

# 长江经济带城市洪涝脆弱性评估

## ——以南京、武汉和成都为例

汪 群<sup>1,2</sup>, 虞刘悦<sup>1</sup>, 吴兆丹<sup>2,3</sup>, 陈浩然<sup>3</sup>

(1. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心, 江苏 南京 211100;  
3. 河海大学企业管理学院, 江苏 常州 213022)

**摘要:**在全球气候变暖和海平面上升的背景下,随着城市化水平的不断提高,城市系统面临洪涝灾害的风险形势也更加严峻。构建长江经济带城市洪涝脆弱性评估模型,采用熵权法确定权重,运用模糊集对分析法判断样本所属等级,对南京、武汉和成都的城市洪涝脆弱性进行评估。结果表明:2012—2016年,南京市平均洪涝脆弱度最低,受低人口密度、建成区高绿化率以及较高经济密度作用,洪涝脆弱性整体呈下降趋势;武汉市平均洪涝脆弱度最高,由于人口密度过高、建成区绿化率过低导致洪涝脆弱性呈现恶化态势;成都市平均洪涝脆弱度位于中等,受人口密度下降、经济密度和排水管道密度上升的影响,洪涝脆弱性呈下降趋势;提出了大力发展当地经济、合理调整城市化速度、兴修排水基本设施等降低长江经济带城市洪涝脆弱性的建议。

**关键词:**长江经济带;城市洪涝脆弱性;熵权法;模糊集对分析法

中图分类号:P426.616

文献标志码:A

文章编号:1003-9511(2020)03-0055-07

当前,全球气候变化、海平面上升与城市化过程中耦合效应不断凸显,水文气象灾害事件次数年均增长率达 8.4%。据统计,当前全球洪涝灾害造成的经济损失占自然灾害总损失的 30% 以上<sup>[1]</sup>,而我国是世界上受洪涝灾害影响最严重的国家之一。长江经济带 11 省市面积占全国总面积的 21%,人口和经济总量超过全国的 40%,在生态地位、经济建设、综合实力上都起着带头和示范作用。然而,近年来,长江经济带城市受到洪涝灾害影响的事件屡见不鲜。如 2017 年 6 月 9 日南京地区强降雨导致 16 个地点或区域出现大面积积水,交通一度中断;2019 年 7 月 13 日,武汉市受强降雨影响出现“长江 2019 年第 1 号洪水”,启动防汛 IV 级应急响应;2019 年 8 月 24 日,成都市发布暴雨橙色预警,暴雨导致路面、水库塌方,启动临时管制预案。IPCC(2001)第 3 次评估报告将脆弱性界定为:“一个自然或社会系统容易遭受或没有能力应对气候变化(包括气候变率和极端气候事件)不利影响的程度,是某一系统气候的变率特征、幅度、变化速率及其敏感性和适应能力的函数”<sup>[2]</sup>。参照 IPCC 对脆弱性的定义和解释,

目前很多研究认为脆弱性的概念包含 3 个方面内容,即暴露性、敏感性和适应性<sup>[3-5]</sup>。在此基础上,本文认为城市洪涝脆弱性是指在自然环境因素和社会环境因素的双重影响下,城市受洪涝灾害时表现出的敏感性,及其结构和功能受到损害的趋势程度,主要表现在受灾人口、死亡人口和直接经济损失等方面<sup>[6]</sup>。对长江经济带城市洪涝脆弱性进行评估,识别出对应脆弱性程度及主要成因,可为相关管理者提供重要的灾害风险信息,是经济带海绵城市建设和城市防灾减灾的重要基础性工作,对提高城市内涝灾害预防能力、划分脆弱性等级、推动长江经济带发展等具有重要意义。

### 1 文献综述

目前国外洪涝灾害的研究主要集中在人类与洪涝灾害如何相互影响方面,且随着研究深入,洪涝灾害脆弱性评估逐渐从定性分析转向定性、定量综合评估<sup>[7]</sup>。Birkmann<sup>[8]</sup>提出以城市人群为中心,注重人在脆弱性形成以及降低脆弱性过程中的作用。Balica 等<sup>[9]</sup>面向抗灾社会对沿海城市防洪脆弱指数

展开研究;Marfai 等<sup>[10]</sup>从社区层面考察了城市洪涝风险的适应性;Rufat 等<sup>[11]</sup>通过 67 个洪涝灾害案例分析洪涝的社会脆弱性;Bodoque 等<sup>[12]</sup>提出通过提升城市公民的意识水平进行洪水风险管理;Haer<sup>[13]</sup>通过评估洪水带来的风险大小最终形成沟通策略。Smith 在《Environmental Hazards》一书中对洪涝灾害风险的评估、人类对洪涝灾害的认识以及社会因素和洪涝灾害之间的关系进行归纳。

国内灾害脆弱性研究起步较晚,大概始于 20 世纪 90 年代<sup>[14]</sup>。借鉴国际研究成果并结合我国具体状况,逐渐形成一套自己的理论基础、研究方式。2004 年国家防汛抗旱总指挥部办公室完成了《洪水风险图编制导则(试行)》,标志着洪灾风险评估开始进入大规模的实践应用层面<sup>[15]</sup>。目前,受气候变化和城市化进程的影响,暴雨难以精准预报、城市洪灾危害巨大等问题受到高度重视和广泛关注,城市洪涝灾害脆弱性研究已成为城市防洪减灾领域研究的热点<sup>[16]</sup>。刘梦贞<sup>[17]</sup>运用模糊综合评价法构建城市洪涝灾害脆弱性评价指标体系。权瑞松<sup>[18]</sup>根据不同类型承灾体的特征进行城市暴雨内涝灾害风险评估。张冬冬等<sup>[19]</sup>提出了城市内涝综合应对总体思路,建立了城市内涝综合应对技术框架。王豫燕等<sup>[20]</sup>以江苏省为研究区域,利用 1984—2011 年江苏省暴雨洪涝灾害的灾情数据和社会经济数据分析灾害的暴露度特征。杨佩国等<sup>[21]</sup>基于历史暴雨洪涝灾情数据构建城市脆弱性曲线,定量研究北京市在不同降雨量下的宏观脆弱性。温泉沛等<sup>[22]</sup>基于湖北省 76 个气象站主要暴雨过程的灾情资料,借助灰色关联法和曲线拟合法构建湖北省暴雨洪涝灾害脆弱性曲线模型。陈轶等<sup>[23]</sup>基于高德积水地图不同等级的积水点深入分析城市内住宅小区洪涝脆弱性的相关特征。

当前对洪涝灾害脆弱性的评价方法主要有 3 种:

**a. 基于历史灾情数据的脆弱性评价。**通过对历史洪涝灾情的相关信息进行分析,从而对洪涝灾害脆弱性进行评估。Benito 等<sup>[24]</sup>整合地质学、历史学、水力学和统计学等多学科方法,提出了基于长时间序列历史洪灾数据的洪水风险评估方法。Nott<sup>[25]</sup>提出将长时间序列的历史洪水资料作为评估区域洪涝灾害风险的重要参考依据。该方法计算简单,但所需的长时间序列灾情数据资料往往较难获得,且历史灾情数据的统计多是在大尺度进行,小尺度灾情资料结果容易与真实情况不相符。

**b. 基于指标体系的脆弱性评价。**通过指标的选取以及权重方法的确定来评估脆弱性,且通常选

取自然因素和社会因素两方面的指标进行综合分析。杨建莹等<sup>[26]</sup>通过构建水稻洪涝灾害等级评价指标体系,评估水稻洪涝致灾风险。该方法获取数据相对容易,可以在宏观上反映区域风险状况,因此应用范围较广。

**c. 基于情景模拟分析的脆弱性评价。**结合历史数据,给定关键影响因素从而构建灾害情景模型<sup>[27]</sup>。Suarez 等<sup>[28]</sup>采用情景模拟的方法分析了洪灾和气候变化对波士顿市区交通系统的影响;潘文斌等<sup>[29]</sup>通过情景模拟研究 7 种不同用地布局情景对研究区内涝节点的雨洪控制效果。该方法能够直观地反映灾害事件的影响范围和程度,解决风险研究中样本少的问题,但受到计算工作量大、地理背景资料要求较高等问题的限制,暂时还未被大范围应用。

综上,洪涝灾害脆弱性的定量评估是现阶段的热点亦是难点,较为常见的量化方法为结合社会、经济、生态等方面因素建立指标评价体系。此外,目前关于城市洪涝脆弱性的评价研究,暂无针对长江经济带城市的洪涝脆弱性评估研究。因此,本文选取长江经济带上中下游经济发展位于前列的 3 个典型省会城市,进行城市洪涝脆弱性评估研究。

## 2 模型构建

基于已有关于城市洪涝脆弱性评估的研究,参考樊运晓等<sup>[30]</sup>对于洪涝灾害的指标研究,按照可得性、科学性、准确性和可操作性原则,综合体现社会、经济、生态等方面因素在城市洪涝脆弱性评价体系中的作用。选取人口密度(市区人口与建成区面积的比值)、人均地区生产总值、道路网密度(道路长度与建成区面积的比值)、排水管道密度(排水管道总长度与建成区面积的比值)、建成区绿化率(植被覆盖面积与建成区面积的比值)5 个指标,利用熵权法计算各指标的权重,从而构建城市洪涝脆弱性评价体系。其中,人口密度越大,地区在洪涝灾害中的暴露性、敏感性将越高,洪涝灾害的脆弱性越高,因此预期人口密度与脆弱性呈正相关;人均地区生产总值可以表示地区的经济密度,经济密度越高,地区在洪涝灾害中的适应能力较强,因此与脆弱性呈负相关;道路网密度可以反映地表的透水性,密度越大,地区在洪涝灾害中的敏感性越高,适应能力较差,因此与脆弱性呈正相关;排水管道密度和建成区绿化率,可以反映发生洪涝灾害时的排水能力和吸水能力,当二者密度增加时,地区在洪涝灾害中的敏感性降低、适应能力增强,因此与脆弱性呈负相关。

## 2.1 选择评价因子并确定等级评价标准

评价样本的第  $i$  个指标值  $x_i (i=1, 2, \dots, 5)$  为 1 个集合  $A_i$ , 将该指标第  $k$  级评价标准看成另一个集合  $B_k (k=1, 2, \dots, K; K$  为评价等级数), 则  $A_i$  与  $B_k$  构成集对  $H(A_i, B_k)$ , 集对  $H(A_i, B_k)$  的  $K$  元联系度公式为

$$\mu_{A_i \sim B_k} = a_i + b_{i,1}I_1 + b_{i,2}I_2 + \dots + b_{i,k-2}I_{k-2} + c_iJ \quad (1)$$

式中:  $\mu_{A_i \sim B_k}$  为联系度;  $a_i$  为  $x_i$  隶属于 1 级标准的可

### a. 正向指标

$$\mu_{A_i \sim B_1} = \begin{cases} [1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & x_i \geq S_1 \\ \frac{2x_i - S_1 - S_2}{S_1 - S_2} + \frac{2S_1 - 2x_i}{S_1 - S_2}i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & \frac{S_1 + S_2}{2} < x_i \leq S_1 \\ 0 + \frac{2x_i - S_2 - S_3}{S_1 - S_3}i_1 + \frac{S_1 + S_2 - 2x_i}{S_1 - S_3}i_2 + 0i_3 + 0j & \frac{S_2 + S_3}{2} < x_i \leq \frac{S_1 + S_2}{2} \\ 0 + 0i_1 + \frac{2x_i - S_3 - S_4}{S_2 - S_4}i_2 + \frac{S_2 + S_3 - 2x_i}{S_2 - S_4}i_3 + 0j & \frac{S_3 + S_4}{2} < x_i \leq \frac{S_2 + S_3}{2} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{2x_i - 2S_4}{S_3 - S_4}i_3 + \frac{S_3 + S_4 - 2x_i}{S_3 - S_4}j & S_4 < x_i \leq \frac{S_3 + S_4}{2} \\ | 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j & x_i \leq S_4 \end{cases} \quad (2)$$

### b. 反向指标

$$\mu_{A_i \sim B_1} = \begin{cases} [1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & x_i \leq S_1 \\ \frac{S_1 + S_2 - 2x_i}{S_2 - S_1} + \frac{2x_i - 2S_1}{S_2 - S_1}i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & S_1 < x_i \leq \frac{S_1 + S_2}{2} \\ 0 + \frac{S_2 + S_3 - 2x_i}{S_3 - S_1}i_1 + \frac{2x_i - S_1 - S_2}{S_3 - S_1}i_2 + 0i_3 + 0j & \frac{S_1 + S_2}{2} < x_i \leq \frac{S_2 + S_3}{2} \\ 0 + 0i_1 + \frac{S_3 + S_4 - 2x_i}{S_4 - S_2}i_2 + \frac{2x_i - S_2 - S_3}{S_4 - S_2}i_3 + 0j & \frac{S_2 + S_3}{2} < x_i \leq \frac{S_3 + S_4}{2} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{2x_i - 2S_4}{S_4 - S_3}i_3 + \frac{2x_i - S_3 - S_4}{S_4 - S_3}j & \frac{S_3 + S_4}{2} < x_i \leq S_4 \\ | 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j & x_i > S_4 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $S_1, S_2, \dots, S_{K-1}$  分别为对应的 1, 2,  $\dots, K$  个等级情况值。

## 2.2 确定城市洪涝脆弱性程度

根据前人研究, 将城市洪涝脆弱性程度分为不脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱、极度脆弱 5 个等级 ( $K=5$ ), 采用均值标准差法进行等级划分。对于人口密度、道路网密度两个正向指标对应的区间分别为  $(0, x - 1.0\sigma)$ 、 $[x - 1.0\sigma, x - 0.5\sigma)$ 、 $[x - 0.5\sigma, x + 0.5\sigma)$ 、 $[x + 0.5\sigma, x + 1.0\sigma)$ 、 $[x + 1.0\sigma, \text{无限大})$ , 人均地区生产总值、排水管道密度、建成区绿化率 3 个反向指标对应的区间分别为  $[x + 1.0\sigma, \text{无限大})$ 、 $[x + 0.5\sigma, x + 1.0\sigma)$ 、 $[x - 0.5\sigma, x + 0.5\sigma)$ 、 $[x - 1.0\sigma, x - 0.5\sigma)$ 、 $(0, x - 1.0\sigma)$ 。其中,  $x, \sigma$  分别为集合各元素均值和均方差。

能性;  $b_{i,1}, b_{i,2}, b_{i,k-2}$  分别为  $x_i$  隶属于 2、3、 $K-1$  级标准的可能性;  $c_i$  为隶属于  $K$  级标准的可能性;  $I_1, I_2, I_{k-2}$  均为差异不确定分量系数;  $J$  为对立系数。参照前人研究  $I_1, I_2, \dots, J$  都取 1。

对给定  $i$ , 不同集对  $H(A_i, B_k)$  对应的  $\mu_{A_i \sim B_k}$  的信息量有重叠, 其中  $\mu_{A_i \sim B_1}$  所含信息量最多、最完整, 因此在评价或决策时只需计算  $H(A_i, B_1)$  的  $K (K > 2)$  元联系度  $\mu_{A_i \sim B_1}$ 。联系度  $\mu_{A_i \sim B_1}$  对正向指标和反向指标的计算方法有两种。

## 2.3 计算指标权重

利用熵权法计算各指标的权重  $w_i$ , 熵是用来解释物质系统状态的一个函数, 表示系统的混乱程度。熵的获得, 意味着信息的丢失。一个系统有序程度越高, 则熵就越低, 囊括的信息量就越高; 反之, 无序程度越高, 则熵就越大, 信息量越小。当评价对象在某项指标上的值相差较大时, 熵值较小, 说明该指标提供的信息量较大, 该指标的权重也相应较大。

基于熵原理, 采用变差系数法计算权重  $w_i$  为

$$w_i = C_{V_i} / \sum_{i=1}^m C_{V_i} \quad (i=1, 2, \dots, 5) \quad (4)$$

其中

$$C_{V_i} = \sigma_i / \bar{X}_i$$

式中:  $C_{V_i}$  为第  $i$  个指标的变差系数;  $\sigma_i$  为均方差;  $\bar{X}_i$  为均值。

## 2.4 联系度计算

设评价样本为集合  $A$ , 所有指标 1 级评价等级标准为集合  $B$ , 则集对  $H(A, B)$  的  $K$  元联系度  $\mu_{A \sim B}$  可定义为

$$\mu_{A \sim B} = \sum_{i=1}^m w_i \mu_{A_i \sim B_1} = \sum_{i=1}^m w_i a_i + \sum_{i=1}^m w_i b_{i,1} I_1 + \dots + \sum_{i=1}^m w_i b_{i,k-1} I_{k-2} + \sum_{i=1}^m w_i c_i j \quad (5)$$

令  $f_1 = \sum_{i=1}^m w_i a_i, f_2 = \sum_{i=1}^m w_i b_{i,1} I_1, \dots$   
 $f_{k-1} = \sum_{i=1}^m w_i b_{i,k-2} I_{k-2}, f_k = \sum_{i=1}^m w_i c_i$

则式(5)变为

$$\mu_{A \sim B} = f_1 + f_2 I_1 + f_3 I_2 + \dots + f_{k-1} I_{k-2} + f_k J \quad (6)$$

对于人口密度、道路网密度两个正向指标采用式(2)计算, 人均地区生产总值、道路网密度、排水管道密度、建成区绿化率 3 个反向指标采用式(3)计算, 结合式(4)得到 2012—2016 年指标权重值带入式(5)、式(6)计算得到  $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$ 。

## 2.5 判断评价样本所属等级

参照有关学者的研究, 由于联系度差异不确定分量系数的确定具有一定的主观性, 采用置信度准则来确定样本的等级。即:

$$h_k = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) > \lambda \quad (k = 1, 2, \dots, 5) \quad (7)$$

式中:  $h_k$  为置信度准则中间变量;  $\lambda$  为置信度, 取 0.5。

## 3 结果分析

### 3.1 洪涝脆弱性评价指标

洪涝脆弱性评价指标取值见表 1。根据表 1 分

表 1 2012—2016 年南京、武汉、成都市指标数据

年份	城市	人口密度/ (人 · km <sup>-2</sup> )	人均地区生产 总值/元	道路网密度/ (km · km <sup>-2</sup> )	排水管道密度/ (km · km <sup>-2</sup> )	建成区绿化率/%
2012	南京	8 473. 20	88 525	10. 13	9. 16	44. 02
	武汉	9 865. 38	79 482	10. 08	15. 72	38. 21
	成都	10 749. 71	57 624	5. 43	5. 51	39. 38
2013	南京	9 019. 64	124 600	10. 02	10. 37	44. 06
	武汉	9 599. 25	110 113	9. 05	16. 87	38. 87
	成都	10 681. 41	63 977	4. 88	11. 92	40. 17
2014	南京	8 837. 87	107 545	10. 11	10. 77	44. 14
	武汉	9 660. 41	98 000	9. 65	16. 46	39. 18
	成都	9 599. 89	70 019	4. 36	11. 61	35. 86
2015	南京	8 654. 30	118 171	10. 03	11. 00	44. 47
	武汉	11 336. 70	104 132	11. 77	16. 25	39. 65
	成都	9 651. 30	74 273	4. 45	12. 79	39. 84
2016	南京	8 563. 21	127 264	10. 35	11. 19	44. 75
	武汉	11 310. 04	111 469	12. 45	15. 91	39. 65
	成都	9 240. 27	76 960	4. 42	12. 74	41. 39

析, 对比 3 个城市各指标的年平均值可以发现, 南京市的人口密度年平均最小, 人均地区生产总值年平均最大, 建成区绿化率年平均最大; 武汉市道路网密度年平均最大; 成都市道路网密度年平均最小。2012—2016 年, 南京市人口密度、人均地区生产总值、道路网密度相对比较稳定, 排水管道密度、建成区绿化率呈上升趋势; 武汉市人口密度、人均地区生产总值、道路网密度、排水管道密度、建成区绿化率均呈现波动上升趋势; 成都市人口密度、道路网密度呈下降趋势, 人均地区生产总值、排水管道密度呈上升趋势; 建成区绿化率波动上升。

### 3.2 城市洪涝脆弱性程度划分

参照城市洪涝脆弱性划分等级, 利用均值标准差法计算得到 2012—2016 年城市洪涝脆弱性程度等级标准见表 2。

由表 2 可知, 比较 2012—2016 年 5 个指标的数值大小可知, 人口密度和道路网密度越大, 洪涝灾害的脆弱性越高, 与人口密度、道路网密度是正向指标的结果一致; 人均地区生产总值、排水管道密度和建成区绿化率越大时, 洪涝灾害的脆弱性越低, 与人均地区生产总值、排水管道密度、建成区绿化率是反向指标的结果一致。

### 3.3 指标权重计算

经计算人口密度、人均地区生产总值、道路网密度、排水管道密度、建成区绿化率对应权重见表 3。

由表 3, 比较 5 个指标的年平均权重, 人均地区生产总值、道路网密度、排水管道密度占较大比重。对于降低城市洪涝脆弱性来说, 发展当地经济至关重要。良好的经济基础可以为城市的抗灾能力、减灾措施等工作提供经济支持。若当地的经济实力不

表2 2012—2016年城市洪涝脆弱性评价指标等级标准

年份	等级	人口密度	人均地区生产总值	道路网密度	排水管道密度	建成区绿化率
2012	不脆弱	(0, 8759.04)	[88 182.18, 无限大)	(0, 6.34)	(14.35, 无限大)	(43.05, 无限大)
	低度脆弱	[8759.04, 9227.57)	[81 696.26, 88 182.18)	[6.34, 7.44)	[12.24, 14.35)	[41.79, 43.05)
	中度脆弱	[9227.57, 10164.63)	[68 724.41, 81 696.26)	[7.44, 9.65)	[8.02, 12.24)	[39.28, 41.79)
	高度脆弱	[10164.63, 10633.15)	[62 238.48, 68 724.41)	[9.65, 10.75)	[5.91, 8.02)	[38.03, 39.28)
	极度脆弱	[10633.15, 无限大)	(0, 62 238.48)	[10.75, 无限大)	[0, 5.91)	[0, 38.03)
2013	不脆弱	(0, 9078.09)	[125 412.36, 无限大)	(0, 5.75)	(15.83, 无限大)	(43.24, 无限大)
	低度脆弱	[9078.09, 9422.43)	[112 487.85, 125 412.36)	[5.75, 6.87)	[14.44, 15.83)	[42.14, 43.24)
	中度脆弱	[9422.43, 10111.11)	[86 638.82, 112 487.85)	[6.87, 9.1)	[11.67, 14.44)	[39.93, 42.14)
	高度脆弱	[10111.11, 10455.44)	[73 714.30, 86 638.82)	[9.1, 10.21)	[10.28, 11.67)	[38.83, 39.93)
	极度脆弱	[10455.44, 无限大)	(0, 73 714.30)	[10.21, 无限大)	[0, 10.28)	[0, 38.83)
2014	不脆弱	(0, 8991.76)	[107 778.9, 无限大)	(0, 5.43)	(15.45, 无限大)	(43.13, 无限大)
	低度脆弱	[8991.76, 9178.91)	[99 816.81, 107 778.9)	[5.43, 6.74)	[14.20, 15.45)	[41.43, 43.13)
	中度脆弱	[9178.91, 9553.207)	[83 892.53, 99 816.81)	[6.74, 9.34)	[11.69, 14.20)	[38.03, 41.43)
	高度脆弱	[9553.207, 9740.357)	[75 930.39, 83 892.53)	[9.34, 10.65)	[10.44, 11.69)	[36.32, 38.03)
	极度脆弱	[9740.357, 无限大)	(0, 75 930.39)	[10.65, 无限大)	[0, 10.44)	[0, 36.32)
2015	不脆弱	(0, 8773.73)	[117 163.8, 无限大)	(0, 5.63)	(15.53, 无限大)	(43.55, 无限大)
	低度脆弱	[8773.73, 9327.25)	[108 011.2, 117 163.8)	[5.63, 7.19)	[15.53, 14.44)	[43.55, 42.43)
	中度脆弱	[9327.25, 10434.29)	[89 706.12, 108 011.2)	[7.19, 10.31)	[14.44, 12.26)	[42.43, 40.21)
	高度脆弱	[10434.29, 10987.81)	[80 553.57, 89 706.12)	[10.31, 11.872)	[12.26, 11.17)	[40.21, 39.09)
	极度脆弱	[10987.81, 无限大)	(0, 80 553.57)	[11.872, 无限大)	[0, 11.17)	[0, 39.09)
2016	不脆弱	(0, 8536.06)	[126 235.9, 无限大)	(0, 5.67)	(15.53, 无限大)	(44.05, 无限大)
	低度脆弱	[8536.06, 9120.28)	[115 733.4, 126 235.9)	[5.67, 7.37)	[15.53, 14.44)	[42.99, 44.05)
	中度脆弱	[9120.28, 10288.73)	[94 728.56, 115 733.4)	[7.37, 10.77)	[14.44, 12.26)	[40.87, 42.99)
	高度脆弱	[10288.73, 10872.95)	[84 226.12, 94 728.56)	[10.77, 12.47)	[12.26, 11.17)	[39.81, 40.87)
	极度脆弱	[10872.95, 无限大)	(0, 84 226.12)	[12.47, 无限大)	[0, 11.17)	[0, 39.81)

表3 2012—2016年指标权重

年份	人口密度	人均地区生产总值	道路网密度	排水管道密度	建成区绿化率
2012	0.096	0.171	0.256	0.415	0.062
2013	0.081	0.297	0.319	0.243	0.061
2014	0.049	0.212	0.397	0.237	0.105
2015	0.129	0.213	0.410	0.187	0.062
2016	0.135	0.223	0.420	0.166	0.056
年平均权重	0.098	0.223	0.360	0.250	0.069

足,洪涝灾害发生时,对于灾害的抵御能力不足,就必然会遭受自然灾害的打击。大规模的城市扩张导致大量的道路建设。越来越多的沥青马路等不透水层覆盖着城市表面,大大降低了地表的透水性;排水管道密度的大小决定城市的排水能力。当遭遇强降雨时,若道路网密度过大、排水管道密度过小,则短时间内无法将雨水排出,容易在城市低洼处发生内涝现象,必然会导致城市洪涝脆弱性。因此表3中人均地区生产总值、道路网密度、排水管道密度3个指标在影响城市洪涝脆弱性中占着很大的比重。在思考如何降低城市的洪涝脆弱性时,可重点考虑改进这3个指标。此外,随着时间的推移,人口密度所占权重增加,说明人口在未来对于城市洪涝脆弱性可能也有一定影响力,需要加以关注。

### 3.4 判断评价样本所属等级

根据评价指标体系的计算,最终可得到南京、武汉、成都市2012—2016年洪涝脆弱性评价结果,见

表4。

表4 2012—2016年南京、武汉、成都市洪涝脆弱性

年份	南京市	武汉市	成都市
2012	中度脆弱	中度脆弱	极度脆弱
2013	高度脆弱	中度脆弱	高度脆弱
2014	高度脆弱	中度脆弱	高度脆弱
2015	中度脆弱	高度脆弱	中度脆弱
2016	轻度脆弱	极度脆弱	中度脆弱

洪涝灾害与受灾人口、直接经济损失密切相关<sup>[7]</sup>,结合表5,江苏省、湖北省、四川省2012—2016年洪涝灾害的受灾人口数量和直接经济损失的实际情况,3个省份受到的洪水灾害影响与对应省会城市的评估结果基本相符,整体趋势一致,因此评估具有一定的科学性和合理性。

表5 2012—2016年江苏省、湖北省、四川省受灾人口和直接经济损失

年份	受灾人口/万人			直接经济损失/亿元		
	江苏省	湖北省	四川省	江苏省	湖北省	四川省
2012	314.64	635.25	2145.26	76.91	70.43	351.03
2013	116.31	470.55	1725.69	9.28	24.17	442.29
2014	30.82	171.63	698.12	1.99	17.52	126.57
2015	586.32	538.73	711.68	148.68	57.94	57.94
2016	256.77	1921.4	250.89	107.4	750.6	750.6

由表4,2012—2014年3个城市中,武汉市洪涝脆弱性程度较好,成都市洪涝脆弱性程度较严重;2015—2016年3个城市的洪涝脆弱性程度发生改

变,南京市洪涝脆弱性程度最好,武汉市洪涝脆弱性程度最为严重。结合表1横向对比分析,2012—2016年,南京市洪涝脆弱性整体处于下降趋势,由2012年中度脆弱下降到2016年轻度脆弱;武汉市在2012—2014年处于中度脆弱,而2015—2016年则分别上升为高度脆弱和极度脆弱;成都市洪涝脆弱性在逐年下降,由2012年极度脆弱变为2016年中度脆弱。

结合表3各指标具体权重分析可知,样本期内人口密度和建成区绿化率权重较低且变化不大,人均地区生产总值、道路网密度和排水管道密度权重较高。其中人均地区生产总值和道路网密度权重总体呈上升趋势,而排水管道密度权重逐年下降。结合具体城市比较来看,2012年排水管道密度权重最高,成都市排水管道密度较低从而导致其洪涝脆弱性处于极度脆弱,而成都市和南京市排水管道密度相对较高;2013年人均地区生产总值、道路网密度和排水管道密度权重均较高,证明成都市和南京市洪涝脆弱性处于高度脆弱主要是由于人均地区生产总值、道路网密度和排水管道密度相对较低造成的;2014—2016年人均地区生产总值、道路网密度和排水管道密度权重基本不变,说明这3个指标对3个城市的影响几乎未发生变化,从而可见成都市和南京市人均地区生产总值、道路网密度和排水管道密度总体处于改善状态,而相比之下武汉市则逐渐恶化。

## 4 结论及建议

### 4.1 结论

本文基于熵权法和模糊集对分析法构建了城市洪涝脆弱性评估模型,并对长江经济带三个重点城市南京、武汉、成都的洪涝脆弱性进行了评估。

南京、武汉、成都市2012—2016年洪涝脆弱性模糊综合评价结果中:南京市洪涝脆弱性平均脆弱度最低,受低人口密度、建成区高绿化率以及相对良好的经济发展基础的影响,总体处于下降的趋势;武汉市洪涝脆弱性平均脆弱度最高,受建成区绿化率过低、人口密度过高的影响脆弱性有持续恶化的趋势;成都市洪涝脆弱性平均脆弱度位于中等,受人口密度下降、人均地区生产总值上升、排水管道密度上升的影响,5年间洪涝脆弱性有所改善。

### 4.2 建议

为降低城市洪涝脆弱性提出如下建议和对策。

a. 推动当地经济发展。雄厚的经济条件是城市抗灾减灾工作的前提。当遭遇洪涝灾害时,城市如果没有一定的经济基础,必定会遭受到洪涝灾害

的打击。在3个城市中,成都的人均地区生产总值相对较低,故应当制定相应的经济政策,合理调整产业结构和空间布局等,推进地区经济高质量发展。

b. 合理调整城市化速度。城市化的过程会对城市带来一系列的影响,如城市面积的扩大导致土壤面积的减少,严重削弱了土壤涵养水源的能力,同时不利于下渗。道路网密度、排水管道密度对城市洪涝脆弱性影响较大,建成区绿化率始终保持稳定的权重,对城市防涝具有一定影响力。在3个城市中,成都市的道路网密度较低,故应调整土地利用结构,合理控制城市化进程。武汉市和成都市的建成区绿化率相对较低,故应扩大绿化面积,使城市洪涝脆弱性呈现良好状态。

c. 优化城市人口结构,加强相关灾害教育。一方面,通过政策引导,加强对外来流动人口的管理,实行外来人口信息登记,同时不断优化人口结构;另一方面,提高公众洪涝灾害的防御意识、能力,在学校、社区等场所普及灾害知识,提高风险防范意识,推动社会公众参与城市防汛应急管理。3个城市中,武汉和成都的人口密度相对较大,故应合理控制人口数量,实现人口与经济的可持续发展。

d. 兴修排水基本设施,加强河防工程建设。增加排水管道数量,可以有效防止暴雨天气内涝情况的发生;加高增厚城市内主干河流防堤,可以防止强降雨期间河水上涨而导致漫堤、溃堤等问题。3个城市中,武汉市的排水管道密度明显优于南京市和成都市,因此南京和成都应当在合理铺设排水基本设施、优化城市排水系统的基础上,吸引社会资本参与,进一步引进新技术。

本文利用城市社会、经济、生态等因素的相关指标构建洪涝脆弱性评估体系,进行定量化研究,有利于发现不同指标与城市洪涝灾害程度之间的联系,并增强不同区域的可比性。目前限于数据的可得性,指标体系纳入的指标有限,如果能优化防汛基础数据、暴雨灾害数据的动态采集和共享,则可以进一步完善评价模型。同时,未来还可以借助此评估模型对不同灾种进行评估和对比。

### 参考文献:

- [1] WAN C F, FELL R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(4): 373-380.
- [2] 郑雪梅,王怡,吴小影,等. 近20年福建省沿海与内陆城市高温热浪脆弱性比较[J]. 地理科学进展, 2016, 35(10): 1197-1205.
- [3] WOLF T, MCGREGOR G. The development of a heat

- wave vulnerability index for London, United Kingdom[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2013, 1: 59-68.
- [4] ZHU Q, LIU T, LIN H, et al. The spatial distribution of health vulnerability to heat waves in Guangdong Province, China[J]. *Global Health Action*, 2014, 7(1): 25051.
- [5] EL-ZEIN A, TONMOY F N. Assessment of vulnerability to climate change using a multi-criteria outranking approach with application to heat stress in Sydney[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 207-217.
- [6] 柳杨, 范子武, 谢忱, 等. 城镇化背景下我国城市洪涝灾害演变特征[J]. *水利水运工程学报*, 2018(2): 10-18.
- [7] 张璟华, 赵咸榕. 浅析中国洪水保险及洪水风险图制作[C]//中国自然资源协会. 中国水论坛第四届学术论文集. 湖北: 湖北科学技术出版社, 2006.
- [8] BIRKMANN J, CARDONA O D, CARRENO M L. Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework[J]. *Natural Hazards*, 2013, 67(2): 193-211.
- [9] BALICA S F, WRIGHT N G, MEULEN F V D. A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts[J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(1): 73-105.
- [10] MARFAI M A, SEKARANOM A B, WARD P. Community responses and adaptation strategies toward flood hazard in Jakarta, Indonesia[J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(2): 1127-1144.
- [11] RUFAT S, TATE E, BURTON C G, et al. Social vulnerability to floods: review of case studies and implications for measurement[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2015, 14: 470-486.
- [12] BODOQUE J M, AMERIGO M, DEZ-HERRERO A, et al. Improvement of resilience of urban areas by integrating social perception in flash-flood risk management[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 665-676.
- [13] HAER B. The effectiveness of flood risk communication strategies and the influence of social networks-Insights from an agent-based model[J]. *Environmental Science & Policy*, 2016, 3(6): 44-52.
- [14] 周瑶, 王静爱. 自然灾害脆弱性曲线研究进展[J]. *地理科学进展*, 2012, 27(4): 435-442.
- [15] 张葆蔚, 冯源. 《全国重点地区洪水风险图编制项目建设管理细则(试行)》解读[J]. *中国防汛抗旱*, 2014, 24(3): 63-65.
- [16] 姜仁贵, 韩浩, 解建仓, 等. 变化环境下城市暴雨洪涝研究进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(3): 11-17.
- [17] 刘梦贞. 城市暴雨洪涝灾害脆弱性模糊综合评价研究[D]. 开封: 河南大学, 2016.
- [18] 权瑞松. 典型沿海城市暴雨内涝灾害风险评估研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [19] 张冬冬, 严登华, 王义成, 等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J]. *灾害学*, 2014, 29(1): 144-149.
- [20] 王豫燕, 王艳君, 姜彤. 江苏省暴雨洪涝灾害的暴露度和脆弱性时空演变特征[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(4): 27-32.
- [21] 杨佩国, 靳京, 赵东升, 等. 基于历史暴雨洪涝灾情数据的城市脆弱性定量研究: 以北京市为例[J]. *地理科学*, 2016, 36(5): 733-741.
- [22] 温泉沛, 周月华, 霍治国, 等. 湖北暴雨洪涝灾害脆弱性评估的定量研究[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(8): 547-557.
- [23] 陈轶, 陈睿山, 葛怡, 等. 南京城市住区居民洪涝脆弱性特征及影响因素研究[J]. *灾害学*, 2019, 34(1): 56-61.
- [24] BENITO G. Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. review of scientific methods[J]. *Natural Hazards*, 2004, 31(3): 623-643.
- [25] NOTT J. Extreme events: a physical reconstruction and risk assessment[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 6: 940-941.
- [26] 杨建莹, 霍治国, 吴立, 等. 西南地区水稻洪涝等级评价指标构建及风险分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 135-144.
- [27] 王海鹰, 秦奋, 张新长. 广州市城市生态用地空间冲突与生态安全隐患情景分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1304-1318.
- [28] SUAREZ P, ANDERSON W, MAHAL V, et al. Impacts of flooding and climate change on urban transportation: a systemwide performance assessment of the Boston Metro Area[J]. *Transportation Research, Part D*, 2005, 10(3): 231-244.
- [29] 潘文斌, 柯锦燕, 郑鹏, 等. 低影响开发对城市内涝节点雨洪控制效果研究: 不同降雨特性下的情景模拟[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(7): 2555-2563.
- [30] 樊运晓, 罗云, 陈庆寿. 区域承灾体脆弱性综合评价指标权重的确定[J]. *灾害学*, 2001(1): 85-88.

(收稿日期: 2019-12-22 编辑: 胡新宇)

(上接第 54 页)

- [14] 任敏. “河长制”: 一个中国政府流域治理跨部门协同的样本研究[J]. *北京行政学院学报*, 2015(3): 25-31.
- [15] 王冠军, 刘小勇. 推进河湖强监管的认识与思考[J]. *中国水利*, 2019(10): 5-7, 10.
- [16] 段学军, 邹辉, 陈维肖, 等. 岸线资源评估、空间管控分区的理论与方法: 以长江岸线资源为例[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2209-2222.
- [17] 魏山忠. 准确定位 主动作为 加快推进长江流域片全面推行河长制[J]. *水利发展研究*, 2017, 17(5): 1-4.
- [18] 丰景春, 王宝龙, 王山东, 等. 河湖长制信息化管理理论与实务[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.

(收稿日期: 2019-01-30 编辑: 陈玉国)