

长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性评估及影响因素分析

黄晶^{1,2},余靖雯^{1,2}

(1.河海大学管理科学研究所,江苏南京 211100;2.河海大学商学院,江苏南京 211100)

摘要:长江三角洲城市群人口、财产、基础设施高度密集,暴雨洪涝灾害带来的影响越来越大,对该区域城市洪涝灾害脆弱性进行评估是保障长江三角洲区域一体化、可持续发展的基础。以长江三角洲城市群中心区27个城市为研究对象,基于超效率DEA模型,将洪涝灾害脆弱性看作一个负面“生产活动”,构建城市洪涝灾害脆弱性评估模型,在分析脆弱性空间分异特征的基础上确定该地区城市洪涝灾害脆弱性的主要影响因素。结果显示:从整体上看,长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性水平差异较大,安徽及浙江远高于江苏和上海,其中,上海的洪灾脆弱性最低;从空间上看,脆弱性分布有明显的地域集聚特征,脆弱性高的城市分布在浙江东南沿海和安徽南部丘陵地区;降雨量、城市发展水平及基础设施的完善性等因素对城市洪涝灾害脆弱性影响显著。

关键词:城市洪涝;脆弱性;数据包络分析;长江三角洲城市群

中图分类号:X43

文献标志码:A

文章编号:1671-4970(2020)06-0039-07

一、引言

2016年5月11日,《长江三角洲城市群发展规划》提出打造“具有全球影响力的世界级城市群”。2019年12月,中共中央、国务院印发了《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》,将长江三角洲区域一体化发展上升为国家战略,以27个城市为中心区,辐射带动长江三角洲地区高质量发展。2020年8月22日习近平总书记在合肥主持召开扎实推进

长三角一体化发展座谈会,强调“一体化”“高质量发展”。近年来,长江三角洲城市群快速发展,高度城镇化显著改变了降雨径流、汇流路径和方式等水文过程,“雨岛效应”凸显、极端暴雨事件增多,洪涝灾害频发^[1]。长江三角洲城市群作为我国经济最发达的地区之一,人口、财产、基础设施高度密集,洪涝灾害风险剧增^[2],严重影响了该地区居民的生产生活。2020年,长江、太湖发生流域性大洪水,安徽省16个市受灾,受灾人口高达1 046.53万人,因灾死

收稿日期:2020-02-14

基金项目:国家自然科学基金项目(71601070;41877526)

作者简介:黄晶(1986—),女,江苏宜兴人,博士,讲师,从事灾害风险管理研究。

亡 14 人,直接经济损失 600.65 亿元;浙江省的杭州、绍兴等 4 市受灾也较重,共有 41.01 万人受灾,直接经济损失 38.4 亿元。据《中国水旱灾害公报》《中国统计年鉴》数据显示,近 5 年来,长江三角洲城市群因洪涝灾害而产生的直接经济损失平均达 291.98 亿元,占该地区自然灾害直接经济损失的 86%。洪涝灾害已成为制约长江三角洲城市群安全和可持续发展的重要因素。提升长江三角洲城市群应对洪涝灾害的能力,是增强该区域城市韧性,实现区域一体化、可持续发展的重要保障,而摸清区域内各城市面对洪涝灾害时的易受损程度以及相关影响因素是第一步。因此,对长江三角洲城市群的洪涝灾害脆弱性进行评估,对提升长江三角洲城市群抵御灾害的韧性能力,保障该区域一体化可持续发展具有重要意义。

目前,对长江三角洲地区洪涝灾害的研究多集中损失评估和风险分析等,少有文献研究该地区的洪涝灾害脆弱性。黄涛珍等利用人工神经网络计算太湖流域的洪灾损失^[3];姜玲等建立了长三角流域内多区域可计算一般均衡模型,计算流域内上海市、江苏省、浙江省的洪灾间接损失^[4]。徐伟从综合评估的角度,基于危险性、暴露性和脆弱性 3 个方面构建长江三角洲地区洪涝风险评价指标体系^[5];Ge 等基于投影寻踪聚类模型评估了长三角地区江浙沪三地自然灾害的社会脆弱性^[6]。国内外关于自然灾害脆弱性的评估方法主要有综合指数法和脆弱性函数评价法,另外,结合 GIS 和 RS 技术的研究也越来越多。如,刘艳辉等运用 TOPSIS 模型和加权求和模型测算地质灾害承灾载体脆弱性^[7];Nguyen 等基于洪水脆弱性指数对越南广平省 10 个村庄的洪涝灾害脆弱性进行了评估^[8];温泉沛等针对强降雨过程,运用灰色关联法和曲线拟合法构建了湖北省暴雨洪涝灾害脆弱性曲线模型^[9]。除此之外,Abebe 等提出一种基于 GIS 和贝叶斯信度网络洪水灾害脆弱性评价模型,分析多伦多市不同地区的洪水脆弱性^[10]。作为广泛运用的脆弱性评价方法,综合指数法与脆弱性函数模型存在一定局限,为此,有学者将基于投入产出的数据包络分析模型运用于灾害脆弱性评价,该方法的主要优势在于无需确定模型的参数和权重,避免了主观性,提升了评价结果的客观性。如,刘毅等构建了我国各省自然灾害脆弱性的

DEA 投入产出模型^[11];侯俊东等运用超效率 DEA 方法对我国各省市的地质灾害社会脆弱性进行了测度^[12]。在洪涝灾害脆弱性研究方面,Huang 等采用 DEA 模型评价了全国各省的洪涝灾害脆弱性^[13];Li 等利用 DEA 方法分析了洞庭湖流域的洪涝灾害系统及其各组成部分的脆弱性时空变化^[14]。

长江三角洲区域的人口、财产、基础设施高度密集,暴雨洪涝灾害带来的影响越来越大。对长江三角洲城市群城市群各城市的洪涝灾害脆弱性进行评估是保障该区域一体化、可持续发展的基础。以长江三角洲城市群 27 个城市为研究对象,采用超效率 DEA 模型对各城市洪涝灾害脆弱性进行定量评估,在此基础上结合莫兰指数和泰尔指数进行空间分析,最后利用 Tobit 回归模型进行因素分析,旨在为长江三角洲城市群各城市提升应对洪涝灾害的韧性能力、推进防灾减灾一体化提供参考。

二、研究方法

1. 城市洪涝灾害脆弱性评价指标选取

城市洪涝灾害脆弱性指的是,城市资源财产暴露于洪涝灾害之下所可能遭受的损害程度,笔者将其界定为城市面临洪涝灾害时易于受到伤害和损失的性质。面对城市这一承灾体的资源财产,从产生损失的效率角度,将洪涝灾害脆弱性看作是一个负面的“生产活动”。将人口总量(万人)、GDP 总量(亿元)、建成区面积(km^2)作为模型的输入要素,将因洪涝灾害产生的损失,包括受灾人口(万人)、直接经济损失(亿元)作为模型输出。洪灾成灾效率越高,脆弱性越大;反之,洪灾成灾效率越低,脆弱性越小。

2. 城市洪涝灾害脆弱性测算方法

在使用传统 DEA 模型进行效率评估时,对于有效的决策单元的评价值均为 1,从而无法对其效率值进行比较。因此,采用 Andersen 等提出的超效率 DEA 模型进行分析^[15]。

假设共有 n 个决策单元(DMU)即被评价城市,每个 DMU 有 m 种投入指标, s 种产出指标。 x_{ij} 为第 j 个城市 DMU _{j} 第 i 种投入指标的投入量, y_{rj} 为第 j 个城市 DMU _{j} 的第 r 种产出指标的产出量。评价第 j_0 个城市 DMU _{j_0} 洪涝灾害脆弱性的超效率 C^2R 模型为:

$$\begin{cases} \min [\theta - \varepsilon (\sum_{i=1}^m s_i^- - \sum_{r=1}^s s_r^+)] \\ \text{s. t. } \sum_n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_0, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_0, r = 1, 2, \dots, s \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n, s_i^- \geq 0, s_r^+ \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为决策单元的超效率值也即各城市洪涝灾害脆弱性值; ε 为非阿基米德无穷小, λ_j 为投入产出指标的权重系数, s_i^- 、 s_r^+ 分别表示投入和产出松弛变量。

3. 城市洪涝灾害脆弱性空间分析方法

(1) 空间自相关分析方法

莫兰指数是空间自相关系数,用于判定整个空间实体相互之间是否存在相关关系。莫兰指数数值整体分布在 $[-1, 1]$ 。其中, $I \in (0, 1]$ 说明各地理实体之间存在正相关关系,其值越大,相关性越强; $I \in [-1, 0)$ 说明存在负相关关系,0 值则无相关关系。表达式为:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (2)$$

式中: z_i 为城市 i 的洪涝灾害脆弱性值与其平均值($x_i - \bar{X}$)的偏差; ω_{ij} 为城市 i 和 j 之间的空间权重,采用两个城市之间的距离作为空间权重; n 为城市总数; S_0 为所有空间权重的聚合:

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \quad (3)$$

统计值 z_i 得分:

$$z_i = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}} \quad (4)$$

式中: $E[I] = \frac{-1}{(n-1)}$, $V[I] = E[I^2] - E[I]^2$ 。

(2) 空间差异分析方法

泰尔指数可用于衡量地区之间的某一属性差异性问题,该指数的优势在其可分解性,通过将差异分解为内部差异和外部差异,在反应差异大小的基础上能够进一步反映引起差异的主要原因。常用计算方法如下:

$$Theil = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\bar{y}} \ln \left(\frac{y_i}{\bar{y}} \right) \quad (5)$$

式中: y_i 为第 i 个城市的洪涝灾害脆弱性值; $\bar{y}$ 为脆弱性的均值; n 为被评价城市总数。

整体泰尔指数可分解为群组内差异 $Theil_W$ 与群组间差异 $Theil_B$,如公式(6)所示,组内差异和组间差异的计算方法如公式(7)和(8)所示:

$$Theil = Theil_W + Theil_B \quad (6)$$

$$Theil_W = \sum_{p=1}^m \left(\frac{n_p}{n} \frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) Theil_p \quad (7)$$

$$Theil_B = \sum_{p=1}^m \left(\frac{n_p}{n} \frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) \ln \left(\frac{\bar{e}_p}{\bar{e}} \right) \quad (8)$$

式中: m 为划分的城市群组数; n_p 为第 p 个群组内所包含的城市数量; $\bar{e}_p$ 为第 p 个城市群组的指标平均值与全部城市指标平均值之比; $Theil_p$ 为第 p 个群组指标值差异的泰尔指数。

4. 城市洪涝灾害脆弱性影响因素分析方法

在洪涝灾害脆弱性评价基础上,进一步分析影响城市洪涝灾害脆弱性的相关因素以及影响程度的大小。由于使用超效率 DEA 模型所得到的城市洪涝灾害脆弱性值是一个大于 0 的受限变量,因此采用考虑了受限因变量的面板 Tobit 模型进行回归分析。从城市的自然地理环境、人口数量、经济建设与社会保障方面选取对城市洪涝灾害脆弱性具有潜在影响的因素,包括平均海拔、降雨量、人口密度、每万人在校大学生数、人均 GDP、建成区排水管道密度、绿化覆盖率、城市医院及卫生院个数。以城市洪灾脆弱性值作为因变量,以选取的 8 个因素作为自变量,建立 Tobit 回归模型。具体模型如下:

$$Y = a + b^T X + \varepsilon$$

$$Y = \begin{cases} Y & \text{if } Y > 0 \\ 0 & \text{if } Y \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: Y 为城市洪涝灾害脆弱性所构成的截断因变量向量, X 为潜在影响因素所构成的自变量向量, a 为截距项向量, b 为未知参数向量,扰动项 $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 。通过显著性检验值检验该因素对洪灾脆弱性是否有显著影响,并通过各影响因素所对应的系数判断其影响的大小和方向。

三、长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性评价及影响因素分析

1. 研究区域数据来源及预处理

选取长江三角洲城市群的 27 个城市(上海、南京、无锡、常州、苏州、南通、扬州、镇江、盐城、泰州、杭州、宁波、温州、湖州、嘉兴、绍兴、金华、舟山、台

州、合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、池州、宣城)为研究对象,收集 2008—2017 年各指标数据。数据来源于浙江省应急管理厅和安徽省应急管理厅发布的相关数据,以及《中国水旱灾害公报》《江苏省水利年鉴》《江苏统计年鉴》《浙江统计年鉴》《安徽统计年鉴》《上海统计年鉴》等。由于自然灾害的发生具有随机性,洪涝灾害也如此,因洪涝灾害而产生的损失年际波动较大,利用某一年洪灾损失数据不能客观地对各城市洪涝灾害脆弱性进行比较。然而在一段时期内,自然灾害所造成的损失均值会表现出一定的稳定性,目前已有学者采用均值的方法解决灾损数据年际变化较大的问题,如赵昕等分别设定了 2 年和 10 年为一个测度时段,采用各指标在测度时段内的均值进行评估^[16]。因此,笔者先以灾损的 2 年平均值进行城市洪灾脆弱性测算,进一步以灾损 10 年平均值进行测算。为了与产出指标一致,投入指标也采用多年均值。统计长江三角洲城市群 27 个城市的投入产出指标数据的均值、最小值、最大值和标准差(表 1)。

表 1 投入产出指标统计结果(2008—2017 年)

变量	投入			产出	
	人口总量 /万人	建成区面积 /km ²	经济总量/ 亿元	受灾人口数 /万人	直接经济 损失/亿元
均值	552.13	206.38	4281.76	38.73	9.55
最小值	72.40	26.00	213.72	0	0
最大值	2425.68	999.00	30632.99	351.00	333.62
标准差	425.24	207.62	4671.28	61.90	26.26

2. 长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性评估结果

利用公式(1)评估 2 年平均和 10 年平均的长江三角洲城市群总体洪涝灾害脆弱性。长江三角洲城市群洪灾脆弱性 10 年均值为 0.441 2。从各个时间段的脆弱性(图 1)分析可知,长江三角洲城市群洪灾脆弱性在 2008—2009 年、2010—2011 年以及 2014—2015 年差别不大,而 2012—2013 年脆弱性较大,说明这两年间各城市受洪涝灾害的影响较大。分析发现,由于 2012 年长江干流出现 5 次编号洪水,长江三角洲城市群位于长江中下游,各城市受此次洪涝灾害影响较大,并且该现象延续影响到 2013 年。2016—2017 年洪灾脆弱性出现了上升,主要是由于 2016 年江南地区接连出现的强降雨所造成的暴雨洪涝灾害,其中浙江省和安徽省受灾严重,受灾人口数和经济损失较往年都有所增加,2017 年各城市降水量比前几年少,受灾情况明显减少,所以

2016—2017 年整体均值较 2012—2013 年略低。

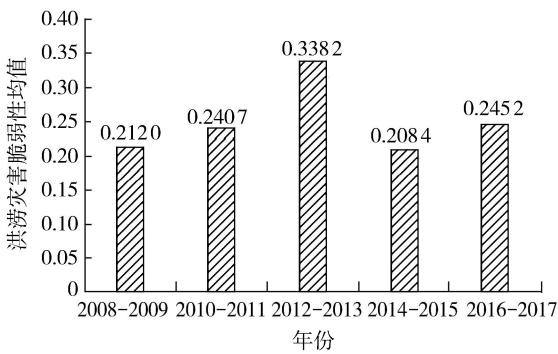


图 1 长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性均值年际变化

从长江三角洲城市群各城市洪涝灾害 10 年平均脆弱性评估结果(图 2)分析发现,池州、舟山、安庆这 3 个城市的洪涝灾害脆弱性最高,脆弱性值均超过 1。舟山属于沿海城市,经常受台风暴雨影响,经济水平相对其他城市较为落后,因此发生洪涝灾害后恢复力较差。池州市和安庆市虽然是内陆城市,但由于地理位置和气候条件特殊,这两个城市的洪涝灾害频发。池州市地处安徽省南部,由于山峰对空气的抬升作用,暴雨强度较大。据统计,池州市近 10 年的平均降雨量是 27 个城市中最多的。安庆市的河网水系是导致洪灾频发的重要原因,长江在安庆境内育有 12 条支流、10 余个湖泊,大多数支流

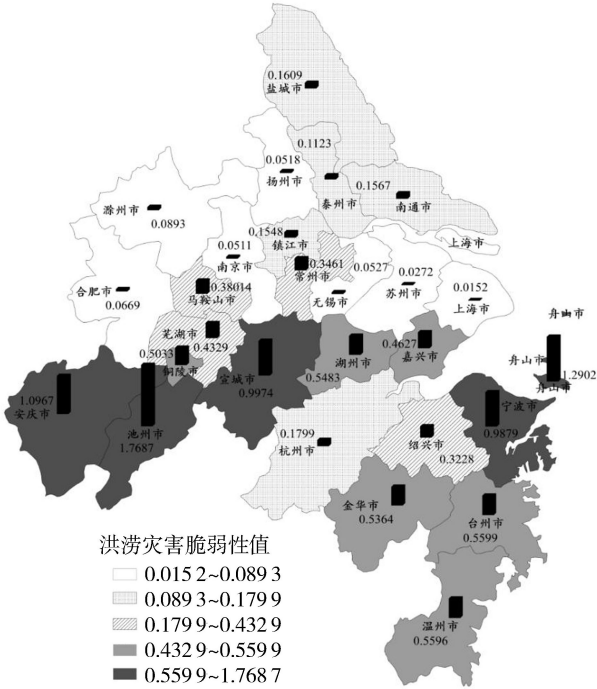


图 2 长江三角洲城市群 27 个城市洪涝灾害脆弱性空间分布

与湖泊相通,注入长江,河网密度高使得该地区更容易受到洪涝灾害的影响。

上海、苏州、南京的洪涝灾害脆弱性最低,分别为 0.015 2、0.027 2 和 0.051 1。这 3 个城市均属城市群中经济水平较为发达的城市,灾后恢复能力强且城市基础设施以及各项防洪措施都较为完善,使得这些城市能够较好地应对洪涝灾害。进一步将研究区域按照上海、江苏、浙江、安徽三省一市进行区域划分,发现安徽和浙江地区的洪涝灾害脆弱性远高于江苏和上海。暴雨频发以及过境洪水是安徽省发生洪涝灾害的两大原因。安徽地处中纬度地区,夏季冷暖气流常在该地区上空交汇,使得高强度暴雨频发,且安徽境内横贯长江、淮河两大江河,众多跨省支流从邻省流入境内,南北地形差异较大,南部多为山地,北部地势较低,因此较高的河网密度以及复杂多样的地形使得该地区更易发生洪涝灾害。浙江省地处我国东南沿海地区,夏季受台风影响大,气候复杂且浙江地势西高东低,极易发生暴雨洪涝灾害。江苏以及上海地区的降雨量较另外两省更少,且大部分城市的基础设施较完善,脆弱性较低。

3. 长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性空间分析

(1)长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性空间自相关分析

为了分析长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性的分布特点,利用全局莫兰指数进行空间自相关分析,得到全局莫兰指数为 0.333 1(表 2),这说明长江三角洲城市群 27 个城市的洪涝灾害脆弱性水平具有明显的聚类特征。结合图 2 分析发现,长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性分布呈现明显的地域特征,脆弱性较高的舟山市、宁波市、台州市、温州市、金华市连片分布。其中,舟山和宁波的脆弱性高达 1.290 2 和 0.987 9,这是由于浙江东南部的沿海城市地处山地迎风坡,容易受台风和亚热带季风气候影响,年降水量大且夏季暴雨频发,加上城市临海,潮水和河流洪水的顶托容易造成城市排水不畅,从而极易引起洪涝灾害。安徽南部地区的安庆市、池州市、宣城市以及铜陵市洪灾脆弱性也均高于 0.5,其

表 2 长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性评价价值的全局莫兰指数

Moran's I (莫兰指数)	预期指数	方差	Z 得分	P 值
0.333 1	-0.038 5	0.014 7	3.061 6	0.002 2

中,池州和安庆的脆弱性分别为 1.768 7 和 1.097 6,这是由于安徽南部多为丘陵山地,地形复杂,城市内部河网密度高且降水量也多于北部城市,因此较北部地区更易发生洪涝灾害。

(2)长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性空间差异分析

分省市评估长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性差异,各地区的脆弱性值及差异结果见表 3。长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性总差异值为 0.440 6,其中地区间差异值为 0.206 6,由此表明各地区的洪涝灾害脆弱性差异明显。如,上海的洪涝灾害脆弱性很低(0.015 2),而安徽的洪涝灾害脆弱性最高(0.666 9),两地区之间的差距高达 0.651 7。地区内部差异值为 0.234 0,这表明各地区内部也存在较大差异,其中安徽内部差异贡献率高达 64.44%,说明安徽省各城市之间洪灾脆弱性差异很大。前述分析也表明,位于安徽南部的安庆、池州由于地形多为丘陵加之降水较多,因此洪涝脆弱性是合肥、滁州的 10 倍以上,地区内部的差异非常明显。

表 3 长江三角洲城市群各地区洪涝灾害脆弱性及泰尔指数分解结果

地区	洪涝灾害脆弱性均值	内部差异贡献率/%	泰尔指数	地区间差异	地区内部差异
江苏	0.123 7	10.14	0.440 6	0.206 6	0.234 0
浙江	0.605 4	25.43			
安徽	0.666 9	64.44			
上海	0.015 2	0			

4. 影响因素分析

利用 Tobit 回归模型分析平均海拔、降水量、人口密度、每万人在校大学生数、人均 GDP、建成区排水管道密度、绿化覆盖率、城市医院、卫生院个数等因素对长江三角洲城市群洪涝灾害脆弱性的影响程度(表 4)。结果表明,各指标对城市群各城市洪涝灾害脆弱性产生的影响差异显著。降雨量与脆弱性水平成正相关关系,绿化覆盖率、人均 GDP 及医院卫生院个数与脆弱性呈负相关关系,平均海拔、人口密度、建成区排水管道密度及每万人在校大学生数这 4 个指标对城市洪涝灾害脆弱性没有显著影响。分析发现,长江三角洲城市群遭受降水强度愈大、持续越长,其脆弱性也越大,安徽和浙江由于年平均降雨量均高于江苏和上海,这两个省大部分城市的洪涝灾害损失较大,因此,两省平均脆弱性要远高于江苏和上海。城市绿化覆盖率能有效降低城市洪涝的

脆弱性,当绿化覆盖率越高时,土地下渗能力越强,对洪涝灾害的缓冲能力就越强,脆弱性越低。人均GDP反映了城市的经济实力,城市的经济越发达,其抵御灾害的能力也就越强,其中,池州、舟山、安庆的经济水平较低,这也是其洪涝灾害脆弱性高的主要原因之一。城市基础设施的完善性也对城市洪涝灾害脆弱性产生影响,例如医院卫生院个数越多,减轻洪涝灾害危害的能力就越强。

表 4 Tobit 模型回归结果

变量	系数	标准差	Z-统计量	P
平均海拔	-0.003 756	0.003 791	-0.990 754	0.321 8
降雨量	0.001 299 ***	0.000 368	3.533 831	0.000 4
人口密度	-7.66×10 ⁻⁵	6.71×10 ⁻⁵	-1.140 868	0.253 9
人均 GDP	-5.95×10 ⁻⁶ **	2.59×10 ⁻⁶	-2.298 672	0.021 5
建成区排水管道密度	0.001 158	0.011 628	0.099 623	0.920 6
绿化覆盖率	-0.045 744 *	0.023 548	-1.942 597	0.052 1
每万人在校大学生数	0.000 102	0.000 282	0.363 071	0.716 6
医院卫生院个数	-0.001 033 **	0.000 466	-2.216 188	0.026 7
常数项	1.410 954	1.107 827	1.273 623	0.202 8

注：***、** 和 * 分别表示在 1%、5% 和 10% 的水平上显著。

四、讨论与结论

本研究认为城市洪涝灾害脆弱性是城市面临洪涝灾害时易于受到伤害和损失的性质,从城市资源财产产生损失的效率角度将城市洪涝灾害脆弱性看作是一个负面“生产活动”。选取人口总量、GDP 总量、建成区面积作为模型的输入要素,将因洪涝灾害而产生的损失(受灾人口、直接经济损失)作为模型输出要素。在研究角度上,从承灾体出发,探究城市抵御洪涝灾害的韧性能力,而已有研究多基于灾害系统论,从致灾因子与孕灾环境的危险性、承灾体的暴露性及灾害损失等角度对洪灾脆弱性进行考虑。聚焦于城市这一承灾体本身,从城市资源财产面对洪涝灾害时易于受损的程度来评估城市的洪涝灾害脆弱性,这将能提供另外一种从城市社会经济的角度探究城市应对灾害的能力。

从研究区域来看,本研究将研究视角聚焦长江三角洲城市群。长江三角洲城市群是中国第一大城市群,是区域一体化高质量发展的典型代表,一旦发生洪涝灾害,将会造成巨大的直接和间接经济损失,产生深远的社会影响。对该区域的洪涝灾害脆弱性

研究将有助于摸清区域内各城市洪涝灾害脆弱性的时空差异,以及气候因素、城市水文、基础设施对城市洪涝灾害脆弱性的影响,为提升应对洪涝灾害的韧性能力、推进防灾减灾一体化提供依据,进一步保障长江三角洲区域一体化发展。研究发现,安徽和浙江的城市洪涝脆弱性远高于江苏和上海,长江三角洲城市群以太湖为界呈现出南高北低的特点。与徐伟等的研究有所差异,其发现长三角地区洪水灾害脆弱性北部地区较南部地区高^[5],这是由于徐伟等认为脆弱性是由灾害导致的损失和致灾因子危险性所决定的,而笔者研究的是承灾体面对洪涝灾害时易于受损的程度,两者所定义的脆弱性不一样。Ge 等在对长三角地区城市自然灾害社会脆弱性评估的研究中,也发现由于上海、南京、苏州等地的适应能力强,脆弱性比其他地区低很多^[17]。

经过上述分析,主要结论如下:第一,从整体上看,长江三角洲城市群各城市洪灾脆弱性存在一定差异。脆弱性值最高的 3 个城市为池州、舟山、安庆,脆弱性值最低的 3 个城市为上海、苏州、南京。从区域角度来看,安徽、浙江的洪涝灾害脆弱性远高于江苏和上海。第二,从空间上来看,各城市洪涝灾害脆弱性值呈明显的地域集聚特征。27 个城市洪涝灾害脆弱性水平具有空间正相关性,脆弱性高的区域连片分布,浙江东南沿海地区及安徽南部丘陵地区脆弱性普遍较高。研究还发现,区域内部差异略高于区域间差异,其中安徽内部差异较大,因此其需要在缩小内部差异的基础上进一步缩小与江苏和上海的差距。第三,自然环境因素中,降水量对城市洪涝灾害脆弱性影响较大,城市发展水平及基础设施的完善性有利于降低脆弱性。具体来说,降雨量与脆弱性水平成正相关,绿化覆盖率、人均 GDP 及医院卫生院个数与脆弱性呈负相关,即城市绿化覆盖面积越广,土壤下渗能力越强;城市人均 GDP 越高,灾害抵御能力越强;城市医院卫生院个数越多,应对灾害的能力越强。

通过上述结果分析,建议从以下方面来提升长江三角洲城市群洪涝害风险管理能力:一是,对于长江三角洲城市群整个区域来说,各城市洪灾脆弱性差异较大,建议根据不同城市所处的位置和洪涝灾害风险的特点,完善应急预案体系,因地制宜推进海绵城市建设;二是,对于由台风、强降雨等导致的洪涝脆弱性较高的城市,如舟山、宁波等,建议推进城

市堤防、河道、水闸、管网、泵站等防洪排涝工程完善升级,加强防洪排涝设施的管护,构筑城市暴雨洪涝预警系统,以社区为单位开展应急演练,进一步加强整个城市应对洪涝灾害的能力;三是,对于经济相对欠发达及社会保障体系还不完善的地区,如池州、宣城、铜陵等,建议加大城市洪涝防治资金投入,建立健全洪涝灾后福利及恢复的保障机制,如洪水保险、社会救助及政府补偿等政策的实施,提升灾害应对及恢复能力。

参考文献:

[1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016,27(4):485-491.

[2] 李国芳,郑玲玉,童奕懿,等. 长江三角洲地区城市化对洪灾风险的影响评价[J]. 长江流域资源与环境, 2013,22(3):386-391.

[3] 黄涛珍,王晓东. BP 神经网络在洪涝灾损失快速评估中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003,31(4):457-460.

[4] 姜玲,张伟,刘宇. 基于多区域 CGE 模型的洪灾间接经济损失评估——以长三角流域为例[J]. 管理评论, 2016,28(6):25-31.

[5] 徐伟. 综合风险防范——长江三角洲地区自然致灾因子与因子等级风险评估[M]. 北京:科学出版社, 2014.

[6] GE Y, DOU W, GU Z, et al. Assessment of social vulnerability to natural hazards in the Yangtze River Delta, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013,27(8):1899-1908.

[7] 刘艳辉,张振兴,苏永超. 地质灾害承灾载体脆弱性评价方法研究[J]. 工程地质学报, 2018,26(5):1121-1130.

[8] NGUYEN C T, VanNGUYEN B. Application of flood vulnerability index in flood vulnerability assessment: a case study in Mai Hoa Commune, Tuyen Hoa District, Quang Binh Province[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2019,5(4):1917-1927.

[9] 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.

[10] ABEBE Y, KABIR G, TESFAMARIAM S. Assessing urban areas vulnerability to pluvial flooding using GIS applications and Bayesian Belief Network Model[J]. Journal of Cleaner Production, 2018(174):1629-1641.

[11] 刘毅,黄建毅,马丽. 基于 DEA 模型的我国自然灾害

区域脆弱性评价[J]. 地理研究, 2010,29(7):1153-1162.

[12] 侯俊东,金欢. 基于超 DEA—多元回归的地质灾害社会脆弱性影响因素研究[J]. 灾害学, 2017,32(4):23-29.

[13] HUANG D, ZHANG R, HUO Z, et al. An assessment of multidimensional flood vulnerability at the provincial scale in China based on the DEA method[J]. Natural Hazards, 2012,64(2):1575-1586.

[14] LI C H, LI N, WU L C, et al. A relative vulnerability estimation of flood disaster using data envelopment analysis in the Dongting Lake Region of Hunan[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013,13(7):1723-1734.

[15] ANDERSEN P, PETERSEN N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis[J]. Management Science, 1993(10):1261-1264.

[16] 赵昕,李琳琳,郑慧. 基于超效率 DEA 模型的风暴潮灾害脆弱性测度[J]. 海洋环境科学, 2014,33(3):436-440.

[17] GE Y, DOU W, DAI J. A new approach to identify social vulnerability to climate change in the Yangtze River Delta[J]. Sustainability, 2017,9(12):2236-2240.

(责任编辑:高虹)

