

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20220522.001.

尚天赦, 王飞, 戈文艳. 基于 GLDAS-2 数据的中国极端降水事件时空变异性研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 248-255.

SHANG Tianshe, WANG Fei, GE Wenyan. Research on the Spatiotemporal Variability of Extreme Precipitation Events in China Based on GLDAS-2 Data[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 248-255.

基于 GLDAS-2 数据的中国极端降水事件 时空变异性研究

尚天赦¹, 王飞^{1,2}, 戈文艳^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:全球气候变化导致极端降水事件频发,为了做好应对极端事件的准备,利用 GLDAS-2.0 数据集进行可靠性分析后,提取 9 个极端降水指标,使用 M-K 检验方法分析了 1948—2014 年中国极端降水事件时空变化特征及其突变趋势。结果表明:全国发生极端降水事件的频率增高,西北、西南和中南地区的年降水量增强趋势明显,连续湿润天数变少,强降水变多,其中西北地区变化最为明显;西北地区中西部,中南与西北、华东的两个交界范围,极端降水相关指标突变趋势明显。结果显示西北地区中西部,西南和中南交界地区以及中南和华东交界地区发生极端降水的频率高,应提前做好应对各种自然灾害的准备。

关键词:极端降水事件; GLDAS; M-K 趋势分析; 空间分布

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0248-08

Research on the Spatiotemporal Variability of Extreme Precipitation Events in China Based on GLDAS-2 Data

SHANG Tianshe¹, WANG Fei^{1,2}, GE Wenyan^{1,2}

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: Global climate change leads to frequent occurrences of extreme precipitation events. In order to prepare for countermeasure to extreme events, 9 extreme precipitation indicators were extracted based on reliability analysis using the GLDAS-2.0 data set, and the M-K test was used to analyze the traits of the extreme precipitation in China from 1948 to 2014. The results show that the frequency of extreme precipitation events over the country had been increasing, and the apparent increases in the amounts of precipitation were observed in annual precipitation in the northwest, southwest and central and southern regions, and changes in the consecutive wet days and heavy precipitation showed that the consecutive wet days in northwest China decreased significantly while the heavy precipitation increased; in the border of central and western China, central and southern China, northwest and east China, extreme precipitation indicators were obviously abrupt. With respect to the high frequency of extreme precipitation in the central and western regions of northwest China, the junction of southwest and central south and the junction of central south and east China, preparations for combating various natural disasters should be made in advance.

Keywords: extreme precipitation events; GLDAS; M-K trend analysis; spatial distribution

收稿日期:2021-09-04

修回日期:2021-12-02

资助项目:国家自然科学基金面上项目“黄土高原刺槐林地根系挤压对土壤物理性状的影响”(42177344),“次降雨特征与植被变化对半干旱黄土区土壤水分补充的协同影响”(41771558);中国科学院国际伙伴计划“气候变化对阿根廷水土资源影响评估与综合适应对策研究”(16146KYSB20200001)

第一作者:尚天赦(1995—),男,河南省汝阳人,硕士研究生,研究方向为水土保持效益评价。E-mail: sts489520189@qq.com

通信作者:王飞(1971—),男,陕西省户县人,研究员,博士生导师,主要从事水土保持环境效应评价与流域综合管理研究。E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn

戈文艳(1990—),女,四川遂宁人,助理研究员,主要从事遥感研究。E-mail: gewenyan@nwafu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

据 IPCC 发布的第六次报告,2001—2020 年全球平均温度比 1850—1900 年平均值高 0.99°C ^[1]。在全球变暖的背景下,极端气候事件发生的概率和强度持续增加,影响范围更加广泛^[2-6]。极端气候事件是指在某个特定时间段内,某类气候要素量值或统计值偏离其原有的平均状态,达到或超过统计量值区间上下限附近特定阈值的事件^[7]。极端降水是极端气候事件的一种具体表现形式,极端降水加剧对本就脆弱的生态环境影响,不仅造成洪涝、崩塌、滑坡、泥石流等灾害事件频发,而且对生态环境的恢复和国民经济发展造成巨大的伤害,严重威胁着人类生命生产安全^[8]。因此,研究极端降水事件的变化对做好地区自然灾害的预警,尤其是洪涝灾害的预警显得尤为重要。

已有研究表明,在气候变暖的背景下,中国发生的极端降水事件呈增多趋势,其中极端降水量增加最多的是华东地区,极端降水日数增加最快的是西北地区^[9-11]。然而,现有的相关研究主要集中于局部地区的极端降水变化,关于大范围内极端降水事件时空变化规律的研究较少^[12-13]。虽然目前认为气象站点数据是最精准的数据,但气象站的观测范围有限,站点数据欠缺代表性,难以代表整个研究区的情况。为了降低由某地区某一气象站点代表该地区整体情况的误差,从而更加完整全面地研究极端降水事件,利用模拟气象数据进行的研究已经越来越多,包括 TRMM^[14]、GCPP^[15]、PERSIANN-CDR^[16]、CHIRPS^[17]、CMFD 等^[18]数据集均有应用,这些数据集记录时间较短,难以进行长期的研究分析。全球陆地数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)的输出产品分辨率高,获取不同地区降水时空特征较为方便,有利于长期频率分析,可以为气象缺测地区提供数据参考,在中国已经经过适宜性评估^[19-21],同时在中国已经有相对广泛的应用^[22-23]。而且,相较于其他模拟产品而言,GLADS 数据更准确,也更加接近气象站点的数据^[22,24]。因此,为了研究大范围内的极端降水变化,本研究使用覆盖全区域更精确和高分辨率网格数据 GLDAS 数据集,对极端降水事件发生的频率和变化趋势进行讨论和研究。

1 研究数据和方法

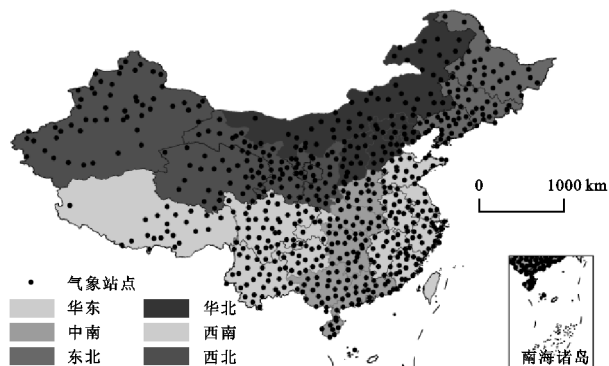
1.1 数据来源

研究使用来自美国宇航局(NASA)、美国海洋和大气局(NOAA)联合开发的 GLADS(Catchment Land Surface Model)-2.0 数据集的降水数据,该版本时间跨度为 1948—2014 年,数据的空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ^[25]。

1.2 方法

将整个中国作为研究区,中国位于欧亚大陆东

部,地形复杂,气候类型多样。因为中国跨度大,地域广阔,为了方便进行分析,根据中国科学院地理所的划分,将全中国分为 6 个区域,分析各个部分的不同指标的变化情况(图 1)。



注:本文所用地图审图号为 GS(2016)2556 号,底图无修改。下图同。

图 1 区域界线划分及气象站点分布^[26]

在对 GLDAS 数据进行计算之前,为确保 GLDAS-2.0 数据集的可靠性,使用中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)与 GLDAS 数据进行相关性分析,以确保 GLDAS 数据的可信度。利用焦俏等的评价方法^[27-28],提取 GLDAS-2.0 数据集的多年平均降水,与气象站点数据进行相关性分析。除去异常值,无数据和难以进行分析的站点后,选择 1961—2014 年 628 个站点的数据为基础观测数据(图 1),与 GLDAS-2.0 数据进行相同年限内的数据相关性分析计算。结果表明,GLDAS 数据与站点数据具有极高相关性,表明 GLDAS-2.0 数据在中国地区进行极端降水计算研究的可靠性很高(图 2)。

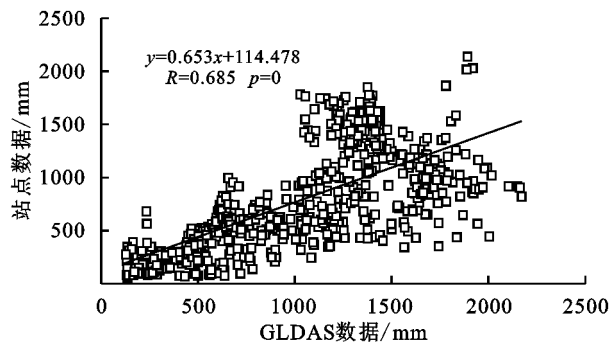


图 2 GLDAS 数据和站点数据的相关性分析

利用 MATLAB 2016 软件对 GLADS-2.0 数据进行处理,得到 1948—2014 年的日降水量数据。中国国家气象局将 24 h 内降水量超过 50 mm 的事件定义为暴雨^[29]。本文在此基础上进一步细化,分别以 24 h 内降水量超过 20 mm(R20),30 mm(R30),50 mm(R50)和 100 mm(R100)为不同指标,来对研究区内降水情况进行分析。根据计算分析,发现 R30 指标与 R20 指标分析结果相似,R100 指标在研究区内变化程度太小可以忽略不

计,所以正式研究时只使用 R20 和 R50 这两个指标。同时,结合气候变化探测和指数联合专家组(ETCCDI)推荐的指标,共选取 9 个极端降水指标(表 1)^[30-34],研究中国的极端降水事件时空变异性。R20 和 R50, Rx1day 和 Rx5day, R95p 和 R99p 这三组指标分别代表

降水绝对指数、降水强度指数、降水阈值指数^[35],降水绝对指数表示降水较多时的极端降水变化,强度指数和阈值指数能反映强度和极端降水的关系,这些指数之间相互影响相互联系^[36]。在计算 R95p 和 R99p 这两个指标时,每一个格点内的数据都参与了计算。

表 1 本研究使用的极端降水指标定义

指数	缩写	定义	单位
最大 1 日降水量	Rx1day	年内 1 日降水量最大值	mm
最大 5 日降水量	Rx5day	年内最大的连续性 5 日降水总量	mm
强降水量	R95p	日降水量大于 95 百分位阈值的降水量总和	mm
极端强降水量	R99p	日降水量大于 99 百分位阈值的降水量总和	mm
日降水强度	SDII	年降水量除以年降水日数	mm/d
持续降水日数	CWD	日降水量大于 1 mm 持续日数的最大值	d
日降水量≥20 mm 天数	R20	日降水量大于或等于 20 mm 的日数	d
日降水量≥50 mm 天数	R50	日降水量大于或等于 50 mm 的日数	d
总降水量	PRCPTOT	年降水量的总和	mm

利用 M-K 分析对表 1 所列的 9 个指标进行分析,来检验这些极端降水指标的突变性。M-K 趋势作为非参数检验方法,对异常值不敏感而被广泛应用于气温降水及水文序列等连续性时间序列的趋势变化分析和显著性检验研究中^[9,37-38]:

假设有一时间序列: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$,其趋势检验统计量公式是:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sign}(X_i - X_j)$$

式中:sign()为符号函数。当 $(X_i - X_j) < 0$ 、 $= 0$ 或 > 0 时,sign($X_i - X_j$)分布为-1,0 或 1;Mann-Kendall 统计量 Z 值计算公式为:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}} & S>0 \\ 0 & S=0 \\ (S+1)/\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}} & S<0 \end{cases}$$

通过 M-K 分析得到的 Z 值表示显著性趋势,根据 Z 值正负来表示极端降水指标的趋势显著性变化。当 Z 为正值时表示上升增加趋势,负值时表示下降减少趋势。Z 的绝对值在大于等于 1.64,1.96, 2.56 时表示分别通过了置信度 90%,95%,99%显著性检验。

本研究将整个中国作为研究区,中国位于欧亚大陆东部,地形复杂,气候类型多样。因为中国跨度大,地域广阔,为了方便进行分析,根据中国科学院地理所的划分(图 1),将全中国分为 6 个区域,分析各个部分的不同指标变化情况。

2 结果和分析

2.1 极端降水的空间分布特征

通过图 3 和图 4 可以看出,1948—2014 年中国年均降水量总体上呈现出西北少,华东及中南南部多的空间分布特征,其中华东和中南地区降水量较多,最高达 2 100 mm 以上;西北和华北降水量较低,东北地区降水量大小较为均匀,年均降水量最低的地区出现在西北的中西部地区,最低可至 1 mm;SDII 平均值大的地方分布主要集中在中南、华东局部和西南少部分地区,西北地区该指标平均值小,表明西北地区降水时间少,降水量也不多,华东和中南地区的情况则正好与西北相反。西南地区的 CWD 较高,其中在西南边界区域的 CWD 可以达到 111 d,表示该地区全年超过 3 个月以上的时间都有降水;而西北和华北的持续降水日数最低的平均为 0.019 d,即基本不存在连续降水的情况。

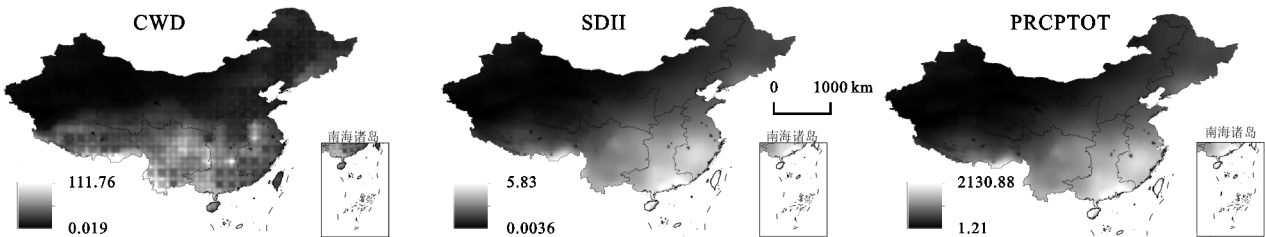


图 3 1948—2014 年中国 CWD,SDII,PRCPTOT 指标平均值空间分布

从图 5,6 可知,三组指标平均值在各个区域内的分布相似。在中南和华东地区降水绝对值、降水强度和降水阈值均高,而在西北地区这三组指标的平均值低,在东北地区这三组指标的平均值集中在一定

范围内。这与 PRCPTOT 指标的空间分布一致,说明过去的一段时间内,中国的降水仍然很不均衡,华东中南沿海地区降水多西北内陆地区降水少的情况没有变化。

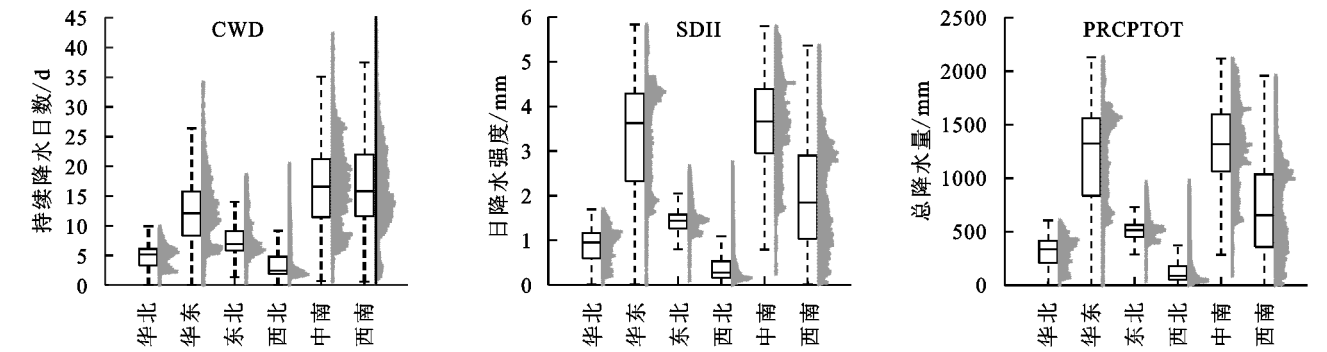


图 4 1948—2014 年中国 CWD,SDII,PRCPTOT 指标平均值在不同区域的分布

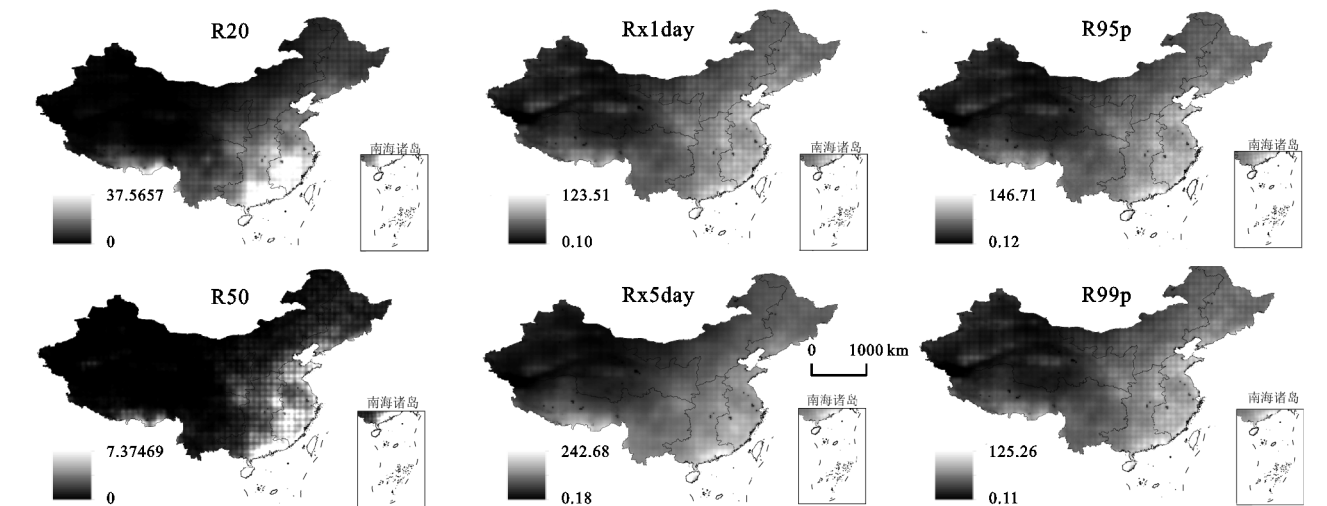


图 5 1948—2014 年中国 6 种极端降水指标平均值空间变化情况

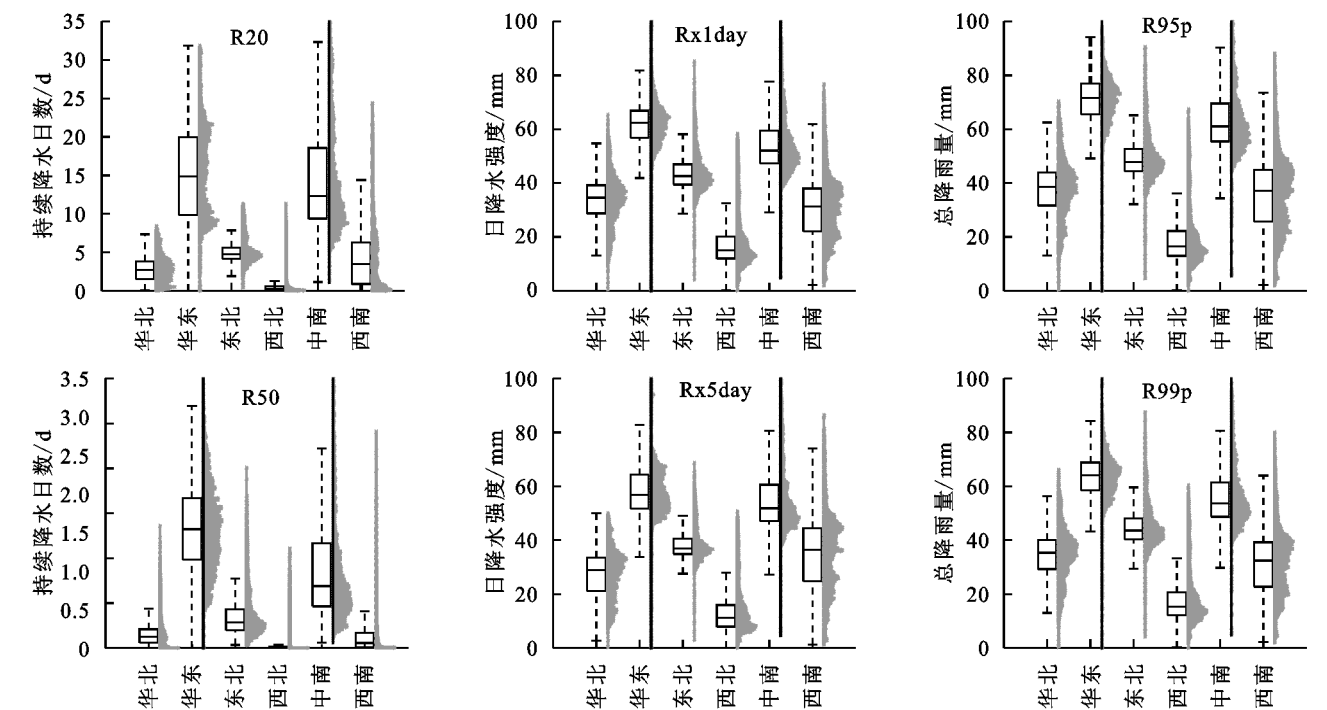


图 6 1948—2014 年中国 6 种极端降水指标在不同区域的分布情况

综合来看,各个极端降水指标的平均值总体上呈现华东高西北低的情况。华东及中南沿海地区因为地处热带及亚热带,再加上台风等自然灾害的影响,所以降水较为频繁;西北地处内陆,降水量逐年增加,然而就各个极端降水指标的平均值来看,判断极端降水事件的发生与否比较困难。因此,本文使用 M-K 趋势分析以便于进一步判别极端降水指标值较低地区发生极端降水事件的趋势变化。

2.2 极端降水事件时空变化趋势

从图 7,8 可知,在全国大部分地区,CWD 呈现出减弱的趋势,其中在华东和华北地区有 20%左右的区域呈现显著性减弱的趋势($p<0.1$),表明全国范围内,持续降水日数会持续减少。

从 PRCPTOT 和 SDII 的变化情况来看,华东、华北和东北的大部分区域均呈现减弱趋势,其中华北地区 SDII 指标有将近 30%区域显著降低($p<0.1$),

PRCPTOT 指标有将近 15%区域趋势显著降低($p<0.1$),表明华北的年降水量随时间变化持续减少,日降水强度呈现减弱趋势;此外在西北、中南和西南地区有 20%左右的区域呈现出增加趋势($p<0.1$),这些地区的年降水量随时间变化有所增加,日降水强度逐年变强。

中南地区有 20%左右的区域 Rx1day 指标呈现显著性增强的趋势($p<0.05$),在西北中部、中南北部,华东、东北和西南的少数地区达到了 99%的显著增加的变化趋势,表明这些地区日降水量持续增加。Rx5day 在华北、华东和东北地区显著性增强($p<0.05$)的区域较少,西北、中南和西南地区显著性增强($p<0.05$)的区域较多,其中在西北西部地区变化比较显著($p<0.01$),表明这些地区的连续日降水量值逐年增加。就整体而言,强度指标在西北、中南、华北和西南地区显著增强,表明这些地区的降水变多。

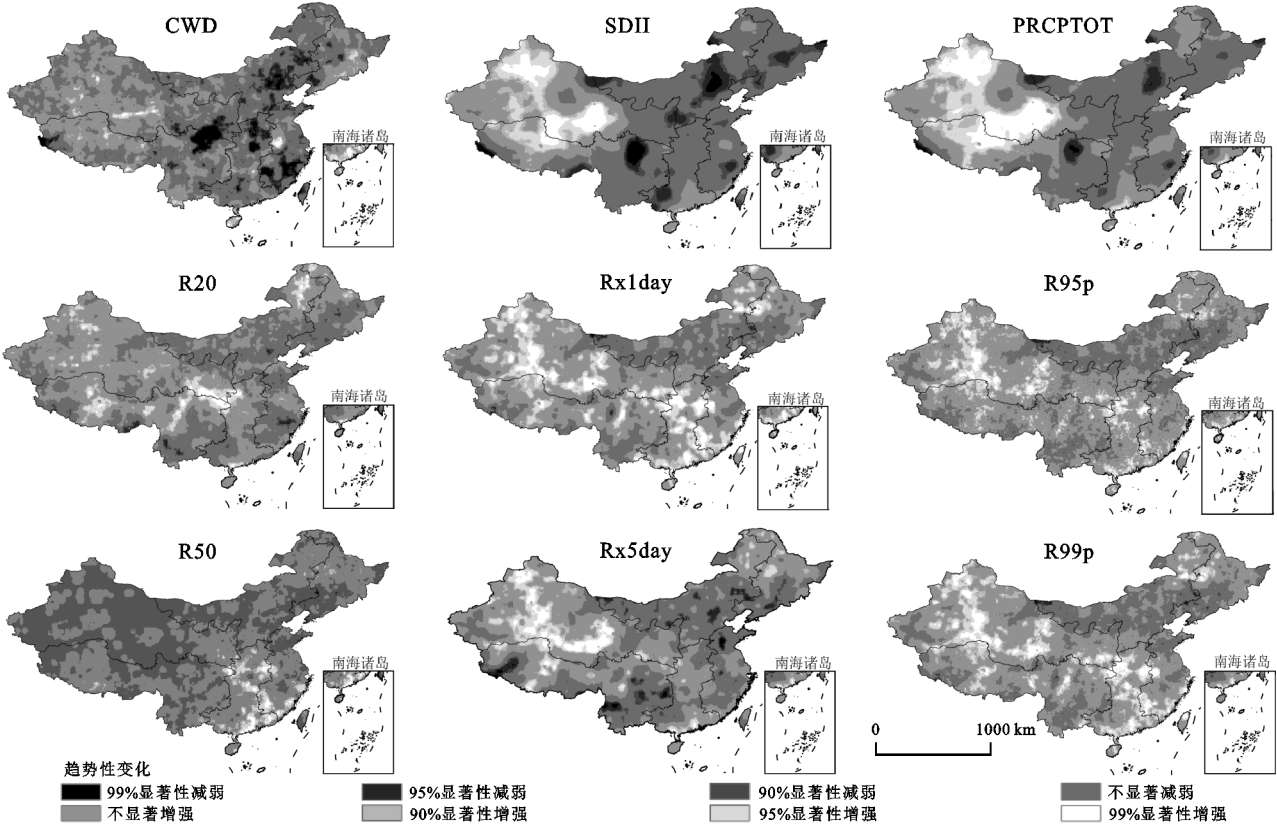


图 7 1948—2014 年中国不同极端降水指标趋势性变化

R95p 和 R99p 发生变化显著增强($p<0.1$)的地区广泛分布在中国的中南、西北和西南地区。而 R95p 在中南和华东地区比 R99p 突变更加显著,R99p 在西北、中南和西南地区发生极端强水量降水事件的突变性比 R95p 更高。R20 指标在西南、西北和中南地区出现显著性增强($p<0.1$)的区域占本地区面积的 9%左右,其中在西南、西北和中南的交界处则表现出

显著性增强趋势($p<0.01$)。

R50 指标在全国大范围呈现增强趋势($p<0.1$),除华北地区外,其他地区有 5%左右的地区呈现显著性增强趋势($p<0.05$),其中在西南、西北和中南的交界处,中南和华东交界处,中南地区南部和华东地区南部增强显著性可达到 99%。这些情况说明西北、中南和西南地区的极端强降水量会逐年增多,降水绝

对指数不断增强, 各个地区存在少数区域出现变化趋势减弱的情况, 即这里极端降水事件地区分布多, 强降水容易出现且分布广泛。R20 和 R50 呈现显著性

减弱趋势($p < 0.01$)的地区分布较少, 降水绝对指数在全中国减少的地区基本不存在, 反映全中国降水强度一直变大。

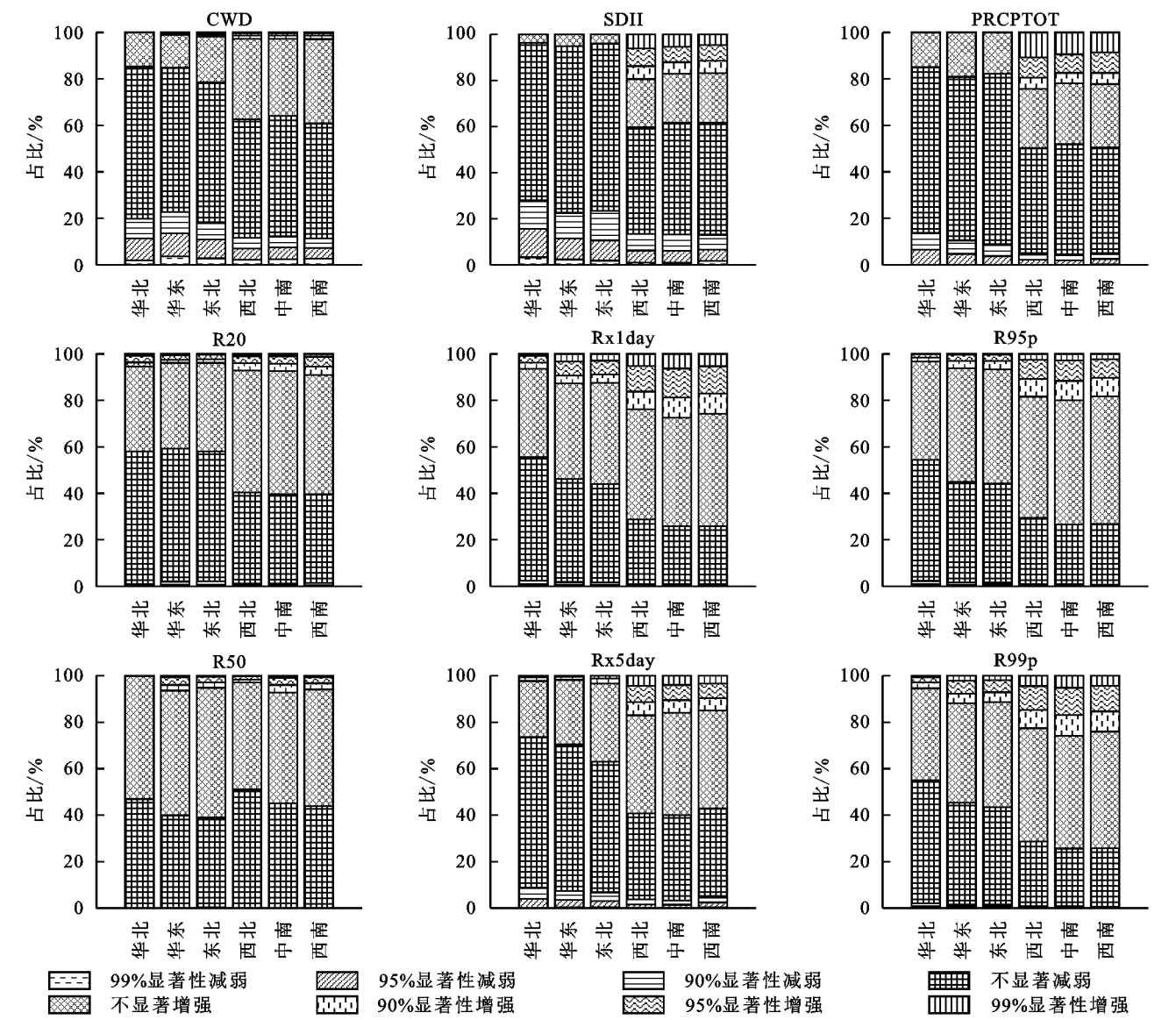


图 8 1948—2014 年中国不同极端降水指标趋势性变化在各地的占比

综上所述, 虽然 CWD, SDII 和 PRCPTOT 这三项指标在全国范围内变化呈现减弱趋势, 但降水绝对指标在全国的大部分地区呈现出增强趋势, 强度指标在西北、中南、西南地区超过 50% 以上区域呈现增强趋势, 阈值指标同样在西北、中南、西南地区大部分区域(70%左右)呈现增强的趋势, 表明全国发生极端降水事件的频率增高, 在西北、中南、西南地区出现了连续湿润天数变少, 强降水变多的情况, 使得降水逐渐集中, 趋于极端化。这种变化在其他人的研究中也有所体现^[10,39-40]。

极端降水事件作为短历时的强降水现象, 结合不同降水指标的平均值和 M-K 分析, 西北地区的降水强度指标、绝对指标和阈值指标呈现明显增强趋势,

表明西北地区发生极端降水的现象越来越多, 这与其他研究结论一致, 可能是西北地区所处的地理位置和全球变暖的外部环境因素所导致^[41-43]。中南北部和中部, 主要指其与西北地区、华东地区的交界处, 绝对指标、强度指标和阈值指标变化增强趋势($p < 0.1$)明显, CWD, SDII, PRCPTOT 指标减弱趋势($p < 0.1$)明显, 表明这里发生极端降水事件的可能性会大大加强^[34,44], 这也与秦岭淮河以南地区极端降水相关结论相似^[23,45-46]。

3 结论

(1) 全国发生极端降水事件的频率增加, 西北、西南和中南地区的年降水量增强趋势($p < 0.1$)明显,

日降水强度逐年增加,连续湿润天数变少,强降水变多,西北地区变化最为明显。

(2) 西北地区中西部的降水强度指标、绝对指标和阈值指标呈现明显增强趋势($p < 0.1$)。中南地区北部和中部,主要指其与西北地区、华东地区的交界处,绝对指标、强度指标和阈值指标变化增强趋势($p < 0.01$)明显,CWD,SDII,PRCPTOT 指标减弱趋势($p < 0.01$)明显,表明这些地区发生极端降水事件的可能性高。

极端降水的发生是各种气候现象综合的结果,之后对大尺度范围的极端降水进一步研究时,应该考虑其他气象因素,如可以结合环流季风的变化来进行细化研究,但大尺度区域的环流季风情况较为复杂,需要分不同情况进行讨论。在未来,应该在西北地区中西部(新疆中部、青海中部),西北和中南交界处(湖北、河南、陕西交界地区),中南和华东交界处(河南、安徽交界处),提前做好因短历时强降水而出现的洪涝灾害的预警。

参考文献:

- [1] Sixth Assessment Report[EB/OL]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [2] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for Rainfall Rates and Climate Change[J]. *Climatic Change*, 1998,39(4):667-694.
- [3] Mackay A. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008,37(6):2407.
- [4] 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(D5):1-22.
- [5] Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. Increasing Trend of Extreme Rain Events Over India in a Warming Environment[J]. *Science*, 2007,314(5804):1442-1445.
- [6] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.1965—2013年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异[J].*地理研究*, 2016,35(4):639-652.
- [7] 郑景云,郝志新,方修琦,等.中国过去2000年极端气候事件变化的若干特征[J].*地理科学进展*, 2014,33(1):3-12.
- [8] Liu Min et al. Changes in Precipitation and Drought Extremes over the Past Half Century in China[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(4):203-203.
- [9] 卢珊,胡泽勇,王百朋,等.近56年中国极端降水事件的时空变化格局[J].*高原气象*, 2020,39(4):683-693.
- [10] 陈星任,杨岳,何佳男,等.近60年中国持续极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J].*长江流域资源与环境*, 2020,29(9):2068-2081.
- [11] 贺冰蕊,翟盘茂.中国1961—2016年夏季持续和非持续性极端降水的变化特征[J].*气候变化研究进展*, 2018,14(5):437-444.
- [12] 孔锋,史培军,方建,等.全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J].*灾害学*, 2017,32(2):165-174.
- [13] 孙鹏,肖名忠,张强,等.水文气象极值事件研究进展[J].*武汉大学学报:理学版*, 2018,64(1):28-36.
- [14] Zhang Y, Hong Y, Wang X, et al. Hydrometeorological Analysis and Remote Sensing of Extremes: Was the July 2012 Beijing Flood Event Detectable and Predictable by Global Satellite Observing and Global Weather Modeling Systems? [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015,16(1):381-395.
- [15] Basheer M, Elagib N A. Performance of satellite-based and GPCC 7.0 rainfall products in an extremely data-scarce country in the Nile Basin [J]. *Atmospheric Research*, 2018,215:128-140.
- [16] Gao F, Zhang Y, Chen Q, et al. Comparison of two long-term and high-resolution satellite precipitation datasets in Xinjiang, China[J]. *Atmospheric Research*, 2018,212:150-157.
- [17] Usman M, Nichol J E, Ibrahim A T, et al. A spatio-temporal analysis of trends in rainfall from long term satellite rainfall products in the Sudano Sahelian zone of Nigeria [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 260-261:273-286.
- [18] 杜懿,王大洋,阮俞理,等.中国地区近40年降水结构时空变化特征研究[J].*水力发电*, 2020,46(8):19-23.
- [19] 孙赫,苏凤阁.雅鲁藏布江流域多源降水产品评估及其在水文模拟中的应用[J].*地理科学进展*, 2020,39(7):1126-1139.
- [20] 王文,汪小菊,王鹏. GLDAS月降水数据在中国区的适用性评估[J].*水科学进展*, 2014,25(6):769-778.
- [21] 王娟敏,孙娴,孙睿,等.2000—2016年中国再分析辐射资料与观测值对比[J].*热带气象学报*, 2020,36(6):734-743.
- [22] 王文,崔巍,王鹏. GLDAS Noah模型水文产品与中国地面观测及卫星观测数据的对比[J].*水电能源科学*, 2017,35(5):1-6.
- [23] Zeqiang C, Yi Z, Gaoyun S, et al. Spatiotemporal characteristics and estimates of extreme precipitation in the Yangtze River Basin using GLDAS data[J]. *Interna-*

- tional Journal of Climatology, 2021,41:E1812-E1830.
- [24] Wang A, Zeng X. Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 2012,117(D5):D05102.
- [25] Rui H, Beaudoin H. Readme document for global land data assimilation system version 2 (GLDAS-2) products[J]. Ges Disc., 2011,2011:1-22.
- [26] 中国科学院资源环境科学与数据中心[EB/OL]. <https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=276>.
- [27] 焦俏.基于微波遥感反演的黄土高原表层土壤水分变化及其对植被恢复的响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [28] 焦俏,王飞,李锐,等.ERS 卫星反演数据在黄土高原近地表土壤水分中的应用研究[J].土壤学报,2014,51(6):1388-1397.
- [29] 中国气象报社.暴雨定义及分类_中国气象局[EB/OL]. http://www.cma.gov.cn/2011/qxfw/2011qqxkp/2011qkpd/201205/t20120508_172024.html.
- [30] Dunn R J H, Alexander L V, Donat M G, et al. Development of an Updated Global Land In Situ-Based Data Set of Temperature and Precipitation Extremes: HadEX3 [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2020:e2019JD032263.
- [31] Donat M G, Peterson T C, Brunet M, et al. Changes in extreme temperature and precipitation in the Arab region: long - term trends and variability related to ENSO and NAO[J]. International Journal of Climatology, 2014,34(3):591-592.
- [32] Rao K K, Patwardhan S K, Kulkarni A, et al. Projected changes in mean and extreme precipitation indices over India using PRECIS [J]. Global and Planetary Change, 2014,113:77-90.
- [33] de Los Milagros Skansi M, Brunet M, SigróJ, et al. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America[J]. Global and Planetary Change, 2013,100(1):295-307.
- [34] 尹红,孙颖.基于 ETCCDI 指数 2017 年中国极端温度和降水特征分析[J].气候变化研究进展,2019,15(4):363-373.
- [35] 任福民,高辉,刘绿柳,等.极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述[J].气象,2014,40(7):860-874.
- [36] 卢芹芹,秦年秀,汪军能,等.近 60 年来百色地区极端降水事件的时空节律变化特征[J].水土保持研究,2021,28(3):216-222.
- [37] 袁文德,郑江坤,董奎.1962—2012 年西南地区极端降水事件的时空变化特征[J].资源科学,2014,36(4):766-772.
- [38] 李志,郑粉莉,刘文兆.1961—2007 年黄土高原极端降水事件的时空变化分析[J].自然资源学报,2010,25(2):291-299.
- [39] 顾西辉,张强,孔冬冬.中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应[J].地理学报,2016,71(5):718-730.
- [40] 陈晓燕,尚可政,王式功,等.近 50 年中国不同强度降水日数时空变化特征[J].干旱区研究,2010,27(5):766-772.
- [41] Wang H, Chen Y, Chen Z. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, northwest of China, during 1960—2010 [J]. Hydrological Processes, 2013,27(12):1807-1818.
- [42] 汪宝龙,张明军,魏军林,等.西北地区近 50 a 气温和降水极端事件的变化特征[J].自然资源学报,2012,27(10):1720-1733.
- [43] 宋世凯.全球变暖背景下 1960—2014 年中国降水时空变化特征[D].乌鲁木齐:新疆大学,2017.
- [44] 郑丽娜.近 55 a 中国西北地区夏季降水的时空演变特征[J].海洋气象学报,2018,38(2):50-59.
- [45] 王怀军,潘莹萍,陈忠升.1960—2014 年淮河流域极端气温和降水时空变化特征[J].地理科学,2017,37(12):1900-1908.
- [46] 倪楠.中国降水的时空变化特征研究[D].北京:对外经济贸易大学,2020.