

近50年东北地区极端降水事件时空演变特征

徐佳奥, 李谢辉

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都
Email: xujiaao20000725@163.com

收稿日期: 2021年6月15日; 录用日期: 2021年7月12日; 发布日期: 2021年7月20日

摘要

为了进一步研究东北地区极端降水事件的时空演变特征, 本文利用中国气象数据网下载的地面气候资料日值降水数据, 主要选取了7个极端降水指数, 通过利用线性趋势、Mann-Kendall检验、滑动t检验、小波分析和反距离加权插值的方法对1971~2020年东北地区极端降水事件的时空演变特征进行了分析。结果表明: 1) 近50年东北地区降水量增加, 干旱日数减少且湿润日数增多, 气候逐渐变湿润; 2) 7个极端降水指数中, 仅有连续湿润日数CWD在1998年有突变发生; 3) 7个极端降水指数显著年际震荡特征在0~9年间, 均存在1~2个主周期, 大多数极端降水指数的主周期在30~31年间; 4) 近50年东北地区东南部强降水量、降水总量高于西北部, 连续干旱日数西部多于东部, 西部气候较干旱, 导致极端降水事件易发于东部和南部, 极端干旱事件易发于西部。

关键词

极端降水指数, 时空分布特征, 突变检验, 小波分析, 东北地区

Spatiotemporal Evolution Characteristics of Extreme Precipitation Events in Northeastern China in Recent 50 Years

Jiaao Xu, Xiehui Li

College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Engineering, Chengdu Sichuan
Email: xujiaao20000725@163.com

Received: Jun. 15th, 2021; accepted: Jul. 12th, 2021; published: Jul. 20th, 2021

Abstract

To further study the spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation

events in Northeastern China, this paper used daily precipitation data of ground climate downloaded from China Meteorological Data Network and mainly selected seven extreme precipitation indices to analyze the extreme precipitation events in Northeastern China from 1971 to 2020. The spatiotemporal evolution characteristics of extreme precipitation events in Northeastern China were analyzed by using linear trend, Mann-Kendall test, sliding t test, wavelet analysis and inverse distance weighted interpolation in the last 50 years. The results showed that: 1) The precipitation in Northeastern China increased, the number of dry days decreased and the number of wet days increased in the past 50 years, and the climate has gradually become wetter; 2) Among the seven extreme precipitation indices, only the CWD of continuous wet days changed abruptly in 1998; 3) The significant interannual oscillations of the seven extreme precipitation indices were between 0 and 9 years, and there were 1~2 main cycles. The main periods of most extreme precipitation indices were 30~31 years; 4) In the last 50 years, the amount of heavy precipitation and total precipitation in the southeast of Northeastern China was higher than that in the northwest, the number of continuous drought days in the west was more than that in the east, and the climate in the west was relatively dry, which led to extreme precipitation events in the east and south, and extreme drought events in the west.

Keywords

Extreme Precipitation Index, Spatial and Temporal Distribution Characteristics, Mutation Test, Wavelet Analysis, Northeastern China

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

极端气候事件是指在一定地区和时间内发生的概率极低的事件,一般指概率密度小于第 10 个或大于第 90 个百分位点,即指特定地区时间内的气候极值[1]。东北地区的农业是当地经济收入的重要来源之一,然而近几年来,极端降水事件作为极端气候事件中的一种重要事件在东北地区频繁发生,给当地的农业生产和人们生活都带来了巨大影响。

目前,国内外学者们针对极端降水事件进行了大量研究,如,Devesh 等对泰国西部极端降水事件分析得出该地区年总降水量没有明显减少,但连续干旱天数逐渐增加的结论[2]; Manton 等对东南亚及南太平洋地区讨论发现其年极端降水总量占年总降水量的比例增多[3]; Karl 和 Kunkel 等分别对美国极端降水事件分析得出其极端降水频率增加[4] [5]。国内学者中,赵金鹏发现青藏高原地区年降水量、日降水量、强降水量等均有增加趋势[6]。也有一些学者对东北地区的极端降水事件进行了研究,如,李洋等发现东北地区东南部是极端降水事件的高发区[7]; 孙凤华等发现东北地区年降水强度呈明显上升趋势,降水向极端化发展[8]。

综上所述可以看出国内外对极端降水事件都相当关注,但其中对东北地区极端降水事件时空分布及变化特征分析地相对较少。东北地区作为全国人均占有粮食量最多的国家,当地的经济发展和生产生活与农业发展息息相关,极端降水事件频发会给当地社会经济带来大量的损失,因此分析东北地区的极端降水事件时空分布及变化特征,能够为东北各地区种植农作物并发展东北地区经济和人们的生产生活提供一定具有参考性和建议性的气候资料,并且给预测未来几十年东北地区极端降水变化趋势和可能发生的灾害提供分析方向,提前做好各方面的安全防范。

2. 研究区概况

本文研究的东北地区包括3个省份(辽宁省、吉林省、黑龙江省),其地广人稀,是我国最大的平原,也是我国主要粮仓之一,北部盛产大豆、大米等,中部盛产高粱、小米、花生,南部盛产玉米、水果等,是农业商品发展的圣地[1]。东北地区自南向北跨暖温带、中温带与寒温带,冬季南北温度差异明显,是典型的温带季风气候,四季分明。冬季主要受蒙古高压控制,夏季受副热带高压影响,夏季温暖短暂,降水和高温主要集中在夏季,冬季天气寒冷干燥,降雪多,地表积雪时间长,温度低,夜晚漫长,昼夜温差大,是我国降雪最多的地区,是研究气候变化的重要地区[9] [10] [11]。

3. 数据与方法

3.1. 数据资料

本文研究数据主要来自于中国气象数据资料共享网的中国地面气候资料日值数据集,根据数据的连续性从中提取出东北地区1971~2020年近50年72个站点的逐日降水观测数据(图1)。计算前对数据的完整性、连续性进行了检验,对缺测值进行了插值,以保证数据的有效性、真实性和可靠性。

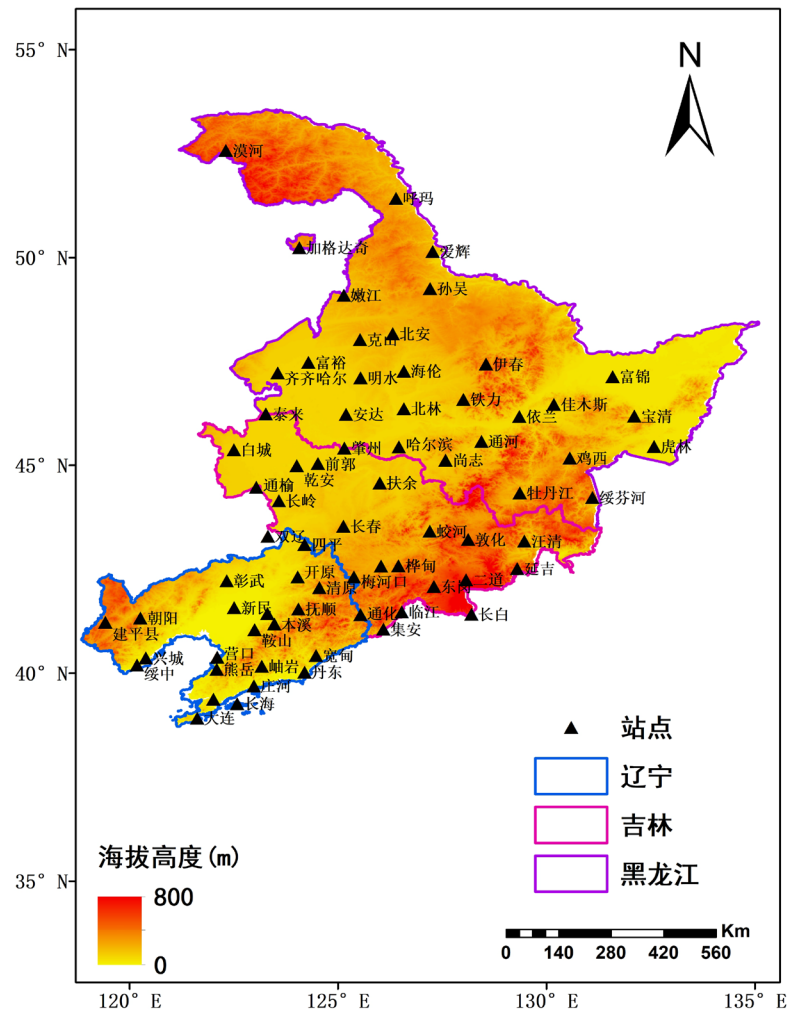


Figure 1. Distribution of selected stations in Northeastern China

图1.东北地区所选站点分布概况

3.2. 极端降水指数选取

世界气象组织经过会议由日气温和日降水数据计算得出了 27 个极端气候指数, 并被欧盟 STARDEX 计划推荐为极端气候事件分析的核心指标, 具有显著性强、噪声低等特点[12]。本文根据研究区的特性选取具有研究意义的 7 个极端降水指标, 具体见表 1。

Table 1. Definition of extreme precipitation index

表 1. 极端降水指数定义

类型	缩写	指数名称(单位)	定义
相对指数	R95p	强降水量(mm)	95%分位值强降水量之和
绝对指数	R10	中雨日数(d)	每年日降水量 ≥ 10 mm 的总日数
持续指数	CDD	连续干旱日数(d)	日降水量 < 1 mm 的最长连续日数
极端降水指数	CWD	连续湿润日数(d)	日降水量 ≥ 1 mm 的最长连续日数
	PRCPTOT	年降水量(mm)	≥ 1 mm 降水日累计量
强度指数	Rx5day	5 日最大降水量(mm)	每月连续 5 日的最大降水量
	SDII	降水强度(mm/d)	降水量 ≥ 1 mm 的总量与日数之比

3.3. 回归线性趋势分析

本文运用线性回归方法计算极端降水指数的倾向率并对相关系数进行显著性检验, 分析出其时间序列的变化趋势, 其中线性回归方程为[6] [13]:

$$x_i = a + bt_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, 样本数为 n , 某一个气候指数变量为 x_i , 对应时间 t_i , 回归常数 a , 回归系数 b , 其中当 $b > 0$ 代表随着时间序列的变化该气候变量呈上升趋势, $b < 0$ 则呈下降的趋势。 a 和 b 的计算公式为:

$$\begin{cases} b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \\ a = \bar{x} - b\bar{t} \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (3)$$

相关系数:

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}} \quad (4)$$

3.4. Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 突变检验是一种非参数检验方法, 通过统计量计算检验突变年份, S_k 是 n 个样本时间序列 x 中 x_i 大于 x_j ($1 \leq j \leq i$) 的累积数, k 为样本数量, 其中

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i (1 \leq k \leq n) \quad (5)$$

设时间序列独立, 则 S_k 的均值和方差分别为:

$$E(S_k) = k(k+1)/4 \quad (6)$$

$$\text{Var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (7)$$

将 S_k 标准化得:

$$UF_k = (S_k - E(S_k)) / \sqrt{\text{Var}(S_k)}, k = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

UF_k 是正序时间序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) 计算出的统计量, 再按逆序时间序列 $(x_n, x_{n-1}, \dots, x_1)$ 计算得到统计量 $UF_k (k = n, n-1, \dots, 1)$, 同时使 $UB_k = -UF_k$ 。一般取 0.05 显著性水平, 那么临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$, 将 UF 、 UB 、 ± 1.96 这 4 条线绘制于一张图中, 若 $UF > 0$, 则有上升趋势; $UF < 0$ 有下降趋势, 若超出 ± 1.96 两条临界线则代表变化趋势显著; 若 UF 和 UB 有交点且在临界值内, 则交点所对应的横坐标年份为突变年份[14] [15]。

3.5. 滑动 t 突变检验

滑动 t 检验的基本思想是把一气候序列中两段子序列均值有无显著差异看作来自两个总体均值有无显著差异的问题来检验。对于样本量为 n 的时间序列 x , 人为设置某一时刻为基准点, 基准点前后是两子序列为 x_1 和 x_2 的样本量分别为 n_1 和 n_2 , 两段子序列平均值分别为 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 , 方差分别为 s_1^2 和 s_2^2 。定义统计量:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (9)$$

其中:

$$s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (10)$$

其服从自由度 $v = n_1 + n_2 - 2$ 的分布。给定显著性水平 α , 查分布表 t 得到临界值 t_α , 若 $|t_i| > t_\alpha$, 则认为在基准点时刻出现了突变, 否则认为基本点前后的两段子序列均值无显著差异。

因 M-K 检验确定的突变年份可能存在一定误差, 因此本文结合子序列长度为 5 的滑动 t 检验确定出二者共同的突变年份, 即为极端降水指数的最终突变年份[16] [17] [18]。

3.6. 小波分析

小波分析是在 Fourier 分析基础上发展起来的一种新的时频局部化分析, 关键在于引入满足一定条件的基本小波函数 $\varphi(t)$:

$$\varphi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (11)$$

式中, $a, b \in \mathbb{R}$, $a \neq 0$, $\varphi_{a,b}$ 称分析小波或连续小波; a 为尺度(伸缩)因子, 在一定意义上 $1/a$ 对应于频率 ω ; b 为时间(平移)因子, 反映时间上的平移。当 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 连续小波变为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (12)$$

式中, $W_f(a,b)$ 为 $f(t)$ 在相平面 (a,b) 处的小波变换系数。对小波变换系数进行分析可以显示出 $f(t)$ 的时频特性和其局部变化特性。

本文运用小波分析的方法讨论各极端降水指数的周期问题, 其中功率谱图分析年际震荡周期变化, 小波全谱图是小波方差的变化图, 其中最大的波峰是极端降水指数变化的主周期[18] [19]。

3.7. 反距离加权插值

通过 ArcGIS 对各个站点各极端降水指数进行反距离加权插值 IDW (Inverse Distance Weighting), 可以得出东北地区极端降水指数的空间分布图, 分析极端降水指数的空间格局及其变化趋势。

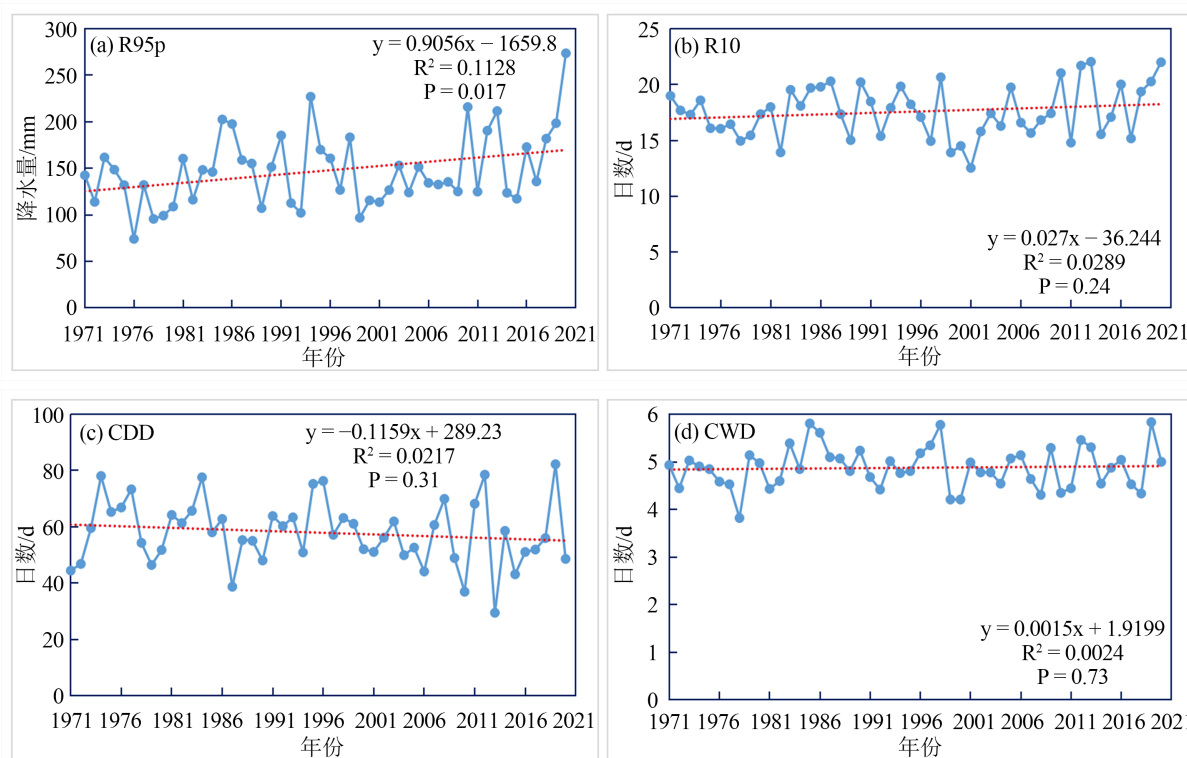
4. 极端降水指数时空分布特征

4.1. 时间序列变化特征

图 2 为东北地区近 50 年 7 个极端降水指数的年际趋势变化图。可以看出, 相对指数的强降水量 R95p 以 0.9056 mm/10a 的速率上升; 绝对指数的中雨日数 R10 以 0.027 d/10a 速率上升; 持续指数中, 连续湿润日数 CWD 和年降水量 PRCPTOT 分别以 0.0015 d/10a 和 0.9949 mm/10a 的速率上升, 而连续干旱日数 CDD 则以 0.1159 d/10a 的速率下降; 强度指数的 5 日最大降水量 Rx5day 和降水强度 SDII 分别以 0.1511 mm/10a 和 0.016 (mm/d)/10a 的速率上升。

从各降水指数变化幅度来看, PRCPTOT 以最快为 0.9949 mm/10a 的速率上升, 而 CWD 以最慢为 0.0015 d/10a 的速率上升, CDD 以 0.1159 d/10a 较慢的速率下降, 从表 2 中可知只有降水强度 SDII 和强降水量 R95p 通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平检验具有显著特征, 其余极端降水指数均未通过显著性检验。

综上分析可知东北地区降水总量和降水强度在上升, 但上升的幅度并不快, 干旱日数下降的幅度也较慢, 总体来看气候湿润日数增多, 干旱日数减少。



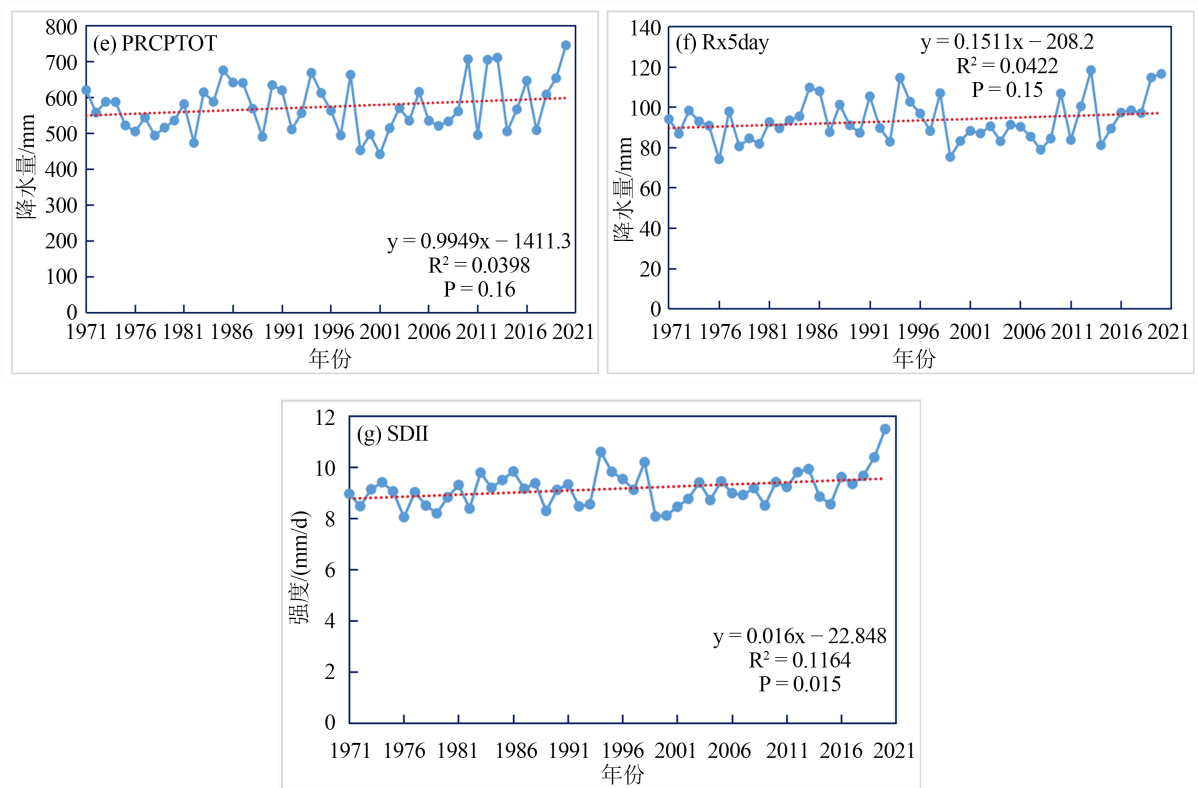


Figure 2. Linear trend of extreme precipitation index in Northeastern China from 1971 to 2020

图 2. 1971~2020 年东北地区极端降水指数线性趋势

Table 2. Trend rate per 10a and significance of extreme precipitation index in Northeastern China during 1971~2020

表 2. 1971~2020 年东北地区极端降水指数 10a 倾向率及显著性

指数	Rx5day (mm)	R10 (d)	R95p (mm)	SDII (mm/d)	CDD (d)	CWD (d)	PRCPTOT (mm)
10a 倾向率	0.1511	0.027	0.9056*	0.016*	-0.1159	0.0015	0.9949

4.2. 时间序列突变特征

图 3 为极端降水指数的 M-K 检验。可以看出, 图 3(a) 中强降水量 R95p 在 1976~1983 年不显著下降, 1984 年后一直呈不显著上升趋势; 图 3(b) 中的中雨日数 R10 在 1971~1985~1999~2012~2020 呈下降 - 上升 - 下降 - 上升的不显著趋势波动变化; 图 3(c) 中连续干旱日数 CDD 在 1988 年前和 1995~2000 年呈不显著上升趋势, 在 1988~2000 年间在 0 刻度线上下波动, 2000 年之后一直呈下降趋势, 其中 1974、1976、1977 年上升趋势显著; 图 3(d) 中连续湿润日数 CWD 在 0 刻度线上下波动较多, 但 1984~2004 年一直呈上升趋势, 整体来看 CWD 呈不显著上升趋势; 图 3(e) 中年降水量 PRCPTOT 在 1985 年前和 2000~2012 年呈下降趋势, 其中 1976、1978~1980、1982 年显著下降, 其余年呈不显著上升趋势; 图 3(f) 中 5 日最大降水量 Rx5day 在 1971~1974 年间在 0 刻度线附近波动, 随后呈不显著下降至 1984 年, 1984~2003 年间不显著上升之后至 2018 年又呈不显著下降, 最后 2018~2020 年不显著上升; 图 3(g) 中降水强度 SDII 在 1983 年前在 0 刻度线附近波动, 1983 年后一直呈上升趋势, 其中 2019 和 2020 年显著上升。综上所述, 各指数都在 0 刻度线附近波动较多, 但从整体来看趋势还是与上文时间序列线性趋势变化结论相近, 除 CDD 呈下降趋势外, Rx5day、R10、R95、SDII、PRCPTOT、CWD 均呈上升趋势。

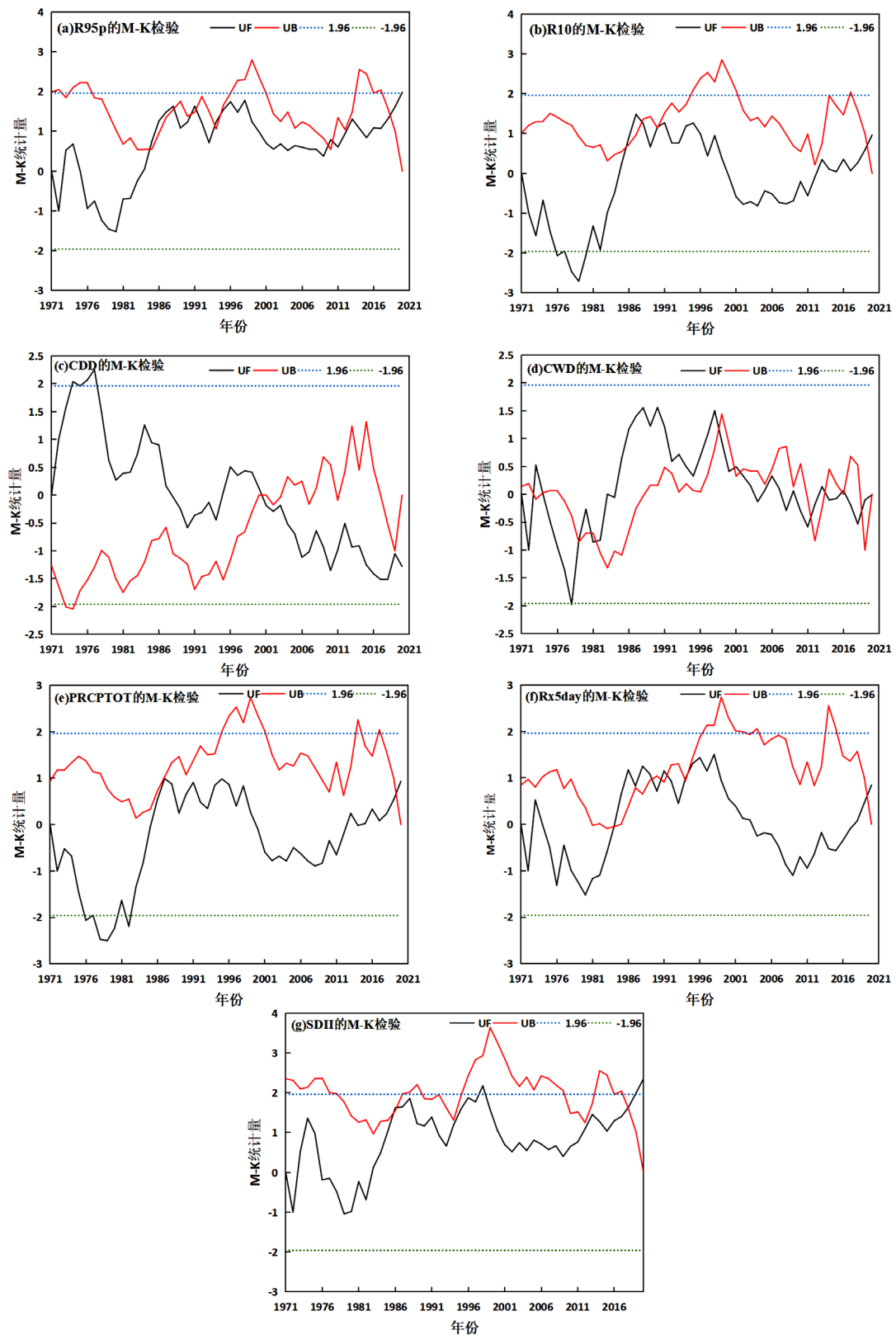


Figure 3. M-K test of extreme precipitation index in Northeastern China from 1971 to 2020

图 3. 1971~2020 年东北地区极端降水指数的 M-K 检验

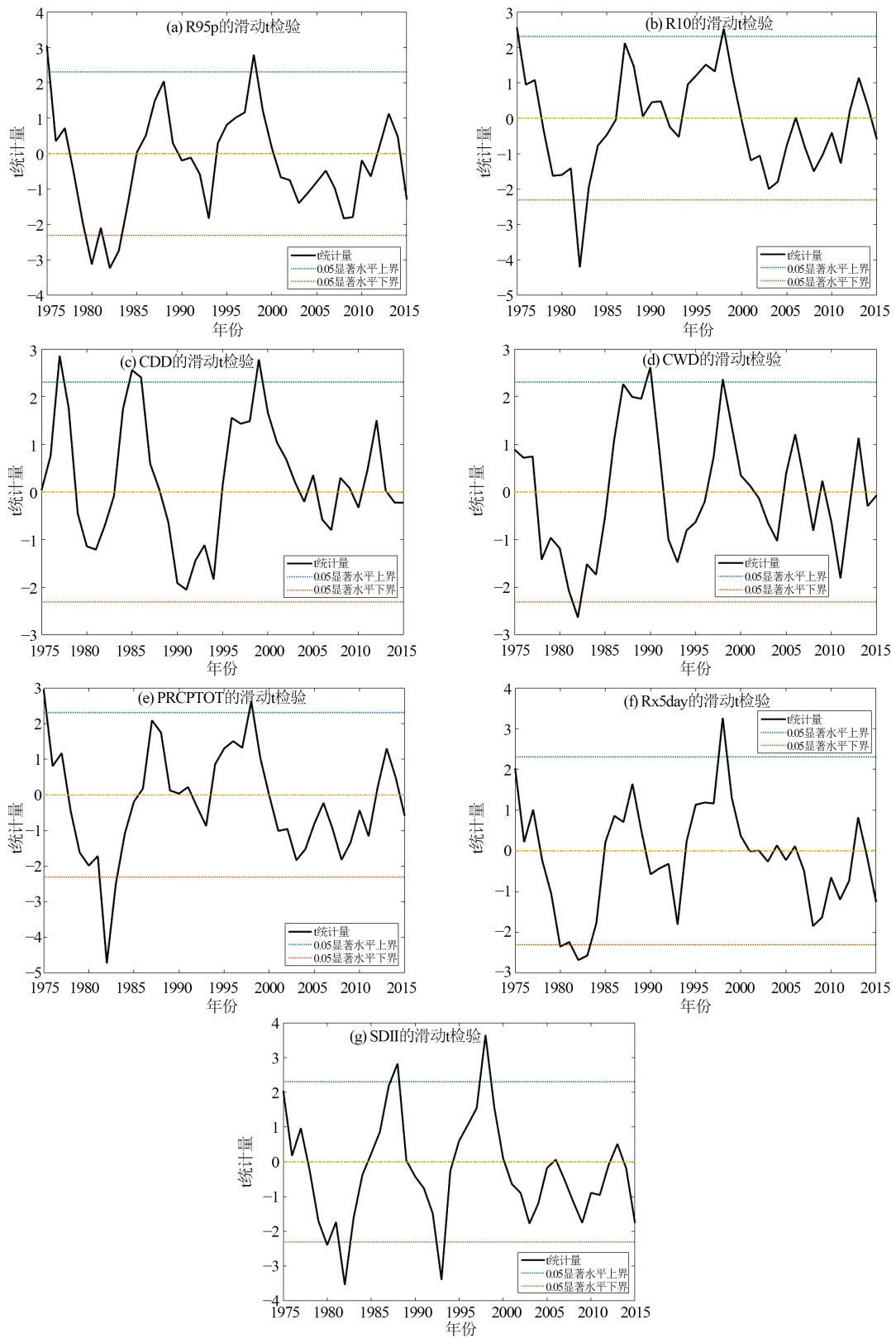


Figure 4. Sliding t test of extreme precipitation index in Northeastern China from 1971 to 2020

图 4. 1971~2020 年东北地区极端降水指数的滑动 t 检验

结合图3和图4对比出极端降水指数的M-K检验和滑动t检验共同突变年份的结果如表3所示, 只有CWD有一明显共同突变年份1998年, 其余指数均没有明显突变年。

Table 3. Comparison between M-K test and sliding t test of extreme precipitation index in Northeastern China from 1971 to 2020
表 3. 1971~2020年东北地区极端降水指数的M-K检验和滑动t检验对比

指数	M-K 检验	滑动 t 检验	突变年
R95p	1984、1988、1990、1991、1993、1994、2009、2010、2018	1975、1980、1982、1983、1998	无
R10	1985、1987、1990、2019	1975、1982、1998	无
CDD	2000	1977、1985、1986、1999	无
CWD	1972、1974、1979~1981、1998、2000、2001、2011、2013、2016、2018、2020	1982、1990、1998	1998
PRCPTOT	2019	1975、1982、1983、1998	无
Rx5day	1984、1989~1991、1994、2019	1980、1982、1983、1998	无
SDII	1986、2018	1980、1982、1988、1993	无

4.3. 时间序列周期特征

由于文章篇幅有限, 因此本文仅列出了具有大多数相同主周期的极端降水指数SDII的小波分析图5。由图5(a)中可以看出, SDII在1975~2009年有显著0~5年的年际震荡特征, 2010~2015有显著2~4年的年际震荡特征, 存在30~31年的主周期。同理, 对其余极端降水指数做周期变化分析, 统计结果如表4, 可知显著年际震荡特征均在0~9年内, 有1~2个主周期存在, 其中R95、PRCPTOT、Rx5day、SDII主周期相同, 都在30~31年间。

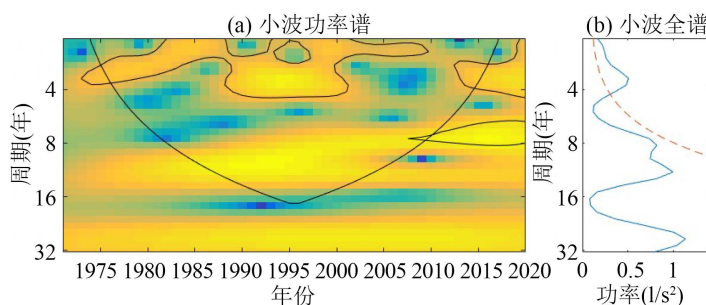


Figure 5. Wavelet analysis of extreme precipitation index of SDII in Northeastern China from 1971 to 2020

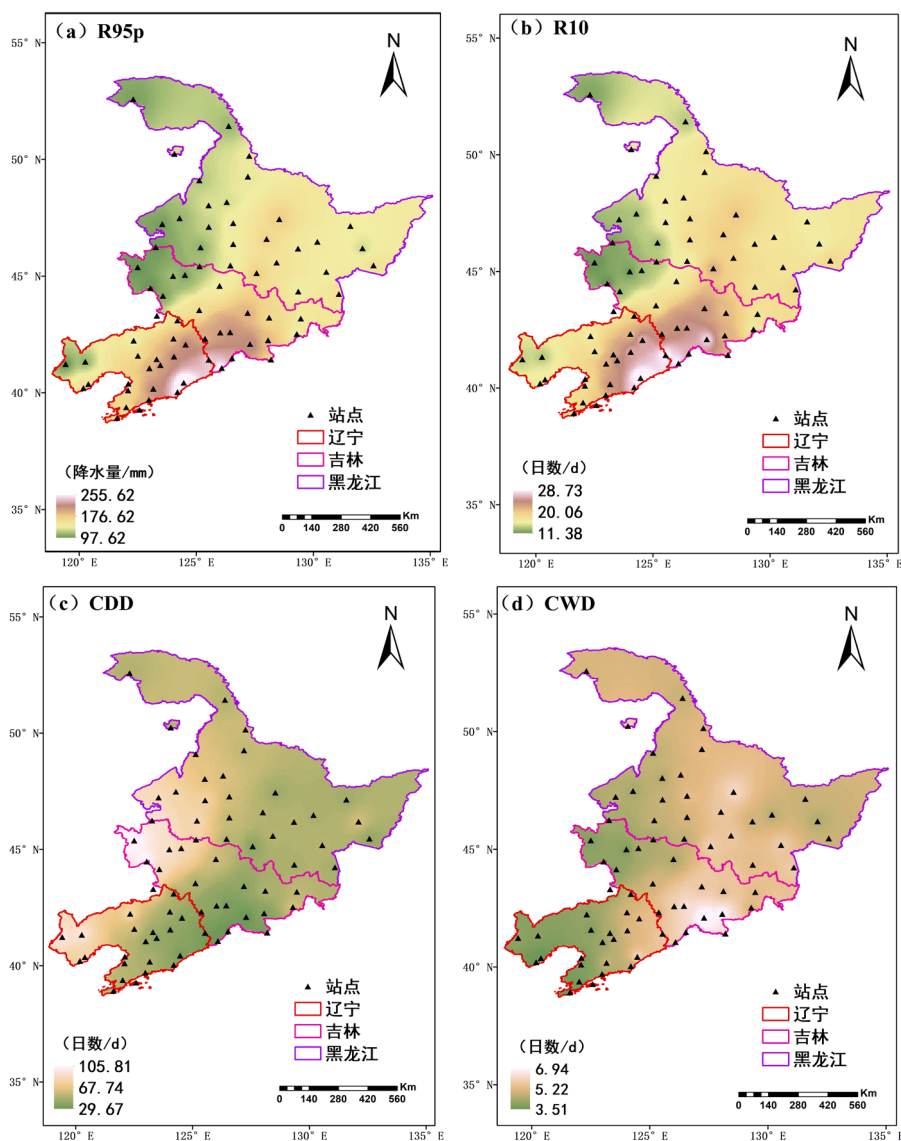
图 5. 1971~2020年东北极端降水指数SDII的小波图

Table 4. Periodic results of wavelet analysis of extreme precipitation index in Northeastern China from 1971 to 2020
表 4. 1971~2020年东北极端降水指数小波分析周期结果

指数	年际震荡特征/a	主周期/a
R95p	0~5	30~31
R10	0~5	25~26
CDD	0~9	3~4、8~9
CWD	0~6	3
PRCPTOT	0~5	30~31
Rx5day	0~5	30~31
SDII	0~5	30~31

4.4. 空间分布特征

图 6 是东北地区近 50 年极端降水各指数的空间分布图。可以看出, 相对指数中强降水量 R95p (图 6(a))自东北地区的西北向东南增加, 最小值为 97.62 mm, 最大值为 255.62 mm, 增加量较大。绝对指数的中雨日数 R10 (图 6(b))自东北地区的西北向东南增加, 最小值为 11.38 d, 最大值为 28.73 d, 增加量较小。持续指数中, 连续湿润日数 CWD (图 6(d))自东北地区的西部向东部增加, 最小值为 3.51 d, 最大值为 6.94 d, 增加量较小; 而连续干旱日数 CDD (图 6(c))则是从东北地区的西部向东部减少, 最大值为 105.81 d, 最小值为 29.67 d, 减少量较多。强度指数中, 年降水量 PRCPTOT (图 6(e))自东北地区的西北部向东南部增加, 最小值为 370.66 mm, 最大值为 959.40 mm, 增加量较大; 5 日最大降水量 Rx5day (图 6(f))自东北地区的西北部向东南部增加, 最小值为 71.79 mm, 最大值为 153.46 mm, 增加量相对较少; 降水强度 SDII (图 6(g))自东北地区的南部向北部减少, 最小值为 6.43 mm/d, 最大值为 13.48 mm/d, 增加量较小。综上可知, 1971~2020 年东北地区 SDII 自南向北呈减少趋势, PRCPTOT、R95p、R10 和 Rx5day 呈西北向东南逐渐增加趋势, CDD 自西向东呈减少趋势, CWD 自西向东呈增加趋势。



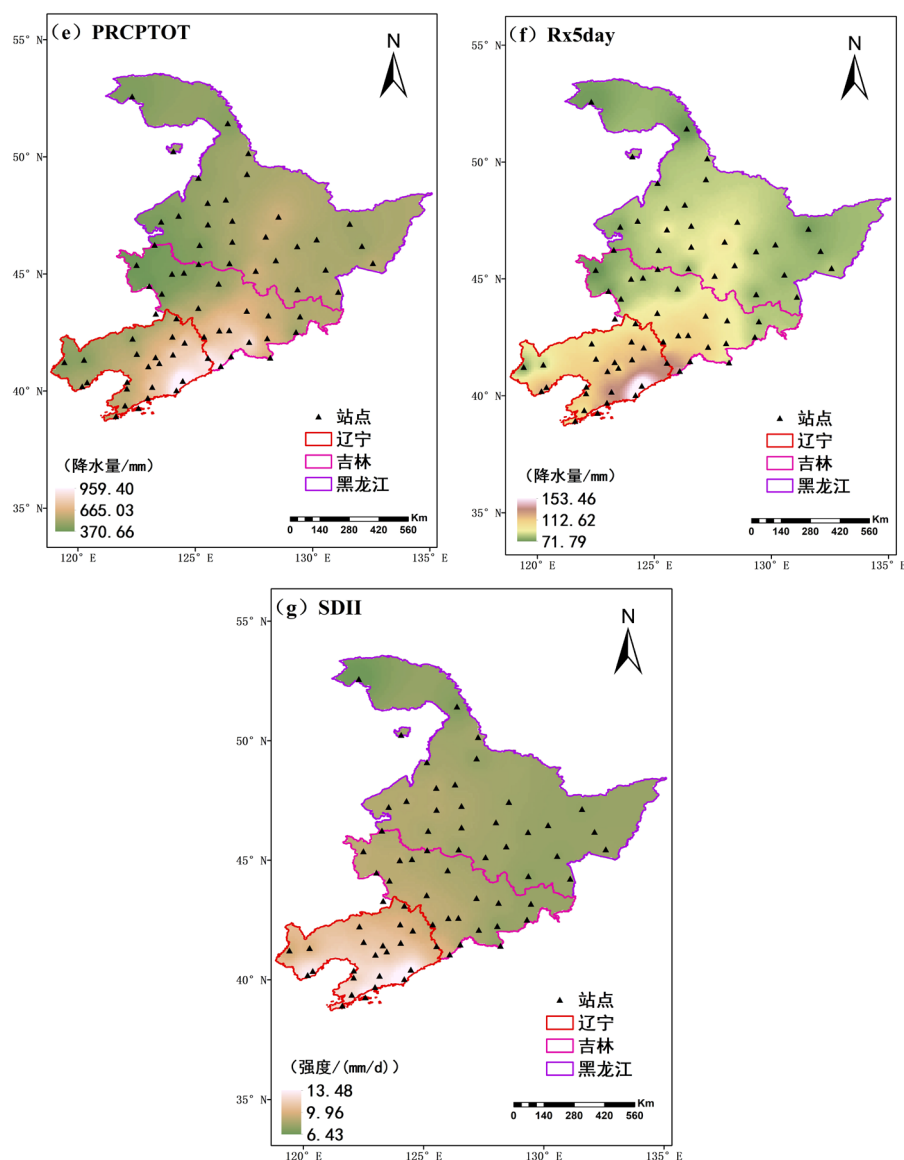


Figure 6. Spatial distribution of extreme precipitation index in Northeastern China from 1971 to 2020

图 6. 1971~2020 年东北地区极端降水指数的空间分布

5. 结论与讨论

本文基于 1971~2020 年东北区域 72 个站点的日降水数据, 通过选取 7 个极端降水指数, 采取线性趋势估计、滑动 t 检验、M-K 检验、小波分析以及 ArcGIS 软件的反距离加权插值对东北地区近 50 年的极端降水事件进行了时空特征分析, 得出以下一些主要结论:

1) 极端降水指数中的相对指数 R95、绝对指数 R10、持续指数 PRCPTOT 和 CWD、强度指数 Rx5day 和 SDII 都呈上升趋势, 干持续指数 CDD 呈下降趋势。即, 1971~2020 年间东北地区降水量增加, 干旱日数减少湿润日数增多。

2) 7 个极端降水指数中 CWD 在 1998 年有突变发生。

3) 1971~2020 年东北地区的 7 个极端降水指数显著年际震荡特征在 0~9 年间, 均存在 1~2 个主周期,

大多数极端降水指数主周期在 30~31 年间。

4) 空间分布上, 极端降水指数中 R95p、R10、PRCPTOT、Rx5day 均自西北向东南方向增加, CWD 自西向东增加, CDD 自西向东减少, SDII 自北向南增加。即, 1971~2020 年东北地区东南部强降水量、降水总量高于西北部, 连续干旱日数西部多于东部, 极端降水事件易发生于东部和南部, 西部气候干旱, 因此应多注意西部极端干旱事件。

以上结论中 1) 与董庆林[1]对东北地区整体研究的论文结论相同, 都是湿指数上升、干指数下降; 结论 4) 与李洋[7]等人对极端降水气候指数的空间分布结论相同, 都是极端降水事件易发生于东部和南部、极端干旱事件易发生于西部。另外, 本文仅从统计学角度对极端降水事件进行了时空特征分析, 而未对引起东北地区极端降水事件的原因进行探讨, 未来可进一步从自然和人为两大因素从机理机制方面选取主要影响因素进行更深入地分析, 这是未来可进一步深入开展的工作。

参考文献

- [1] 董庆林. 东北地区近 50 年来极端气候事件时空变化特征[D]: [硕士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2011.
- [2] Devesh, S. and Mukand, S.B. (2014) Trends in Extreme Rainfall and Temperature Indices in the Western Thailand. *International Journal of Climatology*, **34**, 2393-2407. <https://doi.org/10.1002/joc.3846>
- [3] Manton, M.J., Della-Marta, P.M., Haylock, M.R., et al. (2001) Trend in Extreme Daily Rainfall and Temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. *International Journal Climate*, **21**, 269-283. <https://doi.org/10.1002/joc.610>
- [4] Karl, T.R., Kukla, G., Razuvayev, V.N., et al. (1991) Global Warming: Evidence for Asymmetric Diurnal Temperature Change. *Geophysical Research Letters*, **18**, 2253-2256. <https://doi.org/10.1029/91GL02900>
- [5] Kunkel, K.E., Easterling, D.R., Redmond, K., et al. (2003) Temporal Variations of Extreme Precipitation Event in the United States: 1895-2000. *Geo Physical Research Letters*, **30**, 1900. <https://doi.org/10.1029/2003GL018052>
- [6] 赵金鹏. 1961-2016 年青藏高原极端气候事件变化特征研究[D]: [硕士学位论文]. 甘肃: 兰州大学, 2019.
- [7] 李洋, 王玉辉, 吕晓敏, 等. 1961-2013 年东北三省极端气候事件时空格局及变化[J]. 资源科学, 2015, 37(12): 2501-2513.
- [8] 孙凤华, 杨素英, 任国玉. 东北地区降水日数、强度和持续时间的年代际变化[J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 610-618.
- [9] 敖雪, 翟晴飞, 崔妍, 等. 不同升温情景下中国东北地区平均气候和极端气候事件变化预估[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(5): 40-51.
- [10] 吴菲菲. 东北地区极端气温事件时空分布特征研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(6): 158-160.
- [11] 华婧婧. 东北三省极端温度时空分布和概率分布特征研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [12] 杨方兴. 内蒙古地区极端气候事件时空变化及其与 NDVI 的相关性[D]: [硕士学位论文]. 陕西: 长安大学, 2012.
- [13] 张万诚, 郑建萌, 马涛, 等. 1961-2012 年云南省极端气温时空演变规律研究[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 710-722.
- [14] 王真. 1971-2018 年四川省极端降水指数时空变化特征[J]. 自然科学, 2019, 7(4): 333-348.
- [15] 尹扬娜. 浙江省 1971-2016 年极端降水指数时空变化特征[J]. 自然科学, 2019, 7(4): 294-306.
- [16] 赵孟伟, 赵梦霞, 邢广君. 许昌市 1953-2016 年降水时空变化特征分析[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2018, 30(4): 1-6.
- [17] 陈俊旭, 赵红玲, 吕燕, 等. 红河流域径流演变分异及其特征[J]. 水电能源科学, 2018, 36(10): 23-26.
- [18] 张璇, 王佳刚, 许杨, 等. 滦河流域干湿变化及大尺度气候因子影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210506.1245.002.html>, 2021-06-20.
- [19] 吕翠美, 吴泽宁, 刘文立, 等. 伊河流域径流周期变化特征的小波分析[J]. 人民黄河, 2007, 29(5): 26-28.