

京津唐地区地震灾害区域宏观脆弱性变化研究^{*}

苏桂武¹, 马宗晋¹, 朱林², 齐文华¹, 邓砚¹, 李曼¹

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 国家煤矿安全监察局, 北京 100713)

摘要: 研究灾害脆弱性的变化有助于深入理解灾害及灾害风险的形成机制。在重新审视承灾体系统灾害脆弱性的分析层次和描述角度之后, 深化了对地震灾害区域宏观脆弱性的影响因素和描述指标的再认识, 完善了以主成分分析为核心技术的分析该类脆弱性时空变化的数理方法。以此为基础, 以1985、1995、2000和2004年为代表时期, 对京津唐地区20多年来的地震灾害区域宏观脆弱性的变化做了进一步的分析和总结。主要结论是: 研究区地震灾害区域宏观脆弱性20多年来的时空变化可分解为少数几种脆弱性模式的变化; 1985年以来, 该类脆弱性的空间分异格局整体稳定; 但是, 各地自身脆弱与否的程度20多年来的变化却很显著——各大中城市市区的脆弱程度显著增强, 其他地区整体减弱, 且变化幅度前者显著大于后者; 研究区地震灾害区域宏观脆弱性的时空变化主要受该地区的人口和经济特别是工商业经济的增长、城市化发展和产业结构的调整等3方面因素所驱动。

关键词: 地震灾害区域宏观脆弱性; 时空变化; 脆弱性模式; 驱动力; 京津唐地区

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2010)02-0001-12

0 引言

近年来, 脆弱性(vulnerability)问题在灾害研究中的核心和基础地位已成为学术界的广泛共识^[1-10]。关于地震灾害中的脆弱性, 以往主要从工程抗灾角度研究各类结构物的抗震性能、易损性程度及与此密切相关的人员伤亡可能程度问题。但是, 任何一次地震灾害的承灾体均不仅限于结构物和人员等有限方面, 而总是多种类和多层面的, 且可粗略地分为承灾体单体、承灾体群体和承灾体系统三类^[11-12]。目前, 相比于结构物和人员等承灾单体与群体而言, 对不同形式承灾体系统的灾害脆弱性问题的讨论在地震灾害研究领域尚较落后。

为此, 我们将在已有研究基础上^[12-13], 以京津唐地区为例, 继续深化对区域性人类社会承灾体系统地震灾害综合整体脆弱性——地震灾害区域宏观脆弱性特点和描述分析手段、时空变化规律和变化驱动机制等问题的分析与讨论, 以期从区域尺度、综合整体层次和动态变化视角不断增进对地震灾害脆弱性问题的理解。

1 地震灾害区域宏观脆弱性描述分析手段的再认识

1.1 人类社会承灾体系统地震灾害脆弱性的分析层次和描述角度

一个遭受地震灾害打击的区域是一个复杂的承灾体系统。前期研究指出, 该承灾体系统的地震灾害宏观综合脆弱性——地震灾害区域宏观脆弱性是相对于该区域人类社会经济体系中的各种承灾单体、群体和各种次级承灾体系统的微观、具体或特定层次/侧面的灾害脆弱性状况而言的; 其概念内涵可大体表述为: 区域人类社会经济体系因遭受地震事件影响以及在与地震事件相互作用过程中, 所体现出来的破坏损失机会/几率的多少、破坏损失潜力的大小和破坏后恢复能力的强弱等方面的整体性质; 且这种整体性质是特定区域人类社会经济系统自身的固有属性, 具有明确的空间范围和空间尺度性质, 是对特定区域人类社会经济体系中的各种微观、具体和特定层面/侧面上的脆弱性, 在区域尺度上的宏观概括和系统整体上的综合^[12]。目前, 随着研究的深入, 关于

^{*} 收稿日期: 2009-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771011); 中国地震局地质研究所基本科研业务费专项(IGCEA0903); 国家科技支撑计划专题(2008BAK50B03-03)

作者简介: 苏桂武(1969-), 男, 河北丰宁人, 理学博士, 研究员, 主要从事环境演变与自然灾害、地震灾害与地震应急、灾害感知/认知与灾害响应/适应研究。E-mail: suguiwu@263.net

这些层次、侧面和角度的认识亦得到了进一步的深化,因此有必要对其进行补充和完善。

如何描述和分析人类社会承灾体系统的地震灾害脆弱性,例如一个区域人类社会经济体系的地震灾害综合脆弱性,目前国内外尚无象分析具体结构物地震灾害脆弱性(或易损性)的 ATC-X 系列(特别是 ATC-13 及后续版本)或 EMS98^[14-16] 等那样较为成熟和大体统一的方法。根据地震灾害区域宏观脆弱性的概念内涵和基本特点可知,要对该类脆弱性进行描述和分析,显然需要“承灾体与自然灾变(Hazard)间相互作用的过程分析理念”和“一般系统论理念”予以支持。基于这些理念,同时结合对国内外相关认识的综合分析来看,依照如图 1 所示框架,从不同分析层次和描述角度先逐步地加以系统解析,然后再予以某种形式的概括和综合,可能是分析该类宏观综合脆弱性的必由之路。其中,分析层次大体有结构和(生物)物理的(Structural and Physical/Biophysical)、功能(包括资源环境功能)和经济的(Functional and Economical)、社会和组织的(Social and Organizational),以及(社会)心理和文化的(Psychological/Social psychological and Cultural)4 个;概括地讲,分别与特定区域人类社会经济体系是由什么样的组份组成和组成特点如何,发挥着什么样的社会经济或资源环境功能,具有什么样的社会组织形式和社会运行机制,以及拥有什么样的社会心理和社会文化传承等方面的相关性性质相对应,体现了从有形的物质实体脆弱性到无形的“精神意识”脆弱性(例如灾害心理与灾害行为的偏差、灾害的文化响应与文化适应的局限等)间的渐进与扩散。描述角度大体有暴露(Exposure)、敏感性(Sensitivity)、弹性(Resilience)和恢复潜力(Recovery Potential)4 个,是相对于区域人类社会经济体系因遭受地震打击或面临地震危险而显现出来的一系列状态和性质而言的。当前,关于暴露、敏感性等的概念内涵,灾害研究中尚无统一界定,常常需要在具体问题中加以具体化。例如,暴露一般指承灾体与特定自然灾变间相互接近的程度,暴露的大小与灾变的频率/概率、强度、历时和灾变与承灾体间的空间邻近程度有关。由于本研究关于京津唐地区的地震灾害区域宏观脆弱性时空变化的讨论是基于设定地震(Scenario earthquake)理念进行的,即假设全研究区均同时遭受了某同一地震烈度的作用,此时描述研究区人类社会经济体系暴露于该地震影响的程度的概率是 100%,灾变强

度也是定值,因此此时研究区相对于该设定地震而具有的暴露就得到了很大程度的简化,且可概括性地理解成该区域内承灾体数量的多少,承灾体数量越多,暴露程度越大,脆弱性越大,也就是说区域内承灾体数量越多则该区域一旦遭受地震打击,产生的损失一般越多,因此脆弱性一般越大。敏感性、弹性和恢复潜力的含义有时有所交叉,但一般来说,敏感性通常与承灾体的类型有关,即不同种类的承灾体易受特定种类和强度灾变影响而产生损失的程度不同,易受影响而产生损失的程度高则敏感性强,脆弱性大。例如,相比于农田、农作物和农业生产系统而言,厂房、设备和工业生产系统更易受地震影响而产生损失,因此一个区域内工业成份越多则对地震影响越敏感,脆弱性越大。弹性一般指承灾体在受到地震等灾变事件作用造成损失/负面影响(或造成超过某域值的损失/负面影响)前,所表现出来的抵御不良影响和对不良影响进行自我适应的能力。例如房屋建筑的结构类型和建筑质量不同,抗震性能不同,亦即它们相对地震而具有的弹性不同;对于一个区域而言,如果当地社会及民众的应急反应和自救互救能力较强,则在遭受同等强度和相似特点的地震作用时,应对灾害事件和适应不良影响的能力较强,灾害损失和影响通常整体较小,亦即弹性较大,脆弱性较小。恢复潜力则主要指某种人类社会经济系统遭受地震打击形成灾害后,在恢复到震前状态或发展到其他某种状态的过程中所体现出来的自我修复和自我调整能力,自我修复和调整的能力越强,恢复能力越强,灾害带来的不良影响就越容易尽快消除,进一步的损失风险越小,因此脆弱性越小。例如发达地区的自我恢复能力通常较贫困地区强,因此灾害脆弱性亦较小等。

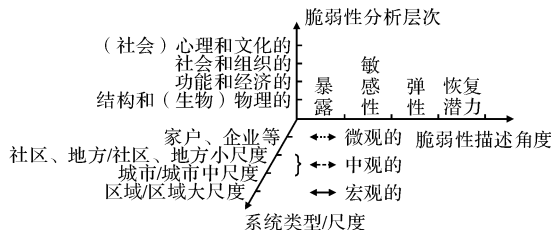


图1 人类社会承灾体系统灾害脆弱性的分析层次和描述角度

1.2 地震灾害区域宏观脆弱性的影响因素和描述指标

分析承灾体灾害脆弱性的具体方法,常用的归纳起来大致有3类:①定性分析;②基于灾害成

灾机理和成灾过程的物理化或机理化的定量分析方法,如实验法、模拟仿真法和灾害实况调查与归纳法等;③基于不同脆弱性评价指标的半定性半定量分析方法,如多指标综合评价方法等。对于一个区域的地震灾害综合宏观脆弱性而言,假如能够基于第2类方法所指示的技术思路,按照前述分析提出的描述该类脆弱性的不同层次和角度,类似建立具体结构物的损失率曲线或破坏概率矩阵那样,从地震致灾的过程与机理出发,厘定出整个区域的宏观综合脆弱性的数理表达式或数理模型,那自然是最好。但是,对于十分复杂的区域灾害脆弱性问题而言,这样做目前尚缺乏基础理论、基本数理方法和基础震害资料的有力支持,更难借助实验予以归纳或验证,同时亦缺少前人的典型研究经验以兹借鉴。因此,基于灾害脆弱性研究的现有进展,从前述地震灾害区域宏观脆弱性的不同分析层次和不同描述角度,在定性分析基础上,提取与这些层次和角度相对应的和与区域尺度相适合的各种可量化的宏观脆弱性指标,然后再以这些指标为基础进行某种形式的数理概括和综合,可能是目前定量分析地震灾害区域宏观脆弱性现实的和主要的途径。

为此,我们在分析地震事件致灾成害,特别是区域尺度和区域综合水平上如何致灾成害,以及相应的应急救援与恢复重建过程的特点及其各类影响因素^[17-20]的基础上,从描述地震灾害区域宏观脆弱性的不同层次,特别是不同角度出发,对影响该类脆弱性大小的因素及其宏观指标,进行了示范性的归纳(图2)。例如,区域社会经济系统中的人口和经济要素,从暴露角度讲,人口和经济密度可用来描述该区域的宏观脆弱性水平,即某地区的人口和经济密度越大,则该地区受到地震威胁或地震发生时受到影响的人口和财产数量就可能越多,灾前的灾害风险或灾后的灾害损失可能越大,因此脆弱性越大;而从敏感性或弹性角度讲,特定地区产业结构中的农业比重越大、人口构成中的老幼人口比例越小和人们受教育的年限越长,地震时受到的影响就可能越小(前者),而人们应对灾害的能力一般越强(后者),因此脆弱性较低;再来看恢复潜力,一个地区地方财政收入较多、人们较富裕,那么该地区通常具有较强的自我恢复能力,因此脆弱性较小。值得说明的是:

(1)本研究讨论的地震灾害脆弱性是区域尺度上的宏观综合脆弱性,因此其描述指标也往往是

宏观而概括性的,那些仅反映各因素细节、局部特点的和仅适合于描述次级尺度承灾体系统(如社区等)的指标,不在这种区域尺度脆弱性分析所要讨论的范畴之列。

(2)有些因素对地震灾害区域宏观脆弱性的影响可同时表现为正反两个方面,故需从中提取脆弱性含义不同的两类指标来同时刻画这同一因素对区域整体产生的不同的脆弱性效应。例如经济要素,一个地区的经济发达程度与该地区的灾害暴露程度有关,经济发达、财产数量多,则暴露程度大、脆弱性大,经济因素的这种脆弱性效应可用GDP密度和财产密度等加以刻画;另一方面,经济发达程度还与一个地区的自救互救能力和恢复潜力有关,经济发达,则灾时自救互救能力强、灾后恢复潜力大,脆弱性小,经济因素的这种脆弱性效应则可用地方财政收入密度、当地居民的收入和储蓄水平等加以反应。

(3)还有一些因素,如社会基础性救灾资源中的医疗、消防和军警队伍等,讨论其脆弱性效应时,我们主要关注这些因素承担的社会职能或职责所反应的脆弱性意义。显然,一个地区的医疗和消防事业越发达,则地震时该地区应急救援和抑制灾害蔓延的能力越强,因此灾害脆弱性越小;至于这些因素自身也作为承灾体的一部分而具有的脆弱性增大效应(暴露增多),与其脆弱性减小效应相比要次要得多,且这种增大效应可以通过区域内的总人口密度和财产密度加以反应,因此,在讨论这些因素的脆弱性意义时,应以其脆弱性减少效应为代表。

(4)专业领域(机构/部门等)的地震灾害及防震减灾科学认识水平、政府层面上的法律法规完备程度、政府及其有关部门的灾害应急指挥能力、民众及地方社会层面的灾害紧急应对能力等,对一个地区灾害脆弱性大小的重大和基础性的影响毋庸置疑。例如,地震科学和防震减灾理论与技术发达、防震减灾体制和法律法规体系健全的国家/地区,应对地震灾害的办法更多、更有效,减轻地震灾害的能力更强等已被国内外很多地震灾害实例所证实。但是,在我们关于京津唐地区地震灾害脆弱性时空变化的具体分析中,由于研究区是同处我国首都圈地区的一个相对较小的范围,因此从空间维度来看,这些因素的很多部分在研究区不同部分之间不大可能有本质的或显著的差别(民众和地方社会层面的灾害应对能力除外);时间维度上虽有很大变革,但目前对其灾害脆弱

性意义进行量化尚较困难。基于这些考虑，本文在具体讨论研究区地震灾害区域宏观脆弱性的时空变化时，暂未对这些因素做系统而深入的考虑。

(5)近年来的灾害实例(例如 2008 年汶川 8.0 级大地震)表明：区域内各减灾行为主体间的综合联动与协调能力/水平，包括各级政府及部门间的联动与协调能力、社会各单位/组织间的协作能力/水平、政府与地方社会及民众间的互动能力与效果等等是影响一个地区灾害脆弱性高低的重大因素。但是，关于这些能力和水平的科学诊断尚需进一步的科学探索，加之与“专业领域的地震灾害及防震减灾科学认识水平等”一样，这些因素/指标中的多数在本文所关注的那个较小空间范围内，也不大可能有本质差别，时间维度上的差别虽然是可以想象的，但具体刻画尚需探索和开发专门的手段与方法。因此，本研究关于研究区的

具体分析计算中也未对这些因素展开十分具体的讨论。

(6)近年来的灾害实例还表明：地方社会和普通民众的防震减灾观念与震灾认知水平、社会民众的灾害应激态势及自我调适能力、地域性文化影响人们响应/适应灾害的形式和特点等也是特定地区地震灾害脆弱性大小的基础性影响因素。对这些因素灾害脆弱性意义及其时空差异性的分析需要借助专门领域的知识，包括行为科学、社会和环境心理学，以及人类生态学或生态人类学等相关学科的知识。关于这些方面，我们虽然也做了一些初步的探索与实证^[19-20]，但取得的认识尚是很局部和有限的，目前尚不足以在研究区地震灾害区域宏观脆弱性时空变化的具体定量分析中加以系统应用。因此，本文关于研究区的实际分析中对这些因素/指标的考虑也是很有限的。

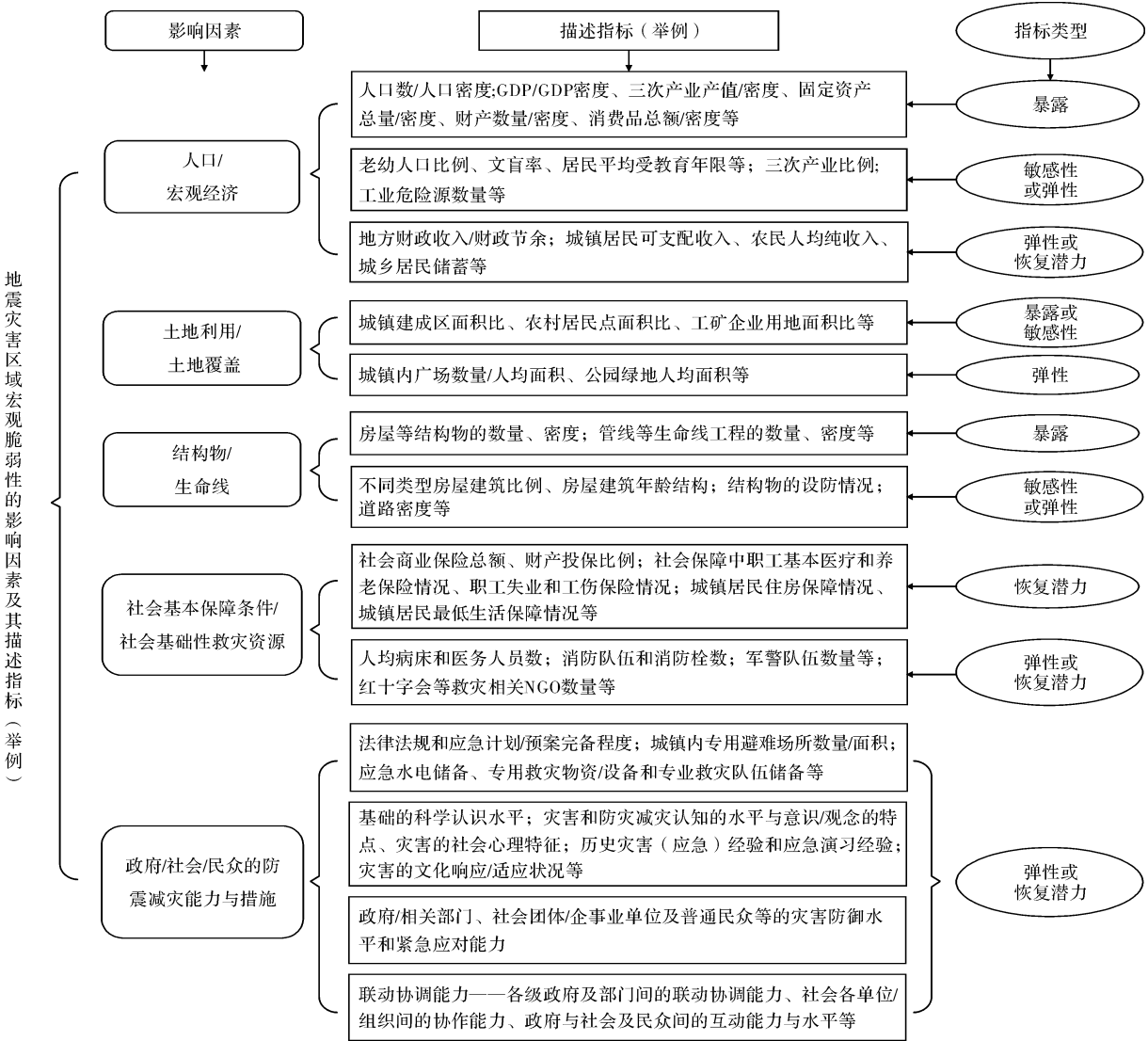


图2 地震灾害区域宏观脆弱性的影响因素和描述指标

以上关于人类社会承灾体系统灾害脆弱性的分析层次与描述角度和地震灾害区域宏观脆弱性的影响因素与描述指标的分析与归纳,仍是比较初步和示范性的,尚需在今后的工作中结合具体形式的承灾体系统而予以不断完善。

1.3 地震灾害区域宏观脆弱性定量分析的数理方法

前述分析表明,地震灾害区域宏观脆弱性的影响因素多且相互关联复杂,各因素脆弱性意义上的描述指标也多种多样,即使是同一因素的脆弱性意义,有的也需要同时提取代表脆弱性增大和脆弱性减小两种不同含义的指标予以刻画。因此,要对这种复杂问题进行定量分析,除提取有代表性的指标外,还必须寻找合适的数理方法予以有效概括和恰当综合。从学术界目前的进展来看,涉及该类问题的定量分析时,层次分析方法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP)是被运用较多的方法。但是,总体而言,该方法在“人为主观性甚至随意性的控制”和“定量结果的实际问题解释能力”方面尚显不足。

为此,本文在前期研究的基础上,进一步发展和完善了一套以主成分分析 (Principal Component Analysis)^[21]为主,以自然函数正交分解 (Empirical Orthogonal Function, 简称 EOF)、因子分析 (Factor Analysis)^[21]和立体数据时空全局分析部分原理与分析问题理念为辅的数理分析方法,来定量分析研究区地震灾害区域宏观脆弱性的时空变化及其驱动机制问题。这套方法中,指标体系确定后的所有分析计算过程都是客观的,从而就在一定程度上弥补了 AHP 方法中人为主观性较难控制的不足,更重要的是计算结果的脆弱性(变化)内涵解释能力也得到了明显提高。

2 京津唐地区地震灾害区域宏观脆弱性的时空变化及其驱动机制

2.1 数据、指标体系和数理分析过程

2.1.1 研究区范围和数据来源

研究区范围与前期研究一致,仍由全部或大部分位于 1976 年唐山 7.8 级地震实际烈度Ⅵ度外包线以内的县级行政区组成,共含 64 个县市^[12]。

数据主要来源:①京、津、冀三省(市)相关年份的社会经济统计年鉴和有关的地方志资料;②“十年尺度中国地震灾害损失预测研究组”于 1995 年发表的部分成果^[22];③由遥感影像解译而来的研究区部分土地利用/土地覆盖资料。

2.1.2 指标体系的建立

基于对地震灾害区域宏观脆弱性的描述分析层次、角度及指标的上述分析和目前的认识水平,同时考虑各指标之于讨论问题的实际意义、代表性和相应数据的当前可获得性等,首先以 2000 年为代表,选取 25 个指标 (S1 ~ S25) 来分析研究区地震灾害区域宏观脆弱性的空间变化(表 1)。

表 1 研究区地震灾害区域宏观脆弱性时空变化分析的指标体系

时空变化分析采用的指标	分类	代 码	
		空间变化	时间变化
预测建筑物地震损失密度/(万元/km ²) (简称:预测建筑物损失)	1 类	S1	
预测经济生产能力损失密度/(万元/km ²) (简称:预测生产能力损失)	1 类	S2	
GDP 密度/(万元/ km ²) ^①	1 类	S3	T1
第一产业产值密度/(万元/km ²) (简称:一产密度) ^①	2 类	S4	T2
第二产业产值密度/(万元/km ²) (简称:二产密度) ^①	1 类	S5	T3
第三产业产值密度/(万元/km ²) (简称:三产密度)	1 类	S6	
乡镇企业产值密度/(万元/km ²)	1 类	S7	T4
总人口分布密度/(人/km ²) (简称:人口密度)	1 类	S8	T5
老幼人口比重/%	1 类	S9	
居民平均受教育年限/a (简称:居民受教育年限)	2 类	S10	
社会文盲率/%	1 类	S11	
城镇建成区面积比重/% (简称:城镇建成区比)	1 类	S12	T6
农村居民点面积比重/%	1 类	S13	
工矿企业用地面积比重/% (简称:工矿用地比)	1 类	S14	
工业危险源个数/个	1 类	S15	
大型水库个数/个	1 类	S16	
全社会固定资产投资密度/(万元/km ²) (简称:固定资产投资)	1 类	S17	T7
全社会消费品零售总额密度/(万元/km ²) (简称:消费品总额)	1 类	S18	T8
地方财政收入分布密度/(万元/km ²) (简称:财政收入密度)	2 类	S19	T9
农民人均年纯收入/(元/人) (简称:农民收入)	2 类	S20	T10
城镇职工平均工资/(元/人) (简称:职工工资)	2 类	S21	T11
城乡居民人均储蓄存款余额/(元/人) (简称:居民存款)	2 类	S22	T12
万人均病床数/(张/万人)	2 类	S23	T13
万人均医护人员数/(人/万人)	2 类	S24	T14
道路密度/(km/km ²)	2 类	S25	

注:①因不同时期社会经济统计数据的统计口径有差别,故空间变化分析时采用的 GDP 密度 S3、一产密度 S4 和二产密度 S5,在时间变化分析时,为保证各指标各时期经济含义一致,4 时期均统一分别用工农业总产值密度 T1、农业产值密度 T2 和工业产值密度 T3 予以替代。

然后基于 1985、1995、2000 和 2004 年 4 个时期的对比,讨论脆弱性的时间变化。因上述 25 个指标中一些指标所代表的意义不能适用于所有时期,例如,由文献[22]计算而来的预测建筑物地震损失密度(S1)和预测经济生产能力地震损失密度(S2)仅适用于 2000 和 2004 年,加之部分指标在某些时期的基础数据难以获取等原因,为保证不同时期计算结果的可比性,这里统一确定基于 14 个指标($T1 \sim T14$)(表 1)讨论脆弱性的时间变化。

确定该指标体系时,主要考虑两条原则:①凡在以 2000 年为代表的脆弱性空间变化分析中被证实较重要或脆弱性解释意义较显著的指标,都尽可能地予以保留;②新确定的指标体系要能充分反映脆弱性变化的主要特征。经不断验证和对比可知,2000 年时,新确定的 14 个指标和原 25 个指标,两者揭示的脆弱性空间变化的主要特征具有良好的一致性^[13],表明用 14 个指标分析脆弱性的时间变化是可靠的。

两套指标中,指标均分两类:第 1 类与研究区地震灾害区域宏观脆弱性的变化总体正相关,即指标值越大一般意味着脆弱性越大,反之越小;第 2 类与脆弱性变化总体反相关。各指标的含义及其所代表的脆弱性内涵前期研究已有阐述^[12-13]。

2.1.3 数理分析方法和分析过程

本研究部分详细而具体的数据处理和分析计算步骤、计算表达式和相应的原理及其脆弱性分析意义,前期研究已有一些阐述^[12-13],这里将其中的关键点和本文进一步深入分析所涉及的计算表达式、相关原理和相应的数据处理方法概括如下:

(1) 数据处理

为消除量纲影响和考虑分析问题的实际意义,先分别对各时期各指标的原始数据进行标准差标准化,后将与脆弱性变化总体呈负相关的第 2 类指标的标准化值的“+/-”号对调,以保证参与分析的数据矩阵与研究区脆弱性的变化总体上具有统一的相关性。

在对比研究区各地自身脆弱与否的程度在不同时期的纵向变化时,为保证各时期计算结果的可比性,对 1985、1995、2000 和 2004 年共 4 个年份 14 个指标的原始数据进行了“时空全局特殊标准差标准化”处理,即:首先将每个指标共 4 个时期(县市)=256 个样本组成的时空全局综合变量进行标准差标准化,然后再将第 2 类指标的标准化值的“+/-”号对调。这种时空全局标准差标准化与同一时期内的一般标准差标准化相比,两者

得到的数据系列的均值(为 0)意义不同,前者是全区全时段(1985-2004 年)的综合平均,因此,若某时期某县市某一指标的得值为正,则表明该时期该县市在该方面的状况比全区全时段的综合平均大,否则比全区全时段的综合平均小,从而就有了明确的时间变化对比意义,而后者只是一个时期的全区平均,没有时间变化方面的含义。

(2) 分析过程

首先基于 2000 年 25 个指标和设定地震烈度 $I = \text{VIII}$ 度时的数据矩阵,进行脆弱性空间变化的典型分析;然后依据设定地震烈度 $I = \text{VI}$ 、 VII 和 IX 度时的数据矩阵,进行有关计算结果的对比;最后以 1985、1995、2000 和 2004 年共 4 个时期为代表,基于 14 个指标分析脆弱性的时间变化。

(3) 计算表达式

①对各时期标准差标准化后的数据矩阵,进行主成分分析,依据如下主成分表达式,计算相应的系数向量 $l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{ip}$ 和主成分 y_i 。

$$y_i = l_{i1}x_1 + l_{i2}x_2 + \dots + l_{ip}x_p, \quad (1)$$

式中: x_k ($k = 1, 2, \dots, P$) 为原变量; y_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 为主成分; $l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{ip}$ 为第 i 个主成分的系数向量; P 、 m 分别为原变量和选定主成分的个数(以下各式同),且 $m \leq P$ 。

②用下式计算各主成分(以下简称 PC)在各原变量上的载荷 a_{ik} 。

$$a_{ik} = l_{ik} \sqrt{\lambda_i}, \quad (2)$$

式中: a_{ik} 为第 i 个 PC 在第 k 个原变量上的载荷; l_{ik} 为第 i 个 PC 的系数向量中与第 k 个原变量相对应的值; λ_i 为第 i 个 PC 的方差。

③用下式计算各变量在不同地震烈度条件下(空间变化研究中)或在不同代表时期(时间变化研究中的)权重。基于各指标间权重大小的相互对比关系及这种对比关系在不同代表时间断面间的变化,综合分析研究区地震灾害区域宏观脆弱性时空变化的主要驱动因素。

$$W_k = \frac{H_k}{\sum_{k=1}^p H_k}, \quad (3)$$

式中: W_k 为第 k 个原变量的权重; $H_k = \sum_{i=1}^m a_{ik}^2$ 是所有选定 PC 在第 k 个原变量上的共同度。

④用下式计算研究区各县市的 PC 综合得分。

$$F_j = \sum_{i=1}^m y_{ji}, \quad (4)$$

式中: F_j 为第 j 个县市的 PC 综合得分; y_{ji} 为第 j

个县市在第 i 个 PC 上的值。

⑤用下式计算研究区各县市的脆弱性综合评价指数。

$$v_j = \sum_{k=1}^p x_{jk}^0 w_k,$$

(5)

式中: v_j 为第 j 个县市的脆弱性综合评价指数; x_{jk}^0 为第 j 个县市第 k 个指标的标准差标准化值(第 2 类指标要经过“+/-”号对调); w_k 为第 k 个指标的权重(式(3))。

⑥为对比研究区各县市自身脆弱与否的程度在不同时期的纵向变化,用下式计算研究区各县市在 1985、1995、2000 和 2004 年等不同时期的脆弱性程度指数。由于该值是经由各指标的时空全局特殊标准差标准化值计算而来的,因此若某时期某分析单元的脆弱性程度指数为正,则表明该时期该分析单元较全区全时段(1985-2004 年)的脆弱性平均状况更脆弱,反之较全区全时段平均的脆弱程度小。

$$v_{ij}^* = \sum_{k=1}^p x_{ijk}^* w_{tk},$$

(6)

式中: t 为 1985、1995、2000 和 2004 年等不同代表时期; w_{tk} 为 14 个指标中第 k 个指标在第 t 年份的权重(式(3),且某指标在某时期的权重值由且仅由各指标在该时期的值确定,而与在其它时期的值无关); x_{ijk}^* 为第 t 年、第 j 县市的第 k 个指标的时空全局特殊标准差标准化值(第 2 类指标同样需要经过“+/-”号对调)。

2.2 结果分析

2.2.1 脆弱性空间变化模式及其时间变化和意义
分别对 2000 年 25 个指标在设定地震烈度 $I =$

Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ及Ⅸ度条件下的数据矩阵进行主成分分析,结果表明:不同烈度条件下,研究区地震灾害区域宏观脆弱性的空间变化均可分解成少数几种脆弱性空间差异模式(简称脆弱性模式,下同),且每一模式的特点,包括方差贡献(表 2)、载荷分布和该模式反映的脆弱性空间分异格局等都基本不随设定地震烈度的变化而变化^[12],这些一致性符合本研究关于“一个区域的地震灾害脆弱性是该区域人类社会经济体系自身固有属性”的认识前提。

脆弱性模式中,前 3 种模式最为重要,规律也最明显、稳定。表 2 显示,前 3 种模式的累积方差贡献达 65%~67%,表明研究区地震灾害区域宏观脆弱性的空间变化中,有 2/3 左右的信息可被前 3 种模式所代表。其中,模式 I 占总方差的 43%~44%,最为主要;前期研究表明,该模式主要是由研究区城市化、人口和经济特别是工商业经济发展水平(因这些因素更主要地与城市和城市经济有关,故本文称其为“城市和城市经济类”因素)的区域差异造成的,且集中反映了研究区“GDP 密度等 1 类指标的值增大脆弱性就随之增大和财政收入等 2 类指标的值增大脆弱性则随之减小”的一般性质。该模式反映的脆弱性呈现以各大中城市为中心向四周递减的总体分异趋势。模式 II 和模式 III 的方差贡献分别为 13.1% 和 9.3% 上下(表 2),两者都与研究区农业和农村问题(本文称其为“农业和农村类”因素)的区域差异密切相关,但相关关系大体相反,因此两模式反映的脆弱性区域分异格局也大致相反,前者反映的脆弱性南高北低,后者北高南低^[12]。

表 2 2000 年 25 个指标和设定地震烈度 $I = \text{Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ度}$ 条件下各 PC 的方差贡献和相应的累积方差贡献

脆弱性模式	对应的主成分	方差贡献/%				累积方差贡献/%			
		Ⅵ度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度	Ⅵ度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
模式 I	PC1	43.508	43.864	44.081	43.203	43.508	43.864	44.081	43.203
模式 II	PC2	13.124	13.071	13.199	13.180	56.632	56.935	57.280	56.382
模式 III	PC3	9.357	9.355	9.295	9.448	65.989	66.291	66.575	65.830
模式 IV	PC4	7.713	7.062	7.624	7.443	73.702	73.353	74.198	73.273
模式 V	PC5	5.278	6.039	5.292	5.756	78.980	79.392	79.490	79.028
模式 VI	PC6	4.622	4.673	4.688	4.683	83.602	84.066	84.179	83.712

表 2 还显示,模式 I 的方差贡献大概是模式 II 和模式 III 两者方差贡献之和的 2 倍左右,表明研究区脆弱性的空间变化中,来自城市和城市经济类因素的影响大概是农业和农村类因素影响的 2 倍左右。这就从宏观概括层面说明:对于研究区的防震减灾而言,处理好城市和城市经济方面的相关

问题更显关键。
对 1985、1995、2000 和 2004 年由 14 个指标组成的各数据矩阵进行的主成分分析表明:1985 年以来,研究区地震灾害区域宏观脆弱性空间分异的变化主要体现为上述 3 种脆弱性模式的变化。其中,模式 I 的变化主要体现在方差贡献上,近

20 年来其方差贡献增加了接近 13 个百分点^[13]；表明 1985 年以来，城市和城市经济类因素对研究区脆弱性空间分异的影响越来越显著。模式Ⅱ和模式Ⅲ的变化以载荷分布的变化和各模式代表的脆弱性空间分异格局的变化较明显，且两模式的变化还具有相当程度的反向特点^[13]。以上 3 种主要脆弱性模式的变化交织在一起，使得研究区地震灾害区域宏观脆弱性的整体空间分异在不同时期而具有不同的特点。

2.2.2 脆弱性空间变化格局及其时间变化和意义

依据式(4)和式(5)，分别计算了 2000 年时 25 个指标和设定烈度 $I = VI、VII、VIII$ 及 IX 度条件下，研究区各县市的 PC 综合得分和脆弱性综合评价指数。结果表明，各烈度条件下，两种结果反映的脆弱性空间分异格局基本一致，且这种格局也基本不随设定地震烈度的变化而变化，这种一致性同样符合本研究关于“一个区域的地震灾害脆弱性是该区域人类社会经济体系自身固有属性”的认识前提。分异格局的基本特点是^[12]：①京、津、唐和秦皇岛等大中城市市区的脆弱程度异常高，这主要与这里的人口和经济过于密集有关；②较全区平均脆弱程度明显小的地区集中在京、津两地诸郊县，这主要与这些县的人口和经济密度虽然通常比较大，但同时却具有较高的财政收入、居民收入和较好的医疗救护等防灾减灾资源与能力有关；③研究区东北和西南两局部的脆弱程度比全区平均普遍略偏高，这主要与这些地区的社会经济发展相对较落后，防灾减灾能力不足有关；④除上述地区外，其他地区的脆弱性状况大体围绕全区平均水平小幅波动。

依据式(4)和式(5)，基于 14 个指标，分别计算了研究区在 1985、1995、2000 和 2004 年等 4 个不同时期的 PC 综合得分和脆弱性综合评价指数，依此分析了脆弱性空间分异格局的时间变化。结果显示：1985 年以来，研究区地震灾害区域宏观脆弱性的空间分异虽然也发生了一些这样或那样的变化，但是以“大中城市市区的脆弱程度异常高”等等上述特点为代表的脆弱性整体空间分异格局，20 年来并未发生根本性改变^[13]。研究区地震灾害区域宏观脆弱性的空间分异格局在不同时期间的整体稳定性，与研究区不同县市间的社会经济状况在同一时期内的横向对比关系，近 20 年来未发生本质变革的事实是吻合的。

值得进一步说明的是，1985 年以来，各大中城市市区始终是研究区最脆弱的部位这一重

要事实，进一步说明降低大中城市的地震灾害脆弱性始终应该是研究区防震减灾工作的重中之重；而研究区东北和西南两局部的脆弱程度始终比全区平均普遍偏高则表明，加强这些地区的防震减灾能力建设同样具有突出而紧迫的现实意义。

2.2.3 脆弱性程度的时间变化及其意义

以上讨论的研究区地震灾害区域宏观脆弱性空间分异格局的时间变化，实际上揭示的只是研究区各县市之间脆弱性高低的横向对比关系(用式(4)—— PC 综合得分和/或式(5)——脆弱性综合评价指数来刻画)在不同时期间的差异，这显然不能反映研究区各县市自身脆弱与否的程度在不同时期间的纵向变化，换句话说，不能揭示“研究区各地的地震灾害宏观脆弱程度，近 20 年来到底是增强了还是减弱了”。

为此，本文在对研究区从 1985 - 2004 年共 4 个时期 14 个指标的所有数据，进行时空全局特殊标准差标准化处理的基础上，利用式(6)计算得到了不同时期研究区各县市自身的脆弱性程度指数，借此揭示了研究区各县市自身脆弱与否的程度在不同时期间的纵向变化。结果显示(图 3)，1985 - 2004 年，整个研究区的地震灾害区域宏观脆弱程度发生了非常显著的差异性变化，整体特点是：①京、津、唐、秦皇岛和承德等大中城市市区的脆弱程度近 20 年来显著增强，且除承德市市区外，脆弱程度趋势性增长的幅度都很大(图 3e)；结合对原始资料的进一步分析可知，这主要与这些地区的人口和经济近 20 年来的持续快速增长和持续高度集中有关。②研究区其它地区的脆弱程度整体减弱，其中以各大中城市周边诸县特别是京、津两地多数郊县的减小幅度的最明显，但总体而言，减小的幅度明显小于上述大中城市市区脆弱程度增大的幅度(图 3e)；这种状况主要与这些地区的人口和经济近 20 年来虽然也有不小的增加，但增加幅度远不如上述城市市区有关，而另一方面，也与这些地区的财政收入、居民收入和医疗救护等救灾及灾后重建的条件与能力等却也得到了较大幅度的改善有关。

本研究的这一结论就从宏观概括的层面和“城”“乡”两类地区直接对比的途径，佐证了 1990 年代末期以来国内外减灾界的一个普遍论点，即：“城市的灾害脆弱性越来越大”。这一结论也更进一步强调了降低城市的地震灾害脆弱性之于研究区防震减灾工作的现实和紧迫意义。

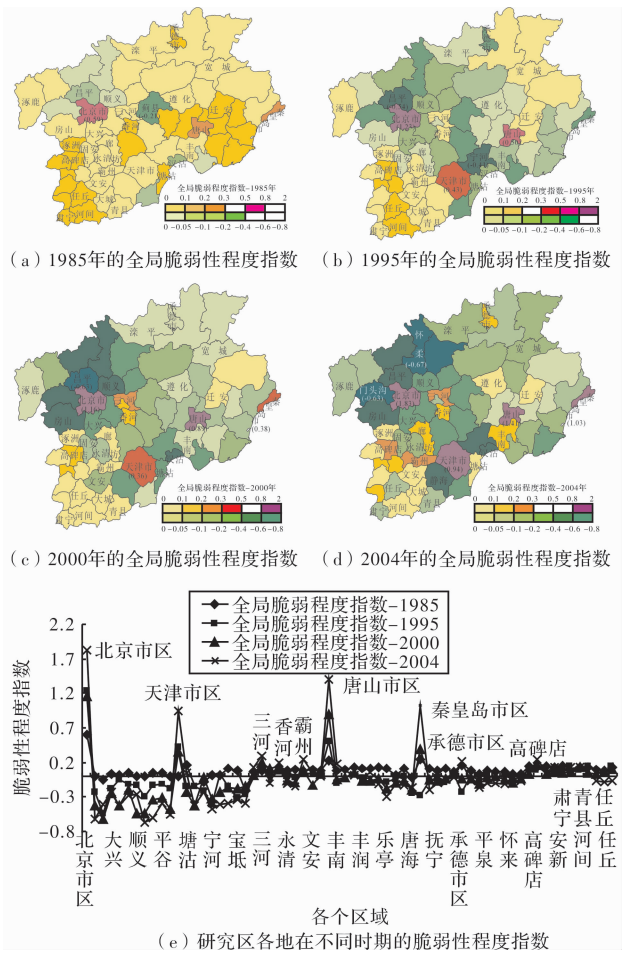


图3 研究区地震灾害区域宏观脆弱性程度的时间变化
(注: 脆弱程度指数=0 表示全区全时段(1985-2004 年)脆弱性大小的平均状况, >0 表示比全区全时段平均的脆弱程度要大, <0 表示比全区全时段平均的脆弱程度要小。)

2.2.4 脆弱性时空变化的主要驱动因素

依据式(3), 分别计算 2000 年时 25 个指标和取地震烈度 $I = VI$ 、 VII 、 $VIII$ 与 IX 度条件下各原始指标的权重。结果表明: GDP 密度 $S3$ 、二产密度 $S5$ 、人口密度 $S8$ 、城镇建成区面积比 $S12$ 、固定资产投资 $S17$ 、消费品密度 $S18$ 、财政收入密度 $S19$ 和人均存款 $S22$ 等几个指标的权重一直较大(图 4); 而这些指标基本可归纳成“人口和经济特别是工商业经济”、“城市化”和“产业结构”等 3 个大的方面。由此可见, 研究区地震灾害区域宏观脆弱性的空间变化, 主要是由该地区各县市之间在人口和经济特别是工商业经济发展状况、城市化水平和产业结构特点等 3 方面的空间差异造成的。

依据式(3), 分别计算 1985、1995、2000 和 2004 年 4 个不同时期 14 个指标的权重, 结果显示(图 5): 工农业总产值 $T1$ 、工业产值 $T3$ 、人口密度 $T5$ 、城镇建成区面积比 $T6$ 、消费品密度 $T8$ 和

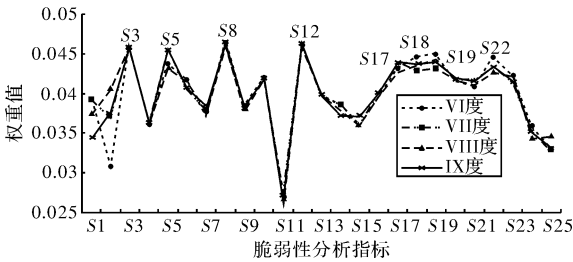


图4 2000 年时 25 个脆弱性分析指标在不同烈度下的权重

财政收入密度 $T9$ 等指标一直都是不同时期的重要指标。指标较重要, 且不同时期权重值大小变动较频繁的则以农业产值 $T2$ 和固定资产投资 $T7$ 两项为主。而所有这些指标, 绝大多数仍可归纳成人口和经济特别是工商业经济的增长、城市化的发展和产业结构的调整等 3 个大的方面。由此可见, 研究区地震灾害区域宏观脆弱性的时间变化则主要是由研究区各县市人口和经济特别是工商业经济的增长、城市化的发展和产业结构的调整等 3 方面动力所驱动的。

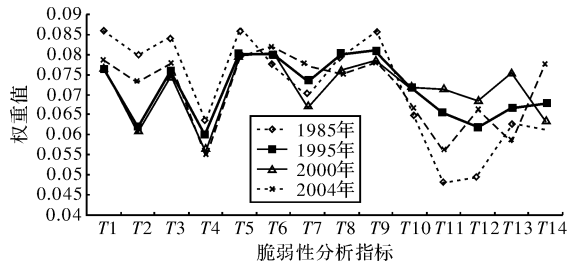


图5 14 个脆弱性分析指标的权重在不同时期期间的变化

3 结论和讨论

3.1 结论

本文在进一步讨论人类社会承灾体系统灾害脆弱性的分析层次和描述角度、地震灾害区域宏观脆弱性的影响因素和描述指标的基础上, 完善了以主成分分析为主, 以自然函数正交分解(EOF)、因子分析和立体数据时空全局分析部分原理及分析问题理念为辅的地震灾害区域宏观脆弱性时空变化分析的数理方法; 然后以 1985、1995、2000 和 2004 年为代表, 对京津唐地区地震灾害区域宏观脆弱性近 20 年来的时空变化及其驱动机制进行了较系统的分析和总结。

(1) 研究区地震灾害区域宏观脆弱性的空间变化主要体现为少数几种脆弱性空间差异模式。其中, 前 3 种模式最为重要, 可占脆弱性空间变化总信息的 $2/3$ 左右, 规律也最明显、稳定; 模式 I 主要是由研究区“城市和城市经济类”因素的区域差

异造成的,反映的脆弱性呈现以各大中城市市区为中心向四周递减的总体分异趋势,这种分异特点占全区脆弱性空间变化总信息的 43%~44%,最为主要。模式Ⅱ和模式Ⅲ分别占脆弱性空间变化总信息的 13.1%和 9.3%左右,且都与“农业和农村类”因素的空间差异密切相关。

因模式Ⅰ的方差贡献是模式Ⅱ和模式Ⅲ两者方差贡献之和的 2 倍左右,表明研究区脆弱性的空间变化中,来自“城市和城市经济类”因素的影响大概是“农业和农村类”因素影响的 2 倍左右;加之模式Ⅰ的方差贡献近 20 年来持续增大了接近 13 个百分点;这就从宏观概括的层次说明,对于研究区的防震减灾而言,处理好城市和城市经济方面的相关问题更显关键。

(2)1985 年以来,研究区地震灾害区域宏观脆弱性的空间分异虽然也发生了一些这样或那样的变化,但其整体分异格局并未发生根本性改变:京、津、唐等大中城市市区的脆弱程度各时期均异常高,较全区脆弱性平均明显小的地区各时期大都集中在京、津两地诸郊县,研究区东北和西南两局部的脆弱性各时期比全区平均普遍略偏高。各大中城市市区始终是研究区最脆弱的部位这一重要事实,就从另一个侧面进一步说明,降低大中城市的地震灾害脆弱性始终应该是研究区防震减灾工作的重中之重。

(3)1985 年以来,整个研究区的脆弱程度发生了非常显著的差异性变化:京、津、唐等大中城市市区的脆弱程度近 20 年来显著增强,且趋势性增强的幅度普遍很大,这主要与这些地区的人口和经济近 20 年来的持续快速增长和持续高度集中有关;研究区其它地区的脆弱程度整体减弱,但减小的幅度明显小于大中城市市区脆弱程度增大的幅度。这一研究结论就从宏观概括的层面和“城”“乡”两类地区直接对比的途径,佐证了目前国内外减灾界的一个普遍论点,即“城市的灾害脆弱性越来越大”;同时也进一步强调了降低城市的地震灾害脆弱性之于研究区防震减灾工作的现实和紧迫意义。

(4)研究区地震灾害区域宏观脆弱性的时空变化,主要是由各县市之间在人口和经济特别是工商业经济的发展状况、城市化的水平和产业结构的特点等 3 方面因素上的空间差异及其时间变化所驱动的。

3.2 讨论

(1)应该指出的是,讨论研究区地震灾害区域

宏观脆弱性时空变化时所采用的 2 套指标体系,都有不小进一步补充或完善的空间,基本分析单元也可以细化。目前,之所以采用这 2 套指标和以县级行政区为基本分析单元,除受现有认识水平限制外,主要是因为与有些指标(如财产数量/密度等)和更小分析单元(如乡一级行政区等)相对应的基础数据,目前尚较难获取。今后,随着认识水平的提高、基础数据的挖掘和积累、指标体系的完善和基本分析单元的细化,应用本研究提出的脆弱性时空变化分析方法,可对研究区地震灾害区域宏观脆弱性的时空变化及其驱动机制做进一步的详细分析,所得结果也会进一步细化和深化对研究区这种宏观脆弱性时空变化规律的认识。

尽管如此,基于现有认识水平、现有基础数据和现有指标体系,仍然揭示出了研究区地震灾害区域宏观脆弱性时空变化方面的一些基本规律,如,各大中城市的脆弱程度异常高,且 20 年来脆弱程度持续增高的过程显著;20 年来研究区脆弱性的区域分异格局整体稳定,但各地自身脆弱与否的程度却发生了非常显著的差异性变化;脆弱性时空变化总信息中,有接近 50% 的信息与研究区的“城市和城市经济类”因素相关,而只有不足 25% 的信息与“农业和农村类”因素有关;等等。而且,几乎可以肯定的是,上述这些基本规律,不大可能随着指标体系的完善和评价单元的细化而发生根本性改变。

(2)特别指出的是,近年来的重大灾害实例(如 2008 年中国南方的冰冻雨雪灾害和汶川 8.0 级地震灾害等)表明,普通民众和地方社会的灾害认知水平、灾害响应能力和灾害应激态势,区域内各减灾行为主体的综合联动/协调能力与水平,地域文化对当地人们响应/适应灾害的影响等等都是一个地区灾害脆弱性高低的重大影响因素,甚至是决定性因素。但是由于现有认识水平的不足、研究和基础数据积累的限制,加之考虑到其中的不少方面(例如各级政府及相关部门间的联动/协调能力、政府与社会及民众间的互动水平等)在同一个时间断面上和在本研究涉及的那个较小空间范围内,不大可能有本质或显著差异等原因,本研究对这些因素的考虑尚不系统不充分,只是通过“老幼人口比重、居民平均受教育年限、万人均病床数和医护人员数、地方财政收入和居民收入”等几个指标,对这些因素的有限方面(主要是民众的灾害认知方面和民众及地方社会的灾害响应方面)作了一些很初步的和很间接的反映。这显然是

本研究的一个不足。未来时期, 借助相关学科的知识, 通过对这些因素的灾害脆弱性意义进行专门的分析与提炼, 提取更加直接而具体的指标, 并将其纳入到本研究发展的方法体系中, 有望对研究区地震灾害脆弱性及其时空变化机制的分析和理解产生重要改进。而这一点恰是我们目前所着重关注的一个方面。

(3) 就研究区地震灾害区域宏观脆弱性的时空变化及其驱动机制, 虽然得出了一些有益结论和规律, 且这些结论和规律也有一定的实际防震减灾指导意义, 如指导区域性的防震减灾规划与部署、制订宏观性的防震减灾方针政策、编制区域性的地震应急预案等。但总体而言, 这些规律还只是一些统计意义上的相互对比概念, 同物理含义明确的具体结构物“破坏概率矩阵”或“损失率曲线”相比, 其解释地震灾害成灾机理的能力和具体的防震减灾指导意义, 还具有不小的距离。

但是, 从灾害研究的实际进展来看, 要想就复杂的区域人类社会经济体系建立起这样的“矩阵”、“曲线”或含义类似的脆弱性机理模型, 短时间内尚缺乏可行性, 这可能是目前限制这一尺度上的灾害脆弱性及其时空变化机制研究难以取得更大突破的关键。今后时期, 在继续深化和细化区域尺度地震灾害脆弱性研究的同时, 应加强地方或社区等小尺度的和家庭或企业等微观层次的承灾体系统地震灾害脆弱性及其时空变化方面的研究。首先, 这样的研究有利于深入挖掘人类社会承灾体系统灾害脆弱性的产生根源和变化机制。与区域复杂系统相比, 这些小尺度或小型系统的组成和结构相对较简单具体, 功能和过程脉络较明确清晰, 因此有利于从成灾机理水平上, 建立起物理和过程含义较明确的脆弱性机理模型, 从而支持深入分析这些系统灾害脆弱性的根源和发展变化动力机制。第二, 这样的研究还具有重要的尺度转换意义, 小尺度或小型人类社会承灾体系统的灾害脆弱性研究, 向下, 可以更加充分地吸收和应用材料科学、建筑工程学、地震工程和工程地震学, 以及社会科学和经济学等领域, 长期研究积累的具体结构物等“微观”含义上的灾害脆弱性研究成果和相应的有用技术方法; 向上, 可以为区域、城市等较大空间尺度的灾害脆弱性深入分析提供细节和基础。而这一方向恰是目前地震灾害研究领域的最薄弱环节之一, 同时也是我们当前所关注的另一个重点。

参考文献:

- [1] Cutter S L, Mitchell J T, Scott M S. Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown county, South Carolina [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2000, 90(4): 713–737.
- [2] White G F, Katers R W, Burton I. Knowing better and losing even more: the use of knowledge in hazards management [J]. *Environmental Hazards*, 2001, 3(3/4): 81–92.
- [3] Fothergill A, Peek L A. Poverty and disasters in the United States: A review of recent sociological findings [J]. *Natural Hazards*, 2004, 32(1): 89–110.
- [4] Thomalla F, Downing T, Spanger-siegfried E, et al. Reducing hazard vulnerability: towards a common approach between disaster risk reduction and climate adaptation [J]. *Disasters*, 2006, 30(1): 39–48.
- [5] Wisner B, Blakie P, Cannon T, et al. *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disaster* [M]. 2nd ed. Routledge, London, 2004.
- [6] 陈颙, 陈棋福, 陈凌. 地震损失预测评估中的易损性分析 [J]. *中国地震*, 1999, 15(2): 97–105.
- [7] 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.
- [8] Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (UN/ISDR). *Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives (2004 version)* [M/OL]. Geneva, Switzerland: United Nations Publications, 2004 [2009-12-08]. http://www.unisdr.org/eng/about_isdr/bd-lwr-2004-eng.htm.
- [9] UN/ISDR. *Hyogo framework for action 2005–2015: building the resilience of nations and communities to disasters (HFA)* [R/OL]. Kobe, Japan, 2005 [2009-12-08]. <http://www.unisdr.org/eng/hfa/hfa.htm>.
- [10] International Panel on Climate Change (IPCC). *Climate change 2007: the physical science basis summary for policymakers, contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [R]. Paris, France, 2007.
- [11] SU G W, WANG G Q, MA Z J. Some preliminary discussion on natural disaster risk and its assessment [C]//Beijing Normal University, Society for Risk Analysis, Japan Section, Department of Earth Science, National Natural Science Foundation of China, ed, *Risk research and management in Asian perspective: proceedings of the first China-Japan conference on risk assessment and management*. Beijing: International Academic Publishers, 1998: 224–231.
- [12] 苏桂武, 朱林, 马宗晋, 等. 京津唐地区地震灾害区域宏观脆弱性变化的初步研究——空间变化 [J]. *地震地质*, 2007, 29(1): 15–33.
- [13] 苏桂武, 马宗晋, 朱林, 等. 京津唐地区地震灾害区域宏观脆弱性空间分异的变化 [J]. *地质科技情报*, 2008, 27(2): 1–11.

- [14] 美国应用技术委员会. 加利福尼亚未来地震的损失估计 [M]. 曹新玲, 毛国敏, 金学申, 等译. 北京: 地震出版社, 1991.
- [15] Fah D, Kind F, Lang K, et al. Earthquake scenarios for the city of Basel [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(5): 405–413.
- [16] Mouroux P, Brun B L. Presentation of RISK – UE project [J]. *Bull Earthquake Eng*, 2006, 4(4): 323–339.
- [17] 邓砚, 苏桂武, 聂高众. 地震应急的影响因素分析[J]. *灾害学*, 2005, 20(2): 7–33
- [18] 苏桂武, 邓砚, 聂高众. 中国地震应急宏观分区的初步研究 [J]. *地震地质*, 2005, 27(3): 382–395.
- [19] 苏桂武, 马宗晋, 王若嘉, 等. 汶川地震灾区民众认知与响应地震灾害的特点及其减灾宣教意义: 以四川省德阳市为例 [J]. *地震地质*, 2008, 30(4): 877–894.
- [20] 王若嘉, 苏桂武, 张书维, 等. 云南普洱地区中学生认知与响应地震灾害特点的初步研究: 以 2007 年宁洱 6.4 级地震灾害为例 [J]. *灾害学*, 2009, 24(1): 133–138.
- [21] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2000.
- [22] 十年尺度中国地震灾害损失预测研究组. 中国地震灾害损失预测图集 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.

Research on Changes of Regional Macroscopic Vulnerability to Earthquake Disasters in Beijing-Tianjin-Tangshan Region

Su Guiwu¹, Ma Zongjin¹, Zhu Lin², Qi Wenhua¹, Deng Yan¹ and Li Man¹

(1. *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;*

2. *State Administration of Coal Mine Safety, Beijing 100713, China)*

Abstract: Study on disaster vulnerability changes is greatly helpful for understanding disasters and disaster risk mechanism. On the basis of re-examination of the levels of analysis and descriptive hierarchies for the vulnerability of disaster-bearing human & social systems, the impacting factors and their descriptive indexes of the regional macroscopic vulnerability to earthquake disasters (RSMVED) are re-recognized, and the methodology centered on principal component analyzing technique for exploring the spatial & temporal change features of this kind of vulnerability is improved. Based on these more fully explanations and this more perfect methodology, the spatial & temporal changes and their driving forces of RSMVED of Beijing-Tianjin-Tangshan region, China, during the past 20 years are analyzed and summarized with evidences in detail by taking 1985, 1995, 2000 and 2004 as the representative time references. The result shows that the spatial and temporal changes of RSMVED of the studied area, from 1985 to 2004, can always be separated into the changes of several main vulnerability patterns. Further analysis indicates the spatial difference structures of RSMVED of this area, in the past 20 years, are rather stable. However, the vulnerability in different areas of this region have changed markedly in resent 20 years. The vulnerabilities in the urban areas of major cities have significantly increased, while vulnerabilities in the other areas have decreased. The amplitude of changes of the former is larger than that of the latter. As far as the change driving forces of RSMVED is concerned, this paper suggested that it is the population and economy increases, urbanization development and industry structure adjustment are the three main ones. It is thought that the changes of regional macroscopic vulnerability to earthquake disasters in the studied region are mainly affected by population and economy increases, urbanization development and industry structure adjustmen.

Key words: regional macroscopic vulnerability to earthquake disasters; spatial and temporal change; vulnerability pattern; driving force; Beijing-Tianjin-Tangshan region