

# 中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素

胡 畔<sup>1,2,3,4</sup>, 陈 波<sup>1,2,3,4</sup>, 史培军<sup>1,2,3,5</sup>

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 应急管理部-教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 4. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 5. 青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008)

**摘要:** 暴雨洪涝灾害给中国造成了巨大人口和经济损失。本文通过对中国气象灾情普查数据的分析, 结合小时降水数据、统计年鉴等资料, 研究了1984—2007年间中国极端降水和暴雨洪涝灾情时空分异特征。在此基础上, 采用地理探测器研究了中国暴雨洪涝灾情时空格局的影响因素。结果表明, 研究时段内全国极端降雨指标没有一致的变化趋势。长江、珠江及东南沿海等流域暴雨洪涝频次显著增加, 但因灾人口死亡率下降, 表明设防能力的提升对人口损失的缓减影响明显; 西北地区因灾死亡人数和人口受灾率、经济损失等均增加, 表明设防能力薄弱; 因暴雨洪涝受灾人口贡献率最高的因子是气象致灾因素, 又因暴雨洪涝死亡人口贡献率最高的是地理等孕灾环境和社会经济等承灾体因素, 故暴雨洪涝直接经济损失贡献率最高的是地理等孕灾环境因素。该研究可为洪水灾情的影响因素定量化分析提供理论参考。

**关键词:** 暴雨; 暴雨洪涝; 灾情; 时空格局; 地理探测器; 影响因素; 中国

DOI: 10.11821/dlxb202105008

## 1 引言

中国是世界上人口和经济大国, 同时也是饱受洪水灾害侵扰的国家之一。根据《中国水旱灾害公报2017》发布的数据<sup>[1]</sup>, 中国自1950年开始, 到2016年, 平均每年因洪死亡人数为4327人, 1990—2017年间平均每年造成约200亿美元的直接经济损失。由于特殊的地理位置, 中国气候主要受东亚季风的影响, 由暴雨引发的洪水灾害尤其严重<sup>[2]</sup>。尤其自1990年起, 中国极端天气事件频率和强度都显著增加<sup>[3]</sup>, 由此导致的洪水灾害更加频繁<sup>[4]</sup>。此外, 近年来快速的城市化进程使中国各主要河流流域洪泛平原及沿河两岸人口与财富快速聚集, 洪水灾害风险因此增加<sup>[5-6]</sup>。水文气象极值的变化和人类活动影响的加剧, 加上两者的复杂交互作用, 会对洪水灾害的强度和频率造成显著影响<sup>[7]</sup>。因此, 在全球变暖影响下, 开展洪水灾害时空规律研究, 并利用地理探测器进行洪水灾害成因量化分析, 对中国洪水风险管理、减少人口和经济损失等具有重要理论与实践意义。

已有研究从不同方面对中国洪水灾害过程及灾情进行了分析。一些学者结合气象和水文数据以及历史统计数据研究了洪水灾害的时空特征<sup>[8]</sup>, 并在省级行政单元尺度上分析了洪水灾害的社会经济影响<sup>[9]</sup>。此外, 已有研究从致灾因子的角度对中国洪灾也做了大量

收稿日期: 2019-08-07; 修订日期: 2021-04-29

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0602404); 国家自然科学基金项目(41621061) [Foundation: National Key Research and Development Program, No.2016YFA0602404; National Natural Science Foundation of China, No.41621061]

作者简介: 胡畔(1994-), 女, 湖北荆门人, 硕士生, 研究方向为洪水灾害。E-mail: hupan@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 史培军(1959-), 男, 陕西靖边人, 教授, 研究方向为综合灾害风险研究与防范。E-mail: spj@bnu.edu.cn

研究,包括极端降水事件的频率、强度及其它特征值的趋势变化等<sup>[10-13]</sup>。同时,部分研究在流域和国家尺度上对中国洪水灾害风险做了评估<sup>[14]</sup>。然而,对于中国县域尺度的洪水灾害灾情研究鲜有报导。王静爱等<sup>[15]</sup>首次从省级报刊中收集、整理并建立了中国县级行政单元洪旱灾害数据库,分析了其灾情时空格局,为识别洪水高风险区提供了重要科学依据。於琨等<sup>[16]</sup>采用了中国各级气象部门上报的县级气象灾害普查数据,发现暴雨高值区与洪水灾害严重区没有明显相关,说明研究洪水灾害仅考虑洪水致灾因子是有局限性的,孕灾环境、承灾体与洪水致灾因子的相互作用也应当纳入研究范围<sup>[17]</sup>。

可见,理解并识别洪水受灾人数、因洪死亡人数及经济损失增加的影响因素,是有效减轻洪水灾害风险的前提,洪水灾情的影响因素研究更是世界共同关注的重大科学问题<sup>[18]</sup>。洪水灾害事件的频次及灾情的严重程度不仅与降雨量和降雨强度有关,还受地形、区域土地利用、流域土壤类型及土壤前期湿度等地球物理指标的相互作用<sup>[19]</sup>,更与人口分布及密度、社会经济发展水平等社会因素密切联系,对洪水灾害的影响因素分析及驱动因子辨识造成巨大挑战。基于此,本文在已有相关研究基础上,增加了地形、河网密度、人口密度、城镇化率等因素分析,这些影响因素对洪水灾情的空间分布具有重要影响,且随着人类社会的发展而发生着动态变化;并采用地理探测器对暴雨洪涝灾情时空格局的影响因素进行量化分析,以期更加深入地理解中国暴雨洪水灾害的形成原因。从全国视角审视洪水时空特征及影响因素,对于理解洪水灾害的时空尺度效应以及对人类活动的区域响应差异性的理论研究和防洪减灾的应用方面,具有重要科学与理论意义,为洪水灾害的管理提供依据与支撑。

## 2 数据与方法

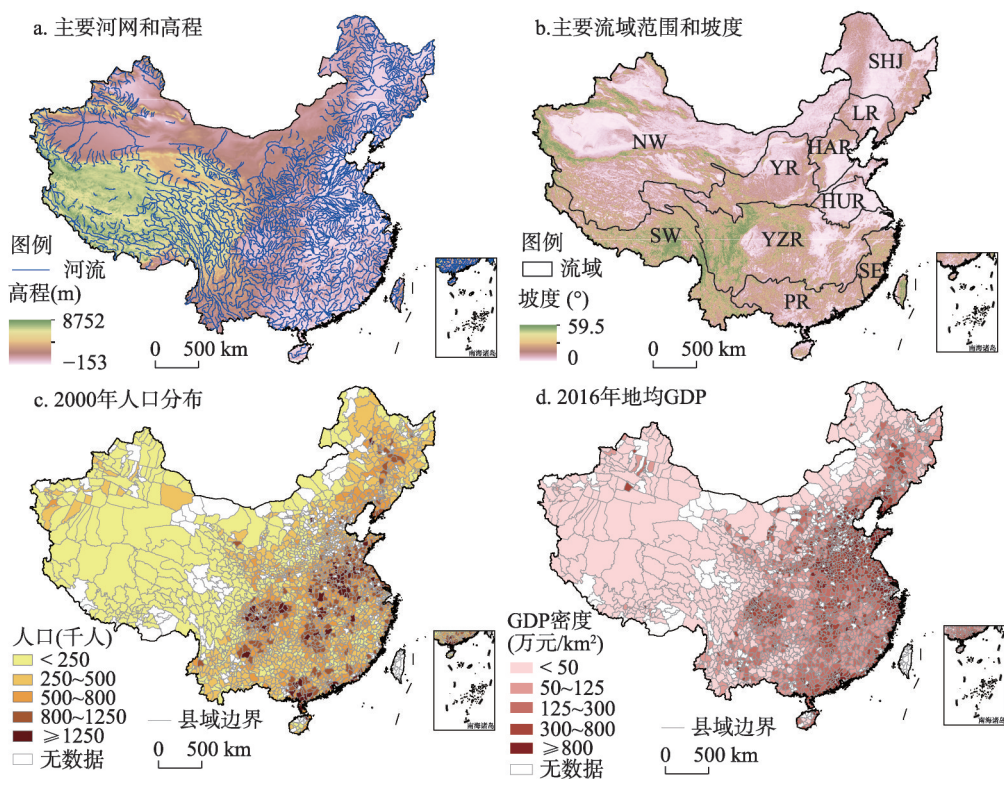
### 2.1 数据

本文采用了国家气候中心收集整理的数据国家县级气象灾害普查数据<sup>[16]</sup>。该数据库包含了民政局统计数据和各级气象部门的上报数据,记录了每场灾害性天气事件的相关指标,例如发生时间、地点,对社会、农业、水资源、工业和交通基础设施等的影响,在公开前进行了质量控制。该数据库是中国的权威单位首次以县级行政区为单位进行分气象灾种统计的数据,空间精细化程度高。本文也参考了国际数据库及相关文献<sup>[20]</sup>对洪水灾害筛选的标准,选取了对人类社会有重大影响的洪水灾害事件进行了分析。筛选标准如下:①死亡人数>1人;②受灾人数>100人;③农田受灾面积>66700 hm<sup>2</sup>;④水毁水库≥1座。满足以上条件之一则看作一场灾害性洪水事件。

小时降水数据来自中国2420个国家级气象站的降水数据。该数据经过了严格的质量控制,可靠性高<sup>[21]</sup>。此外,为了进行暴雨洪涝灾情的影响因素研究,还收集处理了对应时段县级总人口数、非农人口数、GDP、高程、河网密度等数据用于洪水灾情的成因分析。人口数据来源于各年《中华人民共和国全国分县市人口统计资料》,由中华人民共和国公安部编制<sup>[22]</sup>;GDP数据来源于《中国县(市)社会经济统计年鉴》<sup>[23]</sup>;DEM数据来自美国国家大气海洋局制作的1 km分辨率地表高程模型数据<sup>[24]</sup>;河网数据来自中国地理信息分类服务网(<http://www.webmap.cn/commres.do?method=result100W>) (图1),流域划分采用了文献<sup>[25]</sup>的方法。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 小时降水事件划分** 本文将连续的降水时间序列划分为独立的降水事件<sup>[26]</sup>。采用时间序列自相关的方法定义降水事件的时间间隔,当自相关系数小于一定阈值(本文定义



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1786号的标准地图制作,底图无修改;  
图b中缩写NW为西北内陆河流域、SW为西南诸河流域、YR为黄河流域,YZR为长江流域、PR为珠江流域、SE为东南诸河流域、HUR为淮河流域、HAR为海河流域、LR为辽河流域、SHJ为松花江流域。

图1 中国主要河网和高程、流域范围和坡度、人口分布与GDP密度

Fig. 1 Spatial distribution of river streams, elevation, major river basins, slope, population and GDP in China

为显著性水平低于5%)时,将此时间步长看做划分降雨事件的时间间隔<sup>[27-28]</sup>。据此,本文将10 h作为划分降水事件的时间间隔。为保证时间序列的连续性,降雨数据缺失率>1%的站点被剔除。最后选取了共1876个雨量站点降水数据用于本文的分析。少量的缺测数据通过Zhang等<sup>[21]</sup>采用的方法进行补充。小时降雨量<0.1 mm/h的数据用0取代<sup>[26]</sup>。由于北方地区的小时观测数据仅限于汛期,而中国的暴雨洪涝灾害几乎都发生在汛期(5—9月),因此本文重点研究汛期的中国洪水灾情情况。

**2.2.2 趋势及相关性分析** 采用Modified Mann-Kendall方法<sup>[29-30]</sup>对中国洪水灾情及降水的年际变化进行趋势分析。趋势大小由Sen's斜率法进行度量,斜率值的正、负分别表示趋势的上升和下降<sup>[31-33]</sup>。

**2.2.3 洪水灾害核密度估计** 本文采用核密度估计方法(KDE)量化中国历史暴雨洪水事件的发生率<sup>[8, 34]</sup>。核密度估计方程如下式:

$$\lambda(t)=h^{-1}\sum_{i=1}^mK\left(\frac{t-T_i}{h}\right) \tag{1}$$

式中:  $T_i$ 指 $i^{\text{th}}$ 洪水事件的发生时间;  $m$ 是洪水事件总数,  $K(x)$ 是核函数,本文使用高斯核进行估计;  $h$ 是频宽,采用无偏交叉检验法计算最优频宽<sup>[35]</sup>;  $\lambda(t)$ 代表了在某个时间段 $t$ 内洪水灾害事件的发生率,  $t$ 的取值范围为 $[t_1, t_m]$ 。

**2.2.4 基于地理探测器的影响因素分析** 地理探测器是一系列用于度量空间分层异质性的



统计学方法。它基于地理空间分异论,用于探测因变量的决定因素、因素之间的相对重要性等<sup>[36-43]</sup>,广泛应用于经济、气象、地质和地理环境因子的相关关系研究中,近年来已有研究用于探测区域山洪灾害的空间分布特征<sup>[44-48]</sup>。该方法基于以下假设:若某一独立变量 $X$ 对依赖变量 $Y$ 有重要的影响,则变量 $Y$ 和 $X$ 在空间上的分布将会具有较强的空间相似性。 $X$ 可以为数值型或定性数据,这为本文综合识别洪水灾害的社会经济因素和水文、气象因素创造了条件。 $X$ 和 $Y$ 之间的相关性可以用 $q$ 统计量来衡量:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (2)$$

式中: $N$ 表示研究区内 $Y$ 的分区个数; $\sigma^2$ 表示 $Y$ 的方差; $L$ 是根据自变量 $X$ 划分的层数( $h=1, 2, \dots, L$ ); $q$ 值的大小会因为对 $X$ 不同的离散化方案发生一定变化。因此采用Cao等提出的方法<sup>[49]</sup>,以获得最大的 $q$ 值为标准,选择最佳的离散化方法。 $N_h$ 表示第 $h$ 层中 $Y$ 变量的数量, $\sigma_h^2$ 表示 $h$ 层中 $Y$ 变量的方差。 $q$ 值范围是 $[0, 1]$ 。 $q$ 值越大,表示 $X$ 对 $Y$ 的影响力越大。此外,地理探测器还可以探测多个因子 $X_1, X_2, X_3, \dots$ 之间的两两交互作用,并判断作用的方向、强弱、是否为线性等。关于地理探测器的原理及算法见网址 <http://www.geodetector.org/>。采用地理探测器进行数据处理和分析的过程如图2所示,连续型变量的离散化方案根据文献<sup>[49]</sup>选取。

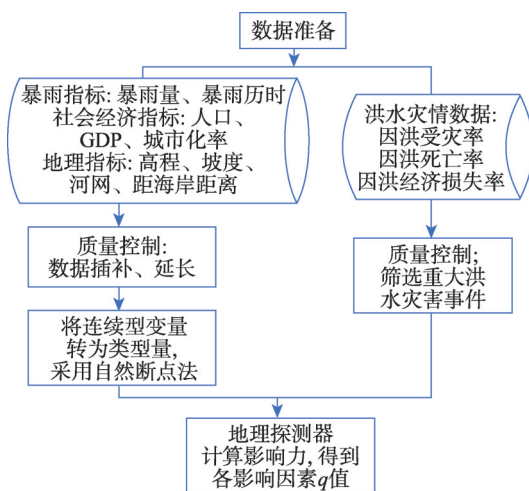


图2 地理探测器使用流程

Fig. 2 Using geodetector to detect the influencing factors of flood disaster

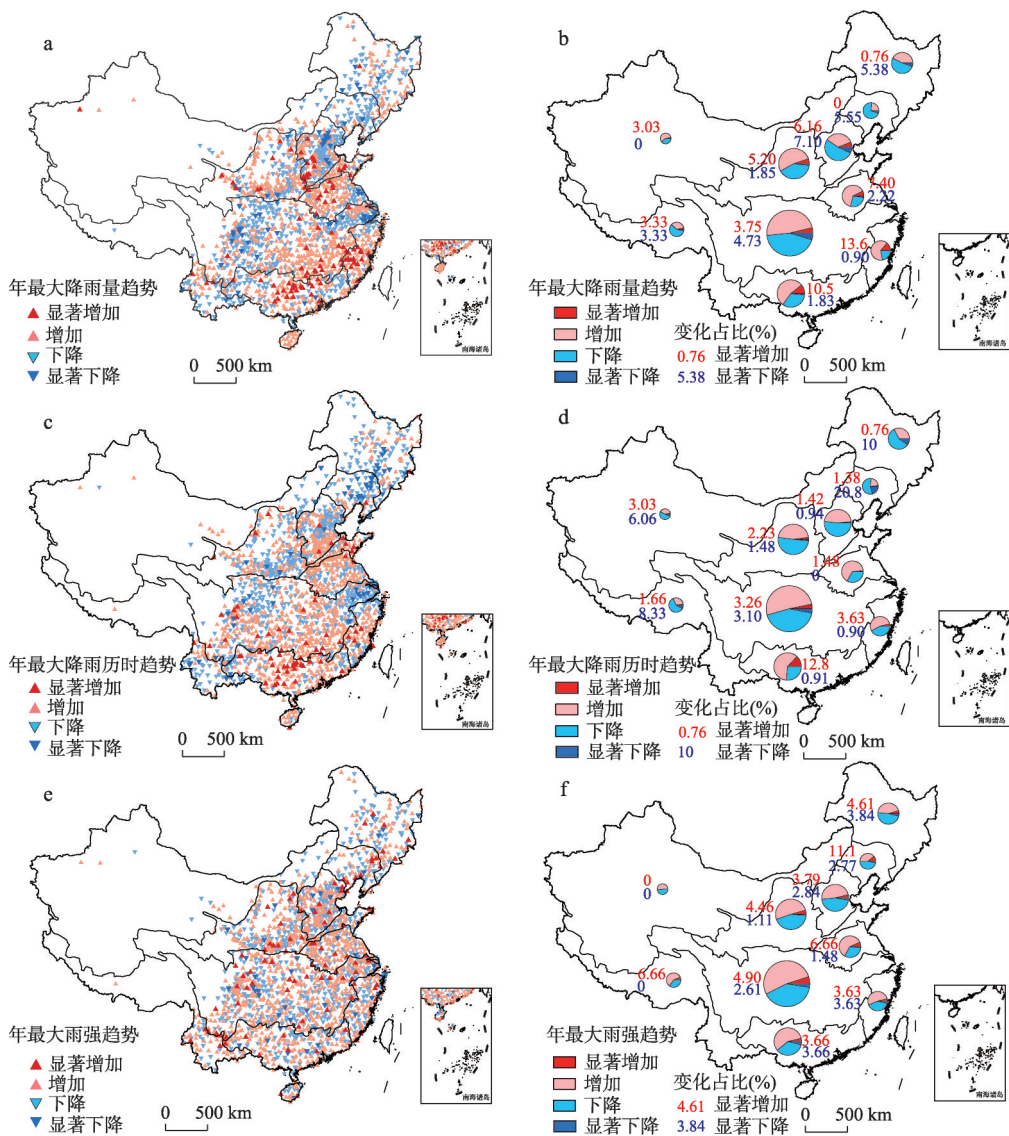
### 3 研究结果

#### 3.1 中国暴雨洪水极值趋势分析

图3是中国年最大降雨事件的降雨特征的变化趋势。从图3a、3b中可以看出,大多数站点的年最大降雨事件的降雨量趋势变化不显著,但部分区域具有显著的增加或减少趋势,其中102个站点(占比5.4%)在0.05水平上显著增加,70个站(占比3.7%)的AMR显著下降。极端降水在中国东南和中东部区域有显著增加的趋势,主要分布于珠江流域中游、东南诸河、淮河流域和海河流域等。总体而言,中国的AMR变化在1984—2007年间不明显。年最大降雨持续时间(ARD)趋势变化(图3c、3d)的空间分布特征与AMR相似,65个站点(占比3.5%)显著上升,69个站点(占比3.7%)呈下降趋势。因此,中国的年最大降水持续时间总体而言没有全国一致的趋势。珠江流域、黄河流域下游及东南诸河,站点出现暴雨历时显著增加的情况;长江下游、松花江和辽河流域降雨历时在减少。图3e中,年最大降雨强度(ARI)趋势的空间格局与AMR(图3a)和ARD(图3c)则完全不同,ARI显著增加的站点和显著下降的站点呈相间分布,从显著性水平看,93个站点(占比5.0%)ARI显著增加,47个站点(占比2.5%)下降。

中国暴雨指标的时空变化如图4所示。暴雨事件根据中国气象局的规定,定义为小时降雨量大于16 mm/h。站点结果的空间插值采用的是反距离加权法(IDW)。总体而言中国的暴雨雨量从东南向东北、西北部递减。由图4可见,中国西北和北部地区暴雨量最少(小于30 mm),且在研究时段内没有显著变化。而中国东部和东南部地区的暴雨量





注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1786号的标准地图制作,底图无修改。

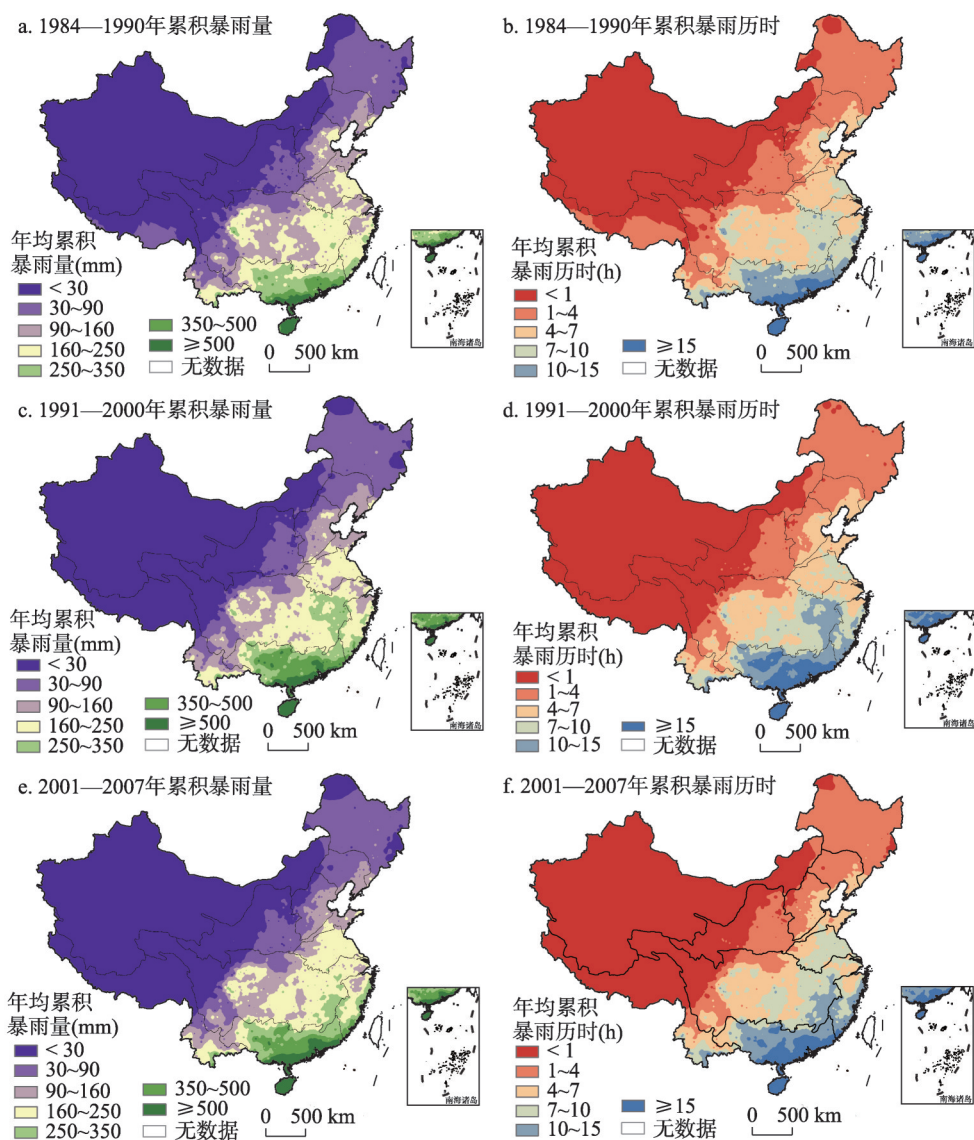
图3 1984—2007年中国暴雨事件特征趋势变化

Fig. 3 Trends in extreme precipitation events in China in 1984-2007

较大，特别是南部沿海区域的暴雨雨量超过 500 mm。1991—2000 年间中国东南部的暴雨量相比于 1984—1990 年有所增加（图 4a、4c），主要发生在珠江流域和长江流域下游，在此期间这些地区的洪水灾害事件也频繁发生。累计暴雨历时的时空格局（图 4b、4d）显示出相似的特征。中国南部沿海及东南部地区在研究时段呈现出暴雨历时增加的趋势，尤其在 1991 年以后更为明显。这意味着这些区域经历了更长历时的暴中雨，显示洪水致灾因子在增强。在研究时段内，中国暴雨雨量和暴雨历时有所增加，其 1991—2000 年时间段内增加的最显著，这与於琰等<sup>[6]</sup>的研究一致。

3.2 暴雨洪水灾害频次时空变化分析

根据现行的地理区划将中国划分为 7 大区域，各区域的洪水事件的发生率如图 5 所示，阴影区域为 95% 置信区间。1984—2007 年间洪水灾害频率增加，其中东北、华东、



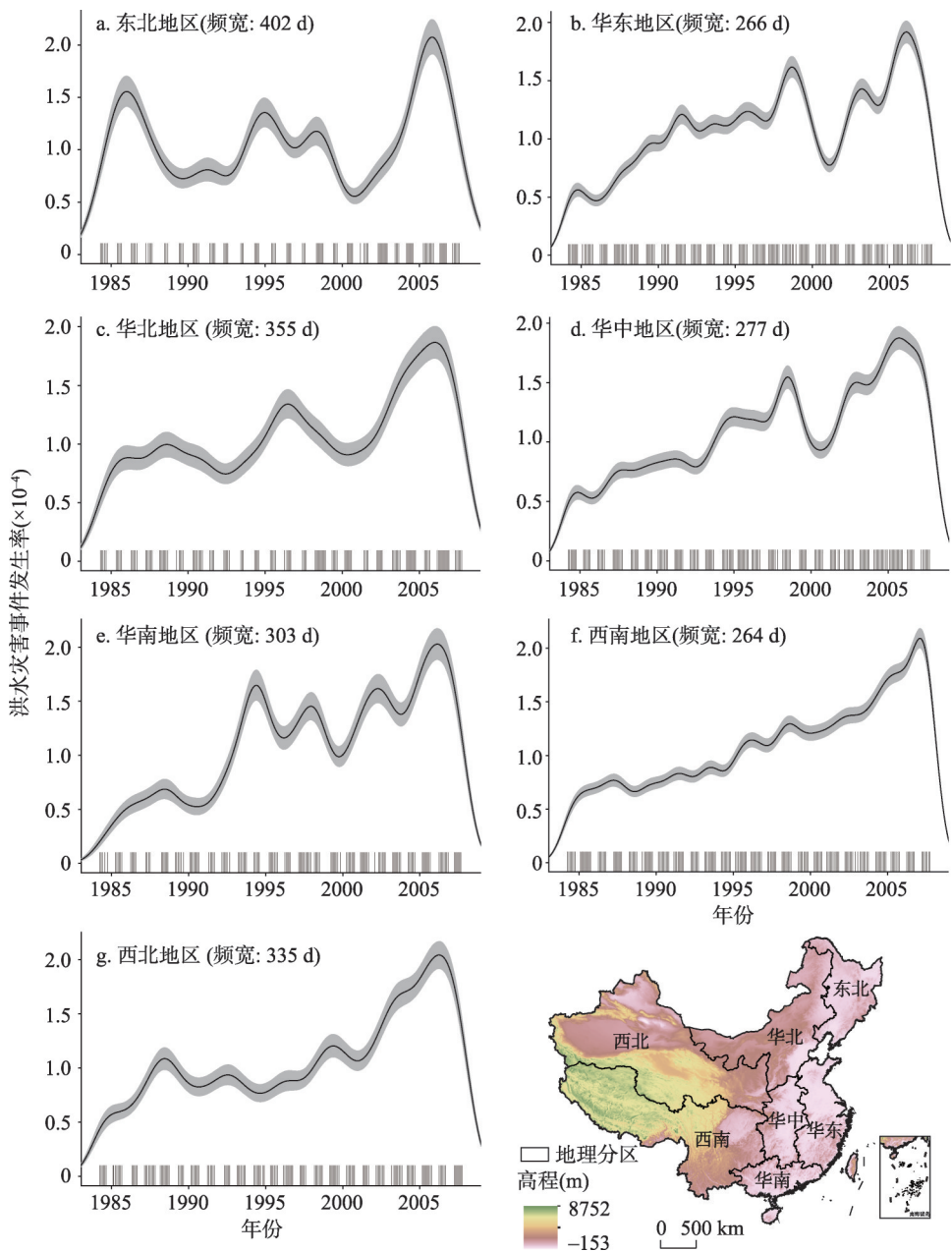
注: 基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1786号的标准地图制作,底图无修改。

图4 1984—2007年中国年累计暴雨量和暴雨历时

Fig. 4 Distribution of annual cumulative rainstorm amount and annual cumulative rainstorm duration in China

华中和华北地区的灾害频率变化呈现相似的特征(出现相间的3个峰值和2个低值区),波动幅度相对于其它地区较大。相对较高的洪灾频率出现在1984—1990年、1996—2000年和2005—2007年3个时段内,而1992—1994年和2000—2003年2个时段的灾害频率相对较低。西南和西北区域的洪灾频次持续上升,波动较小。各区域洪水事件发生率曲线的起始部分出现剧烈的上升和下降(图5),原因是时间序列的边界效应,始末的时间序列趋势具有较大不确定性,这是起点和终点的数据量较少造成的。

3个研究时段的中国年平均洪水频次、死亡率(死亡人数/百万人)、洪水受灾率(%) (受灾人口/总人口)和人均直接经济损失(2007年现值元)如图6、图7所示。长江流域、黄河流域和珠江流域的灾害频次较高,而中国东北部的洪水频次也呈增加趋



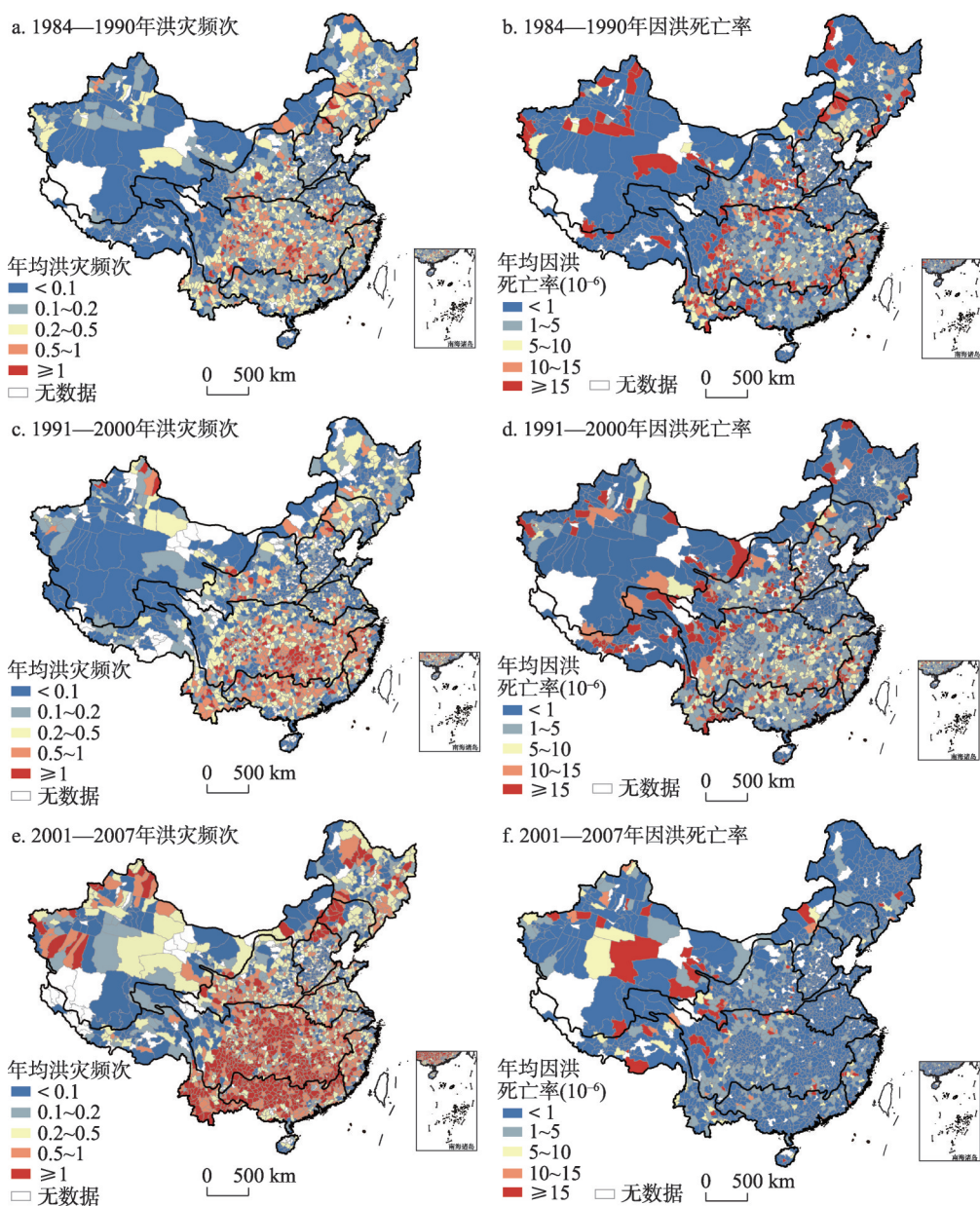
注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1786号的标准地图制作,底图无修改;  
阴影为95%置信区间;横坐标竖线表示每次历史洪水发生的时间。

图5 中国七大地理分区的洪水事件发生率

Fig. 5 Occurrence rate of flood events in seven geographical regions of China

势。1991—2000年间的洪水频次显著高于1984—1990年的年平均值。主要是长江流域中下游和珠江流域的洪水频次出现增加的情况。相比之下，华北和东北地区的洪水频次在1991—2000年间下降。除此之外，其他地区在1991—2000年洪水频次都在增加。2001—2007年间洪水频次相比前两个年代增加更多，主要在中国西南、华南、东北地区 and 长江流域全流域，特别是暴雨洪水灾害频次在西北干旱地区明显增加。



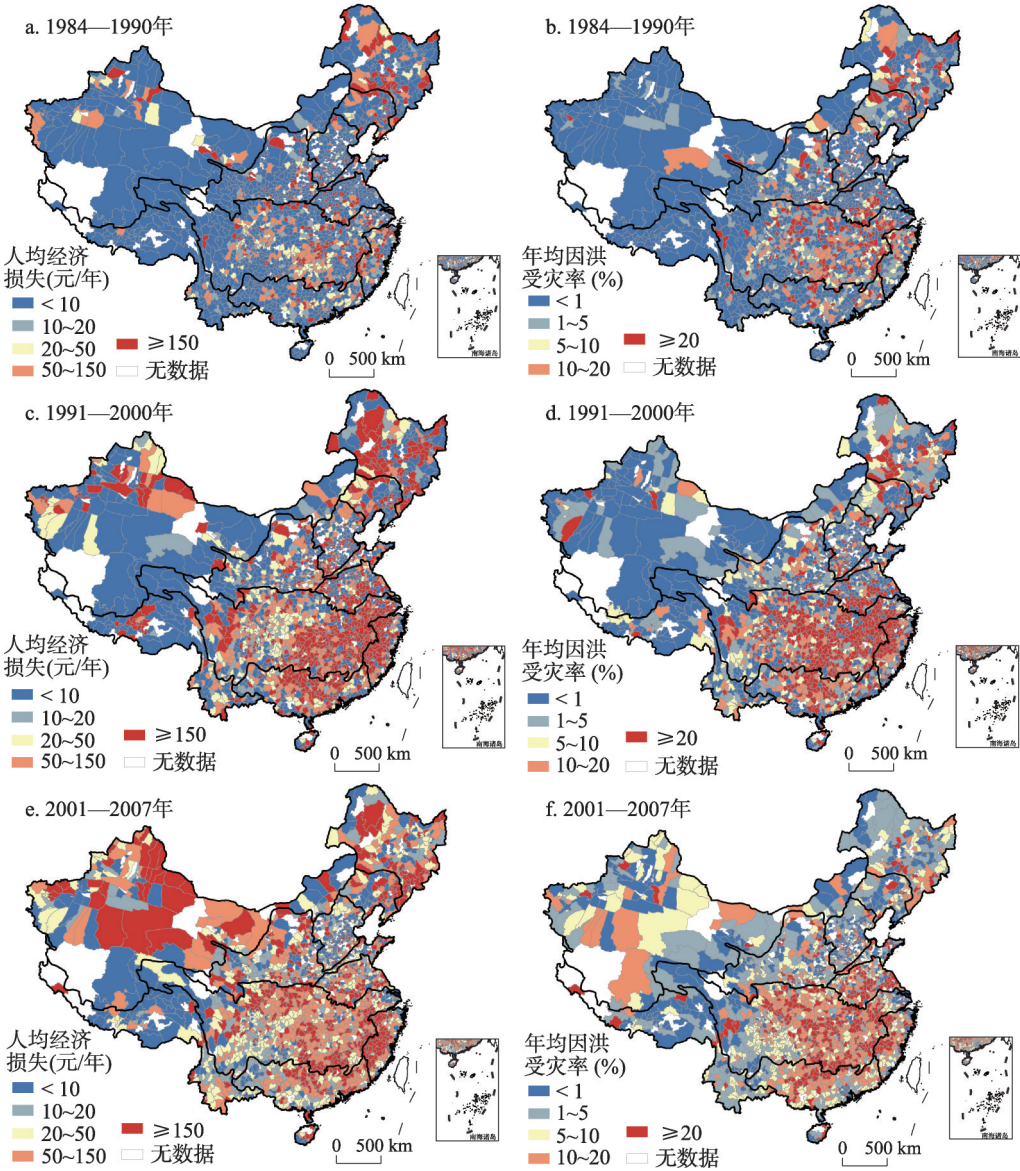


注: 基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1786号的标准地图制作, 底图无修改。

图6 中国县域不同时段洪灾频次和因洪人口死亡率

Fig. 6 Annual frequency of flood events and flood-induced mortality rate in counties of China

因洪死亡率的空间格局与洪灾频次的空间分布不同, 人口死亡率较大的县呈现零散分布(图6)。相对而言华中、华南地区的因洪死亡率更高。值得注意的是, 中国西北干旱区的一些县域因洪死亡率也很高, 这与有关区域性的研究结果相符<sup>[50]</sup>。新疆地区在1980年以后, 降水呈现增加的趋势, 这导致极端降雨事件更加频发<sup>[51]</sup>。总体而言, 相比于20世纪80年代, 1991—2000年因洪死亡率在全国大部分地区呈现下降的趋势, 死亡率在长江流域中下游和珠江流域等地区明显减少。这在一定程度上说明了华中、华南地区的社会经济快速发展, 使得这些地区的设防水平在逐步提高。东北地区的因洪死亡率



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1786号的标准地图制作,底图无修改。

图7 中国各县洪水灾害受灾率与人均直接经济损失(折算为2007年价格)

Fig. 7 Proportion of flood-affected population and direct economic loss per capita in China

也有所下降,中国西北和华北地区例如新疆、内蒙古等省份死亡率则趋于上升,这可能与极端降雨增加以及气候变暖导致的融冰、融雪速率增加有关<sup>[50, 52]</sup>,同时,这些地区社会经济发展水平相比于中国东南地区较为落后,洪水设防水平也较低。上述分析发现,中国洪水灾害频次在时间和空间上均有增加,特别是长江流域、珠江流域和华东沿海一带,然而洪水灾害导致的死亡率在时空上有明显减少。

图7为年平均因洪受灾率和直接经济损失在全国各县的空间分布特征。在全国很大范围内,相较于1984—1990年,洪水受灾率和直接经济损失在增加。人口受灾率和人均经济损失最高的县多分布于长江流域和珠江流域,但值得注意的是,西北地区受灾率和



人均经济损失也在增加。华中、华东、相比于年平均受灾率, 华南和东北区域的年均直接经济损失增加的县更多, 直接经济损失增加的幅度特别是在中国西北地区(尤其是新疆北部地区)较大。值得关注的是, 西北区域的暴雨洪水灾害频次在不断增加, 特别是新疆地区西北内陆河流域的部分县域在研究时段内持续增加(图6)。由于西北地区地广人稀, 缺乏雨量站资料, 因此很难完全确定这一现象是否是极端降雨增加而引起的。但从图7可见社会经济脆弱性的增加的确是一个重要的影响因素。

### 3.3 暴雨洪水灾害影响因素分析

综合图4、图6和图7可以看出, 县级行政区极端降雨的空间格局自东南向西北呈现规律递减趋势, 然而洪灾频次、因洪受灾人数、死亡人数及经济损失等灾情的空间分布却不完全遵循该规律, 比如西北地区一些县市的洪灾强度甚至高于东中部的一些地区。表明除暴雨以外, 还有其他下垫面和人类活动因素影响洪水灾情的分布, 区域产汇流机制、河川径流对于人类活动和降雨变化的响应、人口和财富的分布等都对洪水灾情的空间分布特征造成影响。因此洪水灾害的发生并不仅仅与暴雨强度等级有关, 还受到经济水平、人口密度等因素的影响, 气象和地理环境因素综合造成了区域洪水灾害的空间分布。

因此应当更深入研究洪水灾害的孕灾环境和承灾体的作用, 即地形、水系、社会经济等影响因素。本文运用地理探测器的方法, 选取人口密度(PD)、地均GDP(GDPD)、城市化率(UR, 以县域非农人口比例度量)、平均高程(ELE)、河网密度(RD)、平均坡度(SLP)、距海岸带距离(DS)、年平均暴雨量(VR)和年平均暴雨历时(DR)做了检测。各个因素对洪水灾情(因洪死亡率、受灾率和经济损失率(各县因洪直接经济损失/GDP))的影响程度用 $q$ 统计量( $q \in [0, 1]$ )度量,  $q$ 表示该影响因素能解释 $100 \times q$ 的依赖变量的空间变化。 $q$ 值的大小表示某自变量对因变量的影响力的强弱。选取的独立变量对3个洪水灾害指标的解釋率在3个研究年代的变化情况如图8、图9所示。

1984—1990年间每个因子对于因洪受灾率的影响力均较弱(图8a、图9a)。1991—2007年间高程、距海岸距离、暴雨量和暴雨历时的影响力显著增加, 其中极端降水在所有考虑的因素中对受灾率的空间分异性影响力增加最大。因洪受灾人数的主要影响因素由强至弱依次为暴雨雨量>暴雨历时>高程>GDP密度>河网密度>距海岸带距离>人口密度>城市化率>坡度, 这说明因洪受灾人数的空间分布主要受到暴雨因子的影响, 雨强越大, 则相应受灾人数越多, 而且在研究时段内暴雨因子的影响力显著增加, 与3.1节中中国东部、东南部地区暴雨量和暴雨历时的增加相对应。其次是地理因素和经济发展水平。东部地区较低的地形条件和密集的河网也使得这些区域对洪水淹没具有高度敏感性。因此, 河网密度对灾情空间分布的影响力也在增加, 这说明城市化和地势低平、河网密集地区的人口增加, 从而使暴雨洪水灾害在增加。

影响因洪死亡率的主要因子由高至低排序为高程>坡度>人口密度>地均GDP>距海岸

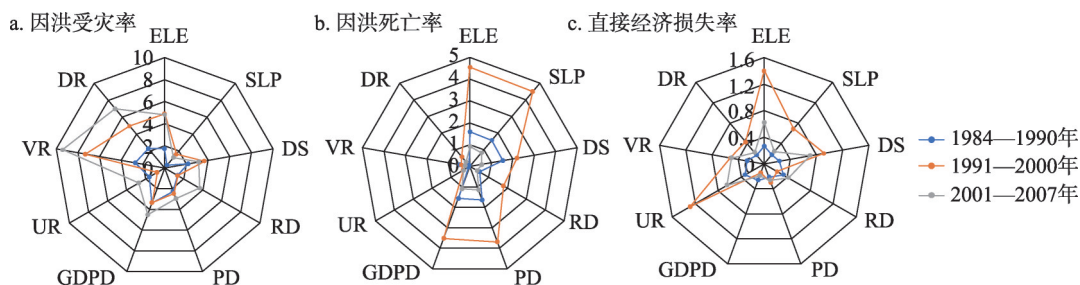
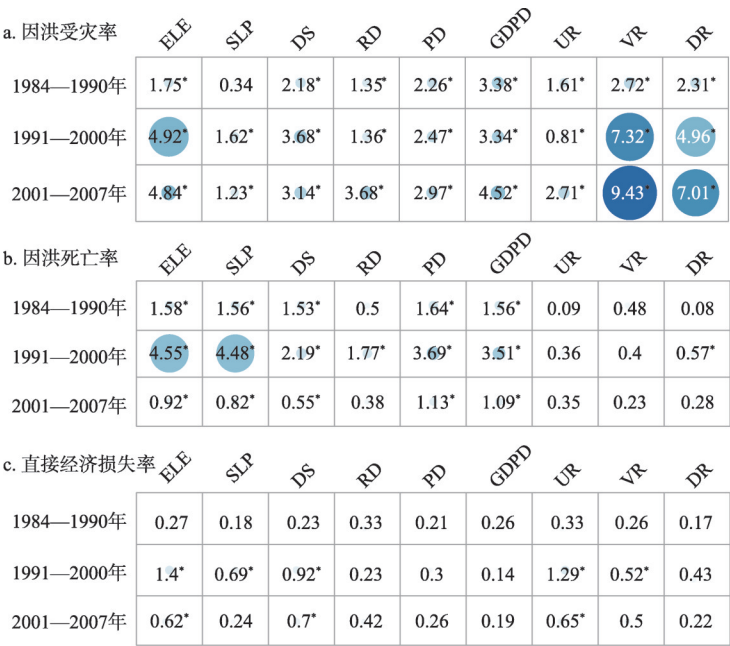


图8 气象及社会经济因素对中国暴雨洪水灾情的贡献率雷达图

Fig. 8 Radar diagram of the contributions of meteorological and socio-economic variables





注：\*表示通过0.05水平显著性检验；图中点越大颜色越深表示影响力越强。

图9 各因子对中国暴雨洪水灾情的影响力(%)

Fig. 9 Percentages of contribution of nine influencing factors to rainstorm-induced flood disasters in China and their significance (%)

距离>河网密度等（1991—2000年）（图8b、图9b），同时暴雨指标的驱动力较弱，说明地理因素和社会经济因素与因洪死亡率有一定关联，而暴雨的强度大小不会对因洪死亡人数的空间分异有很大影响，在中国暴雨雨量增加的趋势背景下，该因素对因洪死亡率的贡献率反而下降了，从图6中也可以看出，在2001年以后因洪死亡率显著地下降，且所有的影响因子对因洪死亡率的贡献均下降了，因洪死亡率对气象因子和地理因子的响应度显著的降低，反映了中国整体社会对洪水灾害的应对能力和防御能力的增强。

总体而言，以上9种影响因素对于直接经济损失率的影响力均较低。图8c、图9c可以看出1991—2000年间影响人均经济损失的主要因子有城市化率>高程>距海岸带距离等地理因素，这意味着社会财富主要聚集在海岸带区域以及低海拔地区，且城市化程度显著影响直接经济损失的空间分布。此外，刘业森<sup>[48]</sup>和王思梦<sup>[47]</sup>在研究中国山洪灾害的影响因素时还加入了土地利用、NDVI植被指数、土壤类型等进行分析，发现除了暴雨因子和地形因子外，这些因素的空间分布规律性对于山洪灾害的空间分布也有显著的影响。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文通过对中国小时降雨数据的分析和气象部门收集上报的中国1984—2007年县级行政区暴雨洪涝灾情数据时空格局的分析，结合社会经济统计年鉴数据以及自然地理要素等，对中国暴雨洪涝灾情的影响因素进行了定性和定量的分析，得到以下结论：

（1）1984—2007年间极端降雨指标没有呈现一致的全国性的空间格局。总体而言，AMR和ARD在长江流域下游、珠江流域中下游地区和淮河流域有增加，ARI的空间分布相对复杂，显著增大和减小的站点分布较为零散。

(2) 1984—2007年间, 华中、华南、东南和西南等地区县域洪灾频次在增加, 但因洪死亡人数在全国范围内大幅减少, 说明全国的洪水设防能力有显著提升。同时, 各个县的因洪受灾人数和直接经济损失在增加, 尤其是长江流域中下游和珠江流域中下游地区。值得注意的是西北和东北地区的因洪死亡人数在增加。

(3) 通过地理探测器分析结果, 除极端降雨外, 洪涝孕灾环境和社会发展水平等对洪水灾害的时空格局也具有不可忽视的影响。中国的大多数人口都分布在地势较低、河网密集的区域, 这些区域社会经济的快速发展会导致人口密度和地均GDP的增加, 进而通过洪水暴露度而影响洪水灾情; 河网密度对洪水灾情空间分布的影响在研究时段内也在加强。这意味着暴雨洪水对低地势、人口密集的城镇地区的影响持续在增加。总体而言, 对于研究考虑的3种灾损指标, 其中对因洪受灾人数影响力最大的因素是极端降水, 其次是高程、GDP和河网密度; 对因洪死亡人数影响力最大的是高程、坡度、人口密度和GDP; 对经济损失率影响最大的是高程、城市化率和距海岸带距离。

## 4.2 讨论

根据研究结果, 本文对洪水灾害应急管理工作提供如下两点参考和建议: ① 应重点关注西北内陆河流域中小城市的防洪能力提升。虽然这些区域位于半干旱地区, 但在研究时段内洪水灾害强度显著增加。该区域在1990年代后经历了快速的城市化进程, 但是在发展过程中没有充分考虑暴雨洪水灾害的影响, 导致在应对时缺乏经验和准备, 同时西南山区的洪水常常会引发泥石流和滑坡等次生灾害。因此, 这些地区应根据城市的扩张相应规划堤防建设, 及时调整防洪保护区内的土地利用变化, 并增设气象和洪涝灾害的监测与预警系统, 编制应对暴雨洪水的应急预案。② 在防洪工作中重视孕灾环境的影响。地势高低对于洪水灾情的严重性有重要的影响, 并且随着时间推移影响程度在增加, 这说明在建设防洪工程的同时还要因地制宜地进行城市功能区划, 保留低洼地区的蓄滞能力和排水功能, 划定洪水灾害高危区域。

本文受限于数据精度等原因, 还存在很多需要改进和完善的方面, 主要包括: ① 本文在影响因素选择方面, 未考虑内部气候变异因子(如ENSO、NAO等)对洪水灾情的影响。有研究表明全球灾情的波动变化与大气系统的内部变异有关。因此, 今后可进一步结合大气环流因素对洪水灾情的影响研究进行完善与补充。② 本文在进行中国洪水灾情影响因素的分析时, 采用的中国气象部门收集整理的县级洪水灾情数据, 由于收集和核实难度较大, 不可避免地存在少量漏报、错报的信息, 但总体而言, 能够客观真实地刻画中国洪涝灾情的时空格局差异。由于中外洪水灾害定义的差异性, 中国地区的洪水灾害数据库中未收录海岸带型洪水, 这也是与EM-DAT数据库收录洪水灾情的主要差异, 可能对本文研究结果造成一定的影响; 由于数据库收录时间年限的限制, 中国尺度的洪水灾情数据时间段(1984—2007年)较全球洪水灾情数据较短, 因此, 中国洪水灾情的空间差异性可能会因数据时间段不同而受到影响。③ 在进行洪水影响因素研究时, 本文采用的影响因子数量仍较为有限, 例如植被密度、堤坝作用等。本文采用的是空间分异性统计工具——地理探测器方法, 该方法能够探测出不同的因子对洪水灾情的影响力大小, 并能比较不同影响因子的贡献率大小, 找出对洪灾影响的主要因素。但却无法检测影响因子对洪水灾情是具有放大还是减弱等效应, 也无法进行时间动态的影响分析, 这对研究结果的实用性造成了一定的影响。后期还可以开展对于影响因素研究的方法改进, 体现不同影响因子对洪水灾情的作用方向。④ 在后续对洪水灾害系统的研究中, 应该更加注重洪水的形成机制研究, 应引入大气和水文水动力学等模型, 对区域乃至全球的洪水过程进行模拟, 实现从雨情、水情、灾情全过程模拟, 以期更深入的了解洪水灾害的发生、发展及影响因素的相互作用规律。

## 参考文献(References)

- [1] Ye J, Li K, Kuang S, et al. China Flood and Drought Disaster Bulletin 2017. Beijing: China Cartographic Publishing House, 2018.
- [2] Chen P, Sun J Q. Changes in climate extreme events in China associated with warming. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(10): 2735-2751.
- [3] Zhang Q, Li J F, Singh V P, et al. Spatio-temporal relations between temperature and precipitation regimes: Implications for temperature-induced changes in the hydrological cycle. *Global and Planetary Change*, 2013, 111: 57-76.
- [4] Shi Peijun, Wang Jingai, Zhou Junhua, et al. Integrated risk management of flood disaster in China: To balance flood disaster magnitude and vulnerability in metropolitan regions. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(4): 1-7. [史培军, 王静爱, 周俊华, 等. 中国水灾风险综合管理: 平衡大都市区水灾致灾强度与脆弱性. *自然灾害学报*, 2004, 13(4): 1-7.]
- [5] Du S Q, He C Y, Huang Q X, et al. How did the urban land in floodplains distribute and expand in China from 1992-2015? *Environmental Research Letters*, 2018, 13(3). DOI: 10.1088/1748-9326/aaac07.
- [6] Li J, Chen Y D, Zhang L, et al. Future changes in floods and water availability across China: Linkage with changing climate and uncertainties. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(4): 1295-1314.
- [7] Zhang Q, Gu X H, Singh V P, et al. Homogenization of precipitation and flow regimes across China: Changing properties, causes and implications. *Journal of Hydrology*, 2015, 530: 462-475.
- [8] Zhang Q, Gu X H, Singh V P, et al. More frequent flooding? Changes in flood frequency in the Pearl River basin, China, since 1951 and over the past 1000 years. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2018, 22(5): 2637-2653.
- [9] Huang D P, Zhang R H, Huo Z G, et al. An assessment of multidimensional flood vulnerability at the provincial scale in China based on the DEA method. *Natural Hazards*, 2012, 64(2): 1575-1586.
- [10] Jiang T, Su B D, Hartmann H. Temporal and spatial trends of precipitation and river flow in the Yangtze River Basin, 1961-2000. *Geomorphology*, 2007, 85(3/4): 143-154.
- [11] Lu R, Fu Y. Intensification of East Asian summer rainfall interannual variability in the twenty-first century simulated by 12 CMIP3 coupled models. *Journal of Climate*, 2010, 23(12): 3316-3331.
- [12] Zhang Q, Gu X H, Singh V P, et al. Spatiotemporal behavior of floods and droughts and their impacts on agriculture in China. *Global and Planetary Change*, 2015, 131: 63-72.
- [13] Zhang Q, Xu C Y, Zhang Z X, et al. Spatial and temporal variability of precipitation maxima during 1960-2005 in the Yangtze River basin and possible association with large-scale circulation. *Journal of Hydrology*, 2008, 353(3-4): 215-227.
- [14] Li C C, Cheng X T, Li N, et al. A framework for flood risk analysis and benefit assessment of flood control measures in urban areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(8): 787. DOI: 10.3390/ijerph13080787.
- [15] Wang Jing'ai, Mao Jia, Jia Huicong. On spatiotemporal patterns of flood and drought hazards in China. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(1): 115-121. [王静爱, 毛佳, 贾慧聪. 中国水旱灾害危险性的时空格局研究. *自然灾害学报*, 2008, 17(1): 115-121.]
- [16] Yu Li, Xu Ying, Zhang Yongxiang. Temporal and spatial variation of rainstorms and the impact of flood disasters due to rainstorms in China in the past 25 years. *Torrential Rain and Disasters*, 2018, 37(1): 67-72. [於琰, 徐影, 张永香. 近25年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*, 2018, 37(1): 67-72.]
- [17] Shi Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics. *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11(3): 1-9. [史培军. 三论灾害研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 2002, 11(3): 1-9.]
- [18] Di Baldassarre G, Montanari A, Lins H, et al. Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(22). DOI: 10.1029/2010GL045467.
- [19] Funk T. Heavy convective rainfall forecasting: A look at elevated convection, propagation, and precipitation efficiency. 10th Severe Storm and Doppler Radar Conference, 2006.
- [20] EM-DAT: The CRED/OFDA International Disaster Database. [2017/12/10]. [www.emdat.be](http://www.emdat.be).
- [21] Zhang Q, Gu X, Li J, et al. The impact of tropical cyclones on extreme precipitation over coastal and inland areas of China and its association to ENSO. *Journal of Climate*, 2018, 31(5): 1865-1880.
- [22] Public Security Administration of the Ministry of Public Security of the People's Republic of China. National Population Statistics by County and City of People's Republic of China. Beijing: Public Publishing House, 2014. [公安部治安管理局. 中华人民共和国全国分县市人口统计资料. 北京: 群众出版社, 2014.]
- [23] Department of Rural Socio-Economic Survey, National Bureau of Statistics. China County and City Social and Economic Statistics Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2004. [国家统计局农村社会经济调查司. 中国县市区社会经济统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2004.]
- [24] The Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE) Digital Elevation Model, Version 1.0. National Oceanic and



- Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center. 1999. [www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html](http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html).
- [25] Liu J Y, Zhang Q, Singh V P, et al. Contribution of multiple climatic variables and human activities to streamflow changes across China. *Journal of Hydrology*, 2017, 545: 145-162.
- [26] Gaál L, Molnár P, Szolgay J. Selection of intense rainfall events based on intensity thresholds and lightning data in Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(5): 1561-1573.
- [27] Dunkerley D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: A comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting. *Hydrological Processes*, 2008, 22(22): 4415-4435.
- [28] Dunkerley D L. How do the rain rates of sub-event intervals such as the maximum 5-and 15-min rates (I5 or I30) relate to the properties of the enclosing rainfall event? *Hydrological Processes*, 2010, 24(17): 2425-2439.
- [29] Yue S, Pilon P, Phinney B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 2002, 16(9): 1807-1829.
- [30] Daufresne M, Lengfellner K, Sommer U. Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. *PNAS*, 2009, 106(31): 12788-12793.
- [31] Kendall M. *Multivariate Analysis*. London, UK: Charles Griffin Co. LTD., 1975.
- [32] Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945, 13(3): 245-259.
- [33] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [34] Mudelsee M, Börngen M, Tetzlaff G, et al. No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe. *Nature*, 2003, 425(6954): 166-169.
- [35] Cowling A, Hall P, Phillips M J. Bootstrap confidence regions for the intensity of a Poisson point process. *Journal of the American Statistical Association*, 1996, 91(436): 1516-1524.
- [36] Li X W, Xie Y F, Wang J F, et al. Influence of planting patterns on fluoroquinolone residues in the soil of an intensive vegetable cultivation area in northern China. *Science of the Total Environment*, 2013, 458: 63-69.
- [37] Onozuka D, Hagihara A. Extreme temperature and out-of-hospital cardiac arrest in Japan: A nationwide, retrospective, observational study. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 258-264.
- [38] Ren Y, Deng L Y, Zuo S D, et al. Geographical modeling of spatial interaction between human activity and forest connectivity in an urban landscape of southeast China. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1741-1758.
- [39] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 114-115.
- [40] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [41] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [42] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250-256.
- [43] Xu C D, Wang J F. Geodetector: Software for measure and attribution of stratified heterogeneity (SH). [2020-12-28]. [www.geodetector.cn](http://www.geodetector.cn).
- [44] Li Huawei, Wan Qing. Study on rainfall index selection for hazard analysis of mountain torrents disaster of small watersheds. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(3): 425-435. [李华威, 万庆. 小流域山洪灾害危险性分析之降雨指标选取的初步研究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(3): 425-435.]
- [45] Xiong Junnan, Zhao Yunliang, Cheng Weiming, et al. Temporal-spatial distribution and the influencing factors of mountain-flood disasters in Sichuan Province. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(10): 1443-1456. [熊俊楠, 赵云亮, 程维明, 等. 四川省山洪灾害时空分布规律及其影响因素研究. *地球信息科学学报*, 2018, 20(10): 1443-1456.]
- [46] Liu Yesen, Yang Zhenshan, Huang Yaohuan, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of China's flash flood disasters since 1949. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2019, 49(2): 408-420. [刘业森, 杨振山, 黄耀欢, 等. 建国以来中国山洪灾害时空演变格局及驱动因素分析. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(2): 408-420.]
- [47] Wang Simeng. Study on spatio-temporal pattern and driving factors of rainstorm induced mountain torrents in China [D]. Xi'an: Northwest University, 2019. [王思梦. 中国暴雨山洪时空分布规律及其驱动因素研究[D]. 西安: 西北大学, 2019.]
- [48] Liu Yesen. Study on spatio-temporal distribution and heterogeneity of driving forces of flash flood in China [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. [刘业森. 中国山洪灾害时空分布格局及驱动力异质性评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.]
- [49] Cao F, Ge Y, Wang J F. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment. *GIScience & Remote Sensing*, 2013, 50(1): 78-92.
- [50] Zhang Q, Gu X H, Singh V P, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River basin, China:

Changes, causes and implications. *Global and Planetary Change*, 2016, 139: 44-55.

- [51] Zhang Q, Singh V P, Li J F, et al. Spatio-temporal variations of precipitation extremes in Xinjiang, China. *Journal of Hydrology*, 2012, 434: 7-18.
- [52] Wen K, Song L. Collections of Meteorological Hazards in China: Xinjiang Volume. Beijing: China Meteorological Press, 2006.

## Spatiotemporal patterns and influencing factors of rainstorm-induced flood disasters in China

HU Pan<sup>1, 2, 3, 4</sup>, CHEN Bo<sup>1, 2, 3, 4</sup>, SHI Peijun<sup>1, 2, 3, 5</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing 100875, China;

2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE, Beijing 100875, China;

3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management Ministry of Emergency Management & Ministry of Education, Beijing 100875, China; 4. Faculty of Geographical Science, BNU, Beijing 100875,

China; 5. Academy of Plateau Science and Sustainability People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, Xining 810008, China)

**Abstract:** Understanding the influencing factors and controls of rainstorm-induced floods, which have caused tremendous losses of human lives and national economy, is a pressing need for flood risk management in China. Based on the meteorological disaster census data of counties in China, hourly precipitation data at 2420 stations, statistical yearbook, terrain data and other data, the authors (1) investigated the spatiotemporal pattern of flood impacts in China over the period from 1984 to 2007 using trend analysis techniques and (2) explored the driving factors of the spatiotemporal pattern by adopting the geospatial statistical analysis tool (Geodetector). This study considered the spatiotemporal patterns and their interplays among county-level flood impacts (i.e., flood-induced mortality rate, proportion of population affected, and economic loss in percentage), disaster-formative environmental factors (i.e., population density, urban population percentages, average elevation, river density, average slope, and average distance to the seashore), and extreme precipitation characteristics (i.e., annual average volume and duration of extreme rainfall). The results show that: (1) there were no consistent temporal trends of extreme rainfall characteristics over the study period across China. (2) The frequencies of flood disasters in the Yangtze and Pearl rivers and southeast coastal areas increased significantly, but the casualties over these regions decreased. (3) Flood-induced casualties, proportion of population affected and economic loss in percentage increased in Northwest China; and meteorological factors, disaster-formative environment factors such as geographical conditions and social economy, and geographical conditions contribute mostly to the proportion of population affected, flood-induced death and economic loss in percentage. These results indicate that more attention should be paid to improving the flood control capacity of small or medium-sized cities in the inland river basins, especially in Northwest China, and we should recognize the important roles that disaster-formative environment plays in triggering flood losses.

**Keywords:** extreme rainfall; rainstorm-induced flood; flood disaster; spatiotemporal pattern; Geodetector; influencing factor; China