

王诗莹, 李伦彬, 于光华. 地震灾害下城市关键基础设施毁伤恢复力评估方法[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 14-18.
[WANG Shiying, LI Lunbin and YU Guanghua. A Method for Assessing the Resilience of Urban Critical Infrastructure Damaged by Earthquake Disasters[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 14-18. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.02.003.]

地震灾害下城市关键基础设施毁伤恢复力评估方法^{*}

王诗莹, 李伦彬, 于光华

(黑河学院 计算机与信息工程学院, 黑龙江 黑河 164300)

摘要:为提高地震灾害后城市关键基础设施恢复力评估准确性, 该文提出城市关键基础设施毁伤恢复力评估方法。分析城市关键基础设施在地震灾害中的响应特征, 确定基础设施毁伤程度与地震灾害等级之间的关系; 收集地震灾害信息, 检测地震灾害等级, 以此作为毁伤恢复力评估的重要指标; 另外, 结合毁伤恢复力的其他影响因素分析结果, 构建恢复力评价指标体系, 通过指标的求解, 与设置的标准数据进行比对, 得出最终的毁伤恢复力量化评估结果。在以某城市区域为例的案例研究中, 通过模拟地震灾害的方式对毁伤恢复力评估, 并对评估结果进行分析, 显示恢复力的平均评价指数为 0.81, 能够有效提高恢复力评估准确性, 具有一定应用前景。

关键词: 地震灾害; 城市设施; 关键基础设施; 设施毁伤; 恢复力评估

中图分类号: P315; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)02-0014-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.02.003

城市关键基础设施是指在出现失效或破坏后, 会严重影响人民生活、社会稳定、经济发展乃至国家安全的物理存在或抽象的系统和资产, 为城市的各项经济活动和其他社会活动提供基础支持。地震灾害是一种典型的自然灾害, 通过引起地面的强烈振动, 致使地面出现裂缝和变形, 导致各种建筑物倒塌和损坏, 设备设施损坏, 破坏城市关键基础设施^[1]。地震灾害对城市关键基础设施的安全稳定影响很大, 不仅会破坏关键基础设施, 甚至可能导致关键基础设施的倒塌。通过震区重建, 震后被破坏的关键基础设施可以得到恢复。

恢复力是城市环境生态中的属性之一。因此, 对地震灾害下城市关键基础设施毁伤恢复力评估至关重要。毁伤恢复能力主要包括生态系统恢复能力、适应性和管理性恢复能力以及维修恢复力等多个部分。灾后恢复系统建设已成为信息系统建设的重点^[2]。为了科学地建立一个灾难恢复系统, 有必要对现有系统的灾难恢复需求和能力进行评估。利用恢复力评估不仅可以掌握恢复系统的容灾能力, 而且可以根据缺陷指导容灾建设。目前, 在相关理论和技术研究中, 基于安全标准的管理毁伤恢复能力评估的研究方法多种多样, 如李宁等人^[3]进行了灾害恢复力的量化方法讨论与实证研究, 构建了基于产业关联影响的间接损失评估模型, 定量评估恢复力变化与实际灾害损

失的关系; 李强等人^[4]引入了基础设施网络均衡理论, 并完成了包含灾害概率、灾害后果以及恢复速率三个主要因素在内的生命线体系恢复力评估框架。尽管以上学者对毁伤恢复能力评估进行了研究, 但以上方法缺乏科学的指标体系, 难以对毁伤恢复力进行准确评估, 为解决以上问题, 文章提出在地震灾害背景下开展城市关键基础设施毁伤恢复力评估, 设置了专业的毁伤恢复力评价标准, 为评估准确性提供了有力保障。

1 关键基础设施毁伤恢复力评估方法设计

该城市关键基础设施毁伤恢复力评估方法在传统评估方法的基础上, 针对地震灾害因素进行具体分析, 并通过评估指标的求解与计算, 得出毁伤恢复力的综合评估量化结果。

1.1 设置毁伤恢复力评价标准

在进行损伤恢复能力评估之前, 应首先确定具体的恢复能力评估标准, 并将其作为评估的比较标准数据。城市基础设施的修复能力可分为 4 个层次, 即完整性、脆弱性、可修复性和不可修复性。适应性、抵抗力、可持续性等特征可以指示弹性的变化, 系统的某些特征也可以指示弹性的

^{*} 收稿日期: 2020-10-27 修回日期: 2020-01-05

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目(18YJCZH175); 黑龙江省自然科学基金项目(YQ2019G004); 黑龙江省哲学社会科学规划项目(19GLD232); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2020081); 黑龙江省属高校基本科研业务费(2018-KYYWF-1247)

第一作者简介: 王诗莹(1985-), 女, 汉族, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 副教授, 主要从事灾害学、关键基础设施保护、脆弱性评估研究。E-mail: shiying_w@126.com

变化趋势。通过设置不同恢复力等级对应的特征参数值区间, 得到恢复力等级分类的标准数据, 从而确定相应的恢复力评分结果。

1.2 分析关键基础设施地震响应与恢复特征

对城市关键基础设施的地震响应与恢复过程进行模拟, 确定其恢复特性^[5]。地震前后任何受损的关键基础设施 n 的功能分别表示为 $f_{o,n}$ 和 $f_{d,n}$, 并根据发电功率进行测量。因此, 损害严重程度可以表示为:

$$S_n = 100 \times (1 - f_{d,n}/f_{o,n}) (\%)。 \quad (1)$$

城市关键基础设施功能损失按原有水平进行标准化, 故式(1)的计算结果为 100% 则表示基础设施停止运行, 而计算结果为 0% 则表示基础设施完全运行^[6]。基于以上原理, 城市关键基础设施在地震破坏后的恢复过程可用时间响应曲线表示如图 1 所示。图 1 中, 城市关键基础设施在 t_0 时刻遭受地震冲击毁伤, 因而性能从正常水平 P_0 降至 P_1 。当资源投入到恢复系统时, 系统性能逐渐恢复, 并最终恢复到正常状态^[7]。图 1 控制时间与时间轴所围成面积反映了地震灾害后果和恢复速度, 可以以此来衡量城市关键基础设施的恢复力大小, 具体可以表示为:

$$R = \int_{t_0}^R F(t) dt / \int_{t_0}^R N(t) dt。 \quad (2)$$

式中: $F(t)$ 和 $N(t)$ 分别表示的是目标设施的 PRF 函数和正常运行时的性能时程函数。

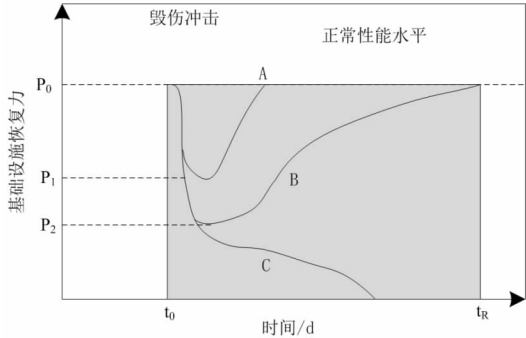


图 1 基础设施震后性能时程响应曲线

1.3 影响毁伤恢复力的因素

由式(2)可知, 城市关键基础设施的恢复力由设施的响应函数和时间函数决定^[8]。因此, 可以确定, 影响基础设施破坏恢复力的因素包括地震灾害的强度和各基础设施本身的脆弱性, 如经济、教育、医疗等条件。图 2 显示了地震灾害强度与灾后恢复能力的关系。

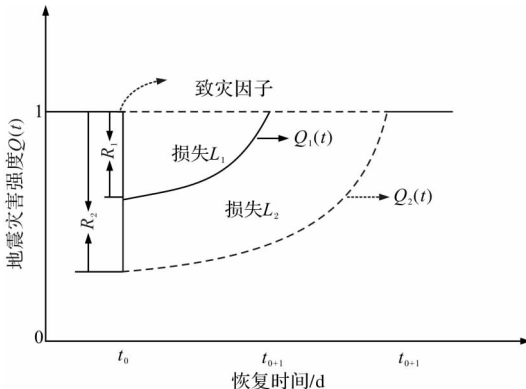


图 2 地震灾害强度与恢复力关系曲线

若一个城市关键基础设施的脆弱性程度为 Q , 一个危险程度为 M 的地震致灾因子在 t_0 时刻出现, 此时基础设施所遭受的风险水平为 G_1 , 经过时间 $t_{0+1} - t_0$ 恢复至正常水平, 则基础设施的灾害毁伤损失可以表示为:

$$L_1 = \int_{t_0}^{t_{0+1}} (1 - Q_1(t)) dt。 \quad (3)$$

当面临相同的地震灾害因素时, 如果系统具有较高的脆弱性和较大的暴露性, 系统所承担的风险将大于 G_1 。如果地震灾害强度较大, 那么基础设施会经过更长的 $t_{0+2} - t_0$ 恢复至正常水平^[9]。

1.4 自动监测地震灾害毁伤程度

从上述毁伤恢复力的影响因素分析结果中可以看出, 地震灾害等级是影响基础设施毁伤恢复力的重要影响因素, 因此要想得出基础设施恢复力的评价结果, 首先需要对地震灾害的等级以及毁伤程度进行检测^[10], 参照地震烈度的划分可将地震灾害可以分为 12 个等级, 不同等级地震灾害的毁伤程度如表 1 所示。

利用专业的地震检测装置对地震灾害的等级进行检测, 并通过专业分析来确定地震灾害等级, 与表 1 中的数据进行对照, 可得出地震灾害程度的自动检测结果。

1.5 构建毁伤恢复力评价指标体系

城市基础设施恢复力评价指标体系分为目标层、系统层和指标层三个层次, 其中目标层水平评估的结果可以用来反映国家和地区城市基础设施恢复力的客观情况^[11]。城市基础设施恢复力系统划分为城市基础设施恢复力、灾害监测预警能力、城市交通设施恢复力和应急救援能力四个方面。此外, 根据指标体系的设计原则选取具体的评估指标, 选择的指标应能直接反映系统层的实际情况。评价指标体系的基本要素构成了评价体系的基本要素。

1.5.1 设置毁伤恢复力评价指标

遵循毁伤恢复力评价指标的选择原则, 得出初始评价指标体系如表 2 所示。

1.5.2 评价指标的标准化处理

在损伤恢复力综合评价指标体系中数据单元不一致, 包括成本型指标和效率型指标^[12]。效率型指数值越大, 恢复力越大, 而成本型指数则相反值越大, 恢复力越小。在获得各指标的实际数据时, 需要对不同维度的数据进行标准化处理, 以消除维度的影响。具体的处理过程如下:

$$X = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), X_i \text{ 为正指标}; X = (X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}), X_i \text{ 为负指标}。 \quad (4)$$

式中: X 为归一化处理后的指标数据结果, X_i 表示设置的初始原始数据。

1.5.3 求解计算指标权重

指标权重采用分层单列排序法计算, 其主要任务是计算判断矩阵的特征向量值和最大特征值, 然后进行一致性检验^[13]。利用公式(5)计算判断矩阵 A 的特征向量。

$$W_i = (a_{i1} \times a_{i2} \times a_{in})^{1/n} / \sum_{i=1}^n (a_{i1} \times a_{i2} \times a_{in})^{1/2}。 \quad (5)$$

式(5)的求解结果表明各因素相对重要性的排序数值。计算随机一致性比值 CR , 若 CR 小于 0.1 说明矩阵具有满意的一致性, 否则, 就需要调整判断矩阵, 直到评价指标具有满意的一致性为止。

表 1 参照地震烈度表划分的地震灾害毁伤程度简表

地震灾害等级	相对震级	判据	地震烈度
微震	<3	地面上的人无感	I
小震	3.5	室内个别静止中的人有感觉	II
小震	4	室内少数静止中的人有感觉，门、窗轻微作响，悬挂物微动	III
小震	4.5	室内多数人、室外少数人有感觉，少数人梦中惊醒，门、窗作响，悬挂物明显摆动，器皿作响	IV
中小地震	5	室外多数人有感觉，多数人梦中惊醒，抹灰出现微细裂缝，个别屋顶烟囱掉砖，不稳定器物摇动或翻倒	V
中地震	5.5	多数人站立不稳，墙体出现裂缝，檐瓦掉落，河岸和松软土出现裂缝，饱和砂层出现喷砂冒水	VI
中地震	6	多数人惊逃户外，汽车驾乘人员有感觉，房屋轻度破坏，局部开裂，河岸出现塌方，饱和砂层常见喷砂冒水，松软土地裂缝较多	VII
中地震	6.5	多数人摇晃，行走困难，大部分基础建筑中等破坏，干硬土出现裂缝，树梢折断，有人畜伤亡	VIII
大地震	7	行动的人摔倒，大部分建筑物严重破坏、多处倒塌且修复困难，滑坡塌方常见	IX
大地震	7.5	处于不稳状态的人会摔离地面，有抛起感，大多数建筑倒塌，出现山崩、地裂，桥梁损坏，铁路轨道轻微弯曲	X
特大地震	8	建筑普遍倒塌，地震断裂延续很长，大量山崩滑坡	XI
特大地震	≥8.5	地面剧烈变化，山河改观	XII

注：表中的数量词：“个别”为 10% 以下，“少数”为 10% ~ 50%，“多数”为 50% ~ 70%，“大多数”为 70% ~ 90%，“普遍”为 90% 以上。

表 2 初始毁伤恢复力评价指标体系

目标层	系统层	指标层	指标性质
地震灾害下的城市关键基础设施毁伤恢复力	压力	余震次数对地震灾害后恢复的影响程度	-
		地震灾害预防手段对地震灾害后恢复的影响程度	+
	状态	卫生机构床位数对地震灾害后恢复的影响程度	+
		医疗救援人数对地震灾害后恢复的影响程度	+
		当地经济发展水平对地震灾害后恢复的影响程度	+
		政府财政收入对地震灾害后恢复的影响程度	+
	响应	城市基础设施自身稳定性对地震灾害后恢复的影响程度	+
		城市基础设施外围保护建筑对地震灾害后恢复的影响程度	+

1.6 实现关键基础设施毁伤恢复力量化评估

将求解出的毁伤恢复力的评价指标结果与其权重值相乘，得出地震灾害下毁伤恢复力的综合评价结果^[14]。将得出的量化指标结果与设置的毁伤恢复力评价标准进行比对，得出最终的城市关键基础设施毁伤恢复力评估结果。

2 实例分析

将设计的地震灾害下城市关键基础设施毁伤恢复力评估方法应用到实际的案例当中，由此来测试评估方法的应用价值。

2.1 案例背景

案例研究以某区域的城市关键基础设施为背景，研究区域处于 104°48' ~ 119°35'E，26°37' ~ 31°48'N，从行政角度来看，研究区域内包括 3 个地级城市和 2 个县级城市。

2.2 收集城市关键基础设施数据

为了保证案例研究分析结果的可信度，收集研究区域内的关键基础设施数据以及历年的地震灾害数据。其中历年地震灾害数据的收集结果如图 3 所示。

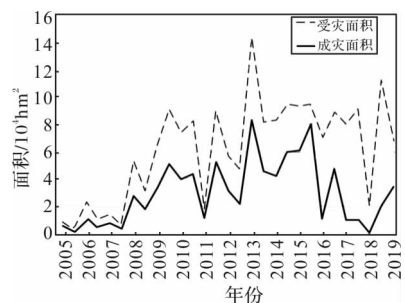


图3 区域地震灾害受灾和成灾面积变化图

城市基础设施数据包括城市道路交通基础设施、城市管网基础设施以及城市园林基础设施等，收集各种基础设施的结构数据和运行特征数据，以此作为毁伤恢复力评估的数据基础。

2.3 设置地震灾害毁伤场景

为了充分应用研究提出的毁伤恢复力评估方法，采用地震灾害作为其毁伤冲击场景。由于地震属于一种自然灾害无法通过人为控制的方式为实验提供地震环境，因此在此次研究分析中调取国内外历年的地震数据进行地震波模拟，从而实现对地震灾害毁伤场景的模拟与设置。模拟的地

震灾害波形如图 4 所示。

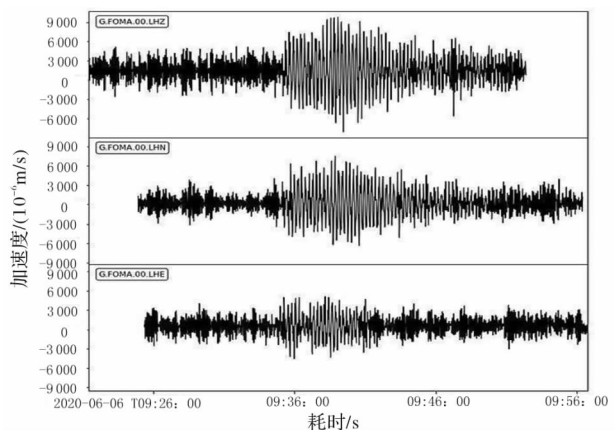


图 4 地震灾害波形图

2.4 毁伤恢复力评估过程

利用计算机设备分别导入收集的城市基础设施数据以及地震灾害模拟波形数据, 并观察在不同程度的地震灾害下此关键基础设施毁伤恢复力的变化情况。应用该评估方法, 得出基础设施的地震灾害响应 PRF 曲线。结合响应特征, 分别得出评价指标体系中各个指标的具体取值以及权值求解结果, 并最终得出量化的恢复力评价结果。

2.5 案例研究结果

通过相关数据的统计分析, 得出城市关键基础设施毁伤恢复力的评估结果如图 5 所示。

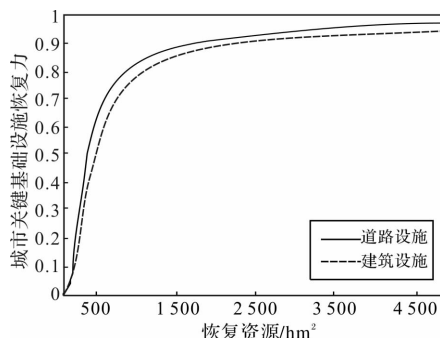


图 5 基础设施毁伤恢复力变化曲线

从图 5 中可以看出在相同的恢复资源投入值下, 建筑设施建设的弹性略小于交通基础设施的弹性, 无论是何种关键基础设施, 随着开采资源的变化, 损伤恢复力曲线都是以凸起的形式出现的。虽然建筑基础设施可以提高系统的性能水平,

但不能显著提高系统的弹性。综合图 5 中曲线的变化趋势和分布区间, 可以得出此次研究区域的城市关键基础设施的平均毁伤恢复力评价结果指数为 0.81。

3 结束语

震害恢复力是由自然环境和社会环境两方面因素共同决定的, 可以根据对城市关键基础设施毁伤恢复力的评估结论, 提出科学可行的灾后恢复重建对策, 以改变地震灾害事件发生的频率, 降低其脆弱性、风险性和危害性, 提高灾后恢复力, 为防灾减灾建设做出贡献。

参考文献:

- [1] 李强, 陈志龙, 赵旭东. 地震灾害下城市生命线体系恢复力双维度综合评估[J]. 土木工程学报, 2017, 50(2): 65-72.
- [2] 刘伟, 黎洁, 徐洁. 连片特困地区易地扶贫移民生计恢复力评估[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 673-680.
- [3] 李宁, 张正涛. 灾害恢复力的量化方法讨论与实证研究[J]. 闽江学刊, 2018, 10(2): 38-43.
- [4] 李强, 陈志龙, 赵旭东. 地震灾害下城市生命线体系恢复力双维度综合评估[J]. 土木工程学报, 2017, 50(2): 65-72.
- [5] 杜国强, 李慧宇, 林慧, 等. 哈尔滨市洪涝灾害城市系统恢复力评价研究[J]. 山西建筑, 2019, 45(7): 251-253.
- [6] 李宏微, 徐永亮, 许尔琪, 等. 珠江三角洲的城市灾害恢复力评估[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 209-215.
- [7] 方伟, 曾博, 徐富强, 等. 极端灾害下基于智能楼宇分布式电源的配电系统负荷恢复力评估分析[J]. 发电技术, 2019(5): 440-447.
- [8] 刘孝富, 蒋卫国, 李京, 等. 生态系统恢复力研究进展及其在防灾减灾中的应用前景[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 157-162.
- [9] 黄晓军, 王博, 刘萌萌, 等. 社会-生态系统恢复力研究进展——基于 CiteSpace 的文献计量分析[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 367-377.
- [10] 田丛珊, 方一平. 地质灾害胁迫下的社会经济恢复力评估及其提升策略——以都江堰市为例[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 127-136.
- [11] 赵春黎, 严岩, 陆咏晴, 等. 基于暴露度-恢复力-敏感度的城市适应气候变化能力评估与特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 250-259.
- [12] 王威, 朱强强, 武佳佳, 等. 地震灾害生命损失多模型评估方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(11): 233-243.
- [13] 刘常瑜, 尚书, 赵强, 等. 基于 GIS 和 TOPSIS-PSR 的湖南省洪涝灾害后恢复力评价[J]. 水电能源科学, 2018, 36(1): 70-73.
- [14] 李波, 朱四虎, 路雁霞, 等. 基于层次分析法的城市地震灾害风险评估研究[J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(2): 21-27.

A Method for Assessing the Resilience of Urban Critical Infrastructure Damaged by Earthquake Disasters

WANG Shiyang, LI Lunbin and YU Guanghua

(School of Computer Science and Information Engineering, Heihe University, Heilongjiang 164300, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of assessing the resilience of urban infrastructure after earthquake disasters, we propose a method for assessing the resilience of urban critical infrastructure damage. The response characteristics of urban critical infrastructure in earthquake disasters is analyzed and the relationship between the

degree of infrastructure damage and the level of earthquake disasters is determined. Collecting earthquake disaster information and detecting earthquake disaster level as an important index for damage resilience assessment. In addition, combining with the analysis results of other influencing factors of damage resilience, the evaluation index system of damage resilience is constructed. By solving the index and comparing it with the set standard data, the final evaluation result of damage resilience is obtained. In the case study taking an urban area as an example, the damage resilience was evaluated by simulating the earthquake disaster, and the evaluation results were analyzed. The results showed that the average evaluation index of the resilience was 0.81, which could effectively improve the accuracy of the resilience evaluation and had a certain application prospect.

Key words: earthquake disasters; urban facilities; critical infrastructure; facilities are damaged; assessment of resilience

(上接第 13 页)

Analysis on the Compound Probability and Future Change of Flood and Waterlogging Disaster Factors in Shanghai

HE Fangfang¹, LIANG Zhuoran² and DONG Guangtao¹

(1. Shanghai Climate Center, Shanghai 200030, China; 2. Hangzhou Meteorological Bureau, Hangzhou 310051, China)

Abstract: According to the time series by extracted annual extreme values of four elements (precipitation, wusong wind speed, surface rainfall in taihu lake basin, and wusong mouth tidal level) in the third stage of Shanghai area (1970 – 2004, 2020 – 2054 and 2060 – 2094), first, the single-factor climate change analysis of “rainstorm or flood or wind or tide” was carried out based on the GEV distribution, it showed that the annual extreme value of the single factor of “rainstorm or flood or wind or tide” is increasing under the influence of climate change. Then, the transcendental probability model of the three-dimensional variables in the Copula function is used to calculate the joint probability of “rainstorm-flood-wind”, “rainstorm-flood-tide” and “rainstorm-wind-tide”, the results show that the probability of “rainstorm-flood-wind”, “rainstorm-flood-tide” and “rainstorm-wind-tide” increases in the future climate change period compared with the historical base period in Shanghai. The increase in the Composite probability of simultaneous occurrence of flood and waterlogging disaster factors indicates that there are greater risks in flood control and drainage safety in Shanghai under the influence of climate change.

Key words: flood disaster; compound probability; future change

《灾害学》入编《中文核心期刊要目总览》(2020 版)

《灾害学》编辑部收到北京大学图书馆的入编通知,《灾害学》入编《中文核心期刊要目总览》(2020 版)(即第 9 版)。

《中文核心期刊要目总览》采用定量评价与定性分析相结合的方法,每 3 年遴选一次。定量评价指标体系采用了被引量(全文、摘要)、被摘率(全文、摘要)、被引量、他引量(期刊、博士论文)、影响因子、他引影响因子、5 年影响因子、5 年他引影响因子、特征因子、论文影响分值、论文被引指数、互引指数、获奖或被重要检索系统收录、基金论文比(国家级、省部级)、Web 下载量、Web 下载率 16 个评价指标,选作评价指标统计源的数据库及文摘刊物达 48 种,统计到的文献数量共计 142 亿余篇次,涉及期刊 13 764 种。参加核心期刊评审的学科专家 1 万多位。经过定量筛选和专家定性评审,从我国正在出版的中文期刊中评选出 1 990 种核心期刊。

《灾害学》继入编《中文核心期刊要目总览》2011 年版、2017 年版之后,再次入编《中文核心期刊要目总览》(2020 年版)。这项荣誉的获得,离不开主办单位、各协办单位的大力支持,离不开编委会各位编委和审稿专家的热心帮助,更离不开广大作者和读者的信任、关心和支持。此项荣誉的获得,更加巩固了《灾害学》杂志在灾害研究领域的学术地位。《灾害学》将一如既往的为广大作者提供最好的服务,努力为党和国家的防灾减灾事业做出应有的贡献。

《灾害学》编辑部

