

全球气候变暖胁迫下的雅鲁藏布江流域植被覆盖度变化驱动机制探讨

郭兵¹, 姜琳^{1*}, 戈大专², 尚明³

(1. 山东理工大学建筑工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要: 为了解雅鲁藏布江流域内植被变化对气候变化响应的时空差异性, 引入重心模型, 分析和探讨了 2002–2014 年雅鲁藏布江流域植被的变化特点与气候因子的相关性。结果表明, 植被的 NDVI (归一化植被指数, Normalized difference vegetation index) 重心与降水重心年际迁移方向具有正相关性。雅鲁藏布江流域的月植被 NDVI 受前 0–1 月降水影响最大, 而不同季节植被的 NDVI 对降水影响表现出一定的滞后性, 其中春季和冬季的植被 NDVI 均与前一季的降水呈现正相关性。该流域中乔木、灌木对降水反应的滞后性比草本植物要大; 生长季的温度变化与植被的生长具有相关性。植被 NDVI 与月均温的正相关性达到最大的时间段差异较大。因此, 植被 NDVI 和气候因子间的时空异质性研究对于雅鲁藏布江流域的生态环境保护具有重要意义。

关键词: 植被; 盖度; 气候因子; 雅鲁藏布江流域; 重心模型

doi: 10.11926/jtsb.3685

Driving Mechanism of Vegetation Coverage Change in the Yarlung Zangbo River Basin under the Stress of Global Warming

GUO Bing¹, JIANG Lin^{1*}, GE Da-zhuan², SHANG Ming³

(1. Shandong University of Technology, School of Civil Architectural Engineering, Zibo 255000, Shandong, China; 2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The Yarlung Zangbo River Basin, located in Qinghai-Tibet Plateau, is an important region of the World biological diversity and ecological landscape protection, which fragile environment is significantly affected by global warming. In order to understand the spatial-temporal difference of vegetation coverage in Yarlung Zangbo River Basin response to climate change, the correlation between vegetation coverage and climatic factors in 2002–2014 was analyzed by center of gravity model. The results showed that there was a positive relation in migratory direction of gravity center between vegetation NDVI and interannual precipitation. The monthly NDVI of vegetation was mostly affected by precipitation of 0–1 month before. There was also a time-lag effect between seasonal NDVI of vegetation and precipitation, and there was a positive relation between NDVI of vegetation in spring and winter and precipitation of prior season. Meanwhile, the time-lag effect of trees and shrubs on

收稿日期: 2016-10-24 接受日期: 2017-01-04

基金项目: 东华理工大学江西省数字国土重点实验室开放研究基金项目(DLLJ201709); 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金项目(2016NGCM02); 国家重大科技专项(00-Y30B14-9001-14/16)资助

This work is supported by the Key Laboratory Project for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology (Grant No. DLLJ201709), the Key Laboratory Project for National Geographic Census and Monitoring, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation (Grant No. 2016NGCM02), and the Special Project on High Resolution of Earth Observation System for Major Function Oriented Zones Planning (Grant No. 00-Y30B14-9001-14/16).

作者简介: 郭兵(1987~), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为生态遥感。E-mail: guobingjl@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: linlin20061998@126.com

precipitation was bigger than that of herbs. The vegetation growth had relation with the temperature change in growing season. Correlation coefficients between month mean temperature and NDVI of vegetation reached up to the maximum value had significant differences. The spatial and temporal heterogeneity between NDVI of vegetation and climatic factors is of great ecological significance for the protection of eco-environment in Yarlung Zangbo River Basin.

Key words: Vegetation; Coverage; Climatic factor; Yarlung Zangbo River Basin; Model of gravity center

工业革命以来,地球环境急剧恶化,极端气候频发,人类正面临着全球环境变化造成的各种自然灾害的不断侵袭^[1]。认识全球变化对中国陆地生态系统的影响,揭示陆地生态系统对全球变化的反应具有重要意义^[2]。

植被作为陆地生态系统中不可或缺的一部分,在全球变化研究中占有举足轻重的地位。气候变化对陆地生态系统的影响及陆地生态系统对气候变化的反馈作用是全球变化研究的热点之一^[3-4]。植被作为陆地生态系统的主体,与一定的气候、地貌、土壤条件相适应,受自然和人为因素的控制,同时对各因素的变化也最敏感,因此植被动态研究一直是生态学研究的主要内容和热点问题之一^[4-5]。遥感光谱信息具有综合性好、现势性强的优点,其近年来发展起来的植被指数可以较好的反映绿色植物的生长状况、空间分布,并可宏观反映绿色植物的生物量和盖度等特征,并且这些特性是可以用遥感的方法进行定量的测定^[5]。植被光谱是植被遥感的基础,为利用卫星数据提取植物的植被信息提供了理论依据,从而可以用遥感信息监测植被动态变化^[6]。NDVI (归一化植被指数, Normalized difference vegetation index) 与绿色植物的盖度存在较好的相关性,从而可以对区域生态环境的变化进行定量的模拟和反演。

近年来,学者们基于 MODIS NDVI 数据开展了大量研究,分析了不同研究区植被盖度变化的驱动机制^[7-8]。李晓兵等^[9]研究了中国北方 NDVI 对降水季节和年际变化的敏感性,结果表明降水的年际变化对植被生长的影响存在着明显的区域差异。高丽敏等^[10]采用定性 with 定量相结合的方法,利用 1982-2000 年的 NDVI 数据和地面气象资料分析了西北生态环境的变化过程,黄土高原区植被指数年际变化与降水量的相关性显著,生态环境变化的地域差异性明显,陕南-陇南湿润半湿润区、黄土高原区、青藏高原高寒区、干旱区生态环境由好到差。张韵捷等^[11]利用 1982-2013 年的长时间序列 NDVI 和气象数据分析了植被生长动态变化特征与气温、

降水的相关性,发现蒙古高原植被的生长状况与降水量有极显著的正相关关系,与气温则有极显著的负相关关系。孙红雨等^[12]则利用 NOAA 时间序列数据分析了中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系,研究表明温度与降水对植被 NDVI 变化都有重要的影响作用。于海达等^[13]基于 250 m 的 MODIS-NDVI 数据,构建了草原植被长势指数,分析了 16 d 间隔的植被长势变化与降水、气温的相关性。张景华等^[14]基于 2000-2010 年的 MODIS NDVI 数据和气象站点数据分析和探讨了澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性。吴喜芳等^[15]利用 NOAA/AVHRR NDVI 和 MODIS NDVI 两种遥感植被数据分析了黄河源区 1982-2012 年植被的时空变化特征及其对气候变化的响应。Wang 等^[16]研究了美国中部大平原 NDVI 与气候之间的关系,认为生长季前、后期温度与 NDVI 呈正相关,生长季中期温度与 NDVI 呈微弱的负相关,NDVI 对前期降水具有滞后性。Yang 等^[17]通过分析 1989-1993 年的 NDVI 数据研究北美草原气候和 NDVI 的关系,结果表明 NDVI 与春季和夏季累积降水量呈正相关关系。

雅鲁藏布江流域位于高寒的青藏高原,是全球生物多样性和生态景观保护的重要地域,是横断山脉组成部分之一^[18]。流域内地势高差大,河谷深切,地形破碎而陡峭,生态环境脆弱,受全球气候变暖影响显著,是科学研究热点地区之一^[18]。随着全球气候变暖日益加剧,陆地生态系统正在发生深刻变化,雅鲁藏布江流域作为气候敏感区,其植被变化极大地影响着区域生态环境质量。在高原气候背景下,植被对气候变化相对敏感,加上该流域特殊的气候类型、多样的植被类型以及复杂的地形,雅鲁藏布江流域内植被变化对气候变化响应时空差异性是本研究的主要问题^[19]。本研究引入重心模型,从时间和空间、年内和年际变化方面分析和探讨了近 13 年雅鲁藏布江流域植被的变化特点与气候因子的相关性,为应对该地区气候变化的影响提供一定科学依据和决策支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

雅鲁藏布江流域地处青藏高原的南部和东南部, 位于 28°~31°N, 82°~97°E。发源于喜马拉雅山脉中段北麓的杰马央宗冰川, 流向大致为自西向东, 流域东西狭长, 最大长度约 1500 km; 南北窄短, 最大宽度只有 290 km^[18]。雅鲁藏布江及支流属于藏

南山原湖盆谷地区, 中上游属于山原湖盆谷地区, 而下游属于藏东高山峡谷区。雅鲁藏布江支流众多, 包括多雄藏布、年楚河、拉萨河、尼洋河、帕隆藏布等, 其中拉萨河最长、集水面积最大; 帕隆藏布年径流量最大。雅鲁藏布江流域是西藏自治区生物资源最为丰富的地方, 流域夏季主要受南亚季风的控制, 湿润的印度洋季风可以带来大量的降雨, 冬季则主要受西风环流的影响, 天气晴朗, 降水稀少^[18]。

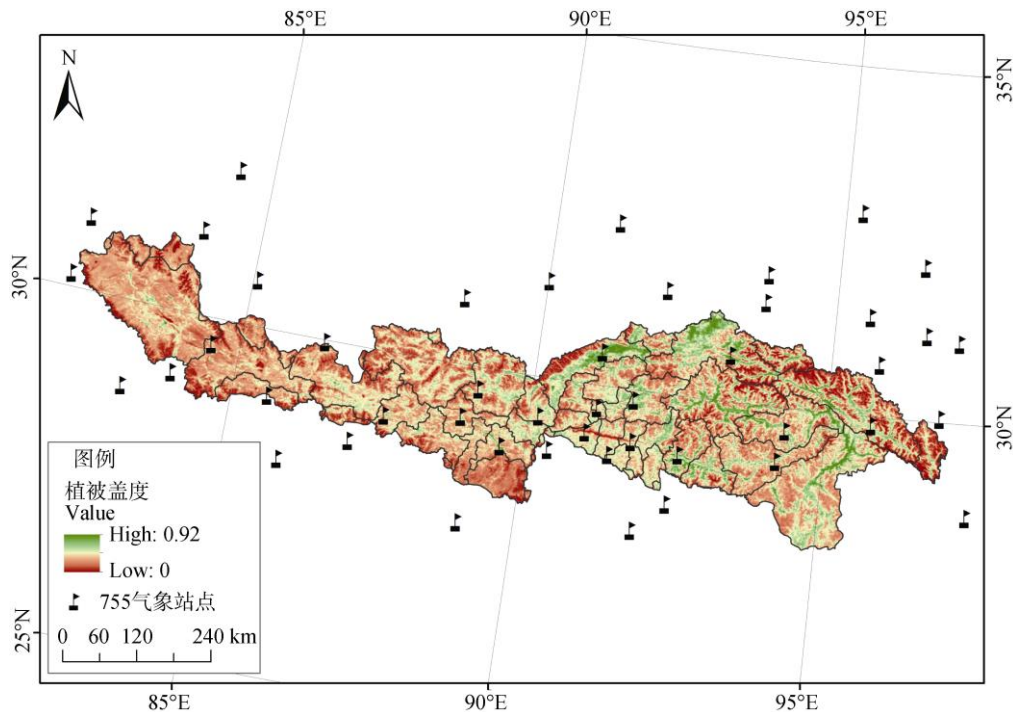


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of studied area

1.2 数据源及预处理

MODIS 植被指数产品(MOD13Q1)数据来自 NASA-Land Processes DAAC 数据中心, 其中包括红波段反射率、近红外波段反射率及 NDVI 数据, 为 16 d 合成产品, 空间分辨率为 250 m^[20]。该 NDVI 数据集已经过几何精纠正、辐射校正、大气校正等预处理, 并且采用最大值合成法(Maximum value composite, MVC)进一步消除了云、大气、太阳高度角等的部分干扰^[15]。该产品已广泛应用于陆表分类信息提取、植被分布及长势监测、作物估产、区域环境评价以及各种生物参数的提取^[21]。

雅鲁藏布江流域植被类型图、雅鲁藏布江流域 30 m 分辨率 DEM (图 1)均来自中国科学院成都山地所数字山地中心科学数据库。气象数据由中国气

象科学数据共享服务网提供, 包括 2002–2014 年雅鲁藏布江流域及周边 50 个气象站点的日降水和气温资料。研究中利用 USGS EROS 数据中心提供的 MRT 对数据进行数据格式及投影的转换, 为了便于面积的统计, 本研究中统一采用克拉索夫斯基阿尔伯斯等积投影。

1.3 研究方法

重心模型 重心的概念起源于力学, 是指在区域空间上存在某一点, 在该点前后左右各个方向上的力量对比保持均衡。引用地学的计算公式^[22–23]:

$$\bar{x} = \frac{\iint M_i x_i}{\iint M_i}; \quad \bar{y} = \frac{\iint M_i y_i}{\iint M_i} \quad (1)$$

其中 (\bar{x}, \bar{y}) 是重心坐标, M_i 为平面区域 i 的质量。

$$M_i = \iint_i \mu d\sigma \quad (2)$$

(x_i, y_i) 为 i 处的地理坐标, 因此上式可改为:

$$\bar{x} = \frac{1}{M_i} \iint \mu x d\sigma; \quad \bar{y} = \frac{1}{M_i} \iint \mu y d\sigma; \quad \bar{z} = 0 \quad (3)$$

重心模型在土地利用、经济和能源等研究领域应用广泛^[22]。当某一地理或空间现象的空间均值显著区别于几何中心时, 表明了这一空间现象的不均衡分布性, 或称“重心偏离”, 偏离的方向指示了空间或地理现象的“高密度”部位^[23]。在本次研究中以植被 NDVI 重心为例, 采用划分网格法, 将雅鲁藏布江流域划分 43 个 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格。取第 i 个网格中心的地理坐标 (x_i, y_i) , M_i 为第 i 个网格的平均 NDVI, 则该区域的植被 NDVI 重心的地理坐标表示为:

$$\bar{x} = \frac{\sum M_i x_i}{\sum M_i}; \quad \bar{y} = \frac{\sum M_i y_i}{\sum M_i} \quad (4)$$

相关系数 相关系数又称线性相关系数, 它是衡量变量之间线性相关程度的指标。样本相关系数用 r 表示, 相关系数的取值范围为 $[-1, 1]$ 。 $|r|$ 值越大, 误差 Q 越小, 变量之间的线性相关程度越高; $|r|$ 值越接近 0, Q 越大, 变量之间的线性相关程度越

低^[10, 24]。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{13} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{13} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

其中 x_i 表示自变向量, y_i 表示因变向量, \bar{x} 、 \bar{y} 分别表示两向量的平均值。

2 结果和分析

2.1 植被 NDVI 与降水相关性

2.1.1 植被 NDVI 与降水相关性的年际分析

基于重心坐标模型分别计算了 2002-2014 年这 13 年的植被 NDVI 重心和降水中心, 并分析了年际间重心迁移方向的相关性。结果表明(图 2), 2002-2003 年、2007-2008 年的植被 NDVI 和降水的年际重心迁移方向完全吻合, 均为东北方向; 而 2003-2004 年、2006-2007 年、2012-2013 年则在纬向上重心迁移方向相吻合; 2004-2005 年、2009-2010 年、2010-2011 年、2011-2012 年、2013-2014 年则在经向上迁移方向相同; 2005-2006 年、2008-2009 年两者的重心迁移方向则相反。因此, 植被的 NDVI 重心与降水重心迁移方向具有正相关性。

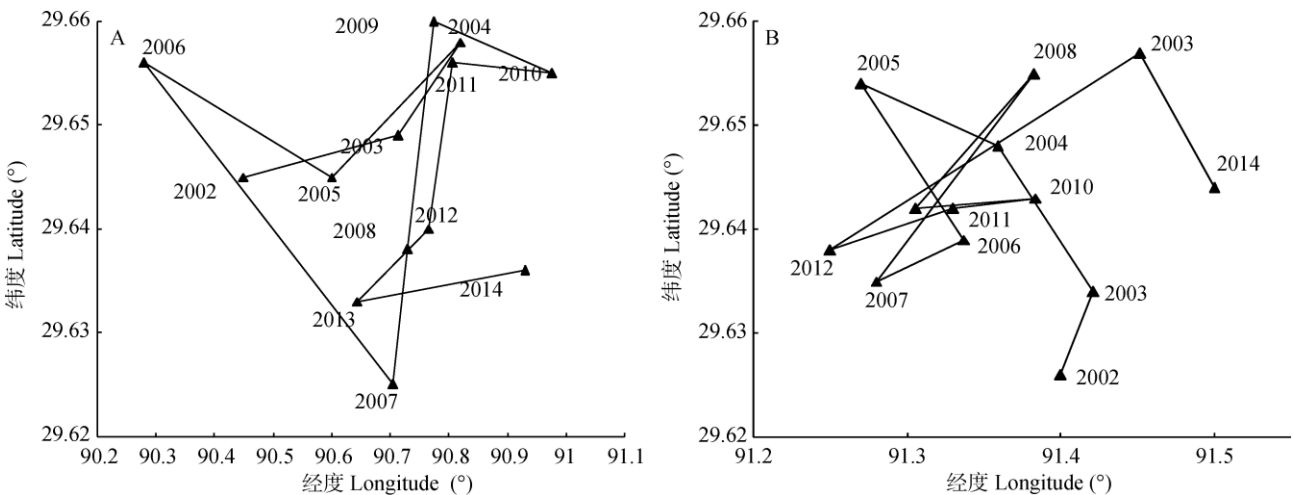


图 2 降水(A)和植被 NDVI (B)重心迁移轨迹对比

Fig. 2 Contrast of gravity center transferring trajectory of precipitation (A) and vegetation NDVI (B)

2.1.2 植被 NDVI 与降水相关性的年内分析

由于植被的生长受降水影响较大, 但是从降水到植被吸收然后通过植被的生长状况反映到植被 NDVI 需要一定的时间, 即植被月均 NDVI 对

降水的影响表现为一定的滞后性(表 1): 雅鲁藏布江流域的月均植被 NDVI 受前 0-1 月(即当前月和前 1 个月的降水之和, 以此类推)的降水影响最大, 相关系数为 0.829, 其次为前 0-2 月, 相关系数

表1 月均降水与月均 NDVI 的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between month mean precipitation and month mean NDVI

NDVI	月均降水量 Month mean precipitation						
	当前月 Current month	前1月 1st month before	前2月 2nd month before	前3月 3rd month before	前0-1月 0-1 month before	前0-2月 0-2 months before	前0-3月 0-3 months before
	0.744	0.790	0.538	0.203	0.829	0.815	0.748

表2 不同季节 NDVI 与降水量的相关系数

Table 2 Analysis of time-lag effect between seasonal precipitation and seasonal NDVI

NDVI	季节降水量 Season precipitation						
	当前季节 Current season	前1季 1st season before	前2季 2nd season before	前3季 3rd season before	前0-1季 0-1 season before	前0-2季 0-2 seasons before	前0-3季 0-3 seasons before
春季 Spring	0.152	0.372	-0.064	0.253	0.316	0.032	0.100
夏季 Summer	-0.495	0.256	-0.104	0.004	-0.446	-0.322	-0.192
秋季 Autumn	-0.266	0.142	-0.474	-0.072	0.050	-0.080	-0.189
冬季 Winter	-0.194	0.372	-0.064	0.253	0.316	0.032	0.100

为 0.815, 而前 3 月(指前第 3 个月, 以此类推)的降水对当前月的植被 NDVI 影响最小, 相关系数仅为 0.203。

年内不同季节植被 NDVI 对于降水也表现出一定的滞后性(表 2), 其中春季植被 NDVI 受冬季降水影响较大, 其相关系数为 0.372; 夏季植被 NDVI 与春季降水呈现较大的相关性, 相关系数为 0.256, 秋季植被 NDVI 与前几季的降水无明显相关性。冬季植被 NDVI 则受秋季降水影响最大, 相关系数为 0.372。可见, 各个季节植被 NDVI 与相应季节的降水表现为弱相关性, 而春季和冬季的植被 NDVI 均与前一季降水呈现较好的相关性。

2.1.3 不同植被类型 NDVI 与降水的相关性

由于不同植被生长所需的水分、植被对降水的有效吸收以及不同植被类型的耐旱程度的不同, 植被 NDVI 对降水量的反应滞后时间也长短不一^[13]。研究表明(图 3), 草甸、草原、栽培植被、垫状稀疏植被、沼泽和河谷灌丛的植被月均 NDVI 与前 0-1 月降水量的相关系数最大, 分别为 0.865、0.910、0.740、0.670、0.806 和 0.800。低山松林、阔叶林的月植被 NDVI 与前 4 月的月降水量的相关系数最大, 分别为 0.399 和 0.350。低山针叶林、中山针叶林植被月 NDVI 与前 3 月的月降水量的相关系数最大, 分别为 0.374 和 0.424。亚高山针叶林植被月 NDVI 则与前 0-4 月的月降水量相关性最大, 其相关系数分别为 0.504。这些表明, 雅鲁藏布江流域的草灌植物、人工作物的植被 NDVI 与当前月、前 1 月、前 2 月的月降水量的相关性较大, 对其植被生长产生较大影响的降水时间段相对较短, 而对于乔

木、灌木植被 NDVI 则与前 4 月、前 3 月的月降水相关性较大, 说明乔木、灌木对降水反应较为滞后。

2.2 植被 NDVI 与气温的相关性

2.2.1 植被 NDVI 与温度因子年内重心迁移轨迹

温度变化会对植被的生长产生一定的影响^[13,24], 不同植被类型具有不同的物候期, 且高寒青藏高原的冬季植被覆盖度相对较低, 本研究着重对植被生长季两者的重心迁移轨迹进行了分析(图 4)。结果表明, 植被 NDVI 年内重心迁移轨迹主要集中于 29.2°~29.8°N, 90.4°~92°E 之间, 而温度重心迁移轨迹则主要集中于 28.1°~32.8°N, 86.1°~94°E 之间。由于随着冬季-春季-夏季-秋季-冬季的变化整个雅鲁藏布江流域的整体温度由上升转为降低, 因此温度的重心由 1 月份开始向高纬度地区移动, 4-5 月份时发生一个重心的回落, 5 月份开始到 9 月份又产生一个重心向高纬度地区的迁移, 由于 6、7、8 月份温度相对稳定, 因此重心位置变化不大。到 11、12、1 月份时温度重心发生相对较明显的向低纬度的移动。与之相对应的植被 NDVI 随着藏北地区植被的生长, 由 1 月份开始植被 NDVI 重心开始向北迁移, 到 8 月份重心轨迹到达最北端, 由 8 月份开始 9、10、11、12 月份植被 NDVI 重心向低纬度迁移, 重心的迁移轨迹基本上与温度迁移轨迹相一致。因此雅鲁藏布江流域生长季的温度变化与植被的生长具有较好的相关性。

2.2.2 植被 NDVI 与气温变化月际滞后性

本研究选取雅鲁藏布江流域 15 站点的气温数据, 分析和探讨不同站点上植被月均 NDVI 与气温

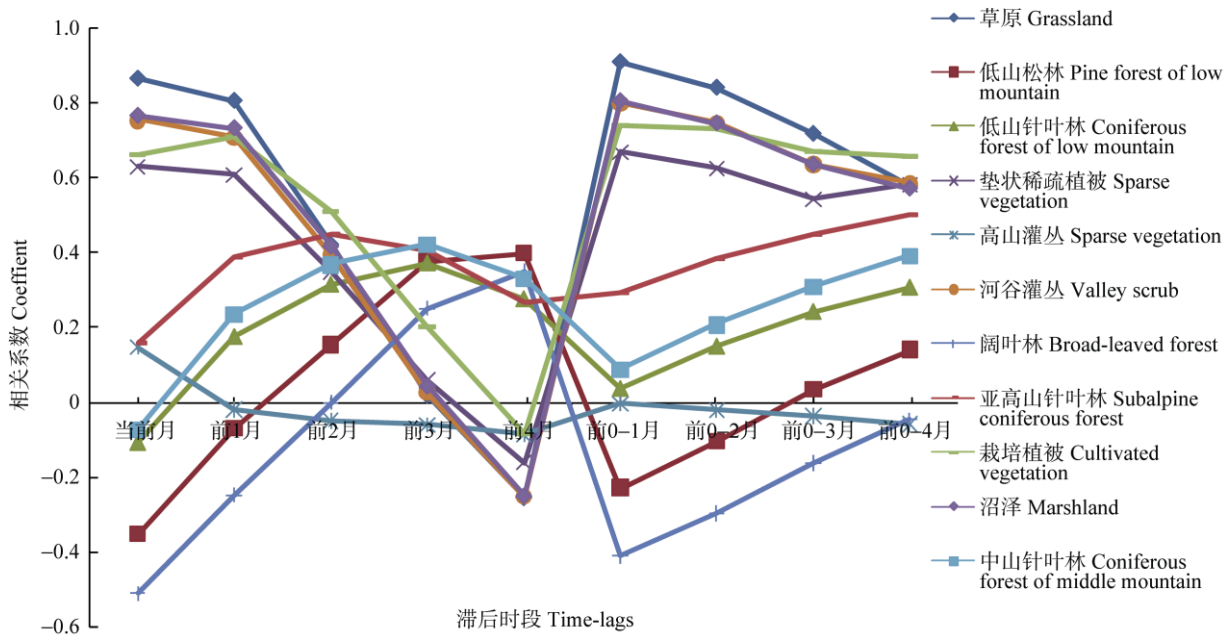


图 3 不同植被类型 NDVI 与降水的相关系数

Fig. 3 Correlation coefficient between NDVI of different plant types and precipitation

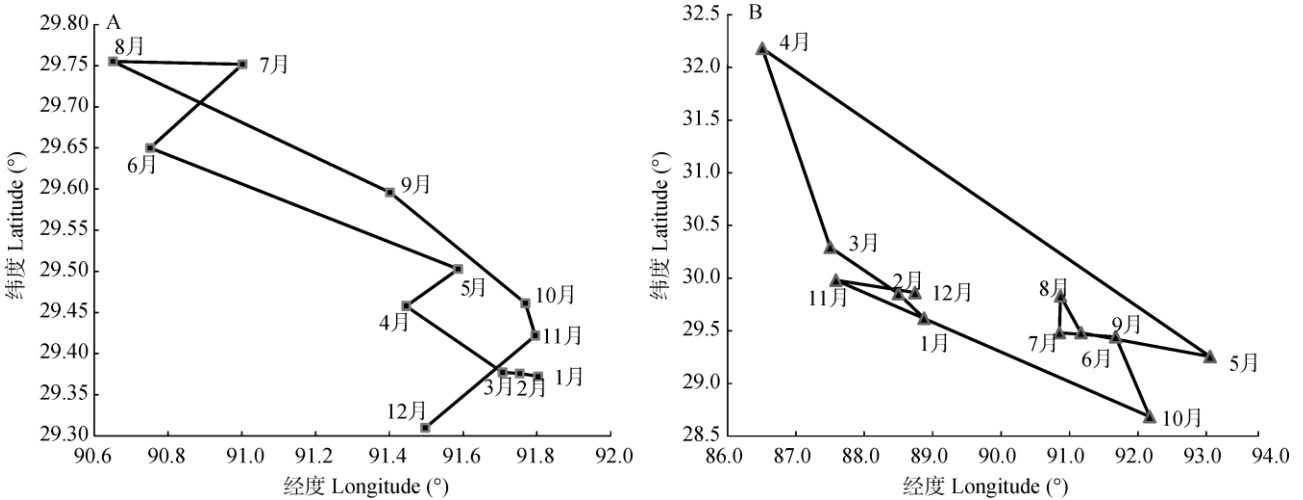


图 4 年内植被 NDVI (A)与气温(B)重心迁移轨迹

Fig. 4 Gravity center transferring trajectory of NDVI (A) and temperature (B)

的相关性, 结果表明(图 5), 各个站点的月均植被 NDVI 与月均温的相关性达到最大主要集中于当前月、前 0-1 月(即当前月与前第 1 个月的平均温度,以此类推)、前 0-2 月、前 0-3 月的 4 个时间段, 但是两者的显著负相关系数达到最大则主要在前 6 月(指前第 6 个月, 依次类推)、前 5 月。在前 0-1 个月相关系数最大的站点数有 5 个, 前 0-2 个月相关系数最大的站点数有 1 个, 前 0-3 月达到最大的

站点数有 2 个, 当前月达到最大值的站点数则有 5 个。月均植被 NDVI 与月均温度负相关系数达到最大的时间段位于前 6 月的站点数有 11 个, 位于前 7 月的站点数则有 4 个。而在 56227 站点两者的相关系数绝对值较小, 说明该站点上月均植被 NDVI 与月均温相关性较小, 原因在该站点位于亚高山针叶林带, 而该种植被类型耐低温, 对温度的变化响应不灵敏。

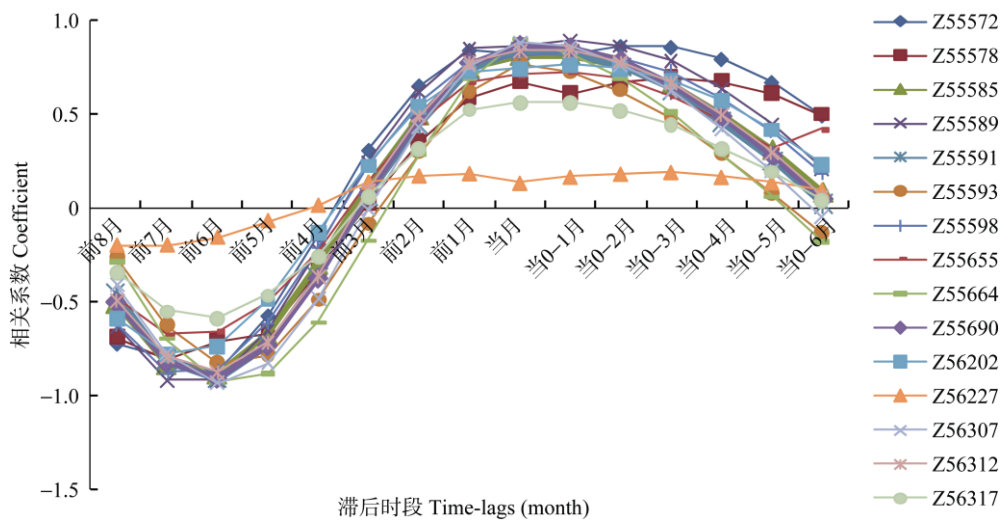


图5 不同站点植被 NDVI 与气温滞后性相关性分析

Fig. 5 Correlation coefficient of time-lag effect between month mean NDVI at different locations and month mean temperature

4 讨论和结论

雅鲁藏布江流域生态环境脆弱, 受全球气候变暖影响显著, 本研究引入重心模型, 从时间和空间、年内和年际等方面分析和探讨了近 13 年雅鲁藏布江流域植被的变化特点与气候因子的相关性。

(1) 植被 NDVI 重心与降水重心年际迁移方向具有显著的正相关性, 说明雅鲁藏布江流域的整体植被变化受降水影响较为显著。由于雅鲁藏布江流域内降水的时空分布不均匀性, 导致了区域内植被变化差异明显, 因而研究区内的植被盖度重心随着降水的变化产生年际迁移^[18]。但是由于植被同时还受气温、地形等其他因素的影响, 因此导致各个年份植被 NDVI 和降水重心迁移的方向不完全一致^[12]。

(2) 雅鲁藏布江流域的月均植被 NDVI 受前 0-1 月降水影响最大, 主要原因在于除雅鲁藏布江流域下游分布有林地之外, 其他地区的地表覆被为草地、草甸、灌木等低矮植被, 这些植被类型对降水的利用效率较高, 其植被 NDVI 对降水的滞后期约为 15~25 d^[1,12]; 而不同季节植被 NDVI 也会表现出一定的滞后性, 其中春季和冬季的植被 NDVI 均与前一季的呈现显著的相关性, 主要原因在于雅鲁藏布江流域冬季降水多为降雪, 积雪对于植被不仅有保护作用, 还可以在春季以冰雪融水的形式为植物生长提供水分, 此外, 秋季该流域总体上气候干燥, 气温较低, 因此该地区秋冬植被的生长对降水变化反应敏感^[18]。

(3) 雅鲁藏布江流域的草灌植物、人工作物的植被 NDVI 与当前月、前 1 月和前 2 月的月降水量具有显著相关性, 对其植被的生长产生较大影响的降水时间段相对较短, 而乔木、灌木植被月均 NDVI 则与前 4 月、前 3 月的月均降水呈现显著相关性, 主要原因在于高大的乔木、灌木与低矮的农作物和草灌植物对水分的利用效率不同上^[8,14]。

(4) 雅鲁藏布江流域生长季的温度变化与植被的生长呈显著相关性, 主要原因在于研究区位于高寒地带, 气候寒冷, 不利于植物的生长, 而生长季各月平均气温较高, 有利于植物的光合作用和生物量的积累^[8]。不同植被类型月均 NDVI 与月均温的相关性达到最大的时间段差异较大, 主要集中于当前月、前 0-1 月(当前月与前 1 个月的平均温度)、前 0-2 月、前 0-3 月等 4 个时间段, 而两者的最大负相关系数则主要位于前 6 月和前 5 月, 这是因为不同的植被类型对温度的响应灵敏度不同, 草灌类植物的生长比乔木更容易受温度的影响^[18]。

参考文献

- [1] CHEN Y H, LI X B, SHI P J. Variation in NDVI driven by climate factors across China, 1983-1992 [J]. Acta Phytoecol Sin, 2001, 25(6): 716-720.
陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983-1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析 [J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716-720.
- [2] LI Z, YAN F L, FAN X T. The variability of NDVI over northwest China and its relation to temperature and precipitation [J]. J Remote

- Sens, 2005, 9(3): 308–313. doi: 10.11834/jrs.20050345.
- 李震, 阎福礼, 范湘涛. 中国西北地区 NDVI 变化及其与温度和降水的关系 [J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 308–313. doi: 10.11834/jrs.20050345.
- [3] WANG Z M, GUO Z X, SONG K S, et al. Responses of vegetation NDVI in northeast China to climate change [J]. *Chin J Ecol*, 2009, 28(6): 1041–1048.
- 王宗明, 国志兴, 宋开山, 等. 中国东北地区植被 NDVI 对气候变化的响应 [J]. 生态学报, 2009, 28(6): 1041–1048.
- [4] XIN B Z, XU J X, ZHENG W. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981–2006): Impacts of climate changes and human activities [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2008, 51(1): 67–78. doi: 10.1007/s11430-007-0137-2.
- [5] MAO D H, WANG Z M, LUO L, et al. Growing-season normal difference vegetation index, NDVI, response to climate changes and increased carbon dioxide concentration in frozen areas of northeast China during 1982–2008 [J]. *Acta Sci Circum*, 2010, 30(11): 2332–2343.
- 毛德华, 王宗明, 罗玲, 等. 1982–2008 年东北冻土区植被生长季 NDVI 对气候变化和 CO₂ 体积分数增加的响应 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2332–2343.
- [6] ZHANG J Y, DONG W J, YE D Z, et al. New evidence for effects of land cover in China on summer climate [J]. *Chin Sci Bull*, 2003, 48(4): 401–405. doi: 10.1007/BF03183238.
- [7] FAN L J, MU X M, ZHAO G J. Runoff variation and its impacting factor during 1960–2009 in Jialing River Basin [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2013, 33(1): 12–17.
- 范利杰, 穆兴民, 赵广举. 近 50 a 嘉陵江流域径流变化特征及影响因素 [J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 12–17.
- [8] LI H X, LIU G H, FU B J. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters Region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(19): 5495–5504.
- 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究 [J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5495–5504.
- [9] LI X B, SHI P J. Sensitivity analysis of variation in NDVI, temperature and precipitation in typical vegetation types across China [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2000, 24(3): 379–382.
- 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 379–382.
- [10] GAO L M, CHEN X P, HUANG Y, et al. Study on eco-environmental spatio-temporal change of different ecological divisions in northwest of China based on RS and GIS [J]. *J Desert Res*, 2007, 27(1): 65–70, 172. doi: 10.3321/j.issn:1000-694X.2007.01.017.
- 高丽敏, 陈兴鹏, 黄艳, 等. 基于 RS 和 GIS 的中国西北不同生态类型区生态环境时空变化研究 [J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 65–70, 172. doi: 10.3321/j.issn:1000-694X.2007.01.017.
- [11] ZHANG Y J, GUI Z, LIU Q S, et al. The analysis of the vegetation dynamic changes from 1982 to 2013 in the Mongolian Plateau based on satellite imageries and meteorological data [J]. *Remote Sens Technol Appl*, 2016, 31(5): 1022–1030. doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.5.1022.
- 张韵婕, 桂朝, 刘庆生, 等. 基于遥感和气象数据的蒙古高原 1982–2013 年植被动态变化分析 [J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(5): 1022–1030. doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.5.1022.
- [12] SUN H Y, WANG C Y, NIU Z, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data [J]. *J Remote Sens*, 1998, 2(3): 204–210. doi: 10.11834/jrs.19980309.
- 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析 [J]. 遥感学报, 1998, 2(3): 204–210. doi: 10.11834/jrs.19980309.
- [13] YU H D, YANG X C, XU B, et al. Changes of grassland vegetation growth in Xilin Gol League over 10 years and analysis on the influence factors [J]. *J Geo-info Sci*, 2013, 15(2): 270–279. doi: 10.3724/SP.J.1047.2013.00270.
- 于海达, 杨秀春, 徐斌, 等. 10 年来锡林郭勒盟草原植被长势变化及其影响因子分析 [J]. 地球信息科学, 2013, 15(2): 270–279. doi: 10.3724/SP.J.1047.2013.00270.
- [14] 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]. *J Nat Resour*, 2015, 30(9): 1425–1435.
- 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.
- [15] WU X F, LI G X, PAN X P, et al. Response of vegetation cover to temperature and precipitation in the source region of the Yellow River [J]. *Resour Sci*, 2015, 37(3): 512–521.
- 吴喜芳, 李改欣, 潘学鹏, 等. 黄河源区植被覆盖度对气温和降水的响应研究 [J]. 资源科学, 2015, 37(3): 512–521.
- [16] WANG J, RICH P M, PRICE K P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the Central Great Plains, USA [J]. *Inter J Remote Sens*, 2003, 24(11): 2345–2364.
- [17] YANG L M, WYLIE B K, TIESZEN L L, et al. An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U.S. Northern and Central Great Plains [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, 65(1): 25–37.
- [18] JIANG L, FENG W L, GUO B. Analysis of dynamic monitoring of

- vegetation change and the correlation with precipitation factor in Yalu Tsangpo River Basin during the past 13 years [J]. *Res Environ Yangtze Basin*, 2014, 23(11): 1610–1619.
- 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, 23(11): 1610–1619.
- [19] YAO T D, ZHU L P. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy [J]. *Adv Earth Sci*, 2006, 21(5): 459–464. doi: 10.3321/j.issn:1001-8166.2006.05.003.
- 姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(5): 459–464. doi: 10.3321/j.issn:1001-8166.2006.05.003.
- [20] MA Z Y, ZHANG H, ZHANG J H. Analysis on vegetation change in Hangzhou based on MODIS [J]. *J Anhui Agri Sci*, 2006, 34(18): 4618–4619. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2006.18.152.
- 马志勇, 张慧, 张军海. 基于 MODIS 杭州地区植被变化分析 [J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(18): 4618–4619. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2006.18.152.
- [21] SI Y H, ZHANG W. Monitoring changes of grassland growth based on vegetation index (NDVI) of MODIS: A case study of Xilin Gol League [J]. *J Agri Sci Technol*, 2008, 10(5): 66–70. doi: 10.3969/j.issn.1008-0864.2008.05.013.
- 司亚辉, 张玮. 基于 MODIS-NDVI 的草地长势变化监测——以锡林郭勒盟为例 [J]. *中国环境科技导报*, 2008, 10(5): 66–70. doi: 10.3969/j.issn.1008-0864.2008.05.013.
- [22] XU J H, YUE W Z. Evolvement and comparative analysis of the population center gravity and the economy gravity center in recent twenty years in China [J]. *Sci Geogr Sin*, 2001, 21(5): 385–389. doi: 10.3969/j.issn.1000-0690.2001.05.001.
- 徐建华, 岳文泽. 近 20 年来中国人口重心与经济重心的演变及其对比分析 [J]. *地理科学*, 2001, 21(5): 385–389. doi: 10.3969/j.issn.1000-0690.2001.05.001.
- [23] QIAO J J, LI X J. The shift route of Chinese economic gravity center in recent 50 years [J]. *Areal Res Dev*, 2005, 24(1): 12–16. doi: 10.3969/j.issn.1003-2363.2005.01.003.
- 乔家君, 李小建. 近 50 年来中国经济重心移动路径分析 [J]. *地域研究与开发*, 2005, 24(1): 12–16. doi: 10.3969/j.issn.1003-2363.2005.01.003.
- [24] DAI X. Temporal and spatial of NDVI variation and correlation analysis between NDVI and climate factors based on SPOT remote sensing in the natural Grassland of Ximeng [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.
- 戴鑫. 基于 SPOT 遥感影像的锡盟天然草地 NDVI 时空变化及其与气象因子相关性分析研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.