

1960~2023年新疆塔城地区汛期极端降水指数年变化特征分析

高婧¹, 罗斌全^{1*}, 杨霏², 井立军³, 王金辉⁴

¹新疆塔城地区气象局, 新疆 塔城

²新疆气象局科技服务中心, 新疆 乌鲁木齐

³沙湾市气象局, 新疆 沙湾

⁴新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州, 新疆 克州

收稿日期: 2025年8月16日; 录用日期: 2025年9月15日; 发布日期: 2025年9月22日

摘要

利用近64年(1960~2023年)新疆塔城地区7个气象观测站汛期(5~9月)降水量资料, 采用世界气象组织推荐的11个极端降水指数, 分别讨论了其气候统计特征、时空变化特征、年变化特征, 结果表明: ① 近64a塔城地区汛期各极端降水指数空间分布总体呈自北向南逐渐减少的趋势, 极值指数中RX1day最大值出现在塔城, RX5day最大值出现在和丰, 最小值均出现在裕民; 绝对指数中SDII最大值出现在裕民, R10、CDD、CWD最多均出现在托里, R20、R50最多均出现在塔城; 相对指数极大值均出现在托里, 极小值均出现在沙湾。② 塔城地区汛期各极端降水指数均以负距平为主, 年际波动明显, 且各站间差异较大, 其中极值指数年际变化分为两个阶段, 1960~2000年以负距平为主, 期间有短暂的正距平, 变化较为平稳, 2001~2019年以正距平为主, 波动起伏较大; 绝对指数除CWD正负距平各出现32年外, 其它均以负距平为主, 且存在明显的年际波动, 1960~1991年正负距平最长连续5年, 但变化较为平稳, 波动较小, 1992~2014年变化加剧, 2015~2023年变化剧烈, 波动较大; 相对指数1960~1974年以正距平为主, 变化较为平稳, 1974~2000年以负距平为主, 2001~2019年以正距平为主, 波动起伏均较大, 2020~2023年以负距平为主, 变化趋于平稳。③ 塔城地区汛期各极端降水指数年代际振荡明显, 其中极值指数中RX1day最大值出现于21世纪初年, RX5day最大值出现于2000年代, 且均在20世纪1990~2000年代经历了“多-多”的变化; 绝对指数中R10和R20在20世纪1980~1990年代经历了“多-多”的变化, SDII和CWD在20世纪1980~1990年代经历了“少-多”的变化, R50和CDD在20世纪1990~2000年代~21世纪初年经历了“少-多-多”的变化; 相对指数均以21世纪初年最多, 1970年代最少, 且均经历了“多-少-多-多-少-多”的交替演变。

关键词

塔城地区, 汛期极端降水指数, 年变化特征

*通讯作者。

Analysis of the Annual Variation Characteristics of Extreme Precipitation Indexes during the Flood Season in Tacheng Prefecture, Xinjiang from 1960 to 2023

Jing Gao¹, Binqun Luo^{1*}, Xian Yang², Lijun Jing³, Jinhui Wang⁴

¹Meteorological Bureau of Tacheng Region, Tacheng Xinjiang

²Science and Technology Service Center of Xinjiang Meteorological Bureau, Urumqi Xinjiang

³Shawan City Meteorological Bureau, Shawan Xinjiang

⁴Kizilsu Kirghiz Autonomous Prefecture of Xinjiang, Kizilsu Kirghiz Autonomous Prefecture Xinjiang

Received: Aug. 16th, 2025; accepted: Sep. 15th, 2025; published: Sep. 22nd, 2025

Abstract

Utilizing precipitation data from the flood season (May to September) over the past 64 years (1960~2023) from seven meteorological observation stations in the Tacheng region of Xinjiang and employing eleven extreme precipitation indices recommended by the World Meteorological Organization (WMO), this study discusses their climatic statistical characteristics as well as temporal and spatial variation features. The results indicate that: ① from May to September in the Tacheng area over the past 64 years, the spatial distribution of extreme precipitation indices generally showed a decreasing trend from north to south. Among the extreme value indices, the maximum RX1day occurred in Tacheng, while the maximum RX5day occurred in Hefeng; the minimum values for both were observed in Yumin. For the absolute indices, the maximum SDII was recorded in Yumin, while the highest values of R10, CDD, and CWD were all found in Tuoli, and the highest R20 and R50 were both in Tacheng. The relative indices reached their maximum values in Tuoli and their minimum values in Shawan. ② The most extreme precipitation indices were dominated by negative anomalies, with significant interannual fluctuations and considerable variation among stations. The interannual variation of extreme value indices can be divided into two phases: there are negative anomalies prevailed from 1960 to 2000, with brief positive anomalies and relatively stable changes from 2001 to 2019, positive anomalies dominated, with larger fluctuations. Among the absolute indices, except for CWD, which had 32 years each of positive and negative anomalies, the others were predominantly negative, with notable interannual variability. From 1960 to 1991, the longest consecutive period of positive or negative anomalies was five years, with relatively stable and minor fluctuations. From 1992 to 2014, changes intensified, and from 2015 to 2023, variations became more drastic with significant fluctuations. For the relative indices, positive anomalies dominated from 1960 to 1974, with relatively stable changes; negative anomalies prevailed from 1974 to 2000, followed by positive anomalies from 2001 to 2019, with substantial fluctuations. From 2020 to 2023, negative anomalies dominated again, and changes tended to stabilize. ③ The extreme precipitation indices in the Tacheng area exhibited clear decadal oscillations. Among the extreme value indices, the maximum RX1day occurred in the early 21st century, while the maximum RX5day appeared in the 2000s, with both experiencing a “high-high” variation during the 1990s~2000s. For the absolute indices, R10 and R20 underwent a “high-high” variation during the 1980s~1990s, while SDII and CWD experienced a “low-high” variation during the same period. R50 and CDD showed a “low-high-high” variation from the 1990s~2000s to the early 21st century. The relative indices all peaked in the early 21st century and were lowest in the 1970s, following an alternating

evolution of “high-low-high-high-low-high”.

Keywords

Tacheng Prefecture, Extreme Precipitation Indexes during the Flood Season, Annual Variation Characteristics

Copyright © 2025 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

在气候变暖背景下,全球大部分地区降水呈现极端化趋势,自 20 世纪中叶以来中高纬度陆地区域极端降水事件明显增加,特别是对气候变化敏感和生态环境脆弱的干旱、半干旱地区,极端强降水引发的洪涝、山体滑坡、泥石流等次生地质灾害,破坏当地赖以生存的生态环境,给区域生态环境和人类生产生活带来不利影响[1]-[3]。

近年来,国内外众多学者着眼于不同地区降水、极端降水事件、极端降水个例,并对其时空变化特征、长期变化趋势等开展了大量研究,得出了很多有价值的结论。施雅风[4]等人利用西北地区气象资料研究了西北地区气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景;史玉光、袁玉江、薛燕、毛炜峰、吴秀兰等[5]-[10]对近 40~50a 新疆降水的研究指出:新疆降水变化的总趋势是增湿明显,平均增幅为 0.67 mm/10a,后 10a 与前 30a 相比降水增加。李佳秀等[11]分析表明,除持续干燥指数外,北疆大部分站点极端降水指数变化率大于南疆。努尔比亚·吐尼牙孜等[12]利用塔里木盆地 44 个气象观测站 1960~2021 年逐日降水量资料,选取世界气象组织(WMO)推荐的 10 个极端降水指数,分析表明极端降水指数存在明显的年际波动和年代振荡,20 世纪 80~90 年代各极端降水指数均经历了“少-多”的变化(持续干期相反)。

塔城地区位于新疆西北部,是新疆乃至全国天气的上游,地形复杂多样,地势南高北低,是生态环境脆弱带、气候变化脆弱区和敏感地带。自然降水是农牧业灌溉的主要水源,但降水量时空分布极不均匀,已成为制约当地农牧业生产和经济发展的瓶颈。近年来众多气象工作者对这一区域诸如积雪[13]、日照[14]、雷暴[15]、大风[16]、冻土[17]、高温[18]、干旱[19]、冷季降水[20]。

2. 资料与方法

2.1. 资料

使用新疆气象局信息中心提供的资料记录完整、连续、空间分布均匀的塔城地区 7 个国家级基准、基本气象观测站(包括:塔城、额敏、裕民、托里、和丰、乌苏、沙湾)近 64a(1960~2023 年)汛期(5~9 月)逐日、月、年降水量实况资料(未经查补延长处理)。将 7 站平均作为区域平均,气候平均值时段为 1960~2023 年。

2.2. 方法

选取世界气象组织(WMO)气候学委员会公布的 11 个极端降水指数(含极值指数、绝对指数、相对指数),并结合文献[3],给出极端降水指数定义(见表 1),探讨近 64a 塔城地区汛期极端降水指数的气候统计特征、时空分布特征及年变化特征。

在统计分析时,利用站点 1960~2023 年汛期(5~9 月)逐日、月、年降水量实况资料,得到塔城地区近 64a 共 11 个极端降水指数随时间变化序列,统计、计算、分析塔城地区及各站汛期极端降水指数的气候统计特征、时空分布特征、年代际变化特征;使用距平法统计分析塔城地区、各站极端降水指数的年际变化特征。

Table 1. Definition of extreme precipitation index
表 1. 极端降水指数定义

类型	代码	名称	定义	单位
极值指数	RX1day	最大 1 d 降水量	每月最大 1 d 降水量	mm
	RX5day	最大 5 d 降水量	每月最大 5 d 降水量	mm
绝对指数	SDII	降水强度	日降水量 $R \geq 1.0$ mm 的累计降水量与降水日数的比值	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$
	R10	中雨日数	日降水量 $R \geq 10.0$ mm 的日数	d
	R20	大雨日数	日降水量 $R \geq 20.0$ mm 的日数	d
	R50	暴雨日数	日降水量 $R \geq 50.0$ mm 的日数	d
	CDD	连续干旱日数	日降水量 $R < 1.0$ mm 的最大连续日数	d
	CWD	连续湿日	日降水量 $R \geq 1.0$ mm 的最大连续日数	d
	相对指数	R95P	强降水量	日降水量大于基准期内第 95% 分位值的降水量
R99P		极强降水量	日降水量大于基准期内第 99% 分位值的降水量	mm
PRCPFOT		汛期降水量	5~9 月日降水量之和	mm

3. 结果与分析

3.1. 塔城地区汛期极端降水指数的气候统计特征

3.1.1. 极值指数气候统计特征

1) 极值指数时空分布特征

Table 2. Climatic statistical characteristics of extreme precipitation indices in the flood season in Tacheng area
表 2. 塔城地区汛期极值指数气候统计特征

		塔城	额敏	裕民	托里	和丰	乌苏	沙湾
RX1day	降水量(mm)	64.6	44.4	35.5	54.8	61.5	44.1	36.0
	出现时间	2015-09-21	1996-05-28	1979-06-11	2011-06-29	2007-07-17	1998-05-19	1987-06-09
RX5day	降水量(mm)	108.6	87.5	73.4	82.1	112.2	89.6	73.5
	出现时间	1966	1988	1960	2016	2007	2016	1999

由表 2 可知,近 64a 塔城地区汛期极值指数中每月最大 1 d 降水量(RX1day)最大值 64.6 mm (2015 年 9 月 21 日,塔城),次大值 61.5 mm (2007 年 7 月 17 日,和丰),其后依次为 54.8 mm (2011 年 6 月 29 日,托里)、44.4 mm (1996 年 5 月 28 日,额敏)、44.1 mm (1998 年 5 月 19 日,乌苏)、36.0 mm (1987 年 6 月 9 日,沙湾)、35.5 mm (1979 年 6 月 11 日,裕民)。每月最大 5 d 降水量(RX5day)最大值 112.2 mm (2007 年,和丰),次大值 108.6 mm (1966 年,塔城),其后依次为 89.6 mm (2016 年,乌苏)、87.5 mm (1988 年,额敏)、82.1 mm (2016 年,托里)、73.5 mm (1999 年,沙湾)、73.4 mm (1960 年,裕民)。

2) 极值指数年际变化特征

由图 1(a)、图 1(b)可知, RX1day 年际变化表现为负距平 34 年, 正距平 30 年, 其中最大正距平 34.6 mm (2015 年), 最小负距平-15.0 mm (1980 年)。1960~1964 年连续 5 年负距平(最小-8.7 mm, 1963 年), 1968~1970 年连续 3 年正距平(最大 14.6 mm, 1970 年), 之后正负距平以 1 年或 2 年为间隔周期交替出现, 期间于 1980 年出现近 64a 最小负距平(-15.0 mm), 1984~1986 年连续 3 年负距平(最小-12.2 mm, 1984 年), 1987~1989 年连续 3 年正距平(最大 6.8 mm, 1989 年), 1990~1995 年连续 6 年负距平(最小-11.3 mm, 1994 年), 2002~2004 年连续 3 年正距平(最大 3.3 mm, 2003 年), 2015~2019 年连续 5 年正距平, 期间于 2015 年出现近 64a 最大值 34.6 mm。

RX5day 年际变化表现为负距平 35 年, 正距平 29 年, 其中最大正距平 53.8 mm (2007 年), 最小负距平-34.7 mm (1974 年)。1961~1964 年连续 4 年负距平(最小-15.1 mm, 1963 年), 1974~1976 年连续 3 年负距平, 期间于 1974 年出现近 64a 最小负距平-34.7 mm, 1978~1982 年连续 5 年负距平(最小-20.7 mm, 1980 年), 1984~1986 年连续 3 年负距平(最小-21.9 mm, 1985 年), 1987~1990 年连续 4 年正距平(最大 29.1 mm, 1988 年), 2002~2005 年连续 5 年正距平(最大 12.5 mm, 2005 年), 之后正负距平以 1 年或 2 年为间隔周期交替出现, 期间于 2007 年出现近 64a 最大正距平 53.8 mm, 2017~2019 年连续 3 年负距平(最小-3.5 mm, 2017 年)。

3) 极值指数年代际变化特征

由图 1(c)、图 1(d)可知, RX1day 年代际变化呈“多-少-少-多-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 其后依次为 1960 年代、2000 年代、1970 年代、1990 年代, 最少为 1980 年代。各站 RX1day 年代际分布各不相同, 其中塔城呈“多-少-少-多-少-多”的交替演变, 1960 年代最多, 2000 年代最少; 额敏呈“多-少-多-多-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1970 年代最少; 裕民呈“少-多-少-少-多-多”的交替演变, 1970 年代最多, 1990 年代最少; 托里呈“多-少-多-少-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1990 年代最少; 和丰呈“多-少-少-少-多-多”的交替演变, 1960 年代最多, 1990 年代最少; 乌苏呈“少-多-多-多-少-多”的交替演变, 1990 年代最多, 1960 年代最少; 沙湾呈“少-多-多-多-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1980 年代最少。塔城地区 RX5day 年代际变化呈“多-少-多-多-多-少”的交替演变, 2000 年代最多, 其后依次为 21 世纪初年、1960 年代、1990 年代、1980 年代, 1970 年代最少。各站 RX5day 年代际分布差异较大, 依据其演变特点可将其划分为 6 种类型, I 型包括乌苏、沙湾, 年代际分布呈“多-少-多-多-少-多”的交替演变, 1990 年代最多, 1970 年代最少; II 型包括塔城, 年代际分布呈“多-少-少-多-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 2000 年代最少; III 型包括额敏, 年代际分布呈“多-少-多-少-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1970 年代最少; IV 型包括裕民, 年代际分布呈“多-少-多-少-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1990 年代最少; V 型包括托里, 年代际分布呈“多-少-多-多-多-少”的交替演变, 2000 年代最多, 1970 年代最少; VI 型包括和丰, 年代际分布呈“多-少-多-少-多-少”的交替演变, 1960 年代最多, 1970 年代最少。

综上所述, 塔城地区极值指数空间分布总体呈自北向南逐渐减少的趋势, 其中 RX1day 最大值出现在塔城, 次大值出现在和丰, RX5day 最大值出现在和丰, 次大值出现在塔城, 最小值均出现在裕民; 塔城地区及各站汛期极值指数年际变化整体均以负距平为主, 且正负距平差异较大, 年际波动明显; RX1day 年代际变化呈“多-少-少-多-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1980 年代最少, RX5day 年代际变化呈“多-少-多-多-多-少”的交替演变, 2000 年代最多, 1970 年代最少, 均在 20 世纪 1990 年代~2000 年代呈“多-多”的演变。

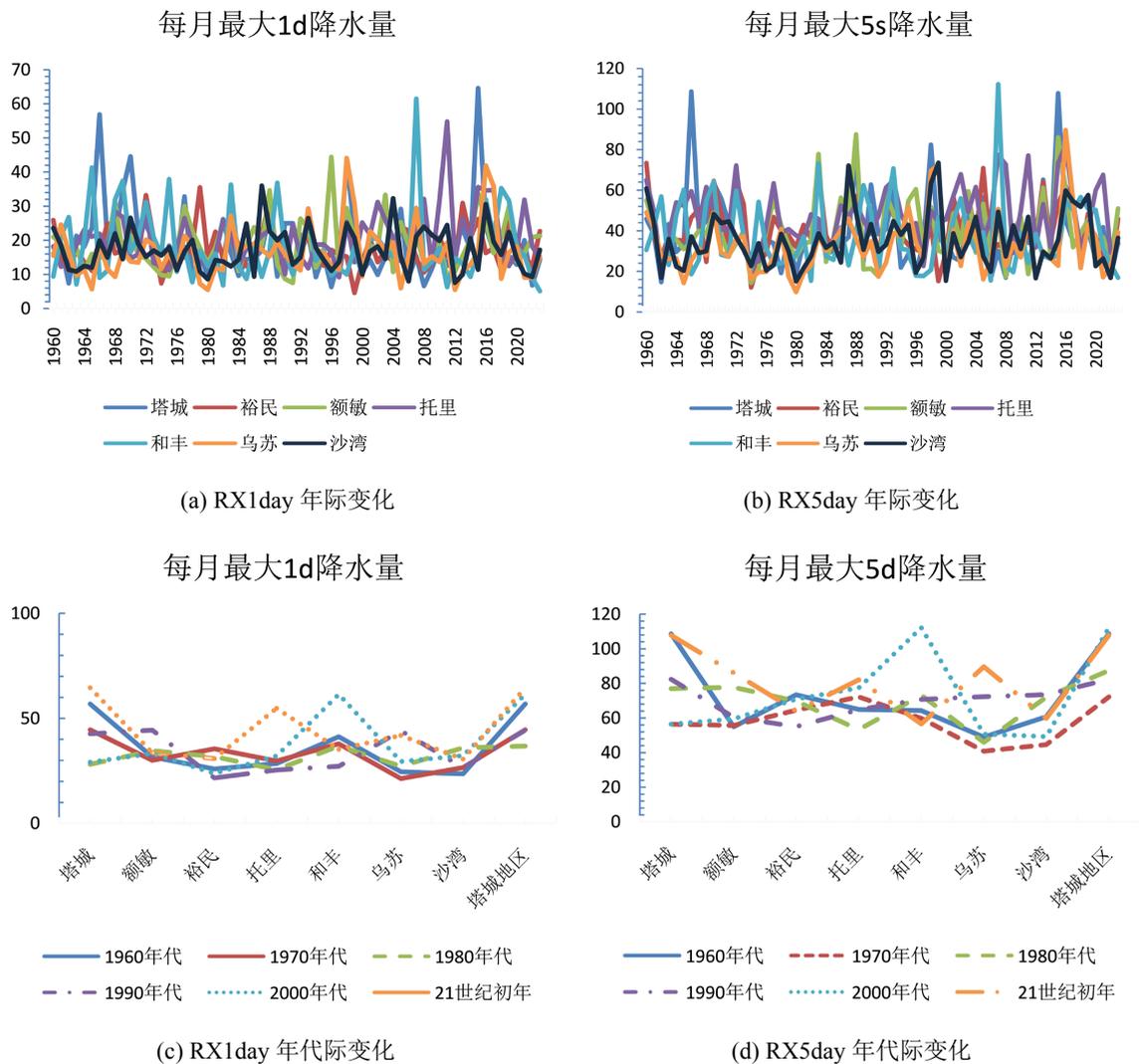


Figure 1. (a~d) The inter-annual and inter-decadal variations of extreme value index in the flood season in the Tacheng region
图 1. (a~d) 塔城地区汛期极值指数年际、年代际变化

3.1.2. 绝对指数气候统计特征

Table 3. Spatial-temporal distribution of absolute index in the Tacheng area
表 3. 塔城地区绝对指数时空分布

绝对指数	平均值	最大(长)	最小(短)	极差
SDII (mm·d ⁻¹)	23.0	34.1 (2017 年)	16.9 (1997 年)	17.2
R10 (d)	41	83 (2016 年)	15 (2022 年)	68
R20 (d)	13	32 (2016 年)	2 (1974 年)	30
R50 (d)	1.7	8 (2015 年)	1	7
CDD (d)	9.5	13 (2020 年)	7	6
CWD (d)	12.5	13 (1972 年)	6 (1974 年)	7

1) 绝对指数时空分布特征

降水强度(SDII)反映了平均降水情况,统计分析表明(见表3),近64a塔城地区SDII平均为 $23.0 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,最大 $34.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (2017年),最小 $16.9 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (1997年),极差为 $17.2 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,说明塔城地区汛期有效降水事件的降水量波动较大;各站SDII在 $20.9\sim 25.0 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,差异较大,其中最大值 $58.5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (1979年,裕民),其后依次为 $46.4 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (2015年,额敏)、 $42.9 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (2015年,塔城)、 $37.8 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (1999年,沙湾)、 $35.9 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (2015年,和丰)、 $34.5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (2016年,托里)、 $34.0 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (2020年,乌苏)。

中雨日数(R10)平均为41 d,最多83 d(2016年),最少15 d(2022年),极差68 d;各站平均在4~8.8 d,托里最多21 d(2016年),其后依次为16 d(1993、2013年,塔城)、16 d(2016年,裕民)、15 d(2013年,额敏)、12 d(2007年,和丰)、11 d(1988年,乌苏)、11 d(1988、1999年,沙湾),各站最少1~3 d,个别年份未出现。

大雨日数(R20)平均13 d,最多32 d(2016年),最少2 d(1974年),极差30 d;各站平均1~3 d,塔城、裕民最多8 d(2013年、2015年),其次为额敏最多7 d(2013年),托里、和丰、乌苏、沙湾均为6 d,各地最少均为1 d,很多年份未出现。

暴雨日数(R50)平均为1.7 d,最多8 d(2015年),最少1 d(共16年),极差7 d,22年未出现;各站平均0.1~0.6 d,塔城最多2 d(1966、1998年),最少1 d(共出现11年),51年未出现;额敏最多2 d(2003、2015年),最少1 d(共出现10年),52年未出现;裕民最多1 d(共出现10年),54年未出现;托里最多4 d(2011、2015年),最少1 d(共出现4年),58年未出现;和丰最多2 d(1989年),最少1 d(共出现12年),51年未出现;乌苏最多2 d(1961、2016年),最少1 d(共出现5年),58年未出现;沙湾最多1 d(共出现9年),55年未出现。表明暴雨属小概率事件,出现频率较少。

连续干旱日数(CDD)平均为9.5 d,最长连续13 d(2020年),最短7 d(共4年),极差6 d;各站平均在6.4~7.9 d,最多13 d(托里,2020年),其后依次为12 d(1979年,裕民)、12 d(1971年,和丰),塔城(2007年)、额敏(1973年)、乌苏(2020年)、沙湾(1973年)最长均为11 d,各站最短连续日数基本在3~5 d。

连续湿日(CWD)平均为12.5 d,最长13 d(1972年),最短6 d(1974年),极差7 d。各站平均在7.9~11.7 d,其中最多19 d(1972年,托里),其后依次为17 d(2013年,塔城),14 d,13 d,除托里、和丰最短连续日数为5 d外,其余均为4 d。

2) 绝对指数年际变化特征

塔城地区SDII年际变化表现为负距平34年,正距平30年,最大正距平 $11.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (2016年),最小负距平 $-6.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (1997年)。1960~1965年正负距平以1年或2年为间隔周期交替出现,期间最大正距平 $2.2 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (1961年),最小负距平 $-6.0 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (1962年),变化平稳,波动小,1966~1970年连续5年正距平(最大 $3.6 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,1970年),1974~1978年连续5年负距平(最小 $-3.9 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,1978年),1980~1982年连续3年负距平(最小 $-3.7 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,1982年),1984~1986年连续3年负距平(最小 $-3.8 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,1984年),1989~1991年连续3年负距平(最小 $-4.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,1990年),1992~2014年正负距平以1年或2年为间隔周期交替出现,期间出现12年负距平、10年正距平,1年距平为0,振荡明显,1997年出现近64a最小负距平 $-6.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,2015~2018年连续4年正距平,期间于2016年出现近64a最大正距平 $11.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,2020~2023年连续4年负距平(最小 $-5.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,2023年)。

R10年际变化表现为35年负距平(最小-26 d,2022年),29年正距平(最大42 d,2016年),正负距平以1年、2年、3年为周期交替出现,其中1974~1982年连续9年负距平(最小-22 d),2001~2005年、2015~2019年连续5年正距平,期间出现最大正距平42 d(2016年),年际振荡剧烈。

R20年际变化表现为34年负距平(最小-11 d,1974年),30年正距平(最大11 d,2013、2019年),正负距平以1年或2年为周期交替出现,其中1962~1965年连续4年负距平(最小-8 d,1962年),1978~1982

年连续 5 年负距平(最小-8 d, 1980 年), 期间出现最大正距平 42 d(2016 年), 最长连续 2 年正距平(11 d, 2019 年), 其中 1977、2004、2011、2016、2020 年距平值为 0, 表明大雨日数(R20)与历年持平。

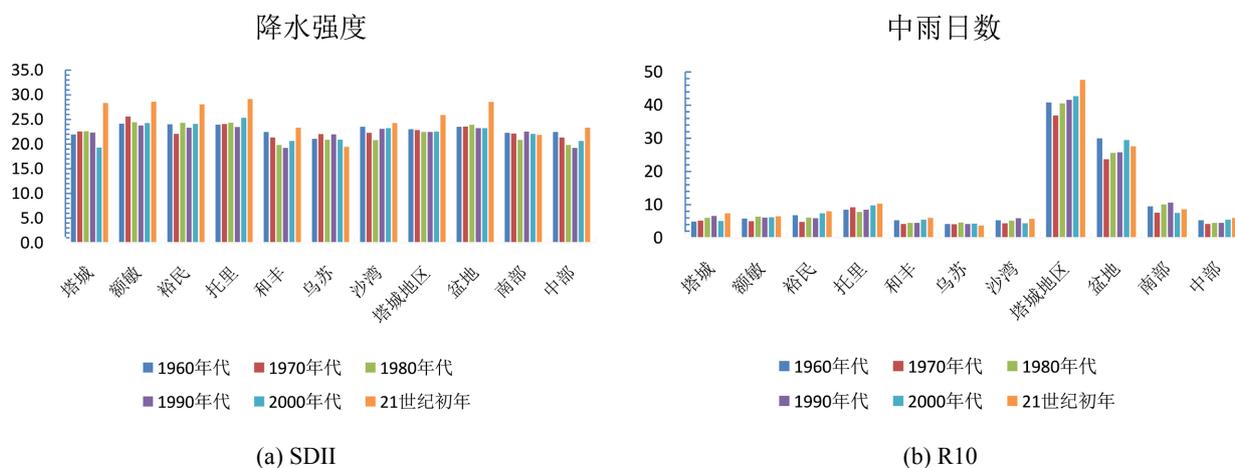
R50 年际变化表现为 38 年负距平(最小-2 d, 22 年), 26 年正距平(最大 6 d, 2015 年), 正负距平以 1 年或 2 年为周期交替出现, 其中 1962~1965 年、1973~1976 年、1978~1981 年、1984~1987 年、1994~1997 年连续 4 年负距平(最小-2 d); 1968~1970 年、2015~2017 年连续 3 年正距平, 期间于 2015 年出现最大正距平 6 d, 其中 1960、1966、1989、2002、2005、2021 年距平值为 0, 表明暴雨日数(R50)与历年持平。

CDD 年际变化表现为 45 年负距平(最小-3 d, 1974、2004、2008、2017 年), 21 年正距平(最大 3 d, 2020 年), 负距平次数远多于正距平, 一般至少连续两年负距平之后出现 1 年正距平, 其中 1963~1970 年连续 8 年负距平(最小-2 d, 4 年), 1974~1978 年连续 5 年负距平(最小-3 d, 1974 年), 1985~1987 年连续 3 年负距平(最小-2 d, 3 年)、1997~2000 年连续 4 年负距平(最小-2 d, 3 年)、2002~2004 年连续 3 年负距平(最小-3 d, 2004 年), 2008~2014 年连续 7 年负距平(最小-3 d, 2008 年)、2016~2019 年连续 4 年负距平(最小-3 d, 2017 年); 连续正距平仅 1993~1994 年出现 1 次(最大 1 d, 2 年), 其中 1972、1983、1984、1988、1990、1996、2001、2006、2015 年距平值为 0, 表明连续干旱日数(CDD)与历年持平。

CWD 年际变化表现为正负距平各出现 32 年(最大 6 d, 1972 年), (最小-6 d, 1974 年), 正负距平以 1 年或 2 年为周期交替出现, 其中 1963~1965 年连续 3 年正距平(最大 3 d, 1964 年), 1966~1968 年连续 3 年负距平(最小-2 d, 1968 年), 1969~1974 年正负距平以 1~2 年为周期交替出现, 期间于 1972 年出现近 64 a 最大正距平, 间隔 1 年后于 1974 年出现最小负距平, 1974~1981 年连续 8 年负距平, 1986~1988 年连续 3 年正距平, 其后正负距平以 2 年为周期交替出现, 2006~2010 年连续 5 年负距平, 2020~2022 年连续 3 年负距平; 共 11 年距平值为 0, 表明连续连续湿日(CWD)与历年持平。

3) 绝对指数年代际变化特征

由图 2(a)~(f)可知, 塔城地区 SDII 年代际变化呈“多-少-少-多-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 其后依次为 1960 年代、1970 年代、2000 年代、1990 年代, 1980 年代最少; 各站 SDII 年代际分布各不相同, 其中塔城呈“少-多-多-少-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 2000 年代最少; 额敏呈“多-少-多-少-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1970 年代最少; 裕民呈“少-多-少-少-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1990 年代最少; 托里呈“少-多-多-少-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1990 年代最少; 和丰呈“多-少-少-少-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1990 年代最少; 乌苏呈“少-多-少-多-少-少”的交替演变, 1970 和 1990 年代最多, 21 世纪初年最少; 沙湾呈“多-少-少-多-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1980 年代最少。



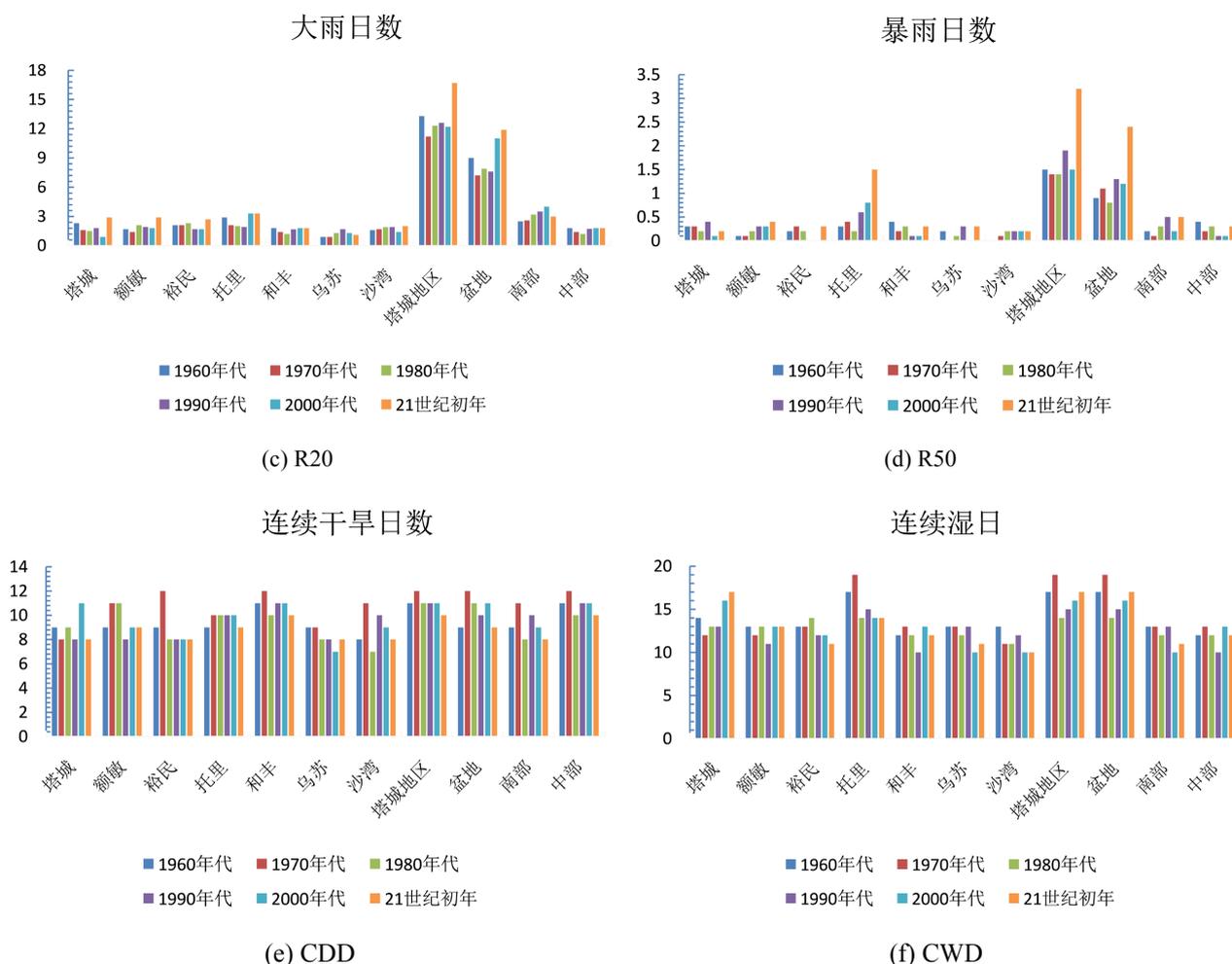


Figure 2. (a~f) Spatial-temporal distribution of absolute index in the Tacheng area

图 2. (a~f) 塔城地区绝对指数年代际变化特征

R10 年代际变化呈“多-少-多-多-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 其后依次为 2000 年代、1970 年代、1960 年代、1980 年代, 1970 年代最少; 各站 R10 年代际分布各不相同, 其中塔城呈“少-多-多-多-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1960 年代最少; 额敏和裕民呈“多-少-多-少-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1970 年代最少; 托里呈“少-多-少-多-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1980 年代最少; 和丰呈“多-少-多-多-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1970 年代最少; 乌苏呈“多-少-多-少-多-少”的交替演变, 1980 年代最多, 21 世纪初年最少; 沙湾呈“多-少-多-多-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1970 年代最少。

R20 年代际变化呈“多-少-多-多-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 其后依次为 1960 年代、1990 年代、1980 年代、2000 年代, 最少为 1970 年代; 各站 R20 年代际分布各不相同, 其中塔城呈“少-多-多-多-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 2000 年代最少; 额敏呈“多-少-多-少-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1970 年代最少; 裕民呈“多-多-多-少-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1990 年代最少; 托里呈“多-少-少-少-多-多”的交替演变, 21 世纪初年和 2000 年代最多, 1990 年代最少; 和丰呈“多-少-少-多-多-多”的交替演变, 21 世纪初年、2000 年代和 1960 年代最多, 1980 年代最少; 乌苏呈“少-少-多-多-少-少”的交替演变, 1990 年代最多, 1960 年代和

1970 年代最少；沙湾呈“少-多-多-多-少-多”的交替演变，21 世纪初年最多，2000 年代最少。

R50 年代际变化呈“多-少-多-少-多-多”的交替演变，21 世纪初年最多，其后依次为 1960 和 2000 年代、1970 和 1980 年代，最少为 1990 年代；各站 R50 年代际分布各不相同，其中塔城呈“多-多-少-多-少-多”的交替演变，1990 年代最多，2000 年代最少；额敏呈“少-少-多-多-多-多”的交替演变，21 世纪初年最多，1960 和 1970 年代最少；裕民呈“少-多-少-少-少-多”的交替演变，21 世纪初年和 1970 年代最多，1990 年代和 2000 年代最少；托里呈“少-多-少-多-多-多”的交替演变，21 世纪初年最多，1980 年代最少；和丰呈“多-少-多-少-少-多”的交替演变，1960 年代最多，1990 和 2000 年代最少；乌苏呈“多-少-多-多-少-多”的交替演变，1990 年代和 21 世纪初年最多，1970 和 2000 年代最少；沙湾呈“少-多-多-多-多-多”的交替演变，1980、1990、2000 年代和 21 世纪初年最多，1960 年代最少。

CDD 年代际变化呈“少-多-少-少-多-多”的交替演变，1970 年代最多，其后依次为 1960、1980、1990、2000 年代，21 世纪初年最少；各站 CDD 年代际分布各不相同，其中塔城呈“多-少-多-少-多-少”的交替演变，2000 年代最多，21 世纪初年最少；额敏呈“少-多-多-少-多-多”的交替演变，1970、1980 年代最多，1990 年代最少；裕民呈“少-多-少-少-少-少”的交替演变，1970 年代最多，1980、1990、2000 年代和 21 世纪初年最少；托里及和丰呈“少-多-多-多-多-少”的交替演变，其中托里 1970、1980、1990、2000 年代最多，1960 年代和 21 世纪初年最少，和丰 1970 年代最多，1980 年代和 21 世纪初年最少；乌苏呈“多-多-少-少-少-多”的交替演变，1960、1970 年代最多，2000 年代最少；沙湾呈“少-多-少-多-少-少”的交替演变，1970 年代最多，1980 年代最少。

CWD 年代际变化呈“少-多-少-多-少-多”的交替演变，1970 年代最多，其后依次为 1960 和 21 世纪初年、1990 年代、1980 年代，最少为 2000 年代。各站 CWD 年代际分布各不相同，其中塔城呈“多-少-多-少-多-多”的交替演变，21 世纪初年最多，1970 年代最少；额敏呈“多-少-多-少-多-多”的交替演变，1960、1980、2000 年代和 21 世纪初年最多，1990 年代最少；裕民呈“少-少-多-少-多-少”的交替演变，1980 年代最多，21 世纪初年最少；托里呈“少-多-少-多-少-少”的交替演变，1970 年代最多，2000 年代和 21 世纪初年最少；和丰呈“少-多-少-少-多-少”的交替演变，1970、2000 年代最多，1990 年代最少；乌苏呈“多-多-少-多-少-多”的交替演变，1960、1970、1990 年代最多，2000 年代最少；沙湾呈“多-少-少-多-少-少”的交替演变，1960 年代最多，2000 年代和 21 世纪初年最少。

综上所述，塔城地区汛期各绝对指数年际波动明显，表现为前期振荡小，变化平稳，中期振荡加剧，后期振荡剧烈的特点；年代际振荡明显，其中 R10 和 R20 在 20 世纪 1980~1990 年代经历了“多-多”的变化，SDII 和 CWD 在 20 世纪 1980~1990 年代经历了“少-多”的变化，R50 和 CDD 在 20 世纪 1990~2000 年代~21 世纪初年经历了“少-多-多”的变化。

3.1.3. 相对指数气候统计特征

1) 相对指数时空分布特征

由表 4 可知，塔城地区强降水量(R95P)极大值 148.8 mm (2016 年)，极小值 29.5 mm (2022 年)，极差 119.3 mm，极比 5.0 mm；7 站极大值 230.2 mm (2016 年，托里)，其后依次为 222.4 mm (2013 年，塔城)、200.2 mm (2016 年，裕民)、189.7 mm (1999 年，乌苏)、186.8 mm (2007 年，和丰)、185.4 mm (2013 年，额敏)、155.94 mm (2016 年，沙湾)。从极大值出现时间来看，仅乌苏出现于 1999 年，其余各站出现于 2007~2016 年；7 站极差 144.6~220.1 mm，其中托里最大，塔城次之，其后依次为裕民、乌苏、额敏、和丰，沙湾最小；7 站极比在 10.9~19.5 mm，其中裕民最大，托里次之，其后依次为乌苏、塔城、沙湾、额敏，和丰最小。

Table 4. Statistical characteristics of relative climate indices for the flood season in the Tacheng area
表 4. 塔城地区汛期相对指数气候统计特征

		塔城	额敏	裕民	托里	和丰	乌苏	沙湾	全区	
相对 指数	R95P	极大 mm (时间)	222.4 (2013)	185.4 (2013)	200.2 (2016)	230.2 (2016)	186.8 (2007)	189.7 (1999)	155.9 (1999)	148.8 (2013)
		极少(时间)	11.4 (1974)	14.5 (1990)	4.6 (1999)	10.1 (1990)	17.1 (2006)	9.2 (1965)	11.3 (1976)	29.5 (2022)
		极差	211.0	170.9	195.6	220.1	169.7	180.5	144.6	119.3
		极比	19.5	12.8	43.5	22.8	10.9	20.6	13.8	5.0
	R99P	极大(时间)	222.4 (2013)	185.4 (2013)	200.2 (2016)	230.2 (2016)	186.8 (2007)	149.4 (2016)	160.7 (1999)	152.8 (2016)
		极少(时间)	11.4 (1974)	22.6 (1974)	4.6 (1999)	16.4 (1997)	17.1 (2006)	9.8 (1980)	11.3 (1976)	29.5 (2022)
		极差	211.0	162.8	195.6	213.8	169.7	139.6	149.4	123.3
		极比	19.5	8.2	43.5	14.0	10.9	15.2	14.2	5.2
	PRCPFOT	极大(时间)	268.7 (2013)	234.0 (1992)	249.6 (2016)	311.4 (2016)	257.0 (2007)	212.3 (1999)	194.4 (1999)	208.2 (2016)
		极少(时间)	32.7 (1974)	38.9 (1974)	37.0 (1974)	55.1 (1997)	48.3 (2006)	28.6 (1980)	36.8 (1968)	54.1 (1974)
		极差	236.0	195.1	212.6	256.3	208.7	183.7	157.6	154.1
		极比	8.2	6.0	6.7	5.7	5.3	7.4	5.3	3.9

极强降水量(R99P)极大值 152.8 mm (2016 年), 极小值 29.5 mm (2022 年), 极差 123.3 mm, 极比 5.2 mm; 7 站极大值 230.2 mm (2016 年, 托里), 其后依次为 222.4 mm (2013 年, 塔城)、200.2 mm (2016 年, 裕民)、186.8 mm (2007 年, 和丰)、185.4 mm (2013 年, 额敏)、160.7 mm (1999 年, 乌苏)、149.4 mm (2016 年, 沙湾)。从极大值出现时间来看, 仅乌苏出现于 1999 年, 其余各站出现于 2007~2016 年; 7 站极差在 139.6~213.8 mm, 其中托里最大, 塔城次之, 其后依次为裕民、和丰、额敏、乌苏, 沙湾最小; 7 站极比在 8.2~19.5 mm, 其中裕民最大, 塔城次之, 其后依次为乌苏、沙湾、托里、和丰, 额敏最小。

汛期降水量(PRCPFOT)极大值 208.2 mm (2016 年), 极小值 54.1 mm (1974 年), 极差 154.1 mm, 极比 3.9 mm; 7 站极大值 311.4 mm (2016 年, 托里), 其后依次为 268.7 mm (2013 年, 塔城)、257.0 mm (2007 年, 和丰)、249.6 mm (2016 年, 裕民)、234.0 mm (1992 年, 额敏)、212.3 mm (1999 年, 乌苏)、194.4 mm (1999 年, 沙湾)。从极大值出现时间来看, 仅额敏、乌苏、沙湾出现于 1990 年代, 其余各站出现于 2007~2016 年; 7 站极差在 183.7~256.3 mm, 其中托里最大, 塔城次之, 其后依次为裕民、和丰、额敏、乌苏, 沙湾最小; 7 站极比在 5.3~8.2 mm, 其中塔城最大, 乌苏次之, 其后依次为裕民、额敏、托里, 和丰及沙湾最小。

2) 相对指数年际变化特征

从图 3(a)可以看出, R95P 年际变化表现为 33 年负距平(最小-43.1 mm, 2022 年), 31 年正距平(最大 76.2 mm, 2016 年), 1960~1973 年以间隔 2 年为周期正负距平交替出现, 期间最大正距平 43.2 mm (1960 年), 最小负距平-35.0 mm (1962 年); 1974~1982 年连续 9 年负距平(最小-41.1 mm, 1974 年), 之后继续以间隔 2 年为周期正负距平交替出现; 1989~1991 年连续 3 年负距平(最小-27.8 mm, 1991 年); 2001~2005 年连续 5 年正距平(最大 21.9 mm, 2001 年), 2015~2019 年连续 5 年正距平期间于 2016 年出现近 64a 最大正距平 76.2 mm, 2020~2023 年连续 4 年负距平期间于 2022 年出现近 64a 最小负距平-43.1 mm。

R99P 年际变化表现为 35 年负距平(最小-44.3 mm, 2022 年), 29 年正距平(最大 79.0 mm, 2016 年), 1960~1973 年正负距平以 2 年为间隔周期交替出现, 期间于 1960 年出现最大正距平 44.1 mm, 1962 年出

现最小负距平-40.4 mm; 1974~1982年连续9年负距平(最小-42.2 mm, 1974年), 之后正负距平继续以2年为间隔周期交替出现; 1984~1986年连续3年负距平(最小-24.5 mm, 1985年), 之后连续2年正距平(最大47.6 mm, 1988年); 1989~1991年连续3年负距平(最小-28.0 mm, 1991年), 1991年之后正负距平继续以1~2年为间隔周期交替出现; 2015~2019年连续5年正距平期间于2016年出现近64a最大正距平79.0 mm, 2020~2023年连续4年负距平期间于2022年出现近64a最小负距平-44.3 mm。

PRCPFOT年际变化表现为35年负距平(最小-64.7 mm, 1974年), 29年正距平(最大89.4 mm, 2016年), 1973年之前正负距平以1~2年为间隔周期交替出现, 最大正距平64.0 mm(1960年), 最小负距平-49.7 mm(1962年), 1974~1982年连续9年负距平, 并于1974年出现近64a最小负距平-64.7 mm, 此期降水偏少, 主要以干旱少雨为主; 1983年为正距平(37.6 mm), 1984~1986年连续3年负距平(最小-26.0 mm, 1985年), 之后连续2年正距平(最大73.4 mm, 1988年), 1989~1991年连续3年负距平(最小-40.7 mm, 1991年), 之后正负距平以1~2年为间隔周期交替出现; 2001~2005连续5年正距平(最大18.4 mm, 2003年); 2008~2010连续3年负距平(最小-24.1 mm, 2008年), 之后正负距平继续以1年为间隔周期交替出现, 2015~2019年连续5年正距平, 期间于2016年出现近64a最大值89.4 mm, 降水以偏多为主, 2020~2023年连续4年负距平(最小值-61.3 mm, 2022年)。

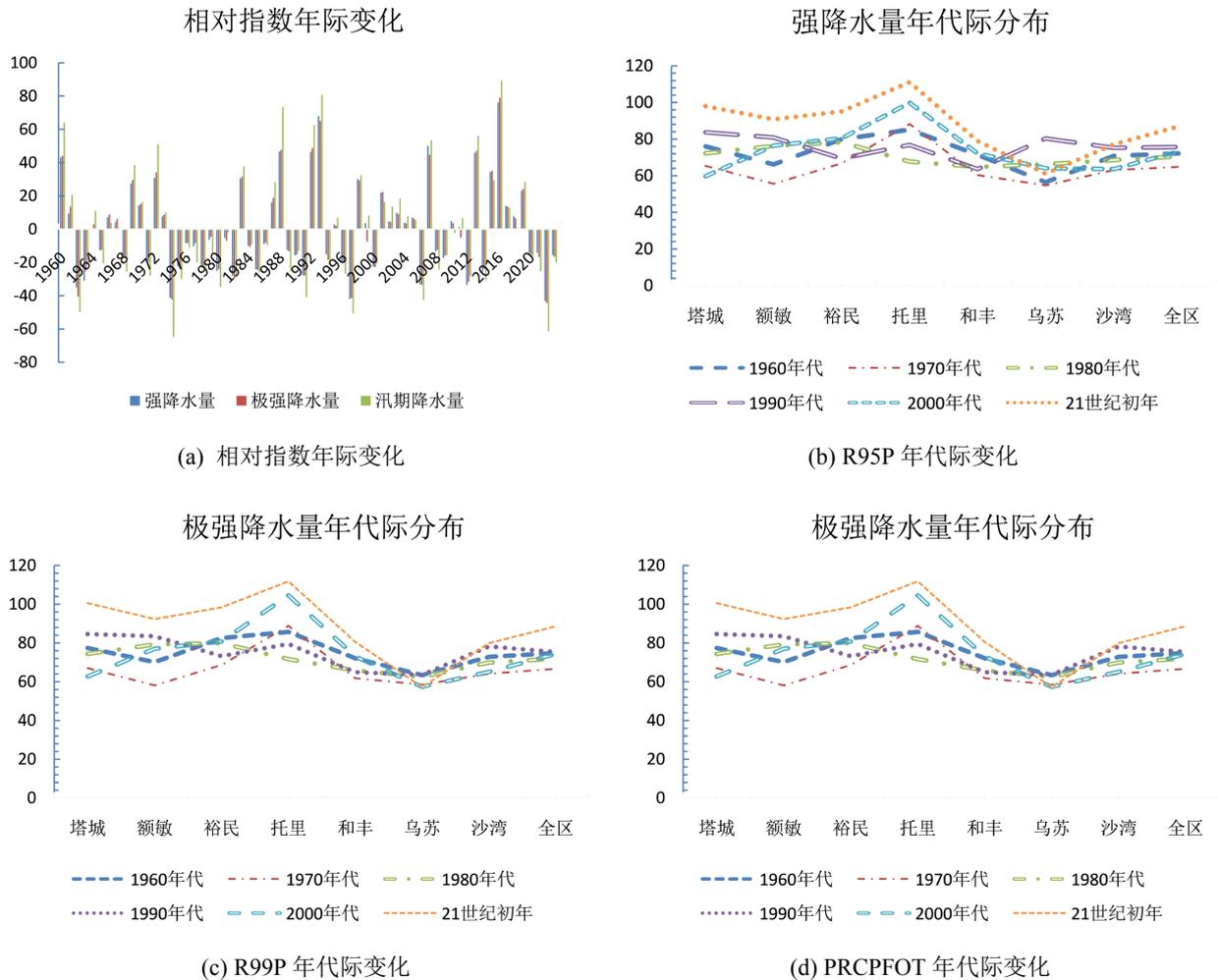


Figure 3. (a~d) The inter-annual and inter-decadal variations of the relative index during the flood season in the Tache area
图 3. (a~d) 塔城地区汛期相对指数年际、年代际变化

3) 相对指数年代际变化特征

由图 3(b)~(d)可知, R95P 年代际变化呈“多-少-多-多-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 其后依次为 1990 年代、2000 年代、1960 年代、1980 年代, 最少为 1970 年代; 各站 R95P 年代际分布各不相同, 依据其演变特点可将其划分为 4 种类型, I 型包括塔城、额敏、沙湾年代际分布呈“多-少-多-多-少-多”的交替演变, 其中塔城 21 世纪初年最多, 2000 年代最少, 额敏 21 世纪初年最多, 1970 年代最少, 沙湾 21 世纪初年最多, 1970 年代最少; II 型包括裕民、和丰年代际分布呈“多-少-多-少-多-多”的交替演变, 均以 21 世纪初年最多, 1970 年代最少; III 包括托里年代际分布呈“少-多-少-多-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1980 年代最少; IV 包括乌苏年代际分布呈“多-少-多-多-少-少”的交替演变, 1990 年代最多, 1970 年代最少。

R99P 年代际变化呈“多-少-多-多-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 其后依次为 1990 年代、1960 年代、2000 年代、1980 年代, 最少为 1970 年代; 各站 R99P 年代际分布各不相同, 依据其演变特点可将其划分为 4 种类型, I 型包括塔城、额敏、沙湾, 年代际分布呈“多-少-多-多-少-多”的交替演变, 其中塔城 21 世纪初年最多, 2000 年代最少, 额敏 21 世纪初年最多, 1970 年代最少, 沙湾 21 世纪初年最多, 1970 年代最少; II 型包括裕民、和丰年代际分布呈“多-少-多-少-多-多”的交替演变, 其中裕民以 21 世纪初年最多, 1970 年代最少, 和丰以 21 世纪初年最多, 1970 年代最少; III 包括托里年代际分布呈“少-多-少-多-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1980 年代最少; IV 包括乌苏年代际分布呈“多-少-多-多-少-少”的交替演变, 21 世纪初年最少。

PRCPFOT 年代际变化呈“多-少-多-多-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 其后依次为 1990 年代、1960 年代、2000 年代、1980 年代, 最少为 1970 年代; 各站 PRCPFOT 年代际分布各不相同, 依据其演变特点可将其划分为 4 种类型, I 型包括塔城、乌苏、沙湾, 年代际分布呈“多-少-多-多-少-多”的交替演变, 其中塔城 21 世纪初年最多, 2000 年代最少, 乌苏 1990 年代最多, 1970 年代最少, 沙湾 21 世纪初年最多, 1970 年代最少; II 型包括裕民、和丰年代际分布呈“多-少-多-少-多-多”的交替演变, 其中裕民 21 世纪初年最多, 1970 年代最少, 和丰以 21 世纪初年最多, 1970 年代最少; III 包括托里年代际分布呈“多-少-少-多-多-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1980 年代最少; IV 包括额敏年代际分布呈“多-少-多-多-少-多”的交替演变, 21 世纪初年最多, 1970 年代最少。

综上所述, 塔城地区各相对指数空间分布总体呈自北向南逐渐减少的趋势, 极大值均出现在托里, 极小值均出现在沙湾; 年际变化均表现为以负距平为主, 存在明显的年际波动, 其中 1960~1974 年以正距平为主, 变化较为平稳, 1974~2000 年以负距平为主, 2001~2019 年以正距平为主, 波动起伏均较大, 2020~2023 年以负距平为主, 变化趋于平稳; 各相对指数年代际振荡明显, 均以 21 世纪初年最多, 1970 年代最少, 且均经历了“多-少-多-多-少-多”的交替演变。

4. 结论

1) 近 64a 塔城地区各极端降水指数空间分布均表现为自北向南逐渐减小趋势, 其中极值指数中 RX1day 最大值为 64.6 mm (2015 年 9 月 21 日, 塔城), 次大值 61.5 mm (2007 年 7 月 17 日, 和丰), 最小值 35.5 mm (1979 年 6 月 11 日, 裕民); RX5day 最大值为 112.2 mm (2007 年, 和丰), 次大值 108.6 mm (1966 年, 塔城), 最小值 73.4 mm (1960 年, 裕民)。

2) 极值指数年际变化整体以负距平为主, 存在明显的年际波动, 1960~2000 年以负距平为主, 期间有短暂的正距平, 变化较为平稳, 2001~2019 年以正距平为主, 波动起伏较大; 存在明显的年代际振荡, RX1day 于 21 世纪初年出现最大值, RX5day 于 2000 年代出现最大值, 均在 20 世纪 90 年代~2000 年代经历了“多-多”的变化。

3) 塔城地区绝对指数中 SDII 平均为 $23.0 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 最大值 $34.1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (2017 年), 最小值 $16.9 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (1997 年), 极差 $17.2 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 说明塔城地区汛期有效降水事件的降水量波动较大; R10 平均 41 d, 最多 83 d (2016 年), 最少 15 d (2022 年), 极差 68 d; R20 平均 13 天, 最多 32 d (2016 年), 最少 2 d (1974 年), 极差 30 d; R50 平均 1.7 天, 最多 8 d (2015 年), 最少值 1 d, 极差 7 d; CDD 平均 9.5 d, 最长连续 13 d (2020 年), 最短 7 d, 极差 6 d; CWD 平均 12.5 d, 最长 13 d (1972 年), 最短 6 d (1974 年), 极差 7 d。

4) 塔城地区绝对指数年际变化除 CWD 正负距平各出现 32 年外, 其余绝对指数均以负距平为主, 1960~2014 年前基本以负距平为主波动变化不大, 2015 年后基本以正距平为主, 波动幅度较大。

5) 塔城地区绝对指数年代际变化差异较大, SDII、R10、R20、R50 均以 21 世纪初年最多, SDII 以 1980 年代最少, R10 和 R20 以 1970 年代最少, R50 以 1990 年代最少, CDD 和 CWD 以 1970 年代最多, CDD 以 21 世纪初年最少, CWD 以 2000 年代最少; 年代际振荡明显, 其中 R10 和 R20 在 20 世纪 1980~1990 年代经历了“多-多”的变化, SDII 和 CWD 在 20 世纪 1980~1990 年代经历了“少-多”的变化, R50 和 CDD 在 20 世纪 1990 年代~2000 年代~21 世纪初年经历了“少-多-多”的变化。

6) 相对指数中 R95P 极大值 148.8 mm (2016 年), 极小值 29.5 mm (2022 年), 极差 119.3 mm, 极比 5.0 mm; R99P 极大值 152.8 mm (2016 年), 极小值 29.5 mm (2022 年), 极差 123.3 mm, 极比 5.2 mm; PRCPFOT 极大值 208.2 mm (2016 年), 极小值 54.1 mm (1974 年), 极差 154.1 mm, 极比 3.9 mm。

7) 各相对指数存在明显的年际波动和年代际震荡, 年际变化均表现为以负距平为主, 1960~1974 年以正距平为主, 变化较为平稳, 1975~2000 年以负距平为主, 2001~2019 年以正距平为主, 波动起伏均较大, 2020~2023 年以负距平为主, 变化平稳; 各相对指数均以 21 世纪初年最多, 1970 年代最少, 且均经历了“多-少-多-多-少-多”的交替演变。

基金项目

新疆气象局气象科技创新发展基金项目“塔城地区汛期极端降水指数时空分布特征及其对大气环流因子的响应(MS202307)”和新疆气象局引导性计划项目“塔城地区暖季短时强降水分布特征及成因分析(YD2024006)”共同资助。

参考文献

- [1] 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718.
- [2] 陈云, 李玉强, 王旭洋, 等. 中国生态脆弱区全球变化风险及应对技术途径和主要措施[J]. 中国沙漠, 2022, 42(3): 148-158.
- [3] 杜亮亮, 周雪英, 赵有谱, 等. 河北邯郸地区极端降水指数气候特征及其与降水量、气温的关系[J]. 干旱气象, 2017, 35(6): 968-974.
- [4] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
- [5] 邓子风, 张家宝. 新疆降水概论[M]. 北京: 气象出版社, 1985: 15.
- [6] 史玉光, 孙照渤, 杨青. 新疆区域面雨量分布特征及其变化规律[J]. 应用气象, 2008, 19(3): 326-332.
- [7] 毛炜峰, 江远安, 李江风. 新疆北部的降水量线性变化趋势特征分析[J]. 干旱区地理, 2006, 29(6): 797-802.
- [8] 姜逢清, 胡汝骥. 近 50 年来新疆气候变化与洪、旱灾害扩大化[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 35-40.
- [9] 袁玉江, 何清, 穆贵金. 天山山区近 40 年夏季降水变化及与南北疆的比较[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 331-335.
- [10] 吴秀兰, 张太西, 王慧等. 1961-2017 年新疆区域气候变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(4): 27-34.
- [11] 李佳秀, 杜春丽, 杜世飞, 等. 新疆极端降水事件时空变化及趋势预测[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1103-1112.
- [12] 努尔比亚·吐尼亚孜, 姚俊强, 阿依努尔·买买提吐逊, 米日古丽·米吉提, 等. 1961-2021 年塔里木盆地极端降水指数时空变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024, 18(5): 25-34.

-
- [13] 井立红, 井立军, 高婧, 等. 塔城地区积雪变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(1): 31-40.
- [14] 井立红, 井立军, 高婧, 等. 塔城地区日照时数变化特征及影响因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(7): 120-126.
- [15] 高婧, 井立军, 李新东, 等. 新疆塔城地区雷暴时空分布及变化特征[J]. 干旱区地理, 2010, 33(1): 37-44.
- [16] 高婧, 井立军, 井立红, 等. 新疆塔城地区大风年际振荡及环流背景[J]. 干旱区地理, 2011, 34(2): 284-291.
- [17] 井立红, 高婧, 秦榕, 等. 塔城地区 1960-2018 年季节性冻土变化特征及其影响因子分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 88-93.
- [18] 井立红, 井立军, 高婧, 等. 塔城地区 1960-2005 年高温天气演变特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(5): 32-37.
- [19] 井立红, 高婧, 李新东, 等. 塔城地区干旱时空分布及变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 58-64.
- [20] 井立红, 魏小亚, 高婧, 等. 近 50a 新疆塔城地区冷季降水变化特征分析[J]. 干旱气象, 2012, 30(1): 39-44.