

黄土高原地区植被变化及其对极端气候的响应

韩丹丹^{1,3}, 穆兴民^{1,2}, 高鹏^{1,2}, 赵广举^{1,2}, 孙文义^{1,2}, 田鹏^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100000)

摘要: [目的] 研究黄土高原地区植被变化及其对极端气候的响应, 为减缓和应对气候异常提供科学依据。[方法] 基于 1982—2017 年遥感影像数据和气象数据, 采用趋势分析、相关分析等方法, 研究黄土高原地区植被时空变化及其对极端气候的响应。[结果] 1982—2017 年期间, 黄土高原 NDVI 以每年 0.37% 的速率呈显著的增加趋势 ($p < 0.01$); 空间上, NDVI 呈现从西北到东南递增的空间分布格局。极端气候指数变化中, 极端气温指数变化趋势较为一致, 即表征极高温事件的极端气温指数呈极显著的增加趋势, 表征极低温事件的指数呈现显著的下降的趋势, 而极端降水指数未发生显著变化。NDVI 年际变化与极端气温指数 FD_0 , $TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{10p} , TN_{90p} , TR_{20} , SU_{25} 均呈极显著相关 ($p < 0.01$); 四季 NDVI 变化与极端降水指数均未表现出明显的相关性, 但与极端气温指数显著相关且春季和夏季的相关性高于秋季和冬季; 月尺度上, NDVI 与极端降水指数 (RX_{1day} , RX_{5day}) 和极端气温指数 ($TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{90p} , TX_x , TN_n) 呈显著的相关性 ($p < 0.01$)。NDVI 与极端气温指数 $TMAX_{mean}$, TN_{10p} , TN_{90p} , TX_x 前 1 个月的相关性大于当月、前 2 个月、前 3 个月的相关性。[结论] 黄土高原地区 NDVI 呈显著增加的趋势, 年际和月际 NDVI 变化与极端气温指数存在相关性, 而与极端降水指数均未表现出明显的相关, 且黄土高原地区的植被覆盖变化对极端气候的响应存在一定的滞后性。

关键词: 黄土高原地区; NDVI; 极端气候指数; 相关性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)02-0247-08

中图分类号: S162.1

文献参数: 韩丹丹, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土高原地区植被变化及其对极端气候的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 247-254. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.036; Han Dandan, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Dynamic changes of vegetation in Loess Plateau and its response to extreme climate [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 247-254.

Dynamic Changes of Vegetation in Loess Plateau and Its Response to Extreme Climate

Han Dandan^{1,3}, Mu Xingmin^{1,2}, Gao Peng^{1,2}, Zhao Guangju^{1,2}, Sun Wenyi^{1,2}, Tian Peng^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: [Objective] The dynamic changes of vegetation on the Loess Plateau and its response to extreme climate were studied, in order to provide scientific basis for mitigating and adapting to climate anomaly. [Methods] Based on the remote sensing data and meteorological data from 1982 to 2017, the study used Mann-Kendall trend test and correlation analysis method to analyze temporal and spatial changes of vegetation in Loess Plateau and its response to extreme climate. [Results] NDVI exhibited a significant increasing trend with an annual rate of 0.37% ($p < 0.01$) from 1982 to 2017, and increased from northwest to southeast on the Loess Plateau. As for the change of extreme climate, the variation trend of extreme temperature was relatively consistent. The extreme high temperature events showed a significant increasing trend, and the

收稿日期: 2019-09-04

修回日期: 2019-10-25

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄土高原水土流失治理与生态产业协同发展技术集成与模式”(2016YFC0501707); 科技基础性工作专项“生态工程与水沙变化调查”(2014FY210120)

第一作者: 韩丹丹(1993—), 女(汉族), 陕西省榆林市人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文及水土保持。Email: handandan17@mails.ucas.ac.cn.

通讯作者: 高鹏(1976—), 男(汉族), 陕西省扶风县人, 博士, 研究员, 主要从事生态水文及水土保持研究。Email: gaopeng@ms.iswc.ac.cn.

extreme low temperature events showed an extremely significant downward trend. However, the extreme precipitation index did not change significantly. The correlation analysis between extreme climate index and NDVI showed that the interannual variation of NDVI was significantly correlated with extreme temperature index FD_0 , $TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{10p} , TN_{90p} , TR_{20} and SU_{25} ($p < 0.01$). There was no significant correlation between NDVI changes and extreme precipitation index in all seasons. However, NDVI showed a significant correlation with extreme temperature index, moreover, the correlation of spring and summer was higher than that autumn and winter. On the monthly scale, NDVI was significantly correlated with extreme precipitation index (RX_{1day} , RX_{5day}) and extreme temperature index ($TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{90p} , TX_x , TN_n) ($p < 0.01$). The correlation between NDVI and extreme temperature index $TMAX_{mean}$, TN_{10p} , TN_{90p} and TX_x a lag of one month was greater than that current month, a lag of two months and a lag of three months. [Conclusion] The NDVI showed a significant increasing trend. The interannual and monthly NDVI changes were correlated with the extreme temperature index, and both showed a significant correlation with the extreme precipitation index. Moreover, the response of vegetation cover change in the Loess Plateau region to extreme climate has a certain lag.

Keywords: the Loess Plateau; NDVI; extreme climate index; correlation

随着全球变暖,极端气候频发,强度增强,其对人类生产生活具有重大影响。IPCC 第 5 次评估报告指出,全球平均气温在 1880—2012 年期间升高了 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。极端气候事件是指特定时段内某类气候要素统计量值显著偏离平均值、且超出其观测统计量值区间上下限的阈值的事件^[2]。与平均态相比,极端气候具有偶然性、反常性的特点,且破坏程度高、灾难性强,地域差异性更为显著^[3]。黄土高原自身复杂的地形影响和长期人类活动的干扰,极端气候对植被的影响比平均态气候的影响更为明显,开展黄土高原植被动态变化及其对极端气候的影响对于该地区生态环境具有重要意义。植被是连接土壤、水和大气纽带,在全球变化中有着重要的作用。目前,前人研究多集中在各个区域平均态气候和人类活动两个因素与植被的关系,认为气候为植被生长的主要驱动因子,降水通常影响干旱半干旱地区的植被,而气温一般有利于温带或寒温带地区的植被生长^[4-6]。极端事件的频发会对植被的生长产生重要的影响,导致植被覆盖状况的改变。近年来,关于植被动态变化与极端降水和气温之间的相关性的认识有了很大的提升。例如,赵安周等^[7]研究表明,春季和秋季 NDVI 与极端气候指数均有显著的相关性。西北干旱区极端气温和降水的增加趋势明显要高于均态气温和降水,且该区域暖湿化和极端化趋势更为显著^[8]。杨方兴^[9]研究发现,内蒙古区域植被 NDVI 与极端降水指数呈显著的相关性,而与极端气温指数未发现明显的相关性。不同区域不同尺度下极端气温和降水与植被的关系具有差异性。黄土高原地区植被 NDVI 与极端气候之间的关系尚不明确。因此,本文利用

1982—2017 年黄土高原遥感数据和 87 个气象站日降雨、日最高温和日最低温数据,研究黄土高原植被覆盖度时空变化及其对极端气候的响应,为科学地减缓和应对气候异常提供依据,以促进黄土高原生态环境和社会经济的可持续发展。

1 研究区概况

黄土高原地区位于中国中西部($100^{\circ}54'$ — $114^{\circ}33'E$, $33^{\circ}43'$ — $41^{\circ}16'N$),包括太行山以西,日月山以东,秦岭以北,长城以南的区域,海拔 $800\sim 2\ 000\text{ m}$,面积约为 $6.24\times 10^5\text{ km}^2$ 。地势西北高东南低,属于干旱大陆性季风气候,年均气温 $4.3\sim 14.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $150\sim 750\text{ mm}$ 。植被类型从东南到西北呈带状分布,依次为森林植被带、森林草原带、典型草原植被带、荒漠草原植被带、草原化荒漠带。降雨集中且多暴雨、土质疏松、植被覆盖低、人类活动以及不合理的土地利用等原因,使得黄土高原地区水土流失严重,生态环境脆弱。

2 研究资料与方法

2.1 数据来源与处理

本研究采用 1982—1999 年的 GIMMS 数据产品和 2000—2017 年 MODIS 月最大合成(MVC)数据产品,空间分辨率为 8 km 和 500 m 。数据来源于美国国家航天航空局(NASA),原始数据已经过辐射校正、几何纠正等预处理(<https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT>)。运用 MRT (MODIS reprojection tools)进行格式、投影的转化和裁剪,并利用均值法获取各月及历年值。气象数据采用 1982—2017 年黄

土高原 87 个气象站日降水与日平均气温、日最高气温和日最低气温数据,数据来源于国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/>)。

2.2 研究方法

极端气候指数利用 RClimDex 模型得到各个气象站的极端气温和极端降水指数,该模型可以分辨错误的气象数据,指数涵盖指标范围广^[10]。本文所取指数包括 3 个极端降水指数和 9 个极端气温指数由 ETCCDMI(expert team on climate change detection and indices)推荐,均已涵盖极端气温和极端降水长期与短期的边缘化与极端态^[11](表 1)。采用气象学

标准对季节划分,分别为春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12 月至次年 2 月)。利用 Mann-Kendall(M-K)趋势分析 1982—2017 年黄土高原地区 NDVI 和极端气候指数的趋势变化,运用相关分析研究极端气候指数与 NDVI 的相关性。M-K 趋势检验方法被广泛使用于气象、水文数据时间序列分析中,其优点在于它不需要样本服从一定的分布,也不受少数异常值的干扰^[12];其检验统计量若为正,表示序列呈增加趋势,为负表示序列呈减少趋势,显著性水平为 0.05 时检验统计量临界值为 ± 1.96 ,显著性水平为 0.01 时为 ± 2.58 ^[13]。

表 1 本研究选取的极端气候指数

项目	指数代码	极端指数	指标定义
极端降水指数	RX _{1day}	月最大降水量/mm	每月最大 1 d 降水量
	RX _{5day}	连续 5 d 最大降水量/mm	每月连续 5 d 最大降水量
	R ₂₅	暴雨日数/d	每年日降水量 ≥ 25 mm 的总日数
极端气温指数	FD ₀	霜冻日数/d	年内日最低温度 < 0 °C 的天数
	SU ₂₅	夏季日数/d	年内日最低温度 > 25 °C 的天数
	TR ₂₀	热夜指数/d	年内日最低气温 > 20 °C 的天数
	TX _r	日最高温度的极高值/°C	每月日内最高气温的最大值
	TN _n	日最低气温的极低值/°C	每月日内最低气温的最小值
	TN _{10p}	冷夜日数/d	日最低气温 $< 10\%$ 分位值的天数
	TN _{90p}	暖夜日数/d	日最低气温 $> 90\%$ 分位值的天数
	TMAX _{mean}	最高气温/°C	日最高气温的平均值
	TMIN _{mean}	最低气温/°C	日最低气温的平均值

3 结果与分析

3.1 NDVI 时空变化分析

黄土高原 1982—2017 年 NDVI 多年平均值为 0.337,1982 年最小,为 0.285,2014 年最大,为 0.442。1982—2017 年 NDVI 呈显著增加的趋势,上升速率为每年 0.37% ($R^2 = 0.75, p < 0.01$) (图 1)。黄土高原 NDVI 变化序列变化可分为两个阶段:1982—1999 年 NDVI 值较低,且增长幅度较小,每年以 0.09% 的速率增长;2000—2017 年 NDVI 值相对增长幅度较大,每年以 0.41% 的速率增长。黄土高原地区 1982—2017 年 NDVI 均值呈从西北到东南递增的趋势(图 2),高值区主要分布在东南部的子午岭山区、黄龙山林区等地,低值区主要分布在榆林西北部、内蒙古、银川的东南部等地。

其中,NDVI 值显著增加区域主要分布在毛乌素沙地西部和中东部、贺兰山、鄂尔多斯高原西北部以及山西吕梁山区和太行山区。通过选取 1982,1999 和 2017 年 3 个年份的植被覆盖覆盖变化进行分段研究,1982—2017 年黄土高原地区植被覆盖状况整体好转,

低植被覆盖面积呈显著减少趋势,高植被覆盖面积呈逐渐增长趋势。其中,1999—2017 年变化更明显。

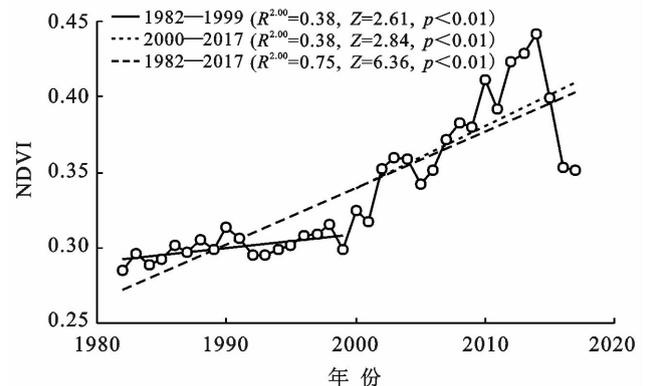


图 1 1982—2017 年黄土高原 NDVI 年际变化

3.2 极端气候指数变化趋势

黄土高原地区极端气温指数变化呈现较为一致的变化趋势,表征极高温事件的极端气温指数 SU₂₅, TMAX_{mean}, TMIN_{mean}, TN_{90p}, TR₂₀, TX_r, TN_n 呈极显著的增加趋势,增加速率分别为 0.482 d/a, 0.047 °C/a, 0.052 °C/a, 0.37 d/a, 0.3 d/a, 0.048 d/a, 0.033 d/a; 表

征极低温事件的 FD_0 , TN_{10p} 呈现显著的下降的趋势, 其下降速率分别 0.580, 0.285 和 0.185 d/a, 表明该地区气温在升高。而相对于极端气温指数, 极端降水

指数 RX_{1day} , RX_{5day} , R_{25} 未发生明显的变化。其中除极端降水指数 RX_{1day} , RX_{5day} , R_{25} 外, 其他的极端指数的趋势变化均通过 0.01 显著性水平(表 2)。

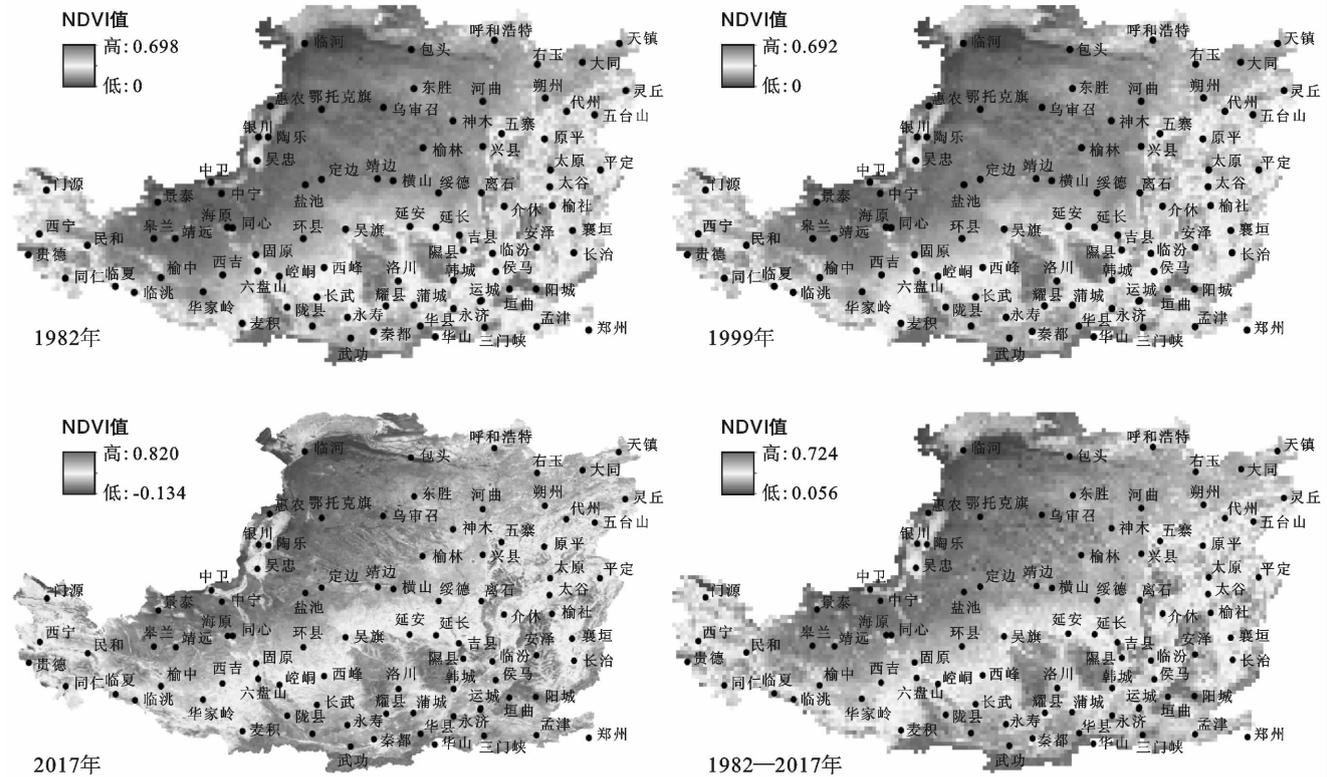


图 2 黄土高原 1982—2017 年 NDVI 空间变化特征

表 2 黄土高原地区 1982—2017 年极端气候指数趋势检验

极端气候指数	拟合方程	r^2	z 值	显著性水平
RX_{1day}	$y=0.11x-172.34$	0.06	1.70	不显著
RX_{5day}	$y=0.14x+71.59$	0.02	0.09	不显著
R_{25mm}	$y=0.02x+2.96$	0.06	1.06	不显著
SU_{25}	$y=0.48x+88.24$	0.42	3.71	0.01
FD_0	$y=-0.58x+1296.78$	0.64	-5.67	0.01
TR_{20}	$y=0.3x+11.50$	0.42	3.94	0.01
$TMAX_{mean}$	$y=0.05x+15.21$	0.47	4.34	0.01
$TMIN_{mean}$	$y=0.05x+2.88$	0.69	5.52	0.01
TN_{10p}	$y=-0.29x+17.86$	0.58	5.04	0.01
TN_{90p}	$y=0.37x+5.02$	0.67	5.54	0.01
TN_n	$y=0.03x-84.44$	0.04	1.02	不显著
TX_r	$y=0.05x+33.98$	0.23	2.95	0.01

3.3 NDVI 与极端气候指数的关系

3.3.1 年际变化 NDVI 与极端气候指数的关系 植被指数 NDVI 与极端气候指数 FD_0 , $TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{10p} , TN_{90p} , TR_{20} 相关系数均在 0.46 以上, 达到 0.01 显著性水平相关(表 3); 与 SU_{25} 相关系数介于 0.35~0.45 之间, 达 0.05 显著的相关性; 而与

极端气候指数 RX_{1day} , RX_{5day} , R_{25} , TN_n 相关系数均在 0.30 以下, 未达到显著性水平(表 3)。

表 3 研究区年际 NDVI 与极端气候指数的相关系数

极端指数	NDVI	极端指数	NDVI	极端指数	NDVI
FD_0	-0.634**	$TMAX_{mean}$	0.466**	TN_{10p}	0.547**
R_{25}	0.196	$TMIN_{mean}$	0.639**	TN_{90p}	0.661**
RX_{1day}	0.137	SU_{25}	0.421*	TN_n	0.059
RX_{5day}	0.123	TR_{20}	0.479**	TX_r	0.296

注: *, ** 分别表示在 0.05, 0.01 水平上显著相关。下同。

3.3.2 不同季节 NDVI 与极端气候指数的关系 植被随着时节变化而变化, 需进一步探讨不同季节的 NDVI 与极端气候指数的关系。春季的 NDVI 与极端气候指数 $TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{10p} , TN_{90p} , TN_n , TX_r 相关系数介于 0.35~0.70 之间, 达到 0.01 显著性水平; 夏季 NDVI 与极端气候指数 $TMIN_{mean}$, TN_{10p} , TN_{90p} , TN_n , TX_r 相关系数均在 0.37 以上, 达 0.01 显著性水平; 秋季的 NDVI 仅与 $TMIN_{mean}$, TN_{90p} , TN_n 呈现出相关性 ($p < 0.05$); 在冬季, 植被指数 NDVI 与极端气候指数 TX_r 呈现出显著的相关性 ($p < 0.05$)。而在季节变化中, 极端降水指数均未与各个季节表现出明显的相关性(表 4)。

3.3.3 不同月份 NDVI 与极端气候指数的关系 由于霜冻日数(FD_0)、暴雨日数(R_{25})、夏季日数(SU_{25})

和热夜指数(TR_{20})没有月值,因此,选取其余 8 个极端指数与 NDVI 做相关散点分布(图 3)。

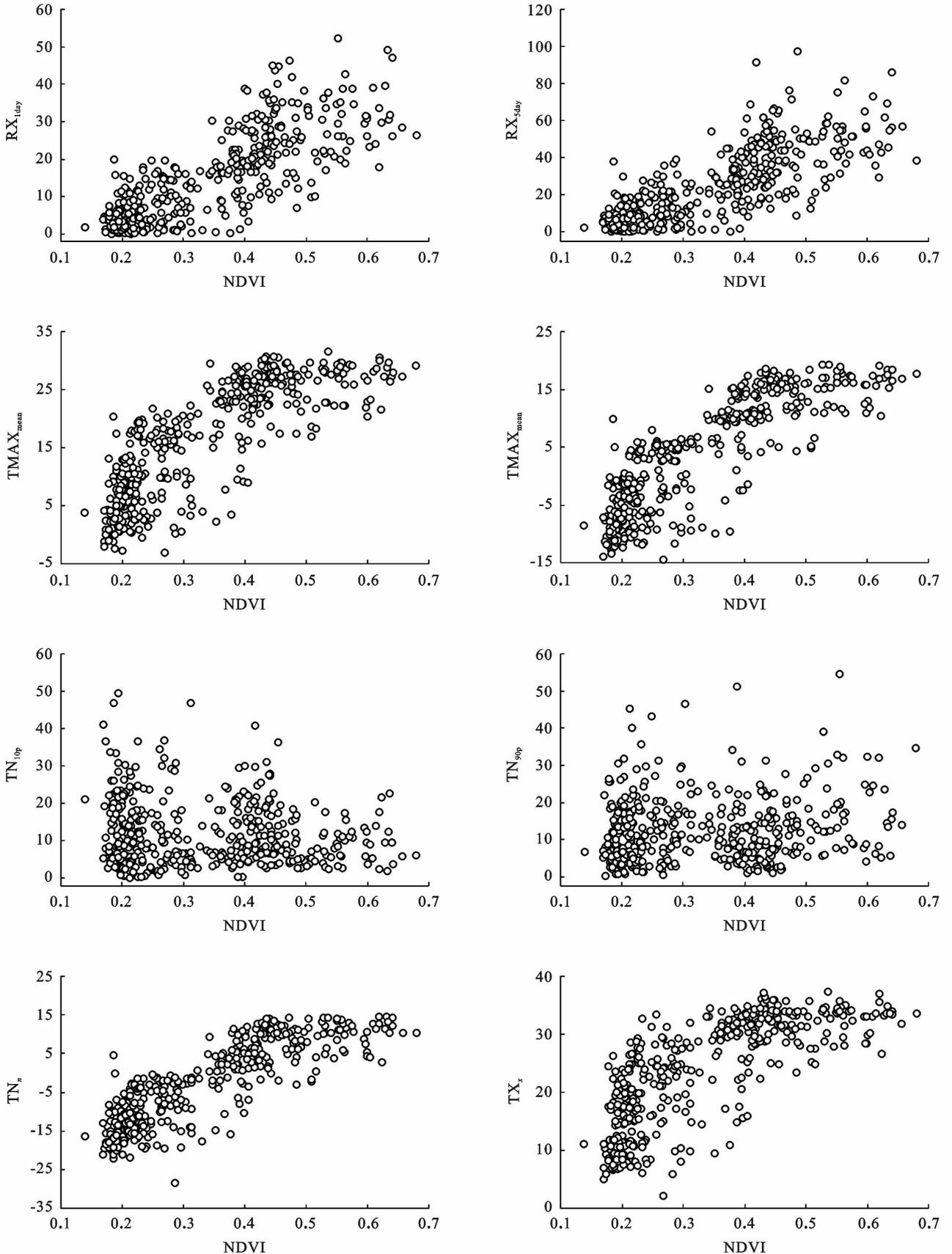


图 3 黄土高原地区 1982—2017 年月 NDVI 与月极端气候指数散点分布

从图 3 可以得出, NDVI 与极端降水指数 RX_{1day} , RX_{5day} 呈正相关, 与极端气温指数 $TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{90p} , TX_x , TN_n 呈显著的正相关。而 NDVI 仅与极端气温指数 TN_{10p} 相关性较低。NDVI 与极端降水指数 RX_{1day} 具有相关性的月份主要集中在 5—9 月, 而与 RX_{5day} 仅在 9 月份呈显著的相关性 ($p < 0.05$)。与极端气候指数 $TMIN_{mean}$, TN_{10p} , TN_{90p} , TN_n 在 4, 6, 7 月中通过显著性水平 ($p < 0.01$)。其中, 在 4, 7 月与 NDVI 具有相关性的指数最多有 5 个, 其次在 6, 9 月有 4 个指数, 在 12 月 NDVI 与所有极端指数均未表

现出显著的相关性(表 5)。

表 4 研究区不同季节 NDVI 与极端气候指数的相关性

极端指数	春季	夏季	秋季	冬季
RX_{1day}	0.163	0.123	0.250	-0.029
RX_{5day}	0.107	0.125	0.284	-0.002
$TMAX_{mean}$	0.548**	0.327	0.210	0.286
$TMIN_{mean}$	0.676**	0.561**	0.438**	0.293
TN_{10p}	-0.551**	-0.473**	-0.333	-0.247
TN_{90p}	0.650**	0.547**	0.427*	0.297
TN_n	0.408*	0.376*	0.404*	0.127
TX_x	0.499**	0.414*	0.063	0.413*

表 5 1982—2017 年黄土高原地区月 NDVI 与月极端气候指数的关系系数

月份	极端指数							
	RX_{1day}	RX_{5day}	$TMAX_{mean}$	$TMIN_{mean}$	TN_{10p}	TN_{90p}	TN_n	TX_x
1 月	-0.314	-0.294	0.307	0.248	-0.142	0.272	-0.031	0.345*
2 月	0.037	0.065	0.388*	0.334*	-0.307	0.290	0.299	0.440**
3 月	-0.086	-0.059	0.481**	0.350*	-0.236	0.418	0.312	0.474**
4 月	0.226	0.216	0.455**	0.568**	-0.484**	0.448**	0.340**	0.314
5 月	0.344*	0.054	0.070	0.324	-0.098	0.299	0.180	-0.077
6 月	0.445**	0.256	0.182	0.472**	-0.378**	0.443**	0.238	0.229
7 月	0.379*	0.121	0.183	0.460**	-0.448**	0.368**	0.535**	0.169
8 月	0.322	0.022	0.170	0.444**	-0.245	0.422*	0.066	0.358**
9 月	0.547**	0.378*	0.010	0.424*	-0.203	0.396*	0.190	0.016
10 月	-0.092	-0.103	0.378*	0.308	-0.327	0.257	0.391*	0.175
11 月	0.143	0.127	0.111	0.308	-0.196	0.311	0.348*	-0.178
12 月	-0.152	-0.105	0.074	0.074	-0.161	0.012	0.066	0.008

3.3.4 滞后性分析 黄土高原地区月 NDVI 与当月、前 1 个月、前 2 个月极端气候指数 RX_{1day} , RX_{5day} , $TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{10p} , TN_{90p} , TN_n , TX_x 均表现出显著的相关性 ($p < 0.01$), 而与前 3 个月极端指数呈现不同程度的相关性 ($p < 0.05$)。NDVI 与前 3 个月极端降水指数 (RX_{1day} , RX_{5day}) 均无显著的相关性(表 6)。与极端气温指数 $TMAX_{mean}$, TN_{10p} , TN_{90p} , TX_x 前 1 个月的相关性大于当月、前 2 个月、前 3 个月的相关性, 表明黄土高原地区的植被覆盖变化对这些极端气候指数的响应存在一定的滞后性。

表 6 月 NDVI 与当月、前 1 个月、前 2 个月、前 3 个月极端气候指数的相关系数

极端气候指数	当月	滞后 1 月	滞后 2 月	滞后 3 月
RX_{1day}	0.810**	0.763**	0.488**	0.089
RX_{5day}	0.800**	0.707**	0.403**	0.011
$TMAX_{mean}$	0.818**	0.849**	0.661**	0.303**
$TMIN_{mean}$	0.850**	0.849**	0.625**	0.242**
TN_{10p}	-0.111*	-0.130**	-0.115**	-0.115*
TN_{90p}	0.135**	0.144**	0.144**	0.140**
TN_n	0.855**	0.847**	0.608**	0.214**
TX_x	0.765**	0.827**	0.685**	0.365**

4 讨论

4.1 NDVI 时空动态变化分布

黄土高原自身复杂的地形影响和长期人类活动的干扰, 如: 乱砍乱伐、过度开垦土地等。导致黄土高原水土流失严重、生态环境脆弱。植被覆盖状况在区域调节气候、改变水土流失扮演着重要角色, 也是衡量土壤侵蚀的重要指标^[14]。1982—2017 年, 黄土高原地区 NDVI 总体呈上升趋势, 且在 1999 年后, 植被 NDVI 增长幅度显著增大, 这与 Sun、张翀等人^[15-16]研究黄土高原植被呈显著增长的趋势结果一致。在空间分布特征上, 黄土高原植被覆盖呈西北到东南递增的趋势, 表明东南部植被覆盖状况比西北部好, 且从不同时间尺度看, 黄土高原子午岭区、黄龙山林区、毛乌素沙地西部 NDVI 值显著增加。影响植被生长的主要因素可分为气候和人类活动。中国政府在 1999 年以后进行大规模的以退耕还林还草为主的植被恢复工程, 使得黄土高原地区植被覆盖在一定程度上得到了改善^[17]。黄土高原地区水资源短缺, 气候环境恶劣。因此, 在气候因素中, 主要是降水和气

温与植被生长有着密切联系,降水与温度主要调节植被年内生长规律,对植被生长有着较大的贡献。

4.2 NDVI 对极端气候的响应

本文采用 12 个极端气候指数,其中表征极高温事件的指数 (SU_{25} , $TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{90p} , TR_{20} , TX_x , TN_n) 呈极显著的增加趋势,表征极低温事件的指数 (FD_0 , TN_{10p}) 均呈现下降的趋势,表明近几十年来黄土高原地区气温在上升,变暖明显。21 世纪以来,全球变暖明显,绝大部分地区夏季温度更高,冬季气温回暖,暴雨事件增多^[18-20]。植被与极端气候指数的关系随季节变化而变化,具有明显的季节依赖性,二者之间的相关主要出现在植被的生长季^[21]。在不同的季节,NDVI 与极端气候指数的相关性不同,春季和夏季的相关性高于秋季和冬季,主要是因为秋季有效能量下降,植物代谢减缓,冬季温度偏低,降水偏少,从而抑制植被生长^[22]。

极端气候不同于普通气候变化,具有突发性,其发生会对生态环境和人类生活造成不利影响。植被是陆地生态系统重要的组成部分,也是气候变化中最为敏感的部分。黄土高原地区植被季节变化明显,降雨集中且多暴雨,主要集中在 6—9 月^[23]。相关分析表明,在年际变化中,NDVI 主要与极端气温指数 ($TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{90p} , TX_x , TN_n) 具有显著的相关性 ($p < 0.01$),而在月尺度上,NDVI 与极端降水指数 (RX_{1day} , RX_{5day}) 和极端气温指数 ($TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{90p} , TX_x , TN_n) 呈现出显著的相关性 ($p < 0.01$)。极端降水指标 RX_{1day} 和 RX_{5day} 仅表示一段时期的降水量,与均态降水不同,可能有其他因素影响二者相关性,例如太阳辐射、城市化等,因此,在月尺度上 NDVI 与极端降水指数呈显著的相关性。NDVI 对极端气候指数的响应特征在不同时间尺度相关性不同^[24-26]。同时,考虑推迟的 1,2 和 3 月情况下,NDVI 与极端降水指数未表现出显著的相关性,而与极端气温表现出明显的滞后性;且 NDVI 与极端气温指数 $TMAX_{mean}$, TN_{10p} , TN_{90p} , TX_x 前 1 个月的相关性大于当月、前 2 个月、前 3 个月的相关性,说明植被变化对极端气候的响应具有一定滞后性^[27-28]。植被—气候的关系是一个复杂的系统,植被的变化是一个动态变化的过程,仍需进一步评估植被变化对极端气候的响应机制。

5 结论

(1) 1982—2017 年黄土高原 NDVI 呈显著增加的趋势,以每年 0.37% 的幅度增加 ($p < 0.01$),且空间上呈从西北到东南递增的趋势。

(2) 极端气候指数变化中,极端气温指数变化趋势较为一致,即表征极端高温事件的指数 (SU_{25} , $TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{90p} , TR_{20} , TX_x , TN_n) 呈极显著的增加趋势,表征极低温事件的指数 (FD_0 , TN_{10p}) 均呈现下降的趋势,极端降水指数未发生明显变化。

(3) NDVI 年际上与极端气温指数 ($TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{90p} , TX_x , TN_n) 显著相关 ($p < 0.01$);月尺度上,NDVI 与极端降水指数 (RX_{1day} , RX_{5day}) 和极端气温指数 ($TMAX_{mean}$, $TMIN_{mean}$, TN_{90p} , TX_x , TN_n) 显著相关 ($p < 0.01$);季节尺度,NDVI 与极端降水指数未表现出明显相关性,而与极端气温指数显著相关;且春季和夏季的相关性高于秋季和冬季。

(4) 黄土高原地区 NDVI 与极端气温指数 $TMAX_{mean}$, TN_{10p} , TN_{90p} , TX_x 前 1 个月的相关性大于当月、前 2 个月、前 3 个月的相关性,说明植被变化对极端气候的响应具有一定滞后性。

[参 考 文 献]

- [1] 黄强,陈子燊. 全球变暖背景下珠江流域极端气温与降水事件时空变化的区域研究[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8):956-967.
- [2] 郑景云,郝志新,方修琦. 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.
- [3] D. Wagner. Scenarios of extreme temperature events [J]. Climate Change, 1996, 33:385-407.
- [4] 郭敏杰. 基于 NDVI 的黄土高原地区植被覆盖度对气候变化响应及定量分析[D]. 陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2014.
- [5] 孙红雨,王长耀,牛铮,等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系:基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报, 1998, 2(3):204-210.
- [6] 姚雪茹. 鄂尔多斯高原植被变化及其与气候、人类活动的关系[D]. 内蒙古 呼和浩特:内蒙古大学, 2012.
- [7] 赵安周,张安兵,赵延旭,等. 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[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3):224-231, 222.
- [8] 祝稳. 西北干旱区植被覆盖动态及其对极端气温和降水过程的响应[D]. 甘肃 兰州:西北师范大学, 2015.
- [9] 杨方兴. 内蒙古地区极端气候事件时空变化及其与 NDVI 的相关性[D]. 陕西 西安:长安大学, 2012.
- [10] Zhang Xuebin, Yang Feng. RCLIMDEX (1.0), User Manual [M]. Canada: Climate Research Branch, Environment, 2004.
- [11] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century [J]. Climate Research, 2002, 19:193-212.

- [12] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2008(5):35-37,40.
- [13] 张盛霖,邓高燕,黄勇奇. Mann-Kendall 检验法在 Excel 中的实现与应用[OL]. 中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn>.
- [14] 刘晓燕,刘昌明,杨胜天,等. 基于遥感的黄土高原林草植被变化对河川径流的影响分析[J]. 地理学报, 2014, 69(11):1595-1603.
- [15] Sun Wenyi, Song Xiaoyan, Mu Xingmin, et al. Spatio-temporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, (209/210):87-99.
- [16] 张翀,任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J]. 资源科学, 2011, 33(11):2143-2149.
- [17] 高健健,穆兴民,孙文义. 1981—2012 年黄土高原植被覆盖度时空变化特征[J]. 中国水土保持, 2016(7):52-56.
- [18] Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961—2008 [J]. *Climate Research*, 2011, 50(2):125-139.
- [19] 张照玺,胡彩虹,李世豪,等. 黄河流域 1961—2010 年极端气温指数的时空变化特征[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(2):48-53.
- [20] Domonkos P, Kysely J, Piotrowicz K, et al. Variability of extreme temperature events in south-central Europe during the 20th century and its relationship with large-scale circulation [J]. *International Journal of Climatology*, 2003, 23(9):987-1010.
- [21] 侯美亭,赵海燕,王箐,等. 基于卫星遥感的植被 NDVI 对气候变化响应的研究进展[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(3):353-364.
- [22] 丁婧祎,赵文武,王军,等. 降水和植被变化对径流影响的尺度效应:以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J]. 地理科学进展, 2015, 34(8):1039-1051.
- [23] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报, 2013, 33(24):7798-7806.
- [24] 王晓利,侯西勇. 1982—2014 年中国沿海地区归一化植被指数(NDVI)变化及其对极端气候的响应[J]. 地理研究, 2019, 38(4):807-821.
- [25] Zhang Dongdong, Yan Denghua, Wang Yicheng, et al. Changes in extreme precipitation in the Huang-Huai-Hai River basin of China during 1960—2010 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 120(1/2):195-209.
- [26] Chen Yu, Chen Xianyan, Ren Guoyu. Variation of extreme precipitation over large river basins in China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 2(2):108-114.
- [27] Zhao Anzhou, Zhang Anbing, Liu Xianfeng, et al. Spatiotemporal changes of normalized difference vegetation index (NDVI) and response to climate extremes and ecological restoration in the Loess Plateau, China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 132(1/2):555-567.
- [28] 王智. 深圳市植被动态变化及其对极端气候的响应[D]. 北京:中国地质大学, 2018.

(上接第 246 页)

- [15] 吕金芝,王焕良. 中国退耕还林工程对粮食产量影响分析与测度[J]. 林业经济, 2010(1):78-89.
- [16] 刘东生,谢晨,刘建杰,等. 退耕还林的研究进展、理论框架与经济影响:基于全国 100 个退耕还林县 10 年的连续监测结果[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2011, 10(3):74-81.
- [17] 东梅,钟甫宁,王广金. 退耕还林与贫困地区粮食安全的实证分析:以宁夏回族自治区为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(1):104-108.
- [18] 刘贤赵,宿庆. 黄土高原水土流失区生态退耕对粮食生产的可能影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(2):99-104.
- [19] 国家统计局课题组. 退耕还林对西部地区粮食生产及供求的影响[J]. 管理世界, 2004(11):97-100, 108-156.
- [20] 郝静,曹明明. 陕北黄土丘陵沟壑区退耕还林对粮食安全的影响:以榆林市米脂县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(8):165-169.
- [21] 王兵,刘国彬,张光辉,等. 黄土高原实施退耕还林(草)工程对粮食安全的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3):241-245.
- [22] 姚清亮,谷建才,陆贵巧,等. VARMA 模型在退耕还林工程粮食安全问题中的应用:以河北省为例[J]. 林业经济, 2009(9):78-80.
- [23] 查小春,赖作莲. 退耕还林对铜川市农村经济结构的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(2):38-43.
- [24] 刘强. 山西退耕还林成效及后续政策研究[J]. 山西林业, 2016(5):6-7.
- [25] 孙蕊,孙萍,吴金希,等. 中国耕地占补平衡政策的成效与局限[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(3):41-46.
- [26] 王跃梅,姚先国,周明海. 农村劳动力外流、区域差异与粮食生产[J]. 管理世界, 2013(11):67-76.
- [27] 杨义武,林万龙,张莉琴. 农业技术进步、技术效率与粮食生产:来自中国省级面板数据的经验分析[J]. 农业技术经济, 2017(5):46-56.