

# 基于AHP\_熵权法的孟印缅地区洪水灾害风险评估

刘媛媛<sup>1,2</sup>, 王绍强<sup>1,2,3</sup>, 王小博<sup>1,2</sup>, 江 东<sup>1,2</sup>,  
N H Ravindranath<sup>4</sup>, Atiq Rahman<sup>5</sup>,  
Nyo Mar Htwe<sup>6</sup>, Tartirose Vjijtpan<sup>7</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国地质大学地理与信息工程学院, 武汉 430074; 4. 印度科学研究中心可持续技术中心, 班加罗尔 560012, 印度; 5. 孟加拉国高级研究中心, 达卡 1212, 孟加拉国; 6. 缅甸耶津农业大学, 内比都 15000, 缅甸; 7. 联合国环境规划署-国际生态系统管理伙伴计划, 北京 100101)

**摘要:** 孟印缅三国地处亚热带与热带季风气候区, 因自然条件制约, 洪涝灾害频繁发生, 对“孟中印缅经济走廊”建设将会带来重大影响。开展孟印缅地区的洪水风险评估可为“孟中印缅经济走廊”的建设安全提供必要的信息和科技支撑。利用1980—2016年的降水数据, 结合河网、数字高程和土地利用等数据, 选取雨季降雨量、暴雨天数、高程、坡度、河网密度、植被覆盖度、土壤可蚀性、人口密度、地均GDP和土地利用10个指标, 采用层次分析法和AHP\_熵权法对孟印缅地区的洪水灾害风险分布进行了比较研究。研究表明: 孟印缅地区高风险区和较高风险区分别占总面积的1.05%和28.76%, 高风险区主要分布在印度北部的恒河平原、印度东北部的阿萨姆邦、孟加拉国大部分地区和缅甸南部。受自然、人口和经济条件的制约, 孟加拉国是孟印缅三国中洪水风险最高的国家, 高风险区和较高风险区分别占总面积的10.61%和65.87%。层次分析法和AHP\_熵权法结果间的比较表明, 后者比前者识别出更大范围的洪水高风险区。本研究为中国开展周边国家自然灾害的风险评估提供了有效的方法, 有助于推进国家孟中印缅经济走廊的建设。

**关键词:** 洪水灾害; 风险评估; 层次分析法(AHP); AHP\_熵权法; 孟中印缅经济走廊

DOI: 10.11821/dljy020190679

## 1 引言

洪水灾害是一种严重的自然灾害, 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>[1]</sup>, 对人类社会的生存和发展有着极大地威胁。随着全球气候变暖与社会经济的快速增长, 洪水灾害造成的损失日益严重。据统计, 世界范围内每年因洪水灾害死亡的人数高达2万人, 因灾流离失所的人口高达2500多万人<sup>[2]</sup>。洪水灾害风险分析与评估是洪水灾害管理的重要组成部分<sup>[3]</sup>, 气候变化为洪水风险评估带来极大挑战<sup>[1]</sup>, 开展洪水风险评估不仅在理论研究上, 而且在有效减免洪水损失的实践上均具有重要意义。

收稿日期: 2019-08-08; 修订日期: 2019-11-05

基金项目: 国家基金委国际地区合作与交流项目(31861143015); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2016-6, KGFZD-135-17-009)

作者简介: 刘媛媛(1996-), 女, 河南安阳人, 博士研究生, 主要从事生态模拟与生态遥感相关研究。

E-mail: liuyuanyuan182@mails.ucas.edu.cn

通讯作者: 王绍强(1972-), 男, 湖北襄樊人, 研究员, 主要从事生态模拟与生态遥感相关研究。

E-mail: sqwang@igsnr.ac.cn

洪水风险评估需要综合考虑各种因素,包括流域特征、气象特征和区域特征。由于资料稀缺、影响因素复杂以及概率分布多样,洪水灾害评估存在很大的不确定性<sup>[4]</sup>。目前,洪水灾害风险评估的方法主要有三种,一是基于历史数据的洪灾风险分析方法<sup>[5-7]</sup>,二是基于系统指标的洪灾风险分析方法<sup>[8-10]</sup>,三是基于情景分析的洪灾风险分析方法<sup>[11,12]</sup>。赵思健等基于历史数据结合二元回归法和信息扩散模型对东北三省农作物洪涝灾害做时空风险评估<sup>[5]</sup>。Black等通过分析历史洪水记录,评估了苏格兰河洪水风险随时间的变化<sup>[7]</sup>。历史数据法的优点是操作简单且比较客观,但数据获取困难,要求具有高时空分辨率的数据,难以适应小尺度<sup>[6]</sup>。Hu等通过建立多指标评估体系来评估区域洪灾风险<sup>[8,9]</sup>。Kourgialas等选用多个指标评估了希腊全国范围的洪灾风险<sup>[10]</sup>,但这种方法存在确定指标权重主观性大的缺陷。Feyen等采用情景分析技术对未来气候变化条件下的欧洲河流洪水风险进行了评估<sup>[11]</sup>。Prudhomme等基于情景分析方法评估了英国河流的洪水风险<sup>[12]</sup>。Feyen等认为基于多个驱动模型并考虑不同排放情景的集成方法可以更好地评估未来洪灾风险<sup>[11]</sup>。

上述三种方法是通过应用层次分析法(AHP)<sup>[8,13]</sup>、灰色聚类法<sup>[14]</sup>、模糊数学法<sup>[15]</sup>和贝叶斯网络法<sup>[16]</sup>等数学理论来实现的。贝叶斯网络法根据领域知识构建贝叶斯网络,利用大量历史数据学习对其进行优化,但其先验概率通常具有主观性与不确定性。相比之下,AHP方法不需要先验概率估计,其基于多指标进行定性与定量分析,是评估风险的一种有效方法<sup>[17]</sup>,近年来被广泛用于灾害风险评估<sup>[18]</sup>。然而,AHP方法在确定权重时主观性较大,主客观综合权重法能减少权重设定的主观性,提高评价的科学性。熵权法是确定客观权重的方法之一,Wu等结合AHP方法和熵权法对淮河流域不同时期的洪水灾害风险进行了评估<sup>[9]</sup>。本研究结合AHP方法和熵权法评估了孟印缅地区的洪水灾害风险。

孟印缅地区地处热带与亚热带季风气候区,降水丰沛,洪水是孟印缅地区最常见的自然灾害。近年来,印度洋快速升温<sup>[20]</sup>,海陆温差降低,印度极端降水事件的强度和频率同时上升<sup>[21]</sup>。孟印缅地区的洪水大多是由极端降水事件造成的。孟印缅三国人口众多,均属于发展中国家,相比发达国家,由于薄弱的经济基础以及尚不完善的防洪抗洪工程体系,洪水灾害更容易造成人员伤亡和经济损失。Panhalka等选取了洪水淹没区、海拔、基础设施和土地利用4个指标对印度Panchganga河中段进行了洪水风险评估<sup>[22]</sup>,该研究对洪水风险的评估只考虑了自然因素,没有考虑人口经济因素对灾害风险的影响。Pandey等将提取的洪水淹没区与社会经济数据相结合评估了印度比哈尔邦北部的洪水灾害风险<sup>[23]</sup>,该研究没有考虑降水、地形和河流等重要因素对洪水灾害的影响,指标的选取不够全面。Ghosh等使用AHP方法从危险性和脆弱性两方面对印度西孟加拉邦的马尔达区进行了洪水风险评估<sup>[24]</sup>,该研究采用的AHP方法确定权重时主观性较大,缺乏对实际数据的反映。目前,孟印缅地区开展了很多区域尺度的洪水灾害风险评估<sup>[22-24]</sup>,但国家尺度的洪水灾害评估研究<sup>[25,26]</sup>开展较少。

因此,本文以孟印缅三国为研究区,分别采用AHP方法与AHP\_熵权法确定权重,指标的选取全面考虑了洪水灾害风险的危险性、敏感性和易损性,对洪水灾害风险进行综合评估。具体目标如下:①建立基于致灾因子、孕灾环境和承灾体的洪水灾害风险评估指标体系;②借助GIS实现孟印缅地区洪水灾害风险区划,识别洪水灾害高风险区;③通过比较AHP方法和AHP\_熵权法的结果,选择合理的洪水风险评估方法。孟中印缅经济走廊是“一带一路”倡议的重点项目,摸清孟印缅地区的洪水灾害风险空间分布格局,可为中国开展周边国家自然灾害的风险评估提供参考,推进国家孟中印缅经济走廊的建设。

## 2 研究区概况与研究方法

### 2.1 研究区概况

孟印缅地区包括孟加拉国、印度和缅甸3个国家，总面积约380.41万km<sup>2</sup>。如图1所示，印度的地形由三部分组成，北部为喜马拉雅山区，中部是由恒河、布拉马普特拉河与印度河的冲积带构成的印度河-恒河平原，南部是德干高原。孟加拉国位于布拉马普特拉河与恒河的交汇处，平原约占全国地形的85%。缅甸地势北高南低，北、西、东为山脉环绕。孟印缅地区的主要河流有恒河、布拉马普特拉河、伊洛瓦底江、萨尔温江和湄公河。孟印缅地区地处热带与亚热带季风气候，降水丰沛。如图2所示，孟印缅地区降水主要集中在6—9月，8年中有7年的最大月降水量超过300 mm，孟加拉国、印度和缅甸三国多年平均降水量分别约为2342 mm、1156 mm和2001 mm。印度东北部的乞拉朋齐是世界降水最多的地区，被称为世界雨极。孟印缅地区是全球人口最为密集的地区之一，气象灾害频发，其中洪水是该地区最常见的自然灾害。近年来，洪水灾害在该地区有加剧的趋势。

本研究中，以下数据用于洪水灾害评估：① 栅格数据，包括1980—2016年的CRU-NCEP-V7逐日降水数据 (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds314.3/>)；2000年的DEM数据，来源于美国国家航空航天局(NASA)提供的SRTM数据 (<http://srtm.csi.cgiar.org/download>)；2012年的土壤数据，来源于世界土壤数据库HWSD (<http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/>)；2015年的人口密度数据和2025年的GDP预测数据，来源于NASA的社会经济数据应用中心SEDAC (<http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/>)。② 矢量数据，基础地理信息数据，来源于国家测绘局地理信息局标准地图服务网站 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)；河网数据来源于全球河网数据库 (<http://gaia.geosci.unc.edu/rivers/>)。③ 遥感数据，2014年的植被覆盖度数据，来源于国家综合地球观测数据共享平台 (<http://www.chinageoss.org/dsp/home/index.jsp>)；2013年的MCD12Q1

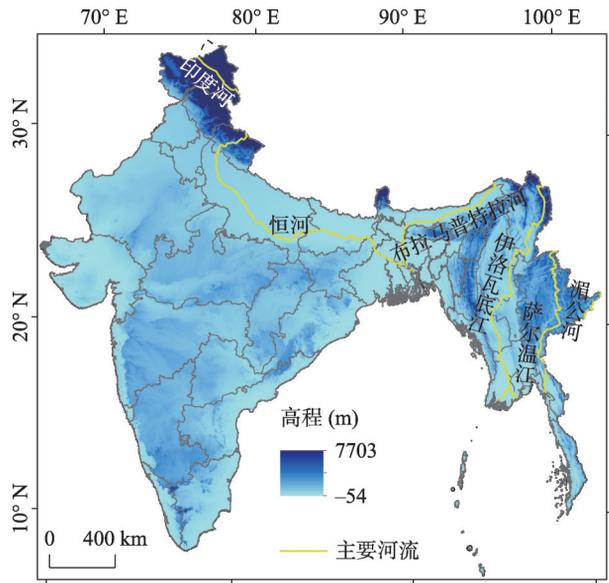


图1 孟印缅地区高程与河流分布

Fig. 1 Distribution of altitude and river systems in BIM region  
注：此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图(审图号：GS(2016)1759号)绘制，底图无修改。

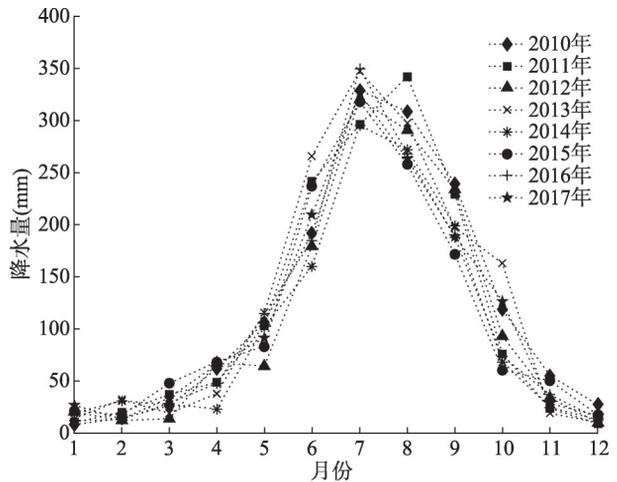


图2 2010—2017年孟印缅地区月降水量

Fig. 2 Monthly precipitation from 2010 to 2017 in BIM region

数据, 来源于 MODIS 土地覆盖类型产品 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)。为了提高精度并保证数据的一致性, 使用 ArcGIS 10.2 对所有指标数据进行校正后统一重采样为 1 km×1 km 分辨率的栅格数据。

## 2.2 评估模型

孟印缅地区洪水灾害风险评估是通过以下步骤实现的: ① 建立包含危险性、敏感性和脆弱性的洪水风险评估指标体系; ② 使用 AHP 方法和 AHP\_熵权法确定每个评估指标的权重; ③ 对各个指标进行标准化处理; ④ 明确洪水灾害危险性、敏感性和脆弱性的空间分布; ⑤ 可视化孟印缅地区洪水灾害风险的分布。

史培军认为广义的灾害风险评估, 是对灾害系统进行风险评估, 即在对孕灾环境、致灾因子、承灾体分别进行风险评估的基础上, 对灾害系统进行风险评估<sup>[27]</sup>。本文中洪水灾害风险是致灾因子危险性、孕灾环境敏感性和承灾体易损性三个方面的综合函数, 洪水灾害风险指数可由公式 (4) 计算得到<sup>[18]</sup>。

危险性指数:

$$H(x) = \sum_{j=1}^i [w_j \times H_{ji}(x)] \quad (1)$$

敏感性指数:

$$S(x) = \sum_{j=1}^i [w_j \times S_{ji}(x)] \quad (2)$$

易损性指数:

$$V(x) = \sum_{j=1}^i [w_j \times V_{ji}(x)] \quad (3)$$

风险指数:

$$R(x) = w_H H(x) \times w_S S(x) \times w_V V(x) \quad (4)$$

式中:  $H_{ji}(x)$ 、 $S_{ji}(x)$ 、 $V_{ji}(x)$  是各指标标准化后的值;  $H(x)$ 、 $S(x)$ 、 $V(x)$ 、 $R(x)$  的值分别表示风险评估模型中的致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性和洪水风险指数;  $w_H$ 、 $w_S$ 、 $w_V$ 、 $w_j$  是各评估因子的权重。

## 2.3 指标数据的处理

本文考虑了指标数据的可获得性, 从洪灾的致灾因子 ( $H$ )、孕灾环境 ( $S$ ) 和承灾体 ( $V$ ) 三方面出发选取了孟印缅洪水灾害评价指标。致灾因子选用年均雨季降雨量 ( $H_1$ ) 和年均暴雨天数 ( $H_2$ ), 孕灾环境主要考虑了高程 ( $S_1$ )、坡度 ( $S_2$ )、河网密度 ( $S_3$ )、植被覆盖度 ( $S_4$ ) 和土壤可蚀性 ( $S_5$ ), 承灾体则选用了人口密度 ( $V_1$ )、地均 GDP ( $V_2$ ) 和土地利用 ( $V_3$ ) (图 3)。

**2.3.1 致灾因子** 降水是区域洪水灾害发生的主要致灾因子。根据 1980—2016 年的 CRU-NCEP-V7 逐日降水数据, 选取年均雨季降雨量 ( $H_1$ ) 和年均暴雨天数 ( $H_2$ ) 两个

子指标作为危险性指标。孟印缅地区的降水主要集中在 6—9 月, 雨季降雨量指每年 6—9 月的降雨量。Goswami 等将印度大于 100 mm/天的降雨定义为暴雨<sup>[28]</sup>, 本研究中暴雨天数指一年中日降雨量大于 100 mm 的天数。雨季降雨量和暴雨天数越大, 发生洪水灾害的可能性越大。

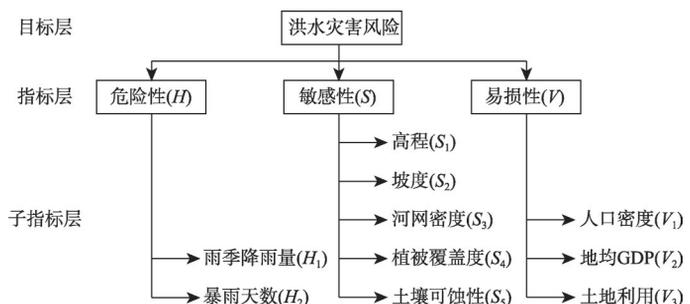


图3 洪水风险评价指标体系

Fig. 3 Index system of flood risk assessment

**2.3.2 孕灾环境** 从洪水灾害的形成机制分析,孕灾环境包括水文环境以及下垫面环境等,在评价洪水灾害孕灾环境敏感性时选取地形、河流分布、植被覆盖度及土壤作为评价指标<sup>[29]</sup>。本研究中,孕灾环境敏感性指标由高程( $S_1$ )、坡度( $S_2$ )、河网密度( $S_3$ )、植被覆盖度( $S_4$ )和土壤可蚀性( $S_5$ )表示。

地形对洪水的形成和分布影响重大。低海拔比高海拔地区更易发生洪水灾害,坡度越陡的地区发生洪水灾害的风险越小<sup>[30]</sup>。因此,高程和坡度的值越小,洪水灾害发生的可能性越大。洪水发生与水系河网有很强的关联性,本研究选用河网密度指标来度量该地区受河流的影响。洪水发生在一定程度上与植被有关,植被具有一定的持水能力,植被覆盖度越大,洪水灾害发生的可能性越小。土壤可蚀性是土壤内在性质对外营力(雨滴打击、降雨特征、地表径流和壤中流等)、气候因素以及人为干扰等综合作用的集中反映<sup>[31]</sup>。土壤可蚀性高的地区更容易发生洪水灾害<sup>[10]</sup>,土壤可蚀性 $K$ 值越大,发生洪水灾害的可能性越大。本文选用Sharply等提供的EPIC模型<sup>[32]</sup>计算了研究区的土壤可蚀性 $K$ 值。

**2.3.3 承灾体** 承灾体脆弱性指标由以下子指标表示:人口密度( $V_1$ )、地均GDP( $V_2$ )和土地利用( $V_3$ )。一个地区的人口密度和GDP越高,该地区对洪水灾害的易损性越高<sup>[33]</sup>。虽然经济水平较好的地区,人们防灾意识强,灾害造成的损失会相对减小,但绝对损失并不会因此而降低,易损性仍随财产和人口的增加而增大<sup>[34]</sup>。考虑到数据的可获取性,本文选用人口密度作为人口易损性指标。同样等级的洪水,经济发达地区承灾体密度大、价值高,造成的经济损失也较大,本文选用地均GDP作为经济易损性评价指标。在洪灾发生时,不同土地利用类型受洪灾破坏的程度不同,其易损性也不同。

**2.3.4 数据标准化** 由于评价指标复杂多样,含义和量纲各不相同,各个指标之间不具有可比性,为了对各个指标数据进行综合运算,需要对数据进行无量纲标准化处理,将各指标数值标准化至0~1,标准化后的数值可反映指标对洪水灾害风险的影响大小。年均雨季降雨量、年均暴雨天数、河网密度、土壤可蚀性、人口密度、地均GDP和土地利用是正向指标,高程、坡度和植被覆盖度是负向指标。标准化计算公式如下:

$$\text{对于正向指标, } Y_{ij} = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (5)$$

$$\text{对于负向指标, } Y_{ij} = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (6)$$

式中: $Y_{ij}$ 为第 $j$ 个指标的第 $i$ 个值; $X_i$ 是原始值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为第 $j$ 项指标的最大值和最小值。

## 2.4 确定指标权重

**2.4.1 层次分析法** 层次分析法是由美国运筹学家A L Saaty于20世纪70年代提出的一种多层次权重分析决策方法,是一种定性与定量相结合的系统分析方法。层次分析法(AHP)可以用来确定各指标的主观权重<sup>[35]</sup>。AHP确定评价指标权重的步骤如下:第一,建立递阶层次结构。第二,构造两两判断矩阵,采用1~9及其倒数的标度方法,对两两元素相对重要性程度进行量化。第三,计算指标主观权重 $w'_i$ 。第四,对一致性进行检验,当 $CR < 0.1$ 时,表明判断矩阵的一致性合理的;当 $CR \geq 0.1$ 时,说明判断矩阵是不合理的,需要重新进行一致性检验<sup>[36]</sup>。

**2.4.2 熵权法** 熵权法是客观赋权法的一种,近年来在国内外得到广泛应用<sup>[37-39]</sup>。指标的熵值越小,表明指标值的变异程度越大,提供的信息量越大,该指标的权重也越大。假设研究区像元数为 $n$ ,采用的指标个数为 $m$ ,则指标矩阵为: $R=(r_{ij})_{m \times n}$ 。第 $i$ 个指标的熵定义为:

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (7)$$

式中:  $H_i$  为第  $i$  个指标的熵;  $n$  为像元的个数; 当  $f_{ij}=0$  时, 令  $f_{ij} \ln f_{ij}=0$ ;  $f_{ij}$  定义为:

$$f_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{j=1}^n Z_{ij}} \quad (8)$$

式中,  $Z_{ij}$  指第  $i$  个指标下第  $j$  个评价对象的标准化后的指标值。

第  $i$  个指标的熵权定义为:

$$w_i'' = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)} \quad (9)$$

式中:  $w_i''$  为第  $i$  个指标的熵权,  $0 \leq w_i'' \leq 1$ ;  $H_i$  为第  $i$  个指标的熵;  $\sum_{i=1}^m H_i = 1$ ;  $m$  为评价指标的个数。

**2.4.3 组合权重** 采用 AHP 方法得出主观权重, 熵权法得出客观权重后, 本文采用线性组合法得出洪水灾害风险评估中的组合权重, 结果如表 1 所示。综合指标的主观权重  $w_i'$  和客观权重  $w_i''$ , 可得出组合权重  $w_i$ , 为了剔除较大波动数据的干扰, 使  $w_i'$  与  $w_i''$  间的差异程度与  $\alpha$  与  $\beta$  的差异程度一致, 引入距离函数的概念<sup>[40]</sup>。

确定组合权重的表达式为:

$$w_i = \alpha w_i' + \beta w_i'' \quad (10)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  是权重的分配系数,  $\alpha + \beta = 1$ 。

主观权重与客观权重的距离函数表达式为:

$$d(w_i', w_i'') = \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (w_i' - w_i'')^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$\alpha$  与  $\beta$  的差值是分配系数间的差异

$$D = |\alpha - \beta| \quad (12)$$

依据上文构造方程组如下:

$$\begin{cases} d(w_i', w_i'')^2 = (\alpha - \beta)^2 \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (13)$$

表 1 洪水风险指标权重

Tab. 1 Weight of flood risk index

目标层	指标层	子指标层	权重		
			层次分析法	熵权法	组合法
洪涝灾害 风险指数	危险性(0.4)	雨季降雨量	0.5000	0.7373	0.590
		暴雨天数	0.5000	0.2627	0.410
	敏感性(0.4)	坡度	0.2587	0.0537	0.190
		高程	0.3209	0.0234	0.222
		土壤可蚀性	0.0929	0.2717	0.152
		植被覆盖度	0.0929	0.3198	0.168
	易损性(0.2)	河网密度	0.2346	0.3315	0.267
		人口密度	0.6942	0.0026	0.629
		地均 GDP	0.2103	0.0091	0.191
		土地利用	0.0955	0.9883	0.180

通过求解方程组 (13) 可以得到各权重的分配系数的 $\alpha$ 和 $\beta$ , 将分配系数带入公式 (10) 得出组合权重 (表1)。

### 3 结果分析

#### 3.1 洪水危险性评估

危险性指标包括雨季降雨量和暴雨天数。图4显示了年平均雨季降雨量 (图4a)、年平均暴雨天数 (图4b) 和危险性指数 (图4c) 的分布。利用GIS中的栅格计算工具获得危险性指数。缅甸西南部、印度东北部与西南沿海的雨季降雨量较高, 年平均雨季降雨量可达2500 mm以上 (图4a), 印度东北部和西南沿海部分地区暴雨天数较多 (图4b)。孟印缅地区高危险区主要分布在印度东北部、印度西南沿海和缅甸西南部, 低危险区主要分布在印度西北部和北部的喜马拉雅山区 (图4c)。

#### 3.2 洪水敏感性评估

敏感性指标表现了研究区的地形、土壤、植被与河流特征。坡度和高程的空间分布分别如图5a和图5b所示, 图5c和图5d分别显示了土壤可蚀性和植被覆盖度的分布, 两者与洪涝灾害的形成有一定的联系。土壤可蚀性越高, 洪涝灾害形成的风险越大。植被覆盖度越大, 洪涝灾害形成的风险越小。河网密度指每单位面积河道的长度, 在本研究中, 河网密度是在半径为2 km的圆内计算的 (图5e)。对各个指标进行归一化后, 根据表1中的指标权重, 使用GIS中的栅格计算工具获得敏感性指数, 图5f为敏感性指数的空间分布。孟印缅地区高敏感区主要分布在印度恒河平原、印度中部、孟加拉国和缅甸中部, 该地区地势平坦, 坡度小于 $5^\circ$ , 高程低于400 m, 植被覆盖度低于50%, 河网密度与土壤可蚀性均较高。低敏感区主要分布在印度东北部、北部喜马拉雅山区和缅甸北部、东部, 以上地区地势陡峻, 坡度大于 $18^\circ$ , 高程达1000 m以上且土壤可蚀性较低 (图5f)。

#### 3.3 洪水易损性评估

易损性指标包括人口密度、地均GDP和土地利用类型。在洪灾发生时, 不同土地利用类型的易损性不同。图6分别显示了研究区的土地利用

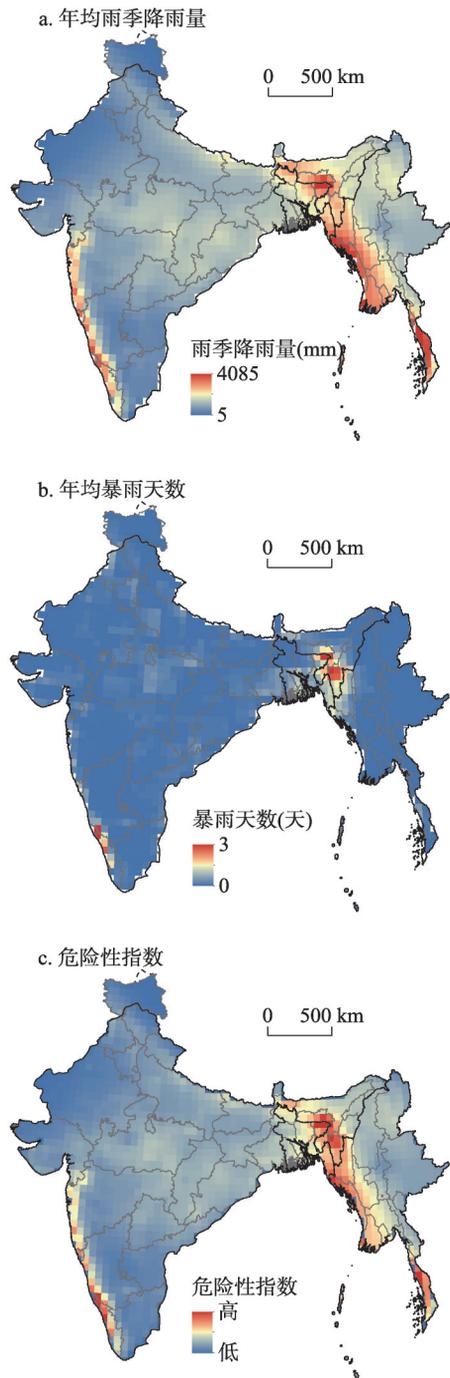


图4 1980—2016年孟印缅地区危险性指数的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of hazard indexes in BIM region from 1980 to 2016

注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 (审图号: GS (2016) 1759号) 绘制, 底图无修改。

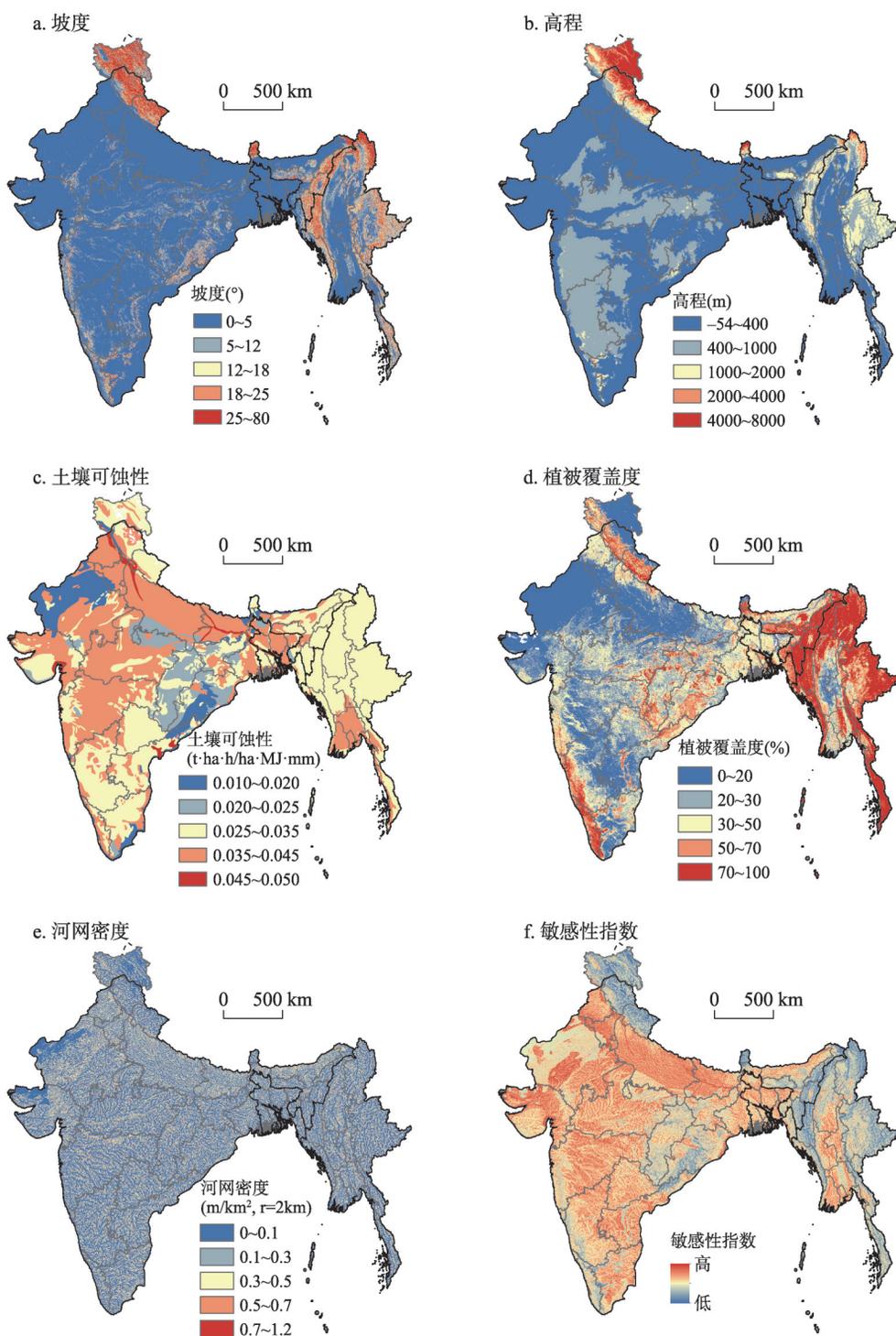


图5 孟印缅地区敏感性指数的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of sensibility indexes in BIM region

注：① 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图（审图号：GS（2016）1759号）绘制，底图无修改。② 坡度和高程基于2000年数据，土壤可蚀性基于2012年数据，植被覆盖度基于2014年数据。

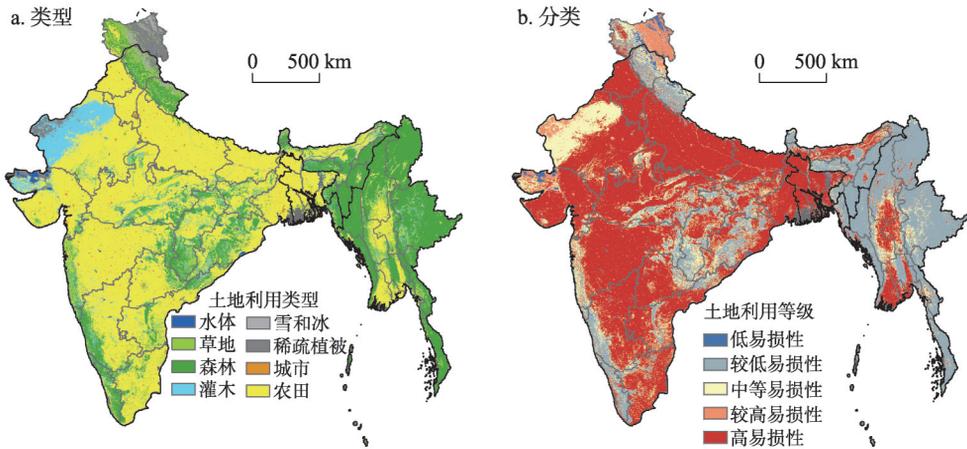


图6 2013年孟印缅地区土地利用空间分布

Fig. 6 Land use mapping in BIM region in 2013

注：此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图（审图号：GS（2016）1759号）绘制，底图无修改。

类型（图6a）及其易损性分类（图6b）。农田最易受到洪水破坏，城市的洪灾易损性也处于较高水平，而森林和未利用地不易受到洪水的影响。根据上述分析，将土地利用类型分为由低到高5个易损性等级，其中土地利用高易损性区占总面积的54%，主要分布在印度中部与南部、孟加拉国和缅甸中部。较低及低易损性区占总面积的26%，主要分布在印度东北部、北部喜马拉雅山区、西南沿海和缅甸北部、东部。如图6b所示，农田和城市的易损性很高，而被森林覆盖的地区易损性较低。

图7显示了研究区人口密度（图7a）、地均GDP（图7b）与易损性指数（图7c）的空间分布。孟印缅地区高易损区主要分布在印度恒河平原、印度中部、孟加拉国和缅甸中部，以上区域人口密度大、经济相对发达且多为农田和城市，低易损性区分布在印度东北部、印度北部喜马拉雅山区、印度西南沿海和缅甸北部、东部，该地区人口密度小、经济水平低且主要被森林覆盖（图7c）。

### 3.4 洪水风险评估

将各指标的空间分布结果和权重输入洪水风险评估模型，得到洪水灾害风险指数。以几何分级法（geometrical interval）为依据，使用GIS将洪水灾害风险的空间分布划分为5个等级（低、较低、中等、较高和高）。图8显示了通过AHP方法（图8a）和AHP\_熵权法（图8b）获得的洪水风险分布。

从地区尺度上看，孟印缅地区高风险区占总面积的1.05%，主要集中在孟加拉国中南部的Sylhet区和Dhaka区、印度东北部的Assam邦、West Bengal邦和西南沿海的Kerala邦、缅甸南部的Ayeyarwady、Yangon省和西南沿海的Rakhine邦，较高风险以上的区域占总面积的28.76%，主要集中在印度北部的恒河平原、印度东北部的Assam邦、孟加拉国大部分地区 and 缅甸中部，以上地区降水丰沛、河网密布、地形平坦且植被覆盖率较低，易受到洪水灾害的影响，此外，该地区人口密度较高且土地利用类型以农田为主，洪水灾害的易损性也较高。中等风险区域与较低风险区域分别占总面积的27.23%和7.51%。低风险区域占总面积的35.45%，主要分布在印度北部的喜马拉雅山区、印度西北部、缅甸北部和东部（图8）。从国家尺度来看，孟印缅三国中洪水灾害风险最大的国

家是孟加拉国, 高风险区占总面积的 10.61%, 较高风险区占总面积的 65.87%, 其次是印度和缅甸, 较高风险以上的区域分别占 30.05% 和 19.33% (表 2)。

如图 8 所示, AHP 方法和 AHP\_熵权法获得的洪水风险分布差异较为明显。在孟印缅洪水风险分布中, AHP\_熵权法得出的高风险区相对较大 (0.46%), 较高风险区明显较小 (1.89%), 中等风险区相对较小 (0.41%), 较低风险区明显较大 (1.94%), 低风险区差异不明显 (表 2)。在孟加拉国、印度和缅甸三国中, AHP\_熵权法得出的孟加拉国和缅甸的高风险区明显较大, 分别为 3.29% 和 1.56%。印度的高风险区差异不明显 (0.1%)。AHP 结果中, 高风险区主要位于孟加拉国中南部、印度东北部和西南沿海、缅甸南部和西南沿海。在 AHP\_熵权法结果中, 高风险区的分布情况与 AHP 法结果基本一致, 但相比 AHP 法的结果, AHP\_熵权法评估的高风险区面积更大, 且识别出了缅甸南部 Ayeyarwady 省大面积的高风险区 (图 8)。

### 3.5 结果验证

本文得出的洪水风险区划图中, 印度较高风险以上的区域与印度 RMSI 公司绘制的印度全国洪水风险等级分布图<sup>[24]</sup>中较高风险以上的区域基本一致。印度地图网站<sup>[41]</sup>绘制的印度洪水灾害易发区分布图中最易发生洪涝灾害的省份中, 北方邦、比哈尔邦、旁遮普邦、拉贾斯坦邦、西孟加拉邦和哈里亚纳邦均位于印度北部的恒河平原, 阿萨姆邦位于印度东北部, 以上省份均位于本文洪水风险区划图的高风险与较高风险区域内。此外, 在 2010—2018 年的历史洪水事件 (<http://www.adrc.asia>) 中, 孟加拉国中部及东部的 Dhaka 区、Sylhet 区和 Chittagong 区的洪水发生频次高达 20 次, 明显高于孟加拉国西部的 Rangpur 区、Rajshahi 区和 Khulna 区。本文的洪水风险评估结果中孟加拉国中部及东部以高风险区为主, 而西部以较高风险区为主。通过分析 2010—2018 年的历史洪水事件得出, 缅甸伊洛瓦底三角洲的 Ayeyarwady 省和西南沿海的 Rakhine 邦的历史洪水事件发生频次较高, 与本文研究结果较一致。通过将本文评估结果与历史洪水事件记录及前人研究进行比较, 证实了本文的方法和结果基本可信。

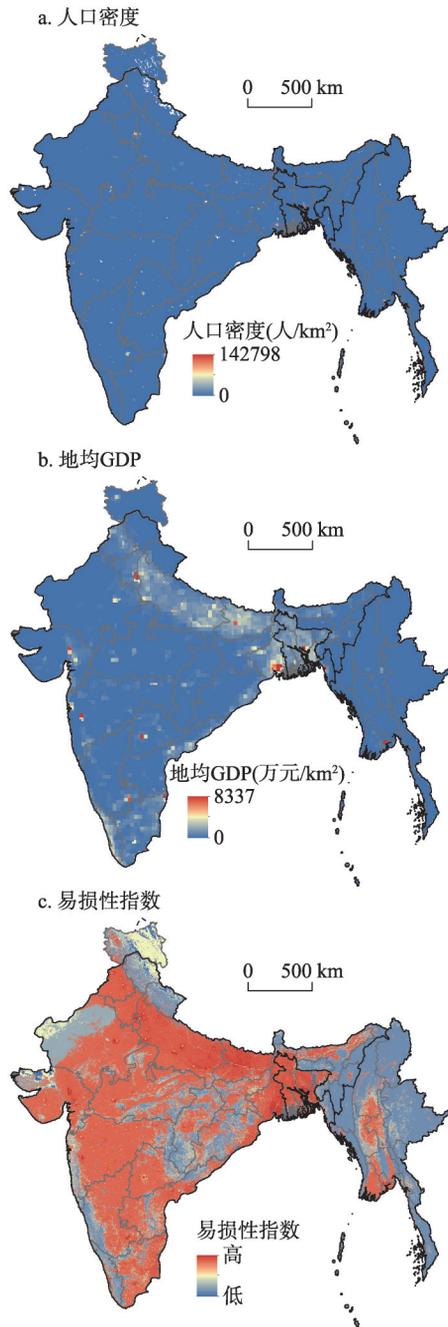


图 7 孟印缅地区易损性指数的空间分布  
Fig. 7 Spatial distribution of vulnerability indexes in BIM region

注: ① 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 (审图号: GS (2016) 1759 号) 绘制, 底图无修改。② 人口密度和地均 GDP 分别基于 2015 年数据和 2025 年预测数据。

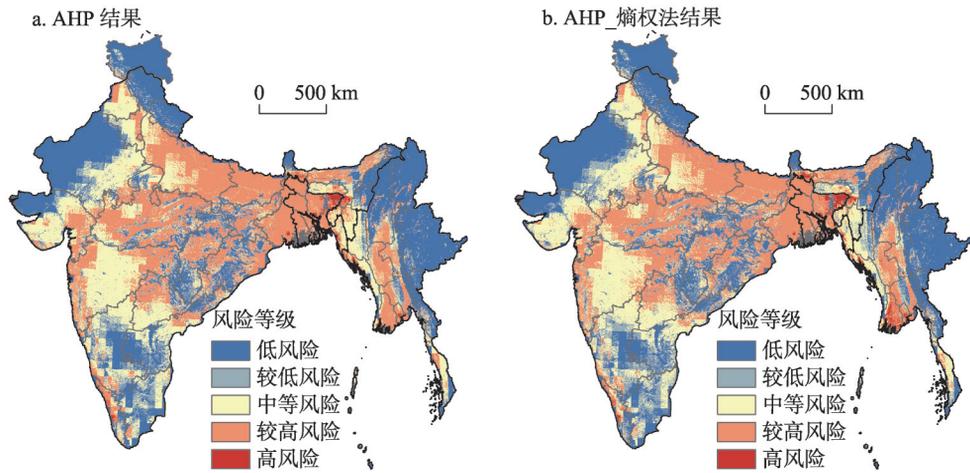


图8 洪水灾害风险的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of regional flood risk

注：此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图（审图号：GS（2016）1759号）绘制，底图无修改。

表2 孟印缅三国洪水灾害风险等级比例

Tab. 2 Ratios of flood risk levels in different countries

风险等级	孟加拉国比例(%)		印度比例(%)		缅甸比例(%)		孟印缅全区比例(%)	
	AHP	AHP_熵权	AHP	AHP_熵权	AHP	AHP_熵权	AHP	AHP_熵权
低	6.60	7.75	31.99	31.72	57.61	57.98	35.56	35.45
较低	0.96	1.48	5.93	7.92	4.86	6.91	5.57	7.51
中等	11.99	14.28	30.48	30.31	17.82	15.78	27.64	27.23
较高	73.13	65.87	31.34	29.69	18.95	17.02	30.65	28.76
高	7.32	10.61	0.26	0.36	0.75	2.31	0.59	1.05

## 4 讨论

### 4.1 孟印缅洪灾风险分布

目前，已经有很多研究涉及到了孟印缅地区的洪水灾害风险评估。Liu等使用AHP方法得出的亚洲典型地区洪水风险区划表明，高风险地区包括印度的West Bengal邦、印度东北部的乞拉朋齐、孟加拉国的Chittagong区、缅甸的Kachin邦和Shan邦，较高风险地区包括印度恒河平原的Uttar Pradesh邦、Haryana邦和Bihar邦<sup>[22]</sup>，这与本文得到的洪水灾害风险分布结果相近。方健等利用全球网格降水、数字高程、坡度、河流水系以及GDP和人口密度数据，得出了基于网格单元和流域单元的全球洪水风险等级图，得出印度半岛北部是经济高风险地区，恒河-布拉马普特拉河流域是洪水灾害经济及人口高风险区<sup>[1]</sup>，与本研究结果一致。Matheswaran等认为印度北部的恒河流域和孟加拉国的大部分地区是洪水高发区<sup>[42]</sup>，与本文研究结果相近。Okazawa等基于自然和社会经济因素得出的全球洪水风险指数分布图中，印度北部恒河平原和孟加拉国的洪水风险指数较高，缅甸的风险指数较低<sup>[43]</sup>，洪水风险指数的空间分布与本文研究结果有较好的一致性。

在本研究采用的两种评估方法中，AHP\_熵权法评估的高风险区面积明显比AHP方法评估的面积大（表2），这一差异表明AHP\_熵权法能够识别出孟印缅地区更大范围的

洪水高风险区。相比AHP方法, AHP\_熵权法识别出了缅甸南部Ayeyarwady省大面积的高风险区(图8)。Ayeyarwady省位于伊洛瓦底江三角洲, 是世界主要稻谷产区之一, 每逢雨季, 西南季风盛行, 雨量丰沛, 江水猛涨, 经常泛滥成灾, 洪涝灾害形成的风险较大<sup>[44]</sup>。Suju等结合GIS评估了缅甸全境的洪水灾害, 得出Ayeyarwady省是受洪水灾害最大的省份<sup>[45]</sup>, 说明AHP\_熵权法的结果相比AHP方法结果较为合理。AHP\_熵权法可以降低指标确定的主观性, 避免结果过多受到专家观点的影响<sup>[19]</sup>。因此, 在评估区域洪水灾害风险时, AHP\_熵权法可以为决策者提供更多的灾害信息。

#### 4.2 不确定性评价

洪水灾害风险系统涉及因素较多, 是一个复杂的系统, 评估指标的选取及其权重是评估结果正确与否的关键。指标的选取与研究者的背景关系密切, 不同背景的研究者选取的指标差异较大。洪灾危险性指标的选取仅考虑了暴雨特征, 没有考虑产汇流等特征。另外, 孟印缅地区数据资料的缺乏, 使得在进行洪水灾害风险分析时, 指标的选取不够全面且难保证数据有统一的精度, 以上因素均会增大灾害评估结果的不确定性。同时, 能否获取高精度的数据对洪水评估结果的影响也很大。本文研究区较大, 数据种类多且分辨率不同, 在评估洪水灾害风险时将数据统一为1 km×1 km的分辨率, 在投影转换和重采样的过程中会产生一定的统计误差, 导致评估结果出现小的偏差。由于孟印缅地区的气象站点较少, 高精度的日降水数据难以获取, 本文采用的CRUNCEP-V7降水数据空间分辨率较低, 使用精度更高的日降水数据可以使评估结果更准确。本文社会经济数据中的人口和GDP数据均采用栅格数据, 相比一般研究常用的统计数据而言, 空间代表性更高。本文通过比较AHP方法和AHP\_熵权法的结果得出, AHP\_熵权法可以识别出更多的高风险区, AHP\_熵权法兼顾了指标的主观性和客观性, 使研究结果更加真实可靠。但目前确定洪水灾害风险权重还没有统一的方法, 如何得到科学合理的权重还需要进一步研究。本文虽然受到数据资料缺乏和精度不高的限制, 但为中国周边国家的洪水灾害评估提供了一个有效可行的办法, 对中国孟中印缅经济走廊的建设安全提供了必要的信息和科技支撑。

#### 4.3 启示

本研究通过评估孟印缅地区的洪水灾害分布, 识别了该地区的洪水高风险区, 可以为孟中印缅经济走廊的基础建设提供一定的科学支持。孟加拉国的吉大港区和缅甸的若开邦是孟中印缅经济走廊的两个重要水路节点, 本文研究结果表明吉大港区和若开邦均有洪涝高风险区分布, 因此, 需要高度关注缅甸若开邦与孟加拉国吉大港区的洪涝灾害问题与社会经济问题, 减轻两个水路节点及其周边地区的洪涝灾害风险, 尤其是每年6—9月降雨较为集中的时期, 注重防范洪涝灾害, 保障孟中印缅经济走廊的建设安全。此外, 为了减轻洪涝灾害对经济走廊建设的影响, 可以考虑在上游修建防洪工程和植被保护与恢复工程<sup>[9]</sup>, 或提前做好医疗与补给物资准备、应急救援队调动等防备措施, 适当对走廊附近的高风险区提供突发公共卫生事件的援助。目前, 孟中印缅经济走廊的路径和方向还未正式明确<sup>[46]</sup>, 国内学者拟议的路径都不可避免的经过洪涝灾害的高风险地区, 因此, 在确定具体路径和方向时可根据孟印缅地区的洪水灾害风险分布, 考虑选择洪涝灾害风险较低的路径。

## 5 结论

洪水是孟印缅地区的主要自然灾害, 本文利用孟印缅地区的降水、数字高程、水系、土地利用和社会经济等数据, 采用AHP方法和AHP\_熵权法对孟印缅地区的洪水灾

害风险进行了评估。得出的结论如下:

(1) 采用AHP\_熵权法的孟印缅地区洪水灾害风险评估结果显示, 高风险区和较高风险区分别占总面积的1.05%和28.78%。其中, 高风险区主要位于孟加拉国中南部、印度东北部和西南沿海、缅甸南部和西南沿海。从国家尺度上看, 孟加拉国的洪水灾害风险最大, 高风险区和较高风险区分别占总面积的10.61%和65.87%。

(2) AHP方法和AHP\_熵权法结果间的比较表明, AHP\_熵权法比AHP方法得出的评估结果更合理。AHP\_熵权法可以降低指标确定的主观性且其结果与历史灾害数据及前人研究结果的一致性更高。

(3) 本文采用的AHP方法和AHP\_熵权法具有一定的可靠性, 且AHP\_熵权法更可靠, 可以识别出更大范围的洪水高风险区与缅甸南部Ayeyarwady省大面积的洪水高风险区。因此, AHP\_熵权法可用于开展中国周边国家自然灾害的风险评估, 然而, 指标的选取要根据当地水文、地质和地貌等特征进行增减。

### 参考文献(References)

- [1] 方建, 李梦婕, 王静爱, 等. 全球暴雨洪水灾害风险评估与制图. 自然灾害学报, 2015, 24(1): 1-8. [Fang Jian, Li Mengjie, Wang Jingai, et al. Assessment and mapping of global fluvial flood risk. Journal of Natural Disaster, 2015, 24(1): 1-8.]
- [2] Kellens W, Terpstra T, De M P. Perception and communication of flood risks: a systematic review of empirical research. Risk Analysis, 2013, 33(1): 24-49.
- [3] 李琼. 洪水灾害风险分析与评价方法的研究及改进. 武汉: 华中科技大学博士学位论文, 2012: 1-10. [Li Qiong. The research and improvement of risk analysis and evaluation method on flood disaster. Wuhan: Doctoral Dissertation of Huazhong University of Science and Technology, 2012, 1-10.]
- [4] Lyu H M, Sun W J, Shen S L, et al. Flood risk assessment in metro systems of mega-cities using a GIS-based modeling approach. Science of The Total Environment, 2018, 626: 1012-1025.
- [5] 赵思健, 张峭. 东北三省农作物洪涝时空风险评估. 灾害学, 2013, 28(3): 54-60. [Zhao Sijian, Zhang Qiao. Spatial-temporal risk assessment of crops caused by flood in the three northeastern provinces of China. Journal of Catastrophology, 2013, 28(3): 54-60.]
- [6] 黄崇福, 郭君, 艾福利, 等. 洪涝灾害风险分析的基本范式及其应用. 自然灾害学报, 2013, 22(4): 11-23. [Huang Chongfu, Guo Jun, Ai Fuli, et al. Basic paradigm of risk analysis in flood disaster and its application. Journal of Natural Disaster, 2013, 22(4): 11-23.]
- [7] Black A R, Burns J C. Re-assessing the flood risk in Scotland. Science of the Total Environment, 2002, 294(1-3): 169-184.
- [8] Hu S, Cheng X, Zhou D, et al. GIS-based flood risk assessment in suburban areas: A case study of the Fangshan district, Beijing. Natural Hazards, 2017, 87(3): 1525-1543.
- [9] Xiao Y, Yi S, Tang Z. Integrated flood hazard assessment based on spatial ordered weighted averaging method considering spatial heterogeneity of risk preference. Science of the Total Environment, 2017, 599-600: 1034-1046.
- [10] Kourgialas N N, Karatzas G P. A national scale flood hazard mapping methodology: The case of Greece-Protection and adaptation policy approaches. Science of the Total Environment, 2017, 601-602: 441-452.
- [11] Feyen L, Dankers R, Katalin Bódis, et al. Fluvial flood risk in Europe in present and future climates. Climatic Change, 2012, 112(1): 47-62.
- [12] Prudhomme C, Wilby R L, Crooks S, et al. Scenario-neutral approach to climate change impact studies: Application to flood risk. Journal of Hydrology: Amsterdam, 2010, 390(3-4): 198-209.
- [13] Kazakis N, Kougiass I, Patsialis T. Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope-Evros region, Greece. Science of the Total Environment, 2015, 538: 555-563.
- [14] 姚俊英, 朱红蕊, 南极月, 等. 基于灰色理论的黑龙省暴雨洪涝特征分析及灾变预测. 灾害学, 2012, 27(1): 59-63. [Yao Junying, Zhu Hongru, Nan Jiyue, et al. Analysis of flood and disaster forecast in Heilongjiang province Based on Grey Theory. Journal of Catastrophology, 2012, 27(1): 59-63.]
- [15] 刘国庆. 基于GIS和模糊数学的重庆市洪水灾害风险评价研究. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2010. [Liu Guoqing. The study of flood disaster risk evaluation in Chongqing based on GIS and fuzzy mathematics. Chongqing: Master Dissertation of Southwest University, 2010.]
- [16] Liu R, Chen Y, Wu J, et al. Assessing spatial likelihood of flooding hazard using naïve Bayes and GIS: A case study in

- Bowen Basin, Australia. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2016, 30(6): 1-16.
- [17] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sci*, 2008, 1(1): 83-98.
- [18] Lyu H M, Shen J S, Arulrajah A. Assessment of geohazards and preventative countermeasures using AHP incorporated with GIS in Lanzhou, China. *Sustainability*, 2018, 10(304): 1-21.
- [19] Wu Y, Zhong P A, Xu B, et al. Changing of flood risk due to climate and development in Huaihe River basin, China. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2017, 31(4): 935-948.
- [20] Roxy M K, Ritika K, Terray P, et al. The curious case of Indian Ocean warming. *Journal of Climate*, 2016, 27(22): 8501-8509.
- [21] Roxy M K, Ghosh S, Pathak A, et al. A threefold rise in widespread extreme rain events over central India. *Nature Communications*, 2017, 8(708): 1-11.
- [22] Panhalkar S S, Jarag A P. Flood risk assessment of Panchganga River: Kolhapur district, Maharashtra using GIS-based multicriteria decision technique. *Current Science*, 2017, 112(4): 785-793.
- [23] Pandey A C, Singh S K, Nathawat M S. Waterlogging and flood hazards vulnerability and risk assessment in Indo Gangetic plain. *Natural Hazards*, 2010, 55(2): 273-289.
- [24] RMSI, India flood risk: India's first countrywide flood risk model. [https://www.rmsi.com/uploads/Services/India-FloodRisk\\_Jan%2015.pdf](https://www.rmsi.com/uploads/Services/India-FloodRisk_Jan%2015.pdf), 2019-3-1.
- [25] Ghosh A, Kar S K. Application of analytical hierarchy process (AHP) for flood risk assessment: A case study in Malda district of West Bengal, India. *Nat Hazards*, 2018, 94(1): 349-368.
- [26] Liu J, Wang X, Zhang B, et al. Storm flood risk zoning in the typical regions of Asia using GIS technology. *Natural Hazards*, 2017, 87(3): 1691-1707.
- [27] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 2002, 3(11): 1-9. [Shi Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics. *Journal of Natural Disaster*, 2002, 3(11): 1-9.]
- [28] Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment. *Science*, 2006, 314(5804): 1442-1445.
- [29] 蒋卫国, 李京, 陈云浩, 等. 区域洪水灾害风险评估体系(I): 原理与方法. *自然灾害学报*, 2008, 17(6): 53-59. [Jiang Weiguo, Li Jing, Chen Yunhao, et al. Risk assessment system for regional flood disaster(I): principle and method. *Journal of Natural Disaster*, 2008, 17(6): 53-59.]
- [30] Wu Y, Zhong P A, Zhang Y, et al. Integrated flood risk assessment and zonation method: A case study in Huaihe River basin, China. *Natural Hazards*, 2015, 78(1): 635-651.
- [31] 王彬. 土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型. 杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2013: 1-17. [Wang Bin. Dynamic mechanism of soil erodibility and soil erodibility calculation model. Yanglin: Doctoral Dissertation of Northwest A&F University, 2013, 1-17.]
- [32] Sharply A N, Williams J R. EPIC-Erosion productivity impact calculator: 1. Model documentation. *Technical Bulletin United States Department of Agriculture*, 1990, 1768: 3-9.
- [33] Pan H, Qiang Z, Peijun S, et al. Flood-induced mortality across the globe: Spatiotemporal pattern and influencing factors. *Science of The Total Environment*, 2018, 643: 171-182.
- [34] 段光耀, 赵文吉, 宫辉力. 基于遥感数据的区域洪涝风险评估改进模型. *自然灾害学报*, 2012, (4): 57-61. [Duan Guangyao, Zhao Wenji, Gong Huili. Improved model of regional flood disaster risk assessment based on remote sensing data. *Journal of Natural Disaster*, 2012, (4): 57-61.]
- [35] Dyer J S. Remarks on the analytic hierarchy process. *Manage Sci*, 1990, 36(3): 249-258.
- [36] Saaty T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *J. Math. Psychol*, 1977 15: 234-281.
- [37] 李帅, 魏虹, 倪细炉, 等. 基于层次分析法和熵权法的宁夏城市人居环境质量评价. *应用生态学报*, 2014, 25(9): 2700-2708. [Li Shuai, Wei Hong, Ni Xilu, et al. Evaluation of urban human settlement quality in Ningxia based on AHP and the entropy method. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(9): 2700-2708.]
- [38] Chen T, Jin Y, Qiu X, et al. A hybrid fuzzy evaluation method for safety assessment of food-waste feed based on entropy and the analytic hierarchy process methods. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(16): 7328-7337.
- [39] Wang T, Chen J S, Wang T, et al. Entropy weight-set pair analysis based on tracer techniques for dam leakage investigation. *Nat Hazards*, 2015, 76: 747-767.
- [40] 张晨, 王清, 陈剑平, 等. 金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价. *岩土力学*, 2011, 32(3): 831-836. [Zhang Chen, Wang Qing, Chen Jianping, et al. Evaluation of debris flow risk in Jinsha River based on combined weight process. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 831-836.]
- [41] Maps of India, Map of Top Ten Flood Prone Areas in India. <https://www.mapsofindia.com/top-ten/geography/india-flood.html>, 2013-06-20.

- [42] Matheswaran K, Alahacoon N, Pandey R, et al. Flood risk assessment in South Asia to prioritize flood index insurance applications in Bihar, India. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 2019, 10(1): 26-48.
- [43] Okazawa Y, Yeh P J F, Kanae S, et al. Development of a global flood risk index based on natural and socio-economic factors. *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(5): 789-804.
- [44] 孙亚勇, 黄诗峰, 李纪人, 等. Sentinel-1A SAR 数据在缅甸伊洛瓦底江下游区洪水监测中的应用. *遥感技术与应用*, 2017, 32(2): 282-288. [Sun Yayong, Huang Shifeng, Li Jiren, et al. The downstream flood monitoring application of Myanmar Irrawaddy River based on Sentinel-1A SAR. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(2): 282-288.]
- [45] Suju L, Yan C, Ming L, et al. Integrating global open geo-information for major disaster assessment: A case study of the Myanmar flood. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(201): 1-19.
- [46] 刘稚, 黄德凯. 地缘政治权力结构冲突下的孟中印缅经济走廊建设. *南亚研究*, 2018(1): 27-49. [Liu Zhi, Huang Dekai. Development of the Bangladesh -China-India-Myanmar (BCIM) economic corridor within a context of structural geo-political power conflict. *South Asian Studies*, 2018, (1): 27-49.]

## Flood risk assessment in Bangladesh, India and Myanmar based on the AHP weight method and entropy weight method

LIU Yuanyuan<sup>1,2</sup>, WANG Shaoqiang<sup>1,2,3</sup>, WANG Xiaobo<sup>1,2</sup>, JIANG Dong<sup>1,2</sup>, N H Ravindranath<sup>4</sup>,  
Atiq Rahman<sup>5</sup>, Nyo Mar Htwé<sup>6</sup>, Tartirose Vjittpan<sup>7</sup>

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment at University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. Centre for Sustainable Technologies, India Institute of Science, Bangalore 560012, India; 5. Bangladesh Centre for Advanced Studies, Dhaka 1212, Bangladesh; 6. Yezin Agricultural University, Naypyitaw 15000, Myanmar; 7. United Nations Environment Programme - International Ecosystem Management Partnership, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The Bangladesh, India and Myanmar (BIM) region has subtropical and tropical monsoon climates. Floods frequently occur around here. Assessing the flood risk in BIM region is important for the safety construction of the BCIM-EC. Based on datasets of precipitation from 1980 to 2016, river network, elevation, land use and etc., we selected ten indexes, namely, rainy season rainfall, rainstorm days, elevation, slope, drainage density, vegetation coverage, soil erodibility, population density, GDP, and land use. A comparative study of flood risk in BIM region is presented using the analytic hierarchy process (AHP) and the AHP\_entropy methods. Based on the assessed results, about 1.05% and 28.76% of the BIM region have high risk and moderate to high risk. High risk zones in the BIM region were primarily concentrated on the Ganges Plain in northern India, Assam State in northeastern India, most of Bangladesh and southern Myanmar. Bangladesh is the country with the highest risk among three countries. The results show that high risk areas and moderate to high risk areas take up 10.61% and 65.87% of the total area of Bangladesh, respectively. Comparisons between results from AHP and AHP\_entropy show that the latter yields a wider range of high flooding risk than the former. The study could provide an effective method for other neighboring countries of China in estimating the flood hazard areas, which can promote the construction of the BCIM-EC.

**Keywords:** flood hazard; risk assessment; analytic hierarchy process (AHP); AHP\_entropy weight method; BCIM-EC