第27卷第4期 2012年4月

周瑶,王静爱. 自然灾害脆弱性曲线研究进展[J]. 地球科学进展 2012 27(4):435-442. [Zhou Yao, Wang Jing'ai. A review on development of vulnerability curve of natural disaster[J]. Advances in Earth Science 2012 27(4):435-442.]

# 自然灾害脆弱性曲线研究进展<sup>\*</sup>

# 周 瑶<sup>1,2</sup>,王静爱<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875;

2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院,北京 100875;

3. 北京师范大学区域地理研究实验室,北京 100875)

摘 要:在全球变化与全球化背景下自然灾害风险逐年增大,灾害评估就成为风险防范的重要基础。灾害评估包括灾情估算与风险评估2个方面,而脆弱性分析是把灾害与风险研究紧密联系起来的重要桥梁。脆弱性曲线作为定量精确评估承灾体脆弱性的方法,近年来在多领域被广泛运用,成为灾情估算、风险定量分析以及风险地图编制的关键环节。从致灾因子角度综述脆弱性曲线的研究进展,重点阐述基于灾情数据、已有曲线、调查和模型的脆弱性曲线构建。研究表明脆弱性曲线构建由单曲线向多曲线库、单一参数向综合参数、单一方法向多领域综合应用发展,具有综合化和精细化的趋势。进一步开展多领域、多方法综合脆弱性曲线研究,对灾损快速评估及风险评价,防灾减灾具有重要意义。

关键 词:自然灾害;致灾强度;灾情;脆弱性曲线;风险评估

中图分类号:X4 文献标志码:A 文章编号:1001-8166(2012)04-0435-08

在全球变化与全球化背景下,自然灾害风险及 其造成的损失有增加的趋势,1990—1999 年 10 年 间自然灾害造成的经济损失超过了 1950—1959 年 的 15 倍<sup>[1]</sup>。尤其进入 21 世纪以来巨灾频发,如 2005 年美国卡特里娜飓风,遇难人数近1 300 人,直 接经济损失近1 000 亿美元; 2008 年发生在中国的 汶川里氏 8 级地震,遇难总人数超过 80 000 人,直 接经济损失近 8 500 亿人民币。自然灾害风险成为 制约国民经济发展的重要因素,给区域的可持续发 展带来沉重压力和严峻挑战。灾害评估作为风险防 范的重要基础,近年来逐渐成为研究重心和关注热 点<sup>[2]</sup>。

灾害评估包括灾情估算与风险评估 2 个方面<sup>[3]</sup>, 而脆弱性分析是把灾害与风险研究紧密联系

起来的重要桥梁,其主要目的是分析社会、经济、自 然与环境系统的相互作用及其对灾害的驱动力、抑 制机制和响应能力<sup>[4]</sup>。脆弱性曲线作为精细定量 的脆弱性评价方法和灾害评估的关键环节,其核心 要素是表达致灾因子强度和承灾体脆弱性的定 量关系。

在中国"十一五"科技支撑重点项目——"综合 风险防范关键技术与示范"中,脆弱性曲线作为一 个关键的科学方法问题被广泛关注并深入探讨<sup>[2]</sup>。 在实际研究中,由于致灾因子和承灾体的种类多样, 因此脆弱性曲线表达的方法繁多,指标种类和内涵 界定也较为混乱。脆弱性曲线的概念界定、数据规 范、曲线精度验证、普适性等方面还需进一步探讨。 本文根据脆弱性曲线的特点,从致灾因子维度系统

收稿日期:2011-10-10;修回日期:2012-02-13.

<sup>\*</sup> 基金项目:公益性行业(气象)科研专项"全球变化背景下中国气象灾害风险区划研究"(编号:GYHY200906019);国家自然科学基金项目 "区域农业旱灾适应性评价模型及风险防范模式研究"(编号:41171402)资助.

作者简介:周瑶(1987-),女,天津人,硕士研究生,主要从事自然灾害风险评价和风险制图研究. E-mail: yaose. zy@163. com

<sup>\*</sup> 通讯作者:王静爱(1955-), 女, 河北定州人,教授, 博导, 主要从事自然灾害风险评价和区域地理研究. E-mail: jwang@ bnu. edu. cn

综述了脆弱性曲线的研究进展;着重介绍了各种脆弱性曲线构建方法的原理,并对其进行分析和评述; 最后讨论了脆弱性曲线的发展趋势和目前研究中存 在的主要问题。

1 脆弱性曲线相关概念

自然灾害风险(Risk) 是灾害损失的可能性,主要取决于致灾因子、脆弱性和暴露性3个因素<sup>[3]</sup>。 联合国 ISDR<sup>[4]</sup>定义的风险是由自然或人为因素导 致的致灾因子和脆弱性之间的关系,表现为所导致 的损害结果的可能性或人口伤亡、财产损失和经济 活动波动的期望损失,可以用风险(*R*) = 致灾因子 (*H*)×脆弱性(*V*)来表示。

承灾体(Element-at-risk)就是各种致灾因子作 用的对象,是人类及其活动所在的社会与各种资源 的集合<sup>[5]</sup>。灾情(Disaster)包括人员伤亡及造成的 心理影响,直接经济损失和间接经济损失,建筑物破 坏,生态环境及资源破坏等<sup>[5]</sup>。脆弱性(Vulnerability)衡量承灾体遭受损害的程度,是灾损估算和风险 评估的重要环节,是致灾因子与灾情联系的桥梁。 当承灾体的脆弱性侧重于因灾造成的灾情水平方面 时,通常可用致灾(h)与成害(d)之间的关系曲线或 方程式表示,即V=f(h,d),又叫脆弱性曲线(Vulnerability Curve)或灾损(率)曲线(函数)(Damage/ Loss Curve),用来衡量不同灾种的强度与其相应损 失(率)之间的关系,主要以曲线、曲面或表格的形 式表现出来<sup>[6]</sup>。

## 2 主要致灾因子脆弱性曲线研究进展

1964 年, White 首次提出了脆弱性曲线方法应 用于水灾脆弱性评估<sup>[7]</sup>。近年来该方法在水灾、地 震、台风、滑坡、泥石流、雪崩和海啸等灾害研究中逐 渐被推广应用。

2.1 水灾脆弱性曲线

水灾是较早应用脆弱性曲线,也是目前脆弱性 曲线发展较为完善的灾种之一。1977 年,英国洪灾 研究中心(FHRC)的Penning-Roswell等<sup>[8]</sup>提出了针 对英国居住和商用房产的阶段一损失曲线(图1)。 他们将建筑分为21 类,并分别求出各类建筑在2种 水灾延时情况及4种社会条件中的水灾脆弱性曲线 共168条,这是目前水灾脆弱性曲线研究最为详尽 的成果之一<sup>[9]</sup>。其中以建筑物和财产的损失金额 (英镑)作为衡量脆弱性的指标。

德国的 HOWAS 数据库包含有针对不同建筑物

上千条水灾历史记录,也被应用于脆弱性曲线的构造<sup>[10]</sup>。澳大利亚资源与环境研究中心(CRES)构建的 ANUFLOOD 模型<sup>[11]</sup>,利用英国和澳大利亚的洪水灾情数据构建了住宅等建筑物的脆弱性曲线。 Dutta 等<sup>[12]</sup>则给出了包括建筑物和农作物在内的多种承灾体日本水灾脆弱性曲线。



Fig. 1 Flood vulnerability curves of buildings<sup>[7 8]</sup> (a) 按洪水淹没时长; (b) 按承灾体

(a) Flood duration; (b) Damage component

综合来看 在水灾脆弱性曲线的研究中 政灾因 子指标在静水条件下常用水深和淹没时间表示 ,而 在水流速度较大的情景下常用流速表示。水灾脆弱 性曲线在发达国家流域水灾的风险评价中广泛应 用 特别是美国、日本、英国等地研究更为深入。

2.2 地震脆弱性曲线

地震脆弱性曲线起初应用于核电站的地震概率 风险评估。Orsini<sup>[13]</sup>基于建筑震害现场调查,提出 使用无参数的地震强度等级建立了易损性函数。 Singhal 等<sup>[14,15]</sup>运用蒙特卡罗仿真法,对钢筋混凝 土框架结构建立了易损性曲线。Hwang 等<sup>[16]</sup>针对 缺乏桥梁结构地震破坏数据的地区,考虑地震地面 运动、局部工程场地条件和桥梁自身参数的不确定 性构建了桥梁结构的易损性曲线(图2)。

Shi 等<sup>[17]</sup> 利用台湾震后调查数据建立了 PVC 管道的地震脆弱性曲线。Colombi 等<sup>[18]</sup> 根据意大利 地震案例数据分别建立了砖结构和加固结构的建筑 脆弱性曲线,并与地震模型建立的脆弱性曲线进行 了对比分析。在地震灾害脆弱性曲线研究中,常用 的致灾强度指标有峰值地面加速度、地表位移和结 构自振周期对应的加速度反应谱等。

2.3 滑坡/泥石流、雪崩灾害脆弱性曲线

从 20 世纪 90 年代起, 脆弱性曲线逐渐应用于 滑坡、泥石流和雪崩等山地灾害的风险评估中。 Bell 等<sup>[19]</sup>利用冰岛的数据对滑坡中建筑物和人的 脆弱性进行了分析。Galli等<sup>[20]</sup>针对意大利的建筑





物和道路分别建立了滑坡灾害的脆弱性阈值曲线。 在泥石流灾害中,Fuchs等<sup>[21 22]</sup>采用奥地利历史灾 情数据构建了不同结构建筑物泥石流脆弱性曲线。 Akbas等<sup>[23]</sup>构造了意大利泥石流掩埋深度和房屋 脆弱性的关系曲线,并与前人结果进行了比较分析。 在滑坡与泥石流灾害脆弱性曲线中,主要的致灾强 度指标有掩埋深度和掩埋面积,而在雪崩灾害的脆 弱性曲线中,常见的致灾强度有掩埋深度、雪崩面积 和雪崩压强等。

雪崩的脆弱性曲线近年才出现和推广<sup>[24]</sup>。 Wilhelm 等利用瑞士、冰岛、奥地利等地的灾情数据 构建了建筑物及人员的雪崩脆弱性曲线<sup>[24 26~28]</sup>。 雪崩脆弱性曲线主要针对北欧、西欧等地的风险评 估展开 研究也较为深入。

2.4 冰雹、旱灾脆弱性曲线

在冰雹脆弱性曲线研究中,澳大利亚和瑞士的 研究开展较早,起初大多以田间实验和定点观测的 方式获取农作物雹灾致灾和损失数据用以脆弱性曲 线的构建<sup>[29]</sup>。后来的研究者基于实验数据、保险数 据与遥感反演数据等建立了建筑物、农作物、汽车等 的冰雹脆弱性曲线(图3)<sup>[30~32]</sup>。有研究者认为 Logistic 曲线是冰雹动能以及农作物损失之间的非线 性关系的最好表达<sup>[31]</sup>。冰雹灾害常用冰雹直径、冰 雹动能和降雹时的风速作为致灾因子指标,其中冰 雹直径数据容易测量,应用广泛。图3中,损失率表 示为保险索赔损失与最大可能损失的比例,致灾因 子指标由冰雹动能( $E_{KINPIX}$ )表示,其计算公式为:  $E_{\text{KINPIX}} = \int_{t_0}^{t_1} \int_{s_0}^{s_1} \dot{E}(x \ y \ t) \ dx dy dt \ [\text{J/m}^2]$  $\dot{E} = 5 \times 10^{-6} \times Z^{0.84} \quad [\text{J/(m}^2 \cdot \text{s})]$  $\text{其中 } Z \ \text{为雷达反射率因子 } \dot{E} \ \text{为动能通量}.$ 









在旱灾脆弱性曲线研究中,有众多研究者从气 象产量的角度入手,研究了不同干旱强度下作物减 产的情况<sup>[33,34]</sup>。Yamoaha<sup>[35]</sup>对美国内布拉斯加州 玉米产量和标准化降水量指数(SPI)进行统计分 析,进而评价了玉米受旱的风险。有学者认为从农 业旱灾形成的机理上来看,农作物缺水造成的危害 和损失随着缺水时间延长呈 Logistic 曲线关系<sup>[36]</sup>, 还有学者利用作物模型分别模拟和构建了小麦、玉 米和水稻旱灾脆弱性曲线<sup>[37~39]</sup>。

常见的旱灾脆弱性曲线通常选取降水距平,SPI 或水分胁迫作为致灾强度指标。在农业旱灾风险研 究中,采用模型方法建立农业旱灾主要承灾体的脆 弱性曲线库,可以为农业旱灾脆弱性从统计意义上 的研究转向灾害机制上的研究提供一种思路<sup>[40]</sup>,有 广阔的应用前景。

2.5 台风(飓风)脆弱性曲线

台风脆弱性曲线研究较多地与工程和保险相结 合。Lee 等<sup>[41]</sup>构建了呈对数分布房屋易损性函数。 Walker 利用 20 世纪 80 年代前后澳大利亚房屋飓风 保险数据构建的建筑物脆弱性曲线 ,是目前应用最 广泛的脆弱性曲线<sup>[42]</sup>。他针对不同时期的建筑物 构建与最大风速相关的脆弱性曲线 ,并认为不同的 设防水平造成了脆弱性差异。Khanduri 等<sup>[42]</sup>针对 美国不同结构房屋建立了风速与建筑物平均损失率 的脆弱性曲线(图 4)。其中 ,损失率指经济损失所 占房屋总体价值的百分比。台风脆弱性曲线所选的 致灾强度指标主要有过程降水量、日最大降水量和 最大风速等<sup>[4]</sup>。





基于上述,从致灾因子上看,地震和水灾脆弱性 曲线研究起步早且发展较为成熟,已有较完善的体 系及与政府和商业等相结合的应用成果。滑坡与泥 石流、雪崩、冰雹等灾害的脆弱性曲线研究在20世 纪90年代左右兴起,相对较为薄弱,主要是因为数 据获取难度大、标准不一。此外暴风雪<sup>[43]</sup>、海 啸<sup>[44,45]</sup>等灾害也有相关脆弱性曲线的研究。从研 究区域上看,脆弱性曲线的研究主要集中于发达国 家,尤其是自然灾害高风险区,如美国、日本和欧洲 莱茵河流域等地的洪水脆弱性曲线,欧洲阿尔卑斯 山区的滑坡与泥石流脆弱性曲线研究等。

## 3 脆弱性曲线构建方法研究进展

## 3.1 基于灾情数据的脆弱性曲线构建

基于实际灾情数据构建脆弱性曲线是脆弱性曲 线研究中最为常用的方法。研究者利用收集到的灾 情数据中致灾与成灾一一对应的关系,采用曲线拟 合、神经网络等数学方法发掘之间的脆弱性规律。

灾情数据来自历史文献、灾害数据库、实地调查 或保险数据等。其中,历史文献、政府统计数据及灾 害数据库是脆弱性曲线的主要数据源。基于问卷和 访谈等方式开展灾后实地调查,可以获取第一手数 据,但较难应用于没有发生灾害的地区且工作量较 大。自然灾害保险相关险种的历史赔付清单,可反 映灾害的实际损失,从保险数据推定易损性曲线的 方法,在北美<sup>[9]</sup>、澳大利亚<sup>[31,32]</sup>、日本<sup>[9,12]</sup>等保险市 场较为发达的地区已得到有效应用。水灾、台风灾 害等是自然灾害保险中发展较为成熟的险种<sup>[4]</sup>。 保险数据对灾情信息记录较为完善精细,在一定程 度上弥补了灾情记录缺乏的情况。

利用灾情数据构建的脆弱性曲线可以较好地反 映实际灾害情景中承灾体的脆弱性水平。在现实中 灾情大小往往还受孕灾环境、灾害预警、防灾水平等 多因素影响,因此灾情记录很难真正刻画出承灾体 自身的脆弱性水平,并且案例数据的不完备也使脆 弱性曲线具有一定的不确定性<sup>[10,46]</sup>。

#### 3.2 基于已有脆弱性曲线的再构建

在已有脆弱性曲线的基础上,通过研究区对曲 线参数本地化的修正,形成新的脆弱性曲线的过程 称为脆弱性曲线的再构建,这种方法应用也比较广 泛。Papathoma-Köhle等<sup>[47]</sup>曾对前人滑坡/泥石流、 雪崩、洪水等灾害的脆弱性曲线研究所涉及的21条 曲线进行分类,其中有12条曲线是采用已有曲线再 构建的方式建立的。有研究者引用 US Army Corps of Engineer 提供的洪水灾害建筑物脆弱性曲线,针 对意大利的水灾灾情,对曲线参数进行了修正<sup>[48]</sup>。 石勇<sup>[49]</sup>根据区域经济差异,从物价、GDP、汇率等方 面对台湾水灾曲线参数进行修正,重构了上海地区 水深一住宅损失脆弱性曲线。在雪崩灾害研究中, 研究者普遍采用 Wilhelm 提出的脆弱性曲线根据研 究区域的实际灾情数据,对该曲线参数进行修正和 重构<sup>[24-28]</sup>。

脆弱性曲线的再构建是对已有脆弱性曲线的修 正,既可以节省独立构建脆弱性曲线的工作量,也便 于同类脆弱性曲线之间的比较。但由于重建的脆弱 性曲线进行了参数本地化修正,强化了适用的区域 性和承灾体类别的针对性,所以在区域上进一步推 广受到限制。

### 3.3 基于系统调查的脆弱性曲线构建

基于对承灾体价值调查和受灾情景假设,推测 出不同致灾强度下的损失率进而构建脆弱性曲线的 方法,被称为系统调查法<sup>[7]</sup>。在水灾脆弱性曲线研 究中首次出现且应用广泛。系统调查法基于土地覆 盖和土地利用模式、承灾体类型、调查问卷等信息, 发掘致灾参数和损失的一一对应关系,进而构建曲 线。以建筑物的系统调查为例:首先对建筑物进行 分类,并对实地建筑物中的财产分类登记;然后根据 财产的类型、质量和使用年限,估算财产价值;再根 据每类财产放置的平均高度(距地面),判断不同水 位情景下该类财产的淹没深度;最后建立不同类别 建筑物的水灾脆弱性曲线。这种方法在英国、澳大 利亚等地的水灾脆弱性评估中也被广泛采用<sup>[7 8 49]</sup>。

基于系统调查法构建脆弱性曲线,优点在于摆 脱了灾害案例数据不完备的局限。但由于调查的工 作量较大,实地调查方法较难适用于大范围区域。 并且调查数据准确性和假设情景的合理性直接决定 了脆弱性曲线的精度,人为因素较大。

3.4 基于模型模拟的脆弱性曲线构建

随着现代信息技术快速发展,基于计算机模型 模拟的脆弱性曲线应运而生。此方法的关键是在数 字环境下通过模型模拟方法,跟踪致灾因子和承灾 体的相互作用过程,定量表达脆弱性曲线。不同的 灾害研究中均发展了各自的灾害评估模型可以用于 脆弱性曲线的构建。在地震灾害中,大量研究者利 用模型模拟的方法构建了以超越概率表示的结构理 论易损性曲线。在旱灾研究中,有学者利用作物生 长模型模拟不同旱灾致灾强度情景,并计算出相应 的产量损失率,构建了作物的旱灾脆弱性曲 线<sup>[37~39]</sup>。

基于模型模拟构建的脆弱性曲线的优点在于: 可以模拟任意灾害情景中的承灾体脆弱性水平,深 入发掘灾害信息,较少受到实际灾情数据缺乏的限 制;可以从灾害自身机理出发细致刻画承灾体的脆 弱性;随着研究的不断深入和成果积累,模型必将逐 步完善,脆弱性曲线的精度也会随之提高,因此模型 模拟法将会成为脆弱性曲线构建的发展趋势。主要 问题是在处理海量数据时,模型的运算量较大,技术 要求高。此外,在模型构建和模拟的过程中,还需要 实际灾情数据检验和修正,从而保证脆弱性曲线的 精度。

## 4 脆弱性曲线综合化研究趋向

4.1 从单曲线向多曲线集成发展

随着承灾体类型的精细化,单一脆弱性曲线已 不能满足风险评估的需求,逐渐向多条脆弱性曲线 集成发展,形成脆弱性曲线库。目前地震、水灾、冰 雹灾种都逐渐形成了自己的脆弱性曲线库。美国联 邦应急管理署(FEMA)在HAZUS-MH的洪水评估 模型中就集成了多种来源的建筑物脆弱性曲线,形 成了比较完备的水灾建筑物脆弱性曲线库。在风险 评估中,可根据具体的孕灾环境和承灾体性质,选择 合适的脆弱性曲线进行建筑物水灾损失计算<sup>[9]</sup>。 由 Risk Frontiers 构建的冰雹灾害脆弱性曲线库,是 集成在针对悉尼和布里斯班地区的冰雹损失开发的 HailAUS 模型里。 从单一地区单一承灾体的离散研究成果向区域 性和承灾体精细化的有体系的脆弱性曲线库发展可 应用于集成入灾害模型化平台,作为脆弱性和灾损 评估模型的一部分。同时加深了人们对脆弱性的认 识,得到的灾害风险评估更为精确,从而为区域防灾 减灾工作提供了更为准确的支持。

### 4.2 从单指标向多指标综合发展

随着对致灾机理认知的深入和致灾测量的精细 化、单指标已经不能满足风险评估的需求,脆弱性曲 线逐渐向多致灾参数综合发展。在水灾研究中,学 者往往综合考虑水深、流速、淹没时间、水灾预警时 间<sup>[9,7,12]</sup>或水深与水速的乘积作为致灾强度综合指 标<sup>[50]</sup>。在冰雹灾害中,Hohl等<sup>[31]</sup>采用冰雹动能作 为致灾因子指标,并用风速进行修正,较为显著地提 高了建筑物冰雹脆弱性曲线精度。旱灾研究中有学 者提出利用作物需水量、蒸散量和灌溉情景等因素 综合计算得到的作物水分胁迫指数构建小麦的旱灾 脆弱性曲线<sup>[39]</sup>。

由于历史灾害记录往往有限,不同观测获取的 致灾强度参数也不一致,在单指标脆弱性曲线的构 建上造成了较大的困难。多指数综合的脆弱性曲线 的出现,提高了灾害数据的可用性,丰富了可分析样 本量。对基于小样本的灾害风险分析提供了新的可 能性。同时从多个角度刻画致灾强度,有助于人们 对灾害机理的全面认识和深入研究,提高了脆弱性 分析的精度。

## 4.3 从单一方法向多领域综合集成方法发展

随着信息技术和评价方法的多元化,脆弱性曲 线的构建方法各有利弊,需互相验证从而提高精度。 单一方法不能满足脆弱性曲线构建的需求,需要组 合和优选,逐渐向多领域综合集成方法发展。在地 震和水灾研究中,有研究者将基于灾情数据构建的 实际脆弱性曲线与基于模型构建的理论脆弱性曲线 进行相互验证,从而提高曲线的精度。针对历史灾 情数据有限且离散的不完备样本问题,黄崇福<sup>[51]</sup>用 信息扩散近似推理结合 BP 神经网络构建混合模糊 神经元网络模型,用于地震、台风等灾害的损失评估 中,均得到了较理想的效果<sup>[51~53]</sup>。

脆弱性曲线本身是多领域结合的研究成果。致 灾因子和承灾体损失数据可来自于历史文献、统计 数据、保险数据、遥感反演、实地测量、问卷调查等多 种手段和数据源。而各灾种的机理模型也是数学、 地学、计算机科学等学科理论的综合应用。因此从 单一方法向多领域、多方法的集成,是脆弱性曲线发 展的自身需求和必然趋势。多种技术的应用和推动 降低了脆弱性曲线构建难度 提高了脆弱性曲线 的评估精度 ,从而拓宽了应用范围。

## 5 结论与讨论

脆弱性曲线是各种灾害风险评估的关键。从不 同灾种的脆弱性曲线发展来看,地震、水灾、台风等 灾害的研究集合政府、商业和保险等领域的力量,脆 弱性曲线研究较为成熟,已经积累了大量成果构建 脆弱性曲线库,形成了较完善的脆弱性评估模型;其 他一些灾种,如滑坡/泥石流、旱灾等,脆弱性曲线研 究起步较晚,成果大多以特定区域单一的脆弱性曲 线形式呈现,应用价值还需进一步证实推广。随着 灾害和风险逐渐向定量化、精确化发展,越来越多的 灾种开始研究应用脆弱性曲线,研究区域逐渐扩大, 整体研究有不断推广和深入的趋势。

从脆弱性曲线构建方法来看,基于历史灾情数 据的构建方法出现较早,是从已成结果中发掘脆弱 性规律,属于"归纳型"脆弱性曲线;而基于系统调 查和模型模拟构建的脆弱性曲线是由灾害参数正向 模拟灾害过程得到致灾强度和脆弱性之间的关系, 则属于"推论型"脆弱性曲线。随着现代信息技术 快速发展和对灾害研究的深入,能反映脆弱性本质 的理论——脆弱性曲线将成为日后的发展趋势。

从脆弱性曲线综合化研究趋向来看,随着灾害 风险评价理论和技术的不断发展,人们开始从多个 视角、多元化综合考虑,探索致灾因子和承灾体脆弱 性间的定量关系。而多视角、多元化的综合应用也 将成为脆弱性曲线今后的发展趋势。

目前,国内外脆弱性曲线研究已积累了一定的 成果和经验,并在继续深入和推广,但研究中仍存在 一些问题。如同一灾种内的脆弱性曲线在脆弱性概 念界定、指标选择、数据标准、曲线精度等方面大多 缺少一定的规范和评价标准,建议可在今后的研究 中针对灾种和承灾体2个维度构建脆弱性曲线的行 业标准,对曲线的研究和应用进行规范。针对脆弱 性曲线综合化的发展趋势,迫切需要建立多层次、多 种方法综合的方法体系,综合利用数据库技术、地 理信息系统技术、遥感技术等,综合分析处理灾情统 计数据、地理信息数据、遥感数据等多源数据以用于 脆弱性曲线的构建。在此基础上构建综合应用平 台,对多源数据、多种技术和多曲线进行集成和共 享,进而建立标准化和业务化的综合脆弱性曲线系 统,为灾损快速评估及风险评价、区域防灾减灾工作

### 服务。

## 参考文献(References):

- World Bank. Hazards of Nature, Risk to Development: An IEG Evaluation of World Bank Assistance for Natural Disaster [R]. Washington DC: World Bank 2006.
- [2] Fang Weihua, Wang Jing´ai, Shi Peijun, et al. Integrated Risk Governance—Database, Risk Map and Web Platform [M]. Beijing: Science Press, 2011. [方伟华,王静爱,史培军,等. 综合 风险防范——数据库、风险地图与网络平台[M]. 北京:科学 出版社,2011.]
- [3] Shi Peijun. Theory and practice on disaster system research in a fourth time [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(6): 1-7.
  [史培军.四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 1-7.]
- [4] UN/ISDR. Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives 2004 Version [Z]. United Nations Publication, 2004.
- [5] Shi Peijun. Theory and practice on disaster system research in a third time[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(3): 1-9.
  [史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报 2002, 11(3): 1-9.]
- [6] Shi Peijun. Atlas of Natural Disaster Risk of China [M]. Beijing: Science Press 2010. [史培军. 中国自然灾害风险地图集[M]. 北京:科学出版社, 2010.]
- [7] Smith D I. Flood damage estimation—A review of urban stagedamage curves and loss functions [J]. Water SA Manuscript ,1994 , 20(3): 231-238.
- [8] Penning-Rowsell E C , Chatterton J B. The Benefits of Flood Alleviation: A Manual of Assessment Techniques [M]. UK: Gower Technical Press , 1977.
- [9] Shi Yong, Xu Shiyuan, Shi Chun, et al. A review on development of vulnerability assessment of floods [J]. Progress in Geography, 2009, 28(1):41-46. [石勇,许世远,石纯,等.洪水灾害脆弱 性研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(1):41-46.]
- [10] Merz B , Kreibich H , Thieken A , et al. Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings [J]. Natural Hazards and Earth System Science , 2004 , 4: 153–163.
- [11] Gissing A , Blong R. Accounting for variability in commercial flood damage estimation [J]. Australian Geographer , 2004 , 35 (2):209–222.
- [12] Dutta D , Herath S , Musiake K. A mathematical model for flood loss estimation [J]. Journal of Hydrology , 2003 , 277(1/2):24– 49.
- [13] Orsini G A. Model for buildings vulnerability assessment using the parameterless scale of seismic intensity (PSI) [J]. Earthquake Spectra , 1999 , 15(3): 463-483.
- [14] Singhal A, Kiremidjian A S. Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage [J]. Journal of Structural Engineering ,1996, 122(12): 1 459–1 467.
- [15] Singhal A, Kiremidjian A S. Bayesian updating of fragilities with application to RC frames [J]. Journal of Structural Engineering,

1998 , 124(8) : 922-929.

- [16] Hwang H, Liu Jingbo. Seismic fragility analysis of reinforced concrete bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37 (6): 47-51. [Hwang H, 刘晶波. 地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 47-51.]
- [17] Shi B J , Chang C H. Damage survey of water supply systems and fragility curve of PVC water pipelines in the Chi-Chi Taiwan Earthquake [J]. *Natural Hazards*, 2006, 37(1/2):71-85.
- [18] Colombi M, Borzi B, Crowley H, et al. Deriving vulnerability curves using Italian earthquake damage data [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6(3): 485–504.
- [19] Bell R , Glade T. Quantitative risk analysis for landslides—Examples from Bildudalur , NW-Iceland [J]. Natural Hazards and Earth System Science , 2004 , 4(1):117–131.
- [20] Galli M , Guzzetti F. Landslide vulnerability criteria: A case study from Umbria , central Italy [J]. Environment Manage , 2007 A0(3/4): 649-664.
- [21] Fuchs S, Heiss K, Hübl J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment [J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2007, 7(5): 495–506.
- [22] Fuchs S. Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria-paradigms of vulnerability revisited [J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2009, 9(2): 337–352.
- [23] Akbas S O , Blahut J , Sterlacchini S. Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows [C] // Proceedings of Landslide Processes: From Geomorphologic Mapping to Dynamic Modeling , 2009.
- [24] Cappabianca F, Barbolini M, Natale L. Snow avalanche risk and mapping: A new method based on a combination of statistical analysis, avalanche dynamics simulation and empirically based vulnerability relations integrated in a GIS platform [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 54(3): 193-205.
- [25] Wilhelm C. Quantitative risk analysis for evaluation of avalanche protection projects [C] // Hestness E ed. Proceedlings of 25 Years of Snow Avalanche Research , 1998.
- [26] Jonasson K , Sigurosson S , Arnalds P. Estimation of Avalanche Risk [R]. Vedurstofu Islands n. R99001-ur01 , Reykjavik , 1999.
- [27] Keylock C J, Barbolini M. Snow avalanche impact pressure-vulnerability relations for use in risk assessment [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(2):227-238.
- [28] Barbolini M, Cappabianca F, Sailer R. Empirical estimate of vulnerability relations for use in snow avalanche risk assessment [C] // Brebbia C ed. Risk Analysis IV. Southampton: WIT, 2004: 533-542.
- [29] Garcia R R, Weiss B E, Murphy A A. Relationships between crop damage and hail fall parameters on the high plains [J]. Atmospheric Research, 1990 25(6):559-582.
- [30] Leigh R , Kuhnel I. Hailstorm loss modelling and risk assessment in the Sydney region , Australia [J]. Natural Hazards , 2001 24 (2): 171–185.

- [31] Hohl R, Schiesser H, Aller D. Hailfall: The relationship between radar-derived hail kinetic energy and hail damage to buildings[J]. Atmospheric Research, 2002 63(1/2): 177-207.
- [32] Hohl R, Schiesser H, Knepper I. The use of weather radars to estimate hail damage to automobiles: An exploratory study in Switzerland [J]. Atmospheric Research 2002, 61(3): 215-238.
- [33] Xue Changying, Huo Zhiguo, Li Shikui, et al. Risk assessment of drought and yield losses of winter wheat in the northern part of North China [J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(1): 131-139. [薛昌颖, 霍治国,李世奎,等. 华北北部冬小麦干 旱和产量灾损的风险评估 [J]. 自然灾害学报, 2003, 12 (1):131-139.]
- [34] Liu Ronghua. Analysis and Assessment Technology Research of Drought Risk of Winter Wheat in Henan [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Engineering, 2008. [刘荣花. 河南省 冬小麦干旱风险分析与评估技术研究[D]. 南京:南京信息 工程大学 2008.]
- [35] Yamoaha C F , Walters D T , Shapiro C A , et al. Standardized precipitation index and nitrogen rate effects on crop yields and risk distribution in maize [J]. Agriculture , Ecosystems and Environment , 2000 , 80(1): 113–120.
- [36] Pan Yaozhong. A research on temporal-spatial characteristics of drought in China during 1949 ~ 1990 [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 1996, 32(1): 138-142.
  [潘耀忠.中国近40年旱灾时空格局分析[J].北京师范大学学报:自然科学版,1996,32(1): 138-142.]
- [37] Wang Zhiqiang. The Drought Disaster Risk Research of Wheat Based on the Assessment of Physical Vulnerability[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2008. [王志强.基于自然脆弱性评 价的中国小麦旱灾风险研究[D].北京:北京师范大学, 2008.]
- [38] He Fei. Regional Agricultural Drought Disaster System Research—Case Study of Drought Disaster of Rice [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2010. [何飞. 区域农业旱灾系统研 究——以湖南蒸水流域水稻旱灾为例[D]. 北京:北京师范 大学, 2010.]
- [39] Jia Huicong, Wang Jing´ai, Pan Donghua, et al. Maize drought disaster risk assessment based on EPIC Model: A case study of maize region in northern China [J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(5): 643-652. [贾慧聪,王静爱,潘东华,等. 基于 EPIC 模型的黄淮海夏玉米旱灾风险评价[J]. 地理学报, 2011,66(5): 643-652.]
- [40] Wang Zhiqiang, Fang Weihua, Shi Peijun, et al. Development and applications of the EPIC model: A review [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science) 2008, 44(5):533-538. [王志强,方伟华,史培军,等. EPIC 农作物生长模型 应用研究进展[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2008, 44(5):533-538.]
- [41] Lee K H , Rosowsky D V. Fragile assessment for roof sheathing failure in high wind regions [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27:857-868.
- [42] Khanduri A C , Morrow G C. Vulnerability of buildings to wind-

storms and insurance loss estimation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2003, 91(4): 455-467.

- [43] Heneka P , Hofherr T. Probabilistic winter storm risk assessment for residential buildings in Germany [J]. Natural Hazards, 2011, 56(3): 815-831.
- [44] Eidsvig U M , Medina-Cetina Z , Kveldsvik V , et al. Risk assessment of a tsunamigenic rockslide at Aknes[J]. Natural Hazards , 2011 , 56(2): 529–545.
- [45] Leone F, Lavigne F, Paris R, et al. A spatial analysis of the December 26th, 2004 tsunami-induced damages: Lessons learned for a better risk assessment integrating buildings vulnerability [J]. Applied Geography, 2011, 31(1): 363–375.
- [46] Moel H de, Aerts J C J H. Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates [J]. Natural Hazards, 2010, 58(1): 407-425.
- [47] Papathoma-Köhle M, Kappes M, Keiler M, et al. Physical vulnerability assessment for alpine hazards: State of the art and future needs [J]. Natural Hazards, 2011, 58(2):645-680.
- [48] Lotto P D , Testa G. Risk assessment: A simplified approach of flood damage evaluation with the use of GIS [C] // Interpraevent 2000-Villach/Osterreich , Italy 2000.

- [49] Shi Yong. The Vulnerability Assessment Research of the City Based on the Disaster Scenario—Case Study of Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University 2010. [石勇. 灾害情 景下城市脆弱性评估研究——以上海市为例[D]. 上海:华 东师范大学 2010.]
- [50] Clausen L K. Potential Dam Failure: Estimation of Consequences and Implications for Planning [M]. Middlesex: Middlesex Polytechnic, 1989.
- [51] Huang Chongfu. Risk Assessment of Natural Disaster: Theory & Practice [M]. Beijing: Science Press, 2005. [黄崇福. 自然灾 害风险评价理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2005.]
- [52] Wang Baohua, Fu Qiang, Feng Yan, et al. Mixed fuzzy nerve net model for fast evaluation on economic loss of flood [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(6): 47-51.
  [王宝华 /付强 冯艳 等. 洪灾经济损失快速评估的混合式模 糊神经网络模型[J]. 东北农业大学学报,2008,39(6): 47-51.]
- [53] Yuan Yi. Advances in the assessment of natural disaster situation [J]. Advances in Earth Science 2010, 25(1):22-32. [袁艺. 自 然灾害灾情评估研究与实践进展[J]. 地球科学进展 2010, 25(1):22-32.]

# A Review on Development of Vulnerability Curve of Natural Disaster

Zhou Yao<sup>1,2</sup>, Wang Jing´ai<sup>1,2,3</sup>

 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875 , China; 2. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875 , China; 3. Laboratory of Regional Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875 , China)

Abstract: With the trend of global change and globalization in these decades , natural disaster risk is getting much more serious. As the foundation of the disaster risk prevention , disaster assessment is composed of loss estimate and risk analysis. The vulnerability analysis is an important component in disaster assessment , connecting analysis of hazard and risk. As the quantitative and accurate assessment means of vulnerability , the vulnerability curve has been widely used in disaster estimate , quantitative risk analysis and risk mapping. This paper briefly describes the research development of vulnerability curves of different hazards , emphasizing the method of building vulnerability curves based on disaster data , existing curve , investigation and model. The research shows that the researches' focuses switch from the single curve to multi-curve database , from single parameter to synthesized parameters , and from single method to integrated method. Further development of vulnerability curve based on multi-discipline and multi-method will have the important impact on disaster estimate , risk analysis and disaster reduction.

Key words: Natural disaster; Hazard; Loss; Vulnerability curve; Risk assessment.