVI 增加的主要原因 (Liu et al., 2014; Liu et al., 2021); 高温、高湿及高 CO₂ 环境使植被的光合作用及呼吸作用得到提高, 有利于植被的生长 (范广洲和程国栋, 2002); 1980 年代以来, 中国大多数地区 NDVI 呈增加状态 (Piao et al., 2003; Zhang and Ye, 2020)。然而, 由于气候的差异性, 中国不同地区 NDVI 对气候变化的响应存在差异, 在东北地区的黑龙江流域, 春季的植被生长主要受温度的影响, 而在生长季 (5-9 月) 则主要受降水调节 (Chu et al., 2019); 在华北地区和内蒙古荒漠区, NDVI 与降水、相对湿度等水分因子呈显著正相关, 与气温和日照时数等热量因子呈显著负相关 (白慧敏等, 2022; 陈琪等, 2022; 赵倩倩等, 2022); 在青藏高原地区, NDVI 与气温和降水均呈显著正相关关系, 并与气温关系更密切 (韩炳宏等, 2019; 杨达等, 2021; Wang S R et al., 2020)。

综上所述, 在不同水、热条件下, 地表植被对气候变化的响应存在明显差异, 从气候区角度来看, 在湿润、半湿润地区, 水分条件较充足情况下, 气温是影响 NDVI 的主要因子, 而在干旱、半干旱地区, 水分条件不足情况下, 降水则为影响 NDVI 的主要因子。那么, 在全球变暖的进程中, 青海高原地表植被对气候暖湿化具有怎样的响应? 是否存在年代际变化? 本文的研究将针对这些问题进行阐述和解答, 以期为维持青海高原草地生态系统长效发展提供科学依据。

2 资料与方法

2.1 所用资料

本文用到的资料包括: (1) 青海省 46 个气象站逐月平均气温和降水总量数据, 站点分布情况如图 1a 所示。该数据集来源于中国气象局地面历史基础气象数据集 3.0 版, 经过了严格的质量控制 (任芝花等, 2012), 精度符合世界气象组织 (WMO) 的标准。(2) 中国区域近地面气温和降水率驱动数据集 (China Meteorological Forcing Dataset, CMFD), 时间分辨率为 3h, 空间分辨率为 0.1°×0.1°, 来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8028b944-daaa-4511-8769-965612652c49/>)。该数据集是以台站资料为基础, 融合了遥感产品和再分析数据集, 其在中国区域的精度要高于国际上现有再分析数据 (阳坤等, 2019; He et al., 2020)。(3) 归一化差值植被指数 (NDVI) 数据选用美国国家海洋和大气局 (NOAA) 基于地表反射率气候数据记录 (CDR) 得到的网格化数据集 (<https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-data-records/normalized-difference-vegetation-index>)。该数据集由 NOAA 极地轨道卫星先进甚高分辨率辐射计 (AVHRR) 和可见红外成像辐射计 (VIIRS) 观测, 时间分辨率为 1d, 空间分辨率为 0.05°×0.05°。本文采用最大值合成方法处理为月资料, 以尽可能消除云层、颗粒、视角及太阳高度角的影响。为了与地面温度和降水率驱动数据空间分辨率相一致, 使用线性插值方法将其插值到 0.1°×0.1° 空间分辨率。所用到的数据资料时间长度均为 1982 年 1 月-2018 年 12 月, 定义每年的 5-9 月为青海高原植被的生长季。为了对青海高原不同区域地表植被特征及气候响应有较详细的了解, 这里参考李红梅等 (2012) 将青海高原分成了 5 个生态功能区 (见图 1a), 其中 I 区为柴达木盆地、II 区为祁连山区、III 区为东部农业区、IV 区为黄河源区、V 区为长江和澜沧江源区。

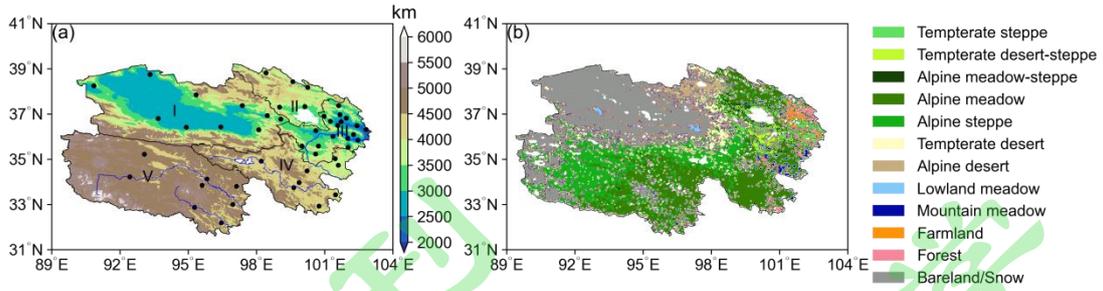


图 1 青海高原海拔高度、气候分区和气象站点位置 (a) 以及地表植被类型分布 (b) (图 1a 中 I - V 分别为柴达木盆地、祁连山区、农业区、黄河源区、长江和澜沧江源区)

Fig.1 Altitude of the Qinghai Plateau and the location and division of meteorological stations (a) and the distribution of surface vegetation types (b) (I - V in Figure 1a is Qaidam Basin, Qilian Mountains, Agricultural Region, the source regions of Yellow River, the source regions of Yangtze and Lancang Rivers)

2.2 分析方法

本文使用的分析方法主要包括简单相关、偏相关、M-K 检验、一元线性回归和多元线性回归以及回归问题的方差分析等数理统计分析方法 (魏凤英, 2007), 同时使用了 t 检验方法对研究结果的显著性进行检验。

用 x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量, 用 t_i 表示 x_i 所对应的时间, 建立 x_i 和 t_i 的一元线性回归方程:

$$\hat{x}_i = a + bt_i \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

其中, a 为回归常数; b 为回归系数。 a 和 b 可以用最小二乘法估计, 即:

$$\begin{cases} b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2}, \quad (2) \\ a = \bar{x} - b\bar{t}, \end{cases}$$

其中, \bar{x} 为变量 x_i 的平均值, \bar{t} 为时间序列的平均值, 回归系数 b 表示气候变量的倾向趋势, 当 $b > 0$ 时, 说明随 t 的增加 x 呈上升趋势; 当 $b < 0$ 时, 说明随 t 的增加 x 呈下降趋势。 b 值的大小反映了上升或下降的速率, 即表示上升或下降的倾向程度。一般把 $b \times 10$ 称为气候倾向率。

在多元线性回归问题的方差分析中, 回归方差等于每个因子方差贡献之和, 可表示为

$$s_{\hat{y}}^2 = \sum_{k=1}^P b_k s_{ky}, \quad (3)$$

其中, y 为预报量; \hat{y} 为预报量的估计量; k 为预报因子; P 为预报因子个数; b_k 为因子的回归系数, s_{ky} 为预报因子和预报量的协方差。因此, 某个因子 k 对预报量 y 变化的贡献率表示为

$$R_k = \frac{b_k s_{ky}}{s_y^2} \times 100\% , (4)$$

其中, s_y^2 为预报量的方差。该方法可以较准确地定量确定影响 NDVI 年际变化的关键气象因子 (张璐等, 2020; 王慧等, 2022)。本文在多元线性回归问题的方差分析中, 均对不同时段气象要素变量去除了线性趋势。

3 青海高原生长季 NDVI 变化特征

图 2 给出了 1982-2018 年青海高原多年平均 NDVI 空间变化和气候倾向率分布, 由图 2a 可以看出青海高原生长季 NDVI 呈由东南向西北逐渐减小的空间分布特征, NDVI 平均值为 0.29, 这与韩炳宏等 (2019) 利用中分辨率成像光谱仪 (MODIS) NDVI 资料得到的结果一致。NDVI 高值区主要位于黄河源区东部和青海湖附近, 因为这些区域海拔较低 (如图 1a 所示), 生长季降水量较充足, 地表以温性草原、高山草甸和高寒草甸为主 (如图 1b 所示), 所以植被覆盖度较高, NDVI 值均大于 0.4, 这部分区域在青海高原的占比约为 28.2%。NDVI 低值区主要位于柴达木盆地及长江、澜沧江源的西部, NDVI 值低于 0.2, 面积占比约为 37.1%, 柴达木盆地平均海拔约 2700 m, 主要以温性荒漠和裸地下垫面为主, 大部分区域 NDVI 值甚至低于 0.1, 三江源西部的可可西里平均海拔超过 4500 m, 地表以高寒荒漠和高山草原下垫面为主。在青海高原中部有一条东北-西南向的高寒草原和温性荒漠过渡带, NDVI 值介于 0.2 - 0.4 之间, 这一区域在青海高原的占比约为 34.7%。

从青海高原 NDVI 气候倾向率空间分布 (图 2b) 可以看出, 除柴达木盆地外, 青海高原 NDVI 值以显著增加趋势为主, 显著增加区域面积约占青海高原的 57.3%, 主要分布在青海高原东部及西南部, 其中祁连山区的青海湖地区增加最为显著, 气候倾向率达 0.068/10 a ($p < 0.01$)。柴达木盆地地表 NDVI 呈显著减少趋势, 面积约占青海高原的 14.8%, 其中茫崖和冷湖地区植被退化最严重, NDVI 气候倾向率达 -0.023/10 a ($p < 0.01$)。由此可见, 近 37 年 (1982-2018 年) 青海高原地表植被呈两极化发展, 在青海高原东部和西南部植被显著变好的同时, 青海高原西北部的柴达木盆地地表植被表现出显著退化态势, 这与赵健赟和彭军还 (2016) 研究指出的青海省 11.3% 的区域 NDVI 呈显著下降的结论一致, 但出现退化的面积更大。

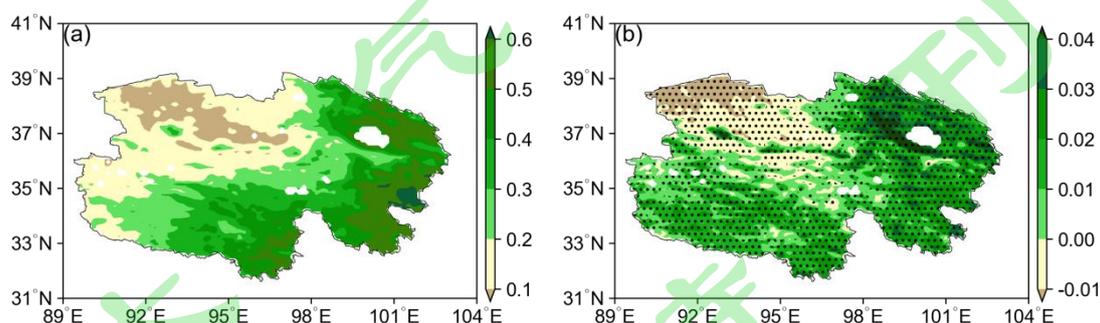


图 2 1982-2018 年青海高原生长季多年平均 NDVI (a) 和气候倾向率分布 (b) (图中打点区域通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验)

Fig.2 Distribution of (a) annual average NDVI and (b) its climate tendency rate in Qinghai Plateau growing season from 1982 to 2018 (The stippled areas in figure (b) indicate correlations above the 0.01 confidence level)

图 3 给出了 1982-2018 年青海高原区域平均 NDVI 年际变化及其 M-K 突变检验结果。图 3a 显示, 青海高原区域平均 NDVI 值在 0.26-0.32 之间变化, 在 1990 年代中期之前 NDVI 值较低, 且在 1989 年出现最小值, NDVI 值从 1990 年代中期之后开始迅速升高, 在 2002 年达到波峰后又波动下降, 直到 2015 年开始又有所回升, 最终在 2018 年出现最大值。整体来看, 在过去的 37a 中青海高原区域平均 NDVI 呈线性增加趋势, 气候倾向率达 0.01/10 a ($p < 0.01$), 其中 1995-2002 年这一时段增加最为迅速, 气候倾向率达 0.05/10 a ($p < 0.01$), 使得 NDVI 均值在 2000 年之后出现了气候态的转变(图 3a)。对其进行 M-K 突变检验显示(图 3b), UF 统计量在 1982-2018 年始终大于零, 说明青海高原生长季 NDVI 值一直处于增加趋势。UF 线在 1996 年之前为波动上升, 表明这段时间 NDVI 增加不明显, 之后 UF 线明显上升, 并在 1996 年出现突变, 之后在 1998 年开始显著上升 ($p < 0.05$)。由此可知, 青海高原生长季 NDVI 值的增加趋势在 1998 年前后出现了显著突变。那么这一突变在整个青海高原是否普遍存在? 是否存在区域差异? 为了探明这一问题, 我们将青海高原生长季 NDVI 分为 1982-1998 年 (P1) 和 1998-2018 年 (P2) 两个时段进行研究。

图 4 给出了青海高原生长季 P1 和 P2 时段 NDVI 的均值和差值场 (P2-P1) 分布。比较图 4a 和 4b 可以发现, 在 P2 时段 NDVI 值等于 0.2 的线比 P1 时段明显向西扩张, 青海高原的东部和南部地区 NDVI 值也有明显增大, NDVI 值大于 0.4 的面积由 24.0 % 增加到 31.7 %, 从图 4c 也可以看出, P2 时段相比于 P1 时段, 祁连山区、农业区、黄河源区东部、长江、澜沧江流域的 NDVI 均值均表现出显著增加的特征 ($p < 0.01$), 说明地表植被出现了明显的好转; 但值得注意的是, 在柴达木盆地 NDVI 值反而出现了大范围的减小, NDVI 值小于 0.1 的面积由原来的 4.8 % 增加到 10.8 %, 说明柴达木盆地地表植被比之前出现显著退化 ($p < 0.01$)。整体来看, P2 时段与 P1 时段 NDVI 的差值大于 0 的区域占 79.1 %, 小于 0 的区域占 20.9 %, 青海高原生长季 NDVI 值增加的区域是减小区域的 4 倍, 这也是图 2b 中青海高原生长季出现整体植被好转的主要原因。由以上的分析可知, 近 37a 来青海高原生长季地表植被变化存在显著区域差异和年代际突变特征, 那么这是什么原因造成的? 不同时段 NDVI 对青海高原气候变化的响应是否存在差异? 接下来我们将对青海高原不同时段的气候变化特征和驱动 NDVI 变化的关键气象要素进行研究。

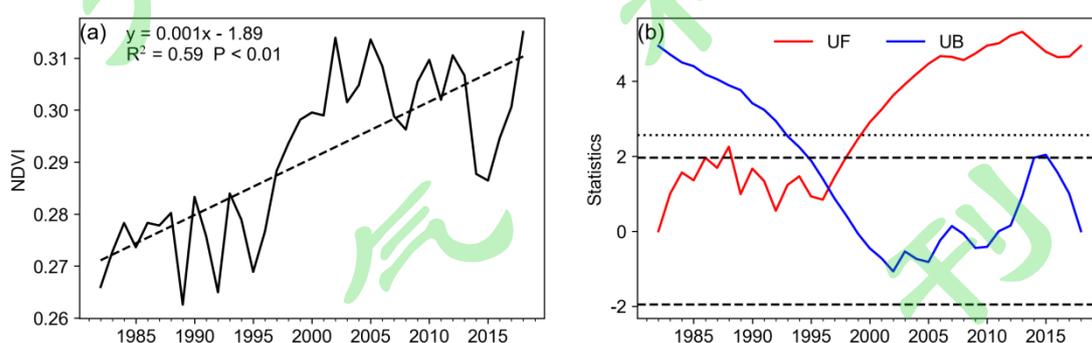


图 3 1982-2018 年青海高原生长季 NDVI 年际变化 (a) 及其 M-K 检验 (b) (图 a 中虚线为线性趋势, 图 b 中虚线、点线分别为 $\alpha = 0.05$ 和 0.01 的显著性水平)

Fig.3 The NDVI time series of Qinghai Plateau in growing season (a) and (b) its M-K statistical test during 1982-2018. (The dotted and dotted lines in Figure 6a and 6b are the significance levels of $\alpha = 0.05$ and 0.01)

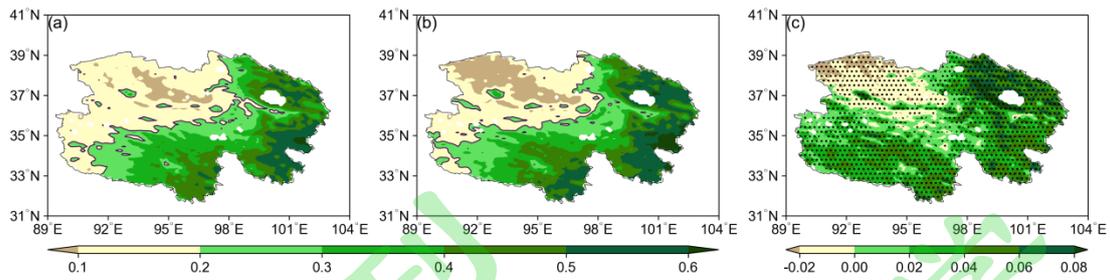


图4 青海高原生长季 P1 (1982-1998 年) (a) 和 P2 (1998-2018 年) (b) 时段 NDVI 的均值和差值场 (P2-P1) (c) 分布 (图中打点区域通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平 t 检验)

Fig.4 The spatial distribution of Qinghai Plateau NDVI in growing season of different periods, (a) in the P1 period (1982-1998), (b) in P2 period (1998-2018) and (c) the difference of NDVI between P1 and P2 period (P2-P1) (The stippled areas in figure (c) indicate above the 0.01 confidence level)

4 青海高原生长季气候暖湿化特征

由于青海高原站点稀少且分布不均,为了更好地分析地表植被对气候变化的响应,本文选用高分辨率的中国区域近地面气温和地面降水率驱动数据集 (CMFD),该数据集为格点资料,与地表植被遥感数据可以很好地匹配。首先我们需要了解一下 CMFD 数据在青海高原的适用性,图 5 给出了 1982-2018 年青海高原 CMFD 资料和气象站地面观测资料得到的气温和降水率/量空间分布及时间演变。由图 5a 和 5b 可以看出,青海高原 CMFD 近地面气温与站点观测资料插值得到的气温空间分布非常相似,均能反映出柴达木盆地和农业区气温较高,南部的唐古拉山、巴颜喀拉山和北部的祁连山周边高海拔地区温度较低的变化。由于青海高原西南部只有 2 个站点,所以站点资料插值得到的温度分布与 CMFD 资料在这一区域差别较大,CMFD 的气温空间分布与实际地形更符合。近 37a 年来,青海高原区域平均 CMFD 气温和站点气温年际变化非常一致 (图 5c),相关系数达 0.98 ($p<0.01$),两者的增温率也比较接近,分别为 $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,均表现为显著增温趋势 ($p<0.01$)。但是由于青海高原气象站点较稀疏,特别是温度偏低地区的气象站点更少,所以气象站点平均的气温均值比 CMFD 气温均值偏高了 $4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由图 5d 和 5e 可以看出,青海高原 CMFD 地面降水率与站点观测资料插值得到的降水量在空间分布上极其相似,均能反映出青海高原生长期降水自东南向西北逐渐减少的分布特征。由于降水要素的局地性比气温要强的多,所以由稀疏站点平均得到的青海高原降水量与 CMFD 平均降水率的相关系数 (0.65) 就不如气温之间的相关系数那么高,但也达到了显著相关水平 ($p<0.01$) (图 5f)。整体来看,两套资料均反映了青海高原生长季降水增多的趋势,标准化后的气候倾向率分别达到 $0.58/10\text{ a}$ 和 $0.34/10\text{ a}$ 。由以上分析可知,CMFD 资料和站点观测资料均反映了近 37a 青海高原的暖湿化气候特征,两套资料得到的气温和降水分布均非常相似,在年际变化上也均显著相关 ($p<0.01$),所以高分辨率的 CMFD 资料在青海高原上具有很好的适用性。

上一节的研究显示,近 37a 来青海高原生长季地表植被变化存在显著的区域差异和年代际突变特征,那么青海高原的气候暖湿化是否存在区域差异和年代际突变特征呢?接下来我们将利用 CMFD 资料对这一问题进行阐述。图 6 给出了青海高原近地面气温和地面降水率的 M-K 突变检验结果,由图 6a 可知,从 1980 年代中期开始,UF 曲线始终大于 0,说明青海高原气温一直处于增温趋势,但在 1993 年发生了突变,之后增温趋势有所趋缓,在 1995 年突变通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,这比郑然等 (2015) 研究得到的青藏高原气温变化在 1997 年的突变时间要早一些,这说明青藏高原的气温突变时间可能北部早于南部。由图 6b 可知,UF 曲线在 1997 年之前为波动变化,表明这段时间青海高原降水趋势不明显,之后 UF 线开始上升,并在 1998 年出现突变,之后一直处于增加趋势,这与 NDVI 在 1998 年开始的显著增加趋势一致。由此可知,1990 年代中后期以来,青海高原地表植被的显著

增加可能受到地面气温和降水率变化的共同影响。但青海高原的暖湿化特征是否存在区域差异？由于地面气温和降水率的突变时间与 NDVI 的比较接近，故这里也以 1998 年为界，分析青海高原不同时期暖湿化的区域差异。

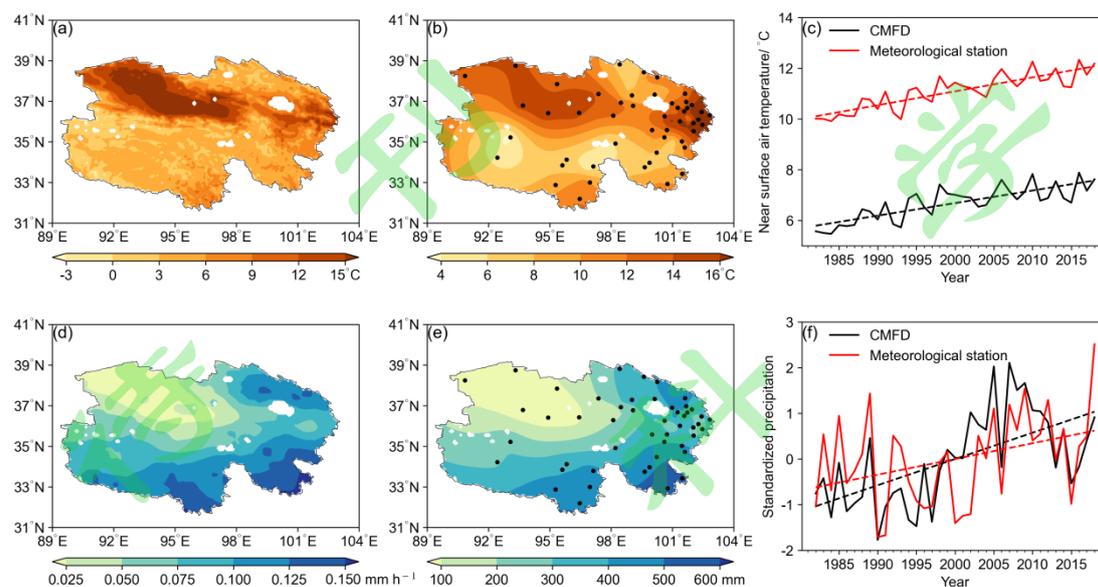


图 5 由 CMFD 资料和地面气象站观测资料得到的 1982-2018 年青海高原平均气温 (a, b) 和平均降水率、总降水量 (d, e) 空间分布及时间演变 (c, f) (图 5b 和 5e 中黑色圆点为气象站点位置)

Fig.5 Spatial distribution of the average temperature (a, b), average precipitation rate, total precipitation (d, e) and temporal evolution (c, f) on the Qinghai Plateau from 1982 to 2018 obtained from CMFD data and surface meteorological observation data (black dots in Figures 5b and 5e are the locations of meteorological stations)

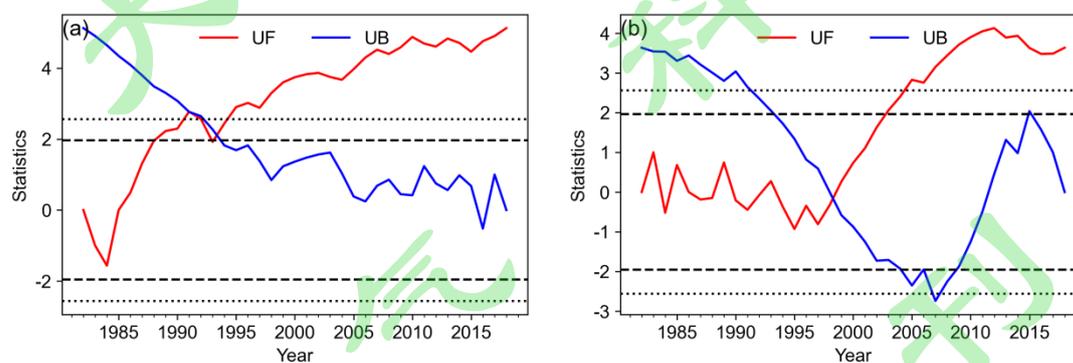


图 6 1982-2018 年青海高原近地面气温 (a) 和地面降水率 (b) 的 M-K 检验 (图 6a 和 6b 虚线、点线分别为 $\alpha=0.05$ 和 0.01 的显著性水平)

Fig.6 M-K test of near-surface air temperature (a) and surface precipitation rate (b) on the Qinghai Plateau from 1982 to 2018(The dotted and dashed lines in Figure 6a and 6b are the significance levels of $\alpha=0.05$ and 0.01)

图 7 给出了不同时段青海高原近地面气温和地面降水率的气候倾向率及前后时段差值场分布。由图 7a 和 7b 可知，1982-2018 年间，青海高原绝大部分地区呈暖湿化趋势，其中气温显著增加的区域占 83.1 % ($p<0.05$)，主要位于柴达木盆地、青海高原的南部和东部，其中柴达木盆地增温率最大值达 $1.59\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ；降水显著增多区域占 59.7%，主要位于青海

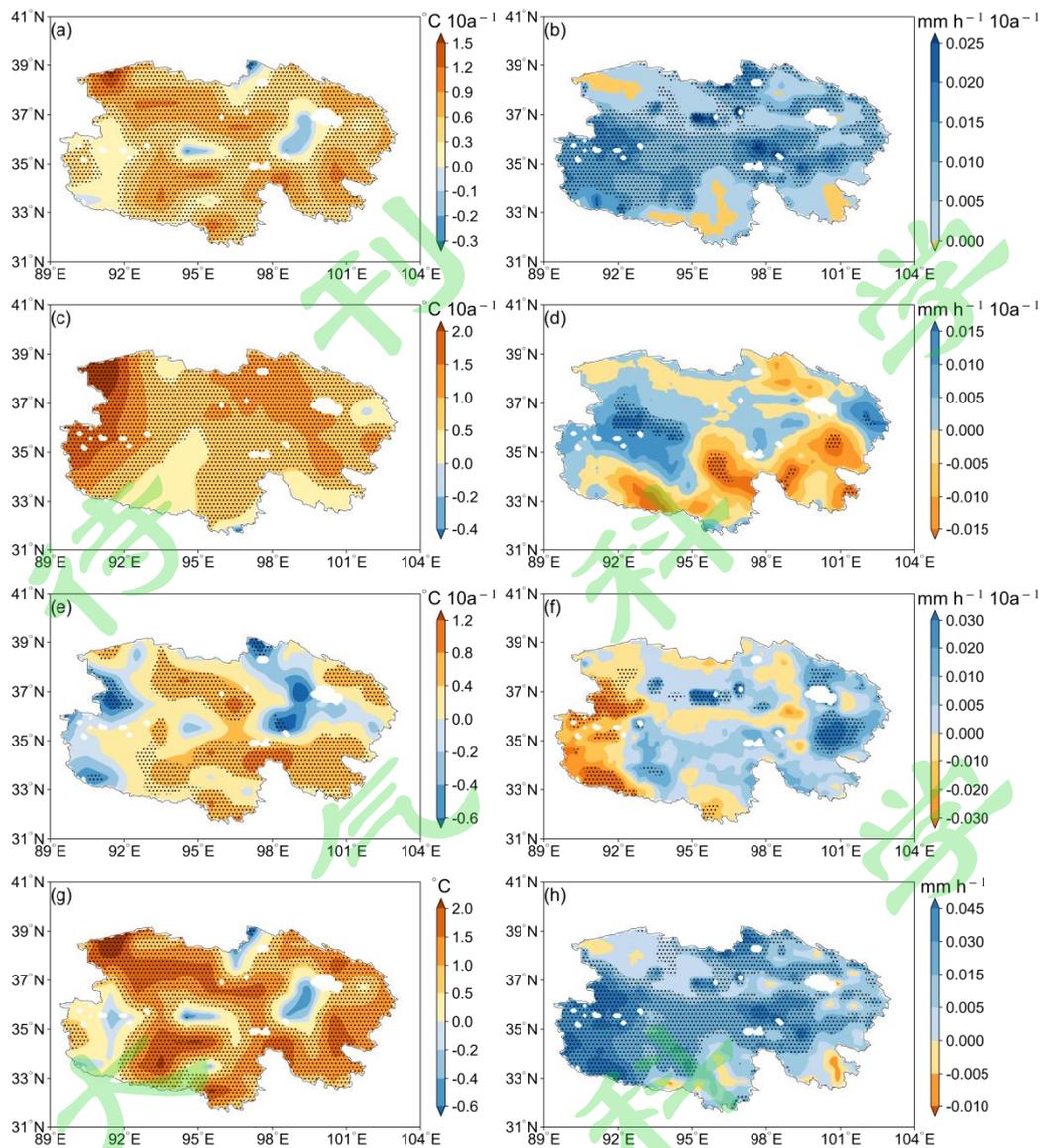


图7 不同时段青海高原温度、降水气候倾向率和差值场, 1982-2018年(a, b); P1: 1982-1998(c, d); P2: 1998-2018(e, f); P2-P1(g, h) (打点区域通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验)
 Fig.7 Climate tendency rate and difference field of temperature and precipitation over Qinghai Plateau in different periods, 1982-2018 (a, b); P1: 1982-1998 (c, d); P2: 1998-2018 (e, f), P2-P1 (g, h) (The dotted area passed the $\alpha=0.05$ significance level test)

高原的中部和西部地区, 气候倾向率最大可达 $0.06 \text{ mm h}^{-1}/10 \text{ a}$ 。在 P1 时段, 青海高原的温度变化与 1982-2018 年整体一致, 81.6% 区域呈现为显著增温, 青海高原西部增温尤为突出, 气候倾向率最大可达 $2.71 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ (图 7c); 而降水的变化与 1982-2018 年整体差别较大, 降水增加的区域出现在柴达木盆地南部、长江、澜沧江源的北部和农业区, 显著变湿的区域占比为 4.4%, 在黄河源区、长江、澜沧江源和祁连山区均为减少趋势, 面积占比为 54.3%, 显著减少区域面积占比为 2.3% (图 7d)。在 P2 时段, 与 P1 时段相比, 气温的增温区域出现减少, 减少面积占 31.3%, 在青海高原的西部、祁连山区和黄河源区北部甚至出现显著降温趋势, 面积占比为 3.2%, 但黄河源区南部、长江、澜沧江源东部的增温比之前更加显著 (图 7e); 降水变湿的区域出现增多, 增多面积占比为 61.7%, 显著增多区域占比 8.9%, 但在柴达木盆地西部和长江、澜沧江源西部出现显著变干的区域, 占比为 8.1% (图 7f)。由前后时段温度和降水率差值 (P2 减 P1 时段) 的空间分布 (图 7g 和 7h) 可知, P2 时段相对于 P1 时段, 青海高原 77.4% 的区域气温显著 ($p < 0.05$) 升高, 64.0% 的区域降水显著增

多，其中柴达木盆地温度变化最大，温差大于 1.5°C 的区域占 27.4%，降水显著增多的区域主要发生在青海中部和西部地区，地面降水率最大增加为 0.10 mm h^{-1} ，这与青海高原 1982-2018 年整体暖湿化（图 7a 和图 7b）趋势一致。

综上所述，青海高原在 1982-2018 年气候整体呈暖湿化特征，地面气温和降水率在 1990 年代中后期发生突变，突变前后气候暖湿化特征存在区域差异。在增温方面，无论是增温范围还是气候倾向率，P1 时段都要强于 P2 时段；在变湿方面，P2 时段强于 P1 时段。

5 青海高原生长季 NDVI 对气候暖湿化的响应

对青海高原生长季 NDVI 与近地面气温和降水率趋势变化的一致性分析发现（图 8），除了柴达木盆地，1982-2018 年青海高原生长季 NDVI 与近地面气温和降水率趋势变化均具有良好的 consistency，其中与近地面气温趋势变化一致的区域占比为 72.6%，两者均为显著增加的区域占比为 51.1%，主要分布在祁连山区、东部农业区和三江源区（图 8a）；与近地面降水率趋势变化一致的区域占比为 73.5%，两者均呈显著增加的区域占比为 37.8%，主要分布在青海高原的西南部、青海湖附近及黄河源区北部（图 8b）。这说明近 37a 青海高原生长季植被的大范围好转是青海高原气候长期暖湿化的结果。但分开 P1 和 P2 时段来看，NDVI 与近地面气温和降水率趋势的一致性并不好，一致显著增加的区域大大减少（图略），这说明青海高原植被对气温和降水的短期趋势并没有明显的响应。那么，青海高原生长季地表植被对气候变化的响应是否主要表现在年际变化上？在气候暖湿化的不同阶段，其年际响应是否存在差异？为了对此问题有更深入地了解，我们首先去除 P1 和 P2 时段所用资料的线性趋势，然后对 NDVI 与近地面气温和降水率进行了偏相关分析和方差分析，以了解在气候暖湿化不同阶段，青海高原生长季 NDVI 对气候变化响应的差异和不同气候因子的贡献情况。

图 9 给出了 P1 和 P2 时段青海高原生长季 NDVI 与近地面气温和降水率的偏相关分布。由图 9a 可以发现，在 P1 时段去除降水的影响，青海高原生长季 NDVI 与气温在 63.5% 的区域表现出负相关关系，8.0% 的区域为显著负相关 ($p < 0.1$)，主要集中在祁连山区的青海湖附近、黄河源区北部及柴达木盆地，这可能是因为在这一时段青海高原的降水整体偏少（图 5f），在水分条件相对不足的情况下，温度升高不利于地表植被的生长和发育。去除温度的影响，P1 时段 NDVI 与降水在祁连山区、农业区和长江、澜沧江源区以不显著的正相关关系为主，在柴达木盆地东部出现显著负相关关系（图 9c），面积占 4.2%，这可能有两种原因，一是这一区域降水量较少，年降水总量只有 51.4 mm，但温度相对较高且地表裸露，蒸发量大，不利于地表植被的生长，二是这一区域以盐碱地为主，地表条件本身就不适于植被生长，所以降水与植被的关系与其他区域不同。在 P2 时段，去除降水的影响，青海高原生长季 NDVI 与气温在 62.8% 的区域呈现出正相关关系，其中 16.0% 的区域为显著正相关 ($p < 0.1$)，主要位于黄河源区和长江、澜沧江源区（图 9b）；去除温度的影响，NDVI 与降水在 61.1% 的区域呈现正相关关系，其中 17.0% 的区域为显著正相关 ($p < 0.1$)，主要位于祁连山区的青海湖附近、农业区和黄河源区北部（图 9d）。由此可以看出，在 P2 时段，温度和降水与 NDVI 的偏相关关系均以正相关为主，这可能是因为在这一时段青海高原的降水比之前明显增加（图 7h），同时在青海高原南部的高海拔地区气温出现显著增温（图 7e），满足了高海拔地区植被所需的热量条件，在水分和热量条件日益变好的情况下，共同促进了地表植被的生长，使得青海高原生长季地表植被出现大范围好转。

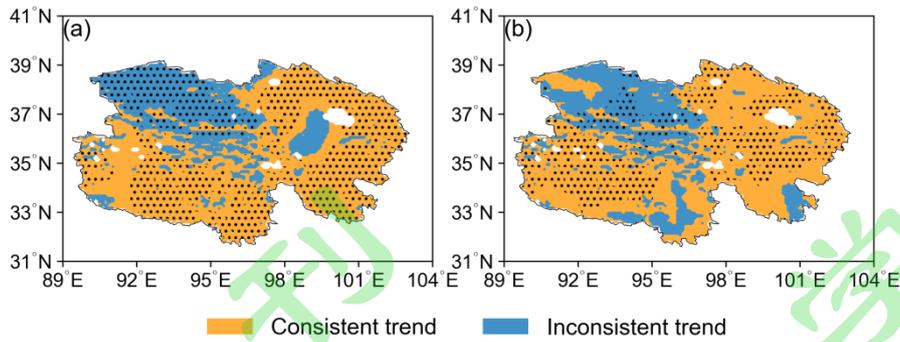


图 8 1982-2018 年青海高原生长季 NDVI 与近地面气温 (a) 和降水率 (b) 趋势变化的一致性分析 (打点区域趋势变化均通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验)

Fig.8 Analysis of the trend consistency between NDVI and the near-surface temperature (a) and precipitation rate (b) during the growing season of Qinghai Plateau from 1982 to 2018 (The dotted area passed the $\alpha=0.05$ significance test)

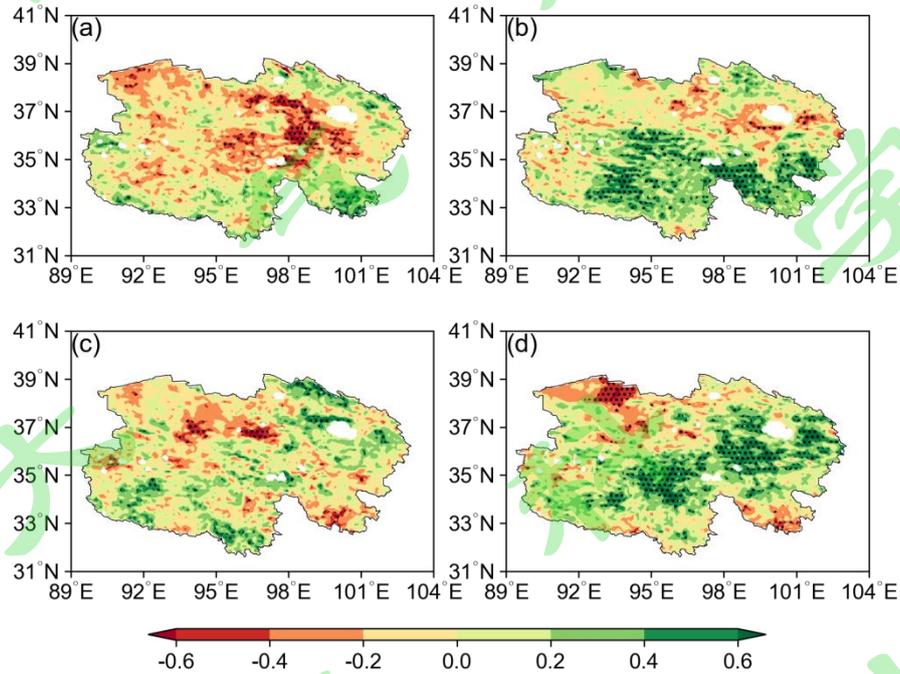


图 9 不同时段青海高原生长季 NDVI 与近地面气温 (a, b) 和降水率 (c, d) 偏相关分布, P1: 1982-1998 (a, c); P2: 1998-2018 (b, d) (打点区域通过了 $\alpha=0.1$ 显著性水平检验)

Fig.9 The distribution of partial correlation between NDVI and near-surface air temperature (a, c) and precipitation rate (b, d) during the growing season of Qinghai Plateau in different periods. P1: 1982-1998 (a, c); P2: 1998-2018 (b, d). (The stippled areas in figures (b, d) indicate correlations above the 0.1 confidence level)

图 10 给出了前后时段青海高原近地面气温和降水率对生长季 NDVI 回归分析方差贡献率的差值分布 (P2-P1)。由图 10a 可以发现, P2 时段相对于 P1 时段, 在青海高原南部, 气温对生长季 NDVI 的贡献率明显增加, 特别是在黄河源区南部和长江、澜沧江源区东部, 气温贡献率增加均超过 20%, 这可能与该时段这些区域气温的显著增温有关 (图 7e); 在青海高原的中部和西北部, 气温的贡献率出现减小, 特别是在黄河源区北部和青海湖西边, 气温的贡献率减小超过 20%, 这与该时段这些区域出现降温趋势相一致 (图 7e)。由图 10b 可以发现, P2 时段相对于 P1 时段, 降水对生长季 NDVI 的贡献率以增加为主导, 特别是在东部

农业区、黄河源和长江源北部以及柴达木盆地西北部，降水的贡献率增加均超过 20%，这可能主要与该时段青海高原降水的整体增加有关。

对比图 9 和图 10 可知，在 P2 时段，气温和降水对青海高原植被变化贡献率增加的区域（图 10）与图 9 中的显著相关区域一致。综合偏相关分析和多元回归方差分析结果表明，在青海高原气候暖湿化初期（P1 时段），水分因子（降水）相对不足的情况下，青海高原地表植被对热量因子（气温）以负反馈为主，特别是在黄河源区北部和青海湖附近；而在青海高原气候暖湿化后期（P2 时段），随着青海高原降水的显著增多，地表植被对热量因子（气温）转为以正反馈为主，特别是在青海高原南部的三江源区，同时，在东部农业区、三江源北部和青海湖附近，地表植被对水分因子（降水）也以正反馈为主，在热量和水分条件日益变好的共同影响下，该时段青海高原地表植被出现了大范围的好转。

综上所述，近 37a 青海高原生长季地表植被出现了大范围好转，这与青海高原气候长期暖湿化趋势相一致。但在不同阶段，地表植被对气候变化具有不同的响应。在青海高原气候暖湿化初期（1998 年以前），水分条件相对不足的情况下，地表植被对热量因子（气温）以负反馈为主，增温不利于地表植被的生长，而在气候暖湿化后期（1998 年之后），在水分条件相对充足的条件下，地表植被对水分和热量因子均以正反馈为主，在两者的共同作用下，青海高原生长季地表植被出现了大范围好转。

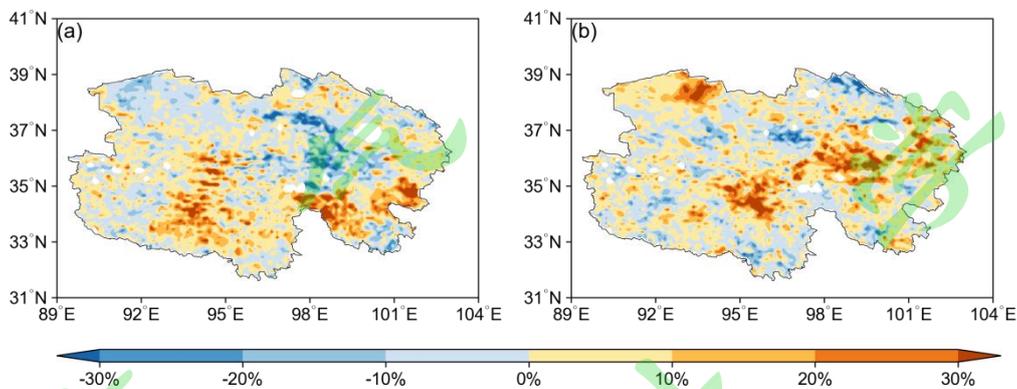


图 10 P2（1998-2018 年）时段与 P1（1982-1998 年）时段青海高原近地面气温（a）和降水率（b）对 NDVI 回归分析方差贡献率的差值（P2-P1）

Figure 10 The difference field of the variance contribution rate of air temperature (a) and precipitation rate (b) near the surface of the Qinghai Plateau to NDVI regression analysis (P2-P1)

6 结论与讨论

本文利用 1982-2018 年 NOAA AVHRR NDVI 数据集与 CMFD 数据集中的近地面气温和地面降水率资料，研究了青海高原暖湿化背景下地表植被变化特征及其对气候变化响应的年代际差异。得到以下几点结论：

（1）1982-2018 年，青海高原生长季（5-9 月）地表植被呈由东南向西北逐渐减小的空间分布特征，整体呈显著增加趋势，气候倾向率达 $0.01/10a$ ，通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平 t 检验（ $P<0.01$ ），但在空间上呈两极化发展，在青海高原东部和西南部植被显著变好（面积占 57.3 %）的同时，青海高原西北部的柴达木盆地地表植被却表现出退化态势（面积占 14.8 %）。

（2）CMFD 资料和站点观测资料均反映了 1982-2018 年青海高原的暖湿化气候特征，但在 1990 年代中后期发生了显著的趋势变化，不同时段气候暖湿化的区域和强度存在差异，P1 时段（1982-1998 年）的增温强于 P2（1998-2018 年）时段，而 P2 时段的变湿强于 P1 时段。青海高原生长季 NDVI 值的增加趋势在 1998 年前后出现了显著突变，1998 年之前为波动上升，趋势不显著，但在 1998 年开始出现显著增加趋势（ $P<0.05$ ），这与青海高原的地面降水率变化趋势相一致。

(3) 在青海高原气候暖湿化不同阶段, 地表植被对气候变化具有不同的响应, 在 P1 时段, 水分条件相对不足的情况下, 地表植被对热量因子(气温)以负反馈为主, 增温不利于地表植被的生长, 特别是在黄河源区北部和青海湖附近; 而在 P2 时段, 在水分条件相对充足的条件下, 地表植被对水分和热量因子均以正反馈为主, 在二者的共同作用下, 青海高原生长季地表植被出现了大范围好转。

植被的生长受多种因素的影响, 其中包括自然因素和人为因素, 自然因素中的气候因子起着至关重要的作用, 气候条件决定了植被类型与分布。降水和温度是影响植物生长最重要的水热条件(Wang and French, 1994), 但其他气候因子的影响也不容忽视, 比如太阳辐射量、相对湿度和地面风速等(Kong et al., 2017; Li et al., 2021; 杨亮等, 2023), 多种气候因子对青海高原地表植被的协同影响还有待进一步深入研究。人类活动对植被的生长也会产生重要影响, 青海高原草地资源丰富, 经济发展以畜牧业为主, 过度放牧将导致植被的严重退化。在 20 世纪末, 国家为保护生态环境, 制定了退耕还林、还草政策及生态环境保护工程建设, 对青海高原植被恢复与改善也起到了积极的作用。如何将影响植被生长的气候因素与人为和社会因素分离, 也对深刻理解气候变化和人类活动对地表植被变化的影响和相对贡献具有重要意义。另外, 特殊的地理环境和土壤条件也会造成植被对气候变化响应的区域差异, 在青海高原整体气候暖湿化背景下, 柴达木盆地地表植被变化及其对气候变化的响应与其他区域存在显著差异。首先, 这与该区域降水极其贫乏但增温异常突出有关, 虽然近年来降水也出现了增加趋势, 但微弱地降水增加对当地水分条件的改善极其有限, 同时该区域气温的增温率比青海其他区域都高, 且地表裸露, 蒸发量极大, 在水分条件不足的情况下, 增温不利于地表植被的生长, 所以, 该区域地表植被一直表现为严重退化趋势; 其次, 该区域分布着大量的盐湖, 地表以盐碱地为主, 土壤条件异于其他区域, 所以, 该地区地表植被对气候变化的响应与青海高原其他区域存在显著差异。

参考文献:

- Chu H S, Venevsky S, Wu C, et al. 2019. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 650: 2051–2062. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.115
- Diao C, Liu Y, Zhao L, et al. 2021. Regional-scale vegetation-climate interactions on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Ecological Informatics*, 65: 101413. doi:10.1016/j.ecoinf.2021.101413
- He J, Yang K, Tang W J, et al. 2020. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. *Scientific Data*, 7: 25. doi:10.1038/s41597-020-0369-y
- Kong D D, Zhang Q, Singh V P, et al. 2017. Seasonal vegetation response to climate change in the northern hemisphere (1982–2013) [J]. *Global and Planetary Change*, 148: 1-8. doi:10.1016/j.gloplacha.2016.10.020
- Li P, Wang J, Liu M M et al. 2021. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015 [J]. *Catena* 203: 105331. doi:10.1016/j.catena.2021.105331
- Liu E Q, Xiao X M, Shao H Y, et al. 2021. Climate change and livestock management drove extensive vegetation recovery in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Remote Sensing*, 13(23): 4808. doi:10.3390/rs13234808
- Liu X F, Zhang J S, Zhu X F, et al. 2014. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during 2000–2011 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 24(2): 288-302. doi:10.1007/s11442-014-1088-0
- Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. 2003. Interannual variations of monthly seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999 [J]. *Journal of Geophysical*

- Research, 108(D14): 4401. doi:10.1029/2002JD002848
- Ran Y H, Li X, Cheng G D. 2018. Climate warming over the past half century has led to thermal degradation of permafrost on the Qinghai–Tibet Plateau [J]. *The Cryosphere*, 12(2): 595–608. doi:10.5194/tc-12-595-2018
- Wang B L, French H M. 1994. Climate controls and high-altitude permafrost, Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 5(2): 87–100. doi:10.1002/ppp/3430050203
- Wang S R, Guo L L, He B, et al. 2020. The stability of Qinghai-Tibet Plateau ecosystem to climate change [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 115: 102827. doi:10.1016/j.pce.2019.102827
- Wang Z Q, Lu Z Y, Cui G L. 2020. Spatiotemporal variation of land surface temperature and vegetation in response to climate change based on NOAA-AVHRR data over China [J]. *Sustainability*, 12(9): 3601. doi:10.3390/su12093601
- Zhang Y H, Ye A Z. 2020. Spatial and temporal variations in vegetation coverage observed using AVHRR GIMMS and Terra MODIS data in the mainland of China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 41(11): 4238–4268. doi:10.1080/01431161.2020.1714781
- 白慧敏, 龚志强, 孙桂全, 等. 2022. 气象要素对华北地区夏季植被覆盖度的影响 [J]. *大气科学*, 46(1): 27–39. Bai Huimin, Gong Zhiqiang, Sun Guiquan, et al. 2022. Influence of meteorological elements on summer vegetation coverage in North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 46(1): 27–39. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2102.20233
- 陈琪, 杨九艳, 闫瑞玲, 等. 2022. 荒漠区不同植被类型 NDVI 变化特征分析—以内蒙古阿拉善盟为例[J]. *中国草地学报*, 44(3): 17–28. Chen Qi, Yang Jiuyan, Yan Ruiling, et al. 2022. Analysis of NDVI variation characteristics of different vegetation types in desert areas—A case study of Alxa League, Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Grassland (in Chinese)*, 44(3): 17–28. doi:10.16742/j.zgxcdxb.20200226
- 范广洲, 程国栋. 2002. 影响青藏高原植被生理过程与大气 CO₂ 浓度及气候变化的相互作用 [J]. *大气科学*, 26(4): 509–518. Fan Guangzhou, Cheng Guodong. 2002. Interactions between physiological process of the Tibetan Plateau vegetation and CO₂ concentration and climate change[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26(4): 509–518.
- 葛骏, 余晔, 解晋, 等. 2017. 青藏高原两类下垫面地表能量分配对气候要素的响应研究 [J]. *大气科学*, 41(5): 918–932. Ge Jun, Yu Ye, Xie Jin, et al. 2017. A study on responses of surface energy partitioning to climatic factors on two types of underlying surface over Qinghai–Xizang Plateau[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(5): 918–932. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16200
- 韩炳宏, 周秉荣, 颜玉倩, 等. 2019. 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 [J]. *草地学报*, 27(6): 1651–1658. Han Binghong, Zhou Bingrong, Yan Yuqian, et al. 2019. Analysis of vegetation coverage change and its driving factors over Tibetan Plateau from 2000 to 2008[J]. *Acta Agrestia Sinica (in Chinese)* 27(6): 1651–1658. doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2019.06.023
- 侯美亭, 赵海燕, 王笋, 等. 2013. 基于卫星遥感的植被 NDVI 对气候变化响应的研究进展 [J]. *气候与环境研究*, 18(3): 353–364. Hou Meiting, Zhao Haiyan, Wang Zheng, et al. 2013. Vegetation responses to climate change by using the satellite-derived normalized difference vegetation index: A review[J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18(3): 353–364. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11137
- 胡琴, 姜大膀, 范广洲. 2015. 青藏高原未来气候变化预估: CMIP5 模式结果 [J]. *大气科学*,

- 39(2): 260–270. Hu Qin, Jiang Dabang, Fan Guangzhou. 2015. Climate change projection on the Tibetan Plateau: Results of CMIP5 models[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(2): 260–270. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1406.13325
- 李红梅, 李作伟, 王振宇, 等. 2012. 青海高原不同生态功能区气候突变时间的比较分析 [J]. 冰川冻土, 34(6): 1388–1393. Li Hongmei, Li Zuowei, Wang Zhenyu, et al. 2012. Comparative analysis of the climate abrupt changing time in different ecological function regions of Qinghai province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 34(6): 1388–1393.
- 李明, 孙洪泉, 苏志诚. 2021. 中国西北气候干湿变化研究进展 [J]. 地理研究, 40(4): 1180–1194. Li Ming, Sun Hongquan, Su Zhicheng. Research progress in dry/wet climate variation in northwest China[J]. Geographical Research (in Chinese), 2021, 40(4): 1180–1194. doi:10.11821/dlyj020200328
- 李生辰, 李栋梁, 赵平, 等. 2009. 青藏高原“三江源地区”雨季水汽输送特征 [J]. 气象学报, 64(4): 591–598. Li Shengchen, Li Dongliang, Zhao Ping, et al. 2009. The climatic characteristics of vapor transportation in rainy season of the origin area of three rivers in Qinhai Xizang Plateau[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(4): 591–598.
- 刘雅勤, 范广洲, 周定文, 等. 2007. 青藏高原冬、春植被归一化指数变化特征及其与高原夏季降水的联系 [J]. 气象学报, 65(6): 959–967. Liu Yaqin, Fan Guangzhou, Zhou Dingwen, et al. 2007. Variability of NDVI in winter and spring on the Tibetan Plateau and their relationship with summer precipitation[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65(6): 959–967.
- 刘振元, 张杰, 陈立. 2017. 青藏高原植被指数最新变化特征及其与气候因子的关系 [J]. 气候与环境研究, 22(3): 289–300. Liu Zhenyuan, Zhang Jie, Chen Li. 2017. The latest change in the Qinghai–Tibetan Plateau vegetation index and its relationship with climate factors[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22(3): 289–300. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.14247
- 毛飞, 唐世浩, 孙涵, 等. 2008. 近 46 年青藏高原干湿气候区动态变化研究 [J]. 大气科学, 32(3): 499–507. Mao Fei, Tang Shihao, Sun Han, et al. 2008. A study of dynamic change of dry and wet climate regions in the Tibetan Plateau over the last 46 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(3): 499–507.
- 朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 等. 2019. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈 [J]. 科学通报, 64(27): 2842–2855. Piao Shilong, Zhang Xianzhou, Wang Tao, et al. 2019. Responses and feedback of the Tibetan Plateau's alpine ecosystem to climate change[J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 64(27): 2842–2855. doi:10.1360/TB-2019-0074
- 祁苗苗, 姚晓军, 刘时银, 等. 2020. 1973–2018 年青海湖岸线动态变化 [J]. 湖泊科学, 32(2): 573–586. Qi Miaomiao, Yao Xiaojun, Liu Shiyin, et al. 2020. Dynamic change of Lake Qinghai shoreline from 1973 to 2018[J]. Journal of Lake Sciences (in Chinese), 32(2): 573–586. doi:10.18307/2020.0225
- 任芝花, 余予, 邹凤玲, 等. 2012. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测 [J]. 应用气象学报, 23(6): 739–747. Ren Zhihua, Yu Yu, Zou Fengling, et al. 2012. Quality detection of surface historical basic meteorological data[J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 23(6): 739–747. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2012.06.011
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 23(2): 152–164. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China[J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 2003, 23(2): 152–164.

- 王慧, 张璐, 石兴东, 等. 2022. 青藏高原中东部地表感热趋势转折特征的季节差异 [J]. 大气科学, 46(1): 133–150. Wang Hui, Zhang Lu, Shi Xingdong, et al. 2022. Seasonal differences in the trend turning characteristics of surface sensible heat over the central and Eastern Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(1): 133–150. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.21026
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 124pp. Wei Fengying. 2007. Statistical Diagnosis and Prediction Technology of the Climate (in Chinese)[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 124pp.
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘新, 等. 2005. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局 [J]. 大气科学, 29(1): 47–56, 167–168. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Xin, et al. 2005. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(1): 47–56, 167–168.
- 徐丽娇, 胡泽勇, 赵亚楠, 等. 2019. 1961–2010 年青藏高原气候变化特征分析 [J]. 高原气象, 38(5): 911–919. Xu Lijiao, Hu Zeyong, Zhao Yanan, et al. 2019. Climate change characteristics in Qinghai-Tibetan Plateau during 1961–2010[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 38(5): 911–919. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00137
- 阳坤, 何杰, 唐文君, 等. 2019. 中国区域地面气象要素驱动数据集(1979-2018) [DB]. 国家青藏高原科学数据中心. Yang Kun, He Jie, Tang Wenjun, et al. 2019. China meteorological forcing dataset (1979-2018) [DB]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center.
- 杨达, 易桂花, 张廷斌, 等. 2021. 青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素 [J]. 应用生态学报, 32(4): 1361–1372. Yang Da, Yi Guihua, Zhang Tingbin, et al. 2021. Spatiotemporal variation and driving factors of growing season NDVI in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 32(4): 1361–1372. doi:10.13287/j.1001-9332.202104.014
- 杨亮, 刘丽男, 孙少波. 2023. 1982–2015 年青藏高原植被变化的主导环境因子 [J]. 生态学报, 43(2): 744–755. Yang Liang, Liu Linan, Sun Shaobo. 2023. The dominated environmental factors of vegetation change on the Qinghai-Tibet Plateau from 1982 to 2015[J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 43(2): 744–755. doi:10.5846/stxb202110182938
- 杨耀先, 胡泽勇, 路富全, 等. 2022. 青藏高原近 60 年来气候变化及其环境影响研究进展 [J]. 高原气象, 41(1): 1–10. Yang Yaoxian, Hu Zeyong, Lu Fuquan, et al. 2022. Progress of recent 60 years' climate change and its environmental impacts on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 41(1): 1-10. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00117
- 张璐, 王慧, 石兴东, 等. 2020. 青藏高原中东部地表感热趋势转折特征及成因分析 [J]. 高原气象, 39(05): 912–924. Zhang Lu, Wang Hui, Shi Xingdong, et al. 2020. Characteristics and causes of surface sensible heat trend transition in central and Eastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 39(5): 912–924. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00050
- 张学珍, 朱金峰. 2013. 1982~2006 年中国东部植被覆盖度的变化 [J]. 气候与环境研究, 18(3): 365–374. Zhang Xuezheng, Zhu Jinfeng. 2013. Variations in fractional vegetation coverage over eastern China during 1982–2006[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18(3): 365–374. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11174
- 赵健赞, 彭军还. 2016. 基于 MODIS NDVI 的青海高原植被覆盖时空变化特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 30(4): 67–73. Zhao Jianyan, Peng Junhuan. 2016. Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Qinghai Plateau based on MODIS NDVI data[J]. Journal of

Arid Land Resources and Environment (in Chinese) 30(4): 67–73.
doi:10.13448/j.cnki.jalre.2016.115

- 赵倩倩, 李建华, 张桂琴, 等. 2022. 气候变化背景下黄河流域植被变化及其成因 [J]. 气候与环境研究, 27(1): 157–169. Zhao Qianqian, Li Jianhua, Zhang Guiqin, et al. 2022. Vegetation changes and their causes in the Yellow River Basin under the background of climate change[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 27(1): 157–169. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21115
- 郑然, 李栋梁, 蒋元春, 等. 2015. 全球变暖背景下青藏高原气温变化的新特征 [J]. 高原气象, 34(6): 1531–1539. Zheng Ran, Li Dongliang, Jiang Yuanchun, et al. 2015. New characteristics of temperature change over Qinghai-Xizang Plateau on the background of global warming[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34(6): 1531–1539. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00123