

近 40 年三江平原极端降水时空变化特征分析

鲁菁¹, 张玉虎¹, 高峰¹, 刘玉洁²

(1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 研究区域尺度极端降水时空格局有助于区域整体性评估降水可能带来的风险。以三江平原 21 个气象站点 1979—2014 年逐日降水量观测资料为基础, 选取了 11 个极端降水指数, 应用气候倾向率、克里金插值法、Mann-Kendall 非参数检验、累积距平、R/S 分析法和相关分析法, 从降水强度、降水频率等方面分析了近 40 a 三江平原极端降水时空变化特征, 并对极端降水指数进行了趋势预测。研究表明: (1) 近 40 a 三江平原极端降水指数整体呈减少趋势, 且降水量减少主要表现为降水强度降低; 其中持续干燥日数(CDD)、普通日降水强度(SDII)、5 日最大降水量(RX5day)存在明显突变现象, 均在 2000 年左右发生“由多到少”的突变; (2) 极端降水指数变化趋势存在显著空间差异, RX1day, RX5day, R99p 呈减少趋势的站点所占比例分别为 52.4%, 61.9%, 61.9%; 年降水总量(PRCPTOT)整体呈现“西北、东南地区上升趋势显著, 东北、西南地区以下降趋势为主”的降水分布格局, 极端降水总量(R99P)上升幅度较大的地区主要集中于平原中部的宝清县; (3) 根据极端降水指数的历史变化趋势与 Hurst 指数叠加结果预测可知, 未来极端降水指数基本呈上升趋势。研究结果可为三江平原农业区充分利用天然降水、预估农业气象灾害影响提供科学依据。

关键词: 极端降水指数; Mann-Kendall 突变; 累积距平; Hurst 指数; 三江平原

中图分类号: P426.61

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)02-0272-11

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Extreme Precipitation in the Sanjiang Plain in Recent 40 Years

LU Jing¹, ZHANG Yuhu¹, GAO Feng¹, LIU Yujie²

(1. College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Within the context of climate change, extreme climate events occurred frequently. By using climatic tendency rate, Kriging interpolation method, Mann-Kendall nonparametric statistical test, accumulative distance leveling, R/S analysis, the variation characteristics and trend prediction of extreme precipitation process in the target area were analyzed based on long-term(1979—2014) daily precipitation data from 21 meteorological stations. The results showed a decreasing trend on the extreme precipitation over the past 40 years in the Sanjiang Plain, which was mainly reflected by the precipitation intensity. Moreover, there were obvious mutations in CDD, SDII, and RX5day. There was a significant spatial difference in the extreme precipitation variation trend. The percentages of sites with decreasing RX1day, RX5day and R99p were 52.4%, 61.9% and 61.9%, respectively. The total annual precipitation (PRCPTOT) was presented as ‘increase in Northwest-Southeast and decrease in Northeast-Southwest’. According to the historical trend of the extreme precipitation index and the prediction of the superposition of the Hurst index, it can be seen that the future extreme precipitation index will present the rising trend in the future. These results can provide scientific basis for making full use of natural precipitation and predicting the influence of agrometeorological disasters in the agricultural area of Sanjiang Plain.

Keywords: extreme precipitation index; Mann-Kendall method; cumulative distance; Hurst index; Sanjiang Plain

在全球气候变暖背景下,极端降水强度和频率均有增加^[1],因极端降水发生特殊性、复杂性致使干旱、洪涝、泥石流等灾害频发,对自然环境和国民经济造成巨大损失^[2-3],各国学者广泛关注,是当前研究的热点。Skansi等^[4]研究显示,南美大陆东部地区极端降水事件加剧。Boccolari^[5]、Croitoru^[6]等研究表明近年来欧洲极端降水事件总体呈上升趋势。已有研究表明,中国极端降水存在复杂的时空变化趋势,长江中下游、东南地区和西北的部分区域极端降水有增加趋势,而华北、东北和西南的部分地区有减少趋势^[1,7]。杨金虎^[8]、顾西辉^[9]等通过对中国近半个多世纪极端降水的变化研究发现,中国极端降水次数在全国大部分区域呈显著增加趋势。

由于不同区域在气候环境、地形地貌等方面存在差异较大,因此,结合区域实际情况仍需开展更为详尽的评估工作。三江平原作为我国重要的商品粮生产基地,大约80%的灌溉农业用水来源于自然降水^[10],下垫面的改变使该区域生态环境相对脆弱^[11],极端降水事件的持续上升将会造成农田淹没、干旱等自然灾害发生,增加大面积农业灌溉区粮食生产的不确定性^[12-14]。近年来,我国学者针对三江平原地区的降水变化开展了相关研究,闫敏华等^[11]定量论述了三江平原地区气候变化事实,认为该区域气候系统内部的变化可能是引起各气候要素发生突变的原因;王秀芬等^[15]分析了三江平原过去30 a降水量的时空变化特征,发现年降水量表现为明显的减少趋势,其中减少幅度较大的区域主要分布在三江平原北部地区;付强等^[16]通过采用近似熵理论、ArcGIS空间分析理论,揭示了近半个世纪三江平原月降水量的空间复杂性。但是,前人研究多集中于三江平原降水量的变化上,而针对三江平原地区极端降水时空变化特征还少有研究,尤其是采用多种方法对极端降水的综合研究鲜有报道。

本文选取多种极端降水指数,应用气候倾向率、克里金插值法、Mann-Kendall非参数检验、累积距平、R/S分析法、相关分析法,分析近40 a三江平原地区极端降水时空变化特征。与已有针对平均态或单一极端降水指数^[17]所做的线性趋势变化研究不同,本文采用世界气象组织气候委(WMO)提出的11个具有较弱极端性、噪声低、显著性强的核心降水指数^[2,18],可较为全面、系统地描述和捕捉区域极端降水强度、频率的时空变化特征。研究结果对三江平原农业气候灾害预估、宏观农业管理制度等方面提供一定的前期基础。

1 研究区域和数据

1.1 研究区概况

三江平原(129°30'—135°05'E,43°50'—48°40'N)位于我国黑龙江省东北部,涵盖由松花江、黑龙江和乌苏里江汇流的三角区域,总面积约10.89万km²,总人口约862.5万人,地势低平(平均海拔约60 m),资源丰富。该区域属温带湿润、半湿润大陆性季风气候,全年平均气温1~4℃,全年平均降水量约539 mm,降水季主要集中于夏秋季,光照时数适中,雨热同期,适合一年一熟的水稻、大豆、玉米等农作物的生长。三江平原湿地面积曾达534.5万hm²,被称为我国沼泽地分布最为广泛的地区,现已成为我国重要的粮食储备基地和商品粮生产基地,每年为国家提供20%的商品粮。农业作为三江平原的第一产业,农业灌溉用水来源成为该地区经济社会发展的关键。因此,探求三江平原极端降水时空变化规律具有现实意义。

1.2 数据来源与处理

本文选取由国家气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/>)和中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的三江平原21个站点(图1)1979—2014年逐日降水量观测资料,分析近40 a三江平原极端降水时空变化规律,并对极端降水指数进行趋势预测,其中基于相对阈值的极端降水指标是在1979—2000年时间序列的基础上进行统计计算的^[19]。为确保各站点降水数据的可信、可靠^[20-21],采取均一性检测方法对所选逐日降水数据进行质量检验控制^[22]。

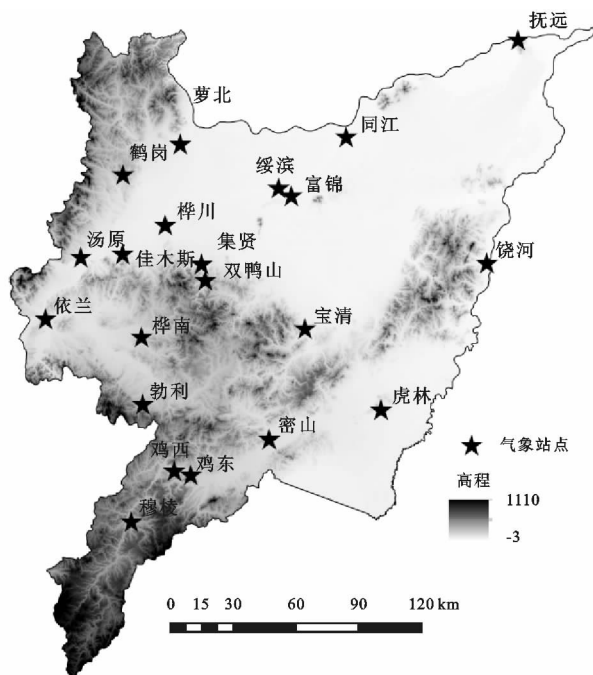


图1 三江平原气象站点分布

2 研究方法

2.1 RClimDex 模型

RClimDex 模型(可从 <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI> 下载)只需按规定格式输入降水量、逐日最高和最低温度等,即可计算得到世界气象组织气候委员会(WMO)推荐使用的 27 个核心极端气候指标,其中极端降水指标 11 个,包括降水总量(PRCPTOT)和下雨天数(RD)^[2,18]。该模型用于执行质量控制(包括识别错误、

搜索异常值、评估同质性),具有操作简单、稳定性强等优点,现已被广泛应用到世界各地^[21-22]。降水指标的计算对于降水缺测值十分敏感,由于研究的气象记录年限跨度较大,难免会存在记录值缺测等情况,因此程序要求所有的缺测值都统一设置为-99.9^[23-25]。根据三江平原实际降水情况和研究需要,基于资料序列的百分位值确定相对阈值的方法^[26],本文选取 11 个极端降水指标(表 1)进行计算,以较为全面、系统地描述和捕捉极端降水事件。

表 1 极端降水指标定义

类型	缩写	指标	极端降水 指标定义	极端降水 指标单位
降水强度指标	RX1day	1 日最大降水量	每月内连续 1 日降水量最大值	mm
	RX5day	5 日最大降水量	每月内连续 5 日的最大降水量	mm
	SDII	普通日降水强度	降水量≥1mm 的总量与日数之比	mm/d
	PRCPTOT	年降水总量	年内日降水量≥1mm 的降水量之和	mm
	R95P	异常降水总量	年内日降水量≥标准时段日降水量序列第 95 百分位值的降水量之和	mm
	R99P	极端降水总量	年内日降水量≥标准时段日降水量序列第 99 百分位值的降水量之和	mm
降水频率指标	CDD	持续干燥日数	日降水量<1mm 的最长连续日数	d
	CWD	持续湿润日数	日降水量≥1mm 的最大持续日数	d
	R10mm	中雨以上日数	年内日降水量≥10 mm 的日数	d
	R20mm	大雨以上日数	年内日降水量≥20mm 的日数	d
	R25mm	暴雨以上日数	年内日降水量≥25 mm 的日数	d

2.2 气候倾向率

气候趋势系数消去了气象要素的均方差和单位对线性回归系数数值大小的影响,从而可以在不同的地理位置、不同的气象要素之间比较趋势变化的大小,能较好地研究和揭露大范围气象场长期空间变化的趋势特征^[27]。具体计算方法见公式(1)。

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \quad (1)$$

$$\bar{t} = (n + 1) / 2 \quad (2)$$

式中: r_{xt} 为气候趋势系数; x_i 为 n 个样本数的气象要素序列($i = 1, 2, \dots, n$); \bar{x} 为要素平均值; \bar{t} 为气象要素平均时间序列。

根据回归理论,气候趋势系数 r_{xt} 与气候倾向率有如下关系:

$$a_1 = r_{xt} \left(\frac{s_x}{s_t} \right) \quad (3)$$

式中: a_1 为气候倾向率; r_{xt} 为气候趋势系数; s_x, s_t 分别为气象要素序列与自然数列的均方差。

2.3 累积距平

气候突变是气象要素变化过程中存在的某种不连续现象,而累积距平是一种由曲线直观判断气候变化趋势的方法^[28]。对于序列 i ,其 t 时刻的累积距平

表示为:

$$\overline{x}_t = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \quad t = (1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: \overline{x}_t 为 t 时刻的累积距平; x_i 为 n 个样本数的气象要素序列($i = 1, 2, \dots, n$); \bar{x} 为要素平均值。距平值增加,累积距平曲线呈上升趋势,距平值减小,累积距平曲线呈下降趋势。本文通过累积距平曲线的波动起伏,判断序列的持续变化情况,并与 Mann-Kendall 非参数检验^[29]等方法相结合,大致确定出序列的突变年份。

2.4 R/S 分析法

R/S 分析法由英国水文学家赫斯特(E. Hurst)提出,通过分析估算的 Hurst 指数,可判断极端降水指标的时间序列趋势的持续性^[30]。(Hurst 指数 H 在 0~1 之间变化,值 0.5 表示缺乏长期持久性,大于/小于 0.5 的值意味着系列的长期持续性/反持续性的存在^[1])为定量描述持续性及反持续性的强度,根据 Hurst 指数的大小进行分级,详见表 2^[31]。

2.5 克里金插值法

克里金插值法(Kriging)于 20 世纪 50 年代由南非地学家工程师 Krige D G 提出,后人将其应用于空间插值的等值线绘制,继而 Kriging 算法被广泛的应用于各行各业领域的空间分析与制图^[32]。本研究在

ArcGIS10.2 环境下,利用 Kriging 将极端降水指数气候倾向率进行空间插值,基于含有距离和方向上存在偏差的样点数据,Kriging 空间插值更能准确反映变量的空间分布特征^[33]。

表 2 Hurst 指数分级					
等级	Hurst 指数值域	持续性强度	等级	Hurst 指数值域	反持续性强度
I	$0.50 < H \leq 0.55$	很弱	— I	$0.45 \leq H < 0.50$	很弱
II	$0.55 < H \leq 0.65$	较弱	— II	$0.35 \leq H < 0.45$	较弱
III	$0.65 < H \leq 0.75$	较强	— III	$0.25 \leq H < 0.35$	较强
IV	$0.75 < H \leq 0.80$	强	— IV	$0.20 \leq H < 0.25$	强
V	$0.80 < H \leq 1.00$	很强	— V	$0.00 < H < 0.20$	很强

3 结果与分析

3.1 极端降水空间变化趋势分析

3.1.1 降水强度指标空间变化趋势分析 极端降水指数变化趋势存在显著的空间差异。1979—2014 年,三江平原 11 个气象站点年降水量(PRCPTOT)呈上升趋势,主要位于西北部及东南部地区,以虎林站、鹤岗站、桦川站、佳木斯站等为代表,其他 10 个气象站点呈下降趋势,但气候倾向率为-2.1 mm/10 a,说明总体站点下降减幅较大,其中特殊年份降水量在一定程度上主导了线性趋势的发展。从变化趋势及站点分布来看,1 日最大降水量(RX1day)与极端降水总量(R99p)变化情况相似,其中三江平原中部地区上升幅度较大,南部地区的 RX1day 上升幅度较小。从相应趋势站点数目来看,5

日最大降水量(RX5day)与极端降水总量(R99p)变化情况更为相似,61.9%气象站点的 RX5day、R99p 呈下降趋势,仅三江平原中部宝清站 R99p 下降趋势达到 95%的显著水平。集中分布在三江平原西部地区的 10 个气象站点异常降水总量(R95p)变化呈上升趋势,但均未达到 95%显著水平。普通日降水强度(SDII)空间分布格局与 PRCPTOT 基本一致,但 SDII 气候倾向率 0.0 mm/(d·10 a)表明三江平原普通日降水强度无明显变化趋势。由降水强度指标空间趋势分布结果可见,近 40 a 来三江平原地区西北—东南部降水较为丰沛,东北—西南地区干旱化趋势明显,极端降水总量上升幅度较大的地区主要集中于平原中部的宝清县,这可能与区域土地利用、植被覆盖、粮食种植等因素相关(图 2、表 3)。

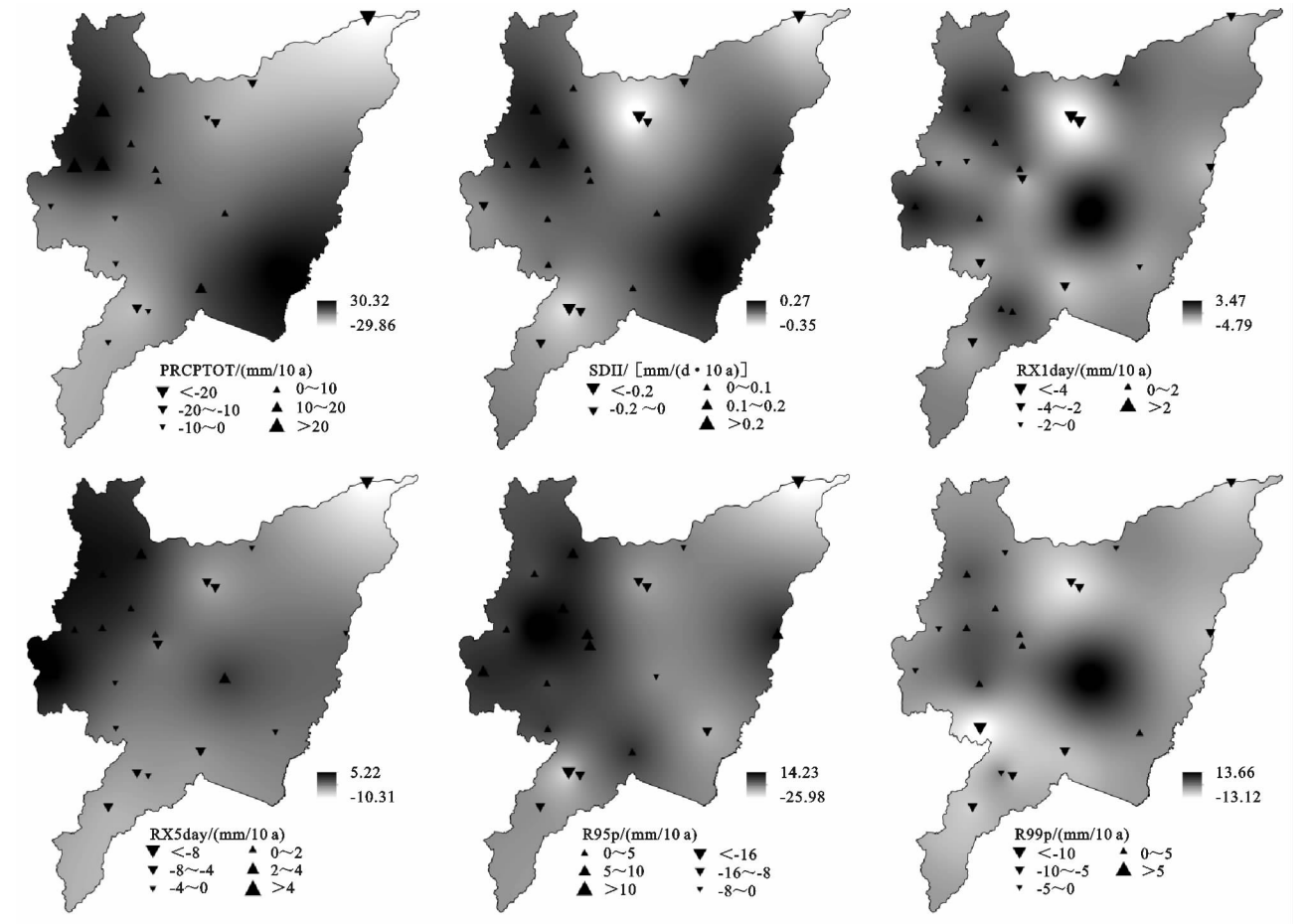


图 2 降水强度指标气候倾向率空间趋势分布

3.1.2 降水频率指标空间变化趋势分析 在持续干燥日数(CDD)变化趋势上,除三江平原南部地区外,其他地区约 61.9%的站点呈下降趋势,下降速率为 $-1.8 \text{ d}/10\text{a}$,其中仅东部地区汤原站 CDD 下降趋势达到极显著水平($p < 0.01$)。持续湿润日数(CWD)在空间及变化趋势上基本与 CDD 呈相反态势变化。1979—2014 年,三江平原绝对指标 R10mm, R20mm, R30mm 均无明显变化趋势,表现出较为稳定的波动状态,但在空间上呈现出“西北、东南地区上升趋势显著,东北、西南地区以下降趋势为主”的降水分布格局(表 3、图 3)。结合极端降水强度指标空间趋势分析结果发现,除 CDD 外,各极端降水指标在空间变化上具有相似变化趋势,能够反映区域极端降水的分布及其变化规律,准确分析降水时间、强度变化及其分布,降低灾害发生风险。

3.2 极端降水时间变化趋势分析

3.2.1 极端降水时间变化趋势 1979—2014 年,三江平原极端降水指数年际变化总体呈下降趋势,仅有 CDD 和 RX5day 两指数通过了 0.05 水平的显著性检验,其气候倾向率分别为 $-1.8 \text{ d}/10\text{a}$ 和 $-2.0 \text{ mm}/10\text{a}$;其余 9 个指数均呈非显著性, RX5day, R95p, R99p, PRCPTOT 这 4 个指数呈非显著性减少趋势,持续湿润日数 CWD 呈微弱下降趋势;对比显示, SDII, R10mm, R20mm, R25mm 这 4 个指数变化趋势不明显。其中,反映平均降水情况的普通日降水量基本处于稳定状态,位于最低值的 1979 年 6.4 mm 到最高值的 1994 年 9.5 mm 仅相差 3.1 mm,说明研究区域的年有效降水事件中的降水量变化不大。此外,整体极端降水指数变化趋势显示三江平原极端降水发生频率呈下降趋势,这与东北地区极端降水指数呈减少趋势的事实相符^[34]。

从 5a 滑动平均值年际变化总体来看(图 4),该区域的 RX1day, RX5day, R95p, R99p, R10mm, R20mm, R25mm, PRCPTOT, SDII 在 20 世纪 90 年代末前后波动起伏较为明显,较好呈现出丰枯极端降水年交错分布特征。根据 5a 滑动平均可将 9 个极端降水指数分为 1979—1981 年, 1981—1997 年, 1997—2001 年, 2001—2014 年 4 个阶段,分别表现为“上升—平稳—下降—上升”的趋势。除 R20mm, R25mm, SDII 这 3 个指数外,在 1979—1981 年和 2001—2014 年前后,其余 6 个极端降水指数均呈现明显阶梯性上升趋势,但总体下降趋势显著。研究结果表明三江平原极端降水总量的减少主要是由于降水强度减少引起的,降水频率对其影响较小。

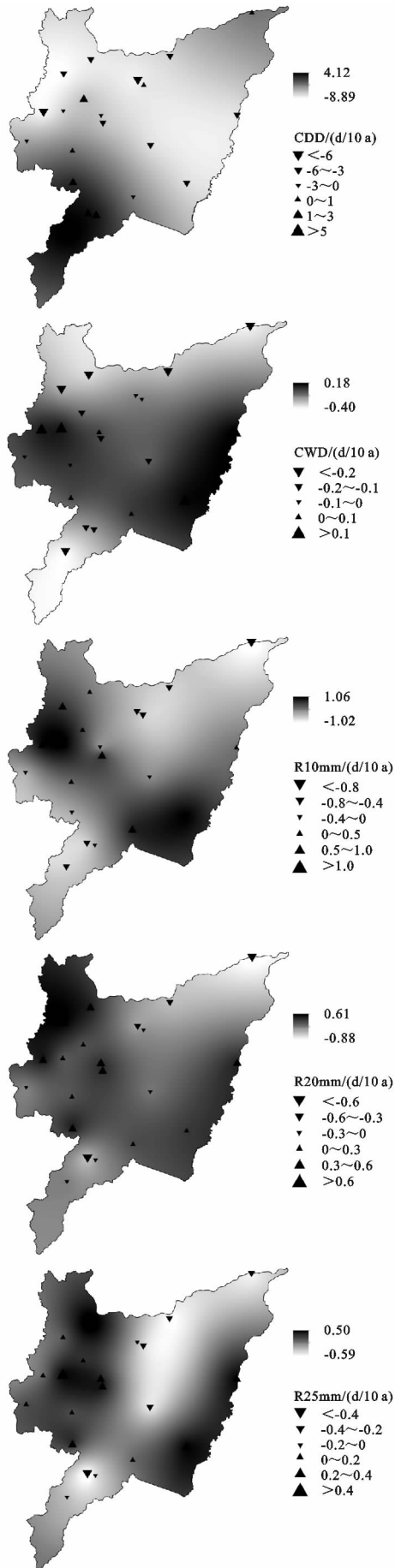


图 3 降水频率指标气候倾向率空间趋势分布

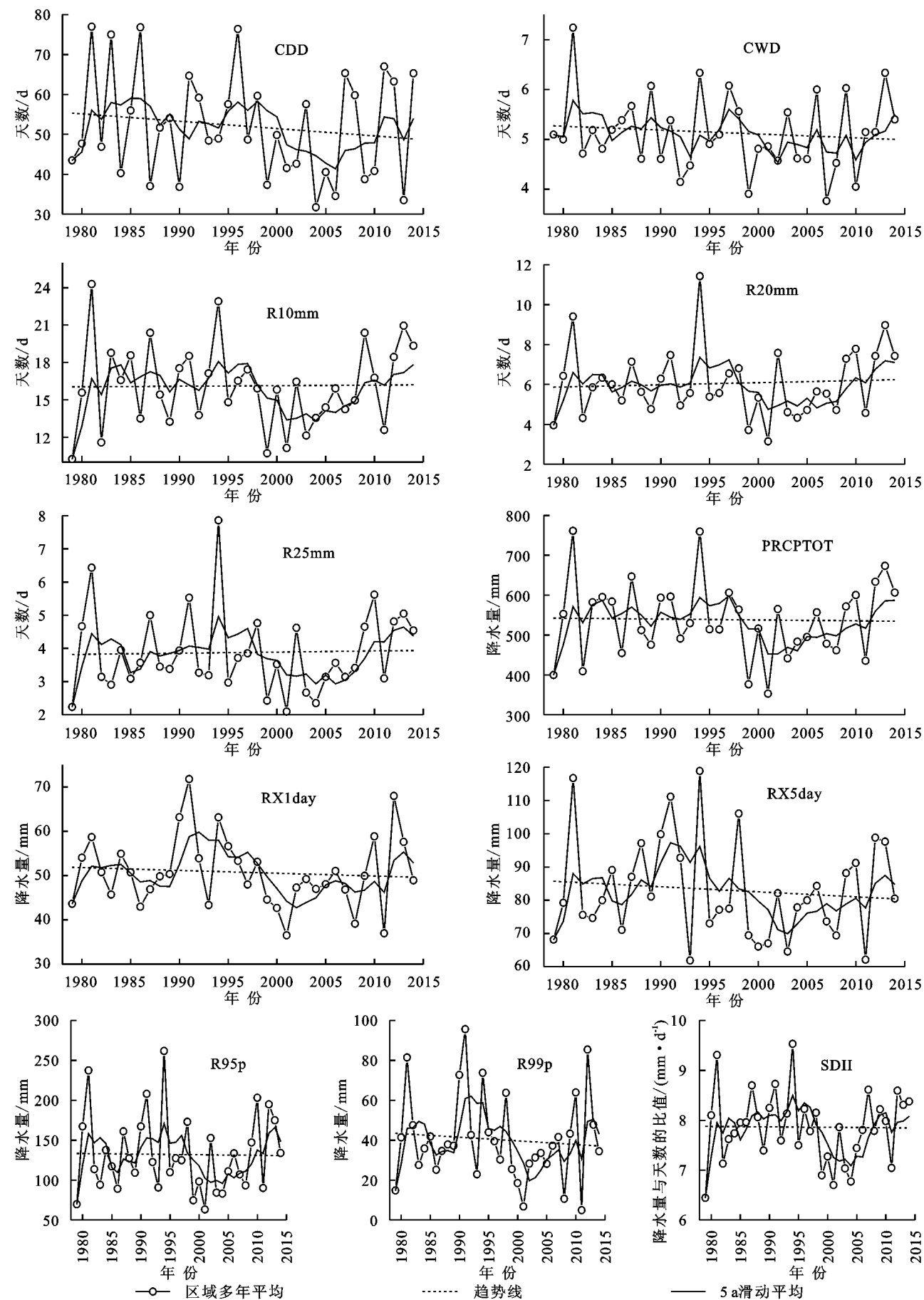


图 4 1979—2014 年三江平原极端降水指数的年际变化

表 3 1979—2014 年三江平原极端降水指标气候倾向率及变化趋势

极端降水强度指标	气候倾向率	站点比重/%	极端降水频率指标	气候倾向率	站点比重/%
PRCPTOT	−2.1 mm/10a	47.6 ↓	CDD	−1.8 d/10a	61.9 ↓
RX1day	−0.8 mm/10a	52.4 ↓	CWD	−0.1 d/10a	66.7 ↓
RX5day	−2.0 mm/10a	61.9 ↓	R10mm	0.0 d/10a	50.0 ↑
R95p	−2.0 mm/10a	42.9 ↓	R20mm	0.0 d/10a	57.1 ↑
R99p	−1.8 mm/10a	61.9 ↓	R25mm	0.0 d/10a	61.9 ↑
SDII	0.0 mm/(d · 10a)	61.9 ↑			

注：↑表示增加，↓表示降低。

3.2.2 极端降水变化的突变特征分析 气候突变是指气候从一种气候态向另一种气候态的急速转变。图 5 揭示了 1979—2014 年 11 个极端降水指数时间序列的 Mann-Kendall 突变检验和累积异常变化。根据 1979—2014 年三江平原 RX1day 累积距平分析显示,三江平原 21 世纪初 1 日最大降水量负距平占优势,累积距平曲线呈下降趋势,2011 年累积距平降至最低 −30.9 mm。Mann-Kendal 突变检验表明,2000 年和 2011 年 RX1day 时间序列发生突变,分别发生了“由多到少”和“由少到多”的突变,但由于 UF(*k*)曲线未通过置信度为 90%的显著性检验,因此突变后变化趋势不明显。RX5day 与 RX1day 变化趋势基本相同,但在 1990 年超过 $\alpha=0.1$ 的置信区间,甚至在 1992 年超过了 $\alpha=0.05$ 的置信区间,说明变化趋势极显著。除 CWD 降水指标外,极端降水量指标与极端降水日数指标的 Mann-Kendall 突变检验和累积距平图分别表明 2000 年左右这些极端降水指数

发生“由多到少”的突变。这一结果与极端降水时间趋势变化中 20 世纪 90 年代末前后波动起伏较为明显的结论相吻合,与武文博^[34]、杨金虎^[8]等东北地区极端降水指数突变趋势相一致。

3.3 极端降水与年总降水量的关系

研究表明,年降水量与极端降水变化相似,极端降水指标相互关联可对极端降水进行较为直观的反映^[2,33]。各极端降水指数之间的相关系数见表 4, CDD 与其余指数之间呈正相关,除与 R95p 之间具有较强的相关性外(通过 0.01 的显著性检验),与剩余极端指数间的相关性较差,同样,CWD 与各极端指数间的相关性也较差。由此可知,除 CDD、CWD 外的各极端降水指数均能较好表征三江平原地区极端降水,具有较好的指示作用,即三江平原极端降水的变化情况会对降水量变化产生显著影响。这将为极端降水过程变化、趋势分析、未来预测等提供合理的基础。

表 4 三江平原极端降水指标与年降水总量的相关性分析

项目	PRCPTOT	RX1day	RX5day	R95p	R99p	SDII	CDD	CWD	R10mm	R20mm	R25mm
PRCPTOT	1	0.677**	0.771**	0.876**	0.705**	0.871**	0.053	0.528**	0.968**	0.956**	0.886**
RX1day		1	0.820**	0.809**	0.956**	0.710**	0.122	0.231	0.557**	0.660**	0.664**
RX5day			1	0.863**	0.848**	0.807**	0.084	0.429**	0.685**	0.775**	0.792**
R95p				1	0.845**	0.865**	0.070**	0.401*	0.770**	0.911**	0.958**
R99p					1	0.737**	0.154	0.271	0.581**	0.681**	0.702**
SDII						1	0.316	0.461**	0.864**	0.901**	0.882**
CDD							1	0.221	0.133	0.114	0.111
CWD								1	0.570**	0.568**	0.491**
R10mm									1	0.920**	0.819**
R20mm										1	0.958**
R25mm											1

注：* 极显著($p<0.01$)；* 显著($p<0.05$)。

3.4 极端降水指数持续性预测

将极端降水指数的历史变化趋势与 Hurst 指数叠加,能对未来极端降水指数的持续性进行分析预测^[30]。表 5 为三江平原极端降水指数的 Hurst 指数。计算可得,三江平原极端降水指数的 Hurst 指数均在 0.35 以下,表现出强的反持续强度,尤其是 RX5day 在 0.2 以下,说明反持续性最强。此外,RX1day,CWD,R20mm,R25mm 均在 $0.25\leq H<0.35$ 范围内,说明这些极端降

水指数 Hurst 现象较明显,具有较强的反持续性。结合三江平原各极端降水指数时间序列的历史变化趋势,即可预测其未来变化趋势:极端降水强度指数基本成上升趋势,极端降水频率指数中除 CWD 外,也基本呈上升趋势。研究结果表明,未来三江平原雨水充沛,存在发生暴雨、洪涝等极端降水事件的可能性,及时采取应对措施,可减小极端气候灾害对该地区农业生产、区域水资源管理等方面带来的不利影响。

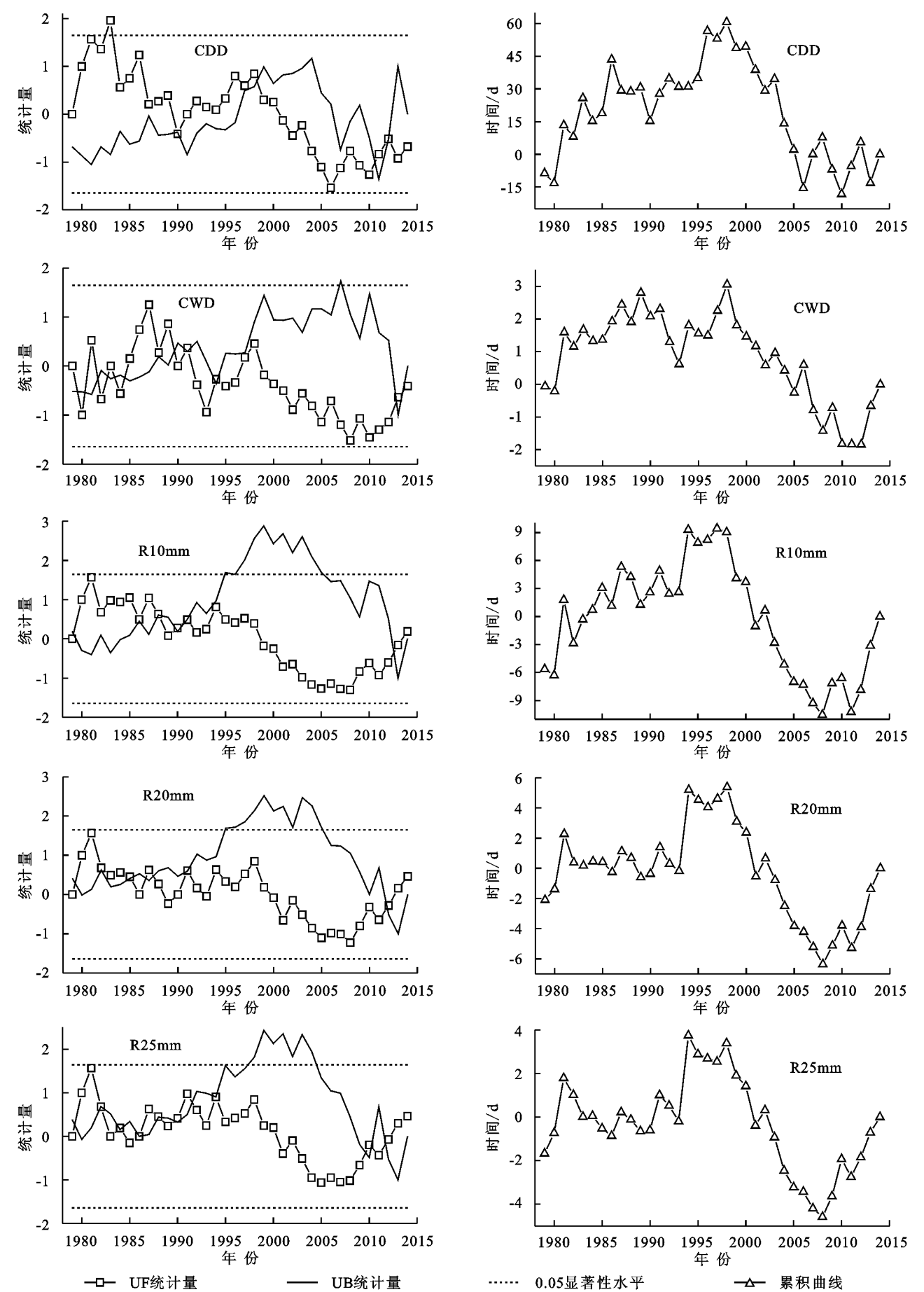
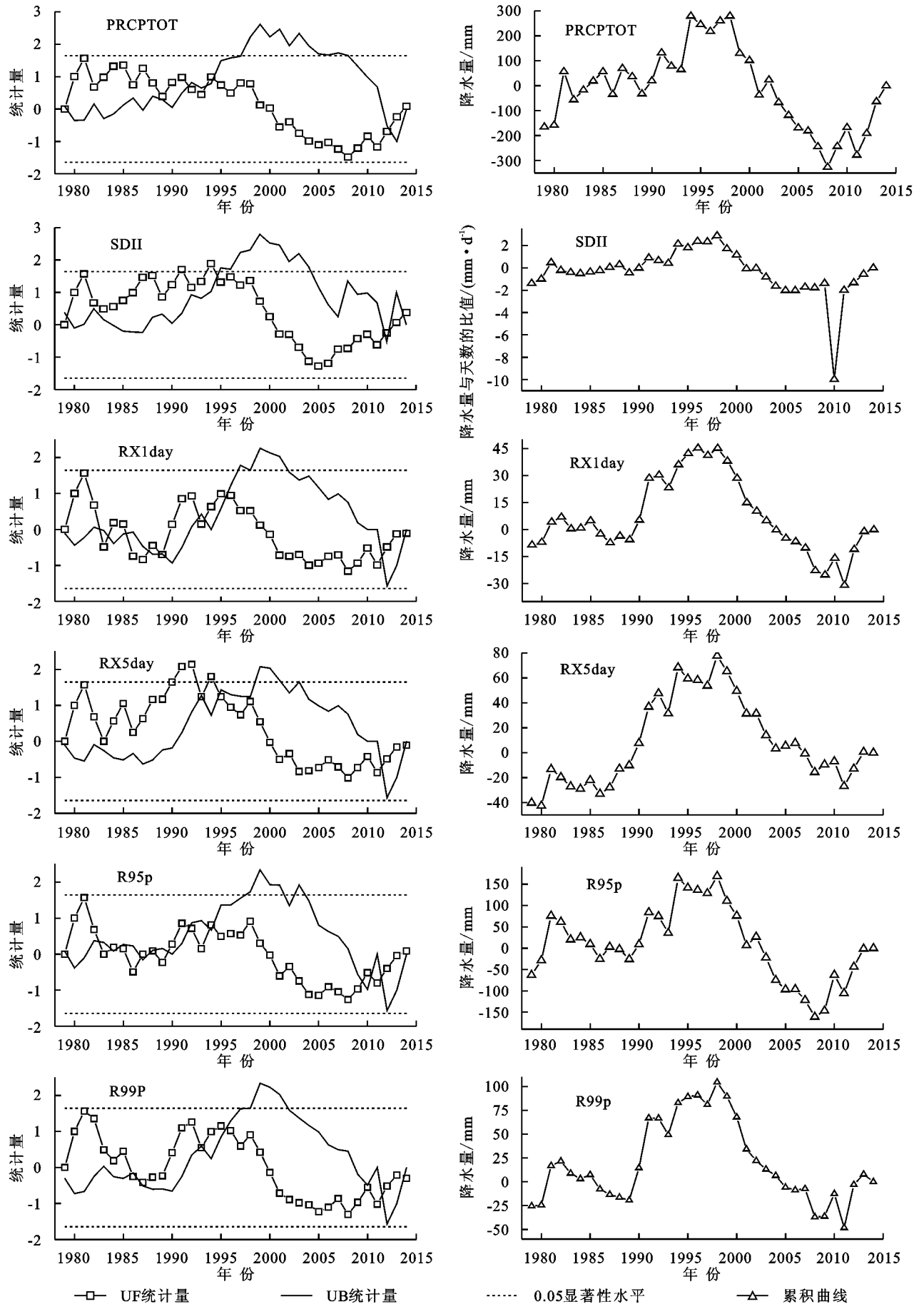


图 5 极端降水指数时间序列的 Mann-Kendall 突变检验和累积异常曲线



续图 5 极端降水指数时间序列的 Mann-Kendall 突变检验和累积异常曲线

表 5 三江平原极端降水指标的 R/S 分析

极端降水指标	Hurst 指数	
降水强度指标	PRCPTOT	0.208
	RX1day	0.273
	RX5day	0.167
	R95p	0.217
	R99p	0.206
	SDII	0.228
	CDD	0.226
降水频率指标	CWD	0.262
	R10mm	0.246
	R20mm	0.307
	R25mm	0.281

4 结 论

(1) 三江平原降水量气候倾向率空间分布整体呈现“西北—东南上升趋势显著,东北—西南以下降趋势为主”格局;其他各极端降水指数气候倾向率的空间分布上升趋势与下降趋势小幅交替出现,变化较为温和,而在南部地区各极端降水指数的变化趋势则较为明显且单一,除 CDD 外,基本处于下降趋势。

(2) 三江平原近 40 a 年降水量整体处于下降趋势,气候倾向率为−2.1 mm/10 a,其中特殊年份降水量在一定程度上主导了线性趋势的发展。由极端降水指标相关性分析可知,除 CDD,CWD 外,各极端降水指数之间具有较强的相关性,且相关系数均通过了 0.01 水平的置信度检验。

(3) 由三江平原各极端降水指数时间序列趋势变化分析可知,该区域部分极端降水指数在 20 世纪 90 年代末前后波动起伏较为明显,较好呈现出丰枯极端降水年交错分布特征。根据 5a 滑动平均年际变化情况表明,三江平原极端降水总量的减少主要是由于降水强度引起,降水频率对其影响较小。

(4) M-K 突变检验指出,CDD,SDII,RX5day 存在明显突变现象,其中,RX5day 在 1990 年超过 $\alpha=0.1$ 的置信区间,甚至在 1992 年超过了 $\alpha=0.05$ 的置信区间,说明变化趋势极显著。此外,通过 Mann-Kendall 突变检验和累积异常曲线图结合,发现在 2000 年左右,除 CWD 降水指标外,极端降水强度指标与极端降水频数指标均发生“由多到少”的突变。

(5) 三江平原各极端降水指数的 Hurst 指数均在 0.35 以下,具有较强反持续性。将极端降水指数的历史变化趋势与 Hurst 指数叠加,即可预测未来极端降水强度指数基本呈上升趋势,极端降水频率指数中除 CWD 外,也基本呈上升趋势。

参考文献:

[1] 高涛,谢立安.近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J].地球科学进展,2014,29(5):577-589.

[2] Wang X, Hou X, Wang Y. Spatiotemporal variations and regional differences of extreme precipitation events in the Coastal area of China from 1961 to 2014[J]. Atmospheric Research, 2017,197:94-104.

[3] Janssen E, Srivier R L, Wuebbles D J, et al. Seasonal and regional variations in extreme precipitation event frequency using CMIP5[J]. Geophysical Research Letters, 2016,43(10):34-56.

[4] Skansi M D L M, Brunet M, Sigró J, et al. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America[J]. Global & Planetary Change, 2013,100(1):295-307.

[5] Boccolari M, Malmusi S. Changes in temperature and precipitation extremes observed in Modena, Italy[J]. Atmospheric Research, 2013,122(3):16-31.

[6] Croitoru A E, Chitoroiu B C, Todorova V I, et al. Changes in precipitation extremes on the Black Sea Western Coast[J]. Global and Planetary Change, 2013, 102(5):10-19.

[7] 谢培,顾艳玲,张玉虎,等.1961—2015 年新疆降水及干旱特征分析[J].干旱区地理,2017(2):332-339.

[8] 杨金虎,江志红,王鹏祥,等.中国年极端降水事件的时空分布特征[J].气候与环境研究,2008,13(1):75-83.

[9] 顾西辉,张强,孔冬冬,等.中国年和季节极端降水时空特征及极值分布函数上尾部性质[J].地理科学,2017, 37(6):929-937.

[10] 赵静.基于虚拟水理论的三江平原农业用水结构调整研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2012.

[11] 闫敏华,邓伟,马学慧.大面积开荒扰动下的三江平原近 45 年气候变化[J].地理学报,2001,56(2):159-170.

[12] 周广胜.气候变化对中国农业生产影响研究展望[J].气象与环境科学,2015,38(1):80-94.

[13] 吕军,孙嗣阳,陈丁江.气候变化对我国农业旱涝灾害的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(9):1713-1719.

[14] 王静,杨晓光,李勇,等.气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅵ.黑龙江省三江平原地区降水资源变化特征及其对春玉米生产的可能影响[J].应用生态学报, 2011,22(6):1511-1522.

[15] 王秀芬,杨艳昭,尤飞.近 30 年来黑龙江省气候变化特征分析[J].中国农业气象,2011,32(S1):28-32.

[16] 付强,李铁男,李天霄,等.基于近似熵理论的三江平原月降水量空间复杂性分析[J].水土保持研究,2015 (2):113-116.

- [17] 李胜利, 巩在武, 石振彬, 等. 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.
- [18] Rimkus E, Kažys J, Bukantis A, et al. Temporal variation of extreme precipitation events in Lithuania[J]. *Oceanologia*, 2011, 53(1): 259-277.
- [19] 李剑锋, 张强, 白云岗, 等. 新疆地区最大连续降水事件时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 312-320.
- [20] 余敦先, 夏军, 张永勇, 等. 近 50 年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1200-1210.
- [21] Limsakul A, Singhruck P. Long-term trends and variability of total and extreme precipitation in Thailand [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 169: 301-317.
- [22] Ruml M, Gregorić E, Vujadinović M, et al. Observed changes of temperature extremes in Serbia over the period 1961—2010[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 183: 26-41.
- [23] Shengjie Wang, Mingjun Zhang, Baolong Wang, et al. Recent changes in daily extremes of temperature and precipitation over the western Tibetan Plateau, 1973—2011[J]. *Quaternary International*, 2013, 313/314(6): 110-117.
- [24] 闫慧敏, 陈伟娜, 杨方兴, 等. 过去 50 年内蒙古极端气候事件时空格局特征[J]. 地理研究, 2014, 33(1): 13-22.
- [25] 王钊, 彭艳, 魏娜. 近 52a 秦岭南北极端温度变化及其与区域增暖的关系[J]. 干旱气象, 2016, 34(2): 269-275.
- [26] Keggenghoff I, Elizbarashvili M, King L. Recent changes in Georgias temperature means and extremes: Annual and seasonal trends between 1961 and 2010[J]. *Weather & Climate Extremes*, 2015, 8(4): 34-45.
- [27] 高红燕, 蔡新玲, 贺皓, 等. 西安城市化对气温变化趋势的影响[J]. 地理学报, 2009, 64(9): 1093-1102.
- [28] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.
- [29] 刘聚涛, 方少文, 冯倩, 等. 基于 Mann-Kendall 法的湖泊稳态转换突变分析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3707-3713.
- [30] 刘宇峰, 原志华, 孙铂. 近 15 年来西安市主要气候要素变化的 R/S 分析[J]. 西安文理学院学报: 自然科学版, 2016, 19(1): 73-78.
- [31] 薛树强, 杨元喜. 广义反距离加权空间推估法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2013, 38(12): 1435-1439.
- [32] 曾红伟, 李丽娟, 张永萱, 等. 大样本降水空间插值研究: 以 2009 年中国年降水为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 811-818.
- [33] Huailiang Wang, Zhuhai Shao, Tao Gao, et al. Extreme precipitation event over the Yellow Sea western coast: Is there a trend[J]. *Quaternary International*, 2016, 441: 1-17.
- [34] 武文博, 游庆龙, 王岱. 基于均一化降水资料的中国极端降水特征分析[J]. 自然资源学报, 2016(6): 1015-1026.

~~~~~

(上接第 271 页)

- [21] 左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征[M]//左大康. 地理研究论文选. 北京: 科学出版社, 1993.
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]//魏凤英. 气候变化趋势. 北京: 气象出版社, 2007.
- [23] Zhou H, Wu J, Geng G, et al. Enhancing the ability of a soil moisture: based index for agricultural drought monitoring by incorporating root distribution[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2017, 53(6): 1409-1423.
- [24] 赵冰雪, 王雷, 程东亚. 安徽省气象数据空间插值方法比较与分布特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 141-145.
- [25] 刘友存, 焦克勤, 赵奎, 等. 中国天山地区降水对全球气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 748-759.
- [26] 陈贺, 李原园, 杨志峰, 等. 地形因素对降水分布影响的研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 119-122.
- [27] 张克新, 潘少明, 曹立国, 等. 横断山区季风期水分盈亏量时空变化特征及其与若干气候指数的相关性分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1869-1877.