

DOI: 10.5846/stxb202012313335

耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 田智慧. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应. 生态学报, 2022, 42(9): 3557-3568.

Geng Q L, Chen X Q, He X H, Tian Z H. Vegetation dynamics and its response to climate change and human activities based on different vegetation types in China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3557-3568.

中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应

耿庆玲^{1,2}, 陈晓青¹, 赫晓慧^{1,2,*}, 田智慧^{1,2}

1 郑州大学地球科学与技术学院, 郑州 450052

2 郑州大学中国气象科学研究院-郑州大学生态气象联合实验室, 郑州 450052

摘要: 不同植被类型对外界干扰和环境变化的敏感性不同。为厘清中国不同类型植被的动态变化特征及其对外界环境变化的响应, 综合利用趋势分析、残差分析和情景模拟方法, 在明确 2000—2015 年间我国不同植被类型归一化植被指数 (NDVI) 时空变化基础上, 对气候变化和人类活动两大驱动要素在不同植被类型 NDVI 变化中的相对贡献进行了定量评估和归因。研究结果表明: (1) 2000—2015 年, 我国植被 NDVI 整体呈增加趋势, 且其空间占比高达 84.1%。其中, 森林植被的改善状况最佳, 显著增加的面积占到了森林总面积的 82.4%; 而荒漠植被的改善状况相对较差, 仅有 22.3% 的区域呈显著增加趋势。 (2) 人类活动在我国植被变化中占主导地位。植被改善区和植被退化区人类活动的相对贡献分别为 76.4% 和 60.0%, 且人类活动对植被的影响更多与管理方式而非土地利用类型转变有关。 (3) 不同类型植被对气候变化和人类活动的响应差异显著。对于植被改善区, 除沼泽外, 人类活动对各类植被 NDVI 变化的贡献率均在 70% 以上, 尤其是对农作物的贡献率最高, 达到 80.7%; 对于植被退化区, 人类活动影响较大的植被类型为沼泽和农作物, 表明 2000—2015 年间我国沼泽受到了更强烈人类活动的负面影响。研究有助于增强对不同植被类型对全球变化响应机制的理解, 并为促进生态建设和植被恢复工作的有效实施提供科学参考。

关键词: 植被变化; 归一化植被指数 (NDVI); 气候变化; 人类活动; 不同植被类型

Vegetation dynamics and its response to climate change and human activities based on different vegetation types in China

GENG Qingling^{1,2}, CHEN Xiaoping¹, HE Xiaohui^{1,2,*}, TIAN Zhihui^{1,2}

1 School of Geoscience and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China

2 Joint Laboratory of Eco-Meteorology of Zhengzhou University and Chinese Academy of Meteorological Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China

Abstract: Climate change and human activities are the main driving forces of vegetation dynamics. However, sensitivity to external disturbance and environment is different among different vegetation types. Knowledge of dynamics of different vegetation types in related to climatic changes and anthropogenic activities is thus critical for understanding the driving mechanism of vegetation changes and developing ecological protection strategies. During the past decades, China has experienced dramatic climate and land use/land cover changes, and the vegetation cover has changed significantly. However, most studies focused on the attribution of vegetation change in a single vegetation type. Vegetation dynamics and its response to climate change and human activities based on different vegetation types remains unknown in China. Therefore, it is necessary to enhance an understanding of contributions of climate change and human activities among different vegetation types in China. Based on the trend analysis, residual analysis and scenario simulation methods, this

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41801085); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0106); 郑州大学青年教师专项科研启动基金项目 (32211701)

收稿日期: 2020-12-31; 网络出版日期: 2022-01-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hexh@zzu.edu.cn

paper investigated the spatial and temporal changes of different vegetation types in China using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) during 2000—2015, and distinguished the relative role of climatic change and human activities. Results indicated that: (1) vegetation NDVI showed an increasing trend in China during 2000—2015, with a proportion of 84.1%. Moreover, the increasing trend can be divided into two stages: the rapid rise stage during 2000—2005 (with a rate of 0.0074/a) and the slow rise stage during 2000—2015 (with a rate of 0.0024/a). Among various vegetation types, the forest vegetation showed the best improvement tendency with significantly increased area accounting for 82.4% of total forest area, while desert vegetation improved relatively poor, with only 22.3% of the area where vegetation increased significantly. (2) Vegetation changes in China were mainly affected by human activities. The relative roles of human activities in vegetation improvement areas and in vegetation degradation areas were 76.4% and 60.0%, respectively. Moreover, its impact was more related to management methods than the change of land use types. (3) The responses of different vegetation types to climate change and human activities varied greatly. In vegetation improvement areas, with the exception of marshes vegetation, the contributions of human activities to vegetation changes were more than 70%, especially to crops with 80.7%. In vegetation degradation areas, marshes and crops vegetation were most affected by human activities, indicating that marshes in China suffered the negative effects of more intensive human interference in 2000—2015. Therefore, regional governments should strive to improve ecological quality of various vegetation types, especially dominant vegetation, to promote the local ecological construction.

Key Words: vegetation changes; NDVI; climate change; human activities; different vegetation types

作为陆地生态系统的主体,植被在调节区域气候、维持地表能量平衡等方面起着关键作用^[1-2],但对外界环境的变化也较为敏感^[3]。长期动态监测和评估植被变化及其驱动要素对于理解全球变化的影响,实现生态系统的有效管理具有重要价值^[4]。植被变化通常受气候变化和人类活动的共同作用^[5],受景观环境异质性与人为干扰强度差异的影响^[6],不同植被类型对驱动因素的响应程度有所差别^[7-8]。因此,针对不同植被类型时空格局演变及归因进行研究,可有效促进对区域植被动态变化及其驱动机制的理解。

全球环境变化与陆地生态系统关系研究是近年来全球变化领域的核心内容之一^[9-10]。研究表明,在气候变暖影响下,全球植被,尤其是北半球植被呈显著增强趋势^[11]。但是,由于不同植被类型对全球变化的敏感性不同,其驱动要素存在较大差异。如在 1982—2015 年期间,北半球除常绿阔叶林外,其它类型植被生长主要受降水影响^[12],而在中国,落叶阔叶林、开放灌丛和草原则均与气温和降水呈正相关关系,但对气温的响应更加强烈^[13]。因此,揭示不同植被类型的动态变化及其对气候因素的响应特征,对于理解陆地与大气的交互作用具有重要意义,也成为气候变化背景下国内外学者关注的重点^[14-15]。但除气候因素外,不同植被类型受到人为因素的影响也不同^[16-17]。不少学者已对气候变化和人类活动对特定类型植被变化的相对贡献进行了量化,如草地、沼泽、荒漠等^[18-21]。但是,对植被类型进行区分更有利于揭示植被变化的驱动机制^[6]。例如,在西北干旱区,人类活动更多的改善了农作物、荒漠、草地和高山植被等,但对森林、灌木、沼泽等植被类型的退化作用较大;而气候变化对除沼泽外的各种植被类型的恢复作用均较大^[22];在西南喀斯特地区,气候因素仅可以解释 8.5% 的年均 NDVI 的变化情况,但是对草地的影响几乎是农田的影响的 4 倍^[23]。总体来看,目前的研究大多局限于单一植被类型,且不同地区植被生长的最重要驱动因素仍不清楚,现阶段尚缺乏对中国不同植被类型时空变化及其归因特征系统而全面的认识。

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 是反映植被生长状态及其覆盖度的有效指标^[24-25],目前在植被变化监测的研究中得到了广泛应用。因此本文基于 2000—2015 年中国植被 NDVI 数据、气象数据和植被类型数据,定量分析了不同植被类型动态变化特征及其对驱动因素的响应程度。旨在揭示 2000—2015 年我国不同植被类型的改善和退化状况,定量评估气候变化和人类活动在不同植被类型改善和退化过程中的相对贡献,以期系统认识气候和人为因素对我国植被变化的影响,深入理解不同类型植被改善和退化的驱动机制提供科学支撑。

1 数据与方法

1.1 数据来源与处理

2000—2015 年植被 NDVI 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1km。该数据集基于 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据, 具有空间分辨率高、对植被变化敏感性强等优势, 适合于大尺度和中尺度植被变化的研究^[26]。为消除低植被覆盖区域土壤背景值的干扰, 将 NDVI 值 < 0.1 的区域划定为无植被区并进行剔除^[27]。

气象数据从中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 获取, 包括 2000—2015 年中国地区的年降水量和年平均气温数据。空间分辨率为 1km, 基于全国 2400 多个气象站点日观测数据, 采用平滑样条函数法进行空间插值得到。

2000 年中国植被类型数据集来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>), 空间分辨率为 1km。为充分了解我国主要植被类型对气候变化和人类活动的响应情况, 按照植被类型的一级分类, 将植被分为森林、灌丛、草原、农作物、沼泽、荒漠植被等 6 种类型 (图 1)。

2000 年与 2015 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1km。按照土地利用类型的一级地类划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种类型。另外, 在 ArcGIS 10.3 平台下, 将所有数据重投影为 WGS84/Albers Equal Area Conic 投影。

1.2 方法

1.2.1 趋势分析法

趋势分析采用的是一元线性回归分析法, 该方法能够减少偶发性因素对植被生长状态的影响, 可以准确地反映出植被长期的变化趋势^[28]。因此, 利用此方法分析 2000—2015 年中国植被的时空变化特征。计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NDVI}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中, slope 表示 NDVI 变化趋势; n 表示研究时序; i 为年序号, 等于 1 到 n 的整数; NDVI_i 表示第 i 年的 NDVI 值; 当 $\text{slope} > 0$, 表示植被趋于改善, 反之则退化。利用 F 检验判断趋势的显著性。计算公式为:

$$F = \frac{S_R}{S_E / (n - 2)} \quad (2)$$

式中, $S_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 称为误差平方和, $S_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 称为残差平方和, $n - 2$ 代表残差自由度, y_i 代表第 i 年的 NDVI 观测值, $\hat{y}_i$ 代表其第 i 年的线性回归值。结合 F 检验结果, 将其变化趋势划分为 6 类: 极显著增加 ($\text{slope} > 0, P < 0.01$)、显著增加 ($\text{slope} > 0, 0.01 < P < 0.05$)、不显著增加 ($\text{slope} > 0, P > 0.05$)、极显著减少 ($\text{slope} < 0, P < 0.01$)、显著减少 ($\text{slope} < 0, 0.01 < P < 0.05$)、不显著降低 ($\text{slope} < 0, P > 0.05$)。

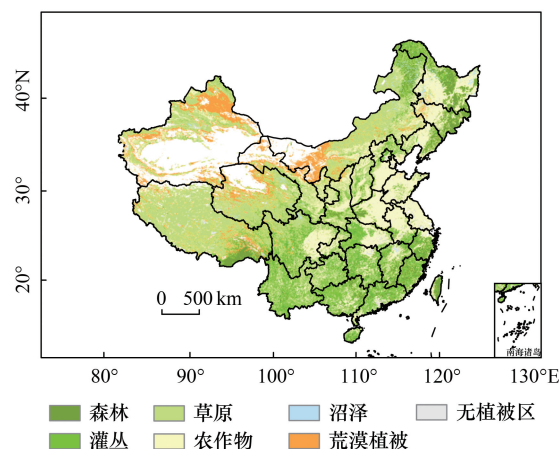


图 1 中国不同植被类型的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of different vegetation types in China

1.2.2 气候变化和人类活动对 NDVI 变化的相对贡献分析

驱动因素对 NDVI 变化的相对贡献分析通过结合残差分析法和情景模拟评估方法进行实现。残差分析法是衡量气候和人为影响因子对植被变化作用程度的一种常用方法。该方法通过逐像元建立 NDVI 与气候因素的多元回归模型,得到 NDVI 预测值,即气候因素对植被变化的影响。在不考虑其他因素的情况下,将 NDVI 残差值视为人类活动产生的影响。将该方法与趋势分析法相结合,可以削弱由于植被饱和效应而产生的对 NDVI 值的影响^[29],其具体表达式如下:

$$\text{NDVI}_p = a \times T + b \times P + C \tag{3}$$

$$\text{NDVI}_h = \text{NDVI}_o - \text{NDVI}_p \tag{4}$$

式中, NDVI_p 表示 NDVI 预测值; NDVI_h 表示 NDVI 残差值; NDVI_o 表示 NDVI 观测值; a 、 b 和 c 分别对应多元回归模型中年均温、年降水和常数项的回归系数; T 和 P 分别为年均气温和年降水量。

情景模拟评估方法是根据计算的 NDVI_o 、 NDVI_p 、 NDVI_h 的变化趋势(slope_o 、 slope_p 、 slope_h) 构建不同的情景,定量评估驱动因素在植被改善和退化中相对贡献的一种方法^[30],所构建的情景如表 1 所示。当 $\text{slope}_o > 0$,表示植被趋于改善,反之则退化;当 $\text{slope}_p > 0$,表示气候变化促进植被生长,反之则抑制;当 $\text{slope}_h > 0$,表示人类活动促进植被生长,反之则抑制。

表 1 不同情景下驱动因素对植被变化相对作用的计算方法

Table 1 The calculation method of the relative effects of driving factors on vegetation change under different scenarios

植被变化分区 Vegetation change zone	情景 Scenarios	slope_o	slope_p	slope_h	气候变化的相对贡献/% Relative contribution of climate change	人类活动的相对贡献/% Relative contribution of human activities
植被改善区 Vegetation improvement areas	情景 1	>0	<0	>0	0	100
	情景 2	>0	>0	<0	100	0
	情景 3	>0	>0	>0	$\frac{\text{slope}_p}{\text{slope}_p + \text{slope}_h} \times 100$	$\frac{\text{slope}_h}{\text{slope}_p + \text{slope}_h} \times 100$
植被退化区 Vegetation degradation areas	情景 4	<0	<0	>0	100	0
	情景 5	<0	>0	<0	0	100
	情景 6	<0	<0	<0	$\frac{\text{slope}_p}{\text{slope}_p + \text{slope}_h} \times 100$	$\frac{\text{slope}_h}{\text{slope}_p + \text{slope}_h} \times 100$

2 结果

2.1 2000—2015 年中国植被 NDVI 的时空变化特征

从时间上看,中国植被覆盖状况在 2000—2015 年间呈现不断改善特征,NDVI 呈波动上升趋势(增速为 0.0034/a)。同时,NDVI 上升趋势的阶段变化特征明显,其中与起始年份差值在 0—5 年期间为快速上升阶段,增速为 0.0074/a;在 5—15 年期间则为缓慢上升阶段,增速为 0.0024/a。另外,整个研究期间,NDVI 的变化范围在 0.483—0.542 之间,平均值为 0.516,最低值出现在起始年份 2000 年(图 2)。

从空间分布上看,中国大部分地区 NDVI 呈增加趋势,具有增加趋势的区域占植被总面积的 84.1%,且这种趋势以显著性增加($P < 0.05$)为主,占比为 52.6%,主要分布在黄土高原、东北平原、长白山脉、小兴安岭、云

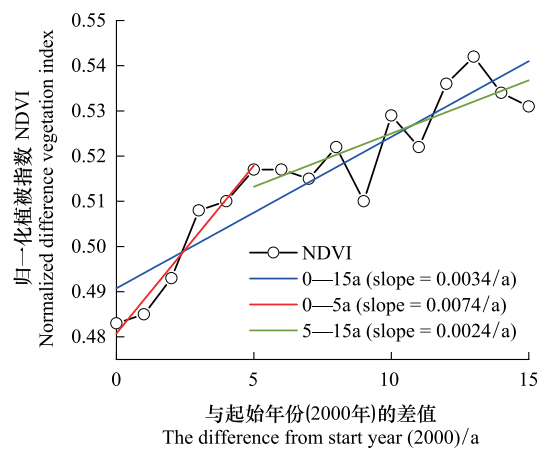


图 2 2000—2015 年中国植被 NDVI 年际变化

Fig.2 Inter-annual variations of NDVI in China during 2000—2015

贵高原、天山山脉以及塔里木盆地北部边缘地区。中国植被 NDVI 呈减少趋势的面积比例相对较小,占 15.9%,且减少趋势以不显著降低为主,占 13.5%,主要分布在内蒙古高原西南部 and 新疆东北部地区;呈显著降低趋势($P<0.05$)的面积占植被总面积的 2.4%,主要集中在我国中东部一些经济发展较快地区,如长三角城市群及部分省会城市中心区域(图 4)。

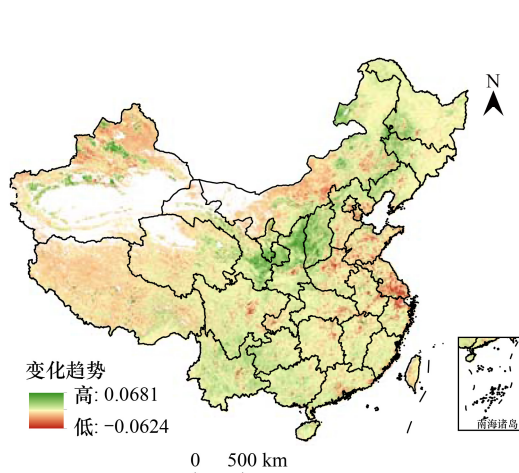


图 3 2000—2015 年中国植被 NDVI 变化趋势

Fig.3 NDVI change trend in China during 2000—2015

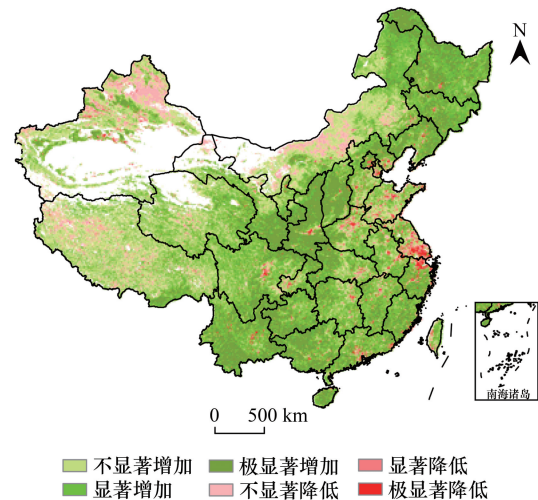


图 4 NDVI 变化趋势显著性的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of NDVI trend significance

从不同植被类型上看,6 种主要植被类型 NDVI 呈增加趋势的比例均远高于呈减少趋势的比例(图 5)。增长比例从高到低依次为:森林>灌丛>沼泽>农作物>草原>荒漠植被。森林和灌丛植被 NDVI 显著增加($P<0.05$)的区域分布范围较广,分别占其总面积的 82.4% 和 79.3%,对于沼泽植被而言,61.5%的区域呈显著增加趋势。同时,在所有植被类型中,荒漠植被 NDVI 呈现退化态势的比例最多,但植被退化主要呈不显著降低趋势,占荒漠植被总面积的 30.3%;草原和农作物 NDVI 呈现降低趋势的比例几乎相当,分别占其总面积的 17.3% 和 15.8%,但农作物 NDVI 的降低状况更加严重,呈显著降低($P<0.05$)趋势的比例最高,占农作物总面积的 5.0%。

2.2 不同植被类型 NDVI 对气候变化和人类活动的响应

气候因素对植被变化的驱动作用如图 6 所示,2000—2015 年,气候变化导致植被 NDVI 呈增加和降低趋势的面积分别占植被总面积的 72.8% 和 27.2%。从植被变化状况来看,仅在气候因素的影响下,植被 NDVI 变化趋势以不显著变化为主。其中呈不显著增加趋势的比例最大,占植被总面积的 59.5%,主要分布在内蒙古高原东北部、黄土高原和东南丘陵的西部地区;呈不显著降低趋势的比例次之,占 24.8%,主要分布在内蒙古高原中部、青藏高原西南部、祁连山脉、华北平原等地区。

人类活动导致植被 NDVI 呈增加和降低趋势的面积分别占植被总面积的 84.4% 和 15.6%(图 6)。其中,呈显著增加($P<0.05$)趋势的面积占 44.7%,主要分布在黄土高原、长白山脉、天山山脉、东北平原和云贵高原

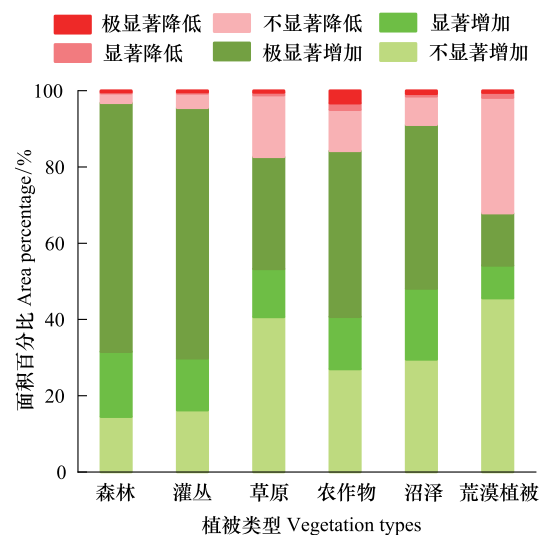


图 5 中国不同植被类型 NDVI 变化趋势

Fig.5 NDVI change trend of different vegetation types in China

东部地区;呈不显著增加趋势的面积占 39.7%,主要分布在青藏高原和云贵高原西北部地区;而呈显著降低 ($P<0.05$) 趋势的比例最小,占植被总面积的 2.0%,主要集中在长三角城市群及部分省会城市中心区域;呈不显著降低趋势的区域主要分布在青藏高原西北部和内蒙古高原等地区,占 13.6%。

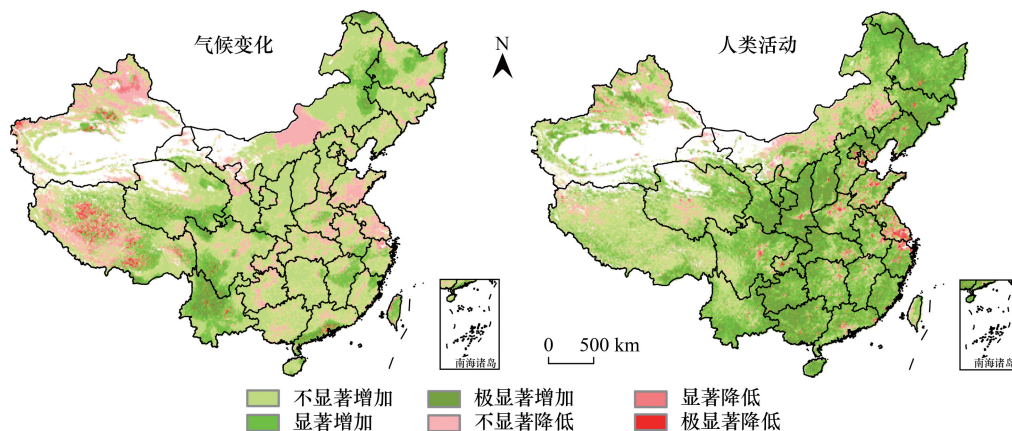


图 6 2000—2015 年气候变化和人类活动对中国植被变化的影响

Fig.6 Effects of climate change and human activities on vegetation change in China during 2000—2015

对于不同植被类型而言,由于植被与气候因素作用关系的复杂性,不同类型植被对气候变化的响应特征存在显著差异。沼泽和灌丛植被受到气候变化的积极影响相对较大,气候变化导致这两种植被类型 NDVI 显著增加 ($P<0.05$) 的区域分别占其总面积的 25.4% 和 18.5%;对于森林和草原,17.7% 和 14.7% 的区域呈显著增加趋势;在农作物植被中,呈显著增加趋势的比例为 9.6%;荒漠植被呈显著增加趋势的比例最小,仅占 7.1%。值得注意的是,草原和荒漠植被受到气候变化的消极影响较大,植被 NDVI 呈显著降低 ($P<0.05$) 趋势的比例相对较高,分别占其总面积的 3.7% 和 4.4% (图 7)。

此外,由图 7 可知,在人类活动的积极干预下,森林和灌丛植被的覆盖状况得到明显改善,植被 NDVI 呈显著增加 ($P<0.05$) 趋势的面积分别占其总面积的 69.6% 和 68.1%;对于农作物和沼泽,52.1% 和 45.1% 的区域呈显著增加趋势;在草原植被覆盖区域,呈显著增加趋势的面积占 27.7%;而荒漠植被呈显著增加趋势的比例最小,仅占 19.9%。从植被退化状况来看,人类活动对草原和农作物 NDVI 降低的影响远大于其他植被类型。其中,草原植被 NDVI 呈显著降低 ($P<0.05$) 趋势的比例最高,占其总面积的 17.4%,其次为农作物,植被 NDVI 呈显著降低趋势的面积占其总面积的 4.3%。

2.3 气候变化和人类活动对不同植被类型 NDVI 变化的相对贡献

由图 8 可知,在我国植被改善区域,气候变化发挥的作用相对较小,贡献率仅为 23.6%,在大多数地区,气候变化对植被改善的贡献率主要集中在 0—20% 范围内。气候贡献率在 80%—100% 范围内的面积较小,仅占植被改善面积的 5.5%,主要分布在内蒙古高原东南部、云贵高原西北部、青海南部等地区;与气候因素相比,人类活动对我国植被改善起到关键作用,贡献率为 76.4%,且在大部分地区的相对贡献率达到 60% 以上,其中贡献率在 80% 以上的区域占植被改善区面积的 57.6%,主要分布在黄土高原、天山山脉、塔里木盆地北部边缘、长白山脉、云贵高原东北部、东南丘陵西南部等地区。

在植被退化区域,尽管气候变化对植被变化的贡献率较植被改善区而言有所提高但仍低于人类活动的作用(二者的相对贡献分别为 40.0% 和 60.0%)。其中,气候变化对植被 NDVI 退化的贡献率在 80%—100% 范围内的面积相对较大,占植被退化面积的 25.3%,主要分布在青藏高原西南部、准噶尔盆地和内蒙古高原中部等地区;人类活动对植被 NDVI 退化的贡献率在 80% 以上的面积同样较大,占植被退化面积的 44.5%,主要分布在内蒙古高原的西南部和东北部、华北平原、长江中下游平原、青藏高原东北部等地区(图 9)。

对于各植被类型而言,在我国植被改善区域,人类活动对 NDVI 变化的贡献率均明显高于气候变化的贡

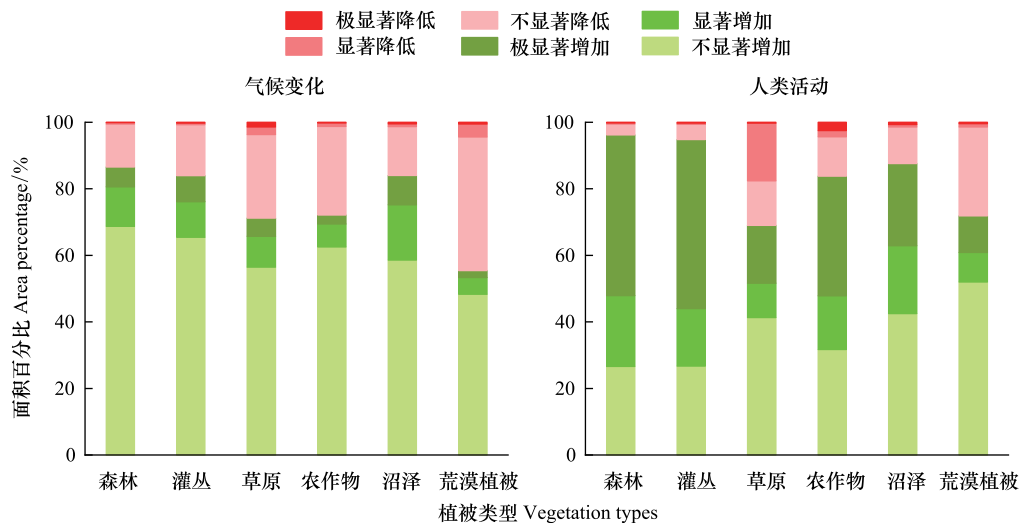


图7 2000—2015年气候变化和人类活动对中国不同植被类型NDVI变化的影响

Fig.7 Effects of climate change and human activities on NDVI change of different vegetation types in China during 2000—2015

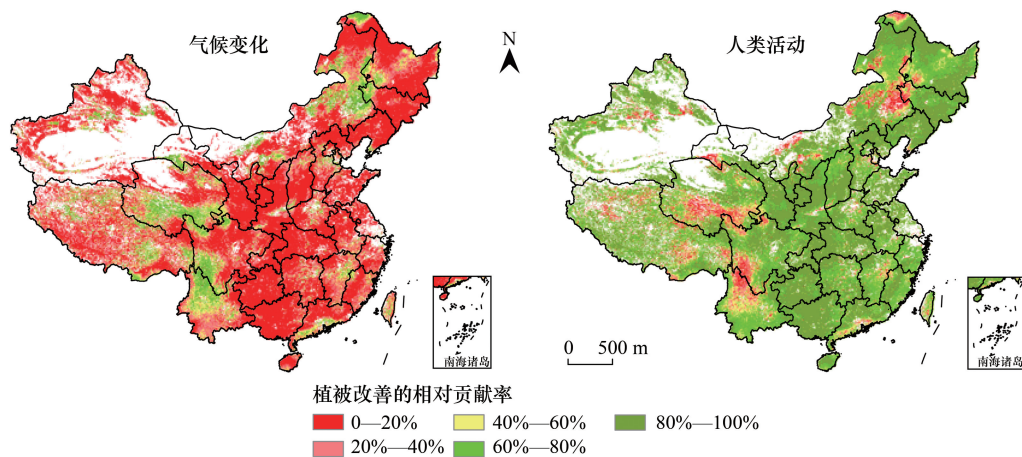


图8 2000—2015年气候变化和人类活动对植被改善的相对贡献

Fig.8 Relative contributions of climate change and human activities to vegetation improvement during 2000—2015

献率。其中,人类活动对农作物NDVI增长的贡献率最大,为80.7%;其次为灌丛、森林、荒漠植被和草原,其贡献率均在70%以上;人类活动对沼泽植被的相对贡献最小,但贡献率仍接近70%(为69.3%)。在我国植被退化区域,草原和荒漠植被受到气候变化和人类活动的相对作用较为均衡,两者对草原和荒漠植被退化的贡献率分别为46.7%、53.3%和48.9%、51.1%。但在沼泽和农作物植被NDVI降低过程中,人类活动的贡献率明显较高,分别为72.9%和72.7%,气候变化的贡献率仅为27.1%和27.3%。同时,人类活动对森林、灌丛植被退化的贡献率也相对较大,分别为68.5%、67.6%(图10)。总体而言,人类活动在我国不同植被类型NDVI增加和减少过程中的相对影响均较大。

3 讨论

在气候变化和人类活动的共同作用下,2000—2015年间中国植被总体覆盖状况得到明显改善,并且不同植被类型NDVI的变化趋势均以增加为主,这一结果与已有研究中我国主要植被类型呈动态转绿趋势这一结论相一致^[31—32]。在对植被NDVI变化的归因分析中发现,人类活动在不同植被类型改善和退化中的相对贡

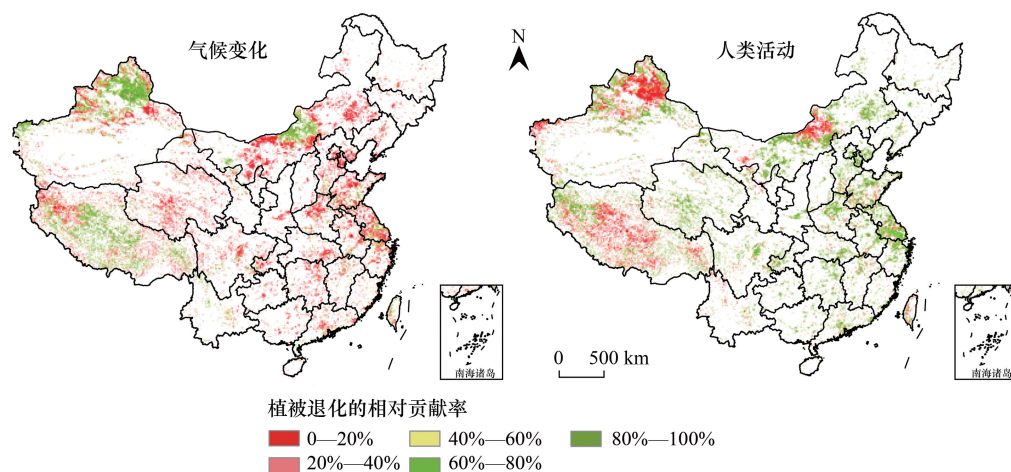


图9 2000—2015年气候变化和人类活动对植被退化的相对贡献

Fig.9 Relative contributions of climate change and human activities to vegetation degradation during 2000—2015

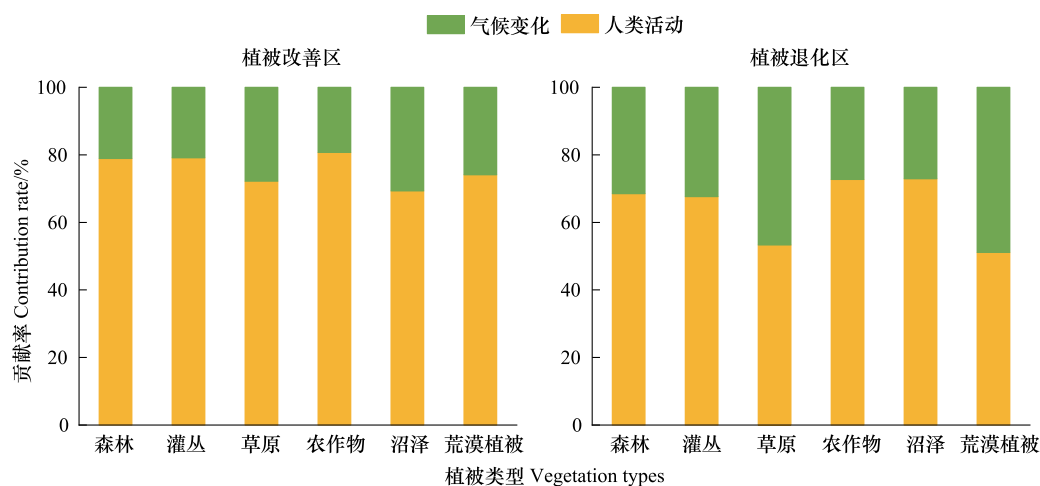


图10 气候变化和人类活动对中国不同植被类型NDVI变化的相对贡献

Fig.10 The relative contributions of climate change and human activities to NDVI change of different vegetation types in China

献均较大。一方面,这与提高农业综合管理水平和生态恢复项目实施下的管理成效有关^[33—34];但另一方面,过度放牧及快速城市化等人类活动对植被生长也产生了一定的负面影响^[35]。如内蒙古高原的科尔沁沙地和长三角地区的植被NDVI在研究期间呈显著下降趋势(图9)。

不同水热条件在一定程度上决定了植被景观格局,相应地,不同植被类型对热量条件与土壤水分变化的响应存在较大差异^[14]。在研究时段内,我国森林和灌丛植被的增加趋势较为明显,尤其是在黄土高原地区(图3)。尽管这很大程度上与近年来大规模实施的三北防护林体系建设工程、退耕还林(草)工程和天然林保护工程等生态建设工程有关,但该地区暖湿化的气候趋势也在一定程度上促进了植被的生长与恢复^[36]。沼泽植被的生长状况也相对较好,这与近几十年来全球气候变暖的变化趋势密切相关。气温上升使得部分沼泽分布区多年冻土融化,植被生长的土壤环境得到改善,气候变化对沼泽植被生长产生了较强的正效应^[37]。然而,气候因素对部分植被类型的负面作用也不容忽视,尤其是草原和荒漠植被的退化受气候变化的影响相对较大(图10),气候驱动下的植被退化区域分别位于准噶尔盆地和青藏高原西南部、内蒙古高原中部地区,这些区域属于西北干旱与半干旱地区,气温和降水量是影响植被生长状况的主要限制性因素。在研究期间,

年降水量显著降低(图 11),导致干旱趋势进一步加剧,进而对植被生长产生了不利影响^[38]。与其他植被类型相比,草原和荒漠植被生态系统更加脆弱,植被退化的风险更高。

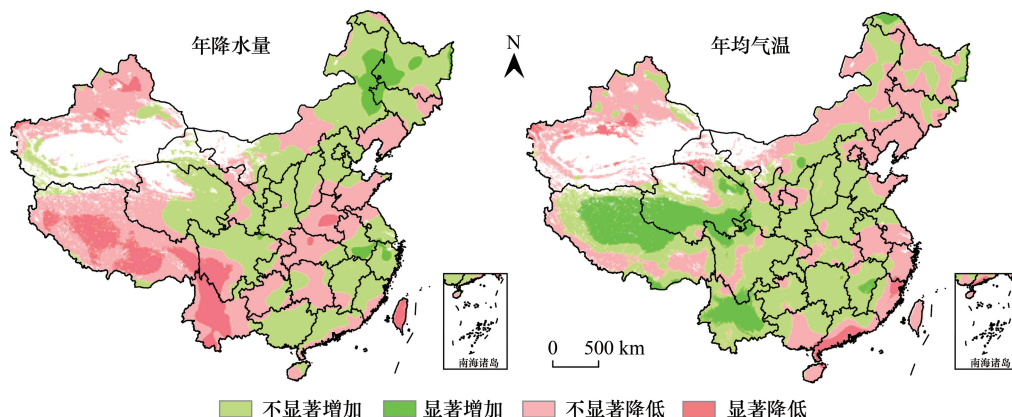


图 11 2000—2015 年中国年降水量及年均气温变化趋势空间分布

Fig.11 Spatial distribution of change trend of annual precipitation and annual mean temperature in China during 2000—2015

除气候环境中的水热条件外,人类活动也是决定植被空间分布格局及动态变化的关键因素。人类活动对植被 NDVI 变化具有双重作用,尤其是对于农作物和草原。就农作物而言,NDVI 的增加主要受到人为因素影响,现代高效农业工程在农作物生长过程中起到明显促进作用^[39],但在长三角城市群及部分省会城市附近,人为干扰对农作物的破坏程度逐渐增强^[40],因此,在粮食安全的战略背景下,人类活动对农作物带来的负面影响应当引起足够重视;草原主要分布在我国北方地区,人类活动对草原恢复的贡献达到 72.2%,这说明“退牧还草”计划等生态项目对草原恢复具有显著的正向作用。但是,应当引起注意的是,在内蒙古高原西南部地区,人类活动对草地植被的破坏较为剧烈(图 9)。Mu 等^[41]已经发现该地区放牧压力并没有得到缓解,而是随着生态脆弱区围封草地面积的增加和牲畜数量的增长,放牧压力变得更加集中。此外,沼泽植被受到放牧活动的影响也较大,青藏高原西南部地区的沼泽大多分布在牧区,沼泽植被受到人类活动的干扰更为强烈^[42]。目前,控制放牧强度仍然是植被生态保护建设中的必要措施。

另外,人类活动也会造成土地利用类型和利用方式发生变化,进而对植被覆盖面积和生态质量产生一定影响,因此明晰土地利用变化的影响程度对于合理认识植被动态变化及其成因分析具有重要意义。本文通过量化土地利用变化对植被 NDVI 变化的贡献发现^[43],仅有 2.3%的区域土地利用类型发生变化,且各类型土地发生变化的占比均较低(图 12)。由土地利用类型变化导致的 NDVI 的变化仅占 NDVI 变化的 2.7%(图 13)。这一方面与所用数据的空间分辨率有关。尽管 2000 年以后,我国启动了一系列重大生态保护和修复工程,如退耕还林(草)项目,且城市发展迅速,这些确实在一定程度上会对我国的生态系统格局产生影响。然而,栅格数据中的单元格属性值仅代表主要的土地覆盖类型,进而忽视了栅格内部的空间异质性。所以,栅格数据的空间分辨率越低,对空间信息的表达越有限。但是,较高

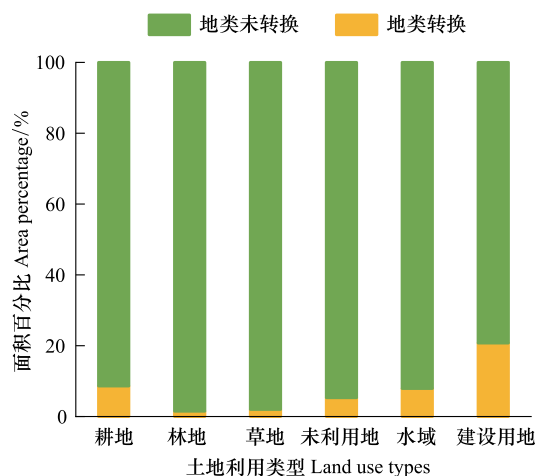


图 12 2000—2015 年间土地利用变化在各植被类型中的面积占比

Fig.12 The proportion of land use change area in various vegetation types during 2000—2015

的空间分辨率尽管对反映空间异质性具有更高的代表性,却增加了计算的难度。因此,选择合适的空间尺度是研究相关问题的关键。本研究采用 1km 空间分辨率的数据进行全国尺度的植被变化分析,尽管在一定程度上忽视了土地利用变化的空间异质性,但是仍能体现其整体的空间信息特征。另一方面,这一结果也间接表明了 2000—2015 年间,我国植被覆盖发生显著变化主要是由于土地利用管理方式的改变或生态保护措施下带来的生态系统功能的提升,而不是土地利用类型变化导致的。如退耕还林(草)项目尽管会产生一定的耕地转化,但是这一项目也涵盖了封山育林、禁牧、天然林保护等自然恢复形式。而农作物植被的变化则可能与农业管理水平的提高或作物种类的改变有关。宋乃平等^[44]通过对盐池县植被变化及其驱动力的分析显示,相比于

土地利用类型变化,土地利用方式改善对植被动态的影响更为关键,且前者对 NDVI 变化的贡献远远小于后者。因此假设在 1km 尺度上土地利用类型变化对 NDVI 变化的贡献可以忽略。尽管这会对研究结果产生一定的不确定性,但是研究结果对于深入理解不同类型植被动态变化及其驱动机制这一问题仍具有一定参考价值。对于更明确的土地利用变化对植被 NDVI 的影响还需结合更高分辨率的空间数据,这也是未来研究中需要进一步解决的问题。

4 结论

本文基于 2000—2015 年 SPOT VGT/NDVI 数据,在剔除非植被区域的基础上,利用趋势分析、残差分析和情景模拟评估法研究了中国植被 NDVI 的时空变化特征,并进一步明确了不同植被类型 NDVI 对气候变化和人类活动两种关键驱动因素的响应。结果表明:

(1) 2000—2015 年我国植被覆盖状况得到明显改善,NDVI 呈波动上升趋势,增速为 0.0034/a。其中 2000—2005 年为快速上升阶段,增速为 0.0074/a;2005—2015 年为缓慢上升阶段,增速为 0.0024/a。

(2) 在气候变化和人类活动的影响下,森林、灌丛和沼泽植被呈现绿化趋势的比例较大,其中,森林植被的改善状况最佳。荒漠植被、草原和农作物受到两者的负面影响较为明显,荒漠植被呈现退化趋势的比例最多,但植被退化以不显著降低趋势为主,占其总面积的 30.3%。值得注意的是,农作物 NDVI 的降低程度最为严重,呈极显著降低和显著降低趋势的比例最高。

(3) 随着人为影响的日益加剧,植被对人类活动表现出较高的敏感性。在我国植被改善区域,气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的相对贡献分别为 23.6% 和 76.4%;而在植被退化区域,两者对植被变化的相对贡献分别为 40.0% 和 60.0%。这说明在 16a 时间尺度上,人类活动是我国植被覆盖变化的决定性因素,未来在对植被的保护和管理中不仅仅要关注人类活动的积极影响,对人为干扰也应予以足够重视。

(4) 不同类型植被对气候变化和人类活动的响应情况存在显著差异。人类活动对改善区植被的相对贡献依次为:农作物>灌丛>森林>荒漠植被>草原>沼泽;对于退化区植被,其相对贡献为:沼泽>农作物>森林>灌丛>荒漠植被>草原。总的来说,人类活动对农作物和灌丛植被的影响远大于草原和荒漠植被,因此对植被类型加以区分,更有利于揭示植被变化的影响机制。

参考文献 (References):

- [1] Zhang B W, Cui L L, Shi J, Wei P P. Vegetation dynamics and their response to climatic variability in China. *Advances in Meteorology*, 2017, 2017: 8282353.

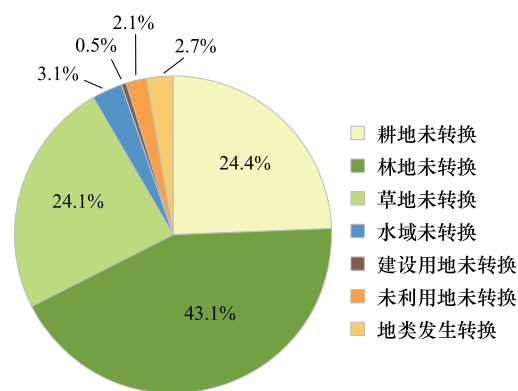


图 13 2000—2015 年间土地利用变化对 NDVI 变化的影响

Fig. 13 Effects of land use change on NDVI change during 2000—2015

- [2] Sun Y L, Shan M, Pei X R, Zhang X K, Yang Y L. Assessment of the impacts of climate change and human activities on vegetation cover change in the Haihe River basin, China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2020, 115: 102834.
- [3] Qi X Z, Jia J H, Liu H Y, Lin Z S. Relative importance of climate change and human activities for vegetation changes on China's silk road economic belt over multiple timescales. *Catena*, 2019, 180: 224-237.
- [4] Tong L J, Liu Y Y, Wang Q, Zhang Z Y, Li J L, Sun Z G, Khalifa M. Relative effects of climate variation and human activities on grassland dynamics in Africa from 2000 to 2015. *Ecological Informatics*, 2019, 53: 100979.
- [5] Shi S Y, Yu J J, Wang F, Wang P, Zhang Y C, Jin K. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over multiple time scales on the Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142419.
- [6] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆盖类型 NDVI 对气候变化的响应. *生态学报*, 2020, 40(2): 678-691.
- [7] Jiang L L, Jiapaer G, Bao A M, Guo H, Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2017, 599-600: 967-980.
- [8] Meng X Y, Gao X, Li S Y, Lei J Q. Spatial and Temporal Characteristics of Vegetation NDVI Changes and the Driving Forces in Mongolia during 1982—2015. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 603.
- [9] Chen T, Bao A M, Jiapaer G, Guo H, Zheng G X, Jiang L L, Chang C, Tuerhanjiang L. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982—2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 1311-1325.
- [10] 刘亚群, 吕昌河, 傅伯杰, 于伯华. 中国陆地生态系统分类识别及其近 20 年的时空变化. *生态学报*, 2021, 41(10): 3975-3987.
- [11] Chen C, Li D, Li Y, Piao S L, Wang X H, Huang M Y, Gentine P, Nemani R R, Myneni R B. Biophysical impacts of Earth greening largely controlled by aerodynamic resistance. *Science Advances*, 2020, 6(47): eabb1981.
- [12] 李茂华, 都金康, 李皖彤, 李闰洁, 吴森垚, 王姗姗. 1982—2015 年全球植被变化及其与温度和降水的关系. *地理科学*, 2020, 40(5): 823-832.
- [13] 卢乔倩, 江涛, 柳丹丽, 刘智勇. 中国不同植被覆盖类型 NDVI 对气温和降水的响应特征. *生态环境学报*, 2020, 29(1): 23-34.
- [14] 孙锐, 陈少辉, 苏红波. 黄土高原不同生态类型 NDVI 时空变化及其对气候变化响应. *地理研究*, 2020, 39(5): 1200-1214.
- [15] Chu H S, Venevsky S, Wu C, Wang M H. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2051-2062.
- [16] Yang H F, Yao L, Wang Y B, Li J L. Relative contribution of climate change and human activities to vegetation degradation and restoration in North Xinjiang, China. *The Rangeland Journal*, 2017, 39(3): 289-302.
- [17] Li H, Zhang H Y, Li Q X, Zhao J J, Guo X Y, Ying H, Deng G R, Rihan W, Wang S L. Vegetation Productivity Dynamics in Response to Climate Change and Human Activities under Different Topography and Land Cover in Northeast China. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 975.
- [18] Liu Y Y, Wang Q, Zhang Z Y, Tong L J, Wang Z Q, Li J L. Grassland dynamics in responses to climate variation and human activities in China from 2000 to 2013. *Science of the Total Environment*, 2019, 690: 27-39.
- [19] Zheng K, Wei J Z, Pei J Y, Cheng H, Zhang X L, Huang F Q, Li F M, Ye J S. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 236-244.
- [20] Hao J, Xu G Y, Luo L, Zhang Z, Yang H L, Li H Y. Quantifying the relative contribution of natural and human factors to vegetation coverage variation in coastal wetlands in China. *Catena*, 2020, 188: 104429.
- [21] Zhou W, Gang C C, Zhou F C, Li J L, Dong X G, Zhao C Z. Quantitative assessment of the individual contribution of climate and human factors to desertification in northwest China using net primary productivity as an indicator. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 560-569.
- [22] 秦景秀, 郝兴明, 张颖, 花顶. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响. *干旱区地理*, 2020, 43(1): 117-125.
- [23] 张凯选, 范鹏鹏, 王军邦, 叶辉. 西南喀斯特地区植被变化及其与气候因子关系研究. *生态环境学报*, 2019, 28(6): 1080-1091.
- [24] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 史尚渝, 丁文斌. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响. *地理学报*, 2020, 75(5): 961-974.
- [25] Wu X T, Wang S, Fu B J, Feng X M, Chen Y Z. Socio-ecological changes on the Loess Plateau of China after Grain to Green Program. *Science of the Total Environment*, 2019, 678: 565-573.
- [26] 刘斌, 孙艳玲, 王永财, 张悦. 基于 SPOT/NDVI 华北地区植被变化动态监测与评价. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(9): 98-103.
- [27] 何航, 张勃, 侯启, 李帅, 马彬, 马尚谦. 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. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 70-80.
- [28] Liu Y Y, Zhang Z Y, Tong L J, Khalifa M, Wang Q, Gang C C, Wang Z Q, Li J L, Sun Z G. Assessing the effects of climate variation and human activities on grassland degradation and restoration across the globe. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105504.
- [29] 陶帅, 邝婷婷, 彭文甫, 王广杰. 2000—2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力——以宜宾市为例. *生态学报*, 2020, 40(14): 5029-5043.

- [30] Xu D Y, Kang X W, Liu Z L, Zhuang D F, Pan J J. Assessing the relative role of climate change and human activities in sandy desertification of Ordos region, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(6): 855-868.
- [31] 王震, 闫文德, 刘曙光, 高超, 湛小勇. 基于 MODIS 数据的中国三种主要土地类型变化的空间特征分析. *生态学报*, 2017, 37(10): 3295-3301.
- [32] 刘雪佳. 中国陆地主要植被类型生产力及其与气候因子的关系[D]. 太原: 山西大学, 2019.
- [33] Shi Y, Jin N, Ma X L, Wu B Y, He Q S, Yue C, Yu Q. Attribution of climate and human activities to vegetation change in China using machine learning techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 294: 108146.
- [34] Guan Q Y, Yang L Q, Guan W Q, Wang F F, Liu Z Y, Xu C Q. Assessing vegetation response to climatic variations and human activities: spatiotemporal NDVI variations in the Hexi Corridor and surrounding areas from 2000 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 135(3): 1179-1193.
- [35] 贺忠华, 张育慧, 何月, 张小伟, 蔡菊珍, 雷莉萍. 浙江省近 20 年植被变化趋势及驱动因子分析. *生态环境学报*, 2020, 29(8): 1530-1539.
- [36] Hu Y F, Dao R, Hu Y. Vegetation change and driving factors: contribution analysis in the loess plateau of China during 2000—2015. *Sustainability*, 2019, 11(5): 1320.
- [37] 刘家福, 马帅, 李帅, 任春颖, 毛德华, 张柏. 1982—2016 年东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2018, 38(21): 7647-7657.
- [38] Li Q, Zhang C L, Shen Y P, Jia W R, Li J. Quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification processes on the Qinghai-Tibet Plateau based on net primary productivity. *Catena*, 2016, 147: 789-796.
- [39] Feng D R, Fu M C, Sun Y Y, Bao W K, Zhang M, Zhang Y F, Wu J J. How large-scale anthropogenic activities influence vegetation cover change in China? a review. *Forests*, 2021, 12(3): 320.
- [40] 王建邦, 赵军, 李传华, 朱钰, 康重阳, 高超. 2001—2015 年中国植被覆盖人为影响的时空格局. *地理学报*, 2019, 74(3): 504-519.
- [41] Mu S J, Zhou S X, Chen Y Z, Li J L, Ju W M, Odeh I O A. Assessing the impact of restoration-induced land conversion and management alternatives on net primary productivity in Inner Mongolian grassland, China. *Global and Planetary Change*, 2013, 108: 29-41.
- [42] 神祥金, 姜明, 吕宪国, 刘兴土, 刘波, 张佳琦, 王宪伟, 佟守正, 雷光春, 王升忠, 仝川, 范航清, 田昆, 王晓龙, 胡远满, 谢永宏, 马牧源, 张树文, 曹春香, 王志臣. 中国草本沼泽植被地上生物量及其空间分布格局. *中国科学:地球科学*, 2021, 51(8): 1306-1316.
- [43] Li Y R, Cao Z, Long H L, Liu Y S, Li W J. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: the case of Mu Us Sandy Land, China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 697-715.
- [44] 宋乃平, 杜灵通, 王磊. 盐池县 2000—2012 年植被变化及其驱动力. *生态学报*, 2015, 35(22): 7377-7386.