

文章编号: 1004-4574(2013)05-0071-06

城市抗震防灾能力评估的系统动力学模型

刘晓然^{1,2}, 苏经宇¹, 王威^{1,2}, 马东辉¹

(1. 北京工业大学 抗震减灾研究所, 北京 100124; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘 要: 针对城市抗震防灾系统具有多层次大规模的复杂性、动态性、自组织等特点, 提出了基于系统动力学理论的城市抗震防灾能力评估模型。首先, 回顾了城市抗震防灾相关研究的发展, 总结了以往城市抗震防灾系统研究的不足; 其次, 给出了基于系统动力学的城市抗震防灾能力评估模型构建的框架, 建立了运用系统动力学构建城市抗震防灾能力评估模型的指标体系, 并分析了城市抗震防灾系统的动态性和因果反馈机制, 构建了系统基本的因果关系图和流图; 最后, 以某城市区域脆弱性为例进行了验证分析。

关键词: 城市抗震防灾能力; 系统动力学; 动态关联; 因果反馈; 仿真模拟

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

System dynamics model of urban earthquake disaster resistance and prevention capacity evaluation

LIU Xiaoran^{1,2}, SU Jingyu¹, WANG Wei^{1,2}, MA Donghui¹

(1. Institute of Earthquake Resistance and Disaster Reduction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In view of the characteristics of urban earthquake disaster resistance and prevention system such as multilevel and large-scale complexity, dynamics and self-organization, this paper proposed an evaluation model of urban earthquake disaster resistance and prevention based on systematic dynamics theory. First, relative research achievements in this respect was reviewed, and the shortage of the previous researches on it was summarized; second, the framework of the evaluation model of urban earthquake disaster resistance and prevention capacity was given based on system dynamics, the index system of the evaluation model was established, the dynamics and causality feedback mechanism of the urban earthquake disaster prevention system was analyzed, and the basic diagrams of causality and systematic dynamics flow was drawn. Finally, the model is verified by an example of some city's regional vulnerability.

Key words: urban earthquake disaster resistance and prevention capacity; systematic dynamics; dynamic correlation; causality feedback; simulation

我国是世界上遭受地震灾害最为严重的国家之一。20 世纪我国地震死亡人数约达 59 万人, 占全球地震死亡人数的 50%。我国大部分的国土面积位于 7 度以上的地震高烈度区域, 包括 23 个省会城市和 2/3 的百万人以上的大城市。根据《国家防震减灾规划(2006—2020 年)》^[1], 到 2020 年, 我国基本具备综合抗

收稿日期: 2012-12-17; 修回日期: 2013-01-08

基金项目: 国家十二科技支撑计划项目(2011BAK07B01, 2011BAJ08B03, 2011BAJ08B05); 国家自然科学基金项目(51208017); 中国博士后科学基金项目(2011M500199); 北京市博士后工作经费资助项目(2012ZZ-17)

作者简介: 刘晓然(1988-), 女, 博士生, 主要从事城市防灾减灾研究。E-mail: xiaoran1227@126.com

御 6.0^[1] 级左右、相当于各地区地震基本烈度的地震的能力,大中城市和经济发达地区的防震减灾能力达到中等发达国家水平。国家综合防灾减灾规划(2011—2015 年)也明确指出,要提高防灾减灾能力,最大限度地减少人民群众生命和财产损失,切实保障经济社会全面协调可持续发展。

近年来,我国工业化和城镇化进程明显加速,城镇人口密度逐渐增大,社会财富聚集,基础设施承载力出现超负荷,部分建筑物达不到设防标准,城市管理较薄弱,经济社会发展与地震灾害的相互耦合造成城市对地震灾害有明显放大作用并不断出现新的特点。

国际上,1997 年美国斯坦福大学的 Davidson 等^[2-3]首先提出了地震灾害风险指数 EDRI 来评估各个城市的潜在地震灾害相对严重程度并分析了不同因素对城市地震风险的贡献。1988 年这个方案被 RADIUS 计划所采纳,并用来对世界上约 50 个城市的地震风险进行比较,该方法的不足之处有:(1) EDRI 指标的相对性,导致最后形成的 EDRI 值也是相对的,不能测定其绝对意义上的地震灾害风险;(2) EDRI 具有不能涉及到城市内地域的风险分布情况的局域性。(3) 其不能直观且量化地指出需要采用何种措施来减少城市地震灾害风险的大小,或者是应减少的程度。

在国内,张风华等^[4]首先提出了城市防震减灾能力的概念,采用 3 个最基本准则和 6 大因素构建了城市防震减灾能力评估指标体系的框架;其次采用层次分析法计算了 3 个评估准则相对于城市防震减灾能力目标的权数和影响城市防震减灾能力的六大因素相对于每个评估准则的权数。以张风华等的研究为基础,郑宇^[5]从可持续发展的视角,建立分析了城市综合防震减灾能力评估指标体系和评估方法。王威等^[6]为有效解决城市抗震减灾能力综合评估中由于一些基础资料不能被准确提供而造成分析指标和评估结果中存在的模糊性和随机性问题,提出了基于云模型理论的城市抗震减灾能力综合评估方法。

从系统工程的角度看,城市的抗震防灾能力评估是一个内部结构多元化的社会系统,涉及到城市的工程性防御系统、非工程性防御系统、社会经济系统等多个系统。城市抗震防灾能力的可持续发展必须考虑多种因素相互关系、动态发展的动态机制。解决这个问题用线性系统的理论和方法及静态的观点显然比较困难,而系统动力学在分析复杂系统的结构与行为方面有很好的效果。目前,国内外学者基于系统动力学对城市抗震防灾能力评估系统研究的探索主要有:(1) 灾害预防与经济协调性。高肖检等^[7]运用系统动力学对浙江省灾害预防和经济协调性进行了研究。(2) 防灾方案的优化。陈式龙等^[8]提出运用系统动力学对西部的防灾减灾规划与优化进行研究的可行性。(3) 灾害管理。赵黎明^[9]运用系统动力学的理论和方法构建了减灾系统动力学模型。(4) 城市承载力。张明媛^[10]运用系统动力学对城市复合承灾系统的 3 个承载体社会子系统、经济子系统、环境子系统之间相互协调性是否促进了当前复合系统的稳定和发展进行了研究。(5) 紧急疏散。肖国清等^[11]基于建筑物火灾疏散中人的行为的特点,应用系统动力学的理论建立了其数学模型。王付明等^[12]针对我国人员紧急疏散效率低,紧急疏散动员机制和组织指挥体系不能满足现实需要等问题,建立了人员紧急疏散系统动力学仿真结构模型。Ahmad 等^[13]为分析人的行为对灾害紧急疏散计划的影响,从 4 个方面基于系统动力学建模思想构建了系统动态反馈模型。

可以看出,大多数人研究的是城市抗震防灾系统的单个方面,是从孤立、单个层次考虑的,忽略了城市抗震防灾系统的整体性及内在关联的复杂性。本文将从城市抗震防灾系统的内部入手,通过对城市抗震防灾能力评估系统动态机制的分析研究,构造城市抗震防灾能力评估系统可持续发展的系统动力学模型,为城市抗震防灾能力提供一种新思路。

1 城市抗震防灾能力评估系统动力学模型概述

系统动力学^[14](system dynamics, SD)认为系统的行为模式与特性主要根植于其内部的动态结构和反馈机制。通过系统分析、综合与推理的方法,把系统内部的因素定性定量化,通过构建系统的因果反馈及流图预测模型实现对系统的动态模拟。城市抗震防灾的 SD 模型是结构性建模方法,是通过因果关系图、流图建立的数学结构模型,是从自然灾害的系统实际出发,通过子系统分析,建立流位流率对,逐步添加变量枝而累加成一个复杂的流图结构模型。

在城市抗震防灾体系中,影响城市抗震防灾能力的各个因素并不是单独起作用的,它们经常交织在一起,互相补充影响,这就形成了很多的因果反馈回路。结合系统动力学的观点,它呈现出的特点如下:第一特点它是动态的。即它所包含的量是随时间变化的,在城市抗震防灾能力评估综合指标体系中,GDP 的增长,

人口的增长、就业人数的增减、绿地面积的变化及对抗震防灾资金投入等都是动态问题。第二个特点是包含了反馈概念。在整个抗震防灾能力评估系统中,人口规模、社会财富对地震造成的灾害损失的反馈有两种:(1)负反馈。在同样的地震灾害条件下,受灾地区人口越多、社会财富越集中,灾害的损失就严重。许多震害表明,城市的经济发展水平越高,地震所造成的相应的经济损失就越大。(2)正反馈。GDP增长率决定着人口增长率、财富密度和防灾投入力度等动态性因素。在考察一个地区抗震防灾能力时,若灾害发生,一方面由于人口和社会财富的集中会加剧城市的地震损失,另一方面,一个运行良好的经济体制、健康有序的社会结构、充足的资金、物质保证,是有助于改善社会的抗震防灾体系,增强社会的抗震防灾能力的。

2 城市抗震防灾能力评估系统动力学模型构建

本文建立的城市抗震防灾能力评估系统动力学模型着重从2个层次描述城市抗震防灾能力评估系统的运行规律和特点。第1层次是根据抗震防灾的过程把城市抗震防灾系统分成防震、抗震、避震、紧急救援与恢复四个过程,由这4个子系统构成一个多回路的复杂反馈系统,见图1(a),它的运行除受自身运行规律支配外,还将受到国民经济系统中与之相联系的其它子系统的制约,并影响其它子系统的运行。

第2层次重点描述构成城市抗震防灾各子系统间的联系和相互作用。主要体现在两方面:一是物质关联。主要分析社会经济系统本身可能积累资金数量,对各子系统投入资金数量是否能够满足各系统发展的需要,对各子系统发展的制约情况及各子系统间的关联性;二是信息关联。它包括方针和政策性的信息及对城市抗震子系统发展影响的相关信息等,见图1(b)。

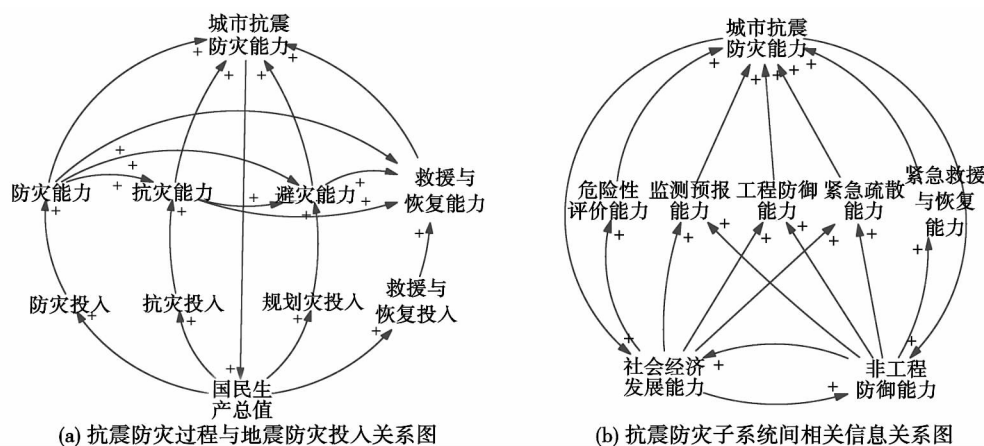


图1 城市抗震防灾系统因果关系图

Fig. 1 Causality diagram of urban earthquake disaster resistance and prevention

3 实例验证

系统应用系统动力学模型也可针对单个区域、单个系统进行专门建模研究,为验证系统动力学在城市抗震防灾方面的实用性,以某城市为例,以区域载体脆弱性为对象构建一个SD模型,并进行预测运算。

区域载体系统模型的建立,从区域人口、经济、建筑、生命线、道路方面考虑,流量变量有生命线长度、建筑面积、道路面积、人口、经济,如图3所示。

3.1 因果反馈分析

(1) 正反馈

区域GDP↑→基础建设投资↑→道路密度↑→交通能力↑→区域GDP↑

区域GDP↑→基础建设投资↑→道路密度↑→区域疏散能力↑→区域脆弱性↓→灾害损失↓→区域GDP↑

(2) 负反馈

区域GDP↑→财富密度↑→区域脆弱性↑→灾害损失↑→区域GDP↓

区域GDP↑→人口数量↑→人口密度↑→区域脆弱性↑→灾害损失↑→区域GDP↓

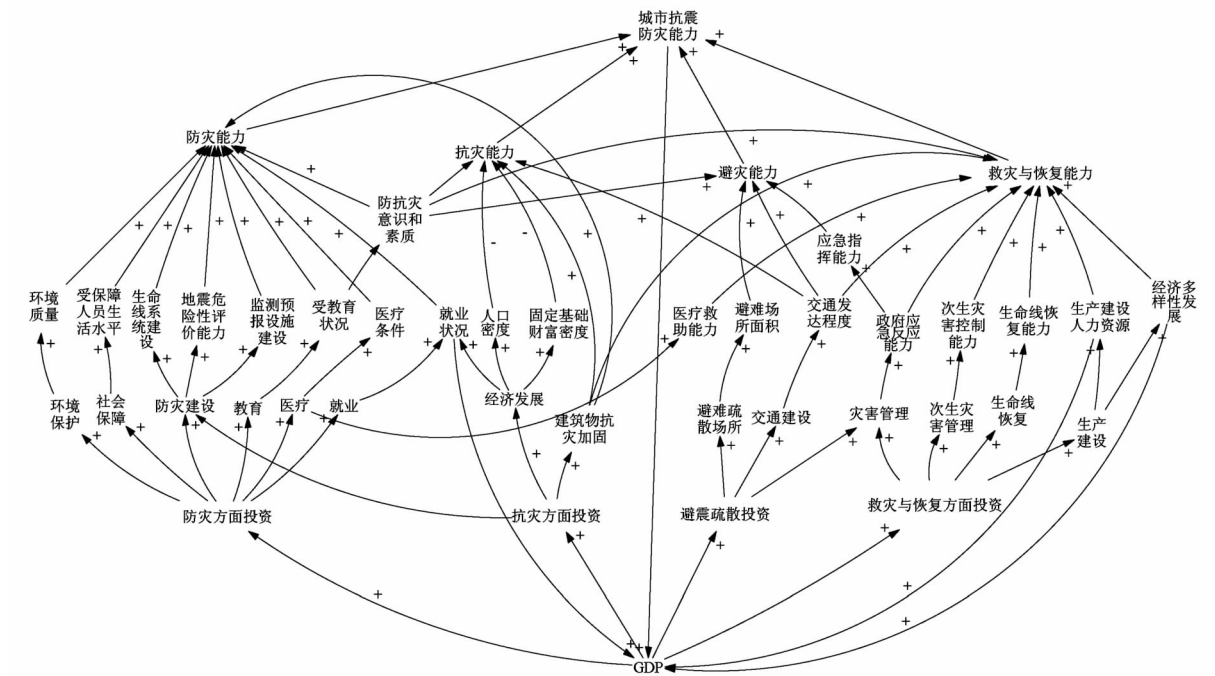


图2 城市抗震防灾能力系统因果图

Fig. 2 Causality diagram of urban earthquake resistance and prevention capacity

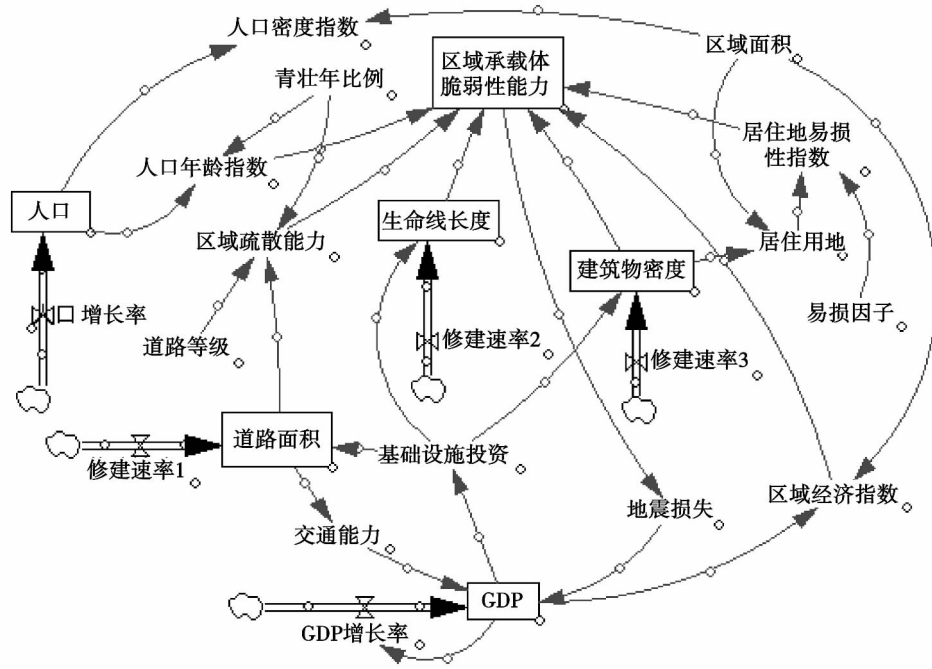


图3 区域载体脆弱性能力评估流程图

Fig. 3 Flowchart of regional vulnerability of hazard-affected bodies capability

区域 GDP \uparrow \rightarrow 基础建设投资 \uparrow \rightarrow 建筑密度 \uparrow \rightarrow 区域脆弱性 \uparrow \rightarrow 灾害损失 \uparrow \rightarrow 区域 GDP \downarrow

区域 GDP \uparrow \rightarrow 基础建设投资 \uparrow \rightarrow 生命线密度 \uparrow \rightarrow 区域脆弱性 \uparrow \rightarrow 灾害损失 \uparrow \rightarrow 区域 GDP \downarrow

正反馈代表随着区域 GDP 的增加, 区域建设投资的增加, 将会使区域脆弱性降低, 同时促进区域的经济
发展; 负反馈则代表随 GDP 的增加, 区域财富及人口密度的增长, 将会扩大区域脆弱性。

3.2 方程分析

用 VENSIM 软件模拟, 内部存在的方程有:

(1) 流量方程分析

$$GDP \cdot K = GDP \cdot J + dT \times D_{GDP};$$

$$POP(\text{population}) \cdot K = POP \cdot J + dT \times D_{POP};$$

$$RA(\text{road area}) \cdot K = RA \cdot J + dT \times D_{RA};$$

$$BA(\text{building}) \cdot K = BA \cdot J + dT \times D_{BA};$$

$$LL(\text{lifeline length}) \cdot K = LL \cdot J + dT \times D_{LL}.$$

(2) 速率方程

$$D_{GDP} = GDP \cdot K \times R_{GDP};$$

$$D_{POP} = POP \cdot K \times R_{POP}.$$

J 为初始时刻 K 为当前时刻 dT 为时间间隔 D 为增长速度。

(3) 辅助方程

$$I = \sum_{n=1}^k \omega_n I_n,$$

I 为区域载体脆弱性 ω_n 为各分指数权重 I_n 为各分指数。

3.3 敏感性分析

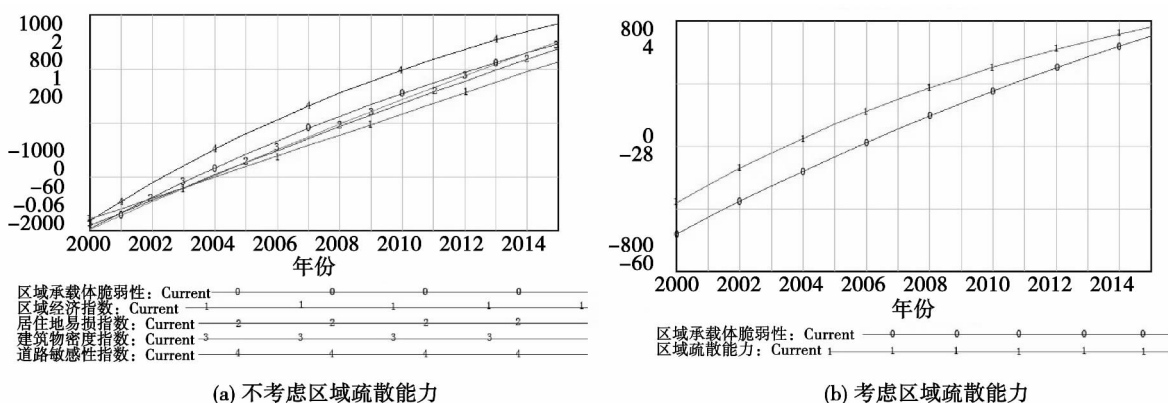


图4 两种情况下区域载体脆弱性预测值

Fig. 4 Predictive value of the regional vulnerability of hazard-affected bodies under two conditions

图4(a)是不考虑区域的疏散能力的情况,从图中可以看出,随着时间的增长,区域人口密度、财富密度等增大,区域风险越来越大;图4(b)是在考虑了区域疏散能力的情况,可以看出区域载体脆弱性比先前降低很多。由此可见,通过有效的抗震防灾措施可以降低城市/区域的脆弱性,增强其抗震防灾能力。以区域住宅建筑的易损性为对象分析,如图7所示,易损因子分别取0.22,0.32,0.42,可知易损因子越大,即易损性越大,区域承载体的脆弱性越高。应用SD模型分析,可以得到各种因素改进下的结果,为城市或区域抗震防灾能力评估及改进提供了很好的模拟效果。

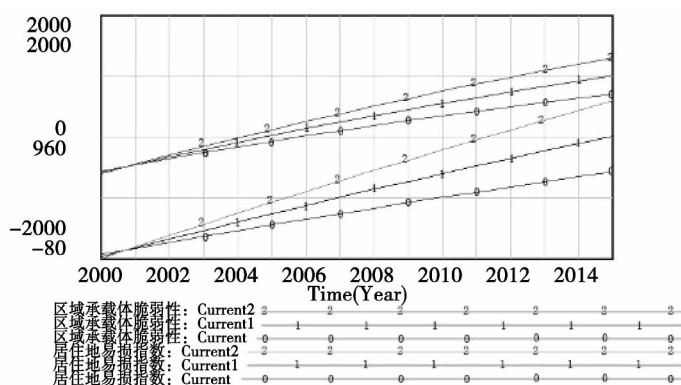


图5 改变易损因子情况下区域载体脆弱性和居住易损性的变化
Fig. 5 Change in regional vulnerability of hazard-affected bodies and living vulnerability under condition of changing vulnerability factors

4 结论

(1) 城市抗震防灾能力评估系统动力学模型构建是可行的。城市抗震防灾系统是一个可分的层次系统,系统间有相互关联性且反馈机制容易形成,各层次间是随时间发展的一个动态过程,这些都是建立一个动态模型的必备条件。

(2) 城市抗震防灾能力评估系统动力学模型具有开放性和独立性。城市抗震防灾能力评估系统动力学模型的独立性表现在地震灾害的仿真模型与数据是相互独立的。这样就可以把城市抗震防灾能力评估系统分解成许多部分可进行单个子系统或子阶段的模拟。城市抗震防灾能力评估系统的开放性表现在它强调联系、发展、运动的观点,随时容纳新的信息技术,城市抗震防灾能力评估系统仿真的内容可以结合实际情况进行开放式的组装和扩充。

(3) 城市抗震防灾能力评估系统动力学模型具有重构性。“重构”有两层含义:1) 通过灾害的动态仿真模拟,重现现实世界的灾害发展过程,通常所说的重现即为重构的一种表示方式;2) 单一灾种的仿真模型与数据是相互独立的,灾害数字仿真问题可以分解成类似组件式的许多部分,不同地区有着不同的灾害现象,如受各种因素的限制,可以单独研制某一灾害数字仿真,在必要的时候进行组装和扩充。

参考文献:

- [1] 国家防震减灾规划(2006-2020年), (2007-10-31) [2012-12-19]. http://news.xinhuanet.com/politics/2007-10/31/content_6982785.htm.
- [2] Davidson A R. An urban earthquake disaster risk index[R]. Stanford, California: The John A. Blume Earthquake Engineering Center, 1997.
- [3] Davidson A R, Shah H C. Understanding urban seismic risk around the world: document A: project document[R]. Stanford, California: Blume Earthquake Engineering Center, 1997.
- [4] 张风华, 谢礼立, 范立础. 城市防震减灾能力评估研究[J]. 地震学报, 2004, 26(3): 318-329.
ZHANG Fenghua, XIE Lili, FAN Lichu. Study on capability evaluation of urban earthquake disaster [J]. Journal of Natural Disaster, 2004, 26(3): 318-329. (in Chinese)
- [5] 郑宇. 城市防震减灾能力评价指标与应急需求研究[D]. 南京: 南京工业大学土木工程学院, 2003: 29-30.
ZHENG Yu. Research on the Evaluating Index of Ability for Urban Earthquake Disaster Reduction and Requirements for Emergent Rescue [D]. Nanjing: College of Civil Engineering of Nanjing University of Technology, 2003: 29-30. (in Chinese)
- [6] 王威, 田杰, 马东辉, 等. 基于云模型的城市防震减灾能力综合评估方法[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(6): 764-770.
WANG Wei, TIAN Jie, MA Donghui, et al. Comprehensive evaluation for cities ability of reducing earthquake disasters Based on cloud model [J]. Journal of Beijing University of Technology. 2010, 36(6): 764-770. (in Chinese)
- [7] 高肖检, 周诚, 刘孝麟, 等. 浙江省灾害预防与经济协调发展的系统动力学模型[J]. 自然灾害学报, 1994, 3(3): 56-61.
GAO Xiaojian, ZHOU Cheng, LIU Xiaolin, et al. System dynamics model on harmonious development between preventing disaster and economy in Zhejiang province [J]. Journal of Natural Disasters, 1994, 3(3): 56-61. (in Chinese)
- [8] 陈式龙, 胡宾, 申义. 我国西部防灾减灾规划与优化的复杂性研究[J]. 中国管理科学, 2000, 8(专辑): 258-263.
CHEN Shilong, HU Bin, SHEN Yi. Disaster presentation and decreasing plantain in the western part of China and the privilege research on its complication [J]. Chinese Journal of Management Science. 2000, 8(Spec): 258-263. (in Chinese)
- [9] 赵黎明. 灾害管理系统研究[D]. 天津: 天津大学管理学院, 2003: 108-112.
ZHAO Liming. Research on risk management system [D]. Tianjin: College of Management of Tianjin University of Technology, 2003: 108-112. (in Chinese)
- [10] 张明媛. 城市复合系统承灾能力研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 62-68.
ZHANG Mingyuan. Research on the Disaster Carrying Capability of Urban Complex System [D]. Dalian: Tianjin University of Technology, 2006: 62-68. (in Chinese)
- [11] 肖国清, 王鹏飞, 陈宝智. 建筑物火灾疏散中人的行为的动力学模型[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 5: 134-139.
XIAO Guoqing, WANG Pengfei, CHEN Baozhi. Dynamic model of human behavior inbuilding fire evacuation [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2004, 5: 134-139. (in Chinese)
- [12] 王付明, 刘贵坤, 宋大鹏. 人员紧急疏散系统动力学仿真模型研究[J]. 信息工程大学学报, 2008, 9(2): 254-256.
WANG Fuming, LIU Guikun, SONG Dapeng. Research on the emergency evacuation system dynamics simulation model [J]. Journal of Information Engineering University. 2008, 9(2): 254-256. (in Chinese)
- [13] Ahmad S, Simonovic S P. Modeling human behavior for evacuation planning: A system dynamics approach [C]//Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress: Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges, 2001.
- [14] 王其藩. 系统动力学(2009年修订版) [M]. 上海: 上海财经大学出版社. 2000.
WANG Qifan. System Dynamics (2009 Edition) [M]. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics press, 2000. (in Chinese)