

近50年东北地区极端温度事件时空演变特征

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7月2日; 录用日期: 2021年7月16日; 发布日期: 2021年8月4日

摘要

为进一步研究东北地区极端温度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日值温度数据, 通过对研究区数据资料进行连续性和可靠性检查, 并对缺测数据进行插补, 通过选取8个极端温度指数, 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方法对1971~2020年的极端温度事件进行了时空演变特征分析。结果表明: 1) 近50年东北地区极端高温事件发生概率增加、极端低温事件发生概率降低; 2) 8个极端气温指数中, 仅有霜冻日数在1988年有突变发生; 3) 8个极端温度指数显著的年际震荡特征在0~11年间, 均存在1~2个主周期, 大多数极端温度指数的主周期在13~14年间或18~19年间; 4) 近50年东北地区的极端高温事件多发生在南部, 极端低温事件多发生在北部, 南部气温高于北部。

关键词

极端温度指数, 时空分布特征, 突变检验, 小波分析, 东北地区

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

Jia'ao Xu, Xiehui Li

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

Received: Jul. 2nd, 2021; accepted: Jul. 16th, 2021; published: Aug. 4th, 2021

Abstract

To further study the spatial and temporal evolution characteristics of extreme temperature events in Northeastern China, this paper used the ground climate daily temperature data downloaded

from the China Meteorological Data Network, and checked the continuity and reliability of the data information in the study area by interpolating the missing measurement data. Eight extreme temperature indices were selected to analyze in Northeastern China from 1971 to 2020. The spatiotemporal evolution characteristics of extreme temperature events 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 probability of extreme high temperature events increased and the probability of extreme low temperature events decreased in Northeastern China in the past 50 years; 2) Among the eight extreme temperature indices, only the number of frost days had a sudden change in 1988; 3) The significant interannual oscillations of the eight extreme temperature indices were between 0 and 11 years, and there were 1~2 main cycles. The main periods of most extreme temperature indices were 13~14 years or 18~19 years; 4) Most of the extreme high temperature events occurred in the south, most of the extreme low temperature events occurred in the north, and the temperature in the south was higher than that in the north.

Keywords

Extreme Temperature 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

近年来全球气候逐渐变暖, 极端温度事件作为极端气候事件中的一种重要分类在全国各地频繁发生, 给多地造成了巨大影响。东北地区作为我国第一大粮食基地, 农业是当地经济收入的重要来源之一[1]。然而近年来, 东北地区干旱、高温等极端温度事件频发, 例如 2018 年辽宁省出现的极端高温闷热天气等, 给东北地区的农业生产和人民生活都带来了巨大影响。

目前, 国内外学者们针对极端温度事件进行了大量研究。如, Devesh 等对泰国西部极端温度事件的分析得出该地区暖日日数和暖夜日数显著增加, 冷日日数和冷夜日数显著减少[2]; Manton 等对东南亚及南太平洋地区的讨论发现, 其暖日和暖夜日数呈增加趋势, 而冷夜和冷日日数呈减少趋势[3]; Peterson 等发现 1961~2003 年中美洲地区暖最高最低温呈增加趋势, 冷最高最低温呈下降趋势[4]。国内学者中, 赵金鹏的研究表明青藏高原地区气温有明显的上升趋势, 其暖指标呈上升趋势、冷指标呈下降趋势[5]; 雅茹等发现内蒙古地区的高温指数呈上升趋势、低温指数呈下降趋势[6], 综上可看出国内外对极端温度事件都相当关注。

东北地区农业生产与当地的经济发展和生产生活息息相关, 极端温度事件频发会给当地经济发展和人民生活都带来一定的损失, 因此对东北地区的极端温度事件进行时空分布及变化特征分析, 能够为东北各地区的农作物生长, 以及为发展东北地区经济和减少灾害损失等提供一定具有参考性和建议性的气候资料, 并且为预测未来几十年东北地区极端温度变化趋势和可能发生的灾害提供分析方向。

现已有一些学者对东北地区的极端温度事件进行了研究。如, 佟晓辉等用线性趋势分析的方法从时间变化、空间分布、发展趋势、指数强度 4 个方面对 1961~2013 年东北地区极端温度进行研究, 发现东北地区冷指数减小, 暖指数增加, 结冰日数、冷昼日数和暖昼日数变化率在东北区域的南北两侧较大, 暖指数增加幅度不断增大, 冷指数变化率先增大后减小[7]; 李洋等选取 8 个极端温度指数对 1961~2013

年东北地区极端温度事件的空间格局及变化进行分析, 发现东北地区西南部易发生极端高温事件, 北部易发生极端低温事件[8]; 吴菲菲采用空间插值方法和趋势分析法, 研究了 1960~2014 年东北地区极端气温时间变化与空间分布特征, 得出东北地区冬季暖日和暖夜的天数在不断增加, 冷日和冷夜的天数在不断地减少等结论[9]。本文结合前人对东北地区的研 究, 从而选取了 8 个极端温度指数, 结合线性趋势分析、Mann-Kendall 检验、滑动 t 检验、小波分析对东北地区的时间趋势、突变年份、周期变化特征进行分析, 再利用反距离加权插值的方法对空间分布特征进行分析。

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[11]。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 and 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

本文研究数据来自中国气象数据资料共享网上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 个站点日气温观测数据(图 1), 包括逐日平均气温、逐日最高气温、逐日最低气温数据。计算前对数据的完整性、连续性进行了检验, 对缺测值进行了插补, 以保证数据的有效性、真实性和可靠性。

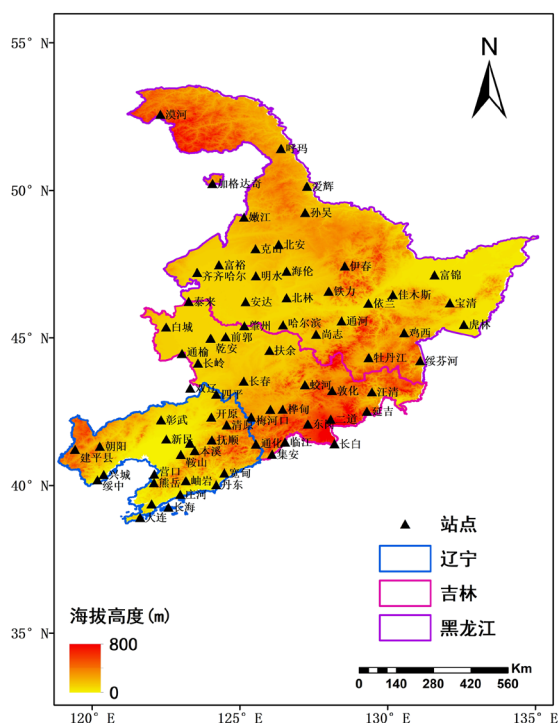


Figure 1. Distribution of selected stations in Northeastern China
图 1. 东北地区所选站点分布概况

3.2. 极端温度指数选取

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点主要选取了具有代表性的 8 个极端气温指数, 具体见表 1 所示, 其中相对指数有 4 个, 绝对指数有 2 个, 持续指数有 2 个。

Table 1. Definition of extreme temperature index

表 1. 极端温度指数定义

类型	缩写	指数名称(单位)	定义	
极端气温指数	相对指数	TX90p	暖昼日数(d)	日最高温 > 90%分位值的日数
		TN90p	暖夜日数(d)	日最低温 > 90%分位值的日数
		TX10p	冷昼日数(d)	日最高温 < 10%分位值的日数
		TN10p	冷夜日数(d)	日最低温 < 10%分位值的日数
	绝对指数	SU25	夏日日数(d)	日最高温 > 25℃的日数
		FD0	霜冻日数(d)	日最低温 < 0℃的日数
	持续指数	WSDI	暖日持续日数(d)	连续 6 日最高温 > 90%分位值日数
		CSDI	冷日持续日数(d)	连续 6 日最低温 < 10%分位值日数

3.3. 回归线性趋势分析

本文运用线性回归方法[6]计算极端温度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:

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

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[13]。 a 和 b 的计算公式为:

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

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 :

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

3.4. Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 突变检验[14]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_j ($1 \leq j \leq i$) 的累积数, k 为样本数量, 其中

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

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[15]。

3.5. 滑动 t 突变检验

滑动 t 检验[16]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[17]:

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

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 $\nu = n_1 + n_2 - 2$ 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[18]。

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, 即为极端温度指数的最终突变年份。

3.6. 小波分析

小波分析[18]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[19]。

本文运用小波分析的方法讨论各极端温度指数的周期问题, 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温度指数变化的主周期。

3.7. 反距离加权插值

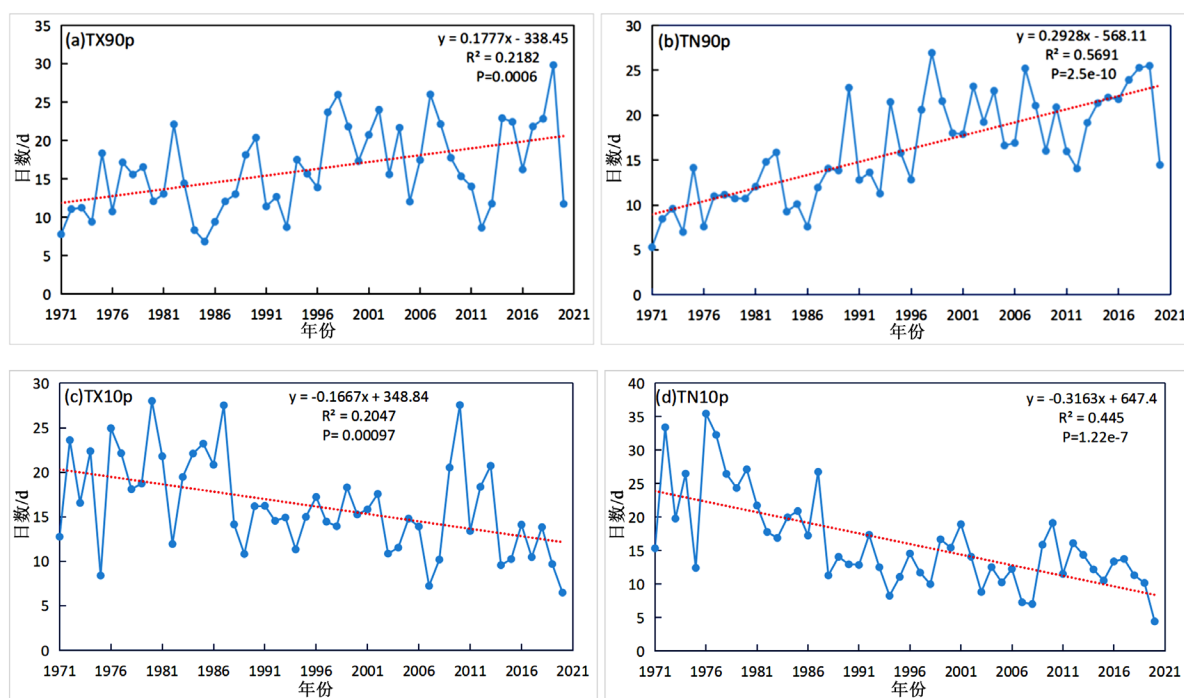
通过 ArcGIS [9]对各个站点各极端温度指数进行反距离加权插值 IDW (Inverse Distance Weighting), 可以得出东北地区极端温度指数的空间分布图, 分析极端温度指数的空间格局及其变化趋势。

4. 极端温度指数时空分布特征

4.1. 时间序列变化特征

图 2 为东北地区 50 年内 8 个极端温度指数的年际趋势变化图。可以看出, 相对指数中, 暖昼日数 TX90p 和暖夜日数 TN90p 分别以 0.1777 d/10a 和 0.2928 d/10a 的速率呈上升趋势变化, 冷昼日数 TX10p 和冷夜日数 TN10p 分别以 0.1667 d/10a 和 0.3163 d/10a 的速率呈下降趋势变化; 绝对指数中, 夏日日数 SU25 以 0.3249 d/10a 的速率呈上升趋势变化, 霜冻日数 FD0 以 0.2878 d/10a 的速率呈下降趋势变化; 持续指数中, 暖日持续日数 WSDI 以 0.0882 d/10a 的速率呈上升趋势变化, 冷日持续日数 CSDI 以 0.0868 d/10a 的速率呈下降趋势变化。综上可得, 暖指数(SU25、TX90p、TN90p、WSDI)均呈上升趋势, 冷指数(FD0、TX10p、TN10p、WSDI)均呈下降趋势, 表明东北地区极端高温事件发生概率增加, 极端低温事件发生概率减少, 东北气候逐渐变暖, 气温升高。

从变化速率幅度上来看, 夜指数 TN90p 和 TN10p 变化速率分别为 0.2928 d/10a 和 -0.3136 d/10a, 昼指数 TX90p 和 TX10p 的变化速率分别为 0.1777 d/10a 和 -0.1667 d/10a, 即可知夜指数变化速率幅度大于昼指数, 说明东北地区夜间升温高于白昼升温。结合表 2 的显著性水平检验情况可以得出, 8 个极端温度指标均通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验, 其趋势均发生极显著变化。



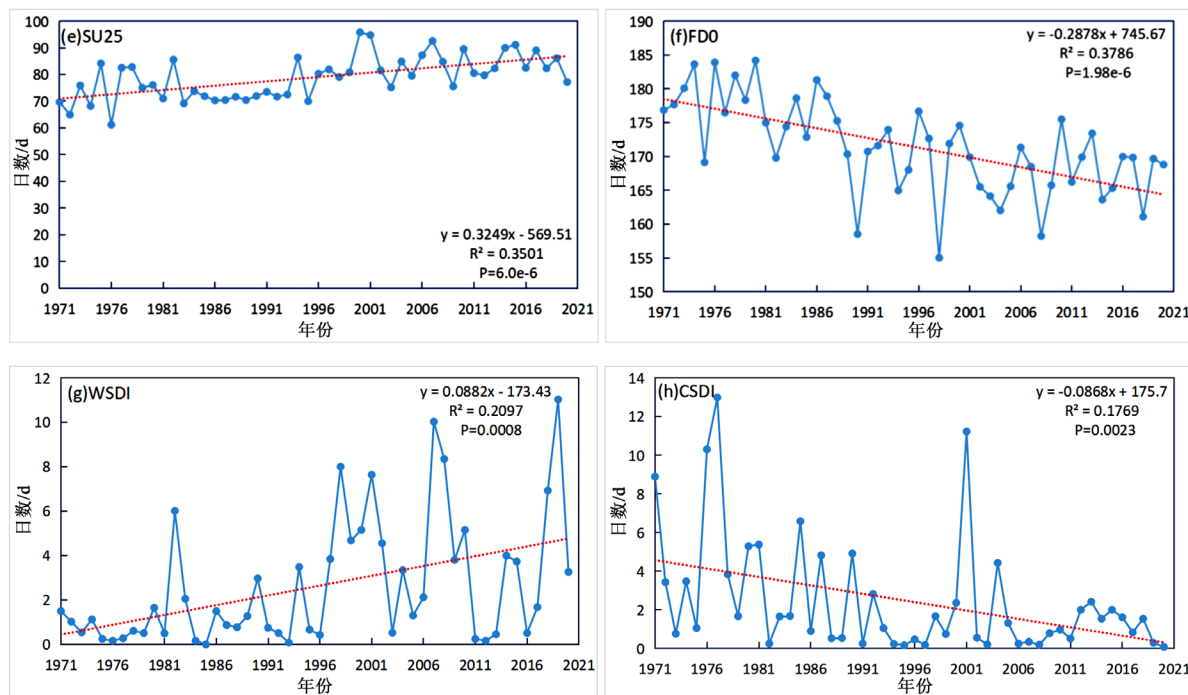


Figure 2. Linear trend of extreme temperature index in Northeastern China from 1971 to 2020
图 2. 1971~2020 年东北地区极端温度指数线性趋势

Table 2. Trend rate per 10a and significance of extreme temperature index in Northeastern China during 1971 to 2020
表 2. 1971~2020 年东北地区极端温度指数 10a 倾向率及显著性

指数	SU25 (d)	TX90p (d)	TN90p (d)	WSDI (d)	FDO (d)	TX10p (d)	TN10p (d)	CSDI (d)
10a 倾向率	0.3249**	0.1777**	0.2928**	0.0882**	-0.2878**	-0.1667**	-0.3163**	-0.0868**

4.2. 时间序列突变特征

图 3 为极端温度指数的 M-K 突变检验图。可以看出, 图 3(a)中暖昼日数 TX90p 一直呈上升趋势, 并从 1998 年开始显著上升; 图 3(b)中暖夜日数 TN90p 一直呈上升趋势, 在 1981~1985 年间和 1988 年后显著上升; 图 3(c)中冷昼日数 TX10p 在 1971~1988 年间呈不显著上升趋势, 从 1989 年开始下降, 并从 2003 年开始显著下降; 图 3(d)中冷夜日数 TN10p 个别年份呈不显著上升趋势, 总体来看呈下降趋势, 并从 1990 年开始下降显著; 图 3(e)中夏日日数 SU25 除个别年份呈不显著下降趋势外, 大多数年份呈上升趋势, 并从 2000 年开始上升趋势显著; 图 3(f)中霜冻日数 FDO 在 1971-1981 年间不显著上升, 1981 年后一直呈下降趋势, 并从 1992 年开始呈显著性下降; 图 3(g)中暖日持续日数 WSDI 在 1971~1981 年呈不显著下降趋势, 1982~1996 年在 0 刻度线上下波动, 自 1997 年之后一直呈上升趋势, 并从 2001 年开始显著上升; 图 3(h)中冷日持续日数 CSDI 在 1976~1981 年不显著上升, 总体来看呈下降趋势, 并从 1994 年开始下降显著。

综上所述, 从 M-K 检验分析中可得暖指数 SU25、TX90P、TN90P、WSDI 整体呈上升趋势, 冷指数 FDO、TX10P、TN10P、CSDI 虽存在个别年份上升, 但整体还是呈下降趋势, 这说明极端高温事件的发生概率上升, 极端低温事件的发生概率下降, 东北地区气温升高、气候变暖。

结合图 3 和图 4 对比出 M-K 检验和滑动 t 检验共同的突变年份见表 3 所示。可以看出, 只有霜冻日数 FDO 存在一明显共同突变年份, 为 1988 年, 其余均未存在明显共同突变年。

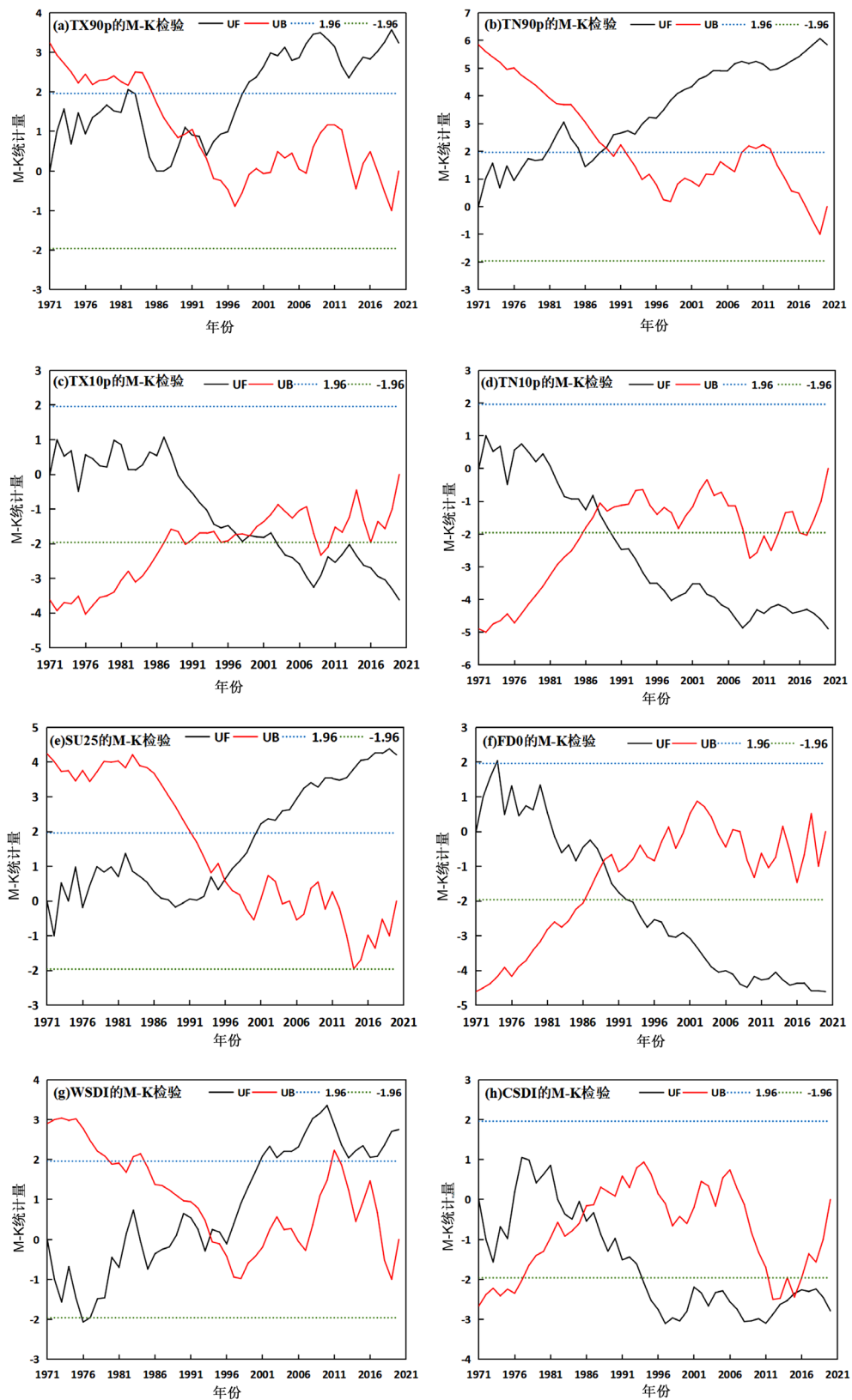


Figure 3. M-K test of extreme temperature index in Northeastern China from 1971 to 2020
 图 3. 1971~2020 年东北地区极端温度指数的 M-K 检验

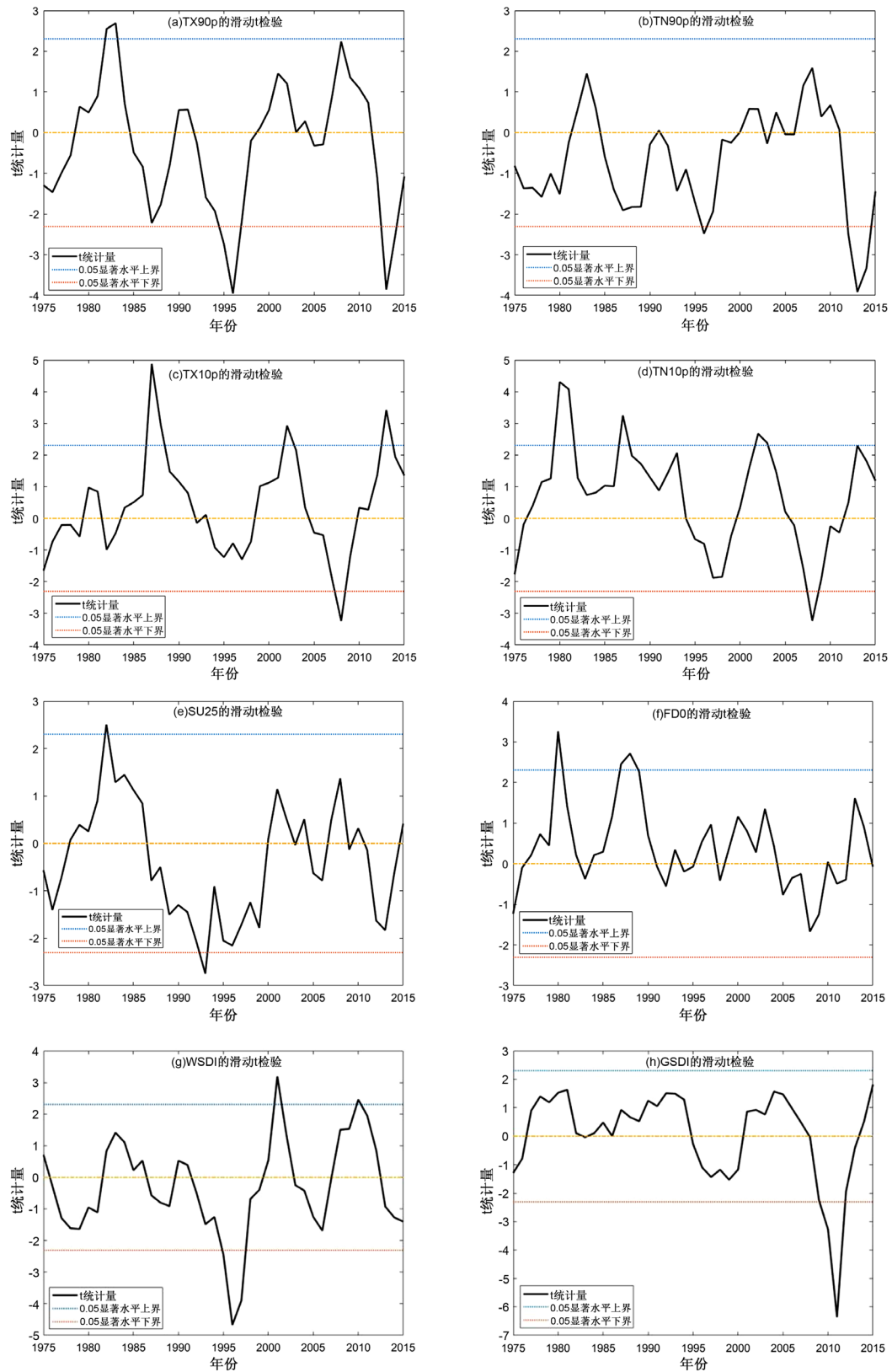


Figure 4. Sliding t test of extreme temperature index in Northeastern China from 1971 to 2020
图 4. 1971~2020 年东北地区极端温度指数的滑动 t 检验

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

指数	M-K 检验突变年	滑动 t 检验突变年	突变年
TX90p	1989~1991	1982、1983、1995、1996、2013、2014	无
TN90p	1989	1996、2012~2014	无
TX10p	1997、1999	1987、1988、2002、2008、2013	无
TN10p	1987	1980、1981、1987、2002、2003、2008	无
SU25	1995	1982、1993	无
FD0	1988	1980、1987、1988	1988
WSDI	1993	1995~1997、2001、2010	无
CSDI	1985、2014、2015	2010、2011	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 SU25 的小波分析图 5。图 5(a)里的锥型黑实线是影响锥线, 锥线以下的周期特性存在不确定性, 从中可看出有显著 0~7 年间的年际震荡特征; 图 5(b)中可以看出有 18~19 年间的主周期。同理, 对其余极端气温指数做周期变化分析, 结果见表 4 所示, 年际震荡特征均在 0~11 年内, 有 1~2 个主周期存在, 其中暖夜日数 TN90p 和夏日日数 SU25 主周期相同, 为 18~19 年间, 冷昼日数 TX10p 和冷日持续日数 CSDI 主周期相同, 为 13~14 年间, 冷夜日数 TX90p 和暖日持续日数 WSDI 主周期相近。

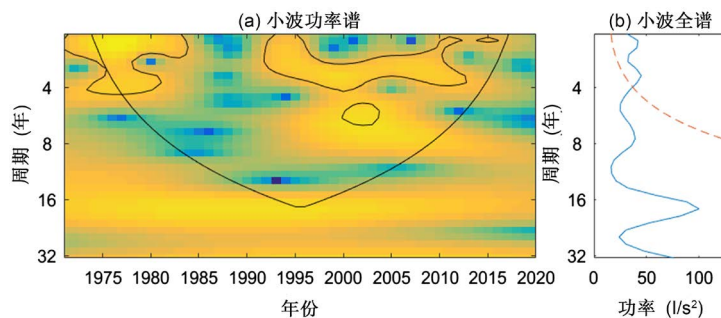


Figure 5. Wavelet analysis of extreme temperature index of SU25 in Northeastern China from 1971 to 2020
图 5. 1971~2020 年东北极端温度指数 SU25 的小波图

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

指数	年际震荡特征/a	主周期/a
TX90p	0~5	10~11
TN90p	0~5	18~19
TX10p	0~5	13~14
TN10p	0~5	27~28
SU25	0~4、5~7	18~19
FD0	0~6	32
WSDI	0~11	9~10
CSDI	0~7	13~14、25~26

4.4. 空间分布特征

图 6 是东北地区近 50 年极端温度各指数的空间分布图。可以看出, 相对指数中, 暖昼日数 TX90p (图 6(a))、暖夜日数 TN90p (图 6(b))、冷昼日数 TX10p (图 6(c))和冷夜日数 TN10p (图 6(d))的空间分布差异都不大, 数值均处于 15~17 d 间。绝对指数中, 夏日日数 SU25 (图 6(e))自西南的 123.41 d 向东北逐渐减少到 42.38 d; 霜冻日数 FD0 (图 6(f))与 SU25 呈相反趋势变化, 自西南的 106.42 d 向东北逐渐增加到 238.3 d; 持续指数中, 暖日持续日数 WSDI (图 6(g))自黑龙江西北值最高 4.84 d 向其他方向逐渐减少, 最低暖日持续日数为 0.84 d; 冷日持续日数 CSDI (图 6(h))在黑龙江西部值较大, 为 4.23 d, 自西北向东南降低, 最低冷日持续日数为 0.53 d。

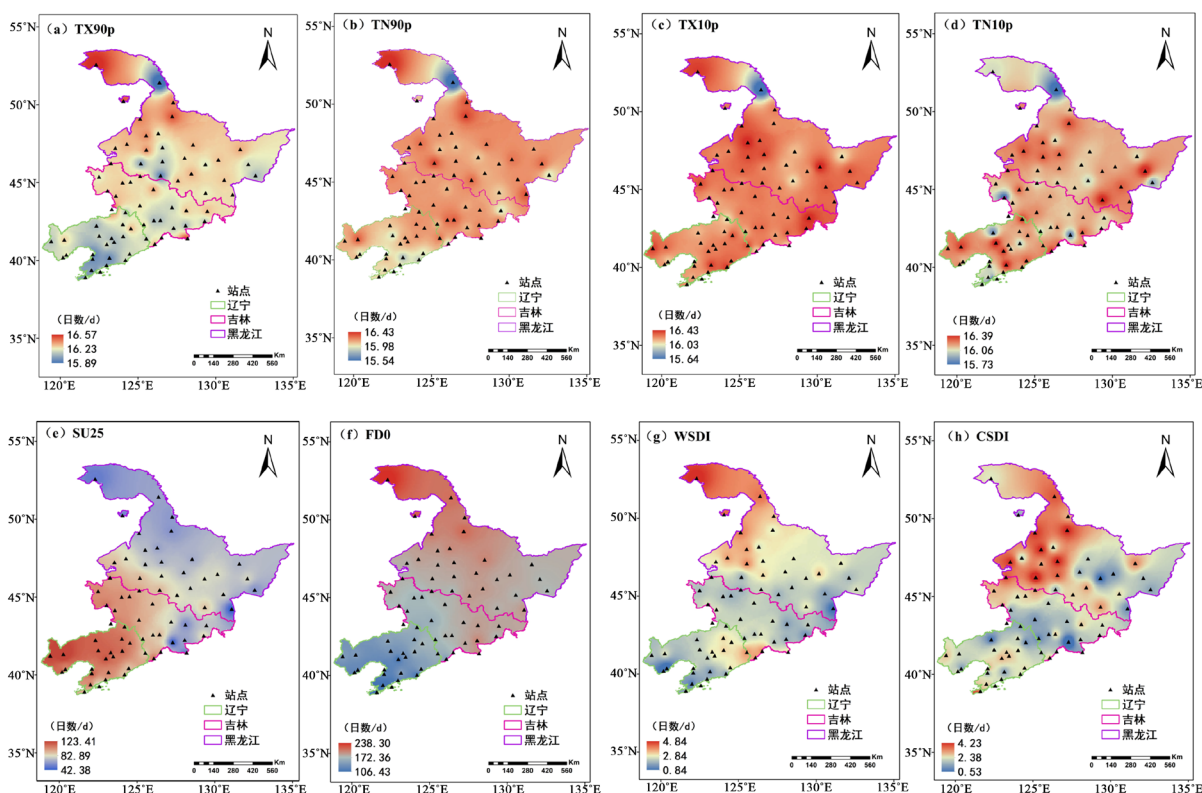


Figure 6. Spatial distribution of extreme temperature index in Northeastern China from 1971 to 2020

图 6. 1971~2020 年东北地区极端温度指数的空间分布

5. 结论

本文基于 1971~2020 年东北区域 72 个站点的日温度数据, 通过选取 8 个极端温度指数, 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 年的极端温度事件进行了时空特征分析, 得出以下一些主要结论:

1) 极端温度指数中的相对指数 TX90p 和 TN90p, 绝对指数 SU25, 持续指数 WSDI 呈上升趋势, 相对指数 TN90p 和 TN10p, 绝对指数 FD0, 持续指数 CSDI 呈下降趋势。即, 1971~2020 年间东北地区极端高温事件发生概率增大, 极端低温事件发生概率降低。

2) 8 个极端温度指数中仅 FD0 在 1988 年有突变发生。

3) 1971~2020 年东北地区 8 个极端温度指数的显著年际震荡特征在 0~11 年间, 均存在 1~2 个主周期,

大多数极端温度指数的主周期在 13~14 或 18~19 年间。

4) 空间分布上, 极端温度指数中 SU25 自南向北逐渐减小, FD0、TX90p、WSDI、CSDI 自南向北逐渐增大, TN90p、TX10p、TN10p 分布较均匀。即, 1971~2020 年东北地区的极端高温事件多发生在东北地区的南部, 极端低温事件多发生于北部, 南部气温高于北部。

6. 讨论

将本文的研究结果与已有研究对比后发现, 结论(1)中极端温度指数时间趋势变化特征与董庆林[1]、华婧婧[11]等多篇论文的结论相同, 都是极端高温指数上升、极端低温指数下降; 与佟晓辉[7]等人分四季对指数进行研究的论文结论有一定区别, 原因可能在于本文主要以年尺度为整体进行分析, 佟晓辉等人则对指数进行了季节性讨论; 结论(4)中极端温度指数的空间变化特征与李洋[8]等人结论相同, 都是极端高温事件易发于南部、极端低温事件易发于北部; 另外, 将结论(2)和(3)与多篇文章对比后发现, 其对东北地区极端温度指数的突变年份和周期变化特征方面分析的较少。

目前本文的研究还存在一定的不足之处, 其中影响温度的因素, 如经纬度、地形地势等因素并没有加入讨论, 其对研究该地区极端温度指数的时空变化特征具有一定影响, 在今后的研究中将会深入讨论此方面的内容。

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] Sharma, D. and Babel, M.S. (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., Hennessy, K., Nicholls, N., Chambers, L., *et al.* (2001) Trend in Extreme Daily Rainfall and Temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. *International Journal Climate*, **21**, 269-284. <https://doi.org/10.1002/joc.610>
- [4] Peterson, T.C., Taylor, M.A., Demeritte, R., Duncombe, D.L., Burton, S., Thompson, F., *et al.* (2002) Recent Changes in Climate Extremes in the Caribbean Region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **107**, 4601-4609. <https://doi.org/10.1029/2002JD002251>
- [5] 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]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [6] 雅茹, 丽娜, 银山, 包玉海. 1960-2015 年内蒙古极端气候事件的时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 106-112.
- [7] 佟晓辉, 刘向培, 叶培春, 史小康, 杨成荫. 1961-2013 年东北区域极端气温的变化特征[J]. 解放军理工大学学报, 2016, 17(6): 579-584.
- [8] 李洋, 王玉辉, 吕晓敏, 叶永昌, 汲玉河. 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.
- [9] 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): 157-160.
- [10] 敖雪, 翟晴飞, 崔妍, 赵春雨, 王涛, 周晓宇, 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.
- [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]. 西安: 长安大学, 2012.
- [13] 张万诚, 郑建萌, 马涛, 任菊章. 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, 邱冰, 李子晨. 红河流域径流演变分异及其特征[J]. 水电能源科学, 2018, 36(10): 22-26.

- [18] 张璇, 王佳刚, 许杨, 郝增超, 郝芳华. 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, 胡彩虹. 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.