

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.009.

夏冰, 马鹏宇, 徐聪, 等. 近 20 年黄河流域植被净初级生产力时空分布及其对极端天气变化的时空响应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 256-266.  
XIA Bing, MA Pengyu, XU Cong, et al. Spatiotemporal Variation of NPP and Its Response to Extreme Climate Indices in Yellow River Basin in Recent 20 Years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 256-266.

# 近 20 年黄河流域植被净初级生产力时空分布及其对 极端天气变化的时空响应

夏冰<sup>1</sup>, 马鹏宇<sup>2</sup>, 徐聪<sup>3</sup>, 张磊<sup>4</sup>

(1.河南职业技术学院 环境艺术工程学院, 郑州 450046; 2.中节能铁汉生态环境股份有限公司, 北京 100083;  
3.青海省水文水资源测报中心, 西宁 810001; 4.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘 要:**为探究黄河流域植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)变化及对极端天气指数的响应情况, 利用 MODIS NPP 数据和极端气候数据, 辅以斜率法和偏相关分析法分析了 2000—2019 年黄河流域植被 NPP 时空动态及其对极端降水指数和极端温度指数的响应情况。结果表明: (1) 近 20 a 黄河流域植被 NPP 呈从北向南增加的趋势, 大面积上表现为增加趋势。 (2) NPP 与极端降水指标以显著和极显著正相关为主。其中, 除最长连续湿润天数呈显著正相关和极显著正相关的像元占比为 16.5%, 其他几种指标均在 25% 以上。 (3) 极端降水事件的水量和强度呈显著增加趋势, 极端温度事件中与偏冷相关指标总体呈下降趋势, 与变暖有关的事件呈明显上升趋势, 其变化存在显著空间异质性, 年际差异大。 (4) 日最高气温的最大值、日最低气温的最大值、冷夜日数、冷昼日数、冰冻天数和霜冻天与植被 NPP 以负相关为主, 日最高气温的最小值、日最低气温的最小值、暖夜日数、暖昼日数、气温日较差和暖期与植被 NPP 以正相关为主。近 20 a 黄河流域植被 NPP 时空变化存在显著地域性差异, 其中在干旱和半干旱地区极端降水增多在一定程度上有利于植被生长, 但极端温度增加对该区植被生长十分不利。另外, 湿润区植被生长均与极端气候呈负效应。

**关键词:** NPP; 极端气候指标; 时空变化; 黄河流域

**中图分类号:** Q948

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)02-0256-11

## Spatiotemporal Variation of NPP and Its Response to Extreme Climate Indices in Yellow River Basin in Recent 20 Years

XIA Bing<sup>1</sup>, MA Pengyu<sup>2</sup>, XU Cong<sup>3</sup>, ZHANG Lei<sup>4</sup>

(1. Department of Environmental Art and Engineering, Henan Polytechnic, Zhengzhou 450046,  
China; 2. CECEP Tech and Ecology & Environment Co., Ltd., Beijing 100083, China;

3. Hydrology and Water Resources Measurement and Reporting Center, Xining 810001, China; 4. State Key  
Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** MODIS NPP data and extreme weather data are used in order to explore the changes of net primary productivity (NPP) of vegetation in this area and its response to extreme weather indexes. The spatial and temporal dynamics of NPP of vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2019 and its response to extreme precipitation index and extreme temperature index were analyzed by using slope method and partial correlation analysis. Based on MODIS NPP and extreme climate data, the spatiotemporal variation characteristics and trend of vegetation NPP and its response to extreme climate change in Yellow River Basin from 2000 to 2019 were studied by using trend analysis and partial correlation analysis. The results showed that: (1) in the past 20 years, the vegetation NPP in the Yellow River Basin showed an increasing trend from

收稿日期: 2021-11-16

修回日期: 2021-12-14

资助项目: 国家自然科学基金“长时间序列黄河三角洲人工刺槐林生物量演化研究”(31971579)

第一作者: 夏冰(1984—), 女, 河南郑州人, 硕士, 副教授, 主要从事园林植物应用、生态修复研究。E-mail: xbing119071@163.com

通信作者: 徐聪(1988—), 男, 青海西宁人, 硕士, 工程师, 主要从事黄河流域生态保护研究。E-mail: xucong2020520@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

north to south, and showed an increasing trend in a large area; (2) NPP was mainly positively correlated with extreme precipitation events; among them, except that the pixels with significant positive correlation and extremely significant positive correlation for the longest continuous wet days accounted for 16.5%, the other indicators were more than 25%, indicating that the increase of extreme precipitation events was conducive to the increase of vegetation NPP; (3) the water volume and intensity of extreme precipitation events showed a significant increasing trend, the indicators related to partial cooling in extreme temperature events generally showed a downward trend, and the events related to warming showed an obvious upward trend; there was significant spatial heterogeneity and large interannual difference in their changes; (4) the maximum value of daily maximum temperature, the maximum value of daily minimum temperature, cold night days, cold day days, freezing days and frost days were mainly negatively correlated with vegetation NPP, while the minimum value of daily maximum temperature, the minimum value of daily minimum temperature, warm night days, warm day days, daily temperature range and warm period were mainly positively correlated with vegetation NPP; there are significant regional differences in the spatial and temporal changes of NPP of vegetation in the Yellow River Basin in recent 20 years; in arid and semi-arid areas, the increase of extreme precipitation was beneficial to vegetation growth to a certain extent, but the increase of extreme temperature was very unfavorable to vegetation growth in this area; in addition, vegetation growth in humid areas had a negative effect on extreme climate. The above research results have guiding significance for the vegetation growth monitoring and climate change response in the Yellow River Basin to propose protection strategies, promote vegetation ecological recovery, formulate effective disaster prevention and mitigation measures, and build a stable ecological barrier.

**Keywords:** NPP; extreme climate; spatiotemporal variation; Yellow River Basin

黄河流域作为黄河水系从源头到入海所影响的重要地理生态区域,地处我国干旱、半干旱、半湿润地区<sup>[1]</sup>,因受大气环流和季风环流的共同影响,黄河流域生态环境保护成为该地区 21 世纪面临最复杂的挑战的任务之一<sup>[2-3]</sup>。但受气候变化、植被退化、人类活动等多种因素的影响,土地退化与恢复、植被退化成为影响黄河流域生态环境的健康持续发展的因素之一<sup>[4-5]</sup>。植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是绿色植物光合作用产生的有机物总量扣除自养呼吸后的剩余部分<sup>[6]</sup>,其不仅是陆地生态系统中物质与能量运转研究的基础,而且能够直接反映植物群落在自然环境下的生产能力,其动态监测是评价植被健康状况的必要手段<sup>[7-12]</sup>。因此,如何及时、有效、大范围监测黄河流域植被生长状况及其对与极端气候变化间的关系成为亟待解决的重要科学课题。

近百余年来,专家学者们从不同角度出發,不断地对植被 NPP 的估算方法、时空分布及其影响因素方面展开研究,取得了显著的进展<sup>[13-16]</sup>。如朱文泉等<sup>[17]</sup>基于改进的 CASA 模型估算了中国陆地不同植被覆盖下时序植被 NPP,通过引入分类精度和植被覆盖类型图,改进了 CASA 模型,进而估算出中国陆地不同植被覆盖下的时序植被 NPP;朱莹莹等<sup>[18]</sup>对中国西北地区植被 NPP 进行因子分析,发现植被

NPP 对气温和降水的响应存在一定的空间差异;李金珂等<sup>[19]</sup>对秦巴山区的 NPP 时空变化特征及相关因子进行解析,得出自然因子对 NPP 的影响由小到大依次为:坡度<高程<气温<降雨<实际蒸散量,人为因子对 NPP 具有积极和消极的两方面作用。也有研究也发现在大陆尺度上,气温升高往往有利于高纬度地区植被 NPP 的增加,而降水的增加往往对于旱地区的植被 NPP 有显著的促进作用。但区域尺度研究发现,NPP 的年际变化在许多地区与年均气温和年累计降水的变化关系不大<sup>[20-22]</sup>,目前针对这一原因并没有明确的结论。但目前大部分的研究致力于平均气候或季节性气候对植被 NPP 的研究,而对于极端气候对植被 NPP 的影响的研究鲜有报道<sup>[23-26]</sup>。随着遥感技术的发展,MODIS 数据因其具有较高的时空分辨率及其获取成本低廉,已成为目前区域 NPP 估算的主要数据源之一<sup>[23,27]</sup>。NASA 团队基于 BIOME-BGC 生态模型与光能利用率建立的全球植被 NPP 年际变化数据产品(MOD17A3),该产品获取的 NPP 信息空间覆盖范围广,数据集分辨率高,且其精度能够满足大尺度的研究需求<sup>[6,23,27]</sup>。目前基于 MOD17A3 数据研究不同植被类型覆盖区域 NPP 的时空分布及与气候变化规律的研究成为该领域研究的热点之一。

鉴于此,为进一步深入探讨黄河流域植被 NPP

时空变化特点及其对极端气候变化的响应,研究基于 MOD17A3 产品和极端天气数据,辅以趋势分析和相关分析法探讨不同植被类型 NPP 的时空分布特征,变化趋势和对极端气温和极端降水的响应。这对黄河流域生态系统碳循环等相关研究具有重要意义,同时也能为生态环境保护和防止自然灾害等方面提供科学支撑。

# 1 研究区概况与研究方法

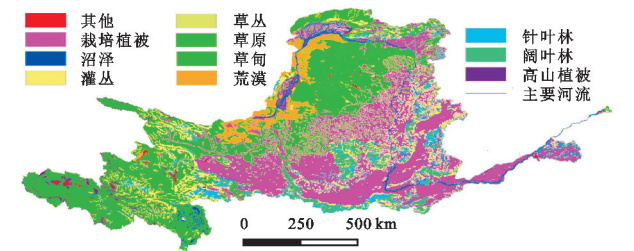
## 1.1 研究区概况

黄河流域地处我国干旱、半干旱和半湿润地区(32°—42°N, 96°—119°E),流域面积  $7.95 \times 10^5 \text{ km}^2$  (图 1),从西到东依次横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原。地势总体呈西高东低的态势,西部河源地区平均海拔超过 4 000 m,中部海拔介于 1 000~2 000 m<sup>[1]</sup>。地貌复杂多样,西部多山,常年积雪,中部为黄土高原地貌,水土流失严重,东部由黄河积平原组成。流域内不同地区气候差异显著,从西到南依次为半湿润气候、半干旱气候和干旱气候<sup>[3]</sup>。全年日照时间长、辐射强,气温日较差大,年较差小,降水量少而不均,湿度小,蒸发量大,多冰雹、沙尘、扬尘天气。黄河流域植被类型丰富,自东向西跨越了落叶阔叶林带、草原带、荒漠带和青藏高原植被带。黄河流域的黄土高原地区水土流失严重,因其特殊的地理位置、地形条件和干旱气候的影响,加之不合理的人为开垦利用,区域内生态环境极为脆弱,水土流失十分严重,是该区域主要的生态环境问题之一<sup>[28]</sup> (图 1)。本研究采用的植被类型数据由中国科学院资源环境科学数据平台(<http://www.resdc.cn>)提供。

## 1.2 数据来源与处理

(1) 植被净初级生产力(NPP)。NPP 数据源于 NASA 提供的 2000—2019 年的 MOD17A3H 数据集,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 1 a。该数据

集采用了最新的生物属性调查表(BPLUT)和新版的全球模型与融合室(GMAO)的日值气象数据对 NPP 数值进行模拟,提高了 NPP 的估算精度。已有多数学者研究发现 MOD17A3H 的 NPP 虽然在某些地区存在高估或低估现象,但其精度能够满足研究大尺度的应用需求<sup>[6,23,27]</sup>。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2016)1600 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 黄河流域植被类型

(2) 极端天气数据集(HadEX3)。HadEX3 数据集([www.climdex.org](http://www.climdex.org))采用综合观测资源来量化昼夜温度和降水变化,由 29 个气候极端指数组成,这些指数是通过世界温度及降水站数据计算而来的,数据涵盖了 1901—2018 年的极端天气事件,综合反映了极端温度和降水事件的频率和强度,该数据被应用于极端天气事件研究中<sup>[29-30]</sup>。根据黄河流域温度和降水的实际情况,本文选择了 19 个最能反映温度日变化范围、温度极端事件、短时和长时降水事件来分析黄河流域植被 NPP 对极端天气变化的响应情况,其中包括 12 个极端温度指数和 7 个极端降水指数(表 1—2),空间数据通过 ANUSPLINE 软件插值生成。

(3) 植被类型数据:由中国科学院资源环境科学数据平台(<http://www.resdc.cn>)提供的中华人民共和国植被类型(1:100 万)数据,该数据是我国植物学家继 1980 年出版的《中国植被》等专著后的又一项总结性重大研究成果数据,是反映我国自然资源条件及生态地理环境的重要基础图件,被广泛应用于各类科学研究中。

表 1 极端温度指标及定义

项目	简称	指标名称	定义	单位
极端温度 指数	TXx	日最高气温的最大值	每年日最高气温的最大值	℃
	TNx	日最低气温的最大值	每年日最低气温的最大值	℃
	TXn	日最高气温的最小值	每年日最高气温的最小值	℃
	TNn	日最低气温的最小值	每年日最高气温的最小值	℃
	TN10p	冷夜日数	每日最低温度小于第 10 个百分位值的天数	d
	TX10p	冷昼日数	每年日最高气温小于第 10 个百分位值的天数	d
	TN90p	暖夜日数	每年日最低气温大于第 90 个百分位值的天数	d
	TX90p	暖昼日数	每年日最高气温大于第 90 个百分位值的天数	d
	DTR	气温日较差	日最高气温与日最低气温的差值	℃
	ID	冰冻天数	每年年内日最高气温小于 0℃ 的天数	d
	FD	霜冻天	每年年内日最高气温小于 0℃ 的天数	d
	WSDI	暖期	每年日最高气温至少连续 6 d 连续小于第 90 个百分位值的天数	d



表 2 极端降水指标及定义

项目	简称	指标名称	定义	单位
极端降水指数	Rx1day	最大 1 d 降雨量	每年日降雨量的最大值	mm
	Rx5day	最大 5 d 降雨量	每年连续五天降雨量的最大值	mm
	SDII	降雨强度	雨天平均降雨量(总降雨量/降雨天数)	mm/d
	R10mm	低强度降雨天数	每年日降雨量大于等于 10 mm 的降雨天数	d
	R20mm	中等强度降雨天数	每年日降雨量大于等于 20 mm 的降雨天数	d
	CWD	最长连续湿润天数	每年连续湿润天数的最大值	d
	PRCPTOT	总降雨量	每年总降雨量	mm

注:日降水量小于 1 mm 的天数被认为是无雨日(干旱日),日降水量大于 1 mm 的天数认为是 有雨日(湿润天数)

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析法 应用一元线性回归模型逐像元分析黄河流域 NPP 的年际变化趋势,公式如下<sup>[17-19]</sup>

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times y) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n y}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:slope 为 NPP 的变化斜率,即 NPP 的变化趋势;y 为第*i* 年的 NPP 数值;i 为年变量,取值 1~*n*。当 slope>0 时,表明 NPP 随着时间的增加也在呈增加的趋势;当 slope<0 时,表明 NPP 随着时间的增加呈下降的趋势,当 slope=0 时,表明 NPP 随着时间的变化基本保持稳定趋势。植被 NPP 的趋势显著性检验采用 F 检验。

1.3.2 植被 NPP 对极端天气指标的响应分析 本文采用偏相关分析法分析植被 NPP 对极端天气指标的响应,偏相关分析法研究某一变量与另一变量相关时,将其他变量作为控制变量,剔除其影响<sup>[25]</sup>,偏相关系数*r* 表示相关程度。

$$r_{xy(z)} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (2)$$

式中:*x* 为植被 NPP;*y* 为极端天气事件;*z* 为除*y* 以外的其他极端天气指标;*r*<sub>*xy*(*z*)</sub> 的绝对值越大,表明极端天气指标对植被 NPP 影响越大,反之,则关系较弱。

偏相关系数的显著性检验,采用 t 检验法,公式为:

$$t = \frac{r \sqrt{n-m-1}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3)$$

式中:*n* 为样本数;*m* 为阶数;*n-m-1* 为自由度。

2 结果与分析

2.1 植被 NPP 时空动态变化

2.1.1 植被 NPP 空间格局的变化 基于均值法计算得到 2000—2019 年黄河流域植被 NPP 多年平均值(图 2),发现黄河流域 NPP 空间分布上呈现出从北向南增加的趋势。其中,NPP 最低值集中在黄河流域的干旱地区,植被类型主要为草原和荒漠植被,NPP 基本集中在 100 gC/m<sup>2</sup> 以下。半干旱区域的 NPP 集中在 300~100 gC/m<sup>2</sup>,但半干旱区内部从西

向东 NPP 表现为不明显的增加趋势,植被类型为草原和荒漠植被。半湿润区作为黄河流域面积最大的区域,其 NPP 集中在 300 gC/m<sup>2</sup> 以上,但在黄河上游的青海省境内,NPP 值较低,集中在 200 gC/m<sup>2</sup> 以下,其覆盖类型主要为草甸。从黄河流经来看,黄河上游的 NPP 值最低,中游次之,下游最高。

从 NPP 的年际变化特征来看,近 20 a 黄河上游的 NPP 整体以持续增加为主,即植被呈改善趋势。其中,2000—2004 年的 NPP 以上升趋势为主,但在 2005—2011 年的 NPP 的增加趋势趋于平缓,尤其在 2005 年和 2011 年的 NPP 呈下降趋势。2012—2019 年的植被 NPP 波动性较大,但整体以上升趋势为主。

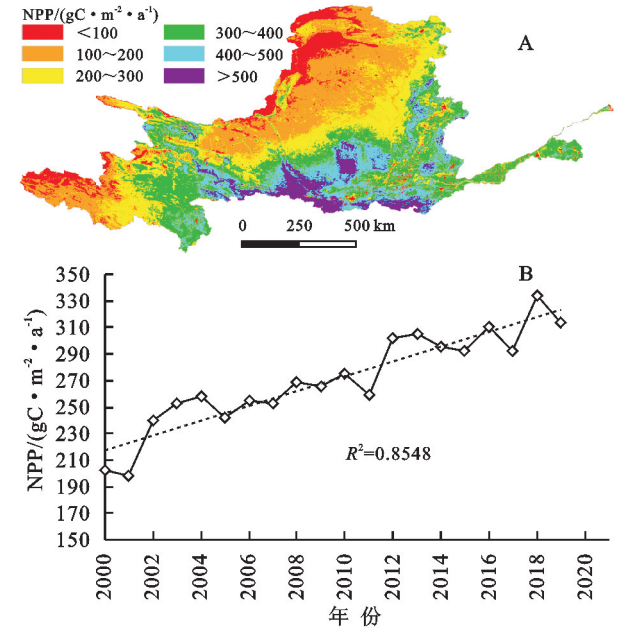
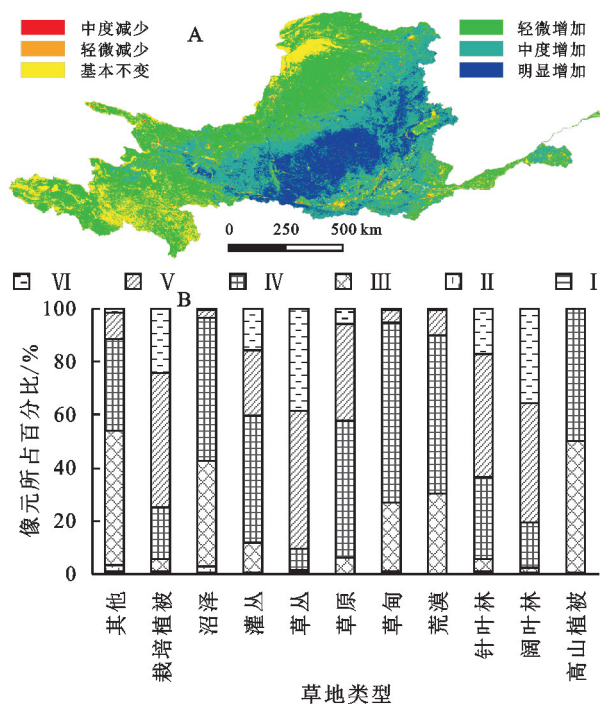


图 2 黄河流域 NPP 年均值空间分布及年际变化趋势

2.1.2 植被 NPP 的年际变化趋势分析 基于 slope 和 F 检验方法得到 20 年间黄河流域 NPP 变化趋势的空间分布、并统计不同植被类型中不同变化趋势等级中所占面积百分比(图 3),发现:黄河流域近 20 年间 NPP 在大面积上表现为增加趋势。其中,在半湿润区的黄河上游、干旱和半干旱区域的 NPP 以轻微增加趋势为主,增加速率每年以 0~3 gC/m<sup>2</sup> 增加,占总面积的 39.7%。在其他区域主要以中度增加(增加速率每

年以  $3\sim 8\text{ gC/m}^2$  增加)和明显增加趋势为主(增加速率每年以大于  $8\text{ gC/m}^2$  增加),分别占总面积的 34.4%, 14.3%。NPP 近 20 a 基本不变的区域集中在兰州至河口镇和内流区域,占总面积的 10.9%。NPP 呈减少趋势的区域零星分布在整个区域内,占总面积的 0.7%。

从不同植被类型来看,其他植被、沼泽植被、高山植被的变化趋势主要以基本不变和轻微增加趋势为主,变化不明显;草甸、荒漠以轻微增加趋势为主,变化相对明显;栽培植被、灌丛、草原、针叶林植被以轻微增加和中度增加趋势为主;草丛、阔叶林植被以中度增加和明显增加趋势为主,变化较明显。



注:图 B 中 I 为中度减少;II 为轻微减少;III 为基本不变;IV 为轻微增加;V 为中度增加;VI 为明显增加。

图 3 黄河流域 NPP 变化趋势及不同植被类型 NPP 变化趋势

## 2.2 极端气候指数时空变化分析

**2.2.1 极端降水指数时空变化** 从黄河流域极端降水空间分布发现(图 4):CWD 大部分地区表现为增加趋势(大部分地区呈变湿润趋势),呈减小趋势的区域集中在海拔较高的西部青藏高原地区和东部的黄河入海口地区,整个区域的变化范围在  $-0.08\sim 0.07\text{ d/a}$ , 20 a 总体以  $0.01\text{ d/a}$  的速率增加;SDII 的变化范围为  $-0.05\sim 0.07\text{ mm/a}$ ,从空间分布来看,黄河流域干旱区的降雨强度和量都有一定的下降趋势,其他地区均以不明显的增加趋势为主,增加速率最大的集中在黄河流域最西和最东端,近 20 a 以  $0.03\text{ mm/a}$  的速率减少;PRCPTOT 在黄河流域大部分地区以减小趋势为主,增加取水的区域主要在黄河流域的龙羊峡至兰州段和兰州至河口镇段,总变化范围为  $-0.41\sim$

$5.59\text{ mm/a}$ ,近 20 a 以  $1.28\text{ mm/a}$  的速率增加;Rx1day 和 Rx5day 增多的区域集中在黄河流域东部地区,主要为湿润区,减小速率较大的区域集中在干旱区,变化范围分别为  $-3.24\sim 1.7\text{ mm/a}$  和  $-2.86\sim 2.56\text{ mm/a}$ ,近 20 a 分别以  $0.54, 1.09\text{ d/a}$  的速率增加;从降水天数来看,R10mm 增多区域集中在兰州至河口镇段,其他区域均以减少区域为主,近 20 a 以  $0.01\text{ mm/a}$  的速率增加,近 20 a 的 R20mm 以  $0.02\text{ d/a}$  的速率减少。极端降水事件整体呈上升趋势,年际变化大。

**2.2.2 极端温度指数时空变化** 如图 5 所示,TXx 在黄河源区主要以降低趋势为主,其他区域以升高趋势为主,变化率范围为  $-0.08\sim 0.09\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ ;TNx 和 TN90p 在兰州以西地区均以降低/减少趋势为主,以东地区以升高/增多趋势为主,总体变化速率分布集中在  $-0.05\sim 0.06\text{ }^{\circ}\text{C/a}$  和  $-0.29\sim 0.07\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ ;TXn 和 TNn 的空间分布呈相反趋势,TXn 除黄河流域最东部外,其他区域均以降低趋势为主,TNn 除黄河流域东部外其他地区均以升高趋势为主;TX10p 和 TX90p 变化范围分别为  $0\sim 0.13\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ ,  $0\sim 0.34\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ ,全区均表现为上升趋势;TN10p 和 FD 全区均呈现降低趋势,变化速率集中在  $-1.0\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C/a}$  和  $-0.430\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ ;DTR 在黄河流域中部以减少趋势为主,其他区域以增多趋势为主;ID 除黄河入河口区域呈减少趋势,其他区域均以增多趋势为主;WSDI 在兰州以西呈减少趋势,以东为增加趋势。

极端温度指数时间变化趋势折线图发现:我国极端温度事件存在显著年际差异,总体呈上升趋势的事件有 TXn, TNn, TN90p 和 TX90p,上升趋势分别为  $0.09, 0.19, 0.23, 0.12\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ ;其他均以下降趋势为主。从时间趋势来看温度正在经历持续变暖趋势,变暖速率远大于变冷速率。

## 2.3 植被 NPP 对极端气候指数的响应格局

分析植被 NPP 与极端降水指数的响应发现(图 6): NPP 与极端降水指数呈显著和极显著正相关的像元占比远多于显著和极显著负相关,但所有极端降水指标与 NPP 整体以不显著的相关关系为主。从空间分布来看,呈显著正相关的区域主要位于干旱区,主要原因是因为该区域植被的生长主要限制因素为土壤水分,因此降水量的增多可能会在一定程度上有利于植被的生长,但不同降水指标对其影响程度存在差异,如 CWD(最长连续湿润天数)对 NPP 的影响较其他指标小。在半干旱地区的极端气候对植被 NPP 主要以显正相关加为主,但其相关系数较干旱地区的小。在半湿润地区,植被 NPP 和极端降水指标存在显著的空间异质性。CWD, R99p, R10mm 和 R20mm 在黄河流域中部地区以不显著负相关为主。

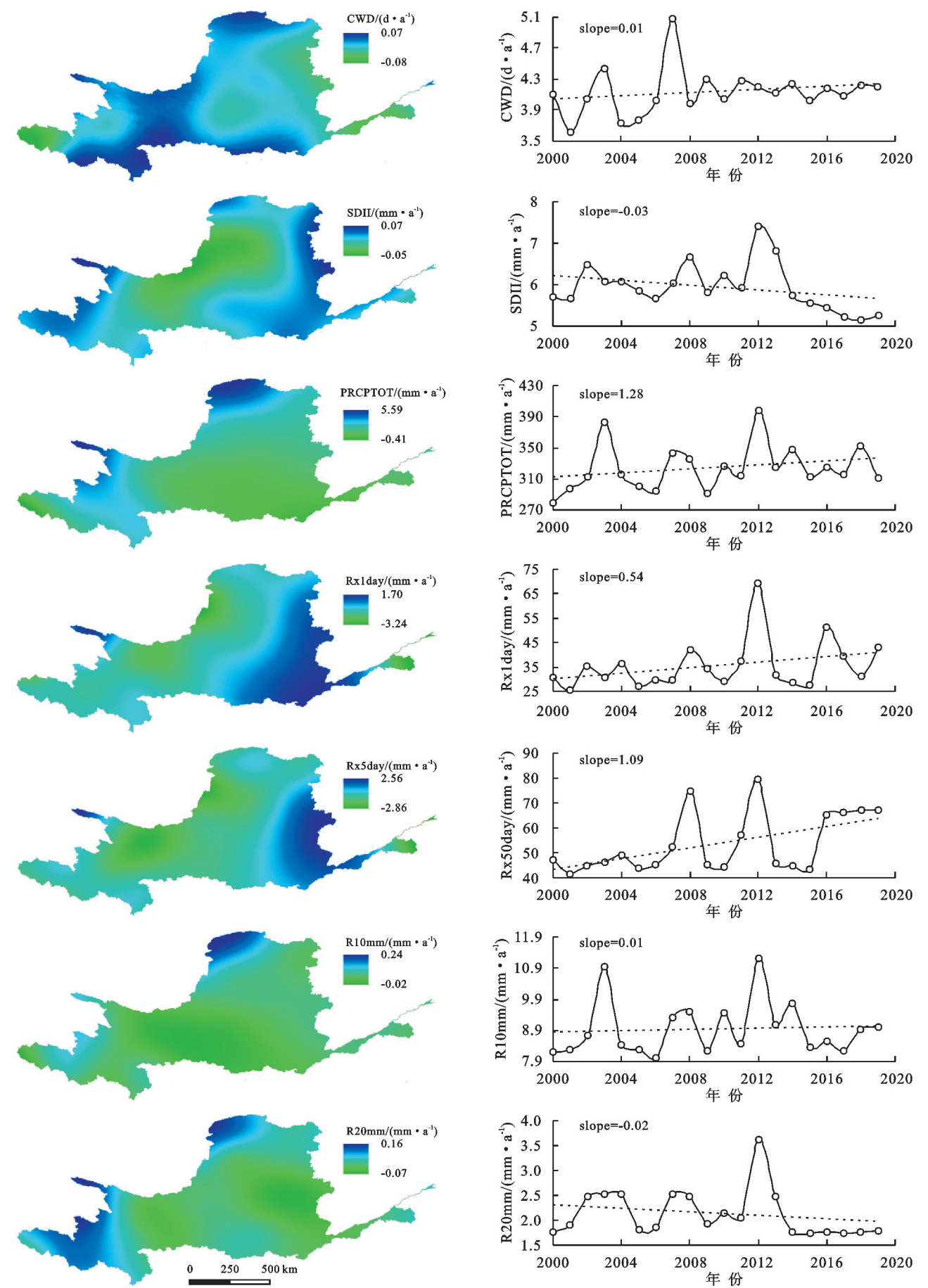


图 4 极端降水事件的时空变化趋势



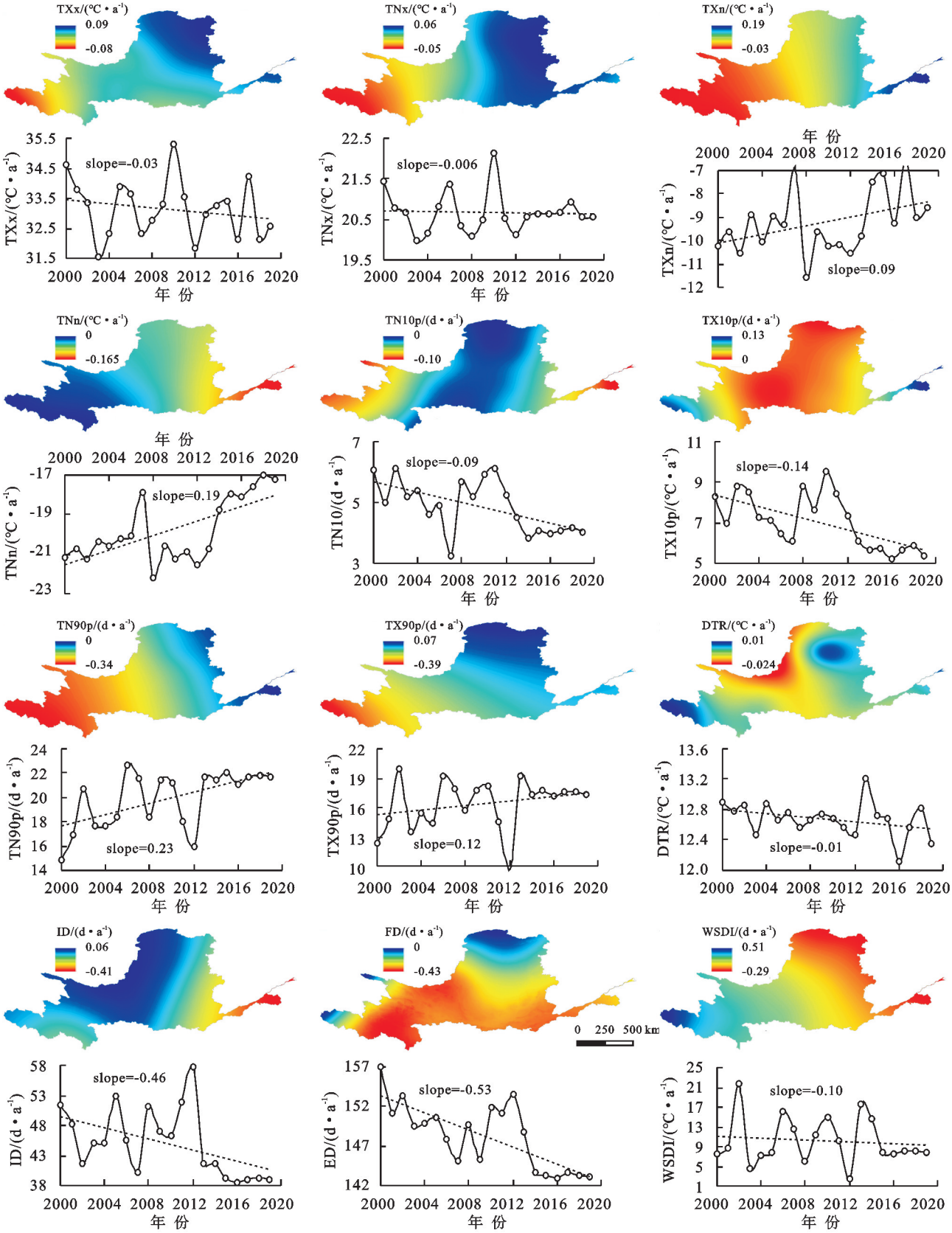


图 5 极端温度事件的时空变化趋势

2.4 植被 NPP 对极端气温的响应格局

分析植被 NPP 与极端气温指标的关系发现(图 7): NPP 与 TXx, TNx 在海拔较高的黄河流域下游地区的龙羊峡以上地区呈显著正相关,但在其他地区主要以显著负相关关系为主。TN10p, TN90p, ID 和 FD 在整个黄河流域,均以负相关关系为主,即与变冷有关的温度指标的增多不利于植被的生长。TXn 和

TNn 在整个区域主要以不显著的正相关为主,空间差异较小。TN90p, TX90p, DTR 和 WSDI 与 NPP

在海拔较高的黄河流域下游地区呈显著的正相关,其他区域均以不显著的正负相关关系并存。

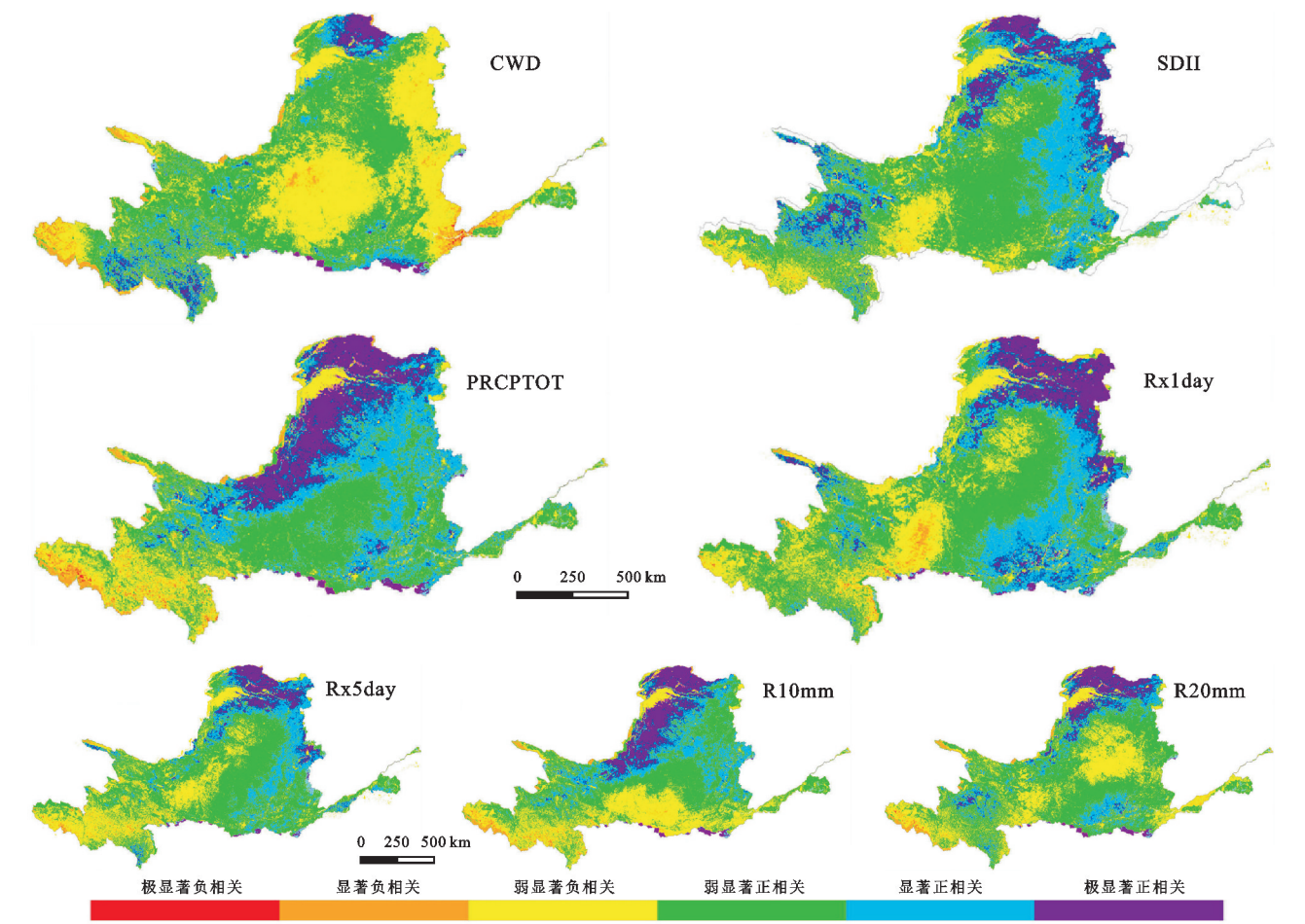


图 6 黄土流域 NPP 与极端降水事件相关系数空间分布

通过统计不同指标的显著性占比发现 TXx, TNx, TN10p, TX10p, ID, FD 与植被 NPP 呈负相关关系的占比大于 80%, 这些极端温度事件的增加不利于植被的生长。TXn, TNn, TN90p, TX90p, DTR 和 WSDI 与 NPP 主要以不显著的正相关关系为主, 这些极端气候事件的增加在一定程度上对植被的生长是有利的。

### 2.5 不同植被类型 NPP 对极端天气事件的响应

从植被 NPP 响应极端天气变化事件的空间分布状况发现: 植被 NPP 受极端天气变化影响存在一定的空间分异, 为了进一步分析不同植被类型对极端天气变化的响应情况, 本文在前文研究的基础上依据不同植被类型, 提取相关性分析结果, 具体分析不同类型的植被 NPP 对极端天气变化事件的响应情况(图 8)。

从不同植被类型 NPP 对极端降水指标的响应情况发现: 不同植被类型的 NPP 与极端降水指标的相关性水平差异很大。其中, 其他植被、灌丛、草甸针叶林和阔叶林与极端降水指标均以不显著的正相关关系为主, 但相关性较小(相关系数集中在  $-0.1 \sim 0.2$ ); 栽培植被受到 PRCPTOT 的影响相对较大, 对其他极端降

水指标的敏感性较弱; 沼泽植被与 PRCPTOT, Rx1day 和 R10mm 为负相关关系; 草丛植被对 Rx1day 较为敏感, 对其他极端降水指标不敏感; 草原和荒漠植被主要受到 R10mm 和 PRCPTOT 的影响, 高山植被与极端气候指标主要表现为负相关关系, 尤其是 PRCPTOT, Rx5day 和 R10mm, 即连续的降水和较大强度的降雨均不适宜此类植被的生长。

从不同植被类型 NPP 对极端气温指标的响应发现: 不同植被类型对极端气温事件的敏感性差异不大。其中, FD, ID, TX10p 和 TN10p 与所有植被表现为负相关关系, 而 TX90p, TN90p 与所有植被表现为正相关关系, 其中, 对沼泽、草甸和高山植被的影响较大。WSDI, DTR, TNx 和 Tx 与沼泽、草甸和高山植被的 NPP 表现为较显著的正相关关系, 对其他植被类型影响不敏感。

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

黄河流域地处干旱、半干旱和半湿润地区, 其生态环境十分脆弱, 植被变化受到气候等因素的影响<sup>[28]</sup>, 本



文分析了黄河流域 2000—2019 年不同植被类型 NPP 的变化结果显示,黄河流域年均 NPP 在干旱区集中在  $100\text{ gC/m}^2$  以下,半干旱集中在  $300\sim100\text{ gC/m}^2$ ,半湿润区集中在  $300\text{ gC/m}^2$  以上,空间分布上存在显著的空间差异。其中,大部分区域植被 NPP 呈显著增加趋势,但在干旱和半干旱区域地区的植被 NPP 增加趋势不显著,在半湿润区域的植被 NPP 增加速率为显著和极显著。这一结论与陈晨等<sup>[31]</sup>对 1982—2015 年黄河流域及各气候区 NDVI 在干旱区增加最慢,在半湿润区植被覆盖增加最快的结果一致,结果也表明这是因为降水对植被的直接影响使得不同地区的植被变化

趋势不一致。本文也较为全面的分析了近 20 a 的 12 个极端温度指标和 7 个极端降水指标的时空变化趋势发现与偏冷相关的极端温度指标(FD, ID, TN10p, TX10p)均呈减弱趋势,与异常偏暖相关的 TN90p, TX90p 均呈升高趋势,气温日较差 DTR 为降低趋势。从时间变化趋势分析发现变暖的速率是大于变冷的速率的;虽极端强降水事件的频率和强度都有所增长,干旱区湿润化趋势较半湿润更加明显,但部分区域仍在经历持续干旱。这都与先前其他研究者对我国极端天气变化的研究具有高度一致性<sup>[31-34]</sup>,间接反映了 HadEX<sub>3</sub>数据集的准确性。

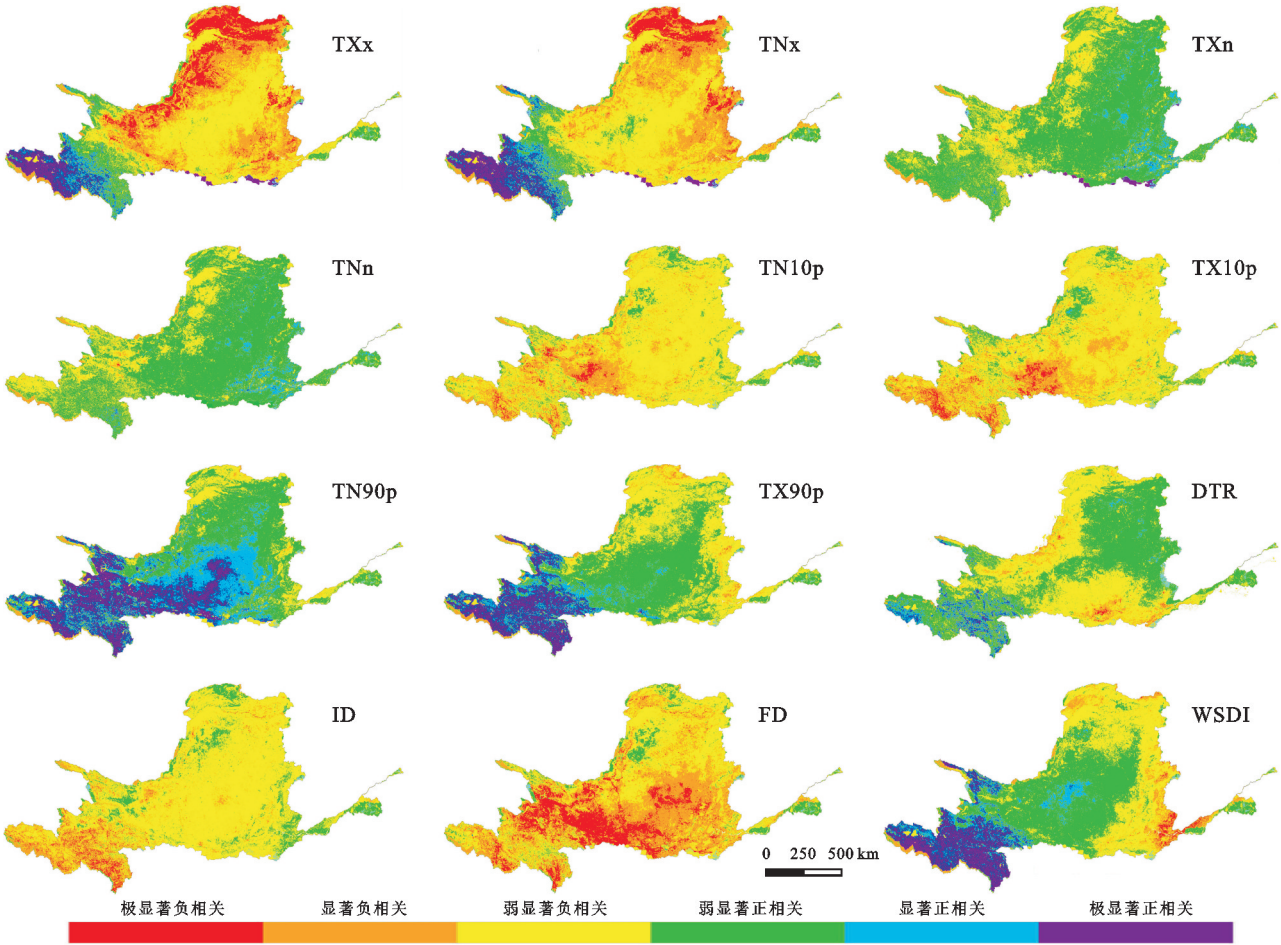
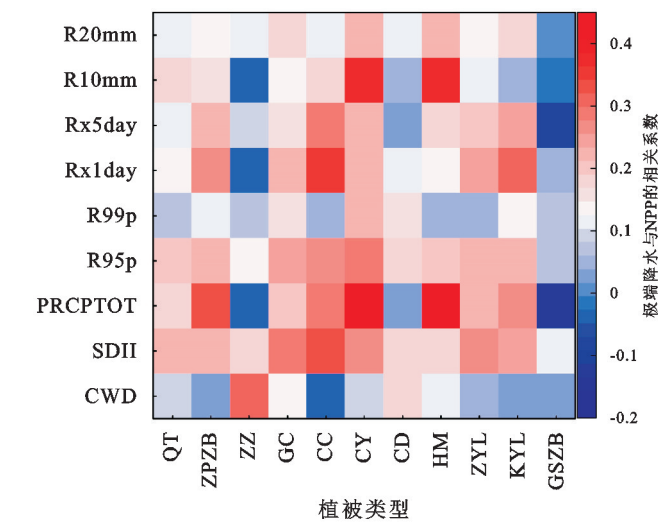


图 7 黄土流域 NPP 与极端气温事件相关系数空间分布

气温和降水被认为是影响植被生长的重要气象因子<sup>[20-23]</sup>,但与平均气候变化相比较而言,极端天气事件的发生因具有突发性、预测性和破坏性大等特点,因此可能会因为气候的突变而严重影响陆地生态系统结构、组成和功能等,严重影响区域陆地生态系统的碳循环,从而影响植被的生长周期而影响植被的生产力和产量<sup>[26]</sup>,但目前对于黄河流域极端天气变化对植被 NPP 影响的研究鲜少。因此,本文基于偏相关分析法逐像元分析了黄河流域极端降水指标和极端温度指标与不同植被类型 NPP 的相关发现:

(1) NPP 与极端降水指标呈显著和极显著正相关的像元占比远多于显著和极显著负相关,但所有极端降水指标与 NPP 整体以不显著的正相关关系为主,且不同极端降水指标对植被 NPP 的影响的空间异质性较小,但同一指标对植被 NPP 因地域差异而存在显著的空间分布差异。呈显著正相关关系的区域主要位于干旱区,半干旱地区的极端降水指标对植被 NPP 以显著正相关关系为主。在半湿润地区,植被 NPP 和极端降水事件存在显著的空间异质性,其中, CWD, R99p, R10mm 和 R20mm 在黄河流域中部地

区以不显著负相关为主,说明植被 NPP 对降水有一个耐受范围,当降水量远超植被的耐受范围时,对植被的生长是不利的,这也符合植被的生理特性。有研究表明在干旱和半干旱地区的植被主要以旱生和强旱生类型为主,在生长阶段,降水的增加对植被的生长的影响显著大于温度的影响,主要因为降水能够缓解土壤水分的胁迫,使植被不会提前进入枯黄期<sup>[34]</sup>。而黄河流域干旱和半干旱区夏季植被的生长严重受到干旱的胁迫,而进入秋季之后,温度迅速降低,十分不利于植被 NPP 的积累<sup>[3]</sup>。因此,本研究结果进一步揭示出黄河流域植被生长会严重受到极端降水事件的影响,同时 Liu 等<sup>[21]</sup>研究认为植被在秋季时需水量会减少,温度增高会增加光合酶的活性、减缓叶绿素的降解。因此,不同季节温度升高也是会对植被生长产生严重的影响。本文研究也发现

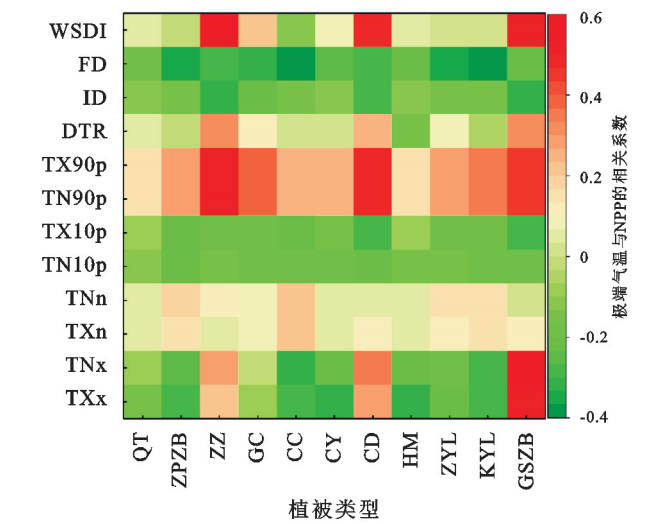


注:QT 为其他;ZPZB 为栽培植被;ZZ 为沼泽;GC 为灌丛;CC 为草丛;CY 为草原;CD 为草甸;HM 为荒漠;ZYL 为针叶林;KYL 为阔叶林;GSZB 为高山植被。

图 8 黄土流域不同植被 NPP 与极端气候事件相关系数统计

不同类型的植被 NPP 对极端气候变化的响应都有着明显差异。结合本文所研究的植被生长的环境特点以及其对极端天气变化的响应而言,生长环境对植被的影响也是显著的,分布在干旱地区的草原、荒漠和草甸由于缺乏长时序的降水因此与极端降水事件之间的显著性较其他植被类型更为显著;高山植被、针阔叶林等适宜的环境特点是气候湿润,雨量充沛,土壤肥力高,由于近年来黄河流域更为明显的湿润化现象,因此较其他类型植被与极端降水事件之间有着负相关。综上所述,植被 NPP 易受长时序低温情况的影响,这种低温不适于植被的生长,与之相反的暖期及温暖的气温环境对植被生长更为有利,日气温的最值这类短时序的事件对植被的生长影响较为不明显;总的来说,植被 NPP 和极端天气之间的正、负相关在空间上共存,异

植被 NPP 对干旱极为敏感,持续干旱环境不适宜植被生长,同时,植被生长对降水情况存在两级分异,强降水情况也不适宜植被生长。(2) 植被 NPP 与 TXx, TNx, TN10p, TX10p, ID, FD 与植被 NPP 呈负相关关系的占比大于 80%,这些极端温度事件的增加不利于植被的生长, TXn, TNn, TN90p, TX90p, DTR 和 WSDI 与 NPP 主要以不显著的正相关关系为主,这些极端气候事件的增加有利于植被的生长。有研究也发现温度升高会增加土壤有机质的分解速率,促使土壤中的养分更容易矿化并提供给植被,从而有利于植被进入物候期<sup>[34]</sup>,有利于植被的生长,但也有研究结果发现温度的升高会使得较为干旱地区的植被生长受到土壤水分胁迫的影响,从而导致植被生长受限,但这取决于温度、太阳辐射、降水和土壤类型等因子对植被物候的共同协调。



质性较大,极端天气事件对植被生长的影响分异显著,温度升高对高海拔地区的植被是有利的,然而黄河流域植被大多分布在干旱半干旱地区,温度升高会加大蒸散发,再加上降水本就时空分布不均,且植被生长仅对长时序降水较为敏感,因此这在一定程度上加剧了干旱,植被生长受到强烈限制,因此国家和地方政府及组织必须重视极端变暖和降水不均对干旱事件加剧的问题,切实保护黄河流域植被资源,尽可能减缓天气变化对植被生长的影响。

### 3.2 结论

研究基于 MODIS NPP 及极端气温和降水数据,分析了 2000—2019 年黄河流域不同植被 NPP 空间分布、变化趋势及不同极端天气事件对不同植被类型 NPP 的影响,为不同植被生长对极端气候事件的

响应情况的研究提出了一个重要的研究框架。总体而言,20 a 黄河流域植被 NPP 空间分布上呈现出从北向南增加的趋势,大面积上表现为增加趋势。其中,NPP 最低值集中在黄河流域的干旱地区,植被类型主要为草原和荒漠植被,NPP 基本集中在  $100 \text{ gC/m}^2$  以下。半干旱区域的 NPP 集中在  $300 \sim 100 \text{ gC/m}^2$ ,植被类型为草原和荒漠植被。半湿润区作为黄河流域面积最大的区域,NPP 集中在  $300 \text{ gC/m}^2$  以上,其覆盖类型主要为草甸。NPP 与极端降水事件主要以显著和极显著正相关为主。其中,呈显著正相关关系的区域主要位于干旱区,半干旱地区的极端气候对植被 NPP 主要以显著正相关为主,半湿润地区,植被 NPP 和极端降水事件存在显著的空间异质性。TXx,TNx,TN10p,TX10p,ID,FD 与黄河流域植被 NPP 以负相关关系为主,TXn,TNn,TN90p,TX90p,DTR 和 WSDI 与植被 NPP 以正相关关系为主。但不同极端气候事件对不同植被的影响存在显著差异。这项研究表明,在黄河流域,植被 NPP 未来将容易受到未来极端气候的影响。因此,后期的研究应该在气候因子的基础上进一步分析季节性极端气候、干旱、蒸散发等因素对不同植被生长的影响,为进一步测量和预测植被对未来气候条件的响应提供模板,季节性多极端气候和干旱如何联合影响植被生长也需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 郜国明,田世民,曹永涛,等.黄河流域生态保护问题与对策探讨[J].人民黄河,2020,42(9):112-116.
- [2] Yang J, Xie B, Zhang D, et al. Climate and land use change impacts on water yield ecosystem service in the Yellow River basin China [J]. Environmental Earth Sciences, 2021,80(3):1-12.
- [3] 周帅,王义民,畅建霞,等.黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J].水利学报,2019,50(10):1231-1241.
- [4] 黄建平,张国龙,于海鹏,等.黄河流域近 40 年气候变化的时空特征[J].水利学报,2020,51(9):1048-1058.
- [5] 王飞,王宗敏,杨海波,等.基于 SPEI 的黄河流域干旱时空格局研究[J].中国科学:地球科学,2018,48(9):1169-1183.
- [6] 范建忠,李登科,周辉.GLOPEM 与 MOD17A3 NPP 的比较[J].陕西气象,2013(1):21-25.
- [7] 刘旻霞,焦骄,潘竟虎,等.青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J].生态学报,2020,40(15):5306-5317.
- [8] Roxburgh S H, Berry S L, Buckley T N, et al. What is NPP? Inconsistent accounting of respiratory fluxes in the definition of net primary production[J]. Functional Ecology, 2005,19(3):378-382.
- [9] 贾怡童,林爱文,朱弘纪.长江流域不同气候分区生长季植被总初级生产力对极端气候变化的时空响应研究[J].国土与自然资源研究,2020(1):38-42.
- [10] 胥晓.四川植被净第一性生产力(NPP)对全球气候变化的响应[J].生态学杂志,2004,23(6):19-24.
- [11] Xu H J, Wang X P. Effects of altered precipitation regimes on plant productivity in the arid region of northern China [J]. Ecological Informatics, 2016,31(1):137-146.
- [12] Henrik V W, Karsten W. Relationships between climate, productivity and vegetation in southern Mongolian drylands[J]. Basic & Applied Dryland Research, 2007,1(2):100-120.
- [13] 陈舒婷,郭兵,杨飞,等.2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应[J].自然资源学报,2020,35(10):2511-2527.
- [14] 卢玲,李新, Frank V.黑河流域植被净初级生产力的遥感估算[J].中国沙漠,2005,25(6):31-38.
- [15] Piao S L, Fang J Y, He J S. Variations in vegetation net primary production in the Qinghai-Xizang Plateau, China, from 1982 to 1999[J]. Climatic Change, 2006, 74(3):253-267.
- [16] 杜梦洁,郑江华,任璇,等.地形对新疆昌吉州草地净初级生产力分布格局的影响[J].生态学报,2018,38(13):4789-4799.
- [17] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
- [18] 朱莹莹,韩磊,赵永华,等.中国西北地区 NPP 模拟及其时空格局[J].生态学杂志,2019,38(6):1861-1871.
- [19] 李金珂,杨玉婷,张会茹,等.秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析[J].生态学报,2019,39(22):8504-8515.
- [20] Tian F, Zhang Y. Spatiotemporal patterns of evapotranspiration, gross primary productivity, and water use efficiency of cropland in agroecosystems and their relation to the water-saving project in the Shiyang River basin of northwestern China[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020,172.DOI:10.1016/j.compag.2020.105379.
- [21] Liu Q. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China[J]. Global Change Biology, 2016,22(2):644-655.
- [22] 李传华,赵军.2000—2010 年石羊河流域 NPP 时空变化及驱动因子[J].生态学杂志,2013,32(3):712-718.
- [23] 李登科,王钊.基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J].生态环境学报,2018,27(3):397-405.
- [24] 张美玲,蒋文兰,陈全功,等.基于 C-SCS 改进 CASA 模型的中国草地净初级生产力模拟[J].中国沙漠,2014, 34(4):1150-1160.



- tial from biomass through ecosystem services trade-off analysis: the case of the province of Rovigo(northern Italy)[J]. *Ecosystem Services*, 2016, 18: 1-19.
- [17] Lester S E, Costello C, Halpern B S, et al. Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial planning[J]. *Marine Policy*, 2013, 38: 80-89.
- [18] Darvill R, Lindo Z. The inclusion of stakeholders and cultural ecosystem services in land management trade-off decisions using an ecosystem services approach[J]. *Landscape Ecology*, 2016, 31(3): 533-545.
- [19] Wan N F, Chen J, Jiang J X, et al. A conceptual framework for ecosystem management based on tradeoff analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 352-361.
- [20] Karimi J D, Corstanje R, Harris J A. Bundling ecosystem services at a high resolution in the UK: trade-offs and synergies in urban landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2021, 36(6): 1817-1835.
- [21] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 等. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同[J]. *地理研究*, 2019, 38(9): 2163-2172.
- [22] Barnett A, Fargione J, Smith M P. Mapping trade-offs in ecosystem services from reforestation in the Mississippi Alluvial Valley[J]. *Bioscience*, 2016, 66(3): 223-237.
- [23] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2077.
- [24] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J]. *地理学报*, 2018, 75(5): 868-879.
- [25] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7582-7595.
- [26] 魏伟, 石培基, 周俊菊, 等. 基于 GIS 和组合赋权法的石羊河流域生态环境质量评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(1): 175-180.
- [27] 王玉纯, 赵军, 付杰文, 等. 石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异[J]. *生态学报*, 2018, 38(13): 4637-4648.
- [28] Potter Christopher S, Randerson James T, Field Christopher B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7: 811-841.
- [29] Field Christopher B, Randerson James T, Malmstrom C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [30] 朱殿珍, 初磊, 马帅, 等. 青藏高原生态屏障区生态系统服务权衡与协同关系[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 308-315.
- [31] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 等. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达[J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5465-5477.
- [32] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [33] 金贵, 王占岐, 姚小微, 等. 国土空间分区的概念与方法探讨[J]. *中国土地科学*, 2013, 27(5): 48-53.

(上接第 266 页)

- [25] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines: part I two dimensional smoothing of data with short range correlation[J]. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 152-167.
- [26] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 786-797.
- [27] Scurlock J M O, Cramer W, Olson R J, et al. Terrestrial NPP: toward a consistent data set for global model evaluation[J]. *Ecological Applications*, 1999, 9(3): 913-919.
- [28] 谷佳贺, 薛华柱, 董国涛, 等. 黄河流域 NDVI/土地利用对蒸散发时空变化的影响[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(1): 158-167.
- [29] Wang S M, Liu Q H, Huang C. Vegetation change and its response to climate extremes in the arid region of northwest China[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(7). DOI: 10.3390/rs13071230.
- [30] Dunn R J, Alexander L V, Donat M G, et al. Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(16). DOI: 10.1029/2019JD032263.
- [31] 陈晨, 王义民, 黎云云, 等. 黄河流域 1982—2015 年不同气候区植被时空变化特征及其影响因素[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(2): 56-62, 81.
- [32] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 337-353.
- [33] You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961—2003[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36(11): 2399-2417.
- [34] 王彦颖. 中国东北植被时空动态变化及其对气候响应研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2016.