

# 基于格网数据和博弈论组合赋权的中巴经济走廊洪灾风险评价

吴瑞英<sup>1</sup>, 孙怀卫<sup>1\*</sup>, 严冬<sup>1</sup>, 陶辉<sup>2</sup>, 廖卫红<sup>3</sup>, 陈皓锐<sup>3</sup>, 桂东伟<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 中巴经济走廊是中国“一带一路”倡议的先试区和重点区, 如何实现该区域内的精确可靠的洪灾风险评价是中国“一带一路”推进中所面临的关键问题。该研究依据中巴经济走廊 0.25°×0.25° 格点数据集(V1)中的日降水数据集, 综合考虑致灾因子、孕灾环境和承灾体等构建了由多变量组成的评价指标体系, 提出运用改进的博弈论耦合直觉模糊层次分析主观权重和基于指标相关性的客观权重(Criteria Importance Though Intercriteria Correlation, CRITIC)并计算得到最优组合权重。以中巴经济走廊为典型研究区开展洪灾风险评价的实例分析并对其年代际演变特征进行了研究, 结果表明: 1) 基于改进的博弈论组合赋权实现了单位约束下组合权重寻优计算, 在此基础上得到的风险分区更加精细; 2) 计算所得 2010 年洪水淹没面积为 14.9 万 km<sup>2</sup>, 计算结果与实际调查洪水淹没面积间相关系数为 0.66, 验证洪灾风险评价方法合理、可靠, 评价结果基本符合历史实际洪灾情况; 3) 中巴经济走廊内洪灾危险性受降水、地形影响较大, 其风险度的空间分布表现为东南部大于西北部; 4) 中高风险区和高风险区占研究区面积的 28.5%, 基本为地形变化小、河网密集、人口分布集中的区域, 由此指示需关注中巴经济走廊内洪灾对社会经济发展的影响与危害; 5) 区域内洪灾高风险区随 1990—2010 年代际变化而扩大, 引起风险上升的主要因素为极端降水的发生。研究结果可为“一带一路”等重点地区的自然灾害防范和评估分析提供理论依据和决策支持, 并为洪涝灾害预报提供有效信息。

**关键词:** 降水; 风险评价; 洪水灾害; 中巴经济走廊; 博弈论

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.14.016

中图分类号: X43; TV87

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-14-0145-10

吴瑞英, 孙怀卫, 严冬, 等. 基于格网数据和博弈论组合赋权的中巴经济走廊洪灾风险评价[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 145-154. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.14.016 http://www.tcsae.org

Wu Ruiying, Sun Huaiwei, Yan Dong, et al. Evaluation of flood disaster risk in China-Pakistan Economic Corridor by combination weighting based on improved game theory and grid data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(14): 145-154. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.14.016 http://www.tcsae.org

## 0 引言

洪水灾害是当前影响范围最为广泛、发生次数最多且损失最为严重的自然灾害之一<sup>[1]</sup>。在防汛抗洪、抢险救灾等决策过程中开展合理的洪水风险评估对于减少洪灾所造成的生命财产损失、指导洪水威胁区土地开发利用具有重要作用<sup>[2]</sup>。风险评估方法日渐成熟, 已被运用到洪灾评价中, 如杨乐婵等<sup>[3]</sup>利用粗糙集约简的 BP 神经网络算法来快速获取洪灾风险、基于地理信息系统(GIS)空间处理能力的集成系统已经逐渐成为了洪灾风险评价强有力的工具<sup>[4-5]</sup>。通过探索, 将 GIS 工具与洪灾评估方法等相结合应用于洪灾风险评估, 刘家福等<sup>[6]</sup>基于层次分析法(Alytic Hierarchy Process, GIS-AHP)集成给出了淮河流域的洪水危险性评价和易损性评价, 傅春等<sup>[7]</sup>建立了

基于 GIS 空间信息单元格的区域洪灾损失快速评估模型并验证其精度可信。一些学者从洪水灾害系统的高维性、复杂性、不确定性等特征出发, 建议采用考虑不确定性的方法, 如任玉峰等<sup>[8]</sup>结合了基于证据理论和可变模糊集来处理洪灾风险评估中的不确定性问题, 金菊良等<sup>[9]</sup>建议综合考虑主客观不确定问题并推荐了基于广义熵智能分析的洪水灾害风险管理方法, 邹强等<sup>[10-11]</sup>进一步研究了基于最大熵原理和属性区间识别理论的洪水灾害风险分析方法。为克服洪灾风险评估中主客观权重不确定性的问题, 引入考虑多个决策主体相互影响和决策均衡的博弈论原理<sup>[12-13]</sup>, 能够较好地兼顾决策者的经验判断从而获得更加合理的洪灾风险评估结果。

中巴经济走廊的建设可能会影响区域生态环境的脆弱性, 也可能使该地区面临极大的自然灾害风险。资料统计, 印度河干支流发生过多次洪水, 造成了严重的人口经济损失<sup>[14]</sup>。对洪水过程的分析也表明, 俾路支省、信德省等面临着较大的洪水风险<sup>[15]</sup>。洪涝灾害的形成是一个多因素综合作用的结果, 有研究给出了洪涝灾害风险评的指标体系, 针对不同的下垫面情况有不同的指标结合<sup>[16]</sup>。尤其是对于易损性的评估, 需要综合社会、经济、生态等多维度进行综合评估。确定各评价指标的权

收稿日期: 2020-12-22 修订日期: 2021-06-02

基金项目: 科技部基础调查专项(2019FY00205); 国家自然科学基金项目(52079055; 52011530128; 51879110)

作者简介: 吴瑞英, 研究方向为水资源管理与灾害分析。

Email: wry@hust.edu.cn

\*通信作者: 孙怀卫, 博士, 副教授, 研究方向为水资源研究。

Email: hsun@hust.edu.cn

重是该项研究的难点,许多研究中的指标权重是通过专家打分,利用层次分析法来确定,主观性较重。对中巴经济走廊开展可靠的洪灾风险评估,对于保障“一带一路”战略具有重要的意义。博弈论作为多因素竞争下的决策方法已得到较好应用<sup>[17]</sup>,本文尝试克服洪灾风险评估中主客观权重不确定性的问题,通过引入考虑多个决策主体相互影响和决策均衡的博弈论原理对原有博弈论优化,使其能够较好兼顾决策者的经验判断,从而获得更加合理的洪灾风险评估结果。

遥感影像地图学在风险评价当中发挥了越来越大的作用,用高分辨率区域格网数据能便捷地得到可靠的区域风险评价结果<sup>[18]</sup>。本文在中巴经济走廊开展洪灾风险评估使用中巴经济走廊  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  格点数据集(V1)中的日降水数据集,基于博弈论原理耦合主观权重和客观权重,考虑区域现状特点和灾害系统理论构建评价指标体系,并对中巴经济走廊内不同年代洪灾风险进行评估,以期为该重点地区可持续发展和基础设施建设等方面提供理论参考与决策支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

中巴经济走廊(China-Pakistan Economic Corridor, CPEC, 图1)从巴基斯坦的瓜尔达港延伸至中国喀什<sup>[19]</sup>,其范围主要涵盖巴基斯坦全境、中国新疆喀什及其周边地区,全长约3 000 km,总面积约为93.2万  $\text{km}^2$ 。研究区位于南亚次大陆的西北部,气温降水量的年际差别明显,每年的7—9月受西南季风的影响,区域性极端降水事件增多、洪水频发。CPEC南部受印度洋季风气候影响明显,北部属于亚洲的内陆区域,青藏高原在此分布,区内约有60%为山区和丘陵。印度河是一条贯穿巴基斯坦全境的国际性河流,其自旁遮普(Punjab)平原以后也逐渐宽阔,在平原区水流流速变小、水流挟沙力变小,导致所带泥沙落淤、河床不断抬高,极易发生洪水灾害,引起大片地区被淹,由此也造成了严重的人员伤亡和社会经济损失<sup>[14]</sup>。近年来,该区年平均气温以  $0.415^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  的速率上升,进入21世纪以来,气温上升速率更快;在1961—2013年间,中巴经济走廊地区年降水量呈现波动上升趋势,20世纪90年代以来,降水量明显上升,极端气候事件显著,洪灾事件频发。据统计,过去的70年期间,中巴经济走廊地区共发生了25场主要洪水事件,几乎每隔3 a就要发生一次,洪涝灾害累计在巴基斯坦造成了超过300亿美元的损失,大约有25 502人丧生,共197 273个村庄遭到破坏,影响的土地面积达616 598  $\text{km}^2$ ,洪涝灾害已经成为影响当地经济社会发展的最主要挑战之一。

### 1.2 中巴经济走廊区域降水数据集

为获得该区域精确可靠的洪灾风险评价结果,本文基于1961—2013年该区气温和降水  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  格点数据集(V1)开展工作,该数据集利用专业气象插值软件Anusplin结合三维地理空间信息进行空间插值得来,并通过广义交叉验证和误差分析评判插值模型效果(已由中国科学院新疆生态和地理研究所发布)。具体的插值过程如下:

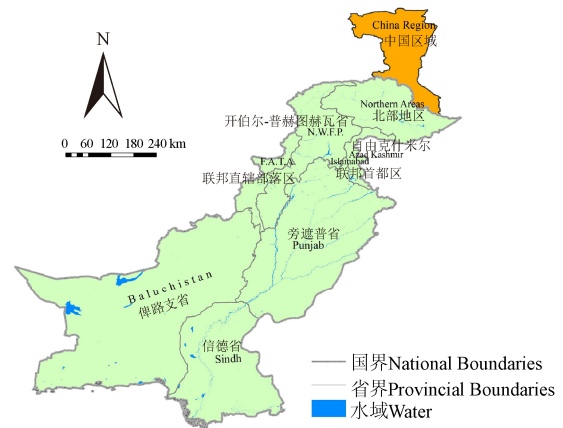


图1 研究区行政区划

Fig.1 Study area administrative division

1) 降水数据预处理:格点化所用资料包括该区内50个气象站逐日资料以及经过重采样的数字高程模型数据(DEM,分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ )。插值前对站点数据进行预处理,过滤掉完整度不满足插值的站点,并在满足设定完整度的基础上利用反距离加权插值法(Inverse Distance Weighted, IDW)对缺测值进行逐日逐站点填补。格点化所用资料包括该区范围内气象站逐日资料,站点在  $30^{\circ}\text{N}$  以南分布较均匀,在  $30^{\circ} \sim 35^{\circ}\text{N}$  分布相对集中,而在研究区  $35^{\circ}\text{N}$  以北地区受地形和气流影响全年降水极其稀疏,故予以忽略,由此在站点的选择上具有较好合理性。

2) Anusplin空间插值:采用二次局部薄盘样条法对降水数据进行空间插值,其中经纬度为自变量,高程为协变量。由于研究区站点小于2 000个,因此只执行Spline(薄盘光滑样条函数)和Lapgrd等相关主程序模块,其中Lapgrd用来对局部薄盘光滑样条表面估值并计算贝叶斯标准误差。

3) 数据评估:选用广义交叉验证的平方根(Square Root of Generalized Cross Validation, RTGCV;由观测值误差和估算值误差组成,用来评估插值模型优劣)的方法进行模型插值结果和观测值的对比分析,并结合均方根误差(RMSE)作为评估插值效果指标。经验证,降水RMSE整体上表现出从1961年至2013年逐渐增大的趋势;RTGCV的波动具有较为明显的周期性规律,夏季较大,秋冬较少,并没有显著的年际变化特征;插值格点年平均RMSE为0.9 mm,表明降水格点数据具有较好的精度和插值效果。

### 1.3 典型洪水选择

据巴基斯坦水电规划署所发布的防洪标准,印度河干流灌溉所用拦河闸防洪设计标准重现期为20—40 a,沿河提防一般能够抵御二十年一遇洪水过程。经近年来建设,印度河流域的防洪标准重现期提升至100 a。

据已有历史洪水径流资料,选择接近防洪标准的典型洪水过程。据典型站点洪峰洪量、持续时间、损失情况等,模拟高、低两个典型洪水事件场景,选择2010年7—8月发生在西北部山区并蔓延到整个印度河流域的洪水过程(近似百年一遇<sup>[19]</sup>)作为高情景;选择2011年7月发生在吉尔吉特山谷并下泄到中部平原区洪水过程(近

似二十年一遇)为低情景,数据来源于 OCHA (Office for the Coordination of Humanitarian Affairs)。见表 1。

表 1 典型洪水信息  
Table 1 Typical flood information

年份 Year	洪水类型 Flood type	洪峰流量 Peak discharge / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
		恰希玛 Chashma	古杜 Guddu
2010	百年一遇	29 355	32 529
2011	二十年一遇	10 094	7 710

注:恰希玛和古杜均为巴基斯坦水文站点。

Note: Chashma and Guddu are hydrological stations in Pakistan.

### 1.4 改进博弈论组合赋权的洪灾风险评价

#### 1.4.1 风险评价指标体系

考虑致灾因子、孕灾环境的危险性以及承载体的易损性等开展洪灾风险评价分析,结合中巴经济走廊的具体气象、地理和历史洪灾关键影响因素建立洪灾风险评价指标体系<sup>[20]</sup>,见图 2。

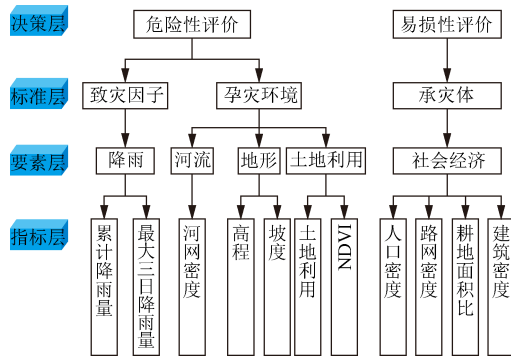


图 2 基于博弈论的组合风险评价指标体系

Fig.2 Portfolio risk assessment index system by game theory

在致灾因子选取过程中,针对降雨量进行分析发现,该区内强降雨大多发生在 3 d 之内且在不同时长降雨中最大三日降雨的雨强和影响面积相关性最好,因此选用研究区季风期洪水频发时期最具破坏性的累积降雨量和最大三日降雨量为指标因子。

地形是影响地表径流的主要因素,高程与坡度是地形的两个主要指标,因而会选取地形因素作为孕灾环境的一个重要组成部分。孕灾环境因子中也包括河流,河网密度是描述河流分布疏密的直接指数(用单位流域的河长和流域面积的比值来表示),其在很大程度上决定了研究区遭受洪水侵害的难易程度。对于研究区,河网分布较为密集,印度河流域附近五水汇集,成为导致洪水泛滥的重要因素。土地利用影响下垫面地表径流过程,其中土地利用类型(文中简称土地利用)和植被覆盖指数(NDVI)是土地利用的重要指标。

基本的社会经济指标因子选取路网、建筑密度以及人口指标,并结合当地耕地范围广的因素选取耕地面积比指标。

对应各指标进行要素收集后统一开展预处理、栅格化、归一化等数据计算,随后采用基于博弈论的组合赋权法结合 GIS 空间分析给出洪灾风险评价。

#### 1.4.2 直觉模糊层次分析计算主观权重

直觉模糊层次分析(Intuitionistic Fuzzy Analytic

Hierarchy Process, IFAHP)是基于层次分析(AHP)改进的主观赋权方法<sup>[21]</sup>,主要计算步骤如下:

#### 1) 构造直觉模糊判断矩阵

在直觉模糊层次分析中,两两比较一二级指标之间重要程度得到直觉模糊判断矩阵  $W = (w_{ij})_{n \times n}$ ,它在层次分析判断判断矩阵的基础上增加了犹豫度。其中,  $w_{ij} = (\mu_{ij}, \nu_{ij})$ ,  $\mu_{ij}$  表示隶属度,即第  $i$  个指标比第  $j$  个指标相对重要的程度;  $\nu_{ij}$  表示非隶属度,即第  $j$  个指标比第  $i$  个指标相对重要的程度;  $w_{ij}$  为直觉模糊数;  $i, j$  分别代表判断矩阵中的行和列。

#### 2) 一致性检验与直觉模糊一致性判断矩阵

对收集到的专家偏好(直觉模糊判断矩阵)进行逻辑检验。在使用直觉模糊层次分析法时,可利用迭代公式,通过设置参数进行迭代,从而避免再次打分。

#### 3) 一致性检验公式

$$(\bar{R}, R) = \frac{1}{2(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (|\bar{\mu}_{ij} - \mu_{ij}| + |\bar{\nu}_{ij} - \nu_{ij}| + |\bar{\pi}_{ij} - \pi_{ij}|) \quad (1)$$

式中  $n$  为指标个数;  $R$  为直觉模糊判断矩阵;  $\bar{R}$  为直觉模糊一致性判断矩阵;  $\pi_{ij}$  代表犹豫度;  $\bar{\mu}_{ij}$ 、 $\bar{\nu}_{ij}$  分别为  $\mu_{ij}$  和  $\nu_{ij}$  的线性表达,  $\bar{\pi}_{ij} = 1 - \bar{\mu}_{ij} - \bar{\nu}_{ij}$ 。

#### 4) 权重计算

在得到直觉模糊一致性判断矩阵之后,计算各指标权重,同层指标相对上一层指标的权重  $w_i$  计算公式为

$$w_i = \left( \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (1 - \nu_{ij})}, 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (1 - \mu_{ij})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \nu_{ij}} \right), i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

本评价体系共有 3 个一级指标,11 个二级指标。设一级指标的权重为  $w_k (k = 1, 2, 3; l = 1, 2, 3, \dots, n)$ ,二级指标相对于一级指标的权重为  $w_{kl} (k = 1, 2, 3)$ ,二级指标相对于预案总评分的综合权重为  $W_{kl}$ 。由于  $w_k$  和  $w_{kl}$  都为直觉模糊数,因此综合权重计算需利用直觉模糊数的运算法则( $\otimes$  为直觉模糊数运算符),公式如下:

$$W_{kl} = w_k \otimes w_{kl} \quad (3)$$

根据综合权重计算各指标的得分权重,即最终权重结果  $H_{kl}$  和归一化计算得综合权重结果  $\bar{H}_{kl}$ 。

$$H_{kl} = \frac{1 - \nu_{kl}}{2 - \nu_{kl} - \mu_{kl}} \quad (4)$$

$$\bar{H}_{kl} = \frac{H_{kl}}{\sum_{l=1}^n H_{kl}} \quad (5)$$

式中  $\mu_{kl}$  和  $\nu_{kl}$  分别代表二级指标相对于一级指标的隶属度和非隶属度。

#### 1.4.3 CRITIC 计算客观权重

CRITIC (Criteria Importance Though Intercriteria Correlation)法是由 Diakoulaki 提出的一种客观赋权方法<sup>[22]</sup>,

综合运用指标间的差异性和冲突性计算权重是 CRITIC 法的基本思想, 差异性以标准差  $\sigma$  形式展现, 其计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2} \quad (6)$$

式中  $X_k$  为同一指标的第  $k$  个取值;  $\bar{X}$  为指标取值的平均值。

不同指标间的冲突性以相关系数  $\rho_{XY}$  计算

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})(Y_k - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})^2}} \quad (7)$$

式中  $Y_k$  分别为指标  $Y$  的第  $k$  个取值;  $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$  分别为指标  $X$ 、 $Y$  的平均值;  $N$  为指标选取个数。

第  $l$  个指标所包含的信息量  $E_l$  为

$$E_l = \sigma_l \sum_{i=1}^n (1 - \rho_{li}) \quad (8)$$

式中  $\sum_{i=1}^n (1 - \rho_{li})$  为第  $l$  个指标和其他指标冲突性量化的结果。 $E_l$  越大, 熵越大, 则表明该评价指标所包含的信息量就越大, 该指标的相对重要性就越大, 代表其在评价中所占比例越大。评价中利用归一化方法计算评价体系中第  $l$  个指标的权重  $w_l$

$$w_l = \frac{E_l}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (9)$$

#### 1.4.4 改进博弈论组合赋权

改进博弈论组合赋权 (Improved Combination Weighting Method of Game Theory, ICWGT) 通过引入运筹学领域中的博弈论来分析决策行为博弈论相互影响时的理性及其决策均衡问题, 其组合赋权的思想是在不同赋权方法当中寻找一种一致或者妥协的赋权方法, 通过使各个指标权重与最优线性组合指标权重之间的离差极小化而达到平衡的寻优方式<sup>[23]</sup>, 从而筛选最优组合权重。基于博弈论的组合赋权可表达为

$$w = \sum_{i=1}^L \alpha_i w_i^T \quad (10)$$

式中  $\alpha_i$  为线性组合系数,  $\alpha_i > 0$ ;  $w$  为组合权重向量;  $w_i$  为各赋权方法得到的权重。以组合权重向量  $w$  与所有  $w_i$  的偏差最小为目标, 对上式的  $L$  个线性组合系数进行优化, 即可得到  $w$  的最优解  $w^*$ , 由此得到的对策模型为

$$\min \left\| \sum_{i=1}^L \alpha_i w_i^T - w_p \right\|_2, p=1, 2, \dots, L \quad (11)$$

第  $p$  个权重方法的基本权重集为  $w_p$ 。其相应的最优化条件<sup>[24]</sup>为

$$\sum_{i=1}^L \alpha_i w_p w_i^T = w_p w_p^T, p=1, 2, \dots, L \quad (12)$$

通过求解得到线性组合  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L)$ , 对其进行归一化处理得  $\alpha^*$ , 那么组合权重就可以表示为

$$w^* = \sum_{i=1}^L \alpha_i^* w_i^T, (l=1, 2, \dots, L) \quad (13)$$

从上述的计算过程可以看出, 组合权重的计算结果过分依赖于线性组合系数, 而通过式 (12) 可以看出线性组合系数  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L)$  的计算结果并不能保证为正, 若其为负则与假设相悖。因此, 需要对博弈论模型进行改进。据矩阵微分的性质, 为保证线性组合系数为正, 优化对策模型<sup>[25]</sup>可得

$$f = \min_{\alpha_1, \dots, \alpha_L} \sum_{i=1}^L \left| \left( \sum_{p=1}^L \alpha_p w_i w_p^T \right) - w_i w_i^T \right| \quad (14)$$

该式与式 (11) 是同一模型的不同变形式, 因线性组合系数  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L)$  一般符合  $\sum_{p=1}^L \alpha_p^2 = 1$ , 故借鉴离差最大化客观赋权的思想, 以上式为目标函数的约束条件<sup>[26]</sup>, 得到如下最优化模型:

$$\begin{aligned} \min_{\alpha_1, \dots, \alpha_L} f &= \sum_{i=1}^L \left| \left( \sum_{p=1}^L \alpha_p w_i w_p^T \right) - w_i w_i^T \right| \\ \text{s.t. } \alpha_p &> 0, p=1, 2, \dots, L, \sum_{p=1}^L \alpha_p^2 = 1 \end{aligned} \quad (15)$$

为求解该模型, 构建拉格朗日函数以及求偏导得到最终组合系数解, 并对其进行归一化处理, 得改进博弈论模型求组合权重系数如下:

$$\alpha_p^* = \frac{\sum_{i=1}^L w_i w_p^T}{\sum_{p=1}^L \sum_{i=1}^L w_i w_p^T} \quad (16)$$

按照 IFAHP 的方式得到主观赋权的指标权重, 并按照 CRITIC 方法得到客观赋权的指标权重, 在这两者的基础上通过改进的博弈论组合赋权计算组合系数并归一化得到最终带组合赋权的指标权重。

#### 1.5 区域地理数据处理

本研究综合考虑多种数据源构建 CPEC 区域地理数据集, 采用重采样方法解决多种数据源空间数据分辨率差异。选用 30 m 分辨率的 DEM 数据 (下载自地理空间数据云), 对原始 DEM 进行填洼处理、水流方向提取、洼地提取、洼地深度计算以及洼地填充等, 得到无洼 DEM 以及坡度数据。经验证, 经过处理后的地形和高程数据能够很好地表征实际地形特征, 并能够较好地适应后续指标权重的计算需求。

将原有土地利用划分为 10 类 (分类中考虑植被和水利设施等因子影响), 采用 GlobeLand30 (30 m 全球地表覆盖数据, 自全国地理信息资源目录服务系统中下载) 按照影响程度排序, 在 GIS 中进行波段融合拼接裁剪等工作生成研究区内的地表覆盖图, 并获取耕地部分面积指标。由 Landsat8 卫星数据经过影像处理和波段运算等得到分析所需的 NDVI 指标; 进一步选取 Gridded Population of the World (GPW) V4 人口密度数据集 (格网 0.25°、30 km 分辨率) 获取了研究区内的人口密度数据, 通过收集来的人口数据在 GIS 中进行拼接融合去噪归一化处理; 为获取



建筑物密度,本研究采用以中巴经济走廊2010年Quickbird正射影像为主要数据源,通过空间计算最终求得建筑物密度,借助RS技术提取建筑物,采用GIS技术进行格网化处理、定量计算和可视化表达,分析研究区建筑面积比的空间分布。基于路网数据(来源于OpenStreetMap)经上述类似处理绘制了路网密度图。

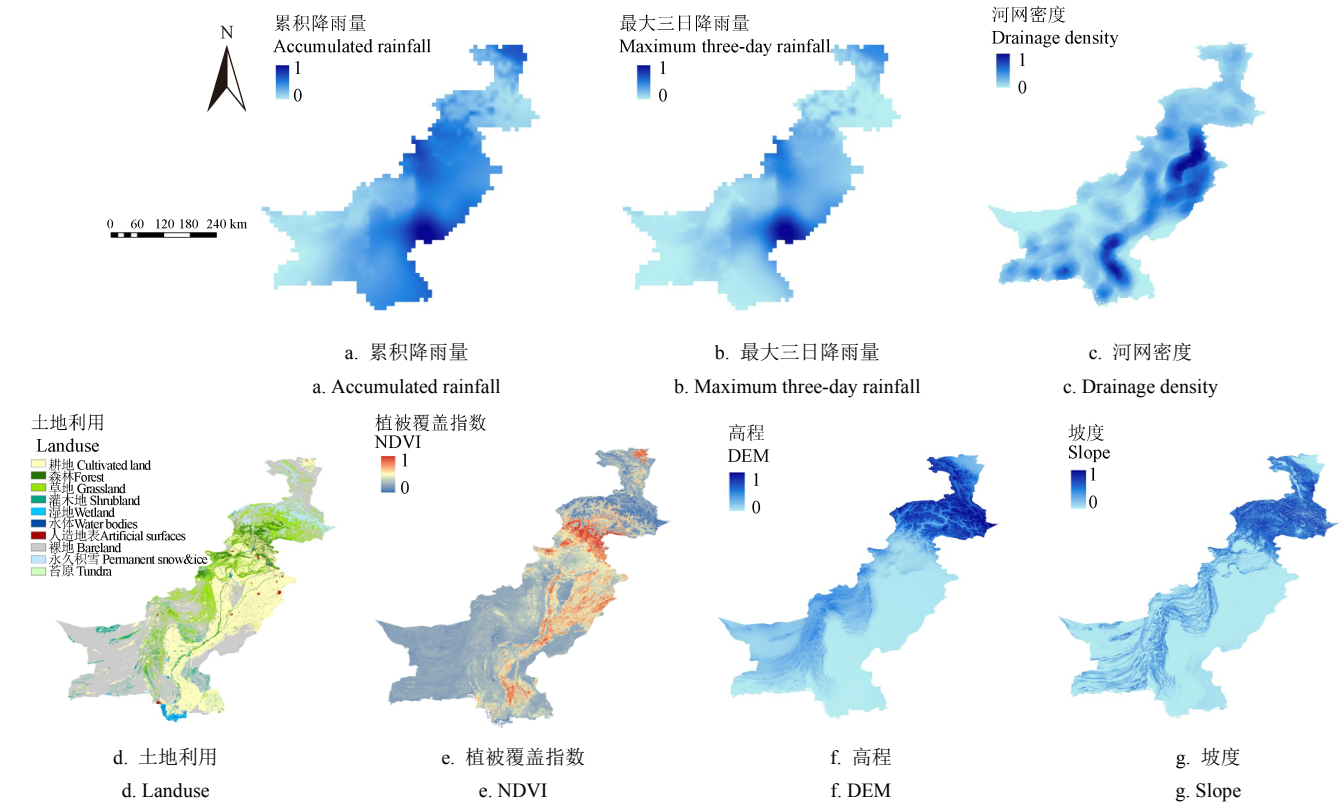
需要指出,在小区域内经常由河道水位与住户地坪高程的对比关系可判断是否成灾,但对于缺乏实测数据的较大区域并不太适用。参考陈华丽等<sup>[27]</sup>在基于GIS的区域洪水灾害评价当中采用的综合风险评价指标体系的

方式在宏观上进行区域风险图的划分,并未进行河道水位与住户地坪高程的对比也得到了精准的分区统计效果。对于整个CPEC而言区域较大,相应数据不好获得或者精准度不足,故本文DEM精度仍选为30m分辨率。

## 2 结果与分析

### 2.1 危险性指标分析

按照所收集和处理好后的中巴经济走廊的数据,对研究区内的危险性与易损性指标进行分析,所有数据均经过归一化处理,结果见图3和图4。



注:图中指标均经过归一化处理。下同。  
Note: Indexes in the figure are all normalized. The same below.

图3 危险性评价指标空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of risk assessment indexes

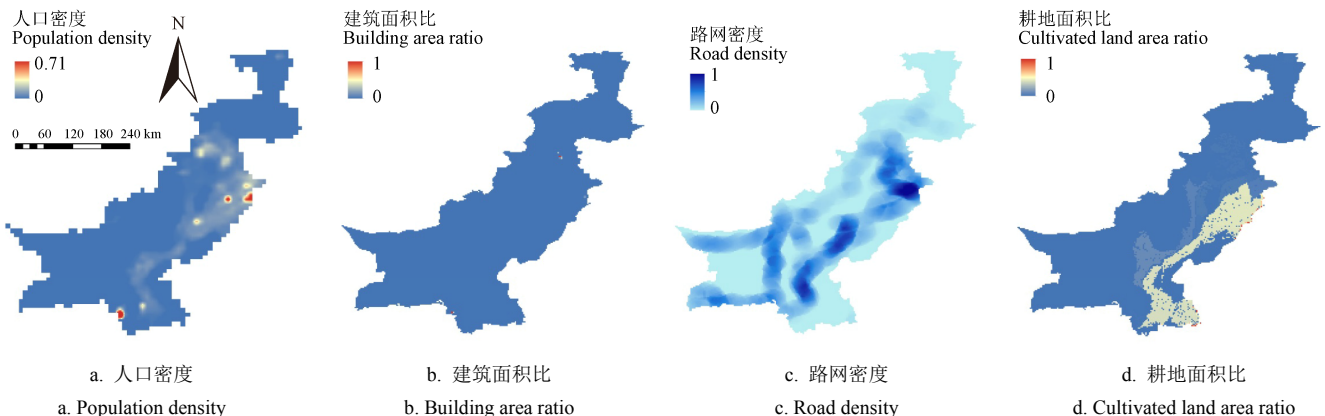


图4 易损性评价指标分空间分布  
Fig.4 Spatial distribution of vulnerability evaluation indexes

降雨是洪水灾害当中最为重要的致灾因子。此次研究选用了2010年的百年一遇降水资料,对其造成的特大

洪水进行风险划分;同时采用了1990和2000年的降水资料进行危险性评价等级区划的对比;选用2010年7月

27 日—8 月 12 日的格点降雨数据, 通过雨量叠加等方法得到相应的累积降雨量以及最大三日降雨量, 如图 3a 和图 3b 所示。考虑河网和土地利用数据对洪灾的重要影响<sup>[28-29]</sup>, 分析得到研究区河网密度数据 (图 3c) 和土地利用数据 (图 3d); 数据处理后得到的无洼 DEM 数据以及坡度数据分别如图 3f 和图 3g 所示。

由图 3a 和图 3b 可见, 累积降雨量在北部山区、旁遮普与信德省交界的南部地带较大, 总体呈现西部少、东部多的趋势, 这一现象主要出现在季风季节, 可能是由于巴基斯坦季风性强降雨引起的。总体来说, 最大三日降雨与累积降雨量分布基本一致, 降雨致灾危险性呈现出东部地区高于西部地区的特点。由图 3c 可以看到河网密度呈现中部东部南部大、西部少的趋势, 这也与前述区域特性基本相符。由图 3d 可以看出耕地及人工地表主要分布在沿河平原, 洪灾危险性在该地区突出。图 3e 中植被主要分布在中部平原区和印度河两岸, 植被越丰富, 相比较而言根系涵水能力越强, 则发生洪灾的可能性越小。根据图 3f 和图 3g, 中巴经济走廊海拔较高和地形变化较大的地区主要集中在西北部, 东南部海拔较低、地形变化较小, 地势较为平坦。总体上地形致灾危险性呈现出东南部地区高于西北部地区的特点。

洪水灾害的易损性评价是据场次洪水对承灾体所造成的损失来估量的, 选用了人口密度、路网密度、耕地面积比和建筑物面积比为易损性的主要评价指标。由图 4 可知, 人口主要集中在印度河流域和旁遮普平原附近, 这也是洪水发生的主要区域以及会造成严重人口伤亡的原因之一; 建筑在整个区域内显示不明显, 但在巴基斯坦的首都伊斯兰堡零星分布; 路网主要分布在研究区的东部平原、东南部地区, 该分布情况与人口分布状态大致吻合; 从土地利用数据中提取耕地部分的数据并经过栅格叠加计算得到耕地面积比, 耕地主要分布在旁遮普平原即五水汇流的地区和人口密度大的地区。

2.2 指标权重

累积降雨量、最大三日降雨量、河网、高程、坡度、土地利用等 6 个危险性评价指标的权重见表 2。

表 2 不同赋权法下的指标权重对比

Table 2 Comparison of index weights under different weighting methods

指标 Index	IFAHP	CRITIC	ICWGT
累积降雨量 Accumulated rainfall	0.217	0.162	0.190
最大三日降雨量 Maximum three-day rainfall	0.136	0.161	0.148
河网密度 Drainage density	0.208	0.222	0.215
高程 DEM	0.170	0.146	0.158
坡度 Slope	0.158	0.154	0.156
土地利用 Landuse	0.054	0.074	0.062
植被覆盖指数 NDVI	0.058	0.082	0.071

注: IFAHP 为直觉模糊层次分析; CRITIC 为基于指标相关性的权重确定方法; ICWGT 为改进的博弈论组合赋权。下同。

Note: IFAHP is Intuitionistic Fuzzy Analytic Hierarchy Process; CRITIC is Criteria Importance Though Intercriteria Correlation; ICWGT is Improved Combination Weighting Method of Game Theory. The same below.

在利用改进博弈论计算的权重指标当中, 累积降雨量和最大三日降雨量二者权重总占比 0.338, 占据较大比例; 在历史洪水调查中, 降水指标作为致灾因子对于洪水起到了决定性作用, 另据风险图统计也可见降雨指标在洪灾风险图里表现明显; 地形因素高程 (DEM) 和坡度的影响是形成径流的产流条件, 二者总权重占比 0.314; 与此类似, 河网密度指标也占据较大比例, 这指标权重都体现了其合理性。总的来说, 改进博弈论法中充分考虑了主观权重和客观权重的差异, 如其累积降雨量、最大三日降雨量等权重表现了 IFAHP 和 CRITIC 两者权重兼顾的特征。改进后的权重使得指标主观赋值适当削减, 客观信息量赋值相应增加, 即改进的博弈论组合赋权在主客观赋值趋于平衡点而达到最优赋权目的。

2.3 评价结果验证

为对最严重情况下的洪灾风险进行评价, 利用自然间断的分类标准对百年一遇情况下的研究区的风险等级大小进行了相应划分。以 IFAHP 方法为参照, 与改进博弈论方法得到的评价结果进行对比 (图 5)。在改进博弈论法的结果中, 低风险和中低风险以及高风险区的面积有些许上升, 极端风险区有扩大趋势, 更符合百年一遇洪灾风险分区特点, 显示了该法对洪灾风险有更为准确的描述。从图 5a 和图 5b 的比较中可见, 旁遮普平原区 (人口分布集中且是著名的粮食产区) 的风险划分更为精细和具体, 显示了更多的风险等级, 因此能提供更多防灾减灾信息。统计得到各个等级风险分区的面积 (表 3), 给出了在百年一遇情况下可能遭受不同等级洪水风险的具体面积大小, 中高和高风险区累积面积占比为 28.5%。

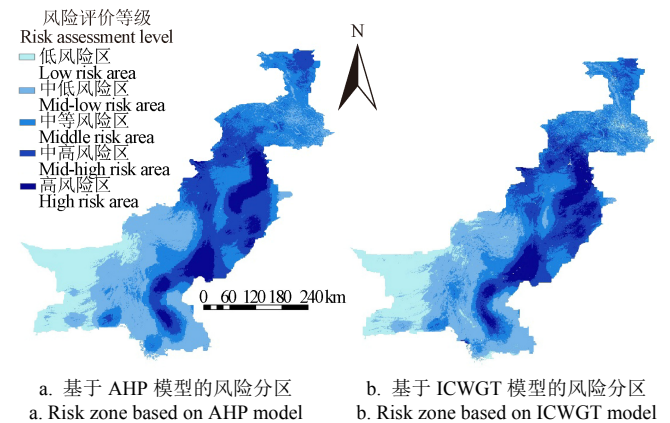


Fig.5 Risk zone of two different models

表 3 各风险等级分区面积比较

Table 3 Comparison of zoning areas of each risk level

风险等级 Risk level	面积 Area/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>		占比 Proportion/%	
	IFAHP	ICWGT	IFAHP	ICWGT
低 Low	13.33	13.47	14.79	14.94
中低 Medium-low	26.16	26.37	29.03	29.26
中等 Medium	24.73	24.60	27.43	27.29
中高 Medium-high	19.08	18.05	21.17	20.02
高 High	6.84	7.64	7.58	8.48

为进一步验证改进博弈论法的评价结果，将洪水危险性评价结果与 2010 年巴基斯坦洪水实际受灾调查情况进行对比（表 4），该数据来源于 OCHA 统计的 2010 年 8 月份实际洪灾影响范围及损失数据。

表 4 洪水评价结果与实际洪水面积比较

Table 4 Comparison between flood assessment results and actual flood areas

地区 Region	风险等级组合值 Risk level portfolio value	实际洪水面积 Actual flood area/ 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>
信德省 Sindh	4.38	3.93
旁遮普省 Punjab	4.07	6.14
联邦首都区 F.C.T.	3.89	1.53
联邦直辖部落 F.A.T.A.	3.23	0.20
俾路支省 Baluchistan	1.96	1.22
开伯尔-普赫图赫瓦省 N.W.F.P.	2.76	1.79
阿扎德克什米尔 Azad Kashmir	3.45	0.13
北部地区 Northern Areas	1.89	0
走廊中国区域 China Region	2.13	0

不同风险区的划分等级描述为高、中高、中等、中低、低等五类风险区，由于这种分类难以直接与面积进行比较，为此对等级分别赋为 5、4、3、2、1 以后进行加权，统计得到出各地区风险等级和洪水面积（洪水面积共 14.9 万 km<sup>2</sup>）；对风险等级组合值与实际洪水面积值求取相关系数为 0.66，说明评价结果与实际受灾情况基本一致，也说明该评价指标赋权具有较强合理性。空间分布结果表明，风险高的区域皆是地形变化小，降雨集中河网密布且人口密集区域，这也说明评价结果可靠。

### 2.4 洪灾风险演变

在洪水风险分析的过程当中，降水是最为重要的驱动因素。按照以往的研究，人们会更多地关注该区域的干旱性特征，而关于极端降水的探究较少，中巴经济走廊地区又是洪灾的高发区域，人口经济分布集中，一旦发生洪水泛滥则会造造成严重损失，鉴于近些年来洪水发生频率不断攀升，本文对降雨要素进行分析给出洪灾风险演变的定量结果。据历史降雨数据，1990 年雨季较大范围降雨过程最长持续了 13 d，2000 年则为 8 d。与 2000 年相比，1990 年降雨范围小，但强度大且持续时间更长，因而 1990 年的洪灾危险更大。2010 年发生特大暴雨且持续时间长引发了百年一遇洪水，为这三个年份之最。在危险性评价图（图 6a~图 6c）中也可以对比分析得到和降雨因子分布变化相同的趋势，统计的分区面积（表 5）可见，2010 年危险性高的区域范围在扩大，洪灾引起的危险趋势也在扩大，并由旁遮普省北侧区域不断延伸。

表 5 不同年份危险性评价分区面积统计

Table 5 Area statistics of risk assessment areas in different years /10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>

危险性等级 Risk level	1990	2000	2010
低 Low	29.49	31.33	13.99
中低 Medium-low	22.86	23.48	24.76
中等 Medium	20.06	22.35	23.09
中高 Medium-high	16.73	11.58	21.84
高 High	3.24	3.65	8.65

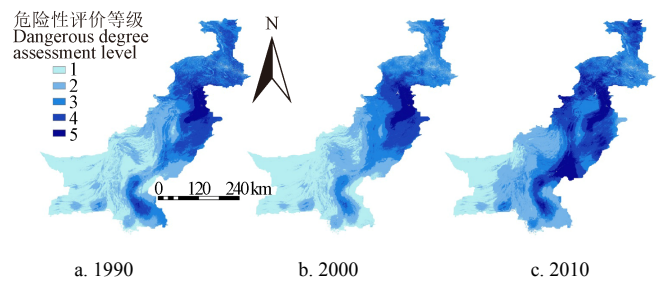


图 6 不同年份危险性对比分析

Fig.6 Comparative analysis of risk degree in different years

### 2.5 高低情景下洪灾风险对比

为描述不同重现期洪水的灾害风险，依据上文提及的不同典型情景的选择方式，从 2011 年 8 月 29 日—9 月 7 日的降水过程中提取相应的最大三日降雨和累积降雨指标，经过计算得到 20 a 重现期下的风险评价指标分区（图 7a）。

两种不同设计洪水的风险分区存在着分区面积及空间分布上的差异（图 7），但总体的分区趋势一致。相比于 2010 年百年一遇洪水过程，在 2011 年洪灾风险分区当中，低风险区面积增加了 4.09 万 km<sup>2</sup>，中低风险区面积增加了 3.22 万 km<sup>2</sup>，中等风险区面积增加了 0.83 万 km<sup>2</sup>，中高风险区面积减少了 4.12 万 km<sup>2</sup>，高风险区面积减少了 2.80 万 km<sup>2</sup>。从空间上来看，低、中低风险区面积的增加地区主要为俾路支省西北部山区、联邦直辖部落地区（F.A.T.A）、西北部边境（N.W.F.P）南部地区，中等风险区面积增加较少地区大多在信德省与俾路支省南部交界地带，2011 年该地区遭遇的强降雨所带来的洪水淹没风险要大于从印度河干流下泄的洪水波所造成的洪灾风险。中高、高等洪灾风险区面积减少地区集中在西北部边境的南部区域与旁遮普省份东部。2011 年季风期在西北部边境、印度河主干流区未发生持续性的强降雨，因而风险区等级在此时发生下降。

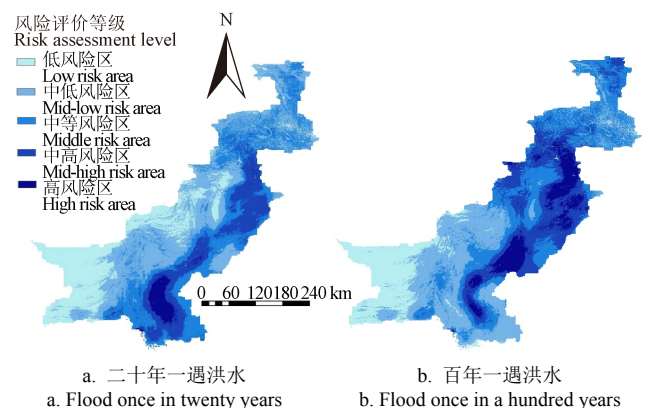


图 7 不同重现期下洪灾风险分区

Fig.7 Flood risk zoning under different return periods

## 3 讨论

本文在原有土地利用的基础上加入 NDVI 植被指标，可以较好地表征植被生长程度，由此得到的洪灾评价结果也表现较好。目前，针对高分辨率的数字高程模型进行的洪灾风险评估越来越常见，据此可以得到更准确的反映洪水灾害风险的空间分布，但对 DEM 的精度作用还



需要进一步探讨。在本文中,研究区面积为 93.2 万 km<sup>2</sup> 而地形坡度的衰减效应多数出现在小范围区域内分辨率较低的情况,由此 30m 的分辨率符合大区域的地理数据采用准则,且地形坡度衰减效应可忽略不计;另外,洪灾评价主要是通过主客观的赋值计算得到相应权重,且实际高程数据经过了填洼处理并提取了相应的坡度数据作为评价指标,也有效消除坡度衰减效应。这些都有助于风险评价中得到较符合的风险等级。

需要指出的是,实际洪水面积与风险等级间并不一定存在非常好的对应关系,故只能将二者匹配结果作为参考。同时,风险本质上是刻画未来损失的可能性,在现实中难以找到绝对的指标对风险进行度量与验证,也就无法客观上对风险模型评估的结果进行绝对的验证<sup>[2]</sup>。因此,本研究参考了李晓萌等研究<sup>[30]</sup>中对该区的洪灾危险性的可视化表达予以佐证。本文所设计的主客观权重相结合方法也具有较好的合理性,一些改进组合赋权方法在防洪保护区的风险评价中也取得了较好结果<sup>[31]</sup>,这也说明考虑主观、客观权重后的结果具有可靠性;前述比较验证结果也表明本文研究对评价指标的权重大小进行的改进能有效消除主客观影响,不仅能获得贴近实际洪水过程的评价等级,而且可以得到精细的风险区划结果。

本文还突出了地形与降雨因子在风险评价当中的重要作用,同时从组合系数的非负约束出发提出的改进博弈论模拟方法,由此相比简单组合赋权法更具科学性和更广泛的应用前景。但本文也尚未具体考虑水利工程要素影响,而仅将其归类在土地利用分类当中,这可能会造成相应的误差,例如分蓄洪工程可降低整个防洪系统洪灾风险。这些还有待于进一步细化各评价因子的作用,进行深入研究探讨。

## 4 结 论

1) 结合直觉模糊层次分析和基于指标相关性的权重确定方法 (Criteria Importance Though Intercriteria Correlation, CRITIC) 通过改进的博弈论组合赋权方法构建了基于气象地理和社会经济指标为主体的风险评价体系,在一定程度上削减了主观因素影响,并调整了客观权重,实现了有约束下组合权重寻优计算。

2) 通过选取 2010 年百年一遇洪水数据,绘制洪水灾害危险性与风险评价图,并对危险性进行分区。评价结果表明,研究区洪水风险较高的地区因该地区地势海拔较低,河网密集,主要分布在旁遮普省的南部和信德省东南部。中高和高风险区累计占比 28.5%,经验证基本为淹没范围大且人口经济分布密区域,与实际情况相符。

3) 以降雨要素分析开展的洪灾风险演变研究表明,在降雨强度大、面积广以及持续时间长的情况下洪灾危险分区会发生变化,其中中高、高风险区范围明显扩大。

本文所提出的中巴经济走廊洪灾风险评价方法及洪灾风险分区结果能够为该区建设提供理论参考和决策支持。此外,有必要继续考虑如水利工程、堤防、植被等因素影响进一步精细化风险评价。

## [参 考 文 献]

- [1] Blöschl G, Kiss A, Viglione A, et al. Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years[J]. *Nature*, 2020, 583(7817): 560-566.
- [2] 方建, 李梦婕, 王静爱, 等. 全球暴雨洪水灾害风险评估与制图[J]. *自然灾害学报*, 2015, 24(1): 1-8.  
Fang Jian, Li Mengjie, J, Wang Jing'ai, et al. Assessment and mapping of global fluvial flood risk[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [3] 杨乐婵, 邓松, 徐建辉. 基于 BP 网络的洪灾风险评价算法[J]. *计算机技术与发展*, 2010, 20(4): 232-234.  
Yang Lechan, Deng Song, Xu Jianhui. Flood risk evaluation algorithm on BP net[J]. *Computer Technology and Development*, 2010, 20(4): 232-234. (in Chinese with English abstract)
- [4] 黄建平, 冉津江, 季明霞. 中国干旱半干旱区洪涝灾害的初步分析[J]. *气象学报*, 2014, 72(6): 1096-1107.  
Huang Jianping, Ran Jinjiang, Ji Mingxia. Preliminary analysis of the flood disaster over the arid and semi-arid regions in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(6), 1096-1107. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王栋, 潘少明, 吴吉春, 等. 洪水风险分析近十年研究进展[A]//第五届尖端科学研讨会论文(摘要)集[C]. 南京大学: 南京大学科学技术处, 2004: 5.
- [6] 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(6): 110-114.  
Liu Jiafu, Li Jing, Liu Jin, 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): 110-114. (in Chinese with English abstract)
- [7] 傅春, 张强. 基于 GIS 空间信息单元格的区域洪灾损失快速评估模型[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2008, 30(2): 193-196.  
Fu Chun, Zhang Qiang. Regional flood disaster losses assessment of Poyang Lake area based on GIS spatial information cells[J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology Edition)*, 2008, 30(2): 193-196. (in Chinese with English abstract)
- [8] 任玉峰, 刘国东, 周理, 等. 基于证据理论和可变模糊集的成都市洪灾风险评估[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 147-156.  
Ren Yufeng, Liu Guodong, Zhou Li, et al. Risk evaluation of Chengdu's flood hazard based on evidence theory and variable fuzzy sets theory[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(21): 147-156. (in Chinese with English abstract)
- [9] 金菊良, 王银堂, 魏一鸣, 等. 洪水灾害风险管理广义熵智能分析的理论框架[J]. *水科学进展*, 2009, 20(6): 894-900.  
Jin Juliang, Wang Yintang, Wei Yiming, et al. Theoretical analysis frame based on general entropy and intelligence integration methodology for flood disaster risk management[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(6): 894-900.



- 894-900. (in Chinese with English abstract)
- [10] 邹强, 周建中, 周超, 等. 基于可变模糊集理论的洪水灾害风险分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 126-132.  
Zou Qiang, Zhou Jianzhong, Zhou Chao, et al. Flood disaster risk analysis based on variable fuzzy sets theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 126-132. (in Chinese with English abstract)
- [11] 邹强, 周建中, 周超, 等. 基于最大熵原理和属性区间识别理论的洪水灾害风险分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 323-333.  
Zou Qiang, Zhou Jianzhong, Zhou C, et al. Flood disaster risk analysis based on principle of maximum entropy and attribute interval recognition theory[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 323-333. (in Chinese with English abstract)
- [12] Lai C G, Chen X H, Chen X Y, et al. A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory[J]. Natural Hazards, 2015, 77(2): 1243-1259.
- [13] 路遥, 徐林荣, 陈舒阳, 等. 基于博弈论组合赋权的泥石流流危险度评价[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 194-200.  
Lu Yao, Xu Linrong, Chen Shuyang, et al. Combined weight method based on game theory for debris flow hazard risk assessment[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 194-200. (in Chinese with English abstract)
- [14] Charles S P, Wang Q J, Ahmad M D, et al. Seasonal streamflow forecasting in the upper Indus Basin of Pakistan: An assessment of methods[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(6): 3533-3549.
- [15] Abbas A, Khan S, Hussain N, et al. Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2013(55-57): 43-52.
- [16] 颜峻, 左哲. 自然灾害风险评估指标体系及方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(11): 61-65.  
Yan Jun, Zuo Zhe. Research on natural disaster risk assessment index system and method[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(11): 61-65. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李阔, 唐川. 泥石流危险性评价研究进展[J]. 灾害学, 2007(1):106-111.  
Li Kuo, Tang Chuan. Progress in research on debris flow hazard assessment[J]. Journal of Catastrophology, 2007(1):106-111. (in Chinese with English abstract)
- [18] 朱静. 城市山洪灾害风险评价: 以云南省文山县城为例[J]. 地理研究, 2010, 29(4): 655-664.  
Zhu Jing. Urban flash-flood risk assessment: A case study in Wenshan City, Yunnan[J]. Geographical Research, 2010, 29(4): 655-664. (in Chinese with English abstract)
- [19] 中国水科院巴基斯坦考察团. 巴基斯坦 2010 年水灾考察报告[J]. 中国防汛抗旱, 2011, 21(3): 71-73.  
Pakistan Delegation from Chinese Academy of Water Sciences. Pakistan 2010 flood investigation report[J]. China Flood & Drought Management, 2011, 21(3): 71-73. (in Chinese with English abstract)
- [20] Jongman B, Aerts J, van Aalst J, et al. Declining vulnerability to river floods and the global benefits of adaptation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(18): 2271-2280.
- [21] Sadiq R, Tesfamariam S. Environmental decision-making under uncertainty using intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process (IF-AHP)[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2009, 23(1): 75-91.
- [22] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method[J]. Computers and Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [23] 任丽超, 栗振锋. 基于博弈论和模糊数学的桥梁风险评价模型[J]. 公路工程, 2017, 42(1): 163-169.  
Ren Lichao, Li Zhenfeng. A new model based on the games theory and fuzzy mathematics in bridge engineering risk assessment[J]. Highway Engineering, 2017,42(1): 163-169. (in Chinese with English abstract)
- [24] 甘蓉, 宣昊, 刘国东, 等. 基于博弈论综合权重的物元可拓模型在地下水质量评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 40-42.  
Gan Rong, Xuan Hao, Liu Guodong, et al. Application of weighted matter-element extension based game theory in groundwater quality evaluation[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(1): 40-42. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李爱华. 岸边集装箱起重机安全评价方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.  
Li Aihua. Research on Safety Assessment Methods of Quayside Container Crane[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王应明. 多指标决策与评价的新方法-投影法[J]. 统计与决策, 1998(4): 7-8.  
Wang Yingming. A new method of multi-index decision-making and evaluation-projection method[J]. Statistics and Decision, 1998(4): 7-8. (in Chinese with English abstract)
- [27] 陈华丽, 陈刚, 丁国平. 基于 GIS 的区域洪水灾害风险评价[J]. 人民长江, 2003, 33(6): 49-51.  
Chen Huali, Chen Gang, Ding Guoping. Risk assessment of regional flood disaster based on GIS[J]. Yangtze River, 2003, 33(6): 49-51. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘荆, 蒋卫国, 杜培军, 等. 基于相关分析的淮河流域暴雨灾害风险评估[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(5): 735-740.  
Liu Jin, Jiang Weiguo, Du Peijun, et al. Rainstorm risk assessment of Huaihe River based on correlation analysis[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(5): 735-740. (in Chinese with English abstract)
- [29] 曾光明, 王亚梅, 李忠武. 洞庭湖土地利用/覆被变化及洪涝灾害研究进展[J]. 四川环境, 2009, 28(5): 62-66, 74..  
Zeng Guangming, Wang Yamei, Li Zhongwu. Research progresses on land use and land cover change as well as flood disaster of Dongting Lake[J]. Sichuan Environment, 2009, 28(5): 62-66, 74. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李晓萌, 马玥, 孙永华, 等. 基于格网的洪水灾害危险性评价分析——以巴基斯坦为例[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(2): 314-320.

- Li Xiaomeng, Ma Yue, Sun Yonghua, et al. Flood hazard assessment in Pakistan at grid scale[J]. *Geo-Information Science*, 2013, 15(2): 314-320. (in Chinese with English abstract)
- [31] 潘汀超, 戚蓝, 田福昌, 等. 组合赋权-模糊聚类算法的改进及其在洪灾风险评估的应用[J]. *南水北调与水利科技* (中英文), 2020, 18(5): 38-56.
- Pan Tingchao, Qi Lan, Tian Fuchang, et al. Improvement of combination weighting-fuzzy clustering algorithm and its application in flood risk assessment[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(5): 38-56. (in Chinese with English abstract)

## Evaluation of flood disaster risk in China-Pakistan Economic Corridor by combination weighting based on improved game theory and grid data

Wu Ruiying<sup>1</sup>, Sun Huaiwei<sup>1\*</sup>, Yan Dong<sup>1</sup>, Tao Hui<sup>2</sup>, Liao Weihong<sup>3</sup>, Chen Haorui<sup>3</sup>, Gui Dongwei<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geology, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The China-Pakistan Economic Corridor (CPEC) is a pilot and key area of China's "One Belt and One Road" Initiative. Achieving accurate and reliable flood risk assessment in this region was a key issue. Based on the daily precipitation data set in the  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  grid data set (V1) of the China-Pakistan Economic Corridor, an evaluation index system composed of multiple variables was constructed by comprehensively considering the disaster causing factors, disaster environment, and disaster bearing body, etc. This study proposed an improved game theory coupled with the subjective weight of intuitionistic fuzzy hierarchy analysis and the objective weight based on the index Correlation (Criteria Importance Through Intercrieria Correlation, CRITIC), which can be used to calculate the optimal combination weight. Taking the CPEC as a typical research area to conduct a case study of flood risk assessment and research on its interdecadal evolution characteristics. A case study of flood risk assessment was carried out, and its interdecadal evolution characteristics were studied. At the same time, it has strengthened the research on the index system of risk assessment in the CPEC and the construction of the weight model. In order to obtain theoretical reference and decision support for sustainable development and infrastructure construction in key areas and provided effective information for flood disaster forecasting. The results showed that: 1) By the improved model, the extreme zones of floods were continuously enlarged, and the description of their distribution was more refined and perfect. The flood area calculated in 2010 was  $14.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ , and the correlated coefficient between the calculated flood area and the actual flood area was 0.66. The flood risk assessment method developed was reasonable and reliable, and the evaluation results were basically in line with the actual flood in Pakistan in 2010. 2) The flood risk was greatly affected by precipitation and topography, and the spatial distribution of the flood risk degree was greater in the southeast than in the northwest in CPEC. 3) Medium and high-risk areas accounted for 28.5% of the study area, mainly the areas with small topographic changes, dense river network, and concentrated population distribution, which indicates the attention should be paid to the impact and harm of floods on social and economic development in CPEC. 4) The region's high-risk areas of flood disasters expanded with the interdecadal changes from 1990 to 2010. Changes in the degree of risk over time could be obtained by comparing these results. Among them, rainfall was the most obvious influence factor. Its intensity range and duration were important and played a decisive role in the possibility of flood disasters. Under the conditions of large intensity, wide area, and long duration, flood risk zones of flood disasters will change. The most obvious was the expansion of medium-high and high-risk areas. 5) There were some differences in the scope of flood risk zones in different return periods, but the overall risk trend was consistent. Compared with the high scenario (once in 100 years), the scope of low and medium low-risk areas increased significantly, the scope of medium risk areas expanded slightly, and the area of medium-high and high-risk areas decreased. The decreased areas were mainly distributed in the southern region of the northwest border and eastern Punjab Province. Therefore, it can be concluded that the combined weight assignment based on the improved game theory has realized the optimization calculation of the combination weight under the unit constraint, and the index weight assignment is more scientific and reasonable.

**Keywords:** precipitation; risk assessment; flood disaster; China-Pakistan Economic Corridor; game theory