

# 全球暴雨洪水灾害风险评估与制图

方建<sup>1,2</sup>, 李梦婕<sup>1,2</sup>, 王静爱<sup>1,4</sup>, 史培军<sup>1,2,3</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 民政部-教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 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; 4. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

**摘要:** 全球洪水灾害风险评估是洪水综合风险管理的基础, 对在宏观上把握洪水灾害风险的空间格局, 识别全球洪水灾害的高风险区, 为国际社会采取措施减轻洪水损失有重要意义。然而受数据和模型的限制, 全球尺度的洪水风险评估工作十分有限。基于灾害系统理论, 从洪水可能造成损失的评估以及洪水致灾因子危险性、孕灾环境稳定性、承灾体脆弱性综合分析的角度出发, 利用全球范围内的降水、径流量、数字高程、土地利用、人口、GDP 等数据, 评估了国家、网格、流域 3 个单元上全球洪水灾害经济和人口风险。最后利用历史洪水损失及前人研究结果, 对本研究评估结果进行了比较验证, 其一致性较好, 准确地反映了全球洪水灾害风险的空间分布。评估结果表明, 受自然因素及人口经济分布的影响, 亚洲地区(尤其是东亚、南亚及东南亚地区)、美国中南部和欧洲西部洪水灾害风险最高。此外, 由于社会经济发展和政府管理水平的落后, 非洲地区洪水灾害人口风险也十分严峻。

**关键词:** 全球; 洪水灾害; 风险评估; 风险制图; 区域规律

中图分类号: TV122+.1

文献标志码: A

## Assessment and mapping of global fluvial flood risk

FANG Jian<sup>1,2</sup>, LI Mengjie<sup>1,2</sup>, WANG Jing'ai<sup>1,4</sup>, SHI Peijun<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education of China, Beijing 100875, China; 3. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. College of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** As a foundation of comprehensive flood risk management, global flood risk assessment would promote the understanding of global flood risk spatial pattern, facilitate the identification of global flood risk hotspots, and is of great significance for global flood loss reduction. However, subject to the deficiency of global data and large scale models, relevant work has been very limited. In this study, according to the theory of natural disaster system, we assessed flood disaster risk globally based on the evaluation of flood-induced potential losses as well as the synthetic analysis of hazard, exposure, vulnerability and the environmental factors. Using global datasets of precipitation, runoff, DEM, landuse, population, GDP and et al, we implemented the risk assessment at multiple levels of country, grid and large river basins with each of distinct method. Finally, the risk results and rankings were validated through the comparison with historical flood losses and also previous researches. Significant high consistency and accurate reflection of spatial distribution of global flood risk were obtained. It could be inferred from the assessment that Asia (especially East, South and Southeast Asia), the south of North America (especially

收稿日期: 2014-03-12; 修回日期: 2014-06-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB955403, 2012CB955404); 国家自然科学基金创新研究群体项目(413221001)

作者简介: 方建(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事气候变化及洪水灾害风险研究. E-mail: fangjian@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 史培军, 男, 教授, 博士. E-mail: spj@bnu.edu.cn

lower reach of the Mississippi river) and the west of Europe are on the list of highest risk. Meanwhile, it is also notable that even though flood hazard is moderate, the population risk in Africa is still remarkable high.

**Key words:** global; flood disaster; risk assessment; risk mapping; regional regularity

洪水是水流从河道或其他水体的正常范围溢漫出来,或者水流在正常情况下不受淹地区累积的现象<sup>[1]</sup>。在联合国公布并重点关注的 15 种主要自然灾害中,洪水灾害是影响范围最广,发生次数最多,损失最为严重的几种灾害之一。洪水灾害造成的损失占到全球自然灾害损失的五分之一<sup>[2]</sup>。洪水风险管理受到国际科研和管理机构高度关注<sup>[3-4]</sup>。在全球尺度进行暴雨洪水灾害的风险评估与制图,是洪水灾害综合风险管理的基础,有利于在宏观上把握全球洪水灾害风险的空间分布格局,识别全球洪水灾害的高风险区,为国际社会采取措施减轻洪水损失与影响提供科学依据。

灾害风险通常被定义为“由于自然或人为灾害与脆弱性条件之间的相互作用产生的例如伤亡、财产损失、经济活动中断和环境破坏等不良后果或预期损失的概率”。从风险结果的角度来说,风险是损失的概率分布或者期望值。而从风险产生的条件来看,风险是致灾因子、承灾体暴露和脆弱性三者共同作用的结果,也可定义为三者的乘积<sup>[5]</sup>。此外,孕灾环境也会影响到灾害的演进和损失及影响的形成,也应成为灾害系统的一部分<sup>[6]</sup>。针对洪水灾害,它是地球表层多个圈层之间相互作用导致的高度复杂的变异现象,其形成变化受到天气系统、陆地表面系统和人类社会经济系统的共同影响<sup>[7]</sup>。与其他自然灾害相比,洪水涉及大气圈、水圈、生物圈多种要素的相互作用,其系统的复杂性增加了风险评估的难度。在全球尺度进行风险评估与制图,既要保证风险要素的全面性与风险表达的准确性,同时也要考虑数据的可获得性及方法的可行性。

洪水灾害及其风险在国际社会倍受关注,在区域和中小流域尺度上,全球各地都开展了广泛的洪水灾害风险评估,通过模型模拟或调查分析制作了各类风险地图,以指导区域洪水风险的综合管理<sup>[8-11]</sup>。然而,在全球尺度上,受数据和大尺度模型方法的限制,相关的研究较少。Herold 与 Mouton<sup>[12]</sup>主要通过全球主要水文站点历史洪峰流量的统计计算,结合基于地形的 GIS 模拟,得到不同重现期下全球洪水的淹没范围和水深。Jongman 等<sup>[13]</sup>基于以上百年一遇洪水淹没范围的模拟结果,利用人口和土地利用分布数据,估算出了全球百年一遇洪水的经济损失。利用以上的结果,UNISDR 全球减灾评估报告(GAR)对全球洪水灾害经济人口暴露及风险进行了评估<sup>[14]</sup>。同时,Winsemius 等<sup>[15]</sup>提出了一个高分辨率的全球尺度洪水风险评估与制图框架,该框架利用全球气象数据集,耦合 PCR-GLOBWB 全球水文和水流演进的水力模型,并通过降尺度方法,得到高分辨率的洪水危险性,结合区域经济人口分布,从全球出发评估各个地区洪水风险。此外,哥伦比亚大学和世界银行联合的全球自然灾害热点项目(Natural Disaster Hotspots)利用 DFO 历史洪水记录,评估全球洪水分布,再结合 EM-DAT 历史洪水损失数据评估脆弱性,最后综合估算全球洪水人口死亡和经济损失风险等级<sup>[16]</sup>。综上分析可知,全球尺度洪水灾害风险评估开展得十分有限,仅联合国全球减灾评估报告和世界银行 Hotspots 项目报告比较典型,影响较大。前者采用解析的方法(analytical method)对洪水可能影响的经济人口进行分析,偏重于洪水致灾因子的模拟,对脆弱性的分析有所欠缺,同时全球模型存在较大的不确定性,影响到损失的评估精度。后者采用经验的方法(empirical method)对洪水致灾因子危险性和承灾体脆弱性进行刻画,进而综合评估风险等级。但仅从历史洪水事件出发,缺乏对洪水灾害系统致灾因子、孕灾环境等多个要素的考虑,系统的分析不够。

因此,本研究综合解析的方法和经验的方法,从洪水可能损失评估的角度以及洪水致灾因子危险性、孕灾环境稳定性、承灾体脆弱性综合分析的角度出发,评估了国家、网格、流域三个单元上全球洪水灾害风险或风险等级,以期国际社会减轻全球洪水损失提供参考。

## 1 研究数据及方法

### 1.1 数据

本研究构建了洪水灾害风险评估的综合数据库,包含了孕灾环境、致灾因子、承灾体和灾情四个子库。其中,孕灾环境子库涉及高程坡度等地形数据以及河网水系等水文数据;致灾因子子库涉及降水、径流等水文气象数据;承灾体子库主要包含人口、GDP、土地利用等社会经济数据;灾情数据库主要为国际主要机构搜

集的历史洪水灾害事件的损失等记录数据。构建的数据库涵盖多个方面的有关数据集 ,数据源来自国际上不同的组织机构 ,有关说明如表 1 所示。

表 1 研究所用数据列表  
Table 1 List of the datasets used in this study

类别	数据名称	数据源	数据说明
孕灾环境	全球数字高程	美国地质调查局( USGS)	美国 USGS 融合多个来源矢量和栅格数据得到的全球 30s 分辨率的数字高程数据。
	全球主要河流数据	世界粮农组织( FAO)	利用 NASA SRTM 15s 数字高程数据提取得到全球主要河流数据。
	全球百年一遇洪水淹没范围	UNEP/UNISDR	结合大尺度水文模型和 DFO 历史洪水记录 ,模拟得到全球百年一遇洪水淹没范围。
	全球逐日降水数据	NASA Goddard Space Flight Center	多源融合的 1996 年 10 月以来全球 1° 格网的逐日降水量数据。
致灾因子	全球站点流量数据	美国橡树岭国家实验室	该数据集主要来自联合国教科文组织出版的文档 ,包含全球 1018 个水文站观测的月径流数据 ,平均时间长度达 21. 5a。
	全球土地利用数据	美国地质调查局( USGS)	USGS 利用 Terra 和 Aqua MODIS 遥感影像得到的全球土地覆盖数据 ,空间分辨率为 0. 5° × 0. 5° ,数据基于 IGBP 分类体系。
	全球人口密度数据	美国橡树岭国家实验室	美国橡树岭国家实验室结合 GIS 和遥感技术得到的全球 1km 人口密度。
承灾体	全球网格 GDP 数据	美国大气海洋局( NOAA)	利用夜间灯光数据和人口密度数据计算得到全球 2006 年 1km 网格的 GDP 数据。
	全球重大洪水灾害事件数据	达特茅斯洪水观测中心( DFO)	达特茅斯洪水观测中心搜集 ,记录了 1985 - 2013 年全球重大洪水灾害事件的主要信息 ,包括时间 ,地点 ,影响的区域 ,死亡人口 ,转移人口 ,诱发原因等信息。
	全球重大洪水灾害记录	EM - DAT	根据新闻报道编录的全球 1950 - 2012 年主要洪水事件记录 ,包括洪水时间、地点及灾情等数据

1. 2 评估方法

本研究从风险的经典定义以及灾害系统理论出发 ,针对不同评价单元上洪水风险表达的差异以及数据可获得性的差异 ,采取不同的方法对国家、网格、流域单元的洪水风险和风险等级进行综合评估。

在国家单元上 ,主要参考了 Jongman 等人的方法<sup>[13]</sup> ,在其方法基础上添加农田的淹没损失 ,使计算的可能损失更接近实际。该方法利用全球百年一遇洪水淹没范围模拟数据 ,叠加全球土地利用数据 ,统计各国受洪水淹没的城市和农田的面积。在脆弱性方面 ,利用荷兰不同承灾体洪水淹没损失曲线<sup>[17]</sup> ,同时通过 GDP 的折算 ,得到各国洪水淹没的脆弱性曲线 ,统计各国城市和农田的单位面积损失 ,最终与淹没面积相结合 ,计算洪水淹没区内绝对经济损失。

网格单元主要利用全球网格降水数据 ,全球数字高程数据 ,全球坡度数据 ,全球河流水系数据以及全球网格 GDP 和人口密度数据 ,评估网格单元上暴雨洪水危险性 ,环境影响因子及人口经济暴露性 ,最后综合分析得到网格单元洪水人口和经济风险等级。

作为致灾因子的度量 ,全球网格暴雨强度的评估主要采用极值分布理论进行重现期的计算<sup>[18]</sup>。根据该理论 ,极端事件或样本尾部数据的概率分布符合特定的规律 ,按照年最大取样( AM) 和超阈值取样( POT) 的数据可分别用统一的广义极值分布( GEV) 和广义帕累托分布( GPD) 进行拟合。本研究从全球 GPCP 日降水数据集中提取每个网格 3d 降水超过 95% 分位数的序列 ,作为极端降水样本 ,再采用广义帕累托分布对各个网格样本集进行极值分布拟合 ,广义帕累托分布的概率密度函数及在此分布下某一降雨量对应的重现期计算如下:

$$f(x; \mu, \sigma, \beta) = - \left( 1 + \beta \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\beta}; \tag{1}$$

$$P = \frac{1}{1 - F(x < x_m)} = \frac{1}{\int_{x_m}^{\infty} f(x) dx} . \tag{2}$$

其中  $\mu$  为位置参数  $\sigma$  为尺度参数  $\beta$  为形状参数  $f(x)$  为概率密度函数  $F(x)$  为累积概率函数  $p$  为降水量对应的重现期  $x_m$  采用最小二乘法估算分布参数并通过反函数计算 10、20、50、100a 一遇对应的降水量以及期望的极端降水量。

网格单元洪水灾害的危险性主要由暴雨强度、海拔高度、坡度、距河流距离这些指标进行刻画,其中后三者表现为反向影响,构建的危险性指数如下:

$$H = \frac{\text{Prec}_n}{\text{Ele}_n + \text{Slp}_n + \text{Dis}_n} \quad (3)$$

其中:  $\text{Prec}_n$  为 3d 极端降水期望的归一化指数;  $\text{Ele}_n$  为高程归一化指数;  $\text{Slp}_n$  为坡度归一化指数;  $\text{Dis}_n$  为距最近河道距离归一化指数。在网格单元洪水致灾因子危险性评估的基础上,结果网格人口和 GDP,得到网格单元上洪水人口和经济风险等级。

在流域单元上,洪水风险等级评估主要从致灾因子危险性、承灾体脆弱性和暴露度 3 个角度进行评估。具体过程如下: (a) 对全球主要流域挑选主要控制站点进行分析,代表性站点主要位于河流干流的下游且有大于 30 年的历史流量观测序列; (b) 对代表站点历史月平均径流筛选极端径流进行洪水频率分析,考虑数据序列长度以及水文数据统计特性,采用广义帕累托分布进行概率分布拟合<sup>[19]</sup>,计算不同重现期下洪峰流量及期望的洪峰流量; (c) 利用 DFO 历史洪水空间分布数据统计各流域历史洪水频次,期望洪峰流量与历史洪水频次结合,得到各流域洪水危险性指数; (d) 利用 DFO 历史洪水灾情数据统计计算各流域历史洪水平均经济损失和死亡人口,得到各流域洪水脆弱性指数; (e) 统计各流域范围内的人口与 GDP,得到各流域洪水暴露度指标; (f) 综合危险性、脆弱性与暴露度,计算风险指数,并划分等级。

## 2 全球洪水灾害风险评估结果

### 2.1 国家单元洪水灾害风险评估结果

利用百年一遇洪水淹没范围数据以及全球土地利用数据,基于土地利用损失计算的方法,得到全球百年一遇洪水经济损失风险图(图 1)。从图中可以看出,全球洪水主要发生在亚洲、欧洲、北美洲的沿海、沿河、沿湖地区。这些地区地形平坦,水源丰富,常常是经济发达地区,通过 GDP 折算得到的单位面积损失也更高,洪水灾害的经济损失风险也就更大。从灾害损失分布的国家和地区来看:中国、美国、印度、俄罗斯、德国、法国、日本、巴西、英国、意大利等国的风险最大。其中中国百年一遇洪水的淹没面积为 42.1 万  $\text{km}^2$ ,仅次于印度,但由于中国的 GDP 是印度的近 3 倍,单位面积损失远高于印度,其总损失高于美国和印度,是世界上洪水灾害风险最高的国家,这与 EM-DAT 中记录的实际灾害损失和联合国 2009 年全球灾害评估报告中的结果一致。

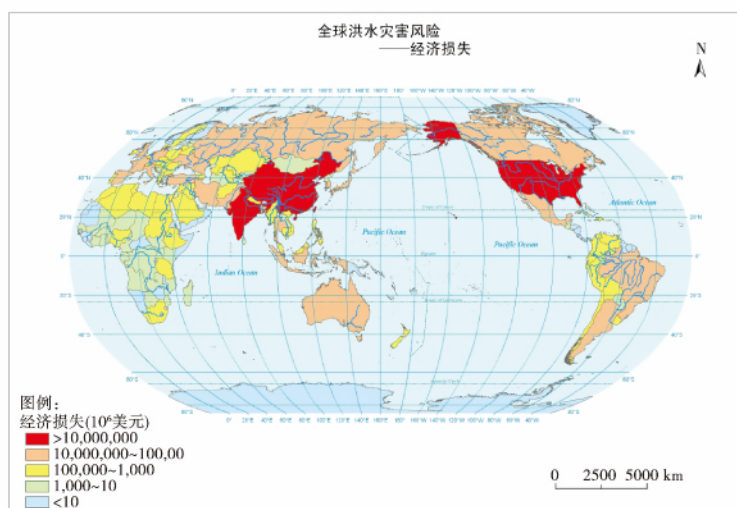


图 1 基于国家单元的百年一遇洪水灾害经济损失风险图

Fig. 1 Map of global economic loss risk for flood occurring once in 100-year on country level

## 2.2 网格单元洪水灾害风险评估结果

综合网格单元洪水灾害危险性、孕灾环境的稳定性和承灾体的暴露度得到网格单元洪水灾害经济及人口风险等级(图2)。从风险分布的网格单元来看,洪水人口高风险区主要分布在洪水频繁且人口密集的印度半岛、中国东部和南部、中南半岛、欧洲西部以及美洲东部部分地区;经济高风险地区主要分布在洪水频繁且经济发达的美国中东部、印度半岛北部、东亚的韩国、日本及中国东部地区、欧洲西部以及南美巴西东部部分地区(图2)。

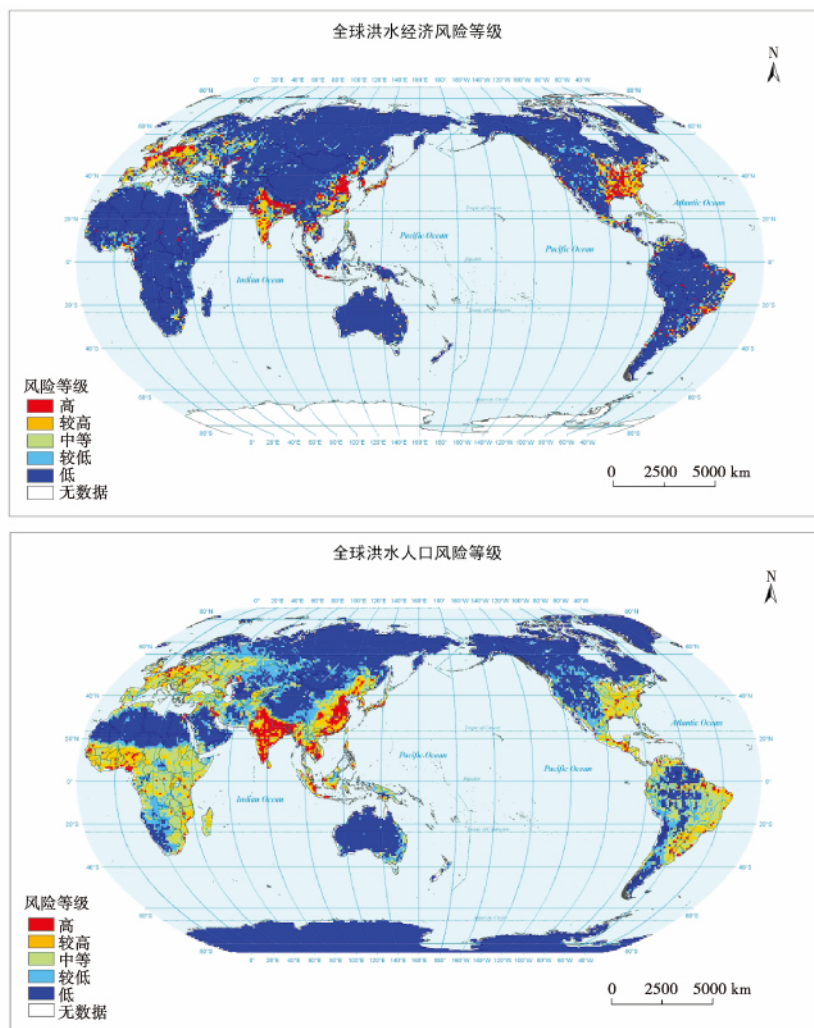


图2 基于网格单元的全球洪水灾害经济(上)与人口(下)风险等级图

Fig.2 Map of global flood risk of economic loss (upper) and population mortality (lower) on grid level

## 2.3 流域单元洪水灾害风险评估结果

综合流域洪水灾害危险性、承灾体的脆弱性和暴露度得到流域洪水灾害经济及人口风险等级(图3)。从洪水灾害风险分布的流域来看,人口高风险区主要分布在恒河-布拉马普特拉河、长江、亚马逊河、尼罗河、湄公河等人口分布密集且雨量水量比较充沛的热带/亚热带流域;经济高风险区主要分布在密西西比河、长江、多瑙河、恒河-布拉马普特拉河、巴拉那河、莱茵河等经济发达且洪水灾害频繁的流域(图3)。其中,涉及中国的全球主要流域有长江流域、黄河流域以及横跨俄罗斯和中国的黑龙江(俄称Amur,阿穆尔河)流域。人口风险方面,长江流域仅次于恒河-布拉马普特拉河流域,位列第二;黄河流域在恒河-布拉马普特拉河、亚马逊河、尼罗河、湄公河等流域之后,排名第8位;黑龙江流域则排名第16位。经济风险方面,长江流域在密西西比河流域之后,排名第2位;黄河流域和黑龙江流域分别排名第11位和第17位。

## 2.4 结果验证

风险在本质上是未来损失的可能性,在现实世界中难以找到绝对的指标对风险进行度量和刻画,因此客观上也就无法对风险模型评估的结果进行绝对的验证。本研究中,以历史实际发生的洪水损失的统计特征



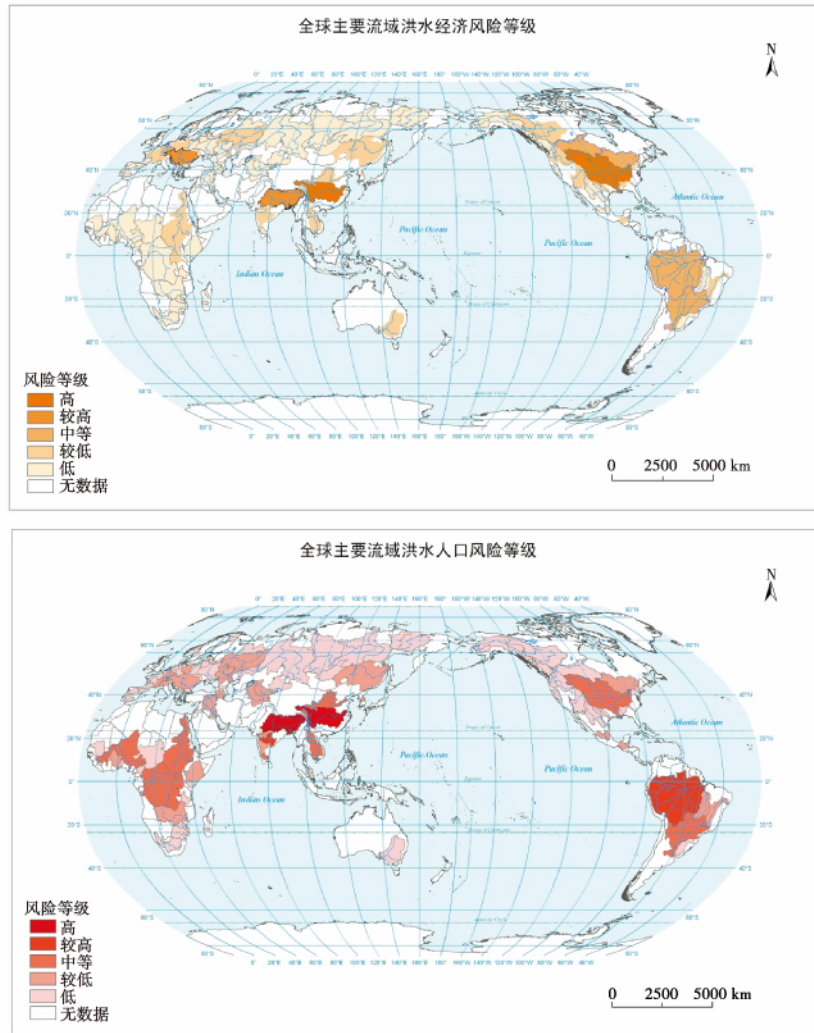


图 3 基于流域单元的 global 洪水灾害综合经济(上)与人口(下)风险等级图

Fig. 3 Map of global flood risk of economic loss (upper) and population mortality (lower) on watershed level

和前人相关的研究成果作为参照,通过综合的比较分析,证明本研究中风险评估结果的可靠性。

对于国家单元的评估结果,参考国际灾害资料库(EM-DAT)对 1950 至 2012 年全球重大洪水事件统计资料,对比分析该数据库记录统计的各国历史洪水灾害经济损失与本研究计算的各国洪水可能损失值。与此同时,参考联合国减灾署全球减灾报告中世界各国洪水风险排名,与本研究各国洪水可能损失的排名进行对比验证,结果如下:将所得结果与 EM-DAT 中损失前 100 名的国家对比分析,各国的历史洪水损失与计算所得结果的 Pearson 相关系数达到了 0.912,相关性在 0.01 置信水平显著。将所得结果与联合国 2009 年的全球灾害评估报告中全球洪水风险评估的结果进行比较,比较前 20 名时,一致的国家占 80%,Spearman 相关系数为 0.450,相关性在 0.05 置信水平显著(表 2)。

表 2 风险评估结果与 EM-DAT 历史洪水损失及 GAR2009 前 20 位国家排名相关系数表

Table 2 Correlation coefficients for risk results on country level

		EM-DAT	Result	GAR2009	Result
EM-DAT	Pearson 相关性	1	0.912 **		
	显著性(双侧)		0.000		
	N	100	100		
GAR2009	Spearman 相关性			1.000	0.450 *
	显著性(双侧)			.	0.047
	N			20	20

注: \* . 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* . 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

由于流域单元洪水风险评估的工作开展较少,暂无权威的结果可以参照比较。本研究利用达特茅斯洪水观测中心( DFO) 历史重大洪水灾害事件的空间分布和灾情数据( DFO ,2013) ,统计各流域近 30a( 1985 – 2013 年) 洪水灾害平均死亡人口和经济损失,以此作为参考,对本研究中流域单元的评估结果进行验证,验证结果如下: 对比评估所得的各流域人口风险等级排名和利用 DFO 数据分析统计的各流域洪水平均死亡人口,计算得到 Spearman 相关系数为 0. 784,相关性在 0. 01 置信水平显著。对比评估所得的各流域经济风险等级排名和利用 DFO 数据分析统计的各流域洪水平均经济损失,计算得到 Spearman 相关系数为 0. 807,相关性在 0. 01 置信水平显著( 表 3) 。

表 3 流域单元风险评估结果与 DFO 洪水死亡人口及经济损失排名 Spearman 秩相关系数表

Table 3 Correlation coefficients for risk results on watershed level

		死亡人口		经济损失	
		DFO	Result	DFO	Result
死亡人口	Spearman 相关性	1. 000	0. 784 **		
	显著性( 双侧)	.	0. 000		
	N	100	100		
经济损失	Spearman 相关性			1. 000	0. 807 **
	显著性( 双侧)			.	0. 000
	N			100	100

注: \*\* . 在 0. 01 水平( 双侧) 上显著相关。

网格单元的结果验证主要参考哥伦比亚大学和世界银行联合发布的全球自然灾害热点地区风险报告的评估结果,对比分析本研究人口和经济风险等级结果与世界银行的结果,分别计算两个网格图层的相关性矩阵,结果表明人口风险等级相关性达到 0. 5302,经济风险等级相关性达到 0. 6257,相关性在 0. 01 置信水平显著。

3 结论与讨论

本研究利用洪水淹没模拟情景与全球土地利用数据,统计计算了各国百年一遇洪水可能的经济损失,评估了国家单元洪水经济风险;利用全球主要流域观测径流数据以及流域人口经济分布和历史洪水灾害记录数据,评估了全球流域单元洪水经济和人口风险等级;利用全球暴雨数据、全球数字高程数据、全球水系分布数据,在致灾因子、孕灾环境和承灾体的综合分析基础上评估了网格单元洪水经济和人口风险等级。与历史损失数据和前人工作的比较验证表明,不同评价单元上的风险评估结果真实可信,能够为国际洪水风险管理及防灾减灾投资提供科学参考。

在评估方法上,本研究综合损失估算和因子分析的方法,从不同评价单元的多个角度进行风险评估,以满足不同对象的应用需求。在国家单元上,洪水经济损失风险评估主要参考了 Jongman 等人的方法,结合淹没范围、土地利用和脆弱性曲线,估算可能损失。同时,考虑到农业损失是洪水经济损失中很重要的一部分,在 Jongman 等人研究的基础上,增加了洪水淹没农作物损失,使评估结果更加接近客观实际。流域性是洪水水文现象与其他自然现象最大的差别,在洪水灾害管理实践中除了行政单元的考虑,更多的政策措施是从流域角度出发制定的。因此,考虑洪水流域特性,从流域单元评估洪水风险,对于为流域洪水管理提供科学依据,推动洪水风险防范具有重要意义。本研究从流域极端径流出发,结合流域内经济人口的暴露与脆弱性,综合分析评估了全球主要流域洪水灾害经济及人口风险等级,在一定程度上保证了洪水风险评估的完整性。在网格单元上,本研究在考虑暴雨致灾因子、人口经济承灾体的基础上,更进一步分析地形、河网等孕灾环境对洪水灾害的影响,并综合这些要素进行风险评估,更加全面地反映了灾害风险这一综合概念的系统特性,更好地表达了全球洪水灾害风险的空间分布。然而,受大尺度水文过程复杂性和多样性的影响,全球尺度上地形等要素对洪水过程及其风险影响机制的深入理解和统一建模还有较大困难。

IPCC 第四次报告明确指出,全球气候变化已是不争的事实,并会对全球和区域水循环造成一定的影响<sup>[20]</sup>。理论上,气候变暖改变地表蒸散发,使水循环过程加速,极端降水事件增多,使得洪水事件更加频

繁<sup>[21]</sup>。然而,由于洪水灾害系统的复杂性,不同地区气候变化的影响有着明显的差异,当前全球尺度的评估仍存在着较大的不确定性,难以得到一致的结论<sup>[1]</sup>。与此同时,受气候变化的影响,传统洪水风险分析中水文序列稳态过程的假设受到挑战,历史序列难以反映未来的变化<sup>[22]</sup>。气候变化给洪水风险评估和管理带来诸多难题和挑战,如何客观全面地分析评估气候变化下的洪水灾害风险将成为未来研究的重点和难点。

## 参考文献:

- [1] IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2012.
- [2] Munich Reinsurance Company. Topics Geo, Natural Catastrophes 2009: Analysis, Assessment, Positions[R]. Munich, Germany, 2010.
- [3] European Commission. Directive 2007/60/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks[J]. Official Journal of the European Union, 2007, L 288: 27–34.
- [4] Schelfaut K, Pannemans B, van der Craats I, et al. Bringing flood resilience into practice: the FREEMAN project[J]. Environmental Science & Policy, 2011, 14(7): 825–833.
- [5] UNISDR. Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives[R]. Geneva, Switzerland, 2004.
- [6] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(04): 8–19.  
SHI Peijun. Second discussion of theory and practice for systematic studies on disasters[J]. Journal of Natural Disasters, 1996, 5(4): 8–19. (in Chinese)
- [7] Kundzewicz Z, Hirabayashi Y, Kanae S. River Floods in the Changing Climate – Observations and Projections[J]. Water Resources Management, 2010, 24(11): 2633–2646.
- [8] Kim Y O, Seo S B, Jang O J. Flood risk assessment using regional regression analysis[J]. Natural Hazards, 2012, 63(2): 1203–1217.
- [9] Wang Y M, Li Z W, Tang Z H, et al. A GIS – Based Spatial Multi – Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China[J]. Water Resources Management, 2011, 25(13): 3465–3484.
- [10] 刘家福, 李京, 刘荆, 等. 基于 GIS/AHP 集成的洪水灾害综合风险评价——以淮河流域为例[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(06).  
LIU Jiafu, LI Jing, LIU Jing, et al. Integrated GIS/AHP – based flood risk assessment: a case study of Huaihe River Basin in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(6). (in Chinese)
- [11] 杜鹃, 何飞, 史培军. 湘江流域洪水灾害综合风险评价[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 38–44.  
DU Juan, HE Fei, SHI Peijun. Integrated flood risk assessment of Xiangjiang River Basin in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(6): 38–44. (in Chinese)
- [12] Herold C, Mouton F. Global flood hazard mapping using statistical peak flow estimates[J]. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss, 2011, 8(1): 305–363.
- [13] Jongman B, Ward P J, Aerts J C J H. Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes[J]. Global Environmental Change, 2012, 22(4): 823–835.
- [14] UNISDR. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction[R]. Geneva, Switzerland, 2009.
- [15] Winsemius H C, Van Beek L P H, Jongman B, et al. A framework for global river flood risk assessments[J]. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss, 2012, 9(8): 9611–9659.
- [16] Dille M, Chen R S, Deichmann U, et al. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis[R]. World Bank Publications, 2005.
- [17] Kok M, Huizinga H J, Vrouwenvelder A C W M, et al. Standard Method 2004: Damage and Casualties Caused by Flooding[R]. Road and Hydraulic Engineering Institute, Netherlands, 2005.
- [18] Coles S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values[M]. Springer, 2001.
- [19] Kidson R, Richards K S. Flood frequency analysis: assumptions and alternatives[J]. Progress in Physical Geography, 2005, 29(3): 392–410.
- [20] IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change 2007 Fourth Assessment Report (AR4) [R]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [21] Milly P C D, Wetherald R T, Dunne K A, et al. Increasing risk of great floods in a changing climate[J]. Nature, 2002, 415(6871): 514–517.
- [22] Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, et al. Stationarity Is Dead: Whither Water Management [J]. Science, 2008, 319(5863): 573–574.