

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.014.

毛喜玲, 殷淑燕, 刘海红. 面向极端气候事件的冀鲁豫地区农业气象灾害分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 327-337.

MAO Xiling, YIN Shuyan, LIU Haihong. Analysis of Agrometeorological Disasters Facing Extreme Climate Events in Hebei, Shandong, and Henan Provinces[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 327-337.

# 面向极端气候事件的冀鲁豫地区农业气象灾害分析

毛喜玲, 殷淑燕, 刘海红

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119)

**摘要:** [目的] 研究冀鲁豫地区表征极端气候事件的极端气候指数时空变化特征, 揭示区域内极端气候事件变化规律及其对农业气象灾害的影响, 为农业生产合理利用气候资源, 提高防灾减灾能力提供科学依据。 [方法] 基于冀鲁豫地区 1960—2020 年 52 个气象站点数据, 1970—2019 年农作物受灾面积数据, 利用一元线性回归、滑动平均、R/S 分析、IDW、Mann-Kendall 和 Pettitt 检验分析了极端气候指数变化特征, 通过灰色关联度和相关分析法研究了极端气候事件对农业气象灾害的影响。 [结果] 1960—2020 年, 冀鲁豫地区气候呈暖干化趋势, 表征高温(低温)事件的指数呈上升(下降)趋势, 气候逐年暖化; 降水量略微下降, 降水强度缓慢上升; 未来该区气温会强持续上升, 降水量(降水强度)会弱持续下降(上升)。近 61 年来该地区极端高温事件发生频率与持续时间呈大范围上升趋势, 冀北与鲁东地区最为显著; 河北中南部和山东中部地区极端低温事件发生频率与持续时间显著降低; 山东中部与河南中东部地区降水极端化特征显著。1970—2019 年, 研究区农作物洪涝、旱灾、风雹受灾面积(受灾率)呈下降趋势, 低温冻害受灾面积(受灾率)略有增加; 旱灾和洪涝是主要的农业气象灾害, 高温和降水对其影响最为显著。 [结论] 未来, 河北中北部、山东中东部地区农作物受高温胁迫可能性较大, 山东中部与河南中东部地区需加强对洪涝灾害的防范, 河北东北部、河南西部地区应注意风雹、低温冻害等突发性灾害。

**关键词:** 极端气候事件; 农业气象灾害; 冀鲁豫地区

中图分类号: P467; S42

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0327-11

## Analysis of Agrometeorological Disasters Facing Extreme Climate Events in Hebei, Shandong, and Henan Provinces

MAO Xiling, YIN Shuyan, LIU Haihong

(College of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to research the temporal and spatial variation characteristics of extreme climate indices in Hebei, Shandong and Henan, and reveal the variation law of extreme climate events in the region and its impact on agricultural meteorological disasters, so as to provide scientific basis for rational utilization of climate resources in agricultural production and improvement of disaster prevention and mitigation capabilities. [Methods] Based on the data of 52 meteorological stations in Hebei, Shandong and Henan Provinces from 1960 to 2020 and the data of crop area affected from 1970 to 2019, the variation characteristics of extreme climate index were analyzed by linear regression, moving average, R/S analysis, IDW, Mann-Kendall and Pettitt test. The influence of extreme climate events on agrometeorological disasters was studied by grey correlation degree and correlation analysis. [Results] From 1960 to 2020, the climate in Hebei, Shandong and Henan Provinces showed a warming and drying trend, and the index of high temperature (low temperature) events showed an upward (downward) trend, and the climate had been warming year

收稿日期: 2022-04-21

修回日期: 2022-06-01

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42071112, 41771110)

第一作者: 毛喜玲(1997—), 女, 甘肃定西人, 硕士研究生, 研究方向为环境变化与自然灾害。E-mail: snumxl@163.com

通信作者: 殷淑燕(1970—), 女, 黑龙江木兰人, 博士, 教授, 主要从事气候变化与自然灾害研究。E-mail: yinshy@snnu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

by year. The precipitation decreased slightly and the precipitation intensity increased slowly. In the future, the temperature in this area will continue to rise strongly, and the precipitation (precipitation intensity) will continue to decline (rise) weakly. In the past 61 years, the frequency and duration of extreme high temperature events in this area showed a large-scale upward trend, especially in northern Hebei and eastern Shandong. The frequency and duration of extreme low temperature events in central and southern Hebei and central Shandong decreased significantly. The extreme characteristics of precipitation in central Shandong and central and eastern Henan were significant. From 1970 to 2019, the disaster area (disaster rate) of crop flood, drought and hail in the study area showed a downward trend, and the disaster area (disaster rate) of low temperature freezing increased slightly. Drought and flood were the main agrometeorological disasters, and high temperature and precipitation had the most significant impact on them. [Conclusion] In the future, the crops in the central and northern Hebei and the central and eastern Shandong are more likely to be subjected to high temperature stress. The prevention of flood disasters in the central Shandong and the central and eastern Henan should be strengthened. The northeastern Hebei and western Henan should pay attention to sudden disasters such as wind hail and low temperature freezing.

**Keywords:** extreme climate event; agricultural meteorological disaster; Hebei, Shandong, and Henan Provinces

近年来,在全球气候变化背景下,极端气候事件发生频次、持续时间和长度均呈持续上升趋势<sup>[1]</sup>,极端气候事件变化特征及其带来的影响成为国内外大批学者关注与研究的焦点。IPCC第六次评估报告指出,相对于1850—1900年、2001—2020年这20 a平均的全球地表温度上升了0.99℃,且2011—2020年这10 a平均的全球地表温度已上升约1.09℃;20世纪50年代以来,高温热浪等极端热事件在全球陆地区域增多、增强,极端冷事件减弱且变少,极端强降水事件在大部分陆地区域增强、增多,一些区域干旱增强<sup>[2]</sup>。曹祥会等<sup>[3]</sup>研究表明河北省最高和最低气温均有所上升,无雨日数呈弱增加趋势,导致河北省气候趋于暖干化。高文华等<sup>[4-5]</sup>对河南省1960—2014年极端气候进行分析,结果表明河南省大部分地区降水量呈减少趋势,但干旱和大暴雨日数呈增加趋势,河南东部地区极端降水事件呈增加趋势,南部地区极端降水事件则呈减弱趋势;极端冷指数(暖指数)呈下降(上升)趋势,低温日数显著减少。

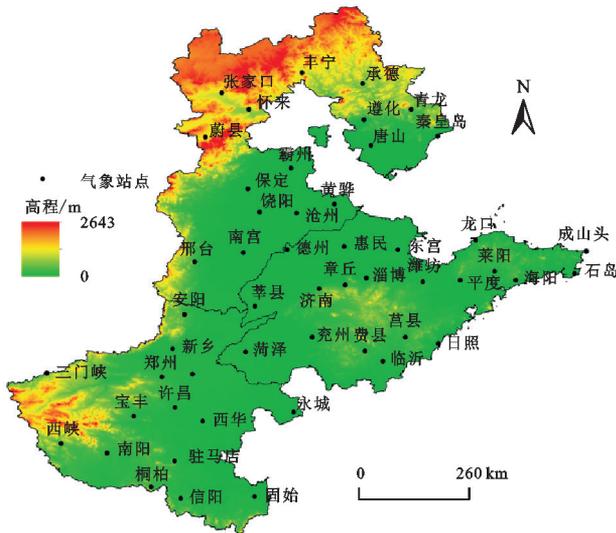
近几十年来的气候变化以及随之而来的气候不稳定性升高,导致极端气候事件增加,这些是农业气象灾害频发的主要诱因<sup>[6]</sup>。中国是受极端气候事件影响严重的国家之一,一些主要的极端气候如干旱、暴雨洪涝、低温冷害、高温、台风、雷暴以及沙尘暴等,每年都会造成一定程度的经济损失和人员伤亡,这些影响主要集中在脆弱性较强的农业领域和农村地区<sup>[7]</sup>。据统计,中国每年因气象灾害造成的损失占整个自然灾害损失的70%左右,造成的直接经济损失占国民生产总值的3%~6%<sup>[8]</sup>。农业是气候变化最敏感的领域之一,灾害性天气直接影响农业生产,气

象灾害中以干旱和洪涝最为严重,是影响农业生产的主要因素,二者所占比重为70%~85%<sup>[9]</sup>。综上所述,前人对农业气象灾害的研究<sup>[7-13]</sup>一方面主要集中在分析其时空变化特点和对粮食生产的影响,另一方面在于统计描述其带来的社会经济损失和人员伤亡,而对极端气候事件频发下农业气象灾害的变化特征研究较少。冀鲁豫地区位于我国气候变化敏感区,气候变暖下极端气候事件导致该地区农业气象灾害频发,主要包括洪涝、旱灾、风雹、低温冻害等,对农业生产和粮食安全造成了严重影响。因此,本文面向极端气候事件,利用气象数据和农作物受灾面积数据对1960—2020年冀鲁豫地区气候变化和农业气象灾害进行分析,以期能掌握冀鲁豫地区极端气候事件的变化规律及其对农业气象灾害的影响,从而在农业生产中更合理地利用气候资源,提高防灾减灾能力,促进农业经济发展。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

冀鲁豫(图1)地处黄河中下游,地处31°23′—42°40′N, 110°21′—122°42.3′E,位于我国华北地带,南北跨度较大,占地面积 $5.116 \times 10^5 \text{ km}^2$ ;区内地貌类型复杂,北部多山地、中南部平原丘陵集中,是我国重要的产粮区,尤其河南、山东为我国产粮大省,主要农作物为小麦和玉米。研究区位于我国温带大陆性季风气候区,由北向南年平均气温为-1.5~16.7℃,年均降水量400.7~900 mm,降水集中在夏秋季节,全年无霜期81~285 d,气候南北差异较大,且南部位于我国南北方气候过渡带,是我国极端气候事件的频发地和气候变化敏感区。



注:基于国家测绘地理信息局标准地图服务系统下载的审图号为 GS(2019)1698 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区及气象站点

1.2 数据来源

从中国气象数据网获取 1960—2020 年的逐日气象数据,缺测数据利用前后相邻数据进行插值获得,

表 1 极端气候指数

分类	指数	单位	定义
极端温度指数	极端最高气温	℃	每年日最高气温年最大值
	极端最低气温	℃	每年日最低气温年最小值
	夏天日数	d	日最高气温>25℃的天数
	冷日持续日数	d	每年至少连续 6 d 日最低气温<10%分位数的日数
	冷昼日数	d	日最高气温<10%分位数的日数
	冷夜日数	d	日最低气温<10%分位数的日数
极端降水指数	年降水量	mm	≥1 mm 降水量日累积量
	降水强度	mm/d	年降水量与≥1 mm 日数之比
	大雨日数	d	日降水量≥25 mm 日数
	强降水量	mm	全年日降水量>95%分位值的总降水量

(2) 反距离权重插值(IDW)。IDW 是根据插值点与样本点的距离进行加权平均的方法,原理是基于地理学中的相近相似原理,即两点距离越大,所赋权重越大,呈正相关,公式为<sup>[14]</sup>:

$$Z(X_0) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^m Z(x_i)}{\sum_{i=1}^m (d_{i0})^p} \right] / \left[ \frac{\sum_{i=1}^m 1}{\sum_{i=1}^m (d_{i0})^p} \right] \quad (1)$$

式中: $Z(X_0)$  为  $X_0$  处估计值; $m$  为预测点周围参与预测站点数量; $Z(X_i)$  为  $X_i$  处估计样本值; $d_{i0}$  为预测点到样本点的距离; $p$  为距离的幂,通常  $p=2$ <sup>[14]</sup>。

(3) 灰色关联度分析。灰色关联度是根据因素之间的历史序列相同或不同的发展趋势,来衡量因素间关联程度的一种方法<sup>[14-16]</sup>,以农作物受灾面积为参考,分别计算受灾面积与极端气候指数间的关联度:

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n S(t) \quad (2)$$

式中: $\bar{S}$  为第  $t$  个极端气候指数与受灾面积的关联度; $n$

最终在研究区内选取 52 个气象站点(图 1)用于极端气候事件的研究;从世界气象组织(WMO)推荐的 27 个极端气候指数中选取 6 个极端温度指数和 4 个极端降水指数(表 1),并通过 RCLimDex 软件计算极端气候指数值。农作物种植面积和受灾面积数据来源于国家统计局,种植面积与受灾面积分别为研究区内农作物每年的总种植面积和总受灾面积,农作物主要包括稻谷、小麦、玉米、大豆、马铃薯等,时间长度为 1978—2019 年。

1.3 研究方法

(1) 时间上用一元线性回归、11 a 滑动平均和 R/S 分析法研究各指数变化特征和未来变化趋势,并通过 Mann-Kendall 突变检验(给定显著性水平  $\alpha=0.05$ ,临界值  $U_{0.05} = \pm 1.96$ )与 Pettitt 突变检验综合分析各指数是否存在突变现象,空间上利用反距离权重(Inverse Distance Weighted)对各指数气候倾向率进行插值分析;最后运用灰色关联度分析、相关分析法探究农业气象灾害与各指数间的关系。

为时间序列长度,其值为 42; $S(t)$  为极端气候指数对受灾面积在第  $t$  年的关联系数,其计算公式如下<sup>[14-16]</sup>:

$$S(t) = \frac{\Delta \min + \rho \Delta \max}{\Delta t + \rho \Delta \max} \quad (3)$$

式中: $\Delta \min$  和  $\Delta \max$  分别为第  $t$  年极端气候指数与受灾面积绝对差的最小值和最大值; $\Delta t$  为第  $t$  年极端气候指数与受灾面积的绝对差; $\rho$  为分辨系数,通常取 0.5。

(4) 受灾率。

$$\text{受灾率} = \frac{\text{受灾面积}}{\text{种植面积}} \times 100\% \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 极端气候指数时间变化特征

2.1.1 极端温度指数 图 2 为 1960—2020 年冀鲁豫地区极端温度指数变化趋势,表征高温事件的极端最高气温与夏天日数呈上升趋势;表征低温事件的极端

最低气温呈上升趋势,冷日持续日数、冷昼日数、冷夜日数呈下降趋势。极端最高气温整体以  $0.02^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  的速率缓慢上升,并于 2002 年达到最大值  $39.5^{\circ}\text{C}$ ,与其相对应的极端最低气温整体上升速率为  $0.6^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,最大值  $-9.4^{\circ}\text{C}$  出现在 2007 年;夏天日数上升速率为  $2.3\text{ d}/10\text{ a}$ ,1994 年达到最大值 146 d;冷日持续日数呈  $-0.6\text{ d}/10\text{ a}$  的下降趋势,近 10 年来波动变幅逐年变小;冷昼日数和冷夜日数分别呈  $-1.7\text{ d}/10\text{ a}$ ,  $4.3\text{ d}/10\text{ a}$  的下降趋势,趋势线变化特征较为相似,

均于 1969 年达到最大值 41 d,48 d。11 a 滑动平均线显示各指数存在阶段性变化特点,极端最高气温在 1960—1987 年呈下降趋势,20 世纪 90 年代后转为上升趋势;极端最低气温在 1960—1970 年呈下降趋势,1970—2020 年平稳上升;1960—1970 年,冷日持续日数、冷昼日数和冷夜日数均呈上升趋势,1970 年之后开始转为下降趋势;1960 年—1973 年—2020 年,夏天日数呈先下降后上升的变化趋势。由此可知,近 61 年来冀鲁豫地区气候呈逐年暖化的变化特征。

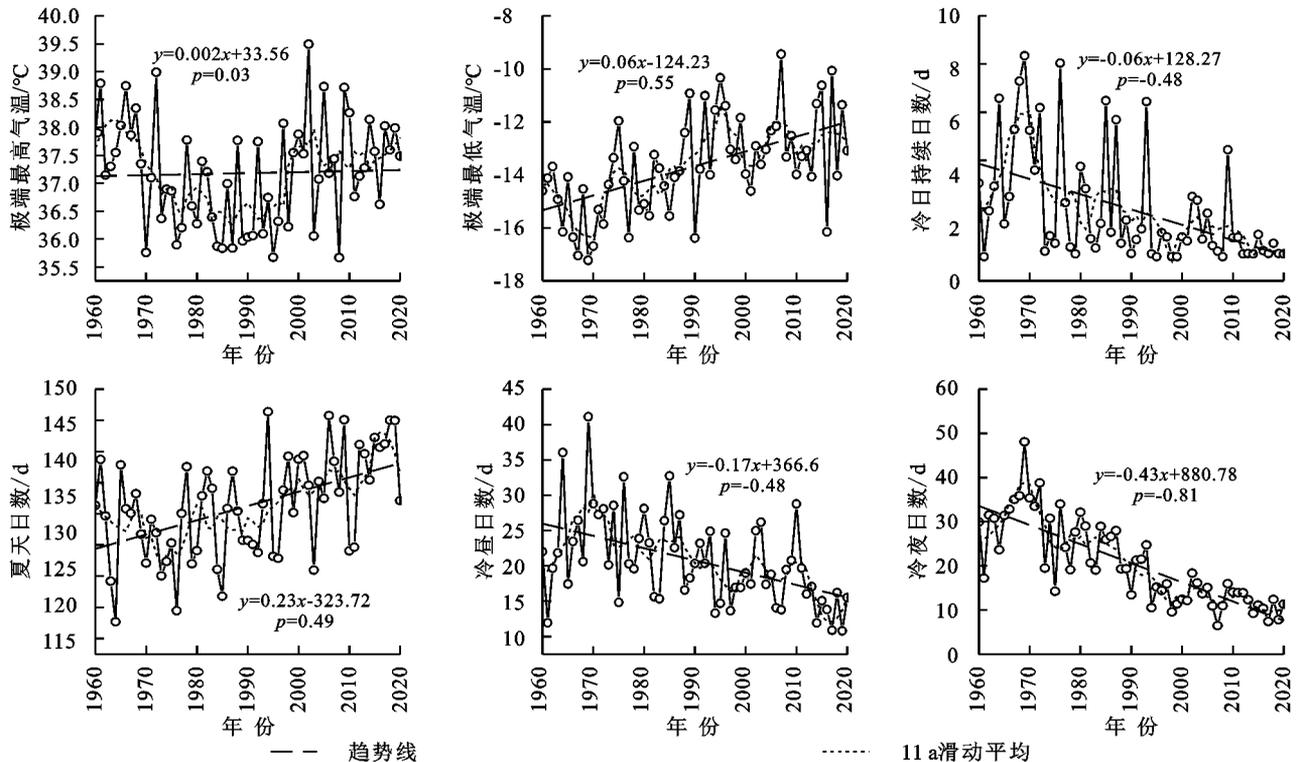


图2 极端温度指数变化趋势

图3为极端温度指数 M-K 突变检验图,UF,UB 曲线较好地描述了极端温度指数的时间变化趋势。极端最高气温和冷昼日数的 UF 和 UB 曲线存在多个交点,无明显突变年份,UF 曲线分别于 1976—2001 年和 2010 年之后超过临界线  $U_{0.05} = \pm 1.96$ ;极端最低气温 UF 曲线在 20 世纪 90 年代后超过临界线  $U_{0.05} = 1.96$ ,并在 1987 年发生突变;冷日持续日数在 1990 年发生突变,UF 曲线在 1995 年之后超过临界线  $U_{0.05} = -1.96$ ;夏天日数突变年份为 2004 年,UF 曲线在 2008 年之后超过临界线  $U_{0.05} = 1.96$ ;20 世纪 90 年代后,冷夜日数 UF 曲线超过临界线  $U_{0.05} = -1.96$ ,并在 1993 年发生突变。Pettitt 突变检验结果(表 2)显示极端温度指数均存在突变年份,但其  $p$  值均大于 0.05,表明检验出的突变点意义不显著。综合两种突变检验结果可知,各温度指数发生突变的年份较少且不显著。

2.1.2 极端降水指数 由图 4 可知,年降水量、大雨

日数、强降水量三者整体呈下降趋势,变化率分别为  $-7.8\text{ mm}/10\text{ a}$ ,  $-0.1\text{ d}/10\text{ a}$ ,  $-4.1\text{ mm}/10\text{ a}$ ,最高值均出现在 1964 年,分别为 1 045.7 mm,12.1 d,345.1 mm,三者 11 a 滑动平均线波动变幅平稳,从 2015 年起开始转为上升趋势;降水强度呈  $0.05\text{ mm}/(10\text{ d} \cdot \text{a})$  的上升趋势,于 1994 年达到最大值  $13.9\text{ mm}/\text{d}$ ,11 a 滑动平均线波动变幅较大。

M-K 突变检验(图 5)UF 与 UB 曲线的波动特征解释了年降水量、大雨日数、强降水量下降和降水强度缓慢上升的变化趋势,UF 与 UB 曲线存在多个交点,各降水指数均无明显突变年份;Pettitt 突变检验结果(表 2)显示极端降水指数均存在突变点,但其  $p$  值均大于 0.05,表明突变点意义不显著。可见,近 61 年来冀鲁豫地区降水量略有减少,降水强度缓慢上升,降水指数不存在突变年份。

2.1.3 极端气候指数未来变化趋势的预测 对各指数进行 R/S 分析,其结果见表 3。极端最高(低)气

温、冷日持续日数、夏天日数、冷昼(夜)日数的 Hurst 指数均大于 0.5,且其值分别为 0.930,0.901,0.799,0.756,0.984,0.821,说明表征温度变化的指数中极端最高(低)气温、夏天日数未来会强持续上升,而冷日持续日数、冷昼(夜)日数未来会呈强持续下降趋势;

年降水量、大雨日数、强降水量、降水强度的 Hurst 指数均大于 0.5,其值分别为 0.628,0.631,0.634,0.615,说明降水指数中年降水量、大雨日数和强降水量未来会持续下降,但持续强度较弱,降水强度未来会呈弱持续上升趋势。

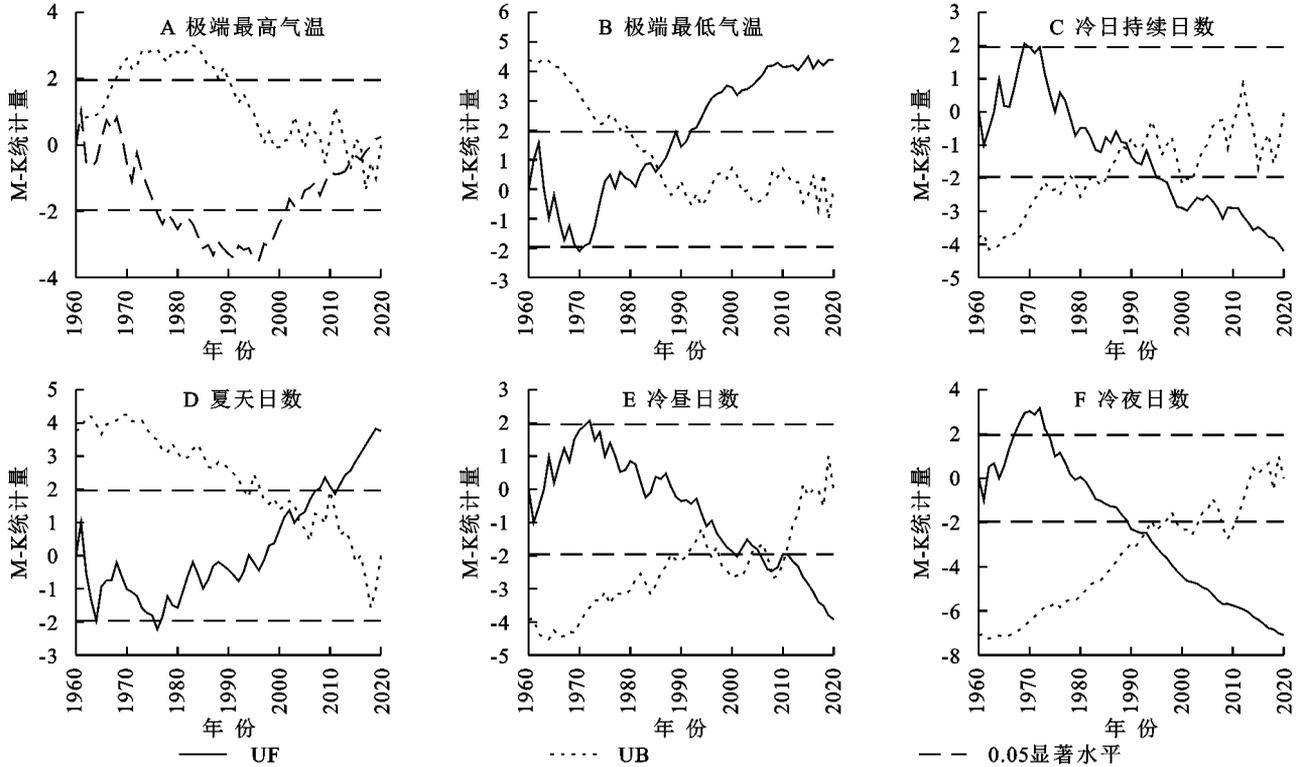


图 3 极端温度指数 Mann-Kendall 检验

表 2 Mann-Kendall, Pettitt 突变检验结果

极端气候 指数	Mann-Kendall			Pettitt			综合分析 结果
	突变年份	UF	UB	突变年份	统计值	<i>p</i> 值	
极端最高气温	—	—	—	1996	-304	0.9096	—
极端最低气温	1987	1.0669	0.0741	1987	-664	0.9999	1987
冷日持续日数	1990	-1.3427	-0.7988	1993	535	0.9994	1990
夏天日数	2004	1.2130	0.9886	1996	-570	0.9997	2004
冷昼日数	—	—	—	1993	554	0.9996	—
冷夜日数	1993	-2.4757	-2.3708	1993	880	1	1993
年降水量	—	—	—	1977	201	0.6503	—
大雨日数	—	—	—	1979	166	0.5116	—
强降水量	—	—	—	1964	192	0.6166	—
降水强度	—	—	—	1993	-242	0.7819	—

注:“—”代表未发现突变点。

## 2.2 极端气候指数空间变化特征

2.2.1 极端温度指数 图 6 为 1960—2020 年冀鲁豫地区极端温度指数气候倾向率空间变化特征。极端最高气温、冷日持续日数、冷夜日数气候倾向率在研究区内正负均有,而极端最低气温和夏天日数气候倾向率均为正值、冷昼日数气候倾向率均为负值,区域差异性较大。极端最高气温气候倾向率为正值的气象站点占 52%,高值集中分布于冀北山地区和鲁东地区,负值在

冀南、鲁西北及豫中地区较为集中;极端最低气温和夏天日数均呈上升趋势,其气候倾向率高值分别集中在河北中西部、鲁东地区;冷日持续日数与冷夜日数气候倾向率空间分布特征相似,负值气象站点数百分比分别为 94%,98%,正值在河南西部和河北丰宁、承德地区较为集中;冷昼日数气候倾向率均为负值,尤其形成以山东莱阳、平度为中心的剧烈下降趋势。

由各温度指数倾向率的空间分布特征可知,近 61 年

来冀鲁豫地区极端高温事件的发生频率与持续时间呈大范围上升趋势,冀北与鲁东地区变化特征最为显著;河北中南部和山东中部地区极端低温事件发生频率与持续时

间显著降低。冀鲁豫地区气候呈变暖趋势,冀北和鲁东地区未来发生旱灾等农业气象灾害的可能性较大,河南中南部地区也需注意突发性低温冻害等对农业生产的影响。

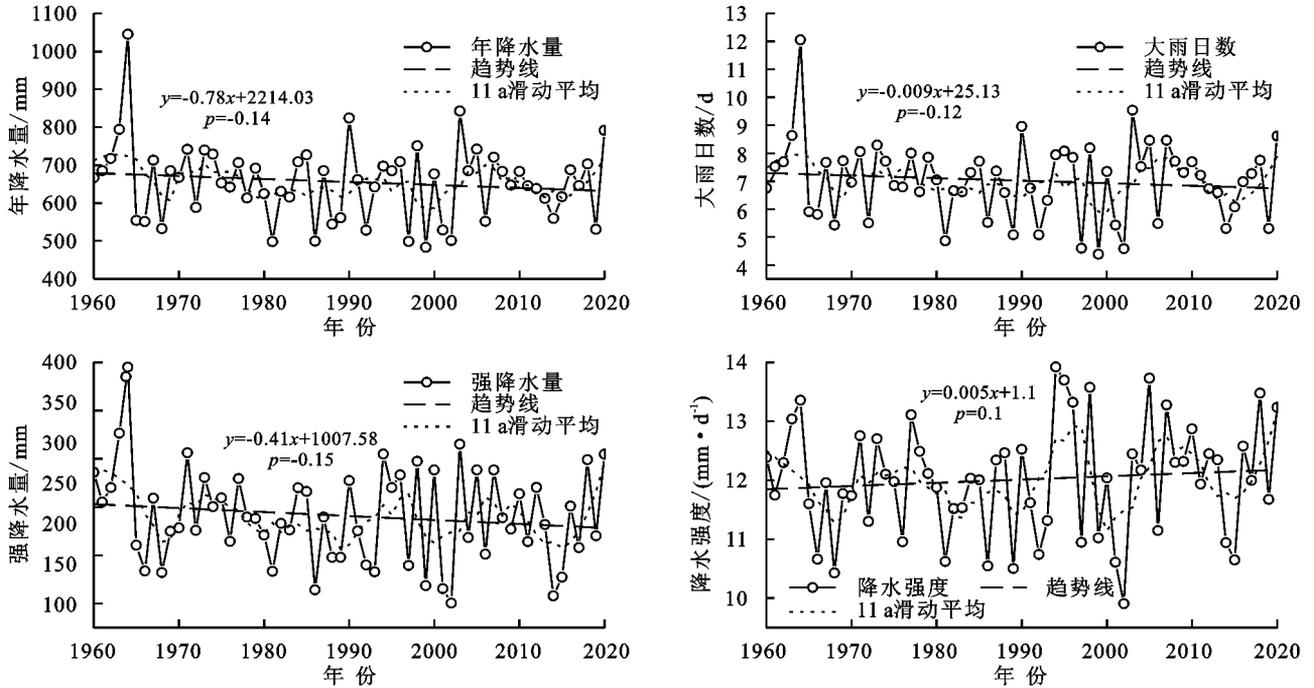


图4 极端降水指数变化趋势

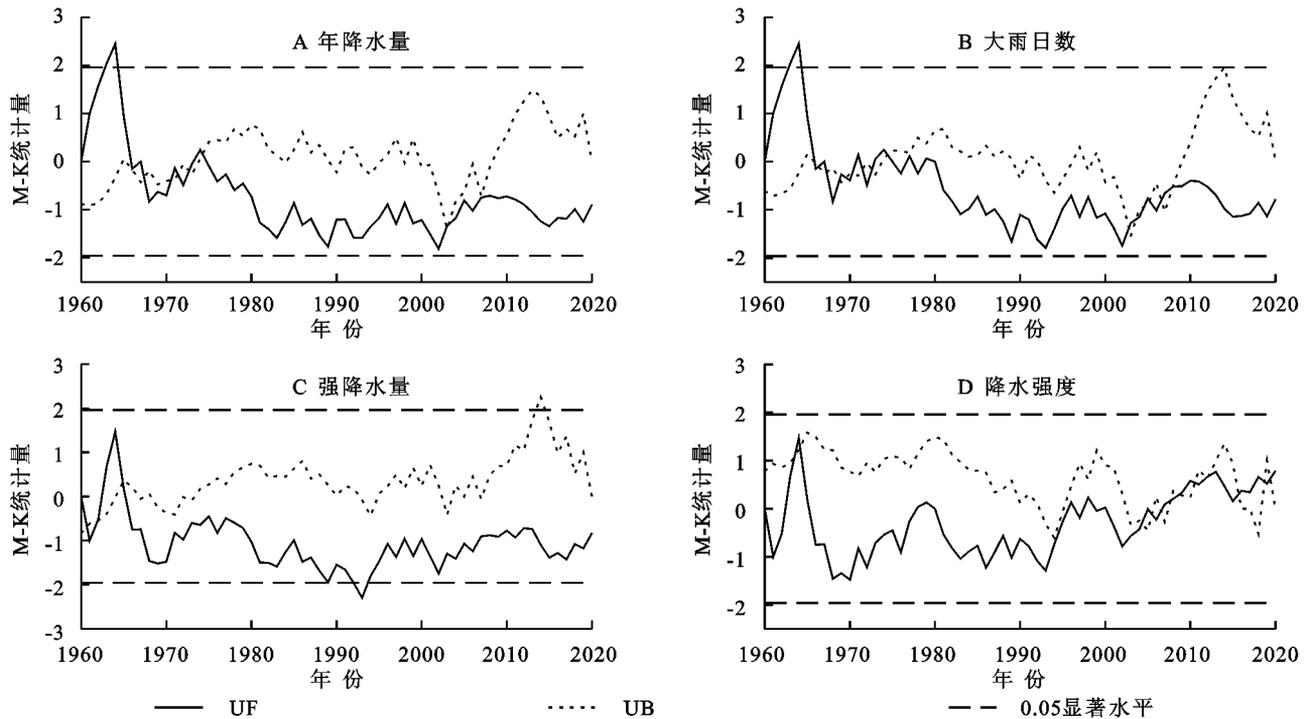


图5 极端降水指数 Mann-Kendall 检验

表3 各极端气候指数 Hurst 指数

项目	极端最高气温	极端最低气温	冷日持续日数	夏天日数	冷昼日数	冷夜日数	年降水量	大雨日数	强降水量	降水强度
历史趋势	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑
Hurst 指数	0.930**	0.901**	0.799**	0.756**	0.984**	0.821**	0.628*	0.631*	0.634*	0.615*
未来趋势	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑

注: \* 表示各指数未来变化趋势呈弱持续或弱反持续, \*\* 表示强持续或强反持续。

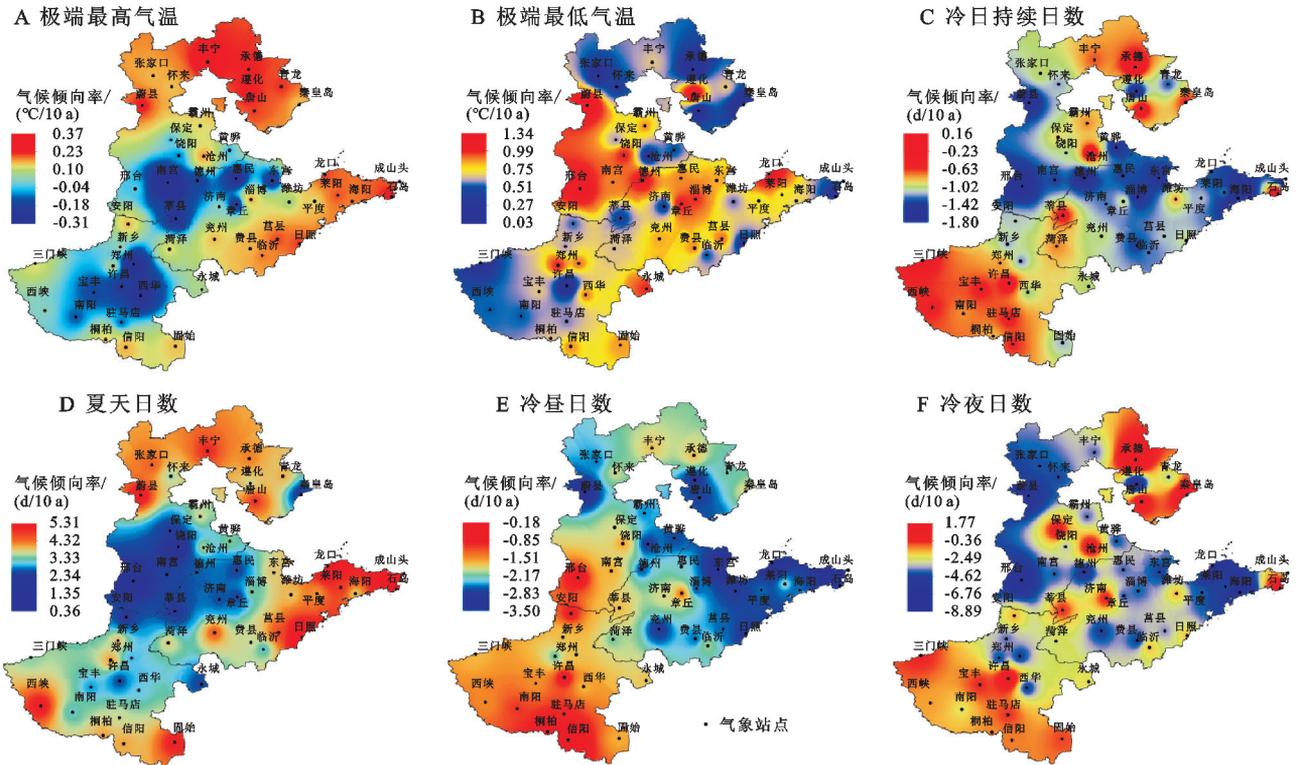


图 6 极端温度指数气候倾向率空间特征

2.2.2 极端降水指数 由图 7 可知,1960—2020 年冀鲁豫地区各降水指数气候倾向率在空间上有正有负,变化特征较为相似。年降水量、大雨日数、强降水量、降水强度在冀西北、鲁中和豫东南地区均呈上升趋势,倾向率负值则集中在河北东北、中东部和山东东部半岛地区,尤其形成以河北饶阳、沧州,山东平度、莱阳为中心的剧烈下降趋势。降水量和降水强度整体呈东北部下降、西南部上升的趋势,且降水量减少的地区降水强度同时减弱,降水量增加的区域降水强度同时增强,呈两极分化特点,表明降水趋于极端化,山东中部与河南中东部地区尤为显著,未来农业生产中需加强对极端降水事件造成的洪涝等农业气象灾害的防范。

2.3 极端气候事件对农业气象灾害的影响

2.3.1 农业气象灾害受灾面积、受灾率变化特征 受灾面积为作物产量减少 10%~30%,成灾面积为作物产量减少 30%~80%,受灾、成灾面积反映不同类型、不同强度的农业气象灾害对作物减产的影响<sup>[7]</sup>;但成灾面积受科技进步、灌溉条件等人为因素的影响,因此本文选择受灾面积进行研究<sup>[18]</sup>。从受灾面积来看(图 8A),1978—2019 年,研究区内洪涝、旱灾、风雹受灾面积均呈下降趋势,而低温冻害受灾面积呈缓慢上升趋势,受灾面积表现为旱灾>洪涝>风雹>低温冻害。

洪涝灾害受灾面积呈  $-4.19 \times 10^4 \text{hm}^2/10\text{a}$  的下降趋势,年代际变幅较大,并于 2003 年达到最大值  $1.64 \times 10^6 \text{hm}^2$ ,且由图 4 可知 1978 年以来年降水量、

大雨日数、强降水量均于 2003 年达到最大值,与洪涝受灾面积相对应;旱灾受灾面积以  $-5.76 \times 10^5 \text{hm}^2/10\text{a}$  的速率显著下降,1986 年达到最大值  $3.77 \times 10^6 \text{hm}^2$ ,以 2002 年为分界点,1978—2002 年受灾面积和年代际变幅整体大于 2002—2019 年;风雹受灾面积呈  $-5.47 \times 10^4 \text{hm}^2/10\text{a}$  的显著下降趋势,1990 年达到最大值  $7.98 \times 10^5 \text{hm}^2$ ;低温冻害受灾面积上升速率为  $2.15 \times 10^4 \text{hm}^2/10\text{a}$ ,1986—2013 年波动变幅较大,并于 2002 年达到最大值  $3.73 \times 10^5 \text{hm}^2$ 。

由于农作物每年种植面积一直在变化,所以不能片面地仅用受灾面积对灾情严重程度进行评价,而受灾率可以作为衡量灾情严重程度的标准之一<sup>[12]</sup>,因此为更好地刻画受灾严重程度的变化,本文利用受灾率对研究区内农业气象灾害变化特征做进一步分析。结果显示(图 8B),洪涝、旱灾、风雹受灾率均呈下降趋势,低温冻害受灾率呈缓慢上升趋势;1978—2019 年,旱灾和洪涝是冀鲁豫地区最主要的农业气象灾害,且旱灾所占比重最大。1986 年旱灾最为严重,受灾率达 35.78%,由图 4 可知,1986 年冀鲁豫地区年降水量达到最小值 499.8 mm,可见降水偏少造成了大范围的干旱;洪涝灾害受灾率仅次于旱灾,1996 年和 2003 年洪涝灾害最为严重,受灾率达 12.66%和 14.85%;风雹受灾率在 0.9%~7.25%波动变化,下降趋势显著;低温冻害受灾率波动平稳,整体呈缓慢上升趋势,2002 年达到峰值 3.36%。

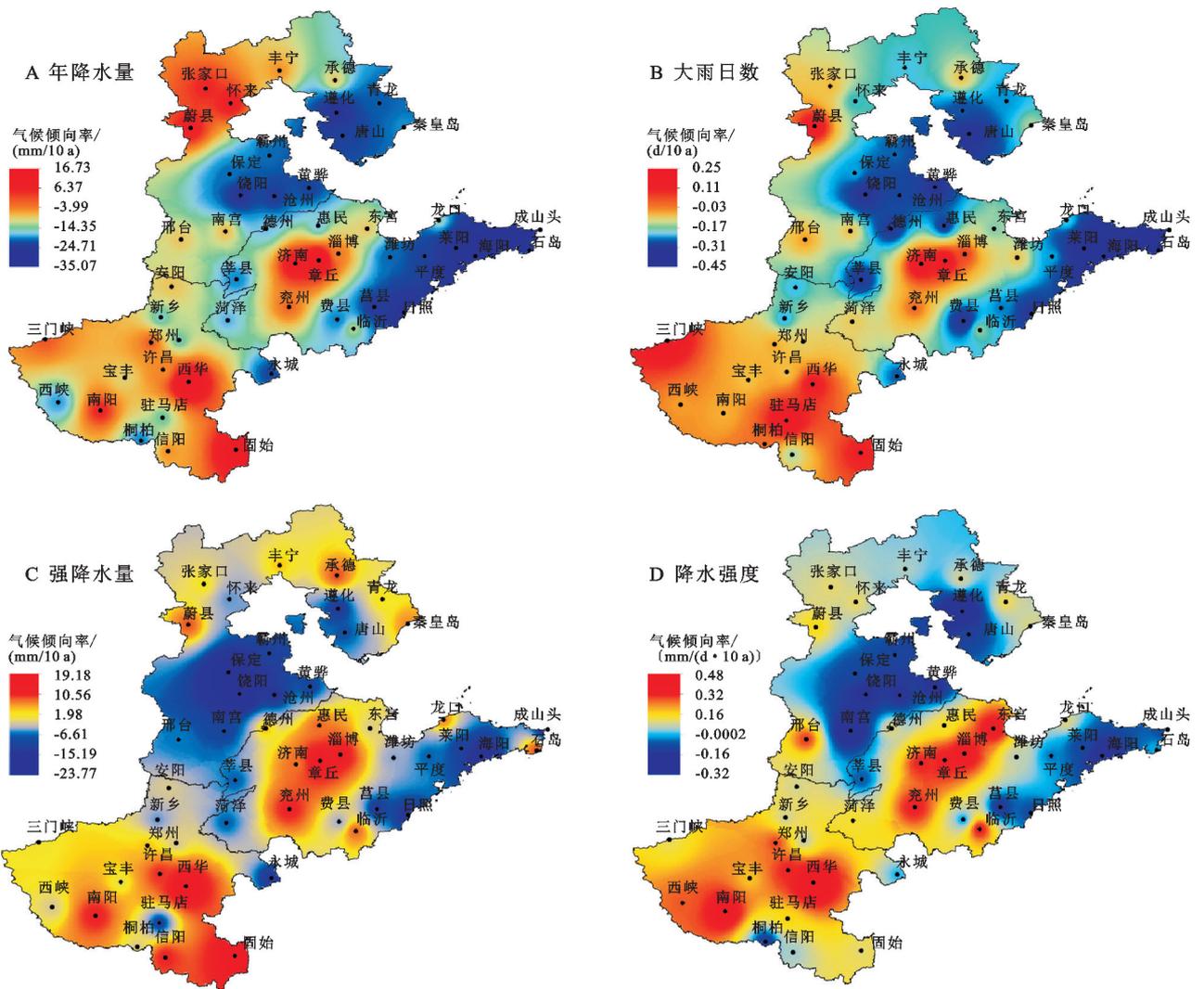


图 7 极端降水指数气候倾向率空间特征

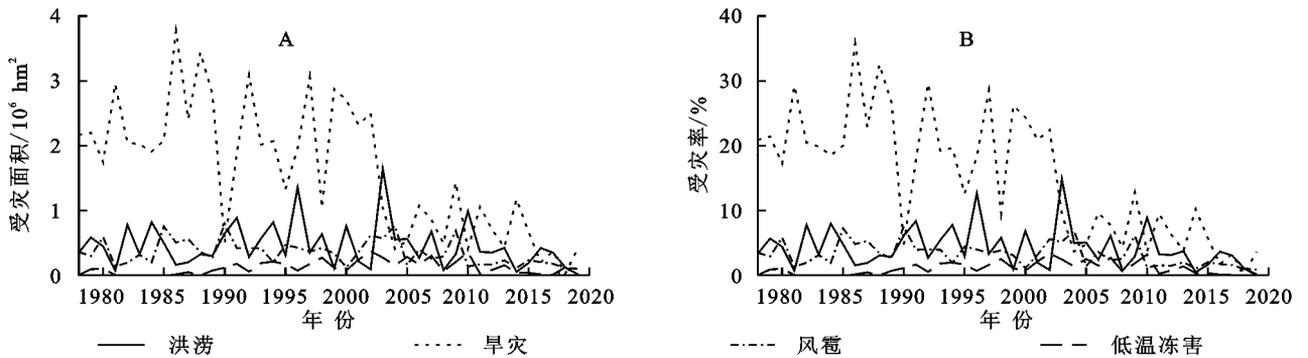


图 8 农作物受灾面积、受灾率变化趋势

2.3.2 农业气象灾害受灾率省域变化特征 图 9 为 1978—2019 年冀鲁豫地区省域结构各灾种受灾率。河北、山东、河南洪涝受灾率(图 9A)分别于 1996 年、1990 年、2003 年达到峰值 17.4%，15.31%，23.41%，洪涝受灾率整体上河南>山东>河北，呈从南向北递减的趋势；旱灾受灾率(图 9B)整体在 0~43%波动变化，山东>河南>河北；风雹受灾率(图 9C)呈由北向南递减的变化特征，年代际波动变幅较大，整体均超过 14%；1994 年之前，低温冻害受灾率(图 9D)均未超过 3%，波动变化不

明显，1994—2019 年波动变幅较大，且 1998—2002 年是冀鲁豫地区低温冻害的频发年份。

2.3.3 农业气象灾害受灾面积、受灾率与极端气候指数相关分析 对受灾面积与极端气候指数进行灰色关联度分析，可知受灾面积与极端气候指数之间表现为不同的关联序列(表 4)；其中低温冻害受灾面积受极端气候指数影响较为平稳，关联度为 0.704 8~0.769 2；洪涝、旱灾和风雹受灾面积受极端气候指数的影响波动较大，关联度分别为 0.593 5~0.811 5，

0.664 4~0.772 5,0.593 3~0.799 0;由关联度可知,洪涝受灾面积受强降雨量影响最大、冷夜日数对旱灾受灾面积影响最大、低温冻害受灾面积受夏天日数影响最大,冷昼日数对风雹受灾面积的影响最强。

将受灾率与极端气候指数作进一步的相关分析,受灾率与极端气候指数之间存在一定的相关性(表 5):洪涝受灾率与夏天日数呈极显著负相关,与冷昼日数呈

著正相关,与年降水量、大雨日数、强降雨量、降水强度均呈极显著正相关;旱灾受灾率与年降水量、大雨日数、强降雨量、降水强度均呈极显著负相关,与冷夜日数呈极显著正相关,与夏天日数呈显著负相关;风雹受灾率与冷日持续日数、冷昼日数呈极显著正相关,与冷夜日数呈显著正相关,而与夏天日数呈显著负相关;低温冻害受灾率与各极端气候指数相关性不强。

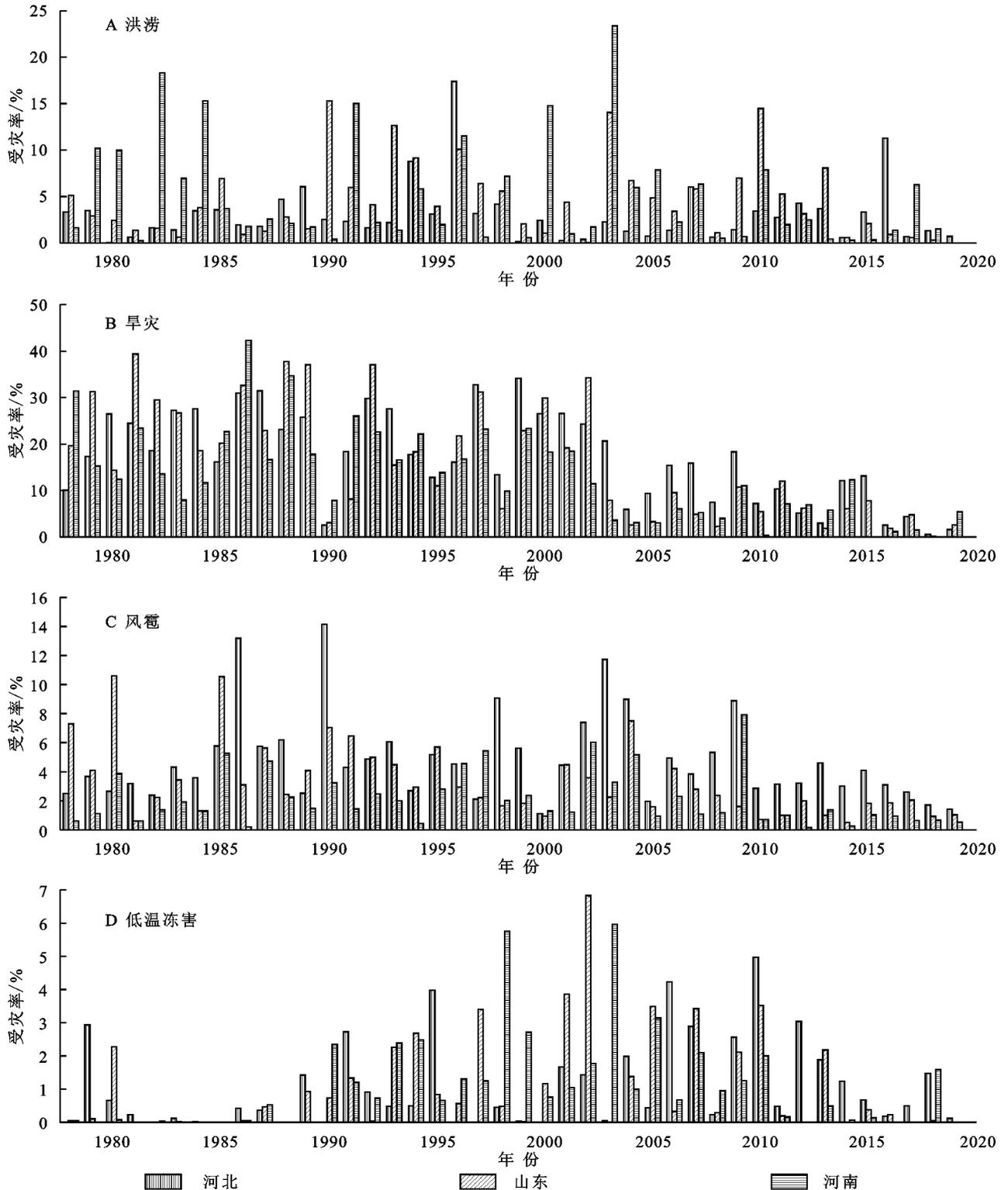


图 9 省域结构农业气象灾害受灾率

表 4 农作物受灾面积与极端气候指数灰色关联度

项目	极端最高 气温	极端最低 气温	夏天 日数	冷日持续 日数	冷昼 日数	冷夜 日数	年降 水量	大雨 日数	强降 水量	降水 强度
洪涝	0.6932	0.7184	0.6854	0.5935	0.7443	0.6918	0.7722	0.7853	0.8115	0.7194
旱灾	0.7160	0.7488	0.7089	0.6644	0.7725	0.8372	0.7026	0.7005	0.6969	0.7058
低温冻害	0.7642	0.7534	0.7692	0.7048	0.7455	0.7215	0.7546	0.7615	0.7629	0.7666
风雹	0.7289	0.7264	0.7187	0.5933	0.7990	0.7657	0.6981	0.7033	0.6981	0.7167

表 5 农作物受灾率与极端气候指数相关性

项目	极端 最高气温	极端 最低气温	夏天 日数	冷日 持续日数	冷昼 日数	冷夜 日数	年降 水量	大雨 日数	强降 水量	降水 强度
洪涝	-0.325*	-0.11	-0.413**	0.039	0.371*	0.067	0.66**	0.623**	0.626**	0.439**
旱灾	-0.02	-0.067	-0.311*	0.256	0.285	0.609**	-0.53**	-0.492**	-0.418**	-0.478**
风雹	-0.293	-0.25	-0.362*	0.476**	0.484**	0.36*	0.191	0.173	-0.039	-0.069
低温冻害	0.246	0.1	0.039	0.035	0.122	-0.258	0.223	0.223	0.207	0.227

注:\*\*表示在 0.01 水平上显著相关,\*表示在 0.05 水平上显著相关。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

在全球气候变暖的大背景下,极端气候事件频发,其持续时间与长度呈持续上升趋势<sup>[1]</sup>。本文研究发现,在极端气候事件方面,1960—2020 年冀鲁豫地区极端高温(低温)事件发生频次与持续时间呈大范围上升(下降)趋势,降水量略有减少的同时降水强度增加,气候呈暖干化趋势;冀北与鲁东地区极端高温事件变化特征最为显著,河北中南部和山东中部地区极端低温事件发生频率与持续时间显著降低,河南中东部与山东中部地区降水极端化特征尤为显著;未来气温会呈强持续上升趋势,降水量(降水强度)呈持续下降(上升)趋势,但强度较弱。此研究结果与前人研究结论相一致<sup>[3-5,19-24]</sup>,符合气候变化背景下,中国气温呈明显增加趋势,降水增加滞后且缓慢,极端降水事件存在增加趋势的研究结论<sup>[25]</sup>。

在农业气象灾害方面,旱灾和洪涝是冀鲁豫地区最主要的农业气象灾害,且旱灾所占比重最大,与前人研究结果相符<sup>[10-13,27]</sup>。1978—2019 年冀鲁豫地区农业气象灾害受灾面积和受灾率整体上呈下降趋势,且 2002—2005 年之间呈骤降趋势,这可能与 1998 年后气候变暖趋缓<sup>[13,26]</sup>,以及 21 世纪以来我国经济不断发展,农业基础设施不断完善,防灾减灾能力增强有关<sup>[13]</sup>。从各灾种受灾率来看,洪涝、旱灾、风雹受灾率均呈下降趋势,而低温冻害受灾率呈略有增加,分析其原因可能是气候变暖背景下气温升高使得农作物抗寒性减弱,作物生长期气温骤降极易导致农作物受灾<sup>[13]</sup>。在我国,干旱和洪涝是受极端气候事件影响区域最广、发生最频繁的自然灾害<sup>[7]</sup>,本文研

究发现冀鲁豫地区旱灾(洪涝)受灾率与表征极端降水事件的指数呈极显著负(正)相关,风雹受灾率与表征极端低温事件的指数呈极显著正相关,且表征极端温度事件的极端最高(低)气温、夏天日数温度阈值均超过了适宜种植粮食作物的自然环境温度<sup>[18,28-29]</sup>,并结合极端气候指数变化特征(图 2—7)和 Hurst 指数(表 3)可知,在未来农业生产中,河北中北部、山东中东部地区农作物受高温胁迫甚至旱灾的可能性较大,山东中部与河南中东部地区需加强对洪涝灾害的防范,河北东北部、河南西部地区应注意风雹、低温冻害等突发性灾害的发生。

极端气候变化不仅破坏了农业生产系统,减弱了农业生产能力,而且直接影响了农作物的品质<sup>[8]</sup>。可见,加强气候变化影响的科学研究和针对极端气候事件的适应性能力建设对推进我国农业和农村经济的可持续发展具有重要意义<sup>[7]</sup>。本文对冀鲁豫地区极端气候事件和农业气象灾害的变化特征以及二者间的关系做了一定的分析研究,在一定程度上揭示了极端气候事件对农业气象灾害的影响,但因极端气候指数由通用划分标准获取,使得此研究针对性较弱,并且在全球气候变化的背景下极端气候事件频发,农业气象灾害发生的不确定性明显增加<sup>[13]</sup>,因此,在未来研究中,极端气候指数划分标准应与作物生长适宜温度阈值建立关系,重视单灾种研究的同时,更要注重灾害系统的分析研究,探究不同灾害类型的群发性和多元关系<sup>[9]</sup>,从而提高农业生产中对气候资源的合理利用和防灾减灾能力。

#### 3.2 结论

(1) 1960—2020 年,冀鲁豫地区气候呈暖干化趋势。表征高温事件的极端最高气温、夏天日数呈上升趋势,表征低温事件的极端最低气温呈上升趋势,

冷日持续日数、冷昼日数、冷夜日数呈下降趋势;降水指数中降水量略微下降的同时降水强度缓慢上升;各气候指数突变年份较少且不显著;未来该区气温会呈强持续上升趋势,降水量(降水强度)会呈持续下降(上升)趋势,但其强度较弱。

(2) 空间上,近 61 年来冀鲁豫地区极端高温事件的发生频率与持续时间呈大范围上升趋势,冀北与鲁东地区变化特征最为显著;河北中南部和山东中部地区极端低温事件发生频率与持续时间显著降低;山东中部与河南中东部地区降水极端化特征尤为显著。

(3) 1970—2019 年,洪涝、旱灾、风雹受灾面积(受灾率)呈下降趋势,低温冻害受灾面积(受灾率)呈弱上升趋势,受灾面积(受灾率)均表现为旱灾 > 洪涝 > 风雹 > 低温冻害;旱灾和洪涝是冀鲁豫地区最主要的农业气象灾害,高温和降水是影响该地区农业气象灾害的主要气候因素。

#### 参考文献:

- [1] 殷聪,杨飞.“一带一路”区域极端气候事件变化及其对典型农业区生长季的影响[J].中国农业气象,2021,42(6):463-474.
- [2] 翟盘茂,周佰铨,陈阳,等.气候变化科学方面的几个最新认知[J].气候变化研究进展,2021,17(6):629-635.
- [3] 曹祥会,龙怀玉,张继宗,等.河北省主要极端气候指数的时空变化特征[J].中国农业气象,2015,36(3):245-253.
- [4] 高文华,李开封,崔豫.1960—2014 年河南极端气温事件时空演变分析[J].地理科学,2017,37(8):1259-1269.
- [5] 高文华,李开封,靳豪豪.1960—2014 年河南极端降水特征分析[J].河南大学学报:自然科学版,2020,50(3):253-261.
- [6] Zhang Z H, Wang P, Chen Y, et al. Spatial pattern and decadal change of agro-meteorological disasters in the main wheat production area of China during 1991—2009[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014,24(3):387-396.
- [7] 冯相昭,邹骥,马珊,等.极端气候事件对中国农村经济影响的评价[J].农业技术经济,2007,160(2):19-25.
- [8] 王晓冬.气候变化对我国农业经济发展的影响与对策研究[J].农业经济,2017(2):84-85.
- [9] 卢丽萍,程丛兰,刘伟东,等.30 年来我国农业气象灾害对农业生产的影响及其空间分布特征[J].生态环境学报,2009,18(4):1573-1578.
- [10] 李治国.近 40 年河南省农业气象灾害对粮食生产的影响研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):126-130.
- [11] 赵映慧,郭晶鹏,毛克彪,等.1949—2015 年中国典型自然灾害及粮食灾损特征[J].地理学报,2017,72(7):1261-1276.
- [12] 于小兵,卢逸群,吉中会,等.近 45 年来我国农业气象灾害变化特征及其对粮食产量的影响[J].长江流域资源与环境,2017,26(10):1700-1710.
- [13] 赵娅君,郑粉莉,姚亚庆,等.1978—2018 年我国农业气象灾害时空变化特征[J].自然灾害学报,2022,31(1):198-207.
- [14] 高雁鹏,陈文俊.1984—2020 年辽宁省极端气温时空变化及粮食产量响应研究[J].地理科学,2021,41(11):2052-2062.
- [15] 于小兵,陈虹,吉中会,等.山东省农业气象灾害与主要农作物产量的灰色关联分析[J].灾害学,2019,34(3):103-108.
- [16] 张星.主要气象灾害对福建粮食生产影响的灰色关联分析[J].中国农业气象,2007(1):105-107.
- [17] 何学敏,刘笑,殷红,等.1986—2015 年中国东北地区主要农业气象灾害变化特征[J].沈阳农业大学学报,2019,50(4):392-398.
- [18] 赵建军,蒋远胜.气候变化对我国农业受灾面积的影响分析:基于 1951—2009 年的数据分析[J].农业技术经济,2011(3):112-118.
- [19] 燕玉超,张福平,刘筱,等.山东省近 54 年的气候变化特征及早涝灾害响应分析[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):245-252.
- [20] 李胜利,巩在武,石振彬.近 50 年来山东省极端降水指数变化特征分析[J].水土保持研究,2016,23(4):120-127.
- [21] 柏会子,肖登攀,刘剑锋,等.1965—2014 年华北地区极端气候事件与农业气象灾害时空格局研究[J].地理与地理信息科学,2018,34(5):99-105.
- [22] 王冀,蒋大凯,张英娟.华北地区极端气候事件的时空变化规律分析[J].中国农业气象,2012,33(2):166-173.
- [23] 曹晴,郝振纯,傅晓洁,等.1960—2017 年中国极端气候要素时空变化分析[J].人民黄河,2020,42(2):11-17.
- [24] 杨若子,邢佩,杜吴鹏,等.1961—2017 年华北地区降水气候特征分析[J].地理科学,2020,40(9):1573-1583.
- [25] 刘凯,聂格格,张森.中国 1951—2018 年气温和降水的时空演变特征研究[J].地球科学进展,2020,35(11):1113-1126.
- [26] 赵海燕,张文千,邹旭恺,等.气候变化背景下中国农业干旱时空变化特征分析[J].中国农业气象,2021,42(1):69-79.
- [27] 白磊,张帆,文元桥,等.基于格点资料的 1961—2018 年中国霜冻灾害时空变化规律[J].中国农业气象,2021,42(9):761-774.
- [28] 蔡武宁.气候变化对农业和粮食生产影响的研究进展与发展方向[J].种子科技,2021,39(9):137-138.
- [29] 覃志豪,唐华俊,李文娟,等.气候变化对农业和粮食生产影响的研究进展与发展方向[J].中国农业资源与区划,2013,34(5):1-7.