

区域承灾体脆弱性指标体系与精细量化模型研究^{*}

张 斌^{1,3}, 赵前胜², 姜瑜君³

(1. 清华大学 公共安全研究中心, 北京 100084; 2. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079;

3. 浙江省气象科学研究所, 浙江 杭州 310017)

摘 要: 灾害损失的严重程度由致灾环境的危险性、承灾体的脆弱性, 以及区域的应急能力决定的。承灾体脆弱性研究对灾害风险管理、区域防灾减灾、减灾投资, 以及灾害保险等有着重要的意义。建立了针对自然灾害的区域承灾体脆弱性评估指标体系; 在此基础上, 引入精细化土地类型, 基于 GIS 对承灾体脆弱性做了基于精细网格的量化模型研究; 并以浙江德清县自然灾害区划为例进行了试验。

关键词: 灾害风险; 承灾体; 指标体系; 模型; 德清县

中图分类号: X4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2010)02-0036-05

灾害(这里指自然灾害)是指人类生存、生产环境因子的异变给人类及其社会带来的灾难^[1]。灾害中的灾害源和承灾体是相互关联、相辅相成的。灾害损失的严重程度由致灾环境的危险性、承灾体的脆弱性, 以及区域的应急能力决定, 大量的灾害案例表明承灾体的脆弱性是导致灾害产生巨大损失的重要原因, 基于灾前的承灾体脆弱性指标的确定则成为区域减灾的首要任务^[2]。承灾体脆弱性评估指标指导决策部门对区域规划进行宏观调整, 以达到降低可能发生的灾害损失的目的。结合致灾环境的危险性与区域的应急能力, 在横向比较中确定不同区域的脆弱性程度, 为有关部门合理、公正地进行减灾投资提供定量化依据, 同时, 在纵向比较中通过预测分析揭示社会在发展或防灾减灾等管理方面存在或将要出现的问题, 既有利于应急管理, 也有利于决策部门对下一步经济发展布局进行调整, 促进其协调发展^[3]。

承灾体脆弱性指各种承灾体应对外部致灾因子打击的固有敏感性, 通过对承灾体脆弱性的分析来反映区域在遇到灾害时可能受到的损失程度^[3-12]。目前, 在灾害学研究中, 对脆弱性有多种不同的理解。2004 年 ISDR 将脆弱性定义为“一种状态, 这种状态决定于一系列能够导致社会群体对灾害影响的敏感性增加的自然、社会、经济和环境因素或者过程”^[13]。UNDP 将脆弱性界定为“由自然、社会、经济和环境等因素而导致的社会群体的一种状态和过程, 决定了群体受害的可能性和受害程

度”^[14-16]。葛全胜等(2008)给出了以下定义: 承灾体在面对潜在的灾害致灾因子危险性时, 由于自然、社会、经济和环境等因素的作用, 所表现出来的物理暴露性、应对外部打击的固有敏感性及与承灾体相伴的人类防抗风险的能力^[5]。本文更倾向于 ISDR(2004)年的观点, 承灾体脆弱性是指一定社会政治、经济、文化背景下, 区域容易受到伤害或损伤的程度大小, 也就是承灾体对灾害的暴露程度、敏感性等, 某孕灾环境区域内特定承灾体对某种致灾因子表现出的易于受到伤害和损失的性质。这种性质是区域自然孕灾环境与各种人类活动相互作用的综合产物。本文综合考虑人口、经济、土地利用类型等脆弱性衡量因素。

1 自然灾害承灾体脆弱性因素分析

承灾体脆弱性受承灾体的暴露程度、应对打击的敏感性、结构性脆弱, 以及社会经济因素的影响有不同的表现形式。

1.1 暴露程度

承灾体的暴露是指暴露在致灾因子影响范围内的承灾体(如人口、房屋、道路、室内财产等)数量或者价值, 它是灾害风险存在的必要条件, 承灾体的暴露取决于致灾因子的危险性和区域内承灾体总量。暴露既是脆弱性的表现形式, 又是脆弱性的影响因素。暴露使得承灾体的脆弱性发生变化, 在

* 收稿日期: 2009-10-09

基金项目: 浙江省科技厅社会发展项目“基于 GIS 的浙江台风灾害评估与区划”(2007C33062); 浙江省气象科技开放研究专项“气象应急平台中基于 GridGIS 的下垫面信息的智能综合与专题出图研究”(2008qn005)

作者简介: 张斌(1981-), 男, 浙江绍兴人, 博士, 主要从事灾害应急管理、GIS、GPS 气象学等研究工作. E-mail: zb612@163.com

易受灾地区，暴露于灾害的人口和财产的比例上升，是灾害损失增加的一个重要原因。暴露是以社会 and 物质生活的地理分布以及人们集中活动的地点来描述的。可以是家庭、工厂、道路、水域、生命线系统、农田、经济作物等各种类型。

1.2 敏感性

承灾体敏感性是指由承灾体本身的物理特性决定的接受一定强度的打击后受到损失的难易程度，是由承灾体自身性质决定的脆弱性。比如，不同要素如温度、降水、风、水陆接触在界面处形成的水平梯度较大的区域，要素变化急剧，对人类活动干扰非常敏感，系统表现出内在的脆弱性。再如老人、孩子、残疾者，或正在从其他灾害中恢复的人，对各种灾害的抗御能力显著地低于正常人，而在各种灾害中成为主要的受害者。某些类型的植被在干旱、炎热的天气下常常容易发生火灾；某些土地类型易受台风、暴雨等灾害的打击；木质房屋在地震后易发生火灾等次生灾害等等。

1.3 结构性脆弱

结构性脆弱与社会不利条件有关，诸如没有土地，城市过分拥挤，缺乏接受培训和教育的机会，没有高收入的工作及利用各种资源和服务的权力等。这种脆弱性产生于社会生活结构，而不是致灾条件或偶然变化。从某种程度上说，财富与安全成正比相关。因为充足的资金为防灾减灾投入提供了保障。发达国家可以依靠先进的科学技术、雄厚的资金，修建一系列现代化的防灾减灾设施，将人员伤亡降低到最低。尽管他们的财产损失绝对值巨大，但相对于其国民生产总值来说只占很小比例，因而具有很强的恢复力。贫穷落后地区则相反，即存在脆弱性“综合症”现象。

1.4 社会-经济因素

在社会-经济因素方面，承灾体脆弱性具体因素可以分为人口、社会经济、居民建筑物及农业经济用地、公共基础设施等几个方面：

(1)人口

城市人口众多，密度较大，因而灾害造成的人员伤亡的人数和比例都远远超过了农村。另外，对于渐发性灾害(如干旱)，人在灾害中的敏感性主要通过人体的忍耐力表现；对于突发性灾害，因其持续时间相对较短，人在这种灾害中的敏感性主要取决于应急自救的能力。

(2)经济密度

经济的高速发展，既带来社会的进步、人类对自然环境改造的能力、人类物质和生活条件的

改善，同时也造成人口不断增长和膨胀、资源的大量消耗、环境的污染、自然生态环境的破坏，造成城市承灾能力降低。值得指出的是，城市的经济社会条件是一把双刃剑，一方面，社会财富的集中会加剧城市的灾害损失，另一方面，充足的财源有利于改善社会的防灾减灾体制，增强社会的防灾减灾能力。这里从经济密度增加承灾体脆弱性方面讨论经济因素，认为区域经济密度越高，在同等致灾因子条件下，受灾地区的社会财富越多越集中，灾害损失的绝对值就大。

(3)居民建筑物及农业经济用地

居民建筑物是城市灾害的主要承灾体。城市的建筑物数量越多，密度越大，所造成的损失就可能越大。发生某种灾害后，极易造成连续多家住户遭受损失的后果。对于地震灾害来说，建筑密度大，城市空旷地带少，也会给地震后的人员疏散和安置问题带来不利影响。农业经济用地的类型很大程度上决定了针对某种特定灾害的易损情况。比如，低温灾害对果园、茶叶用地的打击尤为明显，台风灾害对鱼塘、大棚等用地的打击明显。

(4)公共基础设施

公共基础设施是指交通、供水、供电、供气等与城市运转紧密相关的系统工程。这些系统一旦遭到破坏，不仅会导致系统本身的破坏，还会引起次生灾害，加重灾害的程度。基础设施在灾后的完善程度，对于灾后的救护和城市功能的恢复发挥着重要作用。例如，交通系统的完善对于区域疏散起到非常关键的作用，一般灾害发生或者在预报状态下将要发生，那么对于疏散转移来说路网疏散难易程度对于生命财产的转移都是非常重要的；另外完善的交通系统能够使救灾物资及时地被运往灾区，保证医疗、救助和抢险的顺利进行，从而可以大大缩短灾后的恢复时间，降低灾害损失。

2 自然灾害承灾体综合脆弱性评价指标选取

根据以上对自然灾害承灾体脆弱性因素分析，区域承灾体综合脆弱性指标选取如下所示。

2.1 人口密度指数

区域人口密度指数计算公式为：

$$P_d = \frac{POP}{S}, \tag{1}$$

式中： POP 为区域内人口总数； S 为区域总面积 (km^2)。人口密度指数越高，说明人群越容易受到灾害影响，承灾体风险水平越高。

2.2 人口年龄结构指数

人口年龄结构指数计算公式为：

$$P_{vul(age)} = \frac{POP_{elder} + POP_{child}}{POP}, \tag{2}$$

式中： $P_{vul(age)}$ 为区域人口体能指数； POP_{elder} 为区域内老年（≥65 岁）人口数； POP_{child} 为区域内儿童（≤14 岁）人口数； POP 为区域人口总人数。人口年龄结构指数越高，说明该区域人口中老年人和儿童所占比例越高，他们的承灾能力就越差。

2.3 经济密度指数

区域经济密度指数计算公式为：

$$E_d = \frac{GDP}{S}, \tag{3}$$

式中： GDP 为区域内经济总量； S 为区域总面积（ km^2 ）。经济密度指数越高，说明区域越容易受到灾害影响，承灾体脆弱性就越高，但是经济密度在灾害防御能力中起到正面的降低风险的作用。

2.4 建筑物密度指数

建筑物密度指数计算公式为：

$$H_d = \frac{S_h}{S}, \tag{4}$$

式中： S_h 为区域内建筑物总面积； S 为区域总面积（ km^2 ）。建筑密度指数越高，其承灾能力越差，越容易受到损害。

2.5 公路敏感性指数

公路的敏感性主要表现为路基和路面抵抗各种外部冲击力、抗冰冻等的能力，这与公路的等级密切相关，高速公路抵抗能力最强，其次为国道、省道……因此可以采用公路等级作为其敏感性指标。对于某一个评估单元而言，内部一般具有多种等级的公路，可以采用低等级公路长度占公路总长度的比例作为公路的敏感性指标，数值越大表示公路敏感性越高，越容易受到损失，其计算公式如下：

$$R_{vul} = \frac{K_{low}}{K}, \tag{5}$$

式中： K_{low} 和 K 分别为被评估区域的低等级公路（三级以下）长度和各级公路的总长度。

2.6 生命线工程密度指数

对于一个评估单元而言，内部生命线（水、电、气、热）越密集，相对来说该区域的生命线越脆弱，计算公式如下：

$$L_{vul} = \frac{L_{length}}{S_{area}}, \tag{6}$$

式中： L_{length} 和 S_{area} 分别为区域内生命线的总长度和区域总面积。

2.7 区域疏散脆弱性指数

区域疏散脆弱性指数通过区域路网和人口密度来体现，区域内路网越发达、人口密度越低则疏散能力越强。区域疏散脆弱性指数计算公式如下：

$$E_v = \frac{i \cdot l_{length}}{POP_d \cdot S}, \tag{7}$$

式中： i 为区域内道路的等级； L_{length} 为区域内某等级道路的长度； POP_d 为区域内人口密度； S 为区域总面积（ km^2 ）。

2.8 精细化土地类型易损指数

地物作为灾害的主要承灾对象，其不同的类型针对不同的灾害具有不同程度的易损性。其易损指数计算公式如下：

$$K_{land} = \frac{k_1 S_1 + k_2 S_2 + \cdots + k_n S_n}{S}, \tag{8}$$

式中：某区域内存在 n 种地物类型； k_n 为第 n 种地物针对某一灾害类型易损系数； S_n 表示第 n 种地物在区域内的面积； S 表示区域总面积（ km^2 ）。

3 基于精细网格的承灾体综合脆弱性量化计算模型

承灾体脆弱性量化是在建立各指标评定标准的基础上，根据指标值确定出区域在该指标方面的脆弱性量化程度。目前，随着承灾体脆弱性研究的深入，脆弱性评价或计算方法也日益多样化、复杂化。承灾体脆弱性评价不仅要评价区域的脆弱性程度给出科学合理的度量，同时还要将这种定量评价转化为指导实践的有用信息传达给决策者。这就要求评价者必须要在数据的转换和评价结果的解释之间作到合理的平衡。此外，承灾体脆弱性评价的客体都是具有动态开放性的多结构、多层次、多形态的高度复杂的系统，但脆弱性评价不能面面俱到，需要抓住复杂系统脆弱性产生的关键过程。

近几年来，随着 GIS 技术的日益普及和完善，应用 GIS 技术评估自然灾害承灾体脆弱性已呈上升趋势。图层叠置法就是基于 GIS 技术发展起来的一种脆弱性评价方法，其思路是将脆弱性构成要素图层间的叠置^[5]。这种方法能够反映区域灾害承灾体脆弱性的空间差异，还能反映区域受灾害影响的风险性、敏感性等的空间差异。本文在 GIS 平台上，将所有数据落实到 1 km × 1 km 的格网上进行处理（图 1）。承灾体脆弱性以 100 m × 100 m 网格为单元进行计算量化。以浙江省德清县自然灾害区划为例进行试验。

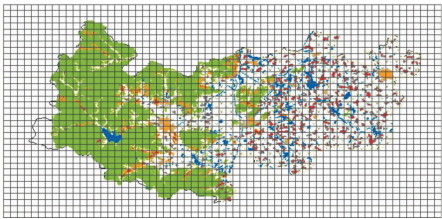


图1 落实到1 km×1 km的格网的土地利用类型数据

选取2007、2008年德清县各个乡镇人口数据,各经济产业数据、建筑物、道路、生命线,以及选取德清精细化土地利用类型,根据土地利用类型数据来量化区域承灾体的脆弱性。土地利用类型数据包含21种:21林地、22灌木林地、23疏林地、24其他林地、31高覆盖草地、32中覆盖草地、33低覆盖草地、41河渠、42湖泊、43水库、51城镇用地、52居民用地、53工交建设用地、66裸岩、111山区水田、112丘陵水田、113平原水田、121山区旱地、122丘陵旱地、123平原旱地(以上数字为类型代码)。根据土地利用类型的一级分类标准以及德清的实际情况,将以上分为居民用地(52、53)、城镇用地(51)、水域(41、42、43)、旱地(121、122、123)、林地(21、22、23、24)、草地(31、32、33)、水田(111、112、113)。下面就将上述指标中的精细化土地类型易损指数做个量化计算。

在自然灾害中,针对不同的灾害类型,不同的土地利用类型很大程度上决定了其承灾体脆弱性的程度。在德清县区域内,定义某土地类型针对某一灾害的最大值潜在易损性为1,其最小值潜在易损性为0(表1),不同土地类型针对不同灾害的潜在易损性因子。

表1 不同土地类型针对不同灾害的潜在易损性因子

	台风	暴雨 洪涝	干旱	大风	大雾	冰雹	低温 冷害	高温	雪灾	雷电
居民地	0.22	0.16	0.01	0.22	0.2	0.11	0.12	0.17	0.13	0.42
城镇地	0.11	0.26	0.01	0.24	0.75	0.11	0.12	0.36	0.24	0.42
水域	0.22	0.26	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.12
旱地	0.11	0.04	0.48	0.13	0.01	0.11	0.26	0.16	0.13	0.01
林地	0.11	0.03	0.16	0.13	0.01	0.01	0.26	0.01	0.24	0.01
草地	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
水田	0.22	0.24	0.32	0.26	0.01	0.64	0.22	0.28	0.24	0.01

如图2所示,研究区域按照土地利用类型可划分为多个多边形区域,各区的属性信息见图例。现将研究区域划分为1 km×1 km的格网状区域。不可避免地,网格化后得到的格网区域可能有落在多个源区域的情况。目前,我们采用面积权重内插法来实现最大限度地合理推定这些格网区域上的属性值(可通过一定的线性规则转化为该格网区域的承

灾体脆弱程度)。此方法根据规则格网区域内各源区域所占面积的百分比来确定格网区域的属性数值。主要步骤如下:①找出落在各个规则格网区域上的源区域;②确定各个源区域与规则格网区域相交部分的面积,并计算其占格网区域面积的百分比;③按照面积比例的多少来分配属性值。

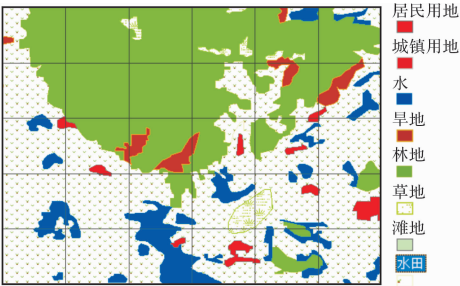


图2 德清县某一区域的1 km×1 km的格网的土地利用类型图

图3为一个格网单位,A、B、C、D为此格网内的土地利用类型。由表1得,针对某一种特定灾害而言,不同土地利用类型的相应潜在易损性因子为 I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_D 。格网中A、B、C、D的面积为 S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 。其单元格网内的精细化土地类型易损指数量化值(I)可表达为:

$$I=I_A S_A+I_B S_B+I_C S_C+I_D S_D。$$
 (9)

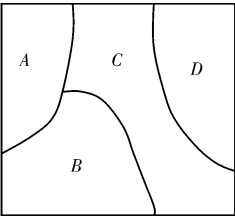


图3 单个格网类型示意图

以台风灾害为例,计算其I值。图4中,字段“typh”为针对台风灾害的值。

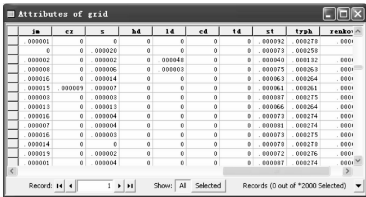


图4 针对台风灾害的精细化土地类型易损指数量化值(“typh”字段)

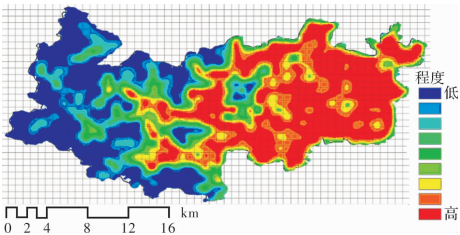


图5 德清县针对台风灾害承灾体脆弱性分布图

以上计算得出了针对台风灾害的精细化土地类型易损指数量化值 K_{land} (见式(8)), 同理, 其他的承灾体脆弱性指标如人口 (P_d)、经济 (E_d)、建筑物 (H_d)、道路 (R_{vul})、区域疏散 (E_v) 等也按照类似的网格化思路求得。最后, 求得针对台风灾害区域承灾体综合脆弱性指数 I , $I = \sum_{n=1}^k x_n I_n$ (I_n 表示人口、经济、建筑物、道路、区域疏散、土地利用类型等的脆弱性指数, x_n 表示各种指数构成承灾体综合脆弱性指数的权重)。将综合指数数据落实到格网中心点上, 根据三次样条函数插值为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 网格距的栅格分布图, 进而得出整个德清区域的针对台风灾害的承灾体综合脆弱性空间分布 (图 5)。

4 小结

本文认为承灾体脆弱性评估应从单个灾种的评估入手, 在对单个灾种的区域承灾体脆弱性有了一个较精细认识的基础上, 再选用复杂的评估方法进行整体的分析。由于承灾体脆弱性概念的模糊性及脆弱系统的复杂性, 脆弱性评估方法的研究进展缓慢, 使脆弱性研究在实践中的应用受到限制。本文提出精细化土地类型易损指数以及基于 GIS 精细化网格的指数量化模型, 在浙江德清灾害规划、嘉兴灾害规划的实际应用中取得良好的效果。另外, 在以后的研究中, 希望在多个系统耦合中的承灾体脆弱性、在不同尺度的承灾体脆弱性等方面进一步深入。

参考文献:

- [1] 薄亚利, 薄利娜. 我国城市灾害综合风险管理模式研究[J]. 法制与社会, 2008(20): 196-197.
- [2] 陈婧, 刘婧, 王志强, 等. 中国城市综合灾害风险管理现状与对策[J]. 自然灾害学报, 2006, 25(6): 17-22.
- [3] 陈国华, 梁韬, 张华文. 城域承灾能力评估研究及其应用[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(2): 651-261.
- [4] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18-25.
- [5] 葛全胜, 邹铭, 郑景云. 中国自然灾害风险综合评估初步研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 朱良峰, 吴信才, 刘修国. GIS 中矢量多边形网格化问题研究[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(1): 12-15.
- [7] 樊运晓, 罗云, 陈庆寿. 承灾体脆弱性评价指标中的量化方法探讨[J]. 灾害学, 2000, 15(2): 78-81.
- [8] 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, 16(1): 85-87.
- [9] 李世奎. 农业气象灾害风险评估体系及模型研究[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(1): 77-87.
- [10] 马宗晋. 中国重大自然灾害及减灾对策[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [11] 赵玲, 唐敏康. 城市灾害应急能力评价指标体系的研究[J]. 职业卫生与应急救援, 2008, 26(1): 31-33.
- [12] 张明媛. 城市承灾能力及灾害综合风险评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [13] ISDR. Living with Risk: A global review of disaster reduction initiative - Report of the International Strategy for Disaster Reduction Secretariat [R]. Geneva: ISDR, 2002.
- [14] UNDP. Human development report 2004: cultural liberty in today's diverse world [C]//New York, United Nations Development Programme, 2004.
- [15] Paralikas A N, Lygeros A I. A multi-criteria and fuzzy logic based methodology for the relative ranking of the fire hazard of chemical substances and installations [J]. Trans IChemE, Part B, Proc Saf Env Prot, 2005, 83: 122-134.
- [16] Brazier A M, Greenwood R L. GIS a consistent approach to land use planning decisions around hazardous installations [J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, 61: 355-361.

Research on Indexes System about Regional Vulnerability of Hazard-affected Bodies and Fine Spatial Quantitative Model

Zhang Bin^{1,3}, Zhao Qiansheng² and Jiang Yujun³

(1. Center for Public Safety Research, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. Zhejiang Research Institute of Meteorological Science, Hangzhou 310017, China)

Abstract: The seriousness of disaster losses is decided by the risk degree of disaster environment, vulnerability degree of disaster body and emergency response capacity of the region. The study on vulnerability of disaster body is of importance to disaster risk management, regional hazard prevention and investment in disaster reduction and insurance. An indexes system for regional vulnerability assessment of natural disasters is established. Refined land type data are introduced and a quantitative study on regional vulnerability by defining fine spatial grid as the basic evaluation unit based on GIS is conducted. As an example, the natural disaster zoning in Deqing country of Zhejiang province is tested.

Key words: disaster risk; hazard-affected bodies; indexes system; model; Deqing country