

DOI: 10.5846/stxb202101270288

胡玲, 孙聪, 范闻捷, 刘海江, 任华忠, 崔要奎. 近 20 年防风固沙重点生态功能区植被动态分析. 生态学报, 2021, 41(21): 8341-8351.

Hu L, Sun C, Fan W J, Liu H J, Ren H Z, Cui Y K. Spatio-temporal dynamics of vegetation in key ecological function zone of wind-break and sand-fixation over the last 20 years. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8341-8351.

近 20 年防风固沙重点生态功能区植被动态分析

胡 玲^{1,2}, 孙 聪³, 范闻捷^{1,2}, 刘海江³, 任华忠^{1,2}, 崔要奎^{1,2,*}

1 北京大学地球与空间科学学院遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871

2 空间信息集成与 3S 工程应用北京市重点实验室, 北京 100871

3 中国环境监测总站, 北京 100012

摘要: 植被是影响防风固沙生态功能的关键指标, 也是检验防风固沙区生态保护成效的重要依据。由 2010 年国务院《全国主体功能区规划》划定的防风固沙类国家重点生态功能区、国家重点生态功能区转移支付县域综合确定研究范围。基于 2000—2019 年中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 的叶面积指数 (LAI) 产品, 从生态区和像元两个尺度分析近 20 年防风固沙重点生态功能区植被的时空变化趋势, 并进一步探索气候因子对 LAI 的影响, 以期揭示我国北方风沙区生态系统防风固沙功能的现状, 为今后生态保护提供支撑。研究结果表明, 2000—2019 年间, 研究区 LAI 年平均值呈现东高西低的空间格局, 随着时间推移有显著增加趋势, 平均增幅为 $0.03 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1} (P<0.01)$ 。在生态区尺度, LAI 在 8 个生态功能区均表现出不同程度的增长, 且 2010—2019 年间 LAI 的增长速率高于 2000—2009 年的, 其中, 科尔沁草原生态功能区在 20 年间呈现最为显著的增加趋势, 区域平均增幅为 $0.1154 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1} (P<0.01)$ 。在像元尺度, 近 20 年 LAI 显著增长 ($P<0.05$) 的区域面积占整个研究区植被面积的 41.6%, 其中, 83.7% 的 LAI 增长区域为草地, 11.2% 为耕地。增长区域主要集中在研究区东部, 呈片状分布, 研究区西部的 LAI 也有一定程度的增长, 增长区域呈带状分布。2010—2019 年 LAI 增长的区域面积为 7.7%, 明显大于 2000—2009 年 LAI 增长的区域面积。气候因子对研究区植被的影响为: 研究区东部降水的增加对当地植被生长有正向的促进作用, 而温度的影响则在整个研究区都较弱。除自然因素外, 人为因素 (防风固沙政策实施、农业技术进步等) 对防风固沙功能区植被状况的改善也至关重要。研究区 LAI 的显著增加表明我国北方防风固沙屏障的生态功能在近 20 年有一定程度的提高。

关键词: 防风固沙; 植被动态; 遥感; 叶面积指数; 气候因子

Spatio-temporal dynamics of vegetation in key ecological function zone of wind-break and sand-fixation over the last 20 years

HU Ling^{1,2}, SUN Cong³, FAN Wenjie^{1,2}, LIU Haijiang³, REN Huazhong^{1,2}, CUI Yaokui^{1,2,*}

1 Institution of Remote Sensing and Geographical Information System, Peking University, Beijing 100871, China

2 Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration & Its Applications, Peking University, Beijing 100871, China

3 China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China

Abstract: Vegetation is crucial for wind-breaking and sand-fixing, and is an important basis for testing the ecological protection effect of wind-break and sand-fixation regions. The study area is the national key ecological function zones of wind-break and sand-fixation designated by the National Plan for Major Functional Zones of the State Council in 2010, as well as the county areas of transfer payment for national key ecological function zones. Based on the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Leaf Area Index (LAI) datasets from 2000 to 2019, this paper analyzed the LAI trend of the study area in both ecological zone scale and pixel scale, and the impacts of climate factors on LAI were also analyzed.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0500205); 国家自然科学基金项目 (41901348)

收稿日期: 2021-01-27; **采用日期:** 2021-05-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yaokuicui@pku.edu.cn

The above-mentioned works can reveal the state of ecosystem in ecological function zone for wind-break and sand-fixation, providing advices for ecological protection. The results show that, during 2000—2019, annual year average LAI decreases from east to west across the study areas, and an overall increasing exists as time went by, with a rate at $0.03 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.01$). At the ecological zone scale, the LAI of the eight ecological function zones increases with various amplitudes, and the increasing trend of LAI from 2010 to 2019 is obviously larger than that in 2000—2009. Among the eight ecological function zones, the Horqin Grassland Ecological Function Zone has the largest increasing amplitude ($0.1154 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$, $P < 0.01$) over the last 20 years. At the pixel scale, the area with significant increase ($P < 0.05$) in LAI accounts for 41.6% of the vegetated regions in the study area, among which 83.7% is covered by grassland and 11.2% is cropland. Pixels with increasing LAI mainly concentrate in the eastern part of the study area, showing a patchy distribution. LAI in the western part has a slight increase, distributing like a strip. Areas with increase in LAI account for 7.7% during 2010—2019, obviously larger than that in 2000—2009. The impacts of climate factors on vegetation in the study area are as follows: the increase of precipitation facilitates vegetation growth in the eastern parts, while in the western parts, these facilitating effects vanish, and the effect of temperature is weak across the whole study area. Apart from the impacts of climate factors, human interventions (implementation of wind-break and sand-fixation policy as well as the progress of agriculture technology) are also crucial on the improvement of vegetation growth. The LAI dynamics indicate that the ecological function for wind-break and sand-fixation in northern China has been improved.

Key Words: wind-break and sand-fixation; vegetation dynamics; remote sensing; leaf area index; climate factors

在自然和人为因素的双重影响下,我国北方干旱-半干旱区土地沙漠化问题非常严重^[1],土地沙漠化造成可利用的土地资源大幅度减少,严重压缩了人类的生活空间^[2],并且在大风作用下,沙漠化地区沙尘暴频发,影响华北、东北及周边的国家和地区,造成重大财产损失,同时也严重制约着当地经济社会的可持续发展^[3],沙漠化防治和沙漠化土地修复工作刻不容缓。研究表明,植被能通过控制和固定流沙起到减缓土地退化的作用^[4]。我国政府高度重视生态保护工作,2008年原环境保护部与中国科学院联合发布了《全国生态功能区划》^[5],2011年国务院发布了《全国主体功能区规划》^[6],按照主导生态功能定位划定了水源涵养、水土保持、防风固沙和生物多样性维护等不同类型的重点生态功能区。与此同时,为加强国家重点生态功能区生态环境保护,财政部于2009年印发了《国家重点生态功能区转移支付(试点)办法》,中央财政以一般性转移支付的方式对国家重点生态功能区县级政府进行生态补偿^[7]。截止到2019年,国家已累计下达转移支付资金5000多亿元,转移支付县域达到817个^[8]。防风固沙型国家重点生态功能区主要是指沙漠化敏感性高、土地沙化严重、沙尘暴频发并影响较大范围的区域,需要采取退耕(牧)还林(草)、控制放牧强度、禁止开矿等多种措施提高植被覆盖以增强区域防风固沙能力。

卫星遥感能够提供大范围、长时间序列的对地观测数据,在植被监测中发挥着十分重要的作用。生态参数遥感产品,如归一化差值植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI)等,常用来监测植被的生长状态。相比于植被指数^[9-11],LAI在监测干旱-半干旱区植被方面有两个优势:(1)植被指数在低植被覆盖区域容易受土壤背景值的影响^[12]而不能准确反映植被动态,而LAI描述的是植被冠层结构的真实状况,受土壤背景影响相对较小;(2)LAI有明确的物理意义,LAI定义为单位地表面上单面绿叶面积的总和^[13],是表征植被结构和长势的重要参数^[14],被广泛的应用到植被动态监测^[15]和作物生长模拟^[16-17]。随着卫星遥感技术的飞速发展,目前已有多类型的LAI产品,例如,MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) LAI^[18],GLASS(Global LAnd Surface Satellite) LAI^[19],GLOMAP(The GLOBal MApping Project) LAI^[20],VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) LAI^[21]等。基于遥感LAI产品对全球植被的监测表明:在全球尺度上,近些年植被有明显的变绿趋势^[22],且主要来自于中国南方森林和中国、印度耕地的贡献^[23]。在全球变绿的大背景下,摸清潜在沙漠化和沙漠化区域植被的变化情况对于了解此类地区的生态环境具有十分重要的意义,同

时也可以检验近年来国家重点生态功能区转移支付政策实施成效。

鉴于此,本文以 MODIS LAI 产品为主要数据源,分析防风固沙重点生态功能区在 2000—2019 年间 LAI 的时空变化情况,特别对比了转移支付政策实施(2010 年)前后该区域植被变化特征,同时分析气候因素(气温和降水)对植被变化产生的影响,以期探索在当前全球气候变化的大背景下,防风固沙重点生态功能区植被的变化情况与影响因素,从而为今后防风固沙工作的开展提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本文研究区由 2010 年国务院《全国主体功能区规划》划定的防风固沙类国家重点生态功能区、国家重点生态功能区转移支付县域综合确定(图 1)。研究区横跨我国北部(34° — 49.5°N , 73° — 125°E),从东到西依次包括:呼伦贝尔草原草甸生态功能区(以下简称呼伦贝尔)、科尔沁草原生态功能区(以下简称科尔沁)、浑善达克沙漠化防治生态功能区(以下简称浑善达克)、阴山北麓草原生态功能区(以下简称阴山)、腾格里沙漠防风固沙区(以下简称腾格里)、柴达木盆地防风固沙生态功能区(以下简称柴达木)、阿尔金草原荒漠化防治生态功能区(以下简称阿尔金)和塔里木河荒漠化防治生态功能区(以下简称塔里木)8 个生态功能区,区域面积近 163.7 万 km^2 ,约占国土面积的 17%。防风固沙重点功能区处于我国的干旱-半干旱地区,年均降水量从东部区的 250 mm 左右降低到西部区的 150 mm,研究区的年均温大约在 4°C — 8°C 。日照强、风力大、降水量少、蒸发量大等一系列因素使得该地的土壤普遍贫瘠,生态环境较为脆弱,土地沙漠化问题严重。2019 年,区域 62% 的土地覆盖为裸地,总的植被覆盖率为 37%,以草地为主,其中草地、耕地和森林各占 34.1%、2.2%、0.14%。

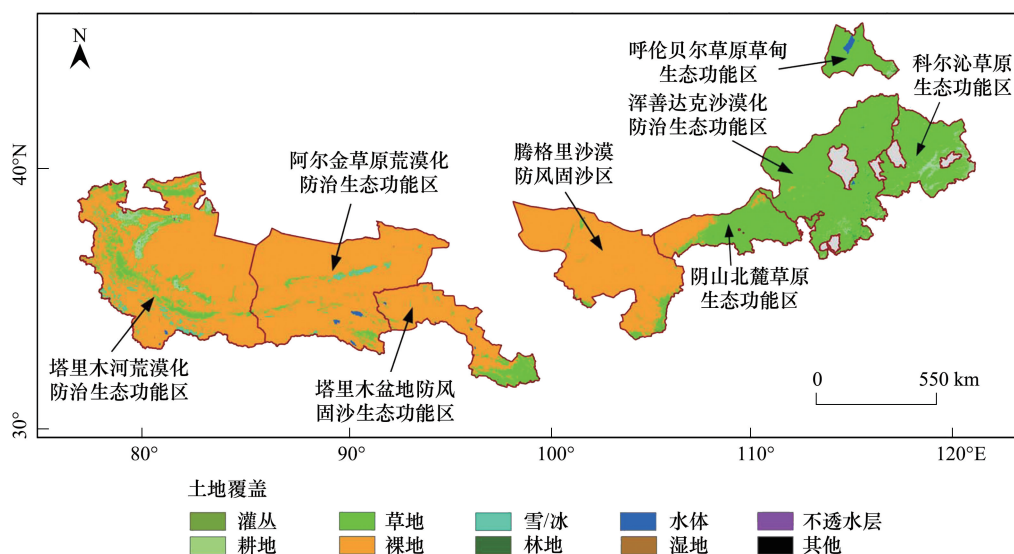


图 1 研究区地理位置、生态功能分区及研究区 2019 年的土地覆盖分布图

Fig.1 Geographic location and land cover (data source: MODIS MCD12Q2 in 2019) of Study area

(数据来源:MODIS MCD12Q2 数据产品, <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q2v006/>)

1.2 数据来源与处理

1.2.1 LAI 数据

本文的 LAI 数据为 2000—2019 年 MOD15A2H, 下载自美国 NASA EOS/MODIS 网站 (<https://search.earthdata.nasa.gov/search/>), 其空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 8 天。该数据集的主算法是通过 3D 辐射传输模型, 利用 MODIS 的红外、近红外地表反射率和卫星观测几何参数, 从特定群落查找表 (Biome-specific

look-up tables, LUTs) 中估算得到。在主算法不适用的情况,则以 LAI—NDVI 的经验关系来替代估算 LAI^[24]。MODIS LAI 产品是目前进行大范围植被时空变化研究中最常用的遥感产品之一,同时,我国草地区的地面验证研究^[25-26]显示该产品能够较好的反映草地的生长变化情况。

原始 LAI 产品经拼接、投影转换及裁剪等预处理后,为消除云和大气影响,进一步采用时间序列谐波分析法(Harmonic Analysis of Time Series, HANTS)^[27]对 2000—2019 年的 LAI 时间序列进行空值的填补及异常值的纠正,进而得到研究区时空连续的 LAI 数据集。最后,为了聚焦 LAI 的年际变化情况,本文对 8 天的 LAI 产品进行了年内的平均,形成了近 20 年的逐年年平均 LAI 时间序列。

1.2.2 气象数据

本研究的气象数据来自国家青藏高原科学数据中心(<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets>)提供的中国气象数据驱动数据集。该数据集将全国 700 多个地面测量站点的实测数据作为算法的输入数据进行气象产品的生产,产品的精度较高^[28]。原始气象数据为防风固沙重点生态功能区 2000—2018 年的年均温和年平均降水速率,空间分辨率为 0.1°,数据预处理阶段将原始的逐年年平均降水速率转化为逐年年累计降水量,此外,为了和 LAI 进行生态区尺度上的相关分析,进一步将 0.1°的气象数据聚合到生态功能区尺度,得到 8 个生态功能区 19 年的气象数据时间序列。

1.3 研究方法

1.3.1 LAI 时空变化趋势分析

绝对变化率:采用一元线性回归方法分析 2000—2019 年间单个防风固沙重点生态功能区(区域尺度)和单一像元(像元尺度)LAI 的绝对变化趋势。计算公式如式(1):

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

式中,Ratio 为趋势线斜率,即 LAI 的绝对年际变化率($\text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{a}^{-1}$); LAI_i 是第 i 年的 LAI 值; i 为年变量; n 为观测年数($n = 20$)。当 $\text{Ratio} > 0$ 时,表示植被 LAI 呈现增加趋势,反之则减少。利用 F 检验对 LAI 的多年变化趋势进行显著性检验,若满足 $P < 0.05$,则认为该时间序列有显著性变化,反之则无显著变化。

相对变化率:在绝对变化率的基础上,每个区域的相对变化率也同样能够反映当前区域植被多年的变化情况。相对变化率的计算公式如式(2):

$$\beta = \frac{\text{Ratio}}{\text{LAI}_{\text{mean}}} \quad (2)$$

式中, β 为区域 LAI 变化的相对变化率,Ratio 为区域 LAI 变化的绝对变化率, LAI_{mean} 为区域 LAI 的多年平均值。

1.3.2 LAI 与气候因子的相关性

选取 Pearson 系数来描述不同生态功能区的 LAI 值与气温、降水之间的相关关系,Pearson 系数的计算公式如式(3):

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_p)(y_i - y_p)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_p)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_p)^2]}} \quad (3)$$

式中, R_{xy} 为变量 x , y 之间的 Pearson 相关系数; x_i 表示第 i 年的 LAI 值; y_i 表示第 i 年的气温或者降水; x_p, y_p 分别表示 2000—2019 年防风固沙重点生态功能区年均 LAI 值及相应的气温和降水值; i 为年变量; n 为监测年数($n = 20$)。

为消除气温和降水之间耦合作用对植被的影响,分别计算气温、降水与 LAI 之间的偏相关系数,得到某一

气候因子对植被单独作用时的相关关系大小,偏相关系数的计算公式如式(4):

$$r_{xy(z)} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{1 - r_{xz}^2} \sqrt{1 - r_{yz}^2}} \quad (4)$$

式中, $r_{xy(z)}$ 描述的是排除变量 z (气温或降水) 的影响后, 变量 x (LAI) 与变量 y (气温或降水) 的相关系数。 r_{xy} , r_{xz} , r_{yz} 分别表示 LAI、气温和降水两两之间的相关性系数。

2 结果与分析

2.1 防风固沙重点生态功能区 LAI 时空分布特征

空间分布上, LAI 年平均值呈现显著的东高西低分布 (图 2), 其中, 东部的呼伦贝尔、科尔沁、浑善达克的 LAI 值多处于 $0.8 \sim 1.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 之间, 而从中部的阴山、腾格里、柴达木到西部的阿尔金、塔里木的 LAI 值偏低, $0 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 区域面积占比高达 64%, 仅有小部分绿洲区域有植被覆盖, LAI 值一般在 $0.5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 左右。

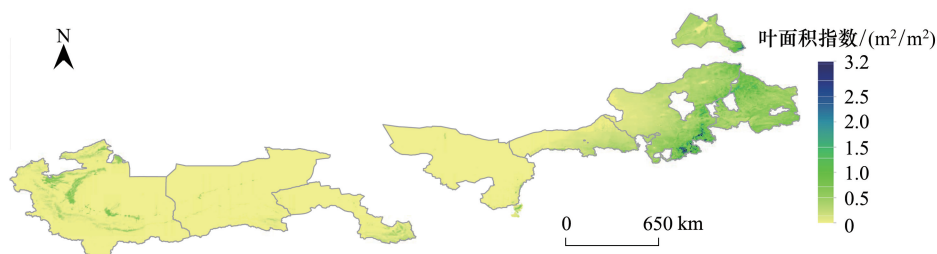


图 2 防风固沙重点生态功能区 2000—2019 年 LAI 平均值的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of multi-year average LAI of the study area from 2000 to 2019

时间维度上, 2000—2019 年间, 研究区 LAI 年均值具有显著的增长趋势 (图 3), 从 2000 年的 $0.19 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 增长到 2019 年的 $0.28 \text{ m}^2/\text{m}^2$, 平均增长速率为 $0.03 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$ ($P < 0.01$)。

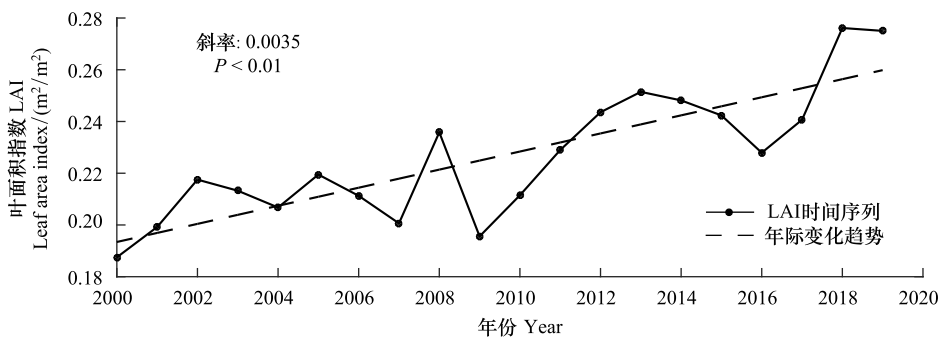


图 3 2000—2019 年防风固沙重点生态功能区 LAI 区域平均值时间序列

Fig.3 Annual variation of regional average LAI across the whole study area from 2000 to 2019

2.2 生态功能区尺度 LAI 变化特征

由于自然条件的差异, 8 个防风固沙重点生态功能区在整体呈现显著增长趋势的同时也具有独特的时空变化特征 (图 4)。从绝对增长速率看, 东部的科尔沁的 LAI 增速最大, 为 $0.12 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$, 西部的阿尔金的 LAI 增速最小, 为 $0.0007 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$; 从相对增长速率来看, 科尔沁的增速依然最大, 为 $0.2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$, 而增速最小的生态功能区则是中部的阴山, 为 $0.1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$ 。

进一步比较转移支付 (2010 年) 前后两个时期植被 LAI 的趋势, 除柴达木外, 其他 7 个生态功能区在 2010—2019 年间 LAI 的增长速率均高于 2000—2009 年, 其中, 科尔沁 (2000—2009 年: $0.04 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$,

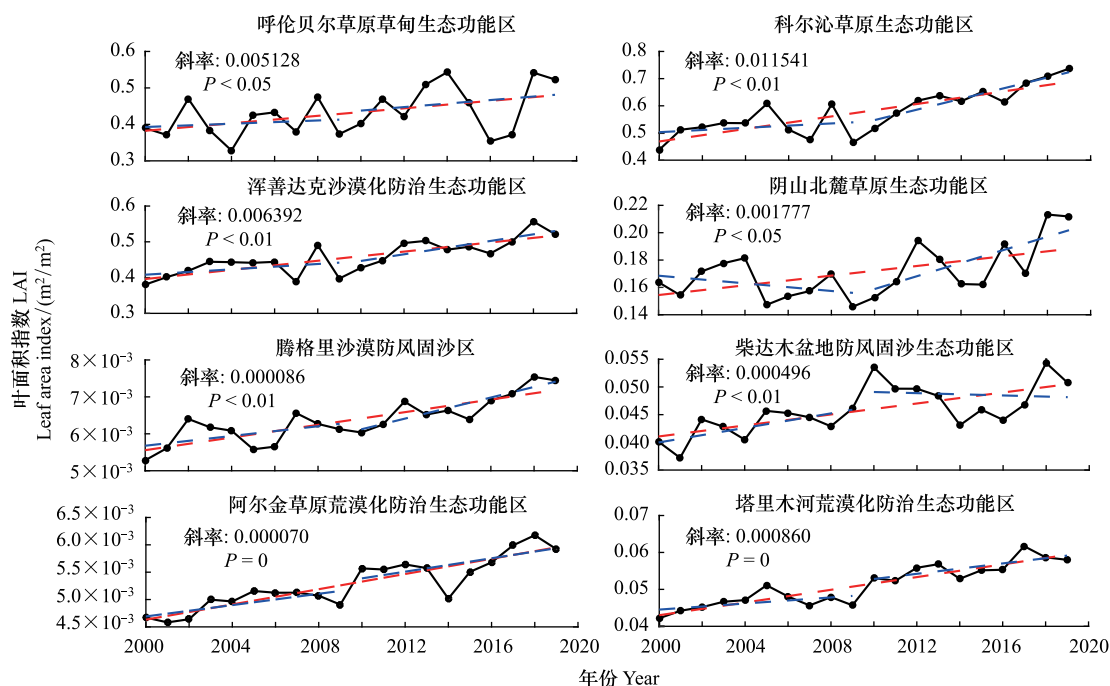


图4 不同生态功能区 LAI 年际变化情况

Fig.4 Temporal dynamics of LAI of different ecological functional areas

图中黑色实线表示 LAI 的时间序列,红色虚线表示 2000—2019 年共 20 年的年际变化趋势,蓝色虚线表示 2000—2009 和 2010—2019 年两个阶段各自的年际变化趋势

2010—2019 年; $0.195 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$) 和阴山(2000—2009 年; $-0.0139 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$, 2010—2019 年; $0.04 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$) 的增长速率增加最为显著。以上结果说明,在生态区尺度,2010—2019 年间,植被生长状况好转相对于 2000—2009 年更明显。

各个生态功能区植被覆盖区 LAI 多年平均值在转移支付前后的对比(图 5)反映出,2010—2019 年,所有植被覆盖区域的 LAI 区域平均值较 2000—2009 年都有一定程度的增长,绝对增长量最多的是植被覆盖度高的科尔沁,增幅为 $0.11 \text{ m}^2/\text{m}^2$,相对 2000—2009 年 LAI 提高 20%,绝对增长量最少的是阴山,增幅约为 $0.024 \text{ m}^2/\text{m}^2$,相对 2000—2009 年 LAI 提高 9.9%。

2.3 像元尺度 LAI 变化特征

像元尺度上(图 6),2000—2019 年,16%的像元 LAI 呈现显著增加趋势且具有明显的空间异质性;LAI 增长区域主要集中在研究区东部,呈片状分布。东部 LAI 增长的像元面积高达 41.4%;科尔沁中有 66.8%的像元呈现 LAI 增长。中部的阴山、腾格里和柴达木, LAI 增长的像元呈现离散分布,增长像元占比为 9%;西部的阿尔金、塔里木, LAI 增长的像元呈带状分布,主要沿着河谷绿洲,增长像元占比为 6%。

对比转移支付政策实施前后十年 LAI 变化趋势空间分布图(图 6),可以看出,2010—2019 年 LAI 呈现显著增加的面积相对 2000—2009 年有明显的扩张,面积比例从 2000—2009 年的 3.5%提高到 2010—2019 年的 7.7%,且基本分布在研究区东部(科尔沁和浑善达克南部),中部和西部 LAI 增长的区域面积保持相对稳定。另外, LAI 增速也有一定程度的提升,尤其是研究区东部,2000—2009 年,东部区区域平均 LAI 增速多为 $0.06—0.11 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$,而到 2010—2019 年, LAI 增速普遍提升到 $0.11—0.19 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$ 。

结合土地覆盖类型(图 1)分析研究区 2000—2019 年 LAI 呈现显著增长的分布情况,结果表明, LAI 增长的像元占研究区植被像元的 41.6%,其中, 83.7% 的增长区域是草地(对整个区域 LAI 增长的贡献占比为 73.7%), 11.2% 是农田(对整个区域 LAI 增长的贡献占比为 16.5%),其他的森林、灌丛等占 5.1%,说明研究区

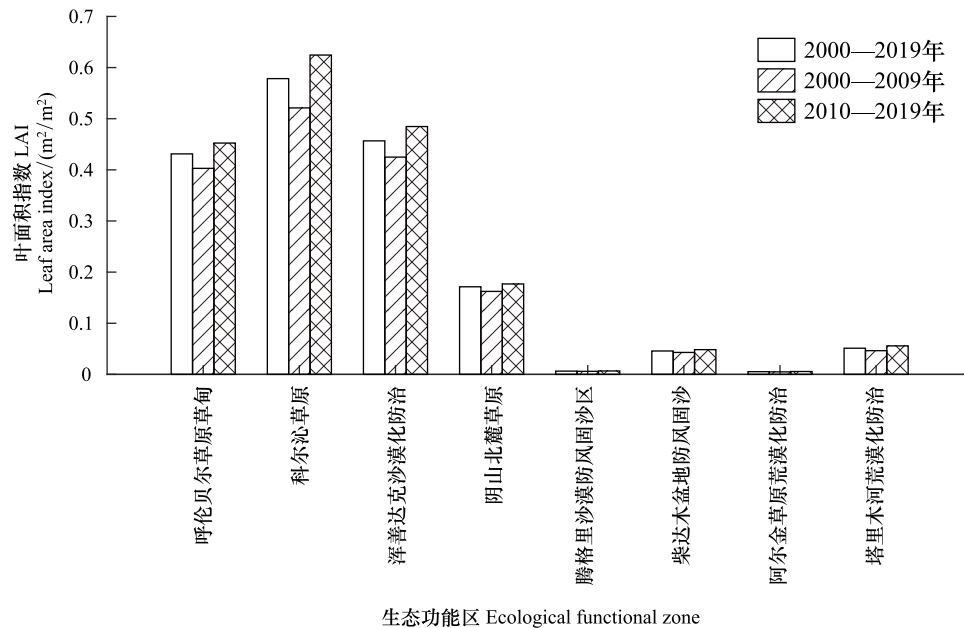


图 5 各个生态功能区有植被覆盖区域 LAI 在不同阶段多年平均值对比

Fig.5 Comparison of regional average LAI of different ecological functional areas

从左到右分别对应从东到西分布的生态区

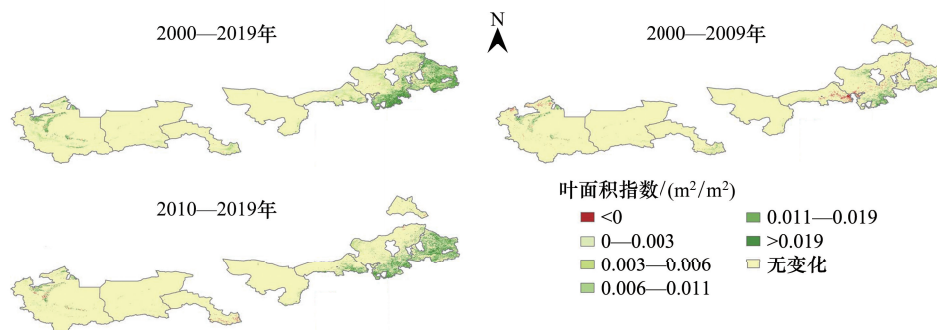


图 6 像元尺度防风固沙重点生态区 LAI 变化趋势

Fig.6 Trend of LAI in pixel scale of different periods

LAI 增长绝大部分来自草地生长状况的改善。进一步分析每种植被类型(草地、农田和林地)的生长动态发现,不同植被类型 LAI 在近 20 年的增长幅度也存在一定差异,草地区(占研究区面积的 34.1%)有 39%的像元呈现显著增长,农田区(占研究区面积的 2.2%)有 82%的像元出现明显增长,森林区(占研究区面积的 0.14%)有 75%的像元呈现显著增长。可见,森林和农田增长幅度更大,而草地虽然增长幅度小,但是增长面积大。

2.4 气候因子对 LAI 的影响

为进一步分析 LAI 增长与转移支付政策的相关关系,首先应明晰气候变化对植被长势的影响。研究^[29-31]表明气候对植被有巨大影响。但 2000 年以来,研究区的气候整体稳定,东部的科尔沁、浑善达克呈现微弱的暖湿化趋势(图 7),但植被 LAI 显著变化是否受到影响有必要进一步探究。

相关和偏相关分析结果(表 1)表明,近 20 年,研究区植被年际变化主要受降水影响且具有一定的空间异质性,和温度的相关性则较弱。降水的促进作用东部大于西部,其中,东部科尔沁的 LAI 和降水的正相关最为

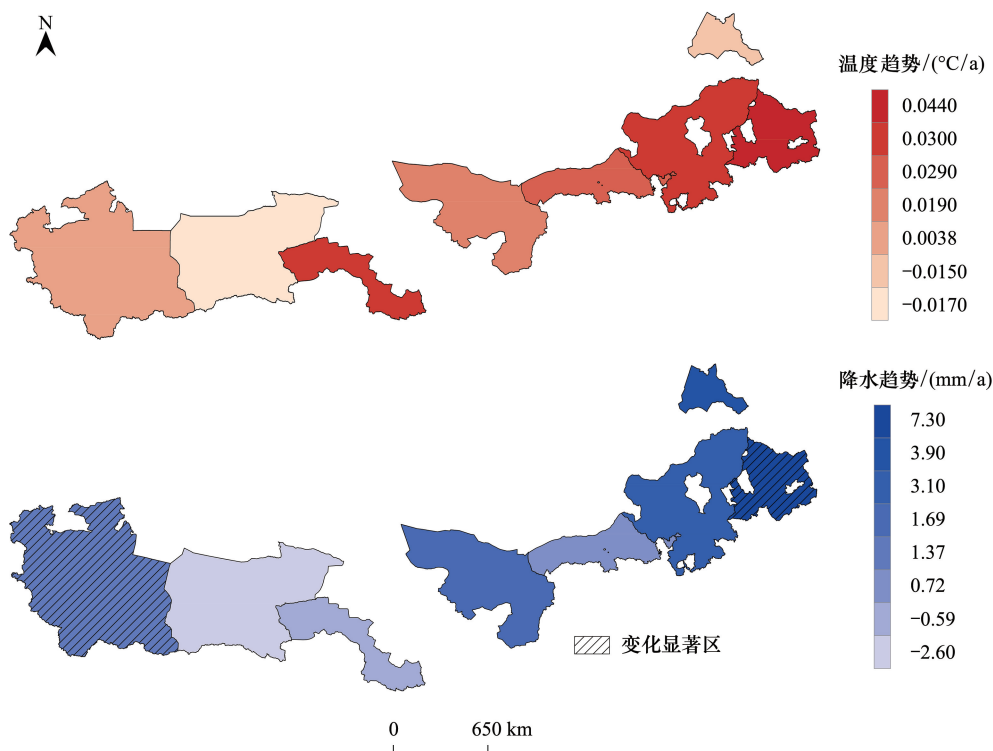


图 7 近 20 年防风固沙重点生态功能区气候因子变化趋势

Fig.7 Trend of climate factors across the study area over the last 2 decades

表 1 2000—2019 年间研究区气候因素和 LAI 的相关性分析

生态功能区名称 Name of ecological function zone	相关系数 Correlation coefficient		偏相关系数 Partial Correlation coefficient	
	降水 Precipitation	气温 Temperature	降水 Precipitation	气温 Temperature
呼伦贝尔草原草甸生态功能区 Ecological function zone of Hulun Buir grassland	0.636 **	0.108	0.648 **	0.192
科尔沁草原生态功能区 Ecological function zone of Horqin grassland	0.723 **	0.344	0.852 **	0.703 **
浑善达克沙漠化防治生态功能区 Ecological function zone of Hunshandake desertification control	0.612 **	0.109	0.687 **	0.408
阴山北麓草原生态功能区 Ecological function zone of grassland at the northern foot of Yinshan mountain	0.722 **	−0.078	0.738 **	0.235
腾格里沙漠防风固沙区 Wind-break and sand-fixation zone of Tengger desert	0.686 **	0.222	0.797 **	0.587 *
柴达木盆地防风固沙生态功能区 Ecological function zone of wind-break and sand-fixation in Qaidam basin	0.369	0.095	0.375	0.117
阿尔金草原荒漠化防治生态功能区 Ecological function zone of desertification control in Altun grassland	−0.268	−0.134	−0.258	−0.111
塔里木河荒漠化防治生态功能区 Ecological function zone of desertification control in tarim river	0.513 *	−0.092	0.509 *	0.059

* 表示在 0.05 的可信度下通过检验; * * 表示在 0.01 的可信度下通过检验

显著,相关和偏相关系数分别为 0.72 和 0.85,说明科尔沁植被 LAI 的显著增长很大程度上受益于当地降水量的增加(图 7)。东部和中部的其他四个生态功能区:呼伦贝尔、浑善达克、阴山、腾格里和降水的相关和偏相关系数均大于 0.6,与已有的研究结果一致^[32]。降水是东部区植被生长的主要水源,近 20 年来东部降水呈现

一定程度的增加趋势(图 7)增加了东部草地生长的水源,故东部的 LAI 呈现成片的大面积增长。分析表明,西部区 LAI 增长与降水和温度没有显著相关关系,与部分已有研究得出的结论不同^[33]。西部区近 20 年的气候变化趋势并不显著,且该地降水稀少,蒸发量大^[34],植被主要分布在绿洲,植被生长所需水分主要来自地下水和冰川融水补给的河川径流,因此位于西部的生态区,其 LAI 和降水年际变化的相关性较弱。

3 讨论

近 20 年,我国防风固沙重点生态功能区的植被状况有明显好转,并且在研究区的不同位置表现出不同特征:LAI 在年平均值增长幅度和呈现增长的区域面积两个方面有东部>西部>中部的特点,这和东、中、西三个区域的气候条件是相关的。相对而言,东部的气候相对湿润,适宜植被生长的区域远多于中西部,加上近 20 年东部降水量相对于中西部的增长更加明显,因而东部植被好转的趋势会更加明显。考虑到植被变化存在非线性的情况,利用非参数检验方法 Mann-Kendall(MK)分析得到研究区植被 LAI 的年际变化趋势空间分布情况(图 8)和图 6 的基本一致。

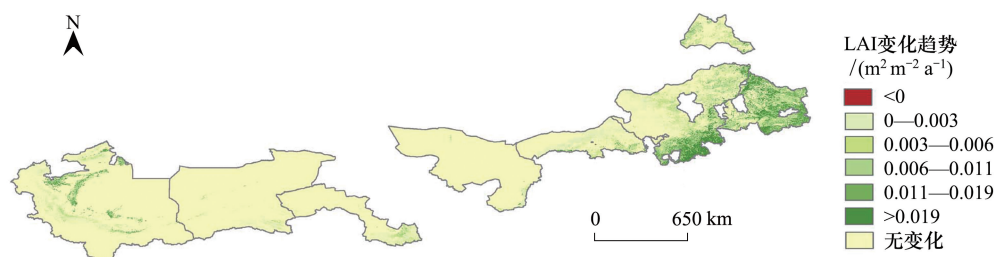


图 8 2000—2019 年间像元尺度防风固沙重点生态区 LAI 变化趋势空间分布(MK 算法)

Fig.8 Spatial distribution of LAI trend in pixel scale during 2000—2019 (MK algorithm)

LAI 增长在不同时期也有一定差异。LAI 在 2010—2019 年的增长幅度和呈现增加的像元面积高于 2000—2009 年,但气温和降水在这两个时期没有显著区别。特别在研究区西部,近 20 年,气温和降水都没有显著变化,但植被 LAI 呈现显著增长,人为因素的影响不容忽视,主要体现在两个方面:(1)2010 年《全国主体功能区规划》发布后,国家启动了重点生态功能区转移支付政策,与此同时生态环境部与财政部共同开展了转移支付资金效果评估,一系列政策推动生态功能区内的地方政府更加重视生态环境保护与治理工作,对防风固沙重点生态功能区生态系统保护与恢复起到积极的促进作用。MODIS 土地覆盖数据显示,研究区自然植被的面积占比从 33.3%(2000 年)增长到 34.4%(2019 年),面积增长约 1.8 万 km^2 ,草地的恢复对研究区 LAI 增长的贡献很大;(2)研究区农田 LAI 的增长也受人为因素的影响。农作物生长很大程度上受农业技术进步(施肥量、灌溉面积增加等)的影响^[35],虽然研究区的农田只占总面积的 2.2%,但 80%的农田 LAI 呈现了显著的增长,农田植被长势明显变好,产量增加,农田变化的影响也值得关注。

本文初步揭示了防风固沙功能区 LAI 年际变化的影响因子,但依然存在一些不足:(1)气候对植被生长的影响非常复杂,本文只考虑气温和降水的年平均值对 LAI 的影响,在解释某些地区 LAI 变化规律时会有一定的局限性。另外,气温和降水在生长季和非生长季对植被的影响也会不同^[32],因此,需要分不同时期去量化气候因子对 LAI 的影响;(2)研究区不同自然地理条件造成的物候周期不尽一致,本研究分析了植被 LAI 年平均值的年际变化情况,但植被年内物候的差异同样也会影响植被的固沙能力,这部分的影响将在今后的研究中着重分析;(3)除自然因素外,人为因素对防风固沙区植被的影响需要重视,人为因素贡献程度缺少量化的数据支撑,因此,如何剥离自然和人为因素,量化人为因素对防风固沙区植被的影响是未来研究的重点。

防风固沙区 LAI 的变好趋势能否进一步提高防风固沙能力还需要探讨,主要原因有:(1)研究区位于我国的干旱-半干旱区,气候条件是制约植被生长的关键因素。特别是在西部干旱区,大面积裸露地表是主要风

沙源,因退耕还林还草而产生的固沙效果有限,即使有转移支付政策的干预,风沙也不可能被完全消除;(2)研究区植被 LAI 的增长部分来自农田,农田面积的持续增加、化肥施用等可能会成为影响该地生态环境的一个潜在风险,影响后续植被的生长。因此,近 20 年植被生长的情况可以作为今后制订植被保护政策的参考,但也必须得结合具体情况做出修订。

4 结论

防风固沙重点生态功能区作为我国北方地区的生态安全屏障,具有重要的战略地位。基于 MODIS LAI 遥感数据产品,本文对 2000 年以来我国防风固沙重点生态功能区的植被动态进行时间序列分析,并探讨了气候对植被变化的影响。结果显示,2000—2019 年,我国防风固沙重点生态功能区的植被状况有显著改善,LAI 年均增长率约为 $0.03 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2} (10\text{a})^{-1}$ 。LAI 变化有明显的时空特征,空间上,LAI 主要增长区域集中在东部半干旱草原区,受降水增加影响;而在西部干旱荒漠区,LAI 有小幅度的增长,且呈现沿河和山麓的带状分布。时间上,LAI 在 2010—2019 年的增长幅度、增长面积比例均高于 2000—2009 年的,研究区西部植被 LAI 的增长和 LAI 在不同阶段的增长差异主要受人为因素(防风固沙政策的实施、农业技术的进步等)的影响。

参考文献(References):

- [1] 王涛,朱震达.我国沙漠化研究的若干问题——1.沙漠化的概念及其内涵.中国沙漠,2003,23(3):209-214.
- [2] 郭泽呈,魏伟,石培基,周亮,王旭峰,李振亚,庞素菲,颜斌斌.中国西北干旱区土地沙漠化敏感性时空格局.地理学报,2020,75(9):1948-1965.
- [3] 朱震达.中国的脆弱生态带与土地荒漠化.中国沙漠,1991,11(4):11-22.
- [4] Roels B, Donders S, Werger M J A, Dong M. Relation of wind-induced sand displacement to plant biomass and plant sand-binding capacity. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(9): 979-982.
- [5] 环境保护部,中国科学院.关于发布《全国生态功能区划》的公告.(2008-07-18)[2020-12-24]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/200910/t20091022_174499.html.
- [6] 国务院.国务院关于印发全国主体功能区规划的通知.(2011-06-08)[2020-12-24]. http://www.gov.cn/zwgg/2011/06/08/content_1879180.html.
- [7] 财政部.关于印发《国家重点生态功能区转移支付(试点)办法》的通知.(2011-07-28)[2020-12-24]. http://yss.mof.gov.cn/zhengceguizhang/200912/t20091225_252633.html.
- [8] 环境保护部环境监测司,中国环境监测总站.国家重点生态功能区县域生态环境质量监测评价与考核技术指南(第二版).北京:中国环境出版集团.2019
- [9] 程杰,杨亮彦,黎雅楠.2000—2018 年陕北地区 NDVI 时空变化及其对水热条件的响应.灌溉排水学报,2020,39(5):111-119.
- [10] 贺军亮,韦锐,李丽,金雁琳.基于时间序列植被指数资料的承德市植被覆盖时空演变分析.水文地质工程地质,2020,47(6):91-98.
- [11] 赵鸿雁,陈英,周翼,裴婷婷,谢保鹏,王晓倩.甘肃中东部植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应.干旱区地理,2019,42(6):1427-1435.
- [12] 唐怡,刘良云,黄文江,王纪华.土壤背景对冠层 NDVI 的影响分析.遥感技术与应用,2006,21(2):142-148.
- [13] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves. Plant, Cell & Environment, 1992, 15(4): 421-429.
- [14] GCOS. The global observing system for climate: implementation needs (GCOS—200)//The GCOS Steering Committee at their 24th. Guayaquil: World Meteorological Organization, 2016.
- [15] 王雅鑫,巴雅尔,孙亚丽,刘晓波.基于叶面积指数的荒漠草原动态监测.内蒙古师范大学学报:自然科学汉文版,2019,48(4):314-322.
- [16] 任建强,陈仲新,周清波,唐华俊.基于叶面积指数反演的区域冬小麦单产遥感估测.应用生态学报,2010,21(11):2883-2888.
- [17] 刘静,马力文,张学艺.宁夏灌区春小麦 LAI 与生长性状和产量的关系.干旱气象,2017,35(3):358-366.
- [18] Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, Privette J L, Glassy J, Tian Y, Wang Y, Song X, Zhang Y, Smith G R, Lotsch A, Friedl M, Morisette J T, Votava P, Nemani R R, Running S W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 214-231.
- [19] Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, Chen P, Yin X J, Zhang L Q, Song J L. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time-series MODIS surface reflectance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 209-223.

- [20] Liu Y, Liu R G, Chen J M. Retrospective retrieval of long-term consistent global leaf area index (1981-2011) from combined AVHRR and MODIS data. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2012, 117(G4): G04003.
- [21] Yan K, Park T, Chen C, Xu B D, Song W J, Yang B, Zeng Y L, Liu Z, Yan G J, Knyazikhin Y, Myneni R B. Generating global products of LAI and FPAR from SNPP-VIIRS Data: theoretical background and implementation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(4): 2119-2137.
- [22] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Arneth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Peñuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viogy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791-795.
- [23] Chen C, Park T J, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [24] 桑宇星, 刘刚, 江聪, 任舒艳, 朱再春. 近 30a 中国叶面积指数变化趋势的不确定性评估. *遥感技术与应用*, 2020, 35(5): 1028-1036.
- [25] 王圆圆, 王猛, 李贵才, 王军邦, 杨忠东, 戎志国. 基于野外观测和 TM 数据的锡林浩特典型草原 MODIS/LAI 产品验证. *草业学报*, 2011, 20(4): 252-260.
- [26] 李振旺, 唐欢, 吴琼, 张保辉, 辛晓平, 杨桂霞. 呼伦贝尔草甸草原 MODIS/LAI 产品验证. *遥感技术与应用*, 2015, 30(3): 557-564.
- [27] Cui Y K, Yang X B, Chen X, Fan W J, Zeng C, Xiong W T, Hong Y. A two-step fusion framework for quality improvement of a remotely sensed soil moisture product: a case study for the ECV product over the Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 124993.
- [28] He J, Yang K, Tang W J, Lu H, Qin J, Chen Y Y, Li X. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 25-25.
- [29] 李本纲, 陶澍. AVHRR NDVI 与气候因子的相关分析. *生态学报*, 2000, 20(5): 898-902.
- [30] 王强, 张勃, 戴声佩, 邹悦, 马中华, 张亚宁. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化. *资源科学*, 2011, 33(8): 1613-1620.
- [31] 王强, 张勃, 戴声佩, 张芳芳, 赵一飞, 尹海霞, 何旭强. 三北防护林工程区植被覆盖变化与影响因子分析. *中国环境科学*, 2012, 32(7): 1302-1308.
- [32] 谢舒笛, 莫兴国, 胡实, 陈学娟. 三北防护林工程区植被绿度对温度和降水的响应. *地理研究*, 2020, 39(1): 152-165.
- [33] 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.
- [34] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 毛伟峰, 王顺德, 韩萍, 王宁练, 李忠勤. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1355-1370.
- [35] 杜加强, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 方广玲, 阴俊齐, 香宝, 袁新杰, 房世峰. 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. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3567-3578.