

1960—2015 年内蒙古极端气候事件的时空变化特征

雅茹¹, 丽娜², 银山^{1,3}, 包玉海^{1,3}

(1.内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022; 2.东北师范大学

环境学院, 长春 130024; 3.内蒙古自治区遥感与地理信息重点实验室, 呼和浩特 010022)

摘 要:近年来,频发的极端气候事件对社会发展、生态建设以及人类健康造成了很大的危害,对极端气候事件的研究具有极其重要的现实意义。基于内蒙古自治区 47 个代表性气象站点的 1960—2015 年气象日值数据,选取与水热组合、植被生长、农牧业发展息息相关的 14 个极端气候事件相关指数,利用线性趋势、Mann-Kendall 检验、Sen's 斜率法以及空间统计方法,分析了内蒙古地区极端气候事件的时空变化规律。结果表明:56 a 间,内蒙古地区极端温度事件存在显著的年际波动,极端高温指数呈显著上升趋势,极端低温指数呈显著下降趋势,且夜间温度增加幅度大于日间温度的增加幅度;极端气温的空间变化特征不明显,东部极端温度事件的变幅略大于西部地区。极端降水指数总体上呈非显著性下降趋势,表明内蒙古地区降水情况较稳定;就其空间变化规律而言,东部和西部各站点的多降水指数以上升趋势为主,中部地区多以下降趋势为主。

关键词:极端气候事件;变化趋势;时空分布;内蒙古地区

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0106-07

Characteristics of Temporal and Spatial Variation of Extreme Climate Events in Inner Mongolia During the Period 1960—2015

YA Ru¹, LI Na², YIN Shan^{1,3}, BAO Yuhai^{1,3}

(1.Institute of Geography Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2.Department of Environmental Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 3.Key Laboratory of remote Sensing and Geographic Information of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract:In recent years, frequent extreme climate events have caused serious harm to social development, ecological construction and human health. The study on extreme climate events is of great practical significance. 14 extreme climatic indices closely related to the combination of water and heat, the growth of vegetation and the development of agriculture and animal husbandry were calculated based on daily data from 47 meteorological stations during 1960—2015 in Inner Mongolia Autonomous Region. The temporal and spatial variations and future trend of extreme climate events were analyzed by using regression tend, Mann-Kendall test, Sen's slope method and spatial statistical method. The results indicate that there is significant interannual fluctuations in the extreme temperature events in Inner Mongolia during the 56 years, the extreme high temperature index shows a significant upward trend, the extreme low temperature index shows a significant downward trend, and the increase of night time temperature is greater than the increase in the inter-turn temperature; the spatial variation characteristics of extreme temperature are not obvious, and the extreme temperature events in the east are slightly larger than those in the western region; the extreme precipitation index shows the insignificant decline overall, which indicates that the precipitation pattern in Inner Mongolia is relatively stable; in terms of spatial variation, the multi-precipitation index of the eastern and western stations is mainly rising, while it is dominated by the downward trend in the central region.

Keywords:extreme climate events; trends; spatial and temporal distribution; Inner Mongolia

收稿日期:2019-07-01

修回日期:2019-08-17

资助项目:国家自然科学基金重点项目(61631011);科技基础资源调查项目(2107FY101301-4);内蒙古科技财政项目(KCJB2018007)

第一作者:雅茹(1993—),女(蒙古族),内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,研究方向为灾害监测与防治以及干旱区地理。E-mail:493678190@qq.com

通信作者:银山(1963—),男(蒙古族),内蒙古通辽人,教授,博士,主要从事研究灾害监测与防治研究。E-mail:yinshan@imnu.edu.cn

气候条件是人类和动植物赖以生活和生长的基础,气候变化早已成为全球备受瞩目的问题。IPCC第5次评估报告指出,1880年以来全球平均温度已升高 0.85°C ,全球气候系统已呈现出变暖趋势,而20世纪50年代以来的变暖趋势更加明显,自1950年以来极端气候亦发频繁^[1-2]。极端气候引发的热浪、洪涝、干旱、雪灾从而造成的供水供电短缺、交通通信和建筑物受损、农牧业减产以及危害人类健康,给社会发展、国民经济和生态环境造成了巨大的损失和破坏^[3],极端气候事件的研究已成为当今社会的焦点问题。

在全球尺度上,随着日渐变暖的全球气候,以冷夜日数的减少及暖夜日数的增加为主要表现的极端气温变化越发显著^[4]。有关研究显示,近几十年以来在全球众多地区如俄罗斯、亚太、美国东部、大洋洲及欧洲的冷夜日数呈不断减少的趋势,相反暖夜日数则不断攀升^[5-10]。除部分地区存在一定的区域差异性外,全球多数区域表征高温的极端气温指数都呈现不同程度的增加趋势^[11-15]。为了增强公众对中国极端降水事件的认知,近年来国内学者就不同流域、不同省域以及不同自然区域的极端降水事件进行了探索性研究^[16-17],但针对局部地区,特别是生态环境脆弱地区的极端气候事件的变化规律的探究需进一步深化。

内蒙古地区位于受东南季风影响的季风边缘地带,是西北干旱区向东北湿润区和华北旱作农业区的过渡带^[18],也是中国北方温带草原的主体,气候变化十分敏感^[19]。研究表明,极端气候事件会影响草原生态结构、植物群落,进而对草原生态系统生产力以及对碳循环产生负影响^[20]。因此,深刻认识和理解极端气候,研究和掌握其变化规律对内蒙古地区自然生态发展和社会经济进步具有至关重要的现实意义。本文以内蒙古地区47个分布较均匀的国家级气象站1960—2015年的逐日最高气温、最低气温以及降水量数据为基础,分析长达56a的极端气候事件时空演变规律,旨在为草原生态恢复、内蒙古地区社会经济发展以及预防和应对灾害事件的发生提供进一步的理论指导。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区是我国北疆大省,位于 $37^{\circ}24'—53^{\circ}23'\text{N}$, $97^{\circ}12'—126^{\circ}04'\text{E}$,东西绵延2400 km,南北跨度1700 km,全区总面积位列我国第三。内蒙古地域广阔,草原面积大,距离海洋较远,边沿有山脉阻隔,大兴安岭北部地区属于寒温带大陆性季风气候,巴彦浩特—海勃湾—巴彦高勒以西地区属于温带

大陆性气候。年均温为 $-4\sim 9^{\circ}\text{C}$,夏季短促炎热,冬季寒冷漫长,气温年较差可达 $31\sim 45^{\circ}\text{C}$,气温变化剧烈,冷暖悬殊甚大,气温日较差为 $12\sim 16^{\circ}\text{C}$,大风日数多;降水量少且不均匀,年总降水量为 $35\sim 550\text{ mm}$,由东北向西南递减。由东向西从湿润、半湿润地区逐渐过渡到半干旱、干旱区^[21],从东北至西南的植被类型分别为:森林,森林草原,典型草原,荒漠草原,草原沙漠和沙漠。自然气候条件恶劣,以及人为活动的污染和破坏,导致此区域生态环境十分脆弱。

1.2 数据来源及处理

本文所使用的气象数据由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nimc.cn/home.do>)提供。为了确保气象数据时间序列的连续性及准确性,本文选取了具有完整历史记录值的内蒙古地区47个国家级气象台站(图1)1960—2015年的逐日最高气温、最低气温和降水量数据。各站点均匀的分布在研究区内森林,森林草原,典型草原,荒漠草原,草原沙漠和沙漠的不同植被类型带、生态区和小气候区,能够较好的代表研究区整体的气候变化情况。所有站点气象数据在使用前均经过了严格的质量控制,包括极值检验、时间一致性检验和均一化检验、异常值(如最低气温是否大于最高气温)检查。

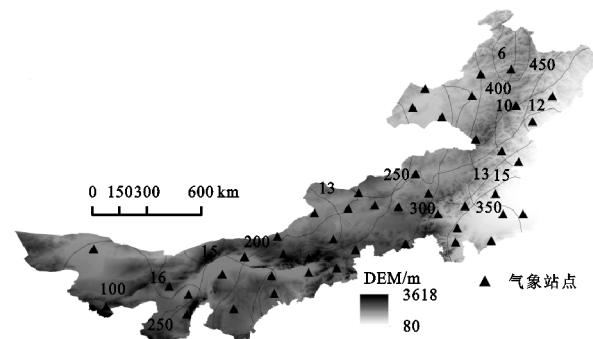


图1 研究区及气象站点分布

1.3 研究方法

1.3.1 极端气候指数 由国际气候诊断与指数专家组(ETCCDMI)确定的“气候变化检测和指标”已经被广泛应用在世界各国极端气候事件的分析研究中^[22-23]。考虑到本文研究区的地理位置和自然环境特征,选取与本研究区植被生长和灾害发生密切相关的8个极端气温指数和6个极端降水指数,其中表示极端高温事件的指数为夏日日数(SU25)、暖昼日数(TX90P)、暖夜日数(TN90P)、暖持续指数(WSDI),表示极端低温事件的指数有霜日日数(FD0)、冷昼日数(TX10P)、冷夜日数(TN10P)、冷持续指数(CS-DI);强降水量(R95PTOT)、年湿期降水总量(PCRPTOT)、普通日降水强度(SDII),5日最大降水(RX5day)表明极端降水事件的强度,持续干燥指数

(CDD)、持续湿润指数(CWD)表明极端降水事件的持续程度,各极端气候指数的具体定义见表 1,在此基础上分析内蒙古极端气候事件的时空演变规律。

表 1 极端气候指数的定义

指数类型	指数	定义	单位
气温指数	夏日日数(SU25)	日最高气温>25℃的日数	d
	暖昼日数(TX90P)	日最高温>90%分位值的日数	d
	暖夜日数(TN90P)	日最低气温>90%分位值的日数	d
	霜日日数(FD0)	一年中日最低温<0℃的日数	d
	冷昼日数(TX10P)	日最高温<10%分位值的日数	d
	冷夜日数(TN10P)	日最低气温<10%分位值的日数	d
	暖持续指数(WSDI)	连续 6 日最高温>90%分位值日数	d
	冷持续指数(CSDI)	连续 6 日最低温<10%分位值日数	d
降水指数	强降水量(R95PTOT)	95%分位值强降水量之和	mm
	年湿期降水总量(PCRPTOT)	一年中湿天降水量总和	mm
	普通日降水强度(SDII)	降水量≥1 mm 的总量与日数之比	mm/d
	5 日最大降水(RX5day)	每月内连续五日的最大降水量	mm
	持续干燥指数(CDD)	日降水量<1 mm 的最长连续日数	d
	持续湿润指数(CWD)	日降水量≥1 mm 的最大持续日数	d

1.3.2 其他研究方法 基于 ArcGIS 10.3 软件对研究区域内 47 个气象站点做泰森多边形分析。通过各站点的影响面积计算出各站点的影响权重,后对各站点加权平均得出整个区域逐年气候指数序列^[25]。

由于单一的线性回归法容易受异常值的干扰,且要求数据在时间尺度上符合正态分布,故本文综合运用线性倾斜估计、Mann-Kendall (MK) 趋势分析和 Sen's 斜率法,利用 MATLAB 软件计算,对极端气候事件的年际变化趋势、各站点长期变化趋势及幅度进行分析^[26-27]。并通过反距离权重空间插值法(IDW)对极端事件的空间变化格局进行研究^[28]。

2 结果与分析

2.1 极端气温事件时空变化

由表 2 和图 2 可知,内蒙古地区极端高温事件指数 SU25, TN90P, TX90P, WSDI 呈显著上升趋势,极端低温事件指数 CSDI, FD0, TN10P, TX10P 呈显著下降趋势。就变化速率而言, TN90P 的上升速率最快,为 3.86 d/10 a, 指数 SU25 和 TX90P 的变化速率为 2.63 d/10 a 和 2.20 d/10 a, 指数 WSDI 较其他指标上升速率略小,仅为 0.90 d/10 a, 极端高温事件的上升情况表明夜间温度的上升对气温增高的贡献率较大;极端低温事件指数下降速率最快的为 FD0, 下降速率为-3.94 d/10 a, 说明内蒙古地区冬季温度的不断增加; TN10P 冷夜日数-3.67/10 a 的下降速

极端气候指数计算方法采用加拿大气象研究中心研究人员 Xuebin Zhang 和 Feng Yang 基于 R 编辑器开发的 RclimDex 1.0 软件^[24]。

率也进一步证实了内蒙古地区夜间温度的上升,指数 TX10P 的下降速率为-1.52 d/10 a, CSDI 指数下降速率较小,变化速率为-0.61 d/10 a。

表 2 内蒙古极端气温指数的 MK 检验

指标	MK-Z 值	Sen's 斜率	趋势
SU25	4.0638**	2.6284	↑
FD0	-7.2866**	-3.935	↓
TX90P	6.3113**	2.2002	↑
TX10P	-4.5444**	-1.5227	↓
TN90P	8.8132**	3.8594	↑
TN10P	-7.951**	-3.6714	↓
WSDI	5.2794**	0.89939	↑
CSDI	-4.0709**	-0.61128	↓

注:“*”和“**”分别通过了 0.05, 0.01 的显著性检验。

由研究区内极端气温事件 MK 检验以及 Sen's 斜率的空间图分布可知,各极端气温指数有较好的一致性,各站点极端高温指数均呈上升趋势,极端低温指数呈下降趋势。SU25 显著上升站点数占 97.9%, 上升速率在 0.74~6.51 d/10 a, 并且区域性差异比较明显,具体表现为自西向东增加的特点,增幅高值区为额尔古纳旗和苏尼特左旗;各站点 TN90P 指数上升趋势均通过了 0.05 水平的显著性检验,增幅为 0.58~5.86 d/10 a, 指数 SU25 的空间变化趋势则相反,西部增幅大于东部; TX90P 指数显著上升站点数占 91.50%, 各站点上升速率差异性不大,在 0.81~2.86 d/10 a 波动;暖持续指数 WSDI 显著上升趋势

站点占 74.5%，但 Sen's 斜率检验未能识别出各站点明显的变化幅度。冷气温指数 FD0, TN10P, TX10P 的下降速率分别在 0.537~7.499 d/10 a, 0.340~6.819 d/10 a, 0.579~2.810 d/10 a, FD0 指数下降速率最快的站点为临河区, 且 97.9% 的站点呈显著下降

趋势。TN10P 指数下降速率最快的站点为乌兰浩特市、临河区、化德县, 下降速率均在 6.15 d/10 a 以上; TX10P 指数所有站点均呈显著下降趋势。CSDI 指数 46 个站点均为下降趋势, 但 Sen's 未能识别其的下降速率。

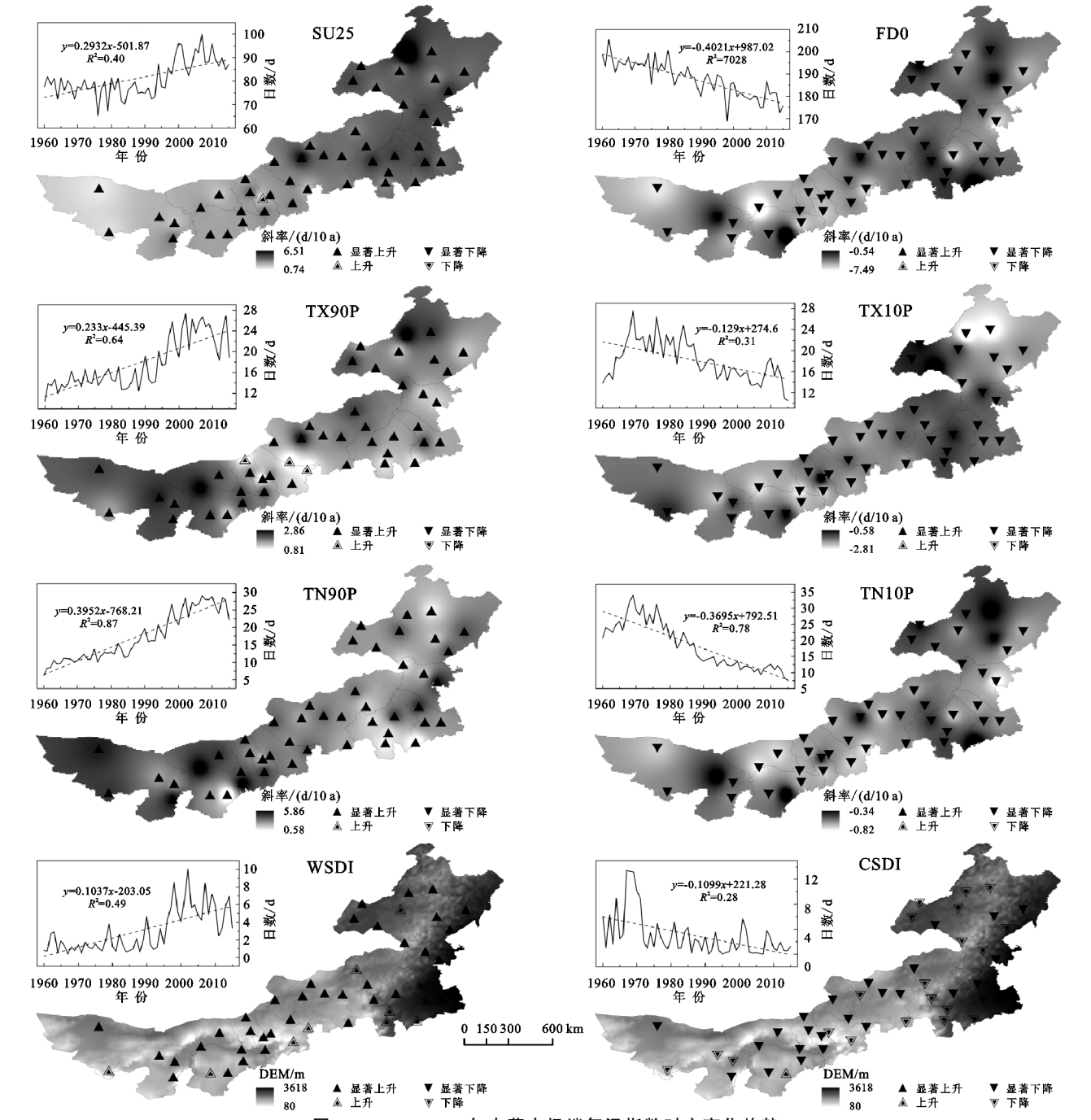


图 2 1960—2015 年内蒙古极端气温指数时空变化趋势

2.2 极端降水事件时空变化

相比极端气温事件而言, 极端降水各指数变化幅度较小。由图 3 可知, 指数 CDD, CWD, R95 PTOT, RX5day 都存在小幅度下降; PRCPTOT(年时期降水总量)呈不显著的上升趋势; SDII 指数趋于平稳状态。极端降水事件各指数的 MK 检验与 Sen's 斜率与线性趋势

一致, 其中只有 CDD 指数通过显著性检验呈显著下降趋势, 下降速率为 3.311 d/10 a, PRCPTOT 指数小幅度增长, 增长速率为 1.197 d/10 a(表 3)。

由图 3 可以看出, 极端降水事件各指数有较明显的空间差异。SDII 指数呈上升和下降趋势的站点分别占 55.32% 和 44.68%, 其最大值分别位于西部和

北部;RX5day 指数各站点变化趋势总体上以下降为主,其中乌审召、通辽市、开鲁县、扎鲁特旗、新巴尔虎右旗呈显著下降趋势;R95PTOT 指数的变化幅度为-10.845~8.571 4 mm/10 a,通辽以及鄂尔多斯两个盟市的下降速率最快;PRCPTOT 指数各站点变化趋势有比较明显的南北分异特征,北部呈上升趋势,南部呈下降趋势,其中上升的站点较多,占 68.09%,上升幅度最大的区域为东北部地区,幅度为 13.179 mm/10 a。表示极端降水时间持续性的指数 CDD 各站点变化趋势以下降为主,呈下降趋势的站点达 89.36%,其中 33.33%的站点呈显著下降趋势,研究区内仅中南小部分地区呈上升趋势;持续湿润指数 CWD 北部站点多为上升趋势,南部站点多为下降

趋势,下降趋势的站点数达 61.70%,但 Sen's 斜率检验未能识别出各站点明显的变化幅度。总体而言,极端降水事件存在明显的空间变化规律,东部和西部各站点的多降水指数以上升趋势为主,中部地区多以下降趋势为主。

表 3 内蒙古极端降水指数的 MK 检验			
指标	MK-Z 值	Sen's 斜率	趋势
SDII	-0.10601	-0.0070678	↓
RX5day	-0.24736	-0.1249	↓
R95PTOT	-0.38871	-0.34487	↓
PRCPTOT	0.50179	1.1967	↑
CDD	-2.3676 **	-3.3111	↓
CWD	-1.1803	-0.047364	↓

注:“*”和“**”分别通过了 0.05,0.01 的显著性检验。

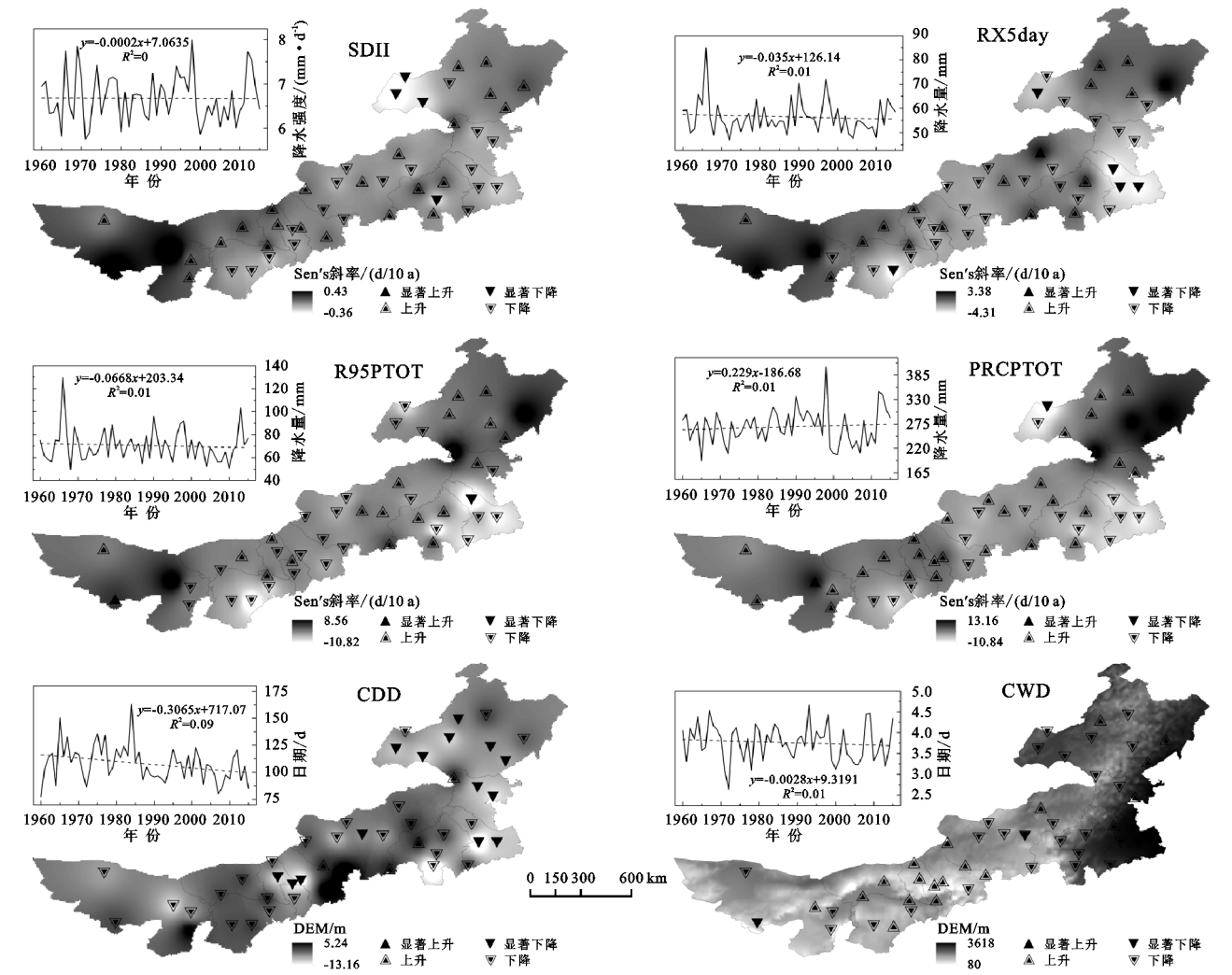


图 3 1960—2015 年内蒙古极端降水指数时空变化趋势

3 讨论

总体而言,气候变暖已成为内蒙古地区的主要特征,对松嫩草地^[29]、西北地区^[30]、珠江流域^[31]的极端气温事件的研究结果也表明各地区极端气温冷事件

的减少以及极端气温暖事件的增加。并且夜间温度冷指数的下降和暖指数的升高均大于日间冷暖指数的变化,故夜间温度的升高对气候变暖的贡献率更大,这与白美兰^[32]等研究结果相同,另有研究结果表明,导致这一变化是由于冬季温室气体的辐射强迫效

应增强而造成大幅度的升温^[33]。极端降水指标变化幅度较小。PRCPTOT 指数呈不明显的上升趋势,说明该地降水总量有小幅度增加,且是由于降水持续时间的增加所致;降水的增加意味着干旱程度的下降,东部和西部各站点 CDD 指数在 56 a 年间的下降趋势也进一步证实了内蒙古东西部持续干燥程度有所下降。

植被对于气候变化的响应尤为敏感。内蒙古地区作为湿润、半湿润和半干旱、干旱的过渡带、农业牧业交错带和生态环境脆弱区,极端降水对羊草群落地上生物量以及大针茅地上生物量有显著的影响,极端高温的增加会导致群落以及大针茅地上生物量的降低^[34]。整体而言,极端降水指数与内蒙古地区 NDVI 均值有较强的相关性,故水分条件仍是内蒙古地区植物生长的主要影响因素^[35]。

本文对研究区极端气候事件的时空演变规律做出了详细的分析,研究结果对于干旱半干旱区的生态恢复、经济发展、社会进步等方面的研究有一定的参考意义。王翌等^[36]的研究结果表明经纬度和坡度对各极端气候事件的空间分布有较强的相关性,ENSO 事件(厄尔尼诺—南方涛动事件)、NAOI 指数(北大西洋涛动指数)、AO 指数(北极涛动指数)是极端气候事件驱动因素之一^[37-39],且人为因素,如城市化进程的加快对极端高温事件的变化也存在一定的影响^[40-41],故极端气候事件的影响因素将在未来的研究中进行更加深入的探讨。

4 结论

1960—2015 年,内蒙古地区表征高温的极端气温事件的 SU25, TN90P, TX90P, WSDI 指数呈显著上升趋势;表征极端气温事件各冷指标 CSDI, FD0, TN10P, TX10P 呈显著下降趋势。并且 TN90P 的加速率、TN10P 的下降速率均大于 TX90P 和 TX10P,表明夜间温度增加幅度大于日间温度的增加幅度。总体而言,内蒙古地区东部极端温度事件的变化幅度大于西部地区。

极端降水指标变化幅度不明显,表明内蒙古地区降水情况较稳定, CDD 指数的下降速率高于 CWD 指数的下降速率,表明内蒙古地区持续干燥程度有所缓解。极端降水事件各指数有较明显的空间差异,东部和西部各站点的 SDII, RX5day, R95PTOT, PRCPTOT 指数以增加趋势为主, CDD 在东西部地区则以下降趋势为主。总体上,极端降水事件存在明

显的空间变化规律,东部和西部各站点的多降水指数以上升趋势为主,中部地区多以下降趋势为主。

参考文献:

- [1] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [2] 罗亚丽. 极端天气和气候事件的变化[J]. 气候变化研究进展, 2012, 08(2): 90-98.
- [3] 任国玉, 陈峪, 邹旭恺, 等. 综合极端气候指数的定义和趋势分析[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 354-364.
- [4] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3): 417-426.
- [5] Gruza G, Rankova E, Razuvaev V, et al. Indicators of climate change for the Russian Federation[J]. Climatic Change, 1999, 42(1): 219-242.
- [6] Choi G, Collins D, Ren G, et al. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955—2007[J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2009, 29(13): 1906-1925.
- [7] Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. maximum and minimum temperature trends for the globe[J]. Science, 1997, 277(5324): 364-367.
- [8] Plummer N, Salinger M J, Nicholls N, et al. Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth century [J]. Climatic Change, 1999, 42(1): 183-202.
- [9] 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: Atmospheres, 2006, 111(5): 1042-1063.
- [10] Klein Tank A M G, Können G P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946—1999[J]. Journal of Climate, 2003, 16(22): 3665-3680.
- [11] Abatan A A, Abiodun B J, Lawal K A, et al. Trends in extreme temperature over Nigeria from percentile-based threshold indices[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(6): 2527-2540.
- [12] Fonseca D, Carvalho M J, Marta-Almeida M, et al. Recent trends of extreme temperature indices for the Iberian Peninsula[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2016, 94: 66-76.
- [13] Goubanova K, Li L. Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensem-

- ble of future climate scenario simulations[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(1/2): 27-42.
- [14] Almazroui M, Islam M N, Dambul R, et al. Trends of temperature extremes in Saudi Arabia[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 808-826.
- [15] Zhang X, Vincent L A, Hogg W D, et al. Temperature and precipitation trends in Canada during the 20 th century[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2000, 38(3): 395-429.
- [16] 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.
- [17] 董旭光, 顾伟宗, 孟祥新, 等. 山东省近 50 年来降水事件变化特征[J]. *地理学报*, 2014, 69(5): 661-671.
- [18] 刘泓志, 肖长来, 张岩祥, 等. 内蒙古 50 余年降水量分布演变特征及趋势[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(2): 74-78.
- [19] 银山, 香宝, 雷军, 等. 内蒙古自然灾害综合分区与评价[J]. *资源科学*, 2002, 24(3): 31-35.
- [20] 张彬, 朱建军, 刘华民, 等. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(9): 1008-1018.
- [21] 李慧静, 包玉海, 包刚, 等. 基于 MODIS-NDVI 的内蒙古植被变化遥感监测[J]. *测绘科学*, 2009, 34(5): 25-27.
- [22] Soltani M, Laux P, Kunstmann H, et al. Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 126(3/4): 775-795.
- [23] Peterson T, Folland C, Gruza G, et al. Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs [M]. Geneva: World Meteorological Organization, 2001.
- [24] Zhang X, Yang F. RCLimDex(1.0) user manual[R]. Climate Research Branch Environment Canada, 2004.
- [25] Aurenhammer F. Voronoi diagrams: A survey of a fundamental geometric data structure[J]. *Acm Computing Surveys(Csur)*, 1991, 23(3): 345-405.
- [26] Han L, Xu Y, Yang L, et al. Changing structure of precipitation evolution during 1957-2013 in Yangtze River Delta, China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(8): 2201-2212.
- [27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 36-56.
- [28] Ashraf M, Routray J K. Spatio-temporal characteristics of precipitation and drought in Balochistan Province, Pakistan[J]. *Natural Hazards*, 2015, 77(1): 229-254.
- [29] 马齐云, 张继权, 来全, 等. 1960—2014 年松嫩草地极端气候事件的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1769-1778.
- [30] 齐月, 陈海燕, 房世波, 等. 1961—2010 年西北地区极端气候事件变化特征[J]. *干旱气象*, 2015, 33(6): 963-969.
- [31] 黄强, 陈子桑. 全球变暖背景下珠江流域极端气温与降水事件时空变化的区域研究[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(8): 956-967.
- [32] 白美兰, 郝润全, 李喜仓, 等. 1961—2010 年内蒙古地区极端气候事件变化特征[J]. *干旱气象*, 2014, 32(2): 189-193.
- [33] Aguilar E. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955—2006[J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114: D02115.
- [34] 刘俊英. 内蒙古地区近 43 年极端天气气候事件变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014.
- [35] 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]. 西安: 长安大学, 2012.
- [36] 王翌. 地形和季风因素对华北极端气候事件时空变化特征的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [37] 李玮, 段利民, 刘廷玺, 等. 1961—2015 年内蒙古高原内陆河东部流域极端降水时空变化特征分析[J]. *资源科学*, 2017, 39(11): 2153-2165.
- [38] 刘慧芝. 西北干旱区极端气候事件变化及其对北大西洋涛动指数的响应[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2016.
- [39] 陈建宇, 赵景波. 1960—2014 年内蒙古极端天气事件趋势分析[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(5): 997-1009.
- [40] 刘俊英, 刘华民, 王伟, 等. 内蒙古地区近四十年极端天气气候事件变化研究[J]. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 2015, 46(4): 400-408.
- [41] 杨续超, 陈葆德, 胡可嘉. 城市化对极端高温事件影响研究进展[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(10): 1219-1228.