

DOI: 10.5846/stxb202107061801

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.

Li H Y, Zhang C G, Wang S Z, Ma W D, Liu F G, Chen Q, Zhou Q, Xia X S, Niu B C. Response of vegetation dynamics to hydrothermal conditions on the Qinghai-Tibet Plateau in the last 40 years. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4770-4783.

## 近 40 年青藏高原植被动态变化对水热条件的响应

李红英<sup>1,3</sup>, 张存桂<sup>1</sup>, 汪生珍<sup>1</sup>, 马伟东<sup>1</sup>, 刘峰贵<sup>1,2,\*</sup>, 陈 琼<sup>1</sup>, 周 强<sup>1</sup>, 夏兴生<sup>1</sup>, 牛百成<sup>1</sup>

1 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810008

2 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008

3 青海省地理空间信息技术与应用重点实验室, 西宁 810008

**摘要:** 植被对水热条件的响应因生态系统的空间异质性而具有显著的差异。基于 GIMMS NDVI3g 和 MODIS NDVI 逐旬数据集, 通过数据融合构建的青藏高原 1982—2020 年的植被时间序列, 利用 Mann-Kendall 趋势法分析近 40 年植被动态变化及其对温度、降水和辐射等水热条件的响应, 并划定了植被动态的主要水热驱动因子分区。结果表明: (1) 近 40 年青藏高原植被生长季平均 NDVI 呈现显著上升趋势, 增速为 0.006/10a, 植被 NDVI 显著增加和减少的区域分别占青藏高原总面积的 73.97% 和 18.38%; (2) 青藏高原植被对水热条件的响应在静态上表现为高原腹地较高原边缘更加明显; 在动态上表现为不同植被类型区对水热因子的响应关系、方向、程度均有所不同; 整体上除森林和灌丛外, 所有高寒植被类型与降水的响应程度要优于温度和辐射; (3) 青藏高原植被生长受水热因子驱动的区域占高原总面积的 55.95%, 其中 42.72% 以上的区域气温、降水和太阳辐射的驱动作用是互补的, 13.23% 的区域由多个水热因子联合驱动; 44.05% 的区域为非气候驱动区。

**关键词:** 青藏高原; 植被动态; 水热条件; 驱动因子

## Response of vegetation dynamics to hydrothermal conditions on the Qinghai-Tibet Plateau in the last 40 years

LI Hongying<sup>1,3</sup>, ZHANG Cungui<sup>1</sup>, WANG Shengzhen<sup>1</sup>, MA Weidong<sup>1</sup>, LIU Fenggui<sup>1,2,\*</sup>, CHEN Qiong<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>1</sup>, XIA Xingsheng<sup>1</sup>, NIU Baicheng<sup>1</sup>

1 College of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

2 Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810008, China

3 Geomatics Technology and Application key Laboratory of Qinghai Province, Xining 810008, China

**Abstract:** The response of vegetation to hydrothermal conditions varies significantly due to the spatial heterogeneity of ecosystems. In-depth exploration of their response and adaptation mechanisms is important for understanding the impact of regional climate change. In order to explore the relationship between vegetation and climate change on the Qinghai-Tibet Plateau for a long time, we constructed the vegetation time series of the Qinghai-Tibet Plateau from 1982 to 2020 based on the global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) NDVI data sets by Maximum Value Composition (MVC), pixel-by-pixel regression analysis and data fusion. The Mann-Kendall trend method was used to analyze the dynamic changes of vegetation over the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years. The partial correlation and complex correlation analysis

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2019YFA0606902); 中国科学院战略先导 A 类专项(XDA2009000002)

**收稿日期:** 2021-07-06; **网络出版日期:** 2022-02-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lfg\_918@163.com

methods were used to explore the responses of vegetation to the changes of temperature, precipitation and radiation, while the main driving factors of vegetation dynamic changes were demarcated. The results show that: (1) in recent 40 years, the average NDVI of vegetation growing season on the Qinghai-Tibet Plateau increased significantly with an average growth rate of 0.006/10a, which was 0.005/10a before 2000 and 0.011/10a after 2000. The area where NDVI increased significantly accounted for 73.97% of the total area of the Qinghai-Tibet Plateau. They were mainly distributed in the north, west and south of the Plateau. The NDVI decreased significantly in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau, accounting for 18.38% of the total area, where the altitude is relatively low and human activities are frequent. (2) The response of vegetation to hydrothermal conditions in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau is more intense than that in the edge of the plateau, and the response threshold is obvious. The temperature is 2—11 °C, the precipitation is 250—650 mm, and the radiation is 2900—3750 MJ/m<sup>2</sup>. On the whole, except for forest and shrub, the response degree of all alpine vegetation types to precipitation is stronger than that of temperature and radiation. On the interdecadal scale, the positive effect of ecological engineering from 2001 to 2010 was the most obvious. (3) The growth of vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau is driven by hydrothermal factors accounts for 55.95% of the total area. Among them, more than 42.72% of the areas are complementary driven by temperature, precipitation and solar radiation. 13.23% of the areas are driven by combination multiple hydrothermal factors. In addition, 44.05% of the areas are non-climate-driven. In space, different vegetation types showed different positive and negative responses to hydrothermal factors. The alpine vegetation in the northern part of the plateau is mainly driven by solar radiation. The arid and semi-arid grasslands in the plateau hinterland are mainly driven by precipitation. The meadows and thickets in the central and southern part of the plateau are mainly driven by temperature. The coniferous, broad-leaved and mixed forests on the southern edge of the plateau are slightly more affected by radiation and temperature.

**Key Words:** Qinghai-Tibet Plateau; vegetation dynamics; hydrothermal conditions; driving factors

植被是全球陆地生态系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>,在调节气候变化、维持陆地生态系统功能等方面发挥着重要作用<sup>[2-3]</sup>。青藏高原作为全球平均海拔最高的独特自然地理单元,是我国乃至亚洲重要的生态安全屏障<sup>[4]</sup>,素有“世界第三极”之称,也是全球气候变化的敏感区和生态脆弱带<sup>[5-6]</sup>。在过去几十年,随着全球气候变化与人类活动加剧,青藏高原地表自然地理要素经历了复杂的变化过程<sup>[7-8]</sup>,这种变化不仅显著影响了当地的植被生态系统<sup>[1,9]</sup>,也对毗邻周边、乃至全球变化产生深刻的影响<sup>[10]</sup>。从 20 世纪 80 年代以来,青藏高原一直是气候-植被关系及生态系统变化研究的热点和难点区域<sup>[11-12]</sup>,被视为我国乃至全球气候变化的“天然实验室”<sup>[13]</sup>。因此,深入探讨全球变化背景下高原植被的时空演变机制,理解高原生态系统对气候变化的响应和适应机理,对于应对区域和全球气候变化、提升和优化高原生态功能和全球生态建设都具有重要意义。

一般而言,区域植被的短期变化多是受人类活动和自然干扰的影响,而长期变化则取决于温度、降水、辐射等水热条件的影响<sup>[14]</sup>。在全球气候变化的背景下,植被生长受水热条件胁迫的影响日趋明显<sup>[15]</sup>,然而,植被对水热变化的响应由于区域生态系统的异质性而呈现明显的空间差异<sup>[16]</sup>。目前国内外学者主要基于 AVHRR、MODIS、Landsat 等卫星遥感数据对整个青藏高原或高原局地区域开展了一系列植被动态研究<sup>[17-19]</sup>,主要包括植被时空变化格局<sup>[20]</sup>、演变规律<sup>[9]</sup>及其驱动机制<sup>[21]</sup>等内容。研究结果显示,由于研究区域、时空尺度的不同,青藏高原的植被对水热条件变化的响应机制也明显的不同<sup>[15,22]</sup>。近 40 年来,青藏高原植被呈现“整体增加、局部减少”的趋势<sup>[14-15]</sup>,但是不同子区域植被动态机制存在显著差异<sup>[14,23]</sup>,水热条件缺乏区域植被显著增加,而水热条件充足地区植被却表现为减少趋势<sup>[22]</sup>。大部分研究认为,青藏高原植被的变化主要受气温影响<sup>[24-25]</sup>,三江源等局部区域植被对气温的响应尤为明显<sup>[26]</sup>。也有学者认为,青藏高原植被变化受降水<sup>[18]</sup>或辐射<sup>[27]</sup>的影响较气温密切。而最新研究结果显示,不同类型植被受不同水热条件的影响,如高寒草甸主要受温度影响,高寒草原受降水和温度双重影响<sup>[28]</sup>,温性草地植被生长受地表温度的影响<sup>[21]</sup>。

综上所述,以往对青藏高原植被动态的研究基于不同数据源、时间尺度和地理区域,在植被时空变化规律、植被对水热条件变化的响应方向和响应程度,尤其是长时间尺度上的响应过程还存在着不确定性,甚至争议。为此,本文基于近 40 年的长时间序列植被数据,从不同时空尺度上探究不同类型植被的变化规律及其对水热条件的响应,以期对青藏高原植被-气候变化之间的关系有更进一步的了解,为气候变化背景下青藏高原植被动态监测、生态修复、生态资源的合理利用和保护等方面提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

青藏高原面积约为 257 万  $\text{km}^2$ <sup>[29]</sup>,平均海拔超过 4000 m,年平均气温为  $-6\text{—}20^\circ\text{C}$ ,年降水量 50—2000 mm,太阳辐射量达  $0.5861\text{—}0.7954 \text{ MJ cm}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ,是我国太阳总辐射值最高的地区<sup>[30]</sup>。由于水热条件在水平和垂直方向上的区域差异,不同气候梯度的热量和水分约束下,青藏高原的植被群落由东南的亚热带雨林过渡到西北的高寒荒漠<sup>[23,31]</sup>。中国植被区划将青藏高原划分为 11 个不同的植被类型区(图 1)。植被类型分区在空间上是呈现出完整的、连续的植被带状分异性<sup>[33]</sup>,可以指示植被地理分布的经纬度和垂直地带性规律及其与水热条件的关系。

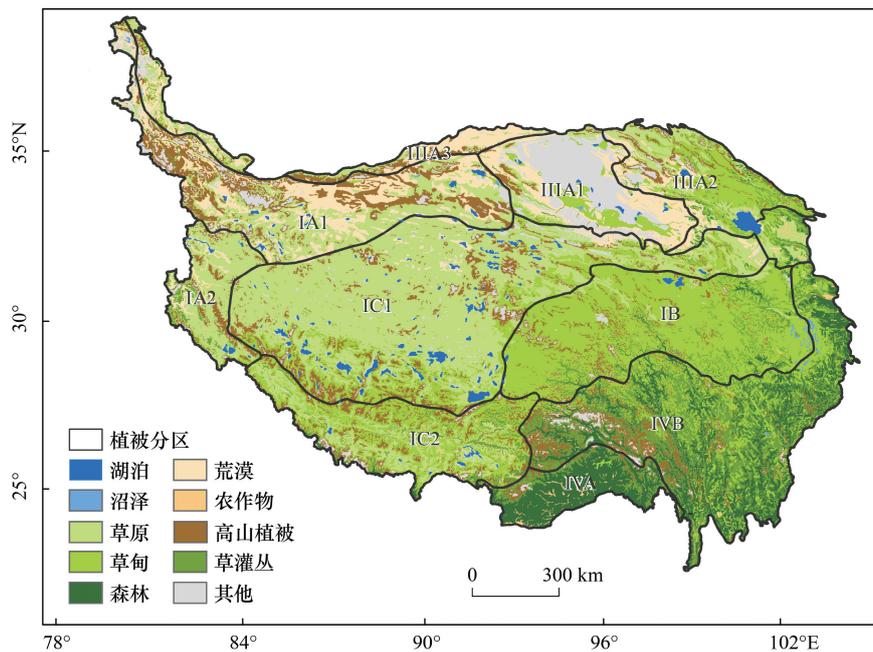


图 1 青藏高原植被区划及植被类型分布(中国 1:100 万植被类型及区划<sup>[32]</sup>)

Fig.1 Vegetation zoning and vegetation type distribution on the Qinghai-Tibet Plateau

IA1: 昆仑山高寒荒漠区; IA2: 阿里高寒荒漠区; IB: 果洛那曲高寒草甸区; IC1: 羌塘高原高寒草原区; IC2: 藏南高山谷地温性草原区; IC: 祁连山东麓灌丛草原区; IIIA1: 柴达木盆地高寒荒漠区; IIIA2: 祁连山东麓草甸草原区; IIIA3: 天山南高寒灌丛荒漠区; IVA: 藏南高山谷地针叶林区; IVB: 藏东川西针叶林灌丛区

### 1.2 数据来源与预处理

#### 1.2.1 数据来源

AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 数据来源于美国国家航空和航天局 (NASA) 的全球监测与模型研究组 GIMMS (Global Inventor Modeling and Mapping Studies) 发布的半月最大值合成产品 GIMMS NDVI3g (以下简称 GIMMS NDVI), 空间分辨率为  $0.083^\circ$ , 时间跨度为 1982—2015 年。MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI 数据亦来源

于 NASA 陆地产品组 MODIS 发布的 16 天的合成植被指数产品 MOD13C1,其空间分辨率为 0.05°,时间跨度为 2000—2020 年。气温、降水和太阳辐射数据(1979—2018 年)来源于中国气象科学数据网(<http://data.cma.cn>),该数据是基于全国 2400 多个气象站点日观测数据,利用澳大利亚 ANUSPLIN 插值软件插值处理生成,空间分辨率 0.01°。数据高程模型(DEM)来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为 1km。植被类型数据为 1:100 万中国植被类型图。

### 1.2.2 数据预处理

由于 AVHRR 和 MODIS 两种数据的传感器及时空分辨率的不同,造成两种数据的 NDVI 值之间存在一定的差异<sup>[34]</sup>。为降低这种差异,同时保持数据在空间上的一致性,首先利用 Savitzky-Golay 滤波对青藏高原 1982—2020 年 GIMMS NDVI、MODIS NDVI 数据进行滤波去噪,采用最大值合成(Maximum Value Composition, MVC)计算生长季(5—9 月)NDVI,并将 MODIS NDVI 采样到 0.083°;对两组数据集重叠观测年份(2000—2015 年)的 NDVI 逐像元建立数据的映射关系;最终,通过逐像元回归分析将 NDVI 时序数据从 1982 年延伸至 2020 年(图 2),用其代表研究区植被的年际变化。GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 数据在重叠年份的年际变化趋势是一致的,相关系数介于 0.88—0.93 之间,均通过了 0.001 的置信度检验,适用于分析青藏高原植被覆盖的时空变化格局。为了消除非植被因素对研究结果的影响,本文取 NDVI ≥ 0.1 的像元进行分析<sup>[35]</sup>。

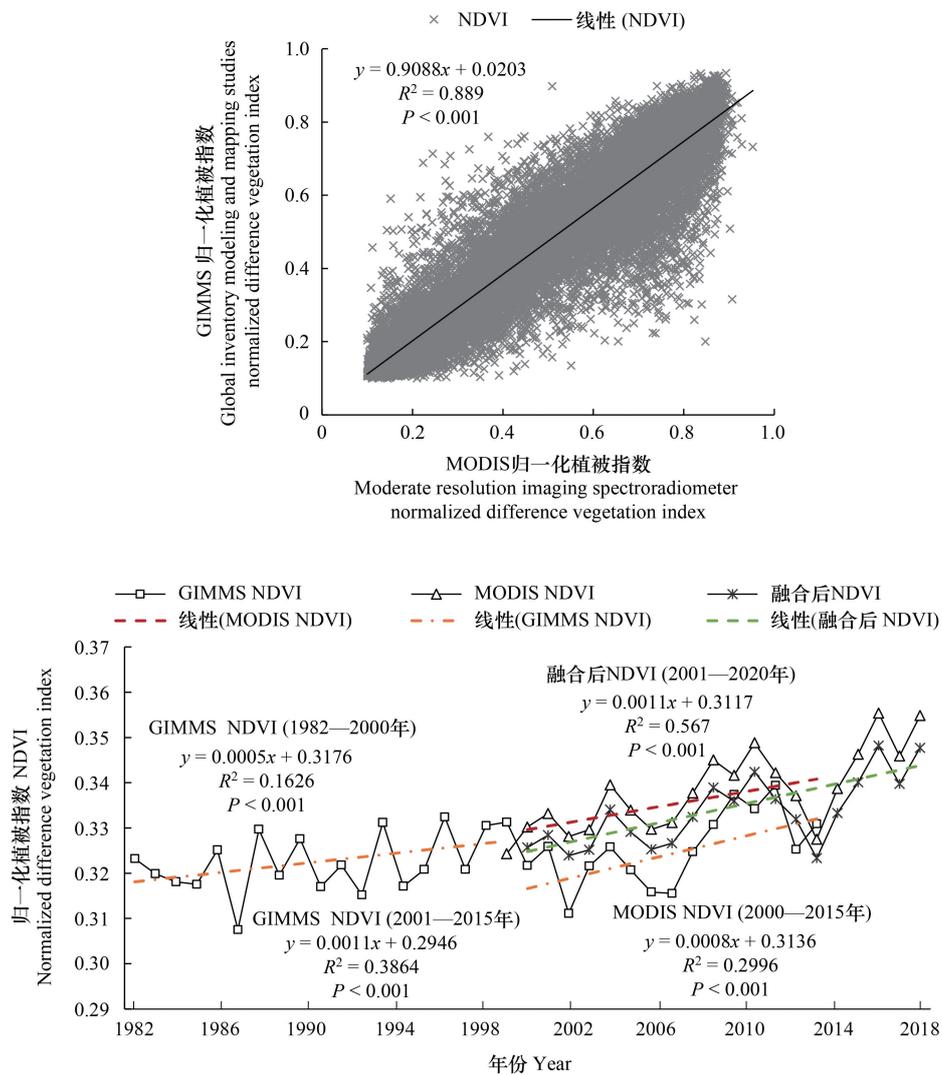


图 2 GIMMS NDVI 与 MODIS NDVI 的重叠观测年份的相关分析及数据融合

Fig.2 Correlation analysis and data fusion of overlapping observation years of GIMMS NDVI and MODIS NDVI

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall (MK) 检验法, 是一种非参数的统计方法。由于该方法不需要数据服从特定的分布特征, 且受异常值的影响较小<sup>[36-37]</sup>, 能更好地监测轻微的变化区域, 变化趋势更为准确<sup>[38]</sup>。因此本文利用 MK 趋势检验来计算长时间序列的植被指数变化趋势。计算方法如公式(1)–(4):

$$Z_{mk} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S>0 \\ 0 & S=0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S<0 \end{cases} \quad (1)$$

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

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

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (4)$$

式中,  $Z_{mk}$  标准化检验统计量,  $S$  是由 1982—2020 年的 NDVI 计算得到的近似服从正态分布的趋势统计量,  $\text{sgn}(\theta)$  为逻辑判别函数,  $\text{var}(S)$  为  $S$  统计量的方差。本文中的检验取显著性水平  $\alpha=0.01$ , 在  $Z_{1-\alpha}=2.58$  上进行双边趋势检验。

#### 1.3.2 相关分析法

植被生长通常受到多个水热因子共同作用的影响, 相关分析法已广泛应用于探索植被生长与水热因子之间的联系<sup>[16]</sup>。本文分别采用偏相关分析和复相关分析法逐像元对青藏高原生长季最大合成 NDVI 与生长季月平均温度、累计降水量、太阳辐射量进行相关分析, 其中偏相关系数用以表示植被与单个水热因子之间的相关程度, 复相关系数表示植被与多个水热因子之间的复合关系程度。偏向关系数和复相关系数计算方法为公式(5)–(7):

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

$$R_{y1.23} = \frac{R_{y1.2} - R_{y3.2}R_{13.2}}{\sqrt{(1 - R_{y3.2})^2} \sqrt{(1 - R_{13.2})^2}} \quad (6)$$

$$R_{y.123} = \sqrt{1 - (1 - R_{y1}^2)(1 - R_{y2.1}^2)(1 - R_{y3.12}^2)} \quad (7)$$

式中,  $R_{xy}$  为植被与单个水热因子间的简单相关系数;  $R_{y1.23}$  为表示固定水热因子 2、3 之后 NDVI( $y$ ) 与水热因子 1 的偏相关系数;  $R_{y.123}$  为 NDVI( $y$ ) 与水热因子 1、2、3 之间的复相关系数。最后, 采用  $t$  检验方法完成偏相关系数的显著性检验, 采用  $F$  检验完成复相关系数的显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 青藏高原植被的时空演变特征

#### 2.1.1 空间分布格局

如图 3 所示青藏高原 1982—2020 年近 40 年 NDVI 均值在空间分布上具有较强的规律性, 在区域水热条件的影响下, 青藏高原植被整体上呈现由东南-西北梯度递减的分布特征。青藏高原植被 NDVI 最高的区域

位于东南部等,以草甸、草原、森林为主,NDVI 最高达 0.92,青藏高原主要的农耕地及人工园林也分布于此(图 1)。植被 NDVI 最低的区域则集中于西北部和北部边界的高寒荒漠地带,这与高原上的地形、气候分异和植被类型相关。

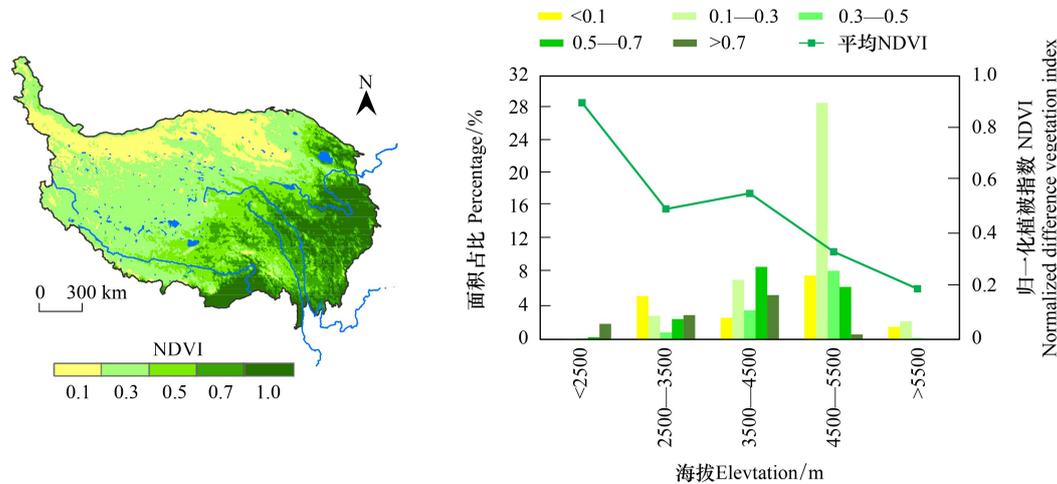


图 3 青藏高原多年平均 NDVI 空间分布及海拔梯度分布特征统计

Fig.3 The spatial distribution and vertical distribution characteristics of NDVI in the Qinghai-Tibet Plateau

由海拔梯度分布特征统计结果(图 3)看,青藏高原的植被覆盖呈现明显的垂直地带性,随着海拔的升高,植被 NDVI 逐渐减小。海拔<2500m 的高原东南缘,面积仅占整个高原的 2.37%,NDVI 均值达到 0.90;2500—3500m 的中海拔带既有植被覆盖极低(NDVI<0.1)的北部沙漠区域,也有以山区林地和农耕地为主的东部主要人类活动区(NDVI>0.8),面积占 14.37%;3500—4500m 的中高海拔带,是青藏高原主要的牧场所在地,植被覆盖较高的高寒草甸、草原均分布于此,面积占比 27.57%,NDVI 均值达 0.55;4500—5500m 的高海拔带主要为高原西北部的高寒草原及高山植被区,面积超过高原总面积的一半以上(51.79%),而 NDVI 均值仅为 0.33;>5000m 的极高海拔带则基本无植被分布。

### 2.1.2 年际时空变化

1982—2020 年青藏高原植被生长季 NDVI 以平均 0.006/10a( $P<0.01$ )的速度呈增加趋势(图 4)。MK 趋势分析结果表明,植被 NDVI 的变化在不同的植被类型分区中有所不同,从高寒荒漠区的 0.014/10a 降低到高寒草甸区的-0.007/10a。其中显著增加的区域主要集中分布在高原北部、西部和南部,面积约为 183.47 万  $\text{km}^2$ ,占总面积的 73.97%;显著减少的区域主要分布在高原腹地及海拔相对较低、人类活动频繁的高原东南部地区,面积约为 45.59 万  $\text{km}^2$ ,占比 18.38%;植被基本保持不变的区域分散在高原各处,东南部居多。此外,在海拔梯度上,除<2500m 的海拔带外,植被显著增加的区域面积均大于减少的区域面积。

### 2.1.3 不同类型植被的年际变化

青藏高原植被以草原、草甸、高山植被、灌丛、荒漠、针叶林和阔叶林为主,占青藏高原总面积的 90% 以上<sup>[11]</sup>。1982—2020 年间,青藏高原所有类型的植被生长季 NDVI 均呈现增加的趋势(图 5),这与 Zhou 等<sup>[2]</sup>的研究结果一致。其中荒漠、草原、高山植被 NDVI 年际变化为极显著增加( $P<0.01$ ),增加面积分别达到 19.2 万  $\text{km}^2$ (7.74%)、56.60 万  $\text{km}^2$ (22.92%)、18.65 万  $\text{km}^2$ (7.52%);森林和灌草丛的 NDVI 年际变化在 2000 年前后呈现先波动后趋于平稳的增加趋势,这与 NDVI 数值在高植被密度区敏感性降低有较大关系,而在 2000 年后不同传感器的数据融合弱化了这种波动使得年际变化趋于平稳增加,增速分别达到 0.009/10a( $P<0.01$ )和 0.005/10a( $P<0.01$ ),显著增加面积分别为 13.88 万  $\text{km}^2$ (5.6%)和 17.94 万  $\text{km}^2$ (7.23%);年际变化上只有高寒草甸 NDVI 呈现不显著地增加(0.0002/10a),但增加的面积达到 42.31 万  $\text{km}^2$ (17.06%)。

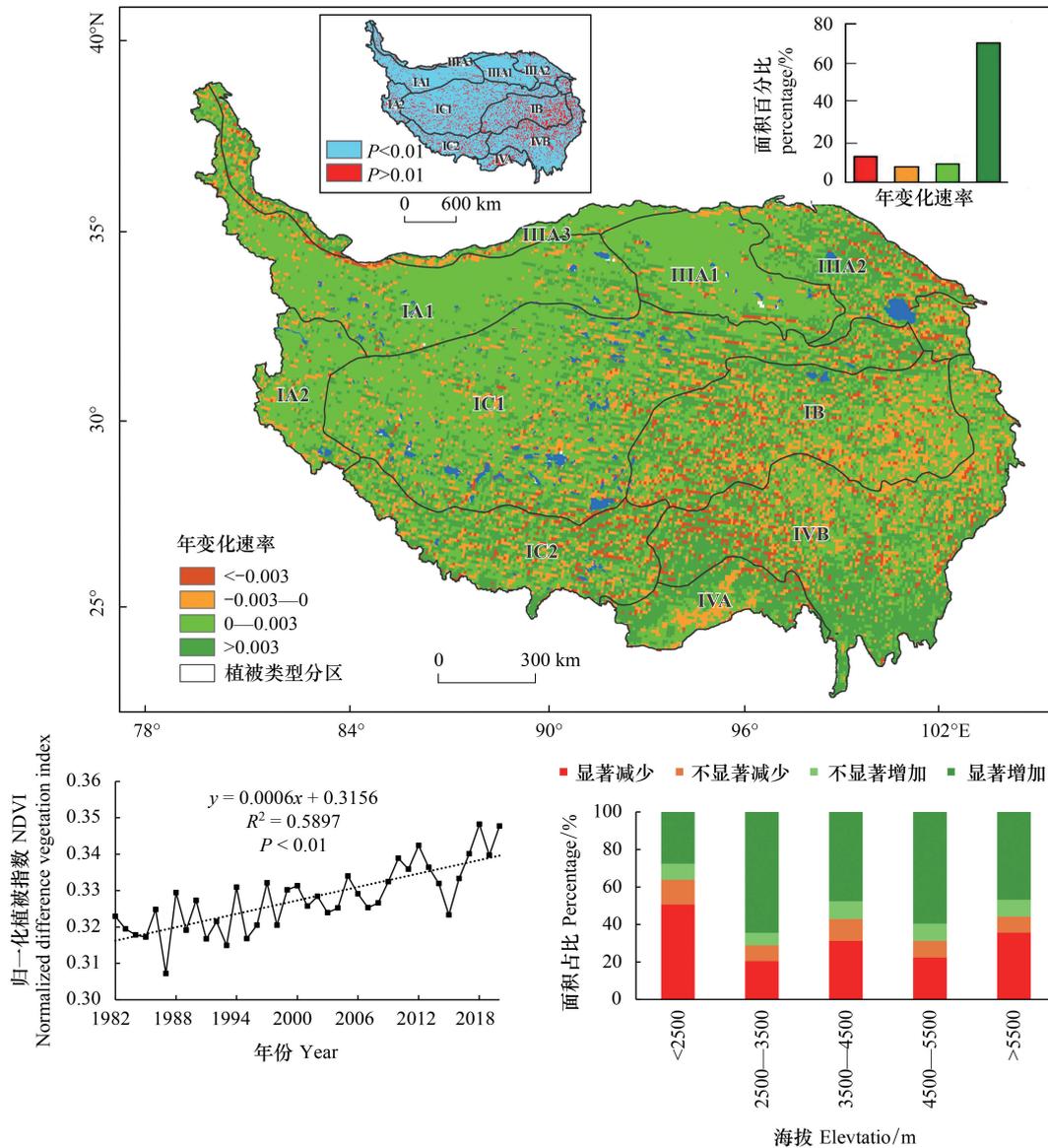


图 4 1982—2020 年青藏高原生长季 NDVI 年际变化

Fig.4 Inter-annual Variation of growing season NDVI on the Qinghai-Tibet Plateau during 1982—2020

2.1.4 年代际时空变化

从 1982—2020 年的四个年代际尺度上分析高原植被变化的变化特征(图 6)。1982—1990 年,青藏高原 88.86%的区域植被 NDVI 呈现不显著的增加,仅有高原西南边缘和柴达木盆地西南约 9.01%的区域呈显著增加趋势。显著减少的区域分散在一江两河、河湟谷地等主要人类开发聚集区域。1991—2000 年间,高原大部分区域(84.1%)的植被变化依然为不显著增加。显著增加的区域主要聚集于黄河、长江、雅鲁藏布江等水源的区域及川西高原,而显著减少的区域则分布于高原北部荒漠地带,说明该阶段植被主要受水分影响。2001—2010 年,随着三江源生态保护、禁牧、退耕还草等生态工程的实施,生态正效应明显。三江源、祁连山及高原东部区域植被显著增加,面积占比达到 21.45%。显著减少的区域主要在高原西南、西藏境内,这与卓嘎等<sup>[18]</sup>、张镱锂等<sup>[39]</sup>和王敏等<sup>[40]</sup>的研究结果一致。2011—2020 年,整个高原面上 64.79%的区域植被 NDVI 表现为不显著的增加,明显增加的区域集中于高原北部的祁连山、长江与澜沧江水源区;显著减少的区域零星分布在柴达木盆地、横断山脉、喜马拉雅山脉沿线。

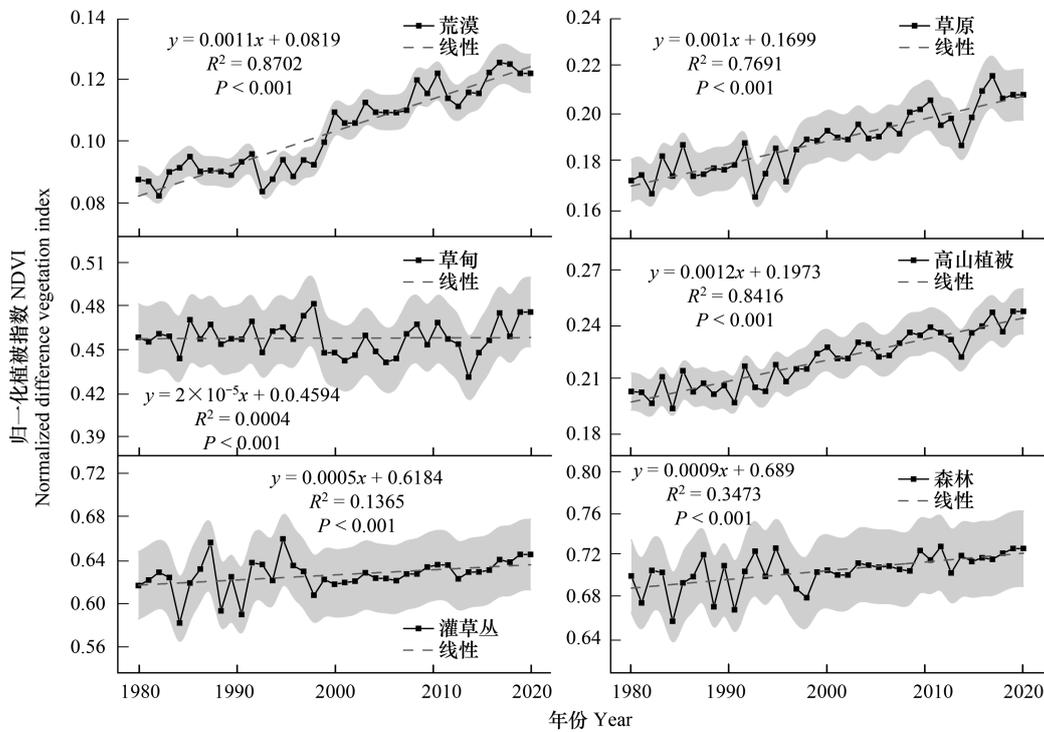


图 5 青藏高原 1982—2020 年不同植被类型的 NDVI 年际变化特征

Fig.5 NDVI interannual variation of different vegetation types in Qinghai-Tibet Plateau during 1982—2020

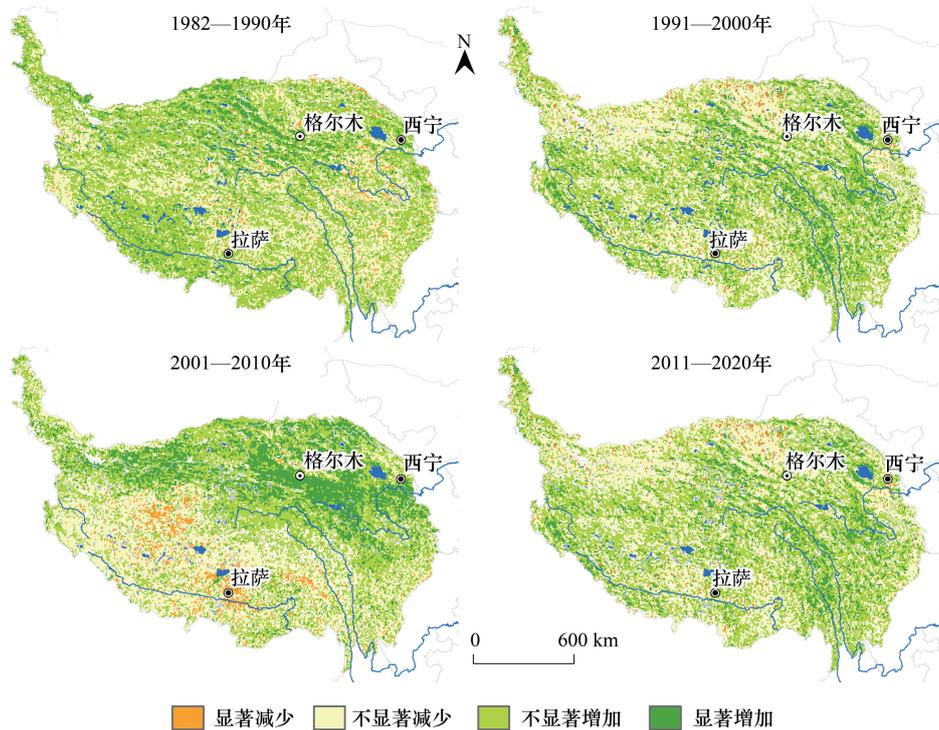


图 6 青藏高原 1982—2020 年生长季 NDVI 在年代际上的变化趋势和显著性检验

Fig.6 The interdecadal trend and significance test of NDVI in growing season of Qinghai-Tibet Plateau during 1982—2020

## 2.2 植被对水热变化的响应

### 2.2.1 静态响应

以 8km 的方格网为单元,建立 1982—2018 年青藏高原生长季平均 NDVI 与平均气温、累计降水量、以及辐射量之间的相关性散点图(图 7),从静态角度探讨植被对水热因子的响应。发现 NDVI 值与气温、降水和辐射量之间均为非线性关系。根据 NDVI 与气温二次函数关系( $R^2 = 0.202, P < 0.001$ ),取气温阈值区间 2—11℃,在该气温区间内,NDVI 随气温升高而迅速增加,增速达 0.026/℃,当气温超过 11℃时,NDVI 增加不再显著。从空间分布上看,青藏高原大部分植被均分布 2—11℃的温度区域内。同样,根据 NDVI 与降水的二次函数关系( $R^2 = 0.693, P < 0.001$ ),取阈值区间 250—650mm,在该降水量区间内,NDVI 随降水量增加而迅速升高,增速为 0.001/(mm),高原腹地的草原、草甸等植被均分布在该降水区间内,而在阈值区间外的 NDVI 与降水量关系则不显著。根据 NDVI 与太阳辐射的二次函数关系( $R^2 = 0.649, P < 0.001$ ),取阈值区间 2900—3750 MJ/m<sup>2</sup>,在该太阳辐射区间内,NDVI 随着辐射量的增加而迅速减少,减少速率为 0.0007/(MJ/m<sup>2</sup>),表明过高的太阳辐射抑制植被生长,在辐射量>3350 MJ/m<sup>2</sup>高原西部高海拔地带,较少有植被分布。

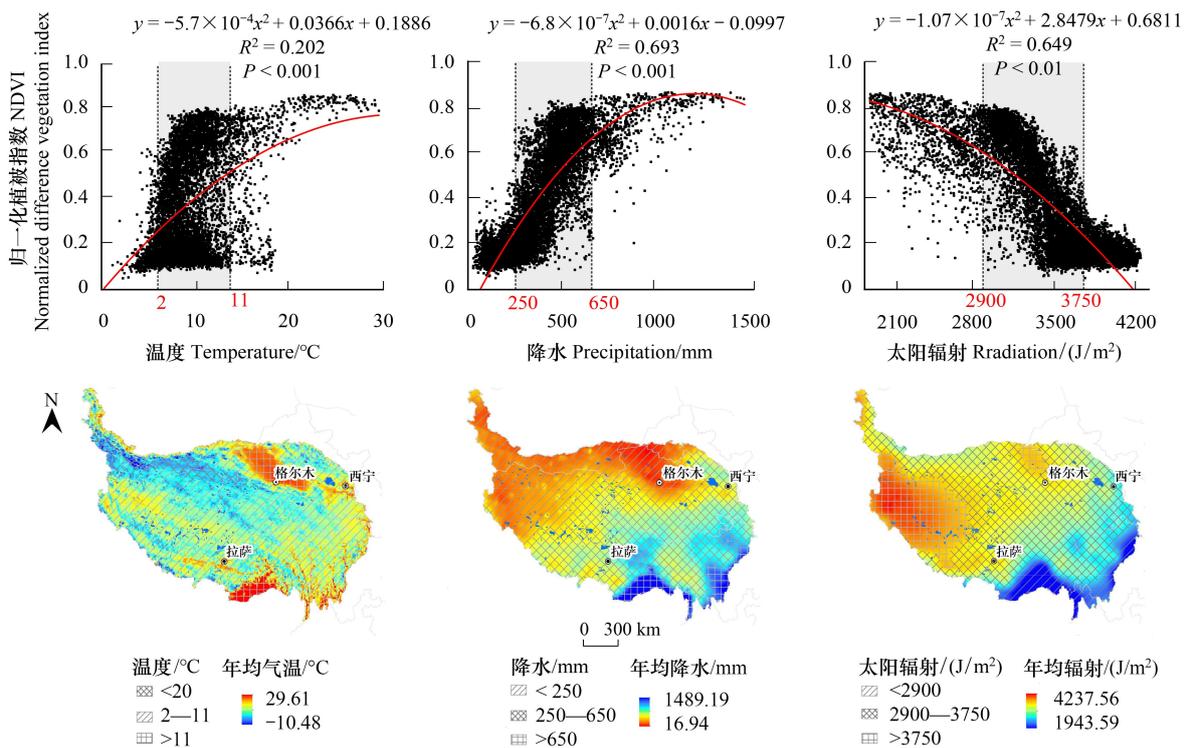


图 7 青藏高原生长季平均 NDVI 与气温 (TEM)、降水 (PRE)、太阳辐射 (RAD) 之间的相关性散点图及其空间分布图

Fig.7 Scatter plot and spatial distribution of the correlation between average NDVI and air temperature (TEM), precipitation (PRE) and solar radiation (RAD) in the growing season of Qinghai-Tibet Plateau

### 2.2.2 动态响应

为探讨植被对单个水热条件因子变化的动态响应,逐像元计算了生长季 NDVI 与气温、降水、辐射量之间的偏相关关系(图 8)。从空间分布看,1982—2018 年青藏高原生长季气温在大部分区域为增加趋势,NDVI 与气温的偏相关关系由东南向西北呈现中部高、外围低的“夹心”状特征,其中显著正相关( $P < 0.01$ )区域集中于青海境内的柴达木盆地、羌塘高原、及西藏西南部;显著负相关( $P < 0.01$ )的区域在高原西北部、东南部的横断山脉等均有分布。降水量变化虽在整个高原上呈现不显著增加趋势,但高原南部的大部分区域表现为降水减少的趋势。NDVI 与降水偏相关系数呈东西向的干湿地带性分布,并由北向南递减,除森林、灌草丛植被区

域外,高原上大部分植被类型区的 NDVI 都与降水呈正相关,其中北部的高山植被、草原、草甸等植被类型区 NDVI 与降水显著正相关( $P < 0.01$ )。太阳辐射除了在喀喇昆仑山西北部、横断山脉西南部的分布地区外,其他大部分区域为减少趋势,而辐射显著减少的区域也正是与 NDVI 呈现显著的负相关关系( $P < 0.01$ )的区域。

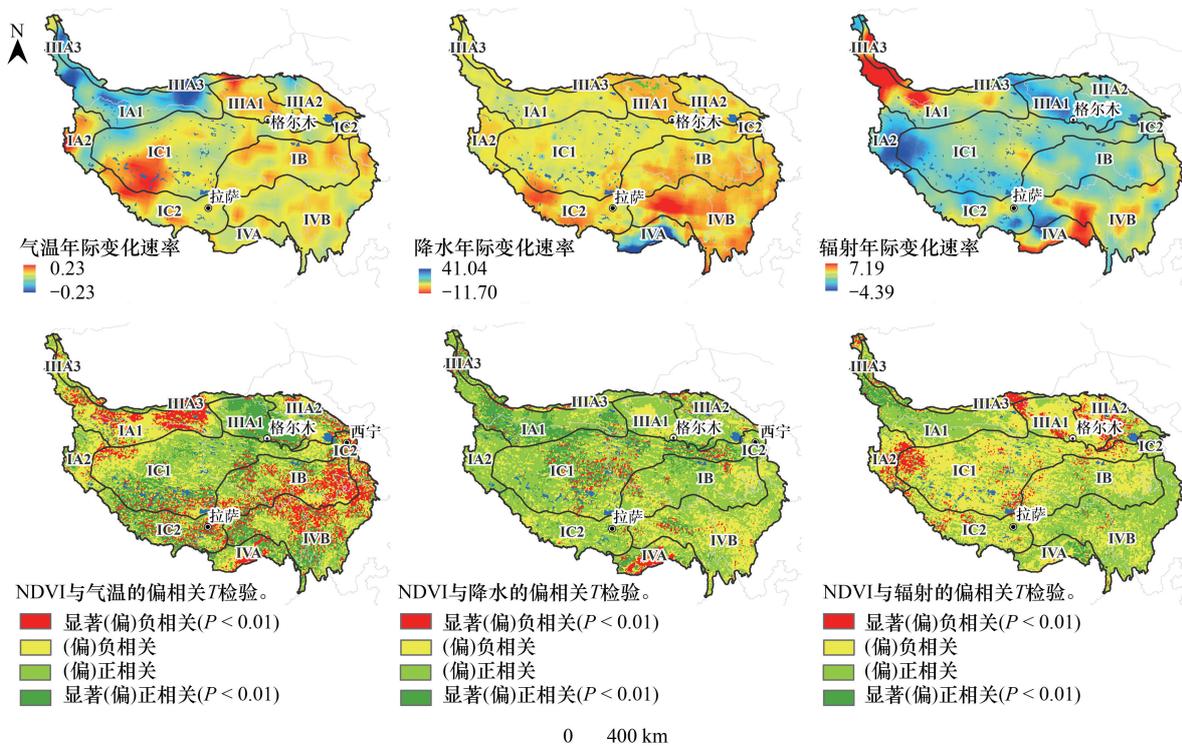


图 8 植被 NDVI 对水热条件因子变化的动态响应

Fig.8 Dynamic response of vegetation NDVI to hydrothermal conditions

### 2.2.3 不同类型植被的动态响应

从不同类型植被(图 9)及区划(图 10)与水热因子的相关程度看,青藏高原上除森林和灌草丛区(IVA、IVB)外,各类型植被与降水的相关程度要好于气温和辐射。降水对高原不同植被类型的正效应大小排序为:荒漠>草原>草甸>高山植被>森林>灌丛>栽培植被,说明降水是荒漠、草原、草甸的主要促进因子。温度对高原不同植被类型负效应大小排序是:栽培植被>高寒植被>荒漠>灌丛>森林>草甸>草原,气温是荒漠、高寒植被的主要抑制因子。辐射量与不同植被类型的相关系数大小排序是:森林>灌丛>高山植被>栽培植被>草甸>荒漠>草原,辐射对森林、灌丛和高山植被的影响为正效应,而对荒漠、草原影响为负效应。植被类型不同的不同分区间,由于地形地貌、海拔、经纬度、土壤类型等自然环境的不同存在显著的差异,如 IIIA1 柴达木盆地高寒荒漠区、IA1 昆仑山高寒荒漠区、及 IA2 阿里高寒荒漠区都是荒漠类型,但由于三个区域地处不同的纬度和海拔带,地形地貌也显著不同,因此植被与水热条件的相关关系有明显的差异。

### 2.3 植被变化对水热条件响应分区

根据以上的分析发现,青藏高原地表植被变化的水热因子驱动存在着明显的区域分异,大部分区域植被变化受单一因子(气温或降水或辐射)的驱动较为显著,部分区域受多个因子的共同作用。对植被变化的驱动因子进行分区,才可以进一步的概括植被在区域尺度上的变化规律。因此,本文通过分析青藏高原多年 NDVI 与气温、降水、以及辐射量的偏相关和复相关关系(图 11),同时为保证变化特征的最大一致性提取其显著性水平为 0.01 的区域,按表 1 规则进行水热驱动因子分区研究。

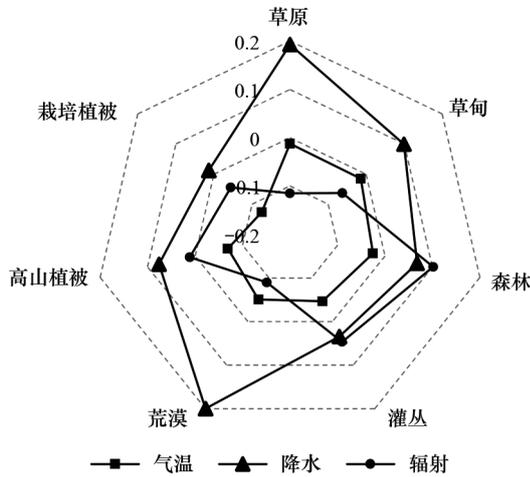


图9 青藏高原不同植被类型与水热条件的相关关系  
Fig.9 The Correlation between different vegetation types with hydrothermal factors on the Qinghai-Tibet Plateau

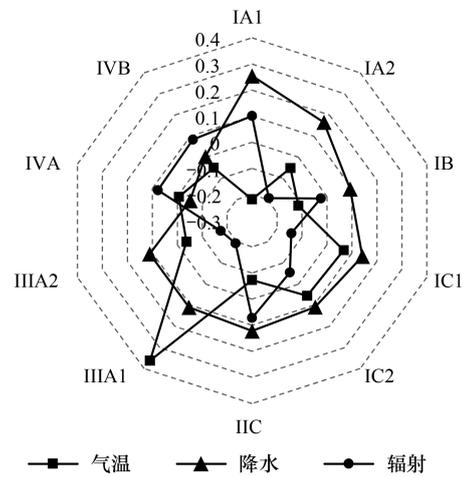


图10 青藏高原不同植被类型区划与水热条件的相关关系  
Fig.10 The Correlation between vegetation zones with hydrothermal factors on the Qinghai-Tibet Plateau

表1 植被变化的驱动分区规则

Table 1 The regionalization rules of driving force for vegetation change

植被变化驱动因子 Driving factors of vegetation change	分区规则 Rules				
	$F$	$T_T$	$T_p$	$T_R$	$R$
气温正驱动 Temperature positive drive	$F > F_{0.01}$	$t > t_{0.01}$			$R_T > 0$
气温负驱动 Temperature negative drive	$F > F_{0.01}$	$t > t_{0.01}$			$R_T \leq 0$
降水正驱动 Precipitation positive drive	$F > F_{0.01}$		$t > t_{0.01}$		$R_p > 0$
降水负驱动 Precipitation negative drive	$F > F_{0.01}$		$t > t_{0.01}$		$R_p \leq 0$
辐射正驱动 Solar radiation positive drive	$F > F_{0.01}$			$t > t_{0.01}$	$R_R > 0$
辐射负驱动 Solar radiation negative drive	$F > F_{0.01}$			$t > t_{0.01}$	$R_R \leq 0$
水热因子复合驱动 Hydrothermal factors combined drive	$F > F_{0.01}$	$t > t_{0.01}$	$t > t_{0.01}$	$t > t_{0.01}$	
非气候因素 Non-climate-driven	$F \leq F_{0.01}$				

$F$ :复相关  $F$  显著性检验 ( $P < 0.01$ )  $F$ -test significance of complex correlation analysis ( $P < 0.01$ );  $T_T$ :NDVI 与气温之间偏相关分析的  $T$  显著性检验 ( $P < 0.01$ )  $T$ -test significance for partial correlation analysis between NDVI and air temperature ( $P < 0.01$ );  $T_p$ :NDVI 与降水之间偏相关分析的  $T$  显著性检验 ( $P < 0.01$ )  $T$ -test significance for partial correlation analysis between NDVI and precipitation ( $P < 0.01$ );  $T_R$ :NDVI 与降水之间偏相关分析的  $T$  显著性检验 ( $P < 0.01$ )  $T$ -test significance for partial correlation analysis between NDVI and precipitation ( $P < 0.01$ );  $R_T$ :NDVI 与气温之间的简单相关系数 simple correlation coefficient between NDVI and temperature;  $R_p$ :NDVI 与降水的简单相关系数 simple correlation coefficient between NDVI and precipitation;  $R_R$ :NDVI 与辐射之间的简单相关系数 simple correlation coefficient between NDVI and radiation

整体而言,在全球变暖和青藏高原向暖湿化演变的过程中,大部分区域植被变化受气候因素影响,呈现气候驱动型,不同类型植被生长的主要驱动因子与植被的生态特征及气候环境密切相关。其中,高原北部高寒植被生长主要受气温和太阳辐射影响,高原腹地干旱半干旱的草原主要受降水影响,高原中南部草甸、灌丛区则主要受气温驱动,对于高原南部边缘的森林生长,受辐射和温度的影响多一点,但则没有明显的规律性。这一结果与 Wu D 等<sup>[16]</sup>、Li 等<sup>[31]</sup>和 Jong 等<sup>[41]</sup>的研究具有较好的一致性。

#### 4 讨论与结论

##### 4.1 讨论

基于 1982—2020 的时序 NDVI 数据发现,在过去的近 40 年中,青藏高原 73.97% 的区域呈现绿化趋势,且

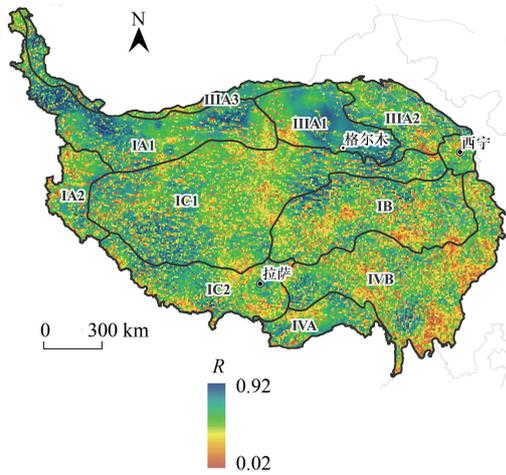


图 11 青藏高原 NDVI 与各水热因子复相关系数空间格局

Fig.11 Spatial pattern of complex correlation coefficients between NDVI and hydrothermal factors on the Qinghai-Tibet Plateau

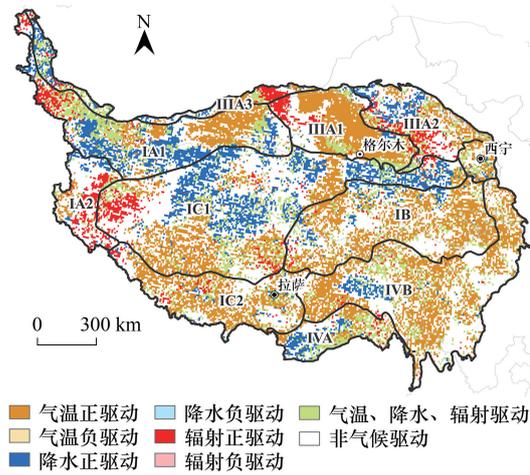


图 12 青藏高原植被变化的水热驱动因子分区

Fig.12 Hydrothermal drivers of vegetation change on the Qinghai-Tibet Plateau zone

在大多数的植被类型区,生长季 NDVI 的变化速率都是正值,平均增速达 0.006/10a。其中 2000 年以前增速为 0.005/10a,而 2000 年以后增速达 0.011/10a,植被迅速增加,这与国家在地区实行“退耕还林”与“退牧还草”等生态政策密切相关。植被变化的这一增长趋势与杨元合等<sup>[30]</sup> (1982—1999 年)、与 Huang 等<sup>[27]</sup> (2001—2017 年)的结果近似或一致,而与韩炳宏等<sup>[24]</sup>认为的 2000—2009 年呈减少态势,2010—2018 年呈增加态势有所不同,这种差异可能与趋势分时所选取的数据起始年份有一定的关系。从海拔梯度上的变化(图 3)可以看出,整个高原除<2500m 的海拔带外,其他海拔带上植被 NDVI 变化速率也均为正值,其中 2500—3500m 的海拔带为青藏高原主要人类活动区,植被类型以草甸、灌丛、栽培植被为主,植被变化受人类活动(耕作制度、灌溉及施肥方式、退耕还林等相关政策)影响较大;在 3500—5500m 海拔带,植被 NDVI 增加的面积随海拔升高而不断增加,这一海拔高度的植被主要受气温、降水等水热条件影响,受人为干扰较少,在全球变暖的大背景下,气候变化对该区植被产生正效应。

在气候变化影响下,植被总是在不断地区适应外界条件的改变使其自身生长更为有利,该过程是动态的、非线性的,植被活动随着水热气候因子的变化过程存在明显的阈值<sup>[42]</sup>。当温度、降水等水热条件的改变超过植被的适应能力时,植被将会在结构功能等多方面受到抑制作用<sup>[46]</sup>。如图 8 所示,柴达木盆地、羌塘高原、及西藏西南部等高海拔区域,植被增加与气候变暖有显著的正相关;而高原西北部、东南部的横断山脉等区域为稀疏的高山植被或荒漠,升温加速土壤水分蒸发,抑制了植被生长;东南部的灌木及森林地带的升温加速植被蒸腾,光合作用减弱<sup>[46]</sup>,温度成为影响这些区域植被生长的限制性因子。NDVI 与降水量显著正相关的高原中北部为高山植被、草原、草甸等低矮植被类型,降水量增加有利土壤水分和养分的运转、植被吸收和生长。虽然西藏东部与横断山脉的森林和灌木区降水量较大,但这些区域的 NDVI 与降水量呈现不显著负相关关系,而与辐射量显著正相关,说明降水量不构成植被生长的限制因子,但由于降水量大,云量较大,导致辐射减弱,不利于植被蒸腾和光合作用,辐射成为影响这些区域植被生长的限制因子。NDVI 与辐射负相关的地区如柴达木盆地,地处干旱区,海拔低、辐射强、地下水出露、加之人类活动等各种因素,植被的生长规律与其他荒漠区截然不同<sup>[47]</sup>,但这一过程的机制机理还不得而知,需要另行研究。

长时间序列的植被变化是一个复杂的过程,不同的植被类型对水热条件和人类活动的干扰存在不同的响应,而本文只研究了青藏高原生长季植被在长时间尺度上对的水热条件响应的规律,并未深入植被对水热条件变化的时滞性不同。同时,对于如柴达木盆地、青海南部高原等特殊高寒区脆弱自然环境下植被对水热响

应表现出的不同现象并未深入研究。由于青藏高原的地理特殊性,植被的生长不仅与气温、降水、辐射等水热条件有密切的关系,同时也与冰川冻土、土壤水热、植被蒸散等多种因素有复杂的相互关系,这些都将是未来探索的方向。

#### 4.2 结论

(1)1982—2020年青藏高原植被 NDVI 在年际上呈波动增长趋势(0.006/10a)。植被显著增加的区域占高原总面积的 73.97%,主要分布在青藏高原北部、西部及南部边缘,植被减少的区域主要为高原东部及南部的人类活动区。在年代际上,2001—2010年三江源等区域的生态保护工程正效应明显。

(2)青藏高原植被对水热气候条件的响应具有显著的空间异质性。静态上,植被对气温的显著响应区间为 2—11℃,对降水的响应区间为 250—650mm,对辐射的响应区间为 2900—3750MJ/m<sup>2</sup>,空间上表现为高原腹地响应明显,东南部四川盆地、西北部昆仑山脉和柴达木盆地无明显响应的一致性;动态上,植被对气温、降水和辐射的响应在不同植被类型中,其响应关系、方向、程度均存在差异,而除森林和灌丛类型外,植被与降水的偏相关程度要优于温度和辐射。

(3)青藏高原植被生长受水热因子驱动的区域占高原总面的 55.95%,其中 42.72%的区域由气温、降水和辐射互补驱动,首要驱动因子是温度,占比 26.54%,13.23%的区域由多因子联合驱动;非气候驱动区域占高原总面积的 44.05%。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Wang Q, Zhang Q P, Zhou W. Grassland coverage changes and analysis of the driving forces in Maqu county. *Physics Procedia*, 2012, 33: 1292-1297.
- [ 2 ] Zhou D W, Fan G Z, Huang R H, Fang Z F, Liu Y Q, Li H Q. Interannual variability of the normalized difference vegetation index on the Tibetan Plateau and its relationship with climate change. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(3): 474-484.
- [ 3 ] Nie T, Dong G T, Jiang X H, Lei Y X. Spatio-temporal changes and driving forces of vegetation coverage on the loess plateau of northern Shaanxi. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 613.
- [ 4 ] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张德镒. 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.
- [ 5 ] 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 等. 青藏高原生态变化. *科学通报*, 2015, 60(32): 3048-3056.
- [ 6 ] 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 郭正堂, 崔鹏, 陈发虎, 张人禾, 张宪洲, 张德镒, 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.
- [ 7 ] Chen J H, Yan F, Lu Q. Spatiotemporal variation of vegetation on the Qinghai-Tibet plateau and the influence of climatic factors and human activities on vegetation trend (2000—2019). *Remote Sensing*, 2020, 12(19): 3150.
- [ 8 ] Wang Z P, Wu J S, Niu B, He Y T, Zu J X, Li M, Zhang X Z. Vegetation expansion on the Tibetan plateau and its relationship with climate change. *Remote Sensing*, 2020, 12(24): 4150.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] Chen F H, Fu B J, Xia J, Wu D, Wu S H, Zhang Y L, Sun H, Liu Y, Fang X M, Qin B Q, Li X, Zhang T J, Liu B Y, Dong Z B, Hou S G, Tian L D, Xu B Q, Dong G H, Zheng J Y, Yang W, Wang X, Li Z J, Wang F, Hu Z B, Wang J, Liu J B, Chen J H, Huang W, Hou J Z, Cai Q F, Long H, Jiang M, Hu Y X, Feng X M, Mo X G, Yang X Y, Zhang D J, Wang X H, Yin Y H, Liu X C. Major advances in studies of the physical geography and living environment of China during the past 70 years and future prospects. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(11): 1665-1701.
- [ 11 ] 王金亭. 青藏高原高山植被的初步研究. *植物生态学报*, 1988, 12(2): 81-90.
- [ 12 ] Wang Y, Peng D L, Shen M G, Xu X Y, Yang X H, Huang W J, LE Yu L, Liu L Y, Li C J, Li X W, Zheng S J, Zhang H L. Contrasting effects of temperature and precipitation on vegetation greenness along elevation gradients of the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2751.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] Wu D H, Zhao X, Liang S L, Zhou T, Huang K C, Tang B J, Zhao W Q. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3520-3531.

- [17] 王强, 张廷斌, 易桂花, 陈田田, 别小娟, 何奕萱. 横断山区 2004—2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子. 生态学报, 2017, 37(9): 3084-3095.
- [18] 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.
- [19] 达瓦扎喜, 王静, 张志明, 秀措, 赵秀玲, 王嘉丽, 周伟奇. 高原河谷城镇化对植被覆盖度的影响. 生态学报, 2020, 40(17): 6025-6036.
- [20] 杜际增, 崔保山, 隋皓辰. 气候变化背景下青藏高原核心区植被变化的时空特征. 环境生态学, 2019, 1(8): 10-20.
- [21] 夏龙, 宋小宁, 蔡硕豪, 胡容海, 郭达. 地表水热要素在青藏高原草地退化中的作用. 生态学报, 2021, 41(11): 46181-144631.
- [22] 王涛, 赵元真, 王慧, 曹亚楠, 彭静, 王春雨. 基于 GIMMS NDVI 的青藏高原植被指数时空变化及其气温降水响应. 冰川冻土, 2020, 42(2): 641-652.
- [23] 丁明军, 张德铨, 刘林山, 王兆锋, 杨续超. 青藏高原植被覆盖对水热条件年内变化的响应及其空间特征. 地理科学进展, 2010, 29(4): 507-512.
- [24] 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.
- [25] 神祥金, 张佳琦, 吕宪国. 青藏高原沼泽湿地植被 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40(18): 6259-6268.
- [26] 覃巧婷, 陈建军, 杨艳萍, 赵晓宇, 周国清, 尤号田, 韩小文. 黄河源区植被时空变化及其对地形和气候的响应. 中国环境科学, 2021, 41(8): 3832-3841.
- [27] Huang X L, Zhang T B, Yi G H, He D, Zhou X B, Li J J, Bie X J, Miao J Q. Dynamic changes of NDVI in the growing season of the Tibetan Plateau during the past 17 years and its response to climate change. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(18): 3452.
- [28] 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, (1): 1-14. (2021-08-16). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20210816.1040.034.html>
- [29] 张德铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. 地理研究, 2002, 21(1): 15-8.
- [30] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 2006, 30(1): 1-8.
- [31] Li T, Yangjian Zhang Y J, Holzapfel C, Ke Huang K, Ning Chen NC, Jian Tao JT, Juntao Zhu J T. Vegetation pattern in northern Tibet in relation to environmental and geo-spatial factors. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(5): 526-537.
- [32] 廖克. 中国植被图. 北京: 中国地图出版社, 2007.
- [33] Zhang Y, Hu Q W, Zou F L. Spatio-temporal changes of vegetation net primary productivity and its driving factors on the Qinghai-Tibetan plateau from 2001 to 2017. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1566.
- [34] 宋富强, 康慕谊, 杨朋, 陈雅如, 刘阳, 邢开雄. 陕北地区 GIMMS/SPOT-VGT 和 MODIS 归一化植被指数的差异分析. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 72-80.
- [35] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 马文红. 近 20 年来中国植被活动在增强. 中国科学(C 辑: 生命科学), 2003, 33(6): 554-565+578-579.
- [36] 马雄伟, 赵庆志, 姚顽强. 黄土高原植被对气候变化的时滞响应及其时变特征. 西安科技大学学报, 2020, 40(1): 157-166.
- [37] Guo M, Li J, He H S, Xu J W, Jin Y H. Detecting global vegetation changes using Mann-Kendal (MK) trend test for 1982-2015 time period. Chinese Geographical Science, 2018, 28(6): 907-919.
- [38] 康雄, 曹俊涛, 陈成, 杨杰, 王建雄. 不同趋势法的宁夏长时序植被变化分析. 测绘通报, 2020, 524(11): 23-27.
- [39] 张德铨, 刘林山, 王兆锋, 摆万奇, 丁明军, 王秀红, 阎建忠, 许尔琪, 吴雪, 张炳华, 刘琼欢, 赵志龙, 刘峰贵, 郑度. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征科学通报, 2019, 64(27): 2865-2875.
- [40] 王敏, 周才平, 吴良, 徐兴良, 欧阳华. 近 10a 青藏高原干湿状况及其与植被变化的关系研究. 干旱区地理, 2013, 36(1): 49-56.
- [41] De Jong R de, Schaepman M E, Furrer R, De Bruin S de, Verburg P H. Spatial relationship between climatologies and changes in global vegetation activity. Global Change Biology, 2013, 19(6): 1953-1964.
- [42] Krishnaswamy J, John R, Joseph S. Consistent response of vegetation dynamics to recent climate change in tropical mountain regions. Global Change Biology, 2014, 20(1): 203-215.
- [43] 焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 侯文娟. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展. 生态学报, 2018, 38(6): 2229-2238.
- [44] 张斯琦, 陈辉, 宋明华, 付阳, 牛慧慧, 杨祎, 张博雄. 2000—2015 年柴达木盆地植被覆盖度时空变化及其与环境因子的关系. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1124-1132.