

基于情景的1951-2011年中国极端降水风险评估

尹占娥, 田鹏飞, 迟潇潇

(上海师范大学旅游学院地理系, 上海 200234)

摘要: 随着全球气候变暖, 极端降水的风险评估研究成为学界和各国政府广泛关注的热点问题, 开展中国极端降水的风险评估研究可以为中国防灾减灾提供参考依据。本文从灾害风险评估视角, 依据国际减灾战略(ISDR)的灾害风险评估模型, 开展了中国极端降水的风险评估研究。首先, 利用1951-2011年全国各站点逐日降水数据, 采用Pearson-III方法, 模拟不同重现期情景下极端降水量和频次分布, 评估中国不同重现期下的极端降水危险性及空间分布; 其次, 基于人口和GDP指标, 分析极端降水脆弱性及空间分布特征; 在此基础上, 评估了5年、10年、50年、100年一遇情景下中国极端降水风险及其空间分布特征。结果表明: ① 中国极端降水危险性等级从东南沿海向西北内陆递减, 5年一遇情景下, 极端降水高危险区和低危险区的分界线大致与400 mm等降水线相同。② 中国极端降水脆弱性高的地区主要分布在人口稠密且经济发达的东部沿海大城市地区, 特别是经济发达的长三角、珠三角和京津冀等城市群地区, 以及中部地区的一些大城市。③ 不同情景下, 中国极端降水风险等级均呈现由东南向西北方向降低。风险等级高和较高的地区主要位于黑河—腾冲线以东, 中和低风险区位于该线以西, 这与中国人口密度分布的胡焕庸线大体一致。

关键词: 极端降水; 风险评估; 危险性分析; 脆弱性分析; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201803002

1 引言

在全球气候变暖背景下, 近年极端降水有不断增加的趋势^[1-3], 极端降水引发的洪涝和泥石流等气象灾害对人类生活、社会发展和自然生态系统产生了严重影响, 引起了各国政府和国内外学者的广泛关注^[4-9], 由于人口密度大、排水设施不健全、土地利用不合理等原因, 极端降水引发的暴雨洪涝灾害对发展中国家的影响更为显著^[10]。中国作为发展中国家, 近年来极端降水频繁发生, 造成了巨大的人员伤亡和财产损失。例如, 2012年7月北京暴雨, 造成79人死亡, 160.2万人受灾, 经济损失达116.4亿元; 2014年6月, 南方九省暴雨洪涝, 造成26人死亡, 489.6万人受灾, 283.8千hm²农作物受灾, 经济损失40.8亿元。2015年8月8日, 浙江省遭百年一遇暴雨袭击, 致14人遇难, 158.4万人受灾。2016年7月, 长江中下游沿江地区及江淮、西南东部等地出现强降雨过程, 此次强降雨共造成浙江、安徽、湖北、湖南、重庆、贵州7省(市)163个县687万人受灾, 因灾死亡14人、失踪8人, 倒塌房屋0.9万间, 农作物受灾面积710千hm², 直接经济损失约91亿元。

极端降水风险研究是开展防灾减灾和制定应急管理对策的基础和依据。联合国国际

收稿日期: 2017-06-28; 修订日期: 2017-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371493) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41371493]

作者简介: 尹占娥(1963-), 女, 山西兴县人, 博士, 教授, 主要从事自然灾害风险评估研究和城市公共安全、自然资源遥感和GIS应用。E-mail: zhaneyin@shnu.edu.cn

减灾战略 (International Strategy for Disaster Reduction, ISDR) 将风险评估定义为, 通过分析致灾因子和评价脆弱性因子, 确认风险性质和范围的方法^[11]。国内外诸多外学者主要针对极端降水的形成机制、时空特征和未来发展趋势进行了较深入研究^[12-17], 极端降水的风险评估主要针对城市和小流域评估模型与方法开展探讨^[18-22]。而针对国家尺度开展的基于情景模拟的极端降水灾害风险评估研究相对较少, 特别是从灾害风险视角, 基于情景模拟的方法, 以极端降水的危险性、脆弱性和风险分析思路, 开展中国的极端降水风险评估研究有待进一步的深入和发展。

因此, 本文利用“中国气象科学数据共享服务网”提供的 1951-2011 年全国各站点逐日降水数据, 以 5 年、10 年、50 年、100 年一遇四种情景, 采用 Pearson-III 型概率计算方法计算各站点不同重现期情景下的极端降水量和频次, 综合分析了中国极端降水危险性空间分布, 基于人口和 GDP 产值分析了中国极端降水脆弱性空间分布特征, 在此基础上, 依据国际减灾战略 (ISDR) 的灾害风险评估理论模型, 开展了不同情景下全国尺度的极端降水风险评估与风险分析。该项研究以风险评估思路和视角, 开展全国尺度的极端降水风险评估具有一定的新意, 研究结果可以为中国极端降水的防灾减灾提供科学的参考依据。

2 数据与方法

2.1 数据

本文研究数据是由“中国气象科学数据共享服务网”提供的 756 个站点 1951 年 1 月-2011 年 12 月的逐日降水数据 (<http://cdc.cma.gov.cn>)。经过数据处理, 最终选取了 637 个有效站点的逐日降水数据用于本研究。将处理后的站点数据导入 ArcGIS 10.1 中, 并与中国 DEM 图进行叠加 (图 1)。

经济数据和人口数据是从“地球系统科学数据共享平台”下载的中国 2010 年 1 km

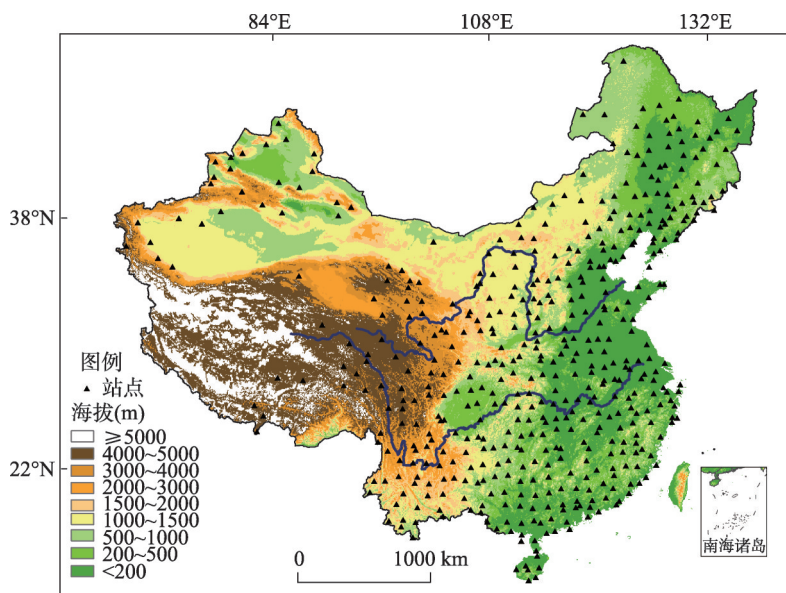


图 1 研究区及气象站点分布

Fig. 1 Study area and the locations of meteorological stations

格网GDP数据和中国2010年1 km格网人口数据 (<http://www.geodata.cn>)。

2.2 重现期分析与情景设计

极端降水的重现期分析主要有: 极值分布、耿贝尔分布和皮尔逊分布(Pearson)等频率分析方法。其中Pearson-III型概率计算方法得到了国内外学者的广泛采用。本文提取每年最大日降水量, 采用Pearson-III型概率计算方法计算各站点不同重现期下的极端降水, 经选取不同气候区下多个站点的雨量历史资料进行了精度验证, 经检验皮尔逊相关系数大部分在90%以上, 且所有站点均通过了0.01的显著性水平检验。因此, Pearson-III型方法计算的降水重现期精度较高, 估算结果可信。选取计算结果中重现期为5年、10年、50年和100年情景下的极端降水量和频次, 综合分析中国极端降水的危险性。

2.3 风险分析

国际减灾战略(ISDR)将灾害风险分析定义为可能造成人员伤亡、财产损失和环境破坏^[6]。通过对潜在致灾因子的分析和评估承灾体的脆弱性, 判断风险性质或范围, 提出了灾害风险概念公式:

$$\text{Risk(风险)} = \text{Hazard(危险性)} \times \text{Vulnerability(脆弱性)} \quad (1)$$

公式(1)概括了构成风险的两个主要因素, 即致灾因子的危险性以及承灾体本身的脆弱性。本文采用该公式, 通过危险性和脆弱性来评估中国各区域的极端降水风险。

3 结果分析

3.1 极端降水危险性分析

本文将24小时降雨量大于50 mm的降水定义为极端降水。采用Pearson-III型概率计算方法, 计算各站点不同重现期下的极端降水, 选取极端降水量和极端降水频次2个指标分析中国极端降水的危险性。降水量按照国家气象部门的暴雨等级标准划分为5个危险性等级: <25 mm, 为低; 25~50 mm, 为较低; 50~100 mm, 为中; 100~250 mm, 为较高; ≥250 mm, 为高。频次同样划分为5个危险等级: <1次, 为低; 1~2次, 为较低; 2~3次, 为中; 3~4次, 为较高; ≥4次, 为高。利用ArcGIS软件进行克里金插值得到5年、10年、50年、100年一遇情景下中国极端降水危险性等级空间分布, 并通过栅格叠加了极端降水量危险性和极端降水频次危险性, 得到极端降水综合危险性分布(图2)。

5年一遇情景下, 全国几乎未出现极端降水综合危险性等级高的区域, 危险等级较高的区域主要位于东南沿海地区、长江中下游流域和四川盆地东部; 极端降水综合危险性等级低的区域主要位于西北地区西部和青藏地区西北部; 从空间分布特征看, 400 mm等降水量以东主要为较高危险区域, 以西主要为中、低危险区。

10年一遇情景下, 海南省和东南沿海开始出现高危险区, 较高危险区范围向周边区域扩大到东南地区大部分区域, 以及华北地区和四川盆地大部分区域, 中危险区范围反而缩小, 但空间分布位置略向西部移, 新疆北部变为中危险区。较低危险区向西扩展, 天山山脉地区的较低危险区范围扩大明显。低危险区范围缩小, 仅分布在西北地区西部和青藏地区西北部区域。

50年一遇情景下, 东南沿海高危险区范围扩大, 而长江中下游的湖北武汉至江西南昌地区出现范围较大的高危险区。较高危险区范围向西向北推移至太行山—横断山一带。中度危险区范围变化不大, 但位置西移至青藏地区东南部中部地区。较低危险区范围明显扩大, 青藏地区大部 and 西北地区西部几乎全为较低危险区。低危险区范围大幅缩小, 仅分布有极少的区域。

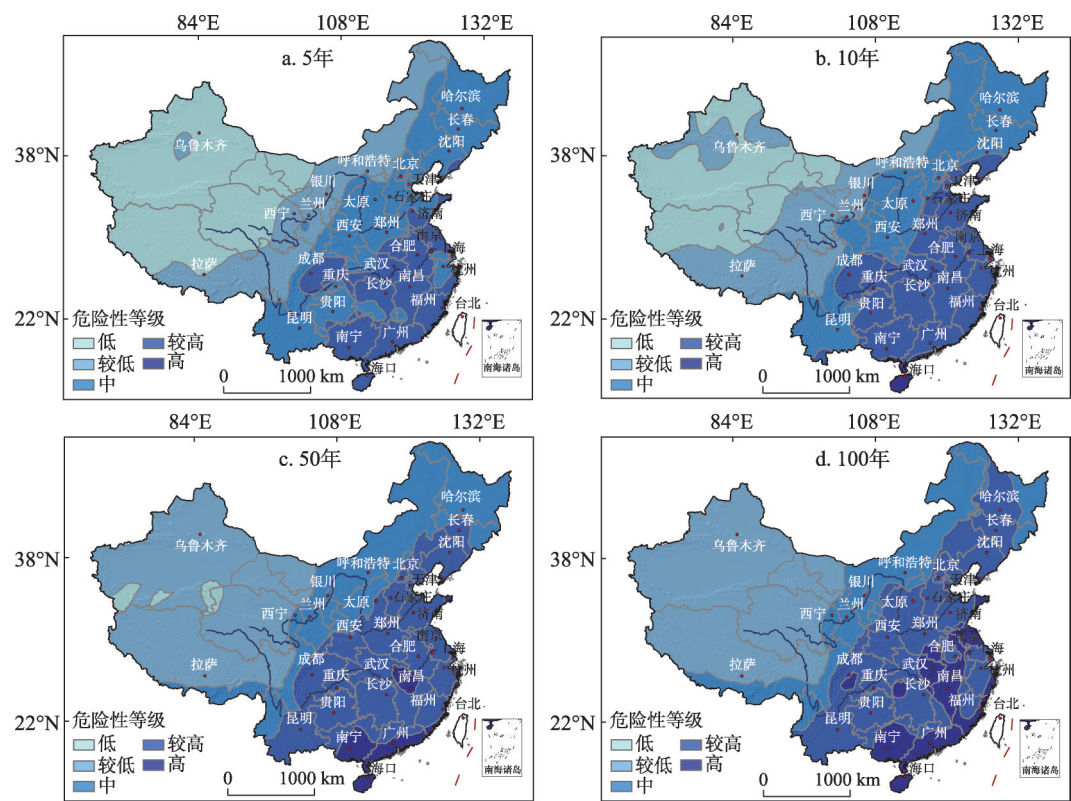


图2 不同重现期下中国极端降水危险性分布

Fig. 2 Spatial distribution of hazard grades of precipitation extremes in different return periods

100年一遇情景下，东部沿海和长江中下游流域高危险区范围进一步扩大，而四川盆地和湖南西北部开始出现高危险区。较高危险区范围变化不大，略向西北推移。中危险区范围反而缩小，较低危险区主要分布在青藏地区大部分区域和西北地区西部，低危险区几近消失。

因此，总体来说不同重现期下极端降水的危险性等级均从东南沿海向西北内陆递减。各重现期下的高危险区都主要位于中国东南沿海一带。随着重现期由5年扩大到100年，高危险区范围由0.1%扩大到8.81%，较高危险区由15.56%扩大到30.89%，中危险区范围略呈下降趋势，低危险区由35%减少到0.01%，较低危险区由20.22%扩大到39.39%（表1）。由此可见，从50年一遇的情景开始，高危险区和较高危险区范围已扩大到中国整个东中部地区，面临的防洪防涝压力不容小觑。

表1 不同重现期极端降水危险性、风险等级所占面积比(%)

Tab. 1 Area proportions of hazard and risk levels in different return periods (%)

等级	危险性				风险			
	5	10	50	100	5	10	50	100
低	35.00	24.14	1.75	0.01	34.74	23.97	2.12	0.04
较低	20.22	24.16	39.32	39.39	22.60	25.88	40.18	40.52
中	29.12	27.77	26.19	20.91	29.45	28.87	29.19	27.74
较高	15.56	23.16	28.95	30.89	12.53	20.53	25.87	27.27
高	0.10	0.76	3.80	8.81	0.68	0.93	2.64	4.43

3.2 极端降水脆弱性分析

极端降水脆弱性分析主要选取人口和经济两大指标，人口以人口密度进行分级，主要分为5个等级，经济指标采用地均GDP产值，同样划分为5个等级，人口密度与地均GDP 5个等级分别对应高、较高、中、较低和低脆弱性等级（表2），将人口和GDP两个指标脆弱性等级在ArcGIS中分别编制脆弱性分布图（图3），在此基础上通过叠加计算，编制了中国极端降水综合脆弱性等级空间分布图（图4）。

从图3和图4中分析得出，中国极端降水脆弱性高的地区主要位于东部沿海城市地区，其中长三角，珠三角和环渤海地区脆弱性等级最高，也是中国经济最发达地区。特别是长三角城市群、珠三角城市群和京津冀城市群地区、以及中东部大城市，如长春、

表2 人口密度和地均GDP脆弱性等级表

Tab. 2 Vulnerability grades of population density and GDP per area			
编号	脆弱性等级	人口密度(人/km ²)	地均GDP(亿/km ²)
1	高	≥ 200	≥ 6000
2	较高	100~200	2000~6000
3	中	25~100	1000~2000
4	较低	1~25	300~1000
5	低	< 1	< 300

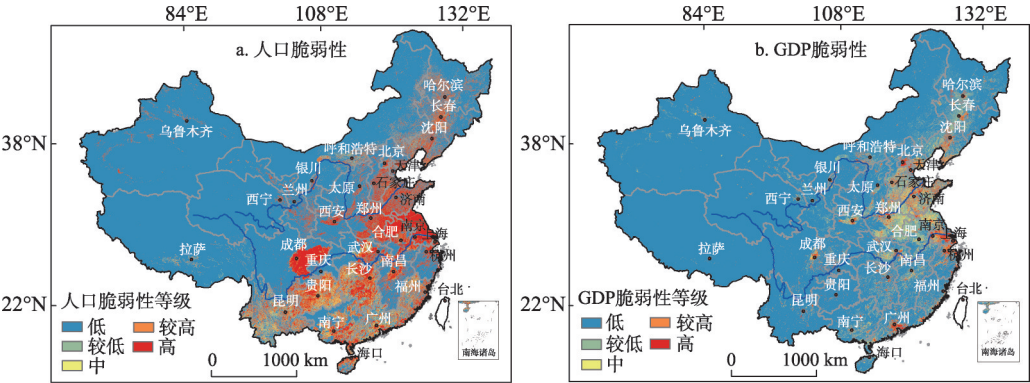


图3 中国极端降水的人口和GDP脆弱性分布

Fig. 3 Spatial distribution of vulnerability grades by population and GDP for precipitation extremes in China

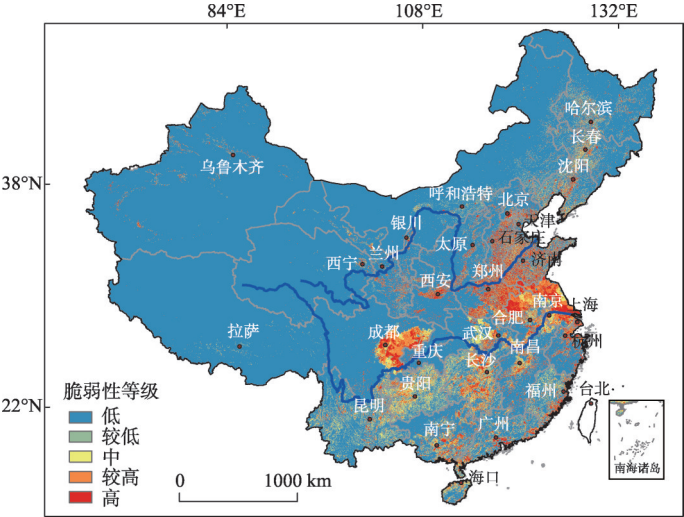


图4 中国极端降水脆弱性分布

Fig. 4 Spatial distribution of vulnerability grades of precipitation extremes in China

沈阳、郑州、武汉、长沙,西部地区大城市,如西安、成都、重庆等。极端降水脆弱性等级为较高的主要分布在人口稠密且经济水平较高的中东部地区,如山东、安徽、河南、河北等地、以及西部地区的四川省。虽然这些地区经济不是很发达,但是由于人口稠密,所以脆弱性等级也较高。脆弱性等级中等的地区主要集中分布在西部地区的广西、贵州、云南和中部地区的湖南、湖北等地。这些地区GDP值虽然不是很高,但人口相对于西北地区也较为稠密,所以脆弱性等级为中等。脆弱性等级较低的地区主要分布在东北地区的黑龙江、辽宁、吉林以及内蒙古等地,这些地区相对于东部地区GDP产值较低,同时人口密度不大,所以脆弱性较低。脆弱性等级最低的地区主要分布在西北干旱地区、青藏高原、内蒙古高原、横断山区,这里地广人稀,人口密度低,同时GDP产值低,脆弱性最低。

因此,总的来说中国极端降水脆弱性高的地区主要分布在人口稠密且经济发达的东部沿海大城市地区,特别是经济发达的长三角城市群、珠三角城市群和京津冀城市群地区以及中部地区一些大城市;脆弱性较高的地区主要分布在华东华北地区和四川盆地,以及零星分布在中西部较大型城市地区。极端降水脆弱性较低和低地区主要分布在西部人口稀少和经济水平低的地区;而脆弱性等级中等的地区主要分布在华中、华南、西南和东北地区。

3.3 极端降水风险分析

基于不同重现期下中国极端降水危险性和脆弱性的等级划分,按国际减灾战略提出的风险计算模型(式(1)),经过栅格计算和重分类,得到中国5年、10年、50年和100年一遇情景下的极端降水风险分布图(图5)。

不同重现期下,中国极端降水风险等级空间分布特征是由东南向西北方向降低。其中,华南南部、东南沿海、长江中下游平原、黄淮海平原、环渤海湾和四川盆地始终为高和较高风险区。风险等级高和较高的地区主要位于黑河—腾冲线以东,中和低风险区位于该线以西,这与中国人口密度分布的胡焕庸线大体一致。

随着重现期的增大,极端降水高风险等级的范围逐渐扩大,其面积变化与极端降水危险性等级的面积变化大致相同(表1)。面积由5年一遇情景下的0.68%扩大到100年一遇情景下的4.43%。风险等级高的地区所占面积比例扩大了近4%,风险等级中的地区所占面积比例呈先扩大后缩小的趋势,变化幅度很小。风险等级低的区域面积比例骤减,由34.74%减少到0.04%。

从不同重现期看中国极端降水风险的空间分布特征,5年一遇情景下,极端降水高风险地区主要是在极端降水较多,经济较为发达,人口稠密的珠三角、长三角、京津冀城市群。10年一遇情景下,高风险区分布有所扩大,湖南、江西、福建等省份风险等级由中风险区变为较高风险区。新疆大部分区域、甘肃和内蒙古西部、青海西部、西藏中北部为低风险区。50年一遇情景下,高风险区面积在长三角、珠三角、京津冀城市群有明显扩大,而低风险区分布在新疆、青海、西藏的人口极少部分地区,分布面积大大缩小。100年一遇情景下,高风险区范围进一步扩大,主要在华南大部分区域,长江中下游等地区扩大,其中较高危险区几乎覆盖了华北平原、长江中下游平原、四川盆地。而低风险区分布面积骤减,几近消失。

4 结论与讨论

本文基于不同重现期下极端降水危险性和人口经济脆弱性,采用国际减灾战略提出

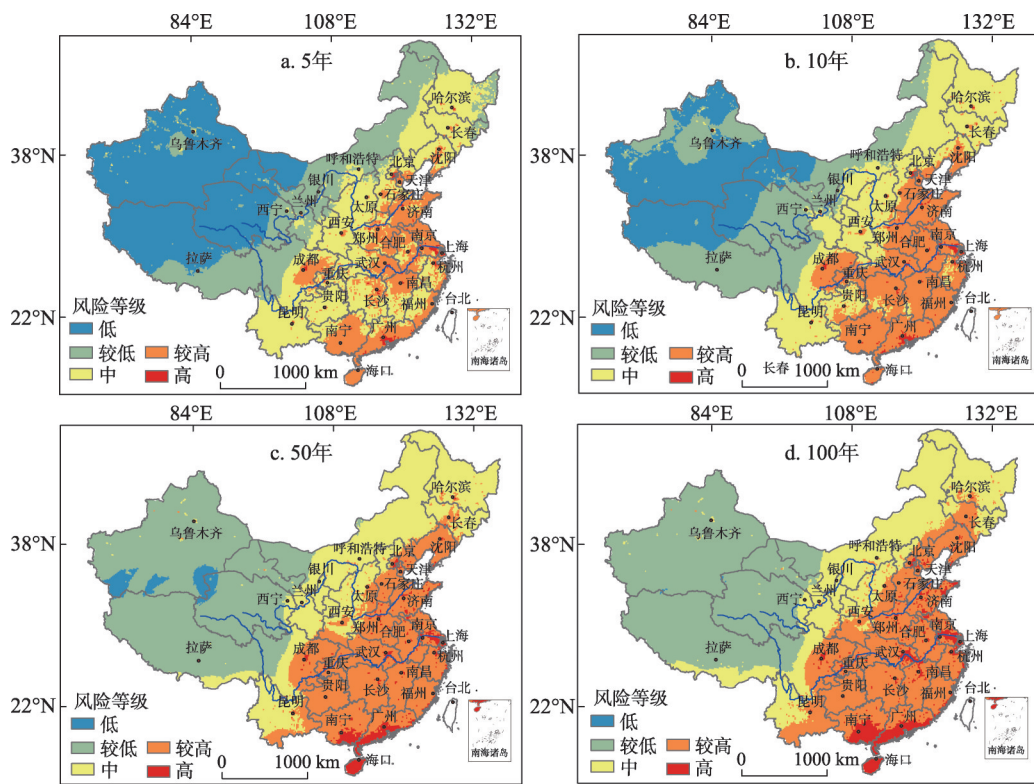


图5 中国极端降水风险分布

Fig. 5 Spatial distribution of risk levels of precipitation extremes in different return periods

的自然灾害风险评估模型, 分析了中国极端降水的危险性、脆弱性和风险的空间分布特征。主要研究结论有:

(1) 中国极端降水危险性等级大致呈现从东南沿海向西北内陆递减的趋势。随着重现期的增大, 高危险等级和较高危险等级区域的范围不断扩大, 低危险等级区域的范围不断缩小。各重现期下, 极端降水综合危险性高危区主要位于中国东南沿海一带的华南地区、华东地区和四川盆地, 危险性等级低的区域主要位于青藏地区大部分区域和西北地区西部。从空间分布特征看, 高、较高危险区域主要分布在400 mm等降水量以东, 而中、低危险区主要分布在以西地区。从50年一遇的情景开始, 高危险和较高危险区范围已扩大到中国整个东中部地区, 西部地区也变为中危险等级, 因此所面临的防洪防涝压力不容小觑。

(2) 中国极端降水脆弱性高的地区主要分布在人口稠密且经济发达的东部沿海大城市地区, 特别是经济发达的长三角城市群、珠三角城市群和京津冀城市群地区, 以及中东部大城市, 极端降水脆弱性较低和低的地区主要分布在西部人口稀少和经济水平低的地区。

(3) 不同重现期下, 中国极端降水风险等级空间分布特征是由东南向西北方向降低。其中, 华南南部、东南沿海、长江中下游平原、黄淮海平原、环渤海湾和四川盆地始终为高和较高风险区。风险等级高和较高的地区主要位于黑河—腾冲线以东, 中和低风险区位于该线以西, 与中国人口密度分布的胡焕庸线大体一致。

本文的研究结果可为政府部门的区域规划和制定防灾减灾战略提供一定的科学参

考,但研究中还有待进一步完善的地方。如,极端降水危险性分析仅采用极端降水量和频次进行,如果综合考虑极端降水的持续天数、极端降水的其他极值等综合分析极端降水危险性,同时脆弱性分析中再综合考虑土地利用类型、地理环境和地形地貌特征等地面环境要素,这样会使得风险分析结果更加精确,研究结果的可参考性更强。

参考文献(References)

- [1] Elias M Z, Andreas M F, Mark A L, et al. Localized climate change scenarios of mean temperature and precipitation over Switzerland. *Climate Change*, 2014, 125(2): 237-252.
- [2] Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. National assessment report of climate change (1): Climate change in China and its future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8. [丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(1): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.]
- [3] Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei, et al. Progresses in observation studies of climate extreme sand changes in mainland China. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 337-353. [任国玉, 封国林, 严中伟, 等. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 337-353.]
- [4] Scoccimarro E, Gualdi S, Bellucci A, et al. Heavy precipitation events in a warmer climate: Results from CMIP5 models. *Journal of Climate*, 2013, 26(20): 7902-7911.
- [5] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [6] Wen X, Fang G, Qi H, et al. Changes of temperature and precipitation extremes in China: Past and future. *Theoretical & Applied Climatology*, 2016, 126(1/2): 369-383.
- [7] Yuan Z, Yang Z, Yan D, et al. Historical changes and future projection of extreme precipitation in China. *Theoretical & Applied Climatology*, 2017, 127: 393-407.
- [8] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3): 417-425.
- [9] Rodrigo F S. Changes in the probability of extreme daily precipitation observed from 1951 to 2002 in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(10): 1512-1525.
- [10] Mirza M M Q. Climate change and extreme weather events: Can developing countries adapt. *Climate Policy*, 2003, 3(3): 233-248.
- [11] UN/ISDR. *Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives*. Geneva: United Nations, 2004.
- [12] Lenderink G, Attema J. A simple scaling approach to produce climate scenarios of local precipitation extremes for the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(8): 85001-85014.
- [13] Goubanova K, Li L. Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean Basin in an ensemble of future climate scenario simulations. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(1): 27-42.
- [14] Li J F, Zhang Q, Chen Y Q. Future joint probability behaviors of precipitation extremes across China: Spatiotemporal patterns and implications for flood and drought hazards. *Global and Planetary Change*, 2015, 124: 107-122.
- [15] Gao Tao, Xie Li'an. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5): 577-589. [高涛, 谢立安. 近50年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述. 地球科学进展, 2014, 29(5): 577-589.]
- [16] Jia Wenxiong, Zhang Yushun, Li Zongxing. Spatial and temporal change of precipitation extremes in Qilian Mountains and Hexi Corridor in recent fifty years. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 33(3): 509-519. [贾文雄, 张禹舜, 李宗省. 近50年来祁连山及河西走廊地区极端降水的时空变化研究. 地理科学, 2014, 33(3): 509-519.]
- [17] She Dunxian, Xia Jun, Zhang Yongyong, et al. The trend analysis and statistical distribution of extreme rainfall events in the Huaihe River Basin in the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1200-1210. [余敦先, 夏军, 张永勇, 等. 近50年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征. 地理学报, 2011, 66(9): 1200-1210.]
- [18] Escuder-Bueno, Castillo-Rodriguez J T, Zechner S, et al. A quantitative flood risk analysis methodology for urban areas with integration of social research data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12(9): 2843-2863.
- [19] Benito G, Lang M, Barriendos M, et al. Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation review of scientific methods. *Natural Hazards*, 2004, 31(3): 623-643.
- [20] Palmer T N, Raisanen J. Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. *Nature*, 2002, 415(6871): 512-514.
- [21] Yin Zhan'e, Xu Shiyuan, Yin Jie, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 553-562. [尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城

市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估. 地理学报, 2010, 65(5): 553-562.]

- [22] Zhou Chenghu, Wan Qing, Huang Shifeng, et al. A GIS-based approach to flood risk zonation. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 15-24. [周成虎, 万庆, 黄诗峰, 等. 基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究. 地理学报, 2000, 55(1): 15-24.]

Multi-scenario-based risk analysis of precipitation extremes in China during the past 60 years (1951-2011)

YIN Zhan'e, TIAN Pengfei, CHI Xiaoxiao

(Department of Geography, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Precipitation extremes are expected to become more frequent and intense under global warming in the coming decades. Risk analysis of precipitation extremes has become a hot issue in academic circles and governments. In this paper, we use the data recorded at 756 meteorological stations from 1951 to 2011. Data were first processed to generate a coherent set of precipitation datasets. Pearson-III frequency analysis method was used to define the thresholds of different rainfall return periods. We chose total extreme precipitation amount and extreme precipitation frequency as indices, and scenarios with return periods of 5, 10, 50 and 100 years were designed to analyze precipitation extremes. The vulnerability of economy and population to precipitation extremes was analyzed. Precipitation extremes and the associated vulnerability were evaluated using the risk assessment model of ISDR to assess the risk pattern of precipitation extremes in China, mapping the risk distribution of precipitation extremes under different return periods in China during the past 60 years (1951-2011). Results show that: (1) the magnitude of extreme precipitation decreases from the southeastern coastal areas to the northwestern inlands. The high-risk areas of extreme precipitation in the 5-year scenario are mainly located in southeastern coastal China. The boundary between high-risk and low-risk areas nearly coincides with the isohyet of 400 mm; (2) China's extreme precipitation is mainly observed in densely populated and economically developed eastern coastal metropolitan areas, especially in Yangtze River Delta urban agglomeration, Pearl River Delta urban agglomeration, Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration and several large cities in the western region of China. The western region of the country, which is resource-scarce and economically less developed, is associated with lower-risk precipitation extremes; (3) under each return period, the extreme precipitation risk level decreases from southeastern coastal areas to northwestern inland areas. The high-risk level areas are distributed in South China, southeastern coastal China, middle and lower reaches of the Yangtze River, Huang-Huai-Hai Plain, Bohai Rim and Sichuan Basin. The areas with high risk are mainly distributed to the east of the Heihe-Tengchong Line (Hu Line), and the medium and low risk areas are located to the west of the Hu Line, which is roughly consistent with the Hu Line of population density distribution in China. This research presents a novel approach to evaluating national-scale precipitation extremes and the associated socio-economic risks. Findings obtained herein can be used as scientific references for governments at all levels in disaster prevention and reduction of extreme precipitation in China.

Keywords: precipitation extremes; risk assessment; hazard analysis; vulnerability analysis; China