中国北方干旱半干旱区植被对气候变化和人类活动的响应

李卓忆[1,2,3]，杨庆[1]，马柱国[1,2]，陈亮[1]，张立祯[3]

[1]中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室，北京 100029；

[2]中国科学院大学，北京 100049；

[3]中国农业大学资源与环境学院，北京 100193

摘要 干旱半干旱区是我国的生态环境脆弱的地区之一。伴随着气候变化和人类活动的加剧，近几十年该区域植被正发生着显著的变化，然而，至今还缺乏对植被变化原因的足够认识。本文基于 GLASS (Global Land Surface Satellite)叶面积指数(LAI)、CRU(Climate Research Unit)气温和降水数据，采用相关系数法及残差分析法研究了 1982～2017 年中国干旱半干旱区植被的时空变化特征，并分析了气温、降水及人类活动对 LAI 变化的相对贡献。结果发现：1)干旱半干旱区植被显著改善，仅局部地区有所退化，且植被改善在夏季最为明显；2)在植被变化中，长期趋势变化和年际变化的影响因子不同，前者受气候变暖影响，而后者则主要与降水的波动密切相关；3)春、夏季气温和夏季降水对干旱半干旱地区植被生长的同季节影响显著，而在新疆北部和内蒙中部地区，植被对气候因子有季节尺度的滞后响应；4)植被变化受到人类活动和气候变化的共同作用，不同地区植被变化的主导因子不同。在植被改善地区，气候因子的贡献率约为 59%，人类活动的贡献率约为 41%；而植被退化地区，气候因子的贡献率约为-51%，人类活动贡献率约为-49%。总的来说，近几十年来我国北方干旱半干旱区植被已发生了显著变化，该变化是气温、降水和人类活动多因素综合影响的结果。

关键词 干旱半干旱区，植被变化，气温，降水，人类活动

文章编号 2022048B　　**文献标识码** doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2210.22048

收稿日期 2022-11-08；**网络预出版日期**

作者简介 李卓忆，女，1998 年出生，博士研究生，主要从事干旱半干旱地区气候变化影响研究。E-mail: lizy@tea.ac.cn

通讯作者 杨庆，E-mail: yangqing@tea.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 42130613、42075171、42175176

Funded by National Natural Science Foundation of China(42130613,42075171,42175176)

Responses of vegetation to climate change and human activities in arid and semi-arid areas of northern China

Zhuoyi Li[1, 2, 3], Qing Yang[1*], Zhuguo Ma[1, 2], Liang Chen[1], Lizhen Zhang[3]

1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

3 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

*Corresponding author: Qing Yang, Email: yangqing@tea.ac.cn

Abstract Arid and semi-arid areas are ecologically fragile regions in China. The vegetation in this area has changed significantly over the last few decades as a result of intensifying climate change and human activity. However, the causes of vegetation variation are still not well understood. Based on the Global Land Surface Satellite (GLASS) leaf area index (LAI) and Climate Research Unit (CRU) temperature and precipitation data, the temporal and spatial variation characteristics of vegetation were conducted in arid and semi-arid areas of China from 1982 to 2017.The residual trend analysis method was used to calculate the relative contributions of temperature, precipitation and human activities to variations in LAI. The results showed that: 1) vegetation was significantly improved in most arid and semi-arid areas, which was especially pronounced in the summer; 2) in most areas of the study area, vegetation was positively correlated with temperature and precipitation, with temperature mainly influencing long-term trends in vegetation while precipitation mainly influencing its interannual variation; 3) spring and summer temperature and summer precipitation have a substantial impact on vegetation growth during the same time, while in northern

Xinjiang and central Inner Mongolia, there is a seasonal lag in the response of vegetation to climate factors; 4) vegetation changes were affected by human activities and climate change, and the dominant factors of vegetation change vary by regions. In places with improved vegetation, the contribution of climatic factors and human activities are 59% and 51%, respectively. In areas with degraded vegetation, climatic forcings contribute about -51%, while human activities contribute about -49%. In general, the vegetation in arid and semi-arid areas of northern China has undergone significant changes in recent decades, which is the result of combined effects of climate change and human activities.

Key words Arid and semi-arid areas, vegetation changes, temperature, precipitation, human activities

1 引言

植被是陆地生态系统的重要组成部分，是土壤和大气之间能量和水分交换的桥梁，控制着地球多圈层间的物质循环和能量输送过程(Piao et al., 2011)。地球上种类丰富的植被不仅能美化环境、提供人类生产生活的必需品，更有不可替代的生态调节功能，例如植被的物理及生物生理特性会对局地气候起到调节作用(张佳华等，2002；Peng et al., 2014；Zeng et al., 2017)。另外，植被显著的固碳能力能起到减缓气候变化的作用(Bonan，2008；Tong et al., 2018)。在气候变化背景下，全球及区域植被覆盖范围的扩大与缩小、物候变化、陆地生态系统碳循环等问题都备受关注(Richardson et al., 2013；Piao et al., 2020a）。其中，基于遥感资料分析植被的动态变化已成为全球变化领域的重要研究方向。常见的表征植被变化的数据源有归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)、增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)、净初级生产力(Net Primary Production, NPP)等。上世纪80年代以来，全球植被指数显著增加，植被活动有明显“增强”现象(Myneni et al., 1997；Zhu et al., 2016)，北半球的植被改善尤为明显 (Tucker et al., 2001；Kong et al., 2017)。Piao et al.(2011) 发现欧亚大陆温带和寒带地区的 NDVI 虽在1997 年出现了下降趋势，但 1982~2006 年的长期趋势仍是明显增加。与此同时，中国植被总体也呈现上升趋势，其中春季 LAI 增速最快(方精云等，2003；彭飞和孙国栋，2017；Jin et al., 2021)，且相比于上世纪 80 年代，90 年代后期以来我国植被覆盖显著改善的区域大幅增加，这种变化在近年来更为剧烈(刘宪峰等，2015；Gong et al., 2020)。

我国干旱半干旱区地处欧亚大陆腹地，地形地貌复杂，生态环境脆弱，降水量稀少，是受全球气候变化影响较大的地区(Xu et al., 2016)。与青藏高原(Zhong et al., 2010；Peng et al., 2012)、西南喀斯特地区(Brandt et al., 2018)等气候敏感区相类似，我国西部及北部地区植被自 80 年代以来整体呈现增加趋势(Lv et al., 2019；何航等，2020；秦景秀等，2020)。贾俊鹤等(2019)对西北六省植被NPP的研究表示，1982~2015年生长季植被总体呈增加趋势，且未来变化以持续性为主；杨丹和王晓峰(2022)发现黄土高原地区 85%以上区域植被呈增加趋势，显著增加地区主要位于陕西北部、山西等退耕还林核心区。然而，植被变化与

区域和时段的选择有很大关系，不同时空尺度的研究所得到的结论往往会有所不同，甚至相反。有研究表明，随着研究时段的延长，植被趋势发生转变的频率明显增加(De Jong et al., 2013)，我国也有研究发现 20 世纪 90 年代以后西北部分地区植被有增长停滞(杜加强等，2015)或是退化的现象(马明国等，2003；李震等，2005)。总的来说，自 80 年代以来，我国北方干旱半干旱区植被整体以增长趋势为主，但在时间上存在波动变化，在空间上亦具有异质性。

气候变化和人类活动扰动是植被变化的重要影响因素(Zhu et al., 2016；Cai et al., 2020)。张清雨等(2013)、Tian et al. (2015)和黄秉光等(2018)在内蒙古和新疆得到的结论表明当地植被与年降水显著相关，而与气温的相关性并不显著。同时也有研究者认为，我国北方植被与气温、降水整体呈正相关，但对气温的响应更敏感(郭铌等，2008；何航等，2020)。现有研究多关注于植被与气候因子的年变化关系上，而植被对不同季节气温、降水响应的敏感性及滞后效应的相关研究较少。此外，人类活动的作用不可忽视，但定量评估人类活动对植被影响的研究相对较少(秦景秀等，2020；Yu et al., 2021)。Herrmann et al.(2005)使用残差趋势法分析了 1982~2003 年萨赫勒地区的植被情况，检测到了人类活动对沙漠化逆转和植被恢复具有一定的贡献；Jiang et al.(2017)对中亚地区 1984~2013 年 NDVI 和气温、降水构建回归方程，发现中亚东(西)部边缘地区分别存在显著的人类活动正(负)作用，造成当地植被的改善(退化)。Sun et al.(2015)对 1998 年~2011 年中国北方地区植被变化的归因分析发现，气候变化和人类活动的相对作用分别约为 30%和 70%，且在植被增加地区二者贡献率分别为 14.85%和 85.15%。Qi et al.(2019)对丝绸之路经济带的研究表明约有 65%研究区域植被增加主要受到人类活动的影响，且人类活动贡献率大于 75%。郭继凯等(2017)研究表明，塔里木河流域人类活动对植被的恢复和改善起主要作用，人类活动所主导的植被改善面积比例超过 70%。在对北方农牧交错带的研究中，王丽霞等(2021)认为是年降水量的增加等气候变化驱动了该区域生态环境的变化；而 Liu Z et al.(2018)得出的结论表明人类活动才是该地区植被改善或退化的主要原因。可以看出，尽管目前很多学者对中国各区域植被变化开展了相关归因研究，但有关植被变化的主要驱动力究竟是气候还是人类活动还存在很多争议。总的来说，近几十年来，我国北方干旱半干旱区植被状况是否出现明显好转，以及

这种“转好”与近些年来该地气候变化和人类活动之间的关系怎样，至今还没有明确的结论。鉴于以上问题，本文主要分析我国干旱半干旱地区近 30 余年来植被覆盖时空变化及其与气候要素在年、季节尺度的相关性，并进一步分离气候变化和人类活动对植被变化的贡献，旨在深入了解我国干旱半干旱区植被变化的事实及成因。

2 数据和方法

2.1 数据

本文使用叶面积指数 LAI 来表征植被生长状态。相比于 NDVI，LAI 物理意义更为明确，可以体现植被垂直方向的结构(彭飞和孙国栋，2017)，且在植被稀疏的干旱半干旱地区受到土壤背景值的干扰较小，能够更准确反映植被动态变化(胡玲等，2021)。文中使用的植被 LAI 资料为国家遥感中心和北京师范大学发布的全球 GLASS LAI 数据集(Liang et al., 2013)。GLASS LAI 是利用 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)和 MODIS(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)反射率数据反演的长时间序列 LAI 数据集(Xiao et al., 2014)，具有时间更连续、空间更完整、受到云的影响更少等优点。GLASS AVHRR LAI 数据的时间分辨率为 8 日(每年最后一个数据的时间间隔为 5d 或 6d)，空间分辨率为 0.05°，时间跨度从 1981 至 2017 年，取每年 4～10 月 LAI 的平均值作为生长季平均 LAI(Average Leaf Area Index, ALAI)(Piao et al., 2006；Park and Sohn, 2010)，每年 3～5 月、6～8 月和 9～11 月 LAI 平均值作为春季、夏季和秋季 LAI。为了与气候数据的空间分辨率保持一致，将植被数据插值为 0.5°×0.5°分辨率。

气象数据选取东英吉利大学(University of East Anglia)气候研究室(Climate Research Unit, CRU)开发的 CRU-TS4.04 气温和降水月数据 (https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/[2022-02-01])，空间分辨率为 0.5°，时段为 1982～2017 (Harris et al., 2020)。CRU 融合了全球大量台站观测数据，并经过严格的质量控制和均一性检验(Mitchell and Jones, 2005)，具有时间尺度长、分辨率高、质量良好等特点。该数据在中国地区适用性良好(Zhao et al., 2006)，并被广泛应用于气候变化的分析(马柱国等，2005；张红丽等，2016)。年及季节平均的处理方式与 LAI 相同。

本文中干旱半干旱的划定是基于刘闯(2018)的区划界限数据。该数据将中国地区共分为四个生态地理大区：东部季风生态地理区、西北干旱生态地理区、青藏高原生态地理区和南方热带岛屿生态地理区（图 1-a）。本文以西部干旱生态地理区作为研究区，其在西南侧与青藏高原生态地理区相邻，东南侧与东部季风生态地理区相邻。青藏高原生态地理区的划分标准承袭了黄秉维先生 1959 年中国综合自然地理区划的观点，以海拔高度 4000m 和地形坡度大于 7° 为界限。而东亚季风生态地理区与西北干旱生态地理区的界限划分指标是 400 mm 等降水量线。本文研究区主要是年降水小于 400mm 的地区，即我国干旱半干旱地区。

2.2 方法

2.2.1 趋势分析

1. 一元线性回归和 t 检验

本文通过一元线性回归分析方法来计算中国干旱半干旱区生长季平均叶面积指数(LAI)的变化趋势。为了检验植被变化趋势的显著性，引入 t 检验量，其公式为(魏凤英，2007)：

$$b = \frac{n\sum_{i=1}^{n} t_i \times LAI - \sum_{i=1}^{n} t_i \sum_{i=1}^{n} LAI_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} {t_i}^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} t_i\right)^2} \tag{1}$$

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

$$\text{其中 } r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i-\bar{t})(LAI_i-\overline{LAI})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(t_i-\bar{t})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(LAI_i-\overline{LAI})^2}} \tag{3}$$

其中 b 是回归直线的斜率；r 是时间 t_i 与 LAI 之间的 Pearson 相关系数；n 是年数；k 是可控制变量数；(n-k)是自由度。$t>t_{0.05}(n-k)$表示通过检验，即 LAI 随时间的变化趋势显著($p<0.05$)。

2.Theil-Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 检验

本文还采用了 Theil-Sen 趋势分析与一元线性回归方法进行结果对比。作为一种非参数的趋势计算方法，Theil-Sen 趋势分析不要求样本服从一定的分布，且对于数据异常值不敏感。其计算公式如下（Jiang et al., 2015）：

$$slope = Median\left(\frac{LAI_j - LAI_i}{j-i}\right), 1982 \le i \le j \le 2017 \tag{4}$$

其中 LAI_j 和 LAI_i 分别是第 j 年和第 i 年的 LAI 值，Median 表示取中值作为最终

结果。

Man-Kendall 检验是一种用来判断趋势显著性的非参数检验方法，通常对 Theil-Sen 趋势分析进行补充，用来判断遥感植被趋势变化及显著性。计算公式见参考文献（Jiang et al., 2015）。

2.2.2 相关分析

本研究分别计算研究区域每个格点的逐年的生长季平均 LAI 与同时段气温和降水相关系数 r，公式如(3)。

对相关系数的检验如公式(2)，通过构建 t 检验量的方式进行。r 为相应的相关系数，当 $t>t_{0.05(n-k-2)}$(即 $p<0.05$)时通过检验，变量之间的相关性显著。

2.2.3 残差分析

本文采用残差趋势法来衡量人类活动对植被的影响。这一方法最早由 Evans 和 Geerken(2004)提出，并由 Wessel et al.(2007)改进，其优势在于：对每个格点构建植被-气候模型，能够考虑到不同地理位置下植被与气候关系的空间异质性；且能定量区分气候和人类活动对植被活动的影响。具体计算过程如下：

首先，建立每个格点植被 LAI 与气候要素之间的回归预测方程：

$$LAI = \mathrm{a} + b_1 T + b_2 P \tag{5}$$

其中：因变量为植被生长季平均 LAI，T、P 为气温和降水，b_1、b_2 为方程回归系数，a 为方程截距。

上述线性回归方程需通过 F-test 检验其整体的显著性，接着需通过 t-test 检验其每个参数的显著性，以判断引起该地 LAI 变化的主导气候因子。

计算 LAI 真实值与预测值之间的差值，即残差值 ε，作为受人类活动影响值。

$$\varepsilon = LAI - LAI' \tag{6}$$

如果残差随时间序列无明显变化，则认为观测到的植被变化是由气候因素造成的。残差随时间递减(即残差随时间变化的斜率为负值，$\varepsilon_{slope}<0$)表示植被生长受到人类活动的抑制，反之 $\varepsilon_{slope}>0$ 则表示人类活动对植被生长有促进作用。且当 $p<0.05$ 时，这种促进或抑制作用是显著的。

气候变化对植被变化的贡献率可通过计算 LAI 预测值的斜率与 LAI 真实值斜率的比值(LAI'_{slope}/ LAI_{slope})来得到，人类活动的贡献率则表示为残差值的斜率

与 LAI 真实值斜率的比值(ε_{slope}/ LAI_{slope})，二者的关系满足：

$$\frac{LAI'_{slope}}{LAI_{slope}} = 1 - \frac{\varepsilon_{slope}}{LAI_{slope}} \tag{7}$$

3 结果分析

3.1 北方干旱半干旱区植被覆盖及变化特征

我国北方干旱半干旱区地形地貌多样，植被空间分布的差异性很大。西部的新疆地区有着三山夹两盆的地形特征，植被多分布在山区和盆地周围的绿洲上，东部内蒙古高原地势西高东低，植被呈由西向东地带性递增，由荒漠逐渐过渡为荒漠草原、草甸草原和典型草原。图 1-b 给出了 1982-2017 年 ALAI（生长季平均 LAI）平均值的空间分布，ALAI 高值区(ALAI>1.2)主要分布在天山西部的森林与草甸，占研究区总面积约 1.7%；中值区(0.1<ALAI<1.2)分布在阿尔泰山、新疆绿洲地区及内蒙古东部等地区，覆盖了研究区大部分的草原、灌木林和耕地，占研究区总面积约 56%。；低值区(ALAI<0.1)为沙漠戈壁地区，是稀疏荒漠植被或无植被覆盖区，占研究区总面积约 42.3%。为避免荒漠地区极小 LAI 所造成的干扰，本文剔除了 ALAI 小于 0.1 的区域。

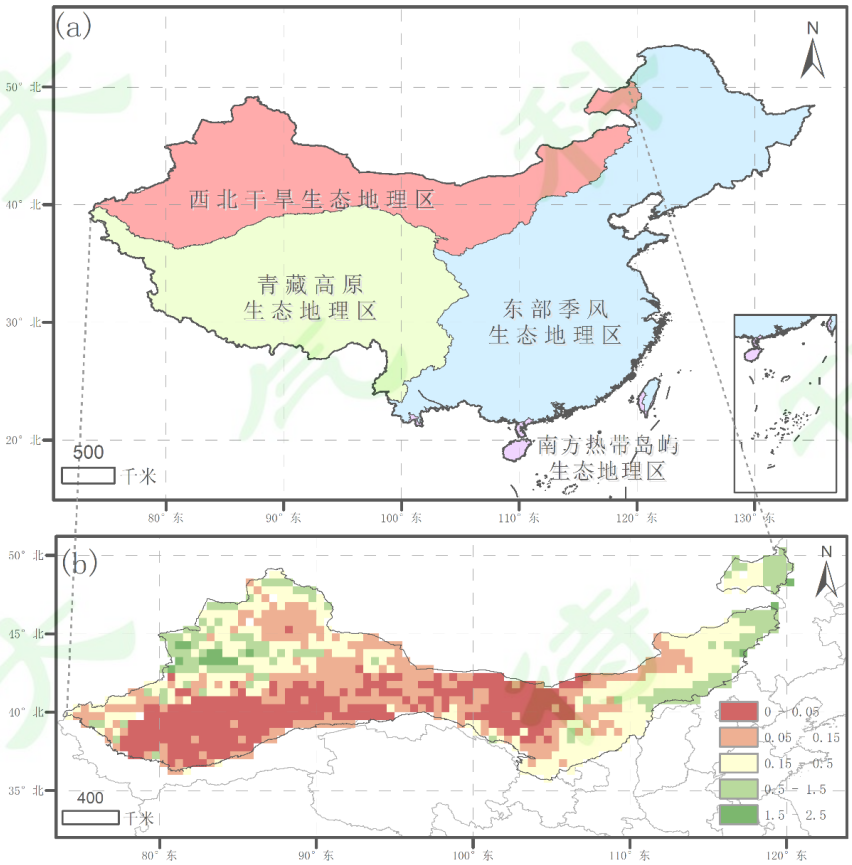

图 1 (a)中国四大生态地理区的划分(刘闯，2018)；(b)研究区 1982～2017 年 ALAI 年平均值的空间分布

Fig 1 (a) The division of four ecogeographic regions in China (Liu, 2018); (b) Spatial distribution of annual mean ALAI in the study area from 1982 to 2017

表 1 给出了 1982-2017 年生长季和季节平均 LAI 及气象变量的平均值和长期趋势。可见 ALAI 和季节平均 LAI 均呈上升趋势，其中 ALAI 的增长速率约为 3.08×10^{-3} a^{-1}。如图 2 所示，ALAI 总体呈现波动上升趋势，范围为 0.33～0.52。与 ALAI 类似，研究区气温在生长季及各个季节均呈现显著上升趋势，其中春季的上升速率最大，约为 6.05×10-2℃ a^{-1}。而降水主要呈现不显著的上升趋势，生长季降水变化速率约为 0.184mm a^{-1}，夏季降水出现了弱的负趋势（表 1）。这说明研究区降水以年际波动为主（图 2b），长期趋势并不明显。

表 1 1982-2017 年生长季和季节平均 LAI 的多年平均值和长期趋势

Table 1 Annual mean and secular trend of growing season and seasonal LAI from 1982 to 2017

	时间序列 Time series	生长季 Growing season	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
均值	LAI	0.43	0.19	0.65	0.23	
	气温(℃)	14.08	6.73	19.24	5.39	-10.78
	降水(mm)	178.20	41.78	111.14	39.23	11.26
变化率 (a^{-1})	LAI($\times10^{-3}$)	3.08*	1.27*	4.84*	1.32*	
	气温(℃$\times10^{-2}$)	4.37*	6.05*	4.82*	2.87*	1.51*
	降水(mm$\times10^{-1}$)	1.84	1.02	-0.19	0.32	0.12

* 达到 95%显著性水平(P<0.05),下同。

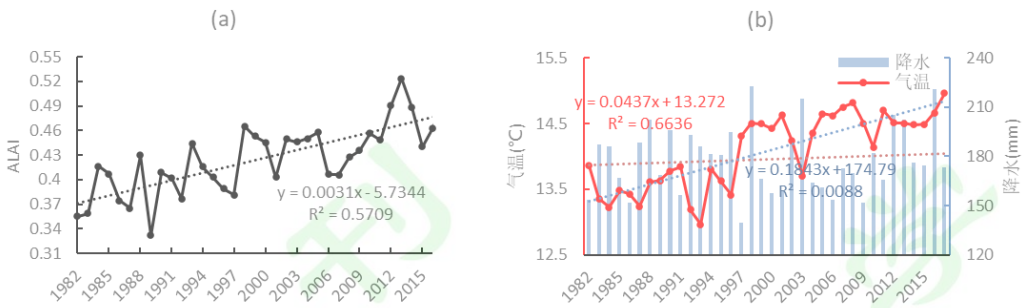

图 2 1982-2017 年研究区(a)ALAI、(b)生长季气温和降水的时间变化

Fig 2 Temporal variations of (a)ALAI and (b) growing season temperature and precipitation in the study area from 1982 to 2017

除了线性回归方法外，本文还使用 Theil-Sen Median 趋势分析法和 Mann-Kendall 检验计算研究区每个格点 ALAI 的趋势和显著性，得到的结果与线性回归方法一致。从 1982～2017 年 ALAI 变化趋势的空间分布上来看(图 3-a)，呈增加趋势的面积约占 80%，其中呈显著增加趋势(通过 95%显著性检验)的区域集中在河套平原、鄂尔多斯高原、祁连山山区、北疆大部分地区及南疆绿洲区，面积占比约为 67%。ALAI 呈减少趋势的面积约占 20%，其中显著减少的面积占比约为 7.2%，主要集中在呼伦贝尔草原。内蒙古锡林郭勒盟草原区植被 ALAI 呈减少趋势但不显著。

由于不同季节的植被绿度存在差异，我们依据相对 LAI 趋势（LAI 线性趋势与平均值的比值）衡量生长季内各季节植被的变化幅度，如图 3 所示。可以看出，植被在各个季节变化的空间分布与 ALAI 相似，其中春季 LAI 呈现增长趋势的面积最大(占比约 85%)，而秋季最小(占比约 75%)。一般情况下，植被指数增长(或称植被变绿)是生长季延长或生物量增长的表现(Piao et al., 2020b)，其中生长季的延长体现为春、秋季植被指数的增长，而生物量和生产力的提升则反映在生长季(尤其是夏季)植被指数的增长。由图 3-b、c、d 可知，在植被显著增长的区域，夏季的增幅（$2.2\times10^{-2}a^{-1}$）明显大于春、秋两季（$1.2\times10^{-2}a^{-1}$ 和 $1.6\times10^{-2}a^{-1}$）。这在一定程度上说明了我国干旱半干旱区植被转好更多体现在植被生物量的增长及生产力的提升(Wang et al., 2019；Li et al., 2021；Gong et al., 2020)。

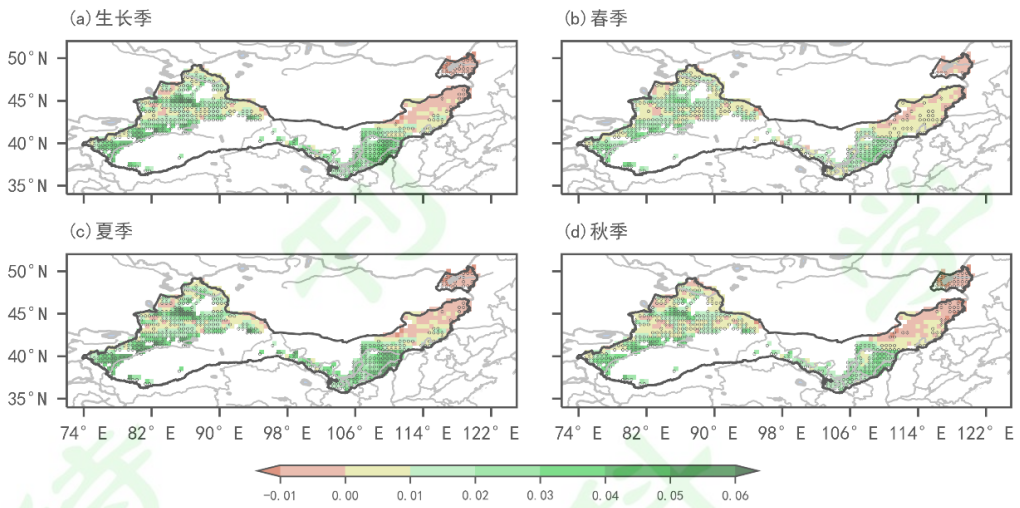

图 3 1982～2017 年生长季(a)、春季(b)、夏季(c)、秋季(d)LAI 相对斜率空间分布

Fig 3 Spatial distribution of (a) growing season, (b) spring, (c) summer, (d) autumn LAI relative trend from 1982 to 2017

*图注：黑色圆点表示显著性水平达 95%的地区，即发生显著变化地区

*Fig Note: The black dots indicate areas with a significance level of 95%

3.2 植被与气候要素的相关性

3.2.1 ALAI 与气温和降水的相关性

在全球变暖的背景下，1982～2017 年中国干旱半干旱区气温呈显著上升趋势。ALAI 与生长季平均气温在植被覆盖区域的相关系数为 0.58。二者呈显著正相关区域占植被覆盖面积约 51%，主要分布在黄土高原北部、河套平原及新疆等地(图 4-a)。呈显著负相关的区域占比约 6.5%，主要分布在内蒙古东部草原地区。值得注意的是，ALAI 与气温呈显著正相关的地区多集中在灌溉农业区，这些地区的农作物由于没有水分条件限制，因此生长状况与气温的相关性很高。

ALAI 和生长季降水在植被覆盖区域的相关系数为 0.34。植被与降水呈正相关的面积占植被覆盖总面积约 93%，其中显著正相关的面积占约 45%。二者均增加的地区占比约 28%，分布在新疆北部伊犁河谷、塔城盆地、鄂尔多斯高原以及宁夏中部等地区；二者均减少的地区占比约 17%，主要分布在内蒙古呼伦贝尔、锡林郭勒草原区(图 4-b)，可见当地草原植被对降水的减少具有高度敏感性。在黄土高原北部、河套平原、新疆绿洲地区等农业较为发达的地区，农业

生产强烈依赖于灌溉，植被生长状况与降水的正相关性并不显著。总体来看，相比于气温，植被与降水呈正相关的面积更大。在我国北方干旱半干旱区，水分是植被生长的制约因子，而气温的影响更为复杂。在水分较为充足的地区(如降水显著增加或有人工灌溉的地区)，气温的升高可以加快植被光合作用、延长生长季，从而促进植被生长；而在水分匮乏的地区，气温的升高会使得空气湿度降低、土壤干旱加剧，不利于植被生长(李晓兵等，2002)。在降水较少的年份，极端高温频发会显著降低植物生产力，甚至使生态系统由碳汇转变为碳源（Du et al., 2018）。

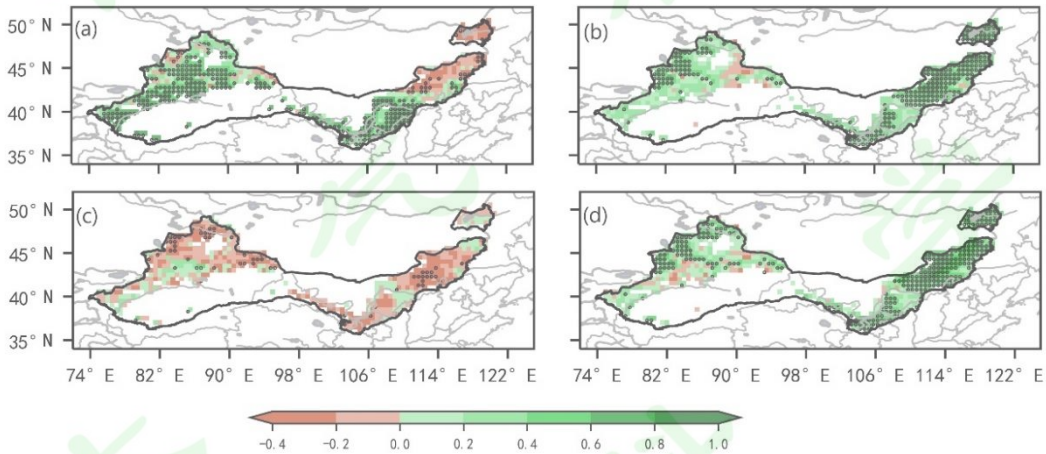

图 4 1982～2017 年 ALAI 与(a)生长季平均气温和(b)生长季降水相关系数的空间分布，(c)、(d)同理(a)、(b)，但 ALAI、气温和降水均先去除了长期趋势

Fig 4 The spatial distribution of correlation coefficient between ALAI and growing season (a) temperature and (b) precipitation from 1982 to 2017, (c), (d) are the same to (a), (b), but ALAI, temperature and precipitation were detrended

*图注：图中黑色圆点表示显著性 P<0.05 地区

*Fig Note: Black dots in the figure indicate areas with significance P less than 0.05.

将图 4-a 与图 3-a 比较可以发现，植被与气温表现为正相关的区域与植被显著增加的区域具有很好的对应关系。那么这种对应关系是否存在因果关系？为了说明整个问题，我们对每个格点的植被 ALAI、气温及降水序列进行去趋势处理，并计算其相关系数，结果如图 4-c,d 所示。可以看出，去趋势后的 ALAI 与

气温整体相关性明显弱于去趋势前，仅有 6.5%的格点通过 95%显著性水平检验，绝大部分地区二者相关性极弱(图 4-c)；而去趋势后的 ALAI 与降水区域平均相关系数为0.41，空间分布(图4-d)与去趋势前差异不大。这说明增暖主导了 ALAI 的长期趋势，而降水变化则主要影响 ALAI 的年际变率，与贾俊鹤(2019)和孙康慧等(2021)用集合经验模态分解及主成分分析所得到的结论一致。这也解释了之前研究中的一个问题，即基于长时间序列的数据往往可以发现了植被指数和气温间存在强的相关性(刘亚荣等，2015；何航等，2020；Jin et al., 2021)，而在较短的时段中这种相关性不明显或区域一致性弱(杨光华等，2009；穆少杰等，2012；Tian et al., 2015；Liu H X et al., 2018；赵倩倩等，2021)。此外，还有相关的研究认为(信忠保等，2007)，干旱半干旱区气温主要调控了植被年内变化，即通过积温来影响植被生长的始、末日期及生长过程，而对年际变化的影响不明显。可以断定，气温对我国北方干旱半干旱区植被的影响主要体现在长期趋势变化上，而降水则与植被的年际变化更加密切相关。

3.2.2 LAI 与季节平均气温和降水的相关性

考虑到植被对气候要素响应的滞后性，这里分别计算了春季、夏季、秋季 LAI 与同季节及前一个季节温度和降水之间的相关系数，结果如图 5 所示。其中图 5-1a、1b、1c、1d 分别表示春季 LAI 与春季气温、春季降水、前冬气温、前冬降水相关系数的空间分布。可以看出，春、夏季气温和同季节的 LAI 在整个区域都有较好的相关性，呈显著相关的面积占比都在植被覆盖区域的 50%左右，远高于秋季的情况。且从图 5-2c、3c 中可看出研究区内大多数地区春、夏季气温对后一季节植被均有较强的影响，尤其夏季气温和秋季 LAI 呈显著相关的面积占比达 58%，说明春、夏季升温对之后植被生长有明显促进作用。

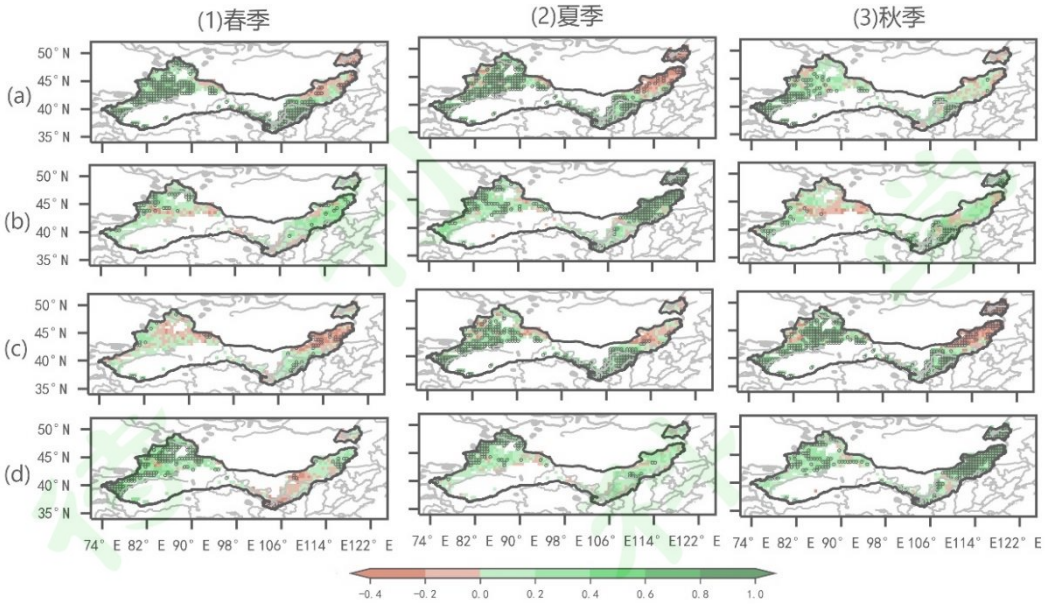

图 5 1982～2017 年各季节平均 LAI 与(a)当季气温；(b)当季降水；(c)前一季节气温；(d)前一季节降水的相关系数空间分布，黑色圆点表示通过 95%显著性检验的地区

Fig 5 Spatial distribution of correlation coefficients between seasonal average LAI and (a) temperature of the current season; (b) precipitation of the current season; (c) temperature of the previous season; (d) precipitation of the previous season. Black dots indicate regions that pass the 95% significance test

各季节 LAI 与当季降水的相关中通过 95%显著性检验的部分偏少，主要集中在北疆、内蒙古东部的夏季和鄂尔多斯高原的秋季，其中夏季 LAI 与当季降水显著相关的面积占植被覆盖区域约 38%。从图 5-1d、2d、3d 中可以看出，新疆北部地区春季 LAI 及内蒙古东部地区秋季 LAI 对降水均存在明显的滞后响应。总的来说，春、夏季气温和夏季降水能较为显著的影响研究区当季植被生长，而在内蒙古东部、新疆北部等地，LAI 变化明显滞后于气温和降水。

3.3 植被变化的归因分析

前文中我们发现 ALAI 与气温和降水均存在较好的相关关系。在本节中，我们在每个格点上建立了植被-气候线性回归方程(公式 4)，得到 ALAI 预测值，以揭示气温和降水变化对研究区植被变化的贡献。实际值与预测值的差值又称为

残差，是植被年际变化中不能被气候变化解释的部分。在我国北方地区人口密度大，植被受到的人类活动的作用不可忽视(Liu Z et al., 2018; Sun et al., 2015)，且随着 2000 年之后多项生态保护工程的实施，人类活动对植被变化的影响变得更为复杂，区域间差异性更大。在这里，我们假设残差值是由人类活动所造成的(包括土地利用的改变、农牧及樵采、生态工程项目的实施及由 CO2 的施肥效应等)。许端阳等(2009)、孙建国等(2014)和 Guo et al.(2017)等根据实地考察或 Google Earth 的验证结果也表明残差值为正值的区域对应了退耕还林实施区，证实了本文这一假设的合理性。

构建回归方程的检验结果如图 6 所示，图中阴影区所表示的是植被显著变化且线性回归方程整体通过 F 检验(置信度为 95%)的区域，约占植被覆盖面积的 67%；其中绿色阴影区表示植被显著变好，红色表示植被显著变差，二者分别占阴影面积的 90%和 10%。通过 F 检验表明线性回归方程整体具有意义，即可以用气温和降水拟合 ALAI。接着对方程的气温、降水项参数分别进行 t 检验。在新疆西部地区、鄂尔多斯高原等地，气温和降水对植被变化的影响都很重要；而在新疆中东部地区，气温是植被变化的主导因子；在内蒙古东部呼伦贝尔草原及锡林郭勒盟部分地区，植被变化的主导气候因子为降水。

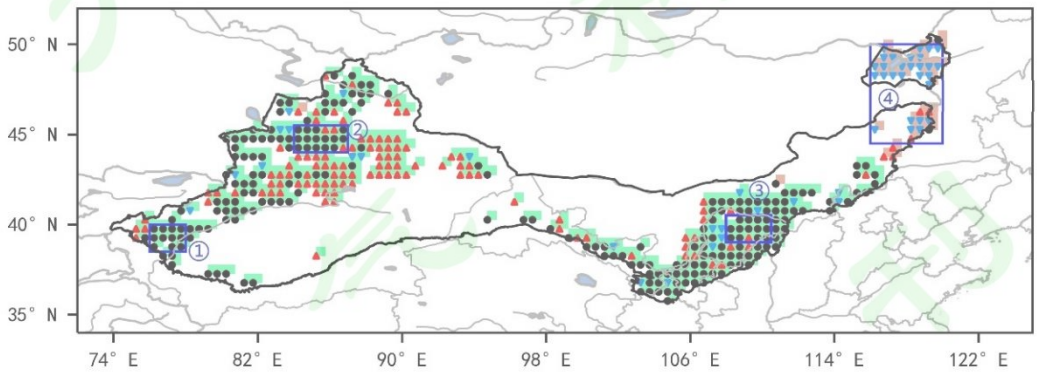

图 6 植被-气候方程的显著性检验结果

Fig 6 Significance test results of vegetation-climate equation

*图注：矩形框所示区域分别为：①喀什绿洲区②天山北麓中部③鄂尔多斯高原北部④内蒙古东部草原区。绿色(红色)阴影区所表示的是植被显著变好(变差)且线性回归方程整体通过 F 检验(置信度为 95%)的区域；红色正三角表示气温通过参数 t 检验的区域；蓝色倒三角表示降水通过参数 t 检验的区域；黑色圆点表示气温和降水均通过参数 t 检验的区域

* Figure note: The areas shown in the boxes are: ① Kashi oasis ② Central part of the northern foot of Tianshan Mountain ③ Northern Ordos Plateau ④ Grassland in eastern Inner Mongolia. The green (red) shaded area represents the area where ALAI is significantly increasing (decreasing) and the linear regression equation passes the F-test (95% confidence). The red triangle indicates the area where temperature passes the parametric t-test. The blue inverted triangle represents the area where precipitation passes the t-test of parameters. The black dot indicates the area where both temperature and precipitation pass the parametric t-test.

在我国干旱半干旱区植被动态变化的归因分析中，大量研究指出人类活动已成为不可忽略的影响因子之一(杜加强等，2015；Piao et al., 2020b)。为了检测人类活动对植被变化的影响，我们用残差趋势分析法定量分析了人类活动对研究区内不同区域植被变化的影响（图 7）。结果发现在植被显著变好的区域中预测值(气候变化)和残差值(人类活动)的斜率均为正值，表示两者对植被生长均起到促进作用，而在植被显著变差的区域内二者斜率均为负值，即对植被生长均表现出不利影响。在植被显著变好的地区中，人类活动对植被恢复贡献率的区域平均值约为 41%，气候变化贡献率约为 59%。由图 7 所示，在新疆和鄂尔多斯高原的大部分地区，残差斜率均通过了 95%显著性检验(黑色正三角形区域)，说明这些地区人类活动对植被生长的促进作用显著。新疆大部分地区人类活动贡献率在 40～60%之间，喀什地区偏低为 20～40%，鄂尔多斯高原地区在 20～50%之间。在内蒙古呼伦贝尔草原等地，人类活动和气候变化均抑制了植被生长，二者的贡献率分别为-49%和-51%。

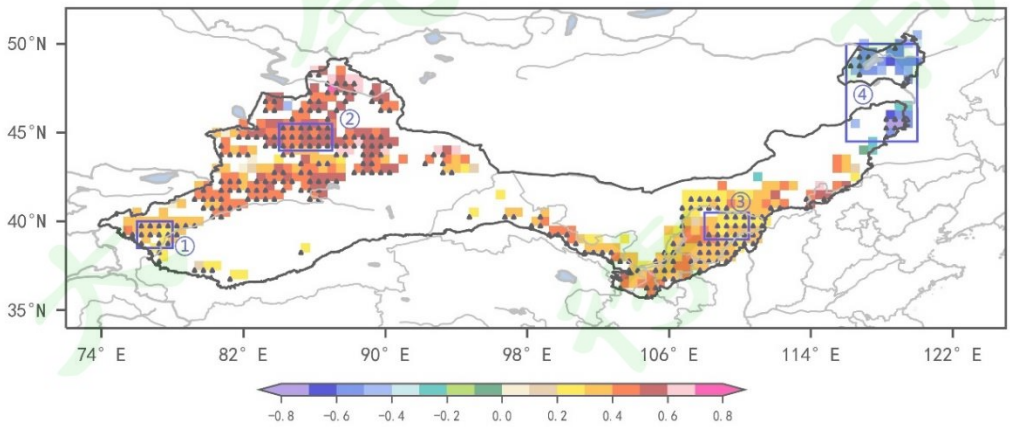

图 7 人类活动贡献率的空间分布图，黑色正三角表示残差斜率有显著趋势（置

信度 95%）

Fig 7 Spatial distribution of human activity contribution, with black positive triangles indicating a significant trend in the slope of the residuals (95% confidence level)

*图注：矩形框所示区域分别为：①喀什绿洲区②天山北麓中部③鄂尔多斯高原北部④内蒙古东部草原区

*Fig Note: The areas shown in the rectangular boxes are: ① Kashi oasis ② Central part of the northern foot of Tianshan Mountain ③ Northern Ordos Plateau ④ Grassland in eastern Inner Mongolia.

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文探究了中国干旱半干旱区植被动态变化的主要影响因素，并量化各种要素的相对贡献。分析可知，研究区内变绿的地区主要包含北疆准噶尔盆地的大部分地区、南疆塔里木河流域绿洲区、喀什地区、河西走廊以及鄂尔多斯高原和河套平原，而植被退化的地区则主要出现在内蒙古部分地区。这里我们选取四个典型区域，且各个区域中所有格点满足以下几个条件：(1)在 1982～2017 年间植被 LAI 变化幅度相近；(2)区域内气温和降水的变化趋势基本一致；(3)植被变化的主导气候因子基本一致；(4)人类活动对植被变化的贡献率相近。这些区域内有相似的气候背景，植被受气候变化和人类活动影响的过程也较为一致，可以用平均值来代表其整体情况。这四个区域(图 6，图 7)分别为喀什绿洲区(一区)、天山北麓中部(二区)、鄂尔多斯高原北部(三区)和内蒙古东部草原区(四区)。

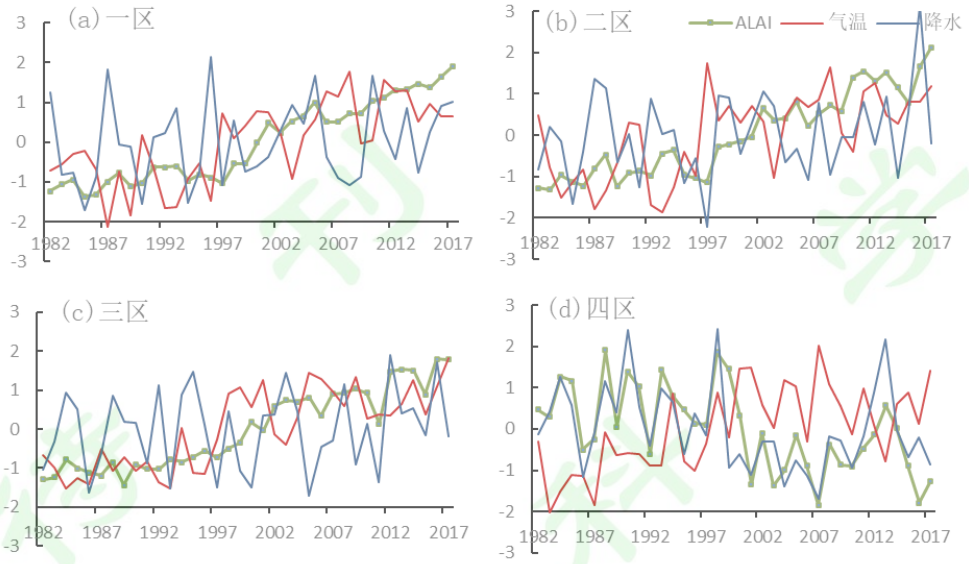

图 8 四个典型区域 ALAI、生长季平均气温和生长季降水的标准化时间序列

Fig 8 Standardized time series of ALAI, growing season mean temperature and growing season precipitation for four typical regions

这四个地区的 1982～2017 年区域平均 ALAI、生长季平均气温和生长季降水的变化如图 8 所示。分析发现，除了四区 ALAI 和年降水呈下降趋势之外，其余各地区气温、降水和 ALAI 序列均呈上升趋势，且 ALAI 和气温均呈显著上升趋势(置信度 95%)(表 2)。其中，一区为喀什北部叶尔羌河流域的绿洲地区，气候变化对植被变化的贡献率约为 67.3%，人类活动的贡献率约为 32.7%。当地降水稀少，农作物和草地大多依赖冰川融水。在气候变暖的背景下，冰川融水持续增加，伴随着 80 年代之后人口增长、农业技术的进步和水利工程的修建，绿洲地区农业得到发展，耕地面积不断扩大。统计数据表明，新疆地区耕地面积在 2007~2013 年年均增加 $2.13\times10^3 km^2$(焦伟等，2017)，且这些耕地主要来自草地、林地等自然绿洲和少数未利用荒地的开垦(杜清等，2014)。需要注意的是，在绿洲地区，大幅度土地开发利用会增大生态系统的脆弱性，如近年来在植被覆盖扩大的同时该区出现了地下水位降低、土地盐渍化等问题(满苏尔·沙比提等，2011)。

表 2 四个典型区域气候变化及人类活动的贡献率

Table 2 The contributions of climate change and human activities in four typical regions

	ALAI 斜率	温度 斜率	降水 斜率	ALAI 模拟值斜率	残差 斜率	气候 贡献率	人类活动 贡献率
一区	0.011*	0.048*	0.544	0.007*	0.003*	67.3%	32.7%
二区	0.018*	0.042*	0.550	0.009*	0.009*	51.4%	48.6%
三区	0.009*	0.050*	0.866	0.006*	0.003*	70.9%	29.1%
四区	-0.005*	0.038*	-1.725	-0.003*	-0.003*	50.6%	49.4%

* 达到 95%显著性水平(P<0.05)

* Achieved 95% significance level (P<0.05)

二区代表的是天山北麓中部地区，其南部高海拔地区的植被多为森林和牧场草地，北部山前平原区多分布着农田植被。较为充沛的降水和冰川融水共同滋养了这里的植被。近年来，天山北坡气温明显上升，降水和径流量均有所增加，暖湿的气候促进了植被的生长(尼加提·伊米尔等，2019)。此外，这里也是人类活动干扰较强的地区，一方面山前平原区耕地面积的不断扩大和草原封育等生态工程的实施使得天山北部绿洲区和山区的植被都有明显增加(张文强等，2020)；另一方面部分地区由于城市化和人口增加引起了森林和草场的减少(尹小君等，2020)。总体来看，这里的人类活动表现为对植被生长的促进作用，贡献率约为 48.6%。

鄂尔多斯高原位于黄河中游，是我国北方典型的农牧交错带，其西部主要分布着沙漠和荒漠草原，东部多为沙地和典型草原。已有研究表明，鄂尔多斯东部半干旱地区植被对气温和降水变化都有较为敏感的响应(Xie et al., 2015)，近年来在降水没有显著变化的情况下，气温的升高加剧了干旱发生的风险，如 2006 年、2011 年和 2015 年鄂尔多斯高原受到干旱事件的影响，这些年份的 LAI 也明显减小(图 8)。三区所代表的鄂尔多斯高原东北部地区人口众多，经济社会发展迅速，植被变化与人类活动关系密切。调查显示，自上世纪 80 年代起鄂尔多斯高原草地和未利用土地面积大幅度减少，而耕地和建筑用地大幅增多，林地和灌木在 2000～2010 年退耕还林工程和天然林保护工程期间呈增多趋势，但在工程完成之后呈下降趋势(Li et al., 2017)。总体来看，三区植被改善与该地耕

地面积扩大和生态保护期间林地和灌木的增多有关。有效的灌溉使得农作物不受水分胁迫，同时温度的升高有利于作物生长，气候和人类活动对该区植被恢复的贡献率分别为 70.9%和 29.1%(表 2)。该结论与 Kong et al.(2018)、杨丹和王晓峰(2022)得到的结论较为一致，即人类活动对黄土高原高原地区的贡献率约为 30%。而 Zheng et al.(2019)和孙建国等(2014)用残差趋势法识别的黄土高原西北部地区人类贡献率分别为 57%和 76%，相比本文的结论偏高，可能是因为其研究起始时间较晚，而该区域在 2000 年之后人类活动对植被变化的促进作用显著增加(许端阳等，2009)，使得后期时段分离得到的人类贡献率明显高于整个时段(1982~2017 年)。

内蒙东部草原区(四区)的主导气候因子为降水(图 8)，ALAI 和降水具有相似的年际变化，二者相关系数为 0.73 (图 8)。根据残差趋势法计算可得气温和降水对该地区植被变化的贡献率为 50.6%，而人类活动贡献率可达 49.4%。在呼伦贝尔和锡林郭勒东部草原地区，植被的显著退化与近年来当地气候暖干化和不合理的人类活动有关。该地区早期的无序开垦现象和过度放牧(张清雨等，2013)及近年来矿产资源开发的力度不断加大(万华伟等，2016)可能是导致植被退化的主要原因。

需要注意的是，残差趋势法虽然能揭示气候变化和人类活动的相对重要性，但不同研究间结果差异较大，从上文中黄土高原地区不同研究结论中贡献率的差异性可以看出这一点。残差法有以下几点问题：（1）没有考虑到植被对气候要素的滞后响应(Wu et al., 2015)。本文中使用年数据构建回归方程，减少了气候要素对植被动态的滞后影响，但在季节或月尺度的研究中，考虑滞后性有助于提高回归方程的准确性(Qing et al., 2021)；（2）模型的构建是基于植被对气候条件的线性、稳态响应的假设。尽管在我国北方大部分地区地处干旱半干旱地带，残差法的适应性较好(孙建国等，2014；Higginbottom et al., 2014)，且本文中对残差趋势法进行了筛选和检验，保证了最后所保留的结果是植被和气候因子存在显著线性关系的地区，但实际很多情况下植被的响应往往是非线性、非稳态的(Sun and Mu, 2011)，用线性方法描述会不可避免的带来误差；（3）未选取无干扰时段构建回归方程。卫星遥感所得到的植被数据多开始于上世纪 80 年代，构建回归方程的时段选取中难以避免人类活动干扰，且气温和降水变化中包含

了人类活动排放 CO_2 和气溶胶所引起的气候变化的信号，也会增大预测方程的不准确性，造成计算得到的人类活动贡献率偏低(Evans and Geerken, 2004)。

4.2 结论

本文基于 GLASS LAI 数据和 CRU 气温和降水数据，采用线性回归、相关分析、残差趋势法等方法研究了 1982～2017 年中国干旱半干旱区植被 LAI 的时空变化特征及其对气候变化和人类活动的响应，主要结论如下：

(1) 1982～2017 年中国干旱半干旱区 ALAI 呈显著增大趋势，变化率为 0.031/10a ($p<0.05$)。在空间分布上，植被显著增加地区占植被覆盖区总面积约 67%，集中在黄土高原、北疆及南疆塔里木盆地周边绿洲区等地；显著减少趋势的面积占比约为 7.2%，主要集中在呼伦贝尔和锡林郭勒草原区。各季节植被均呈显著增长趋势，其中夏季增速最快。

(2)区域平均 ALAI 与气温的相关系数约为 0.58，显著正相关地区的占比约 51%，显著负相关占比约 6.5%；与降水的相关系数约为 0.31，在通过显著性检验的地区中，降水与植被均增加的地区占比约 28%，均减少的地区占比约 17%。去趋势后大部分地区 ALAI 与气温的相关性明显减弱，但与降水的相关性维持在较高水平，说明气温对植被的影响主要表现在长期趋势上，而降水的影响则主要表现在年际变化上。

(3)春、夏气温和夏、秋降水对干旱半干旱地区植被的当季生长状况影响显著，而在新疆北部和内蒙古东部等地，植被 LAI 对气温和降水的响应存在季节尺度的滞后效应。

(4)研究区内植被变化的主导气候因子具有时空差异，在新疆部分地区气温为主导因子，在内蒙古东部降水为主导因子，而其余大部分地区受气温和降水的共同影响。在植被显著转好的区域中，气候变化的贡献率约占 59%，人类活动的贡献率约占 41%，且具有一定的空间异质性；在植被退化的内蒙古草地地区，气候变化的贡献率约占-51%，而人类活动的贡献率约占-49%。

本文的研究主要利用 LAI 指数来分析植被变化与气候变化和人类活动的关系，并未涉及不同植被类型的变化与影响因素的关系。下一步工作，拟将 LAI 数据与植被类型区划结合起来，定量分析不同生态区、不同植被类型植被的变化情况。在植被变化的归因分析上，残差趋势法仅能较粗略的提取人类活动对

植被的影响，且无法揭示什么样的人类活动是植被变化的主要驱动力。未来需要将进一步完善植被变化的检测归因方法。

参考文献

丹利, 季劲钧, 马柱国. 2007. 新疆植被生产力与叶面积指数的变化及其对气候的响应 [J]. 生态学报, (09): 3582-3592. Dan Li, Ji Jingjun, Ma Zhuguo. 2007. The variation of net primary production and leaf area index over Xinjiang autonomous region and its response to climate change [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), (09): 3582-3592. doi:10.3321/j.issn:1000-0933.2007.09.005

杜加强, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 等. 2015. 1982-2012 年新疆植被 NDVI 的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应 [J]. 应用生态学报, 26(12): 3567-3578. Du Jiaqiang, Jiarheng Ahati, Zhao Chenxi, et al. 2015. Dynamic changes in vegetation NDVI from 1982 to 2012 and its responses to climate change and human activities in Xinjiang, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 26(12): 3567-3578. doi: :10.13287/j.1001-9332.20150929.006

杜清, 徐海量, 赵新风, 等. 2014. 新疆喀什噶尔河流域 1990-2010 年土地利用/覆被及景观格局的变化特征 [J]. 冰川冻土, 36(06):1548-1555. Du Qing, Xu Hailiang, Zhao Xinfeng, et al. 2014. Changing characteristics of land use /cover and landscape pattern from 1990 to 2010 in the Kaxgar River basin, Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 2014, 36(6): 1548-1555. doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0185

方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 2003. 近 20 年来中国植被活动在增强 [J]. 中国科学 C 辑:生命科学, (06): 554-565+578-579. Fang Jingyun, Piao Shilong, He Jinsheng, et al. 2003. China's vegetation activities have been enhanced in the past 20 years [J]. Science in China Series C: Life Sciences, (06): 554-565+578-579. doi:10.3969/j.issn.1674-7232.2003.06.010

郭继凯, 吴秀芹, 董贵华, 等. 2017. 基于 MODIS/NDVI 的塔里木河流域植被覆盖变化驱动因素相对作用分析[J]. 干旱区研究, 34(03): 621-629. Guo Jikai, Wu Xiuqin, Dong Guihua, et al. 2017. Vegetation coverage change and relative effects of driving factors based on MODIS/NDVI in the Tarim River Basin[J]. Arid Zone Research (in Chinese), 34(03): 621-629. doi:10.13866/j.azr.2017.03.19

郭铌, 朱燕君, 王介民, 等. 2008. 近 22 年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系

[J]. 植物生态学报, (02): 319-327. Guo Ni, Zhu Yanjun, Wang Jiemin, et al. 2008. The relationship between NDVI and climate elements for 22 years in different vegetation areas of northwest China [J]. Journal of Plant Ecology (in Chinese), (02): 319-327. doi:10.3773/j.issn.1005-264x.2008.02.008

黄秉光, 杨静, 黄玫. 2018. 近 55 a 新疆植被净初级生产力的时空变化 [J]. 沙漠与绿洲气象, 12(04): 90-94. Huang Binguang, Yang Jing, Huang Mei. 2018. The spatiotemporal variation of net primary productivity of vegetation in Xinjiang in recent 55 years [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 12(04): 90-94. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2018.04.013

何航, 张勃, 侯启, 等. 2020. 1982—2015 年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应 [J]. 生态与农村环境学报, 36(01): 70-80. He Hang, Zhang Bo, Hou Qi, et al. 2020. Variation characteristic of NDVI and Its response to climate change in northern China from 1982 to 2015 [J]. Journal of Ecology and Rural Environment (in Chinese), 36(01): 70-80. doi:10.19741/j.issn.1673-4831.2019.0115

胡玲, 孙聪, 范闻捷, 等. 2021. 近 20 年防风固沙重点生态功能区植被动态分析[J]. 生态学报, 41(21):8341-8351. Hu Ling, Sun Cong, Fan Wenjie, et al. 2021. Spatio-temporal dynamics of vegetation in key ecological function zone of wind-break and sand-fixation over the last 20 years[J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 41(21):8341-8351. doi:10.5846/stxb202101270288

贾俊鹤, 刘会玉, 林振山. 2019. 中国西北地区植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应 [J]. 生态学报, 39(14): 5058-5069. Jia Junhe, Liu Huiyu, Lin Zhenshan. 2019. Multi-time scale changes of vegetation NPP in six provinces of northwest China and their responses to climate change [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 39(14): 5058-5069. doi:10.5846/stxb201808241810

焦伟, 陈亚宁, 李稚. 2017. 西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因[J]. 生态学杂志, 36(01): 181-189. Jiao Wei, Chen Yaning, Li Zhi. 2017. Remote sensing estimation and the reasons for temporal-spatial differences of vegetation net primary productivity in arid region of Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology (in Chinese), 36(01): 181-189. doi:10.13292/j.1000-4890.201701.016

李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 等. 2002. 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, (02): 254-261. Li Xiaobing, Chen Yunhao, Zhang Yunxia, et al. 2002. Impact of climate change on desert steppe in northern China [J]. Advance in Earth Science (in Chinese), (02): 254-261. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2002.02.015

李震, 阎福礼, 范湘涛. 2005. 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, (03): 308-313. Li Zhen, Yan Fuli, Fan Xiangtao. 2005. The variability of NDVI over northwest China and its relation to temperature and precipitation [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), (03): 308-313. doi: 10.11834/jrs.20050345

刘闯, 石瑞香. 2018. 中国四大生态地理区的划分及其界线数据研究 [J]. 全球变化数据学报, 2(1): 42-50. Liu Chuang, Shi Ruixiang. 2018. GIS dataset of boundaries among four Geo-eco regions of China [J]. Journal of Global Change Data & Discovery (in Chinese). 2018, 2(1): 42-50. doi:10.3974/geodp.2018.01.08

刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 2015. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征 [J]. 生态学报, 35(16): 5331-5342. Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. 2015. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in China during 1982-2012 [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 2015, 35(16): 5331-5342. doi: 10.5846/stxb201404150731

刘亚荣, 贾文雄, 黄玫, 等. 2015. 近 51 年来祁连山植被净初级生产力对气候变化的响应 [J]. 西北植物学报, 35(03):601-607. Liu Yarong, Jia Wenxiong, Huang Mei, et al. 2015. Response of vegetation net primary productivity to climate change in the Qilian mountains since recent 51 years [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica (in Chinese), 35(03): 601-607. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2015.03.0601

马明国, 董立新, 王雪梅. 2003. 过去 21a 中国西北植被覆盖动态监测与模拟 [J]. 冰川冻土, (02): 232-236. Ma Mingguo, Dong Lixin, Wang Xuemei. 2003. Study on the dynamically monitoring and simulating the vegetation cover in northwest China in the past 21years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), (02): 232-236. doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2003.02.022

马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 2005. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征[J]. 大气科学, (05): 671-681. Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqiang, et al. 2005. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over northern China during the last century [J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences (in Chinese), (05): 671-681. doi: 10.3878/j.issn.1006-

9895.2005.05.01

满苏尔·沙比提, 阿布力米提·阿巴白克热, 热汗古丽·吾买尔. 2011. 喀什地区近 10a 绿洲耕地变化及其地下水位效应分析 [J]. 干旱区资源与环境, 25(11): 145-151. Mansuer Shabiti, Ablimit Ababakri, Riyangul Omar. 2011. Cultivated land change and it's ground water level response in Kashghar in last decade [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 25(11): 145-151. doi:10.13448/j.cnki.jalre.2011.11.013

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(09): 1255-1268. Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao, et al. 2012. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001-2010 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 67(09): 1255-1268. doi: 10.11821/xb201209010

尼加提·伊米尔, 满苏尔·沙比提, 玉苏甫·买买提. 2019. 天山北坡植被 NDVI 时空变化及其与气候因子的关系 [J]. 干旱区研究, 36(05): 1250-1260. Nijiati Yimier, Mansur Shabiti, Yusufu Maimaiti. 2019. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and its relationship with climatic factors on the northern slope of the Tianshan Mountains [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 36(05): 1250-1260. doi:10.13866/j.azr.2019.05.23

彭飞, 孙国栋. 2017. 1982～1999年中国地区叶面积指数变化及其与气候变化的关系 [J]. 气候与环境研究, 22(02): 162-176. Peng Fei, Sun Guodong. 2017. Variation of leaf area index in China from 1982 to 1999 and its relationship with climate change [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22(02):162−176. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16061

秦景秀, 郝兴明, 张颖, 等. 2020. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响[J]. 干旱区地理, 43(01): 117-125. Qin Jingxiu, Hao Xingming, Zhang Ying, et al. 2020. Effects of climate change and human activities on vegetation productivity in arid areas[J]. Arid Land Geography (in Chinese), 43(01): 117-125. doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2020.01.14

孙建国, 张卓, 韩惠, 等. 2014. 气候和人类因素在黄土高原西北部植被变化中的贡献率研究[J]. 遥感信息, 29(02): 83-88. Sun Jianguo, Zhang Zhuo, Han Hui, et al. 2014. Contributions of climate and human to vegetation variation on Northwest Loss Plateau[J]. Remote Sensing Information (in Chinese), 29(02): 83-88. doi:10.3969/j.issn.1000-3177.2014.02.015

孙康慧, 曾晓东, 李芳. 2021. 中国生态脆弱区叶面积指数变化的主导气象因子研究 [J]. 自然

资源学报, 36(07): 1873-1892. Sun Kanghui, Zeng Xiaodong, Li Fang. 2019. Climate change characteristics in ecological fragile zones in China during 1980–2014 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(4): 455−468. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18058

万华伟, 高帅, 刘玉平, 等. 2016. 呼伦贝尔生态功能区草地退化的时空特征 [J]. 资源科学, 38(08): 1443-1451. Wan Huawei, Gao Shuai, Liu Yuping, et al. 2016. Grassland degradation monitoring and spatio-temporal variation analysis of the Hulun Buir Ecological Function Region [J]. Resources Science (in Chinese), 38(08): 1443-1451. dodi:10.18402/resci.2016.08.04

王丽霞, 史园莉, 张宏伟, 等. 2021. 2000—2020年北方农牧交错区植被生态功能变化及驱动因子分析[J]. 生态环境学报, 30(10): 1990-1998. Wang Lixia, Shi Yuanli, Zhang Hongwei, et al. 2021. Analysis of vegetation ecological function changes and driving factors in farming-pastoral ecotone in Northern China from 2000 to 2020[J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 30(10): 1990-1998. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.10.006

魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术(第 2 版) [M]. 北京: 气象出版社. 18-19,30-31. Wei Fengying. 2007. Modern Climate Statistical Analysis and Prediction Techniques (in Chinese) [M]. 2nded. Beijing: China Meteorological Press, 27–59, 188–194

信忠保, 许炯心, 郑伟. 2007. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, (11): 1504-1514. Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Zheng Wei. 2007. Science in China Series D: Earth Sciences, (11):1504-1514. doi:10.3969/j.issn.1674-7240.2007.11.009

许端阳, 康相武, 刘志丽, 等. 2009. 气候变化和人类活动在鄂尔多斯地区沙漠化过程中的相对作用研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(04): 516-528. Xu Duanyang, Kang Xiangwu, Liu Zhili, et al. 2009. Assessing the relative role of climate change and human activities in sandy desertification of Ordos region, China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 39(04): 516-528. doi:10.1007/s11430-009-0079-y

杨丹, 王晓峰. 2022. 黄土高原气候和人类活动对植被 NPP 变化的影响[J]. 干旱区研究, 39(02): 584-593. Yang Dan, Wang Xiaofeng. 2022. Contribution of climate and human activities to changes in net primary productivity in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research (in Chinese),

39(02): 584-593. doi:10.13866/j.azr.2022.02.25

杨光华, 包安明, 陈曦, 等. 2009. 1998-2007 年新疆植被覆盖变化及驱动因素分析 [J]. 冰川冻土, 31(03):436-445. Yang Guanghua, Bao Anming, Chen Xi, et al. 2009. Study of the vegetation cover change and its driving factors over Xinjiang during 1998-2007 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 31(03):436-445

尹小君, 祝宏辉, Gao Gerry, 等. 2020. 气候变化和人类活动对天山北坡净初级生产力变化的影响 [J]. 农业工程学报, 36(20): 195-202. Yin Xiaojun, Zhu Honghui, Gao Gerry, et al. 2020. Effects of climate change and human activities on net primary productivity in the Northern Slope of Tianshan, Xinjiang, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (in Chinese), 36(20): 195-202. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2020.20.023

张红丽, 张强, 刘骞, 等. 2016. 中国干旱状况的时空分布特征及影响因素[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 52(04): 484-491. Zhang Hongli, Zhang Qiang, Liu Qian, et al. 2016. The temporal and spatial distribution characteristics of dryness index and its main factors in China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 52(04): 484-491. doi: 10.13885/j.issn.0455-2059.2016.04.010

张佳华, 符淙斌, 延晓冬, 等. 2002. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究 [J]. 地球物理学报, (05): 631-637. Zhang Jiahua, Fu Congbin, Yan Xiaodong, et al. 2002. Global respondence analysis of LAI versus surface air temperature and precipitation variations [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), (05): 631-637. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2002.05.005

张杰, 张强, 李栋梁, 等. 2008. 不同植被 LAI 的 MODIS 反演及其在青藏高原东部的应用 [J]. 高原气象, (04): 904-910. Zhang Jie, Zhang Qiang, Li Dongliang, et al. 2008. MODIS retrieval of different vegetation LAI and its application to the East of Qinghai Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), (04): 904-910

张清雨, 赵东升, 吴绍洪, 等. 2013. 基于生态分区的内蒙古地区植被覆盖变化及其影响因素研究 [J]. 地理科学, 33(05): 594-601. Zhang Qingyu, Zhao Dongsheng, Wu Shaohong, et al. 2013. Research on vegetation changes and influence factors based on eco-geographical regions of Inner Mongolia [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 33(05): 594-601. doi:10.13249/j.cnki.sgs.2013.05.010

张文强, 罗格平, 郑宏伟, 等. 2020. 基于随机森林模型的内陆干旱区植被指数变化与驱动力分析:以北天山北坡中段为例 [J]. 植物生态学报, 44(11): 1113-1126. Zhang Wenqiang, Luo Geping, Zheng Hongwei, et al. 2020. Analysis of vegetation index changes and driving forces in inland arid areas based on random forest model: a case study of the middle part of northern slope of the north Tianshan Mountains [J]. Chinese Journal of Plant Ecology (in Chinese), 44(11): 1113-1126. doi:10.17521/cjpe.2020.0111

赵倩倩, 张京朋, 赵天保, 等. 2021. 2000 年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应 [J]. 高原气象, 40(02):292-301. Zhao Qianqian, Zhang Jingpeng, Zhao Tianbao, et al. 2021. Vegetation changes and its response to climate change in China since 2000 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 40(02):292-301. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00025

Bao G, Qin Z H, Bao Y H, et al. 2014. NDVI-Based Long-Term Vegetation Dynamics and Its Response to Climatic Change in the Mongolian Plateau [J]. Remote Sens, 6(9): 8337-8358. doi: 10.3390/rs6098337

Bonan G B. 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. Science, 320(5882): 1444-1449. doi: 10.1126/science.1155121

Brandt M, Yue Y M, Wigneron J P, et al. 2018. Satellite-Observed Major Greening and Biomass Increase in South China Karst During Recent Decade [J]. Earth Future, 6(7): 1017-1028. doi: 10.1029/2018EF000890

Cai D W, Ge Q S, Wang X M, et al. 2020. Contributions of ecological programs to vegetation restoration in arid and semiarid China [J]. Environ Res Lett, 15(11). doi:10.1088/1748-9326/abbde9

De Jong R, Verbesselt J, Zeileis A, et al. 2013. Shifts in Global Vegetation Activity Trends [J]. Remote Sens, 5(3): 1117-1133. doi:10.3390/rs5031117

Du L, Mikle N, Zou Z H, et al. 2018. Global patterns of extreme drought-induced loss in land primary production: Identifying ecological extremes from rain-use efficiency [J]. Sci Total Environ, 628: 611-620. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.114

Evans J, Geerken R. 2004. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. J Arid Environ, 57(4): 535-554. doi:10.1016/S0140-1963(03)00121-6

Gong Z, Kawamura K, Ishikawa N, et al. 2020. Vegetation dynamics and phenological shifts in

long-term NDVI time-series in Inner Mongolia, China [J]. Jpn Agric Res Q, 54(1): 101-112. doi:10.6090/jarq.54.101

Guo Q, Fu B, Shi P, et al. 2017. Satellite monitoring the spatial-temporal dynamics of desertification in response to climate change and human activities across the Ordos Plateau, China[J]. Remote Sens, 9(6): 525. doi:10.3390/rs9060525

Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset[J]. Scientific data, 7(1): 1-18. doi: 10.1038/s41597-020-0453-3

Herrmann S M, Anyamba A, Tucker C J. 2005. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate[J]. Glob Environ Change, 15: 394-404. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2005.08.004

Jiang L, Bao A, Guo H, et al. 2017. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. Sci Total Environ, 599: 967-980. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.012

Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, et al. 2015. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin [J]. Ecol Indic, 51: 117-126. doi:10.1016/j.ecolind.2014.07.031

Jiapaer G, Liang S L, Yi Q X, et al 2015. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator [J]. Ecol Indic, 58: 64-76. doi:10.1016/j.ecolind.2015.05.036

Jin K, Wang F, Zong Q L, et al. 2021. Spatiotemporal differences in climate change impacts on vegetation cover in China from 1982 to 2015 [J]. Environ Sci Pollut Res, 29: 10263-10276. doi:10.1007/s11356-021-16440-7

Kong D, Miao C, Borthwick A G, et al. 2018. Spatiotemporal variations in vegetation cover on the Loess Plateau, China, between 1982 and 2013: possible causes and potential impacts[J]. Environ Sci Pollut Res, 25: 13633-13644. doi: 10.1007/s11356-018-1480-x

Kong D D, Zhang Q, Singh V P, et al. 2017. Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere(1982-2013) [J]. Glob Planet Change, 148: 1-8. doi:10.1016/j.gloplacha.2016.10.020

Li C, Wang R H, Cui X F, et al. 2021. Responses of vegetation spring phenology to climatic factors in Xinjiang, China [J]. Ecol Indic, 124: 107286. doi:10.1016/j.ecolind.2020.107286

Li S, Wang T, Yan C Z. 2017. Assessing the Role of Policies on Land-Use/Cover Change from 1965 to 2015 in the Mu Us Sandy Land, Northern China [J]. Sustainability, 9(7): 1164. doi:10.3390/su9071164

Liang S L, Zhao X, Liu S H, et al. 2013. A long-term Global LAnd Surface Satellite (GLASS) data-set for environmental studies [J]. Int J Digit Earth, 6(sup1): 5-33. doi:10.1080/17538947.2013.805262

Liu H X, Zhang A B, Jiang T, et al. 2018. Response of Vegetation Productivity to Climate Change and Human Activities in the Shaanxi–Gansu–Ningxia Region, China [J]. J Indian Soc Remote Sens, 46: 1081–1092. doi:10.1007/s12524-018-0769-z

Liu Z, Liu Y, Li Y. 2018. Anthropogenic contributions dominate trends of vegetation cover change over the farming-pastoral ecotone of northern China[J]. Ecol Indic, 95: 370-378. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.07.063

Lv M X, Ma Z G, Li M X, et al. 2019. Quantitative Analysis of Terrestrial Water Storage Changes Under the Grain for Green Program in the Yellow River Basin [J]. J Geophys Res-Atmos, 124(3): 1336-1351. doi:10.1029/2018JD029113

Mitchell T D and Jones P D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids[J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 25(6): 693-712. doi: 10.1002/joc.1181

Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. Nature, 386(6626): 698-702. doi:10.1038/386698a0

Park H, Sohn B J. 2010. Recent trends in changes of vegetation over East Asia coupled with temperature and rainfall variations [J]. J Geophys Res, 115(D14). doi:10.1029/2009JD012752

Peng J, Liu Z H, Liu Y H, et al. 2012. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent [J]. Ecol Indic, 14(1): 28-39. doi:10.1016/j.ecolind.2011.08.011

Peng Q, Wang R, Jiang Y, et al. 2021. Contributions of climate change and human activities to vegetation dynamics in Qilian Mountain National Park, northwest China[J]. Glob Ecol Conserv, 32: e01947. doi: 10.1016/j.gecco.2021.e01947

Peng S S, Piao S L, Zeng Z Z, et al. 2014. Afforestation in China cools local land surface temperature

[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 111(8): 2915-2919. doi:10.1073/pnas.1315126111

Piao S L, Mohammat A, Fang J Y, et al. 2006. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China [J]. Glob Environ Change-Human Policy Dimens, 16(4): 340-348. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.002

Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al. 2011. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006 [J]. Glob Change Biol, 17(10): 3228-3239. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02419.x

Piao S L, Wang X H, Wang K, et al. 2020a. Interannual variation of terrestrial carbon cycle: issues and perspectives [J]. Glob Change Biol, 26(1): 300-318. doi:10.1111/gcb.14884

Piao S L, Wang X H, Park T, et al. 2020b. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening [J]. Nat Rev Earth Environ, 1(1): 14-27. doi:10.1038/s43017-019-0001-x

Qi X, Jia J, Liu H, et al. 2019. Relative importance of climate change and human activities for vegetation changes on China's silk road economic belt over multiple timescales[J]. Catena, 180: 224-237. doi: 10.1016/j.catena.2019.04.027

Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, et al. 2013. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system [J]. Agric For Meteorol, 169: 156-173. doi:10.1016/j.agrformet.2012.09.012

Sun G and Mu M. 2011. Nonlinearly combined impacts of initial perturbation from human activities and parameter perturbation from climate change on the grassland ecosystem[J]. Nonlinear Process Geophys, 18(6): 883-893. doi: 10.5194/npg-18-883-2011

Sun Y, Yang Y, Zhang L, et al. 2015. The relative roles of climate variations and human activities in vegetation change in North China[J]. Phys Chem Earth, 87: 67-78. doi: 10.1016/j.pce.2015.09.017

Tian H J, Cao C X, Chen W, et al. 2015. Response of vegetation activity dynamic to climatic change and ecological restoration programs in Inner Mongolia from 2000 to 2012 [J]. Ecol Eng, 82: 276-289. doi:10.1016/j.ecoleng.2015.04.098

Tong X W, Brandt M, Yue Y M, et al. 2018. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering [J]. Nat Sustain, 1(1): 44–50. doi:10.1038/s41893-017-0004-x

Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, et al. 2001. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999 [J]. Int J Biometeorol, 45(4): 184-190. doi:10.1007/s00484-001-0109-8

Verrelst J, Camps-Valls G, Muñoz-Marí J, et al. 2015. Optical Remote Sensing and the Retrieval of Terrestrial Vegetation Biogeophysical Properties—A Review [J]. Isprs J Photogramm, 108: 273-290. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.05.005

Wang G C, Huang Y, Wei Y R, et al. 2019. Climate warming does not always extend the plant growing season in inner Mongolian grasslands: evidence from a 30-year in situ observations at eight experimental sites [J]. J Geophys Res-Biogeosci, 124(7): 2364-2378. doi:10.1029/2019JG005137

Wessels K J, Prince S D, Malherbe J, et al. 2007. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa[J]. J Arid Environ, 68(2): 271-297. doi: 10.1016/j.jaridenv.2006.05.015

Wu D, Zhao X, Liang S, et al. 2015. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change[J]. Glob Change Biol, 21(9): 3520-3531. doi: 10.1111/gcb.12945

Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, et al. 2014. Use of General Regression Neural Networks for Generating the GLASS Leaf Area Index Product From Time-Series MODIS Surface Reflectance [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 52(1): 209-223. doi:10.1109/TGRS.2013.2237780

Xie B N, Jia X X, Qin Z F, et al. 2015. Vegetation dynamics and climate change on the Loess Plateau, China: 1982–2011 [J]. Reg Envir Chang, 16: 1583–1594. doi:10.1007/s10113-015-0881-3

Xu Y F, Yang J, Chen Y N. 2016. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China [J]. Theor Appl Climatol, 126(1-2): 213-222. doi:10.1007/s00704-015-1572-1

Yu L, Wu Z, Du Z, et al. 2021. Insights on the roles of climate and human activities to vegetation degradation and restoration in Beijing-Tianjin sandstorm source region[J]. Ecol Eng, 159: 106105. doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.106105

Zeng Z Z, Piao S L, Li L Z X, et al. 2017. Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades [J]. Nat Clim Change, 7(6): 432-+. doi:10.1038/nclimate3299

Zhao T B and Fu C B. 2006. Comparison of products from ERA-40, NCEP-2, and CRU with station data for summer precipitation over China[J]. Advances in Atmospheric sciences, 23(4): 593-604. doi: 10.1007/s00376-006-0593-1

Zhong L, Ma Y M, Salama M S, et al. 2010. Assessment of vegetation dynamics and their response to variations in precipitation and temperature in the Tibetan Plateau [J]. Clim Change, 103(3-4): 519-535. doi:10.1007/s10584-009-9787-8

Zheng K, Wei J Z, Pei J Y, et al. 2019. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau[J]. Sci Total Environ, 660: 236-244. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.022

Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, et al. 2016. Greening of the Earth and its drivers [J]. Nat Clim Change, 6(8): 791-795. doi:10.1038/nclimate3004