

基于不同灾害数据的 1985-2019 年南亚和东南亚洪水变化特征分析

王毅¹ 刘爽¹ 周庆亮¹ 包红军¹ 尹宜舟² 杨琨¹

1 国家气象中心, 北京 100081

2 国家气候中心, 北京 100081

提 要: 本文基于紧急灾害数据库 (EM-DAT) 和达特茅斯洪水实验室 (DFO) 的灾害数据, 对比分析了 1985-2019 年南亚、东南亚洪水灾害的频次、强度及造成的人口损失的变化特征, 并探讨了与热带气旋相关的洪水灾害的变化趋势, 结果发现: 近 35 年东南亚地区洪水发生频次总体比南亚地区多 15% 左右, 其中与热带气旋相关的洪水频次, 东南亚地区约是南亚地区的 4 倍; 与热带气旋相关的洪水事件占东南亚地区所有洪水灾害事件的约 20%; 月际分布表明南亚地区洪水灾害集中在 6-8 月, “单峰”特征明显, 而其与热带气旋相关的洪水频次呈“双峰”结构; 东南亚的洪水灾害年内分布相对均匀; 基于两种数据平均后的洪水趋势检验表明, 近 35 年南亚、东南亚洪水的频次均呈显著增加的趋势, 而每次洪水灾害的损失人口数则显著减少; 东南亚地区平均洪水灾害的强度略小于南亚地区, 但东南亚地区洪水灾害的强度近 35 年有显著增加趋势。此外, 基于 EM-DAT 数据统计的近 35 年东南亚和南亚洪水灾害造成的经济损失均表现出明显增加趋势。

关键词: 洪水, 灾害, 热带气旋, 南亚, 东南亚

Analysis of Variation Characteristics of Floods in South Asia and Southeast Asia during 1985-2019 Using Different Disaster Databases

Wang Yi¹ Liu Shuang¹ Zhou Qingliang¹ Bao Hongjun¹ Yin Yizhou²
Yang Kun¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 National climate Center, Beijing 100081

Abstract: Based on Emergency Events Database (EM-DAT) and Dartmouth Flood Observatory (DFO) disaster datasets, this study compares the variation characteristics of frequency, magnitude and fatalities of floods in South Asia and Southeast Asia during 1985-2019. The trends of Tropical Cyclone (TC)-associated floods are also discussed. The results show that frequency of floods in Southeast Asia is about 15% more than that in South Asia for recent 35 years. Among all floods, the frequency of TC-associated floods in Southeast Asia is around 4 times more than that in South

资助项目: 国家重点研发计划 (2020YFE0201900)、国家自然科学基金项目 (41975100) 和国家重点研发计划 (2017YFC1502004) 共同资助

第一作者: 王毅, 主要从事集合预报、全球灾害性天气预报技术研究. Email: yiwang@cma.gov.cn

通信作者: 周庆亮, 主要从事高影响天气分析预报技术研究. Email: zhouql@cma.gov.cn

Asia. The TC-associated floods account for approximately 20% of all floods in Southeast Asia. Monthly distribution shows that floods in South Asia concentrate in June – August which exhibiting a unimodal pattern while TC-associated floods in South Asia present a bimodal distribution. Floods in Southeast Asia are evenly distributed throughout the year. Trend test of averaged floods by two databases indicate that both floods in South Asia and Southeast Asia has significantly increased over recent 35 years while the flood-induced fatalities per flood event decreased significantly. On average, the magnitude of floods in Southeast Asia is smaller than that in South Asia, but there is a significant increasing trend in the magnitude of floods in Southeast Asia during recent 35 years. In addition, both economic losses of floods in South Asia and Southeast Asia based on EM-DAT data exhibit obvious increasing trend over the past 35 years.

Key words: floods, disaster, tropical cyclone, South Asia, Southeast Asia

引 言

洪水灾害是发生频率最高的自然灾害之一，占有所有自然灾害的40%以上（Jonkman, 2005；尹宜舟等，2020）。洪水灾害的影响和造成的损失非常巨大，洪水影响的人口占有所有自然灾害影响总人口的50%以上（Slater and Villarini, 2016）。据不完全统计，平均每年洪水造成的经济损失超过7千亿美元（Chen et al, 2020）。在全球变暖背景下，随着人口增长和经济发展，未来洪水灾害的影响预计将愈加严重（Yamazaki et al, 2018）。IPCC将洪水定义为水流从河道或其他水体的正常范围溢漫，或者水流在正常情况下不受淹地区累积的现象（Field et al, 2012）。除受到强降水、季风和热带气旋等气象因素影响之外，洪水灾害还与地形、植被、土壤，气候变化及人类社会经济活动等相关，因而是一种高度复杂的自然社会现象（方建等，2014, 2015；包红军等，2016；Emerton et al, 2017）。掌握洪水的时空分布规律对于认识洪水灾害，开展洪水灾害预警及洪涝灾害风险管理具有重要的意义。

南亚和东南亚国家濒临印度洋和太平洋，台风暴雨多发，并且覆盖青藏高原“亚洲水塔”的下游，河流水系发达，人口密度很高，受洪水灾害的影响严重。研究表明，南亚和东南亚地区是“一带一路”沿线国家中自然灾害发生最多的地区，主要以洪水和风暴灾害为主（王维国等，2017；毛星竹等，2018；王会军等，2020）。例如，2013年印度和尼泊尔的洪水灾害造成了超过6600人死亡（Tanoue et al, 2016）。2011年泰国洪水持续长达数月，导致了巨大的人员伤亡和经济损失（Gale and Saunders, 2013）。多个气候模式预测指出，未来重大洪水事件在南亚和东南亚地区会继续增加（Eccles et al, 2019）。

对于灾害时空规律及形成机制的研究是以大量的灾害数据作为基础。目前全球洪水灾害的数据库包括紧急灾害数据库（Emergency Events Database, EM-DAT）（CRED, 2012）、国际洪水网络（IFNET）和达特茅斯洪水实验室（Dartmouth Flood Observatory, DFO）（Brakenridge, 2019）全球重大洪水事件数据等。不少学者利用灾害数据库开展了全球或区域尺度上洪水变化特征的研究（司瑞洁等，2007；

Singh and Kumar, 2013)。蒋卫国等(2006)基于EM-DAT数据对1950-2004年全球洪涝灾害进行了分析,发现洪水发生频次、受灾人口及经济损失总体上呈现增加趋势,亚洲是洪水灾害最频发的地区之一。Najibi and Devineni(2018)分析了1985-2015年全球洪水的变化趋势,并按照洪水灾害的持续时间进行分类,结果表明过程较短的洪水(持续时间在7天以下)的频次没有明显趋势,而过程较长的洪水频次上升明显。Chen et al(2020)基于DFO洪水数据研究了1985-2018年东南亚部分国家洪水的变化特征,结果表明洪水频次呈显著增多趋势,而热带气旋引发的洪水频次(约占总洪水频次的25%)的长期趋势则不明显。陈兴茹等(2019)利用EM-DAT数据分析了湄公河流域国家洪灾损失的时空分布特征。

已有的相关研究主要基于单一的灾害数据库,并且缺乏针对南亚和东南亚的对比分析。由于信息来源、灾害定义及收录条件的不同使得各数据库差异不可避免,因此,利用不同数据进行研究可以更好地认识灾害的变化特征。本文利用两种灾害数据库,对比南亚、东南亚洪水灾害的变化特征,旨在为理解区域洪水时空分布格局,减轻洪水灾害风险和服务“一带一路”倡议提供科学依据和决策参考。

1 资料和方法

本研究中南亚、东南亚地区的国家定义如表1,南亚包含了8个国家,东南亚包含了11个国家。

表1 本研究中南亚、东南亚的国家

地区	国家	数量
南亚	印度、巴基斯坦、孟加拉国、阿富汗、尼泊尔、不丹、斯里兰卡、马尔代夫	8
东南亚	越南、老挝、柬埔寨、泰国、马来西亚、新加坡、印度尼西亚、文莱、菲律宾、缅甸、东帝汶	11

本文使用了两种被许多国际机构及学者广泛引用的国际洪水灾害数据,分别是紧急灾害数据库(EM-DAT)和达特茅斯洪水实验室(DFO)全球重大洪水事件数据,研究时段是两者数据时段重合的1985-2019年。

EM-DAT是由世界卫生组织和比利时国家灾害流行病学研究中心(CRED)建设的,包含了1900年以来全球自然灾害及技术灾害事件。自然灾害数据分为气象、水文、气候等6大类,每类分为不同亚类,其中洪水灾害亚类又细分为海岸洪水、山洪、冰塞洪水及河流洪水子类。每条灾害记录包含了灾害发生所在国家等地理信息、灾害起止时间、灾害成因、相关灾害(次生灾害)等以及灾害的人口损失和评估的经济损失。EM-DAT信息主要来源于联合国、政府和非政府组织、保险公司、研究机构和媒体等多种途径。

DFO洪水数据记录了全球1985年以来造成人员伤亡和经济损失的重大洪水

灾害事件，信息来源于媒体、政府、常规观测以及遥感数据。除了灾害发生所在的国家、起止时间、灾害损失（死亡人数、影响人数、经济损失）等要素，DFO 数据还提供了洪水灾害严重度(Severity)，严重度按轻重从 1、1.5 到 2 逐级增强，分别代表洪水灾害的估计重现期在 20 年以下，20-100 年之间和 100 年以上。

一种灾害往往会引发次生灾害甚至灾害链，对于这种关联性很强的灾害，EM-DAT 数据也进行了描述。例如，如果热带气旋引发了洪水等次生灾害，则这条灾害记录中“相关灾害”字段标记为“洪水”。EM-DAT 和 DFO 数据都包含了灾害成因字段。EM-DAT 洪水灾害中成因包括热带气旋、季风降水等，而 DFO 洪水灾害成因分为暴雨、热带气旋、季风降水、融雪、溃坝、雪崩等。

洪水灾害的轻重程度是反映灾害影响的重要指标。根据 DFO 数据中洪水灾害的持续时间、严重度等级和影响空间范围可以计算洪水灾害的强度：

$$\text{灾害强度} = \log_{10} (\text{持续时间} \times \text{严重度等级} \times \text{影响空间范围}) \quad (1)$$

例如，对于一次持续时间为 5 天，严重度等级为 1，影响范围为 20000 平方公里的洪水灾害，计算得到的洪水灾害强度为 5。

本文采用非参数 Mann-Kendall (MK) 检验和 Sen 斜率检测法来研究洪水灾害的长期趋势，其优点是不需要预先假定样本的分布，且对异常值不敏感 (Yue et al, 2002)。Sen 斜率是用来估计序列变化趋势的数值程度大小，但不能对趋势进行显著性检验。MK 检验的 Z 统计量是一个正态分布的统计量，Z 为正（负），表明序列呈上升（下降）趋势。当 Z 的绝对值大于 1.65、1.96 和 2.58 时，分别表示其通过了 0.1、0.05 和 0.01 显著性水平检验。

2 洪水灾害频次的特征分析

2.1 数据预处理和洪水频次统计

首先从灾害数据库中提取发生在南亚、东南亚国家的洪水灾害记录，并剔除重复记录。将 DFO 数据中洪水灾害成因是海啸、巨浪、雪崩、冰湖溃决的事件进行剔除，最后得到基于 DFO 的南亚、东南亚洪水事件分别为 608 次和 700 次。

从 EM-DAT 洪水亚类数据中提取到南亚、东南亚洪水记录分别为 581 条和 585 条。此外，南亚、东南亚 EM-DAT 数据中气象类-风暴亚类灾害的“相关灾害”为“洪水”的记录分别为 39 条和 131 条。将上述记录合并后得到基于 EM-DAT 的南亚、东南亚洪水灾害各为 620 次和 716 次。比较可知，1985-2019 年东南亚地区洪水发生总频次比南亚地区多 15% 左右。

对各国洪水频次进行统计分析发现（见图 1），南亚地区洪水发生频次最多的国家是印度，两种数据记录的印度的洪水事件都超过了 250 次，明显多于其他国家。孟加拉国、阿富汗、巴基斯坦近 35 年洪水频次在 50-100 次，而不丹和马尔代夫洪水发生次数最少。

印度尼西亚和菲律宾是东南亚地区最易遭受洪水灾害的国家，至少有一种数据统计的洪水次数超过了 200 次。另外，越南洪水灾害超过 100 次，而泰国和马来西亚洪水次数介于 50-100 次之间。新加坡只有 DFO 数据记录了 1 次洪水。两

种数据均没有记录到文莱出现过洪水灾害。在南亚、东南亚所有国家中，印度、印度尼西亚、菲律宾、越南依次是 1985 年以来发生洪水灾害最多的国家。

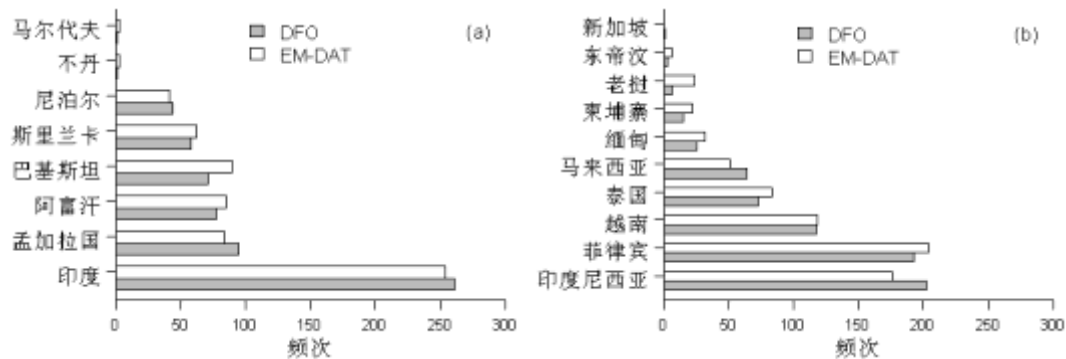


图1 1985-2019年(a)南亚、(b)东南亚各国基于EM-DAT的和基于DFO的洪水灾害频次
Fig. 1 Total frequency of EM-DAT based floods and DFO based floods for different countries in (a) South Asia and (b) Southeast Asia during 1985-2019.

南亚、东南亚位于易造成洪涝灾害的热带气旋（台风）暴雨多发区，因此进一步分析与热带气旋有关的洪水灾害有助于理解洪水灾害的时空变化格局。为表述方便，以下将热带气旋引发或与热带气旋有关的洪水简称为 TC 洪水（TC floods）。对于 EM-DAT 数据，本文定义其中洪水亚类的灾害成因为热带气旋的事件，和风暴亚类-热带气旋子类相关灾害为洪水的事件为 TC 洪水事件。对 DFO 数据，定义灾害成因为热带气旋或热带风暴的事件为 TC 洪水事件。对灾害成因筛查后得到的南亚、东南亚 TC 洪水的频次如表 2 所示。可以看出，南亚 TC 洪水频次约占其总洪水频次的 5%，而东南亚 TC 洪水频次占到总洪水频次 20%左右。显而易见，东南亚地区 TC 洪水灾害较南亚地区更为频繁，前者大约是后者的 4 倍。

表2 南亚、东南亚TC洪水频次及其占总洪水频次的比例（单位：%）

Table 2 Frequency of TC floods and its ratio (Unit: %) to total frequency of floods in South Asia and Southeast Asia

Asia				
	南亚TC洪水 频次	南亚TC洪水频次占 总洪水频次比例	东南亚TC洪水 频次	东南亚TC洪水频次 占总洪水频次比例
EM-DAT	32	5.2%	149	20.8%
DFO	34	5.6%	140	20%

图 2 给出了 1985-2019 年各国 TC 洪水的发生频次。可以看出，印度是南亚地区 TC 洪水发生最多的国家，累积发生了近 20 次，约占其总洪水次数的 7%。菲律宾、越南是南亚、东南亚所有国家中 TC 洪水发生最多的国家，分别超过了 80 次和 30 次。菲律宾 TC 洪水发生频次占其总洪水频次的 43%左右，说明热带气旋是菲律宾洪水灾害的重要诱发或因素。阿富汗、不丹、马尔代夫、东帝汶和

新加坡在两种数据库中均未记录到 TC 洪水灾害。

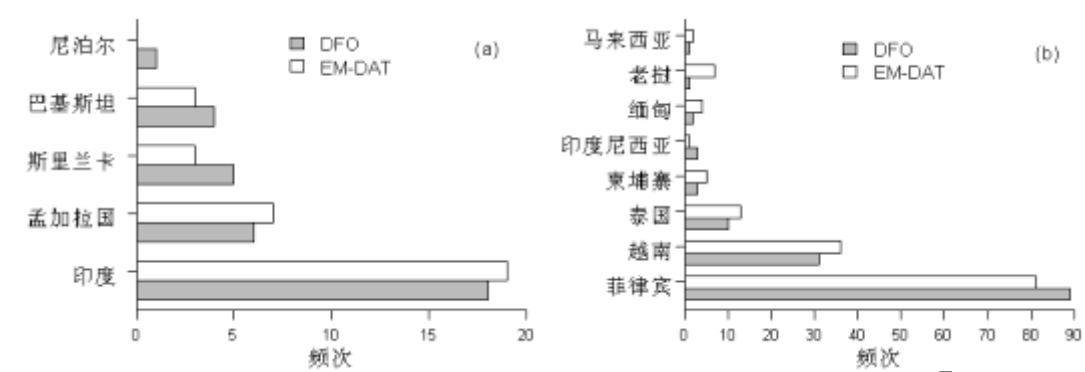


图2 1985-2019年(a)南亚、(b)东南亚各国基于EM-DAT的和基于DFO的TC洪水频次

Fig. 2 Total frequency of EM-DAT based TC floods and DFO based TC floods for different countries in (a) South Asia and (b) Southeast Asia during 1985-2019

2.2 月际分布特征分析

南亚和东南亚所处的地理位置不同，气候背景不同，导致洪水灾害的发生季节也存在差异。这里以数据中洪水灾害开始日期所在的月份作为洪水发生的月份。南亚、东南亚地区平均的洪水频次的月际分布如图 3 所示。由图可知，基于两种数据得到的洪水频次有一致的年内变化。

图 3a 显示，南亚地区洪水频次表现出明显的季节性特征，6-8 月为洪水灾害的高发期，7 月为峰值期，平均有 3 次以上洪水灾害，而冬季（12 月-1 月）洪水发生次数较少。南亚属于全球著名的季风区，季风降水集中在 6-9 月，从洪水灾害的月际分布可知南亚洪水灾害与季风活动有着密切的关系。与南亚地区的“单峰”特征不同，东南亚地区洪水“单峰型”不明显，6 月至 12 月均有不同程度洪水灾害发生，仅在 3-5 月出现一个低谷。另外，南亚、东南亚每月洪水频次的标准差较大（图略），表明两个地区洪水频次的年际变化都很显著。

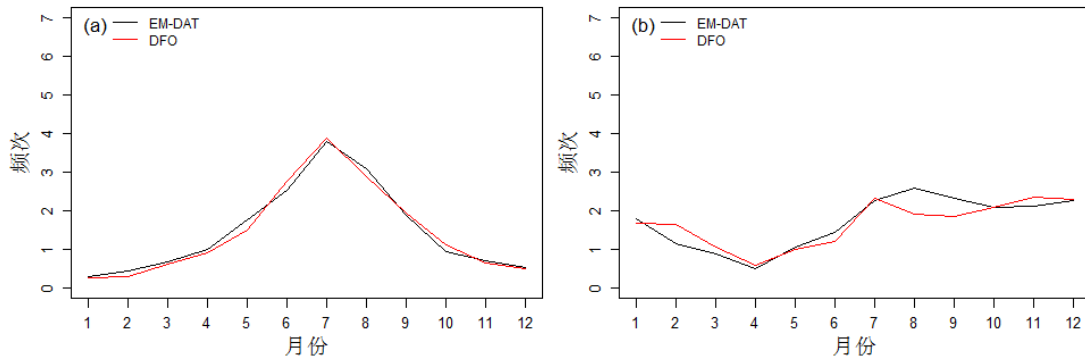


图3 (a)南亚、(b)东南亚的基于EM-DAT的和基于DFO的平均洪水频次的月际分布

Fig. 3 Monthly distribution of average frequency of EM-DAT based floods and DFO based floods in (a) South Asia and (b) Southeast Asia.

TC 洪水频次的月际分布特征与上述总的洪水频次的月际分布特征差异明显（见

图 4)。图 4a 显示，南亚地区 TC 洪水频次呈现“双峰”特征，第一个峰值出现在 5 月，另一个是 10-11 月，而 1-3 月和 8 月则无 TC 洪水发生。南亚 TC 洪水频次的双峰特征与北印度洋热带气旋的活跃期（5 月、10 月和 11 月）有关。对于东南亚地区，1-6 月 TC 洪水事件较少，3 月是一个低谷，6-12 月是东南亚 TC 洪水的频发期。EM-DAT 和 DFO 数据在东南亚地区 8-9 月的 TC 洪水频次上存在一定的差异，前者记录的 TC 洪水灾害事件要多于后者。

进一步分析表明，两种数据本身对灾害的分类，特别是录入的洪水灾害成因的差别使得 TC 洪水样本差异较大，进而导致图 4 中两者 TC 洪水频次在个别月份差异明显。例如，对某次洪水灾害，EM-DAT 数据记录为风暴亚类-热带气旋子类，相关灾害字段为洪水，而 DFO 数据记录的此次洪水的成因为暴雨。因而，需要注意基于细分后的 TC 洪水样本的统计结果的不确定性相对较大。

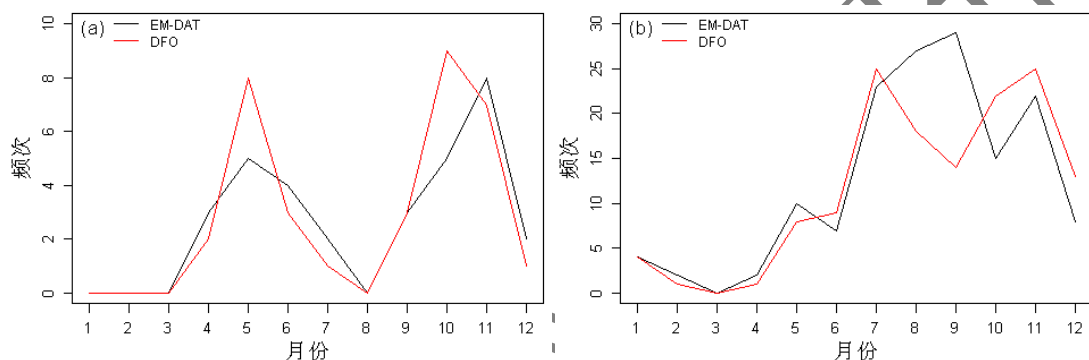


图4 1985-2019年(a)南亚、(b)东南亚的基于EM-DAT的和基于DFO的TC洪水频次的月际分布

Fig. 4 Monthly distribution of frequency of EM-DAT based TC floods and DFO based TC floods in (a) South Asia and (b) Southeast Asia for 1985-2019

2.3 长期趋势分析

在分析洪水频次的长期趋势之前，首先检验了两种数据统计的灾害频次变化的一致性。计算 EM-DAT 和 DFO 两种数据的逐年洪水频次的相关系数，南亚为 0.632，东南亚为 0.626，均通过了 0.01 显著性水平检验，表明两种资料有较好的一致性。

图 5 是 1985-2019 年南亚、东南亚地区逐年洪水频次的时间序列，圆圈和三角分别代表 EM-DAT 和 DFO 记录的洪水频次。图中还给出了两种资料平均的洪水频次（实线）。表 3、表 4 分别是基于 MK 显著性检验和 Sen 斜率估计得到的南亚、东南亚地区年度洪水频次的长期趋势分析结果。

图 5a 显示，南亚地区洪水频次从 1985 年起波动上升，到了 2007 年起有所下降，但是 2013 年起又缓慢上升，这种上升趋势在 EM-DAT 数据中体现得更为明显。对南亚洪水，基于 EM-DAT 和 DFO 数据的 MK 趋势检验 Z 统计量分别为 5.1699 和 1.1246，前者通过了 0.01 显著性水平检验。两种数据平均的结果显示，平均的洪水频次上升趋势仍然通过了 0.01 显著性水平检验。南亚地区洪水 1985 年平均发生 9 次，到了 2019 年平均出现 22 次，峰值出现 2007 年，达到 37.5

次。

同样地, 东南亚地区洪水频次上升的趋势也非常显著(图 5b)。基于 EM-DAT 和 DFO 数据的 MK 趋势检验 Z 统计量分别为 5.1047 和 1.8223, 分别通过了 0.01 和 0.1 显著性水平检验。东南亚洪水灾害峰值也是 2007 年, 达到 44.5 次。比较南亚和东南亚洪水的 Sen 斜率可知, 近 35 年东南亚地区的洪水增加幅度更大。

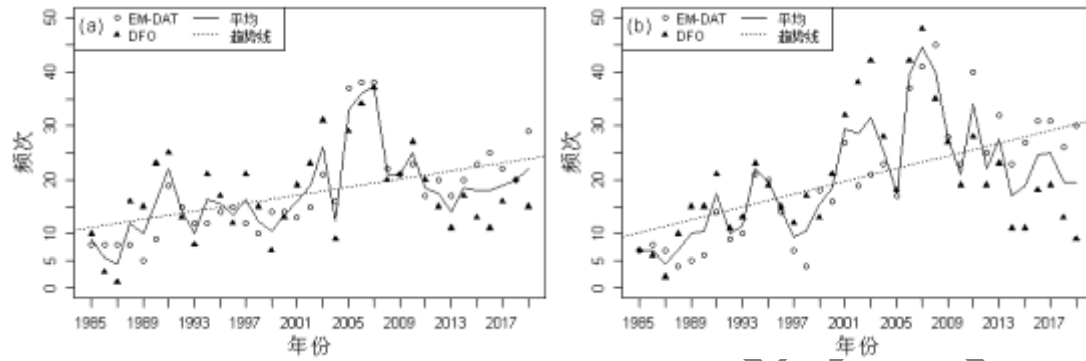


图5 1985-2019年(a)南亚、(b)东南亚的逐年基于EM-DAT和基于DFO的洪水频次(散点), 实线表示基于EM-DAT和DFO的平均值, 虚线代表平均值的线性趋势

Fig. 5 Annual frequency of EM-DAT based floods and DFO based floods in (a) South Asia and (b) Southeast Asia for 1985-2019 (points). Solid lines represent average frequency of EM-DAT and DFO dataset, dashed line indicates liner trend

表3 1985-2019年南亚基于EM-DAT、基于DFO及基于两者平均的年度洪水频次及死亡人数的MK检验的Z统计量和Sen斜率, +, *, **分别表示趋势通过0.1、0.05和0.01显著性水平检验

Table 3 MK test's Z statistic and Sen slope of frequency of EM-DAT based floods, DFO based floods and their average in South Asia during 1985-2019. +, *, ** indicate trend is significant at 0.1, 0.05 and 0.01 level, respectively

南亚	EM-DAT		DFO		EM-DAT和DFO平均	
	Z统计量	Sen斜率	Z统计量	Sen斜率	Z统计量	Sen斜率
年度洪水频次	5.1699**	0.5	1.1246	0.1818	3.796**	0.3333
年度TC洪水频次	2.5977**	0	0.5902	0	1.7804 ⁺	0.0185
年度洪水死亡总人数	-1.0509	-34.2727	-2.1302*	-38	-1.5338	-34.25
年度TC洪水死亡总人数	2.0356*	0	-0.4819	0	0.5466	0
平均每次洪水死亡人数	-2.5847**	-6.2022	-3.522**	-4.2112	-3.3799**	-7.0759
平均每次TC洪水死亡人数	2.0667*	0	-0.6864	0	1.7589 ⁺	0

表4 同表3, 但为东南亚

Table 4 Same as Table 3, but for Southeast Asia

东南亚	EM-DAT		DFO		EM-DAT和DFO平均	
	Z统计量	Sen斜率	Z统计量	Sen斜率	Z统计量	Sen斜率
年度洪水频次	5.1047**	0.8095	1.8223 ⁺	0.3158	3.9103**	0.5588
年度TC洪水频次	4.5089**	0.25	-0.0287	0	2.6518**	0.1111
年度洪水死亡总人数	0.6249	5.0385	-0.3835	-4.222	0.0426	0.2778

年度TC洪水死亡总人数	1.8353 ⁺	4.4118	-0.8948	-2.625	0.2983	1.0625
平均每次洪水死亡人数	-3.2095 ^{**}	-1.3091	-2.6415 ^{**}	-1.1295	-2.8403 ^{**}	-1.3219
平均每次TC洪水死亡人数	0.6687	0.4333	-1.1363	-0.9902	0.7264	0.5679

计算 EM-DAT 和 DFO 两种数据的逐年 TC 洪水频次的相关系数，南亚为 0.369，东南亚为 0.471，分别通过了 0.05 和 0.01 显著性水平检验，但其相关性弱于总洪水频次，说明 TC 洪水统计结果的不确定性相对更大。

南亚、东南亚地区的 TC 逐年洪水频次时间序列如图 6 所示。实线是两种资料平均的 TC 洪水频次。需要指出的是，南亚地区 TC 洪水频次中很多是 0 或者 1，对 Sen 斜率的计算造成困难导致 Sen 斜率为 0，但 MK 的趋势检验仍然是有意义的。南亚地区基于 EM-DAT 的 TC 洪水频次显著增加，然而 DFO 数据未检测到明显趋势，二者平均后的 TC 洪水频次呈弱的上升趋势。平均后的东南亚 TC 洪水频次增加趋势仍比较明显（通过了 0.01 显著性水平检验）。平均的南亚、东南亚 TC 洪水频次峰值分别是 1991 年和 2008 年，分别出现了 3 次和 12.5 次洪水灾害。

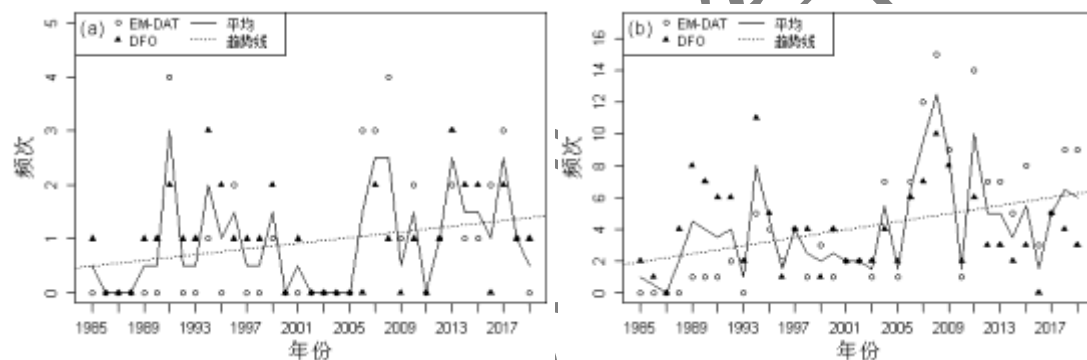


图6 同图5，但为TC洪水频次

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for TC floods

3 洪水灾害强度及损失趋势分析

灾害的危害性不一定取决于灾害发生的频次，一定程度上是由灾害强度、区域人口密度与应对灾害的恢复能力决定的。下面将结合灾害强度进一步分析洪水灾害造成的损失的变化特征，这里首先分析了人口损失（死亡人数）的情况。基于 DFO 洪水数据利用公式（1）计算了每次洪水灾害的强度。洪水灾害强度是综合反映洪水的严重度等级、洪水持续时间以及影响空间范围的指标，其数值越大，表明洪水灾害的强度越大。总体而言，南亚、东南亚洪水的平均灾害强度分别为 5.45 和 5.06，而 TC 洪水的平均灾害强度分别为 5.67 和 5.3，表明南亚洪水灾害造成的影响一般较东南亚更加严重。

分析洪水灾害的年平均强度及年最大强度发现（见表 5），南亚地区洪水和 TC 洪水灾害强度的变化趋势不明显，年最大灾害强度则略有下降。东南亚地区洪水灾害的平均及最大强度增加显著。同时，东南亚地区 TC 洪水灾害的平均强

度也呈现显著的上升趋势。经分析，近 35 年南亚地区强度最大的洪水灾害出现在印度(强度为 8.4)，从 2004 年 6 月 20 日至 10 月 7 日，造成了约 3000 人死亡。东南亚地区强度最大的洪水灾害发生在泰国（强度为 7.95），从 1995 年 8 月 1 日持续到 11 月 9 日，导致了超过 230 人死亡。

表5 1985-2019年南亚、东南亚基于DFO的洪水和TC洪水的年平均及年最大灾害强度MK检验的Z统计量和 Sen斜率，*，**分别表示趋势通过0.05和0.01显著性水平检验

Table 5 MK test’ s Z statistic and Sen slope of yearly mean and maximum magnitude of DFO based floods and TC floods in South Asia and Southeast Asia during 1985-2019. *, ** indicate trend is significant at 0.05 and 0.01 level, respectively

	南亚		东南亚	
	Z统计量	Sen斜率	Z统计量	Sen斜率
洪水年平均灾害强度	0.8237	0.0063	2.8971**	0.0149
洪水最大灾害强度	-1.3917	-0.0131	2.0166*	0.0252
TC洪水年平均灾害强度	0.7548	0	2.2014*	0.021
TC洪水最大灾害强度	0.871	0	0.838	0.014

图 7 是南亚、东南亚地区逐年平均每次洪水死亡人数的时间序列，即洪水造成的年总死亡人数与年洪水频次之比，来消除洪水事件次数的增减对死亡人数的影响。通过对世界银行发布的人口数据统计可知，南亚地区总人口近 35 年平均为 14.3 亿，东南亚地区总人口近 35 年平均为 5.3 亿。需要说明的是，南亚地区 1991 年因洪水损失人口累积达 14 万人以上，东南亚地区 2008 年因洪水损失人口累积约 10 万人，这两个极端年份没有在图中显示，但都参与趋势分析的时间序列中。结合表 3、4 可知，虽然南亚、东南亚两个地区洪水灾害造成的年总死亡人数变化趋势不明显，然而，平均每次洪水灾害导致的死亡人数 35 年来显著减少，都通过了 0.01 显著性水平检验。比较两种数据平均的 Sen 斜率发现，南亚地区单次洪水灾害死亡人数减少幅度更大。两种数据平均后的 TC 洪水灾害死亡人数无明显趋势。

综上所述，近 35 年来南亚、东南亚洪水灾害的频次均显著增多，单次洪水灾害造成的死亡人数在显著减少，且这些趋势的可信度较高。此外，东南亚地区 TC 洪水的频次和强度都呈上升趋势。

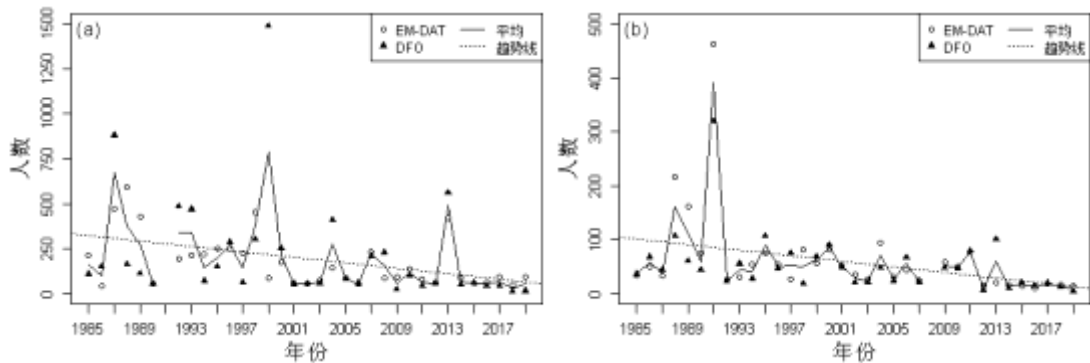


图7 同图5，但为平均每次洪水造成的死亡人数

Fig. 7 Same as Fig. 5, but mean number of fatalities per floods event

EM-DAT 国际灾害数据中还提供了对灾害导致的经济损失的估计值。分析 1985-2019 年因洪水灾害造成的经济损失表明，近 35 年南亚、东南亚地区洪水灾害造成的经济损失分别约为 1184 亿美元和 777 亿美元。需要指出的是，2011 年 8 月 5 日起泰国发生了持续长达 5 个多月的洪水，EM-DAT 数据显示此次洪水灾害造成了高达 400 亿美元的经济损失和约 800 人死亡。进一步对年经济损失时间序列进行 MK 趋势检验发现，近 35 年两个地区洪水灾害造成的经济损失均呈增加趋势（通过了 0.01 显著性水平检验），并且剔除极端值（2011 年泰国洪水灾害）后东南亚地区洪灾的经济损失仍存在显著上升趋势。

4 结论与讨论

南亚、东南亚地区洪水灾害频发，灾害影响严重。本文基于 EM-DAT 和 DFO 两种国际灾害数据，对比分析了 1985 年以来两个地区洪水灾害频次、强度及造成的人口损失等变化特征，并探讨了与热带气旋相关的洪水灾害的变化趋势，得到如下主要结论：

(1) 综合两种数据表明，1985-2019 年之间东南亚地区的洪水灾害较南亚地区更多，前者比后者多 15% 左右，其中与热带气旋相关的洪水，东南亚地区是南亚地区的 4 倍左右。东南亚地区 TC 洪水频次占其总洪水频次的 20%，而南亚地区 TC 洪水频次仅占总洪水频次的 5%。印度、印度尼西亚和菲律宾是洪水灾害最多的国家，菲律宾、越南和印度易遭受 TC 洪水灾害。

(2) 从洪水发生的月际分布来看，南亚地区洪水频次集中在 6-8 月，“单峰”特征突出，而其 TC 洪水的频次呈“双峰”结构，5 月、10 月（11 月）是南亚地区 TC 洪水的多发期。东南亚地区洪水年内分布较为均匀，年内各月都有发生。

(3) 两种灾害数据平均后的 Mann-Kendall 趋势分析表明，1985-2019 年南亚、东南亚洪水的频次呈显著增加趋势，而单次洪水灾害的损失人口数显著减少（都通过了 0.01 显著性水平检验）。东南亚地区洪水灾害的强度一般弱于南亚，但近 35 年其洪水灾害的强度有明显增加趋势。

(4) 根据 EM-DAT 的数据统计可知，过去 35 年来南亚和东南亚洪水灾害造成的经济损失均表现出明显增加趋势。

值得指出的是，从洪水灾害的月际分布和年际变率来看，本文所用的两种灾害资料的一致性较好，但是对于与热带气旋相关的洪水，二者也存在趋势不一致的情况，原因是两种数据本身对灾害的分类，特别是录入的洪水灾害成因存在差别，因而基于细分后的 TC 洪水样本的统计结果的不确定性相对较大。。例如，基于 EM-DAT 资料发现东南亚地区 TC 洪水呈显著增加趋势，而 DFO 资料没有反映。司瑞洁等（2013）指出数据编录方法的调整，使得 EM-DAT 数据自 2003 年后有相对较多的灾害事件满足录入标准而被记录，可能会影响灾害频次的统计

结果。本文将 EM-DAT 数据中气象-风暴亚类“相关灾害”为洪水的事件也作为洪水事件,相应东南亚地区 TC 洪水次数增加了 121 次,其中 2003 年以后的有 98 次,占比 81%,而 DFO 数据中 2003 年以后的 TC 洪水事件占比 49%。除灾害本身随时间自然增加以外,信息收录问题可能是 EM-DAT 记录存在一定偏差的原因。这也体现出本文采用不同来源数据开展研究的优势,避免了使用单一数据分析洪水灾害这一复杂问题带来的不足。

此外,本文主要分析了南亚、东南亚区域尺度上洪水的长期变化特征,洪水灾害演变形成机制,如气候变化(ENSO 等)、人类活动对洪水的可能影响有待进一步研究,促进洪水灾害预警和洪涝灾害风险管理。

参考文献

- 包红军,王莉莉,沈学顺,等,2016. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J]. 气象, 42(9): 1045-1057. Bao H J, Wang L L, Shen X S, et al, 2016. A review: advances of flood forecasting of hydro-meteorological forecast technology[J]. Meteor Mon, 42(9): 1045-1057 (in Chinese).
- 陈兴茹,王兴勇,白音包力皋,2019. 1962 年以来湄公河流域国家洪灾损失时空分布分析[J]. 灾害学, 34(1): 113-116. Chen X R, Wang X Y, Bai Y B L G, 2019. Analysis of spatial and temporal distribution of flood losses in Mekong river basin since 1962[J]. J Catastrophol, 34(1): 113-116 (in Chinese).
- 方建,杜鹃,徐伟,等,2014. 气候变化对洪水灾害影响研究进展[J]. 地球科学进展, 29(9): 1085-1093. Fang J, Du J, Xu W, et al, 2014. Advances in the study of climate change impacts on flood disaster[J]. Adv Earth Sci, 29(9): 1085-1093 (in Chinese).
- 方建,李梦婕,王静爱,等,2015. 全球暴雨洪水灾害风险评估与制图[J]. 自然灾害学报, 24(1): 1-8. Fang J, Li M J, Wang J A, et al, 2015. Assessment and mapping of global fluvial flood risk[J]. J Nat Dis, 24(1): 1-8 (in Chinese).
- 蒋卫国,李京,王琳,2006. 全球 1950-2004 年重大洪水灾害综合分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 42(5): 530-533. Jiang W G, Li J, Wang L, 2006. Compositive analysis of global flood disaster from 1950 to 2004[J]. J Beijing Normal Univ Nat Sci, 42(5): 530-533 (in Chinese).
- 毛星竹,刘建红,李同昇,等,2018. “一带一路”沿线国家自然灾害时空分布特征分析[J]. 自然灾害学报, 27(1): 1-8. Mao X Z, Liu J H, Li T S, et al, 2018. Spatio-temporal patterns of natural disasters in countries along the Belt and Road[J]. J Nat Dis, 27(1): 1-8 (in Chinese).
- 司瑞洁,温家洪,尹占娥,等,2007. EM-DAT 灾难数据库概述及其应用研究[J]. 科技导报, 25(6): 60-67. Si R J, Wen J H, Yin Z E, et al, 2007. Emergency events database (EM-DAT) and its applications[J]. Sci Technol Rev, 25(6): 60-67 (in Chinese).
- 王会军,唐国利,陈海山,等,2020. “一带一路”区域气候变化事实、影响及可能风险[J]. 大气科学学报, 43(1): 1-9. Wang H J, Tang G L, Chen H S, et al, 2020. The Belt and Road region climate change: facts, impacts and possible risks[J]. Trans Atmos Sci, 43(1): 1-9 (in Chinese).
- 王维国,王莉萍,孙敏,等,2017. “一带一路”建设气象服务能力分析[J]. 海洋气象学报, 37(4): 19-24. Wang W G, Wang L P, Sun M, et al, 2017. Analysis on the meteorological service capability of the Belt and Road construction[J]. J Mar Meteor, 37(4): 19-24 (in Chinese).
- 王毅,张晓美,周宁芳,等,2021. 1990-2019 年全球气象水文灾害演变特征[J]. 大气科学学报, 44(4): 496-506. Wang Y, Zhang X M, Zhou N F, et al., 2021. Evolution characteristics of global meteorological and hydrological disasters from 1990 to 2019 [J]. Trans Atmos Sci, 44(4): 496-506 (in Chinese).
- 尹宜舟,李多,孙劭,等,2020. 2019 年全球重大天气气候事件及其成因[J]. 气象, 46(4): 538-546. Yin Y Z, Li D, Sun S, et al, 2020. Global major weather and climate events in 2019 and the possible causes[J]. Meteor Mon, 46(4): 538-546 (in Chinese).
- Brakenridge G R, (2019-04-24). Global active archive of large flood events[EB/OL]. Dartmouth Flood Observatory. <https://data.humdata.org/dataset/global-active-archive-of-large-flood-events-dfo>.
- Chen A F, Giese M, Chen D L, 2020. Flood impact on Mainland Southeast Asia between 1985 and 2018-the role of tropical cyclones[J]. J

-
- Flood Risk Manage, 13(2): e12598.
- CRED, (2012-11-09). EM-DAT: the international disaster database[EB/OL]. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/external/emergency-events-database-em-dat>.
- Eccles R, Zhang H, Hamilton D, 2019. A review of the effects of climate change on riverine flooding in subtropical and tropical regions[J]. J Water Climate Change, 10(4): 687-707.
- Emerton R, Cloke H L, Stephens E M, et al, 2017. Complex picture for likelihood of ENSO-driven flood hazard[J]. Nat Commun, 8(1): 14796.
- Field C B, Barros V, Stocker T, et al, 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gale E L, Saunders M A, 2013. The 2011 Thailand flood: climate causes and return periods[J]. Weather, 68(9): 233-237.
- Jonkman S N, 2005. Global perspectives on loss of human life caused by floods[J]. Nat Hazards, 34(2): 151-175.
- Najibi N, Devineni N, 2018. Recent trends in the frequency and duration of global floods[J]. Earth Syst Dyn, 9(2): 757-783.
- Singh O, Kumar M, 2013. Flood events, fatalities and damages in India from 1978 to 2006[J]. Nat Hazards, 69(3): 1815-1834.
- Slater L J, Villarini G, 2016. Recent trends in U.S. flood risk[J]. Geophys Res Lett, 43(24): 12428-12436.
- Tanoue M, Hirabayashi Y, Ikeuchi H, 2016. Global-scale river flood vulnerability in the last 50 years[J]. Sci Rep, 6(1): 36021.
- Wang Y, Yan Z W, 2009. Trends in seasonal precipitation over China during 1961-2007[J]. Atmos Oceanic Sci Lett, 2(3): 165-171.
- Yamazaki D, Watanabe S, Hirabayashi Y, 2018. Global flood risk modeling and projections of climate change impacts[M]//Schumann G J P, Bates P D, Apel H, et al. Global Flood Hazard: Applications in Modeling, Mapping, and Forecasting. New York: American Geophysical Union: 185-203.
- Yue S, Pilon P, Cavadias G, 2002. Power of the Mann-Kendall and spearman' s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. J Hydrol, 259(1-4): 254-271.