

引用格式:Liu Ying, Zhu Xiufang, Xu Kun, *et al.* Comparative Analysis of the Impact of Drought on the Crop Productivity of Irrigated and Rain-fed Farmland Ecosystems[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(2): 381-390. [刘莹, 朱秀芳, 徐昆, 等. 干旱对灌溉和雨养农田生态系统生产力的影响对比分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(2): 381-390.]  
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2021.2.0381

## 干旱对灌溉和雨养农田生态系统生产力的影响对比分析

刘莹<sup>1,3</sup>, 朱秀芳<sup>1,2,3</sup>, 徐昆<sup>1,3</sup>, 陈令仪<sup>3</sup>, 郭锐<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

3. 北京师范大学地理科学学部遥感科学与工程研究院, 北京 100875)

**摘要:**灌溉是农作物应对干旱等极端气候条件的有效调节机制,在全球气候变化的背景下,未来干旱等极端气候事件发生的频率和严重程度预估会增加,定量分析灌溉和雨养条件下干旱对农田生态系统农作物生长的影响有助于更好地评估人类应对极端气候事件对生态系统的消极影响的能力,为制定合理有效的生态系统保护措施提供依据。以中国北方干旱区为研究区,基于标准化降水蒸散指数产品和MODIS增强型植被指数以及总初级生产力产品,利用MK趋势分析,皮尔逊相关分析和一元线性回归分析研究了2000~2014年间中国北方干旱区农田生态系统干旱、植被指数以及总初级生产力的发展趋势,分析了中国北方旱区农作物对干旱的响应的滞后时间,在相应的滞后时间下对比分析了灌溉农田和雨养农田农作物受干旱影响的差异。研究结果显示:在2000~2014年间北方旱区农田生态系统64.10%的区域呈现干旱减轻的趋势、75.78%和81.87%的区域呈现植被指数增加和总初级生产力增加的趋势,其中64.82%的植被指数增加和68.34%总初级生产力增加的区域伴随着干旱的减轻。除半干旱区雨养农田植被指数对干旱的响应的滞后时间为2个月外,其余滞后时间均为1个月。在滞后时间下,去趋势干旱指数与植被指数异常及总初级生产力异常均呈现显著的正相关关系。相对于雨养农田来说,灌溉分别缓解了32.22%和29.42%北方旱区干旱对农作物植被指数和总初级生产力的消极影响,且在干旱区的缓解程度要高于半干旱区。定量分析了干旱对灌溉和雨养农田生态系统GPP和EVI的影响差异,为评估灌溉抵抗干旱气候对植被生态系统的影响研究提供了参考。

**关键词:**标准化降水蒸散指数;增强型植被指数;总初级生产力;干旱区;灌溉

**中图分类号:**S162.5+2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2021)02-0381-10

### 1 引言

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,提供了全世界66%的粮食供给<sup>[1]</sup>,储存了10%的陆地碳储量<sup>[2]</sup>。农田不仅具有粮食生产、生态服务、经济安全以及社会稳定等多种功能<sup>[3]</sup>,还具有调节生态系统碳循环,影响与人类相关的重大环境问

题的生态价值<sup>[4]</sup>。干旱是对农业生产影响最广泛的气候灾害之一<sup>[5-6]</sup>。干旱可以通过关闭气孔,降低气孔导度进而降低光合作用的方式对植被生长产生直接的影响,也可以通过诱发疾病、引发火灾以及改变土壤的酸碱度等间接方式影响植被的生长<sup>[7-13]</sup>。有研究指出未来30 a温度和降水格局的变化会导致中国北方地区重度和极端季节性干旱发

收稿日期:2020-06-22;修订日期:2021-04-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFA0606900),国家自然科学基金青年基金项目(41401479)资助。

作者简介:刘莹(1996—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要从事植被生态遥感研究。E-mail: liuying\_ly@mail.bnu.edu.cn

通讯作者:朱秀芳(1982—),女,浙江天台人,副教授,主要从事遥感应用研究。E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn

生的频率增加、强度加剧、范围扩大<sup>[14]</sup>。在世界范围内,未来30~90 a里由于降水的减少或者蒸发量的增加,许多人口稠密地区(欧洲,美国东部,东南亚和巴西)干旱发生的频率、严重程度仍然会继续升高<sup>[15]</sup>,这将对粮食安全以及生态系统的碳循环造成严重的威胁。

目前关于干旱对植被生产力的影响研究有很多<sup>[16-22]</sup>,也有一些关注到了干旱对农田生态系统生产力的影响<sup>[23-26]</sup>。但很少有研究定量对比分析不同土地管理方式(例如灌溉和雨养)下干旱对农田生态系统植被生产力的影响差异。灌溉是一种重要的土地管理方式<sup>[27]</sup>,全球约40%的谷类作物都是在灌溉条件下生产的<sup>[28]</sup>。灌溉对于稳定和增加作物产量有重要作用。灌溉一方面增加了土壤湿度和地表蒸散,改变热通量的分割和水分的再分配<sup>[29-32]</sup>,另一方面可以增加地表植被覆盖度,提高陆地生态系统生产力,进而影响陆地生态系统的碳循环等<sup>[33-34]</sup>。因此,利用植被生产力数据定量分析灌溉和雨养条件下干旱对农田生态系统农作物生长的影响有助于理解干旱条件下农作物的碳吸收的能力和评估人类应对极端气候事件对生态系统的消极影响的能力,为有效地规划和减轻干旱对农业生产造成的不利影响,制定合理有效的生态系统保护措施提供科学依据。

以中国北方旱区农田生态系统为研究对象,使用植被指数数据和总初级生产力数据来定量分析不同土地管理方式下农作物生产力对干旱的响

应差异。具体目标包括:①分析2000~2014 a北方旱区农田生态系统干旱、植被指数及总初级生产力的变化趋势;②分析农作物对干旱的响应的滞后时间以及干旱对北方旱区农田生态系统植被指数和总初级生产力的影响;③量化分析灌溉和雨养农田生态系统植被指数和总初级生产力受干旱影响的差异。

## 2 研究区与数据

### 2.1 研究区概况

根据联合国千年生态系统服务评估报告中的定义(年降水量低于年潜在蒸发量2/3的土地)所提取的全球旱区边界,在保证县级行政单元完整的前提下确定了中国旱区范围。整个旱区被分为4个子区:极端干旱区、干旱区、半干旱区和亚湿润旱区<sup>[35-36]</sup>。研究选取了其中的极端干旱区、干旱区和半干旱区作为研究区,另外由于极端干旱区内农田所占比例很低(0.46%),因此将极端干旱区合并到干旱区内得到本研究所需要的中国北方旱区范围,包括干旱和半干旱两个子区(图1)。

研究区地处中纬度(34°~51° N, 73°~125° E),气候条件非常恶劣,气候类型主要以大陆性季风气候为主,冬季长而寒冷,夏季短而炎热,春秋季气温变化较快,主要地区的年均气温低于10℃,年降水量自东向西从400 mm减少到10 mm以下,而且大部分地区,夏季降水量占总降水量的80%以上<sup>[37]</sup>。近年来,北方地区发生旱灾的频率较高<sup>[38-40]</sup>,而且容

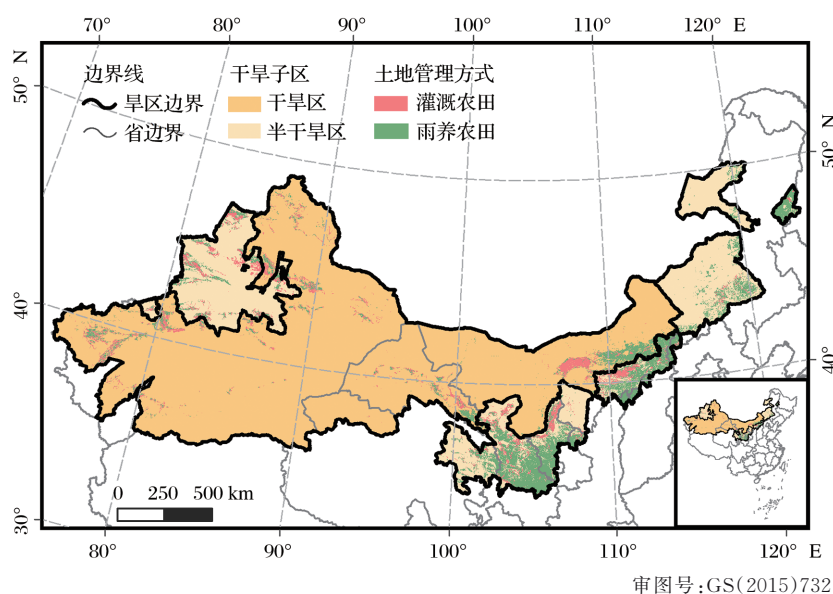


图1 北方旱区位置示意图

Fig.1 The location of dry lands of northern China

易发生多年连旱,受灾面积和成灾面积较大。据统计,1951~2000年期间,华北、西北地区的旱灾受灾率居我国六大地区分区的第一位和第三位,西北、东北和华北地区的旱灾成灾面积占受灾面积比例的前三位<sup>[41]</sup>。可见,北方地区相对来说更容易受到干旱的严重影响。

## 2.2 数据获取与预处理

研究使用标准化降水蒸散指数 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) 数据集来表征中国北方旱区的干旱状况,该数据来自于 DIGITAL. CSIC (<http://sac.csic.es/spei/database.html>)所提供的0.5°分辨率的覆盖全球范围的标准化降水蒸散指数数据集 SPEIbase v2.5<sup>[42]</sup>。该数据集基于气候研究单位(CRU, Climate Research Unit)时间序列版本为3.24.01的气候数据制作,包括了自1901~2015年的1~48个月时间尺度的SPEI月值数据。

使用增强型植被指数 EVI(Enhanced Vegetation Index)和总初级生产力 GPP(Gross Primary Productivity)来表征北方旱区农田的植被生产力。其中,EVI来源于USGS(United States Geological Survey) (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a3v006/>)提供的1km空间分辨率的月MODIS EVI数据产品MOD13A3。GPP来源于NTSG(Numerical Terradynamic Simulation Group) (<http://www.ntsug.umd.edu/>)提供的1 km空间分辨率的月MODIS GPP产品MOD17A2。

除了表征干旱与农作物生产力的数据外,还包括由Li等<sup>[35]</sup>提供的中国北方旱区矢量边界数据,来源于中国科学院资源环境科学数据中心的(<http://www.resdc.cn>)2000年1 km分辨率的中国土地利用与土地覆盖数据和2000年的中国灌溉耕地和雨养耕地分布图<sup>[43]</sup>。为了在同一空间尺度下分析,将SPEI数据集双线性插值到1 km空间分辨率。结合已有数据集中数据的可获取时间以及北方旱区实际作物物候,选取2000~2014年作物生长季(4~9月)作为研究的时间段。

## 3 研究方法

### 3.1 标准化降水蒸散指数 SPEI

SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)由Vicente-Serrano于2010年提出<sup>[44]</sup>。SPEI指数通过计算月降水与潜在蒸散量的差值并

进行正态标准化处理得到。该指数同时考虑了降水和蒸散对干旱的影响而且还具有多个时间尺度来满足不同研究的需要。研究区内的主要作物生长季为4~9月,6个月时间尺度的SPEI数据(记作SPEI6-9)是利用4~9月每月的降水量与潜在蒸散量的差值聚合得到的,可以表征生长季整体的干旱状况。

### 3.2 SPEI、EVI和GPP趋势分析

首先,利用4~9月的EVI和GPP数据的均值来表示生长季EVI和GPP,利用SPEI6-9来代表生长季SPEI的值。然后,利用M-K趋势分析方法<sup>[45]</sup>从像元尺度上进行生长季干旱及植被生产力的变化趋势分析。M-K趋势分析得到的Z统计值表示待分析数据的变化趋势,Z统计值的正负分别代表待分析数据的增加趋势和减少趋势,Z统计值的绝对值大于1.64则代表通过95%的显著性检验,即变化趋势显著。接着,利用一元线性回归分析从区域尺度上进行生长季干旱及植被生产力的变化趋势分析。一元线性回归分析得到的线性拟合斜率表示待分析数据的变化趋势,斜率的正负分别代表待分析数据的增加趋势和减少趋势。一元线性回归时得到的显著性水平P值小于0.05代表通过95%的显著性检验。

### 3.3 去趋势SPEI和EVI/GPP异常值的计算

利用一元线性回归对生长季SPEI进行线性拟合,去除其线性趋势,得到去除线性趋势的SPEI(记作:Detrended SPEI),以便后续分析只关注其异常波动情况。利用Papagiannopoulou等<sup>[46]</sup>提出的计算NDVI等植被时间序列数据异常值的方法来计算EVI和GPP异常(记作:EVI/GPP anomaly),具体过程如下:

(1)对原始时间序列进行线性趋势去除:

$$y_t \approx y_t^{\text{Tr}} = \alpha_0 + \alpha_1 t \quad (1)$$

$$y_t^{\text{D}} = y_t - y_t^{\text{Tr}} \quad (2)$$

其中: $y_t$ 为待分析变量的原始时间序列, $y_t^{\text{Tr}}$ 为研究期内的趋势值序列, $y_t^{\text{D}}$ 为去除了线性趋势的数据, $t$ 为研究期内的时间序列数据, $\alpha_0$ 和 $\alpha_1$ 分别是待分析变量与时间序列线性拟合的截距和斜率。

(2)计算季节周期 $y_t^{\text{S}}$ ,假定季节周期是一年一次并且不随时间变化时,将其简单地估计为相应月份的期望值。

(3)计算异常值 $y_t^{\text{R}}$ :

$$y_t^{\text{R}} = y_t^{\text{D}} - y_t^{\text{S}} \quad (3)$$



### 3.4 EVI/GPP异常对干旱的滞后时间分析

滞后时间分析是在区域尺度上进行的,首先分别计算生长季EVI异常、GPP异常与滞后时间为0~6个月(SPEI6-9、SPEI6-8, ..., SPEI6-3)的去趋势SPEI数据的皮尔逊相关系数。根据相关系数最大值所对应的SPEI的月份来确定不同区域(干旱区和半干旱区)、不同土地管理方式(灌溉农田、雨养农田)下的滞后时间。

### 3.5 干旱对EVI/GPP的影响分析

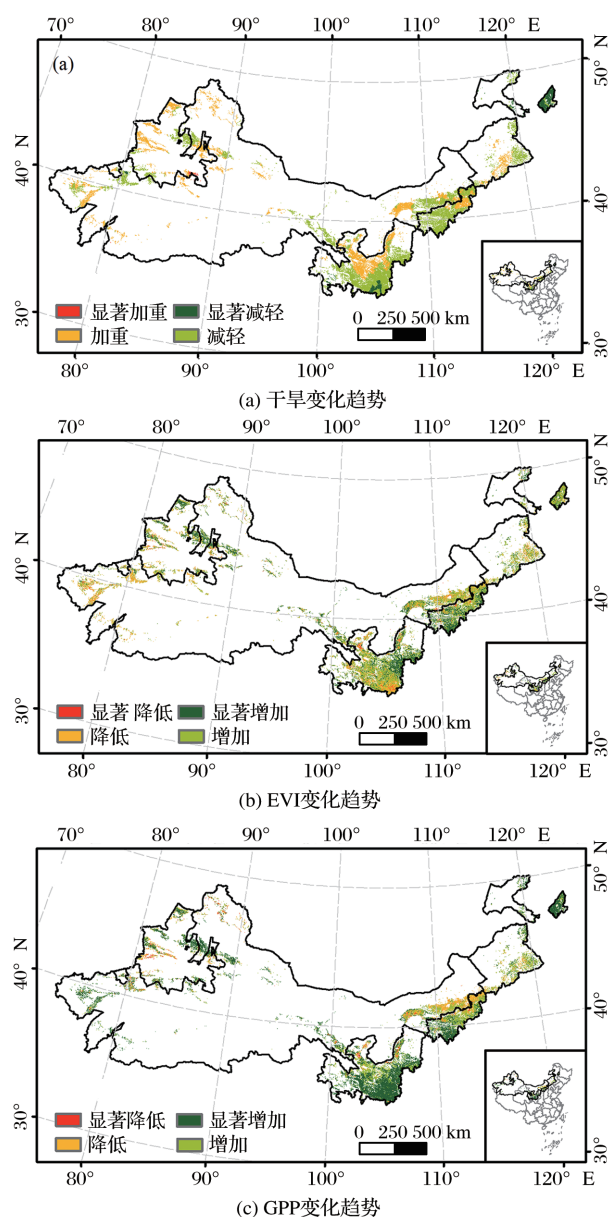
针对干旱区和半干旱区的灌溉和雨养农田生态系统,分别计算去除线性趋势的SPEI与EVI/GPP异常的皮尔逊相关系数和一元线性拟合的斜率。皮尔逊相关系数用来表示干旱对农作物生产力是否有影响,线性拟合的斜率用来量化干旱对农作物生产力的影响大小。对比分析不同区域和不同农田生态系统干旱对EVI/GPP的影响差异。

## 4 结果分析

### 4.1 北方旱区农田生态系统干旱及植被生产力的变化趋势分析

利用M-K趋势分析方法对2000~2014年北方旱区农田生态系统干旱及农作物生产力(EVI和GPP)进行了趋势分析,结果如图2所示。除了北方旱区中南部和西南部的少部分区域外,大部分区域内(71.92%)EVI与GPP表征的植被生产力变化趋势一致。总体来看,2000~2014年北方旱区农田生态系统大部分区域呈现干旱减轻、植被生产力增加的趋势,其中干旱减轻、EVI增加和GPP增加的区域分别占北方旱区农田总面积的64.10%、75.78%和81.87%。空间上来看,只有北方旱区农田的中部,东北部及西部的少部分区域存在干旱加重、植被生产力降低的趋势,其他地区均是相反的情况。干旱减轻的区域与植被生产力增加的区域存在很好的一致性,统计显示,分别有64.82%和68.34%的EVI和GPP增加的区域存在着干旱的减轻。然而,干旱加重与植被生产力的降低在空间上的对应性较低,24.43%和30.70%的EVI和GPP降低的区域伴随着干旱的加重。

除了逐像元趋势分析以外,还利用一元线性回归分析在区域尺度上进行了干旱与植被生产力的趋势分析,结果如图3所示。与逐像元趋势分析的结果一致,干旱区与半干旱区均呈现干旱减轻、EVI和GPP增加的趋势。但是从区域上来看,半干旱区



审图号:GS(2015)732

图2 2000~2014年北方旱区农田生态系统的干旱、EVI和GPP的变化趋势空间分布图

Fig.2 The spatial distribution of trends in drought, EVI and GPP in farmland ecosystems in the DNC from 2000 to 2014

干旱减轻及EVI和GPP增加的速率和幅度均高于干旱区。除此之外,对比了灌溉农田和雨养农田内干旱与植被生产力的变化趋势差异,结果如表1所示,无论在干旱区还是半干旱区,雨养农田内干旱减轻的速率均高于灌溉农田。

但是植被生产力的变化趋势差异在干旱区和半干旱区内有所不同,干旱区内,灌溉农田的生产力增加速率高于雨养农田;半干旱区内,灌溉农田的生

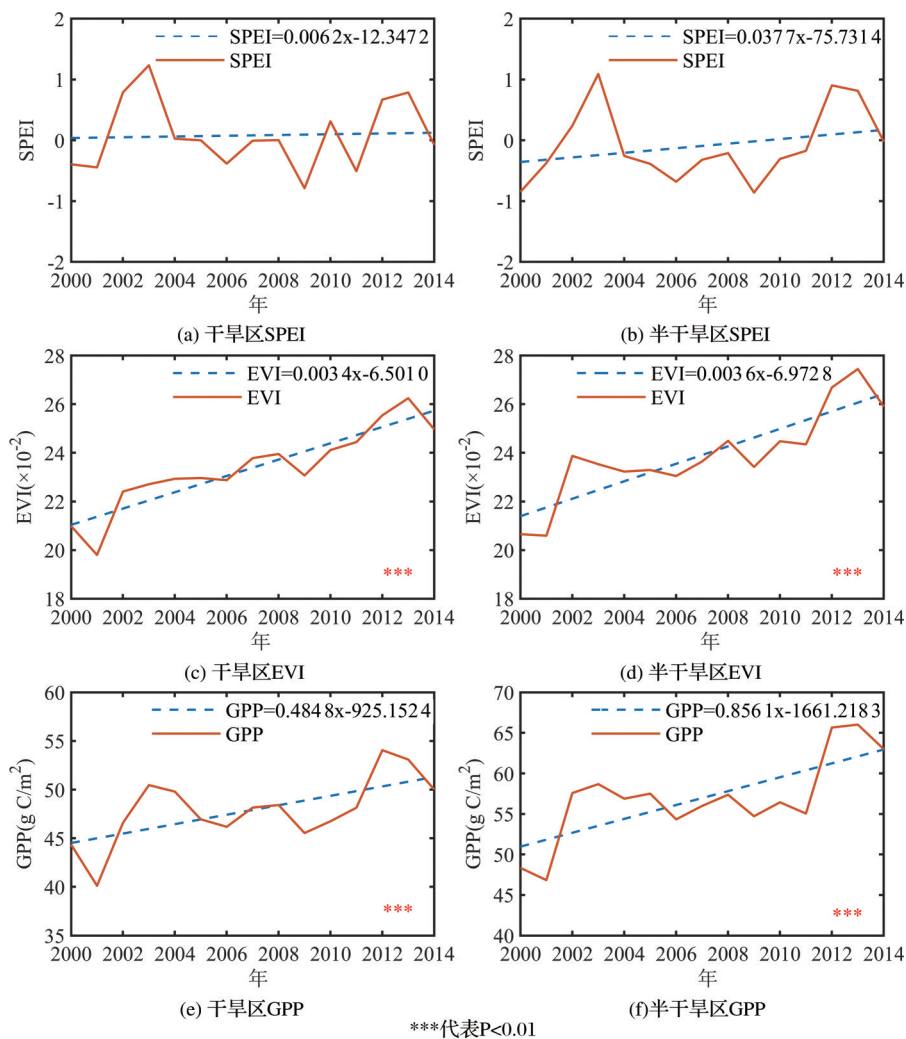


图 3 区域尺度上 2000~2014 年北方旱区农田生态系统干旱、EVI 和 GPP 变化趋势分析图

Fig.3 The trends of drought, EVI and GPP in farmland ecosystems in the DNC from 2000 to 2014 at a regional scale

表 1 区域尺度上 2000~2014 年北方旱区灌溉农田和雨养农田干旱、EVI 和 GPP 变化趋势

Table 1 The trends of drought, EVI and GPP in irrigated farmland and rainfed farmland in the DNC from 2000 to 2014 at a regional scale

趋势线	干旱区		半干旱区	
	灌溉农田	雨养农田	灌溉农田	雨养农田
SPEI	$\text{SPEI}=0.0014x-2.6465$	$\text{SPEI}=0.0102x-20.3659$	$\text{SPEI}=0.0167x-33.4344$	$\text{SPEI}=0.0428x-86.0340$
EVI (***)	$\text{EVI}=0.0035x-6.7651$	$\text{EVI}=0.0031x-6.0819$	$\text{EVI}=0.00356x-6.9082$	$\text{EVI}=0.00360x-7.0028$
GPP (***)	$\text{GPP}=0.5250x-1004.2431$	$\text{GPP}=0.4613x-878.7872$	$\text{GPP}=0.6476x-1239.4607$	$\text{GPP}=0.9034x-1756.8417$

注:\*\*\*代表通过 99% 的显著性水平。

产力增加速率低于雨养农田。对于灌溉农田和雨养农田整体来看,干旱减轻和生产力增加的速率在半干旱区均高于干旱区。

#### 4.2 北方旱区农田生态系统干旱对农作物生产力的影响

##### 4.2.1 农作物对干旱的响应的滞后时间

利用皮尔逊相关分析分别计算了 2000~2014 年北方旱区不同土地管理方式下 EVI 异常、GPP 异

常与不同滞后时间所对应的去除线性趋势的干旱指数之间的相关系数,其结果如表 2 所示。对于干旱区所有农田类型以及半干旱区灌溉农田,去趋势干旱指数与 EVI、GPP 异常的相关系数在滞后月份为 1 时达到最大值;而对于半干旱区雨养农田,GPP 异常得到的相关系数最大值所对应的滞后月份为 1,而 EVI 异常得到的相关系数最大值所对应的滞后月份为 2。因此对于干旱区所有农田类型以及半

干旱区灌溉农田来说,植被生产力对干旱的响应的滞后时间为1个月;对于半干旱区雨养农田来说,GPP对干旱的响应的滞后时间为1个月、EVI对干旱的响应的滞后时间为2个月。后续的分析均是基于该滞后分析结果进行的。

4.2.2 北方旱区农田生态系统干旱对农作物生产力的影响

利用2000~2014年北方旱区农田生态系统的去趋势干旱指数分别与EVI和GPP异常在最佳滞后月份下的皮尔逊相关系数和线性拟合的斜率来表示干旱对农作物生产力的影响,结果如图4所示。由图可以看出:在干旱区和半干旱区内,去趋势干旱指数与EVI和GPP异常均呈现出显著的正相关关系;典型的干旱年份(2001、2006、2009、2011和2014年)对应是EVI和GPP负异常峰值的年份,说明干旱状态对北方旱区农作物生产力具有很大的影响。

为了探究干旱对农作物生产力的影响程度,将去趋势干旱指数与植被指数异常和总初级生产力异常进行线性拟合,线性拟合斜率的正、负值分别代表干旱对农作物生产力产生消极、积极影响,线性拟合斜率的大小表示在相同的干旱变化程度下,植被指数和总初级生产力的变化程度。由图4可以看出,无论用EVI还是GPP表征植被生产力,半干旱区线性拟合的斜率均要高于干旱区,说明干旱对

表 2 不同滞后月份下去趋势干旱指数与植被生产力异常的相关系数

Table 2 The correlation coefficients of Detrended SPEI and vegetation productivity anomaly in each lag month

植被 生产力	滞后月 份	相关系数(干旱区)		相关系数(半干旱区)	
		灌溉农田	雨养农田	灌溉农田	雨养农田
EVI	0	0.54**	0.67**	0.69**	0.77**
	1	0.62**	0.80**	0.78**	0.82**
	2	0.56**	0.72**	0.75**	0.84**
	3	0.50*	0.65**	0.62**	0.75**
	4	0.42	0.49*	0.45*	0.42
	5	0.33	0.43	0.45*	0.42
	6	0.35	0.46	0.30	0.11
GPP	0	0.75**	0.77**	0.75**	0.79**
	1	0.82**	0.88**	0.87**	0.878**
	2	0.66**	0.80**	0.82**	0.876**
	3	0.55*	0.72**	0.62**	0.77**
	4	0.42	0.49*	0.45*	0.46*
	5	0.36	0.44	0.54*	0.46*
	6	0.32	0.35	0.27	-0.02

注:\*\*代表通过95%的显著性水平,\*代表通过90%的显著性水平,加粗代表最大相关系数

半干旱区农作物生产力的影响要高于干旱区。

4.3 北方旱区干旱对灌溉农田和雨养农田农作物生产力的影响差异

利用2000~2014年北方旱区灌溉农田和雨养农田的去趋势干旱指数分别与EVI和GPP异常在

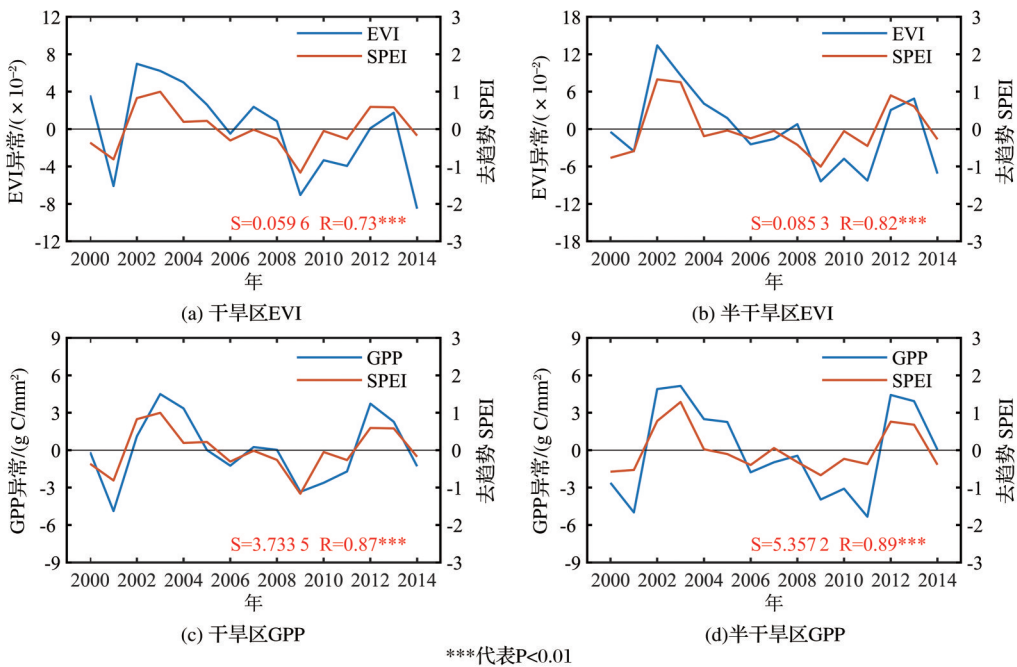


图 4 2000~2014年北方旱区农田生态系统去趋势干旱指数与EVI、GPP异常相关系数及线性拟合斜率

Fig.4 Correlation coefficients and linear fitting slopes between Detrended SPEI and EVI/ GPP anomaly of farmland ecosystems in the DNC from 2000 to 2014



最佳滞后月份下的皮尔逊相关系数和线性拟合的斜率来表示干旱对灌溉农田和雨养农田农作物生产力的影响及其影响的大小,结果如表3所示。灌溉农田和雨养农田内去趋势干旱指数与EVI/GPP异常都呈现显著的正相关关系。整个干旱区以及各干旱子区内,雨养农田的去趋势干旱指数与EVI/GPP异常线性拟合的斜率均高于灌溉农田。若利用雨养区与灌溉区线性拟合斜率的差值占雨养区内线性拟合斜率的比值来表示灌溉因素对于干旱消极影响的缓解程度,可以发现灌溉因素缓解了32.22%和29.42%干旱对北方旱区农田植被EVI和GPP的消极影响。在区域上看,干旱区灌溉因素对于干旱消极影响的缓解程度要高于半干旱区。

**表3 2000~2014年北方旱区灌溉农田和雨养农田去趋势干旱指数与植被指数异常和总初级生产力异常的相关系数及线性拟合斜率**

**Table 3 Correlation coefficients and linear fitting slopes between Detrended SPEI and EVI/GPP anomaly of irrigated farmland and rainfed farmland in the DNC from 2000 to 2014**

植被 生产力	区域	相关系数		线性拟合斜率		
		灌溉区	雨养区	灌溉区	雨养区 (雨养-灌溉)/雨养	
EVI	北方旱区	0.73	0.84	0.061	0.090	32.22%
	干旱区	0.62	0.80	0.048	0.074	35.14%
	半干旱区	0.78	0.84	0.069	0.082	15.85%
GPP	北方旱区	0.88	0.91	3.79	5.37	29.42%
	干旱区	0.82	0.88	2.82	4.23	33.33%
	半干旱区	0.87	0.88	4.24	5.54	23.47%

注:相关系数均通过0.05的显著性检验,加粗代表雨养区的线性拟合斜率大于灌溉区

## 5 讨 论

鉴于数据和篇幅限制,本研究尚有以下不足,需要在后续研究中完善:

(1)SPEI数据相比于其他数据来说空间分辨率较低,为了在同一空间尺度下进行分析,将该数据集通过双线性插值的方法进行了重采样。该步骤可能会引入一些不确定性,更高分辨率的干旱指数数据有助于未来更好地研究干旱对作物生产力的影响。

(2)农田生态系统的提取以及灌溉农田与雨养农田的划分是基于2000年的土地利用类型分布图、灌溉耕地分布图和雨养耕地分布图进行的。但是由于土地利用变化、农业生产水平的提高以及灌溉技术的进步等因素的影响,15 a间农田生态系统以

及灌溉和雨养农田的位置也会发生一定的变化。使用单一年份的数据进行参考会增加所提取的灌溉耕地和雨养耕地内的植被类型混合程度,这不会对本研究的定性结论产生影响,但是会高估灌溉农田生产力受干旱的消极影响、低估雨养农田生产力受干旱的消极影响,进而低估灌溉对于干旱造成的消极影响的缓解能力。此外,本文采用的灌溉耕地分布图和雨养耕地分布图是根据有效灌溉面积获取的,有效灌溉面积指的是有灌溉设施,在干旱年份可以提供灌溉用水的耕地面积,它和实际灌溉面积有一定差异,实际实施灌溉的耕地可能小于或者大于有效灌溉面积。灌溉耕地分布图中也不能反映灌溉的强度(灌溉量),对于补给灌溉而非充分灌溉的耕地,灌溉在一定程度上减少了干旱的影响,但没有完全消除干旱的影响,由此减少了灌溉和非灌溉耕地之间的差别。未来连续时间序列的土地利用类型分布图以及更加精细的灌溉耕地图(如实际灌溉耕地空间分布图、灌溉强度分布图等)的发展将会推动相关研究的进一步完善。

(3)对植被指数和总初级生产力数据进行了异常值计算,这一步骤可以将植被生产力稳定的长期变化以及季节周期去除,从而主要关注由于气候等不稳定因素造成的植被生产力在研究期间的波动。但是研究期间除了干旱因素会对农作物生长产生影响外,高温、太阳辐射、冻害和虫害等因素也会对农作物的生长产生影响<sup>[20,47-49]</sup>。本文还无法将其他气候或者人为因素的影响与干旱造成的影响剥离。

(4)文中有关干旱对农作物生产力的影响是将所有农作物作为整体进行的研究,由于土地利用类型精细程度的限制,未再对不同作物类型进行区分。不同作物类型对于干旱的响应也不是完全一致的。该因素也会对研究引入一定的不确定性。

## 6 结 论

基于中国北方干旱区15年的标准化降水蒸散指数以及MODIS增强型植被指数和总初级生产力产品,研究了北方干旱区2000~2014年生长季内干旱与植被指数以及总初级生产力的变化趋势,明晰了植被指数和总初级生产力对于干旱的滞后时间,量化了灌溉对于干旱造成的消极影响的缓解能力,有利于了解气候变化背景下作物的生长状况以及灌溉等人工管理因素对于农作物应对气候变化的有效程度。得到的主要结论如下:

(1)2000~2014年间,北方旱区农田生态系统64.10%的区域呈现干旱减轻的趋势,75.78%的区域呈现植被指数增加的趋势,81.87%的区域呈现总初级生产力增加的趋势。其中分别有64.82%植被指数增加和68.34%的总初级生产力增加的区域伴随着干旱的减轻,说明植被生产力的增加与干旱的减轻存在很好的空间一致性。从区域上看,半干旱区内干旱减轻与植被生产力增加的速率均高于干旱区。

(2)干旱区所有农田类型和半干旱区灌溉农田对干旱的响应具有1个月的滞后时间,半干旱区雨养农田GPP对干旱的响应具有1个月的滞后时间,而EVI对干旱的响应具有2个月的滞后时间。在该滞后时间下,去趋势干旱指数与植被指数异常和总初级生产力呈现显著的正相关关系,表明干旱对北方旱区农作物生产力具有消极影响。

(3)北方旱区干旱对灌溉农田和雨养农田具有不同程度的消极影响,在相同的干旱加剧情况下,雨养农田植被生产力的降低程度要高于灌溉农田。整体来看,灌溉分别缓解了32.22%和29.42%北方旱区干旱对农作物植被指数和总初级生产力的消极影响。从区域上看,干旱区内灌溉因素对于旱消极影响的缓解程度要高于半干旱区。

#### 参考文献(References):

- [1] Yin Fei, Mao Renzhao, Fu Bojie, *et al.* Farmland Ecosystem Service and Its Formation Mechanism[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 929-934.[尹飞, 毛任钊, 傅伯杰, 等. 农田生态系统服务功能及其形成机制[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 929-934.]
- [2] Paustian K, Andr  n O, Janzen H H, *et al.* Agricultural Soils as a Sink to Mitigate CO<sub>2</sub> Emissions[J]. Soil Use and Management, 2007, 13(s4): 230-244. doi: 10.1111/j. 1475-2743. 1997.tb00594.x.
- [3] Liu Wenchao, Yan Changzhen, Qin Yuanwei, *et al.* Crop-land Dynamics and Its Influence on the Productivity in Recent 20 Years in Northern Shaanxi, China[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 101-110.[刘文超, 颜长珍, 秦元伟, 等. 近20 a陕北地区耕地变化及其对农田生产力的影响[J]. 自然资源学报. 2013, 28(8): 101-110.]
- [4] Zhao Rongqin, Qin Mingzhou. Temporospatial Variation of Partial Carbon Source/Sink of Farmland Ecosystem in Coastal China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, 23(2): 1-6.[赵荣钦, 秦明周. 中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异[J]. 生态与农村环境学报. 2007, 23(2): 1-6.]
- [5] Li Y P, Ye W, Wang M, *et al.* Climate Change and Drought: A Risk Assessment of Crop-yield Impacts[J]. Climate Research, 2009, 39(1): 31-46. doi: 10.3354/cr00797.
- [6] Hu Y N, Liu Y J, Tang H J, *et al.* Contribution of Drought to Potential Crop Yield Reduction in a Wheat-maize Rotation Region in the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(7): 1509-1519. doi: 10.1016/S2095-3119(14)60810-8.
- [7] Anderegg W R L, Berry J A, Field C B. Linking Definitions, Mechanisms, and Modeling of Drought-induced Tree Death[J]. Trends in Plant Science, Elsevier Ltd, 2012, 17(12): 693-700. doi: 10.1016/j.tplants.2012.09.006.
- [8] Nepstad D, Lefebvre P, Da Silva U L, *et al.* Amazon Drought and Its Implications for Forest Flammability and Tree Growth: A Basin-wide Analysis[J]. Global Change Biology, 2004, 10(5): 704-717. doi: 10.1111/j.1529-8817.2003.00772.x.
- [9] Flexas J. Drought-inhibition of Photosynthesis in C3 Plants: Stomatal and Non-stomatal Limitations Revisited[J]. Annals of Botany, 2002, 89(2): 183-189. doi: 10.1093/aob/mcf027.
- [10] Sang  esa-Barreda G, Camarero J J, Oliva J, *et al.* Past logging, Drought and Pathogens Interact and Contribute to Forest Dieback[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 208: 85-94. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.04.011.
- [11] Zhang Y, Peng C H, Li W Z, *et al.* Monitoring and Estimating Drought-induced Impacts on Forest[J]. Environmental Review, 2013, 115(April): 103-115. doi: 10.1139/er-2013-0006.
- [12] Zhang Y, Xiao X M, Zhou S, *et al.* Canopy and Physiological Controls of GPP during Drought and Heat Wave[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(7): 3325-3333. doi: 10.1002/2016GL068501.
- [13] Tian Hanqin, Xu Xiaofeng, Song Xia. Drought Impacts on Terrestrial Ecosystem Productivity[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 31(2): 231-241.[田汉勤, 徐小锋, 宋霞. 干旱对陆地生态系统生产力的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 231-241.]
- [14] Hu Shi, Mo Xingguo, Lin Zhonghui. Projections of Spatial-temporal Variation of Drought in North China[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(2): 239-248.[胡实, 莫兴国, 林忠辉. 未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 239-248.]
- [15] Dai A G. Increasing Drought under Global Warming in Observations and Models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(2): 52-58. doi: 10.1038/NCLIMATE1633.
- [16] Chen S L, Huang Y F, Wang G Q. Detecting Drought-induced GPP Spatiotemporal Variabilities with Sun-induced Chlorophyll Fluorescence during the 2009/2010 Droughts in China[J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 107092. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107092.
- [17] Chen T, Van Der Werf G R, De Jeu R A M, *et al.* A Global Analysis of the Impact of Drought on Net Primary Productivity[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2013, 10(2): 2429-2451. doi: 10.5194/hess-17-3885-2013.
- [18] Deng Y, Wang X H, Wang K, *et al.* Responses of Vegetation Greenness and Carbon Cycle to Extreme Droughts in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 298: 108307. doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108307.
- [19] Jiang W X, Wang L C, Zhang M, *et al.* Analysis of Drought Events and Their Impacts on Vegetation Productivity based on the Integrated Surface Drought Index in the Hanjiang River



- Basin, China[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 254: 105536. doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105536.
- [20] Pei F S, Li X, Liu X P, *et al.* Assessing the Impacts of Droughts on Net Primary Productivity in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 114: 362–371. doi: 10.1016/j.jenvman.2012.10.031.
- [21] Wang H Y, He B, Zhang Y F, *et al.* Response of Ecosystem Productivity to Dry/Wet Conditions Indicated by Different Drought Indices[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 347–357. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.212.
- [22] Zhang L, Xiao J F, Zhou Y, *et al.* Drought Events and Their Effects on Vegetation Productivity in China[J]. *Ecosphere*, 2016, 7(12). doi: 10.1002/ecs2.1591.
- [23] Gallardo M P, Vicente-Serrano S M, Quiring S, *et al.* Response of Crop Yield to Different Time-scales of Drought in the United States: Spatio-temporal Patterns and Climatic and Environmental Drivers[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 264: 40–55. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.09.019.
- [24] Liu X F, Pan Y Z, Zhu X F, *et al.* Drought Evolution and Its Impact on the Crop Yield in the North China Plain[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 984–996. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.07.077.
- [25] Ming Bo, Tao Hongbin, Wang Pu. Impact of Drought on Grain Yield in Beijing Investigated by SPEI-based Methods [J]. 2013, 18(5): 28–36. [明博, 陶洪斌, 王璞. 基于标准化降水蒸散指数研究干旱对北京地区作物产量的影响[J]. 2013, 18(5): 28–36.]
- [26] Zipper S C, Qiu J, Kucharik C J. Drought Effects on US Maize and Soybean Production: Spatiotemporal Patterns and Historical Changes [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9): 094021. doi: 10.1088/1748-9326/11/9/094021.
- [27] Zhu Xiufang, Zhao Anzhou, Li Yizhan, *et al.* Impact of Irrigation on Climate [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4816–4828. [朱秀芳, 赵安周, 李宜展, 等. 农田灌溉对气候的影响研究综述[J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 4816–4828.]
- [28] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Statistical Year Book–World food and Agriculture[M]. Food and Agriculture Organization of United Nations: Rome, Italy, 2012.
- [29] Lu J Y, Carbone G J, Huang X, *et al.* Mapping the Sensitivity of Agriculture to Drought and Estimating the Effect of Irrigation in the United States, 1950–2016[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 292: 108124. doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108124.
- [30] Zhang T Y, Mahmood R, Lin X M, *et al.* Irrigation Impacts on Minimum and Maximum Surface Moist Enthalpy in the Central Great Plains of the USA[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2019, 23: 100197. doi: 10.1016/j.wace.2019.100197.
- [31] Zhu X F, Liang S L, Pan Y Z, *et al.* Agricultural Irrigation Impacts on Land Surface Characteristics Detected from Satellite Data Products in Jilin Province, China[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(3): 721–729. doi: 10.1109/JSTARS.2011.2106152.
- [32] Zhu X F, Liang S L, Pan Y Z. Observational Evidence of the Cooling Effect of Agricultural Irrigation in Jilin, China[J]. *Climatic Change*, 2012, 114(3–4): 799–811. doi: 10.1007/s10584-012-0435-3.
- [33] Li X, Troy T J. Changes in Rainfed and Irrigated Crop Yield Response to Climate in the Western US [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(6): 064031. doi: 10.1088/1748-9326/aac4b1.
- [34] Sun H Y, Zhang X Y, Liu X J, *et al.* Impact of Different Cropping Systems and Irrigation Schedules on Evapotranspiration, Grain Yield and Groundwater Level in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 211: 202–209. doi: 10.1016/j.agwat.2018.09.046.
- [35] Li J W, Liu Z F, He C Y, *et al.* Are the Drylands in Northern China Sustainable? A Perspective from Ecological Footprint Dynamics from 1990 to 2010 [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 223–231. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.088.
- [36] Millenium Ecosystem Assessment. *Ecosystems & Human Well-being: Synthesis* [M]. Washington, Island Press, DC: 2005.
- [37] Yang X H, Ci L J, Zhang X S. Dryland Characteristics and Its Optimized Eco-productive Paradigms for Sustainable Development in China [J]. *Natural Resources Forum*, 2008, 32(3): 215–227. doi: 10.1111/j.1477-8947.2008.00201.x.
- [38] Cai Q, Liu Y, Lei Y, *et al.* Reconstruction of the March–August PDSI since 1703 AD based on Tree Rings of Chinese Pine (*Pinus Tabulaeformis* Carr.) in the Lingkong Mountain, Southeast Chinese Loess Plateau [J]. *Climate of the Past*, 2014, 10(2): 509–521. doi: 10.5194/cp-10-509-2014.
- [39] Chen H P, Sun J Q. Changes in Drought Characteristics over China Using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(13): 5430–5447. doi: 10.1175/jcli-d-14-00707.1.
- [40] Zhao S H, Cong D M, He K X, *et al.* Spatial-Temporal Variation of Drought in China from 1982 to 2010 based on a Modified Temperature Vegetation Drought Index (mTVDI) [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1–12. doi: 10.1038/s41598-017-17810-3.
- [41] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. *Statistics of New China's Agriculture in 60 Years* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2009. [中华人民共和国农业部. 新中国农业60年统计资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.]
- [42] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, *et al.* A New Global 0.5° Gridded Dataset (1901–2006) of a Multiscalar Drought Index: Comparison with Current Drought Index Datasets based on the Palmer Drought Severity Index [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(4): 1033–1043. doi: 10.1175/2010JHM1224.1.
- [43] Zhu X F, Zhu W Q, Zhang J S, *et al.* Mapping Irrigated Areas in China from Remote Sensing and Statistical Data [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(11): 4490–4504. doi: 10.1109/JSTARS.2013.2296899.
- [44] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 1696–1718. doi: 10.1175/2009JCLI2909.1.

- [45] Lanzante J R. Resistant Robust and Non-parametric Techniques for the Analysis of Climate Data: Theory and Examples, including Applications to Historical Radiosonde Station Data[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 16(11): 1197-1226.
- [46] Papagiannopoulou C, Miralles D G, Decubber S, *et al.* A Non-linear Granger-causality Framework to Investigate Climate-vegetation Dynamics [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017(10):1945-1960. doi:10.5194/gmd-10-1945-2017.
- [47] Ge Feifan, Mao Kebiao, Jiang Yuelin, *et al.* Extreme High-temperature in Summer and Its Impacts on Vegetation in East China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(1): 42-51.[葛非凡, 毛克彪, 蒋跃林, 等. 华东地区夏季极端高温特征及其对植被的影响[J]. *中国农业气象*, 2017, 38(1):42-51.]
- [48] Muller K, O'Connor T G, Henschel J R. Impact of a Severe Frost Event in 2014 on Woody Vegetation within the Nama-Karoo and Semi-arid Savanna Biomes of South Africa [J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 133: 112-121. doi: 10.1016/j.jaridenv.2016.06.010.
- [49] Wolf A, Kozlov M V, Callaghan T V. Impact of Non-outbreak Insect Damage on Vegetation in Northern Europe will be Greater than Expected during a Changing Climate[J]. *Climatic Change*, 2008, 87 (1-2) : 91-106. doi: 10.1007/s10584-007-9340-6.

## Comparative Analysis of the Impact of Drought on the Crop Productivity of Irrigated and Rain-fed Farmland Ecosystems

Liu Ying<sup>1,3</sup>, Zhu Xiufang<sup>1,2,3</sup>, Xu Kun<sup>1,3</sup>, Chen Lingyi<sup>3</sup>, Guo Rui<sup>3</sup>

(1. *Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

2. *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

3. *Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)*

**Abstract:** Irrigation is an effective regulation mechanism for crops to response to extreme climatic conditions such as drought. Due to global climate change, the frequency and severity of extreme weather events such as drought are expected to increase in the future, quantitative analysis of the impact of drought on crop growth of farmland ecosystem under irrigation and rain-fed conditions will help to better assess the ability of human beings to cope with the negative impact of extreme climate events on the ecosystem, and provide a basis for formulating reasonable and effective ecosystem protection measures. The dry lands on northern China is taken as the study area. Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) products and Enhanced Vegetation Index (EVI), Gross Primary Productivity (GPP) products provided by MODIS, this paper analyzes the trends of drought and EVI, GPP of farmland ecosystems in the study area from 2000 to 2014 by using MK trend analysis and explores the lag time of crop productivity response to drought by using Pearson correlation coefficient. Then, the effects of drought on EVI and GPP of farmland ecosystem under the corresponding time lag are analyzed by using linear regression analysis and the differences in the effects of drought on EVI and GPP of irrigated farmland and rain-fed farmland are further compared. Study results indicate during 2000~2014, 64.10% of the study area showed a trend of drought alleviation, and 75.78% and 81.87% of the study area showed a trend of increased EVI and GPP, of which 64.82%, 68.34% of the areas with an increase in EVI, GPP were accompanied by drought alleviation. Expect for the lag time of rain-fed crop EVI in semiarid dry land response to drought was 2 months, all the rest lag time was 1 month. Based on the lag time, the SPEI and EVI, GPP showed a significant positive correlation. Compared to rain-fed farmlands, irrigation alleviated the negative effects of drought on EVI and GPP by 32.22% and 29.42%. The degree of mitigation in arid area is overall higher than that in semi-arid area. This study quantifies the differences of the impact of drought on the GPP and EVI of irrigated and rain fed farmland ecosystems, which provides a reference for the study of the impact of irrigation resistance on vegetation ecosystems.

**Key words:** SPEI; EVI; GPP; Dry land; Irrigation