

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.05.04

梅雨雨带移动对1961-2020年江苏省极端降水的影响

陈燕¹, 陈兵¹, 孙佳丽¹, 王国庆^{2,3,4}

(1. 江苏省气候中心, 江苏南京 210019; 2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029; 3. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏南京 210029; 4. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098)

摘要: 极端降水的气候态特征及其演变对于城市内涝防控、水环境污染治理、海绵城市建设等意义重大。利用江苏省67个国家气象观测站1961-2020年的日降水资料,采用趋势分析、M-K检验、小波分析等方法分析强降水和极强降水的气候态特征和年代际变化,以及梅雨雨带移动对江苏省内淮河流域和长江流域极端降水的影响。结果表明:江苏省沿江地区强降水和极强降水的雨量最大。强降水和极强降水分别贡献了全年34.5%和11.9%的降水量,1/3的极端降水发生在6月下旬至7月中旬。江苏省大部分地区的极端降水雨量、雨日和雨强呈增加趋势,但只有长江流域通过显著性检验。极端降水的雨强年代际波动较小,雨量年代际波动较大;年代际波动性与其平均态之间无显著的对应关系。梅雨雨带的南北移动对极端降水产生明显影响,江苏省内的长江流域和淮河流域的年降水异常度和强降水距平百分率对应关系较好,在降水异常偏多年份发生极端降水的概率较高。江苏省内长江流域和淮河流域近60年的强降水多次出现增加、减少的变化。2010年以后长江流域极端降水增多,雨量和雨日上升趋势显著,开始时间明显提前,结束时间推后,持续时间增长。

关键词: 极端降水; 梅雨雨带; 气候态特征; 强降水; 极强降水; 江苏省

中图分类号: P426.6; P467

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)05-0027-09

Influence of Meiyu Belt movement on the extreme precipitation in Jiangsu Province from 1961 to 2020

CHEN Yan¹, CHEN Bing¹, SUN Jiali¹, WANG Guoqing^{2,3,4}

(1. *Jiansu Provincial Climate Center, Nanjing 210019, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 3. *Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*; 4. *Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The climatic characteristics and evolution of extreme precipitation are of great significance to the prevention and control of urban waterlogging, water environmental pollution control, and the construction of sponge cities. Based on the daily precipitation data from 67 national meteorological observatories in Jiangsu Province from 1961 to 2020, the trend analysis, Mann – Kendall test and wavelet analysis are used to analyze the temporal and spatial distribution characteristics and changing trends of heavy and extremely heavy precipitation, as well as the effects of the Meiyu Belt movement on extreme precipitation in the Huai River Basin and the Yangtze River Basin. The results show that the area along the Yangtze River had the largest amount of precipitation. Heavy precipitation and extremely heavy precipitation contributed 34.5% and 11.9% of the annual precipitation, respectively, and one-third of the extreme precipitation events occurred from late June to mid-July. In most areas of Jiangsu Province, extreme precipitation, rainy days and rainfall intensity showed an increasing trend, but only the increasing trend of the Yangtze River Basin passed the significance test. The inter-decadal rain intensity of extreme precipitation fluctua-

收稿日期:2022-02-21; 修回日期:2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879162、41975006、51779144); 国家重点研发计划课题(2017YFA06055002、2017YFC1502701); 江苏省气象局重点科研项目(KZ202102); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2020nkzd01)

作者简介: 陈燕(1977-), 女, 江苏扬州人, 博士, 正研高工, 主要从事气候变化影响评估、城市气象、风能资源评估研究。

通讯作者: 王国庆(1971-), 男, 山东成武人, 博士, 教授级高工, 主要从事气候变化、水文水资源、流域水文模型等方面的研究。

ted slightly, whereas the inter-decadal rainfall fluctuated greatly; however, there is no significant correspondence between the inter-decadal fluctuations and the average state of extreme precipitation. The north-south movement of the Meiyu belt had a significant impact on extreme precipitation. In the Yangtze River Basin and the Huaihe River Basin in Jiangsu area, the annual precipitation anomalies were associated with strong precipitation, so in the year of abnormally high precipitation, the probability of extreme precipitation events was relatively high. The heavy rainfall in the Yangtze River Basin and the Huaihe River Basin in Jiangsu area have increased and decreased many times during recent 60 years. After 2010, extreme precipitation events started to increase, with a significant increment in rainfall and rainy days in the Yangtze River Basin, most of which started early but finished late with a prolonged duration.

Key words: extreme precipitation; the Meiyu Belt; climatic characteristics; heavy precipitation; extremely heavy precipitation; Jiangsu Province

1 研究背景

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第六次评估报告显示,自 20 世纪 50 年代以来,持续加强的气候变化已经导致全球大部分陆地区域强降水事件的频率和强度增加^[1]。如果未来全球变暖加剧,大部分地区的强降水事件很可能会加剧并更加频繁,全球气温每升高 1 °C,则全球范围内的极端日降水事件预计将加剧约 7%,极端日降水事件的增多会带来更加广泛和严重的影响^[1-4]。

受季风气候的影响,我国东部地区降水丰沛,在气候变暖的背景下,降水年代际变化明显,也是强降水事件发生频率较高的地区之一^[5-7]。中国大部分地区的降水量和降水日数向强降水方向转变,降水分布对全球变暖的响应因地而异,江淮地区、华南、西南等暖湿地区的弱降水日数减少,而强降水增幅和日数较多^[8]。在降水呈增加趋势的地区,极端降水事件发生的频率远高于其他地区^[9]。中国年代际暴雨雨量和雨日表现出由东南沿海地区向华中、西南及环渤海地区逐渐扩张的梯度增加趋势,暴雨的雨量和雨日梯变比雨强更为明显^[10]。不同地区极端降水的持续性、波动性也发生了明显变化。20 世纪 80 年代中期以来,长江全流域的极端强降水事件峰值期变得更为集中,多发生在 6 月,增加了发生全流域洪水的可能性^[11],同时极端降水指标的周期性趋向于高频,即降水的变化更加频繁^[12]。在东南沿海的冬季、黄河中下游的秋季和长江以南地区的夏季,极端降水的区域性与持续性明显,容易诱发区域性洪涝灾害^[13]。西南地区东部区域持续性暴雨事件的数量、持续时间、影响范围、极端强度均呈增加趋势^[14]。华南大部分地区夏季降水量增多,且呈现集中趋势,25 mm 以上和 50 mm 以上的持续性降

水过程均呈增加趋势^[15]。华中地区不同阈值的年极端小时降水频次在 21 世纪初期表现为低频波动变化,随后的波动变化呈加大趋势^[16]。很多学者对三峡库区、汉江流域、云南高原等多地开展研究,获得了当地的极端降水变化特征^[17-19]。

江苏省位于长江中下游地区,兼有淮河流域和长江流域,受季风气候影响明显,雨量丰沛,降水量年际波动大。20 世纪 60、70 年代,中国梅雨雨带偏北;80、90 年代,雨带偏南;90 年代末雨带呈明显北移的趋势,1999 年以前雨带主要位于长江及以南地区,1999 年以后雨带则明显北移到了长江以北的淮河流域,在此影响下,淮河和江南梅雨期降水量年际变化明显,从 20 世纪 90 年代末开始,淮河梅雨有显著增加趋势,而江南梅雨则显著减少^[20-22]。梅雨雨带的南北移动会显著影响降水落区,梅雨锋位置决定了极端强降水的发生区域^[23-25]。2010 年以来,江苏省连续多年多雨,2015、2016、2018、2020 年的降水量均位于历史前 10 位,分别为第 3、1、10、4 位,且极端降水事件频发^[26]。在降水增多的背景下,分析最新极端降水的气候态及其变化,对于城市内涝防控、水环境污染治理、海绵城市建设以及地下水水位管理等都有十分重要的意义^[27-29]。本研究基于江苏省 67 个国家气象观测站 1961-2020 年长序列降水量资料,分析极端降水的演变特征和年代际差异,以及梅雨雨带移动对江苏省内的淮河流域和长江流域的极端降水的影响,为防范洪涝灾害、有效管理水资源等提供参考。

2 资料来源与研究方法

2.1 气象资料

所用气象资料来自江苏省气象信息中心的江苏省 67 个国家气象观测站近 60 年(1961-2020 年)逐日降水资料和天气现象资料。各气象站点分

布如图 1 所示,其中江苏省域内分布于淮河流域的气象站点共 35 个,长江流域的气象站点共 32 个。

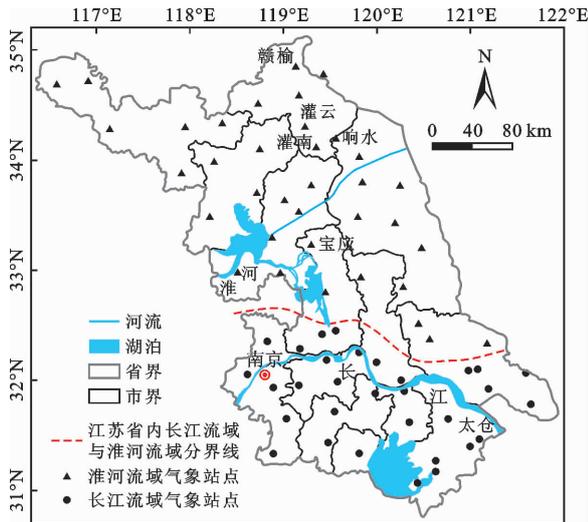


图 1 江苏省国家级气象站点分布

在这 67 个气象站中,响水站为 1970 年建站,且 1995 和 1996 年部分月份资料缺测,取其完整的 1971 - 1994 年、1997 - 2020 年降水资料进行分析,该站有效资料完整率为 96%;其余 66 个站的有效资料完整率均为 100%;总体完整率为 99.7%。这些观测资料均按照中国气象局气象观测规范要求,经过严格质量控制和均一性检验,数据质量可靠,可用于极端降水特征分析。

2.2 研究方法

按照世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)建议的极端降水定义,采用相对阈值的方法,将某一个气候时段内相对于当地日降水最强的 5% 和 1% 事件分别定义为强降水和极强降水。相对阈值方法可以部分消除地域影响,具有广泛的应用^[30-31]。

采用 Bonsai 等^[32]的方法确定极端降水事件阈值,将 1961 - 2020 年每个气象站的日降水序列 X (日降水量 ≥ 0.1 mm) 按照升序排列,某个值小于或等于 X_m 的概率为:

$$P = \frac{m - 0.31}{n + 0.38} \quad (1)$$

式中: n 为降水序列数; m 为 X_m 的序号。 $P = 95\%$ (99%) 对应的 X_m 值即为该站强降水(极强降水)的日降水量阈值。

统计日降水量大于阈值的极端降水的雨量、雨日、雨强,并定义其雨量(雨日)在年雨量(年雨日)中的占比为其雨量(雨日)的贡献率。定义每年第

一次极端降水与最后一次极端降水之间的间隔为极端降水的持续时间。采用线性趋势法、F 检验、变异系数(标准差和平均值的比值)、Mann - Kendall (M - K) 检验、小波分析等方法分析强降水和极强降水的时间变化特征。

采用年降水量距平与标准差的比值(δ) 判断年降水量的异常程度^[33],当 $|\delta| \geq 2$ 时,为降水典型异常年;当 $1 \leq |\delta| < 2$ 时,为降水异常年;当 $|\delta| < 1$ 时,为降水正常年。

3 极端降水气候态特征

3.1 极端降水时间分布特征

根据江苏省 67 个国家气象观测站的长序列降水资料,分析极端降水的年代际分布特征。图 2 为 1961 - 2020 年江苏省全省平均的极端降水年际变化。

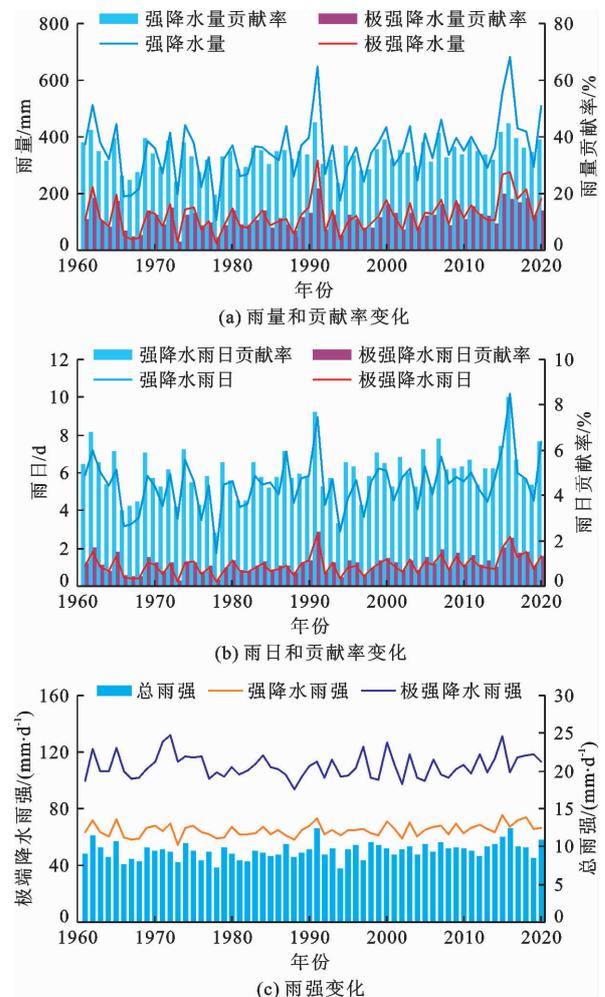


图 2 1961 - 2020 年江苏省极端降水年际变化

由图 2 可知,强降水量多年平均值为 352.0 mm,最低值和最高值分别为 104.7 和 678.9 mm,出现在 1978 和 2016 年,这两年也是近 60 年来江苏省

年降水量最小和最大值出现的年份;强降水贡献率在 19.4% (1978 年)~45.1% (1991 年)之间波动,多年平均值为 34.5%。强降水日数多年平均值为 5.4 d,最多的 2016 年为 10.2 d,占当年降水日数的 8.3%,最少的 1978 年仅为 1.8 d,占当年降水日数的 2.3%。强降水的雨强平均值为 65 mm/d,在 54.2~75.3 mm/d 之间波动。极强降水的雨量、雨量贡献率、雨日、雨日贡献率、雨强的多年平均值分别为 122 mm、11.9%、1.1 d、1%、111.7 mm/d,1991 年长江中下游地区梅雨期降雨多且集中,该年极强降水量和降水日数及其贡献率约为平均值的 2~3 倍。总体而言,强降水以 5% 的降水日数贡献了 34.5% 的降水量,极强降水以 1% 的降水日数贡献了 11.9% 的降水量。

图 3 为江苏省年中各旬极端降水的雨量和雨日占全年的比例。由图 3 可以看出,11 月中旬至 4 月中旬会出现零星极端降水;从 4 月下旬开始极端降水迅速增加,6 月中旬的雨量和雨日均占全年极端降水雨量和雨日的 5% 以上;6 月下旬至 7 月中旬是江苏省的梅雨季节,也是极端降水集中爆发期,雨量和雨日占比达到 10% 以上;随后缓慢减少,9 月中旬后二者占比降至 5% 以下。与强降水相比,极强降水在 7 月上旬和 8 月上旬的占比更高,这两个时段更易诱发洪涝灾害。

3.2 极端降水空间分布特征

图 4 为江苏省极端降水的多年平均雨量、雨日和雨强的空间分布和变异系数。由图 4 可以看出,极端降水空间分布特征明显,江苏省沿江地区为极端降水雨量高值区,多年平均强降水和极强降水的雨量分别在 365、125 mm 以上;徐州地区的极端降水雨量最小,极端降水的雨日由南向北逐渐减少。雨强分布与雨日相反,由南向北逐步增大,苏州地区强降水和极强降水的雨强分别为 60、100 mm/d,连云港地区和盐城北部则达到 72、125 mm/d。

对比不同要素的变异系数显示,雨强的年际波动最小,变异系数在 0.1~1.3 之间;雨量的年际波动最大,变异系数在 0.4~1.6 之间。对比强降水和极强降水的同一要素,极强降水的波动性更明显,变异系数一般为强降水的 2~3 倍。

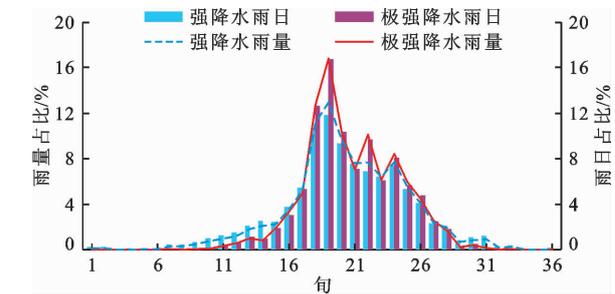


图 3 江苏省年中各旬极端降水的雨量和雨日占全年的比例

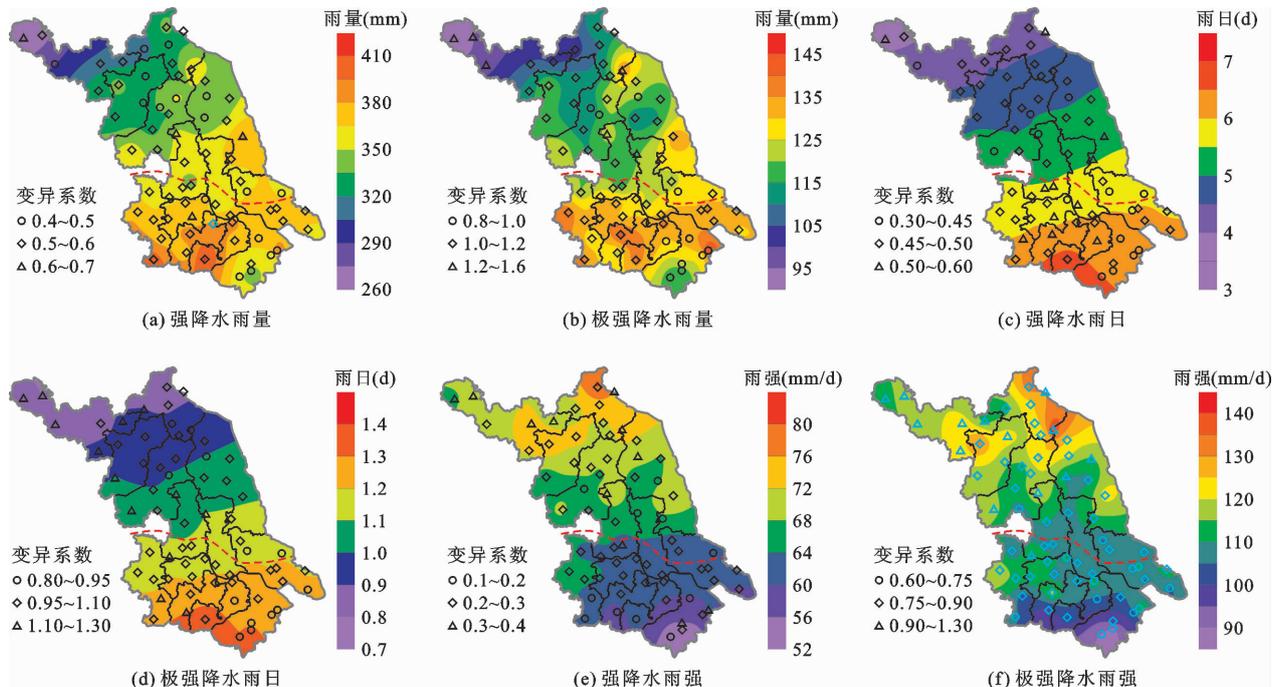


图 4 江苏省极端降水的多年平均雨量、雨日和雨强的空间分布和变异系数

从图 4 还可以看出,江苏省极端降水的年代际波动性与其平均态之间无显著对应关系,即在同样的雨

量、雨日、雨强区间内,不同程度的变异系数均可能存在,这表明海陆分布、地形特征等不随时间变化的要素并不是影响江苏极端降水年际变化的主要因素。

3.3 极端降水变化趋势

图5为1961-2020年江苏省极端降水的变化趋势及其置信度空间分布。图5(a)、5(b)显示,江苏省内的长江流域强降水和极强降水的雨量呈显著增加趋势,分别达到20和10 mm/(10a)以上,且大部分站点均通过了置信度为0.05的显著性检验,其中太仓地区增加趋势最强,并通过0.001的显著性检验;在江苏省内的淮河流域,徐州和盐城地区中部

的强降水和极强降水的雨量呈减小趋势,其余地区呈增加趋势,但除宝应气象站外,其他所有站点均未通过显著性检验。图5(c)、5(d)显示,强降水和极强降水的雨日变化趋势与雨量趋势基本一致。图5(e)、5(f)表明雨强的变化趋势和雨量、雨日略有不同,徐州、淮安和盐城地区中部呈减小趋势,其余地区呈增加趋势,但仅有少量、分散站点的增加趋势通过了显著性检验。需要特别注意的是赣榆地区,该地区多年平均的极端降水雨强为全省最高(图4(e)、4(f)),且雨强呈增加趋势,要注意极端降水带来的城市内涝。

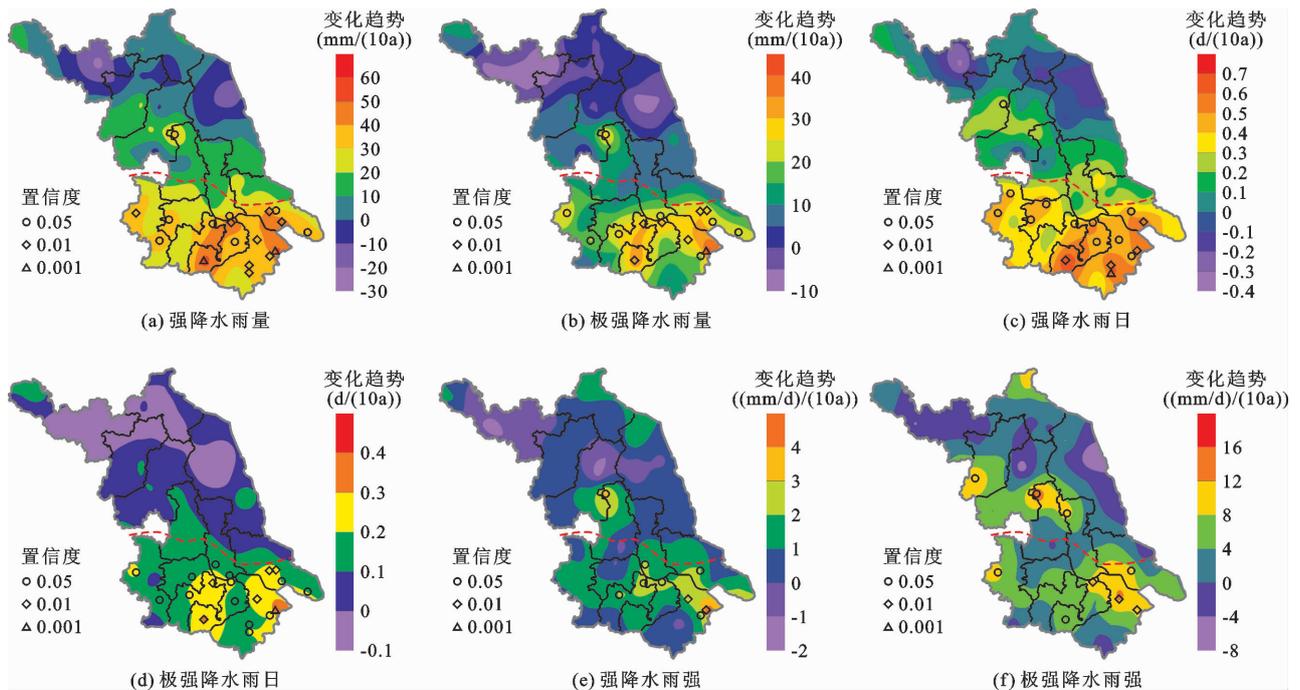


图5 1961-2020年江苏省极端降水的变化趋势及其置信度空间分布

4 梅雨雨带移动对极端降水的影响

4.1 对降水异常度的影响

梅雨雨带的南北移动,不仅会影响年降水量,更会明显影响江苏省内长江流域和淮河流域的极端降水。图6和7分别为1961-2020年江苏省内两个流域的降水异常度和强降水距平百分率的年际变化。降水异常度以年降水量距平与标准差的比值表示,若该比值 ≥ 1 或 ≤ -1 ,即为异常偏高或偏低;若该比值 ≥ 2 或 ≤ -2 ,即为典型异常偏高或偏低。对比图6和7可以发现,降水异常度与强降水距平百分率之间有很好的对应关系,在20世纪80年代之前,梅雨雨带偏北,江苏省内淮河流域降水异常偏高年份较多,长江流域异常偏低年份较多;之后梅雨雨

带南移,江苏省内长江流域1991年降水典型异常偏高,同时该区域强降水的雨量、雨日、雨强均明显偏高;90年代末,梅雨雨带明显北移至淮河流域;江苏淮河流域的强降水增多,雨量、雨日的正距平明显多于长江流域;2010年以后,强降水中心随着梅雨雨带再次南移至长江流域,在江苏省内长江流域,2015、2016年均均为降水典型异常偏高年,其中2016年的强降水雨量和雨日距平达到167%、153%,为近60年的极值。由以上结果可知,江苏省强降水多集中在梅雨期,因此强降水的年代际变化和梅雨雨带的南北移动有很好的呼应关系^[12,20]。

对比图6和图7还可以发现,总体而言,在降水量异常偏多的年份,发生极端降水事件的概率也比较高。但是在降水正常年,同样存在发生极端降水

的可能性。例如,从年降水量异常程度判断,江苏省内淮河流域2000年为降水正常年,但该年的强降水事件的雨强距平百分率达26.3%,为历史最强(图7(c)),雨量距平百分率为42.3%(图7(a)),雨日距平百分率为12.7%(图7(b))。这是由于在2000年8月29日至31日,第12号台风“派比安”经过江苏省近海,在冷空气的共同影响下,淮北的盐城、连

云港、宿迁、淮安普降大雨,23个气象站出现37个暴雨日,其中包括13个气象站出现19个大暴雨日。降水中心位于响水、灌南和灌云(其位置见图1),这3地8月30日出现特大暴雨,降水量分别为699.7、279.5和266.8 mm,均为当地日降水量历史最高值,其中响水地区降水量达699.7 mm,为江苏省日降水量历史极值。

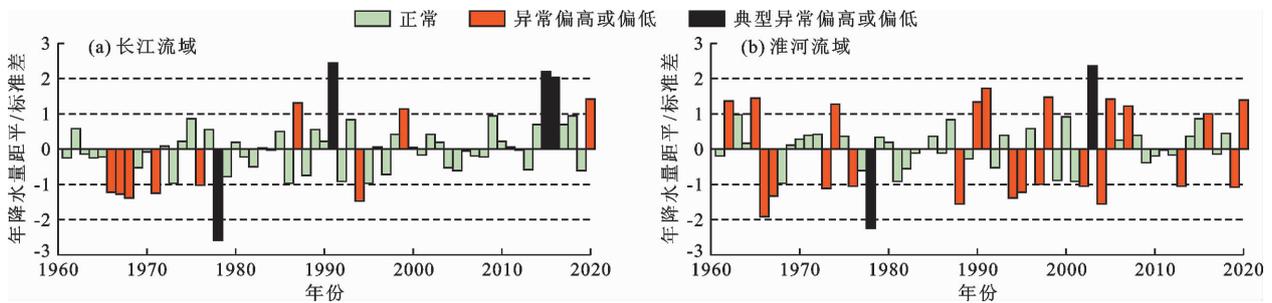


图6 1961-2020年江苏省内两个流域降水异常度的年际变化

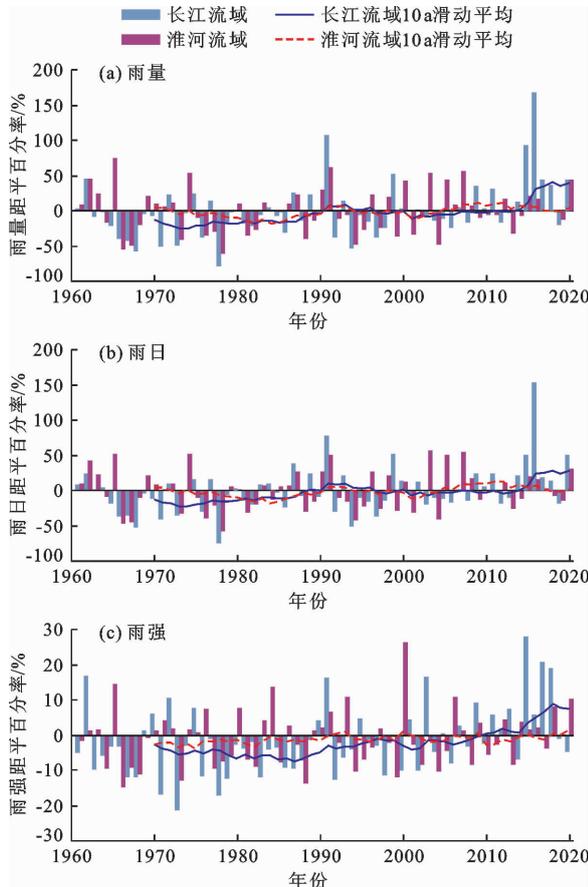


图7 1961-2020年江苏省内两个流域强降水距平百分率的年际变化

4.2 对起止和持续时间的影响

图8为1961-2020年不同年代江苏省内两个流域极端降水的起止和持续时间的变化。分析图8可知,江苏省内长江流域的强降水开始时间平均为

5月12日,比淮河流域早23 d;平均在9月14日结束,比淮河流域晚12 d;持续时间为123 d,比淮河流域长35 d。两个流域之间极强降水的开始时间、结束时间和持续时间的差异较小,长江流域的极强降水开始时间比淮河流域早8 d,结束时间基本一致,持续时间比淮河流域长8 d。

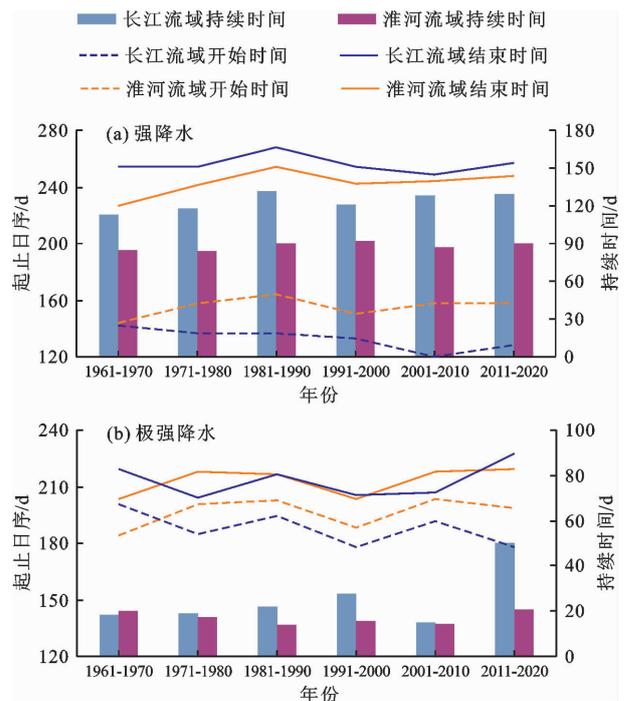


图8 1961-2020年不同年代江苏省内两个流域极端降水的起止和持续时间的变化

在2010年以后,当梅雨雨带由淮河流域移至长江流域后,长江流域极端降水开始时间明显提前,结

束时间推后,持续时间增长。与前一个10年相比,长江流域2011-2020年极强降水时间提前14 d开始,推后21 d结束,持续时间长达50 d,明显高于其他年代,均为历史极值,这也体现了梅雨雨带移动的影响。

4.3 对突变性的影响

梅雨雨带的南北移动使得江苏省内长江流域和淮河流域近60年的强降水多次出现增加、减少的变化,有时会发生气候突变,图9给出了强降水M-K突变检验。由图9可以看出,长江流域的强降水雨量、雨日、雨强在20世纪90年代后呈增加趋势。雨量和雨日在2008年左右发生气候突变,随后表现为强上升趋势,并在2016年通过了0.05显著性水平;雨强的突变发生时间略早,在2005年发生气候突变,在2013年达到显著性水平。淮河流域的强降水雨量、雨日、雨强在2005年后缓慢上升,发生数次突变,但上升趋势均未达到显著性水平。极强降水的M-K突变检验与强降水类似,发生突变的时间也基本相同。

图10为研究时段内江苏省内两个流域强降水的小波能量谱。图10表明,江苏省内长江流域和淮河流域1961-2020年强降水具有明显的年际振荡周期。在淮河流域,强降水雨量和雨日在20世纪60年代和70年代中期均有2~4 a的短周期信号,20世纪90年代出现了4~8 a的周期信号,20世纪90年代后期至2005年左右再次出现2~4 a的显著周期信号;雨强在20世纪70年代至80年代中期出现了显著的4~8 a的周期信号,随后至2005年为准10 a的周期信号。长江流域的强降水雨量和雨日周期信号在20世纪90年代表现为2~4 a的显著周期信号;2010年后表现为4~8 a的周期信号;雨强均表现为2~4 a的短周期信号。江苏省内长江流域和淮河流域在时间上交替出现振荡周期信号,这表明受梅雨雨带移动的影响,两流域同时出现极端降水的概率较小。

5 结论与讨论

本文利用江苏省67个国家级气象观测站1961-2020年长序列降水资料,分析极端降水(包括强降水和极强降水)的时空分布特征和变化趋势,以及梅雨雨带移动对江苏省内淮河流域和长江流域的极端降水的影响。主要结论如下:

(1)江苏省沿江地区的强降水和极强降水的雨量最大,连云港和盐城北部的强降水和极强降水的

雨强最大。从全省平均来看,强降水贡献了全年34.5%的降水量,极强降水贡献了11.9%的降水量。6月下旬至7月中旬是极端降水爆发期,1/3的极端降水发生在该时段。

(2)江苏省极端降水变化趋势空间差异明显,长江流域极端降水的雨量、雨日呈显著增加趋势。极端降水的雨强年际波动最小,雨量的年际波动最大;极端降水的年际波动性与平均态之间无显著对应关系。

(3)梅雨雨带的南北移动对极端降水产生明显影响,江苏省内的长江流域和淮河流域的年降水异常度和强降水距平百分率之间有良好的对应关系。2010年以后梅雨雨带中心南移至长江流域,江苏省长江流域极端降水增多,开始时间明显提前,结束时间推后,持续时间增长。

(4)梅雨雨带的南北移动,使得江苏省内长江流域和淮河流域近60年的强降水多次出现增加、减少的变化。最为明显的是长江流域强降水雨量和雨日在2008年左右发生气候突变,随后上升趋势显著,出现了显著的4~8 a周期信号。

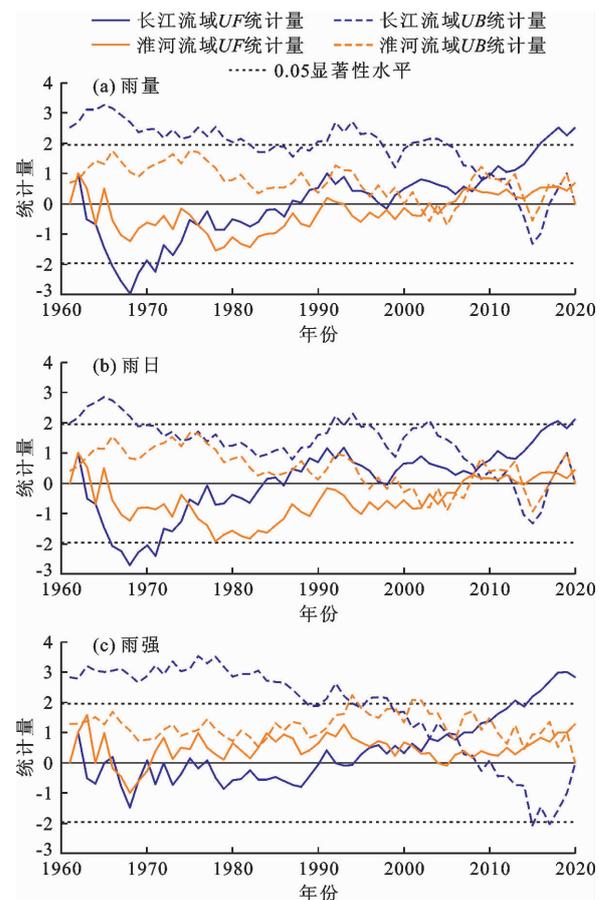
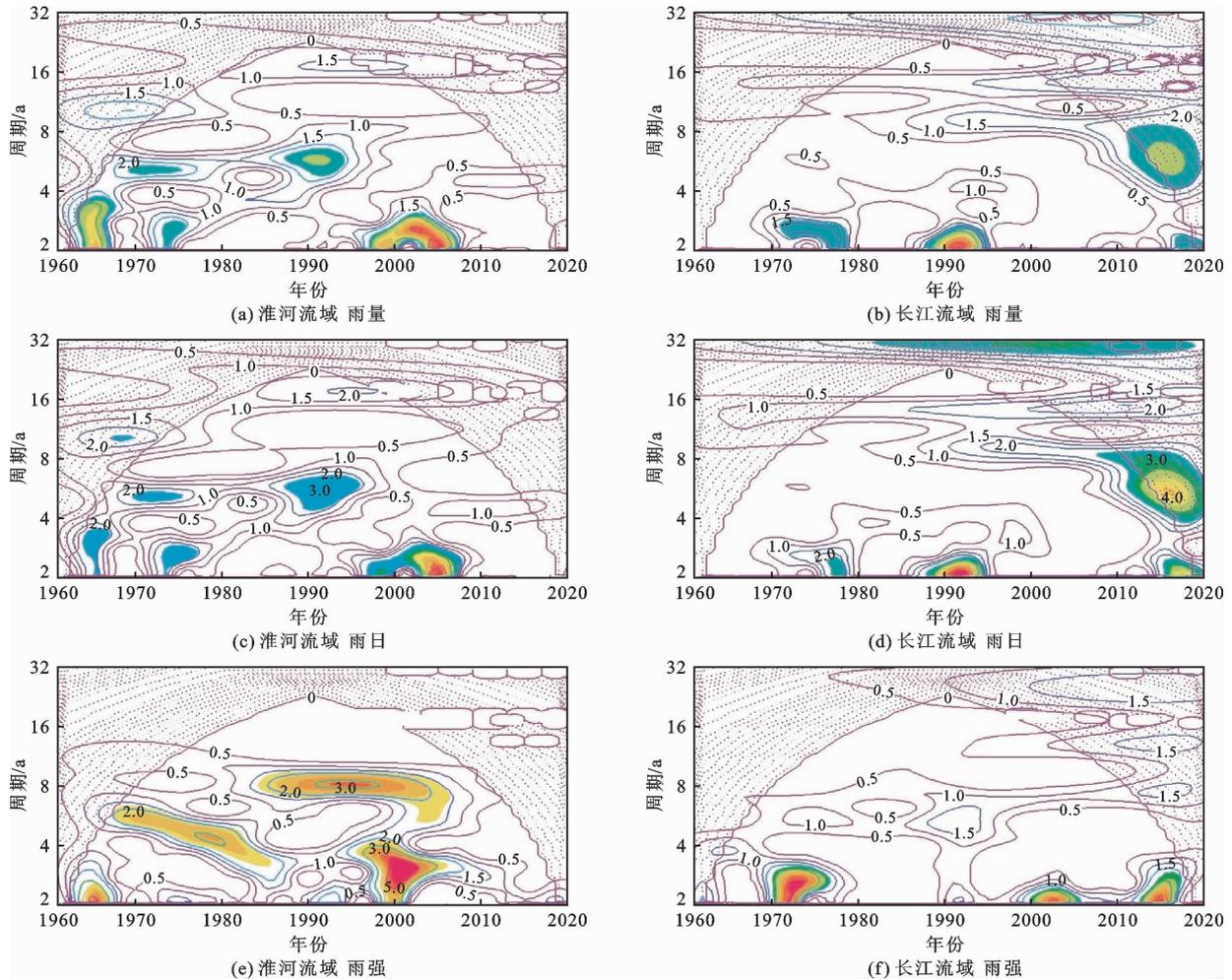


图9 1961-2020年江苏省内两个流域强降水M-K突变检验



注:阴影部分表示通过了95%信度水平检验,点状区为边界作用明显的头部区域。

图10 1961—2020年江苏省内两个流域强降水 Morlet 小波能量谱

本文研究显示梅雨雨带中心的南北移动是影响江苏省极端降水事件发生区域、发生频率、发生时间的重要因素,强降水、极强降水的雨量、雨日和雨强在江苏省内长江流域和淮河流域呈现不一样的变化特征,这和很多学者的研究结论基本一致^[23-25,34-35]。在梅雨较强的年份,发生极端降水事件的概率较高,年降水量也较大,一般属于降水异常偏高年。但是在降水正常年,受台风、局地或者短时天气过程的影响,同样存在发生极端降水的可能性。因此,在关注环流形势的同时,也需要注意局地强对流天气带来的强降水,及其可能诱发的城市内涝和暴雨灾害。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] GROISMAN P Y, KARL T, EASTERLING D, et al. Changes in the probability of extreme precipitation: Impor-

tant indicators of climate change [J]. Climatic Change, 1999, 42(1): 243-283.

- [3] ZOLINA O, SIMMER C, GULEV S K, et al. Changing structure of European precipitation: Longer wet periods leading to more abundant rainfalls [J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(6): 460-472.
- [4] STOTTP. How climate change affects extreme weather events [J]. Science, 2016, 352(6293): 1517-1518.
- [5] 严中伟,杨赤.近几十年中国极端气候变化格局[J].气候与环境研究,2000,5(3):267-272.
- [6] 任国玉,任玉玉,战云健,等.中国大陆降水时空变异规律——II.现代变化趋势[J].水科学进展,2015,26(4):451-465.
- [7] 翟盘茂,李蕾,周佰铨,等.江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J].应用气象学报,2016,27(5):631-640.
- [8] JIANG Zhihong, SHEN Yuchen, MA Tingting, et al. Changes of precipitation intensity spectra in different regions of mainland China during 1961-2006 [J]. Journal

- of Meteorological Research, 2014, 28(6): 1085-1098.
- [9] ZHAI Panmao, ZHANG Xuebin, WAN Hui, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [10] 史培军,孔锋,方佳毅. 中国年代际暴雨时空变化格局[J]. *地理科学*, 2014, 29(11): 1281-1290.
- [11] 苏布达,姜彤,任国玉,等. 长江流域1960-2004年极端强降水时空变化趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 9-14.
- [12] 吴舒祺,赵文吉,杨阳,等. 基于小波变换的长江中下游地区极端降水与大气环流响应关系研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(4): 67-76.
- [13] 闵岫,钱永甫. 中国极端降水事件的区域性和持续性研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(6): 763-771.
- [14] 周杰,赵俊虎,李永华,等. 西南地区东部区域性暴雨事件的客观识别及其变化特征[J]. *高原气象*, 2021, 40(4): 789-800.
- [15] 李慧,周顺武,陆尔,等. 1961-2010年中国华南地区夏季降水结构变化分析[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(3): 247-256.
- [16] 刘佩廷,刘敏,谌伟,等. 华中区域年极端小时降水特征分析[J]. *暴雨灾害*, 2020, 39(5): 508-515.
- [17] 董钊煜,彭涛,董晓华,等. 1960-2016年三峡库区极端降水事件时空变化特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(5): 93-101.
- [18] 赵爱莉,张晓斌,郝改瑞,等. 1971-2018年汉江流域陕西段降水时空特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(6): 80-87.
- [19] 曾学梅,丁文荣. 云南高原岩溶区极端降水变化规律研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(2): 28-35.
- [20] 司东,丁一汇,柳艳菊. 中国梅雨雨带年代际尺度上的北移及其原因[J]. *科学通报*, 2010, 55(1): 68-73.
- [21] 马音,陈文,王林. 中国夏季淮河和江南梅雨期降水异常年际变化的气候背景及其比较[J]. *气象学报*, 2011, 69(2): 334-343.
- [22] 刘海文,周天军,朱玉祥,等. 东亚夏季风自20世纪90年代初开始恢复增强[J]. *科学通报*, 2012, 57(9): 765-769.
- [23] 黄荣辉,陈际龙,刘永. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系[J]. *大气科学*, 2011, 35(4): 589-606.
- [24] 杨玮,徐敏,周顺武,等. 江淮流域6-7月极端强降水事件时空变化及环流异常[J]. *高原气象*, 2017, 36(3): 718-735.
- [25] 韩翠,尹义星,黄伊涵,等. 江淮梅雨区1960-2014年夏季极端降水变化特征及影响因素[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(5): 445-455.
- [26] 沈阳,孙燕,吴海英,等. 2018年5月江苏极端降水事件发生前副热带高压异常及原因分析[J]. *气象科学*, 2019, 39(2): 214-225.
- [27] SHARIFI S, MASSOUDIEH A, KAYHANIAN M. A stochastic storm water quality volume-sizing method with first flush emphasis[J]. *Water Environment Research*, 2011, 83(11): 2025-2035.
- [28] 陈燕,惠品宏,周学东,等. 气候变化对城市年径流总量控制率分区的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(5): 525-536.
- [29] 陈燕,许退祯,孙佳丽,等. 降雨控制模式对海绵城市设计参数的影响——以江苏省为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(4): 15-23.
- [30] KIKTEV D, SEXTON D M H, ALEXANDER L, et al. Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(22): 3560-3571.
- [31] SOHRABI M M, RYU J H, ABATZOGLOU J, et al. Climate extreme and its linkage to regional drought over Idaho, USA[J]. *Natural Hazards*, 2013, 65(1): 653-681.
- [32] BONSAL B R, ZHANG Xuebin, VINCENT L A, et al. Characteristic of daily and extreme temperature over Canada[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(9): 1959-1976.
- [33] 王绍武,龚道溢,陈振华. 近百年来中国的严重气候灾害[J]. *应用气象学报*, 1999, 10(S1): 43-53.
- [34] 竺夏英,何金海,吴志伟. 江淮梅雨期降水经向非均匀分布及异常年特征分析[J]. *科学通报*, 2007, 52(8): 951-957.
- [35] 平凡,唐细坝,高守亭,等. 长江和淮河流域汛期洪涝大气环流特征的比较[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(4): 766-782.