DOI: 10.5846/stxb202105151273
曹云,孙应龙,陈紫璇,延昊,钱拴.2000—2020 年黄河流域植被生态质量变化及其对极端气候的响应.生态学报,2022,42(11):4524-4535.
Cao Y, Sun Y L, Chen Z X, Yan H, Qian S.Dynamic changes of vegetation ecological quality in the Yellow River Basin and its response to extreme climate during 2000—2020.Acta Ecologica Sinica,2022,42(11):4524-4535.

2000—2020 年黄河流域植被生态质量变化及其对极端气候的响应

曹　云*,孙应龙,陈紫璇,延　昊,钱　拴
国家气象中心,北京　100081

摘要:黄河流域处于我国生态保护和建设的重要战略地位,但流域生态环境脆弱,特别是在人类活动和气候变化等因素影响下,流域生态特征逐步发生变化,生态安全面临重大挑战。为了掌握极端气候变化对黄河流域植被生态特征影响,以植被生态质量指数(EQI)为评价指标,利用 2000—2020 年黄河流域气象数据和遥感数据,采用线性趋势分析、Hurst 指数和相关分析等统计方法,分析了黄河流域植被生态质量的时空变化特征,探讨了气候变化背景下极端气温指标和极端降水指标与植被 EQI 变化关系。结果表明:(1)2000—2020 年,黄河流域季尺度和年尺度植被生态质量指数均呈波动增加趋势($P<0.05$),其中夏季增加趋势最大,平均每 10 年生态质量指数增加 6.7;(2)2000 年以来黄河流域有 97.7%的地区植被生态质量指数呈上升趋势,其中趋势率>5/10a 的面积占比为 37.4%,且流域 Hurst 指数达到 0.8,表明流域植被生态质量指数具有强持续性,未来大部分流域植被将持续改善。(3)流域植被生态质量指数与极端气温类指数以负相关为主,相关系数多介于-0.3—0.3 之间,其中霜冻日数(FD0)和夏日日数(SU25)与植被生态质量具有负相关性的站点最多,占比达到 78%。(4)流域植被生态质量指数与极端降水类指数多呈正相关,其站点比例平均达到 85%,达到显著水平的站点比例平均为 37%,且相关程度也要明显高于极端气温类指数。(5)2000 年以来黄河流域降水和气温变化波动较大,但是总体上呈增加趋势,分别每 10 年增加 31.8 mm、0.33 ℃,是流域植被生态质量改善的重要自然因素,其中降水影响更为显著。

关键词:生态质量指数;极端气候事件;极端气温;极端降水;气候变化;时空变化;相关分析

Dynamic changes of vegetation ecological quality in the Yellow River Basin and its response to extreme climate during 2000—2020

CAO Yun*, SUN Yinglong, CHEN Zixuan, YAN Hao, QIAN Shuan
National Meteorological Center, Beijing 100081, *China*

Abstract: The Yellow River Basin is in an important strategic position of ecological protection and construction in China, but the ecological environment of the basin is fragile. Especially under the influence of human activities and climate changes, the ecological characteristics of the Yellow River Basin have gradually changed, and ecological security is facing major challenges. In order to understand the impact of extreme climate change on ecological quality of vegetation in time, the vegetation ecological quality index (EQI) was constructed by net primary productivity (NPP) and fractional vegetation cover (FVC) as the evaluation index. By using MODIS and meteorological data from 2000 to 2020, this paper estimated the EQI and extreme climate indices in the Yellow River Basin. Based on the EQI and extreme climate indices, the aims of the present study analyzed the temporal and spatial variation characteristics of the EQI in the Yellow River Basin, and discussed

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC1510204);国家气象中心预报员专项(Y202116)
收稿日期:2021-05-15;　　**网络出版日期**:2022-02-10
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: caoyuncy@sohu.com

the response characteristics of EQI to extreme temperature indices and extreme precipitation indices during 2000—2020, using methods of linear regression, the Hurst index, correlation analysis and other methods. The results showed that: (1) in the seasonal and annual scales, the EQI in the Yellow River Basin showed a volatility increasing trend from 2000 to 2020, which was the highest change rate of 6.7/10a in the summer. (2) In the trend analysis of EQI change, the area of increasing trend accounted for 97.7% of the basin area, of which 37.4% showed an increasing trend with the change rate >5/10a. The Hurst index of EQI in the past 21 years was 0.8, which indicated that the EQI would maintain the same trend of change in the future. (3) The EQI was negatively correlated with the extreme temperature indices, of which the correlation coefficients were mostly between −0.3 and 0.3. Among which, the number of observation stations with positive correlation between EQI and number of frost days (FD0) and number of summer days (SU25) was the largest, accounting for 78% of the total. (4) The EQI was positively correlated with the extreme precipitation indices, of which was higher than temperature indices. With positive correlation, the number of observation stations accounted for 78% of the total, which the percentage of stations that reached a significant level was 37% on average. (5) Since 2000, the variation of precipitation and temperature in the Yellow River Basin has fluctuated greatly, but generally showed an increasing trend with 31.8 mm and 0.33 °C per 10 years. Warmer and wetter climate during 2000—2020 was the main driving force to promote vegetation EQI in the Yellow River Basin, which indicated that precipitation might be the key influencing factor for the vegetation EQI.

Key Words: ecological quality index; extreme climate event; extreme temperature; extreme precipitation; climate change; spatio-temporal dynamics; correlation analysis

近百年来气候变化加剧,极端天气事件呈现频率增加、强度加剧、持续时间延长的态势,加之 21 世纪仍将以增加趋势为主,影响范围扩大,人类社会发展以及生态环境必将受到更为显著影响[1—3]。作为陆地生态系统的重要组成部分,植被—气候间相互作用形成了复杂系统,气候变化对生态系统影响研究已成为全球生态气候变化研究重点[4—5]。在气候变暖、极端天气频发的背景下,生态系统结构和过程的气候影响机制将更为复杂,加之研究起步相对较晚,近年来才逐步引起国内外学者的热切关注[6—8]。

黄河流域处于我国生态保护和建设的重要战略地位,幅员辽阔,横跨我国东中西三大区域,流域地形地貌复杂多样、水热条件时空差异明显,生态环境敏感脆弱,成为众多学者研究关注的热点区域[9—12]。20 世纪 70 年代以来,黄河流域升温趋势明显,极端高温日数在不同季节均呈显著增加趋势,极端低温日数呈显著减少趋势[13—14],但极端气温指数突变年份相对一致,多集中于 20 世纪 90 年代[15]。极端降水指数在黄河流域多呈下降趋势,但变化趋势不明显,存在时空差异[16]。已有研究显示,黄河上游总降水量和极端降水量 2006 年之后增加趋势明显[17],尤其河源区增加最为明显,进一步提高了流域洪水爆发的可能性[13];黄河中游 2000 年以来极端降水量也呈增加趋势[18];然而黄河下游极端降水量在 1961—2005 年总体呈减少趋势[13]。此外极端降水对降水总量影响越来越大[18],对黄河流域生态环境影响也逐步加强。

作为我国北方重要的生态屏障和经济地带,黄河流域植被变化研究相对较多。在气候变化和人类活动影响下,黄河流域植被 NDVI 总体呈增加趋势[19—20];植被净初级生产力(Net Primary Productivity,NPP)呈微小增加趋势,波动较大[10,21];植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover,FVC)呈现从东南向西北递减的分布,在时间变化上呈增加趋势[22—23]。黄河流域植被变化时空分异性相对明显,中上游对整个流域植被 NPP 的贡献最大[21],NDVI 在 2005 年以后增长趋势明显[20],植被覆盖度增加趋势的突变点大致在 2000 年[23]。总体来看,黄河流域植被时空变化特征受研究时段、指标方法以及植被类型的影响,存在一定差异[10,24]。

近年来随着区域气候变暖加剧,高温干旱、暴雨洪涝等极端天气事件增多,对流域生态系统产生直接或间接影响,加之不合理开发利用,造成流域部分地区植被稀疏、水土流失严重、水环境恶化[14,25—26],严重制约了黄河流域生态恢复和改善,需进一步加强流域生态气候变化研究。围绕黄河流域,以往有关植被气候变化的影响研究,主要基于植被 NDVI、净初级生产力或覆盖度等单一生态特征指标,多利用 2010 年之前数据资料,

开展流域植被时空变化分析及其气候响应研究[20,27—28],然而对黄河流域植被生态系统综合监测评估,以及对气候变化响应的研究相对缺乏,尤其是结合 2000 年以来极端气候事件的影响研究尚不多见。因此,开展黄河流域植被生态综合监测评估及其气候变化响应研究,对维护黄河流域生态安全、掌握极端气候事件的生态影响规律,具有十分重要的作用。本研究利用 2000—2020 年 MODIS 遥感资料和逐日气象数据,以生态质量指数为评价指标,分析气候变化背景下黄河流域植被生态质量的时空变化特征,揭示极端气温、降水变化对流域植被生态质量的影响,以期认识和了解黄河流域复杂多变的生态气候影响特征,为明晰黄河流域植被生态质量变化规律、应对极端天气事件影响提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄河,发源于青海南部巴颜喀拉山地区,自西向东流经 9 个省(区),最终在山东省东营市垦利县流入渤海,全流域划分为 8 个二级流域分区,在我国北方生态环境演变中具有重要地位[29—30]。黄河流域地势西高东低,西北部属干旱气候,中部属半干旱气候,东南部属半湿润气候,气候复杂多样,流域水资源总体紧张,水土流失和土地荒漠化严重,整体景观格局趋于复杂化、破碎化和分散化[21,31—32]。黄河流域多年(2000—2020 年)平均降水量 485.7 mm,气温 10.2 ℃,日照时数 2383.7 h,空间分布差异明显(图 1)。流域植被类型多样,以草地、林地、耕地三类植被生态系统分布面积最广,其中草地面积占比达到了 41%[10]。

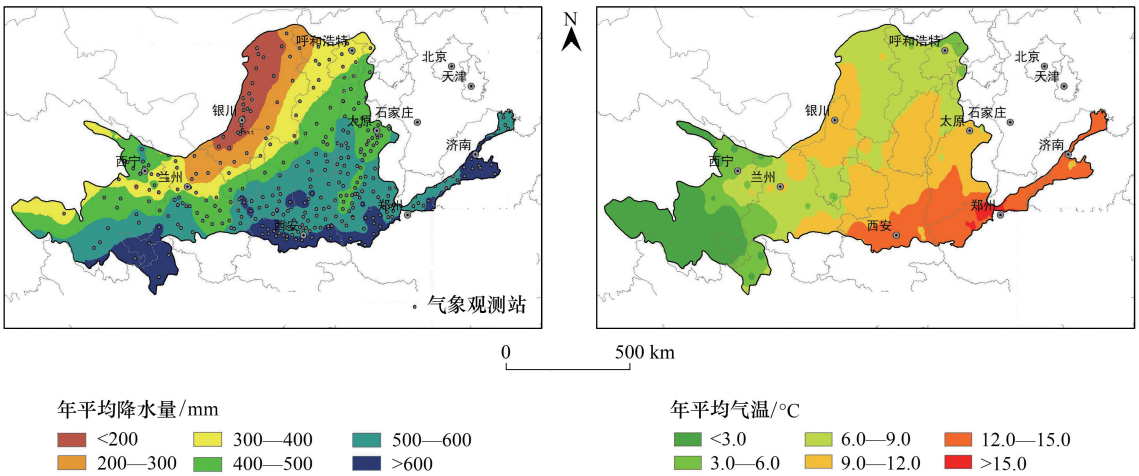

图 1 黄河流域多年平均气温和降水量

Fig.1 Spatial distribution of annual precipitation and air temperature in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

1.2 数据来源

气象数据,来自国家气象信息中心,选择黄河流域地区分布较为均匀、记录相对完整的 320 个站点,2000—2020 年逐日平均气温、日最高(低)气温、日降水量等气象数据。

遥感数据,为 NASA 提供 MOD13A3 级植被指数产品,空间分辨率 1 km;植被类型、土地利用、海拔高程、土壤质地等基础数据来自国家基础地理信息中心和中国科学院南京土壤研究所等单位。

1.3 研究方法和评价指标

1.3.1 植被生态质量指数

植被净初级生产力和覆盖度是反映区域生态系统生态质量的两个重要指标,因此采用植被净初级生产力(NPP)和覆盖度(FVC)所构建的植被生态质量指数(Ecological Quality Index,EQI)作为评价指标[33—34],反映区域植被生态质量变化特征,计算公式如下:

$$EQI = (FVC \times f_1 + \frac{NPP}{NPP_{max}} \times f_2) \times 100 \quad (1)$$

式中,EQI 为评估时段的植被生态质量指数,在 0—100 之间变化;FVC 为评估时段植被覆盖度,NPP 为评估时段的植被净初级生产力,NPP_{max}为评估时段植被 NPP 的最大值,f_1 和 f_2 为权重系数,具体技术方法参见行业标准(QX/T 494—2019)[34]。

1.3.2　极端气候指标

本研究采用广泛应用于极端天气气候事件研究的 18 个气候指数[35—38],包括 12 个极端气温指数和 6 个极端降水指数(表 1),基于 2000—2020 年黄河流域范围内 320 个气象观测站点逐日气温、日最高(低)气温、降水量等气象数据,计算极端气候指标。

表 1　极端气候指标

Table 1　Definition of extreme climate indices

分类 Categories	名称 Names	代码 ID	定义 Definitions	单位 Units
气温类指数	霜冻日数	FD0	年内日最低气温<0℃的日数	d
Temperature	夏日日数	SU25	日最高气温>25℃日数	d
indices	结冰日数	ID0	日最高气温<0℃的日数	d
	炎热夜数	TR20	日最低气温>20℃的日数	d
	生长季日数	GSL	年内日均温连续 6d 高于 5℃与连续 6d 低于 5℃间日数	d
	冷夜日数	TN10p	日最低气温<10%分位值的日数	d
	暖夜日数	TN90p	日最低气温>90%分位值的日数	d
	冷昼日数	TX10P	日最高气温<10%分位值的日数	d
	暖昼日数	TX90p	日最高气温>90%分位值的日数	d
	热持续指数	WSDI	每年至少连续 6 天日最高气温>90%分位值的累计日数	d
	冷持续指数	CSDI	每年至少连续 6 天日最低气温<10%分位值的累计日数	d
	气温日较差	DTR	日最高气温与最低气温之间差值的均值	℃
降水类指数	连续 5 日最大降水量	RX5day	连续 5 日的最大降水量	mm
Precipitation	降水强度指数	SDII	雨日(日降水量≥1mm)降水总量与降水日数之比	mm/d
indices	中雨日数	R10	日降水量≥10mm 的日数	d
	连续干旱日数	CDD	日降水量<1mm 的连续日数最大值	d
	连续湿润日数	CWD	日降水量≥1mm 的连续日数最大值	d
	雨日降水总量	PRCPTOT	雨日(日降水量≥1mm)累计降水总量	mm

1.3.3　统计分析方法

(1)趋势分析,采用一元线性回归方法,对 2000 年以来黄河流域植被生态质量指数变化趋势进行时间序列分析,以趋势率表示变化趋势的特征。趋势率正负表示增加或减少趋势,其值的大小反映增加或减少的速率;通常以其 10 年变化量来开展相应趋势分析。趋势率计算公式如下:

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

式中,n 是研究时间序列的长度;i 为第 i 年;X_i 表示第 i 年的生态质量指数;θ_{slope} 为趋势率,表示指数随时间变化的速率。

(2)Hurst 指数,利用 R/S 分析法计算植被生态质量变化的 Hurst 指数,反映变化趋势的可持续性特征。Hurst 指数值(H)在 0—1 之间,其中当 $0 \leq H < 0.5$ 时,表示变化趋势具有一定程度的反持续性,将来的变化趋势与过去的相反;当 $0.5 < H \leq 1$ 时,表示变化趋势具有持续性,未来的变化趋势与过去的一致;当 $H = 0.5$ 时,表

示变化时间序列为随机序列,未来变化趋势不受过去影响[20,39]。

(3)相关分析,为提高研究结果的精度,基于气象站点分布,提取站点区域植被生态质量指数与极端气候指数开展相关分析。采用 Pearson 相关系数,并基于相关系数的大小进行相关程度的分级[40],用于分析植被生态变化对极端气候变化的响应特征。

2 结果与分析

2.1 植被生态质量时空变化特征

2.1.1 不同季节变化特征

2000—2020 年黄河流域不同季节植被生态指数在空间分布上大致相同(图 2),从西北部向东南部生态质量指数大致呈逐步升高趋势。其中,河源地区和南部平原植被生态质量指数均要明显高于流域其他地区,而流域中北部多为黄土地貌,水土流失严重,植被生态质量偏低。春季气温逐步升高,降水增多,黄河流域植被开始返青生长,植被覆盖度和生产力相对较低,因而春季植被生态质量指数偏低。夏季是植物主要生长阶

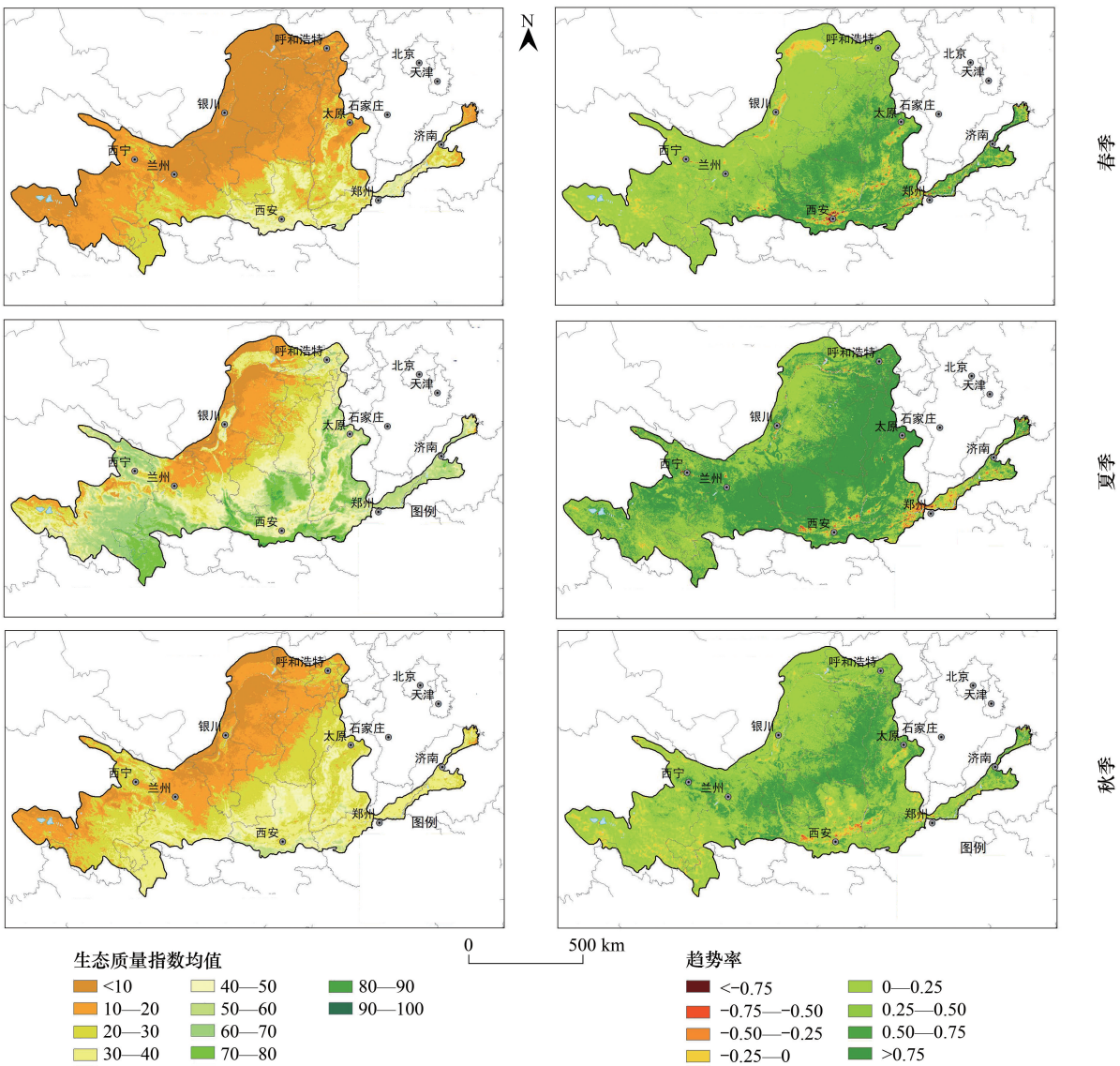

图 2 2000—2020 年黄河流域植被生态质量指数季节均值和变化趋势分布

Fig.2 Spatial distribution of seasonal average and trend of EQI in the Yellow River Basin during 2000—2020

段,流域植被生产力高、覆盖度好,平均植被生态质量指数达到 40.9,要明显高于春季和秋季。

从季节多年变化趋势来看,黄河流域大部地区植被生态质量指数多呈增加趋势(图 2),尤其陕西中北部和山西西部等地生态质量指数增加明显,季节变化率达到(5.0—7.5)/10a,明显高于流域其他地区。2000 年以来,整个流域季节植被生态质量指数呈显著上升趋势($P<0.05$),春季、夏季和秋季的趋势率分别达到 3.0/10a、6.7/10a和 3.1/10a(图 3),而且各季节 Hurst 指数均达到了 0.8 以上,变化趋势具有较强持续性,表明主要生长季流域植被生态质量指数仍将延续过去变化,保持呈上升趋势,流域植被生态质量将持续改善。

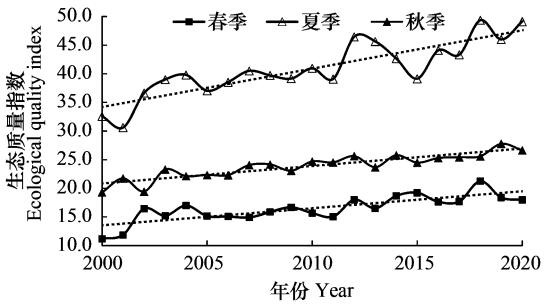

图 3　2000—2020 年不同季节黄河流域植被生态质量指数逐年变化特征

Fig.3　Inter-annual variations of different seasons of EQI in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

2.1.2　年尺度变化特征

在年尺度上,流域植被生态质量空间分布与季节上分布相似(图 4),其中东南部平原地区植被生态质量指数最高,年均值达到 30—50;中北部地区生态质量明显偏差,指数大多低于 20。2000—2020 年,流域大部地区植被生态质量指数呈上升趋势,分布面积占流域总面积的 97.7%,其中生态质量指数每年增加 0.5 以上的流域面积占比,达到 37.4%。此外,整个流域平均生态质量指数 2000 年以来也呈显著上升趋势(图 5),趋势率达到 4.4/10a($P<0.05$),2020 年生态质量指数较 2000 年提高了 53.5%,尤其 2012 年以来各年生态质量指数均高于多年均值,流域植被生态质量改善趋势明显;且流域 Hurst 指数也达到 0.8,说明整个流域植被生态质量改善趋势具有较强持续性,未来黄河流域生态质量将保持改善趋势。

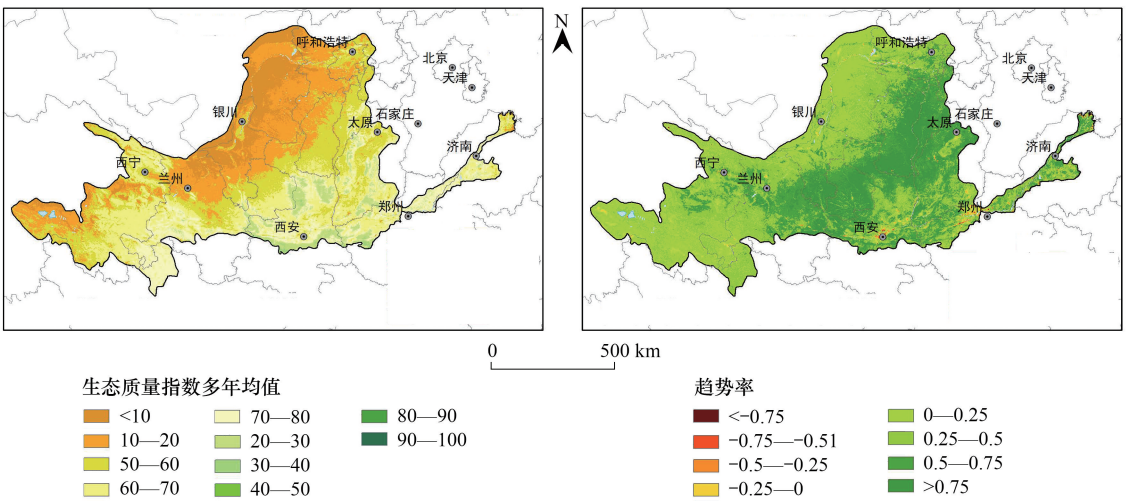

图 4　2000—2020 年黄河流域植被生态质量指数多年均值和变化趋势分布

Fig.4　Spatial distribution of annual average and trend of EQI in the Yellow River Basin during 2000—2020

2.2　植被生态质量指数对极端气候的响应

2.2.1　与极端气温指数相关分析

与极端气温类指数的相关分析显示(图 6),黄河流域植被生态质量与气温类指数相关程度偏弱,相关系数在-0.3—0.3 间的站点比例达到 60%以上,达到显著水平的站点比例为 12%。其中,冷夜日数(TN10p)、霜冻日数(FD0)以及气温日较差(DTR)与植被 EQI 间存在较强的相关性,相关系数的绝对值>0.5 的站点比例达到 10%—15%,而且相关性达到显著水平的站点比例也较高,为 17%—20%。此外,黄河流域植被生态质量

与气温类指数多以负相关为主,其站点比例平均达到65%,其中霜冻日数(FD0)和夏日日数(SU25)与植被生态质量指数具有负相关关系的站点最多,占比达到78%,说明日最低气温<0℃日数和日最高气温>25℃日数的增多,明显不利于流域植被生态质量改善。仅生长期和暖夜日数与植被生态质量指数明显以正相关为主,其站点比例分别达到72%和60%,其中与暖夜日数达到显著水平的站点占比达到了19%。

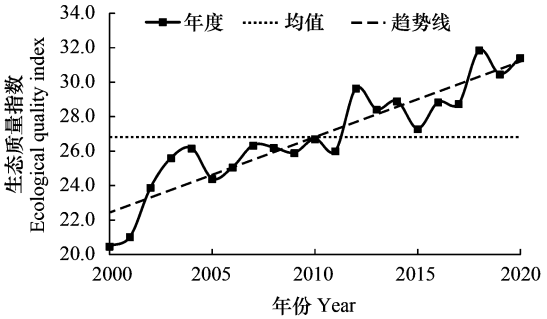

图5 2000—2020年黄河流域植被生态质量指数逐年变化特征

Fig.5 Inter-annual Variations of annual Vegetation Ecological Quality in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

对于大多数气温类指数,具有正相关的站点与具有负相关的站点,无明显空间分布差异,正、负相关的站点在整个流域都有分布,但对于热持续指数(WSDI),正、负相关的站点在流域内具有明显地理空间分布差异,具有正相关的站点多分布于流域的中北部地区,负相关的站点多分布于南部地区,说明热持续指数增加在气温相对偏低的北部地区,对植被生态质量具有一定正效应,在南部热量充足地区对植被生长具有负效应。

2.2.2 与极端降水指数相关分析

黄河流域植被生态质量指数与降水类指数的相关程度(图7),多高于气温类指数,其中与降水强度指数(SDII)、中雨日数(R10)和雨日降水总量(PRCPTOT)的相关程度明显偏强,相关系数的绝对值>0.3的站点比例分别达到71%、74%、85%。此外,黄河流域植被生态质量与降水类指数均以正相关为主,其站点比例平均达到85%,达到显著水平的站点比例平均为37%。其中,中雨日数(R10)和雨日降水总量(PRCPTOT)与生态质量指数(EQI)间呈正相关的站点最多,占比达到99%,且达到显著水平的站点比例分别为56%和68%。在降水类指数中,连续干旱日数(CDD)和连续湿润日数(CWD)与植被生态质量指数间的相关性偏弱,但正、负相关性的站点分布存在空间上差异,呈负相关的站点多分布于南部地区。

3 讨论

3.1 流域植被生态质量变化特征

在空间分布上,黄河流域植被生态质量指数从西北向东南大致呈递增趋势,这与流域植被NPP、NDVI逐渐升高分布特征相对一致[10,20,41],可能与区域分布植被生态系统类型具有较高的相关性[10]。从时间尺度来看,黄河流域NDVI多呈显著增加趋势[41],大部地区植被覆盖度也呈增加趋势[9,23,42],改善面积要大于退化面积[22]。从流域植被NDVI、NPP等不同指标变化的研究结果表明,黄河流域植被在不同时段多呈改善趋势,这与本研究植被生态质量指数2000年以来呈增加趋势的结论,基本一致。同时流域植被生态质量改善趋势具有较强持续性,袁丽华等[20]研究也发现流域植被持续改善的面积占比达到53%。

区域气候变化对植被生长具有重要影响,是黄河流域植被覆盖变化的主要限制因素[27,43]。2000年以来,黄河流域降水和气温变化波动较大,但是总体上呈增加趋势,分别为31.8mm/10a、0.33℃/10a(图8),仅降水量与植被生态质量指数具有显著的相关性。流域四季增温趋势较为明显、秋季降水显著增多,蒸散呈减少趋势[27,44],区域气候变化总体有利于流域植被恢复生长。近年来北方地区气候呈温暖湿润的变化趋势,促进了区域植被覆盖增加[42],加之部分流域干旱呈降低的趋势,特别是2005年之后植被干旱影响减弱[45—46],为黄河流域生态保护和高质量发展提供气象保障。在黄河上游地区,也发现暖湿化趋势是比较一致的气候变化特征,尤其2000年以来降水明显增多,流域植被指数呈增加趋势,且2000年作为突变点,流域植被覆盖度增加速率达到2000年以前的2倍[11,23]。

在黄河流域,气温和降水与植被NDVI具有显著正相关的面积比例达到20%以上,成为影响流域植被生态变化的重要自然因子[11,41]。然而在不同地区、不同时段,气象因子对植被生态影响存在一定差异。气候驱

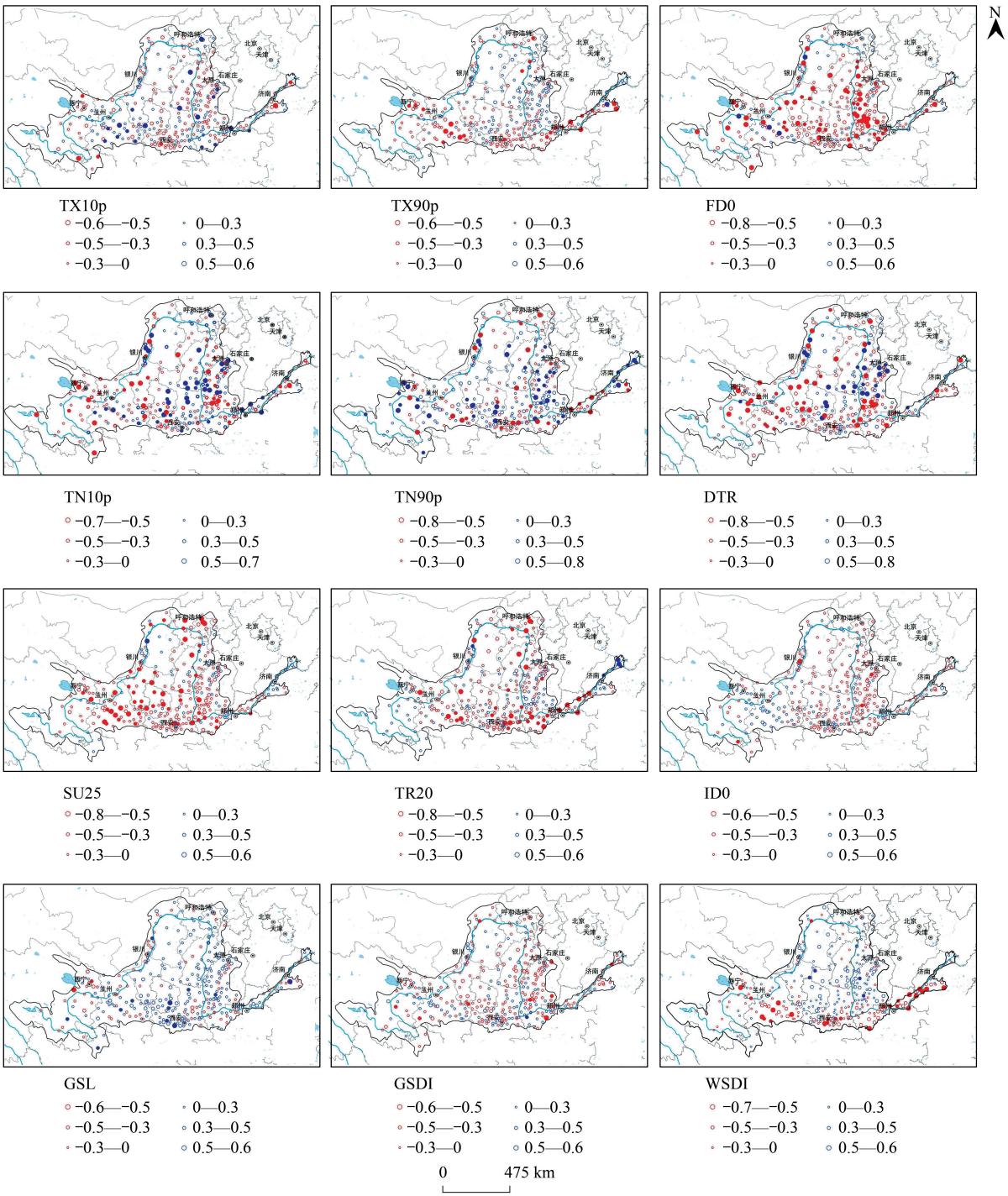

图 6　2000—2020 年黄河流域植被生态质量指数与气温类指数间相关系数的分布特征

Fig.6　Spatial distribution of correlation coefficient between EQI and the temperature indices in the Yellow River Basin during 2000—2020

红色表示负相关,蓝色表示正相关;实心表示达到 0.05 显著相关水平;FD0:霜冻日数 Number of frost days;SU25:夏日日数 Number of summer days;ID0:结冰日数 Number of icing days;TR20:炎热夜数 Number of tropical nights;GSL:生长季日数 Growing season length;DTR:气温日较差 Daily temperature range;TN10p:冷夜日数 Percentage of days when TN (daily minimum temperature)<10th percentile;TN90p:暖夜日数 Percentage of days when TN (daily minimum temperature)>90th percentile;TX10P:冷昼日数 Percentage of days when TX (daily maximum temperature)<10th percentile;TX90p:暖昼日数 Percentage of days when TX (daily maximum temperature)>90th percentile;WSDI:热持续指数 Warm spell duration index;CSDI:冷持续指数 Cold spell duration index

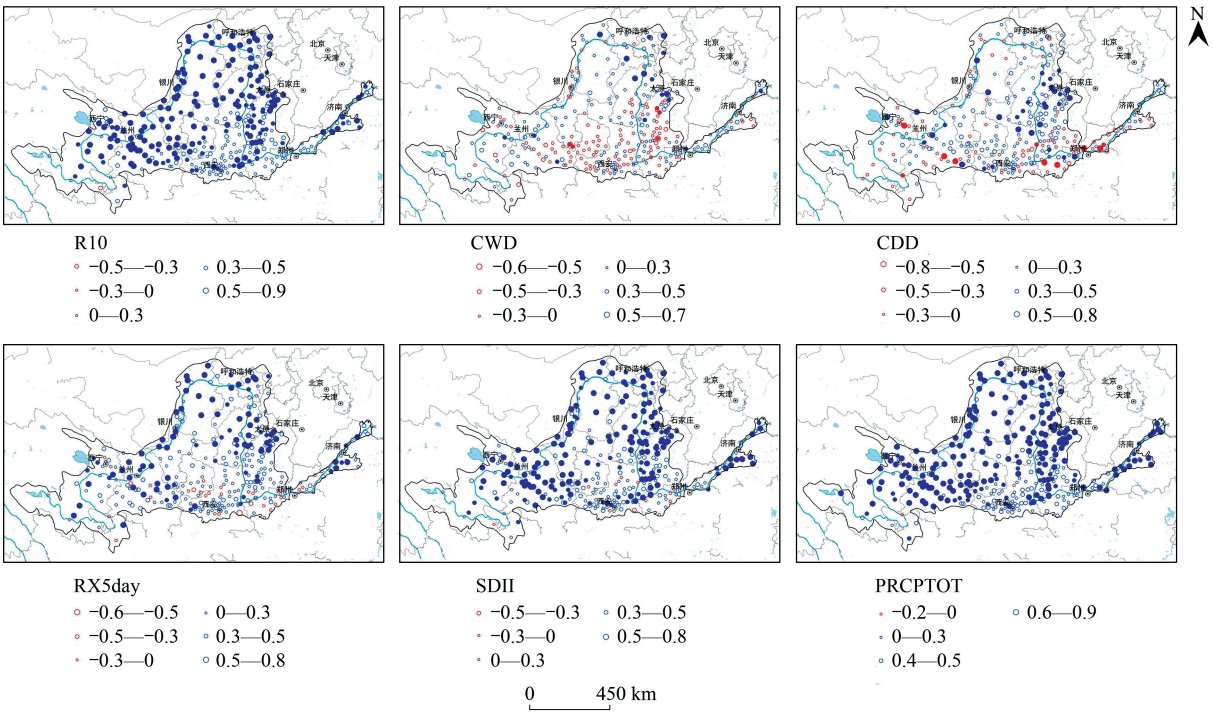

图 7 2000—2020 年黄河流域植被生态质量指数与降水类指数之间相关系数的空间分布特征

Fig.7 Spatial distribution of correlation coefficient between EQI and the precipitation indices in the Yellow River Basin during 2000—2020

RX5day:连续 5 日最大降水量 Maximum consecutive 5-day precipitation;SDII:降水强度指数 Simple precipitation intensity index;R10:中雨日数 Annual count of days when PRCP≥ 10mm;CDD:连续干旱日数 Maximum length of dry spell;CWD:连续湿润日数 Maximum length of wet spell;PRCPTOT:雨日降水总量 Annual total precipitation in wet days

动影响的研究表明,降水是黄河流域植被覆盖年际变化的主要驱动因子,其相关程度要高于与气温相关性[9,43];流域植被 NPP 变化受降水影响较大[21]。但有研究认为,黄河源区属于热量限制区,植被覆盖对气温变化更为敏感[23],特别在春季植被 NDVI 与温度呈显著正相关性,而对降水变化不敏感[47]。也有研究发现,降水量和气温对黄河流域植被 NPP 变化的影响作用相当,但存在一定的空间差异性,可能与区域水热资源条件的限制以及植被类型有关,如林地 NPP 变化主要受气温的影响,湿地和草地主要受降水的影响[10,21]。

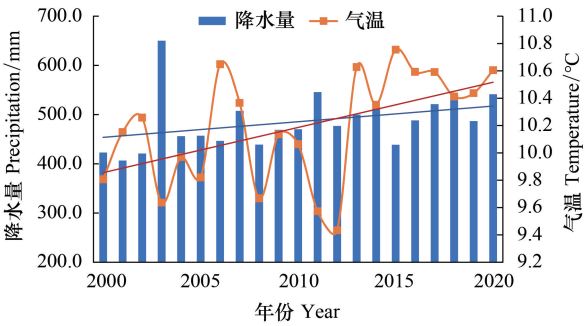

图 8 黄河流域 2000—2020 年降水量和气温的变化趋势

Fig.8 Trend of change of annual precipitation and air temperature in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

此外,除受到自然条件影响以外,流域植被变化也受到人类活动的影响。“三北”防护林、“退耕还林还草”、坡改梯等一系列生态保护和修复工程的逐步实施,显著提高了黄河流域植被 NDVI 和 LAI,对区域乃至全国尺度的植被变化、生态环境改善具有重要意义[11,48—49]。近年来黄河流域林地、草地面积有所增加,植被 NPP 提高,这与流域多年持续开展水土保持措施有关,黄河流域生态保护建设成效逐步显现[21,50]。在陕西北部、山西西部等黄河中游生态恢复和建设地区,植被生态质量出现明显改善,其他研究也发现中游地区林地面积逐步增加[49—50],且中游地区植被 NDVI 增速最快[41],较好反映出人类活动对黄河流域生态环境改善的贡献。然而城市扩张、过度放牧等人类活动成为流域部分地区植被 NPP、NDVI 下降的主要驱动力,甚至超过了气候变化的影响[20—21,51]。下一步需围绕不同植

被类型、不同气候区、不同地形地貌类型,分类开展流域植被生态质量时空变化的主导驱动力影响研究。

3.2　植被 EQI 对极端气温、降水的响应

与植被生态质量指数(EQI)相关分析表明,极端气温类指标对黄河流域植被影响具有相对一致,多以负相关为主,尤其与最低气温和最高气温相关的霜冻日数(FD0)和夏日日数(SU25)指标,有 78%站点呈负相关,有 15%站点达到显著相关($P<0.05$)。表明低温日数和高温日数的增加,均会减缓黄河流域植被的生长发育,导致流域植被生态质量下降。韩丹丹等[8]也发现黄土高原极端气温指数增加,影响植被生长,NDVI 呈下降趋势;而且其他地区研究也得到基本类似结果,极端气温指数与植被 NDVI 多呈负相关[39,52],暖、冷极端气温指数的增强在一定程度均对当地植被的生长发育产生不利影响。其主要原因在于北方地区水分条件总体偏差,时空分布不均,且高温导致生态系统蒸腾蒸发加强,影响植物生长水分需求[39,53];而气温偏低,会导致植被生长积温不足,甚至出现低温灾害,从而对植物的生长发育产生不利影响[52]。值得关注的是,到 2080 年多数极端气温指标在黄河流域整体呈现上升趋势,暖极端事件将更加严重[54],势必对流域生态系统产生更大影响。

在黄河流域,极端降水类指数对黄河流域植被 EQI 影响程度,要明显高于气温类指数,且均以正相关为主,尤其雨日和雨量类指标,具有正相关的站点比例高达到 99%,达到显著相关的站点比例超过 50%。在西北地区研究也发现,降水类指数与植被 NDVI 以正相关为主,相关程度也高于气温类指数,降水对大部地区植被生长具有积极作用,利于区域植被改善[52]。说明在水资源相对偏少的北方地区,降水对植被影响更加明显,而热量条件影响在气候相对湿润的南方地区较为重要[55—57]。杜加强等[24]研究也发现半湿润地区植被 NDVI、NPP 多与气温显著正相关,半干旱地区则与降水量的正相关性更强,植被对降水量的响应更为敏感。植被与气候变化间关系较为复杂,不同时段、不同区域间气候影响存在较大不确定性,在后续研究中需进一步加强生态气候影响过程和机理的探索。

4　结论

本文基于生态质量指数和极端气候指标,分析了黄河流域 2000—2020 年植被生态质量时空分布特征及其对极端气候变化的响应,得到以下结论:

(1)在季、年尺度,2000 年以来黄河流域植被生态质量指数整体均呈显著上升趋势,流域植被生态明显改善,其中夏季生态质量指数增加最快,平均每 10 年增加 6.7。

(2)在空间分布上,黄河流域大部地区植被生态质量指数 2000 年以来均呈上升趋势,分布面积占流域总面积的 97.7%,且 Hurst 指数达到 0.8,表明黄河流域植被改善具有强持续性,未来大部地区植被仍将持续改善。

(3)在气候变化背景下,黄河流域植被生态质量指数与极端气温类指数多以负相关为主,与极端降水类指数多呈正相关,且相关程度要明显高于极端气温类指数,尤其雨日和雨量指标,有 99%的站点与生态质量指数呈正相关,有 50%以上站点达到显著水平。

(4)2000 年以来黄河流域气温和降水总体呈增加趋势,是流域植被生态质量改善的重要自然因素,其中降水对植被影响更为显著。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] 朴世龙, 张新平, 陈安平, 刘强, 连旭, 王旭辉, 彭书时, 吴秀臣. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(9): 1321-1334.

[3] 胡宜昌, 董文杰, 何勇. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展. 地球科学进展, 2007, 22(10): 1066-1075.

[4] John R, Chen J Q, Ouyang Z T, Xiao J F, Becker R, Samanta A, Ganguly S, Yuan W P, Batkhishig O. Vegetation response to extreme climate

events on the Mongolian Plateau from 2000 to 2010. Environmental Research Letters, 2013, 8(3): 035033.
[5] 贾俊鹤, 刘会玉, 林振山. 中国西北地区植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应. 生态学报, 2019, 39(14): 5058-5069.
[6] Smith M D. The ecological role of climate extremes: current understanding and future prospects. Journal of Ecology, 2011, 99(3): 651-655.
[7] 张彬, 朱建军, 刘华民, 潘庆民. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响. 植物生态学报, 2014, 38(9): 1008-1018.
[8] 韩丹丹, 穆兴民, 高鹏, 赵广举, 孙文义, 田鹏. 黄土高原地区植被变化及其对极端气候的响应. 水土保持通报, 2020, 40(2): 247-254.
[9] 孙睿, 刘昌明, 朱启疆. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系. 地理学报, 2001, 56(6): 667-672.
[10] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 蒋卫国, 侯鹏, 李营. 2001—2010 年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2811-2818.
[11] 叶培龙, 张强, 王莺, 徐丽丽, 韩林君, 李蓉. 1980—2018 年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响. 大气科学学报, 2020, 43(6): 967-979.
[12] 董盼盼, 修玉娇, 张振明, 张明祥. 黄河流域湿地保护与高质量发展. 湿地科学, 2020, 18(3): 350-355.
[13] 陈效逑, 刘立, 尉杨平. 1961—2005 年黄河流域极端气候事件变化趋势. 人民黄河, 2011, 33(5): 3-5.
[14] 张克新, 董小刚, 廖空太, 蒋志成, 曹立国. 1960—2017 年黄河流域极端气温的季节变化特征及其与 ENSO 的相关性分析. 水土保持研究, 2020, 27(2): 185-192.
[15] 吴灿, 赵景波, 王格慧. 黄河流域极端气温指数的气候演变特征分析. 中国农业气象, 2015, 36(5): 525-535.
[16] 赵翠平, 陈岩, 王卫光, 郜志云. 黄河流域近 50a 极端降水指数的时空变化. 人民黄河, 2015, 37(1): 18-22.
[17] 马佳宁, 高艳红. 近 50 年黄河上游流域年均降水与极端降水变化分析. 高原气象, 2019, 38(1): 124-135.
[18] 贺振, 贺俊平. 1960 年至 2012 年黄河流域极端降水时空变化. 资源科学, 2014, 36(3): 490-501.
[19] 李春晖, 杨志峰. 黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系. 地理研究, 2004, 23(6): 753-759.
[20] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, 33(24): 7798-7806.
[21] 田智慧, 张丹丹, 赫晓慧, 郭恒亮, 魏海涛. 2000—2015 年黄河流域植被净初级生产力时空变化特征及其驱动因子. 水土保持研究, 2019, 26(2): 255-262.
[22] 张亚玲, 苏惠敏, 张小勇. 1998—2012 年黄河流域植被覆盖变化时空分析. 中国沙漠, 2014, 34(2): 597-602.
[23] 吴喜芳, 李改欣, 潘学鹏, 王彦芳, 张莎, 刘峰贵, 沈彦俊. 黄河源区植被覆盖度对气温和降水的响应研究. 资源科学, 2015, 37(3): 512-521.
[24] 杜加强, 舒俭民, 张林波, 郭杨. 黄河上游不同干湿气候区植被对气候变化的响应. 植物生态学报, 2011, 35(11): 1192-1201.
[25] 祝青林, 张留柱, 于贵瑞, 戴东, 蔡福, 刘新安. 近 30 年黄河流域降水量的时空演变特征. 自然资源学报, 2005, 20(4): 477-482.
[26] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 江涛. 水文变异下的黄河流域生态流量. 生态学报, 2011, 31(17): 4826-4834.
[27] 刘绿柳, 肖风劲. 黄河流域植被 NDVI 与温度、降水关系的时空变化. 生态学杂志, 2006, 25(5): 477-481, 502-502.
[28] 池源, 石洪华, 孙景宽, 李捷, 杨帆, 付战勇. 近 30 年来黄河三角洲植被净初级生产力时空特征及主要影响因素. 生态学报, 2018, 38(8): 2683-2697.
[29] 刘昌明, 郑红星. 黄河流域水循环要素变化趋势分析. 自然资源学报, 2003, 18(2): 129-135.
[30] Wang F, Wang Z M, Yang H B, Zhao Y. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow River basin based on SPEI. Science China Earth sciences, 2018, 61(8): 1098-1111.
[31] 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征. 自然资源学报, 2003, 18(4): 437-442.
[32] 刘希朝, 李效顺, 蒋冬梅. 基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估. 农业工程学报, 2021, 37(4): 265-274.
[33] 钱拴, 延昊, 吴门新, 曹云, 徐玲玲, 程路. 植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型. 生态学报, 2020, 40(18): 6573-6583.
[34] 全国农业气象标准化技术委员会. QX/T 494—2019 陆地植被气象与生态质量监测评价等级. 北京: 气象出版社, 2019.
[35] Vincent L A, Peterson T C, Barros V R, Marino M B, Rusticucci M, Carrasco G, Ramirez E, Alves L M, Ambrizzi T, Berlato M A, Grimm A M, Marengo J A, Molion L, Moncunill D F, Rebello E, Anunciação Y M T, Quintana J, Santos J L, Baez J, Coronel G, Garcia J, Trebejo I, Bidegain M, Haylock M R, Karoly D. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960—2000. Journal of Climate, 2005, 18(23): 5011-5023.
[36] 王琼, 张明军, 王圣杰, 骆书飞, 汪宝龙, 朱小凡. 1962—2011 年长江流域极端气温事件分析. 地理学报, 2013, 68(5): 611-625.
[37] 刘青娥, 吴孝情, 陈晓宏, 杨冰. 珠江流域 1960—2012 年极端气温的时空变化特征. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1356-1366.
[38] 杨志刚, 杜军, 林志强. 1961—2012 年西藏色林错流域极端气温事件变化趋势. 生态学报, 2015, 35(3): 613-621.
[39] 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. 地理研究, 2019, 38(4): 807-821.
[40] 张晓东, 朱文博, 崔耀平, 张静静, 朱连奇. 伏牛山地区森林植被动态变化对水热条件的响应. 地理研究, 2016, 35(6): 1029-1040.
[41] 郭帅, 裴艳茜, 胡胜, 杨冬冬, 邱海军, 曹明明. 黄河流域植被指数对气候变化的响应及其与水沙变化的关系. 水土保持通报, 2020, 40

(3): 1-7, 13-13.
[42] 杨胜天, 刘昌明, 孙睿. 近 20 年来黄河流域植被覆盖变化分析. 地理学报, 2002, 57(6): 679-684.
[43] 张艳芳, 吴春玲, 张宏运, 王姝. 黄河源区植被指数与干旱指数时空变化特征. 山地学报, 2017, 35(2): 142-150.
[44] 黄建平, 张国龙, 于海鹏, 王闪闪, 管晓丹, 任钰. 黄河流域近 40 年气候变化的时空特征. 水利学报, 2020, 51(9): 1048-1058.
[45] 周帅, 王义民, 畅建霞, 郭爱军, 李紫妍. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究. 水利学报, 2019, 50(10): 1231-1241.
[46] 王佳瑞, 孙从建, 郑振婧, 李晓明. 近 57 年来黄土高原干旱特征及其与大气环流的关系. 生态学报, 2021, 41(13): 5340-5351.
[47] 刘绿柳, 许红梅. 黄河流域主要植被类型 NDVI 变化规律及其与气象因子的关系. 中国农业气象, 2007, 28(3): 334-337.
[48] Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, Xu X L, Qin Y W, Ning J, Zhou W C, Zhang S W, Li R D, Yan C Z, Wu S X, Shi X Z, Jiang N, Yu D S, Pan X Z, Chi W F. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2): 195-210.
[49] 李艳忠, 刘昌明, 刘小莽, 梁康, 白鹏, 冯异星. 植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2005-2020.
[50] 张冉, 王义民, 畅建霞, 黎云云. 基于水资源分区的黄河流域土地利用变化对人类活动的响应. 自然资源学报, 2019, 34(2): 274-287.
[51] 王涛, 李贝贝, 裴春营. 植被 NDVI 对城市扩展及气候变化的响应——以西安及其附近区域为例. 干旱区地理, 2017, 40(2): 388-396.
[52] 张晋霞, 徐长春, 杨秋萍. 2001—2017 年新疆 NDVI 变化及其对极端气候的响应. 水土保持通报, 2020, 40(5): 250-256, 275-275.
[53] 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. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1866-1878.
[54] 李佳瑞, 牛自耕, 冯岚, 姚瑞, 陈鑫鑫. CMIP5 模式对长江和黄河流域极端气温指标的模拟与预估. 地球科学, 2020, 45(6): 1887-1904.
[55] 张远东, 张笑鹤, 刘世荣. 西南地区不同植被类型归一化植被指数与气候因子的相关分析. 应用生态学报, 2011, 22(2): 323-330.
[56] 朱玉果, 杜灵通, 谢应忠, 刘可, 宫菲, 丹杨, 王乐, 郑琪琪. 2000—2015 年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应. 生态学报, 2019, 39(2): 518-529.
[57] 曹云, 钱永兰, 孙应龙, 钱拴, 张晔萍, 延昊. 基于 MODIS NDVI 的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析. 生态环境学报, 2020, 29(5): 857-865.
[58] 冯磊, 杨东, 黄悦悦. 2000—2017 年川渝地区植被 NDVI 特征及其对极端气候的响应. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2316-2326.