

雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应

韩先明^{1,2}, 左德鹏¹, 李佩君¹, 徐宗学¹, 高晓曦¹

(1. 北京师范大学水科学研究院城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875;
2. 水利部宣传教育中心, 北京 100053)

摘要:基于雅鲁藏布江流域2000—2016年MODIS遥感产品,选取植被归一化指数NDVI研究近年来研究区植被覆盖变化情况,并结合流域内气象站实测数据,采用趋势分析法、Hurst指数法和偏相关系数法研究流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应关系。结果表明:近年来流域上游和下游地区植被覆盖以改善为主,中游地区则以恶化为主;流域低海拔地区为NDVI高值区,植被覆盖度随海拔升高呈先稳定后下降再稳定的趋势;流域NDVI与气温的偏相关系数大于降水,说明雅鲁藏布江流域整体上植被生长受气温影响要大于降水;流域Hurst指数空间差异性显著,均值为0.51,说明流域植被覆盖整体呈弱可持续性,其中拉萨河流域及雅鲁藏布江上游地区空间持续性较强,达到0.74。

关键词:MODIS;归一化植被指数;降水;气温;雅鲁藏布江

中图分类号:S771.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)01-0016-08

Spatiotemporal variability of vegetation cover and its response to climate change in Yarlung Zangbo River Basin//
HAN Xianming^{1,2}, ZUO Depeng¹, LI Peijun¹, XU Zongxue¹, GAO Xiaoxi¹ (1. *Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 2. *Publicity & Education Center of Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China*)

Abstract: Based on the MODIS remote sensing products from 2000 to 2016 in the Yarlung Zangbo River Basin, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was adopted to demonstrate the changes of vegetation cover. Combined with the measured data from the meteorological stations in the basin, the trend analysis method, Hurst index method, and partial correlation coefficient method were used to investigate the response of vegetation cover to climate change. The results show that the NDVI in the upstream and downstream region in recent years was mainly improved, while that in the middle reaches was mainly deteriorated. The high value of NDVI was located in the low elevation area. The trend of vegetation cover against elevation was firstly stable, then downward, and finally stable again. The correlation coefficient between NDVI and temperature in the Yarlung Zangbo River basin was greater than that with precipitation, indicating that the impact of temperature on the growth of vegetation in the Yarlung Zangbo River Basin is much stronger than that of precipitation. The Hurst index across the whole basin showed a significantly spatial heterogeneity, with an average value of 0.51, indicating that the NDVI of the Yarlung Zangbo River Basin showed a weak sustainability. The spatial sustainability of the NDVI in the Lhasa River Basin and the upper reaches of the whole basin was relatively strong, reaching the value of 0.74.

Key words: MODIS; NDVI; precipitation; temperature; Yarlung Zangbo River

植被作为重要的自然资源,是人类生存环境中不可或缺的组成部分。植被覆盖与气象要素密切相关,通过水汽输送的方式,植被适应着气候变化并在一定程度上表征气候变化。同时,植被参与并影响全球水循环、生化循环、能量平衡等过程,对生态系统变化产生深远的影响。植被覆盖是连接气象和水文的载体,通过生态系统的反馈可对其他生态要素产生不同程度的作用。植被指数在评价植被覆盖度、生长活

力和生物量等植被状态信息时发挥着重要作用,其中归一化植被指数^[1-3](normalized difference vegetation index, NDVI)是表征植被生长状态和植被空间分布密度的指示因子,能够很好地反映植被的动态变化,在气象、水文等领域的研究中被广泛应用。

雅鲁藏布江作为我国西南地区最大的外流河,地处青藏高原腹地,区位海拔跨度极大。流域内植被及生态环境十分脆弱,是我国重要的地理屏障,因

基金项目:国家自然科学基金(9164720019);国家重点研发计划(2017YFC1502703);北京市自然科学基金(8202030)

作者简介:韩先明(1994—),男,硕士研究生,主要从事生态水文研究。E-mail: hanxianming@mail.bnu.edu.cn

通信作者:左德鹏(1985—),男,副教授,博士,主要从事流域水文过程和生态水文学研究。E-mail: dpzuo@bnu.edu.cn

此研究雅鲁藏布江流域植被变化及水文过程,提高对该地区植被覆盖变化的认识,厘清植被覆盖变化同气象要素的关系对我国的水能开发、环境保护、地缘政治有着重大战略意义^[4-9]。许多学者^[10-14]在不同地区对 NDVI 与气象要素的关系进行了探究,姜琳等^[15]研究了降雨因子对雅鲁藏布江流域植被生长的影响;姜红涛等^[16]利用 NDVI、降水和气温数据,分析了艾比湖流域 NDVI 变化趋势及其对降水和气温的响应特征,指出 NDVI 总体上与年降水量呈正相关,而与平均气温呈负相关。朴世龙等^[17]发现近年来我国大部分地区 NDVI 呈增长趋势,西北干旱区域和青藏高寒区域 NDVI 增长率在夏季达到最大,东部季风区域 NDVI 增长率在春季达到最大。大多研究表明 NDVI 对降水的响应存在一定滞后性^[18-19],同降水及气温存在正相关关系^[20];NDVI 与海拔也存在一定关系,一般来说低海拔地区 NDVI 值相对较高^[21]。就雅鲁藏布江流域而言,Li 等^[22]通过遥感手段对 1999—2013 年雅鲁藏布江流域 NDVI 年际变化及其沿海拔梯度变化特征进行了分析,发现以阔叶林和针叶林为主的低海拔地区植被覆盖增加明显。陈斌^[23]利用 SPOT 数据集对雅鲁藏布江大峡谷自然保护区不同植被类型、海拔梯度下的 NDVI 时空变化规律进行了研究。吕洋等^[24]分析了雅鲁藏布江流域植被覆盖时空变化规律,发现 NDVI 与降水之间存在较为明显的正相关关系。

已有研究对雅鲁藏布江流域植被覆盖变化进行了相关分析,然而不同植被类型下的植被生长状况及其持续性分析还未做充分探讨。考虑到研究区测站稀疏,属于缺资料地区,本文基于 MODIS 高精度遥感影像,采用趋势分析、Hurst 指数、偏相关性分析对研究区 2000—2016 年生长季、年内和年际植被覆盖空间异质性做详细分析,探讨植被覆盖对气候变化的响应,以期为研究区生态环境保护 and 气候变化研究提供参考。

1 研究区概况和数据

1.1 研究区概况

雅鲁藏布江流域^[25]位于北纬 27°8′~31°2′,东经 82°0′~97°1′之间,地处我国西藏自治区境内,是

世界上平均海拔最高的流域。流域发源于西藏西南部喜马拉雅山脉北麓的杰马央宗冰川,上游称为马泉河^[26]。流域海拔高度绝大部分在 3 000 m 以上,从源头杰马央宗冰川到下游河谷,由于干旱、半干旱半湿润、湿润地区组成。流域东西狭长,南北窄短,南有喜马拉雅山脉,北有冈底斯山及念青唐古拉山脉,南北之间为藏南谷地,在米林以下的下游地区分布着著名的大拐弯地带^[27]。流域降水年际变化不大,多年平均降水量 300~500 mm,但空间分布差异极大且年内分配不均,部分地区夏季降水可达全年降水量 80%。

通过咨询西藏水利专家并查阅相关文献^[28],将雅鲁藏布江流域分为上、中、下游,上游为日喀则市拉孜县以上宽谷区,植被覆盖多以草甸和草原为主;中游为河谷区,植被覆盖多以高山植被和草甸为主;米林县派镇以下为下游峡谷区,植被覆盖多以灌丛、针叶林和阔叶林为主。研究区水文气象站点主要位于流域中、下游且分布不均,属于缺资料流域,气象站分布、高程及流域概况如图 1 所示。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 植被数据

NDVI 数据由美国航空航天局 NASA 提供的 MODIS (moderate resolution image spectroradiometer) 遥感产品 (MOD13A3) (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>) 处理所得,已经过质量控制,该产品时长为 2000 年 2 月至 2016 年 12 月。MOD13A3 是 MODIS 的三级产品,是在二级产品的基础上,对由传感器成像过程产生的边缘畸变 (Bowtie 效应) 进行校正所得。该产品空间分辨率为 1 km×1 km,时间分辨率为月,原始数据为 EOS-HDF 格式,有效值域范围为 -0.2~1.0,数值越大说明植被覆盖状况越好。数据通过 MRT 软件批量处理成 GEO TIFF 格式,并通过 ArcGIS 投影拼接裁剪处理,其中合成方法选用最大合成法。植被类型数据来源于国家自然科学基金委员会中国西部环境与生态科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>),空间分辨率为 1:100 万。

1.2.2 气象数据

气象数据包括逐月降水和平均气温,均来自中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/>)

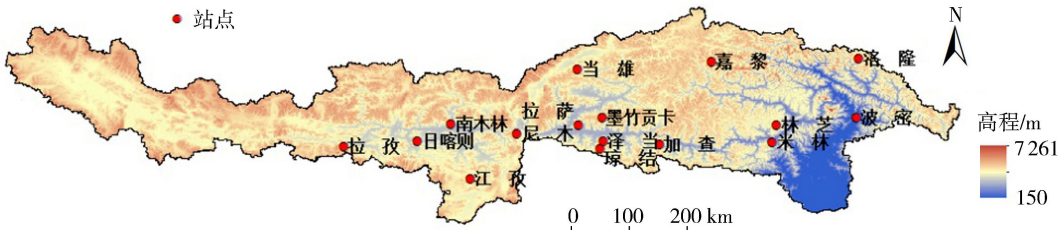


图 1 研究区概况及气象站点分布

的中国地面气候资料月值数据集。该数据集已通过质量控制,月年值各要素无错误数据。主要选取雅鲁藏布江流域内 15 个气象站点(当雄、拉孜、南木林、日喀则、尼木、拉萨、墨竹贡卡、琼结、泽当、江孜、嘉黎、波密、加查、林芝、米林)自 2000 年 2 月至 2016 年 12 月的逐月降水和平均气温数据,经去趋势处理后用于和 NDVI 进行偏相关分析。研究区气象站点分布如图 1 所示。

2 研究方法

2.1 偏相关系数法

偏相关系数^[29]是考察多变量相关程度时采取的研究方法,是在控制其他变量的条件下,衡量其中某两个变量直接线性相关关系的指标。其中,一阶偏相关系数的计算公式为

$$r_{12-3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)}} \quad (1)$$

式中: r_{12-3} 为控制第 3 个变量的情况下第 1 个变量和第 2 个变量的相关系数; r_{12} 为第 1 个变量和第 2 个变量的相关系数; r_{13} 为第 1 个变量和第 3 个变量的相关系数; r_{23} 为第 2 个变量和第 3 个变量的相关系数。 r_{12-3} 越接近 1,表明偏相关性越高。

2.2 Hurst 指数法

基于重标极差(R/S)分析方法的 Hurst 指数^[30]是定量描述时间序列信息长期依赖性的有效方法,该方法是由英国水文学家 Hurst 对尼罗河进行的长期水文观测归纳发明,其基本原理是:给定一时间序列 $\{\xi_t\}$,对于任意正整数 τ ,定义均值序列:

$$\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi_i \quad (2)$$

$$X_{t,\tau} = \sum_{u=1}^t (\xi_u - \langle \xi \rangle_\tau) \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (3)$$

$$R_\tau = \max_{1 \leq t \leq \tau} X_{t,\tau} - \min_{1 \leq t \leq \tau} X_{t,\tau} \quad (4)$$

$$S_\tau = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\xi_i - \bar{\xi}_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: $\langle \xi \rangle_\tau$ 为给定时间序列的均值序列; $X_{t,\tau}$ 为时间序列与其均值序列的累计离差; R_τ 为累计离差的极差; S_τ 为时间序列的标准差。若存在 $R/S \propto \tau^H$,则说

明时间序列存在 Hurst 现象, H 值称为 Hurst 指数,其值可在双对数坐标系($\ln \tau, \ln(R/S)$)中用最小二乘法拟合得到。Hurst 指数主要有 3 种形式:①当 $0.5 < H < 1$ 时,表明此序列为持续性序列,即未来变化趋势与过去趋势一致,且 H 越接近于 1,持续性越强;②当 $H=0.5$ 时,表明该时间序列为随机序列,即未来变化趋势与过去趋势无关;③当 $0 < H < 0.5$ 时,表明该时间序列具有反持续性,即未来的变化趋势与过去趋势相反,且 H 越接近于 0,反持续性越强。

2.3 一元线性回归法

一元线性回归法是根据自变量和因变量的相关关系,建立两者的线性回归方程对因变量进行分析的方法^[31-32]。一元线性回归法的模型为

$$Y_t = a + bX_t \quad (6)$$

$$a = \frac{\sum_{t=1}^n Y_t}{n} - b \frac{\sum_{t=1}^n X_t}{n} \quad (7)$$

$$b = \frac{n \sum_{t=1}^n X_t Y_t - \sum_{t=1}^n X_t \sum_{t=1}^n Y_t}{n \sum_{t=1}^n X_t^2 - \left(\sum_{t=1}^n X_t \right)^2} \quad (8)$$

式中: X_t 为自变量时间序列; Y_t 为因变量时间序列; a 和 b 为一元线性回归方程的参数; n 为系列长度。当 $b>0$ 时,自变量与因变量呈正线性相关;当 $b<0$ 时,自变量与因变量呈负线性相关;当 $b=0$ 时,自变量与因变量无线性相关关系。

3 雅鲁藏布江流域 NDVI 特征分析及其对气候变化的响应

3.1 植被覆盖空间分布特征

3.1.1 NDVI 空间分布特征

从基于最大值合成法计算的 2000—2016 年雅鲁藏布江流域生长季 NDVI 空间分布(图 2)可以看出,NDVI 高值区主要分布于流域中游和下游地区,尤其是下游地区,米林、波密等站附近 NDVI 值大多在 0.8 以上;而拉孜以上上游地区由于海拔较高,不少地区冰雪终年覆盖,罕有植被生长,故多为 NDVI 低值区,基本小于 0.4。和图 1 对比可以发现高海拔地区 NDVI 值普遍较低,低海拔地区 NDVI 值保持

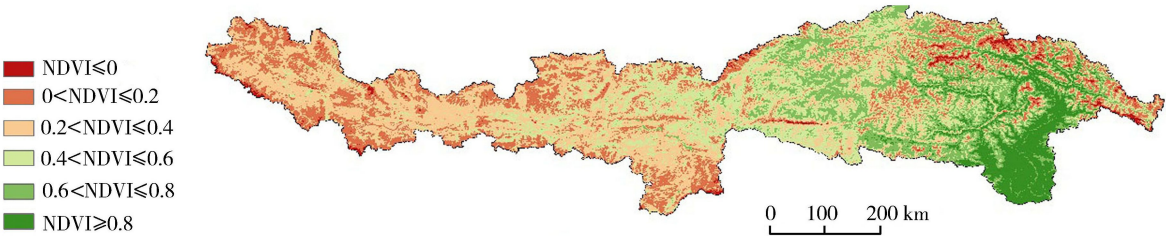


图 2 2000—2016 年生长季平均 NDVI 空间分布

稳定高值,说明植被覆盖分布特征与海拔存在有一定相关关系。

3.1.2 NDVI 沿高程变化特征

以 250 m 为分度值对雅鲁藏布江流域 NDVI 值沿高程变化特征进行分析(图 3)。可以看出,NDVI 值呈现一定程度的海拔分异性,随海拔升高,NDVI 值显著下降。中低海拔地区为 NDVI 高值区,海拔高度为 1 000~2 500 m 范围内 NDVI 值基本保持同一水平,均值为 0.91。2 500 m 以上地区 NDVI 值逐步下降,在 3 000 m 附近呈微弱上升趋势之后急剧下降。6 000 m 以上 NDVI 值较低,均值为 0.03,且随海拔高度增加 NDVI 值基本保持不变。

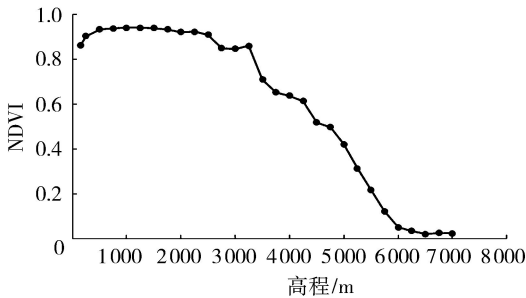


图 3 NDVI 沿高程分布变化

3.2 植被覆盖时间趋势特征

3.2.1 NDVI 年际变化分析

雅鲁藏布江流域狭长且空间差异性较大,不同地区 NDVI 年际变化差别显著。对研究时段内流域 NDVI 年际变化趋势进行空间分析(图 4),可以看出,流域内 NDVI 年际变化空间异质性显著,流域上游和下游地区年际 NDVI 变化趋势中增加比例分别占 56.82% 和 58.60%,而流域中游地区 NDVI 变化趋势中增加比例仅占 42.07%。流域上游和下游地区 NDVI 10 a 变化趋势在-1%~1%之间的比例分别为 73.17% 和 58.70%,而流域中游地区 NDVI 10 a 变化趋势在-1%~1%之间的比例为 51.72%。结果表明流域上游和下游地区植被覆盖以改善为主且绝大部分区域变化轻微,流域中游地区植被覆盖以恶化为主且部分区域恶化程度较重。雅鲁藏布江流域人类活动对下垫面植被变化的影响不容小觑,下一步可以联系土地利用变化等因素进一步探讨其驱动机制,在更

长时间尺度上进行植被覆盖对气温和降水的时间滞后性分析,探究下垫面变化对湿度和蒸散量等更多气象要素的响应关系,并分析研究结果的不确定性,并继续补充数据源,例如采用 SPOT VGT 和 AVHRR 遥感数据,应用多源遥感数据时空融合技术研究下垫面长期时空演变特征。

分析 2000—2016 年雅鲁藏布江流域上游、中游、下游地区 NDVI 年均值变化(图 5),可以看出,NDVI 总体呈上升趋势,增长率为 0.002%/10a(显著性水平 $p<0.001$),表明近 17 a 流域植被覆盖总体呈缓慢好转趋势,尤其是中游和下游地区 NDVI 自 2015 年后出现显著增长。NDVI 自上游、中游至下游呈依次增大趋势,NDVI 均值分别为 0.21、0.36 和 0.55,全流域 NDVI 均值为 0.41,这与上中下游地区海拔差异有一定关系。上游大部分地区位于雪线以上或山谷边缘,坡度变化剧烈,植被生长稀疏;而下游地区海拔较低,气温较高,降水丰沛,在适宜的雨热条件下植被生长旺盛。因此,可以看出雅鲁藏布江流域植被分布因地形和海拔分布不均,且具有很大大空间差异性。

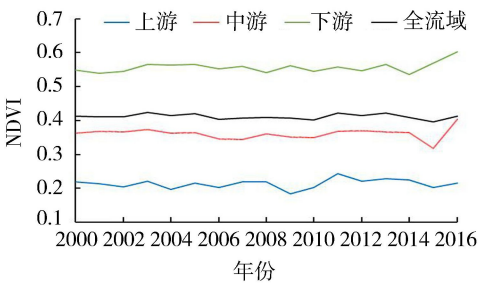


图 5 2000—2016 年 NDVI 年际变化

3.2.2 NDVI 年内变化分析

对 2000—2016 年各月 NDVI 均值进行计算后的空间分布如图 6 所示,为了更加清楚地展现 2000—2016 年各月 NDVI 均值的最大值和最小值空间分布情况,制作最值统计图如图 7 所示。从图 6 和图 7 可以看出:2 月 NDVI 低值区面积最大,中上游 NDVI 值均小于 0.4,仅有流域下游植被覆盖面积较大,NDVI 值维持在 0.9 左右;8 月 NDVI 高值区面积最大,中上游 NDVI 值均在 0.4 至 0.5 之间,流域中游植被覆盖面积达年内最大值,维持在 0.7 左右。

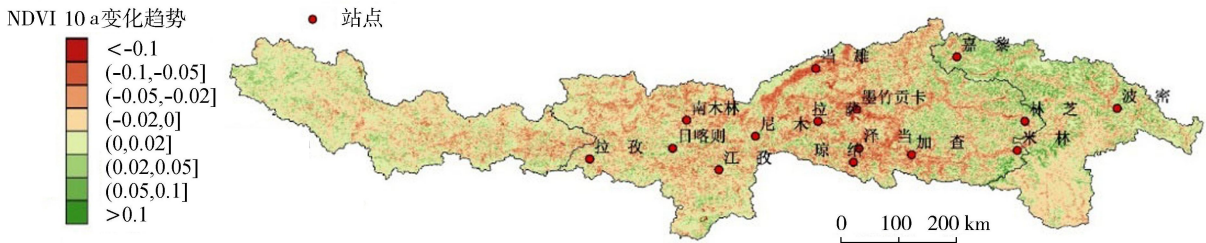


图 4 2000—2016 年 NDVI 10 a 变化趋势空间分布

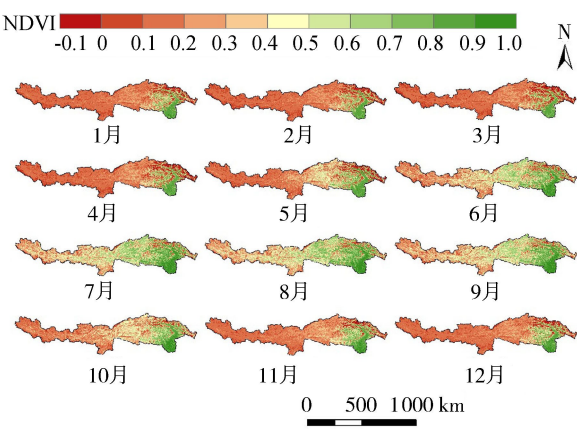


图6 2000—2016 年 NDVI 年内变化空间分布

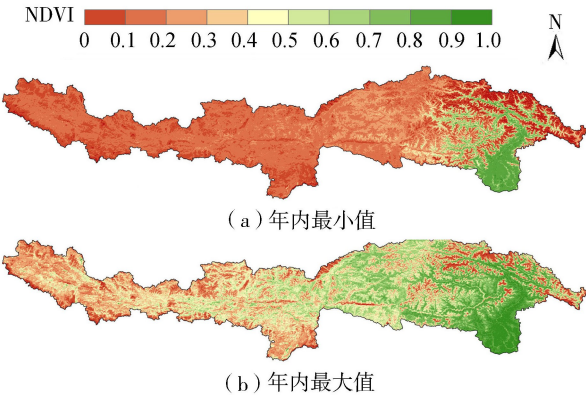


图7 2000—2016 年 NDVI 年内最值空间分布

分别统计研究区上游、中游、下游和全流域 NDVI 年内变化如图 8 所示。可以看出 NDVI 值随月份变化呈先增大、后减小趋势,全流域 1—3 月 NDVI 值维持在 0.22 左右,在 3 月达最小值 0.21,之后稳步上升在 7 月达最大值 0.48,9 月之后下降较为明显,在 12 月下降为 0.25。流域内各分区和全流域年内变化趋势基本一致,但下游地区 NDVI 值在 1—3 月呈明显下降趋势。

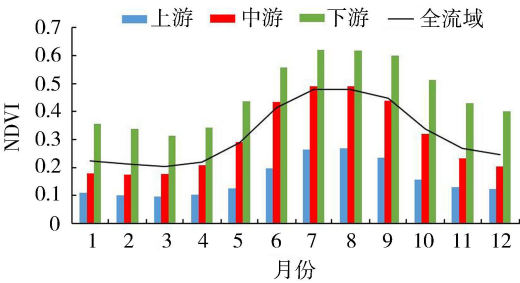


图8 2000—2016 年 NDVI 年内变化

3.2.3 NDVI 季节变化分析

为了准确反映各季节植被生长情况,按照春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12—2 月)对雅鲁藏布江流域各季 NDVI 采用最大值合成法进行统计分析,结果见图 9。从图 9 可以看出,2000—2016 年间流域夏季 NDVI 值最大,均值达 0.40,其中 2013 年的 0.42 和 2010 年的 0.37 分别为

最大和最小值;其次为秋季,NDVI 均值为 0.36,在 2000—2005 年间呈缓慢上升趋势,并在 2005 年达最大值 0.39,此后波动下降,在 2008 年达最小值 0.33,2009 年后基本维持在 0.35 左右;春季和冬季 NDVI 值相对较小,均值均为 0.21。夏季和秋季 NDVI 呈下降趋势,10 a 变幅均为 -0.0003% (夏季 $p=0.876$,秋季 $p=0.897$),而春季和冬季 NDVI 呈上升趋势,10 a 变幅分别为 0.003% ($p=0.131$) 和 0.002% ($p=0.097$)。

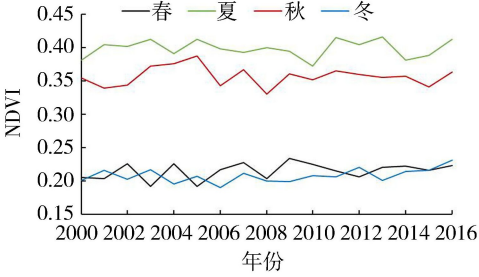


图9 2000—2016 年各季 NDVI 变化过程

3.2.4 NDVI 变化持续性分析

由上文分析可以发现雅鲁藏布江流域 NDVI 变化具有明显的周期性,因此有必要对该流域 NDVI 变化的持续性进行研究。通过对 NDVI 月值逐格点进行 Hurst 指数计算,结果空间分布如图 10 所示,相关统计信息如表 1 所示。

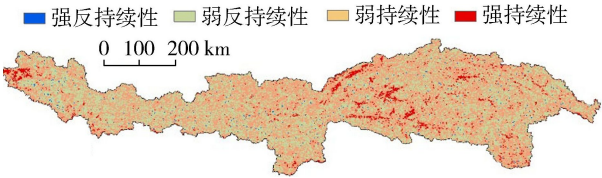


图10 2000—2016 年逐月 NDVI 的 Hurst 指数空间分布

表1 雅鲁藏布江流域逐月 NDVI 持续性统计

Hurst 指数	持续性等级	所占流域比例/%	所占流域面积/m ²
≤0.4	强反持续性	7.69	18 498
(0.4,0.5]	弱反持续性	35.69	85 826
(0.5,0.6]	弱持续性	43.93	105 633
>0.6	强持续性	12.69	30 526

从图 10 可以发现,NDVI 的 Hurst 指数分布具有一定的空间差异性,在流域中游墨竹贡卡附近拉萨河流域及流域上游地区空间持续性较强,表明未来与过去变化趋势趋同概率较高。全流域 Hurst 指数均值为 0.51,说明雅鲁藏布江流域 NDVI 呈弱持续性,未来与过去的变化趋势趋同概率较低。如表 1 所示,研究区呈弱持续性比例最大,达 43.93%,流域面积为 105 633 m²;其次是弱反持续性,面积为 85 826 m²,占 35.69%;强持续性与强反持续性所占比例最小,分别为 12.69% 和 7.69%,所占面积分别为 30 526 m² 和 18 498 m²。

3.3 不同植被类型 NDVI 时空变化特征

雅鲁藏布江流域植被类型数据来源于寒区旱区

数据中心提供的 1 : 100 万中国植被图集,通过对不同植被类型年际及年内 NDVI 进行叠加并采用最大值合成法进行统计分析,结果如图 11 所示。由图 11 可知,不同植被类型年际和年内分布从大到小依次为阔叶林、草丛、针叶林、栽培植被、灌丛、草甸、草原、高山植被和其他,均值分别为 0.88、0.86、0.76、0.56、0.53、0.37、0.33、0.27 和 0.13。其中,2009 年栽培植被和草原 NDVI 值较其他年份小,灌丛和高山植被 NDVI 值较其他年份大。植被非生长期栽培植被和草原 NDVI 值趋同,生长期开始后,4—7 月草原和阔叶林 NDVI 值趋同,7—10 月栽培植被和灌丛 NDVI 值趋同,这体现生长期草原和阔叶林、栽培植被和灌木分布差距较小的特点,草丛、灌丛相较于阔叶林、栽培植被等植被类型受植物节律影响,年内变化显著的特点。研究表明^[20]高海拔地区不同高程植被覆盖与植被类型有关,通常在 3 600 m 左右植被覆盖开始出现急剧下降。对流层平均气温直减率为 0.65℃/100 m,3 600 m 以上绝大部分地区平均温度在 0℃ 以下,植被类型从阔叶林针叶林向草原荒漠过渡可能是不同海拔高度植被覆盖度差异的原因。

3.4 植被覆盖对气候变化的响应关系

在雅鲁藏布江流域植被与气象要素的相关性分析中,为了探讨区域 NDVI 与站点气象要素的关系,根据研究区气象站点位置,参考已有研究^[33-37],利用 ArcGIS 提取以各站点为中心,半径为 1.5 km 的区域 NDVI 平均值,并对 2000—2016 年 NDVI、气温和降水数据进行去除趋势处理,然后分别计算 NDVI 与气温和降水的偏相关系数,结果如图 12 所示。

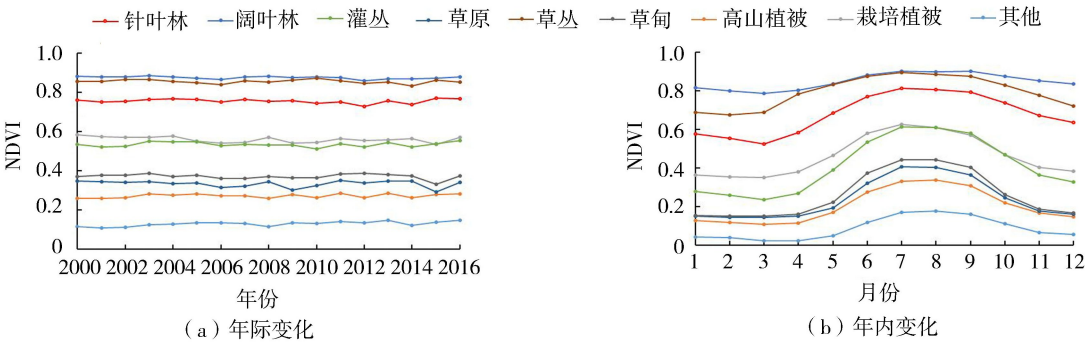


图 11 2000—2016 年不同植被类型 NDVI 年际和年内变化过程

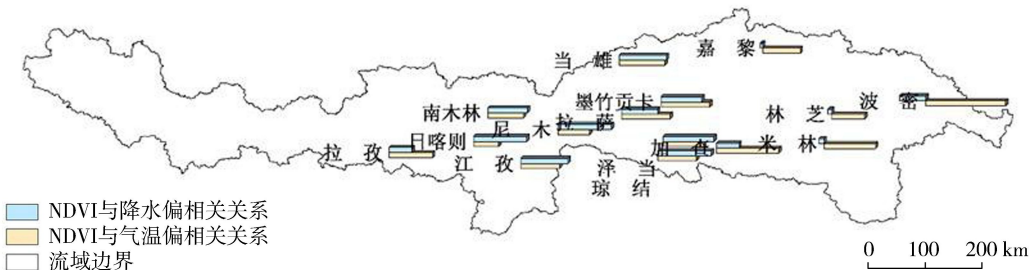


图 12 NDVI 与气象要素相关性分布

NDVI 与气温的偏相关系数在 0.27 ~ 0.85 之间,均值为 0.47;而 NDVI 与降水的偏相关系数在 -0.28 ~ 0.57 之间,均值为 0.28,且通过了显著水平为 0.05 的显著性检验。下游同中上游相比,NDVI 和气温的偏相关系数较降水大,说明流域下游地区植被覆盖受气温影响更大。全流域 NDVI 与气温的平均偏相关系数大于降水,说明整体来说雅鲁藏布江流域植被生长受气温影响要强于降水。

4 结 论

- a. 流域植被覆盖自上游、中游至下游呈递增趋势,海拔 2 500 m 以上植被覆盖开始下降,至 6 000 m 以上后保持在极低水平。流域上游和下游植被覆盖以改善为主且绝大部分区域变化轻微,流域中游植被覆盖以恶化为主且部分区域恶化程度较重。
- b. 植被覆盖在 2 月低值区面积最大,8 月高值区面积最大。NDVI 夏季最大,秋季次之,春季和冬季相对较小。夏季和秋季 NDVI 呈下降趋势,而春季和冬季呈上升趋势。
- c. 流域 Hurst 指数空间差异性显著,均值为 0.51,说明流域植被覆盖整体呈弱可持续性,墨竹贡卡附近拉萨河流域及流域上游空间持续性较强。整体来说流域植被覆盖受气温影响要强于降水,下游最为明显。
- d. 不同植被类型 NDVI 年际和年内分布从大到小依次为阔叶林、草丛、针叶林、栽培植被、灌丛、草甸、草原、高山植被和其他。生长期草原和阔叶林、栽培植被和灌木分布差距较小,非生长期栽培植

被和草原分布较为相近。

参考文献:

- [1] NOURI H, ANDERSON S, SUTTON P, et al. NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem; an assessment of vegetation in the Adelaide Parklands[J]. *Science of the Total Environment*, 2017 (6), 584-585: 11-18.
- [2] LUMBIERRES M, MENDEZ P, BUSTAMANTE J, et al. Modeling biomass production in seasonal wetlands using MODIS NDVI land surface phenology [J]. *Remote Sensing*. 2017, 9(4): 392.
- [3] 廖淑敏,薛联青,陈佳澄,等. 塔里木河生态输水的累积生态响应[J]. *水资源保护*, 2019, 35 (5): 120-126. (LIAO Shumin, XUE Lianqing, CHEN Jiacheng, et al. Cumulative ecological response of ecological water transmission in Tarim River [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(5): 120-126. (in Chinese))
- [4] 吕燕,陈俊旭,赵红玲. 雅鲁藏布江-布拉马普特拉河流域国家及尼泊尔水土-经济耦合评价[J]. *水资源保护*, 2018, 34 (4): 61-66. (LYU Yan, CHEN Junxu, ZHAO Hongling. Evaluation on water and land-economy coupling of countries in Yarlungzangbo-Brahmaputra River Basin and Nepal[J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(4): 61-66. (in Chinese))
- [5] 张小侠. 雅鲁藏布江流域关键水文要素时空变化规律研究[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
- [6] 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.
- [7] 邱志鹏,张光科. 雅鲁藏布江水资源开发的战略思考[J]. *水利发展研究*, 2006, 10 (2): 15-19. (QIU Zhipeng, ZHANG Guangke. Strategic consideration of water resources development in the Yarlung Zangbo River Basins [J]. *Water Resources Development Research*, 2006, 10(2): 15-19. (in Chinese))
- [8] ZHANG D H. The surface pollen assemblages and their relationships with climate in the middle and lower reaches of the Yalung Zangbo River [D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [9] LIU P. National interests and interdependence: China, India and the case of the Yarlung Zangbo-Brahmaputra River[J]. *South Asian Studies*, 2013 (4): 33-46.
- [10] 李晓兵,陈云浩,张云霞,等. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(2): 254-261. (LI Xiaobing, CHEN Yunhao, ZANG Yunxia, et al. Impact of climate change on desert steppe in northern China[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17 (2): 254-261. (in Chinese))
- [11] 唐红玉,肖风劲,张强,等. 三江源区植被变化及其对气候变化的响应[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2 (4): 177-180. (TANG Hongyu, XIAO Fengjin, ZHANG Qiang, et al. Vegetation change and its response to climate change in Three-River Source Region [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2 (4): 177-180. (in Chinese))
- [12] 神祥金,周道玮,李飞,等. 中国草原区植被变化及其对气候变化的响应[J]. *地理科学*, 2015, 35(5): 622-629. (SHEN Xiangjin, ZHOU Daowei, LI Fei, et al. Vegetation change and its response to climate change in grassland region of China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(5): 622-629. (in Chinese))
- [13] KELLER F, KIENAST F, BENISTON M. Evidence of response of vegetation to environmental change on high-elevation sites in the Swiss Alps [J]. *Regional Environmental Change*, 2000, 1(2): 70-77.
- [14] ZHANG Ke, CHAO Lijun, WANG Qingqing, et al. Using multi-satellite microwave remote sensing observations for retrieval of daily surface soil moisture across China[J]. *Water Science and Engineering*, 2019, 12(2): 85-97.
- [15] 姜琳,冯文兰,郭兵. 雅鲁藏布江流域近 13 年植被覆盖动态监测及与降水因子的相关性分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 11 (23): 1610-1619. (JIANG Lin, FENG Wenlan, GUO Bing. Analysis of dynamic monitoring of vegetation change and the correlation with precipitation factor in Yalu Tsangpo River Basin during the past 13 years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 11 (23): 1610-1619. (in Chinese))
- [16] 姜红涛,塔西甫拉提·特依拜,阿尔达克·克里木,等. 艾比湖流域 NDVI 变化及其与降水、温度的关系[J]. *中国沙漠*, 2014, 36 (6): 1678-1684. (JIANG Hongtao, TASHPOLAT Tiyp, ALDAK Krim, et al. Responses of NDVI to the variation of precipitation and temperature in the Ebinur Lake Basin [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 36 (6): 1678-1684. (in Chinese))
- [17] 朴世龙,方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. *地理学报*, 2003, 58 (1): 119-125. (PIAO Shilong, FANG Jingyun. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58 (1): 119-125. (in Chinese))
- [18] 邵步粉,周锁铨,顾婷婷,等. 鄱阳湖流域 NDVI 时空变化及其与地表径流的关系[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(2): 288-294. (SHAO Bufen, ZHOU Suoquan, GU Tingting, et al. Spatiotemporal changes of NDVI and their relationships with runoff in the Poyang Lake Basin [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(2): 288-294. (in Chinese))
- [19] 陈福军,沈彦俊,胡乔利,等. 海河流域 NDVI 对气候变化的响应研究[J]. *遥感学报*, 2011, 15(2): 401-414. (CHEN Fujun, SHEN Yanjun, HU Qiaoli, et al. Responses of NDVI to climate change in the Hai Basin

- [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(2): 401-414. (in Chinese))
- [20] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等. 2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 705-716. (LIU Xianfeng, PAN Yaozhong, ZHU Xiufang, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 705-716. (in Chinese))
- [21] ZHANG W, FU X F. Analysis and evaluation of principal climatic factors of NDVI in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, 622: 012048.
- [22] LI H, JIANG J, CHEN B, et al. Pattern of NDVI-based vegetation greening along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas and its response to global warming[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(3): 186.
- [23] 陈斌. 高海拔大流域 NDVI 时空响应研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [24] 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 Yang, DONG Guotao, YANG Shengtian, 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))
- [25] GUO B, JIANG L, GE D, et al. Driving mechanism of vegetation coverage change in the Yarlung Zangbo River Basin under the Stress of Global Warming[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2017, 25(3): 209-217.
- [26] 王秀娟. 雅鲁藏布江流域水循环时空变化特性研究[J]. *西藏科技*, 2015, 10(7): 8-12. (WANG Xiujian. Spatiotemporal variation characteristics of water cycle in the Yarlung Zangbo River Basin [J]. *Tibet Science*, 2015, 10(7): 8-12. (in Chinese))
- [27] 黄文星,王国灿,王岸,等. 雅鲁藏布江大拐弯地区河流形态特征及其意义[J]. *地质通报*, 2013, 32(1): 130-140. (HUANG Wenxing, WANG Guocan, WANG An, et al. The morphology of the Yalung Zangbo River in the Great Canyon Region and its implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(1):130-140. (in Chinese))
- [28] 陈斌,李海东,曹学章,等. 雅鲁藏布江流域植被格局与 NDVI 分布的空间响应[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 120-128. (CHEN Bin, LI Haidong, CAO Xuezhong, et al. Vegetation pattern and spatial distribution of NDVI in the Yarlung Zangbo River Basin of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(1): 120-128. (in Chinese))
- [29] YAN L K. Application of correlation coefficient and biased correlation coefficient in related analysis [J]. *Journal of Yunnan University of Finance and Economics*, 2003,19(3): 78-80.
- [30] FUNAHASHI H, KIJIMA M. Does the Hurst index matter for option prices under fractional volatility [J]. *Annals of Finance*, 2017, 13(1): 55-74.
- [31] 李果,强茂山. 水利工程投资进度控制图模型[J]. *水利经济*, 2010, 28(1): 45-48. (LI Guo, QIANG Maoshan. Investment progress controlchart model for water conservancy projects. [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2010,28(1):45-48. (in Chinese))
- [32] 陈琛. 农村水库移民养老保险金标准组合测算模型及其应用:以山西省垣曲县小浪底移民库区为例[J]. *水利经济*, 2010, 28(1): 71-74. (CHEN Chen. Combination forecast model for social endowment insurance level of reservoir resettlement in rural areas and. its application ;a case of Xiaolangdi reservoir resettlement region in Yuanqu County of Shanxi Province [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2010,28(1):71-74. (in Chinese))
- [33] 王东升,袁树堂,杨祺. 金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析[J]. *水资源保护*, 2019, 35(4): 35-41. (WANG Dongsheng, YUAN Shutang, YANG Qi. Analysis of hydrological minimum evolution and ecological base flow guarantee in Yunnan area of Jinshajiang River Basin, China [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(4): 35-41. (in Chinese))
- [34] 杨元建,石涛,唐为安,等. 气象台站环境的卫星遥感调查与评估:以安徽代表气象站为例[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(6): 791-797. (YANG Yuanjian, SHI Tao, TANG Weian, et al. Study of observational environment of meteorological station based remote sensing: cases in six stations of Anhui Province [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(6): 791-797. (in Chinese))
- [35] 张清雨,吴绍洪,赵东升,等. 内蒙古草地生长季植被变化对气候因子的响应[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5): 754-764. (ZHANG Qingyu, WU Shaohong, ZHAO Dongsheng, et al. Responses of growing season vegetation changes to climatic factors in Inner Mongolia Grassland [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5): 754-764. (in Chinese))
- [36] 班璇,师崇文,郭辉,等. 气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(4): 1-7. (BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(4): 1-7. (in Chinese))
- [37] 游宇驰,李志威,李希来. 1990—2011 年若尔盖高原土地覆盖变化[J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(2): 62-69. (YOU Yuchi, LI Zhiwei, LI Xilai. Land cover change in Zoige Plateau during 1990-2011 [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(2): 62-69. (in Chinese))

(收稿日期:2019-01-10 编辑:郑孝宇)