

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.008

# 气候变化条件下黄河流域的旱涝特征

张瑞涵<sup>1</sup>, 高 涵<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;

2. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为了准确预估、及时应对流域未来的旱涝灾害事件,需定量评价气候变化条件下流域的旱涝特征。本文以黄河流域为例,基于 RCP8.5 情景下的降水数据得到流域 2011—2055 年的系列 SPI 值,并通过旱涝频率、旱涝覆盖面积率、旱涝站次比以及旱涝强度 4 种量化指标,研究气候变化条件下流域的旱涝特征。结果表明:①未来黄河流域湿润事件的影响范围大于干旱事件,流域遭受涝灾的可能性较大;②未来黄河流域发生极端湿润事件的频率较高;③未来黄河流域将由低旱易涝状态转变为低旱低涝状态;④未来黄河流域湿润事件的重现期大于干旱事件。其中,特旱事件的重现期为 6.3 年,特润事件的重现期为 5.7 年。

**关键词:** 气候变化;黄河流域;旱涝特征;SPI

**中图分类号:** P426.616

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2020)03-0323-07

## Characteristics of drought-flood in the Yellow River Basin under climate change

ZHANG Ruihan<sup>1</sup>, GAO Han<sup>2</sup>

(1. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to predict and respond to the future drought-flood disasters in the basin, it is necessary to evaluate the characteristics of drought-flood under the climate change conditions. Under the RCP8.5 scenario, the study based on the series of SPI values from the precipitation covering 2011~2055 in the Yellow River Basin, analyzed the characteristics of drought-flood by applying the frequency of drought-flood index, the coverage rate of drought-flood index, the ratio of drought-flood stations index and the intensity of drought-flood index under the climate change conditions. The results revealed that ①The impact of wet events is greater than those of drought events and that the basin is more likely to suffer from floods;②The frequency of extreme wet events will be higher;③The Yellow River Basin will change from low drought and easy flooding to low drought and low drought;④The recurrence period of wet events will be longer than drought events in the future. The recurrence period of the extreme drought event is 6.3 years and the recurrence period of the special run event 5.7 years.

**Key words:** climate change; the Yellow River Basin; drought and flood characteristics; SPI

近百年来,全球变暖对水文循环过程的影响逐渐加强,极端天气事件呈现出广发和频发的态势,其最直接的后果是引起一系列的自然灾害。干旱和洪涝是中国最主要的气象灾害之一<sup>[1]</sup>,尤其是 2020 年汛期以来,南方多地发生洪涝灾害,严重影响国民经济发展和农业生产。因此如何准确预估、提前应对流域未来的旱涝灾害是我们亟待解决的问题。

标准化降水指数(SPI)作为一种常用的旱涝指数<sup>[2-3]</sup>,由于其在计算过程中消除了降水的时空分布差异,在各个区域和各个时段都能有效反应旱涝状况,并具有良好的稳定计算特性<sup>[4]</sup>,而被广泛使用。

为此,本文以我国黄河流域为研究对象,采用 SPI 指数探究气候变化条件下流域未来的旱涝特征,以期为准确预估、提前应对旱涝事件提供支持。

收稿日期: 2020-09-04; 网络出版日期: 2020-09-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20200928.1547.019.html>

第一作者: 张瑞涵,女,硕士,工程师,研究方向为水文与水资源。E-mail: 871952887@qq.com

## 1 研究区域及数据来源

本文选取黄河流域 82 个气象站点 1966—2019 年的逐日降水量为计算资料,其中部分气象站点的日值数据出现缺测现象,采用趋势预测法对其进行插补。数据主要来源于中国气象数据共享网。各气象站点分布状况见图 1。

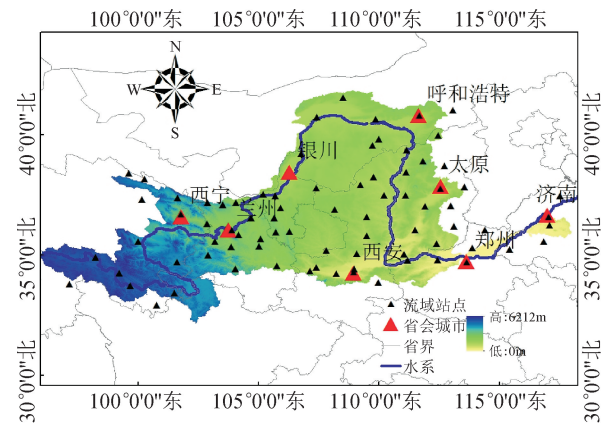


图 1 研究区域气象水文站点分布图

Fig. 1 Distribution of meteorological and hydrological stations in the study area

## 2 研究方法

### 2.1 标准化降水指数

标准化降水指数(SPI)是实测降水量相对于降水概率分布函数的偏差。本次 SPI 指标选取时间尺度为 3 个月。目前常采用 Gamma 分布函数描述某时间尺度的累积降水量,对降水量进行正态标准化处理后,进而依据标准化降水累积频率划分不同干旱等级。假设某一时间尺度累积降水量是  $x$ ,则其概率密度形式:

$$f(x)=\frac{1}{\beta\Gamma(\alpha)}x^{\alpha-1}e^{-x/\beta}(x>0)\tag{1}$$

$$\Gamma(\alpha)=\int_0^\infty x^{\alpha-1}e^{-x}dx\tag{2}$$

式中: $\Gamma$  为 Gamma 函数; $\alpha$ 、 $\beta$  分别为形状和度参数。可以采用极大似然法得到  $\alpha$ 、 $\beta$  的估计值,即:

$$\alpha=\frac{1}{4A}\left(1+\sqrt{1+\frac{4A}{3}}\right)\tag{3}$$

$$\beta=\frac{x}{\alpha}\tag{4}$$

式中: $A=\ln(x)-\frac{1}{n}\sum_i\ln(x_i)$ ,其中  $n$  为实测降水时间序列长度; $x_i$  为降水序列; $x$  为降水量多年平均值。

确定概率密度函数中的参数后,对于某一年的降水量  $x_0$ ,可求出随机变量  $x$  小于事件  $x_0$  的概率为:

$$P(x<x_0)=\int_0^{x_0}f(x)dx\tag{5}$$

则累积概率分布为:

$$H(x)=p+(1-p)P(x<x_0)\tag{6}$$

式中: $p=m/n$ ,其中  $m$  为降水系列中降水量为 0 的项数。对累积概率分布函数进行标准正态化处理,就可以反求出对应的 SPI 值。

结合 McKee 等<sup>[5]</sup>提出的干旱等级分类方法和中国气象干旱等级分类标准,依照 SPI 值可将干旱的严重程度分为 9 个等级,结果见表 1。

表 1 基于 SPI 的干旱(湿润)等级划分标准

Tab.1 SPI based drought (humid) grades

| 等级 | 干旱(湿润)状况 | 划分标准               |
|----|----------|--------------------|
| 1  | 特润       | $SPI>2.0$          |
| 2  | 重润       | $1.5<SPI\leq2$     |
| 3  | 中润       | $1<SPI\leq1.5$     |
| 4  | 轻润       | $0.5<SPI\leq1$     |
| 5  | 正常       | $-0.5<SPI\leq0.5$  |
| 6  | 轻旱       | $-1.0<SPI\leq-0.5$ |
| 7  | 中旱       | $-1.5<SPI\leq-1.0$ |
| 8  | 重旱       | $-2.0<SPI\leq-1.5$ |
| 9  | 特旱       | $SPI\leq-2.0$      |

### 2.2 旱涝特征值

本论文选用旱涝频率、旱涝站次比、旱涝覆盖面积率以及旱涝强度表征研究区域的旱涝特征。

#### 2.2.1 旱涝频率

旱涝频率是用于评价区域旱涝事件发生的频繁程度。计算公式为:

$$P=\frac{n}{N}\times100\%\tag{7}$$

式中: $n$  为发生干旱(湿润)事件的月数; $N$  为黄河流域的降水资料的总月数; $P$  为旱涝频率。

#### 2.2.2 旱涝站次比

旱涝站次比是用于评价旱涝事件的影响范围,为区域内发生干旱(湿润)的站点数占全部站点数比例。计算公式为:

$$P(i)=\frac{m}{M}\times100\%\tag{8}$$

式中: $i$  代表年份; $m$  为发生干旱(湿润)的站点数; $M$  为黄河流域气象站点数; $P(i)$  为  $i$  年的旱涝站次比。

当  $P\geq70\%$ ,为全域性干旱(湿润);当  $50\%\leq P<70\%$ 时,为区域性干旱(湿润);当  $30\%\leq P<50\%$ 及  $10\%\leq P<30\%$ 时,为部分区域性和局域性干旱(湿润);当  $P<10\%$ 时,无明显性干旱(湿润)。

#### 2.2.3 旱涝覆盖面积率

旱涝覆盖面积率也是用于评价旱涝事件的影响

范围,但该指标侧重考虑旱涝事件的面积占比,计算公式为:

$$S_d = \frac{S_1}{S_2} \times 100\% \quad (9)$$

式中: $S_d$ 为干旱覆盖面积率; $S_1$ 为干旱(湿润)区域所占面积,可采用 Thiessen 多边形法计算得到; $S_2$ 为流域总面积。

#### 2.2.4 旱涝强度

旱涝强度用于反映旱涝事件的严重程度,计算公式为:

$$S = \left( \frac{1}{m} \right) \times \sum_{j=1}^{45} \left( \sum_{i=1}^m |SPI_{ij}| \right) \quad (10)$$

式中: $S$ 为旱涝强度; $j$ 为年份; $i$ 为站点; $m$ 为发生干旱(湿润)的站点数; $SPI_{ij}$ 为 $j$ 年 $i$ 站发生干旱(湿润)的 SPI 值。

当  $0.5 \leq S < 1.0$ , 为轻度干旱(湿润);  $1.0 \leq S < 1.5$  时, 为中度干旱(湿润); 当  $S \geq 1.5$ , 为重度干旱(湿润)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 黄河流域未来气候变化情景下的降水预估

##### 3.1.1 未来气候情景的降水预估

选择全球气候模式提供的第五次国际耦合模式比较计划(CMIP5)中北京气候中心气候系统模式数据(BCC-CSM1.1),通过降尺度处理,预估黄河流域 2011—2055 年的降水数据。

目前气候系统模式提供了 4 种典型排放情景,即 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5。其中 RCP8.5 排放情景是指:在不实施有效气候变化减缓措施的情况下,人类活动导致温度气体浓度达到的最高情景,在一定程度上代表人类未来可能面临的最恶劣气候状态<sup>[6]</sup>。在该情景下,到 21 世纪末全球平均温度升幅约为  $3.7^\circ\text{C}$ <sup>[7]</sup>。其中中国地区将增温  $1.3^\circ\text{C}$  到  $5.0^\circ\text{C}$ ,接近全球平均水平,同时极端天气发生的频次和强度均有所增加<sup>[8]</sup>。因此,本文将预估 RCP8.5 情景下中国地区—黄河流域 2011—2055 年的降水数据,旨在揭示最恶劣气候状态下黄河流域的旱涝特征。

依据黄河流域 82 个气象站点 1966—2019 年的降水资料,选用 2011—2019 年数据对该气候模式降水预估结果进行验证,结果见图 2。

由图 2 可知,黄河流域气候模式预估的降水量与实测降水量较为吻合。为了进一步说明结果,采用相对误差  $Er$  对所选取气候模式下 RCP8.5 排放情景的适用性进行评价,其计算公式如下:

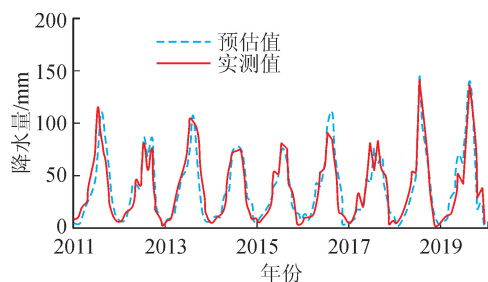


图 2 黄河流域降水量预估与实测值对比

Fig. 2 Comparisons of the estimated and measured precipitation in the Yellow River Basin

$$Er = (P_j - P_0) / P_0 \times 100\% \quad (11)$$

式中: $P_j$ 为预估降水量的平均值, $P_0$ 为实测降水量的平均值。

当  $Er > 0$  时,预估偏大;当  $Er = 0$  时,预估与实测值完全吻合;当  $Er < 0$  时,预估偏小。若  $|Er| < 0.1$ ,预估精度达到标准。结果显示,相对误差  $|Er|$  为 0.01,预估降水量的准确性较高,CMIP5 气候模式下 RCP8.5 排放情景具有较好的适用性。

##### 3.1.2 未来降水量的变化情况

以 1966—2010 年的降水量作为基准期,探究黄河流域未来(2011—2055 年)降水量的变化情况。

由图 3 可知,黄河流域各月降水量基本上呈现增加趋势,其中 6 月份的变化幅度最大,9 月份最小,1 月份和 5 月份降水变化幅度出现负值,降水量减少;四季中春季降水量增加最少,夏季降水量增加最多。总的来说,黄河流域多数月份降水增加且增幅较大,个别月份降水量减小。上述研究成果和康丽莉等<sup>[9]</sup>的结论相近,且变化趋势相同,进一步证明黄河流域未来降水量的预估较为准确。

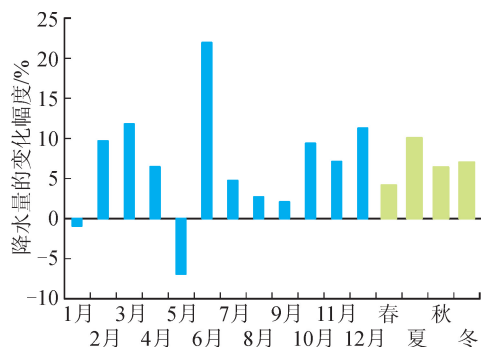


图 3 黄河流域未来降水量相对于基准期的变化幅度

Fig. 3 Range of precipitation in the Yellow River Basin relative to the base period

图 4 为黄河流域未来降水量的空间分布情况。未来时期,黄河流域降水量呈现从东南向西北方向递减的趋势,且与流域历史时期的降水空间分布规律相同,高值区主要分布在东部地区,低值区分布在

内蒙古河套平原部分地区以及宁夏银川一带,未来流域降水量介于 146~748 mm 之间。

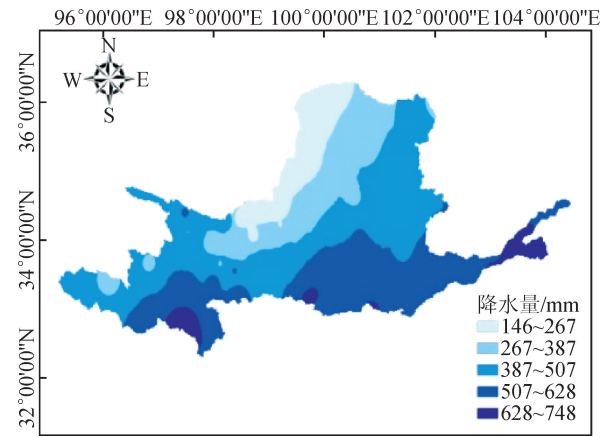


图 4 黄河流域未来降水量的空间分布特征  
Fig. 4 Spatial distribution of precipitation in the Yellow River Basin

3.2 基于 SPI 的黄河流域旱涝特征

3.2.1 时间演变特征

根据 SPI 原理以及预估的未来降水量,计算黄河流域 2011—2055 年的 SPI 值,结果见图 5。由图 5 可知,黄河流域 SPI 指数呈现波动状态,有略微增加趋势,说明黄河流域 2011—2055 年的干湿状况基本维持在同一水平。SPI 指数在 2013—2017 年、2026—2040 年以及 2049—2050 年均小于 -0.5,表征该时期流域较为干旱;SPI 指数在 2018—2025 年、2043—2048 年均大于 -0.5,表征该时期流域较为湿润。

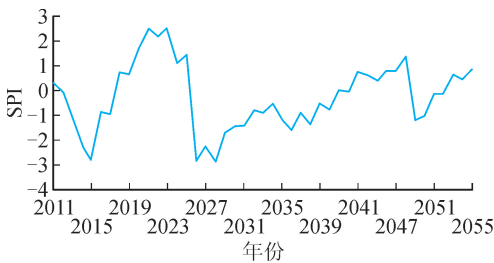


图 5 黄河流域 SPI 的变化情况  
Fig. 5 Change of SPI in the Yellow River Basin

采用旱涝站次比、旱涝覆盖面积率、旱涝强度,揭示气候变化条件下黄河流域的旱涝特征。

由图 6 可知,黄河流域在 2011—2055 年之间,多发生部分区域性和局域性干旱,其所占比例分别为 49.06%和 43.40%。2015 年和 2036 年的干旱站次比均大于 50%,达到区域性干旱。从干旱覆盖面积率分析,黄河流域年均覆盖面积率为 14.9%,其中 2015 年干旱覆盖面积率达到最大,为 60.7%。

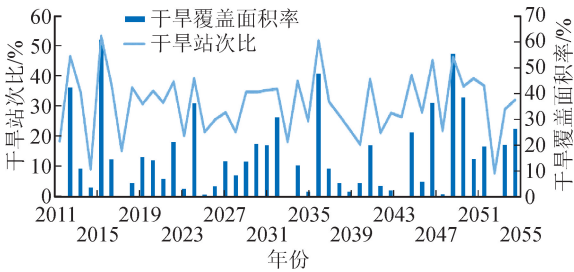


图 6 黄河流域未来干旱事件的覆盖面积率和站次比  
Fig. 6 Coverage area rate and station frequency ratio of future drought events in the Yellow River Basin

由图 7 知,黄河流域在 2011—2055 年之间,多发生部分区域性和局域性湿润。2018 年、2029 年、2031 年、2045 年、2046 年以及 2050 年的湿润站次比均大于 50%,达到区域性湿润。从湿润覆盖面积率分析,黄河流域年均覆盖面积率为 26.0%,其中 2045 年干旱覆盖面积率达到最大,为 54.0%。对比图 6 和图 7 可知,黄河流域未来湿润事件的覆盖面积率多大于干旱事件,湿润事件的影响范围多大于干旱事件,未来流域遭受涝灾的可能性较大。

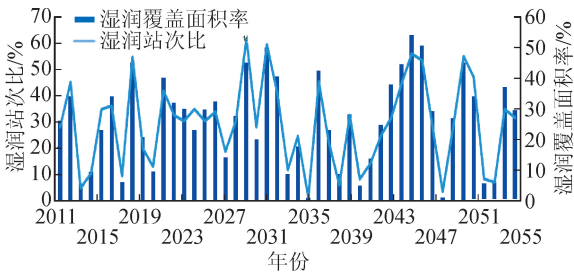


图 7 黄河流域未来湿润事件的覆盖面积率和站次比  
Fig. 7 Coverage area rate and station frequency ratio of future humid events in the Yellow River Basin

图 8 和图 9 为黄河流域未来的旱涝强度,由图 8 和图 9 可知,黄河流域在 2011—2055 年的平均干旱强度为 0.99,有 32 年的干旱强度在 1.0~1.5 之间波动,达到中度干旱强度,其他年份以轻度干旱强度为主;黄河流域在 2011—2055 年的平均湿润强度为 1.05,有 22 年的湿润强度在 1.0~1.5 之间波动,达到中度湿润强度,2020 年、2052 年的湿润强度均大于 1.5,达到了重度湿润强度。



图 8 黄河流域未来干旱事件强度  
Fig. 8 Intensity of future drought events in the Yellow River Basin

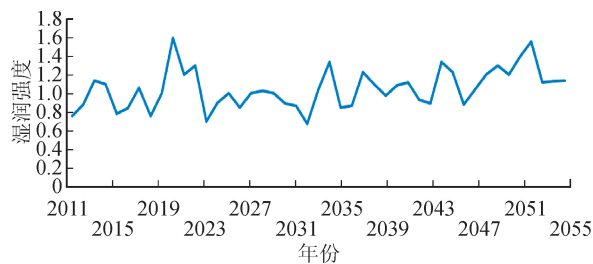


图9 黄河流域未来湿润事件强度  
Fig. 9 Intensity of future humid events  
in the Yellow River Basin

对比图 8 和图 9 可知,黄河流域在 2020—2024 年、2037 年之后湿润事件的强度略大于干旱事件。

3.2.2 空间分布特征

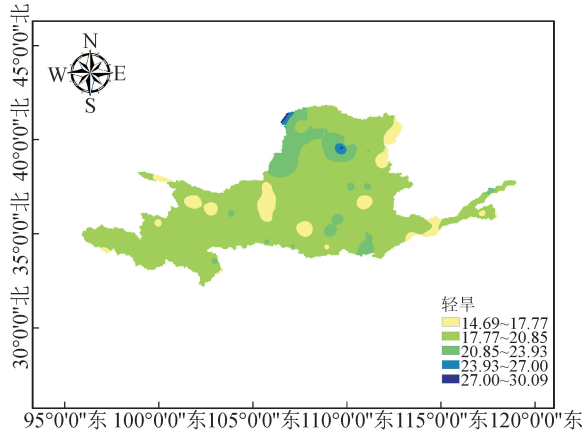
根据黄河流域 82 个气象站点的 SPI 值,计算流域轻旱(润)、中旱(润)、重旱(润)以及特旱(润)频率值,并绘制相应的空间分布图,结果见图 10 和图 11。

由图 10(a)~(d)可知,黄河流域轻旱事件发生频率处于 14.69%~30.09%之间,绝大部分地区轻旱频率小于 20.85%,内蒙古为轻旱事件的高频区;中旱事件发生频率大致在 10.50%~24.63%之间,大部分地区中旱频率小于 18.98%;重旱事件频率

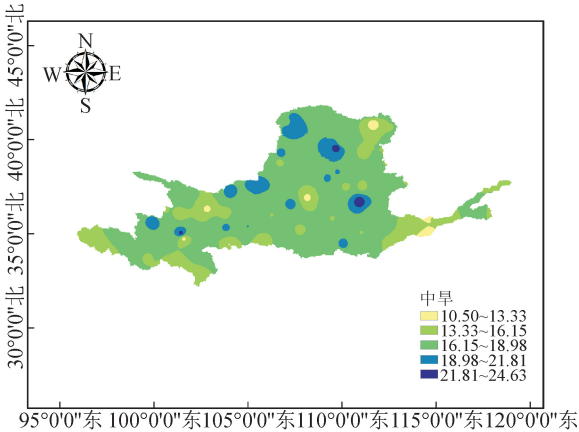
分布在 5.01%~15.15%之间,其高频区主要集中在流域的南部地带,包括青海、四川、宁夏、陕西等地;特旱事件发生频率分布在 2.69%~12.05%之间,高频区主要集中在黄河流域的西部以及东北部。整体而言,黄河流域未来极端干旱事件的高频率区主要集中在上、中游地带,这是由于黄河流域的上、中游地区属于干旱和半干旱气候类型区,降水量稀少,蒸发量大,易发生干旱事件。

由图 11(a)~(d)可知,黄河流域轻润事件发生频率处于 13.47%~27.92%之间,低频区主要集中在流域中部地带;中润事件发生频率在 8.42%~25.49%之间,大部分地区的中润频率小于 22.08%,其高频区位于青海、甘肃、陕西、山东以及山西等地;重润事件频率分布在 3.10%~18.44%之间,大部分地区重润频率小于 12.31%;特润事件发生频率分布在 1.72%~15.76%之间,高频区主要集中在黄河流域中、下游地带。

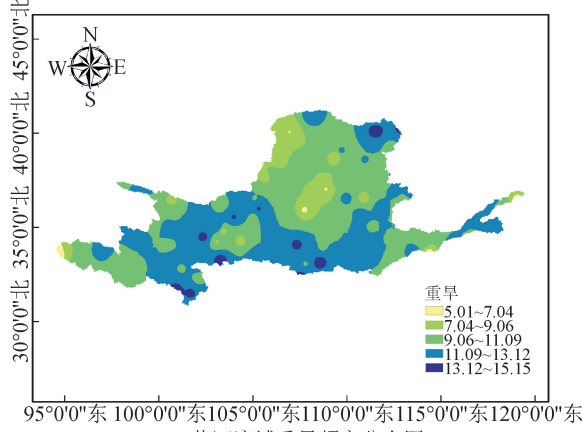
对比图 10 和图 11,可以发现黄河流域未来轻旱事件和轻润事件发生的可能性均较高,中旱事件、重旱事件以及特旱事件的频率均小于对应的湿润事件频率,由此说明未来黄河流域发生极端湿润事件的频率较高,即发生洪涝灾害的可能性大于干旱灾害。



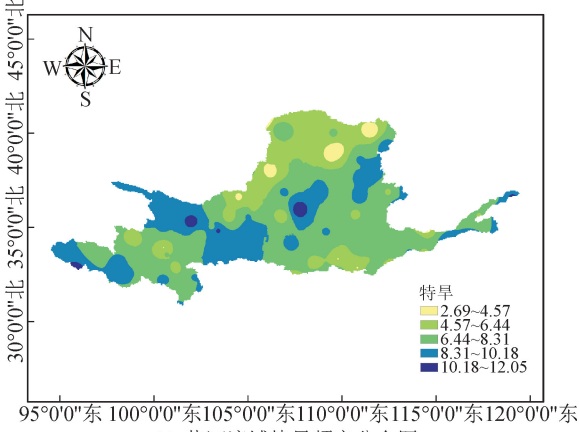
(a) 黄河流域轻旱频率分布图



(b) 黄河流域中旱频率分布图



(c) 黄河流域重旱频率分布图



(d) 黄河流域特旱频率分布图

图 10 黄河流域未来干旱事件频率分布图

Fig. 10 Frequency distribution of future drought events in the Yellow River Basin

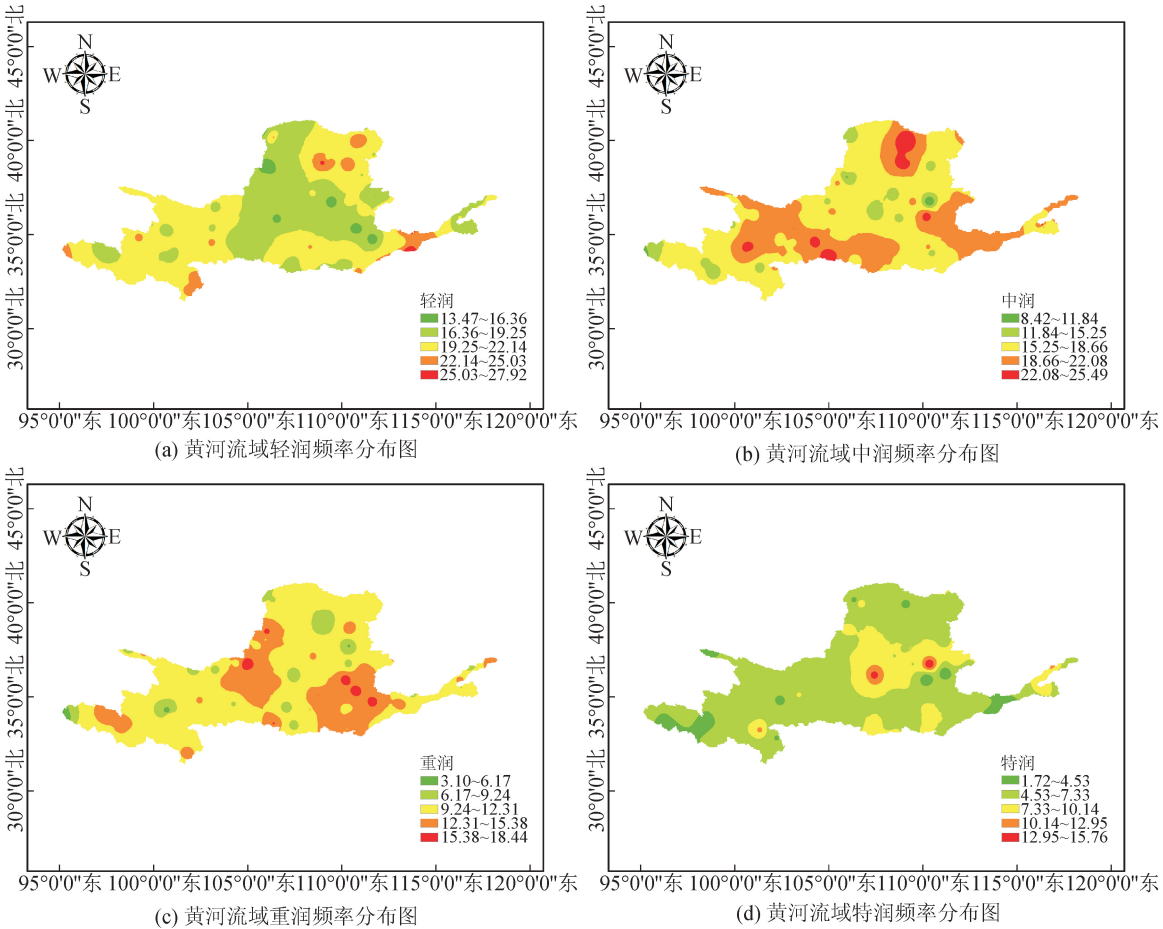


图 11 黄河流域未来湿润事件频率分布图  
Fig. 11 Frequency distribution of future humidification events in the Yellow River Basin

3.2.3 旱涝转化特征

为了探究黄河流域未来旱涝转化特征,计算不同年代下黄河流域的干旱频率和湿润频率,结果见表 2。由表 2 可知,2011—2020 年,黄河流域旱涝事

件的发生频率均较高,尤其是湿润事件,达到 48%左右,之后旱涝事件频率呈现下降-上升-下降的趋势。未来黄河流域将由低旱易涝状态转变为低旱低涝状态。

表 2 黄河流域旱涝特征变化分析表

Tab. 2 Analysis of changes in the characteristics of drought and flood in the Yellow River Basin

| 年代     | 2011—2020 | 2021—2030 | 2031—2040 | 2041—2055 | 旱涝特征变化分析          |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| 干旱频率/% | 27        | 21        | 26        | 19        | 减少 6-增加 5-减少 7    |
| 湿润频率/% | 48        | 32        | 43        | 21        | 减少 16-增加 11-减少 22 |

3.3 旱涝事件的重现期

为了更好地应对旱涝事件,对黄河流域未来的 SPI 序列进行频率计算,计算旱涝事件的重现期,结果见表 3。

表 3 黄河流域旱涝事件重现期成果表

Tab. 3 Results of the return period of drought and flood events in the Yellow River Basin

| 类型 | $E(x)$ | $C_v$ | $C_s$ | 重现期/a |     |     |     |
|----|--------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|
|    |        |       |       | 轻     | 中   | 重   | 特   |
| 干旱 | -1.28  | 0.56  | 0.34  | 1.2   | 1.6 | 2.8 | 6.3 |
| 湿润 | -1.23  | 0.34  | 0.35  | 1.1   | 1.5 | 2.6 | 5.7 |

注: $E(x)$ 为 SPI 的平均值; $C_v$ 为变差系数; $C_s$ 为偏态系数

由表 3 可知,未来黄河流域干旱事件和湿润事件的重现期有所差异。其中轻旱、中旱、重旱、特旱的重现期分别为 1.2 年、1.6 年、2.8 年和 6.3 年;轻润、中润、重润、特润的重现期分别为 1.1 年、1.5 年、2.6 年和 5.7 年。湿润事件的重现期大于干旱事件,尤其是在特旱(润)的情况下。

4 结 论

探究气候变化条件下黄河流域的旱涝特征,可得出以下结论。

1) 未来黄河流域多数月份降水增加且增幅较

大,个别月份降水量减小。

2) 未来黄河流域干旱年均覆盖面积率为 14.9%,湿润年均覆盖面积率为 26.0%。未来湿润事件的覆盖面积率多大于干旱事件,湿润事件的影响范围多大于干旱事件,流域遭受涝灾的可能性较大。

3) 未来黄河流域轻旱事件和轻润事件发生的可能性均较高,中旱事件、重旱事件以及特旱事件发生的频率均小于对应的湿润事件频率。未来流域发生极端湿润事件的频率较高,即发生洪涝灾害的可能性大于干旱灾害。

4) 未来黄河流域将由低旱易涝状态转变为低旱低涝状态。

5) 未来黄河流域湿润事件的重现期大于干旱事件。其中,特旱事件的重现期为 6.3 年,特润事件的重现期为 5.7 年。

整体来看,受人类活动影响,全球气候呈现变暖趋势。未来黄河流域气温升高,大气循环、水循环方式及速度发生改变,流域易形成降水,引起涝灾事件发生。

本研究虽仅讨论了黄河流域的旱涝特征,但其研究方法对准确预估其他流域未来的灾害发展情况同样具有指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 罗那那,巴特尔·巴克,吴燕锋. 基于标准化降水指数的北疆地区近 52 年旱涝变化特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 293-299.  
LUO Nana, BATUR BAKE, WU Yanfeng. Analysis on spatiotemporal characteristics of drought-flood based on standard precipitation index in Northern Xinjiang in recent 53 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(2): 293-299.
- [2] HAYES M J, SVOBODA M D, WILHITE D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(3): 429-438.

- [3] ZHANG Qiang, SUN Peng, SINGH V P, et al. Spatial-temporal precipitation changes (1956-2000) and their implications for agriculture in China [J]. Global and Planetary Change, 2012, 82/83: 86-95.
- [4] 杜华明,贺胜英. 岷江流域降水特性与旱涝灾害趋势分析[J], 水土保持研究, 2015, 22(1): 153-157.  
DU Huaming, HE Shengying. The analysis on characteristics of precipitation and trends in drought and flood disasters in Minjiang River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 153-157.
- [5] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLIEST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceeding of the 8th Conference on Applied Climatology, Boston: American Meteorological Society, 1993: 179-184.
- [6] 张学珍,李侠祥,张丽娟,等. RCP 8.5 气候变化情景下 21 世纪印度粮食单产变化的多模式集合模拟[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2314-2328.  
ZHANG Xuezheng, LI Xiaxiang, ZHANG Lijuan, et al. Multi-model ensemble projection of crop yield of India under RCP 8.5 climate change scenario during the 21st century[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(11): 2314-2328.
- [7] ROSENZWEIG C, ELLIOTT J, DERYNG D, et al. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(9): 3268-3273.
- [8] 人民网. 中国发布《第三次气候变化国家评估报告》[N]. 中国气象报, 2014-12-9(1).
- [9] 康丽莉, RUBY L L, 柳春, 等. 黄河流域未来气候-水文变化的模拟研究[J]. 气象学报, 2015, 73(2): 382-393.  
KANG Lili, RUBY L L, LIU Chun, et al. Simulative study of future climate and hydrological change over the Yellow River Basin [J]. Acta Meteorological Sinica, 2015, 73(2): 382-393.

(责任编辑 王绪迪, 卢 秀)