

青藏高原植被NDVI对气候因子响应的 格兰杰效应分析

周玉科

(中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101)

摘要:多变的气候和复杂的地理环境使得青藏高原植被对气候变化响应敏感,因此分析高原植被与气候因子之间的动态关系对气候变化研究和生态系统管理具有重要意义。论文基于1982—2012年青藏高原气象数据(气温、降水)以及GIMMS NDVI3g遥感数据,在像素级别上运用格兰杰因果关系检验方法,在月尺度和季节尺度上分析了高原植被NDVI(主要是草原)与平均气温、降水量之间的响应情况及因果关系。研究表明:①月尺度上NDVI与平均气温之间、NDVI与降水量之间的时序平稳性比例高于季节尺度,月尺度下达到平稳性的植被区域分别占99.13%和98.68%,季节尺度下分别占64.01%和71.97%;②月尺度下高原平均气温和降水量对NDVI影响的滞后期都集中在第12~13个月,荒漠草原、典型草原和草甸3种植被类型的滞后期一致,季节尺度下平均气温和降水量对NDVI影响的滞后期主要分布在第3~4和第6个季度,3种植被类型的滞后期差异性较大;③月尺度下,青藏高原约98.95%的植被覆被区的平均气温是引起NDVI变化的格兰杰原因,反之,大部分地区(约89.05%,除高原东南区域)内NDVI也是引起平均气温变化的格兰杰原因;季节尺度下,青藏高原中部以外植被区域(约92.03%)内的平均气温是引起NDVI变化的格兰杰原因,而在东部和西部部分地区(约50.55%)中NDVI也是引起平均气温变化的格兰杰原因;④月尺度下,高原东北和西北地区(约72.05%)内的降水量是引起NDVI变化的格兰杰原因,大部分地区(约94.86%,除东南部少量区域)中NDVI是引起降水量变化的格兰杰原因;季节尺度下,高原东南部(约61.43%)地区内的降水量是引起NDVI变化的格兰杰原因,高原中东部地区(约48.98%)中NDVI是引起降水量变化的格兰杰原因。总之,高原植被NDVI与气温、降水的相互作用显著,彼此均可构成格兰杰因果效应,但总体上气候因子的影响程度大于植被的反馈作用,月尺度的效应区域大于季节尺度的效应区域。

关键词:青藏高原;平稳性检验;格兰杰因果关系;多尺度分析;滞后阶;NDVI;气候变化

陆地植被是地球表面生态系统中重要的组成部分,其发育与演替主要受到气候变化和人类活动的影响(刘亚龙等, 2010)。作为衡量生态环境的重要因素,植被对气候变化的响应研究在一定程度上为生态环境的治理提供了有效依据(宫攀等, 2009; Zhang et al, 2012; 穆少杰等, 2102)。在过去几十年中,气候变化被认为是陆地植被生长的主要驱动力

(Nemani et al, 2003)。青藏高原因其植被多样性和地理环境的复杂性成为植被与气候变化关系研究的理想场所(梁四海等, 2007),因此研究植被变化与气候因子的相互作用关系对青藏高原生态环境保护 and 区域生态科学发展具有重要的科学意义。

近年来,基于常规方法的植被与气候变化相关性研究取得了一定的进展,方法主要包括多元线性

收稿日期:2018-09-11;修订日期:2019-02-25。

基金项目:国家自然科学基金项目(41601478, 31700417);国家重点研发计划项目(2016YFC0500103);中国科学院STS项目(KFJ-SW-STS-167);资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金(2016)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41601478 and 31700417; National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFC0500103; STS Program of Chinese Academy of Sciences, No. KFJ-SW-STS-167; Open Fund of the State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems in 2016.]

第一作者简介:周玉科(1984—),男,山东济宁人,助理研究员,从事生态遥感、时空大数据挖掘研究。

E-mail: zhouyk@igsnrr.ac.cn

引用格式:周玉科. 2019. 青藏高原植被NDVI对气候因子响应的格兰杰效应分析[J]. 地理科学进展, 38(5): 718-730. [Zhou Y K. 2019. Detecting Granger effect of vegetation response to climatic factors on the Tibetan Plateau. Progress in Geography, 38(5): 718-730.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.05.009

分析法和贝叶斯推断2大类,这2类方法能够有效处理复杂数据的相关关系(侯美亨等, 2013; 孙颖等, 2013)。如李晓兵等(2000)通过研究季节尺度下的中国北方温带草原植被对降水变化的响应,认为降水量的变化会影响下一年北方大部分温带草原植被的长势情况。Ichii等(2002)提出了在高纬度地区,春秋季节植被NDVI与温度呈显著正相关性的结论。Zhou等(2007)则指出在大多数情况下,植被长势会受到温度和降水的共同作用,即便仅在一因素的作用下,植被长势也会因其作用的时间和强度的变化而变化。青藏高原植被NDVI对气候变化的响应研究中,基于遥感观测资料来估算气候变化对植被NDVI的影响存在一定的不确定性,因此归因的结果往往具有较大的争议(孔冬冬等, 2017)。实际上在研究2个或多个变量之间的相关关系时,若不考虑时间序列的自相关性可能会导致变量之间的伪相关(李瑞萍等, 2015)。曹鸿兴等(2008)通过计算分析指出,格兰杰因果关系检验法能够在探讨变量之间相关性的同时消除自身变化对结果的影响,可作为气候变化归因分析的新方法。

随着遥感观测数据的广泛使用,大尺度上探讨青藏高原植被NDVI与气候因子之间的因果关系成为可能。本文基于月和季节2个时间尺度,选取平均气温和降水量等相关因子,运用格兰杰因果检验法对青藏高原1982—2012年植被NDVI状态与关键气候因子进行归因分析,并揭示它们之间相互作用的时空规律。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

青藏高原地处中国西南部,位于 $73^{\circ}\text{E} \sim 105^{\circ}\text{E}$ 和 $26^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 之间,地跨中国西藏、青海、新疆、甘肃等6个省区,占地面积250万 km^2 ,约为全国总面积的1/4。作为高山高原气候地区,青藏高原的气候特点主要表现为:气温偏低,昼夜温差大,年降水量较少,降水季节性差异显著。受海拔高度、高原季风气候和高大山脉等因素的影响,年平均气温由高原东南地区约 20°C 向西北地区逐渐递减至约 -6°C ,年降水量也相应由4000 mm逐渐递减至近50 mm以下(方锋等, 2014)。高原地区植被覆盖类型丰富多样,广泛分布着森林、荒漠、草原、草甸等多种植被(刘双侗等, 2014)。由于高原地区植被以草原为主,本文主要基于荒漠草原、典型草原和草

甸3种草原植被类型探讨青藏高原植被NDVI与关键气候因子之间的因果关系(图1)。

1.2 数据与预处理

本文使用的NDVI数据为美国国家航空航天局(NASA)研究开发的第三代NDVI数据(Global Inventory Modeling and Mapping Studies, GIMMS NDVI3g, <http://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g/>),研究时间段为1982—2012年,采用WGS_84坐标系,其时间分辨率为15 d,空间分辨率为 $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ 。为减少云、大气对NDVI的影响,将多时相影像组合为时间序列堆栈,提取每个像素的时序值,采用Savitzky-Golay(S-G)滤波进行平滑,去除异常值和噪声。

气象数据来源于中国科学院寒区科学数据中心提供的中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集产品,该数据集是基于中国气象局观测数据,通过现有的TRMM降水数据、Princeton再分析数据和GLDAS数据等资料制作而成(Yang et al, 2011; Yang et al, 2014)。其时间分辨率为3 h,空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$,选取时间段1982—2012年的青藏高原地区气温(TEMP)及降水(PREC)资料。基于像素级别探讨NDVI与平均气温、降水量之间的因果关系,需要将其统一在同一分辨率下进行研究。本文基于最近邻采样方法将气候数据重采样至空间分辨率为 $8\text{ km} \times 8\text{ km}$,并分别汇总为月尺度数据和季节尺度数据。

2 研究方法

本文基于月尺度和季节尺度对NDVI数据和气象数据的相互作用关系进行研究。根据青藏高原草

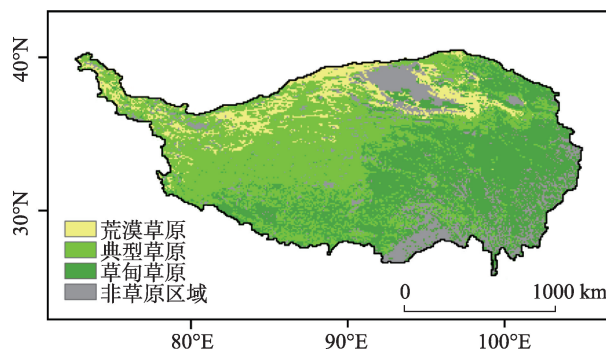


图1 青藏高原草原植被分布

Fig.1 Spatial distribution of grassland vegetation on the Tibetan Plateau

原植被生长规律,季节尺度将一年的植被生长过程分为生长季前(1—4月)、生长季(5—9月)、生长季后(10—12月)(Piao et al, 2006; Ding et al, 2013; 马晓芳等, 2016; 孔冬冬等, 2017)。这种季节尺度的划分方法有利于分析生长季前的温度、降水对生长季植被NDVI状况的影响。采用格兰杰因果检验法研究植被NDVI对气候因子的响应,其流程如图2所示:将NDVI数据和气象数据分别依据月尺度和季节尺度进行划分,得到2组数据。分别对2组数据中NDVI、TEMP和PREC时间序列进行平稳性检验,若检验数据为非平稳并且各个序列为同阶单整,可对数据进行协整检验,未通过协整检验则丢弃该数据。若通过平稳性检验或协整检验,则可以运用格兰杰因果检验判断植被NDVI与影响因子之间的因果关系,进而探讨植被NDVI对气候变化的响应。

2.1 平稳性检验

时间序列具有平稳性是格兰杰因果关系检验的前提,若不进行平稳性检验而直接进行格兰杰因果检验可能会导致伪回归(王丰龙等, 2013)。检验被分析时间序列是否平稳也就是检验其是否存在单位根,常用的方法为增广迪肯-富勒(Augmented Dickey-Fuller, ADF)检验(朱玉祥等, 2014)。对于时间序列 $X=\{x_t\}$,其检验方程为:

$$\Delta x_t = \alpha + \beta t + \delta x_{t-1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \Delta x_{t-i} + \varepsilon_t \quad (1)$$

式中: t 为时间变量; α 为常数项; βt 、 β_i 为趋势项; ε_t 为残差项; i 为滞后阶数, m 为最大滞后阶数。假定原假设 $H_0: \delta=0$,备择假设 $H_1: \delta \neq 0$ 。检验分为3步:第一步,根据公式(1)进行检验;第二步,删去趋势项进行检验;第三步,删去常数项、趋势项进行检验。若检验在任一步拒绝 H_0 ,则表示时间序列 X 中不存在单位根,即 X 为平稳时间序列,方可停止检验,否则便要继续检验至第三步结束为止。重复同样步骤,对时间序列 $Y=\{y_t\}$ 同样进行ADF检验,若序列 X 和 Y 皆为平稳序列,则可对其进行格兰杰因果检验。

2.2 协整检验

对于某些时间序列的回归方程具有良好的拟合优度和显著性水平,但是其残差序列却呈现非平稳性,协整检验(co-integration test)是判断该类时间序列平稳性的有效方法。协整关系是指2个非平稳的时间序列组合在一起的线性组合具有平稳性,故可用协整检验区分真回归和伪回归(郭燕枝等, 2011)。假设2个非平稳序列 $X=\{x_t\}$ 和 $Y=\{y_t\}$ 同阶单整,存在线性组合 $X+bY$ 使得 $\{x_t+by_t\}$ 是平稳序列,则

称 X 和 Y 之间具有协整关系。2个序列之间常用的协整检验方法为E-G(Engle Granger)两步法(Gülen, 1996)。对于同阶单整序列 $X=\{x_t\}$ 和 $Y=\{y_t\}$,其检验步骤如下:

第一步:建立2个时间序列 X 、 Y 的回归方程,得到回归方程的残差序列 $\{\varepsilon_t\}$;

第二步:对残差序列 $\{\varepsilon_t\}$ 进行ADF检验。

假定原假设 $H_0: \delta=0$,备择假设 $H_1: \delta \neq 0$,若结果拒绝 H_0 ,表示该残差序列 $\{\varepsilon_t\}$ 中不存在单位根,即 $\{\varepsilon_t\}$ 为平稳时间序列,则可以认为序列 $X=\{x_t\}$ 和 $Y=\{y_t\}$ 具有协整关系,同样可进行格兰杰因果检验。

2.3 格兰杰因果检验

两个时间序列 X 、 Y 之间是否存在因果关系可通过格兰杰因果关系检验法进行判别(曹永福, 2006)。从统计学角度来看,当 X 和 Y 两个时间序列的相关系数达到一定的显著性水平时,可以认为 X 和 Y 之间存在因果关系。设2个平稳序列 $X=\{x_t\}$ 和 $Y=\{y_t\}$,首先估计2个时间序列之间是否具有因果解释能力,然后引入最优滞后阶,通过格兰杰因果检验法判断时间序列 X 是否可以影响时间序列 Y 。其回归模型为:

$$y_t = \alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i x_{t-i} + \sum_{i=1}^n \gamma_i y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (2)$$

式中: β_i 为时序数据 X 的趋势项; γ_i 为时序数据 Y 的趋势项; n 为变量 X 和 Y 的最大滞后阶; α 为常数

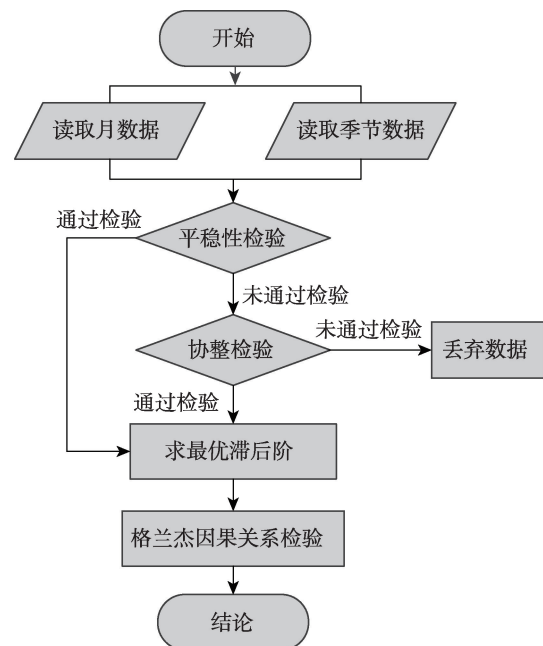


图2 研究路线

Fig.2 Study roadmap

项; ε_t 为残差项。假定原假设 H_0 : X 不是引起 Y 的格兰杰原因($H_0: \forall t \in (1, 2, \dots, n), \gamma_t = 0$);备择假设 H_1 : X 是引起 Y 的格兰杰原因($H_1: \exists t \in (1, 2, \dots, n), \gamma_t \neq 0$)。当不考虑 X 的情况下(即假定 $\beta_t = 0$),建立回归模型的残差平方和 RS_R ;当考虑 X 的情况下(即假定 $\beta_t \neq 0$),建立回归模型的残差平方和 RS_U 。构造 F 统计量:

$$F = \frac{RS_R - RS_U}{RS_U} \times \frac{N - 2n - 1}{n} \sim F(n, N - 2n - 1) \quad (3)$$

取置信水平为95%,若 $F \geq F_{0.05}(n, N - 2n - 1)$,则存在 $t \in (1, 2, \dots, n)$,使得 $\gamma_t \neq 0$,即应该拒绝原假设 H_0 ,认为 X 是引起 Y 的格兰杰原因,反之则不能认为 X 是引起 Y 的格兰杰原因。

3 结果与分析

3.1 平稳性分析

采用格兰杰因果检验法研究青藏高原植被NDVI与平均气温、降水量等影响因子之间的动态变化关系,首先必须检验青藏高原NDVI、TEMP和PREC三个时间序列的平稳性。对于任意2个时间序列平稳性分析包括平稳性检验与协整检验,平稳性检验采用的方法为ADF检验,协整检验采用E-G两步法。

基于月尺度和季节尺度对青藏高原每一个像素点的NDVI与TEMP、NDVI与PREC进行平稳性分析,假定原假设 H_0 :两个时间序列均呈现平稳性;备择假设 H_1 :至少一个时间序列呈现非平稳性。分别对4种时序关系进行ADF检验,若结果拒绝 H_0 ,则可以进行格兰杰因果检验,否则需要判断2个序列是否同阶单整,若为同阶单整序列,需进行协整检验;当结果拒绝 H_0 ,同样可进行格兰杰因果检验。

不同尺度的研究得出,月尺度下的平稳性分析中拒绝比例都要高于季节尺度,分别高出35.12%和26.71%,说明基于月尺度下的NDVI与TEMP、NDVI与PREC达到平稳性的像素点比季节尺度下的多(表1)。NDVI与TEMP、NDVI与PREC在2个尺度下拒绝比例都要高于接受比例,基于月尺度的研

究尤为明显。说明基于青藏高原绝大多数像素点的植被NDVI与平均气温、降水量等影响因子之间可以进行格兰杰因果检验,其中月尺度下的NDVI与TEMP、NDVI与PREC可进行格兰杰因果检验的比例分别为99.13%和98.68%,季节尺度下可进行格兰杰因果检验的比例分别为64.01%和71.97%。

3.2 平均气温、降水量对NDVI的滞后影响

格兰杰因果关系检验对滞后阶有着极强的敏感性,已有研究表明虽然任一滞后阶都可以进行格兰杰因果检验,但是基于最优滞后阶进行格兰杰因果检验的意义更大(易会文,2006)。本文通过建立VAR模型,基于月尺度和季节尺度对青藏高原每一个像素点的NDVI与TEMP、NDVI与PREC进行最优滞后阶选取,即选取出平均温度对NDVI、降水量对NDVI的最优滞后影响,采用赤池信息量(Akaike information criterion, AIC)和施瓦兹(Schwarz Criterion, SC)最小化准则来判定最优滞后阶(Ferrarini, 2002; Aybar et al, 2002; 周建, 2005)。不同尺度下NDVI与TEMP、NDVI与PREC的最优滞后阶空间分布如图3所示。从月尺度来看,青藏高原大部分地区平均温度对NDVI、降水量对NDVI的滞后影响都集中在第12~13个月,平均温度对NDVI在北部少数地区滞后影响在13个月之后,在南部少数地区滞后影响在9~11个月。降水量对NDVI在东部少数地区滞后影响在6~7个月,在南部少数地区滞后影响在3~5个月。从季节尺度来看,青藏高原东、西部地区平均温度对NDVI的滞后影响在第3个季度,中部地区滞后影响在第4、6个季度,南部少部分地区滞后影响在第6个季度。而在降水量对NDVI的滞后影响分析中,青藏高原东南部地区滞后影响在第3个季度,中部地区滞后影响在第4、6个季度。

基于不同尺度反映青藏高原平均气温、降水量对NDVI的滞后影响效应,其最优滞后阶频数折线图如图4。可以看出,月尺度下平均温度对NDVI、降水量对NDVI的滞后影响都集中在第12~13个月,而季节尺度下平均温度对NDVI、降水量对ND-

表1 平稳性分析结果
Tab.1 Count of stationarity analysis (%)

是否拒绝 H_0	月尺度		季节尺度	
	NDVI与TEMP	NDVI与PREC	NDVI与TEMP	NDVI与PREC
拒绝	99.13	98.68	64.01	71.97
接受	0.87	1.32	35.99	28.03

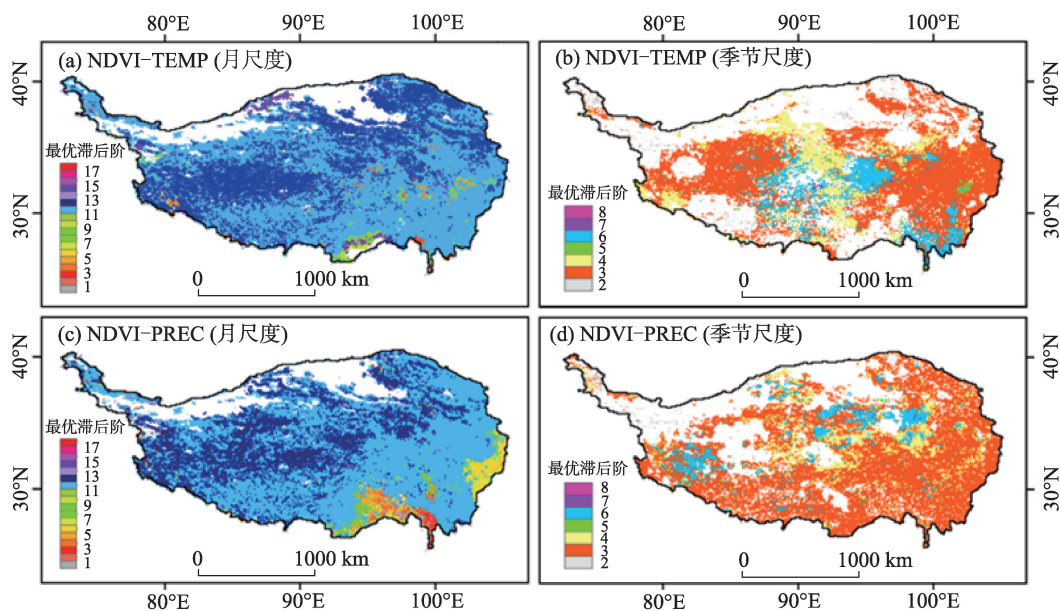


图3 最优滞后阶空间分布

Fig.3 Spatial distribution of optimal lag order

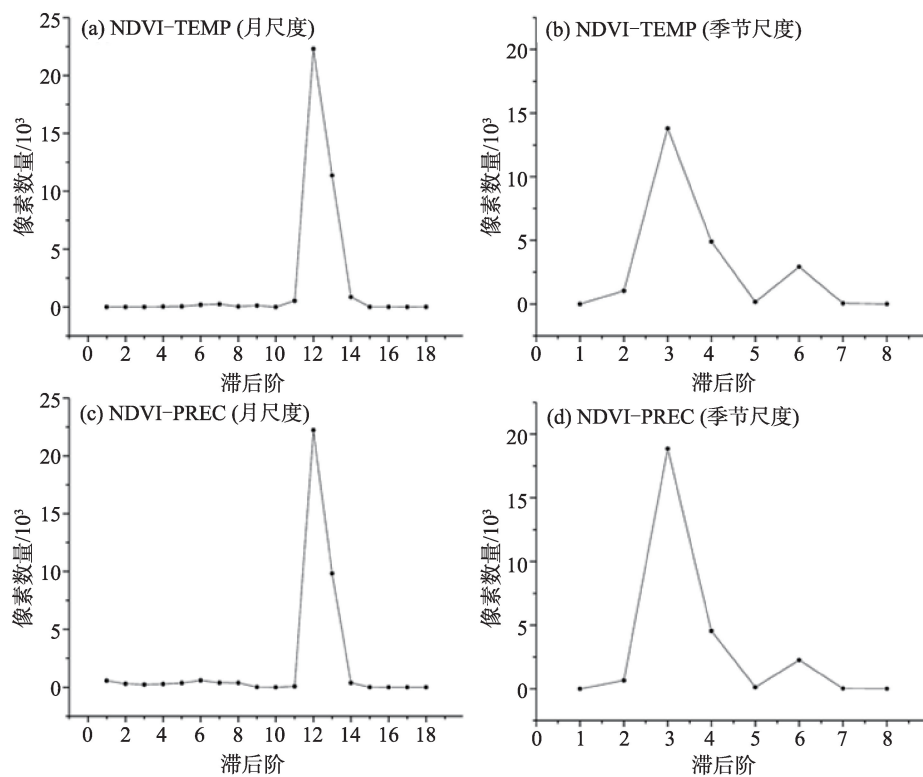


图4 最优滞后阶频数

Fig.4 Frequency of optimal lag order

VI的滞后影响主要分布在第3~4和6个季度。由表2可以看出,月尺度下平均温度对NDVI、降水量对NDVI滞后阶在第12~13个月占比分别高达94.28%和90.02%,而季节尺度下平均温度对NDVI、降水

量对NDVI滞后阶在第3~4和6个季度的占比分别为94.56%和96.85%。

基于荒漠草原、典型草原和草甸3种植被类型探讨青藏高原平均气温、降水量对NDVI的滞后影

表2 最优滞后阶频率
Tab.2 Proportion of optimal lag order (%)

滞后阶	月尺度		季节尺度	
	NDVI 与 TEMP	NDVI 与 PREC	NDVI 与 TEMP	NDVI 与 PREC
1	0	1.57	0	0
2	0	0.84	4.51	2.54
3	0	0.66	60.24	71.25
4	0.08	0.79	21.46	17.15
5	0.12	1.02	0.72	0.49
6	0.52	1.63	12.84	8.45
7	0.67	1.08	0.22	0.11
8	0.10	1.07	0.01	0
9	0.32	0.03		
10	0	0		
11	1.46	0.21		
12	62.45	62.43		
13	31.83	27.59		
14	2.39	1.06		
15	0.02	0.02		
16	0.03	0		
17	0	0		
18	0.01	0		

响,最优滞后阶频数折线图如图 5 所示。不难看出,不管是月尺度还是季节尺度,其平均温度对 NDVI、降水量对 NDVI 的滞后影响都与图 4 高度相似,月尺度下平均温度对 NDVI、降水量对 NDVI 的滞后影响较多集中在第 12~13 个月,季节尺度下滞后影响主要在第 3~4 和 6 个季度。在月尺度下,青藏高原中 TEMP-NDVI 和 PREC-NDVI 的像素数量高度相似,滞后阶为 12 的像素数量中草甸>典型草原>荒漠草原,而在滞后阶为 13 的像素数量中典型草原>草甸>荒漠草原。而在季节尺度下,TEMP-NDVI 和 PREC-NDVI 像素数量的异质性较大,草甸和典型草原滞后阶在第 3 个季度最多,在第 4、6 个季度较多,而荒漠草原的滞后阶大部分集中在第 3 个季度。此外,3 种植被类型在滞后阶为 5 时同时趋向于 0,与图 4 高度相似。

3.3 NDVI 与平均气温的因果关系分析

基于多个尺度对青藏高原植被 NDVI 与平均气温进行格兰杰因果关系检验,分别包括月尺度和季节尺度下的 $Y_{NDVI}-X_{TEMP}$ 、 $Y_{TEMP}-X_{NDVI}$ 。假定原假设 H_0 : 时间序列 X 不是引起时间序列 Y 变化的格兰杰原因;备择假设 H_1 : 时间序列 X 是引起时间序列 Y 变化的格兰杰原因。由于 2 个时间序列具有平稳性是

格兰杰因果检验的必要条件,因此对青藏高原中检验出具有平稳性的像素进行格兰杰因果检验,其显著性水平 P 的空间分布如图 6 所示。在月尺度下,青藏高原绝大多数地区中 $Y_{NDVI}-X_{TEMP}$ 和 $Y_{TEMP}-X_{NDVI}$ 的 $P < 0.05$; $Y_{TEMP}-X_{NDVI}$ 的 $P > 0.05$ 的区域有青藏高原东南部部分地区。在季节尺度下,青藏高原中部地区中 $Y_{NDVI}-X_{TEMP}$ 的 $P > 0.05$,其他地区均小于 0.05;而 $Y_{TEMP}-X_{NDVI}$ 的显著性水平在东部和西部部分地区小于 0.05,其他地区均大于 0.05。

假设在 95% 的置信水平上拒绝原假设 H_0 ,即 $P < 0.05$ 时认为 X 是引起 Y 变化的格兰杰原因,则 NDVI 与平均气温的格兰杰效应区如图 7 所示。可以看出:月尺度下,在青藏高原绝大多数地区,平均气温是引起 NDVI 变化的格兰杰原因;在大多数地区 NDVI 也是引起平均气温变化的格兰杰原因,但在高原东南部部分地区 NDVI 不是引起平均气温变化的格兰杰原因。在季节尺度上,在青藏高原中部地区,平均气温不是引起 NDVI 变化的格兰杰原因,除中部外其他地区平均气温是引起 NDVI 变化的格兰杰原因;而在东部和西部部分地区,NDVI 是引起平均气温变化的格兰杰原因,其他地区 NDVI 不是引起平均气温变化的格兰杰原因。由表 3 可得,月

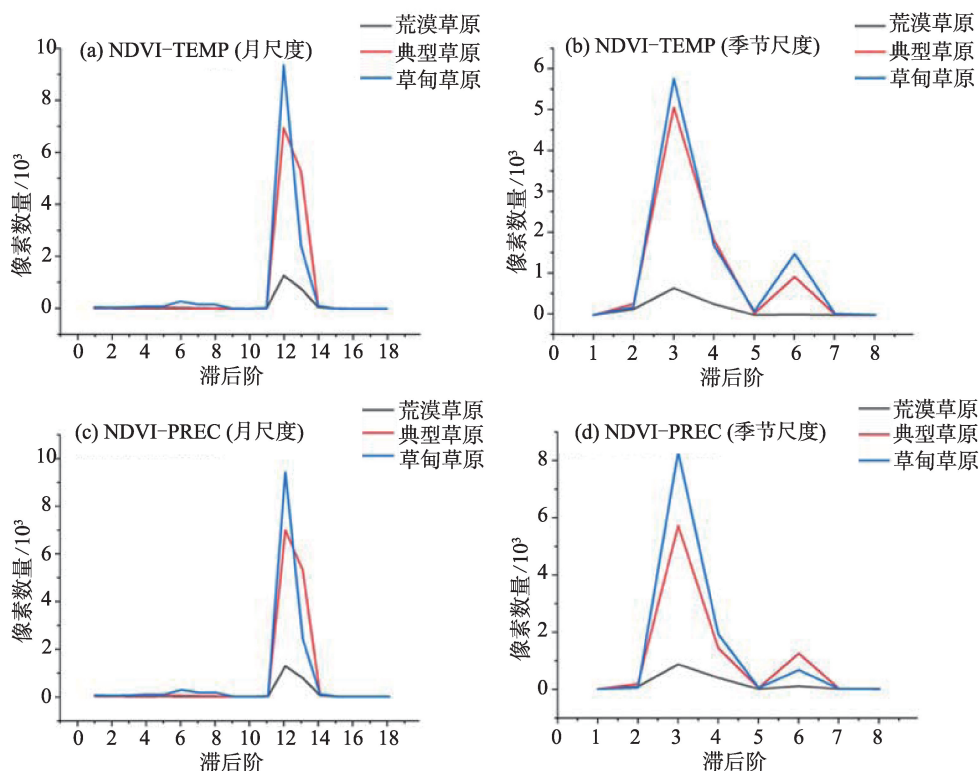


图5 3种植被类型滞后阶频数

Fig.5 Frequency of three types of vegetation

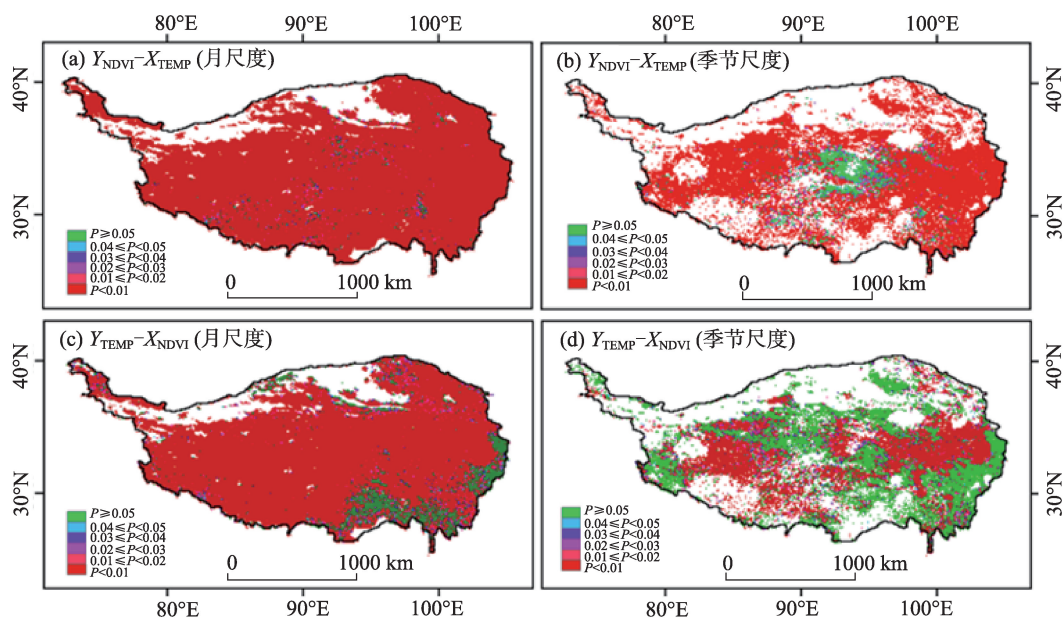


图6 NDVI与平均气温格兰杰原因的显著性水平

Fig.6 P value of Granger causality test between NDVI and temperature

尺度下平均气温是引起NDVI变化的格兰杰原因(占98.95%),NDVI是引起平均气温变化的格兰杰原因(占89.05%);季节尺度下平均气温是引起NDVI变化的格兰杰原因(占92.03%),认为NDVI是引起平

均气温变化的格兰杰原因仅占50.55%。

3.4 NDVI与降水量的因果关系分析

基于多个尺度对青藏高原植被NDVI与降水量进行格兰杰因果关系检验,分别包括月尺度和季节

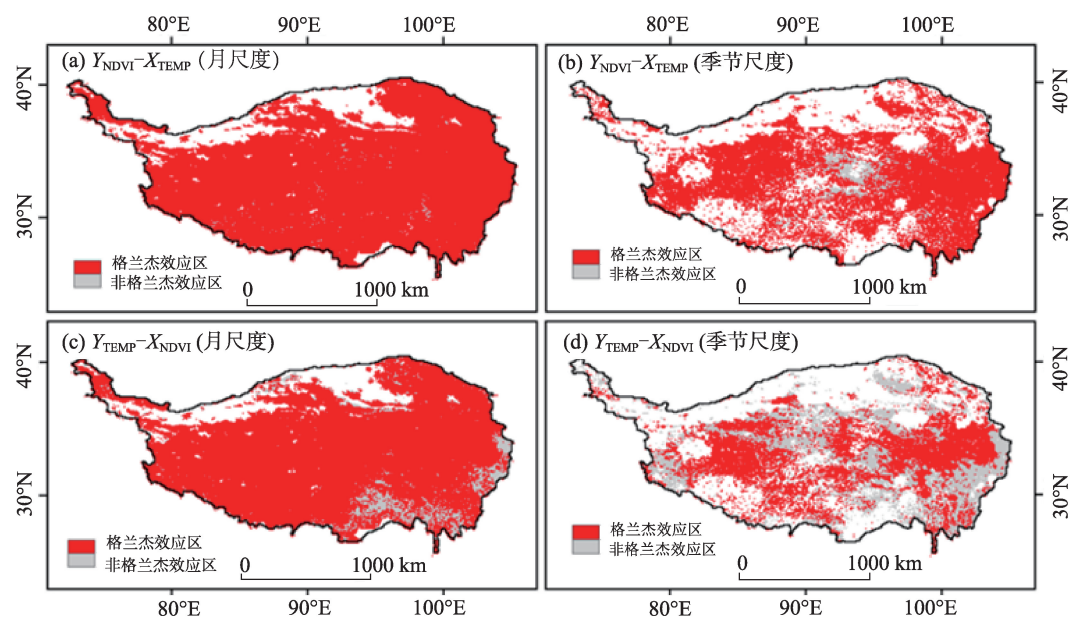


图7 NDVI与平均气温的格兰杰效应区
Fig.7 Granger effect area between NDVI and temperature

表3 NDVI与平均气温的格兰杰效应区频率
Tab.3 Proportion of Granger effect area on the Tibetan Plateau between NDVI and Temperature (%)

是否拒绝 H_0	月尺度		季节尺度	
	$Y_{NDVI}-X_{TEMP}$	$Y_{TEMP}-X_{NDVI}$	$Y_{NDVI}-X_{TEMP}$	$Y_{TEMP}-X_{NDVI}$
拒绝	98.95	89.05	92.03	50.55
接受	1.05	10.95	7.97	49.45

尺度下的 $Y_{NDVI}-X_{PREC}$ 、 $Y_{PREC}-X_{NDVI}$ 。假定原假设 H_0 : 时间序列 X 不是引起时间序列 Y 变化的格兰杰原因, 备择假设 H_1 : 时间序列 X 是引起时间序列 Y 变化的格兰杰原因。其显著性水平 P 的空间分布如图 8 所示。在月尺度下, 青藏高原东北和西北地区中 $Y_{NDVI}-X_{PREC}$ 的 $P < 0.05$, 南部大部分地区 $P > 0.05$; 而 $Y_{PREC}-X_{NDVI}$ 的 P 值在大部分地区中均小于 0.05, 仅在东南部略有少许地区大于 0.05。在季节尺度下, 青藏高

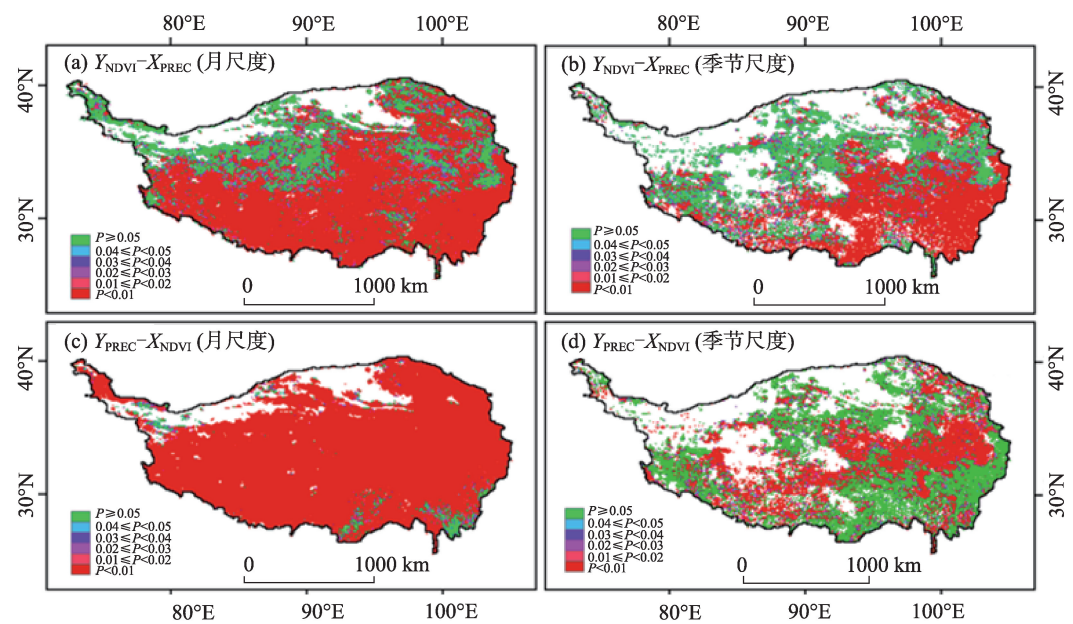


图8 NDVI与降水量格兰杰原因的显著性水平
Fig.8 P value of Granger causality test between NDVI and precipitation

原东部和西北部地区中 $Y_{\text{NDVI}}-X_{\text{PREC}}$ 的 $P > 0.05$, 在东南部小于 0.05; 而 $Y_{\text{PREC}}-X_{\text{NDVI}}$ 的显著性水平在高原中东部地区小于 0.05, 除中东部外其他地区均大于 0.05。

假设在 95% 的置信水平上拒绝原假设, 即 $P < 0.05$ 时认为 X 是引起 Y 变化的格兰杰原因, 则 NDVI 与降水量的格兰杰效应区如图 9 所示。由图可知: 月尺度下, 青藏高原东北和西北地区降水量是引起 NDVI 变化的格兰杰原因, 在南部大部分地区降水量不是引起 NDVI 变化的格兰杰原因; 而在高原大部分地区, NDVI 是引起降水量变化的格兰杰原因, 仅在东南部略有少许地区 NDVI 不是引起降水量变化的格兰杰原因。季节尺度下, 青藏高原东部和西北部地区, 降水量不是引起 NDVI 变化的格兰杰原因, 东南部地区, 降水量是引起 NDVI 变化的格兰杰原因; 而在高原中东部地区则 NDVI 是引起降水量变化的格兰杰原因, 除中东部外其他地区的 NDVI 不是引起降水量变化的格兰杰原因。由表 4 可得, 月尺度下降水量是引起 NDVI 变化的格兰杰原因 (占 72.05%), NDVI 是引起降水量变化的格兰杰原因 (占 94.86%); 季节尺度下降水量是引起 NDVI 变化的格兰杰原因 (占 61.43%), NDVI 是引起降水量变化的格兰杰原因 (占 48.98%)。

4 讨论

本文通过格兰杰因果检验分析植被 NDVI 与平均气温和降水量变化的关系。相较于传统的相关分析法, 格兰杰因果检验能克服由自身变化带来的伪回归, 已有不少研究证实将格兰杰因果检验用于气候学研究的有效性 (郑祚芳等, 2012; He et al, 2017)。研究表明, 当高原植被遭到大面积破坏后, 其部分地区降雨量会明显减少, 进而可能会导致荒漠化加剧, 当该地区变为荒漠时, 其地表气温将略有增加 (Wang et al, 2002; 范广洲等, 2002; 范广洲等, 2008)。以往应用说明了本文应用格兰杰因果检验探索植被 NDVI 与气温、降水关系的适用性。而实际研究数据往往并不完全满足所需要的统计要求, 因此格兰杰因果检验在某种意义上存在一定程度的不确定性 (刘劲龙等, 2013)。例如在青海地区 2008 年夏季, 该时期气温偏高, 植被正处于生长旺盛期, 但是由于降水分布不均匀, 导致大部分地区植被长势较差 (严应存等, 2009), 这些研究表明了

青藏高原植被与气候因子相互作用的复杂性。

由于月尺度下绝大多数温度、降水量对 NDVI 影响的滞后阶为 12, 故本节提取出青藏高原较为典型的 1 月和 7 月的平均温度、降水量及 NDVI, 分析平均温度、降水量和 12 个月之后的 NDVI 之间的相关关系。由于青藏高原大多数区域在 1 月份基本无降水量, 相关性分析无效, 故使用 1 月份和 7 月份的平均温度与 NDVI 以及 7 月份的降水量与 NDVI 进行 Spearman 相关性分析 (图 10)。结果表明, 温度和 NDVI 的相关性分析中, 7 月份的正相关性大于 1 月份, 7 月份的负相关性也大于 1 月份。图 10a 中, 1 月份青藏高原北部和南部部分区域的正相关性较为明显, 东部区域负相关程度明显, 中部少数区域相关程度不显著; 7 月份 (图 10b) 青藏高原北部区域中温度和 NDVI 的正相关性程度较高, 中部及北部略有小部分区域负相关特征明显, 西南部区域则呈现出较低的相关性。图 10c 为青藏高原 7 月份的降水量与 NDVI 的相关关系, 从图中可以看出, 西北部区域中降水量与 NDVI 呈现出较高的相关性, 其中北部区域正相关性显著, 西部区域负相关性显著, 中部和南部少部分区域相关性较低。

通过对部分典型月份 (1 月、7 月) 的相关性分析可以看出, 平均温度和降水量在一定程度上与 NDVI 呈现出明显的相关性, 但是仍然有一些区域的相关性不够显著, 这也体现了青藏高原植被 NDVI 与气候因子相互作用的复杂性。因此基于格兰杰因果关系检验, 利用不同尺度研究植被 NDVI 与平均温度、降水量间的因果关系, 在探讨青藏高原植被 NDVI 对气候变化响应机理方面具有重要意义。

5 结论

本文在青藏高原 1982—2012 年 GIMMS NDVI3g 遥感数据以及平均气温、降水量数据的基础上, 利用格兰杰因果检验方法, 从月尺度和季节尺度分析高原植被 NDVI 与平均气温、降水量之间的因果关系。基于最优滞后阶进行格兰杰因果检验的方法能够有效揭示植被 NDVI 对气候变化的响应。研究主要得出以下结论:

(1) 平稳性评价中, NDVI 与平均气温、NDVI 与降水量在月尺度和季节尺度下拒绝比例都要高于接受比例, 基于月尺度的研究尤为明显。其中月尺度下可进行格兰杰因果检验的比例分别为 99.13% 和 98.68%, 季节尺度下可进行格兰杰因果检验的比

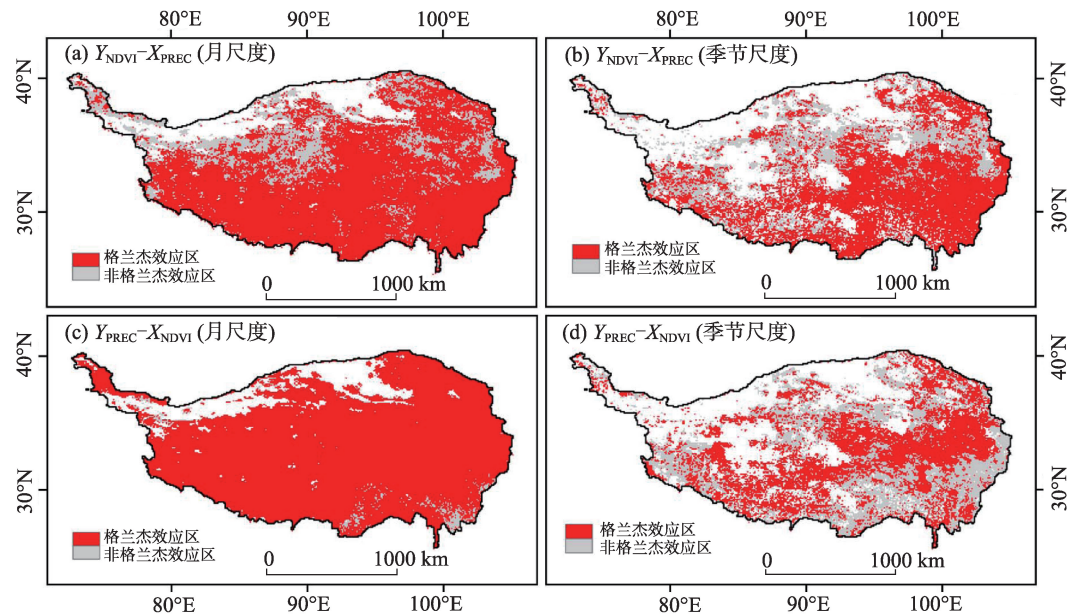


图9 NDVI与降水量的格兰杰效应区

Fig.9 Granger effect area between NDVI and precipitation

表4 NDVI与降水量的格兰杰效应区频率

Tab.4 Proportion of Granger effect area on the Tibetan Plateau between NDVI and precipitation (%)

是否拒绝 H_0	月尺度		季节尺度	
	$Y_{NDVI}-X_{PREC}$	$Y_{PREC}-X_{NDVI}$	$Y_{NDVI}-X_{PREC}$	$Y_{PREC}-X_{NDVI}$
拒绝	72.05	94.86	61.43	48.98
接受	27.95	5.14	38.57	51.02

例分别为64.01%和71.97%。

(2) 月尺度下平均气温对NDVI、降水量对NDVI的滞后影响都集中在第12~13个月,而季节尺度下的滞后影响主要分布在第3~4和第6个季度。其中荒漠草原、典型草原和草甸3种草原植被类型月尺度下TEMP-NDVI和PREC-NDVI的像素数量高度相似,在季节尺度下像素数量的异质性较大。

(3) 月尺度下,在青藏高原绝大多数地区平均气温是引起NDVI变化的格兰杰原因(约98.95%);大多数地区中NDVI也是引起平均气温变化的格兰杰原因(约89.05%),但在高原东南部部分地区内的NDVI不是引起平均气温变化的格兰杰原因。在季节尺度上,在青藏高原中部地区,平均气温不是引起NDVI变化的格兰杰原因,除中部外其他地区平均气温是引起NDVI变化的格兰杰原因(约92.03%);而在东部和西部部分地区内的NDVI是引起平均气温变化的格兰杰原因(约50.55%),其他地区内的NDVI不是引起平均气温变化的格兰杰原因。

(4) 月尺度下,在青藏高原东北和西北地区中降

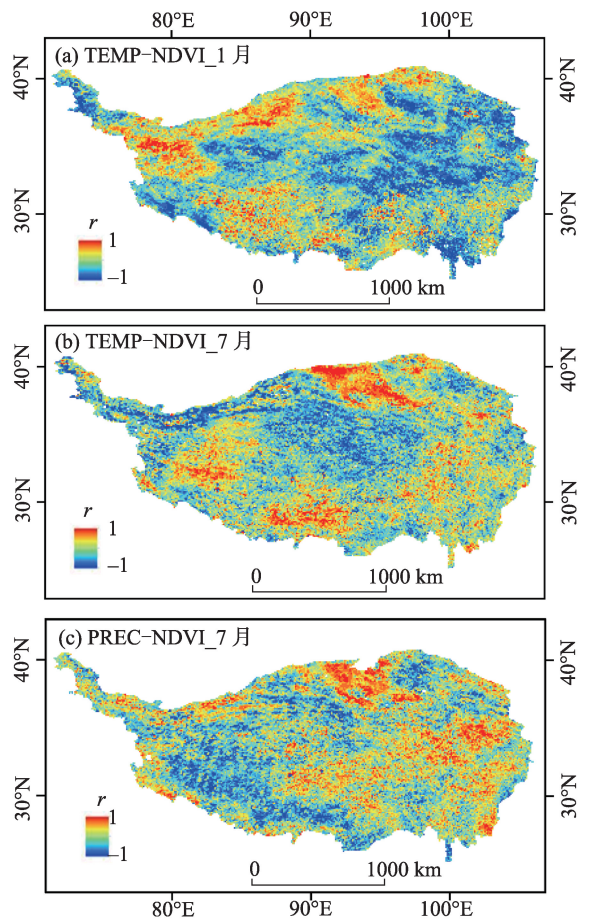


图10 典型月份的平均温度、降水量和NDVI的Spearman相关分析

Fig.10 Spearman correlation analysis of temperature and NDVI, precipitation and NDVI in typical months

水量是引起NDVI变化的格兰杰原因(约72.05%),在南部大部分地区降水量不是引起NDVI变化的格兰杰原因;而在高原大部分地区内的NDVI是引起降水量变化的格兰杰原因(约94.86%),仅在东南部少部分地区的NDVI不是引起降水量变化的格兰杰原因。季节尺度下,青藏高原东南部地区中降水量是引起NDVI变化的格兰杰原因(约61.43%),东部和西北部地区中降水量不是引起NDVI变化的格兰杰原因;而在高原中东部地区的NDVI是引起降水量变化的格兰杰原因(约48.98%),除中东部外其他地区的NDVI不是引起降水量变化的格兰杰原因。

参考文献(References)

- 曹鸿兴, 郑艳, 虞海燕, 等. 2008. 气候检测与归因的格兰杰检验法 [J]. 气候变化研究进展, 4(1): 37-41. [Cao H X, Zheng Y, Yu H Y, et al. 2008. Granger causality test for detection and attribution of climate change. *Advances in Climate Change Research*, 4(1): 37-41.]
- 曹永福. 2006. 格兰杰因果性检验评述 [J]. 数量经济技术经济研究, 23(1): 155-160. [Cao Y F. 2006. A comment on Granger causality test. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 23(1): 155-160.]
- 范广洲, 程国栋. 2002. 影响青藏高原植被生理过程与大气CO₂浓度及气候变化的相互作用 [J]. 大气科学, 26(4): 509-518. [Fan G Z, Cheng G D. 2002. Interactions between physiological process of the Tibetan Plateau vegetation and CO₂ concentration and climate change. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 26(4): 509-518.]
- 范广洲, 华维, 黄先伦, 等. 2008. 青藏高原植被变化对区域气候影响研究进展 [J]. 高原山地气象研究, 28(1): 72-80. [Fan G Z, Hua W, Huang X L, et al. 2008. Advances of the study on influence of vegetation change over Tibetan Plateau on regional climate. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 28(1): 72-80.]
- 方锋, 孙兰东, 郭俊琴, 等. 2014. 中国西北地区城市经济发展对降水趋势的影响 [J]. 自然资源学报, 29(11): 1878-1887. [Fang F, Sun L D, Guo J Q, et al. 2014. The impact of urban economic development on precipitation changing trends over northwestern China. *Journal of Natural Resources*, 29(11): 1878-1887.]
- 宫攀, 陈仲新. 2009. 基于MODIS数据的东北地区植被物候参数提取 [J]. 土壤通报, 40(2): 213-217. [Gong P, Chen Z X. 2009. Regional vegetation phenology monitoring based on MODIS. *Chinese Journal of Soil Science*, 40(2): 213-217.]
- 郭燕枝, 刘旭. 2011. 基于格兰杰因果检验和典型相关的农民收入影响因素研究 [J]. 农业技术经济, (10): 92-97. [Guo Y Z, Liu X. 2011. Research on the factors affecting farmers' income based on Granger causality test and typical correlation. *Journal of Agrotechnical Economics*, (10): 92-97.]
- 侯美亨, 赵海燕, 王笋, 等. 2013. 基于卫星遥感的植被NDVI对气候变化响应的研究进展 [J]. 气候与环境研究, 18(3): 353-364. [Hou M T, Zhao H Y, Wang Z, et al. 2013. Vegetation responses to climate change by using the satellite-derived normalized difference vegetation index: A review. *Climatic and Environmental Research*, 18(3): 353-364.]
- 孔冬冬, 张强, 黄文琳, 等. 2017. 1982—2013年青藏高原植被物候变化及气象因素影响 [J]. 地理学报, 72(1): 39-52. [Kong D D, Zhang Q, Huang W L, et al. 2017. Vegetation phenology change in Tibetan Plateau from 1982 to 2013 and its related meteorological factors. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 39-52.]
- 李瑞萍, 郭雪梅, 李智才. 2015. 影响山西省气温变化的可能原因分析与检验 [J]. 气象与环境科学, 38(2): 77-81. [Li R P, Guo X M, Li Z C. 2015. Analysis and test about possible reasons for temperature change in Shanxi Province. *Meteorological and Environmental Sciences*, 38(2): 77-81.]
- 李晓兵, 王瑛, 李克让. 2000. NDVI对降水季节性和年际变化的敏感性 [J]. 地理学报, 55(S1): 82-89. [Li X B, Wang Y, Li K R. 2000. NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in northern China. *Acta Geographica Sinica*, 55(S1): 82-89.]
- 梁四海, 陈江, 金晓媚, 等. 2007. 近21年青藏高原植被覆盖变化规律 [J]. 地球科学进展, 22(1): 33-40. [Liang S H, Chen J, Jin X M, et al. 2007. Regularity of vegetation coverage changes in the Tibetan Plateau over the last 21 years. *Advances in Earth Science*, 22(1): 33-40.]
- 刘劲龙, 徐刚, 杨娟. 2013. 利用格兰杰因果检验法分析重庆极端气温事件及其与平均气温和降水量变化的关系 [J]. 中国农业气象, 34(2): 236-242. [Liu J L, Xu G, Yang J. 2013. Extreme temperature events in chongqing and their relation with the mean temperature and precipitation change based on Granger causality test. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 34(2): 236-242.]
- 刘双韵, 张丽, 王翠珍, 等. 2014. 基于MODIS数据的青藏高原植被物候变化趋势研究(2000年—2010年) [J]. 遥感信息, 29(6): 25-30. [Liu S Y, Zhang L, Wang C Z, et al. 2014. Vegetation phenology in the Tibetan Plateau using MODIS data from 2000 to 2010. *Remote Sensing Information*, 29(6): 25-30.]
- 刘亚龙, 王庆, 毕景芝, 等. 2010. 基于Mann-Kendall方法的

- 胶东半岛海岸带归一化植被指数趋势分析[J]. 海洋学报, 32(3): 79-87. [Liu Y L, Wang Q, Bi J Z, et al. 2010. The analysis of NDVI trends in the coastal zone based on Mann-Kendall test: A case in the Jiaodong Peninsula. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(3): 79-87.]
- 马晓芳, 陈思宇, 邓婕, 等. 2016. 青藏高原植被物候监测及其对气候变化的响应[J]. 草业学报, 25(1): 13-21. [Ma X F, Chen S Y, Deng J, et al. 2016. Vegetation phenology dynamics and its response to climate change on the Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 25(1): 13-21.]
- 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2012. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 67(9): 1255-1268. [Mu S J, Li J L, Chen Y Z, et al. 2012. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001–2010. *Acta Geographica Sinica*, 67(9): 1255-1268.]
- 孙颖, 尹红, 田沁花, 等. 2013. 全球和中国区域近50年气候变化检测归因研究进展[J]. 气候变化研究进展, 9(4): 235-245. [Sun Y, Yi H, Tian X H, et al. 2013. Recent progress in studies of climate change detection and attribution in the globe and China in the past 50 years. *Climate Change Research*, 9(4): 235-245.]
- 王丰龙, 刘云刚. 2013. 中国城市建设用地扩张与财政收入增长的面板格兰杰因果检验[J]. 地理学报, 68(12): 1595-1606. [Wang F L, Liu Y G. 2013. Panel Granger test on urban land expansion and fiscal revenue growth in China's prefecture-level cities. *Acta Geographica Sinica*, 68(12): 1595-1606.]
- 严应存, 肖建设, 刘宝康. 2009. 青海省2008年牧草长势综述[J]. 青海气象, (1): 47-50. [Yan Y C, Xiao J S, Liu B K. 2009. Summary of pasture growth in Qinghai Province in 2008. *Journal of Qinghai Meteorology*, (1): 47-50.]
- 易会文. 2006. 格兰杰因果检验用法探讨[J]. 中南财经政法大学研究生学报, (5): 34-36. [Yi H W. 2006. Discussion on how to do Granger causality test. *Journal of the Postgraduate of Zhongnan University of Economics and Law*, (5): 34-36.]
- 郑祚芳, 张秀丽, 高华. 2012. 北京气候变暖与主要极端气温指数的归因分析[J]. 热带气象学报, 28(2): 277-282. [Zheng Z F, Zhang X L, Gao H. 2012. An attribution analysis between the climate warming and extreme temperature indices in Beijing in the past 49 years. *Journal of Tropical Meteorology*, 28(2): 277-282.]
- 周建. 2005. 时间序列建模中滞后阶数选取准则函数的检测效力及其特征[J]. 系统工程理论与实践, 25(11): 20-27. [Zhou J. 2005. The researches on the test power and features on the lagging number selecting criteria about the time series models. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 25(11): 20-27.]
- 朱玉祥, 赵亮. 2014. 中国近百年地面温度变化自然因子的因果链分析[J]. 气象科技进展, 4(3): 36-40. [Zhu X Y, Zhao L. 2014. The causal chain analysis of natural factors for China surface temperature variation during the recent 100 years. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 4(3): 36-40.]
- Aybar A, Iftar A. 2002. Overlapping decompositions and expansions of Petri nets [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(3): 511-515.
- Ding M J, Zhang Y L, Sun X M, et al. 2013. Spatiotemporal variation in alpine grassland phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau from 1999 to 2009 [J]. *Science Bulletin*, 58(3): 396-405.
- Ferrarini L. 2002. On the reachability and reversibility problems in a class of Petri nets [J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 24(10): 1474-1482.
- Gülen S G. 1996. Is OPEC a cartel? Evidence from cointegration and causality tests [J]. *Energy Journal*, 17(2): 43-57.
- He B, Chen A, Jiang W, et al. 2017. The response of vegetation growth to shifts in trend of temperature in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 27(7): 801-816.
- Ichii K, Kawabata A, Yamaguchi Y. 2002. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990 [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 23(18): 3873-3878.
- Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300: 1560-1563.
- Piao S, Mohammat A, Fang J, et al. 2006. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China [J]. *Global Environmental Change*, 16(4): 340-348.
- Wang L N, Zheng Q L, Song Q L. 2002. Influences of surface conditions over the Tibetan Plateau on China summer circulation [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 25(2): 186-191.
- Yang K, Wu H, Qin J, et al. 2014. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review [J]. *Global and Planetary Change*, 112: 79-91.
- Yang K, Ye B, Zhou D, et al. 2011. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau [J]. *Climatic change*, 109(3-4): 517-534.
- Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, et al. 2012. Monitoring vegetation phenology using MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 471-475.

Zhou D W, Fan G Z, Huang R H, et al. 2007. Interannual variability of the normalized difference vegetation index on

the Tibetan Plateau and its relationship with climate change [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24(3): 474-484.

Detecting Granger effect of vegetation response to climatic factors on the Tibetan Plateau

ZHOU Yuke

(Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Nature Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Due to the complex plateau climate and unique geographical environment, the vegetation responds strongly to climatic shifts on the Tibetan Plateau. Therefore, it is of great significance to discuss the causality between vegetation and climate changes. Using the meteorological dataset including average temperature and precipitation and the GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) NDVI3g remote sensing data from 1982 to 2012 to analyze the causal relationship between NDVI and its influencing factors at the monthly and seasonal scales by the Granger causality test on the pixel level, this study examined the response of plateau vegetation (mainly grassland) to average temperature and precipitation change and causality. The results show that: 1) The stationarity proportion of vegetation NDVI and average temperature (99.13%), NDVI and precipitation (98.68%) at the monthly scale was higher than at the seasonal scale (64.01% and 71.97% respectively). 2) Lagging effects of average temperature on NDVI and precipitation on NDVI were around 12-13 months at the monthly scale and mainly 3, 4, and 6 quarters at the seasonal scale on the Tibetan Plateau. The three vegetation types—desert steppe, typical steppe, and meadow steppe—showed high similarities at the monthly scale, while greater heterogeneity was observed at the seasonal scale. 3) For 98.95% of the area covered by vegetation on the Tibetan Plateau, it is believed that average temperature change was the Granger cause of NDVI change, while for 89.05% of the region (except for the southeast), NDVI change was supposed to be the Granger cause of average temperature change at the monthly scale. At the seasonal scale, average temperature change was considered the Granger cause of NDVI change in 92.03% of the region (except for the central part of the Tibetan Plateau). Nevertheless, in the eastern and western parts of the plateau (about 50.55% of the region), NDVI change was interpreted as the Granger cause of average temperature change. 4) In the northeast and northwest of the region (about 98.95% of the area) precipitation change was believed to be the Granger cause of NDVI change, while in 94.86% of the region (except for a few areas in the southeast) NDVI change was supposed to be the Granger cause of precipitation change at the monthly scale. At the seasonal scale, precipitation change was considered the Granger cause of NDVI change in the southeastern part of the plateau (61.43% of the area). Nevertheless, in the central and eastern parts of the region (about 48.98% of the area), NDVI change was interpreted as the Granger cause of precipitation change. Overall, climatic factors on the Tibetan Plateau have an interactive relationship with vegetation and each can cause a Granger effect to the other, with climatic factors having stronger Granger effect on vegetation than the other way round. The Granger effect region on the Tibetan Plateau at the monthly scale is larger than the Granger effect region at the seasonal scale.

Keywords: Tibetan Plateau; stationarity test; Granger causality; multi-scale analysis; lag order; NDVI; climate change