

# 基于 MODISNDVI 数据的陕甘宁地区植被覆盖 时空变化及其对极端气候的响应

赵安周<sup>1,2</sup>, 张安兵<sup>1,2</sup>, 赵延旭<sup>3</sup>, 范倩倩<sup>1,2</sup>, 赵玉玲<sup>1,2</sup>

(1. 河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学

河北省煤炭资源综合开发与利用协同创新中心, 河北 邯郸 056038; 3. 河北工程大学 建筑与艺术学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:**干旱、热浪等极端气候事件对植被生态系统有重要的影响。基于 MODIS NDVI 数据集、日降水、日平均气温以及最高和最低气温数据, 辅以 Sen 趋势分析、相关分析等方法, 分析了 2000—2014 年陕甘宁地区植被覆盖的时空演变及其对极端气候的响应。结果表明: (1) 近 15 年来陕甘宁地区 NDVI 呈显著增加趋势 ( $p < 0.01$ ), 其增加速率为 0.066/10 a, 就不同的植被类型来看, 草地、灌丛、栽培作物、针叶林和阔叶林均呈现显著上升的趋势 ( $p < 0.01$ ), 其上升速率分别为 0.06/10 a, 0.058/10 a, 0.077/10 a, 0.039/10 a 和 0.036/10 a; (2) 空间上, NDVI 呈由东南向西北递减的分布格局, 显著增加的区域主要位于榆林、延安等生态工程重点建设的区域; (3) 就极端气候指数的变化来看, 除 TXx 外, 其他极端气候指数的变化均未通过 0.05 置信水平检验; (4) 在月尺度上, NDVI 与极端降水指数 (RX5day 和 RX1day) 和极端气温指数 (TMAXmean, TMINmean, TNx, TNn, TXn 和 TXx) 存在显著相关性; (5) 在季节尺度上, 春季和秋季植被 NDVI 与极端气候指数均存在显著的相关性 ( $p < 0.01$ ), 夏季植被 NDVI 与极端降水指数呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 冬季植被 NDVI 与 RX5day 呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ); (6) 滞后性分析表明月 NDVI 与极端降水指数 (RX1day 和 RX5day) 和极端气温指数 (TMAXmean 和 TXx) 前 1 个月的相关性大于当月、前 2 个月以及前 3 个月, 表明该地区的植被对这些极端气候指数的响应存在一定的滞后性。

**关键词:** NDVI; 时空变化; 极端气候指数; 相关分析; 陕甘宁地区

中图分类号: Q948.1; P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0224-08

## Spatiotemporal Changes of Vegetation in the Shaanxi—Gansu—Ningxia Region and Response to Climatic Extremes Based on MODIS NDVI Data

ZHAO Anzhou<sup>1,2</sup>, ZHANG Anbing<sup>1,2</sup>, ZHAO Yanxu<sup>3</sup>, FAN Qianqian<sup>1,2</sup>, ZHAO Yuling<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. Hebei Collaborative Innovation Center of Coal Exploitation, Hebei University of Engineering, Handan,

Hebei 056038; 3. College of Architecture and Art, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract:** Droughts, precipitation and other extreme climatic events often impact on vegetation. Base on daily precipitation, temperature (average, maximum, and minimum) data from 14 meteorological stations and a satellite-derived normalized difference vegetation index (NDVI) from MODIS dataset, we investigated relationship between vegetation change and climatic extremes in Shaanxi—Gansu—Ningxia region during 2000—2014. The results showed that the vegetation coverage of the study region exhibited the significant increase, with a linear tendency being 0.066/decade ( $p < 0.01$ ) during 2000—2014. Annual NDVI during 2000—2014 for grassland, shrub-land, cultivated vegetation, needle leaved forest and broad-leaf forest exhibited the significant increase in a linear trend of 0.06/decade, 0.058/decade, 0.077/decade, 0.039/decade and 0.036/decade ( $p < 0.01$ ), respectively. As for spatial distribution, NDVI showed the decreasing trend from southeast to northwest, the areas in Yulin and Yan'an exhibited the significant increase because of the ecological engineering con-

struction. All of the climatic extremes had no significantly change trend except the TXx. On the monthly scale, vegetation coverage and different vegetation types significantly positively responded to precipitation extremes and temperature extremes (TMAXmean, TMINmean, TNx, TNn, TXn and TXx) ( $p < 0.01$ ). All of the precipitation extremes and temperature extremes indicted significant positive relationship with NDVI in the spring and autumn ( $p < 0.01$ ). However, only the relationship between precipitation extremes (RX1day and RX5day) and NDVI was significant in summer. The vegetation showed the significant negative relation to RX5day in winter ( $p < 0.05$ ). Time lags analysis demonstrated that NDVI responded to precipitation extremes (RX1day and RX5day) and temperature extremes (TMAXmean and TXx) a lag of 1 month.

**Keywords:** NDVI; spatiotemporal variation; climate extremes; correlation analysis; Shaanxi—Gansu—Ningxia region

极端气候事件是指某类气候要素统计量或量值在特定时间段内显著偏离其平均态、且达到或超出其观测或统计量值区间上下限附近特定阈值的事件<sup>[1]</sup>。相比于气候平均状态,极端气候事件的发生更具有反常性、不可预见性等,会对生态环境和人类社会的健康发展造成更为巨大的影响<sup>[2-3]</sup>。IPCC 第五次评估报告指出,1880—2012 年期间,全球平均气温升高了  $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $0.65 \sim 1.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[4]</sup>。历时观测数据表明全球气候变暖会增加极端气候事件(洪涝、干旱、热浪等)发生的频率和强度<sup>[5]</sup>。极端事件的增多使得全球气候变化问题受到了国内外学者的广泛关注。在全球气候变暖的背景下,地处生态环境脆弱区的植被生态系统对极端气候的响应异常敏感,因此有必要选取典型区域对植被覆盖时空演变及其对极端气候事件的响应进行认识和评价。

随着全球气候变化日益受到各个国家和地区的高度关注,全球气候变暖与植被生态系统的关系研究已成为当前国内外学者关注的热点和核心问题<sup>[6-7]</sup>。目前,气候变化可以分为波动变化、趋势变化以及极端事件 3 个方面<sup>[8]</sup>。以往对植被覆盖时空演变的归因分析多关注前两个方面对植被的影响,而对极端事件对植被覆盖变化的影响尚缺乏全面的认识<sup>[9]</sup>。目前,国外学者针对亚洲蒙古高原<sup>[10]</sup>、南美亚马逊雨林<sup>[11]</sup>等生态敏感区的植被对干旱、厄尔尼诺等极端事件的响应做了一系列探索性研究,取得了卓有成效的研究成果。遗憾的是,国内关于植被生长对极端气候的响应的研究分析稍显薄弱,尤其是针对陕甘宁等生态脆弱区和敏感区。IPCCAR5 同时指出,1960—2009 期间中国的地表平均气温上升了  $1.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,高于 1951—2012 年全球气温的上升速率( $0.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[12]</sup>,气温的快速上升使得极端气候事件出现的强度和频率都呈现增加的趋势<sup>[13]</sup>。在全球气候变暖背景下,植被生态系统对极端气候事件的脆弱性逐渐增加,因

此,研究植被对极端气候事件的响应对生态系统的健康发展尤为重要。

陕甘宁地区地处中国西北的黄土高原丘陵沟壑区,生态环境脆弱,是全球气候变化的敏感地区和生态工程建设的重点区域,1960—2010 年期间,其年均气温的上升速率达到  $0.336\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,高于全国的 ( $0.26 \pm 0.032$ ) $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ <sup>[14]</sup>,这些变化将会导致该地区出现干旱等极端事件的频率增大,研究植被覆盖变化对极端事件的响应有助于该地区一系列生态工程建设的顺利实施。鉴于此,利用植被指数和气象数据,辅以趋势分析、Mann-Kendall (M-K) 检验以及相关分析等方法,本文分析陕甘宁地区植被覆盖的时空变化特征和极端气候指数的变化特征,并对二者关系进行分析,这对了解区域生态环境演变规律,促进区域生态环境和社会经济的健康发展具有重要的意义。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

陕甘宁地区处于黄土高原中部的丘陵沟壑区,是我国生态环境治理的重点区域。总面积约  $1.38 \times 10^5\text{ km}^2$ ,在行政单元上包括陕西 25 县,甘肃 8 县以及宁夏的 8 县。气候类型属于暖温带大陆性季风气候向温带半干旱气候的过渡带,降水呈从南向北逐渐减小的趋势,年降水量在  $330 \sim 570\text{ mm}$ ,年际变化大,50% 以上的降水集中在 6—9 月。主要地貌类型为山、塬、川。由于地形地貌、强降水和人类活动的影响,使得该地区植被稀疏,水土流失严重<sup>[15]</sup>。该地区的植被类型主要包括栽培作物、林地、草地、灌丛等(附图 7)。

### 1.2 数据来源及预处理

2000—2014 年的遥感数据来源于美国国家航空航天局 (NASA) 的 EOS/MODIS 数据产品中的 MOD13Q1 NDVI 数据 (<http://e4ftl01.cr.usgs.gov>),其时间分辨率为 16 d,空间分辨率为  $250\text{ m} \times$

250 m。该数据产品具有较高的空间分辨率,同时经过云、气溶胶、水汽等处理,因此被广泛应用于区域植被覆盖时空变化的研究。首先,使用 MRT(MODIS Reprojection Tools)将所下载的 MODIS—NDVI 数据进行格式和投影转换;然后,为消除异常值得影响,采用大合成法(MVC)合成月 NDVI 数据,并统计其年平均值。年 NDVI 为 12 个月 NDVI 的均值,春季、夏季、秋季和冬季分别为 3—5 月、6—8 月、9—11 月以及 12—次年 2 月。同时为消除植被覆盖较低区域的影响,参照该地区的植被类型图和已有的研究<sup>[16]</sup>,将 2000—2014 年多年生长季 NDVI 均值大于 0.1 的区域作为植被区域。

植被类型数据来源于中国 1:100 万植被数据集,陕甘宁地区的植被主要包括栽培作物、林地、灌丛、草地等。另外,2000—2014 年陕甘宁地区 14 个气象站点的日降水、平均气温、最高/最低气温数据来源于中

国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。本文所选数据均经过了极值检验等严格的质量检查。同时,为保证结果的可信度,利用 RCLimDex 软件对所获取的资料进行异常值和错误值的筛选、日最高气温是否小于最低气温等质量控制<sup>[17]</sup>。

### 1.3 研究方法

1.3.1 极端气候指数的计算 极端气候指数定义是基于世界气象组织气候委员会(CCI)、全球气候研究计划(WCRP)气候变化以及可预测性计划(CLIVAR)气候变化检测、监测和指标专家组(ETCCDMI)等组织和机构所确定的气候变化检测指数<sup>[18]</sup>。这些指数目前已广泛应用于极端气候研究中。本文所选取的极端指数包括 2 个极端降水指数和 10 个极端气温指数,具体见表 1。年极端指数为 12 个月极端指数的均值,春季、夏季、秋季和冬季极端指数分别为 3—5 月、6—8 月、9—11 月以及 12—次年 2 月极端指数的均值。

表 1 极端指数的定义

英文缩写	极端指数	定义	单位
RX1day	1 日最大降水量	每月内连续 1 日的最大降水量	mm
RX5day	5 日最大降水量	每月内连续 5 日的最大降水量	mm
TMAXmean	最高气温	日最高气温的月均值	℃
TMINmean	最低气温	日最低气温的月均值	℃
TN10p	冷夜日数	日最低气温 < 10% 分位值的日数天	d
TN90p	暖夜日数	日最低气温 > 90% 分位值的日数天	d
TNn	日最低气温的极低值	每个月日最低气温的最小值	℃
TNx	日最低气温的极高值	每个月日最低气温的最大值	℃
TX10p	冷昼日数	日最高温 < 10% 分位值的日数天	d
TX90p	暖昼日数	日最高温 > 90% 分位值的日数天	d
TXn	日最高气温的极低值	每个月日最高气温的最小值	℃
TXx	日最高气温的极高值	每个月日最高气温的最大值	℃

1.3.2 趋势分析 利用非参数化趋势度(Sen)方法<sup>[19]</sup>来计算 2000—2014 年陕甘宁地区 NDVI 的变化趋势,并采用 M-K<sup>[20]</sup>方法检验其变化趋势的显著性,具体计算公式如下:

$$\text{Slope} = \text{Median} \frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{t_j - t_i} \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) \quad (2)$$

$$\text{sign}(\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j) = \begin{cases} -1 & \text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j < 0 \\ 0 & \text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j = 0 \\ 1 & \text{NDVI}_i - \text{NDVI}_j > 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{var}(S)} & S < 0 \end{cases}$$

式中:Slope 为 NDVI 的变化趋势; $t_j$  和  $t_i$  为时间序数;NDVI<sub>i</sub> 和 NDVI<sub>j</sub> 分别为第  $i$  个月和第  $j$  个月的 NDVI 值; $n$  为研究时序。当 Slope > 0 的时候,NDVI 呈上升的趋势;Slope < 0 的时候,NDVI 呈下降的趋势。若  $1.56 < |Z| < 1.96$ ,NDVI 呈弱显著变化趋势( $p < 0.1$ ); $1.96 \leq |Z| < 2.56$ ,NDVI 呈显著变化趋势( $p \leq 0.05$ ); $|Z| \geq 2.56$ ,NDVI 呈极显著变化趋势( $p \leq 0.01$ )。

1.3.3 相关分析 相关系数的计算公式如下<sup>[21]</sup>:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (5)$$

式中:  $R$  表示相关系数, 其范围为  $0 \sim 1$ ;  $\text{NDVI}_i$  表示第  $i$  个月的 NDVI 值;  $\overline{\text{NDVI}}$  表示 2000—2014 月 NDVI 的均值;  $P_i$  和  $\bar{P}$  表示第  $i$  月的极端气候指数和极端气候指数的均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 NDVI 时间变化特征

2000—2014 年陕甘宁地区 NDVI 呈显著增加的趋势, 其增加速率为  $0.066/10 \text{ a}$  ( $p < 0.001$ )。2000 年的 NDVI 年平均值为  $0.2384$ , 到 2014 年增加到  $0.3562$ , 增长率为  $49.41\%$ 。期间, 2001—2002, 2011—2012, 2000—2001 年的增加速率最快, 其增长率分别为  $16.17\%$ ,  $8.03\%$  和  $6.33\%$  (图 1)。

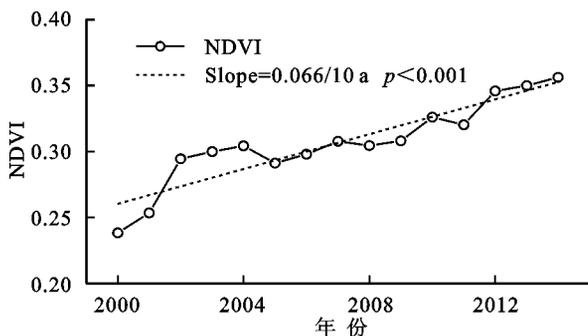


图 1 2000—2014 年陕甘宁地区 NDVI 变化

同时, 根据研究区植被类型图, 进一步分析了 2000—2014 年陕甘宁地区不同植被类型的 NDVI 变化趋势 (图 2), 从图中可知, 草地、灌丛、栽培作物、针叶林和阔叶林均呈现显著上升的趋势 ( $p < 0.001$ ), 其上升速率分别为  $0.06/10 \text{ a}$ ,  $0.058/10 \text{ a}$ ,  $0.077/10 \text{ a}$ ,  $0.039/10 \text{ a}$  和  $0.036/10 \text{ a}$ , 栽培作物的上升速率最大, 其次为草地。从不同植被的 NDVI 值来看, 针叶林的 NDVI 年平均最大, 介于  $0.5114 \sim 0.5905$ , 草地的 NDVI 值最小, 介于  $0.1939 \sim 0.3011$ 。

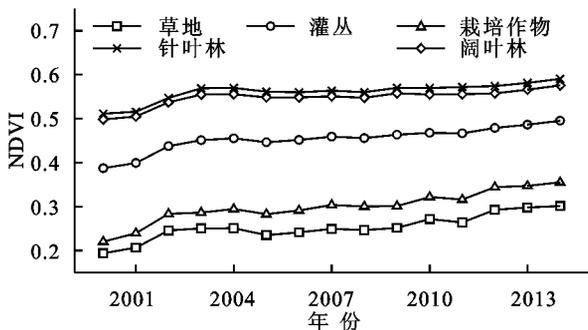


图 2 2000—2014 年陕甘宁地区不同植被类型的 NDVI 变化

### 2.2 NDVI 空间变化特征

2000—2014 年期间陕甘宁地区 NDVI 均值呈从东南到西北递减的态势, 高值区主要分布在东南部的子午岭、黄龙山等地, 这些地区的植被类型主要为落叶阔叶林、针叶林等, 植被长势较好; 低值区主要分布在榆林的西北部、吴忠市的东南部等地, 这些地区多为戈壁沙漠, 植被较为疏松 (附图 8)。NDVI 的频率分布图显示陕甘宁地区呈现单峰的结构, NDVI 的平均值为  $0.3078$ , 总体植被覆盖较差, NDVI 值小于  $0.5$  的像元比例达到  $90.19\%$ , 其中介于  $0.2 \sim 0.3$  之间的像元数最多, 比例达到  $39.58\%$ 。

### 2.3 NDVI 空间趋势特征

为进一步分析陕甘宁地区 NDVI 的变化情况, 采用 Sen 方法来计算 2000—2014 年陕甘宁地区 NDVI 的变化趋势, 并采用 M-K 方法检验其变化趋势的显著性。结果表明, 陕甘宁地区 NDVI 整体呈现上升的趋势, 呈上升和减小趋势的面积分别占  $97.92\%$  和  $1.95\%$  (附图 9), 其中呈极显著上升和显著上升的区域分别占  $60.70\%$  和  $14.99\%$ , 主要分布在榆林、延安等地区, 其主要因为这些地区为“退耕还林还草”等一系列生态工程重点实施的区域, 在这些生态工程的实施下, 该地区的 NDVI 呈显著增加的趋势, 变化不显著的区域仅占  $17.39\%$ , 主要分布在该地区的东南部的山地等区域, 其主要原因是这些地区植被主要为林地, 变化相对稳定。

### 2.4 极端气候指数变化趋势

2000—2014 年陕甘宁地区 12 个极端指数的变化趋势见图 3。从图中可以看出,  $\text{RX1day}$ ,  $\text{TMAXmean}$ ,  $\text{TNx}$ ,  $\text{TX10}$ ,  $\text{TX90}$ ,  $\text{TXn}$  和  $\text{TXx}$  呈现下降的趋势, 其下降速率分别  $1.66 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ,  $0.17^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,  $0.74^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,  $0.14^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,  $1.07^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,  $0.29^\circ\text{C}/10 \text{ a}$  和  $1.35^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。而  $\text{RX5day}$ ,  $\text{TMINmean}$ ,  $\text{TN10}$ ,  $\text{TN90}$  和  $\text{TNn}$  呈现增加的趋势, 其增加速率为  $2.24 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ,  $0.001^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,  $1.38 \text{ day}/10 \text{ a}$ ,  $0.64 \text{ day}/10 \text{ a}$  和  $0.39^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 除  $\text{TXx}$  外, 其他所有极端指数的变化均未通过  $0.05$  置信水平检验。

### 2.5 不同月份 NDVI 与极端气候指数的关系

由于植被生长对降水、气温等气象因子存在一定的滞后性, 因此年尺度的相关性并不能很好的解释植被与极端降水、气温的相关性<sup>[16]</sup>。鉴于此, 本文从月尺度上分析了 2000—2014 年陕甘宁地区月 NDVI 与 12 个极端气候指数的相关性。结果显示 NDVI 与  $\text{RX5day}$ ,  $\text{RX1day}$ ,  $\text{TMAXmean}$ ,  $\text{TMINmean}$ ,  $\text{TNx}$ ,  $\text{TNn}$ ,  $\text{TXn}$  和  $\text{TXx}$  有显著的相关性 ( $p < 0.01$ ), 其决定系数  $R^2$  都在  $0.60$  以上。但与  $\text{TN10}$ ,  $\text{TN90}$ ,  $\text{TX10p}$  和  $\text{TX90p}$  的相关性较低 ( $p > 0.05$ ), 其决定系数  $R^2$  都在  $0.1$  以下 (图 4)。

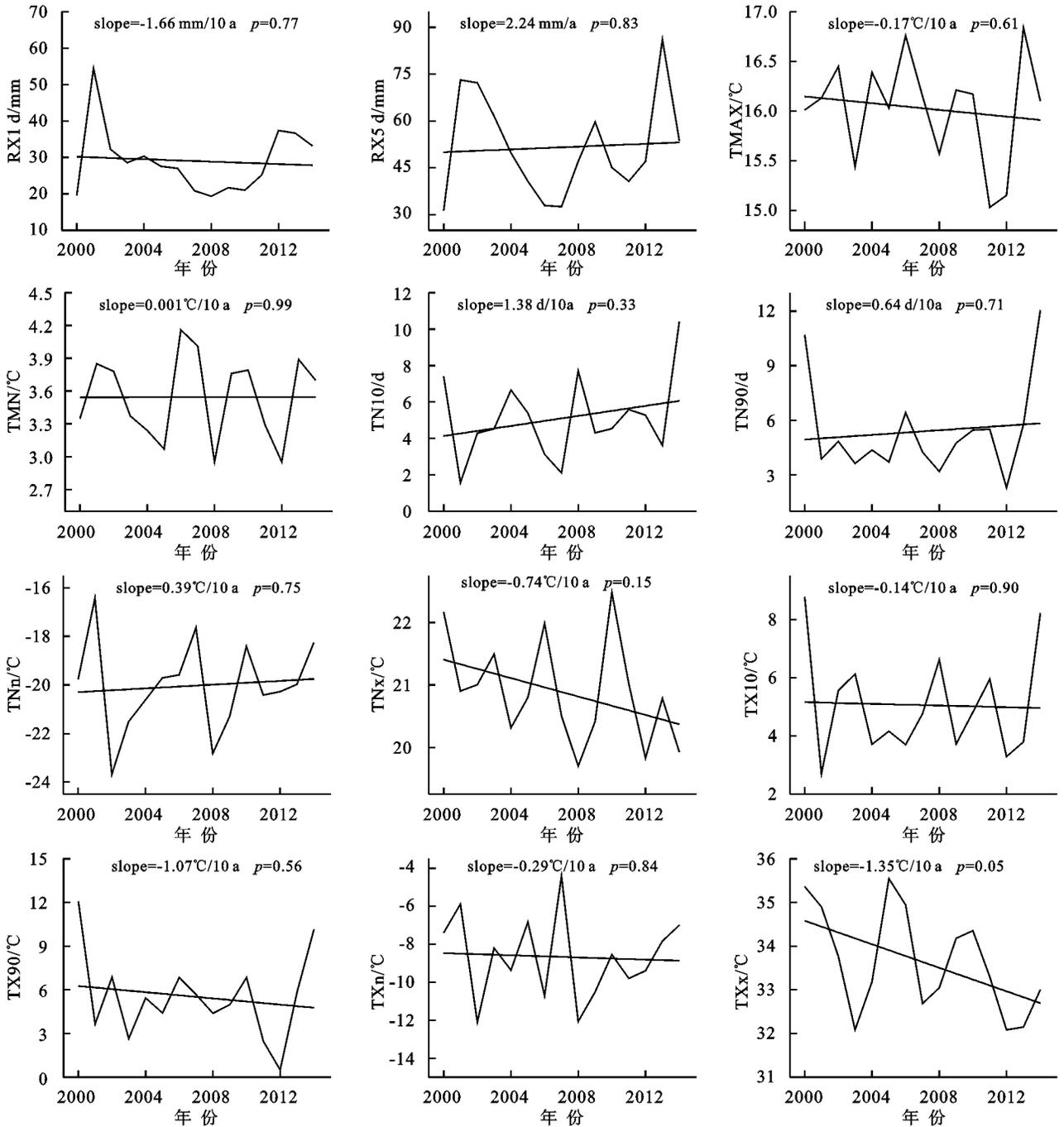


图 3 2000—2014 年陕甘宁地区极端气候指数变化趋势

鉴于此,选取与 NDVI 相关性较好的 8 个极端气候指数,分析不同植被类型的月 NDVI 与极端气候指数的相关性(表 2)。从植被类型来看,不同的植被类型对极端气候指数的响应有所不同,但其 NDVI 与 RX5day, RX1day, TMAXmean, TMINmean, TNx, TNn, TXn 和 TXx 均有显著相关性( $p < 0.01$ )。对草地、灌丛、栽培作物、针叶林和阔叶林而言, RX5day 可以解释植被变化的 66.11%, 63.34%, 65.14%, 57.86% 和 57.31%(表 2)。

## 2.6 不同季节 NDVI 与极端气候指数的关系

考虑到不同的季节 NDVI 对极端气候指数的响

应不同,本文进一步分析了不同季节 NDVI 与极端气候指数的相关性(表 3)。

从表中可以看出,春季和秋季的 NDVI 与极端降水指数(RX1day 和 RX5day)和极端气温指数(TMAXmean, TMINmean, TNn, TNx, TXn 和 TXx)均有显著的相关性( $p < 0.01$ );夏季的 NDVI 仅与 RX1day 和 RX5day 呈显著正相关( $p < 0.05$ ),与 TMAXmean 和 TXx 呈显著负相关( $p < 0.01$ );在冬季,NDVI 与极端降水指数呈现负相关,其中与 RX1day 有显著的相关性( $p < 0.05$ )。

表 2 2000—2014 年陕甘宁地区不同植被类型月 NDVI 与月极端气候指数的相关性

	草地	灌丛	栽培作物	针叶林	阔叶林
RX1day	$y=49.853x^2+42.23x-4.970$ $R^2=0.5759$	$y=68.60x^2-23.56x+3.99$ $R^2=0.5817$	$y=26.44x^2+37.87x-4.72$ $R^2=0.58697$	$y=67.01x^2-38.95x+7.99$ $R^2=0.5471$	$y=53.32x^2-25.04x+5.05$ $R^2=0.5469$
RX5day	$y=161.13x^2+39.18x-4.82$ $R^2=0.6611$	$y=142.63x^2-60.22x+10.83$ $R^2=0.6334$	$y=89.77x^2+42.75x-5.25$ $R^2=0.6514$	$y=121.71x^2-71.88x+15.08$ $R^2=0.5786$	$y=94.42x^2-44.06x+9.15$ $R^2=0.5731$
TMAXmean	$y=-300.96x^2+249.85x-24.98$ $R^2=0.7106$	$y=-65.32x^2+112.8x-19.78$ $R^2=0.8233$	$y=-198.43x^2+196.12x-21.79$ $R^2=0.7261$	$y=-11.00x^2+61.93x-14.92$ $R^2=0.8237$	$y=68.60x^2-23.56x+3.99$ $R^2=0.5817$
TMINmean	$y=-259.06x^2+232.64x-36.21$ $R^2=0.7758$	$y=-40.38x^2+92.03x-28.71$ $R^2=0.8681$	$y=-170.24x^2+182.42x-33.15$ $R^2=0.791$	$y=4.54x^2+46.15x-23.94$ $R^2=0.8605$	$y=-19.10x^2+66.84x-14.10$ $R^2=0.8449$
TNn	$y=-270.37x^2+249.36x-45.68$ $R^2=0.7794$	$y=-25.51x^2+86.79x-35.20$ $R^2=0.8484$	$y=-177.42x^2+195.48x-42.38$ $R^2=0.7949$	$y=19.05x^2+35.14x-28.88$ $R^2=0.8534$	$y=-7.77x^2+43.58x-29.03$ $R^2=0.8639$
TNx	$y=-245.07x^2+213.77x-26.90$ $R^2=0.7371$	$y=-52.08x^2+96.30x-22.33$ $R^2=0.8294$	$y=-162.7x^2+168.69x-24.26$ $R^2=0.7537$	$y=-11.76x^2+58.37x-19.56$ $R^2=0.8154$	$y=-21.06x^2+66.89x-19.29$ $R^2=0.8363$
TXn	$y=-306.59x^2+259.89x-34.70$ $R^2=0.7319$	$y=-55.73x^2+107.39x-27.18$ $R^2=0.8262$	$y=-201.88x^2+203.79x-31.32$ $R^2=0.7456$	$y=-4.60x^2+57.86x-22.40$ $R^2=0.8293$	$y=-8.92x^2+58.41x-20.53$ $R^2=0.8431$
TXx	$y=-265.64x^2+217.01x-12.50$ $R^2=0.5968$	$y=-64.04x^2+103.93x-9.29$ $R^2=0.7097$	$y=-176.61x^2+171.31x-9.89$ $R^2=0.6118$	$y=-8.56x^2+51.81x-3.30$ $R^2=0.706$	$y=-20.28x^2+61.56x-4.04$ $R^2=0.7325$

表 3 不同季节 NDVI 与极端气候指数的相关性

参数	春季	夏季	秋季	冬季
RX1day	0.562**	0.368*	0.642**	-0.242
RX5day	0.565**	0.500**	0.678**	-0.335*
TMAXmean	0.833**	-0.456**	0.911**	0.148
TMINmean	0.878**	0.242	0.927**	0.002
TNn	0.832**	0.194	0.902**	0.049
TNx	0.849**	0.185	0.908**	-0.078
TXn	0.820**	-0.254	0.851**	0.074
TXx	0.767**	-0.437**	0.787**	0.061

注: \*\* 和 \* 分别代表 0.01, 0.05 显著性水平, 下表同。

同时, 本文进一步分析了陕甘宁地区不同季节 14 个气象站点的 NDVI 与极端气候指数的相关性, 具体步骤为如下: (1) 以气象站点为中心, 提取站点周边  $3 \times 3$  像元范围内的 NDVI 均值作为该站点的 NDVI 值; (2) 基于上述结果, 逐站点计算 NDVI 与极端气候指数的相关系数。在春季和秋季, 所有气象站点的 NDVI 与极端气候指数均呈现显著的正相关 ( $p < 0.05$ ); 在夏季, 除洛川站外, 所有气象站点的 NDVI 与降水极端气候指数 (RX1day 和 RX5day) 均呈现正相关, 但是只有 21.43% 和 42.86% 的气象站点通过了 0.05 显著性水平检验, 主要分布在中部地区, 对于 TMINmean, TNn, TNx 和 TXn 极端气温指数来说, 只有 28.57%, 21.43%, 14.19% 和 7.15% 的站点与 NDVI 呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 对 TMAXmean 和 TXx 极端气温指数来说, 除西吉站外, 所有气象站点的 NDVI 与极端气候指数均呈现负相关, 但只有 21.43% 和 28.57% 的站点通过了 0.05 显著性水平检验, 主要分布在北部的榆林等地; 在冬季, 所有站点的 NDVI 与极端降水指数呈负相关, 50% 和 85.71% 的

站点通过了 0.05 显著性水平检验, 对于极端气温指数来看, 所有站点的 NDVI 与 TMAXmean 呈现正相关, 除了西北部的西吉站外, 其他所有站点均未通过 0.05 显著性水平检验, 50%, 64.29%, 28.57%, 92.86% 和 92.86% 的气象站点的 NDVI 与 TMINmean, TNn, TNx, TXn 和 TXx 呈正相关, 但均未通过 0.05 显著性水平检验。

### 2.7 NDVI 与极端气候指数的滞后性分析

由于植被生长对水热条件的改变存在一定的滞后性, 本文进一步分析了 NDVI 与当月、前 1 个月、前 2 个月以及前 3 个月极端气候指数的相关性 (表 4)。从表中可以看出, 陕甘宁地区月 NDVI 与当月、前 1 个月、前 2 个月的极端气候指数均存在显著相关性 ( $p < 0.01$ ), 与前 3 个月的极端气温指数存在显著的相关性 ( $p < 0.05$ ), 与极端降水指数 (RX1day 和 RX5day) 和极端气温指数 (TMAXmean 和 TXx) 前 1 个月的相关性大于当月、前 2 个月以及前 3 个月, 表明该地区的植被对这些极端气候的响应存在滞后性。

表 4 月 NDVI 与当月、前 1 个月、前 2 个月、前 3 个月极端气候指数相关系数

参数	滞后 0 月	滞后 1 月	滞后 2 月	滞后 3 月
RX1day	0.675**	0.756**	0.373**	0.018
RX5day	0.670**	0.803**	0.328**	-0.054
TMAXmean	0.829**	0.869**	0.682**	0.309**
TMINmean	0.877**	0.865**	0.626**	0.219**
TNn	0.881**	0.843**	0.583**	0.156*
TNx	0.850**	0.851**	0.633**	0.249**
TXn	0.843**	0.844**	0.624**	0.231**
TXx	0.757**	0.835**	0.698**	0.373**

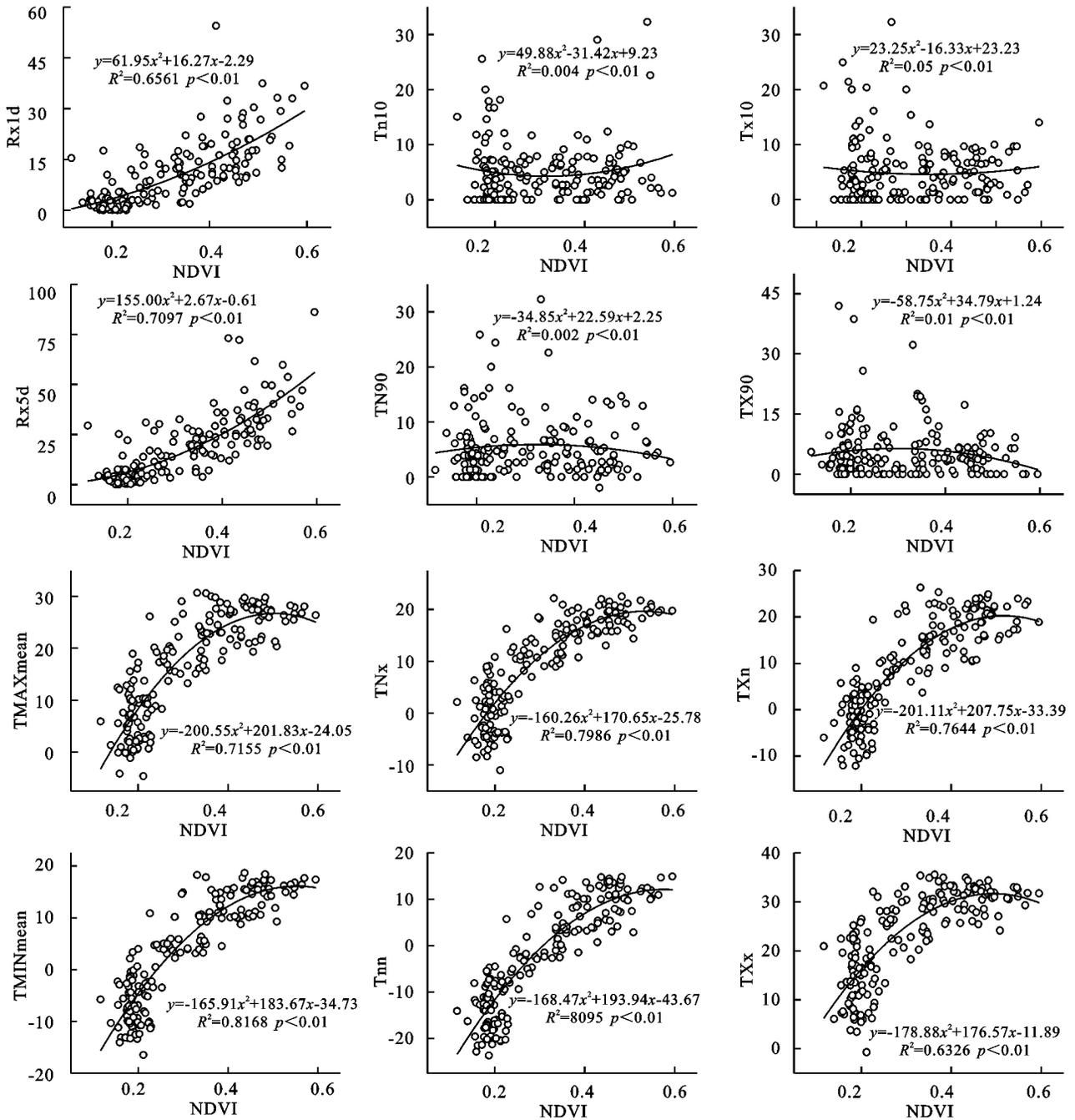


图 4 2000—2014 年陕甘宁地区月 NDVI 与月极端气候指数的相关性

### 3 结论与讨论

(1) 2000—2014 年期间陕甘宁地区植被 NDVI 呈显著增加趋势,其增加速率为  $0.066\%/10\text{ a}$  ( $p<0.001$ )。分植被类型来看,草地、灌丛、栽培植被、针叶林和阔叶林均呈现显著上升的趋势( $p<0.001$ )。

(2) 空间上,陕甘宁地区的植被 NDVI 呈从东南到西北减小的趋势,高值区主要分布在东南部的子午岭、黄龙山等山区,低值区主要分布在西北部的榆林等地。植被 NDVI 整体呈上升的趋势,其中呈极显著上升和显著上升的区域分别占  $60.70\%$  和  $14.99\%$ 。

(3) 极端气候指数中, RX5day, TMINmean,

TN10, TN90 和 TNn 呈现增加的趋势、其他极端气候指数呈现下降的趋势,除 TXx 外,其他所有极端指数的变化均未通过  $0.05$  置信水平检验。

(4) 相关分析表明,在月尺度上, NDVI 与 RX5day, RX1day, TMAXmean, TMINmean, TNx, TNn, TXn 和 TXx 存在显著相关性,从植被类型来看,不同的植被类型对的 NDVI 与 RX5day, RX1day, TMAXmean, TMINmean, TNx, TNn, TXn 和 TXx 均有显著相关性。

(5) 滞后性分析表明陕甘宁地区植被月 NDVI 与极端降水指数(RX1day 和 RX5day)和极端气温指数(TMAXmean 和 TXx)前 1 个月的相关性大于当

月、前2个月以及前3个月,表明该地区的植被对这些极端气候的响应存在一定的滞后性。

极端气候事件对植被的影响是一个非常复杂的过程,目前已经受到国内外学者的广泛关注<sup>[10,22-24]</sup>。相关分析表明,在月尺度,NDVI与RX1day, RX5day, TMAXmean, TMINmean, TNn, TNx, TXn和TXx有极强的相关性,这与Tao等在鄱阳湖流域的研究结果类似<sup>[25]</sup>。在不同的季节,NDVI与极端气候指数相关性不同,春季和秋季的相关性高于冬季和夏季,主要是由于温度过高会加速地表蒸散发的过程,使得土壤水分的减小,抑制植被的生长<sup>[26]</sup>。此外,随着近年来陕甘宁地区农业生产水平的逐步提高,其生活方式也发生了改变,人口对该区域生态环境的压力有所减轻,在没有大的气候波动的情况下,该地区的植被未来将呈现平稳增长的趋势<sup>[14]</sup>。但区域气候模式表明,2011—2050年陕甘宁地区会出现暖干化的变化趋势,因此需要进一步评估未来气候场景下的极端气候事件对植被的影响,明确极端气候事件与植被的相互影响机制。

#### 参考文献:

- [1] 郑景云,郝志新,方修琦,等. 中国过去2000年极端气候事件变化的若干特征[J]. 地理科学进展,2014,33(1):3-12.
- [2] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等. 近53年内蒙古寒潮时空变化特征及其影响因素[J]. 地理学报,2014,69(7):1013-1024.
- [3] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts [J]. Science, 2000,289(5487):2068-2074.
- [4] Liao H, Chang W. Integrated assessment of air quality and climate change for policy-making: highlights of IPCC AR5 and research challenges[J]. National Science Review, 2014,1(2):176-179.
- [5] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等. 1965—2013年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异[J]. 地理研究,2016,35(4):639-652.
- [6] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. Science, 2003,300(5625):1560-1563.
- [7] Ma Z, Peng C, Zhu Q, et al. Regional drought-induced reduction in the biomass carbon sink of Canada's boreal forests[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012,109(7):2423-2427.
- [8] Ding M, Zhang Y, Liu L, et al. The relationship between NDVI and precipitation on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2007,17(3):259-268.
- [9] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等. 2000—2014年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报,2015,70(5):705-716.
- [10] John R, Chen J, Ou-Yang Z T, et al. Vegetation response to extreme climate events on the Mongolian Plateau

- from 2000 to 2010 [J]. Environmental Research Letters, 2013,8(3):33-35.
- [11] Hilker T, Lyapustin A I, Tucker C J, et al. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the Amazon [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014,111(45):16041-16046.
- [12] Stocker T F. Climate change 2013: The physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge University Press, 2014.
- [13] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. Climate extremes and the carbon cycle [J]. Nature, 2013,500(7462):287-295.
- [14] 李双双,延军平,万佳. 近10年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(7):960-970.
- [15] Li S, Yang S, Liu X, et al. NDVI-based analysis on the influence of climate change and human activities on vegetation restoration in the Shaanxi—Gansu—Ningxia region, Central China [J]. Remote Sensing, 2015,7(9):11163-11182.
- [16] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等. 1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学报,2015,35(16):5331-5342.
- [17] 王琼,张明军,王圣杰,等. 1962—2011年长江流域极端气温事件分析[J]. 地理学报,2013,68(5):611-625.
- [18] 李双双,杨赛霓,刘宪锋. 1960—2013年秦岭—淮河北极端降水时空变化特征及其影响因素[J]. 地理科学进展,2015,34(3):354-363.
- [19] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968,63(324):1379-1389.
- [20] Kendall M G. Rank correlation methods [J]. British Journal of Psychology, 1984,25(1):86-91.
- [21] Peng J, Liu Z, Liu Y, et al. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent [J]. Ecological Indicators, 2012,14(1):28-39.
- [22] 赵舒怡,宫兆宁,刘旭颖. 2001—2013年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J]. 地理学报,2015,70(5):717-729.
- [23] 张彬,朱建军,刘华民,等. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J]. 植物生态学报,2014,38(9):1008-1018.
- [24] Liu G, Liu H, Yin Y. Global patterns of NDVI-indicated vegetation extremes and their sensitivity to climate extremes [J]. Environmental Research Letters, 2013,8(2):025009.
- [25] Tan Z, Tao H, Jiang J, et al. Influences of climate extremes on NDVI (normalized difference vegetation index) in the Poyang Lake Basin, China [J]. Wetlands, 2015,35(6):1033-1042.
- [26] 周德成,赵淑清,朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响:以陕西省安塞县为例[J]. 自然资源学报,2011,26(11):1866-1878.