

DOI: 10.5846/stxb202101130143

何玉杰,孔泽,户晓,张江,王猛,彭长辉,朱求安.水热条件分别控制了中国温带草地 NDVI 的年际变化和增长趋势.生态学报, 2022, 42(2): 766-777.

He Y J, Kong Z, Hu X, Zhang J, Wang M, Peng C H, Zhu Q A. Water and heat conditions separately controlled inter-annual variation and growth trend of NDVI in the temperate grasslands in China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 766-777.

## 水热条件分别控制了中国温带草地 NDVI 的年际变化和增长趋势

何玉杰<sup>1,2</sup>, 孔 泽<sup>2</sup>, 户 晓<sup>2</sup>, 张 江<sup>2</sup>, 王 猛<sup>3</sup>, 彭长辉<sup>2,4</sup>, 朱求安<sup>1,5,\*</sup>

1 河海大学水文水资源学院, 南京 210098

2 西北农林科技大学林学院, 生态预测与全球变化研究中心, 杨凌 712100

3 东北师范大学地理科学学院, 长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室, 长春 130024

4 魁北克大学蒙特利尔分校环境科学研究所, 蒙特利尔加拿大 C3H3P8

5 国家地球系统科学数据中心, 国家科技基础条件平台, 北京 100101

**摘要:**温带草地区是我国植被对气候变化响应的敏感区和陆地生态系统的生态脆弱区,是组成草地资源的重要部分。由于全球变暖,气候变化带来的极端气候影响越来越大,探究我国温带草地植被覆盖时空变化规律和水热条件变化对其生长的影响,对区域生态的环境保护,实现畜牧业的可持续发展和更加合理有效地利用草地资源具有重要的现实意义。基于 1982—2015 年长时间序列的气象(降水、温度、太阳辐射)数据和 GIMMS NDVI 3g 数据,采用去趋势分析法和相关性分析法,探究近 34 年中国温带地区生长季草地归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)和气候因子变化格局,以及水热条件对 NDVI 的同步影响和滞后影响。研究结果表明:(1)1982—2015 年中国温带草地生长季平均温度和月平均太阳辐射呈增长趋势,降水量为下降趋势,温带草地气候逐渐呈现“暖干化”;(2)1982—2015 年中国温带草地生长季 NDVI 的年际变化由降水因子主导,特别是在 1999 年之后,降水的对于中国温带草地生长季 NDVI 年际变化的影响更为显著;(3)1982—2015 年中国温带草地生长季 NDVI 为增长趋势,生长季热条件(温度和太阳辐射)的显著上升控制着 NDVI 的增长趋势;(4)1982—2015 年中国温带草地生长季 NDVI 对水热因子在年际变化上存在明显的滞后响应,生长季前期 NDVI 对温度滞后响应最明显,生长季中后期降水则成为植被生长滞后影响的主要控制因子。

**关键词:**中国温带草地;归一化植被指数;气候因子;相关性分析法

## Water and heat conditions separately controlled inter-annual variation and growth trend of NDVI in the temperate grasslands in China

HE Yujie<sup>1,2</sup>, KONG Ze<sup>2</sup>, HU Xiao<sup>2</sup>, ZHANG Jiang<sup>2</sup>, WANG Meng<sup>3</sup>, PENG Changhui<sup>2,4</sup>, ZHU Qian<sup>1,5,\*</sup>

1 College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

2 Center for Ecological Forecasting and Global Change, College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

3 Key Laboratory of Geographical Processes and Ecological Security in Changbai Mountains, Ministry of Education, College of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

4 Institute of Environment Sciences, University of Quebec at Montreal, Montreal C3H3P8, Canada

5 National Earth System Science Data Center, National Science & Technology Infrastructure of China, Beijing 100101, China

**Abstract:** The temperate grassland is the sensitive to climate change and is the ecologically fragile area of the terrestrial

**基金项目:**第二次青藏高原科学考察研究项目(2019QZKK0304);国家重点研发计划(2016YFC0501804);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2019B04714)

收稿日期:2021-01-13; 网络出版日期:2021-09-10

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuq@hhu.edu.cn

ecosystem in China, and it is an important part of the grassland resources. Due to global warming, the extreme climate impact brought by climate change is getting bigger, so exploring the temporal and spatial changes of vegetation coverage in the temperate grasslands in China and the effects of changes in water and heat conditions on vegetation growth are of greatly practical significance to the environmental protection of regional ecology, the sustainable development of animal husbandry, and more rational and effective use of grassland resources. Based on the long-term meteorological data (precipitation, temperature and radiation) and GIMMS NDVI 3g data from 1982—2015, this study used trend analysis and correlation analysis to explore the changes of grassland NDVI (Normalized difference vegetation index) in the growing season in the temperate regions of China, and the pattern of climate change, as well as the simultaneous and lagging effects of hydrothermal conditions on the NDVI. The results showed that: (1) From 1982 to 2015, the average temperature and total solar radiation in China's temperate grassland growing season showed an increasing trend, the total amount of precipitation was a downward trend, and the temperate grassland climate gradually became "warm and dry". (2) From 1982 to 2015, the inter-annual variation of NDVI in the growing season of temperate grassland in China was dominated by precipitation factors. Especially after 1999, the influence of precipitation on the inter-annual variation of NDVI in the growing season of temperate grassland in China was more significant. (3) From 1982 to 2015, the NDVI of China's temperate grassland growing season was with an increasing trend, and it was positively correlated with water and heat factors. The significant increase in thermal conditions (temperature and solar radiation) during the growing season controlled the growth trend of the NDVI. (4) From 1982 to 2015, the NDVI of China's temperate grassland growing season had an obvious lagging response to the inter-annual variation of water and heat factor. The NDVI responded most obviously to the temperature lag in the early stage of the growing season, and precipitation became the main controlling factor for the lagging influence on vegetation growth in the middle and late growing seasons.

**Key Words:** temperate grassland of China; normalized difference vegetation index; meteorological factors; correlation analysis

全球变化背景下,生态系统的可持续发展是人类面临的共同的挑战<sup>[1]</sup>。陆地生态系统对气候变化的响应一直是全球变化生态学领域的研究热点<sup>[2-3]</sup>。草地作为我国陆地生态系统的重要组成部分,其面积约占国土总面积五分之二<sup>[4-5]</sup>,具有强大的生态功能,如保持水土、防风固沙、调节气候以及涵养水源等,是可持续发展畜牧业的基础<sup>[6]</sup>,并且对发扬地区人文历史、维系区域生态平衡和发展区域经济有重要价值和意义<sup>[7]</sup>。与此同时,草地生态系统生境脆弱,对气候变化和人类活动因素的改变响应十分敏感<sup>[8]</sup>。研究表明半个世纪以来中国草地面积在逐渐的减少,仅 1995 年到 2000 年我国干旱地区的草原面积就减少约  $5.5 \times 10^5 \text{ hm}^2$ <sup>[9]</sup>,尤其在全球变暖的背景下,我国温带地区的草地枯黄期和生长季的长度均受到了不同程度的影响<sup>[10]</sup>。中国温带地区近年来的气候呈现逐渐暖干化,对草地植被的分布以及草地生产力产生负面影响,不仅破坏了草地的生态环境平衡,更是对可持续发展草原畜牧业产生了严重的威胁<sup>[11]</sup>。

植被指数是能够有效反映一定时间内植被覆盖程度和植被生长情况的指示因子<sup>[11]</sup>,被广泛应用于植被动态变化的研究中。传统草地植被生产力实测主要依靠人工野外定点实际观测,在不同时间和空间尺度研究上局限性较大,而植被指数数据主要借助于卫星遥感技术进行观测,能够有效补充地面观测,实现空间尺度转换,优势突出<sup>[12]</sup>。其中归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)是目前应用最为广泛的植被指数之一<sup>[13]</sup>,在植被覆盖、净初级生产力(Net primary production, NPP)、生物量以及物候等方面的进行了大量的研究<sup>[14]</sup>。如根据 GIMMS NDVI 3g 数据集研究表明北半球植被生长季时长自 1981 年以来有所延长,植被覆盖的整体趋势有所增加,并且由于秋季 NDVI 的增加,导致在 1982—2013 年生长季北半球 76% 的地区的 NDVI 同样呈现增长趋势<sup>[15]</sup>。因此利用植被指数来分析植被生长、分布等对气候变化的响应被认为是一种有效的方法和手段。

水热因子是植物生长的必要因子,不论是降水、温度和太阳辐射等单独作用还是共同作用都会在不同尺度上对植被变化产生影响<sup>[16-17]</sup>。20多年来,气候变化对中国草地生态环境的影响及草地植被覆盖变化的研究较多,包括草地植被指数时空变化格局及其对水热因子的响应<sup>[1]</sup>。有研究通过对全球植被 NDVI 变化趋势分析后得出北半球中高纬度气温升高引起植被活动的增加<sup>[18]</sup>;Piao 等<sup>[9]</sup>在中国温带地区草地 NDVI 与气候因子之间的关系研究中得出:1982—1999 年草地 NDVI 持续增长,生长季降水在 200mm 左右视为温带地区草地植被生长的转折点。并且有研究表明,降水对草地植被生长有着明显的滞后影响,周期在 50—60d 不等<sup>[3]</sup>;段艺芳等人<sup>[20]</sup>则认为,在黄土高原地区,大部分植被对温度的滞后效应不明显。

综上所述,我国温带草地植被生长状态对气候变化在年际及趋势变化上的响应特征仍需进一步研究。本研究以中国温带草地为研究对象,以其生长季降水总量为水条件,平均温度和太阳辐射为热条件,采用去趋势分析和相关性分析法对 1982—2015 年中国温带草地生长季 NDVI 动态变化及其对气候水热因子变化的响应进行了解析,并以 2 个月为滞后时间尺度,对生长季温带草地 NDVI 对水热因子的滞后响应进行了探讨。本研究在描述温带草地 NDVI 与气候的关系的基础上,分别探求水、热条件在时间和空间上对温带草地生长的影响,从而区分水热条件对温带草地生长季 NDVI 的年际变化和整体增长趋势的贡献。这将有助于更加准确地把握温带草地植被时空变化格局,全面认识草地—气候相互关系,有利于指导畜牧周期、合理利用草地资源,为保护和监测温带草地生态环境及可持续发展畜牧业提供理论参考。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究区域

中国温带草地从东到西包括我国大部分北方草地地区,其温度带包括寒温带、中温带和暖温带,由于西北地区的严重干旱条件和东部季风气候的共同作用,其气候条件有着明显的季节性和空间差异性,植被覆盖的时空变化特征也十分的明显,故温带草地成为对气候变化响应最为敏感的地区之一<sup>[21]</sup>。

本文研究的草地类型分布范围是根据《1:100 万中国植被图集》<sup>[22]</sup>经过数字化处理,按不同温度带和植被类型归类后得到的矢量底图(<http://www.resdc.cn/>),从而提取得到的中国温带草地研究区域(图 1)。

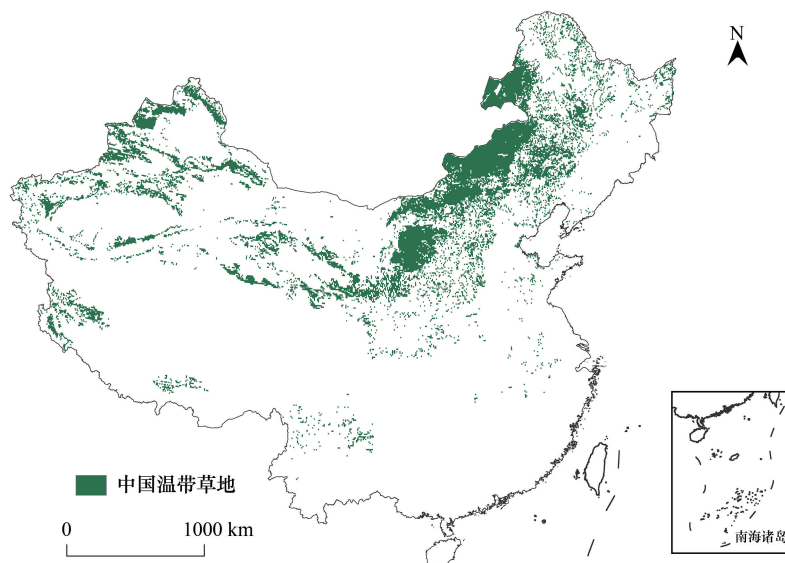


图 1 研究区域

Fig.1 Study area of temperate grassland in China

### 1.2 数据来源与预处理

本文研究时段为 1982—2015 年,将 5—10 月定义为温带草地的生长季<sup>[23]</sup>,利用温带草地地区生长季

NDVI 和气象数据(降水、温度、太阳辐射)研究中国温带草地植被动态、气候因子变化及其相互关系,并统一将空间数据分辨率设为  $8\text{km} \times 8\text{km}$ 。

### 1.2.1 NDVI 数据

NDVI 数据来自于美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)全球监测与模型研究组(Global Inventory Monitoring and Modelling Studies, GIMMS)提供的 1982 年 1 月至 2015 年 12 月,每 15d 合成的空间分辨率为  $8\text{km}$  的数据集(GIMMS NDVI 3g (<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>))。NDVI 值域为  $-1.0$ — $1.0$ , NDVI 小于 0, 表明无植被覆盖,或表明存在较大的云团、水体或者冰雪覆盖等影响近红外波段反射, NDVI 等于零则代表该地区无植被生长<sup>[24]</sup>。通常, NDVI 指数大于 0.1 代表有植被生长,且数值越大表示植被生长状况或者覆盖状况越好<sup>[25]</sup>。为减少云、大气、太阳高度角等不确定因素的影响,本文取 NDVI 大于 0.1 的部分合成为逐月数据,求其生长季平均值来反映草地生长情况。基于 ArcGIS 采用最大值合成法(MVC)分别建立 1982—2015 年生长季、5—6 月、7—8 月和 9—10 月 NDVI 数据集。

### 1.2.2 气候数据

本文选取与植被生长关系最为密切的生长季平均温度、月平均太阳辐射和降水总量作为影响草地生长季 NDVI 变化的主要气候因子。中国逐月(1982—2015)的温度和降水数据来自中国国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>),辐射逐月数据来自国家气象科学数据中心(<http://www.data.cma.cn/>),并选取温带草地分布范围内 27 个辐射监测站,统计其逐月的太阳辐射总量。本研究将降水作为水分影响条件,平均温度和月平均太阳辐射作为热量影响条件,在此基础上建立中国温带草地 3—4 月、5—6 月、7—8 月以及生长季的水热条件数据集。

### 1.3 方法

本文利用线性回归法分析近 34 年的中国温带草地生长季 NDVI、温度、太阳辐射和降水等因子在时间上的变化趋势,以自变量的变化斜率的 10 倍表示该因子的“趋势率”。并以气候因子为自变量, NDVI 为因变量,分析长时间序列下 NDVI 对气候因子变化的响应关系。在去趋势分析的基础上,对 NDVI 与温度、太阳辐射和降水分别进行时间和空间上的关系分析,以此来探究生长季中国温带草地植被生长对水热条件的响应。去趋势分析又称作“消除波动趋势分析法”,可以去除因子本身在时间趋势上的特征,从而用以分析因子在时间波动格局之间的响应关系。在此基础上,以两个月为时间尺度,分别求得 3—4 月水热因子与 5—6 月 NDVI 相关系数、5—6 月水热因子与 7—8 月 NDVI 相关系数以及 7—8 月的水热因子与 9—10 月 NDVI 的相关系数,以及 5—10 月期间,每两月的 NDVI 与水热因子同时期相关性来探究温带草地生长季 NDVI 对水热条件的时滞效应。

## 2 结果与分析

### 2.1 1982—2015 年中国温带草地生长季 NDVI 与气象因子趋势分析

1982—2015 年中国温带草地植被研究区生长季 NDVI 和温度呈上升趋势、降水呈下降趋势(图 2)。整体上,生长季 NDVI 呈上升趋势,趋势率为  $0.007/10\text{a}$ ,变化范围在  $0.441$ — $0.505$  之间。生长季 NDVI 的变化拐点分别是 1998 年和 2006 年,1998 年之前 NDVI 呈现波动式增长,1998—2006 年 NDVI 先大幅度上升后缓慢下降的变化过程,2007—2015 年 NDVI 则为快速大幅度上升期。2012 年为研究区生长季 NDVI 最大年,最大值为  $0.505$ 。空间格局来看,温带草地生长季 NDVI 呈增长趋势的地区主要集中在新疆草地、黄土高原草地东部以及内蒙古草地中部地区。呈减少趋势的地区分布于东北草地西南部、内蒙古草地东北部及新疆草地西北部地区。从 NDVI 的显著性水平空间格局显示,温带草地 NDVI 整体呈下降趋势的区域并未表现出显著性,而 NDVI 呈增长趋势的地区大部分通过了显著性检验( $P < 0.05$ )。

研究区生长季降水年际波动较大,多年降水量平均水平为  $315.19\text{mm}$ 。生长季降水整体上呈缓慢下降趋势,趋势率为  $-3.92\text{mm}/10\text{a}$ 。降水在年际变化上呈阶段式变化,1982—1997 年降水变化较为平稳,1998 年为



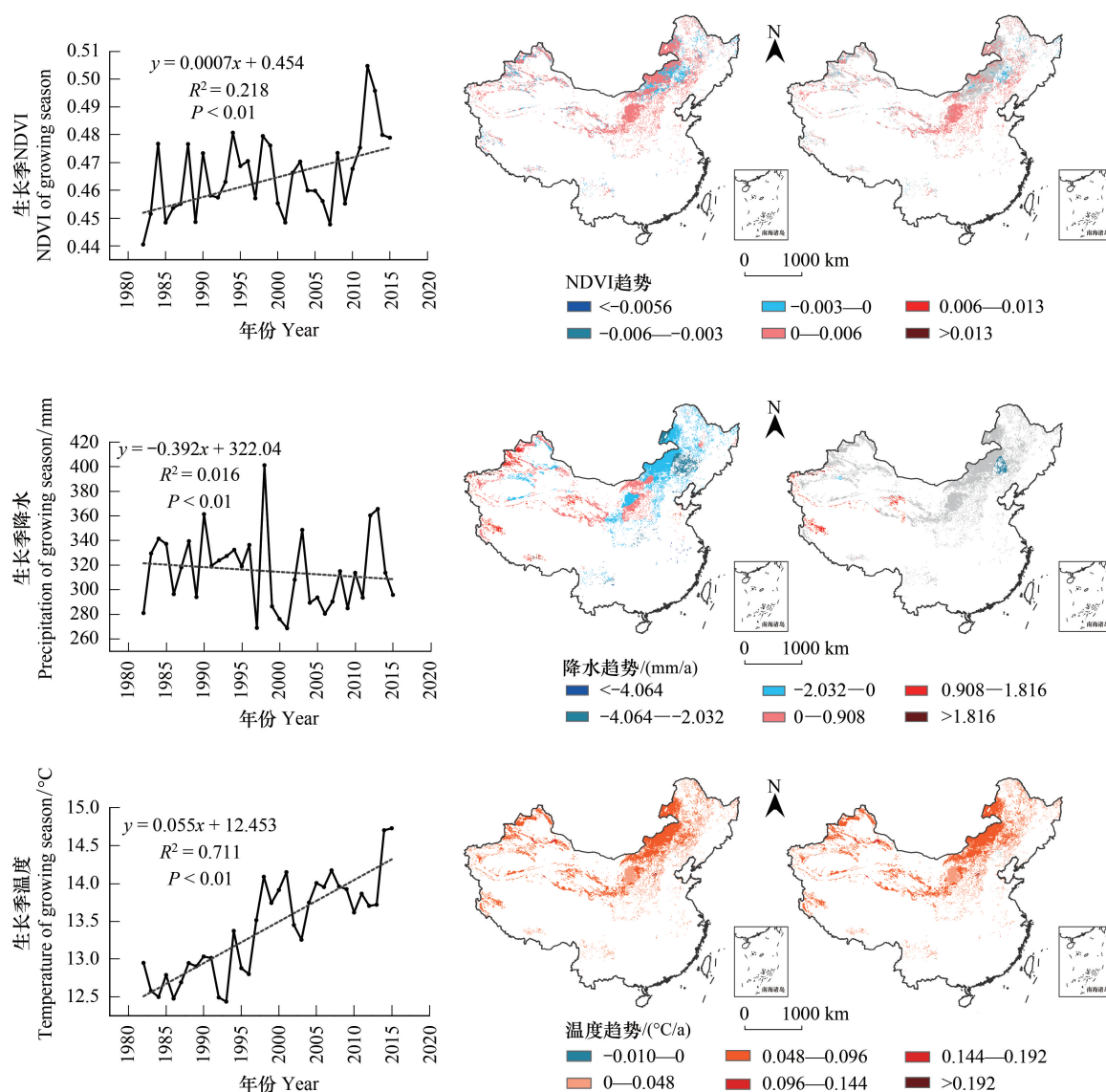


图2 1982—2015年中国温带草地生长季NDVI、降水和温度年际变化、趋势变化空间格局与趋势显著变化空间格局

Fig.2 Interannual change, trend change and significant trend change of NDVI, precipitation and temperature in the growing season of temperate grassland in China from 1982 to 2015

灰色区域为非显著变化区域

生长季降水最大年,降水量达401.28mm;2001年为降水量最小年(268.82mm),2003年和2013年降水趋势略有回升,但整体上仍表现为下降趋势。从空间格局来说,生长季降水变化空间差异明显,呈东部下降,西部增长的趋势。其中降水呈减少趋势的地区分布于内蒙古草地东北部地区,而呈增长趋势的地区主要分布在内蒙古草地西南部、新疆草地西部和华北草地地区。从降水的显著性水平空间格局来看,温带草地生长季降水的空间趋势变化并不显著。

温带草地生长季多年平均气温呈上升趋势,增长速率为 $0.55^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,多年平均水平为 $13.42^{\circ}\text{C}$ 。中国温带草地生长季平均温最低年是1993年( $12.43^{\circ}\text{C}$ ),是温带草地气温持续上升的开始,气温最高年为2015年( $14.73^{\circ}\text{C}$ )。温带草地生长季绝大部分地区平均气温呈显著增长趋势,尤其是内蒙古草地、黄土高原草地北部地区 and 新疆草地等地的平均气温增长幅度较大。

本研究选取分布于温带草地范围内的27个辐射监测站的太阳辐射数据(图3),生长季辐射月平均值整

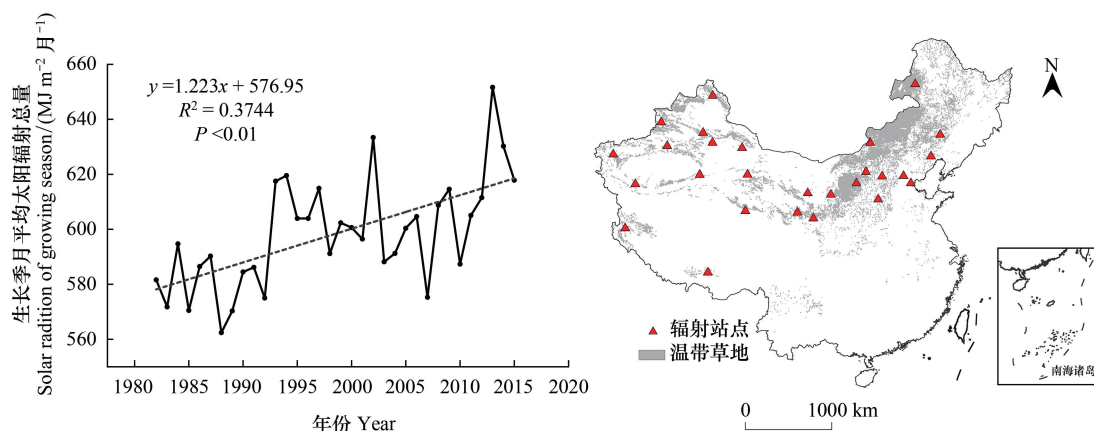


图3 1982—2015年中国温带草地生长季辐射年际变化与辐射站点空间分布格局

Fig.3 Interannual variation and spatial distribution pattern of radiation sites of radiation in the growing season of temperate grassland in China from 1982 to 2015

体呈显著上升的趋势( $P < 0.01$ ),增长速率为  $12.23 \text{ MJ m}^{-2} 10\text{a}^{-1}$ )。太阳辐射的变化可以分为1982—1992年,1993—2003年和2004—2015三个阶段。第一个阶段,生长季月平均太阳辐射波动处于较低水平,最低太阳辐射值年出现在1988年( $562.40 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ );第二个阶段,生长季月平均太阳辐射于1993年上升到一个较高的水平,该阶段太阳辐射波动起伏较为稳定;第三个阶段,2004—2013年为生长季月平均太阳辐射整体呈现快速上升阶段,2014年有所下降。

## 2.2 温带草地生长季 NDVI 对水热因子的同时期响应

年际变化上温带草地生长季降水、温度和太阳辐射与生长季 NDVI 均表现出正相关关系,且通过了显著性检验( $R^2_{\text{降水}} = 0.3628, P < 0.01$ 、 $R^2_{\text{温度}} = 0.0702, P < 0.01$  和  $R^2_{\text{辐射}} = 0.2836, P < 0.01$ ) (图4)。

去趋势后的 NDVI 与水热因子年际变化结果显示,研究区生长季 NDVI 的年际变化受生长季降水主导(图5)。温带草地生长季 NDVI 年际变化与生长季降水年际变化整体上表现一致( $R^2 = 0.5676, P < 0.01$ )。1982—1997年 NDVI 与降水均表现为先上升后下降的波动规律。1998—2015年,NDVI 与降水均在1998年、2003年和2013年等多个时间拐点上重合。生长季 NDVI 与温度之间的年际变化整体上表现出显著的负相关( $R^2 = 0.0727, P < 0.01$ ),尤其是1999—2015年,NDVI 与温度的年际变化趋势呈现出明显相反的变化趋势。生长季太阳辐射与 NDVI 的年际趋势变化在1989—1995年和2000—2015年两个时段的波动上一致, $R^2$ 值为0.124。以1999年为时间节点,将1982—2015年分成两个时间段。1982—1999年间,对生长季各因子做去趋势处理后的 NDVI 与降水、温度和太阳辐射均为正相关,且降水表现出相对更高的相关关系( $R^2_{\text{降水}} = 0.6222, R^2_{\text{温度}} = 0.1127, R^2_{\text{辐射}} = 0.1720, P < 0.01$ );2000—2015年,NDVI 与降水保持着更高水平的正相关( $R^2_{\text{降水}} = 0.8724, P < 0.01$ ),与温度则表现为较高水平的负相关( $R^2_{\text{温度}} = 0.3466, P < 0.01$ ),与太阳辐射表现为较低的正相关性( $R^2_{\text{辐射}} = 0.2026, P < 0.01$ )。

## 2.3 温带草地生长季 NDVI 对水热因子的滞后响应

表1为生长季 NDVI 对水热因子在年际变化上的滞后响应系数,并且各个相关因子之间的相关性均通过了  $P < 0.01$  的显著性检验。由 NDVI 对水热条件变化的时滞响应系数对比发现:温带草地生长季 NDVI 对水热条件存在明显的滞后响应关系。生长季前的温度和太阳辐射是影响生长季初期 NDVI 的主要气候因子。进入生长季后,降水对 NDVI 的滞后影响更加明显。同步关系研究中,NDVI 与水热条件均为正相关。5—6月 NDVI 与同时期降水和太阳辐射相关系数较高;7—8月 NDVI 与同时期降水相关系数较高;9—10月 NDVI 与同时期太阳辐射相关系数较高。滞后关系中,NDVI 与水热条件均为正相关,其中5—6月 NDVI 与3—4月温度和太阳辐射相关性较降水高;7—8月 NDVI 与5—6月降水相关性较高,与热条件相关性不明显;9—10月

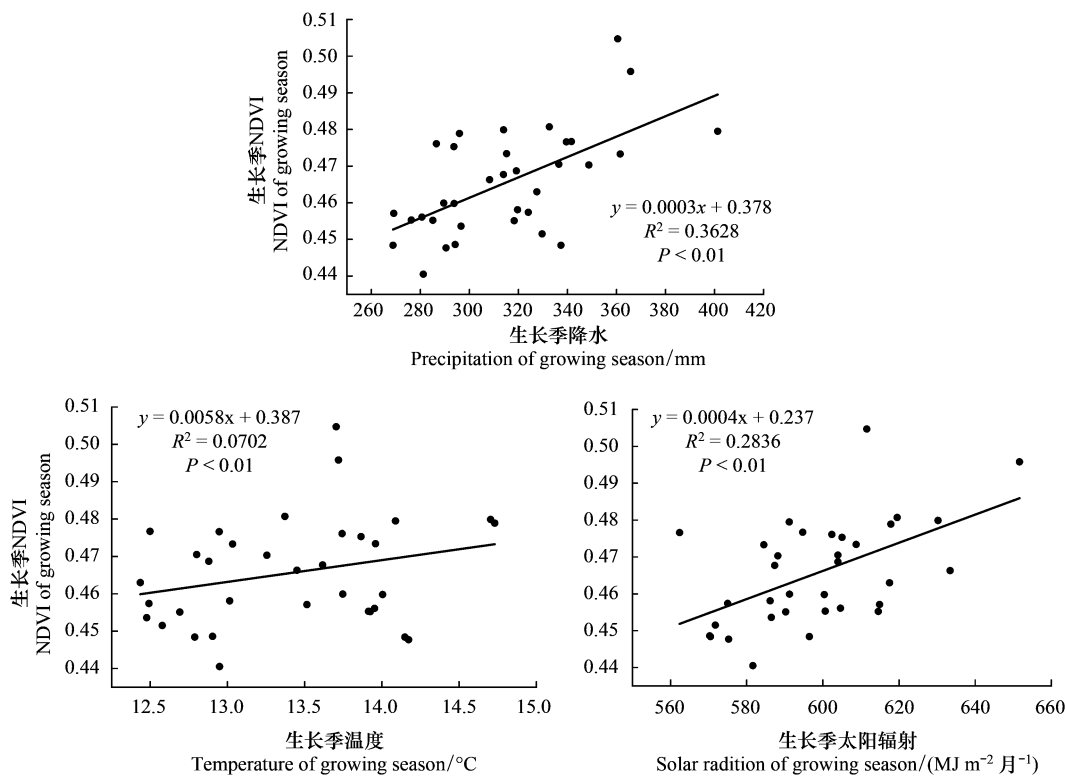


图 4 1982—2015 年中国温带草地生长季 NDVI 对生长季降水、温度和太阳辐射变化的响应

Fig.4 Responses of precipitation, temperature and solar radiation to NDVI changes during the growing season of temperate grassland in China from 1982 to 2015

NDVI 与 7—8 月降水和太阳辐射相关性较高,与温度相关性不明显。综上,最为显著的影响因素评估中,5—6 月 NDVI 主要影响因素为 3—4 月温度 ( $R=0.551, P<0.01$ ); 7—8 月 NDVI 主要影响因素为 5—6 月的降水 ( $R=0.606, P<0.01$ ); 9—10 月 NDVI 主要影响因素为 7—8 月降水 ( $R=0.554, P<0.01$ ) (表 1)。

表 1 生长季 NDVI 对水热因子变化的滞后响应

Table 1 The lagging response of NDVI in the growing season to changes in water and heat factors

因子 Parameters	生长季 NDVI NDVI of growing season			
	月份	5—6 月	7—8 月	9—10 月
降水 Precipitation	3—4 月	0.269 **	—	—
	5—6 月	0.428 **	0.606 **	—
	7—8 月	—	0.457 **	0.554 **
	9—10 月	—	—	0.099 **
温度 Temperature	3—4 月	0.551 **	—	—
	5—6 月	0.381 **	0.045 **	—
	7—8 月	—	0.076 **	0.046 **
	9—10 月	—	—	0.195 **
太阳辐射 Solar radiation	3—4 月	0.456 **	—	—
	5—6 月	0.404 **	0.188 **	—
	7—8 月	—	0.280 **	0.393 **
	9—10 月	—	—	0.324 **

带 \* 的标注为显著性, \*\* 表示  $P<0.01$

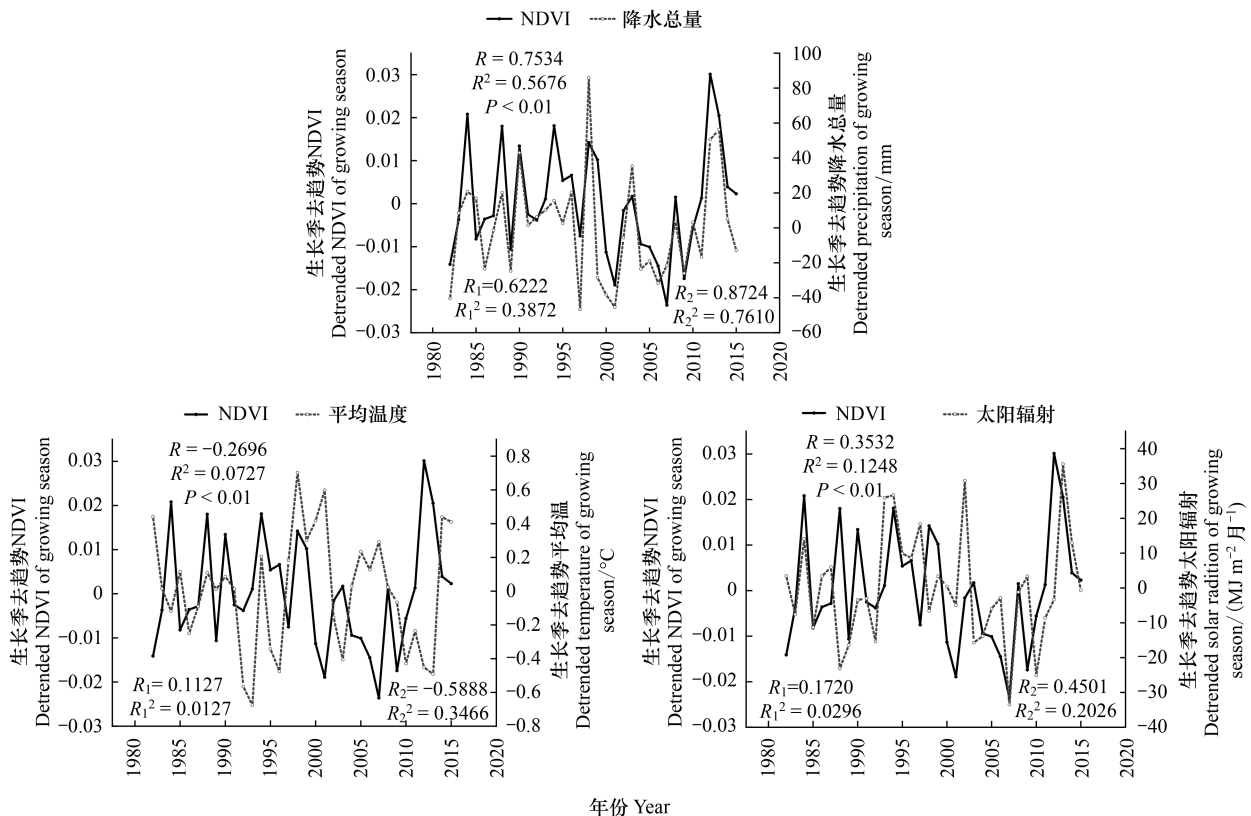


图 5 1982—2015 年中国温带草地生长季 NDVI 与降水、温度和太阳辐射去趋势变化

Fig.5 Changes in NDVI and precipitation, temperature and solar radiation in the growing season of temperate grassland in China from 1982 to 2015

## 2.4 温带草地 NDVI 对水热因子响应的区域特征

图 6 结果表明,去趋势生长季 NDVI 与降水在大部分地区呈显著正相关,相关水平较高。NDVI 与温度呈显著负相关,尤其是在 1999 年之后,NDVI 与降水的相关性更为显著。从显著分布格局来看,去趋势后的 NDVI 与降水呈显著正相关,并表现出较高的相关性水平,分布于内蒙古草地和新疆草地等地区( $R > 0.66$ )。去趋势后生长季 NDVI 与温度显著负相关,相关性水平较低( $-0.66 < R < -0.33$ ),集中在内蒙古草地和新疆草地西北部地区,其它大部分地区二者呈不显著相关。以 1999 年为时间节点,分别求 1982—1999 年和 2000—2015 年的生长季 NDVI 与水热条件的去趋势显著相关空间格局。其中,1982—1999 年间,NDVI 与降水呈现较高水平的显著正相关( $R > 0.66$ ),分布区域主要集中在内蒙古草地和新疆草地西北部。NDVI 与温度除了在新疆草地西北部表现出显著负相关外,其他地区呈不显著相关。2000—2015 年间,NDVI 与降水呈现出比前一时段更强的显著正相关,而与温度除了在内蒙古草地中部地区表现出显著负相关外,大部分草地地区呈不显著相关。

## 3 讨论

本研究中,中国温带草地生长季 NDVI 与水热因子的年际变化趋势表明,降水呈显著下降趋势,温度和太阳辐射呈显著上升趋势,区域气候呈逐渐“暖干化”。空间上,生长季 NDVI 呈显著上升格局,与水(降水)热(温度、太阳辐射)因子之间均表现为显著正相关,表明研究区生长季热因子(温度和辐射)控制着 NDVI 的上升趋势。通过 NDVI 与水热因子的去趋势年际变化关系分析,1982—2015 年间温带草地 NDVI 年际变化主要受生长季水(降水)因子的年际变化所控制。另外,温带草地生长季 NDVI 对水热因子变化滞后响应的结果表



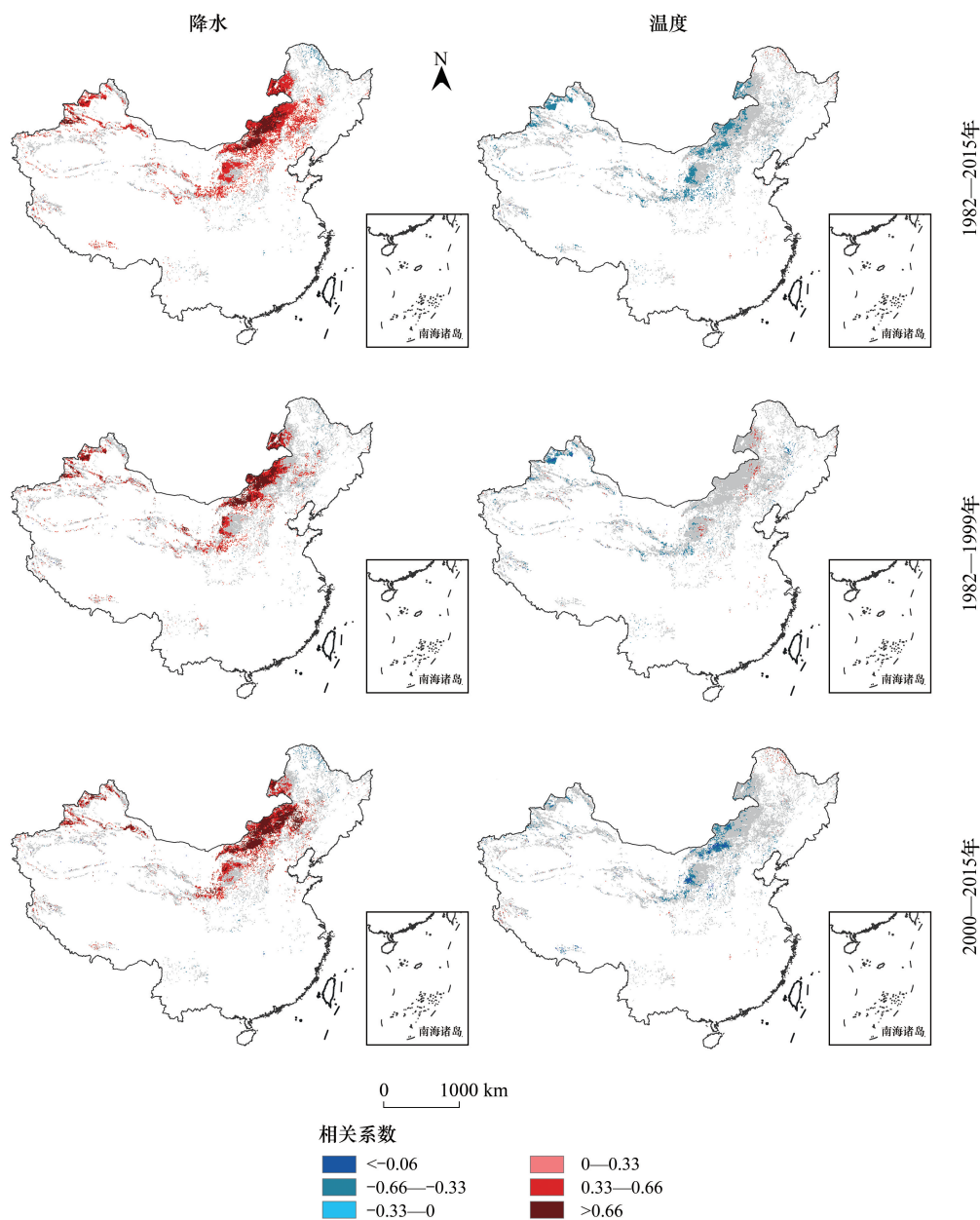


图 6 1982—2015 年中国温带草地生长季 NDVI 与水热因子去趋势显著相关空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of de-trend correlation between NDVI and hydrothermal factors in the growing season of temperate grassland in China from 1982 to 2015

蓝色代表负相关,红色代表正相关,灰色部分为非显著区域( $P > 0.05$ )

明, 5—6 月 NDVI 对 3—4 月热条件(温度和太阳辐射)有着明显的滞后响应, 7—8 月及 9—10 月 NDVI 分别对 5—6 月和 7—8 月的水条件(降水)有滞后响应。空间变化格局上, 中国年降水总量呈现出由东北向西南的递减分布特征<sup>[21,26—27]</sup>, 这可能与东亚夏季季风减弱有关, 导致北方生长季的降水量有所下降<sup>[28]</sup>, 且降水量的变化是影响草地生产力变化主要因子, 这一结论与本研究结果一致。持续变暖的过程影响着全球地区的气候变化, 使得北半球过去三十多年温度为近千年气温最高<sup>[21]</sup>, 本研究结果也表明近 34 年中国温带草地温度升温速率较快, 与在 20 世纪 80 年代以来升温变快结果相一致<sup>[29]</sup>, 且高于 Peng 等<sup>[30]</sup> 对全国平均气温的升温速率的估算 ( $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )。本研究中 1999 年生长季温度开始出现下降趋势, 其升温幅度明显减缓, 与中国气温的年际变化的研究结果相符合<sup>[31—32]</sup>, 其主要影响因素是气候系统本身的自然变化以及气候外冷却因子的

产生等因素有关<sup>[33-34]</sup>。有研究表明太阳辐射时间变化规律明显<sup>[35]</sup>,我国东、西部地区的太阳辐射近 50 年逐渐下降,1999 年之后略有回升<sup>[36-37]</sup>。并且在 1980—2010 年,我国年草地生产力与代际的降水、温度和太阳辐射都呈正相关<sup>[25]</sup>,本研究结果中太阳辐射存在明显的时间变化规律,并与生长季 NDVI 呈显著正相关。

本研究可将中国温带草地生长季 NDVI 的年际变化为三个阶段,即 1982—1998 年的增长阶段,1999—2006 年增长趋势放缓阶段,2007—2015 年快速增长的阶段,与国内许多研究中国 NDVI 整体年际变化趋势的结论一致。田海静<sup>[25]</sup>认为在 1982—2013 年研究期间,1991—2000 年是植被恢复不明显时期,其余时间段为植被明显恢复期。赫英明等<sup>[31]</sup>研究发现全国平均 EVI(增强型植被指数)的趋势率为  $1.0 \times 10^{-3}/a$ ,与本研究中对 NDVI 趋势变化研究结果相近。Liu 等<sup>[30]</sup>研究则提出我国大部分地区的植被覆盖变化都经历了“增加—减少—增加”的过程,其对应变化的时间段与本研究的结果一致。以上研究结论均表明了近 30 年来我国植被覆盖变化存在显著的年际变化规律,其整体呈显著增加趋势特征。

本研究中,水条件指生长季降水,热条件为生长季温度和太阳辐射。张仁平<sup>[28]</sup>指出降水量可以改变植被的覆盖度,对半干旱地区草地植被覆盖影响较大,尤其是典型草原以及荒漠草原。且有研究指出温带草原和荒漠的生长季 NDVI 变化与降水呈现显著正相关关系<sup>[38]</sup>,验证了本研究中生长季 NDVI 表现出年际间极大的起伏变化,是受到了生长季降水极大地起伏变化影响。Kaufmann 等<sup>[32]</sup>研究认为北半球植被覆盖增加是受全球气候变暖所影响,金凯<sup>[39]</sup>研究认为中国近 34 年的生长季 NDVI 增加与温度紧密相关,杨雪梅<sup>[40]</sup>认为太阳辐射的增加利于植被进行光合作用,并能够有效促进植被提前进入生长季。温带草地地区地势平坦,生长季地表植被吸收太阳辐射增加,同时太阳辐射的增加能够引起地表温度的上升,有效地促进植被生长。这些研究结果能够支撑本文研究中近 34 年来温带草地生长季 NDVI 的显著增加与热因子的水平上升关系密切。从水热阶段变化来看,20 世纪 90 年代后,我国北方地区气候呈现出“暖干化”的趋势,北方植被覆盖的增加速度有放缓的趋势,甚至部分地区出现下降的趋势<sup>[41]</sup>。1998—2006 年间气温和辐射显著上升但降水不断减少,气候“暖干化”的趋势引起生长季内的草地植被的水分胁迫,导致生长季时期的草地植被生长趋势下降<sup>[42]</sup>。这一研究结果则印证了 NDVI 的增长趋势是受到热条件(温度和太阳辐射)的快速上升的影响。

温度的上升和太阳辐射的增强有助于北半球高纬度地区植被提前进入生长季<sup>[11]</sup>。而我国的植被 NDVI 在夏秋季节对水热条件的综合反应比较复杂<sup>[32]</sup>,9 月份的太阳辐射和温度的增多会增强植被蒸腾作用,使植被提前进入枯黄期,从而导致 NDVI 下降,而降水量的增加则会延缓这一现象<sup>[43]</sup>。本文以两个月为滞后时间尺度,对中国温带草地生长季 NDVI 对水热条件的滞后效应研究分析得出,3—4 月温度和太阳辐射与 5—6 月 NDVI 显著正相关,表明进入生长季前热条件的增加和积累有助于植被生长,促进其提前进入生长季。生长季中后期(7—10 月)NDVI 与 5—8 月降水呈显著正相关,表明生长季期间研究区温度和太阳辐射相对较高,降水则成为控制植被生长的主要因素。

区域性的气候变化不仅仅受气象因素单一作用的影响,人类活动的影响也不容小觑,往往是由二者共同作用所导致<sup>[44]</sup>。自 1980 年以来,我国气温快速变暖的主要原因是温室效应、土地利用变化和人类活动引起的能源消耗释放的热量带来的显著影响,同时对植被生长变化具有积极或消极的作用<sup>[45]</sup>。21 世纪后,我国植被覆盖的增加速率明显加快,这与近年来我国实施的大型林业生态建设工程有关。陕西省西北部是我国退耕还林还草工程实施较为成功的地区,有研究学者发现该地区的人类活动对植被恢复起到了促进的作用<sup>[46]</sup>。因此,人类对草地资源过度使用行为(如过度放牧)和保护行为(如退耕还林还草)等产生的影响,可能会导致大气—植被—土壤养分循环的改变。本研究主要考虑的气候因子是水因子(降水)和热因子(温度和太阳辐射),然而温带草地对气候变化十分敏感,中国温带地区分布范围广、包含草地类型众多,极端条件发生强度不同会引起草地不同的强烈的反应,各影响因子之间互相作用和对植被产生的影响机制复杂。在进一步研究植被动态变化对气候因子变化响应的过程中还应纳入  $CO_2$  浓度变化、干旱事件、氮沉降、土壤温度、湿度以及风速等能够对植被生长产生影响的环境因子。

## 4 结论

本研究以中国温带草地植被为研究对象,基于长时间序列 NDVI 和气象数据,分析了我国温带草地生长季 NDVI 时空变化特征和对水热因子变化的响应,探讨生长季水热条件的变化对草地植被生长状态的可能影响。主要结论如下:

(1) 1982—2015 年中国温带草地生长季平均温度和平均太阳辐射呈增长趋势,降水量为下降趋势,从整体上而言,温带草地气候逐渐“暖干化”。

(2) 中国温带草地生长季水热因子与 NDVI 的年际变化关系表明,在 1982—2015 年间,中国温带草地生长季 NDVI 年际变化由降水因子主导,特别是在 1999 年之后,降水对于中国温带草地生长季 NDVI 年际变化的影响更为显著。

(3) 中国温带草地生长季 NDVI 对水热因子变化的响应特征表明,1982—2015 年中国温带草地生长季热条件(温度和太阳辐射)的显著上升控制着其 NDVI 的增长趋势。

(4) 1982—2015 年中国温带草地 5—10 月 NDVI 对水热因子在年际变化上存在明显的滞后响应,其中温度对植被进入生长季有明显的促进作用;而在生长季中后期,降水则成为对中国温带草地生长滞后影响主要控制因子。

## 参考文献(References):

- [1] 李周园. 中国典型草地覆被变化与下垫面气候因子关系研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [2] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability//McCarthy J, Canziani O, Leary N, Dokken D, White K. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the (IPCC). New York: Cambridge Press, 2001.
- [3] 刘成林, 樊任华, 武建军, 闫峰. 锡林郭勒草原植被生长对降水响应的滞后性研究. 干旱区地理, 2009, 32(4): 512-518.
- [4] 朱守先. 低碳草业发展模式探析. 生态经济, 2014, 30(10): 70-72.
- [5] 曹婧. 贵州地区紫花苜蓿生长状况评价及其  $Mn^{2+}$  毒害效应分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [6] 冯兆佳, 陈俊, 杨玉婷, 白慧敏, 杨烁. 长期撂荒地植物种出现次数与个体数的空间异质性分析研究. 家畜生态学报, 2019, 40(5): 66-71.
- [7] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 任贾文, 王绍武, 伍荣生, 杨修群, 王苏民, 刘时银, 董光荣, 卢琦, 黄镇国, 杜碧兰, 罗勇. 中国气候与环境演变评估(I): 中国气候与环境变化及未来趋势. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4-9.
- [8] 赵伟. 北方六省草地生产力时空动态及气候驱动因子分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [9] Piao S L, Mohammad A, Fang J Y, Cai Q, Feng J M. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. Global Environmental Change, 2006, 16(4): 340-348.
- [10] 张熙庭. 中国温带地区草地植被动态时空特征及其对气候变化的响应[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [11] 杜卫. 中国森林生物量时空变化及其对气候变化响应[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
- [12] 冯露, 岳德鹏, 郭祥. 植被指数的应用研究综述. 林业调查规划, 2009, 34(2): 48-52.
- [13] Cao L J, Zhu Y N, Tang G L, Yuan F, Yan Z W. Climatic warming in China according to a homogenized data set from 2419 stations. International Journal of Climatology, 2016, 36(13): 4384-4392.
- [14] 王遵亲, 丁一汇, 何金海, 虞俊. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236.
- [15] 许艳, 唐国利, 张强. 基于均一化格点资料的全球变暖趋缓期中国气温变化特征分析. 气候变化研究进展, 2017, 13(6): 569-577.
- [16] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G, Nemani R R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. Nature, 1997, 386(6626): 698-702.
- [17] Wang J, Meng J J, Cai Y L. Assessing vegetation dynamics impacted by climate change in the southwestern karst region of China with AVHRR NDVI and AVHRR NPP time-series. Environmental Geology, 2008, 54(6): 1185-1195.
- [18] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. Nature, 2013, 501(7467): 403-407.
- [19] Santer B D, Bonfils C, Painter J F, Zelinka M D, Mears C, Solomon S, Schmidt G A, Fyfe J C, Cole J N S, Nazarenko L, Taylor K E, Wentz F J. Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature. Nature Geoscience, 2014, 7: 185-189.
- [20] 段艺芳, 任志远, 孙艺杰. 陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应. 生态学报, 2020, 40(10): 3408-3419.
- [21] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 374-381.

- [22] 侯学煜. 中国植被图集(1:100 万). 植物生态学报, 2001(03):88.
- [23] 齐月, 房世波, 周文佐. 近 50 年来中国东、西部地面太阳辐射变化及其与大气环境变化的关系. 物理学报, 2015, 64(8): 089201.
- [24] 赵静, 张继权, 李颖, 郭恩亮, 冯玉, 王蕊. 吉林省东部气象因子与玉米延迟型冷害的时空演变规律. 水土保持研究, 2019, 26(1): 266-272.
- [25] 田海静. 非气候因素引起的中国植被变化遥感诊断——以林业工程为例[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- [26] 梁爽, 彭书时, 林鑫, 丛楠. 1982—2010 年全国草地生长时空变化. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 49(2): 311-320.
- [27] Ni J. Impacts of climate change on Chinese ecosystems: key vulnerable regions and potential thresholds. *Regional Environmental Change*, 2011, 11(1): 49-64.
- [28] 张仁平, 冯琦胜, 郭靖, 尚振艳, 梁天刚. 2000—2012 年中国北方草地 NDVI 和气候因子时空变化. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1403-1412.
- [29] Liu Y, Li Y, Li S C, Motesharrei S. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: correlations with climate and human factors. *Remote Sensing*, 2015, 7(10): 13233-13250.
- [30] Peng S S, Chen A P, Xu L, Cao C X, Fang J Y, Myneni R B, Pinzon J E, Tucker C J, Piao S L. Recent change of vegetation growth trend in China. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(4): 044027.
- [31] 赫英明, 刘向培, 王汉杰. 基于 EVI 的中国最近 10a 植被覆盖变化特征分析. 气象科学, 2017, 37(1): 51-59.
- [32] Kaufmann R K, Zhou L, Tucker C J, Slayback D, Shabanov N V, Myneni R B. Reply to Comment on "Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981-1999" by J. R. Ahlbeck. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D11): 4127.
- [33] 孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 赵天宝. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系. 自然资源学报, 2010, 25(3): 407-414.
- [34] 吴锦奎, 王杰, 丁永建, 叶柏生, 高鑫. 干旱区农田、草地和荒漠下垫面辐射收支平衡的对比分析. 高原气象, 2010, 29(3): 645-654.
- [35] 杨帆, 邵全琴, 李愈哲, 樊江文, 包玉海. 北方典型农牧交错带草地开垦对地表辐射收支与水热平衡的影响. 生态学报, 2016, 36(17): 5440-5451.
- [36] Xu Y F, Yang J, Chen Y N. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 126(1/2): 213-222.
- [37] He B, Chen A F, Jiang W G, Chen Z Y. The response of vegetation growth to shifts in trend of temperature in China, *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(7): 801-816.
- [38] 张清雨, 吴绍洪, 赵东升, 戴尔阜. 内蒙古草地生长季植被变化对气候因子的响应. 自然资源学报, 2013, 28(5): 754-764.
- [39] 金凯. 中国植被覆盖时空变化及其与气候和人类活动的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [40] 杨雪梅. 气候变暖背景下河西地区荒漠植被变化研究(1982—2013)[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [41] 安佑志. 基于遥感的中国北部植被 NDVI 和物候变化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [42] 赵天保, 李春香, 左志燕. 基于 CMIP5 多模式评估人为和自然因素外强迫在中国区域气候变化中的相对贡献. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(2): 237-252.
- [43] 杨雪梅, 杨太保, 刘海猛, Ghebregabher M G, 王倩, 魏怀东. 气候变暖背景下近 30a 北半球植被变化研究综述. 干旱区研究, 2016, 33(2): 379-391.
- [44] 丁一汇, 王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识. 科学通报, 2016, 61(10): 1029-1041.
- [45] Li H D, Li Y K, Gao Y Y, Zou C X, Yan S G, Gao J X. Human impact on vegetation dynamics around Lhasa, southern Tibetan plateau, China. *Sustainability*, 2016, 8(11): 1146.
- [46] Zhang G L, Dong J W, Xiao X M, Hu Z M, Sheldon S. Effectiveness of ecological restoration projects in Horqin Sandy Land, China based on SPOT-VGT NDVI data. *Ecological Engineering*, 2012, 38(1): 20-29.