

文章编号: 1673-8411(2019)03-005-08

新疆极端降水时空特征及其对 ENSO 影响的响应研究

谢培^{1,2,3}, 张玉虎^{2*}, 乔飞^{1,3}

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048;

3. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

摘要: 基于 1961—2015 年新疆地区 51 个气象站逐日降水资料和南方涛动指数资料, 借助 RclimDex 模型, 利用线性变率、距平分析、Mann-Kendall 非参数检验等方法, 分析过去 55a 新疆极端降水变化特征及其对 ENSO 影响的响应。研究表明: (1) 1961—2015 年新疆持续干燥日数 $-3.9\text{d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的速率下降, 除降水强度指数外, 最大 1 日降水量、强降水量、总降水量和大雨日数都呈现显著上升趋势, 且突变基本发生于 1986 年; (2) 最大 1 日降水量、强降水量、总降水量和大雨日数都表现为“北多南少”的格局, 其线性倾向率表现为北疆大部分站点正增长, 且变化趋势明显, 南疆少数站点呈负增长, 且变化趋势较弱; (3) 20 世纪 80 年代以后 El Nino/La Nina 事件波动加剧, 且 El Nino 事件发生强度大于 La Nina 事件。El Nino 事件年对新疆产生增湿效应, 冷季降水增加幅度大于暖季, 空间上表现为北疆的塔城、阿勒泰、巴音布鲁克和南疆西部的喀什至和田一带年总降水明显偏多。

关键词: 新疆; 极端降水; ENSO

中图分类号: 0212.4

文献标识码: A

Spatial and Temporal Characteristics of Extreme Precipitation in Xinjiang and Its Response to ENSO

Xie Pei^{1,2,3}, Zhang Yuhu^{2*}, Qiao Fei^{1,3}

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012; 2. School of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048; 3. Institute of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Based on the daily precipitation data and southern Oscillation Index data of 51 meteorological stations in Xinjiang from 1961 to 2015, we use the RclimDex model, linear variability, anomaly analysis, and Mann-Kendall nonparametric test to analyze the characteristics of extreme precipitation changes and their response to ENSO impacts in past 55 years in Xinjiang. The research shows that: (1) The number of continuous drying days in Xinjiang decreased by $-3.9\text{d}/10\text{a}$ in 1961-2015. Except the precipitation intensity index, the maximum 1-day precipitation, heavy precipitation, total precipitation and heavy rain days all showed a significant increase, and mutations basically occurred in 1986. (2) The maximum 1-day precipitation, heavy precipitation, total precipitation and heavy rain days all show the pattern of “northern more and south less”, and the linear tendency rate shows that most stations in northern Xinjiang are growing, and the trend is obvious. A few sites in southern Xinjiang showed negative growth and the trend is negligible. (3) The fluctuation of El Nino/La Nina events intensified after the 1980s, and the intensity of El Nino events was greater than that of La Nina. The El Nino event year has a humidifying effect on Xinjiang, and the precipitation in the cold season is greater than the warm season. The annual total precipitation in northern Xinjiang such as Tacheng, Altay, and Bayinbrook, and Kashgar-Hetian areas in the western part of southern Xinjiang is obviously higher.

Keywords: Xinjiang; extreme precipitation; ENSO

收稿日期: 2019-03-09

基金项目: 国家科技重大专项子课题“天津滨海工业带水质目标全过程精细化管理体系研究”(2017ZX07107-001-002)

作者简介: 谢培(1992-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事气候与环境相关研究。E-mail: xiepei198@163.com

通讯作者: 张玉虎(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境系统分析及风险评估研究。E-mail: zhang_yuhu@163.com

引言

新疆位于亚欧大陆腹地, 远离海洋, 降水稀少且时空差异大, 属于典型的干旱半干旱区, 水资源严重短缺, 生态环境脆弱, 对气候变化敏感。近年来极端降水事件频发^[1], 研究表明我国西部地区降水增加, 尤其近 50 多年来增加显著^[2]。张强等^[3]研究得出, 新疆地区极端降水事件自 1980 年以来发生频繁。张林梅等^[4]研究得出新疆阿勒泰地区极端降水于 80 年代中期后频数(强度)加强, 并于 20 世纪 90 年代中期达到最多。施雅风等^[5]研究表明, 气候变暖背景下新疆发生了由暖干向暖湿的转变。

厄尔尼诺 / 南方涛动事件 (El Nino/Southern Oscillation, 简称 ENSO) 是全球范围内大尺度海气相互作用现象, ENSO 会加剧极端水文事件的发生^[6]。ENSO 对区域乃至全球气候变化的影响是气候变化研究的热点问题^[7-8]。在过去的几十年中, 国内外学者的研究重点都放在了 ENSO 与我国东部、中东部地区降水的关系上, 而关于 ENSO 与西部气候特征的研究相对较少^[9-12]。因此, 本文探讨了我国西北新疆地区极端降水变化及其对 ENSO 影响的响应, 对新疆地区水资源管理、防洪抗旱以及农业生产规划等具有理论和现实指导意义。

1 数据来源和研究方法

1.1 研究区和数据

新疆维吾尔自治区位于亚欧大陆腹地、中国西北边陲, 地处 $73^{\circ}40' \sim 96^{\circ}18'E$ 、 $34^{\circ}25' \sim 48^{\circ}10'N$, 占地面积约为 160 万 km^2 , 是中国最大的省级行政区。新疆地形地貌复杂, 盆地与山脉相间排列构成“三山夹两盆”的特殊地域结构。新疆年降水量较少且时空分布不均, 约为 145 mm, 天山山脉横贯新疆中部, 把新疆分隔为南疆和北疆两个区域, 其中北疆年降水约为 150 ~ 200 mm, 南疆年降水低于 100 mm^[13]。

文中选用新疆地区 51 个资料序列较长的气象站 (图 1), 1961—2015 年逐日降水数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>)。南方涛动指数 (Southern Oscillation Index, 简称 SOI) 来源于英国东英吉利大学气候研究中心 (<http://www.cru.uea.ac.uk/>)。此外, 为确保气象数据质量, 数据缺失部分采用相邻站点同期数据插值进行插补, 并对插值前后的数据进行分析, 结果表明缺失数据与插值方法对最终计算结果影响不大。

ClimDex 由加拿大国家气候数据中心的 Byron Gleason 开发, 用于监测气候变化的气候极值, 此

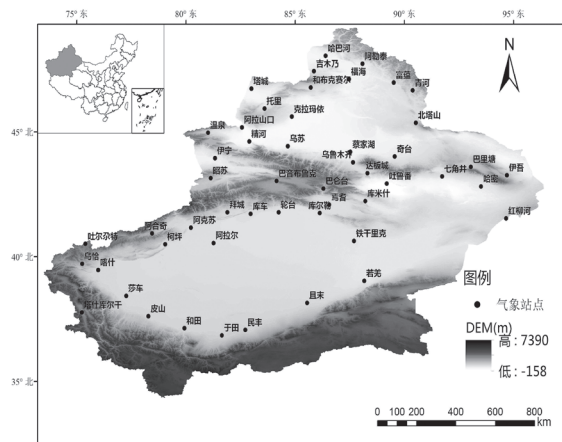


图 1 新疆气象站点分布图

1.2 研究方法

1.2.1 RclimDex模型

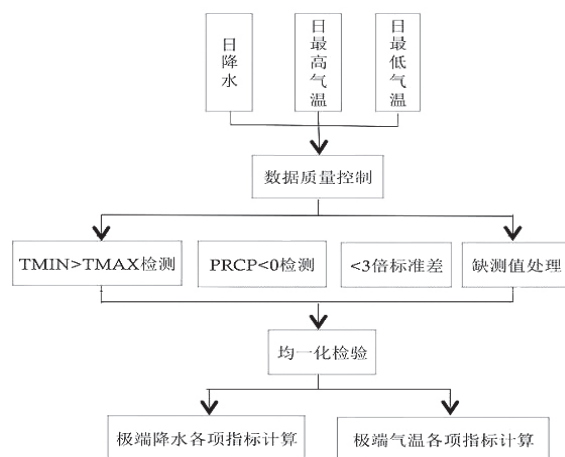


图 2 RclimDex 结构功能图

后经加拿大气象研究中心张学斌等进一步改进得到 RclimDex, 该模型可用于计算多种极端气候指数^[14]。RclimDex 为世界气象组织气候委员会所推荐用于气候变化检测、监测及极端气候指数分析, 其功能结构如图 2 所示。该模型操作简单, 只需输入逐日降水, 最高、最低气温等基本信息, 通过统计计算获得 27 项极端气候指数^[14]。文章基于研究区实际降水情况和研究需要, 并依据世界气象组织气候委员会推荐的“气候变化检测和指标体系”^[15-16], 选取 6 个极端降水指数, 如表 1。

1.2.2 趋势检验方法

线性倾向率的计算通过一元一次直线方程 $y = ax + b$ 进行定量描述, y 表示样本量为 n 的某一变量, 用 x 表示对应时间序列^[17]。

回归系数 a 表示气候变量 x 的变化趋势和倾向程度, 当 $a > 0$ 时, y 呈上升趋势; $a < 0$ 时, y 呈现

表 1 极端降水指数及其定义

名称	代码	定义	单位
最大 1 日降水量	RX1day	最大 1 日降水量	mm
强降水量	R95p	年降水量高于 95% 分位值的降水量	mm
降水强度指数	SDII	年降水量与日降水量 $\geq 1\text{mm}$ 的日数之比	mm/d
大雨日数	R10	年内日降水量 $\geq 10\text{mm}$ 的日数	d
总降水量	PRCRTOT	年总降水量	mm
持续干燥日数	CDD	年内日降水量 $< 1\text{mm}$ 的连续最大日数	d

下降趋势; a 的绝对值越大, y 变化程度越明显。

Mann-Kendall 非参数检验法等^[18]仅用于检测序列的变化趋势, 后来经过 Sneyers 等人的进一步完善, 发展成一种能检测气候突变的新方法^[19]。由于其计算简便, 可以明确突变开始的时间, 且能指出突变区域, 成为检测气候突变的一种常用方法^[20]。

2 结果与分析

2.1 极端降水变化特征分析

2.1.1 极端降水时间变化特征

1961—2015 年, 除持续干燥日数外, 其余极端降水指数的区域平均值都呈现上升趋势, 如图

3。持续干燥日数呈现出 $-3.9\text{d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的下降趋势, 表明了持续干燥日数减少, 研究区整体存在变湿趋势, 其干旱形势也将得到一定程度得到缓解。最大 1 日降水量、强降水量、降水强度指数、总降水量和大雨日数都呈现为上升趋势, 线性倾向率分别为 $0.58\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $2.82\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $0.07\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $8.24\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $0.24\text{d} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 说明近 55a 来新疆极端降水事件发生频率、强度增加, 以上结论与李佳秀等^[21]对 1961—2011 年新疆极端降水指数变化趋势研究一致。此外, 进一步对近 5a (2011—2015 年) 极端降水指数变化趋势进行分析得出, 各极端指数变化趋势方向性不变, 但线性倾向率加大, 以强降水量最为明显 ($15.8\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$)。

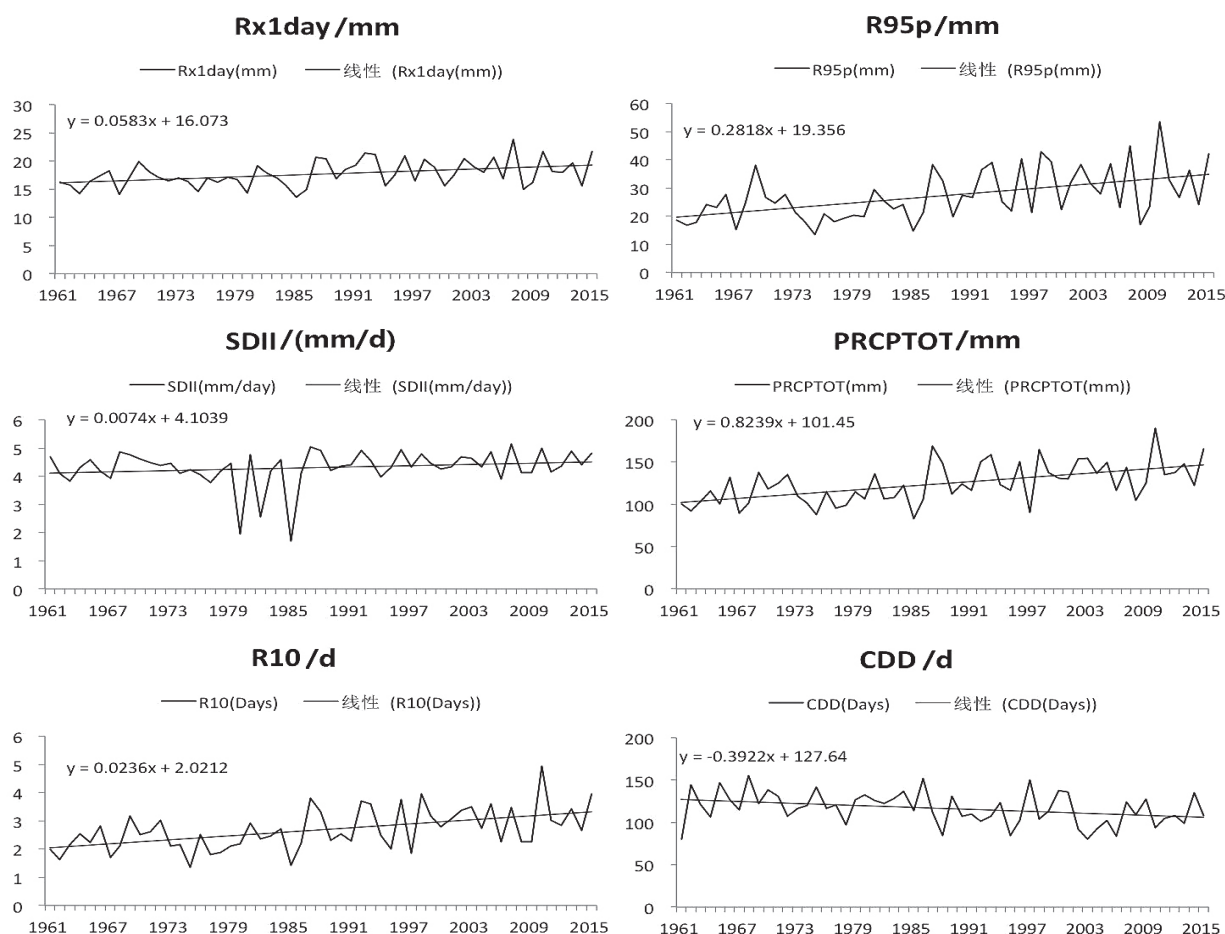


图 3 1961—2015 年极端降水指数年际变化

如图 4, 采用距平分析和 Mann-Kendall 检验可得, 极端降水距平变化年代际特征明显, 并存在明显突变现象。持续干燥日数于 20 世纪 80 世纪中后期转变为距平负值区, 经突变检验可知, 持续干燥日数下降具体发生于 1986 年, 结合表 2, 持续干燥日数于突变年前的 125d 下降到 109d, 相对减少 13%, 该下降趋势明显但未通过水平为 0.01 的显著性检验。降水强度指数距平值于 20 世纪 90 年代后呈现出正距平的主导地位, 但突变检验表明降水强度并未发生明显突变。最大 1 日

降水量、强降水量、总降水量和大雨日数都基本于 20 世纪 80 年代由距平负值区转变为距平正值区, 上升趋势显著, 均通过水平为 0.01 的显著性检验。此外, 经突变检验得出, 这一变化基本发生于 1986 年, 以强降水量上升趋势最大, 突变发生后相对增长 45%。以上分析表明新疆地区极端降水变化存在明显的分界线 1986 年, 这与施雅风等^[22]新疆于 20 世纪 80 年代中期发生了由暖干向暖湿转变现象的结论基本一致。

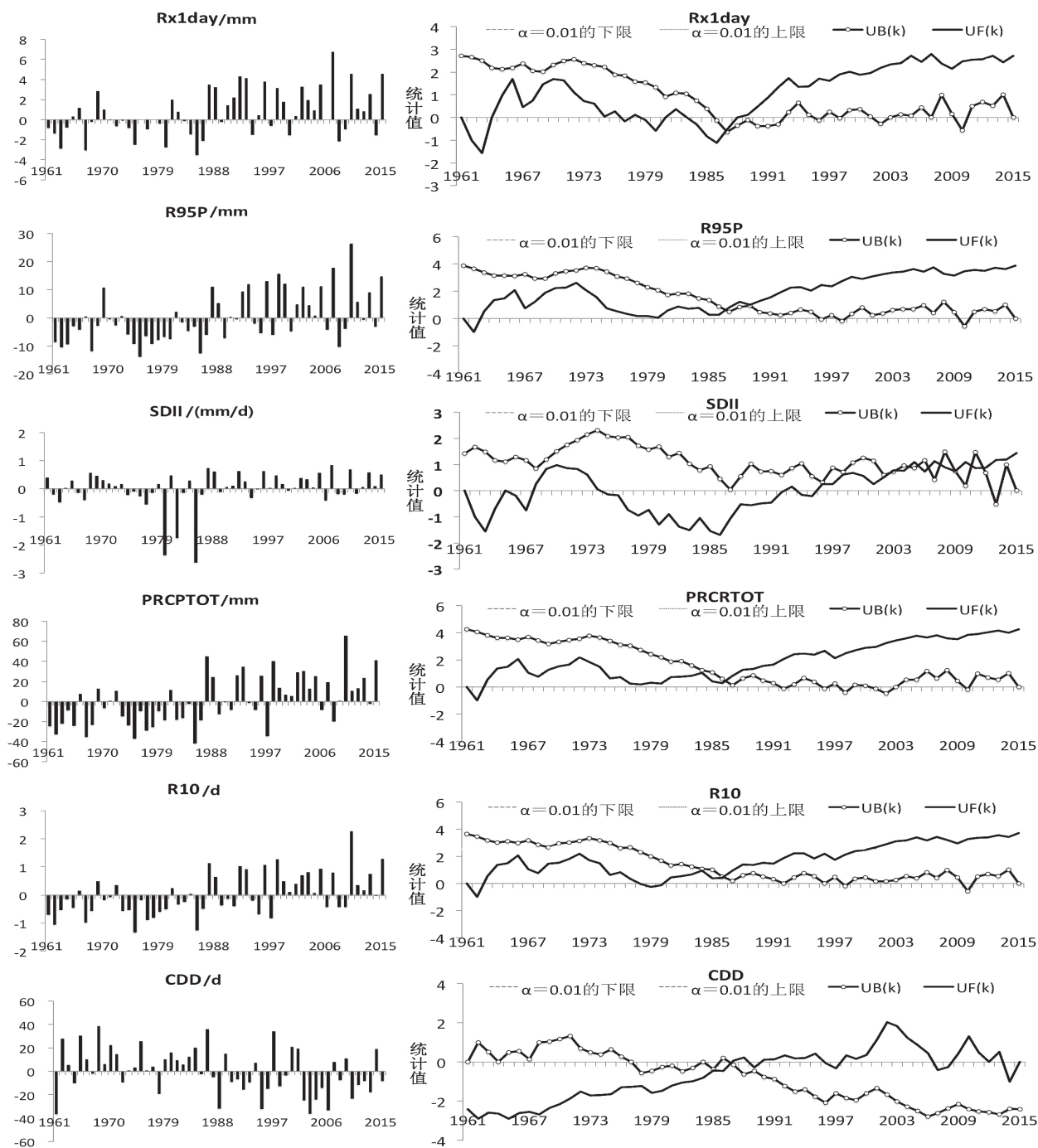


图 4 1961—2015 年极端降水指数距平变化和突变检验

表 2 极端降水指数及其定义

变量	均值	突变年	M-K 显著性检验 Z 值	突变前均值	突变后均值	变化趋势	相对变幅
Rx1day/mm	17.69	1987	2.7***	16.63	18.75	↑	13%
R95p/mm	26.98	1986	3.76***	22.05	31.91	↑	45%
PRCPTOT/mm	135.71	1986	4.23***	123.05	148.37	↑	21%
SDII/(mm/d)	4.49	—	1.53	4.29	4.9	↑	10%
R10/d	2.66	1986	3.77***	2.26	3.07	↑	10%
CDD/d	117.09	1986	1.61	125.00	109.00	↓	13%

注: *** 表示通过了 99% 的显著性检验

2.1.2 极端降水空间变化特征

利用 ArcGIS10.2 的普通克里格法对近 55a 来极端降水空间分布和线性倾向率进行空间插值分析, 如图 5。最大 1 日降水量、强降水量、大雨日数与总降水量空间分布大体一致, 都呈现出明显“北多南少”的格局。强降水量与最大 1 日降水量的较高值均表现为天山山脉附近站点。持续干燥

日数空间分布呈现出明显的“南多北少”的格局, 南疆平均持续干旱日数高达 158d, 北疆平均持续干燥日数仅为 79d。降水强度指数无明显空间分布特征, 巴仑台呈现较大降水强度, 约为 $7.4\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

各极端降水指数线性倾向率空间分布呈现较大差异性, 最大 1 日降水量、强降水量和总降水

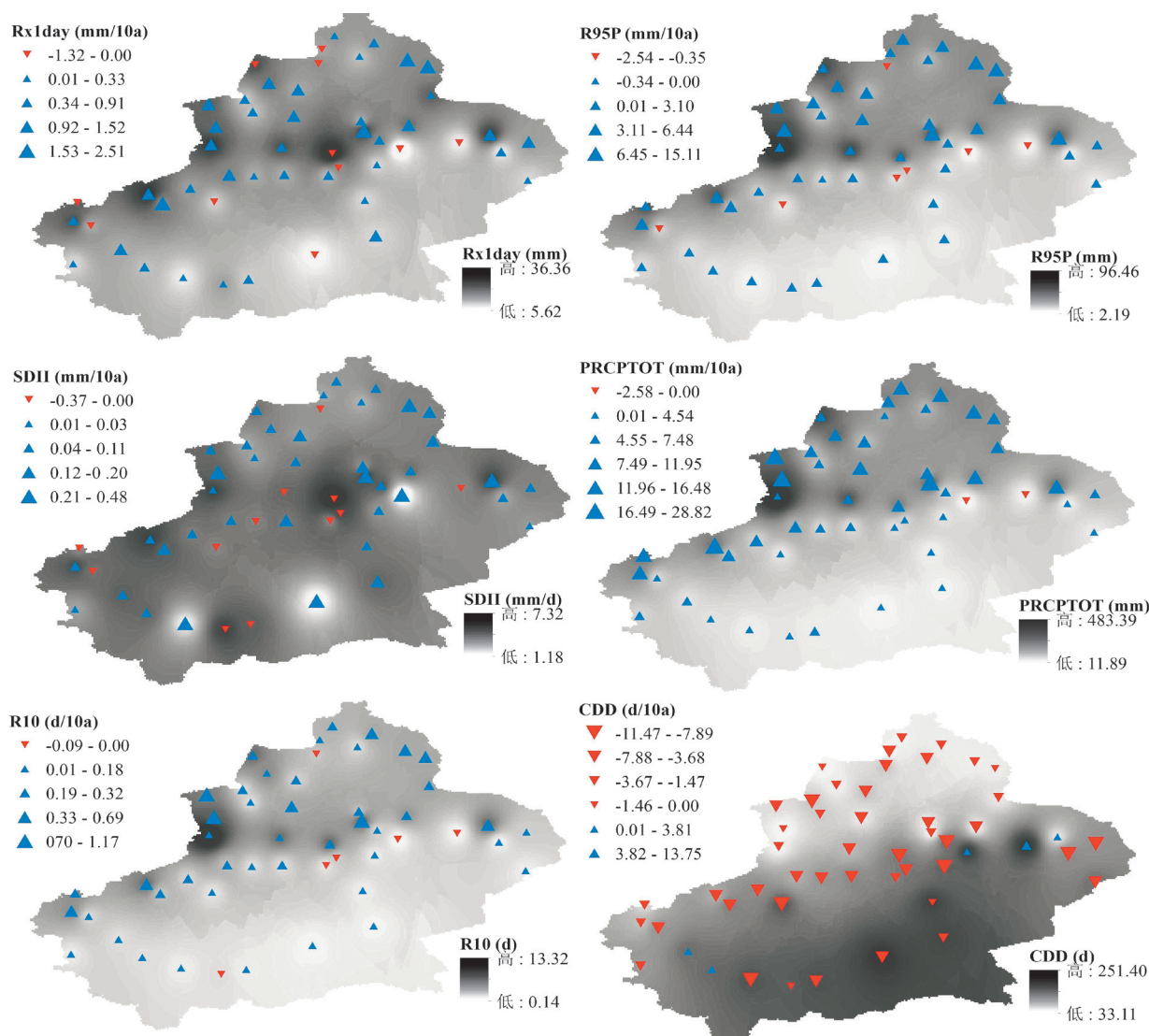


图 5 1961—2015 年新疆地区 6 个极端降水指数空间分布及其线性倾向率

量的变化速率分别为 $-1.316\sim 2.512\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $2.544\sim 15.11\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $-2.579\sim 28.823\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ，北疆大部分地区南疆伊吾县和东疆若羌县增长率较大，南疆地区变化率较小，部分站点存在减少趋势。降水强度指数变化速率介于 $0.375\sim 0.483\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 之间，变化幅度不大。大雨日数变化速率介于 $-0.097\sim 1.17\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 之间，北疆地区大雨日数增加趋势较南疆地区明显。持续干燥日数变化速率为 $-11.471\sim 13.754\text{d}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ，大部分地区均呈下降趋势，但在莎车、七角井、巴里塘和吐鲁番等地区存在上升趋势。持续降雨日数下降的站点，约占90%，最大1日降水量、强降水量、总降水量、降水强度和大雨日数呈现上升趋势的站点分别占78%、84%、96%、76%和90%。由此可见，大部分站点极端降水变化趋势与气候变化总趋势一致，但区域降水变化可能受到大气环流、地形等自然因素及人为因素的影响。

2.2 厄尔尼诺对极端降水的影响

2.2.1 El Nino/La Nina事件发生的时间和特征

El Nino 事件发生时，南方涛动指数 SOI 为负值；反之，La Nina 事件发生时 SOI 为正值。

本文依据赵永平和陈永利^[23]提出的用 SOI 资料来检测 ENSO 事件：SOI ≤ 0.5 ，连续 5 个月以上定义为 El Nino 事件；SOI > 0.5 ，连续 5 个月以上定义为 La Nina 事件。ENSO 等级划分主要是对 SOI 指数进行标准化，将 0.5 个标准差作为一个等级，得到 ENSO 冷暖事件的强度指标，将非 ENSO 事件的强度定量为 0；强、中等和弱厄尔尼诺年强度等级定量为 3、2 和 1 级；强、中等和弱拉尼娜年强度定量为 -3、-2 和 -1 级，如表 3。

由表 3 和图 6 可知，过去 55a，El Nino/La Nina 事件共计发生 26a，占比 51%，剩余 24a 为正常年。1961—2015 年 El Nino 事件持续最长时间为 19 个月，最短时间为 5 个月，LaNina

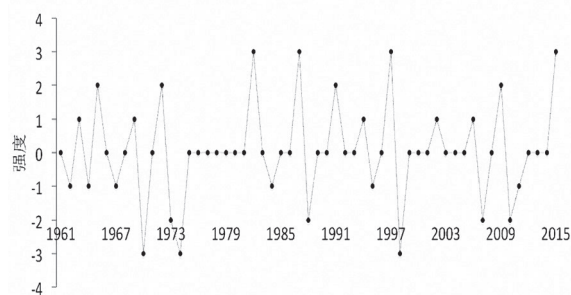


图 6 1961—2015 年 El Nino/La Nina 事件发生强度变化

表 3 1961—2015 年 El Nino/La Nina 事件发生年表

El Nino/La Nina 事件年		起止时间	长度	SOI	Σ SOI	强度	等级
暖 事 件	1963	1963. 06 — 1964. 01	8	-0. 84	-6. 79	弱	1
	1965	1965. 04 — 1966. 04	13	-2. 10	-8. 5	中等	2
	1969	1968. 11 — 1969. 12	14	-1. 20	-5. 2	弱	1
	1972	1972. 04 — 1973. 02	11	-2. 00	-9. 8	中等	2
	1982	1982. 04 — 1983. 04	13	-2. 80	-22. 6	强	3
	1987	1986. 11 — 1988. 02	16	-1. 70	-14. 1	强	3
	1991	1991. 02 — 1992. 04	15	-2. 30	-13. 6	中等	2
	1994	1994. 10 — 1995. 02	5	-1. 30	-3. 2	弱	1
	1997	1997. 03 — 1998. 04	14	-2. 20	-19. 5	强	3
	2002	2002. 05 — 2003. 02	10	-1. 30	-6. 7	弱	1
	2006	2006. 08 — 2007. 01	6	-1. 40	-3. 9	弱	1
	2009	2009. 06 — 2010. 04	11	-1. 30	-3. 3	中等	2
	2015	2014. 06 — 2015. 12	19	-1. 02	-19. 4	强	3
	1962	1962. 09 — 1963. 02	6	1. 00	3. 4	弱	-1
	1964	1964. 03 — 1965. 01	11	1. 48	7. 36	弱	-1
1967	1967. 08 — 1968. 05	10	1. 34	2. 86	弱	-1	
1970	1970. 06 — 1972. 01	20	2. 10	19. 9	强	-3	
1973	1973. 05 — 1974. 10	18	1. 23	22. 8	中等	-2	
冷 事 件	1974	1974. 09 — 1976. 06	19	2. 83	21. 4	强	-3
	1984	1984. 10 — 1085. 10	13	1. 10	4. 3	弱	-1
	1988	1988. 07 — 1989. 07	13	1. 30	16. 9	中等	2
	1995	1995. 09 — 1996. 05	9	0. 68	5. 45	弱	-1
	1998	1998. 09 — 2000. 05	21	1. 63	22. 23	强	-3
	2007	2007. 05 — 2008. 04	12	2. 00	8. 07	中等	-2
	2010	2010. 04 — 2011. 05	12	1. 80	25. 15	中等	-2
	2011	2011. 07 — 2012. 03	9	0. 91	8. 23	弱	-1

事件持续最长时间为21个月, 最短时间为6个月。El Nino事件强年为1982年、1987年、1997年和2015年, La Nina 事件强年为1970年、1974年和1998年。El Nino/La Nina事件呈现起伏波动, 且于20世纪80年代以后波动更加剧烈, El Nino事件发生强度大于La Nina事件, 其中El Nino事件强年发生3次, La Nina事件强年仅发生1次。

2.2.2 El Nino/La Nina 事件对极端降水的影响

选取总降水量与 SOI 指数进行响应分析。近55年正常年的总降水量为139.24mm, El Nino 事

件年的总降水量为141.85mm, La Nina 事件年的总降雨量为133.55mm, 表明 El Nino 事件年对研究区有一定程度的增湿作用。为探明增湿的时间尺度, 进一步对比冷暖季降水对 ENSO 响应。综合考虑研究区降水在一年中的分配量, 将一年划分为冷、暖两季进行降水对 ENSO 响应研究。参考确定气候分类的吉良指数^[24], 每年4月至10月为暖季, 11月至次年3月为冷季。El Nino 事件年冷季增湿幅度(34%)大于暖季(1%); La Nina 事件年冷季降水减少幅度(8%)略高于暖季(5%)。具体数据见表4。

表4 极端降水指数及其定义

时间	年平均降水 /mm	变幅	暖季降水 /mm	变幅	冷季降水 /mm	变幅
El Nino 事件年	141.85	2%	95.62	1%	35.53	34%
La Nina 事件年	26.133.55	-4%	88.99	-5%	24.42	-8%
正常年	135.139.24	-	94.24	-	26.58	-

研究区跨越较大经纬度, 为了更好地分析 El Nino/La Nina 事件对区域降水的影响, 采用空间插值法分别绘制 El Nino/La Nina 事件年降水距平分布图。El Nino 事件年全疆78%的站点表现为正距平, 其中奇台、伊宁等地区降水增加多于30mm; La Nina 事件年全疆56%的站点表现为负距平, 其中北塔山、吉木乃、和布克赛尔等地区降水

减少多于30mm。如图7, El Nino 事件年北疆的天山、塔城、阿勒泰、巴音布鲁克和南疆西部喀什至和田一带降水明显偏多, 而阿克苏、吐鲁番盆地至哈密南部地区降水明显偏少。La Nina 事件年北疆的塔城、阿勒泰、巴音布鲁克和南疆西部喀什至和田一带降水明显偏少, 仅哈密、昭苏等极少地区降水增多。

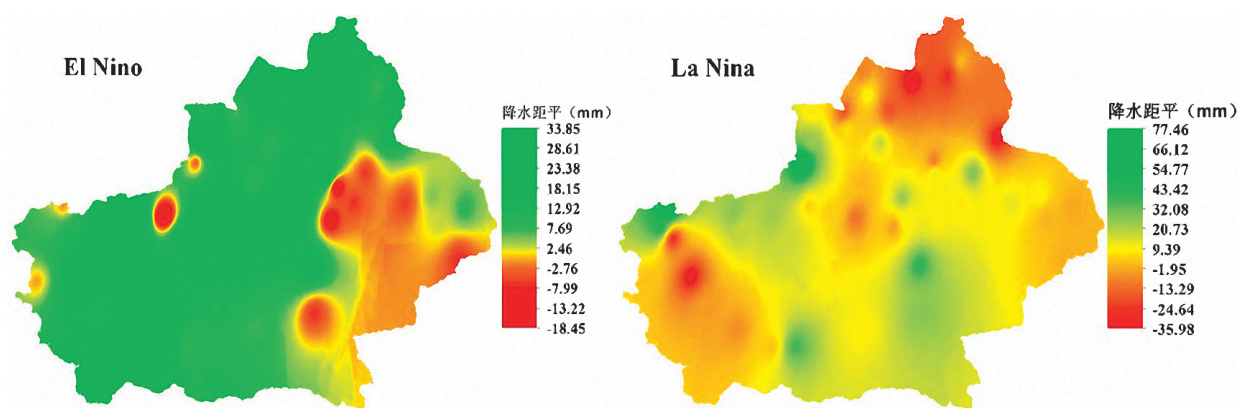


图7 El Nino/La Nina 事件发生年新疆地区降水距平变化空间分布

3 结论

通过分析近55a来新疆极端降水变化及其对 ENSO 影响的响应, 得到以下结论:

(1) 除持续干燥日数以外, 新疆极端降水事件总体呈现增加趋势。持续干燥日数以 $-3.9d \cdot (10a)^{-1}$ 的线性倾向率下降, 但该下降趋势并未通过置信区间为99%的显著性检验; 降水强度指数呈不明显增加趋势; 最大1日降水量、

强降水量、总降水量和大雨日数呈显著上升趋势。总体上, 反映了干燥程度的降低, 雨强、雨日和雨量的增加。

(2) 极端降水空间分布呈现出“北多南少”的格局, 极端降水线性倾向率表现为北疆大部分站点正增长, 且变化趋势明显, 南疆少数站点呈负增长, 且变化趋势较弱。大部分站点极端降水变化趋势与总趋势一致, 具体表现为: 高于90%的站点持续干燥日数下降, 表明了新疆无雨日的

减少; 高于70%的站点的最大1日降水量、强降水量、总降水量和大雨日数均呈现上升趋势。

(3) 20 世纪 80 年代以来 El Nino/La Nina 事件波动加剧, 且 El Nino 事件发生强度大于 La Nina 事件。El Nino 事件年对新疆产生增湿效应, 冷季增加幅度大于暖季, La Nina 事件年表现为降水减小, 冷季减少幅度略高于暖季。空间上, El Nino 事件年 78% 的站点降水为正距平, 其中北疆地区的塔城、阿勒泰、巴音布鲁克和南疆西部地区的喀什至和田一带年总降水明显偏多, La Nina 事件年约 56% 的站点降水为负距平, 其中北疆地区的塔城、阿勒泰、巴音布鲁克和南疆西部地区的喀什至和田一带年总降水明显减少。

参考文献:

- [1] 慈晖, 张强, 张江辉, 等. 1961-2010 年新疆极端降水过程时空特征 [J]. 地理研究, 2014, 33(10): 1881-1891.
- [2] 王绍武, 蔡静宁, 慕巧珍, 等. 中国西部年降水量的气候变化 [J]. 自然资源学报, 2002, 17(4): 415-422.
- [3] Zhang Q, Singh V P, Li J, et al. Spatio-temporal variations of precipitation extremes in Xinjiang, China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 434-435(2): 7-18.
- [4] 张林梅, 苗运玲, 李建丽, 等. 新疆阿勒泰地区近 50a 夏季极端降水事件变化特征 [J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1199-1208.
- [5] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
- [6] Zhang Q, Li J, Singh V P et al. Influence of ENSO on precipitation in the East River basin, south China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118: 1-13.
- [7] 宗海锋, 张庆云, 陈烈庭. 东亚-太平洋遥相关型形成过程与 ENSO 盛期海温关系的研究 [J]. 大气科学, 2008, 32(2): 220-230.
- [8] 王慧. 1956 ~ 2011 年环渤海地区气候的变化特征及其与 ENSO 的相关性分析 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.
- [9] 陈菊英, 王玉红, 王文. 近 50 年来 ENSO 的冷暖事件评定及其对夏季雨型的滞后效应 [A]. 汛期旱涝预测方法研究 [C]. 北京: 气象出版社, 2000.
- [10] 刘永强, 丁一汇. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响 [J]. 大气科学, 1995, 11(3): 200-208.
- [11] 许武成, 马劲松, 王文. 关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述 [J]. 气象科学, 2005, 25(2): 212-220.
- [12] 王庆, 马倩倩, 夏艳玲, 等. 最近 50 年来山东地区夏季降水的时空变化及其影响因素研究 [J]. 地理科学, 2014, 34(2): 220-228.
- [13] 周华荣, 黄韶华. 对新疆生态环境问题及其对策的若干思考 [J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13(4): 1-8.
- [14] Zhang X, Yang F. RclimDex(1.0) User Manual [M]. Climate Research Branch Environment Canada Downs view, Ontario, 2004.
- [15] 游庆龙, 康世昌, 闫宇平, 等. 近 45 年雅鲁藏布江流域极端气候事件趋势分析 [J]. 地理学报, 2009, 64(5): 592-600.
- [16] Vincent L A, Peterson T C, Barros VR, et al. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000 [J]. Journal of Climate, 2005, 18: 5011-5023.
- [17] 王月华, 李占玲, 赵韦. 疏勒河流域极端降水特征分析 [J]. 水资源研究, 2015, 4(6): 537-545.
- [18] Mann, H B. Nonparametric tests against trend [J]. The Econometric Society, 1945, 13(3), 245-259.
- [19] 唐启义. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [20] 封国林, 龚志强, 支蓉, 等. 气候变化检测与诊断技术的若干新进展 [J]. 气象学报, 2008, 66(6): 892-905.
- [21] 李佳秀, 杜春丽, 杜世飞, 等. 新疆极端降水事件的时空变化及趋势预测 [J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1103-1112.
- [22] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.
- [23] 赵永平, 陈永利. 一百多年来 ENSO 事件分类和 ENSO 循环研究. 海洋湖沼通报, 1998, (3): 7-12.
- [24] 方精云. 吉良龟夫与生态学的发展 [J]. 生态学杂志, 1995, 14(2): 70-75.