

# 江苏省洪涝灾情及风险的时空分析

梅玉琳, 吉中会

(南京信息工程大学 管理工程学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:**采用灰色关联分析, 计算全省各市 2011—2017 年洪涝灾情指数; 运用熵权法估算洪涝风险指标权重, 评估各市 2005—2018 年综合洪涝风险。主要结果表明: 选取的灾情指标能有效地反映区域洪涝灾情, 扬州是全省历史灾情较为严重的城市, 全省大部分城市在 2012 年和 2015 年的灾情指数较高, 2016 年苏南和苏中的灾情较严重; 各市在 2014 年之前洪灾风险较小, 波动也较小, 而 2014 年之后风险增加显著, 主要由降水因素变化导致; 相对高风险区在空间上呈现由北向南, 由海向内陆转移的趋势。

**关键词:**洪涝; 灰色关联分析; 灾情; 风险

**中图分类号:** P954

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0852(2022)01-0097-06

## 0 引言

江苏省因地处中纬度的海陆相过渡带和气候过渡带, 兼受西风带、副热带和低纬东风带天气系统的影响, 气象灾害频发, 影响面广, 洪涝灾害是其最主要的灾种之一。洪涝灾害研究涵盖江苏地区主要集中在长江流域<sup>[1]</sup>、淮河流域, 以及里下河平原<sup>[2-3]</sup>。如葛云健等分析了自公元 237 年以来江苏历史洪涝灾害的时空格局<sup>[4]</sup>; Sun 等通过对长江流域三省一市(江苏、安徽、浙江及上海)洪涝风险比较, 发现江苏风险最高<sup>[5]</sup>。因此, 有必要深入分析江苏省近年来洪涝灾害的时空变化特征, 对区域社会经济发展以及开展防洪抗灾工作具有现实意义。

洪涝灾情需考虑人员伤亡和财产损失等因素, 风险分析则需综合考虑致灾因子、孕灾环境、承灾体脆弱性和防灾减灾能力等方面, 因而涌现了大量多因子综合方法, 其核心在于因子权重的确定<sup>[6]</sup>。相关方法在应用中各有优缺点, 例如, 层析分析法的权重具有人为主观性<sup>[6]</sup>; 模糊理论通过模糊集将不确定性信息进行量化, 但结果一般用等级表达<sup>[7]</sup>; 主成分分析可以遴选出对因变量产生影响的主要成分, 但是降维过程使得主

成分的解释带有模糊性<sup>[8]</sup>。灰色系统是指部分信息已知而部分信息未知的系统, 目前灰色系统理论已经广泛应用于“小样本”“贫信息”的不确定性系统<sup>[9]</sup>。我国洪涝灾情数据较为不足, 可以认为洪涝灾情研究属于小样本不确定性系统问题, 因此本文通过灰色关联模型, 探索灾情系统各因子之间的关系。熵值法可以根据指标的变异程度确定指标权重, 是多指标综合评价的客观方法, 因此本文利用熵值法确定洪灾风险各指标权重。

## 1 研究区概况

江苏省地处长江中下游平原, 河网密布, 地表水资源丰富, 水域面积占全省面积的 16.8%(见图 1), 降水多集中在夏季, 同时受梅雨季节和长江汛期的影响, 出现大旱大涝的机率很高。

## 2 资料与方法

首先构建灾情指标体系, 基于灰色关联模型计算各市洪涝灾情指数; 再考虑致灾因子、孕灾环境, 及承灾体脆弱性和防灾减灾能力, 采用综合指数法评估风险指数; 最后对各市的灾情和风险进行分析。

收稿日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41501555, 91546117); 国家社科基金重大项目(16ZDA047)

作者简介: 梅玉琳(1998-), 女, 江苏泰州人, 助理工程师, 主要研究方向为气象灾害风险管理。E-mail: analyticservice.net

通讯作者: 吉中会(1984-), 女, 江苏盐城人, 讲师, 博士, 主要研究方向为灾害风险评估与管理。E-mail: zhonghuiji@nuist.edu.cn

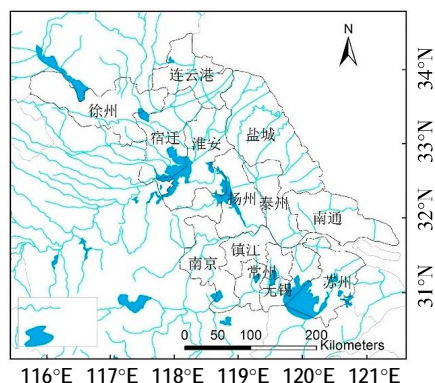


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

## 2.1 指标选取及数据来源

### 2.1.1 灾情指数的因子选取

洪灾发生会对农业、生命财产及经济产生显著影响,因此将农作物受灾面积、受灾人口、转移人口、倒塌房屋和直接经济损失五个方面作为衡量暴雨洪涝灾情的指标,构建洪涝灾情指数。由于部分灾情统计数据缺失,研究时间序列为2011—2017年,数据来源于2012—2018年《江苏水利年鉴》。

### 2.1.2 风险评估的指标选取

根据现代自然灾害风险理论,洪灾风险由致灾因子、孕灾环境,及承灾体脆弱性和防灾减灾能力等组成<sup>[9]</sup>。降水是引发洪涝的直接因素,考虑到江苏暴雨洪涝集中在6—8月,单日强降水、持续性降水均有可能引发洪涝,因此选择6—8月降水量、最大单日降水量、总降水量、降雨天数4个指标作为致灾因子。

江苏整体地势低平,水网密集,虽地表水资源丰富,但年内分配不均,水位变化幅度大易导致洪涝;近年来建成区和园林绿化面积不断提高,对缓解洪涝具有一定作用。因此,选择海拔高程、建成区绿化覆盖面积、园林绿化面积、地表水资源量作为孕灾环境指标。

此外,经济发达、人口稠密、耕地面积大的地区,洪灾脆弱性高<sup>[10]</sup>,因此选取常住人口数、土地面积、第一产业增加值比重、地区GDP作为承灾体脆弱性指标。灾害的预防和监测、工程和非工程性防御措施,以及应急管理能够体现防灾救灾能力<sup>[12]</sup>。公共财政预算包括抗洪救灾、建设防洪工程等的预算;卫生机构床位数是突发洪涝灾害时收治受伤群众的医疗资源的衡量<sup>[13]</sup>,因此,将这两者作为抗灾救灾能力的指标。

根据以上四个方面所涉及的指标,构建洪灾风险

评估的指标体系,求算风险指数。除气象数据来自江苏各市县统计年鉴,其余均来自于江苏各地级市统计年鉴(2006—2019年)。

## 2.2 研究方法

灰色关联分析是基于灰色系统理论的一种多因素综合评价方法,对样本数量没有过多要求,且计算量小<sup>[9]</sup>,比较适合数据量相对较少的灾情分析。它通过分析参考序列与比较序列各点间的距离来判定各序列之间的差异性,根据序列曲线的相似程度来判断序列间的关联程度,依据关联程度求算各灾情指标权重,结合归一化指标值,获取综合灾情指数。本文根据灰色关联分析方法,首先利用五个灾情指标数据构建参考序列;由于指标值越大,灾情越严重,因此选择各指标中的最大值构成比较序列;采用均值变换对数据进行处理,以消除指标量纲的影响,将计算的各指标关联度作为对灾情影响的权重;最后将权重归一化处理,计算综合灾情指数,计算步骤参考文献<sup>[14]</sup>。

熵值法通过熵值来判断指标的离散程度,离散程度越大,说明该指标对综合评价的影响越大<sup>[15]</sup>,权重确定依赖于数据本身,能规避人为主观判定的不确定性。因此,采用熵值法确定综合风险中各指标权重<sup>[16]</sup>。根据致灾因子、孕灾环境、承灾体脆弱性以及防灾减灾能力等四个方面(一级指标)及其涉及的各个二级指标构建风险评估指标体系进行综合风险评估,计算公式参考文献<sup>[17]</sup>。

## 3 结果分析

### 3.1 洪涝灾情指数的时空分析

考虑到最严重灾情往往对区域发展的影响最为突出,因此将其作为标准(比较序列),通过灰色关联分析计算各市各灾情指标值与最严重灾情(各指标最大值)的关联程度,关联程度越高,说明该指标越能反映灾情,权重越大。

表1显示,各灾情指标值与最大灾情之间的关联度均较高(0.71~0.88),说明选取的灾情指标是有效的。农作物受灾面积、受灾人口和转移人口均出现了最大值,说明这三个指标能更好表征灾情。

将关联度标准化处理作为各灾情指标权重,计算得到各市洪涝的灾情指数(见图2)。可以看出,近年来扬州洪涝灾情较其他城市更高;大部分城市2012和2015年的灾情指数较高,尤其是扬州2015年和连云港2012年的灾情最为严重;2016年苏南和苏中地区

表1 江苏省各市灾情关联度  
Table1 Disaster correlation degree of cities in Jiangsu Province

城市	农作物受灾面积	受灾人口	转移人口	倒塌房屋	直接经济损失
南京	0.828	0.784	0.764	0.766	0.820
苏州	0.769	0.760	0.767	0.739	0.742
无锡	0.77	0.747	0.882	0.786	0.877
常州	0.785	0.798	0.783	0.781	0.787
南通	0.762	0.746	0.761	0.730	0.714
镇江	0.875	0.766	0.825	0.766	0.792
扬州	0.797	0.808	0.81	0.792	0.778
泰州	0.798	0.817	0.771	0.771	0.785
盐城	0.792	0.798	0.843	0.787	0.795
淮安	0.804	0.855	—	0.806	0.787
徐州	0.815	0.739	0.771	—	0.776
宿迁	0.859	0.862	0.736	0.736	0.778
连云港	0.799	0.852	0.811	0.811	0.789

注:“—”表示统计时段内的数据为 0。

的灾情较严重,其中泰州灾情指数最高。从总体上看,苏中地区灾情高于苏南和苏北地区。

3.2 洪灾风险指数分析

3.2.1 时间序列分析

根据洪涝灾害风险评估指标体系计算综合风险指数(见图 3),从时间序列来看,各城市在 2014 年之前的洪灾风险较小,风险指数之和均在 5 以下,从 2015 年开始,风险指数显著增加,这与部分城市降水显著增加有关,如镇江风险指数由 2014 年的 0.34 突增到 4.18,深究其因,镇江 2015 年最大单日降水量为 228 mm、年降水量 1544 mm,均为统计年份中的最高值,且远高于同期均值(80 mm 和 1030 mm),而这两个指标在其致灾因子中的权重均高达 34.5%,高于其他两个指标(22%和 9%),导致综合风险指数突增,这一结果也印证了近年来极端降水大大增加了区域洪灾风险的结论<sup>[18]</sup>。

从风险最高值出现的年份来看,2005 年风险指数最高值为 0.43(盐城),而 2018 年已经高达 5.40(镇江),这说明全省洪涝灾害发生概率大大增加。由于 2014 年后风险指数激增,导致 2005—2014 年的风险指数变化在相同比例尺度下不显著,因此将前 10 年风险指数局部放大(图 3 中左上方),可以看出这期间风险总值亦是波动变化的。前三年(2005—2007 年)淮安最高,2014 年风险指数的主要贡献城市为南通(0.42)和镇江(0.34),深入分析其指标发现,这些城市风险指数突出的主要因素仍是降水。

将江苏省划分苏南、苏中、苏北三个区域,分别绘制风险值的折线图(见图 4),对各市作进一步分析。

从分区可以看出,2005—2014 年各市的风险指数变化相对较小,苏南和苏中地区呈波动上升趋势,而苏北则呈现先降再升,转折点在 2010 年。2015 年及以后各市均呈现波动上升的态势,风险值逐年增大,

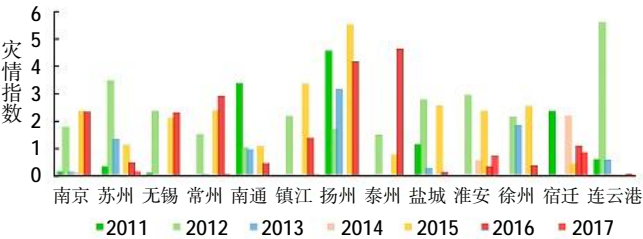


图2 江苏省各市洪涝灾情指数分布

Fig.2 Flood disaster index distribution of cities in Jiangsu Province

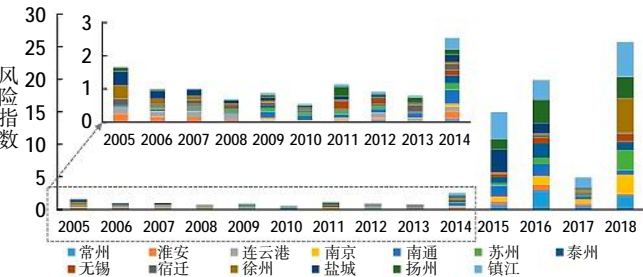


图3 江苏省各市洪涝灾害综合风险指数

Fig.3 Comprehensive flood disaster risk indexes of cities in Jiangsu Province

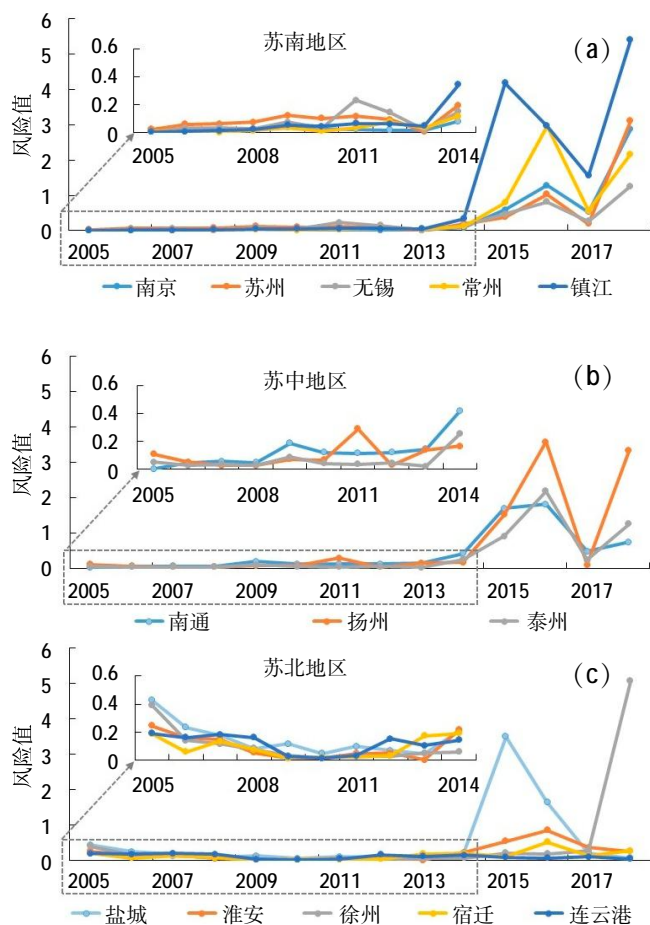


图4 2005—2018年分区洪灾综合风险指数

Fig.4 Flood risk indexes of different area from 2005 to 2018

2017年又呈现一个显著的低值点(同图3),原因是除徐州和连云港外,其他城市综合风险指数均出现了下降,深究遴选指标发现,这一年江苏大部分城市降水较往年偏少,尤其是部分权重较高的因子出现了同期的最低值,如苏州和常州的最大单日降水量分别仅有48 mm和61 mm。

从2015年开始,苏南苏中波动上升,苏北除盐城和徐州变化较剧烈外,其他城市风险指数在0~1之间,相对平稳。盐城2015年洪灾风险指数较高,主要由降水因素所致,年降水量和最大单日降水量高达1466 mm和113 mm,而近年来风险逐步下降,是由孕灾环境不断改善所致。徐州2018年风险骤然升高,这与当年突增的降水有关,虽然近几年环境有所改善,防灾减灾能力也大大提升,但致灾因子增长幅度更大,风险指数增加迅速。风险指数变化幅度在空间上呈现苏中高,苏南和苏北相对较低的态势,说明苏中遭遇洪灾的概率最高。

### 3.2.2 空间格局分析

以3~4年为一个跨度, 求算各市各阶段平均综合风险指数,结合自然断裂法,绘制江苏省平均综合风险指数空间分布图(见图5),可以看出,相对高风险地区由苏北向苏中、苏南转移,由沿海向内陆城市转移。

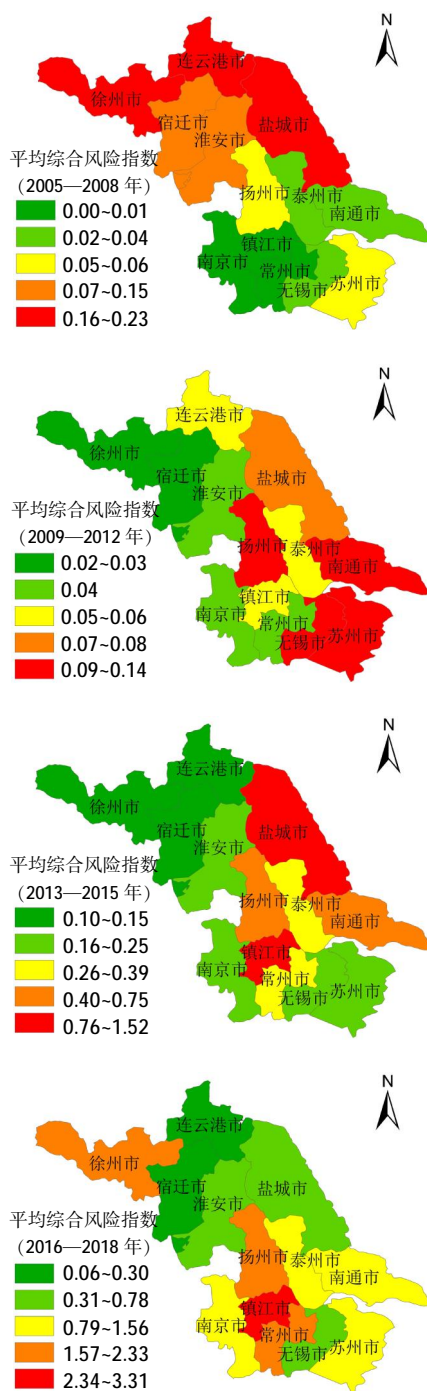


图5 江苏省各市综合风险指数分布

Fig.5 Comprehensive risk index distribution of cities in Jiangsu Province



## 4 结论

2014 年之前,全省的洪涝风险指数的波动较小,苏南和苏中呈现波动上升趋势,而苏北地区则呈现先降后升趋势。2014 年之后各地级市均呈显著的波动上升趋势,镇江、扬州、盐城及徐州的变化幅度较大,主要是受致灾因子(降水)的影响,其他区域相对较小。高风险区域在空间上呈现由北向南,由海向内陆转移的趋势。近年来盐城虽然降水增加,但是承灾体的脆弱性也在不断下降,因而风险下降明显;而徐州则由于降水增多增强的幅度较之其他因素更大,而风险增大明显。此外,苏中地区洪涝风险变化幅度也高于苏南和苏北,除了与该区域的地形地貌、海拔,以及水网分布等自然因素有密切关系之外,还需高度重视经济快速增长带来的承灾体暴露度和脆弱性变化的问题,以保障区域可持续发展。

## 5 讨论

本文依据历史统计数据,分别采用灰色关联法和熵值法来确定评估指标的权重,很大程度上避免了人为主观因素的影响,能直观地反映江苏省各市的洪涝灾情和洪灾风险情况,通过与历史统计数据的对比分析,结果也较为合理。对研究结果中显示灾情和风险均有增强趋势或变化幅度较高的城市,如盐城、镇江、常州、扬州、徐州等城市要尤其引起重视,应根据其主要影响指标采取适宜的措施。虽然研究结果显示区域的灾情与风险并不完全一致,但是历史灾情是衡量区域未来风险的重要指标。

因考虑指标数据的可获取性,本文仅采用近十年来的数据,少部分数据有所缺失,仅通过简单的平滑进行了处理,可能会造成分析结果偏差,在以后的研究中将考虑尽量延长时间序列,以保证结果的稳定性。研究发现降水对综合风险影响较大,在相同尺度下弱化了其他指标的影响。因此,在未来研究中可以考虑将降水因素单独析出,进一步深入分析其他各指标对洪涝灾害风险的影响。此外,今后可以尝试采取其他多指标综合的方法模型构建灾情指数和风险指数,并与本研究结果进行对比,以获得更加完善的结论及规律。

### 参考文献:

[1] SUN R, GONG Z, GAO G, et al. Comparative analysis of Multi-Criteria Decision-Making methods for flood disaster risk in the

Yangtze River Delta [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020,51:101768.

- [2] 叶正伟, 许有鹏, 潘光波. 江淮平原水网区汛期雨量与洪涝水位关系——以江苏里下河腹部地区为例[J]. 地理研究, 2011,30(6):1137-1146. (YE Zhengwei, XU Youpeng, PAN Guangbo. Relationship between flood rainfall and water level in a Jianghuai plain river network region: A case study in the inner Lixiahe, Jiangsu [J]. Geographic Research, 2011,30(6):1137-1146. (in Chinese))
- [3] 叶正伟, 许有鹏, 徐金涛. 江苏里下河地区洪涝灾害演变趋势与成灾机理分析[J]. 地理科学, 2009,29(6):880-885. (YE Zhengwei, XU Youpeng, XU Jintao. Flood changing trend and flooding mechanism in Lixiahe region, Jiangsu, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2009,29(6):880-885. (in Chinese))
- [4] 葛云健, 吴笑涵. 江苏历史时期洪涝灾害时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019,28(8):1998-2007. (GE Yubjian, WU Xiaohan. Spatial and temporal distribution of historical flood disasters in Jiangsu Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,28(8):1998-2007. (in Chinese))
- [5] 徐宗学, 陈浩, 任梅芳, 等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展, 2020,31(5):713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood /waterlogging disasters in China [J]. Advances in Water Science, 2020,31(5):713-724. (in Chinese))
- [6] 马国斌, 蒋卫国, 李京, 等. 中国短时洪涝灾害危险性评估与验证[J]. 地理研究, 2012(1):34-44. (MA Guobin, JIANG Weiguo, LI Jing, et al. Assessment and validation of short-term flood hazards in China [J]. Geographical Research, 2012(1):34-44. (in Chinese))
- [7] 曹璞源, 胡胜, 邱海军, 等. 基于模糊层次分析的西安市地质灾害危险性评价[J]. 干旱区资源与环境, 2017,31(8):136-142. (CAO Puyuan, HU Sheng, QIU Haijun, et al. Evaluation of geological hazards and its validation in Xi'an City based on FAHP [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017,31(8):136-142. (in Chinese))
- [8] 唐余学, 廖向花, 李晶, 等. 基于 GIS 的重庆市山洪灾害区划[J]. 气象科技, 2011,39(4):423-428. (TANG Yuxue, LIAO Xianghua, LI Jing, et al. Regionalization of torrential flood disaster in Chongqing based on GIS [J]. Meteorological Science and Technology, 2011,39(4):423-428. (in Chinese))
- [9] 王顺久, 周继业. 我国气象多因素综合评价方法应用综述[J]. 高原山地气象研究, 2019,39(4):88-96. (WANG Shunjiu, ZHOU Jiye. An overview on the application of multifactor comprehensive evaluation method in meteorology [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2019,39(4):88-96. (in Chinese))
- [10] 史培军, 汪明, 胡小兵, 等. 社会—生态系统综合风险防范的凝聚力模式[J]. 地理学报, 2014,69(6):863-876. (SHI Peijun, WANG Ming, HU Xiaobing, et al. Integrated risk governance consilience mode of social-ecological system [J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(6):863-876. (in Chinese))
- [11] 张正涛, 高超, 刘青, 等. 不同重现期下淮河流域暴雨洪涝灾害风险评价[J]. 地理研究, 2014,33(7):1361-1372. (ZHANG Zhengtao, GAO Chao, LIU Qing, et al. Risk assessment on storm flood disasters of different return periods in Huaihe River basin [J]. Geo-

- graphical Research, 2014,33(7):1361-1372. (in Chinese))
- [12] 胡俊锋, 杨佩国, 吕爱锋, 等. 基于ISM的区域综合减灾能力评价指标体系研究[J]. 灾害学, 2014,29(1):75-80. (HU Junfeng, YANG Peiguo, LV Aifeng, et al. Regional comprehensive evaluation index system of disaster reduction capacity based on ISM [J]. Journal of Catastrophology, 2014,29(1):75-80. (in Chinese))
- [13] 王一新, 苑希民. 基于主成分分析的城市防洪减灾能力综合评价[J]. 自然灾害学报, 2016,25(6):1-8. (WANG Yixin, YUAN Ximin. Comprehensive evaluation of urban flood control and disaster reductionability based on principal component analysis [J]. Journal of Natural Disasters, 2016,25(6):1-8. (in Chinese))
- [14] 姚俊英, 朱红蕊, 南极月, 等. 基于灰色理论的黑龙江省暴雨洪涝特征分析及灾变预测[J]. 灾害学, 2012,27(1):59-63. (YAO Junying, ZHU Hongrui, NAN Jiyue, et al. Analysis of flood and disaster forecast in Heilongjiang province based on Grey theory [J]. Journal of Catastrophology, 2012,27(1):59-63. (in Chinese))
- [15] YANG Weichao, XU Kui, LIAN Jijian, et al. Integrated flood vulnerability assessment approach based on TOPSIS and Shannon entropy methods [J]. Ecological Indicators, 2018,89:269-280.
- [16] 刘海龙, 管志涛. 中国电影产业时空演变特征及驱动因素[J]. 热带地理, 2021,41(5):943-955. (LIU Hailong, GUAN Zhitao. Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of Chinese film industry [J]. Tropical Geography, 2021,41(5):943-955. (in Chinese))
- [17] 徐桂珍. 基于自然灾害风险理论的陕西省典型作物干旱灾害风险评估与区划[J]. 中国农村水利水电, 2017(7):179-184,188. (XU Guizhen. Risk assessment and regionalization of drought disaster for typical crops in Shaanxi Province based on natural disaster risk theory [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(7):179-184,188. (in Chinese))
- [18] COTTERILL D, STOTT P, CHRISTIDIS N, et al. Increase in the frequency of extreme daily precipitation in the United Kingdom in autumn[J]. Weather and Climate Extremes, 2021,33:100340.

## Spatio-Temporal Analysis of Flood Impacts and Risk in Jiangsu Province

MEI Yulin, JI Zhonghui

(School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** This study calculated the comprehensive flood impact indexes of each city in Jiangsu Province from 2011 to 2017 through grey correlation analysis, and assessed the comprehensive flood risk by using the entropy method to determine each index weight from 2005 to 2018. The results show that: (1) The considered indicators can effectively reflect the regional flood impact. Yangzhou is the most severely affected city. Most cities have high values of the disaster index in 2012 and 2015. In 2016, disaster situations are severe in the southern and central areas. (2) The risk value and the corresponding fluctuation range were both low for all cities before 2014, while the risk increased significantly after 2014 which was mainly led by the precipitation change. The relatively high-risk areas show a trend of shifting from north to south and from sea to inland in space.

**Keywords:** flood; grey correlation analysis; disaster impact; risk

(上接第 46 页)

## Applicability Research of HEC-HMS Model Parameter Regionalization in Small Basin of Henan Province

CHENG Xu<sup>1</sup>, MA Xixia<sup>1,2</sup>, WANG Wusen<sup>1</sup>, LIU Xinxin<sup>1</sup>, WANG Qianli<sup>1</sup>, XIAO Yao<sup>1</sup>

(1. School of Water Conservancy Science, Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Yellow River Institute for Ecological Protection, Regionally Coordinated Development, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the applicability of HEC-HMS model parameters regionalization in small basin in Henan Province, in this paper, the HEC-HMS model was applied to six small basins, including Luanchuan, Gaocheng, Xiahecun, Peihe, Zhongtang and Liqingdian. Luanchuan, Gaocheng, Xiahecun and Peihe were taken as reference basins to establish the regression relationship between the model parameters and the underlying surface characteristic. Zhongtang, Liqingdian basins were taken as an example to verify the regionalization results. The average qualified rates of HEC-HMS model in Luanchuan, Gaocheng, Xiahecun, Peihe, Zhongtang and Liqingdian basins are 80.56%, 83.33%, 77.78%, 80.56%, 83.33% and 75%, respectively, which reach the level B of flood forecast. It shows that HEC-HMS model could be used for flood simulation of small basins in Henan Province. Besides, the regionalization method could effectively calculate the model parameters of HEC-HMS model for small basin without Hydrologic data in Henan Province.

**Keywords:** small basins in Henan Province; HEC-HMS model; parameter regionalization; regression relationship