

基于灾害响应过程的城市洪涝灾害韧性评价

吴华清, 方建, 栾一博

摘要: 韧性对于提高城市防灾、抗灾能力具有重要作用。本文通过对已有城市灾害韧性研究的梳理, 将城市遭受灾害事件影响下的响应过程划分为抵御、预警、反应、响应、恢复四个阶段, 选取 21 个相关指标建立了城市灾害韧性评价指标体系, 以长江中下游流域最为频发的洪涝灾害为例, 运用熵值法计算指标权重, 对长江中下游 76 个城市 2005 年、2010 年和 2015 年城市洪涝灾害韧性进行评价并分级。结果发现: 2005 年、2010 年、2015 年城市洪涝灾害韧性等级逐年提高且在 2010 年-2015 年阶段城市灾害韧性得分平均提升水平高于 2005 年-2010 年的城市灾害韧性得分平均提高水平。整体上, 上海城市洪涝灾害韧性水平领先于其他城市。各准则得分的最大值多集中在上海和江苏, 最小值多集中于安徽、湖北以及江西和湖南省份的城市。上海和江苏、浙江城市准则等级较高, 安徽、江西、湖北和湖南省的省会城市等级大多高于省内其他城市。本研究从城市受灾响应阶段出发, 考虑城市在不同阶段韧性的变化情况, 构建了城市灾害韧性评价指标体系, 为城市灾害韧性评价提供了新视角, 对于构建城市灾害治理体系具有重要意义。

关键词: 韧性, 洪涝灾害, 长江中下游, 熵值法, 城市

1 引言

城市是人类生存发展的重要载体, 也是作为人与自然相互作用的复杂系统。随着我国快速城镇化, 人口、物质和经济要素在城市中迅速聚集, 城市面对各类灾害风险事件的脆弱性不断增加。韧性, 作为系统应对灾害事件扰动的吸收、恢复以及改进能力^[1], 对于提高城市御灾抗灾能力, 减少灾害损失具有重要作用。提高城市韧性是提升城市治理水平, 加强城市风险防控的重要手段。党的十九届五中全会审议通过的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》明确提出在全面建设社会主义现代化国家中要加强韧性城市的建设。

洪涝灾害是我国最常见的灾害之一, 极端降雨和内涝事件频发, 已经成为影响中国城市公共安全的突出问题^[2]。以 2012 年“7.21 北京特大暴雨”事件为例, 突发的极端降雨过程造成北京 61 年来最强烈的暴雨洪涝灾害, 导致 79 人死亡, 160.2 万人受灾, 经济损失达 116.4 亿元^[3]。长江中下游地区经济发达, 人口稠密, 同时也是水网密布的区域。受到东亚季风的影响^[4], 长江中下游地区是我国洪涝灾害最为频发的区域, 对我国社会经济的造成了巨大影响。然而在全球气候变化的影响下, 未来长江中下游地区城市极端天气事件将进一步加剧。

城市灾害韧性研究起源于韧性研究。韧性研究最先应用于力学与工程领域, 随后拓展到生态领域及社会生态领域^[5], 在这个过程中, 韧性也被 Timmerman^[6]引入灾害学领域进行研究。城市灾害韧性包含了居民与社区健康、建筑和基础设施、城市环境以及城市网络等多个研究对象, 并涉及地震、洪涝、台风、海啸等突发灾害事件, 以及气候变化、海平面上升等

慢性灾害事件。其中，城市系统受水灾和地震灾害冲击下的韧性变化和韧性治理是城市灾害韧性研究的热点^[7]。

评价城市灾害韧性的主要方法有模型计算与指标体系评价。损失三角形测度模型、系统功能状态公式和基于时间的损失恢复率等的模型计算方法主要针对城市支撑系统，例如城市电力网络、交通网络受灾后的韧性损失情况。例如 Chen 等^[8]建立了一种考虑适应性、抵抗性和恢复性的新的城市模型来模拟不同灾害情境下的城市韧性的损失情况。指标评价方法广泛应用于国内外城市韧性评价中，其中国外的灾害韧性评价指标体系多针对社区或区域尺度，而基于市级尺度的灾害韧性评价指标体系较少^[9]。国内现有研究偏向于市级层面，基于不同视角或韧性需求开展了相关研究^[10-14]，但近年来随着社区治理的逐渐增加，社区尺度的韧性研究逐渐成为焦点^[15,16]。在指标体系构建的研究上，也逐渐从灾害风险单一维度的评价逐渐完善为综合风险、暴露和脆弱性等多维度进行评价。

近年来，围绕城市灾害韧性的评价研究有不少的探索，但是基于指标体系评价方法的城市灾害韧性研究大多从城市社会、经济、自然环境等方面选取指标进行静态的评价，缺少对城市受灾响应过程中，韧性的变化情况进行考虑^[17]。而通过模型方法评价的城市灾害韧性，虽然从灾害发生过程的角度动态考虑了城市在韧性变化，但一方面多针对基础设施、电力网络等城市物理支撑体系进行研究，缺少对城市社会经济韧性的综合考虑；另一方面对数据的精度要求很高，适用于微观尺度的评价，不适用于在宏观尺度把握城市整体的灾害韧性水平，也不利于长期跟踪城市的韧性建设情况。

为有利于动态监测城市灾害韧性，本文将城市对灾害事件的响应过程划分为抵御、预警、应急、恢复四个阶段，并选取相关指标，构建了城市灾害韧性评价指标体系。以长江中下游地区城市洪涝灾害韧性为评价对象，以期指导长江中下游城市有效应对暴雨洪涝等极端灾害事件，基于当前正在开展的国土空间规划体系的建设，从四个响应阶段分别有针对性的提高区域防灾减灾能力，保障人民安全。

2 城市洪涝灾害韧性指标体系与评价方法

2.1 指标体系构建

本研究以洪涝灾害为例，根据城市灾害韧性的概念特征及城市系统功能的时间变化过程，考虑指标选取的科学性、系统性、实用性和可操作性等原则，从抵御、预警、应急和响应四个阶段构建了包含 21 个指标的城市洪涝灾害韧性评价指标体系，如表 1 所示：

表 1 城市洪涝灾害韧性评价指标体系			
目标层	准则层	指标层（单位）	指标属性
城市灾害韧性	抵御（A）	A1 水闸数量（个）	+
		A2 防洪堤长度（千米）	+

预 警 (B)	A3 建成区排水管道密度 (%)	+
	A4 建成区绿地覆盖率 (%)	+
	B5 气象台站数量 (个)	+
	B6 水文站数量 (个)	+
	B7 广播覆盖率 (%)	+
	B8 电视覆盖率 (%)	+
	B9 移动电话用户覆盖率 (%)	+
	B10 国际互联网用户覆盖率 (%)	+
	C11 水利、环境、公共设施管理业占就业人数比重 (%)	+
	C12 每万人拥有医院、卫生院数 (个)	+
应 急 (C)	C13 每万人拥有医院、卫生院床位数 (个)	+
	C14 全国综合减灾示范社区个数 (个)	+
	C15 城市道路覆盖率 (%)	+
	D16 地区生产总值 (万元)	+
	D17 人均储蓄额 (元)	+
	D18 货运总量 (万吨)	+
	D19 卫生、社会保障、社会福利业占就业人数比重 (%)	+
	D20 城镇居民恩格尔系数 (%)	-
	D21 城市登记失业率 (%)	-

在选取的指标中,包含了正指标与负指标。正指标数值越高,表明城市洪涝灾害韧性水平越强;负指标数值越低,城市洪涝灾害韧性水平越强。除 D20 和 D21 为负指标外,其余 19 个指标均为正指标。

2.2 指标权重确定

本文选择熵值法确定指标权重,熵值法作为一种客观赋权法,能够减少人为决策的误差,还可以避免多个指标间信息相互重叠的问题^[18],为多指标综合评价提供了合理的依据,其计算步骤如下:

(1) 数据标准化

不同指标数据间无法直接进行比较计算,为了消除这种差异,需要对选取的指标数据进行标准化处理,本文选择最小-最大标准化方法进行处理,该方法也是熵值法常用的数据标准化处理方法。

(2) 熵值法计算权重

熵值法计算权重共分为四步：分别计算①指标比重②熵值③差异系数④权重，计算具体过程如下：

$$y_{i,j} = \frac{x'_{i,j}}{\sum_{i=1}^n x'_{i,j}} \quad (1)$$

其中， $x'_{i,j}$ 表示数据标准化后的第 i 个城市的第 j 个指标； $y_{i,j}$ 表示城市 i 占有所有城市指标 j 之和的比重。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n y_{i,j} \cdot \ln y_{i,j} \quad (2)$$

其中， $k = 1 / \ln(n)$ ； e_j 为第 j 个指标的熵值。

$$g_j = 1 - e_j \quad (3)$$

其中， g_j 为第 j 个指标的差异系数。

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (4)$$

其中， w_j 为第 j 个指标的权重。

2.3 城市灾害韧性得分计算

(1) 各准则得分计算

计算出各指标权重 w_j 后，运用标准化后各城市指标数据 $x'_{i,j}$ 与权重 w_j 相乘即可得到各指标得分，将指标得分根据准则叠加得到抵御、预警、应急和恢复四个阶段准则得分，计算公式如下：

$$S_{i,j} = w_j \cdot x'_{i,j} \quad (6)$$

$$S_{i,c} = \sum_{j=1}^m S_{i,j} \quad (c=1,2,3,4) \quad (7)$$

其中， $S_{i,j}$ 为 i 城市 j 指标得分， $S_{i,c}$ 为 i 城市 c 准则得分，准则 c 个数为 4，分别为抵御、预警、应急和恢复。

(2) 韧性得分计算

对城市 i 各阶段得分 $S_{i,c}$ 累加即可得到城市 i 灾害韧性水平 R_i ，计算公式如下：

$$R_i = \sum_{c=1}^4 S_{i,c} \quad (8)$$

(3) 城市灾害韧性得分及准则得分分级

在计算城市洪涝灾害韧性各准则得分和韧性得分后，运用自然间断点分级法将城市洪涝灾害韧性各准则得分和城市洪涝灾害韧性得分划分为低、较低、中等、较高、高五类。

3 长江中下游城市洪涝灾害韧性评价

3.1 研究区及数据

(1) 研究区概况

长江中下游流域(111°E—119°E, 26°N—33°E)包含湖南、湖北、江西、安徽、浙江、江苏和上海七个省(市),共有 78 个地级行政区。长江中下游流域山地丘陵和平原盆地相间分布,河流众多,水网密布。受东亚季风影响^[4],长江中下游流域洪涝灾害频发,严重影响了长江中下游城市人民安全与经济发展。本研究选取了长江中下游七个省(市)的 75 个地级行政区及上海市作为研究对象。

(2) 数据来源

各城市指标数据均为统计数据,来源于各省、市统计年鉴及国民经济和社会发展统计公报。选取年份为 2005 年、2010 年和 2015 年。对于部分缺失数据的指标选用省级尺度数据,如 A1, B4, B5;对于年份缺失的指标选用其他邻近年份代替,如 A2 选用 2007 年,2010 年和 2012 年数据进行代替, B4 选用 2007 年、2010 年和 2015 年数据代替, B5 选用 2008 年、2010 年和 2015 年数据代替。

3.2 指标权重结果分析

运用熵值法计算出了城市灾害韧性评价指标体系各个指标的权重,结果见图 1。

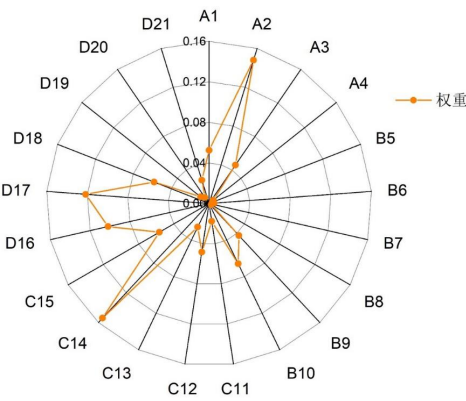


图 1 指标权重

由图 1 可见,指标 C14 (0.1540)、A2 (0.1480)、D17 (0.1217)、D16 (0.1018) 权重较大,对于城市灾害韧性评价影响较大。对指标权重进行累加可以得到各个准则层权重:抵御 (0.2519)、预警 (0.1220)、应急 (0.3023)、恢复 (0.3237),其中恢复准则和应急准则权重较大,预警准则权重最小。

3.3 城市洪涝灾害韧性结果分析

3.3.1 抵御、预警、应急和恢复阶段评价

根据公式计算出各城市 2005 年、2010 年和 2015 年城市灾害韧性抵御、预警、应急、

恢复准则的得分情况，根据自然断点法对城市灾害韧性各准则得分进行分类，结果见图 2。

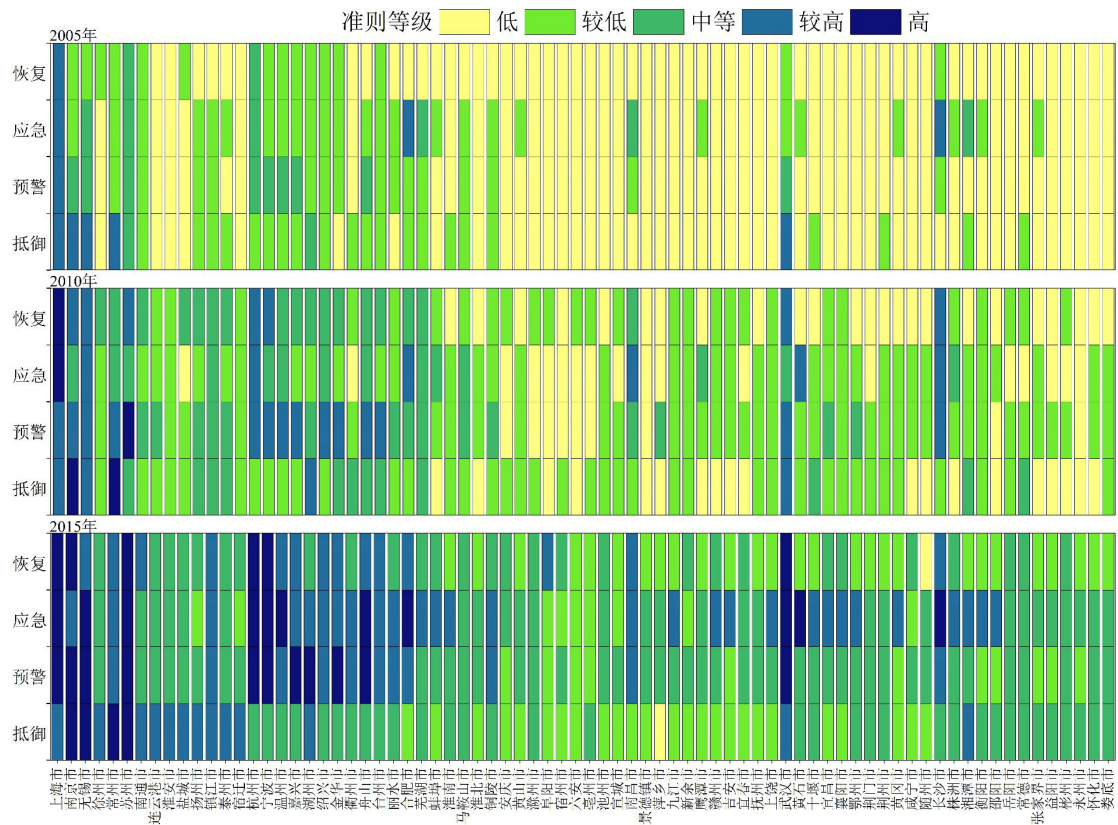


图 2 城市灾害韧性准则等级

整体上城市洪涝灾害抵御、预警、应急、恢复阶段韧性水平呈上升趋势，在 2005 年，2010 年和 2015 年三个时间点，预警准则平均得分（0.01733，0.02734，0.03655）较其他三个准则均为最低，2005 年应急准则平均得分（0.02524）最高，2010 年和 2015 年恢复准则平均得分（0.04553，0.06910）最高。从 2005 年至 2010 年，四个准则平均得分分别提升 48.57%，57.79%，37.51%，86.86%，2010 年至 2015 年，四个准则平均得分分别提升 60.06%，33.65%，87.54%，51.75%。

在 2005 年，大部分城市抵御准则得分为低等级，鹰潭得分最低，南京抵御准则得分最高，南京、上海、常州、无锡和武汉为较高等级城市。预警准则无高等级城市，大部分城市得分为低等级，邵阳得分最低，上海得分最高，为唯一一个较高等级城市。应急准则无高等级城市，大部分为低等级，亳州得分最低，上海得分最高，上海和合肥、长沙为较高等级城市。恢复准则无高等级城市，大部分为低等级，鄂州得分最低，上海得分最高，为唯一一个较高等级城市。

2010 年，大部分城市抵御准则得分为低和较低等级，怀化得分最低，常州得分最高，常州和苏州为高等级，上海、湖州、无锡和武汉等级为较高。大部分城市预警准则得分等级为较低，宿州得分最低，等级为低，苏州得分最高，为唯一一个高等级城市。大部分城市应

急准则得分为低和较低，宿州得分最低，上海得分最高，为唯一一个高等级城市。大部分城市恢复准则得分等级为低和较低，鄂州得分最低，上海得分最高，为唯一一个高等级城市。

2015 年，大部分城市抵御准则得分处于较低和中等水平，萍乡得分最低，为唯一一个等级为低的城市，常州得分最高，常州、苏州和无锡得分为高等级。浙江除湖州、湖南除湘潭等级为较高外，其余城市等级均为中等，江苏除常州、苏州和无锡外，其余城市等级均为较高，江西除萍乡外其余城市等级均为较低。大部分城市预警准则得分为中等，阜阳得分最低，舟山得分最高。安徽、江西、湖北和湖南省会城市合肥、南昌、武汉和长沙城市等级均高于省内其他城市，武汉得分为高等级，其他三个省会城市等级为较高。大部分城市应急准则得分为中等和较高，无城市得分为低等级。宿州得分最低，舟山得分最高。大部分城市恢复准则得分均为较低和中等，随州得分最低，为唯一一个低等级城市，上海得分最高。各省会城市得分均在较高及以上等级。

3.3.2 韧性综合分析

各城市的灾害韧性，运用自然断点法进行分级，分级结果如见表 2。图 3 展示了 2005 年，2010 年和 2015 年的城市灾害韧性等级的分布情况。

表 2 城市灾害韧性分级表

灾害韧性等级	韧性得分范围	城市数		
		2005 年	2010 年	2015 年
低	$R \leq 0.0991$	52	28	0
较低	$0.0991 < R \leq 0.1538$	18	26	24
中	$0.1538 < R \leq 0.2312$	4	14	32
较高	$0.2312 < R \leq 0.3605$	2	7	12
高	$R > 0.3605$	0	1	8

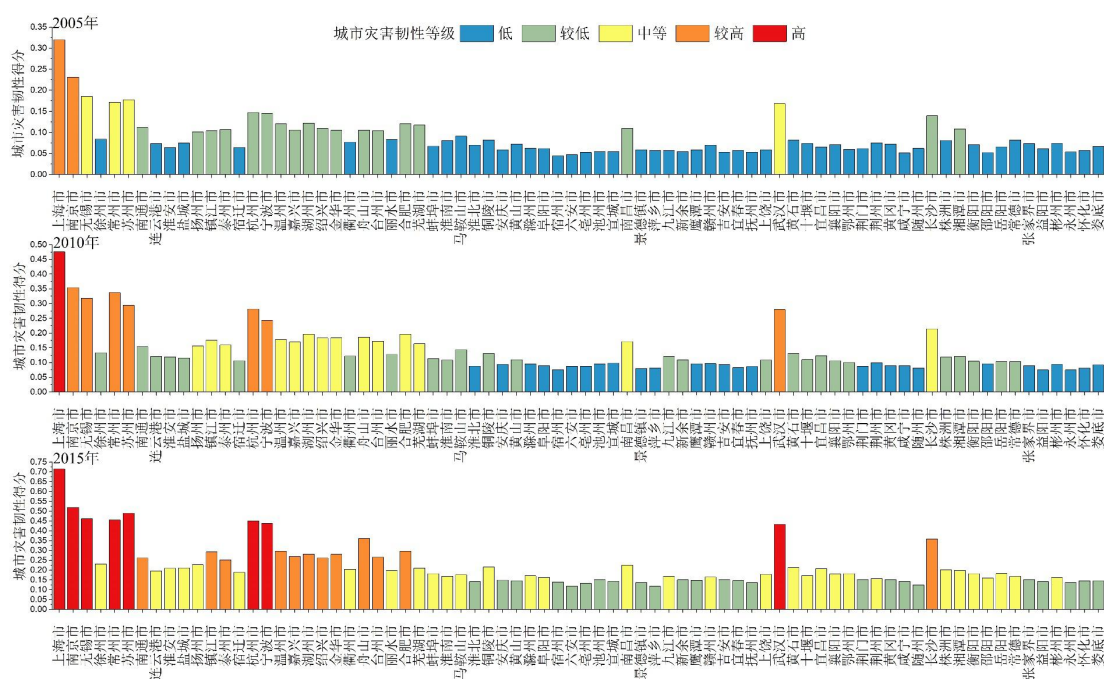


图3 城市灾害韧性等级分布

由表2和图3可见,2005年,无城市洪涝灾害韧性为高等级,仅有上海和南京两个城市洪涝灾害韧性为较高等级,大部分城市为低等级。浙江除衢州和丽水韧性为低等级外,其余8个城市韧性等级均为较低。除无锡、苏州、常州外,只有湖北省省会武汉韧性为中等等级。江西、安徽和湖南除省会城市南昌、合肥和长沙外,仅有靠近省会城市的芜湖和湘潭灾害韧性为较低等级,其他均为低等级。湖北除武汉其他城市洪涝灾害韧性均为低等级。除浙江省会杭州外,其余省会城市洪涝灾害韧性等级均高于省内大部分其他城市,江苏、江西和湖北省会城市南京、南昌和武汉灾害韧性等级高于省内其他所有城市。

2010年,仅有上海灾害韧性为高等级,浙江城市洪涝灾害韧性等级均在较低及以上,且除衢州和丽水外,其余城市等级均在中等及以上。江苏省城市洪涝灾害韧性等级也均在较低及以上,且南京、常州、无锡和苏州等级为较高。江西、安徽、和湖南灾害韧性等级为低的城市占省内城市的半数以上。湖北除武汉等级为中等外,等级为低和等级为较低的城市各占一半数量。省会城市的灾害韧性等级均在中等以上,且高于省内大部分,江西、湖南和湖北省会城市南昌、长沙和武汉灾害韧性等级高于省内其他所有城市。

2015年,上海、南京市、苏州、无锡、常州、杭州、宁波、武汉市8个城市洪涝灾害韧性为高等级,无灾害韧性为低等级的城市。浙江省除衢州市和丽水市外,其余城市等级均在较高及以上。江苏省所有城市等级均在中等以上。江西省除南昌市、上饶市、九江市和赣州市等级为中等外,其余城市等级均为较低。安徽省城市洪涝灾害韧性等级为较低的城市数占安徽省城市数的一半,仅有省会城市合肥为较高等级。湖南省和湖北省灾害韧性等级为中等的城市数超过了省内城市数的一半,长沙市等级为较高,武汉市等级为高。省会城市的灾害韧性等级均在中等以上,且高于省内大部分城市,安徽省、湖南省和湖北省省会城市

合肥、长沙和武汉灾害韧性等级高于省内其他所有城市。

综合以上结果来看，城市洪涝灾害韧性等级逐年提高，上海城市洪涝灾害韧性水平领先于其他城市，并且上海、江苏、浙江三个东部省市城市洪涝灾害韧性等级明显高于安徽、江西、湖北、湖南四个中部省份城市等级。

3.4 城市洪涝灾害韧性时间变化分析

分别比较 2010 年与 2005 年韧性得分以及 2015 年与 2010 年韧性得分，得出长江中下游各城市在 5 年时间内城市洪涝灾害韧性水平的提升情况，结果见图 4。

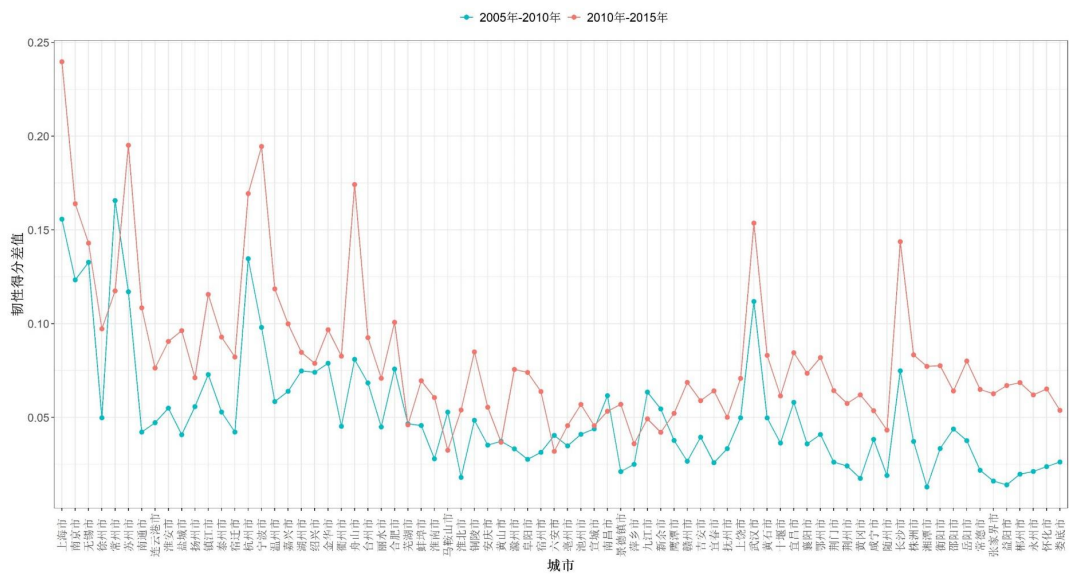


图 4 2005-2010 和 2010-2015 时间段韧性水平提升情况

由图 4 可见，所有城市洪涝灾害韧性水平在五年时间内均呈现出提高的趋势，2005-2010 年常州洪涝灾害韧性提升最多，湘潭提升最少；2010-2015 年上海洪涝灾害韧性提升最多，六安提升最少。2010-2015 年城市洪涝灾害韧性得分平均提升 0.08260，高于 2005-2010 年的城市洪涝灾害韧性得分平均提高水平。长沙和武汉在两个时间段内城市洪涝灾害韧性得分提升水平明显高于省内其他城市洪涝灾害韧性得分提升水平。除此之外，2005-2010 年，江苏常州和浙江杭州洪涝灾害韧性得分提升水平明显高于省内其他城市洪涝灾害韧性得分提升水平；2010-2015 年，江苏苏州，浙江杭州、宁波和舟山洪涝灾害韧性得分提升水平高于省内其他城市洪涝灾害韧性得分提升水平。安徽和江西各城市洪涝灾害韧性得分提升水平较为相近，没有灾害韧性得分提升水平特别突出的城市。

4 结论与建议

本文将城市在受到灾害事件威胁下所采取的措施根据灾害事件过程分为抵御、预警、应急、恢复四个响应阶段。根据各个阶段选取指标体系，构建评价指标体系，以长江中下游频发的洪涝灾害为例，对长江中下游城市 2005 年、2010 年、2015 年城市灾害韧性进行评价，

得出结论如下:

(1) 2005 年、2010 年、2015 年城市灾害韧性抵御、预警、应急、恢复阶段水平呈上升趋势。整体上,上海和江苏、浙江城市准则等级较高,各准则得分的最大值也多集中在上海和江苏,最小值多集中于安徽、湖北以及江西和湖南省份的城市,安徽、江西、湖北和湖南的省会城市等级大多高于省内其他城市。

(2) 2005 年、2010 年、2015 年城市洪涝灾害韧性等级逐年提高,在 2010 年-2015 年阶段城市灾害韧性得分平均提升水平高于 2005 年-2010 年的城市灾害韧性得分平均提高水平。上海市城市洪涝灾害韧性水平领先于其他城市,东部省市(上海、江苏、浙江)城市灾害韧性等级明显高于中部省份(安徽、江西、湖北、湖南)城市等级。

(3) 湖南和湖北省会长沙和武汉城市灾害韧性得分在 2005 年-2010 年时间段和 2010 年-2015 年时间段内提升水平明显高于省内其他城市灾害韧性得分提升水平。安徽和江西各城市灾害韧性得分提升水平较为相近,没有灾害韧性得分提升水平特别突出的城市。

在气候变化影响下,未来极端事件呈增多增强趋势,为保障长江经济带和中下游重要城市群的可持续发展,需要建立一个更加全面、更为协调的综合防灾减灾体系,提升城市应对灾害的韧性水平。

(1) 通过国土空间规划的编制和管控,逐步完善城市防灾减灾的支撑体系。通过防灾减灾规划与国土空间规划的融合,一方面规避高风险的不宜开发区域,另一方面增加城市防灾减灾能力建设相关设施与空间的合理布局,促进韧性建设与社会经济的协调发展。

(2) 通过智慧城市和大数据平台建设,建立针对洪涝灾害的应急预警系统,增加城市暴雨洪涝灾害预警与应急救援能力。

(3) 建议从城市圈、城市群和城市一体化等网络角度,构建区域应急治理系统,针对洪涝灾害的影响范围广、上下游跨区域致灾的特征,实现联动救治。

(4) 针对不同级别和功能的城市,进行年度城市洪涝灾害韧性评价,并进行同等级别和功能的城市的横向比较,及时发现韧性建设薄弱环节或落后区域。

参考文献

- [1] Masnavi MR, Gharai F, Hajibandeh M. Exploring urban resilience thinking for its application in urban planning: a review of literature[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16(1): 567-582.
- [2] 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(05): 713-724.
- [3] 谭畅,孔锋,郭君,等.1961-2014 年中国不同城市化地区暴雨时空格局变化——以京津冀、长三角和珠三角地区为例[J].灾害学,2018,33(03): 132-140.
- [4] 卞洁,李双林,何金海.长江中下游地区洪涝灾害风险性评估[J].应用气象学报,2011,22(05): 604-611.

- [5] Alexander DE. Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013, 13(11): 2707-2716.
- [6] Timmerman P. Vulnerability, Resilience, and the Collapse of Society. Toronto: Institute for Environmental Studies[J]. Environmental Monograph, 1981, 1.
- [7] 杨敏行, 黄波, 崔翀, 等. 基于韧性城市理论的灾害防治研究回顾与展望[J]. 城市规划学刊, 2016, (01): 48-55.
- [8] Chen C, Xu L, Zhao D, et al. A new model for describing the urban resilience considering adaptability, resistance and recovery[J]. Safety science, 2020, 128: 104756.
- [9] Cutter SL. The landscape of disaster resilience indicators in the USA[J]. Natural Hazards, 2016, 80(2): 741-758.
- [10] 刘宏波, 翟国方, 施益军. 从响应到韧性: 基于《Urban Resilience Master Planning》的思考[A]. 中国城市规划学会、沈阳市人民政府. 规划 60 年: 成就与挑战——2016 中国城市规划年会论文集 (01 城市安全与防灾规划) [C]. 中国城市规划学会、沈阳市人民政府: 中国城市规划学会, 2016: 12.
- [11] 孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(08): 151-158.
- [12] 张明斗, 冯晓青. 长三角城市群内各城市的城市韧性与经济发展水平的协调性对比研究[J]. 城市发展研究, 2019, 26(01): 82-91.
- [13] 修春亮, 魏冶, 王绮. 基于“规模—密度—形态”的大连市城市韧性评估[J]. 地理学报, 2018, 73(12): 2315-2328.
- [14] 杜金莹, 唐晓春, 徐建刚. 热带气旋灾害影响下的城市韧性提升紧迫度评估研究——以珠江三角洲地区的城市为例[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(05): 88-98.
- [15] 邓诗琪. 气候变化背景下城市社区雨涝灾害韧性测度研究[D]. 南京工业大学, 2018.
- [16] 田丽. 基于韧性理论的老旧社区空间改造策略研究[D]. 北京建筑大学, 2020.
- [17] 缪惠全, 王乃玉, 汪英俊, 林陪晖. 基于灾后恢复过程解析的城市韧性评价体系[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(01): 10-27.
- [18] 刘梦丽. 中原城市群城市脆弱性时空格局演变及障碍因素研究 [D]. [硕士学位论文]. 河南大学, 2018.

作者简介

吴华清, 华中师范大学城市与环境科学学院, 本科生

方建, 华中师范大学城市与环境科学学院, 副教授

栾一博, 武汉市规划研究院, 博士