

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2021.0057

孟庆博,刘艳丽,鞠琴,等.雅鲁藏布江流域近18年来植被变化及其对气候变化的响应[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):539-550. MENG Q B, LIU Y L, JU Q, et al. Vegetation change and its response to climate change in the Yarlung Zangbo River basin in the past 18 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 539-550. (in Chinese)

# 雅鲁藏布江流域近18年来植被变化 及其对气候变化的响应

孟庆博<sup>1,3</sup>, 刘艳丽<sup>1,2,4</sup>, 鞠琴<sup>3</sup>, 刘冀<sup>5</sup>, 王国庆<sup>1,2,4</sup>, 金君良<sup>1,2,4</sup>,  
关铁生<sup>1,2</sup>, 刘翠善<sup>1,2,4</sup>, 鲍振鑫<sup>1,2,4</sup>

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098;  
3. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 4. 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029;  
5. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:**基于MODIS(moderate resolution image spectroradiometer) NDVI(normalized difference vegetation index)数据、DEM数据、1:100万中国植被类型图,运用Mann-Kendall趋势及突变点检验法对2001—2018年雅鲁藏布江流域不同海拔梯度和植被类型的NDVI进行提取,分别在时间和空间尺度上分析其年际变化并探究流域NDVI变化与植被类型和气候因子的相关性。结果表明:全流域尺度、不同海拔梯度和不同植被类型近18年的NDVI年际变化均呈增长趋势且在2013年之后呈现明显的增长趋势。在空间尺度上,80%的流域近18年来NDVI呈增长趋势,植被状况得到较好的改善;流域NDVI在海拔小于等于3500m时主要受针叶林和阔叶林的影响,大于3500m且小于等于5000m主要受灌丛、草原及草甸的影响,大于5000m受高山植被和草甸影响较大;流域植被的NDVI受降水和气温的影响较大,其中温度的影响略强于降水;气候变化对流域植被的影响具有滞后效应,在该条件下流域植被的NDVI与气候因子的相关系数由大到小为草原、草甸、灌丛、高山植被、针叶林、其他植被、阔叶林。若一种植被类型受气温的影响大于降水,其对气温变化的响应也会更为敏感;反之,若该植被类型受降水的影响大于气温,则会对降水变化的响应更为敏感。

**关键词:**气候变化;植被变化;雅鲁藏布江;NDVI;驱动效应

中图分类号:TV211 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



近几十年来全球的多种生态系统一直受气候变化的影响,而气候变暖的影响已导致中国近几十年植被变化的进程加快<sup>[1-3]</sup>。植被既是陆地生态系统最主要的组成部分,还是连结土壤、大气及水分等生态要素的纽带<sup>[4]</sup>。因此,在较长时间尺度上对植被进行监测,分析植被覆被的时空变化特点及其变化与气候因子、土壤等环境要素的相关性,对于揭示气候变化与植被变化及人类活动的内在关系具有重大

意义<sup>[5-8]</sup>, Piao等<sup>[9]</sup>、Larson等<sup>[10]</sup>、Hye等<sup>[11]</sup>和Chen等<sup>[12]</sup>对21世纪初至今北半球植被覆盖度的增长态势与20世纪80、90年代进行对比,发现前者较后者明显变暖且气候变暖与降雨量的变化是影响植被覆盖变化最主要的原因。

归一化植被指数即NDVI(normalized difference vegetation index),是一种基于卫星遥感光谱信息得到的植被指数,在植被监测方面具有的覆盖

收稿日期:2020-07-01 修回日期:2020-11-30 网络出版时间:2020-12-10

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20201209.1639.010.html

基金项目:国家自然科学基金(91747103;51679145;91847301;51779146);国家重点研发计划(2016YFA0601602)

作者简介:孟庆博(1996—),男,河北石家庄人,主要从事水文水资源方面研究。E-mail:292951995@qq.com

通信作者:刘艳丽(1981—),女,河南泌阳人,教授级高级工程师,博士,主要从事气候变化对水文水资源的影响研究。E-mail:ylliu@nhri.cn

范围广、空间分辨率高等优点能充分反映植被覆盖度的变化,是目前应用最广泛的表征植被生长状况及植被覆盖度的指标<sup>[13-14]</sup>。随着遥感技术的不断发展,可供使用的 NDVI 数据集变得多源化,国内外学者<sup>[15-17]</sup>对不同来源的 NDVI 数据集进行比较并利用它们在植被相关领域进行了深入探讨。如:赵玉萍等<sup>[18]</sup>基于 GIMMS NDVI 分析藏北高原草地的 NDVI 与气候因子的关系,发现 NDVI 与同时期的降水、气温月值数据都呈高度正相关关系,且 NDVI 对气温、降水的响应存在滞后情况;Spano 等<sup>[19]</sup>通过分析降水与植被的相关性发现两者的相关性存在地区特征,尤其在干旱区和半干旱区 NDVI 与降水具有显著相关性且植物生长期 NDVI 的主要驱动因素是降水;Wang 等<sup>[20]</sup>通过分析美国中部平原的 NDVI 与气候要素的关系,发现在生长期的中期 NDVI 与温度呈负相关,而在前、后期具有显著正相关性,且在生长期前期阶段 NDVI 对降水变化的响应存在滞后情况;周金霖等<sup>[21]</sup>利用长时间序列的 MODIS NDVI 数据得到西南地区的季节合成植被指数(SINDVI)并与气温、降水进行相关性分析,结果表明西南地区的植被与气温存在较为显著的相关性,而与降水的相关系数在空间上存在较大差异;徐兴奎等<sup>[22]</sup>研究了 1982—1994 年 NOAA-AVHRR 的 NDVI 数据对中国不同气候区降水的滞后时间,结果显示不同气候区的滞后时间不同且差异明显,其中西北干旱区相较于降水较多的南方地区滞后时间较短。

同时,由于气温、降水等气候条件会随着海拔的变化出现显著差异,因此研究 NDVI 动态变化与海拔梯度的相关性对认识高原地区植被活动对气候变化的响应具有重要意义。为研究高海拔区域植被系统对气候变化的响应,本研究以雅鲁藏布江流域为例,分析 MODIS NDVI 的年度变化与海拔梯度、植被类型的关系,并分析降水及气温因子对植被的影响。

## 1 研究区概况

雅鲁藏布江流域作为世界上海拔最高的流域,发源于喜马拉雅山脉北麓,位于 28°00'N~31°16'N、82°00'E~97°07'E,流域面积约为 24.05 万 km<sup>2</sup>。流域北部以冈底斯山和念青唐古拉山脉为界限,南邻喜马拉雅山脉,流域东西方向狭长,南北方向窄短<sup>[23]</sup>,干流长度约 2 057 km,最大宽度 290 km,平均海拔约 4 500 m。在印度洋暖湿气流的影响下,流域上下游气候条件差异性较大。气温随海拔高程

的变化差异明显,自上游至下游呈逐渐增加的趋势,源头所在的高海拔地区年平均气温约 0~3 ℃,中游地区约 5~9 ℃,而拉萨一带的月平均最高气温约为 10~17 ℃;降水自上游至下游大致呈递增的趋势,在日喀则约为 420 mm,而巴昔卡的年降水量可达 5 000 mm,多年平均年径流量为 1 661 亿 m<sup>3</sup>,且径流年内分配不均,丰水期水量占全年水量的 70%,而枯水期水量仅占 20%不到<sup>[24]</sup>。流域植被上游主要是高寒草原、高寒草甸及一些高山带植被等,中游主要被灌丛和草甸所覆盖,下游地区的植被主要为针叶林、阔叶林和一部分高山带植被。

## 2 数据及研究方法

### 2.1 数据来源与处理

#### 2.1.1 NDVI 数据

选取的 NDVI 数据是所属 NASA 的地球观测系统的 MODIS NDVI 产品(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>),MOD13A3 是 MODIS/Terra 卫星的三级产品,空间分辨率为 1 km×1 km,时间尺度为月,在生成该月尺度产品时,算法整合与该月重叠的所有 MOD13A2 产品<sup>[25]</sup>。数据选取的年份范围为 2001 年至 2018 年,为标准的 EOS-HDF 格式。

通过 MODIS Reprojection Tools(MRT)软件对原始的 NDVI 数据进行批量拼接、重投影等操作,最终得到 TIFF 格式的 NDVI 数据集,投影为 Albers 等面积投影,利用 MATIAB 软件进行编程对数据集进行裁剪,得到雅鲁藏布江流域的 NDVI 数据集。

#### 2.1.2 DEM 数据

选取的 DEM 数据的分辨率为 90 m,为了与 MODIS NDVI 数据达到一致的空间分辨率对 DEM 数据进行重采样,最终转换为 1 km×1 km 的空间分辨率。通过 ArcGIS 软件的 Spatial Analyst Tools 工具,将流域 DEM 数据以海拔 500 m 为区间间隔裁剪为多个海拔梯度的掩膜,其中 >4 500~5 000 m 和 >5 000~5 500 m(以 2 000~2 500 m 为例,表示海拔大于 2 000 m 且小于等于 2 500 m 的数值范围,其他海拔范围同理)的区域占流域总面积的比例最高,分别为 31.1% 和 30.3%,而 ≤1 500 m、>1 500~2 000 m、>2 000~2 500 m、>2 500~3 000 m 及 >3 000~3 500 m 的比例均不到 3%,因此将 5 个区域统一整合为 ≤3 500 m,占流域总面积约 9.0%。

#### 2.1.3 植被类型数据

使用的植被类型数据为源自国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心([• 540 • 生态与环境](http://</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

www.geodata.cn) 的 1:100 万中国植被类型图。根据青藏高原南峰地区的植被垂直带谱信息将流域内的植被类型划分为 9 种,依次为阔叶林、针叶林、草原(包含草丛、温带禾草和灌木荒漠)、灌丛、高山植被、草甸和其他植被类型(包括农作物及经济作物

等),占流域面积比例分别为 4.50%、6.94%、14.22%、15.75%、19.07%、33.91%、5.61%,其中由于草丛、温带禾草和灌木荒漠草原的面积之和不到流域总面积的 6%,为体现直观性将其统一划为草原。植被类型见图 1。

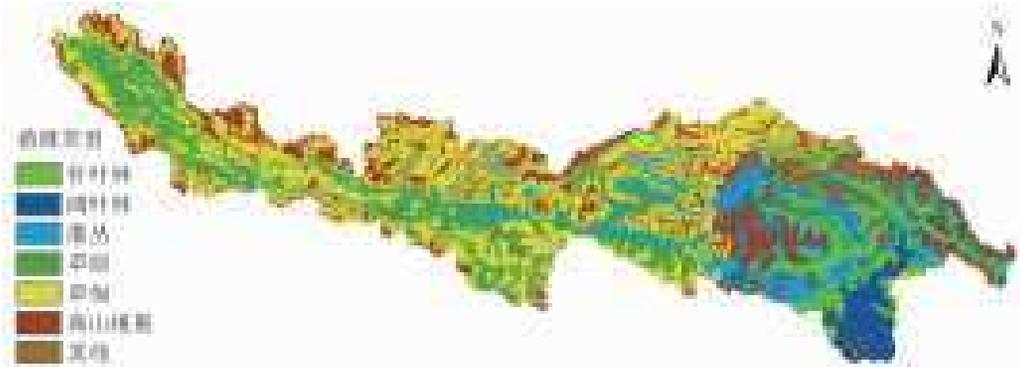


图 1 雅鲁藏布江流域植被类型

Fig. 1 Map of vegetation types in the Yarlung Zangbo River basin

为了提取不同植被类型的 NDVI 数据,在 ArcGIS 软件中将上述 7 种植被类型作为掩膜,分别对 7 种植被类型的 MODIS NDVI 年值进行提取,得到 2001—2018 年 7 种植被类型的共 126 个 NDVI 数据。

#### 2.1.4 气象数据

使用的气温、降水数据为我国陆地气象台站的观测数据,均源自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括 2006—2018 年雅鲁藏布江流域内 10 个气象站点逐月的月平均气温和月降水数据,利用 IDW(inverse distance weighted)空间插值法,得到与 NDVI 一样空间分辨率的月平均气温和月降水空间分布数据。

## 2.2 研究方法

利用 Mann-Kendall 趋势及突变点检验法对流域 18 年来植被 NDVI 的时间变化特征进行分析,通过对 2001—2018 年雅鲁藏布江流域每个像元 MODIS NDVI 的 Slope 值进行计算,进而分析 18 年雅鲁藏布江流域的植被 NDVI 空间变化特征,并探究气候因子对 NDVI 影响的滞后性。

### 2.2.1 Slope 趋势分析

基于像元尺度的 MODIS NDVI 年值数据,通过 MATLAB 软件进行编程计算 2001—2018 年雅鲁藏布江流域每个像元的 NDVI 回归方程的斜率(Slope),定量分析 2001—2018 年尼洋河流域植被 NDVI 的空间变化特征。若  $Slope > 0$  则说明该像元内的植被 NDVI 有增长趋势,植被状况有所改善,且数值越大表明改善的效果越好;反之,表明像元内的植被状况变差<sup>[26]</sup>。其计算公式为

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NDVI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: $n$  表示时间序列的长度,从 2001 年到 2018 年共 18 年; $i$  表示第  $i$  年; $NDVI_i$  表示第  $i$  年的 NDVI 值。

### 2.2.2 趋势性和突变点检验

基于像元尺度的 NDVI 月值数据,采用 Mann-Kendall 趋势检验法对 2001—2018 年雅鲁藏布江全流域、流域内不同海拔梯度及不同植被类型地区的平均 NDVI 值进行时间序列的趋势分析。在 M-K 趋势检验中,将某时间序列的 NDVI 值  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  看作一组独立分布的样本数据<sup>[27]</sup>,其统计值  $S$  的计算公式为

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

式中:

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

Mann(1945)和 Kendall(1948)指出,当  $n > 8$  时,随机序列  $S_i (i = 1, 2, \dots, n)$  近似地服从正态分布,其均值  $E(s)$  和方差  $\text{Var}(s)$  为

$$E(s) = 0 \quad (4)$$

$$\text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

进一步得到 M-K 的统计值

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$Z_{MK} > 0$  时表明数据呈现增大的趋势,  $Z_{MK} < 0$  时表明数据呈现减小的趋势, 而  $Z_{MK}$  值的大小与变化趋势是否显著密切相关。当  $\alpha = 0.05$  时,  $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ ; 当  $\alpha = 0.01$  时,  $Z_{1-\alpha/2} = 2.58$ 。

不仅分析全流域的 NDVI 变化趋势, 还对整个流域 NDVI 年际变化的突变点进行分析。在 M-K 突变点检验中, 对有  $n$  个样本数据的 NDVI 时间序列  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  构造秩序列

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad k=2, 3, \dots, n \quad (7)$$

式中: 当  $x_i > x_j$  时,  $r_i = 1$ ; 当  $x_i \leq x_j$  时,  $r_i = 0$ ;  $j = 1, 2, \dots, i-1$ 。通过  $S_k$  得到统计量  $UF_k$

$$Z_{UF_k} = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad k=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中:  $UF_1 = 0$ ; 当时间序列  $X$  相对分布连续并且相互独立时,  $S_k$  的期望及方差可由下式计算:

$$\begin{cases} E(S_k) = k(k-1)/4 \\ \text{Var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \end{cases} \quad (9)$$

对时间序列  $X$  倒序并重复上述过程计算  $UB_k$ , 使  $UB_k = -UK_k (k = n, n-1, \dots, 1)$ ,  $UB_1 = 0$ 。若  $UF_k$  和  $UB_k$  两条线出现交点且交点在临界线范围之内, 则交点的时间表示序列  $X$  的突变点。

### 2.2.3 相关分析

主要通过计算与检验 NDVI 变化与有关变量的相关系数来探讨植被变化与植被类型、降水及气温的相互关系, 公式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

式中:  $x_i$  为植被 NDVI 月值;  $y_i$  为气候因子(月降水量/月平均气温);  $\bar{x}$  为 NDVI 月数据的平均值;  $\bar{y}$  为月尺度气候因子数据的平均值;  $n$  为月份, 是数据的时间序列长度。

### 2.2.4 滞后相关系数

降水、气温作为气候变化的重要指示因子与植被的变化息息相关, 但是降水、气温变化对植被产生的影响存在滞后情况, 即气候变化积累到某种水平时才会导致植被变化<sup>[8]</sup>。利用滞后相关系数探究降水、气温对 NDVI 影响的滞后性, 其原理为

$$r_T = \max\{R_0, R_1, R_2, \dots, R_n\} \quad n \geq 0 \quad (11)$$

式中:  $r_T$  为滞后相关系数;  $R_0, R_1, R_2, \dots, R_n$  分别代表 NDVI 与当前月、前 1 个月、前  $n$  个月的气候因子的相关系数。以降水为例, 若前推  $n$  个月的情况下 NDVI 与降水的相关系数为最大值, 即得到  $r_T =$

$R_n$ , 表明滞后时间为  $n$  个月。

在当前月、前 1 个月、前 2 个月、前 3 个月共 4 种滞后时间条件下分别计算月降水量、月平均气温与 NDVI 的相关系数, 并进行流域植被对降水、气温变化的敏感性分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 NDVI 年际变化特征

#### 3.1.1 流域尺度

以年为时间尺度, 计算 2001—2018 年的流域平均 NDVI 值(图 2), 并利用 Mann-Kendall 趋势检验法及突变点检验对流域尺度下植被 NDVI 的时间变化特征进行定量分析。结果显示, 2001—2018 年雅鲁藏布江流域平均植被 NDVI 呈增加趋势, 平均增长速度为  $0.01\%/(10 \text{ a})$ , 在 2006 年和 2016 年出现较大的波动增大, 在 2018 年出现较大的波动减小, 且在 2017 年 NDVI 达到了 0.276, 是近 18 年来的最高值; 在 Mann-Kendall 的趋势检验中, 多年(2001—2018 年)的流域平均 NDVI 在显著性水平为 0.05 时,  $Z_{MK} = 3.03 > 1.96 > 0$ , 说明 2001—2018 年雅鲁藏布江流域的植被 NDVI 呈显著增长趋势。



图 2 2001—2018 年流域平均 NDVI 随时间变化趋势

Fig. 2 The trend of the river basin average NDVI over time from 2001 to 2018

在显著性水平为 0.05 的 Mann-Kendall 的突变点检验(图 3)中, 2001—2016 年流域植被 NDVI 在未超过显著性水平的情况下呈现增长趋势, 在 2015 年之后这种增长的趋势超过了显著性水平, 呈现显著性增长趋势, 而  $UF$  曲线和  $UB$  曲线的交点在两条显著性水平线之间, 可以确定突变点为 2013 年, 2013 年之后的增长趋势是一个突变现象。

#### 3.1.2 不同海拔梯度

基于裁剪得到的多个海拔梯度的 DEM 掩膜, 提取 2001—2018 年共 6 种海拔梯度 ( $\leq 3500 \text{ m}$ 、 $>3500 \sim 4000 \text{ m}$ 、 $>4000 \sim 4500 \text{ m}$ 、 $>4500 \sim$

5 000 m、> 5 000~5 500 m、> 5 500 m) 的植被 NDVI 年值数据,以年为时间尺度,计算 2001—2018 年 6 种海拔梯度的平均 NDVI 值共 108 个数据,并结合线性回归法及 Mann-Kendall 趋势检验法对不同海拔梯度下植被 NDVI 的时间变化特征进行定量分析。结果(图 4、表 1)表明,6 种海拔梯度植被的 NDVI 趋势线斜率及 Mann-Kendall 统计检验值均大于 0,说明在时间尺度上均呈逐渐增大的趋势,且海拔大于 4 500 m 地区的植被平均 NDVI 均通过了置信度为 0.05 的显著性检验,表明海拔大于 4 500 m 地区的植被 NDVI 增长趋势显著。同时,6 种海拔梯度的植被 NDVI 均在 2015 年后呈现增长的趋势。

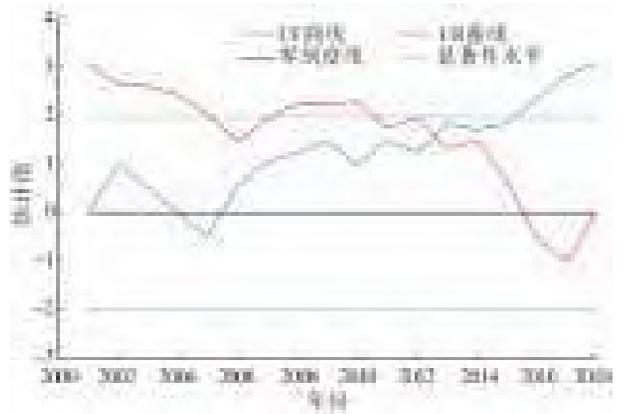


图 3 Mann-Kendall 突变检验结果  
Fig. 3 Mann-Kendall mutation test results

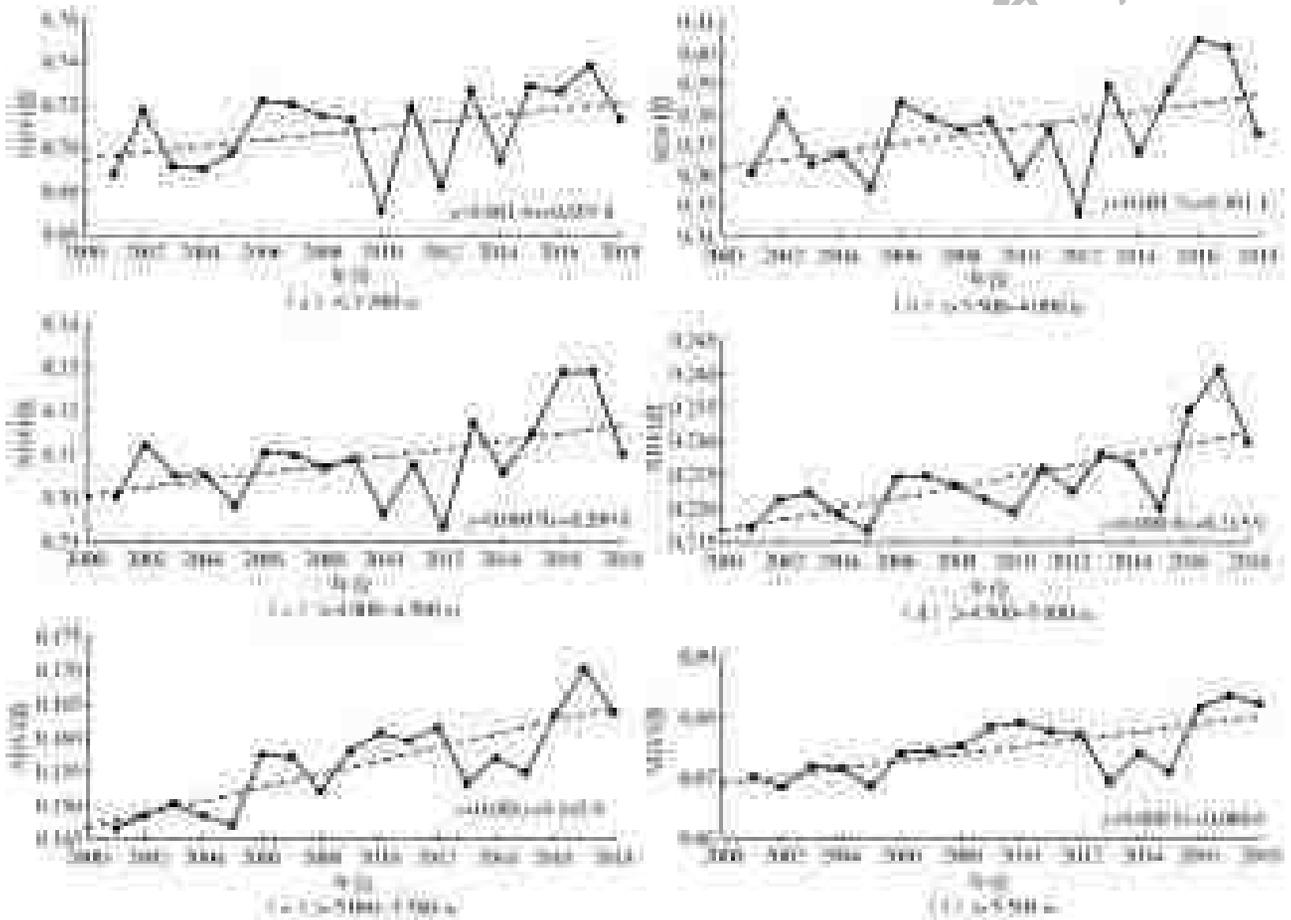


图 4 不同海拔梯度的平均 NDVI 随时间变化趋势  
Fig. 4 Time-varying trend of average NDVI at different altitude gradient

表 1 不同海拔梯度 NDVI 变化的 Mann-Kendall 检验值  
Tab. 1 Mann-Kendall test value of NDVI change at different altitude gradients

海拔梯度	$\leq 3\ 500\text{ m}$	$> 3\ 500\sim 4\ 000\text{ m}$	$> 4\ 000\sim 4\ 500\text{ m}$	$> 4\ 500\sim 5\ 000\text{ m}$	$> 5\ 000\sim 5\ 500\text{ m}$	$> 5\ 500\text{ m}$
Z <sub>MK</sub> 值	1.82	1.52	1.74	3.03	3.56	2.88

### 3.1.3 不同植被类型

利用裁剪得到的多种植被类型数据的掩膜,对 2001—2018 年共 7 种植被类型(阔叶林、针叶林、草原、灌丛、高山植被、草甸、其他植被)的 NDVI 年值数据进行提取,并计算 2001—2018 年 7 种

植被类型的平均 NDVI 共 126 个数据。利用线性回归法及 Mann-Kendall 趋势检验法定量分析不同植被类型的 NDVI 时间变化特征。结果(图 5、表 2)显示,7 种植被类型的植被 NDVI 趋势线斜率均大于 0,且 Mann-Kendall 统计检验值大都通过

了置信度为 0.05 的显著性检验,说明在时间尺度上植被覆盖度呈现逐渐增长的趋势,且增长趋势显著。根据图 6 所示,大部分植被 NDVI 在 2014

年左右到达低值后有一个明显的上升趋势,印证了上文关于不同海拔梯度植被的 NDVI 时间变化的结论。

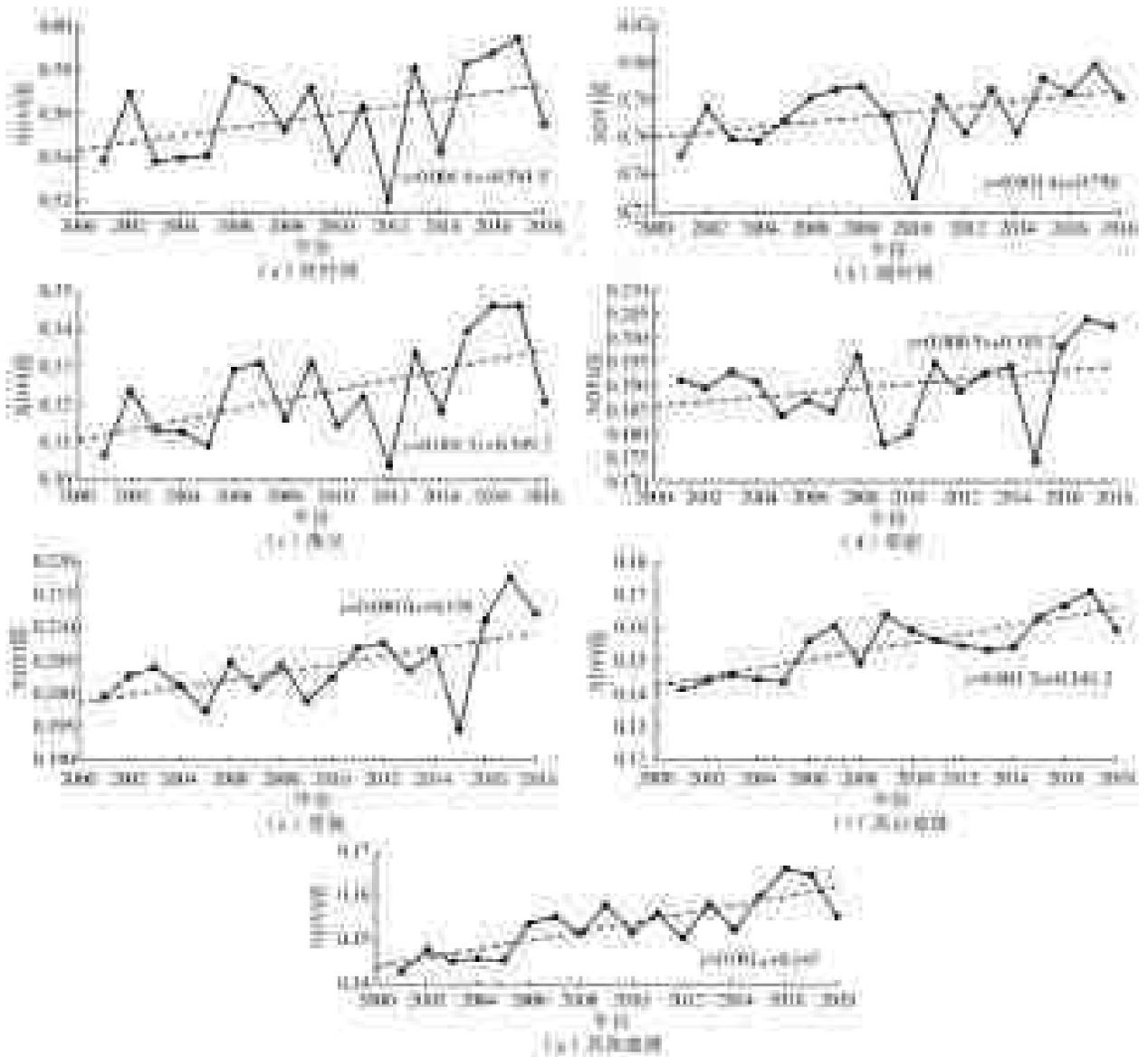


图 5 不同植被类型的平均 NDVI 随时间变化趋势

Fig. 5 Time-varying trend of average NDVI of different vegetation types

表 2 不同植被类型 NDVI 变化的 Mann-Kendall 检验值  
Tab. 2 Mann-Kendall test value of NDVI change of different vegetation types

植被类型	针叶林	阔叶林	灌丛	草原	草甸	高山植被
Z <sub>MK</sub> 值	2.12	2.20	2.42	1.29	2.42	3.18

### 3.2 NDVI 空间变化特征

基于 2001—2018 年 MODIS NDVI 的年值数据,对流域每个像元的 Slope 值进行分析,正值说明 NDVI 具有逐渐增长的趋势,反之则说明具有递减的趋势(以 0~0.001 为例,表示 Slope 值大于 0 且小于等于 0.001 的数值范围,图中其他 Slope 值范围同理)。在空间尺度上,雅鲁藏布江流域大部分地区的 NDVI 年值在 2001—2018 年呈增长趋势,占流

域面积的 80% 左右,该地区植被的 NDVI 上升,表明植被覆盖度升高,植被生长情况有所改善。流域下游地区的植被主要为低海拔的针叶林、阔叶林及灌丛,该区域年均 NDVI 增长趋势最显著,说明低海拔地区植被的生长状况改善的最好。流域上游及中游地区的年均 NDVI 的变化情况具有明显的空间差异,大部分草原及草甸植被的年均 NDVI 呈减小趋势,而一些高山植被的年均 NDVI 呈增长趋势,表明高海拔地区的植被其生长状况及环境适应性具有差异性,但从总体来讲植被 NDVI 呈减小趋势的地区主要分布在中上游的高海拔地区,说明气温、湿度及水汽条件等要素对植被的生长有较大的影响。



图 6 2001—2018 年雅鲁藏布江流域 NDVI 变化趋势

Fig. 6 NDVI change trend in the Yarlung Zangbo River basin from 2001 to 2018

基于像元尺度的 NDVI 年值数据,根据不同海拔梯度及不同植被类型共 13 种(6+7)掩膜对各个海拔梯度的植被类型掩膜进行提取,利用掩膜计算各个海拔梯度不同植被类型的 NDVI 均值时间序列并与不同海拔梯度的 NDVI 均值时间序列进行相关性分析得到近 18 年各海拔梯度 NDVI 变化与植被类型的 Pearson 相关系数(图 7)。结果显示,对于相关系数  $R$ ,针叶林与阔叶林的相关系数随高程增大而减小,草甸的随高程增大而增大,灌丛、草原和其他植被的随高程的增大而先增大、后减小,而高山植被的相关系数随高程的增大而先减小、后增大。针叶林与阔叶林在  $\leq 3500$  m 时相关系数最高,分别为 0.98 和 0.94,后面随高程增大而逐渐减小到 0.56 和 0.90。灌丛在  $> 3500 \sim 4000$  m 时最高(0.98),草原在  $> 4500 \sim 5000$  m 时最高(0.73),其他植被在  $> 4000 \sim 4500$  m 时最高(0.91),其后均随高程增大而减小,不同的是,草原在  $> 3500 \sim 4000$  m 时相关系数为最小(0.30),而灌丛和其他植被在海拔  $> 4500 \sim 5000$  m 时相关系数才降到最小(0.69 和 0.60)。草甸在  $> 4000 \sim 4500$  m 时相关系数最小(0.28),其后随高程增大而逐渐增大到 0.98。反观高山植被,其在  $> 4500 \sim 5000$  m 时最小(0.55),其后随高程增大而逐渐增大,在  $> 5500$  m 时达到最高(0.98)。

根据以上结果对各个海拔梯度的植被 NDVI 变化与植被类型的相关性进行分析,海拔梯度在  $\leq 3500$  m 时 NDVI 变化主要受针叶林及阔叶林的影响,海拔梯度在  $> 3500 \sim 4000$  m 时 NDVI 变化受针叶林和灌丛的影响较大,海拔梯度在  $> 4000 \sim 4500$  m 时 NDVI 变化主要受灌丛和其他植被的影响,海拔梯度在  $> 4500 \sim 5000$  m 时 NDVI 变化主要受灌丛、草原和草甸的影响,而  $> 5000 \sim 5500$  m

和  $> 5500$  m 两个海拔梯度的 NDVI 变化均受草甸和高山植被的影响较大。综上所述,不同植被类型的 NDVI 在各个海拔梯度均存在极大差异。

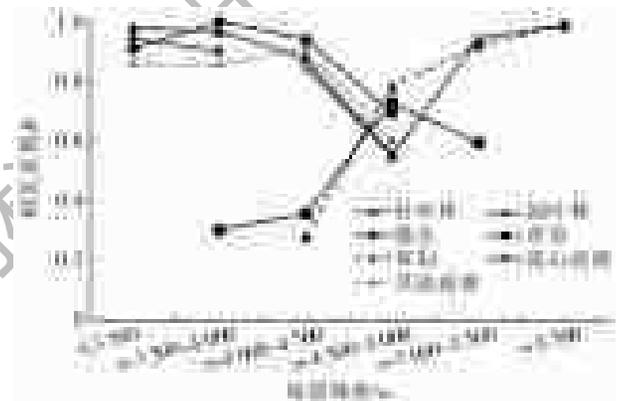


图 7 不同海拔梯度 NDVI 变化与植被类型的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficients of NDVI changes at different altitude gradients and vegetation types

### 3.3 NDVI 变化与气候因子的相关性

基于 2006—2018 年雅鲁藏布江流域的植被 NDVI,在本月、前 1 个月、前 2 个月、前 3 个月共 4 种滞后时间条件下分别分析其与月降水量、月平均气温相关系数的空间分布特征,见图 8。结果显示:随着前推时间的增加,上游地区的植被 NDVI 与降水逐渐从高度正相关关系变为低相关关系,在中游地区甚至逐渐达到中度负相关关系,而在下游地区其与降水的相关性逐渐从低相关关系及高度负相关关系转变为高度正相关关系;反观气温因子,随着前推时间的增加,上游及中游地区在总体相关关系变化上与降水得到的结果相似,大致从高度正相关关系转变为低相关关系,而下游仅在阔叶林植被区与降水有相似的结果,其他地区的结果同上、中游。

基于上述气温、降水与 NDVI 的各 4 种相关性

分析结果,通过式计算雅鲁藏布江流域植被 NDVI 与两种气候因子的滞后相关系数,结果见图 9(以

0.5~0.8 为例,表示相关系数大于等于 0.5 且小于 0.8 的数值范围,同理 0~0.5)。

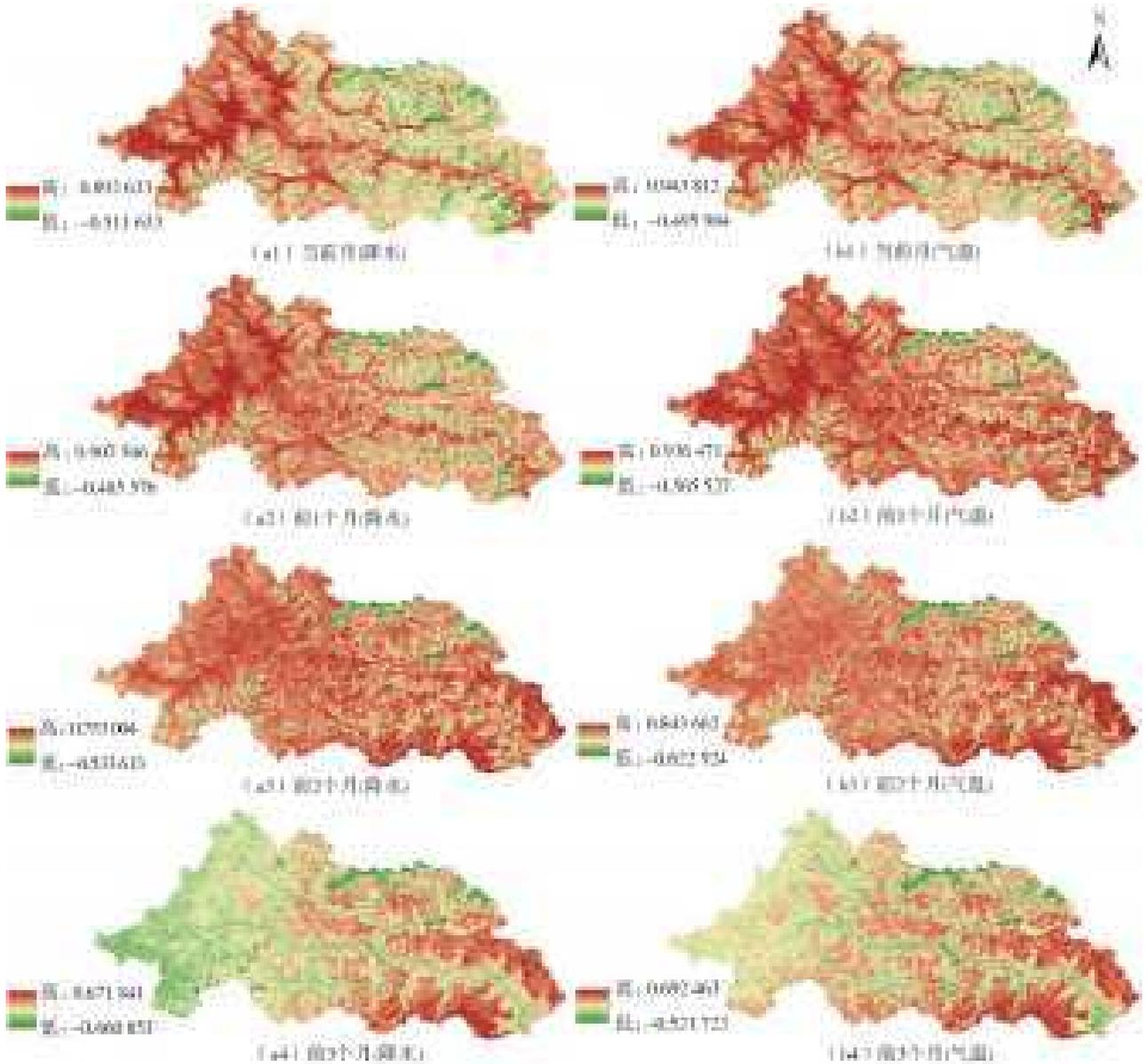


图 8 研究区植被 NDVI 与不同时间气候因子的相关系数

Fig. 8 Correlation coefficients of vegetation NDVI and climate factors at different times in the study area

由图 9 可知,雅鲁藏布江流域的降水和气温对植被 NDVI 的影响较为显著,且具有明显的空间各异性。从降水角度来看,流域有 33.69% 的植被与降水呈高度相关关系( $r_T \geq 0.8$ ),47.48% 的植被与降水呈中度相关关系( $0.5 \leq r_T < 0.8$ ),流域内植被 NDVI 与降水呈高度相关的地区主要分布在上、中游地区,呈低相关关系的地区主要分布在低海拔地区的下游。从气温角度来看,气温与植被 NDVI 呈高度相关的区域主要分布在中、下游,占流域面积的 20.34%,而与植被 NDVI 中度相关的区域占流域面积的 65.85%,表明在流域植被 NDVI 与气温的相关性上中度相关占主导地位。

基于上述结果对流域植被 NDVI 与降水和气温的相关性进行比较,发现雅鲁藏布江流域 52.96% 植被的 NDVI 在与降水和气温的相关性上表现为后者强于前者,但流域植被的 NDVI 与降水高度相关的地区面积(33.69%)大于与气温高度相关的地区面积(20.34%)。综上所述,雅鲁藏布江流域在植被与降水和气温的相关性上变现为气温略强于降水。

### 3.4 不同植被类型的 NDVI 变化与气候因子的相关性

不同的植被类型对应的生长周期不同,因此对降水、气温等气候要素的敏感度也各不相同,以月为时间尺度,对植被与气温、降水的相关关系进行分

析,计算降水和气温发生变化时不同植被对应的响应时间,结果见图 10 和表 3。结果显示,气温、降水与不同植被的 NDVI 的相关系数由大到小依次为草原、草甸、灌丛、高山植被、针叶林、其他植被、阔叶林,而其对降水、气温变化的响应时间由长到短均表现为阔叶林、针叶林、灌丛、其他植被、草原、高山植

被、草甸。从雅鲁藏布江同一种植被类型来看,除了草原和草甸外,植被的 NDVI 与气温、降水的相关系数均表现为气温大于降水,除草原、草甸和高山植被对气温的响应时间大于其对降水的响应时间外,其余植被对两种气候因子变化的响应时间均表现为降水大于气温。

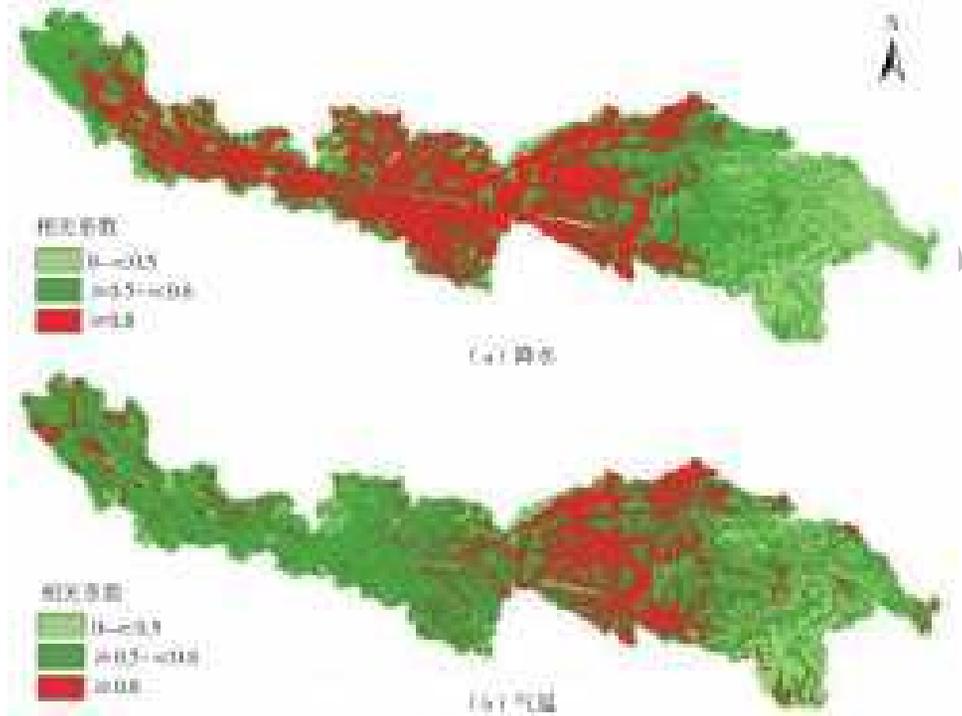


图 9 研究区植被 NDVI 与降水和气温的滞后相关系数

Fig. 9 Lag correlation coefficient of vegetation NDVI and precipitation and temperature in the study area

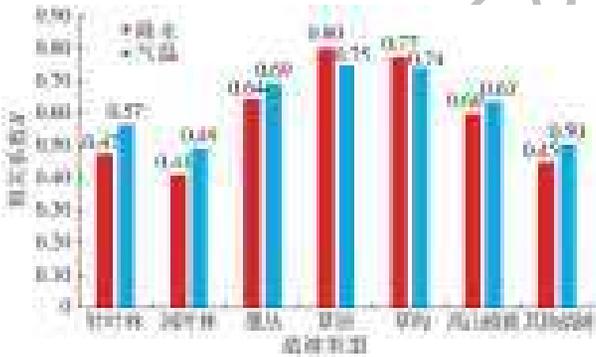


图 10 研究区不同植被类型与气候因子的相关系数

Fig. 10 Correlation coefficients of different vegetation types and climatic factors in the study area

表 3 研究区不同植被类型 NDVI 对气候因子变化响应的滞后时间

Tab. 3 The lag time of the response of different vegetation types NDVI to the change of climate factors in the study area 单位:月

植被类型		针叶林	阔叶林	灌丛	草原	草甸	高山植被	其他植被
平均滞后时间	降水	1.79	2.52	1.29	0.90	0.64	0.85	1.18
	气温	1.43	2.36	1.12	1.02	0.86	0.94	1.02

(2)雅鲁藏布江流域植被的 NDVI 变化与降水和气温表现为中度相关及以上的面积均大于流域面积的 80%且发现流域 52.96%的面积其植被 NDVI 与降水的相关性弱于气温,但与降水高度相关地区

的面积(33.69%)大于与气温高度相关地区的面积(20.34%)。总体来讲,雅鲁藏布江流域植被的 NDVI 受降水及气温的影响均较大且植被 NDVI 受气温的影响大于降水。

#### 4 结论

(1)18 年来雅鲁藏布江流域 80%左右地区的 NDVI 呈增长趋势,植被生长情况有所改善,其中下游地区的 NDVI 增长趋势最显著;6 种海拔梯度的植被 NDVI 在时间尺度上均呈逐渐增大的趋势,其中海拔大于 4 500 m 地区的植被 NDVI 增长趋势显著且 6 种海拔梯度的植被 NDVI 均在 2015 年呈现增长趋势;从植被类型的角度看,其结果与不同海拔梯度的相似,均呈现逐渐增长的趋势且趋势较为显著。

(3)雅鲁藏布江流域不同植被的 NDVI 与降水、气温的相关系数由大到小均表现为草原、草甸、灌丛、高山植被、针叶林、其他植被、阔叶林,其对降水、气温变化的响应时间由长到短均表现为阔叶林、针叶林、灌丛、其他植被、草原、高山植被、草甸;根据结果可知,气温对植被产生的影响强于降水,同时该植被对气温变化进行响应的时间更短。

#### 参考文献(References):

- [1] 王东. 西南地区植被覆盖变化及对不同时间尺度气候特征的响应分析[D]. 兰州:西北师范大学,2014. (WANG D. Vegetation cover change and its response to different time scales of the climate characteristics [D]. Lanzhou:Northwest Normal University,2014. (in Chinese)) DOI:10.7666/d.D571675.
- [2] 方精云,朴世龙,贺金生,等. 近 20 年来中国植被活动在增强[J]. 中国科学(C 辑:生命科学),2003,33(6):554-565. (FANG J Y,PIAO S L,HE J S,et al. China's vegetation activities have increased in the past 20 years [J]. Sciencein China Series C: Life Science,2003,33(6):554-565. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1006-9259.2003.06.010.
- [3] 朴世龙,方精云. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化[J]. 第四纪研究,2001,21(4):294-302. (PIAO S L, FANG J Y. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China[J]. Quaternary Sciences,2001,21(4):294-302. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1001-7410.2001.04.002.
- [4] 周伟,王倩,章超斌,等. 黑河中上游草地 NDVI 时空变化规律及其对气候因子的响应分析[J]. 草业学报,2013,22(1):138-147. (ZHOU W,WANG Q,ZHANG C B,et al. Spatiotemporal variation of grassland vegetation NDVI in the middle and upper reaches of the Hei River and its response to climate factors[J]. Acta Prataculturae Sinica,2013,22(1):138-147. (in Chinese)) DOI:10.11686/cyxb20130117.
- [5] 李明杰,侯西勇,应兰兰,等. 近十年黄河三角洲 NDVI 时空动态及其对气温和降水的响应特征[J]. 资源科学,2011,33(2):322-327. (LI M J,HOU X Y,YING L L,et al. Spatial-temporal dynamics of NDVI and its response to temperature and precipitation in the Yellow River Delta during the period 1998-2008[J]. Resources Science,2011,33(2):322-327. (in Chinese)) DOI:10.1631/jzus.A1000105.
- [6] 戴声佩,张勃,王强,等. 祁连山草地植被 NDVI 变化及其对气温降水的旬响应特征[J]. 资源科学,2010,32(9):1769-1776. (DAI S P,ZHANG B,WANG Q,et al. Variation in grassland vegetation NDVI and its Ten-Day response to temperature and precipitation in the Qilian Mountains[J]. Resources Science,2010,32(9):1769-1776. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:ZRZY.0.2010-09-022.
- [7] CRISTINA A,JULIE C Z,MARIA J P,et al. NDVI as an indicator for changes in water availability to woody vegetation[J]. Ecological Indicators,2012,23:290-300. DOI:10.1016/j.ecolind.2012.04.008.
- [8] 张景华,封志明,姜鲁光,等. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析[J]. 自然资源学报,2015,30(9):1425-1435. (ZHANG J H,FENG Z M,JIANG L G,et al. Analysis of the correlation between NDVI and climate factors in the Lancang River basin[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(9):1425-1435. (in Chinese)) DOI:10.11849/zrzyxb.2015.09.001.
- [9] PIAO S,WANG X,CAIS P,et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. Global Change Biology,2011,17(10):3228-3239. DOI:10.1111/j.1365-2486.2011.02419.x.
- [10] LARSON C. Third Pole' glacier research gets a boost from China. [J]. Science,2011,334(6060):1199. DOI:10.1126/science.334.6060.1199.
- [11] HYE S P,SOHN B J. Recent trends in changes of vegetation over east Asia coupled with temperature and rainfall variations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2010,115(14):101-112. DOI:10.1029/2009jd012752.
- [12] CHEN B,XU G,COOPS N C,et al. Changes in vegetation photosynthetic activity trends across the Asia-Pacific region over the last three decades[J]. Remote Sensing of Environment,2014,144:28-41. DOI:10.1016/j.rse.2013.12.018.
- [13] 杜加强,王跃辉,师华定,等. 基于 MODIS 和 Landsat 的青藏高原两代 GIMMS NDVI 性能评价[J]. 农业工程学报,2016,32(22):192-199,316. (DU J Q,WANG Y H,SHI H D,et al. Performance evaluation of GIMMS NDVI3g and GIMMS NDVIg based on MODIS and Landsat in Tibetan Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(22):192-199,316. (in Chinese)) DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.22.026.
- [14] 孙燕武. 基于 ETM+ 影像的丘陵地区林地信息提取 [J]. 科技创新与生产力,2019(3):16-18. (SUN Y W. Information extraction of forest land in hilly area based on ETM+ images[J]. Technology Innovation

- and Productivity, 2019(3):16-18. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;TAIY. 0. 2019-03-006.
- [15] 武黎黎,陈月庆,蚩志锋,等. 3 种 NDVI 遥感数据产品在大别山区的对比分析[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2019, 32(4): 584-589. (WU L L, CHEN Y Q, CHI Z F, et al. Comparative analysis of 3 NDVI remote sensing datasets in the Dabie Mountains[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2019, 32(4): 584-589. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-0972. 2019. 04. 012.
- [16] 杜加强,舒俭民,赵晨曦,等. 两代 AVHRR GIMMS NDVI 数据集的对比分析:以新疆地区为例[J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6738-6749. (DU J Q, SHU J M, ZHAO C X, et al. Comparison of GIMMS NDVIg and GIMMS NDVIg for monitoring vegetation activity and its responses to climate changes in Xinjiang from 1982 to 2006[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): 6738-6749. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201504190805.
- [17] 张杰,郭锐,王介民. NOAA/AVHRR 与 EOS/MODIS 遥感产品 NDVI 序列的对比及其校正[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 1097-1104. (ZHANG J, GUO N, WANG J M. Contrast and calibration of remote sensing production NDVI of NOAA/AVHRR and EOS/MODIS[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(5): 1097-1104. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN: GYQX. 0. 2007-05-024.
- [18] 赵玉萍,张宪洲,王景升,等. 1982 年至 2003 年藏北高原草地生态系统 NDVI 与气候因子的相关分析[J]. 资源科学, 2009, 31(11): 1988-1998. (ZHAO Y P, ZHANG X Z, WANG J S, et al. Correlation analysis between NDVI and climatic factors of grassland ecosystems in the northern Tibetan Plateau from 1982 to 2003[J]. Resources Science, 2009, 31(11): 1988-1998. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn:1007-7588. 2009. 11. 022.
- [19] SPANO D, CESARACCIO C, DUCE P, et al. Phenological stages of natural species and their use as climate indicators[J]. International Journal of Biometeorology, 1999, 42(3): 124-133. DOI: 10. 1007/s004840050095.
- [20] WANG J, RICH P M, PRICE K P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(11): 2345-2364. DOI: 10. 1080/01431160210154812.
- [21] 周金霖,马明国,肖青,等. 西南地区植被覆盖动态及其与气候因子的关系[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(5): 966-972. (ZHOU J L, MA M G, XIAO Q, et al. Vegetation dynamics and its relationship with climate factors in southwestern China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(5): 966-972. (in Chinese)) DOI: 10. 11873/j. issn. 1004-0323. 2017. 5. 0966.
- [22] 徐兴奎,林朝晖,薛峰,等. 气象因子与地表植被生长相关性分析[J]. 生态学报, 2003, 23(2): 221-230. (XU X K, LIN Z H, XUE F, et al. Correlation analysis between meteorological factors and the ratio of vegetation cover[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(2): 221-230. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0933. 2003. 02. 001.
- [23] 张嘉琪,任志远. 雅鲁藏布江流域生长季 NDVI 对湿季降水的响应[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 209-212. (ZHANG J Q, REN Z Y. Responses of vegetation changes in growing season to precipitation in Yarlung Zangbo River basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 209-212. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; STBY. 0. 2015-02-039.
- [24] 刘湘伟. 雅鲁藏布江流域水文气象特性分析[D]. 北京:清华大学, 2015. (LIU X W. Analysis of the meteorological and hydrological characteristics in the Yarlung Zangbo River basins[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)) DOI: CNKI; CDMD: 2. 1017. 800430.
- [25] 韩红珠,白建军,张波,等. 基于 MODIS 时序的陕西省植被物候时空变化特征分析[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(4): 125-131. (HAN H Z, BAI J J, ZHANG B, et al. Spatial-temporal characteristics of vegetation phenology in Shaanxi Province based on MODIS time series[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(4): 125-131. (in Chinese)) DOI: 10. 6046/gtzyyg. 2018. 04. 19.
- [26] 吕洋,董国涛,杨胜天,等. 雅鲁藏布江流域 NDVI 时空变化及其与降水和高程的关系[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 603-611. (LYU Y, DONG G T, YANG S T, et al. Spatio-temporal variation in NDVI in the Yarlung Zangbo River basin and its relationship with precipitation and elevation[J]. Resources Science, 2014, 36(3): 603-611. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZRZY. 0. 2014-03-020.
- [27] 刘洋,李诚志,刘志辉,等. 1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6198-6208. (LIU Y, LI C Z, LIU Z H, et al. Assessment of spatio-temporal variations in vegetation cover in Xinjiang from 1982 to 2013 based on GIMMS-NDVI[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6198-6208. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201506071149.

**Vegetation change and its response to climate change in the Yarlung Zangbo River basin in the past 18 years**

MENG Qingbo<sup>1,3</sup>, LIU Yanli<sup>1,2,4</sup>, JU Qin<sup>3</sup>, LIU Ji<sup>5</sup>, WANG Guoqing<sup>1,2,4</sup>, JIN Junliang<sup>1,2,4</sup>,  
GUAN Tiesheng<sup>1,2</sup>, LIU Cuishan<sup>1,2,4</sup>, BAO Zhenxin<sup>1,2,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 3. College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;

5. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

**Abstract:** Climate change is a hot topic in recent decades, and the global ecosystem has already been affected by it. Climate warming has a significant impact on the vegetation change process in country. Vegetation is an important part of the terrestrial ecosystem. It not only affects the hydrology, climate, and energy balance of the ecosystem, but also is subject to change the hydrological, climatological process. Therefore, by monitoring the vegetation status, analyzing the characteristics of temporal and spatial changes of vegetation cover and the correlation of climate factors, soil and other factors with the vegetation changes are of great significance for revealing the intrinsic relationship between climate change and vegetation changes.

Firstly, based on MODIS NDVI data, DEM data, and 1 : 1 million Chinese vegetation type map, the Mann-Kendall trend and mutation point test method were used to analyze the temporal change characteristics of NDVI at different altitude gradients and vegetation types from 2001 to 2018 in the basin. Slope value of MODIS NDVI for each pixel and the characteristics of the vegetation NDVI spatial change were calculated from 2001 to 2018 in the Yarlung Zangbo River basin. Secondly, spatial distribution characteristics of the correlation coefficient between NDVI and monthly precipitation and monthly average temperature under the four lag time conditions of the current month, the previous month, the first two months, and the first three months were analyzed to explore the lag of climate factors on NDVI. Finally, the response time corresponding to different vegetations was calculated based on precipitation and temperature change and then correlation between NDVI changes of different vegetation types and climate factors were analyzed.

(1) From 2001 to 2018, NDVI showed an increasing trend in 80% of the Yarlung Zangbo River basin. Among them, the downstream area showed the most significant increase in NDVI. The 6 types of altitude gradients showed a gradual increase in NDVI. Vegetation NDVI in areas with an altitude greater than 4,500 m has a significant growth trend. From the perspective of vegetation types, the results are similar to those of different altitude gradients, and both show a gradual significant increase trend; (2) The area where the vegetation NDVI is moderately correlated with precipitation and temperature is 80% of the Yarlung Zangbo River basin, and it is found that the correlation between vegetation NDVI and precipitation in 52.96% area of the basin is weaker than that of temperature, but 33.69% area is highly correlated with precipitation than that of area highly correlated with temperature; (3) From the perspective of the same planting type in the Yarlung Zangbo River, except for grassland and meadow, the correlation coefficients of vegetation NDVI with temperature are all higher than precipitation. The response time of grassland, meadow, and alpine vegetation to temperature is longer than precipitation, and the response time of other vegetation to the changes of the two climatic factors shows that precipitation response time is greater than temperature.

(1) Vegetation growth in the Yarlung Zangbo River basin has improved in the past 18 years. The vegetation NDVI at different altitude gradients and vegetation types has shown an increasing trend in 2015. It may be related to the state's environmental protection and ecological construction policies in Tibet during the "Twelfth Five-Year Plan" period after 2013. (2) The NDVI of the vegetation in the Yarlung Zangbo River basin is greatly affected by precipitation and temperature. The correlation of vegetation with precipitation and temperature displayed that temperature is slightly stronger than precipitation; (3) The temperature in the Yarlung Zangbo River basin has a stronger impact on vegetation than precipitation, and the vegetation has a shorter response time to temperature changes.

**Key words:** climate change; vegetation change; Yarlung Zangbo River; NDVI; driving effect