

DOI: 10.5846/stxb201712112226

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): - .
Liu J F, Ma S, Li S, Ren C Y, Mao D H, Zhang B. Changes in vegetation NDVI from 1982 to 2016 and its responses to climate change in the black-soil area of Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): - .

1982—2016 年东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候变化的响应

刘家福^{1,2}, 马 帅¹, 李 帅¹, 任春颖², 毛德华², 张 柏^{2,*}

1 吉林师范大学旅游与地理科学学院, 四平 136000

2 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012

摘要: 植被是陆地生态系统的重要组成部分, 在调节气候、水土保持等方面具有重要作用, 因此, 监测植被生长变化并探讨其与气候变化之间的关系, 在全球变化研究中具有重要意义。基于 MODIS NDVI 和 GIMMS NDVI 数据集, 并通过一致性检验, 在区域和像元两个空间尺度上, 利用一元线性回归模型, 研究东北黑土区 1982—2016 年植被生长动态, 分析植被生长对气温和降水量的响应程度。结果表明: 区域尺度上, 1982—2016 年东北黑土区植被生长季 NDVI 变化分为 3 个阶段(先增加继而减少最后再增加), 区域植被的生长在气温、降水量的共同作用下, 呈现出明显季节差异; 像元尺度上, 1982—2016 年东北黑土区 NDVI 总体趋势为改善状态, 主要改善植被类型为草原、森林和农业植被, 鹤岗市、绥化市和长春市改善面积较大; 多年平均 NDVI 值与同期气温和降水量具有一定的相关关系, 平原地区植被 NDVI 与气温主要呈显著正相关关系, 植被类型主要为耕地; 平原地区边缘和山地地区的植被 NDVI 与降水量以显著正相关关系为主, 主要植被类型为森林和草地。

关键词: 植被 NDVI; 气温; 降水量; 东北黑土区

Changes in vegetation NDVI from 1982 to 2016 and its responses to climate change in the black-soil area of Northeast China

LIU Jiafu^{1,2}, MA Shuai¹, LI Shuai¹, REN Chunying², MAO Dehua², ZHANG Bai²

1 College of tourism and geographical sciences, Jilin normal university, Siping 136000, China

2 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China

Abstract: As an important component of terrestrial ecosystems, vegetation plays an important role in climate regulation, soil and water conservation, and terrestrial carbon balance. The monitoring of vegetation growth and dynamics responsive to climate change therefore become quite necessary to understand global climate change. Based on the GIMMS NDVI and MODIS NDVI as well as a consistency check between these two datasets, this study examined the relationships between the spatiotemporal patterns of the NDVI and climate change over the black-soil area of the Northeast China from 1982 to 2016, using the unary linear regression model at both the pixel and regional scales. Our results showed that, at the regional scale, the NDVI during the growing season presented three different trends across these years (i.e., firstly with an increase, then a decrease, and finally an increase). Regionally, the vegetation growth was jointly affected by temperature and precipitation, which showed significant seasonal changes. By contrast, at the pixel scale, the NDVI exhibited a general increasing trend. The main vegetation types characterized by an increasing trend included grasslands, forests, and crops; and the cities that experienced significant vegetation growth are Hegang, Suihua, and Changchun. The mean NDVI had a close correlation with

基金项目: 国家自然科学基金 (41771383, 41471148); 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-08-02); 吉林省科技发展计划项目 (20150204047SF)

收稿日期: 2017-12-11; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangbai@neigae.ac.cn

temperature and precipitation over the same period. Over the regions that are mainly covered by arable lands, the vegetation NDVI was positively related to air temperature, while it had a significant positive correlation with precipitation over the edges of the plains and mountains, where the dominant vegetation types are forests and grasslands.

Key Words: vegetation NDVI; temperature; precipitation; the Northeastern black soil area

全球气候变化与陆地生态系统响应是国际地圈生物圈计划的重要研究内容^[1]。植被作为地球生态系统主体,是大气、土壤和水分相互作用的天然联系,在全球物质和能量循环过程中起到十分重要的作用^[2-4],因此监测植被生长动态具有重要现实意义和科学价值。在全球变化背景下,植被覆盖变化容易受到气候和人类活动的共同影响,地表植被对自然因素和人类活动干扰响应已成为国内外研究热点问题,气候变化对地表植被的影响得到学术界高度关注^[5-7]。东北黑土区地处我国东北边陲,对气候变化反应敏感,是我国东北地区植被动态研究的敏感区域之一。在全球变暖和人类活动共同影响下,东北黑土区气候变化明显,平均气温显著升高,降水量显著减少,导致水土流失严重,生态环境日趋恶化^[8-9]。分析东北黑土区植被 NDVI 动态,研究植被 NDVI 变化与气候因子的关系可为应对全球气候变化提供重要的理论依据,及时探讨植被对气候变化的响应,对丰富全球变化区域响应的研究具有重要意义。陈福军等^[10]相关研究表明植被 NDVI 与气候因子具有显著的相关性。Fensholt 等^[11]对全球半干旱地区 1981—2007 年植被绿度研究表明,全球范围内植被绿度增长速度受到空气温度和降水共同影响。陆晴等^[12]利用 GIMMS NDVI 数据和地面气象数据,研究了青藏高原草地覆盖变化及其对气候因素的响应。Zhao 等^[13-14]对新疆 NDVI 的研究表明,区域 NDVI 主要呈增加趋势,且与降水量和潜在蒸散量(ET)增加有关。范昊明等^[15],尚建勋等^[16],魏建兵等^[17]对东北黑土区的土壤侵蚀和侵蚀沟治理问题进行了探讨。上述研究主要针对更大空间尺度,对时段内变化过程、变化趋势的持续性关注相对不足,此外,对长时间序列东北黑土区植被 NDVI 变化及其与气候变化关系的探讨鲜有报道。

本文利用 MODIS NDVI 数据集对 GIMMS NDVI 数据集进行插补,获取长时间序列数据,在多个空间尺度和不同季节,计算多个时间序列东北黑土区植被动态变化趋势,同时结合气象数据(气温、降水量),探讨东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候因子的响应。以期明确我国东北黑土区植被覆盖时空变化特征,以及气候因子与植被 NDVI 的相关性关系,旨在丰富我国东北黑土区对全球变化响应的研究成果,同时为东北黑土区对气候变化的响应研究提供科学依据。

1 研究区概况

黑土是具有强烈胀缩和扰动特性的粘质土壤,典型的黑土土壤包含黑土和黑钙土,本文将黑土、黑钙土集中分布的区域划分为东北黑土区。东北黑土区是世界仅存的“三大黑土区”之一,地理位置介于 41°01′—53°05′E,115°03′—135°05′N 之间(图 1),是世界三大黑土区中面积最小,气候条件最寒冷的区域^[18-19]。东北黑土区主要分布在松嫩流域腹地,北起嫩江、北安,南至四平,气候干燥寒冷,降雨集中,年平均降雨量 400—700mm,水资源总量 1415.99 亿 m³,人均占有量 1213.98m³^[20-21]。东北黑土区从南向北具有暖温带、温带和寒温带的热量变化,自东向西具有湿润、半湿润和半干旱的湿度分异,具有独特的植被分布格局,是全球变化研究的敏感区域之一^[22]。东北黑土区植被覆盖度较高,主要植被类型为农业植被、森林和草原,还有少部分草甸、灌丛等植被(图 2)。

2 材料与方法

2.1 数据来源与预处理

GIMMS NDVI 数据来自美国国家航天航空局(NASA)戈达德航天中心(Goddard space flight center, GSFC),空间分辨率为 8km、时间分辨率为 15d^[23-24]。本文数据是由 NASA 官网下载的 1982 年—2013 年每



图1 东北黑土区范围

Fig.1 Black soil area in Northeast China

15d 提供的 GIMMS NDVI3g 数据;MODIS NDVI 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台,增强了对植被的检测能力,空间分辨率为 1km,已被应用在多个领域^[25-26],本文使用的是 MOD13A3,即 1km 分辨率月合成的植被指数产品,时间跨度是 2000—2016 年。气象数据由国家气象科学数据共享服务平台提供,1:100 万矢量化植被类型图(图 2)来自中国植被类型图。

MOD13A3 数据在时间和空间分辨率上均优于 GIMMS NDVI3g 数据,因此在时间上 MOD13A3 数据可以对 GIMMS NDVI3g 数据进行插补^[27-28]。首先对 1km 空间分辨率的 MOD13A3 数据重采样处理,得到 8km 空间分辨率的月值数据,然后对两种数据集进行一致性分析,确立数据插补的可能性,获得 GIMMS NDVI3g 数据在 2013—2016 年各月份的数据序列。

为反映植被年内和年际变化特征,采用生长季(3—11 月)、春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)和秋季(9—11 月)NDVI 合成值表征植被生长状况,各季节分

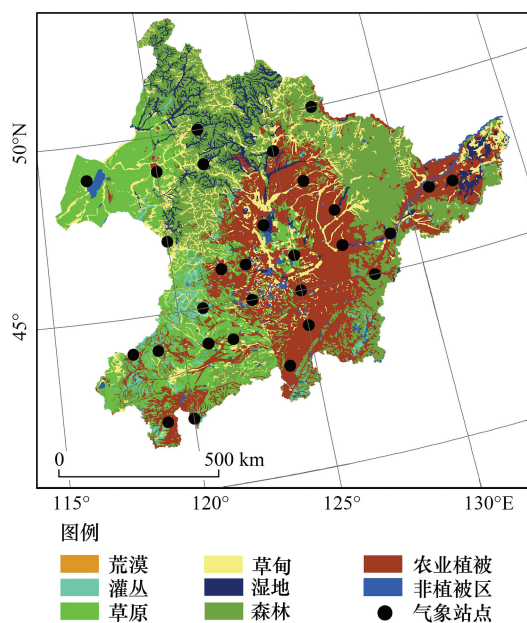


图2 黑土区植被类型及气象站点分布图

Fig.2 Vegetation types and meteorological station distribution map in black soil area

别为时段内月 NDVI 平均值。气象数据来自于研究区内 29 个气象站点 1982—2016 年逐月平均气温和降水,同时采用 Kriging 方法对气候数据进行空间插值处理,获取像元大小与 NDVI 数据一致、投影相同的气候要素栅格数据;采用固定起始年份,逐步增加结束年份的分析方法,分别计算 1982—2006, 1982—2008, 1982—2010, 1982—2012, 1982—2014, 1982—2016 年 6 个时间序列的气候变化和植被动态,根据趋势斜率的变化范围,定义 5 个趋势等级(表 1);最后为了在像元尺度上更好的反映气温、降水对植被生长的影响,延长时间序列区间长度,计算了 1982—2000, 1982—2005, 1982—2010, 1982—2016 年 4 个时间序列气温、降水量与植被 NDVI 的相关性。

表 1 1982—2016 年东北黑土区植被 NDVI 变化趋势结果统计

Table 1 The statistics of vegetation NDVI changes in black soil area of Northeast China from 1982 to 2016

变化斜率 S_{NDVI} Change Slope	变化趋势 Trend of Change	面积 Areas/ km^2	面积比例 Area Ratio/%
$S_{NDVI} \leq -0.03573$	轻微退化	130900	13.40%
$-0.03573 < S_{NDVI} \leq -0.00122$	显著退化	7831	0.80%
$-0.00122 < S_{NDVI} \leq 0.00447$	基本不变	267091	27.33%
$0.00447 < S_{NDVI} \leq 0.02753$	轻微改善	388504	39.76%
$0.02753 < S_{NDVI} \leq 0.03861$	显著改善	182807	18.71%

2.2 逐像元分析法

线性回归分析方法计算简单,结果容易比较,是研究植被动态变化趋势的常用方法^[29-30]。本文采用最小二乘回归分析方法,年份为自变量,NDVI 为因变量,模拟 1982—2016 年多年 NDVI 变化趋势,公式为:

$$S = \frac{n \sum_{m=1}^n m \times NDVI_m - \sum_{m=1}^n m \sum_{m=1}^n NDVI_m}{n \sum_{m=1}^n m^2 - \left(\sum_{m=1}^n m \right)^2} \quad (1)$$

式中, S 为趋势斜率, $S > 0$ 代表植被有增加的趋势,反之则减少; n 是研究时间序列的长度; m 为 1982—2016 年序号($m=1, 2, 3, 4, \dots, 35$); $NDVI_m$ 表示第 m 年的平均 NDVI 值。

对 1982—2016 年东北黑土区多年植被 NDVI 与同期气温、降水量进行逐像元相关分析,探讨相关系数的空间分布情况,分析多年植被 NDVI 对气温、降水量的响应,相关性公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}} \quad (2)$$

式中, \bar{a} 为多年气温、降水平均值, \bar{b} 为多年 NDVI 平均值, i 为年序号($i=1, 2, 3, 4, \dots, 35$), n 是研究时间序列的长度, a_i 是第 i 年气温、降水量值, b_i 是第 i 年的 NDVI 值。

3 结果与分析

3.1 MODIS 与 GIMMS 数据的一致性检验

MODIS NDVI 和 GIMMS NDVI 具有不同传感器,表 2 列出了其波段范围、波长范围、空间和时间分辨率的差异。由表可见,在进行长时间序列分析年际变化前需要对两种数据集进行一致性检验。

两种数据集有 14a 时间交叉,通过全区域各月平均 NDVI 分析,2 种数据集 R^2 为 0.9509,并通过 0.05 置信度检验(图 3)。MODIS 拟合数据与 GIMMS NDVI3g 数据的生长季各月相关系数分别为 0.803、0.648、0.673、0.559、0.537、0.796、0.715、0.625、0.732($P < 0.01, n = 26357$),均为显著正相关关系。综上所述,MODIS 数据集对 GIMMS 数据集进行插补是可行的。

表 2 GIMMS 和 MODIS 两种数据集传感器的几何和光谱特征

Table 2 Geometric and spectral characteristics of GIMMS and MODIS two data sets sensors

传感器 Sensor	近红波段 NIR/ μm	红波段 R/ μm	时间分辨率 Time resolution/d	空间分辨率 Spatial resolution/km
MODIS	0.841—0.876	0.620—0.670	1	1
AVHRR	0.725—1.100	0.580—0.680	15	8

3.2 区域尺度的 NDVI 变化

1982—2016 年春季 NDVI 年平均值在 0.22—0.34 之间,多年平均值为 0.27。整体来看,35a 春季东北黑土区植被覆盖变化呈增加趋势,并且增加量随时间长度的增加而逐渐呈极显著增加趋势(表 3)。逐年变化显示(图 4),春季 NDVI 变化主要分 3 个阶段:1982—1998 年春季 NDVI 呈不显著增加趋势,1998—2010 年春季 NDVI 呈显著增加趋势($P < 0.05$),2010—2016 年春季 NDVI 呈极显著增加趋势($P < 0.01$),年内平均 NDVI 最大值出现在 2009 年,最大值为 0.343。1982—2016 年夏季 NDVI 年平均值在 0.50—0.55 之间,多年平均值为 0.53。在 6 个时间序列内呈减少趋势(表 3),尤其

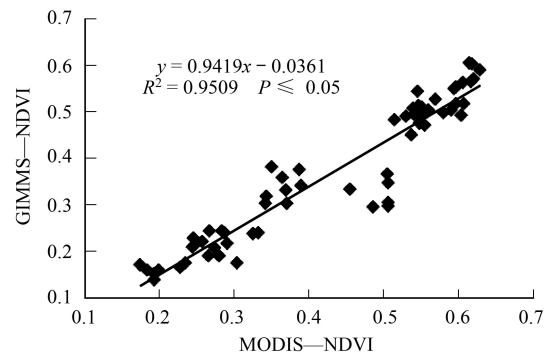


图 3 GIMMSNDVI 和 MODIS NDVI 数据关系

Fig.3 Data relations between GIMMSNDVI and MODIS NDVI

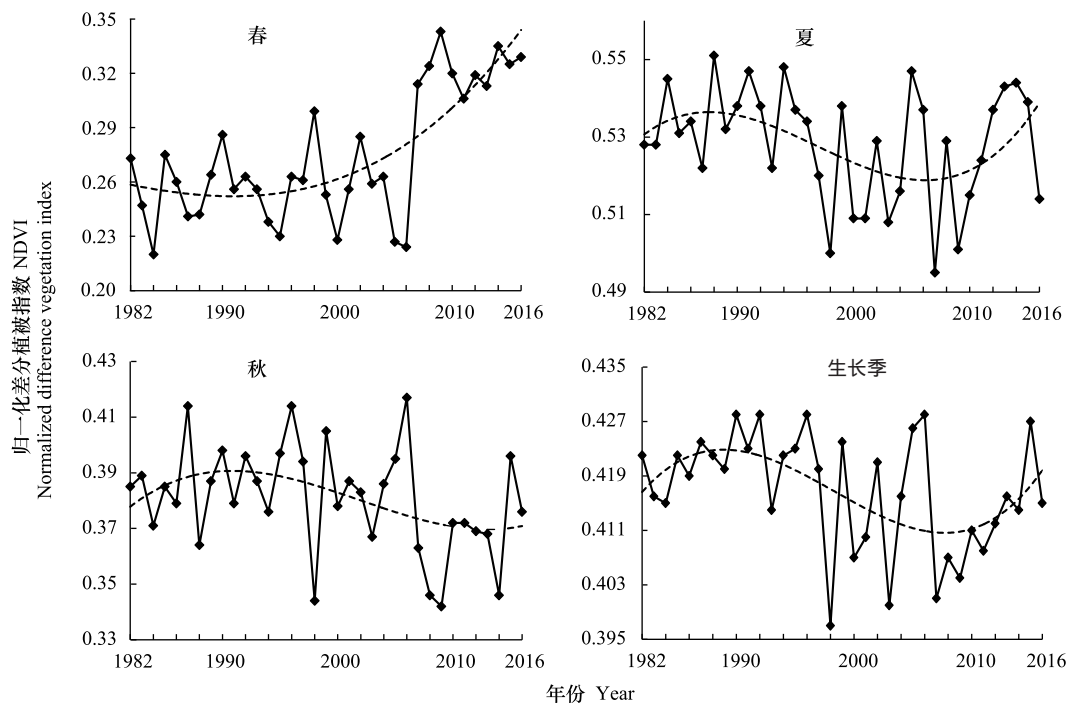


图 4 各季节、生长季植被 NDVI 的年内变化

Fig.4 Interannual variation of NDVI during growing season and season

1982—2012 年呈极显著减少趋势($P < 0.01$),2012—2016 年呈不显著减少趋势($P > 0.05$)。整体来看,根据 NDVI 年内变化显示(图 4),夏季 NDVI 在 35a 的变化主要分 3 个阶段:1982—1988 年夏季 NDVI 呈增加趋势,1988—2008 年呈减少趋势,2008—2016 年呈增加趋势,年内平均 NDVI 最大值出现在 1987 年,最大值为 0.551。

1982—2016 年秋季 NDVI 年平均值在 0.34—0.42 之间,多年平均值为 0.38。在 6 个时间序列中(表 3),除 1982—2006 年呈不显著增加趋势外,其余 5 个时间序列均呈减少趋势,其中 3 个时间序列呈显著减少趋势($P < 0.05$);逐年变化显示(图 4),秋季 NDVI 呈先增加后减少趋势,且变化幅度较小,年内平均 NDVI 最低值出现在 2009 年,最低值为 0.342。

1982—2016 年间生长季 NDVI 平均值在 0.39—0.43 之间,变化幅度相对较小,多年平均值为 0.41。生长季 NDVI 在 6 个时间序列除 1982—2006 年外,均呈显著减少趋势($P < 0.05$)。逐年变化显示(图 4),生长季 NDVI 并非持续减少,1982—1990 年呈显著增加趋势($P > 0.05$),1990—2007 年呈极显著减少趋势($P < 0.01$),而 2007—2016 呈不显著增加趋势,该阶段最大值出现在 2006 年,其值为 0.428。

区域植被的生长受水热条件的共同控制^[31-32],从图 4 中可以看出,东北黑土区植被 NDVI 多年平均值呈现出明显的季节变化,夏季植被年平均 NDVI 值均高于春季、秋季和生长季,而生长季则高于春季和秋季,因此,植被 NDVI 与气温、降水等气候因素密切相关。

表 3 各季节、生长季的区域 NDVI 年际变化趋势统计

Table 3 Statistics of trends in growing and seasonal NDVI at regional scale

时间序列 Time Series	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	生长季 Growing Season
1982—2006	0.154	-0.439 *	0.05	-0.29
1982—2008	0.293	-0.413 *	-0.138	-0.346 *
1982—2010	0.473 *	-0.495 **	-0.273	-0.424 *
1982—2012	0.556 **	-0.417 *	-0.312 *	-0.458 *
1982—2014	0.629 **	-0.257	-0.398 *	-0.434 *
1982—2016	0.684 **	-0.244	-0.333 *	-0.338 *

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

3.3 像元尺度的 NDVI 动态变化

1982—2006 年,东北黑土区植被 NDVI 总体趋势为退化状态(图 5),退化区域面积占东北黑土区总面积的 39%,其中,轻微退化区域占 28%,显著退化区域占 11%,严重退化区域为哈尔滨市、呼伦贝尔市、双鸭山市和伊春市,退化面积占区域总退化面积的 13%。相反,区域内改善面积相对较少,占研究区总面积的 30%,其中显著改善区域仅占 0.8%。总体来看,改善区域主要集中在赤峰市、呼伦贝尔市和通辽市,分别占改善区域总面积的 14%,18%和 33%,改善区域的植被类型主要是农业植被、草原和森林,分别占比 41%,22%和 18%。此外,赤峰市、黑河市和兴安盟地区 NDVI 整体趋势基本不变。

1982—2012 年,东北黑土区植被 NDVI 总体趋势为改善状态(图 5),植被覆盖率较 2006 年相比有明显的提高,改善区域面积占东北黑土区总面积的 56%,退化区域面积占东北黑土区总面积的 15%。呼伦贝尔市、黑河市和哈尔滨市与 2006 年相比,改善面积显著提高,改善面积分别占市区域的 33%、50%和 48%,其中森林、草原和农业植被等重要植被类型明显改善。此外,赤峰市、通辽市、松原市、大庆市和四平市 5 个区域内植被 NDVI 趋势与 2006 年相比,有明显退化迹象。

1982—2016 年,东北黑土区植被 NDVI 总体趋势为改善状态(图 5),植被覆盖较 2012 年相比变化不大,改善区域面积占东北黑土区总面积的 58%,主要植被类型为草原、农业植被和森林,退化区域面积占研究区总面积的 14%。2016 年与 2006 年相比,除大庆市和松原市之外,1982—2006 年呈轻微退化和显著退化趋势的区域范围几乎全部发展为改善趋势,东北黑土区 10 年间平均每年改善面积约为 25653.34km²,特别是鹤岗市、绥化市和长春市改善面积均占市区域面积 80%以上。

3.4 区域尺度 NDVI 与气候要素的关系

对东北黑土区内 29 个气象站点 35a 季节内多年平均气温和平均降水量统计可知(图 6):各季节年平均气温变化趋势平缓,夏季和生长季气温相对较高,夏季多年平均气温为 21.02℃,生长季多年平均气温为

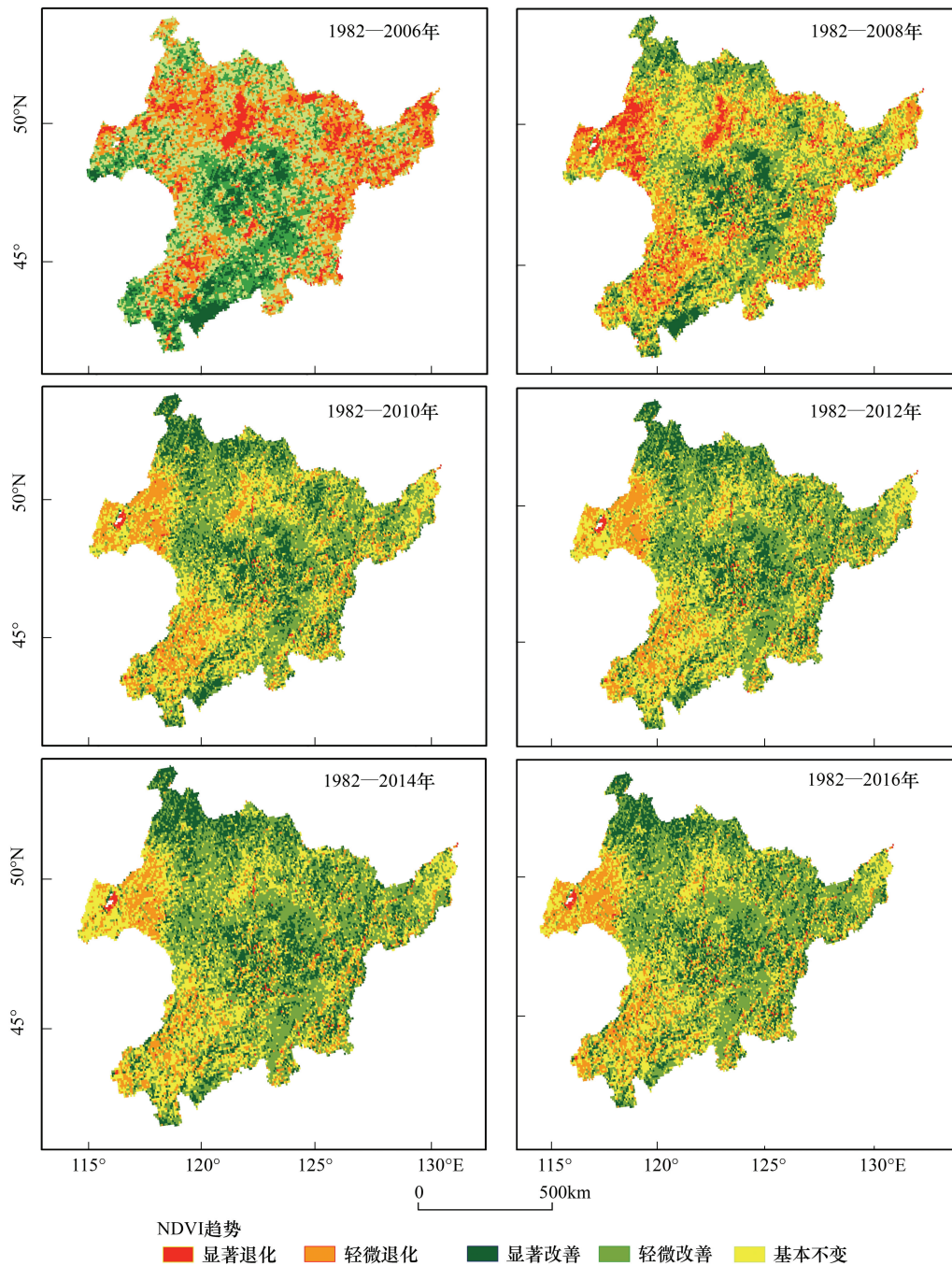


图 5 不同时间序列植被 NDVI 变化的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of NDVI changes of growing season during different time series

10.41℃。秋季气温较低,多年平均气温为 4.51℃。春季气温值浮动较大,多年平均气温最高为 8.2℃,最低为 3.28℃;各季节、生长季降水量差别很大,春季降水量变化幅度较小,在 11.81—40.53mm 之间,夏季多年平均降水量最高达 147.63mm,秋季降水量呈现出“一峰多谷”趋势,最大值为 49.92mm,最小值为 11.04mm。

表 4 为东北黑土区植被 NDVI 多年平均值与同期气候因子(气温、降水量)的相关系数,依表可知,除夏季外植被 NDVI 与同期气温在 6 个时间序列上均呈正相关关系,同时在 6 个时间序列中生长季和春季均达到 0.05 的显著水平,夏季、秋季 NDVI 与气温的相关性较差;随着研究时段不断延长,生长季、春季 NDVI 与相应时段气温的相关性呈现出缓慢降低趋势,夏季和秋季则呈现缓慢增加趋势;此外,6 个时间序列中除了秋季 NDVI 与同期降水量呈负相关关系外,其余三个季节均呈正相关关系,并与同期降水量的相关性随时间尺度

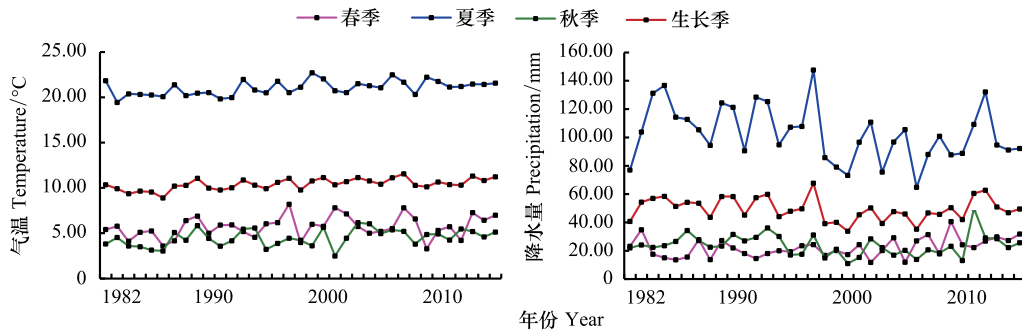


图6 东北黑土区气候因子变化
Fig.6 Changes of climate in black soil area of Northeast China

延长而明显增加,逐步呈现出降水量对该季节植被生长的影响。

表4 各季节、生长季 NDVI 与同期气温、降水量的相关性

Table 4 Significance level of correlation between NDVI and temperature and precipitation over same period

项目 Item	季节 Season	时间序列 Time series					
		1982—2006	1982—2008	1982—2010	1982—2012	1982—2014	1982—2016
NDVI 与气温 NDVI&temperature	生长季	0.355 *	0.472 *	0.432 *	0.438 *	0.435 *	0.395 *
	春季	0.691 **	0.656 **	0.423 *	0.385 *	0.368 *	0.412 *
	夏季	-0.144	-0.285	-0.25	-0.247	-0.211	-0.213
	秋季	0.042	0.15	0.094	0.097	0.163	0.155
NDVI 与降水量 NDVI&precipitation	生长季	0.137	0.03	0.046	0.059	0.038	0.045
	春季	0.117	0.351	0.38 *	0.376 *	0.436 *	0.487 *
	夏季	0.119	0.266	0.275	0.283	0.294	0.288
	秋季	-0.316	-0.149	-0.074	-0.11	-0.149	-0.155

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

3.5 像元尺度 NDVI 与气候要素相关性分析

多年平均 NDVI 值与同期气温主要呈正相关关系(图7),4 个时间序列的像元数比例均占 76%以上,显著

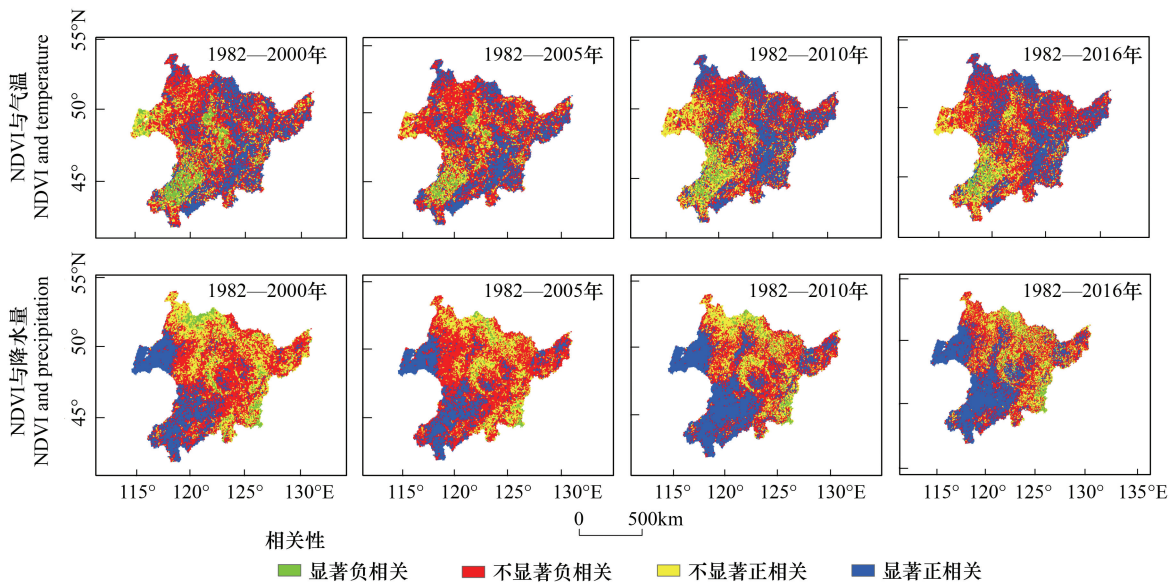


图7 NDVI 与同期气温、降水量的相关性

Fig.7 Spatial distribution of correlations between NDVI and temperature and between NDVI and precipitation

正相关的面积比例 1982—2000 年为 28%, 1982—2005 年为 30%, 1982—2010 年为 35%, 1982—2016 年达到 37%, 主要分布在哈尔滨市、黑河市地区, 主要植被类型为草甸和农业植被。4 个时间序列显著负相关的面积比例分别为 3%, 5%, 6%, 10%, 主要分布在兴安盟、通辽市和赤峰市地区, 主要植被类型为农业植被、森林和草原植被。显著正相关和显著负相关的区域均随时间长度的延长而呈增加趋势。

多年平均 NDVI 值与同期降水量主要呈正相关关系(图 7), 4 个时间序列的像元数有 50%—62% 的区域呈正相关, 4 个时间序列显著正相关面积比例分别为 23%, 24%, 36%, 38%, 主要分布在通辽市、赤峰市和呼伦贝尔市地区, 主要植被类型为森林、草原及农业植被。显著负相关的面积比例较小, 4 个时间序列显著负相关的面积比例分别为 5%, 3%, 3%, 4%, 主要分布在哈尔滨市、吉林市, 主要植被类型为草甸、湿地和森林植被。显著正相关的区域随时间长度的延长而呈增加趋势, 而显著负相关的区域无明显变化。

4 讨论

总体来看, 本文东北黑土区植被 NDVI 变化趋势的结果与欧亚大陆^[33]、东北冻土区^[34]得出的植被覆盖变化基本一致。生长季是植被整个物质循环中最重要的阶段, 生长季 NDVI 在 1998 年、2007 年前后浮动较大, 这种相反的变化趋势主要是由于夏季 NDVI 的相应变化造成的, 其次是秋季, 春季 NDVI 变化对此影响较小; 春季 NDVI 与其他季节有所不同, 主要呈增加趋势, 是由于退耕还林、生态环境建设等政策的有效实施, 东北黑土区的春季植被覆盖情况逐年改善; 夏季气温较高, 降水量集中, 具有较好的植被生长环境, 植被 NDVI 值明显高于其他三个季节; 秋季气温逐渐下降, 降水量减少, 但植被不会立即枯萎消失, 因此秋季植被 NDVI 值整体高于同期春季; 4 个阶段的年际 NDVI 变化趋势是人类活动和气候因子共同作用的结果。此外, 生长季、夏季和秋季 NDVI 的变化量均随时段的延长而呈显著减少趋势, 表明 NDVI 的增长速度正在放缓; 生长季和其他季节正相关区域面积比例随时段增加呈不显著增加趋势, 表明生态环境建设有了初步进展, 植被覆盖度增强, 生态效应趋于良性发展。东北黑土区具有特殊的区位特征, 黑土区土地肥沃, 农业植被覆盖广泛, 草原、森林等植被覆盖面积较高, 但由于人类活动影响, 城市扩张、荒漠化情况严重, 呼伦贝尔等草原地区植被退化严重, 需要得到相关重视。

同期气温、降水量对多年时间序列 NDVI 均存在较大影响, 其中春季、夏季和秋季 NDVI 对同期降水量的响应要大于同期温度, 说明降水量在该季节影响着植被的生长; 生长季 NDVI 对同期温度的敏感性高于同期降水量, 表明生长季中的温度高低对植被生长有一定的制约力。植被 NDVI 与气温呈显著正相关的区域集中分布在黑土区内的平原地区, 平原区域内河流分布较广, 对气温变化极为敏感, 植被类型以耕地为主, 其所需的土壤水文条件受温度的影响较大, 气温的升高可以加快植被光合作用, 进而促进植被生长。植被 NDVI 与气温呈显著负相关的地区分布在大兴安岭山脉以及松辽平原边缘地区, 土壤水分条件有限, 人为干扰能力下降, 由于气温升高, 加快土壤水分的蒸发, 进而限制了植被生长。受降水影响明显的区域集中分布在东北黑土区的西部, 该区域为半干旱区, 降水量多年持续降低, 气候干旱, 区域植被以草原和森林为主, 草地对降水量的敏感性更强, 因此降水量是该地区影响植被生长的主要因子。与降水量呈负相关的区域集中在平原地区, 受影响的植被类型主要为湿地、沼泽化草甸, 由于降水量不断减少, 沼泽湿地植被生长可利用的土壤面积扩大, 生长条件得到改善, 同时该地区为东北多年冻土分布区域, 多年来降水量的减少及气温升高, 促使冻土土壤环境大为改善, 从而促进植被生长。

5 结论

(1) 本文基于线性回归模型方法, 应用 MODIS NDVI 数据集对 GIMMS NDVI 数据集进行时间序列扩展, 并通过一致性检验, 解决了单一数据集时间序列有限的局限性; 从区域、像元两个空间尺度, 研究了东北黑土区 1982—2016 年植被生长的动态变化, 分析了气候变化与植被生长的相关性, 丰富了植被 NDVI 与气候关系的研究成果。

(2)东北黑土区多年 NDVI 动态变化表明:区域尺度上,植被 NDVI 值呈现出季节变化,夏季和生长季 NDVI 值高于春季和秋季;1982—2016 年,东北黑土区植被在春季呈显著增加趋势,夏季呈现出先增加再减少最后增加的动态变化,秋季东北黑土区植被 NDVI 变化幅度较小,生长季植被 NDVI 变化幅度不大,主要呈显著减少趋势。在像元尺度上,1982—2016 年东北黑土区 NDVI 总体趋势为改善状态,鹤岗市、绥化市和长春市植被 NDVI 改善面积较大,改善面积占东北黑土区总面积的一半以上。

(3)东北黑土区植被 NDVI 多年平均值对气候变化的响应说明:区域尺度上,东北黑土区年均气温变化趋势平缓,降水量起伏变化较大,多年时间序列 NDVI 均与同期气温、降水量存在一定相关性,各季节对气候变化的敏感性各不相同;不同季节主要的控制因素不同,气温影响着春季和秋季的植被生长,夏季降水量发挥主导作用。像元尺度上,多年平均 NDVI 值与同期气温和降水量主要呈正相关关系,显著正相关的比例较大;平原地区植被 NDVI 与气温主要呈显著正相关关系,气温的升高促进植被生长,集中在哈尔滨市、黑河市地区,植被类型以耕地为主;平原地区边缘和山地植被 NDVI 与降水量主要呈显著正相关关系,降水量增加可改善植被生长环境,主要分布在通辽市、赤峰市和呼伦贝尔市地区,植被类型主要为森林、草地。

参考文献 (References):

- [1] Canadell J G, Steffen W L, White P S. IGBP/GCTE terrestrial transects: dynamics of terrestrial ecosystems under environmental change. *Journal of Vegetation Science*, 2010, 13(3): 298-300.
- [2] 李净, 刘红兵, 李彩云, 李龙. 基于 GIMMS 3g NDVI 的近 30 年中国北部植被生长季始期变化研究. *地理科学*, 2017, 37(4): 620-629.
- [3] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001: 1-673.
- [4] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. *生态学报*, 2017, 37(2): 341-348.
- [5] 王茜, 陈莹, 阮玺睿, 李小冬, 王小利, 史健宗, 王志伟. 1982-2012 年中国 NDVI 变化及其与气候因子的关系. *草地学报*, 2017, 25(4): 691-700.
- [6] 王宏, 李晓兵, 李霞, 莺歌, 符娜. 基于 NOAA NDVI 和 MSAVI 研究中国北方植被生长季变化. *生态学报*, 2007, 27(2): 504-515.
- [7] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 张敏, 范云豹. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 576-592.
- [8] 高鹏, 穆兴民, 王飞, 王双银. 中国东北地区近百年来降水量变化趋势分析. *水文*, 2010, 30(5): 80-84, 18-18.
- [9] 王玉玺, 解运杰, 王萍. 东北黑土区水土流失成因分析. *水土保持科技情报*, 2002, (3): 27-29.
- [10] 陈福军, 沈彦俊, 胡乔利, 齐永青, 张玉翠. 海河流域 NDVI 对气候变化的响应研究. *遥感学报*, 2011, 15(2): 401-414.
- [11] Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, Reenberg A, Prince S D, Tucker C, Scholes R J, Le Q B, Bondeau A, Eastman R, Epstein H, Gaughan A E, Hellden U, Mbwo C, Olsson L, Paruelo J, Schweitzer C, Seaquist J, Wessels K. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981-2007-an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 144-158.
- [12] 陆晴, 吴绍洪, 赵东升. 1982—2013 年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系. *地理科学*, 2017, 37(2): 292-300.
- [13] Zhao X, Tan K, Zhao S, Fang J. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(10): 946-952.
- [14] 赵霞, 谭琨, 方精云. 1982-2006 年新疆植被活动的年际变化及其季节差异. *干旱区研究*, 2011, 28(1): 10-16.
- [15] 范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境. *水土保持学报*, 2004, 18(2): 66-70.
- [16] 尚建勋, 朱悦. 东北黑土区侵蚀沟专项治理的几点思考. *中国水土保持*, 2017, (11): 16-18.
- [17] 魏建兵, 肖笃宁, 李秀珍, 布仁仓, 张春山. 东北黑土区小流域农业景观结构与土壤侵蚀的关系. *生态学报*, 2006, 26(8): 2608-2615.
- [18] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 王志强, 魏欣. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策. *中国水土保持科学*, 2008, 6(1): 1-8.
- [19] 谢云, 段兴武, 刘宝元, 刘刚, 冯艳杰, 高晓飞. 东北黑土区主要黑土土种的容许土壤流失量. *地理学报*, 2011, 66(7): 940-952.
- [20] 梁丰, 刘丹丹, 王婉昭, 刘鹏飞, 于芳健. 1961-2013 年东北地区夏季降水变化趋势分析. *水土保持研究*, 2015, 22(5): 67-73.
- [21] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 胡远满. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势. *生态学报*, 2013, 33(2): 519-531.
- [22] 王绍强, 周成虎, 刘纪远, 李克让, 杨晓梅. 东北地区陆地碳循环平衡模拟分析. *地理学报*, 2001, 56(4): 390-400.
- [23] 杜加强, 高云, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 方广玲, 袁新杰, 阴俊齐, 舒俭民. 近 30 年新疆植被生长异常值时空变化及驱动因子. *生态学报*, 2016, 36(7): 1915-1927.
- [24] 杜加强, 舒俭民, 赵晨曦, 贾尔恒·阿哈提, 王丽霞, 香宝, 方广玲, 刘伟玲, 何萍. 两代 AVHRR GIMMS NDVI 数据集的对比分析——以新疆地区为例. *生态学报*, 2016, 36(21): 6738-6749.
- [25] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, Cao R, Zhang Y F, Shen W M. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin.

- Ecological Indicators, 2015, 51: 117-126.
- [26] 成方妍, 刘世梁, 张月秋, 尹艺洁, 侯笑云. 基于 MODIS 序列的北京市土地利用变化对净初级生产力的影响. 生态学报, 2017, 37(18): 5924-5934.
- [27] Fensholt R, Rasmussen K, Nielsen T T, Mbow C. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends — Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(9): 1886-1898.
- [28] Mao D H, Wang Z M, Luo L, Ren C Y. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18: 528-536.
- [29] 殷刚, 孟现勇, 王浩, 胡增运, 孙志群. 1982-2012 年中亚地区植被时空变化特征及其与气候变化的相关分析. 生态学报, 2017, 37(9): 3149-3163.
- [30] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [31] 郭金婷, 胡远满, 熊在平, 闫晓露, 任百惠, 布仁仓. 中国东北多年冻土区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2413-2422.
- [32] 成方妍, 刘世梁, 尹艺洁, 吕一河, 安南南, 刘昕明. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素. 生态学报, 2017, 37(3): 788-797.
- [33] Piao S L, Wang X H, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. Global Change Biology, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [34] 毛德华, 王宗明, 宋开山, 刘殿伟, 张柏, 张素梅, 罗玲, 张春华. 东北多年冻土区植被 NDVI 变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应. 中国环境科学, 2011, 31(2): 283-292.