



吴利华^{1,2} 成鹏³ 董李勤^{1,2} 程希平^{1,2} 巩合德^{1,2} 马月伟^{1,2} 魏爱英^{1,2}

1951—2017 年丽江极端气温和降水事件的变化特征

摘要

为系统弄清丽江极端气温和降水事件的变化特征,基于丽江气象站 1951—2017 年逐日最高气温、最低气温和降水量资料,采用线性倾向估计、Mann-Kendall 突变检验、滑动 t 检验和 Morlet 复小波的方法对 16 个极端气温指数和 11 个极端降水指数的变化趋势、突变和周期特征进行了分析。1) 变化趋势分析表明:月最低气温极大值、月最低气温极小值、夏季日数、暖夜日数、暖昼日数、热日持续指数呈显著增加趋势,霜冻日数、冷夜日数、冷日持续指数、月平均日较差呈明显减少趋势,月最高气温极大值、热夜日数、作物生长期呈不显著增加趋势,月最高气温极小值、冷昼日数呈不显著减少趋势,冰封日数在研究期内均为 0 d;极端降水指数日降水 ≥ 1 mm 的降水日数呈显著减少趋势,特强降水量呈显著增加趋势,中雨日数、持续湿期、年总降水量、5 日最大降水量均呈不显著减少趋势,大雨日数、强降水量、持续干期、1 日最大降水量、降水强度均呈不显著增加趋势。2) 突变检验分析表明,部分极端气温指数和降水指数的突变年份显著,大部分指数的显著突变年份集中在 20 世纪 80 年代至 21 世纪初,其余指数的显著突变年份在 20 世纪 50 至 70 年代,并且极端冷事件指数霜冻日数、冷夜日数和冷昼日数在显著突变年份后呈现减少趋势,而极端暖事件指数夏季日数、暖夜日数和暖昼日数在显著突变年份后呈现增加趋势,热夜日数在研究期内只有 2015 年为 1 d,其余年份均为 0 d。3) 周期分析表明:极端气温指数除冰封日数外的 15 个指数存在 2~6 个准周期,介于 3~56 a 之间,存在 1~3 个主周期,介于 10~56 a 之间;11 个极端降水指数存在 4~6 个准周期,介于 4~56 a 之间,存在 1~3 个主周期,介于 12~56 a 之间;部分极端气温指数或降水指数具有相同或相近的主周期。

关键词

丽江;极端气温;极端降水;变化趋势;突变检验;周期分析

中图分类号 P467;X43

文献标志码 A

收稿日期 2021-06-23

资助项目 国家自然科学基金(42061012);西南林业大学科研预研基金(110822129);西南林业大学教育科学研究面上课题(YB201815);云南省教育厅科学研究基金(2014Y314)

作者简介

吴利华,男,博士,讲师,主要从事冰川与气候变化研究。wulhmail@163.com

0 引言

在全球气候系统变暖的背景下,极端破纪录气温事件在增多^[1],并且已经导致高温干旱和暴雨洪涝等极端气候事件的发生频率与强度出现加剧的趋势,特别是对气候变化敏感区和脆弱区将产生长远、巨大影响^[2-3]。城市作为经济全球化进程中引领和带动全社会实现可持续发展的引擎和支点^[4],同时也是气候变化响应的敏感区和脆弱区^[3],关注城市极端气候事件变化规律,对于城市防灾减灾应急机制的建立和完善具有现实意义。由于极端气候变化具有很强的地域分异性,云南近年来各种极端气候事件频繁发生,已引起众多学者的重视和关注^[5-15],现有的研究大多选取了国际气候变化监测和指标专家组(Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI)定义的部分指数进行分析,对于将 ETCCDI 定义的 27 个气候指数全部应用于云南城市极端气候事件的研究较少。丽江作为滇西北中部、青藏高原与云贵高原交接处的城市,地处高原季风、季风环流和西风环流的影响区,同时又是世界文化遗产丽江古城的所在地,本文将 ETCCDI 定义的 16 个极端气温指数^[3,16-17]和 11 个极端降水指数^[16]全部应用在丽江极端气候事件的研究中,采用线性倾向估计、Mann-Kendall 突变检验、滑动 t 检验、Morlet 复小波的方法分析其变化特征,以期对丽江的农业生产建设、自然灾害防御等提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文所用数据是丽江气象站 1951—2017 年逐日观测资料,包括日最高气温、日最低气温和日降水量(20:00—次日 20:00),来源于国家气象信息中心提供的《中国地面国际交换站气候资料日值数据集(V3.0)》和基于统一的数据环境 CIMISS 平台,所用数据均由审核部门进行了极值检验和时间一致性检验等严格的质量检查和控制。在计算极端气温和降水指数之前,通过 R 软件中的 RCLimDex 程序对数据进行处理,以达到检测和提高数据质量的目的,包括异常值和错误值的筛选、日最高气温是否小于最低气温、日降水量是否小于 0 mm 等,

1 西南林业大学 地理与生态旅游学院,昆明,650224

2 国家林业和草原局 西南生态文明研究中心,昆明,650224

3 乌鲁木齐市气象局,乌鲁木齐,830002

以保证结果的可信度^[17].

1.2 研究方法

本文基于 ETCCDI 定义的 16 个极端气温指数^[3,16-17]和 11 个极端降水指数^[16](表 1 和表 2),极端气温指数包括极值指数、绝对指数、相对指数和其他指数,极端降水指数包括绝对指数、相对指数、持续指数和强度指数,采用线性倾向估计、Mann-Kendall 突变检验(简称 M-K 突变检验)、滑动 t 检验(简称 MTT)和 Morlet 复小波的方法分别对丽江 27 个极端气候指数的变化趋势、突变及周期特征进行

分析.具体做法如下:用线性倾向估计法分析气候指数变化趋势即利用一元线性回归对丽江各极端气候指数的趋势变化作线性估计,并用相关系数进行显著性检验^[18];采用 M-K 突变检验结合 5 年滑动 t 检验(简称 5 年 MTT)和 10 年滑动 t 检验(简称 10 年 MTT)分析丽江极端气候指数的突变特征,以防止对突变时间的误判,其基本原理见相关文献^[18-19];应用 Morlet 复小波分析来确定丽江极端气候指数的周期,并结合其小波方差变化图确定主周期,关于小波分析方法的介绍详见相关文献^[18,20].

表 1 极端气温指数的定义^[3,16-17]

Table 1 Definition of extreme temperature indices^[3,16-17]

分类	代码	指数名称	指数定义	单位
极值指数	TXx	月最高气温极大值	每月中日最高气温的最大值	℃
	TNx	月最低气温极大值	每月中日最低气温的最大值	℃
	TXn	月最高气温极小值	每月中日最高气温的最小值	℃
	TNn	月最低气温极小值	每月中日最低气温的最小值	℃
绝对指数	FD	霜冻日数	一年中日最低气温<0℃的日数	d
	SU	夏季日数	一年中日最高气温>25℃的日数	d
	ID	冰封日数	一年中日最高气温<0℃的日数	d
	TR	热夜日数	一年中日最低气温>20℃的日数	d
相对指数	TN10p	冷夜日数	日最低气温<10%分位值的日数	d
	TX10p	冷昼日数	日最高气温<10%分位值的日数	d
	TN90p	暖夜日数	日最低气温>90%分位值的日数	d
	TX90p	暖昼日数	日最高气温>90%分位值的日数	d
其他指数	WSDI	热日持续指数	每年至少连续 6 d 日最高气温>90%分位值的日数	d
	CSDI	冷日持续指数	每年至少连续 6 d 日最低气温<10%分位值的日数	d
	DTR	月平均日较差	日最高气温与日最低气温之差的月平均值	℃
	GSL	作物生长期	首次出现连续 6 d 的日平均气温>5℃与 7 月后首次出现连续 6 d 的日平均气温<5℃之间的日数	d

表 2 极端降水指数定义^[16]

Table 2 Definition of extreme precipitation indices^[16]

分类	代码	指数名称	指数定义	单位
绝对指数	R10	中雨日数	日降水量≥10 mm 的日数	d
	R20	大雨日数	日降水量≥20 mm 的日数	d
	R1	日降水≥1 mm 的降水日数	日降水量≥1 mm 的日数	d
相对指数	R95pTOT	强降水量	日降水量>95%分位值的年累计降水量	mm
	R99pTOT	特强降水量	日降水量>99%分位值的年累计降水量	mm
持续指数	CDD	持续干期	日降水量<1 mm 的最大持续日数	d
	CWD	持续湿期	日降水量>1 mm 的最大持续日数	d
	PRCPTOT	年总降水量	日降水量>1 mm 的年累计降水量	mm
强度指数	Rx1day	1 日最大降水量	每月最大 1 日降水量	mm
	Rx5day	5 日最大降水量	每月连续 5 日最大降水量	mm
	SDII	降水强度	年降水总量与湿日日数(日降水量≥1.0 mm)的比值	mm/d

2 结果分析

2.1 极端气温指数的变化特征

2.1.1 变化趋势

采用线性倾向估计法对丽江 1951—2017 年期间 16 个极端气温指数的变化趋势进行分析研究,如图 1—4 所示.可知,月最低气温极大值(TNx)、月最低气温极小值(TNn)、夏季日数(SU)、暖夜日数(TN90p)、暖昼日数(TX90p)、热日持续指数(WSDI)呈明显增加趋势,均通过了 0.001 的显著性检验,而霜冻日数(FD)、冷夜日数(TN10p)、冷日持续指数(CSDI)、月平均日较差(DTR)呈明显减少趋势(其中 FD 通过了 0.01 的显著性检验,TN10p 通过了 0.001 的显著性检验,CSDI 和 DTR 通过了 0.05 的显著性检验).月最高气温极大值(TXx)、热夜日数(TR)、作物生长期(GSL)呈不显著增加趋势,月最高气温极小值(TXn)、冷昼日数(TX10p)呈不显著减少趋势.冰封日数(ID)在 1951—2017 年均均为 0 d.整体上,极端暖事件指数(SU、TN90p、TX90p、WSDI、TR、GSL)呈现增加趋势,而极端冷事件指数(FD、TN10p、CSDI、TX10p)呈减少趋势,月最低气温

指数(极大值 TNx、极小值 TNn)的增温幅度比月最高气温指数极大值(TXx)的大.

2.1.2 突变特征

由于各极端气候指数可能存在的突变年份不确定性较大,因此采用 M-K 突变检验结合 5 年 MTT 和 10 年 MTT 分别对极端气温指数的突变特征进行分析,其中丽江 16 个极端气温指数的检验结果如表 3 所示.

1) 极端气温极值指数(TXx、TNx、TXn、TNn)的突变特征

M-K 突变检验结果表明,TXx 的突变点集中在 20 世纪 80 年代和 21 世纪初,其中 2005 年附近的突变点与 10 年 MTT 的检验结果 2004 年相近,M-K 检验结果显示 TXx 在 2005 年后呈显著增加趋势.TNx 的 M-K 检验突变点在 1986 年附近,在 1986 年后 TNx 呈显著增加趋势,而 5 年 MTT 和 10 年 MTT 得出 TNx 的突变点集中在 20 世纪 60、70、90 年代和 21 世纪初.TXn 的 M-K 检验突变点不显著,而 5 年 MTT 和 10 年 MTT 一致得出 TXn 的突变点在 1960 年附近.TNn 的 M-K 检验、5 年 MTT、10 年 MTT 的突变检验结果基本一致,TNn 的突变点集中在 20 世纪 60、

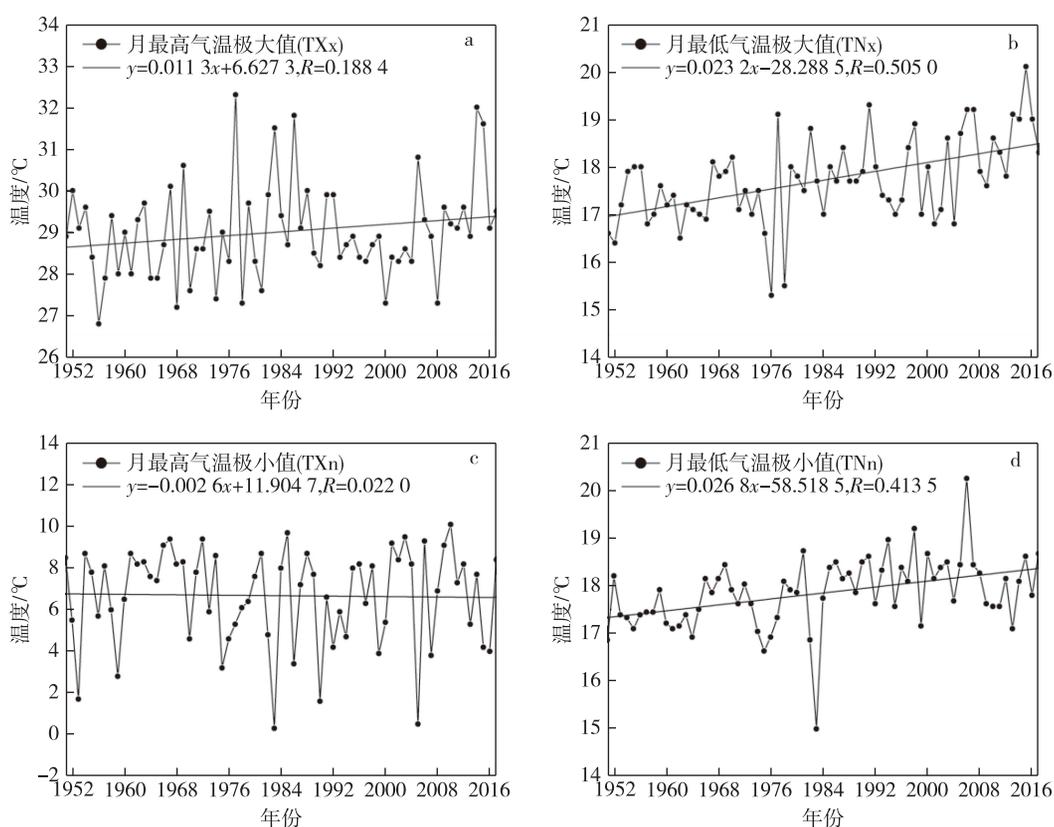


图 1 1951—2017 年丽江极端气温极值指数线性变化趋势

Fig. 1 Linear trends in extremal indices of extreme temperature in Lijiang from 1951 to 2017

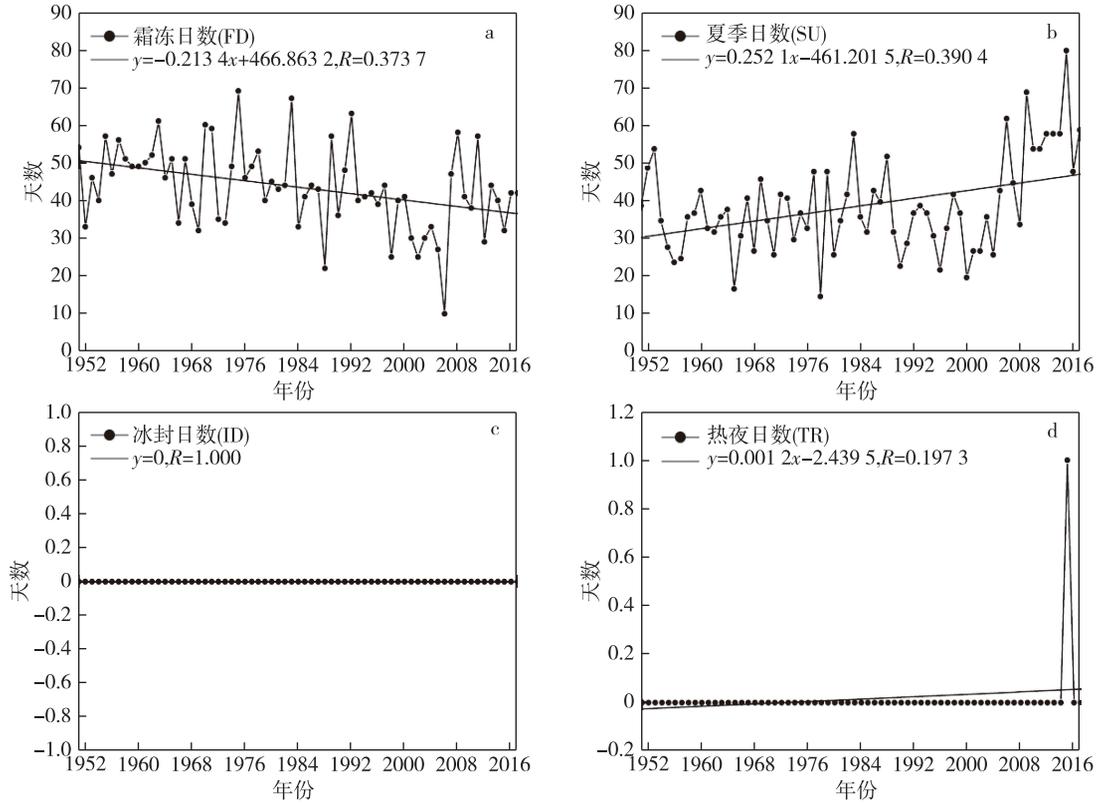


图2 1951—2017年丽江极端气温绝对指数的线性变化趋势

Fig.2 Linear trends in absolute indices of extreme temperature in Lijiang from 1951 to 2017

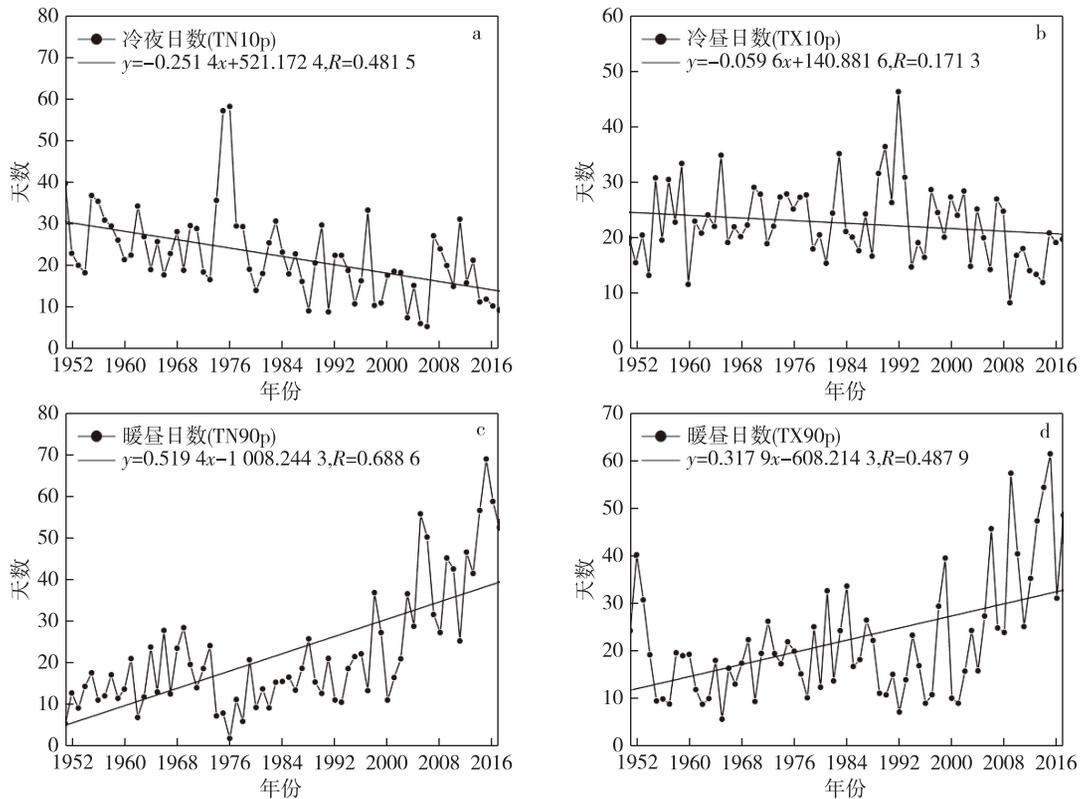


图3 1951—2017年丽江极端气温相对指数的线性变化趋势

Fig.3 Linear trends in relative indices of extreme temperature in Lijiang from 1951 to 2017

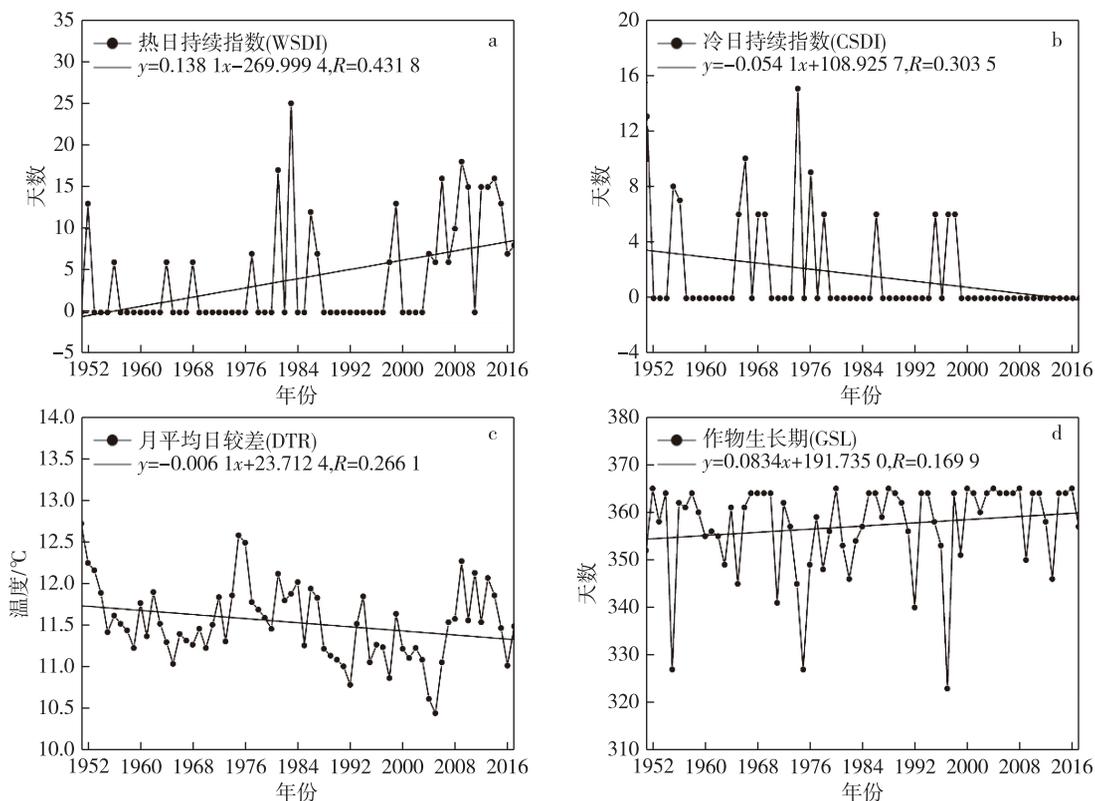


图4 1951—2017年丽江极端气温其他指数的线性变化趋势

Fig. 4 Linear trends in other indices of extreme temperature in Lijiang from 1951 to 2017

70年代,其中以1967、1976年左右的突变点最明显,M-K检验结果显示 TN_n 在这两个突变点后均呈显著增加趋势。

2) 极端气温绝对指数(FD、SU、ID、TR)的突变特征

M-K突变检验结果表明,FD的突变点在1986年附近,并在该突变点后呈显著减少趋势,而5年MTT和10年MTT的结果均显示FD的突变点在1997、2006年附近.SU的M-K检验,5年MTT、10年MTT的突变检验结果基本一致,突变点主要集中在21世纪初,以2008年附近的突变点最为一致,M-K检验结果显示SU在2008年后呈显著增加趋势.ID在1951—2017年的值均为0d,不存在变化,没有突变点.TR在1951—2017年只有2015年为1d,其余年份均为0d,没有明显突变点。

3) 极端气温相对指数(TN_{10p} 、 TX_{10p} 、 TN_{90p} 、 TX_{90p})的突变特征

MTT结果显示 TN_{10p} 的突变点集中在20世纪60、70、80年代和21世纪初,并且M-K突变检验和10年MTT的结果一致显示 TN_{10p} 在1985年左右存在显著突变点,M-K检验结果显示 TN_{10p} 在1985年

后呈显著减少趋势.由表3可知, TX_{10p} 的MTT的突变点集中在20世纪80、90年代和21世纪初, TN_{90p} 和 TX_{90p} 的MTT得出的突变点均集中在20世纪60、70、80、90年代和21世纪初,M-K突变检验和MTT的检验结果均一致表明: TX_{10p} 、 TN_{90p} 、 TX_{90p} 分别在2008、2002、2008年附近存在显著突变点,并且M-K检验结果显示这3个指数在突变点后分别呈显著的减少、增加、增加的趋势。

4) 极端气温其他指数(WSDI、CSDI、GSL、DTR)的突变特征

M-K突变检验结果表明WSDI整体呈增加趋势,没有显著突变点,而5年MTT和10年MTT的结果均表明WSDI在2005年附近存在显著突变点,10年MTT结果显示WSDI的突变点集中在20世纪80、90年代和21世纪初.M-K检验和10年MTT的结果均显示CSDI不存在显著突变点,5年MTT的结果显示其突变点集中在20世纪60、90年代.DTR的M-K检验结果显示突变点在1953、1974、1984年附近,并在这些突变点后分别呈显著的减少、减少、增加的趋势,这与MTT得出的结果基本一致.GSL的M-K检验结果显示突变点在1953、1969、1980、1983年

表3 1951—2017年丽江极端气温指数突变检验结果

Table 3 Results of mutation test of extreme temperature indices in Lijiang from 1951 to 2017

指数	M-K 突变检验	5 年 MTT	10 年 MTT
TXx	1982/1985/1987/2005/2008	无	1992/2004
TNx	1986	1966/1971/1991/2012	2002/2004
TXn	无	1960	1960/1969/1972
TNn	1967/1976	1965/1972	1964/1984
FD	1986	1997/2000/2006	1997/2006
SU	2008	2004/2008	1988/2001/2004/2007
ID	无	无	无
TR	无	无	无
TN10p	1985	1973/1978/2006/2011	1963/1978/1984
TX10p	2008	1988/1993/2008	2004/2007
TN90p	2002	1973/1978/2002/2004/2011	1960/1963/1973/1983/1994/2002/2004
TX90p	2008	1988/2004/2005	1965/1970/1988/1997/2001/2007
WSDI	无	2005	1987/1997/2000/2005/2007
CSDI	无	1964/1993/1998	无
DTR	1953/1974/1984	1955/1973/1987/2006	1960/1973/1984/1987/2006
GSL	1953/1969/1980/1983	1965/1970/1984	1983/1984

注:表中数据通过了 0.05 的显著性检验,“无”表示未通过 0.05 的显著性检验。

附近,并在突变点后分别呈显著的增加、增加、减少、减少的趋势,其中 1969、1983 年附近的突变点与 MTT 得出的结果基本一致。

2.1.3 周期特征

本文对选取的丽江 16 个极端气温指数在 1951—2017 年期间进行 Morlet 复小波分析.限于篇幅,本文仅选取 2 个有代表性的极端气温指数 (TX10p 和 CSDI) 给出其小波系数实部等值线和小波方差 (图 5).小波系数实部等值线图能反映极端气温序列不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布,等值线为正值时代表极端气温指数较大 (或较多),等值线为负值时表示极端气温指数较小 (或较少),小波方差的峰值即为极端气温指数存在的主周期.图 5a 和 5c 分别是 TX10p 和 CSDI 的小波系数实部等值线,图 5b 和 5d 分别是 TX10p 和 CSDI 的小波方差.图 5a 显示, TX10p 存在 5、10、13、22、36 和 55 a 左右的准周期,13、22 和 55 a 左右的周期贯穿始终.图 5b 显示 13、22 和 55 a 左右的周期对应的小波方差值较大,为 TX10p 的主控周期.图 5c 显示, CSDI 存在 4、7、15、34 和 54 a 左右的准周期,15 和 34 a 左右的周期贯穿始终.图 5d 显示 15 和 34 a 左右的周期对应的小波方差值较大,为 CSDI 的主控周期.同理,对其余 13 个极端气温指数作周期变化分析 (因 ID 在研究期内均为 0 d,故未作其周期分析),统计结果如表 4 所示,除 ID 外的 15 个极端气温指数存

在 2~6 个准周期,介于 3~56 a 之间,存在 1~3 个主周期,介于 10~56 a 之间,其中 TXx、TNx、TX10p、DTR、GSL 均存在 56 a 左右的主周期, TXn、TR、TX90p、WSDI 均存在 51 a 左右的主周期, TXx、TNx、TNn、FD、SU、TN90p、DTR 均存在 44 a 左右的主周期,

表4 1951—2017年丽江极端气温指数周期分析

Table 4 Period analyses of extreme temperature indices in Lijiang from 1951 to 2017 a

指数	周期	主周期
TXx	43/56	43/56
TNx	12/18/31/44/56	44/56
TXn	5/11/18/30/53	11/53
TNn	6/11/15/27/44	15/27/44
FD	6/12/25/44	25/44
SU	5/8/17/30/46	46
ID	—	—
TR	3/6/43/51	51
TN10p	6/10/18/25/38	10/25/38
TX10p	5/10/13/22/36/55	13/22/55
TN90p	5/17/25/41	41
TX90p	5/8/17/24/48	48
WSDI	8/11/22/51	22/51
CSDI	4/7/15/34/54	15/34
DTR	19/44/56	44/56
GSL	30/43/55	55

注:因指数 ID 在研究期内均为 0 d,没有变化,周期用“—”表示。

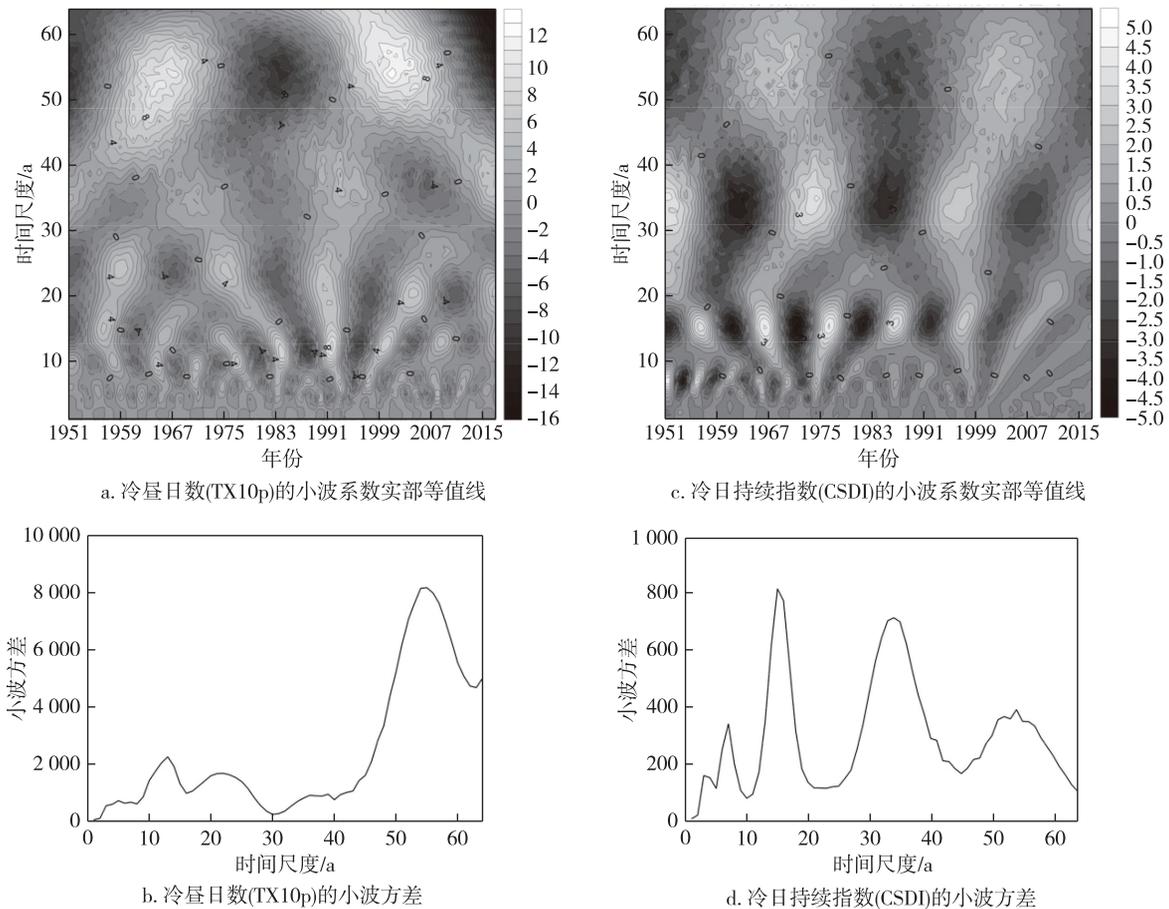


图5 1951—2017年丽江极端气温指数TX10p和CSDI的小波分析

Fig. 5 Wavelet analyses of extreme temperature indices of TX10p and CSDI in Lijiang from 1951 to 2017

TN_n、FD、TN10_p、TX10_p、WSDI均存在25 a左右的主周期,TN_n、TX10_p、CSDI均存在15 a左右的主周期,TX_n、TN10_p均存在10 a左右的主周期。

2.2 极端降水指数的变化特征

2.2.1 变化趋势

采用线性倾向估计法对丽江1951—2017年期间11个极端降水指数的变化趋势进行分析,如图6—9所示,可知,日降水 ≥ 1 mm的降水日数(R1)呈明显减少趋势(通过了0.05的显著性检验),特强降水量(R99_pTOT)呈明显增加趋势(通过了0.05的显著性检验),中雨日数(R10)、持续湿期(CWD)、年总降水量(PRCPTOT)、5日最大降水量(Rx5day)均呈不显著减少趋势,大雨日数(R20)、强降水量(R95_pTOT)、持续干期(CDD)、1日最大降水量(Rx1day)、降水强度(SDII)均呈不显著增加趋势。

2.2.2 突变特征

采用M-K突变检验结合5年MTT和10年MTT分别对极端降水指数的突变特征进行分析,结果如

表5所示。

1) 极端降水绝对指数(R10、R20、R1)的突变特征

M-K突变检验结果显示R10和R20没有显著突变点,而MTT结果显示R10的突变点集中在20世纪50、60、90年代和21世纪初,并且5年MTT和10年MTT均得出R10在1961、2002、2004年附近存在显著突变点,MTT结果也显示R20的突变点集中在20世纪60、80、90年代和21世纪初,其中5年MTT和10年MTT均得出R20在1985、2002、2007年附近存在显著突变点.R1的M-K检验结果显示在2002、2003、2004年附近存在显著突变点,并在突变点后分别呈增加、增加、增加的趋势,其中2004年附近的突变点与10年MTT得出的结果相同,而5年MTT的结果显示R1在1956年附近也存在显著突变点。

2) 极端降水相对指数(R95_pTOT、R99_pTOT)的突变特征

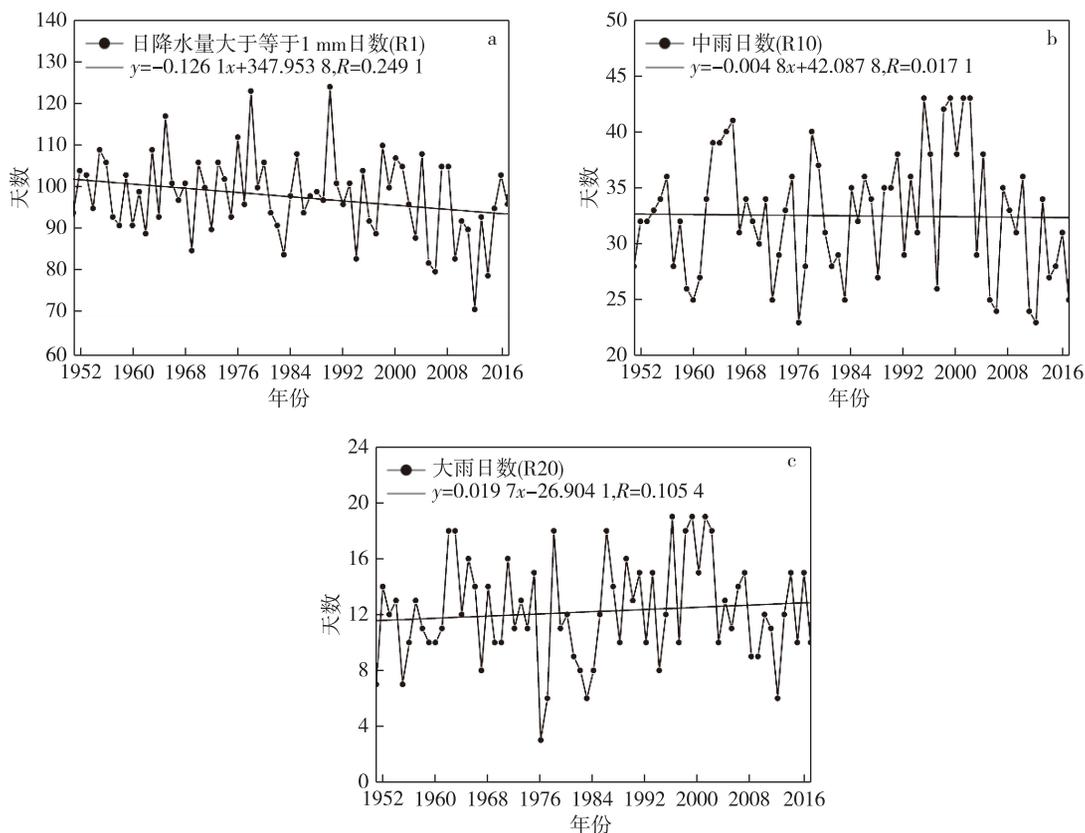


图6 1951—2017年丽江极端降水绝对指数的线性变化趋势

Fig. 6 Linear trends in absolute indices of extreme precipitation in Lijiang from 1951 to 2017

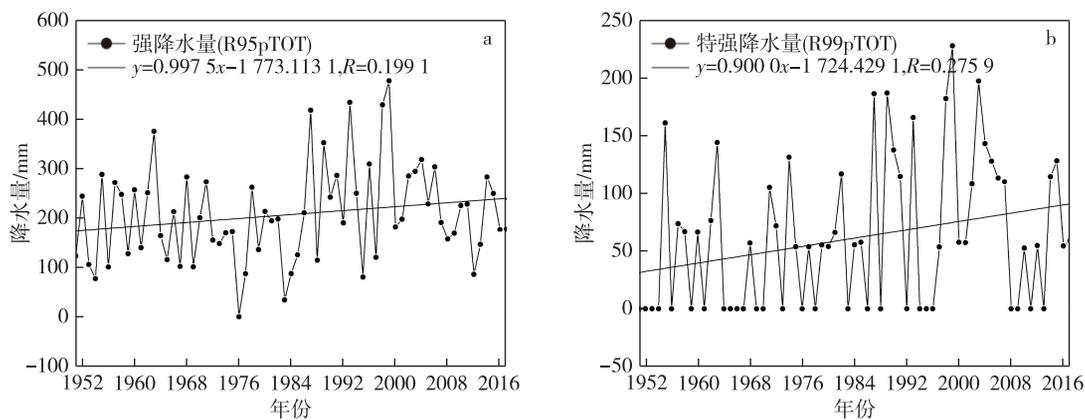


图7 1951—2017年丽江极端降水相对指数的线性变化趋势

Fig. 7 Linear trends in relative indices of extreme precipitation in Lijiang from 1951 to 2017

M-K 突变检验结果显示 R95pTOT 在 1963、1984 年附近存在显著突变点,并在突变点后分别呈增加、减少的趋势,MTT 结果显示 R95pTOT 在 1984、1986、2006、2007 年附近存在显著突变点,由此可知,1984 年附近的突变点是两种方法所得相同结果.M-K 突变检验结果表明 R99pTOT 的突变点在 1951 年附近,整体呈显著增加趋势,而 5 年 MTT 和 10 年 MTT

均表明 R99pTOT 在 2007 年附近存在显著突变点.

3) 极端降水持续指数 (CDD、CWD、PRCPTOT) 的突变特征

M-K 突变检验结果表明 CDD 没有显著突变点,而 MTT 结果表明 CDD 突变点集中在 20 世纪 60、70 年代.CWD 的 M-K 突变检验结果显示在 2000、2011 年附近存在显著突变点,在突变点后分别呈显著的

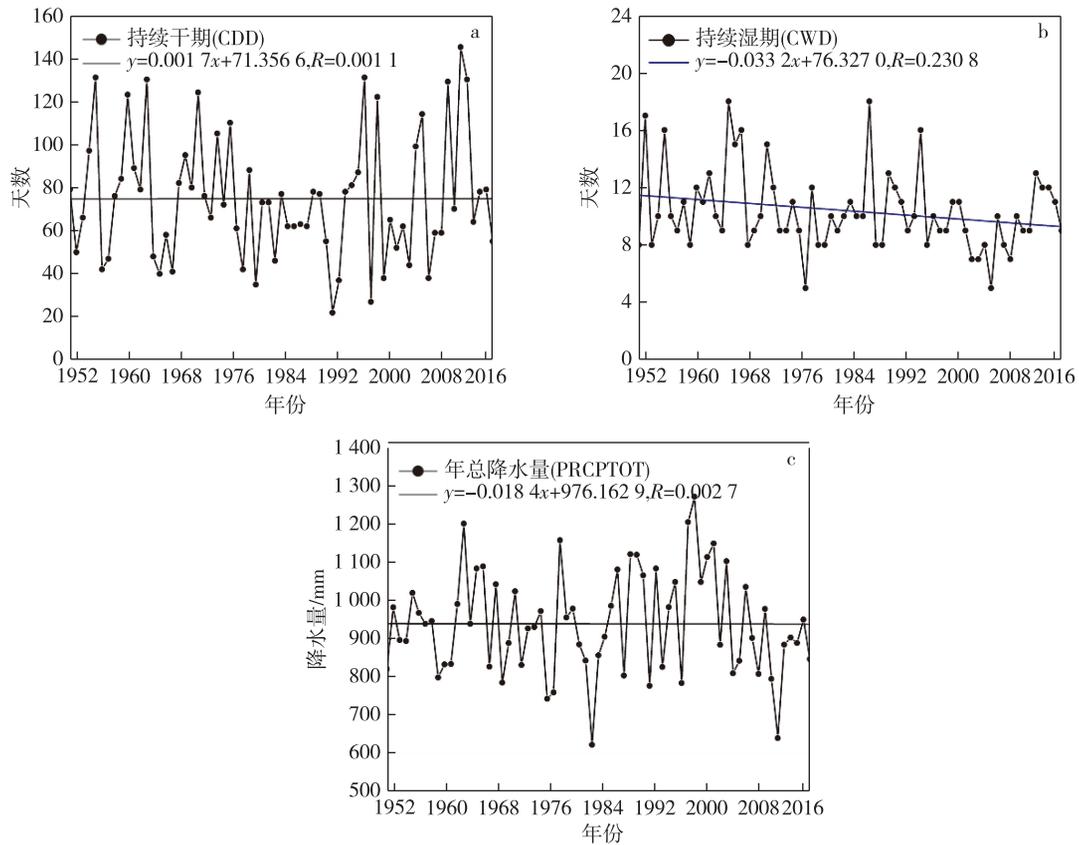


图 8 1951—2017 年丽江极端降水持续指数的线性变化趋势

Fig. 8 Linear trends in continuous indices of extreme precipitation in Lijiang from 1951 to 2017

增加、减少的趋势,这与 MTT 所得结果基本一致,MTT 得出的 CWD 其余突变点集中在 20 世纪 70、90 年代.由表 5 可知,PRCPTOT 的显著突变点有多个,两种方法得出的共同突变点在 1961、2010 年附近,PRCPTOT 分别在这两个突变点后呈显著的减少、增加的趋势.

4) 极端降水强度指数(Rx1day、Rx5day、SDII)的突变特征

由表 5 可知,Rx1day 存在多个显著突变点,M-K 突变检验和 MTT 所得共同突变点在 2007 年附近,Rx1day 在该突变点后呈显著增加趋势.M-K 突变检验和 5 年 MTT 的结果均显示 Rx5day 不存在显著突变点,而 10 年 MTT 结果显示 Rx5day 在 2005、2007 年附近存在显著突变点.M-K 突变检验和 10 年 MTT 的结果显示 SDII 存在多个显著突变点,其中这两种方法得出的共同突变点在 1983 年附近,SDII 在该突变点后呈显著减少趋势,而 5 年 MTT 未检验出 SDII 有显著突变点.

2.2.3 周期特征

本文对选取的 11 个极端降水指数在 1951—

2017 年期间进行 Morlet 复小波分析.限于篇幅,本文仅选取 2 个有代表性的极端降水指数(R99pTOT 和 CDD)给出其小波系数实部等值线和小波方差(图 10).小波系数实部等值线图能反映极端降水序列不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布,等值线为正值时代表极端降水指数较大(或较多),等值线为负值时表示极端降水指数较小(或较少),小波方差的峰值即为极端降水指数存在的主周期.图 10a 和 10c 分别是 R99pTOT 和 CDD 的小波系数实部等值线.图 10b 和 10d 分别是 R99pTOT 和 CDD 的小波方差.图 10a 显示,R99pTOT 存在 4、6、12、22 和 56 a 左右的准周期,12、22 和 56 a 左右的周期贯穿始终,图 10 b 显示,12、22 和 56 a 左右的周期对应的小波方差值较大,为 R99pTOT 的主控周期.图 10c 显示,CDD 存在 4、12、19、35 和 56 a 左右的准周期,12、19 和 56 a 左右的周期贯穿始终.图 10d 显示,12、19 和 56 a 左右的周期对应的小波方差值较大,为 CDD 的主控周期.同理,对其余 9 个极端降水指数作周期变化分析,统计结果如表 6 所示,即 11 个极端降水指数存在 4~6 个准周期,介于 4~56 a 之间,存

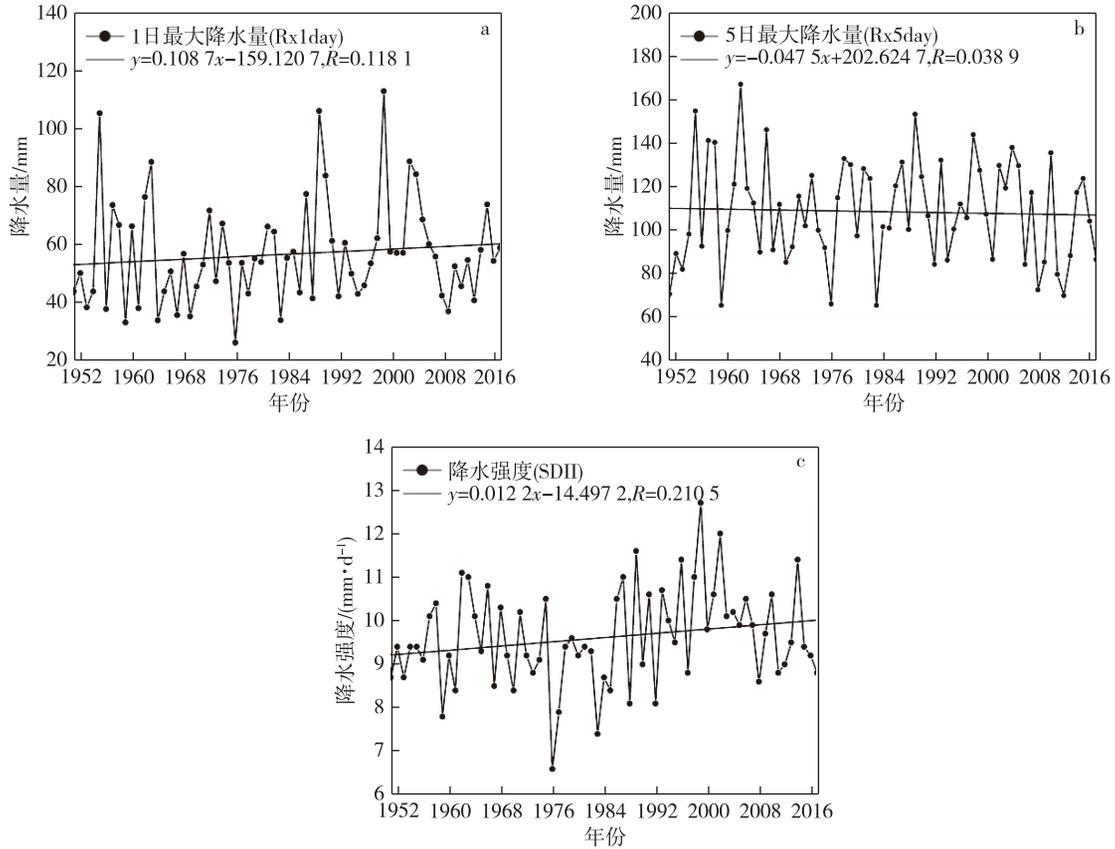


图9 1951—2017年丽江极端降水强度指数的线性变化趋势

Fig.9 Linear trends in intensity indices of extreme precipitation in Lijiang from 1951 to 2017

表5 1951—2017年丽江极端降水指数突变检验结果

Table 5 Results of mutation test of extreme precipitation indices in Lijiang from 1951 to 2017

指数	M-K 突变检验	5年 MTT	10年 MTT
R10	无	1956/1961/1966/2002/2004	1961/1992/1994/2002/2004/2007
R20	无	1961/1985/1997/2002/2007	1985/2002/2004/2007
R1	2002/2003/2004	1956	2004
R95pTOT	1963/1984	1986/2006/2007	1984/1986/2006/2007
R99pTOT	1951	1970/2007	1997/2007
CDD	无	1963/1968	1976/1977/1979
CWD	2000/2011	2001/2009/2011	1972/1995/2000/2001
PRCPTOT	1959/1961/1976/2010/2012	1961/1985/1997/2002/2004	2002/2004/2007
Rx1day	1955/1974/1978/2007/2009	2005/2006/2007	2005/2006/2007
Rx5day	无	无	2005/2007
SDII	1953/1960/1967/1981/1983	无	1975/1985/1992/2002/2007

注:表中数据通过了0.05的显著性检验,“无”表示未通过0.05的显著性检验.

在1~3个主周期,介于12~56a之间,其中R10、R20、R1、R95pTOT、R99pTOT、CDD、PRCPTOT、Rx1day、Rx5day、SDII均存在55a左右的主周期,R99pTOT、CDD、Rx1day均存在12a左右的主周期,R99pTOT、Rx1day均存在22a的主周期.

3 结论与讨论

本文选取了16个极端气温指数和11个极端降水指数来研究1951—2017年丽江极端气候事件的变化趋势、突变和周期特征,得出以下主要结论:

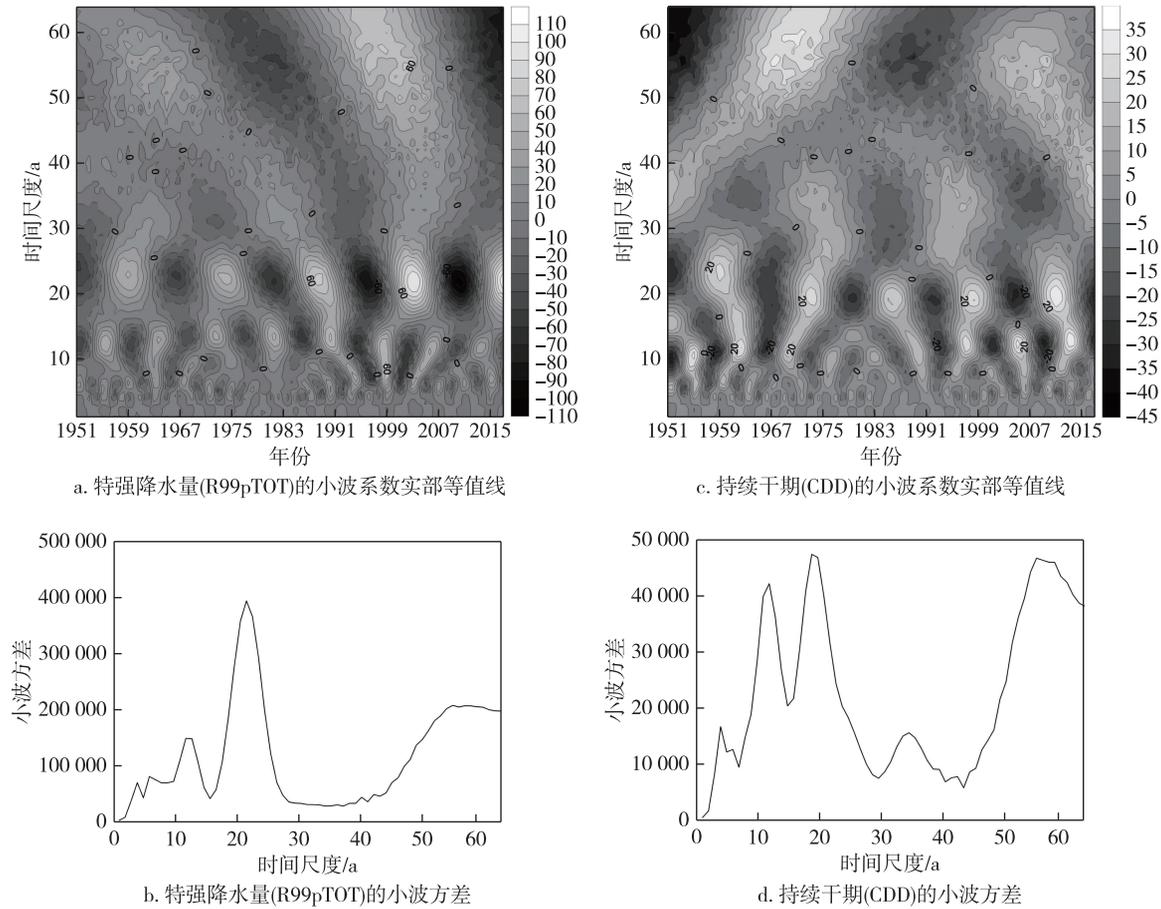


图 10 1951—2017 年丽江极端降水指数 R99pTOT 和 CDD 的小波分析

Fig. 10 Wavelet analyses of extreme precipitation indices of R99pTOT and CDD in Lijiang from 1951 to 2017

表 6 1951—2017 年丽江极端降水指数周期分析

Table 6 Period analyses of extreme precipitation indices in Lijiang from 1951 to 2017

指数	周期	主周期
R10	4/12/21/55	55
R20	5/12/19/54	54
R1	9/13/19/35/55	55
R95pTOT	4/6/9/13/22/56	56
R99pTOT	4/6/12/22/56	12/22/56
CDD	4/12/19/35/56	12/19/56
CWD	4/7/10/25/41/56	41
PRCPTOT	5/13/20/35/55	55
Rx1day	4/7/13/22/56	13/22/56
Rx5day	8/13/22/30/55	55
SDII	5/12/30/55	55

1) 变化趋势

丽江极端气温指数 TN_x 、 TN_n 、SU、 TN_{90p} 、 $WSDI$ 呈明显增加趋势, FD 、 TN_{10p} 、 $CSDI$ 、 DTR 呈明显减少趋势. 而 TX_x 、 TR 、 GSL 呈不显著增

加趋势, TX_n 、 TX_{10p} 呈不显著减少趋势, ID 在 1951—2017 年均均为 0 d, 以上结果与王新博等^[9]、夏范燕等^[10]、吉正熙等^[21] 研究丽江站部分极端气温指数所得结果基本一致. 整体上, 丽江极端暖事件指数 (SU 、 TN_{90p} 、 $WSDI$ 、 TR 、 GSL) 呈现增加趋势, 而极端冷事件指数 (FD 、 TN_{10p} 、 $CSDI$ 、 TX_{10p}) 呈现减少趋势, 月最低气温指数 (TN_x 、 TN_n) 的增温幅度比月最高气温指数极大值 (TX_x) 的大, 这与张万诚等^[6] 得出的云南省极端气温总体变化趋势基本一致.

极端降水指数 $R1$ 呈明显减少趋势, $R99pTOT$ 呈明显增加趋势. $R10$ 、 CWD 、 $PRCPTOT$ 、 $Rx5day$ 均呈不显著减少趋势, $R20$ 、 $R95pTOT$ 、 CDD 、 $Rx1day$ 、 $SDII$ 均呈不显著增加趋势. 上述结果与王新博等^[9]、夏范燕等^[10] 研究丽江站部分极端降水指数所得的结果一致.

2) 突变特征

经 M-K 突变检验结合 5 年 MTT、10 年 MTT 得到丽江极端气温指数和降水指数的突变特点如下:

丽江极端气温指数 TX_x 、 TN_x 、 TN_n 、 FD 、 SU 、 TN_{10p} 、 TX_{10p} 、 TN_{90p} 、 TX_{90p} 、 DTR 、 GSL 的突变时间显著,突变点分别在 2005、1986、1967/1976、1986、2008、1985、2008、2002、2008、1953/1974/1984、1969/1983 年附近,其中 TX_x 、 TN_x 和 TN_n 在以上显著突变点后呈增加趋势,极端冷事件指数 FD 、 TN_{10p} 和 TX_{10p} 在上述显著突变点后呈减少趋势,而极端暖事件指数 SU 、 TN_{90p} 和 TX_{90p} 在以上显著突变点后呈增加趋势, DTR 大部分年份呈减少趋势,在显著突变点 1953、1974、1984 年后分别呈减少、减少和增加的趋势, GSL 在显著突变点 1969、1983 年后分别呈增加和减少的趋势。 TX_n 、 $WSDI$ 和 $CSDI$ 的 M-K 突变检验时间不显著, ID 在 1951—2017 年的值均为 0 d,不存在变化, TR 在研究期内只有 2015 年为 1 d,其余年份均为 0 d。本文丽江极端气温指数的突变年份与王晓等^[7]得出云南省的结果接近,其中云南省的极端气温指数 FD 、 SU 、 TN_{10p} 、 TX_{10p} 、 TX_{90p} 的突变时间分别为 1989、2003、1987、2004、2002 年附近,本研究中丽江对应指数的显著突变点分别为 1986、2008、1985、2008、2008 年附近,并且在突变点后的变化趋势完全一致,分别为减少、增加、减少、减少、增加的趋势,也与王新博等^[9]研究丽江站得出的结果基本一致(文献[9]中 FD 、 SU 、 TN_{10p} 、 TX_{10p} 、 TX_{90p} 的突变年份分别为 1987/1989、2008、1986、2008、2005 年左右)。

极端降水指数 $R1$ 、 R_{95pTOT} 、 R_{99pTOT} 、 CWD 、 $PRCPTOT$ 、 $Rx1day$ 、 $SDII$ 的突变时间比较显著,分别在 2004、1984、1951、2000/2011、1961/2010、2007、1983 年附近,并且这些指数分别在突变点后呈增加、减少、增加、增加/减少、减少/增加、增加、减少的变化趋势。其他指数 $R10$ 、 $R20$ 、 $Rx5day$ 、 CDD 的 M-K 检验结果未呈现出明显的突变时间。本研究中 CWD 、 $SDII$ 的突变年份与王新博等^[9]得出的结果接近(文献[9]中对应的突变年份分别为 1997、1986/1987 年附近)。

3) 周期特征

丽江极端气温指数除 ID 外的 15 个指数存在 2~6 个准周期,介于 3~56 a 之间,存在 1~3 个主周期,介于 10~56 a 之间,部分极端气温指数具有相同或相近的主周期。其中本研究中丽江极端气温指数 $CSDI$ 的主周期 15 a 与王晓等^[7]得出云南省的结果相同,丽江的 FD 准周期 6 a、 SU 准周期 5 a、 TN_{10p} 准周期 6 a、 TX_{10p} 准周期 13 a、 TX_{90p} 准周期 5 a、

$WSDI$ 准周期 11 a、 $CSDI$ 准周期 7 a 与王晓等^[7]得出的云南省的结果 3、3、7、15、5、11 和 7 a 接近或相同。

丽江 11 个极端降水指数存在 4~6 个准周期,介于 4~56 a 之间,存在 1~3 个主周期,介于 12~56 a 之间,部分极端降水指数具有相近或相同的主周期。其中本研究丽江极端降水指数 CDD 的主周期 19 a、 R_{99pTOT} 的主周期 12 a、 CWD 的准周期 7 a、 $PRCPTOT$ 的准周期 5 a、 $SDII$ 的准周期 5 a 与杨晓静等^[11]得出的云南省的结果 18、14、8、8 和 8 a 较为接近。

以上丽江极端气温指数变化所呈现出的极端冷事件减少、极端暖事件增加的趋势与全球^[22]、全国^[23-25]和云南省^[6-7]的气候系统变暖的大趋势基本一致,而极端降水指数变化结果与云南省、丽江站的极端降水事件已有的部分研究结果基本一致,但也存在一定的差异性,这主要是由于研究区域、研究的时间尺度和研究方法等选择不同所致。关于气候变暖与极端气候事件变化之间的关系,涉及到有关形成机制的复杂问题^[16,26-27],其中可以确定的是气候变暖增加了极端暖事件的上升趋势^[26],而极端降水变化的具体成因机制更加复杂^[16],有待进一步深入研究。

参考文献

References

- [1] Coumou D, Robinson A, Rahmstorf S. Global increase in record-breaking monthly-mean temperatures [J]. *Climatic Change*, 2013, 118(3/4): 771-782
- [2] Allen S K, Barros V, Burton I, et al. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [R]//IPCC. A special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press, 2012: 1-582
- [3] 李双双, 杨赛霓. 1960—2014 年北京极端气温事件变化特征 [J]. *地理科学*, 2015, 35(12): 1640-1647
LI Shuangshuang, YANG Saini. Changes of extreme temperature events in Beijing during 1960—2014 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(12): 1640-1647
- [4] 刘金祥. 可持续发展理念视角下的我国城市化 [J]. *现代城市*, 2012, 7(3): 4-7
LIU Jinxiang. China's urbanization under the idea of sustainable development [J]. *Modern City*, 2012, 7(3): 4-7
- [5] 罗燕, 田永丽, 戴敏, 等. 云南近 50 年极端气温及降水事件变化特征与区域气候变暖的关系 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(6): 870-877
LUO Yan, TIAN Yongli, DAI Min, et al. Extreme temperature and precipitation events change features over Yunnan in recent 50 years and their relation with regional climate change [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Science Edition)*, 2015, 37(6): 870-877

- [6] 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
ZHANG Wancheng, ZHENG Jianmeng, MA Tao, et al. Temporal and spatial distribution and variation of extreme temperatures in Yunnan province from 1961 to 2012[J]. Resources Science, 2015, 37(4): 710-722
- [7] 王晓,李佳秀,石红彦,等.1960—2011年云南省极端气温事件的时空分布及趋势预测[J].资源科学,2014,36(9):1816-1824
WANG Xiao, LI Jiashu, SHI Hongyan, et al. The temporal-spatial distribution and prediction of extreme temperature events in Yunnan province from 1960 to 2011[J]. Resources Science, 2014, 36(9): 1816-1824
- [8] 和文秋,丁文荣.滇西北极端气温时空变化规律研究[J].华夏地理,2015(9):60-62
HE Wenqiu, DING Wenrong. Study on the temporal and spatial variation of extreme temperature in northwest Yunnan[J]. National Geographic, 2015(9): 60-62
- [9] 王新博,王龙,杨荣赞,等.丽江极端气候指数的长期变化特征分析[J].农业与技术,2019,39(7):135-139
WANG Xinbo, WANG Long, YANG Rongzan, et al. Analysis of long-term variation characteristics of extreme climate indices in Lijiang[J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(7): 135-139
- [10] 夏范燕,吴巩固,李丽,等.近50年内滇西北极端气候变化[J].云南师范大学学报(自然科学版),2014,34(3):64-69
XIA Fanyan, WU Gongsheng, LI Li, et al. The extreme climate change of northwest Yunnan in recent 50 years[J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 2014, 34(3): 64-69
- [11] 杨晓静,徐宗学,左德鹏,等.云南省1958—2013年极端降水时空变化特征分析[J].灾害学,2015,30(4):178-186
YANG Xiaojing, XU Zongxue, ZUO Depeng, et al. Spatio-temporal characteristics of extreme precipitation in Yunnan province from 1958 - 2013 [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 178-186
- [12] 李运刚,何大明,胡金明,等.红河流域1960—2007年极端降水事件的时空变化特征[J].自然资源学报,2012,27(11):1908-1917
LI Yungang, HE Daming, HU Jinming, et al. Spatial and temporal variations of extreme precipitation events in the Red River Basin during 1960 - 2007 [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(11): 1908-1917
- [13] 曹言,王杰,张雷,等.滇中地区极端降水事件的时空变化特征分析[J].人民长江,2017,48(21):50-55
CAO Yan, WANG Jie, ZHANG Lei, et al. Temporal and spatial variation analysis of extreme precipitation at central area of Yunnan province [J]. Yangtze River, 2017, 48(21): 50-55
- [14] 李斌,李丽娟,李海滨,等.1960—2005年澜沧江流域极端降水变化特征[J].地理科学进展,2011,30(3):290-298
LI Bin, LI Lijuan, LI Haibin, et al. Changes in precipitation extremes in Lancang River Basin, 1960 - 2005[J]. Progress in Geography, 2011, 30(3): 290-298
- [15] 覃顺萍,吴巩固,李丽,等.1961—2010年云南省极端降水时空变化特征[J].云南师范大学学报(自然科学版),2015,35(1):67-72
QIN Shunping, WU Gongsheng, LI Li, et al. Temporal-spatial variations of extreme precipitation events from 1961 to 2010 in Yunnan province[J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 2015, 35(1): 67-72
- [16] 翟盘茂,刘静.气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J].中国工程科学,2012,14(9):55-63,84
ZHAI Panmao, LIU Jing. Extreme weather and climate events and disaster prevention and mitigation under the background of climate warming[J]. Engineering Science, 2012, 14(9): 55-63, 84
- [17] 王琼,张明军,王圣杰,等.1962—2011年长江流域极端气温事件分析[J].地理学报,2013,68(5):611-625
WANG Qiong, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Extreme temperature events in Yangtze River Basin during 1962-2011[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 611-625
- [18] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:43-113
WEI Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999:43-113
- [19] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,1992,16(4):482-493
FU Congbin, WANG Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1992, 16(4): 482-493
- [20] 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
LÜ Cuimei, WU Zening, LIU Wenli, et al. Wavelet analysis on characteristic of periodic variation for runoff in the Yihe River Basin [J]. Yellow River, 2007, 29(5): 26-28
- [21] 吉正熙,赵景波.云南省丽江市1960—2017年极端气温变化特征[J].地球环境学报,2019,10(4):377-389
JI Zhengxi, ZHAO Jingbo. Variation characteristics of extreme temperature in Lijiang, Yunnan province during 1960-2017 [J]. Journal of Earth Environment, 2019, 10(4): 377-389
- [22] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: D05109. DOI: 10. 1029/2005JD006290
- [23] 翟盘茂,任福民.中国近四十年最高最低温度变化[J].气象学报,1997,55(4):418-429
ZHAI Panmao, REN Fumin. On changes of China's maximum and minimum temperatures in the recent 40 years [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1997, 55(4): 418-429
- [24] 任福民,翟盘茂.1951—1990年中国极端气温变化分析[J].大气科学,1998,22(2):217-227
REN Fumin, ZHAI Panmao. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951-1990 [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1998, 22(2): 217-227
- [25] 翟盘茂,潘晓华.中国北方近50年温度和降水极端事

件变化[J].地理学报,2003,58(增1):1-10

ZHAI Panmao, PAN Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(sup1): 1-10

- [26] 马晓华,赵景波.1958—2013年豫南地区极端气温变化特征及周期分析[J].资源科学,2014,36(9):1825-1833

MA Xiaohua, ZHAO Jingbo. Analysis on characteristics of extreme temperature change and cycle of southern Henan from 1958 to 2013 [J]. *Resources Science*, 2014, 36(9): 1825-1833

- [27] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: implication for rainfall rates with climate change [J]. *Climatic Change*, 1998, 39(4): 667-694

Variation characteristics of extreme temperature and precipitation events of Lijiang from 1951 to 2017

WU Lihua^{1,2} CHENG Peng³ DONG Liqin^{1,2} CHENG Xiping^{1,2}
GONG Hede^{1,2} MA Yuewei^{1,2} WEI Aiyong^{1,2}

1 School of Geography and Ecotourism, Southwest Forestry University, Kunming 650224

2 Southwest Research Center for Ecocivilization Administration, Kunming 650224

3 Urumqi Meteorological Bureau, Urumqi 830002

Abstract The main objective of this study is to reveal the variation characteristics of extreme temperature and precipitation events in Lijiang of Yunnan province. The data of daily maximum and minimum temperature and daily precipitation from 1951 to 2017 were obtained from Lijiang Meteorological Station. The variation trends, mutation and period characteristics of 16 extreme temperature indices and 11 extreme precipitation indices have been analyzed with methods of linear regression analysis, Mann-Kendall abrupt change test, moving t test, and Morlet complex wavelet analysis. The results of variation trends are as follows. As for extreme temperature indices, significant increasing trends were observed in TN_x , TN_n , SU , $TN90p$, $TX90p$ and $WSDI$; obvious decreasing trends were observed in FD , $TN10p$, $CSDI$ and DTR ; non-significant increasing trends were observed in TX_x , TR and GSL ; non-obvious decreasing trends were observed in TX_n and $TX10p$; and the values of ID remained 0 days during the study period. As for extreme precipitation indices, a significant decreasing trend was observed in $R1$; a significant increasing trend was observed in $R99pTOT$; non-significant decreasing trends were observed in $R10$, CWD , $PRCPTOT$ and $Rx5day$; whereas non-significant increasing trends were observed in $R20$, $R95pTOT$, CDD , $Rx1day$ and $SDII$. The results of mutation test are as follows. Significant mutation years were observed in some extreme temperature and precipitation indices, which usually fall on period from the 1980s to the beginning of the 21st century or period from the 1950s to the 1970s. Furthermore, the extreme cold events indices of FD , $TN10p$ and $TX10p$ showed decreasing trends after the significant mutation years, while the extreme warm events indices of SU , $TN90p$ and $TX90p$ showed increasing trends after the significant mutation years. The values of TR were 1 day in 2015 and 0 days in the remaining years of the study period. The periodic results of wavelet analysis are as follows. The 15 extreme temperature indices (except ID) presented 2–6 quasi-periods ranging at 3–56 years, with 1–3 main periods ranging at 10–56 years. The 11 extreme precipitation indices presented 4–6 quasi-periods ranging from 4–56 years, with 1–3 main periods ranging from 12–56 years. Therefore, there are same or similar main periods for some extreme temperature and precipitation indices.

Key words Lijiang; extreme temperature; extreme precipitation; variation trend; mutation test; periodic analysis