

# Research on Evolution of Earthquake Disaster Social Risk Based on System Dynamics

Weiwei Zhang, Xuanhua Xu\*, Xuanpeng Yin, Yanfen Yu

School of business, Central South University, Changsha 410083, China

## 基于系统动力学的地震灾害社会风险演化研究

张威威, 徐选华\*, 尹偃鹏, 余艳粉

中南大学商学院, 长沙 410083, 中国

### Abstract

In order to solve the problem of earthquake disaster emergency rescue and emergency resource allocation and the social risk change of earthquake disaster, based on the analysis of the interrelationships of various elements of earthquake hazard social risk evolution system, the method of system dynamics was used to construct the earthquake disaster The evolution of social risk, causal graph and system dynamics model, and the Nepal earthquake as an example, the evolution of the social risk of earthquake disaster simulation analysis. The simulation results show that the different allocation of emergency resources will have a certain impact on the social risk of earthquake disaster. The less the allocation of resources, the greater the possibility of the occurrence of social disasters, to provide a reference for how to reasonably allocate emergency resources for the emergency departments when conducting emergency risk management.

**Keywords:** earthquake; system dynamics; social risk; risk evolution

### 摘要

针对地震灾害应急救援过程中, 应急资源配置与地震灾害社会风险变化的问题, 在

深入分析地震灾害社会风险演化系统的各要素相互关系的基础上, 采用系统动力学的研究方法, 构建了地震灾害社会风险演化的因果关系图和系统动力学模型, 并以尼泊尔地震为例, 对地震灾害社会风险演化进行了仿真分析。仿真结果表明: 应急资源配置的不同, 会对地震灾害社会风险产生一定的影响, 资源配置越少, 地震灾害社会风险发生的可能性也就越大, 从而为应急部门在进行应急风险管理时, 如何合理配置应急资源提供参考依据。

**关键词:** 地震; 系统动力学; 社会风险; 风险演化

### 1. 引言

近年来我国重大突发事件的发生呈显著上升趋势, 突发事件种类明显增多, 突发事件发生频率明显增高, 涉及范围明显扩大, 突发事件及其影响的复杂性和应对难度显著加大, 给国家经济和人民生命财产造成重大损失, 同时造成了严重的社会问题[1-3]。地震灾害作为重大突发事件的一种, 其发生频繁, 破坏力极强, 波及范围广, 甚至可能会产生一系列的社会风险问题, 这些问题如果得不到及时有效的解决而被逐渐积累, 很容易演化为群体性事件, 降低社会的稳定性和安全性[4]。而且地震灾害发生后, 对灾区及时的救援是减轻灾民损失和痛苦的最重要的措施, 如救援物资的调集、救援医疗人员的分配数量、救援资金的数量以及救援交通工具的安排等, 如果这些救援措施实施

\*通讯作者: xuxh@csu.edu.cn

不当,会导致灾民心理失衡、社会失序等社会风险的发生,甚至可能转化为社会危机。因此,如此合理调度应急救助资源,探索地震灾害社会风险的演化机理,提出风险应对建议,是目前应急管理部门亟待解决的问题。

目前国内外学者对风险演化已作出一些研究,陈庭强等[5]采用复杂网络的动力学理论,建立基于复杂网络的金融信用风险演化模型,并通过仿真研究探讨了金融信用风险中监管者的监控强度、个体风险抵抗能力等因素对金融信用风险演化的影响;陈长坤等[6]以莫拉克台风为例,研究了台风灾害演化系统风险问题,构建了基于复杂网络的台风网络演化模型,并利用复杂网络节点的出入度、子网节点数等理论确定台风风险演化过程中的关键节点,从而为台风治理提供建议;Dunia等[7]针对决策过程中个体的行为容易受到其他个体的决策影响这一现象,根据复杂网络原理构建个体决策行为演化模型,并通过平均场方法得到其演化的规律;Xu等[8]分析了重特大洪涝灾害社会稳定风险的演化过程,利用复杂网络理论刻画了洪涝灾害社会稳定风险演化的拓扑结构图,并利用改进的复杂网络理论中紧密度指标,对拓扑结构图中各个节点的出入度、节点的距离进行分析计算,确定社会稳定风险演化过程中的关键节点,为洪涝灾害管理提供理论参考;马祖军等[9]为了研究城市地震次生灾害的演化规律,构建了基于贝叶斯网络的城市地震次生灾害演化模型,并利用贝叶斯网络工具箱得出各类城市地震次生灾害的发生概率,从而为城市防震工作提供参考依据;王勇胜等[10]指出集群环境下群风险的理论中,缺少网络环境下的风险演化研究,并利用贝叶斯网络对项目群风险演化进行了分析,为项目群环境下的风险管理提供建议;Zhang等[11]探讨了隧道施工中不确定性的安全风险问题,利用模糊贝叶斯网络分析影响安全风险的各变量之间的因果关系,提出一种专家可信度指标来保证基本风险因素概率的可靠性,并用实证论证所提出方法的可行性,从而增加了项目在复杂环境中成功的可能性;Goh等[12],杨浩雄等[13]研究了城市交通安全问题,分析了造成

交通拥堵的原因,影响等,并建立基于系统动力学的城市交通安全的系统动力学模型,对解决城市交通拥堵的对策进行仿真分析,为解决交通拥堵问题提供建议;Mariagrazia等[14]利用系统动力学模型研究了旅行过程中由蚊子传播疾病的传染过程,分析了蚊子的生命周期和人类旅行中的行为,并通过对不同的疾病控制策略进行分析比较,得出不同时期不同行为下传染病控制策略的不同组合。

综上所述可以看出,风险演化的研究方法基本上有复杂网络法、系统动力学方法、贝叶斯网络法等,风险演化的研究已有一些成果,但很少对灾害引发的社会风险演化过程进行研究。现有的灾害社会风险的研究都是基于对灾害社会风险的识别、灾害社会的预警分析、灾害社会风险的应对策略研究等,很少对灾害社会风险演化规律和机理进行研究。基于上述问题,本文采用系统动力学的方法对地震灾害社会风险演化过程进行定量化研究,通过对地震灾害社会风险的各个因子间的关系进行分析,建立地震灾害社会风险系统动力学演化模型,并利用模拟仿真的方法来探索地震灾害社会风险动态演化过程及其特征,为防震救灾工作提供理论依据和建议。

## 2. 地震灾害社会风险演化的系统动力学模型

系统动力学可以从系统本身入手,分析系统整体结构与系统内部各影响因素之间的关系,有利于明确地表达要解决的问题,确定系统的边界,通过构建因果回路图、存量流量图、政策结构图等将复杂的系统关系转变为一定的数学关系。该模型注重的是系统结构及其动态行为的研究,对参数数据精度要求相对较低。对于地震灾害社会风险而言,其风险难以量化,无法得到精确的数据。利用系统动力学建立社会风险模型,通过科学的赋值方法对社会风险影响因素进行量化,有效进行社会风险控制与管理。地震灾害社会风险系统包括财产损失风险、社会失序风险、社会稳定风险和心理失衡风险4个子系统,各子系统之间并非孤立存在,单个社会风险因素的发生可能会导致其他社会

风险的发生、扩散进而导致整体系统的不稳定，甚至崩溃。依据系统动力学原理和地震

### 2.1 系统边界的确定

系统的边界是指研究问题中系统变量的要素。重大地震灾害的发生不仅会给人类的生命安全，而且地震灾害的发生会严重破坏人们的生存环境，受灾主体在面对大的灾难时，他们的心理会受到严重的影响，并且形成了特殊的利益需求，包括物资，资金，医疗服务，交通工具等，但是随着灾害造成伤亡人数越来越多，供水、食物、交通工具等基本生活条件的需求越来越多，同时他们的需求得不到满足，受灾主体就可能为了自身的生存需要而引发社会冲突，造成社会秩序混乱，人们往往会将这种结果的主要责任归因于政府部门的救灾不力。如 2010 年 1 月 12 日海地地震，由于救灾物资的不足，灾民强抢救灾粮食等物资，造成严重的社会失序；2015 年 4 月 29 日，尼泊尔发生 8.1 级地震，地震幸存者由于无法找到离开加德满都的公交而引起民愤，从而示威抗议政府救灾不力。因此本文从救灾物资、救灾交通工具、救灾医疗服务和救助资金四个方面入手，分析地震灾害社会风险的演化过程。

### 2.2 地震灾害社会风险因果关系图

在确定系统研究边界后，经过对边界要素之间关系的分析，可以得到系统因果关系图。因果关系图是对系统各变量间的相互关系进行剖析，是对系统内部结构关系的定性描述。地震灾害社会风险是由客观因素和主观因素的双重作用下发生的，本文从以下几个方面考虑地震灾害社会风险。

(1) 财产损失风险。地震灾害本身，地震灾害以及次生灾害造成的环境破坏，直接会引发财产损失风险的发生。地震的发生会对周围环境造成严重的破坏，如房屋倒塌、农田损坏、牲畜死亡等，这些实物财产会遭受巨大的损失。如果在救援过程中，灾民得不到足够的救助资金，无法弥补灾民所遭受的部分财产损失，就可能引发灾民的财产损失风险。

(2) 社会失序风险。地震灾害发生打

灾害社会风险因素之间的演化关系，建立地震灾害社会风险系统动力学模型。

破了社会原有正常运行的秩序，造成人们生活资料的结构性短缺，失去生存所需的必要的物质条件。在生存的压力下，人们可能会不顾法律和道德的约束，发生非常规行为，如抢劫财务、哄抢物资、暴力冲突等，这些都成为地震灾害带来的潜在社会风险。如 2010 年 1 月发生的海地地震，由于救援物资的严重缺乏，灾民无视警察的存在，强抢粮食等物资，造成了严重的社会失序风险。

(3) 社会稳定风险。地震灾害发生后，灾区的交通会被切断，当救援交通工具无法满足救援需求时，会造成大量的灾民滞留，当他们求助无门时，灾民会对政府缓慢的救援措施感到失望，当地的治安管理可能会无法维持，甚至可能导致较大的社会动荡，严重影响了社会的稳定性。

(4) 心理失衡风险。重大地震灾害的巨大破坏性不仅表现在物质方面的损失，更重要的是它能给灾民的心理造成强烈的影响，当灾害过后，强烈的心理惊吓会刺激着灾民，使其处于一种非正常的心理状态，这种心理状态主要表现为焦虑、恐惧、情绪低落等，甚至会失落、绝望。这种心理如果不及治疗，容易产生灾后综合症，造成心理失衡风险。

地震灾害社会风险的诱发因素，包括救灾物资、救灾交通工具、救灾医疗服务和救助资金。其中，救灾物资的缺乏会引发灾民哄抢救灾物资，导致社会失序风险的发生；救灾交通工具的缺少，容易造成大量灾民滞留，导致社会稳定风险的发生；救灾医疗服务的不完善，容易给灾民的心理带来创伤，造成心理失衡风险的发生；救助资金的不足，给灾民带来财产损失，导致财产损失风险的发生。根据救灾物资、救灾交通工具、救灾医疗服务和救助资金四个子系统内部各变量的相互关系，画出地震灾害社会风险的因果关系图，如下图 1 所示。图中箭头表示变量之间的因果关系，正号和负号分别表示正效应和负效应。



### 3.2 模型的仿真结果检验

为了验证模型的仿真结果的有效性，本文选取 2015 年 4 月 25 日尼泊尔地震案例，对该模型进行验证。此次地震震级为 8.1 级，总共造成 22303 人受伤，将此数据作为本文中的初始参数，对尼泊尔地震社会风险进行系统动力学仿真模拟。

由于在实际的救援过程中，需要多种救援交通工具、多种类型的救援物资以及多种类型的救援医疗人员，考虑到相关数据不易获取，因此本文并没有进行细分。模型中仿真模拟时间为 12 天，时间间隔为 1 天。

为了定量描述地震灾害社会风险，本文引入聂高众等[17]提出的地震应急救援需求的概念模型，其表述为：

$$Y = K_x Q_x F_x - \delta C_y$$

其中， $Y$  表示某种救灾物资或者救灾人员的实际最小需求量； $K_x$  表示受灾区的地区系数； $Q_x$  表示气候系数， $F_x$  表示某种救灾物资或者救灾人员的理论统计需求量， $F_x$  根据灾区总人口、地震伤亡人数、房屋倒塌等地震实际情况计算出来的，且  $F_x = f(\alpha, \text{死伤人数}) + f(\beta, \text{灾区总人口}) + f(\gamma, \text{无家可归人数}) + f(\theta, \text{其他})$ ， $\alpha, \beta, \gamma, \theta$  为需求系数； $C_y$  表示受灾地区该类救灾物资或者救灾人员的现有数； $\delta$  为灾后保全率。

文中的地震灾害救援需求的相关系数 ( $\alpha, \beta, \gamma, \theta$ ) 和系统中的计算公式如下：

需救援交通工具数=地区系数\* (0.06\*受伤人数+0.004\*灾区总人口)

需医疗人员数=地区系数\*0.11\*受伤人数

需救援物资量=地区系数\* (5.7\*受伤人数+1.6\*灾区总人口)

需救助资金数=100\*受伤人数+25\*灾区总人口

通过上述公式以及仿真结果，得出模型的仿真结果检验表，如表 1 所示。

由表 1 可以看出，对比计算值，模型各个预测值的相对误差均在 5% 以内，因此可以说明该模型是真实有效的[18-19]，可以利用该模型对地震灾害社会风险演化状况进行分析和预测。

表 1 模型仿真结果检验

参数	救援医疗人员保有量 (人)	救援交通工具保有量 (辆)	救援物资保有量 (件)	救助基金保有量 (万元)
计算值	2713	3837	614457	17294
模拟值	2585	3668	593151	16436
误差	4.7%	4.4%	3.5%	5.0%

## 4. 模拟仿真与结果分析

### 4.1 需救援人口数分析

周阿颖等[20]研究表明，地震发生后的救灾速率存在明显的时空特征，最开始的时间救灾速率变化比较大，随着时间的推移救灾速率越来越小，最后趋近于饱和，并且救灾速率变化最快的时间段大体上为灾后发生的 10 小时至 75 小时。这些结果表明，灾后救援的最佳时间为灾后发生的前三天，此时应急救援效果最佳，超过这个时间，灾后救援的效率会逐渐降低。从图 4 需救援人口模拟图可以看出，地震发生后的前三天由于救援效率比较高，获得营救的灾民会较多，而剩下的需救援人口就会越来越少。

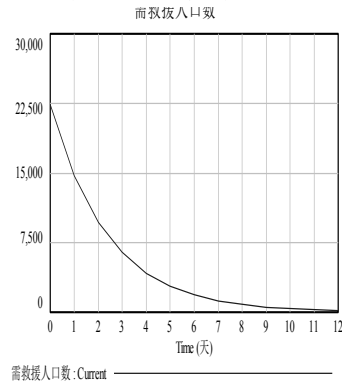


图 4 地震灾害需救援人口数变化情况

### 4.2 救援医疗人员量与心理失衡风险分析

地震灾害破坏力巨大，影响范围广，严

重威胁到人们的生命安全。地震灾害发生后，当地医疗部门需要结合实际情况，迅速组建地震灾害紧急救援医疗队。地震发生后，由于灾区的道路、医疗卫生站等遭到破坏，各地的救援队伍很难在短时间内迅速聚集，因此在灾害发生之处灾区实际的救援医疗人员较少，大多的灾民得不到基本的医疗救治，地震灾害容易给灾民带来强烈的惊吓，他们的心理状态已经处于临界状态，再加上得不到基本的医疗救治的刺激，诱发灾民产生强烈的消极情绪，引发心理失衡风险。随着救援医疗人员的不断增多，越来越多的灾民得到救治，他们的消极情绪得到安慰，从而减少了地震灾害给灾民造成的心理伤害。

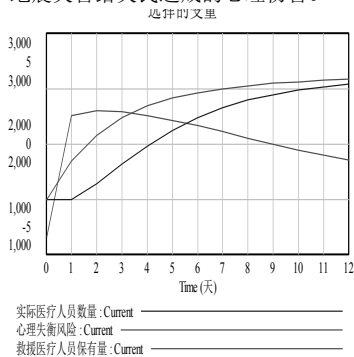


图5 地震灾害救援医疗人员数量和心理失衡风险变化情况

### 4.3 救援物资量与社会失序风险分析

地震发生后，不同的震级、地区，所需要的救援物资的种类和数量是不同的。本文由于获取数据有限，故未细分救援物资种类。地震发生初期，灾区的通讯等受到破坏，紧急救援部门很难第一时间获得较为准确的受灾人数，并且道路等受到破坏，救援物资很难及时输送到灾区，救援物资的增加速率较为缓慢。随着救援工作的逐步进行，越来越多的灾民得到救助，所需要的救援物资数量增加趋势也越来越显著。但是在地震初期对救援物资的调集数量不够，物资极其短缺，大量的灾民无法获取基本的生活必需品，为了生存他们可能会做出一些非理智的行为，如哄抢食物，群体性暴力冲突等，从而促进了地震灾害社会失序风险的发生。

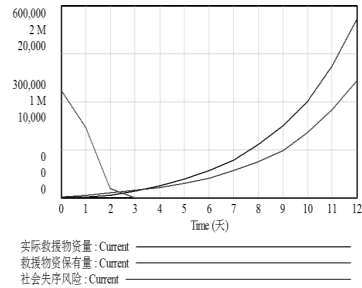


图6 地震灾害救援物资量与社会失序风险变化情况

### 4.4 救援交通工具量与社会稳定风险分析

由上图6可以看出，救援物资的保有量在逐渐增多，救援交通工具的数量也基本与救援物资的变化趋势一致。地震灾害初期，灾区的应急救援管理部门会配备一定的救援车辆，但是地震灾区较大，无法满足救援需求，从而造成较多的灾民滞留在灾区。地震的突然袭击，使得人们的基本生存物质和精神瞬间崩塌，加上不断的余震发生，人们有迫切的想法离开灾区，救援车辆的不足可能会引发地震灾害埋下的社会失序风险。如尼泊尔发生8.1级地震，由于救灾初期救援交通工具的调集数量明显不足，尼泊尔首都加德满都的灾民由于无法找到离开的公交而引起民愤，从而示威抗议政府救灾不力，打破了原有的社会稳定的状态。随着救援的不断推进，救援交通工具的不断增多，越来越多的灾民得到安置，灾民心里恐惧的情绪得到减缓，降低了地震灾害社会稳定风险的发生。

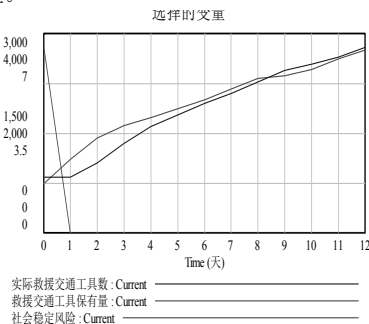


图7 地震灾害救援交通工具量与社会稳定风险变化情况

#### 4.5 救助资金量与财产损失风险分析

地震灾害发生后,灾民需要大量的资金需求,其中主要包括应急救灾款、灾民医疗费用、搬迁费用、灾民生活费用等。随着上述救灾工作的开展,救助资金的数量呈不断上升的趋势。地震灾害发生初期,灾民的实物财产如房屋、田地等遭到破坏,给灾民造成了巨大的财产损失。救灾之初,应急部门短时间无法积聚巨大的资金,实际投入的救助资金量远远小于所需要的救助资金量,无法弥补灾民巨大的财产损失,增加了财产损失风险。而随着各国政府的支持以及社会各界团体的援助,救助资金不断增多,灾民的财产损失得到补偿,从而降低了财产损失风险的发生。

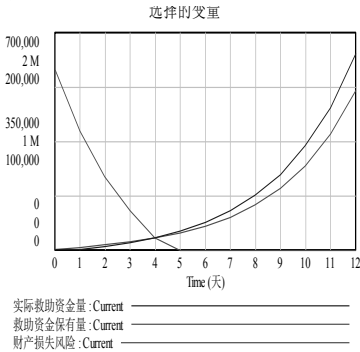


图8 地震灾害救助资金量与财产损失风险变化情况

#### 4.6 讨论

本文从地震灾害应急救援角度出发,对地震灾害救援过程中的救援物资、救援交通工具、救援医疗人员、救助资金配备问题进行讨论,通过分析各个应急救援资源的数量变化,探讨相应的地震灾害社会风险变化情况,从而为降低地震灾害社会风险的。文中没有细分各个救灾资源的种类,只是粗略的将这些资源集中考虑。灾区的不同、受灾程度的不同,所需要的救灾资源是不相同的,细分灾民对救援资源的不同需求,考虑多种救灾资源对地震灾害应急救援的影响,理清应急救援水平对地震灾害社会风险的影响是今后的研究方向。其次,本文仅仅粗略地

探讨了应急资源的不同配置与相应的地震灾害社会风险变化情况。但是,不同类型的应急资源与相应社会风险发生的比例关系,难以找到准确的平衡点,这也值得今后深入研究。

#### 5. 结论

针对地震灾害救援过程中应急资源配置与灾害社会风险变化的问题,本文结合研究区域实际情况建立地震灾害社会风险演化的系统动力学模型,对不同的应急资源进行仿真模拟,实现了地震应急救援过程中救援医疗人员、救援物资、救援交通工具、救助资金等的动态模拟,从模拟结果中可以看出在应急救援过程中应急资源投入的数量,会对灾害社会风险产生一定的影响。因此,应急救援部门应合理配置应急资源,加大应急资源的投入,并重视灾害对灾民心理健康的影响,从而降低社会风险水平。但是,由于获取数据的有限,部分变量的设定具有较强的主观性,在一定程度上降低了模拟结果的准确性,因此后续研究应提高模型的准确性。

#### Acknowledgements

This study was supported by National Social Science Foundation of China (No.71671189),Central South University Postgraduate Independent Exploration and Innovation Project(No. 502211804).

#### 致谢

本研究得到了国家自然科学基金项目(71671189)和中南大学研究生自主探索创新项目(502211804)的资助。

#### 参考文献

- [1] 吴绍洪,靳京,郑景云. 中国地震灾害中“伤亡比”指标的估算. 地理科学进展, 2015, 34(7): 918-925.
- [2] 徐锡蒙,郑粉莉,关颖慧,等. 2013年我国地震灾害时空特征与灾害损失分析. 水土保持研究, 2015, 22(4): 321-325.
- [3] 王曦,周洪建. 区域地震灾害年度风险

- 评估中的情景分析. 灾害学, 2015(2): 70-74.
- [4] Cheng J W, Mitomo H, Otsuka T, et al. The effects of ICT and mass media in post-disaster recovery – A two model case study of the Great East Japan Earthquake. *Telecommunications Policy*, 2015, 39(6):515-532.
- [5] 陈庭强, 何建敏. 基于复杂网络的信用风险传染模型研究. *中国管理科学*, 2014, 28(11):111-117.
- [6] 陈长坤, 纪道溪. 基于复杂网络的台风灾害演化系统风险分析与控制研究. *灾害学*, 2012, 27(1):1-4.
- [7] López-Pintado D. Diffusion in complex social networks. *Games & Economic Behavior*, 2008, 62(2):573-590.
- [8] Xu X H, Wang C H, Cai C G, et al. Evolution and coping research for flood disaster social stability risk based on the complex network. *Natural Hazards*, 2015, 77(3):1491-1500.
- [9] 马祖军, 谢自莉. 基于贝叶斯网络的城市地震次生灾害演化机理分析. *灾害学*, 2012, 27(4):1-5.
- [10] 王勇胜, 冷亚军. 基于贝叶斯网络推理的项目群风险及其演化研究. *东北电力大学学报*, 2011, 31(6):104-109.
- [11] Zhang L, Wu X, Skibniewski M J, et al. Bayesian-network-based safety risk analysis in construction projects. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 131(3):29-39.
- [12] Goh Y M, Love P. Methodological application of system dynamics for evaluating traffic safety policy. *Safety Science*, 2012, 50(7):1594-1605.
- [13] 杨浩雄, 李金丹, 张浩, 等. 基于系统动力学的城市交通拥堵治理问题研究. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(8):2135-2143.
- [14] Mecoli M, Angelis V D, Brailsford S C, et al. Using system dynamics to evaluate control strategies for mosquito-borne diseases spread by human travel. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(9):2219-2228.
- [15] 孙滢悦, 杨青山, 陈鹏, 等. 草原牧区雪灾应急救援需求系统动力学模型与实证研究. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(6): 108-114.
- [16] 汪建, 赵来军, 顾彩云. 地震应急避难需求的系统动力学研究. *中国安全科学学报*, 2013, 23(1): 121-128.
- [17] 聂高众, 高建国, 苏桂武, 等. 地震应急救援需求的模型化处理——来自地震震例的经验分析. *资源科学*, 2001, 23(1):69-76.
- [18] Fu Y, Piplani R. Supply-side collaboration and its value in supply chains. *European Journal of Operational Research*, 2004, 152(1):281-288.
- [19] Lin J, Linb T E. Object-oriented conceptual modeling for commitment-based collaboration management in virtual enterprises. *Information & Software Technology*, 2004, 46(4):209-217.
- [20] 周阿颖, 张朝, 史培军, 等. 影响地震救灾效率的因素分析——以汶川 8.0 级地震和玉树 7.1 级地震为例. *灾害学*, 2011, 26(4):134-138.