

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.001

气候变化对雅鲁藏布江流域植被动态的影响机制

左德鹏^{1,2}, 韩煜娜^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 李佩君^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;

2. 北京师范大学城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要:基于雅鲁藏布江流域1981—2015年长时间序列植被、降水、气温和干旱数据集,采用非参数统计方法 Sen's slope 和 Mann-Kendall 趋势检验法识别了各要素时空变化特征,采用 Pearson 相关性分析和地统计学方法分析了植被覆盖对气候变化响应的时滞效应,探讨了气候变化对植被动态的影响机制。结果表明:归一化植被指数(NDVI)大体由上游至下游呈逐渐增大的空间分布特征,且中游部分地区植被有所改善,下游地区存在一定退化现象;流域上游主要受气温影响呈干旱化,中游和下游地区受降水影响趋于暖湿化;流域上游和中游地区 NDVI 与降水和干旱呈显著正相关关系,且主要在滞后1月时相关性最高,中游及下游东南部 NDVI 与气温呈显著负相关关系,滞后0~3月的区域均有分布。

关键词:气候变化;干旱;植被动态;时滞效应;雅鲁藏布江流域

中图分类号:P339

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2022)06-0001-08

Impact mechanism of climate change on vegetation dynamics in the Yarlung Zangbo River Basin// ZUO Depeng^{1,2}, HAN Yuna^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, LI Peijun^{1,2} (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the long time series vegetation, precipitation, temperature and drought data sets of the Yarlung Zangbo River Basin from 1981 to 2015, the non-parametric statistical methods Sen's slope and Mann-Kendall trend test were used to identify the spatio-temporal change characteristics of each element. Pearson correlation analysis and geostatistical method were used to analyze the time lag effect of vegetation cover response to climate change, and the impact mechanism of climate change on vegetation dynamics was discussed. The results show that the normalized difference vegetation index (NDVI) is generally increasing in spatial distribution from upstream to downstream, and the vegetation in some regions of the middle reaches has improved, while there is some degradation in the lower reaches. The upper reaches of the basin are mainly affected by temperature and become arid, while the middle reaches and lower reaches tend to become warm and humid due to precipitation. NDVI in the upper and middle reaches of the basin has a significant positive correlation with precipitation and drought, and the correlation is highest mainly when it lags behind 1 month. NDVI in the middle reaches and southeast of the lower reaches has a significant negative correlation with temperature, and it is distributed in areas that lag behind 0 to 3 months.

Key words: climate change; drought; vegetation dynamics; time lag effect; Yarlung Zangbo River Basin

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,通过光合作用、呼吸作用和蒸腾作用等在维持地表-大气界面能量平衡、水文循环和碳循环等过程中发挥重要作用^[1-2],其动态变化通常被用来描述不同时空尺度下的环境变化^[3],已被广泛应用于相关研

究^[4]。长期实践表明,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是定量表征植被状态的有效指标^[5],且通过大范围、高精度的遥感影像提取要素特征已成为相关研究的有力工具^[6-7]。近年来,全球气候变化导致干旱、洪涝、高

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3201104,2021YFC3201502);国家自然科学基金(91647202);清华大学水沙科学水利水电工程国家重点实验室及宁夏银川水联网数字治水联合研究院联合开放基金(sklhse-2022-low07)

作者简介:左德鹏(1985—),男,副教授,博士,主要从事流域水文过程模拟及干旱评估研究。E-mail: dpzuo@bnu.edu.cn

温热浪和低温冷害等极端气候事件频发^[8-9],加剧了极端水文事件发生,导致水资源重新分配,对植被生长产生了重大影响^[4,10-11]。已有众多国内外学者在全球范围^[4,12]和区域尺度上^[13-15]进行了大量研究,发现近年来全球植被发生了显著变化,生长季植被覆盖主要以上升趋势为主^[4],整体呈变绿趋势。部分研究表明,在区域尺度上,植被对气候变化的响应存在滞后性,植被生长可能并非由当前的气候条件驱动,早期的气候条件可能会产生更大的影响^[4,16-17]。

雅鲁藏布江是世界海拔最高的河流之一,也是中国最长的高原河流。流域地处高寒的青藏高原,是全球生物多样性和生态景观保护的重要地区^[18],海拔高差大,东西跨度长,植被分布呈明显垂直地带性,空间异质性突出,生态系统十分脆弱^[19-20],其植被动态变化对流域生态环境质量具有重要影响。已有研究表明,雅鲁藏布江流域经历了一系列局部气候变化、地质灾害和生物多样性改变等自然环境变化^[21]。由于现有研究所用数据时间序列较短或长序列数据连续性差等问题,一般难以充分反映植被动态变化特征。因此,本研究基于雅鲁藏布江流域1981—2015年长时间序列 GIMMS NDVI3g 植被覆盖数据集、CHIRPSv2.0 降水数据集、CMFD 中国区域高分辨率气象要素驱动数据集和 scPDSI 自校准的帕尔默干旱指数 (self-calibrating Palmer drought severity index, scPDSI) 数据集,采用非参数统计方法 Sen's slope 和 Mann-Kendall 趋势检验法识别植被绿度、降水、气温和干旱时空变化特征,采用 Pearson 相关性分析和变异函数计算及滞后相关系数统计的地统计学方法分析植被覆盖对气候变化响应的时滞效应,探讨气候变化对植被动态的影响机制。

1 研究区概况

雅鲁藏布江流域(82°00'E ~ 97°07'E, 28°00'N ~ 31°16'N)位于青藏高原南部,面积 24.048 万 km²,地势呈西高东低、南北高中间低的特征,平均海拔 4000 m 以上^[22],覆盖阿里、日喀则、拉萨、山南、昌都、那曲和林芝等地区^[23-25](图 1)。流域年平均降水量约为 428.7 mm^[26],年平均气温约为 5.92 °C^[21],植物生长季为 5—9 月。东南部热带季风气候区降水量可达 3000 mm 以上,平均气温高达 28 °C。流域北至冈底斯山,东北部与怒江流域相邻,东至念青唐古拉山,南至喜马拉雅山,西与玛旁雍错等流域毗邻。流域上游及中游部分地区植被类型主要为高寒草原、高寒草甸和高山植被,中游其他地区 and 下游分布有灌丛、针叶林、阔叶林、高山植被和栽培植被等,流域东南部热带季风气候区植被以阔叶林为主^[20,27]。

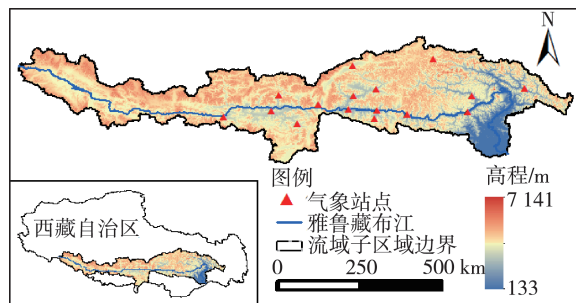


图1 雅鲁藏布江流域地理位置

Fig.1 Geographic location of the Yarlung Zangbo River Basin

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

2.1.1 植被数据集

植被数据来源于 <https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>,时间分辨率为 0.5 月,空间分辨率为 8 km,后续数据均以此为基础重采样至 8 km,并统一地理坐标系为 GCS_WGS_1984。与其他数据集相比,GIMMS NDVI 数据具有时间序列更长、覆盖范围更广、植被动态变化表征能力更强的优势,且在青藏高原地表覆盖动态变化研究中的结果明显优于 MODIS NDVI 数据^[28-29]。本文基于雅鲁藏布江流域 1981—2015 年 GIMMS NDVI 植被覆盖数据集,通过计算得出月植被 NDVI 数据序列,有助于准确调查植被动态变化的真实特征^[30]。

2.1.2 气象要素数据集

基于雅鲁藏布江流域 1981—2015 年降水、气温和干旱指数数据分析气象要素的时空变化特征,其中降水数据来源于 CHIRPSv2.0 数据集 (<ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/>),气温数据来源于中国区域高分辨率气象要素驱动数据集 (China meteorological forcing dataset, CMFD) (<http://westdc.westgis.ac.cn/data>),干旱指数数据采用 scPDSI^[31],来源于 CRU TS 4.03 (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/>)。这些数据集均具有较高准确性,已被全球气候、水文、生物、地理科学家广泛应用于气候变化^[32]、陆表过程^[22,33]和能量模拟以及评估植被动态变化^[34]等方面。

2.2 研究方法

2.2.1 最大值合成法

最大值合成法 (maximum value composites, MVC) 是基于高时间分辨率数据通过合成方法获得低时间分辨率数据的方法,在目前植被生长状况研究中较为常用。使用该方法可以降低云量、大气和

太阳高度角等干扰,具体计算公式为

$$I_{NDVi} = \max I_{NDVi,j} \quad (1)$$

式中: I_{NDVi} 为第 i 月的 NDVI 值; $I_{NDVi,j}$ 为第 i 月中第 j 期的 NDVI 值, $j=1, 2$ [35]。

2.2.2 Sen's slope 和 Mann-Kendall 非参数趋势检验法

两种方法均为非参数统计方法,允许数据序列存在缺失值,且不需要数据符合特定分布,对异常值敏感性较低,通常用于研究不遵循任何特定分布数据序列的趋势,目前广泛用于水文、气象等研究中。Mann-Kendall 非参数趋势检验法主要用于检验 Sen's slope 计算所得数据序列趋势的显著性,两种方法的详细计算过程可参考文献[36-38]。

2.2.3 Pearson 相关性分析

Pearson 相关系数能够有效表现不同要素之间的相关程度和方向,反映要素之间的关系 [39],本文主要对植被 NDVI、气温、降水和干旱之间的相关性进行分析,并采用 t 检验的方法进行了显著性检验(分别按 0.01, 0.05 和 0.1 的显著性水平划分)。利用滞后相关系数探究气温、降水对植被 NDVI 影响的滞后性,计算公式为

$$r_t = \max(r_0, r_1, r_2, \dots, r_m) \quad (m \geq 0) \quad (2)$$

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

其中

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

式中: r_t 为滞后相关系数; $r_0, r_1, r_2, \dots, r_m$ 分别为植被绿度与当前月、前 1 月、前 2 月、 $\dots$ 、前 m 月的气候

因子的相关系数; n 为总月数; r 为两要素的相关系数; t 是统计量; r_{12-3} 为在控制第三个要素的情况下,第一个和第二个要素的偏相关系数; r_{12} 、 r_{13} 、 r_{23} 分别为相应的两个要素之间的相关系数。 r 的有效值范围为 $[-1, 1]$, 绝对值越接近于 1, 表明要素之间相关性越强。一般来说,当 $|r|$ 在 0.8~1.0 之间时要素之间呈高度相关性,在 0.5~0.8 之间为中度相关性,在 0.3~0.5 之间为低度相关性,小于 0.3 时认为无相关性。

3 结果与分析

3.1 植被 NDVI 时空变化特征

基于文献调研资料,将 5—9 月定义为雅鲁藏布江流域植被生长季 [40-42],通过求均值得到生长季及四季植被绿度,采用非参数统计方法 Sen's slope 和 Mann-Kendall 趋势检验法及变异系数分析植被 NDVI 时空变化特征(图 2)。针对 NDVI 值的空间分布,以 0.2 为间隔将其划分为 5 个等级:低植被覆盖(0.0~0.2]、中低植被覆盖(0.2~0.4]、中等植被覆盖(0.4~0.6]、中高植被覆盖(0.6~0.8]和高植被覆盖(0.8~1.0]。整体来看,流域大致由上游至中游再到下游呈现逐渐绿化的空间分布特征。在 4 个季节,流域均以低植被和中低植被覆盖区域为主,占总面积的 70% 左右,主要分布在上游及中游地区,土地覆被类型主要为永久性冰川积雪、草地和草甸,冬春季以低植被覆盖区域为主,夏秋季及生长季则中低植被覆盖区域相对较多。在下游地区,植被 NDVI 值相对较大,尤其东南部墨脱县常年可达

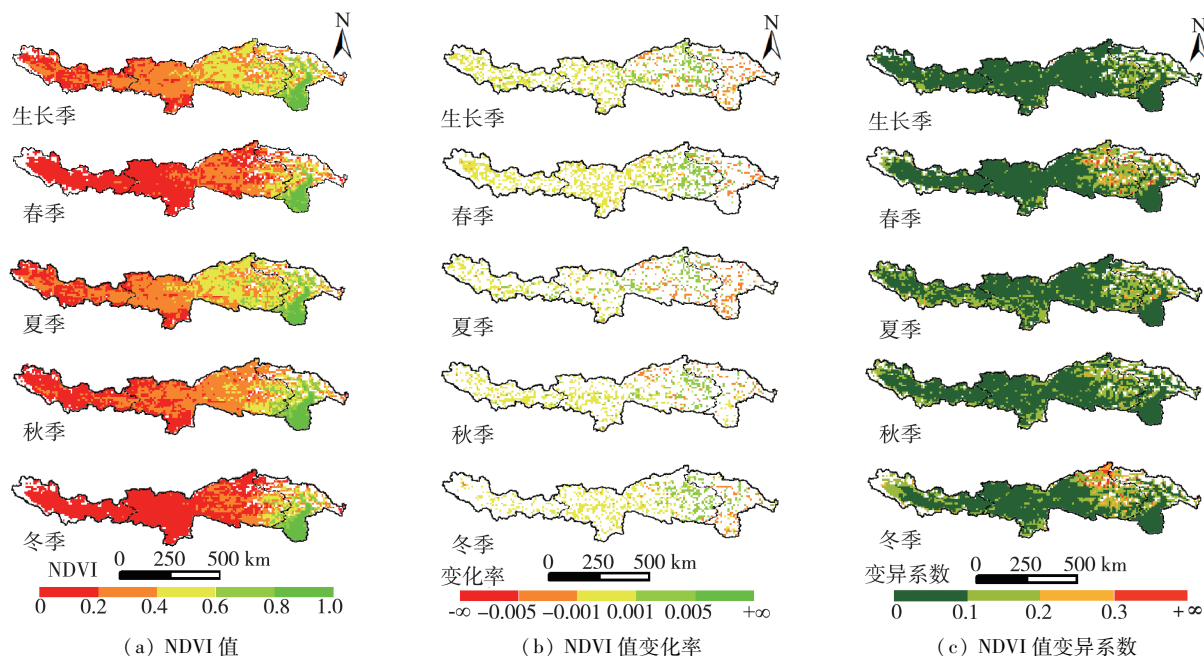


图 2 1981—2015 年雅鲁藏布江流域 NDVI 值及其变化空间分布

Fig. 2 NDVI values and its spatial change distribution in the Yarlung Zangbo River Basin from 1981 to 2015

0.8 以上,印证了不同植被类型年内生长变化规律的差异性。

根据逐像元变化趋势及 NDVI 值变异系数的空间分布发现,生长季仅 32.03% 的像元(即图 2(b)中已填充颜色的格点)通过了 0.05 的显著性水平检验,约 2/3 的区域(即图 2(b)中空白部分)变化趋势不显著。在通过显著性检验的区域内,流域上游及中游占流域总面积 15.97% 的区域维持在基本稳定不变的状态,即变化率位于 $-0.001 \sim 0.001$ 之间且通过显著性检验的区域,相应的变异系数小于 0.1,NDVI 值波动性较小;NDVI 值变化较为明显的区域主要在中游及下游地区,占流域总面积的 6.11%,且春季和冬季波动性较大,而下游地区主要是灌丛、高山植被、针叶林和阔叶林地区植被,气温升高降水减少的“暖干化”趋势可能从一定程度上抑制了植被生长,使 NDVI 值呈微弱退化趋势,且在生长季和夏季呈退化特征的区域面积大于其他季节。

3.2 生长季气候变量时空变化特征

基于 CHIRPSv2.0、CMFD 和 scPDSI 数据集,分析了 1981—2015 年雅鲁藏布江流域生长季降水、气温和干旱指数的时空变化特征,结果如图 3 所示。1981—2015 年流域生长季(5—9 月)平均气温分布在 $-9.19 \sim 28.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间内,整个流域气温呈逐年上升趋势,上游地区升温速度较快,最高可达 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。流域生长季降水量分布在 $49.53 \sim 3227.95\text{ mm}$ 之间,主要以 1000 mm 以下的区域为主,约占流域总面积的 90%。除下游东南部热带季风气候区外,流域上游降水量略高于中游和下游其他地区。除上游南部及下游东南部少量区域外,流域降水量主要以逐年增加趋势为主,中游增速相对较大,可达 $12.24\text{ mm}/\text{a}$ 。在流域气温、降水等多因素综合影响下,以干旱指数 scPDSI 来表征流域干旱特征,极端干旱、严重干旱、中度干旱、轻微干旱、基本正常、轻微湿润、中度湿润、重度湿润、极度湿润的 scPDSI 数值范围分别为 $(-\infty, -4]$ 、 $(-4, -3]$ 、 $(-3, -2]$ 、 $(-2, -1]$ 、 $(-1, 1)$ 、 $[1, 2)$ 、 $[2, 3)$ 、 $[3, 4)$ 、 $[4, +\infty)$ 。可见整个流域绝大部分地区多年为基本正常状态;上游、中游和下游的北部地区相对更为湿润;下游东南部阔叶林地区降水量较其他地区更丰富,但气温较高,植被蒸散量较大,干旱指数小于 -1 ,呈轻微干旱特征。1981—2015 年流域上游趋于干旱,中游和下游以暖湿化趋势为主。

考虑 scPDSI 与降水和气温的内在关系,分析 scPDSI 与降水和气温的相关关系得到图 4 和图 5。可见,在雅鲁藏布江流域,中游及下游地区 scPDSI

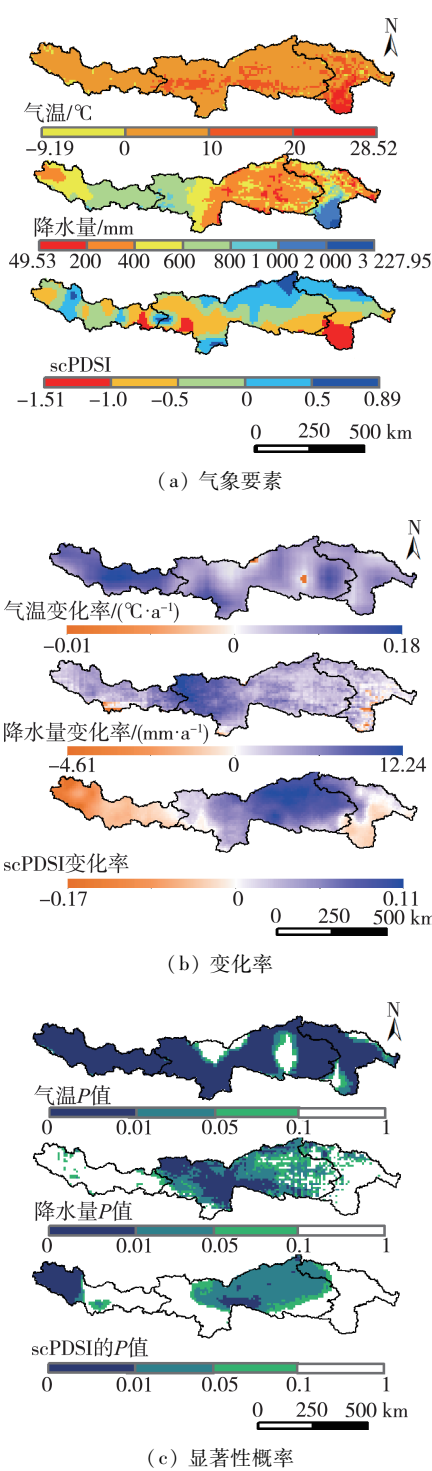


图3 1981—2015 年雅鲁藏布江流域生长季气温、降水和干旱指数及其变化空间分布

Fig.3 Temperature, precipitation and drought index and their spatial change distribution in growing season of the Yarlung Zangbo River Basin from 1981 to 2015

与降水存在显著正相关关系,超过流域面积 65.65% 的区域通过了 0.01 显著性水平检验,且偏相关系数在 0.5 ~ 0.8 之间。雅鲁藏布江源区 scPDSI 与降水的相关性不显著而与气温呈显著负相关,其他地区 scPDSI 与气温的偏相关系数主要分布在 $-0.3 \sim 0.3$ 之间,且未通过 0.1 显著性水平检

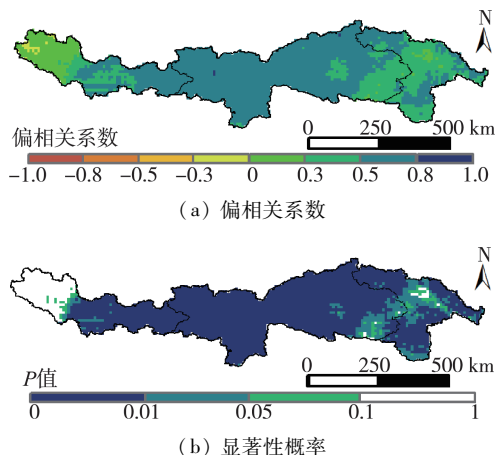


图 4 1981—2015 年雅鲁藏布江流域干旱与降水的相关关系

Fig. 4 Correlation between drought and precipitation in the Yarlung Zangbo River Basin from 1981 to 2015

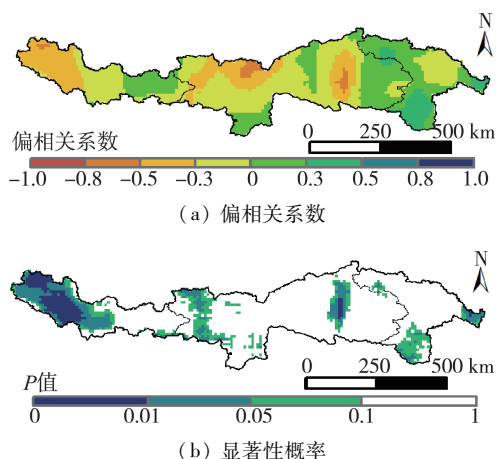


图 5 1981—2015 年雅鲁藏布江流域干旱与气温的相关关系

Fig. 5 Correlation between drought and temperature in the Yarlung Zangbo River Basin from 1981 to 2015

验。说明雅鲁藏布江源区干旱特征受气温影响大,其他地区主要受降水影响。

3.3 NDVI 与气候变量的相关性分析

雅鲁藏布江流域海拔高差大,东西跨度长,流域地形及地表覆被具有明显空间异质性,气象要素对 NDVI 的影响也具有异质性。图 6 为 1981—2015 年 NDVI 与降水、气温、scPDSI 的相关性分析及显著性检验结果,可以看出,受地形和气候条件影响,流域上、中、下游分别呈现不同特征。上游地区各要素对 NDVI 影响不大,相关系数主要分布在 $-0.3 \sim 0.3$ 区间,其中降水和气温与 NDVI 的相关系数通过显著性检验的格点数更多,对植被影响更显著;中游地区 NDVI 与降水和 scPDSI 呈显著正相关关系,而与气温呈显著负相关关系,表明降水增加会促进中游地区草甸生长,气温升高则产生一定抑制作用;而在下游地区,降水和干旱对植被生长的抑制作用不显

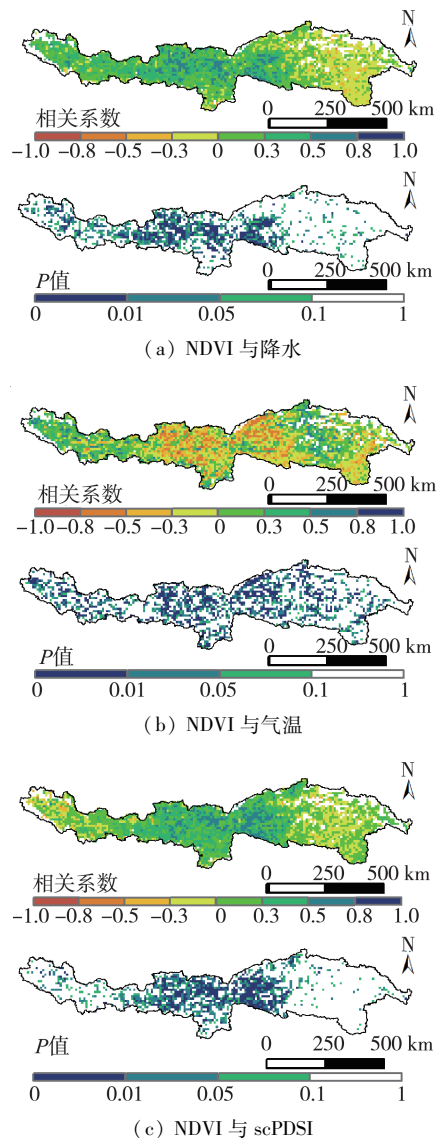


图 6 1981—2015 年雅鲁藏布江流域 NDVI 与气象要素的相关关系

Fig. 6 Correlation between NDVI and meteorological factors in the Yarlung Zangbo River Basin from 1981 to 2015

著,NDVI 与气温的相关性更显著,气温对东南部阔叶林生长的抑制作用相对更强。

3.4 气候变化对 NDVI 影响的时滞效应

在像元尺度上基于逐月数据采用 Pearson 相关性分析和滞后相关系数统计的地统计学方法研究了气象要素对 NDVI 影响的时滞效应。图 7 为 1981—2015 年像元尺度上气象要素对 NDVI 影响的时滞效应分析结果,结合图 6 来看,除了流域下游东北部及上游源区约 26.19% 的区域可能受常年积雪和冰川覆盖的影响为空值外,上游和中游部分地区,占流域总面积的 45.83%,植被以高寒草甸和草原为主,NDVI 与气温的相关性主要在滞后 1 月时达最大值,植被生长受上月气温的影响更明显,其中上游地区以正相关关系为主,中游地区则呈负相关关系。在

流域东南部阔叶林地区,气温对 NDVI 时滞效应较弱,NDVI 与当月气温相关性相对较高。而在阔叶林西北部与之相接的针叶林地区,气温对植被影响的时滞以 2~3 月为主。同样,当考虑降水对 NDVI 的时滞效应时,上游和中游部分地区主要为滞后 1 月达最大相关系数的区域,且 NDVI 与降水呈正相关关系,而中游部分地区和下游则主要以无时间滞后占主导,滞后 2~3 月的区域与气温具有相似空间分布,即在雅鲁藏布江流域的针叶林地区,植被生长对降水和气温的反馈均约 2~3 月,气象要素 2~3 月的累积效应对针叶林的生长影响较大。

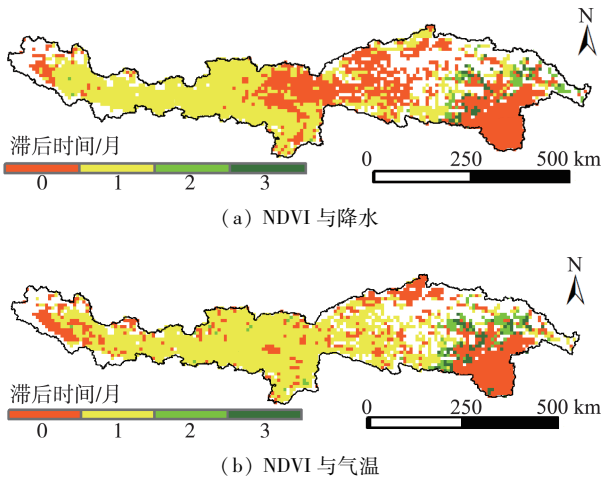


图 7 1981—2015 年像元尺度上气象要素对 NDVI 时滞效应分析结果

Fig. 7 Analysis results of time lag effect of meteorological elements on NDVI at pixel scale from 1981 to 2015

3.5 讨论

植被动态演变是自然因素和人类活动共同作用的结果,农田耕作、森林砍伐和植树造林等人类干扰会促进植被格局的改变,探究人类活动对植被生长的影响至关重要。初步采用中国人口空间分布公里网格数据集和 1980 年、2015 年的土地利用类型数据,提取了人口密度、生态恢复(退耕还林还草面积)和城市化(耕地、林地及草地等变为城乡用地的面积)3 个指标表征人类活动(图 8)。受地形和气候特征等因素影响,雅鲁藏布江流域人口整体较少,除中游的日喀则市东部、拉萨市和山南市外,其余地区人口密度低于 4 人/km²,自然因素对植被生长的影响相对更大。同时,流域生态恢复程度和城市化水平较低,1980—2015 年的生态恢复面积仅 8 km²,主要在流域下游东南部地区;城市化面积 99 km²,主要分布在流域中游及下游的拉萨市、山南市、日喀则市东部及林芝市等地。在现有数据的空间分辨率下定量分析人类活动对雅鲁藏布江流域植被动态的影响受限,可在后续进行深入研究。

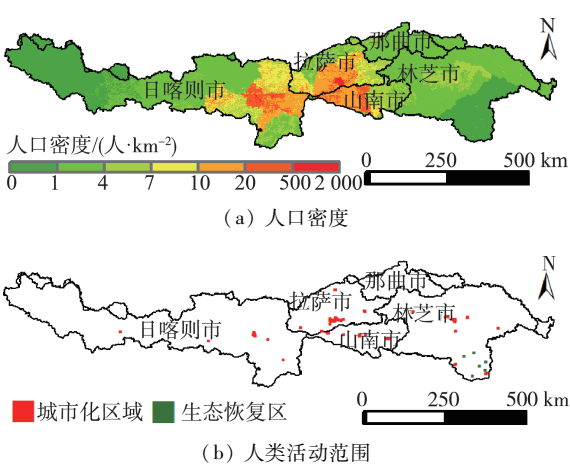


图 8 雅鲁藏布江流域人类活动空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of human activities in the Yarlung Zangbo River Basin

4 结论

a. 1981—2015 年雅鲁藏布江流域 NDVI 大致由上游至下游呈逐渐增大空间分布特征,且中游植被改善,下游存在一定退化趋势,冬春季 NDVI 的波动较其他季节更为明显。

b. 1981—2015 年雅鲁藏布江流域气温和降水整体均呈增长趋势,其中上游气温上升速度较快,趋于干旱化,中下游地区受降水增加影响趋于暖湿化。

c. 由于植被类型和气候条件具有空间异质性,降水、气温和干旱对 NDVI 的影响在流域上、中、下游不尽相同。上游和中游部分地区 NDVI 与降水和 scPDSI 呈显著正相关关系,且主要在滞后 1 月时相关性最高,中游部分地区和下游 NDVI 与气温呈显著负相关关系,滞后 0~3 月区域均有分布,阔叶林地区主要与当月气象要素相关性最大,而阔叶林西北部的针叶林和灌丛地区在滞后 2~3 月时相关系数最大。

参考文献:

[1] TUCKER CJOHN R, GOFF T. African land-cover classification using satellite data[J]. Science, 1985, 227 (4685): 369-375.

[2] 赵娜娜,王贺年,张贝贝,等. 若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应[J]. 水资源保护, 2019, 35 (5): 40-47. (ZHAO Nana, WANG Henian, ZHANG Beibei, et al. Runoff variation in Zoige Wetland Basin and its response to climate change [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5): 40-47. (in Chinese))

[3] CHEN Baozhang, XU Guang, COOPS Nicholasc, 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.

- [4] WU Donghai, ZHAO Xiang, LIANG Shunlin, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(9):3520-3531.
- [5] TUCKER Comptonj. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2):127-150.
- [6] WHITE Amandab, KUMAR Praveen, TCHENG David. A data mining approach for understanding topographic control on climate-induced inter-annual vegetation variability over the United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(1):1-20.
- [7] 吴志勇, 侍恒, 何海, 等. 岔巴沟流域植被变化特征及其对水沙的影响 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(1):31-37. (WU Zhiyong, SHI Heng, HE Hai, et al. Characteristics of vegetation change and impact on runoff and sediment in Chabagou Watershed [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(1):31-37. (in Chinese))
- [8] 卫林勇, 江善虎, 任立良, 等. CRU 产品在中国大陆的干旱事件时间性效用评估 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(2):112-120. (WEI Linyong, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. Utility assessment of CRU products for temporality of drought events in mainland China [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(2):112-120. (in Chinese))
- [9] 袁飞, 章益棋, 刘懿, 等. 基于标准化帕尔默干旱指数的西江流域干旱评估 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(1):46-52. (YUAN Fei, ZHANG Yiqi, LIU Yi, et al. Drought assessment of Xijiang River Basin based on standardized Palmer drought index [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1):46-52. (in Chinese))
- [10] 马明卫, 韩宇平, 严登华, 等. 特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(5):11-21. (MA Mingwei, HAN Yuping, YAN Denghua, et al. Research progress on the mechanism and influence of extreme drought-induced disasters [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(5):11-21. (in Chinese))
- [11] 毛思媛, 贾艳红, 假冬冬, 等. 嫩江下游洪水演进及对洪泛区植被影响分析 [J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(3):27-33. (MAO Siyuan, JIA Yanhong, JIA Dongdong, et al. Analysis of flood evolution in lower reaches of Nenjiang River and its impact on vegetation in floodplain [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(3):27-33. (in Chinese))
- [12] ZENG F W, COLLATZ G, PINZON J, et al. Evaluating and quantifying the climate-driven interannual variability in global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) normalized difference vegetation index (NDVI3g) at global scales [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(8):3918-3950.
- [13] XU Guang, ZHANG Huifang, CHEN Baozhang, et al. Changes in vegetation growth dynamics and relations with climate over China's landmass from 1982 to 2011 [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(4):3263-3283.
- [14] CONG Nan, WANG Tao, NAN Huijuan, et al. Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: a multimethod analysis [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(3):881-891.
- [15] 扈祥来. 甘肃省黄土丘陵地带森林植被对水资源的影响 [J]. *水科学进展*, 2000, 11(2):199-202. (HU Xianglai. Influence of forest cover on the water resources in loess hill region of Gansu Province [J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(2):199-202. (in Chinese))
- [16] CHEN T X, DE JEU R A M, LIU Y, et al. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: a case study over mainland Australia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140(140):330-338.
- [17] ZHONG Lei, MA Yaoming, SALAMA Mhd Suhayb, et al. Assessment of vegetation dynamics and their response to variations in precipitation and temperature in the Tibetan Plateau [J]. *Climatic Change*, 2010, 103(3/4):519-535.
- [18] ZHANG Baiping, CHEN Xiaodong, LI Baolin, et al. Biodiversity and conservation in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2002, 2(2):135-143.
- [19] ZHAN Qiqi, ZHAO Wei, YANG Mengjiao, et al. A long-term record (1995-2019) of the dynamics of land desertification in the middle reaches of Yarlung Zangbo River Basin derived from Landsat data [J]. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(1):12-21.
- [20] 韩先明, 左德鹏, 李佩君, 等. 雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应 [J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(1):16-23. (HAN Xianming, ZUO Depeng, LI Peijun, et al. Spatiotemporal variability of vegetation cover and its response to climate change in Yarlung Zangbo River Basin [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(1):16-23. (in Chinese))
- [21] LI Fapeng, XU Zongxue, FENG Youcan, et al. Changes of land cover in the Yarlung Tsangpo River Basin from 1985 to 2005 [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(1):181-188.
- [22] 田富强, 徐冉, 南熠, 等. 基于分布式水文模型的雅鲁藏布江径流水源组成解析 [J]. *水科学进展*, 2020, 31(3):324-336. (TIAN Fuqiang, XU Ran, NAN Yi, et al. Quantification of runoff components in the Yarlung Tsangpo River using a distributed hydrological model [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3):324-336. (in Chinese))
- [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] 刘晓婉,徐宗学,彭定志. 雅鲁藏布江流域 NDVI 与降水量时空分布特征及其相关性分析[J]. 中国农村水利水电,2018(1): 89-95. (LIU Xiaowan, XU Zongxue, PENG Dingzhi. Spatio-temporal pattern in NDVI and precipitation and their relationships in the Yarlung Zangbo River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(1): 89-95. (in Chinese))
- [26] LIU Jiangtao, XU Zongxue, BAI Junrui, et al. Assessment and correction of the PERSIANN-CDR product in the Yarlung Zangbo River Basin, China[J]. Remote Sensing, 2018,10(12): 20-31.
- [27] 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,2021,19(3): 539-550. (MENG Qibo, LIU Yanli, JU Qin, 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))
- [28] 刘浏,牛乾坤,衡静霞,等. 雅鲁藏布江流域干湿转换特征及植被动态响应[J]. 农业工程学报,2020,36(2): 175-184. (LIU Liu, NIU Qiankun, HENG Jingxia, et al. Characteristics of dry and wet conversion and dynamic vegetation response in Yarlung Zangbo River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(2): 175-184. (in Chinese))
- [29] BECK Pieter, GOETZ Scott. Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: ecological variability and regional differences [J]. Environmental Research Letters, 2012, 7:0295012.
- [30] BAO Gang, QIN Zhihao, BAO Yuhai, et al. NDVI-based long-term vegetation dynamics and its response to climatic change in the Mongolian Plateau [J]. Remote Sensing, 2014,6(9): 8337-8358.
- [31] 吴志勇,程丹丹,何海,等. 综合干旱指数研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(1): 36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. Water Resources Protection, 2021,37(1): 36-45. (in Chinese))
- [32] CHEN Yingying, YANG Kun, HE Jie, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116 (D20): 1A.
- [33] XUE Baolin, WANG Lei, YANG Kun, et al. Modeling the land surface water and energy cycles of a mesoscale watershed in the central Tibetan Plateau during summer with a distributed hydrological model [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2013, 118 (16): 8857-8868.
- [34] SHEN Miaogen, PIAO Shilong, CONG Nan, et al. Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau [J]. Global Change Biology, 2015, 21 (10): 3647-3656.
- [35] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003.
- [36] SEN Kumarp. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 324(63): 1379-1389.
- [37] MANN H. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13: 245-259.
- [38] KENDALL M. Rank correlation methods [M]. London: Charles Griffin, 1990.
- [39] PEARSON Karl. Notes on the history of correlation [J]. Biometrika, 1920, 13(1): 25-45.
- [40] ZHANG Yixin, XU Guoce, LI Peng, et al. Vegetation change and its relationship with climate factors and elevation on the Tibetan Plateau [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16 (23): 4709.
- [41] 李海东,陈斌,叶尔纳尔·胡马尔汗,等. 西藏雅鲁藏布江流域植物物候变化及其海拔效应[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(12): 1102-1108. (LI Haidong, CHEN Bin, YERNAER Humaerhan, et al. Changes in vegetation phenology and its elevation-dependent effects in the Yarlung Zangbo River valley of Tibet, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(12): 1102-1108. (in Chinese))
- [42] 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 Jiaqi, REN Zhiyuan. Response 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))

(收稿日期:2021-07-28 编辑:王芳)