

DOI: 10.5846/stxb202208032216

雷茜, 胡忠文, 王敬哲, 张英慧, 邬国锋. 1985—2015 年中国不同生态系统 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2023, 43(15): 6378-6391.

Lei Q, Hu Z W, Wang J Z, Zhang Y H, Wu G F. Spatiotemporal dynamics of NDVI in China from 1985 to 2015: ecosystem variation, regional differences, and response to climatic factors. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6378-6391.

1985—2015 年中国不同生态系统 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应

雷 茜^{1,2,3,4}, 胡忠文^{1,2,3,4}, 王敬哲^{5,*}, 张英慧^{1,2,3,4}, 邬国锋^{1,2,3,4}

1 自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, 深圳 518060

2 广东省城市空间信息工程重点实验室, 深圳 518060

3 深圳市空间信息智能感知与服务重点实验室, 深圳 518060

4 深圳大学建筑与城市规划学院, 深圳 518060

5 深圳职业技术学院人工智能学院, 深圳 518055

摘要: 植被是陆地生态系统不可或缺的部分, 气候是影响其动态变化的重要驱动因素。因此, 探究植被的时空变化及其与气候因子的响应关系, 有助于理解陆地生态系统的内在演化机制。目前, 不同生态系统尺度下的植被动态变化与气候因子的时间响应关系仍未被完整剖析。因此, 为了厘清过去 30 年不同生态系统植被生长对气候因子的响应关系, 利用 GIMMS NDVI3g 数据和气候资料数据, 通过 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验分析了 1985—2015 年中国陆地 NDVI 的时空变化特征, 结合时间序列相关分析探究了 NDVI 变化与降水、温度和饱和水汽压差的内部关联, 探讨了不同生态系统植被与气候因子间的时间响应机制。结果表明: (1) 1985—2015 年中国陆地植被呈现改善趋势, 年均 NDVI 先减小后增加, 拐点时间在 1995 年左右, 整体变化率为 $0.5 \times 10^{-3}/a$ 。农田、森林和草地生态系统的植被显著改善的程度最高, 湿地生态系统的植被退化趋势最显著。(2) 中国陆地植被 NDVI 与气候因子的相关性存在明显的空间异质性, 且受不同生态系统分区影响。内蒙古高原中部草地生态系统 NDVI 与降水呈正相关, 而在东部森林生态系统和青藏高原草地生态系统呈负相关; 农田生态系统 NDVI 与温度呈明显正相关, 在西部高寒、干旱地区呈负相关; 中国东部农田生态系统 NDVI 与饱和水汽压差呈正相关, 而在新疆北部和内蒙古高原中部草地生态系统负相关明显。(3) 不同生态系统植被生长对气候因子存在月尺度的时间响应差异。降水对森林生态系统植被生长存在累积效应, 农田生态系统植被生长对降水的响应最快; 不考虑累积时, 不同生态系统植被生长对当月或滞后 1 月的温度相关性最高; 不同生态系统饱和水汽压差对植被生长存在两个月的累积效应, 且随着滞后时长的增加相关性逐渐降低。研究成果有利于预测和评价全球气候变化背景下的植被动态变化, 可为区域生态环境保护提供理论依据。

关键词: NDVI; 气候响应; 生态系统; 趋势分析; 时滞效应

Spatiotemporal dynamics of NDVI in China from 1985 to 2015: ecosystem variation, regional differences, and response to climatic factors

LEI Qian^{1,2,3,4}, HU Zhongwen^{1,2,3,4}, WANG Jingzhe^{5,*}, ZHANG Yinghui^{1,2,3,4}, WU Guofeng^{1,2,3,4}

1 Ministry of Natural Resources Key Laboratory for Geo-Environmental Monitoring of Great Bay Area, Shenzhen 518060, China

2 Guangdong Key Laboratory of Urban Informatics, Shenzhen 518060, China

3 Shenzhen Key Laboratory of Spatial Smart Sensing and Services, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

4 School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

5 School of Artificial Intelligence, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2020A1515111142, 2021A1515110910); 深圳市高等院校稳定支持计划(20220811173316001); 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室(福州大学)开放基金(2022LSDMIS05)

收稿日期: 2022-08-03; **网络出版日期:** 2023-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jzwang@szpt.edu.cn

Abstract: Vegetation plays an important role in linking water, atmosphere, and soil. Accurate evaluation of the relationships between climatic factors and vegetation is essential for the formulation of scientific ecological restoration strategies. The response between vegetation and climate has been a hot topic in recent research. However, the heterogeneity of various ecosystems and regions is rarely considered in China, which calls for a comprehensive and comparative understanding. Based on the Global Inventory Monitoring and Modeling System (GIMMS) third generation of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), climate reanalysis data (temperature, precipitation, and vapor pressure deficit (VPD)), and land cover data, this study analyzed the climate dynamics of the spatiotemporal variations of vegetation NDVI in China from 1985 to 2015. The Theil-Sen estimator and Mann-Kendall test were employed to investigate the relationships between NDVI and climatic factors to further explore the temporal response mechanism between different ecosystems and climatic factors in China. The results showed that: (1) The annual mean NDVI in China gradually increased by 0.5×10^{-3} every year from 1985 to 2015. The NDVI declined before 1995 and then increased. A significant vegetation improvement was observed in cropland, forest, and grassland ecosystems, and the obvious vegetation degradation was mainly in the wetland ecosystem. (2) The response of vegetation to climatic factors varied in different ecosystems. Pixel clusters of positive correlation between precipitation and vegetation were mainly distributed in grassland ecosystems in Central Inner Mongolia Plateau, while the pixel clusters of negative correlation were mainly distributed in forest ecosystems and the Qinghai-Tibet Plateau. The linear correlation relationship between vegetation and temperature was significant in farmland ecosystem, and the negative correlation relationship was detected in cold and arid regions of West China. Vegetation and VPD were positively correlated in farmland ecosystem of East China, and negative correlations were evident in Northern Xinjiang and Central Inner Mongolia Plateau dominated by grassland ecosystems. (3) Time-lag effects of NDVI responses to climate change were detected at the month level. The forest ecosystem had a long lag cumulation period to precipitation, and the cropland ecosystem responded fastest to precipitation. Responses of different ecosystems to temperature exhibited the highest correlations within the current month or the 1-month period. Generally, VPD in different ecosystems had a two-month cumulative effect on vegetation growth, and the correlation gradually decreased with the increasing lag time. These findings are of great significance for understanding the climate dynamics of vegetation growth and it can provide a theoretical basis for the protection of the regional ecological environment under the background of global climate change.

Key Words: Normalized Difference Vegetation Index; climatic response; ecosystem; trend analysis; time-lag effects

植被在陆地生态系统中扮演着不可或缺的角色,在水热交换、生物化学循环和气候变化中发挥重要作用^[1]。降水与温度是驱动植被变化的关键因素,水热条件的差异会对植被生理机能和分布密度造成影响,进而改变植被结构。饱和水汽压差(Vapor pressure deficit, VPD)能够影响植被气孔闭合,控制植被光合、蒸腾等生理过程^[2],是陆地生态系统中影响植被生长的重要驱动因素之一。作为决定植被生长的关键因素,气候动态变化对植被的影响值得关注^[3]。因此,在全球变暖背景下,探究地表植被覆盖和气候因子的时空变化,了解二者的响应关系,对深入理解全球气候变化与植被生态学的响应机制具有重要意义。

探究植被时空动态需要长时序数据的支撑,而具备持续观测、多时空尺度优势的遥感技术为此提供了有效手段^[4]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能有效反映区域植被的生长状况,是监测陆地生态系统植被覆盖度和长势的优良指标,已被广泛应用于植被动态变化研究中^[5-6]。GIMMS (Global Inventory Monitoring and Modeling System) NDVI 数据因其时间跨度最长且范围覆盖全球,在不同尺度的植被动态研究中极具代表性,在植被覆盖时空变化^[7]、物候分析^[8-9]、动态变化驱动机制^[10]等研究中取得大量进展。在全球气候变化背景下,开展植被监测并分析其驱动因素,对更好地预测和评价植被动态变化具有重要意义。然而,已有研究大都是使用线性趋势拟合方法对植被指数进行简单分析^[11-12],对植被的时空演变波动性考虑不足。此外,气候作为驱动植被动态变化的关键因素,二者之间的动态响应关系也受到众多学

者的关注^[13]。不同植被类型对同一气候因子的响应不同^[14],不同地区的植被对气候因子的响应也存在明显差异。文献表明青藏高原地区^[10]及我国北方地区^[15]植被的生长主要受降水的影响,而华北南部、华南地区^[16]的植被对温度的响应则更为明显。已有研究证实了在北半球高纬度地区,大部分 NDVI 显著改变的区域受气候变化控制,其主要驱动因素是温度,其次是太阳辐射和降水^[17]。饱和水汽压差急剧上升是干旱导致植被死亡的主要原因之一^[18],而且饱和水汽压差的增加也被证实能影响农田生态系统作物生长和产量^[19]。不同气候因子与不同植被的滞后和累积效应存在显著差别,青藏高原植被对温度和降水的短期累积响应明显,且对降水的响应更为显著^[20],黄土高原地区植被生长对当月和上月气候因子最敏感^[21],中亚森林地区植被对降水的累积滞后响应时间较长^[13]。然而,现有研究对植被与饱和水汽压差之间的时间响应规律的剖析不足。同时,针对不同土地利用^[22]、植被分区^[10]和气候分区^[16]的相关研究越来越多,却鲜有研究考虑到不同生态系统中植被在冠层结构、生理特征等方面存在显著差异,不区分生态系统得到的分析结果可能存在一定局限性。我国植被类型丰富、气候条件复杂,在全国尺度下使用集总式的分析思想可能会导致研究结果不确定性较强。因此,有必要从不同生态系统的视角研究植被与气候之间的时空变化以及响应关系,精细刻画植被与气候的时滞效应。

鉴于此,本研究基于 GIMMS NDVI3g 数据和气候资料数据,结合不同生态系统探究 1985—2015 年期间中国陆地 NDVI 时空变化及其与气候因子(降水/温度/饱和水汽压差)的时间响应关系。旨在探究以下两个问题:(1) 中国陆地 NDVI 在 1985—2015 年间的变化趋势如何,该种趋势是否存在显著变化?(2) 植被对气候因子如何响应,这种关系在不同生态系统上有何规律和差异?

1 数据与方法

1.1 研究区概况

中国地处亚洲东部、太平洋西岸,领土面积辽阔,海陆总面积约 1260 万 km²,陆地总面积约 960 万 km²。领土纬度范围较广,跨度约 50°,自北向南包含了亚寒带、温带、亚热带和少许热带区域,生态系统类型丰富^[23]。参考中国自然地理分区,结合本研究需要,将中国划分为东北、西北、华北、华东、华中和华南七大区域(图 1)。

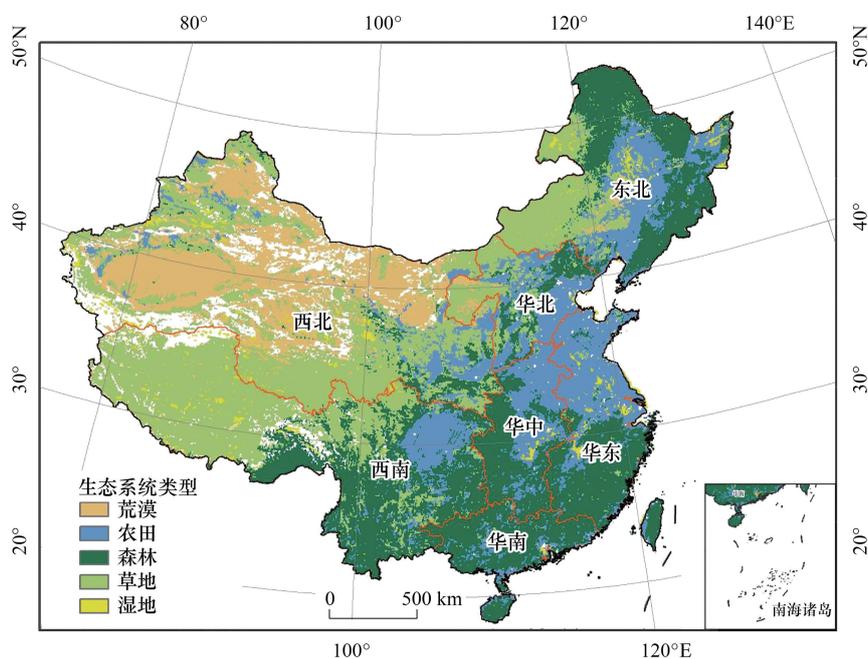


图 1 1985—2015 年中国陆地稳定生态系统空间分布

Fig.1 Spatial distribution of stable ecosystem in China from 1985 to 2015

中国东西、南北跨度大且地势高低不同,地形以山地和高原为主,自西向东地势呈阶梯状逐渐降低,最高约 8848 m,最低约-154 m。降水从东南沿海向西北内陆逐渐减少,年均温和 10℃ 及以上积温由南向北逐渐降低,造成了多种气温与降水组合,形成了多种气候,气候条件由东南向西北越来越严酷^[24-25]。气候差异导致植被类型存在空间分异,进而影响不同生态系统在空间的分布。整体上,森林和农田生态系统主要分布在东南和东北地区,西北地区以草地和荒漠生态系统为主,农田生态系统集中在四川盆地以及东部地区。

1.2 数据来源与预处理

1985—2015 年 NDVI 数据是由国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/en/>) 提供的全球 GIMMS NDVI3g v1 数据集^[26]。该数据时间分辨率为 15 d,空间分辨率约 8 km,是目前时序最长(1981 年 7 月—2015 年 12 月)、覆盖范围最广(全球)的 NDVI 数据集。为了削弱云和气溶胶对大气的影 响,将每月两期的 NDVI 数据采用最大值合成(Maximum Value Composition, MVC)方法计算逐月的 NDVI 数据^[27]。为了减少由于数据异常或者植被区短期内波动而导致的不确定性,本研究取 31 年 NDVI ≥ 0.1 的像元作为稳定植被区^[28],以此为阈值掩膜获取 1985—2015 年中国陆地稳定植被区逐月和逐年的 NDVI 数据。

气候数据分别来自国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>) 提供的中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集(1901—2020)、中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集(1901—2020)和爱达荷大学气候学实验室 (<http://www.climatologylab.org/terraclimate.html>) 提供的 TerraClimate 全球 4 km 分辨率逐月饱和水汽压差数据^[29-31]。生态系统数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>) 提供的中国陆地生态系统空间分布数据集(1990—2010 年,每 5 年 1 期)^[32]。本研究对 5 期数据取交集,以此获取 1990—2010 年稳定的生态系统并作为本研究的生态系统分区(图 1)。为了数据间匹配,采用 8 km 覆盖范围内覆盖最多的生态系统来表示该像元所属生态系统类型。由于聚落生态系统受人为因素干扰较大,在本研究中仅针对农田、森林、草地、湿地、荒漠生态系统开展后续分析。

1.3 研究方法

1.3.1 时间序列分析

本研究基于 Theil-Sen Median 趋势分析法,对 NDVI 时间序列逐像元计算每个栅格的变化率(Slope),以此反映研究期间区域植被覆盖变化的综合趋势^[13]:

$$\text{Slope} = \frac{N \times \sum_{i=1}^N i \times x_i - \left(\sum_{i=1}^N i \right) \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)}{N \times \sum_{i=1}^N i^2 - \left(\sum_{i=1}^N i \right)^2} \quad (1)$$

式中,Slope 是每个像元回归方程的斜率; N 是时间序列数据时长($N = 31$); x_i 是第 i 年的 NDVI 平均值。Slope > 0,表示植被增加;Slope < 0,表示植被退化。

采用 Mann-Kendall(M-K)非参数统计检验法对 NDVI 变化趋势进行显著性检验。趋势分析法和 M-K 检验法相结合可以减少数据中少量异常值对结果的影响,很大程度上避免了测量误差和离群数据的干扰^[33]。其公式为:

对序列 $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,使用检验统计量 Z 进行趋势检验, Z 值计算方式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S}{\sqrt{\text{Var}(S)}} (S > 0) \\ 0 (S = 0) \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} (S < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{其中, } S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j); \text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, \theta > 0 \\ 0, \theta = 0 \\ -1, \theta < 0 \end{cases}; \text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

式中,sgn 是符号函数, n 是时间序列中数据个数。假设采用双边趋势检验,在给定显著性水平 α 下,当 $|Z| > U_{1-\alpha/2}$ 时,拒绝原假设,认为趋势显著。在 $|Z| \geq 2.58$, $|Z| \geq 1.96$ 时表示趋势通过了置信度为 99%、95% 的显著性检验,分别为极显著和显著, $|Z| < 1.96$ 则表示趋势不显著。综合以往研究^[15,34],本研究利用栅格数据叠加分析,将 NDVI 的变化结果与 M-K 检验结果叠加,结合本研究 Slope 值将 NDVI 变化趋势分为六个等级,包括极显著退化/改善、显著退化/改善、不显著退化/改善(表 1)。

表 1 植被 NDVI 变化趋势类型
Table 1 Types of NDVI change trends

斜率 Slope	Z	变化类型 Change types	斜率 Slope	Z	变化类型 Change types
>0	≥ 2.58	极显著改善	<0	<1.96	不显著退化
	≥ 1.96	显著改善		≥ 1.96	显著退化
	<1.96	不显著改善		≥ 2.58	极显著退化

Z: 检验统计量

为了更清楚地揭示植被时间演变的波动性,本研究对 NDVI 时间序列逐像元进行二次非线性拟合,拟合公式如下:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (3)$$

式中, y 表示为第 x 年的 NDVI, x 依次为 1—31, a 、 b 、 c 是回归系数。根据一元二次方程理论,NDVI 的变化拐点时间为第 $-b/2a$ 年,根据拐点时间确定本研究中 NDVI 年际变化的四种趋势:①当 $a > 0$,且 $-b/2a \leq 1$ 或 $a < 0$,且 $-b/2a \geq 31$ 时,NDVI 连续递增;②当 $a < 0$,且 $-b/2a \geq 31$ 或 $a < 0$,且 $-b/2a \leq 1$ 时,NDVI 连续递减;③当 $a < 0$,且 $1 < -b/2a < 31$ 时,NDVI 先增后减;④当 $a > 0$,且 $1 < -b/2a < 31$ 时,NDVI 先减后增。

1.3.2 NDVI 与气候因子相关分析

相关分析法已被广泛用于研究植被生长与气候因子间的关系^[14]。因此,本研究利用 Pearson 相关系数法对不同生态系统 NDVI 与月累积降水量、月平均温度、月饱和水汽压差进行逐像元分析,并以此衡量 NDVI 与气候因子的相关性。其计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^n (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中, r_{xy} 为 x 与 y 的相关系数, n 为时间序列长度, i, j 表示时间, x_i 代表 NDVI 的值, y_i 代表气候因子的值, \bar{x} , \bar{y} 分别代表 NDVI 和气候因子的均值。当 $i = j$ 时,说明 NDVI 与气候因子在同一时间点相关性研究;在滞后研究中,则设 $j = i \pm k (k \in N^*)$, $+k$ 表示 NDVI 的变化对气候因子存在 k 个月滞后,反之表示 NDVI 在 k 个月影响了气候。

考虑到气候因子存在累积/滞后效应,参考 Gessner 等^[35]的研究成果进一步分析植被与气候因子之间的响应关系。本研究采用的时滞互相关分析以三个月的累积(累积 1、累积 2、累积 3)和三个月的滞后(滞后 0、滞后 1、滞后 2)展开。为便于分析不同生态系统植被与气候的时滞响应结果,以月为时间间隔在像元尺度上求出对应的 9 种组合的相关系数(表 2)。本研究中累积时长取累积时段的平均值参与计算。

2 结果

2.1 NDVI 时间序列动态变化特征

1985—2015 年中国陆地 NDVI 年均值分布情况及其变化趋势如图 2 所示,结果显示 1985—2015 年中国陆地 NDVI 空间分异明显,自西北向东南 NDVI 值逐渐增加,NDVI 低值分布在西北,高值主要分布在西南东部、东北以及东南沿海区域。1985—2015 年间中国陆地 NDVI 整体呈增加趋势,整体变化率为 $0.5 \times 10^{-3}/a$ 。中

国陆地 NDVI 的变化在不同生态系统和不同自然地理分区均表现出明显的差异。研究期间,农田、森林和草地生态系统的植被均呈现改善趋势,其中农田生态系统的植被增长最快(0.001/a)且近一半呈显著改善趋势,荒漠生态系统植被增长缓慢(图 3),而湿地生态系统约一半的植被在退化,其中有近 18%的植被呈显著退化(表 3)。

表 2 累积滞后相关分析组合

Table 2 Cum_Lag correlation analysis combination

累积时长(月) Cumulative time	滞后时长(月) Lag time		
	滞后 0 Lag 0	滞后 1 Lag 1	滞后 2 Lag 2
累积 1 Cum 1	X: 1 — n Y: 1 — n	X: 2 — n Y: 1 — n-1	X: 3 — n Y: 1 — n-2
累积 2 Cum 2	X: 2 — n Y: (1, 2) — (n-1, n)	X: 3 — n Y: (1, 2) — (n-2, n-1)	X: 4 — n Y: (1, 2) — (n-3, n-2)
累积 3 Cum 3	X: 3 — n Y: (1, 2, 3) — (n-2, n-1, n)	X: 4 — n Y: (1, 2, 3) — (n-3, n-2, n-1)	X: 5 — n Y: (1, 2, 3) — (n-4, n-3, n-2)

X:NDVI;Y:气候因子;n:时间长度

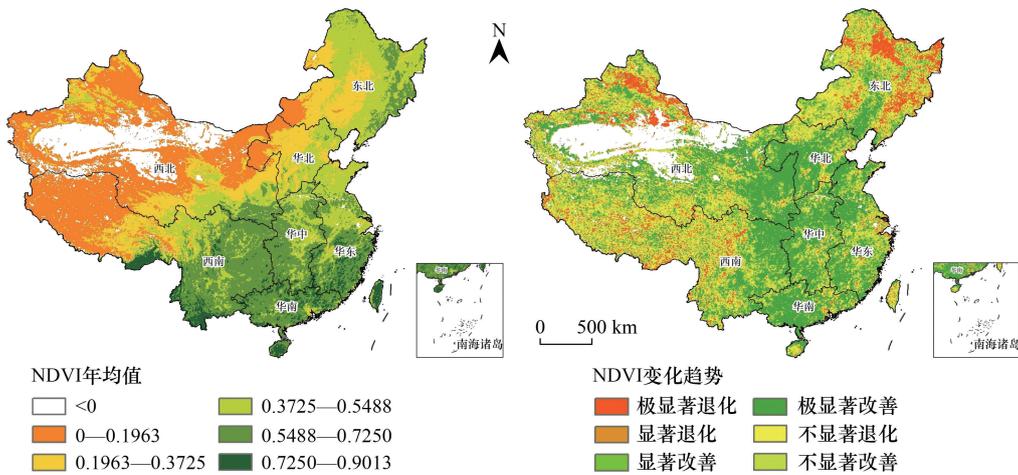


图 2 1985—2015 中国陆地 NDVI 分布和变化趋势

Fig.2 Spatiotemporal variation of NDVI in China from 1985 to 2015

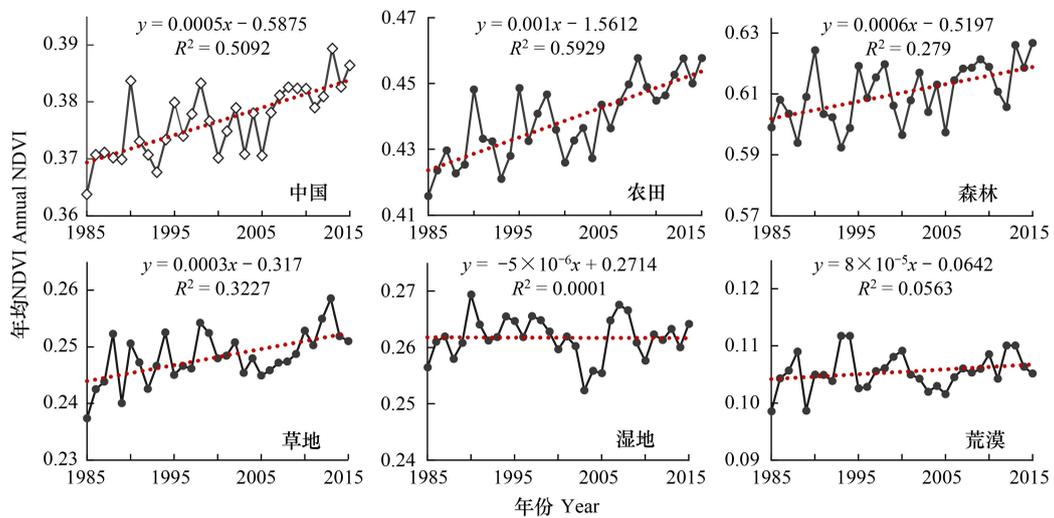


图 3 1985—2015 中国植被 NDVI 变化趋势曲线

Fig.3 Changing trend of NDVI in China from 1985 to 2015

1985—2015 年间中国陆地植被改善区域约占植被总面积的 66.39%, 显著改善约占 32.22%, 显著改善区域集中在华中、华东和华南区域。然而, 在整体改善的情况下, 中国陆地植被在局部区域存在严重的退化, 约 33.61% 的植被呈现退化趋势, 显著退化区域占 8.93%, 显著退化区域主要分布在西北、东北和西南地区 (图 2)。华北、华中和华南地区三个地区植被覆盖情况较好, 有超过 80% 的植被呈改善趋势。相比之下, 东北地区约有 18% 的植被呈显著退化趋势。就西北地区而言, 尽管本研究已经排除了无稳定植被覆盖的像元, 结果显示该区域也约有 10% 的植被呈现显著退化 (表 4)。

表 3 1985—2015 年生态系统分区 NDVI 年变化趋势统计/%
Table 3 The annual NDVI variation in different ecosystems from 1985 to 2015

生态系统类型 Ecosystem types	变化类型 Change types					
	极显著退化 Extreme significant degradation	显著退化 Significant degradation	不显著退化 Non-significant degradation	不显著改善 Non-significant improvement	显著改善 Significant improvement	极显著改善 Extreme significant improvement
农田生态系统 Farmland ecosystem	7.65	3.32	13.41	20.35	8.57	46.69
森林生态系统 Forest ecosystem	8.49	4.49	18.61	25.27	9.93	33.21
草地生态系统 Grassland ecosystem	6.70	4.98	25.68	29.72	8.24	24.68
湿地生态系统 Wetland ecosystem	17.92	6.22	25.32	23.69	7.21	19.64
荒漠生态系统 Desert ecosystem	18.77	5.39	16.52	19.00	6.95	33.36

表 4 1985—2015 年不同地理分区 NDVI 年变化趋势统计/%
Table 4 The annual NDVI variation in different geographic regions from 1985 to 2015

自然地理分区 Geographic regions	变化类型 Change types					
	极显著退化	显著退化	不显著退化	不显著改善	显著改善	极显著改善
东北 Northeast China	18.20	7.42	28.10	26.32	6.47	13.50
西北 Northwest China	9.97	4.39	19.39	24.68	8.27	33.30
华北 North China	1.80	1.71	11.89	22.97	9.64	51.99
西南 Southwest China	7.86	5.72	25.11	28.73	8.68	23.90
华东 East China	2.78	2.18	12.63	24.74	11.66	46.01
华中 Central China	0.77	0.62	6.37	22.00	12.60	57.64
华南 South China	1.59	1.43	8.77	18.50	9.26	60.46

本研究采用二次非线性回归方法对年际 NDVI 进行逐像元曲线拟合, 以期分析 1985—2015 年期间中国陆地年 NDVI 的变化规律。由图 4 可知, 1985—2015 年间中国大部分区域 NDVI 变化都表现出先减后增或先增后减的变化特征, 先减后增的区域主要分布在东部, 尤其在黄土高原、四川盆地和东南沿海一带较为集中; 先增后减的区域主要分布在西北、西南和东北地区。在华中和东北少部分地区 NDVI 一直增加, NDVI 一直减小的区域大部分较散乱地分布在中国东部。进一步分析 NDVI 变化拐点的时间, 1985—2015 年在 NDVI 先增后减的区域中, 大部分区域在 1995 年以后植被才开始退化, 而东部植被退化主要在 2005 年以后。小兴安岭、长白山和阿尔泰山脉南端区域部分植被退化主要发生在 1985—1995 年间。中国陆地植被先退化后增加的突变时间主要发生在 1985—1995 和 1995—2005 这两个时间段。其中, 黄土高原区域植被大多在 1985 年之后就开始改善, 东南沿海一带植被自 1995 年起才开始改善 (图 4)。

2.2 气候因子时空格局

图 5、图 6 分别为年平均降水/温度/饱和水汽压差的变化以及在不同分区的变化程度占比, 结果显示 1985—2015 年间中国降水/温度/饱和水汽压差的变化具有空间异质性。年平均降水整体呈微弱增加趋势,

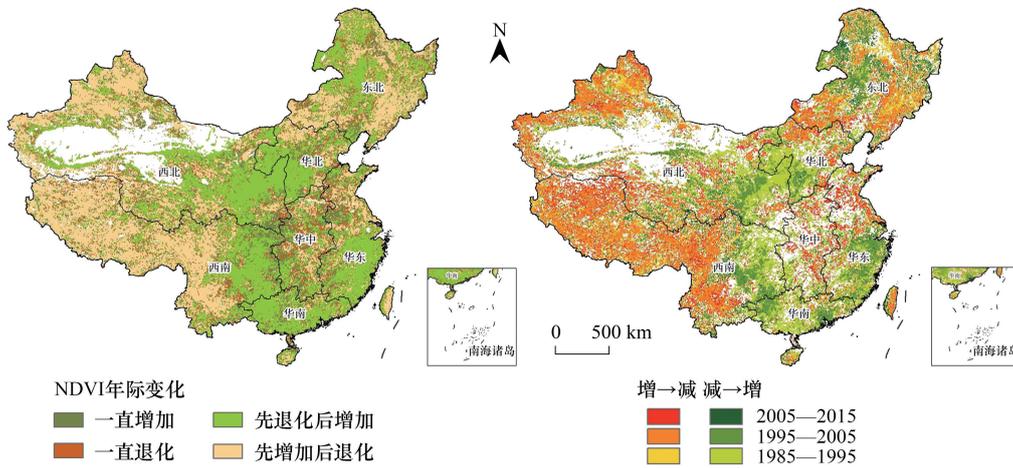


图 4 1985—2015 中国陆地 NDVI 年际变化及变化拐点空间分布

Fig.4 Inter-annual variation distribution of NDVI and turning points in China from 1985 to 2015

平均变化率约 8.9×10^{-3} mm/a。在各自然地理分区中,严重减少的区域主要分布在西南、华南和东北地区 (slope < -0.3),且西北、华中以及华东地区约 80% 区域的降水均呈现上升趋势(图 6)。反之,几乎整个东北地区的降水都呈下降趋势。华南地区降水严重减少的区域占比最大,集中在广东、福建沿海一带(图 5)。在各生态系统分区中,森林和湿地生态系统中超过 50% 的地区降水都呈现减少趋势,农田和森林生态系统降水严重减少和剧烈增加的范围最大,约 70% 的荒漠生态系统降水在增加(图 6)。

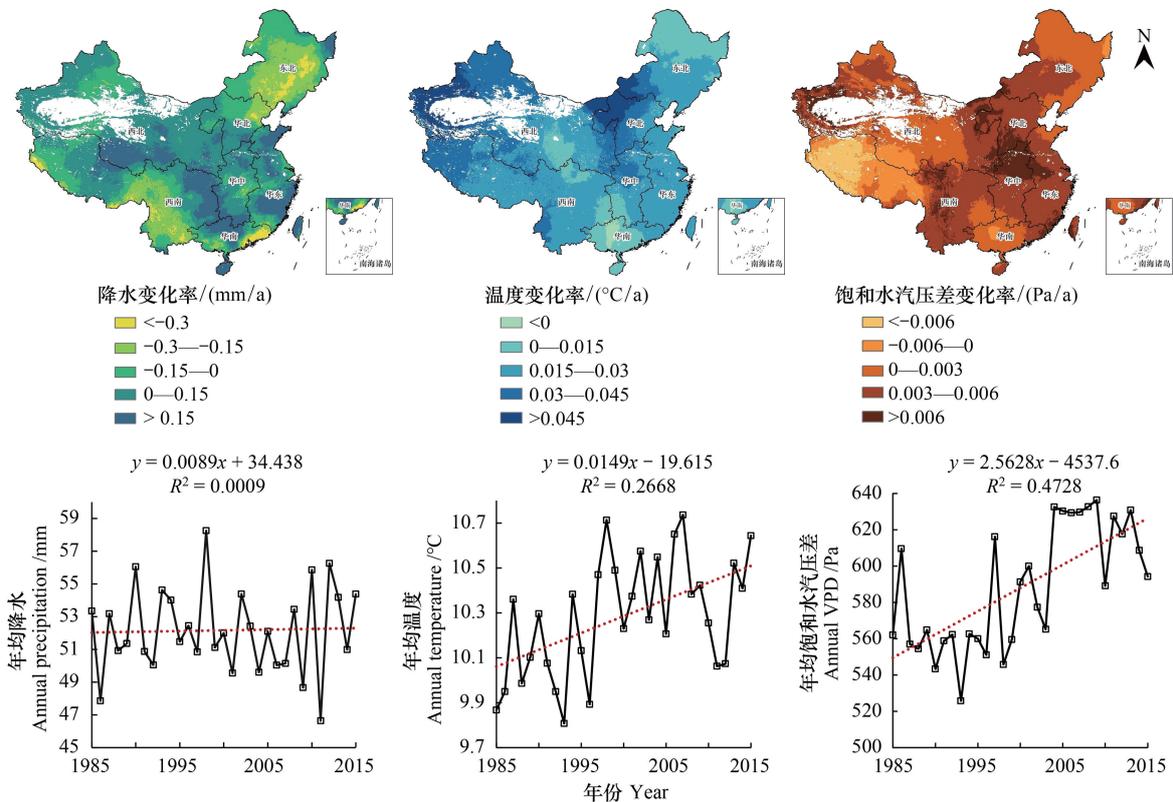


图 5 1985—2015 年中国气候因子年际变化的空间分布和趋势线

Fig.5 Inter-annual variation distribution and trendline of climatic factors in China from 1985 to 2015

温度整体呈现明显上升趋势,整体变化率从 $-0.6\times 10^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 到 $6.7\times 10^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。在各自然地理分区中,西北和华北地区的温度上升最快,最大升温速率超过 $4.5\times 10^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ (图5)。在各生态系统分区中,仅有极少部分森林和农田生态系统温度呈降低趋势;草地和荒漠生态系统温度上升速率最快,超过60%的区域温度增长率都高于全国平均水平(图6)。

年平均饱和水汽压差呈上升趋势,整体上升速率为 $2.6\text{ Pa}/\text{a}$ 。1985—2015年间饱和水汽压差降低的区域仅分布于青藏高原区域。西南东部、华北、华中和华东地区饱和水汽压差上升最快,上升速率高于 $3.0\text{ Pa}/\text{a}$ (图5)。不同生态系统分区中,20%的草地和湿地生态系统区域饱和水汽压差在降低,农田、荒漠和森林生态系统饱和水汽压差呈现上升趋势(图6)。

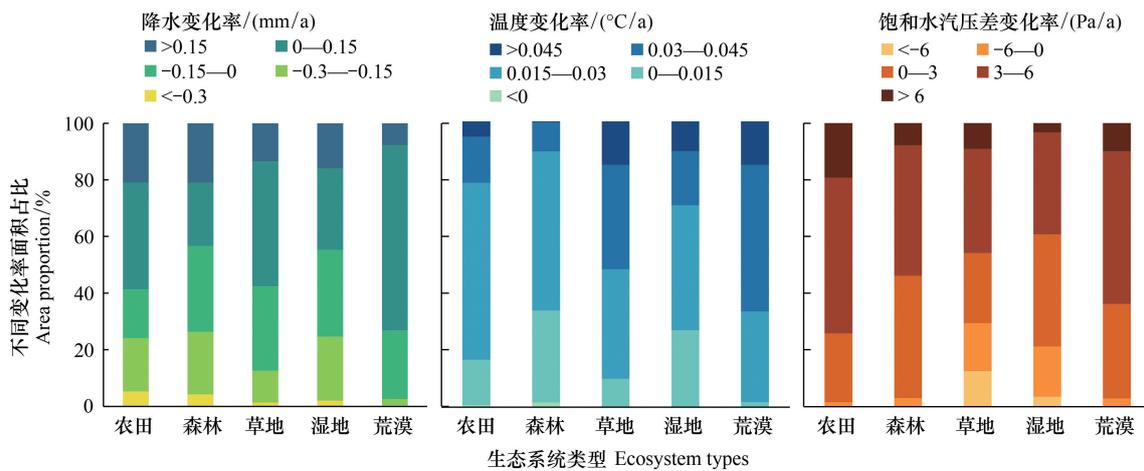


图6 不同生态系统降水/温度/饱和水汽压差变化率面积统计

Fig.6 Area statistics of precipitation/temperature/VPD variation in different ecosystems

2.3 不同生态系统 NDVI 与气候因子的相关性

为了进一步了解植被动态变化与气候之间的关系,本研究逐像元计算了1985—2015年中国植被区域平均NDVI与气候因子之间的Pearson相关系数(图7)。1985—2015年间,中国陆地植被NDVI与降水呈正相关的区域主要分布在西北、华北以及西南的四川盆地,负相关区域主要分布在东北、西南、华南地区。内蒙古高原中部NDVI与降水具有最强的正相关关系,相关系数最高为0.81。大小兴安岭、武夷山脉区域以及青藏高原地区的植被与降水呈明显负相关关系,最低相关系数低至-0.71。中国陆地NDVI与温度的相关关系也存在明显的空间异质性。西南地区呈负相关较多,华南和华中地区呈正相关较多。呈明显正相关的像元主要分布与四川盆地、华北平原、长江中下游平原等地区,最大相关系数达0.88。相反,在藏南、横断山脉、阿尔泰

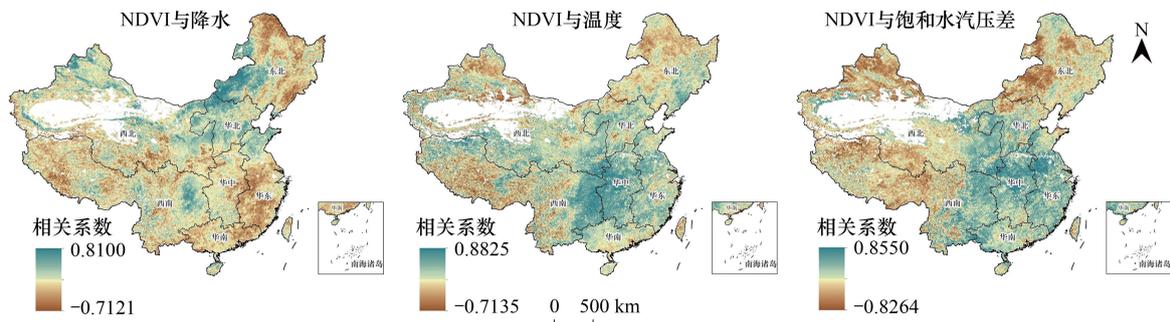


图7 1985—2015年NDVI与气候因子的相关系数

Fig.7 Pearson correlation coefficients between NDVI and climatic factors from 1985 to 2015

山脉和锡林郭勒盟地区,植被与温度表现出明显的负相关关系,最低相关系数为-0.71。中国陆地 NDVI 与饱和水汽压差的相关关系空间分异明显。呈正相关的像元主要分布在中国东南部,最大正相关像元处于长江中下游平原,最大相关系数约为 0.86;呈负相关关系像元主要分布在西北、西南和东北地区,其中新疆北部和内蒙古高原中部负相关关系最明显,最低相关系数约-0.83。

本研究分析了不同生态系统 NDVI 与气候因子年际变化相关性,结果如图 8 所示。结果表明,农田生态系统植被对温度、饱和水汽压差和降水的敏感性逐渐降低,主要表现为三种气候因子增加促进作农田生态系统 NDVI 增加。森林生态系统 NDVI 与温度和饱和水汽压差之间表现为明显的正相关关系,而与降水之间的相关性较小。草地生态系统 NDVI 对降水、温度和饱和水汽压差的相关性依次降低,且草地生态系统 NDVI 与饱和水汽压差主要表现为负相关关系。湿地生态系统 NDVI 对温度的敏感性强于降水和饱和水汽压差,主要表现为温度的增加促进湿地生态系统 NDVI 增加。荒漠生态系统 NDVI 在所有生态系统中对温度的敏感度最低,降水主要是促进荒漠生态系统 NDVI 增加,饱和水汽压差对荒漠生态系统 NDVI 影响的差异最大(相关系数 r 值分布最离散)。

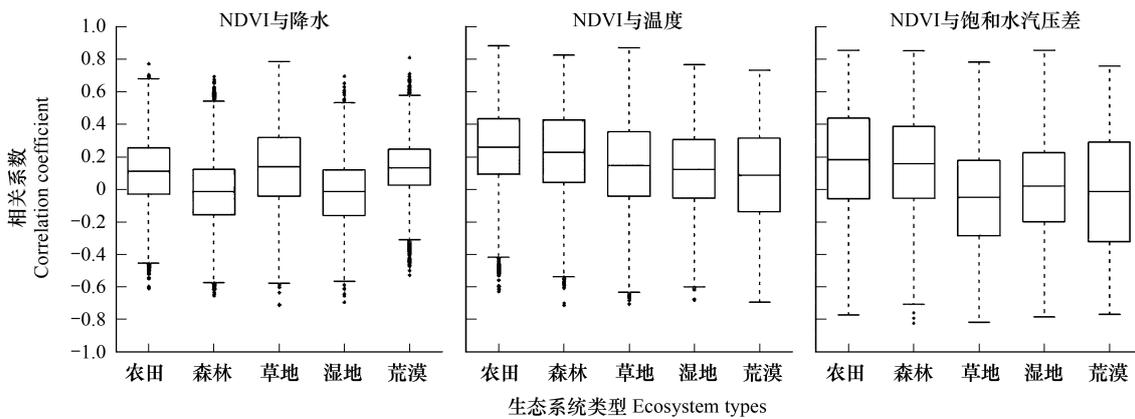


图 8 不同生态系统 NDVI 与气候因子的相关系数

Fig.8 Boxplot of correlation coefficients between NDVI and climatic factors in different ecosystems

2.4 不同生态系统植被对气候因子的时间响应

图 9 展示了 1985—2015 年中国陆地 NDVI 在月尺度上对气候因子的 9 种累积滞后组合的空间分布。NDVI 与降水的累积滞后相关分析结果显示,在中国绝大区域,植被对降水在各累积滞后组合下都表现出正

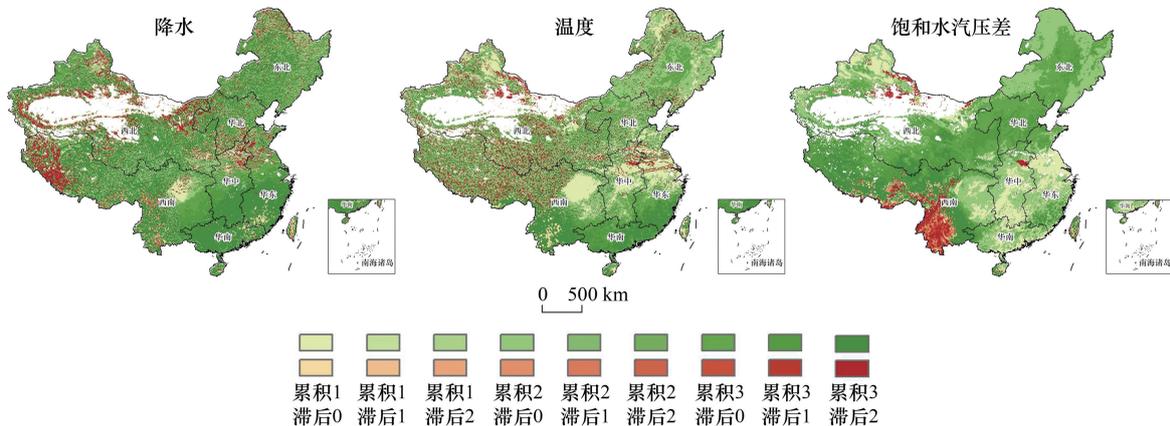


图 9 不同气候因子的累积滞后对 NDVI 的影响(红:负效应;绿:正效应)

Fig.9 The effects of climatic factors accumulation-lag to NDVI (Red: negative effect; Green: positive effect)

效应,仅在西南地区青藏高原西部、西北荒漠区域和东部(华北、华中、华东交界)部分区域表现出负效应,且都是累积3个月的降水抑制植被生长。在降水促进植被生长的区域中,西南四川盆地植被生长对降水的响应最快(累积1月滞后0月),华南沿海地区降水对植被生长的促进作用存在明显的累积效应。NDVI 与温度的累积滞后相关分析结果显示,总体上中国北方植被生长对温度的响应比南方快,青藏高原区域温度对植被生长在不同累积滞后情况存在正负两种效应。四川盆地和华东农田区域植被生长对温度的响应最快,且为正效应。NDVI 与饱和水汽压差的累积滞后相关分析结果显示,仅有新疆天山山脉、西南横断山脉和华中极少数平原地区的植被生长对饱和水汽压差响应慢且表现为负效应。其他地区饱和水汽压差对植被生长都表现为正效应,其中西北准格尔盆地和东南部植被对饱和水汽压差变化的响应较快,而在青藏高原和北方地区植被生长对饱和水汽压差的累积存在滞后效应。

图 10 展示了像元尺度上不同生态系统 NDVI 与气候因子的 9 种时滞组合相关分析结果。结果显示,月尺度上不同生态系统植被生长对降水的时间响应差异不大。农田生态系统植被对降水响应及时,其 NDVI 与滞后 0 月的降水相关性较高。森林生态系统 NDVI 与累积 3 个月降水的相关系数较高。草地生态系统植被生长对降水响应存在 1 个月的滞后,考虑降水累积后几乎无滞后效应。湿地生态系统植被生长对累积降水存在较明显的滞后响应,其 NDVI 与累积 2—3 月的降水平均相关系数最大,在累积达 3 个月后随滞后月份增加相关性下降明显。荒漠生态系统由于植被稀疏,其 NDVI 与降水的 9 种累积滞后结果的相关系数都很低且差异小。不同生态系统植被对温度的时间响应规律比较一致,在不考虑累积时,当月和滞后 1 月的 NDVI 与温度的相关性接近。农田和湿地生态系统植被对温度的响应最快,其 NDVI 与当月温度的相关性最高,且滞后月份越长,相关性越低。森林生态系统 NDVI 与温度所有时滞组合的相关系数都较大。草地生态系统植被对温度的响应较快,其 NDVI 与滞后 0 月的温度相关性较高。不同生态系统植被生长对饱和水汽压差累积两个月的响应更明显,且随着滞后时长的增加相关性逐渐降低。农田、湿地和荒漠生态系统植被对饱和水汽压差的时间响应规律一致,对无累积的饱和水汽压差存在 1 个月滞后效应。农田生态系统 NDVI 对饱和水汽压差的

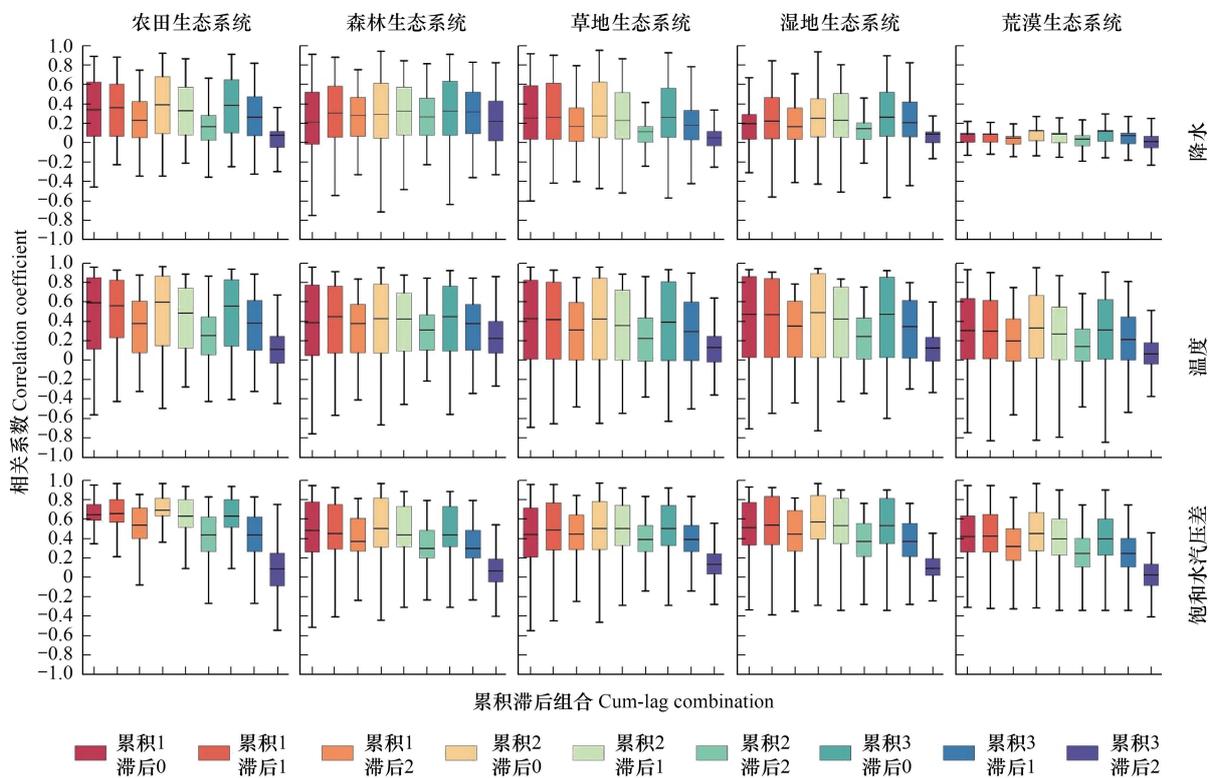


图 10 不同生态系统 NDVI 对气候因子的时间响应
 Fig.10 Response of different ecosystems' NDVI to climatic factors

响应除累积 3 个月滞后 2 个月外均表现出较高的相关性。森林生态系统植被生长对饱和水汽压差累积 1 到 3 个月情况下都没有表现出滞后效应。草地生态系统植被生长在饱和水汽压差累积 1—2 个月时表现出 1 个月滞后效应。

3 讨论

基于 1985—2015 年中国植被和气候因子时空变化趋势结果,本研究发现 1985—2015 年中国陆地 NDVI 虽在不同年份存在增减波动,但是整体呈现改善趋势(图 2),与 Wang 等^[16]、王茜等^[7]、耿庆玲等^[6]的研究结果较一致。本研究利用二次非线性回归方法,分析了植被变化逆转的拐点,发现植被整体改善的区域存在植被退化逆转现象,且该现象在 1995 年左右出现(图 5)。这一发现表明自 20 世纪 90 年代以来,中国实施的退牧、退耕还林还草、三江源生态保护等一系列生态修复工程^[36]在黄土高原区域、四川盆地、中国东部等地区取得显著成效。本研究发现与涂又等^[34]的研究结果相似,在北疆荒漠、青藏高原区域以及东北小兴安岭和长白山森林地带的植被出现显著退化。同时,过度开发围垦、养殖污染等活动造成湿地生态系统的景观格局破碎化^[37],从而导致植被退化。

本研究在年尺度针对植被变化分析其与气候因子相关性,进而解释在不同区域和生态系统视角下气候因子对植被生长的影响。内蒙古高原中部草地生态系统由于气温较高,气候分区上属于干旱、半干旱区^[38],降水能够更好促进植被生长。然而植被变化会随着气候条件的变化在一定阈值范围内波动^[39],当水热条件的改变超过植被的适应能力时,植被将会在结构功能等多方面受到抑制作用^[10]。四川盆地、华北平原、长江中下游平原等地农田生态系统分布广泛,其作物由于特定物候更依赖于气候条件,温度的升高会加快土壤有机质的分解速度,这更容易加速土壤中养分的矿化,促进植被的生长^[40]。青藏高原的高寒草地长时间处于低温条件,温度过高会改变生态群落的小气候环境,进而间接或直接影响植被生长^[41]。研究期间横断山脉森林生态系统 NDVI 与温度主要呈负相关关系,这一发现与熊巧利等^[42]对该地区 2000—2016 年气温升高不利于横断山脉植被生长的研究结果相符。

本研究同时分析了植被与气候因子在月尺度的累积和滞后效应。结果显示森林生态系统植被对降水的累积效应更明显。这可能是由于受森林特有的垂直结构的影响,其冠层与林下植被层能够截留降水并且削弱太阳长波辐射降低土壤水分蒸发。此外,林下的枯枝落叶层还可以通过吸收和渗透降水使树木根系和林下土壤储存充足水分。随着时间的推移,森林生态系统所存储的水分逐渐被释放,并在较长时间内能够重新利用,从而避免受到即时干旱的影响^[43—44]。横断山脉的森林生态系统降水累积对植被具有抑制作用,可能是由于该地区地处湿润地区,其独特的地形条件受湿热的南亚季风影响,降雨过于充沛,影响植被生长^[23]。农田生态系统大部分的作物根系较浅,依赖于土壤浅层水,因此对降水的响应更快,表现为四川盆地农田生态系统降水促进植被生长的响应最快,而华北平原农田生态系统降水的长期累积抑制植被生长。湿地生态系统由于自身水分充足,导致降水对其的影响存在明显的累积滞后效应。森林生态系统植被对温度的相关性高,且北方温度升高促进植被生长的响应比南方迅速,因为温度升高通常会增强植被叶片细胞活性,促进植被生长^[14]。南北方植被对温度的时间响应的差异可能是因为南方年内温度变化幅度小,植被受温度限制较小。相对而言,北方温度随季节变化大,植被的物候特征明显,植被对温度的响应更加显著。饱和水汽压差是导致植被干旱死亡的主要原因之一,也是影响陆地生态系统生物群落的重要因素^[45]。新疆北部荒漠生态系统区域属于干旱区, Li 等研究发现干旱导致的饱和水汽压差增加会降低植被气孔导度,减缓植被绿化速率,增加植被死亡率^[46]。横断山脉地形复杂,区域土壤保水性较差,在长时间饱和水汽压差累积时,植被为了避免木质部水分流失会通过关闭叶片气孔减少光合作用^[18]。因此,西南横断山脉区域的森林生态系统植被对饱和水汽压差表现为长时间累积抑制植被生长。同时,本研究发现华北平原极少数农田生态系统对饱和水汽压差的累积负反馈效应,其内在原因有待于在今后的研究中进一步探索。此外,区别气候变化和人类活动对 NDVI 的影响,以及 NDVI 在不同植被类型下的空间异质性也有待于在后续研究中展开。

4 结论

1) 1985—2015 年中国植被呈现改善趋势, NDVI 整体变化率为 $0.5 \times 10^{-3}/a$, 植被显著改善和显著退化的区域各占 32.2% 和 9.0%, 且绝大部分区域在研究期间存在植被变化逆转的拐点, 植被改善的区域是在 1995 年左右出现植被退化逆转的现象。年平均降水以 $8.9 \times 10^{-3} \text{ mm}/a$ 速率微弱增加; 温度明显上升, 整体变化率从 $-0.6 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}/a$ 到 $6.7 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}/a$; 年平均饱和水汽压差呈现上升趋势, 整体上升速率为 $2.6 \text{ Pa}/a$ 。植被活动受全国气候变化的影响, 在农田、森林和草地生态系统显著改善, 湿地生态系统的植被退化趋势最严重。

2) 中国陆地植被 NDVI 与气候因子的相关性存在明显的空间异质性, 且受不同生态系统分区影响。NDVI 与降水呈正相关像元主要分布在内蒙古高原中部草地生态系统, 负相关的主要分布森林生态系统和青藏高原; NDVI 与温度在农田生态系统分布的地区呈明显正相关, 西部高寒、干旱地区的负相关效应较明显; NDVI 与饱和水汽压差呈正相关像元主要分布在中国东部农田生态系统, 负相关关系最明显像元分布在新疆北部和内蒙古高原中部草地生态系统。

3) NDVI 与气候因子存在月尺度上的累积和滞后效应, 且不同生态系统植被与气候因子的时间累积滞后效应具有差异性。森林生态系统植被对降水累积响应明显, 农田生态系统植被对降水的响应最快; 不同生态系统植被对温度的响应表现在当月或滞后 1 月呈现最高的相关性; 不同生态系统植被生长对饱和水汽压差累积两个月的响应更明显, 且随着滞后时长的增加相关性逐渐降低。

参考文献 (References):

- [1] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [2] Yuan W, Zheng Y, Piao S, Ciais P, Lombardozzi D, Wang Y P, Ryu Y, Chen G X, Dong W J, Hu Z M, Jain A K, Jiang C Y, Kato E, Li S H, Liener S, Liu S G, Nabel J, Qin Z, Quine T, Sitch S, Smith W K, Wang F, Wu C Y, Xiao Z Q, Yang S. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. Science Advances, 2019, 5(8): eaax1396.
- [3] 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.
- [4] 李超, 李雪梅. 2000—2018 年中国植被生态质量时空变化特征. 长江流域资源与环境, 2021, 30(9): 2154-2165.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 丛楠, 张扬建, 朱军涛. 北半球中高纬度地区近 30 年植被春季物候温度敏感性. 植物生态学报, 2022, 46(2): 125-135.
- [10] 李红英, 张存桂, 汪生珍, 马伟东, 刘峰贵, 陈琼, 周强, 夏兴生, 牛百成. 近 40 年青藏高原植被动态变化对水热条件的响应. 生态学报, 2022, 42(12): 4770-4783.
- [11] Li P F, Wang J, Liu M M, Xue Z H, Bagherzadeh A, Liu M S. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015. Catena, 2021, 203: 105331.
- [12] 梁大林, 唐海萍. 青藏高原两种高寒草地植被变化及其水温驱动因素分析. 生态学报, 2022, 42(1): 287-300.
- [13] 吴林霖, 王思远, 马元旭, 杨瑞霞, 官云兰, 海凯, 刘卫华. 中亚地区植被对气候变化的响应机制初探. 遥感学报, 2021, 0.
- [14] Wu D H, Zhao X, Liang S L, Zhou T, Huang K C, Tang B J, Zhao W Q. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. Global Change Biology, 2015, 21(9): 3520-3531.
- [15] 秦格霞, 芦倩, 孟治元, 李政, 陈泓羽, 孔婕, 吉珍霞, 秦安宁. 1982—2015 年中国北方草地 NDVI 时空动态及其对气候变化的响应. 水土保持研究, 2021, 28(1): 101-108, 117.
- [16] Wang H J, Li Z, Cao L, Feng R, Pan Y P. Response of NDVI of natural vegetation to climate changes and drought in China. Land, 2021, 10(9): 966.

- [17] Ding Y X, Li Z, Peng S Z. Global analysis of time-lag and -accumulation effects of climate on vegetation growth. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 92: 102179.
- [18] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [19] Zhang S, Tao F L, Zhang Z. Spatial and temporal changes in vapor pressure deficit and their impacts on crop yields in China during 1980-2008. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(4): 800-808.
- [20] Zhe M, Zhang X Q. Time-lag effects of NDVI responses to climate change in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet. *Ecological Indicators*, 2021, 124: 107431.
- [21] Sun Q Q, Liu C, Chen T Y, Zhang A. A weighted-time-lag method to detect lag vegetation response to climate variation: a case study in loess plateau, China, 1982-2013. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 923.
- [22] 黄豪奔, 徐海量, 林涛, 夏国柱. 2001—2020 年新疆阿勒泰地区归一化植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2022, 42(7): 2798-2809.
- [23] 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.
- [24] 李雪萍, 史兴民, 王阿如娜. 中国典型等降水量线年代际空间演变. *中国沙漠*, 2016, 36(1): 232-238.
- [25] 郭志华, 刘祥梅, 肖文发, 王建力, 孟畅. 基于 GIS 的中国气候分区及综合评价. *资源科学*, 2007, 29(6): 2-9.
- [26] The National Center For Atmospheric Research. 全球 1/12 度 AVHRR GIMMS 均一化植被指数 (1981-2015). National Tibetan Plateau Data Center, 2018.
- [27] Li J, Fan K, Zhou L M. Satellite observations of el niño impacts on Eurasian spring vegetation greenness during the period 1982 - 2015. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 628.
- [28] 刘宁, 彭守璋, 陈云明. 气候因子对青藏高原植被生长的时间效应. *植物生态学报*, 2022, 46(1): 18-26.
- [29] 彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月降水量数据集 (1901—2020). 国家青藏高原科学数据中心, 2020, DOI:10.5281/zenodo.3185722.
- [30] 彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月平均气温数据集 (1901—2020). 国家青藏高原科学数据中心, 2019, DOI:10.11888/Meteoro.tpdc.270961.
- [31] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, Hegewisch K C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958 - 2015. *Scientific Data*, 2018, 5: 170191.
- [32] 徐新良, 刘纪远, 张增祥. 中国 5 年间隔陆地生态系统空间分布数据集 (1990-2010). 全球变化科学研究数据出版系统, 2015, DOI:10.3974/geodb.2015.01.01.V1.
- [33] Forthofer R, Lehen R. *Public program analysis: a new categorical data approach*. Boston, MA: Springer US, 1981.
- [34] 涂又, 姜亮亮, 刘睿, 肖作林, 闵婕. 1982—2015 年中国植被 NDVI 时空变化特征及其驱动分析. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 75-84.
- [35] Gessner U, Naeimi V, Klein I, Kuenzer C, Klein D, Dech S. The relationship between precipitation anomalies and satellite-derived vegetation activity in Central Asia. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 74-87.
- [36] Zheng H Y, Miao C Y, Li X Y, Kong D X, Gou J J, Wu J W, Zhang S P. Effects of vegetation changes and multiple environmental factors on evapotranspiration across China over the past 34 years. *Earth's Future*, 2022, 10(4): e2021EF002564.
- [37] 夏少霞, 于秀波, 王春晓. 中国湿地生态站现状、发展趋势及空间布局. *生态学报*, 2022, 42(19): 7717-7728.
- [38] 王菱, 甄霖, 刘雪林, Ochirbat Batkhisig, 王勤学. 蒙古高原中部气候变化及影响因素比较研究. *地理研究*, 2008, 27(1): 171-180.
- [39] Krishnaswamy J, John R, Joseph S. Consistent response of vegetation dynamics to recent climate change in tropical mountain regions. *Global Change Biology*, 2014, 20(1): 203-215.
- [40] Toledo M, Poorter L, Peña-Claros M, Alarcón A, Balcázar J, Leño C, Licona J, Llanque O, Vroomans V, Zuidema P, Bongers F. Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance. *Journal of Ecology*, 2011, 99(1): 254-264.
- [41] 卓嘎, 陈思蓉, 周兵. 青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2018, 38(9): 3208-3218.
- [42] 熊巧利, 何云玲, 李同艳, 余岚. 西南地区生长季植被覆盖时空变化特征及其对气候与地形因子的响应. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 259-266.
- [43] Huber S, Fensholt R, Rasmussen K. Water availability as the driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007. *Global and Planetary Change*, 2011, 76(3/4): 186-195.
- [44] Jiang L L, Guli · Jiapaer, 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.
- [45] 王大为, 赵成章, 方锋, 林婧婧, 李丽丽, 杨永明. 石羊河流域水分利用效率特征及其对饱和水汽压差的响应. *生态学报*, 2023, 43(8): 1-13.
- [46] Li M Y, Guan J Y, Zheng J H. Climate drivers contribute in vegetation greening stalls of arid Xinjiang, China: an atmospheric water drying effect. *Water*, 2022, 14(13): 2019.