

近 41 年来江南地区暴雨洪涝灾害时空变化特征分析*

黄埡飞¹ 管兆勇¹ 蔡倩² 吕纯月¹
HUANG Yafei¹ GUAN Zhaoyong¹ CAI Qian² LÜ Chunyue¹

1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京, 210044
 2. 广东省气象公共服务中心, 广州, 510000
 1. *Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*
 2. *Guangdong Meteorological Public Service Center, Guangzhou 510000, China*
- 2020-10-15 收稿, 2021-05-07 改回.

黄埡飞, 管兆勇, 蔡倩, 吕纯月. 2021. 近 41 年来江南地区暴雨洪涝灾害时空变化特征分析. 气象学报, 79(4): 582-597

Huang Yafei, Guan Zhaoyong, Cai Qian, Lü Chunyue. 2021. Spatiotemporal variation characteristics of rainstorms and related flood disasters in Jiangnan region in the recent 41 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(4):582-597

Abstract Rainstorm and capacity building for disaster prevention are important factors that affect the occurrence of flood disasters and the changes in their losses. Based on the rainstorm-flood disaster data, daily precipitation data observed by meteorological stations, and socio-economic data in the Jiangnan region (Shanghai, Zhejiang, Fujian, Hunan, and Jiangxi) from 1978 to 2018, the spatiotemporal variation characteristics of rainstorms and losses caused by rainstorm-flood disasters were investigated in Jiangnan region in the recent 41 years. Results show that the affected area, the damaged area, the affected rate and the damaged rate of crops by rainstorm-flood disasters show a "first rising-then falling" trend in the recent 41 years in Jiangnan region. A relatively high level period is found in the 1990s. The spatial distribution of disasters shows a characteristic of "more in the west and less in the east". In the past 41 years, the frequency and intensity of rainstorm in Jiangnan region have fluctuated and increased, the duration and spatial concentration are increasing, showing a characteristic of "higher in the middle and east of the Jiangnan region and lower in the west". Rainstorms are concentrated from May to August, especially in June. Except for the number of severe rainstorm days, the number of rainstorm days, the number of extreme rainstorm days, and the accumulated rainfall amount of the rainstorm all are significantly and positively correlated with the sizes of affected areas and injured areas as well as the affected rate of the crops. The increase in the intensity of rainstorms is an important factor that contributes to the increase in the affected area, especially the damaged area. The intensity of heavy rainstorms has increased, which have a positive impact on the area affected by the disasters, especially the increase in the area damaged by the disasters. The consecutive rainstorm days, the standard deviation of rainstorm days per month, and the standard deviation of the rainstorm days per station are significantly and positively correlated with the affected area, the damaged area, the affected rate, and the damaged rate, indicating the stronger the spatiotemporal concentration and the sustainability of rainstorms, the greater the disaster loss. There are decadal differences in the relationship between precipitation and disaster losses, and the correlation between them has shown a decreasing trend in recent years. The frequency and intensity of rainstorms are not completely consistent with the distribution of flood-induced losses in time and space, indicating that the occurrence and impact of rainstorm-flood disasters are not only affected by meteorological factors, but also by disaster-bearers and social factors. The

* 资助课题: 国家重点研发计划重点专项(2019YFC1510201)、国家自然科学基金项目(41975073)。

作者简介: 黄埡飞, 主要从事气象灾害研究。E-mail: huangyafeinuist@163.com

通信作者: 管兆勇, 主要从事气候动力学研究。E-mail: guanzy@nuist.edu.cn

construction of disaster prevention in the Jiangnan region is spatially characterized by "strong in the east and weak in the west". The ability of disaster prevention in Jiangnan region has gradually developed, which has played an important role in reducing disaster occurrences and disaster losses. Therefore, in the Jiangnan region, especially the western Jiangnan region, disaster prevention should be further addressed.

Key words Rainstorm-flood, Disaster losses, Jiangnan region, Disaster prevention capacity building

摘 要 暴雨和防灾能力建设是影响洪涝灾害发生及其损失变化的重要因素。根据 1978—2018 年江南地区(沪、浙、闽、湘、赣五省、市)暴雨洪涝灾害数据、气象台站观测逐日降水量资料、社会经济数据,统计分析了近 41 年江南地区暴雨及其引发的洪涝灾害损失的变化特征及时、空差异,并从降水和社会防治两方面分析其成因。结果表明:近 41 年来江南地区因暴雨洪涝灾害农作物受灾面积、成灾面积、受灾率和成灾率呈先升后降的波动变化趋势,20 世纪 90 年代为相对高值期,空间分布呈明显的西多东少特点。近 41 年来江南地区暴雨发生频次及强度呈波动增加趋势,且暴雨在时间、空间上的持续性和集中度呈增加趋势,空间上呈现为江南中东部较高、西部较低的特点,暴雨发生集中期为 5—8 月,尤以 6 月最多。暴雨日数、大暴雨日数、暴雨累计降水量与农作物受灾面积、成灾面积、受灾率均呈显著正相关关系,在一定范围内,暴雨强度增强,是农作物受灾面积、尤其是成灾面积增加的重要因素。持续性暴雨日数、每月暴雨日数标准差、每站暴雨日数标准差与农作物受灾面积、成灾面积、受灾率、成灾率均呈显著正相关关系,说明暴雨在时间和空间上的持续性、集中度越强,受灾损失就越大。降水与受灾损失的关系存在年代际差异,近年来它们之间的相关呈降低趋势。暴雨频次、强度与洪涝受灾损失在时间、空间上的分布并不完全一致。暴雨洪涝灾害发生及其影响既受气象因素影响,也受到承灾体和社会因素影响。尽管江南地区灾害防治能力逐渐增强,对减少灾害发生和减轻灾害损失发挥了重大作用,但江南地区防灾能力建设在空间上呈现为东强西弱的特点。因此,整个江南地区,尤其是江南西部,应当继续加强防灾能力建设。

关键词 暴雨洪涝, 灾害损失, 江南地区, 防灾能力建设

中图法分类号 P426.616

1 引言

中国暴雨洪涝灾害频发,是全球洪涝灾害出现频次最高的国家之一,灾害损失惨重,一直严重影响着国民经济和社会发展(黄士松, 1986; Tao, et al, 2009; Ashutosh, 2014; Zhao, et al, 2017)。数据显示,1950 年至 2016 年,中国因洪涝灾害死亡人数超过 28 万,仅 2016 年一年,全国 31 省(自治区、直辖市)受灾人口就达 10095.41 万,因灾死亡 686 人,失踪 207 人,直接经济损失达 3643.26 亿元,占 2016 年 GDP 的 0.49%(国家防汛抗旱总指挥部, 2017)。江南地区位于中国东南部,山脉连绵,水汽充足,利于暴雨洪涝灾害的发生(万日金等, 2008),这一地区历年暴雨洪涝灾害损失约占全国的五分之一,仅 2016 年,江南地区因洪致灾灾情严重,受灾人口约 2400 万,占到了全国的将近四分之一(国家防汛抗旱总指挥部, 2017)。《中国气象灾害大典》收录的中国主要气象灾害分布综合示意图显示,江南地区是中国暴雨洪涝灾害最频发的区域(温克刚等, 2008)。随着社会经济不断发展、城市化进程不断推进,社会、经济、人口要素日益密集,

洪涝灾害的空间分布及其影响特征也发生了新的变化(吴绍洪等, 2012)。充分认识和理解暴雨洪涝灾害的时、空特征及其影响,分析其成因,对于防灾减灾规划、保护人民生命财产安全具有重要的现实意义(秦大河, 2015)。

为提高对暴雨洪涝灾害及其防治的认识、增强防灾减灾的有效性和针对性,中外有许多学者对暴雨及其引发的洪涝灾害灾情和损失进行了大量研究(丁一汇, 2019; 罗亚丽等, 2020)。王黎娟等(2007, 2008)、Guan 等(2011)、白静漪等(2014)、Ke 等(2014)、Jin 等(2017)、陈传雷等(2018)对中国不同区域各类暴雨进行了研究,发现中国暴雨区域差异较大,具有显著的年际和年代际变化特征。Quan(2014)、王晓东等(2015)、姜灵峰等(2016)、肖潺等(2017)、杨红娟等(2017)、於琨等(2018)对中国不同时间和空间尺度上的暴雨洪涝灾害事件及其影响的特征进行了研究,发现区域差异显著,中国南方受灾较重,且灾害损失日益严重。

洪涝灾害的发生受到当地气象条件的影响,降水是其中最主要的诱发因素(Shi, et al, 2011; Wenzel, et al, 2014; 王晓东等, 2015),灾害发生和

当地当日强降水与前期累计降水关系紧密(Zhao, et al, 2012; Furl, et al, 2015; Marengo, et al, 2017; Gourley, et al, 2017)。Zhai等(2005)发现暴雨不一定引发洪涝灾害,但是两者存在较强的相关。Brooks等(2000)发现美国暴雨洪涝与短时间内降水事件变化趋势相似,两者间有较强的相关,这在美国暴雨洪涝灾害的预报、预警中发挥了重要作用。Gao等(2015)通过致灾降水阈值研究了淮河流域旱涝与降水的关系。因此,在地质条件相对稳定的情况下,分析洪涝灾害与降水的关系,通过预测降水来预估洪涝灾害发生的可能性有重要的意义(夏军等, 2019)。

但是,洪涝灾害的发生及其影响又不仅仅与降水因素有关,也与社会防治因素息息相关(Habersack, et al, 2015; Lendering, et al, 2016; Aerts, et al, 2018)。de Vries等(2012)、Sarmiento(2009)认为土地利用等社会经济因素对于灾害发生及影响有重要作用。姜灵峰等(2016)认为气象灾害防治建设是近20年来中国气象灾害损失总体呈下降趋势的社会原因。还有一些学者针对中国的气象灾害防治、减灾对策进行了分析(刘玲等, 2003; 郭进修等, 2005; 姜海如, 2007; 辛吉武等, 2007; 夏军等, 2019),但受限于数据较少,大多以定性描述为主,少有定量分析。

但是,当前多局限于对暴雨本身或者灾害灾情本身的变化与防御对策分析研究,较少涉及到其成因分析(姜灵峰等, 2016)。即使有部分研究灾害与降水关系的工作也相对宏观、不够具体(王晓东等, 2015),特别是用较长时间序列对江南不同区域灾情变化与降水时、空差异的对应关系分析仍然少见,对于社会防治对灾害发生及其损失的影响的研究也就更不充分,因而需要进行定量的、更深入的研究。

近年来,随着各级政府不断加强防灾、减灾能力建设,更精确可靠的灾情数据不断更新,暴雨洪涝灾害造成的损失是否发生了一些新的变化?其成因又是什么?这对于各级政府下一步如何加强防灾、减灾工作有何启示?为弄清这些问题,本研究分析了近41年来江南地区暴雨洪涝灾害及其影响的变化趋势、空间差异,并从气象因素和社会防治因素两方面探究其成因,以期为进一步加强暴雨洪涝灾害防治管理和规划提供参考依据。

2 资料与方法

使用的降水实况资料来源于中国气象局“中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)”,包括中国基本气象站、基准气候站、一般气象站共2474个站点。使用的暴雨洪涝灾害灾情信息、社会经济数据取自中国气象局历年出版的《中国气象灾害年鉴》(中国气象局, 2005—2017)和国家统计局网站(<http://data.stats.gov.cn/index.htm>),包括灾害发生时间、地点、农作物受灾面积(因灾减产1成以上的农作物播种面积)、成灾面积(因灾减产3成以上的农作物播种面积)、绝收面积(因灾减产8成以上的农作物播种面积)、受灾率(受灾面积占总播种面积的比例)、成灾率(成灾面积占总播种面积的比例)、受灾人口、直接经济损失以及各类防灾、减灾投资项目和金额等。

基于《降水量等级》标准,暴雨定义为短时间内发生较强降水(24 h降水量不小于50 mm)的天气现象,大暴雨标准为24 h降水量不小于100 mm,特大暴雨标准为24 h降水量不小于250 mm。暴雨日数是指在研究时段里研究区域内所有观测站发生暴雨的日数总和,大暴雨日数、特大暴雨日数依此类推(例如,当某日 x 个观测站发生暴雨时,则记暴雨日数为 x)。洪涝灾害是指因为降水较多而产生的洪水、涝灾与渍害的总称。暴雨洪涝灾害是指由暴雨引发的洪涝灾害(於俐等, 2018)。

综合考虑自然地理区域和灾情损失、防治数据的行政省域性,本研究提到的江南地区取上海、浙江、福建、江西、湖南5个省级行政区域,包括352个气象观测站。本研究对各项数据进行逐条整理和核实,考虑到数据的连续性、完整性、可靠性和可对比性,采用的研究时段为1978—2018年。

首先采用常规统计方法对江南地区暴雨及其引发的暴雨洪涝灾害损失数据计算均值、最大值、最小值、标准差、峰度、偏度等,利用趋势分析、小波分析、突变检验等方法分析时间、空间分布及变化特征。利用相关分析、对比分析等方法分析灾害与降水、防灾减灾能力建设的关系。

3 江南地区暴雨洪涝灾害影响的时、空特征

3.1 江南地区洪涝灾害影响的时间变化

以1978—2018年因洪涝灾害农作物受灾面积

的平均值定义特大与重大洪涝灾害年,标准为:因洪涝农作物受灾超过其平均值 90% 的年份为特大洪涝灾害年,受灾面积介于其平均值 50%—90% 的年份为重大洪涝灾害年,其余为一般洪涝灾害年(姜灵峰等, 2016)。要说明的是,这种定义带有一定的主观性,但都可以给出客观标准,便于在防灾减灾决策中应用。

江南地区洪涝灾害严重。统计结果表明,近 41 年洪涝造成江南地区农作物受灾累计 $7.8 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 年均 $1.9 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 年均受灾率为 9.5%; 累计成灾 $4.4 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 年均 $1.1 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 年均成灾率为 5.3%。

近 41 年江南地区因洪涝农作物受灾面积、成灾面积、受灾率和成灾率具有明显的年际和年代际变化。图 1 显示,在 20 世纪末之前呈波动上升趋势,20 世纪 90 年代为峰值期,在 20 世纪末以后呈波动下降趋势。4 项数据的最高值均出现在 1998 年,江南地区受灾达 $5.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 成灾达 $3.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 受灾率达 26.66%, 成灾率达 17.84%。历史资料显示,1998 年,江南地区乃至全国都发生了大范围特大暴雨洪涝灾害事件,属于 50 年一遇的涝年。近 41 年中共有 9 a(1990、1992、1993、1994、1995、1996、1998、2002、2010 年)达到重大或以上洪涝灾害等级,其中有 7 a 处于 20 世纪 90 年代;有 3 a(1994、1998、2010 年)达到特大洪涝灾害等级,其中 2 a 处于 20 世纪 90 年代。20 世纪 90 年代

年均受灾 $3.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 比近 41 年平均值高 73.48%, 10 a 中有 9 a 均高于近 41 年的平均值;而 1978—1989 年和 2000—2018 年年均受灾面积均低于平均值,31 a 中有 27 a 均低于平均值。可见,大灾之年,作物受灾面积和成灾面积明显高于多年平均水平,灾害的等级越高,对农业生产的影响越严重。

需要说明的是,特大暴雨洪涝的 3 a 可能分别与 1994 年印度洋偶极子事件、1997/1998 年及 2009/2010 年厄尔尼诺事件有关(Guan, et al, 2003, 2003a; 冯利华等, 2001; 王钦等, 2012)。

通过滑动 t 检验,发现受灾面积的突变时间大约在 1988 年和 1999 年。为进一步阐明灾害发生规律,制作了不同时段受灾面积、受灾率均值统计表(表 1),发现 2000 年后灾害发生较少、影响较轻、变化幅度较小。结果还表明,1978—1999 年的受灾面积、受灾率均值及其标准差均高于 2000—2018 年均值及其标准差,说明 2000 年后受灾损失较轻且变化幅度较小,其原因可能涉及到降水量的年代际变化以及防灾、减灾能力的提升等。峰度、偏度均为正值,且 2000 年后峰度、偏度值较 2000 年前更大,说明 2000 年后暴雨洪涝灾害发生相对集中于个别年份,无灾或灾害发生少、影响小的年份相对较多。

3.2 江南地区洪涝灾害影响的区域差异

江南地区洪涝灾害受灾情况具有显著的地域

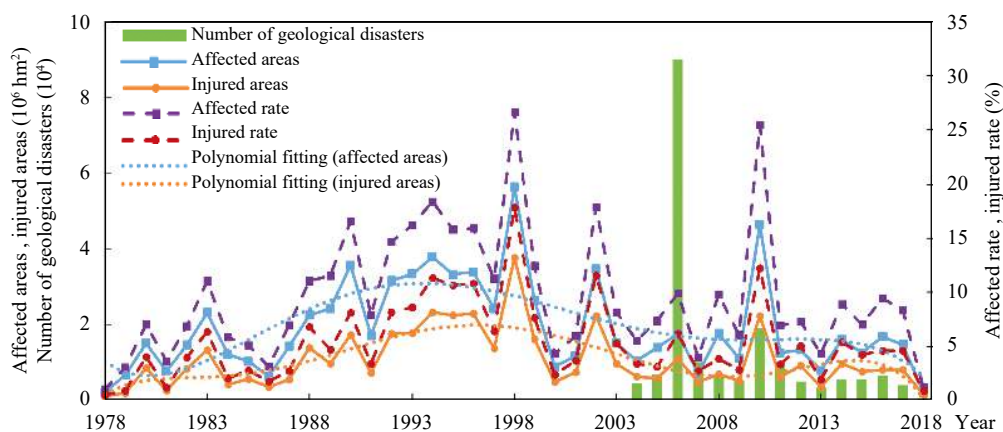


图 1 1978—2018 年江南地区暴雨洪涝灾害农作物受灾面积(蓝色折线)、成灾面积(橙色折线)、受灾率(紫色虚线)、成灾率(红色虚线)及地质灾害频次(绿色柱形)的年际变化(蓝色和橙色虚线分别为受灾面积和成灾面积的多项式拟合曲线)

Fig. 1 Variations of affected agricultural area (cyan solid), damaged area (orange solid), affected rate (purple dashed), damaged rate (red dashed) and frequency of geological disasters due to rainstorm-flood disasters (green bars) during 1978—2018 in Jiangnan region (Dotted lines in cyan and orange are for polynomial fittings of affected and damaged areas, respectively)

表 1 1978—2018 年江南地区暴雨洪涝灾害农作物受灾面积、受灾率常规统计结果
Table 1 Statistics of affected agricultural area and affected rate due to rainstorm-flood disasters during 1978—2018 in Jiangnan region

时段	受灾面积				受灾率			
	平均值(10^6 hm^2)	标准差(10^6 hm^2)	峰度	偏度	平均值(%)	标准差(%)	峰度	偏度
1978—1999年	2.2	1.3	0.5	0.6	10.5	6.2	0.5	0.6
2000—2018年	1.5	1.0	5.4	2.1	8.3	5.4	5.7	2.1
1978—2018年	1.9	1.2	1.1	1.1	9.5	5.9	1.3	1.2

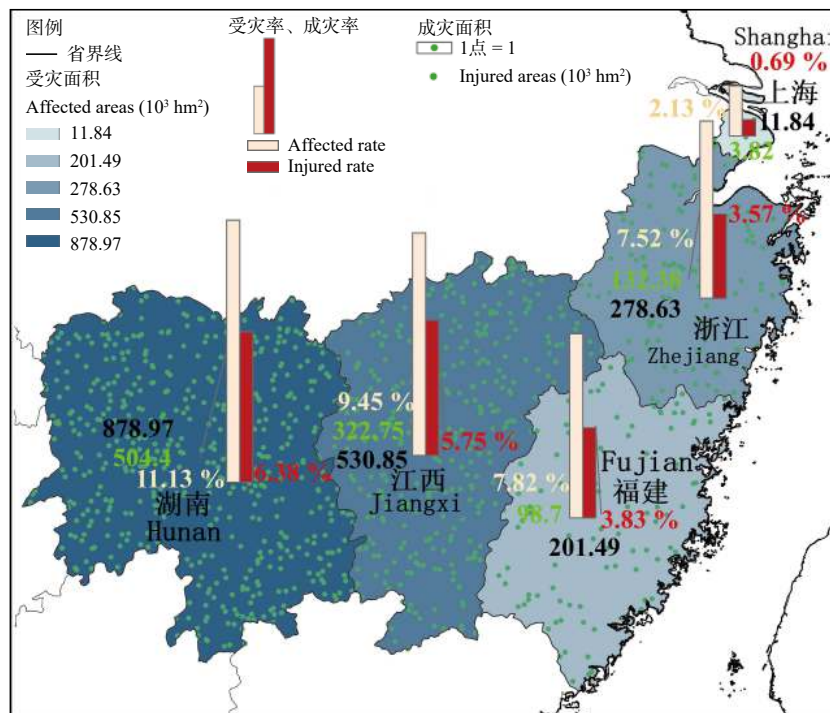


图 2 1978—2018 年江南地区洪涝灾害农作物受灾面积 (蓝色底图)、成灾面积 (绿色圆点)、受灾率 (黄色柱形) 和成灾率 (红色柱形) 的空间分布

Fig. 2 Distribution of affected agricultural areas (bluish shades), damaged areas (green dots), affected rate (yellow bars) and damaged rate (red bars) due to rainstorm-flood disasters during 1978—2018 in Jiangnan region

差异。图 2 为近 41 年江南地区不同省份或区域洪涝灾害农作物受灾面积、成灾面积、受灾率和成灾率，从中可见，江南地区受灾情况的地域性特点较强。近 41 年年平均受灾面积、成灾面积、受灾率均呈现由西向东减少的分布特征，空间差异显著。江南东部地区的受灾率不到江南西部地区的二分之一。

受灾面积最大的是湖南省 (江南西部)，年平均受灾面积达 $8.8 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，占湖南省农作物总播种面积的 11.13%，占整个江南地区受灾面积的 46.21%，年平均成灾面积 $5.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，占整个江南地区成灾面积的 47.5%。江西省 (江南中部) 年平均受灾面积居第二，达 $5.3 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，受灾率为 8.77%，占整个江

南地区受灾面积的 27.9%。江南东部地区受灾面积总计 $4.9 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，受灾率仅为 4.59%，占整个江南地区受灾面积的 25.9%，上海市各项数据均最低。

值得注意的是，对比 2000 年前后的年平均受灾率发现，各省受灾率均明显降低。特别是江南东部地区，平均受灾率从 9.44% 降到 4.59%，降幅达到 51.38%。

江南地区内部各区域受灾面积、受灾率特征可从表 2 进一步看出显著的差异。江南西部 (湖南) 受灾面积、受灾率平均值及受灾面积的标准差均最高，说明其受灾面积、受灾率较大，受灾面积变化幅度大，受到暴雨洪涝灾害的影响较大。江南中部

表 2 1978—2018 年江南地区不同区域暴雨洪涝灾害农作物受灾面积、受灾率常规统计结果
Table 2 Statistics of affected agricultural areas and affected rate due to rainstorm-flood disasters during 1978—2018 in Jiangnan region

区域	受灾面积				受灾率(%)			
	平均值(10^6 hm^2)	标准差(10^6 hm^2)	峰度	偏度	平均值(%)	标准差(%)	峰度	偏度
湖南(江南西部)	8.8	5.8	0.8	1.2	11.1	7.3	0.7	1.2
江西(江南中部)	5.3	4.6	7.5	2.4	9.5	7.9	7.1	2.3
福建	2.0	2.3	3.9	2.0	7.8	8.2	3.4	1.8
浙江	2.8	2.4	0.3	0.9	7.5	5.7	-0.4	0.6
上海	0.1	0.2	2.7	1.9	2.1	3.9	3.1	2.0
江南东部	4.9	4.2	1.3	1.3	7.2	5.4	1.0	1.1

(江西)地区受灾面积、受灾率的峰度、偏度均为正值且较大,说明其发生过极严重的暴雨洪涝灾害,分析数据可知,近 41 年单年受灾面积及受灾率极大值均以江西省最大,1998 年江西省受灾面积达 $2.4 \times 10^6 \text{ hm}^2$,受灾率高达 41.63%,远高于江南东部和西部地区。而江南东部地区受灾面积、受灾率平均值及标准差均较低,说明其受到暴雨洪涝灾害影响相对较小。

4 近 41 年江南地区暴雨发生特点

洪涝灾害多由暴雨造成。1978—2018 年江南地区暴雨频次及强度呈波动上升趋势。由图 3 可知,近 41 年整个江南地区所有观测站年均暴雨日数约 1530 d,年均大暴雨日数约 214 d,单站平均暴雨日数为 4.3 d。江南地区观测站暴雨日数最多的

是 2016 年,达 2167 d,其次是 1999、2010 和 2015 年,都超过了 2000 d,最少年份为 1978 年,为 881 d。大暴雨日数最多的是 2005 年,达 352 d,其次是 1994、1998、1999、2010、2016 年,均超过了 300 d,最少年份为 1978 年,为 74 d。

近 41 年来,江南地区暴雨强度与频次的变化趋势基本一致。暴雨日数(暴雨累计降水量)总体上均具有年际和年代际变化特征。暴雨日数(暴雨累计降水量)功率谱分析表明,85% 信度以上的主要变化周期有 27.3、2.3 a(3.4 a)。小波分析表明,90% 信度以上的主要变化周期均为 2—4 a。同时,长期趋势为正,趋势系数为 126.1 d/(10 a)(11042.3 mm/(10 a)),表明暴雨日数(暴雨累计降水量)有上升趋势。就年代际变化而言,20 世纪 90 年代和 2010 年以后为暴雨频次及强度的高值期,20 世纪 80 年代以前及

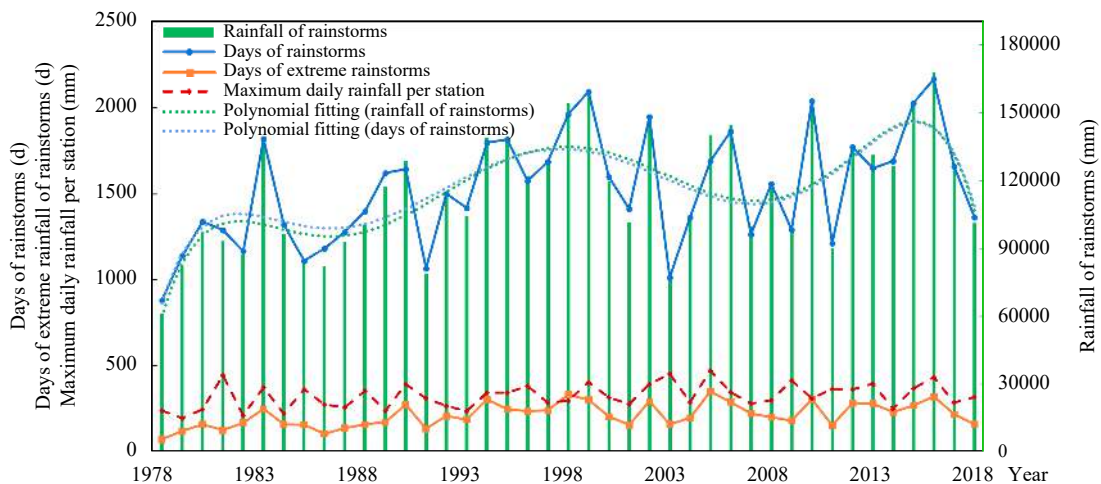


图 3 1978—2018 年江南地区暴雨日数(蓝色折线)、大暴雨日数(橙色折线)、暴雨累计降水量(绿色柱形)、单站单日最大降水量(红色虚线)的年度变化

Fig. 3 Variation of rainstorm days (cyan solid), extreme rainstorm days (orange solid), rainfall of rainstorms (green bars), and maximum daily rainfall per station (red dashed) during 1978 to 2018 in Jiangnan region

21 世纪初暴雨频次及强度相对较低。暴雨日数与暴雨累计降水量的变化基本一致,其相关系数为 0.99,两者高度相关。

滑动 t 检验表明,暴雨日数和暴雨累计降水量的突变时间均在 1993、1999 和 2011 年附近。2000—2018 年的年平均暴雨日数及暴雨累计降水量平均值均高于 1978—1999 年平均值(表 3),但标准差则低于 1978—1999 年,说明 2000—2018 年暴雨频次及强度相对更高,但其变化幅度相对较低。而 2000—2018 年的年平均暴雨日数及暴雨累计降水量峰度和偏度均略小于 1978—1999 年,这说明在本时间段内暴雨变化幅度较小,极端大暴雨发生

次数相对较少。

近 41 年江南地区暴雨频次及强度的空间分布差异显著。由图 4 可知,江南地区暴雨频次及强度的空间分布总体上呈现出江南中东部较高、西部较低的特点。年平均暴雨日数、年平均暴雨累计降水量均以江南东部最高、中部次之、西部最低。而去除掉江南东部站点数较多的影响,年平均暴雨日数/站点数、年平均暴雨累计降水量/站点数都以江南中部最高,江南东部略次之,江南西部仍最低。需要注意的是,在江南东部地区内,福建省暴雨频次及强度较大,年平均暴雨累计降水量/站点数高达 4049.6 mm,年平均暴雨日数/站点数高达 5.3 d,说

表 3 1978—2018 年江南地区暴雨频次及强度常规统计结果
Table 3 Conventional statistical results of frequency and intensity of rainstorms during 1978—2018 in Jiangnan region

时段	暴雨日数				暴雨累计降水量			
	平均值(d)	标准差(d)	峰度	偏度	平均值(mm)	标准差(mm)	峰度	偏度
1978—1999年	1460.3	318.7	-0.68	0.23	108934.7	26614.3	-0.78	0.28
2000—2018年	1610.5	314.9	-0.71	0.00	123029.1	24954.1	-0.98	0.06
1978—2018年	1529.9	322.0	-0.78	0.10	115466.2	26508.9	-0.89	0.12

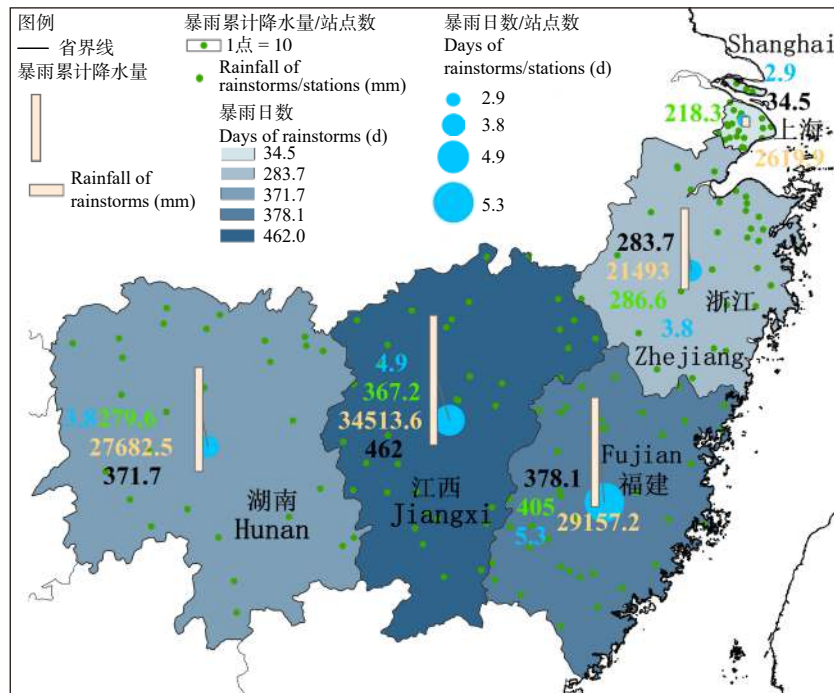


图 4 1978—2018 年年平均江南地区暴雨日数(蓝色底图)、暴雨日数/站点数(蓝色圆点)、暴雨累计降水量(黄色柱形)、暴雨累计降水量/站点数(绿色圆点)的空间分布

Fig. 4 Distribution of annual mean days of rainstorms (bluish shades), annual mean rainfall of rainstorms (yellowish bars), annual mean days of rainstorms/stations (bluish dots), and annual mean rainfall of rainstorms/stations (green dots) during 1978—2018 in Jiangnan region

明其平均每个站点每年发生暴雨超过 5 d, 暴雨累计降水量超过 4000 mm。由此可见, 如果仅考虑降水量的绝对值而不是相对值的影响, 福建省、江西省可能会面临更高的暴雨洪涝灾害风险。江南西部地区暴雨频次及强度相对于江南地区中部和东部均较低, 说明如果仅考虑降水因素, 其面临的暴雨洪涝灾害风险相对较低。但这与前文分析的江南地区农作物受灾损失西多东少的空间分布(图 2)并不一致。究其原因, 可能与江南地区东、中、西部不同区域本身的自然地理环境和防灾能力差异有关。

近 41 年江南地区暴雨频次的时间分布较集中。由图 5 可知, 江南地区暴雨主要发生在 6 月, 占全年的比例超过四分之一。其次为 5、7 和 8 月, 5—8 月各月发生的暴雨占全年的比例均超过 10%, 总计共占全年的 69.73%。而 1—3 月和 10—12 月为暴雨的少发期, 这 6 个月各月发生的暴雨占全年的比例均低于 5%。由此可知, 如果仅考虑降水因素, 江南地区 5—8 月暴雨洪涝灾害风险较高, 尤其是 6 月, 需要特别注意防范预警。但是, 需要注意的是, 大暴雨、尤其是特大暴雨的多发期, 相对于暴雨的多发期, 有所延后。5—9 月为大暴雨的多发期, 这 5 个月各月占全年的比例均超过 10%, 其中

6 月最多, 占全年的 31.82%。特大暴雨在 1—3 月和 11—12 月未见发生, 主要集中在 6—10 月, 这 5 个月每月占全年的比例均超过了 10%, 其中, 6、8、9 月各月占全年的比例均超过了 20%, 7 月占全年的 18.45%。11 月到 3 月, 这 5 个月近 41 年未发生特大暴雨。大暴雨尤其是特大暴雨虽然发生次数少, 但是暴雨强度大, 其所引发的暴雨洪涝灾害造成的影响很可能更加严重。对比洪涝灾害发生时间(表 4)发现, 暴雨频次的时间分布与洪涝灾害发生的时间分布基本一致。

近 41 年江南地区暴雨在时间、空间上分布的均匀性呈波动下降趋势, 持续性、集中性暴雨日益频发。由图 6 可知, 江南地区持续性暴雨日数、各月暴雨日数的标准差、各观测站暴雨日数的标准差均呈波动上升趋势, 且年代际变化特征与暴雨频次及强度的变化特征(图 3)基本一致, 均以 20 世纪 90 年代和 2010 年以后为相对高值期。将连续 3 d 及以上发生暴雨记为持续性暴雨(鲍名, 2007), 将所有持续性暴雨的日数求和记为持续性暴雨日数, 发现持续性暴雨日数以 1998 年(187 d)、1999 年(166 d)、2005 年(157 d)和 2006 年(129 d)居多。各月暴雨日数的标准差以 1995 年(212.25 d)、2017 年(203.1 d)、1998 年(186 d)和 1994 年

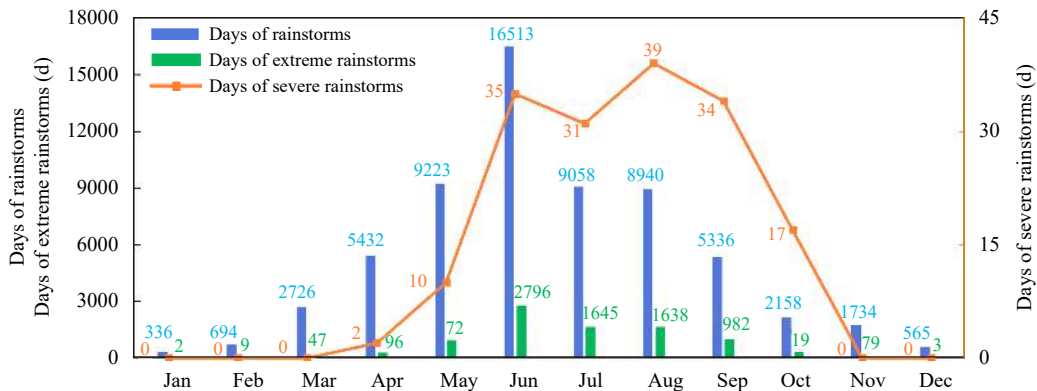


图 5 1978—2018 年江南地区暴雨日数(蓝色柱形)、大暴雨日数(绿色柱形)和特大暴雨日数(橙色折线)的时间分布
 Fig. 5 Monthly variations of rainstorm days (blue bars), heavy rainstorm days (green bars) and extremely heavy rainstorm days (orange solid) during 1978—2018 in Jiangnan region

表 4 2004—2016 年江南地区暴雨洪涝灾害频次分布

Table 4 Monthly changes in frequency of rainstorm-flood disasters during 2004—2016 in Jiangnan region

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
灾害频次	0	0	2	7	31	45	18	7	3	2	5	0

注: 灾害频次根据历年《中国气象灾害年鉴》整理, 仅统计受灾面积超过 $5 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 或因灾死亡 10 人以上, 或造成直接经济损失 1 亿元以上的暴雨洪涝灾害。

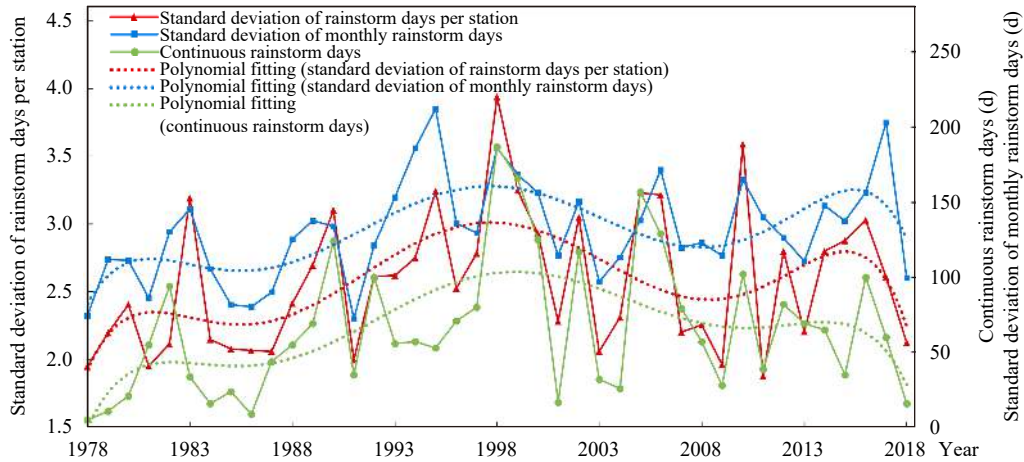


图6 1978—2018年江南地区持续性暴雨日数(绿色折线)、各月暴雨日数的标准差(蓝色折线)和各观测站暴雨日数的标准差(红色折线)(点线为这三种变化曲线相应的多项式拟合)

Fig. 6 Consecutive rainstorm days (green solid), standard deviation of monthly rainstorm days (blue solid), and standard deviation of rainstorm days per station (red solid) during 1978—2018 in Jiangnan region (Dotted lines are the polynomial fittings corresponding to these three quantities)

(185.96 d)最大,说明这些年份暴雨较集中地分布在一两个月内,而非均匀分布在12个月。各站暴雨日数的标准差以1998年(3.94 d)、2010年(3.59 d)、1995年(3.25 d)和1999年(3.25 d)最大,说明这些年份暴雨较集中地分布在一些站点(区域),而非均匀分布在各个站点(区域)。如果仅考虑降水因素,时间、空间上的持续性、不均匀性更强的暴雨可能会导致更严重的洪涝灾害。

5 近41年江南地区暴雨洪涝灾害变化原因分析

造成近41年江南地区洪涝灾害发生频次及其影响变化的因素较为复杂,既有自然因素,也有社会因素。降水因素是最重要的自然因素之一,而最突出的社会因素则可能是暴雨洪涝灾害防治能力建设。

5.1 降水量变化的影响

暴雨频次及强度增加对于洪涝灾害损失增加有显著正向影响。相关分析结果(表5)表明,1978—2018年暴雨日数、大暴雨日数、暴雨累计降水量与农作物受灾面积、成灾面积、受灾率、成灾率均呈显著正相关(通过了99.9%的显著性 t 检验),即暴雨发生频次及强度越高,暴雨洪涝灾害造成农作物受灾面积、成灾面积、受灾率、成灾率就越大。且大暴雨日数与农作物受灾面积、成灾面积、受灾率

的相关系数均略高于暴雨日数与农作物受灾损失因子的相关系数,说明在一定范围内,暴雨强度增强,是农作物受灾面积、尤其是成灾面积增加的重要因素。但是特大暴雨日数与受灾面积等因子的相关关系则不够显著。解释这一现象,可从两个角度进行:(1)当一次暴雨已经造成当地作物受灾后,在此地暴雨强度增强或再次发生暴雨时,受灾面积就不容易增加。以2010年6月14—24日江西11市暴雨洪涝为例,共包括88个观测站,其中仅有39个站在这期间的单站最高日降水量未超过1000 mm,仅有21个站单站未超过500 mm,仅有7个站单站未超过250 mm,而其农作物受灾面积仅为 $6.1 \times 10^5 \text{ hm}^2$,受灾率为11.1%,绝收面积 $1.3 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。(2)进一步核查发现,41年来,即使是受灾率较高的湖南省和福建省,其最高的受灾率分别只有29.91%(1996年湖南)和33.97%(1990年福建),成灾率则更低,因而不存在所有农作物播种面积均已受灾的情况。而这两省受灾面积与特大暴雨发生的频率并不存在很好的对应关系。究其原因可能有以下3种情况:(1)特大暴雨发生本身较少而导致统计意义上的相关关系不够显著,(2)近年来通过新增改善除涝面积等防灾、减灾工程建设增强了承灾体韧性,(3)农作物品种选择对暴雨洪涝的敏感性不同从而导致灾害形成的机理和后果存在差异。

表 5 江南地区降水因子与灾害损失因子的相关系数
Table 5 Correlations between precipitation factors and disaster loss factors in Jiangnan region

相关系数	受灾面积	成灾面积	受灾率	成灾率
暴雨日数	0.57***	0.57***	0.61***	0.60***
大暴雨日数	0.57***	0.58***	0.61***	0.62***
特大暴雨日数	0.23	0.23	0.27*	0.27*
暴雨累计降水量	0.57***	0.57***	0.61***	0.61***
持续性暴雨日数	0.56***	0.56***	0.57***	0.56***
每月暴雨日数标准差	0.62***	0.65***	0.64***	0.67***
每站暴雨日数标准差	0.72***	0.72***	0.74***	0.74***

注: * $P < 0.1$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。

持续性暴雨日数、每月暴雨日数标准差、每站暴雨日数标准差与农作物受灾面积、成灾面积、受灾率、成灾率均呈显著正相关关系(通过了 99.9% 的显著性 t 检验),说明暴雨在时、空上的持续性、不均匀性越强,暴雨洪涝灾害造成农作物受灾面积、成灾面积、受灾率、成灾率就越大。每月暴雨日数标准差、每站暴雨日数标准差与受灾损失的相关系数更大,表明暴雨的时、空集中度对灾情的影响可能比暴雨的持续性对灾情的影响更大。每月暴雨日数标准差与成灾面积、成灾率的相关系数 (> 0.6) 大于其与受灾面积、受灾率的相关系数,说明在时间上更集中的暴雨可能更易导致农作物成灾,农作物产量受到的影响更大。

线性回归分析表明,江南地区灾损因子与降水因子的回归系数均为正。江南地区受灾面积与暴雨日数、大暴雨日数、特大暴雨日数、暴雨累计降水量、持续性暴雨日数、每月暴雨日数标准差、每站暴雨日数标准差的回归系数均为正,分别为 2140 hm^2/d 、10020 hm^2/d 、80280 hm^2/d 、26 hm^2/mm 、15060 hm^2/d 、22190 hm^2/d 、1704920 hm^2/d 。对比回归系数的大小,进一步佐证了前文由比较相关系数大小得出的结论,暴雨频次、强度、持续性及时空集中度增强对于受灾损失增大有显著正影响。

值得注意的是,灾害与暴雨变化在不同年代呈现不同的关系。对比图 1 和图 3 可以发现,在 20 世纪 90 年代暴雨频次及强度与受灾损失的对应关系较好,但是 2010 年以后,对应关系较弱,即 2010 年后暴雨频次及强度均较高,但受灾损失却相对较低。计算表明,1981—1999 年暴雨日数与受灾面积的相关系数为 0.73(通过了 99.9% 的显著性 t 检验),2000—2018 年暴雨日数和受灾面积的相关系

数仅为 0.53(通过了 95% 的显著性 t 检验),1990—1999 年暴雨累计降水量与受灾面积的相关系数为 0.56(通过了 90% 的显著性 t 检验),而 2009—2018 年暴雨累计降水量与受灾面积的相关系数仅为 0.51(未通过 90% 的显著性 t 检验)。换句话说,1981—1999 年受灾面积变化方差有 53.3% 能够被暴雨日数变化所解释,而 2000—2018 年,仅有 28.1% 的受灾面积变化方差能被暴雨日数变化所解释。1990—1999 年受灾面积变化方差有 31.4% 能够被暴雨累计降水量变化所解释,而 2009—2018 年受灾面积变化方差仅有 26.0% 能够被暴雨累计降水量变化所解释。

无论是从时间还是空间上看,暴雨频次及强度的分布与农作物因洪涝受灾损失分布均不一致甚至完全相反。从时间变化上看,近 41 年江南地区暴雨频次及强度均呈波动上升趋势(图 3),与农作物受灾面积等呈先增后减的波动变化趋势(图 1)并不一致。这表明暴雨洪涝灾害发生及其影响既受气象因素影响,也可能受到承灾体和社会因素影响。例如,2016 年,江南地区暴雨发生频次和强度为近 41 年最高,但是发生暴雨洪涝灾害频次及造成农作物受灾面积、受灾率均较低。可能的原因有二:(1)近年来灾害防治能力越来越强,有效地减少了灾害发生和减轻了灾害造成的影响;(2)2016 年发生的暴雨洪涝灾害虽然总次数少,但是,发生的灾害大都影响范围广,持续时间长。

从空间差异上看,近 41 年农作物受灾情况的空间分布与暴雨发生频次及强度的空间分布并不完全一致。这可通过对比图 2 和图 4 看出。图 2 中,农作物受灾面积、成灾面积、受灾率均呈显著的自西向东下降的特征,而图 4 则显示,暴雨频次

及强度均呈显著的自东向西下降的特征,暴雨频次及强度除以站点数的值则以中部最高,东部略次之,西部最低。可见,暴雨洪涝灾害造成的影响比较复杂,且与暴雨发生的频次和强度并非一一对应,其他自然地理、社会环境等多因素可能起到了重要作用。

5.2 暴雨洪涝灾害防治能力建设

进入 21 世纪以来,江南地区暴雨频次及强度呈波动上升趋势,但农作物受灾面积却呈波动下降

趋势。这表明探究暴雨洪涝灾害及其影响变化的原因,除分析气象因素之外,还需从暴雨洪涝灾害防治能力建设上分析。

近年来江南地区洪涝灾害防治能力建设逐年显著增强。图 7 为江南地区地质灾害防治投资、地质灾害防治项目数、水库数、水库总库容量、除涝面积(除涝面积指由于兴修水利设施或进行改种,使易涝耕地免除淹涝,除涝标准达到三年一遇以上者)。从图中可以看出,2004—2017 年,5 项指标均

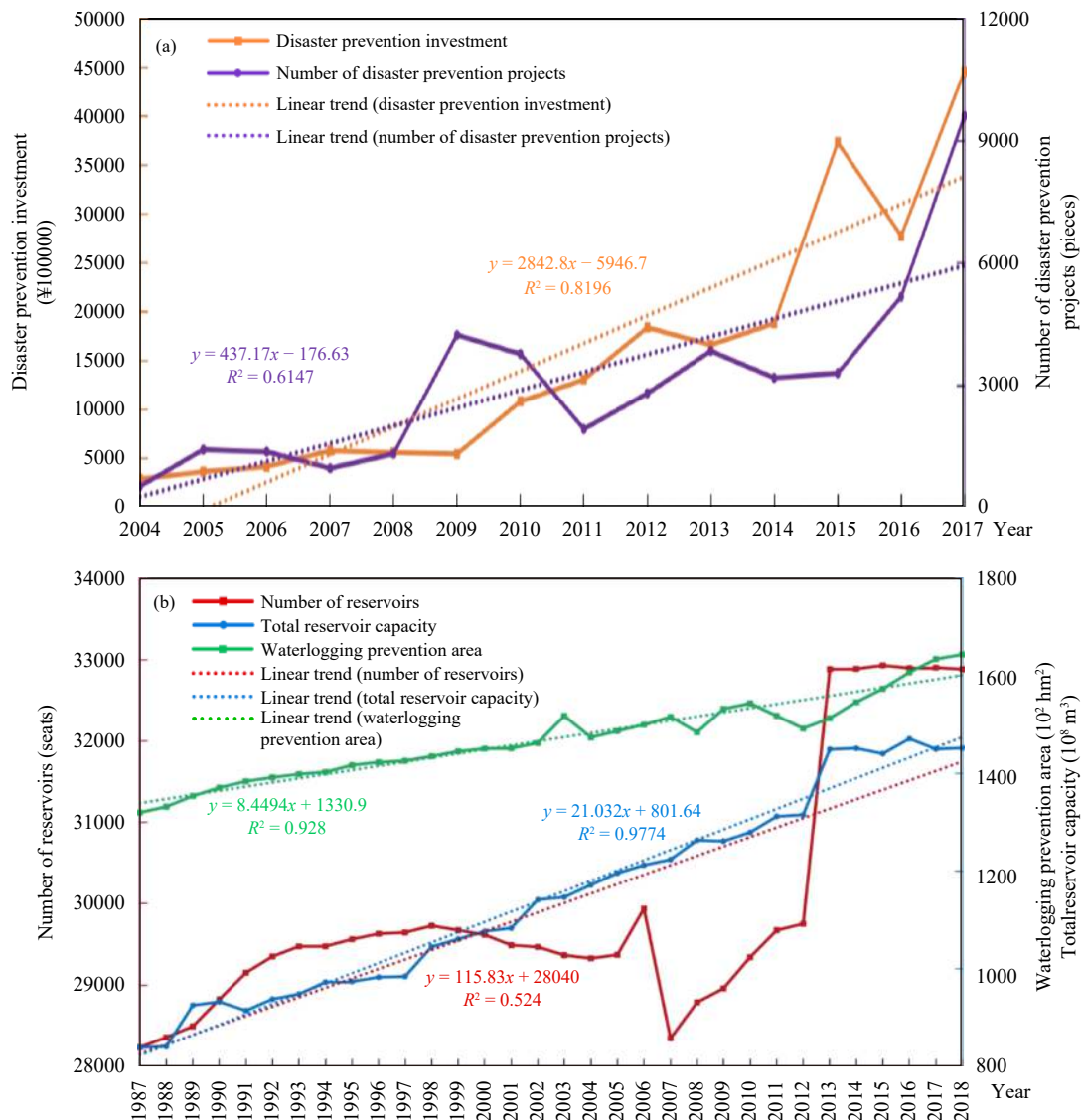


图 7 江南地区各项灾害防治数据 (a. 2004—2017 年地质灾害防治投资 (橙色折线) 及项目数 (紫色折线), b. 1987—2018 年水库数 (红色折线)、水库总库容量 (蓝色折线)、除涝面积 (绿色折线))

Fig. 7 Variations of disaster prevention data in Jiangnan region (a. disaster prevention investment (orange solid) and projects (purple solid) from 2004 to 2017, b. number of reservoirs (red solid), total reservoir capacity (blue solid) and water-logging prevention area (green solid) from 1987 to 2018)

呈不同程度的增长趋势,尤其是灾害防治投资金额和项目数逐年显著增长,可见相关部门对于增强防灾、减灾能力有所行动。1987—2018年,江南地区水库数、水库总库容量、除涝面积的趋势系数分别为 1158.3 个/(10 a)、 $210.3 \times 10^8 \text{ m}^3/(10 \text{ a})$ 、 $8400 \text{ hm}^2/(10 \text{ a})$,2004—2017 年灾害防治投资、灾害防治项目数、灾害防治投资占 GDP 比例的趋势系数分别为 284280 万元/(10 a)、4371.7 项/(10 a)、0.013%/(10 a)。江南地区地质灾害防治投资平均每年为 15.38 亿元,平均占当年 GDP 比例为 0.0140%。地质灾害防治投资最高的年份为 2015 年,高达 37.34 亿元,占当年 GDP 的 0.0267%;最低为 2004 年,仅 2.91 亿元,占当年 GDP 的 0.0084%,相差 10 多倍,总体上地质灾害防治投资占 GDP 的比例也呈显著增加趋势(图略),可见相关政府部门越来越意识到在发展经济的同时,增强防灾、减灾能力的重要性。地质灾害防治投资在 2010 年之后发生了较大的增长,这可能是因为 2010 年发生暴雨洪涝灾害频次及强度均最高,造成损失最大,相关部门治理灾害需要较大投入,也更加意识到加强防灾预警工作、增强承灾体抗灾能力的重要性。2004—2009 年,地质灾害防治投资相对较小,平均每年 4.61 亿元,平均占 GDP 的 0.0089%;而 2010—2017 年,地质灾害防治投资平均每年约 23.45 亿元,平均占 GDP 的 0.0178%,灾害防治投资金额超过原来的 5 倍,占 GDP 的比例也翻倍增长。

洪涝灾害防治能力建设也受到暴雨频次及强度变化的影响。相关分析结果表明,水库数与暴雨日数、暴雨累计降水量均呈显著正相关,相关系数分别为 0.52 和 0.46(通过了置信度 90% 的显著性 t 检验);灾害防治投资与暴雨日数呈显著正相关,相关系数为 0.49(通过了置信度 90% 的显著性 t 检

验)。由此可见,当年暴雨发生频次及强度越高,相关部门对于灾害防治的投入就越大。及时准确的暴雨预报、灾害预警和有效的灾害防治措施,对于减少灾害发生和减轻灾害损失发挥了重要作用。

将 1987—2018 年江南地区灾害损失因子与灾害防治因子进行相关分析(表 6),发现灾害损失因子与灾害防治因子呈显著负相关,受灾面积与水库数、水库总库容量、除涝面积的回归系数分别为 $-246 \text{ hm}^2/\text{个}$ 、 $-2928 \text{ hm}^2/(10^8 \text{ m}^3)$ 、 $-6317 \text{ hm}^2/(100 \text{ hm}^2)$,说明随着灾害防治能力的提升,灾害损失显著减少。

为进一步验证灾害防治能力建设对于减少灾害发生与减轻灾害损失的作用,从时间和空间两个维度对比在不同灾害防治能力建设情况下的暴雨致灾概率及其影响,发现暴雨洪涝灾害防治工程建设对避免灾害发生及减轻其影响作用明显。

从时间上看,选取近 41 年中暴雨日数超过 1900 d 的共 6 a 数据进行对比(表 7),发现在暴雨频次与强度基本相当的情况下,近年来暴雨造成的洪涝灾害影响明显减轻。2016 年暴雨频次及强度略高于 1999 年,但其农作物受灾面积、成灾面积、受灾率却远低于 1999 年,尤其是成灾面积,降幅达 99.3%。2015 年与 2010 年暴雨频次及强度相当,但其农作物受灾面积、成灾面积、受灾率明显下降,2015 年受灾面积、成灾面积仅为 2010 年的约 27%。且 2015 年相对于 2010 年,暴雨洪涝灾害直接经济损失减少了 67.38%(614.9 亿元),受灾人口减少了 57.68%(2559.7 万人)。可见,暴雨洪涝灾害防治工程建设对避免灾害发生或减轻其影响作用明显。

从空间上看,江南西部农作物受灾情况较重,但其暴雨频次及强度均较低,相反,江南东部幅员辽阔、人口稠密、经济发达,但其受灾损失却最

表 6 江南地区灾害防治因子与灾害损失因子的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between disaster prevention factors and disaster loss factors in Jiangnan region

相关系数	受灾面积	成灾面积	受灾率	成灾率
水库数	-0.30*	-0.23	-0.26	-0.21
水库总库容量	-0.47***	-0.43**	-0.39**	-0.37**
除涝面积	-0.42**	-0.36**	-0.34*	-0.30*
水库数/农作物播种面积	-0.51***	-0.47***	-0.43**	-0.40**
水库总库容量/农作物播种面积	-0.51***	-0.47***	-0.42**	-0.40**
除涝面积/农作物播种面积	-0.51***	-0.48***	-0.42**	-0.41**

注: * $P < 0.1$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$ 。

表 7 暴雨频次、强度与农作物受灾情况统计表
Table 7 Statistics of the frequency and intensity of rainstorms and the damage to crops

年份	暴雨日数(d)	大暴雨日数(d)	暴雨累计降水量(mm)	受灾面积(10 ⁶ hm ²)	成灾面积(10 ⁶ hm ²)	受灾率(%)
2016	2167	322	167789.1	1.7	0.8	9.46
1999	2095	304	159799.2	2.6	1.6	12.44
2010	2040	307	156416.6	4.6	2.2	25.47
2015	2028	271	153807.0	1.3	0.8	6.99
1998	1963	334	154242.1	5.6	3.8	26.66
2002	1948	295	148909.9	3.5	2.2	17.91

轻。分析这种不平衡的成因,可能是江南西部因地理因素而承灾条件较差,易发生滑坡、泥石流等灾害,而江南东部虽然面积大,但是地形分布和地质条件相对不易发生洪涝灾害,且在经济发展的同时,防灾、减灾能力不断增强,有效减少了灾害发生和降低了灾害等级。

江南地区防灾、减灾能力建设在空间上存在显著的东强西弱的特点(表 8),这对于江南东部灾害发生频次及损失均较少有着显著的正影响。灾害防治项目数、除涝面积、水库总库容量均以浙江省最大,福建省或湖南省次之,灾害防治投资以江西省最大,浙江省次之,灾害防治投资占 GDP 的比例以江西省最大,湖南省次之。单位农作物播种面积灾害防治项目数、灾害防治投资、除涝面积、水库总库容量均以浙江省最大,福建省或上海市次大;单位人口灾害防治项目数、除涝面积、水库总库容量均以浙江省最大,单位人口灾害防治投资以江西

省最大,浙江省次之。2004—2017 年江南东部平均每年建设灾害防治项目 2127.4 个,占江南地区的 68.6%;年平均水库总库容量 587.5 亿 m³,占江南地区的 44.5%;除涝面积 7.0×10⁵ hm²,占江南地区的 45.8%。这也说明,江南地区,尤其是江南中西部地区,需要继续加强防灾、减灾投资和项目实施。

另外,随着中国天气、气候预报准确率越来越高,暴雨洪涝灾害预报、预警信息发布与传播对减少灾害发生或减轻损失的作用日益显著。2004 年中国气象局颁布实施《突发气象灾害预警信号发布试行办法》,2007 年,国务院办公厅印发《关于进一步加强气象灾害防御工作的意见》,明确提出要设立气象信息员,以便传播预警信息,现在中国已有超过 70 万名气象信息员,覆盖 99.7% 的行政村(姜灵峰等,2016),这显著提高了农村地区对暴雨洪涝灾害的防范能力,从而使得在同等气象条件下,灾害发生频次及损失显著减少(表 7)。

表 8 2004—2017 年平均江南地区各项灾害防治数据
Table 8 Average disaster prevention data in Jiangnan region from 2004—2017

地区	上海	浙江	福建	沪浙闽 (江南东部)	江西 (江南中部)	湖南 (江南西部)	江南地区
灾害防治投资/GDP	0.002%	0.018%	0.017%	0.013%	0.059%	0.028%	0.021%
灾害防治项目数(项)	1.9	1268.7	856.9	2127.4	156.0	818.7	3102.1
灾害防治投资(万元)	2664	54584	28092	85339	64003	52052	201394
除涝面积(10 ³ hm ²)	56.9	509.5	134.3	700.7	379.5	450	1530.2
水库总库容量(亿 m ³)	0.7	411.6	175.1	587.5	297.4	436.4	1321.3
灾害防治项目数(项)/农作物播种面积(10 ³ hm ²)	0.005	0.552	0.439	0.459	0.028	0.102	0.171
灾害防治投资(万元)/农作物播种面积(10 ³ hm ²)	6.96	23.73	14.37	18.40	11.65	6.49	11.09
除涝面积/农作物播种面积	0.149	0.222	0.069	0.151	0.069	0.056	0.084
水库总库容量(亿 m ³)/农作物播种面积(10 ³ hm ²)	0.0018	0.1790	0.0896	0.1267	0.0541	0.0544	0.0728
灾害防治项目数(项)/常住人口(万)	0.0009	0.2374	0.2309	0.1885	0.0350	0.1243	0.1389
灾害防治投资(万元)/常住人口(万)	1.19	10.21	7.57	7.56	14.35	7.9	9.02
除涝面积(10 ³ hm ²)/常住人口(万)	0.0255	0.0953	0.0362	0.0621	0.0851	0.0683	0.0685
水库总库容量(亿 m ³)/常住人口(万)	0.0003	0.077	0.0472	0.0521	0.0667	0.0663	0.0592

6 结论与讨论

分析了1978—2018年江南地区暴雨洪涝灾害及其影响的时、空特征,并探究了降水因子和社会防治因子对其的影响,总结如下:

近41年来江南地区因暴雨洪涝灾害农作物受灾面积、成灾面积及受灾率具有显著的年际和年代际变化特征,在20世纪末之前呈波动上升趋势,20世纪末以后呈波动下降趋势。且2000—2018年受灾面积、受灾率及其标准差均低于1978—1999年均值及标准差。而从空间上看,江南地区受灾损失呈现明显的自西向东下降的特点。江南西部(湖南省)年均受灾面积、成灾面积、受灾率占整个江南地区的近二分之一。江南中部(江西)年均受灾面积、受灾率的峰度、偏度较大。江南东部受到暴雨洪涝灾害影响相对较小。

近41年来江南地区暴雨发生频次及强度呈波动增加趋势,空间上呈现为江南中东部较高、西部较低的特点,暴雨发生集中期为5—8月,占全年的69.73%,尤以6月最多,占全年的26.33%。

暴雨日数、大暴雨日数、暴雨累计降水量与农作物受灾面积、成灾面积、受灾率均呈显著正相关(相关系数0.6左右),即暴雨发生频次及强度越高,暴雨洪涝灾害造成农作物受灾面积、成灾面积、受灾率就越大。大暴雨日数与农作物受灾面积、成灾面积、受灾率的相关系数均略高于暴雨日数,说明在一定范围内,暴雨强度增强,对农作物受灾面积、尤其是成灾面积增加有一定正影响。但是值得注意的是,特大暴雨日数与受灾面积等因子的相关并不强,由此可见,当暴雨强度达到一定程度后,暴雨强度继续增强,对于增加农作物受灾、成灾面积没有显著影响。

持续性暴雨日数、每月暴雨日数标准差、每站暴雨日数标准差与农作物受灾面积、成灾面积、受灾率、成灾率均呈显著正相关,说明暴雨的时、空上的持续性、集中度越强,受灾损失就越大。

暴雨频次、强度与农作物受灾情况在时间、空间上的分布并不完全一致,这表明暴雨洪涝灾害发生及其影响既受气象因素影响,也受到承灾体和社会因素影响。近14年来江南地区地质灾害防治投资、地质灾害防治项目数、水库数、水库总库容量、除涝面积等灾害防治建设数据均呈不同程度的增

长趋势,使得在同等降水频次与强度下,农作物受灾情况大幅度减轻。水库数、灾害防治投资与暴雨日数呈显著正相关,由此可见,当年暴雨发生频次及强度越高,相关部门对于灾害防治的投入就越大。及时有效的灾害防治措施,对于减少灾害发生和减轻灾害损失发挥了重要作用。空间上,江南地区防灾、减灾工程建设呈现为东强西弱的特点。

上述研究表明,暴雨洪涝灾害发生及其影响与降水因素存在较强的相关,但社会防治能力建设是重要的影响因素,其对减少灾害发生和减轻损失发挥了重要作用。在洪涝灾害研究中,首要的困难就是历史灾情资料不足,而且气象、统计、水利、民政等部门统计保存的资料存在一些出入。本研究主要基于气象、统计部门收集的暴雨洪涝灾害灾情数据开展江南地区近41年暴雨洪涝灾害及其影响的时、空变化分析,在区域尺度上开展单灾种的灾害影响研究,有利于进一步认识江南地区暴雨洪涝灾害影响的时、空差异和社会影响下暴雨洪涝灾害承灾体的变化,对进一步加强暴雨洪涝灾害防治能力建设、避免暴雨洪涝灾害发生、减轻其损失具有指导意义。然而,文中对各单项防灾、减灾具体措施分别对减少暴雨洪涝灾害或减轻其损失的贡献率研究还显不足,对交通受阻、滑坡等地质灾害产生的经济损失和人员伤亡考虑不足,对上游降水对下游洪涝灾害的影响考虑不足,未来可开展更细致更全面更具实际意义的研究工作。

实践证明,暴雨洪涝灾害防御工程建设和气象灾害预警效果显著,这也启示,未来要继续加强防灾、减灾工作。同时,不仅要关注暴雨及其引发的洪涝灾害本身的发生特点,更要关注区域承灾体在社会经济等因素作用下的变化,因地制宜、因事而化、因时而进地制定具有针对性的防灾、减灾对策。

需要说明的是,文中主要探讨了不同等级的暴雨洪涝与灾情的联系,而江南地区暴雨洪涝灾害的形成与暴雨的频次、强度、发生区域、承灾体性状等有关,灾害的形成机理十分复杂,还需要有更多的研究才能阐明。而暴雨的频次、强度、发生区域与大气环流变化、海温异常强迫等因素有关,尽管已有不少相关研究,但更系统的更深入的研究则需要在未来进行。

致 谢: 相关数据资料来自国家统计局、中国气象局。

参考文献

- 白静漪, 管兆勇. 2014. 华东地区夏季不同等级降水变化特征分析. *气象科学*, 34(4): 365-372. Bai J Y, Guan Z Y. 2014. Climatic characteristics of graded summer precipitation over East China. *J Meteor Sci*, 34(4): 365-372 (in Chinese)
- 鲍名. 2007. 近 50 年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景. *大气科学*, 31(5): 779-792. Bao M. 2007. The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over China and their backgrounds on the large scale. *Chinese J Atmos Sci*, 31(5): 779-792 (in Chinese)
- 陈传雷, 管兆勇, 肖光梁等. 2018. 辽宁省极端长历时暴雨时空分布及影响系统特征. *气象与环境学报*, 34(2): 28-34. Chen C L, Guan Z Y, Xiao G L, et al. 2018. Characteristics of temporal and spatial distribution and influencing weather systems of extreme long duration rainstorms in Liaoning province. *J Meteor Environ*, 34(2): 28-34 (in Chinese)
- 丁一汇. 2019. 中国暴雨理论的发展历程与重要进展. *暴雨灾害*, 38(5): 395-406. Ding Y H. 2019. The major advances and development process of the theory of heavy rainfalls in China. *Torrential Rain Disaster*, 38(5): 395-406 (in Chinese)
- 冯利华, 张强. 2001. 1998 年长江巨洪与厄尔尼诺事件. *东海海洋*, 19(4): 13-16. Feng L H, Zhang Q. 2001. Large flood along the Changjiang River in 1998 and El Nino event. *Donghai Mar Sci*, 19(4): 13-16 (in Chinese)
- 国家防汛抗旱总指挥部. 2017. 中国水旱灾害公报: 2016. 北京: 中国水利水电出版社, 1-23. State Flood Control and Drought Relief Headquarters. 2017. *Bulletin of Flood and Drought Disasters in China: 2016*. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1-23
- 郭进修, 李泽椿. 2005. 我国气象灾害的分类与防灾减灾对策. *灾害学*, 20(4): 106-110. Guo J X, Li Z C. 2005. Classification of meteorological disasters and strategies for hazard prevention and reduction in China. *J Catastrophol*, 20(4): 106-110 (in Chinese)
- 黄士松. 1986. 华南前汛期暴雨. 广州: 广东科技出版社, 244pp. Huang S S. 1986. *Heavy Rainfall Over Southern China in the Pre-Summer Rainy Season*. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 244pp (in Chinese)
- 姜海如. 2007. 气象灾害的危害层次及其防御抗救过程研究. *暴雨灾害*, 26(3): 193-198. Jiang H R. 2007. Classification of meteorological disasters and salvation measures. *Torrential Rain Disaster*, 26(3): 193-198 (in Chinese)
- 姜灵峰, 崔新强. 2016. 近 20 年我国农业气象灾害变化趋势及其原因分析. *暴雨灾害*, 35(2): 102-108. Jiang L F, Cui X Q. 2016. Analysis on variation tendency and cause of China's agrometeorological hazards in the latest 20 years. *Torrential Rain Disaster*, 35(2): 102-108 (in Chinese)
- 刘玲, 沙奕卓, 白月明. 2003. 中国主要农业气象灾害区域分布与减灾对策. *自然灾害学报*, 12(2): 92-97. Liu L, Sha Y Z, Bai Y M. 2003. Regional distribution of main agrometeorological disasters and disaster mitigation strategies in China. *J Nat Dis*, 12(2): 92-97 (in Chinese)
- 罗亚丽, 孙继松, 李英等. 2020. 中国暴雨的科学和预报: 改革开放 40 年研究成果. *气象学报*, 78(3): 419-450. Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al. 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: Research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China. *Acta Meteor Sinica*, 78(3): 419-450 (in Chinese)
- 秦大河. 2015. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理及适应国家评估报告. 北京: 科学出版社, 120pp. Qin D H. 2015. *National Assessment Report on Extreme Weather and Climate Events and Disaster Risk Management and Adaptation in China*. Beijing: Science Press, 120pp (in Chinese)
- 万日金, 吴国雄. 2008. 江南春雨的时空分布. *气象学报*, 66(3): 310-319. Wan R J, Wu G X. 2008. Temporal and spatial distribution of the spring persistent rains over southeastern China. *Acta Meteor Sinica*, 66(3): 310-319 (in Chinese)
- 王黎娟, 管兆勇, 何金海. 2007. 2005 年 6 月华南致洪暴雨的大尺度环流特征及成因探讨. *南京气象学院学报*, 30(2): 145-152. Wang L J, Guan Z Y, He J H. 2007. Features of the large-scale circulation for flash-flood-producing rainstorm over South China in June 2005 and its possible cause. *J Nanjing Inst Meteor*, 30(2): 145-152 (in Chinese)
- 王黎娟, 管兆勇, 何金海. 2008. 2003 年淮河流域致洪暴雨的环流背景及其与大气热源的关系. *气象科学*, 28(1): 1-7. Wang L J, Guan Z Y, He J H. 2008. The circulation background of the extremely heavy rain causing severe floods in Huaihe river valley in 2003 and its relationships to the apparent heating. *Scientia Meteor Sinica*, 28(1): 1-7 (in Chinese)
- 王钦, 李双林, 付建建等. 2012. 1998 和 2010 年夏季降水异常成因的对比分析: 兼论两类不同厄尔尼诺事件的影响. *气象学报*, 70(6): 1207-1222. Wang Q, Li S L, Fu J J, et al. 2012. On the formation of anomalous summer precipitation in the years of 2010 and 1998: A comparison of the El Niño's impact between Modoki and typical El Niño cases. *Acta Meteor Sinica*, 70(6): 1207-1222 (in Chinese)
- 王晓东, 董炜华, 褚丽娟等. 2015. 吉林西部旱涝灾害与降水对应关系的分析. *灾害学*, 30(4): 53-58. Wang X D, Dong W H, Chu L J, et al. 2015. Relationship analysis of drought-flood disasters and precipitation in western Jilin province. *J Catastrophol*, 30(4): 53-58 (in Chinese)
- 温克刚, 丁一汇. 2008. 中国气象灾害大典. 综合卷. 北京: 气象出版社, 159-229. Wen K G, Ding Y H. 2008. *China Meteorological Disaster Encyclopedia: Synthesis Fascicule*. Beijing: China Meteorological Press, 159-229 (in Chinese)
- 吴绍洪, 尹云鹤. 2012. 极端事件对人类系统的影响. *气候变化研究进展*, 8(2): 99-102. Wu S H, Yin Y H. 2012. Impacts of climate extremes on human systems. *Adv Climate Change Res*, 8(2): 99-102 (in Chinese)
- 夏军, 王惠筠, 甘瑶瑶等. 2019. 中国暴雨洪涝预报方法的研究进展. *暴雨灾害*, 38(5): 416-421. Xia J, Wang H Y, Gan Y Y, et al. 2019. Research progress in forecasting methods of rainstorm and flood disaster in China. *Torrential Rain Disaster*, 38(5): 416-421 (in Chinese)
- 肖滢, 叶殿秀, 陈昊明. 2017. 中国大陆雨涝时空特征. *灾害学*, 32(1): 85-89. Xiao C, Ye D X, Chen H M. 2017. Temporal and spatial

- characteristics of waterlogging over mainland China. *J Catastrophol*, 32(1): 85-89 (in Chinese)
- 辛吉武, 许向春. 2007. 我国的主要气象灾害及防御对策. *灾害学*, 22(3): 85-89. Xin J W, Xu X C. 2007. The main meteorological disasters in China and the countermeasures. *J Catastrophol*, 22(3): 85-89 (in Chinese)
- 杨红娟, 韦方强, 马振峰等. 2017. 四川省泥石流灾害的时空分布规律和降水特征. *灾害学*, 32(4): 102-107. Yang H J, Wei F Q, Ma Z F, et al. 2017. Spatial-temporal distribution of debris flows in Sichuan province in China and the corresponding rainfall characteristics. *J Catastrophol*, 32(4): 102-107 (in Chinese)
- 於琰, 徐影, 张永香. 2018. 近 25a 中国暴雨及其引发的暴雨洪涝灾害影响的时空变化特征. *暴雨灾害*, 37(1): 67-72. Yu L, Xu Y, Zhang Y X. 2018. Temporal and spatial variation of rainstorms and the impact of flood disasters due to rainstorms in China in the past 25 years. *Torrential Rain Disaster*, 37(1): 67-72 (in Chinese)
- 中国气象局. 2005—2017. 中国气象灾害年鉴. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 2005—2017. Yearbook of Meteorological Disasters in China. Beijing: Meteorological Press (in Chinese)
- Aerts J C J H, Botzen W J, Clarke K C, et al. 2018. Integrating human behaviour dynamics into flood disaster risk assessment. *Nat Climate Change*, 8(3): 193-199
- Ashutosh M. 2014. Managing natural hazards in India. *Dis Adv*, 7(12): 26-31
- Brooks H E, Stensrud D J. 2000. Climatology of heavy rain events in the United States from hourly precipitation observations. *Mon Wea Rev*, 128(4): 1194-1201
- de Vries F T, Liiri M E, Bjørnlund L, et al. 2012. Land use alters the resistance and resilience of soil food webs to drought. *Nat Climate Change*, 2(4): 276-280
- Furl C, Sharif H O, El Hassan A, et al. 2015. Hydrometeorological analysis of tropical storm Hermine and central Texas flash flooding, September 2010. *J Hydrometeorol*, 16(6): 2311-2327
- Gao C, Zhang Z T, Zhai J Q, et al. 2015. Research on meteorological thresholds of drought and flood disaster: A case study in the Huai River Basin, China. *Stochast Environ Res Risk Assess*, 29(1): 157-167
- Gourley J J, Flamig Z L, Vergara H, et al. 2017. The Flash project: Improving the tools for flash flood monitoring and prediction across the United States. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(2): 361-372
- Guan Z Y, Ashok K, Yamagata T. 2003. Summertime response of the tropical atmosphere to the Indian Ocean dipole sea surface temperature anomalies. *J Meteor Soc Japan*, 81(3): 533-561
- Guan Z Y, Yamagata T. 2003a. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections. *Geophys Res Lett*, 30(10): 1544
- Guan Z Y, Han J, Li M G. 2011. Circulation patterns of regional mean daily precipitation extremes over the middle and lower reaches of the Yangtze River during the boreal summer. *Climate Res*, 50(2-3): 171-185
- Habersack H, Haspel D, Schober B. 2015. Flood prevention and mitigation at large rivers. *Nat Hazards*, 75(1): 1-3
- Jin D C, Guan Z Y. 2017. Summer rainfall seesaw between Hetao and the middle and lower reaches of the Yangtze River and its relationship with the north Atlantic oscillation. *J Climate*, 30(17): 6629-6643
- Ke D, Guan Z Y. 2014. Variations in regional mean daily precipitation extremes and related circulation anomalies over central China during boreal summer. *J Meteor Res*, 28(4): 524-539
- Lendering K T, Jonkman S N, Kok M. 2016. Effectiveness of emergency measures for flood prevention. *J Flood Risk Manage*, 9(4): 320-334
- Marengo J A, Torres R R, Alves L M. 2017. Drought in Northeast Brazil: Past, present, and future. *Theor Appl Climatol*, 129(3): 1189-1200
- Quan R S. 2014. Risk assessment of flood disaster in Shanghai based on spatial-temporal characteristics analysis from 251 to 2000. *Environ Earth Sci*, 72(11): 4627-4638
- Sarmiento F O. 2009. Geomorphology of natural hazards and human-induced disasters in Ecuador. *Dev Earth Surf Process*, 13: 149-163
- Shi J, Cui L L. 2012. Characteristics of high impact weather and meteorological disaster in Shanghai, China. *Nat Hazards*, 60(3): 951-969
- Tao F L, Yokozawa M, Zhang Z. 2009. Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new process-based model development, optimization, and uncertainties analysis. *Agric For Meteorol*, 149(5): 831-850
- Wenzel F, Zschau J. 2014. Early Warning for Geological Disasters. Berlin, Heidelberg: Springer, 1-12
- Zhai P M, Zhang X B, Wang H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *J Climate*, 18(7): 1096-1108
- Zhao H J, Ma F S, Guo J. 2012. Regularity and formation mechanism of large-scale abrupt karst collapse in southern China in the first half of 2010. *Nat Hazards*, 60(3): 1037-1054
- Zhao S Y, Deng Y, Black R X. 2017. A dynamical and statistical characterization of U.S. extreme precipitation events and their associated large-scale meteorological patterns. *J Climate*, 30(4): 1307-1326